

「太陽エネルギー技術研究開発  
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)」

事業原簿【公開】

担当部	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー部
-----	------------------------------------

## —目次—

概 要	iii
「太陽エネルギー技術研究開発」基本計画	iv
I. 事業の位置付け・必要性について	
1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性	I-1
1.1 NEDOが関与することの意義	I-1
1.2 実施の効果	I-1
2. 事業の背景・目的・位置づけ	I-1
II. 研究開発マネジメントについて	
1. 事業の目標	II-1
2. 事業の計画内容	II-1
2.1 研究開発の内容	II-1
2.2 研究開発の実施体制	II-37
2.3 研究開発の運営管理	II-41
III. 研究開発成果について	
1. 分野別、課題に対する主要な成果	III-1
2. 個別テーマの成果概要	III-6
3. 成果発表の件数	III-39
IV. 実用化の見通しについて	
1. 実用化の見通し	IV-1
2. 波及効果	IV-7

### (添付資料)

添付資料1：事前評価関連資料（事前評価書、パブリックコメント募集の結果）

添付資料2：論文リスト

概要

最終更新日

平成 22 年 8 月 10 日

プログラム（又は施策）名	H22fy:エネルギーイノベーションプログラム H20fy-H21fy:新エネルギー技術開発プログラム								
プロジェクト名	太陽エネルギー技術研究開発 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)				プロジェクト番号			07015	
担当推進部	新エネルギー部								
0. 事業の概要	本プロジェクトでは太陽光発電技術に関連し、新材料・新規構造等を利用して飛躍的な高性能化へのアプローチを探索し、可能性を実証することを目標にした研究開発を行う。そのために研究開発の中心となる研究拠点を設置し、他研究機関と協力関係を構築しながら、ブレークスルーを探る。研究拠点はリーダーシップを発揮しながら研究開発を実施・推進するのみならず、海外との研究協力（人材交流等）、及び、成果と情報の集積・交換の場としての役目を果たす。								
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>① 太陽光発電は、総合科学技術会議の「第3期科学技術基本計画」（平成 18 年 3 月閣議決定）において戦略重点科学技術に、また平成 19 年 4 月資源エネルギー庁公表の「エネルギー技術戦略（技術戦略マップ 2007）」において新エネルギーの開発・導入促進に寄与する技術の中でも特に政策目標への寄与が大きいと思われる技術に、それぞれ位置付けられている。更に、平成 19 年 3 月に改定された「エネルギー基本計画」において、自立した環境適合的なエネルギー需給構造を実現するため、太陽光発電をはじめとする新エネルギーの着実な導入拡大を図ることが挙げられている。</p> <p>② また、新・国家エネルギー戦略(平成 18 年 5 月公表)において、新エネルギーの中長期的な成長支援として太陽電池の技術開発支援を進めることが謳われている。 本研究開発は太陽光発電システムの技術開発により、経済性・性能を飛躍的に改善することを目標に行うものであり、まさにそういった背景と合致する。</p> <p>③ 近年、米国のソーラー・アメリカ計画（S A I）や欧州の戦略的研究計画（S R A）が太陽電池に関する技術開発計画として策定された。特筆すべきことに、その双方で新材料・新規構造等による革新的な太陽電池の開発についても述べられており、革新的な太陽電池に関するいくつかの開発プロジェクトが立ち上がっている。これに対し、日本の技術的優位性を超長期に渡って維持するためには、本研究開発を立ち上げ、積極的かつ継続的な研究開発を実施する必要がある。</p> <p>④ 本研究開発は新材料・新規構造等を用いた革新的な技術開発であることから、開発の推進には斬新な発想も必要になると考えられる。このような斬新な発想を得るためには国内は元より、広く海外からも知的資源を集める必要があり、海外研究機関との研究協力はその有効な手法の一つだと考えられる。</p> <p>本研究開発は研究拠点を中心とした強固な体制で、海外の研究機関との研究協力をを行いながら、従来技術の延長上でない革新的な技術の開発を推進するものであり、民間のみでは実施しえない技術開発である。更に本研究開発は太陽光発電の技術開発を通じ、温室効果ガスの排出量削減への寄与が期待できるものであり、非常に公共性が高い事業でもあるためNEDOが推進することがふさわしい。</p>								
II. 研究開発マネジメントについて									
事業の目標	2050年までに「変換効率が40%」かつ「発電コストが汎用電源未満料（7円/kWh未満）」の太陽電池を実用化することを目指した研究開発の中で、本研究開発は変換効率40%の実現に向けた技術の基礎・探索研究段階と位置づけて研究開発を実施する。								
事業の計画内容	主な実施事項	H20fy	H21fy	H22fy	H23fy	H24fy	H25fy	H26fy	総額
	ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発	←							→
	高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発	←							→
	低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発	←							→
開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載) (単位:百万)	会計・勘定	H20fy	H21fy	H22fy	H23fy	H24fy	H25fy	H26fy	総額
	一般会計	0	0	0					
	特別会計(需給)	26.4	17.5	19.1					

円)	総予算額	26.4	17.5	19.1					
契約種類：委託									
開発体制	経産省担当原課	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							
	プロジェクトリーダー	設置せず ただし、下記の各グループのリーダーをグループリーダーとしてNEDOが指名。 東京大学グループ：中野義昭 教授 産総研グループ：近藤道雄 センター長 東京工業大学グループ：小長井誠 教授							
	委託先（*委託先が管理法人の場合は参加企業数および参加企業名も記載）	Ⅱ．研究開発マネジメントについて の図1～3（実施体制1～3）参照							
情勢変化への対応	<p>・平成20年6月23日 より強固な体制での研究開発実施のため、平成20年度の政府予算20.00億円・NEDO内内示額18.73億円に対し、3.67億円の予算増額を行い、予算を22.40億円とした。</p> <p>・平成20年10月30日 補正予算5.00億円が示達されたので、一部事業者について加速を行い、平成21年度乃至は平成22年度購入予定の装置を平成20年度に前倒し発注するべく個別契約の実施計画書の変更を行った。</p>								
評価に関する事項	事前評価	平成19年度実施 担当部 新エネルギー技術開発部							
	中間評価	平成22年度 中間評価実施予定							
	事後評価	平成27年度 事後評価実施予定							
Ⅲ．研究開発成果について	<p>下記平成22年度中間目標について22年度末までに達成予定である。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・Ⅲ－V族系材料による高集光多接合太陽電池で非集光時の変換効率33%と集光時の変換効率42%を達成する。また、新概念太陽電池については動作原理を検証する。高度光利用技術についてはデバイスプロセスと組み合わせ量子収率を10%高めることに資する。</li> <li>・シリコンおよび化合物多接合太陽電池について要素セル材料の開発並びにデバイス化により多接合太陽電池で変換効率20%を達成する。新概念太陽電池については動作原理を検証する。高度光利用技術についてはデバイスプロセスと組み合わせ変換効率20%に資する。</li> <li>・バンドエンジニアリング、薄膜フルスペクトル太陽電池、光のマネージメント・TCO等の研究開発により、低倍率集光時、真性変換効率20%（有効受光面積：1cm<sup>2</sup>）を達成する。</li> </ul>								
	投稿論文	「査読付き」191件、「その他」15件（2010年5月末現在）							
	特許	「出願済」46件、「登録」0件（うち国際出願4件）（2010年5月末現在）							
	その他の外部発表（プレス発表等）	「研究発表・講演」772件、「新聞・雑誌等への掲載」60件 「展示会への出展」29件（2010年5月末現在）							
Ⅳ．実用化の見通しについて	<p>太陽電池生産量は2009年時点で世界全体において日本企業のシェアが約1/7である。一方、太陽光発電ロードマップPV2030+によれば2050年には国内市場向けだけでも太陽光発電産業は約4兆円産業に成長すると推定される。</p> <p>本研究開発は超長期的な技術開発を進め、革新的な技術により太陽光発電の変換効率の向上及び発電コストの低減を目指すものであるが、それらの技術の開発は、短期的にも現状の太陽電池の特性向上に役立つ技術への波及効果が期待でき、我が国の太陽光発電産業の国際競争力の維持向上につながっていくものと期待される。</p>								
Ⅴ．基本計画に関	作成時期	平成20年4月 作成							

<p>する事項</p>	<p>変更履歴</p>	<p>平成20年8月 新エネルギー技術研究開発に係る基本計画・実施方針を内容の明確化のため「拠点」という表現を「中心研究機関」あるいは「グループ」と変更する。</p> <p>平成20年10月 基本計画の「達成目標」について委託先との協議の結果、詳細な数値が決定したので追記を行った。</p> <p>平成22年3月 「新エネルギー技術研究開発」基本計画の研究開発項目⑦「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）」及び新規研究開発項目「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」を統合して新たに「太陽エネルギー技術研究開発」基本計画を制定。</p>
-------------	-------------	---

(エネルギーイノベーションプログラム)  
「太陽エネルギー技術研究開発」基本計画

新エネルギー技術開発部

## 1. 研究開発の目的・目標・内容

### (1) 研究開発の目的

環境と調和した健全な経済産業活動と安全・安心な国民生活の実現を図るため、クリーンエネルギーである太陽光発電の更なる普及が要望されている。太陽光発電の更なる普及を実現するためには、これまでに蓄積した技術の更なる高効率化、共通基盤技術の発展及び低コスト化を可能とする革新的技術の開発が不可欠である。本プロジェクトは、経済性・出力安定性といった課題を克服し、新エネルギー等の自律的な普及を図ることを目標とするエネルギーイノベーションプログラムの一環として実施する。

太陽光発電の急速な普及を背景に、海外においても、太陽光発電技術の開発が精力的に取り組まれており、太陽光発電ロードマップ（PV2030+）で示された技術課題の解決に向け、まさに、グローバルな開発競争となっている。我が国は太陽光発電の技術開発及びその導入量・生産量において長らく世界一を誇っていたが、欧州を中心に行われている導入普及政策により、市場の中心は欧州へと移り始めており、我が国の地位確立のためには、これまで以上の技術開発が必要となっている。このため、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO」という。）は、産学の科学的知見を結集して太陽光発電の技術開発を行い、これを産業技術へ繋げていくとともに、社会の共通基盤として情報の整備、提供を通じて、行政、産業界、地域住民等の間で科学的知見に基づいた正確かつ適切な認識の醸成を図ることを目的に、本プロジェクトを実施する。

### (2) 研究開発の目標

太陽光発電ロードマップに示された2020年の発電コスト14円/kWh、2030年の7円/kWh、2050年の7円/kWh未満に資す技術の開発を目標とする。

なお、個々の研究開発項目の目標は別紙「研究開発計画」に定める。

### (3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

[委託事業]

- ①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）〔委託事業〕
- ②太陽光発電システム次世代高性能技術の開発〔委託事業、共同研究事業（負担率：2/3）〕

## 2. 研究開発の実施方式

### (1) 研究開発の実施体制

本研究開発は、NEDOが、単独ないし複数の企業、大学等の研究機関(原則、国内に研究開発拠点を有していること。ただし、国外企業の特別な研究開発能力、研究施設等の活用あるいは国際標準獲得の観点からの国外企業との連携が必要な場合はこの限りではない)から公募によって研究開発実施者を選定し実施する。

NEDOは、研究開発に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルを検討し、これを最大限活用することにより効率的な研究開発を図る観点から、必要に応じて研究開発責任者(プロジェクトリーダー)を指名し、その下に効果的な研究を実施する。

### (2) 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、経済産業省及び研究開発実施者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標、並びに本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。

具体的には、必要に応じて外部有識者による技術検討委員会を設置し、開発内容について審議し、その意見を運営管理に反映させる他、プロジェクトリーダーを指名しているプロジェクトは、四半期に一回程度プロジェクトリーダー等を通じてプロジェクトの進捗について報告を受けること等を行う。

### 3. 研究開発の実施期間

本研究開発の実施期間は研究開発項目ごとに以下のとおりとする。

- ① 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）  
本研究開発の期間は、平成20年度から平成26年度までの7年間とする。
- ② 太陽光発電システム次世代高性能技術の開発  
本研究開発の期間は、平成22年度から平成26年度までの5年間とする。

### 4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、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について、外部有識者による研究開発の中間評価及び事後評価を実施する。なお、中間評価結果を踏まえ必要に応じてプロジェクトの加速・縮小・中止等の見直しを迅速に行う。評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。なお、評価の実施時期や方法は、研究開発項目毎に別紙研究開発計画に記載する。

### 5. その他重要事項

#### (1) 研究開発成果の取扱いについて

- ① 成果の普及  
本研究開発で得られた研究成果についてはNEDO、委託先とも普及に努めるものとする。
- ② 知的基盤整備事業又は標準化等との連携  
得られた研究開発の成果については、知的基盤整備又は標準化等との連携を図るためデータベースへのデータ提供、標準案の提案等を積極的に行う。
- ③ 知的財産権の帰属  
本研究開発で得られた研究開発の成果に関わる知的財産権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。

#### (2) 基本計画の変更

NEDOは、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、内外の研究開発動向、政策動向、プログラム基本計画の変更、評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

#### (3) 根拠法

- ① 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）  
「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第1項第1号イ」
- ② 太陽光発電システム次世代高性能技術の開発  
「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第1項第1号イ」

### 6. 改訂履歴

- (1) 平成22年3月、「新エネルギー技術研究開発」の研究開発項目⑦「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）」及び新規研究開発項目「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」を統合して新たに制定。

(別紙) [研究開発計画]

研究開発項目①「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)

### 1. 研究開発の必要性

現在、世界的にこれまでにないほど、環境に対する意識が高まっている。その中で2007年の「地球温暖化対策に関する内閣総理大臣演説」において、2050年までに温室効果ガスCO<sub>2</sub>の排出量を半減する『Cool Earth 50』が発表された。太陽光発電はこの提案に貢献し、持続可能な社会の構築に資する技術の一つとして期待されている。大規模な普及を実現し、期待に応えるためには、太陽光発電の性能の飛躍的な向上が必要である。それにより、住宅や商用施設等での導入促進や、未利用地等での大規模発電等、太陽光発電の適用可能域を抜本的に拡大し、さらに海外の砂漠など全地球的な視点での太陽光発電の利用も可能とするなど、グローバルな展開も期待される。しかしながら、求める性能レベルにまで飛躍的に向上させるためには、従来技術の延長線上にない革新的な技術の開発が必要不可欠である。

また、我が国の太陽光発電技術は世界のトップ水準にあるが、海外を見渡すと、近年、米国の Solar America Initiative (SAI:ソーラー・アメリカ計画) や欧州の Strategic Research Agenda (SRA:戦略的研究計画) など太陽電池に関する技術開発計画が策定され、その双方で新材料・新規構造等による革新的な太陽電池の開発が取り上げられており、既にいくつかの開発プロジェクトが立ち上がっている。

革新的な太陽電池の開発にあたっては、多岐に亘る可能性の確認と選択を進めることが重要であり、それぞれの技術分野の専門家との協力により知見を積み上げていく必要がある。

このような観点から、温室効果ガスの半減に寄与する技術を確立し、日本の技術的優位性を超長期に亘って維持するためには、我が国においても革新的な超高効率太陽電池の開発を実施する研究グループを形成し、その中心的研究機関を中心として、優れた海外の研究者と協力を行いながら積極的かつ継続的な研究開発を推進する必要がある。

### 2. 目的

地球温暖化対策として温室効果ガスの大幅削減に寄与するために、太陽光発電の性能を飛躍的に向上させることを目的とする。これにより、住宅や商業施設等での導入促進や、未利用地等での大規模発電等、太陽光発電の適用可能域を抜本的に拡大することが可能となる。

また、2050年に向けた長期的視野に立ち、国内の知見・技術を結集して、新材料・新規構造等を利用した革新的な太陽光発電技術を開発することで、日本の技術的優位性を超長期に亘って維持し、産業競争力強化に資することを目的とする。

### 3. 研究開発の具体的内容

本研究開発では、太陽光発電技術に関連し、新材料・新規構造等を利用して「変換効率40%超」かつ「発電コストが汎用電力料金並み(7円/kWh)」の達成へのアプローチを探索し、可能性を実証することを目標にした研究開発を行う。

本研究開発では、変換効率向上のためのブレークスルーを探ることを優先的に行い、低コスト化技術については変換効率向上技術の進捗に応じて取り組むこととする。また、海外の先進的な研究機関・大学等と情報や研究人材の交流(研究員の派遣や受入れ等)を実施し、研究開発を促進させる。

本研究開発では以下の技術分野を対象とする。

- ・多接合型太陽電池
- ・量子ナノ構造太陽電池
- ・光マネジメント構造(波長変換・波長分割構造等)
- ・その他新規概念太陽電池(熱光起電力技術:TPV、プラズモン太陽電池等)
- ・革新的太陽電池評価技術

本研究開発では、公募によって複数の研究グループを選定し、研究開発を委託により実施する。ただし、本研究開発にあたっては新たな研究施設等の建設は行わない。

平成22年度に実施する「日・EUエネルギー技術協力 太陽光分野」については、国際共同研



究・実証等に係る事業であり、委託により実施する。

#### 4. 達成目標

2050年までに「変換効率が40%」かつ「発電コストが汎用電源未満料（7円/kWh未満）」の太陽電池を実用化することを目指した研究開発の中で、本研究開発は変換効率が40%の実現に向けた技術の基礎・探索研究段階と位置づけて研究開発を実施する。

個別研究開発テーマの最終目標及び中間目標は、テーマごとに取り組む技術の現在の成熟度と、2050年に到達すべき技術レベルから、平成26年度末時点で達成すべき技術レベルを判断し、以下の通りとする。

##### (1) ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発

国立大学法人東京大学 先端科学技術研究センター 情報デバイス分野教授 中野 義昭氏をグループリーダーとして以下の目標で研究開発を実施する。

中間目標（平成22年度末）

- ・Ⅲ－Ⅴ族系材料による高集光多接合太陽電池で非集光時の変換効率33%と集光時の変換効率42%を達成する。
- ・新概念太陽電池については動作原理を実証する。
- ・高度光利用技術についてはデバイスプロセスと組み合わせて量子収率を10%高めることに資する。

最終目標（平成26年度末）

- ・Ⅲ－Ⅴ族系材料による高集光多接合太陽電池で非集光時の変換効率35%と集光時の変換効率45%を達成する。
- ・新概念太陽電池については変換効率10%ないし15%を達成する。
- ・高度光利用技術についてはデバイスプロセスと組み合わせて上記目標に資する。

##### (2) 高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発

独立行政法人産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター センター長 近藤 道雄氏をグループリーダーとして以下の目標で研究開発を実施する。

中間目標（平成22年度末）

- ・シリコンおよび化合物多接合太陽電池について要素セル材料の開発並びにデバイス化により、多接合太陽電池で変換効率20%を達成する。
- ・新概念太陽電池については動作原理を実証する。
- ・高度光利用技術においてはデバイスプロセスと組み合わせて変換効率20%の達成に資する。

最終目標（平成26年度末）

- ・シリコンおよび化合物多接合太陽電池について要素セルの高度化ならびに高度光利用技術の組み合わせにより多接合太陽電池で変換効率25%を達成する。
- ・新概念太陽電池については変換効率10%を達成する。

##### (3) 低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発

国立大学法人東京工業大学 大学院理工学研究科 電子物理工学専攻教授 小長井 誠氏をグループリーダーとして以下の目標で研究開発を実施する。

中間目標（平成22年度末）

バンドエンジニアリング、薄膜フルスペクトル太陽電池、光のマネージメント・TCO等の研究開発により、低倍率集光時、真性変換効率20%（有効受光面積：1cm<sup>2</sup>）を達成する。

最終目標（平成26年度末）

小面積の5～6接合薄膜フルスペクトラムセルにより、真性変換効率30%（低倍率集光、有効受光面積：1cm<sup>2</sup>）を達成する。

##### (4) 革新的太陽電池評価技術の研究開発

平成21年度に公募により実施者を選定し、以下の目標で研究開発を実施する。

最終目標（平成22年度末）

集光型多接合太陽電池評価技術の開発

薄膜多接合太陽電池評価技術の開発

(5) 日・EUエネルギー技術協力 太陽光分野

日・EUの研究機関が協力して太陽電池に関する研究開発を実施する。

平成22年度に公募により実施者を選定し、研究開発を実施する。

目標は公募後に設定する。

5. 評価の時期及び方法

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成22年度及び平成24年度後半に実施し、研究開発テーマごとに進捗を判断し、技術分野及び研究開発テーマの見直し・絞り込み等を行い、必要に応じて研究グループの整理を行う。また、事後評価を平成27年度に実施する。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

# I. 事業の位置づけ・必要性について

## 1. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

### 1.1 NEDO が関与することの意義

現在、世界的にこれまでにないほど、環境に対する意識が高まっている。その中で2007年の「地球温暖化対策に関する内閣総理大臣演説」において、2050年までに温室効果ガスCO<sub>2</sub>の排出量を半減する『Cool Earth 50』が発表された。太陽光発電はこの提案に貢献し、持続可能な社会の構築に資する技術の一つとして期待されている。大規模な普及を実現し、期待に応えるためには、太陽光発電の性能の飛躍的な向上が必要である。それにより、住宅や商用施設等での導入促進や、未利用地等での大規模発電等、太陽光発電の適用可能域を抜本的に拡大し、さらに海外の砂漠など全地球的な視点での太陽光発電の利用も可能とするなど、グローバルな展開も期待される。しかしながら、求める性能レベルにまで飛躍的に向上させるためには、従来技術の延長線上にない革新的な技術の開発が必要不可欠である。

また、我が国の太陽光発電技術は世界のトップ水準にあるが、海外を見渡すと、近年、米国の Solar America Initiative (SAI:ソーラー・アメリカ計画) や欧州の Strategic Research Agenda (SRA:戦略的研究計画) など太陽電池に関する技術開発計画が策定され、その双方で新材料・新規構造等による革新的な太陽電池の開発が取り上げられており、既にいくつかの開発プロジェクトが立ち上がっている。

革新的な太陽電池の開発にあたっては、多岐に亘る可能性の確認と選択を進めることが重要であり、それぞれの技術分野の専門家との協力により知見を積み上げていく必要がある。

このような観点から、温室効果ガスの半減に寄与する技術を確立し、日本の技術的優位性を超長期に亘って維持するためには、我が国においても革新的な超高効率太陽電池の開発を実施する研究グループを形成し、その中心的研究機関を中心として、優れた海外の研究者と協力をしながら積極的かつ継続的な研究開発を推進する必要がある。

新コンセプトの太陽電池等、現状技術の延長にない技術革新を目指した長期視野での技術研究開発を実施する本事業は、上記ロードマップに従った長期にわたり軸のぶれがない取り組みの一環であるが、事業リスクが高く、実施期間も長期にわたることから、企業などが自主的に実施することは困難であり、NEDO 事業として行うことの意義は大きく、必要とされている。

### 1.2 実施の効果

地球温暖化対策として温室効果ガスの大幅削減に寄与するために、太陽光発電の性能を飛躍的に向上させることを目的とする。これにより、住宅や商業施設等での導入促進や、未利用地等での大規模発電等、太陽光発電の適用可能域を抜本的に拡大することが可能となる。

また、2050年に向けた長期的視野に立ち、国内の知見・技術を結集して、新材料・新規構造等を利用した革新的な太陽光発電技術を開発することで、日本の技術的優位性を超長期に亘って維持し、産業競争力強化につながる。

## 2. 事業の背景・目的・位置づけ

太陽光発電は、総合科学技術会議の「第3期科学技術基本計画」（平成18年3月閣議決定）において戦略重点科学技術に、また平成19年4月資源エネルギー庁公表の「エネルギー技術戦略（技術戦略マップ2007）」において新エネルギーの開発・導入促進に寄与する技術の中でも特に政策目標への寄与が大きいと思われる技術に、それぞれ位置付けられている。更に、平成19年3月に改定された「エネルギー基本計画」において、自立した環境適合的なエネルギー需給構造を実現するため、太陽光発電をはじめとする新エネルギーの着実な導入拡大を図ることが挙げられている。

また、新・国家エネルギー戦略(平成18年5月公表)において、新エネルギーの中長期的な成長支援として太陽電池の技術開発支援を進めることが謳われている。本研究開発は太陽光発電シ

システムの技術開発により、経済性・性能を飛躍的に改善することを目標に行うものであり、まさにそういった背景と合致する。

本研究開発は、新コンセプトの太陽電池等、現状技術の延長にない技術革新を目指した中・長期視野での技術研究開発を実施することで、太陽光発電の経済性、性能、機能、適用性、利便性等の抜本的な改善を図るものであり、太陽光発電の制約のない普及拡大を促進するために必要不可欠である。本事業で研究開発を行う低価格・高性能の太陽電池開発、抜本的改革技術の探索は、NEDO が平成 21 年 6 月に「2030 年に向けた太陽光発電ロードマップ (PV2030)」を改訂した「太陽光発電ロードマップ (PV2030+)」においても中心的な研究開発課題として位置づけられている。

## 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

革新的太陽光発電技術研究開発（以下、本事業）は、地球温暖化対策として温室効果ガスの大幅削減に寄与するために、太陽光発電の性能を飛躍的に向上させることを目的とする。また、2050年に向けた長期的視野に立ち、国内の知見・技術を結集して、新材料・新規構造等を利用した革新的な太陽光発電技術を開発することで、日本の技術的優位性を超長期に渡って維持し、産業競争力強化に資することを目的とする。

#### (2) 研究開発の目標

2050年までに「変換効率が40%」かつ「発電コストが汎用電源未満料（7円/kWh未滿）」の太陽電池を実用化することを目指した研究開発の中で、本事業は変換効率40%の実現に向けた技術の基礎・探索研究段階と位置づけて研究開発を実施する。

個別研究開発テーマの最終目標及び中間目標は、テーマごとに取り組む技術の現在の成熟度と、2050年に到達すべき技術レベルから、平成26年度末時点で達成すべき技術レベルを判断し、詳細目標を設定した。（詳細目標は2.1.4 究開発計画 を参照）

### 2. 事業の計画内容

#### 2.1 研究開発の内容

##### 2.1.1 研究開発項目分野

本事業では、太陽光発電技術に関連し、新材料・新規構造等を利用して「変換効率40%超」かつ「発電コストが汎用電力料金並み（7円/kWh）」の達成へのアプローチを探索し、可能性を実証することを目標にした研究開発を行う。

本事業では、変換効率向上のためのブレークスルーを探ることを優先的に行い、低コスト化技術については変換効率向上技術の進捗に応じて取り組むこととする。また、海外の先進的な研究機関・大学等と情報や研究人材の交流（研究員の派遣や受入れ等）を実施し、研究開発を促進させる。

本事業では以下の技術分野を対象とした。

- ・多接合型太陽電池
- ・量子ナノ構造太陽電池
- ・光マネジメント構造（波長変換・波長分割構造等）
- ・その他新規概念太陽電池（熱光起電力技術：TPV、プラズモン太陽電池等）

上記目標を達成するため、下記開発項目分野について研究開発を実施した。

- ①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発
- ②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発
- ③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発

##### 2.1.2 研究開発項目の推移

平成20年度には、公募から選定された3件の研究開発を開始した。

研究開発テーマ毎の平成22年度までの開発スケジュールを表1に示す。なお、平成23年度以降のスケジュールについては、中間評価の結果を踏まえ決定する。

表 1. 研究開発の全体スケジュール

No	研究開発テーマ	H 2 0	H 2 1	H 2 2
I ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発				
① 集光型多接合太陽電池				
1	4 接合太陽電池の研究開発	←	→	→
2	多接合太陽電池集光動作解析	←	→	→
3	広帯域 AlGaInN 結晶を用いた多接合太陽電池の開発	←	→	→
4	エピタキシャル成長技術開発（逆エピ、格子整合型 4 接合）	←	→	→
② 効率量子タンデム太陽電池製造プロセス技術開発				
5	MOVPE ナノ構造形成技術	←	→	→
6	高倍集光セル微細加工技術	←	→	→
7	次世代プロセス技術開発（InGaN 多接合セル）	←	→	→
8	水素 MBE 法（GaInNAs:Sb/量子ナノ構造）	←	→	→
9	MOVPE 法（GaInNAs/量子井戸構造）	←	→	→
10	エピタキシャル成長技術開発（量子構造挿入型、格子整合型 4 接合）	←	→	→
11	高倍集光セルの開発	←	→	→
③ 量子ドット超格子を基板とした超高効率太陽電池				
12	量子ドット超格子型	←	→	→
13	量子ドット超格子型（自己組織化量子ドットの積層化）	←	→	→
14	量子ドット・有機ハイブリッド材料による中間バンド型	←	→	→
15	光マネジメント（金属ナノ粒子）	←	→	→
④ハイブリッド素材による超高効率多接合型太陽電池				
16	高配向性平面ポリシラン材料の開発	←	→	→
17	新概念素子用ハイブリッド光電素材	←	→	→
18	多結晶化合物多接合太陽電池	←	→	→
19	E T A 構造による新概念素子	←	→	→
20	金属ナノ粒子/光マネジメント材料	←	→	→
21	金属ナノ粒子吸収型セルの研究開発	←	→	→
22	ナローバンドギャップ太陽電池	←	→	→
II 高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発				
①シリコン系 3 接合太陽電池の開発				
1	高配向性平面ポリシラン材料の開発	←	→	→
2	配列制御ナノ結晶シリコン材料の開発	←	→	→
3	結晶系ナローギャップ材料太陽電池の開発	←	→	→
4	シリコン-ゲルマニウム-スズ低温エピタキシャル新技術の開発	←	→	→
5	ガラス基板上のシリコン・ゲルマニウム等単結晶シード層形成技術	←	→	→
6	ゲルマニウム系単結晶エピ成長技術の開	←	→	→

	発			
7	フッ素系イオン制御プラズマプロセスの開発	←		→
8	擬単結晶固相成長技術の開発	←		→
9	ヘテロ接合デバイス化技術の開発	←		→
10	ヘテロ接合デバイス化技術の開発－超高周波プラズマ	←		→
11	ヘテロ接合デバイス化技術の開発－低ダメージ成膜	←		→
②化合物系4接合太陽電池の開発				
12	ワイドギャップカルコゲナイド系太陽電池の開発	←		→
13	構造制御ワイドバンドギャップ化合物太陽電池の開発	←		→
14	革新的ワイドギャップ材料太陽電池の開発	←		→
15	酸窒化物系ワイドギャップ材料の開発	←		→
16	酸化物ワイドギャップ材料の開発 A	←		→
17	酸化物ワイドギャップ材料の開発 B	←		→
18	化合物系タンデムセルの開発	←		→
③新概念新材料の検討				
19	ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討 A	←		→
20	ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討 B	←		→
21	ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討 C	←		→
22	ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討 D	←		→
23	単結晶有機半導体を用いた新概念太陽電池の検討 A	←		→
24	単結晶有機半導体を用いた新概念太陽電池の検討 B	←		→
25	強相関材料を用いた新概念太陽電池の検討 A	←		→
26	強相関材料を用いた新概念太陽電池の検討 B	←		→
27	構造制御ナノ材料を用いた太陽電池	←		→
④高度光利用技術の開発				
28	メカニカルスタック技術の開発 A	←		→
29	メカニカルスタック技術の開発 B	←		→
30	高度光閉じ込め技術の開発 A	←		→
31	高度光閉じ込め技術の開発 B	←		→
32	高性能透明導電膜の開発	←		→
33	高性能ガラス基板作技術を使った高性能透明導電膜の開発	←		→
Ⅲ低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発				
① バンドエンジニアリング				
1	ナノドット禁制帯幅制御	←		→
2	マルチエキシトン	←		→

3	ナノドット量子効果を有する薄膜の形成技術	←		→
4	Geの遷移型制御	←		→
5	薄膜新素材	←		→
6	ワイド/ナローギャップ材料設計	←		→
② 薄膜フルスペクトル太陽電池				
7	シリコン系薄膜集光型セル	←		→
8	広バンドギャップシリコン系薄膜	←		→
9	サブセル界面接合技術	←		→
10	カルコパイライト系集光型セル	←		→
11	放熱基板カルコパイライト系集光型セル	←		→
12	構造設計とカルコパイライト系トップセル	←		→
13	光学設計技術	←		→
14	集光型 CdTe 薄膜	←		→
③ 光のマネージメント・TCO				
15	表面プラズモン	←		→
16	p型透明導電膜	←		→
17	フルスペクトルTCO	←		→
18	グラフェン透明導電膜	←		→

### 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2に示す。

表2. 研究開発予算（実績）の推移（単位：億円）

年度	H20	H21	H22(予定)	総額(予定)
ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発	14.0	6.6	7.6	28.2
高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発	6.0	5.4	6.2	17.6
低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発	6.4	5.5	5.3	17.2
計 特別会計(石特高度化勘定)	26.4	17.5	19.1	63.0

### 2.1.4 研究開発計画

#### 研究開発項目①「ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発」

##### 1. 研究開発の必要性

本テーマでは、東京大学を中心として、Ⅲ－Ⅴ族系材料による高集光多接合太陽電池の逆エピ格子不整合系・量子構造挿入型・InGaAsN(格子整合)挿入型のいずれかタイプにおいて、3ないし4接合を実現して、集光時のセル変換効率45%を実現し(平成22年度)、高集光セルで問題となる電流抵抗ロスの低減についても取り組む。また、これに加えて東京大学を中心として、新概念、新技術の太陽電池の創出を目指した研究開発を実施する。

##### 2. 具体的内容



#### (1) 集光型多接合太陽電池

Ⅲ－Ⅴ族系材料による高集光多接合太陽電池において、高品質な InGaAsN 材料の開発、逆エビ構造多接合セルを開発して、超高効率な 3 ないし 4 接合太陽電池を開発する。さらに、3 接合セルを対象に、集光動作解析を進めるとともに、計算機シミュレーションによって材料中の残留不純物挙動の解析も行う。

#### (2) 高効率量子タンデム太陽電池 製造プロセス技術開発

Ⅲ－Ⅴ族系材料による高集光多接合太陽電池の量子構造挿入型・InGaAsN(格子整合)挿入型のいずれかのタイプにおいて、3 又は 4 接合を実現して、集光時のセル変換効率の向上と、高集光セルで問題となる電流抵抗ロスの低減についても取り組む。

#### (3) 量子ドット超格子を基盤とした超高効率太陽電池

量子ドットを導入したマルチバンド構造では、変換効率の理論値は最高 60%を越え、シングル接合太陽電池の約 2 倍の効率が得られる。そのためには高密度、高均一で三次元的に周期配列した量子ドット超格子を開発する必要がある。特に、中間層厚を薄くした量子ドット超格子、そしてサイズ揺らぎ 10%以下、中間層厚 10nm 以下を実現することを目標とする。また並行して、金属ナノ粒子を用いた光マネジメント技術の開発を行う。

#### (4) ハイブリッド素材による超高効率多接合型太陽電池

多接合化による 40%超の変換効率達成を将来目標とし、新技術および新概念に基づく発電機構を研究し、可視から近赤外領域に渡る様々な吸収帯や高いキャリア移動度などを有する新規素材を用いた新概念、新接合太陽電池を創出し、超高効率多接合太陽電池を見通すことが可能な要素技術を開発する。特に、新概念を実現するために不可欠な素材探索およびセル構造構築に向けた研究開発においては、無機、有機、金属、ハイブリッド素材の研究開発において、強みを有する機関との連携体制を構築する。

### 3. 目標

平成 22 年度中間目標：

Ⅲ－Ⅴ族系材料による高集光多接合太陽電池で非集光時の変換効率 33%と集光時の変換効率 42%を達成する。また、新概念太陽電池については動作原理を検証する。高度光利用技術についてはデバイスプロセスと組み合わせて量子収率を 10%高めることに資する。

平成 26 年度最終目標：

Ⅲ－Ⅴ族系材料による高集光多接合太陽電池で非集光時の変換効率 35%と集光時の変換効率 45%を達成する。また、新概念太陽電池については変換効率 10%ないし 15%を達成する。高度光利用技術についてはデバイスプロセスと組み合わせて上記目標に資する。

#### 研究開発項目②「高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発」

##### 1. 研究開発の必要性

本テーマでは、40%を超える高効率のために最適な複数のバンドギャップを有する高度秩序薄膜材料を新たに設計・創製する。それら新材料をシリコン系 3 接合および化合物系 4 接合デバイスに適用し、波長選択型導電層を介して 2 端子メカニカルスタック太陽電池を形成する。また光マネジメント技術、多重エキシトン生成、二光子利用技術などの新原理検証についても検討を行う。これらの開発された新材料は最終的に最適なものを選択して相互に利用する。

本件研究開発では、本テーマに関する全体目標の達成に向けて、産業技術総合研究所がグループの中心となって研究開発を行うと共に、担当サブテーマの研究開発を行う。

## 2. 具体的内容

### (1) シリコン系 3 接合太陽電池の開発

シリコン系材料において、トップ、ボトム層それぞれに用いるワイドおよびナローギャップ材料の開発を行う。また、単結晶あるいは高度秩序構造を持つ材料の製膜技術を開発するほか、材料制御技術の確立を目指す。さらに、これらの材料に適したヘテロ接合技術・デバイスの基礎検討も行う。

### (2) 化合物系 4 接合太陽電池の開発

化合物系 4 接合太陽電池のトップ層に用いることを想定した CIS 系、酸化物、化合物系ワイドギャップ材料の開発を行う。量子ドット超格子のミニバンドを用いた超高効率太陽電池の開発を行う。また、CIS 系化合物のメカニカルスタック技術の開発を行う。

### (3) 新概念新材料の検討

多重励起子生成が得られるナノシリコンやカーボンナノチューブ等を用いたナノカーボン材料およびデバイス化の開発を行う。また、有機系材料においても、効率向上を目指し、単結晶材料およびデバイス化の開発を行う。また、多重キャリア生成が得られるとされる強相関材料およびデバイス化の開発も行う。

### (4) 高度光利用技術の開発

各セルを機械・電気・光学的接合を可能にするモノリシックメカニカルスタック技術の開発を行う。光学ロスの少ない高性能透明導電膜の開発を行う。また、メカニカルスタック技術に適した新規光閉じ込め技術の開発も行う。

## 3. 目標

平成 22 年度中間目標：

シリコンおよび化合物多接合太陽電池について要素セル材料の開発並びにデバイス化により多接合太陽電池で変換効率 20% を達成する。新概念太陽電池については動作原理を検証する。高度光利用技術についてはデバイスプロセスと組み合わせて変換効率 20% に資する。

平成 26 年度最終目標：

シリコンおよび化合物多接合太陽電池について要素セルの高度化ならびに高度光利用技術の組み合わせにより多接合太陽電池で変換効率 25% を達成する。新概念太陽電池については変換効率 10% を達成する。

## 研究開発項目③「低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発」

### 1. 研究開発の必要性

本テーマでは、東京工業大学を中心として、大面積化が可能な薄膜系で、将来、エネルギー変換効率 40% を実現するため、ワイドギャップからナノギャップの広い禁制帯幅の領域で、今までにない光吸収層材料を開発するとともに、広い波長範囲で有効に光子を利用するため光のマネジメント技術の開発を行う。これらの要素技術をもとに、5~6 接合からなる低倍率集光型薄膜太陽電池を試作し、エネルギー変換効率 30% を達成する。

## 2. 具体的内容

### (1) バンドエンジニアリング

薄膜フルスペクトル太陽電池のミドルセル用光吸収層材料として、1.1-1.6eV の範囲で禁制帯幅制御が可能な SiC/Si ナノドットを開発する。シリコン量子ドットのサイズ効果による

バンドエンジニアリング、ならびに、マルチエキシトン生成の顕在化による量子効率増倍などの諸効果の原理実証と、薄膜太陽電池へ適用可能性を検証する。ナノドット量子効果を有するボトム層対応高品位薄膜の開発を行う。歪 Ge 膜の作製技術の開発において、間接遷移型半導体から直接遷移型半導体への転換を実証する。アモルファス／微結晶化合物薄膜新素材、およびワイドギャップ(1.7～2.0eV)材料やナローバンドギャップ(0.6～1.0eV)材料の材料設計・開発をおこなう。以上の検討成果により、この成果を、中心機関と連携して太陽電池に適用し、目標の変換効率の実現を目指す。

#### (2) 薄膜フルスペクトル太陽電池

シリコン系薄膜、CdTe 薄膜、カルコパイライト薄膜、ならびに、これらを組み合わせた薄膜フルスペクトル太陽電池を開発する。さらに、これらの薄膜フルスペクトル太陽電池を低倍率集光下で有効に動作させるためのデバイス技術を開発する。広バンドギャップシリコン系薄膜の開発、及びフィルファクタの低下を防止するサブセル界面接合技術の開発を行う。また、Ag 系及び Cu 系カルコパイライト材料を用いた太陽電池の必要特性を明らかにする。各要素太陽電池間を光学的なロスなく接合する『オプティカルカップリング』構造の設計・形成技術の開発を行う。さらに集光型 CdTe 太陽電池を開発し、シリコン系薄膜太陽電池などと組み合わせて多接合セルあるいは波長スプリッティングによる集積型セルを開発する。

#### (3) 光のマネジメント・TCO

半導体太陽電池に適用可能な金属ナノ粒子の表面プラズモンによる効果を明確化し、その効果を有効に利用できる太陽電池構造を検討する。集光型セル用 TCO への要求特性を満足するグラフェンをはじめとする新材料の探索研究を行い、材料の薄膜作製技術開発を行う。

### 3. 目標

平成 22 年度中間目標：

バンドエンジニアリング、薄膜フルスペクトル太陽電池、光のマネジメント・TCO 等の研究開発により、低倍率集光時、真性変換効率 20% (有効受光面積：1cm<sup>2</sup>) を達成する。

平成 26 年度最終目標：

小面積の 5～6 接合薄膜フルスペクトルセルにより、真性変換効率 30% (低倍率集光、有効受光面積：1cm<sup>2</sup>) を達成する。

2.1.5 研究開発内容

研究開発テーマ、開発目標、研究内容は以下のとおり。

表.3 研究開発項目①「ポストシリコン超高効率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	達成目標	その他
①集光型多接合太陽電池						
1	20～22	4接合太陽電池の研究開発	豊田工業大学	InGaAsN 太陽電池の高効率化において、窒素(N)に起因した欠陥によるキャリア移動度、キャリア寿命の低下が最大の課題である。本プロジェクトでは、成膜時の表面反応過程の制御により欠陥密度低減が可能な、化学ビーム・エピタキシー(CBE)法を用いて、高品質 InGaAsN 材料の開発を行う。InGaAsN 材料の成膜過程、電子物性と欠陥物性を詳細に検討して、材料品質の向上をはかる。さらに、成膜過程の理解のため、III-V-N 系半導体成長シミュレータの研究開発を、九州大学に再委託して行う。	22年度中間目標： InGaAsN 単接合太陽電池で非集光の変換効率15%を得る。  26年度最終目標： シャープ株式会社と相互に協力して、AlInGaP/InGaAs/InGaAsN(1eV)/(Ge または InGaAs) 4接合セルにおいて、非集光時変換効率35%、1000倍集光時変換効率45%を達成する。	
2	20～22	多接合太陽電池集光動作解析	豊田工業大学 (再委託：九州大学、宮崎大学)	高効率化の観点からサブセル材料のバンドギャップの最適化をはかった格子不整合系3接合セルを対象に、高効率化に不可欠な転位挙動の解析と転位密度低減、ならびに集光動作による高効率化を研究する。格子不整合 1.2eV の InGaAs の MBE 法によるエピ成長および転位挙動の解析とそれに基づく転位密度低減を検討する。また、集光動作特性解析シミュレータの開発と集光動作特性解析を、宮崎大学に再委託して行う。	22年度中間目標： シャープ株式会社に協力して集光型多接合太陽電池の高効率化に寄与し、集光時の変換効率42%を達成する。  26年度最終目標： InGaAsN 結晶成長技術およびシャープ株式会社と協力して、3ないし4接合セルの高効率化に寄与し、集光時の変換効率45%を達成する。	
3	20～22	広帯域 AlGaInN 結晶を用いた多接合太陽電池の開発	名城大学	以下の要素技術を構築しながら研究を遂行する。 ①GaInN 結晶成長技術の確立： 低 In 組成(平成20年度)、中 In 組成(平成21年度)、高 In 組成(平成22年度) ②p 型 GaInN 導電性制御技術： 低 In 組成(平成20年度)、中 In 組成(平成21年度)、高 In 組成(平成22年度) ③GaInN および GaInNAs 少数キャリア拡散長評価 少数キャリア寿命を各年度ごとに目標を定めて評価する	22年度中間目標： 1.0eV 帯または 1.4eV 帯の単接合セルにて、変換効率5%を達成する  26年度最終目標： 広帯域 AlGaInN 結晶を用いた多接合太陽電池の検討し、単接合セルで変換効率10%以上を達成し、かつ、多接合セルの製作のための要素技術を確立する	
4	20	エピタキ	シャープ	格子不整合系の逆積み3接合	22年度中間目標：	

	～ 22	シヤル成長 技術開発 (逆エピ、 格子整合型 4接合)	ブ(株)	セルの成長条件の最適化を行う。平成 23 年以降は逆積み 3 接合セル技術を発展させて逆積み 4 接合セル検討を行い、併せて量子構造形成多接合セル、InGaAsN 層導入多接合セル開発も行う。	逆積み 3 接合セルで非集光時変換効率 33%、集光時変換効率 42%を達成する。  26 年度最終目標： 逆積み 4 接合構造、量子ドット挿入 InGaAs(1eV)セル、もしくは InGaAsN(1eV)セルを形成した Ge 基板上 4 接合構造セルで非集光時効率 35%、集光時効率 45%を達成する。	
②効率量子タンデム太陽電池製造プロセス技術開発						
5	20 ～ 22	MOVPE ナノ 構造形成技 術	東京大 学	量子井戸を挿入して Ge への格子整合と長波長化を両立するミドルセルを、高スループットの MOVPE により作製する。P による歪み補償を活用し、InGaAs あるいは InAs の積層量子構造を挿入した 1.0 eV 帯セルの成長技術を確立する。シャープ(株)と共同で格子整合系 3 接合あるいは 4 接合セルを作製し、1000 倍集光で効率 45%を達成する。この目的のため、セル作製プロセスに移転可能な量子構造導入セルの成長技術を開発する。	22 年度中間目標： InGaAs/GaAsP 歪み補償量子井戸を挿入した (In)GaAs ミドルセルを作製し、1.2eV 帯まで長波長側の吸収端をのぼし、1.75eV のトップセル下で 16mA/cm <sup>2</sup> を達成する。  26 年度最終目標： 量子井戸を挿入した (In)GaAs ミドルセルを作製し、1.75eV のトップセル下で I <sub>sc</sub> =17mA/cm <sup>2</sup> (バンドギャップは 1.2 eV に相当)、1.4eV のセル下で I <sub>sc</sub> =14mA/cm <sup>2</sup> (バンドギャップは 1.0 eV に相当)を得る。さらに、これらのミドルセルを利用した 3 または 4 接合セルをシャープ(株)と共同して製作し、集光時の変換効率 45 %を得る。	
6	20 ～ 22	高倍集光セル 微細加工 技術	東京大 学	InGaP/InGaAs 多接合セルに微細構造を活用した全波長域に対応する反射防止構造を形成し、高効率化を図る。また、小面積セルを単一基板上に集積直列接続し、高集光下でも直列抵抗の寄与を減じた高効率セルを作製する。さらにマイクロ集光システムとハイブリッド集積させたマイクロセルアレイを開発する。	22 年度中間目標： ①シャープ株式会社が供給する III-V 化合物系多接合高効率太陽電池に対するエッチング技術を開発し、表面に光り閉じこめ構造を導入して、全波長域 (1300～400nm) の反射率を 0.5%以下にすることで、従来の 2 層 AR コート処理セルに対して、2 %の短絡電流の向上を達成する。 ②シャープ株式会社が供給する III-V 化合物系多接合高効率太陽電池チップを、東京大学で、マイクロチップ化し、シャープ株式会社に配線して、マイクロアレイを試作し、課題の抽出を行う。	

					26年度最終目標： 多接合セルの微細加工により、小面積セルのモノリシック集積により直列抵抗を減じたマイクロセルアレイをシャープ株式会社と協力して開発し、集光システムとハイブリッド集積し、5000倍集光下で変換効率40%を達成する。
7	20 ～ 22	次世代プロセス技術開発（InGaN多接合セル）	東京大学	ドーピング制御された高品質・高In濃度InGaNを得ることを目的として、低温PSD成長法によるInGaNの相分離抑制技術の開発、及び、InGaN薄膜へのドーピング技術を開発する。最終的に、InGaN多接合セル実現のための基礎技術としてバンドギャップ2eV以下のInGaN単接合太陽電池を作製する。	22年度中間目標： ①In組成0.5でX線回折半値幅0.12°以下の結晶性を持つInGaNを実現する。 ②In組成0.3でホール濃度 $5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 以上のp型InGaNを作製する。  26年度最終目標： バンドギャップ2eV以下のInGaN単接合セルを製作し変換効率7%を達成する。
8	20 ～ 22	水素MBE法（GaInNAs:Sb/量子ナノ構造）	東京大学	変換効率45%(集光)の4接合タンデムセルを達成するために、1eV帯のサブセル材料としてGaInNAs:Sb薄膜の開発を原子状水素援用分子線エピタキシー法(水素MBE法)により行う。また3接合タンデムセルのミドルセルに多重量子井戸や積層量子ドット構造等を導入した高効率化技術を開発する。	22年度中間目標： ①GaInNAs:Sb薄膜の高品質・長波長帯ヘテロ成長技術(水素MBE法)を開発し、単接合セルで、非集光時の変換効率15%を達成する。 ②3接合セルのGaAsミドルセルにInAs系積層量子井戸・ドットを挿入し、長波長域の吸収により $I_{sc} = 2\text{mA}/\text{cm}^2$ の増大を達成する(これは、1.75eVのトップセル下で $16\text{mA}/\text{cm}^2$ に相当する)。  26年度最終目標： ①シャープ株式会社と協力して4接合セルを製作して、集光時の変換効率45%を達成する。 ②シャープ株式会社と協力して3接合セルを製作して、集光時の変換効率42%を達成する。
9	20 ～ 22	MOVPE法（GaInNAs/量子井戸構造）	東京大学	MOVPE法によりGaAs及びGe基板上GaInNAs(N:1-5%)薄膜・量子井戸構造の長波長化(1eV帯)を行う。平成22年度の間目標までは、急速熱処理(RTA処理)による高品質化技術を中心に開発する。また、GaInNAs薄膜については、平成24年度までに単接合セルで変換効率15%を達成	22年度中間目標： GaInNAs(N:1-5%)薄膜・量子井戸構造において、X線半値幅0.1°以下および、PL半値幅25meV以下@10Kを達成する。  26年度最終目標： ①GaInNAs薄膜では、シャープ株式会社と協力

				し、平成25年度よりシャープ株式会社と協力して4接合セルを開発する。GaInNAs量子井戸構造については、平成24年度までに、長波長域(1eV)まで吸収端をのぼし、光電流増大させ、平成25年度よりシャープ株式会社と協力して3接合セルを開発する。  本サブテーマでは、変換効率45%(集光)の4接合タンデムセルを達成するため、MOVPE法によりGaAs及びGe基板上GaInNAs(N:1-5%)薄膜・量子井戸構造の長波長化(1eV帯)を行う。平成22年度の間目標までは、急速熱処理(RTA処理)等による高品質化技術を中心に開発する。	して4接合セルにおいて、集光時の変換効率45%を達成する。 ②GaInNAs量子井戸構造では、シャープ株式会社と協力して3接合セルにおいて、集光時の変換効率42%を達成する。	
10	20 ～ 22	エピタキシャル成長技術開発(量子構造挿入型、格子整合型4接合)	シャープ(株)	第4項に同じ	第4項に同じ	
11	20 ～ 22	高倍集光セルの開発	シャープ(株)	セルの直列抵抗低減を意図した高倍集光用デバイス設計を行う。光学系一体型モジュールの実現のため集積化による高倍集光セルの開発検討を行う。	22年度中間目標： 集積化のためのセル化プロセス検討とセル間配線プロセスを検討し、課題を抽出する。  26年度最終目標： 光学系一体化モジュールにおいて5000倍集光時変換効率40%を達成する。	
<b>③量子ドット超格子を基板とした超高効率太陽電池</b>						
12	20 ～ 22	量子ドット超格子型	東京大学	pn接合構造中に最適構造のミニバンドを1つ追加した量子ナノ構造(中間バンド型)太陽電池(集光時の変換効率の最高の理論値60%)を実現する素子構造として、高密度、高均一で3次的に周期配列した量子ドット超格子(ドット結晶)を開発する。歪み補償成長法による中間バンド型量子ドット太陽電池の作製技術を開発し、ポンプ・プローブ法等により非線形光吸収過程の検証を行う。	22年度中間目標： サイズ揺らぎ10%、中間層膜厚10nm以下の量子ドット超格子(中間バンド)型太陽電池を作製し、2光子吸収過程の検証とセル効率12%を達成する。  26年度最終目標： ①量子ドット超格子(中間バンド)の製造技術を確認し、量子ナノ効果の実証とセルで非集光時の変換効率15%を達成する。 ②量子ナノ構造(中間バンド型)タイプの太陽電池が変換効率40%越えを実現する設計技術を確認する。	
13	20 ～	量子ドット超格子型	電気通信大学	量子ドット超格子太陽電池の開発において、良質な量子	22年度中間目標： 光吸収波長帯(1.0～	

	22	(自己組織化量子ドットの積層化)		ドット超格子構造の作製技術の開発が重要な課題であり、本事業では、化合物半導体量子ドットの高均一化・高密度化およびその積層化の基礎技術を開発し、量子ドット超格子太陽電池への応用開発を進める。	1.3 μm) を有する化合物半導体量子ドットの単層構造において、量子ドットの不均一幅を 20meV 以下に抑制し、かつ量子ドット密度を $6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 以上に高密度化するための成長技術を開発する。さらに、上記量子ドット構造の 10 層以上の多重積層化技術を開発する。  26 年度最終目標： 上記量子ドットの多重積層構造における不均一幅を 25meV 以下に抑制し、試作の量子ドット超格子太陽電池において 15% 以上の電力変換効率を達成する。	
14	20 ～ 22	量子ドット・有機ハイブリッド材料による中間バンド型	新日本石油(株)	新概念太陽電池創出のため、有機半導体と量子ドットによる 3 次元超格子構造体を利用した中間バンド型太陽電池を開発する。具体的には、(a) 3 次元超格子構造体の原料として、化合物系半導体量子ドットと有機半導体からなる量子ドット・有機ハイブリッド材料を開発し、(b) そのハイブリッド材料を利用した、3 次元超格子構造の形成技術を開発することで、中間目標である中間バンド生成と 2 光子吸収の実証を行う。	22 年度中間目標： 1.8～2.0eV のバンドギャップをもつ有機半導体とこれとエネルギー準位がマッチし、かつ 1.0eV 程度のギャップをもつ量子ドットからなる中間バンドを有する光吸収層において、光吸収の確認ならびに 2 光子吸収の実証を行う。  26 年度最終目標： 量子ドット・有機ハイブリッド中間バンド型太陽電池を開発し、変換効率 10% を達成する。	
15	20 ～ 22	光マネジメント (金属ナノ粒子)	東京大学	金属ナノ粒子を用いた光マネジメント技術の開発を行う。金属ナノ粒子が光を吸収すると光近接場を生じる効果を検証する。近接場は、ごく近傍に存在する光吸収体に効率的に光を伝達するアンテナの役目をすることによって、太陽電池が本来有する吸収率を大きく増強させる効果が期待される。この効果を使って量子ドット型太陽電池が十分に光を取り込めるようにする。	平成 22 年度中間目標： 金属ナノ粒子による近接場効果により、1.5～2.5eV 帯における光吸収係数が 10% 増強することを実証する。  平成 26 年度最終目標： 金属ナノ構造を太陽電池に作りこみ、吸収係数の増加が量子ドット超格子型セルの変換効率に定量的に反映されることを実証する。	
④ハイブリッド素材による超高効率多接合型太陽電池						
16	20 ～ 22	界面電荷移動遷移型セル	東京大学	金属酸化物とジシアノメチレン基を有する有機分子からなる界面錯体の光励起を動作原理 (新概念) とするセルを実現することを目的とし、素材探索およびセル構造構築に向けた研究開発を行なう。	22 年度中間目標： 界面電荷移動遷移を利用して、1eV 帯領域で光電変換を達成する。  26 年度最終目標： 界面電荷移動遷移型セ	(*)ETA 型セルあるいは、大阪大と兵庫県立大が中心となり無機新材料および新接合技術によ



				<p>将来目標である超高効率多接合太陽電池の実現に向けては、本サブテーマで研究開発を行なう界面電荷移動遷移型セル単独での実現を目指す一方で、他のサブテーマで開発する新概念/新接合セル(*)との組み合わせも視野に入れている。さらには、本テーマの取組みの中で開発する 1eV 帯で光電変換可能な新概念セルは、『ポストシリコン超高効率太陽電池』のテーマⅡ、Ⅲで研究開発する無機系多接合セルを補強できるなど、幅広い視点からの高効率化を目指す。</p>	<p>ルで変換効率 10%を達成する。</p>	<p>り、従来の無機多接合太陽電池では、光電変換が困難であった領域での光電変換を目指す多接合型セル</p>
17	20 ～ 22	新概念素子用ハイブリッド光電素材	東京大学	<p>ETA 型セルを中心に新概念や新接合光電変換素子の素材開発を行なうことを目的とし、光吸収、励起状態の寿命、ドナー、アクセプター材料とのエネルギーレベルマッチングおよび電荷注入速度などに着目し、可視から近赤外領域の幅広い光電変換を可能とするための光電変換材料の研究開発を行う。</p>	<p>22 年度中間目標： 電圧ロスの低減と光吸収波長域の拡大が期待されるドナー/色素/アクセプターでの新概念太陽電池 (ETA) において、新日石株式会社に協力して、1.4eV 帯および 1.0eV 帯での ETA 構造素子を試作し光電変換を検証する。</p> <p>26 年度最終目標： 新日石株式会社に協力して、ETA 構造における新概念素子の材料検討による効率向上と光マネジメントの適用により、変換効率 10%を達成する。</p>	
18	20 ～ 22	多結晶化合物多接合太陽電池	大阪大学	<p>新概念、新技術の太陽電池の研究開発の一部として、非Ⅲ-V 族系化合物半導体材料による新規太陽電池の開発を目的に、その材料開発と、多結晶化合物半導体薄膜を用いた多接合太陽電池作製技術の実証を行う。</p> <p>材料開発においては、その要素技術として、半導体薄膜の電気化学法および塗布法による形成技術を開発、トップセルに用いるバンドギャップが 1.8～2.2 eV の半導体の開発、0.6～1.2 eV 領域のボトムセルの開発、ならびに、トップセルと連結したタンデム型太陽電池の開発を行う。</p>	<p>22 年度中間目標： ①トップセル用のバンドギャップ 1.8～2.2 eV の太陽電池材料を開発する。 ②バンドギャップ以上の波長帯に対する単膜での光電流発生率の平均光量子収率 50%以上 (溶液との接合による評価) を達成する。 ③擬似太陽光照射に対する変換効率 3%以上を達成する。</p> <p>26 年度最終目標： ①0.6～1.2 eV 領域のボトムセルを開発する。 ②トップセルと連結したタンデム型太陽電池を開発し、変換効率 15%以上を達成する。</p>	
19	20 ～ 22	ETA 構造による新概念素子	新日本石油(株)	<p>本研究開発では新概念太陽電池創出のため、ドナー/色素/アクセプター 3 元系による</p>	<p>22 年度中間目標： ドナー/色素/アクセプターでの新型太陽電池</p>	

				ETA 構造素子を開発する。具体的には、ETA 構造素子に適したドナー/色素/アクセプター 3 元系相分離構造材料を開発するとともに、中間目標までには素子化検討を行い、光電変換の基本コンセプトを実証する。	(ETA)において、1.0eV 帯および 1.4eV 帯での E T A 構造による新概念素子を試作し、光電変換を検証する。  26 年度最終目標： E T A 構造による新概念素子の材料検討による効率向上と光マネジメントの適用により、変換効率 10%を達成する。	
20	20 ～ 22	金属ナノ粒子/光マネジメント材料	新日本石油㈱	本研究開発では高度光利用技術創出のため、金属ナノ粒子アレイ構造を利用した光マネジメント材料を開発する。具体的には、(a)金属ナノ粒子アレイ作製技術の開発と、(b)太陽電池への組み込み技術を開発し、効率向上効果の実証を目指す。	22 年度中間目標： 金属ナノ粒子構造を用いた光マネジメントを、ETA 構造素子（又は他の光電変換素子）へ適用し、金属ナノ粒子アレイの効果による量子収率が 10%増大することを実証する。  26 年度最終目標： ETA 構造による新概念素子に光マネジメントの適用により、変換効率 10%を達成する。	
21	20 ～ 22	金属ナノ粒子吸収型セルの研究開発	東京大学	金属の種類や形状に依存する様々なプラズモン吸収を利用して、実現しうる光電変換能力を明らかにするために、光電変換の原理解明および系の最適化を進め、新概念セルを開発する。	22 年度中間目標： 光電変換機構を解明し、光電変換を実証する。  26 年度最終目標： 金属ナノ粒子吸収型セルで 10%達成する。	
22	20 ～ 22	ナローバンドギャップ太陽電池	兵庫県立大学	ナローギャップ用光電変換材料としては、銅およびニッケルを中心とした元素を含む硫黄系およびセレン系ナノ結晶粒子を第一ターゲットとし、ドーパントを変化させることでバンドギャップコントロールを行なう。化学手法の特徴を生かし、効率良く系統的に材料の研究開発を行ない、それらのナノ結晶粒子を使用して、半導体膜の創製を行うとともに、セル化技術の研究開発を行なう。 4 接合太陽電池のナローギャップ領域での光電変換を可能とする第 3 ジャンクションセルおよび第 4 ジャンクションセル、さらにはそれらからなる 2 接合セルを開発する。	22 年度中間目標： ナローバンドギャップ太陽電池用として、0.9-1.0eV および 0.6-0.7eV のバンドギャップを有する硫黄系またはセレン系の材料を開発し、セル化して光電変換を実証する。  26 年度最終目標： ナローバンドギャップセルからなる 2 接合太陽電池を作製し、変換効率 15%を達成する。	

表. 4 研究開発項目②「高度秩序構造を有する薄膜多接合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	達成目標	その他
① シリコン系 3 接合太陽電池の開発						
1	20 ～ 22	高配向性平面ポリシラン材料の開発	産業技術総合研究所	平面ポリシラン薄膜を用いて高効率多接合太陽電池に適したシリコン系トップセルを開発する。この開発のために、バンドギャップ 1.8eV 以上の平面ポリシランの薄膜作製技術開発と物質・薄膜・デバイス特性の実証を行う。	22 年度中間目標： バンドギャップ 1.8eV 以上の平面ポリシラン薄膜を用いた太陽電池で変換効率 10%を達成する。  26 年度最終目標： バンドギャップ 1.8eV 以上の平面ポリシラン薄膜を用いた単接合太陽電池で変換効率 12.5%を達成する。	
2	20 ～ 22	配列制御ナノ結晶シリコン材料の開発	東京農工大学	量子サイズナノ結晶シリコンにおけるバンドエンジニアリングとヘテロ接合界面の欠陥低減と電気的特性向上という当グループが蓄積してきた二つの知見を発展させ、太陽電池の革新に不可欠なバンドギャップ制御と取り組み、最適ワイドバンドギャップトップセル用材料の形成のための以下の要素技術開発と実証を行う。	22 年度中間目標： ・バンドギャップ 1.8eV 以上の単接合 nc-Si 太陽電池で変換効率 10%を達成する。 ・その際の特性値としては FF= 0.8、Voc=0.7 V、Isc=18 mA を目標とする。  26 年度最終目標： ・バンドギャップ 1.8eV 以上の単接合 nc-Si 太陽電池で 12.5%の効率を達成する。 ・本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。	
3	20 ～ 22	結晶系ナローギャップ材料太陽電池の開発	産業技術総合研究所	高効率多接合太陽電池に用いるシリコン系ボトムセルの高効率化を目指して、高品質結晶系ナローギャップ材料の開発、精密制御ヘテロ接合の開発を行い、太陽電池試作を通じて開発した技術を実証する。	22 年度中間目標： バンドギャップ 0.9eV のシリコンゲルマニウムを用いた太陽電池で変換効率 8%を達成する。その要素技術として、シリコンゲルマニウムの少数キャリア寿命 100 μs、ヘテロ界面再結合速度：1000 cm/s を目標とする。  26 年度最終目標： バンドギャップ 0.9eV のシリコンゲルマニウムを用いた太陽電池で変換効率 10%を達成する。	
4	20 ～ 22	シリコン-ゲルマニウムスズ低温エピタキシャル新技術の開発	産業技術総合研究所	シリコン-ゲルマニウムスズを用いた高効率多接合太陽電池に適したシリコン系ボトムセルの開発を目的として、シリコン-ゲルマニウムスズ系擬単結晶作製技術開発とそれを用いた太陽電池作製によるデバイス実証を行う。	22 年度中間目標： バンドギャップ 0.9eV の SiSn 系混晶薄膜を用いた太陽電池で変換効率 8%を達成する。その要素技術として、バンドギャップ 0.9eV の SiSn 系混晶薄膜で直接遷移を確認し、欠陥密度 10 <sup>16</sup> cm <sup>-3</sup> を目標とす	

					る。 26年度最終目標： バンドギャップ 0.9eV の SiSn 系混晶薄膜を用いた太陽電池で変換効率 10% を達成する。その要素技術として、バンドギャップ 0.9eV の SiSn 系混晶薄膜で直接遷移を確認し、欠陥密度 $10^{15}\text{cm}^{-3}$ を目標とする。	
5	20 ～ 22	ガラス基板 上のシリコ ン・ゲルマ ニウム等単 結晶シード 層形成技術	コーニ ング H D ジャ パン合 同会社	透明なガラス基板上のシリ コン等の単結晶薄膜を基板 として用い、当該シリコン 等単結晶薄膜上にエピタキ シャルによる単結晶成長を 行う事により、本事業の目 標達成の基礎となる低欠陥 のシリコン・ゲルマニウム 等の狭バンドギャップ単結 晶シード層薄膜を開発す る。本研究では、ガラス上 単結晶シリコン等薄膜を、 太陽電池用に適した膜厚ま で成長させるエピタキシャル 技術と、成長に適した基 板の要件を探索する。	22年度中間目標： ・シリコン・ゲルマニウ ム等単結晶薄膜を単結晶 シード層としたバンド ギャップ 0.9eV の単接合太 陽電池で変換効率 8% を達 成する。 ・その要素技術として単 結晶薄膜の転位密度として $10^8\text{cm}^{-2}$ を目標とする。 26年度最終目標： ・シリコン・ゲルマニウ ム等単結晶薄膜を単結晶 シード層としたバンド ギャップ 0.9eV の単接合太 陽電池で変換効率 10% を達 成する。 ・その要素技術として単 結晶薄膜の転位密度として $10^7\text{cm}^{-2}$ を目標とする。	
6	20 ～ 22	ゲルマニウ ム系単結晶 エピ成長技 術の開発	東京工 業大学	変換効率 40% を目指す Si 系 3 接合薄膜太陽電池の開 発に資するボトムセル用ナ ローギャップ太陽電池材料 として、Si 基板上への Ge の低温エピタキシャル成長 技術の開発とそれを用いた ナローギャップヘテロ接合 太陽電池技術の実証を行 う。	22年度中間目標： ・Si と Ge 単結晶薄膜の ヘテロ接合を用いたボトム 用単接合太陽電池で変換効 率 8% を達成する。 ・その要素技術として Ge 単結晶薄膜のキャリア 拡散長として Ge エピタキ シャル膜のウェーハーレ ベルでの膜厚と同程度（キャ リア寿命 $10\mu$ 秒）を目標 とする。 26年度最終目標： ・ガラス基板上に形成し た単結晶 Si 基板上に単結 晶 Ge 薄膜を活性層として 作製した、ボトムセル用ヘ テロ接合型太陽電池で変換 効率 10% を達成する。 ・本技術を用いた単接合 セルを産業技術総合研究所 に提供し、多接合太陽電池 での変換効率 25% 達成に 寄与する。	
7	20 ～	フッ素系イ オン制御ブ	東北大 学	HIT 太陽電池におけるアモ ルファスバッシベーション	22年度中間目標： ・産業技術総合研究所と	

	22	ラズマプロセスの開発		<p>時のダメージ等に代表される欠陥生成によるデバイス劣化を抑制するため、気相および表面において荷電粒子の物理的衝撃および紫外線照射を抑制できるビーム技術を使用して、気相反応および表面反応の高精度制御が実現できる薄膜成長技術を検討する。弗素中性粒子ビーム、弗素負イオンビームあるいは水素中性粒子ビーム、水素負イオンビームを用いてシラン系ガス(SiH<sub>4</sub>, SiF<sub>4</sub>)およびゲルマニウム系ガス(GeH<sub>4</sub>, GeF<sub>4</sub>)との気相反応および表面反応を制御することにより、プラズマ気相成長法に比べ低温で欠陥や不純物の少ない結晶質ゲルマニウム系薄膜成長の可能性実証を行う。</p>	<p>協力してバンドギャップ 0.9eV の Ge あるいは Si/Ge による単接合太陽電池で変換効率 8% を達成する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>その要素技術として成長温度 400℃以下でバンドギャップ 0.9eV の結晶質ゲルマニウム系薄膜で欠陥密度(ダングリングボンド密度)を 10<sup>16</sup>cm<sup>-3</sup> 台とすることを目標とする。</li> </ul> <p>26 年度最終目標：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>産業技術総合研究所と協力してバンドギャップ 0.9eV の Ge あるいは Si/Ge による単接合太陽電池で変換効率 10% を達成する。</li> <li>その要素技術として成長温度 400℃以下でバンドギャップ 0.9eV の結晶質ゲルマニウム系薄膜で欠陥密度(ダングリングボンド密度)を 5×10<sup>16</sup> cm<sup>-3</sup> 以下とすることを目標とする。</li> <li>本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25% 達成に寄与する。</li> </ul>	
8	20 ～ 22	擬単結晶固相成長技術の開発	東海大学	<p>多接合太陽電池で変換効率 25% (平成 26 年度末) を達成するためのシリコン系ナローギャップ材料の開発として以下の研究開発を行う。金属誘起結晶化によるゲルマニウム及び高ゲルマニウム組成シリコンゲルマニウムの大粒化を目指し、結晶構造、電気的特性の最適化を検討する。得られた大粒径薄膜をシード層とし、擬単結晶光活性層を形成する。これにより高効率多接合太陽電池に適したボトムセルを開発する。</p>	<p>22 年度中間目標：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>バンドギャップ 0.9eV の擬単結晶ゲルマニウム等を用いた太陽電池で変換効率 8% を達成する。</li> <li>その要素技術として、波長 1000nm で 30% 以上の分光感度を目標とする。</li> </ul> <p>26 年度最終目標：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>バンドギャップ 0.9eV の擬単結晶ゲルマニウム等を用いた太陽電池で変換効率 10% を達成する。</li> <li>その要素技術として、波長 1000nm で 50% 以上の分光感度を目標とする。</li> <li>本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25% 達成に寄与する。</li> </ul>	
9	20 ～ 22	ヘテロ接合デバイス化技術の開発	産業技術総合研究所	<p>単接合トップセル、単接合ミドルセルならびに単接合ボトムセルを組み合わせることで、メカニカルスタックシリコン系 3 接合太陽電池を実現する。このための要素技術として、単結晶あるいは擬単結晶シリコン-</p>	<p>22 年度中間目標：</p> <p>バンドギャップ 0.9eV のシリコンゲルマニウム、シリコンゲルマニウムスズなどを用いたヘテロ接合太陽電池で、変換効率 8% を達成する。</p>	

				<p>ゲルマニウムスズ薄膜を用いたナローギャップセルの温度係数を改善し、高温でも発電効率の低下を防ぐヘテロ接合を有する太陽電池デバイスを開発する。なお、シリコン系材料のみならず、化合物系材料も視野に入れ、トップセル、ミドルセル、ボトムセルそれぞれに最適な材料を選択する。さらに、3 接合太陽電池の作製には、他チームで開発するメカニカルスタック技術を取り入れる。また、高度光閉じ込め技術も取り入れることにより、高効率化を図る。</p>	<p>26 年度最終目標： ヘテロ接合を形成することで、バンドギャップ 0.9eV の単接合太陽電池で変換効率 10%を達成する。</p>
10	20 ～ 22	ヘテロ接合デバイス化技術の開発 —超高周波プラズマ	三菱重工業	<p>ミドルセル(Eg ~1 eV)およびボトムセル(Eg = 0.7~0.85 eV)の開発を実施する。シリコンゲルマニウム系はこれまでもアモルファスおよび微結晶では開発が行われてきたが、単結晶薄膜を使った例は全くといっていいほど無い。ミドルセルがシリコンで無い理由は、多接合においては長波長の吸収が重要であることと、テクスチャ構造を避けるため、ゲルマニウムを微量添加して吸収係数を高める必要があることである。また、ゲルマニウム添加は後で述べるエピタキシャル成長の低温化にも貢献する。ボトムセルはバンドギャップから言うと高濃度のゲルマニウムを含む Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> で十分だが、ゲルマニウムは真性欠陥がアクセプタになるという課題があり、Si-Sn あるいは Si-Ge-Sn 系も視野に入れて開発を行う。Sn 系はゲルマニウムが希少元素である点から元素戦略としても意義がある。Si-Ge 系単結晶薄膜および Si-Ge-Sn 系単結晶薄膜をガラス基板上に形成する技術はガラス基板上にシード層を形成する技術と、その上の低温エピタキシャル成長技術から成り立っている。本研究では産業技術総合研究所に研究者を派遣し、共同で研究開発を行うものであり、特に上記ゲルマニウム系薄膜のデバイス</p>	<p>22 年度中間目標： ・単結晶あるいは擬単結晶シリコン—ゲルマニウムスズ薄膜を用い、これにヘテロ接合を形成することで、バンドギャップ 0.9eV の単接合太陽電池で変換効率 8%を達成する。 ・本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 20%達成に寄与する。</p> <p>26 年度最終目標： ・ヘテロ接合を形成することで、バンドギャップ 0.9eV の単接合太陽電池で変換効率 10%を達成する。 ・本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。</p>

				化技術の開発を行うものである。	
11	20 ～ 22	ヘテロ接合デバイス化技術の開発ー低ダメージ成膜	京セラ	低ダメージの成膜技術を用いてヘテロ接合の高電圧化技術などを開発することで、ナローギャップセルにヘテロ接合構造を適用し、高効率多接合太陽電池に適したボトムセルを開発する。	22年度中間目標： ・バンドギャップ 0.9eV のシリコンゲルマニウム、シリコンゲルマニウムスズなどの単結晶基板を用いたヘテロ接合太陽電池で、変換効率8%を達成する。 ・その際の特性値として、開放電圧 0.3V 以上を目標とする。 ・本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率20%達成に寄与する。  26年度最終目標： ・ヘテロ接合を形成することで、バンドギャップ 0.9eV の単接合太陽電池で変換効率10%を達成する。 ・本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率25%達成に寄与する。
② 化合物系4接合太陽電池の開発					
12	20 ～ 22	ワイドギャップカルコゲナイド系太陽電池の開発	産業技術総合研究所	Cu(In <sub>1-x</sub> Gax)(SySe <sub>1-y</sub> ) <sub>2</sub> 系材料 (CIGSSe) を用いて高効率多接合太陽電池に適した化合物系トップセルを開発する。	22年度中間目標： バンドギャップ 1.7eV 以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率 9%を達成する。その要素技術として、硫化物系薄膜のキャリア寿命 1ns 以上、開放電圧 0.9V 以上、近赤外から吸収端近傍の波長での内部量子効率 90%以上を得ることを目標とする。  26年度最終目標： バンドギャップ 1.8eV 以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率 12%を達成する。
13	20 ～ 22	構造制御ワイドバンドギャップ化合物太陽電池の開発	パナソニック 電工	多接合太陽電池で変換効率 25% (平成26年度末) を達成するための化合物系ワイドギャップ材料を用いたトップセルの高効率化を目的として、光吸収層のバンドギャップ分布制御、窓層-光吸収層の界面制御、裏面コンタクト制御、光吸収制御等の構造制御の要素技術開発を行い、高効率化技術を実証する。	22年度中間目標： ・バンドギャップ 1.7eV 以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率 9%を達成する。 ・その要素技術として、硫化物系薄膜のキャリア寿命 1ns 以上、開放電圧 0.9V 以上、近赤外から吸収端近傍の波長での内部量子効率 90%以上を得ることを目標とする。 ・本技術を用いた単接合

					セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率20%達成に寄与する。  26年度最終目標： ・バンドギャップ 1.8eV以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率12%を達成する。 ・本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率25%達成に寄与する。	
14	20～22	革新的ワイドギャップ材料太陽電池の開発	産業技術総合研究所	超高効率多接合太陽電池の開発においては、ワイドギャップ材料である第1セルの高効率化が重要である。本サブテーマでは、ワイドギャップ材料として有望なInGaP系等のエピタキシャル薄膜成長技術を開発し、超高効率多接合太陽電池に適したトップセルを開発する。特にこれまでに報告例の無いIn <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> P/GaP量子ナノ構造太陽電池を開発し、その動作実証を行う。また、本拠点で既に確立している高度なGaAs/(In)GaAs量子ドット作製技術を用いて、量子ドット太陽電池の吸収波長帯を長波長帯に大幅に拡大するとともに、ドット中のサブバンド間エネルギーを制御し中間バンドの設計技術を高度化することにより、太陽電池の高効率化を目指す。	22年度中間目標： ①バンドギャップ 1.8eV以上系太陽電池での変換効率9%を達成する。その要素技術として、以下を目標とする。 ・ワイドギャップ材料において少数キャリア寿命1ns以上、拡散長0.3μm以上。 ・1.9eV以上(波長:650nm以下)で光吸収を持つ(量子効率3%以上)GaP基板上In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> P量子ドット太陽電池の作製。 ②10層以上のInAs量子ドット超格子を形成し、顕微PL測定により、中間バンド形成が出来ていることを確認する。 In(Ga)As系量子ドット太陽電池において波長1100nmで量子効率で10%以上を達成する。  26年度最終目標： ①InGaP/GaP量子ドットを用いた太陽電池で変換効率10%を達成する。 ②InAs、InGaAs系量子ドットを用いた太陽電池で変換効率10%を達成する。	
15	20～22	酸窒化物系ワイドギャップ材料の開発	物質・材料研究機構	化合物系半導体をベースにした4接合型太陽電池を用いてタンデム型太陽電池の高性能化を図ることを目的として、トップセルとして酸窒化物系ワイドギャップ材料のバンドギャップ制御および価電子帯制御に関する要素技術開発とトップセルとしての太陽電池特性を向上させる技術の実証を行う。	22年度中間目標： ・バンドギャップ 2.8eV程度のInGaNを用いた太陽電池において変換効率5%を達成する。 ・そのための要素技術として2.8eV程度のInGaNで以下を目標とする。 ・1nsecのライフタイム ・InGaNをp型化し、キャリア濃度1x10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup>	



					<p>26年度最終目標：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・バンドギャップ 2.5eV 程度の InGa<sub>N</sub> を用いた太陽電池において変換効率 12% を達成する。</li> <li>・そのための要素技術として 2.5eV 程度の InGa<sub>N</sub> で 5nsec のライフタイムを目標とする。</li> <li>・本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25% 達成に寄与する。</li> </ul>	
16	20 ～ 22	酸化物ワイドギャップ材料の開発 A	東京工業大学	<p>バンドギャップが <math>\sim 2\text{eV}</math> の酸化物半導体を新たに探索し、これを用いた高エネルギー領域の太陽光に対応する太陽電池の開発を目的とし、酸化物半導体の探索とその欠陥密度の制御技術の開発と酸化物を用いた太陽電池作製技術の実証を行う。</p>	<p>22年度中間目標：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・高品位ワイドギャップ酸化物半導体を用いたバンドギャップ <math>\sim 2\text{eV}</math> の太陽電池で変換効率 5% を達成する。</li> <li>・その要素技術として、結晶シリコンよりもイオン化ポテンシャルが 0.5eV 以上大きいバンドギャップが <math>\sim 2\text{eV}</math> の P 型酸化物半導体で裾状態密度を <math>10^{19}\text{cm}^{-3}</math> 以下を目標とする。</li> </ul> <p>26年度最終目標：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ワイドギャップ酸化物半導体を用いた太陽電池で、変換効率 12% を達成する。</li> <li>・本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25% 達成に寄与する。</li> </ul>	
17	20 ～ 22	酸化物ワイドギャップ材料の開発 B	豊橋技術科大学	<p>多接合太陽電池において変換効率 25% (平成 26 年) を達成するための光吸収層用高品質ワイドバンドギャップ酸化物材料ならびに多接合型太陽電池トップセルを開発することを目的として、<math>\text{Cu}^{1+}\text{-Cu}^{2+}\text{-O}</math> 系ならびに <math>\text{Cu}^{1+}\text{-Ag}^{1+}\text{-O}</math> 系光吸収層用高品質酸化物材料の電気化学的形成技術、<math>\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^{1+}</math> ならびに <math>\text{Cu}/\text{Ag}</math> 比制御によるバンドギャップ制御技術などの要素技術を開発すると共に、多接合型太陽電池トップセルに好適なバンドギャップ 1.7-1.8eV 程度の <math>\text{Cu}^{1+}\text{-Cu}^{2+}\text{-O}</math> ならびに <math>\text{Cu-Ag-O}</math> 層を用いた単接合太陽電池を形成し、ワイドバンドギャップ酸化物材料、バン</p>	<p>22年度中間目標：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・バンドギャップ 1.7eV 以上の酸化物材料を用いた太陽電池において変換効率 5% を達成する。</li> <li>・その要素技術としてバンドギャップ 1.7-1.8eV の <math>\text{Cu}^{1+}\text{-Cu}^{2+}\text{-O}</math>・<math>\text{Cu-Ag-O}</math> 単一配向膜を実現し、これを用いて 0.8V の開放電圧を目標とする。</li> </ul> <p>26年度最終目標：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・バンドギャップ 1.7eV 以上の酸化物材料を用いた太陽電池において変換効率 12% を達成する。</li> <li>・その要素技術としてバンドギャップ 1.7-1.8eV の <math>\text{Cu}^{1+}\text{-Cu}^{2+}\text{-O}</math>・<math>\text{Cu-Ag-O}</math> 単一配向膜にて移動度 <math>100\text{cm}^2\text{V}^{-1}</math></li> </ul>	

				ドギャップ制御技術ならびに高品質化技術の実証を行う。	$1s^{-1}$ を目標とする。 ・本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25% 達成に寄与する。
18	20 ～ 22	化合物系タンデムセルの開発	産業技術総合研究所	メカニカルスタック型及びモノリシック型の化合物系多接合太陽電池の作製技術を開発し、太陽電池の高性能化を図ることで、全体目標の達成を目指す。	22年度中間目標： 化合物多接合太陽電池で変換効率 20% を達成。 Ge 基板上でバンドギャップ 1.0-1.4eV の CIGS 系太陽電池により変換効率 13% を達成。  26年度最終目標： 化合物多接合太陽電池で変換効率 25% を達成。
③ 新概念新材料の検討					
19	20 ～ 22	ナノシリコン / ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討 A	産業技術総合研究所	ナノシリコン結晶と高分子の混合体を用いた太陽電池で多重励起子の生成による超高効率太陽電池の作製を目的として、ナノシリコン / ナノカーボン複合材料における多重励起子生成の原理検証と本材料を用いた新概念太陽電池開発によるデバイス実証を行う。	22年度中間目標： ・閾値エネルギー 2.5Eg (Eg はバンドギャップエネルギー) 以上で多重励起子生成を実現する。 ・ $h\nu \geq 3.5Eg$ の光に対して励起子生成の量子収率 150% 以上を達成する。 ・ $h\nu \geq 3.5Eg$ の光に対して入射光強度の n 乗 ( $n \geq 1.2$ ) の依存性を有する光電流を実現する。  26年度最終目標： ・Si ナノ微結晶/高分子構造等を用いた単接合太陽電池において変換効率 10% を達成する。
20	20 ～ 22	ナノシリコン / ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討 B	産業技術総合研究所	半導体単層カーボンナノチューブ (CNT) を活用することにより、従来にない優れた特性を有する高効率太陽電池の実現を目指す。具体的には、半導体単層 CNT の特異な形状・構造・光・電子特性を利用して広い波長範囲で光電変換機能を実現する。更に、半導体単層カーボンナノチューブを用いた太陽電池で多重励起子の生成を検証し、将来の超高効率太陽電池に寄与が可能であるか検討する。	22年度中間目標： ・半導体カーボンナノチューブの純度を 90% 以上まで向上させる。 ・カーボンナノチューブのバンドギャップを遠赤外域の 0.2~1.3eV の範囲で制御し、0.1~0.5V の開放電圧を達成する。 ・バルクヘテロ接合カーボンナノチューブ太陽電池の量子効率の最大値を 50% 以上とする。 ・バンドギャップの 3 倍以上のエネルギーかつ $1mJ/cm^2$ 以下の強度の光に対して、1 光子の吸収において 2 個以上の電子-正孔対の生成を確認する。  26年度最終目標： ・カーボンナノチューブを用いた太陽電池で変換効率 10% を達成する。

21	20 ～ 22	ナノシリコン / ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討C	九州大学	ナノ結晶シリコン中でバンドギャップの2倍以上の光子エネルギーの光子1個で2個以上の多重励起子を生成できることを利用して、シリコン中で生じる多重励起子生成を利用した太陽電池の開発を目的として、励起子を高効率に電子と正孔に分離し電流として外部に取り出すために、マイクロPIN接合シリコン材料を製作し、これを用いて多重励起子生成と光電流の取り出しが可能であることを実証する。そして、多重励起子生成を利用した太陽電池を開発する。	<p>22年度中間目標：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 閾値エネルギー<math>2.5E_g</math> (<math>E_g</math> はバンドギャップエネルギー) 以上で多重励起子生成を実現する。</li> <li>・ <math>h\nu \geq 3.5E_g</math> の光に対して励起子生成の量子収率150%以上を達成する。</li> <li>・ <math>h\nu \geq 3.5E_g</math> の光に対して入射光強度の <math>n</math> 乗 (<math>n \geq 1.2</math>) の依存性を有する光電流を実現する。</li> </ul> <p>26年度最終目標：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 多重励起子太陽電池で変換効率10%を達成する。</li> <li>・ その要素技術として <math>h\nu \geq 3.5E_g</math> の光に対して光電流量子収率100%以上を目標とする。</li> </ul>	
22	20 ～ 22	ナノシリコン / ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討D	東北大学	アルカリ-フラーレン、アルカリ-ハロゲン等の異種異極性イオンプラズマ中の基板バイアス法によって形成された“強固なn型半導体CNT”および“強固なp型半導体CNT”、“pn接合を内蔵したCNT”等の進化CNTを利用した新概念太陽電池を検討する。進化CNTの中で強固なn型CNTとp型CNTを各々p-doped Siとn-doped Siに薄膜状で密着させてヘテロ界面上にpn接合を形成するヘテロ界面CNT太陽電池および電極間に単独1本のpn接合内蔵CNTのみを架橋させるpn接合内蔵CNT太陽電池を検討する。それぞれにおいて、擬似太陽光及び近赤外領域の光照射下での電圧-電流曲線測定等の特性評価、及びCNTのバンドギャップの3倍以上のエネルギーの光を入射することによる多重励起子生成を利用した太陽電池特性発現の原理実証を行う。高効率化を目的とし、束状進化CNTを一定間隔で2次元、3次元に分散整列した場合の太陽電池を評価する。	<p>22年度中間目標：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ カーボンナノチューブの構造制御により <math>E_g</math> を0.2~1.3 eVの範囲で制御し、<math>V_{OC}=0.1\sim 0.5</math> Vを達成する。</li> <li>・ エネルギー<math>&gt;3E_g</math>、強度<math>&lt;1</math> mJ/cm<sup>2</sup>の光入射において、ヘテロ界面及びpn接合内蔵カーボンナノチューブを用いた多重励起子生成利用太陽電池の原理を実証する。(1光子吸収2個以上電子-正孔対形成を確認する。)</li> </ul> <p>26年度最終目標：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ pn接合内蔵カーボンナノチューブ太陽電池で変換効率10%を達成する。</li> </ul>	
23	20 ～ 22	単結晶有機半導体を用いた新概念太陽電池の検討A	産業技術総合研究所	有機半導体単結晶薄膜の形成技術を開発し、有機半導体単結晶を用いた太陽電池が将来の超高効率太陽電池に寄与が可能であるか検討する。これまでの有機半導	<p>22年度中間目標：</p> <p>有機/無機ヘテロ接合セルで変換効率1%、<math>V_{oc}=E_g - 0.3V</math>を達成する。そのための要素技術として単結晶性有機薄膜の励起子拡散</p>	

				<p>体を用いた太陽電池はアモルファスやせいぜい微結晶混合状態であり、有機半導体の励起子拡散や電荷輸送において損失が大きく十分な変換効率が得られていないと考えられる。そこで、不純物や欠陥の少ない有機単結晶薄膜でヘテロ接合を形成することで、従来値を覆す高い変換効率の有機太陽電池の創出の可能性を模索する。そのために、まず不純物・欠陥の極めて少ない有機単結晶薄膜を超高真空中で成長させる技術を開発する（単結晶性有機薄膜形成技術）。また、有機単結晶薄膜を太陽電池へ実装するために、有機単結晶薄膜の無機基板へのヘテロ接合の形成技術を開発する（有機/無機ヘテロ接合形成技術の開発）。</p>	<p>長で 100 nm を目標とする。</p> <p>26 年度最終目標： 単結晶性有機薄膜ヘテロ接合セルで変換効率 10%、<math>V_{oc}=E_g - 0.1V</math> を達成する。そのための要素技術として単結晶性有機薄膜の励起子拡散長で <math>1\mu m</math> を目標とする。</p>
24	20 ～ 22	単結晶有機半導体を用いた新概念太陽電池の検討 B	東京工業大学	<p>薄膜気相成長に溶液プロセスを導入したフラックス気相成長法を新たに用いて、太陽電池有機半導体材料の革新的高品質化プロセスを開発すること、よって、有機薄膜の品質向上が励起子拡散長の飛躍的増大、および接合界面での電圧損失の抑制による開放電圧の向上を試み、有機半導体材料が効率 40% を達成するためのキーマテリアルとなる可能性を検証する。</p>	<p>22 年度中間目標： ・有機/無機ヘテロ接合セルで変換効率 1%、<math>V_{oc}=E_g - 0.3V</math> を達成する。 ・そのための要素技術として単結晶性有機薄膜の励起子拡散長で 100 nm を目標とする</p> <p>26 年度最終目標： ・単結晶性有機薄膜ヘテロ接合セルで変換効率 10%、<math>V_{oc}=E_g - 0.1V</math> を達成する。 ・そのための要素技術として単結晶性有機薄膜の励起子拡散長で <math>1\mu m</math> を目標とする</p>
25	20 ～ 22	強相関材料を用いた新概念太陽電池の検討 A	産業技術総合研究所	<p>1eV 以下のバンドギャップを有する分子化合物半導体を用いた太陽電池において、低エネルギーフォトンの有効利用と、高エネルギーフォトンによる多重励起子の生成の検証により、将来の超高効率太陽電池に寄与が可能であるか検討することを目的として、飛躍的な効率向上とコスト低減を目指したショットキー接合型/ヘテロ接合型セルの開発と広帯域フォトン有効利用の実証を行う。</p>	<p>22 年度中間目標： 有機強相関ヘテロ接合太陽電池を作製し、以下を達成する。 ・1 eV 以下の低光子エネルギー領域で分光量子効率として 5% 以上 ・2 eV (<math>&gt; 2E_g</math>) 以上の光子エネルギー領域において、ポンプ-プローブ分光で定量化したキャリア生成増幅率 200% 以上</p> <p>26 年度最終目標： 有機強相関ヘテロ接合太陽電池で変換効率 10% を達成する。</p>

26	20 ～ 22	強相関材料を用いた新概念太陽電池の検討B	理化学研究所	強相関材料の電荷秩序光崩壊による多重励起子生成を利用した太陽電池を開発する。本研究開発では、特に酸化物系の強相関材料における電荷秩序相が光照射により崩壊して金属相に相転移する現象に着目し、一光子あたり複数個のキャリアが生成する可能性を実証し、接合の内部電界により電子と正孔とに分離する機構について、その原理を理論的に構築するとともに実験的に検証する。また、この原理に好適な材料を設計し、多重キャリア生成を利用した太陽電池を開発する。	22年度中間目標： ・強相関ヘテロ接合太陽電池を作製し、以下を達成する。 ・吸収光子数で規格化した外部電流で定義される分光量子効率として5%以上を達成する。 ・ポンププローブ分光でキャリア増幅を確認し、薄膜ヘテロ接合の基礎吸収端光に比べた短波長光照射下での量子効率の増幅率として2倍以上を目標とする。  26年度最終目標： ・強相関酸化物ヘテロ接合太陽電池で変換効率10%を達成する。 ・その要素技術としてp, n層の化学ポテンシャル差と開放電圧の関係を明らかにして開放電圧0.5V以上を目標とする。
27	20 ～ 22	構造制御ナノ材料を用いた太陽電池	産業技術総合研究所	金属ナノ材料とナノ半導体材料を組み合わせ、構造制御した金属ナノ粒子の光学非線形特性に着目した新概念太陽電池を開発することを目的として、高効率太陽電池としての要素技術開発とプラズモン電荷分離技術の実証を行う。	22年度中間目標： 金属ナノ材料を用いた太陽電池で変換効率1%を達成する。そのための要素技術として拡散長0.1μmを目標とする。  26年度最終目標： 金属ナノ材料を用いた太陽電池で変換効率10%を達成する。そのための要素技術として拡散長10μmを目標とする。
④ 高度光利用技術の開発					
28	20 ～ 22	メカニカルスタック技術の開発A	産業技術総合研究所	異なる太陽電池のメカニカルスタックを目的として、接合技術の開発と接合による二端子型太陽電池の製造技術の開発を行う。	22年度中間目標： 分光感度の異なる2種類の太陽電池を接合させ、二端子セルとする際に、接着抵抗0.5Ω/cm <sup>2</sup> 以下、接着部の透過率90%以上を達成し、メカニカルスタックセルにおいて、電流を律則する要素セルの80%以上の電流密度を得る。  26年度最終目標： メカニカルスタック技術を薄膜型多接合太陽電池に適用し、発電効率25%を達成する。
29	20 ～ 22	メカニカルスタック技術の開発B	東京農工大学	高融点無機半導体太陽電池から有機半導体太陽電池まで多種類の材質の太陽電池間の接合を実現するために太陽電池多接合用透明導電接着フィルム(T-ACF)要素	22年度中間目標： T-ACFで接着抵抗0.5Ω/cm <sup>2</sup> 以下、実効屈折率1.8～2.0、実効消光係数3～5x10 <sup>-5</sup> 、光透過率70%を達成する。

				技術開発とその実証を以下のように行う。	26年度最終目標： T-ACFを用いて産業技術総合研究所等と協力して多接合太陽電池で変換効率25%を達成する。	
30	20～22	高度光閉じ込め技術の開発A	産業技術総合研究所	薄膜多接合太陽電池の高効率化にとって極めて重要な光マネジメント、すなわち各発電層における光吸収の促進、ならびに入射光の各発電層間への効率的な分配を実現することを目的として、多接合太陽電池の最裏面に用いる光散乱基板（フォトニック基板）と、個別の発電層間を繋ぐための波長弁別機能を有した中間層（フォトニック導電膜）を開発する。	22年度中間目標： ・周期構造を利用したフォトニック基板を単接合太陽電池に適用し、従来技術に較べて近赤外領域の波長感度を20%向上させる。その要素技術として半導体中を伝搬する近赤外光の散乱量50%以上を目標とする。 ・多層構造を利用した新規なフォトニック導電膜において、従来の単層中間層に較べて波長弁別率を50%向上させる。  26年度最終目標： ・周期構造を利用したフォトニック基板を単接合太陽電池に適用し、従来技術に較べて近赤外領域の波長感度を20%向上させる。 ・本技術を薄膜型多接合太陽電池に適用し、発電効率25%を達成する。	
31	20～22	高度光閉じ込め技術の開発B	大阪大学	金属ナノ粒子を用いたプラズモン効果を基盤技術として、新規な透明導電層を形成し、テイラーメイドな散乱波長選択性を有する多接合型太陽電池用の高機能透明導電層を開発する。この3カ年では、プラズモン活用による光散乱波長選択制御技術検証に注力し、下記の開発内容を進める。	22年度中間目標： ・プラズモン活用型透明導電層を用いた新規な光閉じ込め構造の作製技術を確立し、単接合薄膜太陽電池において、従来技術に較べて長波長光感度を20%向上させる。 ・ミドル層およびボトム層に必要な波長域において、光散乱波長選択制御が可能であることを実証する。  26年度最終目標： ・新規に開発する光閉じ込め構造により、従来技術に較べて長波長光感度を30%向上させる。 ・本技術を用いて産業技術総合研究所等と協力して多接合太陽電池で変換効率25%を達成する。	
32	20～22	高性能透明導電膜の開発	産業技術総合研究所	幅広い波長領域に感度を有する高効率太陽電池に必要な窓電極の開発を目的として、透明導電膜の移動度の支配的要因の明確化と高い	22年度中間目標： ・可視・近赤外領域（波長：400～1700 nm）で透明な導電性酸化物において抵抗率 $3 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$ 以下、波	

				<p>透明性と高い導電性を兼ね備えた低エネルギー損失窓電極の材料開発を行う。</p>	<p>長 1700 nm における吸収係数 <math>6.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}</math> 以下を同時に達成する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 200 °C 以下の低温プロセスで上記酸化物を作製する薄膜形成技術を開発する。</li> </ul> <p>26 年度最終目標：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 本技術を薄膜型多接合太陽電池に適用し、発電効率 25% を達成する。</li> </ul>	
33	20 ～ 22	高性能ガラス基板作技術を使った高性能透明導電膜の開発	東京工業大学	<p>酸化物表面の原子レベル構造制御技術を使って、ナノスケールで規則的な凹凸を持つナノ秩序表面構造ガラス基板を作製し、その上での均一な透明導電膜の結晶成長によって、25% 以上の変換効率を有する薄膜多接合型太陽電池における高性能透明導電膜を開発することを目的として、ナノパターンガラス基板作製および透明導電性薄膜の高品質結晶成長に関する要素技術開発を行う。</p>	<p>22 年度中間目標：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ ナノパターンガラス基板（1 cm 角以上）上での透明導電膜において、従来（例えば <math>\text{SnO}_2</math>）に比して、おおむね 2 倍の移動度（<math>80 \sim 100 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{sec}</math>）および半分の電気抵抗率（<math>2 \times 10^4 \Omega \text{ cm}</math>）を達成する。</li> </ul> <p>26 年度最終目標：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ ナノパターンガラス基板（10cm 角以上）上で、近赤外域を含む光透過波長域を拡大した、低抵抗・高移動度の高性能透明導電膜を作製する。</li> <li>・ 本技術を用いて産業技術総合研究所等と協力して多接合太陽電池で変換効率 25% を達成する。</li> </ul>	

表.5 研究開発項目③「低倍率集光型薄膜フルスペクトル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	達成目標	その他
①バンドエンジニアリング						
1	20 ～ 22	ナノドット 禁制帯幅制御	東京工業大学	薄膜フルスペクトル太陽電池のミドルセル用光吸収層材料として、1.1-1.6eVの範囲で禁制帯幅制御が可能なSiC/Siナノドットを開発する。	22年度中間目標： SiC/Siナノドットの欠陥密度を $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以下にまで低減する技術を開発することにより、シングル接合セルで真性変換効率5%を達成する。  26年度最終目標： Siナノドット・シングル接合セルで真性変換効率10%を達成する。多接合太陽電池のミドルセルへ適用し、セルレベルでの動作を実証する（ナノドットセルからの真性変換効率3%）。	
2	20 ～ 22	マルチエキシトン	東京工業大学	シリコン量子ドットのバンドエンジニアリング、ならびに、状態密度制御によるフォノン散乱抑制、マルチエキシトン生成による変換効率向上などの諸効果の原理実証と、薄膜太陽電池へ適用可能性を検証するため、薄膜シリコン系技術と整合性があり、かつ、高品質なシリコン量子構造形成可能なSi/CaF <sub>2</sub> ヘテロエピタキシャル量子ドット構造を用いて、原理検証のための研究を行う。	22年度中間目標： Si量子ドットの遷移エネルギー $E_g < E < 3.3 \text{ eV} (\text{@}1 \text{ nm})$ 領域における、マルチエキシトン生成(2E <sub>g</sub> )等による量子効率の増倍効果に関する原理実証を目標として、光生成電流が観測可能なSi量子ドット結晶層及び素子構造を形成する。  26年度最終目標： p-i-nセル構造の変換効率を明らかにするとともに、多接合型シリコン薄膜太陽電池に適用可能な素子構造と変換効率最適化への指針を提示する。	
3	20 ～ 22	ナノドット量子効果による薄膜形成技術	三洋電機(株)	高品位マトリクス形成技術の開発を行い、ナノドット粒子配置法の開発、及び量子効果の検証を行う。さらにナノドット量子効果を用いた高効率太陽電池デバイスの開発	22年度中間目標： ①ナノドット量子効果を有するボトム層対応高品位薄膜の開発 ②バンドギャップ制御幅：約0.2 eV ③欠陥準位密度： $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以下  26年度最終目標：	



					<p>①単接合セル： 変換効率 7%</p> <p>②低倍率集光多接合セル： 真性変換効率 30% (プロジェクト、有効受光面積：1cm<sup>2</sup>)</p>	
4	20 ～ 22	Ge の遷移型制御	東京工業大学	遷移型制御の理論予測及び最適構造設計と歪 Ge 膜の結晶成長技術の開発を行う。	<p>22年度中間目標： 歪 Ge 膜の作製技術の開発において、間接遷移型半導体から直接遷移型半導体への転換を実証するために、光子エネルギー0.7eV 付近における光吸収係数の1桁以上の増大を確認する。</p> <p>26年度最終目標： 直接遷移型へと転換した歪 Ge を用いた単接合太陽電池において、真性変換効率 5%を達成する。</p>	
5	20 ～ 22	薄膜新材料	岐阜大学 (再委託:岐阜高専)	アモルファス/微結晶化合物薄膜新素材の開発と組成比等による禁制帯幅制御技術を確認する。さらに、ゲストフリーSiGe系クラスレート薄膜の開発を行う。金属およびシリコンの蒸着による金属 Si 混合薄膜の作製技術を開発し、金属 Si 混合薄膜から金属内包 Si クラスレート薄膜を作製する。さらに、この薄膜の熱処理により、ゲストフリー Si クラスレート薄膜を作製する。	<p>22年度中間目標： 禁制帯幅 2.2eV 程度で、光電気伝導を示し、欠陥密度 <math>2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}</math> 以下のアモルファス/微結晶化合物新素材薄膜を開発。それを用いた単接合太陽電池にて開放電圧 1.0V 以上を達成。 光電気伝導を示し、欠陥密度 <math>2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}</math> 以下のゲストフリー/希ガス内包 Si クラスレート薄膜を作製。</p> <p>26年度最終目標： 単接合太陽電池にて開放電圧 1.2V 以上を達成。中心機関と連携して低倍率集光型多接合太陽電池にこれを適用し、真性変換効率 30% (有効受光面積：1cm<sup>2</sup>) を達成。ゲストフリー/希ガス内包 Si<sub>x</sub>Ge<sub>1-x</sub> クラスレート薄膜において、理論値 1.3~2eV をもとに連続的に制御可能な禁制帯幅を明らかにする。禁制帯幅 1.8eV 程度のクラスレート薄膜を用いた太陽電池にて変換効率 5%を達成。</p>	

6	20 ～ 22	ワイド／ナ ローギャッ プ材料設計	龍谷大 学	ワイドバンドギャップ光吸 収層材料として $E_g=1.7\sim$ $2.0\text{eV}$ 、ナローバンドギャッ プ光吸収層として $E_g=0.6\sim$ $1.0\text{eV}$ の直接遷移型化合物半 導体の組成、結晶構造、結 晶配向を設計する。材料設 計で得られた特性を実験結 果と比較して材料設計の有 効性を確認する。この成果 を、中心機関と連携して太 陽電池に適用する。	22年度中間目標： ワイドバンドギャップ光 吸収層材料として $E_g=1.7$ $\sim 2.0\text{eV}$ 、ナローバンド ギャップ光吸収層として $E_g=0.6\sim 1.0\text{eV}$ の直接遷 移型化合物半導体の組 成、結晶構造、結晶配向 を設計する。材料設計で 得られた特性を実験結果 と比較して材料設計の有 効性を確認する。この成 果を、中心機関と連携し て太陽電池に適用し、低 倍率集光時、真性変換効 率 20% (有効受光面積： $1\text{cm}^2$ ) を得る。  26年度最終目標： 5-6 接合からなる低倍率 集光型化合物系薄膜太陽 電池材料 ( $0.6\sim 2.0\text{eV}$ ) の 材料設計を行う。材料設 計で得られた特性を実験 データと比較して材料設 計の有効性を確認する。 この材料設計を、中心機 関と連携して低倍率集光 型薄膜フルスペクトル太 陽電池に適用し、低倍率 集光多接合セルで真性変 換効率 30% (有効受光面 積： $1\text{cm}^2$ ) を達成する。	
②薄膜フルスペクトル太陽電池						
7	20 ～ 22	シリコン系 薄膜集光型 セル	東京工 業大 学	シリコン系薄膜、CdTe 薄 膜、カルコパイライト薄 膜、ならびに、これらを組 み合わせた薄膜フルスペク トル太陽電池を開発する。 さらに、これらの薄膜フル スペクトル太陽電池を低倍 率集光下で有効に動作させ るためのデバイス技術を開 発する。	22年度中間目標： 低倍率集光で真性変換効 率 20% (有効受光面積： $1\text{cm}^2$ )。  26年度最終目標： 低倍率集光多接合セルで 真性変換効率 30% (有効 受光面積： $1\text{cm}^2$ )。	

8	20 ～ 22	広バンド ギャップシ リコン系薄 膜	シヤ ー プ (株)	短波長の光子エネルギーを有効に電力変換するためにエネルギーバンドギャップの大きなシリコン系合金薄膜材料を活性層に用いた薄膜太陽電池により高い電圧で電流を取り出せるようにして、これを光入射セルに適用した積層型マルチバンドギャップ多接合太陽電池に適用して変換効率の向上を図る。	22年度中間目標： 単接合型薄膜太陽電池で 開放電圧：1.2V以上(サ イズ 1cm <sup>2</sup> 以上) 多接合型薄膜太陽電池で 真性変換効率：15%以上  26年度最終目標： 多接合型薄膜太陽電池で 真性変換効率：17%以上 (サイズ1cm <sup>2</sup> 以上)	
9	20 ～ 22	サブセル界 面接合技術	三 菱 電 機 (株)	超高効率の薄膜フルスペクトル太陽電池を実現するために、低倍率集光(～50sun)に問題となるフィルファクタの低下を防止するサブセル界面接合技術を開発する。	22年度中間目標： サブセル界面におけるト ンネル伝導評価の基本技 術およびサブセル界面に 電氣的に作用する薄膜構 造体の開発により、サブ セル界面抵抗 300 mΩcm <sup>2</sup> (サブセル界面部電圧降 下 0.15V 以下)を得るこ とを目標とする。  26年度最終目標： トンネル伝導評価手法の 高精度化およびサブセル 界面のトンネル伝導促進 技術の完了により、サブ セル界面抵抗 100 mΩcm <sup>2</sup> (サブセル界面部電圧降 下 0.05V 以下)を得るこ とを目標とする。	
10	20 ～ 22	カルコパイ ライト系集 光型セル	東 京 工 業 大 学	Ag系ワイドバンドギャップ材料の開発を行う。1.1eV 集光セルの開発及び 1.4eV 帯カルコパイライト系材料の高品質化③ カルコパイライト系太陽電池貼り合わせ技術開発	22年度中間目標： 中心機関と連携して最終 目標を達成するための、 Ag系及び Cu系カルコパ イライト材料を用いた太 陽電池の必要特性を明ら かにする。 ●バンドギャップ 1.1eV の Cu(InGa)Se <sub>2</sub> 薄膜太陽 電池を用いて、低倍率集 光時において真性変換効 率 20% (単接合、有効 受光面積 1cm <sup>2</sup> )を得る。 ●Ag(InGa)Se <sub>2</sub> 薄膜太陽電 池において開放電圧 0.9V 以上を得る。 ●対向する透明導電膜付 きガラス基板上に Cu(InGa)Se <sub>2</sub> 薄膜太陽電 池を貼り合わせ、貼り合 わされた状態において変 換効率 15%を達成す る。貼り合わせによる 2 層タンデム構造の課題を 抽出する。	

					<p>26年度最終目標： メカニカルスタック型 2～3 層タンデム太陽電池において、低倍率集光時において真性変換効率 25% (有効受光面積 1cm<sup>2</sup>) を得る。この開発した技術を中心機関と連携して低倍率集光型フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積 1cm<sup>2</sup>) を達成する。</p>	
11	20～22	放熱基板カルコパイライト系集光型セル	青山学院大学	<p>CuInTe 系薄膜形成と太陽電池の試作を行う。放熱基板上での CIGS 太陽電池の作製を行う。さらに集光型太陽電池における放熱基板温度シミュレーション及び冷却機構の検討を行う。</p>	<p>22年度中間目標： 放熱基板上のカルコパイライト系集光セルを開発することにより、真性変換効率 10% (ナローギャップ単接合、低倍集光、受光面積 0.5cm<sup>2</sup> 程度) および 20% (ミドルギャップ単接合、低倍集光、受光面積 0.5cm<sup>2</sup> 程度) を達成する。中心機関と連携して最終目標を達成するため、放熱基板上のカルコパイライト系を用いた太陽電池の必要特性を明らかにする。</p> <p>26年度最終目標： 放熱基板上のカルコパイライト系集光セルで真性変換効率 25% (単接合、低倍集光、有効受光面積 0.5cm<sup>2</sup>) を実現する。この開発した技術を中心機関と連携してワイドギャップセルと組み合わせた低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積：1cm<sup>2</sup>) を達成する。</p>	

12	20 ～ 22	構造設計と カルコパイ ライト系 トップセル	立 命 館 大 学	<p>高効率薄膜フルスペクトル太陽電池達成の道筋を明示することを目的として、計算機を用いて低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の総合的なデバイス構成・要素セル設計を行う。</p> <p>高効率薄膜フルスペクトル太陽電池達成に必須な、トップセルとなる高効率ワイドギャップCu(In, Al)S<sub>2</sub> (CIAS) 太陽電池の開発を行う。</p>	<p>22年度中間目標： (1) デバイス構成（セル数・集光倍率）と各要素セルの仕様（Eg, <math>\eta</math>, Jsc, Voc, FF, サブバンドギャップの透過率）を明示する。テーマ全体の最終目標達成のためのデバイス構成・各要素セルの仕様を理論的に明示する。 (2) CIAS 薄膜（Eg=1.9～2.3eV）について基礎的な成長技術開発を行い、真性変換効率 <math>\eta = 5\%</math> を得る。</p> <p>26年度最終目標： (1) <math>\eta = 40\%</math> 実現に必要なデバイス構成・各要素セルの仕様を明示する。ならびにデバイス構成・各要素セルと実デバイスとの差異を明示する。 (2) TCO 上での CIAS 薄膜の成長技術開発を行い、CIAS 単接合太陽電池で真性変換効率 <math>\eta = 10.5\%</math> を得る。中心機関と連携して低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30%（有効受光面積：1cm<sup>2</sup>）を達成する。</p>	
13	20 ～ 22	光学設計技術	(株) カネカ	<p>低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の光学設計技術として、太陽光スペクトルを短波長光と長波長光に分離し、閉じ込めるオプティカルカップリング・オプティカルスプリッティングによる光マネージメント構造の設計方法を開発する。さらに、中心機関で作製されたシリコン系・化合物系の薄膜太陽電池を活用して薄膜フルスペクトル太陽電池を実現する。</p>	<p>22年度中間目標： 低倍率集光系シリコン系／化合物系多接合薄膜太陽電池において、 ①変換効率 30%を達成するためのオプティカルカップリング構造の提案（シミュレーションによる光学設計） ②オプティカルカップリング・オプティカルスプリッティング構造を有する低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池において、光学設計による3%の変換効率向上の実証</p> <p>26年度最終目標： オプティカルカップリング・オプティカルスプリッティング構造を中心機関と連携して低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性</p>	

					変換効率 30% (有効受光面積 : 1cm <sup>2</sup> ) を達成する。	
14	20 ～ 22	集光型 CdTe 薄膜	木更 津高 専	集光型 CdTe 薄膜では、集光型 CdTe 太陽電池を開発し、シリコン系薄膜太陽電池などと組み合わせて多接合セルあるいは波長スプリッティングによる集積型セルを開発する。	22 年度中間目標 : 直列抵抗 0.5 Ωcm <sup>2</sup> を得る。シリコン系薄膜 / CdTe 4 端子タンデム太陽電池に適用し、低倍率集光時、真性変換効率 20% (有効受光面積 : 1cm <sup>2</sup> ) を得る。  26 年度最終目標 : 直列抵抗 0.2 Ωcm <sup>2</sup> を得る。低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積 : 1cm <sup>2</sup> ) を達成する。	
③光のマネージメント・TCO						
15	20 ～ 22	表面プラズモン	東京工業大学	半導体太陽電池に適用可能な金属ナノ粒子の表面プラズモンによる効果を明確化し、その効果を有効に利用できる太陽電池構造を検討することで、変換効率向上を目指す。また、得られた知見から表面プラズモンを薄膜フルスペクトル太陽電池へ適用する方法を提案する。	22 年度中間目標 : 半導体太陽電池における表面プラズモン効果の明確化 (ピーク波長における光電流の 5% 向上)  26 年度最終目標 : 表面プラズモンによるピーク波長での光電流の 10% 向上、および表面プラズモンを薄膜フルスペクトル太陽電池へ適用する方法の提案	

16	20 ～ 22	p形透明導電膜	龍谷大学 (共同実施： 新潟大学)	集光型セル用 p 型 TCO への要求特性を満足する新材料の探索研究を行い、材料の薄膜作製技術開発を行う。	<p>22年度中間目標： 基本特性として <math>E_g &gt; 3.0\text{eV}</math>, <math>\sigma &gt; 10\text{Scm}^{-1}</math> を達成する。中心機関と連携して、p型透明導電膜をシリコン系薄膜太陽電池に適用してp型透明導電膜の有効性を確認し、また化合物系薄膜太陽電池の裏面電極に適用して長波長光を透過させた状態で真性変換率 10%を達成する。</p> <p>26年度最終目標： 基本特性として <math>E_g &gt; 3.0\text{eV}</math>, <math>\sigma &gt; 10^3\text{Scm}^{-1}</math> を達成する。開発した p 型透明導電膜を中心機関と連携して低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積：<math>1\text{cm}^2</math>) を達成する。</p>	
17	20 ～ 22	フルスペクトル TCO	旭硝子 (株)	多接合薄膜フルスペクトルセルに適用可能な透明電極の開発を目的として、太陽光のフルスペクトルにわたって透明でかつ高い導電性を有する膜材料の開発と、フルスペクトルにわたって透過率を有する透明導電基板の開発を行う。	<p>22年度中間目標： 2 ミクロンまで透明な TCO として可能性のある材料を探索し、概ね 0.4 ミクロンから 1.4 ミクロンで光吸収率が 5% 以内 (浸液法で測定した TCO 基板としての透過率で 87%)、比抵抗 <math>1 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}</math> 以下を実現する。この開発した TCO 基板をグループ内の他機関へ供給して太陽電池に適用し、低倍率集光時、真性変換効率 20% (有効受光面積：<math>1\text{cm}^2</math>) を得る。</p> <p>26年度最終目標： 選定された材料の成膜プロセスに改良を加え、フルスペクトルに対して有効な光散乱・光閉じ込め効果を有する表面テクスチャ形状を付与する手法を開発する。概ね 0.4 ミクロンから 2 ミクロンの波長で光吸収率が 5% 以内、ヘイズ率 40% 以上で比抵抗 <math>1 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}</math> 以下を達成する。この開発した TCO 基板を中心機関と連携して低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍</p>	

					率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積 : 1cm <sup>2</sup> ) を達成する。	
18	20 ～ 22	グラフェン 透明導電膜	富士 電機 ホール ディング ス (株)	超高効率太陽電池で必須となる赤外領域においても透過率が高い透明導電膜の開発を目的として、新規材料であるグラフェンを透明導電膜へ適用するための技術開発を行う。	22年度中間目標 : 導電率 $6 \times 10^3$ S/cm 以上、透過率 : 80 %以上 @380-2000 nm  26年度最終目標 : シート抵抗 : 10 Ω/□以下、透過率 : 90 %以上 @380-2000 nm	



## 2.2 研究開発の実施体制

本事業を実施するための基本計画については、平成 19 年 12 月、平成 20 年 1 月に外部有識者による革新型太陽光発電技術開発に係る検討委員会ならびに平成 20 年 1 月に外部有識者による太陽光発電技術委員会においてその方向性を審議し、平成 20 年 3 月に策定された。

本事業は、NEDO が選定する企業、大学、民間研究機関、あるいは独立行政法人等（以下、「委託先」という。）が、NEDO と委託研究契約を締結し実施した。

実施した公募の状況は以下のとおりである。

平成 20 年度：「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）」に関する公募

・公募期間：平成 20 年 3 月 19 日から 4 月 21 日

・審査項目・基準

- 1) 提案内容が本公募要領に記載の「事業の概要」に示す目的・要件と合致していること。
- 2) 提案内容に新規性・革新性があり、技術的に優れていること。
- 3) 共同提案の場合、研究開発テーマ内の各研究機関の提案内容が相互補完的であること。
- 4) 提案された研究内容・研究計画は実現可能であること（技術的可能性、計画、目標の妥当性等）。
- 5) 応募者は本研究開発を遂行するための高い能力を有していること。
- 6) 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が期待できること
- 7) 総合評価

・審査委員会委員（敬称略）：

黒川 浩助（東京工業大学特任教授）、工藤 一浩（千葉大学教授）、田中 一宣  
（（独）科学技術振興機構上席フェロー）、渡辺 征夫（九州大学 名誉教授）

・応募件数：7 件

・採択件数：3 件

研究開発の実施体制を図 1～3 に示す。

図1. 実施体制1

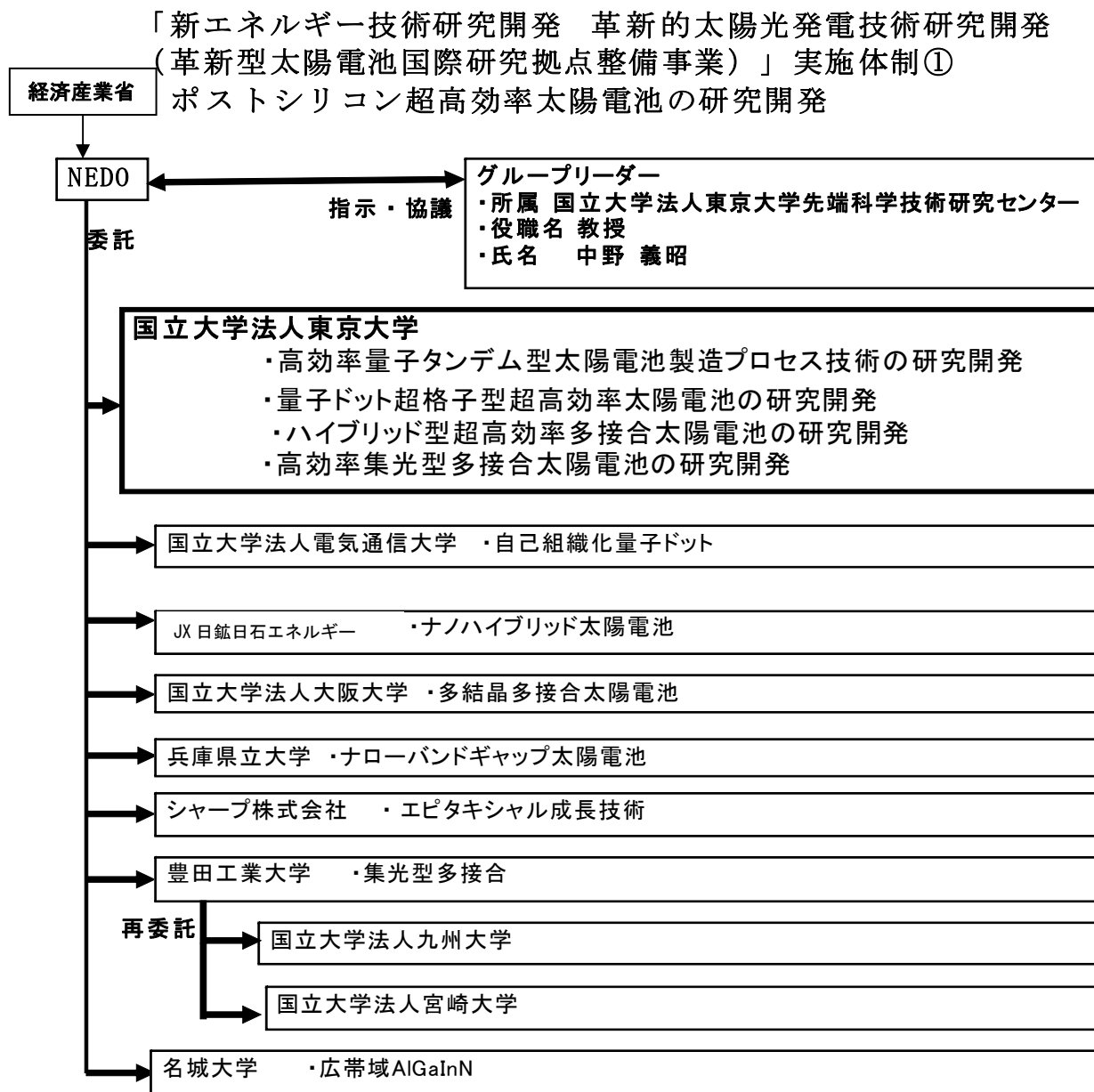


図2. 実施体制2

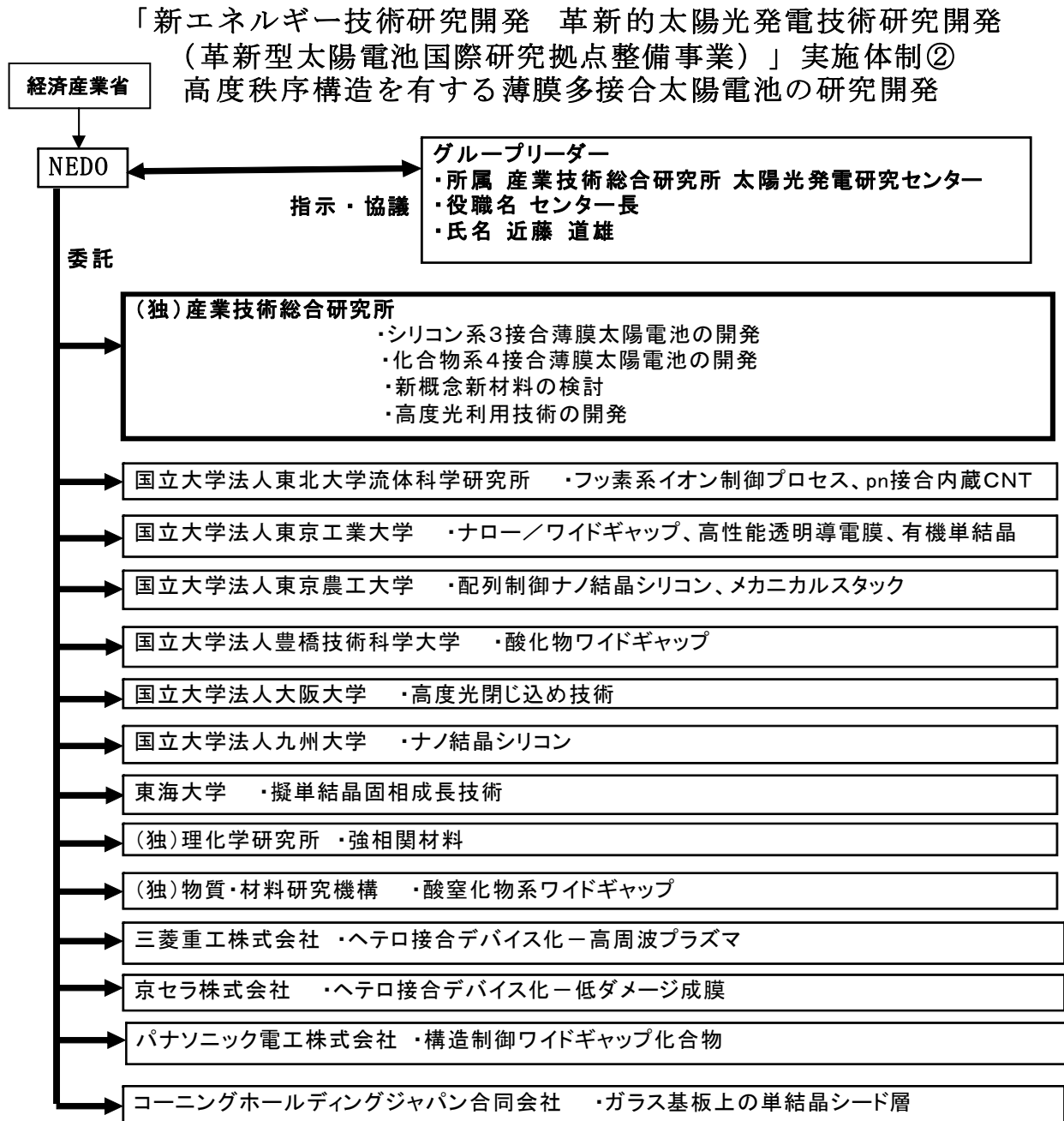


図3. 実施体制3



## 2.3 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任と決定権をもつ NEDO は、経済産業省と密接な関係を維持しつつ、研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施した。また NEDO 新エネルギー技術開発部で実施する太陽光発電技術開発に関する全事業のあり方やロードマップの策定等について、外部有識者の意見を聴取するために太陽光発電技術研究開発委員会を開催し、運営管理に反映させている。

具体的に本プロジェクトに関しては、平成 19 年 12 月の第 1 回革新型太陽光発電技術開発に係る検討委員会から、平成 20 年度以降の技術開発・研究開発の中で取り上げられ、それ以後、技術開発の進め方や公募の開発課題に関する意見を求め、公募要領に反映した。またプロジェクト実施期間中においては、その方向性や実施内容について意見を求め、研究開発の運営に反映した。(表 6. 参照)

表 6. 太陽光発電技術委員会の実施状況

実施時期	実施項目	内容
平成 19 年 12 月	第 1 回革新型太陽光発電技術開発に係る検討委員会	「革新型太陽電池国際研究拠点整備事業」においてとりあげる技術分野、プロジェクトの構築方法などについての討議。
平成 20 年 1 月	第 2 回革新型太陽光発電技術開発に係る検討委員会	革新型太陽光発電技術開発の全体スキームおよび当面の実施の方向について。
平成 20 年 2 月	第 10 回太陽光発電技術委員会	平成 20 年度研究開発体制について、「太陽光発電システム未来技術研究開発」中間評価結果について、各プロジェクト基本計画(案)、実施方針(案)
平成 21 年 6 月	第 12 回太陽光発電技術委員会	平成 21 年度の実施方針と平成 22 年度以降の新規プロジェクトについて、PV2030+の公開について、その他

また、3 グループにおいてそれぞれ GL (グループリーダー) 主催による進捗報告会を年に数回開催した。進捗報告会においては、GLが進捗状況について委託先報告を受け、開発の方向性などを審議し、必要に応じて開発内容を修正することとなっている。(表 7)

表 7. 進捗報告会の実施状況

実施項目	開催時期
東大グループ全体会議 (ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発)	平成 20 年 9 月、平成 20 年 11 月、平成 21 年 2 月、平成 21 年 4 月、平成 21 年 6 月、平成 21 年 8 月、平成 21 年 10 月、平成 22 年 1 月、平成 22 年 3 月、平成 22 年 4 月、平成 22 年 6 月
産総研グループ全体会議 (高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発)	平成 20 年 11 月、平成 21 年 8 月、平成 22 年 1 月、平成 22 年 7 月
東工大グループ全体会議 (低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発)	平成 20 年 8 月、平成 20 年 12 月、平成 21 年 7 月、平成 21 年 10 月、平成 22 年 5 月

さらに成果の発信・公表の場として、年度毎の成果報告会を、他の太陽電池関連事業とともに、表 8 のとおり実施した。

表 8. 成果報告会等の実施状況

実施項目	開催時期	場所
平成 20 年度成果報告会	平成 21 年 7 月 17 日	はまぎんホールヴィアマーレ (横浜市みなとみらい)
平成 21 年度成果報告会	平成 22 年 7 月 27 日、 28 日	東京国際フォーラム (東京都千代田)

加えて、成果の発信・公表ならびに情報交換の場として、本プロジェクトの 3 グループ合同開催で国際シンポジウムを表 9 のとおりに実施した。また、さらなる研究加速のために本シンポジウムでは欧米等から研究員を招聘して世界の最先端研究についての講演を頂いた。

表 9. 革新的太陽光発電国際シンポジウムの実施状況

実施項目	開催時期	場所
第 1 回革新的太陽光発電国際シンポジウム	平成 21 年 3 月 2 日、 3 日	東京大学先端科学技術研究センター (東京都目黒区)
第 2 回革新的太陽光発電国際シンポジウム	平成 21 年 12 月 7 日、 8 日	つくば国際会議場 (茨城県つくば市)
第 3 回革新的太陽光発電国際シンポジウム	平成 22 年 10 月 7 日、 8 日 (予定)	東京工業大学大岡山キャンパス (東京都目黒区)

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。

### 3. 情勢変化への対応

以下の理由により、平成 20 年度の METI との調整額 20.00 億円・NEDO 内示額 18.73 億円に対し、3.67 億円の予算増額を行い、予算を 22.40 億円とした。(本事業が「新エネルギー技術研究開発」の大括りの中で実施しており、「新エネルギー技術研究開発」の予算枠からはみ出していないので加速ではない。)

今回の公募に際し、7 件の応募があったが、この中から本事業として進めていく技術開発テーマとして、外部有識者による採択審査委員会で特に優良な評価を受けた下記の 3 件が採択候補となった。

- ・ KPV20-003: (提案者: (独) 産業技術総合研究所)
- ・ KPV20-001: (提案者: 国立大学法人東京工業大学)
- ・ KPV20-005: (提案者: 国立大学法人東京大学)

ただし、KPV20-005 については太陽電池研究開発の実績がある研究者が、他採択候補と比較して不足していると考えられたため、成果の創出に向けⅢ-V 族化合物系太陽電池の技術に実績のある研究者を充当することが必要であると判断された。上記採択審査委員会では、この点を補うために、別提案である KPV20-002 (提案者: 豊田工業大学) の一部を組み込んで実施することが必要との結論に至った。豊田工業大学の山口教授等はⅢ-V 族化合物系太陽電池の研究に関し 20 年以上の実績があり、特に結晶成長表面反応の制御等による欠陥密度の低減に研究実績がある。太陽電池とは直接的に関係してこなかった研究者が多い東京大学の研究に、豊田工業大学の知見を生かすことで新しい概念の太陽電池においても結晶中の欠陥密度の低減やキャリア濃度の制御が早期に達成されて変換効率の向上に大きく貢献できることが期待される。

上記 3 提案 (KPV20-003, KPV20-001, KPV20-005) のみを採択する場合には、当初予算枠の範囲内で実施できる見込みであったが、加速資金を充当して、KPV20-002 の一部を組み込むことで、より強固な体制として研究開発を推進したい。これにより、世界に先んじた成果の創出が期待される。

### Ⅲ. 研究開発成果について

本事業の研究開発は、太陽光発電の経済性、性能・機能、適用性、利便性等の抜本的な改善を図り、太陽光発電の普及拡大を促進するため、現状技術の延長にない技術革新を目指した超長期的視野でテーマを募集し、その中から優れた提案を採択し実施した。目標設定が挑戦的で、高い目標を掲げたテーマが多いこともあり、成果達成への道のりがかなり厳しいテーマもある。その場合でも、いろいろな材料・構造・製造方法等のアプローチの中で、実施したアプローチが、所期の目標達成につながらなかった理由、目標達成への道筋が明確にできれば、後年度の研究開発へつながる。

また現段階では、各要素技術の開発・検証を主に研究開発を行っており、開発成果を集約した太陽電池の製作に至っていない。研究開発の主要な成果を表 10～12 に示す。今後はこれらの成果を元に本研究開発の目標である「変換効率40%超」かつ「発電コストが汎用電源未満」の実現に向けさらに研究開発を行っていく。

#### 1. 分野別、課題に対する主要な成果

##### 1-1. ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発

ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発の主要な成果、達成度、今後の課題についてを表 10 に示す。

表 10. ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発の主要な成果

テーマ名	目標	成果	達成度	今後の課題
エピタキシャル成長技術 (シャープ)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・逆積み3接合構造セルのバッファ層成長条件の最適化</li> <li>・逆積み3接合構造セルの電流整合</li> <li>上記施策により、非集光時効率 33%を達成する</li> <li>・トンネルピーク電流密度 15A/cm<sup>2</sup> 以上の実現</li> <li>・コンタクト/電極接触抵抗, シート抵抗等, 直列抵抗の低減</li> <li>上記施策により, 集光時効率 42%を達成する.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・バッファ層成長条件の最適化及びサブセルの電流整合の改善により, 非集光時効率 35.8% (AIST 測定)を達成 (世界最高値)</li> <li>・トンネル接合構造の改良 (ピーク電流密度 56A/cm<sup>2</sup>), コンタクト/電極接触抵抗及びシート抵抗の改善等により, 集光時効率 42.1% (x230, 自社測定)を達成</li> </ul>	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>・集光時効率 45%達成のため, 逆積み4接合をメインに検討</li> <li>・公的機関による集光時効率測定</li> <li>・直列抵抗成分の更なる改善</li> </ul>
MOVPE ナノ構造形成技術 (東京大学)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・InGaAs/GaAsP 歪み補償量子井戸を挿入した(In)GaAs ミドルセルを作製</li> <li>・1.2eV 帯まで長波長側の吸収端を拡張</li> <li>・1.75eV のトップセル 下 で I<sub>sc</sub>=16 mA/cm<sup>2</sup> (GaAs 単セルの値から 2 mA/cm<sup>2</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・歪み補償量子井戸セルを作製. in situ モニタによる歪み調整技術確立</li> <li>・階段型量子井戸で吸収端 1.24 eV を実現</li> <li>・障壁層の薄層化 + 界面制御により GaAs 単セルから</li> </ul>	◎	量子井戸挿入セルにおける量子井戸からのキャリア脱出メカニズムの解明による, 短絡電流のさらなる増大と開放電圧の低下抑制



	増大)	の短絡電流増大 3.3mA/cm <sup>2</sup> を実現		
量子タンデムセル技術 (東京大学)	3 接合セルの GaAs ミドルセルに InAs 系積層量子井戸・ドットを挿入し、短絡電流 2mA/cm <sup>2</sup> の増大を達成	量子ドット挿入型 GaNAs 中間層を用いた GaAs セルにより、GaAs セルに比べて最大 6 mA/cm <sup>2</sup> の短絡電流増大を達成	◎	3 接合タンデムセル・集光セルの開発 (シャープと共同開発)
量子ドット超格子型 (東京大学)	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子ドットのサイズ揺らぎの低減 10%以下</li> <li>中間層膜厚 10nm 以下</li> <li>2 光子吸収過程の原理実証</li> <li>セル効率 12%以上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子ドットのサイズ揺らぎの 8.7%を達成</li> <li>中間層膜厚 15nm 以下を達成</li> <li>2 光子吸収過程の原理実証は測定準備中</li> <li>セル効率 16.1%を達成</li> </ul>	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>GaAs(311)B 基板を用いた量子ドット成長技術の開発</li> <li>歪み補償構造の更なる最適化</li> <li>量子ドット構造、測定技術の開発</li> <li>量子ナノ効果の寄与の実証、集光技術との融合を図る</li> </ul>
量子ドット超格子構造太陽電池の研究開発 (電気通信大学)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sb 導入法による InAs 量子ドット(QD) の高密度化 (6×10<sup>10</sup> cm<sup>-2</sup> 以上)</li> <li>近接積層 QD の高均一化 (PL 半値幅 20 meV 以下)</li> <li>GaNAs 層による歪補償のための構造最適化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>QD 密度 6×10<sup>10</sup> cm<sup>-2</sup> かつ PL 半値幅 19 meV の QD 構造を達成</li> <li>Sb 導入法により QD 密度 4×10<sup>11</sup> cm<sup>-2</sup> の超高密度化 (面内超格子化) を達成</li> <li>Type II QD 構造によりキャリア寿命 5 ns 以上を達成</li> <li>GaNAs 層成長条件の検討</li> </ul>	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>QD サイズ微小化および歪補償層・歪緩和層の導入による結晶性の向上</li> <li>GaNAs 歪補償層の導入による多重近接積層化</li> <li>Sb 導入法による面内 QD 超格子構造の作製技術の開発</li> <li>高密度・高均一 QD のセル構造への導入と特性評価</li> </ul>
界面電荷移動遷移型セルの研究開発 (東京大学)	界面電荷移動遷移を利用して、1eV 帯領域で光電変換を達成する	新原理に基づく近赤外領域での光電変換達成	○	光電変換領域の拡張と効率向上

※達成度 (H22 年度末見込)

◎ : 大幅達成、○ : 達成、△ : 未達(次年度達成見込)、× : 未達(次年度達成見込無し)

#### 1-2. 高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発

高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発の主要な成果、達成度、今後の課題についてを表 11 に示す。

表 11. 高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発の主要な成果

テーマ名	目標	成果	達成度	今後の課題
ヘテロ接合デバ	・微結晶 SiGe 発電層	・バッファ層挿入	○	・無し (済み)

イ化技術の開発（三菱重工業）	での試作と温度特性評価（ヘテロ接合界面制御の影響調査） ・ヘテロ接合デバイスの作製および評価（単接合太陽電池で変換効率 8%）	により特性改善 ・Ge に対し特定の界面処理が変換効率向上に非常に有効であることを見出し、4.23%まで向上。	○	・界面処理効果の分析と最適化、基板面方位と抵抗率の最適化、構成膜の最適化（ヘテロ材料、反射防止膜の適用など）
構造制御ワイドバンドギャップ化合物太陽電池の開発（パナソニック電工）	・光吸収層のバンドギャップ分布制御（キャリア寿命 1ns 以上） ・界面制御技術（開放電圧 0.9V 以上） ・裏面コンタクト制御（量子効率 90% 以上）	・バンドギャップ制御に成功。不純物混入防止で効率 3.8%達成 ・開放電圧 0.74V 達成 ・シミュレーションから短絡電流増加に目処	○ ○ ○	・バンドギャップ分布制御の最適化。キャリア寿命測定法立ち上げ中 ・界面層と光吸収層の相互拡散抑制 ・裏面コンタクト層形成法の確立
革新的ワイドギャップ材料太陽電池の開発（産総研）	GaAs 基板上 InAs、InGaAs 量子ドット太陽電池の開発 ・10 層以上量子ドット超格子の中間バンド形成の確認。 ・InAs、InGaAs 系量子ドットを用いた太陽電池で変換効率 10%（最終目標）	・20 層 InGaAs 量子ドット超格子のミニバンド形成確認 ・12.6%ですでに達成。	◎ ◎	・ミニバンド形成した量子ドット超格子の太陽電池応用 ・中間バンド太陽電池の動作実証
ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討（産総研）	・高純度半導体単層 CNT を抽出する技術開発（90%以上） ・半導体単層 CNT のバンドギャップ制御（バンドギャップ 0.2 ~ 1.3eV、開放電圧 0.1~0.5V） ・バルクヘテロ接合 CNT 太陽電池の量子効率の最大値を 50% 以上とする。	・95%以上 ・バンドギャップ 0.8~1.3eV、開放電圧 0.14~0.57V ・量子効率の最大 65%（最高 73%）	◎ ○ ◎	・純度 99%以上、抽出率 10wt%以上とする。 ・平均直径 1.1nm 以上の単層 CNT を用いてバンドギャップ 0.6 ~ 1.3eV を達成する。 ・広いエネルギー範囲で量子効率の最大値を 70%以上。
メカニカルスタック技術の開発（東京農工大）	・透明導電性接着剤特性（透過率 70% 以上、接合抵抗 0.5 Ω cm <sup>2</sup> ） ・多接合セル実証（ソーラーセルによる二端子セル作製）	・透過率 80%、接合抵抗 2.5 Ω cm <sup>2</sup> ・ソーラーセルによる二端子セル作製成功	○ ◎	・低抵抗化、大面積均一化 ・多種類のセルにおける実証
高性能透明導電膜の開発（産総研）	・低エネルギー損失窓電極の開発（近赤外領域（波長：400~1700 nm）で透明な導電性	最大プロセス温度 200℃において抵抗率 2.7x10 <sup>-4</sup> Ω cm、波長 1700	◎	可視高移動度を維持した状態で更に低抵抗率化を図る。

	酸化物において抵抗率 $3 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$ 以下、波長 1700 nm における吸収係数 $6.0 \times 10^3 \text{cm}^{-1}$ 以下を同時に達成する。200 °C 以下の低温プロセスで上記酸化物を作製する薄膜形成技術を開発する。)	nm の吸収係数約 $5 \times 10^3 \text{cm}^{-1}$ と中間目標を上回る特性を得た。現在のところ、抵抗率 $2.2 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$ まで低抵抗率化できている。		
--	--	--	--	--

※達成度 (H22 年度末見込)

◎ : 大幅達成、○ : 達成、△ : 未達(次年度達成見込)、× : 未達(次年度達成見込無し)

### 1-3. 低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発

低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発の主要な成果、達成度、今後の課題についてを表 12 に示す。

表 12. 低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発の主要な成果

テーマ名	目標	成果	達成度	今後の課題
ナノドット禁制帯幅制御	シングル接合セルで変換効率 5% を達成する。	SiC/Si ナノドットに酸素添加することにより変換効率の大幅アップを実現。世界最高の開放電圧 518mV を達成。ITO 側から光照射する構造で光電流 $5.4 \text{mA/cm}^2$ を達成。現状で得られている Voc, Isc, FF それぞれの最高値が同時に達成できれば 3.8% の変換効率となる。	◎	ITO 側から光照射する構造の最適化、膜剥離の問題を解決することにより、5% の変換効率を達成見込み。
薄膜新材料	アモルファス/微結晶化合物薄膜ならびに、ゲストフリー SiGe 系クラスレート薄膜の開発	・アモルファス InGaN で光感度 252 倍を達成。 ・約 1.5eV のバンドギャップの Si クラスレートで、世界で初めて光電気伝導度 $\sim 1 \times 10^{-7} \text{S/cm}$ を観測。	○	一層の高品質化により欠陥密度 $2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ を実現する。
ワイド/ナローギャップ材料設計	ナローバンドギャップ材料の材料設計 新材料開発 : 0.6 ~ 1.0eV	CuIn(Se1-XTeX)2 系の X=0.5 で $E_g=0.88 \text{eV}$ が得られた。	◎	薄膜の一層の高品質化
シリコン系薄膜集光型セル	低倍率集光で真性変換効率 20%	微結晶 Si 太陽電池では、低倍率集	○	シリコン薄膜系 2 接合、3 接合太陽電池

		光で変換効率が大幅にアップ（1sun 8.7%、7 sun 9.4%）することを世界で初めて見出した。a-Si/mc-Si タンデムセルで変換効率 10.1%、高電圧型 a-SiO/a-Si タンデムセルで 9.4%（開放電圧 1.92V）を達成。現状技術でトリプルセルを接合すれば、16%程度の変換効率が得られることを理論解析で明確化。		の最適設計と、低倍率集光特性の検討
サブセル界面接合技術	サブセル界面トンネル伝導構造の開発 サブセル界面抵抗： 300 mWcm <sup>2</sup>	サブセル界面抵抗： 500mWcm <sup>2</sup> (300mWcm <sup>2</sup> 達成見込み)	○	成膜条件、ドーピング濃度等の最適化、材料の組合せ、後続プロセス条件の最適化
カルコパイライト系集光型セル	低倍率集光時において真性変換効率 20%（単接合、有効受光面積 1cm <sup>2</sup> ）	バンドギャップ約 1.1 eV の CIGS を用いて、約 7 倍集光により、変換効率 20.3%を達成した。	◎	1.4eV 帯、高 Ga 組成 CIGS 太陽電池の効率向上によるミドル・セル用太陽電池を開発。
放熱基板カルコパイライト系集光型セル	・ CuInTe 系薄膜形成と太陽電池の試作 ・ 放熱基板上での CIGS 太陽電池で変換効率：20%	・ CuInTe 薄膜の低温製膜技術（200℃）確立し、変換効率 5%（非集光） ・ 金属基板上 CIGS セルで 18%（非集光）	○	Te フラックス制御および不純物効果による更なる高効率化、集光時の動作確認
光学設計技術	新規直並列多接合薄膜太陽電池の開発	シリコン系と化合物系太陽電池からなる新規多接合薄膜太陽電池を提案し、数値計算により 3%の変換効率向上を確認。世界で初めて微結晶シリコンセルと CIGS セルの直列タンデム構造の作製に成功した。	◎	新規太陽電池セル作製方法の検討と、光学調整を中心とする構造最適化の検討。
p 型透明導電膜	基本特性として Eg>3.0eV，σ>10 Scm <sup>-1</sup> を達成する。	(1)禁制帯幅 Eg(CuAlO <sub>2</sub> )=3.1eV、Eg(新材料)=2.6eV	◎	開発した p 型透明導電膜を用いて、中心機関でアモルファス Si シングル接合セル

		(2)可視光透過率 80% (新材料) (3)電気導電率 21 S/cm (新材料)		を作製し、セル特性から p 型 TCO 利用の特質の明確化する。
グラフェン透明導電膜	グラフェン成膜技術の開発 導電率 $6 \times 10^3$ S/cm 以上、透過率：80% 以上@380-2000 nm	導電率 $2 \times 10^4$ S/cm	○	MBE によるエピ成長技術開発

※達成度 (H22 年度末見込)

◎：大幅達成、○：達成、△：未達(次年度達成見込)、×：未達(次年度達成見込無し)

## 2. 個別テーマの成果概要

### 2-1. ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発

#### 2-1-1 集光型多接合太陽電池

1) 4 接合太陽電池の研究開発 (豊田工大、再委託：九州大学)

<H22 中間目標：InGaP 単接合太陽電池で変換効率 15% (非集光)、H26 最終目標：シャープ(株)と協力し AlInGaP/InGaAs/InGaAsN(1eV)/ (Ge または InGaAs) 4 接合セルにおいて、変換効率 35% (非集光)、変換効率 45% (1000 倍集光時) >

○開発項目① InGaAsN 材料の成膜過程の解明と高品質化

N 添加の効果を明らかにするため、In を添加しない GaAsN 材料の成膜を検討した。成膜時の表面反応過程の制御には、①基板表面のステップ密度制御 (微傾斜 GaAs (001) 基板使用)、②成膜速度制御の 2 つの手法を試みた。これまで、GaAsN 材料の移動度を低下させる N 起因の散乱体密度は、MBE 法や MOCVD 法など、その成膜方法によらず、N 濃度に比例することが報告されていた。一方、本研究で上記の 2 つの手法で表面反応を制御した GaAsN 膜では、N 起因の散乱体密度を大幅に減少できることを世界で初めて示した。これは、従来限界と考えられていた N 添加によるキャリア移動度の減少を、他の方法に比べて CBE 法では大きく改善できることを示すものである。また、キャリア寿命を評価した結果、成膜速度減少とともにキャリア寿命の大幅な改善を確認した。窒素濃度 0.85% の GaAsN 膜で 0.9 ns のキャリア寿命を達成し、さらにこの試料をアニール処理することにより、1 ns を超えるキャリア寿命を得た。これは、太陽電池化した時に単接合で変換効率 10% 以上が期待できる値である。低成膜速度の CBE 法は、キャリア移動度、キャリア寿命の両方の改善に有効であることが示された。

○開発項目② III-V-N 系半導体成長シミュレータの研究開発 (九州大学)

III-V-N 系 ((In)GaAsN 系) 太陽電池開発では、N に関連した点欠陥の導入が電子 (正孔) の散乱を引き起こし、ひいては変換効率の低下を招くことが見出されてきている。本研究では、まず、熱力学解析手法を基本とするシミュレーションコードの開発を行い、世界で初めて III-V-N 系半導体薄膜の組成 (N 取り込み量) 予測シミュレーションを行った。本シミュレーションでは、第一原理計算を基本とする解析を用いて、格子歪み、構造多形 (立方晶/六方晶) が N 取り込み量に与える影響を考慮している。また、各種 V 族原料ガスと N 取り込み量の関係を検討するため、各種生成反応に対する平衡定数の解析を行った。As 系原料の反応に関する物性 (平衡定数) の系統的なデータを公表するのも世界初である。今後、九州大と豊田工大との連携を更に強化して共同研究を進展させ、ここで求めた N 取り込み量と N に関連した点欠陥の導入プロセスを原子レベルで解析し、III-V-N 系多接合太陽電池の変換効率向上に貢献する。

○開発項目③ InGaAsN 材料の電子物性と欠陥制御

過渡容量分光 (DLTS) 法を用いて GaAsN 材料中の欠陥評価を行い、複数の電子捕獲準位の存在を明らかにした。本研究で見いだした再結合中心が InGaAsN 材料における特性劣化の主要な原因である事が示唆された。GaAsN 材料中の N-H 複合欠陥に関して、起源及び構造に関して検討を行い、N-H 結合に起因した複数の赤外吸収ピークが、異なる欠陥構造のピークである事を明らかにした。フォトルミネッセンス (PL) 測定で得た発光スペクトルの解析から、

GaAsN 材料のバンドギャップ、およびバンド端近傍の欠陥準位について検討した。特性劣化との関係が指摘されている発光について、その起源に関する考察を行った。

○開発項目④ InGaAsN 単接合セルの開発評価

Si ドープ n 型 GaAsN とアンドープ p 型 GaAsN とのホモ接合で単接合セルを試作し、良好な pn 接合特性を得た。セル構造の最適化がまだ不十分であり、少数キャリア寿命 0.1 ns の GaAsN 膜 (N 組成 0.6%) を用いた単接合セル (反射防止膜無し) で、効率 4% ( $V_{OC}=0.625V$ ) と低い、従来の結果に比べて高い  $V_{OC}$  を実現した。上記 1ns の少数キャリア寿命を有する GaAsN 膜を用いることにより効率 10%以上の達成の見通しを得た。さらには成膜条件とセル構造の最適化で効率 15%以上の中間目標の達成が見込める。

2) 多接合太陽電池の集光動作解析 (豊田工大、再委託: 宮崎大学)

<H22 中間目標: シャープ(株)と協力し変換効率 42% (集光時)、H26 最終目標: InGaAsN 結晶成長技術及びシャープ(株)と協力して、3ないし4接合セルにおいて、変換効率 45% (集光時) >

○開発項目① 転位挙動の解析と転位密度低減

格子不整合系 1.7eV/1.2eV/0.67eV の 3 接合セルの実現のため、格子不整合 1.2eV の InGaAs の MBE 法による転位挙動解析を行った。大型放射光施設 SPring-8 の MBE-XRD 装置により、InGaAs/GaAs(001)成長中の歪緩和の様子を 3 次元逆格子マッピングにより世界で初めてリアルタイム観測した。この結果を基に、InGaAs の歪緩和の面内非対称性の発現、消失の起る膜厚領域の同定と転位のすべり運動を阻害するブロッキング過程を反映した歪と結晶性の膜厚変化を得た。

さらに、本手法を、転位密度の低減に有効とされる傾斜組成  $In_xGa_{1-x}As$  バッファ層に応用し、歪緩和のリアルタイム解析を行った。その結果、In 組成の高い二層目の成長が一層目の歪緩和を促進していることが確認できた。本手法を傾斜組成  $In_xGa_{1-x}As$  バッファ層に応用することで、各 InGaAs 層の歪緩和過程を同時に解析でき、転位密度の低減に有効なバッファ層の構造設計に有用であることが示された。本知見は、シャープが達成した格子不整合系 3 接合セルの高効率化 (非集光時 35.8%、集光時 42.1%) に、間接的に寄与した。今後、シャープとの連携をさらに強化することで、格子不整合系 3 接合セルの集光時の効率 45% (最終目標) の達成に寄与する。(シャープは中間目標の集光時の効率 42%を達成済)

○開発項目② 集光動作特性解析シミュレータの開発と集光動作特性解析 (宮崎大学)

集光型太陽電池には光学系により様々な面内分布や色収差を持った光が入射され、それらの分布を考慮した太陽電池開発が必須となる。本研究では、照射光の分布を 3 次元 (3D) 的に考慮することができる 3D 多接合型太陽電池等価回路を開発した。このモデルを用いて計算した多接合型太陽電池の集光時動作特性が実測値と一致することを確認し、本研究により導出されたパラメータおよびモデルが適当であることが示された。また、この手法は太陽電池温度が変化したときにも有効であることを実測値との一致により示し、集光動作をより詳細に解析できるようになった。

光学計算手法を確立し、レンズ等の光学系により太陽電池にどのような分布の光が照射されるかを計算することが可能となった。さらに、3D 等価回路モデルを組み合わせることにより、どのような光学系を用いると、どのような太陽電池特性が出力されるかを総合的に計算することが可能となった。本手法を活用することにより、光学系から太陽電池構造までを総合的に最適化設計することが可能となった。

<成果発表件数>特許出願 (外国): 0(0)、論文 (査読付): 6(6)、研究発表・講演: 106、新聞・雑誌等への掲載: 23、展示会出席: 4

3) 広帯域 AlGaInN 結晶を用いた多接合太陽電池の研究開発 (名城大学)

<H22 中間目標: 1.0eV 帯または 1.4eV 帯の単接合セルにて変換効率 5%を達成する、H26 最終目標: 広帯域 AlGaInN 結晶を用いた多接合太陽電池の検討し、単接合セルで変換効率 10%以上を達成し、かつ、多接合セルの製作ための要素技術を確立する >

○開発項目① GaInN 結晶成長技術の確立

In 組成 0.4 を超える高品質 GaInN の作製技術を確立した。また、GaN 基板上に DH (ダブルヘテロ) 構造広帯域 AlGaInN 太陽電池を試作し、波長約 400nm において内部量子効率 90%以上を実現した。AM1.5 のソーラーシミュレータ (155mW/cm<sup>2</sup>) を用いた評価によって、変換効率 1.4%という世界最高レベルの AlGaInN 太陽電池を実現した。

○開発項目② p 型 GaInN 導電性制御技術

In 組成 0.2~0.4 において、室温での正孔濃度  $>10^{19}cm^{-3}$  の p 型 GaInN (世界最高レベル) を実現した。

○開発項目③ GaInN および GaInNAs 少数キャリア拡散長評価

蛍光寿命測定装置を使用して GaInN の蛍光寿命の評価を行った。

当初予定していた中間目標を達成するために、着実に実施内容を遂行している。本年度も順調に研究を遂行することによって、当初目標とした変換効率 5%という AlGaInN 太陽電池を単セルで実現できる見込みである。また、LED と太陽電池を同一素子で実現するという当初の計画ではなかった成果も得られている。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0(0)、論文（査読付）：13(13)、研究発表・講演：19、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

#### 4) エピタキシャル成長技術（シャープ）

<H22 中間目標：逆積み 3 接合セルで変換効率 33%（非集光時）、42%（集光時）、H26 最終目標：逆積み 4 接合構造、量子ドット挿入 InGaAs(1eV)セル、もしくは InGaAsN(1eV)セルを形成した Ge 基板上 4 接合構造セルで変換効率 35%（非集光時）、効率 45%（集光時）>

逆積み 3 接合セルにおいて、組成勾配バッファ層及び格子不整合系ボトムセルの成長条件最適化を実施した。トップセル/ミドルセル/ボトムセルの電流バランス改善を図った。

逆積み 3 接合セルにおいてバッファ層の成長条件の最適化及びサブセルの電流整合を改善した結果、非集光時効率においては平成 26 年度目標を上回る 35.8%を達成した。（独）産業技術総合研究所による測定値であり、世界最高記録であることが認められた。

<成果発表件数>特許出願（外国）：2(0)、論文（査読付）：5(4)、研究発表・講演：17、新聞・雑誌等への掲載：1、展示会出展：3

#### 2-1-2 高効率量子タンデム太陽電池製造プロセス技術開発

##### 5)MOVPE ナノ構造形成技術（東京大学）

<H22 中間目標：InGaAs/GaAsP 歪み補償量子井戸を挿入した(In)GaAs ミドルセルを作製し、1.2eV 帯まで長波長側の吸収端をのぼし、1.75eV のトップセル下で 16mA/cm<sup>2</sup> を達成する。H26 最終目標：量子井戸を挿入した(In)GaAs ミドルセルを作製し、1.75eV のトップセル下で I<sub>sc</sub>=17mA/cm<sup>2</sup>（バンドギャップは 1.2 eV に相当）、1.4eV のセル下で I<sub>sc</sub>=14mA/cm<sup>2</sup>（バンドギャップは 1.0 eV に相当）を得る。これらのミドルセルを利用した 3 または 4 接合セルを製作し、集光時の変換効率効率 45 %を得る。>

InGaAs/GaAsP 歪み補償量子井戸の設計を行い、その場観察を活用した MOVPE 技術の開発とあわせて、目標を達成する量子井戸セルの開発に成功した。歪み補償階段ポテンシャル量子井戸により、吸収端を 1.24 eV まで長波長化し、目標値である 1.2 eV 帯をクリアした。吸収電流に関しては、障壁層を世界最高記録の 5 nm まで薄層化し、トンネルによるキャリア輸送の効率化を達成し、GaAs 単セルからの短絡電流増大 3.3mA/cm<sup>2</sup> を実現した。これは、目標である GaAs 単セルからの短絡電流増大 2mA/cm<sup>2</sup> を大きく上回る成果である。なお、高効率の量子井戸セルを得るためには、i 層における量子井戸の位置を中心から p 層側に多少ずらすという巧妙な構造が必須であることをシミュレーションと実験の両面から解明し、成果につなげている。

<成果発表件数>特許出願（外国）：2(0)、論文（査読付）：55(53)、研究発表・講演：153、新聞・雑誌等への掲載：22、展示会出展：4

##### 6)高倍集光セル微細加工技術（東京大学）

<H22 中間目標：①Ⅲ-V 化合物系多接合高効率太陽電池に対するエッチング技術を開発し、表面に光り閉じこめ構造を導入して、全波長域（1300~400nm）の反射率を 0.5%以下にすることで、従来の 2 層 AR コート処理セルに対して、2%の短絡電流の向上を達成する。②シャープ株式会社が供給するⅢ-V 化合物系多接合高効率太陽電池チップを、東京大学で、マイクロチップ化し、シャープ株式会社で配線して、マイクロアレイを試作し、課題の抽出を行う。H26 最終目標：多接合セルの微細加工により、小面積セルのモノリシック集積により直列抵抗を減じたマイクロセルアレイをシャープ株式会社と協力して開発し、集光システムとハイブリッド集積し、5000 倍集光下で変換効率 40%を達成する。>

TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の 2 層誘電膜に対して、電子線リソグラフィとドライエッチングにより 400 nm ピッチ程度でナノ凹凸構造を形成し、500~1100nm における広波長域において反射率の低減を達成した。これは、目標である 400~1300 nm における低反射率化をほぼ達成したものと見える。本構造の特徴を維持しつつ低コストかつ大面積展開が可能な手法として TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の 2 層誘電

膜上に SiO<sub>2</sub> ナノ粒子を自己組織化配列する手法を開発し、GaAs 単セルの短絡電流を 3%向上させた。これは、目標である短絡電流の 2%増大を上回る成果である。

III-V 多接合セルのマイクロ集積化に関しては、シャープの提供する多接合セルのドライエッチングによる素子分離に取り組んでおり、22 年度末に表面再結合電流などの性能評価を完了できる見込みである。

<成果発表件数>は 2-1-2 5) 記載の件数を含む

#### 7) 次世代プロセス技術開発 (InGaN 多接合セル) (東京大学)

<H22 中間目標 : ①In 組成 0.5 で X 線回折半値幅 0.12° 以下の結晶性を持つ InGaN を実現する。②In 組成 0.3 でホール濃度  $5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$  以上の p 型 InGaN を作製する。H26 最終目標 : バンドギャップ 2eV 以下の InGaN 単接合セルを製作し変換効率 7%を達成する。>

①In 組成 0.5 で X 線回折半値幅 0.06° (世界最高品質)の結晶性を持つ InGaN を実現。(目標達成)

②In 組成 0.3 でホール濃度  $6 \times 10^{17}/\text{cm}^3$  の p 型 InGaN を実現。(目標達成)

③スパッタ法による世界初の IIIIV 族 LED、太陽電池の作製 (目標を前倒しで達成)

<成果発表件数>は 2-1-2 5) 記載の件数を含む

#### 8) 水素 MBE 法 (GaInNAs:Sb/量子ナノ構造) (東京大学)

<H22 中間目標 : ①GaInNAs:Sb 薄膜の高品質・長波長帯ヘテロ成長技術 (水素 MBE 法)を開発し、単接合セルで、非集光時の変換効率 15%を達成する。②3 接合セルの GaAs ミドルセルに InAs 系積層量子井戸・ドットを挿入し、長波長域の吸収により  $I_{sc} = 2\text{mA}/\text{cm}^2$  の増大を達成する (1.75eV のトップセル下で  $16\text{mA}/\text{cm}^2$  に相当)。H26 最終目標 : ①ヤープ株式会社と協力して 4 接合セルを製作して、集光時の変換効率 45%を達成する。②シャープ株式会社と協力して 3 接合セルを製作して、集光時の変換効率 42%を達成する。>

①水素 MBE 法による GaInNAs:Sb 薄膜成長の高品質化を行った。pin 構造単接合セルの試作を行い、GaInNAs:Sb 層の長波長域 ( $\lambda = 900 \sim 1000\text{nm}$ ) の量子効率として、最大約 80% (世界トップデータ) を達成した。また i 層膜厚 = 0.6 nm のとき、GaAs フィルター下での GaInNAs:Sb 層のみからの短絡電流の寄与は、 $9.6 \text{mA}/\text{cm}^2$  であり、4 接合セルの電流整合の最適条件となる  $14\text{mA}/\text{cm}^2$  に近づけることができた。

②3 接合セルの GaAs ミドルセルに InAs/GaNAs 歪み補償積層量子ドットを挿入し、長波長域の吸収を増大させることを試みた。10 層積層させた量子ドット太陽電池において、量子ドット層が無い従来型の GaAs ホモ接合太陽電池と比較して、短絡電流は  $2.24\text{mA}/\text{cm}^2$  増大し (世界トップデータ)、当初の目標 ( $2.0\text{mA}/\text{cm}^2$  増) をクリアした。

<成果発表件数>は 2-1-2 5) 記載の件数を含む

#### 9) MOVPE 法 (GaInNAs/量子井戸構造) (東京大学)

<H22 中間目標 : GaInNAs (N:1-5%)薄膜・量子井戸構造において、X 線半値幅 0.1° 以下および、PL 半値幅 25meV 以下@10K を達成する。H26 最終目標 : ①GaInNAs 薄膜では、シャープ株式会社と協力して 4 接合セルにおいて、集光時の変換効率 45%を達成する。②GaInNAs 量子井戸構造では、シャープ株式会社と協力して 3 接合セルにおいて、集光時の変換効率 42%を達成する。>

N 濃度 3.1%までの GaAs 基板上 GaInNAs 薄膜、単一量子井戸 (SQW)、多重量子井戸 (MQW) 構造を MOVPE 法により作製し、RTA 処理による効果を検討した。界面平坦性を維持しつつ、フォトルミネッセンス (PL) 発光効率の増大や、キャリアの局在状態の減少等、高 N 濃度 GaInNAs 薄膜・量子井戸構造を高品質化・均質化する RTA 処理技術を確立した。

Ge 基板上 GaInNAs の MOVPE 成長技術の開発においては、低温成長した薄い GaAs バッファ層を介し、結晶成長条件を最適化することにより、Ge 基板に格子整合した GaInNAs 薄膜の作製に成功した。また、2 段階 GaAs バッファ成長技術を導入することにより、X 線半値幅 ( $2\theta/\omega$ ) を 0.09° から 0.06° へ、PL 半値幅 (10K) においては 134meV から 34meV へと狭線化に成功し、大幅な高品質・均質化を実現した。

<成果発表件数>は 2-1-2 5) 記載の件数を含む

#### 10) エピタキシャル成長技術開発 (量子構造挿入型、格子整合型 4 接合) (シャープ)



<H22 中間目標：「4）エピタキシャル成長技術」に同じ。H26 最終目標：逆積み4 接合構造、量子ドット挿入 InGaAs(1eV)セル、もしくは InGaAsN(1eV)セルを形成した Ge 基板上4 接合構造セルで非集光時効率 35%、集光時効率 45%を達成する。>

「4）エピタキシャル成長技術」に同じ。

#### 11) 高倍集光セルの開発（シャープ）

<H22 中間目標：集積化のためのセル化プロセス検討とセル間配線プロセスを検討し、課題を抽出する。H26 最終目標：光学系一体化モジュールにおいて 5000 倍集光時変換効率 40%を達成する。>

逆積み3 接合セルの集光特性を向上するために、トンネルピーク電流の向上、コンタクト層と電極の接触抵抗の低減、シート抵抗低減のための検討を行った。トンネル接合構造の改良を行い、1000 倍集光動作時に必要な 15A/cm<sup>2</sup> を上回る 56A/cm<sup>2</sup> のトンネルピーク電流密度と 4mΩ・cm<sup>2</sup> 程度の低抵抗を実現した。コンタクト層と電極の接触抵抗は 4E-4Ω・cm<sup>2</sup> 程度、表面シート抵抗については約 600Ω/sq を達成したが、500 倍集光が可能なレベルであり更に改善が必要である。集光セル特性としては 230 倍集光時に 42.1%（自社測定値）が得られ、平成 22 年度目標をクリアした。

<成果発表件数>は 2-1-1 4) 記載の件数を含む

#### 2-1-3 量子ドット超格子を基板とした超高効率太陽電池

##### 12) 量子ドット超格子型（東京大学）

<H22 中間目標：サイズ揺らぎ 10%、中間層膜厚 10nm 以下の量子ドット超格子(中間バンド)型太陽電池を作製し、2 光子吸収過程の検証とセル効率 12%を達成する。H26 最終目標：①量子ドット超格子（中間バンド）の製造技術を確立し、量子ナノ効果の実証とセルで非集光時の変換効率 15%を達成する。②量子ナノ構造(中間バンド型)タイプの太陽電池が変換効率 40%越えを実現する設計技術を確立する。>

InAs/GaNAs 系歪み補償構造の最適化を行い、100 層以上の多重積層化、および量子ドットサイズ揺らぎ 10%を達成した。このときの中間層膜厚は 20nm で、現在、ミニバンドの形成が見込まれる 10nm 以下を目指して改善を進めている。また、50 層積層量子ドット超格子型セルを作製し、GaAs ホモ接合太陽電池と比較して短絡電流は増大し、26.1mA/cm<sup>2</sup> を達成した。変換効率は 16.1%（世界最高効率）が得られ、当初目標の 10%以上を達成した。現在、2 段階光吸収の検証を行っているが、より詳細に調べるためには時間分解測定が必要であるため、測定装置を現在構築中である。

<成果発表件数>は 2-1-2 5) 記載の件数を含む

##### 13) 量子ドット超格子型（自己組織化量子ドットの積層化）（電気通信大学）

<H22 中間目標：光吸収波長帯（1.0~1.3μm）を有する化合物半導体量子ドットの単層構造において、量子ドットの不均一幅を 20meV 以下に抑制し、かつ量子ドット密度を 6×10<sup>10</sup> cm<sup>-2</sup> 以上に高密度化するための成長技術を開発するとともに、量子ドット構造の 10 層以上の多重積層化技術を開発する。H26 最終目標：量子ドットの多重積層構造における不均一幅を 25meV 以下に抑制し、試作の量子ドット超格子太陽電池において 15%以上の電力変換効率を達成する>

###### ○開発項目① サーファクタント原子の導入による高密度量子ドット構造の開発

Sb サーファクタント効果の導入法により、InAs 量子ドット成長における 6×10<sup>10</sup>cm<sup>-2</sup> 以上の高密度化の成長条件を確立した。さらに自己形成 GaAs ナノホール・スペーサー層を導入した近接2重積層 InAs 量子ドット構造において Sb 導入法を適用し、6×10<sup>10</sup>cm<sup>-2</sup> 以上の高密度化の成長条件を確立した。InAs ドット成長の初期過程において見出したライブニング効果（ドット密度の減少、ドットサイズの均一化）を考慮した新たな成長手法を考案し、1×10<sup>11</sup>cm<sup>-2</sup> のドット密度で、発光半値幅 28meV を達成した。Sb 導入法においてライブニング効果を考慮した精密な成長制御により、量子ドット密度 4×10<sup>11</sup>cm<sup>-2</sup> の超高密度化を実現した。超高密度 InAs 量子ドット構造の発光特性を調べ、面内量子ドット超格子構造の可能性を示唆した。これにより、面内量子ドット超格子構造を導入した中間バンド型太陽電池の試作、原理検証実験への展開が見込まれる。

###### ○開発項目② 自己形成ナノホール埋め込み層を用いた高均一量子ドット構造の開発

自己形成ナノホール層を介した近接2重積層構造において、発光半値幅 19meV を達成した。これにより、中間目標である不均一幅 20meV 以下で、かつドット密度 6×10<sup>10</sup> cm<sup>-2</sup> 以上の高密度・高均一量子ドットの自己形成技術の開発を達成した。Sb 導入法による高密度量子ドットの自己形成において、量子ドット成長後の成長中断中に Sb 照射を施す手法を提案し、量子

ドットの高品質化に有効であることをその場 X 線回折測定により明らかにした。

○開発項目③ 歪補償層を導入した高密度・高均一ドットの超格子構造の開発

面内量子ドット超格子層上に歪緩和 GaAsSb 埋め込み層を導入することにより、5ns～11ns のキャリアの長寿命化を達成した。これは太陽電池の高効率化に向けた重要な結果である。近接多重積層成長による量子ドットの縦型超格子化の実現に向けた GaNAs 歪補償層の成長条件について検討を進めており、GaNAs スペーサ層を導入した多重積層成長を検討中である。

○開発項目④ 面内量子ドット超格子構造の作製とその多重化技術の開発

面内量子ドット超格子層の多重積層成長の成長条件について検討し、GaAsSb 層 6nm+GaAs 層 44nm のスペーサ層において良質な 5 重積層構造を作製した。この 5 重積層構造における量子ドット総密度は  $2 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$  に達し、従来の量子ドット構造の約 50～100 層の積層構造に相当する超高密度構造である。現在、中間目標にある 10 層積層化を検討中である。面内量子ドット超格子層を導入した中間バンド型太陽電池の試作を進めており、分光量子効率スペクトルおよび太陽電池特性の評価解析を検討中である。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0(0)、論文 (査読付) : 2(2)、研究発表・講演 : 34、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出席 : 0

14) 量子ドット・有機ハイブリッド材料による中間バンド型 (新日本石油)

<H22 中間目標 : 1.8～2.0eV のバンドギャップをもつ有機半導体とこれとエネルギー準位がマッチし、かつ 1.0eV 程度のギャップをもつ量子ドットからなる中間バンドを有する光吸収層において、光吸収の確認ならびに 2 光子吸収の実証を行う。 H26 最終目標 : 量子ドット・有機ハイブリッド中間バンド型太陽電池を開発し、変換効率 10% を達成する >

中間バンド形成に必要な構造要件 (有機半導体材料内において、nm レベルで QD を近接させる) を満たす材料の探索を行った結果、有機半導体材料でこの要件に適合し光電変換性能の高い材料がなく、中間バンド構造の形成は困難であることが分かった。そこで、中間バンド型と同程度の高効率が期待でき、必要な構造要件が少なく、より簡便に作製できる可能性がある MEG (多励起子生成) 型の検討にシフトした。

溶液に分散した PbS 量子ドットから MEG に起因するシグナルを確認した。PbS とハイブリッド化する材料として、エネルギー準位や材料の透明性の観点から適切な電子輸送材や、ホール輸送材を選定した。電子輸送材、PbS、ホール輸送材のハイブリッド化手法を検討し、その過程で使用する材料を選定した。

中間目標である、「量子ドットからなる光吸収層での効果実証」に関しては、上記選定した材料の組合せで、MEG 効果の確認を実施予定。

<成果発表件数>は 2-1-4 19) 記載の件数を含む

15) 光マネジメント (金属ナノ粒子) (東京大学)

<H22 中間目標 : 金属ナノ粒子による近接場効果により、1.5～2.5eV 帯における光吸収係数が 10% 増強することを実証する。 H26 最終目標 : 金属ナノ構造を太陽電池に作りこみ、吸収係数の増加が量子ドット超格子型セルの変換効率に定量的に反映されることを実証する。 >

直径 15nm、高さ 50nm の銀ナノ粒子を周期 20nm で配置した金属ナノ粒子配列について、本系を太陽電池表面に配置した際に生じる太陽電池層による光吸収増大効果を、FDTD 数値計算により検証した。これまでの知見とは異なり、金属ナノ粒子-太陽電池基板間の電磁気相互作用に近接場効果は見られなかった。しかし金属ナノ粒子配列を均質な有効媒質として記述することで、FDTD 数値計算を良好に再現できた。金属ナノ粒子配列の有効誘電率は、ナノ粒子の局在プラズモン共鳴周波数を境に大きく変化した。共鳴周波数よりも低エネルギー側では、ナノ粒子配列は高誘電率薄膜とみなすことができ、太陽電池上で反射防止膜として機能した。本計算においては、適切な構造を用いることで、特定の波長における基板表面における反射を 90% 以上抑制できることを示した。一方で、共鳴周波数よりも高エネルギー側において薄膜は負の誘電率を示し、太陽電池基板の光吸収を抑制する方向に作用した。以上の計算結果は、これまで近接場による効果とされてきた過去の文献による報告ともよく一致した。

<成果発表件数>は 2-1-2 5) 記載の件数を含む

2-1-4 ハイブリッド素材による超高効率多接合型太陽電池

16) 界面電荷移動遷移型セルの研究開発 (東京大学)

<H22 中間目標 : 界面電荷移動遷移を利用して、1eV 帯領域で光電変換を達成する。 H26 最終目標 : 界面電荷移動遷移型セルで変換効率 10% を達成する。 >

ナフタレン環を含むジシアノメチレン化合物と酸化チタンナノ多孔体中の酸化チタン表面で合成した界面錯体を用いた界面電荷移動遷移型セルにおいて、 $1\mu\text{m}$  付近で光電変換効率を達成。その他にも、 $1\text{eV}$  帯での高効率光電変換に向けた幾つかの成果を得た。ジシアノメチレン化合物にドナー性置換基を導入する、長波長領域の光電変換が高効率化できることを見出した。また、共吸着剤（デオキシコール酸）をジシアノメチレン溶液に適量添加すると、光電変換効率が向上（ $80\%$ 以上（@ $470\text{nm}$ ））することなども明らかにした。

<成果発表件数>は2-1-2 5) 記載の件数を含む

#### 17) 新概念素子用ハイブリッド光電素材の研究開発（東京大学）

<H22 中間目標：電圧ロスの低減と光吸収波長域の拡大が期待されるドナー/色素/アクセプターでの新概念太陽電池（ETA）において、新日石株式会社に協力して、 $1.4\text{eV}$  帯および  $1.0\text{eV}$  帯でのETA構造素子を試作し光電変換を検証する。H26 最終目標：新日石株式会社に協力して、ETA構造における新概念素子の材料検討による効率向上と光マネージメントの適用により、変換効率 $10\%$ を達成する。>

近赤領域で光電変換するハイブリッド材料の開発を行ってきた。その結果、分子自己組織化体と酸化チタンナノ粒子とのハイブリッド構造の中で、分子自己組織化体の励起子生成に対応する吸収を用いて、約  $0.9\cdot\text{m}$  (約  $1.4\text{eV}$ ) で光電変換が可能な素材を見出した。有機分子の酸化チタンナノ粒子への吸着条件などの検討を行い、ハイブリッド素材の高性能化に向けた指針を得た。

近赤外領域で強い吸収を示す PbS などの無機化合物半導体量子ドットが、ハイブリッド光電素材として適用可能であることを明らかにした。量子ドットの粒子径を調整することで、 $1\text{eV}$  での光吸収を発現させることが可能であることも確認している。現状では、 $750\text{nm}$  に吸収ピークを持つ PbS 量子ドットと酸化チタンのハイブリッド素材を用いることで、 $1.0\cdot\text{m}$  ( $1.2\text{eV}$ ) における光電変換を達成している。

<成果発表件数>は2-1-2 5) 記載の件数を含む

#### 18) 多結晶化合物多接合太陽電池（大阪大学）

<H22 中間目標：トップセル用のバンドギャップ  $1.8\sim 2.2\text{eV}$  の太陽電池材料を開発し、バンドギャップ以上の波長帯に対する単膜での光電流発生の平均光量子収率  $50\%$  以上（溶液との接合による評価）を達成して、擬似太陽光照射に対する変換効率  $3\%$  以上を達成する。H26 最終目標： $0.6\sim 1.2\text{eV}$  領域のボトムセル、及びトップセルと連結したタンデム型太陽電池を開発し、変換効率  $15\%$  以上を達成する>

##### ○開発項目① 化合物半導体の研究開発

トップセル用のバンドギャップ  $1.8\sim 2.2\text{eV}$  の太陽電池材料の開発においては、塗布法（おもにスプレー熱分解法）によるカルコパイライト薄膜（ $\text{CuInS}_2$ ）の組成制御に取り組んだ。これまでに、 $\text{CuInS}_2$  の Cu、In を Ag や Zn で部分置換した薄膜により、 $2.06\text{eV}$  までバンドギャップを広げることに成功している。

##### ○開発項目② 多結晶多接合太陽電池の研究開発

電気化学法による  $\text{CuInS}_2$  薄膜の堆積技術をほぼ確立し、バンドギャップ以上の波長帯に対する単膜での光電流発生の平均光量子収率  $50\%$  以上を達成した。電気化学法により作製した  $\text{CuInS}_2$  薄膜において、擬似太陽光照射に対する変換効率として約  $7\%$  を実現した。これは、非真空プロセスによる同様の太陽電池としては世界最高レベルである。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0(0)、論文（査読付）：1(1)、研究発表・講演：15、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

#### 19) ETA構造による新概念素子（新日本石油）

<H22 中間目標：ドナー/色素/アクセプターでの新型太陽電池（ETA）において、 $1.0\text{eV}$  帯および  $1.4\text{eV}$  帯でのETA構造による新概念素子を試作し、光電変換を検証する。H26 最終目標：ETA構造による新概念素子の材料検討による効率向上と光マネージメントの適用により、変換効率 $10\%$ を達成する>

ドナー/アクセプターの相分離構造評価手法としてモルフォロジー評価および移動度評価の手法を確立した。ETA構造に利用可能な各種色素のイオン化ポテンシャル測定を行い、P3HT/PCBM系に適合するエネルギーレベルを有する色素を選定した。選定した色素を用いてP3HT/色素/PCBMのETA構造素子の試作を行い、光電変換特性を評価し、近赤外域での光電変換を確認した。

中間目標の  $1.0\text{eV}$  帯および  $1.4\text{eV}$  帯での光電変換特性を平成22年度中に確認予定。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0(0)、論文（査読付）：0(0)、研究発表・講演：3、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

## 20) 金属ナノ粒子/光マネジメント材料の研究開発（新日本石油）

<H22 中間目標：金属ナノ粒子構造を用いた光マネジメントを、ETA 構造素子（又は他の光電変換素子）へ適用し、金属ナノ粒子アレイの効果による量子収率が 10%増大することを実証する。H26 最終目標：ETA 構造による新概念素子に光マネジメントの適用により、変換効率 10%を達成する。>

アノード酸化条件とナノホールアレイの形成状態の相関を調べ、ナノホールアレイテンプレート法を用いた金属ナノ粒子サイズおよび分布の制御手法を確立した。前記手法で形成した金属ナノ粒子アレイを既存ドナー/アクセプター 2 成分系太陽電池への組み込み、量子収率向上効果を確認中。

<成果発表件数>は 2-1-4 19) 記載の件数を含む

## 21) 金属ナノ粒子吸収型セルの研究開発（東京大学）

<H22 中間目標：光電変換機構を解明し、光電変換を実証する。H26 最終目標：金属ナノ粒子吸収型セルで 10%達成する。>

光電変換を実証し、加えて、波長 900 nm (1.4 eV) まで光電変換に利用できることを示した。光励起された金ナノ粒子から酸化チタンへの電子移動を直接明らかにし、機構の一部を解明した。電荷分離への局在電場の寄与を明らかにするとともに粒子の単分散性を高めて効率を向上するため、ナノスフィアリソグラフィ (NSL) 法による粒子アレイ作製法を導入した。また、効率向上のため、金属ナノ粒子の増強電場による色素増感系の光電流増強を測定する系を確立した。

<成果発表件数>は 2-1-2 5) 記載の件数を含む

## 22) ナローバンドギャップ太陽電池（兵庫県立大学）

<H22 中間目標：ナローバンドギャップ太陽電池用として、0.9-1.0eV および 0.6-0.7eV のバンドギャップを有する硫黄系またはセレン系の材料を開発し、セル化して光電変換を実証する。H26 最終目標：ナローバンドギャップセルからなる 2 接合太陽電池を作製し、変換効率 15%を達成する。>

化学的手法により合成した硫黄・セレン系ナノ結晶粒子を使用して、半導体膜の創製を行った。さらにそのナローバンドギャップ半導体膜を使用して太陽電池セルの開発を行い、その光電流・電圧の発生に成功した。得られた膜のバンドギャップが 0.98 eV となり、「0.9-1.0 eV のバンドギャップを有する硫黄・セレン系の材料を開発し、セル化して光電変換を実証する」という目標を達成した。また材料によっては、25 mA cm<sup>-2</sup> もの大きな光電流を発現するものも開発された（現在特許申請処理中）。

さらに、ドーピングおよび材料の試行を繰り返し、ナローバンドギャップ材料となる半導体膜の新材料創製に成功し、さらにそれを使用した太陽電池を作製し、光電流・電圧の発生に成功した（現在特許申請処理中）。そのナローバンドギャップ材料は 0.5 eV となり、「0.6-0.7eV のバンドギャップを有する硫黄系またはセレン系の材料を開発し、セル化して光電変換を実証する」という目標からは、ほんの僅かにナローバンド側にずれた結果となったが、この枠においてはローバンドギャップ化の方が難しく、ワイドバンドギャップ化は容易なため、現在そのワイドバンドギャップ化の研究を進めている (0.5 eV ⇒ 0.6 eV)。ゆえに、中間目標はほぼ達成できたと考えられ、中間評価に向けての達成度は 90%と考えられる。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0(0)、論文（査読付）：0(0)、研究発表・講演：1、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

## 2-2. 高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発

### 2-2-1 シリコン系 3 接合太陽電池の開発

#### 1) 高配向性平面ポリシラン材料の開発（産総研）

<H22 中間目標：バンドギャップ 1.8eV 以上の平面ポリシラン薄膜を用いた太陽電池で変換効率 10%を達成する。H26 最終目標：バンドギャップ 1.8eV 以上の平面ポリシラン薄膜を用いた単接合太陽電池で変換効率 12.5%を達成する。>

平成 20 年度には、空気中で安定な架橋ポリシランをトルエンなどの汎用溶媒に溶かした溶

液から基板上に塗布した塗布膜を真空下 400°C以上で加熱するだけで、近赤外光を吸収するポリシラン薄膜を簡便に作製できることを見出した。また、加熱温度と加熱時間をコントロールすることにより、ポリシラン薄膜のバンドギャップを紫外光から近赤外光まで連続的に変化させることができることも分かった。

平成21年度には、鎖状ポリシラン薄膜に、光照射することにより鎖状ポリシラン同士を架橋させ、その後、真空下で加熱すると平面性が向上して、吸収が長波長側にシフトすることを見出した。さらに、鎖状ポリシランに結合している置換基の種類を、アルキル基、フェニル基、ナフチル基、アンスリル基と変えることにより、加熱後の薄膜のバンドギャップを制御できることも分かった。

さらに平成22年度には、加熱処理することにより 1.8eV にバンドギャップが制御された平面性ポリシラン薄膜を用いて作製したフラーレンとの積層タイプの太陽電池デバイスを作製した。このデバイスの AM1.5 の擬似太陽光照射下での I-V 特性を評価したところ、 $V_{oc}=0.33V$ ,  $J_{sc}=0.15mA/cm^2$ ,  $FF=0.16$  を得た。

<成果発表件数>特許出願（外国）：2(0)、論文（査読付）：0(0)、研究発表・講演：5、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

## 2) 配列制御ナノ結晶シリコン材料の開発（東京農工大）

<H22 中間目標：バンドギャップ 1.8eV 以上の単接合 nc-Si 太陽電池で変換効率 10%を達成する。その際の特性値としては  $FF=0.8$ ,  $V_{oc}=0.7V$ ,  $I_{sc}=18mA$  を目標とする。H26 最終目標：バンドギャップ 1.8eV 以上の単接合 nc-Si 太陽電池で 12.5%の効率を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。

>

「ナノ結晶シリコン層の形成プロセス技術」においては、任意の厚さの nc-Si 層を均一に形成するプロセス技術を確立した。ナノ構造に適した低温酸化アニール法および乾燥技術を導入した。連続プロセスによってセルフスタンディング膜を基板から剥離する技術を開発し、大面積化も実現した。

「粒径制御によるバンドギャップエンジニアリング」においては、フォトルミネセンスと光吸収スペクトル解析により、バンドギャップの拡大および目標範囲（1.8 eV 以上）での可変性を実証した。また入射光スペクトルに合わせてバンドギャップ分布を制御する基本技術を開発した。

「界面のキャリアトラップ低減」については、ナノ構造表面に高品質のトンネル酸化膜を形成し、界面の欠陥を低減した。また超臨界乾燥の導入により光導電感度を向上できることを見いだした。

「太陽電池要素としての評価」については、基礎となる光導電の測定評価を先行して実施し、想定する波長域での光電材料としての有用性を確認した。また、試作セルで変換効率 3%を得た。引き続き、その向上を追求中である。さらに光キャリア増倍、青色燐光など、光電変換に関係する新規現象を見いだした。

<成果発表件数>特許出願（外国）：4(2)、論文（査読付）：12(12)、研究発表・講演：14、新聞・雑誌等への掲載：4、展示会出展：3

## 3) 結晶系ナローギャップ材料太陽電池の開発（産総研）

<H22 中間目標：バンドギャップ 0.9eV のシリコンゲルマニウムを用いた太陽電池で変換効率 8%を達成する。その要素技術として、シリコンゲルマニウムの少数キャリア寿命 100  $\mu s$ 、ヘテロ界面再結合速度：1000  $cm/s$  を目標とする。H26 最終目標：バンドギャップ 0.9eV のシリコンゲルマニウムを用いた太陽電池で変換効率 10%を達成する。>

分子線エピタキシー（MBE）でシリコンゲルマニウム（SiGe）の形成を行い、膜成長条件と膜の組成、歪の関係を明らかにした。Si 基板上に Ge 組成 60%の SiGe 膜を太陽電池に必要な厚さ 5  $\mu m$  まで成長可能であることを確認した。SiGe の膜質評価指標として少数キャリア寿命に注目し、その正確な測定に必要な Ge、SiGe の表面不活性化技術を世界で初めて確立した。この手法で作製した膜に適用したところ、膜中の欠陥密度が高いことを反映して、少数キャリア寿命は Ge 組成 10%の膜で 0.9  $\mu s$ 、Ge 組成 90%の膜で 0.3  $\mu s$  と低い値であることが判明した。伝導帯側のバンド不連続が小さく、価電子帯側のバンド不連続が大きい、アモルファスシリコン、GaP、InGaP が SiGe とのヘテロ接合形成に適していることを見出し、アモルファスシリコン/SiGe 接合、GaP/SiGe 接合を実際に試作した。ヘテロ界面の再結合速度の評価を予定している。Ge 組成 10%で変換効率は 1.3%と改善の余地が大きい、MBE 法で作製した SiGe 薄膜を用いたヘテロ接合太陽電池をおそらく世界で初めて試作した。なお、このセルではヘテロ接合形成にアモルファスシリコンを使用し、SiGe 膜の厚さは 4.6  $\mu m$  で

あった。SiGe 薄膜セルでは少数キャリア寿命が小さくても（この場合  $0.9\mu\text{s}$ ）、ヘテロ接合の採用と適切なセル設計で変換効率の向上が可能であることを、セル試作を通じて確認した。<成果発表件数>特許出願（外国）：0(0)、論文（査読付）：1(1)、研究発表・講演：3、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

#### 4) シリコン-ゲルマニウムスズ低温エピタキシャル新技術の開発（産総研）

<H22 中間目標：バンドギャップ  $0.9\text{eV}$  の SiSn 系混晶薄膜を用いた太陽電池で変換効率 8%を達成する。その要素技術として、バンドギャップ  $0.9\text{eV}$  の SiSn 系混晶薄膜で直接遷移を確認し、欠陥密度  $10^{16}\text{cm}^{-3}$  を目標とする。 H26 最終目標：バンドギャップ  $0.9\text{eV}$  の SiSn 系混晶薄膜を用いた太陽電池で変換効率 10%を達成する。その要素技術として、バンドギャップ  $0.9\text{eV}$  の SiSn 系混晶薄膜で直接遷移を確認し、欠陥密度  $10^{15}\text{cm}^{-3}$  を目標とする。>

シラン、水素、テトラメチルスズを原料ガスとして反応容器に導入し、プラズマ CVD 法により SiSn 薄膜(Sn 濃度 0~30 at%)の作製を行った。XRD、ラマン散乱スペクトル測定により作製した SiSn 混晶薄膜の構造解析を行った。また、膜中 Sn 濃度の評価には EDX, XPS スペクトル測定を用いた。その結果、膜中 Sn 濃度 1 at%以下のものに関しては、微結晶化した SiSn 薄膜の作製に成功しているが、膜中 Sn 濃度 1at%以上のものに関してはアモルファス状態である事を確認した。

透過-反射スペクトル測定より吸収スペクトルを算出し、さらに得られた吸収スペクトルをタウツ-プロットする事により光学バンドギャップの見積もりを行った。その結果、膜中 Sn 濃度の増加に伴い、光学バンドギャップがレッドシフトすることを確認した。さらに、アモルファス状態ではあるが、膜中 Sn 濃度~20 at%で光学バンドギャップ  $0.9\text{eV}$  の SiSn 混晶薄膜の作製に成功した。

太陽電池材料としては、光照射時のコンダクティビティーが重要となるため、SiSn 単膜に Al のコプラナー電極を蒸着し、明/暗状態のコンダクティビティーの測定を行った。その結果、Sn 濃度 13 at%(光学バンドギャップ~ $1.2\text{eV}$ )までの光起電流の存在を確認した。

上記の実験結果を基に、ヘテロ接合型 SiSn 薄膜太陽電池の作製を開始した。構造は、Asahi U 基板(ガラス基板にテクスチャー付き  $\text{SnO}_2$  膜の付いた基板)上に p/i/n 層をプラズマ CVD 法で堆積したスーパーストレート型 (Asahi U/p(a-SiC)/ i(SiSn)/n(a-Si:P)/裏面電極)である。作製した SiSn 薄膜太陽電池の外部量子効率スペクトルの測定を行った結果、膜中 Sn 濃度の増加に伴い長波長領域の光感度が大幅に上昇することが確認された。さらにこの実験により、外部量子効率スペクトルにおける長波長領域における立ち上がり位置(エネルギー位置)は、タウツ-プロットより求めた光学バンドギャップのエネルギー位置とほぼ等しい事が確認された。今後、デバイス性能を上昇させるため、デバイスにおける条件出しを試みる予定である。

なお、高品質な i 層(SiSn)薄膜を作製するためには、気相中で発生するラジカル種の挙動を理解し、それらを制御する必要がある。そこで、プラズマ発光スペクトル(OES)の測定による気相診断を行い、気相中で発生するラジカル種と膜質との相関を調べている。しかし、製膜前駆体の特定には至っていない。

一方、膜質向上の観点から、ESR による欠陥密度測定に着手した。しかし、膜中の荷電欠陥が原因と見られる ESR 信号強度の大幅な低下が見られ、正確に欠陥密度測定が行えていない。太陽電池デバイスの特性測定においても、i(SiSn)層内で電界が弱められキャリア収集効率の低下を招いている事を示唆する結果が得られている。今後、荷電欠陥の起源をより詳細に調べ、それを低減できる製膜法を検討する予定である。

<成果発表件数>特許出願（外国）：1(0)、論文（査読付）：0(0)、研究発表・講演：3、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

#### 5) ガラス基板上的シリコン・ゲルマニウム等単結晶シード層形成技術（コーニング）

<H22 中間目標：シリコン・ゲルマニウム等単結晶薄膜を単結晶シード層としたバンドギャップ  $0.9\text{eV}$  の単接合太陽電池で変換効率 8%を達成する。その要素技術として単結晶薄膜の転位密度として  $108\text{cm}^{-2}$  を目標とする。 H26 最終目標：シリコン・ゲルマニウム等単結晶薄膜を単結晶シード層としたバンドギャップ  $0.9\text{eV}$  の単接合太陽電池で変換効率 10%を達成する。その要素技術として単結晶薄膜の転位密度として  $107\text{cm}^{-2}$  を目標とする。>

バンドギャップ  $0.9\text{eV}$  に相当する Ge 組成約 0.5 の SiGe 単結晶薄膜を、MBE 法により厚さ約  $3\mu\text{m}$  までガラス上 Si 薄膜基板の上にエピタキシャル成長した。反応性熱 CVD 法では厚さ  $7\mu\text{m}$  の Si 単結晶薄膜成長をガラス上 Si 薄膜基板の上に実現し、Ge 薄膜についても既に成膜実験を開始しているため、目標の SiGe 膜を今年内には成長できることを見込んでいる。さらに、ガラス上 Ge 薄膜基板については加熱温度  $500^\circ\text{C}$  まで問題がないことを確認したので、同様に

SiGe 単結晶薄膜の成長を行い、今年内にガラス上 Si 薄膜基板との比較および最適化を行う予定である。単接合太陽電池の作製は、これまで結晶成長条件の把握に時間を要したため未実施であるが、7 月には最初の試作および特性評価を行う予定である。

Si 単結晶薄膜の転位密度評価として、Dash エッチャントによるエッチピット密度評価法が有効であることを確認した。MBE 法によりガラス上 Si 薄膜基板の上にエピタキシャル成長した SiGe 単結晶薄膜について、Ge 組成 0.3 ではエッチング法で  $10^8 \text{cm}^{-2}$  以下の転位密度を示唆する結果を得たが、Ge 組成 0.5 の試料ではエッチピット観察に成功していないため、TEM による転位密度評価を 7 月までに予定している。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1(0)、論文 (査読付) : 0(0)、研究発表・講演 : 3、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 1

#### 6) ゲルマニウム系単結晶エピ成長技術の開発 (東工大)

<H22 中間目標 : Si と Ge 単結晶薄膜のヘテロ接合を用いたボトム用単接合太陽電池で変換効率 8%を達成する。その要素技術として Ge 単結晶薄膜のキャリア拡散長として Ge エピタキシャル膜のウェーハーレベルでの膜厚と同程度 (キャリア寿命  $10 \mu$  秒) を目標とする。 H26 最終目標 : ガラス基板上に形成した単結晶 Si 基板上に単結晶 Ge 薄膜を活性層として作製した、ボトムセル用ヘテロ接合型太陽電池で変換効率 10%を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。 >

$\text{Si}_2\text{H}_6$ - $\text{GeF}_4$ 系原料ガスを用いる反応性熱 CVD 法により、Ge 基板 (100) を用いたホモエピタキシャル成長の条件を検討し、 $350^\circ\text{C}$ で表面モフォロジーに優れたホモエピ膜の作製条件を確立した。

Si (100) 基板を用いて、前年度の確立したホモエピタキシャル成長条件を用いて、Si 上の Ge のヘテロエピタキシャル成長条件を検討した。この条件では、結晶性、及び、Ge 組成が低下するという問題点が明らかとなり、ガス流量比、反応圧力、基板温度について再度、検討を進めた。その結果、 $300^\circ\text{C}$ 以下 ( $275^\circ\text{C}$ ) の条件において、堆積速度は遅いものの表面モフォロジーに優れた Ge 組成の高いエピ膜を作製できることを明らかにした。この条件を用いて Si 基板上に Ge を堆積し、太陽電池の試作を行ったが、Ge 膜厚が予想以上に薄く、発電を確認するに至らなかった。

この問題を解決するため、見出した Si のヘテロエピタキシャル条件により、Ge のエピタキシャル seed 層を作製し、Ge のホモエピタキシャル成長条件との組み合わせによる Ge 膜の成長の検討の取り組みを開始した。これを用いて、太陽電池の再試作を行う予定である。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0(0)、論文 (査読付) : 0(0)、研究発表・講演 : 3、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 7) フッ素系イオン制御プラズマプロセスの開発 (東北大)

<H22 中間目標 : 産業技術総合研究所と協力してバンドギャップ  $0.9\text{eV}$  の Ge あるいは Si/Ge による単接合太陽電池で変換効率 8%を達成する。その要素技術として成長温度  $400^\circ\text{C}$ 以下でバンドギャップ  $0.9\text{eV}$  の結晶質ゲルマニウム系薄膜で欠陥密度 (ダンダリングボンド密度) を  $10^{16} \text{cm}^{-3}$  台とすることを目標とする。 H26 最終目標 : 産業技術総合研究所と協力してバンドギャップ  $0.9\text{eV}$  の Ge あるいは Si/Ge による単接合太陽電池で変換効率 10%を達成する。その要素技術として成長温度  $400^\circ\text{C}$ 以下でバンドギャップ  $0.9\text{eV}$  の結晶質ゲルマニウム系薄膜で欠陥密度 (ダンダリングボンド密度) を  $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$  以下とすることを目標とする。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。 >

平成 20 年度は、中性粒子ビームによる Ge 成長のため、 $\text{GeH}_4$  および  $\text{GeF}_4$  供給対応のガス導入系を導入し、既設の中性粒子ビーム装置に接続して、初期的な成膜可能性について検討した。

平成 21 年度は、上記水素中性粒子ビームと  $\text{GeF}_4$  による Ge 堆積を試み、 $\text{GeF}_4$  の吸着確率の違いから、Ge 成膜速度の基板種類依存性が大きいことがわかった。特に Si や  $\text{SiO}_2$  に比べプラスチック基板への成長速度が速いことが分かった。しかし、結晶性の評価では膜は Ge 結晶ではなく  $\text{GeO}_x$  になっていることが判明した。チャンバからの酸素放出の抑制や吸着確率の向上のためにパルス変調プロセスを適用して効果が見られた。しかし、このガス系では高速で緻密な成膜は難しいと判断した。

平成 22 年度は、更なる高付着率を持つ M0 プリカーサを用いてより緻密で高速な成膜を目指して、中性ビームエネルギー、フラックス、プロセス室圧力、基板温度の依存性を評価した。高付着率を持つプリカーサを用いることで、膜中にカーボンの成分が若干残るものの、デポレートは大きく向上した。また、ビームのパルス化、基板温度の極低温化を行うことで、プ

リカーサの吸着確率および表面反応を促進させ、不純物濃度を低減、高密度な成膜が可能になることを確認した。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0(0)、論文（査読付）：0(0)、研究発表・講演：2、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

#### 8) 擬単結晶固相成長技術の開発（東海大）

<H22 中間目標：バンドギャップ 0.9eV の擬単結晶ゲルマニウム等を用いた太陽電池で変換効率 8%を達成する。その要素技術として、波長 1000nm で 30%以上の分光感度を目標とする。H26 最終目標：バンドギャップ 0.9eV の擬単結晶ゲルマニウム等を用いた太陽電池で変換効率 10%を達成する。その要素技術として、波長 1000nm で 50%以上の分光感度を目標とする。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。>

金属誘起結晶化によるシード層形成では、SiGe シード層形成過程において、Si と Ge の共晶温度（420℃）以下のプロセスでは、SiGe の結晶化は起こるものの、1週間以上時間を要し実用的ではないこと、また 450℃まで上昇させることで処理時間は4時間程度にまで短縮できるが、Ge の分離が著しいことが分かった。現在、430℃程度に SiGe 結晶化と処理時間の両者を両立できる条件を模索中であり、22年度末までには良質な SiGe シード層の実用的な形成法が得られる見込みである。

結晶シリコン基板をシード層とし、擬単結晶 Ge の成長を検討している。電子ビーム蒸着及びスパッターにより擬単結晶を直接製膜する方法と非晶質製膜後の固相成長により結晶化させる方法を夫々比較した結果、直接製膜と固相成長の双方で電子ビームによって製膜した試料から擬単結晶を得ることに成功した。現在、原因について究明中であるが、酸素や水素等の不純物が影響している可能性が高い。この擬単結晶 Ge 膜を用いて現在太陽電池の試作中であり、今年度中に報告の予定である。

欠陥処理については、水素プラズマ、高圧水蒸気等の検討を行ったが、Ge 濃度が高い程処理効果は少なく、現状では有効な手法は見つかっていない。今後、水素以外の元素による処理の検討を予定している。

<成果発表件数>特許出願（外国）：1(0)、論文（査読付）：6(6)、研究発表・講演：14、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

#### 9) ヘテロ接合デバイス化技術の開発（産総研）

<H22 中間目標：バンドギャップ 0.9eV のシリコンゲルマニウム、シリコンゲルマニウムスズなどを用いたヘテロ接合太陽電池で、変換効率 8%を達成する。H26 最終目標：ヘテロ接合を形成することで、バンドギャップ 0.9eV の単接合太陽電池で変換効率 10%を達成する。>

光電子分光法により、n 型単結晶シリコンとアモルファスシリコンならびに酸素濃度 4 原子%のアモルファス酸化シリコンの価電子帯におけるバンドオフセットを評価したところ、それぞれ 0.11 eV ならびに 0.27 eV であった。

単結晶シリコンとアモルファス炭化シリコンの価電子帯におけるバンドオフセットは、炭素濃度を 8 原子%から 15 原子%に増加させると、0.25 eV から 0.36 eV に増加した。

単結晶シリコンと i 層の価電子帯におけるバンドオフセットの増加につれて、HIT 型ヘテロ接合太陽電池の曲線因子が減少することが明らかになり、太陽電池特性を向上させるためには、バンドオフセットの小さい材料を採用すべきことが示唆された。

単結晶ゲルマニウム基板に対してフッ酸洗浄を行うと表面に酸化ゲルマニウム膜が残存し、当該基板を用いた HIT 型ヘテロ接合太陽電池の特性を低下させることが示唆された。

単結晶ゲルマニウム基板を過酸化水素中でいったん酸化させ、その後のアニール処理により酸化ゲルマニウムを熱脱離させることで、清浄なゲルマニウム表面が得られることが明らかになった。

酸化と熱アニールの組合せによる洗浄を施した p 型単結晶ゲルマニウム基板に対して、アモルファスシリコンの i 層、n 層を用いて作製した HIT 型ヘテロ接合太陽電池において、基板と i 層のバンドギャップ差が大きいにも関わらず、1900 nm 程度までの長波長領域においても電流を取り出すことができた。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0(0)、論文（査読付）：1(1)、研究発表・講演：2、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

#### 10) ヘテロ接合デバイス化技術の開発—超高周波プラズマ（三菱重工業）

<H22 中間目標：単結晶あるいは擬単結晶シリコン—ゲルマニウム—スズ薄膜を用い、これにへ



テロ接合を形成することで、バンドギャップ 0.9eV の単接合太陽電池で変換効率 8% を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 20% 達成に寄与する。H26 最終目標：ヘテロ接合を形成することで、バンドギャップ 0.9eV の単接合太陽電池で変換効率 10% を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25% 達成に寄与する。>

「微結晶 SiGe 発電層での試作と温度特性評価」についてはヘテロ接合界面の組成をステップ状に変更したバッファ層を設けることで、結晶性、発電効率、温度特性が改善されることを見出した。

「ヘテロ接合デバイスの作製および評価」については、現状利用可能なナローバンドギャップ材料である単結晶 Ge を用いてヘテロ接合デバイスの作製、評価を行っている。ここで、Ge は清浄表面を得るのが難しい材料であるが、AES と LEED を用い、ケミカルプロセスとドライプロセスを組み合わせることで清浄表面が得られていることを観測した。また、a-Si を用いヘテロ接合を形成、a-Si の膜厚や c-Ge の界面処理による影響を調査し、特定の界面処理が変換効率向上に非常に有効であることを見出した。最適化を行うことで変換効率を 4.23% まで向上させた。さらに温度特性の評価：同開放電圧の Ge ホモ接合セル（理論値）よりも良好な温度特性が得られていることを確認した（ホモ：-1.8%/°C、作製したセル：-1.3%/°C）。バンドオフセット評価についても IPE を用いて a-Si/c-Ge 電導帯のオフセット評価を実施。

<成果発表件数>特許出願（外国）：1(0)、論文（査読付）：0(0)、研究発表・講演：2、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

#### 11) ヘテロ接合デバイス化技術の開発—低ダメージ成膜（京セラ）

<H22 中間目標：バンドギャップ 0.9eV のシリコンゲルマニウム、シリコンゲルマニウムスズなどの単結晶基板を用いたヘテロ接合太陽電池で、変換効率 8% を達成する。その際の特性値として、開放電圧 0.3V 以上を目標とする。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 20% 達成に寄与する。H26 最終目標：ヘテロ接合を形成することで、バンドギャップ 0.9eV の単接合太陽電池で変換効率 10% を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25% 達成に寄与する。>

「ヘテロ接合形成前表面処理」については、エッチングガスを用いた大面積均一エッチング条件を確立した。表面ラフネス増大回避のため、低エッチングレート（約 4nm/分）で Si 基板上の熱酸化膜除去を確認した。繰り返し再現性・エッチング潜伏期間の有無などについても調査した。また、Si(111) 両面ミラー基板においてダブルヘテロ構造を作製した。 $\tau$  は、ウェット処理（希 HF 処理）の方がドライエッチング処理よりも大きく、ドライエッチング処理で低 $\tau$  となる原因（プラズマダメージ・表面終端状態など）を調査中である。ウェット処理による $\tau$  改善評価については、処理法を探索中である。現在までに、化学パッシベーション（キンヒドロン/メタノール処理）による $\tau$  値の約 50% まで到達している（ $\tau$  は大気中測定）。引き続き Ge 基板も用いて条件最適化・再現性向上・表面状態安定化などの改善を実施していく。

「薄膜堆積（セル作製）」については、22 年度に使用装置の新チャンバーを立ち上げる。低電力 RF 電源を導入し、プラズマダメージの低減とプロセス条件の安定性確保を図る。

「バンドオフセット制御」については、使用チャンバーへの Ge ガス系統増設、および新チャンバーへの各種ガス系統導入準備、不純物ガス検出用 Q-MASS 設置などを行った。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0(0)、論文（査読付）：0(0)、研究発表・講演：1、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

#### 2-2-2 化合物系 4 接合太陽電池の開発

##### 12) ワイドギャップカルコゲナイド系太陽電池の開発（産総研）

<H22 中間目標：バンドギャップ 1.7eV 以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率 9% を達成する。その要素技術として、硫化物系薄膜のキャリア寿命 1ns 以上、開放電圧 0.9V 以上、近赤外から吸収端近傍の波長での内部量子効率 90% 以上を得ることを目標とする。H26 最終目標：バンドギャップ 1.8eV 以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率 12% を達成する。>

「硫黄系太陽電池の開発」については、CIGSSe 系材料製膜装置を設計・導入し、CIGSSe 系薄膜の堆積実験に着手した。また、ワイドギャップ CIGSSe 太陽電池の高効率化技術の検討を行い、バンドギャップ 1.7eV の CuGaSe<sub>2</sub> 太陽電池で変換効率 9.7% を達成した。さらに、硫黄系ワイドギャップ太陽電池の作製と高性能化に着手した。

「単結晶太陽電池作製技術」については、ワイドギャップ材料バルク単結晶育成装置を導入した。この装置を用いて、CuInSe<sub>2</sub> のバルク単結晶の育成に成功した。また、CIGSSe 系混晶

のバルク単結晶の育成に着手した。これを基板として CIGSSe 薄膜の作製を行う予定である。

「評価技術の開発」については、CIGSSe 系材料の欠陥および表面・粒界・バルクの評価に着手した。また、粒界領域のバンド湾曲の組成依存性の評価に着手し、局所領域の禁制帯幅の計測装置を設計した。さらに凹凸 < 10 nm の縦貫断面を作製可能な技術を確立した。また、光一歩査ケルビンプローブ顕微鏡を用いて、積層方向の電位プロファイルを評価する技術を確立した。

本研究開発を進めるにあたり、海外の研究協力機関である Helmholtz Zentrum Berlin の CIGS 系太陽電池研究グループの代表者である H. W. Schock 氏を招き、評価技術に関する課題を議論するとともに、今後の方向性について議論した。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0(0)、論文 (査読付) : 0(0)、研究発表・講演 : 2、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

### 13) 構造制御ワイドバンドギャップ化合物太陽電池の開発 (パナソニック電工)

<H22 中間目標 : バンドギャップ 1.7eV 以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率 9%を達成する。その要素技術として、硫化物系薄膜のキャリア寿命 1ns 以上、開放電圧 0.9V 以上、近赤外から吸収端近傍の波長での内部量子効率 90%以上を得ることを目標とする。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 20%達成に寄与する。H26 最終目標 : バンドギャップ 1.8eV 以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率 12%を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。>

「光吸収層のバンドギャップ分布制御技術」については、デバイス・シミュレーションからステップ形のバンドギャップ分布で高効率化を確認。液体ソースを用いたスプレー塗布熱分解法 (SPD) で光吸収層 Cu(In,Ga)S<sub>2</sub> 膜の膜厚、組成比、バンドギャップ制御を達成。また、溶液調製等で太陽電池に適した抵抗率 100~10000 Ωcm への制御に成功。目標バンドギャップ 1.7~1.8eV に制御できる光吸収層に適した材料に目処が立った。また、製膜装置からの不純物混入による効率低下原因を究明。不純物混入防止策を施した結果、基本構成の CuInS<sub>2</sub> 太陽電池の短絡電流が約 5 倍に増加し、効率 3.8%を得た。

「界面制御技術」については、SPD 法により、太陽電池に適した低キャリア濃度 10<sup>12</sup>/cm<sup>3</sup>、高移動度 30cm<sup>2</sup>/V・s の界面層 In<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 膜の作製に成功。また、界面層 In<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 膜の大気アニールでの酸化による低抵抗化が太陽電池短絡発生の原因であることを究明。界面層と光吸収層の連続製膜で短絡防止に成功。初期的な結果ながら、ワイドバンドギャップ光吸収層と組み合わせた太陽電池で開放電圧 0.71V を達成した。

「裏面コンタクト制御」については、デバイス・シミュレーションから光吸収層と裏面コンタクト層のバンドギャップ構成の最適化で短絡電流増加を確認した。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 2(0)、論文 (査読付) : 0(0)、研究発表・講演 : 3、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

### 14) 革新的ワイドギャップ材料太陽電池の開発 (産総研)

<H22 中間目標 : ①バンドギャップ 1.8eV 以上系太陽電池での変換効率 9%を達成する。その要素技術として、以下を目標とする。ワイドギャップ材料において少数キャリア寿命 1ns 以上、拡散長 0.3 μm 以上。1.9eV 以上(波長:650nm 以下)で光吸収を持つ (量子効率 3%以上) GaP 基板上 InxGa1-xP 量子ドット太陽電池の作製。②10 層以上の InAs 量子ドット超格子を形成し、顕微 PL 測定により、中間バンド形成が来ていることを確認する。In(Ga)As 系量子ドット太陽電池において波長 1100nm で量子効率で 10%以上を達成する。H26 最終目標 : ① InGaP/GaP 量子ドットを用いた太陽電池で変換効率 10%を達成する。②InAs、InGaAs 系量子ドットを用いた太陽電池で変換効率 10%を達成する。>

MBE 法において、As<sub>2</sub> 分子線や成長中断法を用いることにより、歪補償層を用いることなく、100 層以上整列した In<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>As 量子ドット多積層構造の作製に成功した。また、各ドットが電子的に結合した多積層量子ドット超格子を形成するため、量子ドット間を 2nm として 20 層の多積層化にも成功した。フォトルミネッセンスの励起光強度依存性から、世界で初めて 20 層以上の多積層量子ドット超格子のミニバンド (中間バンド) の形成を確認した。これらの技術を用いて試作した量子ドット太陽電池の変換効率は産総研のソーラーシミュレーターで測定した実測値でも 12.6%を示し、世界トップレベルである。歪補償技術による量子ドット太陽電池では、量子ドット間バリア層の薄膜化に伴って N 濃度を増加する必要があるため、それによって Voc が低下する問題がある。本研究では歪補償層を用いないため、ドット間を 3nm としても Voc はほとんど低下しないことがわかった。

<成果発表件数>特許出願(外国):1(0)、論文(査読付):3(3)、研究発表・講演:9、新聞・雑誌等への掲載:2、展示会出展:0

#### 15) 酸窒化物系ワイドギャップ材料の開発(物質・材料研究機構)

<H22 中間目標:バンドギャップ 2.8eV 程度の InGa<sub>N</sub> を用いた太陽電池において変換効率 5% を達成する。そのための要素技術として 2.8eV 程度の InGa<sub>N</sub> で「1 nsec のライフタイム」、「InGa<sub>N</sub> を p 型化し、キャリア濃度  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  以下」を目標とする。H26 最終目標:バンドギャップ 2.5eV 程度の InGa<sub>N</sub> を用いた太陽電池において変換効率 12% を達成する。そのための要素技術として 2.5eV 程度の InGa<sub>N</sub> で 5nsec のライフタイムを目標とする。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25% 達成に寄与する。>

In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 薄膜の高品質化と良好な接合を形成することが本テーマ達成にとって重要である。InGa<sub>N</sub> 薄膜の E<sub>g</sub> を InN 量を増大させることで 2.6eV まで低減化し、時間分解フォトルミネセンスから InGa<sub>N</sub> 薄膜で 280psec のライフタイムを確認した。InGa<sub>N</sub> 薄膜へ  $10^{19} \text{cm}^{-3}$  レベルの Mg ドーピングを行い、光電子分光測定から p 型化を示唆するフェルミレベルのシフトとゼーベック効果による p 型傾向も確認することができた。

太陽電池として、Ga<sub>N</sub> と透明高分子膜とのショットキー接合から FF0.69 を達成。InGa<sub>N</sub> 薄膜を用いて短絡電流の向上を確認することができたが、FF0.3 と性能の向上が望まれる。SPRING8 での光電子分光を用いて評価した価電子帯トップのエネルギー位置をもとにバンドギャップを考慮して、In 組成に対する伝導帯ボトムエネルギーを求めた。キャリア輸送の観点からバンドオフセットを見積もることができた。InGa<sub>N</sub> 薄膜の向上と p 型化を示唆するデータから pn 接合太陽電池に向け接合を形成できる段階になってきたと考えられる。

酸化物材料として、ZnO 系薄膜を有機金属化学堆積法で作製した。品質を向上させるために薄膜成長表面での理論的な理解を試みた。c 軸配向しやすい ZnO 系材料は c 面方向に極性構造を持つために薄膜成長様式・水素雰囲気に対する安定性に大きな差が生じることが明らかとなった。

<成果発表件数>特許出願(外国):3(1)、論文(査読付):5(5)、研究発表・講演:16、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出展:0

#### 16) 酸化物ワイドギャップ材料の開発 A (東工大)

<H22 中間目標:高品位ワイドギャップ酸化物半導体を用いたバンドギャップ ~2eV の太陽電池で変換効率 5% を達成する。その要素技術として、結晶シリコンよりもイオン化ポテンシャルが 0.5eV 以上大きいバンドギャップが ~2eV の P 型酸化物半導体で裾状態密度を  $10^{19} \text{cm}^{-3}$  以下を目標とする。H26 最終目標:ワイドギャップ酸化物半導体を用いた太陽電池で、変換効率 12% を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25% 達成に寄与する。>

「ワイドギャップ酸化物半導体の探索」については、価電子帯上端がカチオンの s<sup>2</sup> 軌道から構成され高いホール移動度が期待できる新規酸化物 p 型半導体として SnO の高品位薄膜の作製を行い、Cu<sub>2</sub>O を除く他の Cu 系 p 型酸化物半導体に比べて高い移動度を示す薄膜が得られる条件を確立した。さらにこの新規 p 型酸化物半導体 SnO のカチオン置換ドーピングによる n 型化を試みた。ドーパントには Sb<sup>3+</sup> を選択し、SnO に Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を添加した焼結体をターゲットに用いた PLD 法により薄膜試料を作製した。ノンドープ試料が p 型の伝導性を示すことに対し Sb ドープ試料は n 型となった。Sb 10% 添加試料の電子濃度と移動度はそれぞれ  $9.9 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 、 $0.4 \text{cm}^2/\text{Vs}$  であった。

高品位薄膜の作製では、「アモルファス酸化物半導体 a-IGZO 薄膜の高品位化」について、まず n 層として期待される n 型アモルファス酸化物半導体であるアモルファス In-Ga-Zn-O(a-IGZO)の太陽電池への可能性を探るために光電流測定を行った。a-IGZO 薄膜は室温で製膜しても高移動度、低欠陥濃度で TFT のチャンネル層として高い性能を示している酸化物半導体である。様々な条件で製膜した a-IGZO の  $\eta \mu \tau$  vs.  $\sigma_D$  を  $h\nu = 3.1 \text{eV}$ 、 $\text{photon flux} < 5 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  の条件下で求めたところ、a-IGZO 薄膜の  $\eta \mu \tau$  は  $\sigma_D$  の増加に従って直線的に増加した。この結果からフェルミ準位の上昇に伴って再結合中心が減少しキャリア寿命が延びたと考えることができる。この結果より太陽電池としての可能性が期待されるが、実験条件などを更に詳細に詰める必要がある。「p 型酸化物半導体 Cu<sub>2</sub>O 薄膜の高品位化」については、既存の酸化物 p 型半導体 Cu<sub>2</sub>O 高品位薄膜作製に取り組み、単結晶と同等な輸送特性を示す高品位薄膜の作製条件を確立した。しかしながら光学測定によるギャップ内準位の評価により  $\sim 10^{18} \text{cm}^{-3}$  程度のギャップ内準位の存在が示唆され、これらギャップ内準位の低減が次なる課題となっている。「ギャップ内準位の硬 XPS 測定による観察」については、ギャップ内準位の

存在は n 型の a-IGZO、p 型の  $\text{Cu}_2\text{O}$  何れにおいても光学スペクトルで観察されているが、これではギャップ内のどこにどのような準位があるか不明であった。そこで SPring-8 のビームラインを用いて硬 XPS 測定を行ったところ、a-IGZO、 $\text{Cu}_2\text{O}$  ともに価電子帯直上に多量の準位が存在していることが明らかとなった。またこれらの準位は製膜条件の最適化で低減できることも明らかとなった。また、「高品位 SnO 薄膜の作製」については、先にも述べたとおり新規酸化半導体 SnO の高品位薄膜作製に取り組み、PLD 法によるエピタキシャル薄膜の作製手法を確立し、高移動度 p 型薄膜、ドーピングによる n 型薄膜の実現につながった。

ヘテロ接合の作製については、高品位  $\text{Cu}_2\text{O}$  薄膜を用いたデバイス作製に取り組んでいるが、芳しいデータは得られていない。そこで  $\text{Cu}_2\text{O}$  薄膜上に他の薄膜を成長させる際の Cu の価数変化を詳細に調べたところ、界面付近では Cu の価数が 2 価になっていることが明らかとなってきた。 $\text{Cu}_2\text{O}$  を用いた高性能デバイス実現には界面における Cu の価数制御技術確立が課題であり、界面作製条件の最適化に取り組んでいる。また、 $\text{Cu}_2\text{O}$  の問題とは区別して a-IGZO の太陽電池としての可能性を評価するために p-Si と n 型の a-IGZO のヘテロ接合を用いた太陽電池を試作した。変換効率は 6.1%を達成したが  $V_{oc}$  が  $\sim 0.38\text{mV}$  と小さい。これを改善するために In-Ga-Zn の組成比を変えることでバンドオフセットを大きくすることに取り組んでいる。

新規酸化半導体 SnO で p/n 両型の伝導性制御が実現したことから、これを用いたホモ接合を試作し評価を行った。整流特性は得られたものの逆バイアス印加時のリーク電流が大きいなど問題点があり、SnO のキャリア濃度制御手法の確立などと合わせて改善に向け取り組んでいる。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1(0)、論文 (査読付) : 2(2)、研究発表・講演 : 4、新聞・雑誌等への掲載 : 3、展示会出席 : 0

#### 17) 酸化物ワイドギャップ材料の開発 B (豊橋技科大学)

<H22 中間目標 : バンドギャップ 1.7eV 以上の酸化物材料を用いた太陽電池において変換効率 5%を達成する。その要素技術としてバンドギャップ 1.7-1.8eV の  $\text{Cu}^+-\text{Cu}^{2+}-\text{O} \cdot \text{Cu}-\text{Ag}-\text{O}$  単一配向膜を実現し、これを用いて 0.8Vの開放電圧を目標とする。 H26 最終目標 : バンドギャップ 1.7eV 以上の酸化物材料を用いた太陽電池において変換効率 12%を達成する。その要素技術としてバンドギャップ 1.7-1.8eV の  $\text{Cu}^+-\text{Cu}^{2+}-\text{O} \cdot \text{Cu}-\text{Ag}-\text{O}$  単一配向膜にて移動度  $100\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  を目標とする。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。 >

「多接合太陽電池の光吸収層用ワイドバンドギャップ高品質酸化物材料の開発とバンドギャップ制御技術の確立」については、0.95~1.65eV-CuO 層ならびに 2.1eV- $\text{Cu}_2\text{O}$  層形成ならびにバンドギャップ制御技術、単配向・高光電流応答 CuO 層ならびに単配向・室温バンド端発光  $\text{Cu}_2\text{O}$  層形成など高品質化技術の確立を達成した。

「単接合太陽電池の形成と高性能化」については、サブストレート型ならびにスーパーストレート型  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$  太陽電池形成技術、ならびに極めて優れた整流性を有する (111) $\text{Cu}_2\text{O}/(0001)\text{ZnO}$  高品質積層体を形成する高品質積層体形成技術を開発した。

「多接合太陽電池の構築」については、Ga:ZnO/ $\text{Cu}_2\text{O}$  積層体の形成に着手しオーミック電極選定の見込みである。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0(0)、論文 (査読付) : 0(0)、研究発表・講演 : 11、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出席 : 0

#### 18) 化合物系タンデムセルの開発 (産総研)

<H22 中間目標 : 化合物多接合太陽電池で変換効率 20%を達成。Ge 基板上でバンドギャップ 1.0-1.4eV の CIGS 系太陽電池により変換効率 13%を達成。 H26 最終目標 : 化合物多接合太陽電池で変換効率 25%を達成。 >

各研究課題において、タンデム太陽電池を作製するために必要な要素技術がほぼ確立できており、中間目標は今年度中に達成可能と考える。

「モノリシックタンデム技術」については、透明導電膜上太陽電池の高効率化に関して、Na の導入法の検討を行い、Na の拡散を促進する手法を見いだした。また、セレンラジカルを用いることで、通常の製膜温度より  $100^\circ\text{C}$  も低い  $450^\circ\text{C}$  でも変換効率 16%以上の高効率を実現した。

「メカニカルタンデム技術」については、GaAs 基板から太陽電池層を剥離する技術を確立した。また、剥離した太陽電池層を TC0/ガラス基板上に接着する技術の開発に着手した。また、剥離した GaAs 系太陽電池と他の太陽電池のメカニカルスタックによるタンデム太陽電池の作製に成功した。

「ボトムセルの開発」については、Ge 基板の表面処理技術を開発し、組成を制御すること

でエピタキシャル薄膜の成長に成功した。また、Ge 基板上の CIGS 太陽電池の作製に着手した。  
<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0(0)、論文 (査読付) : 0(0)、研究発表・講演 : 2、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

### 2-2-3 新概念新材料の検討

#### 19) ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討 A (産総研)

<H22 中間目標 : 閾値エネルギー  $2.5E_g$  ( $E_g$  はバンドギャップエネルギー) 以上で多重励起子生成を実現する。  $h\nu \geq 3.5E_g$  の光に対して励起子生成の量子収率 150%以上を達成する。  $h\nu \geq 3.5E_g$  の光に対して入射光強度の  $n$  乗 ( $n \geq 1.2$ ) の依存性を有する光電流を実現する。 H26 最終目標 : Si ナノ微結晶/高分子構造等を用いた単接合太陽電池において変換効率 10 %を達成する。 >

ナノシリコン結晶は、電気化学エッチングおよび液体中でのレーザーアブレーション法により作製した。この方法により、発光強度が強く、かつ、バンドギャップエネルギーが異なる 2 種類のナノシリコン結晶を得た。水中でナノ秒レーザーアブレーションにより作製したナノシリコン結晶は、青色発光を示し、大気中でも安定であった。また、溶液中に浮遊する小さなナノシリコン結晶の  $TiO_2$  ナノチューブテンプレートへの堆積法を開発した。このような複合物はガラス基板上に分散したナノシリコンよりも速い PL 発光強度の減衰を示したが、ナノシリコン結晶における励起子多重生成の存在を実証するに至っていない。しかし、ナノシリコンと  $TiO_2$  の複合物は太陽電池特性を示しており、ハイブリッド太陽電池の可能性を示している。

これまでの研究から、ガラス上に分散させたナノシリコン結晶において、PL 強度および光起電流が励起エネルギーに対し非線形増加する事を確認している。そこで、この現象を利用し、本研究では、高分子 (MEH-PPV および P3HT) とナノシリコン結晶間においてエネルギー移動することを確認した。このような複合材料の系では、増強された PL 発光の減衰がナノシリコン結晶のみの系と比較し、より強いことを明らかとした。しかし、高分子によるバックグラウンドの発光強度が非常に強く、ナノシリコン結晶中において励起子多重生成現象の有無を実証するに至っていない。

一方、ナノシリコン結晶と高分子を混ぜ合わせた材料では、ナノシリコン結晶と高分子界面でバルクヘテロ接合が形成され、光起電力が発生する事を実験的に観測することに成功した。そこで、このような複合材料系におけるバルクヘテロ接合の最適化と、さらなる性能向上のため、ナノシリコン結晶と高分子の特性自体について研究を行った。その結果、グローブボックス内で p 型のナノシリコン結晶を高分子とブレンドした複合材料では、光安定性が飛躍的に改善される事が明らかとなった。特に、ナノシリコン結晶と P3HT とをブレンドした複合材料では、コンダクティビティーの明/暗比が 156 まで増大した。さらに、この系における光起電力は、ナノシリコン結晶の濃度が最大 40 wt. %まで発生し、この光起電流はナノシリコン結晶の濃度の関数として表すことができる事を見出した。しかし、現段階では太陽電池の最適化を行っておらず、太陽電池性能は低い。

ブレンドした材料内における励起子の解離条件を満たしつつ、キャリアの輸送特性を改善するため、ポーラス状の酸化チタン ( $TiO_2$ ) ナノチューブ内にナノシリコン結晶/P3HT 複合材料内に詰め込み、縦方向に配列させた。その結果、キャリア輸送特性が大幅に改善されることが明らかとなった。

また、ナノシリコン結晶/ナノカーボン ハイブリッド型太陽電池セルを開発するため、レーザーアブレーション法を水中で用い、光感受性のある自己組織化したナノシリコン結晶構造体の合成にも着手している。この工程では、連続的にプラズマと熱処理を施すことが可能であり、フラーレンやカーボンナノチューブのような有機材料をナノ構造体に堆積させる事ができる。そのため、この手法によって作製したナノシリコン結晶にフラーレンを堆積したハイブリッド材料では、ナノシリコン結晶とフラーレンが電氣的に結合する。その結果、このような系で受光感度を有するヘテロ接合が形成される事を明らかにした。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0(0)、論文 (査読付) : 18(16)、研究発表・講演 : 25、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 1

#### 20) ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討 B (産総研)

<H22 中間目標 : 半導体カーボンナノチューブの純度を 90%以上まで向上させる。カーボンナノチューブのバンドギャップを遠赤外域の  $0.2 \sim 1.3eV$  の範囲で制御し、 $0.1 \sim 0.5V$  の開放電圧を達成する。バルクヘテロ接合カーボンナノチューブ太陽電池の量子効率の最大値を 50%以上とする。バンドギャップの 3 倍以上のエネルギーかつ  $1mJ/cm^2$  以下の強度の光に対して、1 光子の吸

収において 2 個以上の電子-正孔対の生成を確認する。 H26 最終目標：カーボンナノチューブを用いた太陽電池で変換効率 10%を達成する。 >

単層 CNT 粉末の分散・分離、超音波・超遠心分離機の最適条件を検討し、95%以上高純度半導体単層 CNT を抽出する技術を開発した。(世界トップクラス)

また、平均直径 1.1nm を持つ単層 CNT を用いて、簡単かつ合理的な方法で、バンドギャップを遠赤外域の 0.8~1.3eV の範囲で制御を達成した。更に、バルクヘテロ接合太陽電池において開放電圧 (Voc) 0.57V (P3HT-PCBM/半導体単層 CNT)、0.37V (P(NDI2OD-T2)/半導体単層 CNT)、0.14V (ナノシリコン/半導体単層 CNT) を達成した。

さらに、P3HT-PCBM バルクヘテロ接合有機太陽電池に半導体単層 CNT を加えることにより、量子効率は可視光領域で最大 65%以上(最高 73%)を達成し、変換効率は従来の 2.9%から 3.15%(最高 3.4%)まで向上した。本研究で開発した技術は様々なバルクヘテロ接合有機太陽電池に応用することができる。現時点においては P3HT-PCBM—半導体単層 CNT バルクヘテロ接合太陽電池の変換効率と量子効率の励起エネルギー依存性から、MCG 効果は確実に証明できていない。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):0(0)、研究発表・講演:3、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出展:1

## 21) ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討 C (九州大)

<H22 中間目標：閾値エネルギー $2.5E_g$  ( $E_g$  はバンドギャップエネルギー) 以上で多重励起子生成を実現する。 $h\nu \geq 3.5E_g$  の光に対して励起子生成の量子収率 150%以上を達成する。 $h\nu \geq 3.5E_g$  の光に対して入射光強度の  $n$  乗 ( $n \geq 1.2$ ) の依存性を有する光電流を実現する。 H26 最終目標：多重励起子太陽電池で変換効率 10%を達成する。その要素技術として  $h\nu \geq 3.5E_g$  の光に対して光電流量子収率 100%以上を目標とする。 >

「閾値エネルギー $2.5E_g$  ( $E_g$  はバンドギャップエネルギー) 以上で多重励起子生成を実現する」という目標に対しては、量子ドット増感太陽電池の光電流の照射光強度依存性を光子エネルギーをパラメータとして測定し、照射光の光子エネルギーの増加に伴い、依存性が linear から superlinear へと変化する多重励起子生成を示唆する結果を得た(中間目標の達成に目処)。

また、「 $h\nu \geq 3.5E_g$  の光に対して励起子生成の量子収率 150%以上を達成する」という目標に対しては、量子ドット増感太陽電池の光電流の照射光波長依存性を測定し、波長 500nm 以下でキャリア生成を確認した。光電流生成効率は短波長ほど増加した。今後、絶対値較正により、量子収率を得る予定である(中間目標の達成に目処)。

「 $h\nu \geq 3.5E_g$  の光に対して入射光強度の  $n$  乗 ( $n \geq 1.2$ ) の依存性を有する光電流を実現する」という目標に対しては、量子ドット増感太陽電池の光電流の照射光強度依存性を測定して、光子エネルギーが  $2.8E_g$  の光に対して、照射光強度の 2 乗の依存性を有する光電流を実現した(中間目標を達成)。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):3(0)、研究発表・講演:19、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出展:0

## 22) ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討 D (東北大)

<H22 中間目標：カーボンナノチューブの構造制御により  $E_g$  を 0.2~1.3 eV の範囲で制御し、 $V_{OC}=0.1\sim 0.5$  V を達成する。エネルギー $>3E_g$ 、強度 $<1$  mJ/cm<sup>2</sup> の光入射において、ヘテロ界面及び pn 接合内蔵カーボンナノチューブを用いた多重励起子生成利用太陽電池の原理を実証する。(1光子吸収 2個以上電子-正孔対形成を確認する。) H26 最終目標：pn 接合内蔵カーボンナノチューブ太陽電池で変換効率 10%を達成する。 >

プラズマ CVD によるカーボンナノチューブ合成時の触媒膜圧、合成温度、ガス圧力、合成時間等を制御することによって、 $E_g=0.2\sim 1.3$  eV の範囲のカーボンナノチューブを合成することに成功した。また、カーボンナノチューブにフラーレンを内包させることによって、仕事関数を制御したカーボンナノチューブを形成した。この構造制御した空のカーボンナノチューブ (CNT) 及びフラーレン内包進化 CNT を用いた薄膜状太陽電池を作製し、ソーラーシミュレータ及び発光ダイオードを用いて、紫外・可視領域、及び近赤外領域の光照射下で電流-電圧特性評価を行い、最大で各々  $V_{OC}=0.53$  V と 0.32 V を達成した。

カーボンナノチューブで構成された太陽電池の場合に、強度が単位時間あたり 3 mJ/cm<sup>2</sup> 以下の光入射において、エネルギーを変化させて出力電力を測定し、エネルギーが約  $2E_g$  以上の条件で、変換効率が徐々に増加する傾向が観測された。この現

象は、Ag/n 型 Si の太陽電池の場合には観測されていないため、カーボンナノチューブにおける多重励起子生成の可能性を示唆している。また、単独 1 本の pn 接合内包 CNT の形成に成功し、直径 1mm に集光したレーザー照射による電圧-電流測定を遂行中である。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0(0)、論文 (査読付) : 7(7)、研究発表・講演 : 18、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 23) 単結晶有機半導体を用いた新概念太陽電池の検討 A (産総研)

<H22 中間目標 : 有機/無機ヘテロ接合セルで変換効率 1%、 $V_{oc}=E_g-0.3V$  を達成する。そのための要素技術として単結晶性有機薄膜の励起子拡散長で 100 nm を目標とする。H26 最終目標 : 単結晶性有機薄膜ヘテロ接合セルで変換効率 10%、 $V_{oc}=E_g-0.1V$  を達成する。そのための要素技術として単結晶性有機薄膜の励起子拡散長で  $1\mu m$  を目標とする。>

有機分子線蒸着装置や昇華精製 (トレインサブレーション) 装置を導入し、基板上的  $C_{60}$  の結晶成長技術や、有機半導体として最も高い移動度を示すルブレンの結晶成長技術を確立した。結晶の評価を X 線回折および AFM により行った結果、数十  $\mu m$  以上におよぶ高品質の単結晶が得られていることを確認した。特に、昇華精製法では、数ミリメートル角かつ厚み数マイクロメートルの薄片状のルブレン単結晶の作製に成功している。ルブレン単結晶は静電的吸着により基板への実装が可能であり、太陽電池化に適している。実際に、単結晶ルブレン (p 型) に対して  $C_{60}$  (n 型) 薄膜を成長させて、有機半導体単結晶の太陽電池化技術を確立した。一方、ルブレンおよび  $C_{60}$  単結晶の励起子拡散長は、現在過渡吸収分光を導入して測定中である。

また、n 型半導体  $C_{60}$  の不純物ドーピング制御を目的として、有機分子線蒸着法によるマグネシウムのドーピング技術を開発した。マグネシウムドーブ量を精密に制御することで、膜の導電率、界面抵抗およびトラップ密度の制御を可能とした。更に、このドーピング膜を陰極バッファ層として導入した  $C_{60}$  と Pc の p-n 接合セルを作製し、太陽電池特性の高性能化に成功した。更に、Si/  $C_{60}$  の有機/無機ヘテロ接合セルは、現在作製中である。

また、有機 p-n ヘテロ接合太陽電池の構造最適化により、まず、ルブレン- $C_{60}$  などにおいて高開放電圧  $V_{oc}=E_g-0.3V$  の発電機構を明らかにした。更に、H23 年度から展開予定の研究項目、単結晶性有機薄膜ヘテロ接合太陽電池の開発を、現在前倒しで行っている。具体的には、有機ヘテロ接合セル実現に向けて、有機ヘテロエピタキシャル成長技術の検討を行い、ルブレン単結晶のステップエッジでの  $C_{60}$  結晶の成長を確認した。これは、有機半導体での単結晶-単結晶接合の可能性を示唆するものである。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0(0)、論文 (査読付) : 1(1)、研究発表・講演 : 5、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 24) 単結晶有機半導体を用いた新概念太陽電池の検討 B (東工大)

<H22 中間目標 : 有機/無機ヘテロ接合セルで変換効率 1%、 $V_{oc}=E_g-0.3V$  を達成する。そのための要素技術として単結晶性有機薄膜の励起子拡散長で 100 nm を目標とする。H26 最終目標 : 単結晶性有機薄膜ヘテロ接合セルで変換効率 10%、 $V_{oc}=E_g-0.1V$  を達成する。そのための要素技術として単結晶性有機薄膜の励起子拡散長で  $1\mu m$  を目標とする。>

新規にイオン液体を用いた有機薄膜・単結晶合成のための有機フラックス製膜装置を開発した。また、イオン液体のコンビナトリアル蒸着技術を確立した。イオン液体をフラックスとして用いて、 $C_{60}$  では  $10\mu m$  程度、ペンタセン、ルブレンでは数百  $\mu m$  の単結晶の育成にも成功した。また、吉田グループと共同で、rubrene/ITO 基板にイオン液体を介して  $C_{60}$  薄膜を堆積し、イオン液体の効果により、大きいグレインサイズの  $C_{60}$ /ルブレン有機/有機ヘテロ接合を作製できた。さらに、極薄のイオン液体の表面張力を活かした接合技術を検討し、長期間にわたる接合力を確認した。

中間評価に向けての達成度として、 $C_{60}$  のグレインサイズ  $10\mu m$  は達成され、さらに他の有機結晶についてもフリースタANDINGの数百  $\mu m$  の単結晶ができるなど、予想以上の成果を得た。一方、励起子拡散長の測定では、測定自体が難しく、評価できていないので、今後、産総研と共同でさらに検討する。有機/有機ヘテロ接合作製において、イオン液体の効果を確認できた事は大きな成果であるが、太陽電池特性評価までには至っていないので、早急に評価する。また、無機/有機ヘテロ接合の太陽電池については、作製プロセスの検討に着手した。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0(0)、論文 (査読付) : 3(2)、研究発表・講演 : 16、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

## 25) 強相関材料を用いた新概念太陽電池の検討 A (産総研)

<H22 中間目標：有機強相関ヘテロ接合太陽電池を作製し、「1 eV 以下の低光子エネルギー領域で分光量子効率として 5 %以上」、「2 eV (> 2Eg)以上の光子エネルギー領域において、ポンプ-プローブ分光で定量化したキャリア生成増幅率 200%以上」を達成する。H26 最終目標：有機強相関ヘテロ接合太陽電池で変換効率 10%を達成する。>

有機化合物半導体と分子性導体 (TTF-TCNQ 等) との接合を形成し、一般的な金属電極との接合に比べて数倍高い電荷分離効率が得られることを見出した。これらの接合を用いて有機化合物半導体の MIM 型プロトタイプ単結晶デバイスを構築し、有機化合物半導体として世界で初めて光起電力効果の確認に成功した。さらに、本デバイスにおいて、従来の有機太陽電池では不可能であった 1eV 以下の赤外領域の光電変換に成功した。

また、単結晶デバイスにおいて励起子拡散長を評価する手法を開発した。本手法を用いて、有機化合物半導体の励起子拡散長が一般的な (単成分) 有機半導体の値 (数十 nm) よりはるかに大きい 20  $\mu\text{m}$  以上であることを見出した。以上から有機化合物半導体が太陽電池用半導体材料としてきわめて有望なことを確認し、かつ光電変換特性と界面電子状態の相関について重要な知見を得た。

これらの作製した素子は単結晶プレーナ型であるため、電極間の電位勾配が小さく正確な分光量子効率の評価には至っていないが、逆バイアス下での測定から 2eV で 2%の量子効率を得た。今後、短チャネル化、薄膜多層化、及び接合に用いる電極の最適化によって目標達成の見込みである。

多重励起子生成について、有機化合物半導体・TTF-CA 単結晶において、低温で 2.25eV の光子エネルギーのポンプ光励起により 8-20 個の電荷移動励起子が生成することが明らかになった。今後、キャリア増倍の可能性について検証を進める。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1(0)、論文 (査読付) : 0(0)、研究発表・講演 : 6、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

## 26) 強相関材料を用いた新概念太陽電池の検討 B (理化学研究所)

<H22 中間目標：強相関ヘテロ接合太陽電池を作製し、吸収光子数で規格化した外部電流で定義される分光量子効率として 5%以上を達成する。また、ポンププローブ分光でキャリア増幅を確認し、薄膜ヘテロ接合の基礎吸収端光に比した短波長光照射下での量子効率の増幅率として 2 倍以上を目標とする。H26 最終目標：強相関酸化物ヘテロ接合太陽電池で変換効率 10%を達成する。その要素技術として p, n 層の化学ポテンシャル差と開放電圧の関係を明らかにして開放電圧 0.5V 以上を目標とする。>

10 種類の強相関酸化物と n 型半導体である Nb ドープ SrTiO<sub>3</sub> との整流性接合を作製し、電気特性や光電流アクションスペクトルを評価して、バンド接続の材料依存性を明らかにした。多重キャリア生成が期待しにくい系ではあるが、LaMnO<sub>3</sub> との単一接合で、疑似太陽光下で効率 0.01%、FF=0.63 を達成し、分光量子効率の最大値は 3%程度を達成した。多重キャリア生成が期待できる電荷整列材料では Nb ドープ SrTiO<sub>3</sub> との接合でノッチやスパイクが形成されキャリアを電流として引き抜けないことが明らかとなった。多重キャリア生成に好適な材料を用いて実験的に光電流で増幅効果を検出するためには、光生成電流にこだわることなく、逆バイアスを印加した光検出器モードでの評価を行う必要がある。また、ノッチやスパイクを形成せずにバンド接続にグラデーションをかけるなどデバイス構造の工夫が必要である。一方で、強相関酸化物では小数キャリアの拡散長が 8nm と短いことが解った。これを解決するため、有機太陽電池で採用されているバルクヘテロ接合を可能にする酸化物の組み合わせを探索し、ZnO とペロブスカイトの組み合わせが有効であることが解りはじめた。

強相関電子の光励起とこれが生み出す多重キャリア生成のシミュレーションを実行可能な、実時間量子ダイナミクス電子状態計算アプリケーションのプロトタイプを開発した。このアプリケーションを用いることにより、2 次元強相関電子系における多重励起キャリア生成の鍵となる諸量、例えば照射光エネルギーの閾値や多重キャリアの生成量などの定量的評価が可能となった。今後は、現実のモット絶縁体に即したパラメータと多重キャリア生成の関係を吟味して、実証実験に好適な材料やデバイス構造への提言を行っていく。

ポンププローブ分光によるキャリア増幅は 5 倍を達成した。実際の接合で光電流としてキャリアの増幅効果を観測するためには、上記の実験上の工夫が必要不可欠である。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1(0)、論文 (査読付) : 5(5)、研究発表・講演 : 24、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

## 27) 構造制御ナノ材料を用いた太陽電池 (産総研)

<H22 中間目標：金属ナノ材料を用いた太陽電池で変換効率 1%を達成する。そのための要素技



術として拡散長  $0.1\mu\text{m}$  を目標とする。H26 最終目標：金属ナノ材料を用いた太陽電池で変換効率 10% を達成する。そのための要素技術として拡散長  $10\mu\text{m}$  を目標とする。>

「プラズモン電荷分離技術」については、平成 20 年度に、単電極特性を調べるために光電気化学的な光電流電圧測定装置を立ち上げた。既存の太陽電池性能評価装置で太陽電池としての評価を行ったが、ほとんど応答は得られなかった。レーザー分光測定のアクションスペクトルからは、プラズモン由来の光電流ではない機構も考えられた。平成 21 年度には、キセノン灯から分光器を通して得られる単色光に対する光応答が殆んど無かった状況から、金属担持方法を様々に変更した結果、銀ナノ粒子の場合、光電流のアクションスペクトルが吸光スペクトルと対応する結果を得、プラズモン励起に起因する光応答であることが示された。IPCE 1% (425 nm) を確認した。これは従来比で 10 倍以上の値である。また、金属ナノ粒子からの光励起電子が酸化チタン中を移動可能な距離について、光短絡電流値を指標にして光電気化学的に調べたところ、約  $1\mu\text{m}$  の酸化チタン膜厚でも光電流を確認した（拡散長の目標達成）。年度後半から現在までに、金や銀のナノ粒子の形状を棒状や三角形に調製して、光吸収波長を赤外域まで自在に制御する技術を確認した。

「高効率太陽電池化要素技術」については、平成 20 年度に、酸化チタンナノ粒子からなる Au ナノコロイド電極を作製し、レドックス電解液を用いた太陽電池を作製、光電変換特性を評価した。一般的に用いられるヨウ素レドックス電解液では Au コロイドが溶解し、光電変換特性を示さなかった。一方、 $\text{WO}_3$  ナノチューブを用いた薄膜電極を作製し、光半導体電極として機能することを明らかにした。平成 21 年度には、Au ナノコロイドならびに酸化チタンナノ粒子からなる光電極ならびにポリマー電解質を用いた太陽電池デバイスの作製、特性評価をおこなった。加えて、CdSe 量子ドット系ならびに色素系において、酸化チタンナノ粒子からなる電極表面をオルトケイ酸テトラエチル (TEOS) により処理することにより、太陽電池の光電流が大幅に向上し、変換効率 2% を達成した。

中間評価に向けての達成度としては、本サブテーマでは、担当研究員の特色を活かして各要素技術開発を進めてきており、目標値を越える結果も得られ、着実に成果を挙げてきたといえる。これまでに、例えば、金や銀のナノ粒子の形状に異方性を持たせて、光吸収波長を赤外域まで自在に制御する技術を確認した。また、光電流のアクションスペクトルが銀ナノ粒子の吸光スペクトルと対応する結果を得、プラズモン励起に起因することが示され、IPCE1% (425 nm) を達成した。最近では棒状の金ナノ粒子（アスペクト比約 3）の光応答の方が球状の金ナノ粒子に比べて数倍大きい結果も得られている。拡散長についても、光短絡電流値を指標にして光電気化学的に調べたところ、約  $1\mu\text{m}$  の膜厚でも光電流を確認できた（目標値の約 10 倍）。さらに、酸化チタンナノ粒子からなる電極表面をオルトケイ酸テトラエチル (TEOS) により処理することにより、CdSe 量子ドット系ならびに色素系における太陽電池の光電流を向上させ、変換効率 2% を達成した。

<成果発表件数> 特許出願（外国）：0(0)、論文（査読付）：3(2)、研究発表・講演：4、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

#### 2-2-4 高度光利用技術の開発

##### 28) メカニカルスタック技術の開発 A（産総研）

<H22 中間目標：分光感度の異なる 2 種類の太陽電池を接合させ、二端子セルとする際に、接着抵抗  $0.5\Omega/\text{cm}^2$  以下、接着部の透過率 90%以上を達成し、メカニカルスタックセルにおいて、電流を律則する要素セルの 80%以上の電流密度を得る。H26 最終目標：メカニカルスタック技術を薄膜型多接合太陽電池に適用し、発電効率 25%を達成する。>

「Si 系単結晶薄膜太陽電池の開発に必要な基板の作製」については、陽極接合法を応用し、シリコンウェハ/TCO/ガラス基板の接合体を形成できることを見出した。接合機構としては、ガラス中に含まれる陽イオンが陰極側に移動し、接合界面近傍のガラス中に負に帯電した陽イオン欠乏層が形成され、TCO 薄膜とガラス側の酸素イオンが化学結合することによって接合しているものと考えられる。また、接合に必要な温度・電界の関係を把握し、TCO の抵抗率は、陽極接合後においても低抵抗 ( $<1 \times 10^{-3}\Omega\text{cm}$ ) であることを確認した。

「セル間の電気・光学・機械的接合を可能にする接合方法の検討」については、表面ラフネス  $R_{\text{rms}}0.3\text{nm}$  以下の平坦性に優れた非晶質  $\text{In}_2\text{O}_3$  薄膜を形成させ、同薄膜同士を圧着・加熱し、非晶質相を固相結晶化させることにより電気・光学的接続が可能であることを見出した（抵抗率：約  $3 \times 10^{-4}\Omega\text{cm}$ 、波長 400-1700nm の範囲で吸収 10%以下）。現在のところ接合強度は弱く、強度改善を図るため材料及び表面処理方法を検討している。また、フラットパネルディスプレイのドライバー IC を実装するなど電氣的接続材料として使用されている市販の異方導電接

着フィルム（導電粒子を均一分散させたエポキシ系樹脂フィルム）の導電粒子分散量を減少させ透明性を改善させた樹脂（波長 500-1700nm の範囲で吸収 10%以下）を用い、TCO/樹脂/TCO の接着抵抗の確認（約  $5\text{m}\Omega\text{cm}^2$ ）、二端子メカニカルスタック太陽電池の試作と評価、接合部での課題抽出を行った。張り合わせる太陽電池として、スーパーストレート型 a-Si:H 太陽電池と a-Si:H/c-Si ヘテロ接合型(HIT)太陽電池を作製し、前者の裏面電極および後者の表面電極として ITO を用い、導電粒子を両 ITO 電極に接着させることで電氣的接続を図った。その結果、開放端電圧 1.435V（シングルセルの足し合わせ 1.463V）、短絡電流密度  $11.2\text{mA}/\text{cm}^2$ 、曲線因子 0.719、変換効率 11.6%と二端子セルとして動作すること、電圧ロス、曲線因子ロスが殆どないことを確認することができた。なお、セル面積は上部セルサイズ（上部 a-Si:H セル  $1.08\text{cm}^2$ 、下部 HIT セル  $0.90\text{cm}^2$ ）にあわせて計算した。現状の課題として、張り合わせ時のボトムセルの分光感度がやや低いことが挙げられ、接着部の樹脂層の厚さが  $10\mu\text{m}$ 程度と厚いことによる横方向の光の逃げあるいは導電粒子での吸収等が要因と考えられる。今後、要因を明らかにし、太陽電池に適した樹脂、導電粒子の種類およびサイズを検討する。

<成果発表件数>特許出願（外国）：2(0)、論文（査読付）：0(0)、研究発表・講演：4、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

### 29) メカニカルスタック技術の開発 B（東京農工大）

<H22 中間目標：T-ACF で接着抵抗  $0.5\Omega/\text{cm}^2$  以下、実効屈折率 1.8~2.0、実効消光係数  $3\sim 5\times 10^{-5}$ 、光透過率 70%を達成する。H26 最終目標：T-ACF を用いて産業技術総合研究所等と協力して多接合太陽電池で変換効率 25%を達成する。>

「接合特性理論的検討」については、シミュレータを用いて電氣的・光学的に好適な接合材料の検討を行った。結果、透過率 70%、接合抵抗率  $0.5\Omega\text{cm}^2$  を個別開発目標と定めた。

「透明酸化導電粒子開発」については、透明酸化導電体微粒子製造装置を導入し、サブ  $\mu\text{m}$  の微粒子形成に成功した。さらに種々導電体粒子の調査を行った。

「透明有機バインダー開発」については、さまざまなバインダーを調査し、 $150^\circ\text{C}$  で硬化し、安定して使用できる透明性ポリイミドを見出した。

「透明導電性接着剤特性」については、 $70\mu\text{m}$  ITO 粒子を分散したポリイミド接着剤を開発した。可視-近赤外域で光学透過率 80%、接合抵抗  $2.5\sim 10\Omega\text{cm}^2$  を達成した。

「多接合セル実証」としては、産総研提供の a-Si:H p-i-n セルと HIT シリコンセルを  $70\mu\text{m}$  ITO 粒子分散ポリイミド接着剤を用いて接合し二端子セル動作に成功した。Voc $1.34\text{V}$  と高い値を得た。本実証により二端子セルを実証する 2 2 年度中間目標を達成した。

<成果発表件数>特許出願（外国）：2(1)、論文（査読付）：4(3)、研究発表・講演：4、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

### 30) 高度光閉じ込め技術の開発 A（産総研）

<H22 中間目標：周期構造を利用したフォトニック基板を単接合太陽電池に適用し、従来技術に較べて近赤外領域の波長感度を 20%向上させる。その要素技術として半導体中を伝搬する近赤外光の散乱量 50%以上を目標とする。多層構造を利用した新規なフォトニック導電膜において、従来の単層中間層に較べて波長弁別率を 50%向上させる。H26 最終目標：周期構造を利用したフォトニック基板を単接合太陽電池に適用し、従来技術に較べて近赤外領域の波長感度を 20%向上させる。本技術を薄膜型多接合太陽電池に適用し、発電効率 25%を達成する。>

光散乱基板（フォトニック基板）の開発の、「光学設計」については、光学計算ソフトを用い、効果的な光閉じ込め効果が期待できる光散乱基板の設計パラメータを探索した。結果、Ag 反射板上に適切な回折格子を形成することにより、半導体中を伝搬する近赤外光の 50%以上を散乱させる基板パラメータ（周期  $0.6\sim 1.6$  ミクロン、アスペクト比 0.25 以上）を明らかにした。「光散乱基板作製技術の確立」については、今回想定する光散乱基板の作製技術となる①TCO 膜の製膜、②回折格子構造のパターニング（周期 2 ミクロン以下）、③埋め込み製膜、④平坦化処理（CMP）の個々について開発を行い、必要とされる構造を実現するための技術を確認した。今回実現した TCO 膜自体への 2 次元高精細パターニングは太陽電池の分野でこれまで報告例の無い新規性ある技術である。また、作製した TCO 回折格子構造の角度分解した光学特性を調べ、設計通りの回折挙動が実現できることを確認した。「太陽電池構造における原理実証」については、Ag 反射層/TCO2 次元回折格子からなるフォトニック基板を開発し、これを薄膜微結晶 Si 太陽電池に適用した。その結果、平坦基板に較べて近赤外感度を 100%向上させることに成功した（ただし、平坦化未処理）。平坦化した場合にも近赤外感度の大幅向上は十分実現可能と見込まれる。

波長弁別中間層（フォトニック導電膜）の開発の「光学設計」については、光学シミュレーションツールを用い、従来構造に較べて波長弁別率を 50%以上向上させる波長弁別中間層（3

層構造、カットオフ波長 800nm) を設計し、パラメータを確立した。「原理実証」として、スパッタ法並びにCVD法により実際に波長弁別中間層(3層構造)をガラス基板上に作製し、設計通りの光学特性が得られることを確認した。またこれを二接合薄膜シリコン太陽電池に適用し、トップセルの光電流が向上することを確認し、原理実証に成功した。

<成果発表件数>特許出願(外国):1(0)、論文(査読付):1(1)、研究発表・講演:3、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出展:1

### 31) 高度光閉じ込め技術の開発B(大阪大)

<H22 中間目標:プラズモン活用型透明導電層を用いた新規な光閉じ込め構造の作製技術を確立し、単接合薄膜太陽電池において、従来技術に較べて長波長光感度を20%向上させる。ミドル層およびボトム層に必要な波長域において、光散乱波長選択制御が可能であることを実証する。H26 最終目標:新規に開発する光閉じ込め構造により、従来技術に較べて長波長光感度を30%向上させる。本技術を用いて産業技術総合研究所等と協力して多接合太陽電池で変換効率25%を達成する。>

「プラズモン活用型透明導電層」については、ナノサイズのAg孤立粒子を作製し、サイズや形状、ならびに透明導電膜層などの環境媒質を調節することによって、光散乱波長域を制御することができることを実証した。(平成22年度目標をほぼ達成)

「微結晶シリコン単接合太陽電池における技術検証」については、上記のプラズモンを裏面光散乱/拡散層に適用して、従来技術に比較して、800nmより長波長領域での光感度を20%以上向上させることができた。(平成22年度目標を達成済み。プロセス整合性を吟味中)

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):0(0)、研究発表・講演:0、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出展:0

### 32) 高性能透明導電膜の開発(産総研)

<H22 中間目標:可視・近赤外領域(波長:400~1700 nm)で透明な導電性酸化物において抵抗率 $3 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$ 以下、波長1700 nmにおける吸収係数 $6.0 \times 10^3 \text{cm}^{-1}$ 以下を同時に達成する。200℃以下の低温プロセスで上記酸化物を作製する薄膜形成技術を開発する。H26 最終目標:本技術を薄膜型多接合太陽電池に適用し、発電効率25%を達成する。>

「透明導電膜の移動度の支配的要因の明確化」については、 $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$ 薄膜の構造、光学特性、および電気特性の関係を、XRD、TEM、TDS(昇温脱離ガス分析)、SE(分光エリプソメトリー)、およびHall測定装置を用いて調べた。その結果、(1)結晶化(170~180℃)に伴いキャリア濃度は減少(約 $4 \times 10^{20} \text{cm}^{-3} \Rightarrow 2 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ )、移動度は増加(約 $40 \text{cm}^2/\text{Vs} \Rightarrow 120 \text{cm}^2/\text{Vs}$ )すること、(2)薄膜内部からのガス( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ , In, InOなど)の熱脱離過程と電気特性に関連があり、非晶質領域あるいは結晶粒内部の状態(薄膜内に導入されたH, OH,  $\text{H}_2\text{O}$ とアトム~ナノスケールの欠陥の状態)が電気特性に大きく関与していること、(3)結晶化に伴う電氣的・光学的移動度の大幅な増加は、有効質量の変化のみでは説明することはできず、キャリアの散乱が大幅に低減していること、(4)結晶化によりキャリアの生成過程が変化(酸素欠損が抑制されHがドナーとして活性化する)し、それによりキャリア散乱が大幅に抑制されていることが示唆されること、などが分かった。

「低エネルギー損失窓電極の開発」については、上記の結果より、高い移動度を示す $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$ 薄膜を得るには非晶質および結晶質層内部の状態が非常に重要であること、その状態を間接的に調べる方法としてTDSが有効であることが分かった。その結果を受け、薄膜製造時の $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{O}_2$ 量を正確に制御することにより薄膜内部の組成・構造を制御し、その結果、高移動度を維持した状態で低抵抗率の薄膜を作製できることを見出した。最大プロセス温度200℃において抵抗率 $2.7 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$ 、波長1700 nmの吸収係数約 $5 \times 10^3 \text{cm}^{-1}$ と中間目標を上回る特性を得た。現在のところ、抵抗率 $2.2 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$ の薄膜が得られている。また、新たな添加物等を添加することにより、高い透明性を維持した状態で更なる低抵抗率化を検討している。

一方、初年度の段階で $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$ を微結晶シリコン薄膜太陽電池の窓電極に適用した。その結果、窓電極にITOを用いた場合に比べ、可視~近赤外域の分光感度の向上、それに伴う電流密度、変換効率の向上を確認した。したがって、現在開発中の透明導電膜は、薄膜型多接合太陽電池においても反射・吸収損失を低減させ、高効率化に寄与するものと考えられる。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):0(0)、研究発表・講演:3、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出展:0

### 33) 高性能ガラス基板作技術を使った高性能透明導電膜の開発 (東工大)

<H22 中間目標> ナノパターンガラス基板 (1 cm 角以上) 上での透明導電膜において、従来 (例えば SnO<sub>2</sub>) に比して、おおむね 2 倍の移動度 (80~100cm<sup>2</sup>/V・sec) および半分の電気抵抗率 (2x10<sup>4</sup>Ωcm) を達成する。 H26 最終目標: ナノパターンガラス基板 (10cm 角以上) 上で、近赤外域を含む光透過波長域を拡大した、低抵抗・高移動度の高性能透明導電膜を作製する。本技術を用いて産業技術総合研究所等と協力して多接合太陽電池で変換効率 25% を達成する。>

「ナノインプリントした高性能ガラス基板技術の開発」については、平成 20 年度は 1 cm 以上のサイズのガラス基板へのナノインプリント技術の開発を達成し、平成 21 年度はナノインプリント中の真空環境導入により、21 年度中に 2 cm サイズの達成の目途は得た。平成 22 年度では、より一層の加熱加圧条件の最適化により 10 cm 以上サイズのガラス基板へのナノインプリント技術の開発を達成出来る見込みがある。

「高性能ガラス基板を使った高性能透明導電膜の開発」については、平成 20 年度には、直線状のナノ凹凸を持つナノパターンガラス基板上への ITO 膜の堆積実験の結果、配向性が向上することを明らかにした。平成 21 年度には、直線状ナノパターンガラス基板上への ITO 膜の堆積では、ナノ壁付近での結晶核分布が、通常のガラス基板とは大きく異なることを見出した。その結果、配向性が向上し、さらに粒径の増大によるキャリア散乱の低下と移動度向上に寄与する可能性を明らかにした。平成 22 年度においては、上記基板を利用したより低抵抗ナノパターン透明導電膜の形成とその上へのシリコン系半導体や液晶分子の単結晶あるいは配向膜の合成条件の検討において、ガラス基板表面と成膜条件のより一層の最適化により目標を達成出来る見込みがある。

<成果発表件数> 特許出願 (外国): 0(0)、論文 (査読付): 13(13)、研究発表・講演: 27、新聞・雑誌等への掲載: 1、展示会出展: 0

## 2-3. 低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発

### 2-3-1 バンドエンジニアリング

#### 1) ナノドット禁制帯幅制御 (東京工業大学)

<H22 中間目標> SiC/Si ナノドットの欠陥密度を 1x10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup> 以下にまで低減する技術を開発することにより、シングル接合セルで真性変換効率 5% を達成する。H26 最終目標: Si ナノドット・シングル接合セルで真性変換効率 10% を達成する。多接合太陽電池のミドルセルへ適用し、セルレベルでの動作を実証する (ナノドットセルからの真性変換効率 3%)。>

#### ○Si ナノドット膜の欠陥密度低減

これまでに欠陥密度は、現状で 7x10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup> まで低減した。a-SiC バリア層に N を添加するなどの新技術開発を行ったところ、熱処理後の導電率が大幅に低下することが観察された。

さらに微量の酸素添加を試みたところ、量子ドット太陽電池の大幅な特性向上に成功した。さらに最適化を行うことで中間目標 (欠陥密度を 1x10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup> 以下) の達成の見通しである。

#### ○不純物拡散の抑制

この課題については、ドーピング層を最初に結晶化させ、それに引き続いて量子ドット層の熱処理を行うことで、ほぼ解決できた。

#### ○Si ナノドット太陽電池の開発

a-SiC バリア層に N を添加することにより量子ドット太陽電池の開放電圧が、165 mV から 289 mV まで向上した。これに引き続いて、微量の酸素添加を行ったところ、開放電圧がさらに 518 mV まで向上した。この値は、M. Green らのグループにより得られた値よりも高く、Si 量子ドットセルとしては、世界最高の値である。また、厚い n 型 Si 側から光を照射する構造のセルを試作したため、短絡電流が低く、変換効率は 0.1% であるが、ITO 側から光照射する構造を作製すれば、3.8% まで変換効率が向上するとの解析結果を得た。ITO 側から光照射する構造の開発とその構造の最適化により電流値を向上させることにより、中間目標 (真性変換効率 5%) の達成の見込みである。

<成果発表件数> 特許出願 (外国): 0(0)、論文 (査読付): 1(1)、研究発表・講演: 12、新聞・雑誌等への掲載: 3、展示会出展: 2

#### 2) マルチエキシトン (東京工業大学)

<H22 中間目標> Si 量子ドットの遷移エネルギー Eg < 3.3eV (@1nm) 領域における、マルチエキシトン

生成(2Eg)等による量子効率の増倍効果に関する原理実証を目標として、光生成電流が観測可能な Si 量子ドット結晶層及び素子構造を形成する。H26 最終目標：p-i-n セル構造の変換効率を明らかにするとともに、多接合型シリコン薄膜太陽電池に適用可能な素子構造と変換効率最適化への指針を提示する。>

#### ○バンドエンジニアリング

光電子分光法(XPS)により、Si と  $\text{CaF}_2$  の化学結合状態を調べ、Si と  $\text{CaF}_2$  が明確に相分離しており、副次的な化合物相が形成していないことを確認した。これと透過電顕の観測結果を併せて、ナノサイズのシリコン量子ドットの存在を確認することが出来た。吸収係数、透過係数の分光特性の測定を行い、量子ドットサイズ・密度との関係を明らかにし、サイズ効果による状態密度低減を実証した。

光吸収係数の分光特性を測定することにより、吸収端波長の量子ドットサイズ依存性、および作製プロセス依存性を明らかにし、ドットサイズ 3-4nm に制御により、吸収端波長 1.1~0.75  $\mu\text{m}$  (@1000 $\text{cm}^{-1}$ ) にバンドギャップ制御可能であることを実証し、目標値 1.1~0.8  $\mu\text{m}$  をクリアした。

#### ○光生成電流測定

光導電率の波長依存性が測定可能な Si 量子ドットの形成条件および測定条件が明らかになった。量子効率・移動度・寿命時間の積の光波長依存性を求めた。ドットサイズ 3.3nm 試料にて光生成電流の分光感度特性が観測され、中間目標が達成できた。

#### ○p-i-n 構造形成

クラッキングセルを用いて、 $\text{CaF}_2/\text{Si}$  量子ドット層と、Si ドーピング層の接合形成と、ドーピング濃度制御に関する基礎データを取得した。その結果、不純物濃度  $10^{17}\sim 10^{19}\text{cm}^{-3}$  の範囲で制御するプロセスを明らかにした。セル構造の形成プロセスを設計し、ドーピング制御技術 ( $10^{17}\sim 10^{19}\text{cm}^{-3}$ ) を確立できた。

<成果発表件数>特許出願(外国): 0(0)、論文(査読付): 0(0)、研究発表・講演: 7、新聞・雑誌等への掲載: 0、展示会出展: 0

#### 3) ナノドット量子効果による薄膜形成技術(三洋電機)

<H22 中間目標: ナノドット量子効果を有するボトム層対応高品位薄膜の開発。バンドギャップ制御幅: 約 0.2 eV、欠陥準位密度:  $5\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$  以下、  
H26 最終目標: 単接合セル: 変換効率 7%、低倍率集光多接合セル: 真性変換効率 30% (プロジェクト、有効受光面積:  $1\text{cm}^2$ ) >

#### ○高品位マトリクス形成技術の開発

最適マトリクス相形成技術の発掘・選択を行い、マトリクス相薄膜形成技術開発、膜特性の検討などのマトリクス相形成法の探索を行った。ナノドット量子効果を発現が可能なマトリクス相の改質技術の開発を行った。

湿式法を用いて緻密な薄膜をテクスチャ基板上に形成できることを確認でき、中間目標欠陥準位密度 (<  $5\times 10^{18}\text{cm}^{-2}$ ) をほぼクリアできる見通しである。

#### ○ナノドット粒子配置法の開発、及び、量子効果の検証

ナノ粒子分散に必要な物性、要求事項等の調査研究を行い、ナノ粒子の入手・形成検討を行った。

マトリクス相前駆体中へのナノ粒子分散について検討を行い均一分散を達成した。湿式形成マトリクス薄膜中のナノ粒子の分散、PL 発光を確認し、中間目標(バンドギャップ制御幅: 約 0.2eV) 達成の見通しである。

#### ○ナノドット量子効果を用いた高効率太陽電池デバイスの開発

ナノドット分散薄膜の形成が可能となったため中間目標 ( $V_{oc} \geq 0.1\text{V}$ ) 達成の見通しである。

<成果発表件数>特許出願(外国): 0(0)、論文(査読付): 1(1)、研究発表・講演: 12、新聞・雑誌等への掲載: 3、展示会出展: 2

#### 4) Ge の遷移型制御(東京工業大学)

<H22 中間目標> 歪 Ge 膜の作製技術の開発において、間接遷移型半導体から直接遷移型半導体への転換を実証するために、光子エネルギー0.7eV 付近における光吸収係数の1桁以上の増大を確認する。

H26 最終目標：直接遷移型へと転換した歪 Ge を用いた単接合太陽電池において、真性変換効率5%を達成する。>

#### ○遷移型制御の理論予測及び最適構造設計

本検討の中間目標は『直接遷移型半導体への転換の実証』であり、その目標に対しては、理論計算により、光吸収係数が歪量に依存することが明らかにした。そこで、歪量の最適値の明確化と変換効率向上確認を目標とした。

最大変換効率を得られる歪量を明らかにするため、光吸収係数増大を考慮した太陽電池の動作解析を行ない、歪量約0.5%が太陽電池応用の最適値であることを明確にした。

この時、歪 Ge 太陽電池は、無歪 Ge 太陽電池の1/400の膜厚で同程度の変換効率を示すことを見出した。

#### ○歪 Ge 膜の結晶成長技術の開発

InGaAs 仮想基板を用いて歪 Ge の製膜技術を開発、上記太陽電池応用及び直接遷移転換が可能な歪量1.55%と言う世界最高の伸張歪を有する Ge 薄膜の製膜に成功した。

<成果発表件数> 特許出願 (外国) : 0(0)、論文 (査読付) : 2(2)、研究発表・講演 : 6、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 2

#### 5) 薄膜新材料 (岐阜大学、岐阜工業高等専門学校)

<H22 中間目標> ① アモルファス/微結晶化合物薄膜新素材の開発：禁制帯幅 2.2eV 程度で、光電気伝導を示し、欠陥密度  $2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$  以下のアモルファス/微結晶化合物新素材薄膜を開発。それを用いた単接合太陽電池にて開放電圧 1.0V 以上を達成。② ゲストフリー-SiGe 系クラスレート薄膜の開発：光電気伝導を示し、欠陥密度  $2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$  以下のゲストフリー/希ガス内包 Si クラスレート薄膜を作製。

H26 最終目標：① アモルファス/微結晶化合物薄膜新素材の開発：単接合太陽電池にて開放電圧 1.2V 以上を達成。中心機関と連携して低倍率集光型多接合太陽電池にこれを適用し、真性変換効率 30% (有効受光面積： $1 \text{cm}^2$ ) を達成。② ゲストフリー-SiGe 系クラスレート薄膜の開発：ゲストフリー/希ガス内包  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  クラスレート薄膜において、理論値 1.3~2eV をもとに連続的に制御可能な禁制帯幅を明らかにする。禁制帯幅 1.8eV 程度のクラスレート薄膜を用いた太陽電池にて変換効率 5%を達成。>

#### ○アモルファス/微結晶化合物薄膜新素材の開発 (岐阜大学)

室温で結晶サイズが数十 nm 程度の微結晶 InGaN の製膜を可能にした。In ターゲットへの投入電力制御により、In 組成比ならびに光学バンドギャップ制御が可能であることを示し、禁制帯幅 2.2eV 程度の微結晶 InGaN において光電気伝導度  $6.4 \times 10^{-4} \text{S/cm}$  (光感度 6.51) を得た。 $\text{N}_2$  ガス分圧比  $\text{N}_2$  を増加することで、膜中の N 組成比を増加させ、光感度を 1.5 から 39.2 に改善できた。また、Ga と In の代わりに GaN、InN ターゲットを使用し、InGaN の N 組成比を増加させ、窒素欠陥を改善し、禁制帯幅 2.2 eV 程度で、光電気伝導度  $1.4 \times 10^{-4} \text{S/cm}$  (光感度 252)

を得た。中間目標値の平成 22 年度中の達成は厳しいと思われるが、最終目標に向け方向性は明確にできた。

#### ○ゲストフリー-SiGe 系クラスレート薄膜の開発 (岐阜大学、再委託：岐阜工業高等専門学校)

金属内包 II 型 Si クラスレートを高い収率で作製するための条件、クラスレートの前駆体であるジエンチル相 NaSi の熱処理条件を探索した。さらに内包する金属元素を抜くための真空熱処理条件を確立し、II 型 Si クラスレート  $\text{Na}_x\text{Si}_{136}$  において Na 含有量を  $x = 1 \sim 2$  まで低減できた。得られた焼結体を押固めた薄膜試料において、光吸収スペクトル(光音響分光法)からダイヤモンド構造の c-Si より大きなバンドギャップエネルギー 1.5 eV を有する半導体であることを示した。また、I 型(金属)と II 型(半導体)の混合試料で世界初めての光電気伝導度  $\sim 1 \times$

$10^{-7} \text{ S/cm}$  を観測できた。作成条件の精密化による更なる不純物低減と焼結体熱処理等による欠陥精製を抑制して中間目標 ( $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  以下) を実現できる見込みである。岐阜高専での希ガスの利用については、希ガス/Si 混合薄膜の合成に成功し、クラスレートに対応する X 線回折ピークを確認できたおり、ほぼ中間目標を達成できる見通しである。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0(0)、論文 (査読付) : 2(2)、研究発表・講演 : 26、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 6) ワイド/ナローギャップ材料設計 (龍谷大学)

<H22 中間目標 : ワイドバンドギャップ光吸収層材料として  $E_g=1.7 \sim 2.0 \text{ eV}$ 、ナローバンドギャップ光吸収層として  $E_g=0.6 \sim 1.0 \text{ eV}$  の直接遷移型化合物半導体の組成、結晶構造、結晶配向を設計する。材料設計で得られた特性を実験結果と比較して材料設計の有効性を確認する。この成果を、中心機関と連携して太陽電池に適用し、低倍率集光時、真性変換効率 20% (有効受光面積 :  $1 \text{ cm}^2$ ) を得る。

H26 最終目標 : 5-6 接合からなる低倍率集光型化合物系薄膜太陽電池材料 ( $0.6 \sim 2.0 \text{ eV}$ ) の材料設計を行う。材料設計で得られた特性を実験データと比較して材料設計の有効性を確認する。この材料設計を、中心機関と連携して低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積 :  $1 \text{ cm}^2$ ) を達成する。>

#### ○第一原理計算による材料設計

$\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  の Sn を Ge や Si に置換した化合物について、第一原理計算を用いて相の安定性と電子構造の評価を行い、太陽電池用光吸収層の材料設計の指針を得た。4 元系化合物半導体  $\text{Cu}_2\text{ZnIVSe}_4$  (IV=Si, Ge, Sn) をワイドギャップ材料候補として見いだした。最適組成にて太陽電池に適用されることにより、中間目標 (真性変換効率 20%) を達成する見通しである。

#### ○実験による検証 (a) 結晶構造解析

$\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  の合成プロセスを明らかにし、 $\text{Cu}_{2-2X}\text{ZnSnSe}_4$  の単一相が得られる領域を決定し、次に X 線リートベルト法で  $\text{Cu}_{2-2X}\text{ZnSnSe}_4$  の結晶構造の解析を行った。 $\text{Cu}_{2-2X}\text{ZnSnSe}_4$  ( $0 \leq X \leq 0.0875$ ) の結晶構造は Cu/(Zn+Sn) 比の減少とともに、格子定数  $a$ ,  $c$  は小さくなり、 $c/a$  も小さくなることを明らかにした。

#### ○実験による検証 (b) 物性評価 :

スクリーン印刷/焼結法を用いて CZTSe や  $\text{CuIn}(\text{Se}, \text{Te})$  系固溶体膜の作製し、可視・近赤外吸収スペクトルから禁制帯幅を決定した。CZTSe 膜は 1100nm 近傍に吸収端を持つ。直接遷移半導体を仮定して、 $h \cdot$  に対し  $(\cdot h \cdot)^2$  をプロットすることで CZTSe の禁制帯幅を求めたところ、1.05 eV であった。また、 $\text{CuIn}(\text{Se}_{1-X}\text{Te}_X)_2$  固溶体の  $X=0.5$  で  $E_g=0.88 \text{ eV}$  が得られ、ナローバンドギャップ ( $0.6 \sim 1.0 \text{ eV}$ ) 材料として期待できることを明らかにした。 $\text{CuIn}(\text{Se}_{1-X}\text{Te}_X)_2$  系の  $X=0.5$  で  $E_g=0.88 \text{ eV}$  が得られ、中間目標 ( $0.6 \sim 1.0 \text{ eV}$  の新材料開発) を達成できた。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0(0)、論文 (査読付) : 5(5)、研究発表・講演 : 16、新聞・雑誌等への掲載 : 1、展示会出展 : 3

#### 2-3-2 薄膜フルスペクトル太陽電池

##### 7) シリコン系薄膜集光型セル (東京工業大学、再委託 : 奈良先端科学技術大学院大学)

<H22 中間目標 : 低倍率集光で真性変換効率 20% (有効受光面積 :  $1 \text{ cm}^2$ )。>

H26 最終目標 : 低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積 :  $1 \text{ cm}^2$ )。>

#### ○集光型 Si 薄膜太陽電池の最適設計・試作 (東京工業大学)

アモルファス Si ならびに、微結晶 Si シングル接合セルの集光特性を詳細に検討した。a-Si シングル接合セルの特性は、1 sun から集光比を高めていくと、曲線因子が低下する。これは、①i 層内の過剰キャリア濃度が増加し、電界分布が変化するため、②TCO のシート抵抗による

影響が無視できなくなるためである。①に関しては、i 層を薄く設計することにより、改善されることが分かった。②については、微細電極を設けることにより改善を図った。以上の結果、数倍集光までは、変換効率が向上することが確認できた。一方、微結晶 Si セルは、もともと開放電圧が低いため、集光比に伴う開放電圧増加の効果が大きくなるため、10 倍集光程度まで変換効率が向上すること、また、微結晶 Si セルに対しては、ヘテロ接合構造が効率向上に大きな効果のあることが分かった。2 層タンデムの開発に関しては、中間層を挿入した a-Si/c-Si セルで変換効率 10.1%、a-SiC/a-Si タンデムセルで変換効率は 8.8% が得られた。以上の結果、アモルファス Si 太陽電池では、i 層の高注入効果が曲線因子を低下させる現象を見出し、その解決策を明確化でき、微結晶 Si 太陽電池では、低倍率集光で変換効率が大幅にアップすることを世界で初めて見出した。中間目標（真性変換効率 20%）は達成の見込みである。

○a-Si:H/CdTe 2 接合セルの最適設計・試作（東京工業大学）

木更津高専で作製した CdTe のガラス基板側に、プラズマ CVD でアモルファス Si を製膜する際、原子状水素等によるネガティブな現象がでないことを実験的に確認した。CdTe 太陽電池のガラス基板の上にアモルファス Si を堆積させた場合の CdTe セルへの光透過率特性の検討と、オプティカルカップリングの最適設計から、変換効率 9.2% の a-Si セルと、変換効率 15.4% の CdTe 太陽電池で 4 端子タンデム太陽電池を構成すれば、変換効率 15.8% が得られるとのシミュレーション結果を得た。実際の 4 端子デバイスで実証し、シリコン系 2 接合と、CdTe の組み合わせを検討することにより高効率化が可能である。

○フルスペクトルセル・トモグラフィ解析（奈良先端科学技術大学院大学）

薄膜素子におけるエレクトロルミネッセンスのスペクトル分光解析により、バンドギャップに対応した波長を有するスペクトルの測定に成功した。薄膜構造における電流フローの発光による解析において、エレクトロルミネッセンス強度の空間分布より透明導電膜の抵抗を非破壊で評価する技術を確認した。

<成果発表件数>特許出願（外国）：2(0)、論文（査読付）：8(8)、研究発表・講演：37、新聞・雑誌等への掲載：3、展示会出展：4

8) シリコン系薄膜集光型セル（シャープ）

<H22 中間目標：広バンドギャップで、光伝導度  $1.0 \times 10^{-6}$  (S/m) 以上、新規薄膜評価技術の確立、単接合型薄膜太陽電池で開放電圧：1.2V 以上(サイズ  $1 \text{ cm}^2$  以上)、多接合型薄膜太陽電池で真性変換効率：15% 以上、H26 最終目標：多接合型薄膜太陽電池で真性変換効率：17% 以上(サイズ  $1 \text{ cm}^2$  以上)>

○広ギャップ材料の開発

RF、VHF、マイクロ波の広い周波数領域でのプラズマにより、膜成長表面での構造緩和を制御し、広バンドギャップ材料の高品質化を図った。バンドギャップ 2.0eV、光伝導度  $3.9 \times 10^{-6}$  (S/m) を達成し、中間目標（光伝導度  $1.0 \times 10^{-6}$  (S/m) 以上）をクリアした。

○広ギャップセルの開発

開発した広ギャップ材料を活性層に用い、不純物添加層や p/i 界面層の開発により出力電圧の高い薄膜太陽電池を開発した。バンド準位評価技術を確認するとともに、aSiC ワイドバンドギャップ (Eg1.95eV) 材料を用いた単接合セルを作製した。界面制御による高開放電圧化技術を開発し、0.928V (変換効率 5.39%) を達成した。高開放電圧を維持しながら短絡電流を増大化を図ることで中間目標（1.2V 以上）を達成する見込みである。

○多接合型薄膜太陽電池の開発

開発した広ギャップセルを光入射側セルに応用し、非晶質シリコン、狭ギャップセルと組み合わせた多接合薄膜太陽電池設計技術を開発し、高効率化を図った。広ギャップセル形成後の非晶質シリコン・微結晶シリコンセルの作製環境を整備した。製膜条件の最適化を実施完了。a-SiC:H 単接合セル変換効率 5.4% (Eg1.95eV) をベースに今後、多接合型太陽電池にて高効率化を図る。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0(0)、論文（査読付）：0(0)、研究発表・講演：2、新聞・



雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 9) サブセル界面接合技術 (三菱電機)

<H22 中間目標 : サブセル界面抵抗  $300 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$  (サブセル界面部電圧降下  $0.15\text{V}$  以下) を得ることを目標とする。H26 最終目標 : サブセル界面抵抗  $100 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$  (サブセル界面部電圧降下  $0.05\text{V}$  以下) を得ることを目標とする。

>

#### ○サブセル界面トンネル伝導評価技術の開発

集光により太陽電池セルに大量の電荷を生成させた条件で、サブセル界面に関わる電気特性を計測し、トンネル伝導に寄与する諸特性を定量的に評価する技術を開発した。雰囲気・温調機構を備えたセル特性評価装置を製作した。微結晶 Si/微結晶 Si セルにおける短絡電流密度および開放電圧は集光に伴う照射強度の増加に比例して向上するのに対し、フィルファクタは逆に低下して効率の制限要素となることを実証した。これを改善するためには、サブセル界面での低抵抗化が不可欠であることを明確化できた。サブセル界面の低抵抗化に重要な役割を果たす再結合準位を定量的に把握するため、その密度・エネルギー分布を静電容量の時間依存性から導出する技術を構築した。サブセル界面の電気特性を評価するためのテストデバイスを考案・試作、サブセル界面抵抗を直接計測する技術を確立した。

#### ○低抵抗サブセル界面トンネル伝導構造の開発

サブセル界面の低抵抗化には、n/p 接合における n 型膜伝導帯と p 型膜価電子帯との間のポテンシャル差を小さくすることが有効であることをシミュレーションで検証した。その第一の手法として、n/p 接合界面でのポテンシャル制御によるバンドの曲がりを引き起こす構造を開発。誘電体材料の酸素欠損形成による固定電荷量とポテンシャル変化 (フラットバンドシフト) の関係から、固定電荷形成によるポテンシャル制御を実証した。バンドの曲がりにより、サブセル界面抵抗を低減できる可能性を示し、ポテンシャルの最適制御による低抵抗化を実施中である。第二の手法として、ポテンシャル差が小さい酸化半導体材料の n/p 接合を挿入する構造を開発した。n 型 ZnO : Al/p 型 NiO : Li 接合構造の挿入により、サブセル界面抵抗  $500 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$  を実証した。今年度中にポテンシャル差が NiO : Li に比べ  $0.2\text{eV}$  小さい  $\text{Cu}_2\text{O}$  等の p 型酸化半導体を適用することにより、中間目標値  $300 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$  を達成する見込みである。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 5 (0)、論文 (査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 2、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 10) カルコパイライト系集光型セル (東京工業大学)

<H22 中間目標 : バンドギャップ  $1.1\text{eV}$  の  $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$  薄膜太陽電池を用いて、低倍率集光時において真性変換効率  $20\%$  (単接合、有効受光面積  $1\text{cm}^2$ ) を得る。

$\text{Ag}(\text{InGa})\text{Se}_2$  薄膜太陽電池において開放電圧  $0.9\text{V}$  以上を得る。

対向する透明導電膜付きガラス基板上に  $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$  薄膜太陽電池を貼り合わせ、貼り合わされた状態において変換効率  $15\%$  を達成する。貼り合わせによる 2 層タンデム構造の課題を抽出する。

H26 最終目標 : メカニカルスタック型 2~3 層タンデム太陽電池において、低倍率集光時において真性変換効率  $25\%$  (有効受光面積  $1\text{cm}^2$ ) を得る。この開発した技術を中心機関と連携して低倍率集光型フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率  $30\%$  (有効受光面積  $1\text{cm}^2$ ) を達成する。>

#### ○Ag 系ワイドバンドギャップ材料の開発

同時蒸着法と 3 段階法を用いて  $\text{Ag}(\text{InGa})\text{Se}_2$  薄膜太陽電池を作製、3 段階法により変換効率を  $5.31\%$  から  $6.03\%$  まで向上させた。Voc= $0.812\text{V}$  という値を得て中間目標 ( $0.9\text{V}$ ) をほぼクリアできた。 $1.1\text{eV}$  集光セルの開発及び  $1.4\text{eV}$  帯カルコパイライト系材料の高品質化を図り、集光下において、CIGS 薄膜太陽電池の特性を評価、変換効率  $20.3\%$  を達成し、中間目標を達成した。Se クラッキング、Ga イオン化、多段階成長法を新規に提案、高 Ga 組成 CIGS 太陽電池作製に向けた技術開発を行った。

#### ○カルコパイライト系太陽電池貼り合わせ技術開発

ITO 同士の貼り合わせに成功し、貼り合わせ時の表面平坦性(<1nm)が重要であることを明確化できた。タンデム太陽電池作製への目処を確立した。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):3(3)、研究発表・講演:14、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出展:0

#### 11) 放熱基板カルコパイライト系集光型セル(青山学院大学)

<H22 中間目標:放熱基板上のカルコパイライト系集光セルを開発することにより、真性変換効率 10% (ナローギャップ単接合、低倍集光、受光面積 0.5cm<sup>2</sup>程度) および 20% (ミドルギャップ単接合、低倍集光、受光面積 0.5cm<sup>2</sup>程度) を達成する。中心機関と連携して最終目標を達成するため、放熱基板上のカルコパイライト系を用いた太陽電池の必要特性を明らかにする。

H26 最終目標:放熱基板上のカルコパイライト系集光セルで真性変換効率 25% (単接合、低倍集光、有効受光面積 0.5cm<sup>2</sup>) を実現する。この開発した技術を中心機関と連携してワイドギャップセルと組み合わせた低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積:1cm<sup>2</sup>) を達成する。>

#### ○CuInTe 系薄膜形成と太陽電池の試作

Cu-In-Te 系薄膜を同時蒸着法により生成膜およびセル特性の Te フラックス量依存性について検討し、セル作製プロセスの最適化により、非集光で変換効率 5.1%(V<sub>oc</sub>=0.335 V, J<sub>sc</sub>=28.2 mA/cm<sup>2</sup>, FF=0.539)を得た(中間目標:低倍集光 10%)。

#### ○放熱基板上での CIGS 太陽電池の作製

放熱基板(Ti)基板上で CIGS 太陽電池を作製し、1sun 変換効率 17.9%を得た。今後、集光特性を測定するが、中間目標(20%)は達成の見通しである。

#### ○集光型太陽電池における放熱基板温度シミュレーション及び冷却機構の検討

表面温度上昇を 4[°C]に抑える冷却機構を明らかにし、最終目標に向けた方向性を見いだした。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):4(4)、研究発表・講演:9、新聞・雑誌等への掲載:3、展示会出展:1

#### 12) 構造設計とカルコパイライト系トップセル(立命館大学)

<H22 中間目標:(1) デバイス構成(セル数・集光倍率)と各要素セルの仕様(Eg, η, J<sub>sc</sub>, Voc, FF, サブバンドギャップの透過率)を明示する。テーマ全体の最終目標達成のためのデバイス構成・各要素セルの仕様を理論的に明示する。(2) CIAS 薄膜(Eg=1.9~2.3eV)について基礎的な成長技術開発を行い、真性変換効率 η=5%を得る。

H26 最終目標:(1) η=40%実現に必要なデバイス構成・各要素セルの仕様を明示する。ならびにデバイス構成・各要素セルと実デバイスとの差異を明示する。

(2) TCO 上での CIAS 薄膜の成長技術開発を行い、CIAS 単接合太陽電池で真性変換効率 η=10.5%を得る。中心機関と連携して低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積:1cm<sup>2</sup>) を達成する。>

#### ○構造設計

高効率薄膜フルスペクトル太陽電池達成の道筋を明示することを目的として、計算機を用いて低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の総合的なデバイス構成・要素セル設計を行った。要素セルの性能が単結晶太陽電池並みである場合に、3スタックではサブ Eg の透過率が 80%以上、4スタックでは同透過率が 90%以上の場合に効率 30%以上が達成可能であることを明らかにした。効率 30%達成のための要素セルの性能、サブ Eg の透過率、最適 Eg の組み合わせを明示できたため、本開発項目の目標を達成したといえる。

#### ○カルコパイライト系トップセル

高効率薄膜フルスペクトル太陽電池達成に必須な、トップセルとなる高効率ワイドギャップ Cu(In, Al)S<sub>2</sub> (CIAS) 太陽電池の開発を行った。性能目標の効率 5%は CuInS<sub>2</sub> で達成したので、今年度中に CIAS での中間目標(真性変換効率 5%)の達成を目指している。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):0(0)、研究発表・講演:8、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出展:0

### 13) 光学設計技術 (株式会社カネカ)

<H22 中間目標> 低倍率集光系シリコン系/化合物系多接合薄膜太陽電池において、以下の目標を達成する。

(1) 変換効率 30%を達成するためのオプティカルカップリング構造の提案(シミュレーションによる光学設計)

(2) オプティカルカップリング・オプティカルスプリッティング構造を有する低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池において、光学設計による 3%の変換効率向上の実証

H26 最終目標：オプティカルカップリング・オプティカルスプリッティング構造を中心機関と連携して低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積：1cm<sup>2</sup>) を達成する。>

#### ○オプティカルカップリング構造形成技術の開発

短波長光の反射と長波長光の透過に関する波長選択性の高いオプティカルカップリング構造体の設計を行った。さらなる検討により透過・反射光の波長範囲を自由に設計することが可能となった。カップリング構造作製手法の検討によりシミュレーションと同等の選択性を持つカップリング構造体の作製に成功した。オプティカルカップリング構造を有する 4 接合セルの数値計算により、変換効率 30%となるフルスペクトル太陽電池の設計に成功し、中間目標を達成した。

#### ○新規直並列多接合薄膜太陽電池の開発

シリコン系と化合物系太陽電池からなる新規多接合薄膜太陽電池の一例として、直列並列接続からなるシリコン系、及び化合物系太陽電池構造を提案し、数値計算により 3%の変換効率向上が見込めることを見出した。新規直並列多接合薄膜太陽電池作製に向けて、世界で初めて微結晶シリコンセルと CISセルの直列タンデム構造の作製に成功した。今年度中にフルスペクトル太陽電池トータルとしての最適化を行い、3%の変換効率向上を実証する。

<成果発表件数>特許出願 (外国)：4(0)、論文 (査読付)：2(2)、研究発表・講演：4、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

### 14) 集光型 CdTe 薄膜 (木更津工業高等専門学校)

<H22 中間目標> 本テーマの集光型 CdTe 薄膜では、集光型 CdTe 太陽電池を開発し、シリコン系薄膜太陽電池などと組み合わせて多接合セルあるいは波長スプリッティングによる集積型セルを開発する。

①直列抵抗の低減：直列抵抗 0.5 Ωcm<sup>2</sup>以下を得る。

②集光型 CdTe 太陽電池の設計・試作：シリコン系薄膜/CdTe 4 端子タンデム太陽電池に適用し、低倍率集光時、真性変換効率 20% (有効受光面積：1cm<sup>2</sup>) を得る。

H26 最終目標：①直列抵抗の低減：直列抵抗 0.2 Ωcm<sup>2</sup>を得る。② 集光型 CdTe 太陽電池の設計・試作：低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積：1cm<sup>2</sup>) を達成する。>

#### ○直列抵抗の低減

CdTe 光吸収層の膜質改善としては、CSS 製膜でのソースへの CdCl<sub>2</sub> 添加効果を検討し、ソース中の CdCl<sub>2</sub> 濃度が 10 mol%程度するとき太陽電池特性が向上することを明らかにした。また、電極作製条件などの最適化を試み、CdTe 膜厚 5.5 μm で変換効率 15.2% (J<sub>sc</sub>: 26.5 mA/cm<sup>2</sup>, Voc: 0.829 V, F.F.:0.692)を達成したが、直列抵抗は 4 Ωcm<sup>2</sup>程度となっており、中間目標 (0.5 Ωcm<sup>2</sup>以下) の達成は厳しい。

#### ○集光型 CdTe 太陽電池の設計・試作

中心機関において CdTe 太陽電池上に a-Si:H 膜の堆積を行うなどの基礎的検討を行ったが、4 端子タンデム太陽電池の作製に至っていない。今後、中心機関にて太陽電池に適用され、中間目標 (真性変換効率 20%に寄与) に向けて検討を進めるが、現時点において中間目標への CdTe 薄膜の寄与は期待できない。

<成果発表件数>特許出願 (外国)：0(0)、論文 (査読付)：0(0)、研究発表・講演：5、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

## 2-3-3 光のマネージメント・TCO

### 15) 表面プラズモン (東京工業大学)

<H22 中間目標: 半導体太陽電池における表面プラズモン効果の明確化 (ピーク波長における光電流の 5% 向上) H26 最終目標: 表面プラズモンによるピーク波長での光電流の 10% 向上、および表面プラズモンを薄膜フルスペクトル太陽電池へ適用する方法の提案。>

#### ○金属ナノ粒子膜をコーティングした太陽電池の開発、評価

粒径および分布の異なる表面修飾した金属ナノ粒子を合成し、シリコンウエハ上への金属ナノ粒子薄膜の作製に成功した。作製した銀ナノ粒子複合薄膜は、銀ナノ粒子の局在表面プラズモンに由来する吸収ピークをもち、マトリックスおよび銀ナノ粒子に由来する反射防止効果を示した。単結晶 Si ウエハを用いて Si 太陽電池を作製し、金属ナノ粒子分散有機薄膜の表面塗布によって Si 太陽電池の短絡電流を 9% 向上させ、ピーク波長における光電流を 22.3% 向上させることに成功した。したがって、中間目標における数値目標「ピーク波長における光電流の 5% 向上」を達成し、さらに最終目標における数値目標の「ピーク波長での光電流の 10% 向上」をも大幅に上回る成果を得た (特許出願済み)。Si ウエハの陽極酸化によってポーラスシリコンを形成し、そのナノ多孔体中に金属ナノ粒子を担持することに成功し、表面プラズモンによる大幅な反射率低減にも成功した。更に作製したポーラスシリコンによって太陽電池を作製することで、電場増強効果による効率向上も期待できる。(特許出願済)

<成果発表件数>特許出願 (外国): 2(0)、論文 (査読付): 5(0)、研究発表・講演: 26、新聞・雑誌等への掲載: 1、展示会出展: 0

### 16) p 形透明導電膜 (龍谷大学、共同実施: 新潟大学)

<H22 中間目標: 基本特性として  $E_g > 3.0\text{eV}$ ,  $\sigma > 10\text{Scm}^{-1}$  を達成する。中心機関と連携して、p 型透明導電膜をシリコン系薄膜太陽電池に適用して p 型透明導電膜の有効性を確認し、また化合物系薄膜太陽電池の裏面電極に適用して長波長光を透過させた状態で真性変換率 10% を達成する。

H26 最終目標: 基本特性として  $E_g > 3.0\text{eV}$ ,  $\sigma > 10^3\text{Scm}^{-1}$  を達成する。開発した p 型透明導電膜を中心機関と連携して低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積:  $1\text{cm}^2$ ) を達成する。>

#### ○新規 p 型 TCO 材料探索と PLD 法による薄膜形成 (龍谷大)

引き続き、 $\text{SrCu}_2\text{O}_2$  系透明導電膜の高性能化について検討した。 $\text{SrCu}_2\text{O}_2$  の Cu/Sr 比を変えたターゲットを用いてパルスレーザー蒸着 (PLD) 法により  $\text{SrCu}_2\text{O}_2$  薄膜を作製し、その光学特性と電気特性を評価した。また、 $\text{CuAlO}_2$  や  $\text{SrCu}_2\text{O}_2$  とは別の材料系で材料探索と薄膜作製を行った。 $\text{SrCu}_2\text{O}_2$  や  $\text{BaCuSeF}$  薄膜においては目標値を上回る電気伝導性を示す薄膜の作製に成功した。また、新規 p 形 TCO 薄膜の開発にも成功し、最も高い電気伝導率と高い可視光透過率を示した。禁制帯幅  $E_g(\text{CuAlO}_2) = 3.1\text{eV}$ 、 $E_g(\text{新材料}) = 2.6\text{eV}$ 、電気伝導率  $12\text{ S/cm}$  ( $\text{BaCuSeF}$ )、 $21\text{ S/cm}$  (新材料) を達成し、中間目標 ( $E_g > 3.0\text{eV}$ ,  $\sigma > 10\text{Scm}^{-1}$ ) をクリアした。

#### ○溶液法とスパッタ法による薄膜形成 (新潟大)

溶液法とスパッタ法を用いて p 型透明導電膜を作製するための基礎技術を確認した。溶液法においては、硝酸金属原料溶液の塗布膜を窒素中熱処理する方法により、p 形  $\text{CuAlO}_2$  薄膜は  $800^\circ\text{C}$  以上で、p 形  $\text{CuYCaO}_2$  薄膜は  $900^\circ\text{C}$  以上で作製できることがわかった。また、スパッタ法においては、Ar 希釈酸素ガスと Cu と Al の金属ターゲットを用いた反応性スパッタ法により薄膜を堆積し窒素中  $800^\circ\text{C}$  以上で熱処理することにより p 形  $\text{CuAlO}_2$  相が出現することがわかった。

<成果発表件数>特許出願 (外国): 2(0)、論文 (査読付): 0(0)、研究発表・講演: 4、新聞・雑誌等への掲載: 0、展示会出展: 3

### 17) フルスペクトル TCO (旭硝子)

<H22 中間目標: 0.4 ミクロンから 1.4 ミクロンで光吸収率が 5% 以内 (浸液法で測定した TCO 基板としての透過率で 87%)、比抵抗  $1 \times 10^{-3}\ \Omega\text{cm}$  以下。この開発した TCO 基板をグループ内の他機関へ供給して太陽電池に適用し、低倍率集光時、真性変換効率 20% (有効受光面積:  $1\text{cm}^2$ ) を得る。H26 最終目標: 選定された材料の成膜プロセスに改良を加え、フルスペクトルに対して有効な光散乱・光閉じ込め効果を有する表面テクスチャ形状を付与する手法を開発する。0.4 ミクロンから 2 ミクロンの波長で光吸収率が 5% 以内、ヘイズ率 40% 以上で比抵抗

$1 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$  以下を達成する。この開発した TCO 基板を中心機関と連携して低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積:  $1\text{cm}^2$ ) を達成する。>

膜材料と成膜条件を探索して、概ね 1.4 ミクロンまでの透明性と電気伝導性を両立する薄膜を作製するべく、検討を進めた。H22 年度中間目標である透明性・電気伝導性を達成するために、Drude モデルにて必要特性の見積もりを行い、目標値を移動度  $80\text{cm}^2/\text{Vs}$  以上、シート抵抗  $12\Omega/\square$  以下と設定した。成膜条件を検討することで、移動度  $70\text{cm}^2/\text{Vs}$  は達成することができた。(目標  $80\text{cm}^2/\text{Vs}$ 、常圧 CVD での従来の特性は  $58\text{cm}^2/\text{Vs}$  程度)。膜厚方向の移動度分布を検討したところ、部分的には移動度  $80\text{cm}^2/\text{Vs}$  を達成出来ていることが確認出来た。この膜材料の光吸収率は 8.6%であり、中間目標値 (5.0%以下) には至っていない。今年度中の目標達成は一部未達になる可能性がある。

<成果発表件数>特許出願 (外国): 0(0)、論文 (査読付): 0(0)、研究発表・講演: 3、新聞・雑誌等への掲載: 0、展示会出展: 0

#### 18) グラフェン透明導電膜 (富士電機ホールディングス)

<H22 中間目標: 新規材料であるグラフェンを透明導電膜へ適用するための技術開発を行い、導電率  $6 \times 10^3 \text{ S/cm}$  以上、透過率: 80 %以上@380-2000 nmを得る。

H26 最終目標: シート抵抗:  $10 \Omega/\square$  以下、透過率: 90 %以上@380-2000 nm>

#### ○グラフェン製膜技術の基礎研究

製膜技術として湿式法 (化学的剥離) と CVD 法を選定した。湿式法では合成手法の最適化によるシートサイズの向上、CVD 方については追試、及び、より高品質化が見込める MBE 装置による製膜を行うこととした。湿式法で作製したグラフェン膜を用い、膜質評価技術 (ラマン分光、XPS、AFM)、透明導電膜特性評価技術 (分光光度計、ホール測定) の修得、立上げも併せて行った。

#### ○グラフェン製膜技術の開発

基礎研究において提案した新規製膜装置を設計・導入し、製膜条件最適化および膜物性と製膜条件の明確化を行った。CVD による成長と任意基板への転写について追試を実施。2 層程度 ( $0.7\text{nm}$ ) での導電率は  $20000 \text{ S/cm}$  程度と非常に高い導電率が得られた。この技術を用いて透明導電膜を作製することにより、中間目標 (導電率  $6 \times 10^3 \text{ S/cm}$  以上、透過率: 80 %以上@380-2000 nm) を達成できる見通しである。

<成果発表件数>特許出願 (外国): 5(0)、論文 (査読付): 0(0)、研究発表・講演: 3 新聞・雑誌等への掲載: 3、展示会出展: 0

### 3. 成果発表の件数

各研究開発項目の成果発表件数を表. 13 に示す。

表 13. 成果発表の件数

平成 22 年 5 月末現在

研究開発項目	特許出願		論文 (査読付)	研究発表 ・講演	新聞・雑誌 等への掲載	受賞 実績	展示会へ の出席
	国内	外国					
ポストシリコン超 高効率太陽電池の 研究開発	4	0	83 (79)	329	35	8	11
高度秩序構造を有 する薄膜多接合太 陽電池の研究開発	20	4	94 (83)	268	10	11	8
低倍率集光型薄膜 フルスペクトル太 陽電池の研究開発	22	0	29 (29)	175	15	6	10
計	46	4	206 (191)	772	60	198	198

なお、各委託先の論文リストを添付資料 2 に示す。

## IV. 実用化の見通しについて

### 1. 実用化の見通し

本事業の研究開発終了時点における目標は、2050年における変換効率および発電コスト目標の達成へのアプローチを探索し、可能性を実証することである。

従って本事業での研究開発は、一般には実用化までにもう一段、即ち次段階の実用化研究（量産化技術開発、スケールアップ研究開発、企業との共同研究など）に引き継がれる必要がある。

ここでは、現時点で考えられる各研究開発項目における実用化について表14にまとめる。

表14 各研究開発における実用化の状況・見通し

開発項目分野	実用化の状況・見通し
<b>ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発</b>	
(1)集光型多接合太陽電池	<p>AlGaInN系材料が持つ物性を発揮させることによって、理論通りの高い内部量子効率さらには変換効率を実現することが可能なことを明らかにできた。さらに、極めて優れたLED材料であるAlGaInNという特徴を活かすことによって、LED機能付きの太陽電池も実現するなど、当初の計画にはない成果も残すことができた。</p> <p>さらに、平成23年度より新たにSi太陽電池との融合を行うことによって、極めて付加価値の高いデバイスの発現が期待され、最終的な実用化の可能性は高い。</p> <p>逆積み構造3接合セルの実用化に向けて、量産エビ技術を平成22年度中に確立する。また、逆積み構造3接合セルにおいて500倍以上の集光倍率と43%以上の効率を早期に実現し、信頼性を確立し集光システムへ適用する（平成25年度までにフィールドテスト投入）。宇宙航空研究開発機構（JAXA）と連携し、逆積み構造3接合セルの宇宙実証を行う。耐環境性などの評価試験を実施し、平成25年度以降に国内衛星向けセルとして実用化していく。</p> <p>4接合太陽電池の研究開発では、課題であるInGaAsN膜の高品質化と単接合セルの高効率化の見通しを得た。多接合太陽電池の集光動作解析では、成膜中の歪緩和のリアルタイム観測による転位挙動の解析、および開発した集光動作特性解析シミュレータによる集光動作特性解析が可能となった。本研究の成果を発展させ、シャープと協力して3接合、4接合太陽電池の高効率化を図ることにより、最終目標の非集光時変換効率35%、1000倍集光時変換効率45%の達成は可能であると考えられる。</p> <p>集光技術と組み合わせることにより低コスト化も可能であり、本技術の実用化は十分に期待できる。</p>
(2)高効率量子タンデム太陽電池	<p>量子井戸挿入、量子ドット、およびGaInNaAs:Sbバルク層挿入による多接合太陽電池の電流マッチング改善による変換効率向上（最終目標45%）に関しては、現段階で当初計画を上回るペースで短絡電流の増大が量子井戸・量子ドットともに得られており、シャープが開発した非集光下での変換効率世界記録を誇る3接合セルにこれらの技術を取り込んで、さらなる効率向上を目指す必要がある。この際、量子井戸はMOVPE法で成長されているため、シャープへの技術移転が現実的な視野に入っており、H23年度以降世界をリードできる研究開発体制の構築が必須である。量子ドットおよびGaInNaAs:Sbバルク層に関してはMBE法で作製されているため、まずはシャープから供給されるGeセル上に東大のMBEでGaInNaAs:Sb/GaAsの多接合構造を形成し、世界最高記録のデモンストレーションを行い技術優位性を確保した上で、シャープの多接合セル作製技術への導入を検</p>

	<p>討する。</p> <p>反射防止ナノ構造や、プラズモンを用いた光マネジメントに関しては学会レベルでも最新データの発表が相次いでおり、III-V 半導体を用いた高効率セルにも適用可能な効率向上技術として研究開発競争が激化している。本プロジェクトにおける成果はこのような潮流のなかで相応なイニシアチブをとるものであるが、今後も技術優位性を保つためには、サブテーマ間の連携を含めた一層の研究開発強化が必要である。</p> <p>InGaN セルに関しては、当初計画を大幅に上回る高品位なセルが作製できており、基礎技術の確立という当初計画から大幅に上方修正して、世界で類を見ない高品位 InGaN セルの低コスト・大面積製造技術として展開できる局面に達している。</p>
<p>(3)量子ドット超格子を基板とした超高効率太陽電池</p>	<p>量子ドットを用いた中間バンドセルに関しては、当初計画を上回るペースで高品位な量子ドット超格子の作製に成功しつつあり、つねに世界をリードする成果を発表している。実用化に向けた2光子吸収の確認には現在のところ至っていないが、この目標に向けて着実に結晶品位の向上と解析技術の高度化を進めている。また、中間バンドセルの実現に関しては世界的に大きな注目を集めており、引き続き我が国の技術優位性を確保できる強力な研究開発体制が必須となっている。</p> <p>Sb 導入による高密度・高均一 InAs/GaAs 系量子ドットの自己形成法については、すでに特許出願しており、太陽電池応用に限らず実用化の可能性が期待される。面内量子ドット超格子構造およびその太陽電池応用については、今後の作製技術の向上と原理検証によって高効率を実証して、実用化の可能性を探る。</p>
<p>(4)ハイブリッド素材による超高効率多接合型太陽電池</p>	<p>界面電荷移動型セルにおいては、まったく新規光電変換素子の考え方を提案するものであり、着実に光電変換の効率向上と長波長化を達成してきた。また、1eV 帯での光電変換を目指した素材についても、素材の絞り込みにも目途が付き、研究開発の方向性が明確になりつつある。金属ナノ粒子吸収型セルにおいては、これまで未解明であった光電変換機構を明らかにし、セルの高効率化に向けた検討に着手してきた。ハイブリッド素材のナノ構造の評価制御技術並びに、金属ナノ粒子のサイズ、形状、配列の制御技術が長波長領域での高効率光電変換を達成するための根幹であり、これらの研究開発体制の強化が必須である。ハイブリッド素材を用いたセルでは、実用化に向けた要素技術確立にあと一步のところまで来ている。国産の太陽電池技術を盤石なものとするためにも、基盤研究段階においてこそ、十分な研究体制を構築することが不可欠と考える。</p> <p>電気化学プロセスにより CIS 系太陽電池を作製し、6.7%の効率を得ている。今後、太陽電池の電極・光学設計の最適化により、10%程度の効率の実現が期待される。その効率は、高価な真空プロセスによる実用的太陽電池特性と比べてほとんど遜色ないことから、低コストを実現して早期の実用化が期待される。</p>
<p><b>高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発</b></p>	
<p>(1) シリコン系 3 接合太陽電池の開発</p>	<p>高配向性平面ポリシラン材料の開発においては、ポリシラン薄膜の構造とデバイス特性、ならびに薄膜のバンドギャップとデバイス特性の相関関係を明確化にして、デバイスの最適化を図り、デバイス特性を向上化させることにより実用化につながる。</p> <p>ヘテロ接合デバイス化技術の開発においては、バンドオフセットの評価技術、ヘテロ接合太陽電池の i 層バンドギャップの最適化技術は、現行の単結晶シリコン系ヘテロ接合太陽電池にも適用可能であり、早期の実用化が期待される。</p> <p>配列制御ナノ結晶シリコン材料の開発については、量子サイズナノ</p>



	<p>結晶シリコン膜の作製プロセス技術、バンドギャップ制御、光電特性の基礎評価、の当初目標をほぼ達成し、量子閉じ込めとキャリア輸送が両立しうることが明らかになった。変換効率を決める主要因子であるバンドギャップ制御と界面トラップ低減についても基礎技術が固まりつつあるので、トップセルの材料として活用できる見通しは十分にある。</p> <p>ガラス基板上のシリコン・ゲルマニウム等単結晶シード層形成技術については、基板として用いるガラス上シリコン単結晶薄膜のコストが将来的な課題の一つではあるが、反応性熱 CVD 法は構成が単純で、成膜速度も速く、大面積化も容易と考えられるので、長期的には実用化の見通しはある。</p>
(2) 化合物系 4 接合太陽電池の開発	<p>酸化物ワイドギャップ材料の開発 a-IGZO は低温で製膜可能なため、接合作製時に界面での反応などの心配が無いため、これを用いた研究が上手く進展すれば実用化段階へスムーズに移行が見込める。</p> <p>革新的ワイドギャップ材料太陽電池の開発については、量子ドット太陽電池の研究は世界的に見てもは始まったばかりで変換効率はまだ 10 数%程度であるが、高効率化のポテンシャルが高く実用化の可能性は大きい。</p> <p>化合物系タンデムセルの開発については、現時点では原理実証を中心に研究開発を段階であるが、平成 23 年度以降に各技術をさらに高度化・単純化することで、工業的に応用可能な技術になる。</p> <p>ワイドギャップカルコゲナイド系太陽電池の開発において、ワイドギャップ CIGSSe 太陽電池の高効率化技術は国内外で注目されている重要課題である。本研究のように、課題ごとに専門家において、系統的な研究開発を進めている例は他になく、高効率化に必要な基本技術にできるだけ早く目処をたて、実用化を進めるところである。</p>
(3) 新概念新材料の検討	<p>単結晶有機半導体を用いた新概念太陽電池の検討については、現時点で太陽電池にするための様々な課題を抱えているが、イオン液体を用いた高温真空下での有機薄膜・結晶の作製は、既存の溶媒-冷却法と比べて、遥かに短時間（1 時間以内）で作製することができること確認している。この高速合成は、実用化において重要な要素であり、有機単結晶合成法として様々な分野で実用化が見込める。</p> <p>ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討においては、半導体 CNT を用いた太陽電池はまだ研究の緒に就いたばかりであり、実用化に向けては解決すべき様々な課題があるが、例えば、n 型電気伝導性の実現や、単一半導體層 CNT では確認されている MCG 効果の p n 接合やバルクヘテロ構造での発現、高純度な半導体 CNT の大量抽出技術開発などを行うことにより実用化が見込める。</p> <p>単結晶有機半導体を用いた新概念太陽電池の検討については、有機半導体の単結晶での高性能化、即ち従来のバルクヘテロ接合を凌ぐ変換効率の検証が重要である（原理検証）。高生産性の有機単結晶の形成技術、同太陽電池化技術の確立を行うことにより、2030 年以降に実用化が見込める。</p> <p>強相関材料を用いた新概念太陽電池の検討については、これまでの研究から、有機化合物半導体を用いることによって、従来の単成分系有機半導体材料では不可能であった 1 eV 以下の赤外域光電変換の確認に成功するとともに、有機太陽電池の高効率化を阻んできた励起子拡散距離を著しく巨大化できることが明らかになった。さらに単結晶デバイスの逆バイアス下での実験から、薄膜多層化による高効率化が示唆されている。以上の特徴を活用し、今後、構成部材の最適化と、実用に即したデバイス構造を構築することにより高効率化が一気に進み、実用化への突破口が開かれると期待される。</p>

<p>(4) 高度光利用技術の開発</p>	<p>プラズモンを用いる高度光閉じ込め技術の開発については、「プラズモン活用型透明導電層」は、従来のテクスチャーTCOと比較して、平坦で、高い光拡散能（設計により波長選択性を持たすことが可能）を有することが実証できている。ただ、本プログラムの最終目的は「多層構造太陽電池」の性能向上であるため、様々な要素太陽電池系の作製プロセスに整合した「プラズモン活用型透明導電層」の開発が必須であり、この実際的なポイントをクリアできれば、実用化の可能性が、極めて高いものと期待される。</p> <p>また、新規光閉じ込め構造を用いた高度光閉じ込め技術の開発については、低コスト生産技術の開発が前提となるが、薄膜シリコン太陽電池への実用化は十分考えられる。また、平坦性及び耐久性（耐熱性・反応安定性等）が担保できれば、シリコンに限らず幅広い太陽電池に適用できる可能性がある。新規波長弁別中間層についても、その効力は確認されており、多層構造が安価に製造できるようになれば、実用化の見込みは大きい。</p> <p>高性能ガラス基板作製技術を使った高性能透明導電膜の開発においては、種々のナノパターンガラス基板の作製が成功し、量産性もあり、十分に実用性があり、当該ガラス基板に興味を示している大手企業もある。</p> <p>透明導電性接着剤を用いたメカニカルスタック技術の開発については、様々な材料との接着性、凸凹面での接着性に優れる点で、独立に作製された異種太陽電池の多接合セル形成に有用であり、実用性が高い。なお、透明導電性接着剤の材料構成、工程内容の最適化を着実に進めることにより、大面積・均一な信頼性の高い実用的接合技術として確立できると考えられる。</p> <p>樹脂とTCOを介したメカニカルスタック技術の開発については、接合のプロセス温度が低く、接着力、接触抵抗、タクトなど生産性にも優れた方法といえる。また、簡便に二端子構造でかつ先に積層された層による制約の少ない条件で後の層が積層することができる多接合太陽電池を提供することができる。今後太陽電池に特化した樹脂および導電粒子を開発すること、二端子セル（モジュール）での効果の実証ができれば実用化に近づく。</p> <p>高性能透明導電膜の開発においては、現状使われているIn2O3系透明導電膜（ITO, IZOなど）の性能向上を行っており、これらの技術については、メーカーでの高品質TCOの開発に資するものである。</p>
<p><b>低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発</b></p>	
<p>(1) バンドエンジニアリング</p>	<p>Si ナノドット膜の欠陥密度低減と不純物拡散の抑制、薄膜形成技術の開発が進み、中間目標の真性変換効率5%（Si ナノドット単接合）を達成できる見通しである。またマルチエキシトン生成等による量子効率の倍増効果の原理も実証されており、最終目標の10%が達成に向けて順調に進捗している。10%が達成できれば、Si 量子ドット単接合太陽電池として実用化の可能性が高まる。さらに、薄膜フルスペクトル太陽電池のミドルセルとして大面積、低コスト化技術開発に展開による実用化の可能性が高い。</p> <p>ワイド/ナローギャップ材料等の薄膜新材料の探索については、特にCuIn(Se<sub>1-x</sub>Te<sub>x</sub>)<sub>2</sub>等ナローギャップ材料に有望なものが発掘され、今後期待される。Geの遷移型制御の開発については、歪Ge太陽電池が、約400分の1の薄膜化が可能であることが示したことでGe太陽電池の大幅な低コスト化に繋がる可能性がある。今後は、本研究が提案する太陽電池構造を作製、セルによる有効性を示すことにより、実用化への見通しを得る。最終目標の達成が見えてくると薄膜フルスペクトル太陽電池のボトムセル、大面積・低コスト薄膜材料としての実用化</p>

	の可能性が高まる。
(2) 薄膜フルスペクトル太陽電池	<p>シリコン系薄膜太陽電池は、低倍率集光により性能が向上することが世界で初めて実証された。今後、2接合レベルで低倍率集光時に15%近い変換効率が得られれば、まず、2接合タンデムの低倍率集光セルから実用化が始まると期待される。</p> <p>広バンドギャップシリコン系薄膜については、高開放電圧・高変換効率化多接合型薄膜太陽電池技術ならびに新規評価技術の開発成果をもって、自社開発の多接合薄膜Si太陽電池モジュール生産技術に適用、平成26年度から変換効率13%のスペックを持つモジュール製品に反映させる予定である。</p> <p>サブセル界面接合技術については、多接合太陽電池技術において高効率の太陽電池を創出する手段として有効であり、本プロジェクトの目標が達成できれば、実用化の可能性は極めて高い。</p> <p>カルコパイライト系集光型セルの開発においては、Ag系トップセル太陽電池の作製技術を確立（変換効率約6%）、1.4eV帯用ミドルセルとしての高Ga組成CIGS膜の新規作製手法としてSeクラッキング、Gaイオン化、多段階法（変換効率約11%）を提案、1.1eV帯用ボトムセル太陽電池においては約7倍集光下で小面積ながら中間目標値の20.3%を既に達成し、集光型セルとして非常に有望である。</p> <p>カルコパイライト系トップセルについては硫化物系のカルコパイライト太陽電池で基本的な成膜技術・太陽電池セル化技術を確立した。CuInS<sub>2</sub>の世界最高効率が11%程度であり、本研究では8.5%が研究開始1年で得られており、比較的高い値が得られているといえる。本太陽電池はフルスペクトル太陽電池のトップセルのみならず、Egを制御することでシングルセルとしても利用できるため、シングルセルとしての実用化も期待できる。（欧州では硫化物系カルコパイライトのシングルセルが既に実用化されている）</p> <p>集光型CdTe薄膜に関しては直列抵抗が高いとの問題点を有しているが、この点が改善できれば、現状で15%以上の変換効率が得られていることから、禁制帯幅1.4～1.5eVの太陽電池の中では低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の構成材として最も有望な太陽電池であると考えられる。</p> <p>以上のような進捗により、Si系およびカルコパイライト系薄膜集光型セルの設計、光学設計、界面接合技術の開発等により中間目標の真性変換効率20%（低倍率集光、単接合）を達成することができた。この成果をもとにした、1sunで35%の薄膜フルスペクトル太陽電池の実用化の可能性は大きい。</p> <p>また、「バンドエンジニアリング」および「光のマネージメント・TCO」で開発された技術を合わせ、最終目標である低倍率集光多接合セルで真性変換効率30%が達成できれば、太陽光発電ロードマップにある2050年までの「変換効率が40%超」かつ「発電コストが汎用電力料金並（7円/kWh）」の太陽電池の実用化に寄与できる可能性が極めて高くなる。</p>
(3) 光のマネージメント・TCO	<p>表面プラズモンを利用した半導体太陽電池の開発においては金属粒子の担持によって表面プラズモンによる反射率低減に成功し、その効果は実証された。この技術を利用し、最終目標である光電流10%向上が実現できれば、シリコン系薄膜太陽電池はもちろん、超薄型バルクシリコン系太陽電池の高効率化の要素技術としての実用化につながる。p型透明導電膜材料の有効性が確認され、中間目標の電気伝導率10Scm<sup>-1</sup>をクリアできたことで、最終目標の真性変換効率30%に大きく一歩前進でき、実用化の可能性が高まった。</p> <p>新規材料としてのグラフェン透明導電膜の開発では、中間目標</p>

	(6000S/cm) を大きく上回る 20000S/cm を達成できたことでシリコン系 3 - 5 接合薄膜太陽電池等の太陽電池以外にも含めた透明導電膜としての実用化の可能性もでてきた。
--	---

## 2. 波及効果

本事業は、2050年までに変換効率40%超の超高効率の実現を目指し、新材料、新構造等を利用した革新的な太陽光発電技術の開発を目的としている。

本事業の太陽電池分野での波及効果として、集光型太陽電池技術の宇宙用・自動車用への適用、メカニカルスタックによる多様な多接合太陽電池の出現、光マネジメントの他太陽電池への適用等の可能性がある。

また、太陽電池以外への波及効果としては、量子ドットを用いた高速通信デバイスの高度化、新規な3次元実装デバイスの出現（オプトエレクトロニクスにも展開可能）、単結晶薄膜による低コスト高性能デバイスの発展（民生応用も）、新材料の開発による多様な応用の創製、透明導電膜のディスプレイへの適用開発の可能性がある。

なお、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。