

「高性能・高信頼性太陽光発電の
発電コスト低減技術開発」

事業原簿
【公開】

担当部	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー部
-----	--------------------------------------

—目次—

概 要	v
プロジェクト用語集	x iii
I. 事業の位置付け・必要性について	
1. 事業の背景・目的・位置づけ	I-1[1]
1.1 事業実施の背景と事業の目的	
1.2 国内外の研究開発の動向	
1.3 技術戦略上の位置づけ	
2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性	I-2[1]
2.1 NEDO が関与することの意義	
2.2 実施の効果(費用対効果)	
II. 研究開発マネジメントについて	
1. 事業の目標	II-1[1]
2. 事業の計画内容	II-2[1]
2.1 研究開発の内容	
2.2 研究開発の実施体制	
2.3 研究開発の運営管理	
2.4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性	
3. 情勢変化への対応	II-3[1]
4. 中間評価結果への対応	II-4[1]
5. 評価に関する事項	II-5[1]
III. 委託テーマの成果詳細と実用化・事業化見通し	
1. 事業全体の成果	III-1[1]
2. 研究開発項目毎の成果と実用化・事業化見通し	
(イ) 先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の技術開発III-2-(イ) -[1]
A 結晶 Si 太陽電池をベースとした複合型太陽電池モジュールの開発 (株式会社カネカ)III-2-(イ)-A[1]
B 高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発 (シャープ株式会社)III-2-(イ) -B[1]
C 低コスト高効率セル及び高信頼性モジュールの実用化技術開発 (京セラ株式会社)III-2-(イ) -C[1]
D 基盤技術開発による先端複合技術セルのための低再結合電極の研究開発 (ナミックス株式会社)III-2-(イ) -D[1]
E 赤外線 FZ 法による高品質低コストシリコン単結晶の開発 (株式会社クリスタルシステム)III-2-(イ) -E[1]
F 高発電効率・低コスト太陽電池スライスプロセスの加工技術構築 (コマツ NTC 株式会社)III-2-(イ) -F[1]

- G 太陽電池用原料品質の最適化及び結晶欠陥の評価技術の開発・制御（株式会社トクヤマ）
Ⅲ-2-(イ) -G[1]
- H CIS 太陽電池モジュール高性能化技術の研究開発（ソーラーフロンティア株式会社）
Ⅲ-2-(イ) -H[1]
- I 低コスト・高信頼性・高効率 Super Si Hetero-Junction (SSHJ)
 太陽電池の開発（パナソニック株式会社）
Ⅲ-2-(イ) -I[1]
- (ロ) 革新的新構造太陽電池の研究開発／
 超高効率・低コストⅢ-V化合物太陽電池モジュールの研究開発
Ⅲ-2-(ロ) -[1]
- A 低コストセル技術開発（東京大学、シャープ株式会社、産業技術総合研究所、
 大阪市立大学（再））
Ⅲ-2-(ロ) -A[1]
- B 低コスト化プロセス技術開発（産業技術総合研究所、東京農工大学、東京大学、タカノ（再）、
 シャープ株式会社、豊田工業大学、大陽日酸株式会社）
Ⅲ-2-(ロ) -B[1]
- C 低コストモジュール開発（シャープ株式会社、パナソニック株式会社、宮崎大学、
 豊田工業大学）
Ⅲ-2-(ロ) -C[1]
- D 超高効率セル開発（東京大学、埼玉大学（再）、シャープ株式会社、宮崎大学、産業技術総合研
 究所、電気通信大学、神戸大学）
Ⅲ-2-(ロ) -D[1]
- (ハ) 革新的新構造太陽電池の研究開発／
 ペロブスカイト系革新的低製造コスト太陽電池の研究開発
Ⅲ-2-(ハ) -[1]
- A 塗布製造技術の開発（パナソニック株式会社）
Ⅲ-2-(ハ) -A[1]
- B 超軽量太陽電池モジュール技術の開発（株式会社東芝）
Ⅲ-2-(ハ) -B[1]
- C 低コスト R2R 太陽電池製造技術の開発（積水化学株式会社）
Ⅲ-2-(ハ) -C[1]
- D 高性能・高信頼性確保製造技術の開発（アイシン精機株式会社）
Ⅲ-2-(ハ) -D[1]
- E 高性能材料合成技術の開発（富士フイルム株式会社）
Ⅲ-2-(ハ) -E[1]
- F 基盤材料技術と性能評価技術の開発（早稲田大学、物質・材料研究開発機構（再）、
 神奈川県立産業技術総合研究所（再））
Ⅲ-2-(ハ) -F[1]
- G 新素材と新構造による高性能化技術の開発（東京大学、産業技術総合研究所（再）、
 九州工業大学（再）、東京工業大学（再）、京都大学（再）、兵庫県立大学（再）、
 熊本大学（再））
Ⅲ-2-(ハ) -G[1]

- (二) 太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発
Ⅲ-2-(ニ) -[1]
- A 先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発
 (豊田工業大学、明治大学、九州大学、名古屋大学、東京工業大学、兵庫県立大学)
Ⅲ-2-(ニ) -A[1]
- B 薄型セルを用いた高信頼性・高効率モジュール製造技術開発 (産業技術総合研究所)
Ⅲ-2-(ニ) -B[1]
- C Cat-CVD など新手法による高性能太陽電池低価格製造技術の開発
 (北陸先端科学技術大学院大学)
Ⅲ-2-(ニ) -C[1]
- D CIS 太陽電池高性能化技術の研究開発 (産業技術総合研究所、東京工業大学、
 学校法人立命館、東京理科大学、筑波大学、鹿児島大学、龍谷大学)
Ⅲ-2-(ニ) -D[1]
- E 高性能キャリア選択性パッシベーションコンタクトの開発 (産業技術総合研究所)
Ⅲ-2-(ニ) -E[1]
- (ホ) 共通基盤技術の開発 (太陽光発電システムの信頼性評価技術等)
Ⅲ-2-(ホ) -[1]
- A 太陽電池性能高度評価技術の開発 (産業技術総合研究所、電気安全環境研究所、
 岐阜大学、宮崎大学、東京理科大学、学校法人立命館)
Ⅲ-2-(ホ) -A[1]
- B 太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発 (産業技術総合研究所、
 デュポン・スペシャルティ・プロダクツ株式会社、東レ株式会社、石川県工業試験場、
 岐阜大学、東京農工大学、北陸先端科学技術大学院大学、電力中央研究所)
Ⅲ-2-(ホ) -B[1]
- C 太陽光発電システムの高精度発電量評価技術の開発 (産業技術総合研究所、
 日本気象協会、東京理科大学、佐賀大学)
Ⅲ-2-(ホ) -C[1]
- D ZEB 適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術の開発 (株式会社カネカ)
Ⅲ-2-(ホ) -D[1]
- E レーザー技術を用いた太陽電池モジュールの寿命予測検査技術の開発
 (日清紡メカトロニクス株式会社、奈良先端科学技術大学院大学)
Ⅲ-2-(ホ) -E[1]
- (へ) 動向調査等
Ⅲ-2-(へ) -[1]
- A 太陽光発電開発戦略に関する動向調査 (みずほ情報総研株式会社)
Ⅲ-2-(へ) -A[1]
- B 発電コスト低減に向けた太陽電池技術開発に関する動向調査 (株式会社資源総合システム)
Ⅲ-2-(へ) -B[1]
- C IEA PVPS 国際協力事業 (株式会社資源総合システム)
Ⅲ-2-(へ) -C[1]

(ト) 高性能太陽電池製造技術実証

.....Ⅲ-2-(ト) -[1]

A 低コストヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池の小規模量産実証 (株式会社カネカ)

.....Ⅲ-2-(ト) -A[1]

(添付資料)

- ・プロジェクト基本計画
- ・事前評価関連資料 (事前評価書)

概要

		最終更新日	2020年11月27日
プロジェクト名	高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発	プロジェクト番号	P15003
担当推進部	PM 新エネルギー部 山田 宏之 (2015年4月～2019年3月) PM 新エネルギー部 山崎 光浩 (2019年4月～) SPM 新エネルギー部 佐藤 剛彦 (2015年4月～2020年3月) PT 新エネルギー部 三宅 良英 (2016年7月～2018年6月) PT 新エネルギー部 加藤 研一 (2017年4月～2018年3月) PT 新エネルギー部 保田 淑晴 (2017年7月～) PT 新エネルギー部 竿本 仁志 (2015年4月～2017年3月) PT 新エネルギー部 小田 和彦 (2015年4月～2016年6月) PT 新エネルギー部 豊田 富美穂 (2015年4月～2017年3月) PT 新エネルギー部 佐々木 崇水 (2015年4月～2017年6月) PT 新エネルギー部 玉井 仁 (2018年7月～2020年6月) PT 新エネルギー部 國川 智輝 (2018年4月～2020年6月) PT 新エネルギー部 葛西 正 (2018年6月～2020年9月) PT 新エネルギー部 福嶋 清 (2019年10月～) PT 新エネルギー部 岩田 雅史 (2020年10月時点) PT 新エネルギー部 中西 直明 (2020年10月時点) PT 新エネルギー部 井川 博之 (2020年10月時点) PT 新エネルギー部 宮川 康陽 (2020年10月時点)		
0. 事業の概要	<p>本プロジェクトでは、太陽光発電開発戦略(以下「開発戦略」と言う)で掲げる発電コスト低減目標達成(結晶シリコン太陽電池、CIS太陽電池は2025年までに、他の太陽電池は2030年までに7円/kWhの実現)に資する高性能と高信頼性を両立した太陽電池の開発を行う。具体的には結晶シリコン太陽電池、CIS太陽電池、III-V化合物太陽電池、ペロブスカイト太陽電池などの開発に加え、高性能結晶シリコン太陽電池製造技術実証、太陽電池の共通基盤技術、開発動向及び市場動向調査、高性能太陽電池製造技術実証を行った。</p>		
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>我が国のエネルギー安定供給の確保や、低炭素社会実現の観点から、再生可能エネルギーの導入拡大を進めることは非常に重要である。その一翼を担う太陽光発電に関しては、その特性を十分に理解し、また、その特長を活かした導入形態を模索していくことで、太陽光発電システムの適正な導入を実現し、エネルギー供給量を着実に拡大していく事が求められる。そのためには引き続き発電コストの低減を進め、太陽光発電産業の発展につなげることが必要である。一方で、発電コストが高い等の課題も指摘され、更なる技術革新が必要とされている。また、固定価格買取制度の効果で国内市場は急拡大しているが、今後、太陽光発電を始めとする再生可能エネルギーの普及がさらに進めば、賦課金が増加し、国民負担の増大が見込まれるとの指摘もある。将来の国民負担を軽減するためには、発電コストの低減は重要な課題である。こうした状況を踏まえ、NEDOは2014年9月に「太陽光発電開発戦略」を策定し、発電コスト低減目標として、2020年に業務用電力価格並となる14円/kWh(グリッドパリティ)、2030年に従来型火力発電の発電コスト並み、あるいはそれ以下に相当する7円/kWh(ジェネレーションパリティ)を掲げた。また、開発戦略では、その目標達成のための方策として、発電コストに関する要素を分析し、モジュール変換効率の向上、システム価格の低減及び長期信頼性を同時に満たす太陽光発電が必要であり、そのためには新たな技術の開発が必要であるとしている。NEDOは開発戦略の柱となる発電コスト低減目標達成のため、2030年までに発電コスト7円/kWhの実現に資する高性能と高信頼性を両立した太陽電池の開発を目指し、2015年から5年間のプロジェクトとして本プロジェクトをスタートさせた。</p>		

II. 研究開発マネジメントについて

<p>事業の目標</p>	<p>本プロジェクトでは、開発戦略で掲げる発電コスト低減目標達成のため、2030年までに7円/kWhの実現に資する高性能と高信頼性を両立した太陽電池の開発を目指す。ただし、実用化が進んでいる結晶シリコン太陽電池とCIS太陽電池については、国内外での競争力確保の観点から太陽電池のコスト低減と効率向上を急ぎ、日本国内における発電コスト7円/kWhの達成目標年を2025年に前倒しする。具体的には、実用化が進んでいる結晶シリコン太陽電池とCIS太陽電池については、14円/kWhを十分に下回る太陽電池モジュールを2020年までに実用化するとともに、2025年までに7円/kWhを実現する要素技術の確立を目指す。また、結晶シリコン太陽電池やCIS太陽電池とは異なり、圧倒的な高効率や低コストで発電コスト7円/kWhを目指す革新的太陽電池については、2030年までに7円/kWhを実現する要素技術の確立を目指す。</p> <p>上記開発と並行して、太陽光発電の信頼性を高め、着実に社会に定着するための評価技術等の共通基盤技術を開発する。</p> <p>また、上記開発の進捗により、中間目標年までに多くの成果が生まれ、とくにヘテロ接合バックコンタクト型太陽電池等の高効率太陽電池の技術は確立しつつある。こうした高効率太陽電池は内外から高く評価されているものの、低コストでの製造プロセスにはまだ課題が残り、2025年の発電コスト目標達成には、技術的ブレークスルーが必要な状況である。そこで、高効率太陽電池の発電コスト目標達成をより強固なものとするべく、「高効率太陽電池製造技術実証」を行う。</p>						
<p>事業の計画内容</p>	<p>研究開発項目</p>	<p>2015fy</p>	<p>2016fy</p>	<p>2017fy</p>	<p>2018fy</p>	<p>2019fy</p>	
	<p>①、③結晶シリコン、CIS</p>	←				→	
	<p>② 革新的高効率(III-V)</p>	←				→	
	<p>② 革新的低コスト(ペロブスカイト)</p>	←				→	
	<p>④ 共通基盤技術</p>	←				→	
	<p>⑤ 調査</p>	←				→	
	<p>⑥ 実証</p>				←	→	
<p>開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載) (単位: 百万円)</p> <p>契約種類: 委託(100%)、共同研究(2/3)、助成(1/2)</p>	<p>会計・勘定</p>	<p>2015fy</p>	<p>2016fy</p>	<p>2017fy</p>	<p>2018fy</p>	<p>2019fy</p>	<p>総額</p>
	<p>一般会計</p>	-	-	-	-	-	-
	<p>特別会計(需給勘定)</p>	4,568	4,852	4,345	4,431	2,906	21,102
	<p>増額予算</p>	-	-	-	-	-	-
	<p>総予算額</p>	4,568	4,852	4,345	4,431	2,906	21,102
	<p>(委託)</p>	3,575	3,664	3,245	3,172	2,436	16,091
	<p>(共同研究)</p>	993	1,189	1,100	1,069	375	4,725
	<p>(助成)</p>	-	-	-	190	96	286
<p>開発体制</p>	<p>経産省担当原課</p>	<p>資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 新エネルギー対策課</p>					
	<p>プロジェクトリーダー</p>	<p>プロジェクトリーダーは設置せず、技術検討委員会におけるコメントをもとにNEDOがマネジメントを行った。</p>					
	<p>プロジェクトマネージャー</p>	<p>新エネルギー部 山崎 光浩</p>					

	委託先・共同研究先	(株)カネカ、シャープ(株)、ナミックス(株)、(株)クリスタルシステム、コマツ NTC(株)、(株)トクヤマ、京セラ(株)、ソーラーフロンティア(株)、東京大学、パナソニック(株)、(国研)産業技術総合研究所、豊田工業大学、大陽日酸(株)、電気通信大学、神戸大学、名古屋大学、名城大学、宮崎大学、東京農工大学、(株)東芝、積水化学工業(株)、アイシン精機(株)、富士フイルム(株)、早稲田大学、北陸先端科学技術大学院大学、明治大学、九州大学、東京工業大学、兵庫県立大学、立命館、東京理科大学、筑波大学、鹿児島大学、龍谷大学、(一財)電気安全環境研究所、岐阜大学、宮崎大学、(一財)電力中央研究所、(一財)日本気象協会、佐賀大学、日清紡メカトロニクス(株)、奈良先端科学技術大学院大学、デュボン・スペシャルティ・プロダクツ(株)、東レ(株)、石川県工業試験場、東京農工大学、みずほ情報総研(株)、(株)資源総合システム
情勢変化への対応	発電コスト 14 円/kWh、7 円/kWh は調達価格等算定委員会でも価格目標として設定され、太陽光発電の固定価格買取制度からの自立が明確に求められるようになった。この状況を受けて、実用化が進んでいる結晶シリコン太陽電池や CIS 太陽電池では、発電コスト 7 円/kWh の達成時期を 2025 年と従来よりも 5 年前倒しとする目標を設定した。目標達成を強固なものとするために、開発体制を強化する目的で対応する研究開発項目で追加公募を行い 2 件採択した。また、量産製造プロセスの課題の抽出および対策を目的とした実証事業を新設し 1 件採択した。また、これまで開発してきた高効率セルの小規模設備製造実証や、実用化を加速するための新たな市場の創出に向けて、BIPV(ZEB)、重量制限のある屋根、車載などのフィージビリティスタディを実施した。特に、車載に関しては、プロジェクト化へ向け太陽光発電システム搭載自動車検討委員会を創立して詳細な調査を実施するとともに、IEA PVPS Task17: PV and Transport の立ち上げ及び運営支援を行った。	
評価に関する事項	事前評価	事前評価 2014 年度 担当部 新エネルギー部
	中間評価	中間評価 2017 年度 担当部 新エネルギー部
Ⅲ. 研究開発成果について	<p>研究開発項目①先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の開発</p> <p>1) 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発</p> <p>「高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶 Si 太陽電池の開発」においては、ヘテロ接合バックコンタクト結晶シリコン太陽電池セルの低コストパターン形成技術開発、セル間配線技術などの実用化技術を開発し、結晶シリコン太陽電池セルとして世界最高のセル変換効率 26.7%を実用サイズ(セル面積 180cm²)で達成した。また、モジュールにおいても、結晶シリコン太陽電池モジュールで世界最高の変換効率 24.5%を達成した。発電コストに関しては、住宅用建材一体型モジュール前提で、2020 年度 14 円/kWh 実現の見通しを得た。また、2025 年に発電コスト 7 円/kWh 達成が可能であるとの見込みを得た。</p> <p>「高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発」においては、更なる低コスト化技術開発として、新規パターンニングプロセス及び新規界面清浄化技術を開発することで、セル変換効率 25.1% (156mm 角)、モジュール変換効率 22.1%を達成した。発電コストに関しては、2020 年度発電コスト 14 円/kWh 実現のためのプロセス開発を完了した。また、2025 年発電コスト 7 円/kWh 達成の定量的なシナリオを提示することができた。</p> <p>「低コスト高効率セル及び高信頼性モジュールの実用化技術開発」においては、これまでに得られた成果をベースに、シードキャスト基板結晶成長中の温度制御最適化を実施した両面受光低コスト PERC 量産プロセスにおいて、受光面パッシベーション及びアニールの最適化により、セル効率 22.01% (産総研にて測定)を確認した。また、モジュール効率 20.1%で寿命 35 年以上の DH/TC 複合ストレス耐性を有することを確認した。発電コストに関しては、低コストセル技術の導入により 2020 年 14 円/kWh の実現が可能であることを確認した。また、2025 年 7 円/kWh 達成に向けて低コスト高効率モジュールの製造技術導入を進めるシナリオを提示した。</p> <p>「基盤技術開発による先端複合技術セルのための低再結合電極の研究開発」においては、n+層に対する接触抵抗 1.8mΩ cm²、p+層に対する接触抵抗 3.8mΩ cm²、電極形成による再結合 470fA cm⁻²を達成した。</p> <p>「赤外線 FZ 法による高品質低コストシリコン単結晶の開発」においては、インゴット製造経費 850 円/kg 以下、ライフタイム 7397 μ sec で結晶欠陥および転位フリー、抵抗面内分布 10.9%以下、酸素成分濃度 6.9×10¹³atoms/cm³、炭素成分濃度 1.2×10¹⁵atoms/cm³のシリコン単結晶を開発した。</p>	

「高発電効率・低コスト太陽電池スライスプロセスの加工技術構築」においては、スライス時の欠陥評価手法と対処条件を構築した。高面品位スライス技術によりダメージエッチングを5 μ m削減可能であることを確認した。カーフロス60 μ mの加工技術開発を行い、市場量産と同等以上の生産性を確保する加工技術を構築した。さらに、カーフロス50 μ mの加工を先行評価し、加工可能であることを確認したほか、カーフロス40 μ mが可能となる固定砥粒ワイヤの製造を確認した。

「太陽電池用原料品質の最適化及び結晶欠陥の評価技術の開発・制御」においては、太陽電池製造の熱プロセスで成長する酸素析出物の形態と数密度が、炭素不純物濃度と結晶成長条件により変化し、ライフタイムや変換効率に悪影響を及ぼすことを解明した。酸素析出物の形態と数密度を制御して高ライフタイムの単結晶インゴットを得るCZ法結晶成長技術を開発した。開発した結晶成長技術と炭素濃度を低減したポリシリコン原料を使用して得られた実用サイズのインゴットのライフタイムは、全長にわたって2000 μ sec以上を達成した。開発したインゴットは熱プロセス後のライフタイム低下が抑えられ、ライフタイム下限値を300 μ secとすると、インゴットの直胴良品歩留りが11.5%向上した。

「低コスト・高信頼性・高効率 Super Si Hetero-junction (SSHJ) 太陽電池の開発」においては、Super Bifacial-SHJ (SBF-SHJ) でモジュール効率20.9%を実現し、2020年発電コスト14円/kWhを達成するとともに、2025年発電コスト7円/kWhを達成する見込みを得た。Super Back Contact-SHJ (SBC-SHJ) でモジュール効率22.0%超を実現し、2020年発電コスト14円/kWhを達成するとともに、2025年発電コスト7円/kWhを達成する見込みを得た。

2) 高性能 CIS 太陽電池の開発

「CIS 太陽電池モジュール高性能化技術の研究開発」において、世界最高変換効率22.9%を達成したCdSバッファCIS小面積セルの技術をもとに、光吸収層の品質改善技術及び光吸収層表面パッシベーション強化技術をさらに改良することに加えて、Cdフリーバッファ層の精密な最適化を行うことにより、変換効率23.4%を達成した。また、本変換効率を達成したCdフリーセル技術を適用したサブモジュール(70mm角)で変換効率20%の見込みを得た。発電コストに関しては、2020年度14円/kWh達成の見込みを得た。また、2025年に発電コスト7円/kWh達成に向けた定量的なシナリオを提示することができた。

研究開発項目②「革新的新構造太陽電池の研究開発」

1) 革新的高効率太陽電池の研究開発 (III-V化合物)

「低コストセル技術開発」では、コロイドリソグラフィ+ドライエッチングによる裏面テクスチャ形成を、薄膜2接合セル(InGaP 300nm/GaAs 600nm)に適用し、裏面ミラーの場合に比べて主にGaAsの光吸収を増大することによりJsc 40%増加を確認した。光閉じ込めにおいて、エピタキシャル最下層への裏面反射構造の導入、サブセルベース厚さの適正化によるエピタキシャル層の薄層化、バッファ層の薄型化を組み合わせるIII-V薄膜3接合セルで総膜厚1/2(従来比)で従来と同等の電気特性を確認した。シリコン上III-Vセルでは、化合物2接合(InGaP/GaAs)とSiセル(バックコンタクト型)とを透明樹脂層を介して接合した4端子セルで変換効率33.0%を達成した。スマートスタック技術(Cu接合)を適用したGaAs/Si系で素子寿命30年以上および実用的な耐久性を実証した。

「低コスト化プロセス技術開発」では、開発した自動装置で4インチウェハを20mm/hで安定的にクラックレス剥離ができることを確認した。また、10回基板利用で電気特性の維持率95%以上、歩留り81%を達成した。全面観察装置を開発し、1時間以内の4インチウェハ非接触スキャン、さらに検出された異常点の分類判定の正答率98.5%を達成した。MOCVDによりGaAs製膜速度120 μ m/hを達成、InGaP製膜速度30 μ m/hを達成した。単セルの変換効率は、それぞれ、24.5%(p on nセル)、15.3%と目標を達成した。また、これらの成果を組み合わせた2接合セルで効率22.3%(反射防止膜で効率約28%見込み)を達成した。HVPEによりGaAs製膜速度170 μ m/h、InGaP製膜速度24 μ m/hを達成。単セルの変換効率は、それぞれ、22.4%、13%を達成した。これらの成果を組み合わせたInGaP/GaAsタンデムセルの開放電圧2.32V、変換効率21.8%を実現した。

「低コストモジュール開発」では、実用セルサイズの非集光・逆積み3接合型モジュールで世界最高となる31.2%の変換効率を達成した。また、モジュール面積当たりの月積発電量で対Si 151%となることを実証した。集光型では、低コスト構造の1m角プラスチックレンズ一体型パネルで変換効率32.2%を達成し、IEC62108準拠の信頼性試験をクリアしたことを確認した。また、2030年時点で、システムコスト119円/W(100MW/年生産)と発電コスト7円/kWhの実現見通しを得た。無追尾低倍集光モジュールで変換効率32.8%を確認した。低コスト化に向けた基盤技術として反射防止コート設計最適化により効率2.52%向上を達成した。また、非集光III-V族多接合型太陽電池モジュールを含む他接合型太陽電池の屋外での発電動作が、気象条件、特に太陽光スペクトルの影響を強く受けることを、実証データをもとに世界で初めて明らかにした。さらに、各種太陽電池の実動作データをもとに、発電量シミュレー

ションモデルを構築し、全国837箇所における各種太陽電池の定格出力あたりの年間発電量予測が可能となった。

「超高効率セル開発」では、電流整合を満たすGaInNAs:Sbセルを開発し、非集光逆積み型GaInP/GaAs/GaInNAs:Sb格子整合系3接合セルで変換効率30.3%(1 Sun)を達成した。GaInP/GaAs/GaInNAs:Sb/Ge 4接合セルの開発に国内で初めて成功(ウエハ接合)した。また今後の課題を明らかにし、50%達成に向けた見通しを得た。量子ドット中間バンドセルでラチェット構造により中間バンド内電子の長寿命化(100 nsec)を実現、室温でサブバンドギャップ光励起強度によって80%のキャリア引出効率を達成した。開発した集光型低電流・高電圧型量子ドットセルにおいて効率32.1%(225 Sun)を達成した。

2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発 (ペロブスカイト)

「塗布法によるペロブスカイト太陽電池の開発」では、大面積均一インクジェット塗布を用いて30cm角サイズのモジュールで世界最高効率17.93%(AIST測定)を達成した。太陽電池セルのペロブスカイト膜の組成制御と界面修飾で高温高湿試験、光照射安定化試験の品質規格の要求事項を達成した。モジュール高効率化、プロセスタクトの短縮、設備コストの低減の可能性を確認し、モジュール製造コスト15円/Wの指針を得た。

「超軽量太陽電池モジュール技術の開発」では、従来困難であった大面積化と高効率化の両立を実現し、面積703cm²のPENフィルム基板モジュールで変換効率14.1%を実現した。ガラス基板(27×29cm)では変換効率16.1%を確認しており、PENフィルム基板モジュールへの展開を進めている。耐久性に関しては、Mixペロブスカイトを採用した5cm角フィルムモジュールで光照射500時間に対し、400時間まで相対効率低下10%を確認した。また、耐熱試験1000時間に対し、550時間まで相対効率低下10%を確認した。

「低コストR2R太陽電池製造技術の開発」では、3cmフィルム基板セルで変換効率13%を達成し、JIS規格C8381準拠の耐久性試験5項目で相対低下率10%以下を達成した。また、オールR2Rプロセスで作成した30cm角フィルム基板モジュールで変換効率11.4%を達成した。量産時5円/W以下が達成可能な内製バリアフィルムにより耐湿熱試験(85℃85%)1000hで相対変換効率低下率10%未満を達成した。

「高性能・高信頼性確保製造技術の開発」では、小面積セルでの変換効率18%の構成において、100mm角で17.04%、240mm角で16.12%の変換効率を有するモジュールを実現した。従来の金電極に対して低コストのカーボン系塗布材料で組成と工法を改良し、金電極でセル変換効率16.51%の構成において、カーボン電極で16.22%を達成した。従来の材料(Spiro-OMeTAD)に対して低コストな有機系新ホール輸送材を開発し、Spiro-OMeTADでセル変換効率18.7%の構成において、有機系新ホール輸送材でセル変換効率18.2%を達成した。耐久性に関しては、カチオンサイト、Brレス・ペロブスカイト層、ホール輸送材の最適化により、光作動耐久性向上(400hrで初期性能の77%を維持)を確認した。

「高性能材料合成技術の開発」では、耐湿性低下の原因となるドーパントを必要としない正孔輸送材料骨格を見出し、新規正孔輸送材料を用いたセルでSpiro-MeOTADを用いたセルと同等以上の変換効率に到達した。吸収長波長端750nm以上を満たしつつ、変換効率の低下なくペロブスカイト膜の耐湿性が向上するペロブスカイト表面処理技術を見出した。上記の新規材料を用いて最大変換効率14.6%を確認した(同条件におけるSpiro-MeOTAD:ドーパント有りの変換効率14.2%)。

「高機能材料・セル製造技術開発」では、低コストかつ長寿命HTMで、材料コスト80円/m²(層厚み50nm)、酸化剤ドーパントフリーのHTM組成を確立した。また、上記HTMとペロブスカイト界面制御の組み合わせにより変換効率22%超を実現するとともに、25%に向けた手順を提示した。製造工程簡易化によるコスト低減を目的とした一段塗布用インキの簡便なバーコート法で変換効率17%。スピコートで変換効率17%を確認した。逆型構造セルを開発し連続光照射1,000時間超の耐久性、85℃耐熱性500時間を達成した。性能評価法の確立に関しては、MPPT法、Dynamic I-V法、Reduced Span I-V法と3種類の測定法を提案し、測定条件の最適化によりヒステリシスの影響を解消できることを実証した。

「新素材と新構造による高性能化技術の開発」では、ペロブスカイト層へのカリウム添加によるI-Vヒステリシス低減効果が様々な組成に有効であることを見出した。また、1cm²セルで変換効率21.65%、3直列モジュール(2.76cm²)で20.7%を達成した。ペロブスカイト単結晶試料の構造と物性を検討し、励起子の特殊性を明らかにした。複数の結晶相が混在し、自発的に超格子を形成していることを見出した。劣化要因となるMAを含まないペロブスカイトでカリウムとセシウムを適切に添加し不純物を制御することにより、セル変換効率21.9%を達成した。高電流化を狙った錫/鉛混合ペロブスカイトでJsc 33.1mA/cm²、Voc 0.8V、セル変換効率20.4%を達成した。100円/m²以下無機系ホール輸送材NiO_xを用いた逆構造型セルで効率19.6%を確認した。混合カチオン型(Cs_xMA_yFA₂PbI₃Br_b)用の前駆体材料FAPbI₃(dmf)₂を開発し、これを用いてVoc 1.21V(電圧ロス0.38V)のセル、変換効率22.2%(Jsc 25.2 mA/cm²、Voc 1.11 V、FF 0.793)のセルを得た。電圧ロスが小さい理由として、Agingにより正孔輸送層で

の酸化が進行し、伝導度が向上するとともに、HOMO準位がより深くなることを明らかにした。カリウム添加ペロブスカイト太陽電池のBr比制御によるEgグレーディングの最適化を行い、表面側Egが1.61eV(Br比=0.15)、裏面側Egが1.48eV(Br比=0.00)の時に効率が最も高くなる(25.2%)ことを明示した。PbSn系ペロブスカイト太陽電池のSn/(Pb+Sn)比制御によるEgグレーディングの最適化を行い、表面側Egが1.47eV(Sn比=0.07)、裏面側Egが1.33eV(Sn比=0.38)の時に効率が最も高くなる(25.5%)ことを明示した。

研究開発項目③「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」

1) 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

「先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発」においては、p型単結晶PERCセル効率20.0%、n型単結晶Bifacial PERTセル効率21.0%を達成した。開発したPERTセルプロセスはp型n型両方に適用可能であることを確認し、高効率拡散系セルプロセスを確立した。SHJセル効率23.2%、pseudo Eff. 24.3%を達成して高効率ヘテロ系セルプロセスを確立するとともに25%達成の目途を得た。複数の企業や大学、研究機関等と連携してモジュールを試作・評価できる体制を構築。PIDやLeTIDといった新しいモジュール劣化現象の原因とメカニズムの解明に貢献した。

「材料・プロセス評価基盤技術に関する研究開発」においては、株式会社トクヤマと共同で、 $10\text{--}20\ \Omega\cdot\text{cm}$ で18 msec、 $1\text{--}2\ \Omega\cdot\text{cm}$ では全長の95%以上の領域で2 msecを超える高ライフタイム結晶の成長に成功した。発光活性化PLにより従来困難であった 10^{14}cm^{-3} 以下の低濃度測定法を開発した。また、 10^{12}cm^{-3} の定量の可能性を見出した。ダイヤモンドワイヤーでスライスした基板の目視できない欠陥のPLイメージングによる可視化し、セル特性への影響を明らかにした。

「高品質・低コスト結晶成長技術に関する研究」においては、p型基板では5msec、n型基板では10msecのバルクライフタイムを実現した。

「新規ヘテロ接合用材料に関する研究」においては、アモルファスシリコンを用いたヘテロ接合型太陽電池において、開放電圧0.740 V以上、変換効率23.2%に貢献した。

「アモルファス・結晶界面における構造及び電気的特性に関する研究」においては、ライフタイムの温度依存測定による界面のバンドオフセット評価手法を確立した。FTS法によるi-a-Si:H層(5 nm)により、 $J_0=4.6\ \text{fA}/\text{cm}^2$ を達成した。堆積速度は約15 nm/minである。このi-a-Si:Hを用いたシリコンヘテロ接合太陽電池(p、n層はプラズマCVD製膜)を作製し、変換効率17.4%($V_{oc}=0.679\ \text{V}$, $J_{sc}=35.0\ \text{mA}/\text{cm}^2$, $\text{FF}=0.732$)を得た。電子選択コンタクトとしてSiドープnc-GaNの形成を試み、結晶性が高く電気的特性の良好な膜の形成に成功した。

「低コスト・拡散系太陽電池におけるキャリア再結合に関する研究」においては、裏面パッシベーション膜により $J_{0\text{rear}}$ を $260\ \text{fA}/\text{cm}^2$ 削減可能なプロセスを開発に成功し、かつエミッタプロファイルの数値シミュレーションより、 $J_{0\text{front}}$ を $50\ \text{fA}/\text{cm}^2$ 削減しうるプロセスを明らかにした。6大学コンソーシアムにおいてシリコン単結晶の高品質化が行われ、 $J_{0\text{bulk}}$ の大幅な削減($100\ \text{fA}/\text{cm}^2$ 以上)に成功しており、全ての技術を組み合わせることにより、最終目標を超える J_0 の削減が可能となった。

「薄型セルを用いた高信頼性・高効率モジュール製造技術開発」においては、板厚50 μm 級の極薄ウエハを用いたSHJセルを開発し、世界トップレベルの変換効率22.0%(4cm^2)を達成した。スクリーン印刷などの低コストプロセスを用いて、両面受光-裏面電極(BC)型セルの効率向上を図り、変換効率22.3%を達成した。任意の波長で内部量子効率のマッピングが可能な内部量子効率マッピング法を新規に開発し、BCセルの電気的遮蔽損失領域の同定に成功した。高信頼性化技術については、PCTによる湿熱劣化の信頼性試験により、インターコネクタに沿った劣化モードを見出し、その劣化メカニズムを初めて提案した。

「Cat-CVDなど新手法による高性能太陽電池低価格製造技術の開発」においては、裏面電極型Siヘテロ接合太陽電池の光入射側表面にCat-CVD窒化Si膜を堆積し、開放電圧730mV以上、変換効率24%以上に貢献した。非質量分離型プラズマイオン注入によりp型a-Siをn型に反転する技術を確立した。また、イオン注入により一旦低下するパッシベーション性能を、事後のアニールで回復できることを見出し、その機構が、Pとともに注入されたHによる欠陥終端であることも明らかにした。この方法で形成したn型a-Siを用いた太陽電池の動作も確認した。

「高性能キャリア選択性パッシベーションコンタクトの開発」においては、シリコンヘテロ接合太陽電池において、ナノ結晶シリコン薄膜をパッシベーションコンタクト材料に適用したものにすることにより、ナノ結晶を用いないベンチマークセルに比べ短絡電流密度の2.1%向上、変換効率23.5%を達成した。また、 TiO_x が結晶シリコン太陽電池の電子コンタクトとしてのみならず、正孔コンタクトとしても機能することを実セルで初めて実証した。従来のアモルファスシリコン p-i層を TiO_x に置換することで J_{sc} を4.1%改善し、解放電圧0.700Vを確認した。

2) 高性能CIS太陽電池の開発

「光吸収層の高品質化によるCIS太陽電池の高効率化」においては、三段階蒸着製膜CIS光吸収層における銀 (Ag) やアルカリ金属添加、およびバンドギャップグレーディング制御、熱光照射処理により変換効率向上を実現した。これにより、世界最高水準の変換効率22.2%を確認した。

「界面制御によるカルコゲナイド系薄膜太陽電池の高効率化」においては、CIS太陽電池のpnヘテロ接合界面に価電子帯オフセット ΔE_v を設けることにより界面再結合電流の抑制が可能であることを指摘した。 ΔE_v を形成する層としてCu欠損層を用いることにより、開発開始時の開放端電圧Vocを+30mV増加させ、 $J_{sc} \times Voc = 26.3 \text{ mW/cm}^2$ を実現、最終目標を達成した。さらに、3段階法におけるCu欠損層の成長モデルを構築した。

「バンド制御による再結合パッシベーション技術の開発」においては、CdフリーかつオールドライプロセスのMOCVD-(Zn, Mg)O:B/sp-(Zn, Mg)O/CIS(Cs処理) 構造で、従来構造よりも30mV高いVoc、 $Voc \times J_{sc}$ 値は29.0mW/cm²を達成した。また、従来のウェットプロセスを用いないオールドライプロセスで、世界で初めて変換効率22%を超えるCIS太陽電池を実現することに成功した。

「エピタキシャル成長を利用したCIS太陽電池の高効率化指針の解明」においては、エピタキシャル製膜の下地となるMo薄膜について、低温バッファ層を導入した新規スパッタ法を開発し、Mo薄膜のエピタキシャル成長に成功した。新たに開発した高温3段階法でMo/サファイア基板上にエピタキシャルCIS薄膜を作製し、キャリアライフタイム τ_2 100ns以上(300K)を達成した。

「結晶欠陥の検出と同定、欠陥密度低減化技術開発支援」においては、アルカリ処理CIS試料の深い欠陥準位の相関を示し、バルク改質 (アンチサイト欠陥の密度低減) の効果があることを確認した。また、バルク再結合成分が減少し、開放起電圧が改善することを、再結合解析より定量的に明らかにした。放射再結合定数の再計算とシミュレーションを組み合わせ、25%の達成に必要な開放起電圧 (欠陥準位) について明らかにした。非輻射再結合損失に加え、 J_{sc} 損失の低減が不可欠であることを示した。

「積層構造・改質界面の電子構造評価による電池特性向上技術の開発」においては、電子構造の深さ方向プロファイルを評価するための技術として窓層/バッファ、バッファ/CIS層界面形成、CIS/Mo界面露出、「その場」アルカリ処理技術を開発した。それらと電子分光法による評価の結果、バッファ/CIS界面のバンド接続がほぼ理想的であること、この界面の拡散電位がアルカリ処理により増大し、処理による開放電圧の増大に対応すること、三段階法、SAS法共に高性能電池のCIS層内、Mo側にバンドギャップ二重傾斜、Back Surface Fieldが存在することを明らかにした。一方、窓層/バッファ、CIS/Mo界面の電子接続には効率向上に向けて改善の余地が残されていることを示した。

「理論計算と実験的手法を組み合わせた粒界と界面を中心とした材料設計とモデル実証研究」においては、 $\text{Cu(In, Ga)(S, Se)}_2[\text{CIGSSe}]$ 系化合物半導体の禁制帯幅やバンド構造 (価電子帯上端[VBM]と伝導帯下端[CBM]の準位) のGa/(In+Ga)比とS/(S+Se)比をパラメーターとした3次元マップを作成し、 CuInSe_2 のGaやSの固溶効果を明らかにするとともに、高効率太陽電池の光吸収層の深さ方向の組成分布や粒界構造モデルを提案した。深さ分解XAFS法を用いて、高効率太陽電池に用いられているCs処理は、表面だけではなく薄膜内部に与える効果で変換効率の向上に寄与していることを示した。

研究開発項目④「共通基盤技術の開発 (太陽光発電システムの信頼性評価技術等)」

「新型太陽電池評価・屋外高精度評価技術の開発」ではペロブスカイト、新型CIGS時定数、新型結晶Siを含む各種新型太陽電池で高精度性能測定技術の開発・実施・実証を行った。また、屋外測定再現性±1%以内の目処を得た。各種モジュールで連続検証中。ストリング評価への応用検討を開始した。「新型太陽電池評価・屋外高精度評価技術の開発」では結晶シリコン太陽電池の経年劣化を、屋外データと室内データを用いて検証した。劣化の主要因は、ヘテロ接合系では開放電圧の減少、バックコンタクト系では高電位のモジュールにおける電圧誘起劣化であることを見出した。「太陽電池モジュールの劣化現象の解明、加速試験法の開発」では長期屋外曝露モジュールでの酢酸による劣化機構が、加速試験同様、電極腐食にともなう電極直下のギャップ形成と、電極直下に残留した銀ピラーの整流性への特性変化の二段階で進行することを見出した。

「ZEB適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術の開発」では新規に開発した温度サイクルに関する加速負荷試験 (ATC試験) によって半田接続部の剥がれやタブ配線断線といった長期信頼性上リスクのある劣化モードも加速され、試験時間として8分の1以下に短縮可能である事を見出した。

	<p><u>研究開発項目⑤「動向調査等」</u></p> <p>「太陽光発電開発戦略に関する動向調査」では、第5次基本計画に掲げられた再生可能エネルギーの「主力電源化」に向けて太陽光発電開発戦略の改訂が緊急の課題であるとの認識から、有識者による「太陽光発電技術戦略委員会」を立ち上げ、太陽光発電の価値・付加価値、太陽光発電の市場創出の可能性等の情報収集・分析を行うと共に、「太陽光発電開発戦略」の方向性を検討した。検討を踏まえた「太陽光発電開発戦略」を推進するべく、市場動向、システム価格や発電コストに関連する各種情報を収集し、最新の発電コストの試算および感度分析を行った。また、制度動向、技術動向、経済性評価（グリッドパリティ等）の情報を調査し、太陽光発電の2050年に向けた導入量を定量的に分析した。今後市場の発展が見込めるアプリケーションとして検討を開始した「太陽光発電システム搭載自動車」の意義、市場動向を調査し、時間帯別の日射量・走行パターンを想定した太陽光発電システム搭載自動車によるCO2排出削減効果の試算を行った。また、太陽光発電搭載自動車に関する国際的な展開として、IEA PVPSにおけるタスク17：PV and Transportの立ち上げ及び運営支援を行った。</p> <p>「発電コスト低減に向けた太陽電池技術開発に関する動向調査」では、太陽光発電システム設置価格とその内訳について調査・分析を行うとともに、世界における太陽電池モジュール技術および産業の現状を調査し、代表的な太陽電池製造企業の事業内容の整理および比較を行った。また、太陽電池モジュールの長期信頼性に関する研究開発動向や国際標準化について調査した。更に、「太陽光発電開発戦略」の改訂に対応するべく、太陽電池モジュールの利用動向と今後の市場と産業の可能性に関して調査した。海外主要国における太陽電池の研究開発動向を調査し、各国の太陽電池技術開発戦略を体系的かつ明確に比較・分析できるよう、その枠組み、予算配分、目標等の比較を行った。特に、新たな太陽電池技術として、量産製品における技術トレンド、ペロブスカイト太陽電池等の研究開発動向と実用化に向けた各機関の取り組みや開発ロードマップ等を調査した。</p> <p>「IEA PVPS国際協力事業」では国際エネルギー機関(IEA)の太陽光発電システム研究協力実施協定(PVPS)に参画し、太陽光発電の普及・促進に向けた国際協力活動を通じた諸外国の技術開発動向や政策動向、市場動向等に関する調査・分析を実施した。具体的には、タスク1専門家会議、ワークショップ等への参画を通じて、各国の国家プログラム、研究開発、実証試験、導入促進、市場動向等の情報を調査した。また、各種ワークショップにおいて日本の動向について講演を行い、加盟国間の情報交換に貢献した。また、日本のタスク1に関わる調査を実施し、報告書をIEA PVPSに提出するとともに、IEA PVPS Trends Reportを始めとする各種報告書を作成するとともに、主要国の国内調査報告書等の日本語版を作成した。特別情報活動では、第7回世界太陽光発電国際会議(WCPEC-7)でタスク10Aの運営責任者を務め、日本およびEUの専門家が中心となり会議に参加したステークホルダーに対し、太陽光発電の市場、価格、産業界の総括的な概要報告と将来のビジネス展望に関するワークショップを開催した。また、第35回欧州太陽光発電国際会議(EUPVSEC-35)において、新しい市場開拓、ビジネスモデルに関するワークショップを実施すると共にIEA PVPSタスク17「PV and Transport」に係る各種情報収集およびタスク17専門家発掘等の支援を実施した。</p> <p><u>研究開発項目⑥「高性能太陽電池製造技術実証」</u></p> <p>「低コストヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池の小規模量産実証」において、製造プロセスの改善を進め、モジュール変換効率22%実現に必要なセル変換効率24%相当を再現性良く得られることを確認した。また、p/n、電極パターン形成に用いる部材のバリューエンジニアリング、既存材料の利用効率の改善可能により、パターン形成の変動費5円/Wの実現見込みを得た。</p>		
	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="443 1865 742 1928">投稿論文</td> <td data-bbox="742 1865 1460 1928">861 件</td> </tr> </table>	投稿論文	861 件
投稿論文	861 件		
	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="443 1928 742 2013">特許</td> <td data-bbox="742 1928 1460 2013">「出願済」440 件（うち海外出願 196 件）</td> </tr> </table>	特許	「出願済」440 件（うち海外出願 196 件）
特許	「出願済」440 件（うち海外出願 196 件）		
	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="443 2013 742 2056">研究発表・講演</td> <td data-bbox="742 2013 1460 2056">3,737 件</td> </tr> </table>	研究発表・講演	3,737 件
研究発表・講演	3,737 件		
IV. 実用化の見通しについて	<p>本事業で確立した高性能・高信頼性太陽電池を具現化するための要素技術は、担当企業で実用化に向けた検討や実証が進んでいる。結晶シリコン太陽電池では、日本企業に強みがある住宅屋根に加え、新たな市場として建物の壁面や窓に向けた商品化が進められている。また、電気自動車に新たに採用された事例がある。CIS太陽電池では、実績がある住宅屋根に加え、重量制限のある屋根に向けた軽量モジュールの開発、電気自動車での実証試験が行われている。III-V化合物太陽電池では、従来の宇宙用途に加え、30%を超過する変換効率を</p>		

	活かした電気自動車での走行実証試験が開始されている。ペロブスカイト太陽電池では、本プロジェクトで確立した変換効率、耐久性を土台として、住宅向けを主とした実証実験が開始されている。	
V. 基本計画に関する事項	作成時期	2015年3月制定
	変更履歴	<ul style="list-style-type: none"> ・2018年2月、アウトプット目標を追記し、研究開発項目⑥「高効率太陽電池製造技術実証」を追加。 ・2019年2月、研究開発項目①「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能CIS太陽電池の技術開発」について、最終目標を修正。 ・2019年4月、プロジェクトマネージャーを山田主任研究員から山崎主査に変更。 ・2019年7月、プロジェクトマネージャーの役職を山崎主査から山崎主任研究員に変更。

プロジェクト用語集

用語（日本語）	用語（英語）	説明
1sun	1sun	AM1.5 の太陽光スペクトルにて入射光強度が 1000 W/m ² の条件を指す。
1σ	1σ (1 sigma)	測定値ばらつきの評価で標準偏差 σ を倍率 1 倍で用いる。
1 ダイオードモデル	1 diode model	太陽電池の等価回路モデルの一つであり、電流源、一つのダイオード、並列抵抗、直列抵抗を用いて太陽電池の電流-電圧特性をあらわすモデル。
2 次準器	secondary standard	各国にひとつ程度しかない 1 次準器によって校正された測定器。
3 段階法	Three-stage process	第 1 段階で In、Ga、Se、第 2 段階で Cu、Se、第 3 段階で In、Ga、Se を蒸着する Cu(In,Ga)Se ₂ 製膜法で、2 重傾斜禁制帯の形成が可能。
III-V 化合物太陽電池	III-V compound solar cells	III-V 族化合物半導体太陽電池。
III-V 族化合物半導体太陽電池	III-V compound semiconductor multi-junction solar cells	III-V 族化合物半導体の組成比を制御してバンドギャップの異なる複数の太陽電池層を重ねた多接合太陽電池。
Akima 法	Akima interpolation	Akima 氏によって考案された 3 次多項式補間法。
ALD（原子層堆積法）	Atomic layer deposition	原料ガスとパージ用ガスを交互に加熱基板面に照射し、薄膜を形成する方法。
Al 法	Al method	電圧誘起劣化現象の加速試験方法の一つ。太陽電池モジュールのカバーガラスに設置した Al 板を電極とし、セルの電極との間に電界を印加し劣化現象を引き起こす。
AlOx	Aluminum oxide	p 型 Si 基板に対するパッシベーション膜として高密度の負の酸化膜固定電荷を持つ。
APE	APE	Average Photon Energy の略で、一つの太陽光スペクトルに含まれるフォトンの平均エネルギーのこと。太陽光スペクトルの波長偏りを示す指標であり、AG1.5G の標準スペクトルを 350-1050nm の範囲で計算すると APE=1.88eV となる。すなわち屋外で測定した実スペクトルの APE がこの値よりも高ければ短波長成分が相対的に多いブルーリッチ、逆であればレッドリッチであるといえる。
a-Si 膜（アモルファスシリコン膜）	Amorphous silicon film	非晶質シリコン膜。シランガスなどをプラズマや Cat などの CVD 法で分解して形成される膜であり、X 線で評価される原子配列の規則性を持っていない。通常、数%の水素を含有し、この水素によって半導体の p 型 n 型の導線性制御が可能となる。a-Si:H 膜と表記される場合もある。

ATC 試験	Accelerated thermal cycle test	IEC61215 に記載の温度サイクル試験をより加速評価できるように開発した新規信頼性試験。
BIPV	Building-integrated photovoltaics	建材一体型の太陽電池モジュール。
Cat-CVD 法 (キャットシーブイデュー法、触媒化学気相堆積法)	Catalytic Chemical Vapor Deposition	目的とする原料ガス分子を真空装置内に導入し、特定の圧力下でこのガスを加熱した触媒体に接触させることで分解し、その分解したガスを基板に輸送して膜形成を行う方法。化学気相成長 (CVD) の一種。
Cat-doping 技術 (キャットドーピング技術)	Catalytic doping method	目的とする原料ガス分子を真空装置内に導入し、特定の圧力下でこのガスを加熱した触媒体に接触させることで分解し、この分解したガスを半導体基板に導き、取り込ませることで基板の導電性を制御する技術。
CCD	Charge Coupled Device	固体撮像素子であり、ビデオカメラなどイメージセンサに広く利用されている半導体素子。
CIGS	CIGS	CIGS (Cu, In, Ga, Se 等の化合物半導体) を発電層に用いた太陽電池。
CIGSSe	CIGSSe	半導体 $\text{Cu(In, Ga)(S, Se)}_2$ の構成元素の頭文字からとった略称。光吸収層として使われる。
CIS 系太陽電池	Copper Indium Selenium Solar Cell	銅、インジウム、セレン他による化合物を光吸収層とした太陽電池。
CZTS	CZTS	$\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ を組成とする化合物半導体。
CZ 法	Czochralski method	結晶の素材を石英製などのるつぼに入れ、抵抗加熱などによって材料を溶かして融点よりも少し高い温度に保っておき、それに単結晶の種子結晶をひたして十分になじませたのち、ゆっくり引き上げて種子結晶の方位配列をもった大きな円柱状の単結晶を成長する方法。
DFT 法	Discrete Fourier Transform	離散フーリエ変換。
DH 試験	Damp Heat Test	電気電子製品を対象にして高温高湿が特性劣化に与える影響を加速して評価する標準的な試験方法で、相対湿度 85%、温度 85°C において対象品に適した長期の時間が推奨されている。
DLTS	DLTS (deep level transient spectroscopy)	過渡容量分光法。半導体における深い準位 (捕獲中心や再結合中心) を測定する方法。電気容量の過渡応答を利用して、トラップのエネルギー、密度、捕獲断面積を推測することができる。
Dry UV 試験	Dry UV test	低湿環境 (実施例では 0~2%RH) で行う UV 照射試験。

EDX	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy	エネルギー分散型 X 線分析法 電子線などを物体に照射した際に発生する特性 X 線のエネルギーを分光することにより、元素分析を行う。
Eg	Eg	バンドギャップエネルギー、禁制帯幅。
EL 検査	Electroluminescence	太陽電池に電界を印加すると、生成した電子と正孔が再結合して発光する(エレクトロルミネッセンス、EL)。これを撮影して、画像を分析することでセルの欠陥や割れを観察することができるため、モジュールの検査には必須の手法となっている。
ELO (エピタキシャルリフトオフ)	Epitaxial lift-off technique	III-V 族基板上に太陽電池を成膜した後、太陽電池のみを引き剥がすプロセス。太陽電池は低コスト基板に転写し、高価な基板は再利用することで低コスト化できるとともに、セルの裏面で反射した光が厚い基板によって吸収されることによるロス低減が可能となる。
EPMA	Electron Probe Micro Analysis	電子線マイクロアナライザ 対象物に電子線を照射すると元素固有の特性 X 線を発生する特性 X の波長と強度から構成元素を同定/定量できる。
EQE(外部量子効率)	External quantum efficiency	太陽電池は半導体材料で形成されており、太陽光などの光が入射すると発電する性質を利用している。1 個の光子が太陽電池に吸収されると、その光子は電子・正孔対をつくる。電子または正孔が外部に電流として取り出されると、その担体は収集されたという。そうでないとき、担体は再結合して電流に寄与しない。量子効率は、太陽電池を短絡条件で動作させたときに電流(すなわち収集された担体)に変換された光子の割合のことをいう。外部量子効率(EQE)は、光の伝搬や反射による損失の効果を含むのに対し、内部量子効率(IQE)は、反射や透過の影響を受けない光子についての効率を指す。
ESTI	ESTI	European Solar Test Installation 欧州共同体の研究所。太陽電池評価研究を実施。
ETFE	ETFE	エチレン-4 フッ化エチレン共重合体。
ETL	Electron transport layer	電子輸送層。
ETM	Electron transport material	電子輸送材料。
EVA	Ethylene-vinylacetate copolymer	太陽電池モジュールに用いられる代表的な封止材のひとつ。エチレン酢酸ビニル共重合体。
FF (フィルファクター)	FF (fill factor)	$=P_{max}/I_{sc}/V_{oc}$ 。太陽光発電素子の短絡電流密度×開放端電圧に対し、最大電力を生じる電流密度×電圧の動作点のこと。直列抵抗が大きく、並列抵抗が小さくなると FF が減少

		する。
FIT	Feed-in Tariff	固定価格買取制度 再生可能エネルギーの普及促進のために採られた代表的施策のひとつ。
FZ 法	Floating zone melting method	単結晶の材料となる多結晶棒を垂直に置いて、上下をクランプし、途中を高周波や電子ビームなどで部分的に加熱溶融し、その溶融ゾーンを下から上または上から下に移動させることによって単結晶を成長する方法。
GPIB ケーブル	GPIB cable	測定器や PC 間で測定信号や制御信号を通信するための接続ケーブル。
HAST 試験	Highly accelerated stress test	加圧により、100℃以上、かつ高密度な水蒸気雰囲気を再現した加速試験方法。
HAXPES	HAXPES	Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy の略。X 線源に高いエネルギーを持つ X 線源を使用することで、通常の XPS よりも数倍の検出深さを有する。非破壊・非接触で埋もれた界面の化学結合状態の評価が可能。
HBC	Hetero-junction Back Contact	アモルファス・シリコン(a-Si)と結晶シリコン(c-Si)のヘテロ接合裏面電極型太陽電池。
HTL	Hole transport layer	正孔輸送層。
HTM	Hole transport material	正孔輸送材料。
HOMO	Highest Occupied Molecular Orbital	基底状態において電子をみたされている軌道(占有軌道)の内、エネルギーの最も高い電子軌道。
IEC	International Electrotechnical Commission	国際電気標準会議。電気工学、電子工学、および関連した技術を扱う国際的な標準化団体である。
IEC/TC82/WG2	IEC/TC (Technical Committee) 82/WG (Working Group) 2	IEC における太陽光発電システムに関する技術委員会 (TC82) 下に設置された非集光型モジュールに関するワーキンググループ (WG)。
IEC61730	IEC61730	太陽電池モジュールの安全性認証規格。
Implied Voc	Implied Voc	1sun での少数キャリア濃度を測定し、計算により算出された Voc のこと。
IPCE	Incident photons to current conversion efficiency	ある波長において、入射したうちの電子へ変換された光子数の割合を百分率 (%) で表したものの。外部量子効率。
ISO	International Organization for Standardization	国際標準化機構。国際的な標準である国際規格を策定するための非政府組織。
Isc(短絡電流)	Short Circuit Current	太陽電池が短絡状態にある時の出力電流。
ISE	ISE	ドイツフ라운ホーファ研究所の太陽エネルギー研究所 Institute of Solar Energy。
ITO	Indium tin oxide	インジウム・スズ合金の酸化物。透明で導電性を有する。

IV 特性	IV characteristic	太陽電池の電流電圧特性。
i-Voc	Implied open circuit voltage	光照射した際の電子と正孔の濃度分布の差から得られる電位差。セル化する前の理想的な開放電圧であり、パシベーション性能の指標。
J_0	Saturation current density	飽和電流密度。
JIS 規格 C8938 の環境試験、耐久性試験	Environmental and endurance test methods for amorphous solar cell modules	アモルファス太陽電池モジュールの環境、耐久性試験に関する JIS 規格。
k=2	k=2	包含係数 k を 2 とした不確かさの推定。通常は U95 に対応。
LAN ケーブル	LAN cable	建物内などの狭い範囲のネットワークケーブル。
LBIC	Light-beam induced current	レーザー等の光を半導体に照射し、局所的な光電流を発生させる。光の照射位置を走査することにより、光電流発生量の分布評価が可能。
L-BSF	Local-Back Surface field	PERC 構造における部分的な BSF(裏面電界層)のこと。
LCO	Local Contact Opening	L-BSF を形成するために、絶縁膜をレーザーやマスクエッチングなどにより形成する方法のこと。
LIA 援用反応性スパッタ	Reactive Sputtering Assisted with low-inductance antenna	低インダクタンスアンテナ (LIA) プラズマを用いた反応性スパッタ法。
LUMO	Lowest Unoccupied Molecular Orbital	基底状態において電子をみたされていない軌道(非占有軌道)の内、エネルギーの最も低い電子軌道。
Mo	Module	太陽電池モジュールの略
MOCVD 法	Metal Organic Chemical Vapor Deposition	有機金属を原料とした化学的気相製膜法である。主に窓層製膜に用いるが、プラズマを用いないため pn 接合界面にダメージを与えることなく製膜できるものである。
N 型 Si 太陽電池	N-type Silicon solar cell	基板に n 型 Si ウエハを利用した太陽電池 p 型 Si 太陽電池より高効率な太陽電池が作製できる。
n 型結晶シリコン太陽電池	N-type solar cells	n 型半導体を基板とし、その上に薄い p 型半導体層を形成した単結晶シリコン太陽電池セル。
n-PERT	Passivated Emitter and Rear Totally diffused	裏面の n+層側を全面不動態化して再結合を抑えた太陽電池構造。
NAS	Network Attached Storage	ネットワーク接続された通常大容量の記憶装置。
NREL	NREL	National Renewable Energy Laboratory 米国の再生可能エネルギー研究所。

Pasivated Contact	Passivated Contact	セル表面上に不活性化層を残したまま電極との接続をとること。
PCBM	PCBM	フラーレン誘導体の1種類で、フェニル酪酸メチルエステル体のことである。フラーレンの炭素数により、PC60BM、PC70BMと表記する。
PCT	Pressure Cooker Test	試験槽内に高温・高密度な水蒸気環境をつくり、モジュール内への水分の侵入を促進させることで劣化を加速するための試験方法。
PEDOT	PEDOT (poly-3,4-ethylenedioxy thiophene)	PEDOTは、含硫黄複素環化合物の一種であるチオフェン誘導体のポリマーである。導電性をコントロールすることが可能であることから、正孔輸送層や透明導電層に用いられる。
PERC 型	Passivated Emitter and Rear Cell	P型Si太陽電池の一種。 裏面構造が現行太陽電池と違っており、より高効率が期待できる構造。
PERT	PERT	Passivated Emitter and Rear Totally diffusedの略。結晶シリコン太陽電池セルにおいて、シリコン基板の表裏両面ともに拡散層が全面に形成され、かつその表面にパッシベーション層が形成されていることを特徴とするセル構造。
PET/Al/PET	PET/Al/PET	アルミ箔をPETフィルムで挟んだ構成の裏面材。
pH感受性蛍光色素	pH Sensitive Fluorescent Dye	pHインジケータとも言われ、主に生物生体試料のpHを計測するための蛍光色素で、単一蛍光波長による場合と2波長蛍光強度の比からpHを求める場合がある。
PID	Potential Induced Degradation	太陽電池とアースの電位差を原因として生じる劣化。 pn接合のリークが原因、PIDが生じやすい太陽電池は比較的初期に特性が急激に低下することが知られている。
PL	Photoluminescence	フォトルミネッセンス 半導体デバイスに光を照射すると、半導体中に生成した過剰キャリアの再結合過程で光を発する 半導体中に欠陥があると発光量が弱まる。
PLD	Pulsed laser deposition	パルスレーザー堆積法。
Pmax	Pmax	太陽電池の動作曲線上において、電力が最も大きくなる点での電力。
PN 接合	PN junction	P型半導体とN型半導体を接合させたもの。
RPD 法	RPD method	薄膜堆積技術の一種。反応性プラズマ堆積法 (reactive plasma deposition) と呼ばれる。TCO薄膜の成膜に利用される。
PTB	PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt ドイツの計量研究所。
PV モジュール日射センサ	PVMS: PV Module Irradiance Sensor	太陽電池モジュールと同等の部材、構造を用いた日射センサ。

PVF/PET/PVF	PVF/PET/PVF	PET フィルムを PVF(ポリフッ化ビニル) フィルムで挟んだ構成の裏面材。
PVMS	Photovoltaic Module Sensor	結晶シリコンの PV セルを全天日射強度測定に用いたセンサ。PV セルを用いることにより高速に日射強度の時間変動を捉えることができる。
RPD	RPD	薄膜堆積技術の一種。反応性プラズマ堆積法 (reactive plasma deposition) と呼ばれる。TCO 薄膜の成膜に利用される。
SBC-SHJ(スーパーバックコンタクト-シリコンヘテロ接合)	Super Back Contact-SHJ	従来の背面コンタクト (Back Contact) 型の SHJ 太陽電池に対して、優れた SHJ 制御技術やセル構造等を用いて変換効率や発電コストを低減させた SHJ 太陽電池。
SBF-SHJ(スーパーバイフェーシャル-シリコンヘテロ接合)	Super Bifacial-SHJ	従来の両面受光 (Bi Face) 型の SHJ 太陽電池に対して、優れた SHJ 制御技術やセル構造等を用いて変換効率向上や発電コストを低減させる SHJ 太陽電池。
SDGs	Sustainable Development Goals	持続可能な開発を目指した目標。
SEM	Scanning Electron Microscope	走査電子顕微鏡。
SHJ(シリコンヘテロ接合)	Silicon hetero-junction	結晶シリコン上に非晶質シリコンや酸化物等を形成することで電氣的接合を形成すること、また形成した状態。
Si ヘテロ接合太陽電池	Silicon heterojunction (SHJ) solar cell	非晶質シリコンと結晶シリコンのヘテロ接合からなる太陽電池。
SIMS	Secondary Ion Mass Spectroscopy	二次イオン質量分析法。イオンビームを照射し、固体表面で発生する二次イオンを質量分析計検出する。
SiNx	Silicon nitride	プラズマ CVD 法などにより堆積されたシリコン窒化膜で、シリコン太陽電池の反射防止やパッシベーションとして用いられる。
SiOx BS	SiOx Back Sheet	シリカ蒸着を行った PET フィルムを用いた裏面材。
SLG	Soda lime glass	青板ガラス、ソーダ石灰ガラス
SSHJ (スーパーシリコンヘテロ接合)	Super SHJ	SBF, SBC-SHJ の総称。
STEM	Scanning Transmission Electron Microscope	走査型透過電子顕微鏡 原子・分子像を直接観察可能なレベルの高倍率・高分解能で観察が可能。
SV 法 (Level 5)	SV method level 5	太陽光発電システムの発電特性の定量的評価手法であり、システム出力係数と各種損失係数を用いた評価、および損失・利得の定量化を特徴とする。Level 5 は 1 分値を用いて解析を行うことにより 11 種類の要因の影響を評価可能である。

SWCT	Smart Wire Connection Technology	Meyer Burger 社が提唱するセル間をワイヤで接続する技術。
TAS 法	Transient Absorption Spectroscopy	過渡吸収分光法。 極微小時間に光励起された電子・正孔対（キャリア）の消失過程を検出する手法。
TC	Thermal cycle	温度サイクル。
TCO（透明導電膜）	Transparent Conductive Oxide	酸化錫や酸化インジウム錫、酸化亜鉛などが良く用いられる。太陽電池の光入射側に用いて光を透過させながら電流を外部に取り出すのに必要な材料である。
TEM	Transmission electron microscope	透過電子顕微鏡。薄膜状の試料に電子線を照射し、試料を透過した電子線を結合レンズ系で拡大する電子顕微鏡。薄膜試料内部の結晶構造、組成、電子状態などの情報が得られる。
U95	U95	測定値の不確かさを信頼区間 95%で見積もったもの。標準偏差の 2 倍に対応。
UV、UV 光	Ultraviolet light	紫外線光（太陽光では波長 300～400nm 程度の範囲）。 太陽電池部材を劣化させる 封止材中の添加剤配合によっては酢酸を生成する原因となる。
UV 照射試験	UV irradiation test	高温環境（典型的には 85° C）で PV モジュールに紫外線を照射する信頼性加速試験の一種。
UV+DH 複合試験	UV+DH Combined test	UV 照射試験後に、引き続き DH 試験を行う複合加速試験。
UV 光照射	Ultra violet light soak	紫外線を照射すること。
Voc	Open circuit voltage	太陽電池が開放状態にある時の出力電圧。
Wet UV 試験	Wet UV test	高温環境（実施例では 30%RH）で行う UV 照射試験。
WPVS	World Photovoltaic Scale	World Photovoltaic Scale 一次基準太陽電池セルの国際根幹比較。
WRR	WRR	World Radiometric Reference 日射照度の国際標準。
X 線 CT	X-ray computed tomography	X 線を利用して物体を走査しコンピュータを用いて処理することで、物体の内部画像を構成する技術。
X 線光電子分光法 (XPS)	X-ray photoelectron spectroscopy	原子組成分析手法の一つ。試料表面から数 nm 程度の深さ領域における組成分析が可能。
ZEB	Zero energy building	各種省エネ技術や創エネ技術を適用して、エネルギー消費量が正味ゼロになる建築物のこと。

μ PCD 法	Microwave Photocunductance Decay	マイクロ波光導電率減衰法 半導体に光を照射すること変化する光導電率をマイクロ波の反射率として検出し、その減衰から半導体内キャリアの寿命を測定する手法。
π	π	π 共役部位。
アニール	Anneal	シリコン基板を電気炉等で加熱すること。
アパーチャー (エリア)	Aperture (Area)	太陽電池モジュールにおいて発電部外周を囲った領域を示す。
アモルファスシリコン	Amorphous silicon	シリコンを主成分とし、原子配列に結晶性を持たない固体半導体。真空蒸着法などにより非常に薄い半導体膜を形成可能。半導体膜形成時の条件を変えることで pn 接合を作製することができる。
アメダス	AMeDAS	気象庁の自動気象観測システム。全国約 1,300 か所で降水量を観測している。そのうち、約 840 か所では降水量に加え、気温、風向・風速、日照時間も観測している。
アルカリ金属	alkali metal	第 1 族元素のうち、水素を除いた元素群の総称。リチウム・ナトリウム・カリウム・ルビジウム・セシウム・フランシウムがこれに該当する。
アルベド	albedo	外部からの入射光に対する、反射光の比である。反射能とも言う。
アルミ裏面電界型太陽電池	Al back surface field solar cell	裏面のアルミニウム電極焼成時に形成される裏面電界 (BSF) 層により、裏面電極近傍でのキャリアの再結合を抑止する構造の太陽電池。
アレイ実効最大出力係数	Effective array peak power	SV 法 Level 5 における損失係数の一つであり、温度や日陰、入射角など、屋内での標準試験条件下での測定に対して屋外条件下で生じる様々な発電特性に影響を与える要因を定量的に分離した後で得られる、システムの実環境下での発電性能を示しており、1.0 であれば銘板値通りの性能を示していることを意味する。
アレイ	array	ひとつの架台に取り付けられた太陽電池モジュールの集まり。
イオンクロマトグラフィー法	Ion Chromatography	イオンや極性分子のような電荷を持つ分子を分離して物質を分離精製する方法。
イオン注入	Ion implantation	シリコン基板上に拡散層のパターンを形成するために貫通孔を形成したシリコンやカーボンの基板のこと。イオン注入用のマスクの場合、ステンシルマスクの貫通孔の部分のみをリンやホウ素のイオンが通過できるので、貫通孔のパターン通りの拡散層が形成できる。

インゴット	Ingot	シリコンを凝固させて一塊りとしたもの。
インターコネクタ	Interconnector	太陽電池のセルとセルを繋ぐ配線。
ウェーブレット法	Wavelet method	1周期の波とその平行移動、およびその2の累乗倍の高調波の和として信号を表す方法。
エアマス	Air mass (AM)	地球大気に入射した太陽光直達光が通過した路程の長さ。標準状態の大気圧(標準気圧:1013hPa)に垂直に入射した太陽直達光が通過した路程の長さを AM1.0 として、それに対する倍率で表す。
エッチピット	Etch pit	結晶中の転位がある部分を選択的にエッチングする溶液を使って現れる凹み(ピット)。
エネルギー分散型 X線分光法	Energy dispersive X-ray spectroscopy	電子顕微鏡に付属し、電子線照射により発生する試料からの特性 X線の強度を測定することにより、原子組成分析を行うことができる。
エピタキシャル成長	Epitaxial growth	基板の結晶構造を反映した結晶膜をその上に堆積すること。
エミッタ層	Emitter layer	電子を放出する層。 P型Si太陽電池においては、表面のN+層に該当する。
エレクトロルミネセンス	Electroluminescence (EL)	太陽電池の分野では、太陽電池セルに電流を注入したときの発光を指し、セルの正常部に比べて劣化部では一般に発光強度が低い、あるいは発光しないことから、劣化解析の手法として用いられる。
オーミック	Ohmic	印可電圧に対して線形に電流が流れる状態、もしくは、単調に流れる電流が増加する状態。
カーフ	Kerf	一般的には切り口、あるいは切り口の幅、として使われているが、ここでは、シリコンのインゴットを板状(ウエハ状)にスライスする際に発生する切削屑(シリコンの微粉末)を指す。
カバーガラス	Cover glass	太陽電池モジュールの受光面側に用いる厚さ数mm程度のガラス。
ガラスフリット	Glass frit	電極ペースト中に添加するガラス粉末で、電極の焼成温度で軟化・流動させ、絶縁膜との反応や、シリコン表面との密着機能を果たす。
ガルバニック腐食	Galvanic corrosion	異種金属接触腐食のこと。電位の違う二つの金属が電解質中で接触すると、卑な金属はイオン化が助長(腐食)され、貴な金属はイオン化が抑制される。
キャスト	Cast	溶解したシリコンを鋳型内で凝固させてシリコン塊を作製する方法
キャリア選択性パッシベーションコン	Carrier selective passivating contact	結晶シリコンなどの半導体表面の欠陥を不活性化する機能と、半導体から電子または正孔

タクト		を選択的に取り出す機能を併せ持った材料。
クラスタ	Cluster	セルの直列接続で、それにバイパスダイオードが並列接続されたものであって、太陽電池モジュールは数クラスタで構成される。
クランプセンサ	Clump sensor	ドーナツ状またはU字状の形体のセンサで、ケーブルを中央に通すことでケーブルに入り込むことなしに電流を計測できるもの。
グリッド・パリテイ	Grid Parity	太陽光発電システムの発電コストが、既存の電力系統の電気料金と同等になること。
コンタクト抵抗	Contact resistance	接触抵抗。二つの導体を接触させたとき、その面に生じる電気抵抗。
サブモジュール	Submodule	集積構造を備えているがカバーガラス等による封止がされていない太陽電池。
シーケンシャル複合ストレス試験	Sequential combined stress test	複数種の単体ストレス試験を連続して実施する試験。
シード	Seed	結晶の情報を成長結晶に伝えるもとなる結晶。
シードキャスト	Seed cast	結晶シリコン太陽電池用高品質インゴットの製造方法の一つ。通常は多結晶インゴットの製造に用いられるキャスト法において、るつぼ底辺に種結晶（シード）を敷き、そこから単結晶成長させることによって、多結晶並みの低コストで単結晶並みの高品質インゴットを製造する方法。
シードキャスト法	Seed cast method	太陽電池用高品質シリコンインゴットの製造技術として研究開発を進めている手法。底面に単結晶シードを配置し、一方向凝固させることで単結晶を育成させる技術。
シード再利用	Seed Recycle	シードキャスト法で種結晶として使用したシードを複数回使用すること。
シート抵抗	Sheet resistance	面抵抗率。薄膜やフィルム状物質の抵抗値で、単位は Ω であるが、シートで有ることを示すために慣用的に Ω/\square と記述する。
シーメンス法	Siemens process	高純度ポリシリコンを生産する製法の一つで、現在主流の生産方法である。半導体に用いるポリシリコンの生産も可能な製法。
システム出力係数	Performance Ratio	等価システム運転時間を等価太陽日照時間で除した値。太陽光発電システムの性能を示す指標として用いられる。
シャドーブレード	Shadow blade	上空カメラの前面に設置する、帯状の板。太陽の日周運動に追従し、直達日射が上空カメラのレンズに入射しないようにする。
シャント抵抗	Shunt resistance	ダイオードの整流性を示すために必要な漏れ抵抗のことであり、大きいほど太陽電池特性は良好となる。
シリカ	Silica	二酸化珪素または主として二酸化珪素によつ

		て構成される天然鉱石、珪石、珪砂の総称。
シリコン型日射計	Silicon photo sensor	シリコン半導体をセンサとして用いた日射計。
スーパーストレート型太陽電池	Superstrate type solar cell	ガラス基板などの透光性基板上に、透明導電膜、シリコン層、裏面電極の順に製膜され、光は透光性基板と透明導電膜層を通して、光活性であるシリコン層に入射させるタイプの太陽電池。
スクリーン印刷	Screen printing	スクリーン版（印刷製版）にコーティングされた乳剤の必要な部分に孔をあけて、その孔を通過してインクを被印刷物に転写する印刷方式のこと。
スタンダードキュア方式	Standard Cure	EVA の架橋反応を架橋炉を用いて行う生産方式。
ステンシルマスク	Stencil mask	シリコン基板上に拡散層のパターンを形成するために貫通孔を形成したシリコンやカーボンの基板のこと。イオン注入用のマスクの場合、ステンシルマスクの貫通孔の部分のみをリンやホウ素のイオンが通過できるので、貫通孔のパターンどおりの拡散層が形成できる。
ストリークカメラ	Streak camera	一瞬の光強度変化とその経過時間を測定するカメラ。
ストリング	String	複数の太陽電池モジュールを直列に接続したもの。
スピコート	Spin coating	塗布プロセスの1種類であり、平滑な基材を高速回転させる事により遠心力で薄膜を製膜する方式を言う。用いる装置は、スピコーターと呼ぶ。
スペクトルミスマッチ	Spectral mismatch	基準太陽電池と被測定太陽電池との分光感度特性のずれが原因で生じる測定誤差。
スペクトルミスマッチ補正	Spectral mismatch correction	太陽電池の特性を測定する際の、被測定太陽電池と基準太陽電池の分光感度スペクトルの差及び基準太陽光スペクトルと入射光の分光放射照度スペクトルの差による測定誤差を補正すること。
スペクトルミスマッチ補正係数	Spectrum mismatch correction factor	スペクトルミスマッチを補正するための係数。
セル	Cell	太陽光発電に用いる太陽電池の構成要素最小単位。
セル効率	Cell efficiency	セルの受光面に入った太陽光と発電された電力の割合。
セル評価	Test production of PV cell for wafer evaluation	太陽電池セルを試作してウエハの評価を行うこと。
セレン化法	Selenization method	プリカーサーをセレン（Se）含有雰囲気中で熱処理することにより CIS 系光吸収層を作製する方法。

セレン化硫化法	Selenization / Sulfurization	セレン化法の後に硫黄 (S) 含有雰囲気中で熱処理することにより表面を硫化して CIS 系光吸収層を作製する方法、本研究では SAS 法 (Sulfurization after Selenization) と呼んでいる。
ソーラシミュレータ法	Solar simulator method	ソーラシミュレータを用いて一次基準太陽電池を校正する手法。
タブ配線	Tab line	太陽電池セルと太陽電池セルとを電氣的に接続する細長い配線。
ダブルガラスモジュール	Double-glass module	受光面側のみならず、裏面材にもバックシートではなくガラスを用いた太陽電池モジュール。
タンデムセル	Tandem cell	短波長を吸収するセルを光の入射側、その後ろに長波長側を吸収するセルを直列になるように構成されたセル。
テクスチャ/テクスチャャー	Texturing	凹凸のこと。光を凹凸によって散乱させることで光の吸収長を長くとり、光をより効果的に半導体で吸収させるのに用いられる。結晶 Si 太陽電池では表面に形成されたピラミッド状表面のこと。
テクスチャ形成技術	Texturing	結晶シリコンでは、晶方位(100)面基板に対してアルカリエッチング剤を用いて異方性エッチングを行い、その表面に四角錐を形成する。この四角錐を通過する際の光の反射・屈折を利用することで、通常の平坦な表面のシリコンと比較して多くの太陽光をシリコン内に導き、多くの発電電流を得ている。この四角錐のように、光散乱を意図的に起こす構造物を作製する技術。
テクニカルデューデリジェンス	Technical Due Diligence	太陽光発電の場合、発電所設置計画または運用段階で行う様々なリスク評価のうち、技術的な領域のもの。
デバイスシミュレーション	Device simulation	半導体素子の断面構造を入力し、そのデバイスの動作を確認するシミュレーション。
テルル化カドミウムモジュール	CdTe module	カドミウムとテルルから成る II-VI 族化合物半導体を材料とする薄膜系太陽電池モジュール。低コストで製造できる点に特徴を有する。
ドーピング	Doping method	半導体材料にその導電性を制御する異種原子を取り込ませ、電氣的に活性化して導電性を制御する技術。
トレーサビリティ	Traceability	測定値がその上位標準に結び付けられていること（正式には、「不確かさがすべて評価された切れ目のない比較の連鎖によって、決められた基準に結び付けられ得ること」）。
トンネル接合	Tunnel junction	非常に薄い絶縁体を二つの導体（或いは半導体）で挟み込むことによって形成する接合。キャリアは絶縁体の障壁を、トンネルを抜けたかのように通過する。

ナノ Si 結晶(ナノシリコン結晶)	Nano-crystalline silicon	結晶シリコンは X 線で評価される原子配列の規則性を持っているが、非晶質シリコンはこの規則性を持っていない。ナノ Si 結晶は、規則性を持つ結晶シリコンのサイズがナノ(10-9m)程度の粒状の構造体であり、粒の密度が緻密な物から非晶質シリコン中にまばらに観察されるものまで広い範囲の状態を持つが、これらを総称してナノ Si 結晶(または微結晶 Si)と表現している。
ナノ粒子	Nanoparticle	ここでは a-Si 成膜に用いるシラン CVD プラズマ中で発生する直径が 10nm 程度以下のナノ粒子。膜に取り込まれ光安定性を悪くする。100nm 以上のいわゆるダストと区別するためにクラスタと呼ばれることもある。
ネックング	Necking	種子結晶に存在していた転位が伝播しないように、結晶を細く長く成長させ、転位を結晶表面に逃がすこと、成長方向に伝播する転位を必然的に切断することにより無転位化する方法。
バスバー電極	Busbar electrode	太陽電池セル面に配設された集電極で太線状のもの。通常、銅箔が半田溶着される。
バックコンタクト型結晶 Si 太陽電池	Back Contact Crystalline Si solar cell	結晶 Si 太陽電池の 1 種で受光面に金属電極が無く、裏面に正負の両方の電極を有する。
パッシベーション層	Passivation layer	太陽電池用の保護層として、①シリコン基板を保護する、②シリコン基板表面の欠陥を終端化する、③膜が持つ固定電荷によるバンドベンディングによる電界効果を持つ、働きがある。
バッファ層	Buffer layer	CIS 太陽電池において、p 型 CIS 系化合物光吸収層と pn 接合を成す n 型半導体層。Cd 系、Zn 系、In 系化合物などの様々な材料が開発されており、複数の層から構成されることもある。
バイパスダイオード	Bypass diode	発電電流を迂回させるためのダイオード。
バックシート	Back sheet	太陽電池モジュールの裏面側に用いる高分子系シート。ポリエチレンテレフタレート (PET) をベースフィルムとするものが多く、PET フィルムをフッ素系の樹脂ではさんだものや、アルミニウム箔を PET フィルムではさんだものなどが用いられる。
バックコンタクト型太陽電池	Interdigitated back contact solar cells	裏面に n+拡散層と p+拡散層を形成し、その直上に電極を形成した構造をしている。この構造では電極を裏面に集約し受光面の電極を無くすることができるため、そのぶん受光面を広くし多くの光を取り込むことで変換効率を高めることが可能となる。
パッシベーション	Passivation	不活性化。 欠陥など再結合の起因を不活性化し、再結合を抑制するもの。

バッファ層	Buffer layer	下の層と上の層を緩衝するための層。エピタキシャル成長においては、成長する薄膜と基板の格子定数が異なる場合に、薄膜に転位が生じないように薄膜と基板の間に挿入する。
バッフルユニット	Baffle unit	本研究では、不要な光の経路を遮って有効な光を取り出すための遮光装置。
バルク欠陥	Bulk defect	ウエハ中に存在する異物や結晶構造が局所的に壊れたもの。
パワーデバイスアナライザ	Power device analyzer	パワーデバイス用の測定器で、電子負荷装置、プログラマブル電源、電流計、電圧計、データロガーなどの機能をあわせ持つ機器。
バンカビリティ	Bankability	金融機関がその事業に融資する可能性を意味する。
バンドオフセット	Band offset	異種間半導体材料の接界面で形成されるポテンシャル障壁（エネルギー差）の総称。
バンドギャップ	Band gap	固体中の電子が定常状態でとり得るエネルギー値の差。電子がエネルギーを受けて低エネルギー状態から高エネルギー状態へ遷移する際、バンドギャップ以下のエネルギーでは遷移できない。
ヒステリシス	Hysteresis	太陽電池の特性が過去の印加電圧等の履歴に依存して変化する現象。
ひまわり 8 号	Meteorological satellite Himawari-8	日本が運用している静止気象衛星で、東経 140 度の赤道上約 36,000km からアジア・太平洋域の気象を常時観測している。2014 年 10 月 7 日に打ち上げられ、2015 年 7 月 7 日から正式運用を開始した。
ファストキュア方式	Fast Cure	EVA の架橋反応を真空ラミネータ内で行う生産方式。
ファイヤスルー	Fire-through	Si 太陽電池表面の楕型銀電極を形成する際の熱処理手法。
フィルタ手法	Filter method	太陽電池屋外計測時、日射強度時間変動や日射強度空間不均一性が規定値を超えた場合を検出し棄却する手法。
フィルタ時間	Filtering period	フィルタ手法を行う際に、日射強度時間変動をモニタリングする時間。
フィンガー電極	Finger electrode	セルで発電した電気を集電するために太陽電池セル表面に形成される細い電極。
フーリエ変換法	Fourier transform method	ある区間で定義された関数を、その区間を周期とする基本正弦波と、その整数倍の周波数をもつ高調正弦波の和に分解する方法。
フラーレン	Fullerene	最小の構造が多数の炭素原子で構成されるクラスタの総称。
プラズマ CVD 法(プラズマシームイディエーション法)	Plasma-enhanced chemical vapor deposition	目的とする原料ガス分子を真空装置内に導入し、特定の圧力下でこのガスに高周波等を印加することで電離(プラズマ)・分解し、その分解したガスを基板に輸送して膜形成を行う方法。化学気相成長(CVD)の一種。

フレーム	Frame	太陽電池 Mo の外枠 アルミ製フレームが一般的。
プログラマブル DC 電源	Programmable DC source	指定したように電圧を変化させることができる直流の電圧源。
フロントエミッタ型太陽電池	Front-emitter solar cell	エミッタ層が光入射側に設置されている太陽電池。
ベアセル	Bare cell	モジュール化する前の結晶シリコン太陽電池セル。
ペースト（電極ペースト）	Paste	電極材料。銀などの導電性微粒子とガラス微粒子、有機樹脂および有機溶媒などを混合した高粘度の液状物で、これをスクリーン印刷によりシリコン基板上に印刷し、焼成することによって電極を形成する。
ヘテロジャンクション	Hetero junction	結晶シリコンとアモルファスシリコンで形成した pn 接合。
ヘテロ接合型太陽電池	Heterojunction photovoltaic module	結晶シリコンとアモルファスシリコンで PN 接合を形成した結晶シリコン系太陽電池。高い電圧が得られて高性能が実現する。
ペロブスカイト	Perovskite	Perovskite を発電層に用いた太陽電池。
ホットスポット試験	Hot spot endurance test	太陽電池モジュールの信頼性試験のひとつ。部分影などにより太陽電池が局所的に遮蔽された場合に局所的に温度が上昇した場合に不具合が発生しないか確認する試験。
ホモジナイザー	Homogenizer	入射光の面内むらを均一化する光学素子または装置。
ポリシリコン	Polysilicon	半導体用、太陽電池用に用いられる高純度シリコン。主としてシーメンズ法で生産される。
ボルツマン定数	Boltzmann constant	状態数とエントロピーを関連付ける物理定数。
マルチワイヤソー	Multi-Wire Saw	角柱あるいは円柱状のインゴットから薄板上のウエハ（またはウェーハ、ウエハーともいう）を切り出す装置。結晶シリコン太陽電池用ウエハ製造において一般に広く用いられている。
マンソーラ	MONSOLA	NEDO 日射量データベースを構成する月平均の日射量データ。MONSOLA は MONTHly mean SOLAR radiation data throughout Japan の呼称である。
ミニバンド	Mini-band	量子ドット超格子のドット間隔が数ナノメートル程度になると、ドット中電子の波動関数が重なりを生じ、電子が取り得るエネルギーが幅を持つようになる。それにより形成される新しいエネルギーバンドのこと。
メカニカルスタック	Mechanical stack	一般的には、半導体素子等を機械的接合を介して直列に積層する技術のこと。太陽電池への応用としては、複数セルを直列接続し、多接合太陽電池構造を形成する技術として期待

		されている。
メタルハライドランプ	Metal halide lamp	水銀とハロゲン化金属（メタルハライド）の混合蒸気中のアーク放電による発光を利用した高輝度ランプのこと。略称としてメタハラなどと呼ばれる場合もある。
メットピー-ヴィ	METPV	NEDO 日射量データベースを構成する毎時の気象データ。METPVはMEteorological Test data for PhotoVoltaic system の呼称である。
メンブレンフィルター	Membrane Filter	精度の高い分溜・分離・抽出・ろ過に使われる多孔性の膜で、主な用途として粒子の除去・ろ過滅菌・液体モニタリング・微生物分析・粒子分析やガス用フィルターなどがある。
モジュール	Module	光入射側はカバーガラス等を用いて封止された太陽電池。
モジュール（全面積）効率	Module (total area) efficiency	フレーム等を含む太陽電池モジュール構造全体の面積に入射した太陽光と発電された電力の割合。
モジュールパフォーマンスレシオ	Module performance ratio	IEC 61853 シリーズで定義される。使用される環境条件（気温、日射スペクトル、角度特性）を考慮した際に、標準試験条件におけるモジュール出力に対して、年平均でどの程度の環境要因の影響を受けるかを数値化した（無次元）指標。日本を含めた6ヶ所の環境条件で計算される。
モノリシック型（モジュール）	Monolithic module	1枚の基板上に太陽電池構成材料を層状に積層して作製したモジュール。
ライフタイム	Lifetime	半導体内に生成した過剰少数キャリア（電子または正孔）が再結合して消滅するまでの寿命。太陽電池セルにおいてはライフタイムが高いほど、少数キャリアを電流として取り出しやすくなるため変換効率が向上する。
ラマン蛍光強度比	Raman ratio of fluorescence intensity	ラマン光を当てた際にSP構造を有する結合をもったものは蛍光を発生する。これの強度の比較。
ラマン分光法	Raman Spectroscopy	物質に単色光を照射してラマン効果により発生したラマン線の波長や散乱光強度を測定して物質のエネルギー準位を求めたり、物質の同定や定量を行う分光法。
リアエミッタ型太陽電池	Rear-emitter solar cell	エミッタ層（p型基板であればn型層、n型基板であればp型層）が光入射面とは反対側に設置されている太陽電池。
リテストガイドライン	Retest guideline	太陽電池の部材を変更した場合に認証取得に必要な信頼性試験項目を示したガイドライン

ロールツーロールプロセス (ロール to ロール、ロールトゥロール、R2R)	Roll to Roll Process	材料フィルムをロールからロールへと連続的に供給し、印刷やラミネートを行うプロセス。
ワイドギャップ半導体	Wide-gap semiconductors	ワイドギャップ半導体は、Si や GaAs などと比較して光吸収端が短波長領域に位置し、可視光領域での透過率が比較的高い半導体である。
合わせガラス	Laminated glass	複数の板ガラスの間に樹脂などの中間膜を挟み、接着したガラスのこと。
暗示開放電圧	Implied Voc (iVoc)	結晶シリコンの実効ライフタイムのキャリア注入依存性から見積もられ、太陽電池で期待される最大の Voc。結晶シリコンの品質や表面の欠陥終端 (パッシベーション) の度合いを反映する。
安全率	Safety Factor	出力保証の場合は、安全率=寿命年数/出力保証年数、で定義する。
暗電流	Dark current	光電効果により光電流を生じる素子において、光を照射しない時にも流れている微弱な電流 熱的要因、絶縁不良、結晶欠陥等のために生じる。
鋳型	Mold	シリコンを凝固させる為の型の役割をするもの。
一方向凝固	Directional solidification	熱の抜熱方向を一方向に限定して、結晶を一方向に成長させ凝固させる方法。
移動度 (易動度)	Mobility	個体物質中において、キャリア (電子・正孔) の移動のしやすさを表す量。電界強度とキャリアの平均速度の比で表される。
応力	Stress	温度サイクルストレスや荷重ストレスで Mo 内部で発生する 力学的な破壊劣化 (電極の断線や剥離やクラック) をもたらず。
温度サイクル試験	Thermal cycle test	太陽電池モジュールの信頼性試験のひとつ。85°Cと-40°Cの温度変化を一定周期で一定回数与える試験。
開口部面積効率	Aperture area efficiency	太陽電池セル・モジュールの全面積のうち、セル・バスバー・フィンガー (グリッド) 電極・インターコネクタなどの基幹的な要素をすべて含む面積を用いて算出した変換効率。
回折結合型プラズモン	Diffraction-coupled Plasmon	物質内の電子振動と光波との共鳴現象であるプラズモンを励起する方法の一つで、回折格子ピッチより大きな波数を入射させて回折光が格子面上を伝搬させることで金属プラズモンを励起する方法。
開放電圧 (Voc)	Open circuit voltage	太陽電池セル・モジュールの出力端子を開放した時の両端子間の電圧。
化学パッシベーション	Chemical passivation	半導体材料において表面欠陥等に起因する少数キャリアの表面再結合を抑制する目的でな

		される表面終端化（安定化）技術の一つで、主に化学薬品への浸漬処理でなされる。一般的な酸化やプラズマ処理、その他薄膜材料形成（堆積）によるパッシベーションと対比される。
拡散長	Diffusion length	励起子または光キャリアがその寿命の間に広がることのできる距離。
荷重試験	Load test	太陽電池モジュールの信頼性試験のひとつ。太陽電池モジュールに対して、一定荷重を一定時間負荷する試験。
加水分解	Hydrolysis	反応物に水が反応し、分解生成物が得られる反応。エチレン-酢酸ビニル共重合樹脂では、水との反応により酢酸が発生する。
加速負荷試験	Accelerated test	太陽電池モジュールの信頼性を加速して評価する試験。
活性化エネルギー	Activation energy	反応の基底状態から遷移状態に励起するのに必要なエネルギー。
規格値	Normalized value	一定のルールに基づき変形した値で、本文では初期値を1とした値に変換した。
基準太陽電池	Reference PV device	定められた照度での出力電流が校正された太陽電池。太陽電池測定の際の照度測定、調整にもちいる。
基準太陽光スペクトル	Reference solar spectrum	太陽電池を測定するために定められた太陽光の分光放射照度スペクトル。
機能性粒界 (SMART)	Seed Manipulation for ARtificially controlled defect Technique	歪み緩和、不純物トラップ、多結晶化抑制、転位の閉じ込めなどの機能を持つ意図的に導入した粒界（名古屋大学技術）。
凝固	Solidification	物質が液体から固体に変わる現象
逆バイアスパルス電圧	Reverse bias pulse voltage	本プロジェクトで開発したPID回復手法。PIDが発生したモジュールにパルス状の電圧をセルに対して逆バイアスになるように印加することにより、発電特性を回復させる。
逆流防止ダイオード	Blocking diode	太陽電池ストリングに直列に取り付けられて、ストリングに電流が逆流することを防止するダイオード。
金リファレンス	Au reference	カバーガラス上に金を蒸着したもの。錫薄膜センサとともに太陽電池モジュールに封入する。化学変化しないので反射率の基準になる。
空乏層	Depletion layer	PN接合を形成した際にできる電気二重層によりキャリアが排他された層（領域）。
屈曲劣化	Wear-out degradation	製品寿命を迎えたときに顕在化する急激な特性の劣化。
傾斜面日射量	Tilted surface irradiance	水平面ではなく傾斜した面に全方位から入射する太陽光の単位面積当りのエネルギー。
結晶シリコンライトスルー太陽電池モ	Silicon light thorough photovoltaic module	半導体材料として結晶シリコンをもちいた透光性の太陽電池である。

ジュール		
結晶欠陥	Crystal defect	シリコン単結晶中の構造的不完全性。
原子層堆積法	Atomic layer deposition	原料ガスとパージ用ガスを交互に加熱基板面に照射し、薄膜を形成する方法。
高温高湿試験/湿熱試験/DH 試験	damp heat (DH) test	太陽電池モジュールの信頼性試験の一つ。一般的な条件は温度 85℃、湿度 85%である。認証試験では、1000 時間の試験後の性能低下が初期値の 5%以内であることを要件としている。
格子不整合	Lattice mismatch	格子定数が基板結晶と成長層の間で整合しない材料系。太陽電池材料のバンドギャップエネルギーを自由に制御できるため、熱損失の少ない高効率の太陽電池構造を設計できる。一方、結晶には歪がかかるため、転位などの格子欠陥が発生する。対義語は格子整合系 (lattice match) である。
固液界面	Interface between solid and melt	融液から結晶を成長するときの液相と固相の境界面。
固化率	Solidification ratio	融液から結晶を成長したとき、最初の融液の重量と結晶になった質量の比。
国際電気標準会議 (IEC)	International Electrotechnical Commission (IEC)	電気工学、電子工学、および関連した技術を扱う国際的な標準化団体。
固定砥粒方式	Fixed diamond abrasive method	Ni メッキにより鋼線に固定されたダイヤモンド砥粒によるスライス方式。
再結合	Recombination	表面や欠陥によって電子・正孔が消失する現象。
再結合電流	Recombination current	空乏層内の再結合準位 (不純物や欠陥) を通して p 型層のホールと n 型層の電子との再結合の結果として生じる電流。
最大出力 (Pmax)	Pmax	太陽電池の動作曲線上において、電力が最も大きくなる点での電力。
酢酸	Acetic acid	CH ₃ COOH EVA の加水分解反応で生じる。太陽電池構成材料の化学的 (腐食) 劣化をもたらす。
三段階法	Three stage evaporation method	多元蒸着法の一つ。CIS 系太陽電池の薄膜形成で幅広く使われている。
集光倍率	Condensing magnification	太陽光強度を 1 (SUN) とした時に集光装置で太陽電池に集められた太陽光強度 (SUN)。
酢酸蒸気曝露試験	Exposure test to acetic acid vapor	一定の温湿度条件にて太陽電池を酢酸蒸気に曝露し、セル電極の信頼性を評価する試験。セルをモジュール化せずとも、セル電極の信頼性を評価可能な試験法であり、モジュールの高温高湿試験に代替可能な試験法として SEMI 標準化が決定した。

酸素析出物	Oxygen precipitate	シリコン単結晶中に固溶した酸素が、熱処理等でSiO ₂ として析出した結晶欠陥であり、半導体では内部ゲッタリングサイトとして有効に働くが、太陽電池ではキャリアライフタイム劣化の原因となる。
時間分解フォトルミネッセンス測定	Time resolved photoluminescence measurement	物質にパルス状の光を照射して励起された電子が基底状態に戻る際に発生する光の減衰特性から少数キャリアの寿命を測定する方法。
色素増感太陽電池	Dye-sensitized solar cell	色素で光感度を増大した酸化チタン等を用いる太陽電池。
四酢酸錫	Tin tetraacetate	錫と酢酸との化学反応により生成する塩。水溶液は可視光に対し透明。
四探針法	Four point probe method	一直線に並べられた4本の梁の外側2本から電流を流し、内部2本の針間に生ずる電位差を測定する方法。
実効的キャリア寿命	Effective carrier lifetime	半導体中のキャリア寿命を測定する時、バルクのキャリア寿命は表面や裏面の影響を受けるため、実際のバルクのキャリア寿命は測定されず、実効的なキャリア寿命が測定される。
湿熱試験	Hygrothermal test	湿度ストレスと温度ストレスを同時に印加する試験。
指定面積効率	Designated area efficiency	太陽電池セル・モジュール上に設けられたマスクの開口部により限定された領域の面積を用いて算出した変換効率。
集光型太陽光発電	Concentrating photovoltaics	集光レンズ、集光鏡等を用いて太陽光を集光し、その光で発電する方法。
種子結晶	Seed crystal	ある結晶方位を有する単結晶を成長させるときに種子として用いる単結晶。
寿命	Life (of product)	製品の出力寿命。
出力係数	Performance ratio	出力係数 = 屋外測定出力 (W) / 室内測定出力 (W) × 1000 (W/m ²) / 屋外測定日射強度 (W/m ²) で計算される。出力係数では太陽電池出力に最も大きな影響を与える日射量を一定の条件に換算している。
上空カメラ	Sky camera	上空に向けて設置されたカメラ。天候や雲の様子を撮影する。
焼成	Sintering	固体粉末の集合体が、融点よりも低い温度で加熱することにより、密度の高い結合体になる現象のこと。
晶癖	Crystal habit	同一の結晶で、同一指数面の発達程度が異なることによって生ずる外形の変化。
小面積セル	Small-area cell	1cm ² 程度の面積を持ち、単一の太陽電池セルと電極によって構成される太陽電池。
水蒸気透過率/水蒸気透過度	Water vapor transmission rate (WVTR)	単位面積・単位時間あたりフィルムから水蒸気が透過する量。一般的な単位としては、g/m ² day が用いられる。

錫薄膜センサ	Tin film sensor	カバーガラス上に数十～百数十 nm の膜厚で錫を成膜したセンサ。封止材の加水分解により発生する酢酸の検出に用いる。
積雲	Cumulus	水平方向だけでなく鉛直上方にも伸びた雲。より上方に成長した雲は積乱雲と呼ばれる。
赤外線サーモグラフィ	Infrared thermography	赤外線を測定して対象の温度分布を画像表示する装置。
赤外分光	Infrared spectroscopy	分子構造を赤外域の吸収スペクトルから観測する方法。
積層欠陥	Stacking fault	結晶中に存在する欠陥の一種。ナトリウムなどの金属原子が集積するとリークパスとなる。
積分球	Integrating sphere	散乱光の照度を計測する際等に用いる。
絶縁体	Insulator	電気を通し難い材料。
接合界面	Interface of junction	同種あるいは異種材料の境界面。
接触抵抗	Contact resistance	電極と基板間の接続に関する抵抗。
接続箱	Junction box	太陽電池モジュールの接続ケーブルをまとめるための箱。
絶対分光放射計	Absolute spectroradiometer	分光放射照度の絶対値を測定する分光放射計。
絶対放射計	Absolute radiometer	光の放射照度絶対値を測定する装置。
設置角	Tilt angle	地面と太陽電池モジュールがなす角度。
全天日射計	Pyranometer	半球面上の全方位から入射する太陽光の単位面積当りのエネルギーを計測する測定器。
掃引方向	Sweep direction	太陽電池特性を測定する際の、印加電圧の変化方向（増加方向または現象方向）。
層雲系（層状の雲）	Stratus	水平方向に広がり、鉛直方向の厚さが薄い雲。雲の高度により、層雲、高層雲、巻層雲に分類される。
走査型電子顕微鏡	Scanning electron microscope	電子顕微鏡の一種で、電子を試料表面に照射し、試料表面近傍から放出される二次電子の数を検出することにより、表面の形状を評価することができる。
双晶	Twins	同一の材料に2つ以上の単結晶のドメインが存在し、それぞれのドメインの結晶方位に、幾何学的な特定の規則性があるものを示す。
相対反射率	Relative reflectance	ある試験時刻において、錫薄膜センサの反射率を金リファレンスの反射率で除したもの。
大規模量子分子動力学膜反応計算技術	Large-scale quantum molecular dynamics (MD) simulation method for thin-film deposition process	従来よりも桁違いに多い 1000 原子以上の大規模分子に対して、量子反応計算を高速で行う技術を膜形成反応に応用した技術。これまで困難であった多数原子による堆積過程の可視化、元素密度や電子状態の随時計算を行うことが可能な技術。
対光応答非直線性	Nonlinearity versus irradiance	太陽電池の出力電流と入射光照度の比例関係からのずれ。

対向ターゲットスパッタ	Facing target sputtering	スパッタで薄膜を形成する際に、2枚の対向して設置されたターゲットを用いて製膜を行う技術。プラズマをターゲット間に閉じ込めることができるため、基板に対するダメージの抑制が可能となる。
体積抵抗率	Volume resistivity	材料内部の電気抵抗。
太陽電池セル	Photovoltaic cell (Solar cell)	太陽光発電に用いる太陽電池の構成要素最小単位。
太陽電池モジュール	Photovoltaic module	配線材を用いて複数の太陽電池セルを直列に接続し、ガラスや高分子部材を用いて封止したもの。太陽電池パネルともいう。
太陽電池屋外計測	Outdoor PV panel performance test	屋外にて、実際の太陽光を用いて行う太陽光パネルのIV計測。
太陽電池セル	photovoltaic cell (solar cell)	太陽光発電に用いる太陽電池の構成要素最小単位。
耐用年数	Durability	太陽電池モジュールが使用できる期間として法的に定められた年数。
多項式補間法	Polynomial interpolation method	関数値が既知の部分においてその関数に最も合うように多項式関数を構成することによって補間する方法。
多接合太陽電池	Multi-junction solar cell	光の利用波長領域が異なる太陽電池を複数積層した太陽電池。
多結晶	Multicrystal	ある塊が様々な方位をもつ多数の単結晶の集合で出来ている固体。
種子結晶 (種結晶)	Seed crystal	ある結晶方位を有する単結晶を成長させるときに種子として用いる単結晶。
単セル PV モジュール	Single cell photovoltaic module	モジュール内に一つのセルのみを封止した、研究用太陽電池モジュール。
単結晶	Monocrystal	1個の結晶内のどの部分においても原子配列の向きが全く同一である固体。
単結晶シリコン太陽電池セル	Monocrystalline silicon	精製された高純度シリコン結晶をスライスした、一つの結晶から製造される太陽電池セル。
単体ストレス試験	Single stress test	主には、湿熱試験、温度サイクル試験、PID試験、DML試験
短波放射	Shortwave radiation	気象学の用語で、太陽から光、すなわち日射を示す。波長帯は可視光 (約 380 nm~800 nm) を含む 100 nm~5,000 nm である。
短絡電流 (Jsc)	Short circuit current	太陽電池セル・モジュールの出力端子を短絡した時の両端子間に流れる電流。
中間バンド	Intermediate-band	量子ドットのミニバンドが、周りの半導体のバンドギャップの中間付近に形成された場合のこと。それらが形成する3つのバンドで太陽光を吸収するのが中間バンド太陽電池である。

長期信頼性	Long term reliability	太陽電池モジュールが30年以上の運転環境下で安定して期待された役割を果たすことができる能力のこと。
超高温定点黒体炉	Ultra high temperature black body furnace	約3000Kの超高温で定点を実現できる黒体炉。
超格子	Superlattice	複数の種類の結晶格子の重ね合わせにより、その周期構造が基本単位格子より長くなった結晶格子。
直列抵抗	Series resistance	太陽電池に対して直列的に作用する抵抗。直列抵抗が大きくなった場合、発電性能は低下する。
低倍集光/低倍率集光	Low concentration	数倍から50倍程度までの範囲で集光すること。
電圧変成器	Voltage transducer	所定範囲の電圧を所望の範囲の電圧に変換する機器。
電圧誘起劣化	Potential-induced degradation (PID)	モジュールのフレームとセル間にかかる電圧により誘起される劣化の総称。大規模太陽光発電所の普及によるシステムの高電圧化にともない顕在化した。セルやモジュールの部材や構造により劣化現象は大きく異なり、そのメカニズムも十分に解明されていない。
転位	dislocation	線状欠陥/結晶の塑性変形を担う
転位クラスタ	Dislocation cluster	多数の転位が高密度に集積し、転位群や亜粒界(sub grain boundary)が形成されたもの。
転位クラスタ占有比率	Dislocation cluster ratio	基板1枚中の転位クラスタの面積比率。単位は%で示す。
転位密度	dislocation density	結晶中の線状の結晶欠陥の面密度。
添加剤	Additives	封止材中には材料の安定性を高めるために、複数の分子が添加剤として配合されている一部は太陽電池 Mo の信頼性に大きく影響する。
電子負荷装置	Electronic load device	電子回路を内蔵していて負荷の大きさを可変にできる負荷装置。
伝導帯オフセット	Conduction band offset	異種半導体を接合した時の伝導帯底のエネルギー差。
電流分布	Current distribution	ある面内などにおいて電流密度の高い部分や低い部分を示す。
電流密度	Current density	単位面積当たりに単位時間に流れる電流量。
等価システム運転時間	Photovoltaic system yield	アレイから供給されるシステム出力電力量を、標準太陽電池アレイ出力で除した値。
等価太陽日照時間	Reference yield	基準アレイ面日射強度で積算アレイ面日射量を供給するのに必要な時間数。
導電体	Conductor	金属など電気を通し易い材料。
透明導電膜	Transparent conductive layer	透光性(透過率:%T)と導電性(シート抵抗: Ω/\square)とを兼ね備えた膜。

二乗平均平方根誤差	Root mean square error	真値との差の二乗の平均をとり、その平方根の値で表した誤差。
日射空間ムラ	Non-uniformity	2つのセンサーで計測される計測時間内の、日射強度の瞬間差の最大値を日射強度で正規化した指標。
日射時間変動	Temporal instability	日射強度計測時間内の、日射強度の最大値と最小値の差を日射強度で正規化した指標。
日射スペクトル	Solar spectrum	波長別の日射強度。太陽から降り注ぐ日射エネルギーは波長毎に強さが異なる。
野立て	Open rack	太陽電池モジュールと架台を地面に設置する方法。
薄膜系太陽電池	Thin-film solar cell	数 μm の光吸収層を用いた太陽電池であり、省資源・低コスト化が期待される。シリコンを用いたものと銅-インジウム-ガリウム-セレン化合物を用いたものが実用化されている。結晶系に比べて水蒸気浸入に弱いとされている。
薄膜シリコンシースルー太陽電池モジュール	Thin-film Si seethrough photovoltaic module	半導体材料として薄膜シリコンをもちいた透光性の太陽電池であって、太陽電池の向こう側が透けて見える。
反応性スパッタ	Reactive sputtering	スパッタで薄膜を形成する際に、酸素や窒素などの反応性のガスを導入してターゲット材料の成分とガスの反応物質を製膜する技術。
反射防止膜	Anti-reflection coating	太陽電池セル表面での光の反射を減少させるために表面につけた透明な薄膜のこと。
光起電流	Photo-carrier current	光が照射されることで流れる電流。
光照射効果	Light induced effect	太陽電池の特性が光照射によって変化する効果。
光劣化	Light-induced degradation (LID)	セルが光照射されることにより、性能が低下する現象。結晶シリコン、アモルファスシリコン等の材料を用いたセルで観測されるが、その両方で原因は異なる。
光閉じ込め	Optical confinement	太陽電池において透明電極や裏面電極で光を乱反射させ、発電層に光を閉じ込めること。
被測定モジュール	MUT: Module under Test	被測定モジュール。
比抵抗	Specific resistance	電極固有の電気抵抗。
標準試験条件	Standard test condition (STC)	太陽電池の測定条件。温度 25°C 、光強度 1 kW/m^2 、エアマス1.5を指す。
表面プラズモン共鳴	Surface Plasmon Resonance	入射光によって励起される物質内での電子の集団振動を表し、光の振動数が表面電子のプラズマ周波数と一致したとき共鳴的な応答が得られる。
封止	Lamination	太陽電池セルならびに配線をモジュール構成材料（ガラス、フィルム、中間膜など）で封じ込めること。
封止材	Encapsulant	太陽電池モジュールにおいてセルを封止し保護する役割を持つ樹脂材料。

複合サイクル試験	Combined cycle test	複数種の単体ストレスを、循環的に、繰り返し印加する試験。
複合ストレス試験	Combined stress test	複数種の単体ストレスを、連続的に、あるいは同時に印加する試験。
不純物	Impurity	結晶中に混入している微量元素。
部分影	Partial shadow	太陽電池モジュールの一部にかかる影のこと。
分光感度	Spectral response	太陽電池出力の入射光波長依存性を表した特性で、短絡電流の入射単色光入力に対する比。
分光放射照度	Spectral irradiance	放射照度農地の特定の波長成分だけを分離して示す波長幅当たりの放射照度。
分光放射照度標準電球	Spectral irradiance standard lamp	分光放射照度の基準となる標準電球。
分子線エピタキシー (MBE)	Molecular beam epitaxy (MBE)	超高真空の成長室内に結晶の構成元素をそれぞれ納めた容器を設置し、複数の金属蒸発源から発生させた分子線により、構成元素を加熱、気化させて基板に体積させる方法。
分子量分布	Molecular weight distribution	合成高分子は同一組成だが、分子量は異なる分子の混合物である。分子量の広がりをも分子量分布と呼ぶ。
変換効率	Conversion efficiency	最大電力を太陽電池セル・モジュール面積と放射照度との積で除した値。面積の定義によって開口部面積効率、指定面積効率、モジュール（全面積）効率などがある。
補外	Extrapolation	ある区間で定義された関数に対して、その区間の外側の隣接した区間における関数値を推定すること
補間	Interpolation	ある区間で定義された関数が、その区間内部の部分区間において関数値が不明の場合に、関数値が既知の部分から不明の関数値を推定すること
窓層	Window layer	太陽電池の受光面側に形成される層状の構造体。太陽光のスペクトルを広域で太陽電池内に取り込むため、各スペクトルでの屈折率や透過率など光学特性が重要な指標となる。
銘板値	Nameplate value	太陽電池モジュールに貼付けられた銘板に記載されている定格出力。
床材	Flooring material	地表面を覆う材料。
遊離砥粒方式	SiC loose abrasive method	SiC 遊離砥粒によるスライス方式。
四探針法	Four point probe method	一直線に並べられた4本の梁の外側2本から電流を流し、内部2本の針間に生ずる電位差を測定する方法。

陽電子消滅寿命測定	Positron annihilation lifetime spectroscopy	ポリマー中に入射された陽電子の一部は、ポジトロニウムを形成して自由体積空隙中へ局在化した後、電子と対消滅する。空隙のサイズが大きいほど陽電子の寿命が長い。陽電子が消滅するまでの寿命を測定することにより、空隙サイズを測定することができる。
離散フーリエ変換法	Discrete Fourier transform method	離散（デジタル）信号のフーリエ変換。
裏面パッシベーションセル	Passivated emitter rear cell (PERC)	従来のセルは裏面にアルミニウム電極を直接印刷していたが、裏面に絶縁膜を形成することで再結合を低減し、効率向上を図ったセル。従来のセルと比べて大幅な工程増とならずに製造できる利点がある。
裏面材	Back material	太陽電池モジュールの裏面に用いる部材。一般的にはバックシートを用いる。
裏面電極セル	Interdigitated back contact (IBC)	セルの n 型電極、p 型電極ともに裏面に櫛型に配置したセル。セル表面に電極が存在しないため、光損失が少なく高効率を達成している。
裏面電極型太陽電池	Back-contact solar cell	すべての電極が光入射面とは反対側に設置されている太陽電池。
粒界	Grain boundary	面欠陥／多結晶における結晶粒同士の境界面。
量子効率	Quantum efficiency	特定の波長の入射光のフォトン数に対してセル内部で発生するキャリア数の割合（内部量子効率）または、セルの外部に取り出されたキャリア数の割合（外部量子効率）のこと。セルの評価には不可欠の手法である。
量子ドット	Quantum dot	主に半導体において、大きさ数～20 ナノメートル程度の粒状の構造を作り、周りをバンドギャップの大きな半導体で覆うと、電子はその領域に閉じこめられ状態密度が離散化する。3 次元全ての方向から電子を閉じ込めたものを量子ドットと称する。
両面受光太陽電池	Bifacial solar cell	表面、裏面両方からの光で発電する太陽電池。

I. 事業の位置づけ・必要性について

1. 事業の背景・目的・位置づけ

1.1 事業実施の背景と事業の目的

近年、太陽光発電市場太陽電池モジュール価格の大幅下落や、価格競争力を有する中国等の新興国の太陽電池メーカーのシェア拡大等、市場の状況は大きくかつ急速に変化した。国内の導入量も、技術開発の進展や生産規模拡大による太陽光発電システムの価格低下、導入補助金の効果により、国内の住宅用システム設置が累計100万件を突破する（太陽光発電協会プレスリリース 2012年5月17日）等、着実に進展してきたが、2012年7月の固定価格買取（FIT）制度が開始によって、太陽光発電の導入はさらに加速（制度前の2012年6月末国内導入量は5.6GWであったが、2013年度末には14.3GWまで拡大（資源エネルギー庁HP）した。固定価格買取制度の効果で大量導入社会の実現は目前となり、従来の「普及させるための戦略」から、「普及後の社会を支える戦略」の検討が必要となってきた。

2014年4月に閣議決定されたエネルギー基本計画では、再生可能エネルギーを「現時点では、安定供給面、コスト面で様々な課題が存在するが、温室効果ガスを排出せず、国内で生産できることから、エネルギー安全保障にも寄与できる有望かつ多様で、重要な低炭素の国産エネルギー源である。」と位置付け、これまでのエネルギー基本計画で示した水準を更に上回る水準の導入を目指すこととしている。太陽光発電は、「個人を含めた需要家に近接したところで中小規模の発電を行うことも可能で系統負担も抑えられる上に、非常用電源としても利用可能である」と期待されている。

我が国のエネルギー安定供給の確保や、低炭素社会実現の観点から、再生可能エネルギーの導入拡大を進めることは非常に重要である。その一翼を担う太陽光発電に関しては、その特性を十分に理解し、また、その特長を活かした導入形態を模索していくことで、太陽光発電システムの適正な導入を実現し、エネルギー供給量を着実に拡大していく事が求められる。しかしながら、太陽光発電を始めとする再生可能エネルギーの普及がさらに進めば、FIT賦課金が増加し、国民負担の増大が見込まれる。

こうした状況を踏まえ、NEDOは太陽光発電の大量導入社会における、1）太陽光発電の安定的拡大、2）産業基盤の強化、3）新たな価値創造の実現の3つの視点から、現状分析、課題抽出を包括的に行い、その課題解決の方策を検討した。そして今後の技術開発の指針を得ることを目的として、2014年9月に「太陽光発電開発戦略（以下、「開発戦略」という。）」を策定した。開発戦略では以下の5つの課題について整理し、解決に向けた取組方針、開発事項等について論じた。

【課題1】国民負担の増大

【課題2】長期・安定な発電能力維持の必要性

【課題3】立地制約の顕在化

【課題4】廃棄物大量発生への対応

【課題5】グローバル競争の激化

この中で【課題1】国民負担の増大に対する最大の解決策は発電コストの低減であるが、開発戦略では発電コスト低減目標として、2020年に業務用電力価格並となる14円/kWh（グリッドパリティ）、2030年に従来型火力発電の発電コスト並みあるいはそれ以下に相当する7円/kWh（ジェネレーションパリティ）を掲げた。また、それらの目標達成のための方策として、発電コストに関する要素を分析し、モジュール変換効率の向上、システム価格の低減及び長期信頼性を同時に満たす太陽光発電が必要であり、そのためには新たな技術の開発が必要であるとしている。

NEDOは開発戦略の柱となる発電コスト低減目標達成のため、2030年までに7円/kWh（シリコン、CIS系については2025年での実現を目指し、前倒しを行った）の実現に資する高性能と高信頼性を両立した太陽電池の開発を目指し、2015年から5年間のプロジェクトとして本プロジェクト「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」を開始した。

1.2 国内外の研究開発の動向

太陽電池の分野では国内においては1974年のサンシャイン計画開始以降、NEDOが主導して技術開発を推進してきた。2014年度までNEDOが「革新的太陽光発電技術研究開発」と「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」で進めてきた発電コスト低減に資する技術の開発は、多くの成果をあげた。例えば、結晶シリコン太陽電池ではヘテロ接合バックコンタクト太陽電池で25%を超える要素技術を

開発し、CIS系薄膜太陽電池でも30cm角サブモジュールで変換効率17.8%（世界最高）を達成する等の成果をあげてきた。また、Ⅲ-V族化合物の薄膜多接合型太陽電池で世界最高効率のセル変換効率を達成、量子ドット等の新概念の太陽電池で世界最高水準の技術を開発、ペロブスカイト太陽電池等の革新的な技術を開発する等、新分野の開拓でも大きな成果をあげた。

一方、世界各国の主要地域における開発状況をみると、国を挙げた研究開発が行われている。プロジェクト開始の2015年時点においては、欧州では、戦略的研究計画（Strategic Research Agenda：SRA）を策定し、発電コスト低減に取り組んでいた。欧州フレームワーク計画FP7（2007～2013）では、製造装置プロセス、集光型太陽電池、次世代太陽電池、薄膜系太陽電池、結晶シリコン太陽電池等、国家横断的な技術開発を行っており、その後はFP7の後継プログラムHorizon 2020（2014～2020）を策定し、更なる研究開発に取り組んでいる。

また、米国では、2011年2月に新たな技術開発戦略として「Sunshot イニシアティブ」を策定し、太陽光発電技術に係るコスト削減、太陽光発電の系統連系に係るコスト削減、太陽光発電の設置・運用に係るコスト削減等の開発を行っている。

一方、中国では、第12次5ヵ年計画（2011～2015年）で、変換効率単結晶シリコン太陽電池で21%、多結晶シリコン太陽電池19%、太陽電池のモジュール製造コスト2020年7元/W（約105円）等の目標を設定し、研究開発を推進していた。2013年時点で、中国メーカーが太陽電池の販売量として出力ベースで6割のシェアを占めるに至ったが、研究開発推進の結果、中国製モジュールの効率、品質とも大きく改善し、さらなるシェアの拡大を実現している。

1.3 技術戦略上の位置づけ

図 I-1 に近年の太陽光発電の研究開発プロジェクトを示す。本プロジェクトは太陽電池の開発を主としていた「革新的太陽光発電技術研究開発」と「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」の成果を踏まえ、開発戦略で掲げた発電コスト低減目標を達成するべく、開発する太陽電池種についても絞り込みを行った。具体的には現在市場に出ている結晶シリコン太陽電池、CIS太陽電池、Ⅲ-V化合物太陽電池、ペロブスカイト太陽電池の4種の太陽電池に絞った。市場の主力製品である結晶シリコン太陽電池とCIS太陽電池については、14円/kWh達成の技術的見通しを得たことから、2020年に14円/kWhを達成するべく、当該技術を着実に実用化するための技術を継続して開発することとした。また、2030年までに発電コスト7円/kWh実現に資する要素技術開発も合わせて進めることとした。加えて、実用化まで時間を要するものの、これまでの開発成果から発電コスト低減に有効な太陽電池の実現に有望と考えられるⅢ-V化合物太陽電池とペロブスカイト太陽電池については、2030年発電コスト7円/kWh達成に資する高性能太陽電池を開発することとした。さらに、上記開発に必要な測定、評価、分析技術等の開発等を共通基盤技術として開発することとした。

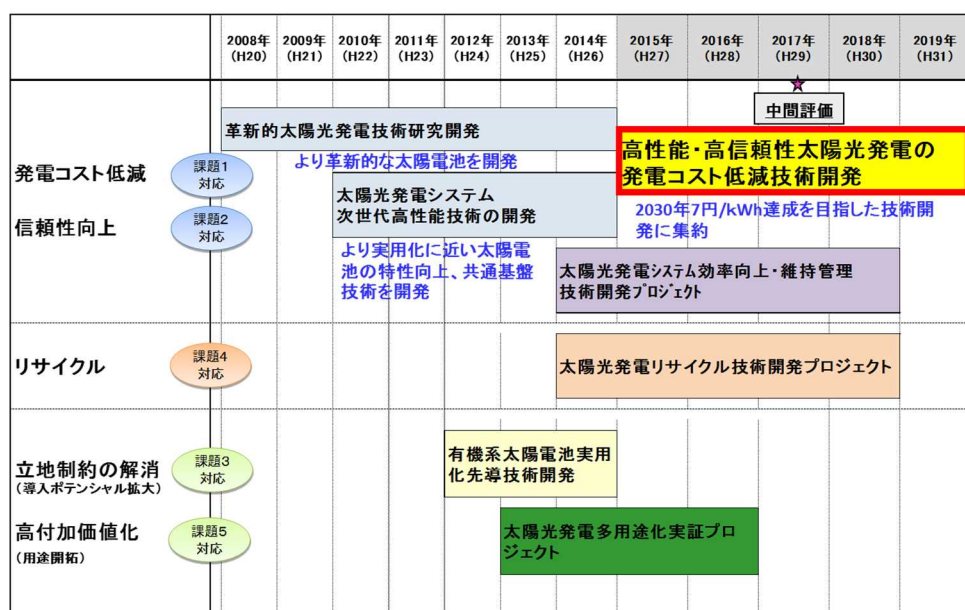


図 I-1. NEDO における太陽光発電研究開発プロジェクト

2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

2.1 NEDO が関与することの意義

1974年に開始したサンシャイン計画以降、NEDOは太陽光発電分野の研究開発を牽引してきた。30年以上にわたるコーディネートの経験があることは研究開発マネジメントにおける大きな強みである。

NEDOは企画、立案段階においては産学官を取りまとめてロードマップを策定するとともに、事業環境の変化に即して改訂を行い、国策を盛り込んだ企画を行う。また、業界全体のニーズを把握するために産学官のヒアリング等を実施し、開発戦略を踏まえた目標を設定することができる。

研究開発体制構築の段階では産学官を組み合わせた柔軟な研究開発体制を構築することができ、企業、大学、公的研究機関でコンソーシアムを形成するとともに、複数の競合企業をコンソーシアムにまとめ上げ、共通の技術目標に向けて研究開発を推進することができる。

事業推進の際には公的機関としての中立性を確保できること、国立研究開発法人制度を最大限に生かして柔軟に推進が可能である。大学及び公的研究機関の基礎研究成果を企業の事業化に活かせるように調整し、必要に応じて加速資金の投入や事業環境の変化に即して追加公募を実施する。長期間にわたる太陽電池の技術開発を牽引してきたNEDOが本研究開発分野に関与するのは最大限の研究開発成果を得るために適切であると考えている。

2.2 実施の効果(費用対効果)

本プロジェクトでは本研究開発は2020年14円/kWhの達成も目標としており、さらに開発した太陽電池モジュールが実用化、販売され、当該モジュールが採用されると想定される2025年には発電コスト7円/kWhを目指す。また、他方、FIT制度の賦課金の負担額は毎年2兆円を超えており、今後の賦課金総額を抑制・減少させていくためには、早期の太陽電池の価格引き下げが必要であり、コスト低減は将来の賦課金含めて大きな波及効果を持つ。

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

(1) 研究開発の目的

本プロジェクトでは、開発戦略で掲げる発電コスト低減目標達成のため、2030年までに7円/kWhの実現に資する高性能と高信頼性を両立した太陽電池の開発を目指す。ただし、実用化が進んでいる結晶シリコン太陽電池とCIS太陽電池については、国内外での競争力確保の観点から太陽電池のコスト低減と効率向上を急ぎ、日本国内における発電コスト7円/kWhの達成目標年を2025年に前倒しする。

具体的には、実用化が進んでいる結晶シリコン太陽電池とCIS太陽電池については、14円/kWhを十分に下回る太陽電池モジュールを2020年までに実用化するとともに、2025年までに7円/kWhを実現する要素技術の確立を目指す。

また、結晶シリコン太陽電池やCIS太陽電池とは異なり、圧倒的な高効率や低コストで発電コスト7円/kWhを目指す革新的太陽電池については、2030年までに7円/kWhを実現する要素技術の確立を目指す。

上記開発と並行して、太陽光発電の信頼性を高め、着実に社会に定着するための評価技術等の共通基盤技術を開発する。

また、上記開発の進捗により、中間目標年までに多くの成果が生まれ、とくにヘテロ接合バックコンタクト型太陽電池等の高効率太陽電池の技術は確立しつつある。こうした高効率太陽電池は内外から高く評価されているものの、低コストでの製造プロセスにはまだ課題が残り、2025年の発電コスト目標達成には、技術的ブレークスルーが必要な状況である。そこで、高効率太陽電池の発電コスト目標達成をより強固なものとするべく、「高効率太陽電池製造技術実証」を行う。

(2) 研究開発の目標

① アウトプット目標

2014年度までに実施した「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」の成果から、結晶シリコン太陽電池とCIS太陽電池については、14円/kWh達成の技術的見通しを得たことから、当該技術を着実に実用化するための技術を開発することとする。

また、結晶シリコンとCIS太陽電池については2025年までに発電コスト7円/kWh実現に資する要素技術開発を進める。加えて、実用化まで時間を要するものの、これまでの開発成果から発電コスト低減に有効な太陽電池の実現に有望と考えられる技術を対象に、2030年発電コスト7円/kWh達成に資する高性能太陽電池を開発する。なお、これまでは主として高性能化に取り組んできたが、実用化を加速するべく、低コスト化や信頼性も重視する。

さらに、上記開発に必要な測定、評価、分析技術等の開発等を共通基盤技術として開発する。

「高効率太陽電池製造技術実証」では、ヘテロ接合バックコンタクト型太陽電池等、海外メーカーに対し圧倒的に高効率な太陽電池の低コストプロセス技術を構築するべく、生産プロセスを設計するとともに、裏面の接合形成プロセス、パターンニングプロセスなど、量産において低コスト化につながる製造技術の実証を行う。

【最終目標】

1) 先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能CIS太陽電池の技術開発

a) 試作モジュールで、発電コスト14円/kWh相当の性能を確認する。

- ・発電コスト算出においては、開発技術のモジュール変換効率(%)、モジュール製造コスト(円/W)、想定する使用環境におけるシステムコスト(円/W)、出力劣化率、設備利用率等の前提条件を客観的に説明すること。

<発電コスト14円/kWhを満たす性能の目安>

- ・モジュール変換効率 22%
- ・モジュールの出力劣化 25年で20%相当

なお、発電コスト目標を達成する使用環境（条件）によっては、上記条件と異なる目標とする場合もあり得る。

b) 2025年までに発電コスト7円/kWhを実現するための開発計画を提示すること。

2) 革新的新構造太陽電池の研究開発

a) 革新的高効率太陽電池の研究開発

- ・モジュール変換効率 : 30%
- ・モジュール製造コスト : 想定する使用環境で、システム価格125円/Wを実現するコスト

b) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

- ・モジュール変換効率 : 20%
- ・モジュール製造コスト : 15円/Wを実現するコスト

3) 太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発

a) 先端複合技術型シリコン太陽電池

① 高効率・低コスト結晶成長、ウエハスライス技術に関する研究開発

p型、n型それぞれの基板のキャリアライフタイムを現状の3倍以上にする。
材料品質、スライスプロセスがセル性能に与える影響を明らかにし、セルプロセスにおける技術開発指針を得る。

② 高効率・低コストセル、モジュールプロセス技術に関する研究開発

新たに開発する先端複合技術型シリコン太陽電池において、各要素技術（成膜、電極、パッシベーション等）がセル性能に与える影響を明らかにし、セル、モジュールプロセスにおける技術開発指針を得る。

b) 高性能 CIS 太陽電池の開発

- ① 小面積セル（1cm角程度）で変換効率2/3%以上
- ② 欠陥密度の低減化技術の開発
- ③ CIS太陽電池の理想的な材料設計技術の提案

4) 共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）

a) 出力測定技術の開発

- ・新型の太陽電池等については、海外における主要研究機関による測定技術との整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度 $\pm 0.5\%$ （ 1σ ）以内を目指す。
- ・薄膜系を含む市販されている太陽電池モジュールの屋外での測定においては精度 $\pm 1.0\%$ （ 1σ ）以内を目指す。

b) 発電量評価技術

- ・気候区による気象データやスペクトルデータ等を整理し、ユーザーにとって利便性の高い日射量データベースを構築する。

c) 信頼性・寿命評価技術の開発

- ・低コストで劣化対策を施した太陽電池モジュールの有効性について実証する。
- ・太陽電池モジュールの性能30年を予測できる加速試験方法を開発する。

5) 動向調査等

a) 動向調査

- ・発電コスト 7 円/kWh 実現に向け、開発戦略の見直しの要否を検討するとともに、必要に応じ、見直し案を作成する。

b) IEA 国際協力事業

PVPS の動向及び展開を踏まえた、定期的な情報発信を行う。

6) 高性能太陽電池製造技術実証

高効率太陽電池を低製造コストで実用化が可能なプロセスの開発を行い、2025年に発電コスト7円/kWhを達成可能な製造技術を試作レベルで実証する。

【中間目標】

1) 先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の技術開発

a) 試作モジュールで、発電コスト 17 円/kWh 相当の性能を確認する。

- ・発電コスト算出においては、開発技術のモジュール変換効率 (%)、モジュール製造コスト (円/W)、想定する使用環境におけるシステムコスト (円/W)、出力劣化率、設備利用率等の前提条件を客観的に説明すること。

<発電コスト 17 円/kWh を満たす性能の目安>

- ・モジュール変換効率 20%
- ・モジュールの出力劣化 20 年で 20%相当

なお、発電コスト目標を達成する使用環境 (条件) によっては、上記条件と異なる目標とする場合もあり得る。

b) 2020 年までの実用化計画を提示すること。

2) 革新的新構造太陽電池の研究開発

a) 革新的高効率太陽電池の研究開発

モジュール変換効率 30%以上、且つ、結晶シリコン並の製造コストを実現するセル・モジュール構造と達成手段を明確化する。

b) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

量産時にモジュール製造コスト 15 円/W を実現しうる、太陽電池セル材料・構造に関する要素技術の開発。

小面積太陽電池セルでの変換効率 20%の達成。

3) 太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発

a) 先端複合技術型シリコン太陽電池

① 高効率・低コスト結晶成長、ウエハスライス技術に関する研究開発
p 型、n 型それぞれの基板のキャリアライフタイムを現状の 2 倍以上にする。

② 高効率・低コストセル、モジュールプロセス技術に関する研究開発
新たに開発する先端複合技術型シリコン太陽電池において、各要素技術 (成膜、電極、パッシベーション等) がセル性能に与える影響を評価し、セル、モジュールプロセスにおける技術開発課題を明らかにする。

b) 高性能 CIS 太陽電池の開発

- ① 小面積セル (1cm 角程度) で変換効率 22%以上
- ② 欠陥検出のためのデバイス構造の明確化
- ③ CIS 太陽電池の電子構造の明確化

- 4) 共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）
- a) 出力測定技術の開発
 - ・ 新型の太陽電池等については、海外における主要研究機関による測定技術との整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度±1.0%（1σ）以内を目指す。
 - ・ 市販されている結晶 Si 系太陽電池モジュールの屋外での測定においては精度±1.0%（1σ）以内を目指す。
 - b) 発電量評価技術
 - ・ 気候区による気象データやスペクトルデータ等を整理し、ユーザーにとって利便性の高い日射量データベースを構築する。
 - c) 信頼性・寿命評価技術の開発
 - ・ PID 現象など太陽電池モジュールの劣化メカニズムを解明するとともに、劣化予防のための具体的な低コスト対策技術を開発する。
 - ・ 太陽電池モジュールの性能 25 年を予測できる加速試験方法を開発する。
- 5) 動向調査等
- a) 動向調査
 - ① 年度毎に太陽電池モジュールの性能と発電コストの関係を客観的に分析するとともに、モジュールの産業競争力を評価する。
 - ② 発電コスト目標達成後の産業、市場動向について、シナリオ分析を行う。
 - b) IEA 国際協力事業
 - NEDO が参画する PVPS の活動に参加し、その内容を産業界に発信する。2018 年度以降の PVPS への新たな活動計画案を作成する。

② アウトカム目標

本プロジェクトで開発した太陽電池モジュールが実用化、販売され、当該モジュールが採用される太陽光発電システムについて、2020 年には発電コスト 14 円/kWh を十分に下回り、2025 年には発電コスト 7 円/kWh を実現する。これにより、固定価格買取制度の早期卒業が実現すれば、年間数千億円の費用負担削減効果が見込まれる。また、「高効率太陽電池製造技術実証」においては、既に研究レベルで高効率を実証している高効率太陽電池の早期市場投入により、国内住宅屋根設置市場（需要地近接型市場）をはじめ、国内外の設置面積制約の大きい太陽電池市場の獲得に貢献する。

③ アウトカム目標達成に向けての取組

NEDO は、2020 年の発電コスト 14 円/kWh 実現に向け、参画企業の事業戦略を確認する仕組みを構築する。

また、先端複合技術型シリコン太陽電池及び高性能 CIS 太陽電池については 2025 年、革新的新構造太陽電池については 2030 年の発電コスト 7 円/kWh、実現に向け、開発技術の実用化を進めるための産学連携体制を構築する。

さらに、開発技術の信頼性評価技術を開発、公表し、発電コスト低減技術の普及拡大に努める。

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

2.1.1 研究開発分野及び事業形態

本プロジェクトでは、以下の研究開発を実施する。

研究開発項目①「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の技術開発」

1. 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

ヘテロ接合とバックコンタクトの統合等、先端技術を複合し、高効率かつ高信頼性を両立したシリコン太陽電池とその低コスト製造技術を開発する。

2. 高性能 CIS 太陽電池の開発

CIS 太陽電池では、実用化規模の大面积モジュールの高効率化及び低コスト製造プロセスの実用化に向けた開発を実施する。

- ・事業形態：研究開発 課題設定型事業
- ・契約等種別：共同研究（NEDO 負担率：2/3）

本研究開発項目は、大学等の関与が必要となる基盤的な研究要素を含むが、すでに実用化が進んでいる太陽電池を対象として主として企業が実施する開発項目であり、共同研究（NEDO 負担率：2/3）で実施する。

研究開発項目②「革新的新構造太陽電池の研究開発」

1. 革新的高効率太陽電池の研究開発

一般には普及していないⅢ-V族太陽電池等の超高効率太陽電池において、将来の普及を目指し、現在普及している太陽電池並みのコストで製造するための低コスト化の要素技術開発並びに、太陽電池の効率向上により発電コスト低減を実現する要素技術開発を合わせて行うことで、2030年に7円/kWhを達成する手段を明らかにする。具体的には、変換効率30%以上の薄膜化合物の超高効率太陽電池で発電コスト7円/kWhを達成するために、Ⅲ-V族の太陽電池の製造装置、製造プロセス、多接合化の為の剥離・接合などの製造コスト低減のための要素技術開発や、モジュール化の要素技術開発を行い、その実現性を見極める。

2. 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

太陽電池に新材料、新構造を用いることで製造コストを革新的に低減させ2030年に発電コスト7円/kWhを目指す。モジュール変換効率は20%程度ながら、新材料、新構造を用いることでモジュール製造コストを15円/Wまで革新的に低減することができる技術を実現する。具体的には、新構造のペロブスカイト系太陽電池等の研究開発を行う。

- ・事業形態：研究開発 課題設定型事業
- ・契約等種別：委託（但し、単独のものは共同研究（NEDO 負担率：2/3））

本研究開発項目は、実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤的技術」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して実施する事業であり、委託事業（NEDO 負担率：100%）として実施する。ただし、民間企業単独、民間企業のみでの連携、大学等の単独実施等、産学官連携とならないものは、共同研究事業（NEDO 負担率：2/3）として実施する。

研究開発項目③「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」

1. 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

太陽電池セル・モジュールの各製造プロセスにおいて、評価解析を行い、得られた知見をもとに、原料、結晶、装置、セル、モジュールメーカーの高効率化、低コスト化、高信頼性化に貢献する。

2. 高性能 CIS 太陽電池の開発

発電コスト7円/kWh達成のために、CIS 太陽電池モジュールの高効率化および発電コスト低減を可能とする界面制御技術、再結合パッシベーション、バンドプロファイル評価技術等、要素技術の研究開発を行う。また、実デバイスでの評価検証を行う。

- ・事業形態：研究開発 課題設定型事業
- ・契約等種別：委託（但し、単独のものは共同研究（NEDO 負担率：2/3））
本研究開発項目は、大学等が研究開発項目①に取り組む企業と産学官で連携して取り組む基盤的技術の開発に係る事業であり、原則委託事業（NEDO 負担率：100%）として実施する。ただし、大学等の単独実施等、産学官連携とならないものは、共同研究事業（NEDO 負担率：2/3）として実施する。

研究開発項目④「共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）」

1. 出力等測定技術の開発
本プロジェクトで開発する太陽電池等、標準化や規格化が進んでいない太陽電池の出力等を正しく評価するための測定技術を開発する。
2. 発電量評価技術
NEDO 日射量データベースについて、データの更新、高精度化等、拡充を進め、ユーザーの利便性向上を図る。
3. 信頼性・寿命評価技術の開発
実際の太陽光発電システムから発電データを取得、分析評価し、発電システムの劣化要因の抽出、劣化メカニズムの解明、および劣化予防対策技術を開発する。太陽電池モジュールが設置される環境を考慮した、長期信頼性を評価するための試験方法を開発する。

- ・事業形態：研究開発 課題設定型事業
- ・契約等種別：委託（但し、単独のものは共同研究（NEDO 負担率：2/3））
本研究開発項目は、試験・評価方法の提案等、国民経済的には大きな便益がありながらも、民間企業の研究開発投資に見合うものが見込めない「公共財の研究開発」事業であり、原則委託事業（NEDO 負担率：100%）として実施する。ただし、民間企業単独、民間企業のみでの連携、大学等の単独実施等、産学官連携とならないものは、共同研究事業（NEDO 負担率：2/3）として実施する。

研究開発項目⑤「動向調査等」

1. 動向調査
開発戦略の発電コスト低減目標の達成に向け、必要な情報を収集、整理、分析する。
2. IEA 国際協力事業
諸外国の技術開発動向や政策動向等について、国際エネルギー機関(IEA)の太陽光発電システム研究協力実施協定(PVPS)に参画し、太陽光発電の普及・促進に向けた国際協力活動を通じた調査・分析を実施すると共に、諸外国の技術開発、政策及び市場動向を把握する。併せてこの活動を通じて日本の太陽光発電の国際競争力向上等を図る。

- ・事業形態：調査委託
- ・契約等種別：委託
諸外国の技術開発動向や政策動向等を把握し、技術開発の方向性や分析・評価手法等の判断に活用するため、各種動向調査や IEA 国際協力事業等を実施するもので、委託事業（NEDO 負担率：100%）として実施する。

研究開発項目⑥「高性能太陽電池製造技術実証」

ヘテロ接合バックコンタクト型太陽電池等、海外メーカーに対し圧倒的に高効率な太陽電池の低コストプロセス技術を構築するべく、生産プロセスを設計するとともに、裏面の接合形成プロセス等、量産において低コスト化につながる製造技術の実証を行う

- ・事業形態：研究開発 課題設定型事業
- ・契約等種別：助成・補助（NEDO 負担率：1/2 以内）
高効率太陽電池の開発実績を有する民間企業が、その技術の事業化を加速し、国際的に競争力を有するために行う開発・実証事業であり、助成事業（助成率：1/2）で実施する。

2.1.2 研究開発テーマ

各研究開発分野で実施する研究開発テーマは、公募により選定した。採択にあたっては、公募時に策定、公表した審査項目・基準に基づいて候補を決定し、外部専門家による採択審査委員会、NEDO 内の契約・助成審査委員会を経て最終決定した。

(1) 2015 年度「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術の研究開発」に関する公募

公募の結果、30 件の提案があったが、各研究開発項目より目標とする発電コスト（2020 年に 14 円/kWh、或いは 2030 年 7 円/kWh）を達成するに資する取り組みとなる 22 件を採択した。

- ・公募期間：2015 年 3 月 10 日～2015 年 4 月 8 日
- ・採択審査委員会：以下の審査項目・基準に基づき採択審査を行った。
- ・審査項目・基準
 - I) 提案内容が基本計画の目的、目標に合致しているか。(不必要な部分はないか)
 - II) 提案された方法に新規性があり、技術的に優れているか。
 - III) 共同提案者や連携先と相互補完的、効率的かつ効果的な体制での提案となっているか。
 - IV) 提案内容・研究計画は実現可能か。(技術的可能性、計画、中間目標の妥当性等)
 - V) 応募者は本研究開発を遂行するための高い能力を有するか。(関連分野の開発等の実績、再委託予定先・共同研究相手先等を含めた実施体制、優秀な研究者等の参加等)
 - VI) 研究開発予算は、開発する技術や期待する成果に対して過大となっていないか。
 - VII) 目標とする発電コスト計算の内訳や、その根拠等が具体的に示されているか。
(研究開発項目①～③)
目標とする開発成果(評価技術、試験方法等)が具体的に示されているか。
(研究開発項目④)
 - VIII) 応募者が当該研究開発を行うことにより国民生活や経済社会への波及効果は期待できるか。
(企業の場合、成果の実用化・事業化が見込まれるか。大学や公的研究開発機関等で、自らが実用化・事業化を行わない場合には、どのような形で製品・サービスが実用化・事業化されることを想定しているか。)
- ・審査委員会委員(敬称略)：
小長井 誠(東京都市大学教授)、田中 良(NIT ファシリティーズ)、片桐 裕則(長岡工業高等専門学校教授)、工藤 一浩(千葉大学教授)、高倉 秀行(立命館大学教授)

(2) 2018 年度「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術の研究開発」に関する公募

発電コスト目標の達成年を 5 年前倒ししたことを踏まえ、既存の研究開発(研究開発項目①③)の体制強化(追加公募)と量産プロセスの構築を狙って新たに追加した実証事業の体制構築(新規公募)を行った。

公募の結果、4 件の提案があった。既存の研究開発(研究開発項目①③)の体制強化(追加公募)に資する取り組みとなる 2 件、量産プロセスの構築を目的とする実証事業(研究開発項目⑥)で 1 件を採択した。

- ・公募期間：2018 年 2 月 26 日～2018 年 4 月 19 日
- ・採択審査委員会：以下の審査項目・基準に基づき採択審査を行った。
- ・審査項目・基準
 - I) 提案内容が基本計画の目的、目標に合致しているか(不必要な部分はないか)。
 - II) 提案内容・研究計画は実現可能か(技術的可能性、計画の妥当性等)。
 - III) 提案された方法に新規性があり、技術的に優れているか。
 - IV) 応募者は本研究開発を遂行するための高い能力を有するか(関連分野の開発等の実績、再委託予定先・共同研究相手先等を含めた実施体制、優秀な研究者等の参加等)。また、共同提案者や連携先と相互補完的、効率的かつ効果的な体制での提案となっているか。
 - V) 研究開発予算は、開発する技術や期待する成果に対して過大となっていないか。
 - VI) 応募者が当該研究開発を行うことにより国民生活や経済社会への波及効果は期待できるか。
(企業の場合、成果の実用化・事業化が見込まれるか。大学や公的研究開発機関等で、自ら

が実用化・事業化を行わない場合には、どのような形で製品・サービスが実用化・事業化されることを想定しているか。)

・審査委員会委員（敬称略）：

小長井 誠（東京都市大学教授）、一木 修（株式会社資源総合システム）、高倉 秀行（立命館大学教授）、庭野 道夫（東北福祉大学教授）、森本 弘（太陽光発電技術研究組合）

2.1.3 研究開発予算の推移

年度ごとの研究開発予算（実績）の推移を表1に示す。

表1. 研究開発予算（実績）の推移（単位：億円）

分野 \ 年度	2015	2016	2017	2018	2019	総額
研究開発項目①（結晶 Si）	7.5	8.7	7.4	7.1	2/3	33.1
〃（CIS）	2.0	2.4	3.0	3.1	1.1	11.2
研究開発項目②（高効率）	9.7	11.4	10.6	11.7	9.2	52.5
〃（低製造コスト）	9.0	8.4	9.9	7.9	7.2	42/3
研究開発項目③（結晶 Si）	8.9	8.7	5.3	6.9	4.3	34.1
〃（CIS）	3.3	2.4	1.8	1.8	1.0	10.3
研究開発項目④	4.8	6.1	4.8	3.2	2.4	21.3
研究開発項目⑤	0.4	0.5	0.6	0.7	0.7	2.9
研究開発項目⑥	—	—	—	1.9	1.0	2.9
計 特別会計（需給勘定）	45.7	48.5	43.5	44.3	29.1	211.1

2.1.4 研究開発内容（分野毎）

研究開発項目①「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能CIS太陽電池の技術開発」

1. 研究開発の必要性

現在普及している結晶シリコン太陽電池やCIS太陽電池は、技術開発の進展、市場拡大による量産効果によって性能向上と価格低減が進んでいる。NEDOの「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」プロジェクトでも、結晶シリコン太陽電池のヘテロ接合とバックコンタクトの統合技術によってセル効率25.1%を達成。CIS太陽電池でも高品質光吸収層とCdフリーバッファ層を開発し、小面積セルで変換効率20.9%（2014年4月）、30cm角サブモジュールで変換効率17.8%（世界最高）を達成する等、大きな成果をあげた。しかしながら、2030年までにこれらの成果を実用化し、発電コスト7円/kWhを実現するためには、性能を維持しつつ、大面積化や低製造コストプロセスの開発等を進めるため、更なる技術革新が必要である。

2. 研究開発の具体的内容

（1）先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

ヘテロ接合とバックコンタクトの統合等、先端技術を複合し、高効率かつ高信頼性を両立したシリコン太陽電池とその低コスト製造技術を開発する。

（2）高性能CIS太陽電池の開発

CIS太陽電池では、実用化規模の大面積モジュールの高効率化及び低コスト製造プロセスの実用化に向けた開発を実施する。

3. 達成目標

【中間目標】

①試作モジュールで、発電コスト 17 円/kWh 相当の性能を確認する。

- ・発電コスト算出においては、開発技術のモジュール変換効率 (%)、モジュール製造コスト (円/W)、想定する使用環境におけるシステムコスト円/W、出力劣化率、設備利用率等の前提条件を客観的に説明すること。

<発電コスト 17 円/kWh を満たす性能の目安>

- ・モジュール変換効率 20%
- ・モジュールの出力劣化 20 年で 20%相当

(加速評価試験の方法については、試験条件 (例えば JISC8917 の温湿度サイクル試験の試験時間等) を提示するとともに、目標年数を保証する製品出荷時と同等の条件を満たすこと。)

なお、発電コスト目標を達成する使用環境 (条件) によっては、上記条件と異なる目標とする場合もあり得る。

②2020 年までの実用化計画を提示すること。

【最終目標】

①試作モジュールで、発電コスト 14 円/kWh 相当の性能を確認する。

- ・発電コスト算出においては、開発技術のモジュール変換効率 (%)、モジュール製造コスト (円/W)、想定する使用環境におけるシステムコスト円/W、出力劣化率、設備利用率等の前提条件を客観的に説明すること。

<発電コスト 14 円/kWh を満たす性能の目安>

- ・モジュール変換効率 22%
- ・モジュールの出力劣化 25 年で 20%相当

(加速評価試験の方法については、試験条件 (例えば JISC8917 の温湿度サイクル試験の試験時間等) を提示するとともに、目標年数を保証する製品出荷時と同等の条件を満たすこと。)

なお、発電コスト目標を達成する使用環境 (条件) によっては、上記条件と異なる目標とする場合もあり得る。

②2025年までに発電コスト7円/kWhを実現するための開発計画を提示すること。

研究開発項目②「革新的新構造太陽電池の研究開発」

1. 研究開発の必要性

従来の延長線上にはないⅢ-V族等の革新的高効率太陽電池や、コスト構造を革新する太陽電池は、2020年の実用化は困難であるが、変換効率の高さや製造コストの低さから、2030年に7円/kWhの達成が見込める有力な太陽電池である。しかしながら、革新的高効率太陽電池は、現在は一般に普及する価格での製造はきわめて困難であり、事業目標達成のためには太陽電池の製造装置及び製造プロセスの開発や、多接合化のための太陽電池層の剥離、接合技術の開発が必要である。

また、近年短時間で発電効率を大幅に伸ばしている、ペロブスカイト太陽電池など、コスト構造を革新する太陽電池の実現が期待される技術も見いだされているが、実用化には原理検証や、信頼性の確認、新しいコンセプトの製造装置の実現が必要である。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 革新的高効率太陽電池の研究開発

一般には普及していないⅢ-V族太陽電池等の超高効率太陽電池において、将来の普及を目指し、現在普及している太陽電池並みのコストで製造するための低コスト化の要素技術開発並びに、太陽電池の効率向上により発電コスト低減を実現する要素技術開発を合わせて行うことで、2030年に7円/kWhを達成する手段を明らかにする。

具体的には、変換効率30%以上の薄膜化合物の超高効率太陽電池で発電コスト7円/kWhを達成

するために、Ⅲ-V族の太陽電池の製造装置、製造プロセス、多接合化の為の剥離・接合などの製造コスト低減のための要素技術開発や、モジュール化の要素技術開発を行い、その実現性を見極める。

(2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

太陽電池に新材料、新構造を用いることで製造コストを革新的に低減させ2030年に発電コスト7円/kWhを目指す。モジュール変換効率は20%程度ながら、新材料、新構造を用いることでモジュール製造コストを15円/Wまで革新的に低減することができる技術を実現する。具体的には、新構造のペロブスカイト系太陽電池等の研究開発を行う。

3. 達成目標

【中間目標】

(1) 革新的高効率太陽電池の研究開発

モジュール変換効率30%以上、且つ、想定する使用環境で、システム価格125円/Wを実現するセル・モジュール構造と達成手段を明確化する。

(2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

量産時にモジュール製造コスト15円/Wを実現しうる、太陽電池セル材料・構造に関する要素技術の開発。

小面積太陽電池セルでの変換効率20%の達成。

【最終目標】

(1) 革新的高効率太陽電池の研究開発

モジュール変換効率30%以上、且つ、想定する使用環境で、システム価格125円/Wを実現する要素技術を確立する。

(2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

量産時にモジュール製造コスト15円/Wを実現しうる、太陽電池モジュール材料・構造・生産プロセスに関する要素技術の開発。

実験室レベルの小型太陽電池モジュールでの変換効率20%の達成。

研究開発項目③「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」

1. 研究開発の必要性

発電コスト7円/kWh、14円/kWhを実現するためには、従来の太陽電池モジュールを超える性能を、低コストで実現しなければならない。そのためには、材料や構造の設計において、基礎的、科学的知見を踏まえた検討を行う必要がある。

本研究開発項目は、研究開発項目①の実施者と産学官連携で進める。

2. 研究開発の具体的内容

以下の研究開発項目を実施する。

(1) 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

太陽電池セル・モジュールの各製造プロセスにおいて、評価解析を行い、得られた知見をもとに、原料、結晶、装置、セル、モジュールメーカーの高効率化、低コスト化、高信頼性化に貢献する。

① 高効率・低コスト結晶成長、ウエハスライス技術に関する研究開発

転位密度が低くライフタイムの長い高品質で低コストな材料の開発を行う。また、ウエハスライス技術については、低コスト化、低ダメージ化のための知見を得るための研究開発を行う。さらに、材料品質、スライスプロセスがセル性能に与える影響の研究を行う。

② 高効率・低コストセル、モジュールプロセス技術に関する研究開発

受光面構造、受光面成膜、裏面成膜、裏面パターン形成、裏面電極構造、高品質透明導電膜、高品質パッシベーション膜、高性能エミッタ、細線低抵抗電極、銀代替電極、ヘテロ接合等の研究開発を行い、技術開発指針を確立する。

(2) 高性能CIS太陽電池の開発

発電コスト7円/kWh達成のために、CIS太陽電池モジュールの高効率化および発電コスト低減を可能とする界面制御技術、再結合パッシベーション、バンドプロファイル評価技術等、要素技術の研究開発を行う。また、実デバイスでの評価検証を行う。

3. 達成目標

【中間目標】

(1) 先端複合技術型シリコン太陽電池

①高効率・低コスト結晶成長、ウエハスライス技術に関する研究開発

p型、n型それぞれの基板のキャリアライフタイムを現状の2倍以上にする。

②高効率・低コストセル、モジュールプロセス技術に関する研究開発

新たに開発する先端複合技術型シリコン太陽電池において、各要素技術（成膜、電極、パッシベーション等）がセル性能に与える影響を評価し、セル、モジュールプロセスにおける技術開発課題を明らかにする。

(2) 高性能CIS太陽電池の開発

① 小面積セル（1cm角程度）で変換効率22%以上

② 欠陥検出のためのデバイス構造の明確化

③ CIS太陽電池の電子構造の明確化

【最終目標】

(1) 先端複合技術型シリコン太陽電池

①高効率・低コスト結晶成長、ウエハスライス技術に関する研究開発

p型、n型それぞれの基板のキャリアライフタイムを現状の3倍以上にする。

材料品質、スライスプロセスがセル性能に与える影響を明らかにし、セルプロセスにおける技術開発指針を得る。

②高効率・低コストセル、モジュールプロセス技術に関する研究開発

新たに開発する先端複合技術型シリコン太陽電池において、各要素技術（成膜、電極、パッシベーション等）がセル性能に与える影響を明らかにし、セル、モジュールプロセスにおける技術開発指針を得る。

(2) 高性能CIS太陽電池の開発

① 小面積セル（1cm角程度）で変換効率2/3% 以上

② 欠陥密度低減化の技術開発指針の構築

③CIS太陽電池の理想的な材料設計技術の提案

研究開発項目④「共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）

1. 研究開発の必要性

太陽光発電の発電コスト低減を実現するためには、長期に亘り安定した発電量を得られることが必要であることから、太陽電池モジュールに対しても、長期信頼性の確保が求められている。

これまでNEDOでは、太陽光発電システム次世代高性能技術の開発において、太陽電池モジュールの評価技術の開発に取り組んできており、出力測定精度の向上や劣化要因について知見が得られつつあるものの、その寿命（耐久性等）を効率的に評価出来る試験技術の確立には至っていない。

発電システムとして信頼性を向上するためには、太陽電池モジュールの耐久性向上に資する技術開発と同時に、実際に設置する環境下での出力測定や寿命を予測できる試験方法といった評価技術の開

発と、PID等の太陽電池モジュールの劣化原因の解明が必要である。
更に、これら評価技術の向上や技術開発と併せて、ガイドライン等の作成、認証機関への技術移転や、標準化・国際規格化を進めるための取り組みも実施することで、信頼性の高い太陽電池が適正に評価される環境を作り、日本の太陽光発電産業の国際競争力の向上に貢献する。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 出力等測定技術の開発

本プロジェクトで開発する太陽電池等、標準化や規格化が進んでいない太陽電池の出力等を正しく評価するための測定技術を開発する。

(2) 発電量評価技術

NEDO日射量データベースについて、データの更新、高精度化等、拡充を進め、ユーザーの利便性向上を図る。

(3) 信頼性・寿命評価技術の開発

①実際の太陽光発電システムから発電データを取得、分析評価し、発電システムの劣化要因の抽出、劣化メカニズムの解明、および劣化予防対策技術を開発する。

②太陽電池モジュールが設置される環境を考慮した、長期信頼性を評価するための試験方法を開発する。

3. 達成目標

【中間目標】

(1) 出力測定技術の開発

・新型の太陽電池等については、海外における主要研究機関による測定技術との整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度 $\pm 1.0\%$ (1σ) 以内を目指す。

・市販されている結晶Si系太陽電池モジュールの屋外での測定においては精度 $\pm 1.0\%$ (1σ) 以内を目指す。

(2) 発電量評価技術

・気候区による気象データやスペクトルデータ等を整理し、ユーザーにとって利便性の高い日射量データベースを構築する。

(3) 信頼性・寿命評価技術の開発

①PID現象など太陽電池モジュールの劣化メカニズムを解明するとともに、劣化予防のための具体的な低コスト対策技術を開発する。

②太陽電池モジュールの性能25年を予測できる加速試験方法（劣化率の予測精度 $\pm 5\%$ 、加速係数100倍以上等）を開発する。

【最終目標】

(1) 出力測定技術の開発

・新型の太陽電池等については、海外における主要研究機関による測定技術との整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度 $\pm 0.5\%$ (1σ) 以内を目指す。

・薄膜系を含む市販されている太陽電池モジュールの屋外での測定においては精度 $\pm 1.0\%$ (1σ) 以内を目指す。

(2) 発電量評価技術

・気候区による気象データやスペクトルデータ等を整理し、ユーザーにとって利便性の高い日射量データベースを構築する。

(3) 信頼性・寿命評価技術の開発

①低コストで劣化対策を施した太陽電池モジュールの有効性について実証する。

②太陽電池モジュールの性能30年を予測できる加速試験方法（劣化率の予測精度 $\pm 5\%$ 、加速係数100倍以上等）を開発する。

研究開発項目⑤「動向調査等」

1. 調査等の必要性

太陽光発電は、産業、市場、技術等、どの視点においても、国内外で急激に変化している。発電コスト低減を着実に進めるとともに、我が国産業の国際競争力を確保するためには、国内外の動向を把握し、プロジェクトマネジメントに反映していく必要がある。

2. 調査等の具体的内容

(1) 動向調査

開発戦略の発電コスト低減目標の達成に向け、必要な情報を収集、整理、分析する。

(2) IEA国際協力事業

諸外国の技術開発動向や政策動向等について、国際エネルギー機関(IEA)の太陽光発電システム研究協力実施協定(PVPS)に参画し、太陽光発電の普及・促進に向けた国際協力活動を通じた調査・分析を実施すると共に、諸外国の技術開発、政策及び市場動向を把握する。併せてこの活動を通じて日本の太陽光発電の国際競争力向上等を図る。

3. 達成目標

【中間目標】

(1) 動向調査

- ①年度毎に太陽電池モジュールの性能と発電コストの関係を客観的に分析するとともに、モジュールの産業競争力を評価する。
- ②発電コスト目標達成後の産業、市場動向について、シナリオ分析を行う。

(2) IEA国際協力事業

NEDOが参画するPVPSの活動に参加し、その内容を産業界に発信する。2018年度以降のPVPSへの新たな活動計画案を作成する。

【最終目標】

(1) 動向調査

発電コスト7円/kWh実現に向け、開発戦略の見直しの要否を検討するとともに、必要に応じ、見直し案を作成する。

(2) IEA国際協力事業

PVPSの動向及び展開を踏まえた、定期的な情報発信を行う。

研究開発項目⑥「高性能太陽電池製造技術実証」

1. 研究開発の必要性

ヘテロ接合バックコンタクト型シリコン太陽電池等の高効率太陽電池は我が国の太陽電池メーカーが世界最高効率を達成する等、技術開発レベルで世界をリードしている。しかしながら、製造工程が複雑なため、量産化と低コスト化には、まだ多くの課題がある。事業化段階においても競争力を有するためには、これらの技術開発と並行して早期に量産プロセスの課題を抽出、解決することが必要である。

2. 研究開発の具体的内容

ヘテロ接合バックコンタクト型太陽電池等、海外メーカーに対し圧倒的に高効率な太陽電池の低コストプロセス技術を構築するべく、生産プロセスを設計するとともに、裏面の接合形成プロセス、パターニングプロセスなど、量産において低コスト化につながる製造技術の実証を行う。

3. 達成目標

【最終目標】

高効率太陽電池を低製造コストで実用化が可能なプロセスの開発を行い、2025 年に発電コスト 7 円 /kWh を達成するための製造技術を試作レベルで実証する。

2.1.5 研究開発内容（実施機関毎）

研究開発テーマ、開発目標、研究内容は以下のとおり。

表. 2 研究開発項目①

「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の技術開発」

(1) 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

No.	開発期間	テーマ名	共同研究先	テーマ概要	目標	その他
1	2015 ～ 2019	結晶 Si 太陽電池をベースとした複合型太陽電池モジュールの開発	株式会社 カネカ	①集電極をセル裏面側に集約し光入射面側の遮光損を低減させること等で高出力化した高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶 Si 太陽電池の開発を開発する。 ②結晶 Si 太陽電池と非結晶 Si 太陽電池を組み合わせた複合型太陽電池を開発する。	【中間目標】 ①セル変換効率：26%、モジュール変換効率：2/3%、 発電コスト：17 円/kWh ②結晶 Si 太陽電池単セルより変換効率が向上することを確認する。 【最終目標】 ①モジュール変換効率：24%、発電コスト：14 円/kWh ②セル変換効率：30%、モジュール変換効率：27%	
2	2015 ～ 2019	高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発	シャープ 株式会社	「太陽光発電開発戦略」で掲げる発電コスト低減目標達成のため、高性能と高信頼性を両立したヘテロ接合型バックコンタクト太陽電池の開発をする。ヘテロ接合型バックコンタクト太陽電池の持つ高いセル変換効率を確保のうえ、上記コスト目標を達成可能となる製造技術を構築する。	【中間目標】 ・モジュール変換効率 21%とし、試作モジュールで確認する。 ・「太陽光発電開発戦略」2030 年発電コスト目標 7 円/kWh への定量的なシナリオを提示する。 【最終目標】 ・モジュール変換効率 22%とし、試作モジュールで確認する。	
3	2015 ～ 2018	基盤技術開発による先端複合技術セルのための低再結合電極の研究開発	株式会社 ナミック ス	モノジャンクションセル用の電極開発において SiNx を取り除かず電流経路を形成できる複合酸化物の探索を行い、電極と Si 基板界面で Passivated Contact 構造を作り出す。これにより再結合電流を小さく抑え開放電圧増加による高効率化が可能な電極を開発する。	【中間目標】 ・低表面濃度の n ⁺ 層に対する接触抵抗 2 mΩ cm ² 以下 (1×10 ²⁰ cm ⁻³) ・p ⁺ 層に対する接触抵抗 5 mΩ cm ² 以下 ・電極形成による再結合 (j _{0-met}) 500 fA cm ⁻² 以下 ※2018 年度で事業終了。終了時点で以下の最終目標を達成。 【最終目標】 ・低表面濃度の n ⁺ 層に対する接触抵抗 2 mΩ cm ² 以下 (6×10 ¹⁹ cm ⁻³) ・p ⁺ 層に対する接触抵抗 2 mΩ cm ² 以下 (6×10 ¹⁹ cm ⁻³) ・電極形成による再結合 (j _{0-met}) 400 fA cm ⁻² 以下	
4	2015 ～ 2017	赤外線 FZ 法による高品質低コストシリコン単結晶の開発	株式会社 クリスタルシステム	低い発電コスト実現のため、高い発電効率を有し且つ長期間の効率劣化を抑制可能な高品質単結晶を安価に製造する方法が必要となり、具体的には下記を赤外線 FZ 法で実現することを目指す。 (a) 高い発電効率を達成するため最適キャリア濃度（リン濃度）で均質組成の単結晶育成 (b) 性能劣化を誘発する酸化励起積層欠陥、COP、転位など	【最終目標】 ・インゴット製造経費 ¥1,700/kg ・直径 220mm ・長さ 300mm 以上 ・リンを均質添加した N 型単結晶であること ・ライフタイム 5msec 以上 ・結晶欠陥 大きさ 100nm 以上が 0.1 個/cm ³ 以下 ・転位がないこと（無転位） ・結晶抵抗面内分布 12% 以下	

				の欠陥の無い高品質単結晶の育成 (c) 安価な製造コストの実現	(100Ωcm, N型結晶において) ・酸素成分および炭素成分濃度 $2 \times 10^{16} \text{atoms/cm}^3$ 以下	
5	2015 ～ 2019	高発電効 率・低コスト 太陽電池 スライスプ ロセスの加 工技術構築	コマツ NTC株式 会社	1. 結晶系太陽電池の発電効率向上 スライスプロセスでの結晶欠陥 や不純物汚染等の、影響明確化 及び改善加工技術を構築する。 2. 結晶系太陽電池の製造コスト 低減 -1. ウエハ薄板化 -2. カーフロスの削減 による、製造コスト低減加工技 術を構築する。	【中間目標】 1. 試作セル発電効率 2/3%以上達成 2-1. ウエハ厚さ $75 \mu\text{m}$ 加工技術確立 2-2. カーフロス $75 \mu\text{m}$ 加工技術確立 【最終目標】 1. 試作セル発電効率 25%以上達成 2-1. ウエハ厚さ $50 \mu\text{m}$ 加工技術確立 2-2. カーフロス $60 \mu\text{m}$ 加工技術確立	
6	2015 ～ 2016	太陽電池用 原料品質の 最適化及び 結晶欠陥の 評価技術の 開発・制御	株式会 社トクヤマ	・原料ポリシリコン等に含まれる 金属不純物のライフタイム及び 変換効率に及ぼす影響を把握 する。 ・原料ポリシリコン等から結晶 インゴットに取り込まれる炭素 等の影響などにより生成するキ ラー欠陥の実体を解明し、キ ラー欠陥の分布や状態を把握可 能な最適な測定手法の開発を行 う。さらに、キラー欠陥の制御 方法を開発する。	【中間目標】 ・不純物および欠陥の影響把握お よび制御化を行う。 ・ライフタイム目標値は $1000 \mu\text{sec}$ とし、ライフタイム下限値は $300 \mu\text{sec}$ 以上とする。 ※2016 年度で事業終了のため、最 終目標を削除。なお、2016 年時点 で中間目標を達成。	
7	2015 ～ 2019	低コスト高 効率セル及 び高信頼性 モジュール の実用化技 術開発	京セラ株 式会社	①低コスト量産プロセスでの高 効率シリコン太陽電池の開発 (セル効率 22%、モジュール 効率 20%) 生産性が高く工程数の少ないシ ンプルな構造で高効率結晶シリ コン太陽電池の量産化を実現す る。 ②高質量産プロセスでの高信 頼性シリコン太陽電池の開発 (寿命 35 年) 各種加速試験の破壊モードと実 フィールドの破壊モードを紐付 けすることで劣化メカニズムを 把握し、劣化要因に対応したセ ル構造・材料、モジュール構 造・材料にすることで高信頼性 化を実現する。	【中間目標】 結晶 Si 太陽電池セルでセル変換 効率 21%を達成する結晶成長技 術、高効率セル化技術の開発およ び高信頼性モジュールの信頼性評 価技術を確立する。 【最終目標】 結晶 Si 太陽電池セルでセル変換 効率 22%、モジュール効率 20%を 達成する結晶成長技術、高効率セ ル化技術の開発および寿命 35 年以 上の結晶シリコン太陽電池セル、 モジュール化技術を確立する。	
8	2018 ～ 2019	低コスト・ 高信頼性・ 高効率 SuperSi Hetero- junction(SS HJ)太陽電池 の開発	株式会 社パナソ ニック	SHJ 太陽電池の高効率化、低コ スト化の要素技術として、①大 面積ウエハ対応技術、②高機能 テクスチャー技術、③高機能ヘ テロ接合技術、④高機能電極形 成技術の開発を実施する。①か ら④の各要素技術の組合せ最適 化により SBF(Super Bifacial)- SHJ と SBC(Super Back Contact)-SHJ の太陽電池セル で高出力を実証する。	【最終目標】 ・試作モジュールで、発電コスト 7 円/kWh 相当の性能を確認する。 ・発電コスト 7 円/kWh@2024 年を 実現するための開発計画を提示す る。 ※2019 年 9 月で事業終了のため、 最終目標は参考情報とする。	

(2) 高性能 CIS 太陽電池の開発

No.	開発期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	目標	その他
1	2015～2019	CIS 太陽電池モジュール高性能化技術の研究開発	ソーラーフロンティア株式会社	CIS 太陽電池のモジュール変換効率向上のために、光吸収層の高性能化、界面の高性能化、モジュール構造の高性能化を実施するとともに、モジュールコスト削減技術の開発を実施することで発電コスト目標を達成する。	【中間目標】 発電コスト：17 円/kWh 30cm 角サブモジュール変換効率：19% 【最終目標】 発電コスト：14 円/kWh 30cm 角サブモジュール変換効率：20%	

表. 3 研究開発項目②

「革新的新構造太陽電池の研究開発」
 (1) 革新的高効率太陽電池の研究開発
 超高効率・低コストIII-V化合物太陽電池モジュールの研究開発

No.	開発期間	項目名	委託先	テーマ概要	目標	その他
I. 低コストセル技術開発						
1	2015～2019	①-a 高効率III-V薄膜セル開発（光閉じ込め）	国立大学法人東京大学（岡田G）	1. III-V薄膜セル（非集光～高倍集光）におけるルミネッセンスカップリング（LC）効果を考慮した動作解析モデルの構築とセル最適設計手法を開発する。薄膜多接合セルの高効率化実証はシャープと連携して行う。 2. 薄膜化による光閉じ込め機構を、量子ドットの吸収増大に適用し、Epitaxial Lift-off（ELO）による薄膜量子ドットセルの開発と高効率化を実証する。	【中間目標】 薄膜多接合セルにおいて、内部発光や多重干渉効果などによるLC効率の増幅効果を実証し、多接合セルに対して有効な光閉じ込め構造を決定する。薄膜多接合セルや薄膜量子ドットセルの構造最適化により、変換効率30%（非集光）の実現可能性を示す。 【最終目標】 III-V薄膜セルにおいて、ELO等低コスト化が可能なプロセスで作製する技術を開発し、LC効果、また光閉じ込め効果を最大活用して、変換効率33%（非集光）を達成する。	
2	2015～2019	①-a 高効率III-V薄膜セル開発（光閉じ込め）	国立大学法人東京大学（中野・杉山G）	シャープと協力して、量子井戸を含むIII-V薄膜3接合セル、及びIII-V薄膜2接合+シリコンセルに適用可能な光閉じ込めメカニズムを検討する。具体的には、裏面光散乱体、表面光散乱構造およびエピタキシャル量子構造によるセル内光散乱体を検討する。シミュレーションおよびテストセルを用いた実験により各構造の光吸収増大効果を定量化し、薄膜多接合構造の最適設計を提案する。	【中間目標】 多接合セルに対して有効な光閉じ込め構造を開発し、量子井戸を含むIII-V薄膜3接合セルおよびIII-V薄膜2接合+シリコンセルの最適層構造を提案する。これにより、変換効率30%（非集光）の実現可能性を示す。 【最終目標】 シャープと連携して量子井戸を含むIII-V薄膜3接合セルおよびIII-V薄膜2接合+シリコンセルに光閉じ込め構造を実装し、光閉じ込め効果を有効に用いることで変換効率33%の達成に資する。	
3	2015～2019	①-a 高効率III-V薄膜セル開発（光閉じ込め）	シャープ株式会社	化合物太陽電池層の薄層化によって材料費および生産性向上による装置減価償却費を低減し、低コスト化を実現することを目的として実施する。具体的には、①逆積み3接合構造、および、②化合物2接合セルとSiセルとのスタックによる3接合構造において、裏面反射の活用、セル表面での散乱制御、ルミネッセンスカップリング（LC）の活用に関する光制御技術開発を行う。その上で、3接合構造における電流整合を考慮した最適化設計を実施する。	【中間目標】 化合物太陽電池層の膜厚を従来の1/4に低減した構造で、変換効率30%を達成する。 【最終目標】 化合物太陽電池層の膜厚を従来の1/4に低減した構造で、変換効率33%を達成する。	

4	2015 ～ 2018	①-b シリコン上Ⅲ-V多接合セル	シャープ株式会社	InGaP/GaAs 2接合セルなどの薄膜化合物2接合セルとSiセルとのスタックによる3接合構造の実現を目指す。化合物太陽電池層のSiセル表面への化合物セルの機械的接合技術の開発およびMOCVDを用いた、Si基板上へのⅢ-V層ヘテロ成長によるセル形成技術の開発の複数のアプローチを行う。	【中間目標】 Ⅲ-V族2接合セルとSiセルとの接合を行ったセルで、変換効率28%を達成する。 ※テーマ整理により2018年度で終了。最終目標を削除。
5	2015 ～ 2019	①-b シリコン上Ⅲ-Vスマートスタックセル	国立研究開発法人産業技術総合研究所	スマートスタック技術により、SiまたはCIGS等の低コストボトムセル上にⅢ-V族トップセルを接合するハイブリッド接合技術の研究を行う。現状接合条件の最適化等、スマートスタック技術を高度化し、最終的に30%以上の変換効率を目標に、研究開発を行う。大面積セルを接合するための実装技術を開発するとともに、発電寿命30年以上を有するスマートスタック高信頼性技術の確立を行う。	【中間目標】 ・GaAs/Si系, GaAs/CIGS系多接合で変換効率28%。 ・システム価格220円/Wを見込むスタック技術の達成手段の明確化。 ・現状1cm 角程度のセル面積を4インチ相当程度に大面積化するための実装技術の明確化。 ・素子寿命30年を目指した高信頼性化技術指針の明確化 【最終目標】 ・GaAs/Si系, GaAs/CIGS系多接合で変換効率30%。 ・システム価格125円/W実現のためのスタック技術確立の指針獲得。 ・大面積化セルの実装技術の確立。 ・素子寿命30年以上の高信頼性化技術指針の確立
6	2018 ～ 2019	①-b シリコン上Ⅲ-Vウエハ接合セル	大阪市立大学(再委託)	表面活性化接合法によりⅢ-Vセル構造とSiボトムセル構造からなるⅢ-V/Si多接合セルを作製し、高効率セル特性を実証する。	【最終目標】 ウエハ接合によるシリコン上Ⅲ-V多接合セルにおいて、非集光下でセル効率>33%を実現する。低倍集光PVモジュール動作を実現する。

II. 低コスト化プロセス技術開発					
1	2015 ～ 2019	②-a 低コスト実装プロセス：エピ層移載	国立大学法人東京大学(岡田G)	<p>(1) ELOによる薄膜セル剥離技術、及び化学エッチングと再成長前の基板の表面クリーニング技術を組み合わせ、10回以上再利用が可能な基板再生技術を開発する。ELO薄膜裏面、また剥離後の基板表面の検査装置、及びELOプロセスの最適化と装置開発は、シャープ、タカノ（再委託）と連携して行う。また項目①-a 高効率Ⅲ-V薄膜セル開発（光閉じ込め）、さらに産総研が行うスマートスタック多接合セルの開発に本技術を適用する。</p> <p>(2) 基板再利用における再成長表面の清浄化過程として、原子状水素クリーニング法を開発する。表面・ヘテロ界面の制御と高品質化に向けて、本グループが独自に開発を行ってきた原子状水素援用分子線エピタキシー(水素MBE)技術を再成長基板表面の清浄化に適用する。</p>	<p>【中間目標】 4インチ基板サイズのエピ薄膜を再現性よく剥離するためのELOプロセスの最適化を行う。剥離速度20 mm/hを達成する高速化基礎技術を開発、基板再利用に向けたELO時の基板表面保護層、ELO後の基板表面清浄化手法の最適化を行い、薄膜セル作製に適用して作製歩留まり70%を達成する。また、発電コスト7円/kWhを達成しうる量産装置の仕様作成を行う。</p> <p>【最終目標】 ELOプロセスの最適化を進め、剥離速度20 mm/h 以上で4インチウエハサイズのELOを可能とする表面清浄化技術の最適化を行い、基板再生コストを1/2以下に低減する。10回以上の再利用基板上へのⅢ-V化合物セル作製を歩留まり90%以上で達成する。</p>
2	2015 ～ 2019	②-a 低コスト実装プロセス：エピ層移載	タカノ株式会社(再委託)	<p>(1) エッチング槽でエピ薄膜を巻き取りながらELOを効率良く行える自動機を開発する。基板の再利用を可能にする表面状態の情報獲得、ELO時間の短縮等の最適化を実現する自動装置の開発を行う。</p> <p>(2) 基板表面の全面観察装置の開発を行う。基板の再利用を可能にするために、表面状態と再利用後の結晶状態との因果関係性を把握するため、全面観察装置の開発を行う。</p>	<p>【中間目標】 ・4インチ基板サイズのエピ薄膜を再現性よく剥離するためのELOプロセスの開発と装置化に向けた検討を行う。 ・基板再利用の為のELO後ウエハ表面の全面観察の基礎技術の開発と装置化に向けた検討を行う。</p> <p>【最終目標】 ・4インチウエハサイズのELO自動化装置の開発 ・4インチウエハ表面の高速観察(1時間以内)可能な装置の開発</p>
3	2015 ～ 2019	②-a 低コスト実装プロセス：エピ層移載・ウエハ再利用・非真空プロセス	シャープ株式会社	<p>(1) 基板コスト低減のために、エピタキシャルリフトオフ(ELO)プロセスにより化合物太陽電池層をGaAs基板から分離し、基板再生プロセスを経て、GaAs基板上に再度太陽電池層を成長させる一連のプロセスを確立する。</p> <p>(2) ELOプロセス以外の基板剥離技術の開発にも取り組み、基板コストの低減を目指す。</p> <p>(3) 基板コスト以外のセル製造コストを低減させるプロセス技術開発にも取り組み、成果を組み合わせることで、発電コスト低減の目標達成を目指す。</p>	<p>【中間目標】 ELOプロセスを経た2接合太陽電池層をセル化し、変換効率25%以上を達成すると同時に、分離した基板を少なくとも1回再成長に利用できるプロセスを開発する。</p> <p>【最終目標】 基板の再利用可能回数を10回まで向上させる。また、新規プロセスを経たセルの試作・評価を行い、発電コスト目標7円/kWhの達成に寄与し得るかの見極めを行う。</p>

4	2018 ～ 2019	②-a 低コスト実装プロセス：エピ層移載	学校法人トヨタ学園豊田工業大学	GaAs基板上に層状化合物をバッファ層で挿入してⅢ-Vセルをエピ成長し、層状化合物の劈開性を利用してⅢ-Vセル層を基板から高速リフトオフし、安価な支持基板に移載する技術を研究開発する。本手法はHF等の化学エッチング不要で、高速なリフトオフが可能であり、GaAs基板は繰り返し再利用できるため、従来のリフトオフ法と比較して大幅な低コスト化が期待できる。	【最終目標】 非HFプロセスでの3インチウエハサイズの高速リフトオフを可能とし、非研磨プロセスで10回以上の再利用基板上へのⅢ-V化合物セル作製を達成する。
5	2015 ～ 2019	②-b 低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術：MOCVD	大陽日酸株式会社	多接合Ⅲ-V族化合物半導体セルに用いるInGaP、GaAs等のMOCVDプロセスにおいて、原料利用効率とスループットを向上させる装置技術開発を行い、成長条件最適化指針を獲得する。 本プロジェクトで開発するHVPEの進捗も踏まえて、MOCVDとHVPEのハイブリッド装置により、低コストⅢ-V化合物半導体太陽電池を形成する新規プロセスを構築することも検討する。	【中間目標】 ・成長速度40 μ m/h (GaAs)、10 μ m/h (InGaP)を得る。また、III族利用効率30%以上を達成する。 ・in situクリーニングや搬送時間の削減による高スループット化の検証と問題点抽出を行う。 【最終目標】 ・MOCVD、HVPEにより成長速度100 μ m/h、効率20% (GaAs)、成長速度20 μ m/h、効率12% (InGaP)を得る。 ・III族利用効率40%以上を達成する。 ・in situクリーニングや昇降温・搬送時間の削減による高スループット化手法を構築する。 ・MOCVDとHVPEの長所を融合したハイブリッド装置やその大口径化の有効性を検証する。
6	2015 ～ 2019	②-b 低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術：MOCVD	国立大学法人東京大学(中野・杉山G)	大陽日酸が開発する高速MOCVD装置および成長条件を用いて、GaAsおよびInGaP結晶層を成長し、キャリア移動度・寿命などの特性と成長条件との相関を明確化、高速成長条件最適化にフィードバックする。さらに、得られた条件をもとにGaAsおよびInGaP単セルを作製しつつ装置形状や製膜条件を改良し、多接合セルの低コスト・高効率化に十分な高速MOCVD条件を構築する	【中間目標】 大陽日酸と共同で、高速製膜条件を用いて単セル効率20%(GaAs 40 μ m/h)、12%(InGaP 10 μ m/h)を得る。 【最終目標】 大陽日酸と共同で、高速製膜(GaAs 100 μ m/h、InP 20 μ m/h)を用いて単セル効率20%(GaAs 40 μ m/h)、12%(InGaP 20 μ m/h)を得る。
7	2015 ～ 2019	②-b 低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術：HVPE	大陽日酸株式会社	超高速・低コストエピタキシャル結晶成長法であるハイドライド気相成長法(HVPE法)により、Ⅲ-V族化合物半導体太陽電池作成技術の研究開発を行う。具体的には、GaAsセルの成膜速度を現状の6倍以上、製膜コストを1/10以下に削減する革新的製膜技術の開発を目指す。 装置の設計は東京農工大と連携して行う。開発装置の運用、評価は産総研で行う。	【中間目標】 成長速度40 μ m/h (GaAs)、10 μ m/h (InGaP)を得るとともに、AlAs製膜における問題点を抽出する。 【最終目標】 成長速度100 μ m/h (GaAs)、20 μ m/h (InGaP)を得るとともに、ELOによる基板リサイクル可能なAlAsを製膜する。MOCVDとHVPEの長所を融合したハイブリッド装置やその大口径化の有効性を検証する。

8	2015 ～ 2019	②-b 低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術：HVPE	国立研究開発法人産業技術総合研究所	超高速・低コストエピタキシャル結晶成長法であるハイドライド気相成長法(HVPE法)により、Ⅲ-V族化合物半導体太陽電池作製技術の研究開発を行う。GaAsセルの製膜速度を現状の6倍以上、成膜コストを1/10以下に削減する革新的成膜技術の開発を目指す。	<p>【中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> 超高速 GaAs、InGaP 成膜技術を開発し、単セル効率15%(GaAs)、8%(InGaP)を達成する。 ELO 等に用いるAlAs をHVPEにより得るための問題点を抽出する。トンネル接合形成によるInGaP/GaAs タンデム太陽電池を試作・評価し、課題を抽出する。 <p>【最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> 超高速 GaAs、InGaP 成膜技術を開発し、単セル効率24%(GaAs), 12%(InGaP)を達成する。 AlAs 層の成長により、ELO を実証する。 InGaP/GaAs タンデム太陽電池2.4V以上の開放電圧を達成する。
9	2015 ～ 2019	②-b 低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術：HVPE	国立大学法人東京農工大学	産総研、大陽日酸と連携し、HVPEの設計に肝要な熱力学計算及び流体計算を担当する。具体的には以下を行う <ul style="list-style-type: none"> GaAsおよびInGaP三元混晶HVPE成長の装置設計支援 GaAsおよびInGaP三元混晶HVPE成長の成長支援 AlAs HVPE成長支援 	<p>【中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> GaAsおよびInGaPのHVPE成長の原料生成メカニズムおよびH-VPE成長のメカニズムを明らかにする。 熱力学解析および流体解析により、GaAs：30 μm/h以上、InGaP：10 μm/h以上の超高速成長技術の成長条件を確立する。 AlAs HVPE実現のための原料生成および結晶成長メカニズムを明らかにするとともに、熱力学解析により、原料部および析出部の反応メカニズムを明らかにする。 <p>【最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> 量産装置により、GaAs：30 μm/h以上、InGaP：10 μm/h以上の超高速成長技術の成長条件を確立する。 AlAs HVPEの量産装置で実現する。
Ⅲ. 低コストモジュール開発					
1	2015 ～ 2019	③-a 低コストモジュール開発：非集光モジュール	シャープ株式会社	<p>I. 低コストセル技術開発及び</p> <p>II. 低コスト化プロセス技術開発</p> <p>で開発する低コスト化合物太陽電池セル技術を用い、将来の発電コスト目標(7円/kWh @2030年)達成に寄与し得るモジュール技術の開発を目的とする。具体的には、1.5～3倍程度の低い倍率の集光を行うことで化合物太陽電池の使用量を一定量削減し、モジュールの低コスト化を図る。</p>	<p>【中間目標】</p> <p>集光倍率1.5～3倍程度の低倍集光モジュールにおいて、許容入射角(光学効率が、垂直入射時比90%となる入射角)15°以上を達成する。</p> <p>【最終目標】</p> <p>前記開発テーマ「I. 低コストセル技術開発」および「II. 低コスト化プロセス技術開発」の成果を利用して作製したセルを用い、モジュール変換効率30%以上を達成する。</p>

2	2015 ～ 2019	③-a 低コストモジュール開発：無追尾モジュール	学校法人トヨタ学園豊田工業大学	高価な化合物太陽電池の使用量を少しでも削減することでモジュールの低コスト化を図ることができる。しかしながら、高精度の追尾架台を前提としたモジュールでは総合的なコストダウンを図ることができない。宮崎大学と連携して追尾無し、あるいは低精度追尾でも安定した動作が可能なモジュールの開発を行う。具体的には、追尾無しでも動作可能なモジュールと、低精度および10分ごとの間欠追尾でも安定な発電を行うことが可能なモジュールの開発を行う。	【中間目標】 非集光下で効率30%のセルを用い、モジュール効率27%を達成する。 【最終目標】 非集光下での効率33%セルを使用して、モジュール効率30%を達成する。
3	2015 ～ 2019	③-a 低コストモジュール開発：集光モジュール	パナソニック株式会社	目標とする太陽電池特性と信頼性を有するモジュールを製作するための基本技術を確立する。このために、モジュールの基本構造の設計、発電素子の実装と配線への電気接続プロセスの開発、プラスチック基板上への配線形成プロセスの開発、50～300～700倍集光を可能にする低コストレンズ設計・基本作製工法の開発を行う。 また、上記基本技術を元に、目標のコストでモジュールを製造するための技術を確立する。	【中間目標】 以下の性能を有するモジュールを開発する。 ・大きさ：33cm□ ・変換効率：>30% ・集光倍率：～500倍 ・システムコスト125円/Wを実現する構造と達成手段を明確化 【最終目標】 以下の性能を有するパネルを開発する。 ・大きさ：99cm□ ・変換効率：38% (33cm □ モジュール) ・システムコスト：≤190円/W ・PICモジュール製造コスト：≤80円/W ・発電コスト：≤14円/kWh
4	2015 ～ 2019	③-a 低コストモジュール開発：集光モジュール	学校法人トヨタ学園豊田工業大学	高価な化合物太陽電池の使用量を少しでも削減することでモジュールの低コスト化を図ることができる。しかしながら、高精度の追尾架台を前提としたモジュールでは総合的なコストダウンを図ることができない。低精度および10分ごとの間欠追尾でも安定な発電を行うことが可能なモジュールの開発を行う	【中間目標】 非集光下で効率30%のセルを用い、モジュール効率27%を達成する。 【最終目標】 非集光下で効率33%のセルを用い、モジュール効率30%を達成する。

5	2015 ～ 2019	③-a 低コストモジュール開発：モジュール実装技術	国立大学 法人宮崎 大学	低コストでモジュール効率を向上させる手法について開発する。太陽電池モジュールの出力は汚れの影響により低下する。これまでの基礎研究により、簡便な超親水性シリカベースコートにより、ガラス表面の汚れが劇的に抑制できることがわかった。また、コートに反射防止膜の機能を持たせることも可能となる。汚れがセルへの入射光スペクトルに与える影響等も詳細に調査し、多接合セルを用いたモジュールに本技術を応用することにより、長期にわたり高出力を維持するモジュールの開発に取り組む。	【中間目標】 モジュール表面コート技術の開発により、1.5～3倍程度の集光が可能な低倍集光モジュールの開発において、許容角15°で90%以上の出力を達成することに寄与する。 【最終目標】 モジュール表面コート技術の開発により、非集光下での効率33%セルを使用して、モジュール効率30%を達成する。
6	2015 ～ 2019	③-b 低コストモジュール発電量試算、屋外評価	シャープ 株式会社	前項③-a で開発したモジュールの屋外評価を、宮崎大学と連携して実施する。宮崎大学の評価技術およびテスト環境を活用し、当事業者が開発したモジュールを、宮崎大学が評価を実施し、評価データ、解析結果を共有する形で進められる。	【中間目標】 スペクトルや太陽光入射角度がモジュール出力におよぼす影響について実測・解析する。また発電コスト試算に向け、実測データを元に設備稼働率の算出を行う。加えて、化合物太陽電池セルの試作を実施し、その特性および歩留等の結果に基づいて、量産性の検証およびコスト低減効果の検討を行う。 【最終目標】 低コストモジュールのフィールドテストを実施し、発電量や設備稼働率の実測結果から、発電コスト7円/kWhの達成に向けた見通しを得る。
7	2015 ～ 2019	③-b 低コストモジュール発電量試算、屋外評価	国立大学 法人宮崎 大学	低倍集光モジュールを効果的に動作させ、かつ飛躍的な低コスト化を実現するためには、安価な追尾機構が必要となる。モジュール出力の太陽光入射角度依存性を測定し、どこまでラフな追尾でも出力を維持することができるかを明らかにする。上記の知見を活かし、低コストモジュールの発電量や設備利用率の試算を実施するとともに、高効率モジュールの開発に寄与する。	【中間目標】 スペクトルや太陽光入射角度がモジュール出力におよぼす影響について実測・解析する。国内の実環境における環境要因において年間を通じて最も効率よく出力できるセルやモジュールの設計を行う。 【最終目標】 低コストモジュールの発電量や設備利用率の試算を実施し、7円/kWhの検証に必要なデータを取得する。

8	2018 ～ 2019	③-b 低コストモジュール発電量試算、屋外評価	学校法人 トヨタ学 園豊田工 業大学	(1)気象条件や大気条件から発電量を予測する手法を開発し、宮崎大学の屋外計測データから検証を行う。 (2)超高効率モジュールでの夏期での発電量低下の原因を解明し、年間発電量の向上を図る。 (3)車載面、自動車車体側面（移動、かつ、周辺構築物の日陰の影響を受ける）向けの発電モデルを開発し、宮崎大学屋外計測データから検証を行う。	【最終目標】 全国各地での年間発電量を算出することにより、発電コストを求める。	
IV. 超高効率セル開発						
1	2015 ～ 2019	④-a 多接合：希釈窒化物-MBE	国立大学 法人東京 大学（岡 田G）	(1)水素MBE成長により、Geボトムセル上への高品質GaInNAs:Sbセルの再成長条件の最適化を行う。 (2)エピタキシャル成長、ウエハ接合、メカニカルスタック技術により InGaP/GaAs/GaInNAs:Sb/Ge 4接合セルを開発する。 (3)窒素δドープ超格子構造を利用した1eV帯GaInNAs混晶の開発は埼玉大と協力して行う。 (4)高倍集光時のルミネッセンスカップリングの影響を考慮した素子設計はシャープと連携して行う。 (5)4接合セル化は、東大グループ、産総研、シャープと連携して進める。	【中間目標】 水素MBE法によるGeボトムセル上へのGaInNAs:Sbセルの再成長条件の最適化、及び2接合セルの作製評価を行う。革新的太陽光発電技術研究開発プロジェクトで開発したGaInNAs:Sb材料を適用して、上部サブセルのフィルタ下で短絡電流密度12mA/cm ² 以上を達成する。 【最終目標】 GaInNAs:Sb/Ge 2接合セル上へのInGaP/GaAsトップ2接合セルのエピタキシャル積層技術、及びメカニカルスタック技術を確立し、4接合セルにより変換効率50%を実現する。	
2	2015 ～ 2019	④-a 多接合：希釈窒化物-MBE	国立大学 法人埼玉 大学（再 委託）	エピタキシャル成長中の原料供給シーケンス制御による、希釈窒化物半導体の高品質成長技術を東大と連携して開発する。GaAs中への窒素δドープ超格子の形成およびInとの混晶化により、多接合セルのサブセル材料として適用可能な高品質1 eV帯混晶膜を作製する。	【中間目標】 N面密度と超格子周期、InおよびGa組成によるバンドギャップエネルギーの制御手法を確立し、Geに格子整合可能な1eV帯混晶薄膜を作製する。上記の条件の下、1～2 ns以上の少数キャリア寿命と400 cm ² /Vs以上の電子移動度を有する混晶薄膜の作製を目指す。 【最終目標】 GaAs基板上GaInNAsヘテロ接合セルの構造設計及び試作を行い、GaAsフィルタ下で短絡電流密度14 mA/cm ² を得る。	

3	2015 ～ 2019	④ -a 多接 合 : InGaP トップセル	シャープ 株式会社	変換効率50%超(集光時)の実現に貢献するために、前プロジェクトで開発した逆積み3接合型太陽電池の変換効率を37.9%(非集光)から更に向上させることを目的としている。具体的には、ルミネッセンスカップリングを活用した逆積み3接合セルを開発する。また別のアプローチとして、InGaPトップセルの特性改善に取り組む。具体的には、セル開放電圧の向上を目指した裏面ヘテロ接合(RHJ)構造の検討を行う。	【中間目標】 逆積み3接合型太陽電池において、ルミネッセンスカップリングの活用もしくはInGaPトップセルにおける裏面ヘテロ接合構造の採用によって高効率化を進め、サブセルの変換効率を前プロジェクトで達成した37.9%セルとの比較での向上を目指す。 【最終目標】 他機関と共同で4接合もしくは5接合型太陽電池を開発し、50%(集光時)の変換効率を目指す。
4	2015 ～ 2016	④ -a 多接 合 : 希釈窒化 物-CBE	学校法人 トヨタ学 園豊田工 業大学	ケミカル・ビーム・エピタキシー(CBE)法を用いた高品質なGaInNAs材料を開発することにより、GaInNAs材料をサブセルに用いた3接合、4接合セルの研究開発を行う。	テーマ整理により2016年度で終了
5	2015 ～ 2016	④ -a 多接 合 : 希釈窒化 物-CBE	国立大学 法人九州 大学(再委 託)	ケミカル・ビーム・エピタキシー(CBE)法を用いた高品質なGaInNAs材料を開発することにより、GaInNAs材料をサブセルに用いた3接合、4接合セルの研究開発を行う。	テーマ整理により2016年度で終了。
6	2015 ～ 2019	④ -a 多接 合 : 量子構造	国立大学 法人東京 大学(中 野・杉山 G)	(1)第3セルに有効バンドギャップ1.15 eVの超格子を挿入し、電流整合のとれたエピタキシャル4接合を作製することで、集光下効率50%の実現を目指す。 (2)超格子挿入によるサブセルにおける発光再結合効率向上効果を定量化し、複数のサブセルにおいて超格子を活用したルミネッセンスカップリングにより、太陽光のスペクトル変動に影響されにくい3接合・4接合セルの設計手法を構築する。	【中間目標】 (1)4接合セルの第3セルに用いて集光下効率50%超を達成するための1.15 eVバンドギャップサブセルに関して、波状構造超格子の構造制御手法を確立する。それを用いた単セルにおいて、電流整合4接合セルの要求値(1.49 eVのフィルタ下で短絡電流9.5 mA/cm ² /sun、開放電圧0.75 eV、曲線因子77%)を達成する。 (2)量子井戸セルを挿入した多接合セルにおけるルミネッセンスカップリングの効果を定量化し、4接合セルの最適設計に資する。さらに、超格子挿入4接合セルの実装に必要な低抵抗トンネル接合などの要素技術を確立する。 【最終目標】 超格子を挿入した4接合セルにより、集光下効率50%を達成する。
7	2015 ～ 2019	④ -a 多接 合 : ウエハ接 合	東京大学 (中野・ 杉山G)	GaAs基板上に成長した2接合セルと、InP基板上に成長した2接合セルをウエハ接合技術によって接合させることで効率50%の4接合太陽電池セル実現を目指す。このために、まずInP上のInGaAsP/GaAsP 2接合セル作製技術を確立する一方、GaAsとInPの接合技術(主に表面活性化接合)を開発する。4接合セルの作製・実証はシャープと連携して行う。	【中間目標】 GaAs系2接合とウエハ接合による4接合セルを形成するためのInP系2接合セルを作製し、GaAsフィルタ下でGaAs系2接合と電流整合条件を確認する。また、GaAs系2接合とInP系2接合の接合条件を確立する。 【最終目標】 GaAs系接合とInP系2接合から成る4接合セルにより、非集光時変換効率42%、集光下変換効率50%を目指す。

8	2015 ～ 2019	④ -a 多接合：多接合動作解析	国立大学 法人宮崎 大学	多重量子井戸 (MQW) を光吸収層に挿入した太陽電池構造に外部電場を印加し、バンド傾斜が各種キャリア緩和過程に与える影響を明らかにすることでの最適構造に関する知見を得る。また、集光動作時の高温測定を行い、各種キャリア緩和過程に与えるセル温度の影響を明確にすることで、高いキャリア回収効率をもつ多接合セル構造 (バンドラインナップ) の提案を行う。	【中間目標】 太陽電池光吸収層に多重量子井戸や超格子あるいは量子ドット構造を挿入したエピタキシャル多接合セルにおけるキャリア回収過程について、内部電界およびセル温度の影響を明確にする。 【最終目標】 最適なキャリア回収効率を示す各接合バンドラインナップの設計により、集光下効率50%以上の多接合セル実現に寄与する。
9	2015 ～ 2017	④-a多接合：窒化物	国立大学 法人名古屋 大学	窒化物半導体を用いて、半極性面および極性面における各In組成におけるPVセル効率のシミュレーションと(1-101)面GaNの決勝成長を行った。半極性面において、十分な性能のPVセルの作成が可能であることを示したが、実際の結晶成長においては、ヒロックからの電流リークが多く、エピ法の改善が必要である。2016年度も引き続き(1-101)面での結晶成長の最適化を図る。	【中間目標】 InGaN吸収層を利用したPVのPCシミュレーションに基づき、c面、-c面、(1-101)面に成長する厚膜InGaNを用いたセルの最適構造設計を行う。 1) InGaN結晶成長を行い、各成長面におけるIn組成40%のInGaN膜成長を実現する。 2) シミュレーションにおいて30%以上の変換効率を達成し、結晶成長およびデバイス構造の最適化との比較を行う。 ※テーマ整理により2017年度で終了。最終目標を削除。
10	2015 ～ 2017	④-a多接合：窒化物	学校法人 名城大学	窒化物半導体材料とGaAs系材料の接合技術を検討した。ITOを中間層として用いる方法および直接接合法の比較を行い、プロセスの容易さなどから直接接合法によりInGaN/GaInP/GaAs/Ge 4接合太陽電池を試作し、開放電圧の上昇などを確認した。2016年度は同手法の最適化を進めInGaNトップセルの有用性を示すことを目的に実験を進める予定である。	【中間目標】 窒化物半導体太陽電池と3接合太陽電池の接合技術を確立し、4接合セルを作製する技術を確立することし、窒化物半導体材料がトップセル材料として有用であることを実証する。 ※テーマ整理により2017年度で終了。最終目標を削除。
11	2015 ～ 2017	④-a多接合：窒化物	国立大学 法人東京 大学 (藤岡 G)	InGaN トップセルと GaAs ベース3接合セルを4接合セル化するための取り組みを行う。本項目では、低温PSD法を用いて無歪・低欠陥のInGaN結晶成長を行い、高品位InGaN基板を供給するための技術を開発する。	【中間目標】 低温PSD法によってIn組成40%、膜厚数ミクロン以上のInGaN厚膜を実現する。 ※テーマ整理により2017年度で終了。最終目標を削除。

12	2015 ～ 2019	④ -b 量子ドット・マルチバンド	国立大学法人東京大学(岡田G)	タイプII型量子ドット及び量子ドット超格子における中間バンド長寿命化による2段階光吸収の増大と、バリア構造による熱脱出の抑制とキャリア収集効率改善を目指した構造の検討を行い、中間バンド型動作による室温高効率化の達成に向けた指針を解明する。	<p>【中間目標】 (1) 面内密度10^{12}cm⁻²前後の超高密度InAs量子ドットのサイズ微小化と高均一化(2) InAs/GaAsSbタイプII超格子を用いた中間バンドの長寿命化(3) 2段階吸収による電流増大を改善するためのAlGaAs及びInGaPなどの高エネルギーギャップ材料を用いた量子ドット埋め込み構造、を統合的に実装した量子ドットセル、及び低電流・高電圧型低倍集光量子ドットセルで効率30%を達成する。</p> <p>【最終目標】 低倍集光量子ドットセルで効率45%を達成する。</p>
13	2015 ～ 2019	④ -b 量子ドット・マルチバンド	国立大学法人東京大学(久保・立間G)	(1) 量子ドットボトムセルの高効率化およびナノ粒子内蔵セル作製 (2) ナノ粒子の設計・合成・評価および増強効果の評価 (3) 量子ドット多接合セル開発およびナノ粒子内蔵セル作製	<p>【中間目標】 (1) PbS/ZnO-NWセルの近赤外領域(800nm以上)で、PCE=4%と$J_{sc}=14\text{mA}/\text{cm}^2$を達成。 (2) PbS-QDの吸収領域を0.65 eVに拡張し、第一励起子吸収に対応するEQEで20%を達成。 (3) 金属ナノ粒子のプラズモン電場共鳴を1400nmで達成し、PbS/ZnO-NWセルに組込、特性を評価。</p> <p>【最終目標】 プラズモン金属ナノ粒子層を組込んだPbS/ZnO-NW太陽電池の近赤外領域(900nm以上)において、PCE=4%以上を達成すると共に、接合層を実装したタンデムセルを実現</p>
14	2015 ～ 2019	④ -b 量子ドット・マルチバンド	国立研究開発法人産業技術総合研究所	ワイドギャップホストを用いたバンド構造の最適化、タイプII量子ドット構造によるマルチバンドの長寿命化を両立したセルを作製し、マルチバンドセルの超高効率化を実現する。	<p>【中間目標】 量子ドット構造による低倍集光セルでの変換効率30%を達成する。</p> <p>【最終目標】 量子ドット構造による低倍集光セルでの変換効率45%を達成する。</p>

15	2015 ～ 2019	④ -b 量子ドット・マルチバンド	国立大学法人電気通信大学	面内密度 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ の量子ドット成長技術の確立および熱処理による結晶性改善効果の確認。Type-II型面内超高密度量子ドット層における励起子状態、ドット間の電子輸送、光吸収・再結合遷移過程の解明。GaAsスペーサ層の導入による長寿命化の達成。	<p>【中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ GaAs (001) 基板上への InAs (Sb) 量子ドットの自己形成において、InAs量子ドットの面内密度 $1 \sim 3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ を達成する。 ・ 5～10層の多重積層化による総密度 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ の超高密度化を達成する。 ・ 面内高密度 InAs 量子ドットの GaAsSb層による埋め込み成長を行い、type-II型のバンド構造を導入することで、キャリアの長寿命化（蛍光寿命10 ns以上）を目指す。 ・ 上記の研究開発の成果を取り込んだ量子ドット太陽電池の試作を行い、低集光（数10倍程度）下におけるセルの基本特性を調べ、変換効率の向上の指針を得る。 <p>【最終目標】</p> <p>面内高密度 InAs (Sb) 量子ドットの積層成長による超高密度化および type-II バンド構造によるキャリアの長寿命化を達成し、集光時の変換効率45%を目指す。</p>	
16	2015 ～ 2019	④ -b 量子ドット・マルチバンド	国立大学法人神戸大学	キャリアの長寿命化と高いキャリア引出効率を実現するため、中間バンドを介したキャリアダイナミクスを超精密に評価する技術を開発し、キャリア寿命制御技術を構築する。これによって、中間バンドを介した2段階光励起プロセスを最大化し、量子ドット・マルチバンドセルの効率向上につなげる。	<p>【中間目標】</p> <p>高効率2段階光吸収を明らかにするとともに、量子ドットによるキャリアの再捕獲・脱出過程のダイナミクスを明らかにすることによって、太陽電池動作下でのキャリア取出し効率を詳細に調べ上げ、室温におけるキャリア寿命として10nsを超える長寿命化を実現し、キャリア取出し効率は50%以上まで引き上げる。</p> <p>【最終目標】</p> <p>中間準位キャリアの長寿命化の集光倍率依存性を解明するとともに、ワイドホストヘテロ構造の最適化によるキャリア分離の最適化の検討をより一層進めることによって、室温におけるキャリア寿命として100nsを超える長寿命化を実現し、キャリア取出し効率は80%以上まで引き上げる。以上により、量子ドット・マルチバンドセルの効率45%に貢献する。</p>	

(2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

ペロブスカイト系革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

No.	開発期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	目標	その他
塗布製造技術の開発						
1	2015 ～ 2019	塗布製造技術の開発	パナソニック株式会社	高効率化技術の研究開発として新規材料の探索、物性評価を進め、高効率化及びその支配因子の特定を図り、変換効率 20%の実証を図る。また、高耐久化技術の研究開発として薄膜太陽電池や有機 EL 封止技術等を活用	<p>【中間目標】</p> <p>0.5 cm² 程度の小面積太陽電池において変換効率 20%を実現する。また、同じく 0.5 cm² 程度の封止した小面積太陽電池において耐久性 (85°C, 85%, 1000hr での相対効率維持率 95%以上) を実証する。さら</p>	

				し、効率的材料探索により変換効率 20%の材料系での劣化要因抽出、耐久性向上方策を見出し、低製造コスト実現の要素技術開発を行う。また、モジュール化技術の研究開発として、直列構造化による効率低下抑制と直列化工法による効率低下抑制のための要素技術開発を行う。	に、5 直列接続の集積モジュールで開放電圧 5V (セル単位で 1V) 以上を達成する。 【最終目標】 実験室レベル (100 cm ² 程度) でのモジュール効率 20%を実現する集積化モジュール構造を確定するとともに、製造コスト 15 円/W 達成の指針を示す。
超軽量太陽電池モジュール技術の開発					
1	2015 ～ 2019	超軽量太陽電池用塗布印刷／モジュール化技術の開発	株式会社 東芝	2030年での7円/kWhを目指し、ペロブスカイト太陽電池モジュールの開発を行う。印刷技術を用いて、高効率化技術の開発を行う。超軽量モジュールはロールトゥロールプロセスによる製造コスト低減が可能で、その軽量性から設置コストの削減も見込める。	【中間目標】 ・5cm角程度の超軽量モジュールの変換効率10%を達成する。 【最終目標】 30cm角程度の超軽量モジュールで変換効率15%、あるいは15cm角程度の超軽量モジュールで変換効率17%を達成する。
2	2015 ～ 2019	超軽量太陽電池の耐久性向上技術の開発	株式会社 東芝	2030年での7円/kWhを目指し、超軽量ペロブスカイト太陽電池の耐久性向上の開発を行う。	【中間目標】 ・JIS規格C8938準拠の耐久性試験の耐熱試験、光照射試験で、変換効率12%の1cm角程度の超軽量セルの相対低下率10%以下を達成する。 【最終目標】 ・JIS規格C8938準拠の耐久性試験の耐熱試験、光照射試験で、変換効率17%の5cm角程度の超軽量モジュールの相対低下率10%以下を達成する。
低コストR2R太陽電池製造技術の開発					
1	2015 ～ 2019	超軽量太陽電池の耐久性の向上	積水化学工業株式会社	当社が構築してきた封止・バリア技術をベースに、ダイレクトバリア技術をペロブスカイト太陽電池へ適用し、屋外耐久10年以上を目指す。	【中間目標】 ・JIS規格C8938準拠の耐久性試験5項目について、変換効率10%の1cm角程度の超軽量セルの相対低下率10%以下を達成する。 【最終目標】 ・JIS規格C8938準拠の耐久性試験5項目について、変換効率17%の5cm角程度の超軽量モジュールの相対低下率10%以下を達成する。
2	2015 ～ 2019	R2Rプロセス・材料技術の開発	積水化学工業株式会社	低コスト製造工程の実現に向け、R2Rプロセス技術を構築し、超軽量太陽電池の革新的低製造コスト化を実現する。ペロブスカイト太陽電池の低コスト製造に必要な材料特性を明確化し、コンソ内にフィードバックすることにより発電コスト7円/kWhに向けた、量産時の製造コスト15円/W、モジュール効率15%の技術を開発する。	【中間目標】 ・10cm角程度の超軽量セルにて変換効率ばらつき $3\sigma < 1\%$ を達成する。 ・太陽電池セル材料・構造に関する要素技術を開発し、量産時に超軽量モジュール製造コスト15円/Wに必要な条件を明確化する。 【最終目標】 ・超軽量基板小面積セルで変換効率18.8%(2mm角)を達成する。 ・30cm角程度の超軽量モジュールで15%、あるいは15cm角程度の超軽量モジュールで17%を達成する。 ・量産時にモジュール製造コスト15円/Wを実現し得る、太陽電池モジュール材料・構造・生産プロセスに関する要素技術を開発する。

高性能・高信頼性確保製造技術の開発					
1	2015 ～ 2019	太陽電池セル構成材料の基礎検討（太陽電池の低コスト材料・製造技術の開発） セル・小モジュール（100mm角）作製プロセスの革新	アイシン精機株式会社	【低コスト化の要素技術】 ① 高性能高信頼性を確保する要素（材料・製造）技術開発 ② 低コスト化に向けた、革新的モジュール製造技術の開発	【中間目標】 ・金代替対極の開発 ・非焼成材料で焼成材料「 TiO_2 」と同等の出力確保 ・低コスト塗工技術開発：スプレー塗工法の開発 ・100mm角モジュールで小型セル変換効率の8割を達成する製造技術の確立 【最終目標】 ・300mm角モジュールで小型セル変換効率の8割を達成する製造技術の確立
2	2015 ～ 2019	太陽電池セル構成材料の基礎検討（太陽電池の低コスト材料技術の開発）	株式会社アイシン・コスモス研究所	【低コスト化の要素技術】 ① 高性能高信頼性を確保するセル製造技術の確立 ② 低コスト化に向けた、新規 HTM（ホール輸送剤）材料技術の開発	【中間目標】 新規 HTM（ホール輸送剤）材料の探索と絞込み 【最終目標】 ・ペロブスカイト層のモルフォロジー制御方法の確立 ・従来の材料 spiro-OMeTAD に対し、コスト 1/10 を実現しうる新規 HTM（ホール輸送剤）材料の開発
高性能材料合成技術の開発					
1	2015 ～ 2017	(1) 正孔輸送材料合成技術開発	株式会社富士フィルム	耐湿性低下を引き起こす親水性ドーパントを用いずに Spiro-MeOTAD 同等の変換効率を有す正孔輸送材料を開発する。	【中間目標】 HOMO レベル $-5.3eV$ 以下と Spiro-MeOTA 以上の電流値または Spiro-MeOTAD に対し同等以上の $J_{sc} \times V_{oc}$ 及び耐湿性を可能とする正孔輸送材料設計を抽出する。 ※2017 年度で事業終了のため最終目標を削除。
2	2015 ～ 2017	(2) ペロブスカイト材料技術開発	株式会社富士フィルム	ペロブスカイトの構成成分の変更、表面処理等の耐湿性向上技術を開発する。	【中間目標】 長波長端 750nm 以上且つ、 $CH_3NH_3PbI_3$ 同等以上の $J_{sc} \times V_{oc}$ と耐湿性を可能とするペロブスカイト材料設計を抽出する。 ※2017 年度で事業終了のため最終目標を削除。
3	2015 ～ 2017	(1)、(2) 共通項目	株式会社富士フィルム		【中間目標】 セル効率 20%以上 ※2017 年度で事業終了のため最終目標を削除。
基板材料技術と性能評価技術の開発					
1	2015 ～ 2019	高性能基盤材料技術の研究開発	学校法人早稲田大学	①モジュール用ホール輸送材料 (HTM) コスト低減 (低コスト化技術・耐久性向上) ②製造工程簡易化によるコスト低減 (高速製造技術の開発) ③準位・界面制御によるセル効率向上 (出力向上)	【中間目標】 ・耐久性・歩留り高い最適な HTM を選定し、効率 20%を達成可能な HTM 材料でコスト 250 円/ m^2 を実現する。 ・低コスト製造要素技術を検討し、効率 20%を達成可能な材料系でホール輸送層 (HTL) 製造コスト 500 円/ m^2 を試験する。 ・以上、セル効率 20%を実現する要素技術を確立する。

					<p>【最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・安価な材料から合成の工程最適化、HTM材料コスト100円/m²・製造工程を簡易化、150円/m² ・高性能なHTM材料での効率増大、小面積セル25%
2	2015 ～ 2019	基盤技術の改良と性能計測技術の研究開発	国立研究開発法人物質材料研究機構	セル構造の改良、認証データ取得	<p>【中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・連続光照射200時間超でも安定動作可能なセル構造を明確化する。 ・<i>J-V</i>測定ヒステリシスを効率で3%以内に作るセル構造を提示する。 <p>【最終目標】 光照射1000時間超、ヒステリシス1%以内のセル要素技術</p>
3	2015 ～ 2019	信頼性の高い性能評価手法の確立	神奈川県立産業技術総合研究所	性能評価法の確立、耐久性評価と劣化因子の特定	<p>【中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・環境制御下、単セルで発電性能の決定因子を解明し、信頼性高い評価法(例えば P_{max})を提示する(変換効率不確かさ10%以内)。 <p>【最終目標】 ヒステリシスを解消できる測定条件、連続光照射試験の実施と劣化因子の特定</p>
新素材と新構造による高性能化技術の開発					
1	2015 ～ 2019	<p>新素材と新構造の開発</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 高性能化に向けたペロブスカイト材料の開発 2) 耐久性確保に向けた材料開発 3) 低コスト対極材料の開発 4) セル出力の高電圧化と電圧損失メカニズムの解析 5) ペロブスカイト太陽電池のセル構造の改良 	国立大学法人東京大学	<p>ペロブスカイト太陽電池の性能向上に向けて、各層(透明導電電極、電子輸送層[正孔ブロック層]、ペロブスカイト層、正孔輸送層[電子ブロック層]、対極)を構成する材料の開発、各層のナノスケール構造の改良、そして各層が接する界面の制御を進める。このため、塗布製造の他、蒸着プロセスやドライプロセスの利用等も積極的に検討する。また、対極構造についても新規構造を検討し、バックコンタクト等も検討する。材料開発においては、まず主役であるペロブスカイト材料の高純度化、広帯域化、ドーピングの検討を行う。実験的研究だけでは分からないことも多いため、理論計算による材料探索も行う。正孔輸送層材料では、耐久性が期待できる金属化合物正孔輸送材料について検討する。また、簡便に対極を構築するための導電材料も開発する。ナノスケール構造の改良と界面制御は表裏の関係にあり、材料開発とも密接に関係する。特にペロブスカイト太陽電池の電子輸送層のナノ構造は、太陽電池効率やヒステリシス等に大きくかかわるものと考えられており、電子輸送の役割を担う酸化物半導体の構造制御について検討する。ペロブスカイト層と正孔輸送層の界面制御も重要であり、正孔輸送材料を改良することでこの界面を制御する検討も行う。</p>	<p>【中間目標】 ガラス基板小面積セル(有効面積約0.03 cm²)で変換効率20%を達成する。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 蒸着により10 mm角でラフネスが±30 nm以内となる高品位ペロブスカイト薄膜を作成する。 2) ホール輸送材フリー構造セルを作製する。 3) カーボン対極を用いたセルを作製する。 4a) ヨウ臭化ペロブスカイトを用いたセルでVoc 1.4 Vを実現する。 4b) 電圧損失を決めるペロブスカイト結晶の質と電荷輸送材料の物性を明らかにする。 5) バックコンタクト構造セルを作製する。 <p>【最終目標】 ガラス基板小面積セル(有効面積約0.03 cm²)で変換効率25%を達成する。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 蒸着により20 mm角でラフネスが±30 nm以内となる高品位ペロブスカイト薄膜を作成する。 2) ホール輸送材フリー構造モジュールを作製する。 3) カーボン対極を用いたモジュールを作製する。 4a) ヨウ臭化ペロブスカイトを用いたVoc 1.4 V以上のセルを、低温製膜による低コスト工程で作製する。 4b) 電圧損失を最小とするモデルをもとに大面積モジュールの作製に使える製膜法を開発する。 5) バックコンタクト構造モジュールを作製する。

2	2015 ～ 2019	界面制御技術	国立大学 法人東京 大学、産 業技術総 合研究所 (再委託)	ペロブスカイト太陽電池の積層材料界面に、界面修飾材料を導入し、材料界面における電荷再結合および直列抵抗成分を制御しFFを向上させることによる高効率化を目指す。	【中間目標】界面制御により、 J_{sc} 2/3 mA/cm ² 以上、 V_{oc} 1.2 V以上の条件でFF 75%以上を実現する。 【最終目標】界面制御によりモジュールでFF 75%以上にするための指針を確立し、変換効率 20%達成に貢献する。
3	2015 ～ 2019	高電流材料技術	国立大学 法人東京 大学、九 州工業大 学(再委 託)	ペロブスカイト太陽電池の光電変換領域を広帯域化することにより、短絡電流密度を上げ高効率化を狙う。同時に、Pb 減量化ペロブスカイト太陽電池の可能性と開発指針を提案する。	【中間目標】Sn系ペロブスカイト層の膜質を高めることにより J_{sc} 26 mA/cm ² を達成する。 【最終目標】Sn系ペロブスカイト太陽電池(赤外光電変換)で J_{sc} 34 mA/cm ² を達成する。
4	2015 ～ 2019	基板構造制御技術	東京大 学、東京 工業大 学(再委 託)	ペロブスカイト結晶と酸化物の界面構造と電子移動物性相関の学理を追及することによって、効率向上と動作安定化、長寿命化技術へと達する道筋を明確化する。また、電場ベクトル制御マイクロ波による界面選択加熱現象を用いて結晶化プロセス制御を行い、最終的には、粒界欠陥の極めて少ない単結晶様ペロブスカイト結晶をメソ細孔中で合成するプロセスを創製する。	【中間目標】基板構造制御により、4 mm角セルで、変換効率面内ばらつき±0.5%以内に収める。 【最終目標】低欠陥ペロブスカイト結晶を形成することで最高デバイス効率を1%押し上げ、デバイスばらつきを±0.5%以内に収める。
5	2015 ～ 2019	電極材料技術	国立大学 法人東京 大学、兵 庫県立大 学(再委 託)	有機ホール輸送材に替えて無機系ホール輸送材を使用することで、「高信頼性化」、「低コスト」および「モジュール出力劣化抑制」の実現を目指す。	【中間目標】a)コスト 250 円/m ² 無機系ホール輸送材で効率 20% (150 円/m ² の場合は 16%) を実現する。 b)無機系ホール輸送材を用いた貼り合わせ製造プロセスを開発する。 【最終目標】a)コスト 250 円/m ² 無機系ホール輸送材で効率 25% (150 円/m ² の場合は 20%) を実現する。 b)無機系ホール輸送材を用いた貼り合わせ製造プロセスで、HTL 製造コスト 150 円/m ² を実現する。
6	2015 ～ 2019	高純度材料技術	国立大学 法人東京 大学、国 立大学法 人京都大 学(再委 託)	ペロブスカイト太陽電池を構成する材料の高純度化法の確立に取り組み、その効果を詳細に検討する。また、溶液法によるペロブスカイト/バッファ層界面の制御による高性能化についても検討する。	【中間目標】材料高純度化により、塗布型セルでの光電変換効率 20%の達成に貢献する。 【最終目標】材料の高純度化および界面制御により、 V_{oc} 1.2 V、および、0.83 を超える FF の実現を目指し、セル変換効率 25%の実現に貢献する。
7	2015 ～ 2019	第一原理計算	国立大学 法人東京 大学、国 立大学法 人熊本大 学(再委 託)	第一原理分子動力学計算と太陽電池デバイス・シミュレーターおよびマテリアルズ・インフォマティクス(「物質に関する情報技術」)を用いて、エネルギー変換効率や安全性の面で優れたペロブスカイト太陽電池用材料の設計指針を確立し、具体的な材料を計算シミュレーションに基づいて提案する。	【中間目標】第一原理計算シミュレーションと太陽電池デバイス・シミュレーターに関する要素技術を確立するとともに、モジュール変換効率 17%以上を達成できる物質を予測する。 【最終目標】第一原理計算シミュレーションと太陽電池デバイス・シミュレーターを駆使した物質探索によって有望物質を理論的に予測し、実デバイスでのモジュール変換効率 20%以上を達成するまで in-silico 材料最適化を行う。

表. 4 研究開発項目③
「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」
(1) 先端複合技術型シリコン太陽電池

No.	開発期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	目標	その他
1	2015～2019	Cat-CVDなど新手法による高性能太陽電池低価格製造技術の開発	国立大学 法人北陸先端科学技術大学院大学	下地基板表面に損傷を与えず、優れた界面が形成できる低温薄膜堆積法、①Cat-CVD法、および、100℃以下の低温でリン(P)やボロン(B)を結晶シリコン(c-Si)に導入できる新不純物ドーピング技術、②Cat-doping技術、および、新規電極形成技術などを駆使、厚み100・m以下の薄板c-Si基板にも対応できる、低価格で高効率な裏面電極型アモルファスシリコン(a-Si)/c-Siヘテロ接合太陽電池を作製する基盤技術の開発を行う	<p>【中間目標】 Cat-CVD法を用い、効率25%以上の高効率c-Si太陽電池の実現を可能とする基盤的要素技術を開発する。</p> <p>【最終目標】 Cat-CVD法、Cat-doping法、新規裏面電極形成法を用い、効率26%の高効率c-Si太陽電池の低価格作製を可能とする基盤的要素技術を開発する。</p>	
2	2015～2019	薄型セルを用いた高信頼性・高効率モジュール製造技術開発	国立研究開発法人産業技術総合研究所	企業との連携によりそれぞれの企業の研究開発目標の達成を支援するとともに、産総研は独自に共通基盤技術として、イオン注入技術を基にしたバックコンタクト型セルなどの開発や、これらのセルを用いた高効率・高信頼性モジュールの開発を行う。	<p>【中間目標】 (連携) 極薄ウエハ(厚み75μm)のセル評価プロセスを確立する。高効率(セル効率22%)のためのセル化技術開発課題を明らかにする。長寿命(35年)のための高信頼性モジュール化技術開発課題を明らかにする。</p> <p>(共通基盤) 高効率セルの低コストのための簡易プロセス要素技術課題を明らかにする。高信頼性の高効率モジュール(モジュール効率22%)の技術開発課題を明らかにする。</p> <p>【最終目標】 (連携) 極薄ウエハ(厚み50μm)の品質指針及び高効率セルプロセス技術開発課題を明らかにする。高効率(セル効率22%)のためのセル化技術開発指針を得る。長寿命(35年)のための高信頼性モジュール化技術開発指針を得る。</p> <p>(共通基盤) 高効率セルの低コストのための簡易プロセス要素技術指針を得る。薄型セルを用いた高信頼性の高効率モジュール(モジュール効率22%)の技術開発指針を得る。</p>	
3	2018～2019	高性能キャリア選択性パッシベーションコンタクトの開発	国立研究開発法人産業技術総合研究所	従来型ヘテロ接合太陽電池は、金属電極がc-Siと接しないパッシベーションコンタクト構造を特徴とし高V _{oc} が得られる一方、光吸収損失が大きい課題がある。本研究では、この課題を克服するため、パナソニック(株)等と連携し、透明性に優れたシリコン系ナノ結晶材料や金属酸化物からなるキャリア選択性パッシベーションコンタクトを開発する。	<p>【最終目標】</p> <p>①(連携) 本研究開発により得られたシリコン系ナノ結晶材料を水素化アモルファスシリコン/結晶シリコンヘテロ接合型太陽電池に適用し、標準的なa-Si:Hのみで構成されるベンチマーク構造(発電効率>22%)に比べ、V_{oc}やFFを維持しつつ、JSCの2%以上の向上を達成する。これにより、連携先の目標達成に貢献する。</p> <p>②(共通基盤) 金属酸化物系パッシベーションコンタクトとして</p>	

					用いたヘテロ接合型結晶シリコン太陽電池において、a-Si:Hのみでヘテロ接合を形成するヘテロ接合型太陽電池に比べ、 J_{sc} を3%以上改善する。さらに、ライフタイム評価による開放電圧 (iV_{oc}) で700mV以上を達成する。以上により、シリコン系ヘテロ接合太陽電池の性能を超え得るポテンシャルを実証する。	
先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発 (コンソーシアム)						
1	2015 ～ 2019	先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発	学校法人トヨタ学園豊田工業大学	<p>①新規高効率標準試作ラインの構築 本テーマを推進するために必要な高効率太陽電池試作ラインを構築する。</p> <p>②高品質結晶シリコン材料・結晶評価 目標のセル変換効率を得るために必要な原料ならびに結晶に関する課題を明らかにする。</p> <p>③セルプロセス評価 各プロセス技術の量産適用時の課題を、太陽電池試作を通じて明らかにする。</p> <p>④ヘテロ技術評価 従来型ヘテロ接合セル作製技術を確立し、新規ヘテロ接合セル製造プロセスを実現する。</p> <p>⑤モジュール評価 太陽電池セルをモジュール化評価し、課題を明確化する。</p> <p>⑥委員会等の開催</p>	<p>【中間目標】</p> <p>①2/3%のセル変換効率を得られる太陽電池セル試作ラインを構築する。</p> <p>②シリコン結晶の評価を進め、2/3%のセル変換効率を得るために必要な原料ならびに結晶の課題を明らかにする。</p> <p>③各プロセス技術を2/3%太陽電池量産に適用する際の課題を、太陽電池試作を通じて明らかにして参画企業の開発を支援する。</p> <p>④高効率ヘテロ接合セルを作製する技術を確立する。新規ヘテロ接合太陽電池の技術的目途付けを行う。</p> <p>⑤2/3%太陽電池セルをモジュール化評価し、課題を明確化する。</p> <p>【最終目標】</p> <p>①変換効率25%の試作ラインを構築する。</p> <p>②25%のセル変換効率を得るために必要な原料ならびに結晶に関する課題を明らかにする。</p> <p>③各プロセス技術を25%太陽電池セルの量産に適用する際の課題を、太陽電池試作を通じて明らかにし参画企業の開発を支援する。</p> <p>④新規ヘテロ接合セルに関して、量産展開可能なプロセスを検討し、セル製造プロセスを実現する。</p> <p>⑤25%太陽電池セルをモジュール化評価し、課題を明確化する。</p>	
2	2015 ～ 2019	材料・プロセス評価基盤技術に関する研究開発	学校法人明治大学	<ul style="list-style-type: none"> ・シリコン原料のデバイスへの影響の評価 ・極低濃度炭素の定量手法の開発 ・新規製造プロセスの評価 ・次世代型太陽電池の評価技術の開発 ・低コスト単結晶の評価 	<p>【中間目標】</p> <p>現在の変換効率20%プロセスを改良し変換効率2/3%を実現するのに必要な基盤技術を確立する。特に、物理化学評価の側面から開発を支援し、豊田工業大学と協働して次々世代 (2/3%) セル量産化のための新規材料・プロセスの評価・解析技術を確立する。それらを用いて、各大学や参画企業が開発している個々のプロセスや材料に関する課題を明らかにする。そこで得られた知見を各研究機関に対して横断的にフィードバックすることにより、本開発に関与している機関全体と協力して最終目標の達成に貢献する。</p>	

					<p>以上の結果を各研究機関ならびに参画企業にフィードバックし、さらには参画企業の目標達成に貢献する。</p> <p>【最終目標】 物理化学評価を通じた支援を継続するとともに、変換効率25%の試作ラインの構築に貢献する。特に、25%高効率太陽電池量産化のための新規材料・プロセスの評価・解析技術を確立する。それにより得られた知見、技術開発指針をもとにプロジェクト連携・協力企業の技術開発を支援し、最終目標の達成に貢献する。</p> <p>さらに、変換効率25%を実現するために必要な基盤技術をもとに、そのための新規材料ならびにセルプロセス技術を提案し、各研究機関ならびに各企業との協力の上、参画企業の目標達成に貢献する。</p>
3	2015～2019	高品質・低コスト結晶成長技術に関する研究	国立大学法人九州大学	<p>① X線カメラによるシリコン単結晶と多結晶の評価 3次元X線トポグラフィ法を用いて、シリコンウエハ内の変換効率低下に關係する欠陥の同定を行う。</p> <p>② CZシリコン結晶化速度、低不純物濃度を達成できる結晶育成方法の提案 高速、低不純物濃度のシリコンCZ結晶の育成方法を提案し、結晶育成を実施する。</p> <p>③ セル作成評価 育成した結晶を用いて、太陽電池セルを豊田工大と協力して作成し、今回育成した結晶の有利性を示す。</p>	<p>【中間目標】 ① X線カメラによるシリコン単結晶と多結晶の評価 X線セクショントポラフマルチスライス法を用いて、シリコンウエハ表面近傍の研磨傷や析出物の3次元観察法を確立する。</p> <p>② CZシリコン結晶化速度の向上と低不純物化法の提案 CZシリコン結晶化速度の向上と低不純物化法の提案を提案し、育成実験を実施する。これにより高ライフタイムの結晶育成条件を提示する。</p> <p>③ セル作成評価 育成した3インチn型結晶を用いて、太陽電池セルを豊田工大と協力して作成する。</p> <p>【最終目標】 ① 3次元X線セクショントポラフ法を用いて、シリコンウエハ中のライフタイム低下欠陥を明らかにする。</p> <p>② CZシリコン結晶化速度、低不純物濃度を達成できる結晶育成方法の提案し、結晶成長を行う。高速、低不純物濃度のシリコンCZ結晶を用いて、セル政策を行う。</p> <p>③ 育成した3インチn型結晶を用いて、太陽電池セルを豊田工大と協力して作成し、本提案の結晶育成方法に優位性を実証する。</p>
4	2015～2019	新規ヘテロ接合用材料に関する研究	国立大学法人名古屋大学	<p>・高品質かつ低吸収なパッシベーション膜の開発のためにクラスター型高性能ヘテロ接合研究開発システムの垂直立上げを行う。そして、上記システムを用いて、パッシベーション膜へ</p>	<p>【中間目標】 ヘテロ接合材料の吸収係数$1 \times 10^3 \text{cm}^{-1}$(@600nm)、導電率：$1 \times 10^{-7} \text{S/cm}$を達成する。この結果を本プロジェクト内の各研究機関ならびに關係企業にフィードバックす</p>

				の0やCなどの添加や新規材料開発を進める。 ・バンドエンジニアリングを駆使し、キャリア選択層に利用できる新規材料の探索を行う。 ・高品質セルに適用可能なシリコン基板の物性解明を行う。	る。 【最終目標】 バンドエンジニアリングを駆使した新規ヘテロ接合材料開発を行い、ヘテロ接合材料の吸収係数 $1 \times 10^2 \text{ cm}^{-1}$ (@600nm)、導電率： $1 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$ の達成を目指す。 また、本研究で得られた知見や基盤技術を各研究機関ならびに関係企業の技術と組み合わせる。	
5	2015～2019	アモルファス・結晶界面における構造及び電気的特性に関する研	国立大学 法人東京工業大学	①ライフタイムおよび電流電圧特性の温度依存性測定を用いて、アモルファスシリコン系材料/結晶シリコン界面の精密な評価を行う技術を開発する。 ②低ダメージで金属酸化エミッタを形成する技術を開発する。	【中間目標】 アモルファス膜と結晶シリコンとの界面構造や界面における再結合速度などを評価・解析して、得られた知見、技術開発指針をもとに、ヘテロ系デバイスにおける表面再結合電流 J_{ofront} を75 fA/cm ² 、裏面再結合電流 J_{orear} を40 fA/cm ² に低減する方法を提案する。 【最終目標】 表面再結合電流 J_{ofront} を10 fA/cm ² 、裏面再結合電流 J_{orear} を10 fA/cm ² に低減する方法を提案し、セルメーカーのヘテロ接合デバイスの高効率化を支援する。	
6	2015～2019	低コスト・拡散系太陽電池におけるキャリア再結合に関する研究	公立大学 法人兵庫県立大学	① 高性能パッシベーション膜材料開発： パッシベーション能力の高い膜を低コストな製膜法により開発し、表裏面再結合電流を低減する。 ② 界面近傍の特性評価技術の構築： 基板/パッシベーション膜界面近傍の電気的特性を高精度に評価する技術を構築し、材料探索ヘフィードバックをかける。 ③ pn接合形成基盤技術の開発： pn接合（エミッタ）の設計指針および形成技術をシミュレーション・実験により開発する。	【中間目標】 表面再結合電流 J_{ofront} 、裏面再結合電流 J_{orear} 、およびバルク再結合電流 J_{obulk} の総和 $J_0 (=J_{\text{ofront}} + J_{\text{orear}} + J_{\text{obulk}})$ を500 fA/cm ² まで低減する。 【最終目標】 表面再結合電流 J_{ofront} 、裏面再結合電流 J_{orear} 、およびバルク再結合電流 J_{obulk} の総和 $J_0 (=J_{\text{ofront}} + J_{\text{orear}} + J_{\text{obulk}})$ を400 fA/cm ² まで低減する。	

(2) 高性能 CIS 太陽電池

No.	開発期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	目標	その他
1	2015～2019	光吸収層の高品質化によるCIS太陽電池の高効率化	国立研究開発法人産業技術総合研究所	①アルカリ金属元素制御技術の開発、バッファ層成膜技術の開発により、CdS/CIS界面の高品質化技術を開発する。 ②高温製膜技術の開発、Cu/Ⅲ族元素組成比制御技術の開発により、CIS結晶の高品質化技術を開発する。 ③新規透明導電膜材料の探索及びCIS/Mo界面制御技術の開発を行う。	【中間目標】 CdS/CIS界面の高品質化およびCIS結晶の高品質化を推進し、CIS小面積セルで変換効率22%を達成する。 【最終目標】 CdS/CIS界面の高品質化およびCIS結晶の高品質化に加えて、新規な透明導電膜材料の探索およびCIS/Mo界面の不活性化を推進し、CIS小面積セルで変換効率2/3%を達成する。	
2	2015～2019	界面制御によるカルコゲナイド系薄膜太陽電	国立研究開発法人東京工業大学	Ag系カルコパイライト等を表面・界面に導入したCIGS太陽電池の評価、あるいはこれまで開発してきたチオ尿素等の処理	【中間目標】 表面、粒界および裏面における再結合成分を減少させる技術を開発し、開始時の短絡光電流と開放端	

		池の高効率化		効果を駆使することにより、理論的に予想される高い変換効率が実現されることを実証する。また、裏面再結合速度を低減し、変換効率を飛躍的に向上させるために Ag 計カルコパイライト等を用いたバンドギャップ制御、あるいは酸化物層導入などを CIGS 系太陽電池に適用し、表面・裏面における界面制御技術の可能性を実証するとともに、薄膜化による低コスト化の可能性を検証する。	電圧との積 $25(\text{mA}/\text{cm}^2 \times V)$ から開放端電圧 V_{oc} を $+20\text{mV}$ 増加させ、 $J_{sc} \times V_{oc} = 25.8(\text{mA}/\text{cm}^2 \times V)$ を達成する。そして、他機関が開発する技術と総合して変換効率 22%の達成に貢献する。 【最終目標】 表面、粒界および裏面における再結合成分を減少させる技術を開発し、開始時の短絡光電流と開放端電圧との積 $25(\text{mA}/\text{cm}^2 \times V)$ から開放端電圧 V_{oc} を $+30\text{mV}$ 増加させ、 $J_{sc} \times V_{oc} = 26.2(\text{mA}/\text{cm}^2 \times V)$ を達成する。そして、他機関が開発する技術と総合して変換効率 2/3%の達成に貢献する。
3	2015 ～ 2019	バンド制御による再結合パッシベーション技術の開発	学校法人立命館	伝導帯位置を制御できる材料として $(\text{Zn}, \text{Mg})\text{O}:\text{B}$ や $\text{Zn}(\text{O}, \text{S}):\text{B}$ などの Zn 系 3 元混晶薄膜を用いて、CBO 制御可能な透明電極を開発する。また、デバイス内の総合的なバンドラインナップの最適化を実現するために、同材料系を用いた高抵抗バッファ層の開発を行う。CIS 表面へのスパッタダメージによる再結合センターの形成を回避するために、本テーマではソフトな成膜法である有機金属気相成長 (MOCVD) 法を用いる。	【中間目標】 従来よりも大きいバンドギャップ (3.5eV 以上) を有し伝導帯位置を制御可能な Zn 系 3 元混晶透明電極を開発し、研究開始時の従来の透明電極を用いたセルに対して 20mV 高い V_{oc} 、 $V_{oc} \times J_{sc}$ 値においては $26\text{mW}/\text{cm}^2$ を達成する。そして、他機関が開発する技術と総合して変換効率 22%の達成に貢献する。 【最終目標】 Zn 系 3 元混晶透明電極の高品質化 (バンド位置制御性、低抵抗、高透過率) に加え、伝導帯位置を制御できる Zn 系 3 元混晶バッファを開発し、デバイス内の総合的なバンドラインナップを最適化することで、研究開始時の従来構造のセルに対して 30mV 高い V_{oc} 、 $V_{oc} \times J_{sc}$ 値においては $27\text{mW}/\text{cm}^2$ を達成する。そして、他機関が開発する技術と総合して変換効率 2/3%の達成に貢献する。
4	2015 ～ 2017	エピタキシャル成長を利用した CIS 太陽電池の高効率化指針の解明	学校法人東京理科大学	結晶粒界が無く、欠陥低減が予想される CIGS 単結晶薄膜をエピタキシャル成長法により製膜して太陽電池を作製し、格子欠陥、結晶粒界および表面ラフネスがデバイス特性へ及ぼす影響を詳細に評価し、欠陥低減技術の開発指針、ひいては CIGS 太陽電池の高性能化指針の解明を目指す。	【中間目標】 エピタキシャル CIGS 単結晶薄膜で、少数キャリア寿命 τ_2 の値で 80ns 以上 (300K) を達成する。また、本技術と他機関が開発する技術を総合して、変換効率 22%の達成に貢献する。 ※2017 年度で事業終了のため最終目標を削除。
5	2015 ～ 2019	結晶欠陥の検出と同等、欠陥密度低減化技術開発支援	国立大学法人筑波大学	①価電子帯から 0.8eV にレベルを持つ欠陥の構造解明、濃度等の定量化を行うとともに、その構造と形成原因を明らかにする。また、価電子帯 0.3eV～0.8eV の未探索領域の欠陥準位の検出と同等を行う。 ②不純物相である Cu_2Se の存在形態 (クラスターサイズや分布) とその定量化、 Cu_2Se によるデバイス特性劣化のメカニ	【中間目標】 格子欠陥、異相欠陥の検出と同定に関する知見と他機関が開発する技術を総合して、変換効率 22%の達成に貢献する。 【最終目標】 格子欠陥、異相欠陥の定量的評価と性質の理解を通して、また他機関が開発する技術を総合して変換効率 2/3%の達成に貢献する。

				<p>ム解明、点欠陥の表面、界面を含めた欠陥分布を明らかにする。</p> <p>③Cu₂Se の形成原因が Ga の拡散不足、反応不足であることを明らかにし、熱や電子等によりエネルギーを与えることで拡散や化学反応を促進する実用的技術開発をする。</p>	
6	2015 ～ 2019	積層構造・改質界面の電子構造評価による電池特性向上技術の開発	国立大学 法人鹿児島大学	<p>(a) CIS 層～窓層に至る積層構造のビルトインポテンシャルの定量評価・増大技術の開発</p> <p>(b) CIS 層堆積後処理による電子構造改質機構の解明及びその活用による接合改質技術の開発</p> <p>(c) デバイス縦貫断面のバンド・電位プロファイルの可視化技術の開発</p>	<p>【中間目標】</p> <p>①CIGSSe 表面状態解明</p> <p>②アルカリハライド処理効果の解明</p> <p>③CIGSSe～窓層までのバンドプロファイル評価技術の開発・改善指針の導出</p> <p>④裏面電極～CIGSSe～バッファ～窓層縦貫断面バンドプロファイルの可視化技術の開発</p> <p>【最終目標】</p> <p>①光吸収層側界面におけるバンド湾曲の増大手法の導出</p> <p>②拡散電位 VD 向上指針の導出</p> <p>③裏面電極近傍電界、光吸収層内バンド傾斜の最適化指針の導出</p>
7	2015 ～ 2019	理論計算と実験的手法を組み合わせた粒界と界面を中心とした材料設計とモデル実証研究	学校法人 龍谷大学	<p>第一原理計算とモデル実験を組み合わせて、Cu(In, Ga)(S, Se)₂ 系化合物について Cu/(In+Ga) 比や S/(S+Se) 比が電子構造や欠陥の生成に与える影響について研究し、光吸収層の結晶粒界やバッファ層/光吸収層界面、光吸収層/Mo 電極層界面の太陽電池特性に与える影響を明らかにする。硫黄を含む CIS 光吸収層について得られた総合的な知見を、CIS 光吸収層の材料設計に生かし、ソーラーフロンティア社の CIS 系モジュールの高性能化に貢献する。</p>	<p>【中間目標】</p> <p>光吸収層として CuInSe₂、CuGaSe₂、CuInS₂ を中心とした 3 元系から、Cu(In, Ga)Se₂、CuIn(S, Se)₂、CuGa(S, Se)₂ 等を想定した 4 元系に検討する材料系を拡張して、CIS 太陽電池の電子構造の明確化を図る。</p> <p>【最終目標】</p> <p>光吸収層として 4 元系からさらに Cu(In, Ga)(S, Se)₂ を想定した 5 元系に材料系を拡張して、光吸収層、バッファ層、裏面電極等の構成要素やそれらの界面を含めた CIS 太陽電池の理想的な材料設計技術を提案する。</p>

表. 5 研究開発項目④
「共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）」

No.	開発期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	目標	その他
太陽電池性能高度評価技術の開発						
1	2015 ～ 2019	新型太陽電池評価・屋外高精度評価技術の開発	国立研究開発法人産業技術総合研究所	<p>I) 新型太陽電池高精度性能評価技術</p> <p>①各種新型太陽電池性能評価技術の開発</p> <p>②一次基準太陽電池校正技術の高度化</p> <p>II) 屋外性能高度評価技術の開発</p>	<p>【中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・新型太陽電池の性能評価再現性 ±0.5% (1σ) 以内を達成する ・WRRスケールに対するトレーサビリティを確実に維持する。AIST, NREL, PTB, ESTI の間で実施する WPVS 国際根幹比較校正をホスト機関として実施する。また、その結果を基に、統計的解析値 (En数) を算定し、根幹ラボ間の定量的な一緻度を明らかにする。 ・高精度屋外測定に使用する P V 	

					<p>モジュール日射センサのセル数等の構造、設置方法およびサイズが測定精度に及ぼす影響を明らかにし、高精度化のために必要な条件を定量化する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・上記開発及び共同機関の開発成果、屋内高精度測定との比較検証等により、市販タイプ結晶 Si 太陽電池モジュールの屋外測定再現性 $\pm 1.0\%$ (1σ) 以内を得るために必要な測定装置、条件、手順を明らかにして実証する。 <p>【最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・新たに開発される新型太陽電池の性能評価再現性 $\pm 0.5\%$ (1σ) 以内を達成する。 ・WRRスケールに対するトレーサビリティを確実に維持する。欧米圏に存在するWPVS根幹ラボ以外の多数の校正機関との間で実施する国際比較校正の結果から統計的解析値 (<i>En</i>数、<i>Z</i>スコア) を算定し、定量的な一致度を明らかにして国際的な不整合を解決する。 ・屋内高精度測定との比較検証により、薄膜系を含む市販太陽電池モジュールの屋外測定再現性 $\pm 1.0\%$ (1σ) 以内を実証する。
2	2015 ～ 2019	屋外実性能 高能率測定 技術の開発	一般財団 法人電気 安全環境 研究所	太陽電池屋外測定技術高能率 化のための基本技術開発と検証	<p>【中間目標】</p> <p>共同機関との連携による開発成果を基に、結晶 Si 系市販太陽電池モジュールのオンサイトにおける測定再現性精度 $\pm 2\%$ (1σ) 以内が達成可能な装置仕様及び手順を明確にする。また、オンサイトでの性能評価を利用して長期間稼働中の太陽電池モジュールの信頼性を判断する手法を検討する。</p> <p>【最終目標】</p> <p>オンサイトにおいて薄膜系モジュールを含め1日複数台の測定と測定再現性精度 $\pm 2\%$ (1σ) 以内を実証するための装置仕様、手順を明らかにする。これらの成果を基に高精度低コスト屋外測定手法のガイドラインをAISTと共同で策定する。</p>
3	2015 ～ 2019	日射変動解 析技術の開 発	国立大学 法人岐阜 大学	日射変動解析技術の開発 (i) PVモジュール日射センサー アレイによる日射変動空間分布 の計測 (ii) 上空撮影カメラによる日 射変動空間分布の計測 (iii) 太陽電池評価に影響与 える要素に関して気象予報モデル による上空大気状態の解析 (iv) 雲のエッジ部による日射	<p>【中間目標】</p> <p>2017年度までの成果から、岐阜大での観測結果や物理気象モデルによる解析結果のほかAIST, JET, 立命大等共同機関での日射スペクトル測定から、雲のエッジ部による日射増大(雲エッジ効果)時および曇天時の雲不均一性に伴う日射強度とその変動時間と、上空大気特性(おもに、雲の高度・分布や</p>

				<p>変動特性の物理解析、太陽電池評価への影響検討 (v) 雲の不均一性に伴う日射変動特性の物理解析、太陽電池評価への影響検討 (vi) 屋外高精度太陽電池性能評価のための気象条件の定量化 (vii) 屋外高精度太陽電池性能評価のための気象条件の定量化の検証・更新 (viii) 大気放射モデルによる日射スペクトルの解析 (viii) 大気放射モデルの改良による日射スペクトルの解析の高精度化 (ix) 日射変化時のスペクトル変化の評価</p>	<p>移動、可降水量等の大気中水分量など)との物理的関係を明らかにする。そして屋外太陽光発電性能評価の高速 IV 計測の計測時間と同程度(ミリ秒オーダー)における日射強度変動特性とその上空気象状態との関連を整理し、屋外計測の高速 IV 計測で±1.0% (1σ) 以内の測定精度を保証する気象条件(雲種類や可降水量など)を定量化する。このため、これらの結果は屋外計測を実施する AIST や JET に提供し、高速 IV 計測に要求される計測時間中の日射強度安定度を物理的根拠を基に定量的に示す指標として、屋外性能評価精度向上の精度目標達成に貢献する。 また日射スペクトル強度推定モデルを構築することにより、日射強度の急変時の日射スペクトル強度変化を推定し屋外計測に活用できるように整理し、屋外計測を実施する AIST や JET に提供し、屋外性能評価精度向上の精度目標達成に役立てる。</p> <p>【最終目標】 2019 年度までの成果から、太陽光発電屋外性能評価高精度化に係わる気象状態、特に雲の高度や形態、移動速度などの気象三次元情報から、屋外性能評価実施者である AIST や JET がより入手・活用しやすい気象情報(例えば地上天気・温度・湿度・風向風速)で評価可能である新たな手法を確立する。岐阜大での観測・数値解析のほか、AIST, JET, 立命大等共同機関での日射スペクトル測定も活用して、入手しやすい新たな気象情報を基に、高速 IV 計測で±1.0% (1σ) 以内の測定精度を保証する気象条件を再検討し、AIST, JET を提供する。 また日射スペクトル強度推定モデルを高精度に修正することにより、日射強度の急変時の日射スペクトル強度変化を高精度に推定し、屋外計測を実施する AIST や JET が実施する屋外性能評価精度向上の精度目標達成に貢献する。</p>
4	2015 ～ 2019	太陽電池温度の高精度測定技術開発	国立大学 法人宮崎 大学	<p>(i) 太陽電池温度の高精度測定手法の開発 (a) 温度センサの種類や取り付け手法の確立 (b) 有風時にも高精度な温度計測技術の確立 (c) 温度解析シミュレーションによる温度解析</p>	<p>【中間目標】 温度センサの取り付け手法等を検討し有風時にも高精度な温度計測技術を確立する。風の影響によるモジュール内温度分布を考慮した太陽電池温度を定義する。得られた高精度温度計測技術を活用し屋外における太陽電池実性能の温度補正に用いることにより高精度評</p>

				<p>(ii) 風の影響によるモジュール内温度分布を考慮した太陽電池温度の明確化 (a) 大型風洞実験設備を用いた温度分布の実証 (b) 温度解析シミュレーションによる温度分布解析・再現</p> <p>(iii) 高精度に計測された温度補正による屋外性能評価技術高精度化 (a) 得られた高精度温度計測技術を活用し屋外における太陽電池実性能の高精度評価に寄与</p>	<p>価に寄与する。産総研において屋内計測され温度特性がわかっているシリコン太陽電池モジュールについて開放短電圧と測定温度の関係を検証し確立された手法の精度を検証する（前倒し事項）。これらの技術により太陽電池モジュールの実温度測定精度$\pm 2^{\circ}\text{C}$以内を達成する。</p> <p>【最終目標】 産総研において屋内計測され温度特性がわかっているシリコンおよびCIGS太陽電池モジュールについて開放短電圧と測定温度を整合させる。太陽電池モジュールの実温度測定精度$\pm 1^{\circ}\text{C}$以内を達成し、太陽電池モジュール出力特性の屋外測定において高精度温度測定結果を出力の温度補正に用いることにより$\pm 1.0\%$ (1σ) 以内の測定精度を達成することに寄与する。</p>
5	2015 ～ 2019	PV日射計測によるシステム性能測定手法開発	学校法人 東京理科大学	<p>PV日射計測によるシステム性能測定手法開発 (i) システム屋外性能高精度評価のための測定手法の開発 a) 屋外評価装置の構築と評価 b) PVモジュール日射センサを用いた測定 c) 高精度モジュール温度測定技術の適用</p> <p>(ii) PV日射センサを用いたPVシステム測定データ解析手法の開発 a) 電流-電圧特性の重ね合わせシミュレーション b) 照度ムラ、温度ムラを考慮した測定条件の評価</p>	<p>【中間目標】 PVアレイおよびシステムの評価に展開するために必要な日射、温度、電流-電圧特性等計測法に対する要求事項を明らかにする。本要求事項を満たした場合の屋外におけるアレイ発電性能の測定精度として、算出値と測定値との誤差 $\pm 3.0\%$ 以内を達成する。</p> <p>【最終目標】 小規模なPVアレイまたはシステムにおけるオンサイト屋外高精度測定を実施し、アレイ面内照度ムラ、アレイ面内温度分布把握、スペクトル補正等を行い、必要な日射、温度、電流-電圧特性等計測法および測定精度を検証することで、市販タイプ結晶Si太陽電池モジュールを用いた太陽電池アレイの屋外測定精度$\pm 1.0\%$ (1σ) を達成する。</p>
6	2015 ～ 2019	スペクトルを考慮した屋外実性能評価技術開発	学校法人 立命館	<p>スペクトルを考慮した屋外実性能評価技術開発 (i) APE 高速測定技術の開発 (ii) APE を用いたスペクトル補正による太陽電池屋外測定高精度化技術の開発</p>	<p>【中間目標】 APEセンサの設計・開発・屋外測定実証を行い、太陽光スペクトル指標APE（二波長帯APE）の高速測定技術を開発する。同サイトに設置したシリコン系・化合物薄膜太陽電池モジュールの短絡電流値と二波長帯APEの相関を明らかにし、高速測定した各種太陽電池モジュールのスペクトル補正による高精度化の基本技術を開発して、屋外測定スペクトルミスマッチによる出力電流測定誤差を補正無しの場合の2分の1に高精度化する技術を検証し、確立する。</p> <p>【最終目標】 4年以上の蓄積測定データを基</p>

					に、高速測定した二波長帯APEを用いた各種太陽電池モジュールのスペクトル補正技術を高精度化させ、屋外測定スペクトルミスマッチによる出力電流測定誤差を補正無しの場合の3分の1に高精度化する技術を検証し、確立する。化合物薄膜太陽電池モジュールを含めた屋外測定の±1.0% (1σ) 以内の測定精度の達成に貢献する。
太陽光発電システムの高精度発電量評価技術の開発					
1	2015 ～ 2019	経年劣化を考慮した各種太陽電池の発電量評価技術の開発	国立研究開発法人産業技術総合研究所	各種太陽電池の経年劣化調査と発電量推定技術の開発	<p>【中間目標】 結晶シリコン系太陽電池アレイにおいて、劣化特性を考慮した定量的な発電量評価手法を開発し、±5%の精度で発電量を推定する技術を開発する。</p> <p>【最終目標】 ヘテロ接合系等の新型結晶シリコン系太陽電池アレイならびに薄膜系太陽電池アレイにおいて、劣化特性を考慮した定量的な発電量評価手法を開発し、±5%の精度で発電量を推定する技術を開発する。</p>
2	2015 ～ 2019	日射量データベースの高度化に関する研究	一般財団法人日本気象協会	<p>①5地点における日射スペクトル等の観測</p> <p>②日射量データベース整備の迅速化</p> <p>③日射量データベースの高密度化</p> <p>④日射量データベースの高精度化および日射量データベースの更新</p> <p>⑤日射スペクトルデータベースの更新と全国整備</p>	<p>【中間目標】 前事業の資産である5地点における日射量観測システムの維持・管理に努めるとともに、データの品質管理を行い、⑤で述べるデータベース用のデータとして整備する。観測データの欠測率は10%以下を目標とする。</p> <p>広く利用されているMONSOLA-11に準ずる月平均日射量データを迅速に整備する手法を開発し、ユーザーにとって利便性の高い日射量データベースを構築する。また、整備した日射量データを用いて、わが国における日射量の年変動について明らかにする。</p> <p>「ひまわり8号」から送信されるデータを蓄積するデータストレージを購入し、データ解析が可能な環境整備を実施する。また、「ひまわり8号」のデータを用いた日射量推定技術の開発を行い、1年分の日射量データベースとして整備する。現状のアメダス地点の日射量データを用いた場合との乖離度について解析し、高密度化の効果について定量的に明らかにする。</p> <p>前事業で設置した5地点の気象観測地点における日射量の観測データを用いて、NEDOの日射量データベースの作成に用いた各種日射量推定モデルの検証・改良を行う。また、MONSOLA-11のデータ整備で用いている日射気候区について、</p>

					<p>最新の気象庁の観測データを用いて解析を行い、必要に応じて見直しを行う。</p> <p>加えて、2013年以降の観測データを収録した日射スペクトルデータを整備する。また、実測データを基に日射スペクトル推定モデルの改良を行い、気象庁の日射観測地点における2017年までの日射スペクトルデータを整備する。</p> <p>【最終目標】 観測は2019年度の夏まで継続する。観測データは⑤で述べるデータベース用のデータとして整備する。2019年度末までに観測システムの撤去作業を完了する。観測データの欠測率は10%以下を目標とする。④で開発する日射量推定モデルを用いて、2019年までの月平均日射量データベースを整備する。</p> <p>中間目標で達成した成果について、地上における日射観測データを用いて検証を行い、日射量推定技術の改良を行う。改良を加えた日射量推定技術を用いて、1kmメッシュ、1年分の日射量データベースとして整備する。</p> <p>中間目標で達成した成果について、地上における日射観測データを用いて検証を行い、日射量推定モデルの改良を行う。改良を加えた日射量推定モデル等により、気象庁から提供される2018年までの最新データを用いた日射量データベースを構築する。</p> <p>2018年までの観測データを収録した日射スペクトルデータベースを構築する。また、実測データを基に日射スペクトル推定モデルの改良を行い、気象庁の日射観測地点における2018年までの日射スペクトルデータを整備する。</p>
3	2015～2019	発電データ分析によるシステム信頼性および劣化率評価	学校法人東京理科大学	発電データ分析によるシステム信頼性および劣化率評価	<p>【中間目標】 北杜サイトの第1期設置システムについて発電特性の分析を継続できる環境を整備・維持しデータ分析を行うとともに、システムの発電データ分析およびモジュールの屋内外測定により設置後10年を迎えるシステムの劣化状況を明らかにする。モジュールの屋内測定結果から算出した年劣化率に対し、屋外測定データを用いたモジュール年劣化率の算出精度として±10%以内(平均)を実現する。</p> <p>【最終目標】 北杜サイトの発電特性分析から得られた劣化率等、本研究において得られた信頼性・劣化に関する知</p>

					見を発電電力量の算出方法に取り込む。本算出方法を用いた北杜メガソーラーの設置後10年間の発電電力量の推定精度として±10%以内(平均)を実現する。
4	2015 ～ 2018	アクセシブルな太陽光発電データベース構築技術の開発	国立大学 法人佐賀 大学	<p>①屋外曝露メガソーラーで利用可能な高速測定システムの開発</p> <p>②発電量、日射量データの補完アルゴリズムソフトウェアの開発</p> <p>③発電量、日射量データの解析ソフトウェアの開発</p>	<p>【中間目標】 屋外曝露メガソーラーにおいて利用可能なリアルタイム発電量、日射量データの高速測定システムを試作し、様々な方式による性能比較を行い、最も性能の高い方式を提案すること、測定間隔1秒以内を中間目標とする。 高速測定システムの実用化の観点から、最適な測定時間間隔を決定する。 発電量、日射量データの補完アルゴリズムソフトウェアを試作し、様々な数理工学的手法による補完アルゴリズムの性能比較を行い、試験データに対する補完誤差が10%を中間目標とする。 発電量、日射量データの解析ソフトウェアを作成し、試験データ・推定データ間の誤差が20%を中間目標とする</p> <p>【最終目標】 屋外曝露メガソーラーで利用できる発電量、日射量データの最高性能の高速測定システムを完成させること、測定間隔20ミリ秒以内を最終目標とする。 現実を再現できる発電量、日射量データの補完アルゴリズムソフトウェアを完成させ、試験データに対して補完誤差が10%以下になるようにする。 発電量、日射量データの解析ソフトウェアを完成させ、日射量等の気象データと発電量との関連を明らかにすることによって、試験データと推定データの誤差が10%以下になることを最終目標とする。</p>
ZEB 適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術の開発					
1	2015 ～ 2019	ZEB適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術の開発	株式会社 カネカ	<p>①ZEB 適用を想定した長期信頼性試験の開発</p> <p>②建材寿命を考慮した長期耐久性、長期発電性能評価技術の開発</p> <p>③低コスト高信頼性太陽電池モジュールの耐久性評価として、高信頼性技術を適用した ZEB 適用型太陽電池モジュールに対して、40年間の運転年数を想定した長期信頼性評価を行い、発電コストの見積もりを行う。</p> <p>④ZEB 適用型太陽電池モジュールの標準化への反映として、建材一体型太陽電池の建材としての適合性、太陽電池としての耐</p>	<p>【中間目標】 ・ ZEB 適用型太陽電池モジュールの30年間以上にわたる発電量を推定する評価方法を確立する。発電量データとの比較から1年目の年間平均出力値としての推定精度は±5%以内とし、30年間以上の運転期間にわたる発電性能の年率低下率(%/年)を推定する評価方法を開発する。評価に要する期間は100日以内とする。 ・ ZEB適用型太陽電池モジュールのZEB特有の負荷に対する耐久性を評価する試験方法と基準をBIPV国際標準化委員会にて提案する。</p>

				<p>久性、発電性能、長期信頼性を適切に評価する基準に関する国際規格や ZEB の普及に際してのガイドライン等に反映させる活動を行う。</p>	<p>・ ZEB適用型太陽電池モジュールとして、発電コスト 7 円/kWhを達成するためのコスト目標と課題を明確化する。</p> <p>・ 信頼性・寿命評価技術の開発を行うほかの採択者と連携し、開発している評価試験法の特徴（メリット、デメリット）を明らかにする。</p> <p>【最終目標】 ZEB 適用型太陽電池モジュールの建材としての利用期間（40 年間以上の運転期間）にわたる運転期間内総発電量（kWh/ 運転期間）を推定する評価方法を開発する。既設置の太陽光パネルに対しての長期信頼性評価に要する期間は 100 日以内とし、発電量実績データから算出される運転期間内総発電量を元に、太陽光パネルとしての継続利用機能耐用年数（継続利用可能期間）を推定する評価技術（推定精度 5 % 目標）を開発する。</p>
レーザー技術を用いた太陽電池モジュールの寿命予測検査技術の開発					
1	2015 ～ 2017	ケーシング側から見た太陽電池モジュールの寿命予測検査技術の開発	日清紡メカトロニクス株式会社	<p>(i) 発電劣化メカニズムの解明</p> <p>(a) 経年発電劣化メカニズムの解明</p> <p>(b) PID発生メカニズムの解明</p> <p>(c) 再現性良好なPID試験条件の決定</p> <p>(ii) 設置される環境を考慮したラボ加速試験方法の開発</p> <p>(iii) 30年発電性能の寿命予測技術の確立</p>	<p>【中間目標】</p> <p>i) 発電劣化メカニズムの解明</p> <p>(a) 経年発電劣化メカニズムの解明</p> <p>p型シリコンセル・n型シリコンセル、ヘテロシリコンセル搭載太陽電池モジュールの経年劣化メカニズムを「ケーシング」と「発電素子」の両面からレーザー技術で解析し、経年劣化メカニズムを提案する。</p> <p>(b) PID発生メカニズムの解明</p> <p>p型シリコンセル・n型シリコンセル、ヘテロシリコンセル搭載太陽電池モジュールのPID発生メカニズムを「ケーシング」と「発電素子」の両面からレーザー技術で解析し、PIDメカニズムを提案する。</p> <p>(c) 再現性良好なPID試験条件の決定</p> <p>実モジュールサイズの太陽電池モジュールで、PID試験結果がアレニウス則で整理可能な解析評価システムを開発する。同一太陽電池モジュール5枚のPID試験結果のばらつきが5%未満を達成する。</p> <p>(ii) 設置される環境を考慮したラボ加速試験方法の開発</p> <p>設置される環境を①湿度、②温度、③塩水、④アンモニア、⑤高電圧に分け、DH条件（①&②）に対して、③、④、⑤の因子の劣化加速係数を算出する。</p> <p>設置場所の環境に対し、①から⑤</p>

					<p>の条件を指定することで、10年、20年、30年に相当するDH試験条件を提示できる試験方法を開発する。</p> <p>(iii) 30年発電性能の寿命予測技術の確立</p> <p>発電劣化メカニズム解明の結果を踏まえ、「ケーシング」のラマン分光分析結果とレーザーによるセルキャリア速度分布評価結果の両面の考察により、レーザー技術による太陽電池モジュールの25年寿命を予測する技術を提案する。</p> <p>信頼性・寿命評価技術の開発を行う他の採択者と連携し、それぞれ開発する評価試験法の特徴(メリット、デメリット)をテーマ全体で、明らかにする。</p>
2	2015 ～ 2017	標準化を目指した寿命予測検査技術の開発	国立大学 法人奈良先端科学技術大学院大学	<p>①標準化を目指した寿命予測試験法の検討と劣化メカニズムのモデル化</p> <p>②寿命予測技術の標準化に向けた規格提案</p>	<p>【中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・発電素子の寿命評価技術を確立する。 ・P型、N型、PERC型Si太陽電池におけるモジュール劣化メカニズムモデルを構築する。 ・寿命予測技術の標準化において、規格第一案を提示する ・信頼性・寿命評価技術の開発を行う他の採択者と連携し、それぞれ開発する評価試験法の特徴(メリット、デメリット)をテーマ全体で、明らかにする。 <p>【最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・劣化メカニズムの解明と、寿命30年間予測する加速試験における標準化規格案をJEMAに提示する。
太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発					
1	2015 ～ 2019	太陽電池モジュールの劣化現象の解明、加速試験法の開発	国立研究開発法人産業技術総合研究所	<p>①モジュール劣化メカニズムの解明</p> <p>②各種加速試験法の開発</p> <p>③国際標準化とワークショップの創設</p>	<p>【中間目標】</p> <p>長期屋外曝露されたモジュール内酢酸量と発電量低下の関係を定量的に評価する。</p> <p>高温高湿試験と紫外線照射試験の組合せ試験を施したモジュールの発電量と試験条件の関係を定量的に評価する。</p> <p>PID現象に影響を及ぼす要因を体系的に整理し、その影響の程度を定量的に評価する。</p> <p>太陽電池モジュールの性能25年を予測できるとともに、屋外曝露に対して70倍以上の加速係数を有する試験方法を実現する。</p> <p>本NEDO事業を行う他の研究機関と連携し、開発している評価試験法の特徴(メリット、デメリット)を明らかにする。</p> <p>計2回のワークショップを開催する。日本電機工業会の委員会から2件以上の技術テーマについて国際標準化に向けて提案する。IEA PVPS タスク13の情報を収集し、結</p>

					<p>果をフィードバックする。また、成果物作成に貢献する。</p> <p>【最終目標】 長期屋外曝露されたモジュールの各種劣化要因と発電量低下の関係を定量的に評価する。 高温高湿試験、紫外線照射試験、温度サイクル試験、結露凍結試験等の組合せ試験を施したモジュールの発電量と試験条件の関係を定量的に評価する。 屋外でのPID試験での劣化要因を体系的に整理し、PIDの劣化現象を定量的に評価する。 各種環境に特有な劣化現象に応じた加速試験法を開発し、太陽電池モジュールの性能30年を予測できるとともに、屋外曝露に対して100倍以上の加速係数を実現する。 計4回のワークショップを開催する。日本電機工業会の委員会から5件以上の技術テーマについて国際標準化に向けて提案する。</p>
2	2015～2017	紫外線を含んだ環境因子による複合劣化現象の解析と屋外曝露劣化との相関性検証	デュボン・スペシャルティ・プロダクツ株式会社	<p>①紫外線を含んだ環境因子による複合劣化現象の解析</p> <p>②屋外曝露モジュールの劣化調査と複合劣化現象との相関性の検証</p> <p>③試験法開発</p>	<p>【中間目標】 紫外線を含む複合加速試験による封止材の劣化の定性的・定量的な指標を見出す。同時に屋外曝露モジュールの発電量低下の原因調査を実施することで、長期屋外曝露における劣化を再現することが可能な紫外線を含む加速試験方法の方向性を明らかにし、共同提案全体の目標である屋外曝露に対して70倍以上の加速係数（PVモジュールの寿命25年予測）を有する試験法の開発に貢献する。</p> <p>【最終目標】 他の共同提案機関とも連携し、種々の複合加速試験条件における封止材の劣化と、様々な設置環境の屋外曝露モジュール等の劣化の情報を統合し、汎用性が高い長期信頼性を評価する加速試験条件を見出すことにより、共同提案全体の目標である屋外曝露に対して100倍以上の加速係数（PVモジュールの寿命30年予測）を有する試験法の開発に貢献する。また、得られた紫外線による劣化、及び試験条件から国際標準化への提案に貢献する。本NEDO事業を行う他の研究機関と連携し、開発している評価試験法の特徴（メリット、デメリット）を明らかにする。</p>
3	2015～2017	屋外曝露モジュールの分析による加速試験法の開発	東レ株式会社	<p>①屋外曝露モジュールの分析</p> <p>②曝露環境の検討</p> <p>③複合加速試験の開発</p> <p>④国際標準化への取り組み</p>	<p>【中間目標】 本NEDO事業を行う他の研究機関と連携し、開発している評価試験法の特徴（メリット、デメリット）を明らかにする。</p> <p>既保有長期曝露モジュール、短期</p>

					<p>曝露モジュールの解析結果から、裏面材の物性のうち環境ストレスにより劣化したパラメータを2種以上特定し、そのパラメータの劣化要因となったストレスの種類と量を推定する。複合加速試験について、既に提案されている試験および考案した試験の結果を検討し、屋外曝露モジュールとの関連について妥当性の検討を行い、加速試験の開発について目処をつける。目標値は、25年の耐久性を満足するかどうかを3ヶ月（0.25年）で判断できることとする（加速係数100倍）。</p> <p>【最終目標】 中期の曝露モジュールと短期の曝露モジュールの分析結果を比較し、電氣的安全性を担保する裏面材の物性が劣化する速度を見積もり、加速試験での挙動と比較する。</p> <p>曝露環境について、モジュール裏面材が受ける温度・湿度・紫外線ストレス量を正確に理解する。</p> <p>以上の検討結果を活用し、モジュールの環境要因による影響を明らかにすること、および、モジュールの安全性低下につながる可能性のある裏面材の劣化メカニズムを再現する加速試験の開発を達成する。目標値は、30年の耐久性を満足するかどうかを4ヶ月弱（0.30年）で判断できることとする（加速係数100倍）。</p> <p>得られた知見・成果を基礎として、国際標準化の議論の場にて意見・提案を行い、標準化に向けた取り組みを行う。</p>
4	2015 ～ 2019	屋外での電圧誘起劣化の実証研究	石川県工業試験場	<p>② 屋外でのPID実証試験</p> <p>③ 太陽電池の解析（太陽電池内部を理論的に解析することで、PIDの劣化メカニズムを解明する。）</p>	<p>【中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・高システム電圧で稼動する太陽電池のI-V特性の2年間分以上の測定データをまとめる。 ・PID誘発試験データから、PID発生時における特性の挙動を、1特性以上見出す。 ・シミュレーション解析を基にモジュール内においてPIDが誘発し易い箇所・部材を見出し、PID現象による劣化メカニズムの解明を目指す。 ・解析結果を基にPIDに有効な対策案を1つ以上見出す。 ・本NEDO事業を行う他の研究機関と連携し、開発している評価試験法の特徴（メリット、デメリット）を明らかにする。 <p>【最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・高システム電圧で稼動する太陽電池のI-V特性の4年間分以上の測

					定データをまとめて、劣化とPID発生との関係性を導出する。 ・従来の太陽電池と比較して、PIDに対する耐性を2倍以上にするための条件を導出する。
5	2015 ～ 2019	電圧誘起劣化が発生した箇所の特 定方法、微視的評価手 法の開発	国立大学 法人岐阜 大学	<p>①PIDのメカニズムの解明</p> <ul style="list-style-type: none"> ・PID加速試験の制御物理量として、PID劣化時の周囲温度、印加電圧、湿度に注目しガラス中より析出するナトリウム化合物を分析する。 ・EVA樹脂中のナトリウム化合物の拡散過程を評価する。 <p>②LBICを用いたPID発生箇所の特 定方法に関する研究開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・LBICを応用しPID発生箇所を高速で特定する測定システムを構築する。 ・太陽電池セルの電気的パラメーター（電流源、抵抗、容量）をモデル化し、V-I特性の2次元マッピングとの相関を明らかにする。 <p>③PIDの回復技術と抑止技術の 開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・室温および高温下において、PID回復現象の電界依存性を評価する。 ・ガラスに析出したナトリウム化合物を定量する。 ・PID抑止効果の液体ガラス塗布膜厚、焼結温度依存性を評価する。 ・液体ガラスを塗布したカバーガラスにおけるナトリウム化合物の分析を行う。 	<p>【中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・NEDO事業を行う他の研究機関と連携し、開発している評価試験法の特徴（メリット、デメリット）を明らかにする。 ・樹脂中拡散過程、太陽電池へのナトリウム化合物の拡散と光起電力低下に関する総合的で微視的なPID現象発現機構を明らかにする。 ・PID発生箇所の特 定技術の開発 ・②で構築したPID発生箇所特 定技術を応用し、局所的レーザー加熱装置を開発する。 ・レーザー加熱による拡散過程を評価する。 ・室温環境下にてPID回復を加速するための、印加電圧とレーザー照射条件を検討する。 ・ガラスの両面に液体ガラス層を形成し、ナトリウム化合物拡散バリアとして使用する。 <p>【最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・PID発生箇所の局所特性測定装置とPIDの回復加速との双方の光学系を同軸に結合する。 ・液体ガラスを用いたPID抑止技術を施工済み太陽電池モジュールに 応用し、PID抑止効果を確認する。
6	2015 ～ 2019	太陽電池モ ジュールの 湿熱劣化の 実時間観測 手法の開発	国立大学 法人東京 農工大学	<ol style="list-style-type: none"> 1) 蛍光色素pHセンサの開発 2) 錫膜酢酸検出センサの開発 3) 金ナノコンポジット膜の局在表面プラズモン共鳴(LSPR)酢酸センサの開発 4) 3種の酢酸検出センサの高温高湿試験における性能比較 5) 試験方法の開発 	<p>【中間目標】</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 蛍光色素酢酸センサ基板はpH5程度を検出できることを明らかにする。 2) 錫薄膜酢酸センサ基板は、2000ppmの酢酸濃度を検出できることを明らかにする。 3) 金ナノコンポジット局在表面プラズモン共鳴(LSPR)酢酸センサ基板は、100ppm程度の微量酢酸濃度を検出できることを明らかにする。 4) 開発した酢酸センサ基板を太陽電池モジュール内に実装して、高温高湿試験を実施し、酢酸検出感度および高温耐久性を比較する。 5) 3種の酢酸センサ基板のうち最適なセンサ基板を抽出する。 6) 要求される検出性能を満たさない場合には、複数のセンサ基板を組み合わせたハイブリッドセンサとすることで要求仕様が満たされることを示す。

					<p>【最終目標】</p> <p>1) 開発酢酸センサ基板を小型化し、太陽電池モジュール内に多数配置して水分浸入による酢酸発生経路を明らかにする。</p> <p>2) 各点で浸入した水分量を求めることで、水分および酢酸発生状態を明確化させ、太陽電池モジュールの劣化メカニズム解明の一助とする。</p> <p>3) 各測定点での酢酸検出分布を推定することでモジュール内部における水分とそれに伴う酢酸の微視的な動態を観測する。</p> <p>以上を遂行することで、本手法が太陽電池モジュールの長期劣化を抑制するための新たな評価技術であることを証明する。</p>
7	2015 ～ 2019	n型結晶シリコン太陽電池における電圧誘起劣化機構の明確化	国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学	<p>①リアエミッタ型太陽電池モジュールに関するPIDの機構解明</p> <p>②ヘテロ接合型太陽電池モジュール</p> <p>③フロントエミッタ型太陽電池モジュール</p>	<p>【中間目標】</p> <p>PID特性の明確化と、その抑制のための指針を明らかにする。</p> <p>【最終目標】</p> <p>PIDによるモジュール変換効率の劣化率を30年で20%以下に抑える条件を明らかにする。</p>
8	2015 ～ 2019	経年劣化を考慮した各種太陽電池の発電量評価技術の開発 / メガソーラーの発電量及び信頼性評価技術の開発	一般財団法人電力中央研究所	<p>①各種太陽電池の発電量評価技術の開発</p> <p>②メガソーラーの発電量診断手法の開発</p> <p>③IEC/TC82/WG2における発電量定格 (IEC 61853) の確立</p>	<p>【中間目標】</p> <p>各種太陽電池モジュールの発電性能の経年劣化率を1%程度の精度で算出することを可能にする長期信頼性評価技術を開発する。</p> <p>メガソーラーの発電性能の経年劣化を2%程度の精度で算出可能な発電量診断技術を開発する。</p> <p>IEC/TC82/WG2にて、IEC 61853シリーズにて規格成立に向けて審議に参加する。IEC 61853-4に日本の気象データを提供し、日本を発電量定格の1つの気候区として採用されるに規格審議を行なう。</p> <p>【最終目標】</p> <p>5つの日射気候区における各種太陽電池の経年劣化を考慮した生涯発電量 (25年) を算出する。</p> <p>メガソーラーの発電性能の経年劣化を1%程度の精度で算出可能な発電量診断技術を開発する。メガソーラーの発電量診断手法に関するガイドラインの作成を行なう。</p> <p>IEC 61853シリーズをJIS規格として成立させる。</p>

表. 6 研究開発項目⑤
「動向調査等」

No.	開発期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	目標	その他
太陽光発電開発戦略に関する動向調査						
1	2015 ～ 2019	「太陽光発電開発戦略」の推進に係る情報収集、太陽光発電コスト分析、太陽光発電産業・市場動向等に関するシナリオ分析	みずほ情報総研株式会社	① 「太陽光発電開発戦略」で提示されている情報の更新 ② 日本における太陽光発電システム発電コスト分析をするとともに、海外(欧米等)における発電コスト分析・評価事例の調査 ③ 国内外における太陽光発電市場の分野別規模や構成要素別の分析及び太陽光発電に係るバリューチェーンの主要企業の動向を調査	【中間目標】 発電コスト目標達成後の産業、市場動向について、シナリオ分析を行う。 【最終目標】 発電コスト 7 円/kWh 実現に向け、開発戦略の見直しの可否を検討するとともに、必要に応じ、見直し案を作成する	
2		「太陽光発電開発戦略」の方向性に関する検討	みずほ情報総研株式会社	上記調査分析に基づき、太陽光発電技術開発の方向性に関する検討	同上	
3		「太陽光発電システム搭載自動車」に関する調査	みずほ情報総研株式会社	「高効率太陽電池」の特長を生かした「面積制約」を受ける環境での活用例として「太陽光発電システム搭載自動車」に関する情報収集、課題の抽出	同上	

発電コスト低減に向けた太陽電池技術開発に関する動向調査						
1	2015 ～ 2019	太陽電池モジュール性能と発電コストの関係性および産業競争力に関する動向調査	株式会社 資源総合システム	<ul style="list-style-type: none"> ① 発電コスト調査 ② 太陽電池モジュールの現状技術および産業競争力に関する調査 ③ 太陽電池モジュールの長期信頼性調査 	<p>【中間目標】 年度毎に太陽電池モジュールの性能と発電コストの関係を客観的に分析するとともに、モジュールの産業競争力を評価する。</p> <p>【最終目標】 発電コスト7円/kWhの達成後の産業・市場の動向について、太陽電池モジュールの新たな利用方法の想定や、産業競争力向上による国内産業発展のためのシナリオ検討</p>	
2		太陽電池モジュール製造技術開発と製造コストに関する調査・分析	株式会社 資源総合システム	<ul style="list-style-type: none"> ① 現在市場で主に流通している結晶シリコンと化合物太陽電池に焦点を当て、太陽電池モジュール製造技術の開発及びプロセス改善等によるモジュール性能向上の可能性、コストの内訳とその変化について調査・分析 ② 欧米各国のや中国等の中核的研究機関や産業団体、大手太陽電池製造企業は発表する開発ロードマップ等の各種資料を調査・整理し、製造コストの内訳について把握 ③ モジュールの製造コスト及び長期信頼性に寄与する太陽電池モジュール用材料・部材、製造装置の開発等によるモジュール性能向上の可能性検討 	同上	
3		太陽電池モジュールの利用動向と今後の産業と市場の可能性に関する調査	株式会社 資源総合システム	<ul style="list-style-type: none"> ① 最近の市場動向から要請される太陽電池モジュール仕様の要件をまとめ、技術開発要素を整理する ② No. 1, No. 2, No. 4 の結果を総合して市場規模並びに導入地域が拡大したことにより新たに必要となる利用環境及び分散電源としての建物装置(BIPV, 軽量化)などへの応用可能性を検討するとともに、発電コスト低減目標達成後の太陽電池製造に係る産業および市場について、太陽電池技術と市場のニーズ、生産体制の構築や国外市場への展開などの国内産業の在り方も含めた検討を行う。 	同上	
4		各国の太陽電池研究開発政策動向及び新たな太陽電池技術に関する調査	株式会社 資源総合システム	<ul style="list-style-type: none"> ① 主要国における研究開発政策動向に関する調査 ② 新たな太陽電池技術の開発動向に関する調査 	同上	

IEA PVPS 国際協力事業						
1	2015 ～ 2019	タスク1 専門家会議等の国際協力活動への参加及びタスク1に係る定期刊行物の作成及び重要刊行物の日本語版の作成	株式会社 資源総合システム	国際協力活動への参加を通じて、日本の太陽光発電の国際競争力向上に資する情報収集を行うために太陽光発電動向の戦略的分析及び情報の普及を実施しているタスク1に参加する。	【中間目標】 NEDOが参画するPVPSの活動に参加し、その内容を産業界に発信する。2018年度以降のPVPSへの新たな活動計画案を作成する。 【最終目標】 PVPS の動向及び展開を踏まえた、定期的な情報発信を行う	
2		特別情報活動（ワークショップ）	株式会社 資源総合システム	タスクIが実施する特別情報（国際会議におけるワークショップ・セミナー等）に関しては、日本の専門家に対して要求される各国との事前調整及び国内調整を実施すると共に必要に応じて会費の講演・運営準備等を実施する。	同上	
3		タスク1に係る定期刊行物の作成及び重要刊行物の日本語版の作成	株式会社 資源総合システム	日本の太陽光発電に関する定期刊行物（調査報告書）の作成及び重要性の高い IEA PVPS 定期刊行物の日本語版の作成。	同上	

表. 7 研究開発項目⑥

「高性能太陽電池製造技術実証」

No.	開発期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	目標	その他
太陽光発電開発戦略に関する動向調査						
1	2018 ～ 2019	低コストヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池の小規模量産実証	株式会社 カネカ	① 低コスト p/n、電極パターン形成技術の量産実証 ヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池の実用化での最大の技術的課題である p/n、電極パターンを低コストで形成するための独自のパターン形成技術を少量生産レベルで実証する。 ② 高変換効率化技術の量産実証 高変換効率化を実現する上でのキー技術である非晶質シリコンによるシリコン基板の高品質パッシベーション技術（高品質ヘテロジャンクション形成技術）や直列抵抗損の低減技術等を小規模生産レベルレベルで実証する。	【最終目標】 ヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池セルを用い 2025 年に発電コスト 7 円/kWh を達成するための製造技術を試作レベルで実証する。	

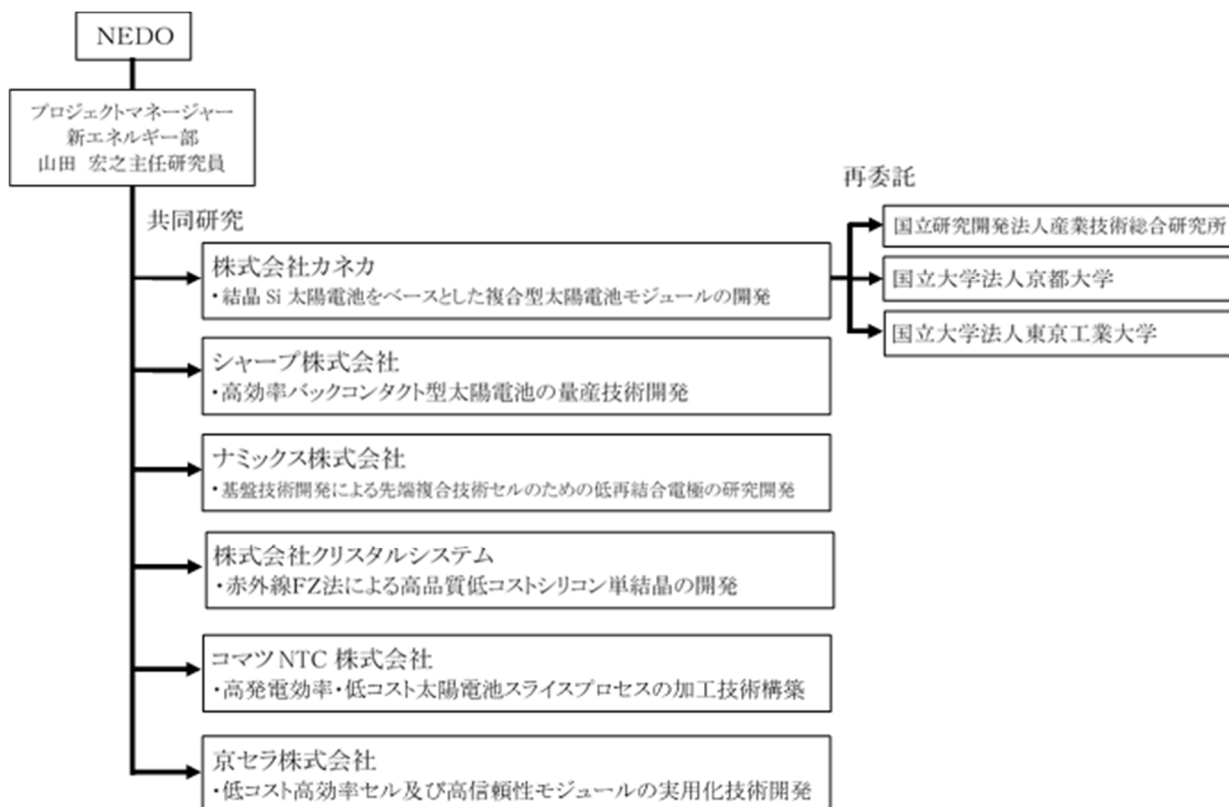
2.2 研究開発の実施体制

本研究開発は、NEDO が選定する企業、大学、民間研究機関、あるいは国立研究開発法人等（以下、「委託先」という。）が、NEDO と委託研究契約を締結し実施している。

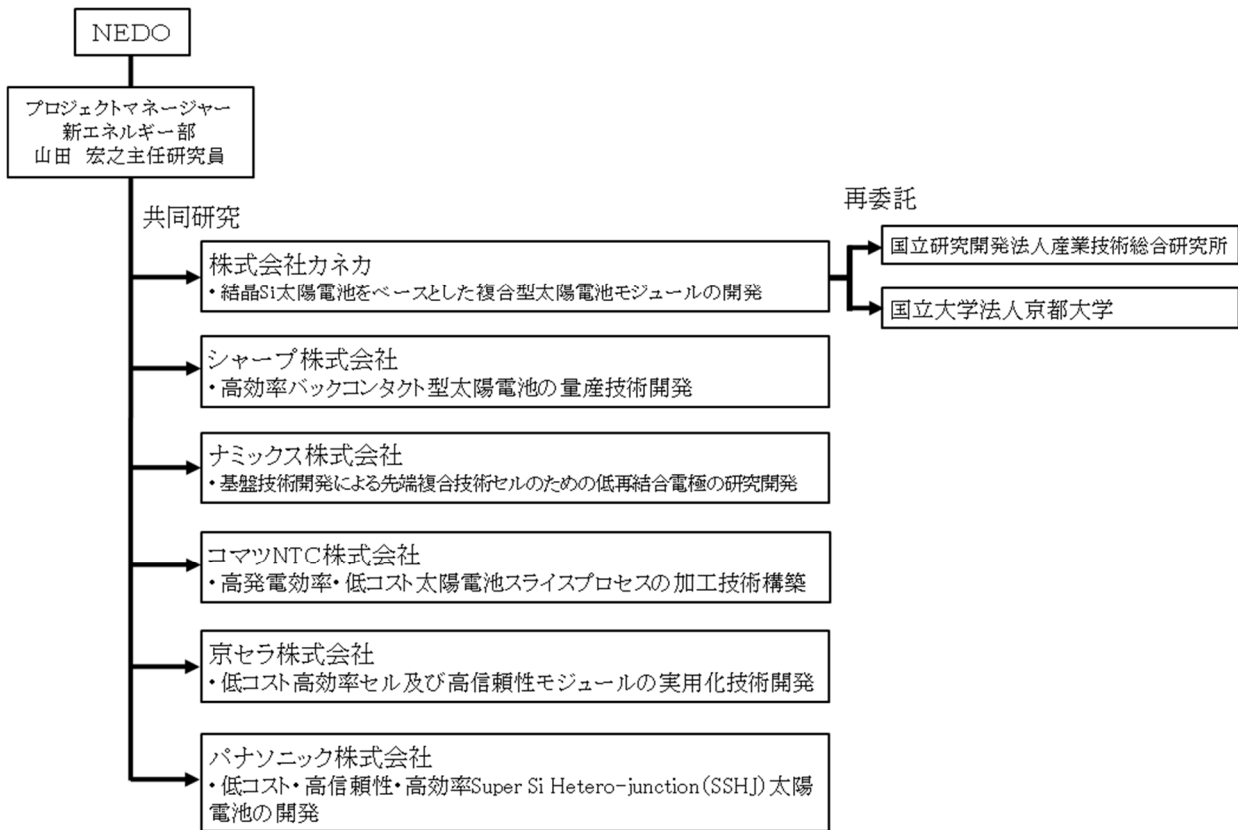
研究開発項目①「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の技術開発」

（１） 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

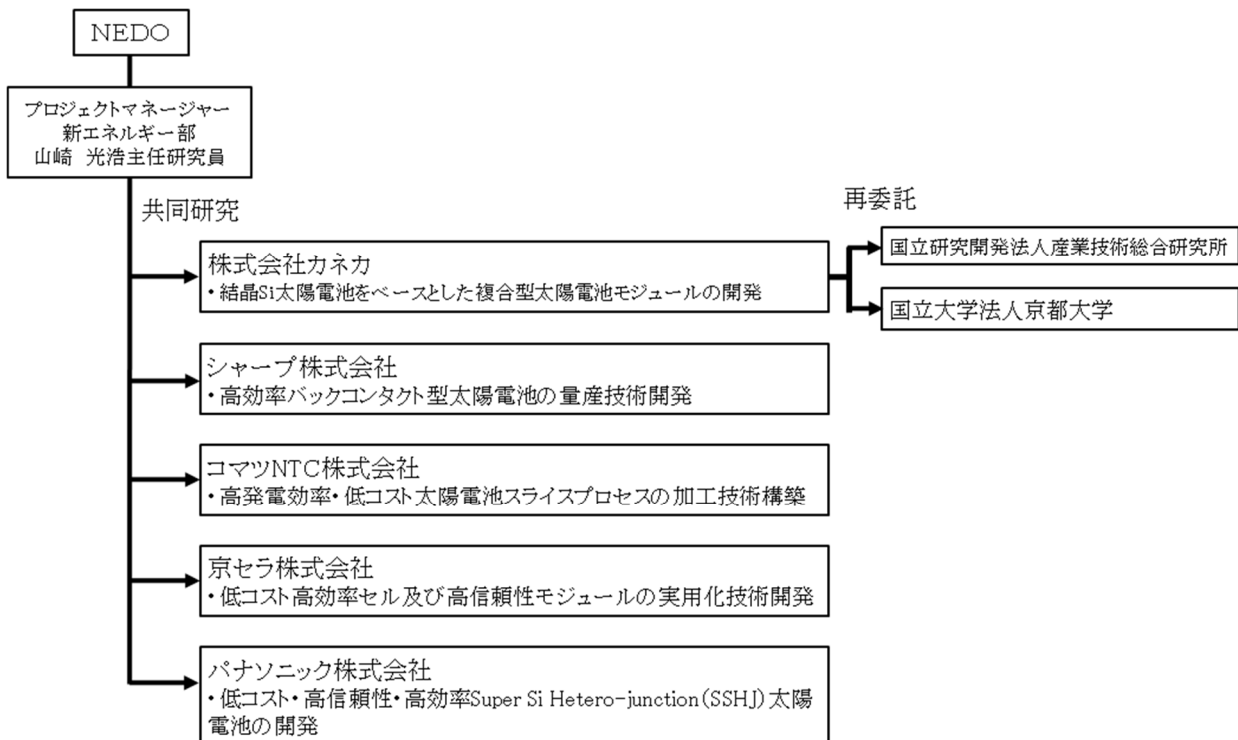
【2015 年度～2017 年度】



【2018年度】

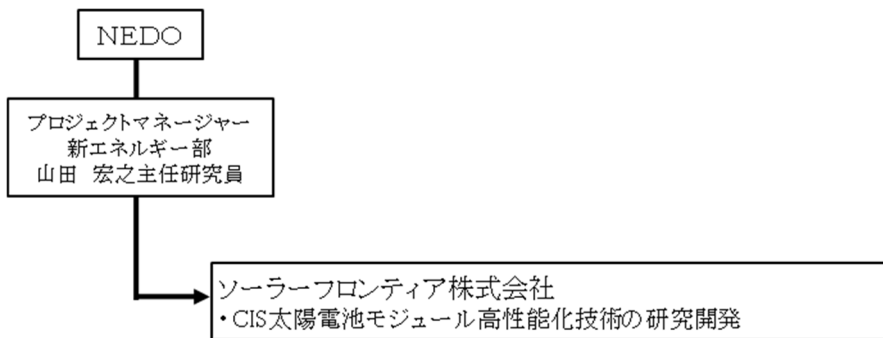


【2019年度】

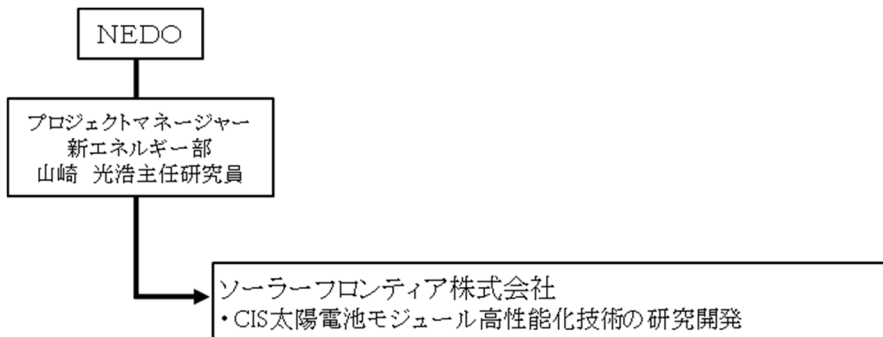


(2) 高性能 CIS 太陽電池の開発

【2015 年度～2018 年度】



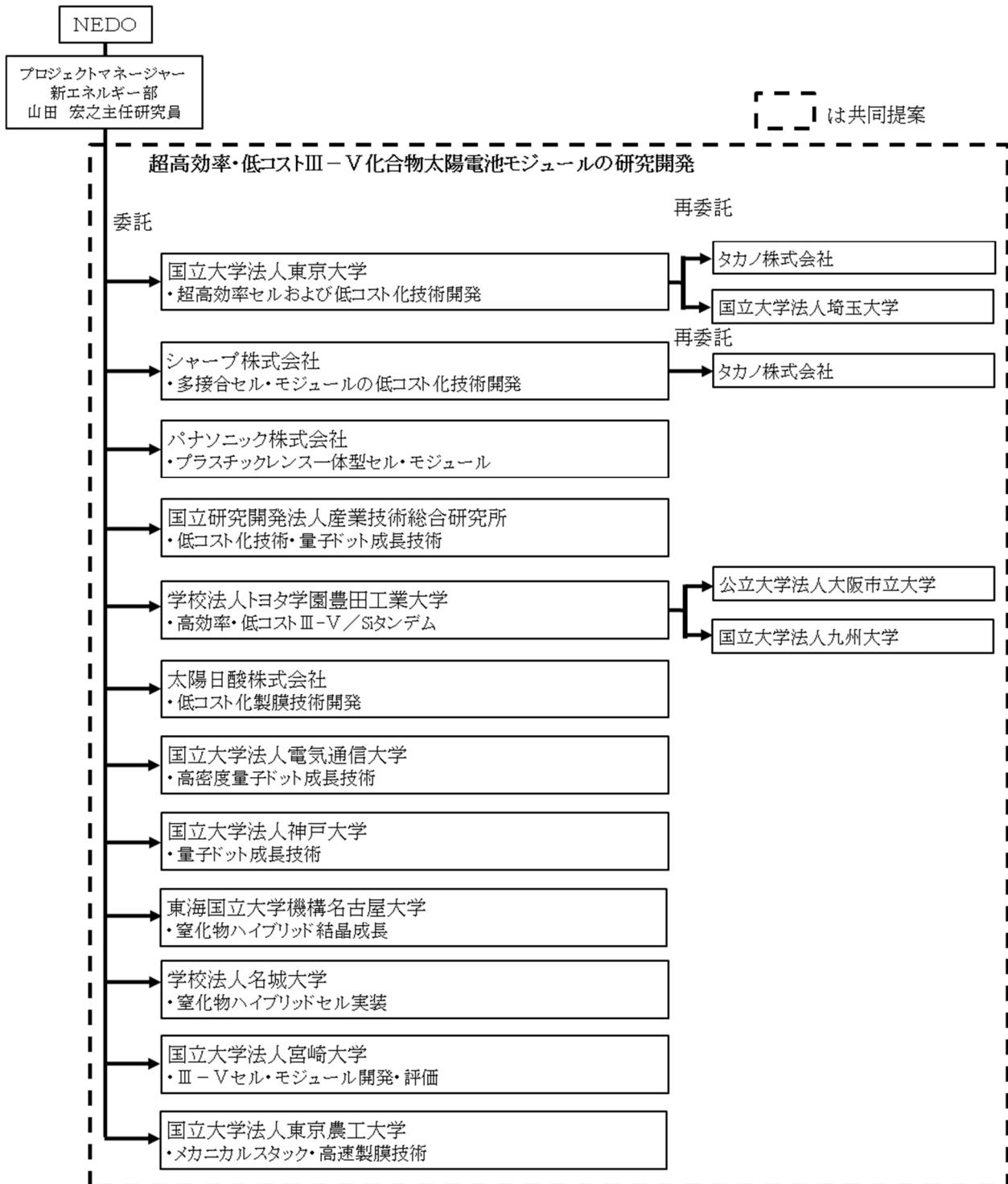
【2019 年度】



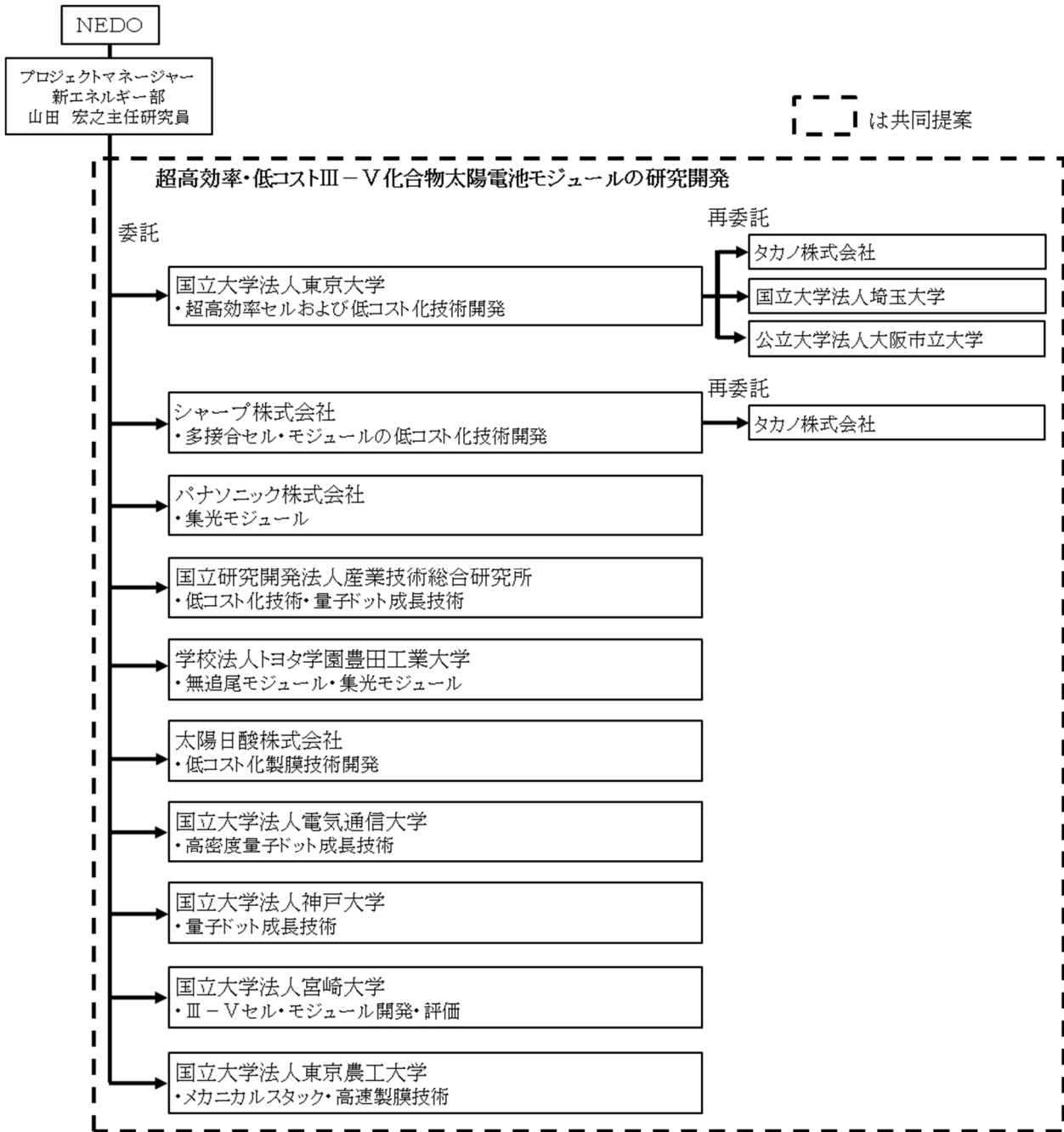
研究開発項目②「革新的新構造太陽電池の研究開発」

(1) 革新的高効率太陽電池の研究開発

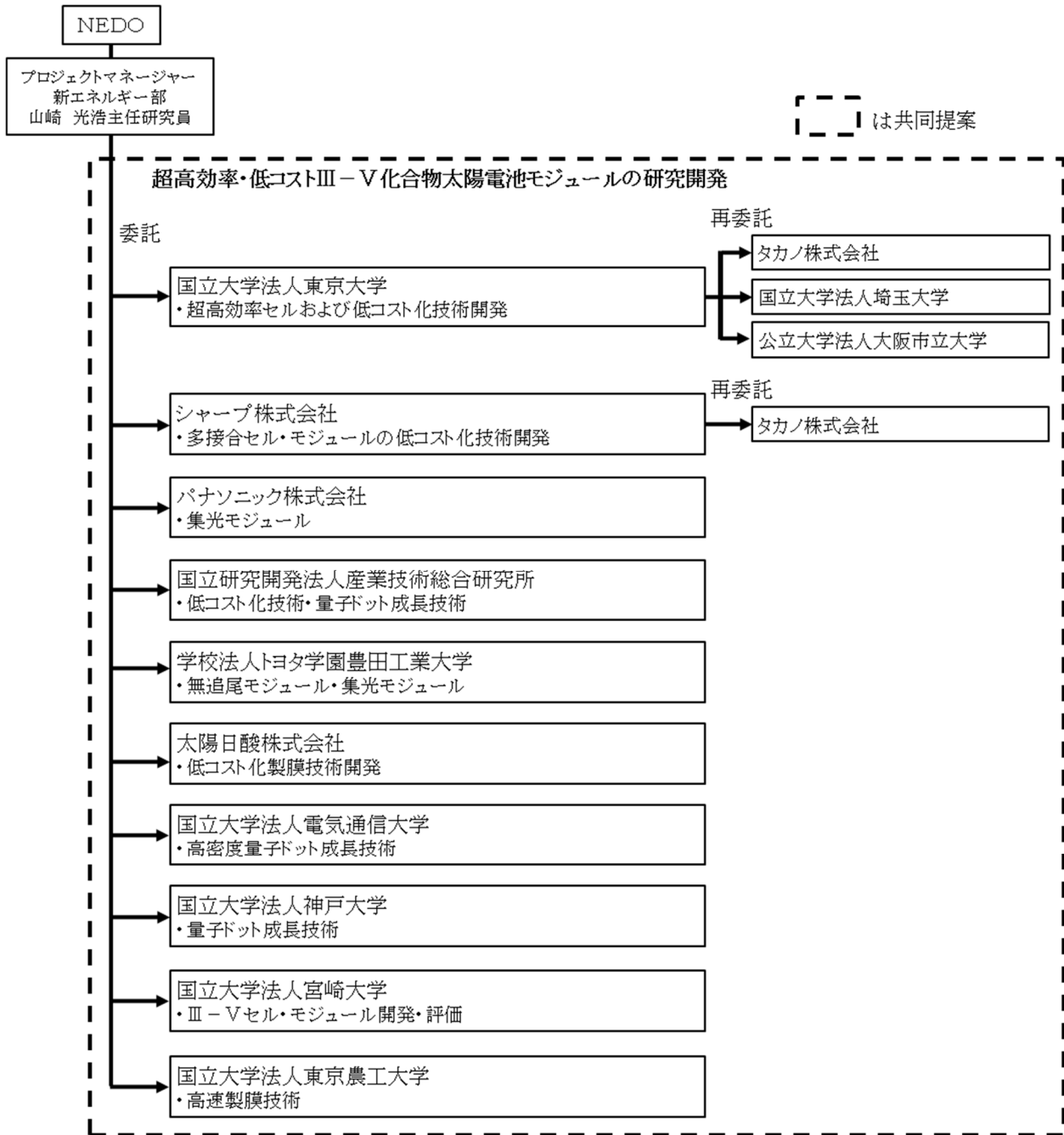
【2015年度～2017年度】



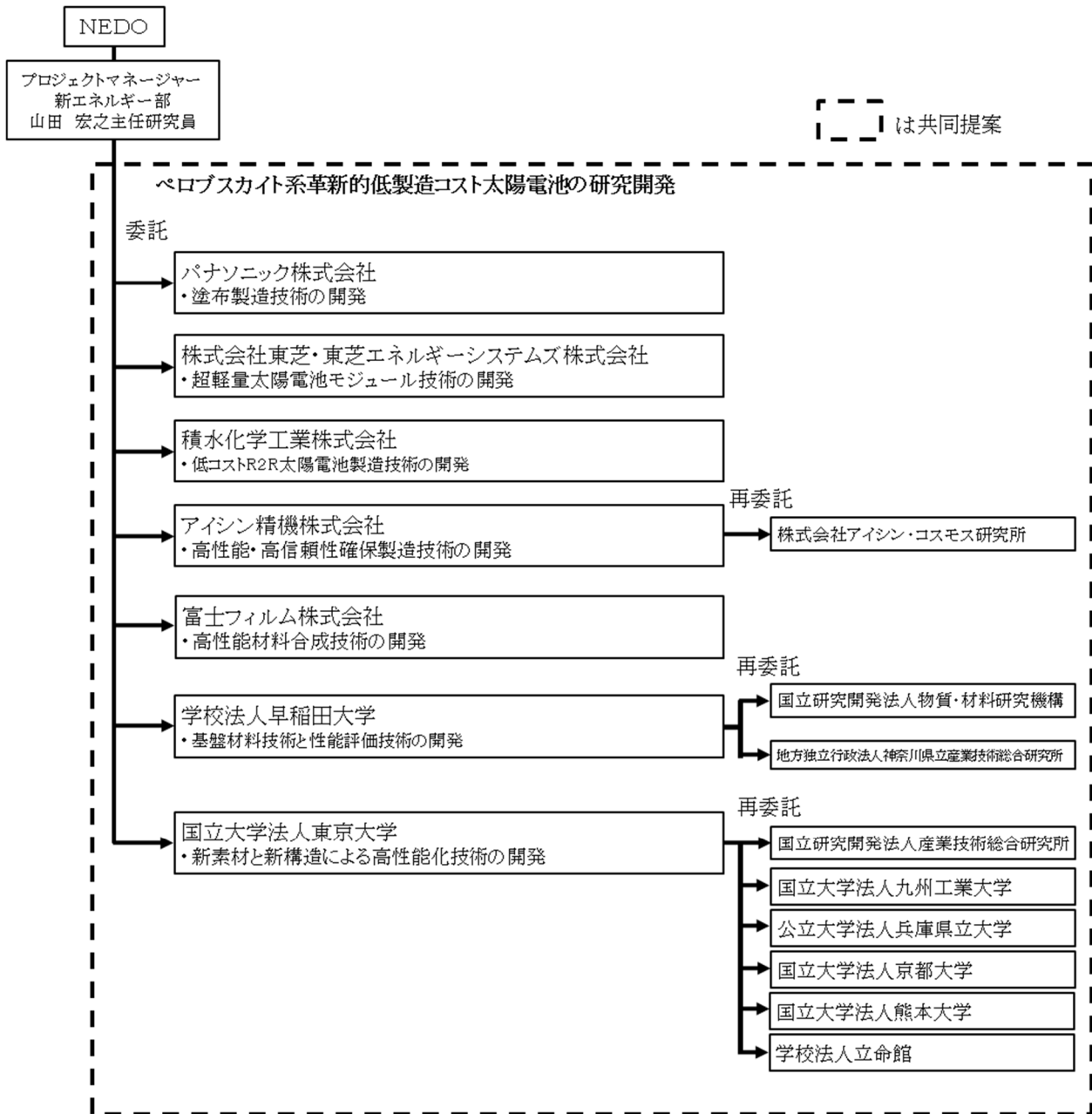
【2018年度】



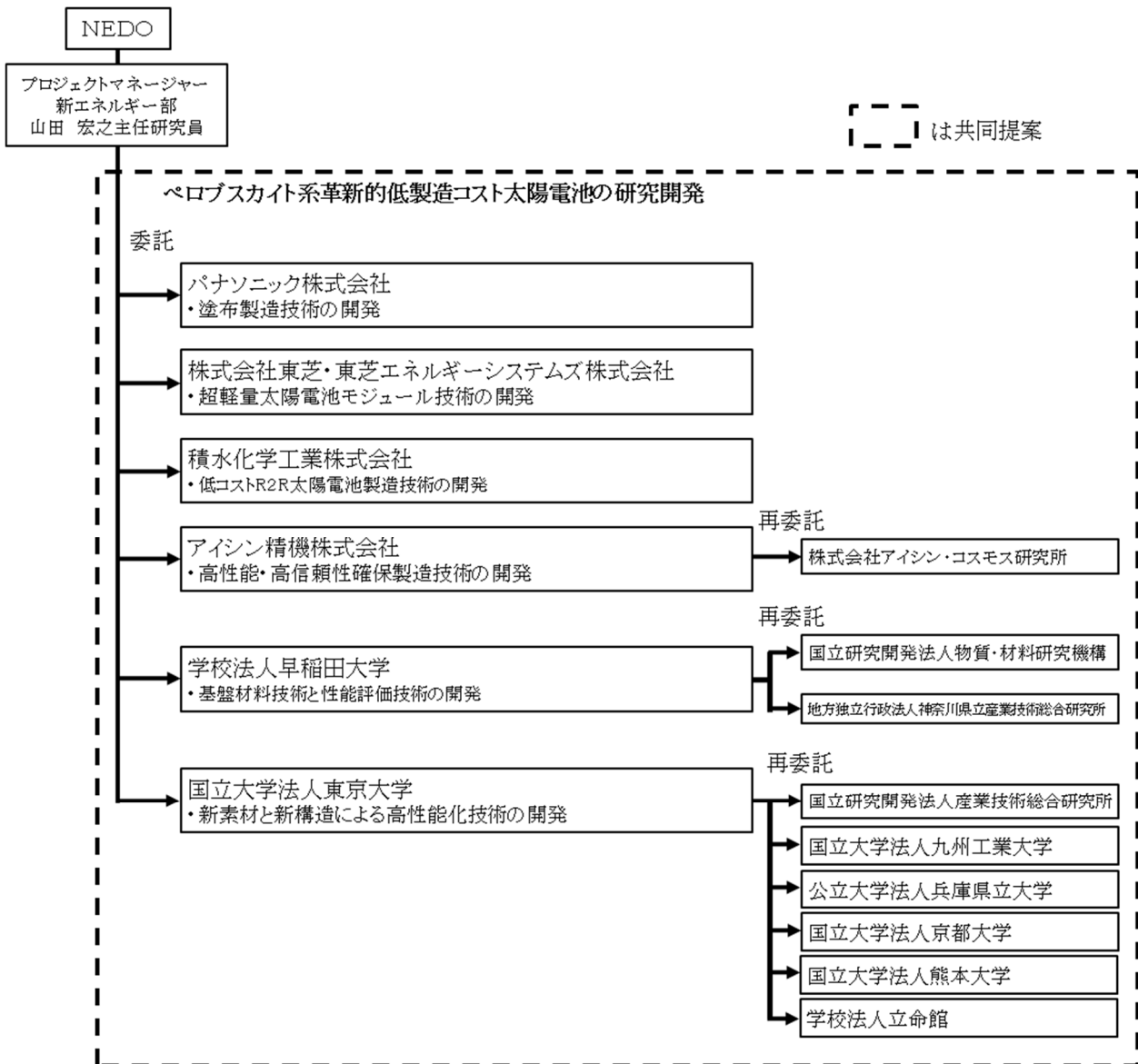
【2019 年度】



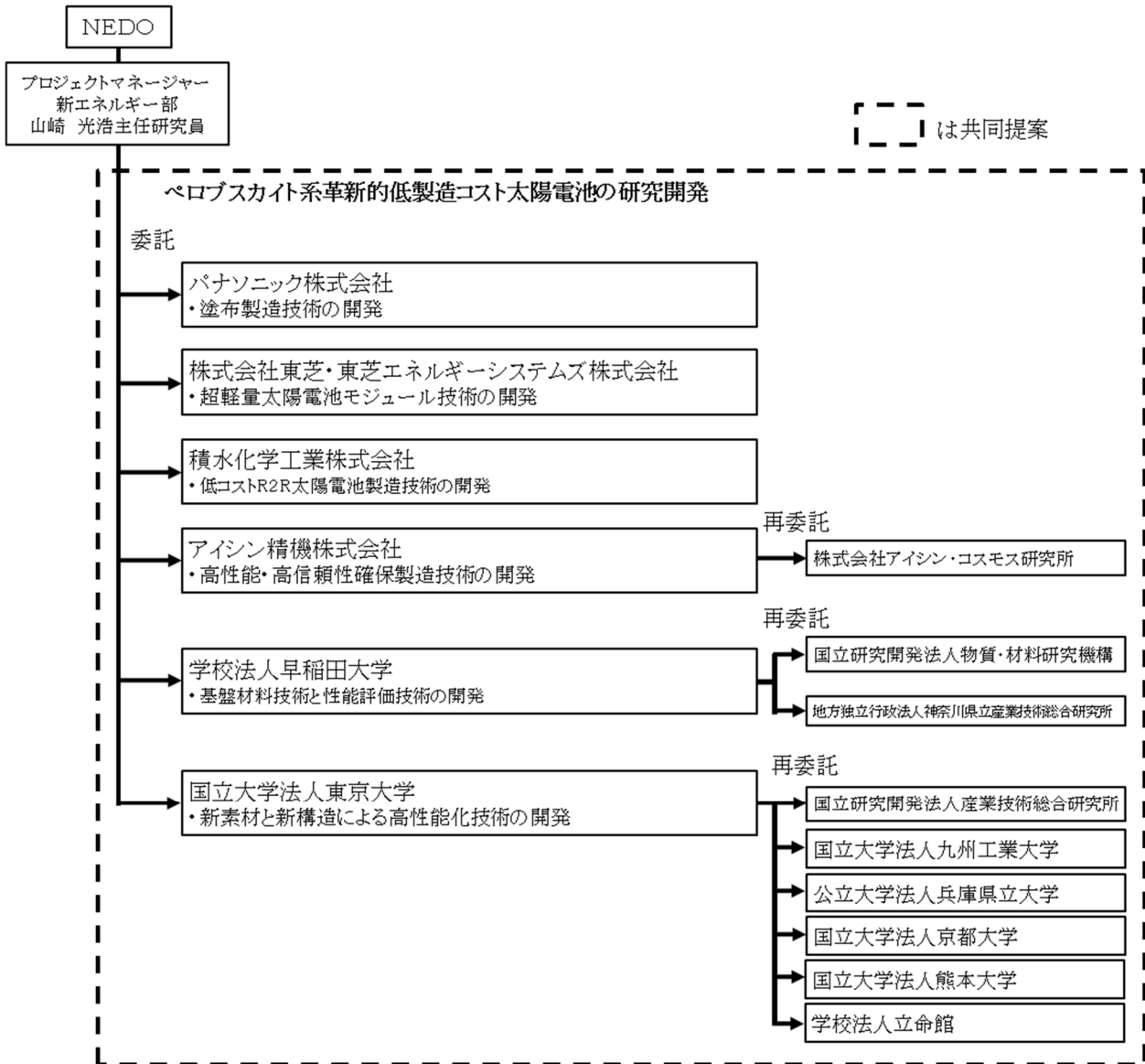
(2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発
【2015年度～2017年度】



【2018年度】



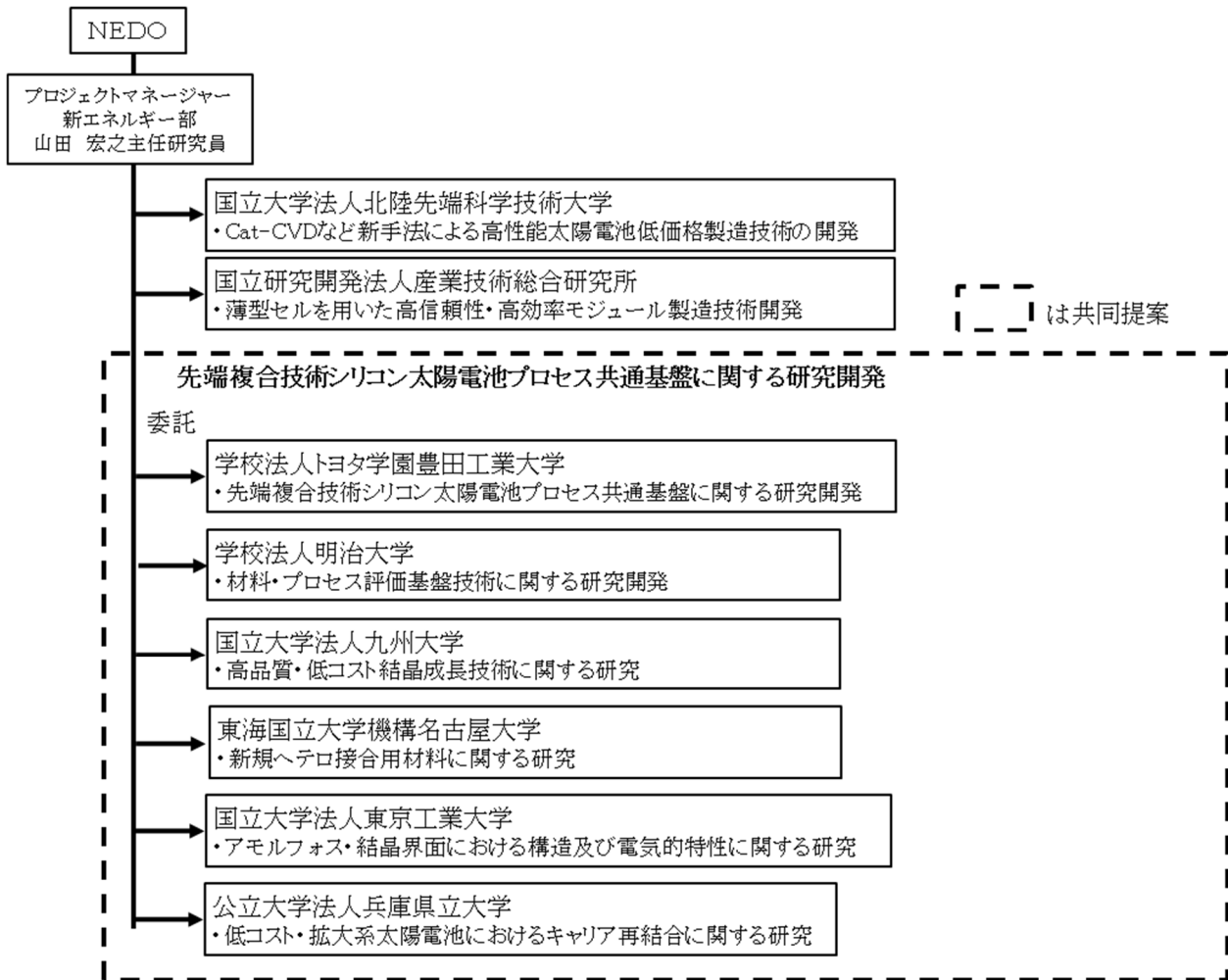
【2019 年度】



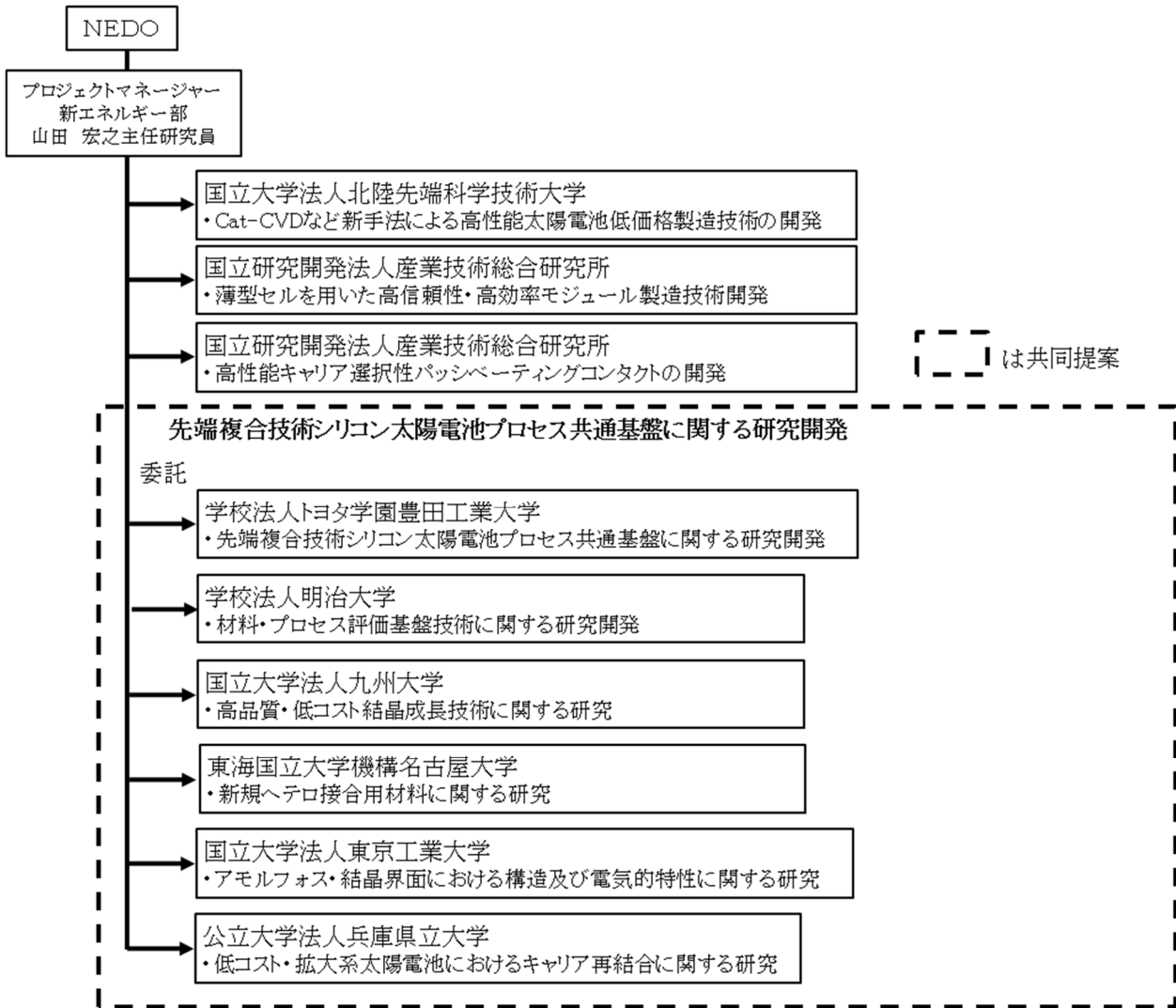
研究開発項目③「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」

(1) 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

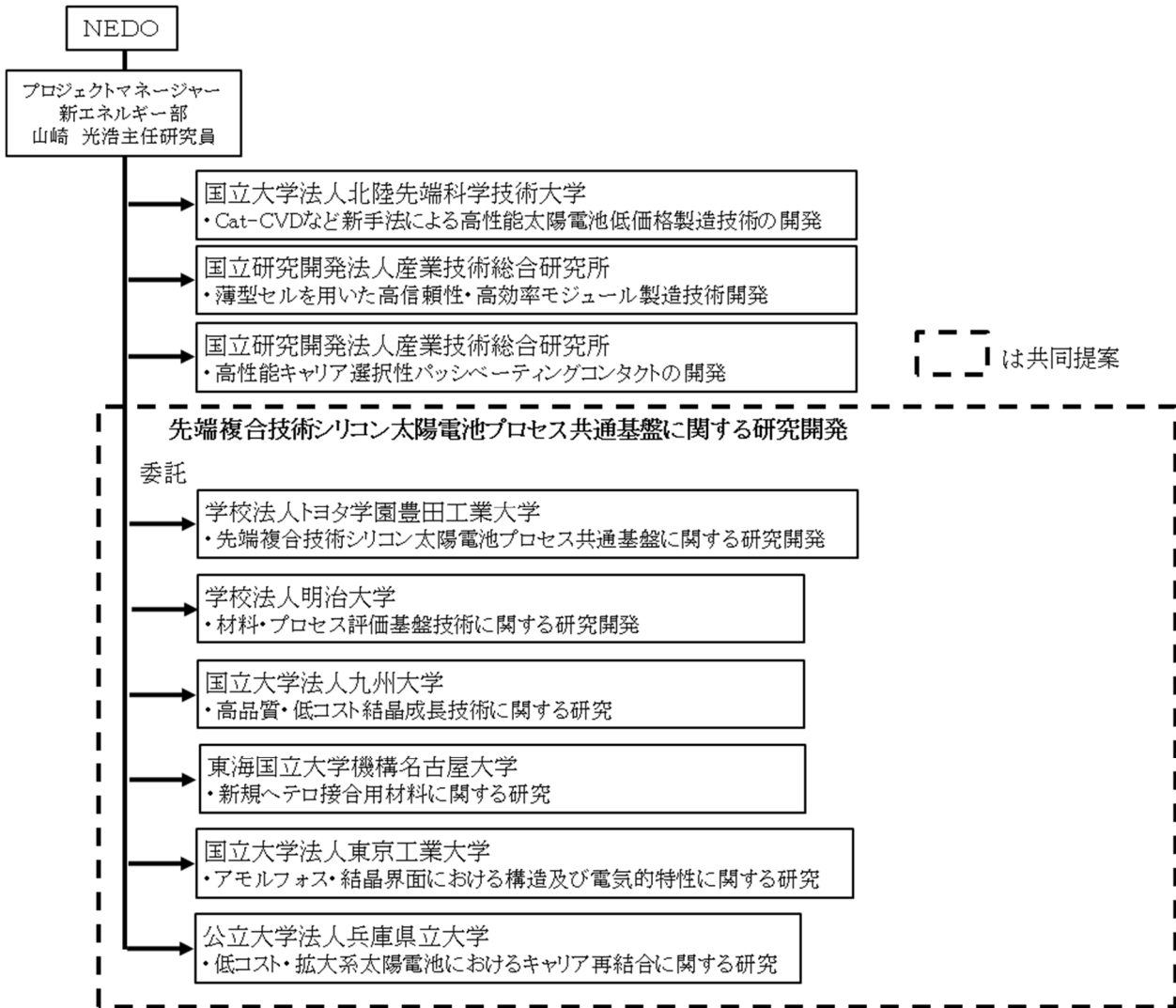
【2015年度～2017年度】



【2018年度】

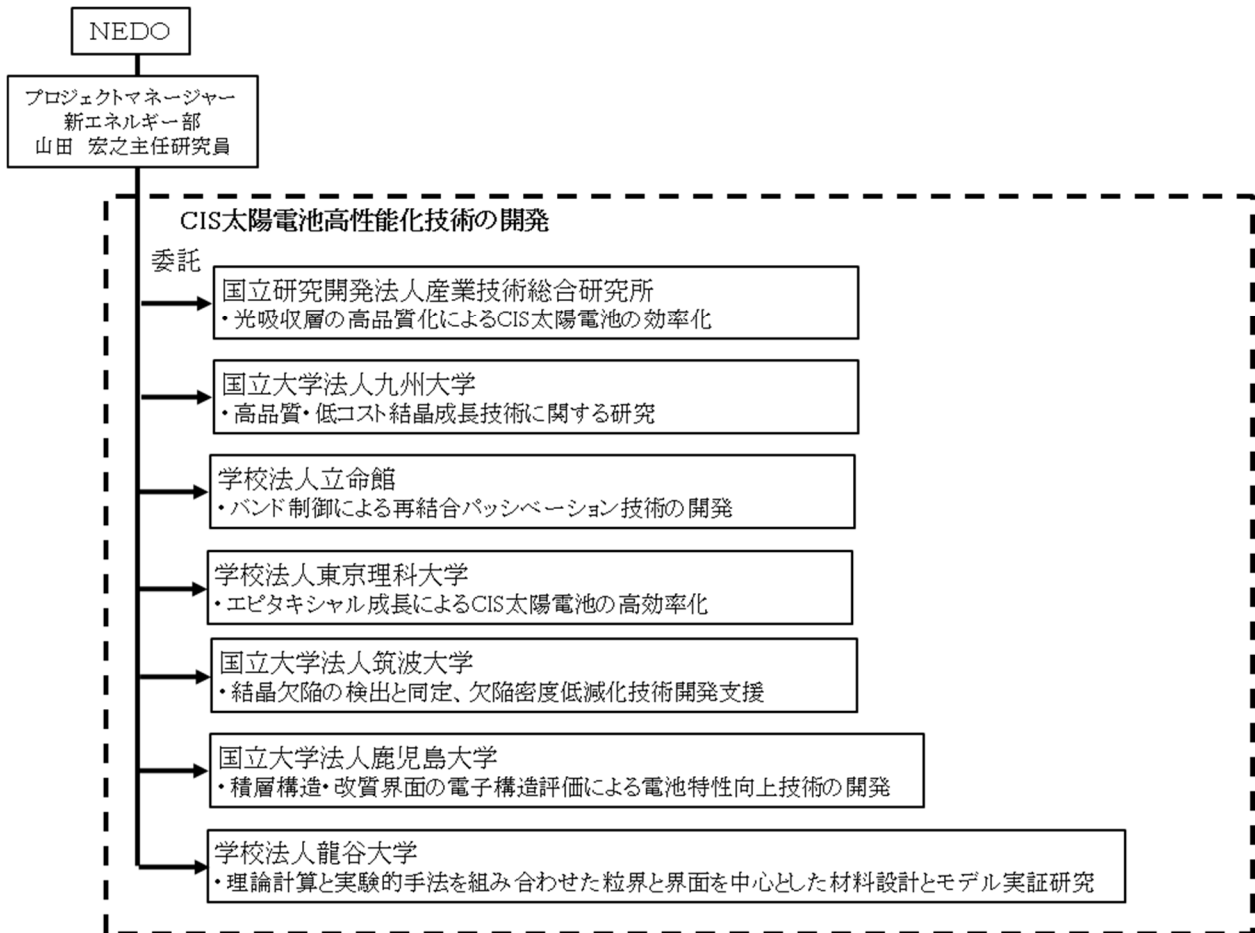


【2019 年度】

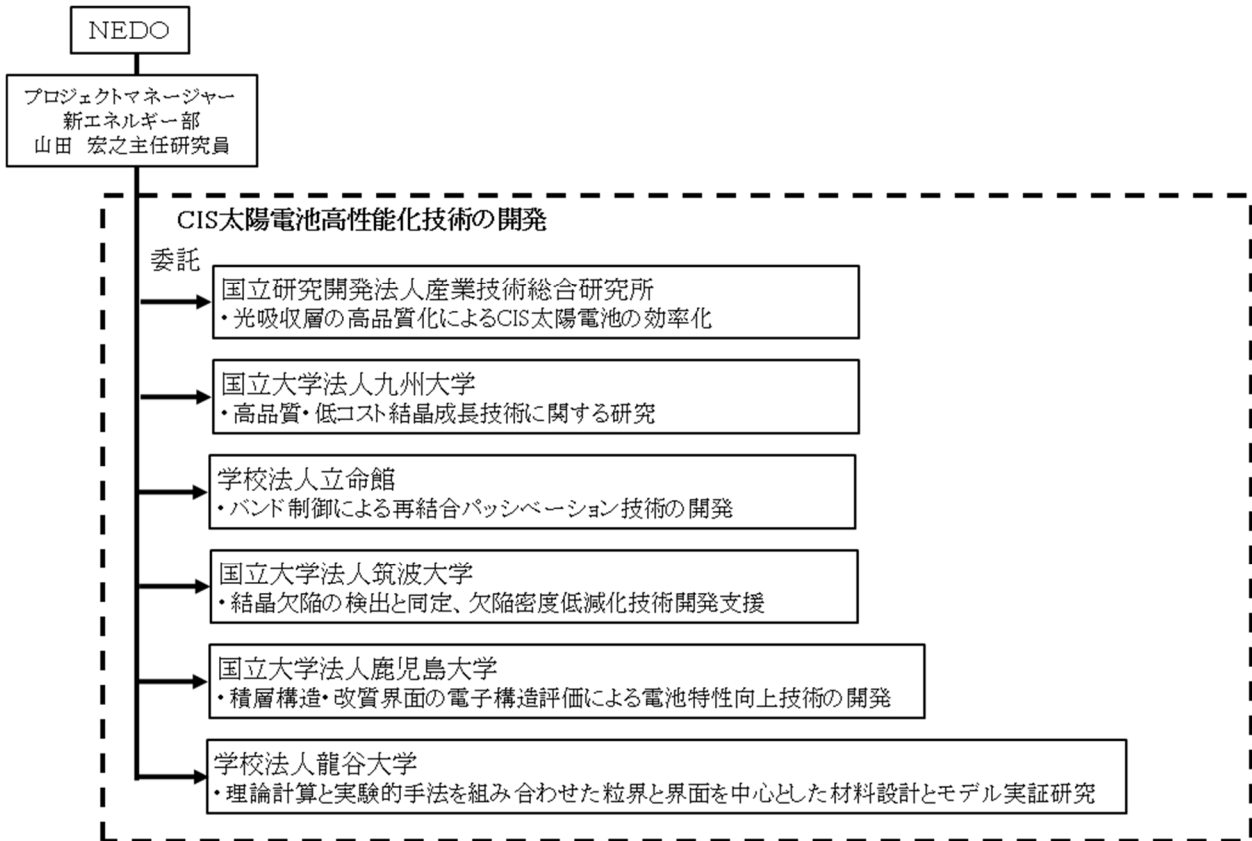


(2) 高性能 CIS 太陽電池の開発

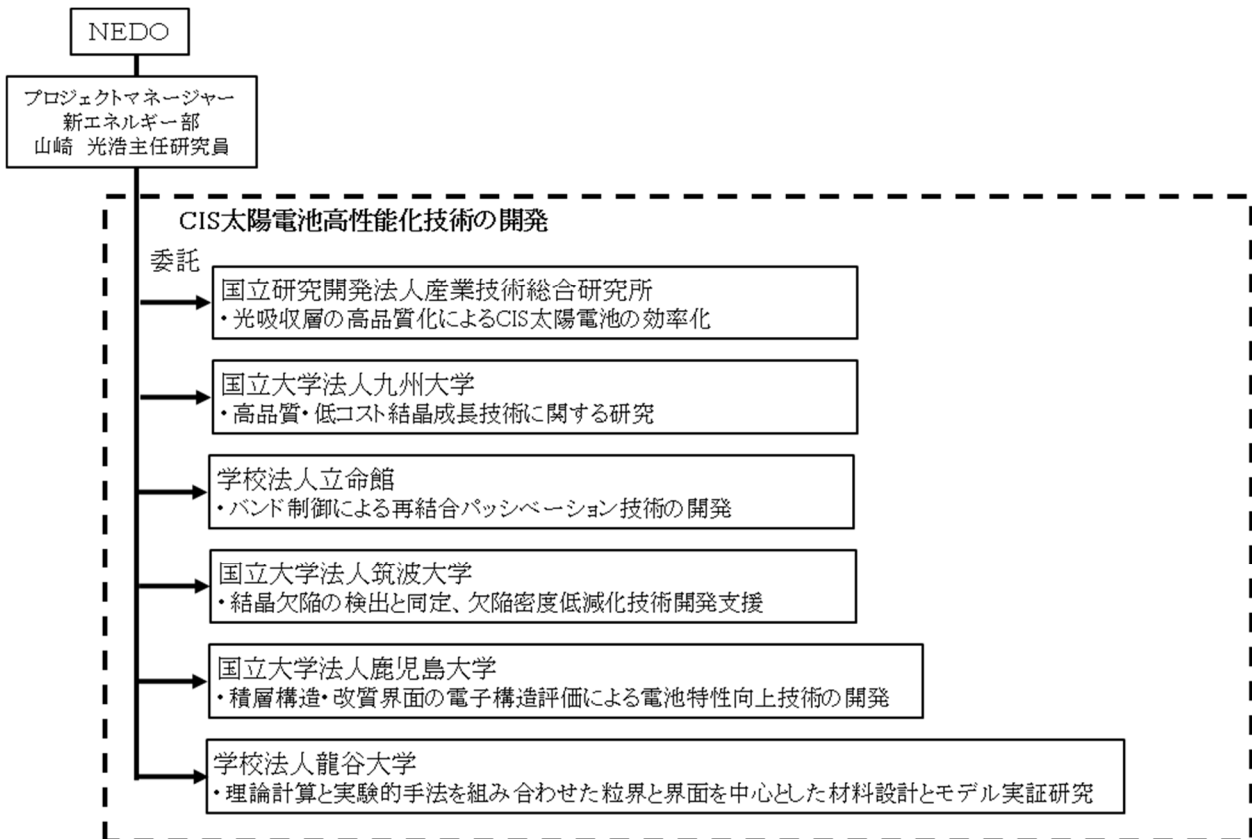
【2015 年度～2017 年度】



【2018年度】



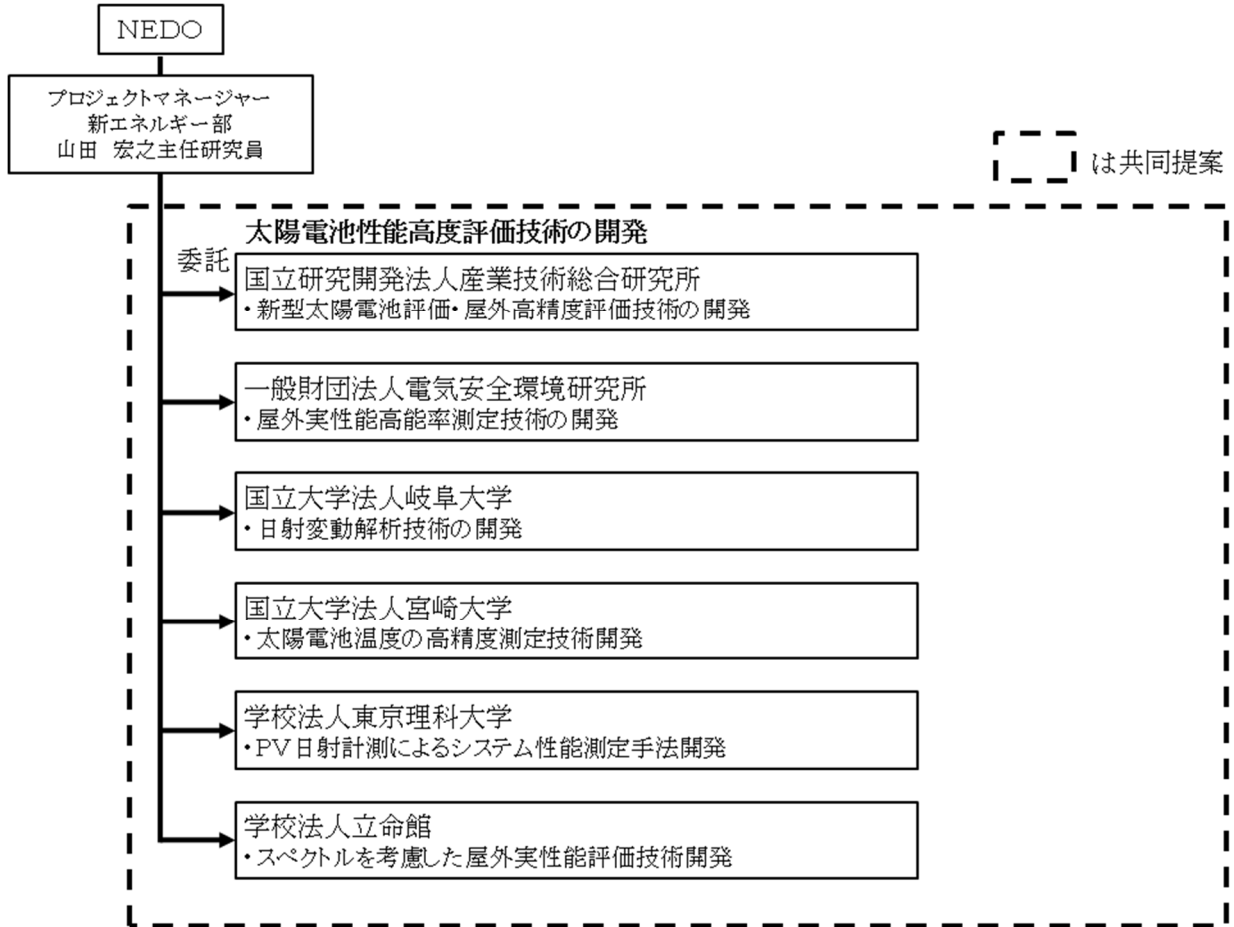
【2019年度】



研究開発項目④「共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）」

(1) 出力等測定技術の開発

【2015年度～2018年度】

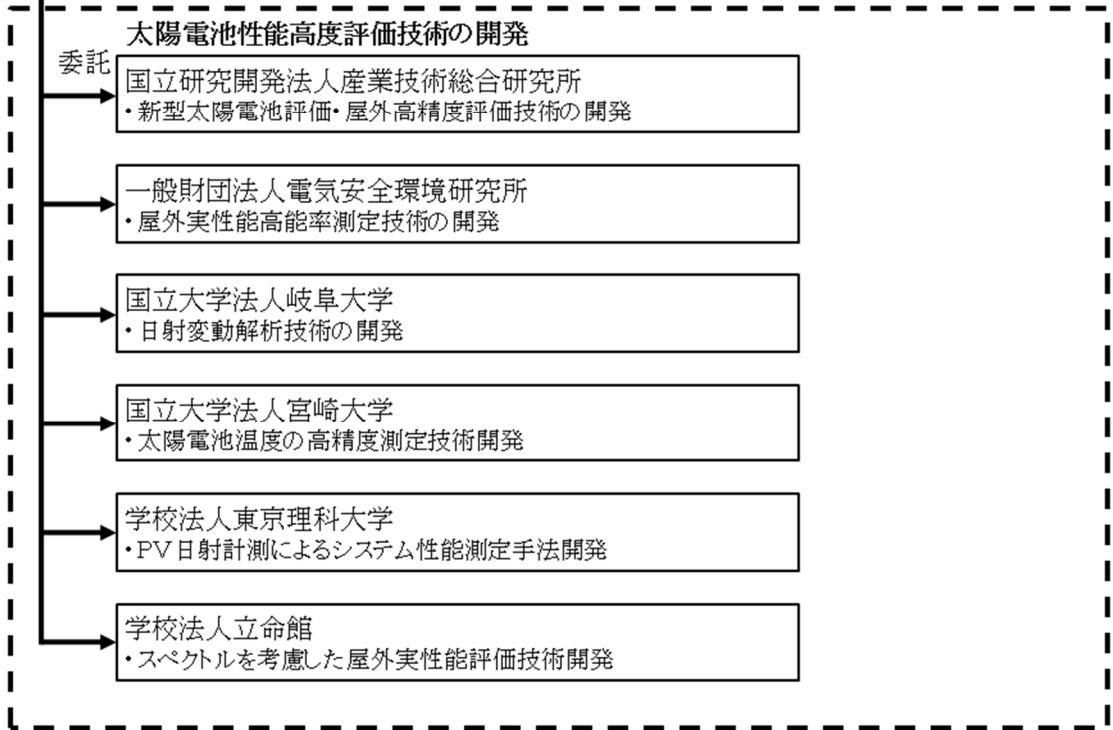


【2019年度】

NEDO

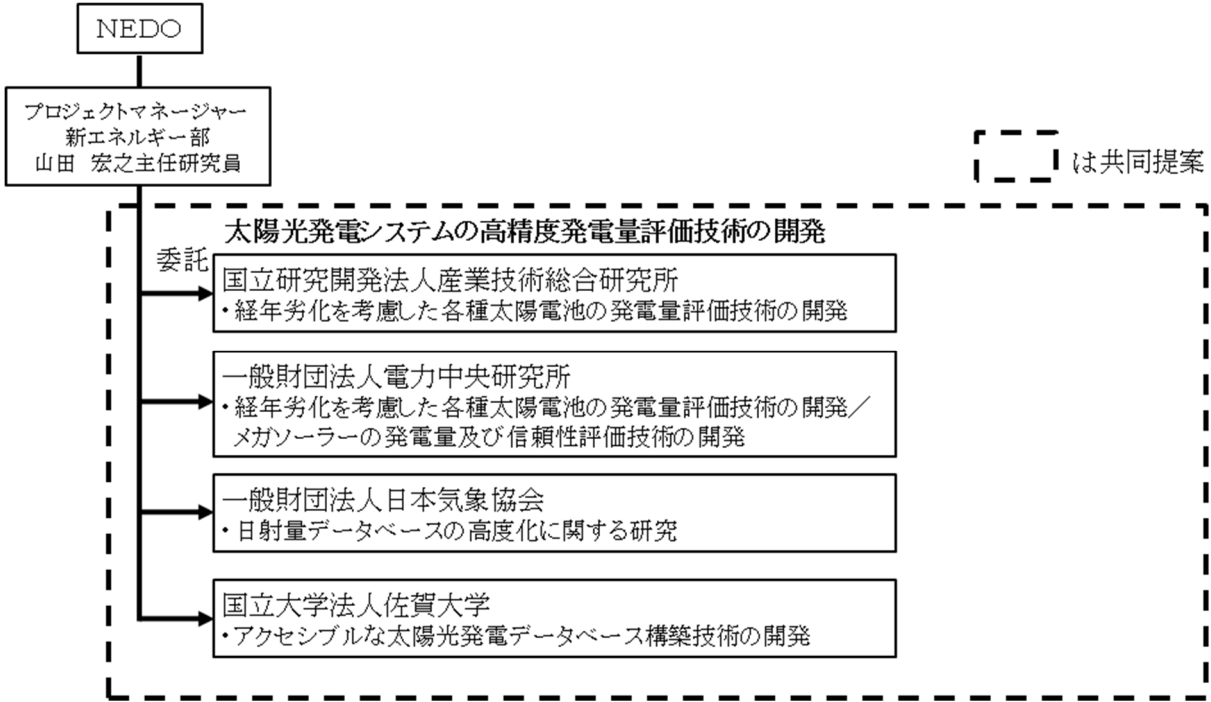
プロジェクトマネージャー
新エネルギー部
山崎 光浩主任研究員

は共同提案

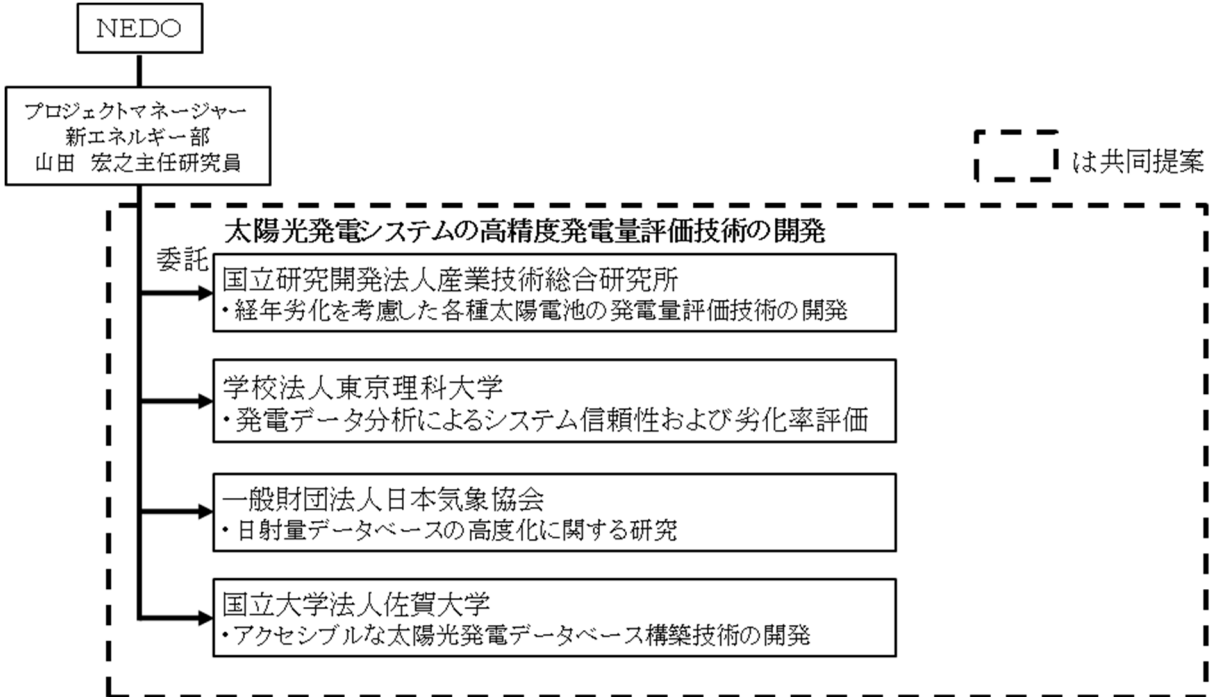


(2) 発電量評価技術

【2015年度～2017年度】



【2018年度】

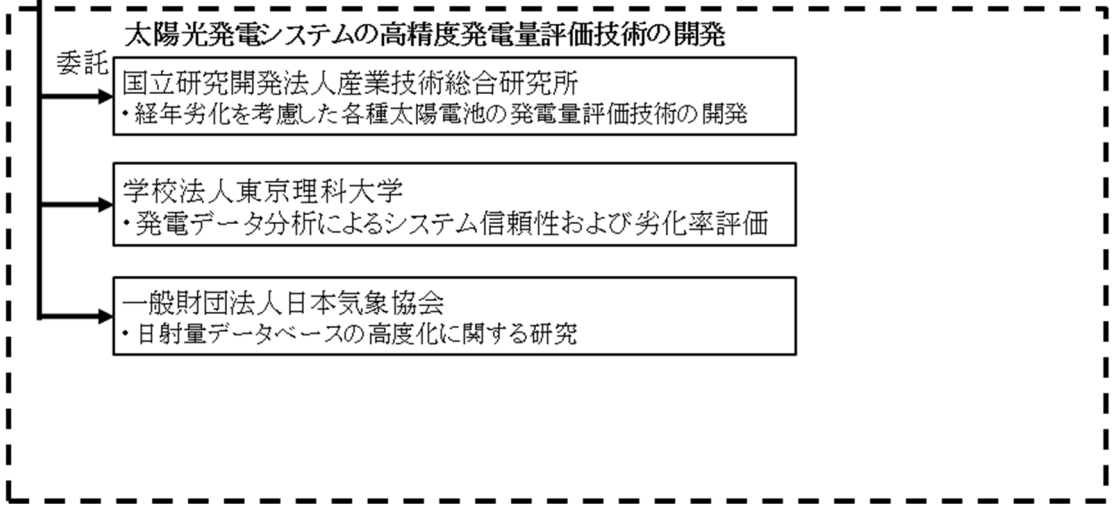


【2019年度】

NEDO

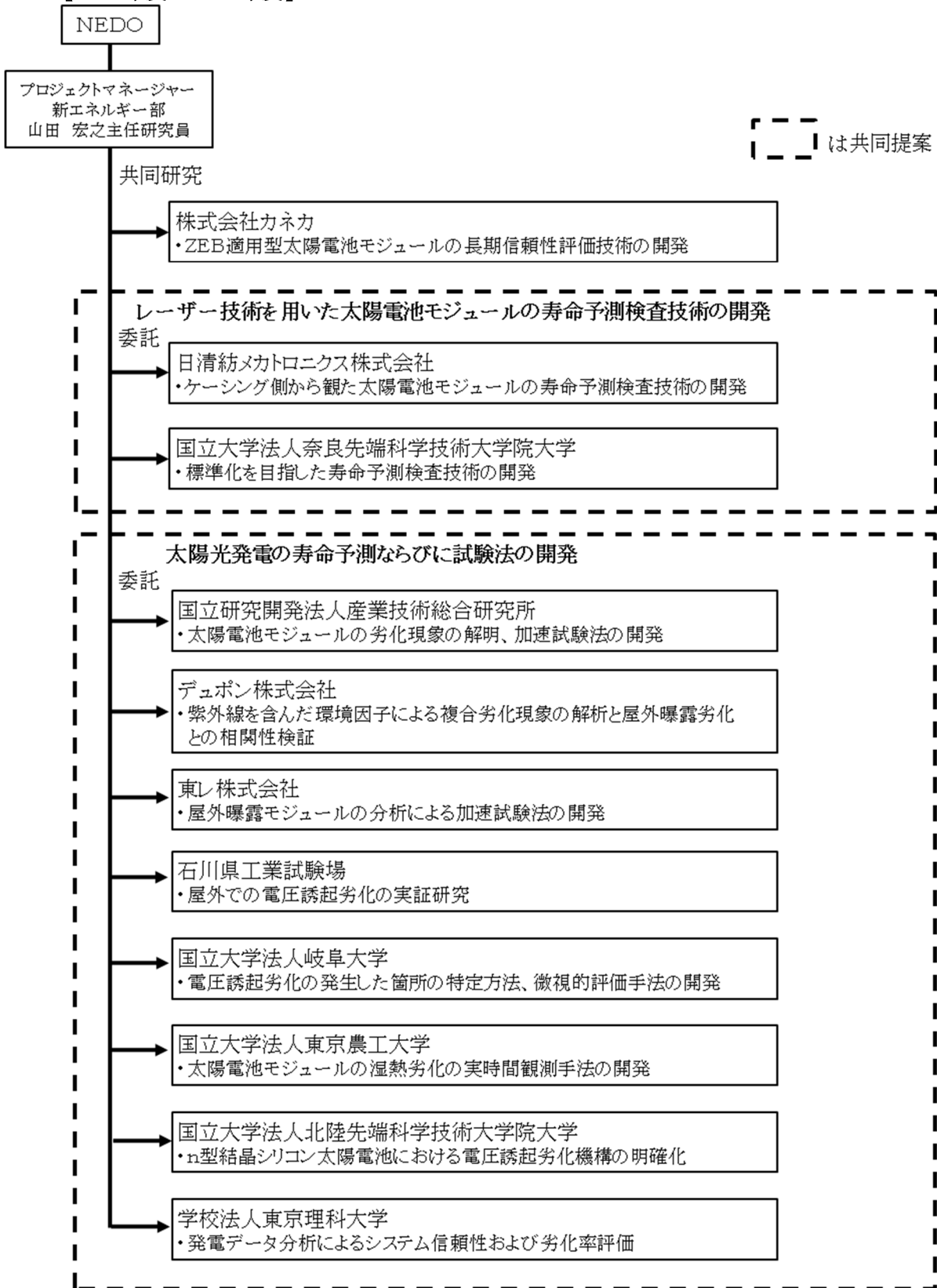
プロジェクトマネージャー
新エネルギー部
山崎 光浩主任研究員

〔 〕は共同提案



(3) 信頼性・寿命評価技術の開発

【2015年度～2017年度】



【2018年度】

NEDO

プロジェクトマネージャー
新エネルギー部
山田 宏之主任研究員

〔 〕は共同提案

共同研究

株式会社カネカ
・ZEB適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術の開発

太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発

委託

国立研究開発法人産業技術総合研究所
・太陽電池モジュールの劣化現象の解明、
加速試験法の開発

再委託

国立大学法人
奈良先端科学技術大学院大学

石川県工業試験場
・屋外での電圧誘起劣化の実証研究

国立大学法人岐阜大学
・電圧誘起劣化の発生した箇所の特定制法、微視的評価手法の開発

国立大学法人東京農工大学
・太陽電池モジュールの湿熱劣化の実時間観測手法の開発

国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学
・n型結晶シリコン太陽電池における電圧誘起劣化機構の明確化

一般財団法人電力中央研究所
・経年劣化を考慮した各種太陽電池の発電量評価技術の開発/
メガソーラーの発電量及び信頼性評価技術の開発

【2019年度】

NEDO

プロジェクトマネージャー
新エネルギー部
山崎 光浩主任研究員

〔 〕は共同提案

共同研究

株式会社カネカ

・ZEB適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術の開発

太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発

委託

国立研究開発法人産業技術総合研究所

・太陽電池モジュールの劣化現象の解明、
加速試験法の開発

再委託

国立大学法人

奈良先端科学技術大学院大学

石川県工業試験場

・屋外での電圧誘起劣化の実証研究

国立大学法人岐阜大学

・電圧誘起劣化の発生した箇所の特定制法、微視的評価手法の開発

国立大学法人東京農工大学

・太陽電池モジュールの湿熱劣化の実時間観測手法の開発

国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学

・n型結晶シリコン太陽電池における電圧誘起劣化機構の明確化

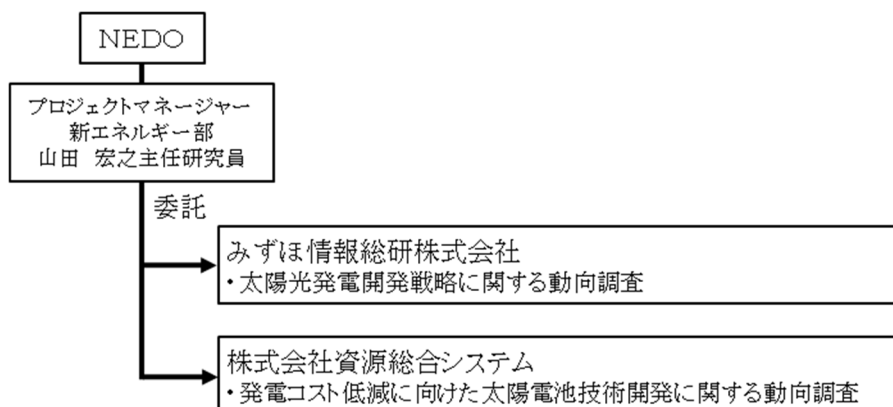
一般財団法人電力中央研究所

・経年劣化を考慮した各種太陽電池の発電量評価技術の開発/
メガソーラーの発電量及び信頼性評価技術の開発

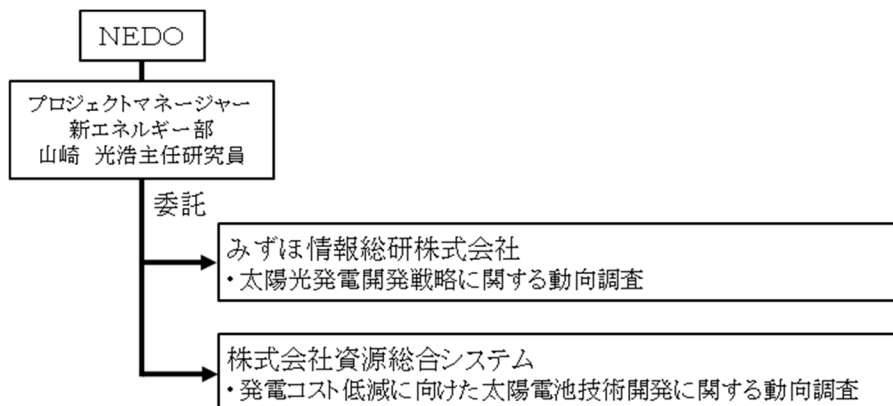
研究開発項目⑤「動向調査等」

(1) 動向調査

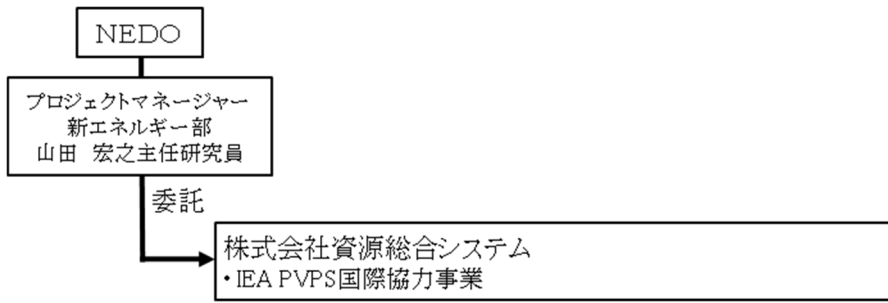
【2015年度～2018年度】



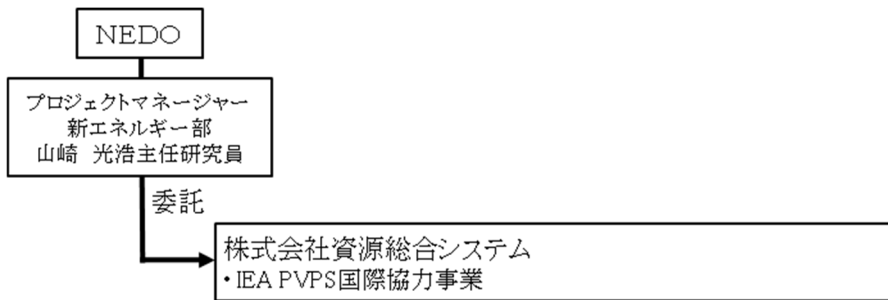
【2019年度】



(2) IEA 国際協力事業
【2015 年度～2018 年度】

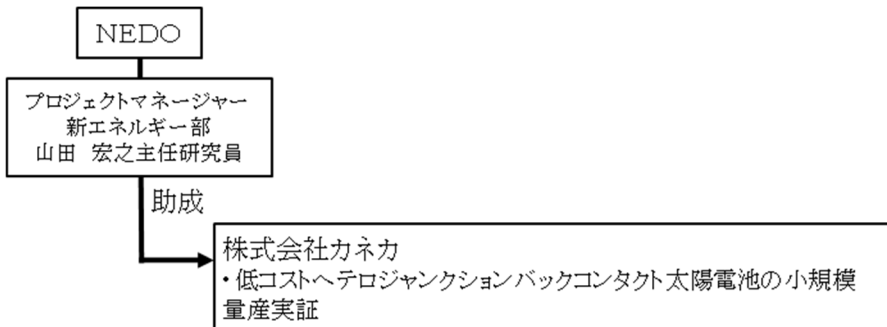


【2019 年度】

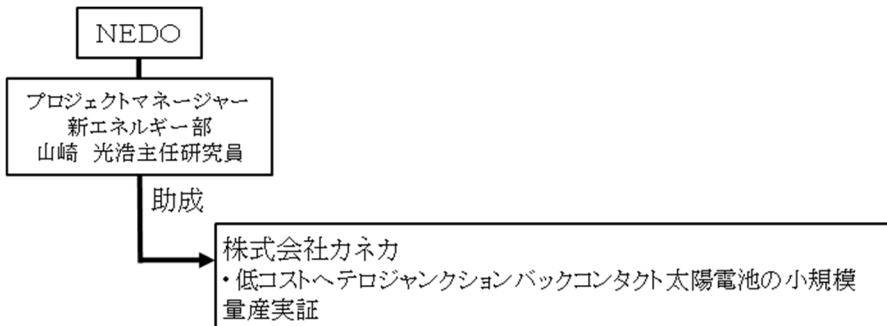


研究開発項目⑥「高性能太陽電池製造技術実証」

【2018年度】



【2019年度】



2.3 研究開発の運営管理

2.3.1 運営方法

本プロジェクトではプロジェクトリーダーを設置せず、NEDO プロジェクトマネージャー(PM)と担当(PT)は研究開発実施者あるいはテーマリーダーと緊密に連携し、研究開発の進捗状況を把握するとともに、実用化時期を配慮した適切な産業財産権の出願管理を行った。各テーマ(研究開発項目)では研究開発開始当初より実施者主導で個別に行う進捗報告会等を実施していたが、研究開発全体の管理・執行をより厳格に行うため、NEDOは2016年度より外部有識者で構成する技術検討委員会等を組織し、知財管理や標準化等の重要事項について検討する他、定期的に技術的評価を受け、目標達成の見通しを常に把握することに努めた。技術検討委員会は以下の5テーマについて個別に各々3名の技術検討委員を設置し、2~3回/年の頻度で委員会を開催するとともに研究開発の運営に反映した。

【5つの技術検討委員会】

1. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会 (結晶シリコン太陽電池)
2. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会 (CIS太陽電池)
3. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会 (Ⅲ-V化合物太陽電池)
4. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会 (ペロブスカイト太陽電池)
5. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会 (共通基盤技術)

【技術検討委員(敬称略)】

1. 結晶シリコン太陽電池 : 小長井 誠 (東京都市大学教授)
高倉 秀行 (立命館大学教授)
山口 真史 (豊田工業大学)
2. CIS太陽電池 : 小長井 誠 (東京都市大学教授)、
山口 真史 (豊田工業大学)
片桐 裕則 (長岡工業高等専門学校教授)
3. Ⅲ-V化合物太陽電池 : 小長井 誠 (東京都市大学教授)
高倉 秀行 (立命館大学教授)
今泉 充 (宇宙航空研究開発機構 (JAXA))
4. ペロブスカイト太陽電池 : 小長井 誠 (東京都市大学教授)
工藤 一浩 (千葉大学教授)
伊藤 紳三郎 (京都大学特定教授)
5. 共通基盤技術 : 小長井 誠 (東京都市大学教授)
高倉 秀行 (立命館大学教授)
田中 良 (NTT ファシリティーズ)

【開催実績、開催予定】

年度	2015	2016	2017	2018	2019
技術検討委員会 (5テーマそれぞれ開催)	0※	2	2 (中間評価実施)	3	3

技術検討委員会ではテーマによってテーマリーダー、テーマ内の個別のチームリーダー、或いは各委託先の担当者が個別に進捗報告を行い、技術検討委員による質疑応答、及びNEDOと技術検討委員による意見集約を通してプロジェクトにおける研究開発内容に対する見解、及び改善すべき点等について議論し、テーマリーダー、チームリーダー、各委託先担当者等に伝えた。技術検討委員会での主な指導内容を以下の表に示す。

1. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会（結晶シリコン太陽電池）

研究開発項目①「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の技術開発」

研究開発項目③「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」

分野	主な指導内容
結晶シリコン太陽電池（研究開発項目①、③）	<p>(2016年8月) 大学、産総研はオリジナリティーのある研究開発を行うとともに、チーム間の役割分担をクリアにすべき。</p> <p>(2017年1月) 研究開発が進んでいる研究テーマと探索段階のテーマとのギャップがある。研究開発が進んでいるテーマはそのまま開発を進めて頂き、探索段階のものは中間評価に向けてテーマを絞るべき。</p> <p>(2017年5月) 2020年目標、2030年目標のどちらに対する開発テーマなのか区別して、見極めを急ぐべき。</p> <p>(2018年1月) 実用化・事業化に向けた開発スケジュールを四半期ごとに示すことで、より明確にしていきたい。</p> <p>(2018年6月) 企業と大学・産総研間の連携が強く感じられた。引き続き連携を深めていきたい。</p> <p>(2018年10月) オリジナル技術の今後の出口イメージを出してほしい。企業との連携を進めてほしい。</p> <p>(2019年3月) 他社と比較してポイントとなる技術を示して、だから勝てるというところを示してほしい。</p> <p>(2019年7月) 残り7カ月となり、各実施者が設定している目標や論文、出願数であるアウトプットは勿論のこと、どのような市場創出に繋がるか、世の中をどう変えるかというアウトカムをはっきりさせるように。</p> <p>(2019年11月) 最終目標であるセル効率達成への道筋を示してほしい。残り3カ月となり、各実施者が設定している目標や論文、出願数であるアウトプットは勿論のこと、どのような市場創出に繋がるか、世の中をどう変えるかというアウトカムをはっきりさせるように。</p> <p>(2020年2月) 企業は実用化・事業化を見据えた技術開発、大学・国研は開発した技術の出口イメージができる成果につながる研究開発をお願いしたい。</p>

2. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会（CIS 太陽電池）

研究開発項目①「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の技術開発」

研究開発項目③「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」

分野	主な指導内容
CIS 太陽電池（研究開発項目①、③）	<p>(2016年7月) 評価指標の考え方など基本的な部分については、共通の認識で連携を進めるべき。</p> <p>(2016年12月) どのような欠陥がバルクライフタイムやFFに影響しているのかを解明し、効率向上につなげるべき。</p> <p>(2017年4月) 次の開発テーマとして、ワイドギャップ化に向けた具体的なアプローチを提案するべき。</p> <p>(2018年2月) 小面積で Efficiency Table に掲載できるデータなど、良い成果が得られている。研究機関の研究レベルは高いが、同じ課題で各機関の横のつながりが見えない点については改善を求む。</p> <p>(2018年5月) モジュールレベルの課題を解決するよう取り組んでいただきたい。また、Voc 損失として、多元系の均一性に関する考察についても示してほしい。</p> <p>(2018年10月) モジュールレベルの課題の解決に向けた連携（研究結果の量産化への貢献）が進んでいることが認められる。課題解決に向けた取り組み、その組み合わせも含めて、でどのような効果が得られるかを整理していただきたい。</p> <p>(2019年3月) 結晶 Si 等との競争力を上げていくためにも、モジュールにおいても効率をあげること。EQE から読み取れるロスについて、コンソーシアムで分析を進め改善すべき。曲線因子が何によって悪くなっているのかについても分析すること。</p> <p>(2019年6月) 小面積タイプの変換効率の努力目標に向けて近い値を出せるように引き続き努力してほしい。ロス解析の結果を踏まえて、何処をどのように改善すれば努力目標に近づけることができるのか、誰が取り組みを進めて行くのか明確にした上で次回までの進捗状況を説明してほしい。</p> <p>(2019年10月) 高効率化技術開発として多項目の取り組みを行ってきたが、終盤となって</p>

きたので、コスト、今後の取り組み等を含めて、技術選択の結論を出してほしい。 (2020年2月) 今回のプロジェクトのアウトカムをより明確に打ち出してほしい。軽量化、軽量を生かした展開への取り組みとアピールもあると望ましい。
--

3. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会 (Ⅲ-V化合物太陽電池)

研究開発項目②「革新的新構造太陽電池の研究開発」

分野	主な指導内容
Ⅲ-V化合物太陽電池 (研究開発項目②)	<p>(2016年7月) 7円/kWhの実現に向けてそれぞれの技術開発の効果が見えるよう、全体シナリオを作成するべき。</p> <p>(2016年12月) トップセルはInGaPに重点化に特化。GaNは見極めが必要。オンシリコンはテーマが多いので集約するべき。</p> <p>(2017年5月) 最終目標に向けてリソース集中に取り組むべき。超高効率セルは量産化につなげるという観点で評価するべき。</p> <p>(2018年1月) ヘテロエピのテーマについてはブレイクスルー技術に発展する判断材料が示されなかったため、今年度で終了するべき。</p> <p>(2018年6月) Siスタック接合は、継続するための判断指標について、次回の技術検討委員会までにデータを示してはっきりさせるべき。</p> <p>(2018年10月) MOCVD、HVPEの高速成膜やELO基板再生などの低コスト化プロセスについて、実用化に向けコスト計算を絶対値で示すべき。また、車載やZEBなど、1sunでⅢ-V太陽電池を使うストーリーを用意すべき。</p> <p>(2019年3月) 量子ドットのテーマは長寿命化において優れた成果が得られているが、量子ドット有無で比較評価した結果や、バイアス光に対するライフタイム変化を示すべき。また、高密度化のテーマは長寿命化や2段階吸収が得られる構造をどのように実現するのか説明すべき。</p> <p>(2019年6月) 各々の目標構造に対し、各開発アイテムがどのような段階を踏んで、どのタイミングで導入され、最終的に実用化されるのか、横軸を時間軸とした図をもって示すべき。</p> <p>(2019年10月) 無追尾集光モジュールは車載用太陽電池を目指すのであれば、重さやコストを考慮した最適解を提案するとともに、結晶シリコンに対する優位性を示すべき。</p> <p>(2020年2月) 5年間の開発を経てモジュール効率30%以上の達成やELO剥離技術、高速成膜技術など多くの進捗が見られた。展開できるものから適用して早期の実用化、事業化につなげていただきたい。</p>

4. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会 (ペロブスカイト太陽電池)

研究開発項目②「革新的新構造太陽電池の研究開発」

分野	主な指導内容
ペロブスカイト太陽電池 (研究開発項目②)	<p>(2011年11月) 面積が小さいので1cm²以上のセルで特性が得られるよう検討いただきたい。コスト試算については各技術がコスト低減にどう貢献するか、最終的なビジョンを描いて進めるべき。</p> <p>(2017年1月) デバイス物理の観点から評価、解析を進めるとともに、デバイス化して目標を達成する道筋を立てるべき。</p> <p>(2017年5月) 目標達成に向けてどのような貢献ができるか検討の上、絞り込むテーマの選別を進めるべき。</p> <p>(2018年1月) 高効率化への寄与が期待できるカリウムドーパの汎用性について明確にすべき。</p> <p>(2018年6月) 2年間で実用サイズのモジュールの実現を目指して注力すること。R-to-R塗工法、スプレー塗工法については成果の見通しが不十分なため、今後最終目標の実現に向かって努力すること。</p> <p>(2018年10月) 塗布方法と出口(想定用途)の関係が不明瞭なので、明確にすべき。塗布方法、フレキ化に関する俯瞰図を作成すべき。目標効率25%に向けた具体的なマイルストーンを明確化が必要。</p> <p>(2019年3月) プロジェクト最終年度を直前にして、未だペロブスカイト層の構成が確定していない印象を持つ。MAフリー処方を進めるのかどうかを含め、早く結論を出すべき。</p> <p>(2019年6月) 光劣化改善、ヒステリシス解消、エージング効果の原因解明等があると認識</p>

	<p>する。解決手法の提示、説明が必要。</p> <p>(2019年9月)セル変換効率について、各委託先・再委託先の成果をどの様に結集すれば目標値の25%を達成できるのかを明確にすべき。</p> <p>(2020年1月)小面積セルの変換効率24.4%は非常に評価できる(目標に対して九分九厘まで来ている印象)。一方、大面積セル、モジュールでの高効率化、光劣化現象要因の明確化が課題であると考え。実用化面では、ZEB、BIPV、その他の領域で結晶シリコン太陽電池と如何に勝負するかがポイントと考える。</p>
--	---

5. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会 (共通基盤技術)

研究開発項目④「共通基盤技術の開発(太陽光発電システムの信頼性評価技術等)

分野	主な指導内容
共通基盤 (研究開発項目④)	<p>(2016年8月)産業界のニーズも踏まえて積極的に知財の創出に努めること。出口イメージを持って開発を進めるべき。</p> <p>(2016年12月)特許などの知財獲得の取り組みが弱い。各グループとも知財獲得の具体的な戦略を示すべき。</p> <p>(2017年5月)寿命予測、試験法の開発では劣化モードのマップ図を作り、既解明点、非解明点を明確にするべき。</p> <p>(2018年2月)性能評価技術の開発ではⅢ-V族、タンデム型、バイフェイシャルの測定技術開発を引き続き行うべき。寿命予測ならびに試験法の開発では、得られた知見をもとにPID劣化が起きないモジュール開発に向けての提案を検討すべき。</p> <p>(2019年10月)アウトプットとアウトカムをGrごとに議論してGrリーダーは次回発表してください。成果について、各Grリーダーを中心に議論しまとめること。</p> <p>(2020年2月)劣化メカニズムの解明、測定技術などの顕著な成果を企業のモジュール開発に上手く反映して欲しい。新型太陽電池の評価は重要なので引き続き取り組むこと。</p>

また他の太陽電池関連事業を含めて、ホームページや展示会による広報、事業紹介パンフレットの作成、学会やシンポジウムでの講演、国際学会への参加と発表、雑誌への寄稿などを通じて成果の発信に努めている。

2.3.2 加速・拡充

必要に応じて事業の加速・拡充を実施している。

【予算増額】

研究開発項目	主な予算増額
研究開発項目① (結晶シリコン太陽電池)	(2016年度) カネカ 11,011千円増額 ヘテロ接合バックコンタクト結晶シリコン太陽電池の高性能化に対し、ヘテロ接合部における高品位の界面の形成技術やパターニング技術の開発等の進捗を登録研究員が従事する時間を増加させることで加速した。これにより、中間目標であるモジュール変換効率21%を22%に向上させることができるとともに、最終目標に対しても、前倒しあるいは高いレベルでの達成に寄与するものと期待された。
	(2017年度) カネカ 286,367千円 「パターニング層形成装置」「出力評価装置」の導入により低コストパターニング技術開発や長期信頼性評価技術等の実用化技術の開発を加速させる。モジュール変換効率の最終目標値向上、達成の前倒し、運転年数延長が期待できる。
	(2019年度) カネカ 40,793千円 ・新規パッシベーション技術、表面/界面制御技術 ・低コスト電極材料・プロセス技術を活用した技術開発を実施することで早期に実用化。
研究開発項目① (CIS太陽電池)	(2017年度) ソーラーフロンティア 30,000千円増額 開発した新技術(CIS太陽電池集積構造における表面電極技術)の量産工場への導入を目指した大面積化の検証を行う。予算増額分は、大面積モジュールの試作費用に充当される。検証の結果、大面積化における課題を明確にすることが期待できる。
	(2018年度) ソーラーフロンティア 50,000千円増額 ①開発した新技術(CIS光吸収層の高品質化技術)の量産工場への導入を加速させる。予算増額分は主に量産工場における試作費用に充当される。これにより、量産試作モジュール

	<p>の高出力化が期待できるとともに、最終目標に対して前倒しあるいは高いレベルでの達成に寄与するものと期待できる。</p> <p>②新技術（CIS 太陽電池集積構造における表面電極技術）の前年度の検証で明らかとなった課題への対策を行う。予算増額分は表面電極形成装置の改造費用と試作費用に充当される。これにより、大面積モジュールにおける出力向上の実証、及び開発技術の量産導入加速が期待できる。</p> <p>（2018 年度）ソーラーフロンティア 24,500 千円増額 開発した新技術（CIS 光吸収層の高品質化技術）を活用した、モジュールの表面材や基板の素材を変更した軽量モジュールの開発を加速させる。予算増額分は軽量モジュールの試作費用（原材料費用、部材費用、廃棄費用）に充当する。これにより、高性能な軽量モジュール開発の成立性を評価し、今後の新規用途市場開拓を目指した開発の可否を判断することが期待できる。</p>
研究開発項目② （Ⅲ-V 化合物太陽電池）	<p>（2017 年度）大陽日酸 35,640 千円 HVPE 装置、MOCVD 装置による GaAs、InGaP 高速製膜評価において、製膜高速化のための要素技術の設計及び装置改造を行い、実証評価を実施する。量産化装置の設計指針を早期に取得することができる。</p>
	<p>（2017 年度）シャープ 119,988 千円 新規用途開発に向けた化合物太陽電池の量産性検証、及び用途の一候補である車載用との実現可能性についての検討を行う。化合物の低コスト化目標達成に向けた見通しを明確にすることができる。</p>
	<p>（2018 年度）東京大学 107,749 千円 基板剥離プロセス高速化のための ELO 装置改造により低コストプロセス開発を加速するとともに、格子整合系 4 接合実現のための成膜装置、及び評価装置の改良、量子ドット原理検証のための測定装置を導入することで超高効率化技術開発を加速した。</p>
	<p>（2018 年度）大陽日酸 25,000 千円 HVPE のドーパントガスラインを増設することにより、広い濃度範囲でドーパントガスを供給し、成膜条件の最適化を図る。InGaP/GaAs₂ 接合セルの開放電圧の最終目標を 2.0→2.4V に修正した。</p>
	<p>（2018 年度）神戸大学 24,840 千円 連続発振チタンサファイアレーザーを導入し、高精度に波長分解した定量的な電流-電圧特性を評価することにより、量子ドットボトムセルに必要な吸収波長帯に対応したセル構造の最適化を行った。</p>
研究開発項目③ （ペロブスカイト太陽電池）	<p>（2015 年度）積水化学工業 18,058 千円 ペロブスカイト塗工機へのドライエア発生装置の追加。ペロブスカイトセルの性能ばらつきを低減でき、小型モジュール装置実現が可能となった</p>
	<p>（2017 年度） 積水化学工業 23,760 千円 オール R2R プロセスでのペロブスカイト太陽電池の実証を 2017 年度中に実施するためのスパッタ装置の R2R 化と原材料費の増額。ロールスパッタ装置専用のスパッタ電源を追加で導入することにより、要素検討とロール化検討を同時に進めることができ、R2R プロセス全体の開発を加速できるとともに R2R 太陽電池の早期実証が可能となった。</p>
	<p>（2017 年度） パナソニック株式会社 11,880 千円 ペロブスカイト膜均一製膜検討装置に基板への塗布液の被覆性の向上のための塗布液循環機構と塗布液供給制御機構を追加、高精細パターニング装置の透明電極のパターニング用のレーザーの変更。最終目標として 30cm 角サイズのモジュールの大面積での効率 20%実証の可能性が期待された。</p>
	<p>（2017 年度）NIMS（早稲田大学再委託先） 5,940 千円 「光照射 1000hr が可能なデバイス構造要素技術の開発」前倒達成をはじめとする、最終目標開発加速のための研究員 1 名分の陽労務費増額。</p>
	<p>（2017 年度）東京大学 57,075 千円 蒸着システムの雰囲気制御機能付き蒸着装置、成膜装置一式および材料秤量装置を導入することにより材料の仕込み量に対する雰囲気の影響を明確化することが期待された。また、精密スプレー塗布システム導入により、塗工システムにおける膜厚、膜質の影響を明確化することが期待された。</p>
	<p>（2017 年度）積水化学工業 2,970 千円 R2R 付帯設備前倒し導入及び試験研究材料の追加に伴う契約金額の増額。</p>
	<p>（2017 年度）兵庫県立大学（東京大学再委託先） 1,150 千円 無機系ホール輸送材とペロブスカイトの間で生ずるエネルギー損失を最小化するため、大型放射光施設スプリング 8 の放射光を利用し、ホール輸送層のフェルミレベル制御検討。</p>
	<p>（2018 年度）積水化学工業 11,500 千円 フィルムへのバリア成膜の検討は外注試作を利用して行いますが、その試作検討のための</p>

	<p>労務費、消耗品、外注費の増額。</p> <p>(2018年度) 東京大学 15,000 千円 ペロブスカイト劣化機構分析のための SEM リース。耐久性能改善のための要素技術確立。</p> <p>(2018年度) 早稲田大学 4,375 千円 蒸着装置の改造によるペロブスカイト組成が変換効率に与える影響の確定。</p> <p>(2019年度) パナソニック 10,890 千円 自社保有シミュレーター修理による大面積 (30cm 角) モジュール変換効率測定頻度アップによる大面積モジュール研究開発の促進。</p>
研究開発項目③ (結晶シリコン太陽電池)	<p>(2016年度) 豊田工業大学 12/3,779 千円増額 先端複合技術型結晶シリコン太陽電池の早期実現に向けて、新たに「ヘテロクラスター型高性能ヘテロ接合研究開発システム」を導入し、結晶シリコン太陽電池のヘテロ接合技術の開発を加速するために増額を行った。これにより、先端複合技術型結晶シリコン太陽電池のセル変換効率の向上が期待された。</p> <p>(2016年度) 名古屋大学 17,575 千円増額 先端複合技術型結晶シリコン太陽電池の早期実現に向けて、新たに装置 3 台(ドラフトチャンバー、純水製造装置、スピンドライヤー)を導入し、結晶シリコン太陽電池のヘテロ接合膜形成前の洗浄技術の開発を加速するために増額をおこなった。これにより、先端複合技術型結晶シリコン太陽電池のセル変換効率の向上が期待された。</p> <p>(2018年度) 九州大学 25,000 千円増額 CZ 法シリコン単結晶引上機の 6 インチ結晶対応炉体を 9 インチ結晶対応炉体へ改造するため増額を行った。CZ 法シリコン単結晶引上機は高純度シリコン単結晶の結晶成長の研究に使用しており、改造により最先端の大口径の結晶成長を実現することが可能となり、高効率化や発電コスト低減に資する研究開発を推進することが期待された。</p> <p>(2018年度) 名古屋大学 30,015 千円増額 偏光式物性評価システムを導入するため増額を行った。これにより、クラスター型高性能ヘテロ接合研究開発システムを用いて製膜した薄膜の膜厚や光学特性の評価が可能となり、バンドエンジニアリングを駆使した新規ヘテロ接合型太陽電池の研究開発を加速することが期待された。</p>
研究開発項目④ (共通基盤技術の開発)	<p>(2018年度) 日本気象協会 12,460 千円増額 将来の PV 導入多様化を見据えた日射量データベース高度化の基礎検討として、特定の市街地を対象に秋季および冬季における日射の移動観測を行い、建物等の影や積雪の反射の影響等について調査・検討をするため増額を行った。これにより、市街地での日射の移動観測の要件、課題等が明らかになった。</p>
研究開発項目⑤ (調査)	<p>(2015~2017年度) みずほ総研 26,556 千円 「太陽光発電システム搭載自動車」に関する調査。「高効率太陽電池」の特長を生かした「面積制約」を受ける環境での活用例として「太陽光発電システム搭載自動車」に関する情報収集、課題の抽出等を行った。</p> <p>(2018年度) 資源総合システム 3,000 千円 太陽電池モジュールの市場環境や利用環境の変化に対応するために、国内で流通するシステム機器、大手太陽電池製造企業の業績推移、中国における太陽光発電システム価格・太陽電池モジュール価格低減要因の分析、太陽光発電システムの新用途における動向と技術課題、太陽光発電システム導入主要国の再エネ比率等について追加調査を実施した。</p> <p>(2017~2019年度) みずほ総研 86,819 千円 新たに IEA PVPS のタスク” PV and Transport” が立ち上がり、それを通じた情報収集及び運営にあたっての各種資料作成支援を実施する。 車両に搭載される太陽光発電が受光し得る日射量を把握するための手法、方向性について検討し、公開可能な資料案を作成する。</p>

2.3.3 追加応募の実施

国外のセル・モジュールメーカーに対し国内外の市場における競争力を保つためには 2030 年に 7 円/kWh の開発目標は遅いとの判断に至り、本プロジェクトの研究開発項目①「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の技術開発」、及び研究開発項目③「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」において開発を進めている結晶シリコン太陽電池や CIS 太陽電池については、7 円/kWh の開発目標を 2025 年に達成するべく発電コスト目標を変更した。

目標の達成に向け、本プロジェクト（研究開発項目①③）において追加公募を行うことにより開発テーマを補充し、2025 年までに 7 円/kWh の実現に資する高性能と高信頼性を両立した太陽電池の開発を目指すこととした。追加応募の結果、研究開発項目①で 1 件、研究開発項目③で 1 件を採択した。

量産プロセスの構築を狙って新たに追加した実証事業（研究開発項目⑥「高性能太陽電池製造技術実証」）の体制構築（新規公募）を行った。公募の結果 1 件の提案があり、低コストヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池の小規模量産実証を目的とする 1 件を採択した。

2.4 研究開発の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

2.4.1 実用化、事業化に向けたマネジメント

研究開発項目⑤の動向調査を通して研究開発動向、市場動向を随時把握し、マネジメントに反映させた。また、50 機関以上ある各事業者を訪問し、幹部や研究開発のキーパーソンとディスカッションを行うことにより各機関の戦略について議論するとともに、プロジェクト成果の実用化、事業化に向けたマネジメントを行った。

2.4.2 実用化、事業化につなげる戦略

- 既に市販されている結晶シリコン太陽電池、及び CIS 太陽電池の開発において、ウエハスライス技術、パッシベーション技術、電極形成技術など、実用化に近い技術はプロジェクト期間内においても研究開発成果を順次量産プロセス及び市販セルに適用し、早期に実用化を実現するとともに、2020 年に発電コスト 14 円/kWh の目標達成を目指す。バックコンタクトヘテロ構造やその他の先端複合型セル構造など、大幅なプロセスの変更を伴う技術については、本プロジェクトで実用化に向けた要素技術を構築し、プロジェクト後半、或いはプロジェクト終了後に早期に小規模な製造実証や量産プロセスの構築を行い、実用化に結び付けるとともに 2030 年に 7 円/kWh、或いは 2030 年より前倒しで 7 円/kWh 達成を目指す。
- Ⅲ-V 化合物太陽電池は高速成膜装置や発電層の低コスト基板への転写などによる低コストプロセスを早期に実現し、2030 年発電コスト 7 円/kWh 達成を目指して大規模発電施設や住宅屋根など電力発電用途向け太陽電池モジュールの実用化を狙う。また、車載型太陽電池など、小面積で高効率を得られるメリットを最大限に活かせる用途についての開発を併せて行い、実用化を目指す。
- ペロブスカイト太陽電池は効率及び耐久性を担保しやすいガラス基板型モジュールと、より低コスト、軽量化を目指した樹脂フィルムや金属箔上の超軽量モジュールの両面から開発を進め、既存の太陽電池モジュールの重量では強度に課題がある建物への設置等、軽量、低コストなどのメリットを活かせる市場から順次事業化を検討する。市場投入と並行して効率、耐久性等の高性能化を進め、最終的には結晶シリコン等既存太陽電池の置き換えも念頭に 2030 年に 7 円/kWh 以下の達成を目指す。

2.4.3 知財戦略・標準化戦略

連携体制に基づき、研究開発項目、或いは連携チーム内で知財合意書を締結させ、各々の研究開発に即した知財戦略、及び発明委員会の設置など管理方法について規定した。

3. 情勢変化への対応

- 研究開発項目⑤の動向調査を通して研究開発動向、市場動向における情勢変化を把握し、基本計画・実施方針に反映することにより、研究開発の効率向上、開発目標の改定をマネジメントした。
- 発電コスト 14 円/kWh、7 円/kWh は調達価格等算定委員会でも価格目標として設定され、太陽光発電の固定価格買取制度からの自立が明確に求められるようになった。これまで開発してきた高効率セルの小規模設備製造実証や、実用化を加速するための新たな市場の創出に向けて、BIPV (ZEB) や、車載などの FS を開始した。高効率セルの小規模設備製造実証としては、「高性能太陽電池製造技術実証」として量産への架け橋となる技術開発のプロジェクトへの発展を計画中。本テーマではバックコンタクトヘテロ型太陽電池等、試作レベルで高効率を達成した太陽電池に対し小規模試作設備を導入し、多数枚同時処理プロセス、スループットやタクトタイムの向上など、量産を想定した場合に低コスト化につながる製造技術の開発を行い、2020 年 14 円/kWh を確実に達成するとともに、2025 年に発電コスト 7 円/kWh 達成を目指すこととした。
- 株式会社トクヤマの「太陽電池用原料品質の最適化及び結晶欠陥の評価技術の開発・制御」において、2017 年度中間目標を 2016 年度に達成したが、株式会社トクヤマのグループ会社が太陽電池用ポリシリコン事業を譲渡し撤退することが決定したことにより、最終目標である最適ポリシリコンの製品化の実現が困難となったため、2016 年度末で事業を終了した。本研究で得られた知見やポリシリコンは、連携先の豊田工業大学や明治大学に引き継ぐことで太陽電池製造技術、評価技術の基礎研究に有効に活用している。
- Ⅲ-V 化合物太陽電池については、技術検討委員会における「トップセルは InGaP に重点化に特化。GaN は見極めが必要。オンシリコンはテーマが多いので集約するべき」との指摘に基づき、一部チームの体制を変更。GaN のテーマについては及び開発内容の見直しを行った。
- Ⅲ-V 化合物太陽電池・低コスト化プロセス技術開発について、豊田工業大学、宮崎大学が取り組んでいたヘテロエピ（シリコンをボトムセルとしてシリコン上に直接成膜してⅢ-V 化合物/Si 太陽電池を形成）について、高効率化の見込みが得られないため 2017 年度で終了とした。
- Ⅲ-V 化合物太陽電池・低コストセル技術開発において、パナソニックが取り組んでいたプラスチックレンズ一体型セル・モジュールを低コストモジュール開発に移動して、豊田工業大学と協力して集光モジュール開発に注力する体制にした。また、豊田工業大学が取り組んでいた部分集光セルを低コストモジュール開発に移動して低コスト無追尾モジュールの開発に注力する体制にした。
- Ⅲ-V 化合物太陽電池・低コストセル技術開発において、Ⅲ-V 化合物と結晶シリコンを接合することによりⅢ-V 化合物/Si 太陽電池を形成する 3 種の方法、①産業技術総合研究所が開発するスマートスタック、②東京農工大学が取り組んでいた導電性接着剤による接合、③大阪市立大学が検討を行っていた真空下での直接接合を用いたⅢ-V/Si の接合のテーマについて 2018 年度秋に行った第 6 回技術検討委員会をステージゲートとして集約を行った。議論の結果、②東京農工大学の導電性接着剤による接合のテーマは 2018 年度で終了とした。

4. 中間評価結果への対応

以下の通り、4点の指摘事項を踏まえて、基本計画や実施方針の改定、研究開発項目の拡充、研究開発の進捗管理、などを実施した。

【指摘事項1】コスト算定の根拠や個々の要素技術開発がどのように発電コスト低減に結びつくのかについて明瞭でない点は改善を望む。

【対応1】発電コスト算定根拠、個々の要素技術開発の発電コスト低減効果については、これまでも求めてきたが、一部、明瞭さが不十分なテーマについては、明確化を図る。また、結晶シリコンや CIS など実用化実績のあるテーマについては、技術検討委員会などの研究開発の進捗管理において、NEDO の発電コスト算定方法を共通して適用することを徹底した。

【指摘事項2】最終目標達成に向けた道筋が不明確な、あるいは達成の見通しが低いテーマがあるため、現状を正確に把握し、今後の道筋を具体的に提示することが望まれる。

【対応2】NEDO は、これまでも最終目標達成に向けた道筋を示すよう実施者に求めているが、これを徹底するとともに、達成の見通しが低いテーマについては、2018 年度および 2019 年度の実施方針に記す通り、研究内容、体制の見直しを行った。

【指摘事項3】経済効果の見通しについては、状況把握をより強化する必要がある。

【対応3】本指摘は、開発成果が国際競争力を保てる事業に成長しうることを見通すために状況把握を強化すべきというものと理解し、国内外の市場及び技術動向調査の内容を再点検し、状況把握をより強化した。これまでに得られた調査結果を踏まえ、基本計画を改定した。具体的には、結晶シリコン太陽電池、CIS 太陽電池の発電コスト目標（7 円/kWh）の到達時期を 2030 年から 2025 年に 5 年間前倒しするとともに、既存の研究開発（研究開発項目①③）の体制強化を目的として 2018 年度に追加公募を行い、①で 1 件、③で 1 件を採択した。また、競争力強化のために高効率太陽電池の低コスト製造技術開発を加速する新たな研究開発項目⑥「高性能太陽電池製造技術実証」を 2018 年度に追加し、1 件を採択した。

【指摘事項4】大学中心の研究開発については、成果を学術論文として発表するだけでなく、連携する企業の実用化・事業化へさらに貢献させていくことが望まれる。

【対応4】大学中心の研究開発については、実用化には直接結びつかないが開発には不可欠な共通基盤技術開発があることに留意しつつ、2018 年度および 2019 年度の実施方針において、市場獲得や新市場創出につながる事業化計画を有する企業の活動を支援する効果の高い事業に重点化して研究開発を行うことをより明確化した。

5. 評価に関する事項

【事前評価】

評価実施時期：2014 年度

評価手法：内部評価

評価部門：評価部、戦略技術センター

評価内容：事前評価書に記載

【中間評価】

評価実施時期：2017 年度

評価手法：外部評価

評価項目：研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等

評価基準：技術評価実施規程に基づき

評価内容：中間評価報告書に記載

【事後評価】

評価実施時期：2020 年度

評価手法：外部評価

評価項目：研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等

評価基準：技術評価実施規程に基づき

Ⅲ. 委託テーマの成果詳細と実用化・事業化見通し

1. 事業全体の成果

結晶シリコン、CIS、Ⅲ-V化合物、ペロブスカイトなどの各太陽電池の研究テーマにおいて、結晶シリコンとCISは2025年に発電コスト7円/kWhを、Ⅲ-V化合物とペロブスカイトは2030年に発電コスト7円/kWhを達成するための技術開発として、各々設定した中間目標を達成すべく産学連携の下で研究開発を行った。結晶シリコン、CIS太陽電池は2020年14円/kWhを達成すべく、早期に量産プロセスに適用可能な技術についても併せて開発した。発電コスト低減には太陽電池セルの変換効率向上、材料、製造コストの低減、耐久性向上によるモジュール長寿命化などが必要となるが、変換効率向上については各太陽電池で世界最高効率を達成するなど、大きな成果をあげた。低コスト化についても高い変換効率を低減させずにコスト低減させる技術を開発しており、各太陽電池において発電コスト目標を達成できるコスト試算を行いながら低コスト化の基礎技術開発を行っている。耐久性向上については材料、製造プロセスなど太陽電池開発からのアプローチに加え、共通基盤技術として太陽電池性能評価、発電量評価や劣化要因解析、寿命試験方法の開発など、耐久性向上につなげる技術を併せた開発を行っており、これらの技術についても大きな進展があった。以下に研究開発項目ごとの主要成果について示す。

研究開発項目①先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能CIS太陽電池の開発

1) 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

ヘテロ接合とバックコンタクトの統合等、先端技術を複合し、高効率かつ高信頼性を両立したシリコン太陽電池とその低コスト製造技術を開発した。

「高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池の開発」においては、ヘテロ接合バックコンタクト結晶シリコン太陽電池セルの低コストパターン形成技術開発、セル間配線技術などの実用化技術を開発し、結晶シリコン太陽電池セルとして世界最高のセル変換効率26.7%を実用サイズ(セル面積180cm²)で達成した。また、モジュールにおいても、結晶シリコン太陽電池モジュールで世界最高の変換効率24.5%を達成した。発電コストに関しては、住宅用建材一体型モジュール前提で、2020年度14円/kWh実現の見通しを得た。また、2025年に発電コスト7円/kWh達成が可能であるとの見込みを得た。

「高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発」においては、更なる低コスト化技術開発として、新規パターンニングプロセス及び新規界面清浄化技術を開発することで、セル変換効率25.1%(156mm角)、モジュール変換効率22.1%を達成した。発電コストに関しては、2020年度発電コスト14円/kWh実現のためのプロセス開発を完了した。また、2025年発電コスト7円/kWh達成の定量的なシナリオを提示することができた。

「低コスト高効率セル及び高信頼性モジュールの実用化技術開発」においては、これまでに得られた成果をベースに、シードキャスト基板結晶成長中の温度制御最適化を実施した両面受光低コストPERC量産プロセスにおいて、受光面パッシベーション及びアニールの最適化により、セル効率22.01%(産総研にて測定)を確認した。また、モジュール効率20.1%で寿命35年以上のDH/TC複合ストレス耐性を有することを確認した。発電コストに関しては、低コストセル技術の導入により2020年14円/kWhの実現が可能であることを確認した。また、2025年7円/kWh達成に向けて低コスト高効率モジュールの製造技術導入を進めるシナリオを提示した。

「基盤技術開発による先端複合技術セルのための低再結合電極の研究開発」においては、n+層に対する接触抵抗1.8mΩcm²、p+層に対する接触抵抗3.8mΩcm²、電極形成による再結合470fAcm⁻²を達成した。

「赤外線FZ法による高品質低コストシリコン単結晶の開発」においては、インゴット製造経費850円/kg以下、ライフタイム7397μsecで結晶欠陥および転位フリー、抵抗面内分布10.9%以下、酸素成分濃度6.9×10¹³atoms/cm³、炭素成分濃度1.2×10¹⁵atoms/cm³のシリコン単

結晶を開発した。

「高発電効率・低コスト太陽電池スライスプロセスの加工技術構築」においては、スライス時の欠陥評価手法と対処条件を構築した。高面品位スライス技術によりダメージエッチングを5 μm 削減可能であることを確認した。カーフロス 60 μm の加工技術開発を行い、市場量産と同等以上の生産性を確保する加工技術を構築した。さらに、カーフロス 50 μm の加工を先行評価し、加工可能であることを確認したほか、カーフロス 40 μm が可能となる固定砥粒ワイヤの製造を確認した。

「太陽電池用原料品質の最適化及び結晶欠陥の評価技術の開発・制御」においては、太陽電池製造の熱プロセスで成長する酸素析出物の形態と数密度が、炭素不純物濃度と結晶成長条件により変化し、ライフタイムや変換効率に悪影響を及ぼすことを解明した。酸素析出物の形態と数密度を制御して高ライフタイムの単結晶インゴットを得るCZ法結晶成長技術を開発した。開発した結晶成長技術と炭素濃度を低減したポリシリコン原料を使用して得られた実用サイズのインゴットのライフタイムは、全長にわたって 2000 μsec 以上を達成した。開発したインゴットは熱プロセス後のライフタイム低下が抑えられ、ライフタイム下限値を 300 μsec とすると、インゴットの直胴良品歩留りが 11.5%向上した。

「低コスト・高信頼性・高効率 Super Si Hetero-junction (SSHJ) 太陽電池の開発」においては、Super Bifacial-SHJ (SBF-SHJ) でモジュール効率 20.9%を実現し、2020年発電コスト 14円/kWhを達成するとともに、2025年発電コスト 7円/kWhを達成する見込みを得た。Super Back Contact-SHJ (SBC-SHJ) でモジュール効率 22.0%超を実現し、2020年発電コスト 14円/kWhを達成するとともに、2025年発電コスト 7円/kWhを達成する見込みを得た。

2) 高性能 CIS 太陽電池の開発

CIS 太陽電池は結晶シリコン太陽電池より変換効率は低いですが、その分製造コストが低いことを見積もることができ、結晶シリコンとは少し異なる特性、コストバランスで 2020年発電コスト 14円/kWh達成、さらには 2025年発電コスト 7円/kWh達成を目指して開発を行っている。以下に主な成果を示す。

「CIS 太陽電池モジュール高性能化技術の研究開発」において、世界最高変換効率 22.9%を達成した CdS バッファ CIS 小面積セルの技術をもとに、光吸収層の品質改善技術及び光吸収層表面パッシベーション強化技術をさらに改良することに加えて、Cd フリーバッファ層の精密な最適化を行うことにより、変換効率 23.4%を達成した。また、本変換効率を達成した Cd フリーセル技術を適用したサブモジュール(70mm角)で変換効率 20%の見込みを得た。発電コストに関しては、2020年度 14円/kWh達成の見込みを得た。また、2025年に発電コスト 7円/kWh達成に向けた定量的なシナリオを提示することができた

研究開発項目②「革新的新構造太陽電池の研究開発」

1) 革新的高効率太陽電池の研究開発 (III-V化合物太陽電池)

III-V化合物は多接合化や集光により高い効率は実証されているため、目標の 2030年発電コスト 7円/kWhを達成するために、どのように高い効率を保ったまま材料コスト、製造コストを低減するかを主体とした開発を行っている。具体的には発電層の低膜厚化や高価な GaAs 系基板の使いまわしのための薄膜セルの基板からの剥離プロセス、安価な基板或いは安価な太陽電池との接合技術、及びタンデム化、光発電層の高速成膜化などである。併せて量子ドットセルなど、更なる高効率化を目指す技術開発も行っている。主な成果を以下に示す。

「低コストセル技術開発」では、コロイドリソグラフィ+ドライエッチングによる裏面テクスチャ形成を、薄膜2接合セル(InGaP 300nm/GaAs 600nm)に適用し、裏面ミラーの場合に比べて主に GaAs の光吸収を増大することにより J_{sc} 40%増加を確認した。光閉じ込めにおいて、エピタキシャル最下層への裏面反射構造の導入、サブセルベース厚さの適正化によるエピタキシャル層の薄層化、バッファ層の薄型化を組み合わせる III-V 薄膜 3 接合セルで総膜厚 1/2(従来比)で従来と同等の電気特性を確認した。シリコン上 III-V セルでは、化合物 2 接合(InGaP/GaAs)と Si セル(バックコンタクト型)とを透明樹脂層を介して接合した 4 端子セルで変換効率 33.0%を達成した。スマートスタック技術(Cu 接合)を適用した GaAs/Si 系で素子寿命

30年以上および実用的な耐久性を実証した。

「低コスト化プロセス技術開発」では、開発した自動装置で4インチウェハを20mm/hで安定的にクラックレス剥離ができることを確認した。また、10回基板利用で電気特性の維持率95%以上、歩留り81%を達成した。全面観察装置を開発し、1時間以内の4インチウェハ非接触スキャン、さらに検出された異常点の分類判定の正答率98.5%を達成した。MOCVDによりGaAs製膜速度120 μ m/hを達成、InGaP製膜速度30 μ m/hを達成した。単セルの変換効率は、それぞれ、24.5%(p on nセル)、15.3%と目標を達成した。また、これらの成果を組み合わせた2接合セルで効率22.3%(反射防止膜で効率約28%見込み)を達成した。HVPEによりGaAs製膜速度170 μ m/h、InGaP製膜速度24 μ m/hを達成。単セルの変換効率は、それぞれ、22.4%、13%を達成した。これらの成果を組み合わせたInGaP/GaAsタンデムセルの開放電圧2.32V、変換効率21.8%を実現した。

「低コストモジュール開発」では、実用セルサイズの新集光・逆積み3接合型モジュールで世界最高となる31.2%の変換効率を達成した。また、モジュール面積当たりの月積発電量で対Si 151%となることを実証した。集光型では、低コスト構造の1m角プラスチックレンズ一体型パネルで変換効率32.2%を達成し、IEC62108準拠の信頼性試験をクリアしたことを確認した。また、2030年時点で、システムコスト119円/W(100MW/年生産)と発電コスト7円/kWhの実現見通しを得た。無追尾低倍集光モジュールで変換効率32.8%を確認した。低コスト化に向けた基盤技術として反射防止コート設計最適化により効率2.52%向上を達成した。また、非集光III-V族多接合型太陽電池モジュールを含む他接合型太陽電池の屋外での発電動作が、気象条件、特に太陽光スペクトルの影響を強く受けることを、実証データをもとに世界で初めて明らかにした。さらに、各種太陽電池の実動作データをもとに、発電量シミュレーションモデルを構築し、全国837箇所における各種太陽電池の定格出力あたりの年間発電量予測が可能となった。

「超高効率セル開発」では、電流整合を満たすGaInNAs:Sbセルを開発し、非集光逆積み型GaInP/GaAs/GaInNAs:Sb格子整合系3接合セルで変換効率30.3%(1 Sun)を達成した。GaInP/GaAs/GaInNAs:Sb/Ge 4接合セルの開発に国内で初めて成功(ウェハ接合)した。また今後の課題を明らかにし、50%達成に向けた見通しを得た。量子ドット中間バンドセルでラチェット構造により中間バンド内電子の長寿命化(100 nsec)を実現、室温でサブバンドギャップ光励起強度によって80%のキャリア引出効率を達成した。開発した集光型低電流・高電圧型量子ドットセルにおいて効率32.1%(225 Sun)を達成した。

2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発 (ペロブスカイト太陽電池)

ペロブスカイト太陽電池は、2030年発電コスト7円/kWh達成に向けて、モジュール変換効率は20%と結晶シリコン太陽電池より若干低いものの、大幅な低コスト(発電コスト7円/kWhの製造コスト15円/W)を実現できる材料や製造プロセスを目指した開発を行った。また、実用化に向けて課題となる耐久性(耐湿性、耐熱性、耐光性)を充足する材料、製造プロセスを構築することにも留意した開発を実施した。以下に主な成果を示す。「塗布法によるペロブスカイト太陽電池の開発」では、大面積均一インクジェット塗布を用いて30cm角サイズのモジュールで世界最高効率17.93%(AIST測定)を達成した。太陽電池セルのペロブスカイト膜の組成制御と界面修飾で高温高湿試験、光照射安定化試験の品質規格の要求事項を達成した。モジュール高効率化、プロセスタクトの短縮、設備コストの低減の可能性を確認し、モジュール製造コスト15円/Wの指針を得た。

「超軽量太陽電池モジュール技術の開発」では、従来困難であった大面積化と高効率化の両立を実現し、面積703cm²のPENフィルム基板モジュールで変換効率14.1%を実現した。ガラス基板(27×29cm)では変換効率16.1%を確認しており、PENフィルム基板モジュールへの展開を進めている。耐久性に関しては、Mixペロブスカイトを採用した5cm角フィルムモジュールで光照射500時間に対し、400時間まで相対効率低下10%を確認した。また、耐熱試験1000時間に対し、550時間まで相対効率低下10%を確認した。

「低コストR2R太陽電池製造技術の開発」では、3cmフィルム基板セルで変換効率13%を達成し、JIS規格C8381準拠の耐久性試験5項目で相対低下率10%以下を達成した。また、オールR2Rプロセスで作成した30cm角フィルム基板モジュールで変換効率11.4%を達成した。量

産時 5 円/W 以下が達成可能な内製バリアフィルムにより耐湿熱試験 (85°C85%)1000h で相対変換効率低下率 10%未満を達成した。

「高性能・高信頼性確保製造技術の開発」では、小面積セルでの変換効率 18%の構成において、100mm 角で 17.04%、240mm 角で 16.12%の変換効率を有するモジュールを実現した。従来の金電極に対して低コストのカーボン系塗布材料で組成と工法を改良し、金電極でセル変換効率 16.51%の構成において、カーボン電極で 16.22%を達成した。従来の材料 (spiro 0MeTAD) に対して低コストな有機系新ホール輸送材を開発し、spiro 0MeTAD でセル変換効率 18.7%の構成において、有機系新ホール輸送材でセル変換効率 18.2%を達成した。耐久性に関しては、カチオンサイト、Br レス・ペロブスカイト層、ホール輸送材の最適化により、光作動耐久性向上 (400hr で初期性能の 77%を維持)を確認した。

「高性能材料合成技術の開発」では、耐湿性低下の原因となるドーパントを必要としない正孔輸送材料骨格を見出し、新規正孔輸送材料を用いたセルで spiro-MeOTAD を用いたセルと同等以上の変換効率に到達した。吸収長波長端 750nm 以上を満たしつつ、変換効率の低下なくペロブスカイト膜の耐湿性が向上するペロブスカイト表面処理技術を見出した。上記の新規材料を用いて最大変換効率 14.6%を確認した (同条件における Spiro-MeOTAD: ドーパント有りの変換効率 14.2%)。

「高機能材料・セル製造技術開発」では、低コストかつ長寿命 HTM で、材料コスト 80 円/m² (層厚み 50nm)、酸化剤ドーパントフリーの HTM 組成を確立した。また、上記 HTM とペロブスカイト界面制御の組み合わせにより変換効率 22%超を実現するとともに、25%に向けた手順を提示した。製造工程簡易化によるコスト低減を目的とした一段塗布用インキの簡便なバーコート法で変換効率 17%。スピノコートで変換効率 17%を確認した。逆型構造セルを開発し連続光照射 1,000 時間超の耐久性、85°C耐熱性 500 時間を達成した。性能評価法の確立に関しては、MPPT 法、Dynamic I-V 法、Reduced Span I-V 法と 3 種類の測定法を提案し、測定条件の最適化によりヒステリシスの影響を解消できることを実証した。

「新素材と新構造による高性能化技術の開発」では、ペロブスカイト層へのカリウム添加による I-V ヒステリシス低減効果が様々な組成に有効であることを見出した。また、1cm²セルで変換効率 21.65%、3 直列モジュール (2.76cm²) で 20.7%を達成した。ペロブスカイト単結晶試料の構造と物性を検討し、励起子の特殊性を明らかにした。複数の結晶相が混在し、自発的に超格子を形成していることを見出した。劣化要因となる MA を含まないペロブスカイトでカリウムとセシウムを適切に添加し不純物を制御することにより、セル変換効率 21.9%を達成した。高電流化を狙った錫/鉛混合ペロブスカイトで Jsc 33.1mA/cm²、Voc 0.8V、セル変換効率 20.4% を達成した。100 円/m²以下無機系ホール輸送材 NiO_x を用いた逆構造型セルで効率 19.6%を確認した。混合カチオン型 (Cs_xMA_yFA_zPbI_aBr_b) 用の前駆体材料 FAPbI₃(dmf)₂を開発し、これを用いて Voc 1.21V (電圧ロス 0.38V) のセル、変換効率 22.2% (Jsc 25.2 mA/cm²、Voc 1.11 V、FF 0.793) のセルを得た。電圧ロスが小さい理由として、Aging により正孔輸送層での酸化が進行し、伝導度が向上するとともに、HOMO 準位がより深くなることを明らかにした。カリウム添加ペロブスカイト太陽電池の Br 比制御による Eg グレーディングの最適化を行い、表面側 Eg が 1.61eV (Br 比=0.15)、裏面側 Eg が 1.48eV (Br 比=0.00) の時に効率が最も高くなる (25.2%) ことを明示した。PbSn 系ペロブスカイト太陽電池の Sn/(Pb+Sn) 比制御による Eg グレーディングの最適化を行い、表面側 Eg が 1.47eV (Sn 比=0.07)、裏面側 Eg が 1.33eV (Sn 比=0.38) の時に効率が最も高くなる (25.5%) ことを明示した。

研究開発項目③「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」

1) 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

本研究開発項目では 2025 年発電コスト 7 円/kWh 達成を目標とする研究開発項目①の結晶シリコン太陽電池の高効率化、低コスト化のための共通基盤技術として、大学や研究機関が、高品質シリコン結晶、高性能パッシベーション膜 (ヘテロ膜)、電極のコンタクト部の再結合を抑制する新規構造や、大幅に工程を削減できるイオン注入などを使ったバックコンタクト形成プロセス等の検討を行った。主な成果を以下に示す。

「先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発」においては、p 型単

結晶 PERC セル効率 20.0%、n 型単結晶 Bifacial PERT セル効率 21.0%を達成した。開発した PERT セルプロセスは p 型 n 型両方に適用可能であることを確認し、高効率拡散系セルプロセスを確立した。SHJ セル効率 23.2%、pseudo Eff. 24.3%を達成して高効率ヘテロ系セルプロセスを確立するとともに 25%達成の目途を得た。複数の企業や大学、研究機関等と連携してモジュールを試作・評価できる体制を構築。PID や LeTID といった新しいモジュール劣化現象の原因とメカニズムの解明に貢献した。

「材料・プロセス評価基盤技術に関する研究開発」においては、株式会社トクヤマと共同で、 $10\text{--}20\ \Omega\cdot\text{cm}$ で 18 msec、 $1\text{--}2\ \Omega\cdot\text{cm}$ では全長の 95%以上の領域で 2 msec を超える高ライフタイム結晶の成長に成功した。発光活性化 PL により従来困難であった 10^{14}cm^{-3} 以下の低濃度測定法を開発した。また、 10^{12}cm^{-3} の定量の可能性を見出した。ダイヤモンドワイヤーでスライスした基板の目視できない欠陥の PL イメージングによる可視化し、セル特性への影響を明らかにした。

「高品質・低コスト結晶成長技術に関する研究」においては、p 型基板では 5msec、n 型基板では 10msec のバルクライフタイムを実現した。

「新規ヘテロ接合用材料に関する研究」においては、アモルファスシリコンを用いたヘテロ接合型太陽電池において、開放電圧 0.740 V 以上、変換効率 23.2%に貢献した。

「アモルファス・結晶界面における構造及び電気的特性に関する研究」においては、ライフタイムの温度依存測定による界面のバンドオフセット評価手法を確立した。FTS 法による i-a-Si:H 層 (5 nm) により、 $J_0=4.6\ \text{fA/cm}^2$ を達成した。堆積速度は約 15 nm/min である。この i-a-Si:H を用いたシリコンヘテロ接合太陽電池 (p、n 層はプラズマ CVD 製膜) を作製し、変換効率 17.4% ($V_{oc}=0.679\ \text{V}$, $J_{sc}=35.0\ \text{mA/cm}^2$, $FF=0.732$) を得た。電子選択コンタクトとして Si ドープ nc-GaN の形成を試み、結晶性が高く電気的特性の良好な膜の形成に成功した。

「低コスト・拡散系太陽電池におけるキャリア再結合に関する研究」においては、裏面パッシベーション膜により $J_{0\text{rear}}$ を $260\ \text{fA/cm}^2$ 削減可能なプロセスを開発に成功し、かつエミッタプロファイルの数値シミュレーションより、 $J_{0\text{front}}$ を $50\ \text{fA/cm}^2$ 削減しうるプロセスを明らかにした。6 大学コンソーシアムにおいてシリコン単結晶の高品質化が行われ、 $J_{0\text{bulk}}$ の大幅な削減 ($100\ \text{fA/cm}^2$ 以上) に成功しており、全ての技術を組み合わせることにより、最終目標を超える J_0 の削減が可能となった。

「薄型セルを用いた高信頼性・高効率モジュール製造技術開発」においては、板厚 50 μm 級の極薄ウェハを用いた SHJ セルを開発し、世界トップレベルの変換効率 22.0% (4cm²) を達成した。スクリーン印刷などの低コストプロセスを用いて、両面受光-裏面電極 (BC) 型セルの効率向上を図り、変換効率 22.3%を達成した。任意の波長で内部量子効率のマッピングが可能な内部量子効率マッピング法を新規に開発し、BC セルの電気的遮蔽損失領域の同定に成功した。高信頼性化技術については、PCT による湿熱劣化の信頼性試験により、インターコネクタに沿った劣化モードを見出し、その劣化メカニズムを初めて提案した。

「Cat-CVD など新手法による高性能太陽電池低価格製造技術の開発」においては、裏面電極型 Si ヘテロ接合太陽電池の光入射側表面に Cat-CVD 窒化 Si 膜を堆積し、開放電圧 730mV 以上、変換効率 24%以上に貢献した。非質量分離型プラズマイオン注入により p 型 a-Si を n 型に反転する技術を確立した。また、イオン注入により一旦低下するパッシベーション性能を、事後のアニールで回復できることを見出し、その機構が、P とともに注入された H による欠陥終端であることも明らかにした。この方法で形成した n 型 a-Si を用いた太陽電池の動作も確認した。

「高性能キャリア選択性パッシベーションコンタクトの開発」においては、シリコンヘテロ接合太陽電池において、ナノ結晶シリコン薄膜をパッシベーションコンタクト材料に適用したすることにより、ナノ結晶を用いないベンチマークセルに比べ短絡電流密度の 2.1%向上、変換効率 23.5%を達成した。また、 TiO_x が結晶シリコン太陽電池の電子コンタクトとしてのみならず、正孔コンタクトとしても機能することを実セルで初めて実証した。従来のアモルファスシリコン p-i 層を TiO_x に置換することで J_{sc} を 4.1%改善し、解放電圧 0.700V を確認した

2) 高性能 CIS 太陽電池の開発

本研究開発項目では 2025 年度発電コスト 7 円/kWh 達成を目標とする研究開発項目①の高性能 CIS 太陽電池の高効率化、低コスト化のための共通基盤技術として、大学や研究機関が CIS 太陽電池の高効率化のための手法の開発や機構解明を行った。以下に主な成果を示す。「光吸収層の高品質化による CIS 太陽電池の高効率化」においては、三段階蒸着製膜 CIS 光吸収層における銀 (Ag) やアルカリ金属添加、およびバンドギャップグレーディング制御、熱光照射処理により変換効率向上を実現した。これにより、世界最高水準の変換効率 22.2%を確認した。

「界面制御によるカルコゲナイド系薄膜太陽電池の高効率化」においては、CIS 太陽電池の pn ヘテロ接合界面に価電子帯オフセット ΔE_v を設けることにより界面再結合電流の抑制が可能であることを指摘した。 ΔE_v を形成する層として Cu 欠損層を用いることにより、開発開始時の開放端電圧 V_{oc} を +30mV 増加させ、 $J_{sc} \times V_{oc} = 26.3 \text{ mW/cm}^2$ を実現、最終目標を達成した。さらに、3 段階法における Cu 欠損層の成長モデルを構築した。

「バンド制御による再結合パッシベーション技術の開発」においては、Cd フリーかつオールドライプロセスの MOCVD-(Zn, Mg)O:B/sp-(Zn, Mg)O/CIS(Cs 処理) 構造で、従来構造よりも 30mV 高い V_{oc} 、 $V_{oc} \times J_{sc}$ 値は 29.0 mW/cm^2 を達成した。また、従来のウェットプロセスを用いないオールドライプロセスで、世界で初めて変換効率 22%を超える CIS 太陽電池を実現することに成功した。

「エピタキシャル成長を利用した CIS 太陽電池の高効率化指針の解明」においては、エピタキシャル製膜の下地となる Mo 薄膜について、低温バッファ層を導入した新規スパッタ法を開発し、Mo 薄膜のエピタキシャル成長に成功した。新たに開発した高温 3 段階法で Mo/サファイア基板上にエピタキシャル CIS 薄膜を作製し、キャリアライフタイム τ_2 100ns 以上 (300K) を達成した。

「結晶欠陥の検出と同定、欠陥密度低減化技術開発支援」においては、アルカリ処理 CIS 試料の深い欠陥準位の相関を示し、バルク改質 (アンチサイト欠陥の密度低減) の効果があることを確認した。また、バルク再結合成分が減少し、開放起電圧が改善することを、再結合解析より定量的に明らかにした。放射再結合定数の再計算とシミュレーションを組み合わせ、25%の達成に必要な開放起電圧 (欠陥準位) について明らかにした。非輻射再結合損失に加え、 J_{sc} 損失の低減が不可欠であることを示した。

「積層構造・改質界面の電子構造評価による電池特性向上技術の開発」においては、電子構造の深さ方向プロファイルを評価するための技術として窓層/バッファ、バッファ/CIS 層界面形成、CIS/Mo 界面露出、「その場」アルカリ処理技術を開発した。それらと電子分光法による評価の結果、バッファ/CIS 界面のバンド接続がほぼ理想的であること、この界面の拡散電位がアルカリ処理により増大し、処理による開放電圧の増大に対応すること、三段階法、SAS 法共に高性能電池の CIS 層内、Mo 側にバンドギャップ二重傾斜、Back Surface Field が存在することを明らかにした。一方、窓層/バッファ、CIS/Mo 界面の電子接続には効率向上に向けて改善の余地が残されていることを示した。

「理論計算と実験的手法を組み合わせた粒界と界面を中心とした材料設計とモデル実証研究」においては、 $\text{Cu(In, Ga)(S, Se)}_2$ [CIGSSe]系化合物半導体の禁制帯幅やバンド構造(価電子帯上端[VBM]と伝導帯下端[CBM]の準位)の Ga/(In+Ga)比と S/(S+Se)比をパラメータとした 3 次元マップを作成し、 CuInSe_2 の Ga や S の固溶効果を明らかにするとともに、高効率太陽電池の光吸収層の深さ方向の組成分布や粒界構造モデルを提案した。深さ分解 XAFS 法を用いて、高効率太陽電池に用いられている Cs 処理は、表面だけではなく薄膜内部に与える効果で変換効率の向上に寄与していることを示した。

研究開発項目④「共通基盤技術の開発 (太陽光発電システムの信頼性評価技術等)」

本研究開発項目では「出力測定技術の開発」、「発電量評価技術」および「信頼性・寿命評価技術の開発」を通じて、太陽電池の効率、耐久性を向上させるための共通基盤技術開発を行った。以下に主な成果を示す。

「出力測定技術の開発」では新型太陽電池の屋内高精度性能評価技術を開発し新型結晶シリコンペラセル及び CIGS で再現性 $\pm 0.5\%$ (1σ) の最終目標を達成した。また、屋外測定につい

ては、PVMS (PV Module Irradiance Sensor) による日射計測や高精度モジュール温度測定、従来より高精度かつ温度係数の情報不用な新温度補正式の技術開発により、高精度な屋外性能評価が様々な照度・温度条件下で実現可能であることを実証し、測定再現性 $\pm 1.0\%$ (1σ) の最終目標を達成した。

「発電量評価技術」では太陽電池モジュールの種類毎の劣化傾向を把握することにより、多くの種類の太陽電池において、発電量評価の上で考慮すべき初期劣化は飽和傾向を示し、初期劣化の程度や飽和に要する時間等の諸特性を明確化できた。また、各種太陽電池の推定発電量と実発電量を比較し、ヘテロ接合系や薄膜シリコン系でも最終目標である $\pm 5\%$ 以内の精度を十分に上回る精度で発電量推定が可能なことを実証した。

日照一日射モデル (日照時間から日射量を推定するモデル) の改良を行い、代表年時別データとして整備した。さらに衛星推定日射量による高密度な面推定データを統合することで、高精度で高密度な (1 km メッシュの解像度の) 月平均日積算日射量データを整備しデータベース化した。

「信頼性・寿命評価技術の開発」では紫外線照射試験を施したモジュールの着色と酢酸量、自由体積サイズ、発電量を定量的に評価した。さらに、PID 現象と Na の関係性を評価するとともに、各種太陽電池での PID 現象を詳細に解析した。光照射時の PID の振舞いを詳細に調査し、波長依存性を明確化するとともに、部分影の影響を見出した。これまでに見出した PID 現象を定性的ながら総合的に説明できるモデルを構築し、これまで個別のモデルで考えられていた p 型と n 型の結晶シリコン太陽電池の PID メカニズムを統一的に説明可能とした。p 型セルにおける反射防止膜を種々変更したセルを用いてより詳細に検証し、上記モデルを強化した。また、これらの知見をもとに、反射防止膜にかかる電界を遮蔽するセル構造を考案し、PID をほぼ完全に抑止できることを実証した。

ZEB 適用型太陽電池モジュールの配線接続ユニットを用いた加速評価方法により、30 年以上の耐久性を評価することができ、耐用年数 30 年以上の設計要件を明らかにすることができた。また、新規加速負荷試験 (ATC 試験) において、ガラス封止構造は、通常のフィルム封止構造 (耐用年数 20 年設計) の 3 倍の耐久性を有することを確認した。

研究開発項目⑤「動向調査等」

本研究開発項目では太陽光発電開発戦略に関する動向調査、発電コスト低減に向けた太陽電池技術開発に関する動向調査、IEA、PVPS の国際協力活動への参加、情報収集、活動提案を行った。

「太陽光発電開発戦略に関する動向調査」では、第 5 次基本計画に掲げられた再生可能エネルギーの「主力電源化」に向けて太陽光発電開発戦略の改訂が緊急の課題であるとの認識から、有識者による「太陽光発電技術戦略委員会」を立ち上げ、太陽光発電の価値・付加価値、太陽光発電の市場創出の可能性等の情報収集・分析を行うと共に、「太陽光発電開発戦略」の方向性を検討した。検討を踏まえた「太陽光発電開発戦略」を推進するべく、市場動向、システム価格や発電コストに関連する各種情報を収集し、最新の発電コストの試算および感度分析を行った。また、制度動向、技術動向、経済性評価 (グリッドパリティ等) の情報を調査し、太陽光発電の 2050 年に向けた導入量を定量的に分析した。今後市場の発展が見込めるアプリケーションとして検討を開始した「太陽光発電システム搭載自動車」の意義、市場動向を調査し、時間帯別の日射量・走行パターンを想定した太陽光発電システム搭載自動車による CO2 排出削減効果の試算を行った。また、太陽光発電搭載自動車に関する国際的な展開として、IEA PVPS におけるタスク 17: PV and Transport の立ち上げ及び運営支援を行った。

「発電コスト低減に向けた太陽電池技術開発に関する動向調査」では、太陽光発電システム設置価格とその内訳について調査・分析を行うとともに、世界における太陽電池モジュール技術および産業の現状を調査し、代表的な太陽電池製造企業の事業内容の整理および比較を行った。また、太陽電池モジュールの長期信頼性に関する研究開発動向や国際標準化について調査した。更に、「太陽光発電開発戦略」の改訂に対応するべく、太陽電池モジュールの利用動向と今後の市場と産業の可能性に関して調査した。海外主要国における太陽電池の研究開発動向を調査し、各国の太陽電池技術開発戦略を体系的かつ明確に比較・分析できるよう、その枠組み、予算配分、目標等の比較を行った。特に、新たな太陽電池技術として、量産製品における技術

トレンド、ペロブスカイト太陽電池等の研究開発動向と実用化に向けた各機関の取り組みや開発ロードマップ等を調査した。「IEA PVPS 国際協力事業」では国際エネルギー機関(IEA)の太陽光発電システム研究協力実施協定(PVPS)に参画し、太陽光発電の普及・促進に向けた国際協力活動を通じた諸外国の技術開発動向や政策動向、市場動向等に関する調査・分析を実施した。具体的には、タスク1 専門家会議、ワークショップ等への参画を通じて、各国の国家プログラム、研究開発、実証試験、導入促進、市場動向等の情報を調査した。また、各種ワークショップにおいて日本の動向について講演を行い、加盟国間の情報交換に貢献した。また、日本のタスク1に関わる調査を実施し、報告書をIEA PVPSに提出するとともに、IEA PVPS Trends Reportを始めとする各種報告書を作成するとともに、主要国の国内調査報告書等の日本語版を作成した。特別情報活動では、第7回世界太陽光発電国際会議(WCPEC-7)でタスク10Aの運営責任者を務め、日本およびEUの専門家が中心となり会議に参加したステークホルダーに対し、太陽光発電の市場、価格、産業界の総括的な概要報告と将来のビジネス展望に関するワークショップを開催した。また、第35回欧州太陽光発電国際会議(EUPVSEC-35)において、新しい市場開拓、ビジネスモデルに関するワークショップを実施すると共にIEA PVPSタスク17「PV and Transport」に係る各種情報収集およびタスク専門家発掘等の支援を実施した。

研究開発項目⑥「高性能太陽電池製造技術実証」

本研究開発項目では2025年7円/kWhを目指し、海外メーカーに対し圧倒的に高効率な太陽電池の低コストプロセス技術を構築するべく、生産プロセスを設計するとともに、量産において低コスト化につながる製造技術の実証を行った。

「低コストヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池の小規模量産実証」において、製造プロセスの改善を進め、モジュール変換効率22%実現に必要なセル変換効率24%相当を再現性良く得られることを確認した。また、p/n、電極パターン形成に用いる部材のバリューエンジニアリング、既存材料の利用効率の改善可能により、パターン形成の変動費5円/Wの実現見込みを得た。

2. 研究開発項目毎の成果と実用化・事業化見通し

(イ) 先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の技術開発

【A 結晶 Si 太陽電池をベースとした複合型太陽電池モジュールの開発】(株式会社カネカ)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
① 高効率バック コンタクトヘテ ロ接合結晶 Si 太 陽電池の開発	①モジュール変換 効率:24%、発電コ スト:14 円/kWh	モジュールでの変換効 率:24%(実用サイズモジ ュール) 発電コスト14 円/kWh	◎	
② 結晶 Si 太陽電 池をベースとし た複合型太陽電 池の開発	②セル変換効率: 30%、モジュール 変換効率:27%	セル変換効率 30%	△	

*1 達成度

◎: 数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○: 数値目標クリア、△: 数値目標未達

【B 高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発】(シャープ)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
① 出力向上技術 の開発	モジュール変換効 率 22%を試作モジ ュールで確認す る。	・フルサイズ(156mm 角) の基板を用いて、 セル変換効率 25.1%の 達成。 ・42 直モジュール試作 モジュール変換効率 22.1%確認 ・信頼性評価 IEC 規格 をクリア	◎	
② 低コスト化技 術の開発	2020 年発電コス ト 14 円/kWh を達 成するためのプロ セス技術開発を行 う。また、2025 年 発電コスト 7 円 /kWh の定量的な シナリオを提示す る。	・発電コスト 14 円/kWh のプロセス技術開発を 達成(社内試算) ・7 円/kWh の定量的な シナリオを作成	◎	

*1 達成度

◎: 数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○: 数値目標クリア、△: 数値目標未達

【C 低コスト高効率セル及び高信頼性モジュールの実用化技術開発】（京セラ株式会社）

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
低コスト量産プロセスでの高効率シリコン太陽電池の開発	発電コスト 14 円/kWh を実現し、更に 7 円/kWh に資する太陽電池モジュール製造技術を開発する (モジュール効率 20%)	テーマ完了時において、発電コスト 11.1 円/kWh(原価)を実現。 7 円/kWh 以下の実現に向けて、モジュール効率 20%(社内測定)を確認し、20.5%達成のための技術要件を明確にした。	◎	
高信頼性シリコン太陽電池モジュールの開発	長寿命モジュール(寿命 35 年)の製造技術導入	単体及び連続複合加速試験、市場回収品追加加速試験、および劣化メカニズム解析に基づく寿命予測技術を開発した。 また自社 PERC セル 60 直モジュールにて、非住宅市場で予測寿命 35 年以上であることを確認した	◎	

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【D 基盤技術開発による先端複合技術セルのための低再結合電極の研究開発】（ナミックス株式会社）
(2015 年度～2018 年度)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度	備考
基盤技術開発による先端複合技術セルのための低再結合電極の研究開発	・低表面濃度の n+層に対する接触抵抗 2 mΩ cm ² 以下 (6×10 ¹⁹ cm ⁻³)	1.8 mΩ cm ² (1×10 ²⁰ cm ⁻³)	◎	
	・p+層に対する接触抵抗 5 mΩ cm ² 以下 (1×10 ²⁰ cm ⁻³)	3.8 mΩ cm ² (1×10 ²⁰ cm ⁻³)	◎	
	・電極形成による再結合 (j _{0-met}) 500 fA cm ⁻² 以下	470 fA cm ⁻²	◎	

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【E 赤外線 FZ 法による高品質低コストシリコン単結晶の開発】(株式会社クリスタルシステム)
(2015 年度～2017 年度)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度	備考
赤外線 FZ 法による高品質低コストシリコン単結晶の開発	①インゴット製造経費： ¥1700/kg	①実績に基づく試算にて目標値の半分以下のコストを達成	◎	
	②直径：220mm	②130mm	△	
	③長さ：300mm 上	③105mm	△	
	④N 型、リンドープ	④N 型、リンドープ	◎	
	⑤ライフタイム ：5000 μ sec 以上	⑤7397 μ sec	◎	
	⑥結晶欠陥 ：0.1 個/cm ³ (大きさ 100nm 以上)	⑥0 個/cm ³	◎	
	⑦転位：0 個/cm ²	⑦0 個/cm ² (ネッキング)	◎	
	⑧抵抗面内分布 ：12%以下	⑧10.9%以下	◎	
	⑨酸素成分濃度 ： $\leq 2 \times 10^{16}$ atoms/cm ³	⑨ 6.9×10^{13} atoms/cm ³	◎	
	⑩炭素成分濃度 ： $\leq 2 \times 10^{16}$ atoms/cm ³	⑩ 1.2×10^{15} atoms/cm ³	◎	

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【F 高発電効率・低コスト太陽電池スライスプロセスの加工技術構築】（コマツ NTC 株式会社）

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
発電効率向上	スライスプロセスが与えるセルへの影響明確化	<ul style="list-style-type: none"> ・スライス時の欠陥評価手法と対処条件を構築。 ・高面品位スライス技術での優位性を確認。ダメージエッチング 5μm 削減可能。 	○	
	連携大学先試作セル 25%	<ul style="list-style-type: none"> ・薄板PV評価実施済 ($\eta \leq 22.4\%$) ・連携大学での試作N型Bifacialセルは $\eta = 20.8\%$ と低い。結晶およびスライス品質には問題がなく、セル製作におけるベース効率の向上が必要との見解。 	○	
製造コスト低減	切断ピッチ 0.110mm 加工技術構築	<ul style="list-style-type: none"> ・切断ピッチ狭小化でのウェハ厚さ確保を推進するため、カーフロス極小化に注力。 ・切断ピッチ 0.15mm 加工技術を確立。 ・薄板基板の品質を向上させるため、スライス面品位をコントロールし、ウェハ曲げ強度が 60%向上した。 ・試作セル結果は、80μm 厚まで性能維持が可能。（切断ピッチ 0.13～0.14mm 相当となる） ・切断ピッチ 0.13mm 加工技術開発にて、高速加工による課題抽出した。 	△	
	うちカーフロス 60 μ m スライス技術構築	<ul style="list-style-type: none"> ・カーフロス 60μm の加工技術開発を行い、市場量産と同等以上の生産性を確保する加工技術を構築した。 ・さらにカーフロス 50μm の加工を先行評価し、加工可能であることを確認したほか、カーフロス 40μm が可能となる固定砥粒ワイヤの製造を確認した。 	◎	
	スライスコストの低減 (18 円/枚)	<ul style="list-style-type: none"> ・カーフロス 60μm でシリコン結晶材料費を除いたスライスコストは、12.5 円/枚を達成した。（自社試算） 	◎	

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【G 太陽電池用原料品質の最適化及び結晶欠陥の評価技術の開発・制御】(株式会社トクヤマ)
(2015年度～2016年度)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	備考
太陽電池用原料品質の最適化及び結晶欠陥の評価技術の開発・制御	不純物および欠陥の影響把握と制御化	太陽電池製造の熱プロセスで成長する酸素析出物の形態と数密度が、炭素不純物濃度と結晶成長条件により変化し、ライフタイムや変換効率に悪影響を及ぼすことを解明した。 酸素析出物の形態と数密度を制御して高ライフタイムの単結晶インゴットを得る CZ 法結晶成長技術を開発した。	○	
	ライフタイム目標値は1000μsec	開発した結晶成長技術と炭素濃度を低減したポリシリコン原料を使用して得られた実用サイズのインゴットのライフタイムは、全長にわたって2000μsec以上を達成した。	○	
	ライフタイム下限値は300μsec以上	開発したインゴットは熱プロセス後のライフタイム低下が抑えられ、ライフタイム下限値を300μsecとすると、インゴットの直胴良品歩留りが11.5%向上した。	○	

*1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【H CIS 太陽電池モジュール高性能化技術の研究開発】(ソーラーフロンティア株式会社)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
高性能化：高性能サブモジュール技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 製品サイズ試作モジュール変換効率16%の実証 サブモジュール変換効率20%の技術確立(小面積セル変換効率23%) 	<ul style="list-style-type: none"> 製品サイズ試作モジュール変換効率16.1%(197.2W) サブモジュール変換効率19.8%(Fh-ISE測定) 小面積セル変換効率23.4%(産総研測定) 	○	
低コスト化：モジュールコスト削減技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 2014年度比モジュールコスト10%削減 	<ul style="list-style-type: none"> 2014年度比モジュールコスト15%以上削減済 	○	
追加目標①：新表面電極技術の大面积化検証	<ul style="list-style-type: none"> 製品サイズモジュールにおける新表面電極技術による出力向上の実証 	<ul style="list-style-type: none"> 出力向上(+7.1W)を実証 量産適用準備が進行中 	○	

追加目標 ②： 軽量化モ ジュール 技術開発	既存モジュール比 ・重量比 1/3 以下 ・出力比 80%以上	既存モジュール比 ・重量比 1/3 (6.6kg) ・出力比 90% (166.6W)	○	
------------------------------------	---------------------------------------	---	---	--

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【I 低コスト・高信頼性・高効率 Super Si Hetero- Junction (SSHJ) 太陽電池の開発】
(パナソニック株式会社) (2018 年度～2019 年度)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
①Super Bifacial-SHJ (SBF-SHJ) 開発	・セル効率：24.0% ・モジュール効率：20.8% ・発電コスト 7 円/kWh 相当の性能を実現	・セル効率：23.2% ※自社測定値 AIST 測定は 9 月予定 ・モジュール効率：20.9% (計算値) 発電コスト 7 円/kWh 相当	○	
②Super Back Contact-SHJ (SBC-SHJ) 開発	・セル効率：25.0% ・モジュール効率：22.0% ・発電コスト 7 円/kWh 相当の性能を実現	・セル効率：25.4% ※自社測定値 (目標達成見込み) AIST 測定は 9 月予定 ・モジュール効率：22.0%以上達成見込み 発電コスト 7 円/kWh 相当	○	

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

A 結晶Si太陽電池をベースとした複合型太陽電池モジュールの開発（株式会社カネカ）

1. 成果詳細

1.1 達成状況

① 高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池の開発

バックコンタクトヘテロ接合（HJBC）結晶Si太陽電池セルにおいて変換効率26.7%（産業技術総合研究所での測定値）を、HJBC太陽電池モジュールにおいて変換効率24.5%（産業技術総合研究所での測定値）をそれぞれ達成した。いずれもSi太陽電池の世界最高記録である。なお、社内測定ではあるが、小サイズモジュールにおいて変換効率25%以上を得た。

モジュール加速劣化試験、屋外環境試験を実施し、HJBC太陽電池は両面電極型ヘテロ接合結晶Si太陽電池と同等以上の信頼性および発電量が期待できることを明らかにした。

② 結晶Si太陽電池をベースとした複合型太陽電池の開発

複合型太陽電池として、トップセルにペロブスカイト太陽電池、ボトムセルに両面電極型ヘテロ接合結晶Si太陽電池を用いた二端子タンデム、及び、トップセルにペロブスカイト太陽電池、ボトムセルにHJBC太陽電池を用いた三端子タンデム構造の複合型太陽電池に関し、設計技術、作製技術、特性評価技術等の要素技術開発を実施し、変換効率向上に向けた技術的な課題とその対応策を明確にした。このなかで、タンデム化により、ヘテロ接合を有する結晶Si系太陽電池の単接合太陽電池セルより変換効率が向上することを確認した。

また、技術開発で得られたデータをもとにデバイス設計を実施し、光学・回路シミュレーションにより、30%以上の変換効率を実現できる見通しを得た。

以上の取り組みにより、本研究開発テーマにおける最終目標を達成した。

1.2 成果の詳細

(1) 概要

本研究開発テーマでは、発電コスト14円/kWhを実現する太陽電池モジュールを2020年までに実用化するための技術開発の観点から、「① 高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池の開発」を実施し、この開発成果を活用し、2020年までの実用化と、2025年までに7円/kWhを実現する要素技術の確立を目的に、結晶Si太陽電池と非結晶Si系太陽電池とを組み合わせた太陽電池であり、更なる高効率化が見込まれる「② 結晶Si太陽電池をベースとした複合型太陽電池の開発」を実施した。以下に各開発項目の概要を記す。

① 高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池の開発

本項目では、太陽電池セル裏面側に集電極を集約することで光入射面側の遮光損を低減させることで、高出力化したバックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池セル及びモジュールを開発した。また、本研究開発テーマにて開発した太陽電池モジュールに対し、モジュール長寿命化を見据えた各種信頼性試験を実施する。信頼性試験の一部は、国立研究開発法人産業技術総合研究所に再委託して実施した。

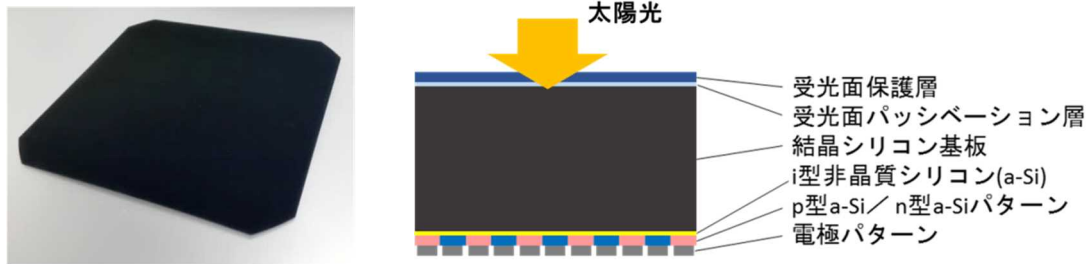
② 結晶Si太陽電池をベースとした複合型太陽電池の開発

本開発項目では、結晶Si太陽電池と非結晶Si系太陽電池を組み合わせた高効率複合型太陽電池を実現するために必要な非結晶Si系太陽電池セルの開発、積層界面での光学損の低減技術、非結晶Si系太陽電池と結晶Si太陽電池との電氣的接続構造の開発を実施するとともに、長期信頼性の評価、低コスト量産要素技術開発等を実施する。非結晶Si太陽電池の要素技術開発の一部は、国立大学法人京都大学と国立大学法人東京工業大学に再委託して実施した。

(2) 高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池の開発

(2-1) 要素技術開発

バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池は、図Ⅲ-2-(イ)-A-1に外観写真と断面構造を示すように、電力を取り出すための電極を太陽電池の裏側のみに形成した構造を有する。このように、電極を裏面に集約することで、受光面での光吸収や反射が抑制でき、両面電極構造よりも変換効率を高めることが可能である。本テーマでは、高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池を実現するために必要な要素技術開発として、表Ⅲ-2-(イ)-A-1に記す事項等に取り組んだ。

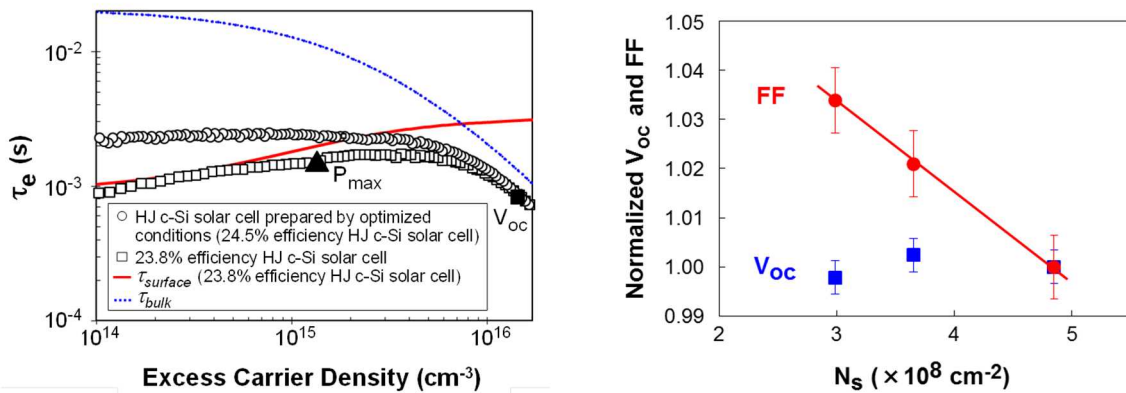


図III-2-(イ)-A-1：バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池セルの外観写真（左）と構造模式図（右）の一例

表III-2-(イ)-A-1：高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池を実現するために取り組んだ主な要素技術開発項目

構成要素	要素技術の開発項目
受光面保護層	低光反射率/低光吸収
受光面パッシベーション層	低いキャリア再結合速度（長キャリアライフタイム） /低光吸収
i型非晶質シリコン (a-Si)	
電極	界面抵抗、ライン抵抗による損失低減、高反射率

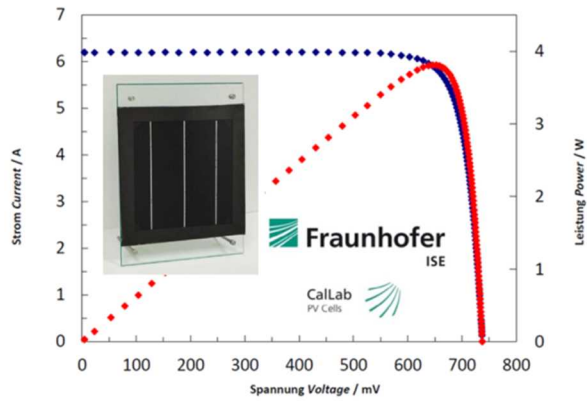
まず、両面電極型ヘテロ接合結晶Si太陽電池を用いて、パッシベーション特性や界面抵抗の観点からヘテロ接合部の改善に取り組み、ヘテロ接合部におけるキャリア再結合速度や界面抵抗損を低減させることが可能となった。ヘテロ接合部の特性改善技術の開発と並行して評価技術の開発を進め、ヘテロ接合界面におけるキャリアの再結合中心密度と開放端電圧 (V_{oc}) 及び曲線因子 (FF) の関係を明確にし、ヘテロ接合部の特性改善がFFの向上に大きく寄与することを明らかにした。ヘテロ接合部におけるキャリア再結合に関する検討結果の一例を図III-2-(イ)-A-2に示す。



図III-2-(イ)-A-2：高効率ヘテロ接合結晶Si太陽電池におけるライフタイム (τ_e) の注入キャリア濃度依存性 (左) と、この関係等から求めたヘテロ接合界面におけるキャリア再結合中心密度 (N_s) と V_{oc} 、FFの関係 (右) の一例。本検討により、高効率ヘテロ接合結晶Si太陽電池におけるキャリア再結合中心密度の低減は、 V_{oc} よりFFの向上に大きく寄与することが明らかとなった。

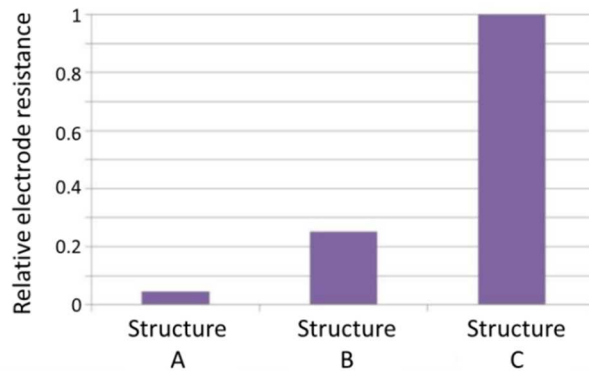
これらの技術開発の結果、2015年度に結晶Si太陽電池のFFとしては世界最高となる83.5%を実現、両面電極型結晶Si太陽電池では世界最高となる変換効率25.1% (第三者機関認証測定値) を実用サイズヘテロ接合結晶Si太陽電池セルにおいて達成した (図III-2-(イ)-A-3)。これによりヘテロ接合界面の特性改善が、FFの向上に有効であることを実証するとともに、更なるヘテロ接合界面の特性改善によりセル特性の改善が期待できることを明らかにした。

Area	151.9 cm ²
V _{oc}	738 mV
J _{sc}	40.8 mA/cm ²
FF	83.5%
Eff.	25.1%



図Ⅲ-2-(イ)-A-3：高効率ヘテロ接合結晶Si太陽電池の第三者機関における認証測定結果の一例

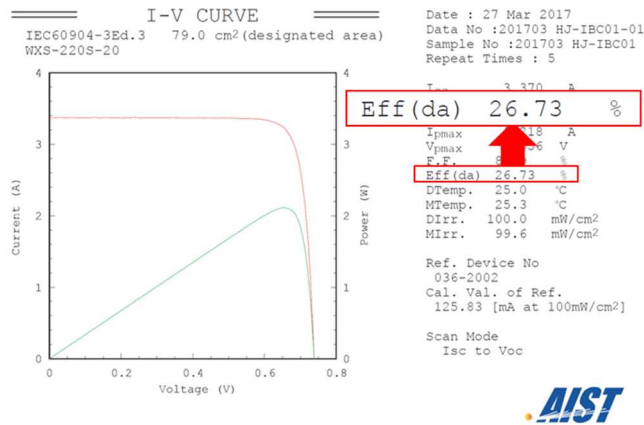
あわせて、バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池において、6インチセルに対するパターン形成技術及び電極抵抗の低減技術の開発を進めた。バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池は裏面側に電極等の構造が集約した構造であることから、片面にp型パターン用電極とn型パターン用電極、インターコネクション用電極を配置する必要があり、配置パターンに関しては制約が多い。一方で、両面電極型結晶Si太陽電池よりも遮光損に関しては制約が少ないため電極の低抵抗化は実現しやすい。これらの特徴を踏まえ、電極抵抗の低抵抗化に関し6インチセルに対して開発した技術の成果の一例を図Ⅲ-2-(イ)-A-4に示す。



図Ⅲ-2-(イ)-A-4：6インチバックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池における電極抵抗の相対値を示す図。両面電極型ヘテロ接合結晶Si太陽電池における典型的な電極抵抗値 (C) に対する開発品 (A、B) の電極抵抗値を記す。これらの検討により電極抵抗値を大幅に低減させることが可能となった。

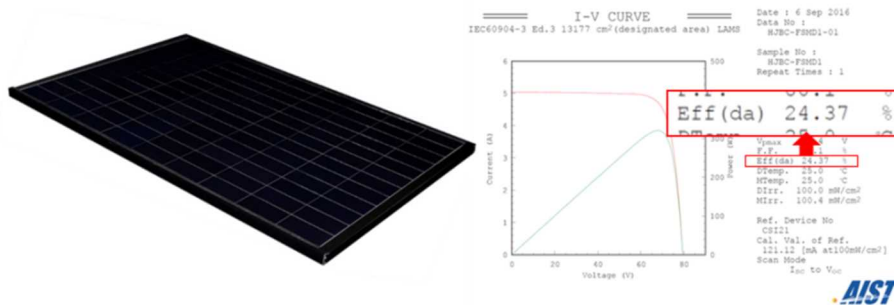
(2-2) 高効率セル、モジュール技術開発

上記のように要素技術開発により実現した高品質アモルファスSiを用いたヘテロ接合技術や、電極の直列抵抗を低減させる技術、太陽光をより効率的に利用できるバックコンタクト技術を、結晶Si太陽電池において組み合わせることで、結晶Si太陽電池セルとして世界最高となるセル変換効率26.33%を実用サイズ (セル面積180cm², designated area measurement: da) のバックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池において達成した(2016年度に報告)。更に、要素技術の開発を進め、セル変換効率は26.7%まで到達した(産業技術総合研究所での測定により確認：図Ⅲ-2-(イ)-A-5)。



図Ⅲ-2-(イ)-A-5：バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池の産業技術総合研究所での測定結果 (da)。変換効率(EFF)26.7%はSi太陽電池セルにおいて世界最高の値である。

また、高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池セルを用い、モジュール内での抵抗損失を最小限にするためのセル間配線技術やモジュールに照射された光の収集効率を高める技術などを新たに開発することで、結晶Si太陽電池モジュールとして世界最高の変換効率24.37%（面積13,177cm²）を2016年度に実現した（図Ⅲ-2-(イ)-A-6）。



図Ⅲ-2-(イ)-A-6：実用サイズである大判のバックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池モジュールの産業技術総合研究所での測定結果 (da)（右）と測定したモジュールの外観写真（左）。変換効率 (EFF)24.37%はSi太陽電池モジュールにおいて世界最高の値である。

太陽電池の使用環境ではモジュールは高温になることが多く、実発電量は定格出力に加え、出力の温度係数によって大きく変化することが知られている。このことから、高効率(変換効率26%台)のバックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池セルを用いて出力の温度依存性を測定した。この結果、出力の温度係数として-0.26%/℃が得られた。この値は、測定したバックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池と同等のVocを有する両面電極型ヘテロ接合太陽電池と同等の値であった。

(2-3) 信頼性評価

バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池の要素検討として、両面電極型ヘテロ接合結晶Si太陽電池の信頼性評価を実施した。その結果、小サイズのモジュール（ミニモジュール）の高温高湿試験（条件：85℃/85%RH）において、6,000時間以上経過後も出力保持率95%以上を維持しており、ヘテロ接合結晶Si太陽電池の各構成要素が十分高い信頼性を有することを確認できた。また、ミニモジュールにおいて、高温高湿試験や温度サイクル試験等を実施し、本テーマで開発したバックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池が標準的な試験条件において、特に問題が生じないことを確認した。主な信頼性試験結果を表Ⅲ-2-(イ)-A-2に記す。

表Ⅲ-2-(イ)-A-2: HJBC太陽電池モジュールの信頼性試験結果の一例

試験方法 (試験条件)	構造	暫定基準	結果
湿耐久性試験 (85度/85%DH)	ミニモジュール	Pmax保持率: 95%以上	合格 (7,500時間)
PID試験 (産総研 A1法)	ミニモジュール	Pmax保持率: 95%以上	合格 (1,000V、7日間)
温度サイクル試験 (85℃⇄-40℃)	大判モジュール	Pmax保持率: 95%以上	合格 (1,000回)
屋外暴露試験 (系統連結)	大判モジュール	Pmax保持率: 95%以上	1年間では、 出力低下なし

(2-4) 高効率Si太陽電池の変換効率

高効率Si太陽電池モジュールの変換効率の記録を表Ⅲ-2-(イ)-A-3に記す。変換効率として23%以上得られている太陽電池はHJBC太陽電池に限られているが、その中でも、本プロジェクトで得た変換効率は特に、高い値を示すことが分かる。なお、本テーマで開発したHJBC太陽電池モジュールの変換効率は、小サイズのGaAs太陽電池モジュールの変換効率の記録である25.1%に匹敵する値である。

表Ⅲ-2-(イ)-A-3: 各機関 (企業) の高効率モジュールの記録

		Voc (V)	Isc (A)	FF (%)	EFF (%)	面積 (cm ²)	発表 時期	測定 機関
HJBC	Kaneka (大判)	79.5	5.04	80.1	24.4	13,177	2016/10	AIST
	Kaneka (建材一体型サイズ)	13.3	4.40	81.7	24.5	1,944	2017/10	AIST
	A社 (大判)	53.4	6.32	81.6	23.8	11,562	2016/03	AIST
	B社 (1セル)	0.736	Jsc=40.2 mA/cm ²	78.0	23.1	不明	2018/10	JET
IBC	C社 (大判)	69.4	6.46	80.0	22.8	15,739	2012/08	NREL
GaAs	D社	11.08	2.303	85.3	25.1	866.45	2017/11	NREL

(3) 結晶Si太陽電池をベースとした複合型太陽電池の開発

(3-1) はじめに

結晶Si太陽電池では、研究開発レベルでは、前述のように既に26.7%まで到達しており、27.1%までは達成の見込みを得ている。しかしながら、結晶Si太陽電池では、1sun条件での理論効率限界は29%程度であり、30%を超えるような変換効率の実現を期待することは難しい。太陽電池の高効率化は、太陽光発電の発電コスト低減に向けた重要な技術であり、更なる高効率化を実現するためには、タンデム化は有望な技術である。

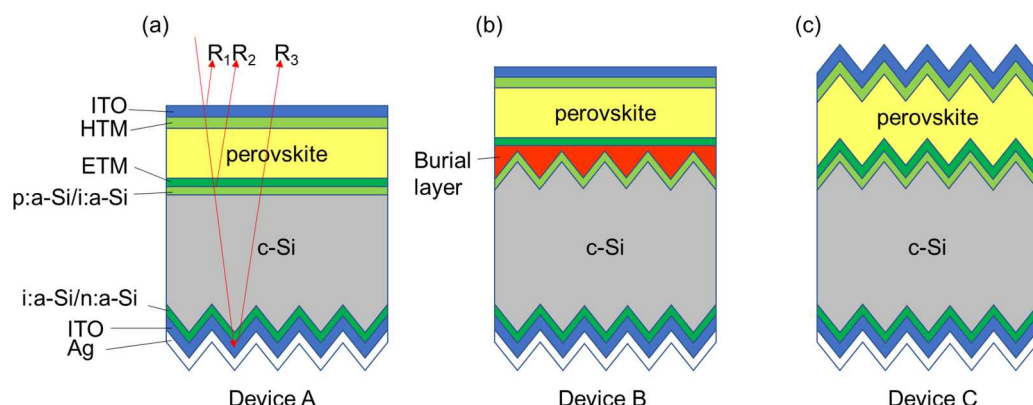
このことから、本テーマでは、圧倒的な低コスト化と高効率化との両立を目指し、既に低コスト化が進んだ結晶Si太陽電池をボトムセルとし、低コスト化が期待されており、近年急速に変換効率が向上したペロブスカイト太陽電池をトップセルとしたタンデム型太陽電池に注目し、研究開発を実施した。

(3-2) 複合型太陽電池の設計

タンデム太陽電池の設計方針を明確にするため、まず二端子構造において構造設計を実施し、その特徴を把握することを試みた。二端子構造では、両面電極型の太陽電池からなるボトムセルの上にトップセルを直接積層して作製する。セルの構造が単純であり、システムも単純にすることができ低コスト化が実現しやすいと期待できる。一方で、トップセルとボトムセルの電流をマッチングさせないと、高い

変換効率が実現できない。このことから二端子タンデム構造でのトップ/ボトムセルの電流マッチングを前提に、セル構造、特にトップセルとボトムセルの界面の形状が電流に与える検討した。

トップセル、ボトムセルの各層のパラメータは、各層の単膜の光学特性を実測して求めた値を用いて、図Ⅲ-2-(イ)-A-7に示す構造のタンデムセルにおいて光学シミュレーションを実施した。



図Ⅲ-2-(イ)-A-7：トップセルとボトムセルの界面の形状が異なるタンデムセルの断面模式図

その結果、最も高い電流は、ボトムセルを両面テクスチャ構造にしたとき (Device C) に得られる (20.25 mA/cm^2)。これは反射率の低減や界面での散乱により光路長を大きくすることができるためである。トップセルをスピコート等のウエットコーティングで形成することを容易にするため、単純にトップ/ボトムセル界面の、ボトムセルの表面を平坦にすると (Device A)、トップセル表面 (図Ⅲ-2-(イ)-A-7における R_1) 及び、トップセル/ボトムセル界面での反射 (図Ⅲ-2-(イ)-A-7エラー! 参照元が見つかりません。における R_2) が大きくなり、高い電流は得られない (17.28 mA/cm^2)。トップセルの形成面を平坦にしつつ、ボトムセルの表面を凹凸構造にする手法として、平坦化層を形成することが考えられる (Device B)。平坦化層の屈折率を制御することで、界面での反射を抑制することができる。また、トップセル再表面の反射は、適切な反射防止層 (AR層) を形成することで抑制でき、ボトムセルを両面テクスチャ構造にしたときに近い電流が得られる (19.57 mA/cm^2)。このようにトップ/ボトムセル界面の形状および界面に設ける層の光学特性は、高い電流を得るためには、非常に重要な要素であることを確認することができた。

(3-3) トップセルの試作結果

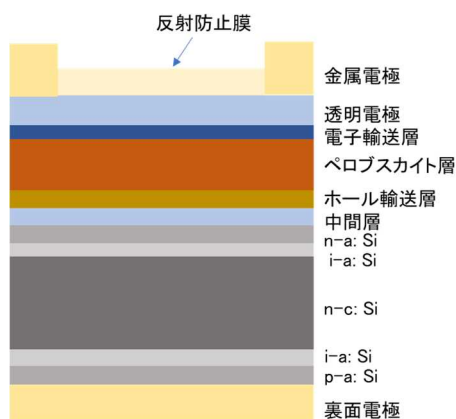
試作したセルや要素サンプルから得られたパラメータを用いて、複合型太陽電池の特性を計算機シミュレーション (光学、回路) により検討し、中間目標達成の前提条件を明確するとともに、各要素セルの構造・光学特性が太陽電池特性に与える影響を明らかにした。また、トップセルの高効率化検討を行い、トップセルの候補であるペロブスカイト太陽電池において変換効率として当時の世界最高水準である21.5%を得た (表Ⅲ-2-(イ)-A-4)。

表Ⅲ-2-(イ)-A-4：3-FTO基板を用いて作製したペロブスカイト太陽電池の太陽電池特性の測定結果 (社内測定)

Scan direction	Jsc (mA/cm^2)	Voc (V)	FF (%)	Efficiency (%)
Forward	24.1	1.15	77.3	21.50
Backward	24.1	1.15	77.8	21.53

(3-4) タンデムセルの試作結果

ボトムセルに両面電極型ヘテロ接合結晶Si太陽電池を用いて図Ⅲ-2-(イ)-A-8に記す構造のペロブスカイト/Siタンデム太陽電池セルの試作を行い、特性を評価した (社内測定)。結果を表Ⅲ-2-(イ)-A-4に記す。



図III-2-(イ)-A-8：ペロブスカイト/Si タンデム太陽電池の試作セルの構造模式図

表III-2-(イ)-A-4：試作したペロブスカイト/Si タンデムセルの特性。タンデムセルのボトムセルに使用したセルと同一条件で作製したヘテロ接合太陽電池セルの単独の太陽電池特性の測定結果を Bottom cell (ref)の欄に記した。

	Jsc	Voc	FF	EFF.
Bottom cell(ref)	1.00	1.00	1.00	1.00
Tandem cell	0.50	2.32	0.93	1.09

タンデムセルにおいては、 J_{sc} はボトムセル単独と比べて約 $1/2$ であるのに対し、 V_{oc} は2倍以上に大きく向上していることから、タンデム化による出力向上のポテンシャルを確認した。

2. 実用化・事業化見通し

株式会社カネカ（以下、カネカ）は、ヘテロ接合結晶Si太陽電池を用いた住宅用ならびに産業用太陽光発電システムの販売を行っている。今後、HJBC太陽電池の量産技術開発を進めるとともに、カネカの保有する太陽電池モジュールの商品設計技術、製造技術、太陽光発電システムの販売チャンネル等を活用することで、本プロジェクトで得られた成果の実用化・事業化は早期に実現できる見通しである。

なお、本テーマで開発した、a-Siによる高品質ヘテロ接合技術、モジュール高効率化技術、高信頼性技術は、バックコンタクト型ヘテロ接合太陽電池に加え、両面電極型ヘテロ接合太陽電池にも適用可能な技術であり、自社製品の開発にも適用している。

また、プロジェクトの成果を活用した高効率太陽電池は、展示会やニュースリリースなどで広くアピールすることで潜在的な顧客に対してもアプローチを図っている。また、国際会議での発表などを通じて、国内外の太陽電池関連の研究者、技術者へのアピールも積極的に行っており、いずれのチャンネルにおいても高い評価を得ている。

3. 波及効果

太陽電池の変換効率の向上は、発電量の増加に加え、一定の発電量がより小面積で得られることから、太陽光発電システムの導入費等の低減にも繋がる。現在導入が進む結晶シリコン太陽電池で27%近いセル変換効率と24%を大きく超えるモジュール効率をあわせて実現したことは、発電コストの低減に大きく寄与するといえる。

プロジェクトで開発したシリコン太陽電池の高効率化技術は、特に、設置面積が制限される住宅やビルにおける太陽電池の更なる普及に貢献するものと期待される。このことは、近年普及に向けた活動が進むZEHやZEBの実現可能性を高めることから、省エネルギー化への取り組みに弾みをつけるものと期待される。

設置面積の観点では車載用途も住宅、ビル用途と同様の課題を有しており、車載用太陽電池の市場拡大にも貢献するものと期待される。

4. 今後の展開

「2. 実用化・事業化見通し」で記したように本テーマで開発した技術を活用した太陽電池の事業化に向け、引き続き、太陽電池の変換効率向上、製造コスト低減、信頼性向上等の技術開発に取り組む。また、カネカは、今回の成果を活用した高効率太陽電池の製品の実用化に向け開発を進める。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	2 (0)	13 (2)	17 (5)	42 (16)	43 (25)	117 (48)
論文	1	2	2	2	0	7
研究発表・講演 (うち国際会議)	5 (2)	4 (4)	9 (7)	2(2)	2 (2)	22 (17)
新聞・雑誌等への掲載	2	3	1	1	0	7
その他	2	2	1	0	0	5

(2020年08月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	株式会社 カネカ	特願2016- 049569	国内	2016年3月14 日	登録	積層型光電変換装置およびその製造方法	三島良太 他
2	株式会社 カネカ	特願2016- 049562	国内	2016年3月14 日	登録	積層型光電変換装置およびその製造方法	三島良太 他
3	株式会社 カネカ	特願2016- 094106	国内	2016年5月9 日	みなし取り 下げ	積層型光電変換装置およびその製造方法	三島良太 他
4	株式会社 カネカ	特願2016- 093754	国内	2016年5月9 日	出願	積層型光電変換装置の製造方法	三島良太 他
5	株式会社 カネカ	特願2016- 102521	国内	2016年5月23 日	みなし取り 下げ	太陽電池及びその製造方法、並びに太陽電池パネル	河崎勇人 他
6	株式会社 カネカ	特願2016- 161825	国内	2016年8月22 日	みなし取り 下げ	太陽電池および太陽電池モジュール	吉河訓太 他
7	株式会社 カネカ	特願2016- 182546	国内	2016年9月20 日	みなし取り 下げ	太陽電池用配線材および太陽電池モジュール	小泉玄介 他
8	株式会社 カネカ	特願2016- 186019	国内	2016年9月23 日	出願	シリコン基板の製造方法	吉田航 他
9	株式会社 カネカ	特願2016- 186020	国内	2016年9月23 日	出願	太陽電池セル、及び太陽電池セルの製造方法	吉田航 他
10	株式会社 カネカ	特願2016- 202414	国内	2016年10月 14日	みなし取り 下げ	光起電装置	中野邦裕 他
11	株式会社 カネカ	特願2016- 220573	国内	2016年11月 11日	出願	光電変換素子および光電変換素子の製造方法	日野将志 他
12	株式会社 カネカ	PCT/JP2017/0 04503	PCT	2017年2月8 日	出願	太陽電池及びその製造方法、並びに太陽電池パネル	吉河訓太 他

13	株式会社 カネカ	201780031451	CN	2017年2月8日	出願	太陽電池及びその製造方法、並びに太陽電池パネル	河崎勇人 他
14	株式会社 カネカ	特願2017-053808	国内	2017年3月17日	みなし取り下げ	太陽電池およびその製造方法	藤本貴久 他
15	株式会社 カネカ	特願2017-063968	国内	2017年3月28日	みなし取り下げ	太陽電池モジュール及びその製造方法	寺下徹 他
16	株式会社 カネカ	PCT/JP2017/017356	PCT	2017年5月6日	出願	積層型光電変換装置およびその製造方法	日野将志 他
17	株式会社 カネカ	PCT/JP2017/021546	PCT	2017年6月9日	出願	太陽電池および太陽電池モジュール	河崎勇人 他
18	株式会社 カネカ	PCT/JP2017/023790	PCT	2017年6月28日	出願	太陽電池用配線材および太陽電池モジュール	寺下徹 他
19	株式会社 カネカ	特願2017-205339	国内	2017年10月24日	出願	バックコンタクト型太陽電池モジュール	吉田航 他
20	株式会社 カネカ	特願2017-214849	国内	2017年11月7日	出願	積層型光電変換装置および積層型光電変換装置モジュールの製造方法	三島良太 他
21	株式会社 カネカ	特願2018-001320	国内	2018年1月9日	みなし取り下げ	太陽電池の製造方法	三島良太 他
22	株式会社 カネカ	PCT/JP2018/001079	PCT	2018年1月16日	出願	太陽電池およびその製造方法	小西克典 他
23	株式会社 カネカ	特願2018-009997	国内	2018年1月24日	出願	太陽電池セル用の接続部材セット、並びにそれを用いた太陽電池ストリング及び太陽電池モジュール	小島広平 他
24	株式会社 カネカ	特願2018-010332	国内	2018年1月25日	出願	太陽電池モジュール	寺下徹 他
25	株式会社 カネカ	特願2018-030753	国内	2018年2月23日	みなし取り下げ	太陽電池の製造方法	三島良太 他
26	株式会社 カネカ	特願2018-030758	国内	2018年2月23日	みなし取り下げ	太陽電池の製造方法	三島良太 他
27	株式会社 カネカ	特願2018-030759	国内	2018年2月23日	みなし取り下げ	太陽電池の製造方法	三島良太 他
28	株式会社 カネカ	特願2018-030796	国内	2018年2月23日	みなし取り下げ	太陽電池の製造方法	中野邦裕 他
29	株式会社 カネカ	特願2018-030800	国内	2018年2月23日	みなし取り下げ	太陽電池の製造方法	三島良太 他
30	株式会社 カネカ	PCT/JP2018/011512	PCT	2018年3月22日	出願	太陽電池モジュール及びその製造方法	小泉玄介 他
31	株式会社 カネカ	特願2018-055925	国内	2018年3月23日	出願	太陽電池の製造方法、および、太陽電池	三島良太 他
32	株式会社 カネカ	特願2018-055926	国内	2018年3月23日	みなし取り下げ	太陽電池の製造方法、および、太陽電池	三島良太 他
33	株式会社	特願2018-	国内	2018年6月29日	出願	太陽電池の製造方法及び	中野邦裕

	カネカ	089819		日		それに用いるホルダ	他
34	株式会社 カネカ	特願2018- 519083	国内	2018年7月25 日	出願	太陽電池及びその製造方 法、並びに太陽電池パネ ル	河崎勇人 他
35	株式会社 カネカ	特願2018- 139518	国内	2018年7月25 日	みなし取り 下げ	太陽電池の製造方法	中野邦裕 他
36	株式会社 カネカ	特願2018- 145634	国内	2018年8月2 日	みなし取り 下げ	洗浄浴槽	渡邊真悟 他
37	株式会社 カネカ	特願2018- 145632	国内	2018年8月2 日	みなし取り 下げ	カセット及び洗浄浴槽セ ット	渡邊真悟 他
38	株式会社 カネカ	特願2018- 152517	国内	2018年8月13 日	みなし取り 下げ	光電変換素子および光電 変換素子の製造方法	吉河訓太 他
39	株式会社 カネカ	特願2018- 516996	国内	2018年8月22 日	出願	積層型光電変換装置およ びその製造方法	三島良太 他
40	株式会社 カネカ	特願2018- 169680	国内	2018年9月11 日	みなし取り 下げ	太陽電池デバイスおよび 太陽電池モジュール	寺下徹 他
41	株式会社 カネカ	特願2018- 169681	国内	2018年9月11 日	みなし取り 下げ	太陽電池モジュール	寺下徹 他
42	株式会社 カネカ	特願2018- 176970	国内	2018年9月21 日	みなし取り 下げ	太陽電池セル、太陽電池 デバイスおよび太陽電池 モジュール	中村淳一 他
43	株式会社 カネカ	PCT/JP2018/0 36419	PCT	2018年9月28 日	出願	太陽電池の製造方法	足立大輔 他
44	株式会社 カネカ	特願2018- 187564	国内	2018年10月2 日	みなし取り 下げ	太陽電池デバイスおよび 太陽電池モジュール	寺下徹 他
45	株式会社 カネカ	TW107136682	TW	2018年10月 22日	出願	太陽電池之製造方法	三島良太 他
46	株式会社 カネカ	201780028271	CN	2018年11月7 日	出願	積層型光電変換装置およ びその製造方法	三島良太 他
47	株式会社 カネカ	16/186069	US	2018年11月9 日	出願	Stacked photoelectric conversion device and method for producing same	三島良太 他
48	株式会社 カネカ	特願2018- 213112	国内	2018年11月 13日	みなし取り 下げ	太陽電池モジュール及び その製造方法	小島広平 他
49	株式会社 カネカ	16/197843	US	2018年11月 21日	出願	Solar cell and method for manufacturing same, and solar cell panel	河崎勇人 他
50	株式会社 カネカ	特願2018- 535473	国内	2018年11月 21日	出願	太陽電池および太陽電池 モジュール	吉河訓太 他
51	株式会社 カネカ	特願2018- 218208	国内	2018年11月 21日	みなし取り 下げ	太陽電池の製造方法	口山崇 他
52	株式会社 カネカ	17796084	EP	2018年12月3 日	出願	Stacked photoelectric conversion device and method for producing	三島良太 他

						same	
53	株式会社 カネカ	特願2018- 232943	国内	2018年12月 12日	みなし取り 下げ	太陽電池モジュール	寺下徹 他
54	株式会社 カネカ	特願2018- 232944	国内	2018年12月 12日	みなし取り 下げ	太陽電池デバイスおよび 太陽電池モジュール	寺下徹 他
55	株式会社 カネカ	特願2018- 234470	国内	2018年12月 14日	みなし取り 下げ	裏面電極型太陽電池の製 造方法	入江暢 他
56	株式会社 カネカ	特願2018- 234638	国内	2018年12月 14日	みなし取り 下げ	裏面電極型太陽電池の製 造方法	浅谷剛 他
57	株式会社 カネカ	特願2018- 544976	国内	2018年12月 17日	出願	光起電装置	中野邦裕 他
58	株式会社 カネカ	特願2018- 235250	国内	2018年12月 17日	みなし取り 下げ	太陽電池モジュール集積 デバイス	岡本紳平 他
59	株式会社 カネカ	特願2018- 243545	国内	2018年12月 26日	みなし取り 下げ	太陽電池の製造方法およ び太陽電池の製造装置	中野邦裕 他
60	株式会社 カネカ	特願2018- 244093	国内	2018年12月 27日	みなし取り 下げ	太陽電池の製造方法	藤本貴久 他
61	株式会社 カネカ	特願2018- 54064	国内	2019年1月7 日	出願	太陽電池用配線材および 太陽電池モジュール	小泉玄介 他
62	株式会社 カネカ	特願2019- 022614	国内	2019年2月12 日	出願	大判半導体基板および割 断半導体基板の製造方法	中野邦裕 他
63	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 05405	PCT	2019年2月14 日	出願	太陽電池の製造方法	口山崇 他
64	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 05407	PCT	2019年2月14 日	出願	太陽電池の製造方法	中野邦裕 他
65	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 05408	PCT	2019年2月14 日	出願	太陽電池の製造方法	足立大輔 他
66	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 06133	PCT	2019年2月19 日	出願	太陽電池の製造方法	三島良太 他
67	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 06135	PCT	2019年2月19 日	出願	太陽電池の製造方法	中野邦裕 他
68	株式会社 カネカ	201780051332	CN	2019年2月21 日	出願	太陽電池および太陽電池 モジュール	吉河訓太 他
69	株式会社 カネカ	16/282407	US	2019年2月22 日	出願	Solar cell and solar cell module	吉河訓太 他
70	株式会社 カネカ	特願2019- 034248	国内	2019年2月27 日	みなし取り 下げ	光電変換素子および光電 変換素子の製造方法	三島良太 他
71	株式会社 カネカ	201780057262	CN	2019年3月18 日	出願	太陽電池用配線材および 太陽電池モジュール	小泉玄介 他
72	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 11116	PCT	2019年3月18 日	出願	太陽電池の製造方法、お よび、太陽電池	吉河訓太 他
73	株式会社 カネカ	16/335119	US	2019年3月20 日	出願	Wiring member for solar cells and solar cell module	小泉玄介 他

74	株式会社 カネカ	特願2019- 054986	国内	2019年3月22 日	みなし取り 下げ	太陽電池の製造方法およ び太陽電池の仕掛品	中野邦裕 他
75	株式会社 カネカ	17852645	EP	2019年4月9 日	出願	Wiring member for solar cells and solar cell module	小泉玄介 他
76	株式会社 カネカ	16/341848	US	2019年4月12 日	出願	Photovoltaic device	中野邦裕 他
77	株式会社 カネカ	201780063287	CN	2019年4月15 日	出願	光起電装置	中野邦裕 他
78	株式会社 カネカ	17860034	EP	2019年5月14 日	出願	Photovoltaic device	中野邦裕 他
79	株式会社 カネカ	特願2019- 092215	国内	2019年5月15 日	みなし取り 下げ	素子の製造方法	日野将志 他
80	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 19526	PCT	2019年5月16 日	出願	太陽電池デバイスおよび 太陽電池モジュール	寺下徹 他
81	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 19527	PCT	2019年5月16 日	出願	太陽電池モジュール	中村淳一 他
82	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 19528	PCT	2019年5月16 日	出願	太陽電池セル、太陽電池 デバイスおよび太陽電池 モジュール	寺下徹 他
83	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 22183	PCT	2019年6月4 日	出願	光電変換素子および光電 変換素子の製造方法	河崎勇人 他
84	株式会社 カネカ	特願2019- 509678	国内	2019年6月21 日	出願	太陽電池モジュール及び その製造方法	寺下徹 他
85	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 26990	PCT	2019年7月8 日	出願	太陽電池の製造方法	口山崇 他
86	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 27758	PCT	2019年7月12 日	出願	洗浄浴槽	口山崇 他
87	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 27760	PCT	2019年7月12 日	出願	カセット及び洗浄浴槽セ ット	口山崇 他
88	株式会社 カネカ	201880010220	CN	2019年8月5 日	出願	太陽電池モジュール及び その製造方法	寺下徹 他
89	株式会社 カネカ	特願2019- 152164	国内	2019年8月22 日	出願	太陽電池の 製造方法	三島良太 他
90	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 35203	PCT	2019年9月6 日	出願	裏面電極型太陽電池の製 造方法	口山崇 他
91	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/3 5888	PCT	2019年9月12 日	出願	太陽電池デバイスおよび 太陽電池モジュール	小島広平 他
92	株式会社 カネカ	特願2019- 169753	国内	2019年9月18 日	出願	太陽電池モジュール	中野邦裕 他
93	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 36765	PCT	2019年9月19 日	出願	太陽電池の 製造方法	口山崇 他
94	株式会社 カネカ	16/495509	US	2019年9月19 日	出願	Solar cell module and manufacturing method thereof	寺下徹 他

95	株式会社 カネカ	特願2019- 175115	国内	2019年9月26 日	出願	太陽電池の製造方法および太陽電池	中野邦裕 他
96	株式会社 カネカ	特願2019- 175116	国内	2019年9月26 日	出願	太陽電池の製造方法および太陽電池	兼松正典 他
97	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 41160	PCT	2019年10月 18日	出願	太陽電池モジュール及びその製造方法	寺下徹 他
98	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 43497	PCT	2019年11月6 日	出願	太陽電池モジュール	岡本紳平 他
99	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 43498	PCT	2019年11月6 日	出願	太陽電池デバイスおよび太陽電池モジュール	中村淳一 他
100	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 44929	PCT	2019年11月 15日	出願	太陽電池モジュール集積デバイス	寺下徹 他
101	株式会社 カネカ	特願2019- 214677	国内	2019年11月 27日	出願	太陽電池の製造方法	兼松正典 他
102	株式会社 カネカ	特願2019- 223983	国内	2019年12月 11日	出願	光電変換素子のエッチング方法、および光電変換素子のエッチング装置	兼松正典 他
103	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 48701	PCT	2019年12月 12日	出願	太陽電池の製造方法および太陽電池の製造装置	中野邦裕 他
104	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 50859	PCT	2019年12月 25日	出願	太陽電池の製造方法	岡本紳平 他
105	株式会社 カネカ	特願2020- 001243	国内	2020年1月8 日	出願	太陽電池製造方法及び太陽電池	兼松正典 他
106	株式会社 カネカ	特願2020- 009252	国内	2020年1月23 日	出願	太陽電池モジュール製造方法	小島広平 他
107	株式会社 カネカ	PCT/JP2020/0 02820	PCT	2020年1月27 日	出願	光電変換素子および光電変換素子の製造方法	日野将志 他
108	株式会社 カネカ	特願2020- 019069	国内	2020年2月6 日	出願	太陽電池ストリングおよび太陽電池ストリング製造方法	小島広平 他
109	株式会社 カネカ	特願2020- 030874	国内	2020年2月26 日	出願	太陽電池および太陽電池製造方法	兼松正典 他
110	株式会社 カネカ	PCT/JP2020/0 08626	PCT	2020年3月2 日	出願	太陽電池の製造方法および太陽電池の仕掛品	中野邦裕 他
111	株式会社 カネカ	特願2020- 049344	国内	2020年3月19 日	出願	太陽電池製造方法および太陽電池	入江暢 他
112	株式会社 カネカ	特願2020- 051037	国内	2020年3月23 日	出願	太陽電池および太陽電池製造方法	古牧周 他
113	株式会社 カネカ	特願2020- 052373	国内	2020年3月24 日	出願	太陽電池および太陽電池製造方法	入江暢 他
114	株式会社 カネカ	特願2020- 053233	国内	2020年3月24 日	出願	太陽電池の製造方法	中野邦裕 他
115	株式会社 カネカ	PCT/JP2020/0 16964	PCT	2020年4月17 日	出願	素子の製造方法	口山崇 他
116	株式会社	特願2020-	国内	2020年4月23	出願	太陽電池の製造方法および太陽電池	兼松正典

	カネカ	076477		日		び太陽電池	他
117	株式会社 カネカ	特願2020- 078070	国内	2020年4月23 日	出願	太陽電池の製造方法およ び太陽電池	兼松正典 他

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	足立大輔	株式会社 カネカ	Impact of carrier recombination on fill factor for large area heterojunction crystalline Silicon solar cell with 25.1% efficiency	Applied Physics Letters 107, 233506	あり	2015年12月
2	足立大輔 他	株式会社 カネカ	Effects of SiO _x barrier layer prepared by plasma-enhanced chemical vapor deposition on improvement of long-term reliability and production cost for Cu-plated amorphous Si/crystalline Si heterojunction solar cells	Solar Energy Materials & Solar Cells 163, 204	あり	2017年1月
3	吉河訓太 他	株式会社 カネカ	Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%	Nature Energy 2, 17032	あり	2017年3月
4	三島良太 他	株式会社 カネカ	High-current perovskite solar cells fabricated with optically enhanced transparent conductive oxides	Applied Physics Express 10, 062301	あり	2017年5月
5	吉河訓太 他	株式会社 カネカ	Exceeding conversion efficiency of 26% by heterojunction interdigitated back contact solar cell with thin film Si technology	Solar Energy Materials & Solar Cells 173, 37	あり	2017年6月
6	山本憲治 他	株式会社 カネカ	High-efficiency heterojunction crystalline Si solar cells	Japanese Journal of Applied Physics 57, 08RB20	あり	2018年7月
7	山本憲治、 Rudi Santbergen 他	株式会社 カネカ、 デルフト工 科大学	Optimization of three-terminal perovskite/Silicon tandem solar cells	IEEE Journal of Photovoltaics 9, 446	あり	2019年1月

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
----	-----	----	------	-----	------

1	山本 憲治	株式会社 カネカ	Progress & Challenges in Thin-Film Silicon Photovoltaics: Heterojunctions & Multijunctions	EUPVSEC2015 (招待講演)	2015年9月
2	宇都 俊彦	株式会社 カネカ	25.1% efficiency Cu metallized heterojunction crystalline Si solar cell	PVSEC-25&GVPC6 (口頭発表)	2015年11月
3	山本 憲治	株式会社 カネカ	薄膜シリコン太陽電池技術の展開 —高効率ヘテロ接合結晶シリコン太陽電池、及びそのペロブスカイト太陽電池との組み合わせへの適用	PVEXP02016 (口頭発表)	2016年3月
4	足立大輔	株式会社 カネカ	高効率銅電極ヘテロ接合結晶シリコン太陽電池	第63回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)	2016年3月
5	足立大輔	株式会社 カネカ	薄膜技術を用いたヘテロ接合結晶シリコン太陽電池の展開	日本化学会第96春季年会 (招待講演)	2016年3月
6	吉河訓太	株式会社 カネカ	6 inch High Efficiency Back Contact Crystalline Si Solar Cell Applying Heterojunction and Thin film Technology	IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference	2016年6月
7	足立大輔	株式会社 カネカ	Over 25% Efficiency Heterojunction Crystalline Si Solar Cell (INVITED)	26th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes	2016年8月2
8	山本 憲治	株式会社 カネカ	26.33% heterojunction back contact Silicon solar cell (INVITED)	7th Silicon-based Heterojunction and Tandem Solar Cells Conference	2016年11月
9	足立大輔	株式会社 カネカ	Record-breaking Efficiency Back-contact Heterojunction Crystalline Si Solar Cell and Module (PLENARY)	Global Photovoltaic Conference 2017	2017年3月
10	吉河訓太	株式会社 カネカ	Exceeding conversion efficiency of 26% by heterojunction interdigitated back contact solar cell	7th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaic	2017年4月
11	吉河訓太	株式会社 カネカ	Record-breaking Efficiency Heterojunction Interdigitated Back-contact Crystalline Si Solar Cell and Module	IEEE 44th Photovoltaic Specialists Conference	2017年6月
12	小西克典	株式会社 カネカ	世界最高効率結晶シリコン太陽電池	第14回 「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017年7月
13	宇津恒	株式会社 カネカ	High Efficiency a-Si/c-Si Heterojunction Solar Cells	27th International Conference on Amorphous and Nanocrystalline Semiconductors	2017年8月

14	山本憲治	株式会社 カネカ	高効率ヘテロ接合結晶シリコン 太陽電池	第78回応用物理学会秋季 学術講演会	2017年9月
15	山本憲治	株式会社 カネカ	Record-breaking Efficiency Back-contact Heterojunction Crystalline Si Solar Cell and Module	34th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2017年9月
16	山本憲治	株式会社 カネカ	High Efficiency a-Si/c-Si Heterojunction Solar Cells	The 27th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017年11月
17	小西克典	株式会社 カネカ	Exceeding conversion efficiency of 26% by heterojunction interdigitated back contact solar cell	The 8th BC workshop on back contact solar cell and module technology,	2017年11月
18	足立大輔	株式会社 カネカ	High Efficiency a-Si/c-Si Heterojunction Solar Cells	2017 Material Research Society Fall Meeting	2017年11月
19	山本憲治	株式会社 カネカ	High efficiency Hetero- junction back contact Si solar cell and module	First International Workshop on Silicon Heterojunction Solar Cells: Science and Industry Technology	2018年10月
20	山本憲治, 足立大輔	株式会社 カネカ	High efficiency hetero- junction back contact crystalline Si solar cells - How high efficiency will be achievable in production -	7th Korea-Japan Joint Seminar on PV	2018年11月15 日
21	山本憲治	株式会社 カネカ	Towards the Record Efficiency of Si Based Solar Cells	The 26th International Workshop on Active- Matrix Flat panel Displays and Devices - TFT Technologies and FPD Materials- (AM- FPD' 19)	2019年7月2日
22	足立大輔	株式会社 カネカ	High Efficiency Heterojunction Back Contact Crystalline Si Solar Cells	The 29th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-29)	2019年11月8 日

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	株式会社 カネカ	高効率の太陽電池開発	日本経済新聞 13面	2015年7月29日
2	株式会社 カネカ	太陽電池 変換効率25.1%	日本産業新聞 8面	2015年10月27日
3	株式会社 カネカ	セル変換効率 初の26%超	日刊工業新聞 15面	2016年9月15日
4	株式会社 カネカ	「効率世界一」を巡る攻防 アモルファス活用が鍵に	日経エコロジー	2016年5月
5	株式会社 カネカ	太陽電池モジュール 変換効率、世界最高24.37%	日本産業新聞 13面	2016年10月28日

6	株式会社 カネカ	変換効率26.63%達成 カネカ 省エ ネ住宅へ展開狙う	日刊工業新聞 15面	2017年8月25日
7	株式会社 カネカ	No.1を生む科学技術	日本産業新聞 30面	2018年9月30日

【その他】

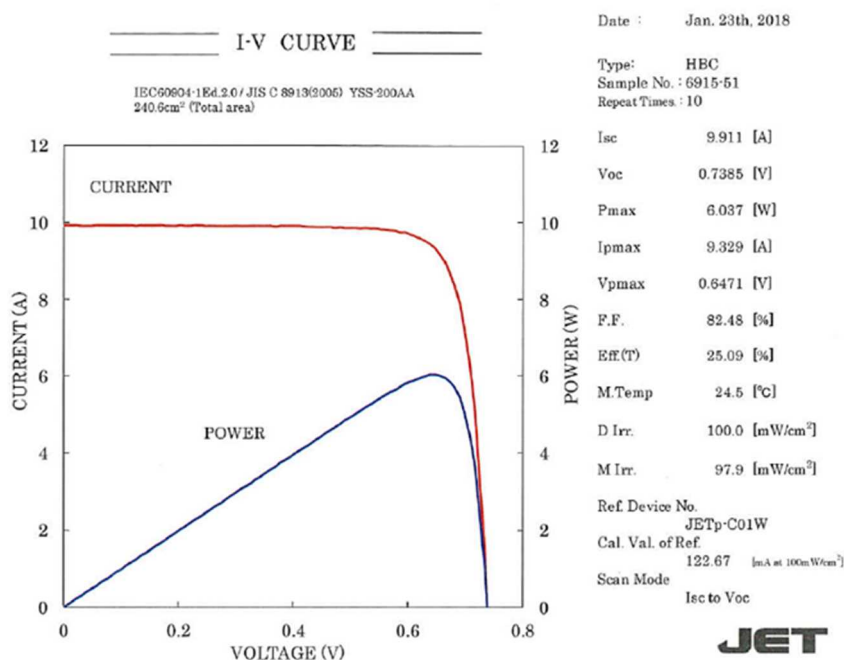
番号	年度	タイトル	内容	発表年月
1	2015年度	「ヘテロ接合結晶シリコン太陽電池、変換効率24.5%を達成」	ニュースリリース	2015年7月
2	2015年度	「結晶シリコン太陽電池でセル変換効率25.1%を達成ー両面電極型結晶シリコン太陽電池における世界最高記録を実用サイズで更新ー」	ニュースリリース	2015年10月
3	2016年度	「結晶シリコン太陽電池で世界最高変換効率26.33% ー世界初、実用サイズで達成ー」	ニュースリリース	2016年9月
4	2016年度	「結晶シリコン太陽電池モジュールで世界最高変換効率24.37%を達成」	ニュースリリース	2016年10月
5	2017年度	「結晶シリコン太陽電池で変換効率世界最高記録を更新 ーセル変換効率26.63%を実用サイズで達成ー」	ニュースリリース	2017年8月

B 高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発（シャープ株式会社）

1. 成果詳細

本プロジェクトでは前プロジェクトで開発した高効率のヘテロバックコンタクト（HBC）型太陽電池（2014年3月にセル変換効率25.1%（セル面積3.72cm²かつdesignated area）を達成）の量産化を目指し、大面積高効率化、低コスト化および長期信頼性技術を含めたモジュール化技術開発を推進した。

大面積高効率化について、短絡電流、開放電圧、曲線因子の向上の観点から開発項目を選択した。主に短絡電流の向上では受光面構造形成技術開発、電極パターン設計、裏面反射構造の最適化検討を推進した。また開放電圧の向上ではシリコン基板ライフタイム向上技術、表面洗浄技術、アモルファスシリコン成膜技術検討を進めた。さらに曲線因子の向上では並列抵抗成分の高抵抗化技術開発、直列抵抗成分の低抵抗化技術開発、ダイオード因子改善技術開発を中心に推進した。これらの検討により、240.6cm²の大面積シリコン基板において、セル変換効率25.1%を得ることができた。（図Ⅲ-2-(イ)-B-1）



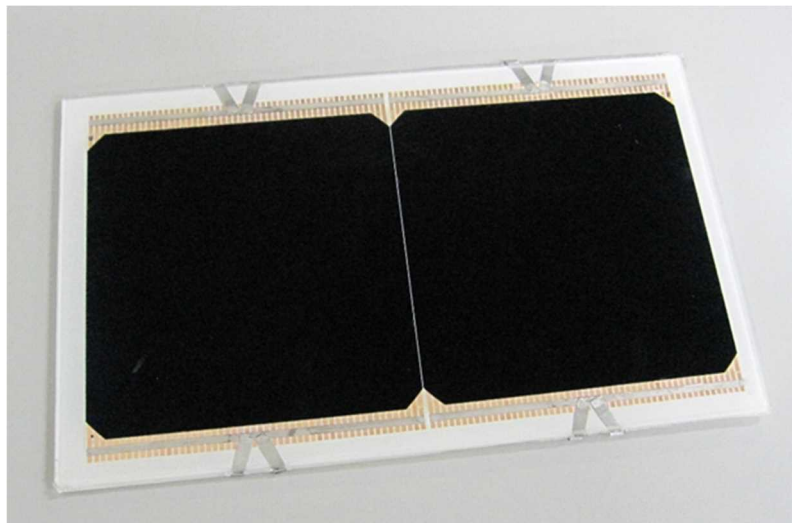
図Ⅲ-2-(イ)-B-1 HBC型太陽電池太陽電池セルのIV特性
((財)電気安全環境研究所にて測定)

低コスト化について、最もコスト低減効果が大きいパターンニングプロセスと洗浄プロセスについてセル特性とコストを詳細検討した。パターンニングプロセスではパターン印刷技術、パターンマスク成膜技術、ドーピングペースト技術、イオンインプランテーション技術、ドライエッチング技術等の比較検討を行い、最終的にパターン印刷技術を基準プロセスとし、電極形成にはパターンマスク成膜技術を採用することでセル特性とコストを最適化できることが判明した。また、洗浄プロセスでは洗浄方法そのものの変更をはじめ、その洗浄プロセスに関連するエッチング材料変更、電極材料変更、また一連のプロセスの見直し等を行うことで、洗浄プロセスのコストダウン検討を行った。その結果、当初の当社試算コストから材料費の75%を低減することができ、目標コストである14円/kWhを見込めるプロセスが得られた。尚、将来のコストダウンのシナリオとして、2025年に7円/kWhを達成するためのシナリオについて当社の見解を示した。（表Ⅲ-2-(イ)-B-1）

表Ⅲ-2-(イ)-B-1 発電コスト7円/kWhのシナリオ

	2015年	2017年	2020年	2025年
発電コスト [円/kWh]	(製品)	17.3 (基準)	13.2	7
モジュール変換効率【%】	(19.1)	21 (基準)	22 (-0.4円/kWh)	23 (-0.7円/kWh)
信頼性技術(運転年数)【年】	(20)	20 (基準)	20	30 (-3.5円/kWh)
信頼性技術(劣化率)【%/年】	-	0.9 (基準)	0.9	0.7 (-0.3円/kWh)
コストダウン(新規プロセス開発含む)	-	-	(-3.7円/kWh)	(-5.8円/kWh)
想定用途 住宅/非住宅	住宅用			

モジュール化について、当社で生産している IBC 型太陽電池でも採用している配線シートを用いた表面実装方式を HBC 型太陽電池に適用する検討を推進した。BLACKSOLAR で採用している IBC 型(拡散方式)と異なり、HBC 型では接合に a-Si 層を用いているため、特に導電性接着剤の選定が重要と考えられる。各種材料の比較検討を行った結果、特性とコストを両立し、HBC 型太陽電池に適した接着性の高い材料の選択が可能になった。次に、更なる低コスト配線シート技術の開発として、従来の高精度のパターニングが必要なフレキシブルプリント基板(Flexible Printed Circuits=FPC)の技術に対して、低コストのフレキシブルフラットケーブル(Flexible Flat Cable=FFC)の技術を応用した新型配線シートの開発を推進した。これらの検討の結果、ミニモジュールを作製し、低コスト化の見通しを得ることができた。(図Ⅲ-2-(イ)-B-2)

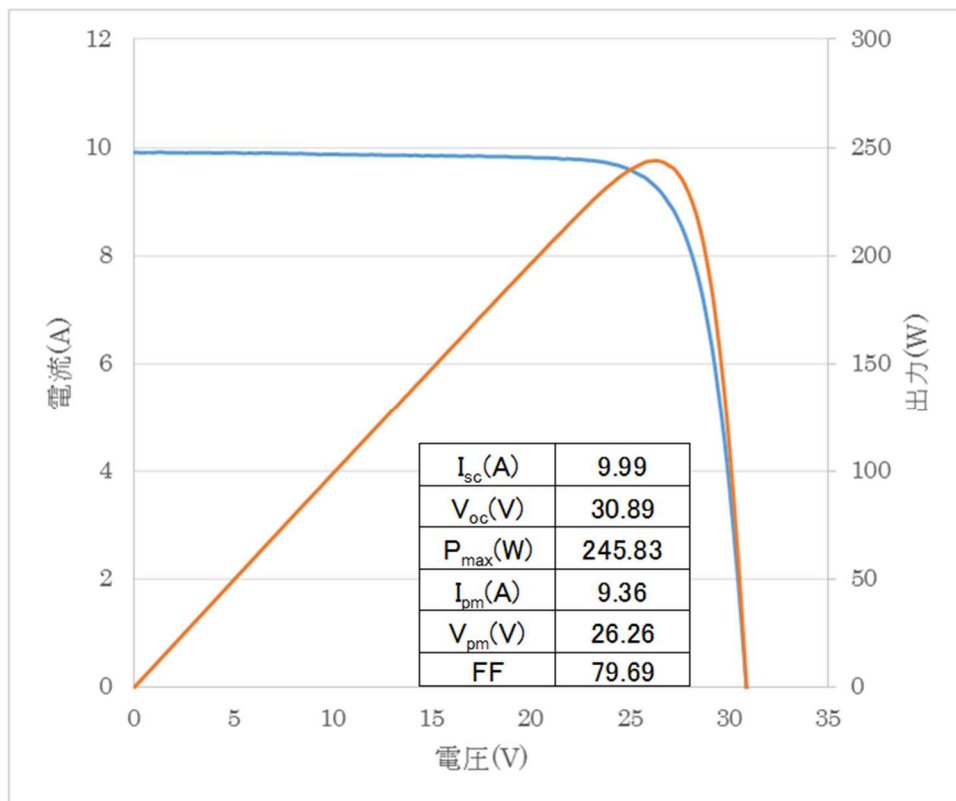


図Ⅲ-2-(イ)-B-2 FFC方式ミニモジュール外観

一連のモジュール開発の総括として、市販サイズである42直モジュールを作製し、電気特性評価を行った。その結果、モジュール変換効率(Aperture)23.4%が得られ、NEDO最終目標(モジュール変換効率22%)を達成することができた。(図Ⅲ-2-(イ)-B-3～図Ⅲ-2-(イ)-B-4、表Ⅲ-2-(イ)-B-2)



図Ⅲ-2-(イ)-B-3 42 直列モジュール外観



図Ⅲ-2-(イ)-B-4 42 直列モジュール電気特性

表Ⅲ-2-(イ)-B-2 42直モジュール変換効率

	η (%)
モジュール変換効率(Aperture)	23.4%
モジュール変換効率(フルエリア)	21.3%

更に、信頼性評価結果から IEC 規格で規定されている試験内容を十分クリアできていることを確認した。(表Ⅲ-2-(イ)-B-3)

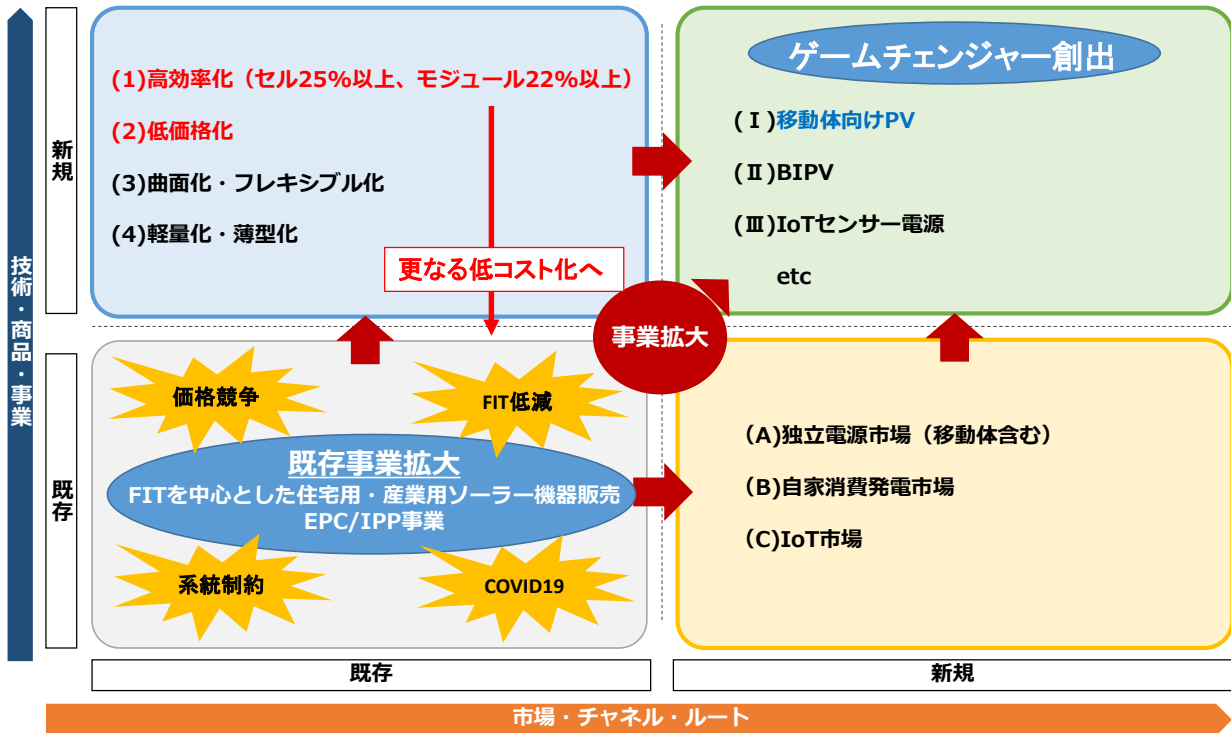
表Ⅲ-2-(イ)-B-3 信頼性試験条件と合格基準

試験	条件		結果※
光照射試験	1SUN	>60kWh/m ²	○
温度サイクル試験	-40°C/85°C	200cyc	○
高温高湿試験	85°C85%RH	1000h	○
結露凍結試験	-40°C/85°C85%RH	10cyc	○

※試験を行ったモジュールのPmaxの低下が5%以内を○としている。

2. 実用化・事業化見通し

本プロジェクトの開始時より、終了に至るまでに、太陽光発電市場は大きく変化したといえる。①中国の太陽光発電市場拡大に伴う低コスト商品が国内に参入してきたこと、②FIT 買い取り価格の低下、③系統連系の制約などの影響により、国内市場が縮小化してきている。さらには、④COVID19 の影響により、太陽光発電市場の将来像も見通しにくくなっている。太陽光発電市場の大きな変化に伴い、実用化、事業化の見通しも変化しているといえる。図Ⅲ-2-(イ)-B-5 に本事業の「実用化・事業化」の考え方の模式図を示す。また図Ⅲ-2-(イ)-B-6 に、今後の事業化に向けてのスケジュールを示す。



図Ⅲ-2-(イ)-B-5 本事業の「実用化・事業化」の考え方

項目	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度
	上	下	上	下	上	下	上	下	上	下
技術開発 (NEDO)	要素技術開発		高効率化開発							
	量産化技術開発完了									
設備	量産検証設備導入(社内投資)		成果活用							
	量産検証設備導入(NEDO)		21%モジュール		22%モジュール					
事業化	HBC第一量産ライン導入(小規模)		各種量産検証設備の導入				信頼性・寿命評価		信頼性・寿命評価	
	HBC第一量産ライン導入(高出力)						更なる低コスト化検討		事業化検討	
新規事業検討							高付加価値市場検討			
							商品化開発			
							信頼性・寿命評価			
							事業化検討			

図Ⅲ-2-(イ)-B-6 実用化・事業化のスケジュール

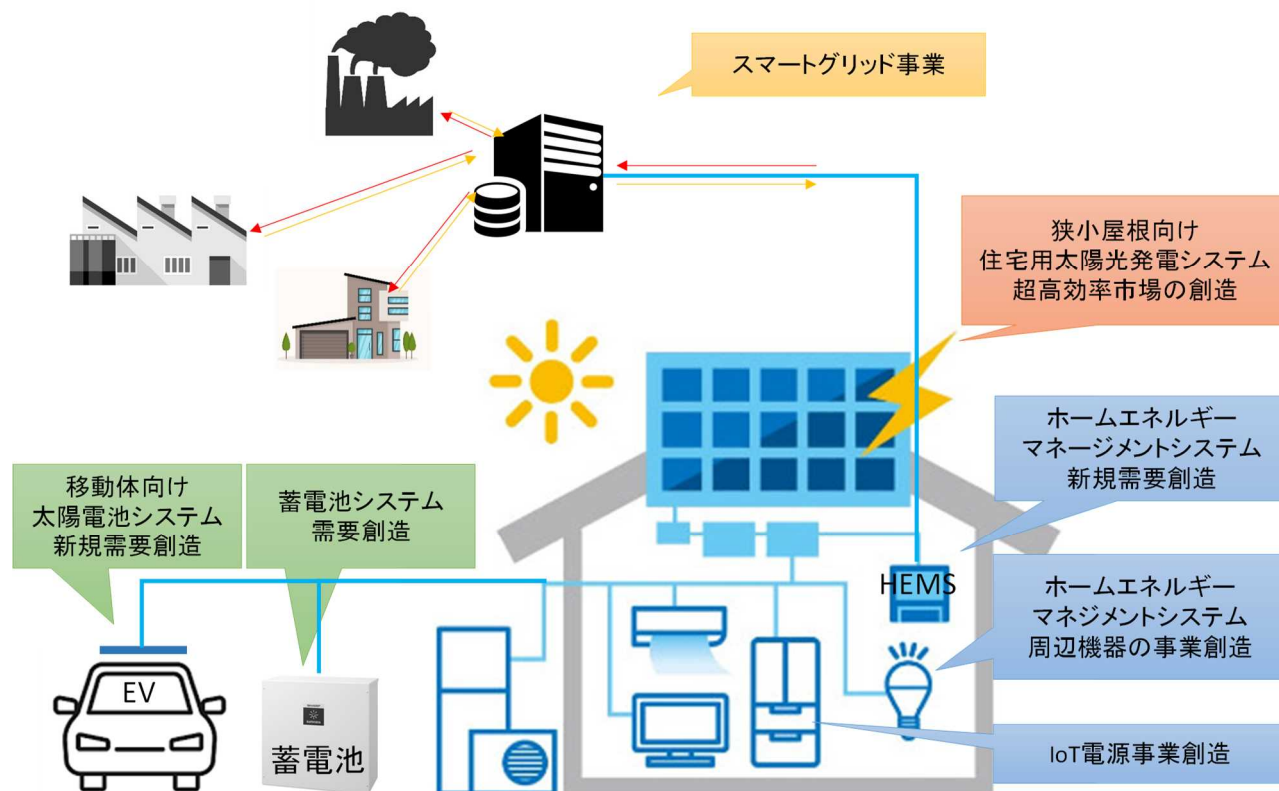
本プロジェクトにて達成した高効率・低コスト化のモジュール開発の成果をもって現国内市場に参入するには、プロジェクト開始時よりも事業リスクが高くなった。当初に設定したコストは、開発当初は十分なものであったが、海外メーカーの参入などにより、現市場ではさらなる低コスト化の必要性があることが確認された。本事業の既存市場への参入にあたり、ヘテロバックコンタクト太陽電池のさらなる低コスト化を推進する。

太陽光発電市場環境は、新規市場として、(A)独立電源市場、(B)自家消費発電市場、(C)IoT電源市場などが、直近、拡大の気配を見せている。そういった中、太陽光発電の技術は、(1)高効率化、(2)低コスト化、(3)曲面化・フレキシブル化、(4)軽量化・薄型化といった高付加価値を持つ技術開発が活発に行われている。本プロジェクトで達成した高効率モジュールは狭小エリアでの発電は十分であり、さらには曲面化、軽量化を目指せるモジュール化技術を有している。

以上のことより、本プロジェクトにおける実用化・事業化の見通しとしては、さらなる低コスト化による既存事業拡大を検討するとともに、高付加価値のある新規市場への事業展開を推進する。特に新規市場としては移動体PV、BIPV、IoT独立電源などが考えられる。本事業の成果は、ゲームチェンジャーとなりえる技術であると考えられる。

3. 波及効果

図Ⅲ-2-(イ)-B-7に、本事業の波及効果に関して示した。



図Ⅲ-2-(イ)-B-7 本事業の波及効果

太陽光発電システムは、多くの産業と係わりながら成立しているため、太陽光発電の普及は多くの産業への波及効果大きい。本事業は、太陽電池モジュール変換効率22%を達成し、製品の競争力を高め、事業化、実用化を目指すことを目的としている。本事業により開発された製品を太陽光発電システムとして確立する際に、主体となる「電気機械」分野だけではなく、周辺機器である「重電機器」分野の「開閉制御装置及び配電盤」や「配線器具」、「半導体素子・集積回路」分野の「半導体素子」(インバーター)や、製造プロセスで必要となる「化学製品」、モジュール化に必要な「ガラス・ガラス製品」、周辺機器や架台に使用される「鉄鋼」の「鋼材」など、多数の分野での波及効果がある。

本事業の太陽電池に係わる産業に対する波及効果としては、以下のことが挙げられる。

- ・高効率化による、狭小屋根向け住宅用太陽光発電システムの超高効率市場
- ・高効率低コスト太陽光発電システムの普及促進に伴うホームエネルギー管理システムなどの周辺機器の新規需要創造
- ・高効率化による低照度での高電圧化の実現が可能になることで創造されるIoT電源市場
- ・高効率低コスト太陽光発電システムの普及促進に伴うインバーター、蓄電池などの周辺の周辺機器の新規需要創造
- ・高効率化による狭小エリアでの高効率発電が可能になることで創造される移動体向け太陽電池システムの新規需要
- ・プラットフォームの構築によるスマートグリッド事業の拡大

また、太陽光発電の普及に伴い、以下の波及効果も得られる

- ・高効率低コスト太陽光発電システムの普及促進によるCO₂削減、地球温暖化問題の解決
- ・上記開発及び生産に携わる開発者、技術者、生産者の知識およびスキルの向上
- ・競合国(中国等)に対する、特に変換効率・信頼性の点での高い技術的優位性および、安易に模倣されない技術の確立

以上、本事業により、日本の技術優位性の維持による技術基盤強化・産業競争力向上が見込める。

4. 今後の展開

本プロジェクトにて達成した高効率・低コスト化のモジュール開発の成果をもって現国内市場に参入するには、プロジェクト開始時よりも事業リスクが高くなった。当初に設定したコストは、開発当初は十分なものであったが、海外メーカーの参入などにより、現市場ではさらなる低コスト化の必要性があることが確認された。本事業の既存市場への参入にあたり、ヘテロバックコンタクト太陽電池のさらなる低コスト化を推進する。

太陽光発電市場環境は、新規市場として、(A)独立電源市場、(B)自家消費発電市場、(C)IoT 電源市場などが、直近、拡大の気配を見せている。そういった中、太陽光発電の技術は、(1)高効率化、(2)低コスト化、(3)曲面化・フレキシブル化、(4)軽量化・薄型化といった高付加価値を持つ技術開発が活発に行われている。本プロジェクトで達成した高効率モジュールは狭小エリアでの発電は十分であり、さらには曲面化、軽量化を目指せるモジュール化技術を有している。

以上のことより、本プロジェクトにおける実用化・事業化の見通しとしては、さらなる低コスト化による既存事業拡大を検討するとともに、高付加価値のある新規市場への事業展開を推進する。特に新規市場としては移動体 PV、BIPV、IoT 独立電源などが考えられる。本事業の成果は、ゲームチェンジャーとなりえる技術であると考えられる。

5. 特許論文リスト

	2015 年度	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	9(0)	2(1)	6(1)	13(11)	4(4)	34(17)
論文	0	0	1	0	0	1
研究発表・講演 (うち国際会議)	2(1)	2(1)	3(1)	3(2)	1(0)	11(5)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	9	0	0	9
その他	3	0	1	0	0	4

(2020 年 08 月 31 日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	シャープ (株)	2016-042064	国内	2016/3/4	放棄	光電変換素子および 光電変換モジュール	松本雄太 他
2	シャープ (株)	2016-042076	国内	2016/3/4	放棄	光電変換素子およ び光電変換素子の 製造方法	石井真人 他
3	シャープ (株)	2016-042085	国内	2016/3/4	放棄	光電変換素子およ び光電変換素子の 製造方法	石井真人 他
4	シャープ (株)	2016-057951	国内	2016/3/23	登録	光電変換装置	酒井敏彦 他
5	シャープ (株)	2016-057981	国内	2016/3/23	放棄	光電変換装置、光電 変換モジュールお よび太陽光発電シ ステム	東川誠 他
6	シャープ (株)	2016-057982	国内	2016/3/23	登録	光電変換装置、光電 変換モジュールお よび太陽光発電シ ステム	東川誠 他
7	シャープ (株)	2016-061535	国内	2016/3/25	放棄	光電変換素子およ びそれを備えた光	森健史 他

						電変換モジュール	
8	シャープ (株)	2016-063868	国内	2016/3/28	放棄	光電変換素子および光電変換素子の製造方法	浅野直城
9	シャープ (株)	2016-064139	国内	2016/3/28	審査中	光電変換装置、光電変換モジュールおよび光電変換装置の製造方法	鄒柳民 他
10	シャープ (株)	2016-159105	国内	2016/8/15	放棄	光電変換素子および光電変換装置	肥後輝明 他
11	シャープ (株)	2016-073889	PCT	2016/8/16	放棄	半導体基板、光電変換素子、半導体基板の製造方法および光電変換素子の製造方法。	森健史 他
12	シャープ (株)	2017-093770	国内	2017/5/10	放棄	光電変換装置およびそれを備える太陽電池モジュール	東川誠 他
13	シャープ (株)	2017-135626	国内	2017/7/11	放棄	光電変換装置、それを備える太陽電池ストリングおよびそれらのいずれかを備える太陽電池モジュール	東川誠 他
14	シャープ (株)	2017-029280	PCT	2017/8/14	放棄	光電変換素子および光電変換装置	肥後輝明 他
15	シャープ (株)	2017-207565	国内	2017/10/26	出願中	太陽電池モジュール、配線シートおよびその製造方法	土津田義久 他
16	シャープ (株)	2017-219149	国内	2017/11/14	出願中	光電変換装置、およびそれを備える太陽電池ストリング	東川誠 他
17	シャープ (株)	2018-058360	国内	2018/3/26	出願中	光電変換素子	肥後輝明 他
18	シャープ (株)	2018-018064	PCT	2018/5/10	出願中	光電変換装置およびそれを備える太陽電池モジュール	東川誠 他
19	シャープ (株)	2018-025895	PCT	2018/7/9	出願中	光電変換装置、それを備える太陽電池ストリングおよびそれらのいずれかを備える太陽電池モジュール	東川誠 他
20	シャープ (株)	16/087599	外国	2018/9/21	登録	PHOTOVOLTAIC CONVERSION DEVICE, PHOTOVOLTAIC MODULE, AND SOLAR POWER GENERATION SYSTEM	東川誠 他
21	シャープ (株)	2018-179316	国内	2018/9/25	出願中	太陽電池モジュール	土津田義久 他

22	シャープ (株)	2018-191658	国内	2018/10/10	登録	光電変換装置	浅野直城 他
23	シャープ (株)	201811209905.4	外国	2018/10/17	審査中	太陽電池モジュール、配線シートおよびその製造方法	土津田義久 他
24	シャープ (株)	16/168739	外国	2018/10/23	審査中	SOLAR CELL MODULE, WIRING SHEET, AND METHOD OF MANUFACTURING WIRING SHEET	土津田義久 他
25	シャープ (株)	16/191205	外国	2018/11/14	審査中	PHOTOVOLTAIC DEVICE AND SOLAR CELL STRING INCLUDING PHOTOVOLTAIC DEVICES	東川誠 他
26	シャープ (株)	201811355287.4	外国	2018/11/14	審査中	光電変換装置、およびそれを備える太陽電池ストリング	東川誠 他
27	シャープ (株)	2018-534396	PCT	2019/2/14	審査中	光電変換素子および光電変換装置	肥後輝明 他
28	シャープ (株)	201780050299.3	外国	2019/2/15	審査中	光電変換素子および光電変換装置	肥後輝明 他
29	シャープ (株)	16/326182	外国	2019/2/15	審査中	PHOTOVOLTAIC DEVICE AND PHOTOVOLTAIC UNIT	肥後輝明 他
30	シャープ (株)	201910231029.3	外国	2019/3/26	審査中	光電変換素子	肥後輝明 他
31	シャープ (株)	2019-517684	PCT	2019/10/25	審査中	光電変換装置およびそれを備える太陽電池モジュール	東川誠 他
32	シャープ (株)	2019-529714	PCT	2019/10/25	審査中	光電変換装置、それを備える太陽電池ストリングおよびそれらのいずれかを備える太陽電池モジュール	東川誠 他
33	シャープ (株)	201880029963.0	外国	2019/11/6	審査中	光電変換装置およびそれを備える太陽電池モジュール	東川誠 他
34	シャープ (株)	201880041877.1	外国	2019/12/23	審査中	光電変換装置、それを備える太陽電池ストリングおよびそれらのいずれかを備える太陽電池モジュール	東川誠 他

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
----	-----	----	------	------------	----	------

1	C. T. Nguyen, K. Koyama, S. Terashima, C. Okamoto, S. Sugiyama, K. Ohdaira, and H. Matsumura	JAIST	Novel chemical cleaning of textured crystalline silicon for realizing surface recombination velocity <0.2 cm/s using passivation Cat-CVD SiNx/a-Si stacked layers	Jpn. J. Appl. Phys. 56, 056502-1-7	有	2017
---	--	-------	---	------------------------------------	---	------

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	Cong Thanh Nguyen	JAIST	Effect and Optimization of Chemical Cleaning before Deposition of Cat-CVD Passivation Films to Realize Extremely Low Surface recombination Velocity on Flat and Textured Structure	第 63 回応用物理学会春季学術講演会	2016/3/20
2	Cong Thanh Nguyen	JAIST	Effect of Chemical Cleaning before Deposition of Cat-CVD Passivation Films to Realize Extremely Low Surface recombination Velocity on Textured Structures	Material Research Society	2016/3/28
3	Cong Thanh Nguyen	JAIST	Effect and Optimization of Chemical Cleaning before Deposition of Cat-CVD Passivation Films to Realize Extremely Low Surface recombination Velocity on Flat and Textured Structure	IEEE-PVSC	2016/6/5
4	杉山 秀一郎	シャープ (株)	高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発	NEDO 2016 年度成果報告会	2016/10/31
5	岡本 親扶	シャープ (株)	企業若手研究者によるパネルディスカッション	175 委員会	2017/7/20
6	杉山 秀一郎	シャープ (株)	高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発	NEDO2017 年度成果報告会	2017/9/22
7	小出 直城	シャープ (株)	高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発	PVSEC	2017/11/13
8	岡本 親扶	シャープ (株)	Fabrication of 25.1% Efficient Hetero Junction Back Contact Si Solar Cells by Mass-Production Process	WCPEC-7	2018/6/13
9	杉山 秀一郎	シャープ (株)	高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発	NEDO2018 年度成果報告会	2018/10/4
10	小出 直城	シャープ (株)	Recent Advances of Heterojunction Back Contact Si Solar Cells in SHARP	SHJ 太陽電池国際ワークショップ	2018/10/26

11	杉山 秀一郎	シャープ (株)	高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発	NEDO2019 年度成果報告会	2019/10/17
----	--------	----------	-------------------------	------------------	------------

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	新聞	シャープ、6 インチサイズの単結晶シリコン太陽電池セルにおいて世界最高の変換効率 25.09%を達成	日経新聞	2018/3/27
2	新聞	6 インチサイズの単結晶シリコン太陽電池セルにおいて、世界最高の変換効率 25.09%を達成	産経新聞	2018/3/27
3	ニュース	6 インチサイズの単結晶シリコン太陽電池セルにおいて、世界最高の変換効率 25.09%を達成	Nifty ニュース	2018/3/27
4	ニュース	シャープ：6 インチサイズの単結晶シリコン太陽電池セルにおいて世界最高の変換効率を達成	Carview	2018/3/27
5	ニュース	シャープ、6 インチ単結晶 Si 太陽電池で 25.09%を達成	MoterFan	2018/3/27
6	雑誌	Sharp hits 25.09% efficiency on full size HJT cell	PV magazine	2018/3/27
7	雑誌	Sharp hits 25.09% conversion efficiency for 6-inch HBC solar cell	PV-tech	2018/3/27
8	ニュース	Sharp touts 25.09% efficiency for mono c-Si solar cell	Renewables Now	2018/3/27
9	ニュース	Sharp's 6-Inch Mono-Crystalline Silicon Solar Cell has a Full Size Conversion Efficiency of 25.09 Percent	CDRinfo	2018/3/27

【その他】

番号	年度	タイトル	内容	発表年月
1	2015	次世代 BLACKSOLAR ヘテロ接合バックコンタクト型太陽電池セル変換効率 25.1%(1.9cm 角セル)	PVJAPAN2015 展示	2015/7/29~31
2	2015	次世代 BLACKSOLAR ヘテロ接合バックコンタクト型太陽電池セル変換効率 25.1%(1.9cm 角セル)	[関西] PVEXPO2015 展示	2015/9/2~4
3	2015	次世代 BLACKSOLAR ヘテロ接合バックコンタクト型太陽電池セル変換効率 25.1%(1.9cm 角セル)	PVEXPO2016 展示	2016/3/2~5
4	2017	6 インチサイズの単結晶シリコン太陽電池セルにおいて、世界最高の変換効率 25.09%を達成	大阪機械記者クラブ	2018/3/27

C 低コスト高効率セル及び高信頼性モジュールの実用化技術開発（京セラ株式会社）

1. 成果詳細

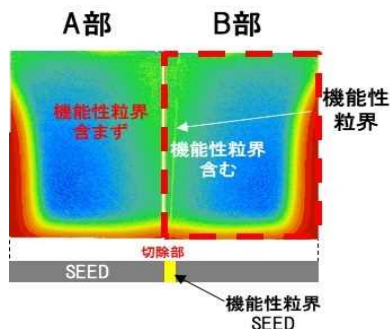
①低コスト量産プロセスでの高効率シリコン太陽電池の開発(セル効率 22%、モジュール効率 20%)

(1) 高品質、低コスト結晶成長技術開発

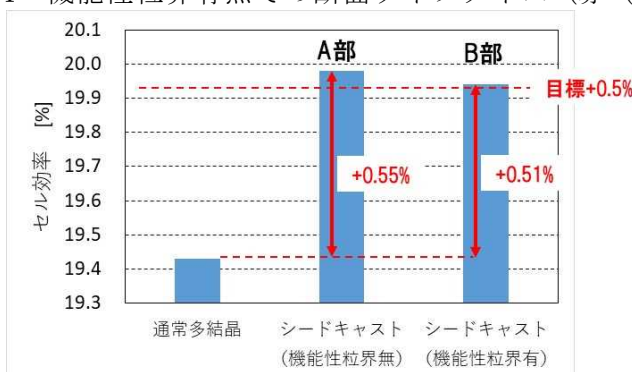
セル変換効率+0.5 ポイントに寄与する結晶品質の実現に向け、シードキャスト法による高品質な結晶育成方法の技術開発に取り組んだ。

結晶成長中の温度制御方法を最適化し、機能性粒界を含む基板においても転位クラスターを大幅に低減した図Ⅲ-2-(イ)-C-1 のようなシードキャストインゴットを実現した。生産ラインの少量試験にてセル効率評価を実施し、このインゴットの高さ方向全領域において、図Ⅲ-2-(イ)-C-2 のようにセル効率の向上（平均+0.51%）を確認した。

上記結果より、シードキャスト法による高品質な結晶育成方法の基本プロセス仕様を確立した。



図Ⅲ-2-(イ)-C-1 機能性粒界有無での断面ライフタイム（赤（低）⇔青（高））

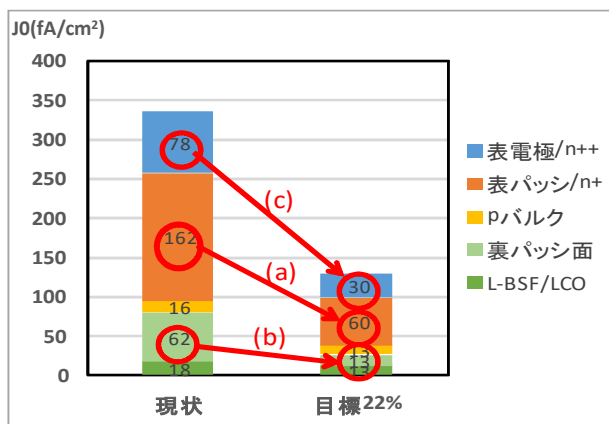


図Ⅲ-2-(イ)-C-2 機能性粒界有無でのセル効率比較

(2) 高効率、低コストセル・モジュール技術開発

P型PERC構造でセル効率22%を達成するための設計指針を明らかにするために、デバイスシミュレーションにより暗電流（飽和電流密度）ロス内訳解析を行った。その結果、ロスの改善効果の大きい順に、

(a) 表パッシベーション層+受光面拡散層、(b) 裏パッシベーション層、(c) 表電極下拡散層となった（図Ⅲ-2-(イ)-C-3）。



図Ⅲ-2-(イ)-C-3 22%達成のためのJ0(飽和電流密度)内訳

(a)においては、受光面拡散層の高シート抵抗化と表パッシベーション層構造の改善によって、高 Voc 化が可能である見込みを得た。具体的には、受光面拡散層シート抵抗 $120\Omega/\square$ で SiN/A10x によるパッシベーション層を形成する事により 680mV 達成の見込みを得た。

(b)においては、裏面 A10x 製膜後のアニール条件を検討し、アニールなしに対して、 $650^{\circ}\text{C}-15\text{min}/\text{N}_2$ 雰囲気条件において変換効率で 0.24 ポイント向上の結果が得られた。長波長感度が大きく向上しており、裏面パッシベーション効果によるものと考えられる。

(c)においては、材料メーカーと高シート抵抗用かつ低ダメージの電極ペーストの検討をおこなった。SiN/A10x 構造の受光面パッシベーション層においては、SiN 構造に比して表電極部のコンタクト抵抗が増大することが問題となっていたが、電極ペースト中のガラスフリットの成分/調整によりコンタクト抵抗を改善させることができた。結果として、SiN/A10x 構造において SiN 構造比で、0.1 ポイントの効率向上を確認した。

また上記 (a) から (c) の改善に加えて、電極抵抗損失改善のために、バスバー本数の検討を行った。現状の 3 本バスバーから 5 本バスバーへ変更し、受光面 n+層のシート抵抗と表電極フィンガー幅/ピッチを最適化することで、効率で 0.46 ポイントの向上が確認された。

以上の素子高効率化要素技術を、(1) 高品質、低コスト結晶成長技術開発で得られたシードキャストウェハに適用し、両面受光 PERC 構造でのプロセス技術の最適化を行った。その結果、セル効率は最大値で 22.01% (AIST 測定) を得た(図 III-2-(イ)-C-4)。

また、上記セルを用いた光閉じ込め構造でのモジュール評価を実施し、ハーフカット 60 直セル×2 並列モジュールにおいて、変換効率 20.10% (社内測定) が得られ(図 III-2-(イ)-C-5)、2019 年度最終目標のモジュール変換効率 20%を達成した。

本プロジェクトにおいて開発した両面受光 PERC 構造セルを、屋外での実使用上での発電量を向上させることを目的に、両面発電モジュール構造で発電量の実証を行った。設置環境として、地上設置を検討した。アルベドが 0.2 の草地設置と、アルベドが 0.85 の反射シート設置で比較評価を行った(図 III-2-(イ)-C-6)。草地設置では、両面発電モジュールは片面発電モジュールに対し発電量の向上は約 2%程度であるが、反射シート設置では約 10%の発電量向上を確認した(図 III-2-(イ)-C-7)。

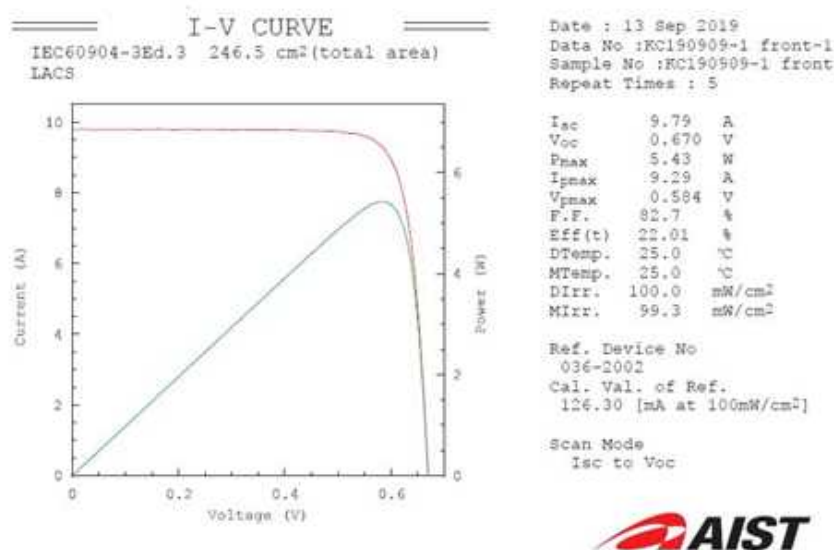
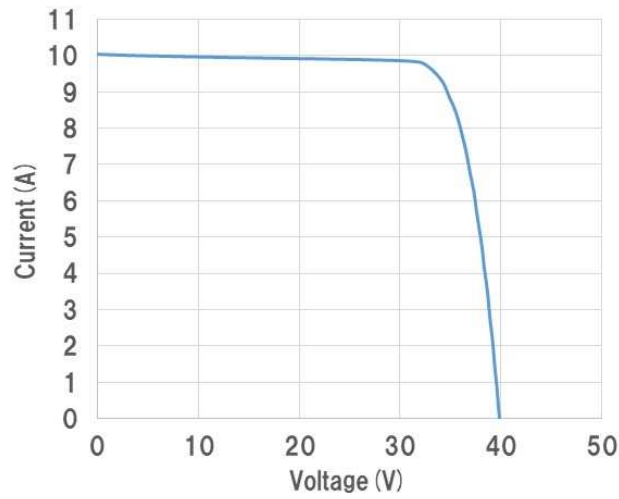


図 III-2-(イ)-C-4 シードキャスト+両面受光 PERC 構造セル特性(最大値)



Voc (V)	Isc (A)	FF (-)	Pm (W)	η (%)
39.90	10.06	0.796	319.2	20.10

図III-2-(イ)-C-5 シードキャスト+両面受光 PERC+光閉じ込め構造モジュール特性(最大値)

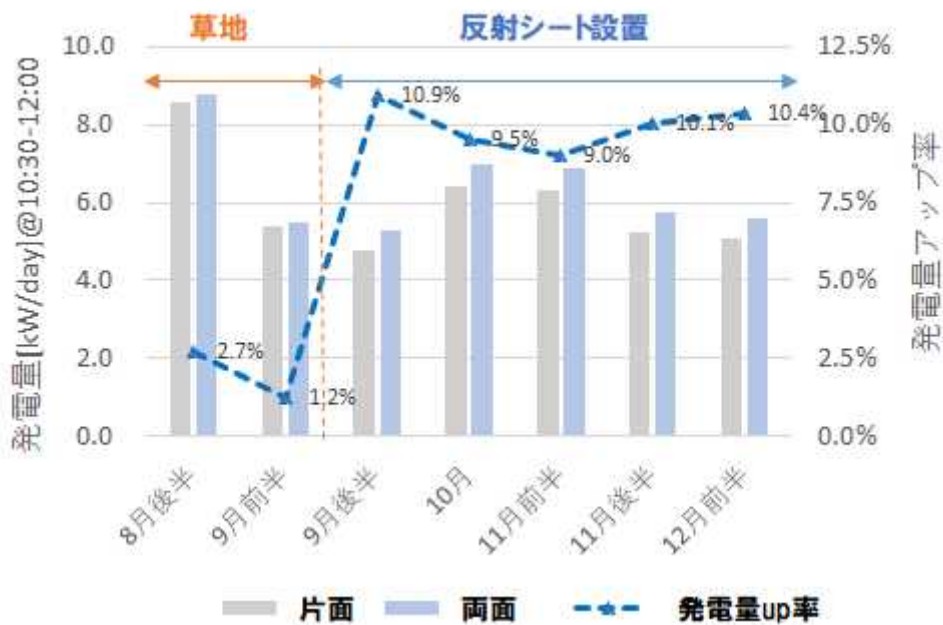


(a) 草地設置



(b) 反射防草シート設置

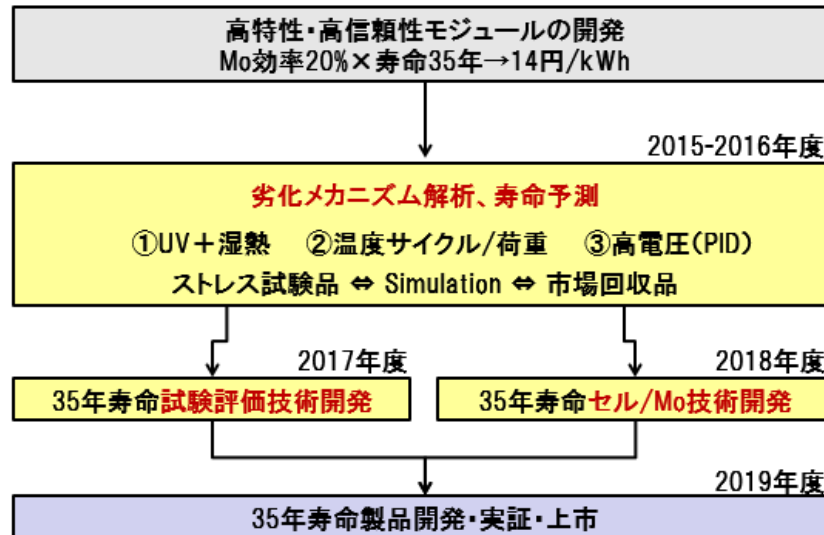
図III-2-(イ)-C-6 地上設置での発電量測定の様子



図III-2-(イ)-C-7 両面発電モジュールの草地設置と反射シート設置の発電量推移
III-2-(イ)-C[3]

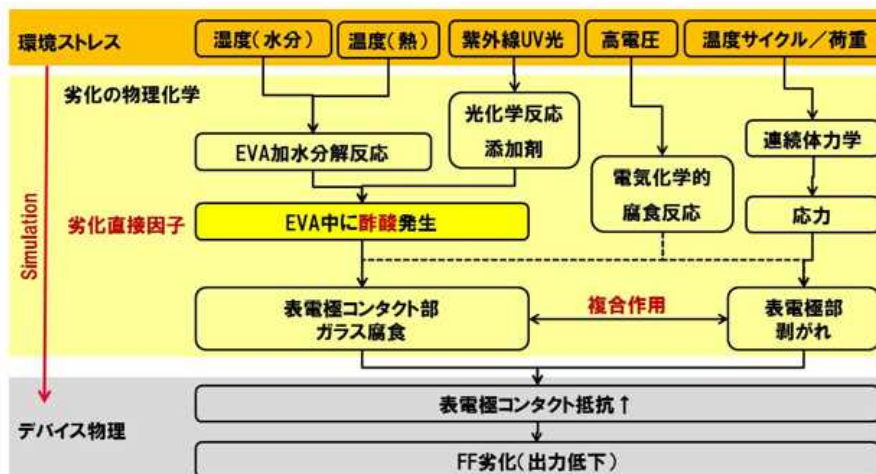
②高品質量産プロセスでの高信頼性シリコン太陽電池の開発（寿命 35 年）

本テーマでは、寿命 35 年以上の実証を目標に、各種ストレス試験、寿命劣化モードの確認、劣化メカニズムの解析、寿命予測技術の開発、寿命予測精度の検証、長寿命化技術の検討、高効率セルを用いた大型モジュールでの寿命 35 年以上の実証を行った。図Ⅲ-2-(イ)-C-8 に、本信頼性テーマの目標を示す。



図Ⅲ-2-(イ)-C-8 信頼性テーマの目標

ストレス試験としては、ストレス要因として紫外線（UV 光）／湿熱／温度サイクル（TC）／電位差（PID を想定）を取り上げ、これらについて単体ストレス試験およびシーケンシャル複合ストレス試験を行った。シーケンシャル複合ストレス試験においては、複合サイクル試験も行った。試験のストレス水準は 2 水準以上とし、また試験は出力劣化が有意明確に検知されるまで行い、寿命予測に必要な情報が得られるように設計した。特に製品寿命を決める湿熱試験においては、特性が屈曲劣化を迎えるまで試験を行った。図Ⅲ-2-(イ)-C-9 に、環境ストレス因子と出力劣化までの因果関係図を示す。



関連確認：ストレス試験品 ⇔ Simulation ⇔ 市場回収品

図Ⅲ-2-(イ)-C-9 環境ストレス因子と出力劣化までの因果関係図

寿命劣化モードの確認は、上記ストレス試験での劣化品やフィールド回収品を評価／分析することで行った。評価は、IV 特性、EL（エレクトロルミネッセンス）像、PL（フォトルミネッセンス）像などの情報を得て行った。分析は、封止材中の水分量や酢酸量の定量分析や、電極コンタクト部の断面 SEM 観

察や EPMA 元素分析などを行った。特に、寿命劣化をもたらす湿熱劣化モードは、封止材中に発生した酢酸によって電極コンタクト部のガラス層が腐食することで生じることが確認された。また、酢酸は湿熱起因で発生するものと、UV 光起因で発生するものがあることが明らかとなった。

劣化メカニズムの解析は、上記評価／分析情報を踏まえつつ、寿命劣化をもたらす湿熱劣化モード、経年劣化をもたらす TC 劣化モード、および PID (pn 接合リーク) をもたらすモジュールフレームとモジュール内セルの間に発生する電位差に起因した劣化モードについて行い、それぞれ劣化物理モデルを構築した。図 III-2-(イ)-C-10 に、UV 湿熱ストレス起因の劣化メカニズムモデルを、図 III-2-(イ)-C-11 に、電位差起因の PID メカニズムモデルを示す。

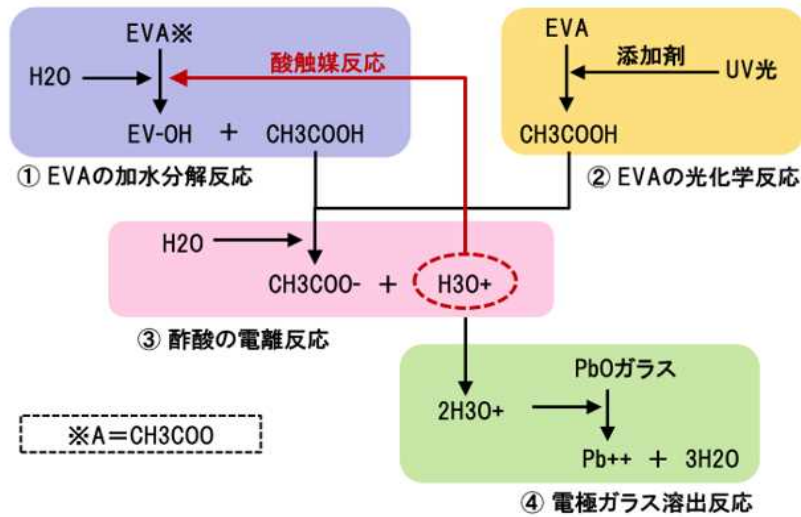


図 III-2-(イ)-C-10 UV 湿熱ストレス起因の劣化メカニズムモデル

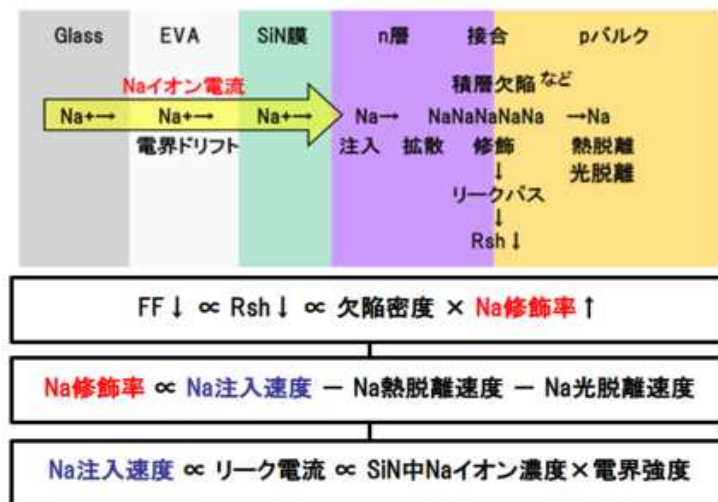
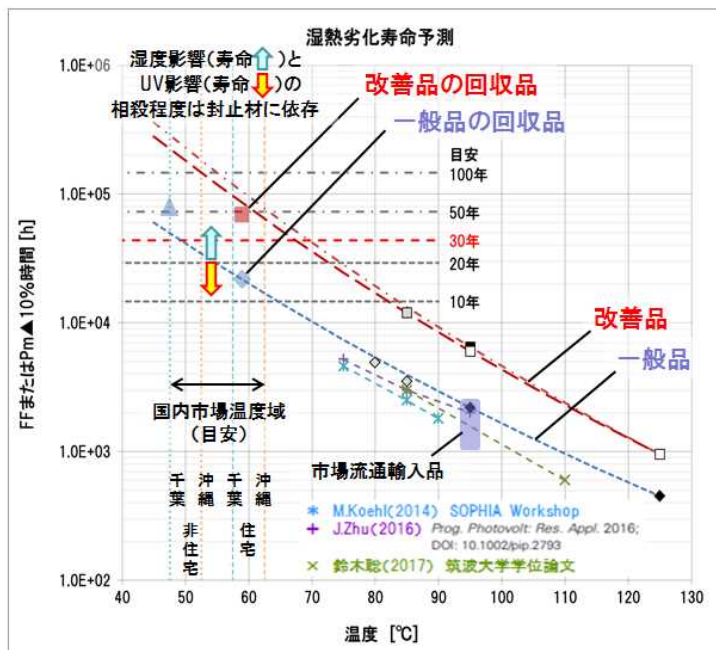


図 III-2-(イ)-C-11 電位差起因の PID メカニズムモデル

寿命予測技術については、前記した劣化物理モデルを踏まえて、劣化シミュレーションシステムを開発した。劣化シミュレーション結果は実際の劣化挙動をよく再現していることが確認された。寿命劣化をもたらす湿熱劣化モードについての寿命予測にあたっては、前記ストレス試験結果から得られる寿命ストレス量と太陽電池モジュールが設置されるフィールド環境条件から見積もられる年間ストレス量から寿命年数を見積もった。開発した寿命予測技術については、産総研と共願で特許出願を行った。図 III-2-(イ)-C-12 に、UV 湿熱ストレス劣化寿命の予測結果を示す。



UV/DH試験による寿命予測と市場回収品追加試験法による寿命予測が整合

自社改善品は国内非住宅市場において寿命 ≫ 35年 (NEDO目標:寿命35年)

出力保証を30年とした場合
安全率 ≧ 1.5 を確保

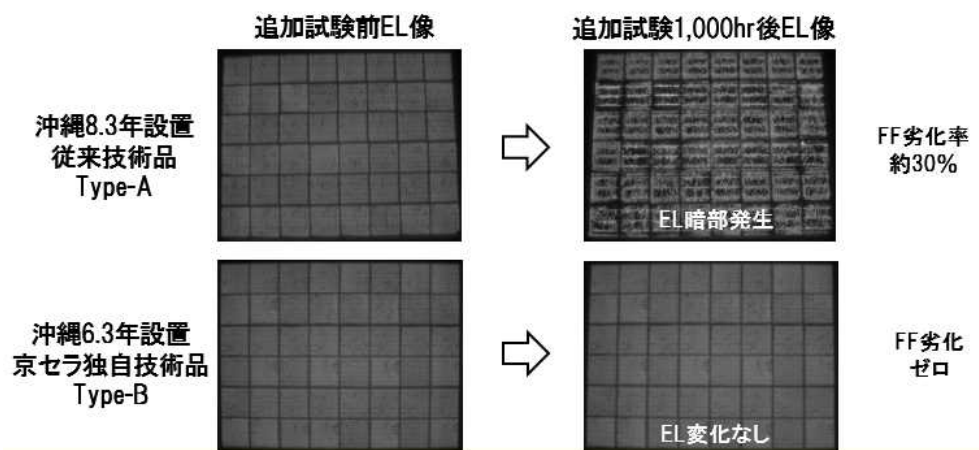
$$\text{安全率} = \frac{\text{製品寿命年数}}{\text{出力保証年数}}$$

図III-2-(イ)-C-12 UV湿熱ストレス劣化寿命の予測結果

寿命予測精度の検証については、フィールド（市場）回収品を追加加速試験にかけることでフィールドダメージ量と残存寿命を把握する方法を検討した。寿命劣化をもたらす湿熱劣化モードについて、この方法による寿命年数を見積もったところ、前述したストレス試験結果から見積もられる寿命年数に対して、比較的良好一致が得られることを確認した。図III-2-(イ)-C-13に、フィールド（市場）回収品の追加湿熱試験結果（EL像）を、図III-2-(イ)-C-14に、フィールド（市場）回収品の追加温度サイクル試験結果を示す。

【市場回収品→追加湿熱(DH)試験】

DHストレス ≧ IEC規格試験



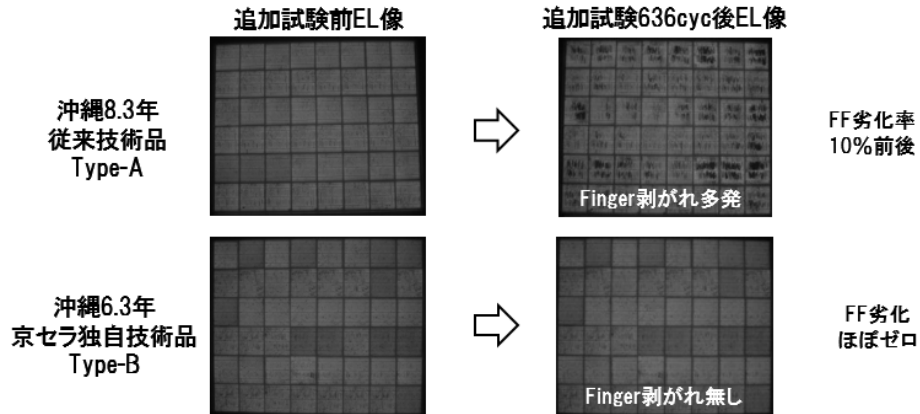
従来品：市場UV/湿熱ストレス → 酢酸発生 → 電極コンタクト腐食劣化

独自品：市場UV/湿熱ストレス → 酢酸発生抑制 → 電極コンタクト腐食なし

図III-2-(イ)-C-13 フィールド（市場）回収品の追加湿熱試験結果（EL像）

【市場回収品→追加温度サイクル(TC)試験】

TCストレス \geq IEC規格試験

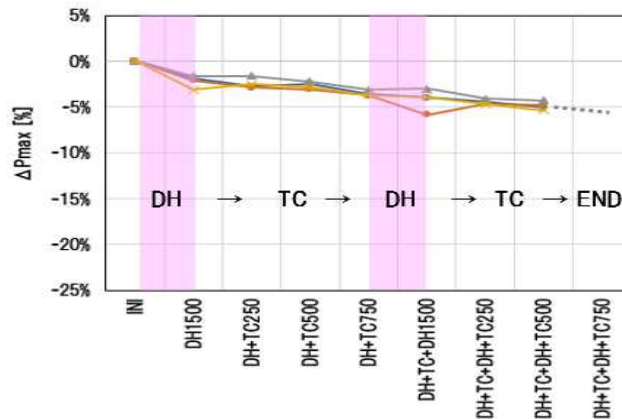


従来品：市場UV/湿熱ストレス→酢酸発生→電極コンタクト腐食→TCストレス→電極剥離劣化
 独自品：市場UV/湿熱ストレス→酢酸発生抑制→TCストレス→電極剥離なし

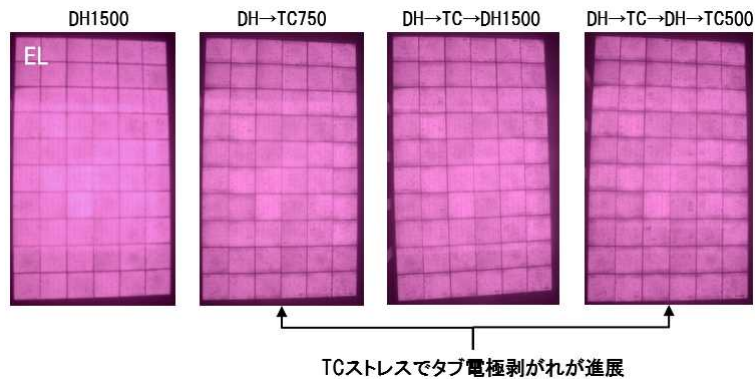
図III-2-(イ)-C-14 フィールド（市場）回収品の追加温度サイクル試験結果

長寿命化技術の検討については、封止材仕様やモジュール構造の検討を行った。封止材仕様については添加剤の配合設計が極めて重要であることが確認された。モジュール構造については、両面受光 PERC セルを念頭に、ダブルガラス構造を含めて検討した。

高効率セルを用いた大型モジュールでの寿命 35 年以上の実証では、両面受光 PERC セルを用いた 60 直製品サイズモジュールについて、国内非住宅市場寿命 35 年相当以上のストレス耐性を有することを、DH/TC シーケンシャル複合サイクル試験と寿命予測技術によって実証した。図III-2-(イ)-C-15 に、両面受光 PERC セル 60 直モジュールの複合サイクル試験結果の特性推移を、図III-2-(イ)-C-16 に、同試験結果の EL 像を示す。



図III-2-(イ)-C-15 両面受光 PERC セル 60 直モジュールの複合サイクル試験結果（特性推移）



図III-2-(イ)-C-16 両面受光 PERC セル 60 直モジュールの複合サイクル試験結果（EL 像）

最後に、高品質量産プロセスでの高信頼性シリコン太陽電池の開発に関する委託研究期間の計画と主な実施内容について図Ⅲ-2-(イ)-C-17にまとめた。また、主な成果と将来課題について図Ⅲ-2-(イ)-C-18にまとめた。

年度	計画	実績
2015	・加速試験と市場での劣化破壊モードの紐付 ・各部位の寿命評価技術開発開始	●市場品の回収→劣化モード解析/分析 ●単体ストレス試験実施 ※ ●湿熱劣化寿命予測
2016	・メカニズム把握/寿命評価技術開発 →材料/構造開発開始 ・寿命評価実証用加速試験装置導入 (前倒し)	●市場品の回収→劣化モード解析/分析 ●単体ストレス試験品→劣化前後分析 ※ ●UV+湿熱劣化寿命予測 ●PID寿命予測 ●温度サイクル寿命解析 ●UV複合試験装置導入(前倒し) ●複合連続ストレス試験開始 ※
2017	・信頼性評価技術確立 ・部材/構造の設計指針確立	●UV及び温度サイクル試験装置導入 ●複合連続ストレス試験→寿命予測 ※ ●市場回収品追加ストレス試験(DH,TC)→寿命検証 ●試験/解析結果まとめ→長寿命化設計指針抽出 ●EVA代替封止材/Wガラス構造試験実施 ※
2018	・Mo20%/寿命35年以上のセル/Mo構造決定 ・実証評価開始	●複合試験(継続)、市場回収品試験(継続) ●PERC両面受光Moの信頼性試験→8月より開始 ※ ●実証用大型光照射試験装置→2月より運用開始 ●実証用大型温湿度試験装置→3月より運用開始
2019	・上記セル/Mo化技術の実証	●PERCセルMoの複合試験遂行 ※ ●複合ストレス試験結果解析→予測寿命35年以上

※ 産総研FREA(福島再生可能エネルギー研究センター)との共同研究

図Ⅲ-2-(イ)-C-17 高信頼性シリコン太陽電池の開発に関する計画と実施内容

成果まとめ	将来課題
<p>①フィールド設置品の回収/分析 → 寿命劣化モードを把握</p> <p>②UV/DH/TC/PID試験を実施、劣化状態の分析 ※ → 劣化メカニズムを定量把握 → 基準複合ストレス試験(UV→DH→TC)を抽出</p> <p>③寿命予測技術を開発 設置地域/設置形態を考慮 → 特許出願 ※</p> <p>④フィールド回収品の残寿命評価技術を開発 → 特許出願 ※</p> <p>⑤改善封止材を用いることで 国内非住宅市場にて寿命35年以上を予測</p> <p>⑥両面受光PERCセル60直モジュールにて 寿命35年相当以上のストレス耐性を実証 ※</p> <p>※ 産総研FREAとの共同研究</p>	<p>①信頼性試験時間の短縮 →シミュレーション技術の開発</p> <p>②経年劣化/発電量予測技術の 開発(寿命予測技術と統合)</p> <p>③両面受光モジュール導入 (裏面構造/材料の選択)</p> <p>④海上など高ストレス市場向け 信頼性設計技術の発展開発</p> <p>⑤市場ユーザーへの情報提供 安全率(寿命/保証期間)の重要性</p>

図Ⅲ-2-(イ)-C-18 高信頼性シリコン太陽電池の開発で得られた主な成果と将来課題

第5次エネルギー基本計画(2018年7月3日閣議決定)では、「再生可能エネルギーの主力電源化」を目指すことが明確に位置付けられた。太陽光発電が脱炭素化に向けての将来の主力電源のひとつとして果たすべき役割は大きい。そのためには発電コスト[円/kWh]の更なる低減を進めて7円/kWh以下を実現することが必要不可欠であり、出力保証年数の長年数化、すなわち太陽電池モジュールの長寿命化が求められる。

妥当な出力保証年数は、寿命情報と妥当な安全率から設定されるべきである(出力保証年数=寿命年数/安全率)。しかし、現時点では寿命についても安全率についても、全うに論じられていない状況である。現在のIEC規格試験(湿熱試験条件は85°C85%1000h)では太陽電池モジュールの寿命評価はできない。寿命予測には、UV/湿熱複合ストレス試験、温度2水準試験(これは寿命劣化が確認されるまで

行う)、湿熱/TC 複合ストレス試験、そして、フィールド回収品による検証（追加加速試験）が必要不可欠である。

今後の太陽光発電産業/市場の健全な成長発展に向けては、長期信頼性情報の市場/ユーザーへの積極的な提供が大切になってくると考える。主力電源化の背景には、今後拡大が見込まれるセカンダリー市場、将来の大量廃棄問題、SDGs のような脱炭素化に向けての世界的な潮流がある。寿命予測試験方法の標準化も検討されるべき将来課題である。

2. 実用化・事業化見通し

高効率シリコン太陽電池の低コスト量産プロセスについては、2017 年より順次製造導入を実施しており、セル効率 21.4%、モジュール効率 19.4%の量産プロセスラインを確立済みである。

また、高信頼性化技術の実用化に関しては、開発した複合ストレス試験の導入と、開発した寿命予測技術を用いた信頼性試験判定基準の標準化について実施・運用中である。事業としては、国内市場 35 年相当以上のストレス耐性を確認した PERC モジュールの量産を実施しており、一部の発電所案件向けに 35 年保証を適用し、今後対象案件の拡大を図る見込みである。

3. 波及効果

まず、要素技術としてシードキャスト法による高品質な結晶育成方法に関連して開発した機能性粒界技術を用いることで、インゴット径が制約となる CZ 法では実現不可能な基板サイズまで大型化することも原理的に可能となり、低コスト化要求に適応して基板サイズを柔軟に選択・生産することが出来る。

また、高信頼性技術の活用による波及効果としては、2012 年から多大な国民負担を課して普及促進を進めた FIT 案件を、長期にわたり貴重な分散電源リソースとして活用する事で、買取期間終了（卒 FIT）後に出力低下が原因で収益が見込めない事を理由に廃棄処分される事を抑制する効果が期待出来る。長期信頼性情報が市場ユーザーに提供されるようになれば、寿命予測情報を踏まえたテクニカルデューデリジェンスやしかるべき保険料率/保険メニューの設定、セカンダリー市場では残寿命評価情報（資産価値）を踏まえた適正価格での取引、などが実現してくると予想される。残寿命評価情報は、将来の大量廃棄問題に対して適切な判断/対処をするためにも重要である。

また、長寿命化技術を取り入れた製品は大量廃棄問題を緩和する方向で環境負荷の軽減に貢献できる。長期信頼性情報は、市場の透明性の確保や適正な市場価格形成、ひいては太陽光発電産業の健全な成長発展、SDGs/脱炭素社会の実現に向けて、必要不可欠な情報として位置づけられていくものと考えられる。

4. 今後の展開

本事業における高信頼性・低コスト・高効率シリコン太陽電池開発による発電コスト 14 円/kWh の実現を通過点として、高信頼性技術を基盤とした太陽光発電システムの普及を通して、リサイクル周期の延伸による関連コストの削減と、更なる高効率セル開発、両面受光タイプのモジュール構造採用による実質的な設備利用率の向上等に取り組み、2025 年より早期に発電原価 7 円/kWh 以下の実現を目指す。

国内市場向けの活用例としては、政府のエネルギー基本計画に基づく 2030 年までの新築住宅の平均での ZEH 実現に向けて、昨今の住宅長寿命化に合わせた高信頼性モジュールを適用することで、とりわけ建材一体型モジュールなどのワンストップサービス提供への貢献が期待できる。

また、太陽光発電産業/市場の健全な成長発展のため、当該プロジェクトで確立した寿命予測技術を公開し、広く世に問う事で、業界全体の技術レベルの向上に貢献する。

さらに、当該プロジェクトで確立した高信頼性技術を活かして、例えば赤道近傍諸国、砂漠、海上といった高ストレス地域への太陽電池モジュールの設置を可能なものとし、再生可能エネルギーの更なる普及に貢献していく。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	5(0)	21(11)	24(14)	18(11)	12(4)	80(40)
論文	0	0	0	1	0	1
研究発表・講演 (うち国際会議)	0	0	2 (1)	2 (0)	3 (0)	7 (1)
新聞・雑誌等への掲載	9	7	0	2	0	20
その他	0	0	0	0	0	0

(2020年08月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	京セラ(株)	特願 2015-168467	国内	2015/8/28	登録	太陽電池素子およびその製造方法	伊藤憲和 他
2	京セラ(株)	特願 2015-189563	国内	2015/9/28	拒絶	絶縁性ペーストおよびその製造方法並びに太陽電池素子の製造方法	石川信哉 他
3	京セラ(株)	特願 2015-254634	国内	2015/12/25	取下	絶縁性ペーストおよびその製造方法並びに太陽電池素子の製造方法	石川信哉 他
4	京セラ(株)	特願 2016-035189	国内	2016/2/26	取下	太陽電池素子	吉田貴信 他
5	京セラ(株)	特願 2016-068921	国内	2016/3/30	取下	太陽電池素子および太陽電池モジュール	石川信哉 他
6	京セラ(株)	特願 2016-079806	国内	2016/4/12	取下	絶縁性ペーストおよび太陽電池素子の製造方法	佐藤順平 他
7	京セラ(株)	特願 2016-088824	国内	2016/4/27	取下	絶縁性ペーストおよびその製造方法並びに太陽電池素子の製造方法	石川信哉 他
8	京セラ(株)	特願 2016-148131	国内	2016/7/28	取下	太陽電池素子およびその製造方法	佐藤順平 他
9	京セラ(株)	特願 2016-189501	国内	2016/9/28	取下	太陽電池素子	村尾彰了 他
10	京セラ(株)	特願 2016-190693	国内	2016/9/29	取下	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	松島徳彦 他
11	京セラ(株)	特願 2016-204546	国内	2016/10/18	取下	太陽電池素子	村尾彰了 他
12	京セラ(株)	特願 2016-209570	国内	2016/10/26	取下	太陽電池素子	荒浪順次 他
13	京セラ(株)	201680076150.8(中国)	外国	2016/12/26	登録	絶縁性ペースト、絶縁性ペーストの製造方法、太陽電池素子の製造方法および太陽電池素子	石川信哉 他

14	京セラ(株)	特願 2017-531639	国内	2016/12/26	登録	絶縁性ペースト、絶縁性ペーストの製造方法、太陽電池素子の製造方法および太陽電池素子	石川信哉 他
15	京セラ(株)	1801003804(タイ)	外国	2016/12/26	公開	絶縁性ペースト、絶縁性ペーストの製造方法、太陽電池素子の製造方法および太陽電池素子	石川信哉 他
16	京セラ(株)	16/007907(米国)	外国	2016/12/26	公開	絶縁性ペースト、絶縁性ペーストの製造方法、太陽電池素子の製造方法および太陽電池素子	石川信哉 他
17	京セラ(株)	PCT/JP2016/088744	PCT	2016/12/26	各国移行	絶縁性ペースト、絶縁性ペーストの製造方法、太陽電池素子の製造方法および太陽電池素子	石川信哉 他
18	京セラ(株)	201780013015.3(中国)	外国	2017/2/24	公開	太陽電池素子	吉田貴信 他
19	京セラ(株)	特願 2017-533988	国内	2017/2/24	登録	太陽電池素子	吉田貴信 他
20	京セラ(株)	1801005014(タイ)	外国	2017/2/24	公開	太陽電池素子	吉田貴信 他
21	京セラ(株)	16/108841(米国)	外国	2017/2/24	公開	太陽電池素子	吉田貴信 他
22	京セラ(株)	PCT/JP2017/007144	PCT	2017/2/24	各国移行	太陽電池素子	吉田貴信 他
23	京セラ(株)	201780021223.8(中国)	外国	2017/3/28	公開	太陽電池素子および太陽電池モジュール	石川信哉 他
24	京セラ(株)	特願 2018-508063	国内	2017/3/28	登録	太陽電池素子および太陽電池モジュール	石川信哉 他
25	京セラ(株)	16/089330(米国)	外国	2017/3/28	登録	太陽電池素子および太陽電池モジュール	石川信哉 他
26	京セラ(株)	PCT/JP2017/012602	PCT	2017/3/28	各国移行	太陽電池素子および太陽電池モジュール	石川信哉 他
27	京セラ(株)	特願 2017-077981	国内	2017/4/11	公開	絶縁性ペースト、太陽電池素子の製造方法および太陽電池素子	佐藤順平 他
28	京セラ(株)	15/484881(米国)	外国	2017/4/11	拒絶	絶縁性ペーストおよび太陽電池素子の製造方法	佐藤順平 他
29	京セラ(株)	特願 2017-088210	国内	2017/4/27	取下	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	伊藤憲和 他
30	京セラ(株)	特願 2017-145318	国内	2017/7/27	公開	太陽電池素子および太陽電池モジュール	岩佐優太 朗
31	京セラ(株)	201780046035(中国)	外国	2017/7/28	公開	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	佐藤順平 他
32	京セラ(株)	17834548.4(欧州)	外国	2017/7/28	公開	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	佐藤順平 他
33	京セラ(株)	特願 2018-530431	国内	2017/7/28	登録	太陽電池素子	佐藤順平 他

34	京セラ(株)	16/255561(米国)	外国	2017/7/28	公開	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	佐藤順平 他
35	京セラ(株)	PCT/JP2017/027494	PCT	2017/7/28	各国移行	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	佐藤順平 他
36	京セラ(株)	201780060259.7(中国)	外国	2017/9/25	公開	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	松島徳彦 他
37	京セラ(株)	特願 2018-509860	国内	2017/9/25	登録	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	松島徳彦 他
38	京セラ(株)	1901001940(タイ)	外国	2017/9/25	出願	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	松島徳彦 他
39	京セラ(株)	16/365527(米国)	外国	2017/9/25	登録	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	松島徳彦 他
40	京セラ(株)	PCT/JP2017/034492	PCT	2017/9/25	各国移行	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	松島徳彦 他
41	京セラ(株)	特願 2018-512641	国内	2017/9/26	登録	太陽電池素子	村尾彰了 他
42	京セラ(株)	16/365551(米国)	外国	2017/9/26	出願	太陽電池素子	村尾彰了 他
43	京セラ(株)	PCT/JP2017/034704	PCT	2017/9/26	各国移行	太陽電池素子	村尾彰了 他
44	京セラ(株)	106133280(台湾)	外国	2017/9/28	登録	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	松島徳彦 他
45	京セラ(株)	特願 2017-201848	国内	2017/10/18	公開	太陽電池素子	荒浪順次 他
46	京セラ(株)	特願 2018-516081	国内	2017/10/26	登録	太陽電池素子	村尾彰了 他
47	京セラ(株)	16/388631(米国)	外国	2017/10/26	出願	太陽電池素子	村尾彰了 他
48	京セラ(株)	PCT/JP2017/038683	PCT	2017/10/26	各国移行	太陽電池素子	村尾彰了 他
49	京セラ(株)	特願 2017-230825	国内	2017/11/30	取下	太陽電池素子	松島徳彦 他
50	京セラ(株)	特願 2018-033054	国内	2018/2/27	取下	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	高橋宏明 他
51	京セラ(株)	201880026320(中国)	外国	2018/4/2	公開	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	伊藤憲和 他
52	京セラ(株)	18791131.8(欧州)	外国	2018/4/2	公開	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	伊藤憲和 他
53	京セラ(株)	特願 2018-544377	国内	2018/4/2	登録	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	伊藤憲和 他
54	京セラ(株)	16/660530(米国)	外国	2018/4/2	出願	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	伊藤憲和 他
55	京セラ(株)	PCT/JP2018/014096	PCT	2018/4/2	各国移行	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	伊藤憲和 他
56	京セラ(株)	107113809(台湾)	外国	2018/4/24	登録	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	伊藤憲和 他
57	京セラ(株)	特願 2018-091196	国内	2018/5/10	登録	太陽電池素子	村尾彰了 他
58	京セラ(株)	特願 2018-137000	国内	2018/7/20	取下	シリコンのインゴット、シリコンのブロック、シリコンの基板およびシリコンのインゴットの製造方法ならびに太陽電池	田辺英義 他

59	京セラ(株)	16/044327(米国)	外国	2018/7/24	登録	太陽電池素子および太陽電池モジュール	岩佐優太郎
60	京セラ(株)	201810841488.9(中国)	外国	2018/7/26	公開	太陽電池素子および太陽電池モジュール	岩佐優太郎
61	京セラ(株)	201880077215.X(中国)	外国	2018/11/20	公開	太陽電池素子	松島徳彦 他
62	京セラ(株)	特願 2019-516264	国内	2018/11/20	登録	太陽電池素子	松島徳彦 他
63	京セラ(株)	PCT/JP2018/042747	PCT	2018/11/20	各国移行	太陽電池素子	松島徳彦 他
64	京セラ(株)	107142396(台湾)	外国	2018/11/28	登録	太陽電池素子	松島徳彦 他
65	京セラ(株)	特願 2020-502881	国内	2019/1/31	出願	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	高橋宏明 他
66	京セラ(株)	PCT/JP2019/003277	PCT	2019/1/31	取下	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	高橋宏明 他
67	京セラ(株) (国研)産業技術総合研究所	特願 2019-043208	国内	2019/3/8	取下	情報処理装置、制御方法、予測方法、及びプログラム	新楽浩一郎 他
68	京セラ(株) (国研)産業技術総合研究所	特願 2019-043209	国内	2019/3/8	取下	情報処理装置、制御方法、予測方法、及びプログラム	新楽浩一郎 他
69	京セラ(株) (国研)産業技術総合研究所	特願 2019-114877	国内	2019/6/20	取下	情報処理装置、制御方法、予測方法、及びプログラム	新楽浩一郎 他
70	京セラ(株) (国研)産業技術総合研究所	特願 2019-114880	国内	2019/6/20	取下	情報処理装置、制御方法、予測方法、及びプログラム	新楽浩一郎 他
71	京セラ株式会社	PCT/JP2019/026800	PCT	2019/7/5	公開	シリコンのインゴット、シリコンのブロック、シリコンの基板、シリコンのインゴットの製造方法、および太陽電池	田辺英義 他
72	京セラ株式会社	特願 2019-127135	国内	2019/7/8	公開	太陽電池素子	村尾彰了 他
73	京セラ株式会社	特願 2019-132730	国内	2019/7/18	取下	シリコンのインゴット、シリコンのブロック、シリコンの基板、シリコンのインゴットの製造方法および太陽電池	小柏陽平
74	京セラ株式会社	特願 2019-141352	国内	2019/7/31	取下	シリコンのインゴット、シリコンのブロック、シリコンの基板および太陽電池	小柏陽平 他
75	京セラ(株) (国研)産業技術総合研究所	特願 2020-039351	国内	2020/3/6	出願	情報処理装置、制御方法、及びプログラム	新楽浩一郎 他
76	京セラ(株) (国研)産業技術総合研究所	特願 2020-039352	国内	2020/3/6	出願	情報処理装置、制御方法、及びプログラム	新楽浩一郎 他
77	京セラ(株) (国研)産業技術総合研究所	特願 2020-039355	国内	2020/3/6	出願	情報処理装置、制御方法、及びプログラム	新楽浩一郎 他

78	京セラ(株) (国研)産業技術総合研究所	PCT/JP2020/009892	PCT	2020/3/6	出願	情報処理装置、制御方法、及びプログラム	新楽浩一郎 他
79	京セラ株式会社	PCT/JP2020/027856	PCT	2020/7/17	出願	シリコンのインゴット、シリコンのブロック、シリコンの基板、シリコンのインゴットの製造方法および太陽電池	小柏陽平
80	京セラ株式会社	PCT/JP2020/029233	PCT	2020/7/30	出願	シリコンのインゴット、シリコンのブロック、シリコンの基板および太陽電池	小柏陽平 他

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	入江祐太	京セラ(株)	Development of high efficient and long-term reliable crystalline silicon solar cells and modules by low cost mass production process	Japanese Journal of Applied Physics, Vol.57 P.853	有	2018/7

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	入江祐太	京セラ(株)	Development of high efficient and long-term reliable crystalline silicon solar cells and modules by low cost mass production process	PVSEC-27	2017/11
2	小島拓人	明治大学 ※共同発表	多結晶シリコンの非鏡面表面における機械学習を用いたエッチピット検出	第65回応用物理学会 春季学術講演会	2018/3
3	田中和文	京セラ(株)	京セラにおける長期信頼性太陽電池モジュール開発の取り組み	第15回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018/7
4	坂元智成	京セラ(株)	結晶Si太陽電池モジュールの湿熱ストレス寿命に及ぼすUV光の影響と添加剤の影響	第66回応用物理学会 春季学術講演会	2019/3
5	伊野裕司	(国研)産業技術総合研究所 ※共同発表	Lifetime Prediction of Crystalline Si PV Modules under UV-Hygrothermal Stress	The 29th edition of the International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-29), (6-Nov-19, Xi'an, China)	2019/11

6	伊野裕司	(国研)産業技術総合研究所 ※共同発表	Lifetime prediction under UV-hygrothermal stress for developing long-term reliable crystalline Si PV Modules	4th International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules, 2019 (SAYURI-PV 2019), 0-13, 19-Nov-19, Tokyo (Japan)	2019/11
7	新楽浩一郎	京セラ (株)	結晶シリコン太陽電池モジュールの寿命予測	第 67 回応用物理学会春季学術講演会シンポジウム	2020/3 (講演会は中止)

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	京セラ (株)	京セラ搭載要領が 30%向上～住宅用太陽光 屋根を効率的利用	電気新聞	2016/3/2
2	京セラ (株)	京セラ 7 種類のモジュールで屋根搭載容量 30% 増～住宅用新 PV システム	化学工業日報	2016/3/3
3	京セラ (株)	京セラ、単結晶 PV 技術に磨き 変換効率、1 % 高まり 19. 8%に	化学工業日報	2016/3/9
4	京セラ (株)	京セラ住宅用太陽光の新製品～「Roof1eX」4 月から順次発売	電波新聞	2016/3/9
5	京セラ (株)	京セラ発電効率アップ～太陽光システム新製品	京都新聞	2016/3/11
6	京セラ (株)	太陽光パネルの搭載容量 30%増加～新モジュールでゼロエネへ提案 京セラ	日刊木材新聞	2016/3/12
7	京セラ (株)	太陽光パネル住宅争奪戦～京セラ同面積で積載 3 割増	日経産業新聞	2016/3/14
8	京セラ (株)	搭載容量が 30%向上 ～京セラ 7 種類のモジュール組み合わせ	プロパン新聞	2016/3/21
9	京セラ (株)	PV EXP02016 レビュー～PERC 技術の導入急増	電子デバイス産業新聞	2016/3/24
10	京セラ (株)	ニュースワンダー ワンダーのトビラ 電力自由化	関西テレビ	2016/5/26
11	京セラ (株)	「報道ステーション」週 2 回 CM	テレビ朝日系列	2016/4/20～9/31
12	京セラ (株)	「エキサイティング! J」 週 1 回 CM	KBS 京都放送	2016/4/1～ 2019/2/28
13	京セラ (株)	エネルギー自給自足の商品を知ろう	住まいの設計	2016/7/1

14	京セラ (株)	太陽パネルメーカー問い合わせ一覧	ソーラージャーナ ル	2016/8/1
15	京セラ (株)	自家消費型システム提案	化学工業日報	2016/11/4
16	京セラ (株)	自社製 SOFC を投入	プロパン新聞	2016/11/14
17	京セラ (株)	自家消費向け開発加速 京セラ両面発電、EV 連携も	化学工業日報	2018/6/29
18	京セラ (株)	PV Japan2018 AI、EV の活用提案 京セラが新型モジュール	電子デバイス産業 新聞	2018/7/5

【その他】

なし

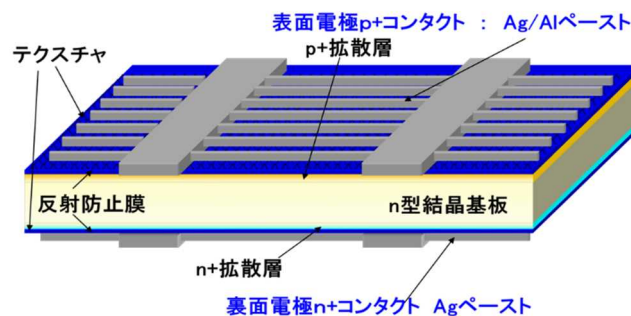
D 基盤技術開発による先端複合技術セルのための低再結合電極の研究開発 (ナミックス株式会社)

1. 成果詳細

1.1 n-PERT 用低再結合電極の開発 (実施期間 2015年7月21日～2018年3月31日)

1.1.1 はじめに

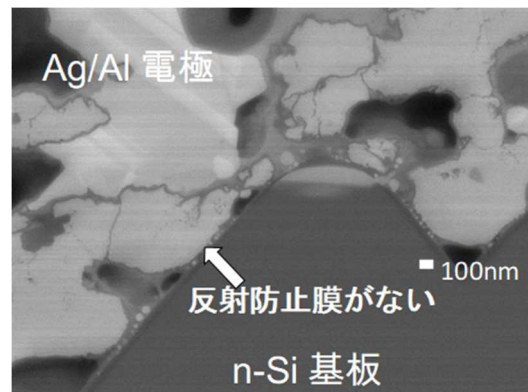
ホモジャンクションセル用の電極材料には非晶質複合酸化物が含まれており、これが基板表面の SiN_x 層と反応し、取り除くことで電流経路を形成している。しかし、 SiN_x を取り除くことが特性低下につながる場合、この SiN_x 層を活用し、一種の Passivated Contact の構造を形成できれば良いと考えられる。このような新しい接続構造を有する電極により、電極直下での再結合が抑制され高い開放電圧に基づく高効率化が期待できる。本研究では、高効率化が期待されている n-PERT 構造(図III-2-(イ)-D-1)の太陽電池を対象として、基板の作成は豊田工業大学、電極-基板の接続のメカニズム解析は明治大学にて行い、表面・裏面での再結合電流を抑制した電極の開発を共同にて実施した。



図III-2-(イ)-D-1 n-PERT 太陽電池構造

1.1.2 本研究の目標

従来の n-PERT 型の p^+ エミッタ用の電極に使用されるペーストは、基板と電極とのコンタクトを取ることが目的でアルミ金属を含有しているのが一般的である。しかし、生成したアルミ合金が基板と接触し金属が Si へ拡散してしまうことで V_{oc} (開放電圧) が下がり、変換効率が低下してしまうことがわかっている。また、ペースト中のガラスフリットにより反射防止膜をファイヤースルーすることで、電極下部の反射防止膜は全体に除去されるため金属とシリコンが直接接触する面積が増大する(図III-2-(イ)-D-2)。これに伴い再結合電流密度も大きくなり V_{oc} が低下するという問題があった。



図III-2-(イ)-D-2 n-PERT p^+ 層 Ag/Al 電極断面 SEM 写真

本検討ではアルミ金属を使用せず、ガラスフリットの反応性をコントロールして反射防止膜を残し、基板と電極金属と直接の接触面積を少なくすることでパッシベーション効果を維持したまま部分的にコンタクトする構造を界面で作ることにより、上記問題を解決できる電極の開発を実施した。従来の n-PERT 構造の太陽電池用の受光面裏面 n+コンタクト電極及び p+コンタクト電極の基板との接続の接触抵抗は、n+層に対しては $5 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$ 、p+層に対して $2 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$ 程度であり、電極と基板の界面での再結合電流密度は $\sim 1000 \text{ fA cm}^{-2}$ と程度が一般的となっている。変換効率は、基板自体の性能が大きく反映されるため、開発電極の開発項目としては、上述の①n+層に対する接触抵抗値、②p+層に対するコンタクト抵抗値、③電極形成による再結合電流密度の3点とした。目標としては、n+層、p+層それぞれの電極の接触抵抗は現行電極レベルを維持、再結合電流密度は現行電極の半分以下まで下げることとした。表III-2-(イ)-D-1 参照。

表Ⅲ-2-(イ)-D-1 開発項目と目標値

開発項目	目標値
①低表面濃度のn+層に対する接触抵抗低減	2 mΩ cm ² 以下 (基板表面濃度1×10 ²⁰ cm ⁻³)
②p+層に対する接触抵抗低減	5 mΩ cm ² 以下 (基板表面濃度1×10 ²⁰ cm ⁻³)
③電極形成による再結合(j _{0-met})抑制	500 fA cm ⁻² 以下

1.1.3 成果内容

ガラスフリットの窒化膜との反応性を変更して作成した開発 Ag 電極 4 点にて n-PERT セル (156mm²、n=3) を試作した。このときのリファレンスセル (Ref) は Ag/Al 電極を用いた。IV 特性を測定した結果を表Ⅲ-2-(イ)-D-2 に示す。

表Ⅲ-2-(イ)-D-2 IV 測定結果 n=3Cell 測定平均

ペースト	F.F	Isc(A)	Voc(V)	Eta(%)	Rs(mΩ)
Ag/Al	0.770	9.940	0.649	20.72	3.41
試作1	0.752	9.965	0.655	20.55	5.27
試作2	0.762	9.987	0.657	20.93	4.48
試作3	0.769	9.950	0.657	21.04	4.22
試作4	0.732	9.979	0.655	20.02	6.76

試作 1-4 全てにおいて Ref より +6~8mV 高い Voc が得られた。試作 1、4 は Rs (直列抵抗) が高く FF が低い変換効率 (Eta) が ref より低い。一方で、試作 2、3 については Rs も低く FF が高く、変換効率が試作 2 で 20.93% (Ref 対比+0.21 ポイント)、試作 3 で 21.04% (Ref 対比+0.32 ポイント) の結果となった。

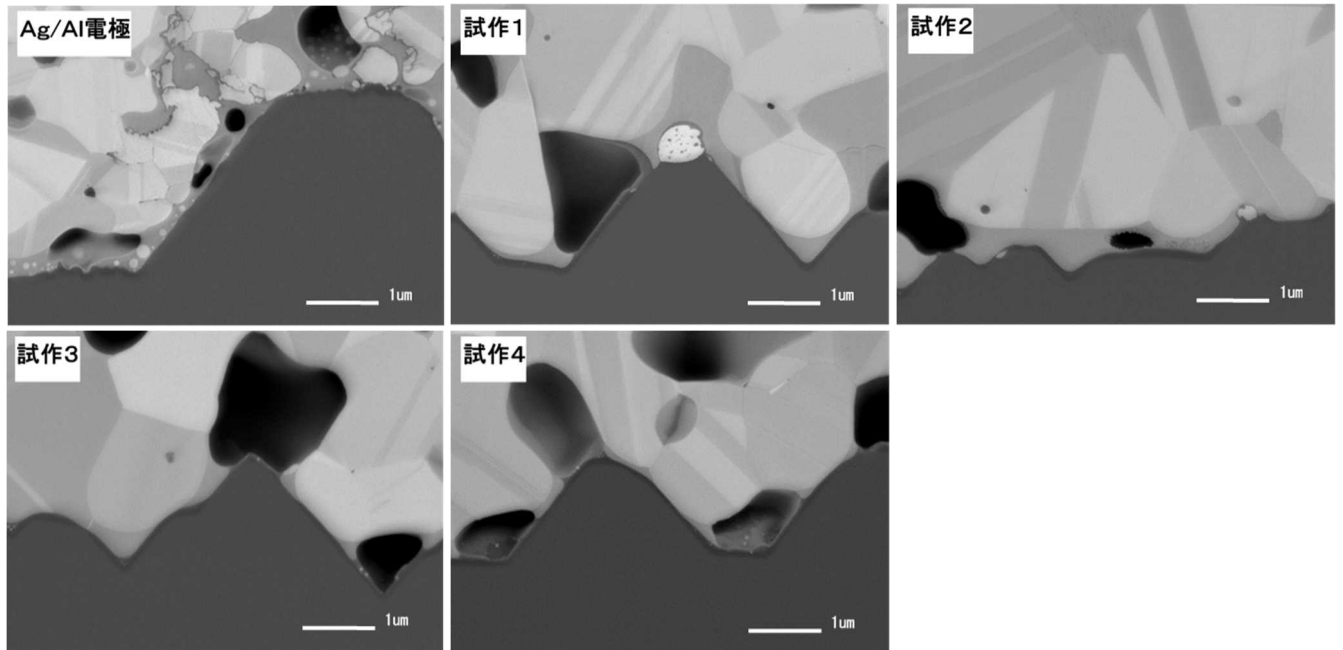
次に試作 3 の Voc、FF が高くなる原因を調べることを目的として、n⁺、p⁺層に対する接触抵抗値と再結合電流値を調べた (表Ⅲ-2-(イ)-D-3)。試作 1 と試作 4 は n⁺層、p⁺層ともに接触抵抗が高い。試作 2 は n⁺層に対する接触抵抗は低い p⁺層に対しては高い。試作 3 のみ n⁺層および p⁺層とも接触抵抗が低い結果となった。これが試作 3 の Rs が低い原因と考えられる。また、Ag/Al 電極 (ref) と比較して試作 1~4 の電極全てにおいて再結合電流 j_{0-met} の値は低く抑えられていることが高 Voc の原因と考えられる。

表Ⅲ-2-(イ)-D-3 n+層、p+層に対する接触抵抗値と再結合電流密度

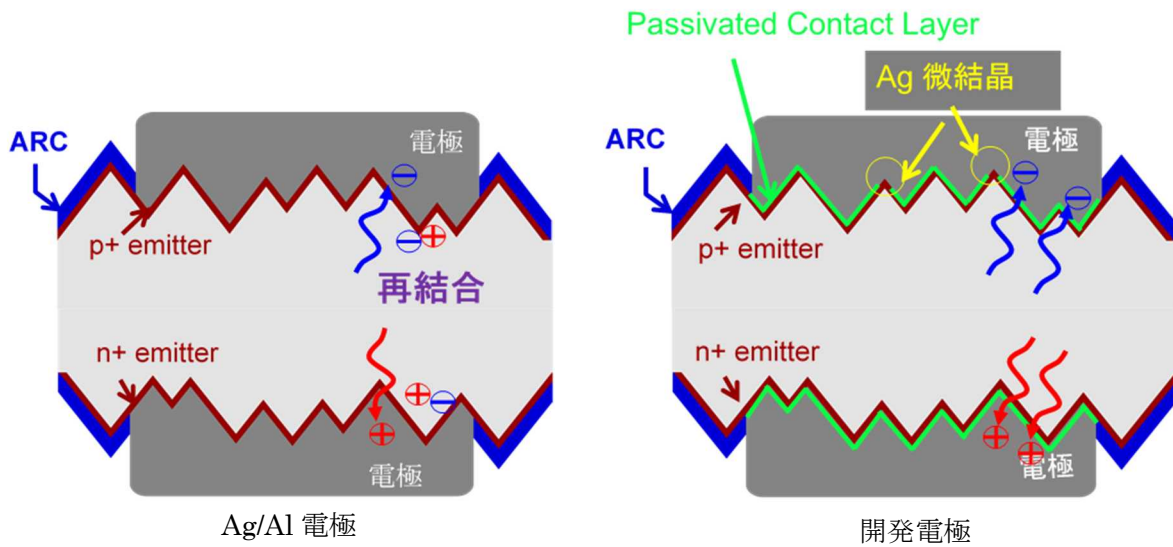
電極	①n+層に対する接触抵抗 (mΩ・cm ²)	②p+層に対する接触抵抗 (mΩ・cm ²)	③再結合電流 j _{0-met} (fAcm ⁻²)
Ag/Al電極	-	1.4	720
試作1	2.4	5.6	490
試作2	1.9	5.1	510
試作3	1.8	3.8	470
試作4	3.2	8.2	550

次に電極と基板面の界面状態を観察する目的で p⁺層の断面 SEM 写真を観察した (図Ⅲ-2-(イ)-D-3)。Ag/Al 電極ではガラスフリットによって反射防止膜が全体に除去され、Ag/Al 合金が接基板と接触し一部が Si 基板に刺さるような形で形成されている。Ag/Al 電極では電極直下の金属との接触面積が増大することで再結合が促進されていることが Voc 低下の原因と考えられる。一方、試作 1~試作 4 については反射防止膜が残留していて電極と基板が直接、接触している箇所が少なく、試作 1<試作 2<試作 3<

試作4の順で残留量が多い。試作4では残存する反射防止膜の厚みが厚く面積も大きく、Agの微結晶の生成も確認できない。このため接触抵抗が高い。一方、試作1、2ではテクスチャ頭頂部に巨大なAgの微結晶が生成しており、ガラスの反射防止膜への反応性が高すぎると考えられる。試作3はテクスチャ底部の反射防止膜は残したまま、テクスチャ頭頂部の反射防止膜が一部除去され、小さなAgの微結晶を生成することにより基板と適切にコンタクトしていることがわかる。概念は、図III-2-(イ)-D-4でコンタクトモデル図として、示した。



図III-2-(イ)-D-3 電極断面 SEM 写真



図III-2-(イ)-D-4 コンタクトモデル図

1.1.4. まとめ

目標の達成状況を表Ⅲ-2-(イ)-D-4 に示す。

表Ⅲ-2-(イ)-D-4 目標値と達成状況

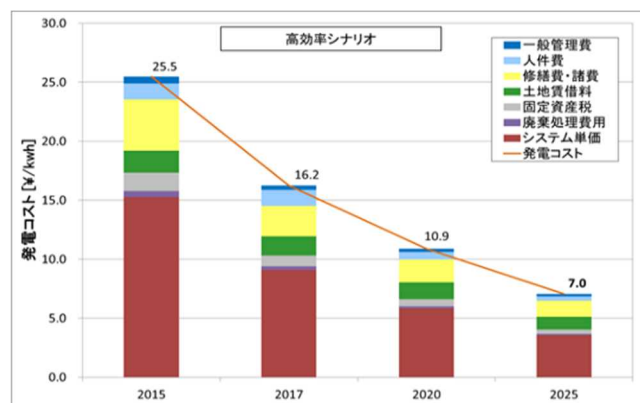
開発項目	目標値	達成状況
①低表面濃度のn+層に対する接触抵抗低減	2 mΩ cm ² 以下 (1 × 10 ²⁰ cm ⁻³)	1.8mΩ cm ² (1 × 10 ²⁰ cm ⁻³)
②p+層に対する接触抵抗低減	5 mΩ cm ² 以下 (1 × 10 ²⁰ cm ⁻³)	3.8mΩ cm ² (1 × 10 ²⁰ cm ⁻³)
③電極形成による再結合(j0-met)抑制	500 fA cm ⁻² 以下	470fA cm ⁻²

n⁺層、p⁺層に対する接触抵抗値目標および電極形成による再結合電流密度 j_{0-met} の低減目標を達成。接触抵抗値を現行品レベルで維持したままで、再結合電流を低減した電極の開発に成功した。また、ガラスフリットの組成を変更することで反射防止膜との反応性の調整と金属微結晶の生成度をコントロールすることが可能となり、V_{oc} を高く維持したままで接触抵抗を低減できた。最終的な IV 特性として、現行 Ag/Al ペーストと比較して開放電圧(V_{oc})+8mV、変換効率(E_{ta})+0.32%を実現した。今後はペーストのガラスフリットの調整で異なる反射防止膜に対してもこの技術の応用が期待できる。

1.2 ヘテロジャンクション用卑金属電極の開発 (実施期間 2018年4月1日~2019年3月31日)

1.2.1 はじめに

本研究では高効率化が期待されているヘテロジャンクション構造の太陽電池を対象として、卑金属を使用した電極ペーストを開発することで、変換効率及び信頼性を現行の Ag 電極レベルを維持したままで電極コストの低減化することを検討する。基板の作成は豊田工業大学、電極-基板の接続のメカニズム解析は明治大学にて行い、新しい卑金属を使用した電極の開発を実施した。



図Ⅲ-2-(イ)-D-5 高効率化による発電コスト低減シナリオ

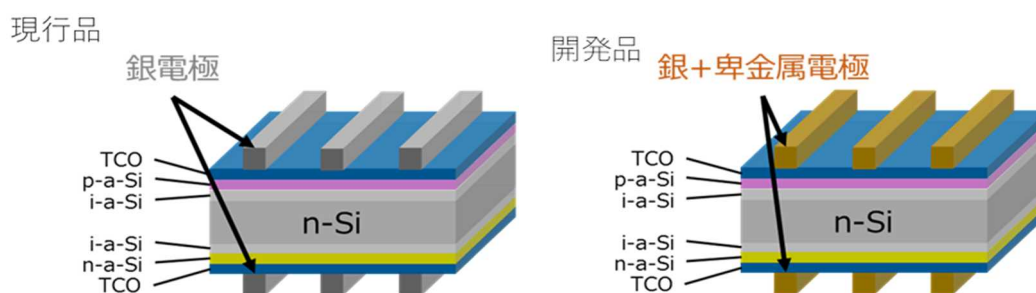
1.2.2 本研究の目標

2025年発電コスト7円/kWh実現のために豊田工業大学と明治大学により提唱された高効率化による発電コスト低減シナリオの中で電極材料費の削減目標が掲げられている。この中で太陽電池電極の材料費の削減率は2017年を基準に2020年で-17%、2025年で-33%を目標としている。(表Ⅲ-2-(イ)-D-5)

表Ⅲ-2-(イ)-D-5 高効率化による発電コスト低減シナリオによる電極材料費削減目標

	2015年	2017年	2020年	2025年
ポリシリコン価格	¥1,600/kg	¥1,000/kg	¥1,000/kg	¥700/kg
インゴット製造経費	¥2,600/kg	¥2,000/kg	¥1,700/kg	¥1,500/kg
ウエハ加工費	¥47.0/枚	¥22.0/枚	¥19.0/枚	¥18.0/枚
セル効率	20.0%	23.0%	25.0%	26.5%
モジュール効率	17.7%	20.4%	22.1%	25.0%
モジュール製造原価	¥56.9/W	¥34.8/W	¥27.4/W	¥24.9/W
セル搭載材料	¥40.5/枚	¥30.0/枚	¥25.0/枚	¥20.0/枚
電極材料費	¥26.3/枚	¥19.5/枚	¥16.3/枚	¥13.0/枚
電極材料費削減率	35%	0	-17%	-33%
運転年数(寿命)	20.0年	20.0年	25.0年	30.0年
システム単価	¥280,438/kW	¥161,138/kW	¥125,925/kW	¥93,603/kW
設備利用率	13.0%	13.0%	13.7%	15.0%
発電コスト	¥25.5/kWh	¥16.2/kWh	¥10.9/kWh	¥7.0/kWh

本研究では高効率化が期待できるヘテロジャンクション用の銀電極をターゲットとして、ペーストに含まれる Ag 粉末の一部を卑金属粉末へ変更し、高価な貴金属 Ag の量を減らすことで電極材料費の削減を検討した(図Ⅲ-2-(イ)-D-6)。開発目標値としては2018年度電極材料費削減率30%(2017年度対比)とし、材料コスト削減目標の大幅な前倒しを狙う。また、その他の目標はセル変換効率、接触抵抗値とし、目標値は現行 Ag ペースト同等水準とした(表Ⅲ-2-(イ)-D-6)。



図Ⅲ-2-(イ)-D-6 ヘテロジャンクションセル電極構造

表Ⅲ-2-(イ)-D-6 開発目標値

開発目標	最終目標 (2018年度)
① 電極コスト削減率(%)	-30% (銀ペースト対比)
② 変換効率(%)	-0.05%差以内 (銀ペースト対比)
③ 接触抵抗	8.0mΩ cm ² 以内

1.2.3 成果内容

最初に卑金属材料として Ag コート Cu 粉末、Ni 粉末を選び、その添加効果を確認する目的でペーストを試作した。ペーストは、下記の Ag 含有率の比率で卑金属粉末と Ag 粉末と混合して三本ロールミルで作成した。

【試作ペーストの配合】

1. Ag コート Cu 粉末+Ag 粉末 ペースト

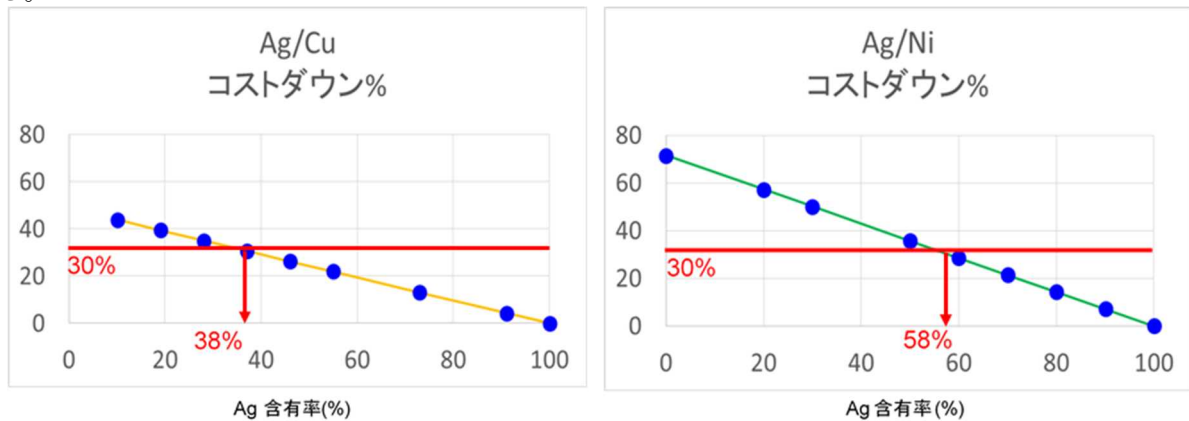
Ag 比率 10%、19%、28%、37%、46%、55%、73%、91%、100%

2. Ni 粉末+Ag 粉末 ペースト

Ag 比率 20%、30%、50%、60%、70%、80%、90%、100%

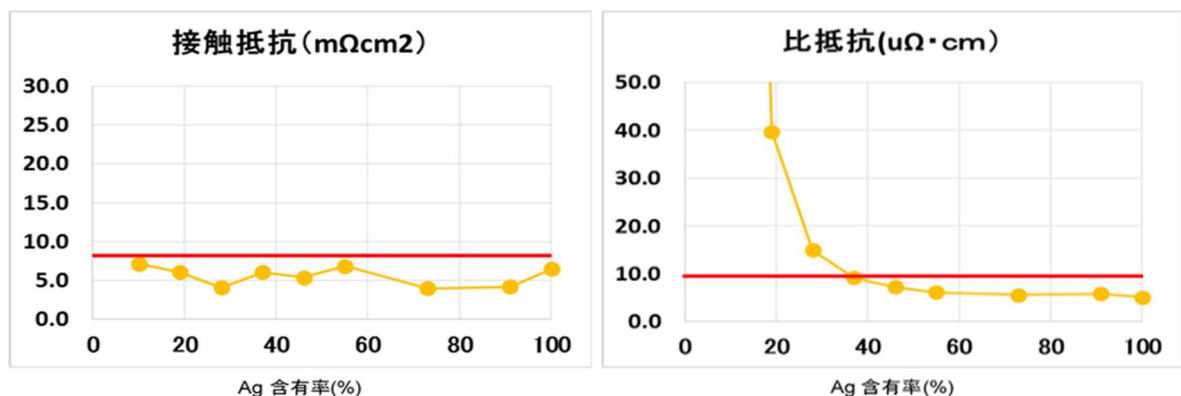
また、作成したペーストのコストの低減率を示す(図Ⅲ-2-(イ)-D-7)。それぞれのペーストのコストは Ag の含有率に対して負の相関があり目標の30%コスト削減するためには、Ag コート Cu 粉末+Ag 粉末ペ

ーストの場合 Ag 含有率 38%以下、Ni 粉末+Ag 粉末の場合 Ag 含有率 58%以下まで Ag 含有率を下げる必要がある。

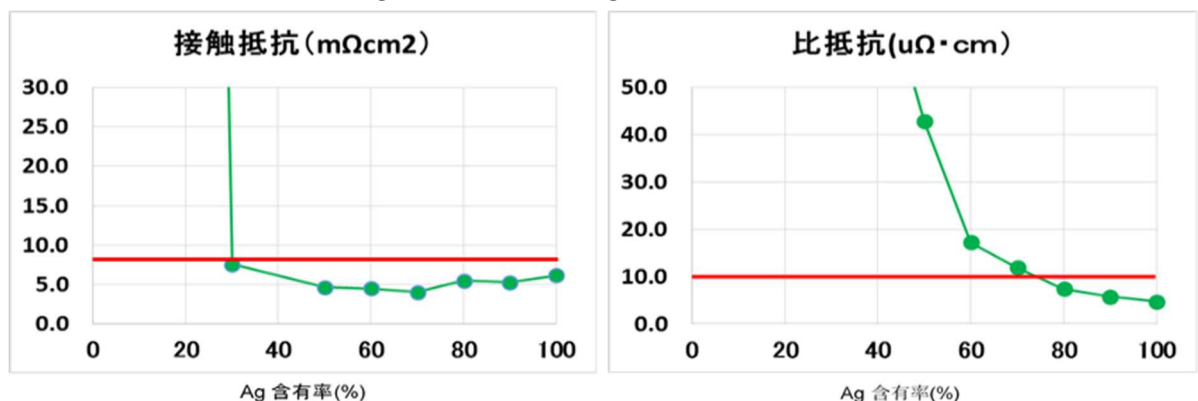


図III-2-(イ)-D-7 Ag コート Cu 粉末、Ni 粉末添加に対する Ag 含有率と材料コストダウン率

続いて各ペーストの電極と基板との接触抵抗、電極の比抵抗の測定を行った(図III-2-(イ)-D-8、図III-2-(イ)-D-9)。接触抵抗は Ag コート Cu 粉末+Ag 粉末では全 Ag 含有率のペーストに対して低い値を示し目標値の $8\text{m}\Omega\text{cm}^2$ 以下を示した。一方、Ni 粉末+Ag 粉末ペーストの場合、Ag 含有率 30%以上では目標値の $8\text{m}\Omega\text{cm}^2$ 以下であるが 20%では急激に接触抵抗値が増加した。また、比抵抗は Ag コート Cu 粉末+Ag 粉末では Ag 含有率 38%以上で目標値の $10\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 以下を達成した。Ni 粉末+Ag 粉末ペーストの場合、Ag 含有率 80%以上でようやく目標値の $10\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 以下となった。以上の結果より Ag コート Cu 粉末を使用したほうが低銀含有率で接触抵抗および比抵抗ともに低く維持でき、コストも有利になることがわかった。



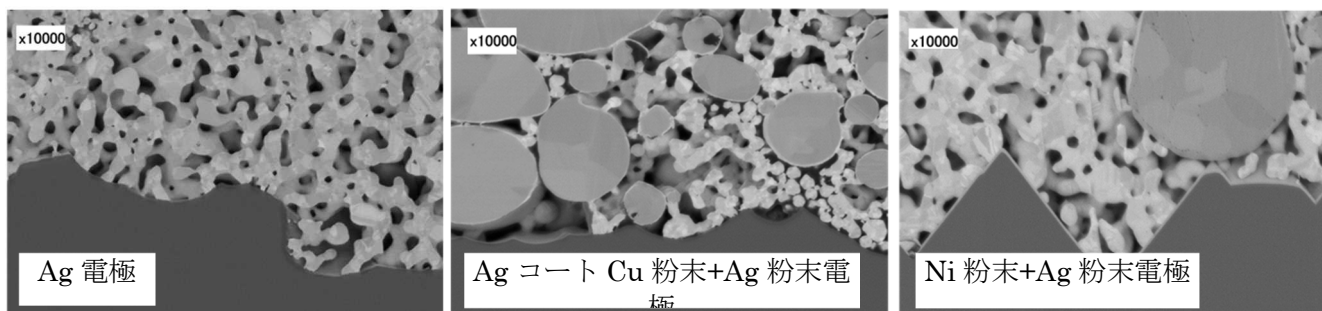
図III-2-(イ)-D-8 Ag コート Cu 粉末+Ag 粉末電極接触抵抗、比抵抗グラフ



図III-2-(イ)-D-9 Ni 粉末+Ag 粉末電極 接触抵抗値、比抵抗グラフ

更に接触抵抗、比抵抗の挙動を調べる目的で電極の断面 SEM 写真を観察した(図III-2-(イ)-D-10)。Ag 電極では、Ag 粒子が隣接する粒子と融着することで導電性が発現している。また、基板の界面では ITO の表面と Ag の粒子が接触により導通し、接触抵抗が確保されている。Ag コート Cu 粉末+Ag 粉末の電極では、上記の銀粒子同士の接続の他に Cu コア表面の Ag と Ag 粉末との接続も確認された。また、Ag コート Cu 粉末の表面が Ag でコートされていることで、ITO との接触でも同様に接続が得られ、これが

Ag コート Cu 粉末+Ag 粉末電極の接触抵抗が Ag 含有率に関係なく低いレベルを維持できる理由と考えられる。一方、Ni 粉末+Ag 粉末の電極の電極では、Ni と Ag との接続はあるが、融着は確認されていない。Ag コート Cu 粉末と比較して比抵抗値が高いのは、Ag 粒子との接続が Ag コート Cu 粉末に対して脆弱であり、加えてNi 金属自体の金属抵抗値も高いことに由来する。また、ITO との接続性についても同様に不利に働いていると考えられる。



図Ⅲ-2-(イ)-D-10 電極断面 SEM 写真

接触抵抗と比抵抗値の目標値をクリアした Ag コート Cu 粉末の Ag 含有率 37%ペーストを使用して太陽電池セルを作成した。比較は Ag 粉末を使用したペーストとした。このときセルは①4BB (バスバー) design、②SWCT (スマートワイヤ) design セルの 2 種類 n=3 枚。詳細の条件は表Ⅲ-2-(イ)-D-7 に示す。

表Ⅲ-2-(イ)-D-7 セル作成条件

①4BB design			②SWCT desin		
スクリーンマスク	メッシュ	SH-ER380CAL-Φ14	メッシュ	ER325-Φ16	
	乳剤厚	12um	乳剤厚	15um	
	フィンガー設計幅	40um	フィンガー設計幅	60um	
	パターン	120本, 4BB	パターン	61本, 0BB	
	メーカー	ムラカミ	メーカー	ムラカミ	
印刷工程	印刷機	MT-550TV (Micro-tec)	印刷機	MT-550TV (Micro-tec)	
	印刷スピード	100mm/sec	印刷スピード	100mm/sec	
	スナッフオフ	1.7mm	スナッフオフ	1.7mm	
	印圧	0.3Mpa	印圧	0.3Mpa	
	スキージ角度	70°	スキージ角度	70°	
	スキージ硬度	70°	スキージ硬度	70°	
	スキージタイプ	Micro-Squeegee	スキージタイプ	Micro-Squeegee	
乾燥工程	装置	Muffola Oven	装置	Muffola Oven	
	条件	150C, 10min.	条件	150C, 10min.	
硬化工程	装置	Muffola Oven	装置	Muffola Oven	
	条件	200C, 45min.	条件	200C, 45min.	
IV	装置	DENKEN PV cell I-V Tester	装置	SpotLIGHT Cell Tester (PASAN)	
	ステージ	4BB	ステージ	GridTOUCH unit	

次に、太陽電池 IV 測定結果を示す。①4BB では Ag と比較して、Ag コート Cu 粉末の Ag 含有率 37%ペーストでは Rs が 1.07mΩ 高く、FF が 0.76 ポイント低い結果となった (表Ⅲ-2-(イ)-D-8)。接触抵抗とライン抵抗が Ag と比較して高いことに起因していると考えられる。また、②SWCT でも Ag と比較して、Ag コート Cu 粉末の Ag 含有率 37%ペーストでは同様に Rs が 0.29mΩ 高く、FF が 0.22 ポイント低い結果となった (表Ⅲ-2-(イ)-D-9)。SWCT でも同様の結果であるが、4BB と比較して Rs の上昇と FF の低下の割合が小さい。これは 4BB と比較して SWCT のほうがワイヤ間の距離が短くフィンガー電極のライン抵抗が高い影響を受けにくいことに起因している。最終的な変換効率では①4BB で-0.02 ポイント、②SWCT で+0.02 ポイントとなった。マスクデザインの最適化も合わせて実施することで、Ag 電極と比較しても実用可能なレベルと考えられる。

表Ⅲ-2-(イ)-D-8 ①4BB IV 結果

ペースト	Voc(V)	Jsc(mA/cm ²)	Rs(mΩ)	FF(%)	Eta(%)
Ag	0.721	38.16	1.39	82.84	22.78
Ag/Cu	0.716	38.75	2.46	82.08	22.76

表Ⅲ-2-(イ)-D-9 ②SWCT IV 結果

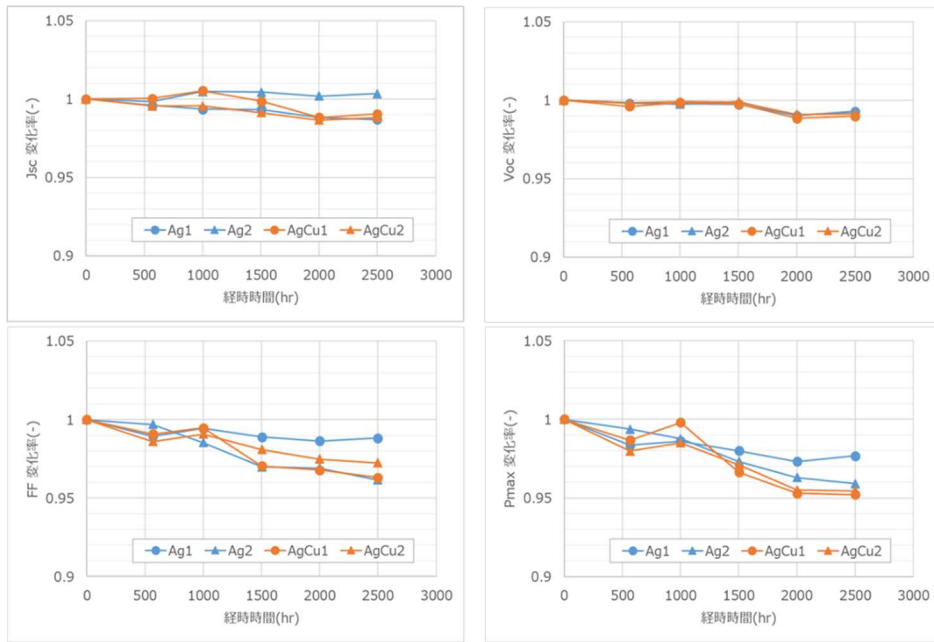
ペースト	Voc(V)	Jsc(mA/cm ²)	Rs(mΩ)	FF(%)	Eta(%)
Ag	0.7235	38.35	5.01	79.78	22.13
Ag/Cu	0.7248	38.42	5.30	79.56	22.15

作成した 4BB のセルを使用して 1 セルモジュールを作成し、85℃/85%の条件で信頼性試験を実施した。セル/モジュールの作成条件および信頼性テストの条件を表Ⅲ-2-(イ)-D-10 に示す。セルには上述の IV 測定で使用した、Ag ペースト及び Ag コート Cu 粉末の Ag 含有率 37%ペーストで作成した 4BB 品を用いた(n=2)。タブ付けはコンダクティブフィルム(CF)を使用して国立研究開発法人産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所(FREA)にて実施した。また、モジュール作成及び信頼性評価は国立研究開発法人産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域太陽光発電研究センターにて実施した。

表Ⅲ-2-(イ)-D-10 セル/モジュールの作成条件および信頼性テスト条件

信頼性テスト		
スクリーンマスク	メッシュ	SH-ER380CAL-Φ14
	乳剤厚	12μm
	フィンガー設計幅	40μm
	パターン	120本, 4BB
	メーカー	ムラカミ
印刷工程	印刷機	MT-550TV (Micro-tec)
	印刷スピード	100mm/sec
	スナッフオフ	1.7mm
	印圧	0.3Mpa
	スキージ角度	70°
	スキージ硬度	70°
乾燥工程	スキージタイプ	Micro-Squeegee
	装置	Muffola Oven
硬化工程	条件	150C, 10min.
	装置	Muffola Oven
DHテスト	条件	200C, 45min.
	モジュール構成	G/G 1セルモジュール, CF接合
	条件	85C/85%RH, 0, 500, 1000, 1500hr

信頼性試験の結果を示す(図Ⅲ-2-(イ)-D-11)。Ag 粉末品と Ag コート Cu 粉末品を使用した電極の両方で FF が経時によって低下しており、この影響で Pmax も低下がみられた。ただし両電極の出力低下の程度は 2500hr 時点で 5%以内に抑えられており、低下の程度も同程度であった。このことから Ag コート Cu 粉末品はモジュール化の信頼性においても、実用できるレベルであることがわかった。



図Ⅲ-2-(イ)-D-11 信頼性試験 (DH85°C/85%) 結果

1.2.4 まとめ

目標の達成状況を表Ⅲ-2-(イ)-D-11 に示す。

表Ⅲ-2-(イ)-D-11 目標達成状況

開発項目	現状	最終目標 (2018年度)	達成状況
① 電極コスト削減率 (%)	Ref Ag 電極	-30% (銀ペースト対比)	-31% 達成
② 変換効率 (%)	Ref Ag 電極	-0.05%差以内 (銀ペースト対比)	-0.02%差 達成
③ 接触抵抗	8.0mΩ cm ² 以内	8.0mΩ cm ² 以内	6.0mΩ cm ² 達成

Ag コート Cu 粉末と Ag 粉末の併用による銀含有率を 37%まで低下させた電極により目標のコスト 30%低減できるペーストができた。比抵抗については、現行の Ag ペーストと比較してわずかに高い結果であるが、SWCT などのマルチバス工法を用いることによりカバーできると考えられる。接触抵抗も 8mΩ cm² 以内、変換効率も Ag 同等の結果となり、目標を達成できた。また、1セルモジュールによる 85°C/85%の信頼性結果でも 2500hr、出力低下 5%以内で Ag 電極と同程度の低下に抑えられ、実用化可能な電極の開発ができた。

2. 実用化・事業見通し

現在、n-PERT 型の構造では変換効率の伸びが小さく、セルを生産するメーカーも少数となってしまった。現行のセルメーカーが少ないこと、今後 n-PERT セルの市場成長も見込めないことから、本研究で進めてきた n-PERT 用電極の事業化については中止とすることとした。

一方、ヘテロジャンクションの太陽電池の需要は増えている。更に銀地金の高騰による電極価格の上昇も追い風となり、ヘテロジャンクション用の電極の低コスト化の要求は増えてきている。図Ⅲ-2-(イ)-D-12 に示すスケジュールにて事業化を計画している。

年度	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度	
製品設計 ヘテロジャンクションセル用ペースト 最終目標 ・ TCO に対する接触抵抗 $< 8\text{m}\Omega\text{cm}^2$ ・ 電極コスト 70% (対銀電極)		→ 最終設計完了				
量産検討			→			
販売活動/サンプルワーク			→			
顧客認証/信頼性試験				→		
生産					→	
販売					→	

図Ⅲ-2-(イ)-D-12 ヘテロ用非金属電極事業化スケジュール

3. 波及効果

電極の非金属化を進めることで電極のコストが低減できれば、セルのコスト低減となり、ヘテロジャンクション太陽電池構造のさらなる普及につながる。

4. 今後の展開

セルメーカー、モジュールメーカーでの信頼性試験評価により採用活動進めていく。今後の高信頼性試験要求に合わせて組成の検討も進める。また、変換効率向上のためにさらなる低抵抗化、細線印刷可能な電極の開発を進めることで普及に努めていく。

5. 特許論文等リスト

	2015 年度	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
論文	0	0	0	1	0	1
研究発表・講演 (うち国際会議)	0(0)	0(0)	2(2)	1(1)	0(0)	3(3)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0	0	0
その他	3	0	0	0	0	0

(2020年08月31日現在)

【特許】

なし

【論文】

番号	所属	タイトル	発表誌名 ページ番号	発表年月
1	School of Science and Technology, Meiji University	Study on chemical bonding states at electrode-silicon interface fabricated with fire-through control paste	Japanese Journal of Applied Physics 57, 08RB23 (2018)	published online2018/7/20

【学会発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	Takefumi Kamioka	Toyota Technological Institute	Carrier Transportation at Novel Silver Paste Contact	2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)	June 25-30 2017
2	Kyotaro Nakamura	Toyota Technological Institute	Novel Silver Paste for N-type bifacial PERT Cell	PVSEC-27	Nov. 14, 2017
3	Kyotaro Nakamura	Toyota Technological Institute	Newly Developed Ag Coated Cu Paste for Si Hetero-Junction Solar Cell	35th EUPVSEC poster	Sep. 24-28, 2018

【新聞・雑誌等への掲載】

なし

【その他】

なし

E 赤外線 FZ 法による高品質低コストシリコン単結晶の開発（株式会社クリスタルシステム）

1. 成果詳細

1-1. 大型赤外線単結晶育成装置の改造

試作開発済みの大型赤外線単結晶製造装置について、高品質単結晶育成条件と赤外線の強度分布、角度依存性などの相関関係を明らかにしながら、直径 220mm を超える N 型シリコン単結晶育成条件の確立を目指した。具体的には、装置の新たな開発は行わず、以下に記載する赤外線強度分布制御法、照射角度の最適化などに必要な改造を実施するとともに、単結晶歩留まりの向上と安定化を可能とする制御装置および計測装置を試作した。

1-1-1. 赤外線集光分布制御装置

開発済みの既存装置はこれまでの大口径単結晶育成試験の結果、熔融帯を形成させるには十分な赤外線量を集光できることが分かったが、赤外線集光分布状態は育成単結晶の直径変化に合致させて最適状態に制御する必要があることが明確となった。そこで、単結晶育成の連続したプロセス（ネッキング工程、クラウン工程、そして直胴工程）において、赤外線の照射位置が直径変化に合致するよう追尾して育成が可能な「赤外線集光分布制御装置」を導入した。本制御装置の導入により、単結晶育成中の赤外線集光分布を常に最適な状態に保つことが可能となり、安定的に直径 130mm までのシリコン単結晶を育成することに成功した。

1-1-2. 固液界面直上の液相拡がり角度精密測定装置

無転位単結晶を育成するには種子付け後にネッキング工程により無転位化させ、直径を太らせるクラウン工程を経て所定の直径の単結晶育成を行う直胴部に至る連続した安定制御が必要である。クラウン部では下側の単結晶の直径よりも大きな直径の融液が上に乗ることになるため、直径差が小さいとクラウン部が長尺化し製造コストの上昇を招く。逆に大きくし過ぎると上側の融液が固化する前に落下してしまう。そこで、原料棒から供給される融液量を正確に測定し、最適に制御する技術が必要となる。本研究開発では、単結晶育成時の最適融液量及び融液形状を正確に測定できる「液相拡がり角度精密測定装置」の設計、導入を行い、ネッキングから直胴部に至る連続したプロセスに使用し、単結晶育成中における固液界面形状の測定を行うことで液相量の制御を行った。従来からのオペレーター制御に本装置による自動測定を付加することで、単結晶成長の安定化及び直径制御技術が向上した。

1-1-3. 液相量制御自動装置

1-1-2 に記載した「液相拡がり角度精密測定装置」により測定された固液界面の液相量について、得られた液相量を最適状態へと制御し自動制御を行うことで、安定した結晶成長を継続させるための「液相量制御自動装置」の設計、導入を行った。結果、単結晶成長の安定性が向上し、「液相拡がり角度精密測定装置」と併せて用いることで直径 130mm、長さ 105mm の単結晶シリコンの育成に成功した。

1-1-4. 大型赤外線単結晶育成装置本体部の改造

1) 種子棒シャフトへの結晶保持装置の付加

無転位シリコン単結晶成長をネッキング法にて行う場合、ネッキングと呼ばれる絞り（直径 4mm 以下、長さ 50mm 以上）を行い、その後直径 220mm まで径を拡げる。この場合、単結晶が成長するにつれ絞り部へかかる重量が増大するため絞り部の破損による結晶落下、および振動が発生しやすくなる。従って、上記問題を回避し、安全かつ安定して結晶育成が可能となる結晶保持機構として、種子棒シャフト結晶保持装置の設計、導入を行い装置への付加を行った。

2) 原料保持シャフト中心軸調整装置

原料となるポリシリコンと育成単結晶の境界となる熔融帯は 20mm 以下の幅で制御されており、安定成長を行うためには熔融帯の安定した制御、即ち双方の回転軸の一致が必要となる。しかし、使用する原料ポリシリコンが 1000mm と長い円柱状のため、長さ方向に若干の湾曲を含み、育成プロセス中に原料の回転軸中心が変動するという問題を含んでいる。

従って、育成中に原料の回転軸中心を調整する原料保持シャフト中心軸調整装置を設計、導入し、育成中に中心軸ズレを調整可能とし、熔融帯の安定化を向上させることで、単結晶成長を最適化した。

1-2. 高品質シリコン単結晶育成条件の検討

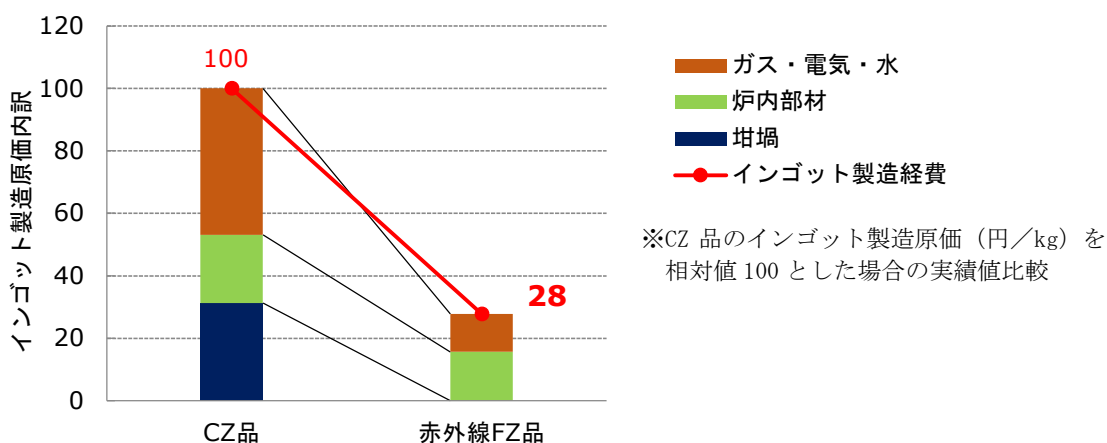
1-2-1. インゴット製造経費

赤外線 FZ 法は CZ 法、高周波 FZ 法等の既存の方法よりも低廉なコストで高品質品を製造可能な方法である。

赤外線 FZ 法がコストメリットを有する主たる理由として以下が挙げられる。

- 1) 主たる変動費である石英るつば、カーボン材等の消耗品部材を一切使用しない。
- 2) 使用するポリシリコン原料は、シーメンズ法で製造された丸棒原料棒をそのまま使用できる。
- 3) シリコン単結晶を太陽電池として利用する場合、変換効率の観点から最適なキャリア濃度 (N 型の場合はリン) が仕様として定められ、一方向凝固法の場合は偏析現象により結晶成長方向でのリン濃度は変動するため、最適組成部は 1 本の単結晶から限られた長さしか得ることができない。一方で、溶媒移動法が適用される赤外線 FZ 法では成長方向に均質組成を持った最適濃度品のみので育成が可能であり、結晶製造時の歩留まりに影響を与えない。

実際に赤外線 FZ 法から育成された単結晶について、実績に基づき算定したインゴット製造原価を図Ⅲ-2-(イ)-E-1 に記載する。なお、比較に用いた CZ 品は N 型シリコン単結晶 HIT 品 (比抵抗 5~20Ω cm) のインゴット製造原価の市況価格を参考とした (相対評価)。



図Ⅲ-2-(イ)-E-1 CZ 品と赤外線 FZ 品のインゴット製造原価比較

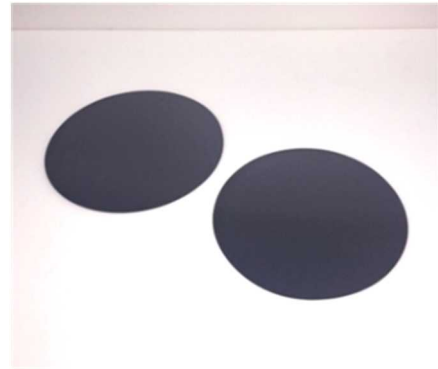
結果、赤外線 FZ 品のインゴット製造原価は CZ 法のシリコン単結晶に対して 1/3 以下となる原価を達成し、非常に低コストでシリコン単結晶が育成できることが実証された。

また、上記インゴット製造原価実績値は、本書内では相対値として表記しているが、実際の数値としては「インゴット製造経費最終目標値：¥1700/kg」の半分以下のコストであり、本赤外線 FZ 法のコストメリットを実証した。

1-2-2. 直径および長さ

赤外線集光分布の最適化ならびに固液界面の液相量制御を行うことで、安定的な原料溶融と結晶固化を両立し、直径 130mm、長さ 105mm のシリコン単結晶を育成した (図Ⅲ-2-(イ)-E-2)。得られた結晶は、シリコン特有の金属光沢が認められ、結晶軸<100>において結晶側面には育成方向に沿って伸びる明確な晶癖線が 4 回対称の位置、即ち(110)の方向に認められた。このことは得られた結晶には大きな結晶粒界は無く、単結晶であることを示している。

また、育成した単結晶から直径 125mm のシリコン鏡面ウェハを作製し、赤外線 FZ 法により育成された単結晶が通常プロセス (市販されているウェハと同一プロセス) にて遜色ない加工が可能であることを実証した (図Ⅲ-2-(イ)-E-3)。



図Ⅲ-2-(イ)-E-2 育成したシリコン単結晶 図Ⅲ-2-(イ)-E-3 シリコン鏡面ウェハ

なお、育成単結晶の大口径化を試み、直径 130mm 品までは成功したが、これ以上の大口径化には届いていない。単結晶の大口径化には安定した原料の溶解と結晶固化の継続、即ち融液の供給と育成結晶側での固化が安定し且つ持続する条件の確立が必要となる。本研究開発においては、原料棒の予備加熱と育成結晶に対する加熱を併用して、原料棒の熔融とシリコン単結晶の固化、双方を安定的に継続させ、実際に直径 130mm の原料棒を使用することで同じく直径 130mm までの単結晶育成に成功している。

今後、直径 130mm 以上の単結晶を育成する場合、使用する原料棒の直径を育成する単結晶と同等まで大きくするか、若しくは直径は 130mm のままで供給するメルト量を増やすか、の二者択一となるが、実際には下記の市況的ならびに技術的問題があることが判明した。

- 1) 市況に存在する原料棒の最大直径は、130mm 程度が限界であり、それ以上の大口径品は入手が困難となる。また、万が一入手が可能であっても、特別な製造と品質調整が必要となり高価となり実用化には適さない。
- 2) 育成単結晶よりも小さい径の原料を使用して単結晶育成を行う場合、原料棒の溶解速度を上げメルト量を増大供給させることで、原料径を超える直径の単結晶を育成することになる。

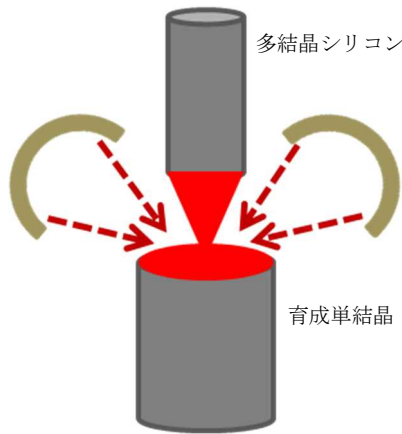
この場合、

- i) 原料溶解に必要となるエネルギー量（赤外線量）が膨大となり、原料熔融の安定条件と単結晶固化の安定条件をイコールとすることが難しくなる。即ち、固液成長界面近傍にて、メルト供給に必要な温度と結晶固化に必要な温度の温度勾配差をつけることが難しく、結晶の安定的な断続固化が困難となる。
- ii) 仮に育成単結晶より小さい直径の原料棒を使用するという上記技術が確立しても、育成単結晶を長尺化しようとした場合、原料棒を長くするか、複数本交換しながらの育成継続をしなくてはならない。即ち、大型赤外線単結晶育成装置の更なる大型化、ないしは製造工場（建屋）の大型化をせざるを得ないという物理的な制約が生ずる。

以上より、本研究開発では直径 130mm のシリコン単結晶を育成した段階にて、更なる大口径化を行う際の育成条件の安定化ならびに実用化を踏まえ、新たな育成方法の検討が必要であると判断した。そして、新たな原料供給方法の提案として、粒状多結晶シリコンを用いた供給機構を採用し、本研究開発の棒状原料を用いた赤外線 FZ 法と並行して、新たな検討と開発を進めた。（図Ⅲ-2-(イ)-E-4、-5 参照）。

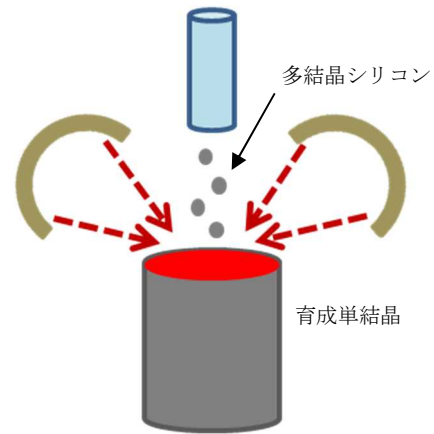
最終的には目標である 220mm 直径品の育成には至っていないが、粒状多結晶シリコンを用いた融液供給機構の開発、基礎技術の確立、そして装置の設計、導入まで完了し、大口径化に対する改善課題と育成メカニズムを明確化することができている。また、特許を含めた実用化に向けた戦略的な構築も進み、本新規技術の確立、そして目標値達成への目途を付けることに成功した。

尚、具体的な粒状多結晶シリコンを用いた方式、および開発成果は「1-2-9. 粒状多結晶シリコン原料を用いた単結晶育成方法の開発」に記載する。



図Ⅲ-2-(イ)-E-4

棒状多結晶シリコンによる育成法



図Ⅲ-2-(イ)-E-5

粒状多結晶シリコンによる育成方法

1-2-3. 導電型

シリコン単結晶の比抵抗値は添加される添加剤の濃度と相関関係にある。本研究開発においては、N型としてリンを添加剤に使い、比抵抗値 $5\Omega\text{cm}$ 品の制御を目指し、当該比抵抗に合致する濃度のリンを添加した単結晶を合成することとした。本質的には原料棒に予め必要量のリンが添加されていることが望ましいが現実問題としては、市販品は無添加品なので、購入後、必要濃度のリン添加が必要となる。

本研究開発では、一般的なシーメンス法による多結晶シリコン棒（直径 130mm）に溝を設け、ここに CZ（引上げ）法で作製された高濃度リン添加単結晶片をレーザ法で溶着する。溶着する CZ 法育成単結晶片は育成軸方向に沿ってリン濃度が変化しているため育成軸方向を互いに逆にした単結晶片を二枚、一組として溶着し、添加するリン濃度の均質化を図ることに成功した。実際に製造した原料棒を図Ⅲ-2-(イ)-E-6 に示す。

なお、溶着に洗浄プロセスを施すことにより、最終的に汚染の無い多結晶シリコン原料棒の作製技術を確立した。

育成した単結晶は PN 判定器により N 型を有していることを確認した（エヌピイエス(株)製 PN-01 による）。

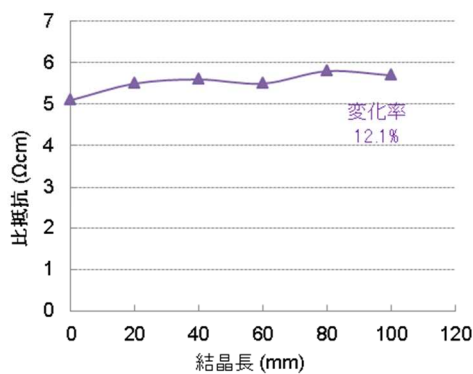


図Ⅲ-2-(イ)-E-6
ドーパントを溶着した
多結晶シリコン棒

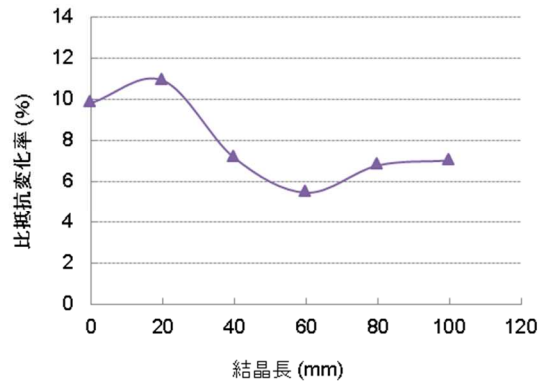
1-2-4. 抵抗面内分布

1-2-3 の手法において、多結晶シリコン原料棒に溶着させる単結晶片のリン添加濃度および単結晶片の量を調整することにより以下の通り最終目標を達成する結晶育成に成功した。

- ・ 中心比抵抗：目標とする $5\Omega\text{cm}$ に対して $5.1\sim 5.8\Omega\text{cm}$ 。
- ・ 比抵抗分布 成長方向：目標とする 15%以内に対して、12.1%。（図Ⅲ-2-(イ)-E-7）
- ・ 比抵抗分布 面内方向：目標とする 12%以内に対して、10.9%以下。（図Ⅲ-2-(イ)-E-8）



図Ⅲ-2-(イ)-E-7 結晶長と比抵抗の関係



図Ⅲ-2-(イ)-E-8 比抵抗変化率と結晶長の関係

注 1) 比抵抗測定装置：四探針抵抗率測定器

注 2) 比抵抗分布： $((\text{比抵抗 max} - \text{比抵抗 min}) / \text{比抵抗 max}) \times 100$

1-2-5. ライフタイム

赤外線 FZ 法により育成したシリコン単結晶を晶癖線に沿って切断し、ラッピング研削およびエッチングによる表面加工変質層の除去後、ライフタイム測定を実施した。目標とする比抵抗 5 Ω cm に対し、比抵抗 1~5 Ω cm の単結晶における測定結果を表Ⅲ-2-(イ)-E-1 に記載する。尚、測定は擬定常状態光伝導度測定法 (QSSPC 法) により行い、SEMI PV13-1111 に準拠した測定を実施した。

結果、各比抵抗におけるライフタイムは最終目標 7000 μ sec を大幅に超えた数値を得ることに成功した。

表Ⅲ-2-(イ)-E-1 ライフタイム測定結果

試料	比抵抗 (Ω cm)	ライフタイム (μ sec)
1	1	7397
2	2	7350
3	5	7962

1-2-6. 結晶欠陥

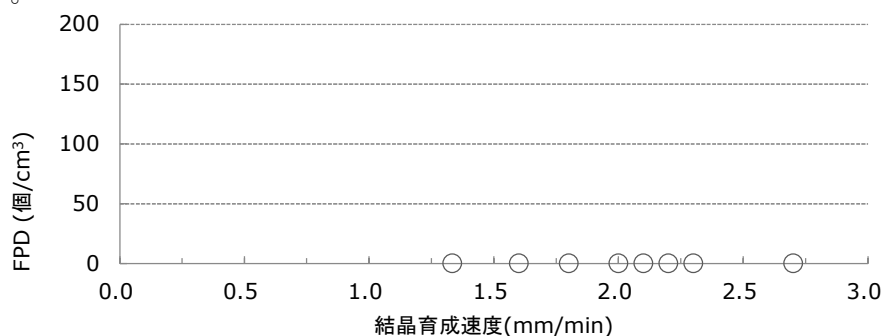
太陽電池としての性能劣化を抑止するため、本研究開発では点欠陥 (負結晶) ならびに層状欠陥 (離溶)、転位等の結晶欠陥を制御した高品質単結晶の開発を実施した。尚、転位については、後述する「1-2-7. 転位」の項にて詳細を記載する。

1) 点欠陥

シリコン単結晶の点欠陥として、空孔起因の負結晶である COP (Crystal Originated Particle) について、最終目標 0.1 個/cm³ (大きさ 100nm 以上) に対する評価結果を以下に記載した。なお、COP の評価を行うには、一般的に種々の測定器、測定対象試料の高度な表面前処理技術、ならびに付随して要する測定環境、雰囲気を制御する設備、そしてノウハウが必要となり、本研究開発期間にて正確な評価をすることは難しい。これに対して、COP と欠陥分布の一致ならびに欠陥発生源が同一であり、且つウェットエッチャントにて評価可能な欠陥として FPD (Flow Pattern Defects) が古くから知られている。従って、本研究開発においても FPD を評価することにより、点欠陥の制御ならびに評価を実施した。

評価は、単結晶のスライス加工後、表層の加工歪層を完全に除去することが必要であり、当該プロセスの確立を併せて行うことで、自社プロセスでの結晶欠陥評価を可能とした。本プロセスにて加工した試料を、セコエッチングと呼ばれるエッチャントで処理し、微分干渉顕微鏡にて表面観察を行うことで、FPD を評価した。

結晶欠陥は種々の結晶育成速度にて行い、個数を密度として換算した結果を図Ⅲ-2-(イ)-E-9 に示す。



図Ⅲ-2-(イ)-E-9 結晶育成速度と FPD の関係

結果、赤外線 FZ 法にて育成された単結晶には、FPD は一切確認されず、0 個/cm³ であることを確認した。即ち、赤外線 FZ 法では負結晶であるボイド欠陥の生成要因となる固形不純物の混入を抑止可能であることが確認できた。

2) 層状欠陥

シリコン単結晶に酸化ケイ素が固溶している場合、熱処理を行うと (若しくはデバイスプロセス等で熱処理が行われると)、過飽和状態にある固溶酸化ケイ素が離溶によりシリコン単結晶の (111) 面に沿って層状に析出し、結晶特性を著しく劣化させる事が知られている。

従って、以下熱酸化処理による評価を実施し、実際の層状欠陥の発生状況を評価した。

①評価条件

- ・評価試料：625 μm 片面鏡面ウェハ
- ・試料加工内容：赤外線 FZ 法にて育成した単結晶にスライス、ラップ、エッチング、鏡面研磨、表裏面ウェット洗浄を実施
- ・評価熱処理：780 $^{\circ}\text{C}$ ×4 時間 (Dry O₂) +1000 $^{\circ}\text{C}$ ×16 時間 (Dry O₂)
(熱処理条件は ASTM F416-91 に準拠する)
- ・欠陥観察：熱処理後のウェハを選択エッチングし、微分干渉顕微鏡観察を実施
- ・観察方法：ASTM F47-94 FIG10, And Table1 準拠

②評価結果

育成したシリコン単結晶のトップ側、ミドル側、テイル側より作製したシリコンウェハについて、各部位 2 枚ずつの評価を実施した。

表 III-2-(イ)-E-2 層状欠陥評価結果

結晶部位	試料	欠陥密度 (個/cm ³)
ヘッド	1	0
	2	0
ミドル	1	0
	2	0
テイル	1	0
	2	0

※微分干渉顕微鏡 ×200 (Nikon Optiphot200)

結果、結晶中に層状欠陥は一切確認されずに、0 個/cm³であることを確認した。即ち、赤外線 FZ 法で育成した単結晶は固溶する酸化ケイ素が極低密度であり、熱処理により酸化ケイ素の離溶は生じておらず、抑制可能であることが確認できた。

以上より、赤外線 FZ 法により育成した単結晶では、点欠陥（負結晶）ならびに層状欠陥（離溶）の制御が可能であり、高品質のシリコン単結晶を育成できることを実証した。よって、最終目標は問題なく達成された。

1-2-7. 転位

従来の CZ 法、ならびに高周波 FZ 法によるシリコン単結晶育成においてはダッシュ法と呼ばれるネッキング手法を用いて無転位単結晶を製造している。この方法は細い結晶を成長させることにより種子結晶と原料棒を接合した際に導入される転位を外側に誘導して排除し無転位化する手法である。本赤外線 FZ 法においても、ダッシュ法の導入により ϕ 65mm までの単結晶にて無転位化 (0 個/cm²) が可能となった (図 III-2-(イ)-E-10)。

なお、転位の評価は選択エッチング法によるエッチピット観察、及び X 線トポグラフ法により行った (図 III-2-(イ)-E-11)。また、 ϕ 130mm 品が得られているネッキングレス法では転位密度 $1 \times 10^7 \sim 1 \times 10^8$ 個/cm²であることを確認した。



図 III-2-(イ)-E-10 実際のネッキング品



図 III-2-(イ)-E-11 X線トポグラフ像

1-2-8. 酸素成分濃度および炭素成分濃度

赤外線 FZ 法により育成したシリコン単結晶について、酸素成分濃度、炭素成分濃度分析結果を以下に記載する。なお、双方ともにフーリエ変換赤外分光法による分析を行ったが、酸素成分濃度の分析のみは、本赤外線 FZ 法では極低濃度となるが故に、検出下限の低い低温測定

を使用した。結果、酸素成分濃度、炭素成分濃度ともに最終目標を大幅に下回る数値を有していることが確認できた（表Ⅲ-2-(イ)-E-3）。

以上より、本研究開発で試作した赤外線単結晶製造装置は酸素成分濃度、および炭素成分濃度を低濃度とする高純度単結晶育成が可能であることを実証した。

表Ⅲ-2-(イ)-E-3 低温 FT-IR

(Unit : atoms/cm³)

サンプル	酸素成分濃度 ^{※1}	炭素成分濃度 ^{※2}
赤外線 FZ 品	6.9×10^{13}	1.2×10^{15}

※1 : Bruker 製 120HR

※2 : Bruker 製 IFS-66V/s

1-2-9. 粒状多結晶シリコン原料を用いた単結晶育成方法の開発

1) 粒状多結晶シリコン原料の溶解

育成単結晶への融液の供給は、粒状多結晶シリコンをそのまま供給するのではなく、融液化し供給する方法を使用する。本供給方式を用いることで、原料の溶解と融液の固化が分離され、各々の制御が安定的に行うことができるため、より安定した単結晶育成が実現可能となる。

粒状多結晶シリコンの融液化は、まず原料である粒状多結晶シリコンを、融液供給器へ供給し、供給器を赤外線で加熱し融液を形成させる。形成した融液を断続的に育成単結晶の成長界面へ供給し固化を続けることで、安定した単結晶成長が可能となる。

本研究開発期間においては、上記一連の装置システム（粒状多結晶シリコンの自動供給装置、融液供給器の形状設計、育成単結晶への融液供給機構）の設計、作製、そして装置への組み込みまでを実現した。

結果、直径 100mm、長さ 30mm のシリコン結晶を得ることに成功し、大口径化への糸口を掴むことに成功した（図Ⅲ-2-(イ)-E-12）。

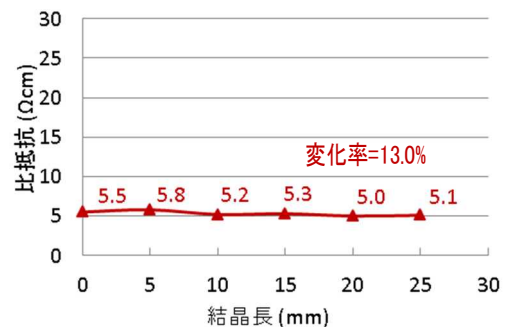


図Ⅲ-2-(イ)-E-12 育成した直径 100mm のシリコン結晶

2) 比抵抗の制御方法

シリコン単結晶中に取り込まれるリン濃度はシリコン融液中の濃度との比率である偏析係数で決定される。即ち、棒状原料を使用した場合と同様に、リンの偏析係数である 0.35 を基に、目標とする比抵抗を達成するために必要なリン濃度を見積もることができる。

本方法では、供給する粒状多結晶シリコン原料に、別途 CZ 法で育成されたリン添加単結晶片を同サイズの粒状形状として粉碎加工し混合した。混合した粒状多結晶シリコン原料を供給器にて同時に溶解し、結晶成長界面へ供給、固化させることにより結晶中の比抵抗制御を可能とし、粒状リン添加単結晶片のリン添加濃度、混合する量、等を調整することにより、棒状原料使用時と同様に、任意の組成のリン添加単結晶を自由に育成できる。結果、目標とする 5Ωcm に対して 5.0 ~ 5.8Ωcm の単結晶を育成することに成功した。



※変化率 : ((比抵抗 max - 比抵抗 min) / (比抵抗 max)) × 100

図Ⅲ-2-(イ)-E-13 比抵抗と結晶長の関係

2. 実用化・事業化見通し

シリコン単結晶を用いた太陽電池について、目下のところ最も効率が高いとされているセルはリンを添加したN型シリコン単結晶とアモルファスシリコンを併せたHIT型に電極を裏側にのみ配置したバックコンタクト方式を組み合わせたHBC型と呼ばれる方式であり、これにはN型単結晶基板が必要とされている。

また、太陽電池として使用される素材はシリコン結晶以外にもあるが、依然としてシリコン単結晶は高い占有率を示しており、将来に涉って主要な基材であると言われている。市場規模としても拡大の一途を辿ると期待されている。それでも太陽電池の発電コストは依然として高いのが現状であり、さらなるコスト削減策が求められている。従って、安価で高性能なシリコン単結晶基板製造方法の確立は極めて重要な課題であり、本研究開発の成果はこのようなニーズに合致したものである。

従来のCZ法もしくはキャスト法は一方向凝固法と呼ばれる方法に属しており、これらの方法でリンを添加した結晶を育成するとリンの分配係数は0.35であり、得られた単結晶中のリン濃度は成長に伴って急激に変化するため、最適なリン濃度（比抵抗値）品のみを使用すると製品の歩留まりが低く、製造コストが極めて高額となる。そこで製造コストを下げるために比抵抗値範囲を広げて使用しているのが現状である。さらには使用する石英ルツボから固溶する酸化ケイ素による影響（酸素析出、酸化励起積層欠陥）や結晶中に内在する結晶欠陥（COP、転位）により性能劣化を招いているのが現状である。他方、高周波FZ法では原理的には均質組成の単結晶を育成可能であるが、特別に調整された高価なポリシリコン原料棒が必要であり、コスト的に安価に製造することは困難である。

本研究開発において大型赤外線単結晶製造装置で育成された直径130mmの単結晶では、現在までに得られている比抵抗値、ライフタイム値、転位、結晶欠陥、酸素および炭素成分濃度は目標値を大幅に超過達成しており、本赤外線FZ法で現状のCZ法、ならびに一方向凝固法の結晶が抱える問題を解決できる高品質単結晶が製造可能であることが実証された。

また、本赤外線FZ法ではルツボなどの消耗品が不要であり、必要電力量も半分以下と推定されるので、製造コストは大幅に低くなる上に最適組成で均質組成の高品質単結晶が製造可能であることが実証された。従って、従来法よりも遥かに高品質品を安価に製造、販売することが可能であり実用化の可能性は極めて高い。

なお、現在までに育成できているN型シリコン単結晶は直径が130mmに止まっているが、本研究開発では直径220mmの大口径化に対する技術的な課題はクリアにされており、赤外線の照射方向、分布制御などの要素技術を最適化することにより大口径化の達成、及び実用化は可能であると確信している。また、並行して開発を進めている粒状多結晶シリコンによる新たな原料供給法に関しても、基礎的な育成技術も確立し、実用化に向け特許を含めた戦略的な構築も進み、本新規技術の実用化の目途が立つまでに至った。即ち、大口径化シリコン単結晶育成方法としての粒状多結晶シリコン供給法の有用性が証明され、今後の実用化と更なる大口径化が可能となった。

3. 波及効果

シリコンは多くの単結晶材料の中でも最も市場規模の大きい素材であり太陽電池産業以外にもLSI用、パワー半導体用など多岐な分野において多用されている。他に光通信分野、医療機器分野、など多くの産業分野でさまざまな単結晶材料が利用されているが主な製法は引上法（CZ法）である。しかしシリコン単結晶育成の例でも示したように引上法はルツボを使用して一方向凝固法により単結晶を得る方法であるため、ルツボから不純物が製品中に混入してしまう他、添加物濃度を均質にできない本源的な欠点がある。

赤外線FZ法はルツボを使用しないために安価に高純度の単結晶製造が可能であり、かつ添加物濃度を最適組成で均質化できる方法であるが、従来は育成可能な最大直径がせいぜい30mm程度とされていた。本研究開発では、すでに直径130mm品の合成に成功しており、更には新たな原料供給手段となる粒状原料供給方式の技術確立も進めており、直径220mm品の合成法もまもなく確立されると予測される。このことは、シリコン以外の多くの単結晶材料製造法への適用が可能となることであり、極めて大きな波及効果が期待される。

4. 今後の展開

本赤外線 FZ 法は世界的にも全く新しい大型単結晶製造法であり、基本特許は株式会社クリスタルシステムが国内外において取得している（日本、米国、ヨーロッパ、中国、韓国）。それでも基本特許以外に多くのノウハウを内包しており、知的所有権の海外への流出を抑止するためにも当面は装置の外販を行わず、シリコン単結晶材料のみの製造、販売を想定している。

尚、事業化に際しては製造工場の新設のみではなく、既存の半導体工場を活用して早期の生産規模拡大を図ることも検討する。

さらには本研究開発事業で開発した大型赤外線 FZ 法は太陽電池産業以外のシリコン市況、具体的にはパワー半導体、センサー、MEMS 業界への進出も可能であるとともに、シリコン以外の光材料、蛍光体材料などの単結晶製造にも最適な方法でありこれらの産業への普及についても積極的に推進していく。

5. 特許論文リスト

	2015 年度	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	0 (0)	2 (0)	2 (2)	2 (2)	0 (0)	6 (4)
論文	0	0	0	0	0	0
研究発表・講演 (うち国際会議)	0 (0)	1 (0)	1 (0)	1 (0)	0 (0)	3 (0)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0	0	0
その他	0	0	0	0	0	0

(2020 年 08 月 31 日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	(株)クリスタルシステム	特願2016-128546	国内	2016年6月29日	国内優先 みなし取 下げ	単結晶製造装置および単結晶製造方法	進藤勇
2	(株)クリスタルシステム	特願 2016-148306	海外	2016年7月28日	国内優先 みなし取 下げ	単結晶製造装置	進藤勇
3	(株)クリスタルシステム	PCT/JP2017/20227	海外	2017年5月31日	審査中	単結晶製造装置および単結晶製造方法	進藤勇
4	(株)クリスタルシステム	PCT/JP2017/20228	海外	2017年5月31日	審査中	単結晶製造装置	進藤勇
5	(株)クリスタルシステム	PCT/JP2018/13162	海外	2018年3月29日	審査中	単結晶製造装置および単結晶製造方法	進藤勇
6	(株)クリスタルシステム	PCT/JP2018/13163	海外	2018年3月29日	審査中	単結晶製造装置および単結晶製造方法	進藤勇

【論文】

なし

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	佐藤剛, 仁田原智	(株)クリスタルシステム	赤外線 FZ 法による高品質低コストシリコン単結晶の開発	口頭発表、ポスター発表 (2016 年度 NEDO 新エネルギー成果報告会)	2016 年 10 月 31 日
2	佐藤剛	(株)クリスタルシステム	赤外線 FZ 法による高品質低コストシリコン単結晶の開発	口頭発表、ポスター発表 (2017 年度 NEDO 新エネルギー成果報告会)	2017 年 9 月 22 日
3	仁田原智 佐藤剛	(株)クリスタルシステム	赤外線 FZ 法による高品質低コストシリコン単結晶の開発	口頭発表、ポスター発表 (2018 年度 NEDO 新エネルギー成果報告会)	2018 年 10 月 4 日

【新聞・雑誌等への掲載】

なし

【その他】

なし

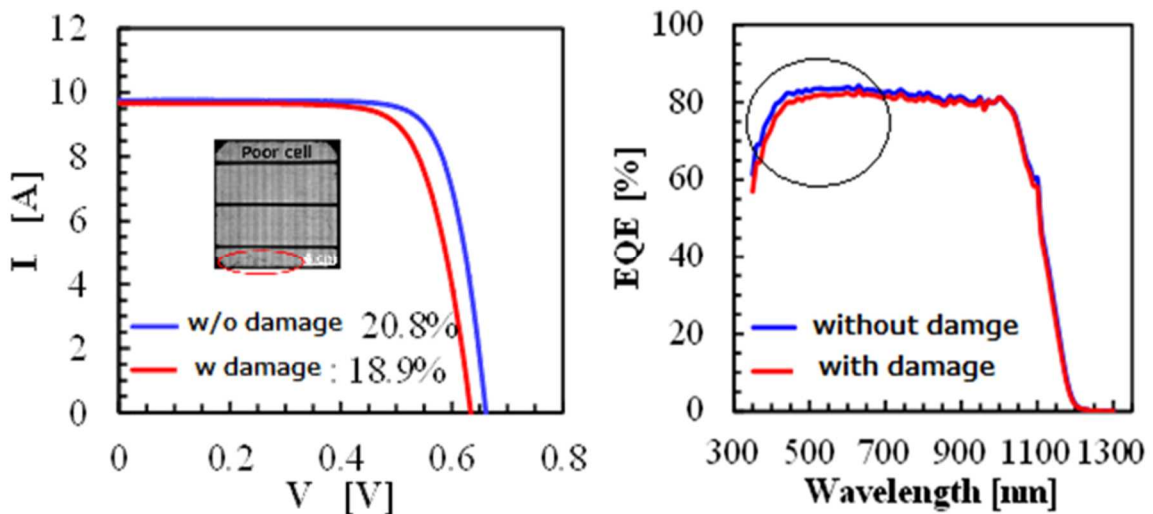
F 高発電効率・低コスト太陽電池スライスプロセスの加工技術構築（コマツ NTC 株式会社）

1. 成果詳細

(1) 結晶シリコン太陽電池の発電効率向上（目標：セル効率 25%以上）

(1) - 1. 太陽電池セル変換効率への影響

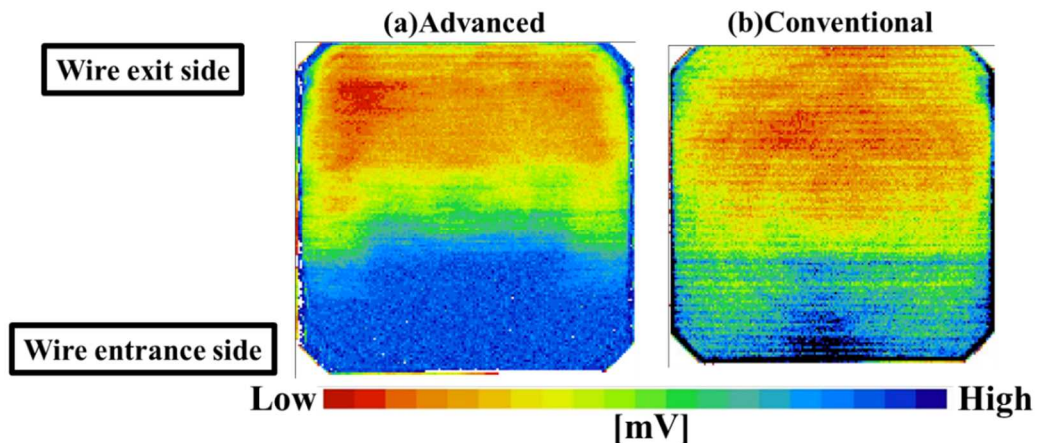
連携先である豊田工業大学の太陽電池セル試作品において、発電効率の異なる太陽電池セルが確認された。この発電効率の悪化原因について、連携大学である明治大学および豊田工業大学とともに解析した。その結果、外部量子効率での短波長側での効率が低下していることがわかった。また、分光感度マッピングやPLイメージングでの可視化により、ウェハスライスプロセスにて生じるダメージやソーマーク、形状不良などのマクロ/マイクロ両視点での問題であることを確認できた。そのほか、一部の不良については、ウェハスライスプロセス前後工程での問題であることも確認し、これらの解決するスライス条件を構築した。（図Ⅲ-2-(イ)-F-1 参照）



図Ⅲ-2-(イ)-F-1 試作セルの太陽電池特性（左図：I-V 特性 右図：外部量子効率）

(1) - 2. ウェハ表面の結晶状態

面状態の大きく異なる試料に対し、 μ -PCR 法により面内のダメージの分布を評価するとともに、ラマン分光法による結晶評価を実施した。なお、 μ -PCR 測定において、励起光源の波長、マッピングサイズをそれぞれ 349 nm、1 mm とし、マイクロ波の反射光のピーク値をマッピングした。図Ⅲ-2-(イ)-F-2 に μ -PCR 法によって得られたマイクロ波反射光のピーク値のマップを示す。マップから、ダメージが改良された高面品位 (Advanced) と低面品位 (Conventional) の試料で異なることがわかり、高面品位の優位性が確認された。



図Ⅲ-2-(イ)-F-2 μ -PCR 法マッピング結果

(1) - 3. スライスダメージ評価

スライスプロセスで生じる表面のダメージが生じると、キャリアライフタイムへ影響を及ぼし、太陽電池性能の低下が懸念される。一般的には、太陽電池セル製造工程で、ダメージ層を除去するエッチングが採用されているが、このエッチング量の過不足によって、太陽電池性能への悪影響や製造コストが嵩むことにつながる。準備した面品位の異なる試料を国立研究開発法人産業技術総合研究所へ展開し、スライス条件の違いにおけるウェハ表面に対するダメージ評価を、マイノリティキャリアライフタイム (MCLT) がシリコン結晶状態まで回復する率を表面からのエッチング除去量で測定した。その結果を図 III-2-(イ)-F-3 に示す。高面品位のウェハは、片面 3 μm の除去量でほぼ MCLT は回復し、低面品位のものは 12 μm のダメージ層を除去しなければならず、高面品位スライス技術の優位性によりエッチング量の低減が可能となるものと考えられる。

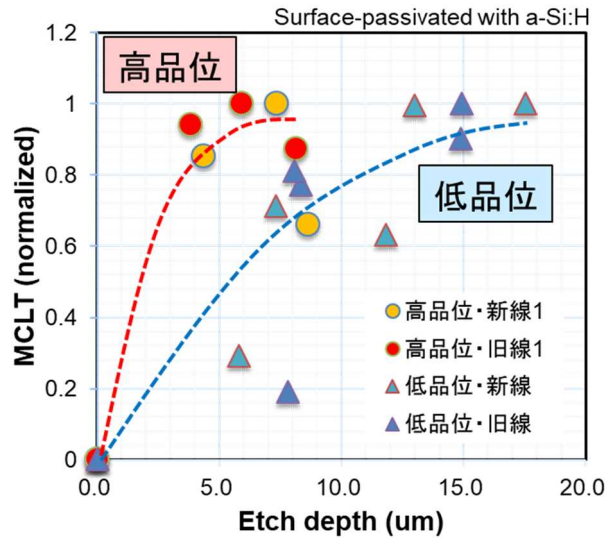


図 III-2-(イ)-F-3 ダメージエッチング除去量とマイノリティキャリアライフタイム (MCLT) 回復率

(1) - 4. 薄型結晶シリコン太陽電池の試作評価

薄板基板による太陽電池性能への影響は、国立研究開発法人産業技術総合研究所に協力いただき、厚さ 40 μm から 400 μm までの SHJ 型太陽電池の試作評価および改善検討により、薄板太陽電池の課題と品質指針を実験的に求めた。その結果を図 III-2-(イ)-F-4 に示す。厚さ 50 μm 級の超薄型セルとしては世界トップレベルの値となる発電効率 22.2%を確認した (厚さ 55 μm にて)。しかし J_{sc} および FF の低下が厚さ 80 μm 以下で顕著に低下し、発電効率を制限する結果となった。この効率低下は、各種シミュレーションの結果、TCO における寄生吸収削減と表面パッシベーション向上が必要であると判断された。

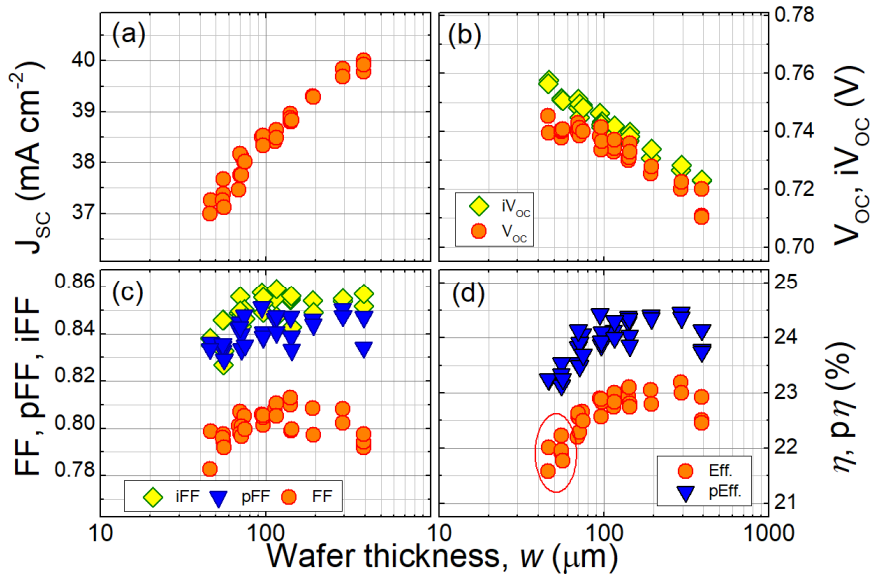
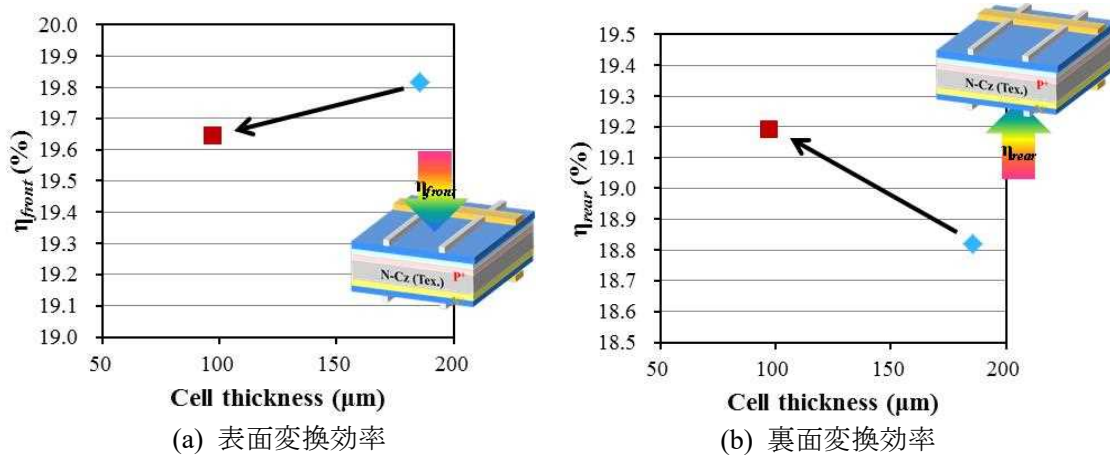


図 III-2-(イ)-F-4 小サイズ SHJ 太陽電池セル性能の厚さ依存性結果まとめ

(1) - 5. 156mm角極薄N型Bifacial PERTセル試作評価

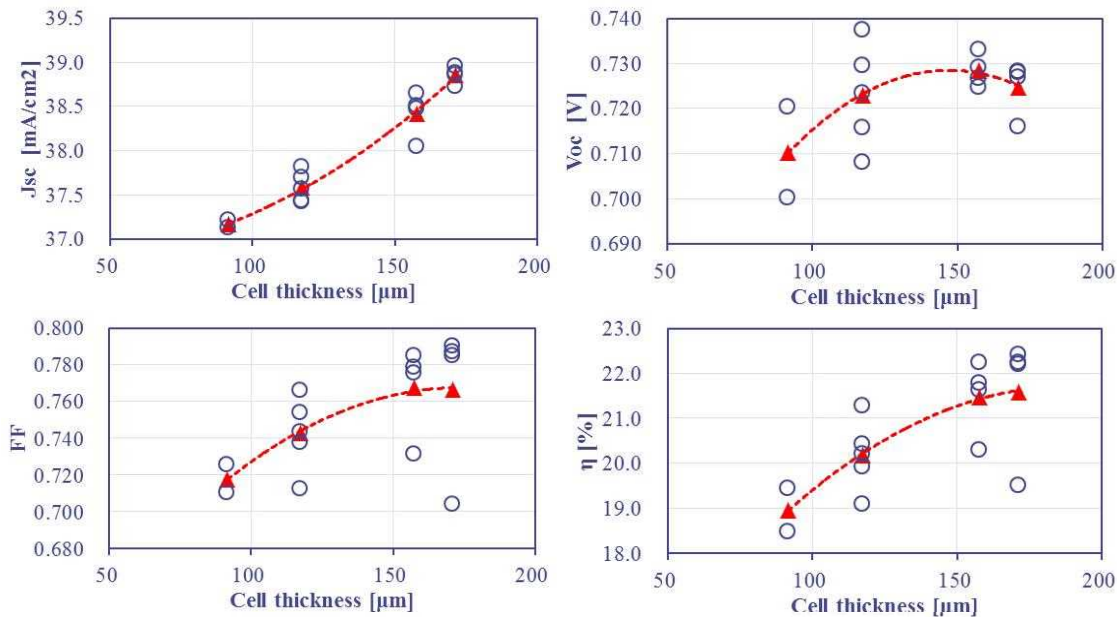
ワイヤソーを使って切り出した極薄ウェハを用いてN型Bifacial PERTセルを試作した結果を図III-2-(イ)-F-5に示す。この実験においては、セル厚を186 μm から97 μm に薄型化した場合、 η_{front} は若干低下するのに対して η_{rear} は向上していることが確認できた。したがって、セル厚低減に伴って裏面効率が向上する傾向にあることが確認できた。このようにセル厚低減に伴って裏面効率が向上するとすれば、N型Bifacialセルを使った両面受光モジュールにおいてウェハを薄型化することは単にモジュールコストを低減するだけでなく、発電量を向上させる効果があることになり、発電コスト低減に大きく寄与することになる。このような知見が得られたことは大きな成果と言える。



図III-2-(イ)-F-5 ワイヤソーにより薄型化したN型Bifacial PERTセルのセル厚に対する効率依存性

(1) - 6. 156mm角極薄SHJセル試作評価

上記の拡散系セルに加え、薄型スライスウェハを使ったSHJセル試作も行い、セル厚とセル特性の関係进行调查した。その結果、117 μm 厚セルで V_{oc} 0.737V、91 μm 厚セルで効率19.4%を確認し、さらに最薄で66 μm 厚セル試作にも成功した。図III-2-(イ)-F-6に示したように J_{sc} 、 V_{oc} はセル厚が薄くなるにしたがって低下する傾向が見られた。 V_{oc} はセル厚低減に伴って最高値は上昇する傾向がみられるもののがらつきが大きくなる。これらの変化を総合した結果、ウェハ薄型化に伴って効率は低下した。



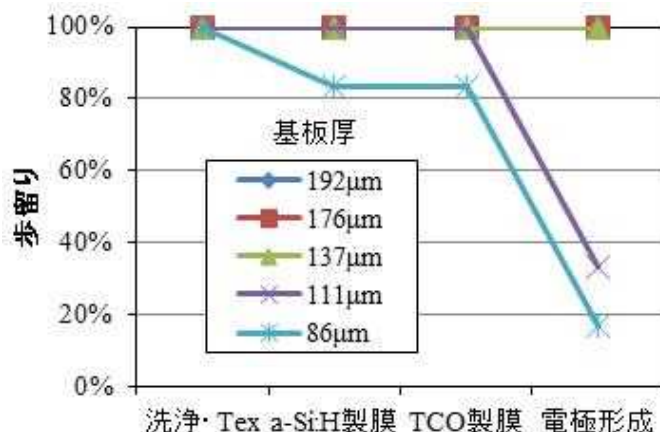
図III-2-(イ)-F-6 SHJセル特性のセル厚依存性

また、上記のセル試作における割れ歩留りが基板厚さによってどのような影響を受けるか、調査した。図Ⅲ-2-(イ)-F-7は工程毎の歩留りを示しているが、137 μm 厚までは100%であった歩留りが111 μm 厚では電極形成工程（搬送・検査を含む）で大幅に低下し、さらに86 μm 厚ではアモルファス製膜工程でも割れが発生していることがわかる。

電極形成工程で発生した割れの原因をさらに細かく分析したところ、

- ・手作業での搬送割れが発生。外周クラックの影響も確認。
- ・工程装置の薄板化対応必要。印刷機ガイド、吸着板平坦度、バキューム穴サイズ、IV測定器の電圧測定ピン、搬送（ベルト・チェーン）などの調整が必要。
- ・電極印刷パラメータ（スキージ速度や圧力、角等度）の最適化が必要。

などの課題が明らかとなった。したがって100 μm 以下の極薄基板を使ってセル生産を行う場合、スライダダメージ（クラック）の低減とセル製造装置の技術開発も必要であることを確認した。

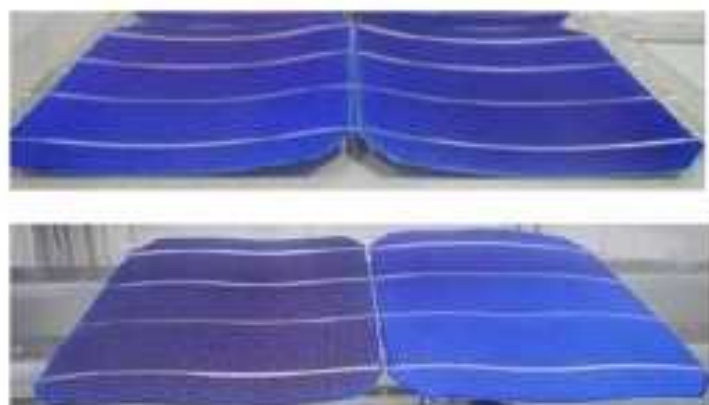


図Ⅲ-2-(イ)-F-7 SHJセル工程毎歩留りの基板厚による影響

(1) - 7. 薄型結晶シリコン太陽電池モジュール試作

薄板基板を用いた太陽電池モジュールの試作は、国立研究開発法人産業技術総合研究所福島再生可能エネルギー研究所（FREA）に協力頂き評価した。その結果、厚さ80 μm のP型両面受光セル製作時に搬送系で半数以上のセルが割れ、歩留まりが悪化した。

また、両面強化ガラスのモジュール試作を行ったが、タブストリング作成時や導電性フィルム接続時において、太陽電池基板の反りが確認された（図Ⅲ-2-(イ)-F-8参照）。フィルム加圧条件の最適化などの課題が明確となった。



図Ⅲ-2-(イ)-F-8 タブストリング作成時のセル反り

(2) シリコン材料歩留まり向上技術 (目標：切断ピッチ 0.110mm)

(2) - 1. 固定砥粒ワイヤの細線化によるカーフロス削減

スライス時の切り代 (カーフロス) を極小化する固定砥粒ワイヤの細線化を行うことで、結晶の材料歩留まりが向上する。この極細線固定砥粒ワイヤを使用したスライスにおいて、開発当初はワイヤの切断軌跡が蛇行し、隣り合うウェハを切り落とした結果、ワイヤが加工中に破断してしまう加工不良が多発した。そのため、固定砥粒ワイヤのダイヤモンド砥粒径や集中度、ワイヤに砥粒を付着させる Ni メッキ厚さなどを調整するとともに、使用するクーラントの探索や供給方法、またスライス条件 (ワーク送り速度およびワイヤ走行条件) などの条件探索を繰り返した。その結果、中間目標および最終目標で掲げたカーフロス下においても、市場要求のウェハスライス精度を満足する結果が得られた (図 III-2-(イ)-F-9 参照)。

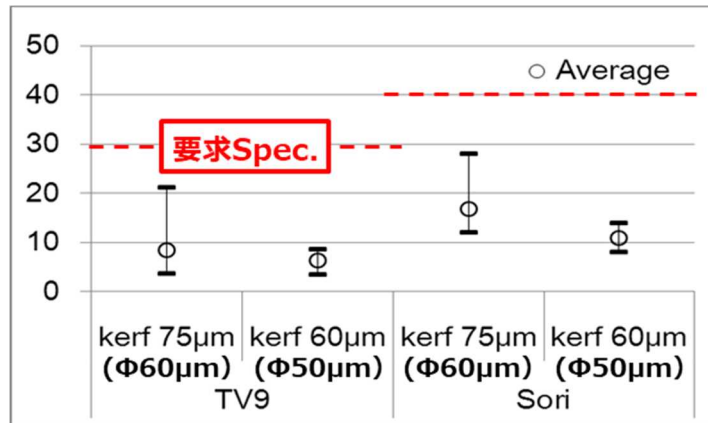


図 III-2-(イ)-F-9 目標カーフロス下におけるウェハ切断精度結果

また、更なる固定砥粒ワイヤの細線化を狙い、芯線径 $\phi 40\mu\text{m}$ での切断試験も実施した。そのワイヤでの切断では、実カーフロスは図 III-2-(イ)-F-10 のように約 $50\mu\text{m}$ であり、よりシリコン材料の高歩留まり化に寄与できる。ウェハ品質については図 III-2-(イ)-F-11 のように厚さばらつきを示す TV9 やそのり最大の値は、図 III-2-(イ)-F-9 に示した精度と比較すると悪化しているが、本プロジェクトの最終目標であったカーフロス $60\mu\text{m}$ を大幅に削減できる成果が得られた。

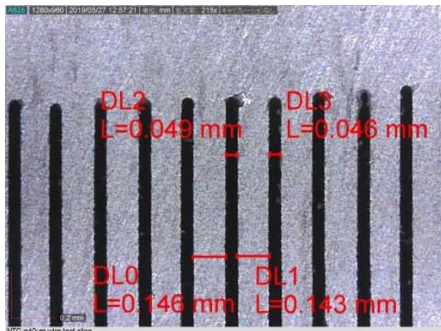


図 III-2-(イ)-F-10 カーフロス $50\mu\text{m}$ 切断面

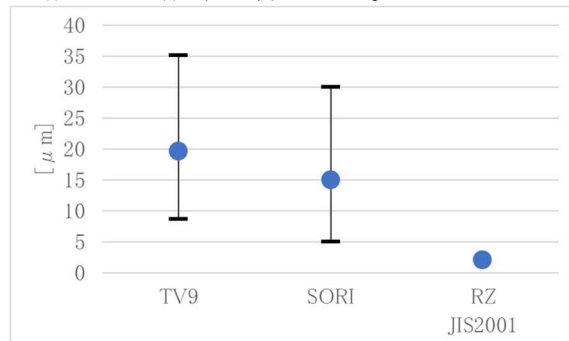


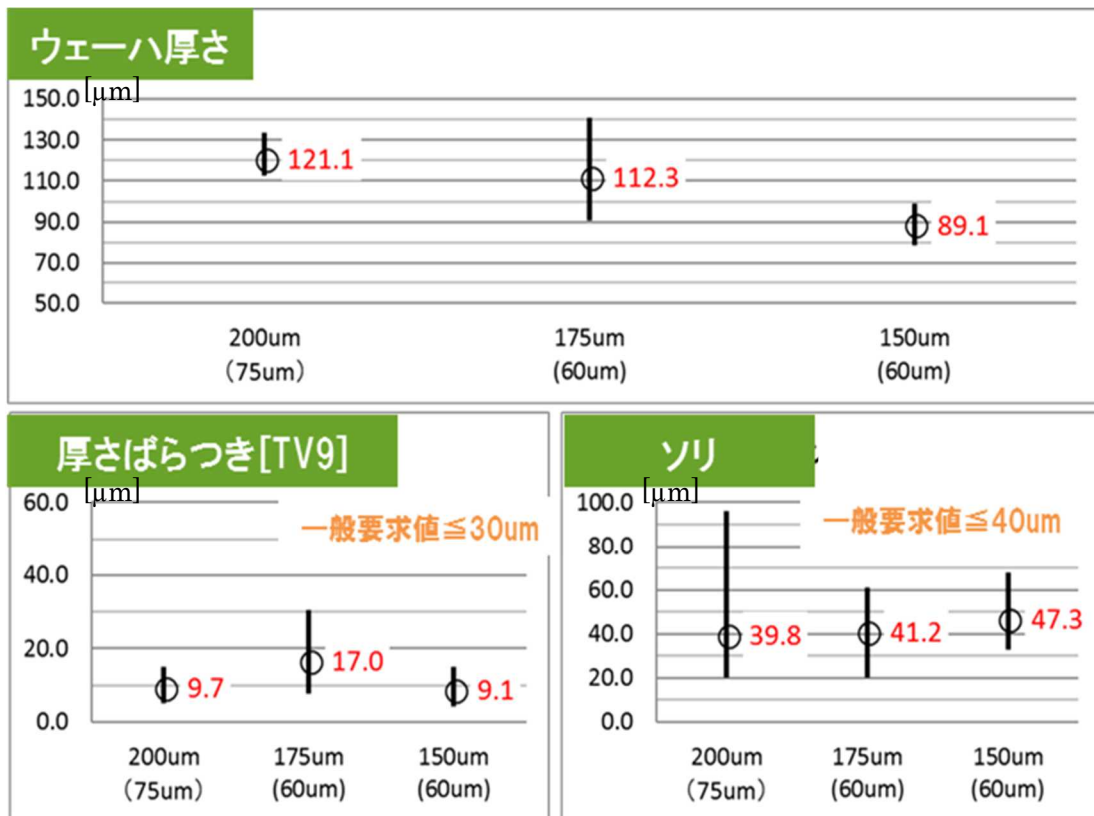
図 III-2-(イ)-F-11 カーフロス $50\mu\text{m}$ 切断精度結果

(2) - 2. 狭切断ピッチスライスによる材料歩留まり向上およびウェハ薄板化

結晶シリコン太陽電池のシリコン材料コストを削減するには、切断ピッチの狭小化によりシリコンインゴットからの基板取得枚数の増加させる必要がある。すなわち、スライス時の切り代 (カーフロス) を極小化と、基板となるシリコンウェハ薄板化が必須となる。

切断ピッチの狭小化については、ワイヤソー主要部品であるメインローラに狭いピッチを形成し、ワイヤの切断ピッチを狭小化させる必要がある。この狭ピッチ溝形成技術において、ピッチ 0.110mm までの溝形成が可能となる技術を構築した。

図 III-2-(イ)-F-12 に、狭切断ピッチスライス技術の切断精度結果を示す。狭ピッチスライス技術においては、切断時の真直性を保つためにワイヤ仕様やスライス条件の最適化を図った。その結果、最終目標には未達となったが、切断ピッチが 0.150mm までの加工技術を構築した。また、その条件で切り出されるウェハ厚さは約 $90\mu\text{m}$ であった。



図III-2-(イ)-F-12 狭切断ピッチスライス技術の切断精度例

(3) スライス製造コスト削減および発電コスト低減効果

(3) - 1. 開発成果による発電コスト低減効果

これまで、スライスプロセスにおける細線化による省カーフロスおよび狭切断ピッチによる薄板化にてシリコン材料の使用量削減や、固定砥粒ワイヤの使用量削減に代表されるスライスコストの削減についての成果を述べてきた。本研究では、固定砥粒ワイヤの使用量削減や加工速度の高速化を推進し、スライスプロセスにおけるシリコン原材料を除く製造コストは、12.5 円/枚と大幅なコスト削減を達成した。

その製造コスト削減に対する発電コストの低減効果を 2015 年の発電コストを基本に算出した。それぞれの発電コスト低減値は、省カーフロスで 0.43 円/kWh、狭切断ピッチで 0.38 円/kWh、スライスコスト削減で 0.52 円/kWh となり、開発成果を合計すると、1.33 円/kWh の低減に寄与することがわかった。

また、シリコン市場取引価格は、単結晶ウェハで 47.9 円/枚 (2020 年 1 月) となっている。そのウェハ単価において、シリコン材料費のほか、変動費および固定費の割合を中国大手スライスメーカーに聞き取り調査した。その結果を基に、本研究開発成果の効果を試算した結果、ウェハ単価は 32.5 円/枚まで削減できることが分かった。

(3) - 2. 将来技術予測による低減シナリオ

一方、太陽光発電における発電コストは大量導入にともない、モジュール価格の低下のほかにも、BOS コストが低減されているものと推察できる。また、設備利用率も向上しており、日本国内の推定発電コストはメガソーラなどの非住宅用において、2020 年で既に 14 円/kWh を下回っているものと推察される。この発電コスト下におけるスライスプロセスでの狭切断ピッチの開発成果を織り込んだ発電コスト低減効果は、0.22 円/kWh となる。

また、これまで NEDO が取り組んだ結晶シリコン太陽電池の各研究成果を鑑みると、太陽電池セルおよびモジュール効率の向上や長寿命化が大いに期待できる。その成果が量産展開されると、2025 年に発電コストは 7 円/kWh を下回る 6.69 円/kWh となり、ジェネレーションパリティを達成できるものと見込む。

2. 実用化・事業化見通し

当社は、2009年以降より固定砥粒用マルチワイヤソーを商品化し、市場ポジションを確立してきたが、後進メーカーの廉価版ワイヤソー市場投入により価格競争に晒され、急激にシェアを奪われつつある。本開発によって得られた極細固定砥粒ワイヤ加工技術は、優位性を確保したものと考えられる。また、連携先と実施した技術開発である発電効率向上加工技術や薄板加工技術による太陽電池試作実績は、到底後進メーカーが達成できない技術と位置づけることができ、廉価版ワイヤソーとの差別化が可能な新機種投入を計画中であり、シェア奪還を狙う。

3. 波及効果

結晶シリコン太陽電池のスライスプロセスに必要な固定砥粒ワイヤにおいても、これまで日本国産ワイヤが圧倒的なシェアを有していた。しかし、現在ではワイヤソー同様に廉価版ワイヤが市場投入されており、そのシェアを徐々に奪われつつある。本開発は、ワイヤ仕様の最適化も加工技術の構築の一環として行っており、国内ワイヤメーカーの技術力向上とマーケットシェア確保を担っている。

また、これまで量産化への移行が進まなかった超薄型結晶シリコン太陽電池の実現においても、アカデミアとの連携により明らかにしてきたことで、実現できることが示唆できている。その具現化においては、搬送などの付帯技術も改善が必須であり、産業の活性化につながる。

しいては、得られた薄板太陽電池基板の特徴である抗折強度向上による3D湾曲対応や軽量化は、移動体や強度の弱い屋根への需要が見込まれる新用途への展開が可能で、太陽光発電の市場開拓に繋がることが期待される。

4. 今後の展開

本研究開発にて低コストシリコンウェハのスライス加工を実現し、この構築した技術の一部は量産加工に適用され、結晶シリコン太陽電池の製造コスト削減に貢献してきた。また、超薄型結晶シリコン太陽電池の基盤技術開発をプロジェクト体制により推進したことで、更なる発電コスト低減に向けた課題や施策を示した。

この成果により、発電コストの目標7円/kWh(2025年)の実現に資する要素技術を確認することができた。本成果で提示した課題を解決し、実用化に向けた量産化開発を推進していく必要がある。また、更なる発電コスト低減に向け、シリコンウェハの大口径化などが検討されており、スライスプロセスはより高難度化するが、本研究開発で得られた成果を適応させ、導入量拡大を推進していく。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	0	2 (2)	0	0	0	2 (2)
論文	0	0	0	1	0	1
研究発表・講演 (うち国際会議)	1 (1)	4 (2)	9 (6)	2 (1)	3 (2)	19 (12)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0	0	0
その他	0	0	0	0	0	0

(2020年08月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	コマツNTC株式会社	特願 2017-013394	国内 および 中国	2017/1/27	公開	ワイヤソー及びワイヤソーによるワークの切断加工方法	河津知之 他
2	コマツNTC株式会社	特願 2017-045111	国内 および 中国	2017/3/9	公開 中国登録	ワイヤソー及びワイヤソーによるワークの切断加工方法	河津知之 他

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	Hitoshi Sai ^{1,2} , Hiroshi Umishio ^{1,3} , Takuya Matsui ^{1,2} , Shota Nunomura ^{1,2} , Tomoyuki Kawatasu ⁴ , Hidetaka Takato ² , and Koji Matsubara ^{1,2}	1 産総研(太陽光) 2 産総研(FREA) 3 筑波大 4 コマツ NTC	Impact of silicon wafer thickness on photovoltaic performance of crystalline silicon heterojunction solar cells	Japanese Journal of Applied Physics 57, 08RB10	有	2018年7月3日

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	K. Nakamura ¹ , A. Tanizaki ² , K. Okamoto ³ , Y. Kawamoto ⁴ , Y. Ohshita ⁵	1 Meiji University 2 Komatsu NTC Ltd. 3 Mitsuboshi Diamond Industrial Co., Ltd. 4 Noritake Co., Ltd. 5 Toyota Technological Institute	Mono Crystalline Si PERC using Less Than 100 μm-thick Wafer by MWS Slicing	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-25)	2015年11月20日
2	鈴木 涼太 ¹ 小島 拓人 ¹ 木下 晃輔 ¹ 河津 知之 ² 中村 京太郎 ¹ 大下 祥雄 ³ 小椋 厚志 ¹	1 明治大理工 2 コマツ NTC 株式会社 3 豊田工大	PL イメージングを用いた結晶シリコン太陽電池のスライスダメージ評価	第77回応用物理学会秋季学術講演会(朱鷺メッセ)	2016年9月15日

3	鈴木 涼太 ¹ 小島 拓人 ¹ 木下 晃輔 ¹ 河津 知之 ² 中村 京太郎 ¹ 大下 祥雄 ³ 小椋 厚志 ¹	1 明治大理工 2 コマツ NTC 株 式会社 3 豊田工大	Evaluation of Saw Damages with Diamond-Coated Wire in Crystalline Silicon Solar Cell by Photoluminescence Imaging	PVSEC-26, Singapore	2016 年 10 月 26 日
4	Kyotaro Nakamura ¹ , Tomoyuki Kawatsu ² , Kazuo Muramatsu ³ and Yoshio Ohshita ⁴	1 Meiji University, 2 Komatsu NTC Ltd., 3 NAMICS CORPORATION, 4 Toyota Technological Institute	P-type Bi-facial PERT Solar Cell using Less Than 100 μ m thick CZ Wafer and Cu Paste	PVSEC-26, Singapore	2016 年 10 月 27 日
5	齋均 ¹ , 海汐寛史 ¹ , 布村正太 ¹ , 松井卓矢 ¹ , 河津知之 ² , 高遠秀尚 ¹ , 松原浩司 ¹	1 産総研, 2 コマツ NTC	極薄ウェハを用いた a-Si:H/c- Si ヘテロ接合太陽電池の検討	第 64 回応用物理学会春 季学術講演会	2017 年 3 月 17 日
6	Yoshio Ohshita ¹ , Takuto Kojima ² , Ryota Suzuki ² , Kosuke Kinoshita ² , Tomoyuki Kawatsu ³ , Kyotaro Nakamura ² , and Atsushi Ogura ²	1 Toyota Technological Institute, 2 Meiji University, 3 Komatsu NTC Ltd.	High quality and thin silicon wafer for next generation solar cells	The 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC44)	2017 年 6 月 25 日
7	H. Sai ¹ , H. Umishio ¹ , T. Matsui ¹ , S. Nunomura ¹ , H. Takato ¹ , T. Kawatsu ² , and K. Matsubara ¹	1 産総研, 2 コマツ NTC	Potential of a a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells with very thin wafers	IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-44)	2017 年 6 月 28 日
8	Yoshio Ohshita ¹ , Takuto Kojima ² , Ryota Suzuki ² , Kosuke Kinoshita ² , Tomoyuki Kawatsu ³ , Kyotaro Nakamura ² , Atsushi Ogura ²	1 Toyota Technological Institute, 2 Meiji University, 3 Komatsu NTC Ltd.	High quality and thin silicon wafer for next generation solar cells	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-44), June 25-30, 2017, Washington D.C, U. S.	2017 年 6 月 29 日
9	河津 知之、 長井 俊樹、 溝口 由佳、 野田 大輔	コマツ NTC 株 式会社	結晶シリコン太陽電池の発電 コスト低減スライシング技術	学振 175 委員会 第 14 回「次世代の太陽光発 電システム」シンポジ ウム	2017 年 7 月 21 日

10	齋均 ¹ 海汐寛史 ¹ 松井卓矢 ¹ 布村正太 ¹ 河津知之 ² 高遠秀尚 ¹ 松原浩司 ¹	1 産総研 2 コマツ NTC	極薄ウェハを用いた a-Si:H/c-Si ヘテロ接合太陽電池の検討 (2)	2017 年 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会	2017 年 9 月 6 日
11	Y. Ohshita ¹ , T. Kojima, T. Kawatsu ³ , K. Kinoshita, K. Nakamura ¹ , A. Ogura ²	1 Toyota Technological Institute, 2 Meiji University, 3 Komatsu NTC Ltd.	Low Kerf Loss (<100 μm) High Quality Silicon Wafer Fabricated by Advanced Diamond Wire Saw	EU PVSEC 2017, Amsterdam	2017 年 9 月 25 日
12	Tomoyuki Kawatsu ¹ , Yoshio Ohshita ² , Kyotaro Nakamura ³ and Atsushi Ogura ³	1 Komatsu NTC Ltd. 2 Toyota Technological Institute 3 Meiji University	THIN WAFER AND LOW KERF-LOSS DIAMOND MULTI-WIRE SAW	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27)	2017 年 11 月 14 日
13	齋均 ¹ 松井卓矢 ¹ 布村正太 ¹ 海汐寛史 ¹ 河津知之 ² 高遠秀尚 ¹ 松原浩司 ¹	1 産総研 2 コマツ NTC	自立・超薄型ウェハによる高効率結晶シリコン太陽電池の実現に向けて	第 65 回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)	2018 年 3 月 17 日
14	齋均 ¹ 松井卓矢 ¹ 布村正太 ¹ 河津知之 ² 高遠秀尚 ¹ 松原浩司 ¹	1 産総研 2 コマツ NTC	Impact of wafer thickness on the photovoltaic performance in a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells	8th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics (Silicon PV 2018)	2018 年 3 月 19 日
15	Kyotaro Nakamura ¹ , Tomoyuki Kawatsu ² , Takefumi Kamioka ³ , and Yoshio Ohshita ¹	1 Toyota Technological Institute 2 Komatsu NTC Ltd. 3 Meiji University	Performance Improvement of Front Junction N-type PERT Solar Cell by Wafer Thinning	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7)	2018 年 6 月 12 日
16	原豊 ¹ 横川凌 ^{1,5} 大西康平 ¹ 神岡武文 ¹ 中村京太郎 ² 大下祥雄 ² 河津知之 ³ 長井俊樹 ³ 山田昇 ⁴ 宮下幸雄 ⁴ 小椋厚志 ^{1,6}	1 明治大理工 2 豊田工大 3 コマツ NTC 4 長岡技大 5 学振 DC 6 再生可能エネルギー研究インスティテュート	単結晶 Si 太陽電池の薄型化へ向けたスライスダメージ評価	第 67 回応用物理学会春季学術講演会	2019 年 3 月 13 日
17	N. Yamada ¹ , K. Onishi ² , R. Yokogawa ² , T. Nishihara ² , T. Kamioka ² , K. Nakamura ³ , T. Kawatsu ⁴ ,	1 Nagaoka University of Technology 2 Meiji University 3 Toyota Technological	Characterization of bendable crystalline Si solar cells made by ultra-thin wafer slicing	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-29)	2019 年 11 月 4 日

	T. Nagai ⁴ , Y. Kotake ¹ , Y. Miyashita ¹ , Y. Ohshita ³ , A. Ogura ²	Institute 4 Komatsu NTC Ltd.			
18	小竹 裕也 ¹ , 長井 俊樹 ² , 河津 知之 ² , 小椋 厚志 ³ , 大下 祥雄 ⁴ , 宮下 幸雄 ¹ , 山田 昇 ¹	1 長岡技科大 2 コマツ NTC 3 明治大学 4 豊田工業大 学	マルチワイヤソーで切断され た薄型単結晶 Si ウェハの機械 特性評価	日本機械学会 [No. 207- 1] 北陸信越支部 第 57 期総会・講演会	2020 年 3 月 7 日
19	Yutaka Hara ¹ , Kohei Onishi ¹ , Ryo Yokogawa ^{1,2} , Tappei Nishihara ¹ , Takefumi Kamioka ¹ , Kyotaro Nakamura ³ , Yoshio Ohshita ³ , Tomoyuki Kawatsu ⁴ , Toshiki Nagai ⁴ , Noboru Yamada ⁵ , Yukio Miyashita ⁵ , and Atsushi Ogura ^{1,6}	1 Meiji University 2 JSPS Research Fellow DC 3 Toyota Technological Institute 4 Komatsu NTC 5 Nagaoka University of Technology 6 Meiji Renewable Energy Laboratory	Evaluation of Sawing Damage for Thin Flexible Silicon Solar Cells	IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-47)	2020 年 6 月 15 日

【新聞・雑誌等への掲載】

なし

【その他】

なし

G 太陽電池用原料品質の最適化及び結晶欠陥の評価技術の開発・制御（株式会社トクヤマ）

1. 成果詳細

1-1. 不純物および欠陥の影響把握と制御化

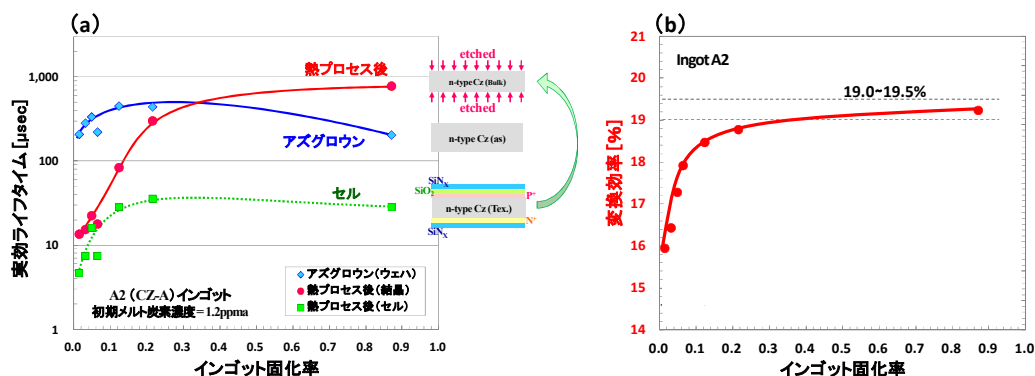
金属および炭素不純物の太陽電池セル性能に及ぼす影響を調べるため、不純物濃度を変えた単結晶インゴットを引上げ、ウェハスライス加工、太陽電池セル（平均変換効率が 19.5%の両面受光型セル）の試作を行ない、セル特性を評価した。また、太陽電池セル製造のプロセス中でシリコン基板（ウェハ）の品質がどのように変化していくのかをライフタイム測定により評価した。さらに、太陽電池性能を低下させるキラ欠陥を特定・解析するため、透過電子顕微鏡等による観察を実施した。

単結晶インゴットは、チョクラルスキー（CZ）法で直径 8~9 インチ、全長 1500~2000mm、実用サイズの n 型単結晶を引上げた。図Ⅲ-2-(イ)-G-1 にインゴットの外観を示す。ドーパントにはリンを添加し、インゴットのトップからボトムまでの比抵抗が 3.1~0.7 $\Omega \cdot \text{cm}$ （リン濃度 27~118ppba）となるように調整した。引上げ条件は従来技術（CZ-A）と本研究開発の成果である開発技術（CZ-B）の 2 種を採用した。



図Ⅲ-2-(イ)-G-1 引上げた単結晶インゴット

図Ⅲ-2-(イ)-G-2(a)に、一般的な太陽電池用インゴット（後述の A2）の全長のライフタイム変化、アズグロウン結晶（アズスライスウェハ）、太陽電池セル、熱プロセス後の結晶バルク（太陽電池セルの表面層をエッチング除去した単結晶バルク=太陽電池セル中のウェハ）の実効ライフタイムを、図(b)には太陽電池の変換効率を、インゴット固化率に対してプロットした。熱プロセス後のライフタイムが変換効率に対応している。インゴット全長で見ると、トップ側（引上げ初期）のライフタイムは熱プロセスにより、アズグロウンよりも大きく低下し、ボトム側（引上げ後半）では高くなっている。

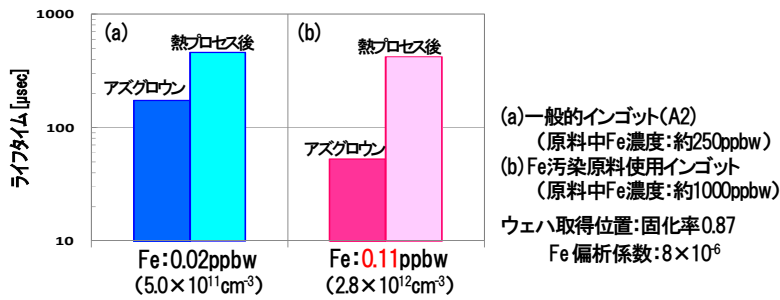


図Ⅲ-2-(イ)-G-2 太陽電池プロセスにおけるインゴット全長のライフタイムと変換効率の変化

1-1-1. 金属不純物の影響

アズグロウン結晶のボトム側でのライフタイム低下の原因は、金属不純物の濃縮と考えられる。原料ポリシリコンに鉄（Fe）を微量添加して、ライフタイムへの影響を調べた（図Ⅲ-2-(イ)-G-3）。インゴットのボトム側（固化率 0.87）の同位置から取得したウェハのライフタイムを比較すると、アズグロウン結晶では Fe 汚染（0.11ppbw）により低下したが、熱プロセス後には差異は見られない。ある程度の金属汚染であれば、太陽電池製造のリン拡散工程でゲッターリングされ、変換効率への影響は非常に小さい。

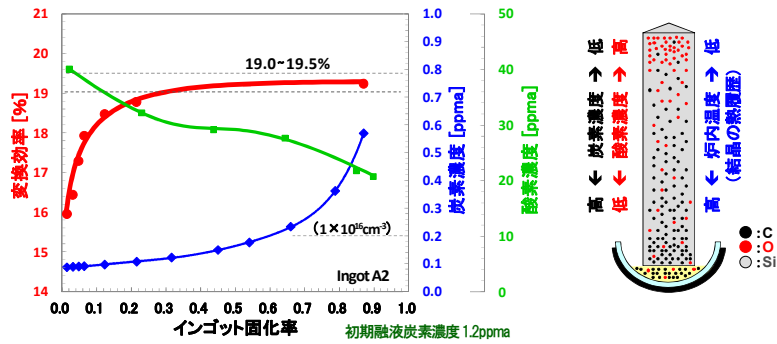
単結晶中に含まれる金属不純物は、その殆どはインゴット製造工程における汚染である。トクヤマグループ会社のシーメンス法により製造したポリシリコン中の金属不純物の濃度は数 ppbw 未満であり、また金属不純物の偏析係数が 10^{-4} ~ 10^{-6} のオーダーであることから、原料ポリシリコン由来の金属不純物が単結晶シリコン中に取り込まれる量は極めて微量で、ライフタイム等の太陽電池性能に及ぼす影響が極めて小さいことを確認した。



図III-2-(イ)-G-3 熱プロセス前後のライフタイム変化

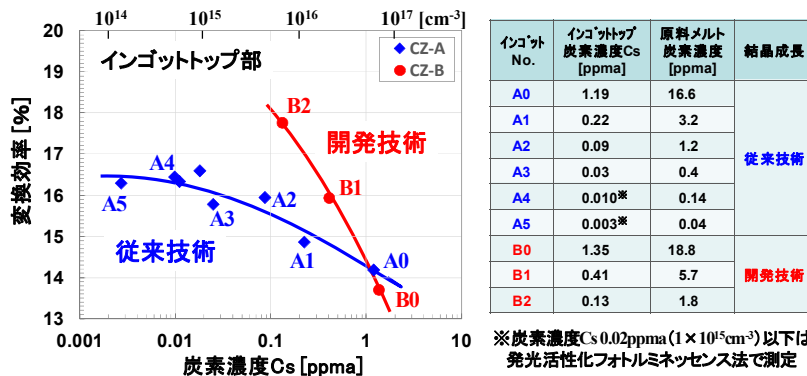
1-1-2. 炭素不純物の影響とキラ欠陥の制御

熱プロセスによるインゴットトップ側のライフタイム低下に着目した。図III-2-(イ)-G-4 にインゴット全長における炭素濃度（置換型炭素 Cs）、酸素濃度（格子間酸素 Oi）、太陽電池セルの変換効率の変化を示す。インゴット中の炭素濃度は偏析によって成長初期には低いのが、成長の後半で急激に上昇している。逆に、酸素濃度はインゴットのトップ側で高い。トップ側のライフタイム低下は、炭素不純物を核に成長する酸素析出物が関係している。



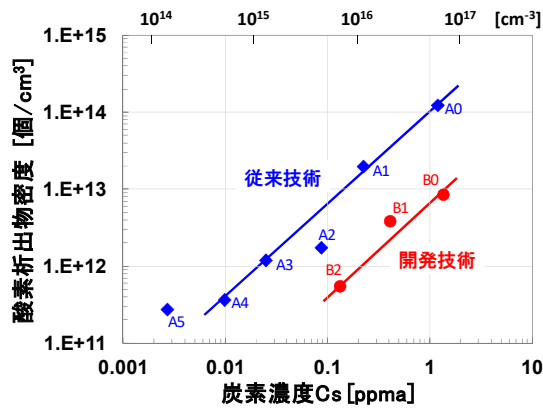
図III-2-(イ)-G-4 インゴット全長の変換効率と炭素濃度、酸素濃度の関係

本共同研究で開発した結晶成長技術（開発技術）と従来技術で、炭素濃度の異なる原料ポリシリコンを使用してインゴットを引上げ、トップ側の同一部位（酸素濃度が高く、酸素析出の影響の顕著な部位）から取得したウェハから作製したn型両面受光セルの変換効率を比較した（図III-2-(イ)-G-5）。開発技術によるインゴットは、トップ部において従来技術のインゴットよりも変換効率が高く、結晶中の炭素濃度が低くなるほどその効果も大きく優れている。



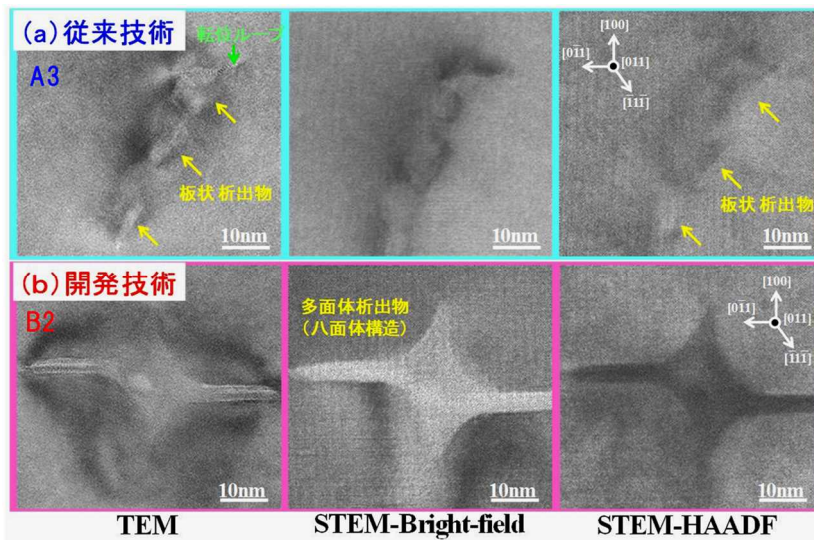
図III-2-(イ)-G-5 インゴットトップ部の変換効率と炭素濃度の関係

開発技術で上げたインゴットの変換効率が優れる理由は以下のとおりである。太陽電池製造の熱プロセスを経てセル中に成長した酸素析出物を透過電子顕微鏡で観察した。図III-2-(イ)-G-5 に対応するシリコン結晶中の酸素析出物の数密度と炭素濃度の関係を図III-2-(イ)-G-6 に示す。結晶中の炭素濃度が低いほど、酸素析出物密度も低くなるが、開発技術による単結晶ウェハでは、炭素濃度に対する酸素析出物密度が従来技術の単結晶ウェハに比べて約1桁低い。

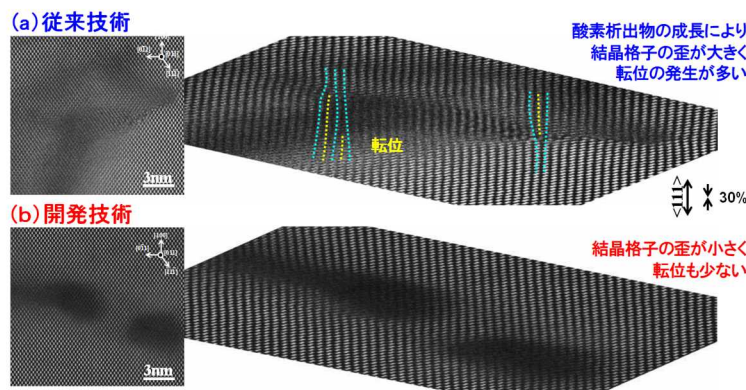


図Ⅲ-2-(イ)-G-6 酸素析出物密度と炭素濃度の関係

高分解能透過電子顕微鏡で観察した酸素析出物の形態を図Ⅲ-2-(イ)-G-7 に示す。これらの結晶欠陥が酸素析出物であることはEDS 元素分析により確認した。従来技術による単結晶ウェハ中に成長した酸素析出物が薄い板状であるのに対して、本研究成果である開発技術では酸素析出物の形態が八面体（多面体）構造であることが特徴である。



図Ⅲ-2-(イ)-G-7 酸素析出物の透過電子顕微鏡像（2,000,000倍）



図Ⅲ-2-(イ)-G-8 酸素析出物の STEM-HAADF 像（8,000,000倍、 $\langle 111 \rangle$ 方向に像を圧縮）

図Ⅲ-2-(イ)-G-8 は、さらに高倍率の高角散乱環状暗視野走査透過電子顕微鏡像（STEM-HAADF）を比較した。図は原子配列を観やすくするため、像を $\langle 111 \rangle$ 方向に30%まで圧縮した画像である。従来技術の結晶は酸素析出物の成長に伴う歪が大きく、転位の発生も多い。一方の開発技術は、歪の小さい八面体酸素析出物が成長するため、転位の発生も極めて少ない。太陽電池製造の熱プロセスの温度域（～

1000℃) で成長する酸素析出物の形態は一般に板状であり、八面体の酸素析出物は 1100℃以上の高温で成長すると言われている。開発した結晶成長技術（特願 2018-526343）は、通常の板状析出物が成長する熱プロセスにおいても八面体析出物が成長するように、インゴット成長工程においてアズグロウン結晶中に形成する析出核が制御されていると考えている。その結果、熱プロセスで成長する酸素析出物の数密度と形態が制御でき、歪や転位の少ない八面体構造にすることで、インゴットトップ部でもライフタイムや変換効率の高い単結晶ウェハが得られる。

炭素を核に成長する酸素析出物がキラー欠陥となり、結晶のライフタイムや太陽電池の変換効率に悪影響を及ぼす。炭素濃度と結晶成長条件により、酸素析出物の数密度と形態が変化し、ライフタイムや変換効率が変わることを明らかにした。

太陽電池製造の熱プロセスを経ることで、単結晶ウェハ中に酸素析出物が成長し、転位等の二次的な欠陥が発生することを高分解能透過電子顕微鏡により観察した。半導体分野では、シリコン基板に高温・長時間の熱処理で 100~1000nm のサイズに成長した酸素析出物を観察解析しているが、本共同研究では、実際の太陽電池セル中に短時間の熱プロセスで成長した 7~30nm 程度の微小な析出初期の酸素析出物の形態を観察した。このような実際の太陽電池のウェハ内部に成長した酸素析出物の形態を解析した例はこれまでに無かった。

1-2. ライフタイム目標値および下限値の達成

1-2-1. ライフタイム目標値 1000μsec

市場で取引される単結晶インゴットやウェハのライフタイム値は、太陽電池製造の熱プロセスを経ないアズグロウン結晶のライフタイム値である。一般的な n 型単結晶のライフタイムは 100μsec 以上と言われているが、ライフタイムは比抵抗、すなわちドーパント濃度によっても変化する（高抵抗ほど高ライフタイム）。CZ 法単結晶の場合、結晶引上げ中に偏析によってドーパント濃度が変化するため、インゴットのトップ~ボトムでも変化する。本研究では、インゴットのトップ~ボトムの比抵抗が 3~1Ω・cm の範囲の比較的 low 抵抗の結晶を作製して評価した。ライフタイムの測定は、明治大学に導入したバルクライフタイム測定装置 Sinton BLS-1 を使用した。

熱処理を受けていないアズグロウンの単結晶インゴットのライフタイム目標値を 1000μsec 以上とした。一般的な太陽電池用ポリシリコンを原料として従来技術で成長させたインゴット（トップ部の炭素濃度 0.066ppma=3.3×10¹⁵cm⁻³）の長手方向のライフタイム分布は 300~900μsec であったが、炭素濃度を低減したポリシリコン原料を使用し、前述の開発した成長技術で得られたインゴット（トップ部の炭素濃度 0.012ppma=6.0×10¹⁴cm⁻³）のライフタイムは全長にわたって 2000μsec (2msec) 以上であり、ライフタイム目標値の 1000μsec 以上を達成した（図 III-2-(イ)-G-9）。従来技術による一般的なインゴットに比べて、ライフタイムは約 3 倍以上に向上した。

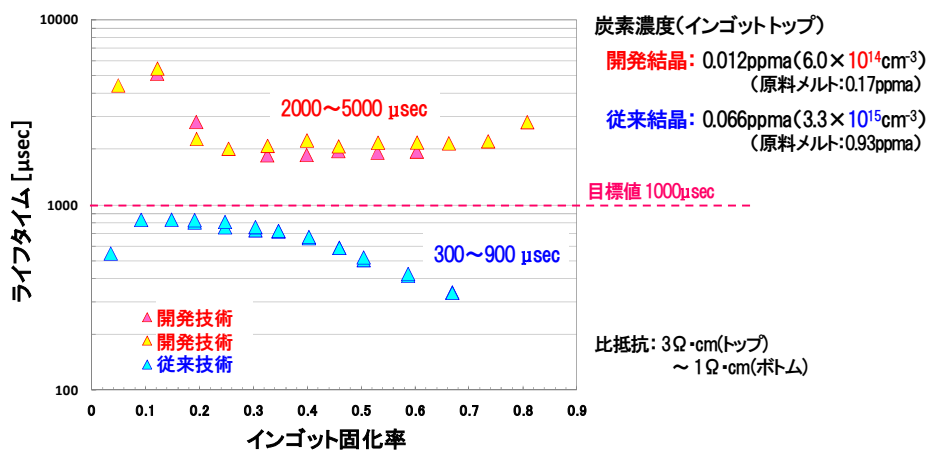
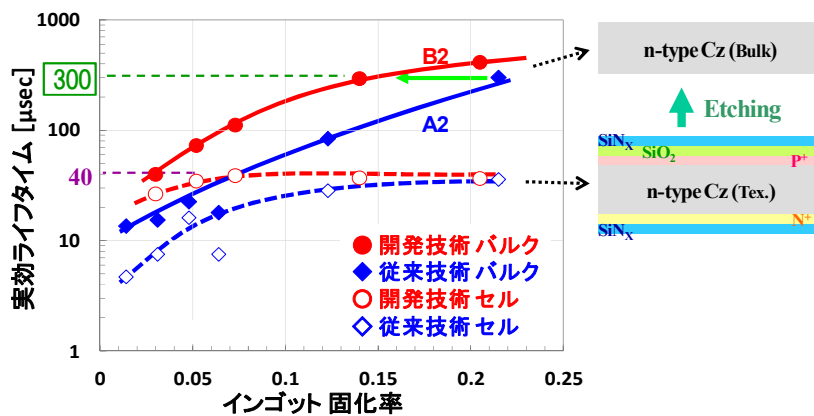


図 III-2-(イ)-G-9 単結晶インゴット全長のライフタイム分布

1-2-2. ライフタイム下限値 300 μ sec 以上

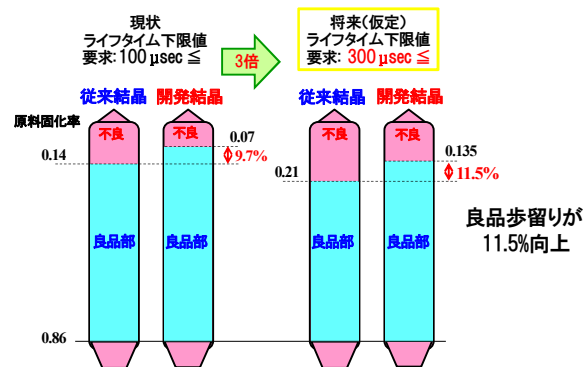
太陽電池製造の熱プロセスを経るとウェハのライフタイムは大きく変化した。特に結晶中の酸素濃度が高く、結晶成長中に CZ 炉内で徐冷されて酸素析出核の多いインゴットのトップ側は熱プロセス後のライフタイム低下が著しかった (図III-2-(イ)-G-2)。

図III-2-(イ)-G-10 には、炭素濃度が同程度で、従来技術 A2 と開発技術 B2 のインゴットトップ側の太陽電池セルの実効ライフタイム (破線) と、セル表面の拡散層およびバッシベーション層をエッチングにより除去した結晶バルクのライフタイム (実線) の関係を示す。現状の太陽電池では、セルの実効ライフタイムはセル設計で決まる限界値で頭打ちするが、セル中の結晶バルクのライフタイムはもっと高いということがわかった。本研究で評価した太陽電池セルの限界値は約 40 μ sec であり、熱プロセス後のバルクのライフタイムが 100 μ sec 以上であれば、セルの実効ライフタイムは限界値 40 μ sec に達することがわかる。すなわち、セルの実効ライフタイムが限界値になるバルク (ウェハ) の熱プロセス後のライフタイムの下限値が 100 μ sec である。ウェハのライフタイムは、熱プロセス後にこの下限値以上であればよい。言い換えれば、同じセル設計ではライフタイムの高いウェハを使用しても、変換効率は一定値以上に高くなることはない。このような単結晶の品質 (ライフタイム) と太陽電池性能 (変換効率) との関係を確認することができた。このような関係から、現在の太陽電池製造においては、単結晶インゴットのライフタイムの極端に低い部位を除いて使用すれば、ライフタイムにばらつきがあっても、変換効率が一定の安定した太陽電池を製造することができている。



図III-2-(イ)-G-10 熱プロセス後の実効ライフタイム (バルクとセルの比較)

また図III-2-(イ)-G-10 は、太陽電池技術が向上して変換効率が向上してくれば、すなわち、上記のセルの限界値が高くなれば、ウェハ (結晶バルク) の品質の差が顕在化してくることを示唆している。将来の変換効率の向上を考慮して、必要なバルクのライフタイム下限値を3倍の300 μ sec と仮定した。この場合、従来技術のインゴットではトップ側の固化率 0.21 以上の部位が良品となるが、開発した結晶成長技術によれば、固化率 0.135 以上の部位が良品となり、300 μ sec 以上の直胴良品部が長くなる。本実験結果では、直胴長を固化率 0.86 まで成長させたインゴットにおいて、直胴良品部が固化率 0.21 以上 (すなわち、直胴良品部 0.21~0.86) から、固化率 0.135 以上 (0.135~0.86) に改善され、固化率で 0.075、直胴良品部の歩留りとして 11.5%向上した (図III-2-(イ)-G-11)。



図III-2-(イ)-G-11 開発技術によるインゴットの良品歩留りの向上

図Ⅲ-2-(イ)-G-10は、トップ部の炭素濃度が約0.1ppmaと比較的高いインゴットの結果であるが、開発技術により直胴部の良品歩留まりが向上してコストダウンに効果のあることが証明された。特に、インゴット引上げ回数とともに偏析によって原料融液中の炭素濃度が濃縮されるマルチプリング法においては、開発した結晶成長技術の適用が非常に有効である。また前述のように、開発した結晶成長技術では、使用する原料ポリシリコンの不純物炭素濃度が低くなるほど、高ライフタイムの単結晶を得ることができる。したがって、より高い変換効率を目指した太陽電池開発のためのウェハとしても期待できる。

1-3. 2020年発電コスト目標14円/kWhに対する貢献度の試算

豊田工業大学と明治大学による2020年発電コスト目標14円/kWhに至るコスト試算では、NEDOプロジェクトにおける結晶成長、スライス加工、セルプロセスの各技術開発成果を活用することによってモジュール製造原価を23.4円/W、発電コストを4.0円/kWh低減する。さらに、BOSコストの低減および設備利用率向上を織り込むことにより、発電コスト14円/kWh達成が可能と見込んでいる(表Ⅲ-2-(イ)-G-1)。ここで、結晶成長技術開発による発電コスト低減は0.2円/kWhの試算である。本コスト試算プログラムを使用して、研究成果の2020年発電コスト目標14円/kWhに対する貢献度を試算した。

表Ⅲ-2-(イ)-G-1 豊田工大・明治大による発電コスト14円/kWh試算(メガソーラー高効率)

	インゴット製造経費(円/kg)	スライス加工費(円/枚)	ウェハ厚+カープロス(mm)	セル搭載材料費(円/枚)	セル効率	PCS・BOS・施工費・販売経費(円/kWh)	設備利用率	モジュール製造原価(円/W)	発電コスト(円/kWh)	モジュール製造原価低減効果(円/W)	発電コスト低減効果(円/kWh)
2015年見積り	¥2,600							¥61.4	¥24.2		
結晶成長技術開発によるインゴット製造経費低減		¥47.0	0.350					¥58.6	¥24.0	¥2.8	¥0.2
スライス加工技術開発によるスライス加工費低減				¥40.5	20.0%	¥223,500		¥52.9	¥23.5	¥5.7	¥0.4
スライス加工技術開発によるウェハ薄型・カープロス低減								¥46.1	¥23.0	¥6.8	¥0.5
セルプロセス開発によるセル搭載材料費低減	¥2,000	¥22.0						¥43.7	¥22.9	¥2.4	¥0.2
セルプロセス開発によるセル効率向上			0.200	¥30.0				¥38.0	¥20.2	¥5.7	¥2.7
生産効果(経験曲線)によるBOSコスト低減					23.0%	¥136,335		¥38.0	¥15.0	¥0.0	¥5.2
設備利用率向上(2015年実績)							14.0%	¥38.0	¥14.0	¥0.0	¥1.1

1-3-1. インゴットのライフタイム向上

図Ⅲ-2-(イ)-G-9に示すように、従来技術で上げたインゴットのライフタイム300~900μsecに対し、開発した技術によるインゴットのライフタイムは全長で2000μsec以上に向上した。ウェハのライフタイム向上がセルの変換効率にどのくらい寄与するのかわ、豊田工業大学のPC1Dデバイスシミュレーションにより、n型両面受光セルとして見積もった。従来技術のライフタイム平均600μsecで得られる変換効率が20.5%であるのに対して、開発技術によるライフタイム2000μsecでは20.8%、変換効率で0.3%向上する。上記コスト試算プログラムによれば、2015年見積りを基準に、変換効率が20.5%から20.8%に向上した場合、モジュール製造原価で0.9円/W、発電コストで0.31円/kWhのコスト低減効果を見込むことができる。

1-3-2. インゴットの良品歩留まり向上

図Ⅲ-2-(イ)-G-10に示すように、開発した結晶成長技術により、太陽電池製造の熱プロセス後のウェハのライフタイムが、従来技術のウェハよりも高くなる。太陽電池プロセスの技術開発により変換効率が向上し、熱プロセス後のライフタイムが300μsec以上のウェハが必要になったと仮定する。本実験の結果では、従来技術では固化率0.21未満のインゴットトップ側は不良、開発技術によれば不良部が0.135未満に低減(直胴良品部の歩留まりが11.5%向上)した。このインゴット直胴歩留りの改善11.5%を、コスト試算プログラムを用いて試算した結果、モジュール製造原価で1.0円/W、発電コストで0.07円/kWhのコスト低減効果を見込むことができる。また、インゴット原価を199円/kg、ウェハ価格を4.0円/枚低減する効果を見込むことができる。

尚、試算においては2015年見積りのうちインゴット収率のみを変更し、セルの変換効率は20%のままとした。実際には、ライフタイムの高いウェハが要求されるのは、セルの変換効率が高くなった場合であるため、変換効率向上による発電コスト低減も見込むことができる。変換効率の向上は、材料コスト低減よりも発電コスト低減への寄与が大きいいため、インゴット収率低下の影響を十分に吸収できる。

上記のインゴットのライフタイム向上分と、良品歩留まり向上分とを合わせると、モジュール製造原価を目標23.4円/Wに対して1.9円/W低減する効果を見込める。また、発電コストの目標14円/kWhのうちNEDOプロジェクトの技術開発分4.0円/kWh、さらに結晶成長技術開発による発電コスト低減0.2円/kWhの試算に対して、0.38円/kWh低減する効果を見込むことができる。

太陽電池セルの性能に及ぼす、原料ポリシリコンと単結晶シリコンインゴット・ウェハの品質の影響を明らかにすることができた。本研究開発の開始時には、これらの関係が不明確であったが、インゴット引上げ実験と太陽電池セル試作評価、結晶内部の欠陥解析をとおして、それぞれの品質・性能の関係を解明した。トクヤマが製造する太陽電池用ポリシリコンは、現在の高効率太陽電池に対して十分高い品質（純度）を有していることを確認できた。単結晶インゴットは、その直胴の引上げ後半においては十分高い品質（ライフタイム）を有しているものの、トップ側においては、太陽電池製造の熱プロセスで炭素を核に成長する酸素析出物がキラ欠陥となり、ウェハ品質（ライフタイム）を著しく低下させる。本研究開発では、酸素析出物の形態・数密度とライフタイム・変換効率との関係を調べ、インゴットトップ部においても高ライフタイムの得られるCZ法結晶成長技術を開発した。2017年度の間目標を1年前倒しで達成した。発電コストを2030年に7円/kWhの実現に資する技術開発目標は達成できなかったが、2020年に14円/kWhの実現に資する技術の開発には成功した。

2. 実用化・事業化見通し

本研究開発の開始時においては、太陽電池に要求される原料ポリシリコンの品質レベルが把握できていなかったが、本検討の結果、トクヤマのグループ会社で製造するポリシリコンの金属および炭素不純物に関する品質が、太陽電池に要求されるレベルを十分満足していることが確認できた。しかしながら、トクヤマとしては、太陽電池用ポリシリコンの事業を譲渡・撤退したことにより、開発した技術の事業化は困難になった。尚、事業譲渡先では、太陽電池用ポリシリコンの製造・販売の事業を継続している。

本研究開発で得られた単結晶シリコン中での不純物の挙動や結晶品質に及ぼす影響等の成果は、トクヤマの主要事業である半導体用ポリシリコンの品質においても重要な知見であり十分活かされている。

3. 波及効果

熱プロセス後の単結晶ウェハのライフタイムが、太陽電池セルの変換効率に関係することが解った。現状の太陽電池ではその影響は未だ小さいものの、将来のさらなる変換効率向上においては、単結晶インゴット・ウェハの低炭素濃度化と酸素析出物等の欠陥制御による結晶品質の改良が必要であることを示唆した。

本研究開発の成果である結晶成長技術による単結晶インゴットおよびスライス加工したウェハ、太陽電池セル評価したサンプルおよび測定・解析データ等は、本プロジェクトの連携先である明治大学、豊田工業大学に引き継ぎ、酸素析出メカニズムの解明や高変換効率太陽電池の試作、研究に活用することで、発電コスト低減の目標達成に寄与する。また、試作したインゴットおよびウェハは、大学コンソーシアムの豊田工業大学、明治大学、九州大学、名古屋大学、東京工業大学、兵庫県立大学へ提供した。

高分解能透過電子顕微鏡を用いて、太陽電池セル中に形成した10nmレベルの酸素析出物の構造を捉えた。太陽電池や半導体のシリコン結晶における酸素析出挙動の研究に有用な手法である。

また、図III-2-(イ)-G-5に示した低炭素インゴット(A4, A5)の炭素濃度は、明治大学で開発した発光活性化フォトルミネッセンス法で測定した。従来の赤外分光法では測定困難な低濃度の測定が可能であった。パワー半導体では、単結晶シリコンのさらなる低炭素濃度化が望まれており、有効な評価技術である。

4. 今後の展開

トクヤマとしては太陽電池用ポリシリコンの事業を譲渡・撤退したが、半導体用ポリシリコンは主要事業であり、さらなる高品質化を継続中である。本研究開発で得られた炭素不純物と酸素析出の挙動に関する知見や結晶成長技術は、半導体用シリコンにも共通する技術であるため、出願した知的財産権の権利化を進めている。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	0 (0)	1 (0)	9 (8)	0 (0)	0 (0)	10 (8)
論文	0	0	2	1	0	3
研究発表・講演 (うち国際会議)	3 (1)	9 (3)	3 (2)	0 (0)	0 (0)	15 (6)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0	0	0
その他	0	0	0	0	0	0

(2020年08月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	トクヤマ	特願 2016-134375	国内	2016/07/06	取下 →PCT	単結晶シリコン板状体	正田勲 橘昇二
2	トクヤマ	PCT/JP2017/024235	PCT	2017/06/30	移行	単結晶シリコン板状体およびその製造方法	正田勲 橘昇二
3	トクヤマ	特願 2018-526343	国内	2017/06/30	登録	単結晶シリコン板状体およびその製造方法	正田勲 橘昇二
4	トクヤマ	2018-7037710	韓国	2017/06/30	登録	単結晶シリコン板状体およびその製造方法	正田勲 橘昇二
5	トクヤマ	201780041617X	中国	2017/06/30	登録	単結晶シリコン板状体およびその製造方法	正田勲 橘昇二
6	トクヤマ	11201900068P	シンガポール	2017/06/30	登録	単結晶シリコン板状体およびその製造方法	正田勲 橘昇二
7	トクヤマ	112017003436.1	ドイツ	2017/06/30	公開	単結晶シリコン板状体およびその製造方法	正田勲 橘昇二
8	トクヤマ	16/315216	アメリカ	2017/06/30	公開	単結晶シリコン板状体およびその製造方法	正田勲 橘昇二
9	トクヤマ	201917000521	インド	2017/06/30	公開	単結晶シリコン板状体およびその製造方法	正田勲 橘昇二

10	トクヤマ	106122354	台湾	2017/07/04	公開	単結晶シリコン板状体およびその製造方法	正田勲 橋昇二
----	------	-----------	----	------------	----	---------------------	------------

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	T. Tachibana, K. Nakamura, A. Ogura, Y. Ohshita, T. Shimoda, I. Masada, E. Nishijima	AIST, Meiji University, Toyota Technological Institute, Tokuyama Corp.	Effects of thermal budget in n-type bifacial solar cell fabrication processes on effective lifetime of crystalline silicon	American Institute of Physics Advances, 7, 045111 (2017)	有	2017/04/12
2	H. Kiuchi, M. Tajima, F. Higuchi, A. Ogura, N. Iida, S. Tachibana, I. Masada, E. Nishijima	Meiji University, Tokuyama Corp.	Determination of low carbon concentration in Czochralski-grown Si for solar cells by luminescence activation using electron Irradiation	Japanese Journal of Applied Physics Rapid Communication Vol. 56, No. 7, 070305 (2017)	有	2017/06/09
3	正田勲	トクヤマ	太陽電池用 CZ シリコンの品質に及ぼす炭素と酸素析出の影響	JETI, Vol. 66, No. 5, 77 (2018)	無	2018/04/22

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	T. Tachibana, K. Nakamura, A. Ogura, Y. Ohshita, T. Shimoda, I. Masada, N. Hayashi, E. Nishijima	AIST, Meiji University, Toyota Technological Institute, Tokuyama Corp.	The effects of annealing processes on effective lifetime in n-type crystalline silicon	31st European PV Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC-2015)	2015/09/14 ~09/16
2	小椋厚志, 小島拓人, 中村京太郎, 田島道夫, 大下祥雄, 西島英一, 正田勲, 飯田伸仁, 橋昇二	明治大学 豊田工業大学 トクヤマ	結晶シリコン太陽電池におけるウェハとプロセスの相性	第 63 回応用物理学会春季学術講演会	2016/03/19 ~03/22

3	小島拓人, 鈴木涼太, 小椋厚志, 立花福久, 大下祥雄, 西島英一, 正田勲, 飯田伸仁, 橋昇二	明治大学 産総研福島 豊田工業大学 トクヤマ	n型 CZ シリコンのキャリア寿命に対する熱処理による酸素析出の影響	第 63 回応用物理学会春季学術講演会	2016/03/19 ~03/22
4	T. Kojima, R. Suzuki, K. Nakamura, A. Ogura, Y. Ohshita, E. Nishijima, I. Masada, N. Iida, S. Tachibana	Meiji University, Toyota Technological Institute, Tokuyama Corp.	Influence of Growth Conditions on Thermal Process Sensitivity for n-Type CZ Silicon	32nd European PV Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC-2016)	2016/06/20 ~06/24
5	正田勲, 橋昇二, 飯田伸仁, 西島英一, 小島拓人, 中村京太郎, 小椋厚志, 大下祥雄	トクヤマ 明治大学 豊田工業大学	単結晶シリコンの品質に及ぼす炭素と酸素析出の影響	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09/13 ~09/16
6	小島拓人, 木下晃輔, 鈴木涼太, 中村京太郎, 小椋厚志, 立花福久, 大下祥雄, 西島英一, 正田勲, 飯田伸仁, 橋昇二	明治大学 産総研福島 豊田工業大学 トクヤマ	n型 CZ シリコン太陽電池のプロセス起因酸素析出に対する成長条件の影響	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09/13 ~09/16
7	木内広達, 田島道夫, 樋口史仁, 小椋厚志, 飯田伸仁, 橋昇二, 正田勲, 西島英一	明治大学 トクヤマ	電子線照射発光活性化 PL 法による太陽電池用 CZ-Si 中の低濃度炭素の定量	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09/13 ~09/16
8	T. Kojima, R. Suzuki, K. Kinoshita, K. Nakamura, A. Ogura, Y. Ohshita, E. Nishijima, I. Masada, N. Iida, S. Tachibana	Meiji University, Toyota Technological Institute, Tokuyama Corp.	Effects of carbon concentration and growth conditions lifetime degradation by oxygen precipitation in CZ silicon	The 26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/24 ~ 10/28

9	H. Kiuchi, M. Tajima, F. Higuchi, A. Ogura, N. Iida, S. Tachibana, I. Masada E. Nishijima	Meiji University, Toyota Technological Institute, Tokuyama Corp.	Determination of Low Carbon Concentration in CZ-Si for Solar Cells by Luminescence Activation Using Electron Irradiation	The 7th International Symposium on Advanced Science and Technology of Silicon Materials (JSPS Silicon Symp.)	2016/11/21 ~11/25
10	正田勲	トクヤマ	太陽電池用 CZ シリコンの品質 に及ぼす炭素と酸素析出の影響	第 5 回パワーデバイス 用シリコンおよび関連 半導体材料に関する研 究会	2017/02/22 ~02/23
11	木下晃輔, 小島拓人, 鈴木涼太, 小林弘人, 大下祥雄, 正田勲, 橋昇二, 小椋厚志	明治大学 豊田工業大学 トクヤマ	赤外線トモグラフィーによる 太陽電池用 n 型 C-Si 中の酸素 析出挙動の評価 - 炭素濃度と成長条件の影響 -	第 64 回応用物理学会春 季学術講演会	2017/03/14 ~03/17
12	小島拓人, 木下晃輔, 鈴木涼太, 中村京太郎, 小椋厚志, 大下祥雄, 正田勲, 橋昇二	明治大学 豊田工業大学 トクヤマ	TEM 像解析による太陽電池用 n 型 CZ-Si 中の酸素析出挙動の 評価 - 炭素濃度と成長条件の影響 -	第 64 回応用物理学会春 季学術講演会	2017/03/14 ~03/17
13	T. Kojima, R. Suzuki, K. Kinoshita, K. Nakamura, A. Ogura, Y. Ohshita, I. Masada, S. Tachibana	Meiji University, Toyota Technological Institute, Tokuyama Cor p.	Effect of Carbon Concentration and Growth Conditions on Oxygen Precipitation Behavior in n-type CZ-Si	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (IEEE PVSC-44)	2017/06/25 ~06/30
14	K. Kinoshita, T. Kojima, H. Kobayashi, Y. Ohshita, I. Masada, S. Tachibana, A. Ogura	Meiji University, Toyota Technological Institute, Tokuyama Corp.	Effects of Carbon Concentration on Oxygen Precipitation through Annealing Process in n-type CZ-Si Evaluated by IR Laser Scattering Tomography	33rd European PV Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC-2017)	2017/09/25 ~09/29
15	正田勲	トクヤマ	太陽電池プロセスにおける酸 素析出初期状態の直接観察	学振 145 委員会 第 156 回研究会	2017/12/14

【新聞・雑誌等への掲載】

なし

【その他】

なし

H CIS 太陽電池モジュール高性能化技術の研究開発（ソーラーフロンティア株式会社）

1. 成果詳細

(1) 目標と成果の概要

本共同研究事業においては発電コスト低減目標として最終目標 14 円/kWh を掲げている。この目標を実現する性能指標とその水準として、製品サイズ試作モジュール変換効率 16%（開口部変換効率 17.3%）を技術到達目標としている。図 1 に CuInSe₂ 系太陽電池（以降 CIS 太陽電池と略す）の変換効率の推移を示す。本事業では CIS 太陽電池の高性能化に必要な要素技術の基礎検討を小面積セル（面積約 0.5～1.0 cm²）で行い、開発された要素技術群は量産モジュールと同じ集積構造を有するサブモジュール（30～7 cm 角）における実証を経て量産工場へと移転され、量産モジュールの生産に適用される。最終目標達成に向けた要素技術の達成水準はサブモジュール開口部変換効率 20%としている。基礎検討用の小面積セルについては Cd フリーバッファ層と比較のために Cd を含むバッファ層を用いたものの両方を研究しており、サブモジュールおよび量産モジュールはすべて Cd フリーである。本事業の成果として小面積セル（Cd フリー）において変換効率 23.4%、サブモジュール（7 cm 角）において変換効率 19.8%を達成した（いずれも世界最高変換効率）。最終技術到達目標としては量産工場の生産ラインを用いて作製した製品サイズ試作モジュールにおいてモジュール変換効率 16.1%を達成し、発電コスト最終目標に関しては市場において 13.3 円/kWh を実現し、いずれも最終目標を達成した。また将来の新分野開拓に向けた軽量化モジュールの開発を事業途中より開始し、既存モジュールとの重量比 1/3、出力比 80%とした最終目標をともに達成した。

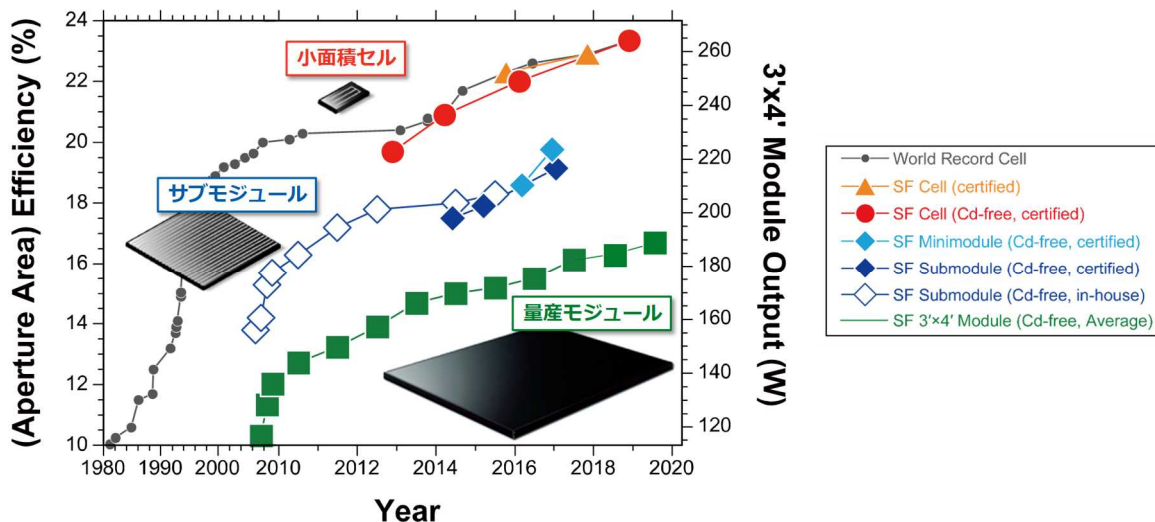


図 III-2-(イ)-H-1 各種 CIS 太陽電池の変換効率の推移。

(2) 小面積セルを用いた要素技術の基礎検討

(2.1) CIGSSe 表面の重アルカリ金属処理効果

CIS 太陽電池における Na 効果は古くから良く知られており、高性能な CIS 太陽電池を作製するうえでガラス基板からの Na の供給、あるいは他の何らかの手法を用いて光吸収層である Cu(In, Ga)(Se, S)₂ (CIGSSe) 層に Na を拡散させることが有効であることが知られている。近年、Na よりも重いアルカリ金属である K、Rb、Cs を含む化合物を CIGSSe 層上に製膜し、熱処理を行うことで CIS 太陽電池の特性が向上されることが発見され、「アルカリ PDT (Post Deposition Treatment)」として注目されている。この技術は当初段階同時蒸着法で製膜された硫黄 (S) を含まない光吸収層を用いた CIS 太陽電池において開発された。我々の光吸収層は金属プリカーサーを用いたセレン化硫化法によって製膜された S を含む CIGSSe であるため、我々の光吸収層に適した独自の重アルカリ金属処理を開発した。具体的にはセレン化硫化法によって製膜した CIGSSe 層の上に重アルカリ金属フッ化物 (KF、RbF、CsF) を蒸着し、H₂S 雰囲気中で熱処理を行うものである。表 1 に小面積セルにおける重アルカリ金属 (K、Cs) 処理効果の比較を示す。処理を行っていない試料と比較して、K 処理、Cs 処理とアルカリ金属の原子番号が大きくなるほど時間分解フォトルミネッセンス法で測定した少数キャリア寿命 (τ) が向上し、太陽電池特性における開放電圧 (V_{oc}) に改善が見られた。詳細なメカニズムはまだ調査中だが、 V_{oc} の照度依存性から算出した界面、空乏層、バルク領域におけるキャリア再結合係数 (それぞれ R_0^i 、 R_0^d 、 R_0^b) が全体的に低減されているため、CIGSSe 光吸収

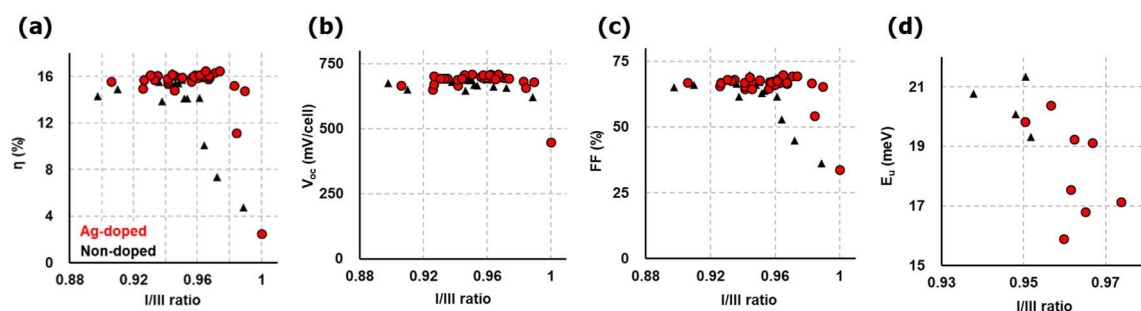
層の界面と光吸収層内両方におけるキャリア再結合の低減が V_{oc} の向上に寄与しているものと考えられる。

表III-2-(イ)-H-1 CIS 太陽電池における重アルカリ金属処理効果の比較。

Alkali treatment	τ (ns)	V_{oc} (mV)	$R_0^a+R_0^b$ (cm^2s^{-1})	R_0^d (cm^2s^{-1})
n/a	14	659	2.8×10^6	2.7×10^{11}
K	60	679	1.0×10^6	2.0×10^{11}
Cs	100	690	6.3×10^5	1.3×10^{11}

(2.2) CIGSSe への Ag 添加効果

CIS 太陽電池の光吸収層である CIGSSe においては、CGI ($[\text{Cu}]/([\text{Ga}]+[\text{In}])$) が化学量論組成である 1 に近づくと $\text{Cu}(\text{S}, \text{Se})_x$ の異相が形成されるために CIS 太陽電池特性の低下を引き起こすことが知られている。図III-2-(イ)-H-2(a)に示すように我々のプロセスにおいては CGI (この図では I/III 族比) = 0.96 が上限となり、それ以上 Cu 組成が増加すると急激に変換効率 (η) が低下する。一方で CIGSSe 自体の結晶品質としては化学量論組成に近い方が Cu 空孔をはじめとする種々の点欠陥が少なくなるため優れていると考えられ (図III-2-(イ)-H-2(d)参照)、一般的に特性の急激な低下が起こる前までは Cu 組成を増加させるほど η は向上する。そこで我々は Cu と同じ I 族元素である Ag の添加効果を詳細に調べた。Ag の添加量は 1 at%以下である。その結果、図 2a-c 赤丸で示すように、従来 0.96 程度であった I/III 族比の上限が 0.98 程度へと向上し、それにともない最高到達変換効率も向上することが分かった。そのメカニズムはまだ明らかではないが、図 2c に示すように、I/III 族比が化学量論組成に近くなると曲線因子 (FF) が顕著に低下することが分かっている。詳細な分析によりこれは硫化が過剰になっていることが要因と判明しており、おそらくセレン化時に形成された CuSe_x が液相となることで硫化時に過剰な硫化を引き起こすと考えている。Ag-Se は Cu-Se よりも一般に融点が高いので、Ag を添加することでこの異常がある程度低減できたのではないかと推察している。いずれにしても I/III 族比の上限が引き上げられたことでより欠陥の少ない CIGSSe を用いることができるようになったことが CIGSSe への Ag 添加効果の帰結であり、これは図 2d に示すように I/III 族比の増加とともに単調に減少するアーバックエネルギー (E_b) にも見て取ることができる。

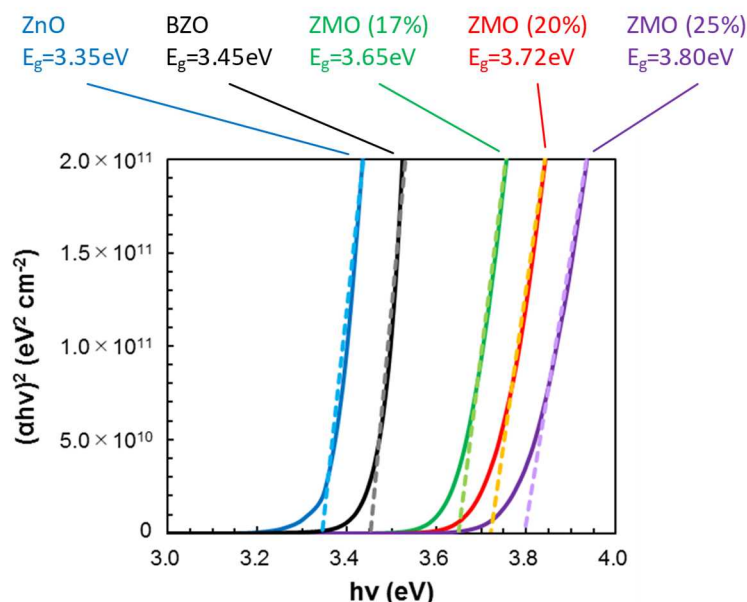


図III-2-(イ)-H-2 各太陽電池特性 (η 、 V_{oc} 、FF) と外部量子効率から算出したアーバックエネルギー (E_b) の I/III 族比 ($([\text{Ag}]+[\text{Cu}])/([\text{Ga}]+[\text{In}])$) 依存性。黒三角が Ag 添加なし、赤丸が Ag 添加ありの試料に対するデータ点。

(2.3) ワイドギャップ第2バッファ層

CIS 太陽電池の光学損失を低減するためには、窓層 (光吸収層上部のバッファ層と透明電極層; 図III-2-(イ)-H-5 および図III-2-(イ)-H-7 参照) の透過率を高めてより多くの光を光吸収層に届け、光吸収層においては到達した光を余すことなく吸収することが重要である。本事業開始以前までに我々は、透明導電膜である $\text{ZnO}:\text{B}$ (BZO) の高易動度化と低キャリア密度化を通じた長波長領域の透過率向上と、光吸収層のバンドギャッププロファイル改善による長波長光の吸収率向上を合わせて行うことで光学損失を大幅に軽減することに成功している。本事業では短波長領域の光学損失の軽減を目的に広いバンドギャップ (E_g) を有するワイドギャップバッファ層の開発を行った。我々は従来第2バッファ層に ZnO ($E_g \sim 3.35$ eV) を用いており、これが窓層透過光波長の下限を制限し

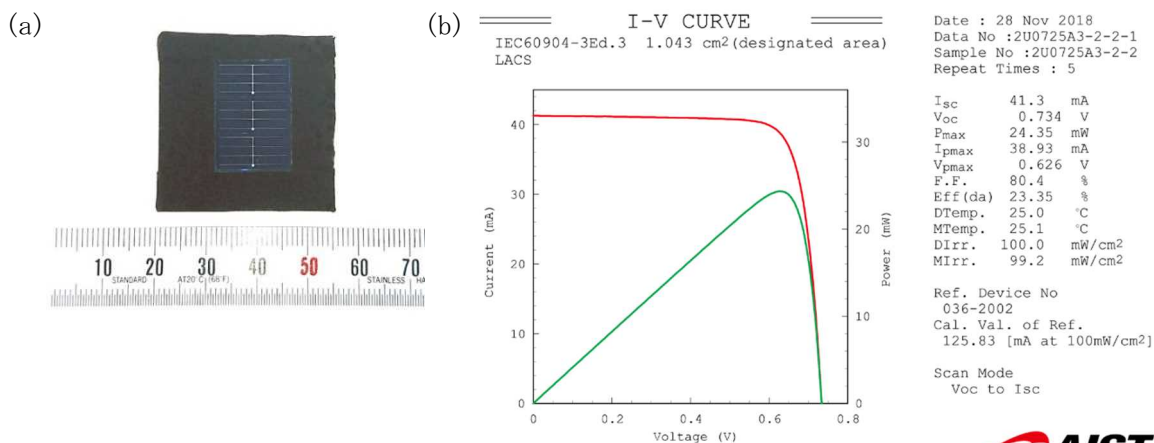
ていた(図Ⅲ-2-(イ)-H-5 および図Ⅲ-2-(イ)-H-7 参照)。今回原子層堆積(ALD)法を用いた(Zn, Mg)O (ZMO)を第2バッファ層として用いることを検討した。図Ⅲ-2-(イ)-H-3に示すように、MgO固溶比を増やすほどZMOの E_g は増大し、より高エネルギー(短波長)の光を光吸収層に届けることが可能となる。ただし、図から明らかなように、透明電極に用いているBZOの E_g の方が小さいため、これが窓層の透過光波長の下限となる。CIGSSe表面とのバンドアライメントの詳細検討の結果、仕込み値でZnOにMgOを20%固溶させた $Zn_{0.8}Mg_{0.2}O$ が新たな第2バッファ層として最適であることが分かった。



図Ⅲ-2-(イ)-H-3 BZO(透明導電膜)、従来の第2バッファ層であるZnO、および(Zn, Mg)O (ZMO)のTaucプロット。ZMOに続く括弧内の数字はZMO中のMgOの固溶比を示す。

(2.4) 世界最高変換効率の達成

上述の主要要素技術をはじめとして、小面積セルを用いた基礎検討において開発した種々の要素技術の最適な組み合わせを検討した結果、図4に示す通り約 1 cm^2 のCdフリーCIS太陽電池において23.4%の変換効率を達成した。これは一般にCdフリーよりも高い性能を実現しやすいCdSをバッファ層に用いたセルを含めても世界最高の変換効率となる。図Ⅲ-2-(イ)-H-5と表Ⅲ-2-(イ)-H-2には本事業開始前の2014年における最高変換効率(20.9%)を達成した小面積セルから最新のセルに至るまでの各記録セルのデバイス構造と太陽電池特性を比較してそれぞれに示す。本事業開始前と比較して絶対値で2.5%の変換効率の向上に成功した。重アルカリ金属処理、ZMO第2バッファ層、およびAg添加CIGSSeのいずれもがCdS、Cdフリー両方のバッファ層を用いたセルの高性能化において重要な貢献をしている。特に、Cdフリーバッファ層を用いたセルがCdSバッファ層を用いたセルの特性を凌駕することができたのは、Cs処理による界面の改善がCdフリーバッファ層の弱みであった界面におけるシャントや再結合を抑制する効果があったためと考えられる。



図III-2-(イ)-H-4 23.4%の世界最高変換効率を達成した小面積セルの(a)外観写真と(b)第三者測定機関による太陽電池特性測定結果。

MgF ₂	MgF ₂	MgF ₂	MgF ₂	MgF ₂
ZnO:B	ZnO:B	ZnO:B	ZnO:B	ZnO:B
ZnO	ZnO	(Zn,Mg)O	ZnO:B	(Zn,Mg)O
Zn(O,S,OH) _x	CdS	Zn(O,S,OH) _x	CdS	Zn(O,S,OH) _x
CIGSSe E _{g,min} =1.07eV	K treatment CIGSSe E _{g,min} =1.11eV	K treatment CIGSSe E _{g,min} =1.10eV	Cs treatment CIGSSe:Ag E _{g,min} =1.13eV	Cs treatment CIGSSe:Ag E _{g,min} =1.08eV
Mo	Mo	Mo	Mo	Mo
glass	glass	glass	glass	glass
(2014) 20.9% Cd-free	(2015) 22.3%	(2016) 22.0% Cd-free	(2017) 22.9%	(2018) 23.4% Cd-free

図III-2-(イ)-H-5 本事業開始前の2014年から現在までの各記録セルのデバイス構造の比較。

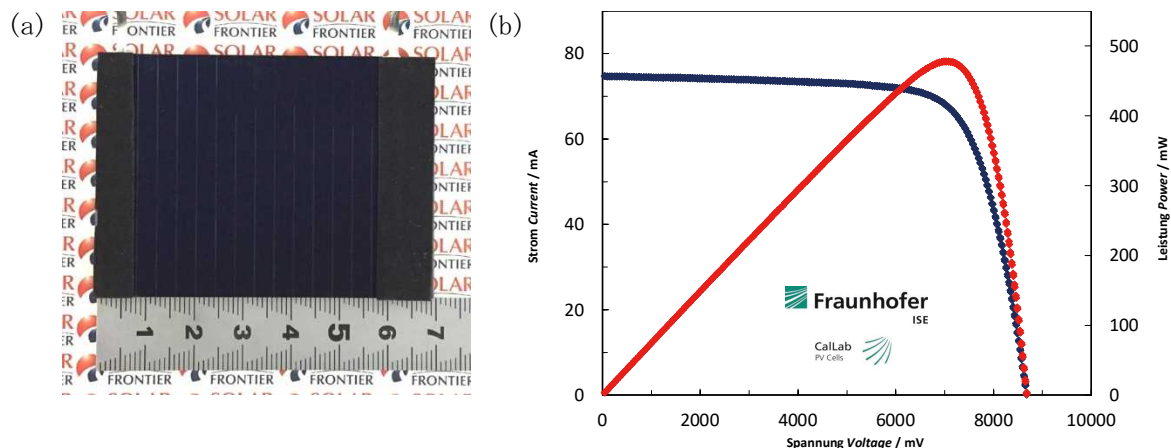
表III-2-(イ)-H-2 各記録セルの太陽電池特性の比較。J_{sc} : 短絡電流密度、E_{g,min} : CIGSSe 光吸収層の最小バンドギャップ、V_{oc,def} = E_g/q - V_{oc} : 開放電圧損失。

Year	Absorber	Alkali treatment	1 st buffer	2 nd buffer	η (%)	V _{oc} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} × J _{sc} (mW/cm ²)	FF (%)	E _{g,min} (eV)	V _{oc,def} (mV)	Test Center
2014	CIGSSe	n/a	Zn(O,S,OH) _x	ZnO	20.9	686	39.9	27.4	76.5	1.07	384	FhG-ISE
2015	CIGSSe	K	CdS	ZnO	22.3	722	39.4	28.4	78.2	1.11	383	FhG-ISE
2016	CIGSSe	K	Zn(O,S,OH) _x	(Zn,Mg)O	22.0	717	39.4	28.2	77.9	1.10	381	FhG-ISE
2017	CIGSSe:Ag	Cs	CdS	n/a	22.9	746	38.5	28.7	79.7	1.13	380	AIST
2018	CIGSSe:Ag	Cs	Zn(O,S,OH) _x	(Zn,Mg)O	23.4	734	39.6	29.1	80.4	1.08	350	AIST

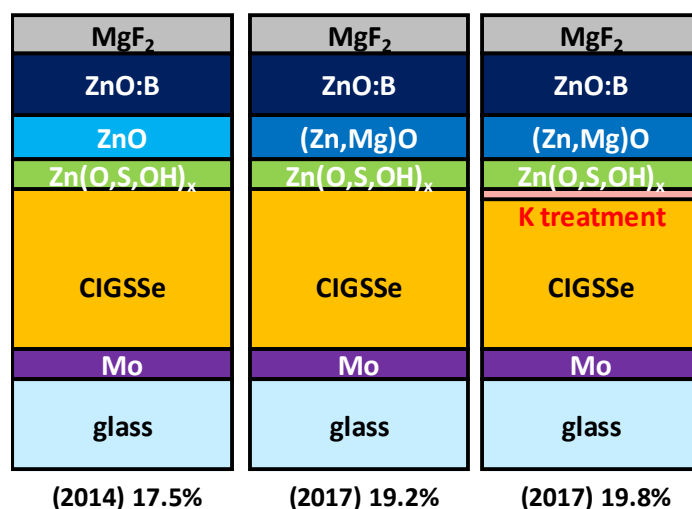
(3) サブモジュール高性能化技術の研究開発

前述のとおり、小面積セルの基礎検討において開発された各要素技術は量産モジュールと同様の集積構造を有するサブモジュールにおいてその効果の実証を行う。サブモジュールおよび量産モジュールはCdフリーであるため、Cdフリー小面積セルで開発された技術を移転する。本事業においては2016年に22.0%を達成したCdフリーセルの技術をサブモジュールへと移転した(図III-2-(イ)-H-5および表III-2-(イ)-H-2参照)。2018年に23.4%を達成したCdフリーセルの技術は本事業期間中にはサブモジュールを用いた実証は行えなかったため今後検討を行いたい。ここで重要となった要素技術はK処理とZMO第2バッファ層である。K処理に関しては装置の都合で30cm角基板の処理が行えなかったため、7cm角基板を用いたサブモジュールにおいて実証を行った。その結果、30cm角サブモジュールにおいて19.2%、7cm角サブモジュールにおいて19.8%の変換効率を達成し、要素技術の目標水準をほぼ達成した。図III-2-(イ)-H-6に19.8%の達成結果を、図III-2-(イ)-H-7と表III-2-(イ)-H-3に本事業開始前の記録である

17.5%のサブモジュールと本成果についてデバイス構造と太陽電池特性の比較をそれぞれに示す。本事業開始前より絶対値で2.3%の変換効率の向上に成功した。これはCdフリー小面積セルと同様の重アルカリ金属処理とZMO第2バッファ層による高性能化を集積構造上で実証したものであり、量産モジュールへの技術移転を目指した検討を進めている。一方で最新の23.4%セルの技術、つまりCs処理とCIGSSeへのAg添加効果はまだサブモジュールで実証できていない。これらの効果を実証することができれば21%に迫る変換効率を持つCdフリーサブモジュールが実現可能であると考えられる。



図III-2-(イ)-H-6 19.8%の世界最高変換効率を達成したCdフリーサブモジュールの(a)外観写真と(b)第三者測定機関による太陽電池特性測定結果。



図III-2-(イ)-H-7 本事業開始前の2014年当時の記録サブモジュールと本事業において開発したサブモジュールの構造の比較。

表III-2-(イ)-H-3 各記録サブモジュールの太陽電池特性の比較。

Year	Area (cm ²)	Alkali treatment	1 st buffer	2 nd buffer	η (%)	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	$V_{oc} \times J_{sc}$ (mW/cm ²)	FF (%)	Test Center
2014	808	n/a	Zn(O,S,OH) _x	ZnO	17.5	680	35.3	24.0	72.8	AIST
2017	841	n/a	Zn(O,S,OH) _x	(Zn,Mg)O	19.2	686	38.0	26.1	73.7	AIST
2017	24.2	K	Zn(O,S,OH) _x	(Zn,Mg)O	19.8	724	37.1	26.9	73.6	FhG-ISE

(4) 量産モジュールの高性能化と発電コストの低減

前述のように小面積セルにおいて開発された要素技術群はサブモジュールにおける実証を経て量産工場へと移転され、量産モジュールの生産に適用される。量産工場においてはこのほかに生産設備の改良や生産プロセスの微調整を通じた継続したモジュール性能の改善が図られている。これらの取り組みの結果、2017年には以前の製品よりも出力および機能性を大幅に向上させた新型CIS太陽電池モジュール

ル「SFKシリーズ」をリリースした(表Ⅲ-2-(イ)-H-4参照)。モジュール出力は本事業開始前の170Wから15W向上させ、185Wとなっている。その後も継続した高性能化の取り組みによって、量産ラインを用いた試作モジュールにおいて197.2W(モジュール変換効率16.1%)を達成している(表Ⅲ-2-(イ)-H-4参照)。現在量産ラインにおいては190W以上の高出力モジュールの取得率が80%近くに達している。これには本事業において得られた様々な知見を活用することでCIS太陽電池モジュールの高出力化とともに出力分布を狭く安定させることに成功したことが大きく影響しており、製造コストの低減にも貢献している。このほかモジュールを含めた太陽光発電システム全体のコスト低減を進めている。表Ⅲ-2-(イ)-H-5に示すとおり、モジュールの高出力化と市場におけるシステム販売価格の低下により、発電コストは事業開始前の18.4円/kWhから13.3kWhへと約5円/kWhの低減に成功し、最終目標を達成した。このうちモジュール高出力化の直接効果は約2円/kWhとなっており、本事業の成果が大きな貢献をしている。2025年の発電コスト目標7円/kWhの達成に向けてはこれまで同様モジュールの高出力化とシステムコストの低減を推し進めるが、今後出力向上による発電コスト低減への寄与は限定的になると試算されており、システムコストの低減とモジュールの長寿命化による発電年数の向上が重要になると考えられる。

表Ⅲ-2-(イ)-H-4 本事業開始前と現在の製品モジュール、および試作モジュールの特性値。

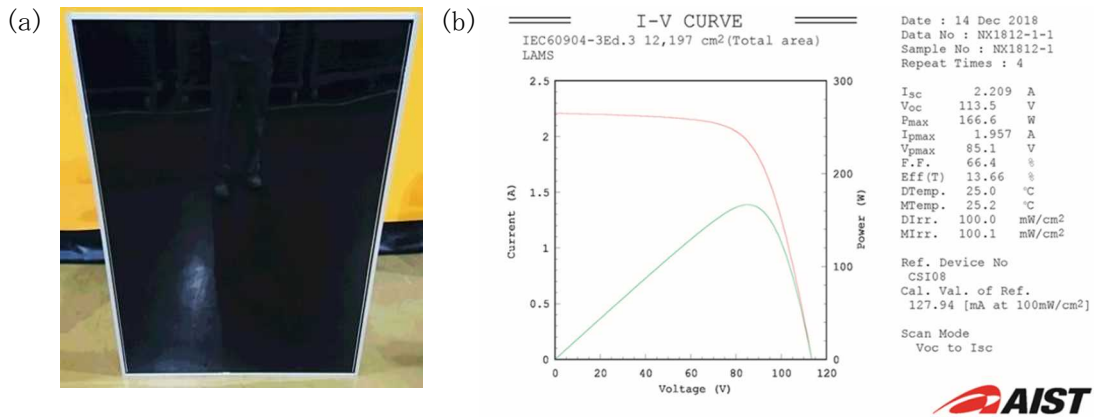
モジュール	P_{max} (W)	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	FF (%)	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)
SF170-S (カタログ値)	170	112	2.20	69.2	87.5	1.95
SFK-185-S (カタログ値)	185	121	2.19	70.0	95.0	1.95
試作モジュール (自社測定値)	197.2	122.7	2.17	74.2	98.8	2.00

表Ⅲ-2-(イ)-H-5 発電コストの達成状況と将来目標。

	2015年 (事業開始前)	2020年 (事業終了時)	2025年 (将来目標)
発電コスト (円/kWh) [2015年からの変化]	18.4	13.3 [-5.1]	7.0 [-11.4]
発電コストの低減分のうち モジュール出力向上による直接効果		-2.1	-3.5
モジュール出力 (W)	170	185	210

(5) 軽量化モジュール技術開発

CIS太陽電池の薄膜太陽電池としての特徴を活かした新分野における将来の多用途展開の可能性を見据えて軽量化モジュールの開発を実施した。目標は試作軽量化モジュールにおいて従来モジュールと比較して重量比で1/3、出力比で80%以上とした。軽量化にあたっては、従来モジュールではガラスを用いているデバイス基板およびモジュール表面材の軽量部材への変更を検討した。具体的にはガラス基板を金属薄板基板に変更したデバイスを開発、試作すると共に、表面材を樹脂フィルムに替えた軽量化モジュールを試作した。なお、軽量化モジュールにおいても金属薄板基板表面を絶縁化処理した上で従来モジュールと同一の集積構造を踏襲している。そのため絶縁処理工程より後のデバイス製造工程は従来モジュールにおけるガラス基板用の工程と同一である。図8aに試作した軽量化モジュールの外観写真を示す。外観は従来モジュールに近いものの、重量を従来モジュール(20kg)の約1/3に相当する6.6kgに軽量化することができた。軽量化に関してはガラス製であった表面材を樹脂フィルムに変更した効果が特に大きい。これはデバイス基板をガラスから金属薄板基板に変更したことで表面材によって強度を確保しなくても基板が割れることがなくなったために変更可能となったものである。図Ⅲ-2-(イ)-H-8bには同モジュールを第三者測定機関において測定した太陽電池モジュール出力特性を示す。出力は現行製品(SFK185-S)の185Wに対して約90%に相当する166.6Wを達成し、目標を達成した。今後さらなる高性能化に取り組むとともに試験設置等を進め、「薄い、軽い、割れない」という本モジュールの特性を活かした幅広い活用の可能性を開拓していく計画である。



図III-2-(イ)-H-8 試作した軽量化モジュールの(a)外観写真と(b)第三者測定機関による出力特性測定結果。

2. 実用化・事業化見通し

出光興産の子会社であるソーラーフロンティアでは NEDO 事業で得られた成果を製造基盤技術として適用し、2006 年 10 月から生産規模を拡大しながら商業生産を行ってきた。これまでの NEDO 事業の成果も含め、開発された要素技術は量産工場への導入検討がなされ、量産検証結果が良好であった技術に関しては順次工場へ展開している。本共同研究期間においてもモジュール出力を 170 W から 185 W（試作モジュールにおいては 197.2 W）へと大幅に向上させることに成功し、発電コストの低減に大きく貢献した。今後、本共同研究開発事業で達成した世界最高変換効率 23.4%の小面積セル要素技術を量産工場へ展開していくことでさらなる高出力化が見込める。一方で、さらなる発電コスト低減に対してはこれ以上の高出力化による寄与は限定的になると試算されていることから、システムコストの低減とモジュール長寿命化による発電年数の向上が重要となる。本共同研究事業で得られた重アルカリ金属処理効果のメカニズムに関する知見はモジュールの長寿命化に対して有用であると考えられ、成果の活用が期待される。他方、CIS 太陽電池は高い発電性能と低い発電コストを両立することができるばかりでなく、薄くて軽い、曲げられる、割れない、様々な形状に加工が可能、などの薄膜太陽電池ならではの特徴を有しており、現在主流の結晶シリコン太陽電池では実現できない将来の新しい用途への展開が期待されている。また、長波長光の発電特性に優れていることから、タンデム型超高効率太陽電池のボトムセルとして適している。今後はモジュールの高出力化と発電コスト低減への努力を進めるとともに、これらのような CIS 太陽電池の特徴を活用して重量制約のある屋根や設置面積に制限のある移動体などの新市場創出へ向けた新技術開発に取り組むことで、太陽電池の設置場所を拡大し太陽光発電の主力電源化への貢献を目指す。

3. 波及効果

本共同研究開発事業の成果によって、CIS 太陽電池は結晶シリコン太陽電池などの他の太陽電池技術と同等の発電コストを実現する優れた太陽電池技術であることが示された。今後、本事業の成果がさらに実用化されていくことによって、さらに低コストで高性能な CIS 太陽電池モジュールが市場に供給され、国内の太陽光発電システムのさらなる発電コスト低減に大きく貢献することが予想される。また、本事業で得られた数々の基礎的な知見は CIS 太陽電池モジュールの高性能化のみならず、非ガラス基板を用いた軽量モジュールやタンデム型太陽電池用ボトムセルの開発にも有用なものであり、本事業の成果の活用により今後の CIS 太陽電池の多用途展開による太陽電池新市場の創出が期待される。

4. 今後の展開

本研究開発事業の成果により、小面積セル変換効率 23.4%とサブモジュール開口部面積効率 19.8%を達成した。また小面積セル、サブモジュール開発における既開発技術の移転や製造プロセスの改善によって出力を大幅に向上させた 185W 新型モジュールをリリースし、最終目標である発電コスト 14 円/kWh を大きく下回る 13.3 円/kWh を達成した。今後もこのような技術移転の流れを踏襲して CIS 太陽電池モジュールの高性能化を進める。まずは、19.8%サブモジュールを実現した技術の工場移転を進めることによって量産モジュールのさらなる高出力化を目指す。並行して得られた基礎的な知見を活用し CIS 太陽電池モジュールの高信頼性化や長寿命化技術開発に取り組み、発電年数の向上による発電コストの低減を目指す。このためには新たに導入するプロセスを開発し、そのコストメリットの検討、大面積薄膜での面内均一性や繰り返し再現性、安定性などの検証を通じて工場での実証実験へと移行する必要がある。また、小面積セルの基礎研究に立ち返り、次世代の高性能化要素技術の開発に注力し、変換効率 25%の達成を目指す。その要素技術を再度サブモジュール、量産モジュールへと移転していくことによって CIS 太陽電池技術全体の高性能化を進めていく。さらに多用途展開による新市場創出を目指し、加重制約のある屋根向けの軽量モジュールの開発や移動体向けタンデム型超高効率太陽電池ボトムセル用の CIS 太陽電池セルの開発に取り組む。これらの取り組みにも本事業で得られた様々な基礎的な知見が活かされる。

5. 特許論文リスト

	2015 年度	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	1 (0)	5 (1)	6 (0)	5 (3)	10 (5)	27 (9)
論文	0	1	2	2	1	6
研究発表・講演 (うち国際会議)	8 (5)	9 (7)	7 (7)	4 (2)	13 (6)	41 (27)
新聞・雑誌等への掲載	206	46	157	79	0	488
その他	0	0	0	0	0	0

(2020 年 08 月 31 日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日 移行日	状態	名称	発明者
1	ソーラーフロンティア(株)	特願 2015-205591	国内	2015/10/19	放棄 (PCT 出願)	光電変換素子	足立駿介 他 2 名
2	ソーラーフロンティア(株)	特願 2016-091479	国内	2016/4/28	出願	光電変換層の製造方法及び光電変換素子の製造方法	半田篤志 他 3 名
3	ソーラーフロンティア(株)	特願 2016-091509	国内	2016/4/28	出願	光電変換層の製造方法及び光電変換素子の製造方法	廣井誉 他 3 名
4	ソーラーフロンティア(株)	特願 2016-130949	国内	2016/6/30	出願	光電変換モジュール	木島駿介 他 8 名
5	ソーラーフロンティア(株)	特願 2016-130867	国内	2016/6/30	出願	光電変換モジュールの製造方法	木島駿介 他 8 名

6	ソーラーフロンティア(株)	PCT/JP2016/78718	PCT	2016/9/28	放棄 (PCT 移行)	光電変換素子	足立駿介 他 2 名
7	ソーラーフロンティア(株)	特願 2017-178367	国内	2017/9/15	放棄 (PCT 出願)	光電変換モジュール及び光電変換モジュールを製造する方法	米山延孝 他 5 名
8	出光興産(株)	特願 2017-178368	国内	2017/9/15	出願	光電変換モジュールの製造方法	濱野幹雄 他 5 名
9	出光興産(株)	特願 2017-178369	国内	2017/9/15	出願	光電変換モジュール	米山延孝 他 5 名
10	ソーラーフロンティア(株)	特願 2017-178370	国内	2017/9/15	放棄 (PCT 出願)	光電変換モジュール及び光電変換モジュールを製造する方法	米山延孝 他 5 名
11	出光興産(株)	特願 2017-207415	国内	2017/10/26	出願	光電変換素子の製造方法	呉志力 他 2 名
12	ソーラーフロンティア(株)	特願 2017-546467	国内	2018/2/6	出願	光電変換素子	足立駿介 他 2 名
13	ソーラーフロンティア(株)	US15/769257	外国	2018/4/18	出願	光電変換素子	足立駿介 他 2 名
14	出光興産(株)	PCT/JP2018/32774	PCT	2018/9/4	放棄 (PCT 移行)	光電変換モジュール及び光電変換モジュールを製造する方法	米山延孝 他 5 名
15	出光興産(株)	PCT/JP2018/32775	PCT	2018/9/4	放棄 (PCT 移行)	光電変換モジュール及び光電変換モジュールを製造する方法	米山延孝 他 5 名
16	出光興産(株)	特願 2018-237248	国内	2018/12/19	放棄 (PCT 出願)	光電変換素子および光電変換素子の製造方法	富田仁 他 1 名
17	出光興産(株)	特願 2018-237264	国内	2018/12/19	出願	光電変換素子	富田仁 他 1 名

18	出光興産(株)	特願 2019-084972	国内	2019/4/26	出願	光電変換素子の製造方法	岩田恭彰 他 2 名
19	出光興産(株)	特願 2019-160289	国内	2019/9/3	出願	微小構造体、微小構造体の製造方法および光電変換素子	加藤拓也 他 2 名
20	出光興産(株)	特願 2019-160442	国内	2019/9/3	出願	薄膜光電変換素子および薄膜光電変換素子の製造方法	加藤拓也 他 2 名
21	出光興産(株)	PCT/JP2019/048683	PCT	2019/12/12	出願	光電変換素子および光電変換素子の製造方法	富田仁 他 1 名
22	出光興産(株)	特願 2019-542010	国内	2020/1/31	出願	光電変換モジュール及び光電変換モジュールを製造する方法	米山延孝 他 5 名
23	出光興産(株)	特願 2019-542011	国内	2020/1/31	出願	光電変換モジュール及び光電変換モジュールを製造する方法	米山延孝 他 5 名
24	出光興産(株)	US16/647160	外国	2020/3/12	出願	光電変換モジュール及び光電変換モジュールを製造する方法	米山延孝 他 5 名
25	出光興産(株)	US16/646948	外国	2020/3/12	出願	光電変換モジュール及び光電変換モジュールを製造する方法	米山延孝 他 5 名
26	出光興産(株)	CN201880059780.3	外国	2020/3/13	出願	光電変換モジュール及び光電変換モジュールを製造する方法	米山延孝 他 5 名
27	出光興産(株)	CN201880059775.2	外国	2020/3/13	出願	光電変換モジュール及び光電変換モジュールを製造する方法	米山延孝 他 5 名

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
----	-----	----	------	------------	----	------

1	T. Kato	ソーラーフロンティア(株)	CIGS solar cell research in Solar Frontier: progress and current status	Japanese Journal of Applied Physics: Special Issue 56, 04CA02	有	2017年2月
2	K. F. Tai et al.	ソーラーフロンティア(株)	From 20.9% to 22.3% CIGS solar cell: Reduced recombination rate at the heterojunction and the depletion region due to K-treatment	Japanese Journal of Applied Physics: Special Issue 56, 08MC03	有	2017年7月
3	T. Kato et al.	ソーラーフロンティア(株)	Enhanced efficiency of Cd-free Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ minimodule via (Zn, Mg)O second buffer layer and alkali metal post treatment	IEEE Journal of Photovoltaics 7, 1773	有	2017年9月
4	Q. Han et al.	ソーラーフロンティア(株)	High-performance perovskite/Cu(In, Ga)Se ₂ monolithic tandem solar cells	Science 361, 904	有	2018年8月
5	T. Kato et al.	ソーラーフロンティア(株)	Record Efficiency for Thin-Film Polycrystalline Solar Cells Up to 22.9% Achieved by Cs-Treated Cu(In, Ga) (Se, S) ₂	IEEE Journal of Photovoltaics 9, 325	有	2018年12月
6	M. Nakamura et al.	出光興産(株)	Cd-Free Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ Thin-Film Solar Cell with Record Efficiency of 23.35%	IEEE Journal of Photovoltaics 9, 1863	有	2019年9月

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	H. Sugimoto et al.	ソーラーフロンティア(株)	Achievement of over 18% efficiency on 30x30cm ² -sized Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ Submodules	2015 European Materials Research Society (E-MRS) Spring Meeting	2015年5月
2	R. Kamada et al.	ソーラーフロンティア(株)	Evaluation of “rollover” in Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ thin film solar cells using Suns-Voc measurements	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)	2015年6月
3	M. Nakamura et al.	ソーラーフロンティア(株)	Current status at Solar Frontier: from fundamental research to industrial mass production of Cd-free Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ solar cell	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)	2015年6月
4	T. Kato et al.	ソーラーフロンティア(株)	Capacitance and admittance studies on metastable and sodium-related defects in Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ thin film solar cell	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC)	2015年9月

5	K. Kitani et al.	ソーラーフロンティア(株)	Characterization of Na depleted Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ thin-film solar cell	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC)	2015年9月
6	加藤拓也	ソーラーフロンティア(株)	セレン化法によるCIS太陽電池の高効率化	日本学術振興会第175委員会「化合物薄膜太陽電池分科会」第5回研究会	2015年9月
7	杉本広紀	ソーラーフロンティア(株)	大面積CISサブモジュール及びCZTSサブモジュールの高効率化	2015年度応用物理学会「多元系化合物・太陽電池研究会」年末講演会	2015年12月
8	杉本広紀	ソーラーフロンティア(株)	次世代カルコパイライト系薄膜太陽電池の現状と展望	立命館グローバル・イノベーション研究機構シンポジウム	2016年2月
9	H. Sugimoto	ソーラーフロンティア(株)	Recent progress in development of Cu(InGa) (SeS) ₂ solar cells in Solar Frontier from R&D to manufacturing	Photovoltaic Technical Conference (PVTC) 2016	2016年5月
10	R. Kamada et al.	ソーラーフロンティア(株)	New world record Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ thin film solar cell efficiency beyond 22%	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)	2016年6月
11	加藤拓也	ソーラーフロンティア(株)	CIS系太陽電池の現状と展望	第4回 環境・エネルギー・資源シンポジウム	2016年6月
12	T. Kato et al.	ソーラーフロンティア(株)	Characterization of the back contact of CIGS solar cell as the origin of “rollover” effect	32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC)	2016年6月
13	T. Kato	ソーラーフロンティア(株)	Recent research progress of high-efficiency CIGS solar cell in Solar Frontier	7th International Workshop on CIGS Solar Cell Technology (IW-CIGSTech)	2016年6月
14	杉本広紀	ソーラーフロンティア(株)	Recent progress in development of Cu(InGa) (SeS) ₂ solar cells	第35回 電子材料シンポジウム(EMS35)	2016年7月
15	K. F. Tai et al.	ソーラーフロンティア(株)	Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ solar cell research in Solar Frontier K. K. with 22.3% world-record efficiency	International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM) 2016	2016年9月
16	T. Kato et al.	ソーラーフロンティア(株)	Recombination analysis of CIGS solar cells using temperature and illumination dependent open-circuit voltage measurement	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC)	2016年10月

17	K. F. Tai et al.	ソーラーフ ロンティア 株	From 20.9% to 22.3% CIGS solar cell: reduced recombination rate at the interface and depletion region due to K-treatment	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC)	2016年10月
18	T. Kato	ソーラーフ ロンティア 株	CIGS solar cell research in Solar Frontier: progress and current status	2017 Materials Research Society (MRS) Spring Meeting	2017年4月
19	H. Sugimoto	ソーラーフ ロンティア 株	Challenge for high efficiency CIGS solar cells in Solar Frontier from R&D to manufacturing	8th International Workshop on CIGS Solar Cell Technology (IW-CIGSTech)	2017年5月
20	T. Kato et al.	ソーラーフ ロンティア 株	Enhanced efficiency of Cd-free Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ minimodule via (Zn, Mg)O second buffer layer and alkali post treatment	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)	2017年6月
21	V. Bermudez et al.	ソーラーフ ロンティア 株	Present status of Solar Frontier Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ record efficiencies and overall progress	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC)	2017年9月
22	T. Kato	ソーラーフ ロンティア 株	Progress in high efficiency CIGS solar cell and module research at Solar Frontier	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC)	2017年11月
23	J. -L. Wu et al.	ソーラーフ ロンティア 株	Investigation on alkali-treatment mechanisms for improving energy conversion efficiency of Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ modules	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC)	2017年11月
24	T. Kato	ソーラーフ ロンティア 株	CIGS development at Solar Frontier: from cell to manufacturing	International Workshop on High Efficiency CIGS solar cells	2017年11月
25	J. -L. Wu et al.	ソーラーフ ロンティア 株	New world record efficiency up to 22.9% for Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ thin-film solar cells	World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7)	2018年6月
26	T. Aramoto	ソーラーフ ロンティア 株	Solar Frontier: past, present, and future	9th International Workshop on CIGS Solar Cell Technology (IW-CIGSTech)	2018年6月
27	平井義晃	ソーラーフ ロンティア 株	ソーラーフロンティアにおける高性能 CIS 太陽電池の開発	日本学術振興会第175委員会 第15回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018年7月
28	加藤拓也	昭和シェル 石油株	高効率 CIS 系薄膜太陽電池の研究開発と量産	東京理科大学総合研究院太陽光発電技術研究部門 第9回シンポジウム「太陽電池・発電技術の最新動向」	2019年1月

29	M. Nakamura	昭和シェル石油(株)	New record CIGS _{Se} solar cell with a Zn-based buffer layer	10th International Workshop on CIGS Solar Cell Technology (IW-CIGSTech)	2019年5月
30	M. Nakamura et al.	昭和シェル石油(株)	Cd-free Cu(In, Ga)(Se, S) ₂ thin-film solar cell with a new world record efficacy of 23.35%	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)	2019年6月
31	田中良明ほか	出光興産(株)	カルコパイライト半導体薄膜形成過程へのGa比率の影響	日本学術振興会第175委員会 第16回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2019年7月
32	木本祥紀ほか	出光興産(株)	Cdフリーカルコパイライト化合物薄膜太陽電池の高性能化	日本学術振興会第175委員会 第16回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2019年7月
33	加藤拓也	出光興産(株)	カルコパイライト化合物薄膜太陽電池の高性能化と今後の展望	応用物理学会応用電子物性分科会7月研究例会	2019年7月
34	R. Kamada et al.	出光興産(株)	Alternative buffer layer for reducing optical losses in Cu(In, Ga)(Se, S) ₂ solar cells	36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC)	2019年9月
35	杉本広紀	出光興産(株)	高効率薄膜太陽電池の開発と新分野への展開	2019年 第80回応用物理学会秋季学術講演会	2019年9月
36	石内隆鳳ほか	出光興産(株)	Cu(In, Ga)(Se, S) ₂ 薄膜上における透明導電膜の導電メカニズム	2019年 第80回応用物理学会秋季学術講演会	2019年9月
37	T. Kato	出光興産(株)	Recent progress and future prospects of CIS-based thin-film solar cell technology - high efficiency and new applications	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC)	2019年11月
38	H. Sugimoto et al.	出光興産(株)	High-performance near-stoichiometric Cu(In, Ga)(Se, S) ₂ solar cells by sub-percent Ag-doping	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC)	2019年11月
39	山口幸士ほか	出光興産(株)	Cu(In, Ga)(Se, S) ₂ 薄膜太陽電池の光学損失評価	薄膜材料デバイス研究会 第16回研究集会	2019年11月
40	稲留徹ほか	出光興産(株)	Cu(In, Ga)(Se, S) ₂ 薄膜太陽電池へのアルカリ処理の効果	薄膜材料デバイス研究会 第16回研究集会	2019年11月

41	Y. Hirai et al.	出光興産(株)	Recent progress and future prospects of CIS-based thin-film solar cell technology - high efficiency and new applications	International Workshop on Ternary and Multinary Compounds (IWTMC2019)	2019年11月
----	-----------------	---------	--	---	----------

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	ソーラーフロンティア(株)	高効率、曲がる太陽電池、ソーラーフロンティア、電気変換13%台	日本経済新聞 他	2015/6/22
2	ソーラーフロンティア(株)	開発物語 ソーラーフロンティア「CIS太陽電池」 常識を覆した驚異の変換効率達成	フジサンケイビジネスアイ	2015/9/28
3	ソーラーフロンティア(株)	ソーラーフロンティア、CIS型太陽電池で効率22.3%を達成	日経テクノロジーオンライン 他	2015/12/8
4	ソーラーフロンティア(株)	CIS太陽電池で効率26%へ、コスト低減では世界を牽引	日経エレクトロニクス	2016/1/13
5	ソーラーフロンティア(株)	ソーラーフロンティア、コスト20%削減の新型パネル展示	フジサンケイビジネスアイ 他	2016/7/1
6	ソーラーフロンティア(株)	Solar Frontier's CEO Aims for 40-Cents-Per-Watt CIGS Modules	GreenTechMedia 他	2016/9/16
7	ソーラーフロンティア(株)	ソーラーフロンティア、CIS系薄膜太陽電池サブモジュールで世界最高変換効率19.2%を達成	読売新聞 他	2017/2/27
8	ソーラーフロンティア(株)	ソーラーフロンティアの太陽電池モジュール、環境省による「L2-Tech認証」取得	日経産業新聞 他	2017/4/4
9	ソーラーフロンティア(株)	昭和シェルとソーラーフロンティア、2017年度科学技術分野の文部科学大臣表彰で科学技術賞(開発部門)を受賞	電波新聞 他	2017/4/12
10	ソーラーフロンティア(株)	ソーラーフロンティア、高出力の新型CIS薄膜太陽電池「SFKシリーズ」	日本経済新聞 他	2017/6/21
11	ソーラーフロンティア(株)	ソーラーフロンティア、薄膜太陽電池を改良しエネ変換効率22.9%	日刊工業新聞 他	2018/1/10
12	ソーラーフロンティア(株)	ソーラーフロンティア、累計出荷量5GWを達成	日本経済新聞 他	2018/4/4
13	ソーラーフロンティア(株)	ソーラーフロンティアとNEDO、CIS系薄膜太陽電池セルで世界最高変換効率23.35%を達成	日本経済新聞 他	2019/1/17

【その他】

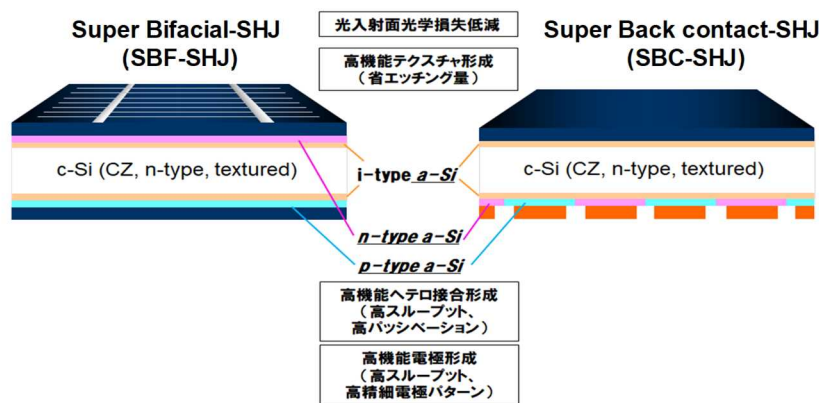
なし

I 低コスト・高信頼性・高効率 Super Si Hetero-junction (SSHJ) 太陽電池の開発 (パナソニック株式会社)

1. 成果詳細 1.1 まとめ

本共同研究開発の目的は、既に市場投入されている当社太陽電池の量産ラインに本共同研究で創出した開発技術を導入することで、NEDO 太陽光発電開発戦略 (NEDO PV Challenges) における当該太陽電池の発電コスト 7 円/kWh 達成目標年を 2030 年から 2025 年に大幅に前倒し実現することである。この実現のための数値目標として下記を設定した。ここで、SSHJ は、Super Si Hetero-junction を、SBF-SHJ は Super Bifacial-SHJ、SBC-SHJ は Super Back Contact-SHJ の略称である。これら構造と数値目標を図 III-2-(イ)-I-1 に示す。

- A) 試作モジュールで、発電コスト 7 円/kWh 相当の性能を確認する
モジュール変換効率：20.8% (SBF-SHJ)、22.0% (SBC-SHJ) @6 インチ
セル変換効率：24.0% (SBF-SHJ)、25.0% (SBC-SHJ) @6 インチ
- B) 発電コスト 7 円/kWh@2024 年を実現するための開発計画を提示する
発電コスト 7 円/kWh 実現の前提条件としては量産想定時の自社条件を用いる。



構造	コスト見込み	達成時期	モジュール効率	セル効率
SBF-SHJ	<14 円/KWh	2020年	20.5%	23.7%
SBF-SHJ	<7円/KWh	2024年	20.8%	24.0%
SBC-SHJ	<7円/kWh	2024年	22.0%	25.0%

図 III-2-(イ)-I-1 セル構造と数値目標

これら数値目標を達成するために、SSHJ 太陽電池の構造やプロセス技術について基礎的技術から量産化技術までを網羅した開発項目を設置し、量産を見据えた開発を進めた。基礎的技術の開発では、国立研究開発法人産業技術総合研究所 (AIST) とプラズマ CVD 法を用いた、また国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学 (JAIST) とは Cat-CVD 法を用いた SSHJ 太陽電池の形成技術に関する連携した共同研究を行い、それぞれ高効率化技術の知見を抽出した。さらに、大規模量子分子動力学膜反応計算技術を用いて原子レベルでのヘテロ接合形成過程について検討を行い、結晶 Si の結晶方位面とこの上に形成する a-Si 膜の成膜過程について実験結果と整合する結果を得ると共に、結晶 Si と a-Si 膜の界面の電子状態を詳細に解析することでパッシベーション性能を良化する開発指針を導出し、界面近傍の元素密度の導出に成功している。量産技術では開発した要素技術を効率的に組み合わせ、下記の結果を得ると共に、数値目標を達成した。表 III-2-(イ)-I-1 に成果をまとめる。

- A) モジュール変換効率(セルサイズ：6 インチ)：
21.0% (SBF-SHJ, 自社計算), 22.0% (SBC-SHJ, 自社計算)
セル変換効率(セルサイズ：6 インチ)：
23.9% (SBF-SHJ, AIST 測定), 25.4% (SBC-SHJ, AIST 測定)

B) 開発成果に基づいてシステム価格を試算したところ、2020年にSBF-SHJで14円/kWh、2024年時点でSBF-SHJ、SBC-SHJ共に7円/kWhの発電コストとなることがわかった。

表 III-2-(イ)-I-1 開発成果

構造	コスト見込み	達成時期	モジュール効率	セル効率	達成
SBF-SHJ	<14円/kWh	2020年	20.9%	23.8%	達成
SBF-SHJ	<7円/kWh	2024年			
SBC-SHJ	<7円/kWh	2024年	>22.0%	25.4%	

達成見込み

1.2 詳細

本事業では、SHJ太陽電池の高効率化、低コスト化の要素技術として、①大面積ウェハ対応技術、②高機能テクスチャ技術、③高機能ヘテロ接合技術、④高機能電極形成技術、⑤モジュール試作(要素技術ベストミックス)の開発を実施した。2018年度はこれら要素技術の出力向上効果の検証やプロセス方式の絞り込み、見極め等を中心に実施し、2019年度は①から⑤の各要素技術の組合せ最適化によりSBF-SHJとSBC-SHJの太陽電池セルで高出力を実証した。

図 III-2-(イ)-I-2に、SBF-SHJ太陽電池セル(6インチ)のI-V特性とモジュール外観写真を示す。NEDO開発期間内のセル変換効率としては、自社測定で23.8%を得ており、セル変換効率の目標(23.7%)を達成していた。これに加えて、第三者評価機関であるAISTにてセル変換効率の測定を行い、変換効率23.9%を得ることで、セル変換効率の目標達成を確認した。これは、60セル構成モジュールにおけるモジュール変換効率20.9%に相当し、モジュール変換効率目標(20.5%@2020年、20.8%@2024年)を超えており、2020年に発電コスト14円/kWh、2024年に発電コスト7円/kWhの発電コストが見込めるモジュール変換効率である。図 III-2-(イ)-I-3に、SBC-SHJ太陽電池セル(6インチ)のI-V特性とモジュール外観写真を示す。SBC-SHJセルで変換効率25.4%(AIST測定)を得た。これは60セル構成モジュールにおけるモジュール変換効率22.0%超に相当する。モジュール変換効率の目標(22.0%@2014年)を超えたため、2024年に発電コスト7円/kWhの達成できる見込みがたつた。

SSHJ太陽電池の変換効率のさらなる向上を目的として、③高機能ヘテロ接合技術の開発の枠組みの中で、太陽電池構造やプロセス技術の基礎的技術の開発として国立研究開発法人産業技術総合研究所(AIST)とプラズマCVD法を用いた、また国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学(JAIST)とはCat-CVD

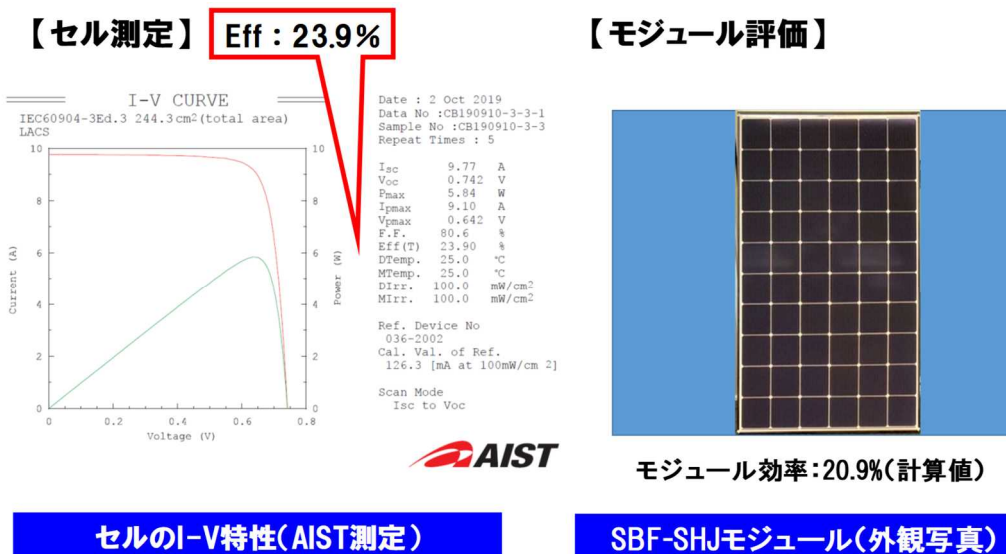
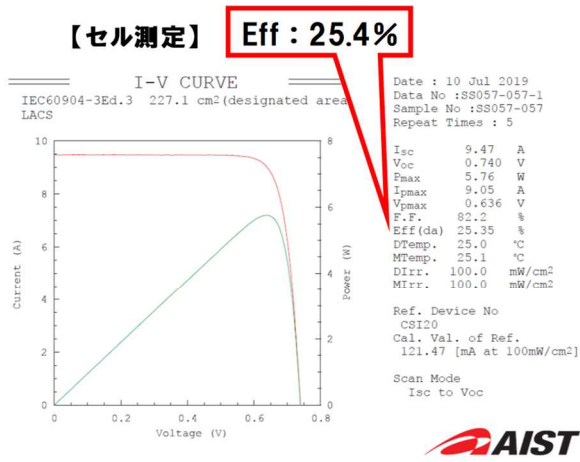


図 III-2-(イ)-I-2 SBF-SHJのセル効率とモジュール外観(開発期間中にセル効率23.8%(自社測定)を得ている)



モジュール効率: 22.0%超
(CTMからの計算値)

セルのI-V特性(AIST測定)

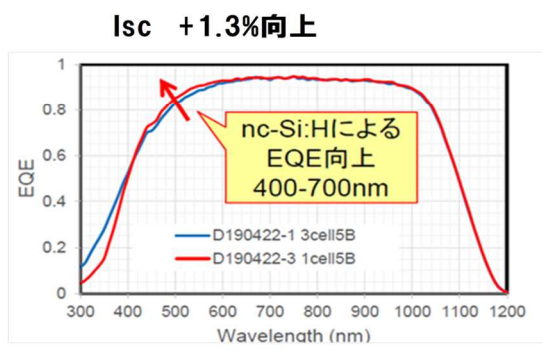
SBC-SHJモジュール(外観写真)

図 III-2-(イ)-I-3 SBC-SHJ のセル効率とモジュール外観

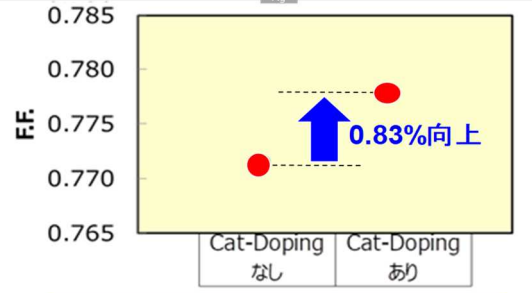
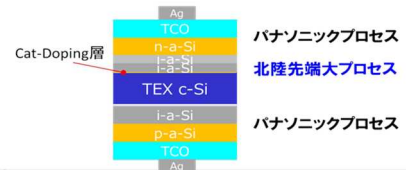
法を用いた SSHJ 太陽電池の形成技術に関する連携した共同研究を行なった。この結果を図 III-2-(イ)-I-4 に示す。AIST ではシリコン系ナノ Si 結晶窓層を用いることで EQE の短波長感度が向上し Isc で +1.3% の向上が、また JAIST の Cat-doping 技術では界面近傍のドーピング効果で FF が +0.83% 向上することがわかった。

・産総研: Si系ナノ結晶(nc-Si:H)窓層
⇒ Isc +1.3%

・JAIST: Cat-doping技術
⇒ FF +0.83%



AIST連携成果



JAIST連携成果

図 III-2-(イ)-I-4 AIST、JAIST との連携共同研究結果

さらに、この枠組みの中では大規模量子分子動力学膜反応計算技術を用いて原子レベルでのヘテロ接合形成過程について検討を行なった。図 III-2-(イ)-I-5 に結果を示す。結晶 Si の結晶方位面とこの上に形成する a-Si 膜の成膜過程について実験結果と整合する結果を得ると共に、結晶 Si と a-Si 膜の界面の電子状態を詳細に解析することでパッシベーション性能を良好化する開発指針を導出した。また、a-Si/c-Si ヘテロ接合の極薄膜領域の結合構造および電子状態の解析が可能であることも確認している。まだ基礎的な段階であり、今後技術改良の余地が残されているが、SHJ 太陽電池のさらなる性能向上に寄与しうる要素技術と考えている。

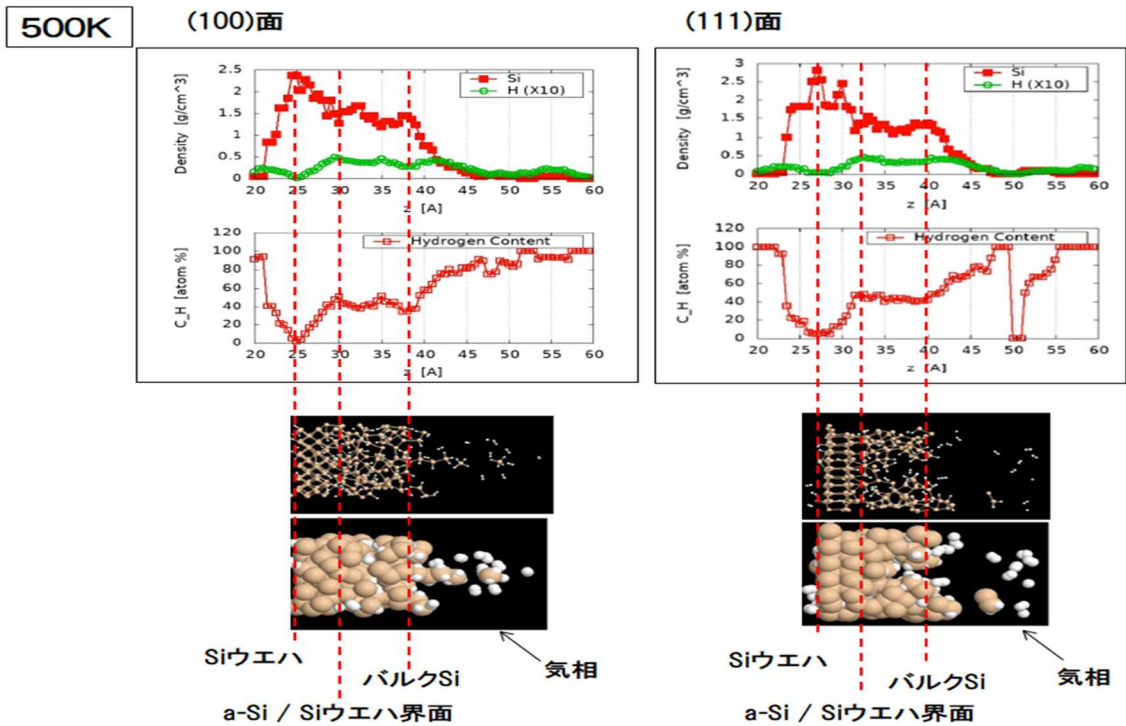


図 III-2-(イ)-I-5 大規模量子分子動力学膜反応計算による成膜過程と膜密度, 水素濃度の計算結果

2. 実用化・事業化見通し

パナソニックでは、太陽光発電システムと HEMS、蓄電池等を組み合わせたエネルギーソリューション事業を継続・強化している。この中で NEDO 技術成果の実用化・事業化計画についても検討を行っている。

3. 波及効果

今回の開発では、基礎的な技術開発の面において AIST、JAIST との連携共同研究の中で、SSHJ のさらなる高効率化の可能性が示されると共に、シミュレーション技術開発では、基礎的ではあるが、これまで可視化困難であったヘテロ接合の形成過程を可視化しその元素密度までを計算することに初めて成功している。太陽電池はその変換効率がシステム全体のコストに大きく影響する性質を持つと共に、SHJ 構造は単セルでの最高の変換効率が得られる構造の一つであることが報告されていることから、世界的な視点で見たときに SHJ 開発の指針となるものと期待している。

4. 今後の展開

太陽電池の変換効率向上技術はモジュール発電効率の向上を通して発電コストの低減に関わる重要な因子であり、太陽光発電システムの中核的な技術である。このことから、パナソニックを含め各企業この効率向上技術開発に先鋭的に取り組んでいる。一方、世界的な潮流を見ると、太陽電池と他の商品、例えば蓄電池や HEMS と組み合わせることで、新たな省電力の提案や CO2 排出削減・環境保護などの環境価値を創造する活動も活発に行われている。パナソニックは、このような国際的な活動が国内外を問わずに今後も活発に行われ、我々の生活にも積極的に取り込まれていくことを認識し、太陽光発電システムと HEMS、蓄電池等を組み合わせたエネルギーソリューション事業を継続・強化している。NEDO で開発した太陽電池の変換効率の向上技術は、数値目標を達成すると共に量産技術としての親和性が極めて高いことから、パナソニックのソリューション事業の継続・強化の重要な技術として十分に活用・展開して、環境価値のさらなる向上を図っていく。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	—	—	—	1 (0)	3 (0)	4 (0)
論文	—	—	—	0	0	0
研究発表・講演 (うち国際会議)	—	—	—	1 (0)	5 (3)	6 (3)
新聞・雑誌等への掲載	—	—	—	0	0	0
その他	—	—	—	0	2	2

(2020年08月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	パナソニック(株)	特願 2019-068620	国内	2019年 3月29日	出願	太陽電池セル	村上洋平
2	パナソニック(株)	特願 2019-178010	国内	2019年 9月27日	出願	太陽電池セル	伊坂隆行 藤嶋大介
3	パナソニック(株)	特願 2019-178305	国内	2019年 9月30日	出願	太陽電池セルおよび太陽電池セル製造方法	松山謙太
4	パナソニック(株)	特願 2019-178308	国内	2019年 9月30日	出願	太陽電池セル	片桐雅之

【論文】

なし

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	村上洋平	パナソニック(株)	Siヘテロ接合型太陽電池の開発と将来への応用展開	第16回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018年 7月5日
2	寺川朗	パナソニック(株)	Future of Silicon Heterojunction Solar PVs	Solar Industry Forum & Solar Mobility Forum	2019年 9月10日
3	寺川朗	パナソニック(株)	シリコンヘテロ接合太陽電池のさらなる進化に向けて	第81回応用物理学会秋季学術講演会	2019年 9月19日
4	松本 光弘	パナソニック(株)	High-efficiency technology of silicon heterojunction solar cells	PVSEC-29 (29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference)	2019年 11月7日

5	寺川朗	パナソニック(株)	Progress in Panasonic's Silicon Heterojunction Solar Cells	15th China SoG silicon and PV Power Conference (China Si PV)	2019年 11月23日
6	片山博貴	パナソニック(株)	大規模量子分子動力学シミュレーションを用いた a-Si/c-Si ヘテロ接合界面分析	第67回応用物理学会 春季学術講演会	2020年 3月15日

【新聞・雑誌等への掲載】

なし

【その他】

番号	年度	タイトル	名称	種類
1	2019年度	当社の将来技術の一部として発表	EU ゴールドインストラクターセミナー	展示会
2	2019年度	当社の将来技術の一部として発表	SPI (Solar Power International 2019)	展示会

(ロ) 革新的新構造太陽電池の研究開発／超高効率・低コストⅢ-V化合物太陽電池モジュールの研究開発

【A 低コストセル技術開発】(東京大学、シャープ株式会社、産業技術総合研究所、大阪市立大学(再))

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
a1. 高効率Ⅲ-V薄膜セル開発 (光閉じ込め) 【東京大学】	シャープと連携して量子井戸を含むⅢ-V薄膜3接合セルおよびⅢ-V薄膜2接合+シリコンセルに光閉じ込め構造を実装し、光閉じ込め効果を有効に用いることで変換効率33%の達成に資する。	サブセルの総厚を3.5 μmから1.0 μmまで約7割削減しても、効率は33.2%から30.2%まで約1割しか低下しないことをシミュレーションで示した。 コロイドリソグラフィ+ドライエッチングによる裏面テクスチャ形成を、薄膜2接合セル(InGaP 300nm/GaAs 600nm)に適用。裏面ミラーの場合に比べて主にGaAsの光吸収を増大してJ _{sc} を40%増大。	○	薄膜多接合セルへの光トラッピング適用の成功事例として世界初の成果
a2. 高効率Ⅲ-V薄膜セル開発 (光閉じ込め) 【シャープ】	化合物太陽電池層の膜厚を従来の1/4に低減した構造で、変換効率33%を達成する。	エピタキシャル最下層への裏面反射構造の導入、サブセルベース厚さの適正化によるエピタキシャル層の薄層化、バッファ層の薄型化を組み合わせ、3接合型セルでエピタキシャル層の厚さを従来比50%減で従来と同等の電気特性を得た。	△	
b1. シリコン上Ⅲ-Vセル(4端子) 【シャープ】	Ⅲ-V族2接合セルとSiセルとの接合を行ったセルで、変換効率33%を達成する。	低コスト化を主眼とした化合物太陽電池とSi太陽電池のスタック型セルについて、各種構造の評価を行い、透明樹脂によるメカニカルスタック構造が最も有効な構造であることを確認した。また本構造で作製した化合物2接合型セル(InGaP/GaAs)とSiセル(バックコンタクト型)の組み合わせで変換効率33%を得た。	○	

<p>b2. シリコン上Ⅲ-Vセル（スマートスタック）</p> <p>【産総研】</p>	<ul style="list-style-type: none"> • GaAs/Si 系で変換効率 30%. • システム価格 125 円/W 実現のためのスタック技術確立の指針獲得. • 大面積化セルの実装技術の確立、素子寿命 30 年以上の高信頼性化技術指針の確立 	<ul style="list-style-type: none"> • InGaP/AlGaAs//TOPCon Si 3 接合電池において 30.8%を実現した。 • Cu 金属、HVPE 法による GaAs 成膜、低倍集光等の適用により、システム価格 125 円/W 実現可能なことを検証した。 • スマートスタック GaAs//Si 多接合太陽電池の信頼性試験を行い、素子寿命 30 年以上および実用的な耐久性を実証した。 • スタンプ転写を用いたスマートスタック実装技術を確立し、GaAs/Si 系 2×2 太陽電池モジュールの試作に初めて成功した。 	○	
<p>b3. シリコン上Ⅲ-Vセル（直接接合）</p> <p>【大阪市大】</p>	<p>ウエハ接合によるシリコン上Ⅲ-V多接合セルにおいて、非集光下でセル効率 33%を実現する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 接合形成条件最適化により、GaAs 基板/Si 基板直接接合界面抵抗を 1.6 mΩcm² まで低減。 • Si ボトムセルのパッシベーション層として IT0 中間層を導入し直列抵抗低減、効率向上を実現。メタルグリッドを介した接合を実現しセルプロセスに適用。 • GaAs 基板再利用の可能性を実証。 	△	

<p>b4. シリコン上Ⅲ-Vセル（接着技術） 【東京農工大】</p>	<p>①高度光利用技術開発：メカニカルスタック層の光の伝達効率 94%、光反射ロス 6% ②大面積低抵抗接合技術開発：4インチレベルにおいてメカニカルスタック層の接合抵抗率 $0.5 \Omega \text{ cm}^2$ ③高効率多接合セル用低コスト化スタック技術開発：効率 30%セルの実現とシステムコスト 125 円/W を見込むスタック技術確立</p>	<p>① 高度光利用技術開発： 中間透明接着層両側に 130nm 厚の IGZO 薄膜を形成することにより光伝達効率 95%（光入射角 0 度）を達成した。(2) 光入射角度を 0~60 度に変えた時、実効的光伝達効率は 95~92%の高い値を維持することを明らかにした。(3) さらに中間接着層の屈折率が小さいほど実効的光伝達効率は大きくなり、屈折率 1 の場合、100%となることを明らかにした。 ② 大面積低抵抗接合技術開発： スタック基板表面を SF_6 プラズマ処理し 40nm 程度のラフネスを形成することにより接合抵抗率 $0.12 \Omega \text{ cm}^2$ の低抵抗率を達成した。 ③高効率多接合セル用低コスト化スタック技術開発： Ⅲ-V トップセルとシリコンボトムセルを用いた、$20 \times 20 \text{ mm}^2$ サイズの 2 接合メカニカルスタックソーラーセルを製作した。$V_{oc}=2.91 \text{ V}$, $J_{sc}=12.6 \text{ mA/cm}^2$, $FF=0.69$, 変換効率=24.9%を得た。目標の変換効率 30%は達成できなかった</p>	<p>①高度光利用技術開発： ◎ ②大面積低抵抗接合技術開発： ◎ ③高効率多接合セル用低コスト化スタック技術開発： △</p>	
---	--	--	--	--

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【B 低コスト化プロセス技術開発】（産業技術総合研究所、東京農工大学、東京大学、タカノ（再）、シャープ株式会社、豊田工業大学、宮崎大学、大陽日酸株式会社）

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
a1. 低コスト実装プロセス：エピ層移載 【東京大学】	4 インチウエハサイズの ELO 技術開発 表面清浄化技術開発、最適化と再利用 10 回以上の達成	ELO 自動制御装置での ELO 条件最適化、20mm/h の速度で 4 インチウエハ全面剥離を達成。（8 月現在：50mm/h 達成） 清浄化処理後ウエハで市販ウエハと同等の平坦性（RMS=0.2-0.3nm）、および再成長 GaAs セルの効率歩留り 81%を達成。シャープと協力し 10 回の再利用に資する技術レベルであることを確認	○	
a2. 低コスト実装プロセス：エピ層移載 【タカノ】	4 インチウエハサイズの ELO 自動化装置の開発。 4 インチウエハ表面の高速観察（1 時間以内）可能な装置の開発	4 インチウエハ用 ELO 自動制御装置を開発。再現性良い 4 インチウエハの全面剥離を実証。 全面観察装置を開発、1 時間以内の 4 インチウエハ非接触スキャン、さらに検出された異常点の分類判定の正答率 98.5%を達成。	○	
a3. 低コスト実装プロセス：エピ層移載・ウエハ再利用 【シャープ】	基板の再利用可能回数を 10 回まで向上させる。また、新規プロセスを経たセルの試作・評価を行い、発電コスト目標 7 円/kWh の達成に寄与し得るかの見極めを行う。	エピ層剥離装置の開発により安定したエピ剥離が可能、かつ、低コストの技術を確立した。 剥離後基板を低コストで再利用可能にする技術を開発し、開発した技術を用いて基板の再利用が 10 回以上可能であることを実証した。 量産装置の設計および価格見積を行い、開発したプロセスのコスト試算を実施した。	○	
a4. 低コスト実装プロセス：エピ層移載 【豊田工大】	・3 インチウエハサイズ の高速リフトオフ ・10 回以上の再利用 基板上へのⅢ-V 化合物セル作製	GaAs、および Si 基板上に層状化合物 GaSe/In ₂ Se ₃ をバッファ層で挿入して GaAs 層をエピ成長し、GaAs エピ層を基板から高速リフトオフする手法を開発した。液体窒素冷却による熱応力を利用し、3 インチ Si 基板から約 10 秒で GaAs エピ層剥離を実現した。	高速リフトオフ： ○ セル作製： △	

<p>b1. 低コストⅢ -V化合物半導 体製膜技術： MOCVD 【大陽日酸】</p>	<p>成長速度 100 μ m/h (GaAs)、20 μ m/h (InGaP)を得る。昇降温 時間各 15 分、搬送速度 15 分達成の為の要素技 術を確立する。さら に、in-situ クリーニン グによる高スループッ ト化手法を構築する。 MOCVD と HVPE の長所を 融合したハイブリッド 装置やその大口径化の 有効性を検証する。</p>	<p>対応基板サイズ 2 インチまたは 3 イン チ径基板 1 枚を処理できる MOCVD 装置 を開発した。基板はサセプタに載置さ れ、薄膜特性の均一化を目的としてサ セプタの自転機能を設けている。 In-Situ クリーニングに対応できる装 置とするとともに、フローチャンネル 構造および、サセプタの形状の設計変 更により、GaAs 成長速度 120 μ m/h を 達成し、InGaP 成長速度についても 30 μ m/h を確認した。</p>	<p>◎</p>	
<p>b2. 低コストⅢ -V化合物半導 体製膜技術： MOCVD 【東京大学】</p>	<p>MOCVDHVPE により成長速 度 100 μ m/h、効率 20%(GaAs)、成長速度 20 μ m/h、効率 12%(InGaP) を得る。</p>	<p>【GaAs セル】 120 μ m/h の成長速度で Voc=1.05V、効率 24.5%を達成 (p on n セル). n on p セルでは高速成長下で の高効率化がより難しいが、リアヘテ ロ構造により Voc=1.05V を達成。 【InGaP セル】 30 μ m/h の成長速度で 効率 15.3%を達成。 【InGaP/GaAs2 接合セル】 これらの成 果を組み合わせた 2 接合セルで効率 22.3% (反射防止膜で効率約 28%見込 み) を達成。</p>	<p>◎</p>	<p>GaAs セ ルの成長 速度と効 率の組み 合わせは 世界記録</p>
<p>b3. 低コストⅢ -V化合物半導 体製膜技術： HVPE 【大陽日酸】</p>	<p>成長速度 100 μ m/h (GaAs)、20 μ m/h (InGaP)を得る。昇降温 時間各 15 分、搬送速度 15 分達成の為の要素技 術を確立する。広い範 囲でドーピング可能な ガス供給システムを実 現する。MOCVD と HVPE の長所を融合したハイ ブリッド装置やその大 口径化の有効性を検証 する。</p>	<p>GaAs 成長速度 170 μ m/h を達成した。 InGaP 成長速度も 141 μ m/h を達成し た。また、Al 供給ラインの追加設計お よびその改造を行い、AlAs 成長を確認 した。スループット向上の為の高温搬 送改造を実施し、従来は反応炉内で 300°Cから 80°Cまでの冷却に 3 時間を 要していた工程を炉外で 20 分で冷却 できることを確認した。</p>	<p>◎</p>	
<p>b4. 低コストⅢ -V化合物半導</p>	<p>・大陽日酸が開発する HVPE 装置に対して、成</p>	<p>・ GaAs セルにおいて、14 μ m/h の成長 速度で変換効率 24.0%、170 μ m/h の成</p>	<p>◎</p>	<p>HVPE に よる ELO</p>

<p>体製膜技術： HVPE</p> <p>【産総研】</p>	<p>膜技術の研究開発を行い、単セル効率 24%(GaAs)、12%(InGaP)を達成する。</p> <p>・HVPE を用いた AlAs 層の成長により、ELO が可能であることを実証する。更に、トンネル接合形成による InGaP/GaAs タンデム太陽電池を試作し、2.4 V 以上の開放電圧を目標とする。</p>	<p>長速度で変換効率 22.4%を実現した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・InGaP セルにおいて 24 μ m/h の成長速度で変換効率 13.0%を実現した。成長速度は 141 μ m/h 達成。 ・Al 系成膜技術では、AlCl₃を優先的に生成する技術を開発し、AlInGaP、AlAs の成長を実現した。AlAs リリース層を用いた ELO 技術が可能であることを実証すると共に、GaAs/InGaAs スマートスタック太陽電池の作製に成功した。 ・高速成長を用いてトンネル接合を作製し、良好なトンネル特性を得た。InGaP/GaAs タンデムセルを試作し、開放電圧 2.32V、変換効率 21.8%を実現した。 		<p>技術の実証、及びスマートスタックセルの作製は世界初。</p>
<p>B5. 低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術： HVPE</p> <p>【東京農工大】</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・GaAs:30 μ m/hr 以上、InGaP: 10 μ m/h 以上の超高速成長技術を確立する。 ・高速で基板結晶に格子整合した三元混晶組成の制御 ・Al 元素を含む二元結晶および三元混晶の成長 	<ul style="list-style-type: none"> ・本 HVPE 成長の熱力学解析結果を基に作製した太陽日酸製 HVPE 装置により、理論解析を用いた成長条件の検討、およびノズル改良により、GaAs および InGaP とともに成膜成長速度 140 μ m/h 以上を達成した。(最終目標達成) ・Al 元素を含む化合物半導体の HVPE 成長の可能性の熱力学解析結果を応用し、AlAs の HVPE 成長に世界で初めて成功した。 	<p>◎</p>	
<p>c1. シリコン上Ⅲ-Vエピ成長</p> <p>【豊田工大】</p>	<p>2017 年度で終了</p>	<p>Si 上の GaAs ヘテロエピ成膜において、成膜法の改良により、GaAs 層の転位密度を $3 \times 10^5 \text{cm}^{-2}$ に低減した。</p>	<p>2017 年度で終了</p>	
<p>c2. シリコン上Ⅲ-Vエピ成長</p> <p>【宮崎大】</p>	<p>2017 年度で終了</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・低温成長 GaAs へのレーザーアニール <p>Nd-YAG レーザーを用いて 200°C で成長</p>	<p>2017 年度で終了</p>	

		<p>した Si 基板上的の GaAs 薄膜をアニー ル。照射時間、60 秒までは結晶性の向 上を確認。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・新規 Ge 原料を用いた Ge バッファ層 導入 <p>PJE 装置を用いた成長で Ge バッファ層 が平坦かつ高品質に成長可能な条件を 確認。Ge バッファ層上への GaAs 成長 で貫通転位低減、良好な GaAs/Ge 界面 を確認。</p>		
--	--	---	--	--

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【C 低コストモジュール開発】(シャープ株式会社、パナソニック株式会社、宮崎大学、豊田工業大学)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
a1. 低コストモジュール開発 【シャープ】	開発テーマ「A 低コストセル技術開発」および「B 低コスト化プロセス技術開発」の成果を利用して作製したセルを用い、モジュール変換効率30%以上を達成する。	低倍集光モジュールを作製し、太陽と正対したときの集光倍率1.9倍、屋外測定での許容角約±13°を得た。 テーマB a1～a3の成果を活用したELO法により作製した2接合型セルを用いたモジュールを作製し27.4%(セル面積)の結果を得た。またこのモジュールとSiセルとのスタック構造モジュールで変換効率30.7%(いずれかのセルのある面積)を得た。	○	
a2. 低コストモジュール開発 【豊田工大】	非集光下で効率33%のセルを用い、モジュール効率30%を達成する。	広角集光光学系を開発し、無追尾集光モジュールでモジュール効率32.8%達成(産総研認定)	○	
a3. 低コストモジュール開発 【パナソニック】	以下の性能を有するPICパネルの実現 ・大きさ: 99cm□ ・変換効率: 38%(PICモジュール) ・システムコスト: ≤190円/W ・PICモジュール製造コスト: ≤80円/W ・発電コスト: ≤14円/kWh	・PIC製造プロセスの低コスト化と長期信頼性を確保した構造で1m角パネルを作製し、変換効率32.2%を確認した。 ・モノモジュールにて、変換効率37.5%を確認した。 ・PIC構造にて、システムコスト試算(2030年)119円/W(100MW/年生産)と7円/kWhの実現見通しを得た。	○	
a4. 低コストモジュール開発 【宮崎大学】	モジュール表面コート技術の開発により、非集光下での効率33%セルを使用して、モジュール効率30%を達成する。	反射防止兼防汚コートを施すことで、太陽電池モジュールの発電量が2.52%増加した。シリカベースの反射防止コートは研究協力機関におけるモジュール構造に採用され、変換効率30%を超えるモジュールが開発された。	○	

<p>b1. 低コストモジュール発電量試算、屋外評価</p> <p>【シャープ】</p>	<p>低コストモジュールのフィールドテストを実施し、発電量や設備稼働率の実測結果から、発電コスト7円/kWhの達成に向けた見通しを得る。実車両に搭載した場合の化合物太陽電池の発電性能の検証を行い、車載用途の実現可能性について見極めを行う。</p>	<p>実用セルサイズの逆積み3接合型モジュール(非集光)試作を実施し、産業技術総合研究所の測定で、31.2%の効率を得た。</p> <p>上記モジュールの屋外発電量評価を実施し、単位面積当たり発電量で、結晶Siモジュール比151%の結果を得た。</p> <p>テーマA b1の成果を活用して作製した、化合物2接合+Siの4端子構造モジュールの屋外評価を実施し、単位面積あたりの発電量で、結晶Siモジュール比128%の結果を得た。</p> <p>屋外測定で得られたデータを宮崎大学および豊田工大で実施の発電量シミュレーションに提供した。</p> <p>屋外測定で得られたデータから発電量試算をおこない、設備稼働率の試算を実施した。</p> <p>開発した3接合型太陽電池の量産性評価を実施し良好な結果を得た。</p> <p>車載用途評価のためのモジュールを作製しプロジェクト外協力機関に提出し、協力機関で車両への実装および公道での実証試験を実施した。</p>	○	
<p>b2. 低コストモジュール発電量試算、屋外評価</p> <p>【豊田工大】</p>	<p>全国各地での年間発電量を算出することにより、発電コストを求める。</p>	<p>気象条件や大気条件から発電量を予測する手法を開発し、宮崎大学屋外計測データから検証を行った。</p>	○	
<p>b3. 低コストモジュール発電量試算、屋外評価</p> <p>【宮崎大学】</p>	<p>低コストモジュールの発電量や設備利用率の試算を実施し、7円/kWhの検証に必要なデータを取得する。</p>	<p>非集光III-V族多接合型太陽電池は、屋外動作において30.79%の変換効率を達成し、Si太陽電池モジュールに比べ約2倍の変換効率を示した。非集光III-V族多接合型太陽電池モジュールを含む他接合型太陽電池の屋外での発電動作が、気象条件、特に太陽光スペクトルの影響を強く受けることを、実証データをもとに世界で初めて明らかにした。さらに、宮崎大学に設置している各種太陽電池の実動作データをもとに、発電量シミュレーションモデルを構築し、全国837箇所における各種太陽電池の定格出力あたりの年間発電量予測が可能となった。</p>	○	

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【D 超高効率セル開発】（東京大学、埼玉大学（再）、豊田工業大学、九州大学（再）、シャープ株式会社、宮崎大学、産業技術総合研究所、電気通信大学、神戸大学、名古屋大学、名城大学）

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
a1. 多接合希 積窒化物 【東京大学】	希積窒化物サブセルの 高品質化と4接合セル への実装技術を確立 し、変換効率50%を目 指す。	・電流整合を満たす GaInNAs:Sb セルを 開発し、逆積み型 GaInP/GaAs/GaInNAs:Sb 格子整合系3接 合セルにおいて、非集光効率~30%を達 成。 ・ GaInP/GaAs/GaInNAs:Sb/Ge 4接合セ ルの開発に国内で初めて成功（ウエハ接 合）。また今後の課題を明らかにし、50% 達成に向けた見通しを得た。	○	
a2. 多接合希 積窒化物 【埼玉大学】	GaAs 基板上 GaInNAs ヘテロ接合セルの構造 設計及び試作を行い、 GaAs フィルタ下で短 絡電流密度 14mA/cm ² 以上を得る。	・窒素 δ ドープを利用した 1eV InGaAs:N 超格子の結晶成長条件を確 立。 ・成長条件とアニール条件の最適化で約 300 cm ² /Vs の電子移動度を達成。 ・試作セルで 1eV までのスペクトル感度 を確認。	△	
a3. 多接合希 積窒化物 【豊田工大】	2016 年度で終了	GaInNAs 材料の残留アクセプタの起源が NH 複合欠陥であり、ダブルアクセプタ である可能性を示した。	2016 年度 で終了	
a4. 多接合希 積窒化物 【九州大】	2016 年度で終了	GaAsN 材料の欠陥構造と電子物性の理論 解析から、高品質化のためにはN起因欠 陥の低減が必要であることを示した。	2016 年度 で終了	
a5. 多接合既 存構造 【シャープ】	他機関と共同で4接合 もしくは5接合型太陽 電池を開発し、50% (集光時)の変換効率 を目指す。	サブセルのpn接合の構造改良で開放電 圧の向上を確認した。いずれも従来比で InGaP: +0.046V, GaAs: +0.044V, 2接 合 (InGaP/GaAs): +0.067V を得た。	○	
a6. 多接合量 子構造 【東京大学】	超格子を挿入した4接 合セルにより、集光下 効率50%を目指す。	第3セルの性能目標値をほぼ達成(70 層の量子井戸により、吸収端 1.15eV, Woc=0.35V, 800nm のフィルタ下で開放 電圧 0.77V, 短絡電流 10mA/cm ² , 曲線因 子 0.69)。	○	ウエハ接合 による4接 合実現にリ ソースを集 中。
a7. 多接合ウ エハ接合 【東京大学】	GaAs 系接合と InP 系2 接合から成る4接合セ ルにより、非集光時変 換効率42%、集光下変	逆積みトップ InGaP/GaAs セル (GaAs ウ エハ: シャープ製) とボトム InGaAsP/InGaAs セル (InP ウエハ: 東大 製) の表面活性化接合により4接合セル	△	

	換効率 50%を目指す。	の作製に成功。InGaAs ボトムセルは外部発光効率 7.3%と世界最高水準の Voc=0.43V を達成し、表面活性化接合による低抵抗トンネル接合形成に成功するも、目標効率の達成には至らず。		
a8. 多接合動作解析 【宮崎大学】	最適なキャリア回収効率を示す各接合バンドラインナップの設計により、集光下効率 50%以上の他接合セル実現に寄与する。	歪緩和層を挿入した InGaAs/GaAsP 超格子太陽電池におけるキャリア緩和過程を 3 つの非破壊評価法で解析し、光吸収によって超格子内に励起された電子の 4 つの緩和過程の寿命を算出した。全温度領域で非発光損失が支配的であるが、温度上昇で熱脱出やトンネリング脱出が短くなることを見出した。	○	
b1. 量子ドットマルチバンド 【東京大学】	タイプ II 超格子セル、及び低電流・高電圧型低倍集光セルにより、効率 45%を目指す。	・低電流・高電圧型量子ドットセルにおいて効率 32.1% (225 sun) を達成。 ・2 段階光吸収の設計指針解明と室温動作、集光での電圧向上効果を確認した。	○	最適化により効率向上が見込まれる成果を得ている
b2. 量子ドットマルチバンド (ナローギャップ) 【東京大学】	プラズモン金属ナノ粒子層を組込んだ PbS QD/ZnO NW 太陽電池の NIR 領域 (0.9 μm 以上) で、η=4%以上を達成し、接合層を実装した多接合を実現する。	・0.87 μm 以上で、PCE=2.44%を達成。 ・金属ナノ粒子の導入により、EQE 及び PCE 向上、1.4 μm で光吸収の増強確認。 ・溶液プロセスで作製できるボトムセルを使った分光多接合で 30%超を実証。	△	
b3. 量子ドットマルチバンド 【産総研】	東大グループとの共同により集光下での変換効率 45%以上を目指す。	・InGaP 系ワイドギャップ半導体中にタイプ II 型 InP 量子ドットを作製し、長キャリア寿命 (30 ナノ秒以上) を達成。 ・タイプ II 量子ドットの高品質化により太陽電池特性向上。 ・東大と共同で、スマートスタック型高電圧低電流量子ドットセルにおいて、5 倍集光で効率 31%を達成。	2018 年度で終了	
b4. 量子ドットマルチバンド・高密度量子ドット成長技術	東大グループとの共同により集光下での変換効率 45%以上を目指す。	・面内密度 $1 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ の超高密度 InAs QD の成長技術の確立。 ・面内超高密度 QD における 3 次元量子閉じ込め効果及び面内ミニバンド化の検	△	

【電通大】		証、Type-II型で蛍光寿命 10ns 以上を確認。 ・集光下における FF 低下の抑制および変換効率向上の確認。		
b5. 量子ドットマルチバンド・キャリア取り出し 【神戸大学】	・室温におけるキャリア寿命として 100ns を超える長寿命化。 ・キャリア取出し効率は 80%以上に引き上げ。	ラチェット機構を量子ドットで実現し、100ns を超えるキャリア寿命を実現するとともに、それによって 2 段階光励起過程で生成されたキャリアの 80%の引き出しに成功した。	○	
c1. 窒化物セル 【名古屋大】	2017 年度で終了	・シミュレーションにより、非極性面上 30% In 組成 300nm 吸収層を用い、7 mA/cm ² の電流が得られることを明らかにした。 ・In 組成 20%程度の 180nm 膜厚の InGa _N 成長し、優れた表面モフォロジーと PV 特性を得た。	2017 年度で終了	
c2. 窒化物セル 【名城大】	2017 年度で終了	窒化物半導体 InGa _N セルと 3 接合太陽電池をメカニカルスタックによって接合し、開放電圧の向上を確認した。	2017 年度で終了	
c3. 窒化物セル 【東京大学】	2017 年度で終了	・PSD 装置改造により、InGa _N 膜の成長速度 1.2 μm/h に高速化 ・格子整合 ScAlMgO ₃ (0001) 基板上へ InGa _N エピタキシャル成長 ・PSD 高速成膜条件において膜厚 1 μm の In _{0.3} Ga _{0.4} N 成長を実現 ・トンネル接合用の高電子濃度 n 型 Ga _N 層作製プロセスの開発	2017 年度で終了	

* 1 達成度

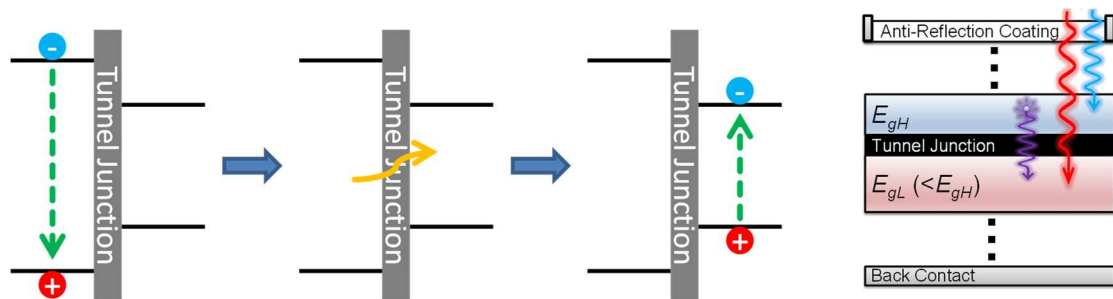
◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

A 低コストセル技術開発（東京大学、シャープ株式会社、産業技術総合研究所、大阪市立大学（再））

1. 成果詳細

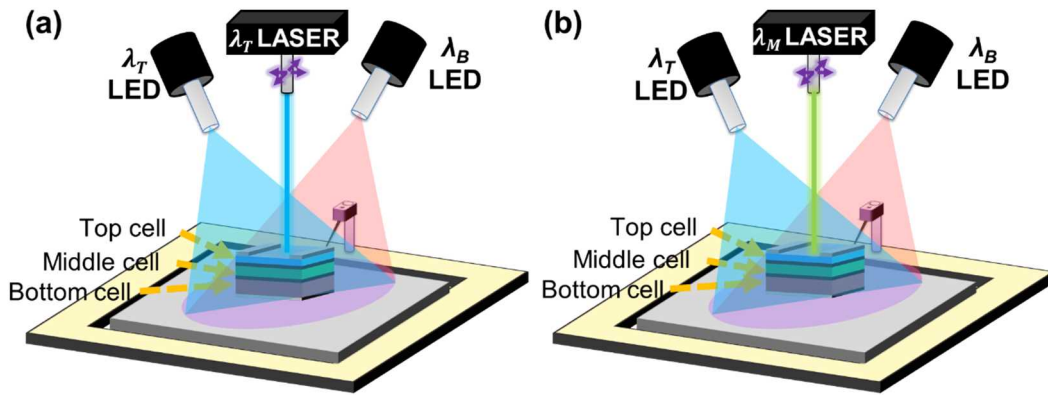
Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a1. 高効率Ⅲ-V薄膜セル開発（光閉じ込め）【東京大学】

多接合太陽電池において直列接続したダイオード間の電流整合条件により、太陽光スペクトルとのミスマッチが生じると電流不整合となり、最も小さなサブセル電流で外部回路への出力電流が律速される。最大変換効率及び実環境下での出力変動に大きな影響を及ぼすこの電流律速を、サブセル間の“ルミネッセンスカップリング(LC)”効果により緩和することができる。ルミネッセンスカップリングは、図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a1-1に示すようにセル上部のワイドバンドギャップ(E_{gH})サブセルに生成した電子正孔対が発光再結合し、セル下部のナローバンドギャップ($E_{gL} < E_{gH}$)サブセルで再吸収される現象である。例として InGaP/GaAs/Ge 3 接合太陽電池の場合、AM1.5 の基準太陽光スペクトル下では GaAs ミドルセルが電流律速サブセルとなる。InGaP トップセルから GaAs ミドルセルへのルミネッセンスカップリングにより、InGaP トップセルに生じた余剰キャリアが GaAs ミドルセルの電流生成に寄与することとなり、効率向上及び電流律速による出力変動を緩和することができると期待される。



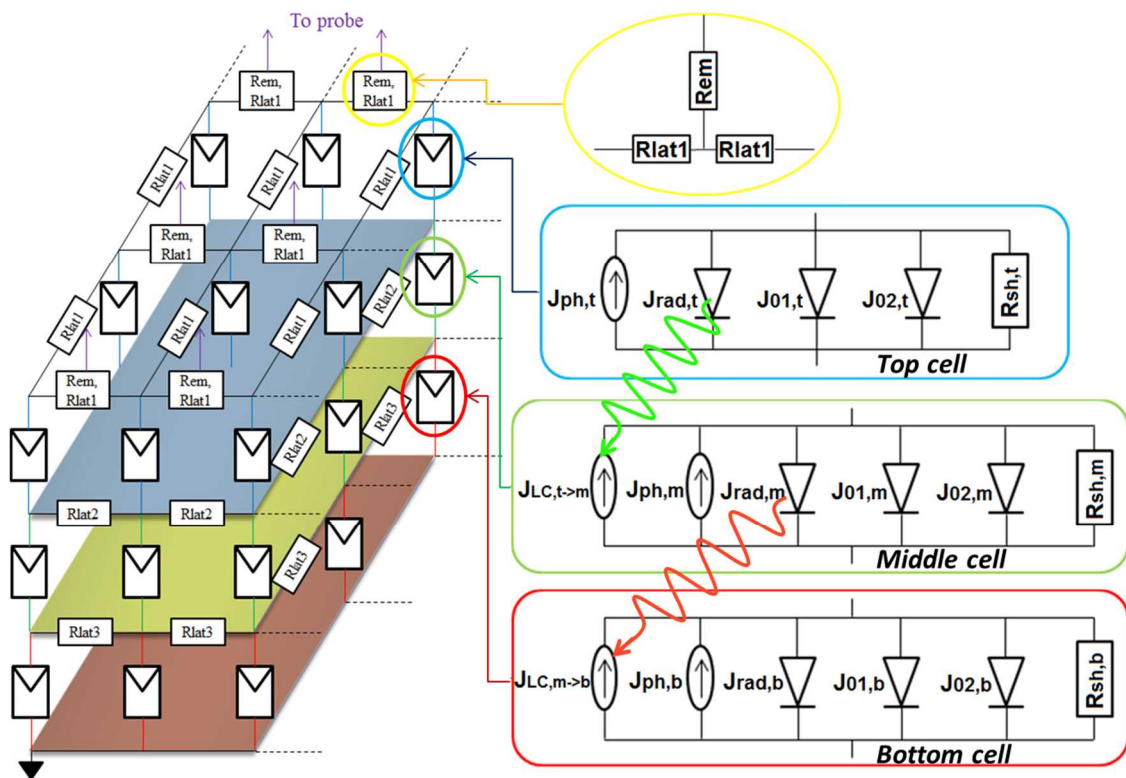
図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a1-1 ルミネッセンスカップリングの模式図

ルミネッセンスカップリングによって生じる電流（LC 電流）を計測するために、レーザー誘起光電流（LBIC）マッピングを用いた。LBIC 測定結果の解析のために、三次元デバイス回路シミュレーションを行った。LBIC は図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a1-2 に示すように、レーザー光を太陽電池セル上でスキャンすることで光電流分布を測定する手法である。多接合太陽電池において、レーザー光の波長を電流律速サブセルが吸収する波長(λ_m)に設定すると、サブセル直接励起による光電流分布を測定することができる。一方で、レーザー光の波長を電流律速サブセルよりワイドギャップのサブセルが吸収する波長(λ_r)に設定すると、電流律速サブセルを直接励起する外部光源は無い場合、ルミネッセンスカップリングによって電流律速サブセルに生じた LC 電流分布を測定することが可能となる。



図III-2-(ロ)-A-1-a1-2 多接合太陽電池におけるLBIC測定の様式図 (a) LC電流分布 (b) 直接励起電流分布

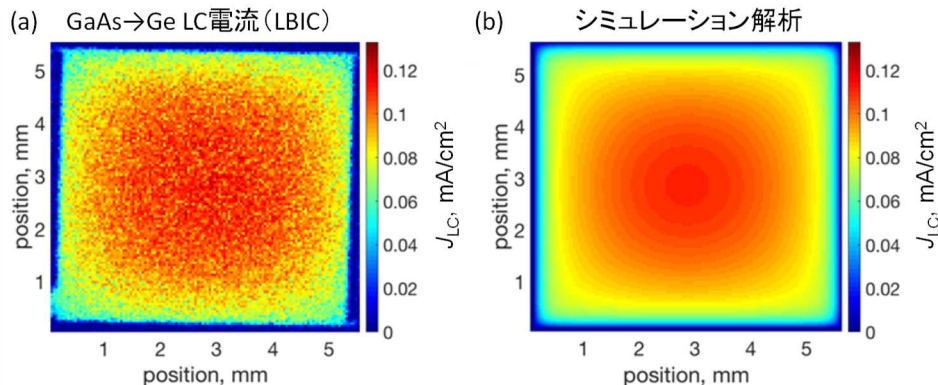
LBIC測定を解析し、LC電流の面内分布やLC効率を定量的に評価するために、三次元デバイス回路シミュレーションを行った。図III-2-(ロ)-A-1-a1-3に構築したモデル図を示す。各サブセルにおいてダイオードが面内配列して抵抗を介して接続している。ルミネッセンスカップリングは上部サブセルにおけるダイオードの発光再結合成分のうち、下部サブセルの光電流生成に寄与するものとして定義される。このモデルをSPICE回路シミュレータで解くことにより、LBIC測定結果の解析を行った。



図III-2-(ロ)-A-1-a1-3 三次元デバイス回路シミュレーションモデルの様式図

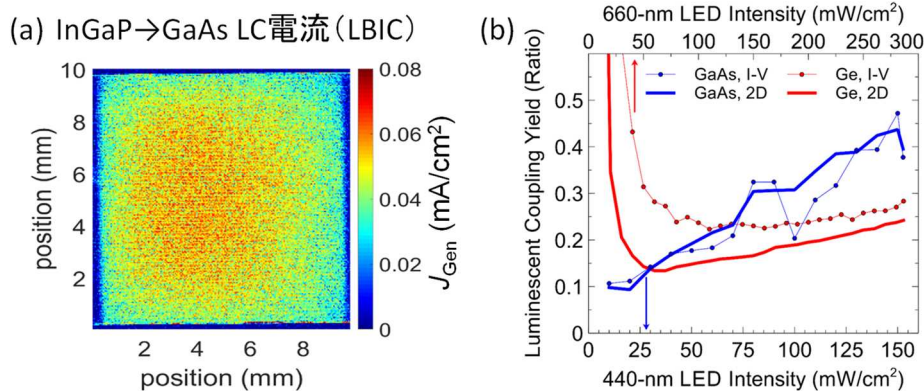
InGaP/GaAs/Ge 3接合太陽電池において、LBICにより測定したGaAs/Geサブセル間のLC電流の面内分布と、ルミネッセンスカップリングを考慮した三次元シミュレーション解析結果を比較した。図III-2-(ロ)-A-1-a1-4に示すように、LBICで測定したLC電流はセル中央付近にかけて大きく、この面内不均一性を三次元シミュレーション解析によって再現することができた。また、LC効果の面内不均一性を

改善することにより、セル変換効率が 0.36%増大する見積もりを得た。



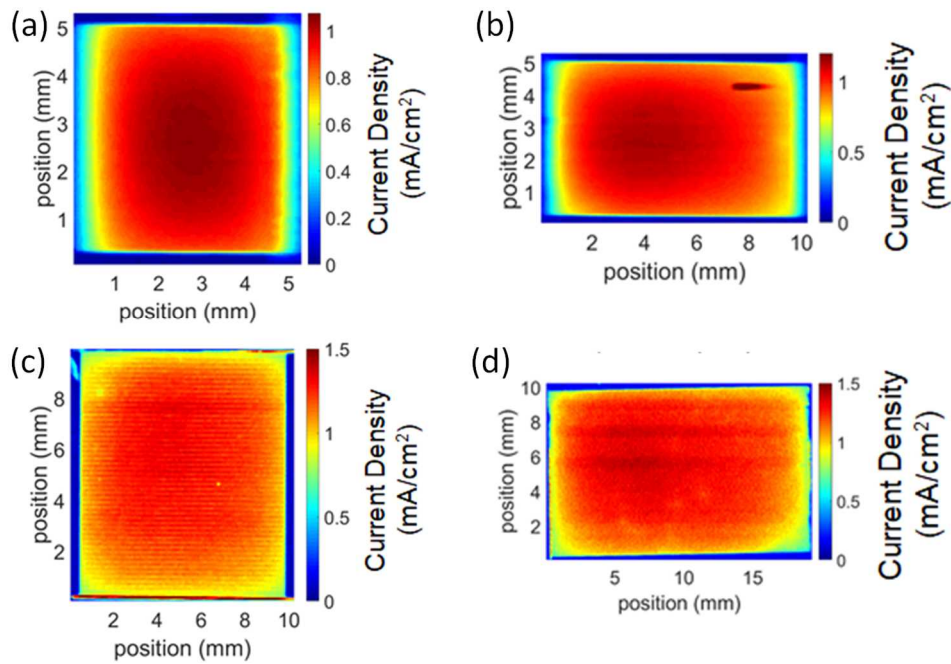
図III-2-(ロ)-A-1-a1-4 InGaP/GaAs/Ge 3 接合セルにおける (a) LBIC マッピング (b) 三次元シミュレーション解析

InGaP/GaAs/Ge 3 接合太陽電池において、AM1.5 照射下で電流律速となる GaAs サブセルに対して、InGaP/GaAs サブセル間のルミネッセンスカップリングによる LC 電流増大を評価した。図III-2-(ロ)-A-1-a1-5 に示すように、図III-2-(ロ)-A-1-a1-4 に示した GaAs/Ge サブセル間の LC 電流分布と同様に、面内不均一であることを明らかにした。InGaP/GaAs サブセル間の LC 効率は、GaAs/Ge サブセル間に比べて低バイアス光強度でもリークが少ない良好な結果が得られた。InGaP/GaAs サブセル間 LC 効率は約 10% と見積もられ、GaAs サブセルの電流律速を緩和して変換効率が增大することが期待される結果を得た。

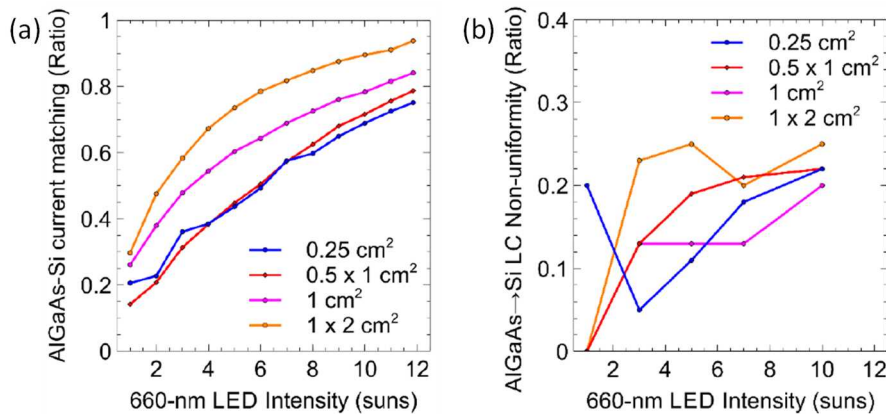


図III-2-(ロ)-A-1-a1-5 (a) InGaP/GaAs サブセル間の LC 電流分布 (b) LC 効率の LED バイアス光強度依存性

表面活性化接合(SAB)を用いて InGaP/AlGaAs 2 接合セルと Si セルを接合した InGaP/AlGaAs//Si 3 接合太陽電池において、ルミネッセンスカップリングによる LC 電流増大のセル面積依存性を評価した(図III-2-(ロ)-A-1-a1-6)。解析結果の図III-2-(ロ)-A-1-a1-7 に示すように、AlGaAs//Si サブセル間の LC 電流はセル面積が大きいほど増大し、また面内不均一性も大きいことを確認した。すなわち、1 cm²以上のセル面積では LC 電流により電流不整合が緩和され、ルミネッセンスカップリングによる効率向上が期待される。

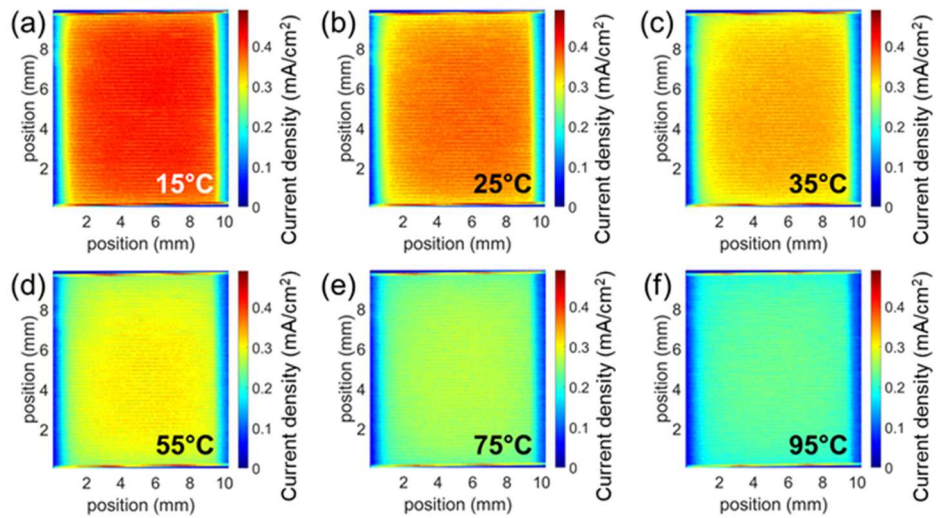


図III-2-(ロ)-A-1-a1-6 InGaP/AlGaAs//Si 3 接合セルの LC 電流分布 (a) 0.25 cm^2 (b) $0.5 \times 1 \text{ cm}^2$ (c) 1 cm^2 (d) $1 \times 2 \text{ cm}^2$

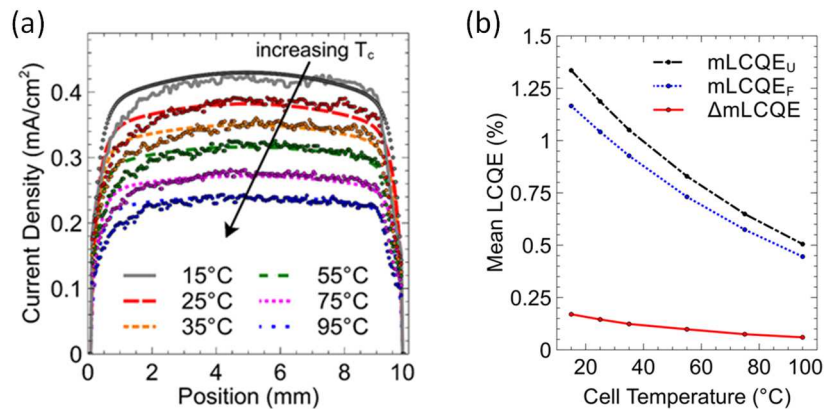


図III-2-(ロ)-A-1-a1-7 AlGaAs//Si サブセル間の (a) LC 電流による電流整合 (b) LC 電流の面内不均一性

InGaP/AlGaAs//Si 3 接合太陽電池において、ルミネッセンスカップリングの動作温度依存性を評価した。図III-2-(ロ)-A-1-a1-8 に LBIC で各温度において測定した AlGaAs//Si サブセル間の LC 電流分布、図III-2-(ロ)-A-1-a1-9 に LC 電流の面内不均一性及び LC 電流から見積もられた外部量子効率の増大分 (mLCQE) をプロットした。LC 電流の面内不均一性は温度が高いほど小さくなり、EQE 増大分も温度が高いほど小さくなった。また図III-2-(ロ)-A-1-a1-9(b)のように、面内不均一性が改善された場合と比較した EQE 増大分 (ΔmLCQE) も同様の温度依存性を示した。

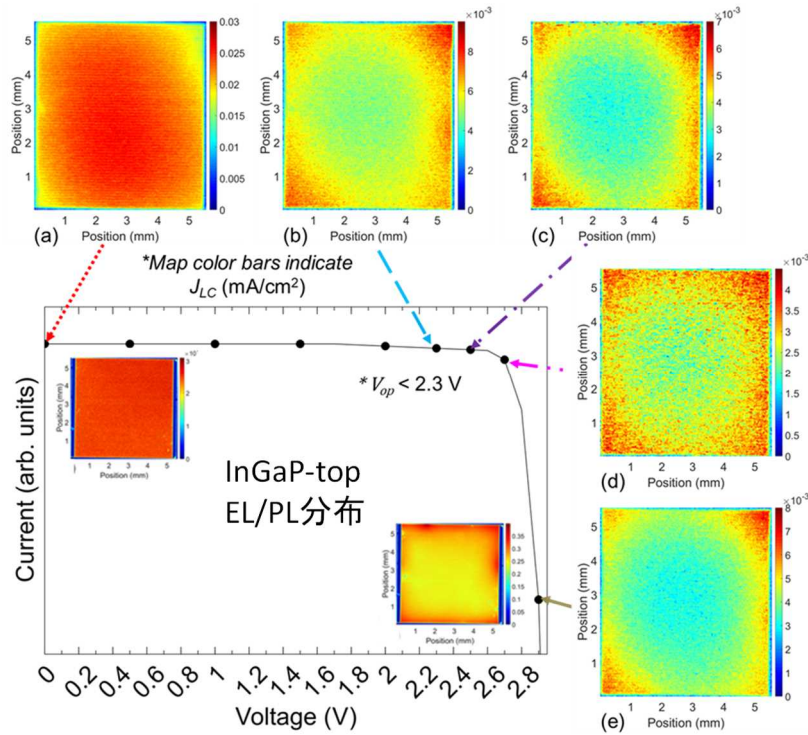


図III-2-(口)-A-1-a1-8 LC 電流のセル動作温度依存性 (a) 15°C (b) 25°C (c) 35°C (d) 55°C (e) 75°C (f) 95°C



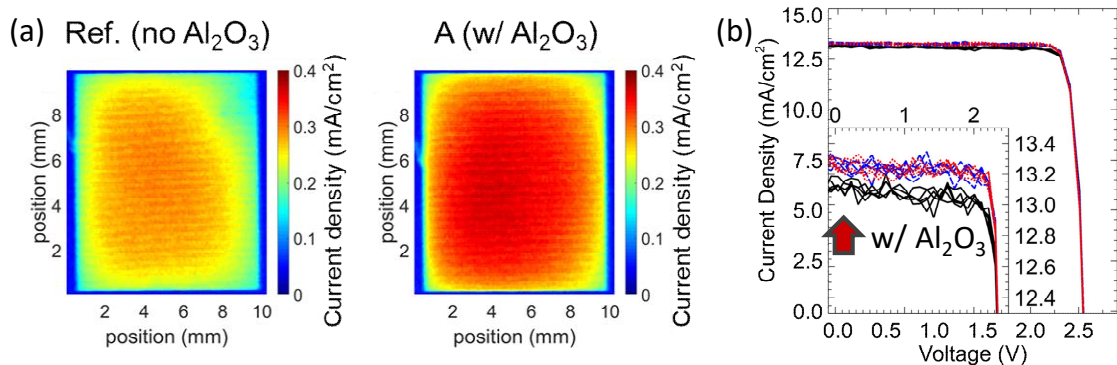
図III-2-(口)-A-1-a1-9 AlGaAs//Si サブセル間 LC 電流の温度依存性 (a) 面内不均一性 (b) EQE 増大分

多接合太陽電池における LC 電流の面内不均一性の起源を解明するため、InGaP/GaAs/Ge 3 接合セルにおける InGaP/GaAs サブセル間の LC 電流分布のバイアス電圧依存性と InGaP トップセルにおける EL/PL 面内分布との比較を行った。図III-2-(口)-A-1-a1-10 に結果のまとめを示す。動作点より高電圧側ではエッジ付近での LC 電流が多く、EL/PL 分布で見た InGaP の発光再結合速度分布と定性的に一致した。



図III-2-(ロ)-A-1-a1-10 InGaP/GaAs サブセル間の LC 電流分布と InGaP の EL/PL 分布のバイアス電圧依存性

LC 電流分布の不均一性改善に向けて、後処理による多接合太陽電池の端面パッシベーションを検討した。InGaP/GaAs/Ge 3 接合太陽電池において、原子層堆積(ALD)法を用いてセル端面に Al_2O_3 パッシベーション膜を形成した。図III-2-(ロ)-A-1-a1-11 に示すように、 Al_2O_3 の有無により InGaP/GaAs サブセル間の LC 電流面内分布の不均一性が改善され、電流電圧特性においても光電流が増大し改善が見られた。



図III-2-(ロ)-A-1-a1-11 端面 Al_2O_3 ALD 膜による (a) InGaP/GaAs サブセル間の LC 電流分布 (b) 電流電圧特性

以上、III-V族多接合太陽電池におけるサブセル間ルミネッセンスカップリングによって生じる、LC 電流の面内不均一性についての評価・解析から、LC 電流の面内不均一性を改善することで得られる高効率化とスペクトル変動による出力変動の抑制に向けた指針を解明することができた。

低コスト化に有効なエピタキシャル結晶層厚削減のポテンシャルを理論的に明確化するため、有限厚

さのサブセル材料による光吸収を考慮したサブセル間電流整合条件を検討した。シャープ楕による IMM 3 接合の薄膜化検討では、従来構造では 37%であった効率が、厚さ 1/2 で 35%、低コスト化目標達成に必要な厚さ 1/4 では効率が 28%まで低下してしまうという実験結果を得た。ただし、これは裏面をミラー電極とした場合であり、裏面テクスチャにより入射光を背面で散乱、表面での全反射を利用して光閉じ込めを行うことで実効的なセル厚さを確保して厚さ 1/4 でも効率を 30%以上に維持できる可能性がある。薄膜 GaAs やアモルファス Si など単セルでの光閉じ込めは、単に実効的な光路長を延長するだけで効率が向上するので単純である。一方、薄膜多接合セルの場合には、各セルで吸収波長帯が異なるため波長によって光路長の延長効果が大きく変化すること、さらにサブセル間で吸収する光子数を合わせて電流整合をとる必要があることから、理論計算を用いて最適な層厚の組み合わせを求める必要がある。

そこで、従来構造の IMM 3 接合の分光量子効率データにモデル計算をフィッティングして得られた InGaP, GaAs, InGaAs 各サブセル材料の光吸収係数をもとに、薄膜化した 3 接合セル内部において、各サブセルでの光吸収（層厚が小さいので、吸収帯域の波長であつても入射光の一部しか吸収しない）と表面・裏面での光多重反射を考慮に入れたサブセル電流出力を計算した。計算モデルの概略を図 III-2-(ロ)-A-1-a1-12 に示す。

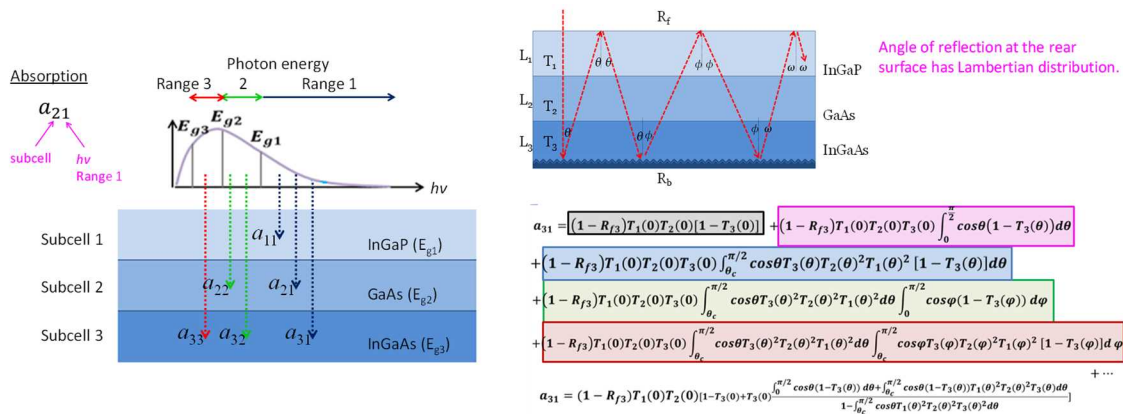


図 III-2-(ロ)-A-1-a1-12 薄膜多接合セル内部での各波長の光の吸収、散乱を計算し、各セルの光吸収を求めるモデル

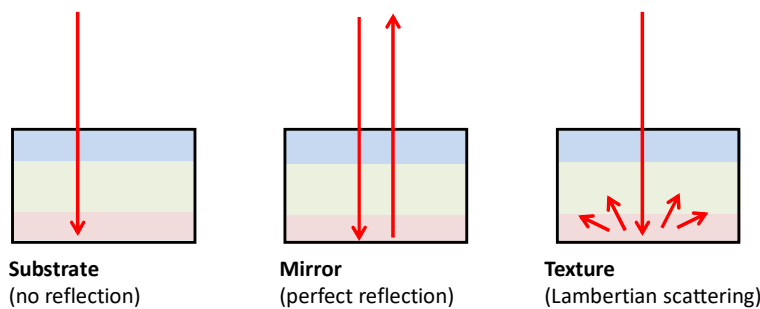
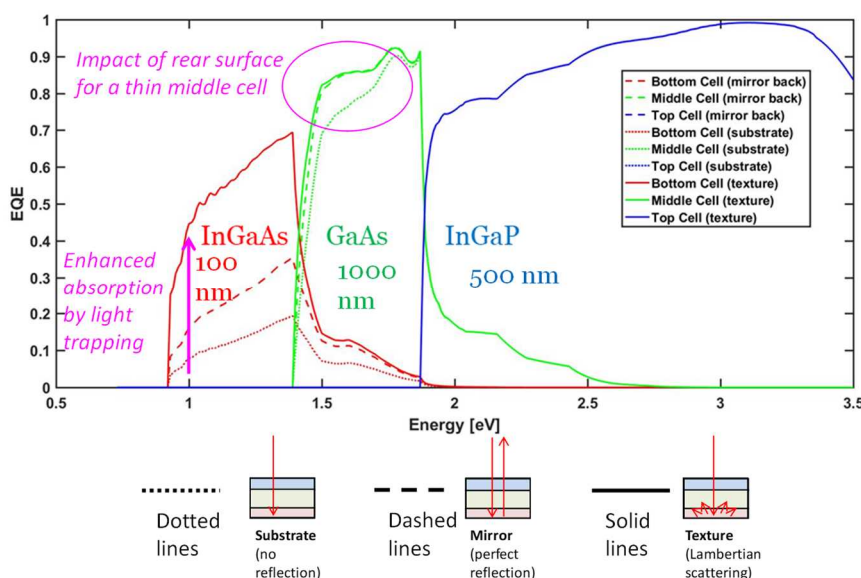


図 III-2-(ロ)-A-1-a1-13 セル裏面のモデル

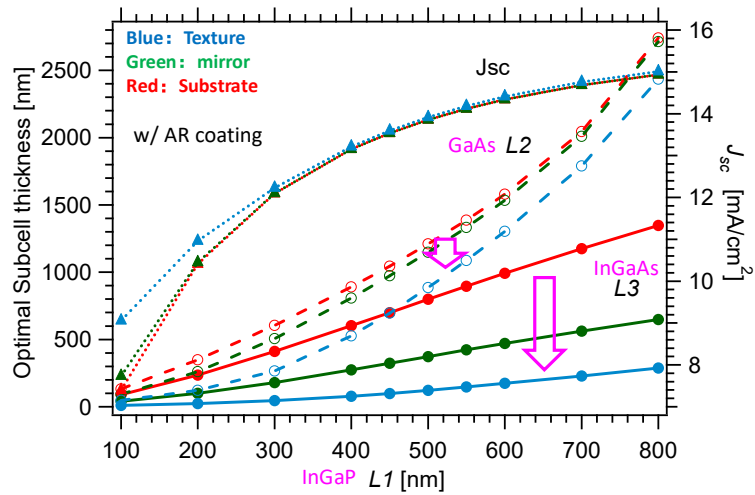
3 接合の光入射に対する裏面構造としては、完全光吸収の基板、平面状の完全鏡面（現状 IMM セルの理想状態）、Lambertian 散乱構造（理想的な光閉じ込めテクスチャ構造）の 3 種類を仮定した（図 III-2-(ロ)-A-1-a1-13）。散乱構造のみが、入射した光の反射方向を cosine 則に従って変化させることができ、この際に反射光の表面への入射角度が全反射条件を満たす場合に図 III-2-(ロ)-A-1-a1-12 に示すような全反射が起きる（図では裏面散乱の度に光の角度が変わっていることに注目されたい）。

このような計算の結果、AM1.5 入射光による各サブセルでの光吸収が計算され、図III-2-(ロ)-A-1-a1-14 に例示するような分光外部量子効率を得られる（表面の無反射コーティングを仮定している）。GaAs と InGaAs サブセルの間に存在するメタモルフィックバッファーによる光吸収は今回の計算では考慮されていない。各サブセルともに光の完全吸収に必要な厚さを大幅に下回っているため、サブセルの吸収波長域であっても量子効率は1にならずに、各サブセル材料での吸収係数が低下する長波長側に向けて低下する。その分、下に存在するサブセルの量子効率が上昇する形となる。ここで注目するのは、裏面テクスチャの効果である。InGaAs ボトムセルの吸収波長域はトップ2セルでは吸収されないため、裏面散乱による多重反射の効果は非常に大きい。図中の破線は垂直反射で光路長が2倍になった場合の結果であるが、これよりもはるかに大きい量子効率が裏面テクスチャの場合に得られている。すなわち、多重反射の効果がボトムセルの光吸収には顕著に現れる。一方で、ミドルセルでは破線の垂直反射と実線の多重反射の差はほとんどない。すなわち、図III-2-(ロ)-A-1-a1-14 に示したサブセル厚の組み合わせでは、裏面テクスチャの効果は InGaAs ボトムセルに限定される。ミドルセル、ボトムセルの厚さがさらに小さい場合には、ミドルセルの光吸収にも裏面テクスチャの効果の効果が現れる。



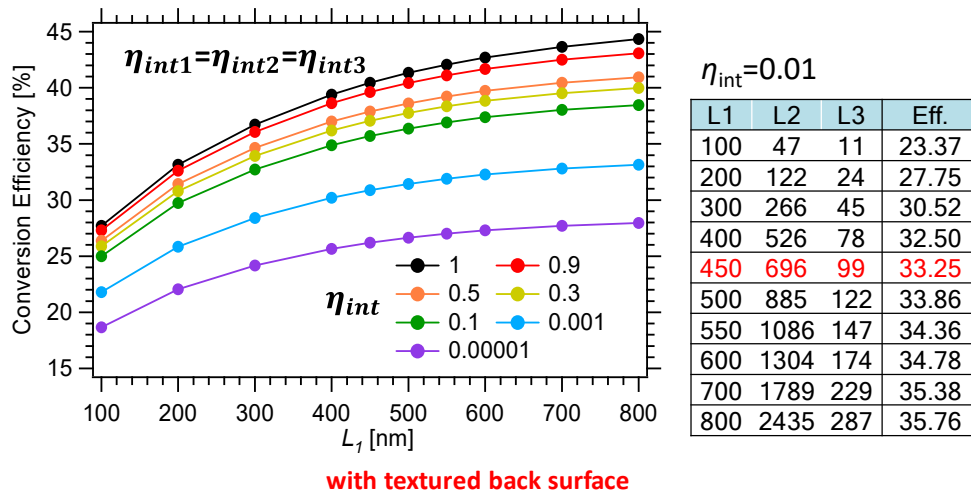
図III-2-(ロ)-A-1-a1-14 薄膜3接合セルの分光量子効率の計算結果例

このような計算により、電流整合を満たす薄膜3接合セルの各サブセル厚さを求めた結果を、図III-2-(ロ)-A-1-a1-15 に示す。InGaP トップセルの厚さの関数として計算している。セル裏面は、図III-2-(ロ)-A-1-a1-13 に示す3種を仮定している。裏面が吸収体（高ドープ基板）、垂直反射のミラー、散乱テクスチャの順で、電流整合に必要なサブセルの厚さが低減される。実際には、IMM 構造では裏面はミラーになるため、図の緑線と青線の差分が重要である。InGaAs ボトムセルの厚さは裏面ミラーを散乱テクスチャに変更すると約半分に低減される。GaAs ボトムセルの厚さに対する裏面テクスチャの効果はボトムセルほど大きくはないが、とくにセル全体が薄くなる（InGaP トップセルの厚さが小さくなる）と、裏面テクスチャによりミドルセルの厚さを2/3程度に低減できる。もちろん、セル全体が薄くなると光吸収が低下し、短絡電流が減少する。



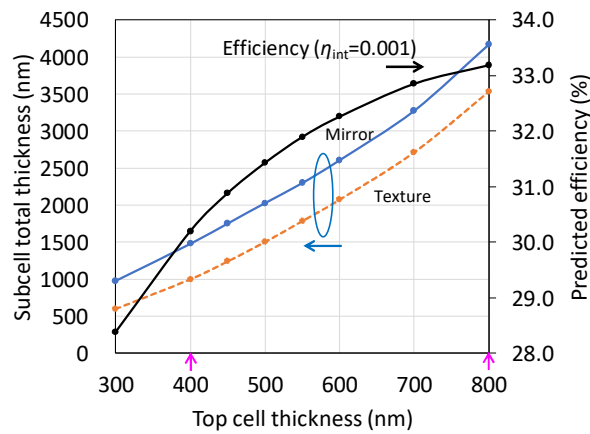
図III-2-(口)-A-1-a1-15 電流整合を満たす薄膜3接合セルの各サブセル厚さ。InGaP トップセルの厚さの関数として計算した値。セル裏面は、図III-2-(口)-A-1-a1-13 示す3種を仮定している

このような光吸収をベースに、サブセル材料の発光再結合効率 η_{int} を考慮した拡張詳細平衡理論による3接合セルの効率を計算した結果を図III-2-(口)-A-1-a1-16に示す。今回考慮した材料に関する典型的な値としては、 $\eta_{int}=0.01$ が目安となる。裏面 Lambertian 散乱構造を用いることで、3セルの厚さ合計が $1.2 \mu\text{m}$ 程度でも効率33%が達成可能という結果を得た。



図III-2-(口)-A-1-a1-16 裏面テクスチャを形成した電流整合条件を満たす3接合セルについて、サブセル材料の発光再結合効率 η_{int} を考慮した拡張詳細平衡理論による3接合セルの効率計算。 $\eta_{int}=0.01$ の場合に電流整合するサブセル厚さ (L1がInGaPトップでL3がInGaAsボトム) 及び変換効率

さらに低コスト化に有効なエピタキシャル薄膜の膜厚削減の可能性を明確化するため、サブセル間のルミネッセンスカップリングの効果をも考慮した効率予測を行った。裏面ミラーと裏面散乱体の2ケースについて、InGaP トップセルの厚さを変数として、その条件で電流整合をとるGaAs、InGaAsサブセルの厚さを計算で求め、サブセル材料の発光再結合効率 $\eta_{int}=0.001$ を仮定した拡張詳細平衡理論による3接合セルの効率計算を行った(図III-2-(口)-A-1-a1-17)。その結果、理想的な裏面テクスチャが実現した場合、3つのサブセルの総厚を $3.5 \mu\text{m}$ から $1.0 \mu\text{m}$ まで約7割削減しても、効率は33.2%から30.2%まで約1割しか低下しないことが示された。これは低コスト化に向けて有望な値と考えられる。



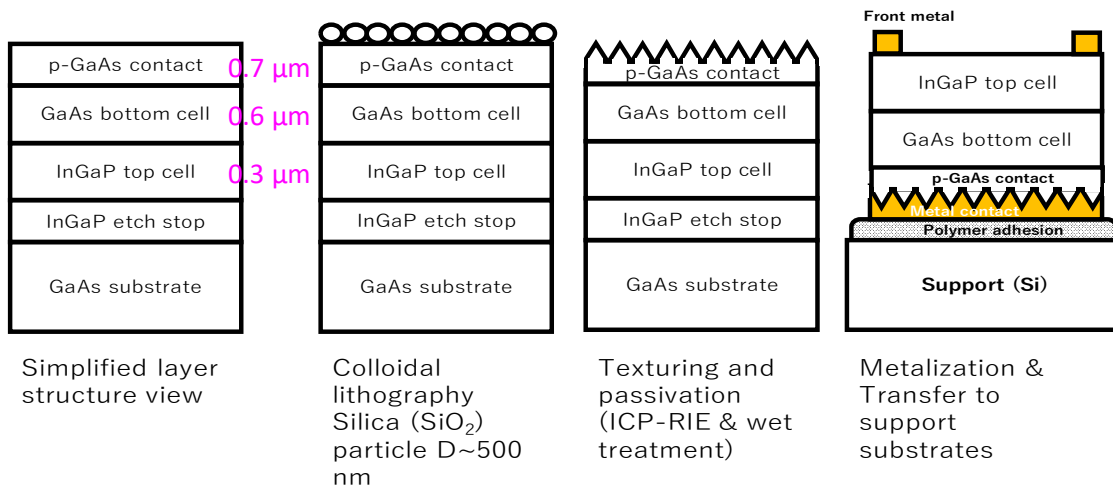
~70% reduction in thickness

Total thickness (nm)	Mirror	4165	1478
	Texture	3534	1001
Efficiency (%)		33.2	30.2

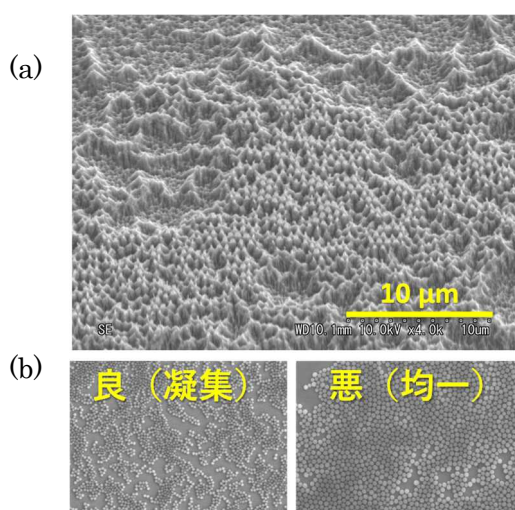
only 10% reduction in efficiency

図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a1-17 裏面ミラーと散乱テクスチャを有する電流整合条件を満たす3接合セルについて、InGaP トップセルの厚さとセルの総厚（メタモルフィックバッファを除く）と発光再結合効率 $\eta_{\text{int}}=0.001$ を仮定した拡張詳細平衡理論による効率を計算した結果

以上のように、裏面散乱体を薄膜3接合セルに適用する効果は絶大であると計算されたので、実際にIMMセルに適用可能な裏面散乱体の実装法を検討した。モデル構造として、まずはInGaP/GaAs 2接合セルを対象とし、図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a1-18に示すように、表面にテクスチャ形成用の厚いGaAsコンタクト層(0.7 μm)を付加した逆積みエピタキシャル層構造を用意した。テクスチャ構造を形成するために、まず直径0.5 μm のシリカ粒子懸濁液をスピコート・乾燥し、GaAs表面に粒子を配列した。その後、シリカ粒子マスクを用いて Cl_2 を用いたドライエッチングを行い、HF溶液でシリカ粒子を除去すると、図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a1-19に示すようなテクスチャ表面を得た。シリカ粒子をスピコートする前のGaAs表面の親水性が粒子の配列状況に大きく影響するため、 H_2O_2 溶液によりGaAs表面を酸化した。そのプロセス時間により表面親水化の度合いが異なり、粒子の凝集状態が変化して形成されるテクスチャに影響した。親水化処理時間が長いGaAs表面にはシリカ粒子が均一に配列してサブミクロンサイズの突起がほぼ均一に形成されたのに対し、親水化処理時間が短いGaAs表面ではシリカ粒子が凝集した部分と粒子のない空隙がまだら模様形成された。その結果、形成したテクスチャにはサブミクロンサイズと数ミクロンサイズの構造が共存する形となった。

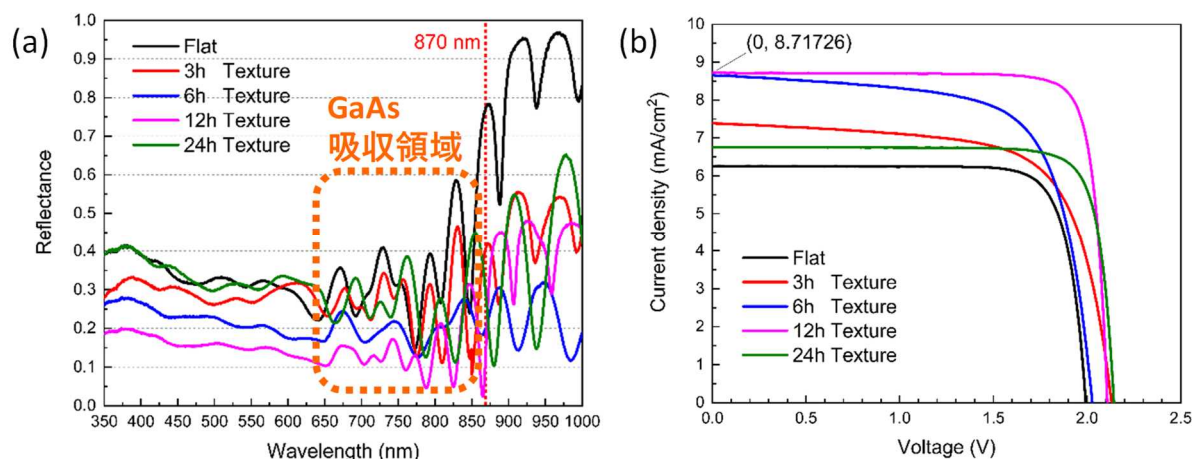


図III-2-(ロ)-A-1-a1-18 裏面散乱テクスチャを有する InGaP/GaAs 2 接合セルの作製プロセスフロー



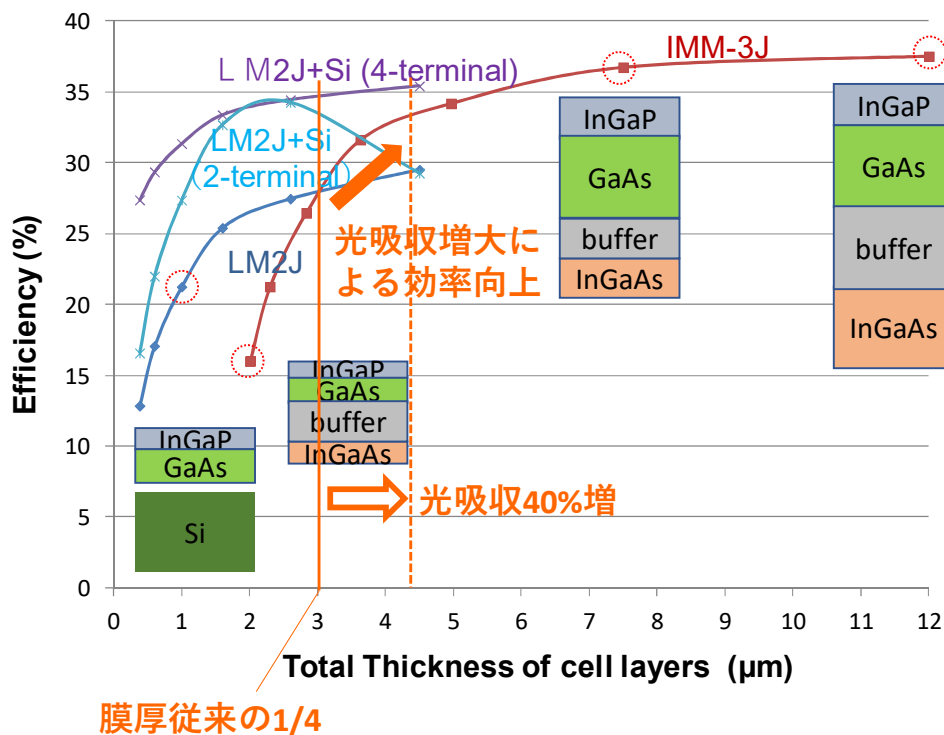
図III-2-(ロ)-A-1-a1-19 (a)シリカ粒子のコロイダルリソグラフィーとドライエッチングにより形成した GaAs の表面テクスチャの SEM 鳥瞰図 (b)親水化時間の異なる GaAs 表面にスピコートして配列させたシリカ粒子の表面 SEM 像

これらの裏面テクスチャを有する InGaP/GaAs 薄膜 2 接合セルの特性を評価した。InGaP サブセルと GaAs サブセルの厚さは、それぞれ $0.3 \mu\text{m}$ と $0.6 \mu\text{m}$ とした。まず、光閉じ込め性能を垂直方向の表面反射率により評価した。光吸収層が十分厚い太陽電池では、セルの吸収波長帯域では 0.3 程度の表面反射率をとる（無反射コーティングを施さない場合）。しかし、セルが薄く光吸収が不十分な場合、裏面がミラーになっていれば、一旦セルに取り込まれた光が再び表面から放出されるので、反射率は 0.3 よりも大きくなる。実際に、図III-2-(ロ)-A-1-a1-20(a)に示した反射率スペクトルでは、GaAs の吸収波長域でも反射率が 0.3 よりも大きくなっている。GaAs 親水化時間が異なる裏面テクスチャでは、表面反射率が異なっており光閉じ込めの効果が異なることを示している。12 時間親水化したテクスチャが最も低い反射率を呈しており、このテクスチャが最も高い光閉じ込め効率を有するといえる。反射率の低下と同時に、セルの表面と裏面が作る光共振器による波長方向の干渉の山谷比が小さくなって（干渉が弱くなって）いる。これは、裏面テクスチャが垂直方向以外に光を散乱することで、干渉のコヒーレンスが低下しているためであり、これも光閉じ込め効果の増大を示している。



図III-2-(口)-A-1-a1-20 GaAs 表面の親水化処理時間を変化させて形成した裏面テクスチャを有する InGaP/GaAs 2 接合セルの (a) 垂直方向の分光反射率 (b) セルの電流電圧特性

裏面テクスチャを有する薄膜 2 接合セルの電流電圧特性を図 III-2-(口)-A-1-a1-20 (b) に示す。支持基板 (シリコン) への転写とウエットエッチングによる基板除去のプロセスの過程でコンタクト抵抗が増大したりシャントしたり、あるいは結晶層にダメージが入ったりするため、セルによっては V_{oc} の低下や曲線因子の低下がみられる。しかし、 J_{sc} に注目すると、反射率測定からもっとも光閉じ込め効果が大いといと推測された 12 時間親水化したテクスチャを裏面に有するセルがもっとも J_{sc} が大きいという整合した結果を得た。裏面が平坦ミラーのセルに比べて約 40% の J_{sc} 増大を得ることができた。冒頭で述べた、低コスト化目標達成に必要な厚さ 1/4 では効率が 28% まで低下してしまうというシャープ(株)による実験結果に関して、約 40% の J_{sc} 増大をセルの層厚が等価的に 40% 増大したものと近似的に解釈すると、セルの層厚は現状の 1/3 に増大したと近似でき、目標とする効率 33% が視野に入る (図 III-2-(口)-A-1-a1-21)。もちろん、前半で述べたシミュレーションをもとにさらに詳細な見積もりと実験による実証が必要となるが、現実に実装可能な裏面テクスチャを用いて薄膜 3 接合セルの厚さを現状の 1/4 にして効率 33% を達成する可能性を示すことができた。

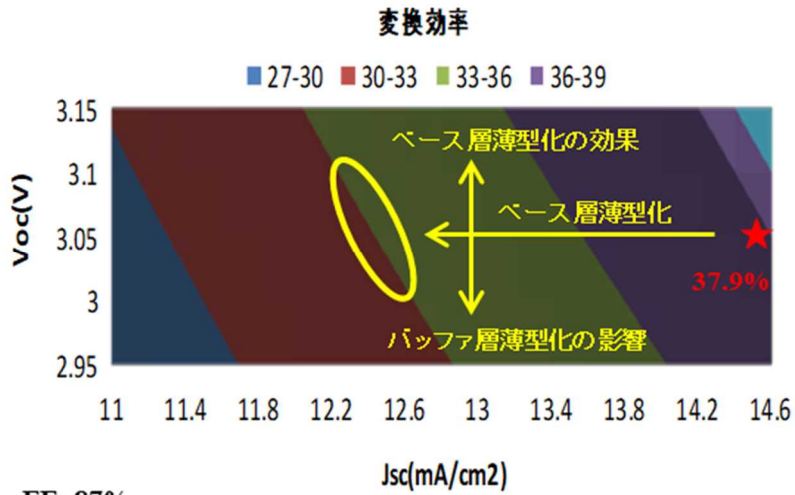


図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a1-21 シャープ(株)による IMM 接合セル効率の膜厚依存性プロットに、コスト低減上の目標である層厚 1/4 の状態と、そこから光吸収が 40%増大した際の効率予測を示す

Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a2. 高効率Ⅲ-V 薄膜セル開発 (光閉じ込め) 【シャープ】

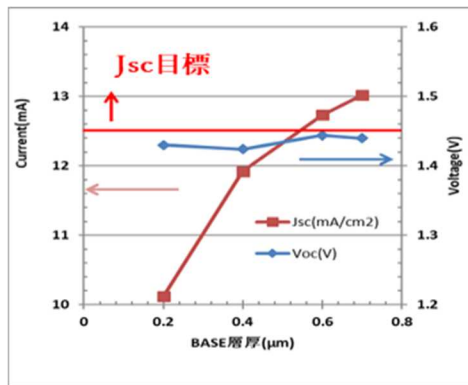
本テーマは、2010 年度から 2014 年度に受託して推進した「革新的太陽光発電技術研究開発 (革新型太陽電池国際研究拠点整備事業) ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発 (エピタキシャル成長技術)」に於いて、変換効率 37.9%を得た GaAs 基板上の逆積み 3 接合セル (逆積み InGaP/GaAs/InGaAs セル) の構造をベースとして低コスト化の取り組みを行った。この太陽電池はエピタキシャル層が 12 μm 以上あり、MOCVD を用いた製造に大きなコストがかかる。ある程度の高効率を維持したまま薄膜化することで低コスト化の取り組みを行った。前プロジェクトで得られた変換効率はチャンピオンデータであるので、大面積化、量産への適用性を鑑み変換効率の目標値は 33%とした。

前プロジェクトで開発した逆積み 3 接合セルの層厚は約 12 μm であり、そのうち大きな割合占める、各サブセルのベース層、および、バッファ層について薄層化の検討を行った。サブセルのベース層は各々のサブセルの発電電流に大きく影響を与え単純に薄層化すると短絡電流が下がる結果となるので、セル最下層に光反射層を加える検討も併せて行った。図 2 に、変換効率 33%を満たすための短絡電流(J_{sc})/解放電圧(V_{oc})の目標、および、薄層化による電気特性への影響の可能性を図示した。

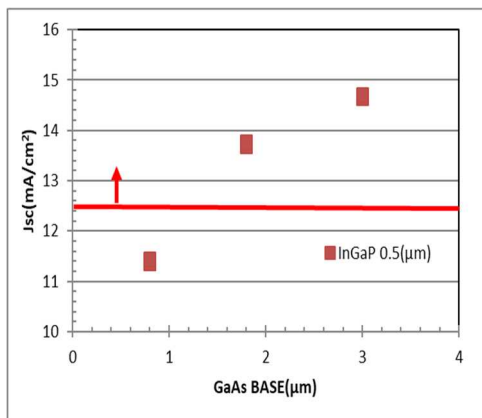


図III-2-(ロ)-A-1-a2-1 セル変換効率 33%を達成のための J_{sc} / V_{oc} 目標

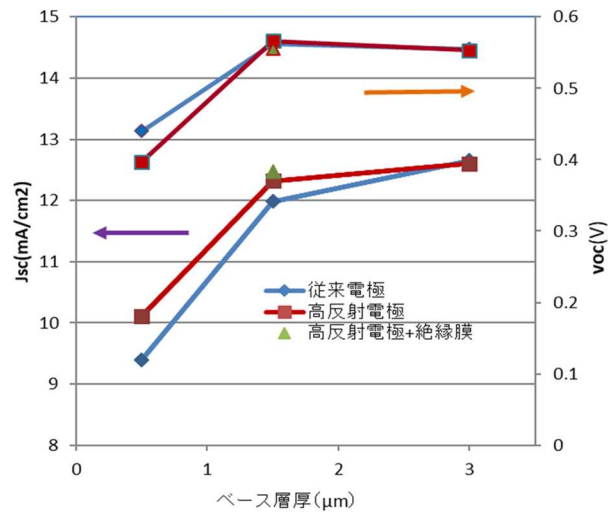
目標とする J_{sc} (12.5 mA/cm^2) が得られる各サブセルのベース層厚を、サブセル単体および 2 接合、3 接合セルで評価を行い決定した。最下段の InGaAs セルについては、裏面構造の改良により裏面反射を活用しより薄型化できる構造とした。その結果それぞれ従来比で InGaP=2/3, GaAs=1/2, InGaAs=1/3 で所望の J_{sc} が得られる結果を得た。



図III-2-(ロ)-A-1-a2-2 InGaP セルのベース層厚と V_{oc} 、 J_{sc} の関係

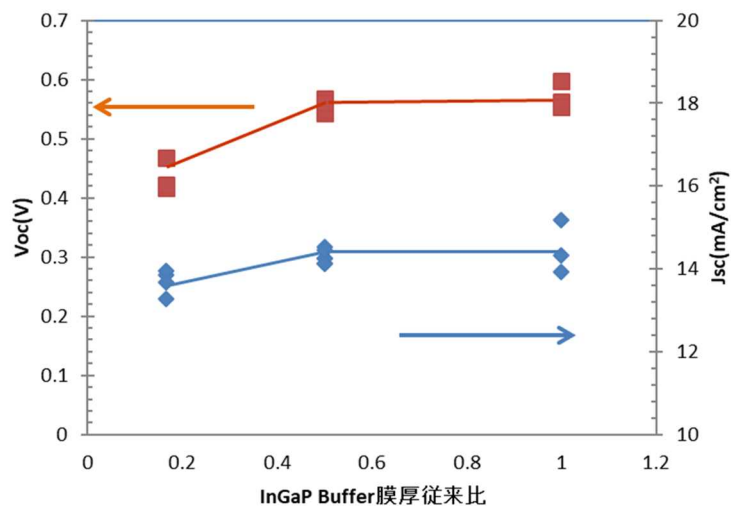


図III-2-(ロ)-A-1-a2-3 InGaP セル下の GaAs セルベース層厚と J_{sc} の関係



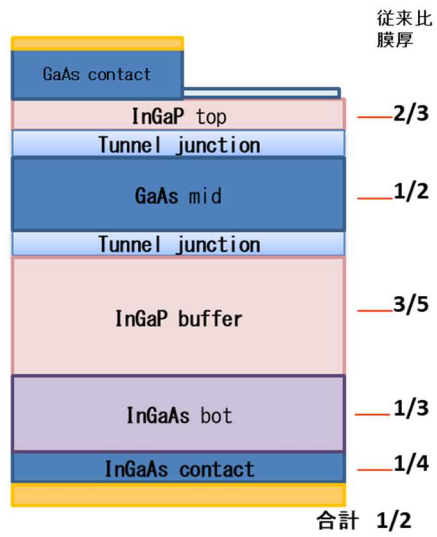
図III-2-(口)-A-1-a2-4 ボトムセルのベース層厚および裏面構造による電気特性への影響

GaAs セルと InGaAs セル間のバッファ層については、従来比 1/6 までは目標とする J_{sc} (12.5mA/cm²) 得ることが確認できたが、 V_{oc} は従来比 1/2 までは所望の値が得られた。

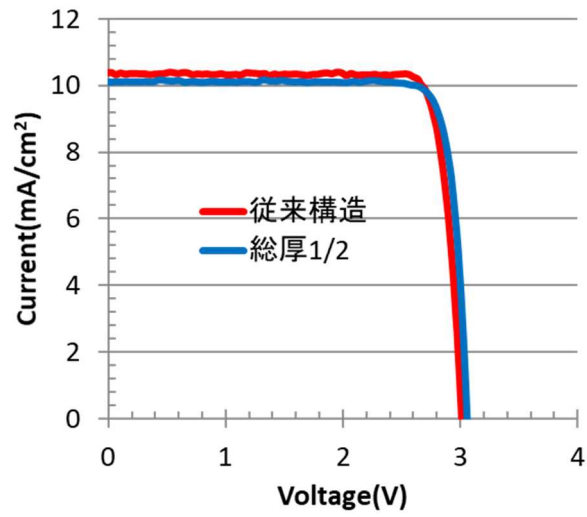


図III-2-(口)-A-1-a2-5 バッファ層厚とボトムセルの電気特性

上記検討結果を取り込んだ逆積み 3 接合型では、エピ層全体の厚さが従来比 1/2 でセル変換効率 26.39% (反射防止膜なし) を得ることが出来た。これは、反射防止膜付きの推定値で 33%以上となる特性となり目標の 33%以上を確認した。一方、目標の従来比 1/4 の厚さについては、期待した結果が得られなかった。目標となる総厚 1/4 の達成は厳しいとの判断で、各セルの高効率化による低コスト化に専念することにした。



図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a2-6 薄型逆積み3接合セル構造 (従来比 1/2 厚さ)



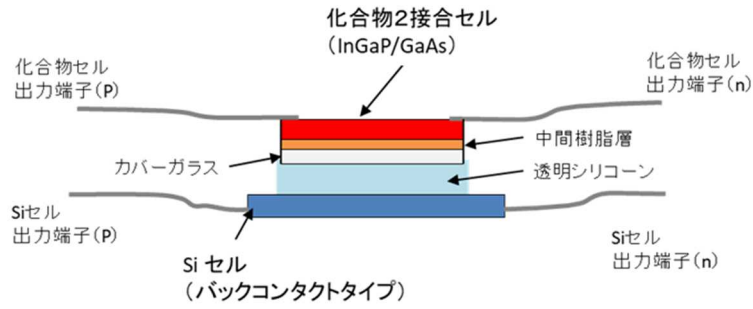
図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a2-7 逆積み3接合型セル電気特性

Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b1. シリコン上Ⅲ-Vセル (4端子)【シャープ】

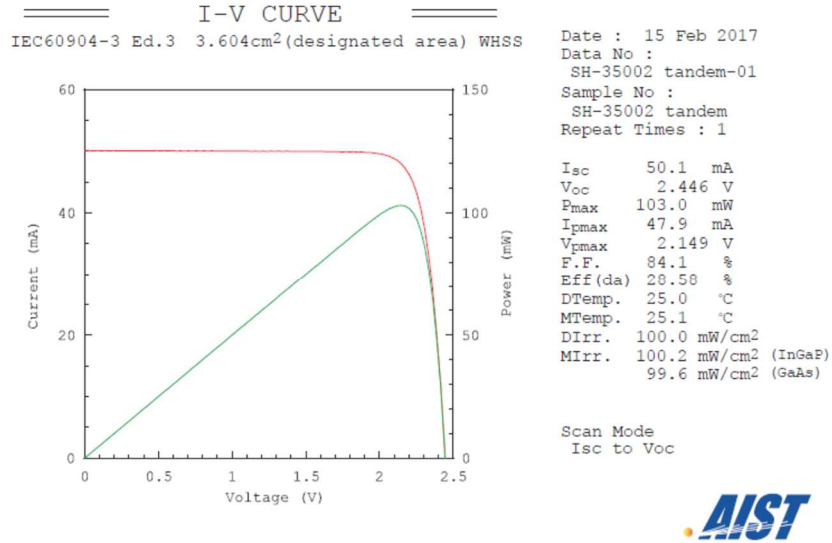
本テーマは低コスト化に資するために2接合型のⅢ-V族化合物太陽電池(InGaP/GaAs)とSi太陽電池のスタック構造による3接合太陽電池の開発に取り組んだ。Siセル表面への化合物セルの機械的接合(メカニカルスタック)技術、およびMOCVDを用いたSi基板上へのⅢ-V層へテロ成長によるセル形成技術の開発に取り組み、そのうち非導電性接着剤でのメカニカルスタック法で有望な結果を得た。本構造で小サイズのセル(化合物2接合セルとSiセルそれぞれから電極が外部に取り出した4端子構造)を作製し、目標としたセル変換効率33%の結果を得た。本委託業務のテーマCでは、本構造を用いたモジュールを作製し、屋外発電量測定を実施して、結果から発電量予測を行った。

表 Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b1-1 各種構造の評価結果等

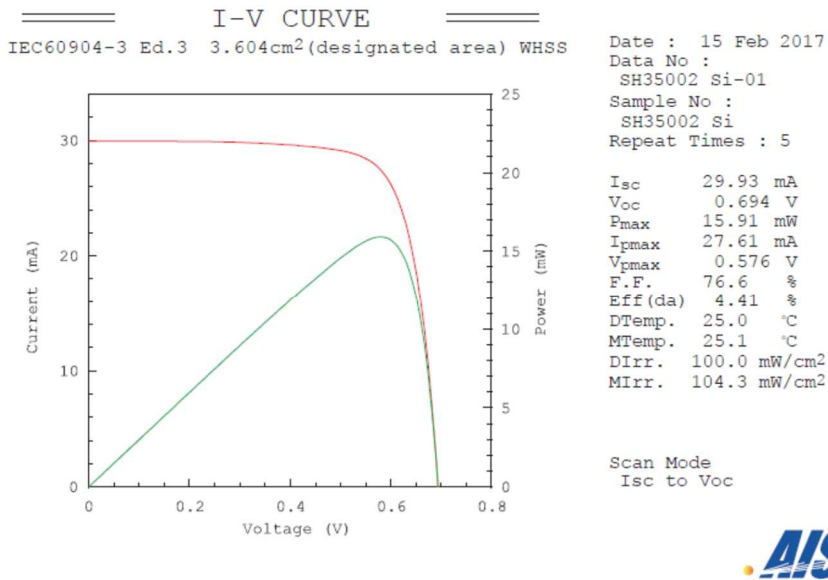
	構造	特長・結果	判定
A	表面活性化接合 (メカニカルスタック)	【特長】 ・接着剤レスのため高信頼性が期待できる ・2端子取出し 【結果】 ・接合可能であることを確認した。 ・Siセル表面の平坦度、清浄度が重要であることを確認した。(低コスト化に適さないと判断)	検討 中止
B	導電性接着剤接合 (メカニカルスタック)	【特長】 ・簡便な工法で接着可能(真空プロセスが必要ない) ・2端子取出し 【結果】 ・接合可能であるが、接合部が高抵抗となる ・導電物質含有の影響で接着剤層の透過率が低い	検討 中止
C	非導電性接着剤接合 (メカニカルスタック)	【特長】 ・簡便な工法で接着可能(真空プロセスが必要ない) ・4端子取出し 【結果】 ・所望の電気特性が得られた ・製作プロセス上の大きな課題は確認できなかった	検討 継続
D	Si上へテロ成長 (MOCVD)	【特長】 ・高価なGaAs基板の使用が不要 ・他の手法と比較してセルプロセスが簡便 ・2端子取出し 【結果】 ・所望の結晶性を持つ層が得られなかった。	検討 中止



図III-2-(ロ)-A-1-b1-1 非導電性接着剤を使用して作製した3接合型セルの断面模式図



図III-2-(ロ)-A-1-b1-2 電気特性測定結果 (化合物2接合部分)



図III-2-(ロ)-A-1-b1-3 電気特性測定結果 (Si部分)

III-2-(ロ)-A-1-b2. シリコン上III-Vセル (スマートスタック) 【産総研】

本テーマにおいては、金属ナノ粒子配列を利用したスマートスタック技術により、モジュール発電効率 30%以上を有しかつコストミニマムなセル構造および実用化技術を検討した。以下の二項目について、本事業で得られた研究開発成果の詳細を記す。

① 低コストハイブリッド多接合技術開発

汎用性の高い結晶 Si 系セルをスマートスタック多接合セルのボトムセルとして用いることにより、高効率化と低コスト化の両立を検討した。結晶 Si セルは各種作製手法 (構造・特徴による分類) があるが、はじめに最も古典的な構造である Al-Back Surface Field (BSF) 型を用いた結晶 Si セルでの検討を行った。

図 III-2-(ロ)-A-1-b2-1 は作製した InGaP/GaAs//Al-BSF Si スマートスタック 3 接合セルの構造模式図、界面の Pd ナノ粒子配列 SEM 像、接合界面 TEM 像である。この組み合わせにおける各種要素セルの EQE 特性を測定したところ、結晶 Si ボトムセルにおいて短絡電流密度値が律速されていることが確認された (図 III-2-(ロ)-A-1-b2-2)。実際、変換効率としては 25.1% という値に止まり、短絡電流向上のためには光マネジメント技術やより精密な構造設計 (膜厚・材料組成設計) の導入が必要であることが示唆された。

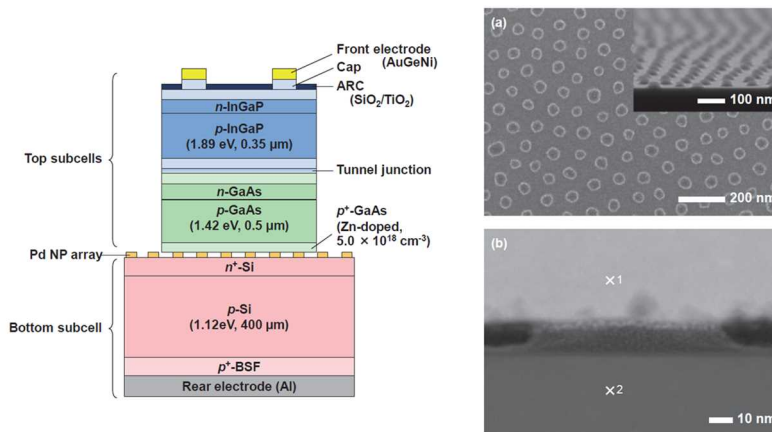
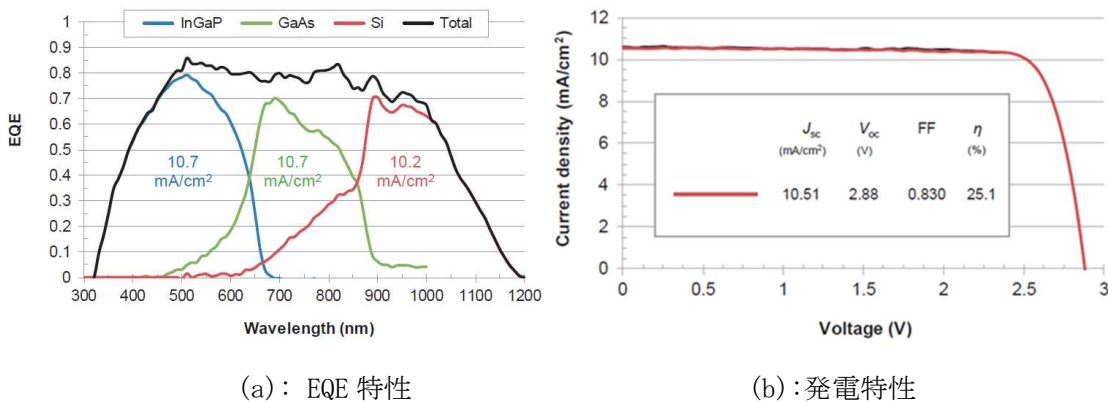


図 III-2-(ロ)-A-1-b2-1 InGaP/GaAs//Al-BSF 型 Si 3 接合セルの構造図、Pd ナノ粒子 SEM 像およびスマートスタック接合界面 TEM 像



(a): EQE 特性

(b): 発電特性

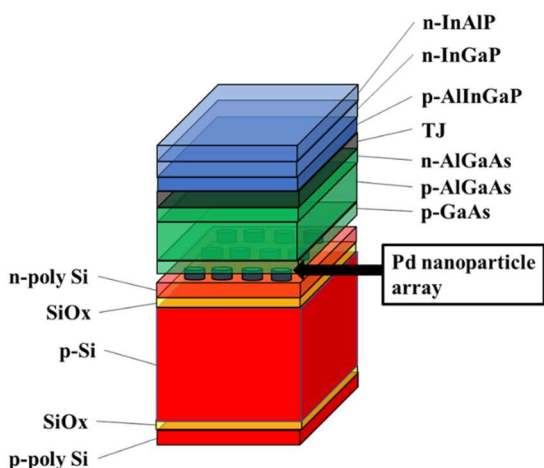
図 III-2-(ロ)-A-1-b2-2 InGaP/GaAs//Al-BSF 型 Si 3 接合セルの特性

Al-BSF 型という最も製造コストが低いタイプの結晶 Si セルを用いた場合において 25% 超の効率を得

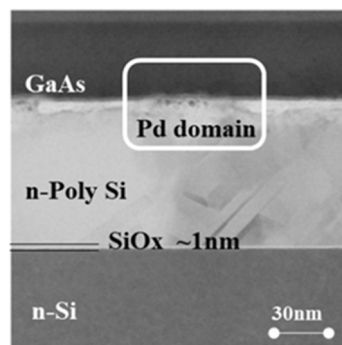
ることができたが、更なる向上 (30%以上) 達成に向け、ボトムセルとして高効率 Si である Tunnel Oxide Passivated contact (TOPCon) Si の適用を検討した。図 III-2-(ロ)-A-1-b2-3(a)には、試作した GaAs//Si 系 3 接合太陽電池の構造を示す。TOPCon Si は、極薄膜酸化層 (SiO) および多結晶 Si 層からなるコンタクト層が特徴で、これにより損失なく電極から電流を取り出し、電圧および電流の増加が可能である。素子構造は、トップセルが InGaP/Al_{0.06}Ga_{0.94}As の 2 接合構造、ボトムセルが TOPCon Si からなり、スマートスタック法により接合し 3 接合構造とした。高効率化のための構造の工夫は、以下の 2 点である。

- ① ミドルセルを GaAs から Al_{0.06}Ga_{0.94}As (以下 AlGaAs) に変更
- ② ボトムセルを Al-BSF Si から高効率 TOPCon Si を適用

ここで、①による効果は、ミドルセルをバンドギャップエネルギーの大きな AlGaAs にすることにより、吸収波長を短波長側にシフトすることにある。これにより、電流律速となっていたボトム Si での光電流発生を増加させることが可能で、かつ開放電圧増加にも寄与する。また、②による効果は、TOPCon Si 適用により、従来の Al-BSF Si に比較し電流および電圧が増大する。以上により、高効率な発電特性が可能となる。図 III-2-(ロ)-A-1-b2-3(b)には、透過電子顕微鏡 (TEM) により、GaAs/TOPCon Si の接合界面を観察したものである。多結晶 n-Si およびトップセル側の最下層であるコンタクト GaAs 層が、Pd ナノドメインを介し接合している様子が、観測されている。実際には、TOPCon Si の多結晶 n-Si 表面には酸化層が存在しており、酸化膜除去を行うことによりデバイス性能が達成された。



(a) 素子構造図

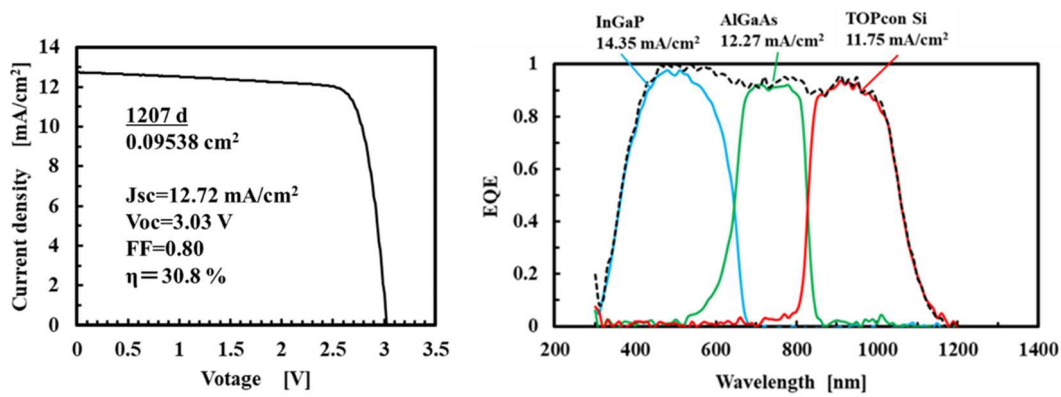


(b) TEM による接合界面観察

図 III-2-(ロ)-A-1-b2-3 InGaP/AlGaAs//TOPCon Si 3 接合太陽電池

図 III-2-(ロ)-A-1-b2-4(a)には、発電特性を示す。素子は TiO₂/SiO₂ の反射防止層を表面に形成しており、これにより短絡電流 12.27mA/cm²、開放電圧 3.03V、曲線因子 0.80、発電効率 30.8%が得られた。電流および電圧の増大により、従来の GaAs/Si 多接合電池に比較して高い効率が達成された。図 III-2-(ロ)-A-1-b2-4(b)には、構成セルの EQE 特性を示す。GaAs セルが 14.35mA/cm²、AlGaAs セルが 12.27mA/cm²、TOPCon Si セルが 11.75mA/cm² であり、ボトム Si セルが電流律速と考えられるが、ほぼ電流整合に近い性能が確認された。

以上、GaAs/AlGaAs//TOPCon Si 3 接合太陽電池において、非集光時の発電効率 30.8%、プロジェクト目標値 (効率 30%以上) を超える良好な性能が達成された。なお、本実験はドイツの Fraunhofer ISE との共同研究により行ったものである。

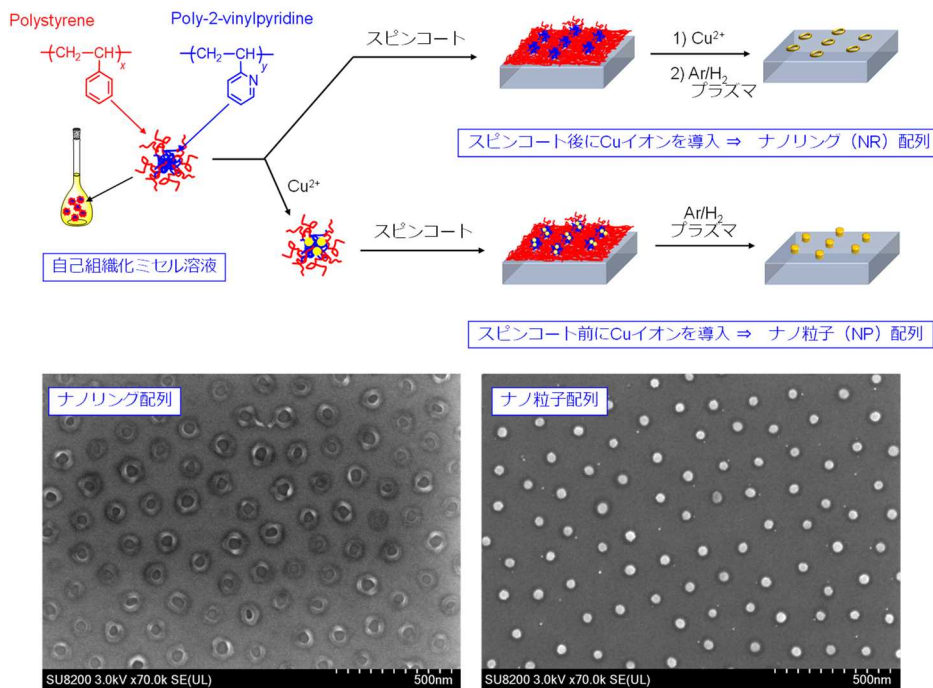


(a) 発電特性

(b) EQE 特性

図III-2-(ロ)-A-1-b2-4 InGaP/AlGaAs//TOPCon Si 3 接合太陽電池の特性

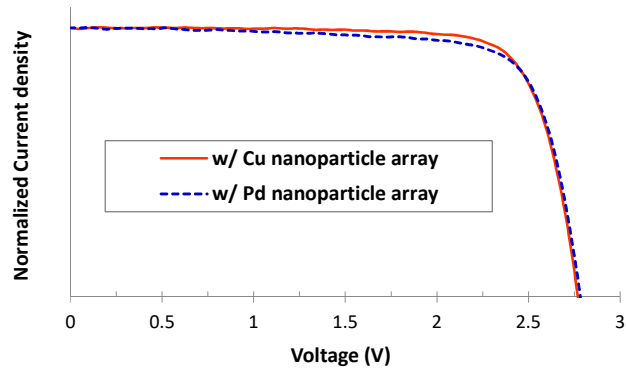
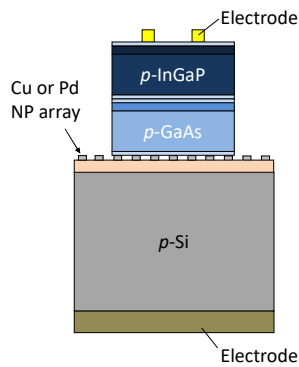
これまでのスマートスタックでは、金属ナノ粒子の素材として Pd を用いてきたが、そのコストは高いため、より安価な金属でも同様の機能が果たせることが好ましい。そこで Cu を用いたスマートスタックを検討した。初めに Pd 同様にブロック共重合体の自己組織化薄膜を利用した手法を適用したところ、Pd の際に得られたような金属ナノ粒子構造を得ることができなかった（ナノリング構造となった）が、薄膜化前の自己組織化ミセルに予め Cu イオンを搭載させた手法を用いることにより Pd と類似した Cu ナノ粒子配列を得ることが確認できた（図III-2-(ロ)-A-1-b2-5）。



図III-2-(ロ)-A-1-b2-5 Cu ナノ構造作製プロセスおよび Cu ナノ粒子配列の SEM 像

得られた Cu ナノ粒子配列を用いたスマートスタックセルを作製し、Pd ナノ粒子配列を用いた場合との比較を行ったところ、遜色ないデバイス特性が得られることを確認した（図III-2-(ロ)-A-1-b2-6）。また、Cu を用いたスマートスタックセルの信頼性を確かめるために温度サイクル試験（ $-40^{\circ}\text{C} \leftrightarrow 85^{\circ}\text{C}$ 、200 サイクル）およびダンプヒート試験（温度 85°C 、湿度 85%、1000 時間）を実施したところ、両テストに

においても顕著な劣化が起こらないことを確認した。こうして、高価なパラジウムに代わり安価な銅を用いることでもスマートスタックとしての機能が得られることが確認できた。



(a): 基本素子構造図

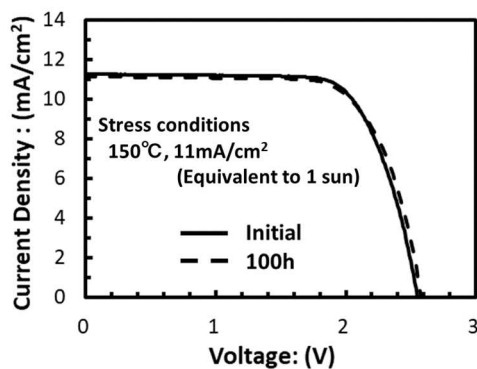
(b): 発電特性比較

図III-2-(ロ)-A-1-b2-6 CuまたはPd ナノ粒子配列によるスマートスタックセルの特性比較

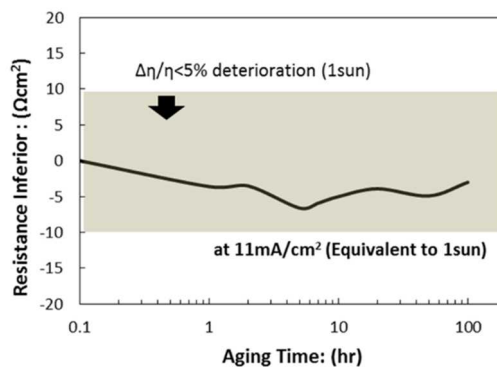
②実用化技術開発

スマートスタック法による GaAs//Si 系多接合太陽電池の実用性を判断するために、初期的な信頼性試験を行った。試験内容は、①加速劣化試験、②温度サイクル試験、③ダンプヒート試験である。試験に適用したサンプルは、GaAs 系トップセル (InGaP/GaAs 2 接合セル) と Al-BSF Si セルからなるスマートスタック 3 接合構造である。

加速劣化試験は、試験温度を 150°C、試験時間を 100 時間として行った。試験最中には、順方向に電流 11mA/cm² (非集光時の発生光電流に相当) を負荷しており、定時毎に降温し I-V 評価を行い経時変化を追った。図III-2-(ロ)-A-1-b2-7(a)には、加速劣化試験を行ったサンプルの試験前後の発電特性を示すが、顕著な劣化は観測されていない。同図(b)には、素子抵抗を追跡した結果を示す。素子抵抗は、開放電圧付近の微分抵抗より求めたもので、特に接合抵抗を主に反映していると考えられる。これより、抵抗変化量は 100 時間経過後も発電効率劣化率 5% を保証する ±10 Ω cm² 以内に十分維持されており、加速劣化試験において接合抵抗等の顕著な劣化が生じていないことを示唆している。加速劣化試験では、劣化の活性化エネルギーが既知である場合に、アレニウス法による素子寿命が推測可能である。本実験において、劣化の活性化エネルギーをボトムセルである Si のバンドギャップ相当 (~1eV) と仮定すると、60°Cにおいて推定素子寿命~17 万時間以上が予測される。これは実年稼働~30 年以上に相当する。



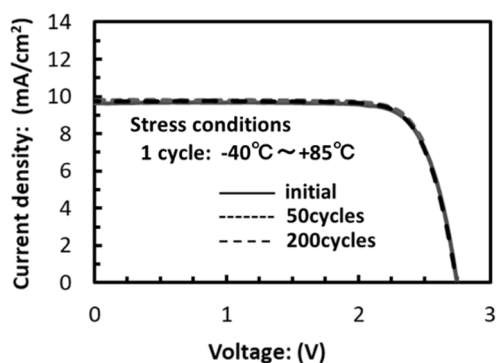
(a) 試験前後の発電特性比較



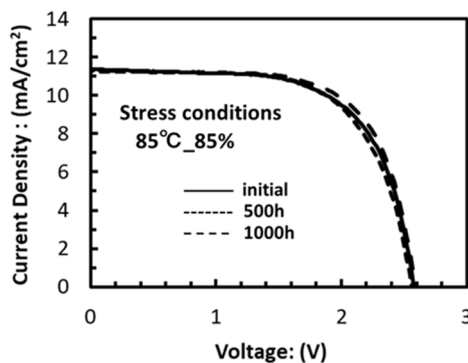
(b) デバイス抵抗の経時変化

図III-2-(ロ)-A-1-b2-7 GaAs//Si 多接合太陽電池の加速劣化試験の結果

温度サイクル試験は、 -40°C から $+85^{\circ}\text{C}$ を1サイクルとして、200サイクル負荷した。図III-2-(ロ)-A-1-b2-8(a)には試験素子の発電特性の推移を示す。これより、劣化は観測されず、発電効率の劣化も1%以内であった。また、トップセルの剥離、クラック等の発生も観測されていない。ダンプヒート試験は、温度 85°C 、湿度85%、試験時間を1000時間、大気暴露雰囲気にて行った。同図(b)に試験素子の発電特性の推移を示す。これより、発電効率は若干増加し(3%)、かつトップセルの物理的な損傷は観測されていない。これらの実験からも、スマートスタック技術を用いたGaAs//Si接合界面は、厳しい環境にも耐久性を有していることが示された。



(a) 温度サイクル試験_発電特性比較

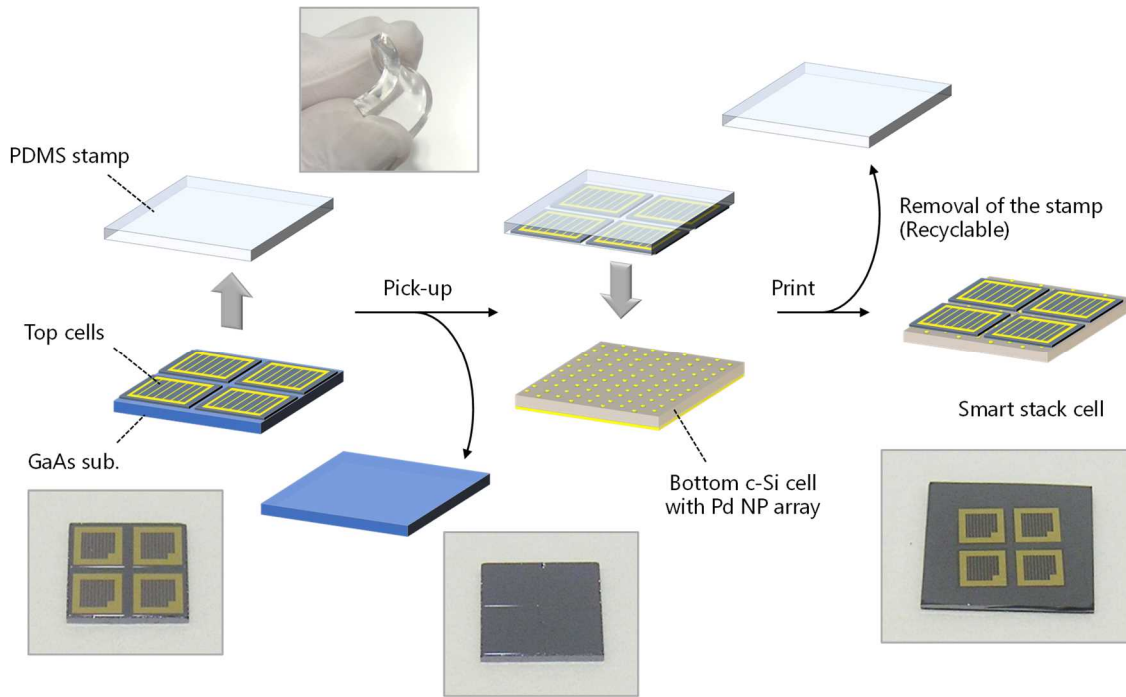


(b) ダンプヒート試験_発電特性比較

図III-2-(ロ)-A-1-b2-8 スマートスタックセルの耐久性試験結果

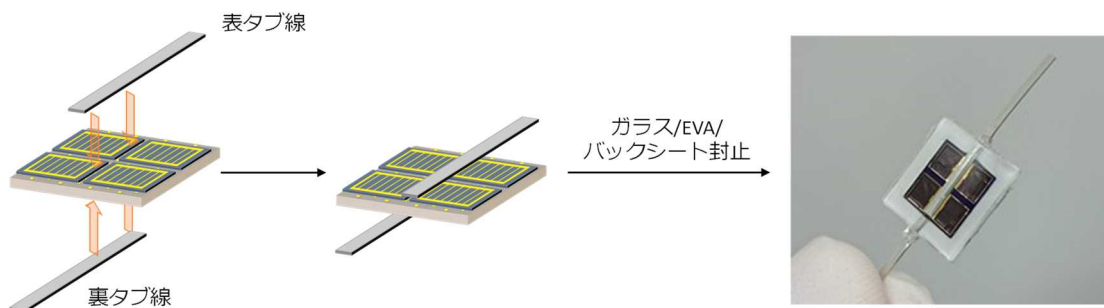
以上より、スマートスタック法により作製されたGaAs//Si系多接合太陽電池は、初期的ではあるが実用的な信頼性を有することが検証された。

スマートスタック技術の実用化に向けては、セル作製プロセスのスループットを高めることも課題であった。そこで新たなスマートスタックプロセスの開発に着手した。スタンプ転写スマートスタックプロセスとは、従来のスマートスタックにおけるトップセルのELO(成長基板からの剥離)⇒ボトムセルへの接合という一連の処理をシリコーン樹脂(ポリジメチルシロキサン:PDMS)のスタンプを用いて複数枚同時に行うための技術である。図III-2-(ロ)-A-1-b2-9にその実証例を示した。4枚のGaAsセルをフッ酸処理によりELO(犠牲層除去)したのち、PDMSスタンプを用いて成長基板から一括で剥離する。その後、Pdナノ粒子配列で表面が修飾されたボトム結晶Siセル上に移動し押し付ける。GaAsセルとPdナノ粒子間で接合が進行したのち、PDMSスタンプを除去することにより一括転写が完了する。こうして得られるスマートスタックセルの太陽電池特性は、従来プロセスと遜色ないことを確認した。なお、転写完了後のPDMSスタンプは再利用可能であり、プロセスコストの観点からも有用と考えられる技術である。



図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b2-9 スタンプ転写スマートスタックプロセス

スタンプ転写プロセスの開発をベースとし、スマートスタックセルのモジュール化にも取り組んだ。例として、一括転写法により作製した GaAs//Si 4セルスマートスタックセルのモジュール化を示す(図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b2-10)。初期状態では、4枚の分離された GaAs セル(各セルは 4 mm 角)が1枚の結晶 Si セル(約 10 mm 角)に接合した構造となっている。4枚のトップセルそれぞれのグリッド電極をタブ線により接続することにより、分離されていたトップセルを統合(一体化)し全体として2端子構造のモジュール化が可能である。さらに、結晶 Si セルにおけるモジュール作製で用いられている各種材料(表面ガラス、EVA 充填剤、裏面バックシート)、機器(ラミネーター)と同様のものを使用し、封止構造を作製することにも成功した。



図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b2-10 GaAs//Si 4セルモジュール

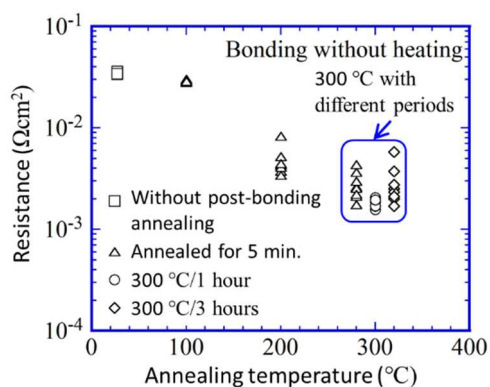
こうして得られたスマートスタックモジュールの信頼性試験(温度サイクル試験)を実施した。初期検討においては、試験中の温度変化に伴う封止材(EVA)の熱膨張・収縮に起因すると思われる接合界面の剥離が観測され、50サイクル程度でも劣化が確認された。そこで、タブ線の取り付け方法を工夫することにより(グリッド電極から引き出したリード電極にタブ線を取り付ける)、50サイクルにおいても

顕著な劣化なく太陽電池特性が維持できることを確認した。しかしながら 100 サイクル後は特性劣化が観測されており、より高い信頼性獲得のためには更なるモジュール構造の検討が必要である。

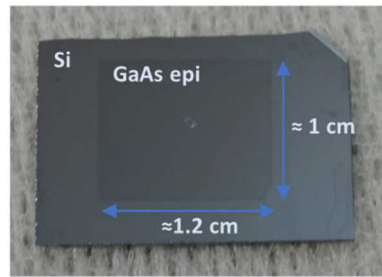
III-2-(ロ)-A-1-b3. シリコン上III-Vセル (直接接合) 【大阪市大】

表面活性化接合 (Surface Activated Bonding=SAB) 法を用いた直接接合セルプロセスの研究開発を行った。SAB 法においては、接合に先立ち試料表面に中性原子ビームを照射し半導体表面の自然酸化膜を除去する。直後の接合により強固な接合界面が形成される。他方でビーム照射により半導体表面に表面準位が形成され、空乏層の形成、界面抵抗の増加、少数キャリア寿命の低下が懸念される。これらの課題の解決による高効率化を目指した。

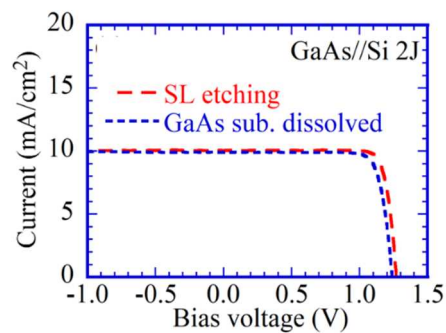
n^+ -GaAs/ n^+ -Si 接合の電気抵抗の熱処理温度依存性 (熱処理時間を 5 min. に固定)、熱処理時間依存性 (熱処理温度を 300 °C に固定) を系統的に調査することにより、低温かつ長時間の熱処理により界面抵抗が低減することを示し、300 °C/1 h の熱処理により最も低い界面抵抗値 1.6 m Ω cm² を得た (図 III-2-(ロ)-A-1-b3-1)。



た 2J セルは従来手法（接合後に GaAs 基板を研磨薄層化し溶解）による 2J セルと同等の特性を示した（図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b3-3）。



図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b3-2. 300 °C/1 h 熱処理と犠牲層エッチングで作製された GaAs エピ層 /Si 接合。

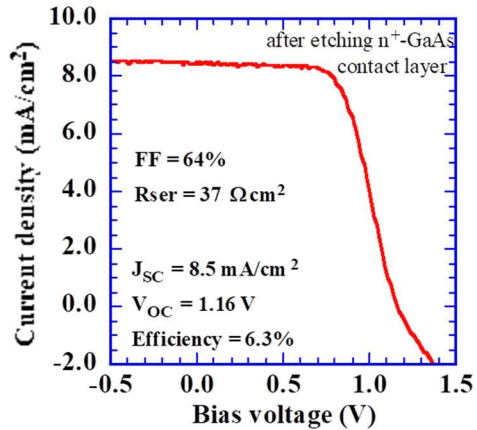


図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b3-3. 接合形成後に犠牲層エッチングを用いた GaAs 基板の分離を経て作製された GaAs/Si 2J セルの I-V 特性。接合後に GaAs 基板を研磨・エッチングを経て作製された 2J セルの特性もあわせて示す。

並行してフレキシブル基板 (PET フィルム) 上に転写された GaAs 1J サブセル層と Si のウエハ接合の形成（図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b3-4）、並びに GaAs/Si 2J セルを作製、多接合動作を実証した（図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b3-5）。これらの検討により、Ⅲ-V/Si ウエハ接合セル作製にあたって表面活性化接合と GaAs 基板再利用の両立が可能となることを示した。大面積化にあたってフレキシブル基板上試料のクラック抑制、平坦化が今後の課題であることを明らかにした。



図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b3-4. ELO法によりPETフィルム上に転写されたGaAs 1J層とSiの接合。



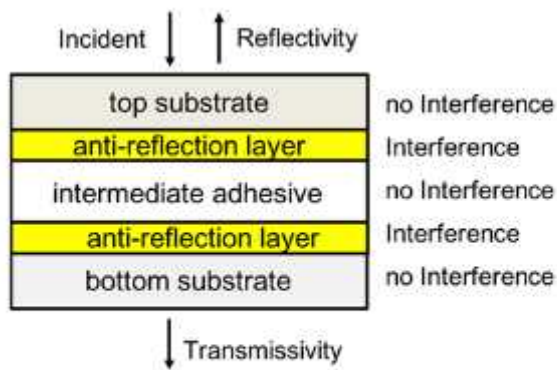
図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b3-5. PETフィルム上に転写されたGaAs 1J層とSiの接合から作製したGaAs/Si 2JセルのI-V特性。

Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4. シリコン上Ⅲ-Vセル (接着技術) 【東京農工大】

1-1 高度光利用技術開発

1-1-1 反射ロス評価用数値解析プログラム開発 (基本プログラム)

半導体トップセルとボトムセルをメカニカルスタックしたときの光反射ロス低減評価のための数値解析プログラムを開発した。図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-1に基本構造を示す。air/半導体基板/無反射層/接着層/無反射層/半導体基板/airである。光がゼロ度正入射したときの反射率及び透過率を計算するプログラムを作成した。



図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-1 光反射ロス数値解析用試料構造モデル

①GaAs, Si, GaP, IGZO, エポキシ材料等の屈折率データベースを作成した。②材料は各層に任意に指定でき、膜厚を入力できるようにした。③各層において多重反射を計算する構成とした。④無反射層には光干渉効果入れた。⑤無反射層は伝導層であるとし、移動度とキャリア濃度を入力できるようにした。⑥光反射ロスの低減とボトム層への実効的光伝達率を評価するために、以下の式を用いて実効的光伝達率 A_{eff} を算出した。

$$A_{eff} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (100 - R_{sample}) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (100 - R_{top}) d\lambda} \quad (\text{III-2-(ロ)-A-1})$$

ここで、 λ_1 と λ_2 は計算対象波長端 ($\lambda_1 < \lambda_2$) であり、 R_{top} は上トップ部基板表面の計算上の反射率であり、 R_{sample} は図 III-2-(ロ)-A-1-b4-1 に示す構造において計算された反射率である。 $1 - R_{top}$ が実効的光入射率である。トップ基板を通過した光が 100% ボトム基板に入射して吸収される理想の場合には $R_{top} = R_{sample}$ となるから、 A_{eff} は 1 となる。 A_{eff} 値を用いて中間層反射ロス低減を評価できるようにした。

1-1-2 反射ロス評価用数値解析プログラム開発 (角度変化)

光反射ロス評価用数値解析プログラム開発：半導体トップセルとボトムセルをメカニカルスタックしたときの光反射ロス低減評価のための数値解析プログラムを開発した。既に開発した air/非干渉半導体基板/多層干渉無反射層/非干渉半接着層/多層干渉無反射層/非干渉半導体基板/air 構造の計算プログラムに光入射角度効果を導入したプログラム開発を行った。図 III-2-(ロ)-A-1-b4-2 に光をゼロ度正入射と 50 度入射したときの GaP/102 nm IGZO/adhesive/102 nm IGZO/Si 構造の試料の光反射スペクトルを示す。入射角度変化により無反射干渉効果に変化して反射率が僅かに変化することを確認した。本プログラムにより、入射角度を有する光のトップ基板透明、ボトム基板不透明の波長領域における、実効的光伝達率 A_{eff} の算出が可能になった。

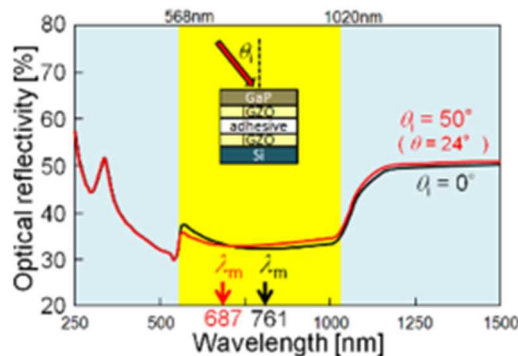


図 III-2-(ロ)-A-1-b4-2 ゼロ度正入射と 50 度入射時の GaP/102nm IGZO/adhesive/102nm IGZO/Si 構造の光スペクトル

1-1-3 無反射透明導電膜成膜開発

3 インチ GaAs 基板 (バンドギャップ 1.43eV) と Si 基板 (バンドギャップ 1.12eV) のスタックを検討した。プラズマスパッタ法を用いて屈折率 1.85 の 130nm IGZO 薄膜を GaAs 及び Si 表面に形成した。そして 20 μ m サイズの ITO 粒子を 6wt% 分散したエポキシ接着剤を用いて IGZO 薄膜面を貼りあわせた。比較のために IGZO を形成しない試料も作製した。図 III-2-(ロ)-A-1-b4-3 に分光光度計を用いて 3 インチ試料の中心点を測定した反射率スペクトルを示す。さらに 1-1 で開発したプログラムにより計算した計算反射スペクトルも併せて示す。波長 890~1040nm が、GaAs が透明でありシリコンに吸収される波長帯である (図黄色帯)。IGZO を用いないとき GaAs ボトム界面及び Si トップ界面からの反射光戻りがあるために実験、計算とも反射率が大きくなった (青色カーブ)。即ち大きな反射ロスが生じた。これに対し IGZO 膜を形成した場合、黄色帯域の反射率は大きく低

下し、黄色帯左外側端の反射率（GaAs トップ表面のみの反射率）に近い値になった。これは IGZO 薄膜の無反射光干渉効果により GaAs ボトム界面及び Si トップ界面の光反射が低下して反射ロスが抑えられ、効率よく光が Si に吸収されたことを示している。表Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-1 に実効的光伝達率 A_{eff} の解析結果を示す。IGZO を用いないとき A_{eff} は 0.79 に止まった。即ち中間接着界面において 21%の反射光ロスが生じた。これに対し IGZO 膜を形成した場合 A_{eff} は 0.93 に向上した。中間層の反射光ロスは 7%に低減し、理論値に近い高い実効的光伝達率が得られた。光反射率スペクトルを 3 インチ試料全面に渡って測定し、試料面の A_{eff} 分布を解析した。図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-4 に示すように、 A_{eff} は 0.91~0.95 の高い値を示した。即ち IGZO 無反射効果を用いることにより大面積に渡って光反射ロスを低減可能であることが明らかになった。これに対し IGZO 膜を形成した場合 A_{eff} は 0.93 に向上した。中間層の反射光ロスは 7%に低減し、理論値に近い高い実効的光伝達率が得られた。光反射率スペクトルを 3 インチ試料全面に渡って測定し、試料面の A_{eff} 分布を解析した。

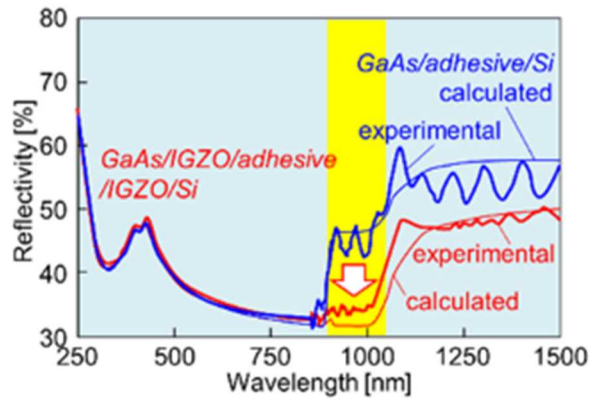


図 III-2-(ロ)-A-1-b4-3

GaAs/IGZO/adhesive/IGZO/Si と
GaAs/IGZO/adhesive/IGZO/Si 試料の光反射率
測定および解析スペクトル

表 III-2-(ロ)-A-1-b4-1

GaAs/IGZO/adhesive/IGZO/Si と
GaAs/IGZO/adhesive/IGZO/Si 試料の
 A_{eff} 実験および理論値

	GaAs/adhesive/Si	GaAs/IGZO/ adhesive/IGZO/Si
Calculated A_{eff}	0.77	0.97
Experimental A_{eff}	0.79	0.93

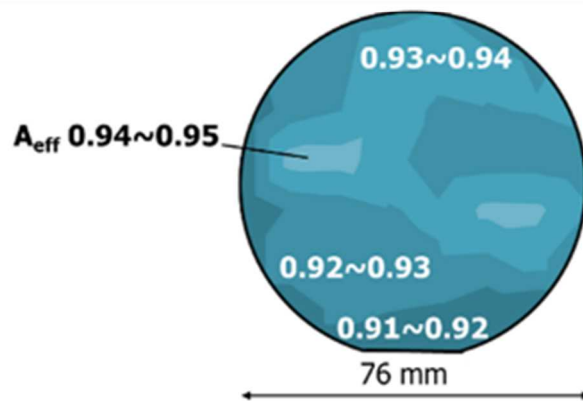


図 III-2-(ロ)-A-1-b4-4 3 インチ
GaAs/IGZO/adhesive/IGZO/Si 試料の
 A_{eff} 面内分布

1-1-4 無反射透明導電膜成膜最適化と光入射角度変化

3 インチ GaAs 基板と 4 インチ Si 基板のスタック及び 2 インチ GaP 基板と 4 インチ Si 基板のスタックを検討した。プラズマスパッタ法を用いて屈折率 1.85 の IGZO 薄膜を GaAs 及び Si 表面に 130 nm、GaP

及び Si 表面に 102 nm の厚さ形成した。そして IGZO 面にエポキシ接着剤を塗り 20 μm サイズ ITO 粒子を 6 Wt% 分散して IGZO 薄膜面を貼りあわせて、GaAs/130 nm IGZO/adhesive/130 nm IGZO/Si と GaP/102 nm IGZO/adhesive/102 nm IGZO/Si の試料を作製した。比較のために IGZO を形成しない試料も作製した。図 III-2-(ロ)-A-1-b4-5 に分光光度計を用いて 5 度正入射測定した反射率スペクトルを示す。波長 902~1020 nm の光が GaAs に透明であり、且つシリコンに吸収される波長帯であり (図 III-2-(ロ)-A-1-b4-5(a) 黄色帯)、568~1020 nm の光が GaP に透明であり、且つシリコンに吸収される波長帯である (図 III-2-(ロ)-A-1-b4-5(b) 黄色帯)。IGZO 膜を形成した場合、黄色帯域の反射率は大きく低下し、黄色帯左外側端の反射率 (トップ基板のみの反射率) に近い値になった。これは IGZO 薄膜の無反射光干渉効果により接着層名面の光反射が低下して反射ロスが抑えられ、効率よく光が Si に吸収されたことを示している。図 III-2-(ロ)-A-1-b4-6 に IGZO 膜厚を変化したときの実効的光伝達率 A_{eff} の計算結果と実験結果を示す。シリコンに光が吸収される波長帯において最適 IGZO 膜厚を選ぶことにより、高い A_{eff} を得られることがわかった。実験結果は計算のピーク値に近い値を示しており、GaAs/130 nm IGZO/adhesive/130 nm IGZO/Si において A_{eff} は 0.94、GaP/102 nm IGZO/adhesive/102 nm IGZO/Si において A_{eff} は 0.93 と高い値となった。

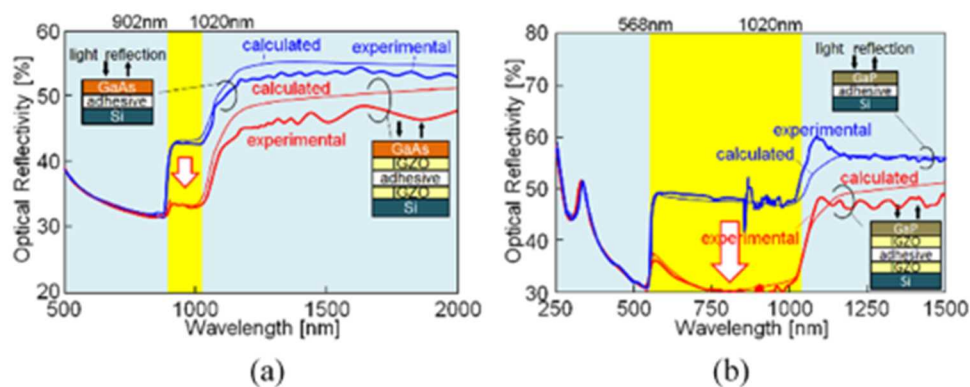


図 III-2-(ロ)-A-1-b4-5 5 度正入射光反射率スペクトル (a) GaAs/130 nm IGZO/adhesive/130 nm IGZO/Si, (b) GaP/102 nm IGZO/adhesive/102 nm IGZO/Si

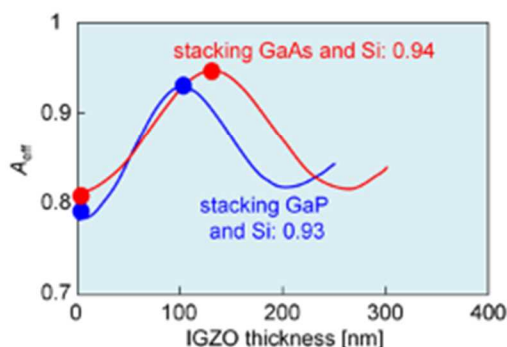


図 III-2-(ロ)-A-1-b4-6 IGZO 膜厚を変化したときの実効的光伝達率 A_{eff} の計算結果と実験結果 (●)

1-1-5 入射角度可変反射率スペクトル測定システム

図 III-2-(ロ)-A-1-b4-7 に示す光入射角度可変反射率スペクトル測定システムを自作した。本装置を用い

て GaAs/130nm IGZO/adhesive/130 nm IGZO/Si 基板の反射率スペクトルの測定を行った。そして GaAs 最表面の反射率を基準として、902~1020nm 範囲の実効的光伝達効率 A_{eff} を算出した。その結果、図 III-2-(ロ)-A-1-b4-8 に示すように、IGZO 無反射層を形成した試料は入射角度 0~60 度に渡り $A_{eff} = 0.95 \sim 0.92$ と高い値を示した。無反射層が広入射角範囲で光伝達効率を上げることが明らかになった。

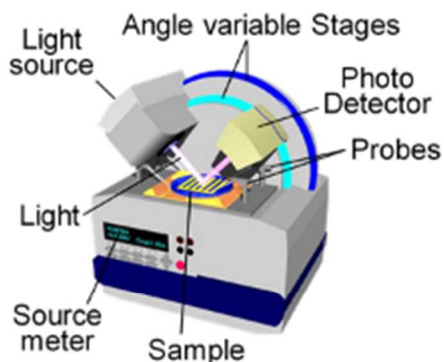


図 III-2-(ロ)-A-1-b4-7 入射角度可変
反射率スペクトル測定システム

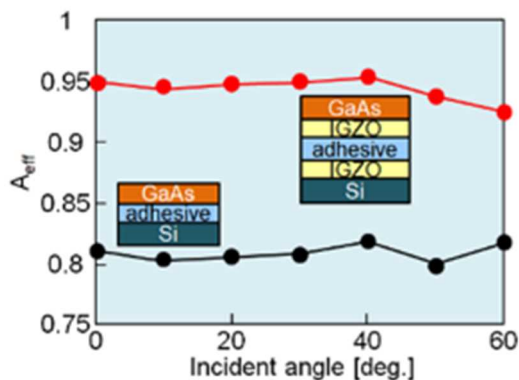
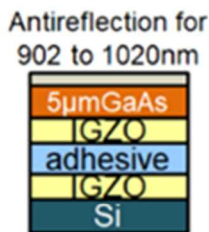


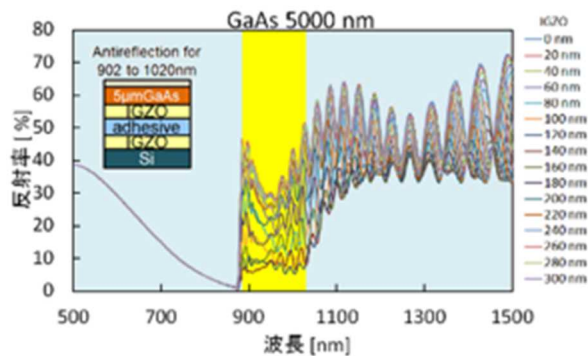
図 III-2-(ロ)-A-1-b4-8 902~1020nm
範囲の実効的光伝達
効率の A_{eff} の光入射角度依存性。
赤は IGZO 無反射膜付き、黒は IGZO 無し

1-1-6 表面無反射層検討

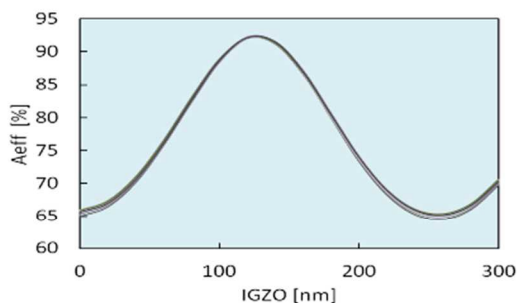
図 III-2-(ロ)-A-1-b4-9 に示すように表面に無反射層を有する構造の GaAs/Si スタックセルの A_{eff} を計算する数値解析プログラムを開発した。トップセルは薄膜であり可干渉を仮定した。中間 IGZO 層も可干渉でありトップ GaAs セルと干渉する。GaAs セルの厚さを $5 \mu\text{m}$ としたとき、大きな A_{eff} を得る IGZO 膜厚条件を調査した。図 III-2-(ロ)-A-1-b4-10 に屈折率 1.47 のエポキシ接着層の両側に IGZO を 0 から 300nm まで変化させて計算した反射率スペクトルを示す。902~1020 nm の範囲が、GaAs が透明であり且つシリコン基板が光を吸収する波長領域である。902 nm 以上の波長領域で反射率は光干渉のために複雑な変化を示した。そして IGZO が無い場合よりも反射率の低下が認められた。GaAs の厚さを 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500 nm として計算を行い、902~1020nm 範囲の反射率を積分して平均反射率%を求めた。100%から平均反射率%を引くことにより A_{eff} を算出した。その結果、図 III-2-(ロ)-A-1-b4-11 に示すように、全ての GaAs 膜厚において同様の結果となり、IGZO 無反射層を厚くするにつれて A_{eff} は増大し IGZO が 120~140nm のとき $A_{eff} = 0.92$ と高い値を示した。さらに IGZO 膜厚を増大させると A_{eff} は低下し、典型的な干渉特性を示した。図 III-2-(ロ)-A-1-b4-11 の結果は既に得られたバルク GaAs/Si の A_{eff} の結果と同様であり、IGZO 膜が薄膜 III-V とシリコンのスタックセルの A_{eff} 向上に有効であることが分かった。



図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-9 表面に無反射層を有する構造の GaAs/Si スタックセル



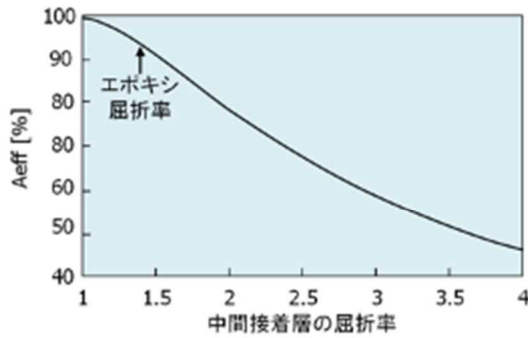
図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-10 面に無反射層を有する構造において屈折率 1.47 のエポキシ接着層の両側に IGZO を 0 から 300nm まで変化させて計算した反射率スペクトル



図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-11 GaAs の厚さが 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500 nm の時の A_{eff} の IGZO 膜厚による変化

1-1-7 中間層屈折率検討

中間接着層の屈折率は現在 1.47 であり、屈折率の最適化により A_{eff} を向上できる可能性がある。図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-12 に上記計算プログラムを用いて非干渉中間接着層の屈折率を変えたときの A_{eff} の変化を示す。接着層の屈折率が 1 の時、即ちエアギャップの時 A_{eff} はほぼ 100% になることがわかった。これは半導体と IGZO とエア間のオプティカルマッチングによるものである。そして屈折率が大きくなると A_{eff} は小さくなった。

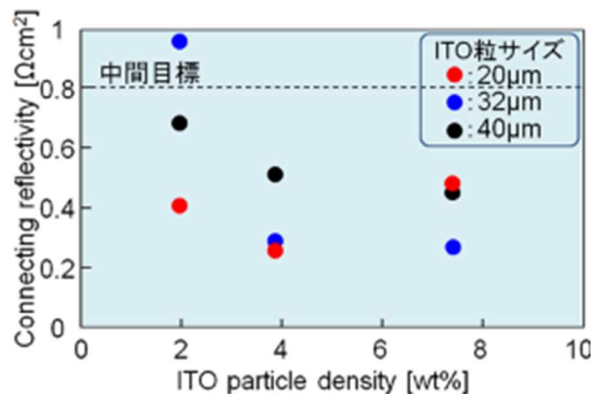


図III-2-(口)-A-1-b4-12 非干渉中間接着層の屈折率を変えたときの A_{eff} の変化

1-2 大面積低抵抗接合技術開発

1-2-1 低抵抗化検討

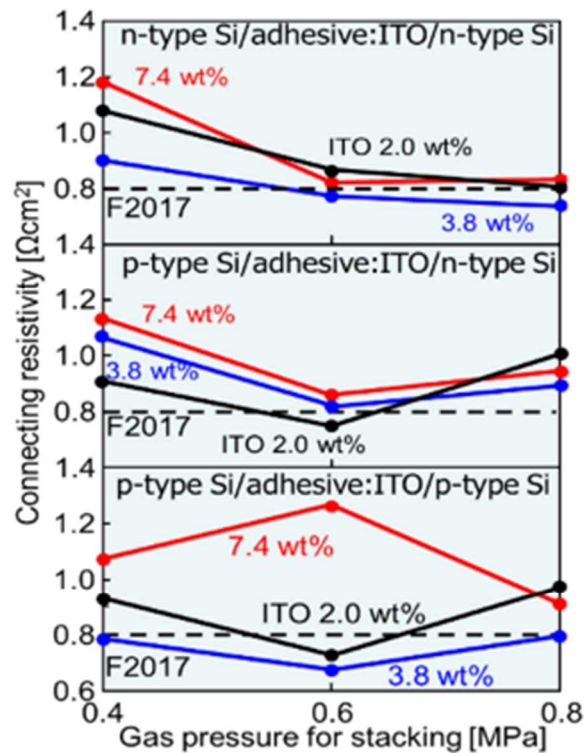
1) n型及びp型低抵抗シリコン基板を用いて低抵抗スタック化最適条件を調査した。エポキシ接着剤への粒径 $20\mu\text{m}$ ITO 導電粒子の含有量を 2.0, 3.8, 7.4 wt%とし、エポキシ接着剤接着時のガス圧力を 0.4, 0.6, 0.8 MPa として 44cm^2 の基板を貼りあわせて試料を作製し、トップ-ボトム基板間の電流電圧特性を測定した。全ての試料は良好なオーミック電流電圧特性を示した。電流電圧特性から接合抵抗率を算出した。図III-2-(口)-A-1-b4-13 に n型 Si-n型 Si, p型 Si-n型 Si, p型 Si-p型 Si 試料の接合抵抗率測定結果を示す。n型 Si-n型 Si 貼り合わせの場合接着時のガス圧力が高いほど接合抵抗率が低下し、ITO 3.8wt%、ガス圧力 0.8MPa のとき、 $0.74\Omega\text{cm}^2$ となった。p型 Si-n型 Si 貼り合わせの場合、ITO 2.0wt%、ガス圧力 0.6MPa のとき、 $0.75\Omega\text{cm}^2$ となった。p型 Si-p型 Si 貼り合わせの場合、ITO 3.8wt%、ガス圧力 0.6MPa のとき、 $0.68\Omega\text{cm}^2$ となった。この度の検討により仕事関数の異なる n型及びp型シリコン基板の貼りあわせにおいて全て $1\Omega\text{cm}^2$ を下回る低接合抵抗率が得られた。現時点での最適条件は、ITO 2.0~3.8wt%、ガス圧力 0.6~0.8MPa にあると思われる。



図III-2-(口)-A-1-b4-13 接合抵抗率と ITO 重量比の関係

2) 低抵抗シリコン基板を用いて低抵抗スタック化最適条件を調査した。エポキシ接着剤を塗布した基板と ITO 導電粒子を散布した基板を貼り合わせることで低抵抗化を試みた。また ITO サイズ 20, 32, 40 μm を調査した。図III-2-(口)-A-1-b4-14 に貼りあわせガス圧力 0.8MPa のときの接合抵抗率と ITO 重量

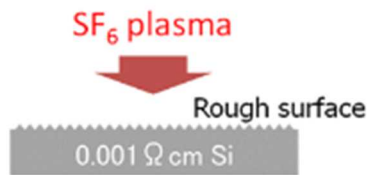
比の関係を示す。ITO 3.8~7.4wt%のとき、接合抵抗率 $0.3\Omega\text{cm}^2$ の低い値が得られた。ITO 粒子は分級しているが、粒子サイズと接合抵抗率との明確な相関は観測されなかった。



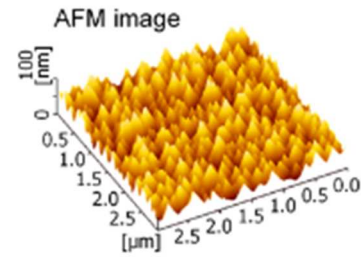
図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-14 n-Si/adhesive/n-Si, p-si/adhesive/n-Si, p-Si/adhesive/p-Si 各試料の接合抵抗率の ITO 含有率及び貼合せ圧力による変化。

1-2-2 大面積表面処理

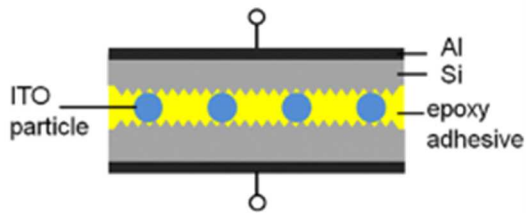
図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-15 のイメージ図に示すように、エッチングガスである SF_6 プラズマを用いてシリコン表面にラフネスを形成することにより ITO とシリコン間の接触抵抗を低減して接合抵抗の低減を試みた。その結果、図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-16 の AFM 測定に示すように、 SF_6 プラズマにより数十ナノメートルのラフネス形成に成功した。本技術を用いて図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-17 に示すようにサイズ 20cm^2 の試料にラフネス構造を施し、ラフネス面の貼合わせ試料を作製した。その結果、図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-18 に示すようラフネスが大きくなるにつれて接合抵抗率の大幅な低減が得られた。そして最低接合抵抗値 $0.12\Omega\text{cm}^2$ を得た。さらにラフ面貼り合わせと鏡面貼り合わせ試料を湿度 50%の常温下に置き、接合抵抗率の時間変化を測定した。その結果、図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-19 に示すようにラフ面貼り合わせ試料は約 2000 時間の長時間にわたり初期の低抵抗値を維持することが分かった。基板表面に僅かなラフネスを導入することによって、接合抵抗率の 2019 年度最終目標値 $0.5\Omega\text{cm}^2$ を容易に達成できることが明らかになった。さらに、基板ラフネスの導入は長時間にわたり低抵抗値を維持する上でも有用である。一方で、プラズマ照射に伴う Si セル特性への影響については今後、検討を進める必要がある。



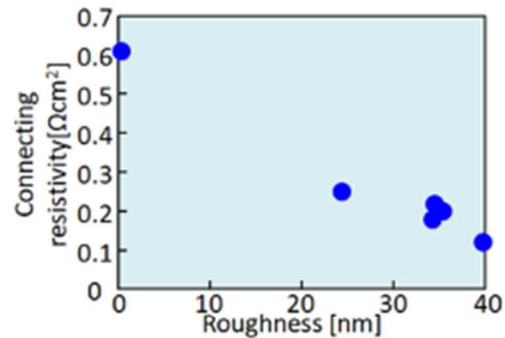
図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-15 SF₆プラズマによるシリコン表面ラフネス形成イメージ図



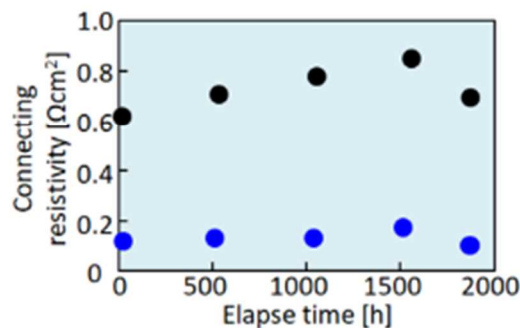
図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-16 SF₆プラズマによるシリコン表面ラフネス形成イメージ図



図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-17 ラフネス面の貼合わせたメカニカルスタック試料の断面図



図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-18 表面ラフネスによる接合抵抗率の変化



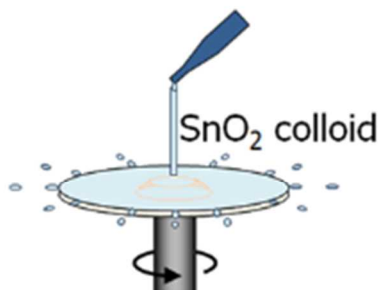
図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-19 接合抵抗率の時間経過変化。
青はラフネス貼り合わせ、黒は鏡面貼り合わせ試料

1-3 高効率多接合セル用低コスト化スタック技術開発

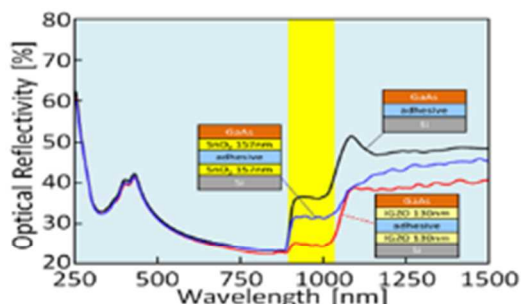
1-3-1 非真空系無反射薄膜形成技術開発

低コスト製造技術開発を目指して図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-20 の概念図のように SnO₂ 導電透明コロイドをスピコートした無反射薄膜形成を試みた。スピコートリングの条件の最適化を行い、4 インチサイズレベルの基板に均一成膜を達成した。そして GaAs と Si 基板に SnO₂ をコーティングして無反射効果を調べた。図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-21 の反射率スペクトルに示すように、902~1020nm の波長範囲において SnO₂ なしの場合よりも反射率が低減し、無反射効果を確認した。しかし、屈折率が 1.57 と低かったために IGZO レベルの反射低減は得られなかった。2019 年度最終目標として掲げるシステムコスト 125 円/W を見込む低コスト化スタック技術を確立するためには、各要素技術の低コスト化を積み重ねる必要がある、

安価な塗布法による無反射膜の形成技術の確立は有用と考える。今後、無反射膜材料、塗布剤の選択、無反射膜成膜条件の検討等を進めることにより、より高い実効的光伝達効率 A_{eff} の実現と低コスト化の両立を図る。



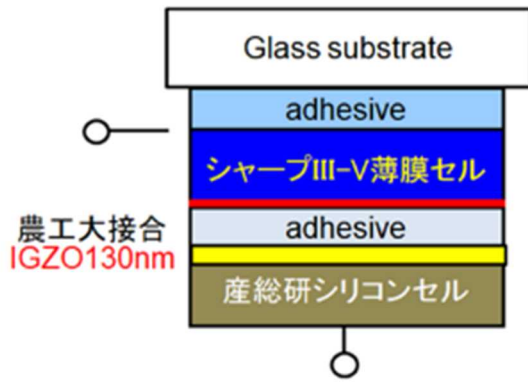
図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-20 SnO₂
無反射膜スピコート概念図



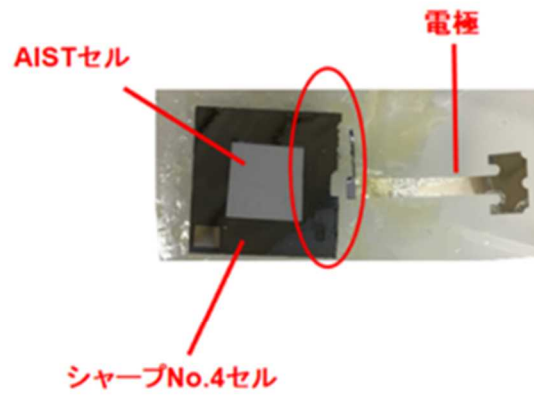
図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-21 IGZO 無反射膜
(赤)、SnO₂ 無反射膜 (青)、無反射膜なし (黒)
の GaAs/Si メカニカルスタック試料の
光反射率スペクトル

1-3-2 低コスト対応高効率ソーラーセル実証

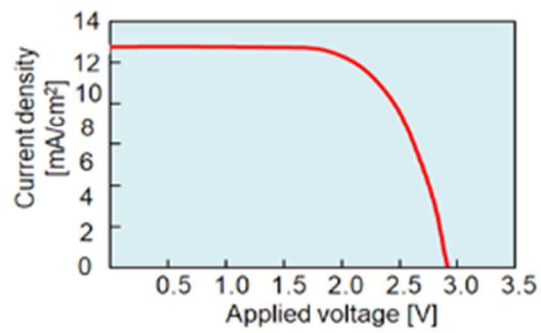
シャープ、産総研セルを用いたスタックセル開発：ガラス基板上に貼り付け、引き出し電極を形成した薄膜Ⅲ-Vセルをシャープ社から、バルクシリコンセルを産総研から提供を受け、図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-22 に示すようにスタックセル作製を試みた。シャープセルは良好なオーミックコンタクトを実現するために接着面に P+層を導入して貰った。そして産総研セルには表面に IGZO 膜 130nm を形成した。ITO 分散エポキシ接着剤により良好な貼合わせが行われ、スタックセルが作製できた。しかし残念ながら図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-23 に示すように、引き出し電極が破損しセル特性が測定不能となった。そこで試料をカットし、Ⅲ-Vセルをガラス基板から剥がし、Ⅲ-Vセル上の細かい電極に直接プロービングすることによりスタックセルの特性測定を試みた。その結果、図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-24 に示すように、 V_{oc} 2.91V, J_{sc} 12.6mA/cm², FF0.69, 変換効率 24.9%が得られた。目標の 30%効率は達成できなかった。



図III-2-(ロ)-A-1-b4-22 産総研及び
 シャープ Gp との
 共同施策多接合ソーラーセルの構造



図III-2-(ロ)-A-1-b4-23 スタック
 セル写真



図III-2-(ロ)-A-1-b4-24 シャープトップ
 セル、産総研ボトムセル
 多接合ソーラーセル特性

2. 実用化・事業化見通し

本プロジェクトで得られた研究開発の成果は、現宇宙用太陽電池事業の拡大および成層圏飛行体用等の新規事業の創出、更には、電動自動車へ搭載可能な高出力太陽光発電モジュールの将来の実用化への貢献が期待される。具体的な製品として、宇宙用に逆積3接合（IMM3J）セル、成層圏飛行体用に IMM3J セルおよび両面採光型2接合セル、車載用には透過型2接合セルとシリコン（もしくは CIS）セルをスタックした4端子型セルを予定する。

テーマ A で得られた成果は以下に示す内容にて、それぞれの事業分野での活用が期待される。

研究開発成果	事業分野	貢献・活用
3 接合型セルでエピタキシャル層の厚さを従来比 50%減で従来と同等の電気特性を得た。	宇宙用 成層圏飛行体用	エピタキシャル層の厚さを半減できるため、エピタキシャル成長に関わる材料コストを半減できる
化合物 2 接合型セル（InGaP/GaAs）と Si セル（バックコンタクト型）の組み合わせで変換効率 33%を得た	成層圏飛行体用 車載用	透過型2接合セルは成層圏での両面採光による高出力化が期待される。 4 端子型は高効率化低コスト化の両立が期待できるため、将来の車載用として開発を継続する。

さらに、今回開発した薄膜Ⅲ-V族多接合セル用の裏面テクスチャ形成による光閉じ込め技術や、光学測定によるルミネッセンスカップリング効果の定量化技術をもとにセル構造の最適設計を進めることで、目標としていたエピタキシャル層の厚さ 75%減で従来と同等の電気特性を得ることが可能となり、宇宙用、成層圏飛行体用、車載用すべての用途に対して一層の低コスト化が可能になる。

3. 波及効果

シリコンボトムセルとのメカニカルスタック4端子型用に開発した化合物2接合トップセル（光透過型）は、裏面からの光でも発電が可能であるため、裏面からの光入射が期待できる成層圏での発電向けとして、両面採光型2接合セルの新規製品化が期待できる。また、宇宙用、成層圏飛行体用、車載用用途に向けて低コスト化が進んだ後には、建材一体型太陽光発電モジュールへの応用が期待できる。本用途では発電可能面積が限られるという制約が宇宙用、成層圏飛行体用、車載用と共通であり、建物の形状と意匠にフィットするモジュール技術を発展させることができれば、車載用よりもさらに大きな市場を狙うことができる。

今回開発されたウエハ接合技術、接着技術に関しては、太陽電池セルモジュール以外にも、電子デバイス・光デバイスにおける多機能・異種材料集積、実装技術に広く応用される可能性を持つ。

ウエハ直接接合に関しては、本事業を通じて「接合界面の低抵抗性」がウエハ直接接合技術の強みであること、加えて、プロセス耐性向上、低界面抵抗の実現が課題であることが明確になった。本検討の知見をⅢ-V//Si 以外の多接合セル用低抵抗接合界面設計、プロセス最適化にフィードバックすることで、各種デバイスへの応用が拓けると考えられる。

一方、導電性接着剤を用いたメカニカルスタック技術は、高屈折率導電材料である IGZO 薄膜の最適

条件を見出し、高い実効的光伝達効率を達成したこと、基板の表面ラフネス制御による低コンタクト抵抗率を達成したことから、光電子デバイスの実装技術として展開が期待される。

4. 今後の展開

本研究開発の成果を活用し、現宇宙用太陽電池事業の拡大および成層圏飛行体用等の新規事業の創出、更には、電動自動車へ搭載可能な高出力太陽光発電モジュールの将来の実用化へに向けた開発を推進する予定である。とくに移動体用の多接合太陽電池に関しては、2020年度よりNEDO「太陽光発電主力電源化推進技術開発／太陽光発電の新市場創造技術開発／移動体用太陽電池の研究開発」プロジェクトにおいて更なる高効率化、低コスト化技術開発を進めることになっている。

太陽電池に限定されない光電子デバイス用途のウエハ接合技術については、以下のような展開が考えられる。

(ウエハ直接接合技術)

大面積 GaAs 基板の再利用を可能とするために、フレキシブル基板上III-Vエピ層のクラックレス化、反りの抑制が必要となる(下表)。また、Si上III-V多接合においてはボトムセルにヘテロ接合を導入する等のシリコンセル開発との密な連携、電流整合を満足するためのIII-V層構成検討、接合界面への波長変換材料(アップコンバージョン)等の中間層導入検討が必要である。これらにより、ウエハ直接接合の強みである低界面抵抗を活かした高性能他接合セル開発が可能になる他、各種デバイスへの応用可能性が高まる。

III-2-(ロ)-A-4-1 GaAs 基板再利用のためのウエハ直接接合比較

直接接合のバリエーション	プロセスフロー	大面積化	GaAs基板再利用	到達点/評価
(A) 従来手法: I ⁺ 基板//Si基板接合+GaAs基板エッチング		可能	不可	<ul style="list-style-type: none"> セル動作実現 シンプル
(B) I ⁺ 基板//Si基板接合+犠牲層エッチングによるGaAs基板分離		困難	可能	<ul style="list-style-type: none"> セル動作実現 大面積化困難
(C) フレキシブル基板(PETフィルム)によるELO+I ⁺ 層//Si基板接合+PETフィルム剥離によるI ⁺ 層転写		可能(要開発)	可能(要開発)	<ul style="list-style-type: none"> セル動作実現 大面積化にはクラック、反りの解決必要。

(導電性接着剤を用いた接合)

本プロジェクトで開発したメカニカルスタック技術①IGZO干渉導電膜の導入、②ITO導電粒子混合エポキシ接着剤を用いたスタック技術開発、③基板の表面ラフネス制御を高度化して、低コストで高効率のメカニカルスタック多接合ソーラーセル製造技術の確立が視野にはいる他、各種デバイスの実装技術への展開が期待される。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願	1	0	1	2	1	5
(うち外国出願)	(1)	0	0	0	(1)	(2)
論文	3	10	12	21	10	56
研究発表・講演	27	29	41	25	20	142
(うち国際会議)	(10)	(21)	(31)	(17)	(14)	(93)
新聞・雑誌等への掲載	2	2	2	1	1	8
その他	2	4	1	1	0	8

(2020年08月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	産業技術総合研究所	特願 2018-124445	国内	2018/06/29	取下	多接合光電変換素子及び多接合太陽電池並びに多接合光電変換素子の製造方法	太野垣健、 牧田紀久夫、 菅谷武芳
2	産業技術総合研究所	特願 2019-056782	国内	2019/3/25	出願	太陽電池およびその製造方法	上川由紀子、 牧田紀久夫、 水野英範、 菅谷武芳
3	産業技術総合研究所	特願 2019-216602	PCT	2019/11/29	出願	半導体装置およびその製造方法	牧田紀久夫、 水野英範、 上川由紀子、 菅谷武芳

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	E. E. Tamayo R., T. Hoshii, R. Tamaki, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Okada, and K. Miyano	東京大学	Maskless fabrication of broadband antireflection nanostructures on glass surfaces	Journal of Optics Vol. 18, 064008, 2016	有	2016年5月
2	B. M. F. Yu Jeco, T. Sogabe, R. Tamaki, N. Ahsan, and Y. Okada	東京大学	Impact of optically nonuniform luminescence coupling effect to the limiting cell conversion efficiency in InGaP/GaAs/Ge triple junction solar cell	Journal of Photonics for Energy Vol. 7, 35501, 2017	有	2017年8月
3	N. Shigekawa, T. Hara,	大阪市立大学、	GaAs/Indium Tin Oxide/Si Bonding Junctions for III-V-	IEEE Journal of Photovoltaics	有	2018年4月

	T. Ogawa, J. Liang, T. Kamioka, K. Araki, and M. Yamaguchi	豊田工業大 学	on-Si Hybrid Multijunction Cells With Low Series Resistance	Vol. 8, 879, 2018		
4	B. M. F. Yu Jeco, T. Sogabe, N. Ahsan, and Y. Okada	東京大学	Temperature dependence of luminescence coupling effect in InGaP/GaAs/Ge triple junction solar cells	Journal of Photonics for Energy Vol. 8, 22602, 2018	有	2018年5 月
5	A. Paszuk, O. Supplie, B. Kim, S. Brückner, M. Nandy, A. Heinisch, P. Kleinschmidt Y. Nakano, M. Sugiyama, and T. Hannappel	Tech. Univ. Ilmenau、 東京大学	GaAsP/Si tandem solar cells: In situ study on GaP/Si:As virtual substrate preparation	Solar Energy Materials and Solar Cells Vol. 180, 343- 349, 2018	有	2018年6 月
6	B. Kim, K. Toprasertpong, A. Paszuk, O. Supplie, Y. Nakano, T. Hannappel, and M. Sugiyama	東京大学、 Tech. Univ. Ilmenau	GaAsP/Si tandem solar cells: Realistic prediction of efficiency gain by applying strain-balanced multiple quantum wells	Solar Energy Materials and Solar Cells Vol. 180, 303- 310, 2018	有	2018年7 月
7	J. P. L. G. Barrios, J. R. Cortez, G. M. Herman, A. Larroder, B. M. Yu Jeco, K. Watanabe and Y. Okada	Philippine Science High School Western Visayas Campus、 東京大学	The Use of Convex Lens as Primary Concentrator for Multi-junction Solar Cells	Emergent Scientist Vol. 2, 5, 2018	有	2018年11 月
8	A. Paszuk, O. Supplie, M. Nandy, S. Brückner, A. Dobrich, P. Kleinschmidt B. Kim, Y. Nakano, M. Sugiyama, and T. Hannappel	Tech. Univ. Ilmenau、 東京大学	Double-layer stepped Si(1 0 0) surfaces prepared in As- rich CVD ambience	Applied Surface Science Vol. 462, 1002-1007, 2018	有	2018年12 月
9	B. M. F. Yu Jeco, E. Veinberg- Vidal, L. Vauche, N. Ahsan, and Y. Okada	東京大学、 CEA-LETI	Temperature dependence of wafer-bonded III-V on silicon multijunction solar cells with luminescent coupling effect	Journal of Photonics for Energy Vol. 9, 015503, 2019	有	2019年3 月
10	B. M. F. Yu Jeco, E. Veinberg-Vidal, L. Vauche, K. Yoshida,	東京大学、 CEA-LETI	Luminescent coupling effect in wafer-bonded III-V on silicon multijunction solar cells	Journal of Photonics for Energy Vol. 9, 015504, 2019	有	2019年3 月

	R. Tamaki, N. Ahsan, and Y. Okada					
11	水野英範, 牧田紀久夫, 菅谷武芳, 大島隆治, 穂積康雄, 高遠秀尚, 松原浩司	産業技術総 合研究所	Palladium Nanoparticle Array-Mediated Semiconductor Bonding That Enables High- Efficiency Multi-Junction Solar Cells	Japanese Journal of Applied Physics. vol. 55, 025001, (2016)	有	2016/01
12	S. Kosar, Y. Pihosh, T. Ivan, K. Mawatari, J. Uemura, Y. Kazoe, 牧田紀久夫, 菅谷武芳, 松井卓也, D. Fujita, M. Tosa, Y. M. Struk, 近藤道雄, T. Kitamori	Chernivtsy National Univ.、 東京大学、 産業技術総 合研究所、 物材機構	Tandem photovoltaic- photoelectrochemical GaAs/InGaAsP-WO3/BiVO4 device for solar hydrogen generation	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 55, 04ES01, (2016)	有	2016/02
13	川北史朗、 今泉充、 牧田紀久夫、 菅谷武芳、 西永滋郎、 柴田肇、 佐藤真一郎、 大島武	JAXA、 産業技術総 合研究所、 量子科学技 術研究開発 機構	High Efficiency and Radiation Resistant InGaP/GaAs//CIGS Stacked Solar Cells for Space Applications	IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference pp. 2574- 2577	無	2016/06
14	水野英範、 牧田紀久夫、 太野垣健、 望月敏光、 高遠秀尚、 菅谷武芳、 H. Mehrvarz、 M. Green、 A. Ho-Baillie	産業技術総 合研究所、 UNSW	A "Smart Stack" Triple- Junction Cell Consisting of InGaP/GaAs and Crystalline Si	IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference	無	2016/06
15	水野英範、 牧田紀久夫、 太野垣健、 望月敏光、 木田康博、 菅谷武芳、 高遠秀尚	産業技術総 合研究所	Al-Back Surface Field-Type Crystalline Si-Based Smart Stack Triple-Junction (InGaP/GaAs/Si) Cells	Proceeding of EUPVSEC, pp. 73 ~75	無	2016/07
16	牧田紀久夫、 水野英範、 大島隆治、 太野垣健、 西永滋郎、 柴田肇、 馬場将亮、 山田昇、 高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 長岡科学技 術大学	Low Concentration GaAs/CuInGaSe and GaAs/Si Multi-junction Solar Cells with Smart Stack Technology	Proceeding of EUPVSEC 2016, pp. 1390~1392	無	2016/07

17	大島隆治、 牧田紀久夫、 太野垣健、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Enhanced open circuit voltage in inverted thin film solar cells lattice- matched to InP	Proceedings of IEEE Photovoltaic Specialist Conference pp. 2354-2357	無	2016/11
18	馬場将亮、 牧田紀久夫、 水野英範、 高遠秀尚、 菅谷武芳、 山田昇	長岡科学技 術大学、 産業技術総 合研究所	Feasibility study of two- terminal tandem solar cells integrated with smart stack, areal current matching, and low concentration	Progress in Photovoltaics: Research and Applications vol. 25, p. 255 (2016)	有	2016/12
19	菅谷武芳、 長門優喜、 岡野好伸、 大島隆治、 太野垣健、 牧田紀久夫、 松原浩司	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	Growth of InGaAsP solar cells and their application to triple-junction top cells used in smart stack multijunction solar cell	Journal of Vacuum Science & Technology B, vol. 35, No. 2 02B103, (2017)	有	2017/03
20	太野垣健、 牧田紀久夫、 水野英範、 大島隆治、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Investigation of the open- circuit voltage in mechanically stacked InGaP/GaAs//InGaAsP/InGaAs solar cells	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 56, 08MC01, (2017)	有	2017/06
21	水野英範、 牧田紀久夫、 太野垣健、 望月敏光、 菅谷武芳、 高遠秀尚	産業技術総 合研究所	High-efficiency III-V//Si tandem solar cells enabled by the Pd nanoparticle array-mediated “smart stack” approach	Applied Physics Express vol. 10, No. 7, 072301 (2017)	有	2017/07
22	大島隆治、 長門優喜、 岡野好伸、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	Effects of substrate miscut on the properties of InGaP solar cells grown on GaAs (001) by solid-source molecular beam epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 56, 08MC08 (2017)	有	2017/07
23	太野垣健、 牧田紀久夫、 水野英範、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Investigation of the properties of semiconductor wafer bonding in multijunction solar cells via metal-nanoparticle arrays	Journal of Applied Physics, vol. 122, 023101 (2017)	有	2017/07
24	馬場将亮、 牧田紀久夫、 水野英範、 高遠秀尚、 菅谷武芳、 山田昇	長岡科学技 術大学、産 業技術総合 研究所	Optical design for 2- terminal III-V/Si SMAC module	Proceedings of IEEE photovoltaics specialist conference 44	無	2017/09
25	大島隆治、牧田 紀久夫、太野垣 健、菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Enhancement of open circuit voltage in InGaAsP- inverted thin-film solar cells grown by solid-source molecular beam epitaxy	Journal of Crystal Growth, 477, pp. 267- 271 (2017)	有	2017/10
26	馬場将亮、 牧田紀久夫、 水野英範、	長岡科学技 術大学、 産業技術総	Reduction of bonding resistance of two-terminal III-V/Si tandem solar cells	Japanese Journal of Applied	有	2017/11

	高遠秀尚、菅谷武芳、山田昇	合研究所	fabricated using smart stack technology	Physics, vol. 56, 122302 (2017)		
27	牧田紀久夫、水野英範、大島隆治、太野垣健、馬場将亮、山田昇、高遠秀尚、菅谷武芳	産業技術総合研究所、長岡科学技術大学	High Reliable Low Concentration InGaP/GaAs/Si 3-Junction Solar Cells with Smart Stack Technology	Proceeding EUPVSEC 2017, pp. 27-29.	無	2017/11
28	馬場将亮、牧田紀久夫、水野英範、高遠秀尚、菅谷武芳、山田昇	長岡科学技術大学、産業技術総合研究所	Effect of Series Resistances on Conversion Efficiency of GaAs/Si Tandem Solar Cells with Areal Current-Matching Technique	IEEE Journal of Photovoltaics, 8, 654 (2018)	有	2018/01
29	菅谷武芳、太野垣健、相原健人、牧田紀久夫、大島隆治、水野英範、長門優喜、中元嵩、岡野好伸	産業技術総合研究所、東京都市大学	Dual-junction GaAs solar cells and their application to smart stacked III-V//Si multijunction solar cells	Applied Physics Express, vo. 11, No. 5, 052301 (2018)	有	2018/04
30	大島隆治、長門優喜、岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合研究所、東京都市大学	Enhancement of open-circuit voltage in InGaP solar cells grown by solid source molecular beam epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 57, 08RD07 (2018).	有	2018/07
31	中元嵩、牧田紀久夫、大島隆治、太野垣健、相原健人、岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合研究所、東京都市大学	High-efficiency and Low-cost Multi-junction Solar Cells with GaAs Multi-stacked Structure	GRAND RENEWABLE ENERGY 2018 Proceedings, P-Pv-2-4 [a90166]	無	2018/10
32	太野垣健、S. Reichmuth、H. Helmers、G. Siefer	産業技術総合研究所、FhISE	Transient analysis of luminescent coupling effects in multi-junction solar cells	Journal of Applied Physics, vol. 124, 183103 (2018).	有	2018/11
33	C. Yi、F. Ma、水野英範、牧田紀久夫、菅谷武芳、高遠秀尚、H. Mehrvarz、S. Bremner、A. Ho-Baillie	産業技術総合研究所、UNSW	Broadband Reflectance Reduction for Wafer Bonded III-V//Si Tandem Cell Using Polydimethylsiloxane - Replicated Surface Texturing	Proceedings of WCPEC-7, pp. 271-274	無	2018/11
34	菅谷武芳、太野垣健、相原健人、牧田紀久夫、大島隆治、水野英範、	産業技術総合研究所、東京都市大学	Smart stacked InGaP/GaAs/GaAs//Si quadruple-junction solar cells	Proceedings of WCPEC-7, pp. 257-260	無	2018/11

	長門優喜、 中元嵩、 岡野好伸					
35	牧田紀久夫、 水野英範、 馬場将亮、 大島隆治、 太野垣健、 相原健人、 中元嵩、山 田昇、 高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 長岡科学技 術大学、東 京都市大学	Nearly 30% High Efficiency Low Concentration InGaP/GaAs//Si 3-Junction Solar Cells Using Smart Stack Technology	Proceeding of EU PVSEC 2018, pp. 20-22	無	2018/11
36	太野垣健、 牧田紀久夫、 大島隆治、 水野英範、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Analysis of luminescence coupling effect in three- terminal tandem solar cells	Journal of Photonics for Energy, vol. 8, No. 4, 045503 (2018)	有	2018/12
37	太野垣健、 牧田紀久夫、 大島隆治、 水野英範、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Impact of nanometer air gaps on photon recycling in mechanically stacked multi- junction solar cells	Optics Express, vol. 27, No. 4, pp. A1-A10 (2019).	有	2019/01
38	太野垣健、 荒木建次、 山口真史、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 豊田工業大 学	Impact of non-planar panels on photovoltaic power generation in the case of vehicles	IEEE Journal of Photovoltaics, 9, 1721 (2019)	有	2019/09
39	大島隆治、 石塚優希、 岡野好伸、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	Growth of InGaAs solar cells on InP(001) miscut Substrates using solid- source molecular beam epitaxy	Phys. Status Solidi A 217, 1900512 (2020)	有	2019/09
40	中元嵩、 牧田紀久夫、 太野垣健、 相原健人、 岡野好伸、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	Spectral response measurements of each subcell in monolithic triple- junction GaAs photovoltaic devices	Applied Physics Express, 12, 102015 (2019)	有	2019/09
41	牧田紀久夫、 水野英範、 太野垣健、 相原健人、 大島隆治、 庄司靖、齋均、 高遠秀尚、 R. Müller、 P. Beutel、 D. Lackner、 J. Benick、 M. Hermle、 F. Dimroth、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 FHISE	III-V//Si multijunction solar cells with 30% efficiency using smart stack technology with Pd nanoparticle array	Progress in Photovoltaics, 28, 16 (2020)	有	2020/01
42	C. Yi、F. Ma、 水野英範、 牧田紀久夫、 菅谷武芳、 高遠秀尚、 H. Mehrvarz、	産業技術総 合研究所、 UNSW	Application of Polydimethylsiloxane Surface Texturing on III-V//Si Tandem Achieving More Than 2% Absolute Efficiency Improvement	Optics Express, vol. 28, 3895 (2020)	有	2020/01

	S. Bremner, A. Ho-Baillie					
43	太野垣健、 牧田紀久夫、 立花福久、 水野英範、 大島隆治、 高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Three-terminal tandem solar cells with a back-contact- type bottom cell bonded using conductive metal nanoparticle arrays	IEEE Journal of Photovoltaics, 10, 358 (2020)	有	2020/03
44	水野英範、 牧田紀久夫、 望月敏光、 太野垣健、 菅谷武芳、 高遠秀尚	産業技術総 合研究所	Cu Nanoparticle Array- Mediated III-V/Si Integration: Application in Series-Connected Tandem Solar Cells	ACS Applied Energy Materials, pp. 3445~ 3453	有	2020/03
45	庄司靖、 牧田紀久夫、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Multiple epitaxial lift-off of stacked GaAs solar cells for low-cost photovoltaic applications	Japanese Journal of Applied Physics, 59, 052003 (2020)	有	2020/04
46	N. Shigekawa ¹ , R. Kozono ¹ , S. Yoon ¹ , T. Hara ¹ , J. Liang ¹ and A. Yasui ²	¹ 大阪市大、 ² JASRI	Effects of post bonding annealing on GaAs//Si bonding interfaces and its application for sacrificial- layer-etching based multijunction solar cells	Solar Energy Materials and Solar Cells Vol. 210, 110501, 2020	有	2020年3 月 (online)
47	T. Hishida, J. Liang, and N. Shigekawa	大阪市大	Low-resistance semiconductor/ semiconductor junctions with intermediate metal grids for III-V-on- Si multijunction solar cells	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 59, SBBB04, 2020	有	2019年11 月 (online)
48	S. Yamajo ¹ , S. Yoon ¹ , J. Liang ¹ , H. Sodabanlu ² , K. Watanabe ² , M. Sugiyama ² , A. Yasui ³ , E. Ikenaga ³ , and N. Shigekawa ¹	¹ 大阪市大、 ² 東大、 ³ JASRI	Hard X-ray photoelectron spectroscopy investigation of annealing effects on buried oxide in GaAs/Si junctions by surface- activated bonding	Applied Surface Science Vol. 473, 627, 2019	有	2018年12 月 (online)
49	T. Hara ¹ , T. Ogawa ¹ , J. Liang ¹ , K. Araki ² , T. Kamioka ² , and N. Shigekawa ¹	¹ 大阪市大、 ² 豊田工大	Electrical properties of GaAs//indium tin oxide/Si junctions for III-V-on-Si hybrid multijunction cells	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 57, 08RD05, 2018	有	2018年7 月
50	N. Shigekawa ¹ , T. Hara ¹ , T. Ogawa ¹ , J. Liang ¹ , T. Kamioka ² , K. Araki ² , and M. Yamaguchi ²	¹ 大阪市大、 ² 豊田工大	GaAs/Indium Tin Oxide/Si Bonding Junctions for III-V- on-Si Hybrid Multijunction Cells With Low Series Resistance	IEEE Journal of Photovoltaics Vol. 8, 879, 2018	有	2018年4 月
51	Jianbo Liang ¹ , Tomoki Ogawa ¹ ,	¹ 大阪市大、 ² 豊田工大	Electrical conduction of Si/indium tin oxide/Si	Japanese Journal of	有	2018年1 月

	Tomoya Hara ¹ , Kenji Araki ² , Takefumi Kamioka ² , and Naoteru Shigekawa ¹		junctions fabricated by surface activated bonding	Applied Physics, 57 , 02BE03 (2018).		
52	Yutaka Ohno ¹ , Hideto Yoshida ² , Seiji Takeda ² , Jianbo Liang ³ and Naoteru Shigekawa ³	¹ 東北大、 ² 阪大、 ³ 大阪市大	Intrinsic microstructure of Si/GaAs heterointerfaces fabricated by surface- activated bonding at room temperature	Japanese Journal of Applied Physics, 57 , 02BA01 (2018).	有	2017年11 月
53	L. Chai, J. Liang, and N. Shigekawa	大阪市大	Effects of annealing on the electrical characteristics of GaAs/GaAs junctions by surface activated bonding	Japanese Journal of Applied Physics, 55 , 068002 (2016).	有	2016年5 月
54	S. Yoshidomi, S. Kimura, M. Hasumi, and T. Sameshima	国立大学法 人東京農工 大学	Indium-gallium-zinc-oxide layer used to increase light transmittance efficiency of adhesive layer for stacked- type multijunction solar cells	Jpn. J. Appl. Phys. 54 (2015) 112301.	有	2015/10/1
55	T. Sameshima, T. Nimura, T. Sugawara, Y. Ogawa, S. Yoshidomi, S. Kimura, M. Hasumi	国立大学法 人東京農工 大学	Indium gallium zinc oxide layer used to decrease optical reflection loss at intermediate	Jpn. J. Appl. Phys. 56 (2017) 012602.	有	2016/12/6
56	M. Hasumi, Y. Ogawa, K. Oshinari, J. Shirakashi, W. Kubo, T. Sameshima	国立大学法 人東京農工 大学	Reduction in connecting resistivity and optical reflection loss at intermediate layer for mechanically stacked multijunction solar cells	Jpn. J. Appl. Phys. 57 (2018) 102301.	有	2018/9/5

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	M. Mori, A. Ogura, K. Yoshida, T. Sogabe, and Y. Okada	東京大学	Device simulation of thin film solar cell characteristics considering Fabry-Perot cavity effect	International Nano- Optoelectronics Workshop, Tokyo	2015年8月
2	K. Watanabe, T. Inoue, H. Sodabanlu, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Self-Organized Texture of GaAs by Wet Etching for Light Trapping in MQW Solar Cell	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), Hamburg, Germany	2015年9月
3	N. Vandamme, J. Goffard, B. Behaghel, A. Cattoni,	東京大学, LPN, IRDEP CNRS	Ultrathin GaAs Solar Cells with a Nanostructured Silver Mirror	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and	2015年9月

	A. Lemaître, S. Collin, A. Delamarre, M. Sugiyama and J.F. Guillemoles			Exhibition (EU PVSEC), Hamburg, Germany	
4	森瑞希、 小倉暁雄、 曾我部東馬、 岡田至崇	東京大学	光干渉効果を考慮した薄膜太陽電池のデバイスシミュレーション	第76回応用物理学 会秋季学術講演会	2015年9月
5	A. Ogura, M. Mori, K. Yoshida, and T. Sogabe	東京大学	Device simulation of thin-film intermediate-band solar cell using drift-diffusion model and FDTD method	SPIE Photonics West 2016, San Francisco, USA	2016年2月
6	長岡恵里奈、 井上智之、 トープラサートポ ン カシディット 山下大之、 渡辺健太郎、 杉山正和、 中野義昭	東京大学	GaAs/Si 太陽電池における変換効率・発電コストの GaAs 層厚依存性	第63回応用物理学 会春季学術講演会	2016年3月
7	B. M. Yu Jeco, T. Sogabe, A. Ogura, N. Miyashita, R. Tamaki, and Y. Okada	東京大学	Laser Beam Induced Current (LBIC) Mapping of InGaP/GaAs/Ge Triple Junction Solar Cells with Luminescence Coupling	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Portland, USA	2016年6月
8	K. Watanabe, T. Inoue, K. Toprasertpong A. Delamarre, H. Sodabanlu, J.-F. Guillemoles M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Optical analysis of the photon recycling effect in InGaAs/GaAsP multiple quantum well solar cell with light trapping structure	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Portland, USA	2016年6月
9	A. Cattoni, Hung-Ling Chen, N. Vandamme, J. Goffard, A. Lemaitre, A. Delamarre, B. Behaghel, K. Watanabe, M. Sugiyama, J.-F. Guillemoles S. Collin	LPN, 東京大学	200nm-thick GaAs solar cells with a nanostructured silver mirror	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Portland, USA	2016年6月
10	B. M. Yu Jeco	東京大学	Spatial Distribution of Temperature Dependent luminescence coupling Current in InGaP/GaAs/Ge Triple Junction Solar Cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016年10月
11	B. Mae YU JECO, R. Vergil Doma, M. Anthony	東京大学、 University of Santo	Acquisition and Analysis of Electrocardiogram Waveforms with Diagnosis Transmission	IEEE TENCON 2016, Singapore	2016年11月

	Morales, E. Grace Tarroza, M. Fatima Villaflores, A. dela Cruz, E. Guevara, R. Rhay Vicerra, M. Luisa Asilo	Tomas	through Short Message Service Communication System		
12	B. Kim, O. Supplie, T. Watanabe, A. Paszuk, T. Hannappel, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学, Tech. Univ. Ilmenau	Double-layer step formation on Si (100) surfaces by moderate-temperature annealing coupled with TBA exposure	Compound Semiconductor Week 2017 (CSW 2017), Berlin, Germany	2017年5月
13	A. Paszuk, O. Supplie, S. Brückner, M. M. May, A. Dobrich, A. Nägelein, B. Kim, Y. Nakano, M. Sugiyama, P. Kleinschmidt, and T. Hannappel	Tech. Univ. Ilmenau, 東京大学	In-situ control over dimer orientation on Si(100) surfaces in arsenic ambient and its impact on the sublattice orientation of subsequently grown GaP	Compound Semiconductor Week 2017 (CSW 2017), Berlin, Germany	2017年5月
14	K. Watanabe, E. Nagaoka, D. Yamashita, K. Toprasertpong Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学	Development of GaAs//Si current-balanced dual junction solar cell integrated by surface- activated bonding	5th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration (LTB- 3D 2017), Tokyo	2017年5月
15	B. Kim, K. Toprasertpong O. Supplie, A. Paszuk, T. Hannappel, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学, Tech. Univ. Ilmenau	Efficiency of GaAsP/Si Two- junction Solar Cells with Multi-Quantum Wells: a Realistic Modeling with Carrier Collection Efficiency	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington DC, USA	2017年6月
16	A. Paszuk, O. Supplie, S. Brückner, M. M. May, A. Dobrich, A. Nägelein, B. Kim, Y. Nakano, M. Sugiyama, P. Kleinschmidt, and T. Hannappel	Tech. Univ. Ilmenau, 東京大学	In situ control over the sublattice orientation of heteroepitaxially grown single-domain GaP/Si:As virtual substrates for tandem absorbers	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington DC, USA	2017年6月
17	L. Zhu, A. Reddy, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano, and H. Akiyama	東京大学	Design of InGaP/GaAs/InGaAs multi-junction cells with reduced layer thicknesses using light-trapping rear texture	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington DC, USA	2017年6月

18	Y. Shoji, K. Watanabe, A. Ogura, and Y. Okada	東京大学	50-layer stacked InGaAs/GaAs quantum dot solar cell with light scattering structure	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU- PVSEC), Amsterdam, Netherlands	2017年9月
19	B. M. F. Yu Jeco, K. Yoshida, R. Tamaki, N. Ahsan, and Y. Okada	東京大学	Analysis of Current Generation in InGaP/GaAs/Ge Triple Junction Solar Cells with Optically Non-Uniform Luminescence Coupling Effect	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU- PVSEC), Amsterdam, Netherlands	2017年9月
20	A. G. Reddy, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano, L. Zhu, and H. Akiyama	東京大学	Feasibility of Thin-Film InGaP/GaAs/InGaAs Multi- Junction Solar Cells Using Light Trapping for Low-Cost and High-Efficiency Applications	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU- PVSEC), Amsterdam, Netherlands	2017年9月
21	T. Sogabe, M. Mori, K. Sakamoto, K. Yamaguchi, and Y. Okada	電気通信大 学、 東京大学	Light Interference Integrated Device Simulation in Thin Film InAs/GaAs Quantum Dot Solar Cell	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
22	K. Watanabe, M. Sugiyama, H. Sodabanlu, K. Toprasertpong and Y. Nakano	東京大学	Current-matched design of GaAs//Si dual junction solar cells integrated by surface activated wafer bonding	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
23	B. Kim, O. Supplie, A. Pasazuk, T. Hannappel, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 Tech. Univ. Ilmenau	MOVPE preparation of GaP template on Si(100) with in-situ reflectance anisotropy monitoring: impact of reactor contamination	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
24	L. Zhu, A. Reddy, M. Sugiyama, K. Watanabe, Y. Nakano, and H. Akiyama	東京大学	Reduced-layer-thickness design of InGaP/GaAs/InGaAs solar cells using light- trapping texture mirror	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
25	M. Giteau, S. Collin, Z. Jehl, D. Suchet, J.-F. Guillemoles and Y. Okada	東京大学、 IPVF CNRS	Advanced Light Trapping for Hot-Carrier Solar Cells	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6月

26	B. M. F Yu Jeco, R. Tamaki, T. Nakamura, M. Imaizumi, N. Ahsan, and Y. Okada	東京大学	Spatial evaluation of luminescent coupling effect in a current-limiting subcell of In GaP/GaAs/Ge triple junction solar cells	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6月
27	O. Supplie, A. Heinisch, M. Sugiyama, and T. Hannappel	Tech. Univ. Ilmenau、 東京大学	Optical in situ quantification of the Arsenic content in GaAsP graded buffer layers for III -V-on-Si tandem absorbers during MOVPE growth	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6月
28	A. Paszuk, O. Supplie, M. Nandy, S. Brückner, A. Dobrich, P. Kleinschmidt, B. Kim, Y. Nakano, M. Sugiyama, and T. Hannappel	Tech. Univ. Ilmenau、 東京大学	As-modified Si(100) Surfaces for III-V-on-Si Tandem Solar Cells	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6月
29	M. Giteau, K. Watanabe, N. Miyashita, H. Sodabanlu, J. Goffard, A. Delamarre, D. Suchet, R. Tamaki, Z. Jehl, L. Lombez, M. Sugiyama, A. Cattoni, S. Collin, J-F. Guillemoles and Y. Okada	東京大学、 IPVF CNRS	Light Absorption Enhancement in Ultra-Thin Layers for Hot-Carrier Solar Cells	SPIE Photonics West 2019, San Francisco, USA	2019年2月
30	B. M. Yu Jeco, A. Chikhalkar, M. Giteau, R. Tamaki, N. Ahsan, R. King, and Y. Okada,	東京大学、 Arizona State University	The influence of Al ₂ O ₃ passivation of III-V on Ge multijunction solar cells to the spatial distribution of luminescent coupling effect	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC46), Chicago, USA	2019年6月
31	O. Supplie, A. Heinisch, A. Paszuk, A. Tummaliéh, M. Sugiyama, and T. Hannappel	Tech. Univ. Ilmenau、 東京大学	Optical in situ Quantification of the As versus P Content during GaAsP Graded Layer Growth for III-V-on-Si Tandems	36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU- PVSEC), Marseille, France	2019年9月
32	Shengjiang Quan, Ziqi Zhang, K. Watanabe, H. Sodabanlu, Y. Nakano, M. Sugiyama	東京大学	Light trapping enhanced InGaP/GaAs two-junction solar cell based on colloidal lithography	第 67 回応用物理学 会春季学術講演会	2020年3月

33	高本達也	シャープ(株)	III-V族系超高効率太陽電池の高効率化技術	学振 175 委員会 「化合物薄膜太陽電池分科会」第 5 回研究会 “夏の学校 2015”	2015/9
34	高本達也	シャープ(株)	III-V 多接合型太陽電池の技術動向	東京理科大学太陽光発電技術研究部門シンポジウム 「太陽電池・発電技術の現状と課題」(東京理科大学)	2016/1
35	高本達也	シャープ(株)	III-V 族多接合型太陽電池の動向について	2016 年第 63 回応用物理学会春季学術講演会(東京工業大学)	2016/3
36	高本達也	シャープ(株)	III-V PV Activities at SHARP	PV Industry WS 2016 (Korea)	2016/9
37	高本達也	シャープ(株)	IMM Triple-junction Solar Cells and Modules optimized for Space and Terrestrial Conditions.	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. (ワシントン DC)	2017/6
38	野中翔一郎, 古川昭雄, 牧田紀久夫, 水野英範, 菅谷武芳, 仁木栄	東京理科大学、 産業技術総合研究所	スマートスタック構造における接合界面の詳細分析 II	第 76 回応用物理学会秋季学術講演会	2015/09
39	望月透、菅谷武芳、 太野垣健、 牧田紀久夫、 大島隆治、 松原浩司、 岡野好伸	東京都市大学、 産業技術総合研究所	スマートスタック多接合太陽電池に向けた MBE による InGaAsP セカンドセルの作製	第 76 回応用物理学会秋季学術講演会	2015/09
40	山田昇、 牧田紀久夫、 馬場将亮、 平井大貴、 菅谷武芳	長岡科学技術大学、 産業技術総合研究所	Fabrication of low concentration multi-junction solar cells with smart stacking and areal current matching technique	31st European Photovoltaics Solar Energy Conference	2015/09
41	川北史朗、 今泉充、舩分宏昌、 牧田紀久夫、 菅谷武芳、 西永慈郎、 佐藤真一郎、 大島武	JAXA、 産業技術総合研究所、 量子科学技術研究開発機構	Radiation Resistance in High-Efficiency III-V/CIGS Mechanical Stacking Solar Cells	31st European Photovoltaics Solar Energy Conference	2015/09
42	菅谷武芳	産業技術総合研究所	III-V 族化合物半導体を用いた革新的太陽電池開発の進展	学振光エレクトロニクス第 130 委員会	2015/10
43	牧田紀久夫、 水野英範、 大島隆治、齋均、 野中翔一郎、 古川昭雄、 高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総合研究所、 東京理科大学	Development of Smart Stacking Technology for Multi-junction Solar Cells	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2015/11

44	馬場将亮、 牧田紀久夫、 菅谷武芳、 山田昇	長岡科学技 術大学、 産業技術総 合研究所	Light management for mechanically stacked dual- junction solar cells with areal current matching techniques	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2015/11
45	菅谷武芳、望月透、 太野垣健、 牧田紀久夫、 大島隆治、 松原浩司、 岡野好伸	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	Fabrication of InGaAsP (1.65eV) second cells for smart stack multijunction solar cells grown using solid-source MBE	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2015/11
46	野中翔一郎、 古川昭雄、 牧田紀久夫、 水野英範、 菅谷武芳、 仁木栄	東京理科大 学、 産業技術総 合研究所	スマートスタック技術による 多接合太陽電池の接合界面の 評価	電子情報通信学会 研究会	2015/11
47	菅谷武芳、 牧田紀久夫、 水野英範、望月透、 大島隆治、 西永慈郎、 岡野好伸、 松原浩司	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	Smart stacked heterogeneous multijunction solar cells fabricated by advanced bonding using metal nanoparticle arrays	The 2015 International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology	2015/12
48	菅谷武芳、 牧田紀久夫、 水野英範、 大島隆治、 太野垣健	産業技術総 合研究所	スマートスタック異種多接合 太陽電池	第 63 会応用物理学 会春季学術講演会 (招待講演)	2016/03
49	大島隆治、 牧田紀久夫、 太野垣健、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	逆積み 1.0 eV 帯 GaInAsP 薄膜 太陽電池における暗電流の低 減	第 63 会応用物理学 会春季学術講演会	2016/03
50	水野英範、 牧田紀久夫、 菅谷武芳、 太野垣健、 望月敏光、 高遠秀尚	産業技術総 合研究所	ボトムに単結晶 Si を用いたス マートスタック多接合セル	第 63 会応用物理学 会春季学術講演会	2016/03
51	水野英範、 牧田紀久夫、 菅谷武芳、 大島隆治、 高遠秀尚、 松原浩司、 仁木栄	産業技術総 合研究所	スマートスタック技術：金属 ナノ粒子配列を用いた高効率 多接合太陽電池の開発	日本化学会 第 96 春季年会	2016/03
52	馬場将亮、 牧田紀久夫、 菅谷武芳、 山田昇	長岡科学技 術大学、 産業技術総 合研究所	スマートスタック/面積電流整 合/低倍率集光を組み合わせた 多接合太陽電池 (SMAC モジュ ール) の設計試作	第 13 回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2016/05
53	菅谷武芳、望月透、 長門優喜、 太野垣健、 牧田紀久夫、 大島隆治、 松原浩司、 岡野好伸	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	MBE による InGaAsP (1.65eV) 太陽電池とスマートスタック 用 3 接合トップセルの試作	第 13 回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2016/05

54	水野英範、 牧田紀久夫、 太野垣健、 望月敏光、 高遠秀尚、 菅谷武芳、 H. Mehrvarz、 M. Green、 A. Ho-Baillie	産業技術総 合研究所、 UNSW	A "Smart Stack" Triple- Junction Cell Consisting of InGaP/GaAs and Crystalline Si	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/06
55	大島隆治、 牧田紀久夫、 太野垣健、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Enhanced open circuit voltage in inverted thin film solar cells lattice- matched to InP	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/06
56	川北史朗、今泉充、 牧田紀久夫、 菅谷武芳、 西永滋郎、柴田肇、 佐藤真一郎、 大島武	JAXA、 産業技術総 合研究所、 量子科学技 術研究開発 機構	High Efficiency and Radiation Resistant InGaP/GaAs//CIGS Stacked Solar Cells for Space Applications	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/06
57	水野英範、 牧田紀久夫、 太野垣健、 望月敏光、 木田康博、 菅谷武芳、 高遠秀尚	産業技術総 合研究所	Al-Back Surface Field-Type Crystalline Si-Based Smart Stack Triple-Junction (InGaP/GaAs/Si) Cells	32nd European Photovoltaics Solar Energy Conference	2016/06
58	牧田紀久夫、 水野英範、 大島隆治、 太野垣健、 西永滋郎、柴田肇、 馬場将亮、山田昇、 高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 長岡科学技 術大学	Low Concentration GaAs/CuInGaSe and GaAs/Si Multijunction Solar Cells with Smart Stack Technology	32nd European Photovoltaics Solar Energy Conference	2016/06
59	大島隆治、 牧田紀久夫、 太野垣健、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Enhancement of open circuit voltage in InGaAsP inverted thin-film solar cells grown by solid-source molecular beam epitaxy	19th international Conference on Molecular Beam Epitaxy	2016/09
60	牧田紀久夫、 水野英範、 大島隆治、 太野垣健、 高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	スマートスタック技術を用い た低倍集光異種接合型多接合 太陽電池の検討	第 77 回応用物理学 会秋季学術講演会	2016/09
61	太野垣健、 牧田紀久夫、 水野英範、 大島隆治、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	スマートスタック InGaP/GaAs//InGaAsP/InGaAs 4 接合太陽電池の光学特性評価	第 77 回応用物理学 会秋季学術講演会	2016/09
62	長門優喜、 菅谷武芳、 大島隆治、 岡野好伸	東京都市大 学、 産業技術総 合研究所	MBE 法を用いた InGaP 太陽電池 における基板オフ角度の検討	第 77 回応用物理学 会秋季学術講演会	2016/09
63	菅谷武芳、望月透、 長門優喜、 太野垣健、	産業技術総 合研究所、 東京都市大	Growth of InGaAsP (1.65eV) Solar Cells and its Application to 3-Junction	32nd North American Conference on	2016/09

	牧田紀久夫、 大島隆治、 松原浩司、 岡野好伸	学	Top Cells for Smart Stack Multijunction Solar Cells	Molecular Beam Epitaxy	
64	馬場将亮、 牧田紀久夫、 菅谷武芳、 山田昇	長岡科学技 術大学、 産業技術総 合研究所	Relative Properties of SMAC solar cell	11th Asian Thermophysical Properties Conference	2016/10
65	牧田紀久夫、 水野英範、 大島隆治、 太野垣健、 馬場将亮、 山田昇、高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 長岡科学技 術大学	Low Concentration InGaP/GaAs/Si 3-Junction Solar Cells with Smart Stack Technology	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
66	太野垣健、 牧田紀久夫、 水野英範、 大島隆治、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Optical characterisation of smart stack four junction InGaP/GaAs//InGaAsP/InGaAs solar cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
67	大島隆治、 長門優喜、 岡野好伸、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	The role of substrate miscut on the properties of InGaP solar cells grown on GaAs(001) by solid source molecular beam epitaxy	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
68	太野垣健、 牧田紀久夫、 水野英範、 大島隆治、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Optical characterisation of smart stack four junction InGaP/GaAs//InGaAsP/InGaAs solar cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
69	水野英範、 牧田紀久夫、 太野垣健、 菅谷武芳、 高遠秀尚	産業技術総 合研究所	Progress of Smart Stack Technology towards Practical Applications	第 64 回応用物理学 会春季学術講演会	2017/03
70	馬場将亮、 牧田紀久夫、 水野英範、 高遠秀尚、 菅谷武芳、山田昇	長岡科学技 術大学、 産業技術総 合研究所	Optical design for 2- terminal III-V/Si SMAC module	IEEE photovoltaics specialist conference 44	2017/06
71	牧田紀久夫、 水野英範、 大島隆治、 太野垣健、 馬場将亮、山田昇、 高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 長岡科学技 術大学	スマートスタック GaAs//Si 系 多接合太陽電池の実用化技術 開発	第 14 回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2017/07
72	牧田紀久夫、 水野英範、 大島隆治、 太野垣健、 高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	スマートスタック技術を用い た異種接合型多接合太陽電池 の検討	第 78 回応用物理学 会秋季学術講演会	2017/09

73	今泉充、高本達也、大島武、菅谷武芳	JAXA、シャープ(株)、量子科学技術研究開発機構、産業技術総合研究所	多元化合物半導体を材料とした宇宙用太陽電池の研究開発	第78回応用物理学会秋季学術講演会	2017/09
74	長門優喜、菅谷武芳、大島隆治、岡野好伸	東京都市大学、産業技術総合研究所	MBE法を用いたInGaP太陽電池の成長温度、成長速度の検討	第78回応用物理学会秋季学術講演会	2017/09
75	牧田紀久夫、水野英範、大島隆治、太野垣健、高遠秀尚、菅谷武芳	産業技術総合研究所	Next-generation High Efficiency and Low Cost GaAs/Si Multijunction Solar Cells with Smart Stack Technology	Int. Conf. on Solid State Devices & Materials 2017, C-3-01 (招待講演)	2017/09
76	牧田紀久夫、水野英範、大島隆治、太野垣健、馬場将亮、山田昇、高遠秀尚、菅谷武芳	産業技術総合研究所、長岡科学技術大学	High Reliable Low Concentration InGaP/GaAs/Si 3-Junction Solar Cells with Smart Stack Technology	33rd European Photovoltaics Solar Energy Conference	2017/09
77	長門優喜、大島隆治、岡野好伸、菅谷武芳	東京都市大学、産業技術総合研究所	Enhancement of open-circuit voltage in InGaP solar cells grown by solid source molecular beam epitaxy	The 27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
78	菅谷武芳、太野垣健、牧田紀久夫、大島隆治	産業技術総合研究所	Dual-junction GaAs PV cells for smart stacked multijunction solar cells	The 27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
79	菅谷武芳、大島隆治、水野英範、牧田紀久夫、望月敏光、太野垣健	産業技術総合研究所	High-efficiency heterogeneous multijunction solar cells fabricated by smart stack technology using metal nanoparticle arrays	2017 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS)	2017/11
80	牧田紀久夫、水野英範、大島隆治、太野垣健、高遠秀尚、菅谷武芳	産業技術総合研究所	スマートスタック技術によるGaAs/Si多接合太陽電池の開発(基本検証および実用化に向けて)	学振175委員会次世代シリコン太陽電池分科会、超高効率太陽電池分科会	2017/12
81	菅谷武芳	産業技術総合研究所	Smart stacked heterogeneous multijunction solar cells fabricated by advanced bonding using metal nanoparticle arrays	10 th Int. Symp. on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma2018) (招待講演)	2018/03

82	中元嵩、 牧田紀久夫、 大島隆治、 太野垣健、 相原健人、 岡野好伸、 菅谷武芳	東京都市大 学、 産業技術総 合研究所	GaAs/GaAs 多重化構造を有する 多接合太陽電池の検討	第 65 回応用物理学 会春季学術講演会	2018/03
83	長門優喜、 大島隆治、 菅谷武芳、 岡野好伸	東京都市大 学、 産業技術総 合研究所	MBE 法を用いた InGaP/GaAs 2 接合太陽電池の高性能化	第 65 回応用物理学 会春季学術講演会	2018/03
84	牧田紀久夫、 水野英範、 大島隆治、 太野垣健、 西永慈郎、 柴田肇、高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Heterogeneous Multi- junction Solar Cells using Smart Stack Technology for Practical Use	2018 MRS Spring meeting	2018/04
85	Chuqi Yi、 Fa-Jun Ma、 水野英範、 牧田紀久夫、 菅谷武芳、 高遠秀尚、 Hamid Mehrvarz、 Stephen Bremner Anita Ho-Baillie	UNSW、 産業技術総 合研究所	Broadband Reflectance Reduction for Wafer Bonded III-V//Si Tandem Cell Using Polydimethylsiloxane - Replicated Surface Texturing	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	2018/06
86	菅谷武芳、 太野垣健、 相原健人、 牧田紀久夫、 大島隆治、 水野英範、 中元嵩、岡野好伸	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	Smart stacked InGaP/GaAs/GaAs//Si quadruple-junction solar cells	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	2018/06
87	大島隆治、 長門優喜、 牧田紀久夫、 岡野好伸、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	Atomic ordering effect on the cell performance of InGaP/GaAs dual-junction solar cells grown by solid- source MBE	Grand Renewable Energy 2018	2018/06
88	中元嵩、 牧田紀久夫、 大島隆治、 太野垣健、 相原健人、 岡野好伸、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	High-efficiency and Low- cost Multi-junction Solar Cells with GaAs Multi- stacked Structure	Grand Renewable Energy 2018	2018/06
89	牧田紀久夫、 水野英範、 馬場将亮、 大島隆治、 太野垣健、中元嵩、 山田昇、高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 長岡科学技 術大学学、 東京都市大 学	スマートスタック GaAs//Si 低 倍集光太陽電池における接合 抵抗削減の検討	第 15 回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2018/07
90	太野垣健、 水野英範、 牧田紀久夫、 大島隆治、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	スマートスタック多接合太陽 電池における光学特性の検討	第 15 回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2018/07

91	中元嵩、 牧田紀久夫、 太野垣健、 大島隆治、 相原健人、 岡野好伸、 菅谷武芳	産業技術総合研究所、 東京都市大学	GaAs 多重構造を有する多接合太陽電池の検討	第15回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018/07
92	太野垣健、 水野英範、 牧田紀久夫、 大島隆治、 菅谷武芳	産業技術総合研究所	Impact of Nanometer Air Gap on Photon Recycling in Mechanically Stacked Multijunction Solar Cells	2018 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2018)	2018/09
93	太野垣健、 牧田紀久夫、 大島隆治、 水野英範、 馬場将亮、山田昇、 菅谷武芳	産業技術総合研究所、 長岡科学技術大学	三端子型スマートスタック多接合太陽電池の作製と特性評価	第79回応用物理学会秋季学術講演会	2018/09
94	中元嵩、 牧田紀久夫、 太野垣健、 大島隆治、 相原健人、 岡野好伸、 菅谷武芳	東京都市大学、 産業技術総合研究所	多接合太陽電池における GaAs 多重化構造の検討	第79回応用物理学会秋季学術講演会	2018/09
95	牧田紀久夫、 水野英範、 馬場将亮、 大島隆治、 太野垣健、 相原健人、中元嵩、 山田昇、高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総合研究所、 長岡科学技術大学	Nearly 30% High Efficiency Low Concentration InGaP/GaAs//Si 3-Junction Solar Cells Using Smart Stack Technology	35th European Photovoltaics Solar Energy Conference	2018/09
96	菅谷武芳、中元嵩、 牧田紀久夫、 相原健人、 太野垣健、 大島隆治、 水野英範、 岡野好伸	産業技術総合研究所、 東京都市大学	Smart Stacked InGaP/GaAs/GaAs//Si Quadruple-Junction Solar Cells Grown using Molecular Beam Epitaxy	34th North American Conference on Molecular Beam Epitaxy (NAMBE 2018)	2018/10
97	水野英範、 牧田紀久夫、 菅谷武芳、 高遠秀尚	産業技術総合研究所	接合媒体に銅ナノ粒子配列を用いたスマートスタックセル	第66回応用物理学会春季学術講演会	2019/03
98	牧田紀久夫、 太野垣健、 水野英範、 馬場将亮、 中西明日香、 高遠秀尚、山田昇、 菅谷武芳	産業技術総合研究所、 長岡科学技術大学	GaAs//Si 系三端子型スマートスタック多接合太陽電池の検討	第66回応用物理学会春季学術講演会	2019/03
99	中西明日可、 馬場将亮、 太野垣健、 牧田紀久夫、 菅谷武芳、山田昇	長岡科学技術大学、 産業技術総合研究所	三端子スマートスタック多接合太陽電池におけるサブセル面積比の影響	第66回応用物理学会春季学術講演会	2019/03

100	中元嵩、 牧田紀久夫、 太野垣健、 岡野好伸、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	Photovoltaic properties of triple-junction GaAs solar cells and their application to laser power converters	Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference 2019	2019/04
101	庄司靖、菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Study on epitaxial lift-off of stacked GaAs solar cells for low-cost photovoltaic application	Compound Semiconductor Week 2019	2019/05
102	石塚優希、 大島隆治、 菅谷武芳、 岡野好伸	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	Growth of InGaAs solar cells on InP(001) miscut substrates using solid- source molecular beam epitaxy	Compound Semiconductor Week 2019	2019/05
103	相原健人、 牧田紀久夫、 水野英範、齋均、 大島隆治、中元嵩、 庄司靖、太野垣健、 高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	InGaP/GaAs//Si 多接合太陽電 池におけるメサ構造の検討	第16回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2019/07
104	牧田紀久夫、 太野垣健、 水野英範、 立花福久、 馬場将亮、 中西明日香、 高遠秀尚、山田昇、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 長岡科学技 術大学	GaAs//Si 系三端子型スマート スタック多接合太陽電池	第16回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2019/07
105	中元嵩、 牧田紀久夫、 太野垣健、 大島隆治、 相原健人、 岡野好伸、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	GaAs 多重化構造を用いた多接 合太陽電池の試作・検討	第16回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2019/07
106	牧田紀久夫、 水野英範、 太野垣健、 相原健人、 大島隆治、 庄司靖、 高遠秀尚、 R. Muller、 P. Beutel、 D. Lackner、 J. Benick、 M. Hermle、 F. Dimroth、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 FhISE	プレナリー講演：III-V//Si three-junction solar cells reaching 30% efficiency using smart stack technology	36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2019/09
107	石塚優希、 大島隆治、 岡野好伸、 菅谷武芳	東京都市大 学、 産業技術総 合研究所	MBE法を用いた InP(001)微傾 斜基板上的 InGaAs 太陽電池の 作製	第80回応用物理学 会秋季学術講演会	2019/09
108	中元嵩、 牧田紀久夫、 太野垣健、 大島隆治、	東京都市大 学、 産業技術総 合研究所	GaAs/GaAs/GaAs//Si スマート スタック4接合太陽電池の作 製	第80回応用物理学 会秋季学術講演会	2019/09

	相原健人、 岡野好伸、 菅谷武芳				
109	太野垣健、 牧田紀久夫、 立花福久、 水野英範、 大島隆治、 高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Demonstration of Three- Terminal GaAs//Si Tandem Solar Cells with a Back- Contact-Type Bottom Cell	The 29th International PV Science and Engineering Conference	2019/11
110	水野英範、 牧田紀久夫、 望月敏光、 太野垣健、 菅谷武芳、 高遠秀尚	産業技術総 合研究所	Fabrication of III-V//Si Tandem Solar Cells by the Copper Nanoparticle Array- Mediated Smart Stack Approach	The 29th International PV Science and Engineering Conference	2019/11
111	水野英範、 牧田紀久夫、齋均、 松井卓矢、 宮寺哲彦、 太野垣健、 望月敏光、 大島隆治、 菅谷武芳、 高遠秀尚	産業技術総 合研究所	招待講演：Smart Stack Technology for Si-Based Tandem Solar Cells	2019 MRS Fall Meeting and Exhibition	2019/12
112	太野垣健、 牧田紀久夫、 立花福久、 水野英範、 大島隆治、 高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	バックコンタクト型三端子タ ンデム太陽電池の作製と評価	第 67 回応用物理学 会春季学術講演会	2020/03
113	R. Kozono ¹ , J. Liang ¹ , K. Watanabe ² , M. Sugiyama ² and N. Shigekawa ¹	¹ 大阪市大 ² 東大	GaAs//Si Hybrid Double Junction Cells Fabricated by Direct Bonding of Epitaxially Lifted-Off GaAs Subcell Layers on PET Films	The 29th International Conference on Photovoltaic Science and Engineering (PVSEC-29), Xi'an, China,	2019年11月
114	R. Kozono, S. Yoon, J. Liang and N. Shigekawa	大阪市大	GaAs/Si Double-Junction Cells Fabricated by Sacrificial Layer Etching of Directly-Bonded III-V/Si Junctions	2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Chicago, IL, USA	2019年6月
115	T. Hishida, J. Liang, and N. Shigekawa	大阪市大	Electrical properties of p+-GaAs//patterned metal layer/n+-Si junctions	2019 6th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration (LTB- 3D 2019), Kanazawa	2019年5月
116	Y. Ohno ¹ , H. Yoshida ² , S. Takeda ² , J. Liang ³ , and N. Shigekawa ³	¹ 東北大 ² 阪大 ³ 大阪市大	Atomistic Structure of Low- Resistance Si/GaAs Heterointerfaces Fabricated by Surface-Activated Bonding at Room Temperature	Americas International Meeting on Electrochemistry and Solid State	2018年9月

				Science (AIMES2018), Cancun, Mexico	
117	Naoteru Shigekawa	大阪市大	Hybrid heterostructures and heterostructure devices fabricated by surface activated bonding technologies (invited)	The 42nd Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits (WOCSDICE 2018), Bucharest, Romania	2018年5月
118	Naoteru Shigekawa	大阪市大	Application of surface-activated bonding technologies for III-V-on-Si hybrid multijunction cells (invited)	EMN Singapore Meeting 2018	2018年1月
119	重川直輝	大阪市大	表面活性化接合法によるIII-V-on-Si タンデム太陽電池(招待)	学振第175委員会次世代シリコン太陽電池分科会 超高効率太陽電池分科会	2017年12月
120	Tomoya Hara ¹ , Tomoki Ogawa ^{1, 1} , Jianbo Liang ¹ , Kenji Araki ² , Takefumi Kamioka ² , Naoteru Shigekawa ¹	¹ 大阪市大 ² 豊田工大	Annealing effects on GaAs/ITO/Si junctions fabricated by surface-activated bonding	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017年11月
121	Sanji Yoon, Jianbo Liang, Naoteru Shigekawa	大阪市大	GaAs single junction cells on Si substrates fabricated by surface activated bonding and etching of sacrificial layers	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/14
122	Naoteru Shigekawa, Jianbo Liang	大阪市大	Measurements of Potentials at Tap Contacts and Estimation of Resistance across Bonding Interfaces in InGaP/GaAs/Si Hybrid Triple-Junction Cells	2017 IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017年6月
123	Naoteru Shigekawa ¹ , Tomoya Hara ¹ , Tomoki Ogawa ¹ , Jianbo Liang ¹ , Takafumi Kamioka ² , Kenji Araki ² , Masafumi Yamaguchi ²	¹ 大阪市大 ² 豊田工大	InGaP/GaAs/ITO/Si Hybrid Triple-Junction Cells with GaAs/ITO Bonding Interfaces	2017 IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017年6月
124	Jianbo Liang ¹ , Tomoki Ogawa ¹ , Kenji Araki ² , Takefumi Kamioka ² , Naoteru	¹ 大阪市大 ² 豊田工大	Electrical Conduction of Si/ITO/Si Junctions Fabricated by Surface Activated Bonding	2017 5th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration	2017年5月

	Shigekawa ¹				
125	Naoteru Shigekawa, Jianbo Liang	大阪市大	Impacts of Bonding-Layer Resistance of Si Bottom Cells on Interface Resistance in InGaP/GaAs/Si Hybrid Triple-Junction Cells	2017 5th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration	2017年5月
126	Yutaka Ohno ¹ , Hideto Yoshida ² , Seiji Takeda ² , Liang Jianbo ³ , Naoteru Shigekawa ³	¹ 東北大 ² 阪大 ³ 大阪市大	Plane-View Transmission Electron Microscopy of Si/GaAs Interfaces Fabricated by Surface-Activated Bonding at Room Temperature	2017 5th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration	2017年5月
127	Naoteru Shigekawa, Jianbo Liang	大阪市大	Surface-activated Bonding of III-V Compound Semiconductors and Si for Fabricating Hybrid Tandem Solar Cells (invited)	2018 International Conference on Electronics Packaging	2017年4月
128	Naoteru Shigekawa and Jianbo Liang	大阪市大	Electrical Characterisation of Coupling Properties in InGaP/GaAs/Si Triple-Junction Cells	PVSEC-26	2016年10月
129	Shunsuke Kimura, Shinya Yoshidomi, Masahiko Hasumi, and Toshiyuki Sameshima	国立大学法人東京農工大学	Reduction in Optical Reflection Loss at Intermediate Adhesive Layer for Mechanically Stacked Multi-Junction Solar Cells	The 22nd International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices	2015/7/2
130	Masahiko Hasumi, Toshiyuki Sameshima, Takayuki Motoki, Tomohiko Nakamura and Tomohisa Mizuno	国立大学法人東京農工大学	Annihilation Properties of Photo-Induced Carrier in Silicon PN Junction	The 22nd International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices	2015/7/2
131	木村駿介、吉富真也、蓮見真彦、鮫島俊之	国立大学法人東京農工大学	メカニカルスタック型多接合ソーラーセルの中間層における光反射ロス低減	薄膜材料デバイス研究会第12回研究集会	2015/10/31
132	T. Sugawara, S. Kimura, S. Yoshidomi, S. Saito, M. Hasumi, T. Sameshima	国立大学法人東京農工大学	Low Optical Reflection at Intermediate Adhesive Layer for Mechanically Stacked Multi-Junction Solar Cells	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016/3/19
133	T. Sameshima, S. Kimura, S. Yoshidomi, T. Sugawara, S. Saito, M. Hasumi	国立大学法人東京農工大学	Low Optical Reflection at Intermediate Adhesive Layer for Mechanically Stacked Multi-Junction Solar Cells	PhotoVoltaic Technical Conference 2016	2016/5/9
134	T. Sameshima, S. Kimura, S. Yoshidomi, T. Sugawara, M. Hasumi	国立大学法人東京農工大学	REDUCTION IN OPTICAL REFLECTION AT INTERMEDIATE ADHESIVE LAYER FOR MECHANICALLY STACKED MULTI-JUNCTION SOLAR CELLS	32nd International European Conference on Surface Science	2016/9/1

135	鮫島俊之、 荷村毅、菅原崇、 小川喜洋、 吉富真也、 木村俊介、 蓮見真彦	国立大学法 人東京農工 大学	メカニカルスタック型多接合 ソーラーセル作製のためのイ ンジウムガリウムジंकオキ サイドを用いた中間接着層に おける光反射ロスの低減	薄膜材料デバイス 研究会第13回研究 集会	2016/10/22
136	Y. Ogawa, M. Hasumi, T. Mizuno, T. Sameshima	国立大学法 人東京農工 大学	Reduction of Optical Reflection Loss at Intermediate Adhesive Layer for Mechanically Stacked Multi-Junction Solar Cells	第64回応用物理学 会春季学術講演会	2017/3/16
137	T. Sameshima, Y. Ogawa and M. Hasumi	国立大学法 人東京農工 大学	Reduction in optical reflection at intermediate adhesive layer for mechanically stacked multi junction solar cells	E-MRS 2017 Spring Meeting	2017/5/23
138	M. Hasumi, Y. Ogawa, K. Oshinari, T. Sameshima	国立大学法 人東京農工 大学	International Conference on Solid State Devices and Materials	Photovoltaic Technical Conference	2017/9/21
139	Yoshihiro Ogawa, Kosuke Oshinari, Masahiko Hasumi, Toshiyuki Sameshima, Tomohisa Mizuno	国立大学法 人東京農工 大学	Transparent and Conductive layers used for Reducing Optical Reflection Loss for Fabricating Mechanically Stacked Multi-Junction Solar Cells	第65回応用物理学 会春季学術講演会	2018/3/19
140	Kosuke Oshinari, Masaki Kondo, Mamiko Yagi, Masahiko Hasumi, Wakana Kubo, Junichi Shirakashi, Toshiyuki Sameshima, Mohamed Amara	国立大学法 人東京農工 大学	Reduction in Connecting Resistivity of Intermediate Adhesive Layer by SF ₆ Plasma Treatment for Mechanical Stacking Multi Junction Solar Cells	第65回応用物理学 会春季学術講演会	2018/3/20
141	T. Sameshima, K. Oshinari, G. Kojitani, M. Hino, T. Watanabe, M. Kondo, M. Yagi, M. Hasumi, W. Kubo, J. Shirakashi, M. Amara	国立大学法 人東京農工 大学	Reduction in connecting resistivity of intermediate adhesive layer for mechanically stacked multi- junction solar cells	Grand Renewable Energy	2018/6/21
142	M. Hasumi, Y. Ogawa, K. Oshinari, G. Kojitani, M. Hino, T. Watanabe, T. Sameshima, T. Mizuno	国立大学法 人東京農工 大学	Transparent and conductive layers used for reducing optical reflection loss for fabricating mechanically stacked multi-junction solar cells	Grand Renewable Energy	2018/6/21

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	産業技術総合研究所	貼り合せで限界を超える	日経エレクトロニクス 2015年12月号, p. 56	2015/12
2	産業技術総合研究所	スマートスタック技術	ケミカルエンジニアリング 2016年5月号	2016/05
3	産業技術総合研究所	吸収波長域の異なるセルからなる多接合型太陽電池の「スマートスタック技術」による展開	月刊 Material Stage 9月号	2016/09
4	産業技術総合研究所	スマートスタック技術による異種材料高効率多接合太陽電池	応用物理, vol. 86, No. 7, pp. 552-557 (2017)	2017/07
5	産業技術総合研究所	スマートスタック技術による異種接合型多接合太陽電池の開発	(株)技術情報協会書籍: 異種材料の接着・接合技術とマルチマテリアル化	2017/10
6	産業技術総合研究所	スマートスタック技術による多接合型太陽電池の研究開発	次世代の太陽電池・太陽光発電—その発電効率向上、用途と市場の可能性—、技術情報協会, pp. 273-281.	2018/04
7	産業技術総合研究所	MBE of III-V Semiconductors for Solar Cells	Molecular Beam Epitaxy -Materials and Applications for Electronics and Optoelectronics- Wiley Vol. 3, No. 16, pp. 265~278	2019/04
1	大阪市大	「貼り合わせで限界を超える」	日経エレクトロニクス	2015年12月

【その他】

番号	年度	タイトル	名称	内容
1	2015	スマートスタックによる次世代多接合太陽電池の研究開発	第10回再生可能エネルギー世界展示会	パネル展示
2	2016	異種材料を自在に組み合わせた スマートスタック次世代多接合太陽電池	第11回再生可能エネルギー世界展示会	パネル展示
3	2016	次世代スマートスタック多接合太陽電池	Nano tech 2017 第16回 国際ナノテクノロジー総合展・技術会議	パネル展示
1	2018	イノベーションジャパン 2018 大学展示 「未来の低炭素社会につながるエネルギー研究」		
2	2017	日本学術振興会 第131委員会講演「表面活性化による異種半導体接合技術とその応用」		

1	2016	JST 関西公立 3 大学新技術説明会「室温異種材料接合で作る革新的グリーンデバイス」		
2	2016	イノベーションジャパン「室温異種材料接合による革新的グリーンデバイスの開発」		
3	2015	大阪府立大学・大阪市立大学ニューテックフェア 2015「異なる半導体の貼り合わせで作る高効率太陽電池」		

B 低コスト化プロセス技術開発（産業技術総合研究所、東京農工大学、東京大学、タカノ（再）、シャープ株式会社、豊田工業大学、宮崎大学（再）、大陽日酸株式会社）

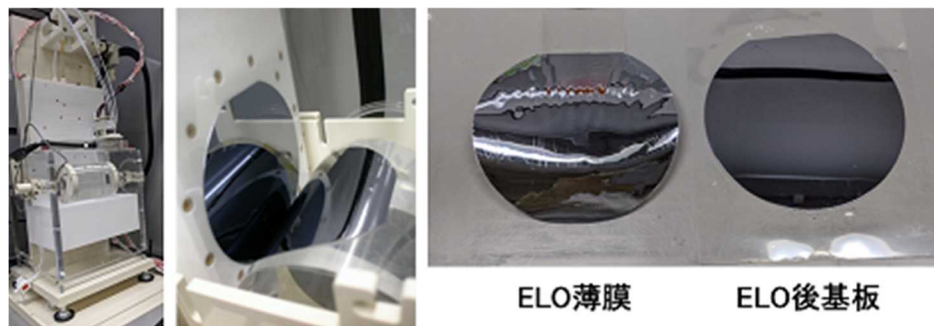
1. 成果詳細

Ⅲ-2-(ロ)-B-1-a1, a2. 低コスト実装プロセス：エピ層移載【東京大学、タカノ（再委託）】

・4インチウエハサイズの ELO 技術開発

ウエハスケールの ELO が達成されている手法として、浸漬法、ウェイト支援法、シリンダー支援法、表面張力支援法といった方式が報告されている。本開発では、自動制御化および大面積化の面で有利であるシリンダー支援法を基礎コンセプトとして採用し、タカノ株式会社（以下、タカノ(株)）と連携し装置開発を実施した。タカノ(株)が ELO 自動装置の製作を、東大は主に装置を用いた ELO 実験を担当した。

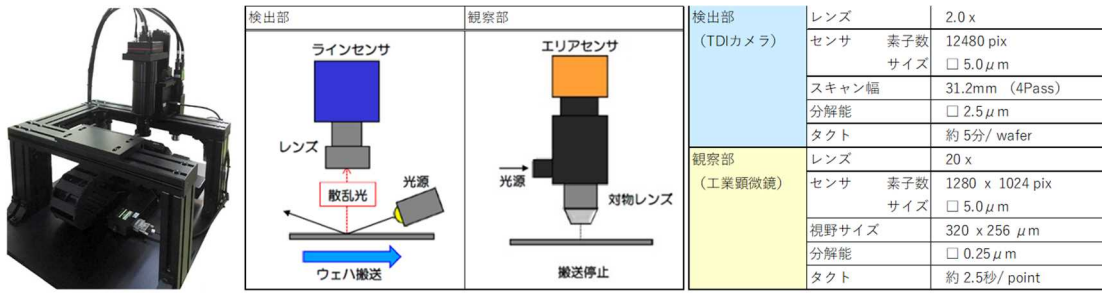
開発当初は小面積チップを用いた基礎実験により再現性良く ELO 薄膜を分離するための諸要素（薄膜支持材、リリース層構造、エッチャント濃度、曲げ半径等）の最適化を行い、シリンダー支援法のコンセプト検討を進めた。装置改良を重ね、プロジェクト終了時点では4インチウエハを用い20mm/hの速度での全面剥離を達成した。さらに各種条件の最適化を進め、2020年8月現在4インチウエハで50mm/hを達成した。（図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-a1-1）



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-a1-1 （左）開発した ELO 自動装置（6号機）、（中央）剥離中の様子（速度20mm/h）、（右）50mm/hで剥離した薄膜と基板の外観。

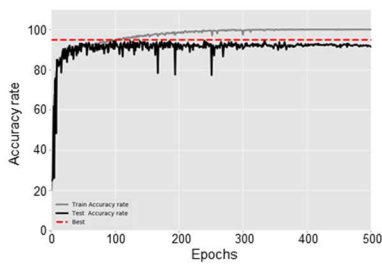
・基板表面の高速全面観察装置開発

Ⅲ-V化合物太陽電池に使用する GaAs ウエハの再利用を実現する上で再利用可否の判断を行う必要があるが、従来既存の装置では解析評価が十分行えないことから、本研究ではタカノ(株)と共同で ELO 後分離された GaAs ウエハの表面観察技術開発、さらに評価用装置の製作にも取り組んだ。本技術開発ではウエハの再利用を目的とし、非接触に、短時間で表面の異物を検出するためのシステムを構築した。開発した装置の検出部の概要を図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-a1-2に示す。具体的には、初めにウエハ表面に発生した異常点を全面にわたって高速に検出する検出部、そして、検出した異常点の位置情報を基に、個別の顕微鏡画像を取得する観察部の2つの光学系を備えた構成とした。



図III-2-(ロ)-B-1-a1-2 評価用装置の光学系の概要

全面観察によって検出された異常点の情報（形状・種類、分布、等）をELO工程にフィードバックするために、製造工程に起因する異常点の種類（クラス）を策定し、機械学習による自動分類判定の実現性について評価を実施した。形状・サイズ・凹凸（高さ）の特徴を基に、「1.ピンホール」、「2.クラック」、「3.膜残り」、「4.付着異物」の4種類に、自動判定を収束させるための「5.不明」分類を加えた計5種類のクラスを定義した。分類にはコンボリユーシオンニューラルネットワーク（CNN）を用い、観察部で取得できる顕微鏡画像に対して判定を行う事とした。その上でELO後GaAsウエハ21枚の異常点検出、及び9063枚の顕微鏡画像の収集を行った。内訳は1.ピンホール⇒2632枚、2.クラック⇒1222枚、3.膜残り⇒1662枚、4.付着異物⇒1710枚、5.不明⇒1837枚である。ここで、学習の際の不均一をなくす目的で学習用のデータ数を各クラス1000枚に統一し、ランダムにピックアップしたうえで学習モデルの構築を行った。また、残りの画像から各クラス100枚ピックアップした上で、正答率の評価を実施した結果、93~95%の高い正答率が得られる事を確認した。図III-2-(ロ)-B-1-a1-3に学習の推移と分類ごとの正答率を示す。誤判定に着目すると、ピンホールとクラックの間で多くの誤判定が生じていた。ピンホールとクラックは共にウエハ表面に対して凹んだ状態となっており、人の判断でも線引きが難しいものが存在する。また、サイズが小さい場合についても誤判定しやすく、不明に判定されるケースもあり、正答率を100%に近づけるための阻害要因となっている。



		判定					正解数
		1.ピンホール	2.クラック	3.膜残り	4.付着異物	5.不明	
正解	1.ピンホール	97	2	0	0	1	97 / 100
	2.クラック	6	92	2	0	0	92 / 100
	3.膜残り	0	0	96	1	3	96 / 100
	4.付着異物	4	0	1	91	4	91 / 100
							376 / 400

図III-2-(ロ)-B-1-a1-3 (a)学習の推移 (b)正答率評価用画像に対する分類の評価結果 (正解率 94.0%) の一例

本開発テーマで検討したELO方式で処理したウエハによる評価を重ねたところ、「3.膜残り」がウエハ周辺で生じ易く、総検出数に対して大きな割合を占める事が判明した。この膜残りについてはフォトルミネンス（PL）情報を用いることで他のクラスの異常点とは明確に異なる特徴を画像化により区別できる事を突き止めた。そこで第一段階の検出部に使用する光源と撮像側のフィルタ条件、および散乱光

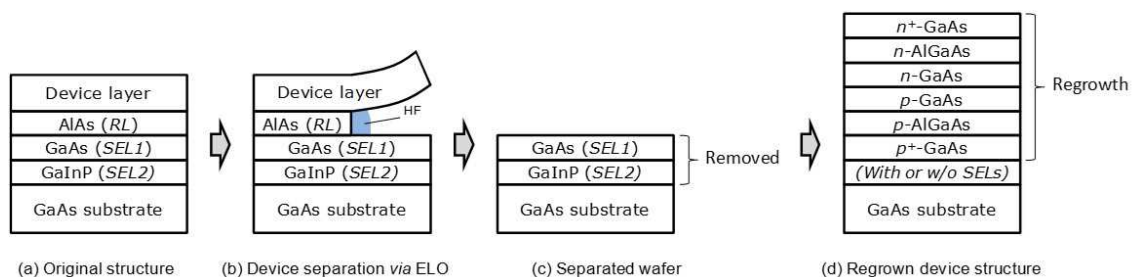
(異常点検出目的)とPL(膜残り特定目的)の強度バランスの最適化を図ることで、第一段階での「3.膜残り」の判定を可能とした。その上でCNNを用いた機械学習による膜残り特定を検討した所、誤判定率0.5%以下という非常に高い判定精度を実現できた。ここでは、画像から明らかに膜残りとして判断できる物を特定する形とし、判断が難しい膜残りとその他の異常点を一つのクラスにまとめる事で誤判定の抑制を図っている。これにより大きな割合を占める膜残りを第一段階の検出部で特定し、それ以外(一部の膜残り含む)の異常点を第二段階の観察部で分類するという枠組みが完成した。

ELO後GaAsウエハサンプルを使用した分類評価を実施した結果、全体的な判定の正答率として98.5%(総数883個)を達成した。付帯効果として個別に取得する顕微鏡画像数と観察時間を大きく軽減でき、最終目標であった「1時間以内の全面観察技術開発」ともに、マッピング描画によるウエハ再利用のためのアウトプットの実現に至った。

・表面清浄化技術開発

ELO法では、試料構造中に予め挿入されたリリース層(AlAs等)の横方向選択性エッチングを行うことにより、半導体基板からデバイス層を分離することができる。その際ウエハが化学溶液に長時間晒されることになるため、通常剥離後の基板表面には化学反応による副生成物が残留してしまう。再成長を行うためにはこの残留物を除去し、清浄かつ平坦な基板表面に再生することが必要である。一般的に広く使われている化学機械研磨(CMP)処理の場合、清浄な再成長基板表面を得るために基板を数十ミクロン程度研磨する必要があり、その結果、基板の再利用全回数は5回程度に制限されるだけでなく、基板の厚みが減少することで高温での太陽電池薄膜の製膜時に基板の反り具合が変化することなどが影響し、その都度成膜条件の調整が必要とされる。本開発項目では、10回以上の再成長に向けて、従来型のCMPで生じるような削り代(厚さ損)を可能な限り抑えるため、化学エッチングをベースとした再生手法を検討した。

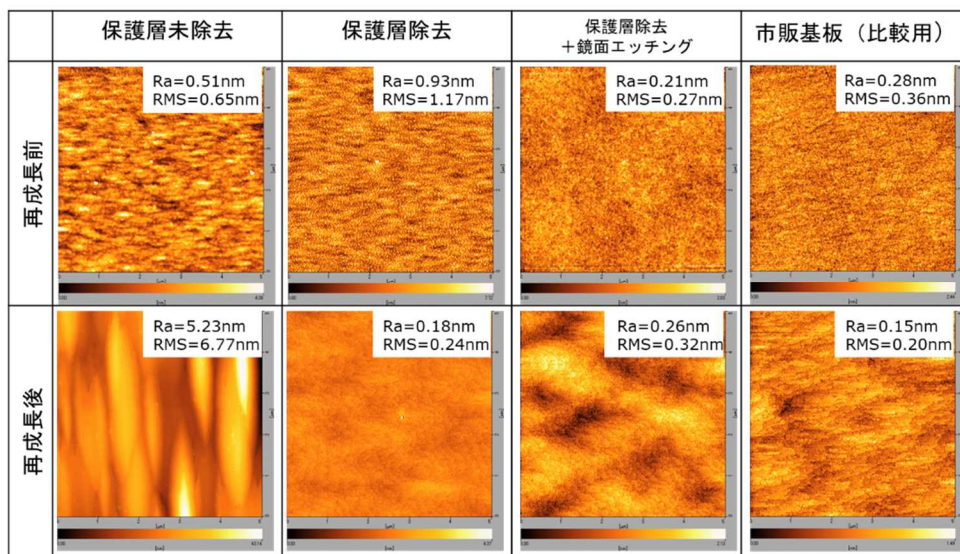
図III-2-(ロ)-B-1-a1-4に示すように、ELO後の基板表面を保護する目的で、リリース層(RL)とGaAs基板の間に選択エッチング層(SEL1, SEL2)を挿入した構造を採用した。ELO工程を経て、SEL1表面には残渣(副生成物)が堆積するが、再成長前にSEL1およびSEL2の層を選択エッチングにより除去することにより清浄なGaAs基板表面を露出させることができる。ELO後の基板表面に対しXPSおよびGD-PES分析を行ったところ、F元素が検出され、HF溶液に関連した副生成物が付着していたと考えられる。しかし、保護層(SEL1, SEL2)除去後にはF元素が観測されなくなったことから、ELO工程に起因した残渣の低減・除去に効果があることが示唆された。



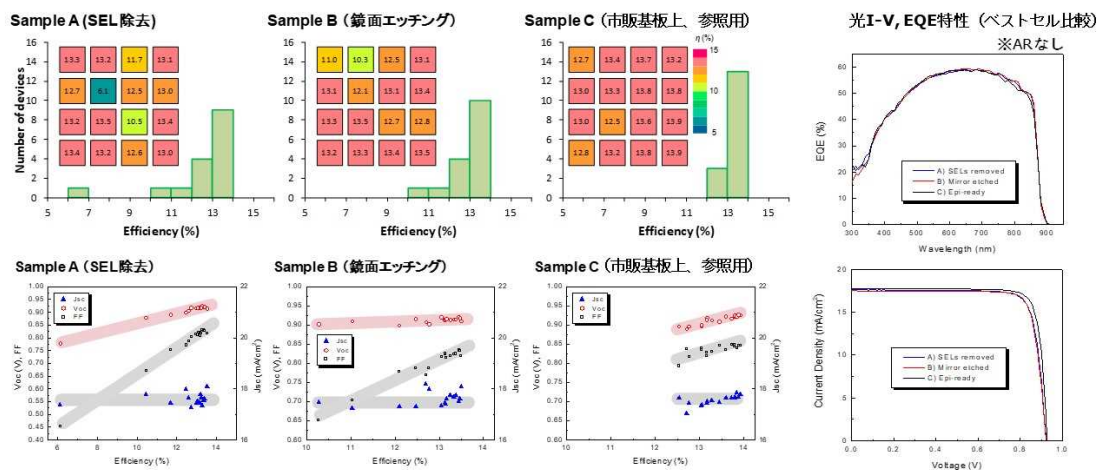
図III-2-(ロ)-B-1-a1-4 本研究項目における基板再利用に向けた清浄化手法および再成長の概要

上記結果を基に ELO 後の基板上への GaAs 単結晶薄膜層の再成長を行い AFM による表面モフォロジー

の観察 (図III-2-(ロ)-B-1-a1-5)、および再成長 GaAs セル (一回再利用) の特性と変換効率分布 (図III-2-(ロ)-B-1-a1-6) を調べた。ELO 後試料の表面状態は ELO の進行状況の揺らぎによって差異が生じやすく、保護層未除去試料のように比較的平坦な場合であっても製膜時に異常成長を来すケースが見られた。保護層除去後では、微小粒子 (XPS 分析から As や Ga 酸化物が示唆) の堆積は観られたものの、再成長時に行う一般的な熱クリーニング工程により除去され平坦な再成長表面を得ることが可能であり、再生長後においても平坦な表面を得ることができた。しかし、再成長デバイスの性能分布 (図III-2-(ロ)-B-1-a1-6 の Sample A) においては特性の低いものが存在していることから、保護層除去後に硫酸系の鏡面エッチング工程を取り入れた。これにより、基板の削り代を数ミクロン/回程度に抑えつつ、市販基板と同等の表面平坦性を得ることができた。複数回再利用に向けて工程の最適化の余地はあるが、デバイス性能 (図III-2-(ロ)-B-1-a1-6 の Sample B) の劣化の抑制、効率の歩留まりを改善させる見通しを立てた。(市販基板上の場合に対して歩留まり~81%)



図III-2-(ロ)-B-1-a1-5 ELO 後基板上への再生長前後における表面 AFM 観察



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-a1-6 ELO 後基板上へ再成長した各 GaAs セル (16 個) の特性分布と、
ベストセル間の特性比較

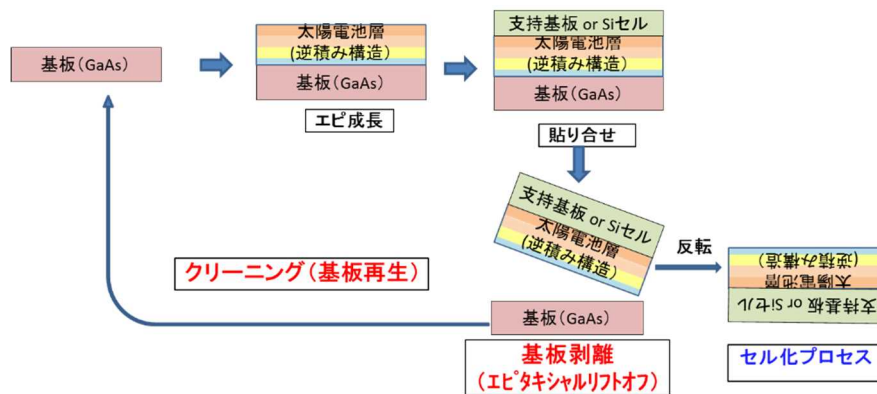
Ⅲ-2-(ロ)-B-1-a3. 低コスト実装プロセス：エピ層移載・ウエハ再利用【シャープ㈱】

本研究において、高効率化合物太陽電池の低コスト化プロセス技術として、基板再利用技術のエピタキシャルリフトオフ法（以下 ELO 法）について検討を行った。高効率化合物太陽電池は、主に GaAs や Ge 基板の上に形成されるが、GaAs や Ge ウエハは非常に高価であるため、低コスト化の阻害要因になっている。基板再利用技術を確立することで、太陽電池層と基板を分離することができ、基板は太陽電池層製膜のための下地基板として再利用できるので、化合物太陽電池の低コスト化が図れる。

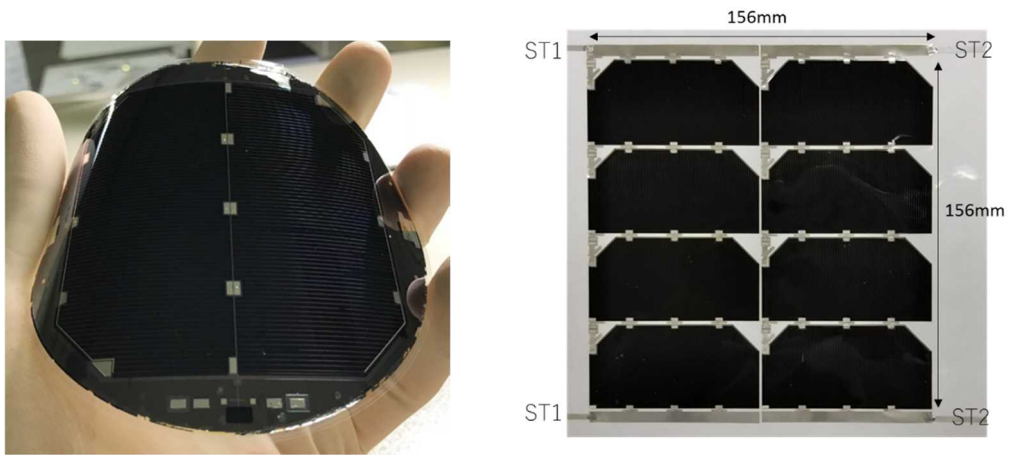
基板再利用を実現するためには、3つの要素技術の確立が必要である。1つ目は ELO プロセス（剥離技術）、2つ目は、基板再生技術、3つ目は、剥離した太陽電池層のセル化技術である。エピ層剥離技術では、独自の剥離方法を開発し、剥離速度 15mm/h で、割れなしで安定的に剥離する技術を開発した。また、量産装置の検討においてはフットプリントの縮小、多枚同時処理をコンセプトに検討を行い、実現可能性を得た。基板再生技術では、エピタキシャル成長、ELO、基板再生を繰り返し実施しても、基板の表面粗さやモフォロジーが維持できる独自の再生方法を開発した。この構造を適用することで、基板利用回数 10 回で IV 特性の保存率 95%以上、歩留り 80%以上が得られた。セル化技術では、太陽電池層のセル化を行い、正常 IV 特性を得ることができた。

コスト試算では、10MW～生産時、基板利用回数 20 回を想定した時の基板再生コストが、市販基板の約 10 分の 1 となる結果が得られた。

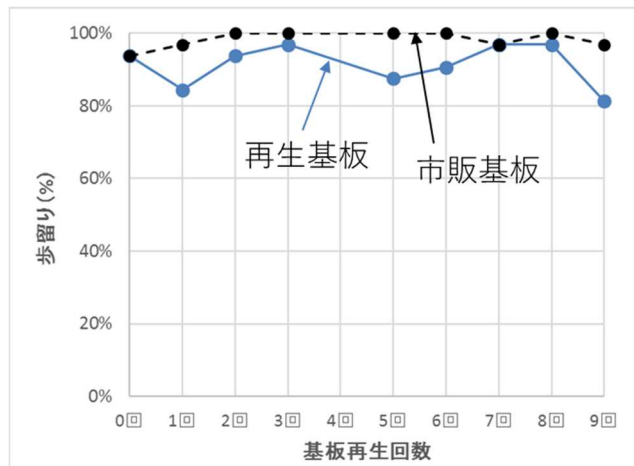
これらの結果から、目標として設定していた「基板再利用回数 10 回」と「基板コスト 6 分の 1」を、概ね達成する結果が得られた。



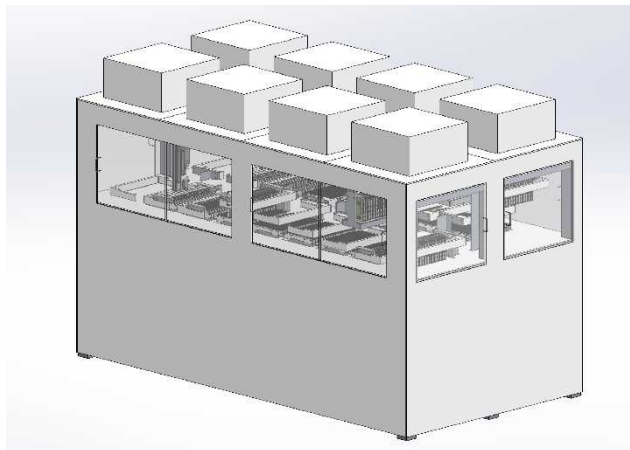
図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-a3-1 基板再利用技術の概要



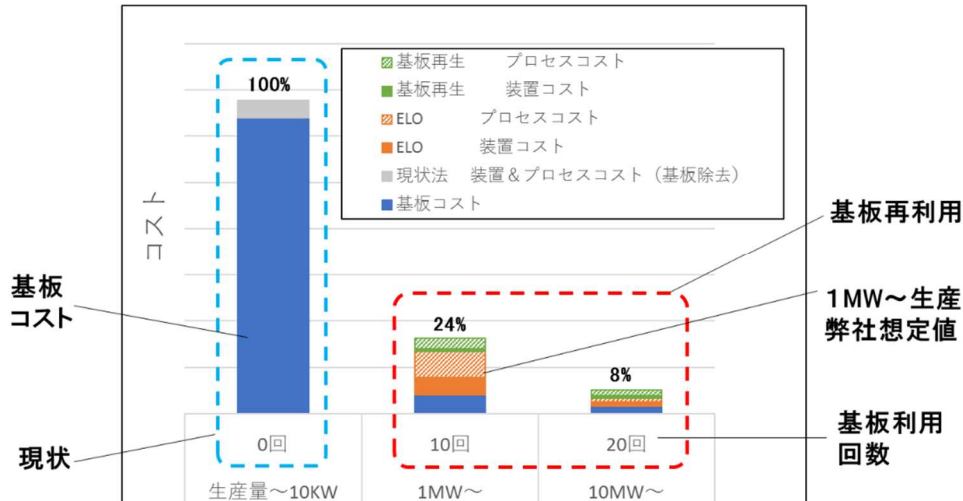
図III-2-(口)-B-1-a3-2 基板再生技術で作製したセルおよびモジュール



図III-2-(口)-B-1-a3-3 基板再生回数とセル歩留りの相関



図III-2-(口)-B-1-a3-4 ELO 量産機概略 (イメージ)



図III-2-(ロ)-B-1-a3-5 現状法および基板再利用時のコスト試算

III-2-(ロ)-B-1-a4. 低コスト実装プロセス：エピ層移載【豊田工業大学】

本研究は、GaAs、またはSi基板上に二次元層状化合物バッファ層を挿入してIII-Vセルをエピ成長し、層状化合物の劈開性を利用してIII-Vセル層を基板から高速リフトオフし、安価な支持基板上に移載することを目指して研究開発を行った。本手法はHF等の化学エッチング不要で、高速なリフトオフが可能であり、基板は繰り返し再利用できるため、従来のリフトオフ法と比較して大幅な低コスト化が期待できる。ここで用いる二次元層状化合物は、Si上でエピタキシャル成長が可能であり、さらに成膜した二次元層状化合物上でGaAsを高品質でエピタキシャル成長できることが必要である。

そこで本研究では、GaAsと類似の結晶構造を有するIII-VI族化合物の In_2Se_3 、およびGaSeを二次元層状化合物バッファ層として用いた。MBE法による成膜条件の最適化により、Si(111)基板上でGaSe/ In_2Se_3 ダブルバッファ構造のエピタキシャル成長を可能とした。GaSeはGaAsの成膜温度で安定な熱耐性を有する層状化合物として必要であり、 In_2Se_3 はSi基板上でGaSeをステップフロー成長させるために必要であった。GaSe上のGaAsエピタキシャル成長では、50nm厚GaSe上でほぼ双晶がないGaAs膜のエピ成長を達成し(1%以下)、剥離に必要な200nm厚GaSe上GaAs膜で双晶割合12%を得た。双晶割合1%以下のGaAs膜にて、PL寿命として約128psを得た。図III-2-(ロ)-B-1-a4-1に、GaSe上のGaAsエピ膜の断面TEM像を示す。GaAs層には転位が見られ、転位密度低減が課題である。

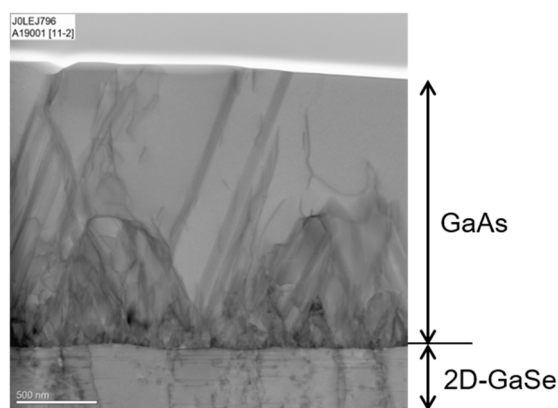


図 III-2-(ロ)-B-1-a4-1 2D-GaSe/ In₂Se₃/Si (111) 上 GaAs の断面 TEM 像

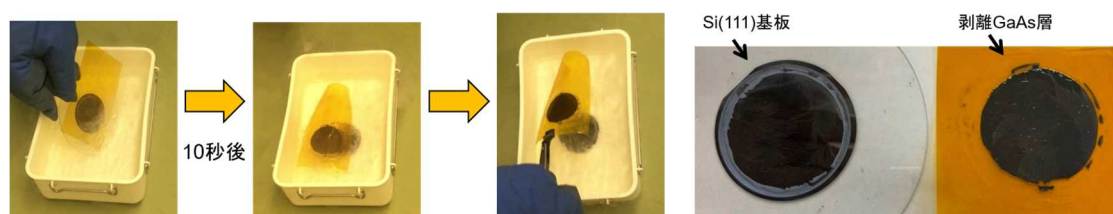


図 III-2-(ロ)-B-1-a4-2 液体窒素浸漬による GaAs エピ膜のポリイミドフィルムへの移載 (左) と、移載後の GaAs 膜と Si 基板 (右)

成膜した GaAs エピ層の剥離は、均一な応力をエピタキシャル層と基板の間に印加するため、試料の膜面を支持基板（アクリル板やポリイミドフィルム）に貼り付けた状態で、液体窒素に浸漬して、均一な熱応力を試料に印加した。その結果、GaSe/In₂Se₃ダブルバッファ構造を用いた試料において、液体窒素に浸漬後約 10 秒程度で、2 インチ、3 インチサイズの Si 基板から GaAs エピ層を剥離することに成功した（図 III-2-(ロ)-B-1-a4-2）。（最終目標：3 インチウエハサイズの高速リフトオフ、達成）

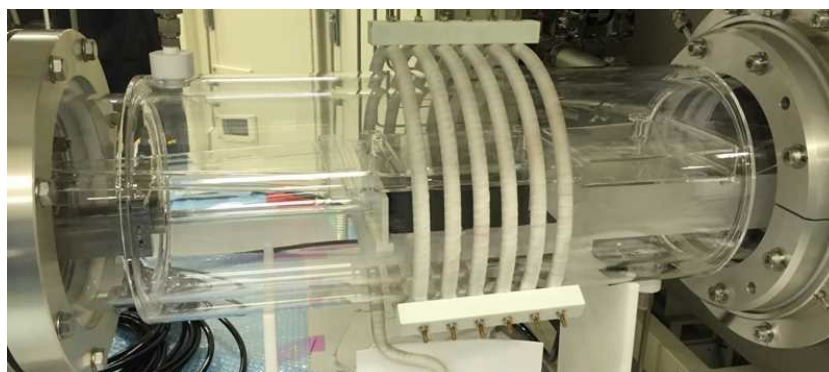
二次元層状化合物の劈開性を利用した III-V エピ層の高速リフトオフ技術は、本プロジェクトの独自技術であり、①安価な Si 基板が利用できる、②従来法と比べて剥離時間を大幅に短縮できる、といったメリットにより、III-V セルの低コスト化に大きく貢献できる可能性がある。

一方、本研究期間内においては、上記の層状化合物バッファ上 GaAs エピ膜の品質向上の研究開発に注力したことから、GaAs セルの試作には至らなかった。（最終目標：10 回以上の再利用基板上への III-V 化合物セル作製、未達）

III-2-(ロ)-B-1-b1. 低コスト III-V 化合物半導体製膜技術：MOCVD 【大陽日酸㈱】

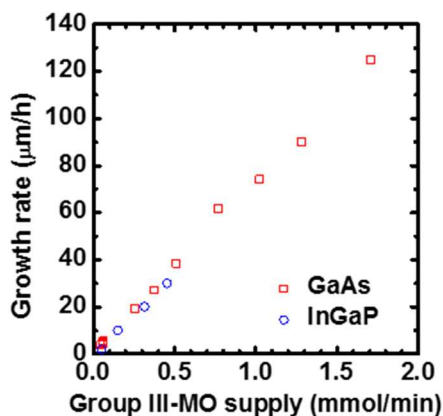
GaAs、InGaP の高速成長に適した MOCVD 装置を開発した。対応基板サイズ 2 インチまたは 3 インチ径基板 1 枚を処理できる装置として設計を行った。基板はサセプタに載置され、薄膜特性の均一化を目的としてサセプタの自転機能を設けている。石英反応管の中に収められた基板を載置したサセプタを高周波誘導加熱により加熱する装置である。石英反応管の中には、石英製のフローチャンネルを設け、原料ガスをサセプタまで供給するとともに、排気を誘導する役割を持たせている。特に、本装置においては、

原料利用効率の向上を目的としてフローチャンネル構造を従来とは異なる設計としており、さらに、フローチャンネルの交換を容易にできるようにすることで開発を効率的に進めることが出来るよう新規設計要素を盛り込んでいる。開発装置の反応炉および加熱コイルを図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-1 に示す。



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-1 開発した MOCVD 装置の反応炉および加熱コイル

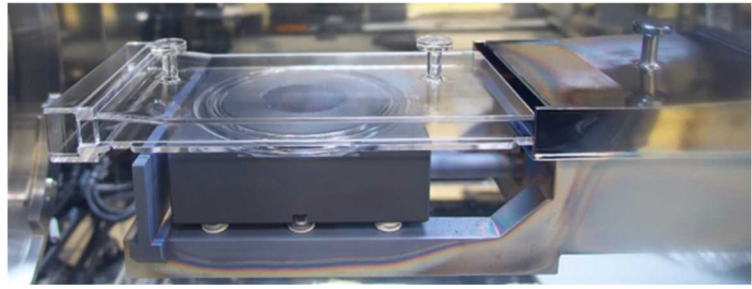
成膜速度の高速化を目的として、ガス導入部であるフローチャンネル構造および、基板保持用のサセプタ形状の設計変更を行った後の、成長結果を図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-2 に示す。GaAs に関しては、 $120\ \mu\text{m/h}$ に到達することができた。同様に、InGaP についても、 $30\ \mu\text{m/h}$ を得ることができた。



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-2 開発した MOCVD 装置による GaAs、InGaP の成長速度

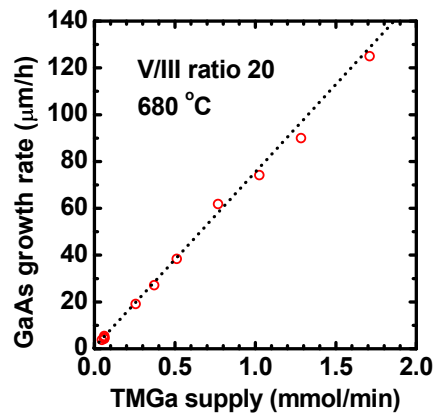
Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b2. 低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術：MOCVD【東京大学】

大陽日酸と協力して、高速成長に対応した2インチ1枚用の横型MOCVD装置を開発し、産総研に設置した(図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b2-1)。本装置は、大陽日酸が開発してきた高速かつ原料利用効率の高い窒化物半導体用のMOCVD装置をベースに、GaAsおよびInP用のMOCVD装置の主にフローライナーを改良したものである。従来の設計に比べて、フローライナーが数分の1まで薄くなっている。これにより、基板に垂直な方向の原料の物質移動境界層(発達した層流のもとではライナーの厚さのおよそ1/3になることが理論的に示される)を薄くして、従来と同じ原料分圧のもとでもウエハ表面に到達する原料(あるいは製膜前駆体)のフラックスを増大することを狙っている。

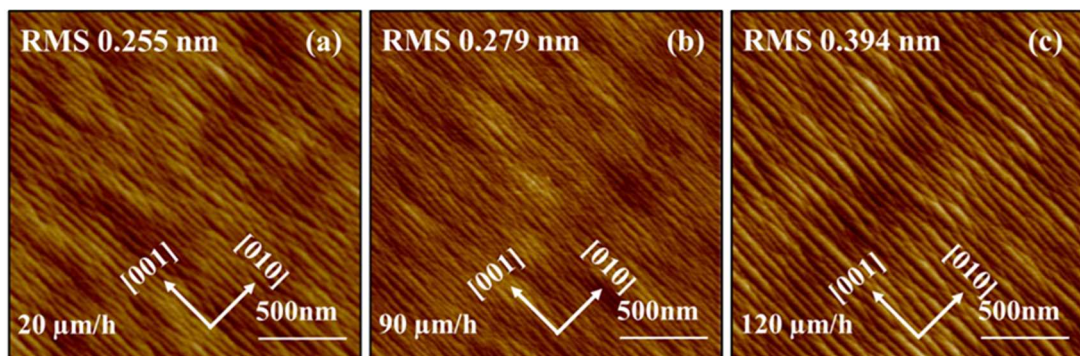


図III-2-(ロ)-B-1-b2-1 高速成長用MOCVD装置の外観と、新設計のフローライナー

本装置を用いて、まず GaAs の高速成長を試みた。図III-2-(ロ)-B-1-b2-2 に示すように、原料である TMGa および AsH₃ の比を V/III =20 に保ったままリアクタへの供給量を増やすにつれて、比例して GaAs の成長速度は増大し、120 μm/h 以上にまで達した。このような高速成長であっても、表面凹凸は低く抑えられている。ただし、原子層ステップではなく、ステップバンチングが起こっている。ここで用いた基板は、〈110〉方向に2度オフした(001)基板である。オフ角のない just 基板を用いると、高速成長のもとでは表面モフォロジーが悪化する傾向がみられた。また、成長温度 680°C は AsH₃ を用いた GaAs の典型的な成長温度よりも数十度高い。このように、微傾斜基板の利用と高めの成長温度は、高速成長下でも平坦かつ規則的な表面モフォロジーを得るために重要である。



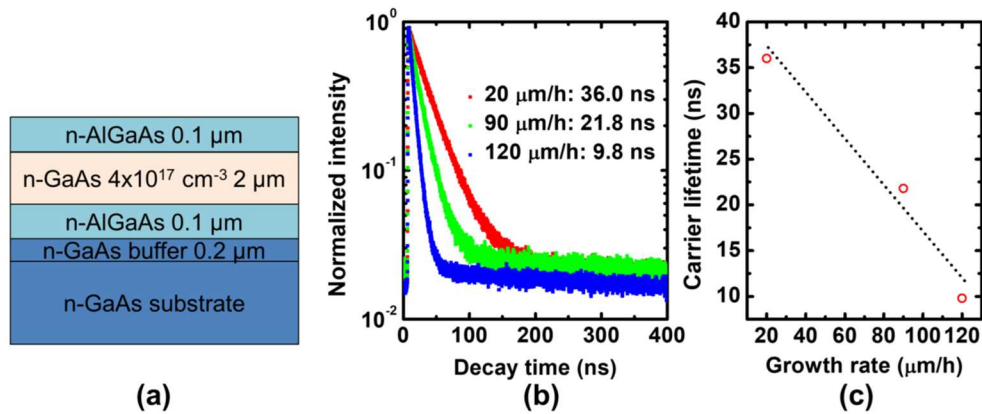
図III-2-(ロ)-B-1-b2-2 GaAs 原料供給量と成長速度の相関



図III-2-(ロ)-B-1-b2-3 20, 90, 120 μm/h の速度で成長した GaAs の AFM 表面モフォロジー像

次に、高速成長が結晶品位に与える影響を、フォトルミネッセンス寿命により調査した。図III-2-(ロ)-B-1-b2-4 (a) に示すダブルヘテロ構造の n-GaAs コアのみを異なる成長速度で形成した。成長速度によ

りバックグラウンドの p 型ドーピング濃度が異なるので、Si ドーピング条件を成長速度ごとに調整して $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の n 型ドーピング濃度を實現している。(b)および(c)に示すように、成長速度が増大するとフォトルミネッセンス寿命は低下した。これは、高速成長によりアンチサイトなどの欠陥が増加し、非発光再結合寿命が低下したためであると考えられる。このような結晶品位の低下が太陽電池特性に与える影響を評価し、変換効率が維持される範囲での高速成長の可能性を追究すべきである。

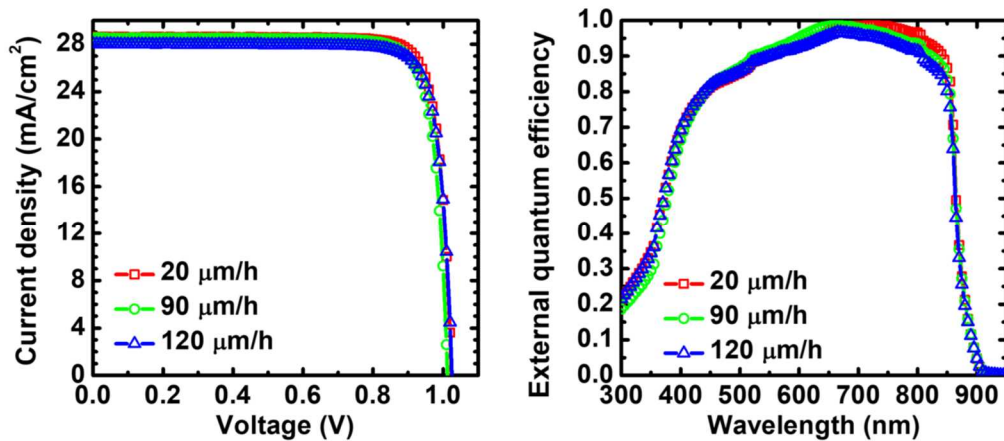


図III-2-(ロ)-B-1-b2-4 20, 90, 120 μm/h の速度で成長した GaAs のフォトルミネッセンス寿命。(a) に示したダブルヘテロ構造を試験に用いた。

そこで、20、90、120 μm/h の成長速度で形成した n-GaAs ベース層を有する p-on-n 型 GaAs 単セルを形成し、変換特性を評価した (図III-2-(ロ)-B-1-b2-5)。シンプルに比較するために、ベース層以外の成長条件はすべて同一にした。ベース層の成長速度を増やすと、変換効率は若干低下したが、その程度は非常に小さかった (表III-2-(ロ)-B-1-b2-1)。高成長速度による効率低下の原因としては、図III-2-(ロ)-B-1-b2-5 において長波長領域の量子効率が低下していることから示唆される、ベース層における少数キャリア拡散長の低下である。すなわち、フォトルミネッセンス寿命から示唆された高速成長によるキャリア寿命の低下が、ベース層の少数キャリア拡散長を劣化させたが、120 μm/h の成長速度まではその劣化は非常に小さいことが結論できた。

以上の知見をもとに高効率 GaAs 単セルを作製し、産総研において認証測定を行った。その結果、AM1.5 のもとで変換効率 24.48%を得た (図III-2-(ロ)-B-1-b2-6)。100 μm/h 以上の成長速度で作製した GaAs 太陽電池の変換効率としては、世界最高記録である。

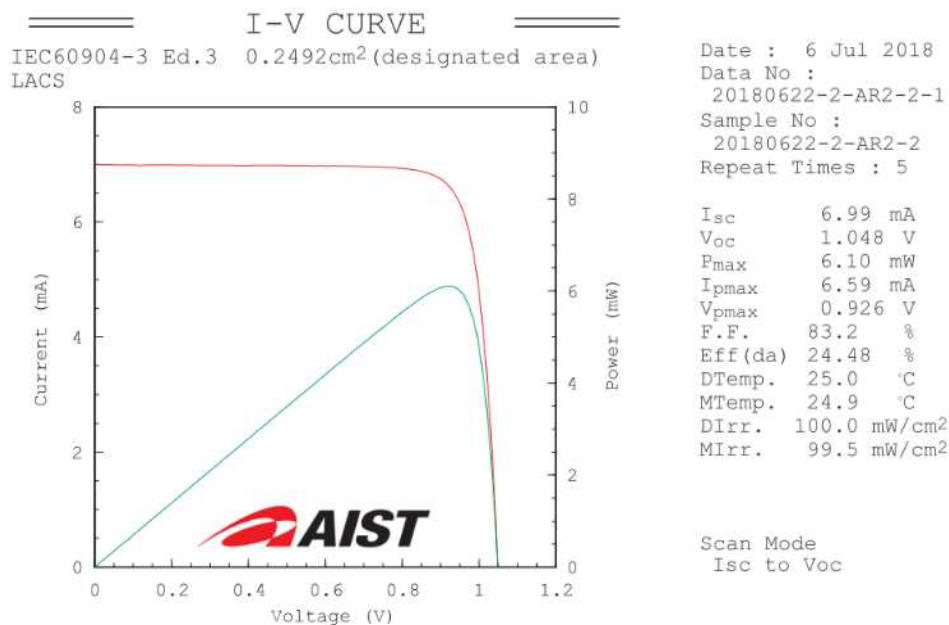
Layer	GR. (μm/h)	V/III	T _g (°C)	P _g (kPa)
p-GaAs contact $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 0.05 μm	5	20	600	6
p-InGaP window $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 0.025 μm	1.9	100	600	6
p-GaAs emitter $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 0.2 μm	20	20	680	6
n-GaAs base $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 2 μm	20/90/120	20	680	6
n-AlGaAs BSF $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 0.05 μm	5	40	680	6
n-GaAs substrate $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	5	20	680	6



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b2-5 20, 90, 120 μm/h の速度で成長した GaAs をベース層に用いた p-on-n 型 GaAs 単セルの構造と特性

表Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b2-1 20, 90, 120 μm/h の速度で成長した GaAs をベース層に用いた p-on-n 型 GaAs 単セルの特性

GR. (μm/h)	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (V)	FF	η (%)
20	28.38	1.023	0.84	24.51
90	28.37	1.013	0.84	24.05
120	27.59	1.023	0.84	23.77



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b2-6 120 μm/h の速度で成長した p-on-n 型 GaAs 単セルの認証測定結果

一方、p-GaAs をベース層に用いる n-on-p セルに関しては、V_{oc} が 1V を超えず、少数キャリアである電子の拡散長が p-GaAs ベース (V_{oc}=1.05 V を達成している) に比べて短いことが問題となった。これは、

高速成長によって導入される結晶欠陥が、伝導帯側により多く分布していることを示唆している。一方で、Ge 基板をボトムセルに用いる 3 接合セルでは n-on-p 構造が必須となるため、この構造でも高速成長下で高効率を達成する戦略が必要である。そこで、図 III-2-(ロ)-B-1-b2-7 に示すリア接合、およびリアヘテロ接合構造により高効率化を図った。リア（ヘテロ）接合構造では、光吸収層が p-on-n 構造と同様に n 型になる。作製したセルの電流電圧特性（図 III-2-(ロ)-B-1-b2-8 (a)）を見ると、リア（ヘテロ）接合構造では、p-on-n 構造と同様に $V_{oc}=1.05$ V を達成してしている。(b)の暗電流を見ると、リア（ヘテロ）接合構造では従来構造に比べて非発光再結合電流が低減されており、これが $V_{oc}=1.05$ V を可能にするメカニズムであると考えられる。これらの結果より、光吸収層が n 型であることが高速成長下でも高 V_{oc} を達成するために必要であることがわかる。ただし、pn 接合界面の再結合を抑制してさらに高効率を可能にすると考えられているリアヘテロ構造に関しては、リア接合構造に対して V_{oc} の改善がない一方、(c)に示すように全波長域で量子効率の劣化を招いている。この原因は、リアヘテロ構造が光励起キャリアの回収を妨げているものと考えられ、pn 接合界面付近のドーピング濃度が設計通りになっていない可能性がある。この点は今後の改善が必要なものの、無反射コーティングなしで変換効率 16.6%が達成されており、無反射コーティングを形成すれば 21%以上の効率が見込まれる。このように、成長速度 $120 \mu\text{m/h}$ で形成した GaAs 太陽電池は、p-on-n、n-on-p いずれの構造でも効率 20%以上を達成できることが示された。

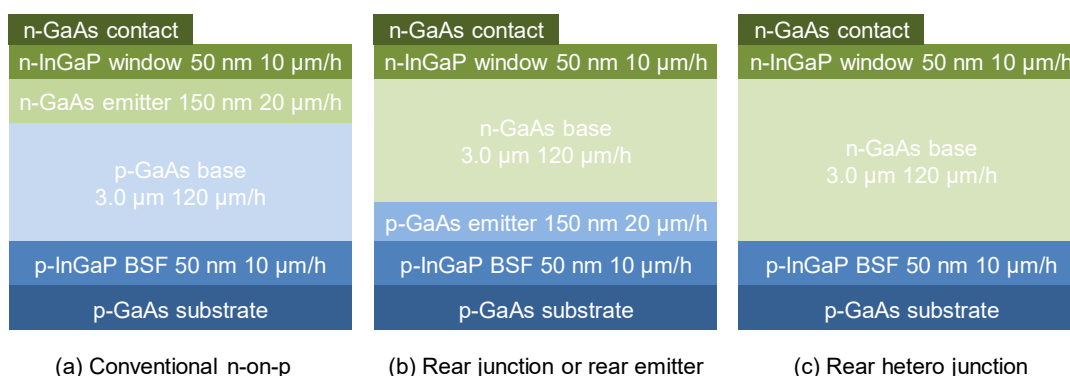
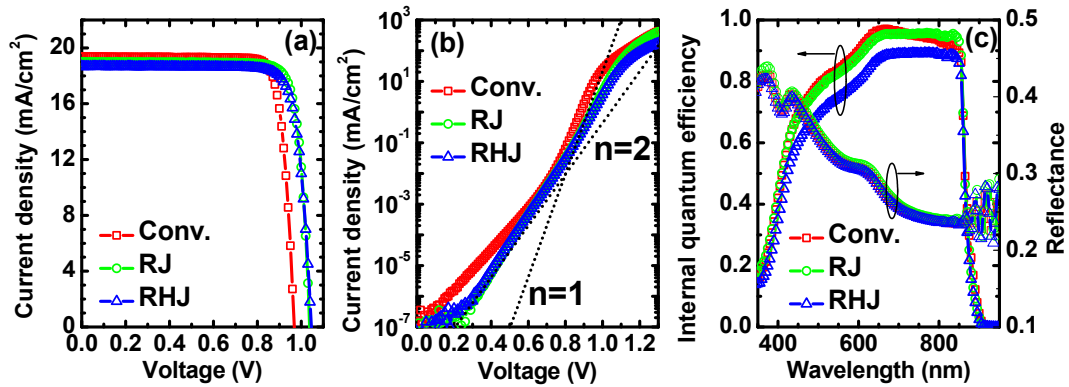


図 III-2-(ロ)-B-1-b2-7 $120 \mu\text{m/h}$ の速度で成長した n-on-p 型 GaAs 単セルの構造

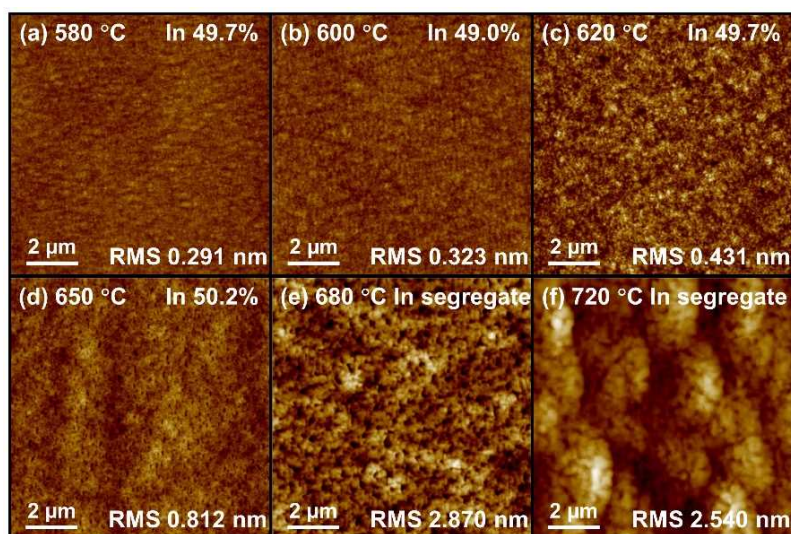
表 III-2-(ロ)-B-1-b2-2 $120 \mu\text{m/h}$ の速度で成長した n-on-p 型 GaAs 単セルの構造

Structure	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)
Conventional	0.97	19.38	0.84	15.81
RJ	1.04	19.00	0.84	16.64
RHJ	1.05	18.68	0.83	16.18

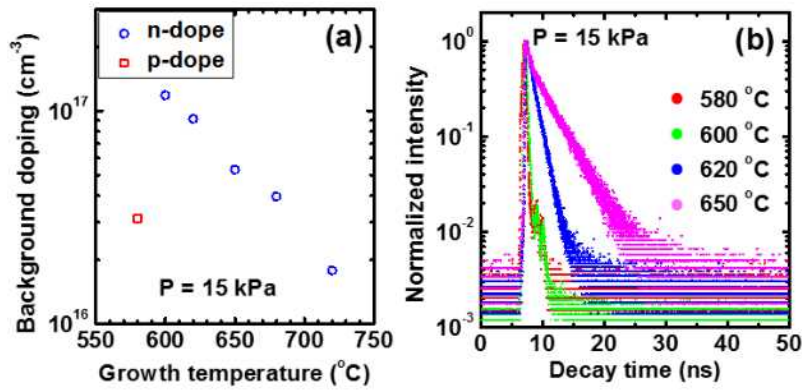


図III-2-(口)-B-1-b2-8 120 $\mu\text{m/h}$ の速度で成長した n-on-p 型 GaAs 単セルの諸特性

InGaP に関しては、これまで述べた GaAs 成長に用いた反応器そのままだと、気相の寄生反応などの影響により高速成長が難しかった。しかし、ガス導入口付近の装置形状を改良することで、30 $\mu\text{m/h}$ までの高速成長が可能になった。InGaP の表面モフォロジーには成長温度が大きく影響することが知られており、本 MOCVD 装置を用いた成長においても成長温度の効果を検討した。用いた基板は、 $\langle 110 \rangle$ 方向に 2 度オフした GaAs (001) 基板である。成長速度は 10 $\mu\text{m/h}$ とした。以下の InGaP 成長で、V/III 比はすべて 100 としている。その結果、成長温度の増加につれて表面が凹凸化することが明らかになった (図 III-2-(口)-B-1-b2-9)。一方、バックグラウンドドーピング濃度は成長温度が低いほど低減され、ダブルヘテロ構造を形成して評価したフォトルミネッセンス寿命も、成長温度が高い方が長いという結果を得た (図 III-2-(口)-B-1-b2-10)。ダブルヘテロ構造のコアである InGaP はノンドープであり、バックグラウンドドーピング濃度により発光再結合寿命は異なる。しかし、(a) で示されたキャリア濃度から計算される発光再結合寿命は、(b) で観察されたフォトルミネッセンス寿命よりもはるかに長い。すなわち、観察されたフォトルミネッセンス寿命は非発光再結合に支配されているといえる。これらの結果から、成長温度が高い方が結晶品位の高い InGaP が得られると結論できる。ただし、680~720°C での成長は表面モフォロジーが劣悪であったので、結晶品位の評価対象からは外した。

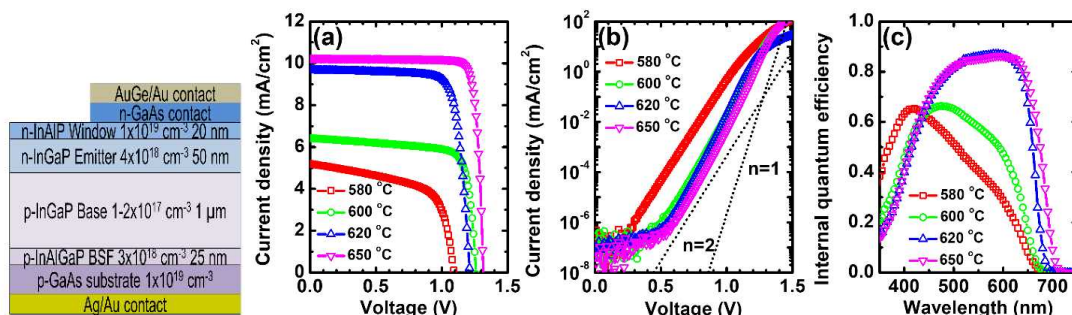


図III-2-(口)-B-1-b2-9 10 $\mu\text{m/h}$ で成長した 1 μm 厚 InGaP の表面 AFM 像

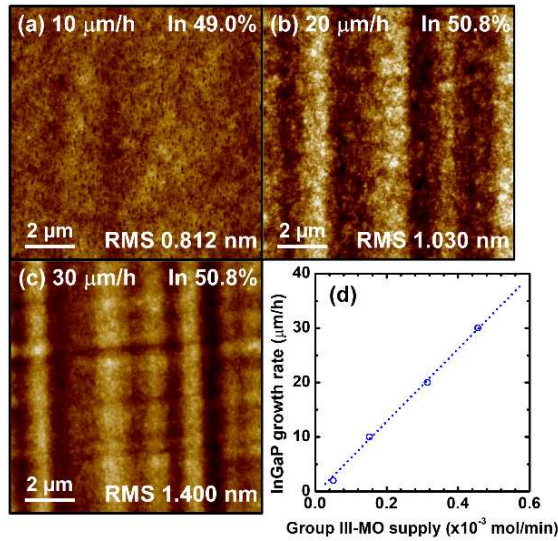


図III-2-(ロ)-B-1-b2-10 10 $\mu\text{m/h}$ で成長した 1 μm 厚 InGaP のバックグラウンドドーピング濃度とフォトルミネッセンス寿命

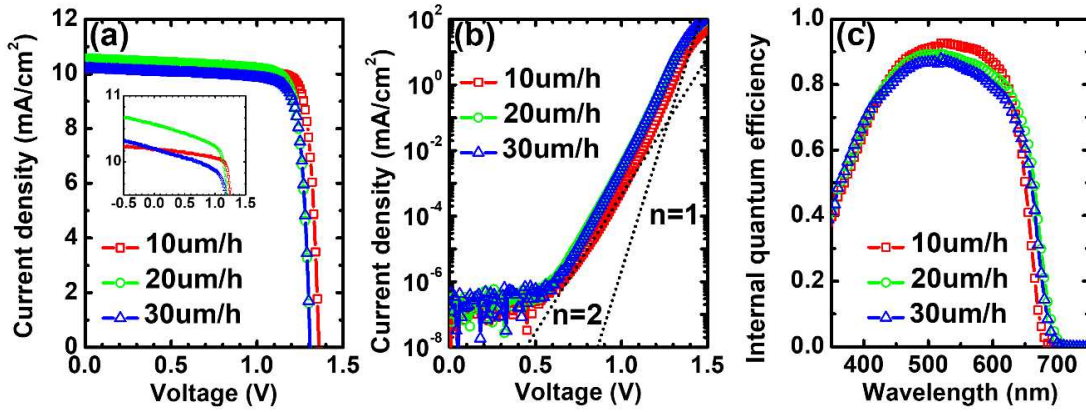
10 $\mu\text{m/h}$ でベース層を形成した InGaP 単セルを作製し、光電変換特性を評価した (図III-2-(ロ)-B-1-b2-11)。(a)の電流電圧特性においては、成長温度が低いほど V_{oc} も J_{sc} も低下した。 J_{sc} の低下は、(c)に示した量子効率の低下と整合している。成長温度が低い InGaP は、フォトルミネッセンス寿命からも明らかのように非発光再結合中心の密度が多く、これが V_{oc} の低下と少数キャリア拡散長の劣化を招いていると考えられる。結晶品位が最良となる 650°C を最適成長温度として、成長速度を 30 $\mu\text{m/h}$ まで増大させた。表面モフォロジーは成長速度につれて悪化するものの、セルの作製には十分な平坦性を得た (図III-2-(ロ)-B-1-b2-12)。これをもとに、10~30 $\mu\text{m/h}$ で成長した p 型ベース層を有する n-on-p InGaP 単セルを作製し、特性を評価した (図III-2-(ロ)-B-1-b2-13 および表III-2-(ロ)-B-1-b2-3)。30 $\mu\text{m/h}$ での高速成長による V_{oc} や変換効率の低下は非常に小さく、無反射コーティングを施したセルの変換効率 15.3% を得た。ここまでに得られた InGaP、GaAs 単セルの高速成長技術を用い、さらにトンネル接合形成のためのドーピング条件などを求め、30 $\mu\text{m/h}$ の InGaP 成長と 120 $\mu\text{m/h}$ の GaAs 成長を組み合わせた InGaP/GaAs 2 接合セルを作製することに成功した (図III-2-(ロ)-B-1-b2-14)。現在の変換効率は 22.3% であるが、今後 InGaP セルの構造と成長条件を改善して、25% 以上の効率を達成できる見込みである。



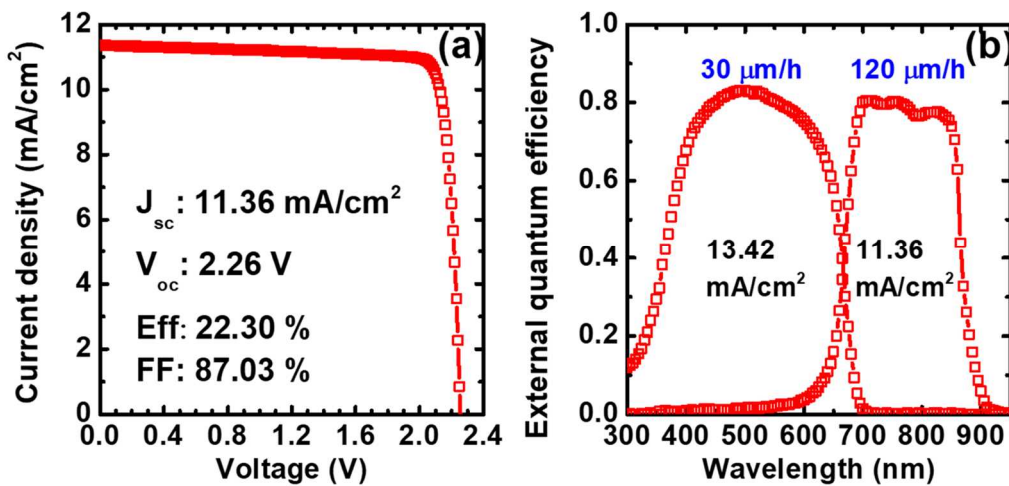
図III-2-(ロ)-B-1-b2-11 10 $\mu\text{m/h}$ で成長した 1 μm 厚ベース層を有する InGaP 単セルの特性



図III-2-(口)-B-1-b2-12 10~30 $\mu\text{m/h}$ で成長した InGaP の表面 AFM 像



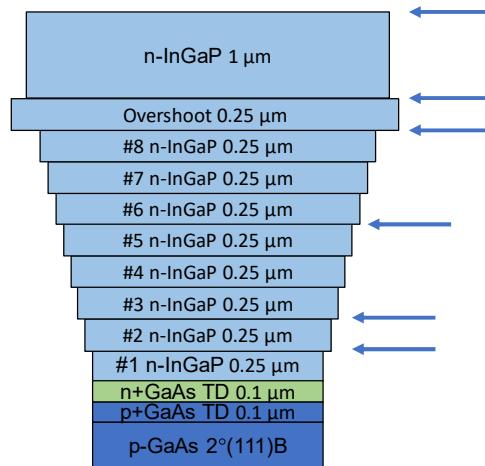
図III-2-(口)-B-1-b2-13 10~30 $\mu\text{m/h}$ で成長した p 型ベース層を有する n-on-p InGaP セル特性



図III-2-(口)-B-1-b2-14 MOCVD 高速成長による InGaP/GaAs₂ 接合セルの特性

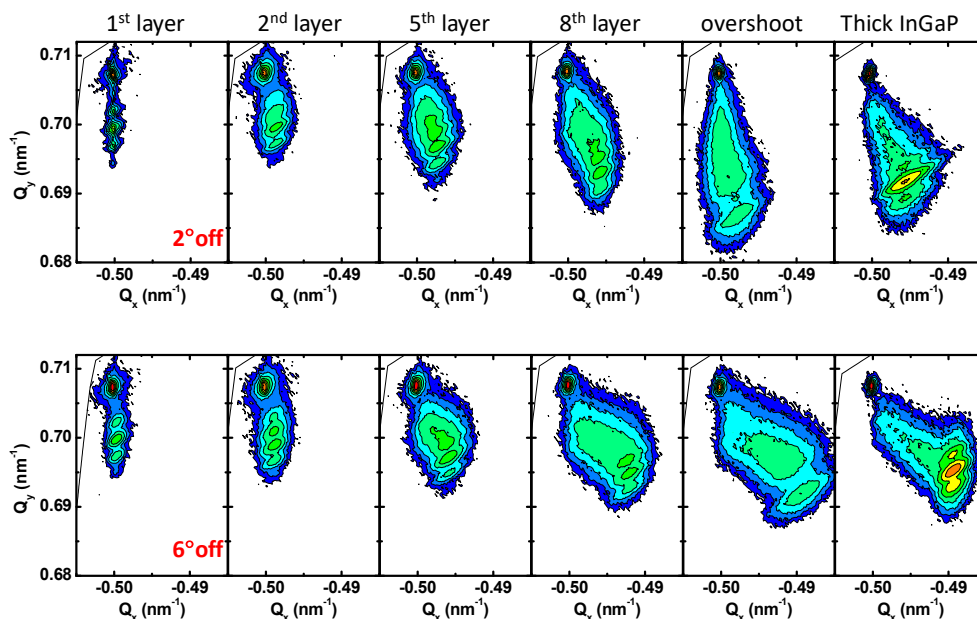
さらに、将来 IMM3 接合セルを高速 MOCVD で成長するための基礎検討として、GaAs ミドルセルと InGaAs ボトムセルの間に挿入されるメタモルフィックバッファを高速で成長することを試みた。図III-2-

(ロ)-B-1-b2-15 に示す層構造を、2 度および 6 度オフした GaAs (001) 基板の上に成長温度 580°C、成長速度 22~24 $\mu\text{m/h}$ で成長した。途中、矢印の位置で成長を止めたサンプルを用意し、X 線回折逆格子マッピングおよび表面 AFM 観察を行った。従来成長速度と同様に高速成長においても、格子不整合な InGaP 層は、不整合度が増えても最初の数層の間は GaAs 基板に擬格子整合し、3 層以上成長して初めて顕著な格子緩和が起こる傾向が見られた。興味深いのは基板のオフ角が大きい方が格子緩和しやすいことである。逆に、2 度オフの基板ではメタモルフィックバッファーに期待される格子緩和が十分に起きていない。結果として、最後に成長する InGaP 層の格子緩和度が基板のオフ角により異なった。成長速度がこの格子緩和度の違いにどのように影響するかは、今後の調査課題である。



- p-GaAs (001) 2° (111)B and 6° (111)B substrates
- Growth rate ~22-24 $\mu\text{m/h}$ at 580 °C, 15kPa
- Stop at several interface → (-2-24)RSM and AFM

図III-2-(ロ)-B-1-b2-15 MOCVD 高速成長により形成した InGaP メタモルフィックバッファー



図III-2-(ロ)-B-1-b2-16 前図矢印の位置で成長を止めたサンプルの X 線回折逆格子マッピング

III-2-(ロ)-B-1-b3. 低コストIII-V化合物半導体製膜技術：HVPE【大陽日酸株】

GaAs、InGaP 成長に適した HVPE 装置を開発した。対応基板サイズ 2 インチ径基板 1 枚を処理できる装置として設計を行った。基板はサセプタに載置され、薄膜特性の均一化を目的としてサセプタの自転機能を設けている。二種の異なる層を連続的に成長する手段として、同一の炉内に二式のガス導入ノズルを平行に構成する方法を採用した。

原料の基板への到達を促進する構造とするように反応炉内の原料部の構造およびノズル構造に関する設計を実施した。この結果を図 III-2-(ロ)-B-1-b3-1 に示す。GaAs に関しては、 $140 \mu\text{m/h}$ に到達することができた。同様に、InGaP についても、 $141 \mu\text{m/h}$ を得ることができた。

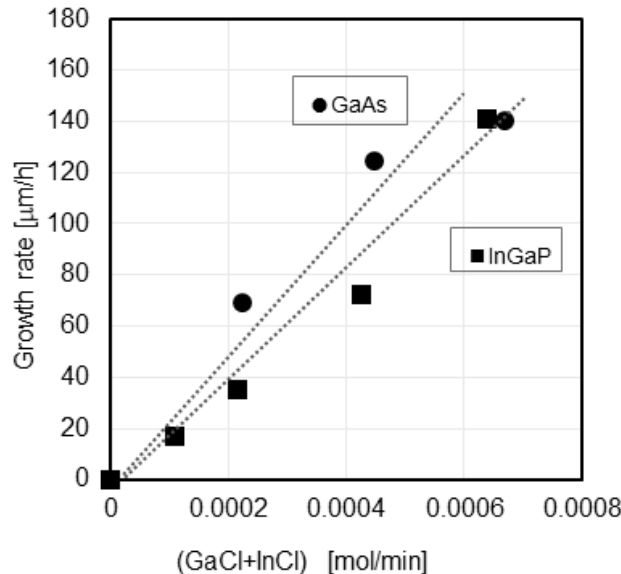
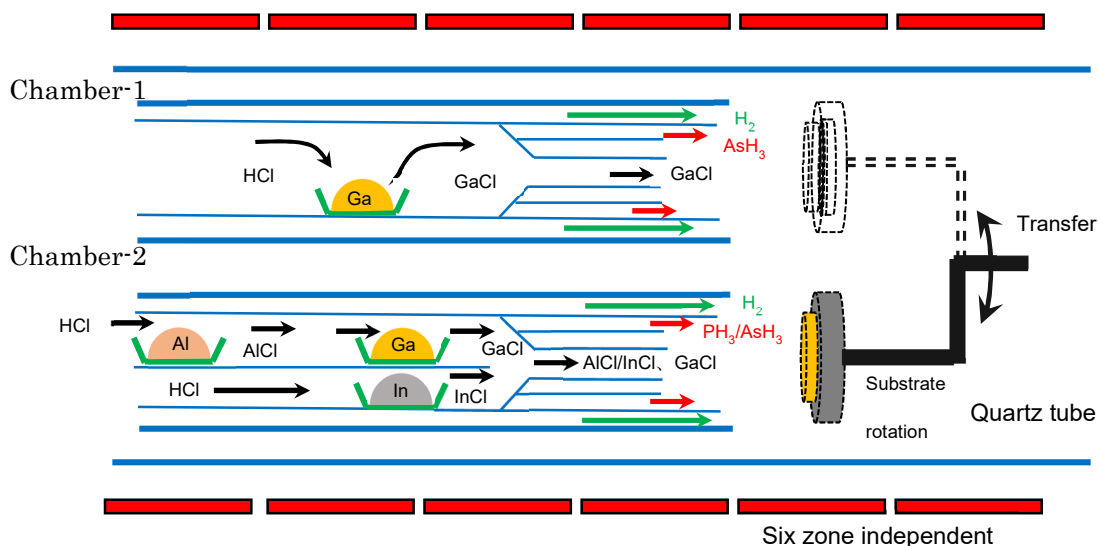


図 III-2-(ロ)-B-1-b3-1 開発した HVPE 装置による GaAs、InGaP の成長速度

HVPE 装置における、AlAs 成膜用の Al 原料部の追加を実施した。図 III-2-(ロ)-B-1-b3-2 に Al ポートを追加した HVPE の概略図を示す。Chamber-2 の中を 2 層式にし、下段を In 金属用ポートにしてある。上段には Ga 金属用ポートと Al 金属用ポートを設置した。塩化 Al は比較的低温で反応生成できるので Ga 用ポートの上流部に配置した。

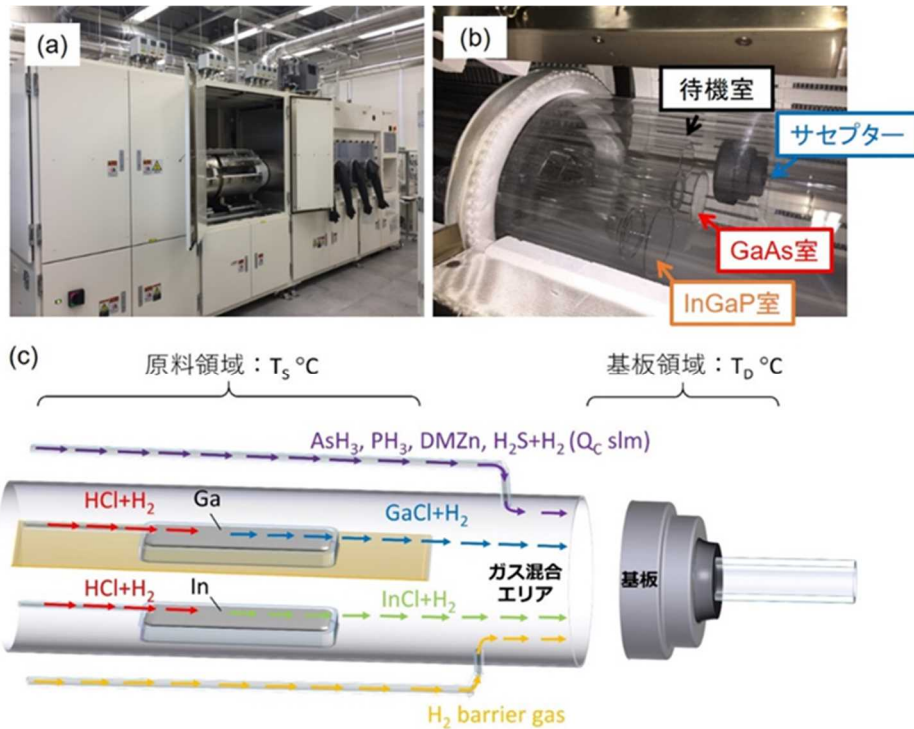


図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b3-2 Al原料を供給可能としたHVPE装置

Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b4. 低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術：HVPE【産業技術総合研究所】

大陽日酸（株）、東京農工大と共同でⅢ-V族化合物セルを作製するためのHVPE試作機（大陽日酸（株）、H260型）を開発した（図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b4-1）。反応炉は、2インチウエハ1枚が導入できる水平置き縦型のホットウォール炉であり、原料領域と基板領域により構成された非真空（大気圧）かつシンプルな装置構成である。Ⅲ族原料ガスには塩化水素（HCl）、V族原料には水素化物のアルシン（AsH₃）、ホスフィン（PH₃）、ドーパント原料には硫化水素（H₂S）、ジメチル亜鉛（DMZn）が用いられ、原料はH₂キャリアによって輸送される。原料領域にはGa、Inが充填された石英ボートが設置されている。原料領域、および基板領域は、それぞれ約800℃、660℃に加熱されている。同図(c)の反応炉を例として成長原理を説明すると、①原料領域でのGa、InとHClガスの反応による金属塩化物（GaCl、InCl）の生成、②基板領域でのⅢ族塩化物とV族原料との反応、の2つの化学反応を経由してGaAsなどの結晶が成長する。InGaPなどの混晶系では、Ga、Inに導入するHCl流量に差をつけることによりⅢ族組成比を容易に制御できる

HVPE法は、炉内における複数の化学反応を経由した結晶成長であることから、原料ガスの制御のみで成長雰囲気を瞬時に切り替えることができない。我々は、この課題に対して3室マルチチャンバーの反応炉を開発した（同図(b)）。マルチチャンバー化することでガス種の異なる成膜室を予め用意することができる。その後、基板が適切なタイミングで成膜室間を移動することでヘテロ成長を行うことが可能となる。



図III-2-(ロ)-B-1-b4-1 開発したHVPE装置の(a)外観、および(b)反応炉内部の写真。(c)はInGaP室の概要図である。

HVPE 成長では、供給するV族原料の熱分解が成長速度に大きく影響する。GaAs 成長では、AsH₃の熱分解温度は約400℃とHVPE反応炉に対して十分に低い。従って、一般的な成長条件下では、AsH₃は基板到達前にAs₄に熱分解され、次の反応式に従ってGaAsが成長される。



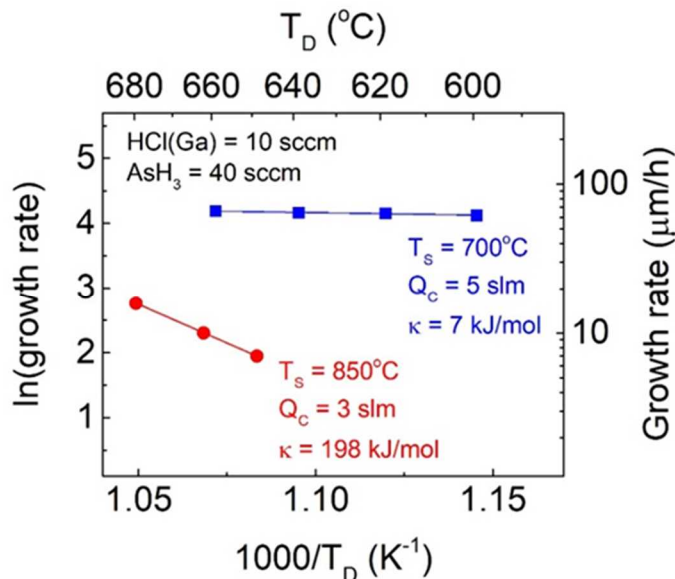
一方で、低圧HVPE法では平均自由行程が長くなることでV族原料の熱分解が抑制されることが報告されていた。その場合、次の反応式に従ってGaAsが成長される。



式(III-2-(ロ)-B-1)の反応障壁(κ)は200 kJ/molと大きく、表面反応律速により高速成長を得るのが困難である。一方で、式(III-2-(ロ)-B-2)のようにAsH₃を熱分解せずに供給することで反応障壁を10 kJ/molと大幅に低減できる。この反応過程は、原料供給律速で成長が進行できるために高速化に適している。しかし、本研究で開発したHVPE装置は大気圧下での成長であり、低圧HVPE法とは異なるアプローチでAsH₃の熱分解を抑制しなければならない。そこで、図III-2-(ロ)-B-1-b4-1(c)の原料領域温度(T_s)とガス流速を制御するためのH₂キャリア流量(Q_c)によってAsH₃の熱分解を制御した。

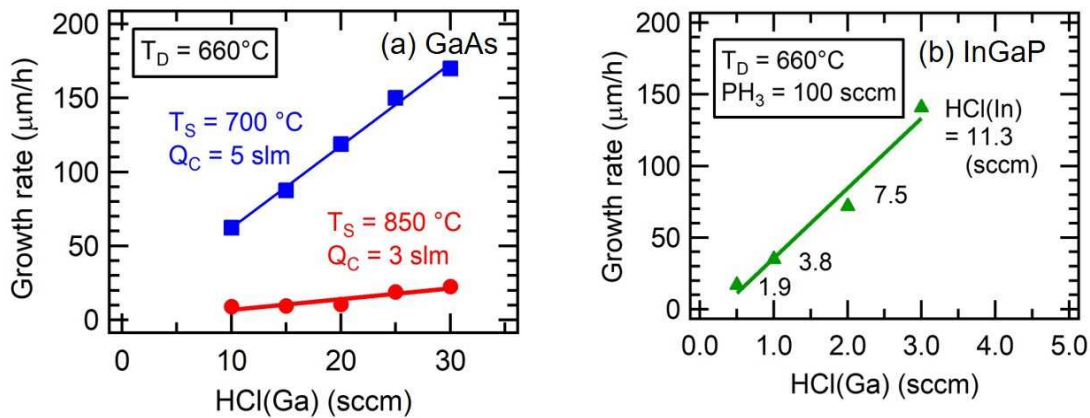
図III-2-(ロ)-B-1-b4-2は、異なる2つの条件下でのGaAs成長速度の基板領域温度(T_D)依存性のアレニウスプロットである。T_s = 850℃、Q_c = 3 slmの条件ではκ = 198 kJ/molであり、式(III-2-(ロ)-B-1)に従ったAsH₃原料がAs₄に熱分解された場合のGaAs成長と考えられる。一方で、T_s = 700℃、Q_c = 5 slmの条件ではκ = 7 kJ/molであり、式(III-2-(ロ)-B-2)に従ったAsH₃原料が直接寄与したGaAs成長

を実現した。この結果は、常圧 HVPE 法では AsH_3 原料の流路の温度、ガス流速の組み合わせによって AsH_3 の分解率が制御できることを示している。



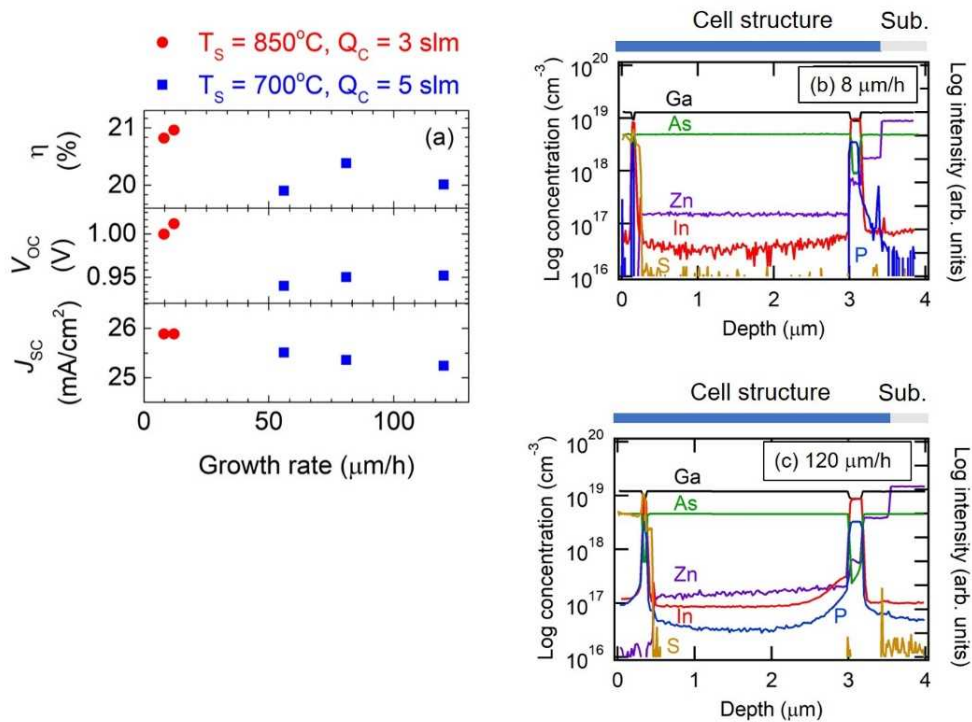
図III-2-(ロ)-B-1-b4-2 GaAs 成長速度の基板部温度 (TD) 依存性のアレニウスプロット

図III-2-(ロ)-B-1-b4-3(a)は、上記の2つの異なる T_s 、 Q_c 条件下での GaAs 成長速度の Ga ボートに導入する HCl 流量 ($\text{HCl}(\text{Ga})$) 依存性である。 T_D は 660°C で固定した。 $T_s = 850^{\circ}\text{C}$ 、 $Q_c = 3$ slm の条件では、表面反応律速に起因して HCl (Ga) 流量に対する成長速度の増分は小さい。一方で $T_s = 700^{\circ}\text{C}$ 、 $Q_c = 5$ slm の条件では原料供給量に比例して成長速度が高速化し、 $170 \mu\text{m/h}$ までの高速化を実現した。本開発で得られた $170 \mu\text{m/h}$ の成長速度は、HCl (Ga) を制御するマスフローコントローラー (MFC) の最大流量下で得られた値であり、原理的な限界速度ではない。今後、更に装置改良を進めることにより更なる高速性が実現できると考えられる。同図(b)は InGaP の成長速度の HCl (Ga) 供給量依存性であり、同様に III 族原料の導入量を増やすことで $140 \mu\text{m/h}$ までの高速化が達成された。図中の数値は、各点での GaAs に格子整合する InGaP 結晶を得るために必要な In ボートに導入する HCl 流量 ($\text{HCl}(\text{In})$) である。InGaP 成長の V 族原料に用いる PH_3 の熱分解温度は約 700°C 以上と AsH_3 と比べて高いことから、InGaP における高速成長も未分解の PH_3 が起因していると考えられる。また、図III-2-(ロ)-B-1-b4-3 (a)、(b)の勾配から原料利用効率を見積もることができ、GaAs 成長、InGaP 成長ともに約 60%の高い原料利用効率であることが分かった。以上、開発した HVPE 装置により原料の供給条件を精密に制御することで、高い原料利用効率で従来技術の 10 倍以上の超高速成長を実現した。



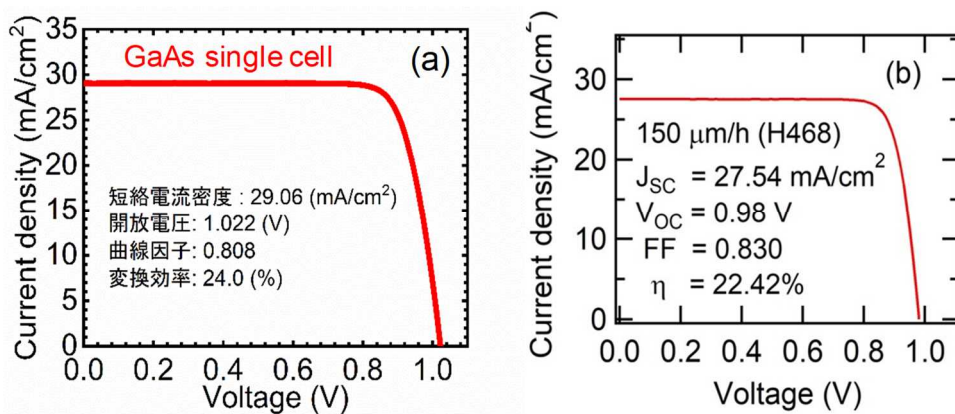
図III-2-(口)-B-1-b4-3 (a) GaAs 成長、(b) InGaP 成長における成長速度の HCl(Ga) 流量依存性

次に、成長速度が GaAs セル特性に与える影響を評価した。GaAs ベース層の成長速度は、図III-2-(口)-B-1-b4-3 (a)の条件を用いて $8\mu\text{m/h}$ から $120\mu\text{m/h}$ の間で変化させた。 $8, 12\mu\text{m/h}$ の成長速度は $T_S = 850^\circ\text{C}$ 、 $Q_C = 3 \text{ slm}$ の表面反応律速、 $56, 81, 120\mu\text{m/h}$ の成長速度は $T_S = 700^\circ\text{C}$ 、 $Q_C = 5 \text{ slm}$ の原料供給律速の成長条件を用いた。図III-2-(口)-B-1-b4-4(a)は GaAs セルのセル特性の成長速度依存性である。 $8\mu\text{m/h}$ で作製した GaAs セルでは 20.8%の変換効率が得られたが、 $120\mu\text{m/h}$ では 20.0%でありわずかに低下した。MOVPE により高速成長で作製された GaAs セルでは、成長速度を速めるに従って EL2 欠陥が単調に増大し、セル特性が低下する傾向が報告されている。しかし、本研究の HVPE 法を用いた高速 GaAs セルの変換効率、 J_{sc} 、 V_{oc} は成長速度の増大によって単調に低下する傾向ではなく、律速条件の違いに依存した傾向を示している。しかし、GaAs バルクの特性は、成長速度や成長律速条件により変化は生じなかった。両セルの特性が異なる要因を調べるために、 $8\mu\text{m/h}$ (反応律速条件下)、 $120\mu\text{m/h}$ (原料供給律速条件下) で作製した GaAs セルについて二次イオン質量分析法 (SIMS) を用いた元素分析を行った。ドーパント元素 (Zn, S) は定量分析、構成元素 (Ga, In, As, P) は定性分析を行った。図III-2-(口)-B-1-b4-4(b)の $8\mu\text{m/h}$ の GaAs セルでは、急峻なヘテロ界面、および GaAs ベース層において深さ方向に $1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の濃度で均一に Zn ドーピングされていることが分かる。一方で、同図(c)の $120\mu\text{m/h}$ の GaAs セルでは、GaAs ベース層の Zn ドーピングが $1.3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ から $2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の間で傾斜していることが分かった。更に、GaAs ベース層と InGaP BSF 層の界面において In, P 元素が GaAs ベース層で検出された。これらから、 $120\mu\text{m/h}$ の GaAs セル作製ではヘテロ界面での原料ガスパーズが不十分であったと考えられる。図III-2-(口)-B-1-b4-4 で作製した全ての GaAs セルでは、 PH_3 供給で 6 秒間の成長中断を適用していた。本成長中断が $8\mu\text{m/h}$ の GaAs セルで有効であることは SIMS 測定から明らかであるが、 $120\mu\text{m/h}$ の GaAs セルの結果からは、6 秒の中断時間ではウエハ表面に原料ガスが微量に残存していることが示唆される。特に、原料供給律速条件を用いた高速 GaAs 成長では反応速度が速いため、残留した原料ガスが効率よく取り込まれたと考えられる。以上より、高速 GaAs セルの成長では更に十分なパーズ時間を設けるシーケンスの改良が必要であることが分かった。



図III-2-(口)-B-1-b4-4 (a) GaAs セルのセル特性 (AM1.5G、1sun) の成長速度依存性、(b) 8μm/h、(c) 120μm/h で作製した GaAs セルの SIMS 分析結果

得られた知見を基にして、成長シーケンスの改善を行うことで得られた本プロジェクトの最高性能の 14μm/h、150μm/h の GaAs セルの I-V カーブを図III-2-(口)-B-1-b4-5 に示す。14μm/h の GaAs セルでは、24.0%の変換効率が得られ、プロジェクトの GaAs セルにおける最終目標値を達成した。一方で、150μm/h の GaAs セルでは 22.42%の変換効率が得られており、14μm/h の GaAs セルと比較すると若干の低下が生じた。ヘテロ界面の最適化など今後の課題は残されているが超高速成長で作製した GaAs セルとして高性能なセル特性を実証した。



図III-2-(口)-B-1-b4-5 本プロジェクトにおいて得られた最高性能の(a) 14μm/h、(b) 150μm/h の GaAs セルの I-V カーブセル (AM1.5G、1sun)

同様に InGaP セルについても成長条件の最適化を行った。図III-2-(口)-B-1-b4-6 は、14、24、40μm/h の異なる成長速度で作製した InGaP セルのセル特性を調べた結果である。MOVPE 法では InGaP の高品質

な高速成長には課題が多く、高速 InGaP セルにおいて V_{oc} が低下する問題が生じていた。一方で、HVPE 法で作製した高速 InGaP セルでは、高速成長時においても特性の大幅な劣化は見られず高い性能を維持している。これらの結果は、混晶系の高速成長は HVPE 法が有利であることが示唆され、インパクトの大きい成果である。図 III-2-(ロ)-B-1-b4-7 は、本プロジェクトで得られた最高性能の InGaP セルの I-V 特性である。 J_{sc} 、 V_{oc} 、FF、 η はそれぞれ 11.32 mA/cm²、1.35V、0.85、13.0% であり、プロジェクト最終目標値である 12% を上回る成果が得られた。一方で、当該セルは表面のパッシベーションが不十分のため、表面再結合による損失が大きい課題が残っている。今後の HVPE 装置開発の進展により高品質 Al 系材料の成長が実現された後には、AlIn(Ga)P 窓層の導入が可能となり J_{sc} が大幅に改善することが期待できる。STR 社の PVcell ソフトウェアを用いて、開発した InGaP セルに AlIn(Ga)P 窓層を導入したときの外部量子効率 (EQE) スペクトルをシミュレーションした結果、AlIn(Ga)P 窓層を導入により J_{sc} が 14~15 mA/cm² に向上できる可能性が示され、多接合セルのトップセルとして十分な性能が得られることが分かった。

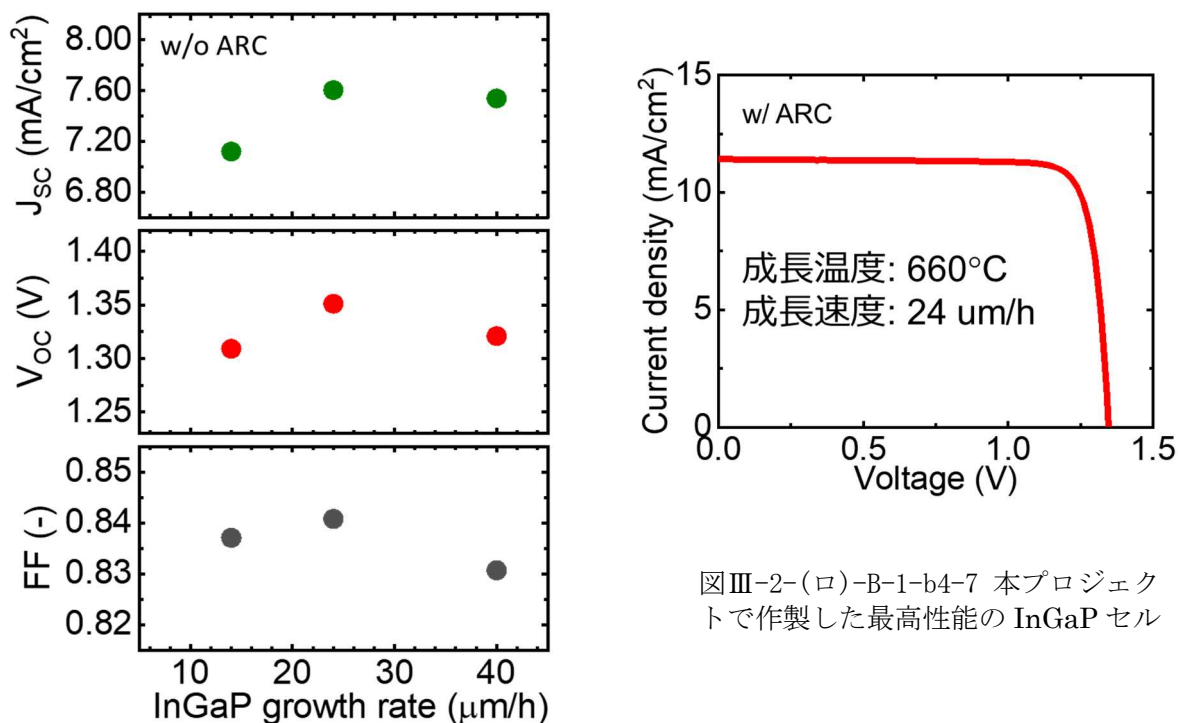


図 III-2-(ロ)-B-1-b4-6 InGaP セル性能におけるの成長速度の影響

図 III-2-(ロ)-B-1-b4-7 本プロジェクトで作製した最高性能の InGaP セル

次に、HVPE では世界初となる Al 系材料の太陽電池応用について述べる。Al 系の成長に関しては III-V 族太陽電池の高性能化と低コスト化の両面において重要な要素である。Al を用いることによる主な利点としては、①バンドギャップのワイド化、②エッチングの選択性の拡大が挙げられる。InGaP セルの高性能化には、これまでの議論の通りワイドギャップのパッシベーション層（窓層、BSF 層）の導入が必要であり、一般に AlIn(Ga)P が用いられる。一方、エッチングの選択性を高める理由として、ELO による基板再利用技術を構築することが挙げられる。典型的な ELO 技術では、基板と太陽電池構造の間にリリース層を設け、エッチングの選択比を利用してリリース層のみを除去する。III-V 族化合物セルの材料構成を考慮した場合、エッチャントに HF、リリース層に Al 組成の高い Al(Ga)As 層を用いることで

太陽電池にほぼダメージを与えずに ELO を実施することが可能となる。以上から、HVPE 法を用いた III-V 族化合物セル開発において Al 系材料の成長は必須であるが、これまでに窒化物半導体以外の Al 系材料の HVPE 成長は実現されていなかった。本節では、HVPE 法による AlInGaP および AlAs 成長に関する研究成果について述べる。

HVPE 法における Al 系材料の成長では、前駆体の制御が重要である。前述の GaAs、InGaP の高速成長およびセル作製では、III 族材料の前駆体として一塩化金属である GaCl や InCl を利用してきた。一方で、AlCl は HVPE 装置の石英リアクタを還元するため、意図しない不純物の混入やリアクタの損傷を招く。AlGaIn などの窒化物半導体の HVPE 成長では、三塩化金属の AlCl₃ を用いることでこの問題を解決している。そこで、我々の HVPE 装置で AlCl₃ を生成するための条件検討を行った。図 III-2-(ロ)-B-1-b4-8 は Al に 1 sccm の HCl ガスを導入したときの各種塩化ガスの分圧の反応温度依存性について HEpiGaNS を用いて計算した結果である。反応温度が 700°C 以上の場合、AlCl が優先的に生成され、一方で 500°C 以下の低温反応では AlCl₃ が優先的に生成されることが分かる。以上から、開発した HVPE 装置で AlCl₃ を生成するためには、従来の In、Ga の反応領域 (860°C) と異なる低温の原料領域を用意し、Al と HCl ガスを低温で反応させる工夫が必要である。本事業において AlInGaP の成長室の改造を行い、Ga や In の反応温度 (860°C) を維持しながら、Al の反応温度として適した 500°C の領域を設けることで AlCl₃ を効率よく生成するようにした。

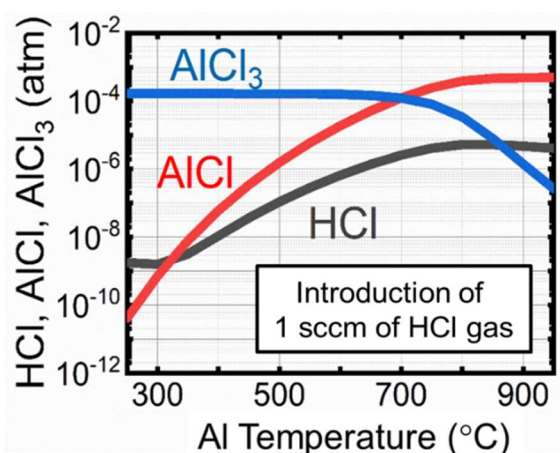
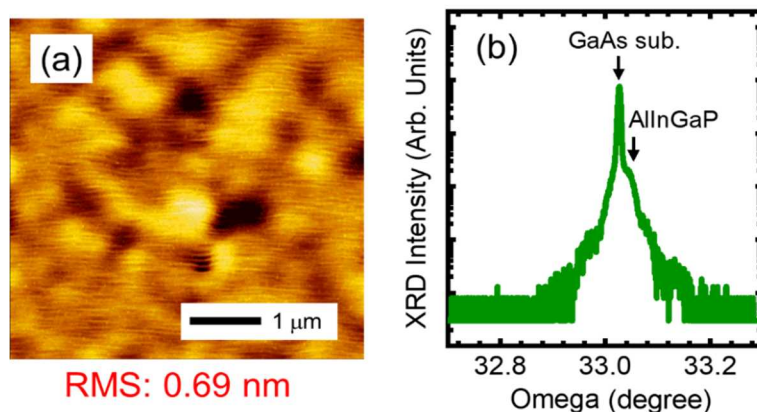
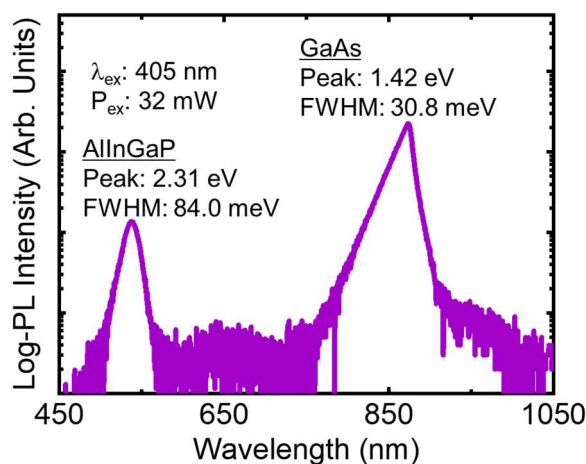


図 III-2-(ロ)-B-1-b4-8 Al 原料に HCl を導入したときの各塩化ガス分圧の反応温度依存性

図 III-2-(ロ)-B-1-b4-9 (a) は H₂ キャリアガスの全流量を 11000sccm として成長したときの AlInGaP の表面モフォロジーを示している。成長時の HCl (Al)、HCl (Ga)、HCl (In)、PH₃ 流量はそれぞれ 2、0.5、20、30sccm となっている。このとき、表面粗さは 0.69nm であり、InGaP と同程度の平坦性が得られている。同図 (b) は、同試料の XRD スペクトルであり AlInGaP が GaAs に格子整合していることが確認できる。また、電子線マイクロアナライザを用いた組成分析では、本試料の AlInGaP 結晶の Al 組成が 29.12% であることがわかった。図 III-2-(ロ)-B-1-b4-10 は、室温で測定した PL スペクトルを示しており、波長 537 nm 付近において AlInGaP からの発光が確認された。これらの結果は、結晶性の高い AlInGaP が HVPE 法で成長できたことを示している。

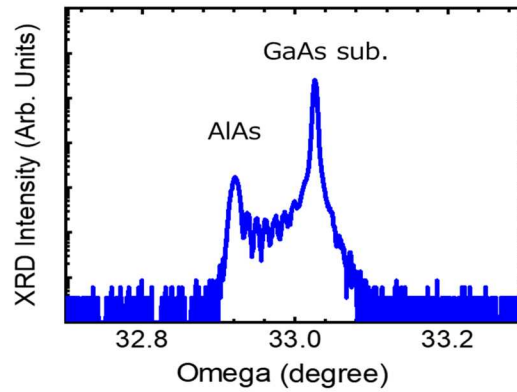


図III-2-(ロ)-B-1-b4-9 AlInGaP 薄膜の(a)表面モフォロジーと(b)高分解 XRD スペクトル

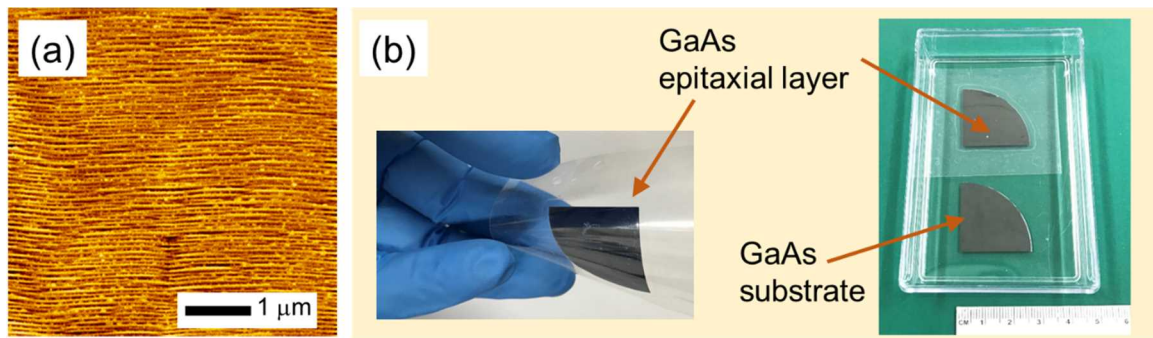


図III-2-(ロ)-B-1-b4-10 AlInGaP 薄膜の室温 PL スペクトル

前述の AlInGaP と同様に、AlAs 成長も $AlCl_3$ を用いた成長技術を開発した。図III-2-(ロ)-B-1-b4-11 は HVPE 法により GaAs 基板上に AlAs を 400nm 成長したときの高分解能 XRD スペクトルを示している。同図から、GaAs 基板のピークに対して低角側に AlAs に起因したピークが明瞭に確認でき、HVPE 法による AlAs 単結晶の成長を実現した。図III-2-(ロ)-B-1-b4-12(a)は、GaAs 基板上に 50nm 厚の AlAs リリース層を成長した後、2000nm 厚の GaAs を成長した際の表面 AFM 像である。同図から AlAs 上にステップ構造を有する高品質 GaAs 薄膜が成長できていることが確認できる。RMS ラフネス値は 0.54nm であり、原子レベルで平坦性に優れた薄膜が得られている。同図(b)は、HF を用いて ELO を実施した後の GaAs のエピタキシャル膜と基板を示している。エピタキシャル膜はフレキシブルフィルムにダメージなく転写できており、HVPE 法を用いた III-V 族化合物セルの ELO 技術の展開が可能であることが世界で初めて実証された。



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b4-11 400 nm厚の AlAs を成膜した試料の高分解 XRD スペクトル



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b4-12 (a) 50nm厚の AlAs 上に 2μm厚の GaAs を成長した薄膜の表面 AFM 像、(b) ELO 実施後のフレキシブルフィルムに転写されたエピタキシャル層と GaAs 基板

Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b5. 低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術：HVPE【東京農工大学】

①熱力学解析と気相成長

気相として原料成分を供給する気相成長法によりⅢ-V族化合物半導体結晶を成長する場合、あらかじめ成長の可能性や成長反応に関する知見を得ておくことは大変有益である。さらに、多くのガス制御系を必要とする気相成長装置において、前もってガス流量などの最適な条件を明らかにしておくことは、装置設計の上からも大きな指針となり得る。

熱力学解析は、まさに、この要請に応えてくれるもので、エピタキシャル成長の現象を理論的に理解し、成長の可能性や析出組成を具体的に計算する手段を与えてくれる。具体的には、熱力学解析により、ある成長条件下におけるⅢ-V族化合物半導体のエピタキシャル成長の可能性、成長の駆動力の大きさ、最大成長量、混晶組成、不純物ドーパ量などを計算することができる。さらに、計算においては、論文やデータ集などにより広く知られている物理的な定数である生成の自由エネルギー変化量のみを用い、装置構造に依存するパラメータなどを一切用いないために、計算手法に依存しない普遍的な計算結果を得ることができる。

気相成長は原料成分の蒸気圧を原料として供給されるために、適度な蒸気圧を持つ原料物質が必要となる。適度な蒸気圧を持たせるためには、その元素の有機化合物にする、あるいはハロゲン化合物にすることが一般的である。このため、Ⅲ-V族化合物半導体の気相成長法は、供給される原料成分により

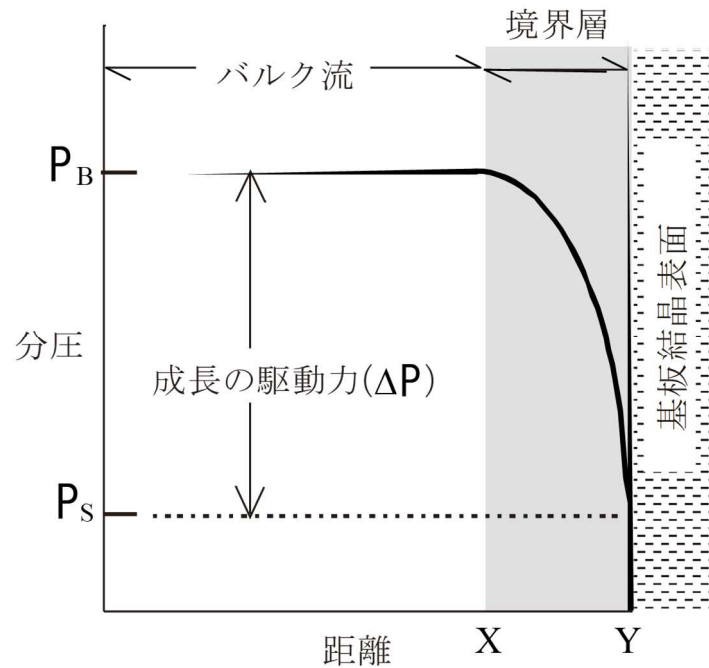
(1) 有機金属を原料とする MOVPE、および (2) ハロゲン化合物を原料とする HVPE に大別できる。なお、元素のそのものの蒸気圧を利用する MBE もあるが、ここでは割愛する。熱力学解析はこれらの成長の種類を問わず、また、どんな結晶にも適用できる。

ところで、実際に行われる結晶成長の過程を完全に解明するためには、成長表面でのダイナミックな動力的過程と自由エネルギー変化を扱う熱力学の両面から考察しなければならない。しかし、気相成長のように、高品質結晶を制御性よく得る必要性から、希薄な原料濃度で物質輸送が律速となる条件が用いられる、つまり、全体の成長過程の中でダイナミックな過程（反応速度）は速く、動力的な影響は無視できるため、熱力学解析が有用になる。

一般に、気相成長法(MOVPE、HVPE)においては、高品質な結晶が得られる気相成長の温度範囲は物質輸送に支配される領域(Mass transport limited region)で成長が行われている。図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b5-1に気相成長法の物質輸送モデルを示す。縦軸は、原料成分の気相分圧を示し、横軸は成長が起こる基板結晶最表面からの距離を示す。原料成分はバルク流として成長部に輸送され、図中の右側に示す基板表面へは境界層を通して供給される。物質輸送律速領域であるので反応速度の影響を考慮する必要はない。いま、成長成分のバルク流中の分圧（原料供給分圧に等しい）を P_B 、析出した結晶と化学平衡にある成長最表面上の分圧（平衡分圧）を P_S とすると、この領域での成長速度 G は次式(Ⅲ-2-(ロ)-B-3)で表される。

$$G = K_g \cdot (P_B - P_S) = K_g \cdot \Delta P \quad (\text{Ⅲ-2-(ロ)-B-3})$$

ここで、 K_g は物質移動係数を示す。 ΔP は成長成分の分圧の差($P_B - P_S$)を示し、成長の駆動力の大きさを表している。したがって、反応速度の影響のない、通常の高品質結晶の得られる物質輸送が律速の条件では、熱力学解析で図中の P_S を求めることにより成長の駆動力の大きさを求めることができる。なお、式(Ⅲ-2-(ロ)-B-3)において ΔP が負の値を持つ場合には、成長は起こらずエッチングが起こる。また、混晶(A_xB_{1-x})の成長では、成分 A および成分 B 各々の成長成分の分圧の差(ΔP_A および ΔP_B)を求めることにより、成長の駆動力の大きさおよび混晶組成を求めることができる。気相成長の熱力学解析により図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b5-1の P_S を求めることは、エピタキシャル成長の可能性や混晶組成の予測など、エピタキシャル成長を行うにあたって有益な多くの指針を与えてくれる。



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b5-1 気相成長における物質輸送のモデル図

②低コスト成長を目指したHVPE成長の熱力学解析

化合物半導体多接合太陽電池のトップセルとして用いられる InGaP を、HVPE により成膜する技術を開発する。InGaP 系の高速成膜技術は NREL においても検討段階と思われ、早急に開発する必要がある。重要な点は高速成長を維持しながらヘテロ界面を制御する技術であり、As/P 系ヘテロ界面制御技術の確立が必須である。

特に、InGaP 三元混晶の場合、基板結晶(GaAs)と格子整合した結晶成長のためには成長結晶の組成制御が必要条件となる。具体的には、成長温度、原料濃度、送入V/Ⅲ比などの各々の成長条件と成長組成の関係を前もって明らかにしておくことが必要となる。この目的のために、GaAs および InGaP の HVPE 成長の熱力学解析を行い、各成長条件と成長の駆動力の関係および成長組成の関係を明らかにし、これらの結果を装置の設計に応用し、大陽日酸における装置作成を行った。

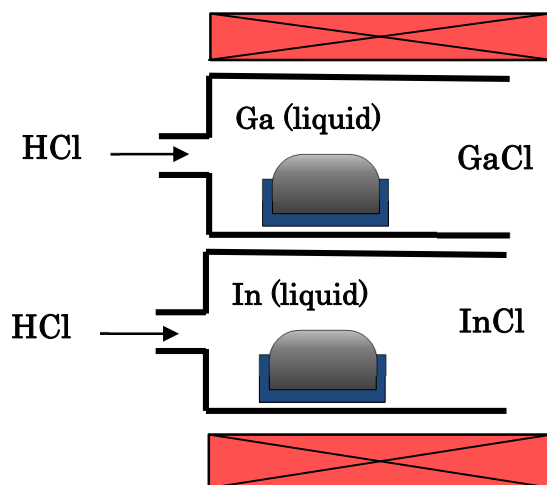
以下、ここでは三元混晶である InGaP の熱力学解析について述べる。

②-1 原料部 (構造および反応)

InGaP の HVPE 成長では、800℃以上に保たれた温度石英ボートに満たされた金属 Ga および In 原料上に水素ガスをキャリアガスとして HCl を送入することにより、反応式(Ⅲ-2-(ロ)-B-4)および(Ⅲ-2-(ロ)-B-5)により生成された GaCl および InCl をⅢ族原料分子とする。図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b5-2 に原料部の模式図を示す。



(Ⅲ-2-(ロ)-B-4)および(Ⅲ-2-(ロ)-B-5)の反応は、熱力学解析の結果、550℃以上で100%反応が進行することが明らかになった。実際の成長装置での原料部温度は850℃程度に保たれるため、原料部に送入されたHClはⅢ族原料と完全に反応し、GaClおよびInClとして成長部に輸送される。



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b5-2 InGaPのHVPE成長におけるⅢ族原料部の模式図

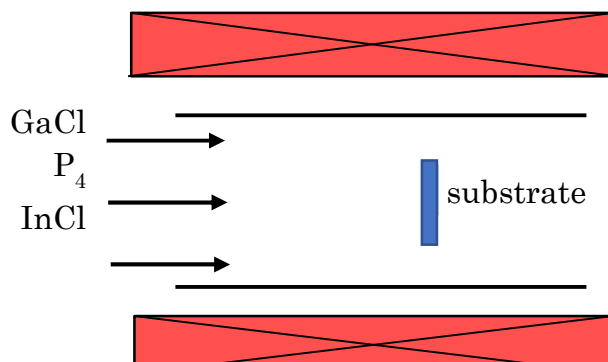
②-2 成長部 (構造および反応)

InGaPの析出部の模式図を図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b5-3に、InGaP三元混晶を構成するGaPおよびInPの二元化合物の析出反応を(Ⅲ-2-(ロ)-B-6)および(Ⅲ-2-(ロ)-B-7)に示す。



なお、V族原料として用いるPH₃は、4PH₃ → P₄ + 6H₂ 反応により不可逆的にP₄に分解される。

図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b3-3に示されたように、析出部に供給される原料分子は、原料部で生成されたGaCl、InClおよびPH₃原料が熱分解され生成したP₄である。



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b5-3 InGaPのH-VPE成長装置の析出部の模式図

②-3 熱力学解析

以下、InGaP の HVPE 成長における熱力学解析について述べる。

(1) 原料部

原料部では、個別に下記反応により、送入した HCl は全て Ga (In) と反応し、各々 GaCl および InCl として、析出部に輸送される。



(2) 成長部

析出部での、ガス気相種は

GaCl, InCl, GaCl₃, InCl₃, HCl, P₄, P₂, N₂, H₂ の 9 種とする。

気相分子種は以下の反応により結ばれる。



(III-2-(口)-B-10)～(III-2-(口)-B-14)に質量作用の法則を適用し、

$$K_1 = a_{\text{GaP}}^2 P_{\text{HCl}}^2 / P_{\text{GaCl}}^2 / P_{\text{P}_4}^{1/2} / P_{\text{H}_2} \quad (\text{III-2-(口)-B-15})$$

$$K_2 = a_{\text{InP}}^2 P_{\text{HCl}}^2 / P_{\text{InCl}}^2 / P_{\text{P}_4}^{1/2} / P_{\text{H}_2} \quad (\text{III-2-(口)-B-16})$$

$$K_3 = P_{\text{GaCl}_3} P_{\text{H}_2} / P_{\text{GaCl}} / P_{\text{HCl}}^2 \quad (\text{III-2-(口)-B-17})$$

$$K_4 = P_{\text{InCl}_3} P_{\text{H}_2} / P_{\text{InCl}} / P_{\text{HCl}}^2 \quad (\text{III-2-(口)-B-18})$$

$$K_5 = P_{\text{P}_2}^2 / P_{\text{P}_4} \quad (\text{III-2-(口)-B-19})$$

が得られる。

反応系を通じて一定に保たれるパラメータは、

(Cl 濃度)

$$A = n_{Cl2} / (n_{N2} + n_{H2}) = [1/2(P_{GaCl} + P_{InCl} + P_{HCl}) + 3/2(P_{GaCl3} + P_{InCl3})] / (1/2P_{HCl} + P_{H2} + P_{N2}) \quad (III-2-(ロ)-B-20)$$

(キャリアガス中の水素濃度)

$$F = n_{H2} / (n_{N2} + n_{H2}) = (1/2P_{HCl} + P_{H2}) / (1/2P_{HCl} + P_{H2} + P_{N2}) \quad (III-2-(ロ)-B-21)$$

(供給Ⅲ族原料とV族原料の関係)

$$U = P_{III}^0 - P_V^0 = (P_{GaCl} + P_{InCl}) - (4P_{P4} + 2P_{P2}) \quad (III-2-(ロ)-B-22)$$

(全圧 = 1atm)

$$1 = P_{GaCl} + P_{InCl} + P_{HCl} + P_{GaCl3} + P_{InCl3} + P_{P4} + P_{P2} + P_{H2} + P_{N2} \quad (III-2-(ロ)-B-23)$$

の4種のパラメータが存在する。

(III-2-(ロ)-B-15)-(III-2-(ロ)-B-23)式から、気相分子種9種が求められる。

なお、InGaP三元混晶中のGaPおよびInPの活量は、式(III-2-(ロ)-B-22)および(III-2-(ロ)-B-23)に示した正則溶液モデルから求めた。

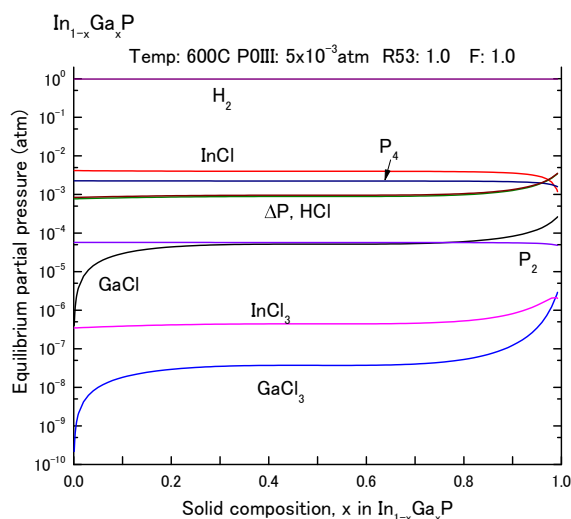
$$a_{GaP} = x * EXP((1 - x) * (1 - x) * \Omega_{GaP-InP} / RT) \quad (III-2-(ロ)-B-24)$$

$$a_{InP} = (1 - x) * EXP(x * x * \Omega_{GaP-InP} / RT) \quad (III-2-(ロ)-B-25)$$

ここで、相互作用パラメータ $\Omega_{GaP-InP} = 3500 \text{ Kcal/mol}$ とした。

上述の熱力学解析により求めた結果を以下に示す。

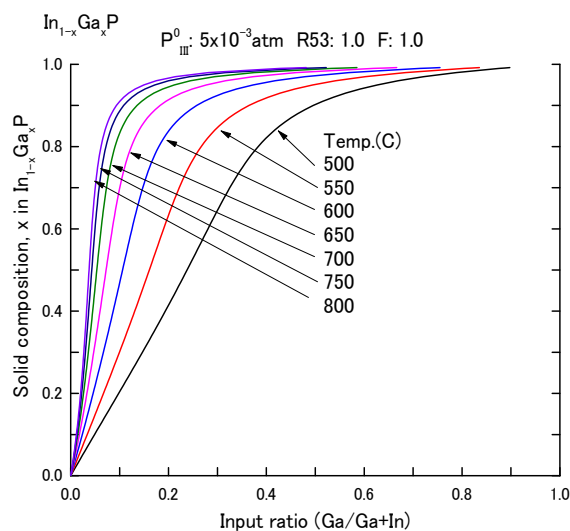
図III-2-(ロ)-B-1-b5-4は熱力学解析により求めた、成長結晶組成とその組成と平衡にある各々の分圧の関係を示す。解析は、成長温度: 600°C、Ⅲ族原料濃度: $5 \times 10^{-3} \text{ atm}$ 、原料送入V/Ⅲ比: 1.0で行った。図からⅢ族の主成分は、InClおよびGaClであることがわかる。一方、V族の主成分はP₄である。混晶中のGaP組成の増加とともに、GaClは増加し、InClは減少している。InCl分圧はGaCl分圧に比較して2桁程度大きな値になっている。このことは、InPはGaPに比較して固相として析出しにくいことを示している。



図III-2-(口)-B-1-b5-4 InGaP H-VPE
成長装置の析出部の模式図

図III-2-(口)-B-1-b5-5 は原料供給比 $[Ga/(Ga+In)]$ と析出組成の関係を示す。図から、Ga 原料の増加により、固相中の GaP 成分が急激に増加することが予想される。さらに、成長温度の増加とともに急激に増加していることから、高温領域では組成制御が難しくなることが示唆される。

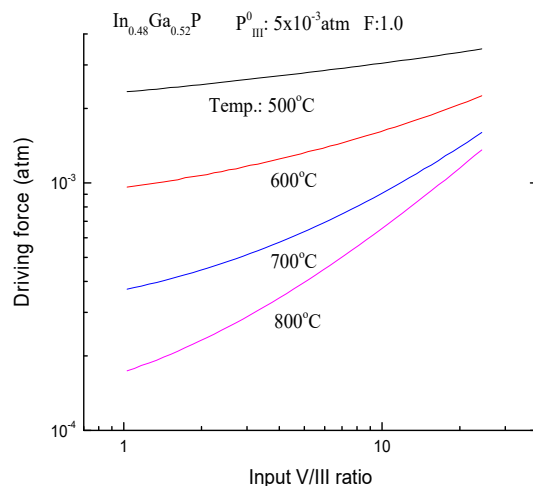
上記に示したように、InGaP の HVPE 成長における熱力学解析により、GaCl-InCl-PH₃系により全組成の InGaP 混晶の成長の可能性が示された。一方、In_{0.48}Ga_{0.52}P 三元混晶は、GaAs 基板結晶と格子整合することが知られている。以下、GaAs 基板結晶と格子整合する In_{0.48}Ga_{0.52}P 混晶の熱力学解析により明らかにされた送入 V/III 比および原料送入分圧と成長速度および成長組成に及ぼす影響について示す。



図III-2-(口)-B-1-b5-5 原料供給比 $[Ga/(Ga+In)]$ と
析出組成の関係

図III-2-(口)-B-1-b5-6 に送入 V/III 比と成長の駆動力の関係を示す。一般に、成長速度は、 $GR = K_g \cdot \Delta P$ で示される。ここで、 K_g は定数、 ΔP は成長の駆動力を示す。したがって、成長速度は成長の駆動力の値に比例すると考えられる。図III-2-(口)-B-1-b5-6 から、成長温度の減少に伴って成長速

度は増加し、送入V/Ⅲ比の増加によっても成長の駆動力が増加することがわかる。

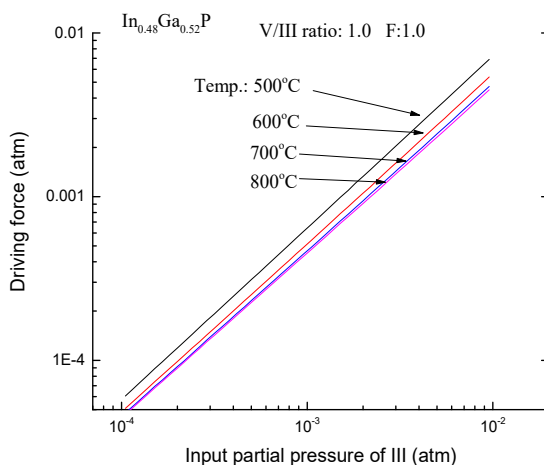


図Ⅲ-2-(口)-B-1-b5-6 送入V/Ⅲ比
と成長の駆動力の関係

図Ⅲ-2-(口)-B-1-b5-7に原料送入分圧と成長の駆動力の関係を示す。図から、原料分圧の増加とともに成長速度は直線的に増加することが示唆される。

以上、送入V/Ⅲ比および原料分圧が成長速度に与える影響が明らかにされた。

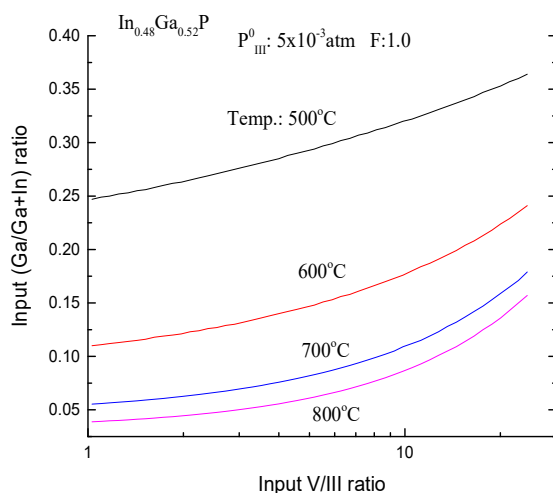
一方、GaAs 基板結晶と格子整合する $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ 混晶の成長のためには、送入V/Ⅲ比および原料分圧と原料送入比を明らかにする必要がある。以下、GaAs 基板結晶と格子整合する場合の原料送入比の関係を示す。



図Ⅲ-2-(口)-B-1-b5-7 原料送入分圧
と成長の駆動力の関係

図Ⅲ-2-(口)-B-1-b5-8は、 $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ を成長するために必要な原料送入比と送入V/Ⅲ比の関係を示す。送入V/Ⅲ比の増加とともに、原料送入比は増加する。このことは、送入V/Ⅲ比の増加により、InPの析出率が増加することを示している。特に、高温領域では組成制御の観点からも高V/Ⅲ比の利用が

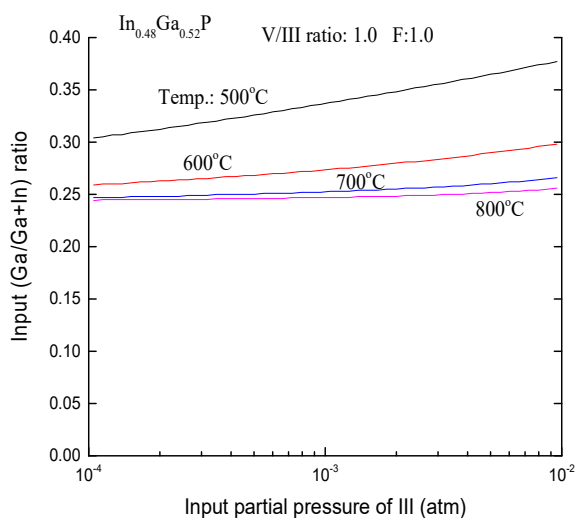
望ましいと考えられる。



図III-2-(ロ)-B-1-b5-8

送入V/Ⅲ比と原料送入比の関係

図III-2-(ロ)-B-1-b5-9は、GaAs基板と格子整合した $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ 混晶の成長のための原料送入比と原料分圧の関係を示す。図から、原料送入比は原料分圧に大きく影響されないことが明らかになった。上記の熱力学解析結果により、実際のInGaP HVPE装置の設計上の大きな指針を与えることができた。

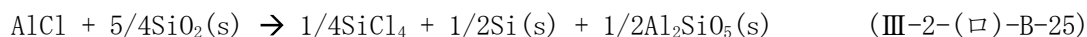


図III-2-(ロ)-B-1-b5-9 原料分圧と原料送入比の関係

③AlAs 成長の熱力学解析、装置設計支援

従来、Al系化合物半導体結晶のHVPE成長は不可能であると言われてきた。それは、HVPE成長におけるAl原料成分であるAlClと反応容器である石英との間で反応が起こり、石英が破損してしまうためで

ある。この場合の反応は、

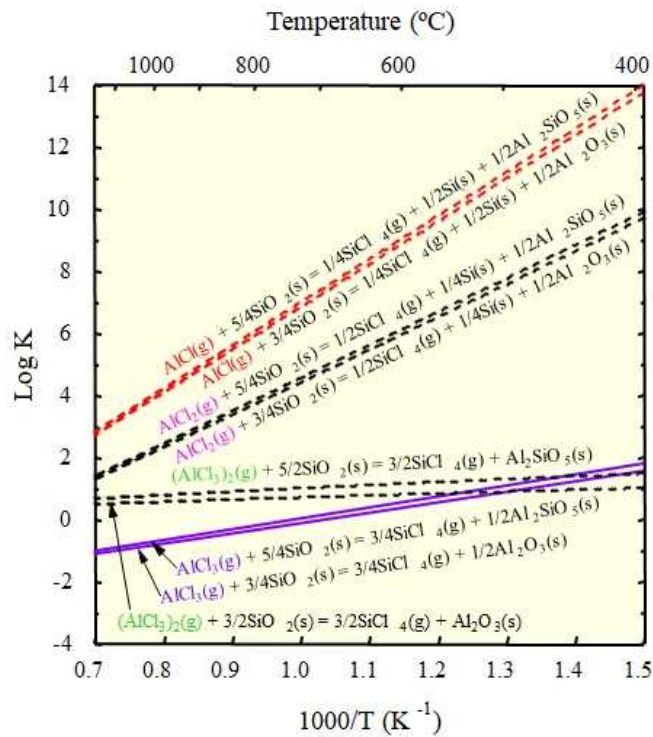


で示され、石英(SiO_2)が反応によりガスである SiCl_4 および固体 Si に分解される。

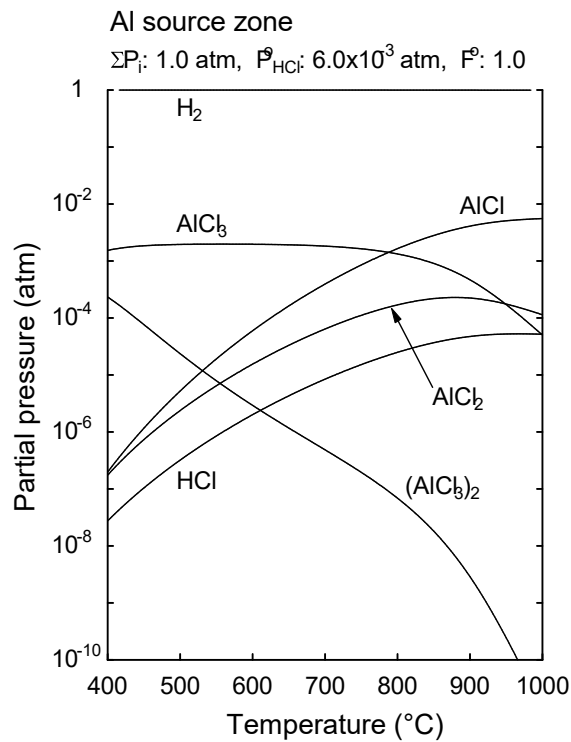
そのため Al 系化合物半導体の HVPE 成長法を可能にするためには、AlCl に代わる石英と反応しない原料分子種を用いる必要がある。本研究では、Al の各種塩化物と石英との反応の自由エネルギー変化を、第一原理計算を用いて精密に計算を行った。その結果を用いて精密な熱力学解析を行うことにより、多くの Al の塩化物 (AlCl , AlCl_2 , AlCl_3) と石英との反応性を調べた。その結果を図 III-2-(口)-B-1-b5-10 に示す。縦軸は AlCl_n と石英との反応の平衡定数の値が対数で示されており、この値が高いほど反応が進行することを示している。図から明らかなように、AlCl および AlCl_2 と石英との反応の平衡定数の値が大きく、反応性が高い。このため、AlCl および AlCl_2 を原料分子とした成長は、不可能であると結論付けられる。一方、 AlCl_3 を Al 原料分子とした場合、その石英との反応の平衡定数の値は小さく、長期にわたり石英と反応することなく、AlAs HVPE 成長が可能になることが明らかになった。

続いて、Al と HCl との反応が起こる原料部での反応の結果生成される各分子種の平衡分圧と温度の関係を図 III-2-(口)-B-1-b5-11 に示す。低温領域では、Al 分子種の主成分は AlCl_3 であり、反応温度の増加とともに AlCl および AlCl_2 の分圧が増加する。安全な観点からは、より低温での原料生成が望ましいが、一方、完全な反応 (反応速度) の観点からより高温での反応が望ましい。十分な反応速度が得られ、安全な原料分子である AlCl_3 を安定的に得られる条件を図 III-2-(口)-B-1-b5-11 から探索すると、 600°C から 700°C の反応温度が最適であることが明らかである。

以上の Al 系の熱力学解析により、(1) Al 原料分子を AlCl_3 とすることにより、反応容器である石英と反応することなく Al 系化合物半導体の HVPE 成長が可能であること、および (2) 原料部の反応を 600°C から 700°C に制御することにより、安全に AlCl_3 のみを供給することが可能であることが明らかになった。



図III-2-(□)-B-1-b5-10 各種 Al 塩化物 (AlCl, AlCl₂, AlCl₃) と石英との反応の平衡定数の温度変化



図III-2-(□)-B-1-b5-11 Al (metal)-HCl-H₂ 反応系の温度と平衡分圧の関係

III-2-(ロ)-B-1-c1. シリコン上III-Vエピ成長【豊田工業大学】

Si 基板上 GaAs 成膜層の欠陥密度低減の技術開発を行った。Si と GaAs の熱膨張係数差により生じる応力を低減するためには、GaAs 成膜温度の低温化が有効である。しかし、成膜温度を低温化しただけでは、過剰 As などの点欠陥を多く含む低品質な GaAs 膜になってしまう。そこで、GaAs 成膜の際、Ga 原料を断続的に供給して、基板に到達した原子の表面マイグレーションを促進するマイグレーション・エンハンスド・エピタキシー (MEE) 法と、成膜中のアニール処理を組み合わせることで、GaAs 膜の高品質化をはかった。表III-2-(ロ)-B-1-c1-1 に、エッチピット法により評価した各試料の転位密度、および X 線回折のロッキングカーブ測定 (GaAs (004) 回折ピーク) の半値幅をまとめる。初期成長層に低温 280°C で MEE 層を挿入した後アニールし、570°C で通常の MBE 法で成膜した GaAs 膜で転位密度 $3 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ を得て、中間目標 10^6 cm^{-2} 以下を達成した。初期成長層に低温 280°C での MEE 層を挿入した後アニールし、その後、低温 300°C で全て MEE 成膜した GaAs 膜では、さらに低い転位密度 $1 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ を得たが、ロッキングカーブの半値幅は増大し、結晶品質は低下した。以上の結果から、初期成長層にのみ低温 MEE 法を導入した 2 段階成長法が欠陥密度低減に有効であることが、本研究により示された。

実施計画見直しにより、本開発項目は 2017 年度で終了となったが、その後の自主研究として行った MBE-XRD 装置 (SPring8 ビームライン 11XU) での結晶成長中の逆格子マッピングその場測定の結果、初期成長層における MEE 法と通常 MBE 法での歪緩和過程の違いが、成膜後の降温過程での欠陥導入にも影響を与えていることが示され、GaAs 層の欠陥密度低減のための重要な知見が得られた。

表 III-2-(ロ)-B-1-c1-1 GaAs 成長膜の転位密度の比較

手法	転位密度 (cm^{-2}) (エッチピット法)	X 線回折測定
		GaAs (004) ロッキングカーブの半値幅 (arcsec)
低温成長 (280°C)	5×10^7	2603
2 段階成長 (標準試料) (600°C/230°C)	2.2×10^8	565
低温 MEE 初期層挿入 (570°C (2.1 μm)/280°C-MEE (70nm))	3×10^5 (中間目標達成)	268
全低温 MEE 成長 (300°C-MEE (1.5 μm)/280°C-MEE (70nm))	1×10^4	605

III-2-(ロ)-B-1-c2. シリコン上III-Vエピ成長【宮崎大学】

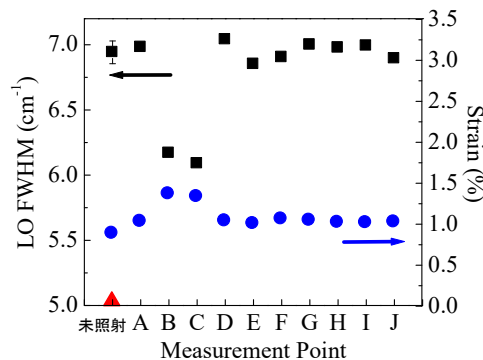
① レーザー光照射による低温エピ GaAs 薄膜の高品質化

III-V on Si の作製においては、基板と成長層の熱膨張係数差により発生する欠陥が問題となる。この問題の解決策として、成長温度を下げることで室温との温度差を小さくし熱的不整合の影響を少なくする方法があるが、一般に低温成長では原子の拡散エネルギーが不足し結晶性が悪くなる。そこで、低温作製した GaAs 薄膜にパルスレーザー光を照射し、成長層のみにアニール処理を施す手法を試みた。

分子線エピタキシー (MBE) 法を用いて、Si (001) 基板上に GaAs 薄膜を成長させた。成長温度はエピタキ

シャル成長が可能な低温成長である300℃と、多結晶成長する200℃を選択した。成長後のGaAs薄膜に波長266 nm、強度1.1 mJのレーザー光を照射面積2.54 mm²の範囲に35、45、60秒間照射した。レーザーアニール後の表面形状を評価するため、走査型電子顕微鏡(SEM)、結晶性を評価するためにラマン分光法を用いた。ラマン測定より得られたスペクトルより、結晶性はLOピークの半値幅(FWHM)より評価し、ピーク位置よりGaAs中の歪み量を見積もった。一度のレーザー照射痕内部において、同じ照射痕内に場所依存性が見られたため、場所依存性を評価するために、同一照射痕内部を分割しA~Jの10箇所にてラマン測定を行った。

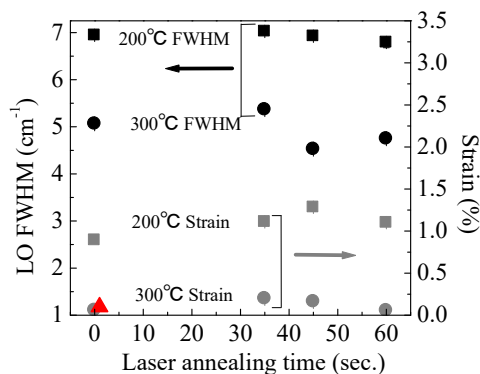
レーザー照射前と、照射後の同一照射痕内の各位置での歪み量を見積もった結果を図III-2-(ロ)-B-1-c2-1に示す。全てで引張歪みを受けている。レーザー照射前の歪みは0.892%であった。一方、GaAsとSiの熱膨張係数差による歪みは、200℃で成長の場合0.0623%である。これはラマン分光法によって求めた歪み量よりはるかに小さい。2軸性の応力と仮定していたが、200℃では多結晶成長していることから応力は不均一であり、多結晶特有の歪みが生じたと考えられる。次にレーザー照射後の歪み量と比較を行う。各測定箇所でもレーザー照射前よりも引張歪みが大きくなっている。レーザー照射により表面温度が上昇し、室温との温度差が大きくなることで引張応力が生じたと考えられる。他の場所と比較してB、Cで特に引張歪みが大きく、この領域の温度上昇が、他の部分より大きい事が示唆される。B、Cで特に強くなった理由は現在検討中であるが、レーザー光自体の面内不均一が影響した可能性が考えられる。



図III-2-(ロ)-B-1-c2-1 成長温度 200℃、60 秒照射の GaAs における各測定箇所での LO 半値幅および歪み量

次に温度依存性と照射時間依存性を議論する。図III-2-(ロ)-B-1-c2-2 に各成長温度、照射時間における LO 半値幅および歪み量を示す。まず、照射前の歪み量を考える。300℃成長の GaAs 層の歪み量は 0.0585%であった。300℃成長における熱膨張係数差から予想される歪み量は 0.0983%であり、ラマンシフトから求めた歪み量より大きい。300℃では GaAs はエピタキシャル成長していることから、成長過程で生じた圧縮歪みが残留した可能性が考えられる。また、300℃の半値幅は 200℃と比較して小さい。200℃は多結晶のため方位がランダムであり、原子間距離も乱れているためであると考えられる。エピタキシャル成長している 300℃では方位が揃っており、200℃と比較して原子間距離の乱れが少なく、半値幅が小さいと考えられる。

レーザー照射後はいずれの成長温度の結果に置いても、引張歪みが増大したが、照射時間60秒で減少した。これは長時間の照射により熱が照射領域外へ放出したため、室温との温度差が減少した可能性が考えられる。一方、結晶性は単調に向上した。照射時間60秒で歪みが減少するとともに結晶性の改善がみられ、レーザー照射が、熱歪みの影響を抑えながら結晶性の向上に有効である可能性が示された。



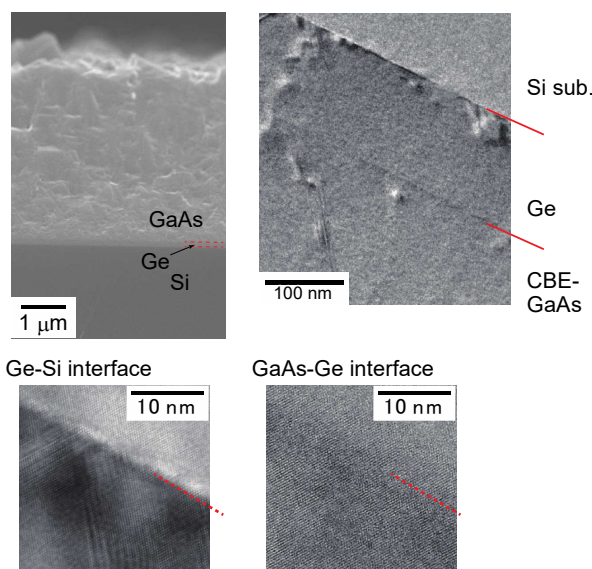
図III-2-(口)-B-1-c2-2 各成長温度，照射時間におけるLO半値幅および歪み量

②安全な原料である tertiarybutylgerman (TBGe) を用いた Ge 薄膜の形成

Si 基板上に直接 GaAs 層を堆積するのではなく、薄い Ge 膜をバッファ層として堆積することで、界面の欠陥を減少できるとの報告がある。一般にエピタキシャル成長における Ge 原料としては、 GeH_4 や Ge_2H_6 が用いられているが、毒性が強く安全装置や除外装置にコストがかかる。そこで、毒性が低く安全な Ge 原料として tertiarybutylgerman (TBGe) を選定した。

2016 年度までに、Ge 薄膜結晶成長条件の探索を行い、エピタキシャル成長可能かつ平滑な表面が得られる条件を見出した。2017 年度は、宮崎大学にて pulsed-jet epitaxy (PJE) 装置を用いて Si (001) 基板上に Ge バッファ層を作製し、その後豊田工大にて chemical beam epitaxy (CBE) 法を用いて GaAs 層を Ge バッファ上に成長させ、評価を行った。図III-2-(口)-B-1-c2-3 に GaAs/Ge/Si (001) の断面 TEM による測定結果を示す。Ge/Si 界面に欠陥が集中しており、GaAs 層への欠陥伝搬も観察される。しかし、欠陥の多くは Ge 層に止まっている。また、GaAs/GaAs/Ge および Ge/Si 界面は平坦になっており、特に GaAs/Ge 界面は格子像で欠陥が見られず、高品質化が可能であることを示唆している。ただし、GaAs 表面は非常に荒く、GaAs 層の成長条件の最適化が必要だと考えられる。

(2)-1 (CBE-GaAs/Ge/Si)



図III-2-(口)-B-1-c2-3 Si (001) 基板上に Ge バッファ層を 100nm 程度堆積し、その上に CBE 法を用いて $4 \mu\text{m}$ の GaAs 層を成長させた試料の断面 TEM 像。左上：低倍率像、右上：GaAs/Ge/Si 界面の拡大像、左下：Ge/Si 界面の拡大像、右下：GaAs/Ge 界面の拡大像。

2. 実用化・事業化見通し

テーマBにおいては、シャープ(株)、東大（再委託：タカノ(株)）がELOによるエピ層剥離装置を、また大陽日酸(株)がHVPE装置の開発を行った。それぞれのメーカーの実用化・事業化見通しを以下に記載する。また産総研が想定する、HVPE装置、エピ層移載装置、スマートスタック装置を組み合わせた2端子型InGaP/GaAs//Si（CIGS）モジュールの実用化イメージに関しても述べる。

【低コスト実装プロセス：エピ層移載・ウエハ再利用（シャープ）】

本プロジェクトで得られた研究開発の成果は、現宇宙用太陽電池事業の拡大および成層圏飛行体用等の新規事業の創出、更には、電動自動車へ搭載可能な高出力太陽光発電モジュールの将来の実用化への貢献が期待される。具体的な製品として、宇宙用に逆積3接合（IMM3J）セル、成層圏飛行体用にIMM3Jセルおよび両面採光型2接合セル、車載用には透過型2接合セルとシリコン（もしくはCIS）セルをスタックした4端子型セルを予定する。

テーマBで得られた成果は以下に示す内容にて、それぞれの事業分野での活用が期待される。

研究開発成果	事業分野	貢献・活用
エピ層剥離装置の開発によりエピ剥離後基板の再利用が10回以上可能であることを実証した。量産装置の設計および価格見積を行い、開発したプロセスのコスト試算を実施した。	成層圏飛行体用 車載用	光透過型2接合セルのエピ層剥離、基板再利用10回が確認できたため、新規製品を予定する成層圏飛行体向け両面採光型セルの低コスト化が期待できる。 更に、将来の車載用として製品開発を予定しているメカニカルスタック4端子型の2接合トップセルの低コスト化が期待される。

以上のように、研究開発の成果を活用し、成層圏飛行体用等の新規事業の創出、更には、電動自動車へ搭載可能な高出力太陽光発電モジュールの将来の実用化へに向けた開発を推進する予定である。

【低コスト実装プロセス：エピ層移載（タカノ（再委託））】

量産向けELO装置は世界的にもまだ販売例は見られず、Ⅲ-V化合物薄膜太陽電池の製造企業における装置内製に留まることを考慮すると、本プロジェクトで開発した成果を早期に量産化技術として確立することで、今後予測される車載用及びUAV用の高効率太陽電池のニーズの高まりを見据え、関連市場の拡大促進への貢献が期待できる。基板表面の高速全面観察装置については、ELO技術、基板再生技術の研究開発段階での活用に留まらず、生産ラインにおける非接触高速検査や品質管理のためのサンプリング検査などへの応用を想定した技術展開も考えられる。

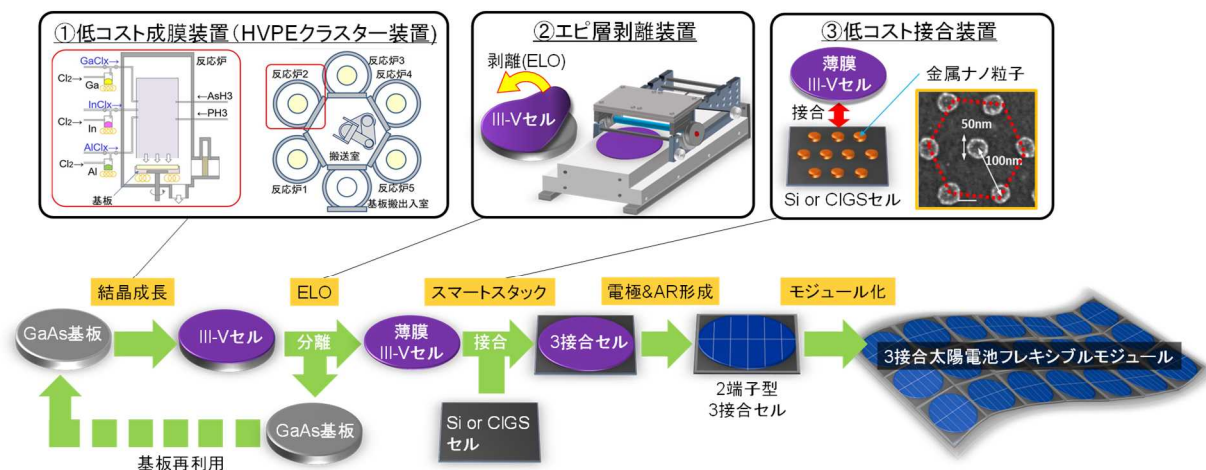
【低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術（大陽日酸）】

本研究で得られた2インチ基板に対するGaAs、InGaP成長技術を元に、HVPEの大型量産装置を開発することでⅢ-V族化合物半導体太陽電池の市場普及に貢献する。その達成のためには製造コストの削減が必須であり、具体的には基板の大口径化、成長速度の更なる高速化、V族/Ⅲ族ガス比率の低減、原料

利用効率の向上に取り組む計画である。大型量産装置の概略図は、「4. 今後の展開」において詳細に述べる。

【Si 上III-Vセル（スマートスタック）・低コストIII-V化合物半導体製膜技術：HVPE（産総研）】

産総研が想定する2端子型 InGaP/GaAs//Si (CIGS) モジュールの実用化イメージを、図III-2-(ロ)-B-2-1に示す。



図III-2-(ロ)-B-2-1 InGaP/GaAs//Si (CIGS) モジュール作製のプロセスイメージ図

上図において、HVPE に関しては大陽日酸が実用化・事業化を検討し、シャープ・タカノが取り組むエピ層剥離装置の実用化と合わせたモジュール作製を想定する。低コスト接合装置に関しては、スマートスタックの技術移転等によりスマートスタック自動装置の開発を行い、Si または CIGS ボトムセルに大面積 InGaP/GaAs トップセルを自動で接合する装置を実現する。HVPE で作製したトップセルをスマートスタックし、2端子型 InGaP/GaAs//Si (CIGS) モジュールを作製する。

3. 波及効果

本事業の主目的達成のために開発する要素技術の中には、下記の通り種々の応用に波及効果を有するものが多く存在する。

【移動体等の新規太陽電池用途への応用】

ELO により作製される薄膜太陽電池は生産コストの低減のみならず、軽量、フレキシブルといった薄膜太陽電池自体の特徴を活かした新規用途（車載電源、モバイルバッテリー、など）の創生への波及が期待できる。化石エネルギーの埋蔵量や、近年より顕在化している気候変動、異常気象、また世界情勢の揺らぎに起因する安定的エネルギー供給への懸念といった世界的な諸問題に対して、電気自動車への搭載、普及が早期に実現されることで、社会生活の安定化に一定の効果をもたらすと考えられる。さらに、当該技術の国外流出を防ぎ、国内自動車関連企業等と連携し、車載をはじめとした移動体用途向け

の太陽電池モジュールの生産体制を確立することで、我が国の経済再生へ大きく貢献できる。また、近年の高度 IT 社会におけるポータブルバッテリーの需要の高まりに対して、軽量で高い発電性能を有する太陽電池が搭載されることで、さらなる市場の拡大、産業創生、雇用創生に大いに期待される。

【光デバイス、パワーデバイス等の化合物半導体の製造技術】

本事業で得られた MOCVD、HVPE 高速製膜技術は化合物半導体太陽電池だけでなく、そのほかの光デバイス、パワーデバイス等の化合物半導体の製造技術にも採用可能であり、当該装置の生産能力向上による化合物半導体のコストダウンや市場普及に貢献する。加えて HVPE 装置による複雑な構造の製膜の実現は、従来 MOCVD で担ってきたデバイス構造への HVPE 技術の応用の可能性を持っており、これによりさらなる製造コストの削減など新たなデバイス製造方法の普及に繋がるものと考えられる。

また、今回大幅な高速化を達成できた MOCVD プロセスに関しては、光ファイバー通信に用いるレーザーおよび変調器を集積した光集積デバイスの製造技術としても大きな注目を集めている。実際、InP などの化合物半導体基板上に光導波路構造を形成した後にクラッド層を形成する「埋め込み再成長」においては、厚さ 10 μm に達する結晶層を数時間かけて成長しており、生産性の低さが製造過程のボトルネックとなっている。このため、今回開発した高速 MOCVD 技術に対する光デバイス業界からの注目度は高く、すでに MOCVD 装置を供給する大陽日酸に対して InP 系結晶の埋め込み再成長のデモが要請され、予備的な開発が始まっている状況である。

【InGaP トップセルのモバイル機器等への応用】

屋内光（照明等）に対して高効率で発電可能な InGaP トップセルについても、単体でエピ層剥離が可能であるため、基板再利用による大幅なコスト削減が期待できるため、高効率セルの低価格化の実現により、モバイル機器などへの応用、普及が期待される。

【ウエハ全面表面観察装置の開発】

本事業で開発している基板表面全面観察評価機は、レーザーや光変調器などの III-V 族化合物半導体製品に対する製造工程内の検査を可能とする。ラインセンサとライン状照明を用いたフォトルミネッセンス画像化および異常診断技術を応用する。

【シリコン基板への化合物半導体のヘテロエピタキシャル成長】

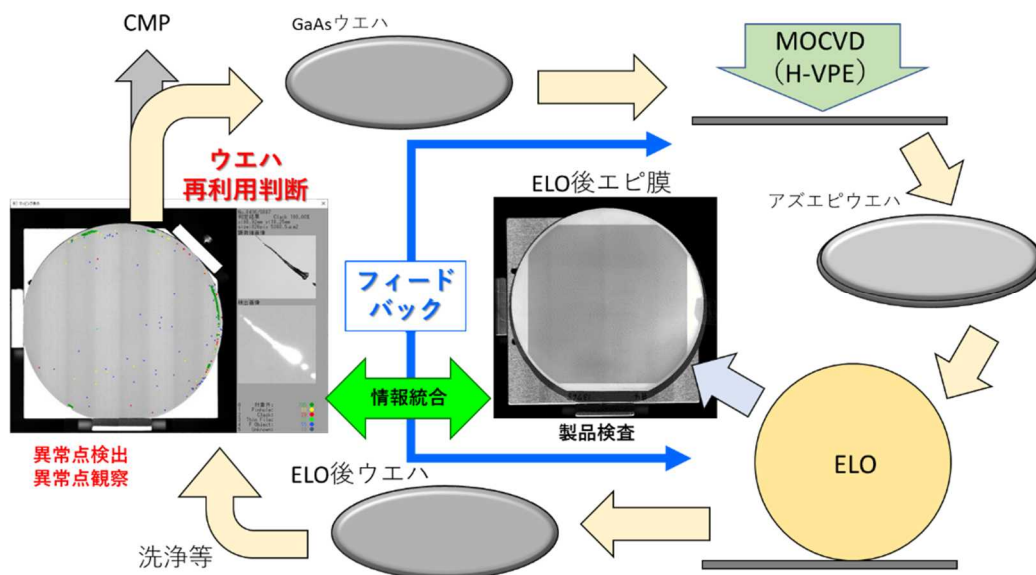
III-V 族化合物半導体のシリコンプラットフォームへの集積は、発光・高感受光機能を持つエレメントをシリコン集積回路に混載することを可能にし、CPU チップ内の光クロック分配やコンピューターボード間の光通信、さらにインターネットのバックボーンである光ネットワーク素子の高速・小型化など情報通信分野を中心に大きな需要がある。ヘテロエピタキシャル成長による III-V 化合物半導体/Si 構造が高品質で実現できれば、これらの応用への波及効果は極めて大きい。

さらに、層状半導体バッファを用いるシリコン基板上の III-V 族化合物半導体成長は、ファンデルワールス界面で劈開できることから、成膜した GaAs エピタキシャル層を簡便に基板から剥離することを可能とする。III-V 族化合物半導体を機能部位として集積したフレキシブルデバイスなどへの応用が考えられる。また、大口径のシリコン基板が繰り返し利用可能であることで、本事業の主要技術として開発している犠牲層エッチングを用いた GaAs 基板からの III-V 族化合物半導体層の剥離 (ELO) よりも、将来的にスループットの向上、低コスト化が期待できる。

4. 今後の展開

【低コスト実装プロセス：エピ層移載技術】

本研究テーマにおいて、ELO 自動機開発、高速表面観察技術開発、およびウエハ再利用技術開発といった高効率薄膜太陽電池の製造工程において低コスト化に貢献しうる重要な要素技術の検討を実施した（図Ⅲ-2-(ロ)-B-4-1）。現状の ELO 試作機では 1 プロセス毎に 1 ウエハを処理しているが、産業化に向けては多数のウエハを同時に処理するための量産技術への応用が必須となる。また、開発した表面観察技術及びシステムを用いる事で、異常点検出～顕微鏡観察～異常点分類を機械で全自動化し、人は異常点分布を画面上で確認した上でウエハ再利用の判断や、問題となっている製造装置の予測を担うといった役割分担が想定される。残された課題は、ウエハ再利用可否の判断と製造装置へのフィードバックの自動化となるが、システム出力データから統計的な解析方法を用いる事で解決の道筋が見えてくると考えている。但し、最終的な判断には「人の責任」が必要となり、自動化の線引きについては議論の余地がある。研究テーマとの相乗効果によって今後の研究成果に大いに役立っていくと期待している。



図Ⅲ-2-(ロ)-B-4-1 表面観察技術を中心としたⅢ-V化合物太陽電池製造工程のプロセスモニタ

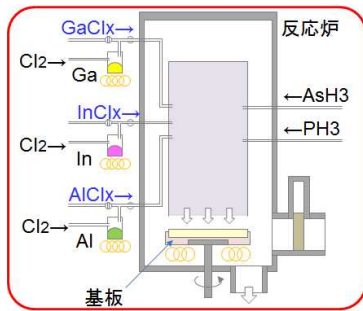
【低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術（MOCVD）】

今回開発した高速 MOCVD プロセスは、既存の装置の中で反応器とガス供給系を改造するのみで製造現場に実装できるため、大陽日酸を主要なサプライヤーとして市場投入が可能な状況である。太陽電池に先駆けて、「3. 波及効果」で述べた光デバイス製造工程に導入される可能性が高い。太陽電池用途には、MOCVD の成熟した装置技術（ウエハ表面への原料供給過程に関する流体力学や反応工学に基づく技術蓄積の賜物である）と HVPE の利点である超高速製膜や高原料利用効率を組み合わせた新概念の結晶成長技術が開発されるべきである。これに関しては、後続の NEDO プロジェクトにおいて主要テーマとして研究開発が進められる予定である。

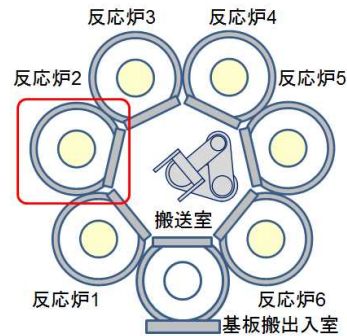
【低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術（HVPE）】

HVPE に関しては、Ⅲ-V 族化合物太陽電池を低コストで成膜可能な量産型結晶成長装置を開発し、そ

の実用化・事業化・普及を図る。Ⅲ-V族化合物半導体太陽電池用のHVPE量産機開発は世界でまだ行われておらず、開発に成功した場合のメリットは非常に大きい。それにより、他の追随を許すことなく、HVPE装置市場の大部分を占有できる可能性がある。具体的には、6インチ多数枚処理に対応できるHVPE装置を開発し、量産効果による製造コスト削減を目指す。主な開発要素は原料の外部供給による大口径多数枚処理への対応である。図Ⅲ-2-(ロ)-B-4-2に、金属原料外部供給ガスノズルの概念図を示す。また、図Ⅲ-2-(ロ)-B-4-3には、HVPEによる6インチ基板複数枚処理の概念図を示す。図のように反応炉をクラスター化することにより、量産型HVPE装置の開発を進める予定である。



図Ⅲ-2-(ロ)-B-4-2 金属原料外部供給ガスノズル概念図



図Ⅲ-2-(ロ)-B-4-3 複数枚処理概念図

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)			1	1		2
論文	2	3	6	13	7	31
研究発表・講演 (うち国際会議)	9 (5)	31 (16)	44 (31)	25 (12)	39 (20)	148 (84)
新聞・雑誌等への掲載		1	6	1	1	9
その他(受賞)		1	2	2		5

(2020年08月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	大陽日酸株式会社	特願 2017-148986	国内	2017/8/1	未審査	気相成長装置	山口晃、 小関修一、 椎名一成
2	大陽日酸株式会社	特願 2018-238882	国内	2018/12/20	未審査	気相成長装置	生方映徳、 小関修一

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	R. E. E. Tamayo, T. Hoshii, R. Tamaki, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Okada, K. Miyano	東京大学	Maskless fabrication of broadband antireflection nanostructures on glass surfaces	Journal of Optics, v 18, n 6, p 064008 (6 pp.), June 2016.	有	2016/06
2	H. Xu, K. Toprasertpong A. Delamarre, H. Sodabanlu, K. Watanabe, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学	Effect of low-V/III-ratio metalorganic vapor-phase epitaxy on GaAs solar cells	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 56, 08MC06, 2017	有	2017/07
3	H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Effects of various dopants on properties of GaAs tunneling junctions and p-i-n solar cells	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 56, 08MC11, 2017	有	2017/07
4	H. Sodabanlu, A. Ubukata, K. Watanabe, T. Sugaya, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 大陽日酸 (株)、 産業技術総 合研究所	Extremely High-Speed GaAs Growth by MOVPE for Low-Cost PV Application	IEEE Journal of Photovoltaics Vol. 8, 887-894, 2018	有	2018/04
5	N. Miyashita, B. Behaghel,	東京大学、 IRDEP,	Enhancement of photocurrent in epitaxial lift-off thin-	Applied Physics Express, Vol. 11,	有	2018/06

	J. -F. Guillemoles and Y. Okada	CNRS	film GaInNAsSb solar cells due to light-confinement structure	072301, 2018		
6	A. Paszuk, O. Supplie, B. Kim, S. Brückner, M. Nandy, A. Heinisch, P. Kleinschmidt, Y. Nakano, M. Sugiyama, Thomas Hannappel	Iluminau Univ., 東京大学	GaAsP/Si tandem solar cells: In situ study on GaP/Si:As virtual substrate preparation	Solar Energy Materials and Solar Cells, v 180, p 343-9, June, 2018	有	2018/06
7	B. Kim, K. Toprasertpong A. Paszuk, O. Supplie, Y. Nakano, T. Hannappel, M. Sugiyama	東京大学, Ilumenau Univ	GaAsP/Si tandem solar cells: Realistic prediction of efficiency gain by applying strain-balanced multiple quantum wells	Solar Energy Materials and Solar Cells, v 180, p 303-10, June, 2018	有	2018/07
8	H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Growth of InGaAs(P) in planetary metalorganic vapor phase epitaxy reactor using tertiarybutylarsine and tertiarybutylphosphine for photovoltaic application	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 57, 08RD09, 2018	有	2018/08
9	T. Nakata, K. Watanabe, N. Miyashita, H. Sodabanlu, M. Giteau, Y. Nakano, Y. Okada, and M. Sugiyama	東京大学	Thin-film multiple-quantum-well solar cells fabricated by epitaxial lift-off process	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 57, 08RF03, 2018	有	2018/08
10	H. Sodabanlu, A. Ubukata, K. Watanabe, S. Koseki, K. Matsumoto, T. Sugaya, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、大陽日酸(株)、産業技術総合研究所	24.5% efficient GaAs p-on-n solar cells with 120 μm h-1 MOVPE growth	Journal of Physics D: Applied Physics Vol. 52, 105501, 2018	有	2018/11
11	A. Paszuk, O. Supplie, M. Nandy, S. Brückner, A. Dobrich, P. Kleinschmidt, B. Kim, Y. Nakano, M. Sugiyama, T. Hannappel	Ilumenau Univ, 東京大学	Double-layer stepped Si(1 0 0) surfaces prepared in As-rich CVD ambience	Appl. Surf. Sci., 462, 1002-1007, Dec. (2018)	有	2018/12
12	H. Sodabanlu, A. Ubukata, K. Watanabe, T. Sugaya, Y. Nakano, and	東京大学、大陽日酸(株)、産業技術総合研究所	High-Speed MOVPE Growth of InGaP Solar Cells	IEEE Journal of Photovoltaics Vol. 10, 480-486, 2020	有	2020/03

	M. Sugiyama					
13	M. Yamaguchi, K. Lee, K. Araki, N. Kojima, Y. Ohshita	豊田工大	Potential and Activities of III-V/Si Tandem Solar Cells	ECS Journal of Solid State Science and Technology, 5(2):Q68-Q73	有	2015/12
14	K. Lee, K. Araki, L. Wang, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Assessing material qualities and efficiency limits of III-V on silicon solar cells using external radiative efficiency	Prog. Photovolt: Res. Appl. (2016) DOI: 10.1002/pip.2787 (online)	有	2016/09
15	山口真史、 Kan-HuaLEE、 荒木建次、 小島信晃	豊田工大	(解説) 次世代太陽電池の高 効率化に関する考察	信学技報 116 卷 471 号 pp. 67-72	無	2017/02
16	M. Yamaguchi, H. Yamada, Y. Katsumata, K. Lee, K. Araki, N. Kojima	豊田工大	(Invited Review) Efficiency potential and recent activities of high- efficiency solar cells	Journal of Materials Research, 32(18);3445-3457	無	2017/09
17	M. Yamaguchi, K. Lee, K. Araki, N. Kojima, H. Yamada, Y. Katsumata	豊田工大	Analysis for efficiency potential of high - efficiency and next - generation solar cells	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 26, pp. 543-552 (2018). Top downloaded article 2017-2018	有	2017/11
18	M. Yamaguchi, K. Lee, K. Araki, N. Kojima	豊田工大	(Topical Review) A review of recent progress in heterogeneous silicon tandem solar cells	Journal of Physics D: Applied Physic, 51(13); 133002	無	2018/03
19	A. Ubukata, H. Sodabanlu, K. Watanabe, S. Koseki, Y. Yano, T. Tabuchi, T. Sugaya, K. Matsumoto, Y. Nakano, and M. Sugiyama	大陽日酸 株、 東京大学、 産業技術総 合研究所	Accelerated GaAs growth through MOVPE for low-cost PV applications	Journal of Crystal Growth Vol. 489, 63-67, 2018	有	2018/05
20	K. Matsumoto, A. Ubukata, P. Guanxi, Y. Yano, T. Tabuchi, S. Koseki, H. Sodabanlu, K. Watanabe, Y. Nakano, and M. Sugiyama	大陽日酸 株、 東京大学	Design evolution of MOVPE reactors for improved productivity: Adaptation to nitrides and feedback to classical III-V	Journal of Crystal Growth Vol. 507, 134-138, 2019	有	2019/02
21	A. Ubukata, H. Sodabanlu, T. Aihara,	大陽日酸 株、 東京大学、	High throughput MOVPE and accelerated growth rate of GaAs for PV application	Journal of Crystal Growth Vol. 509, 87-90, 2019	有	2019/03

	R. Oshima, T. Sugaya, S. Koseki, K. Matsumoto, K. Watanabe, Y. Nakano, and M. Sugiyama	産業技術総 合研究所				
22	R. Oshima, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	Fabrication of GaAs solar cells grown with InGaP layers by hydride vapor- phase epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 57, 08RD06 (2018)	有	2018/07
23	R. Oshima, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	Improvement of heterointerface properties of GaAs solar cells grown with InGaP layers by hydride vapor-phase epitaxy	IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 9, pp.154-159 (2019)	有	2018/11
24	Y. Shoji, R. Oshima, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	Ultrafast growth of InGaP solar cells via hydride vapor phase epitaxy	Applied Physics Express, vol. 12, 052004 (2019)	有	2019/04
25	T. Aihara, T. Tayagaki, R. Oshima, Y. Shoji, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	Analysis of subcell open- circuit voltages of InGaP/GaAs dual-junction solar cells fabricated using hydride vapor phase epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics vol. 59, SGGF02 (2020)	有	2020/02
26	R. Oshima, Y. Shoji, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	High-doping performance of sulfur and zinc dopants for tunnel diodes using hydride vapor phase epitaxy	IEEE Journal of Photovoltaics, 10, pp. 749~753, (2020)	有	2020/02
27	R. Oshima, Y. Shoji, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	Evaluation of GaAs solar cells grown with different growth regimes by hydride vapor phase epitaxy	Journal of Crystal Growth, 537, 125600 (2020)	有	2020/03
28	Y. Shoji, R. Oshima, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	Effects of growth interruption on InGaP fabricated via hydride vapor phase epitaxy	Journal of Crystal Growth, 544, 125712 (2020)	有	2020/05
29	T. Tayagaki, R. Oshima, Y. Shoji, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総 合研究所	Luminescence effects on subcell current-voltage analysis in InGaP/GaAs tandem solar cells	Journal of Photonics for Energy, 10, 025504 (2020)	有	2020/06
30	H. Suzuki et al.,	Univ. Miyazaki	Real-time observation of rotational twin formation during molecular-beam epitaxial growth of GaAs on Si (111) by x-ray diffraction	AIP Advances, Vol16, 035303	有	2016/03
31	H. Suzuki, Y. Ohshita, N. Kojima,	Univ. Miyazaki, Toyota	Effect of substrate orientation on strain relaxation mechanisms of	Jpn. J. Appl. Phys. 6 08MA06	有	2017/03

	A. Fukuyama, T. Iakri, M. Yamaguchi	Tech. Inst.	InGaAs layer grown on vicinal GaAs substrates measured by in situ X-ray diffraction			
--	---	----------------	--	--	--	--

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	宮下直也, Benoit Behaghel J.-F. Guillemoles 岡田至崇	東京大学	エピタキシャルリフトオフにより作製した GaInNAsSb 薄膜太陽電池 評価	第 63 回応用物理学会春季 学術講演会	2016/03
2	長岡恵里奈, 井上智之, トープラサートポ ン カシディット, 山下 大之, 渡辺健太郎, 杉山正和, 中野義昭	東京大学	GaAs/Si 太陽電池におけ る変換効率・発電コスト の GaAs 層厚依存性	第 63 回応用物理学会春季 学術講演会	2016/03
3	宮下直也, 岡田至崇	東京大学	エピタキシャルリフトオフ による薄膜 GaInNAsSb 太陽電池の作製	第 13 回「次世代の太陽光 発電システム」シンポジ ウム (長岡)	2016/05
4	H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Growth of C-Doped GaAs in Planetary MOVPE Reactor Using Tertiarybutyl-Arsine and Carbon- Tetrachloride	18th International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE-18), San Diego, USA	2016/07
5	木村大希, 宮下直也, 渡辺健太郎, ソダーバンル ハ ッサネット, 中田達也, 杉山正和, 岡田至崇	東京大学	エピタキシャルリフトオフ 法により分離した GaAs 基板の表面清浄化手法の 検討	第 77 回応用物理学会秋季 学術講演会	2016/09
6	N. Miyashita, B. Behaghel, J.-F. Guillemoles and Y. Okada	東京大学	Enhancement of Photocurrent in Epitaxial Lift-Off Thin Film GaInNAsSb Solar Cells By The Light Confinement Structure	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016/10
7	H. Xu, K. Toprasertpong A. Delamarre, H. Sodabanlu, K. Watanabe, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学	Effect of low-V/III- ratio metalorganic vapor-phase epitaxy on GaAs solar cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016/10
8	H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Effects of various dopants on properties of GaAs tunneling junctions and p-i-n solar cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016/10

9	宮下直也, 岡田至崇	東京大学	Enhancement of photocurrent in thin film dilute nitride cells separated by epitaxial lift-off technique	第 64 回応用物理学会春季 学術講演会	2017/03
10	ソダーバンル ハ ッサネット、 渡辺健太郎、 生方映徳、 菅谷武芳、 杉山正和、 中野義昭	東京大学、 大陽日酸 (株)、 産業技術総 合研究所	Extremely high growth rate MOVPE: GaAs growth for low-cost PV application	第 64 回応用物理学会春季 学術講演会	2017/03
11	中田達也、 渡辺健太郎、 ソダーバンル ハ ッサネット、 木村大希、 宮下直也、 杉山正和、 岡田至崇、 中野義昭	東京大学	エピタキシャルリフトオフにより分離した GaAs 基板上の堆積物分析	第 64 回応用物理学会春季 学術講演会	2017/03
12	M. Sugiyama, (Invited)	東京大学	III-V nano-epitaxial MOVPE for high-efficiency and low-cost solar cells	MRS Spring meeting 2017 (Apr. 17-21, 2017, Phoenix, USA) ES11.7.01.	2017/04
13	B. Kim, O. Supplie, T. Watanabe, A. Paszuk, T. Hannappel, Y. Nakano, M. Sugiyama	東京大学, Ilumenau Univ.	Double-layer step formation on Si (100) surfaces by moderate-temperature annealing coupled with TBA exposure	Compound Semiconductor Week 2017 (May 14-18, 2017, Berlin, Germany) P1.24.	2017/05
14	A. Paszuk, O. Supplie, S. Brückner, M. M. May, A. Dobrich, A. Nägelein, B. Kim, Y. Nakano, M. Sugiyama, P. Kleinschmidt, T. Hannappel	Ilumenau Univ., 東京大学	In-situ control over dimer orientation on Si(100) surfaces in arsenic ambient and its impact on the sublattice orientation of subsequently grown GaP	Compound Semiconductor Week 2017 (May 14-18, 2017, Berlin, Germany) D6.6.	2017/05
15	K. Watanabe, E. Nagaoka, D. Yamashita, K. Toprasertpong Y. Nakano, M. Sugiyama	東京大学	Development of GaAs//Si current-balanced dual junction solar cell integrated by surface-activated bonding	Proceedings of 2017 5th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration, LTB-3D 2017, p 53 (June 13, 2017, Tokyo)	2017/06
16	T. Nakata, K. Watanabe, H. Sodabanlu, D. Kimura, N. Miyashita, Y. Okada, Y. Nakano, and	東京大学	Analysis of Deposited Residues and Its Cleaning Process on GaAs Substrate after Epitaxial Lift-Off	IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2017 (June 25-30, 2017, Washington DC, USA) 238.	2017/06

	M. Sugiyama				
17	H. Sodabanlu, K. Watanabe, A. Ubukata, T. Sugaya, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学、 大陽日酸(株)	Extremely high-speed GaAs growth by MOVPE for low-cost PV application	IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2017 (June 25-30, 2017, Washington DC, USA) 650.	2017/06
18	B. Kim, K. Toprasertpong O. Supplie, A. Paszuk, T. Hannappel, Y. Nakano, M. Sugiyama	東京大学, Ilumenau Univ.	Efficiency of GaAsP/Si Two-junction Solar Cells with Multi- Quantum Wells: a Realistic Modeling with Carrier Collection Efficiency	IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2017 (June 25-30, 2017, Washington DC, USA) 722.	2017/06
19	A. Paszuk, O. Supplie, S. Brückner, M. M. May, A. Dobrich, A. Nägelein, B. Kim, Y. Nakano, M. Sugiyama, P. Kleinschmidt, T. Hannappel	Ilumenau Univ., 東京大学	In situ control over the sublattice orientation of heteroepitaxially grown single-domain GaP/Si:As virtual substrates for tandem absorbers	IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2017 (June 25-30, 2017, Washington DC, USA) 726.	2017/06
20	H. Sodabanlu, A. Delamarre, K. Watanabe, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	An Alternative Methodology to Investigate Properties of Minority Carriers: Effects of n Dopant Species	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Amsterdam, Netherlands	2017/09
21	宮下直也, 八木修平, 渡辺健太郎, 木村大希, ソダーバンル ハ ッサネット, 中田達也, 杉山正和, 岡田至崇	東京大学、 埼玉大学	基板再利用に向けた ELO 後基板の清浄化工程と再 成長の検討	第 78 回応用物理学会秋季 学術講演会	2017/09
22	中田達也, 渡辺健太郎, ソダーバンル ハ ッサネット, 宮下直也, 岡田至崇, 中野義昭, 杉山正和	東京大学	エピタキシャルリフトオフ 工程により生じた GaAs 基板上堆積物の結晶化条 件の評価	第 78 回応用物理学会秋季 学術講演会	2017/09
23	X. Hao, H. Sodabanlu, K. Toprasertpong A. Delamarre, K. Watanabe, Y. Nakano, M. Sugiyama	東京大学	High Speed Growth for GaAs Solar Cells with Low V/III Ratio	第 78 回応用物理学会秋季 学術講演会	2017/09
24	T. Nakata, H. Sodabanlu, N. Miyashita,	東京大学	Thin-film multiple quantum wells solar cells fabricated by	27th International Photovoltaic Science and Engineering	2017/11

	Y. Okada, K. Watanabe, Y. Nakano, and M. Sugiyama		epitaxial lift off process	Conference (PVSEC-27), Otsu	
25	H. Sodabanlu, M. Sugiyama, K. Watanabe, and Y. Nakano	東京大学	Growth of InGaAs(P) in planetary MOVPE reactor using TBA and TBP for photovoltaic applications	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017/11
26	K. Watanabe, M. Sugiyama, H. Sodabanlu, K. Toprasertpong Y. Nakano	東京大学	Current-matched design of GaAs//Si dual junction solar cells integrated by surface activated wafer bonding	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27) (Nov. 12-17, 2017, Biwako, Japan) 3TuPo.118	2017/11
27	B. Kim, O. Supplie, A. Pasazuk, T. Hannappel, Y. Nakano, M. Sugiyama	東京大学, Ilumenau Univ.	MOVPE preparation of GaP template on Si(100) with in-situ reflectance anisotropy monitoring: impact of reactor contamination	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27) (Nov. 12-17, 2017, Biwako, Japan) 3TuPo.130	2017/11
28	M. Sugiyama, (Invited)	東京大学	PHOTOVOLTAIC 4.0: Next- generation Renewable Energy Systems Powered by High-efficiency Low- cost Photovoltaics	Global Photovoltaic Conference 2018 (March 14~16, 2018, Gwangju, Korea).	2018/03
29	中田達也、 渡辺健太郎、 宮下直也、 ソダーバンル ハ サネット、 岡田至崇、 中野義昭、 杉山 正和	東京大学	エピタキシャルリフトオ フによる薄膜多重量子井 戸太陽電池の開発	第 65 回応用物理学会春季 学術講演会	2018/03
30	H. Sodabanlu, A. Ubukata, K. Watanabe, T. Sugaya, Y. Nakano, M. Sugiyama	東京大学, 太陽日酸, 産総研	Effects of V/III ratio on the quality of GaAs grown by MOVPE with extremely-high growth rate	第 65 回 応用物理学会 春 季学術講演会	2018/03
31	K. Watanabe, T. Nakata, N. Miyashita, H. Sodabanlu, M. Giteau, Y. Nakano, Y. Okada, and M. Sugiyama	東京大学	Light absorption enhancement in thin- film multiple quantum wells solar cells fabricated by epitaxial lift-off technique	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018/06
32	H. Sodabanlu, A. Ubukata, K. Watanabe, T. Sugaya, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 大陽日酸 (株)、 産業技術総 合研究所	Impacts of V/III ratio on the quality and performance of GaAs p-n solar cells by ultrafast MOVPE	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018/06

33	O. Supplie, A. Heinisch, M. Sugiyama, T. Hannappel	Ilumenau Univ., 東京大学	In situ quantification of the Arsenic content in GaAsP graded buffer layers for III-V-on-Si tandem absorbers during MOVPE growth	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018/06
34	A. Paszuk, O. Supplie, M. Nandy, S. Brückner, A. Dobrich, P. Kleinschmidt B. Kim, Y. Nakano, M. Sugiyama, T. Hannappel	Ilumenau Univ., 東京大学	As-modified Si(100) Surfaces for III-V-on- Si Tandem Solar Cells	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018/06
35	H. Sodabanlu, A. Ubukata, K. Watanabe, T. Sugaya, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 太陽日酸 (株)、 産業技術総 合研究所	GaAs p-n Solar Cells with MOVPE Growth Rate of 120 $\mu\text{m}/\text{h}$	35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Brussels	2018/09
36	H. Sodabanlu, A. Ubukata, K. Watanabe, T. Sugaya, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 太陽日酸、 産総研	High growth rate MOVPE: InGaP growth for low- cost PV application	第 66 回 応用物理学会 春 季学術講演会	2019/03
37	M. Giteau, K. Watanabe, H. Sodabanlu, N. Miyashita, M. Sugiyama, A. Cattoni, S. Collin, J.-F. Guillemoles and Y. Okada	東京大学、 IPVF CNRS	Epitaxial Lift-Off of Ultrathin Heterostructures for Hot-Carrier Solar Cell Applications	Compound Semiconductor Week 2019 (CSW2019), Nara	2019/05
38	H. Sodabanlu, A. Ubukata, K. Watanabe, T. Sugaya, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 太陽日酸 (株)、 産業技術総 合研究所	Effects of MOVPE growth parameters on high speed grown InGaP PV	Compound Semiconductor Week 2019 (CSW2019), Nara	2019/05
39	N. Miyashita, N. Ahsan, Y. Okada, R. Tatavarti, A. Wibowo, and N. Pan	東京大学、 MicroLink Devices	Epitaxial Lifted-Off Thin Film GaInP/GaAs/GaInNAsSb Lattice-Matched Triple Junction Solar Cells	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC46), Chicago, USA	2019/06
40	H. Sodabanlu, A. Ubukata, K. Watanabe, T. Sugaya, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 太陽日酸 (株)、 産業技術総 合研究所	High-speed MOVPE growth of InGaP solar cells	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC46), Chicago, USA	2019/06
41	H. Sodabanlu, A. Ubukata, T. Sugaya,	東京大学、 太陽日酸 (株)、	High Speed MOVPE for InGaP/GaAs Multijunction Solar	36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and	2019/09

	K. Watanabe, Y. Nakano, and M. Sugiyama	産業技術総合研究所	Cells	Exhibition (EU PVSEC) (Sep. 9-12, 2019, Marseille, France) 3BV.1.46	
42	O. Supplie, A. Heinisch, A. Paszduk, A. Tummaliéh, M. Sugiyama, T. Hannappel	Ilumenau Univ., 東京大学	Optical in situ Quantification of the As versus P Content during GaAsP Graded Layer Growth for III-V- on-Si Tandems	36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC) (Sep. 9-12, 2019, Marseille, France) 3BV.1.52	2019/09
43	宮下直也, 岡田至崇	東京大学	エピタキシャルリフトオフ法を用いたエピ薄膜分離と基板再生技術開発 (招待講演)	第 67 回応用物理学会春季 学術講演会	2020/03
44	H. Sodabanlu, A. Ubukata, K. Watanabe, T. Sugaya, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学, 太陽日酸, 産総研	GaAs rear- heterojunction solar cell: application of high-speed MOVPE to tandem PV cells	第 67 回応用物理学会春季 学術講演会	2020/03
45	Z. Zhang, K. Watanabe, H. Sodabanlu, Y. Nakano, M. Sugiyama	東京大学	Solid Epitaxial Lift- off (ELO) of GaAs Solar Cell on Silicon Substrate	第 67 回応用物理学会春季 学術講演会	2020/03
46	十楚博行	シャープ(株)	III-V 化合物太陽電池の未 来予想図	第 34 回 P V T E C 技術交 流会	2016/05
47	高本達也	シャープ(株)	Cost-reduction technologies for High- efficiency III-V Multijunction Solar Cells	第 64 回応用物理学会春季 学術講演会 (パシフィコ 横浜)	2017/03
48	高本達也	シャープ(株)	III-V 族化合物半導体多接 合太陽電池の低コスト化 と応用	光機能材料研究会 (東京 理科大 森戸記念館)	2018/08
49	高本達也	シャープ(株)	「宇宙から地上へ」高性 能太陽電池の開発	2019 年応用物理学会秋季 学術講演会シンポジウム (北海道大学)	2019/09
50	M. Yamaguchi, K. H. Lee, K. Araki, N. Kojima	豊田工大	(Invited) Potential and Activities of III-V/Si Tandem Solar Cells	228th ECS Meeting, Phoenix Convention Center and Hyatt Regency, AZ, USA	2015/10
51	Masafumi Yamaguchi	豊田工大	(Invited) Present and future of III-V/Si tandem solar cells	PV Asia Scientific Conference 2015, Sands Expo and Convention Center, Singapore	2015/10
52	M. Yamaguchi, K. H. Lee, K. Araki, N. Kojima, Y. Ohshita	豊田工大	(invited) Potential and Recent Results of High- Efficiency III-V/Si Tandem Solar Cells	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-25), BEXCO, Busan, Korea	2015/11
53	L. Wang, H. Nakamura, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Optical properties of layered $(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{Se}_3$ buffer material deposited on GaAs(111) substrate for III-V	25th International Photovoltaic Science&Engineering Conference (PVSEC- 25), Busan, Korea	2015/11

			/Silicon solar cell		
54	Masafumi Yamaguchi	豊田工大	(Invited) Defect Engineering for Super High Efficiency III-V Compound MultiJunction Solar Cells	2015 MRS Fall Meeting & Exhibit, Hynes Convention Center/Sheraton Boston Hotel, MA, USA	2015/12
55	K. Lee, K. Araki, L. Wang, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Assessing Material Qualities and Efficiency Limits of III-V on Silicon Solar Cells Using Radiative Efficiency	CPV-12	2016/04
56	Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Science and Technology of High Efficiency Solar Cells and Materials	229th ECS Meeting, San Diego, USA (招待講演)	2016/05
57	K. Lee, K. Araki, L. Wang, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Assessing Material Qualities and Efficiency Limits of III-V on Silicon Cells Using External Radiative Efficiency	第13回次世代の太陽光発電シンポジウム(学振175委員会)新潟県長岡市	2016/05
58	K. Lee, K. Nakamura, T. Kamioka, N. Kojima, H. Lee, L. Wang, K. Araki, Y. Ohshita, A. Ogura, M. Yamaguchi	豊田工大	Fabrication and performance analysis of a mechanical stack InGaP/GaAs//Si solar cell	43rd IEEE PVSC	2016/06
59	K. Lee, K. Araki, L. Wang, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Assessing material qualities and efficiency limits of III-V on silicon solar cells using external radiative efficiency	43rd IEEE PVSC	2016/06
60	Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Recent Activities of III-V/Si Tandem Solar Cells	ICTMC-20, Halle, Germany (招待講演)	2016/09
61	M. Yamaguchi, K. Lee, K. Araki, K. Nakamura, N. Kojima, Y. Ohshita	豊田工大	Efficiency Potential of Future Generation Solar Cells	PRiME 2016, Honolulu, USA	2016/10
62	Y. Wang, H. Suzuki, Y. Yokoyama, T. Ikari, A. Fukuyama, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Selective-area growth of GaAs on patterned Si substrates by using chemical beam epitaxy	PVSEC-26 (ポスターアワード受賞)	2016/10
63	Masafumi Yamaguchi	豊田工大	High-efficiency III-V triple junction solar cells and silicon solar	7th Korea Si PV Workshop, Busan, Korea (招待講演)	2016/11

			cells		
64	山口真史	豊田工大	次世代太陽電池の高効率化の可能性	2016年度 応用物理学会「多元系化合物・太陽電池研究会」年末講演会、福島県郡山市(招待講演)	2016/12
65	山口真史、 Kan-Hua Lee、 荒木建次、 小島信晃	豊田工大	次世代太陽電池の高効率化に関する考察	電子情報通信学会「電子デバイス研究会/シリコン材料・デバイス研究会共催」北海道札幌市	2017/02
66	M. Yamaguchi, H. Yamada, Y. Katsumata	豊田工大	Efficiency Potential and Recent Activities of High Efficiency and Si Tandem Solar Cells	2017 MRS Spring Meeting & Exhibit (招待講演)	2017/04
67	M. Yamaguchi, K. Lee, K. Araki, N. Kojima	豊田工大	Efficiency Potential of Future Generation Solar Cells	E-MRS 2017 Spring Meeting	2017/05
68	Y. Wang, K. Araki, K. Nakamura, K. Lee, T. Kamioka, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Enhancement of Si Photovoltaic Module by Introducing III-V/Si Hybrid Configurations and Cost Evaluations under Various Cost Ratios of III-V/Si Photovoltaics	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (44th IEEE PVSC)	2017/06
69	Y. Wang, A. Yamamoto, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Molecular-beam epitaxy grown GaAs on Si substrate with a GaAs buffer layer grown by migration-enhanced epitaxy	第14回次世代の太陽光発電システムシンポジウム	2017/07
70	M. Yamaguchi, L. Zhu, H. Akiyama, Y. Kanemitsu, H. Tampo, H. Shibata, K. Lee, K. Araki, N. Kojima	豊田工大	Analysis for Future Generation Solar Cells and Materials	2017 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2017)	2017/09
71	M. Yamaguchi, H. Yamada, Y. Katsumata	豊田工大	Analysis for Efficiency Potential of High Efficiency Solar Cells	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2017)	2017/09
72	N. Kojima, L. Wang, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Novel Epitaxial GaAs Lift-Off Approach via van der Waals Interface in In ₂ Se ₃ Buffer Layer	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2017) <ポスターアワード受賞>	2017/09
73	N. Kojima, L. Wang, Y. Ohshita,	豊田工大	SINGLE DOMAIN GROWTH OF LAYERED In ₂ Se ₃ ON Si(111) AS AN	The 27th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11

	M. Yamaguchi		INTERMEDIATE BUFFER LAYER IN GaAs ON Si	(PVSEC-27)	
74	Y. Wang, O. Elleuch, A. Yamamoto, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	GALLIUM ARSENIDE ON SILICON WITH A LOW-TEMPERATURE BUFFER LAYER GROWN BY MIGRATION-ENHANCED EPITAXY	The 27th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27)	2017/11
75	山口真史	豊田工大	Si タンデム太陽電池の高効率化の可能性と研究開発動向	学振第 175 委員会 次世代シリコン太陽電池分科会 超高効率太陽電池分科会合同研究会 (招待講演)	2017/12
76	N. Kojima, Y. Wang, K. Kawakatsu, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	XRD Pole Figure Analysis of In ₂ Se ₃ Zinc-Blende Like (ZBL) Van der Waals Template for Epitaxial GaAs Lift Off	World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7)	2018/06
77	Y. Wang, A. Yamamoto, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Low-Temperature Grown Gallium Arsenide on Silicon by Using Migration-Enhanced Epitaxy	World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7)	2018/06
78	川勝 桂, Yu-Cian Wang, 小島信晃, 大下祥雄, 山口真史	豊田工大	層状化合物 In ₂ Se ₃ エピタキシャル膜の双晶ドメイン評価	第 15 回次世代の太陽光発電システムシンポジウム	2018/07
79	Y. Wang, N. Kojima, K. Kawakatsu, A. Yamamoto, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Mechanical epitaxial lift off of GaAs epitaxial layers by using cleavage of In ₂ Se ₃ layered structures	第 15 回次世代の太陽光発電システムシンポジウム	2018/07
80	Y. Wang, N. Kojima, K. Kawakatsu, A. Yamamoto, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	GaAs Epitaxial Layers Grown on Ga ₂ Se ₃ /In ₂ Se ₃ for Epitaxial Lift-off by Using Cleavage of α -In ₂ Se ₃ Layered Structures	The 7th Korea-Japan Joint Seminar on PV	2018/11
81	M. Yamaguchi, K. Lee, K. Araki, N. Kojima	豊田工大	Overview for Efficiency Potential of Solar Cells	The 7th Korea-Japan Joint Seminar on PV	2018/11
82	N. Kojima, Y. Wang, K. Kawakatsu, A. Yamamoto, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Epitaxial GaAs Lift Off via III-VI Layered Compounds	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC 46)	2019/06
83	Y. Wang, N. Kojima, K. Kawakatsu, A. Yamamoto, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	GaAs grown on Si (111) by inserting metal selenides films	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC 46)	2019/06

84	川勝桂、 Yu-Cian Wang、 小島信晃、 大下祥雄、 山口真史	豊田工大	Si (111) 微傾斜基板上 2D-In ₂ Se ₃ 成膜に基板オフ方向が与える影響	第 16 回次世代の太陽光発電システムシンポジウム	2019/7
85	Y. Wang, N. Kojima, A. Yamamoto, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Improved GaAs quality on 4° vicinal Si(111) with metallic selenides buffers by annealing GaAs at the initial growth	第 16 回次世代の太陽光発電システムシンポジウム	2019/07
86	小島信晃、 Wang Yu-Cian、 川勝桂、 山本嵩勇、 大下祥雄、 山口真史	豊田工大	2D-In ₂ Se ₃ を利用した Si (111) 上 GaAs エピ層の薄層剥離	2019 年第 80 回応用物理学会秋季学術講演会	2019/09
87	Y. Wang, N. Kojima, K. Kawakatsu, A. Yamamoto, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Metallic selenides as the buffers for GaAs grown on Si (111)	2019 年第 80 回応用物理学会秋季学術講演会	2019/09
88	川勝桂、 Yu-Cian Wang、 小島信晃、 大下祥雄、 山口真史	豊田工大	Si (111) 微傾斜基板のオフ方向が 2D-In ₂ Se ₃ 薄膜の結晶方位に与える影響	2019 年第 80 回応用物理学会秋季学術講演会	2019/09
89	N. Kojima, Y. Wang, K. Kawakatsu, A. Yamamoto, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Heat-resistant 2D-metal Selenides as a Mechanical Cleavage Layer for the GaAs Lift-off	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-29)	2019/11
90	K. Kawakatsu, Y. Wang, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Effect of the off-cut Direction of Si(111) Substrate on 2D-In ₂ Se ₃ Twin Formation as a Mechanical Cleavage Layer for the GaAs Lift-off	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-29)	2019/11
91	Y. Wang, N. Kojima, K. Kawakatsu, A. Yamamoto, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Multi-step Growth of GaAs on 4° Vicinal Si (111) with Metallic Selenide Buffers	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-29)	2019/11
92	A. Ubukata, H. Sodabanlu, K. Watanabe, S. Koseki, Y. Yano, T. Tabuchi, T. Sugaya, K. Matsumoto, Y. Nakano, and M. Sugiyama	大陽日酸 (株)、 東京大学、 産業技術総 合研究所	Extremely Rapid GaAs Growth by MOVPE for Low-Cost PV Applications	18th US Workshop on Organometallic Vapor Phase Epitaxy (OMVPE-18), Santa Fe, USA	2017/07

93	生方映徳、 相原健人、 ソダーバンル ハッサネット 大島隆治、 菅谷武芳、 小関修一、 矢野良樹、 田淵俊也、 松本功、 中野義昭、 杉山正和	大陽日酸 (株)、産業 技術総合 研究所、 東京大学	高速成長 GaAs の低 温フォトルミネセン ス特性	第 65 回応用物理学 会春季学術講演会	2018/03
94	A. Ubukata, T. Aihara, H. Sodabanlu, R. Oshima, T. Sugaya, K. Watanabe, S. Koseki, Y. Yano, Y. Nakano, M. Sugiyama	大陽日酸 (株)、産業技術 総合研究 所、 東京大学	MOVPE の歩留まりお よび太陽電池応用 GaAs の高速成長の検 討	19 th -Int. Conf. Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE)- XIX	2018/06
95	生方映徳、 相原健人、 ソダーバンル ハッサネット 大島隆治、 菅谷武芳、 矢野良樹、 田淵俊也、 松本功、 渡辺健太郎、 中野義昭、 杉山正和	大陽日酸 (株)、産業技術 総合研究 所、 東京大学	GaAs 太陽電池構造の 超高速成長	学振 175 委員会	2018/07
96	生方映徳、 相原健人、 ソダーバンル ハッサネット 大島隆治、 菅谷武芳、 渡辺健太郎、 小関修一、 矢野良樹、 田淵俊也、 松本功、 中野義昭、 杉山正和	大陽日酸 (株)、産業技術 総合研究 所、 東京大学	超高速成長 GaAs の 低温フォトルミネセ ンス特性	第 79 回応用物理学 会秋季学術講演会	2018/09
97	生方映徳、 ソダーバンル ハッサネット 相原健人、 大島隆治、 渡辺健太郎、 小関修一、 菅谷武芳、 松本功、 中野義昭、 杉山正和	大陽日酸 (株)、東京大 学、 産業技術 総合研究 所	Extremely rapid Growth of GaAs and P-based materials by MOVPE for low-cost PV applications	電子材料シンポジウ ム	2018/10

98	生方映徳、 菅谷武芳、 大島隆治、 牧田紀久夫、 庄司靖、 小関修一	大陽日酸 ㈱、 産業技術 総合研究 所	GaAs および InGaP 太 陽電池の高速成長	175 委員会	2019/07
99	生方映徳、 大島隆治、 庄司靖、 牧田紀久夫、 ソダーバナル ハッサネット 渡辺健太郎、 小関修一、 菅谷武芳、 松本功、 中野義昭、 杉山正和	大陽日酸 ㈱、 東京大 学、産業 技術総合 研究所	Comparison of growth method of III-V compounds for low-cost III-V compound semiconductor PV applications	電子材料シンポジウ ム	2019/10
100	大島隆治、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 大陽日酸㈱	Fabrication of p-i-n GaAs solar cells grown by hydride vapor phase epitaxy	第 64 回応用物理学会春季 学術講演会	2017/03
101	R. Oshima, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸㈱	Characterization of GaAs solar cells grown by hydride vapor phase epitaxy in a horizontal reactor	IEEE photovoltaics specialist conference 44	2017/06
102	菅谷武芳	産業技術総 合研究所	スマートスタックと HVPE による低コスト多接合太 陽電池の研究開発	学振 175 委員会超高効率 太陽電池分科会	2017/07
103	大島隆治、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 大陽日酸㈱	ハイドライド気相成長法 による低コスト GaAs 太陽 電池の作製	第 14 回「次世代の太陽光 発電システム」シンポジ ウム	2017/07
104	大島隆治、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 大陽日酸㈱	HVPE 法を用いた低コスト III-V 族太陽電池の高均一 成長	第 78 回応用物理学会秋季 学術講演会	2017/09
105	R. Oshima, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸㈱	Fabrication of GaAs solar cells grown with InGaP window layers by hydride vapor phase epitaxy	The 27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
106	K. Makita, R. Oshima, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸㈱	Fabrication of InGaP Solar Cells with Hydride Vapor Phase Epitaxy	The 27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
107	R. Oshima, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸㈱	A comparison of HVPE and MBE growth technologies for GaAs solar cell structures	2018 MRS Spring meeting	2018/04
108	R. Oshima, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸㈱	Improvement of heterointerface properties of GaAs solar cells grown with InGaP layers by hydride vapor-phase epitaxy	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	2018/06

109	大島隆治、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	HVPE 法で作製した GaAs 太陽電池のヘテロ界面品 質の向上	第 15 回「次世代の太陽光 発電システム」シンポジ ウム	2018/07
110	大島隆治、 庄司靖、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	HVPE 法を用いた GaAs 太 陽電池のヘテロ界面の検 討	第 79 回応用物理学会秋季 学術講演会	2018/09
111	庄司靖、 大島隆治、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	ハイドライド気相成長法 による InGaP 太陽電池の 高速成長	第 79 回応用物理学会秋季 学術講演会	2018/09
112	庄司靖、 大島隆治、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	HVPE 法を用いた InGaP 結 晶の超高速成長と太陽電 池応用	第 1 回結晶工学×ISYSE 合同研究会	2018/11
113	庄司靖、 大島隆治、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	HVPE 法における InGaP 結 晶の成長速度の高速化	第 66 回応用物理学会春季 学術講演会	2019/03
114	大島隆治、 庄司靖、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	HVPE 法によるトンネル接 合に向けた高濃度ドーピ ングの検討	第 66 回応用物理学会春季 学術講演会	2019/03
115	R. Oshima, Y. Shoji, K. Makita, A. Ubukata, T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	Observation of dislocations in graded buffer layers of IMM single junction InGaAs solar cells by two- photon excitation photoluminescence	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2019/06
116	大島隆治、 庄司靖、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	HVPE 法で作製した InGaP/GaAs 2 接合太陽電 池	第 16 回「次世代の太陽光 発電システム」シンポジ ウム	2019/07
117	庄司靖、 大島隆治、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	HVPE 法による InGaP 太陽 電池の作製と AlInGaP の 成膜検討	第 16 回「次世代の太陽光 発電システム」シンポジ ウム	2019/07
118	Y. Shoji, R. Oshima, K. Makita, A. Ubukata, T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	Influence of growth interruption on InGaP grown by hydride vapor phase epitaxy	The 19th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy	2019/07
119	T. Sugaya	産業技術総 合研究所	招待講演: High speed growth of III-V materials using MOVPE and HVPE for low cost photovoltaics	The 19th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy	2019/08

120	R. Oshima, Y. Shoji, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総合研究所、 大陽日酸(株)	Evaluation of GaAs solar cells grown with different growth regimes by hydride vapor phase epitaxy	The 19th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy	2019/08
121	R. Oshima, Y. Shoji, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総合研究所、 大陽日酸(株)	招待講演：Recent progress on HVPE-grown III-V solar cells with extremely high growth rates	2019 International Conference on Solid State Devices and Materials	2019/09
122	T. Aihara, T. Tayagaki, R. Oshima, Y. Shoji, T. Sugaya	産業技術総合研究所	Characterization of subcell open-circuit voltages in InGaP/GaAs tandem solar cells fabricated using hydride vapor phase epitaxy	2019 International Conference on Solid State Devices and Materials	2019/09
123	大島隆治、 庄司靖、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総合研究所、 大陽日酸(株)	HVPE 法を用いた GaAs の超高速成長	第 80 回応用物理学会秋季学術講演会	2019/09
124	庄司靖、 大島隆治、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総合研究所、 大陽日酸(株)	HVPE 法における AlInGaP のエピタキシャル成長	第 80 回応用物理学会秋季学術講演会	2019/09
125	庄司靖、 大島隆治、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総合研究所、 大陽日酸(株)	InGaP solar cells grown by hydride vapor phase epitaxy for application to low-cost high-efficiency photovoltaics	第 38 回電子材料シンポジウム	2019/10
126	菅谷武芳	産業技術総合研究所	依頼講演：太陽光発電の国内外における状況と今後の研究開発について	電気学会東京支部茨城支所	2019/10
127	Y. Shoji, R. Oshima, T. Aihara, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総合研究所、 大陽日酸(株)	Growth of AlInGaP by hydride vapor phase epitaxy using AlCl ₃ for application to InGaP solar cells	The 29th International PV Science and Engineering Conference	2019/11
128	T. Sugaya, R. Oshima, Y. Shoji, K. Makita, A. Ubukata	産業技術総合研究所、 大陽日酸(株)	High-speed growth of III-V materials by HVPE for low-cost smart stacked multijunction solar cells	2019 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS)	2019/12
129	大島隆治、 相原健人、 太野垣健、 庄司靖、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総合研究所、 大陽日酸(株)	HVPE 法を用いた 2 接合セルの EL 発光による開放電圧解析	第 67 回応用物理学会春季学術講演会	2020/03
130	庄司靖、 大島隆治、 牧田紀久夫、	産業技術総合研究所、 大陽日酸(株)	HVPE 法による AlAs の結晶成長および ELO の実証	第 67 回応用物理学会春季学術講演会	2020/03

	生方映徳、 菅谷武芳				
131	Y. Shoji, R. Oshima, K. Makita, A. Ubukata, T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	Epitaxial Lift-Off of the Single-Junction GaAs Solar Cells Grown via Hydride Vapor Phase Epitaxy	47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2020/06
132	徳田、鈴木、 福山、碓、他	宮崎大学	表面光起電力法を用いた GaAs/Si 太陽電池におけ るバッファ層の評価	第 12 回「次世代の太陽光 発電システム」シンポジ ウム	2015/05
133	原田、鈴木、 福山	宮崎大学	MBE 法による Si (11L) 基板 上の GaAs 成長と結晶性評 価	第 45 回結晶成長国内会議	2015/10
134	奥谷、鈴木、 福山、碓、他	宮崎大学	MBE 法を用いて高指数 Si (11L) 基板上に作製した GaAs の結晶評価	第 13 回「次世代の太陽光 発電システム」シンポジ ウム	2016/05
135	I. Harada H. Suzuk, T. Ikari, A. Fukuyama	Univ. Miyazaki	Crystal Growth of GaAs on High indexed Si Substrates for Multi- Junction Solar Cells	PVSC43	2016/05
136	H. Suzuki, T. Ikari, A. Fukuyama, et al.	Univ. Miyazaki	The influence of substrate orientation on strain relaxation mechanisms of InGaAs layer grown on vicinal GaAs substrates measured by in situ X- ray diffraction	PVSEC-26	2016/10
137	Yu-Cian Wang, H. Suzuki, M. Yamaguchi et al.	Toyota Tech. Inst. Univ Miyazaki	Selective-area growth of GaAs on patterned Si substrates by using chemical beam epitaxy	PVSEC-26	2016/10
138	H. Suzuki, T. Ikari, A. Fukuyama, et al.	Univ. Miyazaki	Ge thin film growth on Si (001) substrates using tBGe for buffer layer of GaAs/Si structure	7 th JSPS Si symposium	2016/11
139	河野将大, 鈴木秀俊等	宮崎大学	新規 Ge 原料 t-C ₄ H ₉ GeH ₃ の Si もしくは GaAs 基板上 における表面反応過程	2016 年真空・表面科学合 同講演会	2016/11
140	戒能賢治, 碓哲雄, 福山敦彦, 鈴木秀俊等	宮崎大学	Si 基板上 GaAs 薄膜のレ ーザーアニールによる結 晶性への影響	第 64 回応用物理学会春季 学術講演会	2017/03
141	奥谷哲, 碓哲雄, 福山敦彦, 鈴木 秀俊等	宮崎大学	MBE 法を用いて作製した Ga 事前供給 GaAs on Si (113) の結晶性の評価	第 64 回応用物理学会春季 学術講演会	2017/03
142	H. Suzuki, et al.	Univ. Miyazaki	In-situ observation of lattice relaxation processes by X-ray diffraction during GaAsSb/GaAs (001) growth	2017 EMRS Spring meeting	2017/05

143	秋田裕紀, 鈴木 秀俊等	Univ. Miyazaki	tBGe を用いたパルスジェ ットエピタキシー装置に よる Si(001) 基板上への Ge 薄膜の成長	第 78 回応用物理学会秋季 学術講演会	2017/09
144	T. Okuya, T. Ikari, A. Fukuyama, H. Suzuki, et al.	Univ. Miyazaki	THE EFFECTS OF Ga PRE- EVAPORATION ON THE CRYSTAL QUALITY OF GaAs THIN FILM GROWN ON Si (113) BY MOLECULAR BEAM EPITAXY	PVSEC-27	2017/11
145	K. Kaino, T. Ikari, A. Fukuyama, H. Suzuki, et al.	Univ. Miyazaki	INFLUENCE OF LASER ANNEALING ON CRYSTAL QUALITY OF GaAs THIN FILMS GROWN ON SI (001) SUBSTRATE”	PVSEC-27	2017/11
146	M. Kawano, Y. Ohshita, H. Suzuki, et al.	Univ. Miyazaki, Toyota Tech. Inst.	SURFACE REACTION PROCESS OF GE THIN FILM ON Si AND GaAs SUBSTRATE BY PULSED-JET EPITAXY APPARATUS	PVSEC-27	2017/11
147	H. Suzuki, O. Elleuch, Y. Wang, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi, et al.	Univ. Miyazaki, Toyota Teck. Inst.	FFECTS OF GE BUFFER LAYER PREPARED BY PULSE-JET EPITAXY ON CRYSTAL QUALITY OF GAAS FILM GROWN ON SI (001) SUBSTRATE	PVSEC-27	2017/11
148	金子翔一、 鈴木秀俊等	宮崎大学	低温成長させた Si(001) 基板上 GaAs の結晶性に対 するレーザーアニールの 影響	第 46 回結晶成長国内会議	2017/11

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	大陽日酸 株式会社	「高性能・高信頼性太陽光発電の 発電コスト低減技術開発」の受託 並びに研究開始のお知らせ	大陽日酸㈱株式会社 ホームページ http://www.mocvd.jp/jp/common/pdf/20170116.pdf	2017/1/16
2	産業技術 総合研究 所	ガリヒ素太陽電池 安価な材料で製 造 HVPE 装置開発	化学工業日報、B 版 1 面	2017/06
3	産業技術 総合研究 所	高効率 GaAs 太陽電池 低コスト製 造装置開発	日刊産業新聞、朝刊 11 面	2017/06
4	産業技術 総合研究 所	効率 20.3% の「ガリヒ素太陽電 池」を低コストで製造	日本経済新聞電子版	2017/06
5	産業技術 総合研究 所	「成膜のコストを 10 分の 1 に」 GaAs 太陽電池の普及へ、低コスト な製造法を開発	Yahoo! ニュース	2017/06
6	産業技術 総合研究 所	成膜のコストを 10 分の 1 に」 GaAs 太陽電池の普及へ、低コスト な製造法を開発	スマートジャパン	2017/06
7	産業技術 総合研究	高効率太陽電池、用途広く 低コ スト製造装置、日経産業新聞	朝刊 15 面	2017/06

	所			
8	産業技術 総合研究 所	ガリウムヒ素系化合物半導体太陽 電池の低コスト成長技術	次世代の太陽電池・太陽光発電—その 発電効率向上, 用途と市場の可能性 —、技術情報協会、pp. 166-175.	2018/04
9	産業技術 総合研究 所	化合物半導体の高速成長と太陽電 池応用	応用物理、vol. 89, No. 6 pp. 333～ 337.	2020/06

【その他】

	年度	タイトル	受賞者	受賞年月
1	2016	ポスターアワード (26 th PVSEC 薄膜太陽電池部 門)	豊田工大	2016/10/28
2	2017	ポスターアワード (33 rd EU PVSEC - Concentrator and Space Photovoltaics-)	豊田工大	2017/9/29
3	2017	第6回結晶工学未来塾(2017)奨励賞(応用物理 学会 結晶工学分科会)	相原健人、産業技 術総合研究所	2017/11/2
4	2018	第一回結晶工学×ISYSE 合同研究会奨励賞	庄司靖、産業技術 総合研究所	2018/11/29
5	2018	応用物理学会講演奨励賞	庄司靖、産業技術 総合研究所	2019/3/9

C 低コストモジュール開発（シャープ株式会社、豊田工業大学、パナソニック株式会社、宮崎大学）

1. 成果詳細

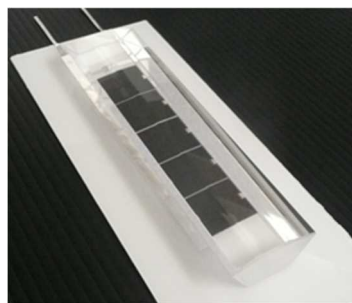
Ⅲ-2-(ロ)-C-1-a1. 低コストモジュール開発【シャープ】

本テーマでは、「A 低コストセル技術開発」および「B 低コスト化プロセス技術開発」で開発する低コスト化合物太陽電池セル技術を用い、モジュール効率 30%超で、将来の発電コスト目標（7 円/kWh@2030 年）達成に寄与し得るモジュール技術の開発に取り組んだ。

開発は化合物 3 接合型セルを用いた低倍集光モジュールと、本委託業務のテーマ A で開発した InGaP/GaAs₂ 接合セルとシリコンセルとを機械的に接合したメカニカルスタックセルを用いたメカニカルスタックモジュールの 2 種について実施した。

低倍集光モジュールは設定目標の許容角±15° で約 1.9 倍の発電量を得ることができた。

メカニカルスタックモジュールについては、テーマ A で開発したセル構造を基本とした 4 端子構造とした。また、上段の化合物 2 接合型セルはテーマ B で開発した基板再利用法を使用して作製したものを使用した。結果、化合物 2 接合セルの変換効率が 25.3%、シリコンセルの効率が 5.4%となり、モジュール合計では、30.7%を得た。（いずれも自社測定値。モジュールを上面視した時に化合物 2 接合セルまたはシリコンセルもしくはその両方が配置されている部分の外周域を受光部面積として計算した値）。これらのモジュールは屋外評価発電量測定を実施し発電量の試算を行った。



	レンズあり	レンズなし
Voc [V]	3.06	3.01
Isc [A]	0.542	0.277
FF	0.806	0.825
Pmax [W]	1.337	0.689

図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-a1-1 低倍集光モジュールの外観（左）、電気特性（右）



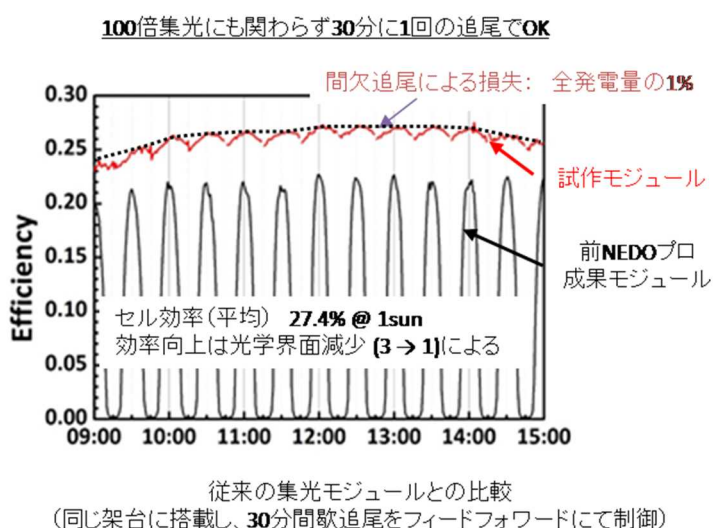
	化合物2接合モジュール		シリコンモジュール	メカニカルスタックモジュール
	ストリング1	ストリング2		
Voc [V]	9.68	9.68	0.70	—
Isc [A]	0.39	0.38	2.40	—
FF	0.83	0.83	0.78	—
Pm [W]	3.11	3.04	1.31	7.46
Eff [%]	12.8	12.5	5.4	30.7

図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-a1-2 メカニカルスタックモジュール外観（左）、電気特性（右）

Ⅲ-2-(ロ)-C-1-a2 低コストモジュール開発【豊田工大】

現状で高コストなⅢ-Vセルを低コスト化するには、集光によりセルの使用量（面積）を減らす必要がある。一方、集光することにより開口角が必然的に減るため、これを抑制するために広角化技術が重要となる。大幅な広角化が実現できれば、低コスト追尾架台の粗い追尾でも動作できるモジュールが可能

となる。そこで、15～30秒毎の追尾が必要であった従来技術に対し、二桁以上粗い15分～30分間隔でも動作する広角設計光学系を用いた低コスト集光モジュールの開発を実施した。開発した集光モジュールの光学系は(1)集光部、(2)ホモジナイザ一部からなり、誘電体の一体化構造となっている。誘電体レンズの屈折率により追尾ずれに伴うスポットの移動距離を低減し、ホモジナイザ部の多重反射による混合作用で、どこにスポットが入射しても、出口にて一様な強度および色収差補正が可能となった。試作したモジュール(単眼モジュール)は屋外(宮崎大学)で実証試験した。モジュール効率は、屋外測定にて28.5%の高効率を得られた。比較のために、同じく凸型のレンズを持っている単眼の集光モジュールも同じ追尾面に搭載し、特性を比較した。30分ごとの間歇追尾動作での発電特性を検証した結果を図III-2-(ロ)-C-1-a2-1に示す。間歇追尾を行うと従来型の集光モジュールは発電量が大幅に低下するが、許容入射角を拡大した広角設計光学系を用いた本モジュールでは発電量の低下は1%とごく僅かであった。



図III-2-(ロ)-C-1-a2-1 30分ごとの間歇追尾動作での発電特性を検証した結果

広角集光レンズの設計技術を活用し、無追尾集光モジュールの開発を実施した。あらかじめ設定した許容入射角の光線がセルのエッジに照射する条件から、レンズ高さを初期値として定めた。このレンズ高さは従来型よりも大幅に低くなった。また、無追尾の固定設置を考えると、例えば真南傾斜面に設置した場合、年間積算日射量は、真上からよりも、30°程度斜めに入射する太陽光成分の方がむしろ大きい。そこで、セルに入射する光束を最大化するレンズ形状を最適値問題として求める手法をとった。設計検証の最終試作として2種類のミニモジュールを試作した。一つは効率志向タイプ(Design A)で、許容入射角は±55°とやや狭く設計し、光軸上での発電効率が高くなるように設計している。もう一つは広角・曲面对応タイプ(Design B)で、光軸上の効率を落としつつ、斜めから入射した太陽光に対し高い発電効率となるように設計している(許容入射角±77°)。両者の外観を図III-2-(ロ)-C-1-a2-2に、入射角特性(設計値)を図III-2-(ロ)-C-1-a2-3に示す。モジュール効率は、効率指向型設計(Design A)にて32.84%(産総研測定)が得られ、最終目標30%を達成した。年間光学的効率をシミュレーションして、今回試作した無追尾低倍集光モジュールと非集光平板モジュールを比較した結果を表III-2-(ロ)-C-1-a2-1に示す。設置面によって年間日射量は異なる入射角分布を示すが、本モジュールは設置形態によらず約80%の年間光学的効率を得られ、平板モジュールに対する比率もほぼ一定(0.84)であった。こ

これは、集光によりセル使用量が 1/1.76 (57%) になったにも関わらず、同じセルを用いた平板モジュールの 84%の性能を維持できることを示している。

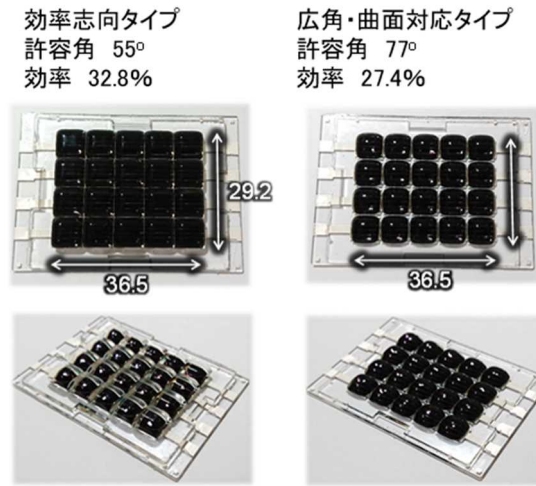


図 III-2-(ロ)-C-1-a2-2 試作した無追尾集光モジュールの外観

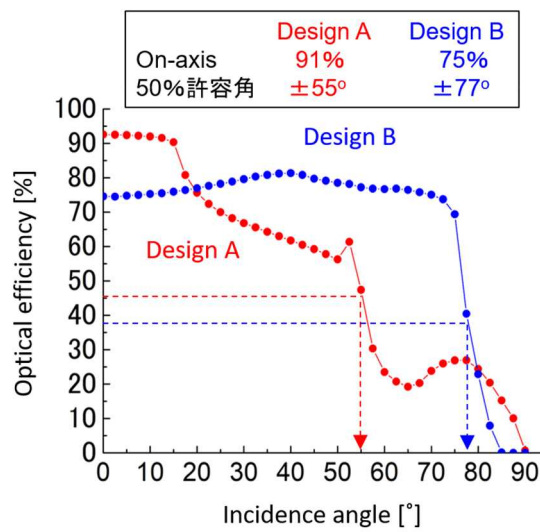


図 III-2-(ロ)-C-1-a2-3 試作した無追尾集光モジュールの入射角特性 (設計値)

表Ⅲ-2-(ロ)-C-1-a2-1 無追尾集光モジュールの各設置モードでの年間発電量(平板比)

	低倍集光 CPV [%]	平板 PV [%]	低倍集光/平板 [-]
車載面 (地面粗度は宮崎市並)	78.4	93.3	0.840
全国最適傾斜面 (南向き設置)	78.8	93.8	0.840
ビル壁面 (8方位加重平均)	79.1	93.7	0.844
東西1軸水平追尾 (バックトラッキング)	80.2	94.8	0.846

無追尾低倍集光モジュールのコスト最適化を試算した結果、試作品よりもセルサイズを2割ほど小さくすることにより、セル単品のコストを差し引いたモジュール化コストは16円/Wになると算定された。中国市場での非集光平板モジュール化コスト12円/Wには及ばないが、提案当初の目標22円/Wはクリアした。セルコスト(非集光換算)が11円/W以上であれば、年間発電量から見ても無追尾低倍集光モジュールのコストメリットが出ると算定され、現行のⅢ-V系セルのコストはこれより1桁以上高いので、無追尾低倍集光モジュールはコストメリットの点で十分に魅力的であると判断できる。

さらに、上記広角集光モジュール技術はトヨタ自動車(車載モジュール製品開発)、パナソニック(プラスチック型集光発電システム製品開発)に技術移転した。

Ⅲ-2-(ロ)-C-1-a3. 低コストモジュール開発【パナソニック】

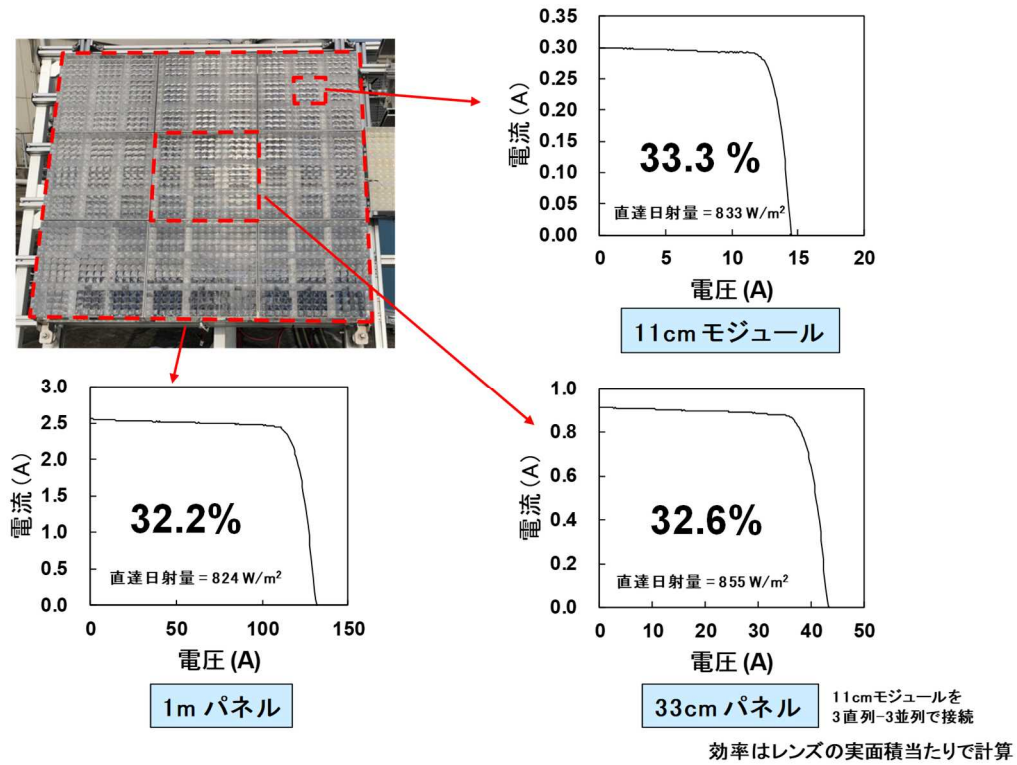
本研究開発では、超高効率発電素子の大きさを最適化し、構成部品のほとんどを低価格で軽量のプラスチック材料にすることで、材料コスト、重量、および体積を従来型CPVよりも約1桁低い、高効率なプラスチックレンズ一体型セルモジュール(Plastic lens integrated Ⅲ-V compound semiconductor cell module、略称PIC)の実現を目指してきた。この実現はモジュールの製造コスト低減に加えて、トラッカーや輸送・設置といったBOSコストの低減にも寄与し、発電コスト目標7円/kWhを達成できると考え、本研究成果でその実現の見通しを得た。以下に、研究開発成果を報告する。

(1) 高効率モジュール設計技術の成果

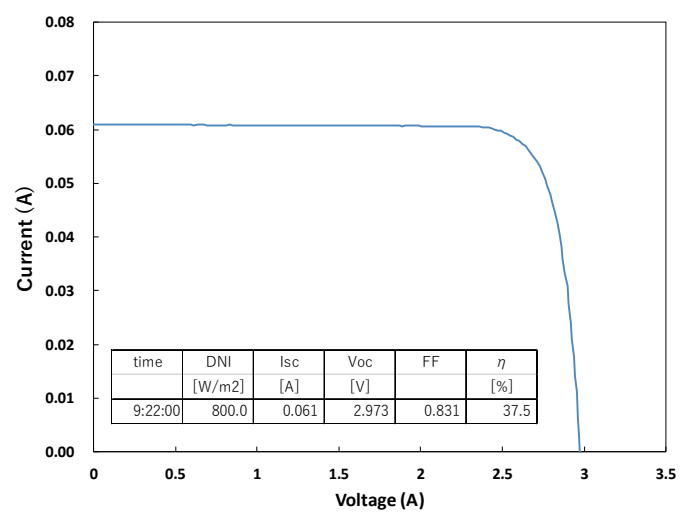
PIC製造プロセスの低コスト化と長期信頼性を確保したPICモジュール構造(薄ガラス回路基板構造)にて、1m角パネルを完成し、大阪門真市にて屋外効率32.2%を確認した。また、さらなる光学損失の向上を図るべく、上記構造から二次レンズを除去した改良構造にて、屋外効率37.5%を約2cm角のモノモジュールで確認した。

(2) 低コストアSEMBル技術の成果

上記改良構造にて、システムコスト試算(2030年、100MW/年生産)を行い、119円/W及び7円/kWh実現の見通しを得た。



図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-a3-1 PIC パネルの変換効率



図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-a3-2 2次レンズレス型モジュールの I-V 特性

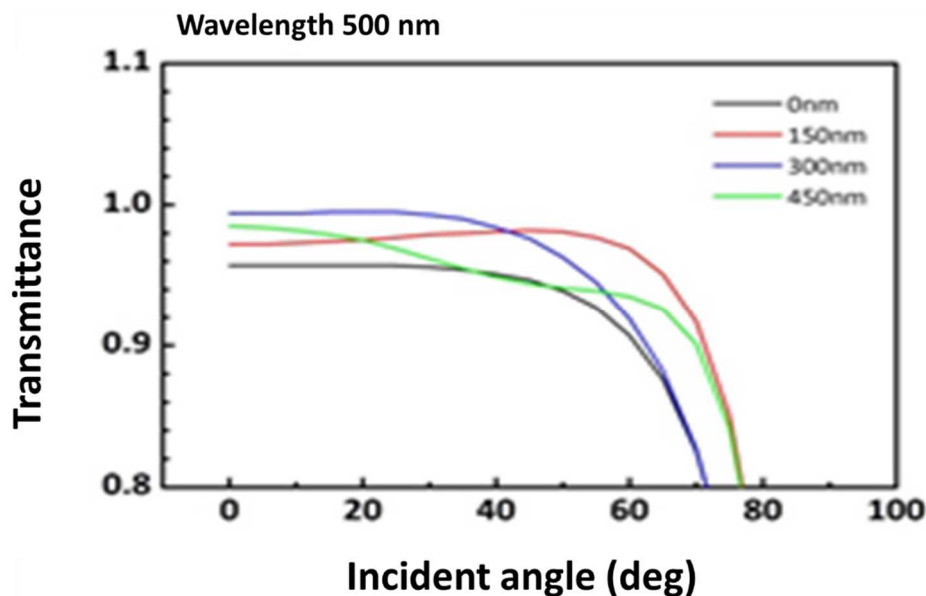
表Ⅲ-2-(ロ)-C-1-a3-1 PIC 太陽電池システムのコスト試算結果

	モジュール効率 (セル効率)	モジュール コスト(目標)	システム コスト(目標)	発電 コスト(目標)
2020年	38% (48%)	71.16円/W (< 80円/W)	177.84円/W (< 190円/W)	9.48円/kWh (< 14円/kWh)
2030年	48% (53%)	32.74円/W (< 40円/W)	118.57円/W (< 125円/W)	6.97円/kWh (< 7円/kWh)

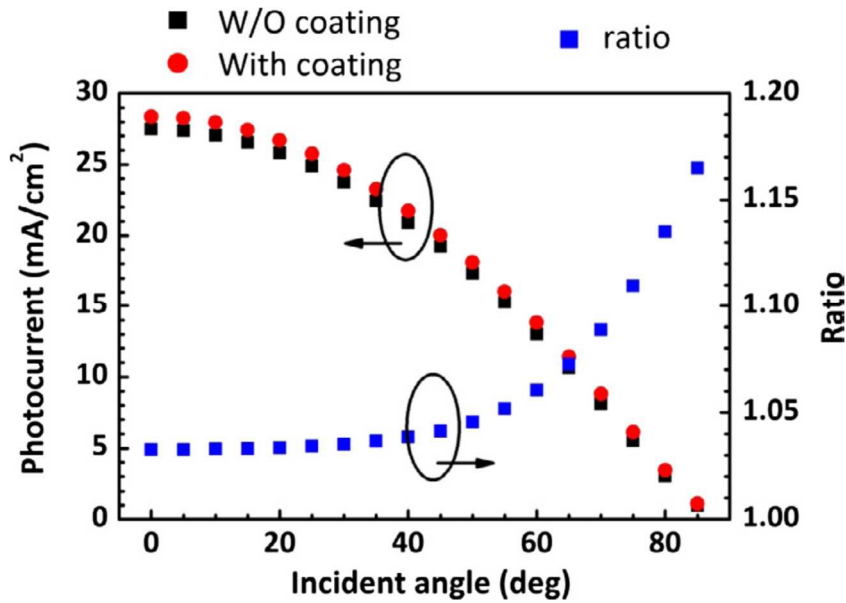
Ⅲ-2-(ロ)-C-1-a4. 低コストモジュール開発【宮崎大学】

シリカベース反射防止兼防汚コート of 反射防止効果について、特性方程式を用いたシミュレーションにより評価した。シミュレーションには反射防止兼防汚コートとガラス基板の屈折率の波長依存性を用いて透過率の計算を行い、Si 太陽電池の分光感度を用いて光電流の計算を行った。反射防止兼防汚コートの透過率は光の干渉により膜厚に依存した。図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-a4-1 に各膜厚における波長 500 nm における透過率の入射角度依存性を示す。150nm の反射防止兼防汚コートでは基板に高角度（基板に垂直方向を 0 度とする）から入射する光をより多く取り込むことが分かった。これは、屋外評価において入射角度が増加する朝および夕の発電量が増加することと一致した。図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-a4-2 に、光の入射角度と、コート塗工有りおよび無しの太陽電池における電流シミュレーション値の関係を示す。左縦軸が電流値、右縦軸がコートした太陽電池の電流値をコートしていない太陽電池の電流値で除した値 (Ratio) を示す。斜めから入射した場合に Ratio が大きい値を示しコートの効果がより大きくなることがわかった。同様のシミュレーションをⅢ-V化合物半導体太陽電池モジュールに対して行い、最適膜厚の検討を行った。図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-a4-3 に、Ⅲ-V化合物半導体太陽電池を構成するトップサブセルとミドルサブセルで発生する光電流の反射防止兼防汚コート膜厚依存性を示す。Ⅲ-V化合物半導体太陽電池は構成するサブセルによって太陽光スペクトルの吸収領域が異なるため、各サブセルで発生する光電流が最大となる膜厚が異なった。取り出せる電流はサブセルで発生する光電流の最小値となるため、最適膜厚は 100nm であった。シリカベースコートは、透過率シミュレーションにより計算された最適膜厚を用いることで、Ⅲ-V化合物太陽電池モジュールの短絡電流が最大で 5.6%増加することが期待され、Ⅲ-V化合物太陽電池モジュール出力の増加に寄与する。

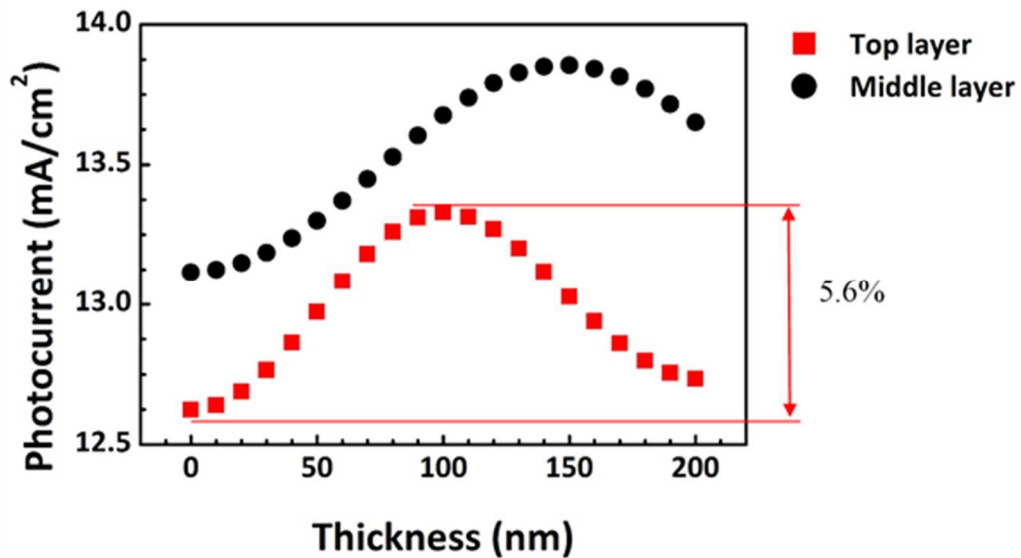
以上の成果より、反射防止コートは研究協力機関におけるモジュール構造に採用され、変換効率 30% を超えるモジュールが開発された。



図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-a4-1 各膜厚における透過率の入射角度依存性



図III-2-(ロ)-C-1-a4-2 光の入射角度とコート塗工有および無しの太陽電池における電流シミュレーション値の関係。左縦軸が電流値、右縦軸がコートした太陽電池の電流値をコートしていない太陽電池の電流値で除した値 (Ratio) を示す。



図III-2-(ロ)-C-1-a4-3 III-V化合物半導体太陽電池を構成するトップサブセルとミドルサブセルで発生する光電流の反射防止兼防汚コート膜厚依存性

III-2-(ロ)-C-1-b1. 低コストモジュール発電量試算、屋外評価【シャープ】

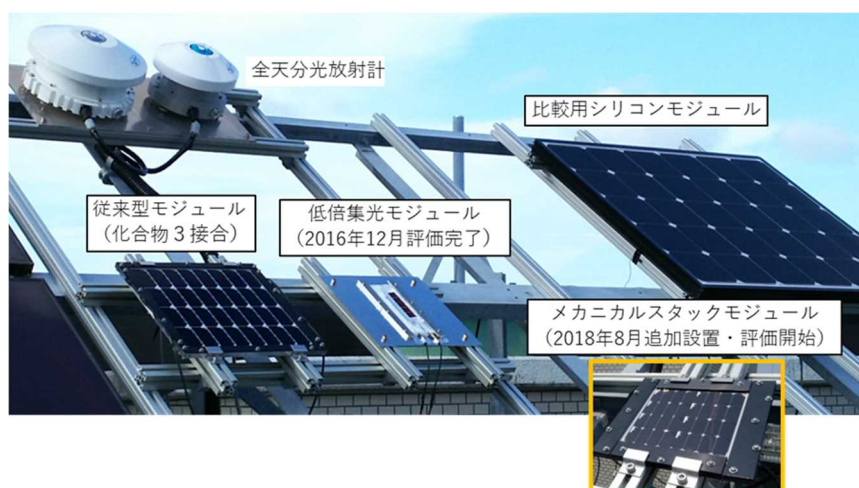
開発したモジュール（低倍集光モジュール、メカニカルスタックモジュール）に加えて、別途作製した化合物 3 接合型セルを用いたモジュール（化合物従来型モジュール）、市販のバックコンタクト型単結晶シリコンモジュール（シリコンモジュール）を使用した屋外発電量測定を実施した。

作製した化合物3接合型モジュールの変換効率は31.2%でモジュールとしては世界最高効率となった。（2016年5月発表当時、シャープおよびNEDO調べ）

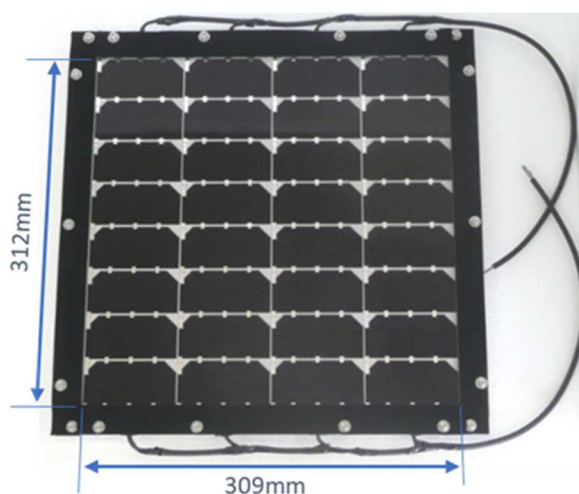
屋外での発電量測定の結果、評価期間全体での発電量はそれぞれシリコンモジュールと比較して化合物従来型モジュールは151%、メカニカルスタックモジュールは128%の結果を得た。なお、得られた発電量データは宮崎大学と共有し、該大学において実施した各種モジュールの発電量試算に用いた。

一方、太陽電池量産性の評価も本項で実施した。評価は化合物3接合型で実施し、約2500枚のエピウエハの作製、これらのセル化により評価した。結果、変換効率の平均は35.0%となり目標としていた34%を上回る結果となった。

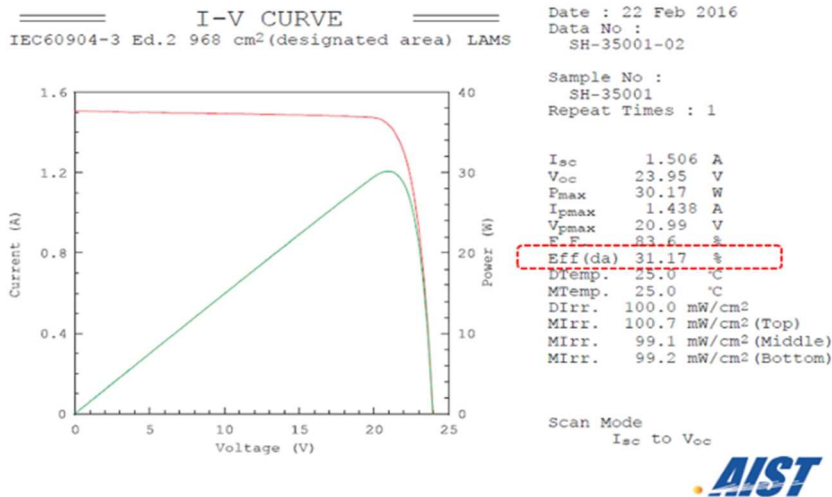
また、本項では太陽電池の新たな応用先として期待される移動体の動力用電源用途について、その可能性の検証、課題の確認、実使用状態での発電量等を検証するために市販車両に太陽電池を搭載して公道走行試験を実施した。なお、モジュールは前述した量産性評価に用いたセルを使用し作製した。また、車両の準備、改造、太陽電池モジュールの車両への取り付け、走行試験およびデータ収集は本委託事業に協力機関として参画のトヨタ自動車株式会社、日産自動車株式会社に依頼して実施した。トヨタ自動車では、プラグインハイブリッド車のプリウスPHVに約860W、日産自動車では電気自動車のe-NV200に約1150W搭載した。



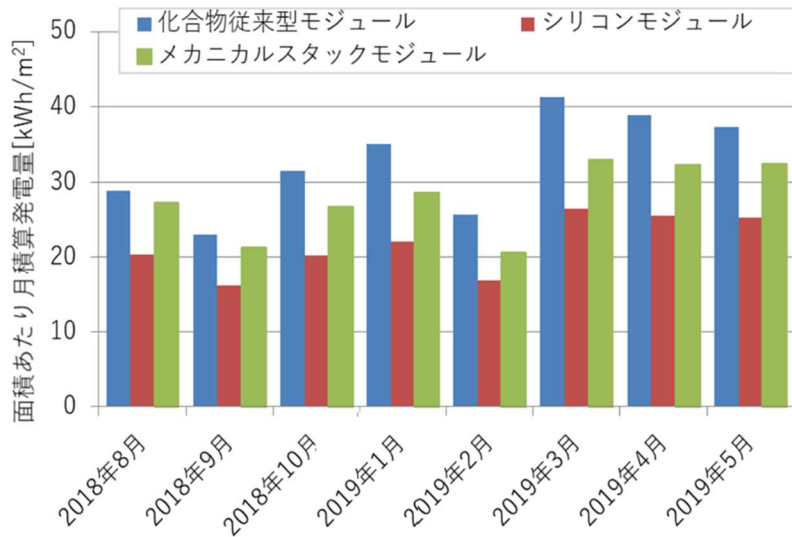
図III-2-(ロ)-C-1-b1-1 屋外評価テストサイトの様子（宮崎大学構内）



図III-2-(ロ)-C-1-b1-2 化合物3接合型モジュール外観



図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b1-3 化合物3接合型モジュール電気特性 (産総研測定)



図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b1-4 各モジュールの屋外発電量測定結果

表Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b1-1 各モジュールの屋外発電量比較

	モジュール面積あたり発電量	P/R
シリコンモジュール	173 kWh/m ² (100%)	0.94
従来型モジュール	262 kWh/m ² (151%)	0.88
メカニカルスタックモジュール	222 kWh/m ² (128%)	0.87
化合物2接合	161 kWh/m ² (93%)	-
シリコン	61 kWh/m ² (35%)	-

[表中()内の数字はシリコンモジュールに対する比率]

表Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b1-2 化合物3 接合型セルの量産性評価結果

	Voc (mV)	Isc (mA)	Pmax (mW)	FF	η (%)
Ave	2989.7	321.5	801.5	0.834	35.0
Min	2884.4	309.5	748.7	0.763	32.7
Max	3072.7	336.4	847.0	0.855	37.0
σ	22.2	3.6	13.4	0.014	0.58



図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b1-5 太陽電池搭載車両外観 (トヨタ プリウス PHV)

表Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b1-3 太陽電池搭載量 (トヨタ プリウス PHV)

	セル枚数	搭載容量 (W)
フード	288	211
ルーフ	576	422
バックドアウィンドウ	270	197
バックドアガーニッシュ	36	30
合計	1176	860



図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b1-6 太陽電池搭載車両外観 (日産 e-NV200)

表Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b1-4 太陽電池搭載量 (日産 e-NV200)

	セル枚数	搭載容量 (W)
フード	240	175
ルーフ	1056	790
リアゲート	256	185
合計	1552	1150

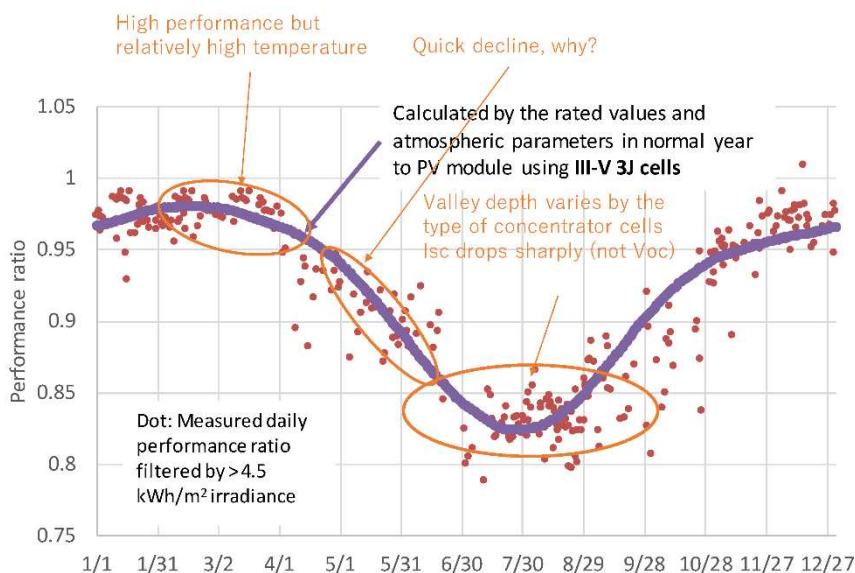
Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b2. 低コストモジュール発電量試算、屋外評価【豊田工大】

モジュールの発電コスト算定のためには正確な年間発電量のモデル化が必須である。しかしながら、多接合太陽電池ではスペクトルミスマッチングの影響により、従来型の発電モデルと乖離が大きい。そこで、多接合太陽電池および種々の設置モードで統一的に同じ基準で年間発電量を算定できるモデルを宮崎大学と共同で開発した。

スペクトルの正確な予測に加えて、非集光あるいは無追尾集光への応用を考えると、入射角度により直達光と散乱光の比率が大きく変化するため、スペクトルの角度依存性も重要となる。これらをモデルに組み込み、METPV-11 の日射・気象データを活用して、多接合セルモジュールの年間発電特性を計算した。大気パラメータ季節変動特性、および多接合セルモジュールの発電モデルを用いて、実際の多接合セルを使ったモジュールの年間発電特性を比較した結果を図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b2-1 に示す。多接合セルを用いたモジュールは従来の発電モデルでは説明できない季節変動特性を示すが、本モデルでの計算では再現することが可能となった。



PV module using 3J tandem cell
 Area: 983 cm²
 STC: 31.17%
 2016/08 - up to now



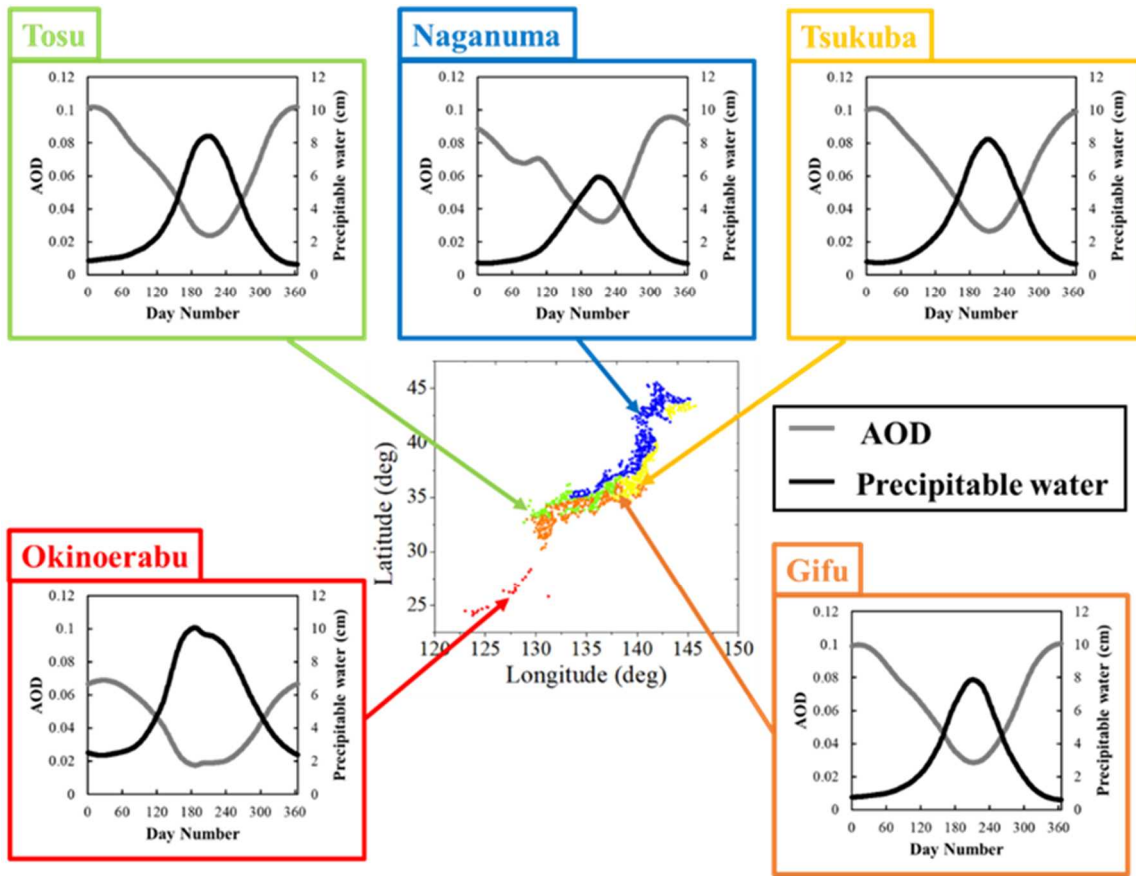
図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b2-1 大気パラメータ季節変動特性、および多接合セルモジュールの発電モデルを用いて、実際の多接合セルを使ったモジュールの年間発電特性を比較した結果

Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b3. 低コストモジュール発電量試算、屋外評価【宮崎大学】

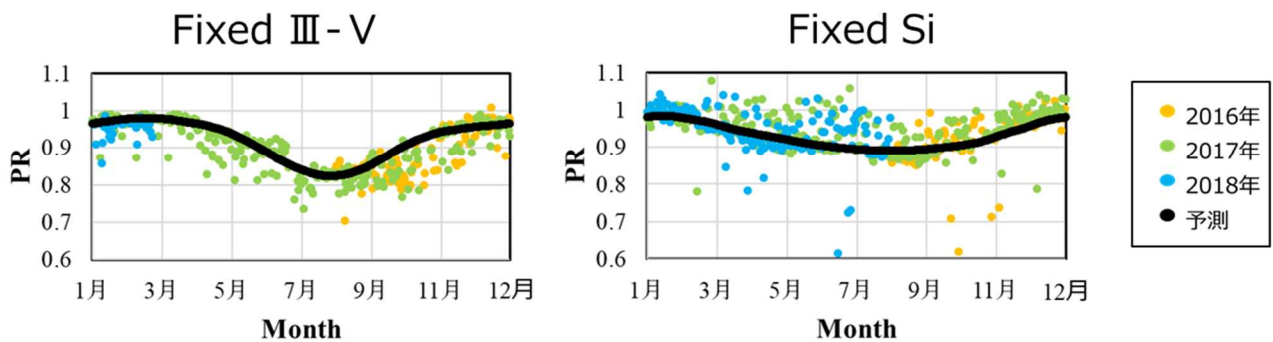
宮崎大学に設置している各種太陽電池の実動作データをもとに、日変動および年変動についても実測値と計算値が一致するようにパラメータを抽出し、発電量シミュレーションモデルを構築した。モデルでは、日射量、温度、スペクトル、入射角度特性を考慮し、精密なシミュレーションが可能となった。設置場所および方法などのサイト情報取得し、それに適応した METPV-11 の日射データおよび5日射気候区の大気パラメータ平年値を使用した。METPV-11 の日射データを用いて、直達および散乱、反射日射量をそれぞれ算出した。図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b3-1 に示す、5日射気候区の大気パラメータ変動平年値により、各地域におけるスペクトルを導出した。これらの過程を経て日射量・スペクトル合成し、さらに、温度補正、角度特性補正を考慮したモジュール特性を計算した。最後に365日24時間で出力(kW)を積算することで年間予測発電量(kWh)を算出した。この作業を日本全国837地点で行うことで太陽光発電ポテンシャルを表す年間予測発電量マップを作成した。

図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b3-2 に南向き傾斜設置したⅢ-V族3接合型太陽電池モジュールおよび単結晶Si太陽電池モジュールのPRの実測値および計算値の年変動を示す。季節により日射量、温度、スペクトル等、様々な動作環境が変化するが、それらを考慮したモデルを構築したことにより、実測値と計算値は精度よく一致した。構築したモデルをもとに日本の各地点における年間日射量を計算した。

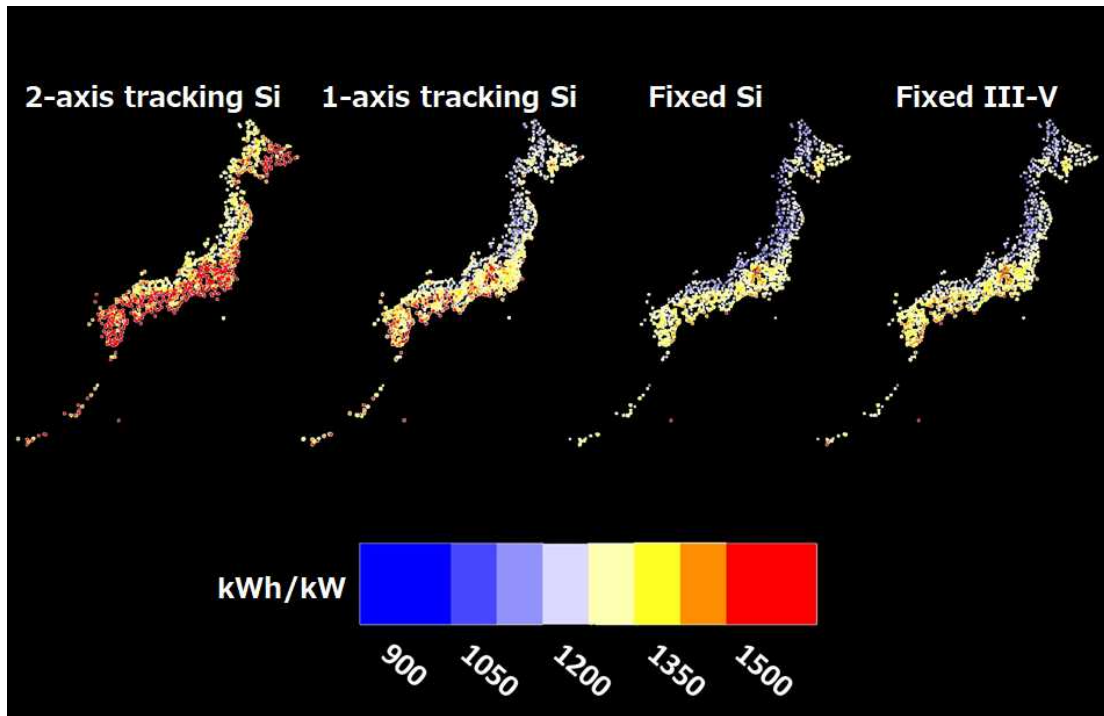
図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b3-3 に、各種太陽電池の定格出力あたりの年間発電量を示す。2軸追尾Si太陽電池、1軸追尾Si太陽電池、南向き傾斜設置Si太陽電池、および南向き傾斜設置Ⅲ-V太陽電池のデータを示している。気象データにはMETPV-11データベースを用い、全国837箇所における定格出力あたりの年間発電量を計算した。この図に示すように、太陽電池の種類を変えた場合や太陽電池の設置方法を変えた場合の日本全国における発電量予測が可能となった。これらの結果に加え、各種太陽光発電システムのイニシャルコストや維持費等を考慮することにより、各種太陽光発電システムを各地域に設置した場合のkWhあたりのコストを導出することが可能となった。



図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b3-1 日射地域区分および代表地点の大気パラメータ変動



図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b3-2 南向き傾斜設置したⅢ-V太陽電池モジュールおよび単結晶 Si 太陽電池モジュールの PR の実測値および計算値の年変動



図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b3-3 各種太陽電池の定格出力あたりの年間発電量

2. 実用化・事業化見通し

本プロジェクトで得られた研究開発の成果は、現宇宙用太陽電池事業の拡大および成層圏飛行体用等の新規事業の創出、更には、電動自動車へ搭載可能な高出力太陽光発電モジュールの将来の実用化への貢献が期待される。具体的な製品として、宇宙用に逆積3接合（IMM3J）セル、成層圏飛行体用に IMM3J セルおよび両面採光型2接合セル、車載用には透過型2接合セルとシリコン（もしくは CIS）セルをスタックした4端子型セルを予定する。

テーマCで得られた成果は以下に示す内容にて、それぞれの事業分野での活用が期待される。

研究開発成果	事業分野	貢献・活用
エピ層剥離2接合型セルを用いたモジュールを作製（27.4%）。また、Siセルとのスタック構造モジュールで効率30.7%を得た。	車載用	4端子型は高効率化低コスト化の両立が期待できるため、将来の車載用として開発を継続する。
逆積み3接合型モジュールで31.2%の効率を得た。本モジュールの屋外発電量を評価し、結晶Siモジュール比151%の単位面積当たり発電量を確認。化合物2接合+Siの4端子構造	車載用	化合物3接合型モジュールおよび化合物2接合型とシリコンをスタックした4端子型モジュールの屋外での高い発電特性が確認でき、更に、電動自動車に搭載し、PVによる走行距離拡大の実証試験を開始したことにより、電動車搭載のPVの価値が認

モジュールの屋外評価を実施し、結晶 Si モジュール比 128% の単位面積あたりの発電量を確認。 車載用途評価のためのモジュールを作製、車両への実装および公道での実証試験を実施した。	識され、今後の事業化開発の起爆剤となることが期待される。
---	------------------------------

3. 波及効果

超高効率の開発モジュールを用いた PV 搭載車の価値が認識されることで、現在、安価量産が実現できているシリコンモジュールの搭載の価値の再認識、普及拡大が促進されることを期待する

4. 今後の展開

本プロジェクトで試作した PV 搭載電動車の走行試験の継続し、データを蓄積するとともに、電動自動車へ搭載可能な高出力太陽光発電モジュールの将来の実用化へに向けた開発を推進する予定である。

5. 特許論文リスト

	2015 年度	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	0	0	3 (0)	3 (1)	2 (1)	8 (2)
論文	5	16	12	10	10	53
研究発表・講演 (うち国際会議)	22 (15)	29 (23)	48 (43)	37 (30)	47 (36)	183 (147)
新聞・雑誌等への掲載	0	8	0	0	7	15
その他	0	2	0	1	2	5

(2020 年 08 月 31 日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	パナソニック株式会社	2017-127734	国内	2017/6/29	出願	電子部品の実装方法及び実装基板	金山秀哲
2	パナソニック株式会社	2017-127314	国内	2017/6/29	出願	太陽電池モジュール	西谷輝
3	パナソニック株式会社	2017-127726	国内	2017/6/29	出願	レンズアレイ及びレンズアレイの製造方法	綾洋一郎
4	パナソニック株式会社	2018-086364	国内	2018/4/27	出願	集光型太陽電池モジュール	林伸彦

5	パナソニック株式会社	2018-120151	国内	2018/6/25	出願	太陽電池モジュール	西谷輝
6	パナソニック株式会社	PCT/JP2018/024470	PCT	2018/6/27	出願	レンズアレイ及びレンズアレイの製造方法	綾洋一郎
7	パナソニック株式会社	PCT/JP2019/017731	PCT	2019/4/25	出願	集光型太陽電池モジュール	林伸彦
8	パナソニック株式会社	2019-086226	国内	2019/4/26	出願	レンズアレイ、及び、太陽電池モジュール	西谷輝

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Husyira Al Husna, Yasuyuki Ota, Takashi Minemoto, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Field test analysis of concentrator photovoltaic system focusing on average photon energy and temperature	Japanese Journal of Applied Physics, Volume 54, No. 8S1, 08KE05-1 - 08KE05-4	有	2015/08
2	Kei Nomura, Kenta Imai, Yasuyuki Ota, Takashi Minemoto, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Effect of aerosols on performance of concentrator photovoltaics	Japanese Journal of Applied Physics, Volume 54, No. 8S1, 08KE07-1 - 08KE07-4	有	2015/08
3	Takuya Hirohata, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Anti-soiling coating based on silica for Fresnel lens of concentrator photovoltaics	Japanese Journal of Applied Physics, Volume 54, No. 8S1, 08KE09-1 - 08KE09-4	有	2015/08
4	山口 真史	豊田工大	(解説) 太陽電池市場の現状と将来展望	WEB Journal, 21(9):2-9	無	2016/01
5	Masafumi Yamaguchi, Tatsuya Takamoto, Kenji Araki, Nobuaki Kojima	豊田工大	Recent results for concentrator photovoltaics in Japan	Japanese Journal of Applied Physics, 55:04EA05	有	2016/03
6	Kenji Araki, Hirokazu Nagai, Kazuma Ikeda, Kan-Hua Lee, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Optimization of Land Use for a Multitracker System Using a Given Geometrical Site Condition	IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS, VOL. 6, NO. 4, JULY 2016, 960-966	有	2016/06
7	Kenji Araki, Hirokazu Nagai, Kan-Hua Lee, Kazuma Ikeda, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Design and Development of Dome-Shaped Fresnel Lens	IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS, VOL. 6, NO. 5, SEPTEMBER 2016 1339-1344	有	2016/06
8	Kenji Araki, Hirokazu Nagai, Rebeca Herrero, Ignacio Ant' on, Gabriel Sala, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Off-Axis Characteristics of CPV Modules Result From Lens-Cell Misalignment-Measurement and Monte Carlo	IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS, VOL. 6, NO. 5, SEPTEMBER 2016, 1353-1359	有	2016/07

			Simulation			
9	Nawwar Ahmad, Keisuke Hatakeyama, Yasuyuki Ota and Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Designing of long wavelength cut thin film filter for temperature reduction of concentrator photovoltaic	MATEC Web of Conferences, 65, 04002	有	2016/07
10	Yoshihide Hidaka, Kenta Imai, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Outdoor Performance Comparison of Concentrator Photovoltaic and FlatPlate Photovoltaic Systems	MATEC Web of Conferences, 65, 04003	有	2016/07
11	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kazuma Ikeda, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Possibility of static low concentrator PV optimized for vehicle installation	AIP Conf. Proc. 1766, 020001-1- 020001-5;	有	2016/09
12	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Intermittent tracking (30 minutes interval) using a wide acceptance CPV module	AIP Conf. Proc. 1766, 050001-1- 050001-6;	有	2016/09
13	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Which is optimum tracker allocation, checkerboard or rectangular grid?	AIP Conf. Proc. 1766, 070001-1- 070001-5;	有	2016/09
14	Kenji Araki, Hirokazu Nagai, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Possibility of solar station to EV	AIP Conf. Proc. 1766, 080001-1- 080001-6;	有	2016/09
15	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Analysis of impact to optical environment of the land by CPV	AIP Conf. Proc. 1766, 090002-1- 090002-6;	有	2016/09
16	Kenji Araki, Hirokazu Nagai, Kan-Hua Lee, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Study on tolerance control for optical alignment of CPV modules using a Monte Carlo simulation	AIP Conf. Proc. 1766, 090003-1- 090003-6;	有	2016/09
17	Yasuyuki Ota, Nawwar Ahmad, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	A 3.2% output increase in an existing photovoltaic system using an anti- reflection and anti- soiling silica-based coat	Solar Energy, Volume 136, 547-552	有	2016/10
18	Nawwar Ahmad, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Temperature reduction of solar cells in a concentrator photovoltaic system	Japanese Journal of Applied Physics, Volume 56, No. 3, 032301-1 -032301-8	有	2017/01

			using a long wavelength cut filter			
19	山口 真史	豊田工大	(解説) 太陽電池市場の現状と将来展望	WEB Journal 2017・1月号 pp. 2-9	無	2017/01
20	Nobuhiko Hayashi, Masaharu Terauchi, Youichirou Aya, Shutetsu Kanayama, Hikaru Nishitani, Tohru Nakagawa, and Michihiko Takase	Panasonic Corporation	Thin concentrator photovoltaic module with micro-solar cells which are mounted by self-align method using surface tension of melted solder	AIP Conference Proceedings, vol.1881, p. 80005, 2017	有	2017/03
21	Kenji Araki, Hirokazu Nagai, Kan-Hua Lee, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Analysis of impact to optical environment of the land by flat-plate and array of tracking PV panels	Solar Energy 144 (2017) 278-285	有	2017/03
22	Taizo Masuda, Kenji Araki, Kenichi Okumura, Shinichi Urabe, Yuki Kudo, Kazutaka Kimura, Takashi Nakado, Akinori Sato, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Static concentrator photovoltaics for automotive applications	Solar Energy, 146; 523-531	有	2017/04
23	Kenji Araki, Hirokazu Nagai, Rebeca Herrero, Ignacio Anton, Gabriel Sala, Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	1-D and 2-D Monte Carlo simulations for analysis of CPV module characteristics including the acceptance angle impacted by assembly errors	Solar Energy, 147;448-454	有	2017/05
24	N. Ahmad, Y. Ota, K. Araki, K.-H. Lee, M. Yamaguchi, K. Nishioka	University of Miyazaki	111 sun concentrator photovoltaic module with wide acceptance angle that can efficiently operate using 30-min intermittent tracking system.	Japanese Journal of Applied Physics, Volume 56, No.9, 092301-1 - 092301-8	有	2017/08
25	Rebeca Herrero, Ignacio Anton, Gabriel Sala, Davide De Nardis, Kenji Araki, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Monte Carlo simulation to analyze the performance of CPV modules	AIP Conference Proceedings, Volume 1881;090001	有	2017/09
26	N. Ahmad, Y. Ota, K. Araki, K.-H. Lee, M. Yamaguchi, K. Nishioka	University of Miyazaki	Optical and thermal simulation for wide acceptance angle CPV module	AIP Conference Proceedings, Volume 1881, 020001-1 - 020001-8	有	2017/09

27	Y. Ota, K. Araki, K.-H. Lee, M. Yamaguchi, K. Nishioka	University of Miyazaki	Estimation of conversion efficiency for partially static concentrator with III-V on Si solar cell	AIP Conference Proceedings, Volume 1881, 020010-1 - 020010-5	有	2017/09
28	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Outdoor validation of the 30 minutes intermittent tracking of 100 x CPV	AIP Conference Proceedings, Volume 1881;020002	有	2017/09
29	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Design of the partial concentrator lens for III-V on Si static concentration	AIP Conference Proceedings, Volume 1881;030001	有	2017/09
30	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Impact of the atmospheric conditions to the bandgap engineering of multi-junction cells for optimization of the annual energy yield of CPV	AIP Conference Proceedings, Volume 1881;070002	有	2017/09
31	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Is it CPV? Yes, but it is a partial CPV	AIP Conference Proceedings, Volume 1881;080001	有	2017/09
32	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Quantifying the potential of III- V/Si partial concentrator by a statistical approach	AIP Conference Proceedings, Volume 1881;080007	有	2017/09
33	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Bandgaps of multi- junction solar cells potentially determined at the sun height of the culmination on the winter solstice	Solar Energy, 153;445-453	有	2017/09
34	Kenji Araki, Liang Ji, George Kelly, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	To Do List for Research and Development and International Standardization to Achieve the Goal of Running a Majority of Electric Vehicles on Solar Energy	Coatings, 8(7):251	有	2018/07
35	Yasuyuki Ota, Kohsuke Ueda, Tatsuya Takamoto, and Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Output evaluation of a world's highest efficiency flat sub module with InGaP/GaAs/InGaAs inverted triple-	Japanese Journal of Applied Physics, Volume 57, Number 8S3, 08RD08-1 - 08RD08-4	有	2018/07

			junction solar cell under outdoor operation			
36	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Nobuaki Kojima, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Achieving Wide-Acceptance Angle and High On-Axis Performance Static Low-Concentration Module Using Hybrid Lens Arrays	AIP Conference Proceedings, 2012:040006	有	2018/09
37	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Takumi Sakai, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Analysis of Fluctuation of Atmospheric Parameters and its Impact on Performance of CPV	AIP Conference Proceedings, 2012:080002	有	2018/09
38	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	The Possibility of the Static LCPV to Mechanical-stack III-V//Si Module	AIP Conference Proceedings, 2012:090002	有	2018/09
39	Daisuke Sato, Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Masafumi Yamaguchi, Noboru Yamada	豊田工大	Design and Evaluation of a III-V/Si Partial CPV Module for Maximization of Power Generation per Unit Module Area	IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS, 9(1):147-153	有	2018/11
40	荒木 建次, 山口 真史	豊田工大	(解説) 車載太陽電池の技術開発動向	月刊車載テクノロジー-2018年11月号, 33:50-54	無	2018/11
41	Kensuke Nishioka, So Pyay Moe and Yasuyuki Ota	University of Miyazaki	Long-Term Reliability Evaluation of Silica-Based Coating with Antireflection Effect for Photovoltaic Modules	Coatings, Volume 9, Issue 1, 49	有	2019/01
42	荒木 建次, 山口 真史	豊田工大	(解説) 太陽電池の車載応用に向けた最近の動向	応用物理, 88(2):84-90	無	2019/02
43	Daisuke Sato, Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Taizo Masuda, Masafumi Yamaguchi, Noboru Yamada	豊田工大	Design of low-concentration static III-V/Si partial CPV module with 27.3% annual efficiency for car-roof application	Progress in Photovoltaics, 2019:1-10	有	2019/03
44	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	A Mesh Down sampling Algorithm for Equivalent Circuit Network Simulation of Multi-Junction Solar Cells	IEEE Access, 7:97208-97215	有	2019/07
45	Kenji Araki, Daisuke Sato, Taizo Masuda, Kan-Hua Lee,	豊田工大	Why and how does car-roof PV create 50 GW/year of new installations? Also,	AIP Conference Proceedings, 2149(1):050003	有	2019/08

	Noboru Yamada, Masafumi Yamaguchi		why is a static CPV suitable to this application?			
46	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Improvement of the spectral sensitivity of CPV by enhancing luminescence coupling and fine-tuning to the bottom-bandgap matched to local atmospheric conditions	AIP Conference Proceedings, 2149(1):060001	有	2019/08
47	Kan-Hua Lee, Sato Daisuke, Kenji Araki, Noboru Yamada, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Demonstration of the performance static low-concentration module using hybrid lens arrays	AIP Conference Proceedings, 2149(1):070009	有	2019/08
48	Kenji Araki, Carlos Algora, Gerald Siefer, Kensuke Nishioka, Ralf Leutz, Sam Carter, Shitao Wang, Steve Askins, Liang Ji, George Kelly	豊田工大	Standardization of the CPV technology in 2019 - The path to new CPV technologies	AIP Conference Proceedings, 2149(1):090001	有	2019/08
49	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Hiromu Saiki, Hiroki Tawa, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Super-Multi-Junction Solar Cells-Device Configuration with the Potential for More Than 50% Annual Energy Conversion Efficiency (Non-Concentration)	Applied Sciences, 9(21):4598	有	2019/10
50	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Measurement and Modeling of the 3-D Solar Irradiance for Vehicle-Integrated Photovoltaic	Applied Sciences, 10(3):872	有	2020/01
51	Hiroki Tawa, Hiromu Saiki, Yasuyuki Ota, Kenji Araki, Tatsuya Takamoto and Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Accurate Output Forecasting Method for Various Photovoltaic Modules Considering Incident Angle and Spectral Change Owing to Atmospheric Parameters and Cloud Conditions	Applied sciences, Volume 10, 703-1 - 703-15	有	2020/01
52	Masafumi Yamaguchi, Kan-Hua Lee, Daisuke Sato, Kenji Araki, Nobuaki Kojima, Tatsuya Takamoto, Taizo Masuda,	豊田工大	Overview of Si Tandem Solar Cells and Approaches to PV-Powered Vehicle Applications	MRS Advances	有	2020/01

	Akinori Satou					
53	Kenji Araki, Hiroki Tawa, Hiromu Saiki, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	The Outdoor Field Test of the 4T III-V on Si Tandem PV Module and Its Energy Yield Modeling	Applied Sciences, 10(7):2529	有	2020/04

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	Jun Hirota, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Influence which Calibration in an Azimuth Direction to be Affected to the Tracking Error	11th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2015/04
2	Yasuyuki Ota, Koji Abe, Katsuhiro Fujita, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	New Material Fresnel Lens with High Performance in Wide Temperature Range	11th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2015/04
3	西岡賢祐, 太田靖之	宮崎大学	既設のPVシステム出力を4%向上させる 反射防止兼防汚コーティング	第12回「次世代の太陽光発電システム」 シンポジウム	2015/05
4	太田靖之, 西岡賢祐	宮崎大学	集光型太陽電池モジュールの最適化 設計	第12回「次世代の太陽光発電システム」 シンポジウム	2015/05
5	Kenta Imai, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Outdoor performance comparison of concentrator photovoltaic and flat-plate systems	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2015/06
6	Shota Kurogi, Takuya Hirohata, Ahmad Nawwar, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Repair of damaged lens surface of CPV using silica based coating	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2015/06
7	Masafumi Yamaguchi	豊田工大	(Invited) Present and Future of R&D for Solar Cells	6th International Symposium of Advanced Energy Science~Towards the Realization of Zero-Emission Energy~, Uji campus, Kyoto University, Japan	2015/09
8	K. Araki, H. Nagai, K. Ikeda, K-H Lee, and M. Yamaguchi	豊田工大	Possibility of compact stand- alone power system using CPV and Tracking PV hybrid.	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference	2015/11
9	K. Araki, H. Nagai, K. Ikeda, K-H Lee, and	豊田工大	Analysis of Impact to Optical Environment of the Land by Flat- plate and Tracking PV Panels Using METPV-11 Database.	25th International Photovoltaic Science & Engineering	2015/11

	M. Yamaguchi			Conference	
10	K. Araki, H. Nagai, K. Ikeda, K-H Lee, and M. Yamaguchi	豊田工大	Optimization of Land Use for Multi-trackers System by Given Geometrical Site Conditions.	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference	2015/11
11	K. Araki, H. Nagai, R. Herrero, I. Antón and G. Sala	豊田工大	Off-axis Characteristics of CPV Modules Result from Lens-cell Misalignment - Measurement and Monte Carlo Simulation.	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference	2015/11
12	K. Araki, H. Nagai, K. Ikeda, K-H Lee, and M. Yamaguchi	豊田工大	Design and Development of Dome-shaped Fresnel Lens.	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference	2015/11
13	S. Naito, K. Araki, K-H. Lee, K. Ikeda and M. Yamaguchi	豊田工大	Optimization of ARC for Si concentrator cells used to wide aperture reflector concentrators	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference	2015/11
14	Masafumi Yamaguchi	豊田工大	(Plenary) Present and Future of Super-High Efficiency III-V Multi-junction, Concentrator Solar Cells and Modules	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference	2015/11
15	Masafumi Yamaguchi, Hiroyuki Yamada, Yasuhiro Katsumata	豊田工大	(Invited) Overview of Photovoltaic R&D in Japan	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference	2015/11
16	Kan-Hua Lee and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Present And Future of III-V Compound Multi-Junction And Concentrator Solar Cells	The 20th International Conference on Semiconductor Photocatalysis & Solar Energy Conversion	2015/11
17	Masafumi Yamaguchi	豊田工大	(Invited) Present and Future of R&D for Solar Cells	The Second International Symposium of Integrated Research and Education Center for Energy Conversion, Storage, Saving, and Transport Technologies	2015/11
18	今井健太, 太田靖之, 西岡賢祐	宮崎大学	集光型および平板型太陽電池システムの屋外性能比較	第7回半導体材料・デバイスフォーラム	2015/11
19	坂元亮太, 黒木翔太, 太田靖之, 西岡賢祐	宮崎大学	防汚兼反射防止コーティングの太陽電池モジュール出力への効果	2015年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2015/11

20	山口真史	豊田工大	(特別講演) 太陽電池の研究開発動向と将来展望	新学術領域研究「人工光合成による太陽光エネルギーの物質変換：実用化に向けての異分野融合」	2016/01
21	山口真史	豊田工大	(招待) 太陽電池の研究開発の現状と将来展望	第23回次世代自動車公開シンポジウム「太陽光エネルギー利用の最新技術」	2016/01
22	坂元亮太, 太田靖之, ¥ 西岡賢祐	宮崎大学	既設の太陽光発電システムの出力を簡単に3%以上向上させる反射防止兼防汚コーティング	第1回COC+みやざきA&Sヒルズ研究会	2016/03
23	Shota Kurogi, Kensuke Nishioka, Yasuyuki Ota	University of Miyazaki	Damage Repairment of Lens Surface in CPV by Silica Based Coating	12th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2016/04
24	Shota Kurogi, Jun Hirota, Kensuke Nishioka, Yasuyuki Ota	University of Miyazaki	Reduction of Soiling on CPV Module by a Tracker System	12th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2016/04
25	Yasuyuki Ota, Yoshiya Abiko, Kenta Imai, Makoto Inagaki, Takashi Iwasaki, Kenichi Kitayama, Shota Kurogi, Rui Mikami, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Impact of Spectral Distribution and Module Temperature on CPV Systems with Lattice-Matched and Mismatched Solar Cell	12th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2016/04
26	Kenji Araki, Hirokazu Nagai, Kan-Hua Lee, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Study on tolerance control for optical alignment of CPV modules using a Monte Carlo simulation	12th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2016/04
27	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Analysis of impact to optical environment of the land by CPV	12th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2016/04
28	Kenji Araki, Hirokazu Nagai, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Possibility of solar station to EV	12th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2016/04
29	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Which is optimum tracker allocation, checkerboard or rectangular grid?	12th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2016/04

30	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Intermittent tracking (30 minutes interval) using a wide acceptance CPV module	12th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2016/04
31	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kazuma Ikeda, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Possibility of static low concentrator PV optimized for vehicle installation	12th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2016/04
32	Yoshihide Hidaka, Kenta Imai, Yasuyuki Ota and Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Outdoor Performance Comparison of Concentrator Photovoltaic and Flat Plate Photovoltaic Systems	2016 5th International Conference on Advanced Materials and Engineering Materials	2016/04
33	日高剛秀, 太田靖之, 西岡賢祐	宮崎大学	エアマスと散乱比を用いた集光型太 陽光発電システムの出力解析	第13回「次世代の太 陽光発電システム」 シンポジウム	2016/05
34	太田靖之, 西岡賢祐	宮崎大学	三接合型太陽電池モジュールへの反 射防止膜の最適化設計	第13回「次世代の太 陽光発電システム」 シンポジウム	2016/05
35	荒木建次, Kan-Hua Lee, 山口真史, 太田靖之, 西岡賢祐	豊田工大	車載用無追尾低倍集光パネルの研究 開発	第13回「次世代の太 陽光発電システム」 シンポジウム	2016/05
36	荒木建次, Kan-Hua Lee, 山口真史, 太田靖之, 西岡賢祐	豊田工大	高倍集光を 30 分毎の間歇追尾で動 作させるのは可能か?	第13回「次世代の太 陽光発電システム」 シンポジウム	2016/05
37	荒木建次, Kan-Hua Lee, 山口真史	豊田工大	複数追尾架台の最適配置問題	第13回「次世代の太 陽光発電システム」 シンポジウム	2016/05
38	Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka, Kenji Araki, Kazuma Ikeda, kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi	University of Miyazaki	Optimization of Static Concentrator Photovoltaics with Aspherical Lens for Automobile	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/06
39	Kazuma Ikeda, Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nisihoka, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	An innovative design approach for static concentrators with large aperture area suitable to automobile application	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/06

40	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kazuma Ikeda, Kensuke Nishioka, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Possibility of CPV for automobile energy source	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/06
41	Kenji Araki, Rebeca Herrero, Ignacio Antón, Gabriel Sala, Hirokazu Nagai, Kan-Hua lee, and masafumi Yamaguchi	豊田工大	Why are acceptance angle of Pm and Isc different in spite of uniform illumination onto concentrator solar cells?	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/06
42	Ryota Sakamoto, Syota Kurogi, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Output Increase of Photovoltaic Module using Silica Based Coat Having Anti-Reflection and Anti- Soiling Effects	26th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
43	Yoshihide Hidaka, Yasuyuki Ota, Makoto Inagaki, Rui Mikami, Takashi Iwasaki, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Influence of Silicon on Glass Lens Temperature on Concentrator Photovoltaic Modules with and without Secondary Optics	26th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
44	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Is it possible to track the 100 x CPV module with 30 minutes intervals?	26th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
45	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	A 2-D Monte Carlo Simulation for Analysis of the Acceptance Angle of CPV	26th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
46	Kenji Araki, Kyotaro Nakamura, Kan-Hua Lee, Takefumi Kamioka, Shimako Naito, Motoo Morimura, Mohammad A. Bareque, Mari Aoki,	豊田工大	Beyond the limit of Si solar cells - III-V on Si cell and its PCSC module concept	26th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10

	Toshio Okumura, Hyunju Lee, Norihiko Maeda, Li Wang, Yutaka Hayashi, Yu-Cian Wang, Nobuaki Kojima, Atsushi Ogura, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi				
47	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Design optimization on static low concentrator PVs installed to various non-optimized locations including the car-roof	26th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
48	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Hypothesis: Optimization of the Bandgaps Combination at the Specific Site, Considering Ever-changing Spectrum, May Be Determined by the Matching Condition to the Sun Height at the Culmination on the Winter Solstice	26th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
49	Masafumi Yamaguchi	豊田工大	(Invited) R&D activities of super high efficiency III-V multi-junction and concentrator solar cells in Japan	26th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
50	Kenji Araki	豊田工大	(Plenary) The New and Third Wave of CPV Not Relying on Perfection of Trackers	GPVC 2017	2017/03
51	綾洋一郎, 林伸彦, 金山秀哲, 西谷輝, 中川徹, 高瀬道彦	パナソニック株式会社	New Concept of Thinner CPV Module with High Performance at Low Cost	第 64 回 応用物理学会春季学術講演会 シンポジウム	2017/03
52	Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Super high efficiency concentrator photovoltaic system and its application to make hydrogen	Laser Solutions for Space and the Earth 2017	2017/04
53	N. Ahmad, Y. Ota, K. Araki, K.-H. Lee, M. Yamaguchi, K. Nishioka,	University of Miyazaki	Optical and thermal simulation for wide acceptance angle CPV module	13th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2017/05
54	Y. Ota, K. Araki,	University of Miyazaki	Estimation of conversion efficiency for partially static	13th International Conference on	2017/05

	K. -H. Lee, M. Yamaguchi, K. Nishioka		concentrator with III-V on Si solar cell	Concentrator Photovoltaic Systems	
55	綾洋一郎, 林伸彦, 金山哲, 西谷輝, 中川徹, 高瀬道彦	パナソニック株式会社	Thin concentrator photovoltaic module with micro-solar cells which are mounted by self-align method using surface tension of melted solder	13th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2017/05
56	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Outdoor Validation of the 30 Minutes Intermittent Tracking of 100 x CPV	13th International Conference on Concentrator Photovoltaics	2017/05
57	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Design of the Partial Concentrator Lens for III-V on Si Static Low Concentrators	13th International Conference on Concentrator Photovoltaics	2017/05
58	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Impact of the atmospheric conditions to the bandgap engineering of multijunction cells for optimization of the annual energy yield of CPV	13th International Conference on Concentrator Photovoltaics	2017/05
59	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Is It CPV? Yes, But It Is a Partial CPV	13th International Conference on Concentrator Photovoltaics	2017/05
60	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Quantifying the Potential of III-V/Si Partial Concentrator by a Statistical Approach	13th International Conference on Concentrator Photovoltaics	2017/05
61	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Omar Elleuch, Nobuaki Kojima, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Pypvcell - "LEGO" of CPV Solar Cell Modeling in Python Language	13th International Conference on Concentrator Photovoltaics	2017/05
62	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	University of Miyazaki	CPV Technologies Not Relying on Perfection of Trackers	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017/06
63	Kenji Araki,	豊田工大	Design Arithmetic of the Lateral	44th IEEE	2017/06

	Kyotaro Nakamura, Yu-Cian Wang, Nobuaki Kojima, Atsushi Ogura, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi		III-V / Si Hybrid Module	Photovoltaic Specialists Conference	
64	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Generalized Numerical Design of Axially-asymmetrical and Grid-arranged Static CPV array for Maximizing Annual Energy Generation	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017/06
65	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	CPV Technologies Not Relying on Perfection of Trackers	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017/06
66	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Proposal of the Bandgap Design Using the Sun Height of the Culmination on the Winter Solstice	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017/06
67	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Analyzing the Cost Reduction Potential of III-V/Si Hybrid Concentrator Photovoltaic Systems	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017/06
68	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Omar Elleuch, Nobuaki Kojima, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Pypvcell: An Open-Source Solar Cell Modeling Library in Python	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017/06
69	太田靖之, 植田浩介, 高本達也, 西岡賢祐	宮崎大学	IMM InGaP/GaAs/InGaAs三接合型太陽電池サブモジュールの屋外動作解析	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017/07
70	荒木建次, Kan-Hua Lee, 山口真史, 太田靖之, 西岡賢祐	豊田工大	CPVにおける追尾架台への脱依存	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017/07
71	荒木建次, Kan-Hua Lee, 山口真史	豊田工大	4 接合以上のモノリシック多接合に意味はあるのか？	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017/07
72	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Omar Elleuch, Nobuaki Kojima, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Pypvcell - “LEGO” of Solar Cell Modeling in Python Language	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017/07
73	Masafumi	豊田工大	(Keynote) Towards Creation of	2017 5th IEEE	2017/08

	Yamaguchi, Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Nobuaki Kojima, Taizo Masuda, Kazutaka Kimura, Akinori Satou, Hiroyuki Yamada		Mobility Society Using Solar Energy	International Conference on Smart Energy Grid Engineering	
74	Masafumi Yamaguchi, Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Nobuaki Kojima, Taizo Masuda, Kazutaka Kimura, Akinori Sato, Hiroyuki Yamada	豊田工大	(Invited) Si Tandem Solar Cells and Their Potential of Automobile Application	PV Asia Scientific Conference 2017	2017/10
75	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Yu-Cian Wang, Nobuaki Kojima, Yasuyuki Ota, Takumi Sakai, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	(Invited) Opportunities in the Single and Multi-junction Solar Cells for Increasing Power Conversion Efficiency and Annual Energy Yield	18th International Union of Materials Research Societies International Conference in Asia	2017/11
76	N. Ahmad, Y. Ota, K. Araki, K.-H. Lee, M. Yamaguchi, K. Nishioka,	University of Miyazaki	EVALUATION AND OPTIMIZATION OF WIDE ACCEPTANCE ANGLE CONCENTRATOR PHOTOVOLTAIC MODULE	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
77	K. Nishioka, S. Kurogi, Y. Ota, J. Hirota	University of Miyazaki	A SOLAR TRACKING SYSTEM WITH DOWNWARD-FACING STANDBY STATE FOR DRY AREAS	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
78	R. Kawashima, T. Sakai, Y. Ota, K. Nishioka	University of Miyazaki	ALBEDO IMPROVEMENT AND WEED PROOF EFFECTS OF A WHITE FORM GLASS MADE FROM WASTE GLASS	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
79	T. Masuda, K. Araki, K.-H. Lee, Y. Ota, K. Nishioka, M. Yamaguchi	University of Miyazaki	MAXIMIZING ANNUAL ENERGY GENERATION AND MINIMIZING THE AREA OF EXPENSIVE III-V CELLS USING OPTIMIZED STATIC CPV	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
80	Y. Ota,	University of	OUTPUT EVALUATION OF A WORLD' S	27th International	2017/11

	K. Ueda, T. Takamoto, K. Nishioka	Miyazaki	HIGHEST EFFICIENCY FLAT SUB-MODULE WITH InGaP/GaAs/InGaAs INVERTED TRIPLE-JUNCTION SOLAR CELL UNDER OUTDOOR OPERATION	Photovoltaic Science and Engineering Conference	
81	高瀬道彦, 綾洋一郎, 林伸彦, 金山秀哲, 西谷輝, 水野文二	パナソニック 株式会社	NOVEL MICRO CPV MODULE INTEGRATED WITH PLASTIC LENS, CIRCUIT BOARD AND III-V COMPOUND SEMICONDUCTOR UTILIZING INJECTION MOLDING AND SURFACE MOUNTING	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
82	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Takumi Sakai, Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	INHERENT UNCERTAINTY OF ENERGY RATINGS OF MULTI-JUNCTION CELLS BY FLUCTUATION OF ATMOSPHERIC PARAMETERS	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
83	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	ANALYSIS OF COST-COMPETITIVENESS OF HYBRID III-V-Si CONCENTRATOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
84	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	OPTIMIZATION PROBLEM ON TRACKER ALLOCATION USING DIMENSIONLESS PARAMETERS ? THEORY AND MEASUREMENT VALIDATION	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
85	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Takumi Sakai, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	ENERGY YIELD PREDICTION OF MULTI-JUNCTION CELLS CONSIDERING ATMOSPHERIC PARAMETERS FLUCTUATION USING MONTE CARLO METHODS	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
86	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Nobuaki Kojima, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	PYPVCELL - OPEN-SOURCED SOLAR CELL MODELING TOOLKIT IN PYTHON LANGUAGE	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
87	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Takumi Sakai, Kyotaro Nakamura, Kan-Hua Lee, Takefumi Kamioka, Kensuke Nishioka, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	SI-BASED TANDEM CELL, 2-TERMINAL OR 4-TERMINAL?	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
88	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Masafumi	豊田工大	EV SOLAR STATION, A KEY INFRASTRUCTURE FOR ABSORBING SURPASS ENERGY GENERATION OF PV	27th International Photovoltaic Science and	2017/11

	Yamaguchi		ON THE CAR-ROOF	Engineering Conference	
89	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	RISKS AND OPPORTUNITIES IN CHALLENGING NEW BANDGAP MATERIALS FOR INCREASING NUMBER OF JUNCTIONS ? PROBABILITY STUDY	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
90	Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Kenji Araki, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	STANDARDIZATION OF LOW-CONCENTRATION PHOTOVOLTAICS? TECHNICAL TERMS AND TESTING CONDITIONS	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
91	T. Sakai, Y. Ota, K. Araki, K.-H. Lee, M. Yamaguchi, K. Nishioka	University of Miyazaki	Estimate of global solar radiation using extraterrestrial radiation and meteorological parameter	Korea-Japan Top University League Workshop on Photovoltaics 2017	2017/11
92	Y. Hidaka and K. Nishioka	University of Miyazaki	Estimation of output power in photovoltaic system using learning function based on performance of the past	Korea-Japan Top University League Workshop on Photovoltaics 2017	2017/11
93	R. Kawashima, T. Sakai, Y. Ota, K. Nishioka	University of Miyazaki	Effects of a white foam glass made from waste glass on albedo improvement and weed control	Korea-Japan Top University League Workshop on Photovoltaics 2017	2017/11
94	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Takumi Sakai, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	(Invited) Prediction of the solar spectrum for accurate prediction of energy yield of the high-performance PV system using multi-junction cells and solar-driven cars	9th PV Performance Modeling Collaborative (PVPMC) Workshop	2017/12
95	荒木建次, 山口真史	豊田工大	(招待) 車載 PV のインパクト、50 GW/年の新市場、温室ガス 8%削減?どんな技術が必要となり何をしなければならぬか、共に考えてみましょう-	学振第 175 委員会 次世代シリコン太陽電池分科会 超高効率太陽電池分科会合同研究会	2017/12
96	Y. Ota	University of Miyazaki	Concentrator photovoltaic system with super high efficiency III-V triple junction solar cell and its application to produce hydrogen and methane	Global Photovoltaic Conference 2018	2018/03
97	Masafumi Yamaguchi	豊田工大	(Plenary) Overview of Si Tandem Solar Cells and Potential of Automobile Applications	Global Photovoltaic Conference 2018	2018/03
98	高瀬道彦, 寺内正治, 林伸彦, 西谷輝, 猪原卓二, 綾洋一郎, 金山秀哲, 水野文二	パナソニック株式会社	Light Plastic Integrated Micro CPV Module: PIC with Three-Junction PV cells	18th International Workshop on Junction Technology	2018/03
99	Kenji Araki,	豊田工大	(Invited) Opportunities for	18th International	2018/03

	Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi		breaking an energy generation limit of photovoltaic using multijunction and super- multijunction cells	Workshop on Junction Technology	
100	Michihiko Takase, Masaharu Terauchi, Nobuhiko Hayashi, Hikaru Nishitani, Takuji Inohara, Youichirou Aya, Shutetsu Kanayama, and Bunji Mizuno	パナソニック 株式会社	Light Plastic Integrated Micro CPV Module: PIC	14th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2018/04
101	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Possibility of the Static LCPV to Mechanical-Stack III-V//Si Module	14th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2018/04
102	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Takumi Sakai, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Analysis on Fluctuation of Atmospheric Parameters and its Impact on Performance of CPV	14th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2018/04
103	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Nobuaki Kojima, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Cost-Competitiveness of Hybrid III-V-Si Concentrator Photovoltaic Systems	14th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2018/04
104	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Nobuaki Kojima, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Achieving Wide-Acceptance Angle and High On-Axis Performance Static Low-Concentration Module Using Hybrid Lens Arrays	14th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2018/04
105	Masafumi Yamaguchi, Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Nobuaki Kojima, Taizo Masuda, Kazutaka Kimura, Akinori Sato	豊田工大	Analysis for efficiency potential of Si tandem solar cells and approach to automobile application	2018 MRS Spring Meeting and Exhibit	2018/04
106	Masafumi Yamaguchi	豊田工大	(Invited) PV for mobility	2nd Terawatt Workshop	2018/04
107	Hiroki Tawa, Yasuyuki Ota,	University of Miyazaki	Comparison of CPV systems with lattice-matched and mismatched	7th World Conference on	2018/06

	Makoto Inagaki, Rui Mikami, Takashi Iwasaki, Munetsugu Ueyama and Kensuke Nishioka		solar cells in long-term outdoor performance	Photovoltaic Energy Conversion	
108	Hiromu Saiki, Takumi Sakai, Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi, and Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Verification of uncertainty in CPV' s outdoor performance	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	2018/06
109	Michihiko Takase, Shutetsu Kanayama, Masaharu Terauchi, Nobuhiko Hayashi, Hikaru Nishitani, Takuji Inohara, Youichirou Aya, and Bunji Mizuno	パナソニック株式会社	A Thin and Light Plastic Integrated CPV Module with Low Temperature mounting process using Induction Heating Technology	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	2018/06
110	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka, Hiromi Tobita, Liang Ji, George Kelly, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Toward the Standardization of the Car-roof PV -Challenge to the 3-D Sunshine Modeling and Rating of the 3-D Continuously Curved PV Panel	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	2018/06
111	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Achieving High Efficiency Static Low-Concentration Photovoltaic Module Using Hybrid Lens Arrays	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	2018/06
112	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Optimization of the Partially Radiative-coupling Multi-junction Solar Cells Considering Fluctuation of Atmospheric Conditions	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	2018/06
113	S. P. Moe, Y. Ota, K. Nishioka	University of Miyazaki	Long term reliability of antireflective silica-based coating on CIGS photovoltaic module	Grand Renewable Energy 2018	2018/06

114	Michihiko Takase, Masaharu Terauchi, Nobuhiko Hayashi, Hikaru Nishitani, Takuji Inohara, Youichirou Aya, Shutetsu Kanayama, and Bunji Mizuno	パナソニック株式会社	A Plastic Integrated Micro CPV Module: PIC with Induction Heating Technology	Grand Renewable Energy 2018	2018/06
115	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Nobuaki Kojima, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	How Does R&D on the Car-Roof PV Impact to the Entire PV Technologies?	Grand Renewable Energy 2018	2018/06
116	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Nobuaki Kojima, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Super-Multijunction Cell, A New Solar Cell Overcoming the Spectrum Loss of Multijunction Cells	Grand Renewable Energy 2018	2018/06
117	林伸彦, 西谷輝, 綾洋一郎, 寺内正治, 猪原卓二, 金山秀哲, 水野文二, 高瀬 道彦	パナソニック株式会社	超薄型集光型太陽電池用レンズアレイの光学系開発	第43回 光学シンポジウム	2018/06
118	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Nobuaki Kojima, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	High efficiency static concentrator lens array for automobile and building integrated photovoltaics	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018/07
119	Kan-Hua Lee, 荒木建次, 山口真史	豊田工大	ZEB 向け PV モジュール開発 豊田工大の挑戦	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018/07
120	荒木建次, Kan-Hua Lee, 山口真史	豊田工大	「超」多接合セルによるスペクトル変動頑健化	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018/07
121	荒木建次, 増田泰造, 木村和峰, 佐藤彰倫, 山口真史	豊田工大	車載太陽電池 実用化に必要な技術開発は何か	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018/07
122	K. Nishioka & Y. Ota	University of Miyazaki	Long Term Evaluation of Anti-Reflection and Anti-Soiling Coating for Existing Photovoltaic Modules	35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2018/09

123	高瀬道彦	パナソニック株式会社	薄型プラスチック一体型 CPV モジュール (PIC) および EV 充電ステーションへの応用	日本学術振興会 産学協力研究委員会 次世代の太陽光発電システム 第 175 委員会	2018/10
124	Masafumi Yamaguchi, Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Nobuaki Kojima, Taizo Masuda, Kazutaka Kimura, Akinori Satou, Hiroyuki Yamada	豊田工大	(Keynote) Overview of Solar Cell R&D and Approaches to Automobile Applications	15th International Conference and Exhibition on Materials Science and Engineering	2018/11
125	Reita Kawashima, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Effect of White Foam Glass Made from Waste Glass on Albedo Improvement	7th Korea - Japan Joint Seminar on PV	2018/11
126	Rie Shibata, Kazuki Okumoto, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Heat Transfer Simulation for Car-Roof Photovoltaic Modules	7th Korea - Japan Joint Seminar on PV	2018/11
127	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Modeling on Unconventional PVs and Their Standardization? Curved Surface, Vehicle-Integration, Multi-Junction Cells, and Static Concentrators	11th PV Performance Modeling Collaborative (PVPMC) Workshop	2018/12
128	才木大夢, 荒木建次, 太田靖之, Kan-Hua Lee, 山口真史, 西岡賢祐	宮崎大学	集光型太陽電池の屋外性能の不確実性検証	第3回フロンティア太陽電池セミナー	2018/12
129	Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Recent Development of Concentrator Photovoltaic System and Its Applications for Solar to Chemical Energy Conversion	International Symposium on Solar Energy Materials	2019/01
130	Kenji Araki, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Estimation of the Range Extension of the Mileage of the Electric Vehicles by the Automotive-Colored Car-Roof Photovoltaic	1st Coatings and Interfaces Web Conference	2019/03
131	Masafumi Yamaguchi, Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Nobuaki Kojima	豊田工大	(Invited) High Efficiency and Low-cost Concentrator Solar Cells	Global Photovoltaic Conference 2019	2019/03

132	Michihiko Takase, Nobuhiko Hayashi, Shutetsu Kanayama, and Bunji Mizuno	パナソニック株式会社	High performance concentrator for thin and lightweight CPV modules	15th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2019/03
133	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Improvement of the Spectral Sensitivity of CPV by Enhancing Luminescence Coupling and Fine-Tuning to the Bottom-Bandgap Matched to Local Atmospheric Conditions	15th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2019/03
134	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Daisuke Sato, Noboru Yamada, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Demonstration of the Performance Static Low Concentration Module Using Hybrid Lens Arrays	15th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2019/03
135	Kenji Araki, Daisuke Sato, Taizo Matsuda, Kan-Hua Lee, Noboru Yamada, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Why and How Does Car-Roof PV Create 50 GW/Year of New Installations? Also, Why is a Static CPV Suitable to this Application?	15th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2019/03
136	Kenji Araki, Andreas W. Bett, Frank Dimroth, Karin Hinzer, Ignacio Luque-Heredia	豊田工大	Panel Discussion on Trending CPV Applications	15th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2019/03
137	Kenji Araki	豊田工大	(Invited) Car-roof PV, possibilities and challenges	8th Solar Energy Conference of CEE (Central and Eastern Europe)	2019/04
138	Masafumi Yamaguchi	豊田工大	(Plenary) Overview of Japanese PV R&D Activities, Efficiency Potential of Solar Cells and PV-Powered Vehicle Applications	International Workshop on Energy Business and Sustainable Development	2019/04
139	高本達也	シャープ(株)	Vehicle Applications that Place High Value on Very High Efficiency Solar Cells	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2019/06
140	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Nobuhiko Hayashi, Kouki Ichihashi, Shutetsu	豊田工大	Alignment Tolerance Control of the Micro CPV Array Using Monte Carlo Methods	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2019/06

	Kanayama, Takuji Inohara, Yohei Morita, Michihiko Takase, Masafumi Yamaguchi				
141	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Nobuhiko Hayashi, Kouki Ichihashi, Shutetsu Kanayama, Takuji Inohara, Yohei Morita, Michihiko Takase, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Design of the Micro-Köhler Concentrator Optics for CPV Application	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2019/06
142	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	A Mesh Down sampling Algorithm for Equivalent Circuit Network Simulation of Multi-Junction Solar Cells	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2019/06
143	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Taizo Masuda, Yoshitaka Hayakawa, Noboru Yamada, Masafumi Yamaguchi, Yasuyuki Ota	豊田工大	Rough and straightforward estimation of the mismatching loss by partial shading of the PV modules installed on an urban area or car-roof	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2019/06
144	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Noboru Yamada, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Curve Correction of the Energy Yield by Flexible Photovoltaics for VIPV and BIPV Applications Using a Simple Correction Factor	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2019/06
145	Masafumi Yamaguchi, Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Nobuaki Kojima, Taizo Masuda, Kazutaka Kimura, Akinori Satou	豊田工大	Proposals for Accelerating Photovoltaics Installations in Japan and Further Developments of Science and Technologies of Photovoltaics	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2019/06
146	Kan-Hua Lee, Daisuke Sato, Kenji Araki, Noboru	豊田工大	Demonstration of High Efficiency Static Low-Concentration Photovoltaic Module Using Hybrid Lens Arrays	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2019/06

	Yamada, Masafumi Yamaguchi				
147	西岡賢祐, 霧村雅昭, 永岡章, 太田靖之	宮崎大学	宮崎の特徴を活かした太陽光発電応用研究開発	第16回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2019/07
148	多和紘希, 才木大夢, 太田靖之, 荒木建次, 高本達也, 西岡賢祐	宮崎大学	太陽光スペクトルを考慮したPV予測発電量マップの作成	第16回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2019/07
149	才木大夢, 荒木建次, 太田靖之, 西岡賢祐	宮崎大学	直達スペクトルと全天傾斜スペクトルの比較検証	第16回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2019/07
150	佐藤大輔, Kan-Hua Lee, 荒木建次, 山口真史, 山田昇	豊田工大	III-V/Si 部分集光によるモジュール面積当たりの発電量最大化	第16回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2019/07
151	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	(Invited) Super-multi-junction solar cells, a new configuration of the robust and high-efficiency solar cell and its application - Operation model based on the annual monitoring of the multi-junction PV modules	18th International Conference on Optical Communications and Networks	2019/08
152	Masafumi Yamaguchi, Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Nobuaki Kojima, Kyotaro Nakamura, Yoshio Ohshita, Taizo Masuda, Akinori Satou, Kazumi Yamada, Tatsuya Takamoto, Takehiko Sato, Mitsuhiro Yamazaki, Hiroyuki Yamada	豊田工大	(Invited) Solar Cells for Cars	29th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules: Materials and Processes	2019/08
153	山口真史, 荒木建次	豊田工大	(招待) 車載用高効率太陽電池開発の現状と将来展望	2019年第80回応用物理学会秋季学術講演会(シンポジウム:脱炭素社会実現に向けた太陽光発電のポテンシャルと挑	2019/09

				戦～電力を越えて、 移動体、建物、さら にその先へ～)	
154	Masafumi Yamaguchi, Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Nobuaki Kojima, Taizo Masuda, Akinori Satou, Mami Hasegawa, Hiroyuki Yamada	豊田工大	Overview of Concentrator Solar Cells and Analysis for Their Non-Radiative Recombination	36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2019/09
155	Masafumi Yamaguchi, Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Nobuaki Kojima, Taizo Masuda, Akinori Satou, Mami Hasegawa, Hiroyuki Yamada	豊田工大	Some Approaches of PV-Powered Vehicles Applications	36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2019/09
156	Hiroki Tawa and Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Creation of forecasting PV energy yield map considering the solar spectrum	8th MALAYSIA-JAPAN JOINT WORKSHOP ON PHOTOVOLTAIC SYSTEMS	2019/09
157	Hiromu Saiki, Yasuyuki Ota, and Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Comparison in availability of spectrum from direct normal irradiance and global tilt irradiance to estimate multi-junction PV output	8th MALAYSIA-JAPAN JOINT WORKSHOP ON PHOTOVOLTAIC SYSTEMS	2019/09
158	Masafumi Yamaguchi, Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Daisuke Sato, Nobuaki Kojima, Taizo Masuda, Akinori Satou, Tatsuya Takamoto	豊田工大	(Keynote) Overview of Si tandem solar cells and potential of automobile applications	3rd International Conference on Materials Science and Materials Chemistry	2019/10
159	多和絛希, 西岡賢祐	宮崎大学	大気パラメータ起因の太陽光スペクトル変化を考慮したPV予測年間発電量マップの作成	2019年応用物理学会九州支部学術講演会	2019/11
160	才木大夢, 西岡賢祐	宮崎大学	太陽光スペクトルを考慮した多接合太陽電池発電量予測の精度検証	2019年応用物理学会九州支部学術講演会	2019/11
161	Hiroki Tawa, Hiromu Saiki, Yasuyuki Ota,	University of Miyazaki	A Spectrum- Energy Model for Annual Yield Estimation of 2-And 4-Terminal Tandem Solar Cells	29th International Photovoltaic Science and	2019/11

	Kenji Araki, Kohsuke Ueda, Tatsuya Takamoto, Masafumi Yamaguchi, Kensuke Nishioka			Engineering Conference	
162	Hiromu Saiki, Hiroyuki Tawa, Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Verification of Accuracy in Spectrum-energy Model for Tandem Solar Cell	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11
163	Michihiko Takase, Kan-Hua Lee, Nobuhiko Hayashi, Shutetsu Kanayama, and Kenji Araki	パナソニック 株式会社	Towards Scaling-Up of Plastic Integrated CPV (PIC) Panels: Status, Challenges and Prospects	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11
164	Kan-Hua Lee, Michihiko Takase, Nobuhiko Hayashi, Shutetsu Kanayama, and Kenji Araki	パナソニック 株式会社	Modeling the Error Tolerance of Micro-CPV with an Uncertainty Analysis	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11
165	Kenji Araki	豊田工大	(Invited) The advantages of MWT modules in photovoltaic vehicles and BIPV	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11
166	Kenji Araki, Liang Ji, George Kelly, Emilio Agudo, Ignacio Anton, Mathieu Baudrit, Anna Carr, Rebeca Herrero, Sarah Kurtz, Zhengxin Liu, Moritz Limpinsel, Zhonglin Lu, Mauro Pravettoni, Kensuke Nishioka, Yasuyuki Ota, Paul Robusto, Hiromi Tobita,	豊田工大	Standardization Discussions for the Car-Roof PV - Starting Two Years Ago, and What We Have Achieved Since Then	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11

	Qian Wu, Zhenyu Wu, Sewang Yoon, Masahiro Yoshita, Masafumi Yamaguchi				
167	Masafumi Yamaguchi, Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Daisuke Sato, Nobuaki Kojima, Taizo Masuda, Akinori Satou, Tatsuya Takamoto, Hiroyuki Yamada	豊田工大	(Plenary) Super-high Efficiency III-V Multi-junction and Concentrator Solar Cells, and PV-powered Vehicle Applications	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11
168	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Taizo Masuda, Daisuke Sato, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Solar Irradiance Onto Car Body Using Mobile Multiple Pyranometer Array System for vehicle-Integrated Photovoltaic applications - Measurement and Modeling	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11
169	Kenji Araki, Daisuke Sato, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Can We Break the 43% Limit of the Annual Average Efficiency (Non-concentration)?	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11
170	Kenji Araki, Daisuke Sato, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Improvement of Performance Ratio of Tandem Cells Using Super- multijunction Configuration- modeling and Outdoor Performance Validation	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11
171	Kenji Araki, Daisuke Sato, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Is Tracker Allocation Optimization in Monsoon Region Different from North America and Europe?	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11
172	Kenji Araki, Daisuke Sato, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Seasonal Irradiation Prediction in Solar-sharing by Solar- trackers for Uniform Illumination to Crops Using Solar Irradiation Databases	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11
173	Daisuke Sato, Kenji Araki, Masafumi Yamaguchi, Noboru Yamada	豊田工大	Performance Evaluation of Low- concentration Static CPV Module with Smooth 3D Curved Surface	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11

174	Kenji Araki, Daisuke Sato, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Minimum Requirements of the Solar Simulators for Curved PV Panels	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11
175	Daisuke Sato, Kenji Araki, Noboru Yamada, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Potential of Low-concentration Static CPV Module (Tandem, Flexible and High Coverage to the 3-D Curved Surface) for Car- roof Application	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11
176	Masafumi Yamaguchi, Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Daisuke Sato, Nobuaki Kojima, Taizo Masuda, Akinori Satou	豊田工大	(Keynote) Importance of Photovoltaic (PV) for Creating Future Clean Energy Society and Our Approaches of PV-Powered Vehicle Applications	4th International Conference on New Energy and Applications	2019/11
177	多和絃希, 西岡賢祐	宮崎大学	太陽光スペクトルを考慮した発電量 予測モデルを用いた2端子および4端 子多接合太陽電池の屋外性能評価	第4回フロンティア 太陽電池セミナー	2019/11
178	才木大夢, 西岡賢祐	宮崎大学	多接合型太陽電池の出力解析モデル の確立および精度検証	第4回フロンティア 太陽電池セミナー	2019/11
179	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Performance Modeling of the Car- roof PV - Overview	13th PV Performance Modeling and Monitoring Workshop	2019/12
180	Masafumi Yamaguchi, Kan-Hua Lee, Daisuke Sato, Kenji Araki, Nobuaki Kojima, Tatsuya Takamoto, Taizo Masuda, Akinori Satou	豊田工大	Overview of Si Tandem Solar Cells and Approaches to PV- Powered Vehicle Applications	2019 MRS Fall Meeting & Exhibit	2019/12
181	Masafumi Yamaguchi, Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Daisuke Sato, Nobuaki Kojima	豊田工大	(Invited) Next Generation Solar Cells and PV-Powered Vehicle Applications	4th International Conference on Fossil and Renewable Energy	2020/02
182	林伸彦	パナソニック 株式会社	プラスチックレンズに高効率微小 太陽電池セルを実装した薄型・軽 量集光型太陽電池	JIEP 関西支部 第 16 回技術講演会	2020/02
183	森田洋平, 林伸彦, Kan-Hua Lee, 金山秀哲, 高瀬道彦	パナソニック 株式会社	プラスチックレンズ一体型による 集光型太陽光発電モジュールの小 型・軽量化開発	応用物理学会 関西 支部 第3回講演会	2020/02

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	シャープ(株)	太陽電池モジュール 世界最高効率シャープが開発	日経新聞	2016/5
2	シャープ(株)	世界最高の変換効率 シャープ 31.17%達成	化学工業日報	2016/5
3	シャープ(株)	化合物3接合型太陽電池 最高変換効率を達成	日刊産業新聞	2016/5
4	シャープ(株)	世界最高の変換効率達成 シャープの化合物系太陽電池セル	日刊工業新聞	2016/5
5	シャープ(株)	シャープ 化合物太陽電池モジュール 世界最高の変換効率達成	電波新聞	2016/5
6	シャープ(株)	シャープ 変換効率31%の太陽電池	日経産業新聞	2016/5
7	シャープ(株)	太陽電池モジュールとして世界最高の変換効率 NEDO プロジェクトの一環 シャープ 化合物3接合型太陽電池 31.17%を達成	日刊油業報知新聞	2016/5
8	シャープ(株)	太陽電池変換効率31% シャープ 化合物系で世界最高	読売新聞	2016/6
9	シャープ(株)	高効率太陽光パネル搭載 電動車を公道実験 シャープとトヨタ	日経産業新聞	2019/7
10	シャープ(株)	高効率太陽電池を搭載 PHV で公道実証 今/下旬から トヨタ	日刊自動車新聞	2019/7
11	シャープ(株)	公道に太陽電池搭載車 シャープ トヨタ 航続距離や燃費検証	電気新聞	2019/7
12	シャープ(株)	高効率太陽電池搭載 PHV 公道で走行実証 NEDO	化学工業日報	2019/7
13	シャープ(株)	太陽電池車 公道で実験	日刊工業新聞	2019/7
14	シャープ(株)	世界最高水準の高効率太陽電池搭載した電動車	電波新聞	2019/7
15	シャープ(株)	NEDO、シャープ、トヨタ 太陽電池搭載 EV 実験	交通毎日新聞	2019/7

【その他】

番号	年度	タイトル	受賞者など	受賞年月
1	2016	太陽電池モジュールで世界最高の変換効率31.17%を達成	ニュースリリース	
2	2016	ポスターアワード (26th PVSEC 新概念・新材料部門)	豊田工大	2016.10.28
3	2018	Technology Contribution (11thPV Performance Modeling and Monitoring Workshop(PVPMC))	豊田工大	2018.12.04
4	2019	世界最高水準の高効率太陽電池を搭載した電動車の公道走行実証を開始	ニュースリリース	
5	2019	イノバイティブPV奨励賞“Ⅲ-V/Si部分集光によるモジュール面積当たりの発電量最大化”(第16回「次世代の太陽光発電システムシンポジウム」)	豊田工大	2019.07.05

D 超高効率セル開発

1. 成果詳細

Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a1. 多接合希釈窒化物【東京大学】

50%以上の集光下効率が見込まれる最適な 4 接合太陽電池 (1.9eV/1.4eV/1.0eV/0.70eV) を格子整合材料で構成するためには、第 3 セル(1.0eV 帯)用の材料として GaInNAs 等のⅢ-VN 系希釈窒化物半導体が必要である。GaInNAs の特徴は In と N の組成を制御することにより格子定数とバンドギャップを広範囲に可変できることであり、従来化合物半導体で実現できなかった GaAs や Ge 基板に格子整合させた 1.0eV 材料を得ることができる。

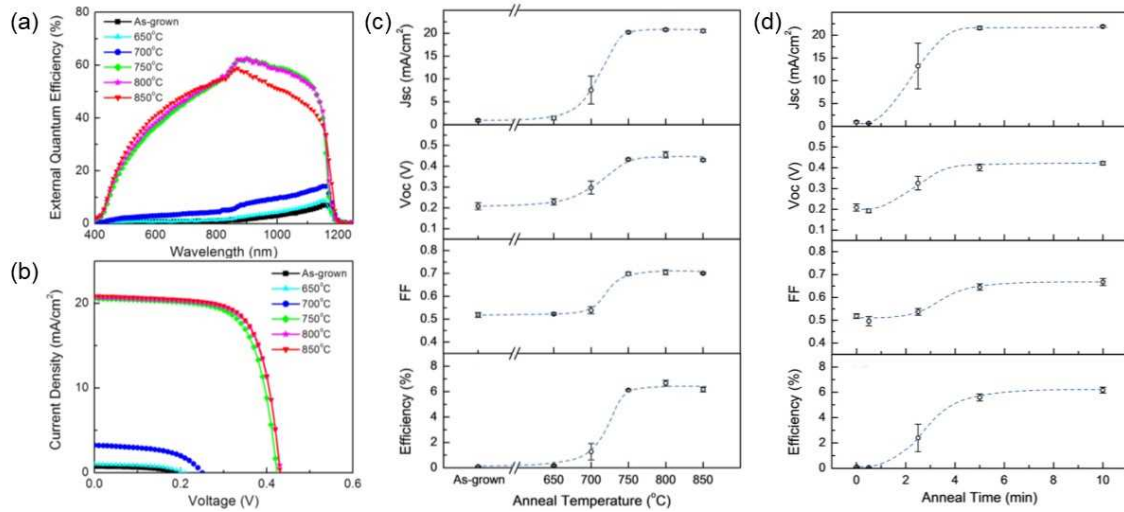
4 接合セルで必要とされる電流密度 $12\sim 13\text{mA}/\text{cm}^2$ を実現するためには、十分な厚さの光吸収層 (1.5 \sim 2.0 μm 以上) が要求される。しかし、GaAs 結晶に窒素原子を導入することによってキャリア移動度、および少数キャリア拡散長が著しく低下してしまうことが課題となっており、1.0eV 帯サブセルとしての十分な光キャリア収集特性を得ることが困難とされていた。この問題解決に当たり、*pn* 構造に *i*-GaInNAs 層を挿入した *p-i-n* 構造を採用し、空乏層領域での内蔵電界による光キャリア収集アシスト効果を積極的に利用することにより電流値の向上が実現できる。さらに、ポストアニールや Sb サーファクタントの導入により窒素に起因した結晶欠陥等が低減され、結晶品質の改善に有効であることを明らかにしてきた。これまでの、GaInNAs:Sb の成長制御技術の開発と高品質化の結果、単接合セルにおいて、GaAs フィルタ下の短絡電流密度 $12.2\text{mA}/\text{cm}^2$ を達成してきた。

本研究開発では、この高品質 GaInNAs:Sb セルを多接合セルに実装するための技術開発に取り組んだ。高品質な GaInNAs:Sb は MBE 法により結晶成長を行うが、他のサブセルについては通常 MOCVD 法により製膜される。そこでシャープ(株)と連携し、MBE と MOCVD を組み合わせたハイブリッド成長 (ウェハシャトル) により多接合セルを構成した。

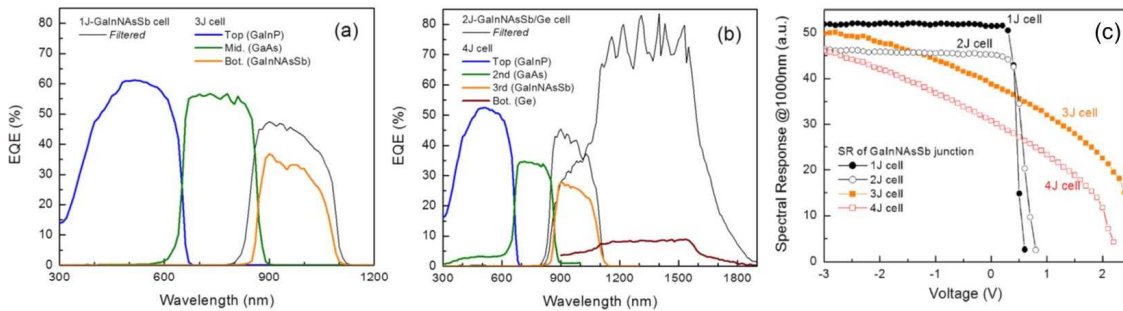
GaInNAs:Sb セルにおいて、十分な水準のキャリア収集効率を得るためには成長後の高温アニール処理 (従来条件では窒素雰囲気下で 850°C , 10 分) が必要であった。しかし、この温度条件は一般的に行われる他のサブセルの MOCVD 成長時の温度と比べて著しく高く、悪影響が懸念されるため、できるだけ低い温度で短時間の処理が好ましい。そこで初めにポストアニール条件の最適化に取り組んだ。十分な光キャリアを生成するため GaInNAs:Sb 層厚を $3\mu\text{m}$ とした単接合セルを MBE 法により作製し、アニール温度と時間を変化させることにより最適条件を探索した (図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a1-1)。その結果、従来行っていたアニール温度よりも 100°C 低い 750°C でも十分なキャリア収集が可能であることが見出された。また時間についても 5 分程度まで短縮しても性能が維持できることがわかった。

次に、MBE と MOCVD を用いたハイブリッド成長による多接合太陽電池を検討した。図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a1-2 には GaInNAs:Sb セルをベースとした 1J \sim 4J セルの分光感度特性を示す。GaInNAs:Sb 1J セル上に MOCVD で GaInP/GaAs セルを再成長したものが 3J セル、同様に GaInNAs:Sb/Ge 2J セル上に MOCVD で再成長したものが 4J セルである。良好な量子効率が得られた 1J および 2J セルに対し、MOCVD で再成長を行った 3J, 4J セルでは、GaInNAs:Sb セルのキャリア収集の劣化が生じた。この要因を探るため、GaInNAs:Sb 1J セルに対し、MOCVD 環境に起因した材料物性の変化を調べた。その結果、アルシン雰囲気でのアニールによって、GaInNAs:Sb 層中に水素原子が選択的に混入することが明らかになった。これはアルシンの熱分解によって発生する水素原子が試料表面から結晶内部に浸入し、N-H 結合を形成することによって取り込まれたと考えられる。GaInNAs:Sb のバンド内で N-H 結合はエネルギー準位を形成し、ドナー的なふるまいを示すことが知られており、これらの試料の C-V 測定においてもキャリア濃度の増加との相関

が得られている。その結果、内蔵電界が *i*-GaInNAS:Sb 層の一部にしか印加されず、フラットバンド領域で再結合ロスとなって GaInNAS:Sb セルのキャリア収集の劣化が生じたと考えられる。



図III-2-(ロ)-D-1-a1-1 GaInNAS:Sb 単接合セルのポストアニール条件の最適化。アニール時間 10 分で温度を変化させた場合の (a)分光感度特性 (b)電流電圧特性 (c)各パラメータのプロット (d)アニール温度を 750°C に固定し時間を変化させた場合の各パラメータのプロット



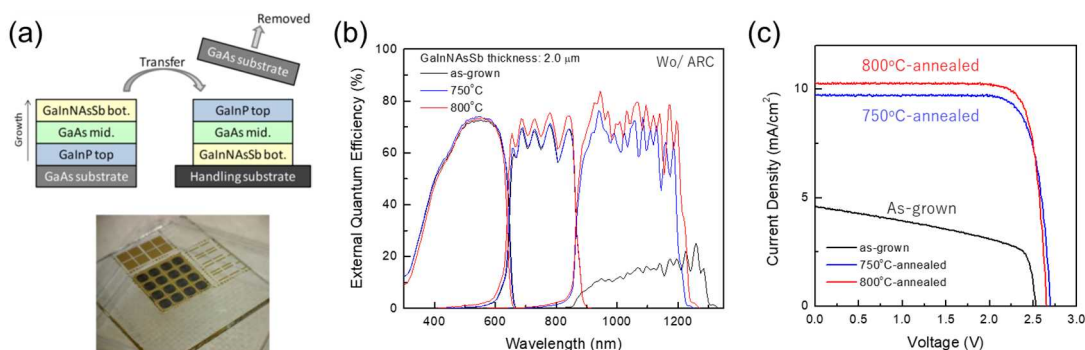
Growth order	1J-cell	2J-cell	3J-cell	4J-cell
Substrate	p-GaAs	p-Ge	p-GaAs	p-Ge
1	GaInNASb subcell by MBE	Ge subcell by MOCVD	GaInNASb subcell by MBE	Ge subcell by MOCVD
2	-	GaInNASb subcell by MBE	GaAs subcell by MOCVD	GaInNASb subcell by MBE
3	-	-	GaInP subcell by MOCVD	GaAs subcell by MOCVD
4	-	-	-	GaInP subcell by MOCVD

図III-2-(ロ)-D-1-a1-2 (a), (b)ハイブリッド成長により作製した多接合セルの分光感度特性 (c)各セルにおける GaInNAS:Sb セルの分光感度 (波長 1000 nm) のバイアス依存性

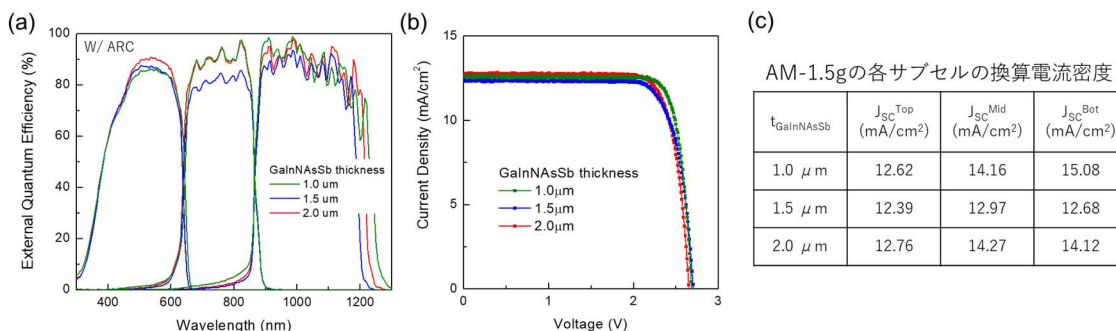
以上の知見を基に、GaInNAS:Sb セルの成膜後の MOCVD プロセスを行わない手法として、格子整合系逆積み型 3 接合セルを提案、検討した。まず、MOCVD で従来とは逆手順で GaInP, GaAs の各セルおよびトンネル接合を形成した。なお、最終的に成長に用いた GaAs 基板を取り除くために、基板とデバイス層の間にエッチストップ層を挿入している。次に MBE で GaInNAS:Sb セルを再成長させ、逆積み型 GaInP/GaAs/GaInNAS:Sb 3 接合セルを試作した。本検討ではエポキシ樹脂を用い、ガラス基板上にセルを転写した。

まず、逆積み 3 接合セルへのポストアニール条件を検討した。GaInNAS:Sb 層厚は 2.0 μm とした。図 III-2-(ロ)-D-1-a1-3 に、アニールなし (as-grown)、750°C・5 分、800°C・5 分 (窒素雰囲気) でアニール

ルを施した場合の太陽電池特性を示す。750°Cでのアニールによって、GaInNAS:Sb セルのキャリア収集効率が向上し、3 接合セルの電流電圧特性の改善が確認できた。また、800°Cのアニールでも他のサブセルへの影響はみられず、750°Cの場合と同程度の特性が得られた。次に、逆積み 3 接合構造における GaInNAS:Sb 吸収層厚の検討を行った (図III-2-(ロ)-D-1-a1-4)。いずれの試料でも同水準の特性が得られ、クラス A ソーラーシミュレータによる評価では 30%を超える効率を得た。一方、多接合セルではルミネッセンスカップリング効果の補正を含むより厳密な評価が必要とされ、その手法に基づき 28.2% (1.0 μm セル) が得られた。GaInNAS:Sb 層厚が最も小さい 1.0 μm のセルにおいても、他の厚さのセルと比べて遜色ない光電流密度が得られており、さらに空乏層厚が短く内蔵電界強度が大きいためキャリア収集効率が向上し FF の改善が得られた。分光感度特性を基にした換算電流を比較すると、いずれもトップセルが電流律速となっており、1.0 eV サブセルとして十分な電流が得られることが確認できた。本検討ではボトムセル側に Au リフレクター (電極) を設けており、その光トラッピング効果を考慮すると、1.0 μm 厚セル、1 回反射条件で実効的には 2.0 μm 厚に相当する光路長となる。光トラッピングがない場合に比べて光電流は 1.18 倍が得られる。一方、2 端子型モノリシック 4 接合の構成ではリフレクター構造の導入が困難であるため、GaInNAS:Sb 厚として 2.0 μm 程度必要となるが、本検討で最も厚い 2.0 μm の場合においても良好なキャリア収集特性が維持できていることから、4 接合展開が可能であると示唆される。



図III-2-(ロ)-D-1-a1-3 MOCVD/MBE ハイブリッド成長により作製した GaInP/GaAs/GaInNAS:Sb 逆積み 3 接合セルにおけるアニール温度の検討



図III-2-(ロ)-D-1-a1-4 MOCVD/MBE ハイブリッド成長により作製した GaInP/GaAs/GaInNAS:Sb 逆積み 3 接合セルにおける GaInNAS:Sb 吸収層厚の検討

本研究で開発した格子整合逆積み 3 接合セル (ILM3J セル) を用い、4 接合セルへ展開するためには 0.7 eV のサブセルが要求される。格子整合系で構成するためには、(i) Ge ボトムセルのエピ成長や、(ii) GaInNAS 系 0.7eV 材料の開発というアプローチが考えられる。しかし、Ge セルの場合には間接遷

移材料であるため光吸収層としては $100\ \mu\text{m}$ オーダーの厚さが必要であり、エピで構成するのは容易ではない。また GaInNAs 系材料の場合にはさらなる開発要素が必要となる。そこで、本研究では ILM3J セル (GaInNAs:Sb 厚= $2.0\ \mu\text{m}$) と Ge ボトムセルとを半導体接合法を用いて直接接合し、GaInP/GaAs/GaInNAs:Sb//Ge 4 接合セル (ILM3J+Ge1J セル) の試作を行った。接合工程では酸溶液中で表面の自然酸化膜層を除去したのち、ILM3J と Ge1J 試料の表面を合わせ、ファンデルワールス接合により一時的に固定したのち、大気中での加圧・加熱により直接接合させた。その後、上側の GaAs 基板をエッチングにより除去し、デバイス化プロセスを施した。図 III-2-(ロ)-D-1-a1-5 に 4 接合セルの分光感度特性と電流電圧特性を示す。いずれのサブセルに関しても各々の波長帯に対応する分光感度が得られており、4 接合セルとして動作させることに成功した。また、GaInNAs:Sb セルでは IQE は 60~70% 程度に留まるが、それ以外のサブセルについては 90% を超える IQE が得られたことから、半導体接合の 4 接合セル化への有効性が確認できた。AM1.5G 下での換算電流密度の比較から GaInNAs:Sb セルで電流が律速されていると考えられ、電流電圧測定においても確かめられた。GaInNAs:Sb セルの量子効率の低下は、キャリア収集効率の劣化によるものであり、アニール条件のずれや接合面におけるポテンシャルバリアの存在が可能性としてあげられる。なお、AM1.5G 光に加え、GaInNAs:Sb サブセルの吸収波長帯の追加光 (CW = 970nm の LED 光) を同時に照射することで FF の向上が得られたことから、今後実験条件の調整によって上記の問題点を改善し、GaInNAs:Sb セルにおける量子効率の向上を図ることで、4 接合セルとしての効率を大きく改善できることが期待される。

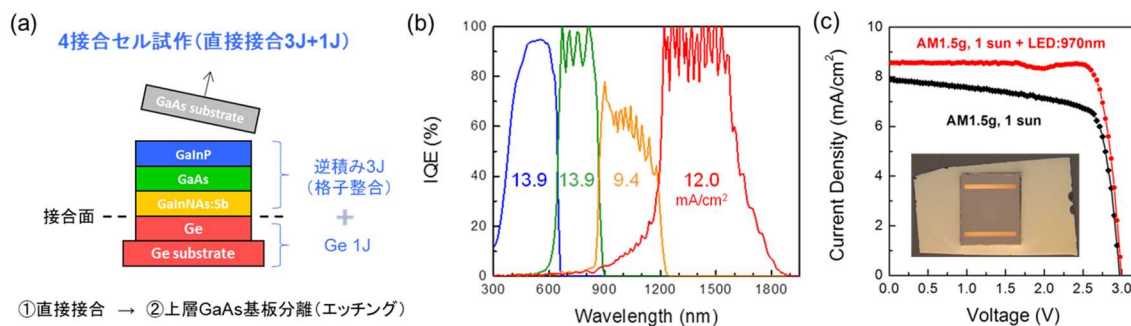
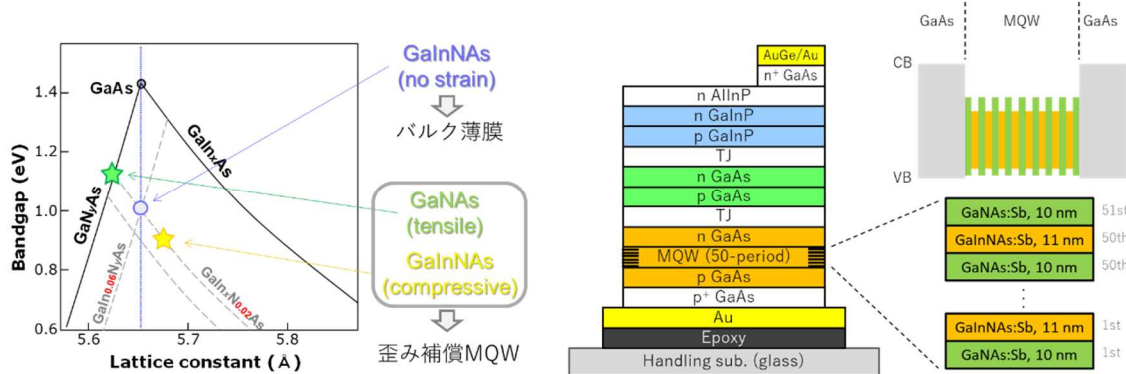


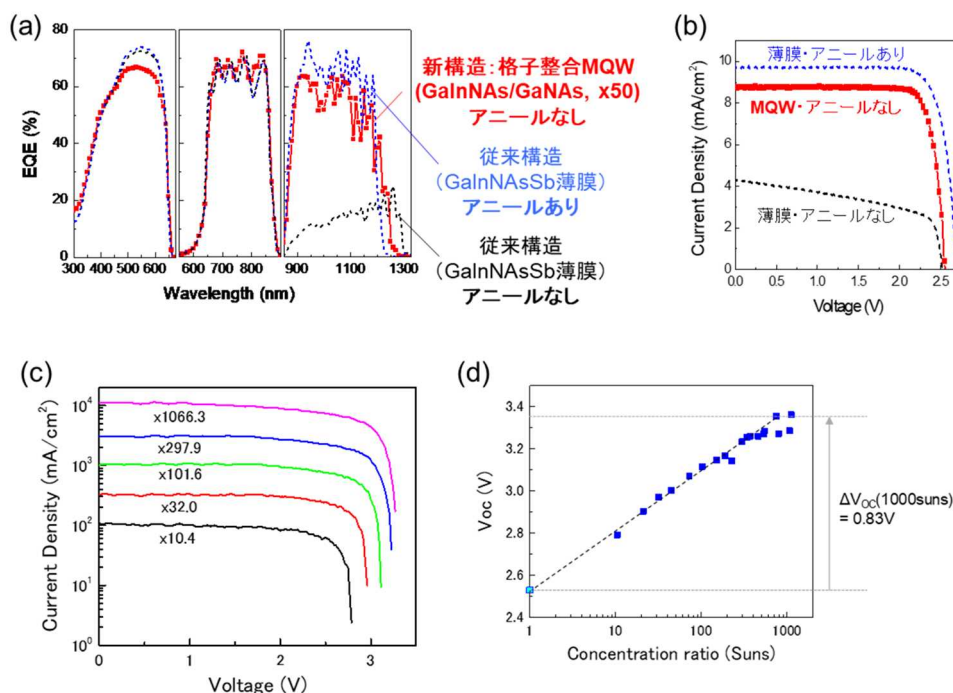
図 III-2-(ロ)-D-1-a1-5 半導体接合により作製した GaInP/GaAs/GaInNAs:Sb//Ge 4 接合セル

変換効率 50% に向けては集光セルへの展開が必須となる。これまでに開発を進めてきた $1.0\ \text{eV}$ の GaInNAs:Sb バルク薄膜セルではポストアニール処理が必要であり、条件の最適化によって 750°C までアニール温度を低下させることができたが、なおトンネル接合のピーク電流の劣化の影響が高倍集光下では懸念される。最終年度はバルク薄膜に代わる疑似格子整合系の GaInNAs:Sb/GaNAs:Sb 系歪み補償多重量子井戸 (MQW) セルを検討し、ポストアニールを行わなくても良好なセル特性を実現した。この MQW 構成は、In 組成を増やした GaInNAs:Sb 井戸層が圧縮応力を、GaNAs:Sb 障壁層が引張り応力を及ぼすため、繰り返し周期構造を採ることによって歪みの蓄積を補償することができ、MQW 層全体として GaAs 基板上に無歪みに製膜することができる (図 III-2-(ロ)-D-1-a1-6)。バルク薄膜と比較して、同じ $1.0\ \text{eV}$ の実効バンドギャップを実現する際に N 組成を低下させた設計が可能であり、N 添加に起因した結晶欠陥の導入を抑制し高品質な結晶成長が可能となる利点がある。図 III-2-(ロ)-D-1-a1-7(a) および (b) に MQW セルを用いた ILM3J セルの太陽電池特性を示す。ポストアニールは施しておらず、as-grown のセルで良好なキャリア収集効率を得られ、FF も 0.83 と良好であった。さらに集光下で評価を行うため、これまで

のエポキシによるガラス基板への転写に代えて、熱伝導の良い GaAs 基板へ直接接合により転写し、集光セル化した。図III-2-(ロ)-D-1-a1-7(c)および(d)に、~1000 倍集光までの電流電圧特性（片対数プロット）と、開放電圧の集光依存性をプロットした。~1000 倍集光下でもトンネル接合の劣化等は観測されず、開放電圧は 3.35V まで増大した（1sun から 0.83V の増加）。一方、直接接合を採ったことで光トラッピング効果は利用できていないため、ボトムの MQW セルに電流律速されたことで、電流電圧特性は裏面リフレクター付きの場合と比べ劣化が見られた。この点は今後構造の最適化によって改善を図る必要がある。しかし、ポストアニールが不要であることは、多接合セルの高効率化には有用な利点であり、また組成や厚さなど自由度の高い材料設計が可能であるため MQW 構造のさらなる研究発展によって現状よりも多様なバンドギャップ材料の設計に展開することができると考えられる。



図III-2-(ロ)-D-1-a1-6 GaInNAs:Sb/GaNAs:Sb 歪み補償 MQW セルを用いた ILM3J セルの概要

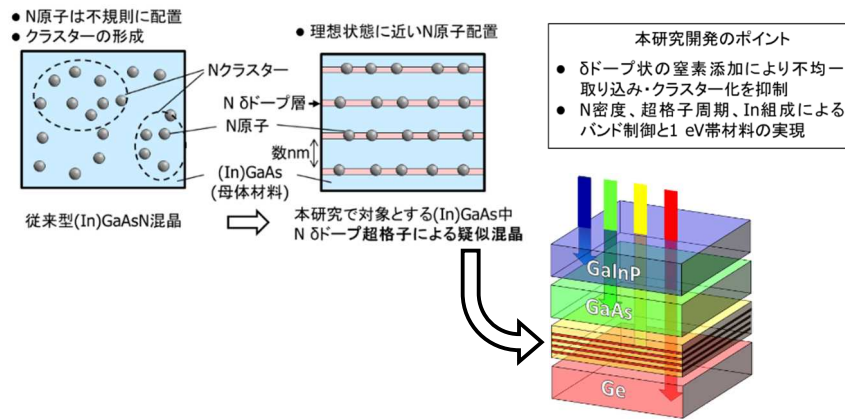


図III-2-(ロ)-D-1-a1-7 GaInNAs:Sb/GaNAs:Sb 歪み補償 MQW セルを用いた ILM3J セルの概要

III-2-(ロ)-D-1-a2. 多接合希釈窒化物【埼玉大学】

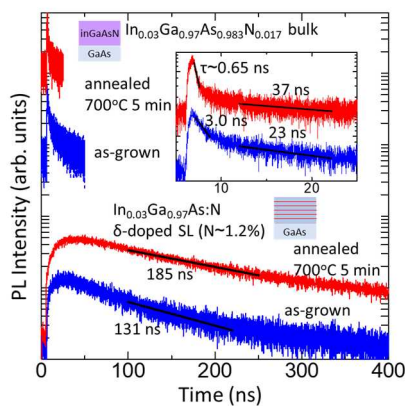
4 接合太陽電池の第3セルに適用可能な 1eV 帯の InGaAsN 高品質結晶を得るために、母体の InGaAs 中に窒素の δ ドープ層を数 nm の周期で繰り返し積層した超格子構造あるいは疑似混晶を利用した新しい成長方法を提案し（図III-2-(ロ)-D-1-a2-1）、その作製技術の確立と物性評価を行った。その結果、MBE

法でエピタキシャル成長が安定的に進行する窒素 δ ドープ層の形成条件を明らかにするとともに、In 組成と窒素添加量を変えることで結晶膜の格子歪とバンドギャップが制御可能であることを確認した。In 組成と窒素添加量の増加に伴いバンドギャップは減少し、超格子中の平均窒素組成 1.7%、In 組成 5%とした場合に成長した超格子のバンドギャップが約 1eV となることをフォトルミネッセンスおよびフォトリフレクタンスにより確認した。

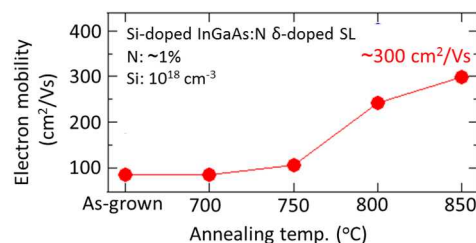


図III-2-(ロ)-D-1-a2-1 窒素 δ ドープ構造を利用した希釈窒化物混晶の作製

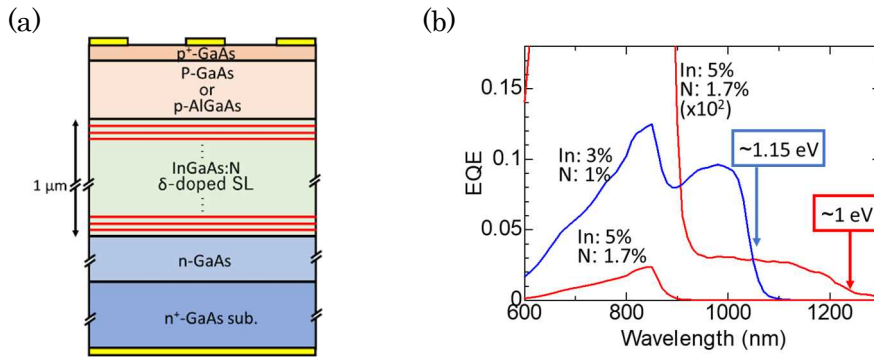
作製した超格子は通常の InGaAsN 混晶に比べ光励起キャリア寿命が 1-2 桁増大し、低温下で 100 ns を超える発光寿命成分が観測されることを見出した(図III-2-(ロ)-D-1-a2-2)。また、電子移動度として約 300cm²/Vs を得た(図III-2-(ロ)-D-1-a2-3)。電気特性の改善に必須のアニール処理は同時にバンドギャップの増加を引き起こし、バンド構造の設計上問題となった。このバンドギャップ増大はアニールが膜中の In-N 結合形成を促進することが一因として指摘されていることから、In と N を空間的に分離した新しい積層構造を提案した。その結果、この構造を適用することで In-N 結合形成量が減少し、アニールに伴うバンドギャップ増大の抑制に一定の効果があることを示した。試作セルは 1200nm (約 1eV) までの光感度を示したものの量子効率微弱であり、現状では改善の余地がある(図III-2-(ロ)-D-1-a2-4)。デバイスシミュレータによる解析から、界面品質や残留キャリアの制御性を改善することがセル効率の向上につながるの見通しを得た。



図III-2-(ロ)-D-1-a2-2
GaInNAs 混晶および InGaAs:N δ ドープ超格子の低温 (5K) 時間分解 PL 特性



図III-2-(ロ)-D-1-a2-3
n 型 InGaAs:N δ ドープ超格子の電子移動度のアニール温度依存性



図III-2-(ロ)-D-1-a2-4

(a) 試作 InGaAs:N δ ドープ超格子セルの積層構造と

(b) 外部量子効率スペクトル

III-2-(ロ)-D-1-a3. 多接合希釈窒化物【豊田工大】

GaInNAs セルの高効率化に必要な欠陥評価・解析を実施した。重水素化原料を用いて成膜した GaAsN の赤外吸収測定、過渡容量分光 (DLTS) 測定等での欠陥解析により、残留アクセプタの起源が NH 複合欠陥であり、ダブルアクセプタである可能性を示した。また、九州大学に再委託して、GaAsN 薄膜における欠陥構造の理論解析を行った (次項)。

実施計画見直しにより、本開発項目は 2016 年度で終了となったが、GaInNAs 材料の高品質化のためには、これらの N 起因欠陥の低減が必要であることを示した。

III-2-(ロ)-D-1-a4. 多接合希釈窒化物【九州大】

GaAsN 薄膜における欠陥構造の理論解析を行った。N を含む GaAs 128 原子モデル (N 組成 $x \sim 0.016$) を用いて VASP コードによる第一原理計算により材料の電子物性・構造物性を解析した。複合欠陥を含む材料の電子状態密度を図 III-2-(ロ)-D-1-a4-1 に示す。Ga 空孔複合欠陥は p 型の特性を示している。この意図せぬアクセプタ導入が GaAsN の高品質化を阻害している。また、H 複合欠陥の形成にも寄与している。

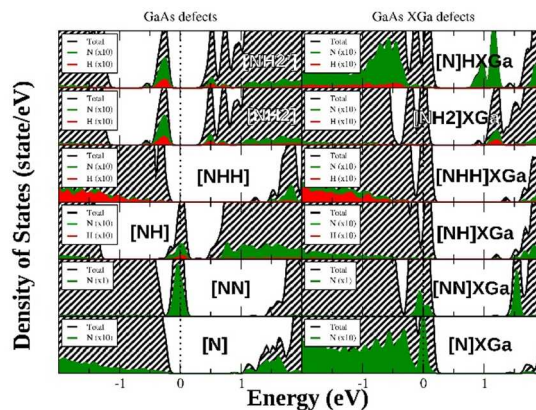
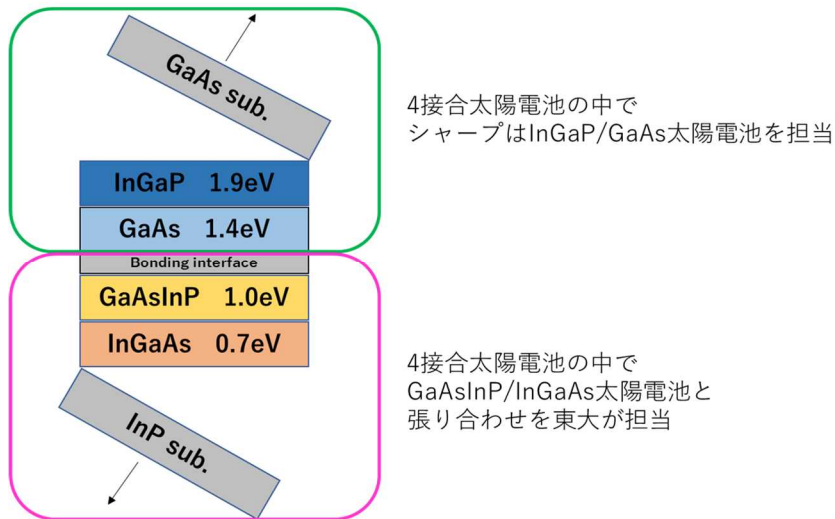


図 III-2-(ロ)-D-1-a4-1 第一原理計算による複合欠陥を含む GaAsN 材料の電子状態密度

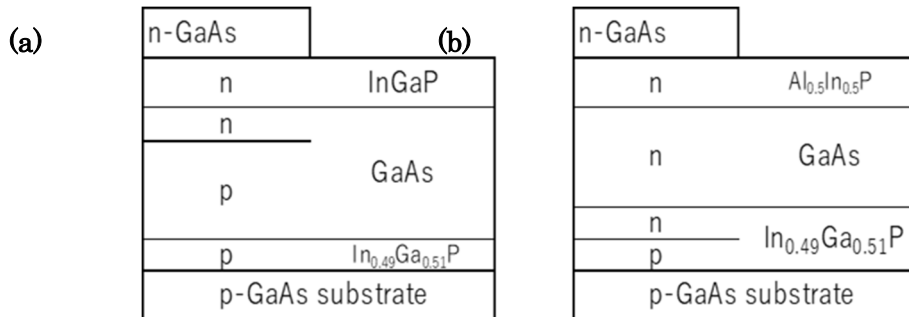
III-2-(ロ)-D-1-a5. 多接合既存構造【シャープ】

参画他機関と共同で4接合もしくは5接合型太陽電池を開発し、50%（集光時）の変換効率を目指すこと目標とし、当社は東京大学とメカニカルスタックの4接合構造での目標達成に取り組み、そのうち受光面側の2接合セル（InGaP/GaAs）の効率向上に取り組んだ。

具体的には、両セルのpn接合部に改良を加えた裏面ヘテロ構造の検討を行い、 V_{oc} の向上を得た。InGaP、GaAsそれぞれについて、いずれも従来比でInGaP: +0.046 V、GaAs: +0.044 V、2接合(InGaP/GaAs): +0.067 Vを得た。本構造で作製したセルは東京大学に提供し、評価検討を実施した。



図III-2-(ロ)-D-1-a5-1 4接合太陽電池構造図



図III-2-(ロ)-D-1-a5-2 構造比較 (GaAsセル) : 従来構造(a)、裏面ヘテロ構造(b)

表III-2-(ロ)-D-1-a5-1 プロジェクト前後での開放電圧の比較

	従来構造	裏面ヘテロ構造			
	(順積み)	(順積み)	上昇幅	(逆積み)	上昇幅
InGaP	1.440	1.486	0.046	1.445	0.005
GaAs	1.020	1.064	0.044	1.087	0.067
InGaP/GaAs	2.460	2.527	0.067	2.488	0.028

III-2-(ロ)-D-1-a6. 多接合量子構造【東京大学】

4 接合セルの電流整合を満たす第 3 セルとして 1.15 eV の光吸収端を有する量子井戸太陽電池の開発を進めた。従来用いていた InGaAs/GaAs/GaAsP 階段量子井戸構造において、GaAs_{0.6}P_{0.4} 障壁層の厚さを 3 nm 程度に抑えてキャリアのトンネル輸送を高効率に保ったまま InGaAs による吸収端を 1.15 eV まで長波長化するために、GaAs 中間層にも P を含有させて InGaAs の圧縮歪みをより効率的に補償できる新構造 (図 III-2-(ロ)-D-1-a6-1) を考案した。MOCVD による層構造の成長法を最適化し、新構造の階段状量子井戸を 70 層含む GaAs 単セルを作製した。AM1.5 照射下での測定により、4 接合セルの第 3 セルとして電流整合を達成するための目標である光吸収端 1.15 eV を得ることができた。開放電圧に関しては、光吸収端エネルギーと V_{oc} との差分として $W_{oc} = 0.35$ V を達成した。これは、本グループで作製した GaAs バルク単セルよりも良好な値である。さらに、GaAs 第 2 セルの下に挿入した場合を想定した 800 nm のフィルタ下での測定により、 $V_{oc}=0.77$ V、 $J_{sc}\approx 10$ mA/cm² (反射率補正後)、曲線因子 0.69 を得た。曲線因子以外は電流整合を達成するための第 3 セルの目標値をほぼクリアした。ただし、量子井戸の層数が 35, 60, 70 と増大するにしたがって、量子井戸の吸収波長域の量子効率や J_{sc} の増大は層数増大から期待される値を下回っており、層数の増大につれてキャリアの外部回路への取り出し効率が劣化していることが懸念された。

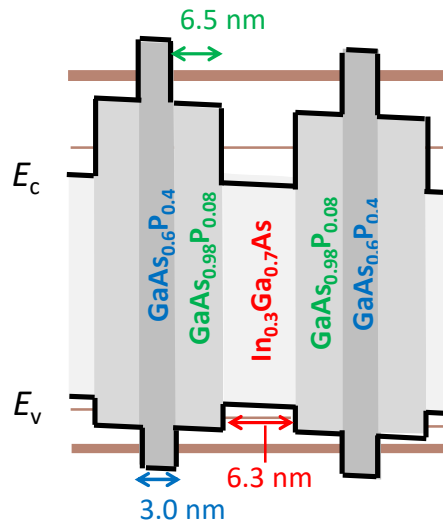
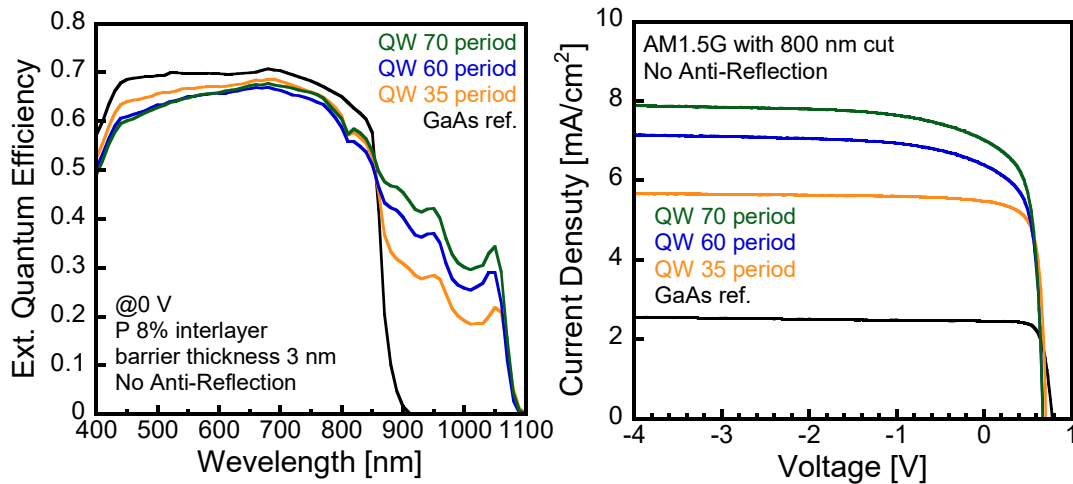
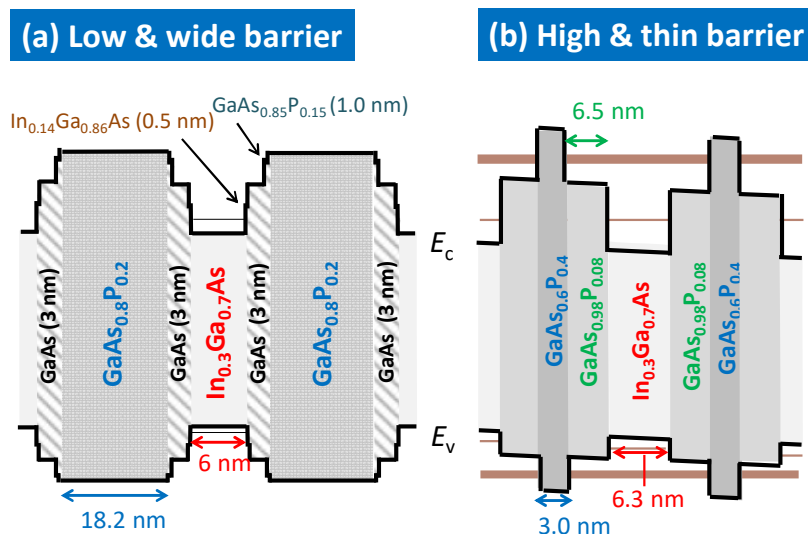


図 III-2-(ロ)-D-1-a6-1 キャリアのトンネル輸送を高効率に保ったまま InGaAs による吸収端を 1.15 eV まで長波長化するために、GaAs 中間層にも P を含有させて InGaAs の圧縮歪みをより効率的に補償できる新構造

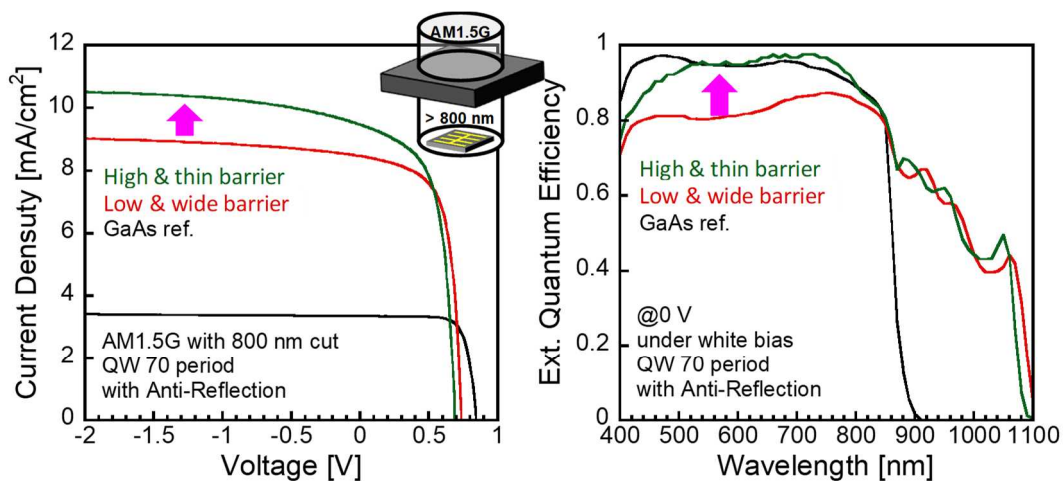


図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a6-2 InGaAs/GaAsP/GaAsP 階段量子井戸を挿入した GaAs 第 3 セルの量子効率と 800 nm フィルタ下での特性

量子井戸の層数が増えた際にキャリア取り出し効率の劣化を招かない構造を検討するため、従来用いていた InGaAs /GaAs /GaAsP 階段量子井戸構造において、歪み補償量子井戸における GaAsP 障壁層に関する 2 つの設計指針 (a: 厚く低い障壁、b: 薄く高い障壁) の優劣を検討した (図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a6-3)。(b)の構造は、上述の図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a6-1 の構造である。両構造の量子井戸を 70 層含む GaAs 単セルを作製し、その特性を比較した (図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a6-4)。短絡条件での内部量子効率に関して、量子井戸の吸収に対応する長波長領域での量子効率は両構造でほぼ等しいが、GaAs の吸収波長域では「b: 薄く高い障壁」のほうが量子効率が高くなった。これは、70 層の量子井戸を横断する少数キャリアの実効移動度が、「b: 薄く高い障壁」でより高くなっている。すなわち、キャリアのトンネルによる輸送がセルの特性向上に貢献していることを明らかにする結果である。4 接合の第 2 セルまでの光吸収に対応するカットオフ 800 nm の長波長透過フィルタのもとでの特性を測定し、効率 50%を得るための 4 接合第 3 セルに求められる特性を比較した。「b: 薄く高い障壁」を用いたセルでは、短絡電流に関しては要求をほぼ満たしているが、開放電圧が若干低く、曲線因子も不十分であった。これは、障壁を薄くするために量子井戸の歪みを圧縮方向にずらした結果、結晶品位が劣化したためであると考えられる。



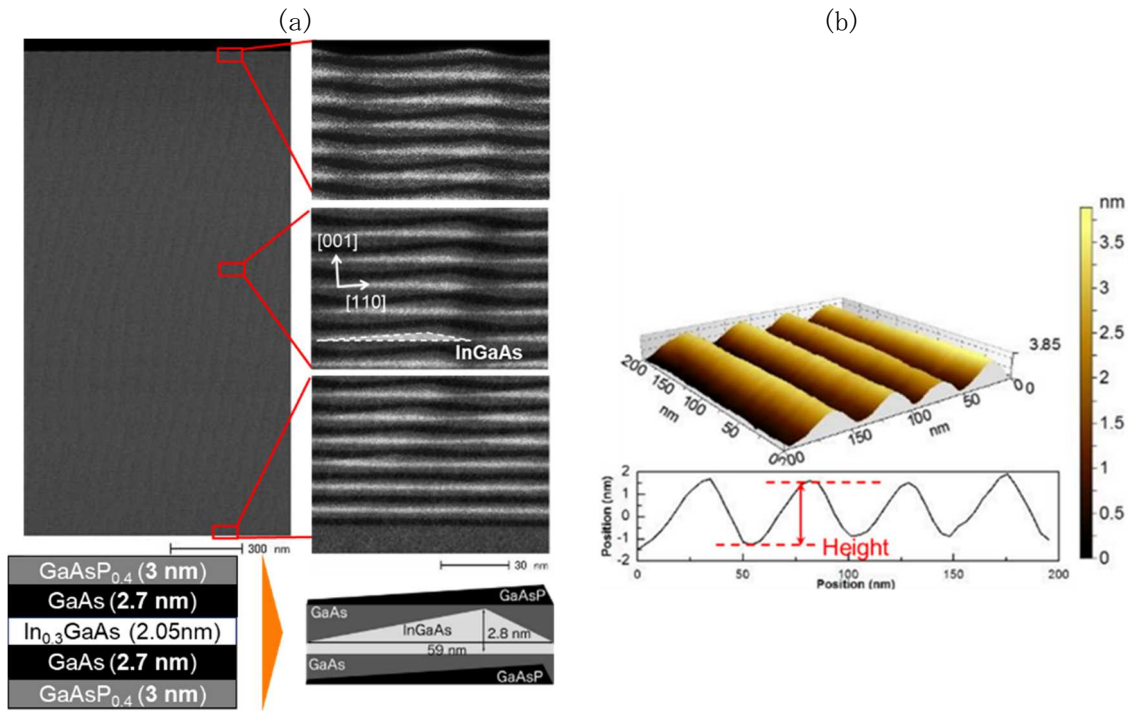
図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a6-3 InGaAs/GaAs/GaAsP 階段量子井戸構造に関する、2 つの設計指針の比較：(a) 厚く低い障壁、(b) 薄く高い障壁



	1 sun	Low & wide	High & thin	Goal for 4J
J_{sc} (mA/cm ²)		8.5	9.5	11.6
V_{oc} (V)		0.736	0.681	0.74
FF		65%	61%	77%

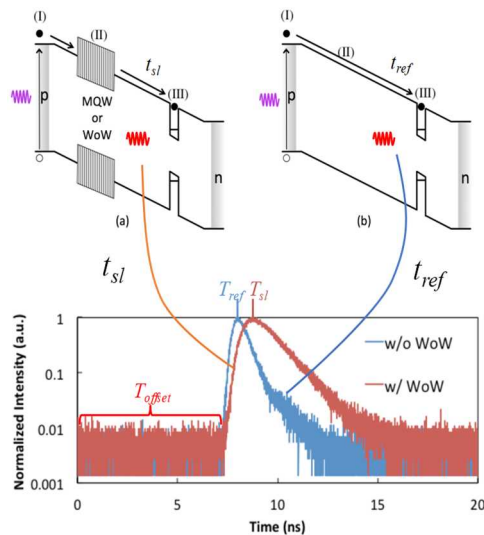
図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a6-4 図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a6-3 に示す 2つの設計思想の InGaAs/GaAsP/GaAsP 階段量子井戸を挿入した GaAs 第 3セルの量子効率と 800 nm フィルタ下での特性

電流整合に十分な光吸収と、光励起キャリアの外部回路へ取り出しを両立でき、かつ多数周期の結晶成長を高品位で実現できる構造として、波状量子井戸構造（図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a6-5）を検討した。本構造は、〈110〉方向に 6 度オフした (001) GaAs 基板上に適切な温度で成長した際に、ステップバンチングにより出現する高指数面と、その原料取り込みが (001) 面とは異なることにより出現する構造である。InGaAs 量子細線が量子井戸に載った形になっている。面内で GaAsP 障壁層が薄い部分が存在するので、そこを通して積層された InGaAs 井戸を跨ぐキャリア輸送がトンネル効果により促進され、GaAsP 障壁層が 3 nm の平坦量子井戸よりも光励起キャリアの外部回路への取り出しが促進されることが期待できる。一方、圧縮歪みがかかる InGaAs が 3 次元構造をとるため歪み応力の分散が平坦量子井戸よりも効率的に行われ、多数周期の積層が平坦量子井戸よりも容易なうえに、歪みによる結晶品位の悪化を抑制しやすい利点が期待される。



図III-2-(口)-D-1-a6-5 200層積層した InGaAs/GaAs/GaAsP 波状量子井戸構造の断面 TEM 像(a)と、InGaAs 波状量子井戸で成長を止めた表面の AFM 像(b)

このような波状量子井戸超格子を横切る電子・正孔の輸送に関して、平坦量子井戸との比較を行った。量子井戸構造を積層方向に跨いで移動するキャリアの実効移動度を測定するため、超格子の下部にキャリア検出用のバンドギャップが異なるプローブ井戸を実装したセル構造を作製し、time-of-flight 測定法により電子・正孔の実効移動度を求めた (図III-2-(口)-D-1-a6-6)。405 nm のパルスレーザー励起光照射により表面近傍で光励起キャリアが生成され、量子構造を横切って光励起キャリアが移動してプローブ井戸で発光するまでの時間を時間分解フォトルミネッセンスで測定した。量子構造を含まない参照セルでの測定値との差分をとって、量子構造を横切るキャリアの移動時間を求めた。量子構造全体の積層厚さをこの移動時間で割り、キャリアの移動速度を得た。セルに外部電圧を印加して量子構造にかかる電界を変化させながら、測定を繰り返し、移動速度の電界に対する傾きからキャリアの実効移動度を求めた。その結果を表III-2-(口)-D-1-a6-1 に示す。電子・正孔ともに、波状量子井戸は平坦量子井戸に比べて高い実効キャリア移動度を實現できることが示された。



量子構造をキャリアが走行するのに要する時間

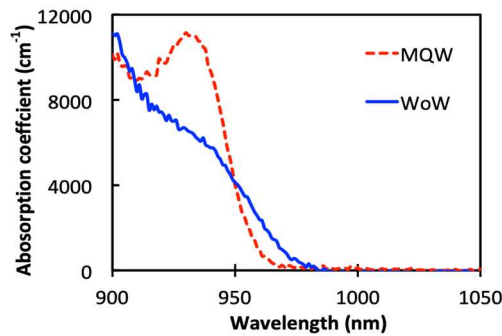
$$t_{sl} - t_{ref}$$

図III-2-(ロ)-D-1-a6-6 平坦量子井戸および波状量子井戸を積層方向に移動するキャリアの実効移動度を測定するためのプローブ井戸付きセル ((a)は量子構造、(b)はバルク GaAs の実効移動度用) のバンドアライメントと、測定した time-of-flight データ

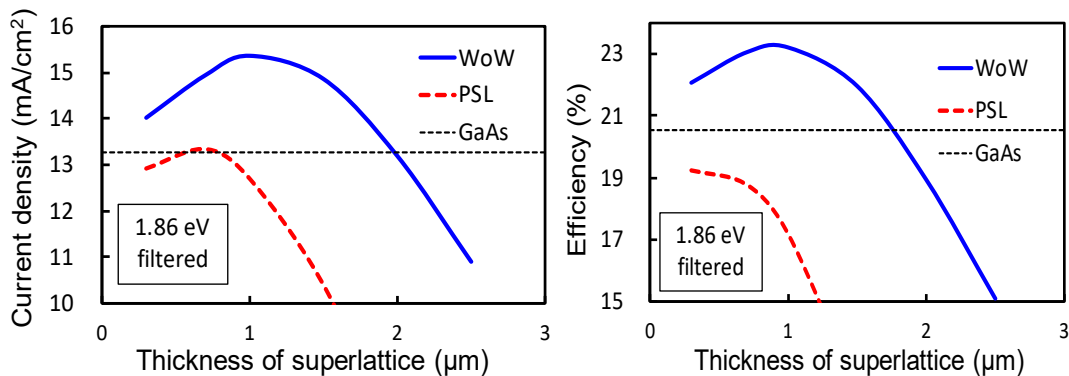
表III-2-(ロ)-D-1-a6-1 平坦量子井戸および波状量子井戸を積層方向に移動するキャリアの実効移動度の測定値

EFFECTIVE MOBILITY			
Carrier mobility [cm ² /(V · s)]			
Structure	electron μ_n	hole μ_p	average
			$\langle \mu_{sl} \rangle = (\mu_n + \mu_p) / 2$
WoW	5.10	2.67	3.89
MQW	1.21	1.45	1.33

これらの値もとに、デバイスシミュレーションを併用して平坦量子井戸と波状量子井戸それぞれを光吸収層に含む GaAs 単セルの特性を見積もった。まず、両構造の GaAs サブバンドギャップ波長帯における光吸収係数を測定した (図III-2-(ロ)-D-1-a6-7)。波状量子井戸では、その構造に由来して電子・正孔の波動関数が空間的にずれていると計算から予測されており、それを反映してエキシトン吸収の無いなだらかな光吸収となっている。また、波状量子井戸構造は平坦量子井戸に比べて不規則であることを反映してか、光吸収端もなだらかな形になっている。しかしながら、サブバンドギャップ波長帯の積分値は両構造でほぼ同じになっている。これらの実効移動度と光吸収係数のデータをもとに、積層した量子井戸を均一な物性 (実効バンドギャップ、光吸収係数、電子・正孔の移動度) を持つバルクと近似して、1次元デバイスシミュレーションに GaAs 単セルの光吸収層として入力することで、光照射下のデバイス特性を予測した (図III-2-(ロ)-D-1-a6-8)。平坦量子井戸に比べて波状量子井戸は、実効キャリア移動度の高いことから、約 100 周期 (積層厚さ約 1 μm) を GaAs 単セルに挿入することで、量子構造を持たない参照セルに比べて短絡電流が増大するだけでなく、変換効率も向上することが予測された。



図III-2-(口)-D-1-a6-7 平坦量子井戸および波状量子井戸の光吸収係数測定結果

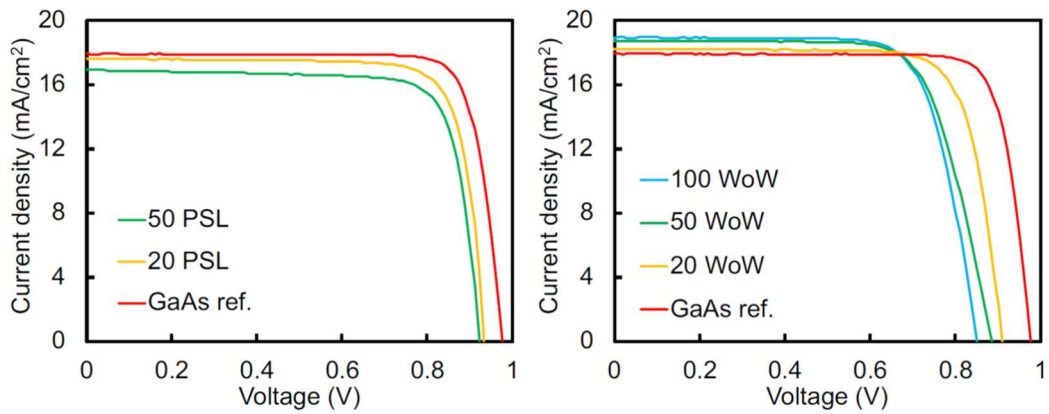


図III-2-(口)-D-1-a6-8 平坦量子井戸および波状量子井戸を光吸収層に含む GaAs 単セルの特性。量子構造を積層方向に移動するキャリアの実効移動度と光吸収の測定値をもとに、量子構造を擬似バルクとして扱った1次元デバイスシミュレーションにより推算した。横軸は、積層した量子構造全体の厚さ

この結果をもとに、量子構造の厚さが $1.0\mu\text{m}$ となる 100 周期を最大として、20, 50, 100 周期の平坦量子井戸および波状量子井戸を挿入した GaAs 単接合太陽電池を作製した。ただし、100 周期の平坦量子井戸を挿入した太陽電池は、結晶成長が困難で今回は作製できなかった。同じ 100 周期でも、3 次元構造を有する波状量子井戸のほうが歪みの蓄積が少なく結晶成長が容易なように感じられた。

1 sun 照射下の電流電圧特性 (図III-2-(口)-D-1-a6-9) を見ると、量子構造の挿入により実効バンドギャップが小さくなることに伴い、開放電圧が低下する傾向がみられる。これは、平坦量子井戸と波状量子井戸に共通の傾向である。一方、実効バンドギャップの縮小によりもたらされる光吸収の増大は短絡電流を増加させるはずであるが、このような傾向は波状量子井戸にのみ観察され、平坦量子井戸では逆に量子井戸の挿入により短絡電流が減少する結果となった。これは、平坦量子井戸ではキャリアの実効移動度が小さく、光励起キャリアを外部回路に十分回収できていないためであり、実効移動度の実測結果およびそれに基づくデバイスシミュレーションと整合する結果である。

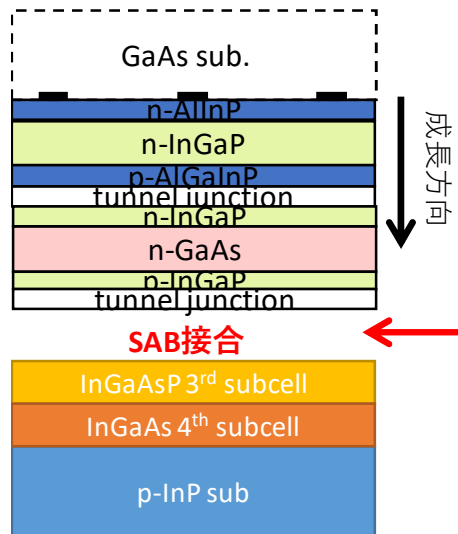
波状量子井戸を挿入した太陽電池の曲線因子が劣化しているが、これはコンタクト層のドーピング濃度が不十分で直列抵抗が重畳しているためであり、再度サンプルを作製してより優れた特性の太陽電池を得て、さらに詳細な比較を行う必要がある。



図III-2-(ロ)-D-1-a6-9 平坦量子井戸 (PSL) および波状量子井戸 (WoW) を挿入した GaAs 単接合太陽電池の電流電圧特性 (1 sun 照射下)

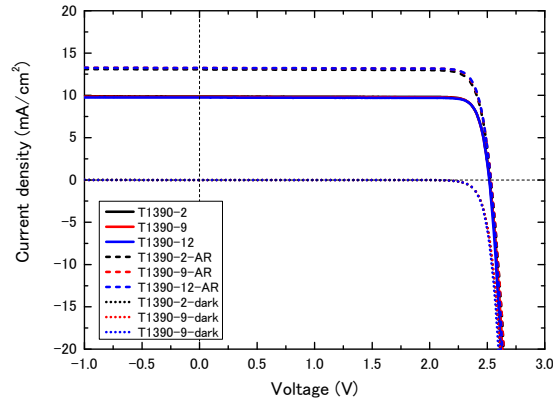
III-2-(ロ)-D-1-a7. 多接合ウエハ接合【東京大学】

シャープから提供された GaAs 基板の上の逆積み InGaP/GaAs トップ 2 接合に、東大で作製する InP 基板の上の InGaAsP/InGaAs ボトム 2 セルを、接合面に寄生構造がなく接合抵抗が低いと期待できる表面活性化ボンディングによりウエハ接合して、4 接合セルの実現を目指した (図III-2-(ロ)-D-1-a7-1)。



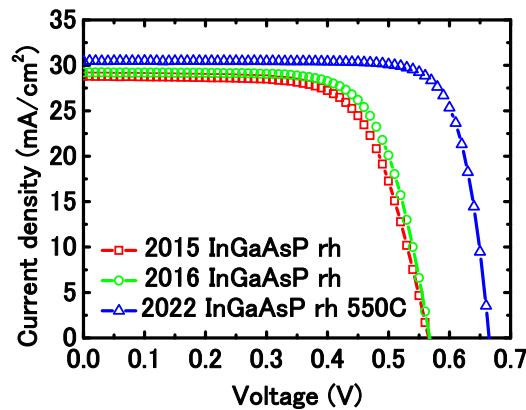
図III-2-(ロ)-D-1-a7-1 表面活性化接合による 4 接合セル形成法

InGaP/GaAs 逆積みトップ 2 接合は、シャープから供給されて、図III-2-(ロ)-D-1-a7-2 に示す良好な電流電圧特性を示した。これに接合されるボトム 2 接合を作製すべく、InP 基板の上の第 3 セル、第 4 セルの作製を進めた。



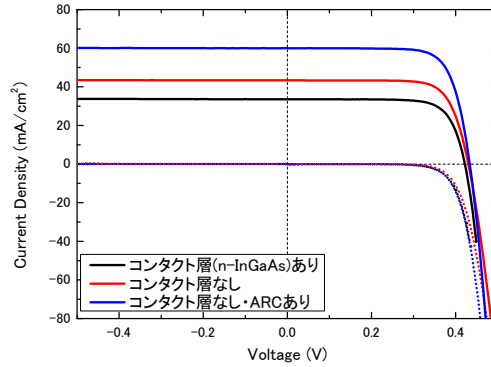
図III-2-(口)-D-1-a7-2 InGaP/GaAs 逆積みトップ 2 接合の電流電圧特性。表面無反射コーティングの有無を比較している

$E_g=1.04\text{eV}$ の InGaAsP セル層構造の結晶成長においては、成長温度が表面モフォロジーに大きく影響した。600°C以上の高温では、表面が凹凸化した。これには、我々が用いている有機V族原料 (TBP) や、MOCVD 反応器の形状 (ガス導入部からウエハまでの距離が比較的長く、供給した原料がウエハ表面に至る前に気相で寄生反応を起こして表面マイグレーションしにくい前駆体を生じやすい) が影響している可能性がある。また、十分な光吸収に必要な $2\mu\text{m}$ 以上を得る際に、膜厚が増加すると表面が凹凸化する傾向があった。一方で、低温成長では、結晶欠陥などが原因となって V_{oc} が上がらない。このような制約の中で、成長温度 550°C で比較的良好なセル特性を得ることができた (図III-2-(口)-D-1-a7-3)。ここでは、高速成長 GaAs セルの構造最適化の中で V_{oc} 増大に効果があるとみられたリアヘテロ構造構造を採用している。



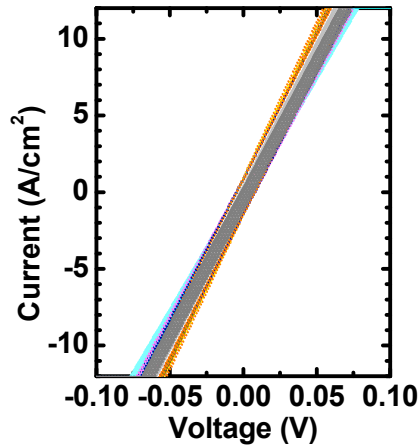
図III-2-(口)-D-1-a7-3 InGaAsP 第 3 セルの電流電圧特性。成長温度を 580°C から 550°C に低下させて比較的良好な特性を得た

一方、 $E_g=0.74\text{eV}$ の InGaAs 第 4 セルに関しては、バンドギャップが小さいので高品位な結晶を得ないと電圧がほとんど出ないという難しいターゲットであったが、幸い表面モフォロジーの課題はなく、結晶成長条件を最適化することで良好なセルを得ることができた。図III-2-(口)-D-1-a7-4 に示すように、 $V_{oc}=0.434\text{V}$, $FF=0.751$, 無反射コーティングつきで $J_{sc}=60\text{mA/cm}^2$ を得ることができた。 $W_{oc}\approx 0.30\text{V}$ であり、既往の文献にも見られないほどの良好な特性が得られている。



図III-2-(口)-D-1-a7-4 InGaAs 第4セルの電流電圧特性

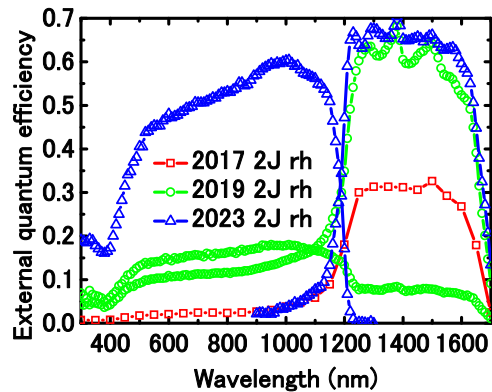
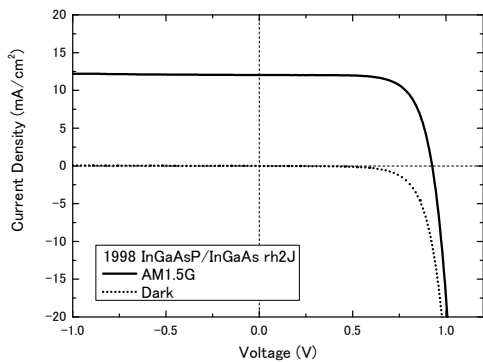
また、InGaAsP と InGaAs セルの間に挿入するトンネル接合に関しては、 $R_{\square \text{ave}} = 5.5 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$ と集光動作に十分な低抵抗を得た (図III-2-(口)-D-1-a7-5)。



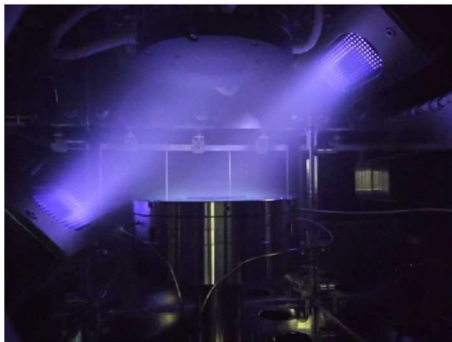
図III-2-(口)-D-1-a7-5 トンネル接合の電流電圧特性

これらの2セルをトンネル接合と組み合わせて、1.04eV InGaAsP と 0.74eV InGaAs の2接合セルを形成した (図III-2-(口)-D-1-a7-6)。上述の要素をすべて組み合わせた2接合セルとしての動作が確認できた。InGaAsセルの吸収波長帯域ではほぼ理想的な量子効率が得られているのに対して、InGaAsPセルの吸収波長帯域の量子効率が低い。これは、InGaAsPを表面モフォロジー悪化の関係で十分厚くできていないことが理由であり、InGaAsPの成長条件最適化がもう一段必要である。

GaAs基板ベースのトップ2セルと、格子不整合なInP基板ベースのボトム2セルを接合して4接合セルを作製するために、2~4インチサイズウエハ対応の表面活性化接合装置を立ち上げ、GaAsおよびInPウエハに対して機械的接合が成立する条件を求めた。接合にあたっては、接合面から酸化層など接合を妨げる表面汚染を除去するための、高真空中で高速原子ビームを照射する表面活性化プロセス (図III-2-(口)-D-1-a7-7) の条件調整が極めて重要である。

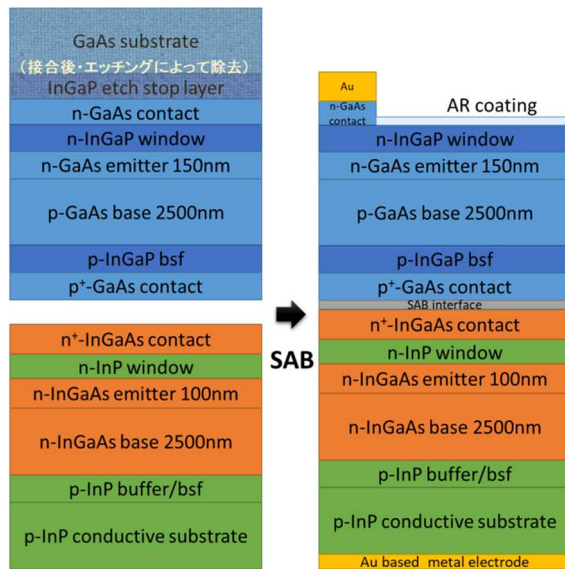


図III-2-(口)-D-1-a7-6 InGaAsP (1.04 eV)と InGaAs (0.74 eV)からなる InP 基板上2接合セルの特性 (無反射コーティング無し)

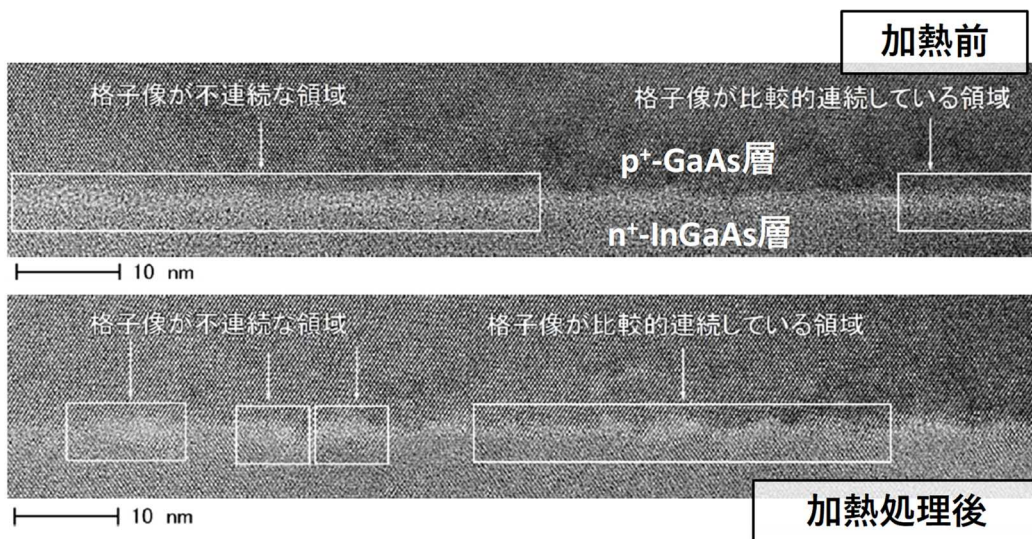


図III-2-(口)-D-1-a7-7 高速 Ar 原子ビーム照射による表面活性化プロセス

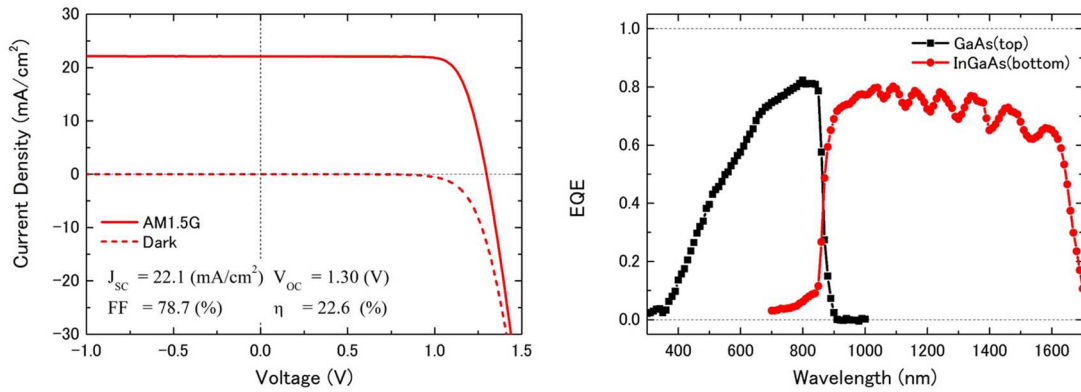
4接合を作製する前の技術検証として、GaAs 基板上に成長した GaAs セル、InP 基板上に成長した InGaAs セルを表面活性化接合により多接合化し、4 接合セルの第 2 セル、第 4 セルから成る 2 接合セルを作製した (図III-2-(口)-D-1-a7-8)。GaAs 基板側の p^+ -GaAs と InP 基板側の n^+ -InGaAs が高真空中での高速原子ビームによる表面クリーニングを経て接合し、接合面自体がトンネル接合として機能することを狙った。室温での接合では接合界面の電気抵抗が大きかったが、比較低温の熱処理により良好なオーム性接合が得られた。接合面を断面 TEM により解析した結果、接合後には接合面をアモルファス層が連続して覆っているが、アニール処理によりアモルファス層の一部が結晶化し、接合面を跨いで結晶が連続する部分が出てきている (図III-2-(口)-D-1-a7-9)。これが接合面の低抵抗化に寄与していると考えられる。トンネル接合の抵抗率は $100\text{m}\Omega/\text{cm}^2$ であるが、表面処理や熱処理の条件を最適化することでさらに 1 桁程度の抵抗低減が見込まれる。2 接合セルの開放電圧は 1.3 V と良好な 2 接合動作を示唆する値であった (図III-2-(口)-D-1-a7-10)。



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a7-8 GaAs 基板の上に成長した GaAs セルと InP 基板の上に成長した InGaAs セルの表面活性化ウエハ接合による 2 接合セルの構造

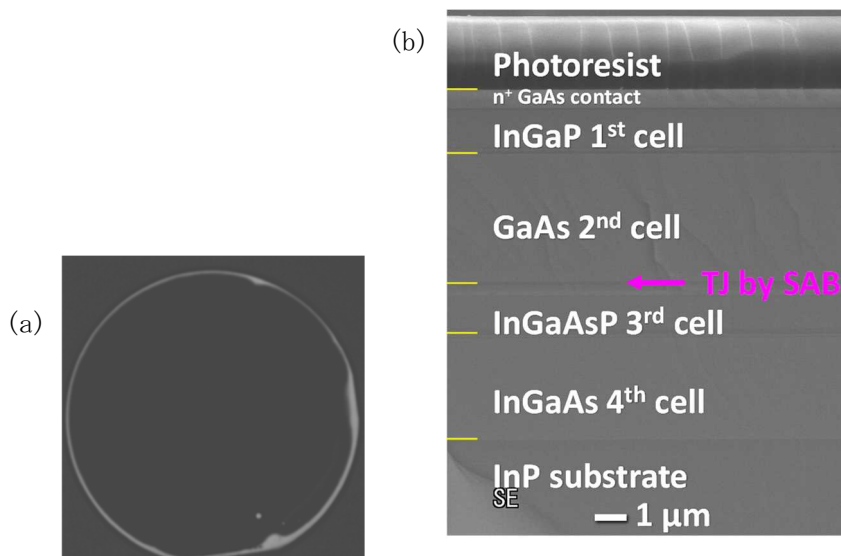


図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a7-9 GaAs/inGaAs 2 接合セルの表面活性化ウエハ接合による接合面の断面 TEM 像

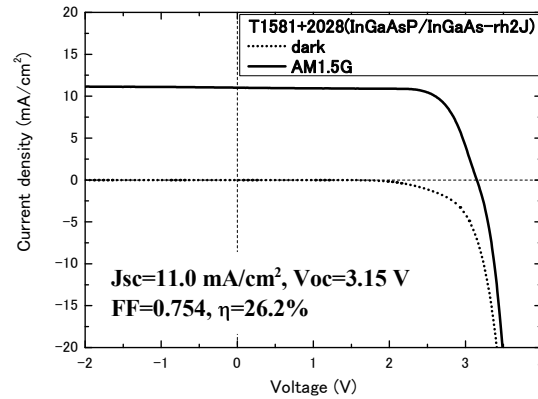


図III-2-(口)-D-1-a7-10 GaAs 基板に成長した GaAs セルと InP 基板に成長した InGaAs セルの表面活性化ウエハ接合による 2 接合セルの特性

本接合技術をもとに、GaAs 基板の 2 セルと InP 基板の 2 セルを接合した 4 接合セルを作製した。図III-2-(口)-D-1-a7-11 に示すように、void の無い良好な接合面が得られた。電流電圧特性（図III-2-(口)-D-1-a7-12）および分光量子効率の測定から、短絡電流は InGaAsP 第 3 セル (11.0 mA/cm²) であったが、光吸収層 InGaAsP の厚さを 2 μm まで表面モフォロジーを保ったまま増大することができたので、InGaAsP 第 3 セルからの短絡電流はトップ 2 セル (12.5 mA/cm²) とあまり変わらないレベルに到達できた。一方で、V_{oc} は 3.1 V と目標とする 3.5 V には届いておらず、これが効率が低く留まっている原因である。InGaAsP 第 3 セルの更なる特性向上と、ウエハ接合プロセスでセルの効率を低下させない条件最適化がもう一段必要である。とくに、接合後のアニール処理温度が高いとセルの特性を劣化させやすいため、この点をもう一段最適化する必要がある。



図III-2-(口)-D-1-a7-11 表面活性化ウエハ接合による 4 接合セルの特性
 (a) 赤外線カメラで観察した表面。void 無しにウエハが接合できていることを示す
 (b) セルの断面 SEM 層



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a7-12 表面活性化ウエハ接合による4接合セルの特性

Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a8. 多接合動作解析【宮崎大学】

エピタキシャル多接合・多接合動作解析では、最適なキャリア回収効率を示す各接合バンドラインナップの設計により、集光下効率50%以上の他接合セル実現に寄与することを目標として研究開発を実施した。

超高効率セル実現を目的として光吸収層に挿入した量子井戸 (MQW) におけるキャリア緩和過程の詳細説明を実施した。MQW を挿入することで光吸収領域を長波長側 (低エネルギー側) へ拡張できるが、同時に MQW 内で形成されたキャリアの再結合損失が生じる。そこで MQW 内に形成された光励起キャリアの発光・非発光・熱脱出過程をそれぞれ高感度評価し、キャリア回収過程における内部電界およびセル温度の影響を明らかにして高いキャリア回収効率をもつ多接合構造の提案を行った。

ミドルセルとして InGaAs/GaAsP 歪補償超格子 (SL) 構造を採用することで、太陽光吸収波長領域を長波長側に拡張できること、形成されるミニバンド内をキャリアがトンネリングにより輸送されるという利点がある。まず初めに、電界印加下でのバンド構造等の理論計算を実施した。nextnano ソフトウェアの導入により、太陽電池の内部電界によってミニバンドが局在化し Wannier-Stark ladder (WSL) と化することを示した。WSL における電子の存在確率をベッセル関数に基づいた解析から算出したところ、図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a8-1 に示すように高次あるいは低次の光学遷移 (光吸収) のみが生じることを理論と実験値から示した。また、SL 構造のキャリア輸送時には図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a8-2 に示すようなトンネリングと多重フォノン放出によるエネルギー損失が同時に起きていることをフォトリフレクタンス解析から明らかにした。

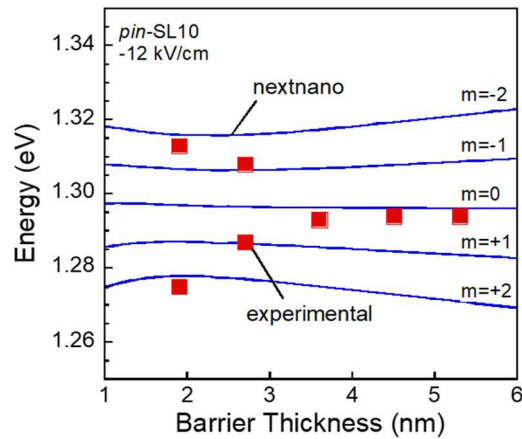


図 III-2-(ロ)-D-1-a8-1 遷移エネルギーの理論値(nextnano)

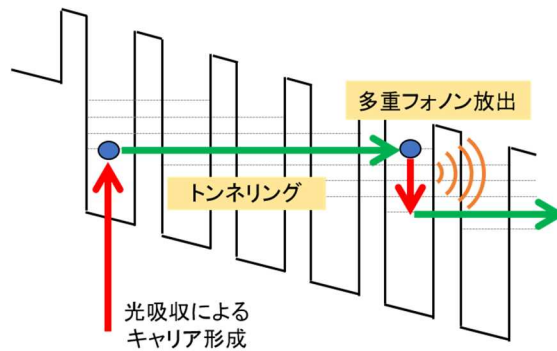


図 III-2-(ロ)-D-1-a8-2 内部電界下でのキャリア輸送とフォトフレクタンス解析結果の比較

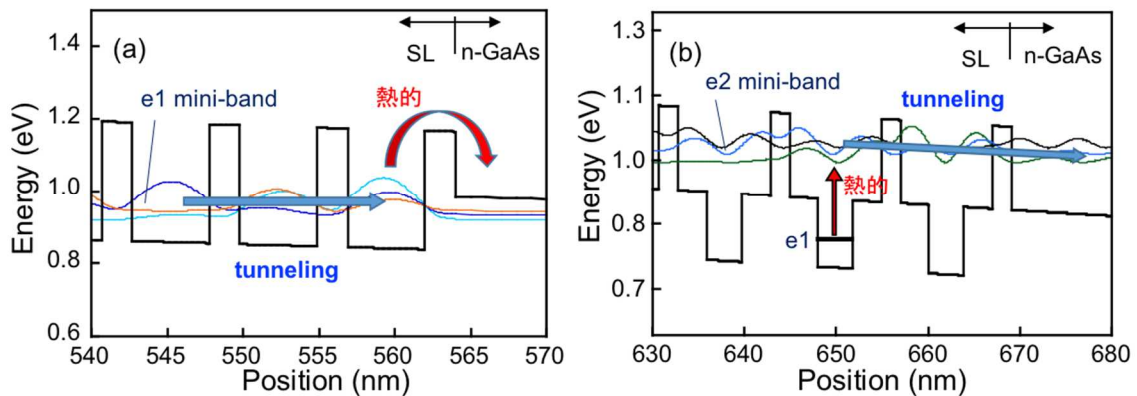


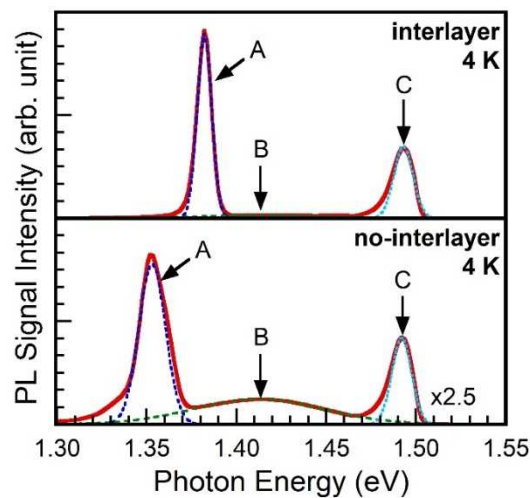
図 III-2-(ロ)-D-1-a8-3 (a)歪緩和層無しおよび(b)歪緩和層有り SL 構造におけるキャリア輸送

光吸収 i 層に SL 構造を挿入した GaAs 太陽電池では、太陽光を十分に吸収するために数 10 スタックの SL 構造を積層させる必要がある。そこで、SL 構造の障壁層と井戸層の間に GaAs 歪緩和層を挿入した試料を用意した。これによって歪の蓄積を回避でき、20 スタックの積層を実現できた。歪緩和層有無の SL 構造領域のバンド構造を、nextnano を用いて計算した結果を図 III-2-(ロ)-D-1-a8-3 に示す。図 III-2-(ロ)-D-1-a8-3(a) に示す歪緩和層無し SL では一次の電子準位 $e1$ がミニバンド化してトンネリングによって輸送できる。しかしながら実際は歪の蓄積によって界面に非発光再結合欠陥が形成され、輸送効率が低下する。さらに、ミニバンドは最右端 InGaAs 井戸層で終了しているため、ここへ到達した電子は最後の GaAsP 障壁層を熱的に乗り越えて n-GaAs 領域へ到達する必要がある。一方、図 III

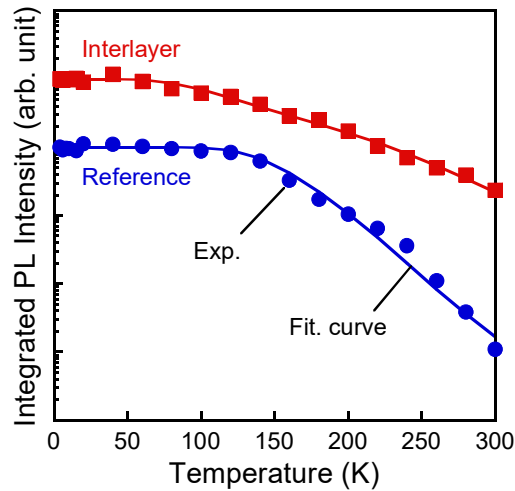
-2-(ロ)-D-1-a8-3(b)に示す歪緩和層有り SL では e1 ではなく二次の電子準位 e2 のみがミニバンド化した。フォトルミネッセンスおよび表面光起電力信号の温度変化測定およびアレニウスプロット解析から、e1 に光励起された電子が e2 へ熱的に励起された後にトンネリングによって輸送されることが分かった。また、e2 ミニバンドは n-GaAs 領域まで染み出しているため、再結合することなくアノード領域へ電子が到達する。この結果、従来の SL 構造挿入 GaAs 太陽電池にくらべてキャリア輸送効率が改善される可能性が高いという知見を得た。

上記の nextnano ソフトウェアによるバンド計算から、図III-2-(ロ)-D-1-a8-3(b)に示すように階段状のポテンシャルになっており、1 次の電子準位 e1 以外に 2 次の電子準位 e2 も形成され且つミニバンド化した事が明らかになった。そのため、SL 構造でのキャリア輸送過程は非常に複雑になる。そこで、GaAs 歪緩和層を有する InGaAs/GaAsP 歪補償 SL 構造を GaAs *p-i-n* 太陽電池光吸収層に挿入した試料に対して、二つの光学的評価手法を用いて、支配的なキャリア輸送過程の同定を行った。

図III-2-(ロ)-D-1-a8-4に極低温 4 K における GaAs 歪緩和層挿入サンプル（上部 interlayer）と挿入していないサンプル（下部 no-interlayer）のフォトルミネッセンス（PL）スペクトルを示す。両サンプルともに A、B、C の三つの PL ピークが観測された。C ピークは GaAs 基板起因の発光ピークであり、B ピークは GaAs 層の欠陥起因の発光ピークと考えられる。理論計算との比較より、A ピークが e1 中電子と価電子帯の 1 次の重い正孔の離散化準位 hh1 間の発光再結合 e1-hh1 であると同定した。図III-2-(ロ)-D-1-a8-5には、A ピークの積分強度を試料温度の関数としてプロットした。

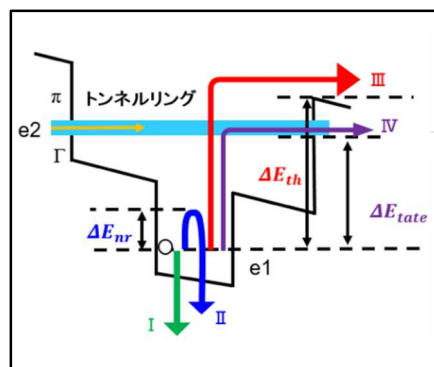


図III-2-(ロ)-D-1-a8-4 極低温での PL スペクトル

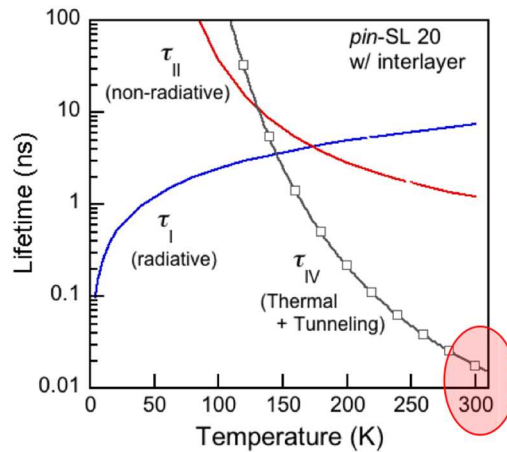


図III-2-(ロ)-D-1-a8-5 A ピークの積分強度温度変化

図III-2-(ロ)-D-1-a8-5 に示した A ピーク積分強度の温度変化は、SL 内電子準位 e1 に光励起された電子の緩和過程を反映した結果である。より詳細な定量解析を行うために、太陽光吸収によって e1 に注入された電子に対して、I: 発光再結合損失、II: 非発光再結合損失、III: e1 から GaAsP 障壁層を超えて熱励起、IV: e1 から e2 へ熱励起した後に e2 ミニバンドをトンネリング、の四つの緩和過程を定義した (図III-2-(ロ)-D-1-a8-6)。実験値は電子の発光再結合に伴う発光と非発光再結合に伴う発熱をそれぞれ PL 法と圧電素子光熱変換分光 (PPT) 法で検出したものを用いた。四つの緩和過程を考慮した速度方程式を用いて、PL と PPT 信号の積分強度の温度変化をフィッティングした。フィッティングによって算出された各緩和過程の活性化エネルギーは、nextnano によって計算したバンド構造のエネルギー差とよく一致したことから、緩和過程の定義が妥当であったことを確認できた。次に、フィッティングで得られたベストフィットパラメータを用いて、四つの緩和過程の寿命 (τ_I , τ_{II} , τ_{III} , τ_{IV}) を算出した。図III-2-(ロ)-D-1-a8-7 に結果を示す。150 K 以下の低温では τ_I が最短で、発光再結合損失が支配的な緩和過程であることを意味する。一方、150 K 以上の高温では τ_{IV} が最短であった。つまり、GaAs 歪緩和層を挿入することで階段状ポテンシャル化した結果、太陽電池が動作する室温付近では、緩和過程IVが支配的であることが実験的に確かめられた。この結果、GaAs 歪緩和層を有する InGaAs/GaAsP 歪補償 SL 構造では再結合によってキャリアが損失する割合が大きく減少し、キャリア回収効率が大きく向上することが期待できるという知見を得た。

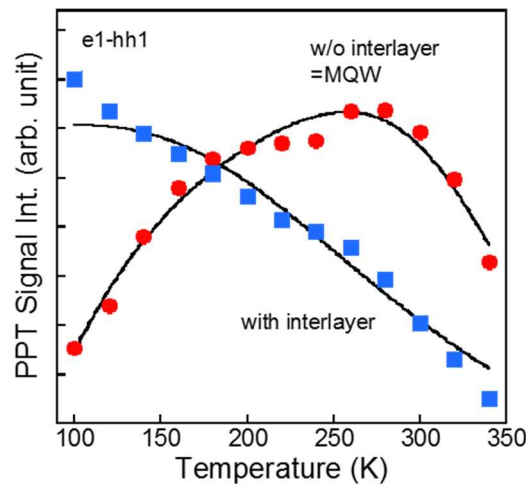


図III-2-(ロ)-D-1-a8-6 e1 電子に対する四つの緩和過程

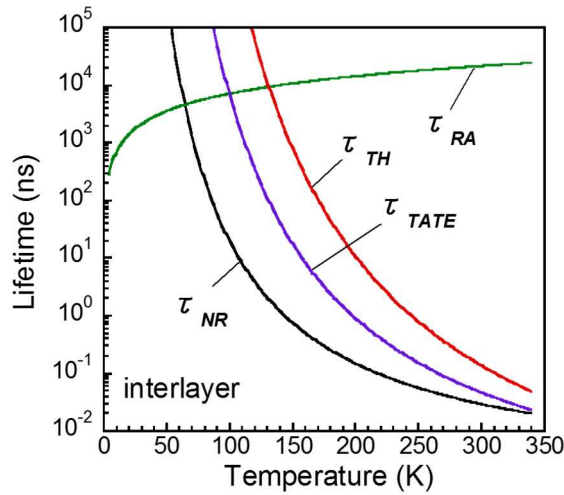


図III-2-(口)-D-1-a8-7 算出された各緩和過程の寿命変化

但し、太陽電池の動作温度である室温付近では PL 信号強度が小さく、測定と解析は困難であったため、解析結果の不確定さが残る。そこで、高温域においても非発光再結合を検出できる PPT 法に着目し、歪緩和層の挿入がキャリア輸送特性に及ぼす影響を議論した。液体窒素温度 (80 K) から室温以上 (340 K) の温度範囲で PPT スペクトルを測定したところ、e1-hh1 遷移起因の PPT ピークが明確に観測された。図III-2-(口)-D-1-a8-8 に、低温から室温以上の温度 (340 K) の温度範囲での PPT 信号強度変化を示す。GaAs 歪緩和層の有無によって高温側の温度変化に明確な違いが観測された。図III-2-(口)-D-1-a8-6 に示した四つの緩和過程を定義したモデルを用いて、上述と同様のフィッティング解析を行い各緩和過程のライフタイムを算出した。結果を図III-2-(口)-D-1-a8-9 に示す。



図III-2-(口)-D-1-a8-8 PPT 信号強度の温度変化



図III-2-(ロ)-D-1-a8-9 室温以上での各緩和過程寿命変化

解析から、全温度領域においてII（非発光再結合損失）のライフタイム τ_{II} が最短になった。この原因は成長時の歪補償が不十分で格子欠陥が増加するためと考えられる。詳細は現在調査中である。一方で、I（発光再結合損失）以外の全てのライフタイムは温度上昇に伴い急激に減少し、340 K付近ではIV（e1 から e2 へ熱励起した後 e2 ミニバンドをトンネリング）のライフタイム τ_{IV} は τ_{II} のライフタイムと同等になった。以上の結果より、実際のデバイス動作環境である室温以上の試料温度（～350 K）での PPT 測定解析から、デバイス動作温度でもミニバンドトンネリング輸送が支配的となり、キャリア輸送特性を改善できることが示唆された。InGaAs/GaAsP 系量子ナノ構造では、(1)低 P 組成障壁層時にミニバンドトンネリングが増加するが、成長時の歪補償が不十分で格子欠陥が増加すること、(2)高 P 組成障壁層では結晶品質はよいが、ミニバンド幅が狭くなること、が分かった。(1)と(2)のトレードオフを考慮した最適設計が必要である。

光吸収層に InGaAs/GaAsP 超格子構造を挿入したエピタキシャル多接合セルにおけるキャリア回収過程を、3つの非破壊評価技術で評価解析を行った。井戸層と障壁層の格子ひずみ緩和を目的とした GaAs 歪補償層を挿入すると高次の電子準位がミニバンド化する。この新たなバンドラインナップを持つ太陽電池セルに対する PL と PPT 信号の温度変化解析から、高次ミニバンドのトンネリングが支配的な緩和過程であることが定量的にわかった。また、実際のデバイス動作環境である室温以上の試料温度（～350 K）での PPT 測定解析から、デバイス動作温度でもミニバンドトンネリング輸送が支配的であり、キャリア輸送特性を改善できることを確認した。

Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b1. 量子ドットマルチバンド【東京大学】

(1) 量子ドット超格子太陽電池の高効率化と構造設計

太陽電池の高効率化の1つの方法として量子ドットを用いた太陽電池が提案され、膨大な研究努力が積み重ねられてきた。本研究では、量子ドットを1)単接合セルとして用いた場合、2)タンデムセルのボトムセルとして用いた場合、の2通りに分けて理論解析を行い、一部実験との比較も行って、高効率化に向けての問題点や有用性・可能性を検討した。

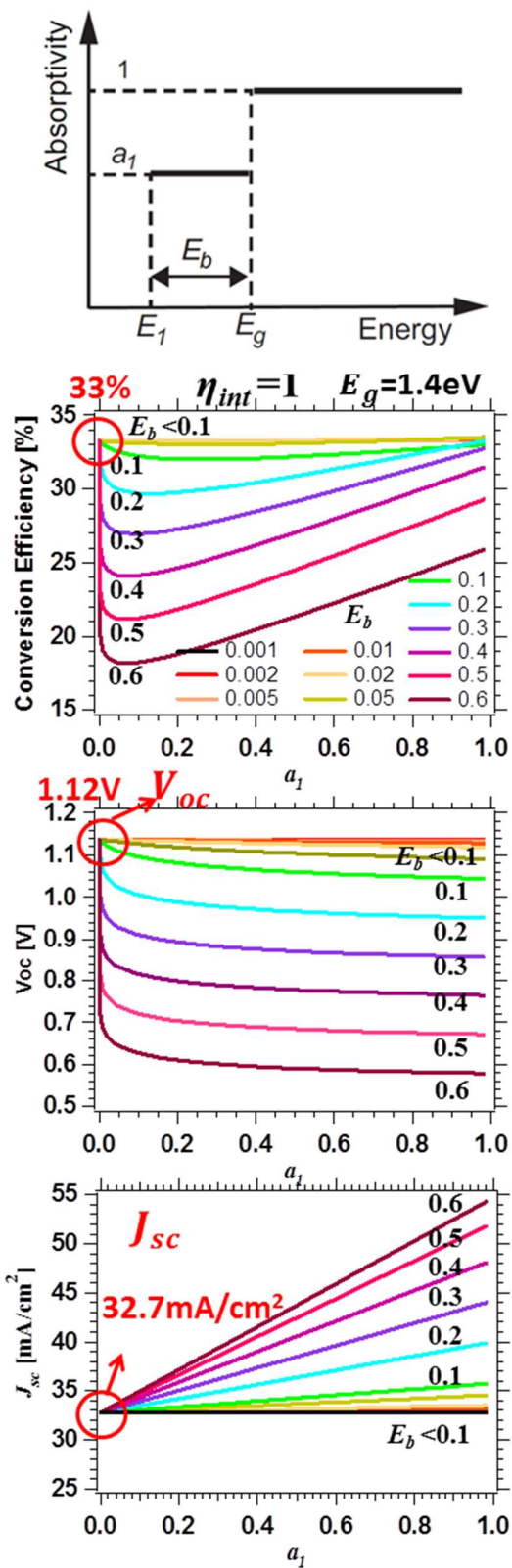
量子ドット単接合セルの場合

中間バンド太陽電池は、単接合セルでも、非集光で45%、最大集光で63%の理論変換効率の可能性を秘めている。その実現に向けては、結晶成長技術や学術研究の蓄積が最も豊富な、エピタキシャル成長したGaAs系半導体に埋め込まれたS-K型のInGaAs量子ドットへの期待が大きい。しかし、これまでの実験報告では、ホスト材料であるGaAsのバルクセルを上回る性能は得られていない。

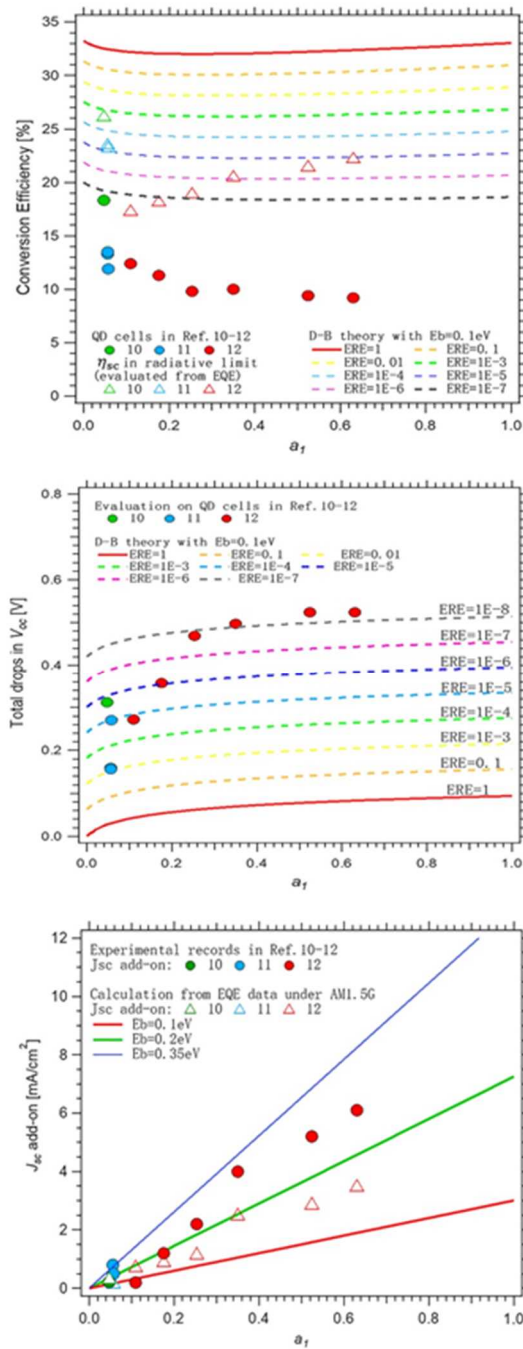
現状、2つの課題があると考えた。1つ目は、フォノンボトルネック効果の有無、2つ目は、量子ドットを埋め込んだ結晶の高品質維持の有無である。高効率の中間バンド太陽電池は、フォノンボトルネック効果有り、高品質維持も有りのもとでなければ実現できない。

我々は、結晶品質は高く維持されているが、フォノンボトルネック効果が無い場合（中間バンド太陽電池として機能していない量子ドット太陽電池）を仮定し、量子ドットと伝導帯の電子の分布に熱平衡条件が成立するとして、短絡電流、開放電圧、曲線因子、変換効率の計算を行った。計算には2ステップ吸収モデルを用いた(図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b1-1)。わずかに量子ドットを導入しただけで著しく開放電圧が低下し、量子ドットによる1段階目の吸収の分だけの電流増加を加味しても、最終的な変換効率が低下することが分かった。これは、高い結晶品質が維持されている「理想結晶」の場合でも見られ、フォノンボトルネック効果が無い場合には必ず生じる内因的(intrinsic)な電圧低下効果であることが分かった。欠陥増加など外因的(extrinsic)な要因で結晶品質が低下して、外部発光効率が低下すると、その対数に比例して、更に開放電圧が低下することも明らかにした。[L. Zhu *et. al.*, Scientific Report 8, 11704 (2018)]

図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b1-2に示すように、量子ドットに関する過去の実験報告の結果を整理して、上記の計算と比べたところ、この理論モデルで最初に仮定した「フォノンボトルネック効果が無い(あるいは弱い)ために中間バンド太陽電池として機能していない量子ドット太陽電池」の描像が、過去の多くのInGaAs-GaAs系S-K量子ドット太陽電池に当てはまっているようであった。報告された実験結果と理論の比較を更に詳しく見ると、光吸収の増大のために量子ドットの密度を増加させた場合や、ドットのIn含有量やサイズを増やして深い量子ドットを作製したような場合に、開放電圧の顕著な低下の傾向が観測された。理論計算との比較は、In導入による欠陥の増加など、外因的(extrinsic)な結晶品質の低下が生じていることを示唆した。[Lin Zhu *et. al.*, Progress in Photovoltaics, <https://doi.org/10.1002/pip.3110>]



図III-2-(ロ)-D-1-b1-1
 量子ドットセルの理論効率
 (フォノンボトルネック効果なし)



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b1-2
理論効率と実験報告との比較

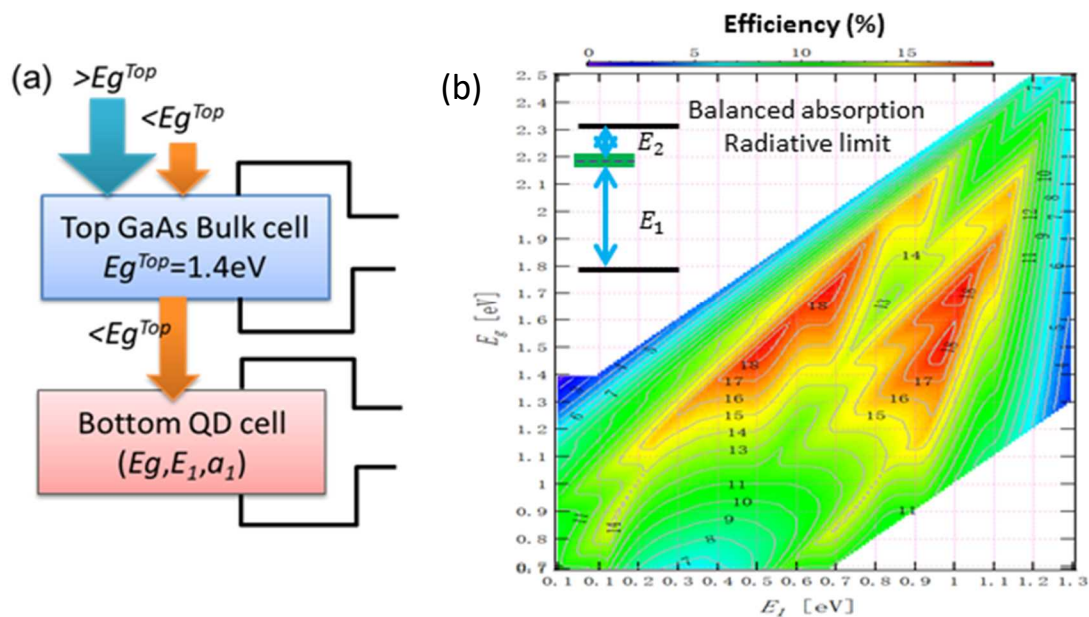
この兆候は、我々自身が米国 NREL と共同で行った、量子ドット太陽電池の絶対エレクトロルミネッセンス測定による開放電圧低下の分析でも検証された。[Lin Zhu *et. al.*, WCPEC-7, June 10-15 (2018)]

以上から、量子ドットを導入した単接合セルで 30%超の変換効率を実現する第 1 の課題は、中間バンド太陽電池の成立条件であるフォノンボトルネック効果を強く誘起させるという本質的な壁であり、第 2 に、欠陥の増加などによる結晶品質低下であることが、明らかになった。

量子ドットセルをタンデムのボトムセルとして用いる場合

量子ドットセルをタンデムのボトムセルとして用いる場合や、類似の場合を検討した。モデルとして、図III-2-(ロ)-D-1-b1-3(a)に示すように、まず、GaAs バルクセル($E_g^{top}=1.4$ eV)をトップセルとし、バンドギャップ E_g の宿主半導体に埋め込まれた InGaAs 量子ドットセル (エネルギー準位 E_1 、吸収率 a_1) をボトムセルとして、4 端子タンデムセルを構成した場合を調べた。量子ドットボトムセルでは、 E_g^{top} 以下の光子エネルギーの赤外光を、 E_1 エネルギーの量子ドットを介して 2 段階光吸収させる。

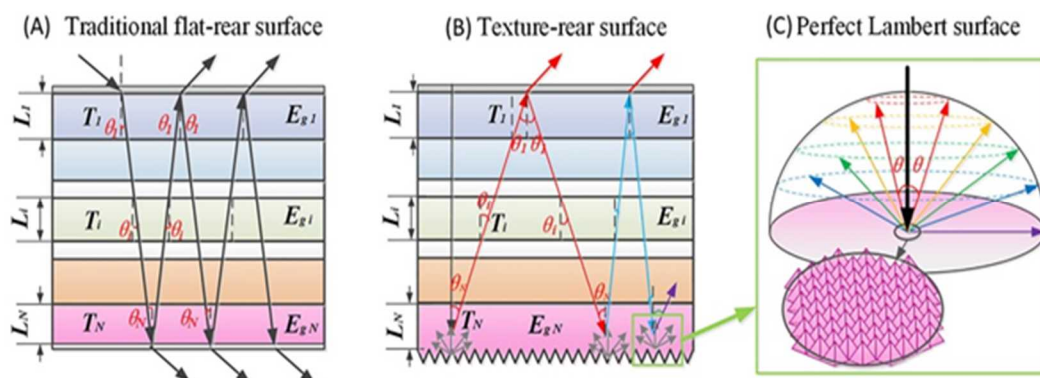
価電子帯から量子ドット、量子ドットから伝導帯の 2 段階光吸収を、 E_g と E_1 の組み合わせごとにバランスさせた最適 2 段階光吸収条件を維持し、かつ、フォノンボトルネック効果が強く中間バンド型ボトムセルが実現されている、理想的な場合について計算したところ、図III-2-(ロ)-D-1-b1-3(b)に示すようにボトムセル効率 18%が期待されることが分かった。GaAs に埋め込まれた InGaAs 量子ドットで、 $E_g=1.4$ eV かつ $E_1=0.95$ eV のときボトムセル効率 17%が期待できることが分かった。理想 GaAs トップセル効率と合わせて、50%超の全体効率となることが分かった。



図III-2-(ロ)-D-1-b1-3 低電流・高電圧型量子ドットセルのボトムセル理論効率

しかし、フォノンボトルネック効果が無いあるいは弱い現実的な場合について計算したところ、バンドギャップ E_1 のバルクボトムセルと同等の寄与に下がってしまうことが分かった。具体的には、 $E_g=1.4$ eV かつ $E_1=0.95$ eV のとき、約 10%の寄与となった。すなわち、フォノンボトルネック効果が弱い場合には、量子ドットボトムセルを付加したことによって、GaAs バルク単接合セルよりも全体効率が向上することは明らかであるが、通常の 2 種のバルクセルからなるタンデムセルと比較すると等価な寄与のみになってしまう。[Lin Zhu *et. al.*, PVSC-46, June 16-21 (2019)]

ただし、結晶成長上の利点は得られる可能性がある。すなわち、 $E_1=1$ eV 近傍の高品質量子ドットが比較的容易に (低コストに) 成長できれば、歪緩和のための厚いバッファ層を成長したり、メカニカルスタックなどの手法を用いる必要がなくなる。量子ドットの密度が低いために十分な光吸収が得にくい問題に関しては、図III-2-(ロ)-D-1-b1-4 に示す裏面テクスチャ構造の導入によりボトムセルの光吸収を格段に増強させられることが、モデル計算により確かめることができた。[Lin Zhu *et. al.*, Progress in Photovoltaics (2019) <https://doi.org/10.1002/pip.3217>]



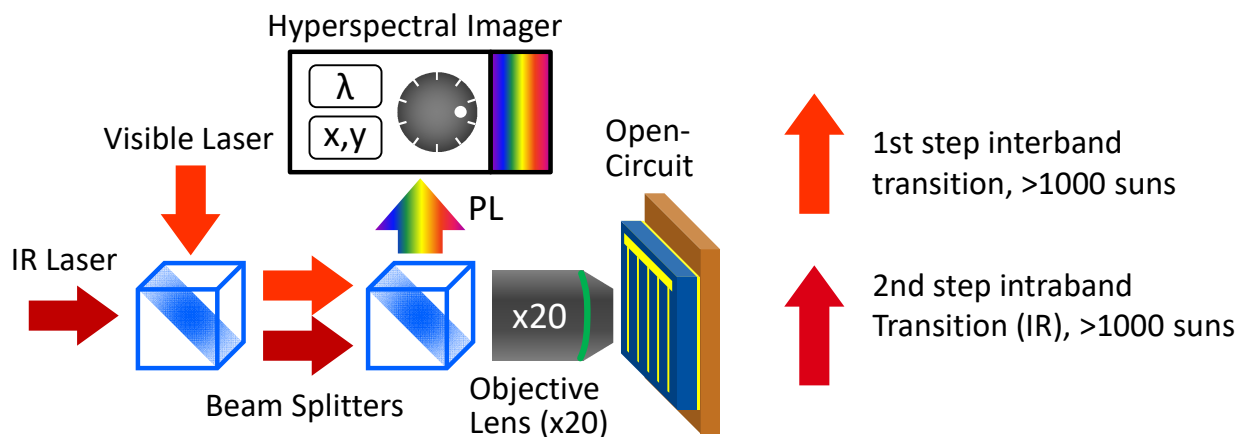
図III-2-(口)-D-1-b1-4 裏面テクスチャ構造による光マネジメント構造

(2) 量子ドットセル集光特性解析：開放電圧の向上

量子ドットセルにおいて、中間バンド型動作による高効率化を実現するためには「2段階光吸収による電流増大」と「擬フェルミレベル分裂による電圧維持」の2つの要件を達成する必要がある。これまで本プロジェクトをはじめとする多くの研究開発により、赤外バイアス照射下での外部量子効率測定 (Δ EQE) や赤外フーリエ変換光電流分光 (FTPS) などを駆使して、量子ドット中間バンド型太陽電池における2段階光吸収について定量的な評価・解析を行い、2段階光吸収によって室温で高効率な電流増大を実現するための必要条件が明らかになってきた。

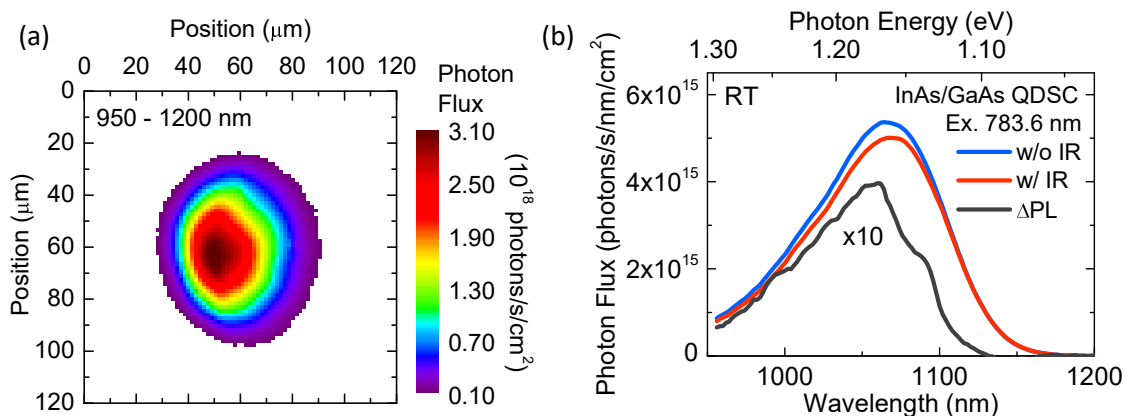
一方で、IB-CB間の擬フェルミレベル分裂による電圧維持については未解明な部分が多い。その理由の一つとして、中間バンド型太陽電池の等価回路が、価電子帯-伝導帯 (VB-CB) 間のダイオードと VB-IB 及び IB-CB 間の直列接続ダイオードとが並列接続した、直並列回路であることが挙げられる。外部端子による電氣的測定ではそれぞれのダイオード電圧を区別することができないため、各準位間で生じる内部電圧、すなわち擬フェルミレベル分裂を区別することができず解析が困難である。

電圧維持の要件達成に向けて、外部回路による電氣的な測定では計測困難な擬フェルミレベル分裂を直接計測するために、絶対値発光分光と一般化プランク則を用いた解析を行った。図III-2-(口)-D-1-b1-5に実験系の模式図を示す。励起光源として1段階目のバンド間遷移を励起するための可視～近赤外光レーザーと、2段階目の IB-CB 間遷移を励起するための赤外光レーザーを太陽電池セルに照射し、試料からの発光スペクトルをハイパースペクトルカメラで測定した。励起光は対物レンズで集光し、励起密度換算で 1000 倍集光相当以上の高倍集光条件下での評価を行った。後述する発光検出系の絶対感度及び波長・空間相対感度校正を行うことによって、量子ドットセルの絶対値発光スペクトルを測定した。



図III-2-(ロ)-D-1-b1-5 絶対値発光スペクトル測定光学系の模式図

多重積層(10層) InAs/GaAs 量子ドット太陽電池(QDSC)において、絶対値発光(PL)スペクトル分光を行った。図III-2-(ロ)-D-1-b1-6に室温における絶対値 PL イメージ(950~1200nmの範囲でスペクトル積分)及び絶対値 PL スペクトル(スポット範囲で空間積分)を示す。励起光は宿主材料を励起する 783.6 nm (1.58 eV, 460 W/cm²)を用いた。PL イメージの面内分布は励起光スポット形状を反映している。InAs 量子ドット基底状態からの絶対値 PL スペクトルピークにおいて、赤外バイアス光 1550nm (0.80 eV, 850 W/cm²)の有無により約8%の強度減少を確認した。一般化プランク則を用いた解析により、量子ドット基底状態の擬フェルミレベル分裂は 1.024eV であり、赤外バイアス光照射による擬フェルミレベル分裂の変化量は 1.8meV と見積もられた。この結果は、赤外バイアス光照射により量子ドットの占有密度が減少して、価電子帯と量子ドット(VB-IB)間の擬フェルミレベル分裂が減少する一方、2段階光吸収により量子ドットと伝導帯(IB-CB)間の擬フェルミレベル分裂が生じているためと考えられる。

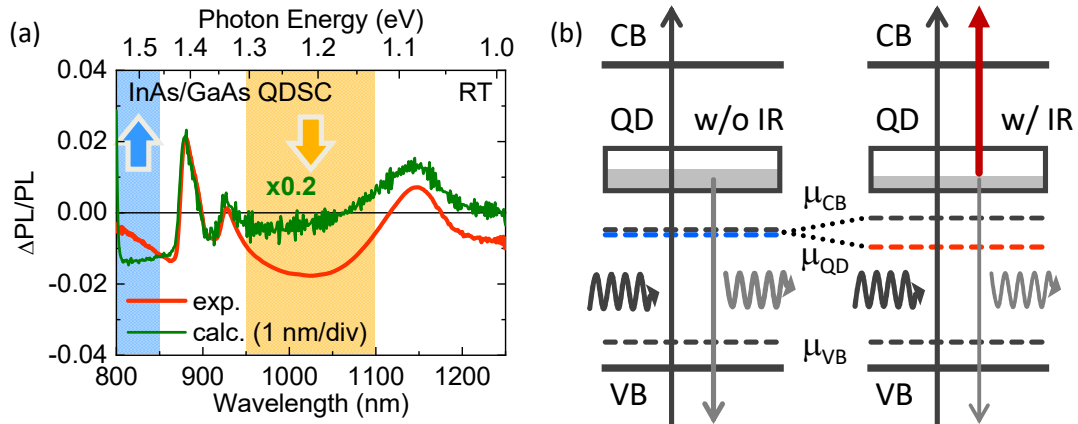


図III-2-(ロ)-D-1-b1-6 InAs/GaAs QDSCにおける室温での

(a)絶対値 PL イメージ (b)絶対値 PL スペクトル

量子ドットからの発光減少メカニズムを解明するため、量子ドット基底状態から宿主材料のバンド端発光までのスペクトル領域における PL 測定を行った。図III-2-(ロ)-D-1-b1-7に室温における InAs/GaAs 量子ドット太陽電池の差分発光スペクトル(赤線: $\Delta PL/PL$, $\Delta PL = PL_{w/IR} - PL_{w/o IR}$)を示す。図III-2-(ロ)-D-1-b1-6と同様、1050nm を中心とする InAs 量子ドット基底状態からの PL 強度減少を確認した。さらに 910nm の InAs 濡れ層からの発光減少とともに、GaAs バンド端発光ピーク 870nm を中心とする微分形状の $\Delta PL/PL$ スペクトルが得られた。ピークシフトを仮定した差分スペクトル(緑線)と

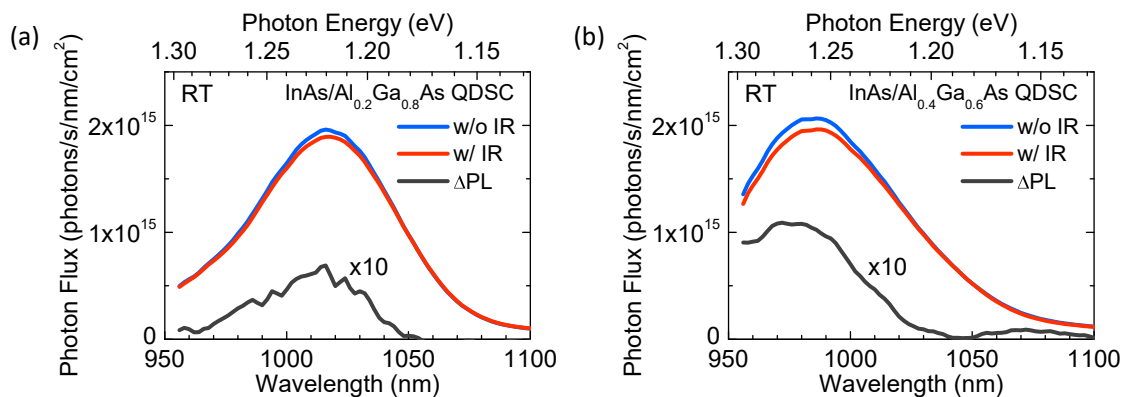
比較すると、GaAs バンド端付近の微分形状については赤外光照射による温度上昇効果と一致した。一方、950~1100nm 付近の減少と 800~850nm 付近の増大は温度変化とは異なる傾向を示しており、2 段階光吸収により量子ドットの占有状態が減少し、伝導帯への光キャリア励起が起こっていることを示唆している。



図III-2-(ロ)-D-1-b1-7 (a)室温 Δ PL/PL スペクトル (b)バンド模式図

InAs/GaAs 量子ドットにおいては、InAs 量子ドットと GaAs 伝導帯間のバンドオフセットが比較的小さく、室温において光キャリアの熱脱出による量子ドット占有密度の減少が避けられない。ワイドバンドギャップ AlGaAs を太陽電池ホスト材料として用いることで、バンドオフセットを大きくして光キャリアの熱脱出を抑制できると期待される。光キャリアの熱脱出は IB-CB 間の擬フェルミレベル分裂を減少させる要因となるため、電圧維持の観点からも有用である。

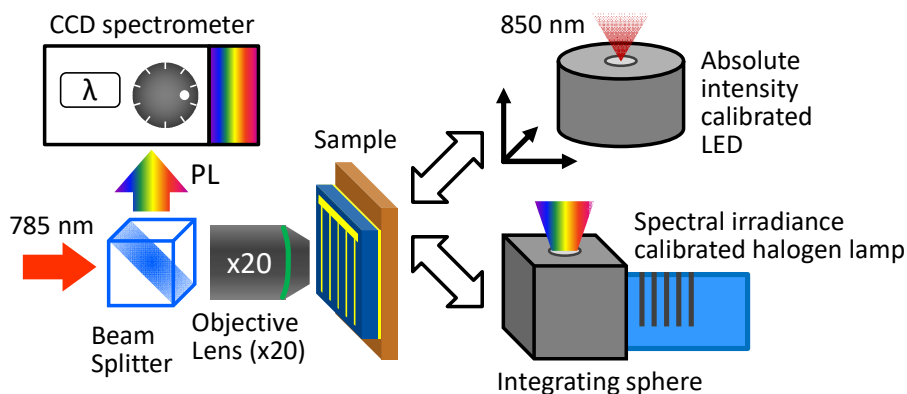
20 層積層した InAs 量子ドットを活性層に含む InAs/Al_xGa_{1-x}As ($x=0.2, 0.4$) 量子ドット太陽電池において、ハイパースペクトルカメラを用いた絶対値 PL 分光により、室温集光下での擬フェルミレベル分裂を評価した。図III-2-(ロ)-D-1-b1-8 に InAs/AlGaAs 量子ドット太陽電池の絶対値 PL スペクトルを示す。InAs/GaAs 量子ドットと同様に、赤外バイアス照射による量子ドット基底状態からの発光減少を確認した。一般化プランク則を用いた解析により、InAs/AlGaAs 量子ドットにおいても InAs/GaAs 量子ドットと同程度の約 1meV の擬フェルミレベル分裂の変化を、赤外バイアス照射下で確認した。



図III-2-(ロ)-D-1-b1-8 InAs/Al_xGa_{1-x}As QDSC における室温での絶対値 PL スペクトル (a) $x=0.2$ (b) $x=0.4$

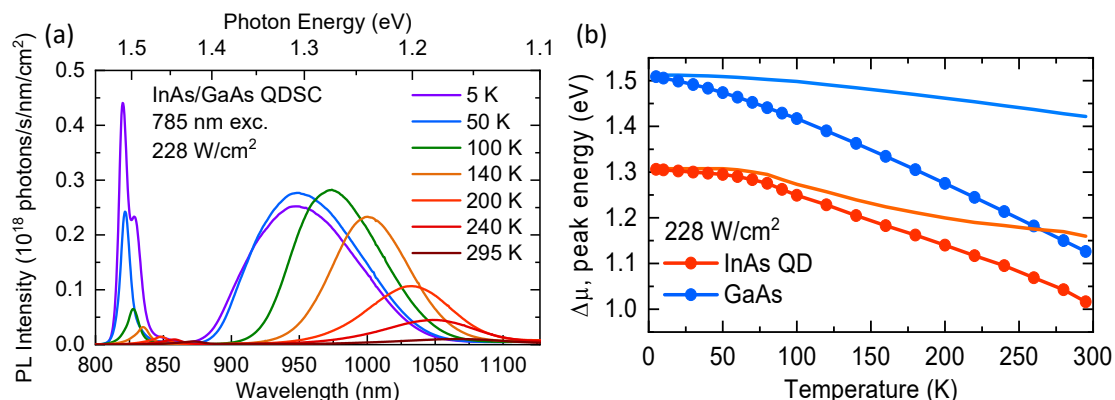
量子ドットセルにおける絶対値発光スペクトルを、量子準位からホスト材料のバンド端まで一括して

計測するために、近赤外高感度 CCD 分光器を導入して光学系を構築した。さらに、熱脱出を抑制した環境下での測定を行うため、低振動光学クライオスタットを導入して顕微分光系に組み込んだ。これらの改良を行った光学系において、図III-2-(ロ)-D-1-b1-9 に示す手順で検出感度の絶対値校正を行った。発光強度の絶対値校正については、強度校正された LED 標準光源（波長 850nm）を用いた。波長・空間相対感度校正には、スペクトル既知の校正用ハロゲンランプと積分球を用いた。これらの校正を行うことによって、通常は任意単位 (arb. units) で得られる発光スペクトル強度を、絶対光子数 (photons/s/cm²/nm) を単位として計測し、一般化プランク則を用いた定量的な解析を行うことが可能となる。



図III-2-(ロ)-D-1-b1-9 絶対値発光スペクトル測定光学系と校正法の模式図

多重積層(10層) InAs/GaAs 量子ドット太陽電池において、785nm (1.58eV, 228W/cm²) 励起下における絶対値 PL スペクトルの温度依存性を測定した(図III-2-(ロ)-D-1-b1-10)。室温から 5 K の極低温まで、温度降下に伴うバンド端シフトに起因するピークのブルーシフトとともに、PL ピーク強度も大きく変化した。絶対値 PL ピーク強度から各温度における擬フェルミレベル分裂を見積もった。InAs 量子ドットと GaAs ホストの擬フェルミレベル分裂を比較すると、低温では擬フェルミレベル分裂の差が大きくなり、高温では擬フェルミレベル分裂の絶対値は小さくなり両者の差も小さくなった。高倍集光条件下ではフォトリリング効果によって量子ドットが光キャリアで占有されることを示唆している。

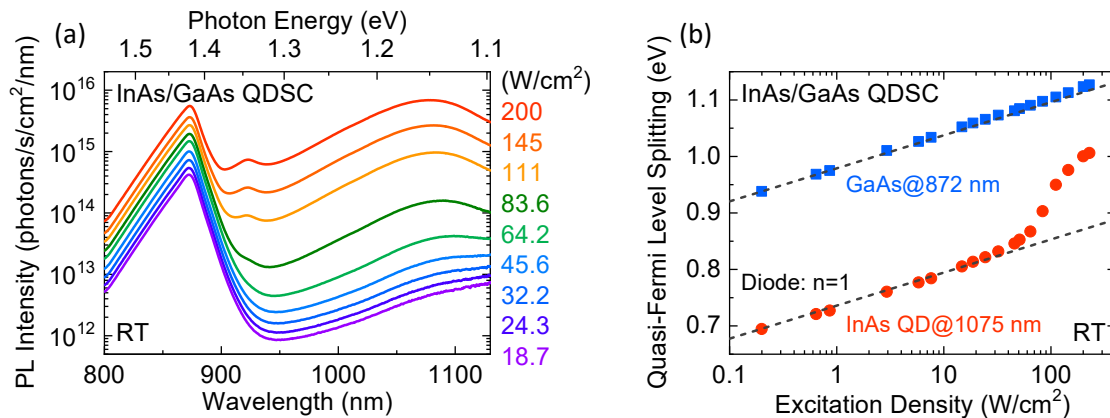


図III-2-(ロ)-D-1-b1-10 InAs/GaAs QDSC の温度依存性

(a) 絶対値 PL スペクトル (b) 擬フェルミレベル分裂

多重積層(10層) InAs/GaAs 量子ドット太陽電池において、785nm (1.58eV) 励起下における室温での絶対値 PL スペクトルの励起光強度依存性を測定した。図III-2-(ロ)-D-1-b1-11 に InAs/GaAs 量子ドット太

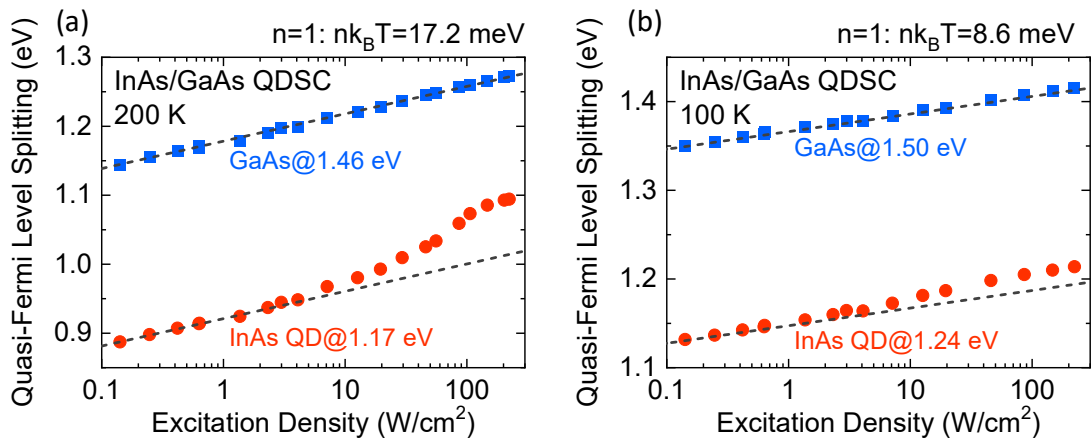
陽電池の絶対値 PL スペクトル (縦軸対数) を示す。872nm (1.42eV) の GaAs 及び 1075nm (1.15eV) 付近の InAs 量子ドット PL ピークそれぞれについて、一般化プランク則を用いた解析により擬フェルミレベル分裂を定量評価した。GaAs については励起密度の対数に対して線形に増加し、ダイオード方程式から予想される理論曲線と良い一致を示した。一方で InAs 量子ドットでは、50W/cm² (500 倍集光相当) から急激な擬フェルミレベル分裂の増大を確認した。最大集光時にはおよそ 0.13eV の非線形増大が得られ、高倍集光下におけるフォトフィリングによる電圧維持実現につながると期待される。



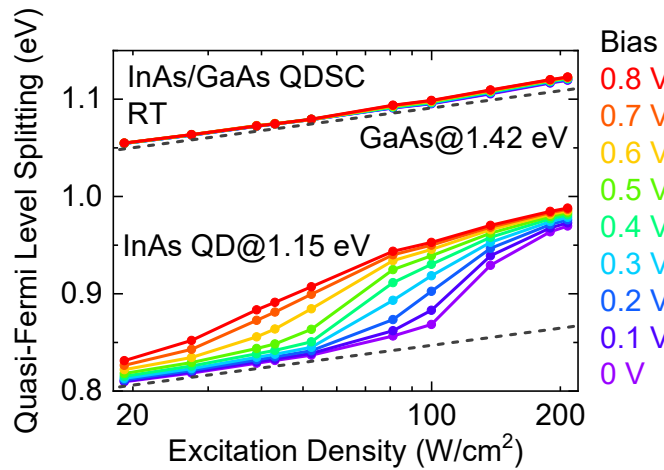
図III-2-(ロ)-D-1-b1-11 InAs/GaAs QDSC の励起密度依存性
(a)絶対値 PL スペクトル (b)擬フェルミレベル分裂

集光による電圧回復の効果をより詳細に理解するために、絶対値発光分光の低温での励起光強度依存性及び電圧バイアス依存性を測定し、集光下での量子ドットにおける擬フェルミレベル分裂の非線形増大の振舞いを解析した。InAs/GaAs 量子ドット太陽電池において、200K と 100K の低温集光下における絶対値 PL スペクトルを測定した。一般化プランク則を用いて絶対値 PL スペクトルを解析し、InAs 量子ドットと GaAs それぞれについて、擬フェルミレベル分裂を定量評価した結果を図III-2-(ロ)-D-1-b1-12 に示す。GaAs バンド端発光については温度によらず室温と同様に、ダイオード方程式から導かれる理論曲線とよく一致した。一方で InAs 量子ドット基底状態については、室温で非線形増大がより顕著であり、100 K の低温ではほぼ理論曲線と一致する傾向を示した。

絶対値発光計測時に外部電圧バイアスを印可し、室温集光下における絶対値 PL スペクトルの電圧バイアス依存性を測定した。電圧バイアス印可時における擬フェルミレベル分裂を一般化プランク則により定量評価した結果を図III-2-(ロ)-D-1-b1-13 に示す。GaAs については印可バイアス電圧によらずほぼ一定の値を示した。一方で InAs 量子ドットでは、バイアス電圧を小さくする (短絡状態に近づく) につれ、非線形増大が起きる励起密度の閾値が大きくなった。これらの温度依存性及び電圧バイアス依存性の結果は、IB-CB 間の非輻射緩和過程により量子ドットに捕獲される伝導帯光キャリアと、量子ドットから伝導帯へと取り出される光電流との間の相反関係を表している。



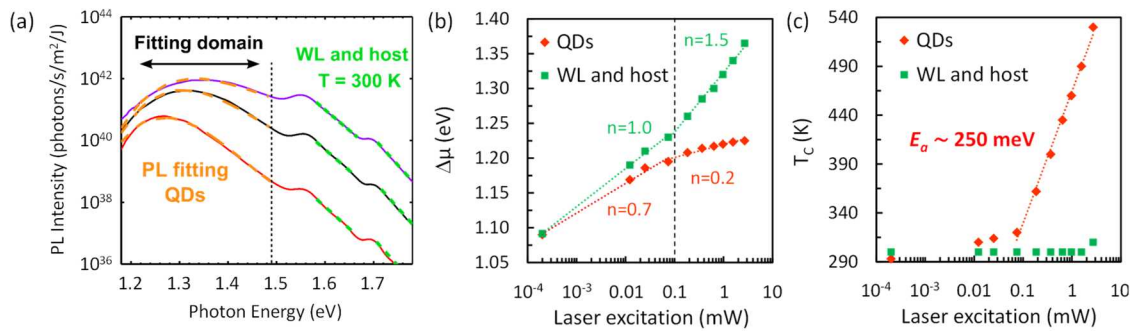
図III-2-(ロ)-D-1-b1-12 InAs/GaAs QDSC における低温での集光下擬フェルミレベル分裂 (a) 200 K (b) 100 K



図III-2-(ロ)-D-1-b1-13 InAs/GaAs QDSC における室温での擬フェルミレベル分裂の電圧バイアス依存性

高倍集光下における電圧回復効果として、量子ドット中間バンド型太陽電池におけるホットキャリア効果についても検討を行った。InAs/Al_{0.2}Ga_{0.8}As 量子ドット太陽電池において、ハイパースペクトルカメラを用いて計測した絶対値 PL スペクトルから、一般化プランク則に含まれるキャリア温度(T_c)もパラメータとしてフィッティングすることで、高倍集光下における擬フェルミレベル分裂とキャリア温度を同時に抽出した。

図III-2-(ロ)-D-1-b1-14 に示すように、集光による擬フェルミレベル分裂の増大に加え、ホットキャリア効果による電圧向上が期待される結果を得た。

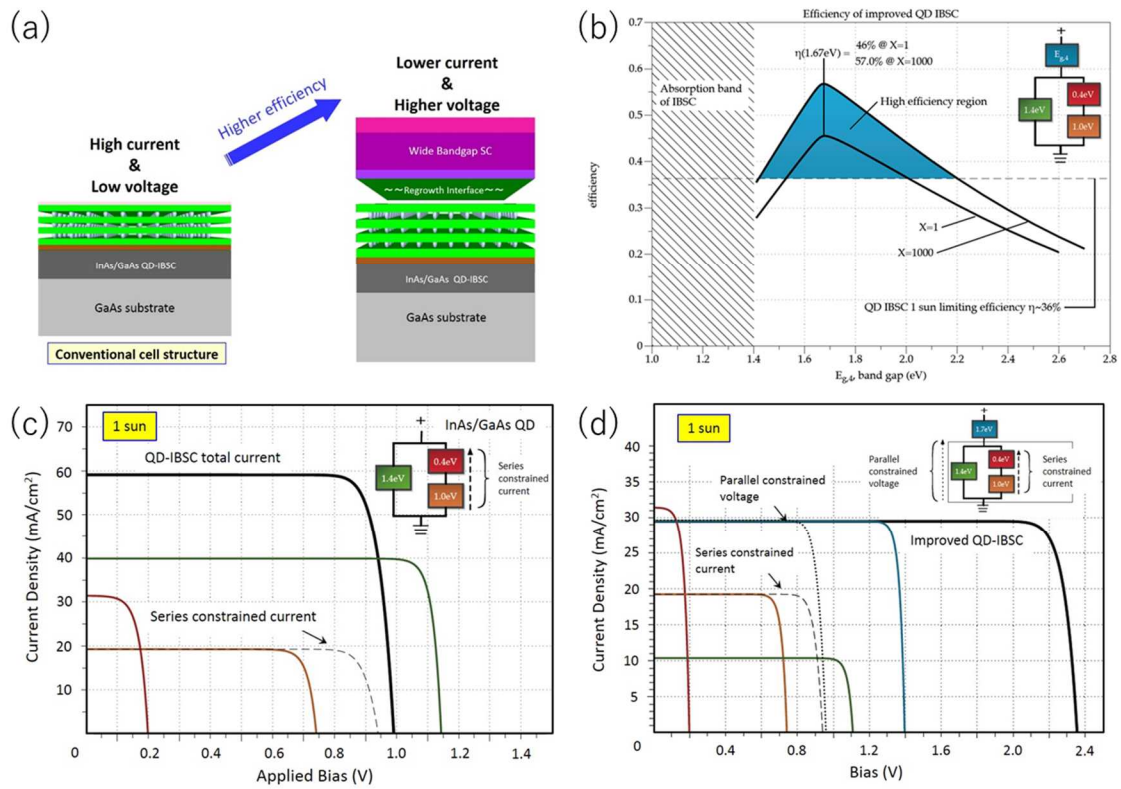


図III-2-(ロ)-D-1-b1-14 InAs/Al_{0.2}Ga_{0.8}As QDSCにおける室温でのホットキャリア効果 (a)絶対値 PL スペクトル (b)擬フェルミレベル分裂 (c)キャリア温度

以上、量子ドットセルにおける中間バンド型動作の要件の一つである電圧維持の達成に向けて、絶対値発光分光計測と一般化プランク則を用いた解析を行い、擬フェルミレベル分裂を直接計測した。得られた知見から、高倍集光下における開放電圧の向上を実現するための指針を見出した。本プロジェクトを通して、室温での高効率2段階光吸収及び電圧維持実現に向けた指針を解明し、量子ドット・マルチバンドセルによる単接合限界を超える高効率化の達成につながる成果を得た。

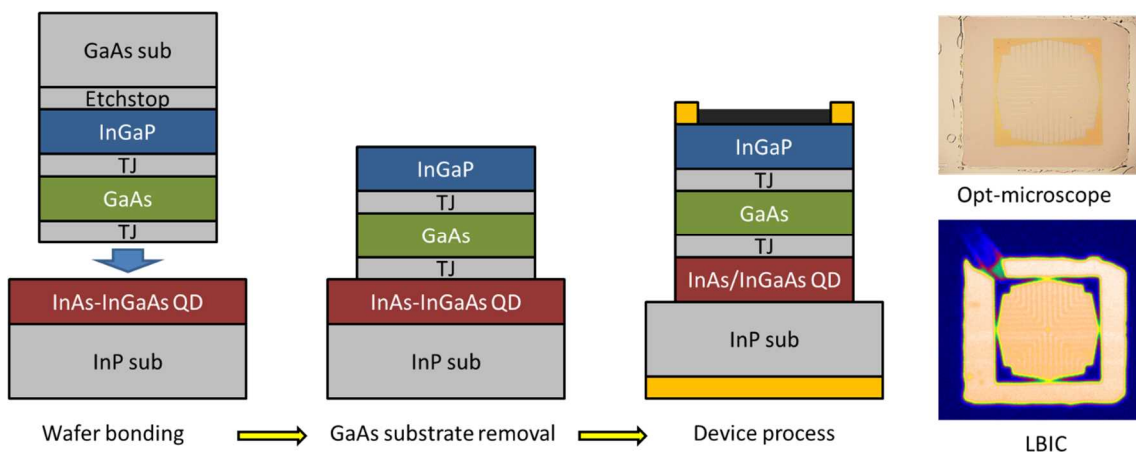
(3) 低電流・高電圧型量子ドットセル

本研究開発では、東大先端研が独自に開発を進めてきた高均一で高密度の量子ドット超格子の作製技術の実績を基に、量子ドット超格子中に形成される中間バンドを介した光電変換過程の制御法を確立し、量子ドットセルの高効率化を目指した。その際、集光動作下において発生する熱のマネジメントが高効率動作実証への重要な要素となる。前述のように中間バンド型太陽電池の動作原理では、中間バンドにおいて擬フェルミ準位分裂によって電圧低下を抑制しつつ、2段階光吸収過程によって生成された追加的なキャリアを収集することで電流を向上させることで、一般的な2準位型の単接合セルに比べて高い効率が得られる。InAs/GaAs系量子ドットセルの場合、短絡電流密度は現状で約30~35mA/cm²で、理論上は~50 mA/cm²になる。したがって100倍以上の集光下では5A/cm²前後になり、ジュール損失とセル温度上昇による影響から、集光効率として約40%が実デバイスの限界と考えられる。そこで電流密度を下げ、開放電圧を上げるアプローチとして、高エネルギーギャップのトップセルの下に、InAs量子ドットを基盤とした中間バンドセルを配置した集光セルの開発を行った。図III-2-(ロ)-D-1-b1-15に低電流・高電圧型量子ナノ構造太陽電池の概要と理論計算結果を示す。本研究開発では、これまでの26.8% (72 suns) から45%以上の高効率の実証を目指し、トップセル材料として従来のAlGaAsやInGaPセルの他に、InGaP/GaAsタンデムセルを取り上げ、産総研、シャープ(株)と連携して進めた。



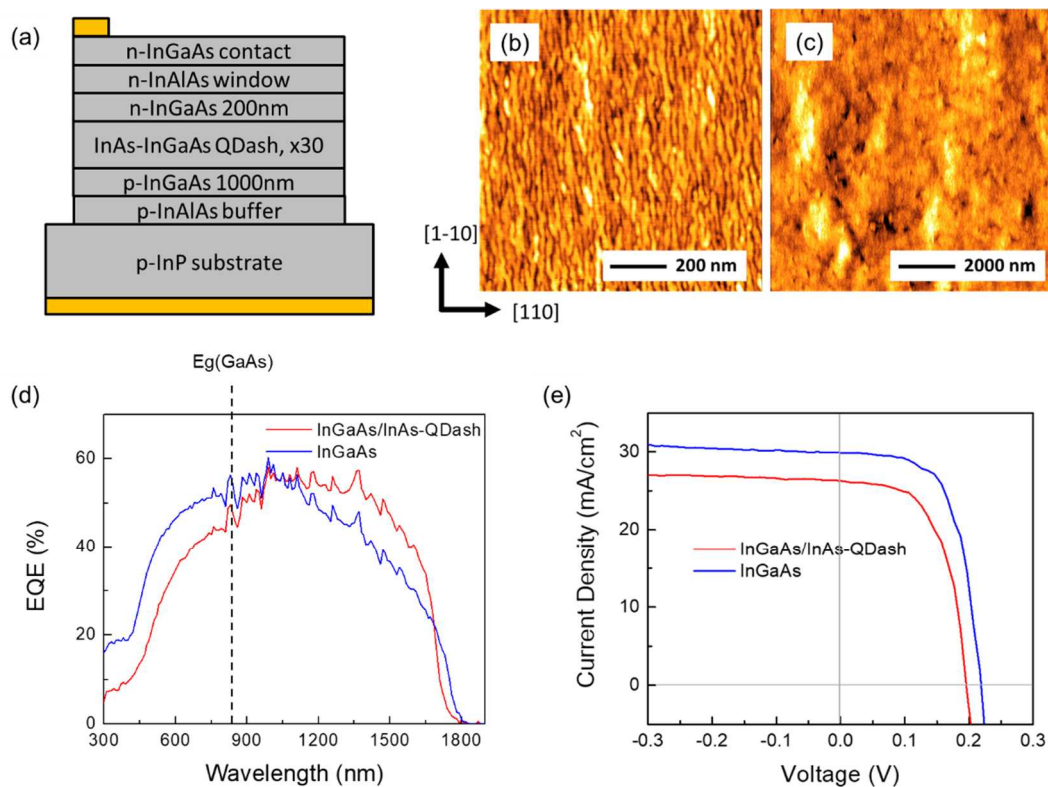
図III-2-(ロ)-D-1-b1-15 低電流・高電圧型量子ナノ構造太陽電池設計

図III-2-(ロ)-D-1-b1-16 に本研究で開発した InAs-InGaAs QD セル、およびシャープ(株)が作製した InGaP/GaAs タンデムセルによる低電流・高電圧型中間バンドセルの作製工程を示す。QD セル上へのトップ側セルの実装には、特性劣化を生じさせずに行える半導体接合法を採用した。ただし、再現性のよい半導体接合のためには試料表面が原子層オーダーで平坦であることが要求される。十分な平坦性が確保されることで、図III-2-(ロ)-D-1-b1-16 に示すように半導体接合後の LBIC マッピングにおいて異常点は見られず均質な電流生成分布を実現できている。



図III-2-(ロ)-D-1-b1-16 半導体接合による InGaP/GaAs//InAs-InGaAs QD 低電流・高電圧型中間バンドセルの作製

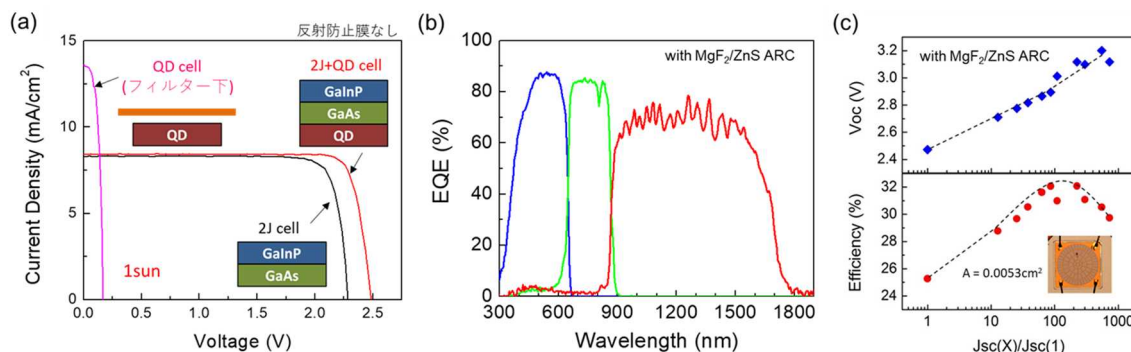
図III-2-(ロ)-D-1-b1-17 に本研究で開発した InAs-InGaAs QD セルの太陽電池特性を示す。成膜には MBE 法を用いた。InP (001) 基板の上に InAs 量子ドットを形成する場合、In 原子の[1-10]方向へのマイグレーション長が[110]方向に比べて大きく、図III-2-(ロ)-D-1-b1-17(b)に見られるような異方性のある形状の量子構造が形成される(量子ダッシュ)。面直方向に対する量子閉じ込め効果に関しては等方的な半球状の量子ドットと近い性質を示すと考えられ、ここでは特に区別せず量子ドットとして取り扱う。この InAs-InGaAs QD 層を埋め込んだセル構造の再表面では原子オーダーで平坦な表面を得られることが確認できる(図III-2-(ロ)-D-1-b1-17(c), RMS ~0.4nm)。図III-2-(ロ)-D-1-b1-17(d), (e)に InAs-InGaAs QD セルの太陽電池特性を、比較用の InGaAs セル(量子ドット層を含まない)と併せてプロットした。トップ側に InGaP/GaAs タンデムセルを配置することを想定し、870 nm よりも長波長域の分光感度に着目すると、量子ドット層を挿入することにより全体に渡って量子効率の向上が得られた。



図III-2-(ロ)-D-1-b1-17 本研究で低電流・高電圧セル用に開発した InAs-InGaAs QD (QDash)セルの概要 (a)セル構造 (b) InAs-InGaAs QDash 表面と(c)最表面 (n-InGaAs contact) の AFM 像、視野はそれぞれ $1\mu\text{m}^2$ および $10\mu\text{m}^2$ (d)分光感度特性 (e)電流電圧特性

次にこの量子ドットセル上に InGaP/GaAs タンデムセルを直接接合した。図III-2-(ロ)-D-1-b1-18(a)に試作した InGaP/GaAs//InAs-InGaAs QD セル (2J+QD セル) の電流電圧特性を、また比較用に接合前の InGaP/GaAs タンデムセル、および QD セル(カットオフ波長 870nm のロングパスフィルタ配置下)の特性も併せて示す。2J+QD セルの短絡電流はトップ側 2J セルに制限された特性を示し、また開放電圧は 2J セルと QD セルの和に相当し、半導体接合に伴う性能劣化等は見られず、各セルの性能を維持できていることが確認できた。図III-2-(ロ)-D-1-b1-18(c)にはパルスソーラーシミュレータを用いた 2J+QD セルの集光特性を開放電圧と効率についてプロットしている。700suns 以上の高倍率集光下においても開放電圧の増加傾向が維持され、225 suns でピーク効率 32.1%が得られた ($J_{sc}/X = 12.3\text{ mA/cm}^2$, $V_{oc} = 3.12$

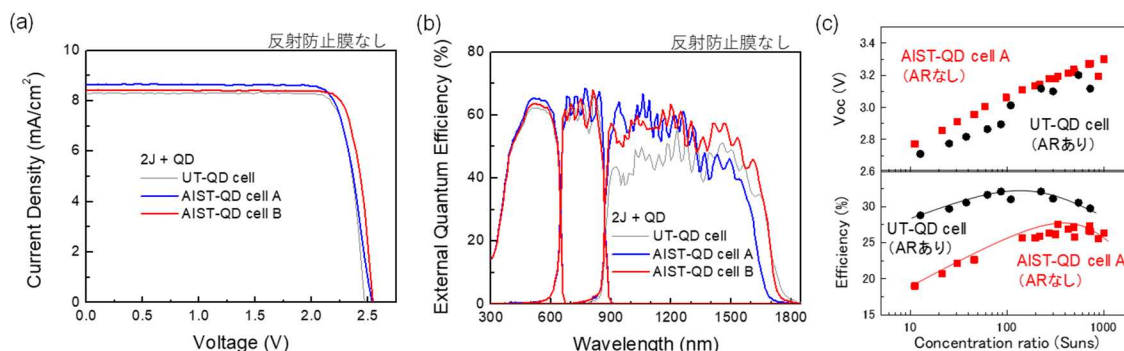
V, FF = 0.837)。一般に、ナローギャップサブセルに比べ、暗電流成分が小さいGaAsやInGaPなどのワイドギャップセルの方が高いFFを示すことから、全体のセル構成をワイドギャップサブセルに電流制限されるように設計することで、集光下においてもFFの低下を抑えることが可能である。このことは、特に、高い電流値が得られる中間バンド型セルには有利であり、低電流・高電圧型セルのコンセプトがジュール損失の抑制だけでなく、FF低下の抑制に対しても有効であることが示された。



図III-2-(ロ)-D-1-b1-18 InGaP/GaAs//InAs-InGaAs QD セル

(a) 電流電圧特性 (b) 分光感度特性 (c) 開放電圧と効率の集光依存性

また、産総研と連携して QD セルの高品質化にも取り組んだ。図III-2-(ロ)-D-1-b1-19 には、上述の 2J+QD セル (UT-QD cell) に加え、産総研で成膜を行った QD セルを用いた 2J+QD セル (AIST-QD cell A, および AIST-QD cell B) の太陽電池特性をプロットしている。いずれのセルにおいてもほぼ同水準の太陽電池特性が得られ、半導体接合およびデバイス化プロセスの再現性が確認できた。AIST-QD cell A および B では、QD セルの高品質化を図り 0.1V 程度の開放電圧の向上を達成した。特に、AIST-QD cell B では成膜条件の微調整を行うことによって、AIST-QD cell A で見られた表面のクロスハッチパターンを解消することに成功し、QD セルの吸収波長帯において量子効率の向上が得られた。



図III-2-(ロ)-D-1-b1-19 産総研との連携により開発した量子ドットセルを用いた InGaP/GaAs//InAs-

InGaAs QDセル (a) 電流電圧特性 (b) 分光感度特性

(c) 開放電圧と効率の集光依存性

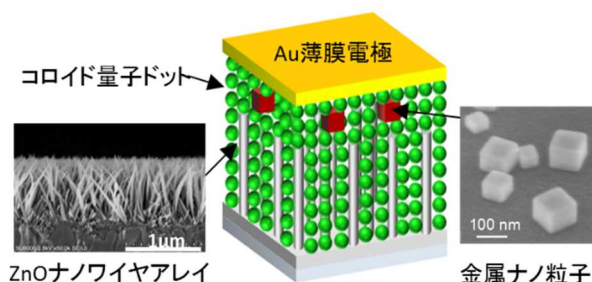
図III-2-(ロ)-D-1-b1-19(c)に示すように、改良セル (AIST-QD cell A) の集光特性評価を行い 1000 suns 集光下で 3.30V と、1 sun 時の 2.54V から約 0.76V が得られた。加えて接合条件の改善も図ったことにより、効率のピークを~100-200 suns から~300-500 suns まで高倍率側にシフトさせることができた。今後、最適化した反射防止膜 (AR) を導入することにより、32.1%以上の効率が得られる見通しである。

本研究では中間バンド型太陽電池の集光動作時に問題となるジュール損失による効率低下を抑制するために、上部に電流制御のためのトップセルを配置した低電流・高電圧型の中間バンド太陽電池の有

効性を示した。本研究では、上部セル、QDセルそれぞれについて最適化されたデバイス特性を損ねることなく実証するために半導体接合法を採用しデバイス化を行ったが、直接エピによる実装技術も今後重要な開発要素である。中間バンド型太陽電池動作の改善についても引き続き取り組むべき課題であり、将来、安価で高効率な主要電源として貢献されることを期待する。

III-2-(ロ)-D-1-b2. 量子ドットマルチバンド (ナローギャップ) 【東京大学】

当研究グループでは、4 接合ボトムセルの構築を目標として、コロイド量子ドットとワイドギャップ半導体のナノ構造体を用いたバルクヘテロ太陽電池 (PbS/ZnO-NW 太陽電池) の高効率化研究を実施してきた。その過程で、金属ナノ粒子の示すプラズモン電場増強効果の利用が、高効率化に有効であることを明らかにした[ACS Nano, 9, 4165-4172 (2015)]。本事業では、これら2つの特長を組み合わせることで、エネルギー変換効率40%超を狙ったIII-V族化合物の多接合太陽電池のボトムセルに資する太陽電池 (図III-2-(ロ)-D-1-b2-1) を、低コスト溶液製造プロセスにより実現するために、以下の中間目標および最終目標を設定し、研究開発に取り組んだ。



図III-2-(ロ)-D-1-b2-1 研究開発を行ったボトムセルのイメージ構造

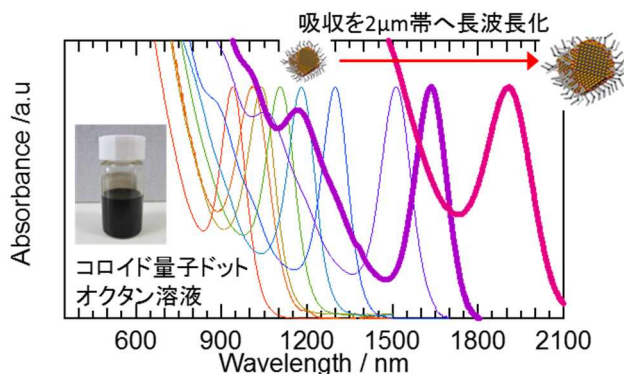
中間目標

- (1) PbS/ZnO-NW セルの近赤外領域 (800nm 以上) で、PCE=4%と $J_{sc}=14\text{mAcm}^{-2}$ を達成
- (2) PbS-QD の吸収領域を 1900nm に拡張し、第一励起子吸収での EQE で 20%を達成
- (3) 金属ナノ粒子のプラズモン電場共鳴を 1400nm で達成し、PbS/ZnO-NW セルに組込む

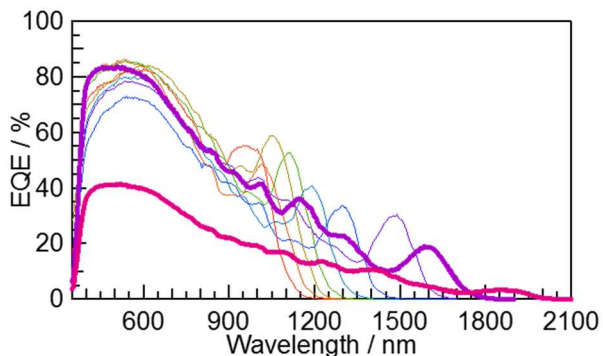
最終目標

プラズモン金属ナノ粒子層を組込んだ PbS/ZnO-NW 太陽電池の近赤外領域 (900nm 以上) において、PCE=4% 以上を達成すると共に、接合層を実装したタンデムセルを実現

本事業の期間内に中間目標を達成することができた。一方、最終目標とした4%の変換効率に対して6割の達成度となった。主な要因としては、太陽電池の開放電圧と曲線因子を十分に高めることができなかったことである。この点については、量子ドット表面の欠陥低減や ZnO ナノワイヤ表面欠陥の低減が不十分であったためである。しかしながら、短絡電流値においては、当初目標 (14mAcm^{-2}) を上回る 17.5mAcm^{-2} 程度を達成することができた。また、簡便な溶液プロセスでも、多接合太陽電池のボトムセルとして有効な赤外太陽電池が構築できることを実証することができた。主な研究開発成果は、以下の3点である。

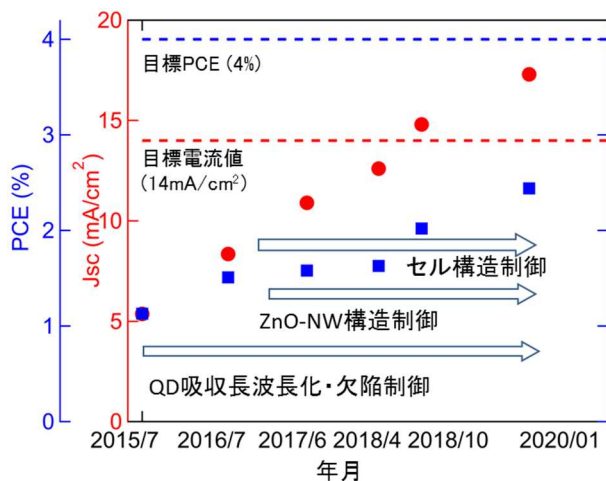


(a) サイズの異なるコロイド量子ドット溶液



(b) EQE スペクトル

図III-2-(ロ)-D-1-b2-2
(a) サイズの異なるコロイド量子ドット溶液の吸収スペクトル (b) EQE スペクトル



図III-2-(ロ)-D-1-b2-3
量子ドット太陽電池の赤外特性改善の推移と主な研究開発内容
*太陽電池特性は、870 nm より短波長を遮断するシャープカットフィルタ下で測定

【主な研究開発成果】

- ◆ 0.87 μm よりも長波長側の疑似太陽光照射下で、エネルギー変換効率=2.44% (短絡電流密度=17.56 mAcm^{-2}) を達成した。溶液プロセスで作製ができ、同等の性能を示す太陽電池の先行報告はない。
- ◆ 金属ナノ粒子の導入により、EQE 及び PCE 向上、1.4 μm で光吸収の増強を達成した。

- ◆ 溶液プロセスで作製できるボトムセルとⅢ-V族化合物 2J トップセルで分光多接合太陽電池を作製し、30%超を実現（世界初）。

以下に本事業で実施したコロイド量子ドットと金属ナノ粒子の電場増強効果を使った赤外光電変換の研究開発成果の詳細を示す。

コロイド量子ドット太陽電池の高性能化

コロイド PbS 量子ドット（以下、量子ドット）の合成条件を検討することで、吸収波長を $1.9\mu\text{m}$ 付近まで拡張し、多接合太陽電池の典型的なボトムセルの一つである Ge セル相当の分光感度領域での光電変換を可能にした（図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b2-2）。さらに、量子ドット表面のリガンド種やリガンド交換手法を検討することで、表面欠陥の低減や、量子ドット間隔を調整した。本検討では、ハロゲンイオン (I⁻) およびエタンジチオール (EDT) を用いた。コロイド量子ドット太陽電池の光電変換の中核を担う量子ドットと ZnO ナノワイヤの混合層の構築においては、ZnO ナノワイヤ内部における量子ドットの充填状態や ZnO と量子ドットの界面状態に着目した。光励起した電子正孔対の分離および自由キャリア輸送能に影響する ZnO ナノワイヤの構造制御（ワイヤ径、長さ、密度）や、ディップコートやスピコート手法の条件を検討した。

赤外光電変換の高効率化には、量子ドット層の赤外分光感度の拡張と合わせて、窓材料の赤外透過率を高めることが高性能化の重要な要素の一つとなる。コロイド量子ドット太陽電池の透明導電性基板として、F ドープ SnO₂ (FTO) あるいは Sn ドープ In₂O₃ を成膜した基材が一般に用いられるが、これらの金属酸化物は可視領域では高い透過性を示すが、 $1\mu\text{m}$ 付近から自由電子吸収が長波長化と共に強くなる。そこで本研究開発では、透明導電性薄膜の低抵抗値を維持しつつ、自由電子密度を低減させるために、高移動度の透明導電性金属酸化膜の調査研究を行い、結晶性の高い酸化チタン薄膜上に、Ta ドープの SnO₂ を疑似エピタキシャル成長させた金属酸化膜（以下、TTO）が有望であることを見出した。TTO のキャリア移動度は、市販の FTO の 2 倍程度となり、その赤外領域での透過率が高まる [S. Nakao *et al.*, Applied Physics Express, **3** (2010) 031102]。

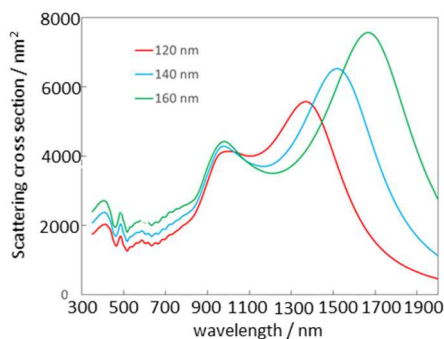
以上の通り、量子ドットの吸収端波長の長波長化や欠陥制御、ZnO ナノワイヤの形態制御、太陽電池素材や構造制御、太陽電池の作製技術の高度化により、コロイド量子ドット太陽電池の近赤外領域での高効率化を行った。多接合化に向けた基礎検討として、上部サブセルの吸収端に相当するカット波長を有する赤外透過フィルタを通した疑似太陽光照射下で短絡電流密度を評価し、最大で 17.5 mAcm^{-2} とすることができた（図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b2-3）。

さらなる短絡電流密度の向上には、Ag や Au ナノ粒子のプラズモン電場増強効果や光散乱効果の利用を検討した。ボトムセルに適したコロイド量子ドットは、第一励起子ピーク位置を $1.5\text{--}1.7\mu\text{m}$ に有することが好ましい。

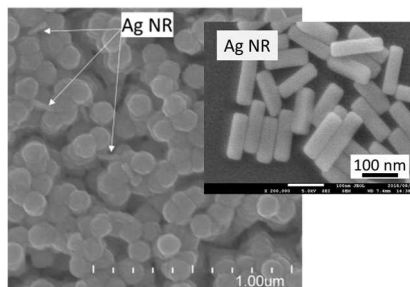
一方、励起子ピーク位置よりも短波長側では、吸収係数が谷を持つ形で減少するため、Ag ナノ粒子のプラズモン電場共鳴効果などにより、光吸収を高めることを目的に、Ag ナノ粒子の形状とサイズを検討し、底辺が 70 nm の正方形で、長さが 140 nm 程度（アスペクト比=2）の直方体（以下、Ag ナノロッド）を、誘電率が 2.6 (PbS 結晶相当) の誘電体内に配置すると、プラズモン電場共鳴効果を近赤外領域で最大にできることを、電磁場シミュレーション計算で明らかにした（図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b2-4）。アスペクト比を高めれば、さらに長波長シフトさせられることも示された。こうした計算に基づき、金ナノロッドをコアとした銀ナノロッド粒子を合成した。アスペクト比は 2.0 から 3.5 の範囲を合成した。

金属ナノ粒子を PbS 量子ドット/ZnO ナノワイヤ混合層に導入する際には、その位置と濃度が重要で

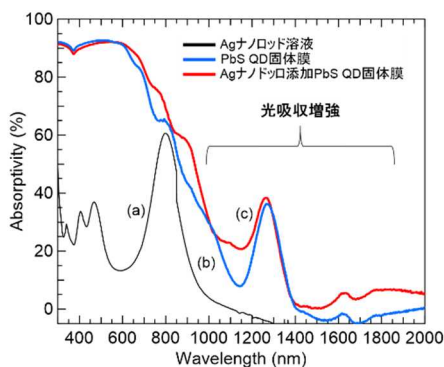
ある [ACS Nano, 9, 4165-4172 (2015)]。そこで、Ag ナノロッドの添加条件を検討した。まず、石英基板上に ZnO ナノワイヤ層を合成し、量子ドットをスピコート法で 25 nm 程度/回の厚さとなるように ZnO ナノワイヤ層を充填して行き、完全に充填する前に、Ag ナノロッドの分散溶液を塗布した後に、量子ドット層を追加で形成すると、Ag ナノロッドを面内に均等に配置できることが分かった (図III-2-(ロ)-D-1-b2-5)。得られた混合層の光吸収スペクトルにおいて、励起子ピークの短波長側を含め、近赤外から赤外領域に渡り光吸収を増加させることができた (図III-2-(ロ)-D-1-b2-6)。Ag ナノロッドを添加した量子ドット/ZnO ナノワイヤ混合層で太陽電池を作製した。光吸収スペクトルと同様に、Ag ナノロッド未添加の太陽電池と異なり、励起子吸収ピーク短波長側の谷部分で、微少ではあるが EQE の増加が起こることを確認した (図III-2-(ロ)-D-1-b2-7)。しかしながら、Ag ナノロッドを添加したセルのエネルギー変換効率は、未添加セルと同程度の値であった。主な要因としては、Ag ナノロッドを配置するプロセスで、量子ドット層に亀裂が発生したり、平坦性が低下するなど、量子ドット層の形態劣化が起こっており、このことがキャリア輸送の低下につながったものと考えられる。



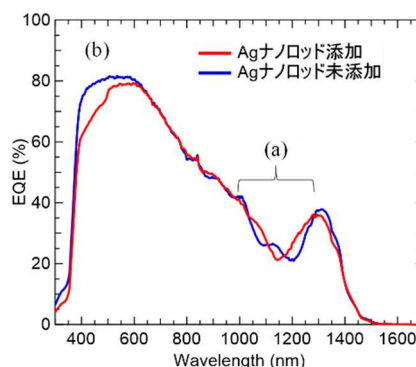
図III-2-(ロ)-D-1-b2-4
Ag ナノロッドを屈折率 2.6 (PbS 相当) 中に分散した時の光散乱スペクトル (計算)



図III-2-(ロ)-D-1-b2-5
(a) ZnO ナノワイヤ・PbS 量子ドット混合層に添加した Ag ナノロッド SEM 像 (b) Ag ナノロッド SEM 像



図III-2-(ロ)-D-1-b2-6
AgNR 溶液 (a) と、AgNR 未添加 (b) と添加膜 (c) PbS QD 固体膜の吸収スペクトル



図III-2-(ロ)-D-1-b2-7
EQE スペクトル Ag NR 未添加 (a) と添加膜 (b)

多接合化検討

III-V 族化合物多接合太陽電池のボトムセルとしてのポテンシャルを検証するために、InGaP/GaAs の 2 接合セル (以下、2Jセル) とコロイド量子ドット太陽電池 (1BJセル) を 2 通りの配置で接続し、疑似多接合太陽電池の性能評価を実施した。並列配置では、2Jセルと GaAs 相当のフィルタ付き 1BJ を並列

にソーラーシミュレータに配置する場合 (a: 並列配置) と、ビームスプリッタにより、GaAs 相当の波長 (約 870 nm) でソーラーシミュレータの光を分割し、短波長側の光 (ビームスプリッタの反射光) を 2J セルに、透過した長波長側の光を 1BJ に照射した場合 (分光タンデム配置) で太陽電池特性を評価した (図 III-2-(ロ)-D-1-b2-8)。

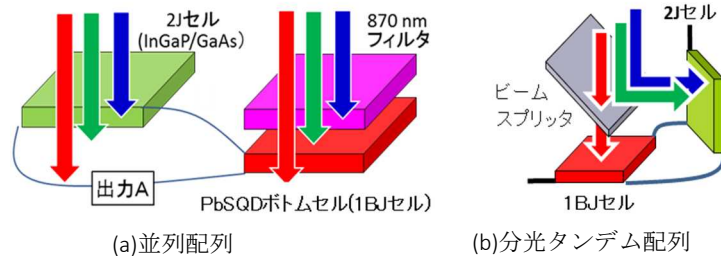


図 III-2-(ロ)-D-1-b2-8 量子ドットセルのボトムセルとしての性能評価に利用したタンデムセル構造 (a) 並列配列 (b) 分光タンデム配列

並列配置の場合、直列接続セルで 30.1% のエネルギー変換効率が得られた。2J セル単独の性能 (28.2%) を上回る値とすることができた。この時、1BJ の短絡電流密度は、 16.9 mA cm^{-2} であり、2J セルの短絡電流密度 (13.5 mA cm^{-2}) との電流マッチングが取れたことが、並列配置で高性能化が達成できた要因と考えられる。

分光タンデム配置では、量子ドットセルのホール輸送層を工夫することで、GaAs 相当のフィルタ下の疑似太陽光照射条件での短絡電流密度を、 17.56 mA cm^{-2} に改善でき、エネルギー変換効率が 2.44% まで高めることができた。2J との分光タンデム配置でも、30% 超 (非集光下) を達成することができた (図 III-2-(ロ)-D-1-b2-9、表 III-2-(ロ)-D-1-b2-1)。

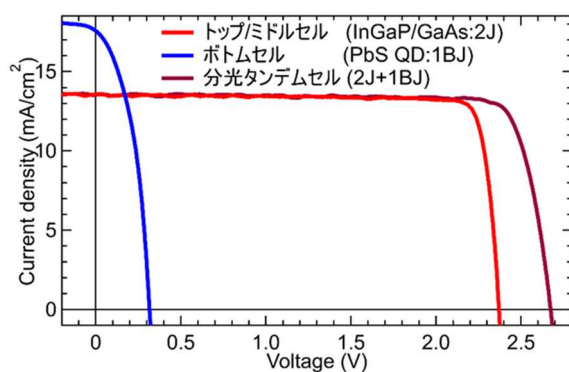


図 III-2-(ロ)-D-1-b2-9 分光タンデム配置で評価したセルの I-V 曲線

表 III-2-(ロ)-D-1-b2-1 分光タンデム配置で評価したセル特性

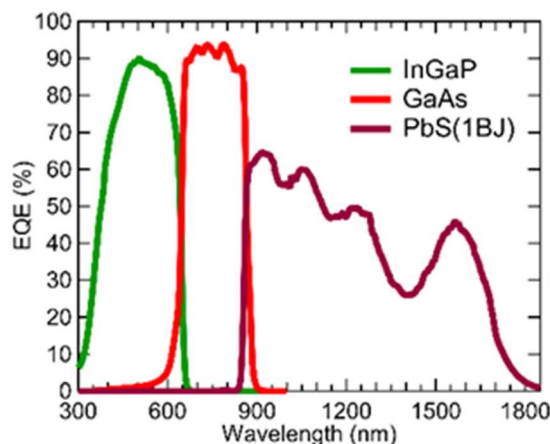
Solar cells	J_{sc}	V_{oc}	FF	PCE
	(mA cm^{-2})	(V)	(%)	(%)
2J	13.56	2.370	87.9	28.25
1BJ	17.56	0.316	44.1	2.44
2J+1BJ	13.53	2.674	84.5	30.58
4T				30.69

2J: III-V 族トップセル
 1BJ: 量子ドットボトムセル
 2J+1BJ: 直列端子接続
 4T: 4 端子接続

1BJ セルの短絡電流密度が並列配置で作製したタンデムセル特性に与える影響を調べたところ、2J セルのそれよりも高くなると、短絡電流密度と共に変換効率は向上し、飽和傾向を示した。例えば、20% の短絡電流密度の上昇により、変換効率は 6.1% の割合で高まることが分かった。一方、2J セルの短絡電流密度に対して 20% 低下するだけで、タンデムセルの変換効率が初期値に比べて 15.4% 低下した。短絡電流密度が 30% 減少した場合は、変換効率は 23.3% 低下することが分かった。つまり、並列配置および分光タンデム配置のいずれでも 30% 程度の値が得られた大きな要因は、1BJ セルの短絡電流値

(フィルタ下) を、2Jセルの短絡電流値 (1-sun 下) よりも高めることができたことである。曲線因子についても、変換効率と同様なコロイド量子ドットボトムセルの短絡電流密度依存性を示した。

本事業で検討を行ったサブセルの分光感度スペクトルを図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b2-10に示す。コロイド量子ドットボトムセルの分光感度は、1.9 μm から立ち上がり、Ge セルと同等であることが分かる。また、今回分光タンデム化に用いたボトムセルは、近赤外～短波長赤外領域で、EQE が 40 から 50%程度に留まっているが、光吸収量が少ないことが関係していることは間違いないので、ZnO ナノワイヤの形態制御と混合層の厚膜化は必要である。さらに、混合層から Au 電極への逆電流を抑止するために、電子ブロッキング層の最適化を行うことが効果的であると考えられる。

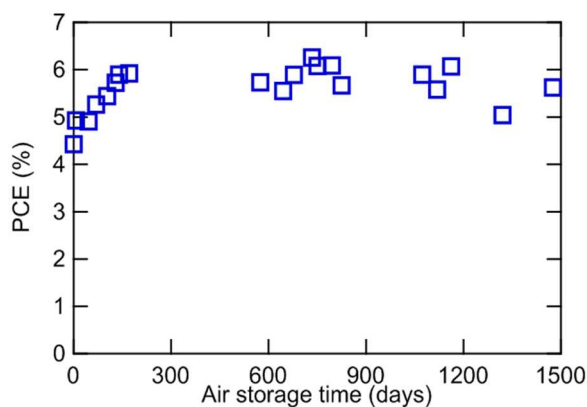


図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b2-10
サブセルの分光感度スペクトル

本事業を通して、多接合太陽電池の高効率化には、ボトムセルの短絡電流密度の向上が重要であることを明らかにした。加えて、金属ナノ粒子のプラズモン電場共鳴効果などの光マネジメント技術の活用は、更なる電流値の増加につながるものとも検証できた。また、ボトムセルの曲線因子と開放電圧には多くの改善の余地が残っている。

並列配置や分光タンデム配置により、多接合太陽電池のボトムセルとしての有効性を実証することができたが、実用性を考慮すると積層構造セルを作製することが不可欠である。積層構造としては、モノリシック型やメカニカル積層型が考えられるが、メカニカル積層型で4端子接続(表Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b2-1)が有力な候補である。

コロイド量子ドットを使った太陽電池は、低温の湿式プロセスで作製できるために、フレキシブルで軽量の基板利用も可能である。また、耐久性については十分な検討ができていないが、未封止状態で室温放置では4年以上(図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b2-11)、疑似太陽光照射下では、3000時間(評価を正常停止)の長期安定性は確認している。



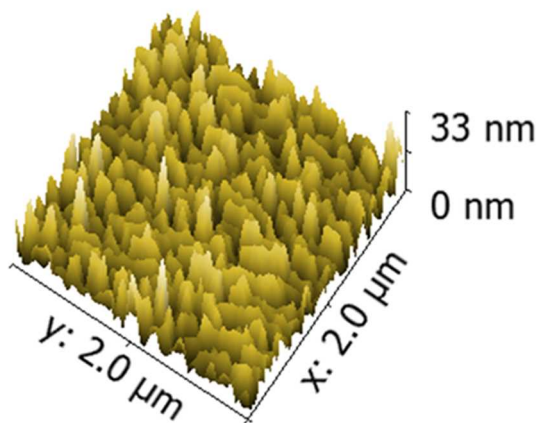
図III-2-(ロ)-D-1-b2-11
コロイド量子ドット太陽電池の動作安定性
評価（室温大気中）

III-2-(ロ)-D-1-b3. 量子ドットマルチバンド【産総研】

本テーマでは、InGaP 系ワイドギャップホストを用いた光吸収の最適化と、タイプ II 型量子ドットによるマルチバンド中のキャリア長寿命化を兼ね備えた量子ドット太陽電池の作製が目標である。In_{0.48}Ga_{0.52}P 中にタイプ II 型 InP 量子ドットを形成することにより、ワイドギャップホストを用いた太陽光スペクトルの高効率利用に加え、電子と正孔を空間的に分離して閉じ込めるタイプ II 型ポテンシャル中のキャリア長寿命化のため、2 段階光吸収過程の高効率化が期待できる。

タイプ II 型 InP 量子ドット太陽電池作製の要素技術として、MBE 装置を用いたタイプ II 型 InP 量子ドットのエピタキシャル成長技術の開発を進めた。InP 量子ドットの結晶成長においては、結晶成長速度に依存してタイプ I 型およびタイプ II 型の異なるポテンシャル構造を有した量子ドットが生成されることが知られていた。そこで、本研究では、タイプ II 型 InP 量子ドットを成長するための結晶成長条件の検討を進めた。結晶成長に用いる基板の比較を行い、タイプ II 型 InP 量子ドットを高い割合で生成する条件の検討を進めた。

以上の検討をもとにタイプ II 型 InP 量子ドットを作製し、図III-2-(ロ)-D-1-b3-1 の AFM 像で示すような量子ドットを作成できること、さらに積層膜厚などによってのサイズを系統的に制御できることを確認した。



図III-2-(ロ)-D-1-b3-1 InP 量子ドットの AFM 像

また、得られた InP 量子ドットの基礎的光学特性の評価をもとに、量子ドットのエネルギー準位を同定した。量子ドットの発光エネルギーから量子ドットのバンド間光学遷移（中間バンド型太陽電池の価電子帯—中間バンド間遷移に相当）のエネルギーが約 1.55-1.7 eV であると算出した。さらに、量子ドットからの発光について時間分解測定を行うことによって、図 III-2-(ロ)-D-1-b3-2 のような発光強度時間変化特性において 30 ナノ秒以上の長い蛍光寿命が観測された。この結果から、量子ドット中のキャリアの寿命が約 30 ナノ秒であることを確認した。これは、通常の GaAs 中の InAs 量子ドットなどのタイプ I 型の量子ドットにおける典型的なキャリア減衰寿命である 1 ナノ秒と比較して、10 倍以上も長いキャリア寿命をタイプ II 型量子ドットが有していることを示している。この長い寿命は、タイプ II 型量子ドットにおいては、電子キャリアと正孔キャリアを空間的に分離して閉じ込めるという特徴によって、輻射再結合過程が抑制されていることを反映している。また、量子ドット中のキャリア寿命が 10 倍以上に長くなるため、太陽光照射下における量子ドット中のキャリア数が 10 倍以上に増大し、これによって 2 段階光吸収による光電流生成の効率も 10 倍以上に増大することが期待される。

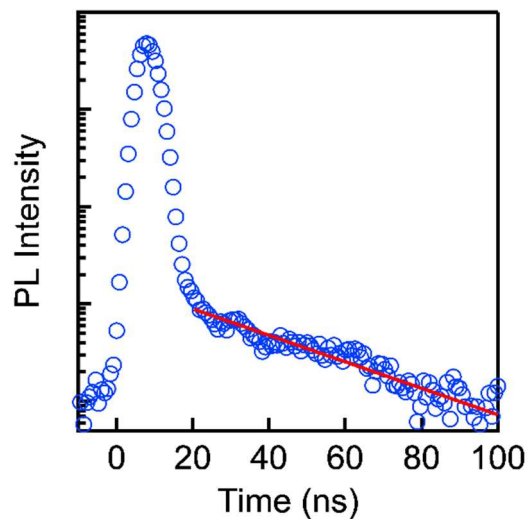
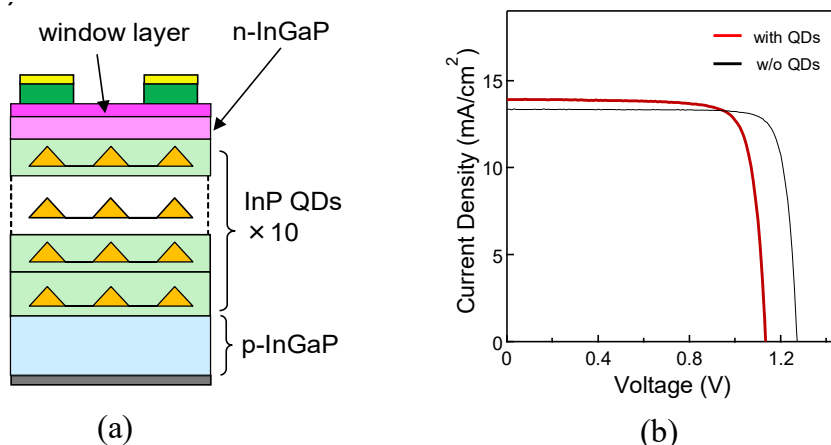


図 III-2-(ロ)-D-1-b3-2 InP 量子ドットの発光強度時間変化特性

次に、InP 量子ドットを実装した太陽電池セルの作製技術の開発を進めた。図 III-2-(ロ)-D-1-b3-3(a) の模式図に示すような、InGaP 太陽電池セルに InP 量子ドットを挿入した試料を作製した。量子ドットによる光吸収を増大させるために、10 層の InP 量子ドット層を InGaP 層で覆うことにより形成した。分光感度特性より InP 量子ドット層による光電流生成を確認し、10%以上の量子効率が得られた。さらに InGaP ホスト InP 量子ドット太陽電池のデバイス構造検討を進め、高性能化のための最適設計を試みた。模式図中の量子ドット層と n-InGaP 層の間に i-InGaP 層を挿入すること、及びタイプ II 量子ドットの高品質化により太陽電池特性が向上した。図 III-2-(ロ)-D-1-b3-3(b) は、InGaP ホスト InP 量子ドット太陽電池、及び量子ドットを挿入しない太陽電池の電流-電圧曲線を比較したものである。量子ドット太陽電池の短絡電流密度、開放電圧、曲線因子、変換効率は、それぞれ、13.4mA/cm², 1.11V, 0.79, 12.3% である。量子ドットが挿入されていない InGaP 太陽電池と比較し、開放電圧が 210mV 低下し、曲線因子や変換効率も量子ドット挿入によりそれぞれ、0.04, 0.5%低下した。このように、量子ドットの挿入により太陽電池に電圧降下が発現する。本プロジェクトにおいてはそれを抑制することができず、2018 年度を以てワイドギャップホスト及びタイプ II 構造セルの研究開発は終了した。今後は開放電圧低下の起源

についてさらなる解明を進め、それを抑制することで量子ドット太陽電池高効率化の実現に取り組む必要がある。



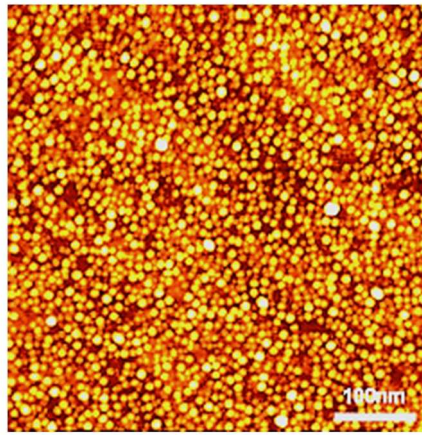
図III-2-(ロ)-D-1-b3-3 (a) 量子ドット太陽電池の模式図と (b) 電流電圧特性

III-2-(ロ)-D-1-b4. 量子ドットマルチバンド・高密度量子ドット成長技術【電通大】

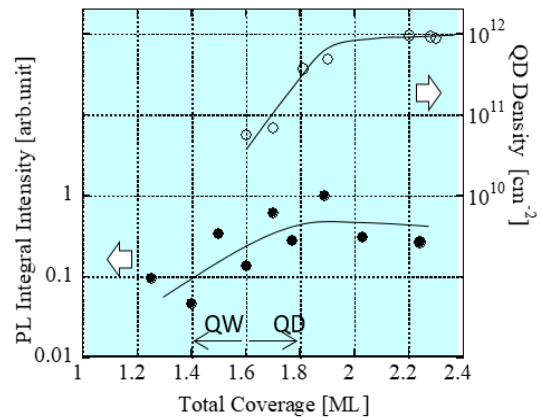
(1) 水冷式 MBE による面内超高密度 InAs 量子ドットの自己形成

量子ドット (QD) 太陽電池の低コスト化に向け、本研究プロジェクトでは、一般的に使用されている比較的 low 価格の GaAs (001) 基板を用い、さらに液体窒素ではなく低コストの水冷シュラウド式の MBE 装置を用い、面内密度 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ の超高密度 InAs QD 層の成長技術を確立した。面内超高密度 InAs QD は、Stranski-Krastanov (SK) 成長モード遷移により GaAs バッファ層上の InAsSb 濡れ層上に自己形成を行う独自の手法を開発したもので、その SK 成長における 2 次元成長から 3 次元成長への遷移過程のメカニズムを解明した。

図 III-2-(ロ)-D-1-b4-1 には、GaAs (001) 基板上への InAsSb 濡れ層上の InAs QD の自己形成により作製した世界最高の面内密度 ($1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) の InAs QD 層の AFM 像で、液体窒素冷却 MBE と同等の面内超高密度 InAs QD 層を高い再現性で成長することが可能となった。また、図 III-2-(ロ)-D-1-b4-2 は InAs 成長量に対する QD 密度と PL 積分強度の関係を調べたもので、QD 密度の増加とともに PL 強度も増大し、結晶性が比較的高いことを示すことができた。

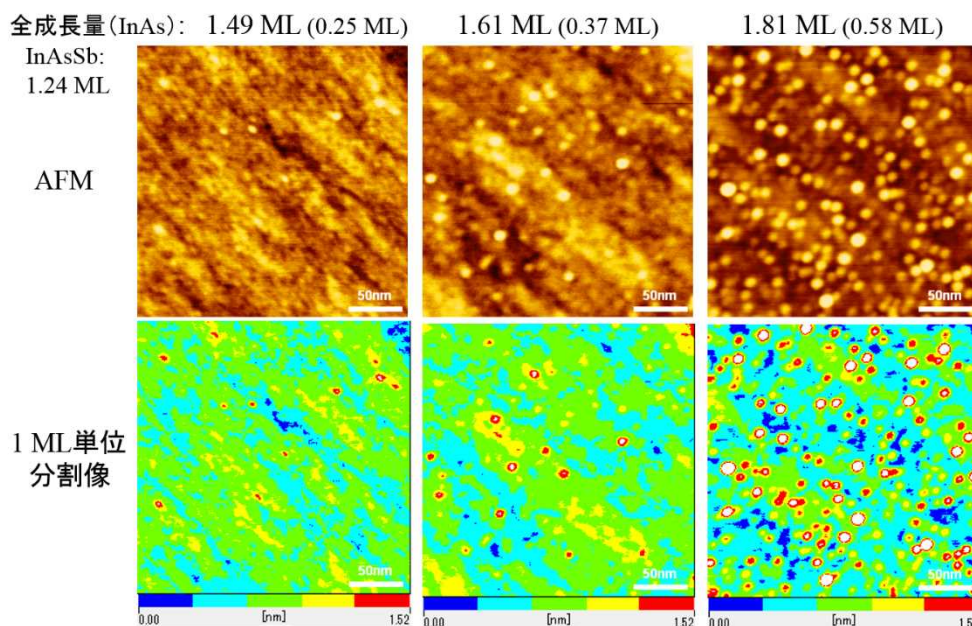


図III-2-(口)-D-1-b4-1
面内超高密度 InAs QD 層の AFM 像
(QD 密度 : $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$)



図III-2-(口)-D-1-b4-2
InAs/InAsSb 成長量に対する InAs QD 密度と PL 積分強度 (15 K)

図III-2-(口)-D-1-b4-3 は、InAsSb 1.24 分子層 (ML) 上に InAs を 0.25 ML, 0.37 ML, 0.58 ML 成長したときの原子間力顕微鏡 (AFM) 像を示す。下段には 1 ML 毎に色分けした AFM 像を示す。通常の GaAs 上の InAs 成長に比べ、InAsSb/GaAs 上では 3 次元核形成の初期段階において、下地 2 次元島が細線化し、その上に 3 次元核が形成される多核形成モードが起きていることが分かった。また、InAs を 0.37 ML 成長した後、In 供給を止めても 3 次元化が進行し、下地層から In 原子が供給されていることが明らかになった。こうした InAs 細線構造の形成や下地層からの In 供給は、GaAs 上の InAsSb 層における高い格子歪および表面 Sb 原子による表面拡散の抑制効果によるものと考えられる。その結果、高密度の多核形成が起こり、InAs 成長量が 0.99 ML では面内密度 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ の超高密度 InAs QD 層が自己形成されることが明らかになった。



図III-2-(口)-D-1-b4-3 InAsSb/GaAs 層上の InAs 成長過程 (InAsSb: 1.24 ML, InAs: 0.25, 0.37, 0.58 ML) AFM 像 (下段: 1 ML 単位で色分け表示)

この面内超高密度 InAs QD のサイズは小さく、平均の QD 高さは約 2nm, 横方向サイズは約 12nm で、QD 間距離も極めて近接している。このような面内超高密度 InAs QD 層の物性を明らかにするために、その発光特性から QD 層内のキャリアの閉じ込め状態について調べた。図 III-2-(ロ)-D-1-b4-4 には、InAsSb 1.25 ML 層上の InAs の成長量を 0 から 0.99ML まで変化させたときのフォトルミネッセンス (PL) スペクトルの変化を示す。InAs が 2 次元成長する成長量 0.25ML 付近までと 3 次元成長する 0.35ML 以上の領域とを境にして PL スペクトルは大きく異なり、不連続な特性を示すことが分かった。InAs 成長量が 0.35 ML 以上の 3 次元成長領域では、AFM 像からも推察されるように、3 次元的な量子閉じ込め効果が起きている量子ドット構造であることが考えられ、その零次元電子系を調べるために、各 InAs 成長量における 3 次元島構造の平均体積 (V) に対する 15K の低温での PL ピークエネルギー (E) の変化を調べた。その結果を図 III-2-(ロ)-D-1-b4-5 に示す。零次元電子系の QD 構造の場合、QD 形状によって QD 量子準位の体積依存性は異なり、 $E = V^{-\gamma}$ の関係があることが理論計算より示されている。図 III-2-(ロ)-D-1-b4-5 の実験結果では、形状因子 γ の値が 0.27 (QD 構造が円錐形) のときにより一致を示すことが分かった。したがって、本研究で開発した面内超高密度 InAs QD 層では、面内で近接した微小 QD の集合体ではあるが、低温下においては零次元電子系の 3 次元量子閉じ込め効果を発現していることが明らかになった。180K 以上の高温における電子状態については次の項目にまとめた。

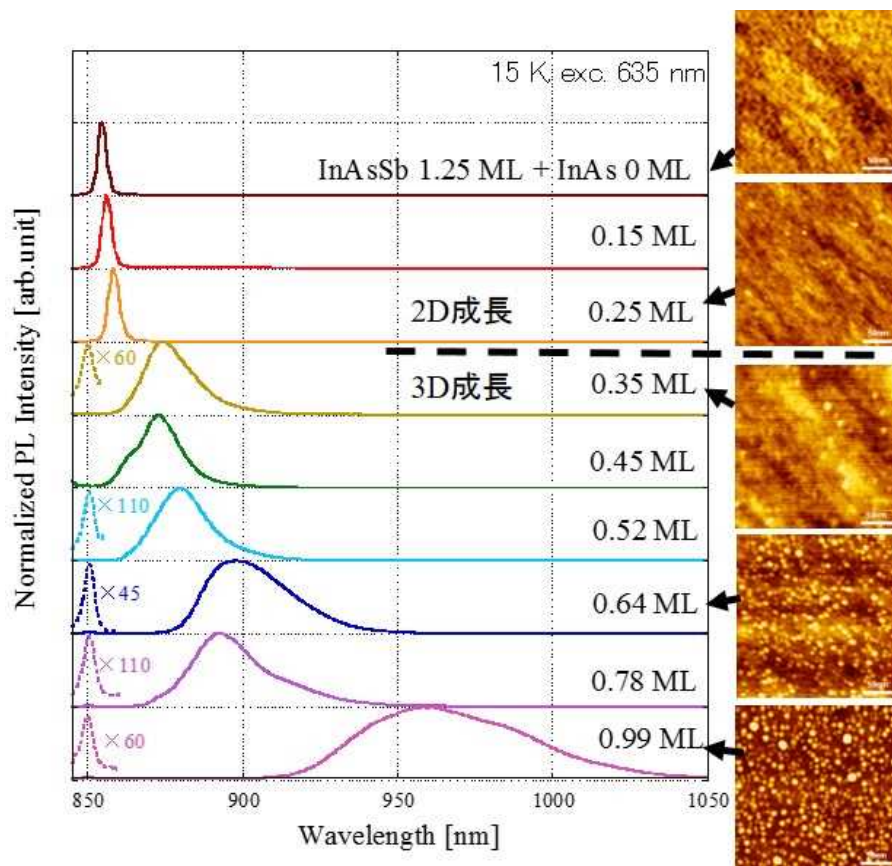
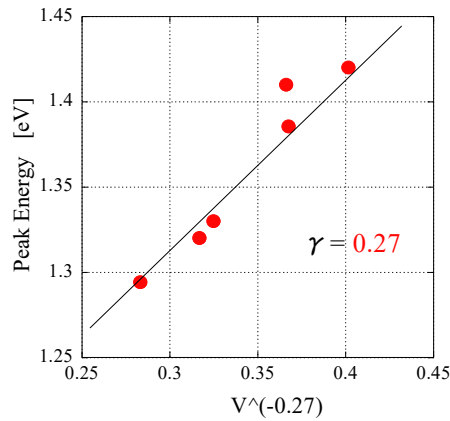


図 III-2-(ロ)-D-1-b4-4
InAsSb 濡れ層上の InAs 成長層の PL スペクトルと AFM 像 (InAs 成長量依存性)

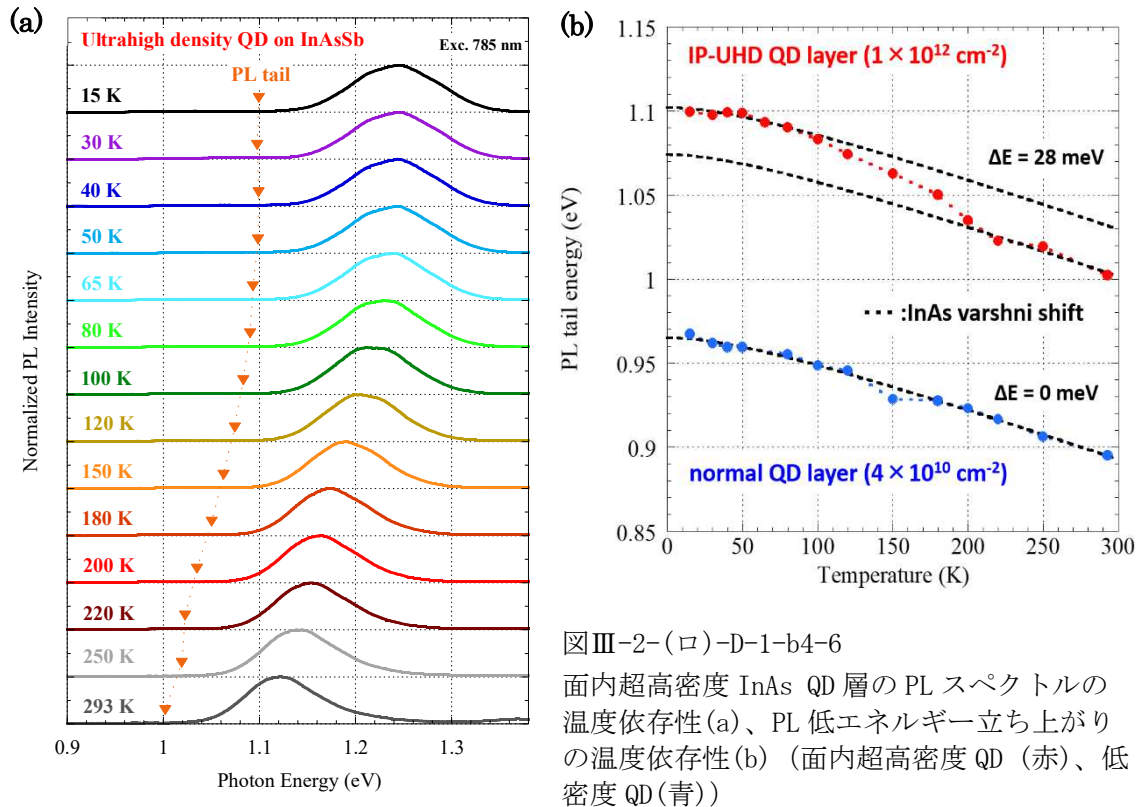


図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b4-5
InAs QD の体積 (V) に対する PL ピーク
エネルギーの変化 ($E = V^{-\gamma}$ の関係)

(2) 面内超高密度 InAs 量子ドット層における中間バンド形成

面内超高密度 InAs QD 層における低温での PL ピークの QD 体積依存性より 3 次元量子閉じ込め効果が確認された。この面内超高密度 QD 層の太陽電池応用では、室温での動作を考えているが、室温付近の高温では QD 量子準位のエネルギー幅 (均一幅) の広がりによって隣接 QD 間での電子的強結合が起これやすくなり、QD 層の面内におけるエネルギーミニバンド (中間バンド) 化の広がり起きたものと考えられる。そこで、この面内超高密度 QD 層の PL スペクトルの温度依存性を測定評価し、QD 準位の均一幅の温度依存性を考慮した独自開発のシミュレーションモデルにより実験結果を検証した。

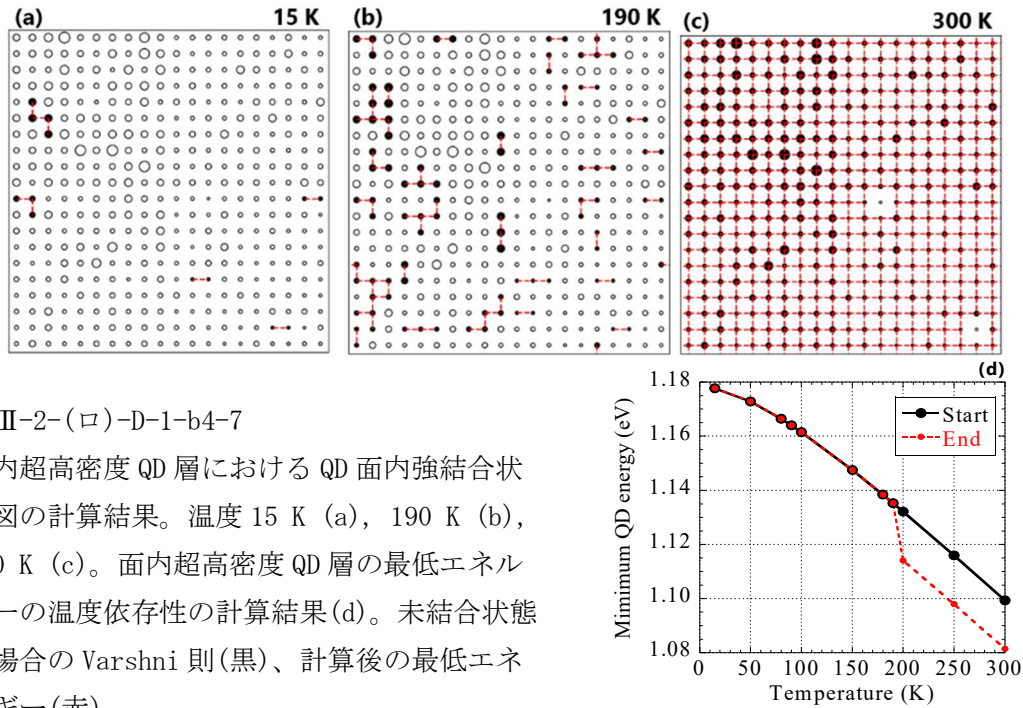
図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b4-6(a)には、QD 密度が $1 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ の面内超高密度 InAs QD 層における PL スペクトルの温度依存性を示す。低温における PL スペクトルのエネルギー幅は、主に QD サイズ、歪量、組成の不均一分布による QD 量子準位の不均一エネルギー幅および高エネルギー量子準位幅との重なりによるものである。温度上昇とともに PL スペクトルは低エネルギー側へシフトするが、15 K から 80 K の低温領域では、エネルギーギャップの温度依存性、所謂 Varshni 則による低エネルギーシフトを示している。しかし、80 K から 200 K では、Varshni 則よりも大きな低エネルギーシフトを起こすことが初めて観測された。PL スペクトルの低エネルギー側の立ち上がりエネルギーの温度依存性を図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b4-6(b)に示す。通常の低密度 QD 試料 (密度 $4 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$) では、15 K から 300 K までの全温度領域について Varshni 則に沿った一様な温度変化を示すが、面内超高密度 QD 試料では、80 K から 200 K にかけて Varshni シフト量に加えて 28 meV も大きく低エネルギーシフトし、さらに高温側では再び Varshni 則に沿った温度依存性を示すことが分かった。これは温度上昇とともに各 QD 量子準位の均一幅が広がり、面内の隣接 QD 間での量子準位が強結合を起こし、QD 準位のバンド化が発現したことによると解釈される。



図III-2-(ロ)-D-1-b4-6

面内超高密度 InAs QD 層の PL スペクトルの温度依存性(a)、PL 低エネルギー立ち上がりの温度依存性(b) (面内超高密度 QD (赤)、低密度 QD(青))

そこで、面内超高密度 QD 層における温度上昇に伴う隣接 QD 間の量子準位の強結合による面内バンド化の拡がりについてシミュレーションを試みた。この計算モデルでは QD 準位の均一幅の温度依存性の実験データを基にした。図III-2-(ロ)-D-1-b4-7(a)-(c)には温度を変化させたときの計算による QD 面内結合状態の様子を示す。黒丸は結合 QD を示し、結合した QD 同士を赤線で繋いだ。図III-2-(ロ)-D-1-b4-7(d)はそのときの QD の最低エネルギーの温度依存性である。15 K では QD はほとんど結合せず、QD の最低エネルギーは Varshni 則に沿って低エネルギーにシフトを示すが、190 K 付近までは徐々に QD 間の面内強結合が拡がり、200 K 以上ではほぼ全 QD が急激に結合することが分かった。よって、最低 QD エネルギーは 200K 付近で急激に大きくシフトし、図III-2-(ロ)-D-1-b4-6(b)の実験結果の様子を計算モデルによってほぼ再現することができた。



図III-2-(ロ)-D-1-b4-7

面内超高密度 QD 層における QD 面内強結合状態図の計算結果。温度 15 K (a), 190 K (b), 300 K (c)。面内超高密度 QD 層の最低エネルギーの温度依存性の計算結果(d)。未結合状態の場合の Varshni 則(黒)、計算後の最低エネルギー(赤)

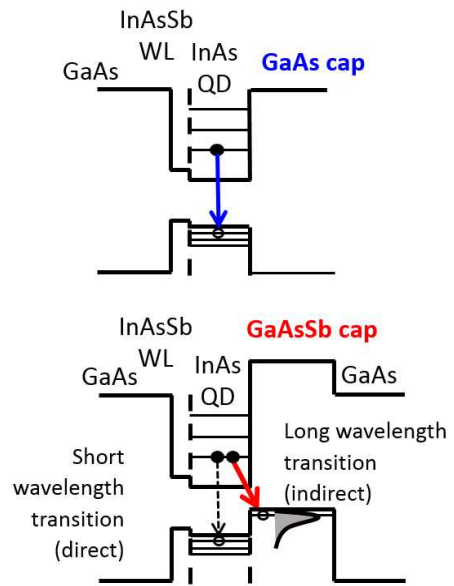
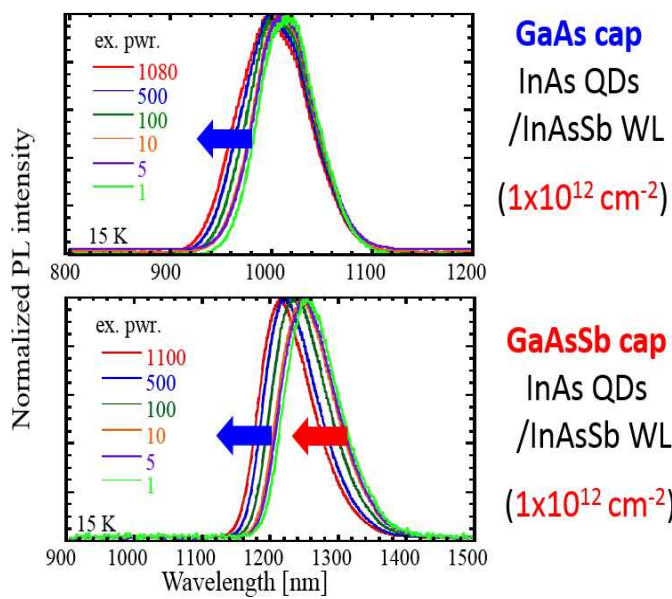
(3) Type-II型面内超高密度 InAs 量子ドット層における光学遷移の解明

InAs/GaAsSb ヘテロ構造は type-II型バンド構造を有し、電子・正孔の空間的分離によるキャリアの長寿命化が期待される。そこで本研究では、InAsSb/GaAs 層上の面内超高密度 InAs QD 層 ($1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) を GaAsSb 層で埋め込み成長を行い、そのフォトルミネッセンス(PL)特性評価を行った。図III-2-(ロ)-D-1-b4-8 は、GaAs 埋め込み成長したものと GaAsSb 埋め込み成長したものの PL スペクトルの励起光強度依存性である。励起光強度を増すと GaAs 埋め込み層のものでは短波長側に連続的なブルーシフトが観測されるが、GaAsSb 埋め込み層のものでは短波長側だけでなく、長波長側も連続的なブルーシフトが起こった。面内超高密度 QD 構造の場合、QD 間の距離は 5 nm 程度と狭く、トンネル効果による電子の面内輸送現象が考えられる。その結果、電子は QD 準位の低いものから占有し、励起光強度の増大とともに高エネルギーの QD の占有化が進行するために連続的なブルーシフトが起きたものと考えられる。

また、GaAsSb 埋め込み層の場合の長波長側でのブルーシフトは、図III-2-(ロ)-D-1-b4-9 に示すように、type-II バンド構造の GaAsSb 価電子帯中の正孔のエネルギー分布を反映したものと考えられる。さらに、時間分解 PL 測定により、GaAsSb 埋め込み層のものでは direct 遷移成分と in-direct 遷移成分が共存していることが分かり、測定温度の上昇とともに in-direct 成分から direct 成分へと支配性が変化する様子が観測された。

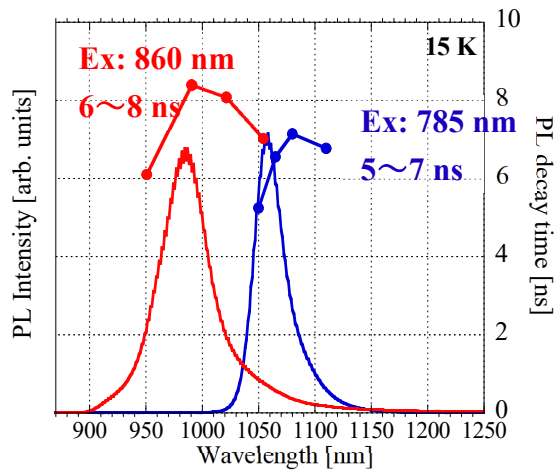
つぎに、GaAsSb/GaAs バッファ層上の type-II型の面内超高密度 InAs QD 層におけるキャリア緩和過程を調べるために、PL 測定における励起光波長を変化させた。図III-2-(ロ)-D-1-b4-10 には、785nm 励起 (GaAs 禁制帯上) と 860nm 励起 (GaAs 禁制帯下) における典型的な PL スペクトルと PL decay time を示す。両励起波長での PL decay time は共に 5~8 ns と長く、type-II バンド構造による in-direct 遷移を示した。785nm 励起における PL ピーク波長は 1060nm で、QD 基底準位の電子と価電子帯正孔との遷移によるが、860nm 励起における PL ピーク波長は短波長化し、QD の励起準位の電子との in-direct 遷移を示した。よって、GaAs 伝導帯上の光励起電子は基底準位まで緩和するが、GaAs 禁制帯以下の InAs 濡れ層での光励起電子は励起準位へ移行し、そのまま励起準位の電子と GaAsSb 価電子帯の正孔との交

差遷移を起こすことが明らかになった。



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b4-8
InAsSb/GaAs 層上の超高密度 InAs QD 層の
PL スペクトルの励起光強度依存性
(上: GaAs cap, 下: GaAsSb cap)

図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b4-9
エネルギーバンド図 (GaAs cap と
GaAsSb cap) および direct 遷移過程と
in-direct 遷移過程



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b4-10
InAs QD/GaAsSb 層の PL スペクトルおよ
び PL decay time の励起光波長依存性 (励
起光: 860 nm, 785 nm)

図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b4-11 には、785nm 励起および 860nm 励起における PL スペクトルの基板面内位置依存性 (P1~P9) を示す。785nm 励起の場合はほぼ同じ PL スペクトルを示し、位置依存性は見られなかった。これは図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b4-8 で示した QD 間の電子の面内トンネル輸送によるもので、より低い基底準位の QD から基底準位が filling される効果によるものと考えられ、どの位置で励起しても面内トンネル効果により基底準位の filling が同様に起こることで説明される。一方、860nm 励起の場合には測定位置依存性が明瞭に観測され、励起準位の電子と GaAsSb 価電子帯の正孔との励起子が局在化され

た束縛励起子であると推察された。したがって、基板面内における QD 構造の不均一性の評価には、860nm 励起による PL 測定は有効であることが分かった。

さらに、GaAsSb/GaAs バッファ層上の面内超高密度 InAs QD 層において、キャリアの長寿命化のために GaAsSb 層と InAs QD 層との間に GaAs スペーサ層を導入した。図 III-2-(ロ)-D-1-b4-12 には、GaAs スペーサ層の有無における 785nm 励起の PL スペクトルと PL decay time を示す。GaAs スペーサ層を導入すると、GaAsSb 層と InAs QD 間の格子不整合量が拡大するために圧縮応力が増大し、PL スペクトルは短波長化することが分かる。また、GaAs スペーサ層によるキャリアの空間分離が拡大することにより、PL decay time は 10ns を超える程まで増長できることが分かった。また、GaAs スペーサ層の導入により type-II 型の交差遷移が室温まで保持され、室温での長寿命化も確認された。

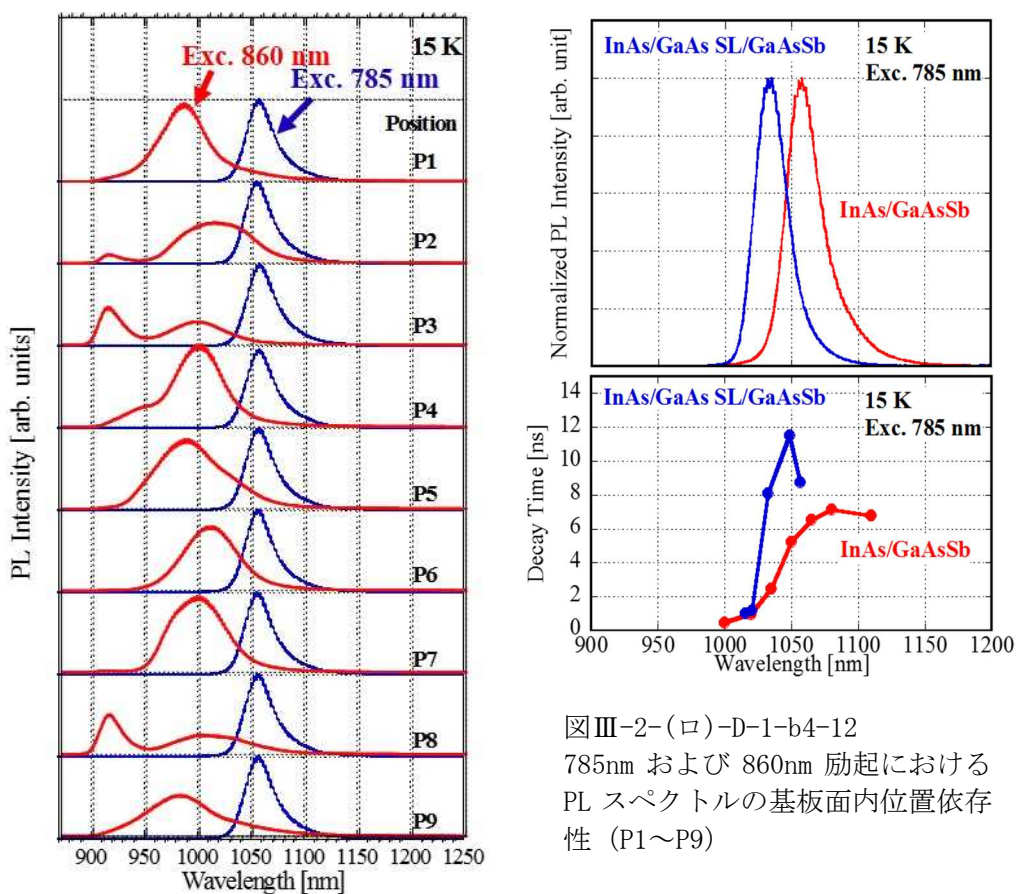
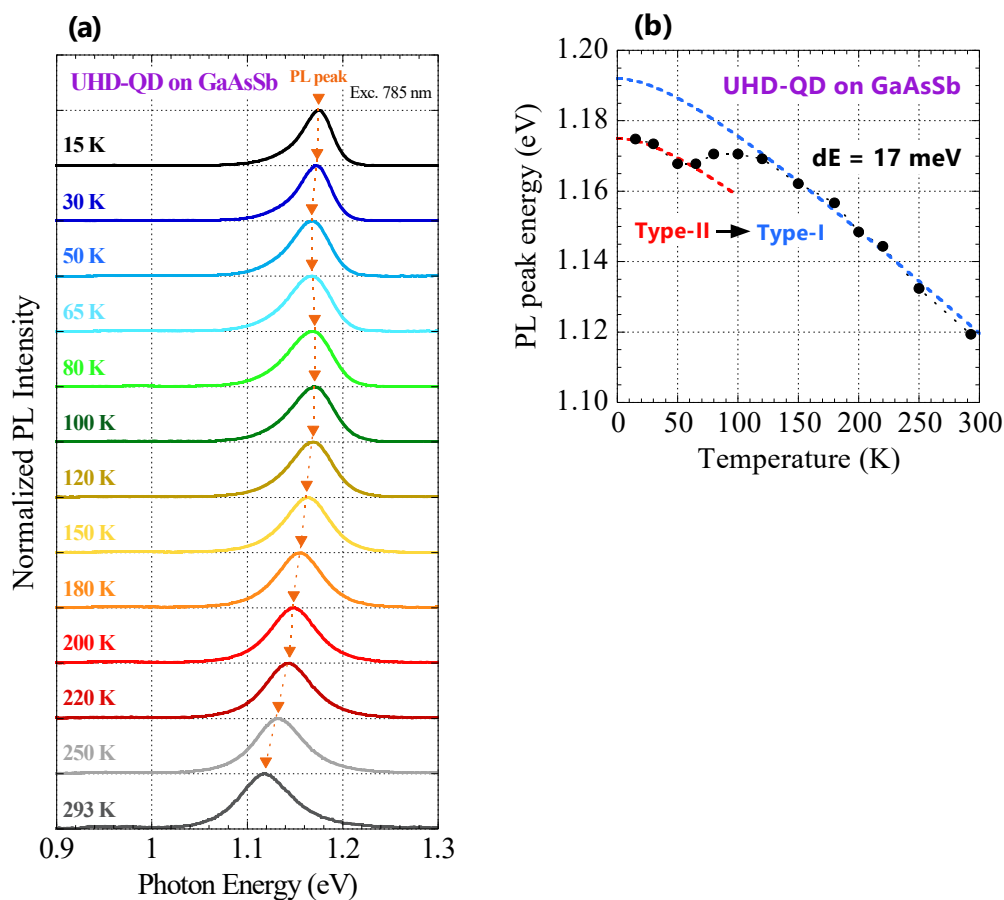


図 III-2-(ロ)-D-1-b4-12
785nm および 860nm 励起における
PL スペクトルの基板面内位置依
存性 (P1~P9)

図 III-2-(ロ)-D-1-b4-11
785nm および 860nm 励起における
PL スペクトルの基板面内位置依
存性 (P1~P9)

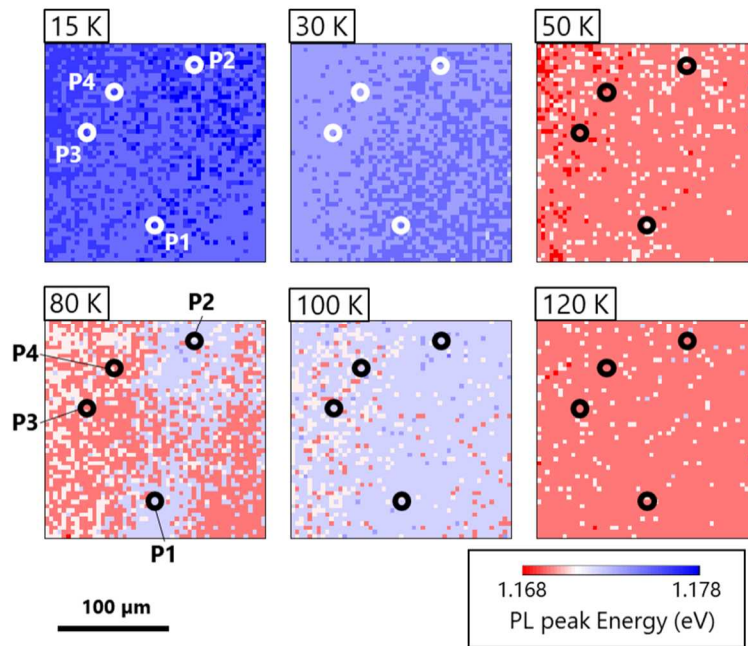
つぎに、Type-II 型面内超高密度 InAs QD 層における再結合過程の遷移について調べた。図 III-2-(ロ)-D-1-b4-13(a) には、GaAsSb 層上の面内超高密度 InAs QD 層 (GaAs スペーサ層なし) の PL 温度依存性を示す。15K における時間分解 PL 測定より、ピーク付近では InAs QD の電子と GaAsSb 層の正孔の Type-II 遷移による 5-7 ns の長寿命キャリアが確認されている。図 III-2-(ロ)-D-1-b4-13(a) 中に示した PL peak のシフトを図 III-2-(ロ)-D-1-b4-13(b) にプロットし、InAs エネルギーギャップ (E_g) のシフトを破線で示した。PL ピークは 50K まで InAs E_g に従ったシフトを示したが、80-120K の範囲で InAs E_g 対

して 17meV 高エネルギー側へのシフトが見られた。低温域では Type-II 発光成分が支配的であるが、温度上昇によって正孔の GaAsSb 層から InAs QD 層への熱励起過程が促進され、高エネルギー側の Type-I 遷移が支配的になり、PL ピークがシフトしたと考えられる。



図III-2-(ロ)-D-1-b4-13 (a) GaAsSb 上超高密度 QD の PL スペクトル温度依存性 (b) PL ピークの温度シフト

この発光遷移過程の支配性の遷移を調べるために、PL ピークエネルギーの面内マッピング像の温度依存性を調べた。その結果を図III-2-(ロ)-D-1-b4-14 に示す。15K から 50K にかけて、Type-II 支配 PL ピークが一様にレッドシフトしていく様子が観測された。80K では、P1, P2 のような高エネルギーシフトしている領域と、P3, P4 のように PL ピークがまだ低エネルギー側にある領域とが観測され、Type-II 発光から Type-I 発光への発光遷移過程の空間的变化を捉えることができた。このような遷移過程の部分的な変化は GaAsSb 層の Sb 組成や QD サイズなどの面内不均一性によるもので、正孔の挙動に面内でばらつきが発生したものと考えられる。

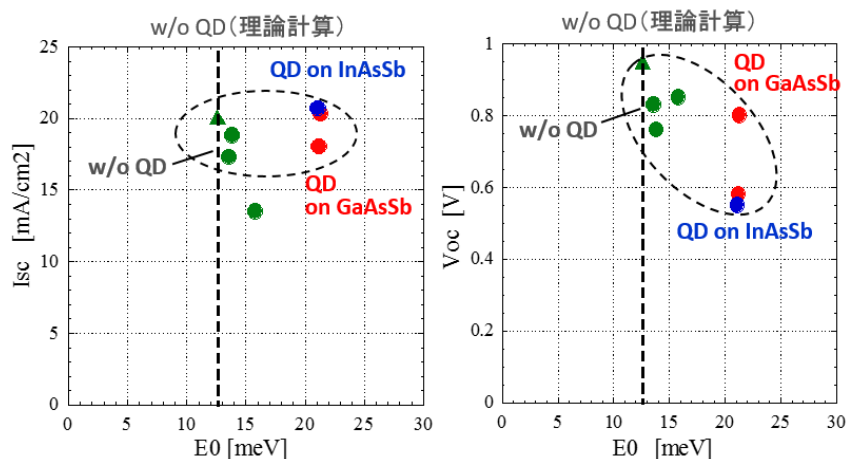


図III-2-(口)-D-1-b4-14 GaAsSb 上超高密度 InAs QD 層 PL ピークエネルギーの面内マッピング像の温度依存性

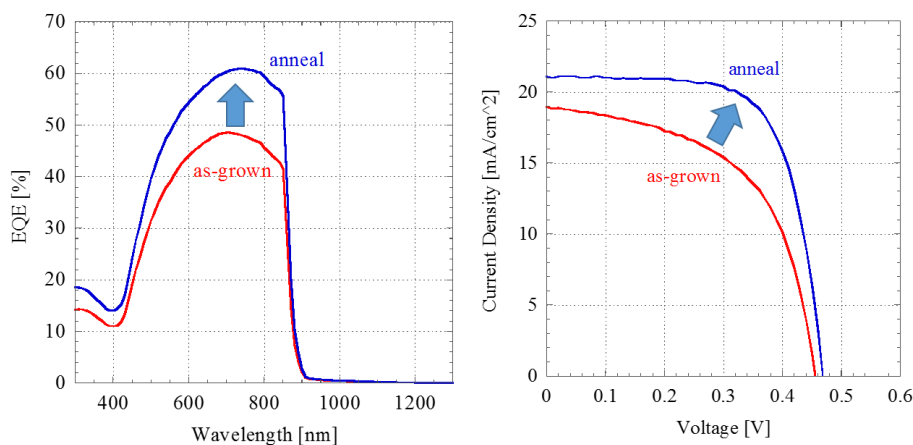
(4) 面内超高密度 InAs 量子ドット層を導入した太陽電池の結晶性評価

GaAsSb バッファ層上または InAsSb 濡れ層上の面内超高密度 InAs QD 層を導入した GaAs 太陽電池と QD 層の無い GaAs 太陽電池を作製し、基本特性（短絡電流 (I_{sc})、開放端電圧 (V_{oc})) と Urbach tail との関係性を調べた。Urbach tail は半導体結晶の無秩序性によるエネルギーバンドの裾に指数関数的な状態密度が形成されるもので、結晶性の評価の一つにもなる。図III-2-(口)-D-1-b4-15には、 I_{sc} と V_{oc} の Urbach tail エネルギー (E_0) 依存性を示す。 E_0 は外部量子効率 (EQE) スペクトルから求めた。また、詳細平衡モデルより計算した QD 層の無い理想的な GaAs 太陽電池の E_0 を点線で示す。理想的なセルの E_0 に比べ、実験結果の QD 無しセルの E_0 は 1~3meV 大きく、QD セルの E_0 は約 6meV 大きい値を示した。 I_{sc} は E_0 にほとんど依存せず、 V_{oc} は E_0 の増大と共に低下する傾向が確認された。Urbach tail により擬フェルミ準位が低下することは明らかであり、QD 層導入セルの結晶性を評価する一つの指標として Urbach tail は重要であると考えている。

つぎに、InAsSb/GaAs 層上の面内超高密度 InAs QD 層 (GaAsSb 埋め込み層) の試料について熱アニール処理 (600°C, 30min) を施し、結晶性の改善効果を調べた。PL 特性においては、アニール処理によって PL 強度は増大し、非発光性再結合の抑制によって蛍光寿命も少し長くなった。また、欠陥によるものと考えられる 1200~1300nm 付近のブロードな PL スペクトル成分も抑制されることが分かり、アニールによる結晶性の改善効果を確認した。図III-2-(口)-D-1-b4-16 は、面内超高密度 InAs QD 層を導入した太陽電池を試作し、室温での外部量子効率および光照射 (AM1.5, 1 sun) 下の電流・電圧特性を調べたものである。アニール処理前の as-grown 試料に比べて、アニール処理を施したものでは外部量子効率の向上および光照射 I-V 特性の改善が見られた。

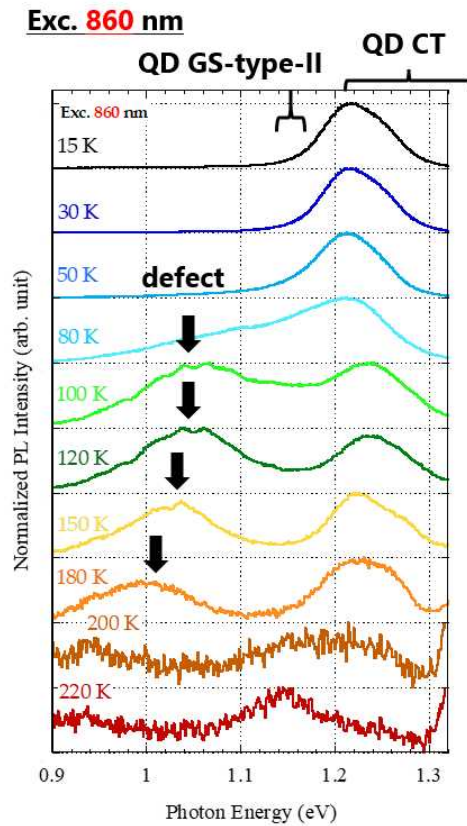


図III-2-(ロ)-D-1-b4-15 面内超高密度 InAs QD 層を導入した GaAs 太陽電池の短絡電流 (I_{sc}) と開放端電圧 (V_{oc}) の Urbach tail エネルギー (E_0) 依存性。点線は QD 層無し理想 GaAs セルの E_0 の理論計算値



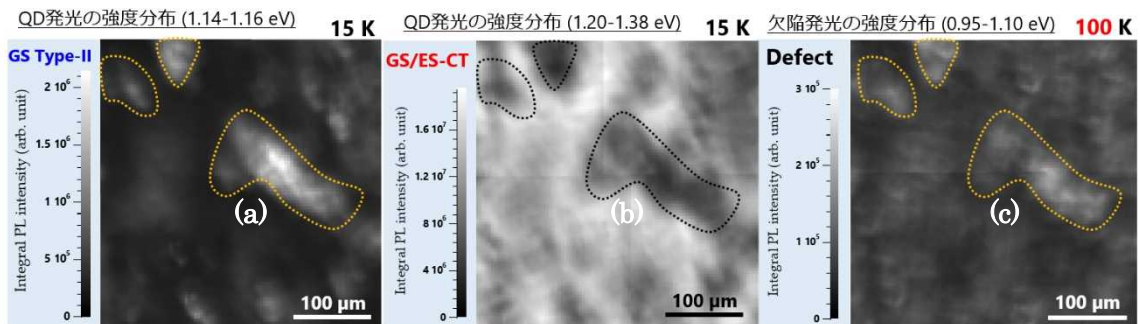
図III-2-(ロ)-D-1-b4-16 InAsSbML/GaAs 層上の超高密度 InAs QD 層を内蔵した GaAs 太陽電池の外部量子効率と光照射 (AM1.5, 1 sun) 電流・電圧特性 (as-grown, anneal 処理)

さらに、自己形成 QD 層の場合、格子歪により非発光性再結合が問題となる。そこで、面内超高密度 InAs QD 層の QD 準位と欠陥の深い準位との関係を調べるために、InAs QD/GaAsSb 層の選択励起 (860nm 励起) を行い、束縛励起子発光による局所的な PL 解析を行った。図III-2-(ロ)-D-1-b4-17 は 860nm 励起における PL スペクトルの温度依存性で、低温領域では QD 基底準位の電子と GaAsSb 層の正孔間の PL (QD GS-typeII) および QD 準位の電子と濡れ層の正孔の交差遷移 (crossed transition, CT) の PL スペクトルが支配的であるが、80K 付近以上になると、1.05eV 付近のブロードな PL スペクトルが強くなり、QD 発光の PL 強度と同程度になることが分かった。この低エネルギー側の深い準位からの発光は欠陥に関与したスペクトルであると考えられ、それらの PL スペクトルについてマッピング測定を行った。



図III-2-(口)-D-1-b4-17
面内超高密度 InAs/GaAsSb QD 層の
PL スペクトルの温度依存性(860 nm
励起)

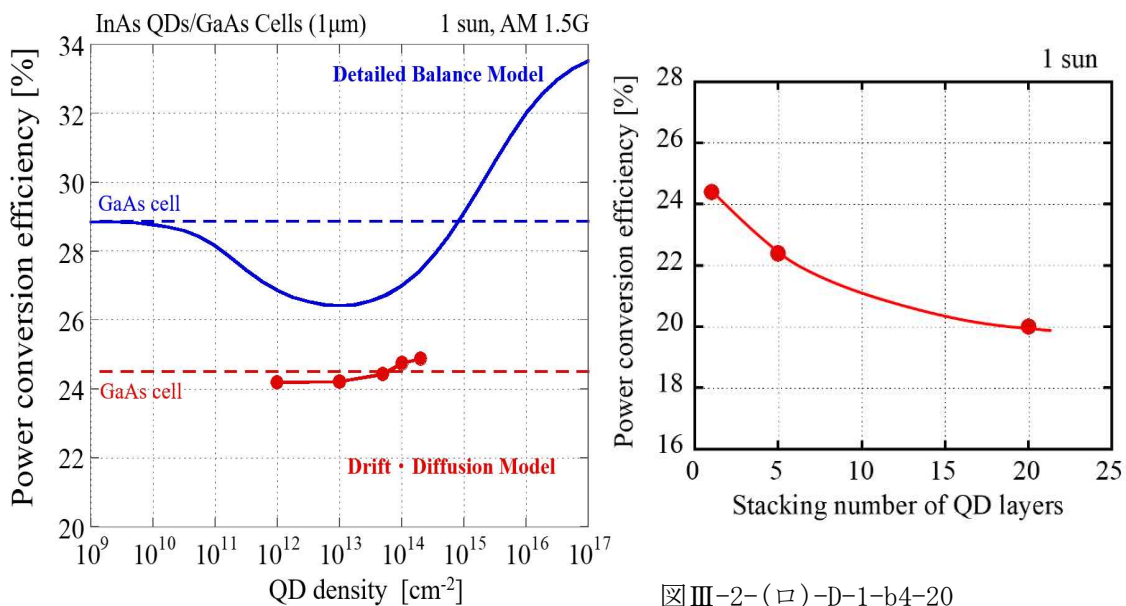
図III-2-(口)-D-1-b4-18 には、15K での QD 発光の GS-type-II 発光の強度分布 (a) と QD CT 発光の強度分布 (b) および 100K での欠陥発光の強度分布 (c) をそれぞれ示す。GS-type-II 発光と QD CT 発光には相補性が観測されることが分かった。また、100 K での欠陥発光像と QD CT 発光像とに対応関係があることも新たに分かった。この欠陥発光は通常の PL マッピング測定では観測されず、しかも QD 準位と結合した欠陥準位からの発光の可能性が示唆され、QD 近傍に存在する欠陥であることが考えられる。したがって、本手法は試料を非破壊でかつ簡便に広い領域の結晶性評価法として期待される。



図III-2-(口)-D-1-b4-18
面内超高密度 InAs/GaAsSb QD 層の 15 K における QD GS-type-II 発光の強度分布 (a) と
QD CT 発光の強度分布 (b)、100 K における欠陥発光の強度分布 (c)

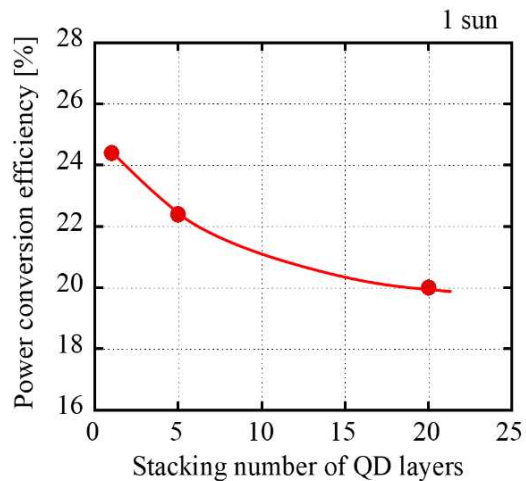
(5) 面内超高密度量子ドット太陽電池特性のドリフト拡散モデルによる計算

本プロジェクトの前半までは、主に詳細平衡(DB)モデルによる QD 密度と太陽電池特性を調べ、高効率化のための QD 密度および集光度について設計の目安を得てきたが、より現実的な構造設計の指針を得るために、キャリアの輸送過程を考慮したドリフト拡散(DD)モデルを導入した理論計算(APSYS 2014)による QD 太陽電池構造とその基本特性について検討した。図III-2-(ロ)-D-1-b4-19には、1 sun (AM1.5G)の照射下における InAs QD 密度と変換効率の計算結果を示す。比較のために DB モデル (QD への電子ドープ無し) の計算結果も示す。QD 層の無い GaAs セルについては、DD モデルによる変換効率は DB モデルの結果に比べて4%程低くなることが分った。QD 密度依存性では、DD モデルと同様に、QD 密度が $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 付近までは変換効率は低下し、その後上昇する傾向が得られ、QD 密度が約 $5 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 以上で、GaAs セルよりも上回ることが分った。ただし、この計算では 自己形成 InAs QD の下地の濡れ層(QW)が無く、その QD 層を i-GaAs 層の中央に配置した計算である。



図III-2-(ロ)-D-1-b4-19

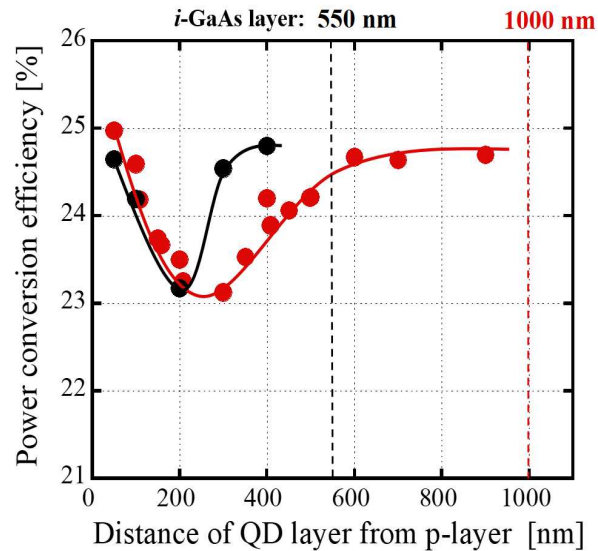
InAs QD/GaAs 太陽電池における理論変換効率の QD 密度依存性 (青：詳細平衡モデル，赤：ドリフト拡散モデル)



図III-2-(ロ)-D-1-b4-20

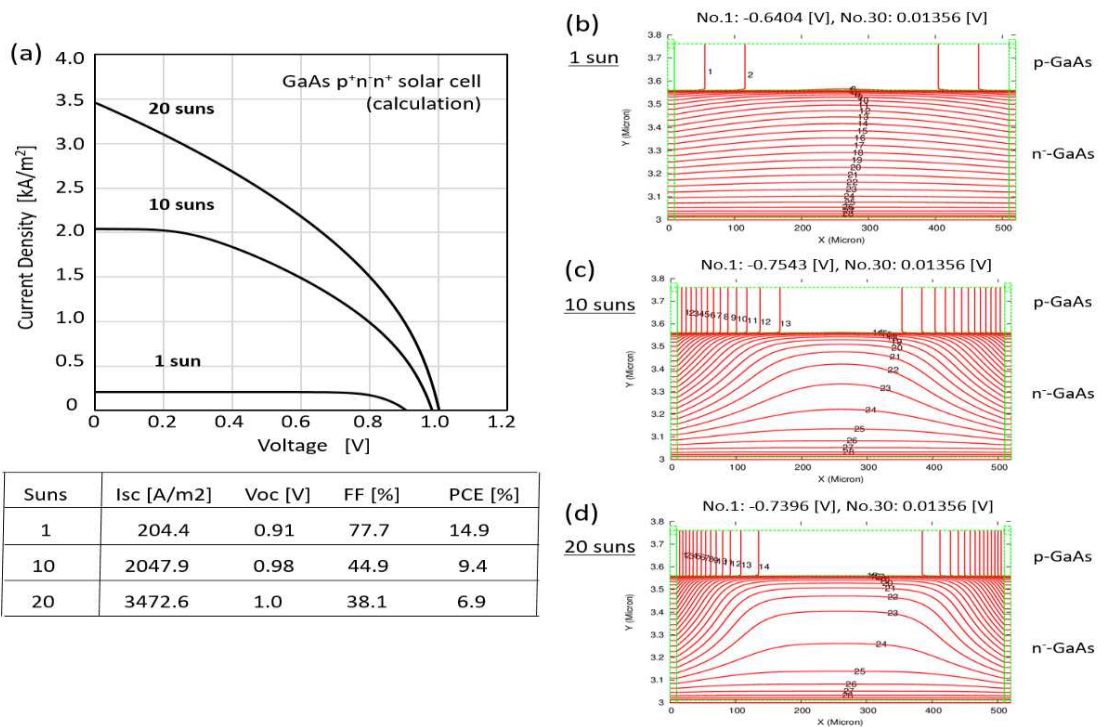
理論変換効率の InAs QD 積層数依存性 (ドリフト拡散モデル)

図III-2-(ロ)-D-1-b4-20には、InAs QD 総密度を $5 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ の一定としたときの変換効率の積層数依存性を計算したもので、QD 積層数を増すと面内密度は低下するが、QD 層での再結合割合が増加するために効率が下がったものと考えられる。また、図III-2-(ロ)-D-1-b4-21には、単一 QD 層 (密度 $5 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$) の pn 接合間の i-GaAs 層内への導入位置に対する変換効率を計算したもので、i-GaAs 層の厚みを 550nm と 1000nm の 2 種類について調べた結果である。両 i-GaAs 層厚において同様に、p 層から 200~300nm 付近で効率は最小値を示し、p, n 層の両側端部に接近するほど効率は上昇することが分った。これは p, n 層の両端部に近くなるほど、QD 層部の電界が大きく、QD 内電子のホッピング伝導が促進されたことによると考えられる。



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b4-21
 理論変換効率の InAs QD 層の導入位置依存性
 (ドリフト拡散モデル, i-GaAs 層厚 550 nm,
 1000 nm)

つぎに、面内超高密度 QD 層を導入したセルの集光特性を調べるために、まずは QD 層の無い GaAs セルについて集光特性をドリフト拡散モデルにより計算を行った。楕形電極の電極間距離が比較的広い 500 μm の場合は、図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b4-22(a)に示すように集光度が 10 suns 以上になると I-V 特性の曲線因子 (Fill Factor, FF) が急激に低下した。このときのセル (p^+ -GaAs/ n^- -GaAs 層) 内のポテンシャル分布を計算すると、図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b4-22(c), (d)のように縦方向の電位勾配だけでなく横方向の電位勾配も形成されていることが分かった。電極間幅の狭い 120 μm の GaAs セルでは、ここでは示していないが、I-V 曲線の劣化も横方向の電位勾配も形成されないことが確認された。したがって、電極間幅の広い (500 μm) セルの場合は面内抵抗が無視できなくなり、特に集光時の電流増大に伴う横方向の電圧降下が起こり、そのため FF が低下したものと考えられる。面内超高密度 QD 層を導入した場合に、面内 QD 層を介したキャリア輸送効果も期待され、実験による検証をつぎの項目 6 で進めた。



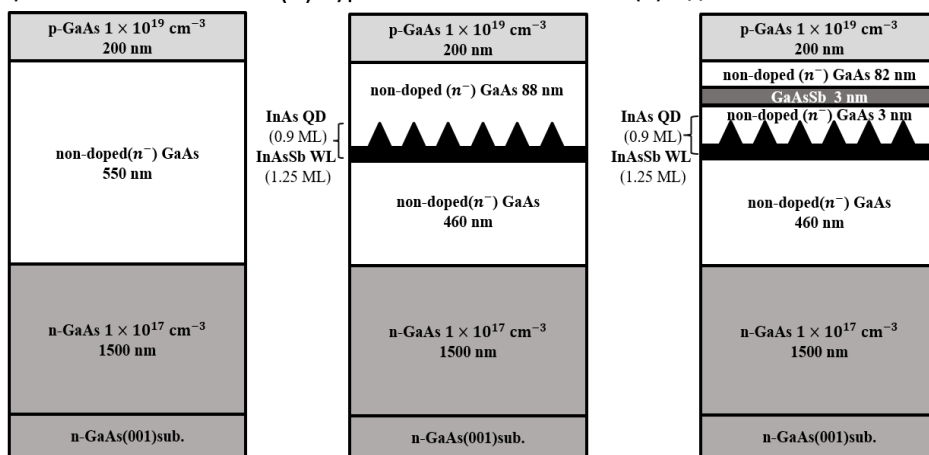
図III-2-(ロ)-D-1-b4-22

GaAs セル(電極間 500 μ m)の I-V 特性の集光度依存性 (a), ポテンシャル分布の集光度依存性(1 sun (b), 10suns (c), 20 suns(d))の計算結果

(6) Type-II型面内超高密度量子ドット太陽電池の集光特性

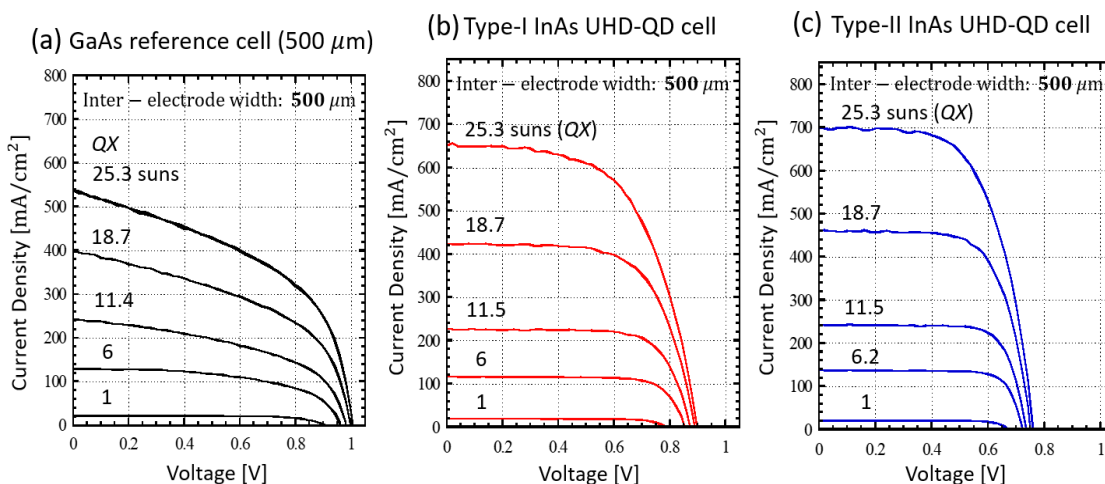
面内超高密度 InAs/InAsSb QD 層を導入した type-I 型・type-II 型の QD セルを作製し、その低倍集光特性を調べた。図 III-2-(ロ)-D-1-b4-23 には MBE 成長した GaAs 参照用セル(a)と面内超高密度 InAs/InAsSb QD 層を単層のみ導入した type-I 型(b)および type-II 型(c)の QD セルの構造を示す。AlGaAs 層の窓層および反射防止膜は施しておらず、楕形電極の電極間幅は 500 μ m とした。各セルの I-V 特性の集光度依存性を図 III-2-(ロ)-D-1-b4-24 に示す。GaAs セルについては、前項目の 5 で示した計算結果と同様に、集光度が 10 以上で I-V 曲線の劣化 (FF の低下) が観測された。しかし、type-I および type-II の UHD-QD セルの I-V 曲線は、電極間幅が 500 μ m の場合においても集光度の増加による I-V 曲線の大きな劣化は起こらないことが分かった。

(a) GaAs reference cell (b) Type-I InAs UHD-QD cell (c) Type-II InAs UHD-QD cell



図III-2-(ロ)-D-1-b4-23

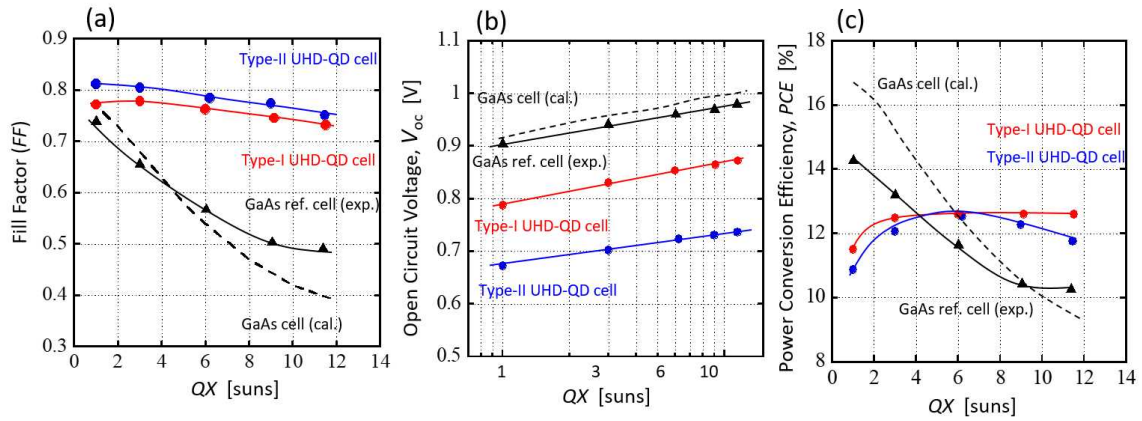
GaAs セル(a), type-I 型 InAs 超高密度(UHD)-QD セル(b), type-II 型 InAs UHD-QD セル(c)の構造図(電極間幅 500 μm)



図III-2-(ロ)-D-1-b4-24

I-V 特性の集光度依存性 (GaAs セル(a), type-I 型 InAs UHD-QD セル(b), type-II 型 InAs UHD-QD セル(c), 電極間幅 500 μm)

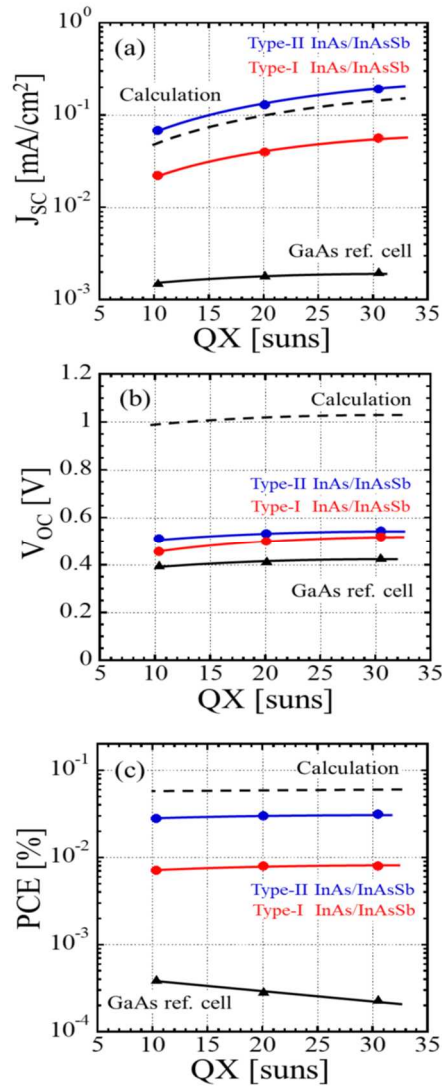
図III-2-(ロ)-D-1-b4-25には、各セルのFF(a)、開放端電圧 (V_{oc}) (b)そして電力変換効率(c)の集光度依存性を示す。図25中の点線は前項目5で述べたGaAsセルについての計算結果で、計算パラメータとしてSRH寿命10ns、Auger再結合速度 $2 \times 10^{-30} \text{cm}^6 \text{s}^{-2}$ 、放射性再結合速度 $2 \times 10^{-8} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ とすることで、GaAsセルの実験結果(▲)を概ね再現出来ることが分かった。図III-2-(ロ)-D-1-b4-25(a)に示すように、GaAsセルでは集光度が増加するとFFは急激に低下するが、type-Iおよびtype-IIのQDセルではFFの低下が抑制された。また、QDセルの V_{oc} はGaAsセルに比べて低下するが、図III-2-(ロ)-D-1-b4-25(b)に示すように集光度の増加に伴い V_{oc} は対数的に増加することが確認された。以上より、電力変換効率の集光度依存性(図III-2-(ロ)-D-1-b4-25(c))では、GaAsセルの変換効率は急激に低下するが、QDセルでは集光することで増加し、集光度が約4以上でGaAsセルの変換効率を超えることが分かった。QDセルの場合に高い集光度においてもFFが維持された要因として、面内超高密度QD層を通した横方向のキャリア輸送効果によるものと考えられ、面内超高密度QD層の有効性を検証することができた。



図III-2-(口)-D-1-b4-25

Fill Factor (a), 開放端電圧(b), 電力変換効率(c)の集光度依存性 (GaAsセル(実験値:▲, 点線: 計算), type-I型 InAs UHD-QDセル(●), type-II型 InAs UHD-QDセル(●), 電極間幅 500 μm)

つぎに、面内超高密度 QD セルの 2 段階光励起特性を評価するために、AM1.5G の擬似太陽光を GaAs セル基板に透過させて QD セルに照射し、電流密度(J)-V 特性を測定した。図III-2-(口)-D-1-b4-26 に短絡電流密度 J_{sc} (a)、開放端電圧 V_{oc} (b)、変換効率 PCE(c)の集光度依存性を示す。詳細平衡モデルによる理論計算の結果も点線で示した。図III-2-(口)-D-1-b4-26(a)より、QD 層のない GaAs セルにおいても不純物準位や欠陥準位を介した光励起と考えられる若干に電流が観測されたが、面内超高密度 QD セルでは 10 sun で GaAs セルの約 44 倍の光電流を確認した。また、キャリア分離構造の type-II 型 QD セルでは、type-I 型 QD セルに比べて J_{sc} が大きく、集光度(QX)の増加に対する J_{sc}/QX の減少も抑制されることが分かった。Type-II 型構造によるキャリアの長寿命化と GaAsSb 層での光励起による光電流の増加によるものと考えられる。 V_{oc} についても GaAs セルに比べて QD セルの方が上回った。また V_{oc} と FF は QX の増大と共にわずかに増加し、その結果、PCE も集光時に増加し、type-II 型 QD セルは type-I 型 QD セルに比べて約 3.7 倍も高くなった。



図III-2-(口)-D-1-b4-26 GaAs透過光を照射した太陽電池の集光特性 ((a)短絡電流密度, (b)開放端電圧, (c)変換効率)

III-2-(口)-D-1-b5. 量子ドットマルチバンド・キャリア取り出し【神戸大学】

IBSCにおける電子の長寿命化は、VBからIBへの第1段光吸収とIBからCBへの第2段光励起に関わるIBを分離することによって実現することに成功した。第1段光吸収で励起された電子を第2段光励起の始状態に移動させるためのダイナミクスは、量子ドットの超格子を形成することで実現できた。これによって、電子寿命は確実に伸び、これまで不明瞭だった、2段階光吸収による光電流生成を顕在化させることができた。われわれの成果が端緒となり、このキャリアダイナミクスは「ラチェット機構」とよばれて世界的に活発な研究が始まりだしている。第1段光吸収と第2段光励起に関わるIBを分離するこのプロジェクトから生まれた独自の考え方は、IBSCの特性向上では根幹の役割をなすものとして国際的に認知されるようになった。

室温での動作を実現するには熱によるキャリア脱出を抑制する必要がある。そのために、われわれは量子ドットをワイドバンドギャップ材料でサンドイッチしたDWELL構造を導入することを提案した。DWELL-IBSCにおいて電子寿命の長寿命化に伴う2段階光電流の増加を室温において実証した。電子寿命の直接観察を目的とした高速光電流計測技術を構築し、パルス光励起による光電流の減衰特性を観測す

ることに成功し、IBにおける電子の熱活性に律速された特性を明らかにした。キャリアダイナミックスの詳細な解析により、電子寿命は1msに達していることが明らかになり、IBからCBへの光励起の増加によって光電流は高速に減衰することを観測した。このような2段階の光励起による光電流引き出し効率は集光を模擬した強励起下で80%に達した。また、このような2段階光励起効果の顕在化によって、出力電圧の効果を抑制することに世界で初めて成功した。

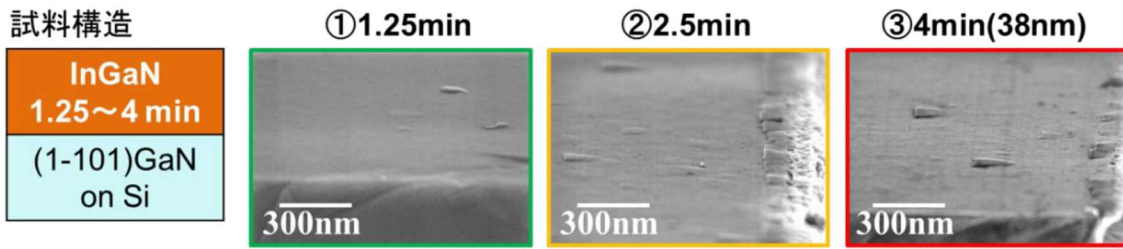
以上の成果をもとに、ワイドギャップのトップセルと量子ドットボトムセルの2接合セル構造での応用を想定して、ボトムセル特性を詳細に調べ上げた。その結果、サブバンドギャップ光のみによるIBSC発電を実証するとともに、サブバンドギャップ光集光下で変換効率0.05%の発電をすることを世界で初めて確認した。

以上の成果は、IBSCの室温での動作を詳細に明らかにしたものであり、サブバンドギャップ光のみによる発電の実証は量子ドットを利用したIBSCが、1997年にマドリード工科大学のA. LuqueとA. Martíによって提案された原理の通り発電することを証明したものである。本研究で観測したサブバンドギャップ光集光下での変換効率0.05%は、2段階目のIB→CBの吸収を示す赤外域だけで期待されている効率4%に比べて2桁小さい値であった。このことは、電流の取り出しが十分であったにもかかわらず、熱励起電流成分が光励起電流成分に比べて大きく、電圧上昇が理想的なレベルに達しなかったことが原因であると考えている。今回実験で実施できなかった135倍以上のより高集光下での動作においては一層の変換効率向上が期待できる。

III-2-(ロ)-D-1-c1. 窒化物セル【名古屋大学】

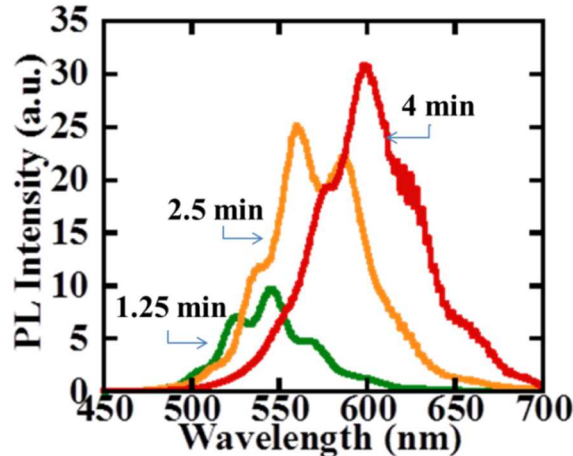
(1) (1-101)面Ga_N上InGa_N結晶成長とPVセル試作

本実験では、比較的In取込効率の高い(1-101)面Ga_Nを用い、InGa_Nの成長実験を行った。初めに、可能な限り成長温度の高い条件でInの取込が30%以上となる成長条件の模索を行った。得られた条件を用いて、厚膜成長を試みた結果を図III-2-(ロ)-D-1-c1-1に示している。試料構造に示すように、Si基板へ作製したGa_N(1-101)面上へInGa_Nを1分15秒から4分まで変化させて成長を行った。成長レートはおよそ10nm/分となっており、通常のInGa_N成長よりも高速で成長を行っている。これは、In原料の偏析を低減させるための成長条件であり、高温での成長が可能となっている。図III-2-(ロ)-D-1-c1-1では得られた結晶の鳥瞰SEM像を示している。成長時間が増えるにつれて、表面に三角形のヒロックが発生している。Inは結晶成長中においては、表面に数ML堆積しながら成長することが知られている。表面でのInの再蒸発と固相中への取込が供給量に追いつかない場合には、Inが凝集したInドロップが発生する。つまり、過剰なIn供給がInドロップの析出の原因である。三角形のヒロックは、このInドロップを起点に成長することが分かっている。先に述べたように、成長条件を最適化した時に成長温度を高く保っているために、再蒸発が促進され、またTMIの供給を制御することで、このようなヒロックを可能な限り低減している。ヒロック周りではIn-rich領域が形成されるために、キャリアの捕獲がおこり、効率低下の原因となるため、可能な限り排除する必要がある。本研究の結果では完全に排除は出来ていないものの、次に示すように発光効率は低減しておらず、良質なInGa_N結晶成長が可能であったことを示している。



図III-2-(ロ)-D-1-c1-1 (1-101)GaN 面上に成長した InGaN 結晶の鳥瞰 SEM 像

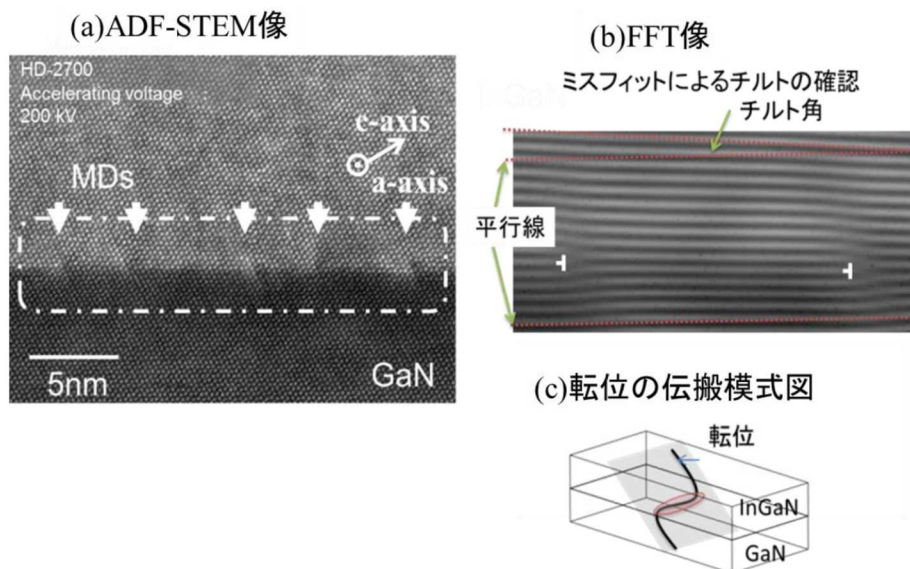
図III-2-(ロ)-D-1-c1-2 は得られた結晶の PL スペクトルを示している。測定は室温で行い、励起レーザーとして 404nm の半導体レーザーを用いた。成長時間が増えるにつれて、発光波長ピークが 540 nm～600nm 程度までシフトしていることが分かる。600 nm の発光では非常に高い In 組成が必要であり、この場合は 35%を超える In 組成であると推定され、本研究の目標値に近い膜厚を得ることが可能であった。このような大きなピークシフトは In 取込効率の変化により説明される。InGaN 膜厚が薄い場合、GaN に格子整合させるために歪エネルギーが蓄積されるため、In を排除することがエネルギー的に安定である。一方で、膜厚が厚くなると格子緩和が起きるために、In 取込効率が上がり In 組成が高くなっていったと考えられる。格子緩和は転位として誘発されるため、通常であれば転位の増加と共に発光強度が低下するはずであるが、本研究においては成長時間の増加と共に発光強度が増加しており、格子緩和と結晶性の相関性が見られていない。これは、緩和のメカニズムがこれまでの c 面での緩和と異なるためであると考えられる。そこで、このような成長手法のメカニズムを解明するために界面での転位の導入過程を観察するため、TEM による評価を行った。



図III-2-(ロ)-D-1-c1-2 各成長時間に対する PL スペクトル

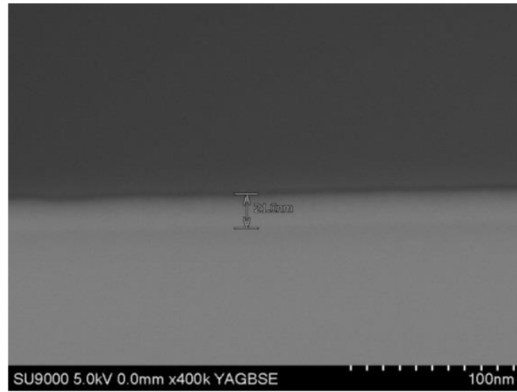
図III-2-(ロ)-D-1-c1-3 に(1-101)面 GaN/InGaN 界面の断面の TEM 像を示す。ADF-STEM 像より GaN と InGaN の界面にミスフィット転位 (MD) が発生していることが分かる。この転位の発生により界面の歪が緩和していると考えられる。InGaN の膜厚が薄い場合は、MD は確認されないことから、4min 成長のサンプルの膜厚 (40nm 程度) が臨界膜厚であることが分かる。MD の間隔は典型的な値として 5nm 程度であった。MD が生成された後に、転位の端で転位が曲がり貫通転位として表面まで伝搬する。この場合、表面での転位密度が大きく増加することから発光効率が下がる。しかしながら、本研究の場合では多くの転位が発生しているにもかかわらず、発光効率に影響が少ない。この理由を明らかにするために、高解像度の原子像 TEM 観察を行い、高速フーリエ変換 (FFT) により得た格子面像を図III-2-(ロ)-D-1-c1-

3に示している。この図から分かるように、ミスフィット転位が入ることにより格子がチルトしており、格子緩和が起きている。チルトによる格子緩和では緩和し切れない場合に、貫通転位の増加が起きると考えられる。その模式図を図III-2-(ロ)-D-1-c1-3(c)に示しているが、GaN層から伝搬した転位に沿って界面でミスフィット転位が発生し、チルトを起こすことで格子緩和を起こした後に、貫通転位として上方に抜けて行くと考えられる。この場合では、緩和前後の転位の密度の変化が非常に小さい状況で格子緩和しており、高品質なInGaN作製が可能であると推測される。

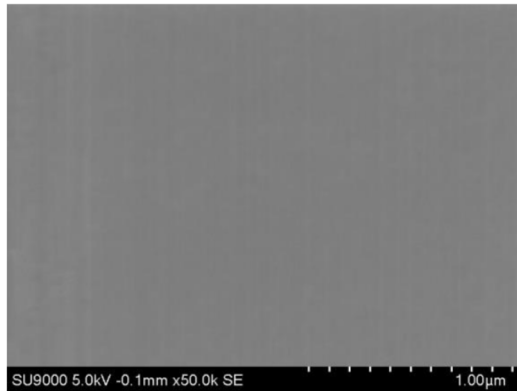


図III-2-(ロ)-D-1-c1-3 (a)断面 ADF-TEM 像と (b) 界面の原子像 FFT 結果及び (c) 転位の伝搬模式図

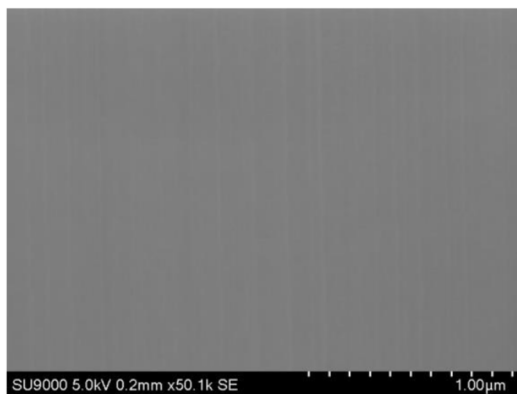
(1-101)面を加工 Si 基板上へ成長したサンプルと、GaN 基板へ成長したサンプルに関して比較を行った。20nm、180nm と成長膜厚を変えた時の表面モフォロジーを SEM にて観察した。まず、20nm 設計のサンプルに関して、図III-2-(ロ)-D-1-c1-4 の(1-101)面 GaN 基板上の断面 SEM 像から InGaN 膜厚は 21 nm であった。図III-2-(ロ)-D-1-c1-5, 6 の表面 SEM 像を比較したところ、平坦性が Si 基板上と GaN 基板上と大きく変わらないことが分かる。実験条件では、In 組成はおよそ 20%程度に設定している。GaN 基板の転位密度は 10^6cm^{-2} 程度であるのに対して、Si 基板上においても同様に低い転位密度を得られているため、成長条件は大きく変わらないことが分かる。一方で、GaN 基板と Si では放射率が異なるため、In 組成が変わると予想される。半極性面での In 組成の同定は比較的高度な計測が必要であり、XRD、EDX および光吸収を用いて評価を進める必要がある。In 組成に関しては成長の温度により修正が可能である。



図III-2-(ロ)-D-1-c1-4 断面 SEM



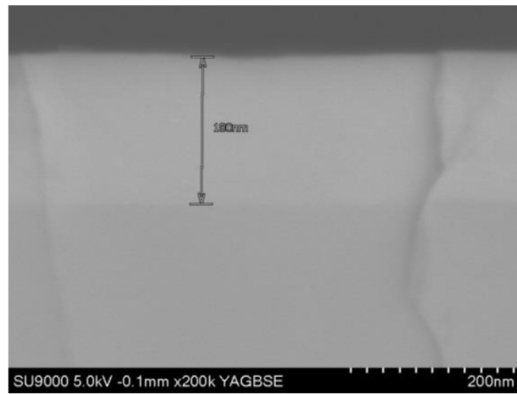
図III-2-(ロ)-D-1-c1-5 Si 基板上(1-101) InGaN 表面 SEM



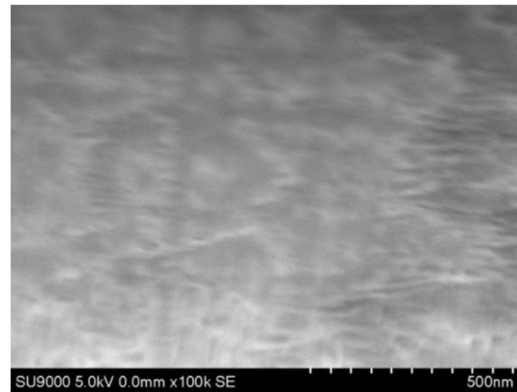
図III-2-(ロ)-D-1-c1-6 (1-101)GaN 基板上 InGaN 表面 SEM

Si 基板上(1-101)Ga_Nおよび(1-101)Ga_N基板を用いて、厚膜における InGa_N結晶成長の比較を行った。InGa_N 成長膜厚の設計値を 170nm 程度とした。図III-2-(ロ)-D-1-c1-7 の断面 SEM 像から InGa_N 膜厚は 180nm であり、おおよそターゲットの膜厚になっている。図III-2-(ロ)-D-1-c1-8 に Si 基板上に成長した (1-101)面 InGa_N の表面 SEM 像を示す。表面にコントラストが見られるが、これは In 組成ムラを表していると考えている。厚膜化により格子緩和が進み、In 組成が比較的多く入ったために、このようなムラが現れてきたと考えられる。一方、図III-2-(ロ)-D-1-c1-9 では Ga_N 基板上の結果を示している。部分的には、非常に平坦な部分が見られているが、多くの場所で三角のヒロックが見られる。この違いは、もともとの Ga_N 基板において、転位集中部と無転位部が混在しており、転位集中部に転位を核としたヒ

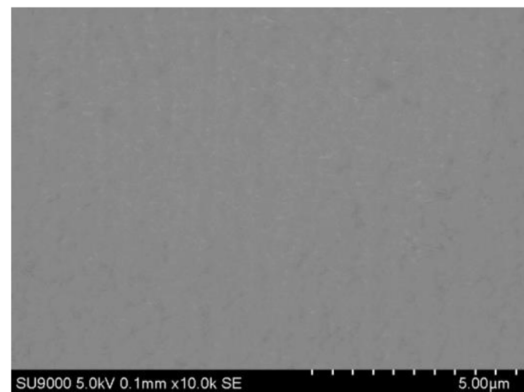
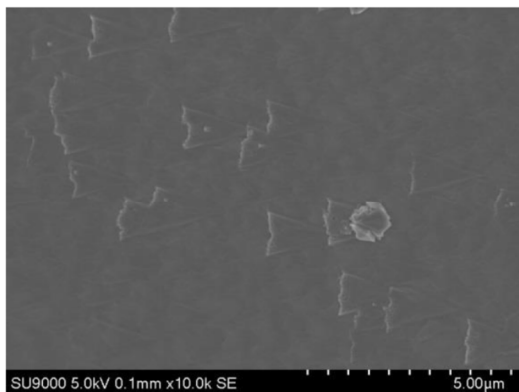
ロック形成が進んだためと考えられる。また、Si 基板でみられるようなムラはあまり観測されていないため、In 組成がやや低くなっていると考えている。



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-7 断面 SEM 像



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-8 Si 基板上(1-101) InGaN 表面 SEM 像

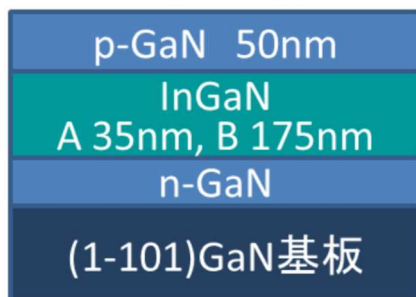


図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-9 (1-101)GaN 基板上 InGaN 表面 SEM 像

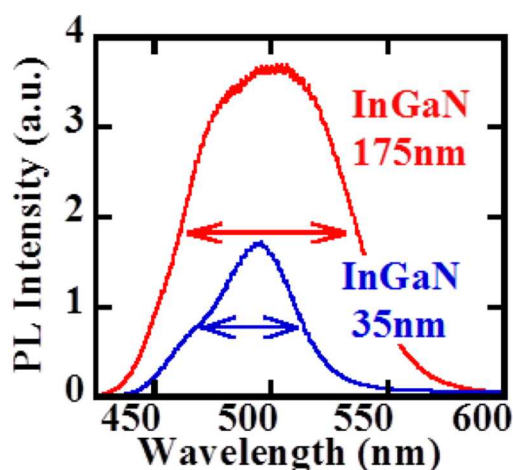
上記のように(1-101) GaN 面上へ高 In 組成の InGaN の結晶成長を行った。しかしながら、厚膜成長においては成長のムラが見られており、これらの成長の不完全がデバイスに与える影響を調査するため、pn 接合を作製し PV セル特性の評価を行った。図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-10 が作製した試料構造であり、基板として(1-101)面 GaN を用いている。InGaN の膜厚を 35nm と 175nm とした。図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-11 に作製した試料の PL スペクトルを示す。いずれの試料においても、500nm 付近の発光が見られており、In

組成が 30%を超えていることが分かる。35 nm の試料においては、半値幅が 40nm 程度であるのに対して、175nm の試料では 75nm 程度となっている。特に、長波長の領域での発光が増加している事から、格子緩和と共に In 組成が増加していることが示唆される。この結果は上記の成長結果と同等であり、実デバイスにおいて厚膜成長によって結晶性の均一化が課題であることが明らかとなった。

作製試料構造

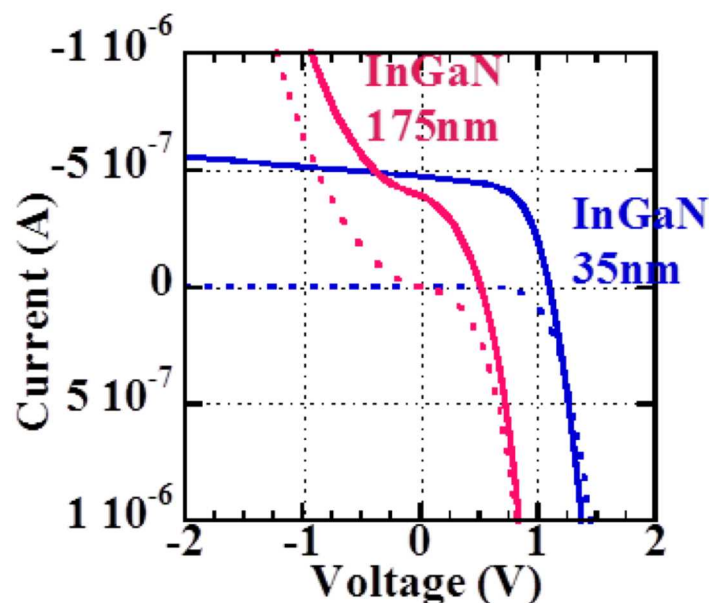


図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-10 PVセルの試料構造



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-11 作製した PV セルの PL スペクトル

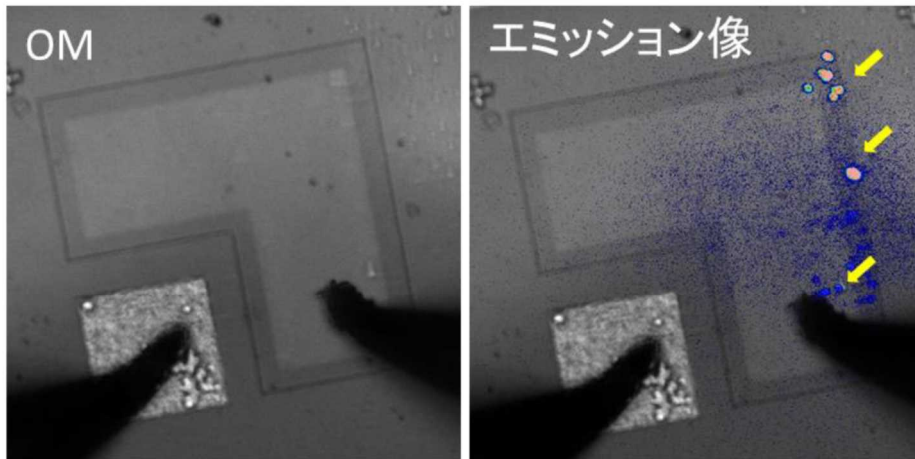
これらの試料に対して、1sun の条件下でソーラーシミュレータを用いて I-V 特性の評価を行った。図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-12 に得られた I-V 特性を示す。実線が光照射時の特性、破線が光非照射時の I-V 特性である。まず InGaN 膜厚が 35nm のサンプルに対しては、短絡電流が 0.5 nA となっており、開放電圧がおおよそ 1.2 V であった。これは後に述べるシミュレーション結果と比較して、電流、電圧ともに比較的近い値となっている。一方で、175nm のサンプルに関しては、光を照射しない場合においても大きなリーク電流が発生していた。光照射を行う事で、電流値の増加は見られたものの、35nm のサンプルと比較しても電流量、開放電圧共に低く、理想的な特性を得ることは困難であった。この原因は、前に示したヒロックなどでのリークと考えられる。



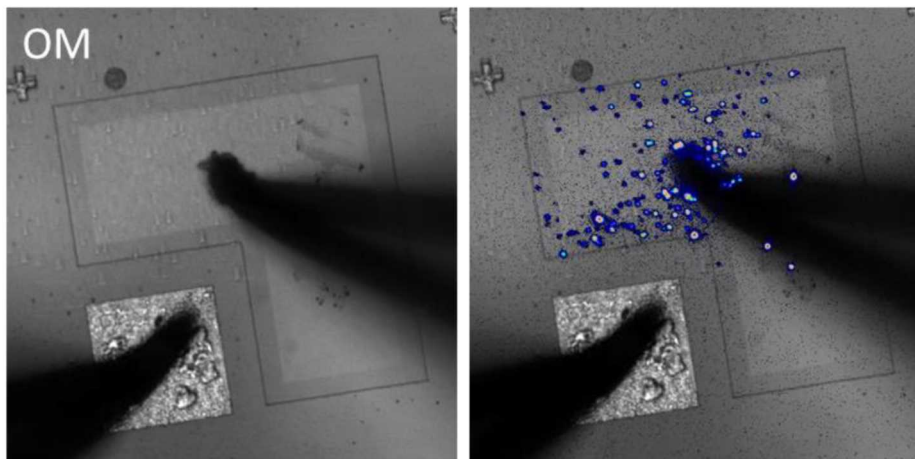
図III-2-(ロ)-D-1-c1-12 異なる InGaN 膜厚を用いた PV セルの I-V 特性比較

リーク電流の異なる2つの素子に関して、リーク箇所を特定するためにエミッション像観察を行った。ヒロックの少ない試料で $6 \mu\text{A}$ (@12 V)、ヒロックの多い試料で $30 \mu\text{A}$ (@6.2 V)の電流が観測されている。図III-2-(ロ)-D-1-c1-13 にエミッション顕微鏡像を示す。上部のヒロックの少ない試料においては、リークはメサ端で多く発生していることがわかる。従って、プロセス不良がリークの支配的な原因であると考えられる。一方で、ヒロックが多く発生した場所の素子では、メサ上に多くのリーク箇所が発生している、OM 像と比較してみると、このリーク箇所がヒロックと一致しており、ヒロック自体がリークに大きく影響していることが明らかとなった。成長ステップの違いから多くの不純物が取り込まれリークが起きていると考えられる。厚膜 InGaN ではヒロックの発生数にバラつきはあるものの、ヒロック自体は完全に抑制出来ておらず、厚膜で I-V 特性を改善するためには結晶成長におけるヒロックの低減が必須である。m 面や c 面 GaN の成長においては、オフ角がヒロックの低減に効果があることが分かっている。また、過飽和度による平坦面の成長に関しても報告があり、(1-101)面においても、これらの実験を進める必要がある。

ヒロック少@-12V-6uA



ヒロック多@-6.2V 30uA

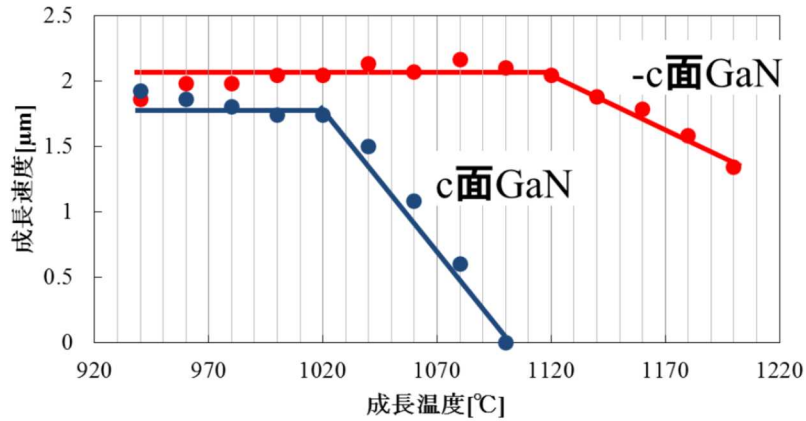


図III-2-(ロ)-D-1-c1-13 厚膜 InGaN を用いた PV セルのリーク源特定

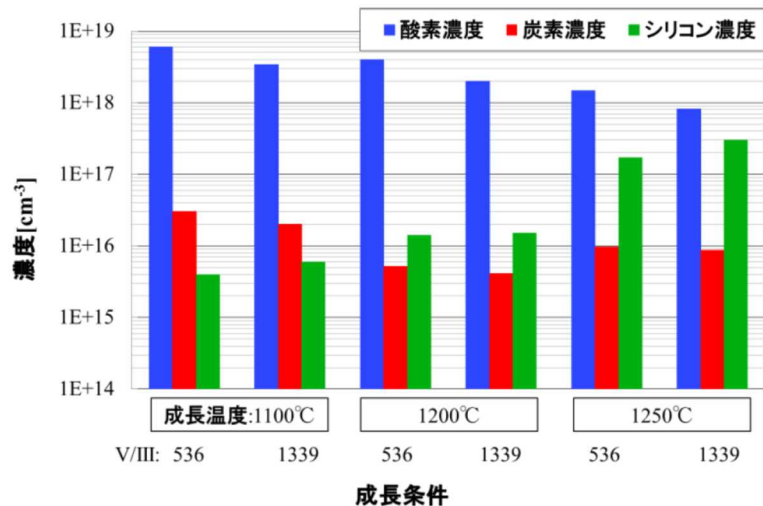
(2) (000-1)面 GaN の結晶成長

前節で述べた(1-101)は非極性面として、PVセル作製に適した面である。また、(000-1)面はピエゾ電界が(0001)面と比較して、正負逆なため、キャリアの掃出しが大きく、同様にキャリアを取り出すのに適した面であると言える。一方で、残留キャリア密度が高く、これまでにLED等へ利用されてきているが、不純物制御に問題を抱えている。そこで、 $-c$ 面の不純物低減を目的とし高温成長を試みた。図III-2-(ロ)-D-1-c1-14に c 面 GaN と $-c$ 面 GaN の成長速度の温度変化依存性を示す。成長速度を通常の成長域でおおよそ $2\mu\text{m/h}$ の条件としている。成長温度が低い時はおよそ $2\mu\text{m/h}$ で一定である。 1020°C を超えたところで c 面の成長速度が低下しており、 1100°C でほとんど成長をしていないことが分かる。一方で、 $-c$ 面での成長においては、 1120°C まではほぼ一定の値で有り、そこから成長速度が下がっている。 1200°C においても、成長が可能であり、高温の安定性が高いことが明らかとなった。高温成長にすることで、 NH_3 との反応を活性化し、不純物の削減が期待される。そこで、得られた結晶に対して、酸素濃度、炭素濃度、シリコン濃度をSIMSにより測定した。図III-2-(ロ)-D-1-c1-15に測定結果を示す。 1100°C 、 1200°C 、 1250°C で成長を行っており、V/III比を540、1340と変化したサンプルを用いた。酸素に関しては、 1100°C 、V/III比540において、 $5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ と非常に高い値であった。V/III比の増加により若干酸素が減少することが分かった。成長温度を上げると、V/III比の影響は大きく表れており、 1250°C で成長

したサンプルに対しては、V/Ⅲ比が 1340 の時に、酸素濃度は $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ まで減少しており、およそ 1 桁の酸素低減に成功した。しかしながら、シリコン濃度が急激に増えていることが分かる。これは、フローチャネル等、装置に用いられている基材の分解により不純物が増えてしまったと考えられる。炭素についても同様な傾向が見られているが、観測された濃度は 10^{15} 台と低く非常に優れた結晶であると考えている。現実的にデバイスを作製する際は、 10^{16} 台の酸素、シリコンの制御が必要であり、さらなる検討が必要である。



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-14 成長温度に対する c 面 GaN と -c 面 GaN の成長速度比較



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-15 (000-1)面上の各成長条件での不純物取込濃度比較

(3) GaN 非極性面、極性面上の太陽電池シミュレーション

窒化物半導体において極性面での太陽電池特性を得るためにシミュレーションを行った。図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-16に(0001)面で得られた結果を示す。図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-16(a)では、In組成を10~30%と変化した時のI-V特性を示している。10%の場合は、比較的高い電流密度を示しているが、1.5Vを超えたところで急激な電流の低下が観測されている。これは、ピエゾ電界が内部で逆方向の電界を与えているが、1.5Vを超えたところで電界が相殺されフラットバンドを形成することによる。その結果、キャリアは界面で再結合により消失するため、電流の低下が見られており、太陽電池としての特性を低下させる原因となっていることが分かる。次に、In組成を変えた場合を見てみると、いずれの試料も階段状のI-V特性を示しており、その傾向はIn組成を上げることで顕著にみられている。In組成が20%になると光吸収は3倍、In組成が30%になると9倍になるにもかかわらず、電流量が減っていく様子が見て

取れる。これは、In 組成が高い場合に定常状態において非常に大きなピエゾ電界が作用しているためであり、現実的には c 面での太陽電池特性は非常に悪化することを意味している。従って、窒化物半導体においては、c 面以外の成長面における太陽電池作製が必須であると考えられる。図 III-2-(ロ)-D-1-c1-16(b) では、c 面と非極性面(m 面 or a 面)の太陽電池特性の比較を示している。ピエゾ電界は c 面方向に発生するために、90 度傾いた面ではこの効果に関係なくデバイス作製が出来る。2つの面を比較した結果、ピエゾ電界が発生しない面方向においては、通常の太陽電池の特性を示すことが分かった。(1-101)面では、ピエゾ電界は 1/3 程度以下に抑えることが出来るため、有効な成長面と考えられる。

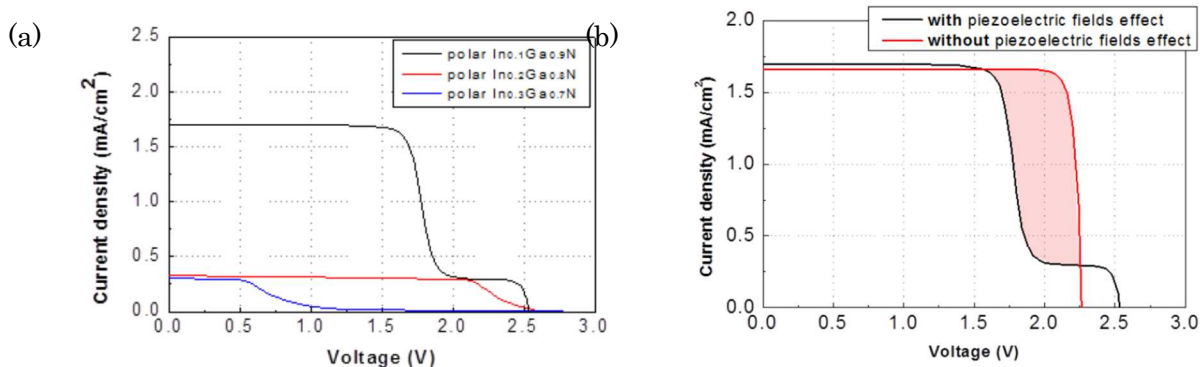
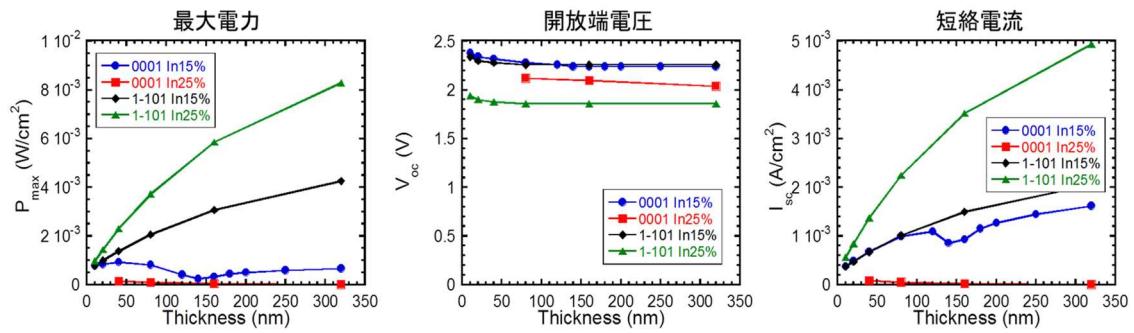


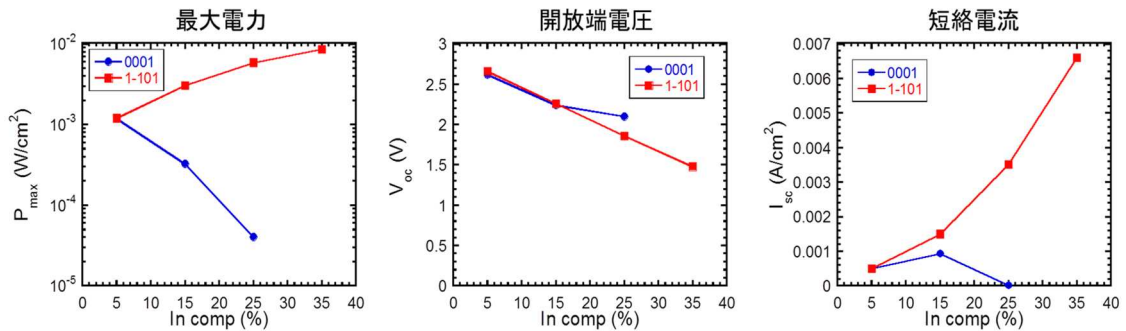
図 III-2-(ロ)-D-1-c1-16 PVSIM による窒化物太陽電池の I-V 特性

(a) In 組成変化と (b) ピエゾ電界有無

上記の結果から、シミュレーションによる (1-101) と (0001) 面の比較を行った。図 III-2-(ロ)-D-1-c1-17 に In 組成を 15% と 25% とし、In 膜厚を 10nm から 320nm まで変化した時の、最大電力、開放端電圧、短絡電流を示している。照射条件として、AM1.5 を想定している。いずれの場合も、膜厚と共に開放端電圧はわずかに減少しているが、概ね 2V 程度である。また、組成が上がるにつれて、電圧は減少する。c 面の場合、膜厚が厚くなるほど電流が減っているがこれはピエゾ電界の影響が強く利いている。一方で、(1-101) 面の場合、電流は単調に増えており、膜厚の増加が電力増大の鍵であることが分かる。160 nm から 320nm と膜厚を 2 倍にすると、3 割程度の電流増加が見られている。一方で、InGa_{0.9}N 成長においては、100nm 以上の高組成 InGa_{0.9}N は困難であり、現実的には 100nm 程度の膜厚における膜質の劣化と、厚膜化の効果がトレードオフになると考えられ、実デバイスでの実験を行う必要がある。次に図 III-2-(ロ)-D-1-c1-18 に In 組成を変化した時に PV セル特性を示す。膜厚は現実的な値として 160nm と固定している。c 面では In 組成を高くするにつれて、効率が著しく下がっているが、(1-101) 面では徐々に上がっていることが分かる。従って、(1-101) 面は PV セルを実現するのに優れた面であることが分かる。一方でやはり高 In 組成 InGa_{0.9}N の成長は困難であるため、図 III-2-(ロ)-D-1-c1-17 の結果と総合的に考えると、150nm 程度 20~30% の In 組成 InGa_{0.9}N を持つ PV セルが当面のターゲットであると考えている。この時、5mA/cm² 程度の電流が得られる事になるが、タンデム型にするためには、十分な電流量でないため今後さらに検討が必要である。



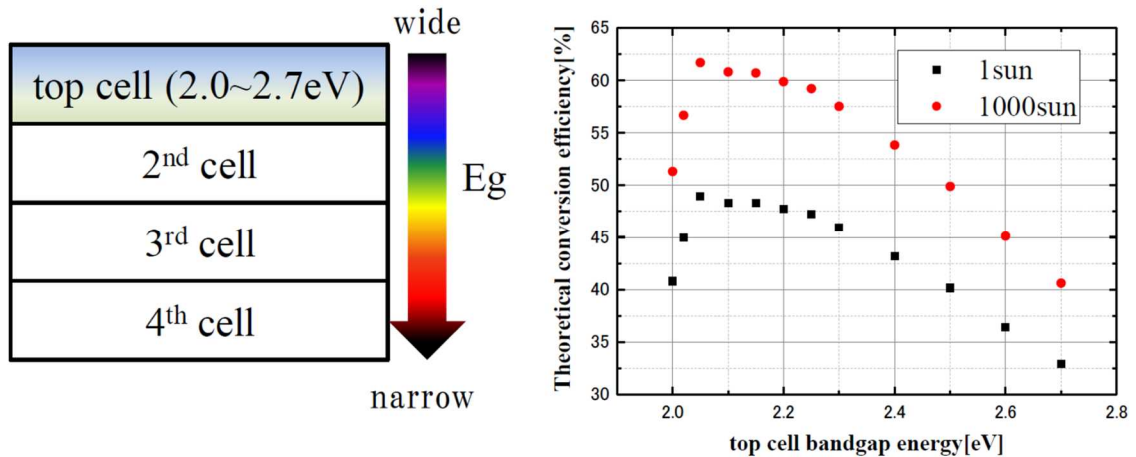
図III-2-(ロ)-D-1-c1-17 In 組成 15%及び 25%における異なる膜厚での PVcell 特性シミュレーション



図III-2-(ロ)-D-1-c1-18 InGaN 膜厚 160 nm における異なる In 組成での PVcell 特性シミュレーション

III-2-(ロ)-D-1-c2. 窒化物セル【名城大学】

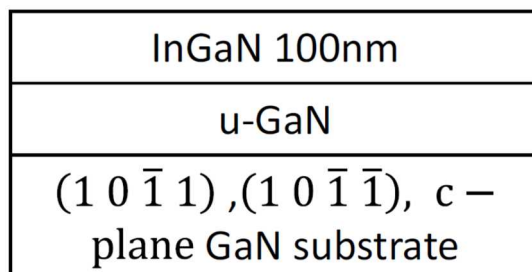
本研究課題では、GaInN を用いたトップセルによって従来実現されていた 3 接合セルのエネルギー変換効率を高めることを目的に研究を推進した。具体的には以下の図III-2-(ロ)-D-1-c2-1 のように 2.0~2.7eV のバンドギャップエネルギーを持つ GaInN トップセルを従来の 3 接合太陽電池に接合することによって、1000 sun で 60%を超えるエネルギー変換効率を持つ太陽電池の実現が期待される。その一方で、GaInN セルと 3 接合セルを高効率太陽電池が実現可能な高品質結晶を結晶成長によって実現するのは困難であり、メカニカルスタックによる高性能化が必須であり、その検討を行った。



図III-2-(ロ)-D-1-c2-1 GaInN トップセルを用いた 4 接合太陽電池の構造と理論的に期待できる変換効率

(1) 半極性 GaInN 太陽電池の検討

図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c2-2 に作製した試料の構造を示す。試料は (10-11)、(10-1-1) 半極性 GaN 基板上に成長温度 800°C、圧力 400 hPa で膜厚 100 nm の GaInN 結晶を MOVPE 法で製膜した。さらに比較として青色 LED や青色半導体レーザーなどで良く用いられている c 面 GaN 基板上にも同じ条件で GaInN 結晶を製膜し、その違いについて検討した。

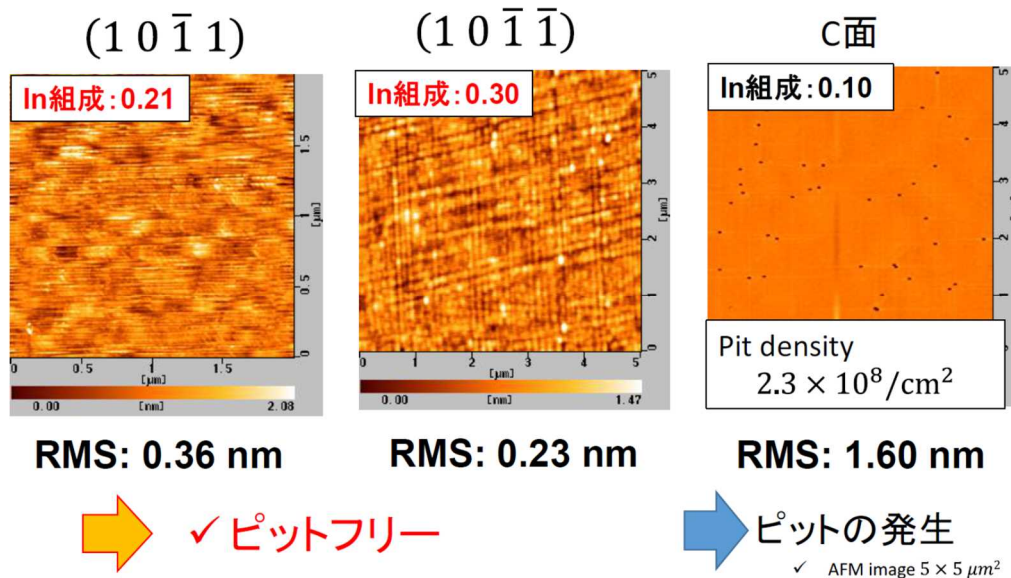


図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c2-2 製膜した試料の断面構造図

これらの製膜した試料を X 線回折法によって In 組成、原子間力顕微鏡観察によって表面状態を確認した。図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c2-3 にその結果をまとめた。左から (10-11)、(10-1-1)、c 面 GaN 基板上に成長した結果である。In 組成においては大きな違いが確認でき、c 面成長した GaInN においては、In 組成は 10%程度であったものが、(10-11)、(10-1-1)成長した GaInN においては、それぞれ 21%と 30%と高 In 組成化されていることが確認された。これは、カリフォルニア大学サンタバーバラ校 (UCSB) や名古屋大学のグループからも同様の報告がされており、半極性面にすることによって In の取り込み効率が高まっていることが考えられる。一方、表面状態を確認すると、c 面 GaN 基板上に成長した GaInN には 1cm²あたり 2.38×10⁸ 個程度の成長ピットが表れており、表面状態を表す RMS も大きな値を示していた。これは、GaInN と GaN の格子不整合に起因するものであり、多数の研究機関から同様の報告がある。また、過去の研究でこのピットが形成されると太陽電池特性は急激に悪化してしまうことが確認されており、c 面では良好な特性を持つ太陽電池を作製するのは困難であることが示唆された。

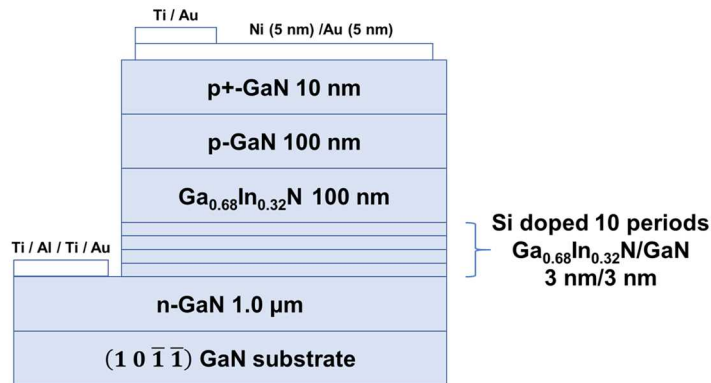
一方、半極性面である (10-11) および (10-1-1) 面 GaN 上に成長した GaInN は高い In 組成にもかかわらず、表面はピットフリーであり、且つ表面平坦性の指標である RMS は c 面の場合に比べ 1 桁も低い値が得られていた。この結果は、GaN 系窒化物半導体では (10-11) がグロースピットを形成する場合に発生する面であり、したがってその結晶面ではピットが極めて開きにくいことを示唆している結果であった。次にデバイス化を検討した。

太陽電池を作製するためには pn 接合を形成する必要がある。SIMS 解析やホール測定を行った結果、(10-11) 面上に成長した GaN では酸素等の不純物の取り込みが極めて高く、したがって複数回検討したが検討した範囲では良好なデバイス性能を得ることができなかった。以上から、本研究では (10-1-1) 面に結晶面を絞り、GaInN 系太陽電池の試作を進めた。

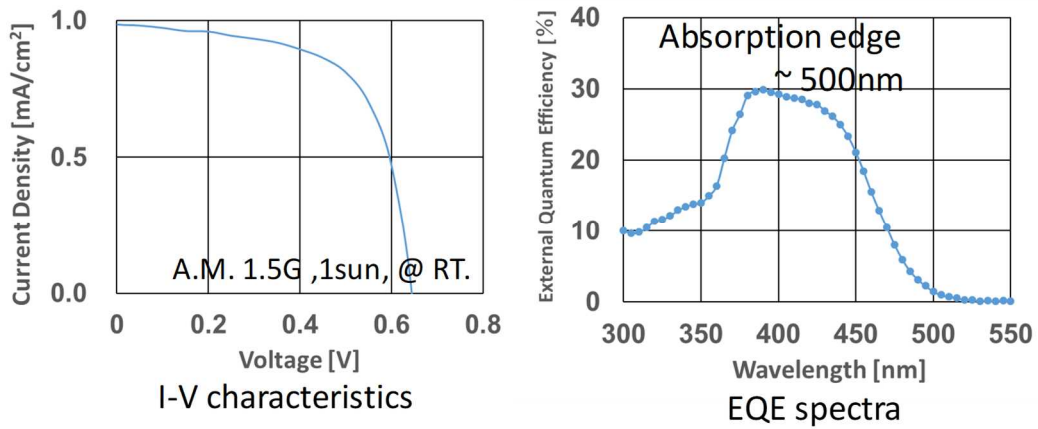


図III-2-(ロ)-D-1-c2-3 各結晶面を持つ GaN 基板上に同製膜条件で GaInN を形成した場合の表面 AFM 像 (図中に各 GaInN 層の In 組成も明記した)

図III-2-(ロ)-D-1-c2-4 に作製したデバイスの試料構造を図III-2-(ロ)-D-1-c2-5 に 1sun 照射時の太陽電池特性及び分光感度特性を示す。本デバイスでは最適化後の結果を示しているが、GaInN 層の直下に GaInN/GaN 超格子を積層したほうが開放電圧の向上が確認されたため、本デバイスではこのような構造を用いた。結果として、光の吸収端は約 500nm まで到達しており、当初の目標である 530nm には到達していないが、従来実現している太陽電池よりも大きく吸収端の長波長化が実現された。一方デバイス特性としては、開放電圧が GaInN のバンドギャップから想定される値に比べて低い課題が残されていることが確認された。このデバイスを透過電子顕微鏡で評価すると、多くの積層欠陥と考えられる欠陥が確認され、この低減が重要だと思われる。



図III-2-(ロ)-D-1-c2-5 作製したデバイス構造

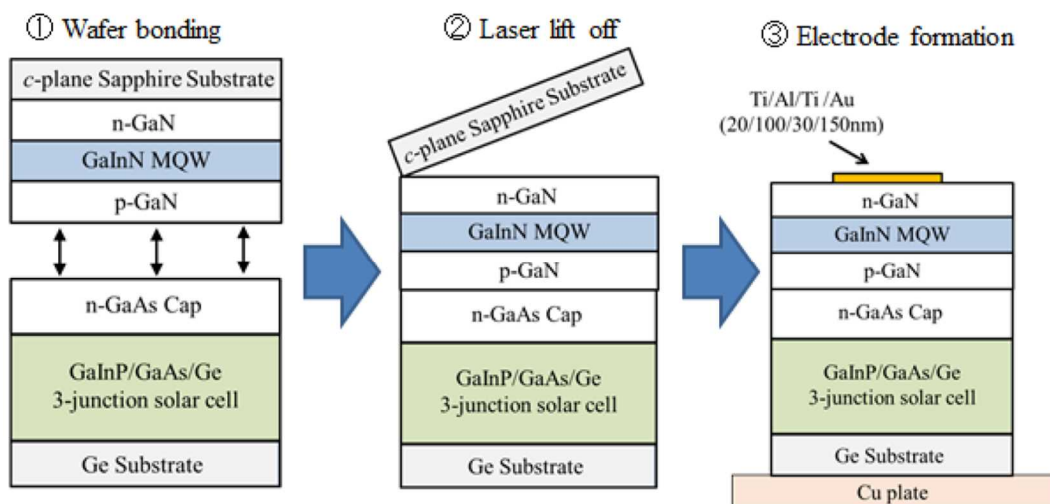


図III-2-(ロ)-D-1-c2-6 作製したデバイスの評価

(2) メカニカルスタック法による4接合太陽電池の試作

次にメカニカルスタック法によって4接合太陽電池の試作を行った。試料はMOVPE法で作製した。本実験ではGe基板上に作製したGaInP/GaAs/Geからなる3接合太陽電池およびGaInN系太陽電池を試作した。本来は各デバイスにおいて電流密度マッチングが必要であるが、本研究ではメカニカルスタックによる4接合セルを実現し、その有用性を検討することが重要であるため、GaInN系セルの電流密度が低いものを用いて実験を行った。

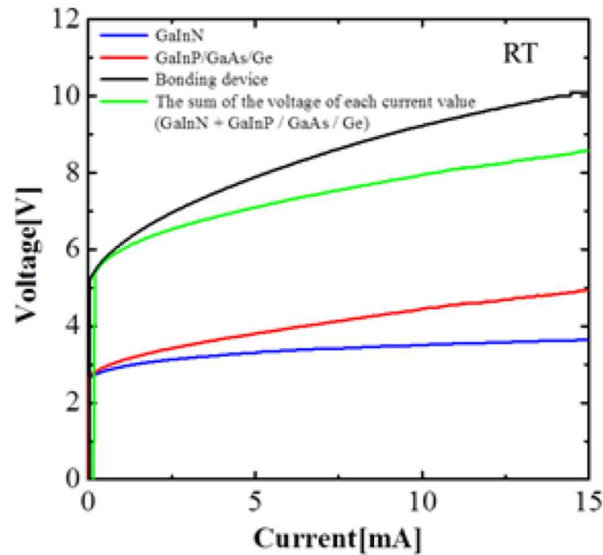
次に、これらの2つの結晶を接合して4接合太陽電池を作製した。一般的に、メカニカルスタック法には、熱・加圧による接合法と、それに加えてプラズマやイオン照射によって表面を活性化した上で接合する方法がある。しかし、検討の結果としてプラズマやイオン照射では表面にダメージが入り、良好な電流-電圧特性を得ることが難しいと判断し、加圧・高温処理によるメカニカルスタック法を中心に最適化を進めた。結果として、ボンディング温度450°C、ボンディング圧力500N、ボンディング時間60 minがボンディング面積と接合強度の点で最適であることがわかった。この実験条件下では、n-GaNとp-GaNがポテンシャル面積の95%以上で結合し、(引張り試験による)結合強度は4.5MPaに達した。この接合強度の値は、Au/Au接合(3.3MPa)の値よりも高い値であり、十分な接合強度を得ていることが確認できた。



図III-2-(ロ)-D-1-c2-7 デバイスプロセスの工程図

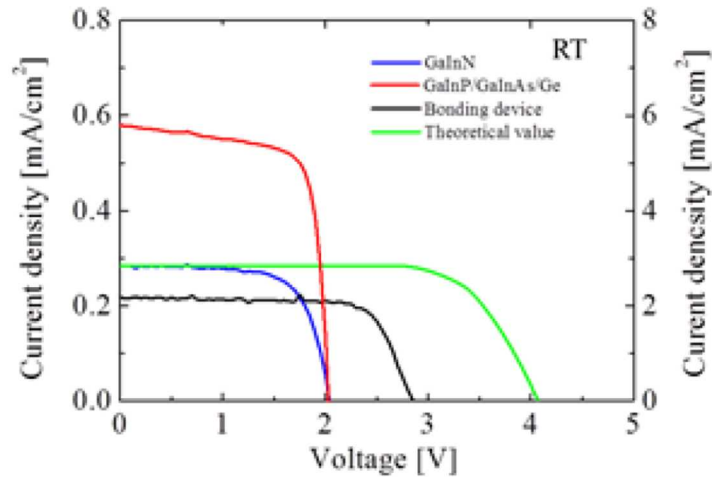
このメカニカルスタック法を用いて次に図III-2-(ロ)-D-1-c2-7のようなプロセスで4接合太陽電池

を試作した。本研究では、Ge は簡易的な Cu プレートによってオーミック接触を得ており、GaN 側の方に Ti/Al/Ti/Au 電極を形成することによってデバイス化を行った。図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c2-8 に作製したデバイスの順方向の電流-電圧特性を示す。本測定では室温で DC バイアス下で測定した。赤線と青線がそれぞれ、別に作製した GaInN および GaInP/GaAs/Ge セルを、黒線が今回作製した 4 接合セルである。理想的には、3 接合セルと GaInN セルは直列接続になっているため、同じ電流値における動作電圧は両デバイスの和で計算できるため、理論的な計算値として緑線を記載した。その結果を比較すると、立ち上がり電圧はほぼ理想的な値を示しているが、一方として電流値の増大にともないその乖離が確認された。これは恐らく接合面に何らかの抵抗成分が存在していると考えられ、今後の検討が必要かと考えられる。



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c2-8 作製したデバイスの電流-電圧特性

図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c2-9 に 1sun 照射時の 4 接合、GaInN、3 接合太陽電池の電流密度-電圧特性を示す。多接合太陽電池では、理論的な開放電圧 (V_{oc}) は各デバイスの合計であり、短絡電流密度 (J_{sc}) は最小値を持つデバイスに依存する。また、フィルファクタ (FF) が各デバイスの最小値であると仮定し、理論的な四接合太陽電池の特性を図中にあわせてプロットした。また表Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c2-1 は、各デバイスの V_{oc} 、 J_{sc} 、FF、および変換効率 (η) をまとめた。4 接合太陽電池の V_{oc} は、多接合化によって増大していることが確認できメカニカルスタックによる直列接続が実現した。しかし、それは理想的な値に比べて約 1V 低い値であった。順方向電流-電圧特性では、大きなショットキー障壁は確認できなかったが、この差異は接合界面に起因していると考えられる。デバイス性能を向上させるためには、p 型 GaN および n 型 GaAs 層の不純物濃度を最適化する必要がある。また、レーザーリフトオフおよび接合界面効果などのプロセス損傷に起因する可能性がある。



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c2-9 AM 1.5 G (1sun) 照射下における太陽電池の特性

これらの課題はあるが、研究の第一歩として、当初の目標通りメカニカルスタックによる四接合太陽電池を実現しており、当初の目標は達成したと考えられる。今後は、さらなるデバイス性能を向上させるために、GaInNセルの吸収波長の長波長化、さらにはそれを用いた4接合太陽電池の試作、さらにメカニカルスタック界面の最適化が必要と考えられる。

表Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c2-1 実現した太陽電池の特性

Solar cell	Voc [V]	Jsc [mA/cm ²]	FF	η [%]
GaInN	2.04	0.285	0.69	0.402
Three-junction	2.03	5.79	0.75	8.76
Four-junction	2.85	0.219	0.74	0.460

Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c3. 窒化物セル【東京大学】

本研究の目的は、低温パルススパッタ (PSD) 法を用いて InGa_n 結晶成長を行い、結晶欠陥密度が少なく、且つ無歪みの高品位 InGa_n 基板を供給するための技術を開発することである。(1) InGa_n 成長速度向上のための装置開発と、(2) InGa_n 成長用基板の探索(窒化物、酸化物や金属などの格子整合基板の利用)を行った。(1)において、スパッタガンの改造やチャンバー構造についての検討を進め、In_{0.2}Ga_{0.8}N 薄膜の成長速度 1.2 μm/h までの高速化を実現した。(2)において、In_{0.17}Ga_{0.83}N と格子定数が一致する ScAlMgO₃ (0001) を用いて InGa_n 薄膜の PSD 成長を行い、エピタキシャルが可能であることを見出した。

パルススパッタ法を用いて高 In 組成 InGa_n 薄膜の高速成長プロセスの開発を行い、GaN テンプレート基板上において厚さ 1 ミクロンの In_{0.3}Ga_{0.7}N 成長を実現した。また、トンネル接合用の高電子濃度 n 型 GaN 薄膜成長プロセスの開発を行うために、パルススパッタ法におけるドーピング技術を構築した。パルススパッタ法で作製した Si ドープ n 型 GaN 薄膜の移動度は高速で成膜しても MOCVD-GaN のトップデータに近い値を示し、高品質なものであることが分かった。さらに、パルススパッタ法では 10²⁰ cm⁻³ 台の高濃度ドーピングを行っても品質劣化が起こらず、MOCVD では実現し得ない高電子濃度 n 型 GaN を作製できることが明らかになった。

パルススパッタ法を用いて高 In 組成 InGaN、InAlN 薄膜の成長プロセスの開発を行い、全 In 組成領域の単結晶薄膜成長を実現した。特に高 In 組成 InAlN 薄膜は熱解離温度が InN よりも低いため、パルススパッタ法による低温成長が有効である。(In/Ga/Al)組成に応じてバンドギャップ、残留電子濃度および電子移動度が系統的に変化することを確認し、それらの制御プロセスの開発を行った。また、GaN 薄膜へのドーピング技術開発も行った。Si ドーピング濃度を MOCVD では達成不能な濃度まで高めることで、酸化物透明導電膜 ITO に匹敵する低抵抗率 n 型 GaN 薄膜の作製に成功した。

2. 実用化・事業化見通し

本プロジェクトで得られた研究開発の成果は、現宇宙用太陽電池事業の拡大および成層圏飛行体用等の新規事業の創出、更には、電動自動車へ搭載可能な高出力太陽光発電モジュールの将来の実用化への貢献が期待される。具体的な製品として、格子整合 3 接合 (LM3J) 及び 4 接合 (LM4J) セルが挙げられる。

一方、海外の直達日射量の豊富な地域などでは、高効率太陽電池を発電部に搭載した集光型発電システムにより、最安値の発電コストが期待されている。セル効率 50%の高効率太陽電池に置き換えることができれば、大幅な発電コストの低減が期待される。具体的な製品として、エピタキシャル/ウエハ接合の両手法で製造可能な 4 接合 (さらに 5 接合) セル、量子ドット中間バンドセルが挙げられる。

テーマ D で得られた成果は以下に示す内容にて、それぞれの事業分野での活用が期待される。

研究開発成果	事業分野	貢献・活用
<ul style="list-style-type: none"> 裏面ヘテロ接合 InGaP/GaAs 2J セル構造で Voc 向上 Voc=2.527V (従来比+0.067V) を実現 量子井戸挿入による 4 接合セルの第 3 セルの電流整合条件を達成 GaInP/GaAs/GaInNAs:Sb 3J 逆積み格子整合セル (ILM-3J) で、効率 30.3% (非集光) を達成 	宇宙・成層圏用途 車載用途 集光型太陽光発電システム	設置面積等の条件・環境から高効率セルが必要とされる用途で普及が期待される。
<ul style="list-style-type: none"> 低電流・高電圧 2J+QD セル (直接接合) で効率 32.1% (225 倍集光)、スマートスタック 2J+QD セルで効率 31.0% (5 倍集光) 面内 QD 密度 $1 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ の超高密度化を実現 (世界最高) dot-in-well 構造において電子の長寿命化を実現、室温で QD からのキャリアの取り出し効率約 80%を達成 (世界初) プラズモン金属ナノ粒子層を組込んだ PbS QD/ZnO NW セルの長波長吸収化 ($J_{sc}=17.3 \text{mAcm}^{-2}$) を達成 	宇宙・成層圏用途 車載用途 集光型太陽光発電システム 熱線利用シーソー太陽電池	多接合セル、量子ドット・マルチバンドセルは高効率であるため、従来から集光型発電システムとして普及が期待されている。一方、基板再利用技術等の低コスト化プロセスにより、新市場の開拓が期待されるため開発を継続する。

3. 波及効果

海外の直達日射量の豊富な地域などでは、高効率太陽電池を発電部に搭載した集光型発電システムにより、最安値の発電コストが期待されている。セル効率 50% の高効率太陽電池に置き換えることができれば、大幅な発電コストの低減が期待される。将来的には、ソーラーステーションとして、大規模な普及が期待できる。

一方、宇宙用太陽電池の製造コストが現状の 1/2~1/3 にできれば、国内市場のみならず、海外市場で大きなシェアを獲得できる可能性がでてくる。海外市場は国内市場の 10 倍以上であり、現行からの大きな事業拡大が期待される。さらに、人工衛星の電気推進（大電力）化や宇宙光発電等に対応した大電力化に 대응するためにも、高効率で低コストの太陽電池モジュールの面積展開が要求されている。本研究成果を活用した大幅な製造コストの低減による高効率多接合セルは、将来の宇宙市場の普及が期待される。

車載太陽電池モジュールの出力を 800W 程度の出力が可能になれば、駆動用電源として電気自動車もしくはハイブリッド車の電費向上が期待される。まずはテーマ A で得られた成果を基に高効率で現実的な製造コストを実現し、大電力が必要な冷凍車や大型トラックなどに搭載されることが期待される。次のフェーズで、テーマ D の高効率セルの市場投入がなされることで、ソーラー電気自動車として、大規模な普及が期待できる。

今回開発されたウエハ接合技術、ELO 技術等の低コスト作製プロセスに関しては、太陽電池セルモジュール以外にも、電子デバイス・光デバイスにおける多機能・異種材料集積、実装技術に広く応用される可能性を持つ。量子ドット中間バンドセルは、バンドギャップ以下の光を 2 段階で吸収させることで電流を増大させるため、可視光の透過率を制御しつつ、近赤外光（熱線）を吸収して発電させるシースルー太陽電池としての可能性がある。

4. 今後の展開

本研究開発では、まず 4 接合セル開発の最終目標達成に向けて種々の課題解決に取り組み、多くの成果を挙げることができた。

- (1) 順積み GaInNAsSb/Ge ボトム 2J セル
- (2) 新規 GaInNAs/GaNAs MQW セル（特徴：アニールなしで高い EQE を達成）
- (3) 表面活性接合 (SAB) による InGaP/GaAs (逆積み) // InGaAs/InP 4J セル (国内初)
- (4) 逆積み裏面ヘテロ InGaP トップセル、InGaP/GaAs セルの高効率化

本研究開発の成果を活用し、現宇宙用太陽電池事業の拡大および成層圏飛行体用等の新規事業の創出、更には、電動自動車へ搭載可能な高出力太陽光発電モジュールの将来の実用化へに向けた開発を推進する予定である。特に移動体用の多接合太陽電池に関しては、2020 年度より NEDO「太陽光発電主力電源化推進技術開発／太陽光発電の新市場創造技術開発／移動体用太陽電池の研究開発」プロジェクトにおいて更なる高効率化、低コスト化技術開発を進めることになっている。

次に量子ドット・マルチバンドセル開発の最終目標達成に向けたハイライト成果として：

- (1) 低電流・高電圧型量子ドットセルの最適化（高密度化等）及び集光特性の評価
直接接合 2J+QD セルで効率 32.1%（225 倍集光、世界初）

スマートスタック 2J+QD セルで効率 31.0% (5 倍集光)

(2) 面内 QD 密度 $1 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ の超高密度化 (世界最高)

(3) ラチェット構造による中間バンド内の電子の長寿命化、及び室温で QD からのキャリアの取り出し効率約 80%を達成 (世界初)

などが挙げられる。以上は、開発当初より想定・提案していた集光型発電システムへの応用が大いに期待される成果である。さらに今回開発されたウエハ接合技術、ELO 技術等の低コスト作製プロセスには、新しい応用と市場開拓の可能性を秘めている。量子ドット中間バンドセルは、バンドギャップ以下の光を 2 段階で吸収させることで電流を増大させることから、可視光の透過率を制御しつつ、近赤外光 (熱線) を吸収して発電させるシースルー太陽電池としての可能性がある。特にビル壁面設置向けの量子ドット太陽電池に関しては、2020 年度より NEDO「太陽光発電主力電源化推進技術開発/太陽光発電の新市場創造技術開発/壁面設置太陽光発電システム技術開発 (ビル壁面開口部向けシースルー太陽電池の開発)」プロジェクトにおいて更なる高効率化、低コスト化技術開発を進めることになっている。

5. 特許論文リスト

	2015 年度	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	合計
特許出願	1	1	0	0	0	2
(うち外国出願)	(1)	(0)	(0)	(0)	(0)	(1)
論文	21	17	22	27	21	108
研究発表・講演	129	129	134	115	105	612
(うち国際会議)	(59)	(73)	(80)	(60)	(56)	(328)
新聞・雑誌等への掲載	1	2	0	1	1	5
その他	7	3	2	4	2	18

(2020 年 08 月 31 日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	国立大学法人東京大学	PCT/JP2015/086247	PCT	2015/12/25	公開	太陽電池	岡田至崇、 曾我部東馬 庄司靖
2	産業技術総合研究所	特願 2016-023482	国内	2016/2/10	取下	光電変換素子及び太陽電池	太野垣健、 菅谷武芳

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	N. Miyashita, N. Ahsan, and Y. Okada	東京大学	Generation and collection of photocarriers in dilute nitride GaInNAsSb solar cells	Progress in Photovoltaics: Research and Applications Vol. 24, 28, 2015	有	2015 年 6 月

2	P. Rale, A. Delamarre, G. El-Hajje, R. Tamaki, K. Watanabe, Y. Shoji, Y. Okada, M. Sugiyama, L. Lombez, and J.-F. Guillemoles	IRDEP, CNRS、 東京大学	Quantitative optical measurement of chemical potentials in intermediate band solar cells	Journal of Photonics for Energy Vol. 5, 53092, 2015	有	2015年6 月
3	N. Miyashita, N. Ahsan, and Y. Okada	東京大学	Evaluation of concentrator photovoltaic properties of GaInNAsSb solar cells for multijunction solar cell applications	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 54, 08KE06, 2015	有	2015年7 月
4	K. Toprasertpong, N. Kasamatsu, H. Fujii, T. Kada, S. Asahi, Y. Wang, K. Watanabe, M. Sugiyama, T. Kita, and Y. Nakano	東京大学、 神戸大学	Microscopic observation of carrier-transport dynamics in quantum- structure solar cells using a time-of-flight technique	Applied Physics Letters Vol. 107, 043901, 2015	有	2015年7 月
5	K. Toprasertpong, T. Tanibuchi, H. Sugiyama, T. Kada, S. Asahi, K. Watanabe, M. Sugiyama, T. Kita, and Y. Nakano	東京大学、 神戸大学	Comparison of Electron and Hole Mobilities in Multiple-Quantum-Well Solar Cells Using a Time- of-Flight Technique	IEEE Journal of Photovoltaics Vol. 5, 1613- 1620, 2015	有	2015年9 月
6	T. Smyth, M. Dvorak, M. J. Y. Tayebjee, V. B. Yasarapudi, H. Xia, Y. Feng, Y. Wang, B. Puthen-Veettil, S. Huang, S. Shrestha, S. P. Bremner, T. W. Schmidt, M. Sugiyama, and G. J. Conibeer	University of New South Wales、 東京大学	Hot Carrier Cooling in $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}/\text{GaAs}_{0.80}\text{P}_{0.20}$ Multiple Quantum Wells: The Effect of Barrier Thickness	IEEE Journal of Photovoltaics Vol. 6, 166- 171, 2015.	有	2015年10 月
7	D. J. Farrell, H. Sodabanlu, Y. Wang, M. Sugiyama, and Y. Okada	東京大学	A hot-electron thermophotonic solar cell demonstrated by thermal up-conversion of sub- bandgap photons	Nature Communications Vol. 6, 8685, 2015	有	2015年11 月
8	H. Wang, V. Gonzalez-Pedro, T. Kubo, F. Fabregat- Santiago, J. Bisquert, Y. Sanehira, J. Nakazaki, and	東京大学	Enhanced carrier transportation distance in colloidal PbS QD-based solar cells using ZnO nanowires	The Journal of Physical Chemistry C Vol.119, 27265, 2015	有	2015年12 月

	H. Segawa					
9	C.-Y. Hung, T. Sogabe, N. Miyashita, and Y. Okada	東京大学	Growth of ErAs nanodots by molecular beam epitaxy for application to tunneling junctions in multijunction solar cells	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 55, 21201, 2016	有	2016年1月
10	A. Delamarre, L. Lombez, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano, and J.-F. Guillemoles	東京大学、 IRDEP, CNRS	Experimental Demonstration of Optically Determined Solar Cell Current Transport Efficiency Map	IEEE Journal of Photovoltaics Vol. 6, 528-531, 2016	有	2016年3月
11	E. López, A. Datas, I. Ramiro, P. G. Linares, E. Antolín, I. Artacho, A. Martí, A. Luque, Y. Shoji, T. Sogabe, A. Ogura, and Y. Okada	Universidad Politécnica de Madrid、 東京大学	Demonstration of the operation principles of intermediate band solar cells at room temperature	Solar Energy Materials and Solar Cells Vol. 149, 15, 2016	有	2016年5月
12	N. Miyashita, N. Ahsan, and Y. Okada	東京大学	Improvement of 1.0 eV GaInNAsSb solar cell performance upon optimal annealing	Physica Status Solidi A Vol. 214, 1600586, 2016	有	2016年10月
13	A. Julian, Z. Jehl, N. Miyashita, Y. Okada, and J.-F. Guillemoles	東京大学	Insights on energy selective contacts for thermal energy harvesting using double resonant tunneling contacts and numerical modeling	Superlattices and Microstructures Vol. 100, 749, 2016	有	2016年12月
14	M. Sugiyama, H. Fujii, T. Katoh, K. Toprasertpong, H. Sodabanlu, K. Watanabe, D. Alonso-Álvarez, N. J. Ekins-Daukes, and Y. Nakano	東京大学、 Imperial Collage London	Quantum Wire-on-Well (WoW) Cell with Long Carrier Lifetime for Efficient Carrier Transport	Progress in Photovoltaics: Research and Applications Vol. 24, 1606-1614, 2016	有	2016年12月
15	H. Xia, R. Patterson, S. Smyth, Y. Feng, S. Chung, Y. Zhang, S. Shrestha, S. Huang, H. Uchiyama, S. Tsutsui, M. Sugiyama, A. Baron, and G. Conibeer	University of New South Wales、 東京大学、 理研	Inelastic X-ray scattering measurements of III-V multiple quantum wells	Applied Physics Letters Vol. 110, 043102, 2017	有	2017年1月
16	Y. Arakawa, K. Ueno,	東京大学	Low-temperature pulsed sputtering growth of	Japanese Journal of	有	2017年2月

	H. Noguchi, A. Kobayashi, J. Ohta, and H. Fujioka		InGaN multiple quantum wells for photovoltaic device	Applied Physics Vol. 56, 31002, 2017		
17	K. Toprasertpong, T. Inoue, A. Delamarre, K. Watanabe, J.-F. Guillemoles, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学、 IRDEP, CNRS	Electroluminescence-based quality characterization of quantum wells for solar cell applications	Journal of Crystal Growth Vol. 464, 94- 99, 2017	有	2017年4 月
18	H. Cho, K. Toprasertpong, H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Stability and Controllability of InGaAs/GaAsP Wire-on-Well (WoW) Structure for Multi-junction Solar Cells	J. Crystal Growth Vol. 464, 86-93, 2017	有	2017年4 月
19	Y. Shoji, R. Tamaki, and Y. Okada	東京大学	Multi-stacked GaSb/GaAs type-II quantum nanostructures for application to intermediate band solar cells	AIP Advances Vol. 7, 65305, 2017	有	2017年6 月
20	S. Naito, K. Yoshida, N. Miyashita, R. Tamaki, T. Hoshii, and Y. Okada	東京大学	Effect of Si doping and sunlight concentration on the performance of InAs/GaAs quantum dot solar cells	Journal of Photonics for Energy Vol. 7, 25505, 2017	有	2017年6 月
21	W. Yanwachirakul, N. Miyashita, H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Okada, and Y. Nakano	東京大学	Design of free-barrier InGaAs/GaNAs multiple quantum well solar cells with 1.2 eV energy gap	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 56, 08MA04, 2017	有	2017年7 月
22	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Solution-processed short-wave infrared PbS colloidal quantum dot/ZnO nanowire solar cells giving high open-circuit voltage	ACS Energy Letter Vol. 2, 2110, 2017	有	2017年8 月
23	L. Wu, G-M. Kim, H. Nishi, and T. Tatsuma	東京大学	Plasmonic photovoltaic cells with dual-functional gold, silver, and copper half-shell arrays	Langmuir Vol. 33, 8976, 2017	有	2017年8 月
24	D. Suchet, Z. Jehl, Y. Okada, and J.-F. Guillemoles	東京大学、 IRDEP, CNRS	Influence of Hot-Carrier Extraction from a Photovoltaic Absorber: An Evaporative Approach	Physical Review Applied Vol. 8, 34030, 2017	有	2017年9 月
25	K. Ueno, T. Fudetani, Y. Arakawa, A. Kobayashi, J. Ohta, and H. Fujioka	東京大学	Electron transport properties of degenerate n-type GaN prepared by pulsed sputtering	APL Materials Vol. 5, 126102, 2017	有	2017年12 月

26	K. Toprasertpong, T. Inoue, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学	Investigation and modeling of photocurrent collection process in multiple quantum well solar cells	Solar Energy Materials and Solar Cells Vol. 174, 146-156, 2018	有	2018年1月
27	T. Fukuda, A. Takahashi, H. Wang, K. Takahira, T. Kubo, and H. Segawa	東京大学	Impedance analysis of PbS colloidal quantum dot solar cells with different ZnO nanowire lengths	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 57, 3EJ02, 2018	有	2018年1月
28	S. Almosni, A. Delamarre, Z. Jehl, D. Suchet, L. Cojocar, M. Giteau, B. Behaghel, A. Julian, C. Ibrahim, L. Tetry, H. Wang, T. Kubo, S. Uchida, H. Segawa, N. Miyashita, R. Tamaki, Y. Shoji, K. Yoshida, N. Ahsan, K. Watanabe, T. Inoue, M. Sugiyama, Y. Nakano, T. Hamamura, T. Toupance, C. Olivier, S. Chambon, L. Vignau, C. Geffroy, E. Cloutet, G. Hadziioannou, N. Cavassilas, P. Rale, A. Cattoni, S. Collin, F. Gibelli, M. Paire, L. Lombez, D. Aureau, M. Bouttemy, A. Etcheberry, Y. Okada, and J.-F. Guillemoles	東京大学、 IPVF, C2N, CNRS、 University of Bordeaux, Aix Marseille University	Material challenges for solar cells in the twenty-first century: directions in emerging technologies	Science and Technology of Advanced Materials Vol. 19, 336-369, 2018	有	2018年4月
29	Y. He, N. Miyashita, and Y. Okada	東京大学	N-H-related deep-level defects in dilute nitride semiconductor GaInNAs for four-junction solar cells	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 57, 08RD11, 2018	有	2018年6月
30	D. Suchet, A. Delamarre,	東京大学、 IPVF, CNRS	Analytical optimization of intermediate band	Progress in Photovoltaics;	有	2018年6月

	N. Cavassilas, Z. Jehl, Y. Okada, M. Sugiyama, and J.-F. Guillemoles		systems: Achieving the best of two worlds	Research and Applications Vol. 26, 800- 807, 2018		
31	K. Toprasertpong, S. M. Goodnick, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 Arizona State University	Effective mobility for sequential carrier transport in multiple quantum well structures	Physical Review B Vol. 96, 075441, 2017	有	2018年8 月
32	L. Zhu, H. Akiyama, and Y. Kanemitsu	東京大学、 京都大学	Intrinsic and extrinsic drops in open-circuit voltage and conversion efficiency in solar cells with quantum dots embedded in host materials	Scientific Report Vol. 8, 11704, 2018	有	2018年8 月
33	S. Kalainathan, N. Ahsan, T. Hoshii, Y. Okada, T. Logu, and K. Sethuraman	Vellore Institute of Technology、 東京大学、 Madurai Kamaraj University	Tailoring sub-bandgap of CuGaS ₂ thin film via chromium doping by facile chemical spray pyrolysis technique	Journal of Materials Science: Materials in Electronics Vol. 29, 19359- 19367, 2018	有	2018年9 月
34	A. Delamarre, D. Suchet, N. Cavassilas, Y. Okada, M. Sugiyama, and J.-F. Guillemoles	東京大学、 IPVF, CNRS	An Electronic Ratchet Is Required in Nanostructured Intermediate-Band Solar Cells	IEEE Journal of Photovoltaics Vol. 8, 1553- 1559, 2018	有	2018年9 月
35	Y. Hazama, Y. Ishida, L. Zhu, C. Kim, S. Shin, and H. Akiyama	東京大学	Revealing Solar-Cell Photovoltage Dynamics at the Picosecond Time Scale with Time-Resolved Photoemission Spectroscopy	Physical Review Applied Vol. 10, 034056, 2018	有	2018年9 月
36	N. Miyashita, Y. He, N. Ahsan, T. Agui, H. Juso, T. Takamoto, and Y. Okada	東京大学、 シャープ	Incorporation of hydrogen into MBE-grown dilute nitride GaInNAsSb layers in a MOCVD growth ambient	Solar Energy Materials and Solar Cells Vol. 185, 359- 363, 2018	有	2018年10 月
37	K. Miyagawa, M. Nagai, G. Yamashita, M. Ashida, C. Kim, H. Akiyama, and Y. Kanemitsu	大阪大学、 東京大学、 京都大学	Quantitative monitoring of the internal field in the depletion layer of a GaAs-based solar cell with terahertz radiation	Applied Physics Letters Vol. 113, 163501, 2018	有	2018年10 月
38	K. Kamide, T. Mochizuki, H. Akiyama, and H. Takato	産業技術総合 研究所、 東京大学	Nonequilibrium Theory on the Conversion Efficiency limit of Solar Cells including Thermalization and Extraction of Carriers	Physical Review Applied Vol. 10, 044069, 2018	有	2018年10 月
39	N. Cavassilas, D. Suchet, A. Delamarre, F. Micheli, and M. Bescond, Y. Okada,	CNRS, IM2NP, LIMMS, IRDEP、 東京大学	Beneficial impact of a thin tunnel barrier in quantum well intermediate-band solar cell	EPJ Photovoltaics Vol. 9, 6, 2018	有	2018年11 月

	M. Sugiyama, and J.-F. Guillemoles					
40	L. Zhu, K.-H. Lee, M. Yamaguchi, H. Akiyama, Y. Kanemitsu, K. Araki, and N. Kojima	東京大学、豊田工業大学、京都大学	Analysis for Non-radiative Recombination in Quantum Dot Solar Cells and Materials	Progress in Photovoltaics: Research and Applications Vol. 27, 971-977, 2019	有	2019年1月
41	F. Aobo Ren, H. Lai, C. Liu, X. Hao, J. Zhang, L. Wu, and M. Sugiyama	Sichuan University、東京大学、Southern University of Science and Technology	A luminescence-based interpolation method for series resistance imaging in thin film solar cells	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 58, 050908, 2019	有	2019年2月
42	K. Toprasertpong, A. Delamarre, Y. Nakano, J.-F. Guillemoles, and M. Sugiyama	東京大学、CNRS, IPVF	Generalized Reciprocity Relations in Solar Cells with Voltage-Dependent Carrier Collection: Application to p-i-n Junction Devices	Physical Review Applied Vol. 11, 024029, 2019	有	2019年2月
43	N. Miyashita, Y. He, T. Agui, H. Juso, T. Takamoto, and Y. Okada	東京大学、シャープ	Inverted Lattice-Matched Triple Junction Solar Cells With 1.0 eV GaInNAsSb Subcell by MOCVD/MBE Hybrid Growth	IEEE Journal of Photovoltaics Vol. 9, 666-672, 2019	有	2019年5月
44	M. Giteau, D. Suchet, S. Collin, J.-F. Guillemoles, and Y. Okada	東京大学、CNRS, IPVF, C2N	Detailed balance calculations for hot-carrier solar cells: coupling high absorptivity with low thermalization through light trapping	EPJ Photovoltaics Vol. 10, 1, 2019	有	2019年5月
45	M. Bouttemy, D. Aureau, M. Frégnaux, Y. Shoji, Z. Jehl, D. Suchet, J.-F. Guillemoles, A. Etcheberry, and Y. Okada	Institut Lavoisier de Versailles、東京大学、CNRS, IPVF	Nanoscale Wet Chemical Engineering of III-V Quantum Dots for Emerging Solar Applications	ECS Transactions Vol. 89, 37-46, 2019	有	2019年5月
46	A. Ren, H. Xu, J. Zhang, H. Hung, A. Delamarre, K. Watanabe, J. Zhang, L. Wu, C. Liu, and M. Sugiyama	Sichuan University、東京大学、Southern University of Science and Technology	Spatially Resolved Identification of Shunt Defects in Thin Film Solar Cells via Current Transport Efficiency Imaging Combined with 3D Finite Element Modeling	Solar RRL Vol. 3, 1800342, 2019	有	2019年5月
47	B. Behaghel, R. Tamaki, H.-L. Chen, P. Rale, L. Lombez, Y. Shoji, A. Delamarre, A. Cattoni, S. Collin,	CNRS, C2N, IPVF、東京大学	A hot-carrier assisted InAs/AlGaAs quantum-dot intermediate-band solar cell	Semiconductor Science and Technology Vol. 34, 084001, 2019	有	2019年7月

	Y. Okada, and J.-F. Guillemoles					
48	N. Miyashita, Y. He, N. Ahsan, and Y. Okada	東京大学	Anneal mediated deep- level dynamics in GaInNAsSb dilute nitrides lattice-matched to GaAs	Journal of Applied Physics Vol. 126, 143104, 2019	有	2019年10 月
49	H. Xu, A. Delamarre, B. M. F. Yu Jeco, H. Johnson, K. Watanabe, Y. Okada, J.-F. Guillemoles, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 Australian National University、 CNRS, IPVF	Current transport efficiency analysis of multijunction solar cells by luminescence imaging	Progress in Photovoltaics: Research and Applications Vol. 27, 835- 843, 2019	有	2019年10 月
50	S. Chen, J. Xue, Xi. Hu, Y. Guo, G. Weng, J. Jiang, Z. Zhu, J. Chu, and H. Akiyama	East China Normal University、 東京大学	Diagnosis of Perovskite solar cells through absolute electroluminescence- efficiency measurements	Frontiers in Physics Vol. 7, 166, 2019	有	2019年10 月
51	S. Okumura, R. Suzuki, K. Tsunoda, H. Nishino, and M. Sugiyama	富士通研究 所、 東京大学	Suppression of three- dimensional pit formation of InAs on GaSb(0 0 1) by Sb-free two-step molecular beam epitaxy	Journal of Crystal Growth Vol. 528, 125269, 2019	有	2019年12 月
52	K. Kamide, T. Mochizuki, H. Akiyama, and H. Takato	産業技術総合 研究所、 東京大学	Heat recovery solar cell	Physical Review Applied Vol. 12, 064001, 2019	有	2019年12 月
53	Y. Shoji, K. Watanabe, and Y. Okada	東京大学	Photo absorption improvement in multi- stacked InGaAs/GaAs quantum dot	Solar Energy Materials & Solar Cells Vol. 204, 110216, 2020	有	2020年1 月
54	L. Zhu, Y. Hazama, A. Reddy, K. Watanabe, Y. Nakano, M. Sugiyama, and H. Akiyama	東京大学	Modeling and design for low-cost multijunction solar cell via light- trapping rear texture technique: Applied in InGaP/GaAs/InGaAs triple junction	Progress in Photovoltaics: Research and Applications Vol. 28, 251- 265, 2020	有	2020年4 月
55	T. Nakamura, M. Imaizumi, H. Akiyama, and Y. Okada	東京大学、 JAXA	Practical target values of Shockley-Read-Hall recombination rates in state-of-the-art triple- junction solar cells for realizing conversion efficiencies within 1% of the internal radiative limit	Progress in Photovoltaics: Research and Applications Vol. 28, 417- 424, 2020	有	2020年5 月
56	T. Suzuki, K. Osada, S. Yagi, S. Naitoh, Y. Shoji, Y. Hijikata, Y. Okada, and H. Yaguchi,	埼玉大学、 東京大学	Molecular beam epitaxial growth of intermediate band materials based on GaAs:N δ -doped superlattices	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 54, 08KA07, 2015	有	2015年7 月

57	K. Osada, T. Suzuki, S. Yagi, S. Naitoh, Y. Shoji, Y. Hijikata, Y. Okada, and H. Yaguchi	埼玉大学、 東京大学	Control of intermediate band configuration in GaAs:N δ -doped superlattice	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 54, 08KA04, 2015	有	2015年7 月
58	N. Kamata, M. Suetsugu, D. Haque, S. Yagi, H. Yaguchi, F. Karlsson, and P. O. Holtz	埼玉大学、 Linköping University	Spectral change of intermediate band luminescence in GaP:N due to below-gap excitation: Discrimination from thermal activation	Physica Status Solidi B Vol. 254, 1600566, 2017	有	2016年11 月
59	M. D. Haque, N. Kamata, T. Fukuda, Z. Honda, S. Yagi, H. Yaguchi, and Y. Okada	埼玉大学、 Hajee Mohammad Danesh Science and Technology University、 東京大学	Nonradiative recombination centers in GaAs:N δ -doped superlattice revealed by two-wavelength-excited photoluminescence	Journal of Applied Physics Vol. 123, 161426, 2018	有	2018年4 月
60	Md. D. Haque, N. Kamata, A. Z. M. T. Islam, Z. Honda, S. Yagi, and H. Yaguchi	埼玉大学、 Hajee Mohammad Danesh Science and Technology University、 University of Rajshahi	Photoluminescence characterization of nonradiative recombination centers in MOVPE grown GaAs:N delta- doped superlattice structure	Optical Materials Vol. 89, 521-527, 2019	有	2019年2 月
61	T. Fukuda, A. Takahashi, K. Takahira, H. Wang, T. Kubo, and H. Segawa	埼玉大学、 東京大学	Limiting factor of performance for solution- phase ligand-exchanged PbS quantum dot solar cell	Solar Energy Materials and Solar Cells Vol. 195, 220, 2019	有	2019年3 月
62	S. Ferdous, N. Kamata, S. Yagi, and H. Yaguchi	埼玉大学	Detection of nonradiative recombination centers in GaPN (N:0.105%) by below- gap excitation light	Physica Status Solidi B Vol. 257, 1900377, 2020	有	2019年10 月
63	Md. D. Haque, N. Kamata, A. Z. M. T. Islam, S. Yagi, and H. Yaguchi	Hajee Mohammad Danesh Science and Technology University、 埼玉大学、 University of Rajshahi	Spectral change of E- band emission in a GaAs:N δ -doped superlattice due to below-gap excitation and its discrimination from thermal activation	Journal of Electronic Materials Vol. 49, 1550-1555, 2020	有	2019年12 月
64	O. Elleuch, L. Wang, K.-H. Lee, K. Ikeda, N. Kojima, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi	豊田工大	Double acceptor in p-type GaAsN grown by chemical beam epitaxy	Journal of Crystal Growth Vol. 432, 45, 2015	有	2015年9 月
65	O. Elleuch, L. Wang,	豊田工大	N-H related defect playing the role of	Journal of Crystal Growth	有	2017年6 月

	K.-H. Lee, K. Ikeda, N. Kojima, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi		acceptor in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	Vol. 468, 581- 584, 2017		
66	H. Valencia, Y. Kangawa, and K. Kakimoto	九州大学	Ab initio study of GaAs(100) surface stability over As ₂ , H ₂ and N ₂ as a model for vapor-phase epitaxy of GaAs _{1-x} N _x	Journal of Crystal Growth Vol. 432, 6, 2015	有	2015年9 月
67	A. Kusaba, Y. Kangawa, Y. Honda, H. Amano, and K. Kakimoto	九州大学	Theoretical approach to surface reconstruction of InN(0001) during raised- pressure metalorganic vapor-phase epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 55, 05FM01, 2016	有	2016年2 月
68	Y. Yokoyama, A. Fukuyama, T. Haraguchi, T. Yamauchi, T. Ikari, and H. Suzuki	宮崎大学	Control of hydrogen and carbon impurity inclusion during the growth of GaAsN thin film by atomic layer epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 55, 01AC06, 2015	有	2015年12 月
69	T. Nakamura, K. Matsuochi, H. Suzuki, T. Ikari, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, and A. Fukuyama	宮崎大学、 東京大学	Effect of Built-in Electric Field on Miniband Structure and Carrier Nonradiative Recombination in InGaAs/GaAsP Superlattice Investigated Using Photoreflectance and Photoluminescence Spectroscopy	Energy Procedia Vol. 102, 121- 125, 2016	有	2016年12 月
70	A. Fukuyama, K. Matsuochi, T. Nakamura, H. Takeda, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, H. Suzuki, and T. Ikari	宮崎大学、 東京大学	Investigation of miniband formation and optical properties of strain- balanced InGaAs/GaAsP superlattice structure embedded in p-i-n GaAs solar cells	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 56, 08MC07, 2017	有	2017年7 月
71	T. Nakamura, A. Fukuyama, M. Sugiyama, and T. Ikari	宮崎大学、 東京大学	Effect of strain relaxation layer insertion on carrier recombination and escaping processes in superlattice solar cell structures using photoluminescence spectroscopy	Journal of Physics D: Applied Physics Vol. 52, 045104, 2018	有	2018年11 月
72	T. Nakamura, A. Fukuyama, M. Sugiyama, and T. Ikari	宮崎大学、 東京大学	Effects of barrier thickness on carrier non- radiative relaxation process in InGaAs/GaAsP superlattice solar cells by piezoelectric photothermal and surface photovoltage	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 58, 112001, 2019	有	2019年10 月

			spectroscopies			
73	小森和弘、 菅谷武芳、天野建、 五島敬史郎	産業技術総合 研究所、 愛知工業大学	Nanophotonic devices based on semiconductor quantum nanostructures	IEICE Transactions on Electronics Vol. E99C, 346- 357, 2016	有	2016年3 月
74	太野垣健、菅谷武芳	産業技術総合 研究所	Type-II InP quantum dots in wide-bandgap InGaP host for intermediate- band solar cells	Applied Physics Letters Vol. 108, 153901, (2016)	有	2016年4 月
75	相原健人、 太野垣健、 長門優喜、 岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合 研究所、 東京都市大学	InGaP-based InP quantum dot solar cells with extended optical absorption range	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 56, 04CS06, (2017)	有	2017年3 月
76	相原健人、 太野垣健、 長門優喜、 岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合 研究所、 東京都市大学	Investigation of the open-circuit voltage in wide-bandgap InGaP-host InP quantum dot intermediate-band solar cells	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 57, 04FS04 (2018).	有	2018年2 月
77	相原健人、 太野垣健、 長門優喜、 岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合 研究所、 東京都市大学	Designs and characterization of InGaP-based InP quantum dot solar cells	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 57, 08RF04, 2018	有	2018年7 月
78	H. Kum, Y. Dai, K Aihara, M. A. Slocum, K. Tayagaki, A. Fedorenko, S. J. Polly, Z. Bittner, T. Sugaya, and S. M. Hubbard	Rochester Institute of Technology、 産業技術総合 研究所	Two-step photon absorption in InP/InGaP quantum dot solar cells	Applied Physics Letters Vol. 113, 043902, 2018	有	2018年7 月
79	相原健人、 太野垣健、中元嵩、 岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合 研究所、 東京都市大学	Effects of front InGaP layer thickness on solar cell characteristics in InP/InGaP quantum dot solar cells	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 58, SBBF09, 2019	有	2019年3 月
80	K. Sameshima, T. Sano, and K. Yamaguchi	電気通信大学	Self-Formation of Ultrahigh-Density (10^{12} cm^{-2}) InAs Quantum Dots on InAsSb/GaAs(001) and Their Photoluminescence Properties	Applied Physics Express Vol. 9, 075501, 2016	有	2016年6 月
81	T. Sogabe, Q. Shen, and K. Yamaguchi	電気通信大学	Recent Progress on Quantum Dot Solar Cells: a review	Journal of Photonics for Energy Vol. 6, 040901, 2016	有	2016年10 月
82	S. Oikawa, A. Makaino, T. Sogabe, and K. Yamaguchi	電気通信大学	Growth process and Photoluminescence Properties of In Plane Ultrahigh-Density InAs Quantum Dots on InAsSb/GaAs(001)	Physica Status Solidi B Vol. 255, 1700307, 2017	有	2017年12 月
83	N. Kakuda and	電気通信大学	Coarsening Process of	Japanese	有	2018年3

	K. Yamaguchi		High-Density InAs Quantum Dots on Sb-Irradiated GaAs	Journal of Applied Physics Vol. 57, 045601, 2018		月
84	A. Makaino, K. Sakamoto, T. Sogabe, S. Kobayashi, and K. Yamaguchi	電気通信大学	Self-Formation of InAs Quantum Dots on SiO _x /Semiconductor Substrates by Molecular Beam Deposition	Applied Physics Express Vol. 11, 085501, 2018	有	2018年7月
85	R. Sugiyama, S. Tatsugi, T. Sogabe, and K. Yamaguchi	電気通信大学	Optical Transition and Carrier Relaxation in a Type-II InAs/GaAsSb Quantum Dot Layers	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 58, 0120040, 2018	有	2018年11月
86	A. Makaino, Y. Tanaka, and K. Yamaguchi	電気通信大学	Molecular Beam Deposition of High-Density InAs Quantum Dots on SiO _x Films	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 58, SDDF07, 2019	有	2019年5月
87	R. Suzuki, K. Terada, K. Sakamoto, T. Sogabe, and K. Yamaguchi	電気通信大学	Low Sunlight Concentration Properties of InAs Ultrahigh-Density Quantum-Dot Solar Cells	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 58, 071004, 2019	有	2019年6月
88	T. Kaizu, T. Matsumura, and T. Kita	神戸大学	Broadband Control of Emission Wavelength of InAs/GaAs Quantum Dots by GaAs Capping Temperature	Journal of Applied Physics Vol. 118, 154301, 2015.	有	2015年10月
89	Y. Harada, N. Kasamatsu, D. Watanabe, and T. Kita	神戸大学	Nanosecond-Scale Hot-Carrier Cooling Dynamics in One-Dimensional Quantum Dot Superlattices	Physical Review B Vol. 93, 115303, 2016	有	2016年3月
90	S. Asahi, H. Teranishi, N. Kasamatsu, T. Kada, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Saturable Two-Step Photocurrent Generation in Intermediate-Band Solar Cells Including InAs Quantum Dots Embedded in Al _{0.3} Ga _{0.7} As/GaAs Quantum Wells	IEEE Journal of Photovoltaics Vol. 6, 465-472, 2016	有	2016年3月
91	Y. Ogawa, Y. Harada, T. Baba, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Effects of Rapid Thermal Annealing on Two-Dimensional Delocalized Electronic States of the Epitaxial N δ-Doped Layer in GaAs	Applied Physics Letters Vol. 108, 111905, 2016	有	2016年3月
92	T. Kaizu, K. Taguchi, and T. Kita	神戸大学	Emission-Wavelength Tuning of InAs Quantum Dots Grown on Nitrogen-δ-Doped GaAs(001)	Journal of Applied Physics Vol. 119, 194306, 2016	有	2016年5月
93	加田智之, 朝日重雄, 原田幸弘, 喜多隆	神戸大学	量子ドット超格子太陽電池における2段階光励起電流生成ダイナミクスの電界依存特性	日本材料学会誌「材料」Vol. 65, No. 9, 647~651, 2016	有	2016年9月
94	M. Suwa, T. Adachi, T. Kaizu,	神戸大学	Polarization Characteristics of Electroluminescence and	Journal of Applied Physics Vol. 120,	有	2016年10月

	Y. Harada, and T. Kita		Net Modal Gain in Highly Stacked InAs/GaAs Quantum-Dot Laser Devices	134313, 2016		
95	T. Tanibuchi, T. Kada, S. Asahi, D. Watanabe, T. Kaizu, Y. Harada, and T. Kita	神戸大学	Photocarrier Transport Dynamics in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Solar Cells Using Time-of-Flight Spectroscopy	Physical Review B Vol. 94, 195313, 2016	有	2016年11月
96	朝日重雄、喜多隆	神戸大学	半導体材料・デバイスの最新の進展「太陽電池の変換効率限界を引き上げる半導体材料設計」	材料 別冊 Vol. 66, No. 3, 244-249, 2017	有	2017年3月
97	S. Asahi, H. Teranishi, K. Kusaki, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cells	Nature Communications Vol. 8, 14962, 2017	有	2017年4月
98	S. Watanabe, S. Asahi, T. Kada, K. Hirao, T. Kaizu, Y. Harada, and T. Kita	神戸大学	Two-Step Photocurrent Generation Enhanced by Miniband Formation in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Intermediate-Band Solar Cells	Applied Physics Letters Vol. 110, 193104, 2017. APL Editor's Picks	有	2017年5月
99	T. Kada, S. Asahi, T. Kaizu, Y. Harada, R. Tamaki, Y. Okada, and T. Kita	神戸大学	Efficient two-step photocarrier generation in bias-controlled InAs/GaAs quantum dot superlattice intermediate-band solar cells	Scientific Reports Vol. 7, 5865, 2017	有	2017年7月
100	K. Hirao, S. Asahi, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Two-Step Photocurrent Generation Enhanced by the Fundamental-State Miniband Formation in Intermediate-Band Solar Cells Using a Highly Homogeneous InAs/GaAs Quantum-Dot Superlattice	Applied Physics Express Vol. 11, 012301, 2017	有	2017年11月
101	S. Asahi, K. Kusaki, Y. Harada, and T. Kita	神戸大学	Increasing Conversion Efficiency of Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cell with a Voltage Booster Hetero-Interface	Scientific Reports Vol. 8, 872, 2018	有	2018年1月
102	喜多隆	神戸大学	高変換効率太陽光発電の研究開発～50%を超える変換効率実現に向けた取り組み	電気評論 6月号, 13-17, 2018	有	2018年6月
103	D. Watanabe, N. Iwata, S. Asahi, Y. Harada, and T. Kita	神戸大学	Hot-Carrier Generation in a Solar Cell Containing InAs/GaAs Quantum-Dot Superlattices as a Light Absorber	Applied Physics Express Vol. 11, 082303, 2018	有	2018年7月
104	S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Reply to: Thermal Artefacts in Two-Photon Solar Cell Experiments	Nature Communications Vol. 10, 956, 2019	有	2019年2月

105	S. Asahi, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Adiabatic Two-Step Photoexcitation Effects in Intermediate-Band Solar Cells with Quantum Dot-in-Well Structure	Scientific Reports Vol. 9, 7859, 2019	有	2019年5月
106	Y. Harada, N. Iwata, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Hot-Carrier Generation and Extraction in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Solar Cells	Semiconductor Science and Technology Vol. 34, 094003, 2019	有	2019年9月
107	Y. Harada, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Bound-to-Continuum Intraband Transition Properties in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Solar Cells	Applied Physics Express Vol. 12, 125008, 2019	有	2019年12月
108	河野司、 久志本真希、 永松謙太郎、 新田修吾、 本田善央、天野浩	名古屋大学	-c 面 GaN 基板上的 GaN の MOVPE 成長における酸素低減の研究	IEICE technical report Vol. 117, 19-22, 2017	無	2017年11月

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	岡田至崇	東京大学	光を活かす：LED と太陽電池（招待講演）	国際光年記念特別講演会	2015年6月
2	T. Hoshii, S. Naitoh, and Y. Okada	東京大学	Photo-assisted impedance spectroscopy for quantum dot solar cell	第34回電子材料シンポジウム	2015年7月
3	R. Tamaki, Y. Shoji, Y. Okada, and K. Miyano	東京大学	Bandgap engineering for efficient two-step photon absorption in InGaAs quantum dot solar cells	第34回電子材料シンポジウム	2015年7月
4	K. Yoshida, Y. Okada, and N. Sano	東京大学	Effects of sequential tunneling between intermediate states on performance of intermediate band solar cells	第34回電子材料シンポジウム	2015年7月
5	S. Naitoh, N. Miyashita, T. Hoshii, and Y. Okada	東京大学	Effect of infrared light concentration on Si-doped InAs quantum dot solar cell	第34回電子材料シンポジウム	2015年7月
6	H. Fujioka, K. Ueno, A. Kobayashi, and J. Ohta	東京大学	Low temperature epitaxial growth of group III nitrides by pulsed sputtering	Workshop on Frontier Photonic and Electronic Materials and Devices 2015, Kyoto	2015年7月
7	M. Sugiyama	東京大学	(Invited) Design and growth of strain-balanced superlattice for efficiency enhancement of multi-junction solar cells	17th U.S. Biennial Workshop on Organometallic Vapor Phase Epitaxy (OMVPE-17), Montana, USA	2015年8月
8	S. Naitoh, N. Miyashita, K. Toprasertpong,	東京大学	Effect of Si Doping on Performance of Quantum Dot Solar Cells	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference	2015年9月

	R. Tamaki, T. Hoshii, M. Sugiyama, and Y. Okada			and Exhibition (EU-PVSEC), Hamburg, Germany	
9	P. Rale, B. Behaghel, A. Delamarre, N. Vandamme, D. Ory, S. Collin, L. Lombez, J.-F. Guillemoles, R. Tamaki, Y. Shoji, and Y. Okada	IRDEP, CNRS、 東京大学	Quantitative Optical Spectroscopy of QDs Intermediate Band Solar Cells	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Hamburg, Germany	2015年9月
10	N. Miyashita, N. Ahsan, and Y. Okada	東京大学	Evaluation of 1.0 eV GaInNAsSb Solar Cells for Multi-Junction Applications and Annealing Effects	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Hamburg, Germany	2015年9月
11	A. Julian, Z. Jehl, Y. Okada, and J.-F. Guillemoles	IRDEP, CNRS、 東京大学	Modeling of Selective Energy Contacts for Hot Carrier Solar Cells	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Hamburg, Germany	2015年9月
12	M. Sugiyama, H. Sugiyama, T. Katoh, K. Toprasertpong, H. Sodabanlu, K. Watanabe, D. Alonso-Álvarez, N. J. Ekins-Daukes, and Y. Nakano	東京大学、 Imperial Collage London	Quantum Wire-on-Well (Wow) Cell with Long Carrier Lifetime for Efficient Carrier Transport	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), Hamburg, Germany	2015年9月
13	A. Delamarre, J.-F. Guillemoles, Y. Wang, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 IRDEP CNRS	Influence of the Host pin Diode Material in Multi-Quantum Well Solar Cells	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), Hamburg, Germany	2015年9月
14	D. Yamashita, G. Kono, T. Hoshii, K. Watanabe, M. Sugiyama, T. Suga, Y. Okada, and Y. Nakano	東京大学	The Effect of Fast-Atom-Beam Ion Species in the Surface Activated Bonding Process for Multi-Junction Solar Cells	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), Hamburg, Germany	2015年9月
15	K. Yoshida	東京大学	(Invited) Quantum Dots & Photonics	18th International Workshop on Computational Electronics, West Lafayette, USA	2015年9月
16	T. Hoshii, S. Naitoh, and Y. Okada	東京大学	Photo-Assisted Impedance Spectroscopy for Quantum Dot Solar Cells	International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM	2015年9月

				2015), Sapporo	
17	N. Ahsan	東京大学	(Keynote) Emerging semiconductor materials and nanostructures for high efficiency intermediate band solar cells	3rd International Conference on Green Energy and Technology, Dhaka, Bangladesh	2015年9月
18	M. Sugiyama	東京大学	(Invited) Embedded InGaAs lateral nanowires for high-efficiency solar cells	5th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano2015), Hsinchu, Taiwan	2015年9月
19	T. Sogabe, A. Ogura, Y. Okada, Q. Shen, Y. Kuga, T. Toyoda, S. Tomić, P. D. McNaughten, and P. O' Brien	東京大学、電気通信大学、マンチェスター大学	Experimental analysis of hot state multiple exciton generation in PbSe quantum dots and its transportation modelling	5th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano2015), Hsinchu, Taiwan	2015年9月
20	R. Tamaki, Y. Shoji, K. Miyano, and Y. Okada	東京大学	Effect of external biases on infrared photo-response in InAs/AlGaAs quantum dot solar cell	5th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano2015), Hsinchu, Taiwan	2015年9月
21	K. Yoshida, Y. Okada, and N. Sano	東京大学	Effect of Sequential Tunneling on Quantum-Dot Intermediate-band Solar Cells	5th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano2015), Hsinchu, Taiwan	2015年9月
22	C.-Y. Hung, T. Sogabe, R. Tamaki, N. Miyashita, and Y. Okada	東京大学	Light absorption via discrete states in GaAs solar cell embedded with Er complex	5th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano2015), Hsinchu, Taiwan	2015年9月
23	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	(Invited) PbS colloidal quantum dot/ZnO nanowires-based solar cells with high efficiency in the near infrared region and long-	The International Conference on Fundamental Processes in Semiconductor Nanocrystals, Spain	2015年9月

			term stability		
24	T. Tatsuma	東京大学	(Invited) Photoelectrochemistry of Metal Nanoparticles	2015 年度光化学討論会	2015 年 9 月
25	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	PbS quantum-dot/ZnO nanowire solar cells yielding high efficiency in the near-infrared region and long-term stability	TOE0-9	2015 年 9 月
26	玉置亮、庄司靖、岡 田至崇	東京大学	赤外光電流スペクトル計測 による 2 段階光吸収の最適 化設計	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015 年 9 月
27	庄司靖、吉田勝尚、 岡田至崇	東京大学	電界減衰型量子ドット太陽 電池のキャリア収集効率の 改善	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015 年 9 月
28	吉田勝尚、 岡田 崇、佐野伸行	東京大学、筑 波大学	量子ドット中間バンド型太 陽電池における連続トンネ ルの影響	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015 年 9 月
29	井上智之、 トープラサートポン カシディット、 アモリ デウラマレ ー、 渡辺健太郎、 ジャンフランソワ ギルモー、 杉山正和、中野義昭	東京大学、 IRDEP CNRS	EL スペクトルを用いた集光 条件下における開放電圧の 評価	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015 年 9 月
30	王海濱、久保貴哉、 中崎城太郎、 瀬川浩司	東京大学	近赤外高効率 PbS 量子ドッ ト/ZnO ナノワイヤ太陽電池 の光電変換特性に与える量 子ドット表面の影響	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015 年 9 月
31	藤岡洋、上野耕平、 小林篤、太田実雄	東京大学	パルス励起堆積法による新 奇ヘテロエピ構造の創製 (招待講演)	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015 年 9 月
32	T. Tatsuma	東京大学	(Invited) Plasmon-induced charge separation at two- dimensional metal semishell arrays on SiO ₂ @TiO ₂ colloidal crystals.	第 5 回 CSJ 化学フェス タ 2015	2015 年 10 月
33	T. Tatsuma	東京大学	(Invited) Plasmon-Induced Photoelectrochemistry	上海師範大学講演会	2015 年 10 月
34	Y. Okada	東京大学	Quantum Dot Growth Technology by MBE for Advanced Photovoltaics	University of Cambridge - The University of Tokyo Joint Workshop on Quantum Nanostructures, Cambridge, UK	2015 年 11 月
35	R. Tamaki	東京大学	Photocurrent Kinetics in Quantum Dot Superlattice	University of Cambridge - The University of Tokyo Joint Workshop on Quantum Nanostructures, Cambridge, UK	2015 年 11 月

36	T. Sogabe	東京大学	Fingerprint of Kondo Resonance in Co-TPP Molecule Coupled to CuN Atomic Layer: A Combined LT-STs and DFT-NEGF Study	University of Cambridge - The University of Tokyo Joint Workshop on Quantum Nanostructures, Cambridge, UK	2015年11月
37	Y. Okada	東京大学	(Invited) Challenges and Advances in Quantum Dot Intermediate Band Solar Cells	MRS Fall Meeting 2015, Boston, USA	2015年11月
38	庄司靖	東京大学	InAs 量子ドット中間バンド太陽電池における AlAsSb キャップ層の導入効果	第11回量子ナノ材料セミナー	2015年11月
39	A. Delamarre, L. Lombez, K. Watanabe, M. Sugiyama, and J.-F. Guillemoles	東京大学, IRDEP CNRS	Spatial carrier collection efficiency imaging by luminescence	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-25), Busan, Korea	2015年11月
40	立間徹	東京大学	金属ナノ粒子の光機能 - 光電変換、プラズモンセンサ、機能性色材 - (招待講演)	日本電気計測器工業会 関西支部・戦略的基盤技術検討委員会	2015年11月
41	H. Fujioka	東京大学	Characteristics of nitride films and devices prepared on bulk GaN substrates by pulsed sputtering	9th International Workshop on Bulk Nitride Semiconductors (IWBNS-IX)	2015年11月
42	H. Fujioka	東京大学	Preparation of III-Nitride Devices for Large Area Light Emitting Devices and Solar Cells	Collaborative Conference on Crystal Growth (EMN 3CG 2015)	2015年12月
43	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	PbS quantum-dot/ZnO nanowire solar cells yielding high efficiency in the near-infrared region and long-term stability	The 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem 2015), USA	2015年12月
44	T. Tatsuma	東京大学	(Invited) Applications of plasmon-induced charge separation	The 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem 2015), USA	2015年12月
45	T. Kubo, H. Wang, Y. Sanehira, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	PbS quantum-dot/ZnO nanowire solar cells yielding high efficiency in the near-infrared region. - Enhanced carrier transport distance in the PbS-QD/ZnO NW hybrid structure	MRS Fall meeting, Boston, USA	2015年12月
46	N. Ahsan	東京大学	(Invited) Characterization of	EMN meeting on Photovoltaics, Hong	2016年1月

			transition metal-doped chalcopyrite thin films for photovoltaic application	Kong	
47	立間徹	東京大学	ナノ粒子による光エネルギーの捕捉と光機能の発現 (招待講演)	近畿大学第6回エネルギーセミナー	2016年1月
48	R. Tamaki, Y. Shoji, and Y. Okada	東京大学	Design optimization for two-step photon absorption in quantum dots by infrared photocurrent spectroscopy	SPIE Photonics West 2016, San Francisco, USA	2016年2月
49	K. Toprasertpong, K. Watanabe, T. Kita, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Effective drift mobility approximation in multiple quantum-well solar cells	SPIE Photonics West 2016, San Francisco, USA	2016年2月
50	T. Inoue, K. Toprasertpong, A. Delamarre, K. Watanabe, M. Paire, L. Lombez, J.-F. Guillemoles, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学, IRDEP CNRS	Quasi-Fermi level splitting evaluation based on electroluminescence analysis in multiple quantum-well solar cells for investigating cell performance under concentrated light	SPIE Photonics West 2016, San Francisco, USA	2016年2月
51	岡田至崇, 庄司靖, 玉置亮, 吉田勝尚, 曾我部東馬	東京大学	量子ドット中間バンド太陽電池の高効率化メカニズム (招待講演)	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016年3月
52	玉置亮, 庄司靖, 菅谷武芳, 岡田至崇	東京大学	フーリエ変換赤外光電流分光による量子ドット太陽電池における室温2段階光吸収の最適化設計 (招待講演)	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016年3月
53	庄司靖, 玉置亮, アーサン ナズムル, 岡田 至崇	東京大学	中間バンド型太陽電池に向けた InAs/InAlAsSb 量子構造の作製と評価	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016年3月
54	渡辺健太郎, 井上智之, トーブラサートポンカシディット, アモリデラマール, ソダーバンル ハッサネット, 杉山 正和, 中野 義昭	東京大学	太陽電池応用 InGaAs/GaAsP 多重量子井戸への緩和層導入効果	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016年3月
55	趙 博文, トーブラサートポンカシディット, ソダーバンル ハッサネット, 渡辺健太郎, 杉山正和, 中野義昭	東京大学	低温での量子井戸および波状量子井戸太陽電池におけるキャリア回収効率の評価	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016年3月
56	井上智之, トーブラサートポンカシディット,	東京大学, IRDEP CNRS	EL測定を用いたGaAs太陽電池の構造評価と効率向上	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016年3月

	デュラマレー アモリ、 渡辺健太郎、 ギルモア ジャンフランソワ、 杉山正和、中野義昭				
57	山下大之、 渡辺太郎、 藤野真久、 星井拓也、 杉山正和、 岡田至崇、 須賀唯知、 中野義昭	東京大学	超高効率多接合太陽電池作製に向けた表面活性化接合界面の評価	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016 年 3 月
58	トープラサートポンカシディット、 谷渕 泰三、 加田 智之、朝日 重雄、 渡辺 健太郎、 杉山 正和、喜多 隆、 中野 義昭	東京大学、 神戸大学	量子井戸太陽電池における電子と正孔の走行時間および実効移動度の評価	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016 年 3 月
59	王海濱、久保貴哉、 中崎城太郎、 瀬川浩司	東京大学	PbS 量子ドット/ZnO 太陽電池の光電変換特性の温度依存	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016 年 3 月
60	王海濱、久保貴哉、 中崎城太郎、 瀬川浩司	東京大学	PbS 量子ドット太陽電池への ZnO ナノワイヤ導入によるキャリア拡散距離の伸長効果	日本化学会第 96 春季 年会	2016 年 3 月
61	立間徹	東京大学	プラズモン誘起電荷分離を利用した金-銀合金ナノ粒子の光誘起脱合金化	日本化学会第 96 春季 年会	2016 年 3 月
62	T. Tatsuma	東京大学	(Invited) Plasmonic nanomaterials	PITTCON 2016	2016 年 3 月
63	T. Tatsuma	東京大学	Photoelectrochemistry of plasmonic two-dimensional halfshell arrays and their applications	電気化学会第 83 回大会	2016 年 3 月
64	王海濱、久保貴哉、 中崎城太郎、 瀬川浩司	東京大学	溶液プロセスで構築する量子ドット太陽電池	第 7 回薄膜太陽電池セミナー	2016 年 3 月
65	A. Ogura, Y. Okada, and T. Sogabe	東京大学	Analysis of Multijunction Solar Cells Under High Concentrations	12th International Conference on Concentrator Photovoltaic System, Freiburg, Germany	2016 年 4 月
66	庄司靖、岡田至崇	東京大学	電界減衰型近接積層 InGaAs/AlGaAs 量子ドット太陽電池の作製評価	第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016 年 5 月
67	玉置亮、庄司靖、 菅谷武芳、岡田至崇	東京大学、 産業技術総合研究所	In(Ga)As 量子ドット太陽電池の 2 段階光吸収特性における普遍的線形関係	第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016 年 5 月
68	N. Ahsan, N. Miyashita, K. M. Yu, W. Walukiewicz, and Y. Okada	東京大学、 Lawrence Berkley National Laboratory	Designing III-V dilute nitride alloys for IBSC application	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Portland, USA	2016 年 6 月

69	R. Tamaki, Y. Shoji, T. Sugaya, and Y. Okada	東京大学	Universal Linear Relationship on Two-Step Photon Absorption Processes in In(Ga)As Quantum Dot Solar Cells	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Portland, USA	2016年6 月
70	K. Toprasertpong, T. Inoue, A. Delamarre, K. Watanabe, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Photocurrent Collection Mechanism and Role of Carrier Distribution in p-i-n Quantum Well Solar Cells	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Portland, USA	2016年6 月
71	D. Yamashita, K. Watanabe, M. Fujino, T. Hoshii, Y. Okada, Y. Nakano, T. Suga, and M. Sugiyama	東京大学	Admittance Spectroscopy Analysis on the Interfacial Defect Levels in the Surface-Activated Bonding of GaAs	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Portland, USA	2016年6 月
72	N. Miyashita	東京大学	(Invited) Enhancement of carrier collection in GaInNAs:Sb solar cells	EMN Prague Meeting, Energy Materials Nanotechnology, Prague, Czech Republic	2016年6 月
73	Y. Okada	東京大学	(Invited) Current Trends in High-Efficiency III-V Nanostructured Solar Cells	Compound Semiconductor Week 2016 (CSW), Toyama, Japan	2016年6 月
74	N. Miyashita, N. Ahsan, and Y. Okada	東京大学	Improvement of 1.0 eV GaInNAsSb solar cell performance upon annealing	Compound Semiconductor Week 2016 (CSW), Toyama, Japan	2016年6 月
75	Y. Shoji, N. Ahsan, R. Tamaki, and Y. Okada	東京大学	InAs/InAlAsSb quantum nanostructures grown on InP substrate for intermediate band solar cell application	Compound Semiconductor Week 2016 (CSW), Toyama, Japan	2016年6 月
76	M. Sugiyama	東京大学	(Invited) Strain-balanced superlattice for high- efficiency solar cells	International Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials (THERMEC 2016), Graz, Austria	2016年6 月
77	Y. Okada	東京大学	Improvements in Quantum Dot Intermediate Band Solar Cells	19th International Conference of Superlattices, Nanostructures and Nanodevices, Hong Kong	2016年7 月
78	K. Toprasertpong, T. Inoue, A. Delamarre, K. Watanabe, M. Paire, L. Lombez, J.-F. Guillemoles,	東京大学, IRDEP CNRS	Electroluminescence-Based Quality Characterization of Quantum Wells for Solar Cell Applications	18th International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE- 18), San Diego, USA	2016年7 月

	M. Sugiyama, and Y. Nakano				
79	H. Cho, K. Toprasertpong, H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Stability and Controllability of InGaAs/GaAsP Wire-on-Well (WoW) Structure for Multi-Junction Solar Cells	18th International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE- 18), San Diego, USA	2016年7 月
80	玉置亮, 庄司靖, 岡田至崇	東京大学	InAs 量子ドット中間バンド 型太陽電池における2段階 光吸収の2次元光電流分光	第35回電子材料シン ポジウム	2016年7 月
81	Y. Okada	東京大学	High-Efficiency Quantum Dot Intermediate Band Solar Cells	5th International Conference & Exhibition on Clean Energy, Montreal, Canada	2016年8 月
82	M. Sugiyama, H. Cho, K. Toprasertpong, H. Sodabanlu, K. Watanabe, and Y. Nakano	東京大学	(Invited) InGaAs/GaAsP Quantum Wells and Wires for High-Efficiency Photovoltaic Applications	16th International Conference On Nanotechnology (IEEE Nano 2016), Sendai	2016年8 月
83	M. Sugiyama, T. K., H. Fujii, H. Cho, H. Sodabanlu, K. Watanabe, and Y. Nakano	東京大学	(Invited) Metalorganic Vapor-Phase Epitaxy of InGaAs/GaAsP Quantum Wells and Wires for High- Efficiency Photovoltaic Applications	18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18), Nagoya	2016年8 月
84	M. Sugiyama, D. Yamashita, K. Watanabe, M. Fujino, T. Suga, and Y. Nakano	東京大学	(Invited) Analysis of Defect Levels at GaAs/GaAs Surface- Activated Bonding Interface for Multi- Junction Solar Cells	PRiME 2016/230th ECS Meeting, Honolulu, USA	2016年9 月
85	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	(Invited) Morphology control of ZnO nanowires for colloidal quantum dot-based solar cells with enhanced efficiency in the near infrared region	E-MRS, Warsaw, Poland	2016年9 月
86	H. Wang, J. Nakazaki, T. Kubo, and H. Segawa	東京大学	Solution processed solar cells based on PbS colloidal quantum dot / ZnO nanowire bulk heterojunctions	ICFPE 2016	2016年9 月
87	H. Wang, J. Nakazaki, T. Kubo, and H. Segawa	東京大学	(Invited) Efficiency enhancement of PbS colloidal quantum dot/ZnO nanowire solar cells in the near-infrared region	10th Aseanian Conference on Nano- hybrid Solar Cells, Beijing, China	2016年9 月
88	H. Wang, J. Nakazaki, T. Kubo, and H. Segawa	東京大学	(Invited) Efficiency enhancement of PbS colloidal quantum dot/ZnO nanowire solar cells in the near-infrared region	The 22th China-Japan Bilateral Symposium on Intelligent Electro photonic Materials and Molecular	2016年9 月

				Electronics (SIEMME' 22), Suzhou, China	
89	T. Tatsuma	東京大学	(Invited) Optical and Photoelectrochemical Properties of Plasmonic Nanomaterials	CEMS Topical Meeting 2016	2016年9月
90	玉置亮, 庄司靖, 岡田至崇	東京大学	InAs/AlGaAs 量子ドット太陽電池における量子効率スペクトルマップ	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016年9月
91	吉田勝尚, 岡田至崇	東京大学	不純物バンドを利用した量子ドット中間バンド型太陽電池の提案とデバイスシミュレーションによる解析	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016年9月
92	トープラサートポソカシディット、井上智之、渡辺健太郎、喜多隆、杉山正和、中野義昭	東京大学、神戸大学	多重量子井戸太陽電池における実効移動度近似の妥当性検証	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016年9月
93	趙博文、齊藤昌太、トープラサートポソカシディット、田尻祐介、小川泰弘、ソダーバシル ハッサネット、渡辺健太郎、喜多隆、杉山正和、中野義昭	東京大学、神戸大学	InGaAs/GaAsP 波状量子井戸におけるキャリア寿命の評価	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016年9月
94	王海濱、久保貴哉、中崎城太郎、瀬川浩司	東京大学	コロイド量子ドットのパシベーションと光電変換特性	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016年9月
95	上野耕平、荒川靖章、今別府秀行、太田実雄、藤岡洋	東京大学	PSD 法による GaN への n 型ドーピング技術の開発	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016年9月
96	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Efficiency enhancement of PbS colloidal quantum-dot/ZnO nanowire heterojunction solar cells	2016年度光化学討論会	2016年9月
97	T. Tatsuma	東京大学	Photoelectrochemical and photovoltaic properties of plasmonic two-dimensional halfshell arrays	2016年度光化学討論会	2016年9月
98	Y. Okada	東京大学	(Invited) Progress of Quantum Dot Intermediate-Band Solar Cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016年10月
99	K. Yoshida	東京大学	Simulation Analysis of Impurity-Band assisted Quantum-Dot Intermediate-Band Solar Cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-	2016年10月

				26), Singapore	
100	Z. Jehl	東京大学	Selective contacts for Hot Carrier Solar Cells using asymmetric double resonant tunneling barriers	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016年10月
101	Y. Shoji	東京大学	Multi-stacked GaSb/GaAs type-II quantum nanostructure for application to intermediate band solar cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016年10月
102	A. Delamarre, P. Verdier, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano, and J.-F. Guillemoles	東京大学, IRDEP CNRS	Optical mapping of the transport efficiency in multi-junction solar cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016年10月
103	W. Yanwachirakul, N. Miyashita, H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Okada, and Y. Nakano	東京大学	Design of free-barrier InGaAs/GaNAs multiple quantum well solar cells with 1.2 eV energy gap	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016年10月
104	T. Tatsuma	東京大学	(Invited) Plasmon-induced charge separation: mechanisms and applications	PRiME2016, Honolulu, USA	2016年10月
105	藤岡洋	東京大学	(Invited) Basic characteristics of GaN prepared by pulsed sputtering deposition	International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2016)	2016年10月
106	T. Tatsuma	東京大学	(Invited) Optical and photoelectrochemical applications of plasmonic nanomaterials	International Workshop on Novel Photo-Induced Phenomena and Applications, Tokyo	2016年11月
107	玉置亮	東京大学	InAs 量子ドット太陽電池における室温高効率2段階光吸収の実現に向けて	第12回量子ナノ材料セミナー	2016年11月
108	N. Ahsan, N. Miyashita, T. Hoshii, S. Kalainathan, and Y. Okada	東京大学、東京工業大学、VIT University	(Invited) Multiband semiconductors for next generation PV applications	International Conference on Materials Processing and Applications (ICMPA2016), Vellore, India	2016年12月
109	N. Miyashita	東京大学	(Invited) Improvement Of Dilute Nitride GaInNAsSb Thin Films And Photovoltaic Characteristics	International Conference on Materials Processing and Applications (ICMPA2016), Vellore, India	2016年12月
110	N. Ahsan, N. Miyashita, T. Hoshii, S. Kalainathan,	東京大学、東京工業大学、VIT	(Invited) Emerging semiconductors for highly efficient PV Applications	3rd International Conference on Mechanics and Mechatronics	2016年12月

	and Y. Okada	University		Research (ICMMR 2016), Uthangarai, India	
111	N. Miyashita	東京大学	(Invited) Characterization Of Dilute Nitride Based Photovoltaics for Multi-junction Solar cell Applications	3rd International Conference on Mechanics and Mechatronics Research (ICMMR 2016), Uthangarai, India	2016年12月
112	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	PbS colloidal quantum dot based solar cells with high external quantum efficiency in the near infrared region	MRS Fall Meeting 2016, Boston, USA	2016年12月
113	T. Kubo	東京大学	(Invited) Organic inorganic hybrid solar cells based on colloidal quantum dots towards high-efficiency near-infrared photovoltaics	ICNME2016, Kobe	2016年12月
114	T. Tatsuma	東京大学	Plasmon-induced photoelectron-chemical and photovoltaic properties of two-dimensional metal half shell array	9th Asian Photochemistry Conference 2016 (APC2016)	2016年12月
115	N. Ahsan, N. Miyashita, K. M. Yu, W. Walukiewicz, and Y. Okada	東京大学、香港市立大学、Lawrence Berkeley National Laboratory	Multiband modification of III-V dilute nitrides for IBSC application	SPIE Photonics West 2017, San Francisco, USA	2017年1月
116	Z. Jehl, D. Suchet, A. Julian, C. Bernard, N. Miyashita, F. Gibelli, Y. Okada, and J.-F. Guillemoles	東京大学、CNRS, IRDEP	Modeling and characterization of double resonant tunneling diodes for application as energy selective contacts in hot carrier solar cells	SPIE Photonics West 2017, San Francisco, USA	2017年2月
117	A. Delamarre, J. Jia, P. Verdier, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano, and J.-F. Guillemoles	東京大学, IRDEP CNRS	Characterisation of multi-junction solar cells by mapping of the carrier transport efficiency using luminescence emission	SPIE Photonics West 2017, San Francisco, USA	2017年2月
118	B. Galvani, F. Michelini, M. Bescond, M. Sugiyama, J.-F. Guillemoles, and N. Cavassilas	Aix Marseille University, 東京大学, IRDEP CNRS	Minibands modeling in strained balanced InGaAs/GaAs/GaAsP cells	SPIE Photonics West 2017, San Francisco, USA	2017年2月
119	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Solution-processed hybrid solar cells using lead sulfide colloidal quantum	AP-HOPV 2017, Yokohama	2017年2月

			dots and zinc oxide nanowires		
120	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Efficiency enhancement of PbS colloidal quantum dot / ZnO nanowire solar cells in the near-infrared region and long-term stability	AP-HOPV 2017, Yokohama	2017年2月
121	S. Naito, R. Tamaki, N. Miyashita, K. Yoshida, and Y. Okada	東京大学	Two-step photon absorption in intermediate band solar cells controlled by the electron filling ratio of quantum dots	ISPlasma 2017, Aichi	2017年3月
122	N. Ahsan, N. Miyashita, K. M. Yu, W. Walukiewicz, and Y. Okada	東京大学、 香港市立大学、 Lawrence Berkeley National Laboratory	(Invited) III-V Dilute Nitrides for Intermediate Band Solar Cell	Global Photovoltaic Conference (GPVC) 2017, Gwangju, Korea	2017年3月
123	岡田至崇, 庄司靖, 吉田勝尚, 内藤駿弥, 玉置亮	東京大学	Recent Progress of Quantum Dot Intermediate Band Solar Cells (招待講演)	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017年3月
124	玉置亮, 庄司靖, 岡田至崇	東京大学	GaSb/GaAs 量子ナノ構造太陽電池における赤外量子効率スペクトル	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017年3月
125	庄司靖, 玉置亮, 岡田至崇	東京大学	GaSb/AlGaAs 中間バンド型太陽電池における量子ナノ構造形状の影響	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017年3月
126	何軼倫, 宮下直也, 岡田至崇	東京大学	原子状水素援用 MBE による Ga(In)NAs 薄膜の残留キャリアと水素照射効果	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017年3月
127	トープラサートポンカシディット、渡辺健太郎、中野義昭、杉山正和	東京大学	多重量子井戸太陽電池のキャリア回収モデル	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017年3月
128	王海濱、久保貴哉、中崎城太郎、瀬川浩司	東京大学	近赤外吸収 AgBiS ₂ ナノ粒子/ZnO ナノワイヤ太陽電池の作製と光電変換特性	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017年3月
129	王海濱、久保貴哉、中崎城太郎、瀬川浩司	東京大学	PbS 量子ドット/ZnO ナノワイヤ太陽電池の短波長赤外域での光電変換特性	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017年3月
130	T. Tatsuma	東京大学	Plasmonic Photovoltaic Cells Based on Two-Dimensional Metal Halfshell Arrays	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017年3月
131	上野耕平、荒川靖章、小林篤、太田実雄、藤岡洋	東京大学	PSD 法による高濃度高移動度 n 型 GaN の開発	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017年3月
132	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Quantum dot size dependent photovoltaic characteristics of PbS	日本化学会第97春季年会	2017年3月

			quantum dot / ZnO nanowire solar cells		
133	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Photocurrent Enhancement of Perovskite Solar Cells by a Plasmonic Waveguide Mode	電気化学会第84回大会	2017年3月
134	Y. Okada, Y. Shoji, and R. Tamaki	東京大学	(Invited) Challenges and Progress on the Development of Quantum Dot Intermediate Band Solar Cells	MRS Spring Meeting 2017, Phoenix, USA	2017年4月
135	M. Sugiyama	東京大学	(Invited) III-V nano-epitaxial MOVPE for high-efficiency and low-cost solar cells	MRS Spring meeting 2017, Phoenix, USA	2017年4月
136	Y. Shoji and Y. Okada	東京大学	Effect of thin InAlAs buffer layer on InAs/InGaAs quantum dots grown on InP (311)B substrate	Compound Semiconductor Week 2017 (CSW 2017), Berlin, Germany	2017年5月
137	N. Miyashita	東京大学	Effect of Hydrogen Annealing for Dilute Nitride GaInNAsSb Solar Cells	Compound Semiconductor Week 2017 (CSW 2017), Berlin, Germany	2017年5月
138	Y. Okada, Y. Shoji, C.-Y. Hung, D. J. Farrell, and T. Sogabe	東京大学	High Density Quantum Dot Solar Cells for Concentrating Photovoltaics (CPV)	17th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Milano, Italy	2017年5月
139	T. Tatsuma	東京大学	(Invited) Plasmon-induced charge Separation and Electric Field Localization	231st ECS Meeting, New Orleans, USA	2017年5月
140	N. Ahsan, S. Kalainathan, N. Miyashita, T. Hoshii, and Y. Okada	東京大学、VIT University、東京工業大学	Multiband Formation in Cr doped CuGaS ₂ Thin Films Synthesized by Chemical Spray Pyrolysis	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington DC, USA	2017年6月
141	R. Tamaki, Y. Shoji, and Y. Okada	東京大学	Type-II Quantum Dots for Application to Photon Ratchet Intermediate Band Solar Cells	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington DC, USA	2017年6月
142	K. Toprasertpong, B. Kim, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学	Carrier Collection Model and Design Rule for Quantum Well Solar Cells	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington DC, USA	2017年6月
143	M. Sugiyama	東京大学	(Invited) III-V Compound Semiconductor Nano-Epitaxial Structures for High-Efficiency Photovoltaic and Solar-to-Chemical Energy Conversion	International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT) 2017, Singapore	2017年6月

144	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	(Invited) Solution processed quantum dots-based solar cells operating in a wide range of the solar spectrum	International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT) 2017, Singapore	2017年6月
145	T. Kubo	東京大学	(Invited) Solution-processed hybrid solar cells using colloidal quantum dot molecules	9th International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics, Kanazawa	2017年6月
146	S. Naito, K. Yoshida, R. Tamaki, N. Miyashita, and Y. Okada	東京大学	High-Efficiency Quantum Dot Intermediate Band Solar Cell (IBSC): Effect of Carrier Occupancy Ratios in IB	International Research Conference on Sustainable Energy, Engineering, Materials and Environment (SEEME), Newcastle upon Tyne, UK	2017年7月
147	R. Tamaki	東京大学	(Invited) Full spectrum quantum efficiency on III-V quantum dot solar cells	International Workshop on Advanced Smart Materials and Engineering for Nano-and Bio-Technologies, Kobe	2017年7月
148	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Near and Short-wavelength Infrared PbS Quantum Dot / ZnO Nanowire Solar Cells	10th International Symposium on Transparent Oxide and Related Materials for Electronics and Optics	2017年7月
149	宮下直也, 何軼倫, 高本達也, 十楚博行, 安居院高明, 岡田至崇	東京大学、シヤープ	希釈窒化物サブセルを用いた格子整合4接合太陽電池の作製	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017年7月
150	玉置亮, 庄司靖, 岡田至崇	東京大学	InAs 量子ドット太陽電池における FTIR 量子効率マッピングによる2段階光吸収電流の定量評価と高効率化設計	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017年7月
151	何軼倫, 宮下直也, 岡田至崇	東京大学	4接合太陽電池に向けた GaInNAs 薄膜中の残留キャリア制御	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017年7月
152	N. Ahsan	東京大学	(Invited) Characterization of Cr-doped CuGaS ₂ thin films for intermediate band solar cell application	International Symposium for Advanced Materials Research (ISAMR-2017), Sun Moon Lake, Taiwan	2017年8月
153	T. Kubo, H. Wang, S. Nakao, H. Saito, S. Magaino, K. Takagi,	東京大学、KISTEC	(Invited) Quantum dot-based solar cells with highly transparent conductive oxides for enhanced photocurrent in	15th International Conference on Advanced Materials (IUMRS-ICAM2017), Kyoto	2017年8月

	T. Hasegawa, J. Nakazaki, and H. Segawa		the short-wavelength infrared region		
154	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Solution processed solar cells based on PbS colloidal quantum dot / ZnO nanowire heterojunctions	15th International Conference on Advanced Materials (IUMRS-ICAM2017), Kyoto	2017年8 月
155	久保貴哉, 王海濱, 瀬川浩司	東京大学	量子ドットを用いた有機無 機ハイブリッド太陽電池と 様々な環境下での発電特性 (招待講演)	第78回応用物理学会 秋季学術講演会	2017年9 月
156	杉山正和	東京大学	超格子の結晶成長技術と太 陽電池応用 (招待講演)	第78回応用物理学会 秋季学術講演会	2017年9 月
157	吉田勝尚, 岡田至崇	東京大学	量子ドット中間バンド型太 陽電池における量子効率の 数値解析	第78回応用物理学会 秋季学術講演会	2017年9 月
158	庄司靖, 玉置亮, 岡田至崇	東京大学	GaSb 量子ナノ構造太陽電池 におけるキャリア抽出過程 の温度依存性	第78回応用物理学会 秋季学術講演会	2017年9 月
159	玉置亮, 庄司靖, 岡 田至崇	東京大学	GaSb/AlGaAs 量子ナノ構造 太陽電池における高効率2 段階光吸収	第78回応用物理学会 秋季学術講演会	2017年9 月
160	松岡絢香, 庄司靖, 玉置亮, 岡田至崇	東京大学	GaAs(311)B 基板上の InGaAs/AlGaAs 積層量子ド ット成長	第78回応用物理学会 秋季学術講演会	2017年9 月
161	W. Yanwachirakul, N. Miyashita, H. Sodabanlu, K. Watanabe, Y. Okada, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Extended Carrier Lifetime in InGaAs/GaNAs Multiple Quantum Well Solar Cells with Free-barrier Conduction Band Structure	第78回応用物理学会 秋季学術講演会	2017年9 月
162	H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Effects of growth temperature on properties of MOVPE grown InP-based solar cells	第78回応用物理学会 秋季学術講演会	2017年9 月
163	トープラサートポン カシディット, デウラムレー アモ リ, 渡辺健太郎, 中野義昭, ジャンフランソワ ギルモー, 杉山 正和	東京大学, IRDEP CNRS	量子構造太陽電池における 光電的相反関係の拡張	第78回応用物理学会 秋季学術講演会	2017年9 月
164	王海濱, 中尾祥一郎, 久保貴哉, 斎藤英純, 馬飼野信一, 高木克彦, 長谷川哲也, 中崎城太郎, 瀬川浩司	東京大学、 KISTEC	高透過性透明導電膜を用い た量子ドット太陽電池の短 波長赤外域の光電変換特性	第78回応用物理学会 秋季学術講演会	2017年9 月
165	T. Kubo, H. Wang, and H. Segawa	東京大学	(Invited) Solution- processed solar cells	2017 International Conference on Solid	2017年9 月

			with nanostructured hybrid materials	State Devices and Materials (SSDM2017), Sendai	
166	T. Tatsuma	東京大学	Synthesis and infrared application of plasmonic compound nanoparticles	2017年度光化学討論会	2017年9月
167	Y. Okada	東京大学	(Keynote) Quantum Dot Photovoltaics: Challenges Towards 50% Efficiency	2nd International Conference on Advances in Materials Science and Technology, Vellore Institute of Technology	2017年10月
168	N. Ahsan	東京大学	(Invited) Multiband characterization of CuGaS ₂ thin films for photovoltaic application	2nd International Conference on Advances in Materials Science and Technology, Vellore Institute of Technology	2017年10月
169	N. Miyashita	東京大学	(Invited) Development of dilute nitrides and multijunction solar cells	2nd International Conference on Advances in Materials Science and Technology, Vellore Institute of Technology	2017年10月
170	T. Kubo, H. Wang, and H. Segawa	東京大学	(Invited) Colloidal quantum dot-based hybrid nanomaterials towards solution processed high efficiency solar cells	International Symposium on Novel Energy Nanomaterials, Catalysts and Surfaces for Future Earth (NENCS 2017), Tokyo	2017年10月
171	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Near and short-wavelength infrared PbS quantum dot / ZnO nanowire solar cells	International Symposium on Novel Energy Nanomaterials, Catalysts and Surfaces for Future Earth (NENCS 2017), Tokyo	2017年10月
172	T. Tatsuma	東京大学	(Invited) Nanostructured plasmonic surfaces and applications	International Workshop on Advanced Nanoscience and Nanomaterials 2017, Shanghai, China	2017年10月
173	T. Tatsuma	東京大学	Photochemical reactions of plasmonic copper sulfide nanoparticles under near-infrared irradiation	International Workshop on Advanced Nanoscience and Nanomaterials 2017, Shanghai, China	2017年10月
174	M. Sugiyama	東京大学	(Invited) InGaAs/GaAsP Quantum Well Superlattice for 1.15-eV Middle Cell in 4-Junction Solar Cell	2017 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS 2017),	2017年11月

				Hawaii, USA	
175	R. Tamaki, Y. Shoji, and Y. Okada	東京大学	Efficient Two-Step Photon Absorption in Type-II GaSb Quantum Dot Solar Cells	OSA Light, Energy and the Environment Congress, Boulder, USA	2017年11月
176	A. Matsuoka, Y. Shoji, R. Tamaki, and Y. Okada	東京大学	InGaAs/AlGaAs Quantum Dot Intermediate Band Solar Cells Fabricated on GaAs (311)B Substrate	OSA Light, Energy and the Environment Congress, Boulder, USA	2017年11月
177	N. Miyashita, T. Agui, H. Juso, T. Takamoto, and Y. Okada	東京大学、 シヤープ	Characterization of Inverted Grown Lattice-Matching Multijunction Solar Cells with 1.0 eV Dilute Nitride Subcell	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
178	R. Tamaki, Y. Shoji, and Y. Okada	東京大学	Full Spectrum Quantum Efficiency Mapping on Type-II Quantum Nanostructure Solar Cells	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
179	B. Behaghel, P. Rale, H.-L. Chen, L. Lombez, Y. Shoji, R. Tamaki, S. Collin, Y. Okada, and J.-F. Guillemoles	東京大学、 IRDEP CNRS	In(Ga)As/Al _{0.2} GaAs Quantum Dot Intermediate-Band-Assisted Hot-Carrier Solar Cell with Fabry-Perot Cavity	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
180	Y. He, N. Miyashita, and Y. Okada	東京大学	Control of Background Carrier Concentration in H-MBE Grown GaInNAs Thin Films for 4-Junction Solar Cells	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
181	Y. Shoji, R. Tamaki, and Y. Okada	東京大学	Proportion of Optical Transition on Carrier Extraction from GaSb Quantum Nanostructures	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
182	K. Yoshida and Y. Okada	東京大学	Drift-Diffusion Analysis on Quantum Efficiency of Quantum-Dot Intermediate-Band Solar Cells	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
183	M. Sugiyama, K. Watanabe, T. Usuki, and Y. Nakano	東京大学	Step-tunnel InGaAs/GaAsP quantum well superlattice for 1.15-eV middle cell in 4-junction solar cell	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
184	K. Toprasertpong, K. Watanabe, A. Delamarre, Y. Nakano, J.-F. Guillemoles, and M. Sugiyama	東京大学、 IRDEP CNRS	Electroluminescence and reciprocity relation in multiple quantum well solar cells	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
185	Y. Okada	東京大学	(Invited) Quantum Dot Intermediate Band Solar Cells: Steps towards High	Current trends in Optical and X-Ray metrologies of key	2017年11月

			Efficiency	enabling nanomaterials/devices for the Ubiquitous Society, renewable energy and health (OptoX NANO), Okayama	
186	Z. Jehl, A. Delamarre, D. Suchet, S. Almosny, N. Cavassilas, M. Giteau, M. Sugiyama, Y. Okada, and J.-F. Guillemoles	東京大学、 IRDEP CNRS	(Invited) Carrier extraction for solar cells beyond the Shockley Queisser limit	Current trends in Optical and X-Ray metrologies of key enabling nanomaterials/devices for the Ubiquitous Society, renewable energy and health (OptoX NANO), Okayama	2017年11月
187	Y. Shoji	東京大学	Growth and Characterization of GaSb Quantum Nanostructures by Solid-Source Molecular Beam Epitaxy	Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS), Hawaii, USA	2017年11月
188	K. Yoshida	東京大学	Numerical Study of Quantum Efficiency of Quantum-Dot Intermediate-Band Solar Cells under Infrared Light Illumination	Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS), Hawaii, USA	2017年11月
189	T. Tatsuma	東京大学	金属ナノ粒子とその光機能 (招待講演)	第29回油化学講演会	2017年11月
190	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Solution processed quantum dots-based solar cells operating in a wide range of the solar spectrum	MRS Fall Meeting 2017, Boston, USA	2017年12月
191	H. Wang, T. Kubo, and H. Segawa	東京大学	Near and short-wave infrared PbS colloidal quantum dot / ZnO nanowire solar cells	Photocatalysis 2 & SIEMME' 23, Tokyo	2017年12月
192	久保貴哉, 王海濱, 瀬川浩司	東京大学	量子ドットで作る太陽電池 (招待講演)	有機材料フォーラム・ポリマー材料科学若手研究会合同セミナー	2017年12月
193	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	(Invited) Solution-processed colloidal-quantum-dot solar cells operating in the infrared region	Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics (AP-HOPV18), Kita-Kyushu	2018年1月
194	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Efficient infrared solution-processed PbS quantum dot / ZnO nanowire solar cell	Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics (AP-HOPV18), Kita-Kyushu	2018年1月
195	R. Tamaki, Y. Shoji, L. Lombez, J.-F. Guillemoles, and Y. Okada	東京大学、 IRDEP CNRS	Quantitative analysis of InAs quantum dot solar cells by photoluminescence spectroscopy	SPIE Photonics West 2018, San Francisco, USA	2018年2月

196	A. Delamarre, D. Suchet, N. Cavassilas, Y. Okada, M. Sugiyama, and J.-F. Guillemoles	東京大学、 IRDEP CNRS	Non-ideal nanostructured intermediate band solar cells with an electronic ratchet	SPIE Photonics West 2018, San Francisco, USA	2018年2月
197	W. Yanwachirakul, N. Miyashita, H. Sodabanlu, K. Watanabe, Y. Okada, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Characterization of InGaAs/GaAsN multiple quantum well with flat conduction band for improving carrier transport in multijunction solar cell	SPIE Photonics West 2018, San Francisco, USA	2018年2月
198	A. Delamarre, D. Suchet, M. Sugiyama, and N. Cavassilas	東京大学、 IRDEP CNRS	Quantum structure for a practical realization of ratchet band solar cells	SPIE Photonics West 2018, San Francisco, USA	2018年2月
199	松林宏弥、 アーサン ナズムル、 金明玉、岡田至崇	東京大学	マグネトロンスパッタを用いた薄膜 CuGaS ₂ の作製	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会	2018年3月
200	玉置亮、庄司靖、 Laurent Lombez、 Jean-François Guillemoles、 岡田至崇	東京大学、 IRDEP CNRS	絶対値発光分光による InAs 量子ドット太陽電池の動作解析	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会	2018年3月
201	何軼倫、宮下直也、 岡田至崇	東京大学	希釈窒化物半導体 GaInNAsSb 中の深準位欠陥の解析と制御	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会	2018年3月
202	王海濱、久保貴哉、 中崎 城太郎、 瀬川 浩司	東京大学	溶液プロセスを使った量子ドット太陽電池	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会	2018年3月
203	立間徹	東京大学	正孔輸送層を用いた全固体 PICS 光電変換セルの開発	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会	2018年3月
204	中村享平、小林篤、 上野耕平、藤岡洋	東京大学	YSZ 基板上 InGaIn および InAlN 薄膜の成長と MISFET 応用	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会	2018年3月
205	H. Wang	東京大学	(Invited) Solution processed Infrared PbS Colloidal Quantum Dot / ZnO Nanowire Solar Cells	日本化学会第 98 春季年会	2018年3月
206	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	PbS quantum dot / ZnO nanowire solar cells operating in a wide range of the solar spectrum	日本化学会第 98 春季年会	2018年3月
207	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	(Invited) Short-wave infrared PbS colloidal quantum dot/ZnO nanowire solar cells	第五回新型太陽電池学術検討会, Beijing, China	2018年5月
208	Z. Jehl, D. Suchet, N. Miyashita, B. Behaghel, M. Giteau, A. Delamarre, B. M. F. Yu Jeco, J.-F. Guillemoles,	東京大学、 IPVF CNRS	Hot Carrier Extraction Using Energy Selective Contacts and Feedback on the Remaining Distribution	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6月

	and Y. Okada				
209	N. Miyashita, Y. He, T. Agui, H. Juso, T. Takamoto, and Y. Okada	東京大学、シ ャープ	Inverted growth of lattice-matched multijunction solar cells with 1.0 eV GaInNAsSb subcell	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6 月
210	Y. He, N. Miyashita, and Y. Okada	東京大学	Analysis And Control Of Deep-Level Defects In Dilute Nitride Semiconductor GaInNAsSb	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6 月
211	T. Nakamura, L. Zhu, M. Yoshita, M. Imaizumi, H. Akiyama, and Y. Okada	東京大学、 JAXA	Quantitative loss analysis of voltage output characteristics on multi-junction solar cells	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6 月
212	J. M. Amboy, B. M. F. Yu Jeco, H. Wang, T. Kubo, T. Kinoshita, Z. Jehl, Y. Shoji, N. Ahsan, H. Segawa, Y. Okada, and J. J. R. Balbin	東京大学、 Mapua University	Cesium lead halide perovskite quantum dot deposition on GaAs substrates by dip coating	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6 月
213	M. Asami, K. Toprasertpong, K. Watanabe, Y. Nakano, Y. Okada, and M. Sugiyama	東京大学	Comparison of effective carrier mobility between wire on well and multiple quantum well by time of flight measurement	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6 月
214	A. Delamarre, D. Suchet, N. Cavassilas, Z. Jehl, Y. Okada, M. Sugiyama, and J.-F. Guillemoles	東京大学、 IPVF CNRS	Resilient Intermediate Band Solar Cell using an electronic ratchet	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6 月
215	K. Toprasertpong, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学	Analytic Approach for Global Structure Optimization of Multiple Quantum Well Solar Cells	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6 月
216	H. Xu, A. Delamarre, J. Jia, B. M. F. Yu Jeco, K. Watanabe, Y. Okada, J.-F. Guillemoles, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 IPVF CNRS	Transport efficiency imaging in multi-junction solar cells by luminescence analysis	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6 月
217	W. Yanwachirakul, N. Miyashita, H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama,	東京大学	Carrier Collection Improvement in InGaAs/GaAsN Multiple Quantum Well Solar Cell with Flat Conduction Band	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6 月

	Y. Okada, and Y. Nakano				
218	L. Zhu, Y. Hazama, C. Kim, M. Slocum, Z. Bittner, S. Hubbard, and H. Akiyama	Sun Yat-sen University、 東京大学、 Rochester Institute of Technology	Experimental analysis of open-circuit voltage drop in quantum-dot solar cells via absolute electroluminescence measurement	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6 月
219	K. Kamide, T. Mochizuki, H. Akiyama, and H. Takato	産業技術総合 研究所、東京 大学	A solar cell enabling heat recovery without fast carrier extraction	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6 月
220	Y. Hazama, Y. Ishida, L. Zhu, C. Kim, S. Shin, and H. Akiyama	東京大学	Contactless measurement of pico-to-nanosecond dynamics of photovoltage: its utility and constraint	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6 月
221	M. Sugiyama	東京大学	(Invited) III-V Compound Semiconductor Nano- epitaxial Structures for high-efficiency Multi- junction Solar Cells	CIMTEC 2018, Perugia, Italy	2018年6 月
222	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Solution processed infrared PbS colloidal quantum dot / ZnO Nanowire solar cells	Grand Renewable Energy 2018, Yokohama	2018年6 月
223	T. Kubo, H. Wang, S. Nakao, H. Saito, S. Magaino, K. Takagi, T. Hasegawa, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学、 KISTEC	Colloidal quantum dot- based photovoltaics with highly transparent conductive oxides in the short-wave infrared region	10th Biannual Conference on Quantum dots, Toronto, Canada	2018年6 月
224	Y. Okada, A. Matsuoka, Y. Shoji, and R. Tamaki	東京大学	Control of Structural Ordering of InGaAs/AlGaAs Quantum Dots in MBE and Application to Intermediate Band Photovoltaics	The 4th edition of Nanotech France 2018 International Conference and Exhibition (Nanotech France 2018), Paris, France	2018年6 月
225	Y. Okada, Y. Shoji, R. Tamaki, and K. Yoshida	東京大学	Effect of Carrier Doping of InAs Quantum Dots on the Performance of QD Intermediate-Band Solar Cells	15th European Vacuum Conference (EVC-15), Geneva, Switzerland	2018年6 月
226	Y. Okada	東京大学	Quantum dot superlattice for application to high- efficiency photovoltaics	12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials (EXCON 2018), Nara	2018年7 月
227	宮下直也, 何軼倫, 安居院高明, 十楚博行,	東京大学、 シャープ	変換効率31%の逆積み GaInP/GaAs/GaInNAsSb 3接 合太陽電池	第15回「次世代の太 陽光発電システム」シ ンポジウム	2018年7 月

	高本達也, 岡田至崇				
228	何軼倫, 宮下直也, 岡田 至崇	東京大学	4 接合太陽電池応用に向けた GaInNAsSb 1.0 eV セルの欠陥解析と特性改善	第 15 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018 年 7 月
229	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	(Invited) Infrared PbS colloidal quantum dot / ZnO nanowire solar cells	22nd international conference on photochemical conversion and storage of solar energy, Hefei, China	2018 年 7 月
230	T. Kubo, H. Wang, and H. Segawa	東京大学	Quantum dot / wide-bandgap semiconductor hetero-junction interfaces engineering for efficient infrared solar cells	4D Material, Yonezawa	2018 年 8 月
231	A. Takahashi, K. Takahira, T. Fukuda, H. Wang, T. Kubo, H. Segawa, and N. Kamata	東京大学	Enhanced power conversion efficiency of PbS QD/ZnO solar cells by thermal annealing	4D Material, Yonezawa	2018 年 8 月
232	A. Delamarre, Z. Jehl, Y. Okada, M. Sugiyama, D. Suchet, N. Cavassilas, and J.-F. Guillemoles	東京大学、 IPVF CNRS	(Plenary) Electronic Ratchets as Necessary Stepping Stones for New PV Concepts	35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Brussels	2018 年 9 月
233	K. Toprasertpong, A. Delamarre, K. Watanabe, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学	Generalized Reciprocity Relation in p-i-n Junction Solar Cells	35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Brussels	2018 年 9 月
234	宮下直也, 何軼倫, 岡田 至崇	東京大学	逆積み格子整合 3 接合太陽電池における GaInNAsSb ボトムセル厚の検討	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018 年 9 月
235	玉置 亮, 庄司 靖, 岡田 至崇	東京大学、産 業技術総合研 究所	InAs 量子ドット太陽電池における赤外光照射下の発光スペクトル解析	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018 年 9 月
236	松林宏弥、 アーサン ナズム ル、金明玉 シヴァベルマン カ ライナザン、 岡田至崇	東京大学、 VIT University	同時スパッタ法による薄膜 CuGaS ₂ の作製	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018 年 9 月
237	M. Kim, N. Ahsan, Z. Jehl, H. Matsubayashi, K. Sivaperuman, and Y. Okada	東京大学、 VIT University	Dependence of Electrical Contact between CuGaS ₂ and Mo Thin Films on Sputtering Conditions	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018 年 9 月
238	浅見 明太、 トープラサートポン カシディット、 渡辺健太郎、 中野義昭、 岡田至崇、杉山正和	東京大学	Wire on Well 構造におけるキャリア移動度の測定と解析	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018 年 9 月

239	X. Hao, A. Delamarre, B. M. F. Yu Jeco, K. Watanabe, Y. Okada, J.-F. Guillemoles, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 IPVF CNRS	Transport efficiency imaging in multi-junction solar cells by luminescence analysis	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018 年 9 月
240	トープラサートポン カシディット, 中野義昭, 杉山正和	東京大学	実効移動度モデルを用いた 量子井戸太陽電池の設計	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018 年 9 月
241	王海濱, 中尾祥一郎, 久保貴哉, 斎藤英純, 馬飼野信一, 高木克彦, 長谷川哲也, 中崎城太郎, 瀬川浩司	東京大学、 KISTEC	PbS 量子ドット太陽電池の 短波長赤外領域での光電変 換特性の高性能化	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018 年 9 月
242	立間徹	東京大学	異方性プラズモニック粒子 を用いた PICS 固体光電変換 セルの開発	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018 年 9 月
243	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Solution processed infrared PbS colloidal quantum dot / ZnO nanowire solar cells	2018 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2018), Tokyo	2018 年 9 月
244	T. Kubo, H. Wang, S. Nakao, H. Saito, S. Magaino, K. Takagi, T. Hasegawa, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学、 KISTEC	PbS quantum dot solar cells giving high spectral sensitivity in the infrared region	2018 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2018), Tokyo	2018 年 9 月
245	N. Ahsan and Y. Okada	東京大学	(Keynote) Emerging semiconductors for next generation solar cells	International Conference on Innovative and Emerging Technologies for Farming, Energy, Environment, Water (ITsFEW), Vellore, India	2018 年 10 月
246	N. Ahsan and Y. Okada	東京大学	(Invited) Emerging semiconductors-Highly Mismatched Alloys - for solar cells	International Workshop on Material Technology and Applications (IWMTA), Vellore, India	2018 年 10 月
247	岡田至崇	東京大学	化合物半導体量子ドットマ ルチバンド太陽電池 (招待 講演)	第 8 回 CSJ 化学フェス タ 2018	2018 年 10 月
248	M. Sugiyama	東京大学	(Invited) A global network of hydrogen for	French-Japanese symposium on solar	2018 年 10 月

			disruptive installation of renewable energy	energy, Perpignan, France	
249	T. Kubo, H. Wang, and H. Segawa	東京大学	Highly infrared-transparent oxides and ZnO nanowires for PbS colloidal quantum dot-based solar cells	4th E-MRS & MRS-J Bilateral symposium, Crete, Greece	2018年10月
250	玉置亮, 庄司靖, Laurent Lombez, Jean-François Guillemoles, 岡田 至崇	東京大学、産業技術総合研究所、IPVF CNRS	InAs 量子ドット中間バンド型太陽電池における絶対値発光分光	第37回電子材料シンポジウム	2018年10月
251	N. Ahsan, S. Kalainathan, and Y. Okada	東京大学、VIT University	(Invited) Multi-bandgap absorption in chalcopyrite CuGaS ₂ by transition metal doping	International Conference on Catalysis Science, Engineering, and Technology, Plasma Science and Technology, Stockholm, Sweden	2018年11月
252	H. Matsubayashi	東京大学	Characterization of Sputtered CuGaS ₂ Thin Films for Solar Cells	The 7th Korea-Japan Joint Seminar on PV, Seoul, Korea	2018年11月
253	M. Kim	東京大学	Majority Carrier Transport between CuGaS ₂ and Mo Thin Films for Solar Cell Application	The 7th Korea-Japan Joint Seminar on PV, Seoul, Korea	2018年11月
254	H. Wang, S. Nakao, T. Kubo, H. Saito, S. Magaino, K. Takagi, T. Hasegawa, J. Nakazaki, and H. Segawa,	東京大学、KISTEC	High efficiency infrared PbS colloidal quantum dot solar cells with 50% EQE at 1.55 μ m	MRS Fall Meeting 2018, Boston, USA	2018年11月
255	T. Tatsuma	東京大学	(Invited) Plasmonic nanomaterials: applications to photovoltaic, photocatalytic, and chiral materials and devices	The 8th International Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference, Pattaya, Thailand	2018年11月
256	N. Ahsan, S. Kalainathan, and Y. Okada	東京大学	(Plenary) Next generation solar cell technology	9th annual symposium on Interdisciplinary science and technology for safety and quality of life, Tsukuba	2018年12月
257	M. Sugiyama	東京大学	(Invited) III-V semiconductor quantum well and wire structures for boosting the efficiency of solar cells	Asia-pacific Solar Research Conference, Sydney, Australia	2018年12月
258	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Efficient infrared PbS quantum dot solar cells toward the bottom subcell of tandem solar cells	IPEROP-19, Kyoto	2019年1月

259	H. -H. Huang, K. Toprasertpong, A. Delamarre, J. Z. Sun, K. Watanabe, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Effective mobility map for InGaP/InGaP multiple quantum-well-based solar cells	SPIE Photonics West 2019, San Francisco, USA	2019年2 月
260	Y. Hazama, Y. Ishida, L. Zhu, C. Kim, S. Shin, and H. Akiyama	東京大学	Monitoring minority- carrier transport and recombination in photovoltaic devices in real time	SPIE Photonics West 2019, San Francisco, USA	2019年2 月
261	K. Kamide, T. Mochizuki, H. Akiyama, and H. Takato	産業技術総合 研究所、 東京大学	A concept of nonequilibrium solar cell - heat recovery solar cell	SPIE Photonics West 2019, San Francisco, USA	2019年2 月
262	樗木悠亮、 庄司靖、宮下直也、 何軼倫、岡田至崇	東京大学、 産業技術総合 研究所	高倍集光下における GaSb/GaAs 量子ナノ構造太 陽電池の特性	第66回応用物理学会 春季学術講演会	2019年3 月
263	M. Kim, N. Ahsanm H. Matsubayashi, Z. Jehl, S. Kalainathan, and Y. Okada	東京大学、 VIT University	Optical Properties of Cr doped CuGaS ₂ Thin Films	第66回応用物理学会 春季学術講演会	2019年3 月
264	H. Huang, K. Toprasertpong, K. Watanabe, D. Amaury, and M. Sugiyama	東京大学	Carrier Transport Modeling in Multiple Quantum Well Based InGaP Solar Cells	第66回応用物理学会 春季学術講演会	2019年3 月
265	渡辺健太郎、 福谷貴史、 ソダーバンル ハッ サネット、 中野義昭、杉山正和	東京大学	表面活性化接合による GaAs//InGaAs 2 接合太陽電 池の開発	第66回応用物理学会 春季学術講演会	2019年3 月
266	久保貴哉、王海濱、 瀬川浩司	東京大学	コロイド量子ドットを用い た赤外光電変換と超高効率 太陽電池への可能性(招待講 演)	第66回応用物理学会 春季学術講演会	2019年3 月
267	王海濱、 César Gagliardi、 久保貴哉、 岡田至崇、瀬川浩司	東京大学	PbS 量子ドット/ZnO ナノワ イヤ太陽電池のヘテロ接合 界面修飾による開放電圧の 向上	第66回応用物理学会 春季学術講演会	2019年3 月
268	H. Wang, S. Nakao, T. Kubo, H. Saito, S. Magaino, K. Takagi, T. Hasegawa, J. Nakazaki, and H. Segawa,	東京大学、 KISTEC	Development of high efficiency infrared PbS QD/ZnO NW solar cells toward the bottom subcell of multi-junction solar cells	日本化学会第99春季 年会	2019年3 月
269	H. Wang, A. Higo, Y. Mita, T. Kubo, and H. Segawa	東京大学	PbS quantum dot / ZnO nanowires hybrid test structures for infrared photodetector	32nd IEEE International conference on Microelectronic Test structures, Fukuoka	2019年3 月
270	T. Kubo, H. Wang, S. Nakao, N. Miyashita,	東京大学	PbS QD/ZnO nanowire solar cells for series- connected triple-junction	MRS Spring Meeting 2019, Phoenix, USA	2019年4 月

	Y. Okada, T. Hasegawa, J. Nakazaki, and H. Segawa		solar cells with a power conversion efficiency of approximately 30%		
271	Y. Okada	東京大学	(Invited) Optimizing the structure of quantum dot intermediate-band solar cells	30th World Nano Conference (NANO30), Zurich, Switzerland	2019年5月
272	N. Miyashita, Y. He, N. Ahsan, and Y. Okada	東京大学	Effect of Annealing on The Bottom Cell in GaInP/GaAs/GaInNAsSb Triple Junction Solar Cells by MBE/MOCVD Hybrid Growth	Compound Semiconductor Week 2019 (CSW2019), Nara	2019年5月
273	Y. Oteki, Y. Shoji, N. Miyashita, Y. He, and Y. Okada	東京大学、 産業技術総合 研究所	GaSb/GaAs quantum nanostructures for intermediate band solar cell under high sunlight concentration	Compound Semiconductor Week 2019 (CSW2019), Nara	2019年5月
274	H.-H. Huang, K. Toprasertpong, A. Delamarre, K. Watanabe, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Numerical demonstration of trade-off between carrier confinement effect and carrier transport for multiple-quantum-well based high-efficiency InGaP solar cells	Compound Semiconductor Week 2019 (CSW2019), Nara	2019年5月
275	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	(Invited) High efficiency infrared PbS QD solar cells toward the bottom subcell of tandem solar cells	The 6th Conference on Science and Technology of Emerging Solar Energy Materials, Beijing, China	2019年5月
276	T. Harada, K. Takauchi, N. Miyashita, T. Ikari, and A. Fukuyama	宮崎大学, 東京大学	Effect of strong sunlight illumination on Hall mobility in solar cell materials for concentrated multi-junction solar cells	The European Materials Research Society Spring Meeting 2019	2019年5月
277	T. Nakamura, R. Iwanaga, T. Aki, A. Watanabe, T. Ikari, M. Sugiyama, and A. Fukuyama	宮崎大学, 東京大学	Role of strain relaxation layer on carrier recombination and escaping lifetimes in superlattice solar cell structures	The European Materials Research Society Spring Meeting 2019	2019年5月
278	Y. Okada	東京大学	(Invited) Quantum Dot Photovoltaics: Challenges Towards 50% Efficiency	10th International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT2019), Marina Bay Sands, Singapore	2019年6月
279	Y. Okada, N. Miyashita, Y. Oteki, and Y. Shoji	東京大学、産 業技術総合研 究所	High-Efficiency InAs-InGaAs Quantum Dash Solar Cells Developed Through Current Constraint	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Chicago,	2019年6月

			Engineering	USA	
280	T. Nakamura, M. Imaizumi, H. Akiyama, and Y. Okada	東京大学、 JAXA	Effect of SRH recombination rate coefficient on internal luminescence efficiency and conversion efficiency of space solar cells	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Chicago, USA	2019年6月
281	L. Zhu, Y. Hazama, C. Kim, and H. Akiyama	東京大学	Quantum-Dot Intermediate-band Solar Cell used as Bottom Cell	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Chicago, USA	2019年6月
282	Y. Hazama, Y. Ishida, L. Zhu, C. Kim, S. Shin, and H. Akiyama	東京大学	Femtosecond-laser photoemission spectroscopy for ultrafast photovoltage dynamics: limitations and possibilities	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Chicago, USA	2019年6月
283	Y. Okada	東京大学	(Plenary) Quantum Dot Intermediate Band Photovoltaics: Steps Towards Higher Efficiency	6th International Conference on Nanotechnology, Nanomaterials & Thin Films for Energy Applications (NANOENERGY2019), Kuala Lumpur, Malaysia	2019年7月
284	N. Ahsan	東京大学	(Invited) Current issues in thin-film intermediate band solar cells	6th International Conference on Nanotechnology, Nanomaterials & Thin Films for Energy Applications (NANOENERGY2019), Kuala Lumpur, Malaysia	2019年7月
285	N. Miyashita	東京大学	(Invited) Study of GaInP/GaAs/GaInNAsSb triple junction solar cells: Effect of hydrogen incorporation to GaInNAsSb in MOCVD/MBE hybrid growth	Asia Pacific Society for Materials Research 2019 Annual Meeting (APSMR2019), Sapporo	2019年7月
286	Y. Oteki, Y. Shoji, N. Miyashita, and Y. Okada	東京大学、 産業技術総合 研究所	Effect of Ga deposition rate on GaAsSb/GaAs Quantum Dots formation	Asia Pacific Society for Materials Research 2019 Annual Meeting (APSMR2019), Sapporo	2019年7月
287	M. Giteau, K. Watanabe, N. Miyashita, H. Sodabanlu, S. Collin, J.-F. Guillemoles, and Y. Okada	東京大学、 IPVF C2N CNRS	Maximizing the Electron Temperature in Hot-Carrier Solar Cells	21st International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON 21), Nara	2019年7月
288	浅見明太, 渡辺健太郎,	東京大学	波状多重量子井戸構造を用いた多接合太陽電池の高効	第16回「次世代の太陽光発電システム」シ	2019年7月

	中野義昭, 岡田至崇, 杉山正和		率化	ンポジウム	
289	Y. Okada	東京大学	(Invited) Progress and Approaches to High-Efficiency Intermediate Band Photovoltaics	7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano 2019), Kobe	2019年9月
290	R. Tamaki, Y. Shoji, and Y. Okada	東京大学	Low Temperature Absolute Photoluminescence Spectroscopy on InAs Quantum Dot Solar Cells	7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano 2019), Kobe	2019年9月
291	N. Miyashita and Y. Okada	東京大学	Strain Compensated Dilute Nitride MQWs as New 1 eV Solar Cell Absorber	7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano 2019), Kobe	2019年9月
292	Y. Oteki, N. Miyashita, Y. Shoji, and Y. Okada	東京大学、 産業技術総合 研究所	Energy Levels of Type-II GaAsSb/GaAs Quantum Dots for Intermediate Band Solar Cell	7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano 2019), Kobe	2019年9月
293	M. Sugiyama	東京大学	(Keynote) Efficiency enhancement of semiconductor photovoltaic structures from power generation to solar-fuel production,	IUMRS-ICA, Perth	2019年9月
294	A. Delamarre, J.-F. Guillemoles, H. Sodabanlu, K. Watanabe, and M. Sugiyama	東京大学、 IPVF CNRS	MIS Structures for Solar Cells Perimeter Passivation	36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Marseille, France	2019年9月
295	H. Xu, K. Watanabe, Y. Nakano, A. Delamarre, J.-F. Guillemoles, and M. Sugiyama	東京大学、 IPVF CNRS	Analysis of Spatial Inhomogeneity in Multi-Junction Solar Cells Using Transport Efficiency Mapping	36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Marseille, France	2019年9月
296	玉置亮, 庄司靖, 岡田至崇	東京大学、 産業技術総合	InAs 量子ドット太陽電池における擬フェルミレベル分	第80回応用物理学会秋季学術講演会	2019年9月

		研究所	裂の集光特性		
297	金 明玉, アーサン ナズムル, イエル リー・カ オ・ザッカーリ, デイルマライサミ ログ, シブアペルマン カ ライナザン, 岡田 至崇	東京大学、 VIT University、 IREC	CuGaS ₂ 薄膜太陽電池におけ るバッファ層の効果	第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会	2019 年 9 月
298	浅見明太, 渡辺健太郎, 中野義昭, 岡田至崇, 杉山正和	東京大学	Ge ベース多接合太陽電池の 高効率化に向けた InGaAs/GaAs/GaAsP 波状量 子井戸構造の作製と評価	第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会	2019 年 9 月
299	樗木悠亮, 庄司靖, 宮下直也, 岡田至崇	東京大学、 産業技術総合 研究所	GaAsSb/GaAs 量子ドット形 成における成長速度の影響	第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会	2019 年 9 月
300	福谷貴史, 渡辺健太郎, ソダーバンル ハッ サネット, 中野義昭, 杉山正和	東京大学	表面活性化接合を用いた GaAs//InGaAs 2 接合型太陽 電池の開発	第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会	2019 年 9 月
301	黄祥鴻, トープラサートポン カシディット, 渡辺健太郎, 杉山正和, 中野義昭	東京大学	量子井戸太陽電池における 変換効率制限要因の考察	第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会	2019 年 9 月
302	王海濱, 久保貴哉, 瀬川浩司	東京大学	PbS 量子ドット/ZnO ヘテロ 接合太陽電池: 平坦型とナ ノワイヤ型の比較	第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会	2019 年 9 月
303	N. Ahsan	東京大学	(Keynote) Prospects in thin-film intermediate band Solar Cells	Indian Summit 2019, Indianapolis, USA	2019 年 10 月
304	玉置亮, 庄司靖, 岡田至崇	東京大学、 産業技術総合 研究所	InAs 量子ドット太陽電池に おける絶対値発行分光に基 づく擬フェルミレベル分裂 の解析	第 38 回電子材料シン ポジウム	2019 年 10 月
305	浅見明太, 渡辺健太郎, 中野義昭, 岡田至崇, 杉山正和	東京大学	波状量子井戸と平坦超格子 における電流密度の比較	第 38 回電子材料シン ポジウム	2019 年 10 月
306	H. Wang, S. Nakao, T. Hasegawa, T. Kubo, and H. Segawa	東京大学	Enhanced short-circuit current in PbS quantum dot solar cells with highly infrared transparent window layers	11th International Symposium on Transparent Oxide and Related Materials for Electronics and Optics (TOEO-11), Nara	2019 年 10 月
307	T. Tatsuma	東京大学	(Invited) Energetic hole ejection involved in plasmon-induced charge separation: local oxidation and an application to near IR	236th ECS Meeting (Atlanta, USA)	2019 年 10 月

			photovoltaics		
308	W. Yanwachirakul, T. Nakamura, K. Watanabe, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 JAXA	Effect of Number of Multiple Quantum Well to Radiative and Non- radiative Recombinations	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 29), Xi' an, China	2019年11 月
309	K. Watanabe, H. Xu, R. Yokota, H. Sodabanlu, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学	Absolute Electroluminescence Characterization for InGaAs PV Cell Lattice- Matched to InP Substrate	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 29), Xi' an, China	2019年11 月
310	T. Fukutani, K. Watanabe, H. Sodabanlu, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学	Development of GaAs//InGaAs 2-junction Solar Cell with Surface Activated Bonding	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 29), Xi' an, China	2019年11 月
311	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	PbS quantum dot / ZnO nanowire solar cells with high infrared spectral sensitivity	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 29), Xi' an, China	2019年11 月
312	T. Tatsuma	東京大学	(Invited) Plasmonic hole ejection and photovoltaic applications	International Workshop on Advanced Nanoscience and Nanomaterials 2019 (IWANN2019), Chonburi, Thailand	2019年11 月
313	H. Wang, T. Kubo, C. Gagliardi, Y. Okada, and H. Segawa	東京大学	Enhance open-circuit voltage of PbS quantum dot solar cells with organic surface passivated ZnO nanowires	MRM, Yokohama	2019年12 月
314	T. Kubo, H. Wang, N. Miyashita, Y. Okada, and H. Segawa	東京大学	Solution-processed colloidal quantum dot- based infrared photovoltaics toward ultra-high efficiency	MRM, Yokohama	2019年12 月
315	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Enhance infrared photocurrent of PbS quantum dot solar cells toward the bottom subcell of multi-junction solar cells	Perovskite and Organic Photovoltaics and Optoelectronics (IPEROP20), Tsukuba	2020年1 月
316	R. Tamaki, Y. Shoji, L. Lombez, J.-F. Guillemoles, and Y. Okada	東京大学、 産業技術総合 研究所、 IPVF CNRS	(Invited) Quasi-Fermi level splitting in InAs quantum dot solar cells from photoluminescence measurements	SPIE Photonics West 2020, San Francisco, United States	2020年2 月
317	M. Giteau, K. Watanabe, N. Miyashita, H. Sodabanlu, D. Suchet, S. Collin, J.-F. Guillemoles, and Y. Okada	東京大学、 IPVF C2N CNRS	Designing better absorbers for hot-carrier solar cells	SPIE Photonics West 2020, San Francisco, United States	2020年2 月

318	H. M. Esmailpour, M. Giteau, A. Delamarre, F. Gibelli, D. T. Nguyen, N. Cavassilas, Y. Okada, J.-F. Guillemoles, L. Lombez, and D. Suchet	IPVF C2N CNRS、 東京大学	Advanced analysis for hot-carriers photoluminescence spectrum	SPIE Photonics West 2020, San Francisco, United States	2020年2 月
319	H. Xu, H. Sodabanlu, M. M. Wilkins, A. Delamarre, T. J. Wijaya, K. Watanabe, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 University of Ottawa、 C2N CNRS	Analysis of perimeter recombination on multijunction solar cells using luminescence imaging	SPIE Photonics West 2020, San Francisco, United States	2020年2 月
320	M. M. Wilkins, M. Asami, H.-H. Huang, K. Hinzer, and M. Sugiyama	University of Ottawa、 東京大学	p-i-p structure for time- of-flight measurements of effective carrier mobility in multi- quantum-well structures	SPIE Photonics West 2020, San Francisco, United States	2020年2 月
321	H.-H. Huang, K. Toprasertpong, M. M. Wilkins, K. Hinzer, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学、 University of Ottawa	Trade-off study on the radiative efficiency and carrier transport of multiple-quantum-well solar cells	SPIE Photonics West 2020, San Francisco, United States	2020年2 月
322	玉置亮, 庄司靖, Jean-François Guillemoles, 岡田至崇	東京大学、 産業技術総合 研究所、 IPVF CNRS	InAs 量子ドット太陽電池に おける絶対値発光分光：電 圧バイアス依存性	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020年3 月
323	樗木悠亮, 庄司靖, 宮下直也, 岡田至崇	東京大学、 産業技術総合 研究所	GaAs _x Sb _{1-x} /GaAs 量子ドット の組成制御によるキャリア の長寿命化	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020年3 月
324	L. Thirumalaisamy, N. Ahsan, S. Kalainathan, S. Kunjithapatham, and Y. Okada	東京大学、 VIT University、 Madurai Kamaraj University	Effect of Sn doping in CuGaS ₂ thin films deposited by chemical spray pyrolysis	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020年3 月
325	J. R. Qiu, N. Ahsan, L. Thirumalaisamy, V. Karthikeyan, M. Kim, S. Kalainathan, and Y. Okada	東京大学、 TUM、 VIT University	Study of Te Substituted CuGaS ₂ (CuGa(S, Te) ₂) Thin Films Deposited by Chemical Pyrolysis	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020年3 月
326	M. Kim, N. Ahsan, N. Miura, Z. Jehl, and Y. Okada	東京大学、 IREC	Controlling Optical Properties of Sputtered CuGaS ₂ by Sulfurization	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020年3 月
327	三浦七輝, 金明玉, アーサン ナズムル, 岡田至崇	東京大学	熱蒸着した n-ZnS 薄膜の物 性評価	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020年3 月
328	W. Yanwachirakul, T. Nakamura,	東京大学, JAXA	Effect of Compressive Strain in Multiple	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020年3 月

	M. Hino, H. Sodabanlu, K. Watanabe, Y. Nakano, and M. Sugiyama		Quantum Well Solar Cell		
329	日野眞生, ヤンワチラーケン ワラーコン, 渡辺健太郎, 中野義昭, 杉山正和	東京大学	多重量子井戸を用いた GaAs 太陽電池における発光効率 の向上	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020 年 3 月
330	浅見明太, 横田莉子, 渡辺健太郎, 中野義昭, 岡田至崇, 杉山正和	東京大学	波状超格子太陽電池におけ る発光特性と電流電圧特性 の関係	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020 年 3 月
331	福谷貴史, 渡辺健太郎, ソダーバンル ハッ サネット, 中野 義昭, 杉山 正和	東京大学	表面活性化接合を用いた InGaP/GaAs//InGaAsP 3 接 合型太陽電池の開発	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020 年 3 月
332	高橋晃宏, 王海濱, 福田武司, 鎌田憲彦, 久保貴哉, 瀬川浩司	東京大学	PbS 量子ドット/ZnO 太陽電 池特性に対する量子ドット 層熱処理の影響	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020 年 3 月
333	H. Wang, C. Gagliardi, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Enhancement of PbS quantum dot solar cell performance with surface passivated ZnO nanowires	日本化学会第 100 春年 会	2020 年 3 月
334	Y. Xiao, H. Wang, T. Kubo, and H. Segawa	東京大学	Solution-processed AgBiS ₂ nanocrystal / ZnO nanowire heterojunction solar cells	日本化学会第 100 春年 会	2020 年 3 月
335	S. Yagi, Y. Sato, N. Ueyama, T. Suzuki, K. Osada, Y. Okada, and H. Yaguchi	埼玉大学	(Invited) Optical and Structural Characterization of GaAs:N δ -Doped Superlattices Grown by Molecular Beam Epitaxy	5th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano2015), Hsinchu, Taiwan	2015 年 9 月
336	S. Mori, S. Yagi, M. Orihara, K. Takamiya, and H. Yaguchi	埼玉大学	Lateral alignment of InN nano-scale dots grown on 4H-SiC(0001) vicinal substrates	11th International Conference on Nitride Semiconductors	2015 年 9 月
337	T. Ikarashi, M. Orihara, S. Yagi, S. Kuboya, R. Katayama, and H. Yaguchi	埼玉大学	Epitaxial relationship of GaN grown on GaAs (110) by RF-molecular beam epitaxy	11th International Conference on Nitride Semiconductors	2015 年 9 月
338	吉川洋生, 八木修平, 矢口裕之	埼玉大学	第一原理計算による GaAs:N δ ドープ超格子における光 学遷移に関する研究	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015 年 9 月

339	宮崎貴史、 八木修平、 矢口裕之	埼玉大学	第一原理計算による InAsN 混晶の伝導帯の解析	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015 年 9 月
340	八木修平	埼玉大学	希釈窒化物混晶の結晶成長 制御とマルチバンド太陽電 池への応用	第 11 回量子ナノ材料 セミナー	2015 年 11 月
341	米倉成一、 高宮健吾、 八木修平、 上田修、矢口裕之	埼玉大学、 金沢工業大学	レーザー照射による GaInNAs 混晶半導体の発光 効率への影響	第 77 回応用物理学会 秋季学術講演会	2016 年 9 月
342	T. Suzuki, S. Yagi, Y. Okada, and H. Yaguchi	埼玉大学, 東京大学	Effect of Carrier Blocking Layer on Carrier Collection in Intermediate-Band Solar Cells using GaAs:N δ - Doped Superlattice	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 26), Singapore	2016 年 10 月
343	八木修平	埼玉大学	窒素 δ ドーピングによる希 釈窒化物混晶の成長と評価	第 12 回量子ナノ材料 セミナー	2016 年 11 月
344	S. Yagi , Y. Okada, and H. Yaguchi	埼玉大学, 東京大学	(Invited) Properties of Dilute Nitride Pseudo- Alloys Grown Using a Nitrogen Delta-Doping Technique	SPIE Photonics West 2017, San Francisco, USA	2017 年 1 月
345	梅田峻平, 八木修平, 宮下直也, 岡田至崇, 矢口裕之	埼玉大学、 東京大学	1 eV 帯 InGaAs:N δ ドー プ超格子の作製	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017 年 3 月
346	加藤諒、八木修平、 岡田至崇、矢口裕之	埼玉大学、 東京大学	n 型 GaAs:N δ ドープ超格子 の電気的特性評価	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017 年 3 月
347	R. Kato, S. Yagi, Y. Okada, and H. Yaguchi	埼玉大学, 東京大学	Electrical Characterization of N- Type GaAs:N δ -Doped Superlattices	Compound Semiconductor Week 2017 (CSW 2017), Berlin, Germany	2017 年 5 月
348	宮島数喜, 八木修平, 庄司靖, 岡田至崇, 矢口裕之	埼玉大学、 東京大学	希釈窒化物半導体中の窒素 原子配置によるバンドギャ ップへの影響	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017 年 9 月
349	高橋渉、高宮健吾、 八木修平、伊藤隆、 秋山英文、矢口裕之	埼玉大学、 東京大学	GaN 混晶のアップコンバー ジョン発光	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017 年 9 月
350	S. Yagi, Y. Okada, and H. Yaguchi	埼玉大学、 東京大学	(Invited) Nanostructured Dilute Nitride Alloys for High-Efficiency Solar Cells	International Symposium on Novel Energy Nanomaterials, Catalysts and Surfaces for Future Earth (NENCS 2017), Tokyo	2017 年 10 月
351	K. Miyajima, S. Yagi, Y. Shoji, Y. Okada, and H. Yaguchi	埼玉大学、 東京大学	Influence of Nitrogen Atomic Arrangement in GaAsN Alloys on Band Gap Energy	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 27), Otsu	2017 年 11 月
352	H. Yoshikawa, S. Yagi, and H. Yaguchi	埼玉大学	First-Principles Study of Optical Transitions in Gallium Arsenide: Nitrogen Delta-Doped	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-	2017 年 11 月

			Superlattices	27), Otsu	
353	S. Umeda, S. Yagi, N. Miyashita, Y. Okada, and H. Yaguchi	埼玉大学、 東京大学	Growth of InGaAs:N δ -Doped Superlattices for Multi-Junction Solar Cells	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6月
354	塚原悠太、 八木修平、矢口裕之	埼玉大学	第一原理計算による GaAsN 混晶中の N 原子配置のバンド構造への影響の検討	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018年9月
355	M. D. Haque, N. Kamata, A. Z. M. T. Islam, Md. Julkarnain, S. Yagi, H. Yaguchi, and Y. Okada	Hajee Mohammad Danesh Science and Technology University、 埼玉大学、 University of Rajshahi、 東京大学	Optical Characterization of Nonradiative Centers in GaAs:N δ -Doped Superlattices by Using Below-Gap Excitation Light	International Conference on Computer, Communication, Chemical, Materials and Electronic Engineering (IC4ME2), Rajshahi	2019年6月
356	H. Yaguchi, W. Takahashi, K. Takamiya, S. Yagi, N. Kamata, Y. Hazama, and H. Akiyama	埼玉大学、 東京大学	Two-Wavelength Excited Photoluminescence Study of Upconversion Photoluminescence from GaPN alloys	13th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS13), Bellevue	2019年7月
357	N. Kamata, K. Nagata, Md. D. Haque, Z. Honda, S. Yagi, H. Yaguchi, and Y. Okada	埼玉大学、 Hajee Mohammad Danesh Science and Technology University、 東京大学	Optical Detection of Nonradiative Recombination Levels via Intermediate Band in GaAs:N δ -Doped Superlattices	30th International Conference on Defects in Semiconductors (ICDS30)	2019年7月
358	S. Md. Amil, A. Shiroma, S. Yagi, K. Takamiya, and H. Yaguchi	埼玉大学	Photoluminescence Intensity Change of GaPN by Laser Irradiation	7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano 2019), Kobe	2019年9月
359	米野龍司、 宮下直也、 岡田至崇、 八木修平、 矢口裕之	埼玉大学、 東京大学	InGaAs:N δ ドープ超格子の電気特性評価	第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会	2019年9月
360	永田航太、 鎌田憲彦、 八木修平、矢口裕之	埼玉大学	窒素 δ -ドープ GaAs 超格子の二波長励起フォトルミネッセンス法によるキャリア再結合準位評価	第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会	2019年9月
361	M. Yamaguchi, T. Takamoto, K. Araki, and N. Kojima	豊田工大	(Invited) Recent Results for Concentrator Photovoltaics in Japan	2015 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2015), Sapporo	2015年9月

				Convention Center, Japan	
362	O. Elleuch, L. Wang, H. Kowaki, K.-H. Lee, K. Ikeda, T. Aihara, N. Kojima, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi	豊田工大	Study of the recombination center in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-25), Busan, Korea	2015年11月
363	K.-H. Lee, K. Ikeda, O. Elleuch, L. Wang, K. Araki, N. Kojima, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi	豊田工大	Criteria of 1-eV InGaAsN Solar Cell for Achieving over 45% Multi-Junction Solar Cells	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-25), Busan, Korea	2015年11月
364	L. Wang, O. Elleuch, N. Kojima, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi	豊田工大	In-diffusion of Nitrogen in GaAsN films after the soft-annealing process	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016年5月
365	O. Elleuch, L. Wang, K.-H. Lee, N. Kojima, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi	豊田工大	Acceptors related to N-H in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016年5月
366	O. Elleuch, L. Wang, K.-H. Lee, K. Ikeda, N. Kojima, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi	豊田工大	N-H related defect playing the role of acceptor in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18), Nagoya	2016年8月
367	O. Elleuch, H. Kowaki, N. Kojima, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi	豊田工大	Study of recombination center in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016年10月
368	R. Katayama, N. Kojima, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi	豊田工大	N incorporation at the surface step in CBE grown GaAsN film on GaAs(111) vicinal substrate	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016年10月
369	O. Elleuch, N. Kojima, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi	豊田工大	Effect of Substrate Off-Angle on Defects in GaAsN Buffer Layer	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017年7月
370	O. Elleuch, Y.-C. Wang, K.-H. Lee, M. A. Bareque, K. Araki, N. Kojima, Y. Ohshita, and	豊田工大	Defects in GaAsN Buffer Layer Grown by Chemical Beam Epitaxy	15th International Conference on Advanced Materials (IUMRS-ICAM2017), Kyoto	2017年8月

	M. Yamaguchi				
371	O. Elleuch, Y.-C. Wang, N. Kojima, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi	豊田工大	Effect of (In)GaAsN buffer layer on dislocation density for lattice-mismatched hetero-epitaxial (In)GaAs film	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 27), Otsu	2017年11 月
372	M. Yamaguchi, L. Zhu, H. Akiyama, Y. Kanemitsu, K.-H. Lee, K. Araki, and N. Kojima	豊田工大	Analysis for Non- Radiative Recombination in Quantum Dot Solar Cells and Materials	35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU- PVSEC), Brussels	2018年9 月
373	M. Yamaguchi, L. Zhu, K.-H. Lee, H. Akiyama, Y. Kanemitsu, K. Araki, and N. Kojima	豊田工大	Analysis for Non- radiative Recombination in Quantum Dot Solar Cells and Materials	The 7th Korea-Japan Joint Seminar on PV	2018年11 月
374	M. Yamaguchi, K.-H. Lee, K. Araki, N. Kojima, and Y. Ohshita	豊田工大	Analysis for non- radiative recombination loss in InGaN and InGaAsN solar cells for multi- junction applications	International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2018)	2018年11 月
375	A. Kusaba, Y. Kangawa, S. Krukowski, T. Kimura, T. Tanikawa, R. Katayama, T. Matsuoka, and K. Kakimoto	九州大学	Surface Energy and Facet Formation in InN films grown by Pressurized- Reactor MOVPE	第34回電子材料シン ポジウム	2015年7 月
376	寒川義裕	九州大学	窒化物半導体結晶成長用基 板表面の第一原理計算によ る考察（招待講演）	日本学術振興会「ワイ ドギャップ半導体光・ 電子デバイス第162委 員会」第94回研究会	2015年7 月
377	A. Kusaba, Y. Kangawa, S. Krukowski, and K. Kakimoto	九州大学	Relationship between stability of facet surfaces and incorporation of zinc- blende phase in InN during pressurized reactor MOVPE: A theoretical approach	5th European Conference on Crystal Growth (ECCG-5)	2015年9 月
378	寒川義裕、柿本浩一	九州大学	InN 加圧 MOVPE におけるフ ァセット面制御によるポリ タイプ制御（招待講演）	第45回結晶成長国内 会議	2015年10 月
379	A. Kusaba, Y. Kangawa, Y. Honda, H. Amano, K. Kakimoto	九州大学	Ab initio-based approach to surface reconstruction on InN(0001) during induced-pressure MOVPE	The 6th International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN-6)	2015年11 月
380	寒川義裕	九州大学	半導体材料の結晶成長～表 面反応に関して第一原理計 算と熱力学解析の視点から ～（招待講演）	第29期CMMフォーラ ム本例会	2016年1 月

381	H. Valencia, Y. Kangawa, K. Kakimoto	九州大学	MOCVD and CBE of GaAs _{1-x} N _x modeled by ab initio stabilities of (100) surfaces under As ₂ , H ₂ , and N ₂	18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18), Nagoya	2016年8月
382	Y. Kangawa	九州大学	(Invited) First Principles Based Simulation for Compound Semiconductor Growth Processes	2016 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2016)	2016年9月
383	Y. Kangawa	九州大学	Ab Initio-Based Approach to Crystal Growth of Nitride Semiconductors: Contribution of Growth Orientation and Surface Reconstruction	International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2016)	2016年10月
384	高本達也	シャープ	超高効率太陽電池の技術動向	第7回薄膜太陽電池セミナー	2016年3月
385	高本達也	シャープ	III-V化合物多接合型太陽電池におけるトンネル接合について	タンデム太陽電池研究会 第2回会合	2018年12月
386	Y. Yokoyama, T. Haraguchi, T. Yamauchi, H. Suzuki, T. Ikari, and A. Fukuyama	宮崎大学	Control of thickness and residual impurity inclusion of GaAsN thin films grown by an atomic layer epitaxy	第34回電子材料シンポジウム	2015年7月
387	宇宿孝則、中村翼、 松落高輝、 倉留弘憲、 相原健人、 トープラサートポン カシディット、 藤井宏昌、 杉山正和、 福山敦彦、碓哲雄	宮崎大学、 東京大学	矩形および階段状超格子太陽電池におけるミニバンド形成の評価	第76回応用物理学会 秋季学術講演会	2015年9月
388	横山祐貴、 前田幸治、鈴木秀俊、 碓哲雄、福山敦彦	宮崎大学	ALE法を用いたGaAsN薄膜成長におけるSiドーピングが電気的特性へ及ぼす影響	第76回応用物理学会 秋季学術講演会	2015年9月
389	原田一徹、 鈴木秀俊、福山敦彦	宮崎大学	MBE法によるSi(111)基板上のGaAs成長と結晶性評価	第45回結晶成長国内 会議	2015年10月
390	村上匠、中村翼、 松落高輝、 杉山正和、 中野義昭、碓哲雄、 福山敦彦	宮崎大学、 東京大学	量子井戸型太陽電池における熱脱出および非発光再結合に必要な活性化エネルギーの積層数依存性	第7回半導体材料・デ バイスフォーラム	2015年11月
391	武田秀明、中村翼、 松落高輝、村上匠、 杉山正和、 中野義昭、碓哲雄、 福山敦彦	宮崎大学、 東京大学	レーザー変調反射分光法を用いた超格子太陽電池の内部電界がミニバンド幅に与える影響評価	第7回半導体材料・デ バイスフォーラム	2015年11月
392	T. Nakamura, K. Matsuoichi, T. Murakami, H. Suzuki, K. Toprasertpong, M. Sugiyama,	宮崎大学、 東京大学	Effect of internal electric field on the miniband formation of multi quantum well solar cell structures investigated by a	American Vacuum Society 62th Int. Symposium & Exhibition	2015年11月

	Y. Nakano, T. Ikari, and A. Fukuyama		photoreflectance and a photothermal spectroscopy		
393	堀切将, 横山裕貴, 鈴木秀俊, 碓哲雄, 福山 敦彦	宮崎大学	GaAsN 薄膜の原子層エピタ キシー成長におけるドーパ ンド Si 供給順序が電気特 性に与える影響	2015 年度応用物理学会 九州支部講演会	2015 年 12 月
394	A. Fukuyama, T. Nakamura, T. Usuki, K. Matsuochi, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, and T. Ikari	宮崎大学、 東京大学	Carrier collection mechanism in the strain- balanced InGaAs/GaAsP super-lattice solar cells by investigating the temperature changes of the surface photovoltage photoluminescence and piezoelectric photothermal signals	SPIE Photonics West 2016, San Francisco, USA	2016 年 2 月
395	T. Usuki, K. Matsuochi, T. Nakamura, K. Toprasertpong, A. Fukuyama, M. Sugiyama, Y. Nakano, and T. Ikari	宮崎大学、 東京大学	Observation of mini-band formation in the ground and high-energy electronic states of super-lattice solar cells	SPIE Photonics West 2016, San Francisco, USA	2016 年 2 月
396	横山祐貴, 堀切将, 鈴木秀俊, 碓哲雄, 福山敦彦	宮崎大学	GaAsN 薄膜の ALE 法による Si 供給順序が Si 吸着サイ トに与える影響	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016 年 3 月
397	武田秀明, 中村翼, 松落高輝, 碓哲雄, 福山敦彦, K. Toprasertpong, 杉山正和, 中野義昭	宮崎大学, 東京大学	フォトルミネッセンス法を 用いた超格子構造中のキャ リア輸送評価	第 13 回「次世代の太 陽光発電システム」シ ンポジウム	2016 年 5 月
398	河野将大, 横山祐貴, 堀切将, 山内俊浩, 原口智宏, 碓哲雄, 福山敦彦, 鈴木秀俊	宮崎大学	Ga 原料の違いが ALE 成長 GaAsN 薄膜の結晶性および 電気特性に与える影響	第 13 回「次世代の太 陽光発電システム」シ ンポジウム	2016 年 5 月
399	T. Nakamura, K. Matsuochi, T. Murakami, H. Suzuki, T. Ikari, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, and A. Fukuyama	宮崎大学, 東京大学	Effect of Built-in Electric Field on Miniband Structure and Carrier Nonradiative Recombination in InGaAs/GaAsP Superlattice Investigated by Using Photoreflectance and Photoluminescence Spectroscopies	European Materials Research Society Spring Meeting 2016	2016 年 5 月
400	Y. Yokoyama, M. Kawano, M. Horikiri, T. Haraguchi, T. Yamauchi, H. Suzuki, T. Ikari, and A. Fukuyama	宮崎大学	Effects of Si gas flow sequence on electrical characteristics of GaAsN films grown by atomic layer epitaxy GaAsN	第 35 回電子材料シ ンポジウム	2016 年 7 月

401	T. Usuki, K. Matsuochi, T. Nakamura, K. Toprasertpong, T. Ikari, A. Fukuyama, M. Sugiyama, and Y. Nakano	宮崎大学, 東京大学	Observation of mini-band formation in the ground and high-energy electronic states of super-lattice solar cells	第 35 回電子材料シンポジウム	2016 年 7 月
402	Y. Yokoyama, H. Horikiri, T. Haraguchi, T. Yamauchi, H. Suzuki, T. Ikari and A. Fukuyama	宮崎大学	Effects of Si Gas Flow Sequence on Electrical Characteristics of GaAsN Films Grown by Atomic Layer Epitaxy	18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18), Nagoya	2016 年 8 月
403	M. Horikiri, W. Ding, Y. Yokoyama, H. Suzuki, T. Ikari, Y. Ohshita, M. Yamaguchi, and A. Fukuyama	宮崎大学	The Influence of Substrate Orientation on Localized Nitrogen State in GaAsN films Grown on Vicinal GaAs (001) Substrates	2016 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2016)	2016 年 9 月
404	横山祐貴, 堀切将, 原口智宏, 山内俊浩, 鈴木秀俊, 碓哲雄, 福山敦彦	宮崎大学	ALE 成長 Si ドープ GaAsN 薄膜のアニール処理が比抵抗に与える影響	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016 年 9 月
405	Y. Wang, H. Suzuki, Y. Yokoyama, T. Ikari, A. Fukuyama, N. Kojima, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi	宮崎大学, 豊田工業大学	Nucleation layer grown by atomic layer deposition for selective-area growth of GaAs on patterned Si substrate by using chemical beam epitaxy	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016 年 10 月
406	K. Matsuochi, T. Nakamura, H. Takeda, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, H. Suzuki, T. Ikari, and A. Fukuyama	宮崎大学, 東京大学	Investigation of miniband formation and optical properties of strain-balanced InGaAs/GaAsP superlattice structure embedded in p-i-n GaAs solar cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016 年 10 月
407	H. Suzuki, T. Sasaki, M. Takahashi, Y. Ohshita, N. Kojima, I. Kamiya, A. Fukuyama, T. Ikari, and M. Yamaguchi	宮崎大学, 豊田工業大学	In situ X-ray diffraction study of strain relaxation process of lattice-mismatched InGaAs grown on vicinal GaAs (001) substrates	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016 年 10 月
408	A. Fukuyama, K. Matsuochi, T. Nakamura, H. Takeda,	宮崎大学, 東京大学	Optical properties of miniband formed in the InGaAs/GaAsP quantum well solar cells by means of	IEEE Nanotechnology Materials and Device Conference	2016 年 10 月

	H. Suzuki, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, and T. Ikari		photoreflectance, photoluminescence, and photothermal spectroscopies		
409	中村翼, 松落高輝, 武田秀明, K. Toprasertpong, 杉山正和, 中野義昭, 鈴木秀俊, 碓哲雄, 福山敦彦	宮崎大学, 東京大学	フラットバンド構造内に挿入された超格子におけるミニバンド形成過程とキャリア輸送評価	2016年度レーザー・量子エレクトロニクス研究会	2016年10月
410	魯家男, 武田秀明, 中村翼, 松落高輝, 鈴木秀俊, 碓哲雄, K. Toprasertpong, 杉山正和, 中野義昭, 福山敦彦	宮崎大学, 東京大学	フォトルミネッセンス法を用いた超格子構造中のキャリア輸送評価	第8回半導体材料・デバイスフォーラム	2016年11月
411	碓哲雄, 福山敦彦, 中村翼, 杉山正和, 中野義昭	宮崎大学, 東京大学	光熱変換法によるInGaAs/GaAsP 超格子に形成されるミニバンド端エネルギーの測定	第37回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム	2016年11月
412	T. Ikari, K. Matsuochi, T. Nakamura, H. Takeda, H. Suzuki, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, and A. Fukuyama	宮崎大学, 東京大学	Excitons in InGaAs/GaAsP multi quantum well and super lattice solar cell structures investigated by a photothermal spectroscopy	The European Materials Research Society Spring Meeting 2017	2017年5月
413	T. Nakamura, K. Matsuochi, H. Takeda, H. Suzuki, T. Ikari, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, and A. Fukuyama	宮崎大学, 東京大学	Effect of barrier thickness on formation of miniband in InGaAs/GaAsP superlattice structure for solar cells application	The European Materials Research Society Spring Meeting 2017	2017年5月
414	高内健二郎, 立神秀弥, 松田真輝, 鈴木秀俊, 西岡賢祐, 碓哲雄, 福山敦彦	宮崎大学, 東京大学	疑似太陽光照射による移動度のドーピング濃度依存性	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017年7月
415	魯家男, 武田秀明, 中村翼, 鈴木秀俊, 碓哲雄, トーブラサートポン カシディット, 杉山正和, 中野義昭, 福山敦彦	宮崎大学, 東京大学	歪緩和層を挿入した超格子太陽電池のキャリア輸送評価	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017年7月
416	中村翼, 武田秀明, 魯家男, 鈴木秀俊, トーブラサートポン カシディット, 杉山正和, 碓哲雄, 福山敦彦	宮崎大学, 東京大学	フォトルミネッセンス法による超格子太陽電池のキャリア輸送特性評価	第78回応用物理学会秋季学術講演会	2017年9月

417	H. Takeda, T. Nakamura, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, H. Suzuki, T. Ikari, and A. Fukuyama	宮崎大学、 東京大学	Investigation of carrier transport mechanism in superlattice solar cells with strain relaxation layer	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
418	T. Nakamura, H. Takeda, J. Lu, H. Suzuki, T. Ikari, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, and A. Fukuyama	宮崎大学、 東京大学	Investigation of Carrier Thermal Excitation Process in GaAs-Inserted InGaAs/GaAsP Superlattice Solar Cell	第36回電子材料シンポジウム	2017年11月
419	J. Lu, T. Nakamura, H. Takeda, H. Suzuki, T. Ikari, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, and A. Fukuyama	宮崎大学、東 京大学	Improvement of carrier thermal escape in GaAs interlayer inserted InGaAs/GaAsP superlattice solar cells	Korea-Japan Top University League Workshop on Photovoltaics 2017	2017年11月
420	T. Nakamura, H. Takeda, H. Suzuki, T. Ikari, M. Sugiyama, and A. Fukuyama	宮崎大学、 東京大学	Demonstration of Carrier Tunneling Transport in Stark Ladder Formed in Superlattice Solar Cells	Korea-Japan Top University League Workshop on Photovoltaics 2017	2017年11月
421	碓哲雄, 立神秀弥, 松田真輝, 高内健二郎, 西岡賢祐, 福山敦彦	宮崎大学、 東京大学	太陽電池における光照射下のキャリア移動度の変化	第7回次世代太陽電池用材料研究会	2017年11月
422	中村翼, 鈴木秀俊, 碓哲雄, 杉山正和, 福山敦彦	宮崎大学、 東京大学	超格子太陽電池におけるシュタルクラダー状態下でのキャリア輸送特性	第65回応用物理学会春季学術講演会	2018年3月
423	A. Fukuyama, S. Tategami, K. Takauchi, N. Matsuda, T. Nakamura, H. Suzuki, K. Nishioka, and T. Ikari	宮崎大学	Effect of Light Irradiation on Carrier Mobility of n- and p-type Si substrates for Solar Cell Application	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6月
424	高内健二郎, 松田真輝, 西岡賢祐, 碓哲雄, 福山敦彦	宮崎大学、 東京大学	集光照射によるGaAsのHall移動度変化と太陽電池特性への影響	第15回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018年7月
425	魯家男, 中村翼, 鈴木秀俊, 碓哲雄, 杉山正和, 福山敦彦	宮崎大学、 東京大学	歪緩和層を挿入した超格子太陽電池のキャリア輸送メカニズム	第15回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018年7月
426	T. Ikari, T. Nakamura, M. Sugiyama, and A. Fukuyama	宮崎大学、 東京大学	Verification of Stark-ladder formation in InGaAs/GaAsP superlattice solar cell structures by a photo-reflectance	International Conference on the Physics of Semiconductors	2018年7月

427	T. Nakamura, T. Ikari, M. Sugiyama, and A. Fukuyama	宮崎大学, 東京大学	Role of GaAs interlayer between quantum well and barrier layers in carrier thermal escaping transport process in InGaAs/GaAsP superlattice solar cells	International Conference on the Physics of Semiconductors	2018年7 月
428	金子翔一, 前田幸治, 碓哲雄, 福山敦彦, 鈴木秀俊	宮崎大学, 東京大学	Si(001)基板上GaAs薄膜の 結晶性に対するレーザーア ニールの影響	第79回応用物理学会 秋季学術講演会	2018年9 月
429	R. Iwanaga, T. Nakamura, J. Lu, T. Ikari, M. Sugiyama, and A. Fukuyama	宮崎大学, 東京大学	Temperature dependence of carrier relaxation process in InGaAs/GaAsP superlattice solar cell with GaAs interlayer	第37回電子材料シン ポジウム	2018年10 月
430	安藝翼, 魯家男, 中村翼, 岩永凌平, 碓哲雄, 杉山正和, 福山敦彦	宮崎大学, 東京大学	歪緩和層挿入による超格子 構造内のキャリア輸送特性 変化	第10回半導体材料・ デバイスフォーラム	2018年10 月
431	原田知季, 高内健二郎, 松田真輝, 碓哲雄, 西岡賢祐, 福山敦彦	宮崎大学	ライフタイム測定によるn およびp-Si基板内に形成さ れる光励起キャリア濃度差 に関する考察	第10回半導体材料・ デバイスフォーラム	2018年10 月
432	石脇祐誠, 高内健二郎, 松田真輝, 碓哲雄, 西岡賢祐, 福山敦彦	宮崎大学	集光照射によるSi基板の Hall移動度変化と太陽電池 特性への影響	第10回半導体材料・ デバイスフォーラム	2018年10 月
433	渡部愛理, 中村翼, 魯家男, 岩永凌平, 碓哲雄, 杉山正和, 福山敦彦	宮崎大学, 東京大学	超格子太陽電池内に形成さ れたシュタルクラダー状態 とキャリアトンネル過程と の関係	第10回半導体材料・ デバイスフォーラム	2018年10 月
434	福山敦彦, 高内健二郎, 西岡賢祐, 碓哲雄	宮崎大学	集光照射下のSi基板におけ る光励起キャリア濃度の非 線形的な増加要因	第8回次世代太陽電池 用材料研究会	2018年11 月
435	高内健二郎, 碓哲雄, 西岡賢祐, 福山敦彦	宮崎大学	光照射下のp-Si基板におけ る光励起キャリア濃度の非 線形的な増加とキャリアラ イフタイムの関係	2018年度応用物理学会 九州支部学術講演会	2018年12 月
436	高内健二郎, 碓哲雄, 西岡賢祐, 福山敦彦	宮崎大学	集光照射下でのSi基板の Hall移動度の温度依存性	第3回フロンティア太 陽電池セミナー	2018年12 月
437	原田知季, 高内健二郎, 宮下直也, 岡田至崇, 碓哲雄, 福山敦彦	宮崎大学, 東京大学	光照射によるnとp-GaAs の移動度減少と太陽電池特 性への影響	第16回「次世代の太 陽光発電システム」シ ンポジウム	2019年7 月
438	岩永凌平, 中村翼, 渡部愛理, 安藝翼, 杉山正和, 碓哲雄, 福山敦彦	宮崎大学, 東京大学	P組成変化超格子太陽電池 試料がキャリア輸送特性に 与える影響評価	第16回「次世代の太 陽光発電システム」シ ンポジウム	2019年7 月
439	安藝翼, 中村翼, 岩永凌平, 渡部愛理, 碓哲雄, 杉山正和, 福山敦彦	宮崎大学, 東京大学	超格子構造中の歪緩和層が 与えるキャリア輸送メカニ ズムへの影響	第16回「次世代の太 陽光発電システム」シ ンポジウム	2019年7 月
440	渡部愛理, 中村翼, 岩永凌平, 安藝翼,	宮崎大学, 東京大学	圧電素子光熱変換分光法に よる歪緩和層挿入超格子太	第16回「次世代の太 陽光発電システム」シ	2019年7 月

	杉山正和, 碓哲雄, 福山敦彦		陽電池のキャリア輸送特性 評価	ンポジウム	
441	渡部愛理, 中村翼, 岩永凌平, 杉山正和, 碓哲雄, 福山敦彦	宮崎大学, 東京大学	歪緩和挿入による超格子太 陽電池のキャリア輸送特性 変化	第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会	2019 年 9 月
442	R. Iwanaga, A. Watanabe, T. Nakamura, T. Ikari, M. Sugiyama, and A. Fukuyama	宮崎大学, 東京大学	Influence of barrier layer height on the carrier transport properties of InGaAs/GaAsP superlattice solar cells	第 38 回電子材料シン ポジウム	2019 年 10 月
443	渡部愛理, 中村翼, 岩永凌平, 杉山正和, 碓哲雄, 福山 敦彦	宮崎大学, 東京大学	Effect of Insertion of the Strain Relaxation Layer on the Carrier Transport Properties of InGaAs/GaAsP Superlattice Solar Cells Investigated by the Photo-Thermal Spectroscopy	第 40 回超音波エレクト ロニクス基礎と応 用に関するシンポジウ ム	2019 年 11 月
444	古川諒, 渡部愛理, 岩永凌平, 中村翼, 碓哲雄, 杉山正和, 福山敦彦	宮崎大学, 東京大学	圧電素子光熱変換分光法に よる歪緩和層挿入超格子太 陽電池のキャリア輸送特性 評価	第 11 回半導体材料・ デバイスフォーラム	2019 年 12 月
445	阿部翼, 原田知季, 安藝翼, 碓哲雄, 福山敦彦	宮崎大学, 東京大学	集光照射による Si の移動度 の変化と太陽電池特性への 影響	第 11 回半導体材料・ デバイスフォーラム	2019 年 12 月
446	後藤和泰、 大島隆治、坂田功、 松原浩司、 菅谷武芳、近藤道雄	東京工業大 学、 産業技術総合 研究所	Studies on highly stacked Ge/Si quantum dot heterojunction solar cells grown with up to 100 stacked layers	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 25), Busan, Korea	2015 年 11 月
447	中村徹哉、今泉充、 佐藤真一郎、 菅谷武芳、望月透、 岡野好伸、大島武	JAXA、 量子科学技術 研究開発機 構、 産業技術総合 研究所、 東京都市大学	Measurement of Ion Beam Induced Current in Quantum Dot Solar Cells	The 11th Inter- national Workshop on Radiation Effects on Semi-conductor Devices for Space Applications	2015 年 11 月
448	太野垣健、菅谷武芳	産業技術総合 研究所	(Invited) Carrier dynamics in type-II quantum dots for wide- bandgap intermediate-band solar ' cells	SPIE Photonics West 2016, San Francisco, USA	2016 年 2 月
449	太野垣健、 長門優喜、 岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合 研究所、 東京都市大学	A Proposal for Wide- Bandgap Intermediate-Band Solar Cells Using Type-II InP/InGaP Quantum Dots	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Portland, USA	2016 年 6 月
450	菅谷武芳、太野垣健	産業技術総合 研究所	Growth of Type-II InP Quantum Dots in InGaP Matrix by Using Solid- Source Molecular Beam Epitaxy for Intermediate- Band Solar Cells	Compound Semiconductor Week 2016 (CSW), Toyama, Japan	2016 年 6 月
451	後藤和泰、 大島隆治、	東京工業大 学、	Fabrication of strain- compensated	32nd European Photovoltaic Solar	2016 年 6 月

	太野垣健、菅谷武芳、松原浩司、近藤道雄	産業技術総合研究所	heterojunction Ge/Si _{1-x} C _x quantum dots solar cells	Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Munich	
452	相原健人、太野垣健、長門優喜、岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合研究所、東京都市大学	Demonstration of InP/InGaP quantum dot solar cells	2016 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2016)	2016年9月
453	相原健人、太野垣健、長門優喜、岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合研究所、東京都市大学	InP/InGaP 量子ドット太陽電池の光学特性評価	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016年9月
454	相原健人、太野垣健、長門優喜、岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合研究所、東京都市大学	InP/InGaP 量子ドット太陽電池における開放電圧の温度依存性	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017年3月
455	佐藤真一郎、菅谷武芳、中村徹也、大島武	量子科学技術研究開発機構、産業技術総合研究所、JAXA	Defect Characterization of III-V Quantum Structure Solar Cells Using Photo-Induced Current Transient Spectroscopy	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington DC, USA	2017年6月
456	相原健人、太野垣健、長門優喜、岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合研究所、東京都市大学	Investigation of the open-circuit voltage in the wide-bandgap InGaP-based InP quantum dot solar cells	2017 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2017), Sendai	2017年9月
457	相原健人、太野垣健、長門優喜、岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合研究所、東京都市大学	Device designs and characterization of InGaP-based InP Quantum dot solar cells	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
458	相原健人、太野垣健、菅谷武芳	産業技術総合研究所	分子線エピタキシー法を用いた InGaP 中の InP 量子ドット薄膜の発光寿命の評価	第6回結晶工学未来塾	2017年11月
459	相原健人、太野垣健、中元嵩、牧田紀久夫、岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合研究所、東京都市大学	InP/InGaP 量子ドット太陽電池の集光特性評価	第15回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018年7月
460	相原健人、太野垣健、中元嵩、岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合研究所、東京都市大学	Effects of front InGaP layer thickness in InP/InGaP quantum dot solar cells	2018 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2018), Tokyo	2018年9月
461	山口浩一	電気通信大学	自己形成量子ドットの作製技術とデバイス応用（招待講演）	第49回基礎科学部会セミナー・低次元形態セラミックスの機能と構造制御、日本セラミックス協会	2015年7月
462	鮫島一樹、山口浩一	電気通信大学	InAsSb/GaAs 層上の面内超高密度 InAs 量子ドットの発光特性	第76回応用物理学会秋季学術講演会	2015年9月
463	秋元直己、山口浩一	電気通信大学	面内高密度 InAs/GaAsSb 量子ドット層における光励起キャリア効果	第76回応用物理学会秋季学術講演会	2015年9月
464	秋元直己、仁井皓大、南裕太、	電気通信大学	面内超高密度 InAs 量子ドット層を導入した太陽電池の	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016年3月

	遠藤航介, 山口浩一		熱処理効果		
465	南裕太, 秋元直己, 鮫島一樹, 山口浩一	電気通信大学	面内超高密度 InAs 量子ドット層における熱処理効果	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016 年 3 月
466	及川信吾, 鮫島一樹, 山口浩一	電気通信大学	InAsSb/GaAs(001) 上の InAs 成長における 3 次元核形成機構	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016 年 3 月
467	山口浩一	電気通信大学	量子ドットのデバイス応用 (招待講演)	太陽光発電プロジェクト講演会「量子ナノ半導体のエネルギー変換デバイスへの応用について」	2016 年 3 月
468	T. Sogabe, Y. Okada, and K. Yamaguchi	電気通信大学、 東京大学	Investigation of Hot Carrier Transportation Dynamics in InAs/GaAs Quantum Dot Solar Cell	High-efficiency materials for photovoltaics	2016 年 9 月
469	仁井皓大, 南裕太, 坂本克好, 曾我部東馬, 山口浩一, 岡田至崇	電気通信大学、 東京大学	InAs/GaAs 量子ドット太陽電池におけるホットキャリア輸送ダイナミクス	第 77 回応用物理学会 秋季学術講演会	2016 年 9 月
470	及川信吾, 馬飼野彰宜, 曾我部東馬, 山口浩一	電気通信大学	InAsSb/GaAs(001) 上への InAs 3 次元島成長とその発光特性	第 77 回応用物理学会 秋季学術講演会	2016 年 9 月
471	山口浩一	電気通信大学	量子ドットデバイスと最先端太陽電池開発 (招待講演)	第 106 回研究開発セミナー	2016 年 10 月
472	杉山涼, 秋元直己, 曾我部東馬, 山口浩一	電気通信大学	GaAsSb/GaAs(001) 上の InAs 量子ドットの発光特性	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017 年 3 月
473	馬飼野彰宜, 及川信吾, 坂本克好, 山口浩一	電気通信大学	Sb 照射熱処理による InAs 量子ドット層の構造変化	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017 年 3 月
474	寺田圭佑, 鈴木亮介, 坂本克好, 曾我部東馬, 山口浩一	電気通信大学	面内超高密度 InAs 量子ドット層を導入した太陽電池のドリフト・拡散モデルによる特性解析	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017 年 3 月
475	T. Sogabe, K. Nii, K. Sakamoto, K. Yamaguchi, and Y. Okada	電気通信大学、 東京大学	Hot Carrier Transportation Dynamics in InAs/GaAs Quantum Dot Solar Cell	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington DC, USA	2017 年 6 月
476	山口浩一	電気通信大学	量子現象利用デバイス技術動向 (依頼講演)	2017 年度 JEITA 先端電子材料・デバイス技術フォーラム	2017 年 7 月
477	山口浩一	電気通信大学	自己形成量子ドットの進展 (招待講演)	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017 年 9 月
478	鈴木亮介, 杉山涼, 加藤智恵, 曾我部東馬, 山口浩一	電気通信大学	面内超高密度 InAs 量子ドット層を導入した太陽電池における Urbach tail の影響	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017 年 9 月
479	杉山涼, 立木象, 曾我部東馬, 山口浩一	電気通信大学	GaAsSb/GaAs(001) 上の高密度 InAs 量子ドットの層の発光特性(2)	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017 年 9 月

480	山口浩一	電気通信大学	面内超高密度量子ドット層の太陽電池応用	第13回量子ナノ材料セミナー	2018年1月
481	杉山 涼, 立木 象, 山口浩一	電気通信大学	GaAsSb/GaAs (001)上の高密度 InAs 量子ドットの層の発光特性(3)	第65回応用物理学会春季学術講演会	2018年3月
482	ウイクラマナヤカ・ラシミ・プラビーン, 馬飼野彰宜, 坂本克好, 山口浩一	電気通信大学	分子線堆積法による SiO ₂ /半導体上への InAs 量子ドットの自己形成	第65回応用物理学会春季学術講演会	2018年3月
483	立木 象, 杉山 涼, 加藤智恵, 山口浩一	電気通信大学	面内超高密度 InAs 量子ドット層の面内 PL マッピング測定評価	第65回応用物理学会春季学術講演会	2018年3月
484	山口浩一	電気通信大学	量子ドットの基礎知識と結晶成長およびデバイス応用(依頼講演)	R&D 支援センター・セミナー	2018年8月
485	立木象, 杉山涼, 山口浩一	電気通信大学	面内超高密度 InAs 量子ドット層の PL マッピング解析	第79回応用物理学会秋季学術講演会	2018年9月
486	鈴木亮介, 坂本克好, 曾我部東馬, 山口浩一	電気通信大学	面内超高密度 InAs 量子ドット層を導入した量子ドット太陽電池の集光特性	第79回応用物理学会秋季学術講演会	2018年9月
487	杉山涼, 立木象, 山口浩一	電気通信大学	量子ドット太陽電池用 Type-II 型 InAs/GaAsSb 量子ドット層の発光特性	第79回応用物理学会秋季学術講演会	2018年9月
488	佐々木一夢, 馬飼野彰宜, 坂本克好, 山口浩一	電気通信大学	分子線堆積法による SiO _x 膜上への InAs 量子ドットの自己形成(3)	第66回応用物理学会春季学術講演会	2019年3月
489	立木 象, 杉山 涼, 山口浩一	電気通信大学	面内超高密度 InAs 量子ドット層の面内 PL マッピング解析(2)	第66回応用物理学会春季学術講演会	2019年3月
490	池田侑矢, 山口浩一, 坂本克好, 小林哲	電気通信大学	イオンビーム堆積法による InP/ZnS CQD 薄膜作製とキャラクター化	第66回応用物理学会春季学術講演会	2019年3月
491	戸川 匠, 鈴木亮介, 寺田圭佑, 坂本克好, 曾我部東馬, 山口浩一	電気通信大学	面内超高密度 InAs 量子ドット層を導入した量子ドット太陽電池の集光特性(2)	第66回応用物理学会春季学術講演会	2019年3月
492	立木 象, 杉山 涼, 山口浩一	電気通信大学	高密度 InAs 量子ドット層における欠陥起因の励起子発光マッピング	第80回応用物理学会秋季学術講演会	2019年9月
493	田中優太, 佐々木一夢, 山口浩一	電気通信大学	分子線堆積法によるガラス基板上への InAs 量子ドットの自己形成	第67回応用物理学会春季学術講演会	2020年3月
494	加藤彬紘, 立木象, 山口浩一	電気通信大学	面内超高密度 InAs 量子ドット層における中間バンド形成	第67回応用物理学会春季学術講演会	2020年3月
495	T. Kada, T. Tanibuchi, S. Asahi, T. Kaizu, Y. Harada,	神戸大学、 東京大学	Two-Step Photocarrier Generation in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Intermediate Band Solar Cell	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, USA	2015年6月

	T. Kita, R. Tamaki, Y. Okada, and K. Miyano				
496	Y. Ogawa, Y. Harada, T. Baba, and T. Kita	神戸大学	Annealing Effects on the Delocalized Electronic States of Epitaxial Two- Dimensional Nitrogen Atomic Sheet in GaAs	第 34 回電子材料シン ポジウム	2015 年 7 月
497	S. Asahi, H. Teranishi, N. Kasamatsu, T. Kada, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Excitation-Intensity Dependence of Two-Step Photoexcitation in InAs/GaAs/Al _{0.7} Ga _{0.3} As Intermediate-Band Solar Cells	第 34 回電子材料シン ポジウム	2015 年 7 月
498	T. Tanibuchi, T. Kada, N. Kasamatsu, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Carrier Time-of-Flight Spectroscopy with Infrared Assistance for Escaping Process in InAs/GaAs Quantum Dot Solar Cells	第 34 回電子材料シン ポジウム	2015 年 7 月
499	D. Watanabe, N. Kasamatsu, Y. Harada, and T. Kita	神戸大学	Hot-Carrier Distribution in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattices and Its Application to Solar Cells	第 34 回電子材料シン ポジウム	2015 年 7 月
500	小川泰弘、 原田幸弘、 海津利行、喜多隆	神戸大学	急速熱アニールによる GaAs 中のエピタキシャル窒素シ ートにおける 2 次元物性の 制御	日本材料学会 半導体 エレクトロニクス部門 委員会 2015 年度第 1 回研究会	2015 年 7 月
501	Y. Harada, Y. Ogawa, T. Baba, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Enhancement of Two Dimensionality in Epitaxial Nitrogen Atomic Sheet in GaAs by Rapid Thermal Annealing	21st International Conference on Electronic Properties of Two- Dimensional Systems/17th International Conference on Modulated Semiconductor Structures	2015 年 7 月
502	T. Kaizu, T. Matsumura, and T. Kita	神戸大学	Broadband Control of Emission Wavelength of InAs/GaAs Quantum Dots by Growth Temperature GaAs Capping Layer	21st International Conference on Electronic Properties of Two- Dimensional Systems/17th International Conference on Modulated Semiconductor Structures	2015 年 7 月
503	Y. Harada, T. Baba, Y. Ogawa, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Epitaxial Nitrogen Atomic Sheet in GaAs Grown by Nitrogen δ -Doping Technique	5th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor	2015 年 9 月

				Nanostructures (SemiconNano2015), Hsinchu, Taiwan	
504	T. Kita	神戸大学	Growth and Characterization of InAs/GaAs Quantum Dot Superlattices for Photovoltaics	5th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano2015), Hsinchu, Taiwan	2015年9 月
505	T. Kita	神戸大学	Carrier Dynamics in InAs /GaAs Quantum Dot Superlattices for Photovoltaics	High-efficiency materials for photovoltaics	2015年9 月
506	谷渕泰三、 加田智之、 朝日重雄、喜多隆	神戸大学	InAs/GaAs 量子ドット超格 子太陽電池における超高速 時間分解キャリア走行過程	第76回応用物理学会 秋季学術講演会	2015年9 月
507	海津利行、 田尻祐介、 喜多隆	神戸大学	GaAs キャップ層成長温度に よる InAs/GaAs 量子ドット のサイズ二項分布変化	第76回応用物理学会 秋季学術講演会	2015年9 月
508	朝日重雄、 寺西陽之、 谷渕泰三、 渡部大樹、 海津利行、喜多隆	神戸大学	Dot-in-well 中間バンド型 太陽電池のバイアス依存性	第76回応用物理学会 秋季学術講演会	2015年9 月
509	渡部大樹、 原田幸弘、 海津利行、喜多隆	神戸大学	InAs/GaAs 量子ドット超格 子を利用したホットキャリ ア型太陽電池	第76回応用物理学会 秋季学術講演会	2015年9 月
510	大橋知幸、 諏訪雅也、喜多隆	神戸大学	近接積層 InAs/GaAs 量子ド ット半導体光アンプの光導 波モード解析	第76回応用物理学会 秋季学術講演会	2015年9 月
511	原田幸弘、 笠松直史、 渡部大樹、喜多隆	神戸大学	InAs/GaAs 量子ドット超格 子におけるホットキャリア 冷却過程	第76回応用物理学会 秋季学術講演会	2015年9 月
512	O. Kojima, T. Taji, T. Kita, C. Y. Jin, J. Yuan, and R. Nozel	神戸大学	Decrease in Photoluminescence Decay Rate in InAs Quantum Dots Coupling with In Nanoparticles Due to Increase in Excitation Power	2nd International Conference on Enhanced Spectroscopies	2015年10 月
513	朝日重雄、 寺西陽之、 笠松直史、 加田智之、 海津利行、喜多隆	神戸大学	量子ドット中間バンド型太 陽電池におけるキャリアの 長寿命化と2段階光電流生 成の増強	第26回光物性研究会	2015年12 月
514	田尻祐介、 海津利行、喜多隆	神戸大学	長波長発光近接積層 InAs/GaAs 量子ドットの偏 光フォトルミネッセンス特 性	第63回応用物理学会 春季学術講演会	2016年3 月
515	小川泰弘、 原田幸弘、 海津利行、喜多隆	神戸大学	急速熱アニールした GaAs 中 のエピタキシャル窒素膜の 輻射再結合寿命	第63回応用物理学会 春季学術講演会	2016年3 月

516	渡辺翔、朝日重雄、 加田智之、 海津利行、 原田幸弘、喜多隆	神戸大学	InAs/GaAs 量子ドット超格子太陽電池におけるミニバンド形成が2段階光吸収に与える影響	第63回応用物理学会 春季学術講演会	2016年3月
517	朝日重雄、 寺西陽之、渡辺翔、 渡部大樹、 海津利行、喜多隆	神戸大学	Dot-in-Well 中間バンド型太陽電池における中間順位内の長い電子寿命	第63回応用物理学会 春季学術講演会	2016年3月
518	T. Kaizu, Y. Tajiri, and T. Kita	神戸大学	Polarized Photoluminescence Properties of Closely-Stacked InAs/GaAs Quantum Dots with Long-Wavelength Emission	17th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures, Nara	2016年3月
519	S. Asahi, H. Teranishi, T. Kada, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Extremely Long Carrier Lifetime Due to Electron-Hole Separation in Quantum-Dot Intermediate-Band Solar Cells	17th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures, Nara	2016年3月
520	Y. Tajiri, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	GaAs First-Spacer-Layer Thickness Dependence of Polarized Photoluminescence Properties of Closely-Stacked InAs/GaAs Quantum Dots with Long-Wavelength Emission	Compound Semiconductor Week 2016 (CSW), Toyama, Japan	2016年6月
521	S. Watanabe, S. Asahi, T. Kada, T. Kaizu, Y. Harada, and T. Kita	神戸大学	Enhancement of Two-Step Photon Absorption Due to Miniband Formation in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Solar Cell	32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Munich	2016年6月
522	S. Asahi, H. Teranishi, S. Watanabe, T. Kada, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Extended Electron Lifetime in Intermediate-Band Solar Cells Using Dot-in-Well Structure	32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Munich	2016年6月
523	K. Hirao, S. Asahi, S. Watanabe, T. Kaizu, Y. Harada, and T. Kita	神戸大学	Thermal Carrier-Escape Process from the Intermediate Band in InAs/GaAs Quantum Dot Solar Cells	第35回電子材料シンポジウム	2016年7月
524	K. Toprasertpong, T. Inoue, K. Watanabe, T. Kita, M. Sugiyama, and Y. Nakano	神戸大学	Investigation of Buck-Like Carrier Transport and Effective Mobility in Multiple Quantum Well Solar Cells	第35回電子材料シンポジウム	2016年7月
525	Y. Harada, J. Yamada, D. Watanabe, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Polarization-Insensitive Intraband Transition in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattices	UK Semiconductors 2016	2016年7月
526	R. Plantenga, V. Kortan, T. Kaizu,	アイントホー ヘン工科大学、	Spatial Electronic Structure of an Isovalent Nitrogen Center in GaAs	33rd International Conference on the Physics of	2016年7月

	Y. Harada, T. Kita, M. Flatte, and P. Koenraad	神戸大学		Semiconductors	
527	T. Kita	神戸大学	(Invited) Carrier Dynamics in InAs Quantum Dot Solar Cell for Photon Ratchet	High-efficiency materials for photovoltaics	2016年9月
528	T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Control In-Ga Intermixing in InAs Quantum Dot on Nitrogen δ -Doped GaAs	19th International Conference on Molecular-Beam Epitaxy	2016年9月
529	朝日重雄、 寺西陽之、 海津利行、喜多隆	神戸大学	ヘテロ界面を利用した光アップコンバージョン太陽電池の2段階光吸収による大幅な電流増加	第77回応用物理学会 秋季学術講演会	2016年9月
530	海津利行、 田尻祐介、喜多隆	神戸大学	近接積層 InAs/GaAs 量子ドットの GaAs スペーサ層膜厚と成長温度による広帯域偏光特性制御	第77回応用物理学会 秋季学術講演会	2016年9月
531	小川泰弘、 原田幸弘、 海津利行、喜多隆	神戸大学	Dot-in-Well 中間バンド型太陽電池における長い電子寿命の観測	第77回応用物理学会 秋季学術講演会	2016年9月
532	平尾和輝、渡辺翔、 朝日重雄、 原田幸弘、喜多隆	神戸大学	InAs/GaAs 量子ドット中間バンド型太陽電池における電子の熱脱出過程の解明	第77回応用物理学会 秋季学術講演会	2016年9月
533	喜多隆	神戸大学	量子ドット中間バンド型太陽電池のキャリアダイナミクス (招待講演)	2016年度太陽光発電プロジェクト講演会～量子ナノ半導体のエネルギー交換デバイスへの応用について～	2017年3月
534	海津利行、 田尻祐介、喜多隆	神戸大学	近接積層 InAs/GaAs 量子ドットの GaAs スペーサ層膜厚と成長温度による広帯域偏光特性制御 (2)	第64回応用物理学会 春季学術講演会	2017年3月
535	平尾和輝、 朝日重雄、 海津利行、喜多隆	神戸大学	InAs/GaAs 量子ドット超格子中間バンド型太陽電池特性のミニバンド形成の効果	第64回応用物理学会 春季学術講演会	2017年3月
536	S. Asahi、 H. Teranishi、 T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Extremely-Long Electron Lifetime in InAs/GaAs/ $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ Dot-in-Well Intermediate-Band Solar Cells	第64回応用物理学会 春季学術講演会	2017年3月
537	T. Kita	神戸大学	(Invited) Carrier Dynamics and Efficient Two-Step Photon Up-Conversion in Quantum-Dot Intermediate-Band Solar Cells	MRS Spring meeting 2017, Phoenix, USA	2017年4月
538	T. Kaizu, Y. Tajiri, and T. Kita	神戸大学	Broadband Control of Polarization Characteristics in Closely-Stacked InAs/GaAs Quantum Dots	Compound Semiconductor Week 2017 (CSW 2017), Berlin, Germany	2017年5月
539	S. Asahi, K. Kusaki,	神戸大学	Increasing Current Generation by Photon Up-	44th IEEE Photovoltaic	2017年6月

	T. Kaizu, and T. Kita		Conversion in a Single-Junction Solar Cell with a Hetero-Interface	Specialists Conference, Washington DC, USA	
540	草木和輝、朝日重雄、海津利行、喜多隆	神戸大学	フォトンアップコンバージョン太陽電池の開発：構造の提案と原理検証	材料学会 2017 年度半導体エレクトロニクス部門委員会 第 1 回研究会	2017 年 7 月
541	平尾和輝、朝日重雄、海津敏行、原田幸弘、喜多隆	神戸大学	低温キャップ InAs/GaAs 量子ドット超格子中間バンド型太陽電池	材料学会 2017 年度半導体エレクトロニクス部門委員会 第 1 回研究会	2017 年 7 月
542	K. Kusaki, S. Asahi, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Photon Up-Converted Photocurrent in a Single Junction Solar Cell with a Hetero-Interface	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Amsterdam, Netherlands	2017 年 9 月
543	K. Hirao, S. Asahi, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Extended Optical Response of Two-Step Photoexcitation in InAs/GaAs Quantum-Dot Superlattice Intermediate Band Solar Cells	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Amsterdam, Netherlands	2017 年 9 月
544	S. Asahi, K. Kusaki, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Increasing Photovoltage Boosted by Photon Up-Conversion in a Single-Junction Solar Cell with a Hetero-Interface	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Amsterdam, Netherlands	2017 年 9 月
545	原田幸弘、山田淳也、渡部大樹、朝日重雄、喜多隆	神戸大学	InAs/GaAs 量子ドット超格子太陽電池におけるバンド内遷移の偏光特性	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017 年 9 月
546	海津利行、喜多隆	神戸大学	近接積層 InAs/GaAs 量子ドットの成長温度による電子状態の変化	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017 年 9 月
547	朝日重雄、草木和輝、原田幸弘、喜多隆	神戸大学	2 段階フォトンアップコンバージョン太陽電池のヘテロ界面における電圧ブースト効果	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017 年 9 月
548	平尾和輝、朝日重雄、海津利行、原田幸弘、喜多隆	神戸大学	低温キャップ InAs/GaAs 量子ドット超格子中間バンド型太陽電池における熱脱出の抑制	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017 年 9 月
549	草木和輝、朝日重雄、海津利行、玉置亮、岡田至崇、喜多隆	神戸大学、東京大学	フォトンアップコンバージョン太陽電池におけるバンド内光学遷移特性	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017 年 9 月
550	T. Kita and S. Asahi	神戸大学	(Invited) Carrier Dynamics in Photon Up-Conversion Solar Cells	6th International Workshop Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures	2017 年 9 月
551	T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	One-Dimensional Miniband Formation in InAs/GaAs	International Symposium on Novel	2017 年 10 月

			Quantum Dot Superlattice	Energy Nanomaterials, Catalysts and Surfaces for Future Earth -Material Research, Characterization and Imaging by In situ/Operando XAFS and X-ray Techniques	
552	S. Asahi, H. Teranishi, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Two-Step Photo-Excited Electrons with Extremely-Long Lifetime in Intermediate-Band Solar Cells Using Dot-in Well Structure	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
553	S. Asahi, K. Kusaki, Y. Harada, and T. Kita	神戸大学	Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cells Incorporating a Voltage Booster Hetero-Interface	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
554	K. Hirao, S. Asahi, T. Kaizu, Y. Harada, and T. Kita	神戸大学	Efficient Two-Step Photocurrent in Intermediate Band Solar Cells Using Highly Homogeneous InAs/GaAs Quantum-Dot Superlattice	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
555	K. Kusaki, S. Asahi, T. Kaizu, R. Tamaki, Y. Okada, and T. Kita	神戸大学	Infrared Absorption Characteristics in Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cells	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
556	S. Asahi, K. Nishimura, K. Kusaki, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Efficient Carrier Collection of Up-Converted Electrons in Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cells	第36回電子材料シンポジウム	2017年11月
557	T. Kita, and S. Asahi	神戸大学	(Invited) Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cells	MTSA2017-OptoX Nano-TeraNano8	2017年11月
558	西村健汰、朝日重雄、海津利行、喜多隆	神戸大学	2段階フォトンアップコンバージョン太陽電池のキャリア収集効率	材料学会第3回半導体エレクトロニクス部門委員会第2回研究会	2017年11月
559	岩田尚之、渡部大樹、朝日重雄、海津利行、喜多隆	神戸大学	InAs/GaAs量子ドット超格子を用いたホットキャリア型太陽電池の動作検証	材料学会第3回半導体エレクトロニクス部門委員会第2回研究会	2017年11月
560	S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	(Invited) Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cell: Propose and Demonstration	SPIE Photonics West 2018, San Francisco, USA	2018年2月
561	Y. Harada, J. Yamada, D. Watanabe, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Polarization Dependent Photocurrent in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Solar Cells	International Conference on Nanophotonics and Nano-optoelectronics 2018 (ICNN11-2), Yokohama	2018年4月

562	T. Kaizu, K. Hirao, and T. Kita	神戸大学	One-Dimensional Electronic States in Closely Stacked InAs/GaAs Quantum Dots with Different Growth Temperatures	International Conference on Nanophotonics and Nano-optoelectronics 2018 (ICNN11-2), Yokohama	2018年4 月
563	S. Asahi, K. Nishimura, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Extraction Efficiency of Up-Converted Electrons in Two-Step Photon Up- Conversion Solar Cells	International Conference on Nanophotonics and Nano-optoelectronics 2018 (ICNN11-2), Yokohama	2018年4 月
564	松尾哲弘、 原田幸弘、 朝日重雄、喜多隆	神戸大学	入射光スペクトル形状を考 慮した2段階フォトンアッ プコンバージョン太陽電池 の理論変換効率	応用物理学会関西支部 2018年度第1回講演会	2018年5 月
565	T. Kaizu, T. Koike, and T. Kita	神戸大学	Multiple Stacking of Capping Temperature- Controlled InAs/GaAs Quantum Dots with AlGaAs Barrier Layers for Broadband Emission	Compound Semiconductor Week 2018, Cambridge, MA, USA	2018年5 月
566	S. Asahi, K. Nishimura, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Carrier Collection Efficiency of Intraband- Excited Carriers in Two- Step Photon Up-Conversion Solar Cells	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6 月
567	Y. Harada, T. Wilson, N. P. Hylton, R. D. Richards, J. P. David, T. Kita, and N. J. Ekins-Daukes	神戸大学	Exciton Hopping Dynamics in GaAsBi	9th International Workshop on Bismuth- Containing Semiconductors, Kyoto	2018年7 月
568	Y. Harada, T. Matsuo, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Optimal Band Gap Energies for Two-Step Photon Up- Conversion Solar Cells with Partial Absorptivity	35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU- PVSEC), Brussels	2018年9 月
569	原田幸弘、 松尾哲弘、 朝日重雄、喜多隆	神戸大学	2段階フォトンアップコン バージョン太陽電池におけ る理論変換効率の入射光ス ペクトル形状依存性	第79回応用物理学会 秋季学術講演会	2018年9 月
570	朝日重雄、喜多隆	神戸大学	フォトンアップコンバージ ョン太陽電池の照射強度変 化によるアップコンバージ ョンへの影響	第79回応用物理学会 秋季学術講演会	2018年9 月
571	岩田尚之、 渡部大樹、 原田幸弘、 朝日重雄、喜多隆	神戸大学	InAs/GaAs 量子ドット超格 子太陽電池におけるホット キャリア電流取り出し特性	第79回応用物理学会 秋季学術講演会	2018年9 月
572	海津利行、 上西奈緒人、 喜多隆	神戸大学	GaAs キャップ温度による窒 素ドーパ GaAs (001) 面上 InAs 量子ドットの発光波長 への影響	第79回応用物理学会 秋季学術講演会	2018年9 月
573	N. Uenishi, T. Kaizu, and	神戸大学	Effects of GaAs-Capping Temperature on The	20th International Conference on	2018年9 月

	T. Kita		Emission Wavelength of InAs Quantum Dots Grown on Nitrogen-Doped GaAs (001) Surfaces	Molecular Beam Epitaxy, China	
574	S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Effect of Excitation Power Density on Photon Up-Conversion in Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cells	第 37 回電子材料シンポジウム	2018 年 10 月
575	K. Kusaki, T. Murata, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Intraband Absorption Characteristics in Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cell	第 37 回電子材料シンポジウム	2018 年 10 月
576	K. Nishimura, S. Asahi, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Carrier-Collection Efficiency in Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cell	第 37 回電子材料シンポジウム	2018 年 10 月
577	絹川典志、朝日重雄、喜多隆	神戸大学	ヘテロ界面を利用した 2 段階フォトンアップコンバージョン太陽電池における輻射再結合過程	第 29 回光物性研究会	2018 年 12 月
578	絹川典志、朝日重雄、喜多隆	神戸大学	フォトンアップコンバージョン太陽電池における輻射再結合と光電流の相反性	第 66 回応用物理学会 春季学術講演会	2019 年 3 月
579	朝日重雄、柴村和樹、草木和輝、喜多隆	神戸大学	正孔のアップコンバージョンを利用したフォトンアップコンバージョン太陽電池の基礎検討	第 66 回応用物理学会 春季学術講演会	2019 年 3 月
580	海津利行、喜多隆	神戸大学	近接積層 InAs/GaAs 量子ドット超格子の 1 次元電子状態の測定温度依存性	第 66 回応用物理学会 春季学術講演会	2019 年 3 月
581	原田幸弘、岩田尚之、朝日重雄、喜多隆	神戸大学	InAs/GaAs 量子ドット超格子を用いたホットキャリア型太陽電池における開放電圧の向上	第 66 回応用物理学会 春季学術講演会	2019 年 3 月
582	T. Kita	神戸大学	(Invited) Up-Conversion Dynamics in Nanostructure	Round-Table Workshop on Future Quantum Photovoltaics, University of Cambridge	2019 年 3 月
583	Y. Harada, N. Iwata, D. Watanabe, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Efficient Hot-Carrier Generation in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattices	Optics & Photonics International Congress 2019, Yokohama	2019 年 4 月
584	T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	One-Dimensional Electronic States in Highly-Stacked InAs/GaAs Quantum Dot Superlattices	Compound Semiconductor Week 2019 (CSW2019), Nara	2019 年 5 月
585	Y. Harada, N. Iwata, D. Watanabe, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Hot-Carrier Extraction in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Solar Cells	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Chicago, USA	2019 年 6 月
586	S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Strong Voltage-Boost Effect in Two-Step	46th IEEE Photovoltaic	2019 年 6 月

			Photon-Up Conversion Solar Cells	Specialists Conference, Chicago, USA	
587	N. Kinugawa, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Reciprocal Relationship Between Photoluminescence and Photocurrent in Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cell	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Chicago, USA	2019年6月
588	村田貴彦、朝日重雄、喜多隆	神戸大学	量子ドットを内包するヘテロ界面を利用した室温動作量子型赤外検出デバイスの開発	2019年度第2回半導体エレクトロニクス部門委員会第1回研究会	2019年7月
589	Y. Zhu, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Extensively-Prolonged Electron Lifetime Within Room Temperature Upon InAs/GaAs Quantum Dot-in-Well Solar Cell	7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano 2019), Kobe	2019年9月
590	T. Murata, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Infrared Photodetector Sensitized by QDs Inserted at the Hetero-Interface	7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano 2019), Kobe	2019年9月
591	Y. Harada, N. Iwata, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Excitation Energy Dependence of Hot-Carrier Extraction Process in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Solar Cells	7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano 2019), Kobe	2019年9月
592	S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Effect of the accumulated Electron Density at the Hetero-Interface in Two-Step Photon-Up Conversion Solar Cells	7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano 2019), Kobe	2019年9月
593	原田幸弘、松井麻斗、喜多隆	神戸大学	InAs/GaAs 量子ドット超格子におけるホットキャリア生成過程	第80回応用物理学会秋季学術講演会	2019年9月
594	Y. Zhu, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Extensively-Prolonged Electron Lifetime Within Room Temperature Upon InAs/GaAs Quantum Dot-in-Well Solar Cell	第80回応用物理学会秋季学術講演会	2019年9月

595	Y. Harada, N. Iwata, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Hot-Carrier Extraction from InAs/GaAs Quantum Dot Superlattices Embedded in GaAs Solar Cells	第 38 回電子材料シン ポジウム	2019 年 10 月
596	S. Asahi, N. Kinugawa, and T. Kita	神戸大学	Reciprocal Change in Photocurrent and Photoluminescence by Intraband transition in Two-Step Photon up- Conversion Solar Cells	第 38 回電子材料シン ポジウム	2019 年 10 月
597	T. Murata, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Infrared Photodetector Sensitized by InAs Quantum Dots Embedded at a GaAs/Al _{0.3} Ga _{0.7} As Hetero- Interface	第 38 回電子材料シン ポジウム	2019 年 10 月
598	T. Kita	神戸大学	Challenge to High Conversion Efficiency Solar Cell Utilizing Quantum Nanostructures	International Workshop on Frontier of Science and Technology for Solar Energy Conversion, Kobe University	2019 年 11 月
599	村田貴彦、 朝日重雄、 喜多隆	神戸大学	InAs 量子ドットを内包する Al _{0.3} Ga _{0.7} As/GaAs ヘテロ界面 における強いバンド内遷移 と赤外光検出特性	第 30 回光物性研究会	2019 年 12 月
600	絹川典志、 朝日重雄、 喜多隆	神戸大学	2 段階フォトンアップコン バージョン太陽電池におけ る光電流と輻射再結合電流 の相反関係及びキャリア収 集特性	第 30 回光物性研究会	2019 年 12 月
601	小島磨、喜多隆、 Richard Hogg	神戸大学	GaAs/AlAs 多重量子井戸に おける連続波励起子共鳴励 起による変調効果	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020 年 3 月
602	原田幸弘、 草木和輝、 朝日重雄、 喜多隆	神戸大学	2 段階フォトンアップコン バージョン太陽電池におけ るバンド内遷移特性	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020 年 3 月
603	Y. Zhu, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Voltage Backtracking Behavior in Intermediate- Band Solar Cell under Intensive Bi/Uni-Color Photoexcitation Examination	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020 年 3 月
604	渡辺航平、 朝日重雄、喜多隆	神戸大学	変調ドーピングした二段階フォ トンアップコンバージョン 太陽電池におけるアップコ ンバージョン電流増大	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020 年 3 月
605	久志本真希、 宇佐美茂佳、 出来真斗、 本田善央、天野浩	名古屋大学	異なる InGaN 膜厚の(1- 101)GaN 基板上太陽電池の 作製	第 9 回ナノ・エピタキ シャル成長講演会	2017 年 7 月
606	篠田涼二、勝洋介、 小出典克、 岩谷素顕、 竹内哲也、上山智、 赤崎勇	名城大学	窒化物半導体材料のウエハ 接合	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015 年 9 月

607	高西徹、大角純也、岩谷素顕、上山智、竹内哲也、赤崎勇	名城大学	半極性(10-11)面自立 GaN 基板上 GaInN の成長機構の解析	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016 年 3 月
608	T. Takanishi, K. Morita, M. Iwaya, S. Kamiyama, T. Takeuchi, and I. Akasaki	名城大学	Microstructure of semi-polar (10-11) plane GaInN thick film on freestanding (10-11) GaN substrate	ISPlasma 2016, Aichi	2016 年 3 月
609	鈴木健太、財部覚、高須賀大貴、小出典克、竹内哲也、岩谷素顕、上山智、赤崎勇	名城大学	GaNIn トンネル接合と n 型 GaNSb による低温 p 側構造の作製	第 8 回 窒化物半導体結晶成長講演会	2016 年 5 月
610	N. Muramatsu, T. Takanishi, S. Mitsufuji, M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Kamiyama, and I. Akasaki	名城大学	Semipolar (10-1-1) GaInN/GaN p-i-n light emitting solar cells	12th International Conference on Nitride Semiconductors	2017 年 7 月
611	K. Takahashi, R. Shinoda, S. Mitsufuji, M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Kamiyama, T. Hattori, I. Akasaki, and H. Amano	名城大学、名古屋大学	Fabrication of GaInN/GaInP/GaAs/Ge 4-junction solar cell using wafer bonding technology	12th International Conference on Nitride Semiconductors	2017 年 7 月
612	高橋一矢、篠田涼二、光藤駿、岩谷素顕、上山智、竹内哲也、服部友一、赤崎勇、天野浩	名城大学、名古屋大学	ウエハ接合技術を用いた GaInN/GaInP/GaAs/Ge 4 接合太陽電池の作製	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017 年 9 月

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	東京大学	県の税優遇 3 社第 1 号 (石川県との共同研究)	北國新聞	2015/11/25
2	東京大学	(科学の扉) 次世代太陽電池 発電量・コスト 巡り競争激化	朝日新聞	2016/5/15
3	東京大学	太陽電池ナノテクで進化 研究中の次世代型 「量子効果」で効率向上	読売新聞	2016/9/1
4	電気通信大学	Cover Page (Phys. Status Solidi B, (2017) pp. 1700307 1-5.)	Phys. Status Solidi B	2018/4
5	電気通信大学	次世代先端デバイス動向(4) 量子ドットデバイス	Yano E Plus	2019/8

【その他】

番号	年度	タイトル	受賞・展示	受賞・展示年月
1	2015	EMS 賞 (第 34 回電子材料シンポジウム)	東京大学; 玉置亮	2015/7/17
2	2015	PVJapan2015 出展 「低コスト高効率太陽電池	東京大学先端科学	2015/07/29~07/31

		開発からエネルギー・ソリューション研究まで」東京ビッグサイト	技術研究センター 岡田研究室	
3	2015	PVJapan2015 出展「次世代太陽電池の研究開発-有機系太陽電池の拓く未来の低炭素スタイル-」東京ビッグサイト	東京大学先端科学 技術研究センター 瀬川・久保研究室	2015/07/29~07/31
4	2015	Poster Prize of Italian Association of Crystallography (AIC), Fifth European Conference on Crystal Growth (ECCG5)	九州大学; A. Kusaba, Y. Kangawa, S. Krukowski, K. Kakimoto	2015/9/10
5	2015	第 39 回応用物理学会講演奨励賞	東京大学; 玉置亮, 庄司靖, 岡田至崇	2015/9/14
6	2015	優秀ポスター発表賞 (第 5 回 CSJ 化学フェスタ 2015)	東京大学; Ling Wu, Gyu Min Kim, Hiroyasu Nishi, and Tetsu Tatsuma	2015/10/15
7	2015	Young Scientist Award, The 6th International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN-6)	九州大学; A. Kusaba, Y. Kangawa, Y. Honda, H. Amano, K. Kakimoto	2015/11/12
8	2016	PVJapan2016 出展「超高効率かつ低コストを実現する次世代III-V族太陽電池」東京ビッグサイト	東京大学先端科学 技術研究センター 岡田研究室	2016/06/29~07/01
9	2016	Outstanding Contribution in Reviewing Journal of Crystal Growth, Elsevier	電気通信大学	2017/1
10	2016	Poster Prize; Asian Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics (AP-HOPV17)	東京大学; H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	2017/2/4
11	2017	PVJapan2017 出展「超高効率かつ低コストを実現する次世代III-V族太陽電池」パシフィコ横浜	東京大学先端科学 技術研究センター 岡田研究室	2017/07/05~07/07
12	2017	Young Researcher Paper Award; 27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27)	東京大学; Ryo Tamaki	2017/11/17
13	2018	PVJapan2018 出展「超高効率かつ低コストを実現する次世代III-V族太陽電池」パシフィコ横浜	東京大学先端科学 技術研究センター 岡田研究室	2018/06/20~06/22
14	2018	Best Poster Award; 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7)	東京大学; Maxime Giteau, Stéphane Collin, Zacharie Jehl, Daniel Suchet, Jean-François Guillemoles, and Yoshitaka Okada	2018/7/13
15	2018	Student Award; 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC)	東京大学; K. Toprasertpong	2018/9/26

16	2019	Molecular Beam Epitaxy (Chapter 4, pp. 57-72), Wiley	電気通信大学	2019/2
17	2019	Best Poster Presentation Award (2nd prize); Asia Pacific Society for Materials Research 2019 Annual Meeting (APSMR2019)	東京大学 ; Yusuke Oteki, Yasushi Shoji, Naoya Miyashita, and Yoshitaka Okada	2019/7/29
18	2019	Energy Conversion Efficiency of Solar Cells	神戸大学	2019/8