

「ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発－窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発」(中間評価)第一回分科会
資料5

「ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発－窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発」

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 ナノテクノロジー・材料技術開発部
-----	---

—目次—

概要

プロジェクト用語集

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
 - 1.1 NEDOが関与することの意義…………… I-1-1
 - 1.2 実施の効果(費用対効果)…………… I-2-1
- 2. 事業の背景・目的・位置付け…………… I-3-1

II. 研究開発マネジメントについて

- 1. 事業の目標…………… II-1-1
- 2. 事業の計画内容…………… II-2-1
 - 2.1 研究開発の内容…………… II-2-1
 - 2.2 研究開発の実施体制…………… II-3-1
 - 2.3 研究の運営管理…………… II-4-1
- 3. 情勢変化への対応…………… II-5-1

III. 研究開発成果について

- 1. 事業全体の成果…………… III-1-1
- 2. 研究開発項目毎の成果…………… III-2-1-1
 - 2.1 高品質大口径単結晶基板の開発…………… III-2-1-1
 - 2.2 高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発…………… III-2-2-1
 - 2.3 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価…………… III-2-3-1

IV. 実用化の見通しについて

- 1. 実用化の見通しについて…………… IV-1-1
 - 1.1 高品質大口径単結晶基板の開発…………… IV-1-1
 - 1.2 高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発…………… IV-2-1
 - 1.3 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価…………… IV-3-1

(添付資料)

- ・イノベーションプログラム基本計画…………… V-1-1
- ・プロジェクト基本計画…………… V-2-1
- ・事前評価関連資料(事前評価書)…………… V-3-1
- ・特許論文リスト…………… V-4-1

概要

最終更新日 平成21年8月20日

プログラム（又は施策）名	I T イノベーションプログラム・ナノテク・部材イノベーションプログラム・エネルギーイノベーションプログラム					
プロジェクト名	ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発－窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発	プロジェクト番号	P07030			
担当推進部/担当者	ナノテクノロジー・材料技術開発部 担当者 大井川欽哉（平成21年8月現在） ナノテクノロジー・材料技術開発部 担当者 福井 徹（平成19年6月～平成19年9月）					
0. 事業の概要	<p>高周波デバイス、高出力デバイス等の高性能電子デバイスは今後の21世紀社会を支える情報家電、コンピュータ、情報通信機器から自動車、医療機器に至るまで極めて広範な分野の製品の高機能化や制御を実現する中核的役割を果たす存在で、窒化物半導体はそれを実現する材料として大きな期待が寄せられています。しかし、既存の結晶作成技術ではこれらのデバイス用に求められる品質レベルに十分対応できず、その実用化に大きな制約となっている。</p> <p>本プロジェクトでは、従来の半導体材料では実現できない領域で動作可能な高出力・超高効率の電力素子、超高速電子素子などの作製に必要な窒化物半導体結晶成長技術の確立を目指し、①高品質大口径単結晶基板の開発、②高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発、および③窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作成と評価に取り組み、我が国のエネルギー削減に大きく貢献することを目的とする。</p>					
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>新・国家エネルギー戦略（2006年5月経済産業省）では、2030年に30%以上のエネルギー消費効率の改善を目標として掲げている。本目標を達成するためには、次世代省エネデバイスである窒化物系化合物半導体の早期実用化が望まれているところであるが、既存の単結晶基板成長技術やエピタキシャル成長技術では、従来の半導体では実現できない領域で動作可能なハイパワー、超高効率デバイス性能を十分に引き出すには至っていない。しかし、現段階で市場が存在しない中での大規模な設備投資が必要な材料開発となることから研究開発のリスクが高く、このため民間企業のみで事業を行うことは困難である。</p> <p>また、本事業は最先端のナノエレクトロニクスの研究開発のため、技術的に見ても企業等の競争に委ねるよりも大学あるいは研究所を拠点に材料メーカー、デバイスメーカー、装置メーカー等が総合的に各々のシーズを動員活用して相互連携の下に競争前段階の基盤技術（窒化物半導体の結晶欠陥低減技術やナノ構造作製技術等）の革新を国家プロジェクトとして推進することが効率的である。</p>					
II. 研究開発マネジメントについて						
事業の目標	<p>本事業（以下の①②③）を実施し、2014年頃から従来の半導体材料では実現できない領域で動作可能なハイパワー・超高効率の電力素子、超高速電子素子が実用化され、我が国のエネルギー消費量削減に大きく貢献する。省エネ効果は、汎用インバーターのみをとっても2030年において原油換算281万kL（インバータ用電力：8,785万kL 普及率：80% 削減率：4% =省電力（281万kL）に相当する。</p> <p>① 高出力デバイス作製に必要な大型／高品質窒化物単結晶基板を作製する。 ② 新たなエピタキシャル成長法を開発し、①で作製した口径4インチの有極性、及び口径3～4インチの無極性窒化物半導体バルク基板上において、低欠陥高品質 GaN、及び AlN-GaN-InN 混晶エピ層を実現する。 ③ ①②を用いて有極性単結晶基板上 FET（電界効果型トランジスタ）と無極性単結晶基板上 FET を作製し、特性の差違、及びその利害得失の明確化する。また、広い混晶組成域における耐圧と結晶欠陥の相関を明確化し①、②へフィードバックする。</p> <p>また、国際標準化に向け、窒化物半導体材料の特性評価の最適手法等の検討を行うと共に、非鉄金属産業戦略（平成18年5月）の「化合物半導体産業戦略」に則り、化合物半導体ロードマップの策定等を通じ、シリコンでは提供できない特性を有する半導体ウェーハ需要の開拓を行う。</p>					
事業の計画内容	主な実施事項	H19fy	H20fy	H21fy	H22fy	H23fy
	①高品質大口径単結晶基板の開発	→	→	→	→	→

	②高品質大口徑エピタキシャル成長技術の開発	→	→	→	→	→
	③窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価	→	→	→	→	→
	成果とりまとめ					→
開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載) (単位：百万円)	会計・勘定	H19fy	H20fy	H21fy	H22fy	H23fy
	一般会計					
	特別会計(需給)	478	860	320	(332)	
	加速予算	108	40			
	総予算額	586	900	320	(332)	
開発体制	経産省担当原課	製造産業局非鉄金属課				
	プロジェクトリーダー	福井大学 葛原正明(平成21年7月～) 名城大学 天野 浩(平成19年6月～平成21年7月) サブリーダー 大阪大学 森勇介、名城大学 天野浩				
	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)	企業、研究機関：(国)大阪大学、(国)福井大学、(学)名城大学 昭和電工(株)、住友電気工業(株)、サンケン電気(株) 管理法人：(財)金属系材料研究開発センター(参加4社) 豊田合成(株)、日本ガイシ(株)、シャープ(株)、(株)豊田中央研究所 再委託先：古河機械金属(株)				
情勢変化への対応	<p>ナノテクノロジー・材料技術開発部主催による「技術推進委員会(年1回)」を開催して外部有識者の意見を運営管理に反映している。</p> <p>平成19年度の第一回技術推進委員会では、委員会提言として「基板・エピグループから【基板】が流れ出るためのグループ間の連携強化」がなされ、対応策として「研究加速による基板供給スピードのアップ」の見直しを行った。</p> <p>その結果、加速資金等の支援を得て基板供給がスピードアップし、展示会ナノテック2009では①「世界最高品質2インチ有極性GaN基板の実現」、②「世界初めてAlGaInの原子レベル成長の実現」、③「内製有極性AlGaIn/GaNエピ上にHEMTで高ドレイン電流の実現」の3つの世界初の成果について広く情報発信を行った。</p> <p>また、平成20年度の第二回技術推進委員会では、「バルク基板の実用化を前倒しする単結晶長尺化等の取り組みが必要」との委員会提言があり、現在、窒化物結晶長尺化技術開発のためのGa連続供給機能付結晶育成装置導入について検討を行っており、機械装置及び消耗品等の費用増が今後の課題である。</p>					
評価に関する事項	事前評価	平成18年度実施 担当部 ナノテクノロジー・材料技術開発部				
	中間評価	平成21年度 中間評価実施				
	事後評価	平成23年度 事後評価実施予定				

<p>Ⅲ. 研究開発成果について</p>	<p>研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」においては、溶液攪拌強化による 面内成長厚さ、品質バラツキ低減を実施したところ、機械的揺動と熱対流の組み合わせによる攪拌において、各種揺動条件を検討することにより、φ3インチ基板の全面にLPE 成長することができた。面内の厚さバラツキはφ2インチと同等であった。φ2インチ高品質有極性基板、無極性基板の結晶性改善を実現し、導電性制御技術を確立した。</p> <p>研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」においては、高速バルブスイッチングで良好なHFET構造を実現し、またAlN基板の有用性を世界で初めて実証した。加圧システムへの窒素及び水素の安定供給実現したところ、Al_{0.25}Ga_{0.75}N(100nm)/GaN でX線半値幅160秒、AFM荒さ指数0.7nmを達成し、大口径基板上の高均一・高品質結晶成長技術を開発した。また、圧力印加により、GaInN 中のInN モル分率の増加を実証し、圧力印加成長の有用性確認した。</p> <p>研究開発項目③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価」においては、研究開発項目①で育成したGaN基板上に研究開発項目②でAlGaN/GaNヘテロ接合をエピタキシャル成長し、その上にプロセス要因を極力排除した標準プロセスを用いて、プレーナ円形ゲート構造の電界効果トランジスタを作製した。試作したゲート長3μmの素子において、最大ドレイン電流510mA/mmの良好な特性を確認した。また、同GaN基板上に作製した縦型p-nダイオードにおいて、1kVを超える逆耐圧が実測され、市販HVPE基板に対する逆耐圧特性の優位性を確認した。</p> <p>以上から、各Gとも平成20年度の研究開発目標は達成し、平成21年度目標の早期達成に向けて研究開発を実施中である。</p>	
	投稿論文	「査読付き」10件、「その他」40件
	特 許	「出願済」32件、「登録」0件、「実施」0件
	その他の外部発表 (プレス発表等)	COMPOUND SEMICONDUCTOR、Volume14 No. 4. P. 20 (2008)
<p>Ⅳ. 実用化の見通しについて</p>	<p>プロジェクトリーダーとともに著名な研究者をグループリーダーとして配し、基板、エピ、デバイスの各グループの有する研究開発ポテンシャルを最大限活用することにより効率的な研究開発を実施し、従来の半導体材料では実現できない領域で動作可能なハイパワー・超高効率の電力素子、超高速電子素子等の作製に必要な窒化物半導体結晶成長技術の確立を行うことにより、2014年頃からハイパワー・超高効率の電力素子、超高速電子素子が実用化され、我が国のエネルギー消費量削減に大きく貢献する。汎用インバータのみをとっていても、省エネ効果は2030年において原油換算281万kLに相当することが期待される。</p>	
<p>Ⅴ. 基本計画に関する事項</p>	作成時期	平成19年3月 制定
	変更履歴	平成20年7月 イノベーションプログラム基本計画の制定により「(1)研究開発の目的」を改訂

プロジェクト用語集

No.	用語	意味・説明
1	アノード電極	素子に電流が流れこむ電極
2	エピタキシャル	Epitaxial とは軸の上にという意味で、基板結晶の上に、基板結晶の軸と同じ方位関係になるような結晶を成長すること、またはその状態である。
3	オーミック	電圧－電流特性が比例する特性。金属と半導体の接合が良好な場合に現れる特性。
4	オン抵抗	FET(電界効果トランジスタ)のドレイン電極とソース電極間の抵抗値の事。オン抵抗が小さいほどFETの損失が小さくなる。
5	欠陥	半導体結晶は原子が規則正しく整列した構造からなる。しかし実際には完全に規則正しく並んでいるのではなく、各種の欠陥が存在する。不純物が混じった欠陥、正規の位置が空になった欠陥、少しずれた欠陥(以上点欠陥)、それが面状に集合した欠陥(転位欠陥)等が知られている。欠陥は半導体の特性に大きな影響をおよぼす。
6	カソード電極	素子から電流が流れ出す電極
7	グレイン	結晶粒のことで、一つ一つのグレインは単結晶である。
8	ゲート	FET(電界効果トランジスタ)の端子の一つで、電圧を印加してFETに流れる電流を制御する電極。
9	コラプス	トランジスタにおいては高電力動作時の大きなドレイン電圧を印加した場合にドレイン電流が減少するという問題
10	混晶	2種以上の物質が混合して一つの均一な結晶をつくったもの。
11	昇華法	気相法の一つで輸送媒体を何も使わずに、反応管に温度差を設けて高温側に原料を、低温側に種結晶を置き、高温で昇華した物質が温度勾配に沿って低温部に輸送され基板に再結晶させる方法。解離蒸気圧の高い結晶材料の成長に利用される。
12	自立基板	種基板上に成長させた厚膜単結晶より下地基板を機械的あるいは化学的に処理して除去した、下地基板なしで存在する単結晶。単独で自立的(フリースタANDING)に存在できるバルク単結晶を指す。
13	ソース	FET(電界効果トランジスタ)の端子の一つで、FETに流れる電流の出口。
14	ダイオード	電流を一定方向にしか流さない作用を持つ整流素子。
15	チャネル	FET(電界効果トランジスタ)で電流が流れる半導体の部分
16	転位	半導体結晶中に含まれる線状の欠陥のこと。
17	テンプレート基板	サファイヤ等の下地基板上にGaN薄膜が成長された基板。
18	ドレイン	FET(電界効果トランジスタ)の端子の一つで、FETに流れる電流の入口。
19	n型ドーパント	母体結晶の中で、結合の手となる電子を一つ余分に持っている不純物原子が格子位置に入ると、余分な電子は活性化し自由に動ける伝導電子となり、半導体結晶に電気伝導性を与える。この種の不純物元素をn型ドーパントという。n型ドーパントの中で電子を放出できる

		ものをドナー(Donor)という。ドナーは電子を放出して自身はプラスにイオン化する。
20	バッファ層	格子定数が大きく異なる層を連続して積層する場合に、格子定数差を緩和(バッファ)ために2層間に挿入される薄い層のこと。
21	p型ドーパント	n型半導体とは逆に、母体結晶の中に結合の手となる電子が一つ不足している不純物原子が格子位置に入ると、価電子帯に空きが生じる。この空きはホール(hole: 正孔)といわれ、他の価電子と位置を交換し、伝導電子と逆のプラス電荷を持って結晶内部を自由に動き、電子と同様に半導体結晶に電気伝導性を与える。この種の不純物元素をp型ドーパントという。p型ドーパントの中ホールを放出できるものをアクセプタ(Acceptor)という。アクセプタは電子を取り込んで(ホールを放出して)自身はマイナスにイオン化する。
22	pn接合	p型半導体結晶とn型半導体結晶の接合で、発光・整流等の半導体デバイスの機能を発現する部分。
23	ピンチオフ	ゲートに電圧を印加して、ソース・ドレン間の電流が流れなくなる状態。
24	フラックス法	フラックス(溶媒)中に溶解した単結晶の成分(溶質)から単結晶を析出させる方法。溶液に対して種結晶の温度を低く保つことにより種結晶を成長させて大型の単結晶を得る。
25	ヘテロ成長	成長させる結晶とは異なる物質を基板として用いる結晶成長のことをヘテロエピタキシャル成長。例えば、サファイア基板上へのGaNの成長はヘテロエピ成長である。ヘテロ接合は物質の異なる結晶間の接合状態をいう。
26	ホモエピ成長	成長させる結晶と同じ物質を基板として用いる結晶成長。
27	無極性基板	有極性基板で発生する分極効果の無い基板であり、a面やm面基板を指す。分極によるデバイス特性劣化は生じないが、有極性基板より作製が困難。
28	メサ	デバイス形状の一つで、凸型の形状を指す。
29	リーク電流	トランジスタの内部で漏れ出している動作とは関係の無い電流。
30	有極性基板	現在実用化されている一般的なGaN基板であり、C面基板の事を指す。基板に垂直な方向に発生する分極効果によりデバイス特性が劣化する。
31	AFM	Atomic Force Microscopeの略。原子間力顕微鏡の事で、試料と探針の原子間にはたらく力を検出して原子レベルの分機能が得られる顕微鏡。
32	ALE	Atomic Layer Epitaxyの略。原子層エピタキシャル成長の事で、1原子層ずつ成長する状態を指す。
33	ELO	Epitaxially Lateral Overgrowthの略。結晶を横方向に成長させる事により、結晶欠陥を低減させる方法
34	EPD	Etch Pit Densityの略。基板を特定のガスや液体でエッチングした際に発生するピット(穴)密度の事で、欠陥の密度にほぼ対応する。
35	TEG	Test Element Groupの略。デバイスで発生する設計上や製造上の問題を見つけ出すための評価用の素子
36	FET	Field Effect Transistorの略。ゲート電極に電圧をかけ、チャンネルの電

	(電界効果型トランジスタ)	界により電子または正孔の流れに閘門(ゲート)を設ける原理で、ソース、ドレイン端子間の電流を制御するトランジスタ。
37	FWHM	Full Width at Half Maximumの略。X線回折強度の広がりの程度を表す指標。 値が小さいほど、結晶品質が優れている事を示す。
38	HFET	Hetero junction FETの略。ヘテロ接合を用いたFETを指す。
39	HVPE	Hydride Vapor Phase Epitaxyの略。原料に金属(Al)、塩化水素、アンモニアを用い、気相熱分解によりAIN厚膜を成長する方法で、成長速度が数百 $\mu\text{m}/\text{時}$ とMOVPEと比べて、10~100倍と高く、単結晶基板作製の工法の一つ。
40	LPE (液相エピタキシ)	Liquid phase epitaxyの略。結晶成長の方法として、溶液から固相結晶を基板の配向性を維持させながら晶出させる方法である。
41	MOVPE (有機金属気相エピタキシ)	Metal-Organic Vapor Phase Epitaxyの略。原料として有機金属やガスを用いた結晶成長方法原子層オーダで膜厚を制御することができるため、半導体レーザを初めとする数nmの設計が必要な分野で用いられる。
42	PL (フォトルミネセンス)	Photoluminescenceの略。半導体に光を照射した際に生じる発光現象で、半導体中の不純物評価等に用いられる。
43	SIMS	Secondary Ion-microprobe Mass Spectrometerの略。試料にイオンビームを照射して飛び出したイオンの数を数えることによって、試料の化学組成などを評価する方法。
44	TEM	Transmission Electron Microscopeの略。透過型の電子顕微鏡観察方法。
45	2DEG (二次元電子ガス)	Two Dimensional Electron Gasの略。半導体中で二次元状に電子が分布する状態を示す。半導体同士や半導体と絶縁体を接合することで、半導体中に電子が充満する。これを電子ガスといい、これが通常、二次元状に分布するため、二次元電子ガスと言う。
46	XRC	X-Ray Rocking Curveの略。X線ロックングカーブの事で、X線回折強度の角度分布を精密に測定した曲線を指す。
47	XRD	X-Ray Diffractionの略 X線の回折により結晶性を評価する方法。

I. 事業の位置付け・必要性について

1. NEDO の事業としての妥当性

1.1 NEDO が関与することの意義

新・国家エネルギー戦略(2006年5月経済産業省)では、2030年に30%以上のエネルギー消費効率の改善を目標として掲げている。本目標を達成するためには、次世代省エネデバイスである窒化物系化合物半導体の早期実用化が望まれているところであるが、既存の単結晶基板成長技術やエピタキシャル成長技術では、従来の半導体では実現できない領域で動作可能なハイパワー、超高効率デバイス性能を十分に引き出すには至っていない。しかし、現段階で市場が存在しない中での大規模な設備投資が必要な材料開発となることから研究開発のリスクが高い。このため民間企業のみで事業を行うことは困難である。

また、本事業は最先端のナノエレクトロニクスの研究開発のため、技術的に見ても企業等の競争に委ねるよりも大学あるいは研究所を拠点に材料メーカー、デバイスメーカー、装置メーカー等が総合的に各々のシーズを動員活用して相互連携の下に競争前段階の基盤技術(窒化物半導体の結晶欠陥低減技術やナノ構造作製技術等)の革新を国家プロジェクトとして推進することが効率的である。

3 ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 中間評価委員会(2009.8.31) 事業原簿 I-1-1 公開

1. 事業の位置付け、必要性について
(1)NEDOの事業としての妥当性(プログラムへの寄与)

社会的背景
地球温暖化対策は喫緊の世界的、国家的課題

抜本的CO₂排出抑制、省エネ技術の必要性

事業の目的
次世代省エネデバイスの実現による電力損失の削減

従来半導体材料では実現できない領域で動作可能なハイパワー、超高効率の電力素子等に必要窒化物半導体結晶成長の基盤技術開発

「第三期科学技術基本計画(H18. 3)」、「エネルギー技術戦略の基本的考え方(H18. 5)」、「新・国家エネルギー戦略(H18. 5)」等における重要な省エネ技術としての位置付け。

3/56

7 ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 中間評価委員会(2009.8.31) 事業原簿 I-1-1 公開

1. 事業の位置付け、必要性について
(1)NEDOの事業としての妥当性(プログラムへの寄与)

4 エネルギーイノベーションプログラム
①総合エネルギー効率の向上

基礎研究 実用化研究 実証

ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造
5.5億円(5.0億円)

7/56

エネルギー資源の約8割を海外に依存する我が国にとって、これを効率的に利用すること、即ち「省エネルギー」を図ることは、エネルギー政策上の重要な課題である。このため更なる省エネルギー技術の開発・導入を進め、もって我が国におけるエネルギーの安定供給の確保を図ることを目的とする「エネルギーイノベーションプログラム」の一環として本プロジェクトを実施する。

6 ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 中間評価委員会(2009.8.31) 事業原簿 I-1-1 公開

1. 事業の位置付け、必要性について
(1)NEDOの事業としての妥当性(プログラムへの寄与)

2. ナノテク・部材イノベーションプログラム

ITの省エネ化を支える 基盤技術
ナノエレクトロニクス(窒化物半導体)
5.5(5.0)

6/56

5 ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 中間評価委員会(2009.8.31) 事業原簿 I-1-1 公開

1. 事業の位置付け、必要性について
(1)NEDOの事業としての妥当性(プログラムへの寄与)

1. ITイノベーションプログラム

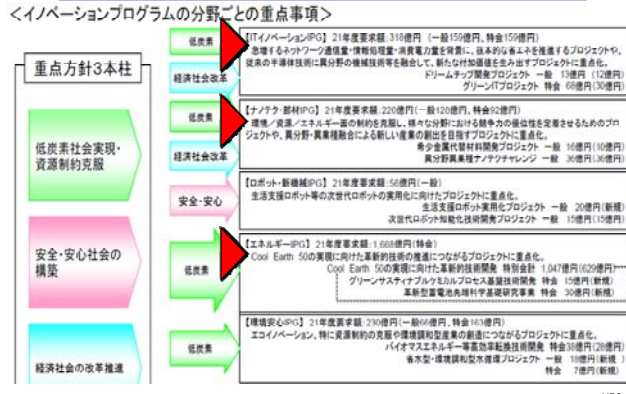
省エネを支える7プロセス基盤技術
GaN(ナニル)
5.5(5.0)

5/56

また21世紀の革新的技術として、情報、環境、安全・安心、エネルギー等の広範な分野の基盤技術である材

材料技術を根幹から変貌させることが期待されるナノテクノロジー（物質の構造をナノレベルで制御することにより、機能・特性の向上や新機能の発現を図る材料技術）の基盤技術を構築することを目的とする「ナノテク・部材イノベーションプログラム」及びITの利活用の深化・拡大を図り、より豊かな国民生活を実現するとともに、我が国の経済活力の向上を図ることを目的とする「ITイノベーションプログラム」の一環としても本プロジェクトを実施する。

1. 事業の位置付け、必要性について (1)NEDOの事業としての妥当性(プログラムへの寄与)



1. 事業の位置付け、必要性について (1)NEDOの事業としての妥当性(NEDO関与の必要性)

高周波・パワーデバイス用としての省エネデバイスの実現は、

- 社会的必要性: **大** (国家的課題: 低炭素社会実現)
- 情報機器・家電産業の国際競争力強化に貢献
- その他、自動車分野、医療機器用途へも展開可能
- 研究開発の難易度: **高**
- 投資規模: **大** = 開発リスク: **大**

(市場が不確定の中での大規模な研究投資が必要)

↓

NEDOがもつこれまでの知識、実績を活かして推進すべき事業

1.2 実施の効果(費用対効果)

従来の製造技術では達成し得ないレベルの高品質大口径(3~4インチ)の窒化物半導体バルク基板(有極性面及び無極性面)及びエピタキシャル基板(高 In 組成及び高 Al 組成)の製造技術開発にあたり、本製造技術を材料メーカー各社が持ち帰り、自己負担で実用化研究を進めるとともに、デバイスメーカー等に対してサンプル出荷を行い従来の半導体材料では実現できない領域で動作可能なハイパワー・超高効率の電力素子、超高速電子素子等の実現を図る。

そのため、本事業では、①高出力デバイス作製に必要な大型・高品質窒化物単結晶基板を作製し、②新たなエピタキシャル成長法を開発して①で作製した口径4インチの有極性および口径3~4インチの無極性窒化物半導体バルク基板上に低欠陥高品質 GaN、及び AlN-GaN-InN 混晶エピ層の実現することで、③有極性単結晶基板上 FET(電界効果型トランジスタ)と無極性単結晶基板上 FET を作製し、特性の差違およびその利害得失を明確化するとともに、広い混晶組成域における耐圧と結晶欠陥の相関を明確化し①、②へフィードバックする。そのため、基板、エピ、デバイスの各グループの有する研究開発ポテンシャルの最大限の活用により効率的な研究開発の推進を図る観点から、プロジェクトリーダーとともに著名な研究者をグループリーダーとして配し、その下に研究者を結集して効果的な研究開発を実施する。

本事業を実施し、従来の半導体材料では実現できない領域で動作可能なハイパワー・超高効率の電力素子、超高速電子素子等の作製に必要な窒化物半導体結晶成長技術の確立を行うことにより、我が国のエネルギー消費量削減に大きく貢献する。汎用インバーターのみをとってみても、省エネ効果は2030年において原油換算280万kL(インバータ用電力: 8,785万 kL 普及率: 80% 削減率: 4% = 省電力(280万 kL)に相当する。また、国際標準化に向け、窒化物半導体材料の特性評価の最適手法等の検討を行う。非鉄金属産業戦略(平成18年5月)の「化合物半導体産業戦略」に則り、化合物半導体ロードマップの策定等を通じ、Si では提供できない特性を有する半導体ウエハ需要の開拓を行う。

1. 事業の位置付け、必要性について
(1) NEDOの事業としての妥当性(事業予算に対する効果)

事業費用の総額 30億円/5年

市場の効果(汎用インバータ(3.7kW級)@2020年)
 製品販売額 250億円/年(年間25万台で計算)
 普及台数 1200万台/計4100万台
 削減電力 49億kWh/年
 削減電気代 490億円/年(10円/kWhで計算)

省エネルギー効果 80万kI/年(2020年推定、原油換算)
 280万kI/年(2030年推定、原油換算)
 2002年全産業モータ比では、約3%相当
 730万トン/年(2030年推定、CO₂換算)

(参考) 我が国のCO₂発生量=20.5億トン(2002年)
 内、全産業モータのCO₂発生量=2.5億トン

(出典: (社)日本機械工業協会[日機連]先導-9]報告書)

1. 事業の位置付け、必要性について
(1) NEDOの事業としての妥当性(事業予算に対する効果)

市場の効果(携帯基地局の送信用増幅器)
 2020年基地局 従来Si & GaAs 3万局
 新規GaNデバイス 21万局

省エネルギー効果(消費電力量)
 従来Si & GaAs 4.2kW/局
 新規GaNデバイス 1.6kW/局
 2020年電力削減 50億kWh/年 ⇒ 500億円/年

省エネルギー効果(CO₂排出削減)
 2020年推定 270万トン/年(原油換算 100万kl/年)
 2030年推定 500万トン/年(原油換算 190万kl/年)

9/56 (出典: (社)日本機械工業協会[日機連]先導-9]報告書)

10/56

I-12. 事業の背景・目的・位置づけ

高周波デバイス、パワーデバイス等の高性能電子デバイスは、今後の21世紀社会を支える情報家電、コンピュータ、情報通信機器のみならず自動車、医療機器など極めて広範な分野の製品の高性能化や制御を実現する中核的役割を果たす存在であり、それを実現する材料として窒化物半導体に大きな期待が寄せられている。しかしながら既存のバルク半導体単結晶成長技術やエピタキシャル成長技術は限界に達し、これらデバイス用に十分な品質の結晶作製に対応できず、その実用化に大きな制約となっている。

このため本プロジェクトでは従来の半導体材料では実現できない領域で動作可能なハイパワー・超高効率の電力素子、超高速電子素子などの作製に必要な窒化物半導体結晶成長技術の確立を目指し、

- ① 高品質大口径単結晶基板の開発
- ② 高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発
- ③ 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価

に取り組むことにより、我が国のエネルギー消費量削減に大きく貢献することを目的とする。

1. 事業の位置付け、必要性について
(2) 事業目的の妥当性(国内外の動向)

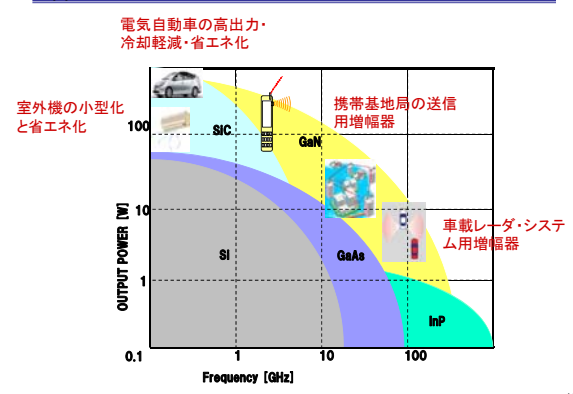
有機性GaN基板			無極性基板	
成長方法	基板サイズ	成長速度	成長方法	基板サイズ
HVPE法	4インチ	400μm/h	HVPE	2インチ
アモノサーマル	4インチ	4μm/h	アモノサーマル	4インチ
高圧HVPE	30mm	2μm/h		
Naフラックス	4インチ	30μm/h	Naフラックス	2インチ

2011年数値目標(出典: IWN2008 古河機械金属(株) 堀井氏資料)

有機性大型GaN基板の開発実績			
成長方法	開発年	基板サイズ	実施者
HVPE	2007	2インチ	日立化成
	2008	2インチ	住友電工
	2010(計画)	4インチ	住友電工
アモノサーマル	2008	1インチ	Ammono SP.20.0
Naフラックス	2008	2インチ×厚3mm	大阪大学
HVPE	2008	40mm□×厚7mm	古河機械金属

2008年の達成状況(出典: IWN2008 古河機械金属(株) 堀井氏資料)

1. 事業の位置付け、必要性について
(2) 事業目的の妥当性(国内外の動向)



12/56

13/56

2016年に期待される窒化系基板サイズと価格の動向に関する見通しについて、窒化物半導体国際ワークショップ(International Workshop on Nitride semiconductor 2008、略称IWN2008)は、窒化物基板サイズと価格動向を報告し、2008年と2016年とのギャップを示した。具体的には、基板サイズは現行2インチから4~6インチへ大型化し、価格は現行1枚1万ドルから1枚数百ドルまで引き下げる必要があることが述べられ、実用化に向けた研究開発の必要性を唱えた。また、2008年においてコマーシャルサンプルが開始された基板を紹介し、

HVPE法による有極性GaN基板(サイズ2インチ未満)と無極性GaN基板(小サイズ)が、そしてアモノサーマル法によるGaN基板とがサンプル供給段階であるとし、これまでの研究開発における成果を認める一方で、実用化のスピードとしては決して十分ではないとした。

これまでの研究の多くは、有極性面の結晶の高品質化に焦点を当てた内容が殆どであったのに対して、最新の報告では、優れたデバイス特性が予想される無極性面の基板成長に関する内容も増加しており、そこでは良質な無極性基板を得るために大型で高品質な結晶成長の試みがなされるなど、より実用化を指向した研究開発が始まっている。なお、本事業では、2011年度末までに有極性GaN基板で4インチ大口径化を実現するという高い目標が設定された。

1. 事業の位置付け、必要性について
 (2)事業目的の妥当性(国内外の動向)

公開

国内外動向	要求事項
①SiC等の異種基板の実用化先行 一部用途で競合するSiC基板は米Cree社が4インチ基板事業化。 また、新日本製鉄でH21.4事業化開始。	結晶基板の大口径化。
②アモノサーマル法で世界トップ品質 ポーランドのAmmono社は1.5インチサイズ大型基板で結晶品質も世界トップ。	結晶基板の品質向上。
③コスト面から結晶成長法の見直しの動き アモノサーマル法で先進的成果を挙げている企業で、低コスト成長法の探索の動き。	結晶成長の速度向上。
④Siデバイスに対する優位性の検証 Siインバータでも高効率であることが普及の課題。 欧州等でSiデバイス性能向上の基礎研究も進展中。	他種基板との差別化。 (高速高耐圧・高温動作)

II. 研究開発マネジメントについて

II 1. 事業の目標

従来の半導体材料では実現できない領域で動作可能なハイパワー・超高効率の電力素子、超高速電子素子を実用化し、我が国のエネルギー消費量削減に大きく貢献する。

15

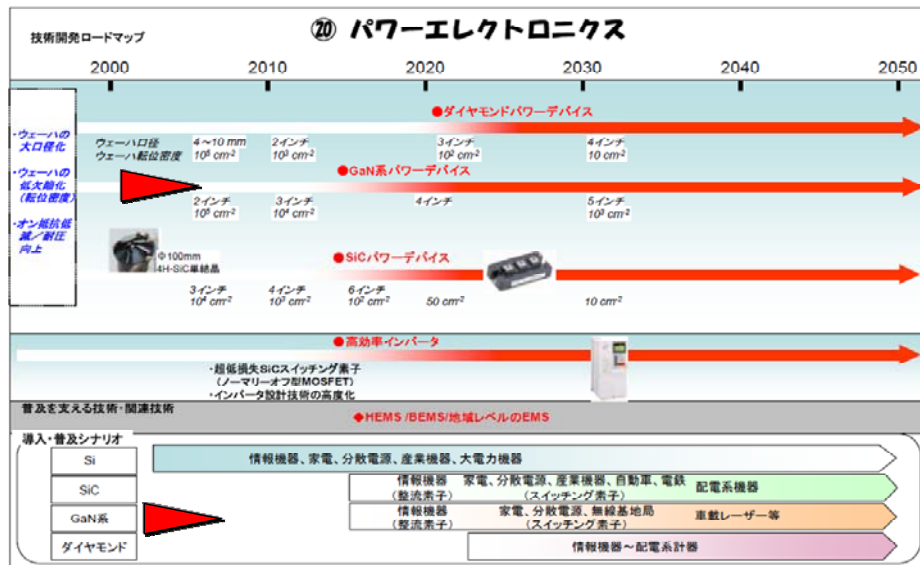
ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 中間評価委員会(2009.8.31)

事業原簿 II-1-1

2. 研究開発マネジメントについて

公開

(1) 研究開発目標の妥当性(事業の目標設定/Cool Earth)



15/56

① 高品質大口径単結晶基板の開発

中間目標: 平成21 年度

2インチ単結晶有極性面、及び無極性面の最適育成条件の検討を行い、前者では転位密度 $< 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 、後者では転位密度 $< 10^6 \text{ cm}^{-2}$ の基板を実現する。またそれらの伝導度制御として、導電性基板では比抵抗 $< 10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$ 、高抵抗基板では比抵抗 $> 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ の基板を実現する。同時に3インチ及び4インチ結晶大型化に必要な要素技術を明らかにする。

最終目標: 平成23 年度

4インチ有極性単結晶基板、及び3~4インチ無極性単結晶基板を実現し、前者では転位密度 $< 5 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$ 、後者では転位密度 $< 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 、積層欠陥密度 $< 10^3 \text{ cm}^{-1}$ の特性を得る。また、それらの伝導度制御として、導電性基板では比抵抗 $< 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 、高抵抗基板では比抵抗 $> 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ の特性を得る。

② 高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発

中間目標: 平成21 年度

高品質大口径ウエーハのエピタキシャル成長のための要素技術を開発するとともに、口径2インチの有極性、及び無極性窒化物半導体バルク基板上において、以下の低欠陥高品質GaN 及び混晶エピ層を実現する。AlGaN、及びInGaN 混晶エピ成長層において、Al 又はIn 組成 $0.5 \geq x \geq 0.2$ で転位密度 $< 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 、ドーピング不純物濃度 N 型 $> 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、P 型 $> 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 面内均一度: 厚み $\pm 5\%$ 、組成: $\pm 5\%$ 、ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$ 。

また、GaN ホモエピ成長層において、残留ドナー濃度 $< 5 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ 、転位密度: 有極性基板上で $< 10^5 \text{ cm}^{-2}$

2、無極性基板上で $<10^6\text{cm}^{-2}$ 面内均一度:厚み $\pm 5\%$ 、ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$ 、ドーピング精度 $\pm 20\%$ 。

最終目標:平成23 年度

無欠陥ヘテロ接合構造を実現するために、高品質、高導電性制御されたエピタキシャル成長法を開発し、口径4インチの有極性、及び口径3~4インチの無極性窒化物半導体バルク基板上において、以下の低欠陥高品質Ga_{0.5}In_{0.5}N、及び混晶エピ層を実現する。

AlGa_xIn_{1-x}N 混晶エピ成長層において、Al 又はIn 組成 $1 \geq x \geq 0.5$ で転位密度 $<10^6\text{cm}^{-2}$ 、ドーピング不純物濃度 N 型 $>10^{18}\text{cm}^{-3}$ 、P 型 $>10^{17}\text{cm}^{-3}$ 面内均一度:厚み $\pm 5\%$ 、組成: $\pm 5\%$ 、ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$ 。

また、Ga_{0.5}In_{0.5}N ホモエピ成長層において、残留ドナー濃度 $<10^{15}/\text{cm}^3$ 、転位密度:有極性基板上で $<5 \times 10^3\text{cm}^{-2}$ 、無極性基板上で $<10^5\text{cm}^{-2}$ 、面内均一度:厚み $\pm 5\%$ 、ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$ 、ドーピング精度 $\pm 20\%$ 。また、上記エピ層からなる窒化物半導体ヘテロ構造において2次元電子ガス移動度 $>2,500\text{cm}^2/\text{Vs}$ 。

③ 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価

中間目標:平成21 年度

窒化物単結晶基板上FET と他種基板上FET の特性の差違、及びその利害得失の明確化。基板/エピ層の品質とデバイス特性との関係の明確化と課題①、②へのフィードバック。

最終目標:平成23 年度

有極性単結晶基板上FET と無極性単結晶基板上FET の特性の差違、及びその利害得失の明確化。

広い混晶組成範囲における耐圧と結晶欠陥の相関の明確化と課題①、②へのフィードバック。

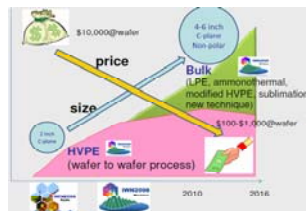
14 ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 中間評価委員会(2009.8.31) 事業原簿 II-1-2 16 ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 中間評価委員会(2009.8.31) 事業原簿 II-1-2

2. 研究開発マネジメントについて
(1)研究開発目標の妥当性(事業の目標設定)

従来の半導体材料では実現できない領域で動作可能なハイパワー・超効率の電力素子、超高速電子素子を実用化し、我が国のエネルギー消費削減に大きく貢献する。

- ①高出力デバイス作製に必要な大型/高品質窒化物単結晶基板を作製。
- ②新エピタキシャル成長法により低欠陥高品質Ga_{0.5}In_{0.5}N、AlN-GaN-InN混晶の実現。
- ③本材料により電界効果型トランジスタを作製し、評価結果をフィードバック。

基本計画に反映
2007年(PJ前) NEDO POST デバイスの参画



(出典:1WN2008 古河機械金属(株) 磯井氏資料)

14/56

2. 研究開発マネジメントについて
(1)研究開発計画の妥当性(中間・最終の目標設定)

研究開発項目	中間・最終の数値目標	国内外先端研究の数値目標
① 大口径化	2009年度 ・有極性単結晶基板で2インチ実現 2011年度 ・有極性4インチ、無極性>3インチ	2011年 ・有極性基板で4インチ ・無極性基板で2~4インチ
② 高品質化	2009年度 ・有極性で転位密度 $<10^5\text{cm}^{-2}$ 実現 ・無極性で転位密度 $<10^6\text{cm}^{-2}$ 実現 2011年度 ・有極性で転位 $<5 \times 10^3\text{cm}^{-2}$ 実現 ・無極性で転位 $<10^5\text{cm}^{-2}$ 実現	2012年 ・転位密度 $\approx 10^4\text{cm}^{-2}$ (3インチ)

16/56

① 高品質大口径単結晶基板の開発

低損失で高出力の電子デバイスとして期待される窒化物半導体ウエハは、現在Ga_{0.5}In_{0.5}N系ヘテロ構造がSiやSiC等の異種基板上に作製されている。このため電子デバイス構造としては横型に限定される上に大きな格子不整合によりデバイス内部に多数の欠陥が発生し、耐圧、オン抵抗等のデバイス特性についても物性値から期待されるような十分な特性は得られていない。また電源などで重要なノーマリオフ動作についても実用的な高出力デバイスとしては実現されていない。このような問題を解決するためには、本質的に結晶構造が等価で格子整合する高品質窒化物単結晶の有極性、或いは無極性基板上にデバイス構造を成長・作製することが必要不可欠である。また、横型デバイス用の高抵抗ウエハ、縦型デバイス用の低抵抗ウエハ実現に向けて、単結晶基板の伝導度制御技術の確立が重要となる。

窒化物単結晶基板を成長するにはHVPE 法やNa 系フラックス溶液成長法、昇華法等が知られているが、現状電子デバイス用の高品位な結晶性を持つ大口径単結晶基板の育成は実現されていない。そこで本研究開

発では、窒化物半導体電子デバイス作製に必要とされる4インチ級の究極的高品質有極性バルク単結晶、及び無極性バルク単結晶を育成する技術を開発し、Si デバイスと同等、或いはそれ以上の安定性を有する高出力デバイスの実用化に資する。

② 高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発

化合物半導体エピ材料の特徴としては、ヘテロ接合を用いたデバイスを作製できることにあり、中でも窒化物は高速化、高出力化、高耐圧化、省エネ化などに優れた性能を発揮できる物性を有している。このような特性を実現するためには、これらデバイス構造中のチャンネル層やドリフト層を形成する薄膜成長技術、即ち結晶欠陥や残留キャリアの低減、ヘテロ接合界面でのキャリアの散乱を抑制するための界面組成急峻性や広い範囲での平坦性、多層構造はもちろんのこと、極めて薄いチャンネル層を作製するための組成や不純物濃度を原子層レベルで制御できる薄膜成長技術が必須である。加えてGaN-AlN-InN系窒化物は、AlGaN やInGaN でも格子不整合が大きく、分極電界や転位、欠陥、クラックなどの問題が生じている。

自動車用インバータなどでは例えば、オン抵抗 $<1.5\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、耐圧 $>2\text{kV}$ で高gm、かつノーマリオフ型等の省電力タイプの電子デバイスの実現が望まれている。しかしSiC やSi 基板上でのエピ成長ではヘテロエピタキシーの制約のため、デバイス特性からの要求品質或いは物性値から期待される特性を十分に満足する段階には未だ達しておらず、高機能の横型、及び縦型窒化物半導体電子デバイス実現のためには、今後窒化物単結晶基板上でAlN-GaN-InN の高範囲に渡る高品質大口径エピタキシャル混晶成長技術が必要である。

また、これら混晶成長に関して、高In 組成領域では線欠陥、原料の気相反応に基づく反応物による点欠陥、成長中の熱分解が大きな問題であり、高Al 組成領域では、酸素および炭素などの不純物の混入を抑制すると共に、効率の良いドーピング技術の開発によるキャリア濃度の向上が必須である。更に、実用的な電子デバイス用エピタキシャルウェハとしては、厚みやキャリア濃度等のウェハ特性に関して、4インチ級の大口径にわたる均一性が要求される。

③ 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価

現在窒化物電子デバイスは、端緒についたばかりであり、実用化したデバイスはSiC などの基板上に形成したGaN チャンネルを用いたFET 構造のみである。その応用は2-5GHz の携帯電話基地局用の200-400W増幅器と30GHz 帯の小型20W 級増幅器に限定されている。窒化物系半導体が元来有する物性を考慮すると、今後はAlN-GaN-InN 系材料を広範囲に自由に組み合わせたヘテロ接合トランジスタの実現が望まれ、その応用は高周波高出力ばかりでなく、高温動作デバイス、高耐圧デバイス、超高速デバイスなど、広い応用範囲が実現可能である。例えば2-5GHz では1kW 以上の増幅器が実現可能となり、基地局ばかりでなく、固体デバイスを用いた超小型マイクロ波加熱(電子レンジ、半導体プロセス装置)、マイクロ波送電などに応用可能である。

またパワーエレクトロニクスにおいても、高電圧動作と高周波動作が同時に実現できるため、例えば数kW 級のインバータ回路は、従来は周波数が低いためコイルやコンデンサが大型化し、モノリシック集積化が不可能であった。窒化物半導体を用いれば高電圧のまま高周波に対応可能であるためパワーエレクトロニクス機器の小型化を推進でき、エアコンなどの家電製品、情報家電、自動車におけるインバータの画期的な性能向上などその応用範囲は極めて広い。

このような電子デバイスを実現するためには、高品質窒化物半導体基板の開発、及び理論的可能で現在までに検討されなかった新しいエピタキシャル成長技術・不純物ドーピング技術の開発をベースに、可能な限り広い範囲の組成のヘテロ接合構造や面方位の組み合わせによるデバイス構造を従来の異種基板上ウェハや各種窒化物半導体ウェハ上に実際にデバイスレベルで試作して、高耐圧性、低損失性、高速性などの諸特性を比較・検証するとともに、その結果を課題①、②の基板・エピ開発にフィードバックすることが必要である。

II.2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

本事業の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委託により実施する。本研究開発の期間は、平成19年度から平成23年度までの5年間とする。

17

ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 中間評価委員会(2009.8.31)

事業原簿 II-2-1

2. 研究開発マネジメントについて

公開

(2)研究開発計画の妥当性(目標達成のスケジュール)



17/56

① 高品質大口径単結晶基板の開発

(1) 窒化物単結晶成長における基礎技術の検討

窒化物半導体バルク成長法における、成長初期過程制御技術、核発生制御技術等を最適化し、必要な有極性、及び無極性窒化物単結晶育成要素プロセスの開発を行う。転位等の欠陥挙動を解明し、転位低減化、高品質化を図る。さらに2~4インチ級への大口径化、長尺化を検討し、大型単結晶育成に必要な要素技術を明らかにする。

(2) 大口径種結晶の開発

結晶成長に必要な種結晶として、格子整合が良く、4インチ級の大口径が得られる有極性、及び無極性面成長と剥離に適した下地基板の選択を行い、大口径の数百 μm 厚結晶自立基板を作製する。V/Ⅲ比、成長温度などの成長条件の最適化、横方向成長等の結晶欠陥低減手法の導入、また成長の阻害となる不純物の低減など、表面性や結晶欠陥制御を検討して2~4インチ種結晶の実現を図る。

(3) 高導電性窒化物単結晶基板の開発

結晶の高品質化、大口径化を行うと同時に、固体、有機珪素化合物、ガスなどを用いて結晶への不純物添加を検討して、効率的なドーピング技術による導電性制御を行い、縦型デバイス動作に必要な低抵抗率の基板を実現する。

(4) 高抵抗化窒化物単結晶基板の開発

結晶の高品質化、大口径化を行うと同時に、炉環境の清浄化や原料高純度化などにより結晶への不純物混入を極力低減して、単結晶の高純度化を図り、不純物キャリア濃度の低減による高抵抗化を目指す。また高純度化に加えて欠陥の低減、アクセプター性不純物の効果的ドーピングを検討し、添加元素の種類、添加量、添加条件などを最適化することにより直流から高周波迄の用途に適する均一で安定した高抵抗単結晶の基板を実現する

② 高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発

(1) 大口径基板上の高品質エピタキシャル結晶成長技術

課題①で開発された大口径高品質窒化物単結晶基板等を用い、4インチ級の有極性、及び無極性窒化物半導体大口径基板上でのエピタキシャル成長に関して、転位等の結晶欠陥や残留キャリアを低減し、原子層レベルでの膜厚、平坦性、不純物を均一に制御する技術を開発するとともに、AlInN/InGaN やAlGaIn/InGaIn などのヘテロ接合を実現する成長技術を開発する。

(2) 高In 組成窒化物層成長技術

有極性、及び無極性窒化物半導体基板上への高均一、高In 組成InGaIn 層を用いた高品質電子デバイス用大口径ウエハの成長技術、および当該InGaIn 層への不純物高濃度ドーピング技術を開発する。

(3) 高Al 組成窒化物層成長技術

有極性、及び無極性窒化物半導体基板上への高均一高Al 組成AlGaIn 層を用いた高品質電子デバイス用大口径ウエハの成長技術、および当該AlGaIn 層への不純物高濃度ドーピング技術を開発する。

(4) 結晶成長その場観察評価技術

基板上での原料のマイグレーションを促進して成長面をナノレベルで平坦化するため、成長速度、歪、組成等をその場観察して、原子層レベルの成長制御を最適化し、気相反応を抑制する技術を開発する。

③ 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価

(1) 横型電子デバイスの評価

横型のパワー高周波素子、パワースイッチング素子を想定して、評価デバイスパターンを標準化し、エピ材料・構造・品質とデバイス特性との相関関係を、プロセス要因を極力排除した評価を通して検討する。課題②で開発された大口径高品質窒化物エピタキシャルウエハ等を用い、簡素なソース/ゲート/ドレイン電極構造による評価トランジスタパターンにおいて、キャリア濃度特性、I-V 特性、C-V 特性などの基本特性評価を行う。また、ゲート長を短くした実用デバイスに近いFET 構造において、耐圧、オン抵抗、リーク電流、高周波特性などより実際の特性の評価を行う。

(2) 縦型電子デバイスの評価

縦型のパワー高周波素子、パワースイッチング素子を想定して、評価デバイスパターンを標準化し、エピ材料・構造・品質とデバイス特性との相関関係を、プロセス要因を極力排除した評価を通して検討する。課題②で開発された大口径高品質窒化物エピタキシャルウエハ等を用い、簡素なソース/ゲート/ドレイン電極構造による評価トランジスタパターンにおいて、キャリア濃度特性、I-V 特性、C-V 特性などの基本特性評価を行う。

(3) 窒化物単結晶基板上デバイスの優位性確認

窒化物単結晶基板上に成長したエピタキシャルウエハをもとに、その上の各種デバイス特性を従来のサファイア、SiC 等の基板上デバイスの特性と比較検討し、その優位性を確認する。

(4) 有極性、及び無極性デバイス構造の比較

有極性、及び無極性面方位をもつ高品質窒化物基板上に成長したエピタキシャルウエハをもとに、その上の各種デバイス特性の比較検討を行う。電圧未印加時に電流の流れないエンハンスメント型の動作、電流コラプスを抑制した低オン抵抗化、高In 系チャネル導入による高速化、高Alバリア導入による高耐圧化など、将来の家電・通信・交通システムへの応用を目指したデバイス構造を試作・評価して、有極性面上と無極性面上での長所、短所を明確化し、それらのデバイス可能性を検討する。

2. 研究開発マネジメントについて
(2)研究開発計画の妥当性(目標達成の予算)

公開

研究開発項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	合計(百万円)
① 高品質大口径単結晶基板の研究開発 有極性・無極性 低抵抗・高抵抗	249	171 (+85)	177	169	259	1110
② 高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発 AlGaIn・InGaIn GaInホモエピ	285	288 (+126)	117	113	179	1108
③ 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイス作製と評価 FET試作評価	52	81 (+149)	26	50	26	384
合計 (提案時要求額)	586 (470)	540 (740)	320 (701)	332 (629)	464 (460)	2602 (3000)

18/56

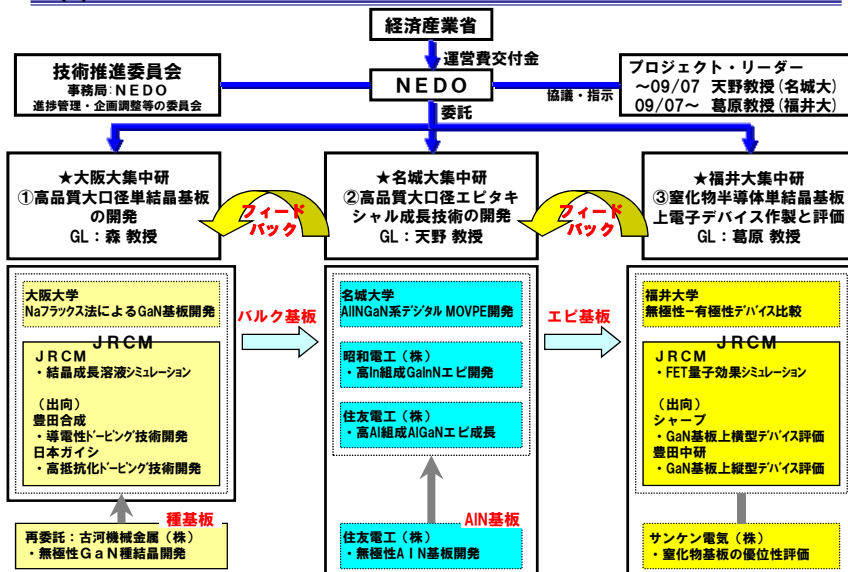
2.2 研究開発の実施体制

本研究開発は、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技術開発機構」という。)が、単独ないし複数の原則本邦の企業、研究組合、公益法人等の研究機関(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。

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の最大限の活用により効率的な研究開発の推進を図る観点から、研究体にはNEDO技術開発機構が委託先決定後に指名する研究開発責任者(プロジェクトリーダー)を置き、その下に研究者を可能な限り結集して効果的な研究開発を実施する。

2. 研究開発マネジメントについて
(3)研究開発実施の事業体制の妥当性(研究開発の実施体制)

公開



19/56

2.3 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDO技術開発機構は、経済産業省および研究開発責任者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的および目標、並びに、本研究開発の目的およ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、必要に応じて設置される技術検討委員会等における外部有識者の意見を運営管理に反映させる他、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。

21

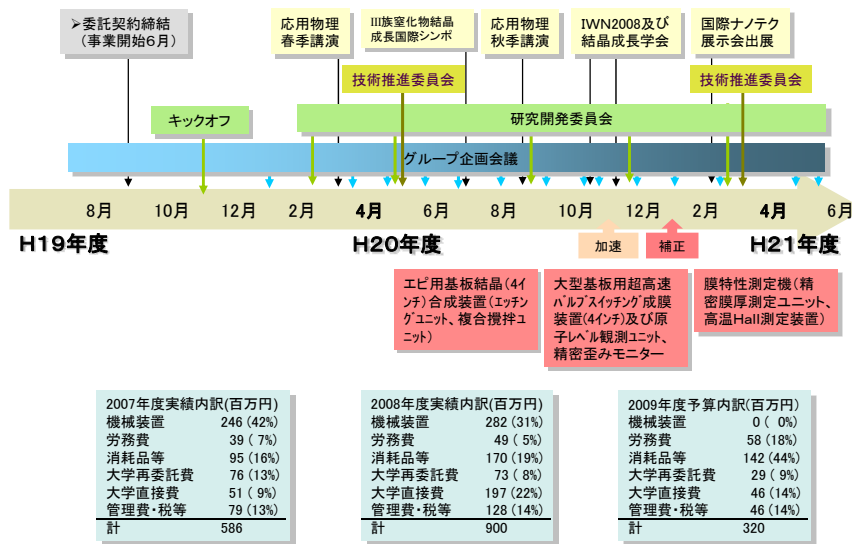
ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 中間評価委員会(2009.8.31)

事業原簿 II-4-1

2. 研究開発マネジメントについて

公開

(3)研究開発実施の事業体制の妥当性(実施者間の連携)



21/56

NEDO技術開発機構は、技術的および政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義なら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21年度、事後評価を平成24年度に実施する。また、中間評価結果を踏まえ必要に応じプロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。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。

20

ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 中間評価委員会(2009.8.31)

事業原簿 II-4-1

2. 研究開発マネジメントについて

公開

(3)研究開発実施の事業体制の妥当性(実用化の想定者)

実用化の想定者	想定される効果
昭和電工(株)	エピタキシャル基板
住友電気工業(株)	エピタキシャル基板
サンケン電気(株)	電源、インバータ等の応用製品
(波及効果)	
豊田合成(株)	単結晶GaN基板
日本ガイシ(株)	単結晶GaN基板
古河機械金属(株)	種結晶基板
シャープ(株)	パワーデバイス
(株)豊田中研	パワーデバイス

20/56

3. 情勢変化への対応

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDO技術開発機構は、経済産業省および研究開発責任者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的および目標、並びに、本研究開発の目的およ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、必要に応じて設置される技術検討委員会等における外部有識者の意見を運営管理に反映させる。

(1) 平成19年度・技術推進委員会(平成20年5月9日)

上記技術推進委員会では、「本事業は、初年度に設定した目標はクリアしており良好な結果が出ている一方で、デバイス評価のための基板供給ができていない点で、今の研究開発スピードでは物足りない。」との提言がなされた。具体的には、「基板・エピグループから【基板】が流れ出るためのグループ間の連携強化」が指摘され、対策として「デバイスグループ(福井大集中研)への基板供給のスピードアップ」の検討を実施した結果、展示会ナノテック2009に世界最高品質2インチ有極性GaN基板出展を達成し、広く研究成果の情報発信を行った。

基板グループでは、結晶育成の品質向上および基板増産を実施した結果、育成容器揺動装置による高品質化および当初比4倍の基板増産の達成、および、世界最高品質2インチ有極性GaN基板をナノテック2009に出展した。

エピグループでは、エピ膜の品質向上および増産を実施した結果、世界で初めてAlGaInの原子レベル成長を実現し、ナノテック2009に出展した。

デバイスグループでは、評価データの早期フィードバックを実施し、プロジェクト内製の有極性AlGaIn/GaNエピ上にHEMT試作、および高ドレイン電流実現の成果をナノテック2009に出展した。

24

ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 中間評価委員会(2009.8.31)

事業原簿 II-5-1

2. 研究開発マネジメントについて

公開

(4) 情勢変化への対応等(進捗状況の把握と対応)

平成19年度・技術推進委員会(平成20年5月9日)

(指摘事項) 基板・エピグループから【基板】が流れ出るためのグループ間の連携強化。

(反映内容) 研究加速による基板供給スピードのアップ。

(委員会提言)

- ・本プロジェクトは、初年度に設定した目標はクリアしており良好な結果が出ている
- ・一方、デバイス評価のための基板供給ができていない点で、今の研究開発スピードでは物足りない

(対処方針)

- ・基板・エピグループから【基板】が流れ出るためのグループ間連携を強化する

対処方針	施策	加速資金	世界初の成果
デバイスグループ(福井大集中研)への基板供給のスピードアップ。	基板グループ ・結晶育成の品質向上 および基板増産	50百万	・育成容器揺動装置による高品質化、および当初比4倍の基板増産を達成 ・世界最高品質2インチ有極性GaIn基板をナノテック2009に出展
	エピグループ ・エピ膜の品質向上および増産	4百万 (消耗品費)	・世界初めてAlGaInの原子レベル成長を実現、ナノテック2009に出展
	デバイスグループ ・評価データの早期フィードバック	26百万	・プロジェクト内製の有極性AlGaIn/GaNエピ上にHEMTを試作、高ドレイン電流実現の成果をナノテック2009に出展

24/56

(2) 平成20年度・技術推進委員会(平成21年3月23日)

上記技術推進委員会では、「現在までの目標は達成するも、基板を作るという目的上実用化を前倒しする長尺化等の取り組みが必要である一方で、基礎的な課題と量産課題を分けて取り組むなど、基礎固めが必要。」との提言がなされた。具体的には、有極性単結晶では早期に結晶大型化の検証、無極性単結晶では基礎的研究課題への取り組み、AlGaIn、InGaInエピ膜では大面積・高品質化への取り組み、それらによる高品質

質で大面積の基板供給を加速することであり、実施可能性について現在検討を行っている。また、窒化物半導体の特徴である耐圧等の試作評価体制の整備も併せて検討を行っている。

以下、平成20年度の成果

研究開発項目① 高品質大口径単結晶基板の開発においては、溶液攪拌条件、基板配置及び成長温度・圧力を検討することにより、2インチ全体でインクルージョンフリーの有極性高品質Ga₂N結晶育成の目処を得た。また、炭素添加条件等の検討により、0.5~1cm角の高品質・無極性Ga₂N結晶の育成を実現した。またGeと炭素の共添加条件の検討により0.02Ω・cmの高導電性Ga₂N結晶、Fe添加条件と育成系の高純度化の結果、従来に比べて約25倍の高抵抗化、をそれぞれ実現した。m面45mmφ Ga₂N自立種結晶において、LPE成長に影響を及ぼすSi不純物濃度を5×10¹⁷cm⁻³以下に低減した。(実施体制: 国立大学法人大阪大学、財団法人金属系材料研究開発センター)

研究開発項目② 高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発においては、超高速パルススイッチング高温デジタルMOVPE 装置について、シミュレーションを活用して設計し、導入を行った。AlGa₂N チャネル層を持つFET 構造を試作し、AlN 基板の有用性を確認した。新In 原料によるGa₂N/アンドープGaInN(In 組成~0.38 (c 面Ga₂N 上)、0.43(a面Ga₂N上)ヘテロ接合構造成長を達成した。(実施体制: 学校法人名城大学、住友電気工業株式会社、昭和電工株式会社)

研究開発項目③ 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価においては、研究開発項目①で育成したGa₂N基板上に研究開発項目②でエピタキシャル成長したAlGa₂N/Ga₂Nヘテロ構造サンプルを形成し、その上にプロセス要因を極力排除した標準プロセスを用いて、プレーナ円形ゲート構造の電界効果トランジスタを作製した。試作したゲート長9mmの素子において、最大ドレイン電流300mA/mm, しきい値電圧-6Vの良好な特性を確認した。現状の基板の高欠陥密度を反映して、耐圧特性にはGa₂N基板を用いた明確な優位性を確認できなかった。(実施体制: 国立大学法人福井大学、財団法人金属系材料研究開発センター、サンケン電気株式会社)

26 ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 中間評価委員会(2009.8.31) 事業原簿 II-5-2 公開

2. 研究開発マネジメントについて
(4) 情勢変化への対応等(実用化のイメージ)

26/56

III 研究開発成果について

III-1 事業全体の成果

研究は、順調に進捗しており、平成21年度中間目標をほぼ達成出来る見込みである。表1に、研究開発項目毎の目標に対して得られた成果、達成度、及び今後の課題を示す。従来の論文等で報じられていない世界で初めての成果も多数得られており、世界に先駆けて Na フラックス法で 2 インチφの有極性基板の作製に成功するなど、早期実用化を目指した展開が必要と言える状況になってきている。これらの成果については、ナノテク2009(国際ナノテクノロジー総合展・技術会議)において展示発表を行った。今後、特許の取得、および口頭発表や論文による対外発表を積極的に進めて行く。

詳細は「III.2 研究開発項目毎の成果」で述べるが、その概要は以下のとおりである。

研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」

溶液攪拌時における溶液流れを解析したところ、静置状態と比較して基板面上の流速が約30倍(～2cm/秒)に増加し、窒素濃度が均一化されることが分かった。成長モードの溶液組成依存性を調べたところ、低Ga比組成では、横方向成長が促進され平坦な結晶表面が得られ、一方、高Ga比組成では三次元成長することが分かった。そして、高Ga比組成では、転位密度は低減するが成長量(成長速度)が小さく、一方、低Ga比組成では、転位密度は減少しないが、成長量(成長速度)が大きくなることが明らかとなった。これらの検討の結果、2インチφ有極性基板上において、転位密度が $10^4\text{cm}^{-2}\sim 10^5\text{cm}^{-2}$ 台になるなど、ほぼ中間目標通りの値を得ることに成功した。様々な知見を導入した新型揺動装置を開発し、その装置を用いてφ4インチ基板の全面にLPE成長することができた。

様々な無極性種基板結晶上でLPE成長を実施したところ、HVPE法で作製したm面HVPE基板上にLPE育成したGaN結晶では多くの粒界が観測され、転位密度も $\sim 10^8\text{cm}^{-2}$ であったが、m面HVPE基板の転位密度は計測が困難なほど多数存在しているとみられることから、Naフラックス法により転位は低減していることが分かった。また、c面HVPE法で作製したGaN結晶から切り出したa面基板、及びm面基板上にLPE育成したGaN結晶では、多いところでも転位密度は $\sim 1\times 10^7\text{cm}^{-2}$ であり、部分的には中間目標値を上回る $< 10^6\text{cm}^{-2}$ であった。これらの結果は、Naフラックス法を用いて無極性面成長を行った場合でも、有極性面成長と同様に転位密度が減少し、結晶性が改善されることを示すものである。そして、a面、及びm面成長において、種基板結晶の結晶性が高いほど、低転位無極性単結晶成長に有用であることが明らかになった。また、無極性面上育成で重要となる成長方位制御法開発のために、Sr添加を実施したところ、Sr添加量の増加に伴い、自然核のアスペクト比(c軸長/a軸長)は増大し、m面が広く現れたm面GaN-LPE結晶を得ることが出来ることが分かった。

また、導電性制御技術では、まず有極性基板を対象に、導電性基板を得るために温度、炭素添加量等の育成条件を最適化し、Ge取込量: $2\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ を実現し、抵抗率測定の結果、中間目標値を大幅に上回る $0.017\ \Omega\cdot\text{cm}$ を得た。今後、無極性基板でのGe添加実験を実施する。さらに高抵抗化基板においては、各種元素の添加実験を行った結果、元素種類によらず、ノドープでの残留キャリア濃度以上の濃度を添加すると高抵抗化することを見出した。Mnを $3\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 導入した結晶の比抵抗は $10200\ \Omega\cdot\text{cm}$ に高抵抗化し、Znを 10^{19}cm^{-3} 程度添加すると中間目標値を大幅に上回る $10^8\ \Omega\cdot\text{cm}$ まで高抵抗化することが分かった。今後、無極性基板での導電性及び高抵抗化基板の実現を目指す。

研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」

高温GaInN成長のための加圧が可能、かつガス切り替え時間0.1秒という超高速ガス切り替えが可能なデジタルMOVPE装置を開発し、世界で初めてAlGaInの原子層エピタキシャル成長(ALE)を確認し、650°Cという低温でALEによる高品質AlGaInの成長の効果を実証した。成長中の圧力増加により、GaInNにおけるIn組成の増加、およびc面上でIn組成0.5に至るまでの高品質GaInNの成長を確認し中間目標を達成した。a面GaInNに関しては、TEM観察によりポイドの形成が確認され、その原因の調査及び対策を継続し、今年度中に中間目標を達成する。また、加圧炉により成長させた高In組成GaInNにおいて、高濃度の酸素および炭素が検出され、その原因調査と対策を引き続き行う。半絶縁性Feドープc面GaInN基板上にHFET構造を作製し、成長中のFeの表面偏析および固相・気相拡散を評価した。通常のMOVPEの成長温度1050°C程度では、アンドープGaInNにFeが $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 程度まで再分布することが確認され、Feを使わない半絶縁性GaInN基板の開発、およびMOVPEにおける低温成長の重要性が指摘された。ガス流体シミュレーションを実施し、既存炉において均一なAl組成および膜厚分布のための成長条件や気相中でのクラスター形成、加圧炉・高温炉においては、均一な高速ガススイッチングを行うためのガスインジェクターに関する設計指針を得た。その結果、c面GaInN上のAlGaInにおけるAl組成、膜厚、ドナーおよびアクセプタ濃度の均一性に関して、中間目標をクリアした。c面AlN

基板上およびサファイア基板上に、AlGaNチャネルHFET構造を作製し、AlN基板の有用性を確認した。無極性面については、c面AlN基板の長尺化および無極性面SiC基板上への成長の2通りを検討し、それぞれの得失にしてさらに検討が必要であることが確認された。2インチc面GaN基板上へのGaNのホモエピタキシャル成長に関しては、膜厚分布、不純物添加分布および制御性について、すべて中間目標を達成している。転位密度に関しては、透過電子顕微鏡による評価が困難なほど少ないため、X線トポグラフ等巨視的な評価を合わせて行い、今年度中に中間目標を達成する。結晶成長その場観察に関しては、c面AlGaN/GaNヘテロ成長におけるAlGaNのAl組成および膜厚と反りの関係を把握した。無極性面では反りの異方性により二次元マッピングが必要であることが判明し、新原理に基づく二次元ウェハ形状その場観察装置の設計及び試作を行い、曲率半径1km以上の精度で、成長中のウェハ形状その場観察に世界で初めて成功した。

研究開発項目③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価」

窒化物単結晶基板上FETと他種基板上FETの特性の差違、及びその利害得失の明確化の目標について、有極性GaN基板上にAlGaN/GaNヘテロ接合FETを試作し、Si基板の上の同構造に比べて20%以上高いドレイン電流密度を確認し、結果を課題①、②にフィードバックした。また、基板/エピ層の品質とデバイス特性との関係の明確化と課題①、②へのフィードバックの目標については、GaN基板の上の縦型p-nダイオードにおいて耐圧特性を統計的に測定し、GaN基板上ダイオードの優位性を確認し、課題①、②にフィードバックした。

表1 研究開発項目毎の目標に対する達成度

研究項目	最終目標	中間目標	成果		今後の課題 (対最終目標)
			中間目標に対する達成値	達成度	
①高品質大口径単結晶基板の開発	有極性面				
	4インチ単結晶 転位密度 $5 \times 10^3 \text{cm}^{-2}$	2インチ単結晶 転位密度 $< 10^5 \text{cm}^{-2}$	2インチφ基板上において $10^4 \text{cm}^{-2} \sim 10^5 \text{cm}^{-2}$ 台	○	溶液攪拌条件の検討による結晶品質の均一化
	無極性面				
	3~4インチ単結晶 転位密度 $< 10^5 \text{cm}^{-2}$ 積層欠陥 $< 10^3 \text{cm}^{-1}$	・最適育成条件の検討 ・転位密度 $< 10^6 \text{cm}^{-2}$	$< 10^6 \text{cm}^{-2}$	○	種基板結晶の大面積高品質化
	伝導度制御				
	・導電性基板 比抵抗 $< 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$	・導電性基板 比抵抗 $< 10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$	$2 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$	◎	Geの高濃度添加
	・高抵抗基板 比抵抗 $> 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$	・高抵抗基板 比抵抗 $> 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$	$10^8 \Omega \cdot \text{cm}$	◎	Znの高濃度添加
	3インチ及び4インチ結晶大型化に必要な要素技術を明らかにする。	種基板結晶に必要な条件が明らかになってきた。 溶液攪拌技術の高度化の重要性が分かった。	◎	大口径高品質種基板結晶の作製、及び溶液攪拌条件の最適化	

次頁へ続く

研究項目	最終目標	中間目標	成果		今後の課題（対最終目標）
			達成値など	達成度	
②高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発	口径4インチの有極性、及び口径3～4インチの無極性窒化物半導体バルク基板上	口径2インチの有極性、及び無極性窒化物基板上	AlGaN の ALE に世界で初めて成功 AlGaN の低温成長に成功	◎ ◎	・大口径化
	AlGaIn, 及びInGaIn 混晶エピ成長層 Al 又はIn 組成 $1 \geq x \geq 0.5$ 転位密度 $< 10^6 \text{cm}^{-2}$ ドーピング不純物濃度 N 型 $> 10^{18} \text{cm}^{-3}$ P 型 $> 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 面内均一度 : 厚み $\pm 5\%$, 組成: $\pm 5\%$, ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$	AlGaIn, 及び InGaIn 混晶エピ成長層 Al 又は In 組成 $0.5 \geq x \geq 0.2$ 転位密度 $< 10^6 \text{cm}^{-2}$ ドーピング不純物濃度 N 型 $> 10^{18} \text{cm}^{-3}$ P 型 $> 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 面内均一度 : 厚み $\pm 5\%$, 組成: $\pm 5\%$, ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$	<p>GaInN に関して</p> <ul style="list-style-type: none"> ・有極性 GaN テンプレート基板上への GaInN 膜の高圧成長実施。PL, X 線回折特性比較。 ・In 組成 0.4～0.5 の高 In 組成 GaInN 膜の成長達成。但し, a 面は膜内に空洞有り。 ・In 組成のパラツキ $\pm 13\%$ と大。 <p>・GaInN 膜内残留炭素, 酸素原子濃度大 ($> 10^{20} \text{cm}^{-3}$)</p> <p>AlGaIn/GaInN ヘテロ接合形成。構造評価実施。</p> <p>AlGaIn に関して</p> <p>Al 組成 $0.5 \geq x \geq 0.2$ 可能。</p> <p>Al 組成 $0.5 \geq x \geq 0.2$ N 型 $\sim 9 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ P 型 $\sim 2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$</p> <p>厚み $\pm 4.9\%$ 組成 $\pm 5.4\%$ Mgドーピング $\pm 7.7\%$ Siドーピング $\pm 9.6\%$</p>	○ ○	<ul style="list-style-type: none"> ・非極性面上の GaInN 膜の結晶性改善 ・空洞発生抑制: デジタル成長 AlGaIn の成長温度に相応して成長温度の低温化又は V/Ⅲ 比の高比率化。 ・均一性向上 (1) ヒータ均熱性向上 (2) 低温成長 ($< 600^\circ\text{C}$) (3) 高 V/Ⅲ 比成長 (> 20000) <p>・さらなる高 Al 組成検討</p>
	GaN ホモエピ成長層 残留ドナー濃度 $< 10^{15} / \text{cm}^3$ 転位密度: 有極性基板上で $< 5 \times 10^3 \text{cm}^{-2}$, 無極性基板上で $< 10^5 \text{cm}^{-2}$ 面内均一度: 厚み $\pm 5\%$, ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$, ドーピング精度 $\pm 20\%$ また, 上記エピ層からなる窒化物半導体ヘテロ構造において 2次元電子ガス移動度 $> 2500 \text{cm}^2 / \text{Vs}$	GaN ホモエピ成長層 残留ドナー濃度 $< 5 \times 10^{15} / \text{cm}^3$, 転位密度: 有極性基板上で $< 10^5 \text{cm}^{-2}$, 無極性基板上で $< 10^6 \text{cm}^{-2}$ 面内均一度: 厚み $\pm 5\%$, ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$, ドーピング精度 $\pm 20\%$ 。	GaN 残留ドナー濃度 $< 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 以下を達成 転位密度 有極性基板上 $< 10^6 \text{cm}^{-2}$ 無極性基板上: 測定中 面内均一性 厚み $< \pm 5\%$ ドーピング不純物濃度 $< \pm 6\%$ ドーピング精度 $< \pm 1\%$	○	<ul style="list-style-type: none"> ・残留不純物低減 ・成長初期の Si スパイクの抑制

前頁から続く

研究項目	最終目標	中間目標	成果		今後の課題 (対最終目標)
			達成値など	達成度	
③窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価	・有極性単結晶基板上FETと無極性単結晶基板上FETの特性の差違, 及びその利害得失の明確化	・窒化物単結晶基板上FETと他種基板上FETの特性の差違, 及びその利害得失の明確化	・GaN基板上FETにて高ドレイン電流を確認	○	・無極性基板上のデバイス試作の加速
	・広い混晶組成範囲における耐圧と結晶欠陥の相関の明確化と課題①, ②へのフィードバック	・基板/エピ層の品質とデバイス特性との関係の明確化と課題①, ②へのフィードバック	縦型ダイオードにて基板/エピ界面の品質と耐圧特性との相関を確認	◎	・基板/エピ層の品質向上による耐圧向上の確認と考察

成果の達成度欄は, ◎: 目標を大幅に上回り達成, ○: 今年度中に目標を達成または達成見込み, △: 来年度以降の達成の指標での評価。

プロジェクト全体の成果発表内訳

特許, 論文, 外部発表等の件数(内訳)

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT※ 出願	査読付き	その他	
H19FY	3件	0件	0件	1件	0件	13件
H20FY	11件	5件	1件	7件	0件	21件
H21FY	9件	1件	2件	2件	0件	6件

III-2 研究開発項目毎の成果

III-2-1 高品質大口径単結晶基板の開発

研究は、順調に進捗しており、平成21年度中間目標を達成見込みである。表 1 に、目標に対して得られた成果、達成度、及び今後の課題を示す。

(1) 窒化物単結晶成長における基礎技術の検討

① 溶液状態制御技術の開発

・溶液攪拌時における溶液流れに関して、大型炉における1軸揺動攪拌について自由界面モデルを用いて Fluent で解析したところ、静置状態と比較して揺動攪拌条件(揺動角度:10°, 揺動周期:1~5rpm)では、揺動周期にかかわらず基板面上の流速が約30倍(~2cm/秒)に増加し、窒素濃度が均一化されることが分かった。

・高品質 GaN 結晶育成条件検討のため、育成圧力とマクロ欠陥(インクルージョン)の相関を調査したところ、インクルージョン低減に効果的である溶液攪拌を実施しない系において、育成圧力を3.7MPaから2.7MPaに低圧化すると、インクルージョン低減(30%以上⇒5%以下)が可能であることが明らかとなった。

・2インチφ有極性基板上において、転位密度が 10^4cm^{-2} ~ 10^5cm^{-2} 台になるなど、ほぼ中間目標通りの値を得ることに成功した。

・新型揺動装置開発として4軸シャフトによる揺動制御技術の高度化を実施し、正転回転、反転回転、1軸揺動などの揺動条件との検討を行ったところ、従来の1軸攪拌よりも回転攪拌は窒化率が上昇しており、より攪拌されていることが示唆される。また、膜厚分布も回転攪拌で改善され、大型結晶育成のために回転攪拌が有望であることが分かった。回転攪拌の中では、窒化率、膜厚分布の観点から反転がもっとも攪拌効果が高いことが分かった。この反転揺動条件により、φ4インチ基板の全面にLPE成長することができた。面内の厚さバラツキはφ2インチと同等であった。

② 核発生・成長方位・転位制御技術

・転位低減に有効な成長モード解明に向けた溶液組成の検討を行ったところ、低Ga比組成では、横方向成長が促進され平坦なLPE結晶が得られた。一方、高Ga比組成では三次元成長することが分かり、溶液組成により成長モードを制御できることが明らかになった。高Ga比組成では、転位密度は低減するが成長量(成長速度)が小さく、一方、低Ga比組成では、転位密度は減少しないが、成長量(成長速度)は大きいことが分かった。

・様々な無極性種基板結晶上でLPE成長を実施したところ、HVPE法で作製したm面HVPE基板上にLPE育成したGaN結晶では、多くの粒界が観測され、転位密度も $\sim 10^8\text{cm}^{-2}$ であったが、m面HVPE基板の転位密度は計測が困難なほど多数存在しているとみられることから、Naフラックス法により転位は低減していることが分かった。また、c面HVPE法で作製したGaN結晶から切り出したa面基板、及びm面基板上にLPE育成したGaN結晶では、多いところでも転位密度は $\sim 1 \times 10^7\text{cm}^{-2}$ であり、部分的には中間目標値を上回る $< 10^6\text{cm}^{-2}$ であった。これらの結果は、Naフラックス法を用いて無極性面成長を行った場合でも、有極性面成長と同様に転位密度が減少し、結晶性が改善されることを示すものである。そして、a面、及びm面成長において、種基板結晶の結晶性が高いほど、低転位無極性単結晶成長に有用であることが明らかになった。

・成長方位制御のために成長面に対するSr添加効果の調査を行ったところ、Sr添加量の増加に伴い、自然核のアスペクト比(c軸長/a軸長)は増大し、m面が広く現れたm面GaN LPE結晶を得ることが出来るなど、Sr添加は成長方位制御に有効であることが分かった。

(2) 大口径種結晶の開発

・HVPE下地基板材料およびバッファー層材料と作製条件を探索し、10mm□以上の自立m面GaN結晶を作製するとともに、NaフラックスLPE種結晶として合計52枚提供した。さらに、直径約45mmのm面、及び10mm□以上のa面自立基板の作製に成功した。無極性基板との比較のために、半極性基板としてサファイヤ上HVPE成長によりφ2インチ{11-22}面GaNテンプレートの作製に成功した。

・m面に適した清浄環境下で種結晶を作製するため、2インチHVPE装置を新規導入し、反応管構造・材質等を工夫することにより、m面GaN結晶中のSi濃度 $< 5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 、酸素濃度 $\leq 2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ まで低減することに成功した。

(3) 高導電性窒化物単結晶基板の開発

・小型炉で温度、炭素添加量等の育成条件を最適化し、Ge取込量: $2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ を実現した。ホール測定にて抵抗率を測定したところ、 $0.017\Omega \cdot \text{cm}$ であった。今後、無極性基板でのGe添加実験を実施する。

(4)高抵抗化窒化物単結晶基板の開発

・不純物低減技術として、φ2インチ結晶育成において、H19 年度で見出した小型炉での育成環境高純度化条件を適用し、さらに育成容器を三重構造とし、炉材からの不純物を含む雰囲気と隔離することで従来よりも酸素濃度が低減された。

・高抵抗化に向けた各種元素の添加実験を行った結果、元素種類によらず、ノドープでの残留キャリア濃度以上の濃度を添加すると高抵抗化することを見出した。Mnを $3 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 導入した結晶の比抵抗は $10200 \Omega \cdot \text{cm}$ に高抵抗化し、Znを $10^{19}/\text{cm}^3$ 程度添加すると $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ まで高抵抗化することが分かった。

表 1 目標に対して得られた成果, 達成度, 及び今後の課題

研究項目	最終目標	中間目標	成果		今後の課題 (対最終目標)
			中間目標に対する達成値	達成度	
①高品質大口径単結晶基板の開発	有極性面				
	4インチ単結晶、 転位密度 $5 \times 10^3 \text{cm}^{-2}$	2インチ単結晶 転位密度 $< 10^5 \text{cm}^2$	2インチφ基板上において $10^4 \text{cm}^{-2} \sim 10^5 \text{cm}^{-2}$ 台	○	溶液攪拌条件の検討による結晶品質の均一化
	無極性面				
	3~4インチ単結晶、 転位密度 $< 10^5 \text{cm}^{-2}$ 、 積層欠陥 $< 10^3 \text{cm}^{-1}$	・最適育成条件の検討、 ・転位密度 $< 10^6 \text{cm}^{-2}$	$< 10^6 \text{cm}^{-2}$	○	種基板結晶の 大面積高品質化
	伝導度制御				
	・導電性基板 比抵抗 $< 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 、	・導電性基板 比抵抗 $< 10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$	$2 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$	◎	Geの高濃度添加
	・高抵抗基板 比抵抗 $> 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$	・高抵抗基板 比抵抗 $> 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$	$10^8 \Omega \cdot \text{cm}$	◎	Znの均一化
	3インチ及び4インチ結晶 大型化に必要な要素技術 を明らかにする。	種基板結晶に必要な条件が 明らかになってきた。 溶液攪拌技術の高度化の重要性が分かった。	◎	大口径高品質種基板結晶の作製、及び溶液攪拌条件の最適化	

(1)窒化物単結晶成長における基礎技術の検討

① 溶液状態制御技術の開発

・溶液攪拌条件の検討

大阪大学では、これまでに Na フラックス法で GaN 結晶を育成する際に、溶液攪拌を導入すると成長速度、及び結晶品質が向上する効果を見出してきた。ここでは、より効果的な溶液攪拌条件を検討するために、図 1 に示す機械式揺動育成炉を用いた結晶育成結果と流体計算ソフト(Fluent)によるシミュレーション結果の比較から、揺動の有無による溶液の流速、育成した GaN 結晶のモフォロジーとの相関を調べた。

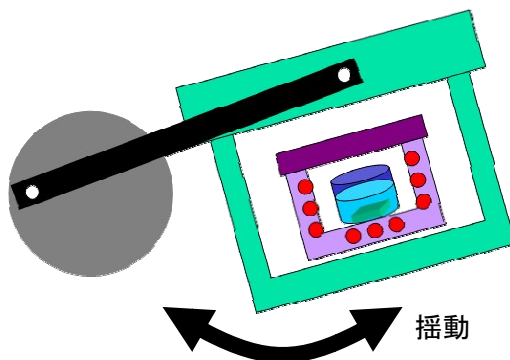


図 1 機械式揺動育成炉の概略図

流体計算ソフト(Fluent)を用いて、揺動の有無による基板表面の流速の変化をシミュレートした。基板サイズ 2 インチ、揺動速度 1rpm の条件で計算を行った。図 2(a), (b)はそれぞれ揺動無し、有り(1rpm)の条件における基板表面の溶液流速の計算結果を示している。揺動無し(図 2(a))の条件では、基板表面にほとんど流れが存在せず、基板端においてランダムな流れが存在することが分かった。一方で、揺動を行った場合(図 2(b))、基板表面で均一な流れが形成され、流速は揺動無しの場合と比較して約 30 倍(2cm/sec)に増加することが明らかになった。また揺動の周期と同期するように、流れの方向が入れ替わり、図 2(b)では右下から左上への流れが示されているが、時間とともに反転して左上から右下への流れと成り、それが交互に繰り返されることが分かった。また、種基板結晶の設置位置にも流速は依存し、一方向揺動の場合は種基板結晶を容器底に密着させる場合よりも、片方を浮かせて斜めに設置する方が、流速が 2 倍程度速くなることが分かった。

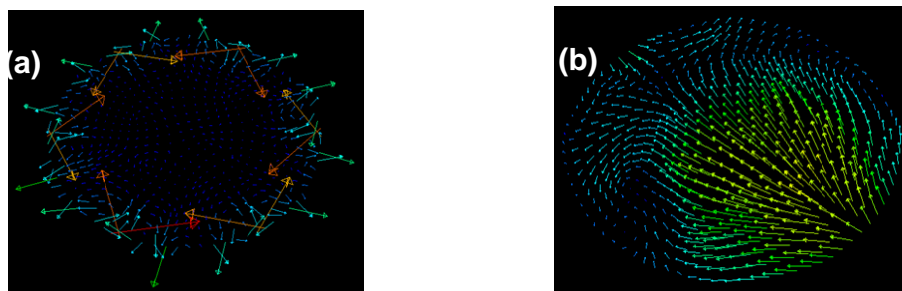


図 2 (a)揺動無し、(b)揺動有り(1rpm)条件での基板表面における流れの計算結果

図 1 に示す機械的揺動育成炉を用いて 2 インチ GaN 結晶育成を行うことで機械式揺動の効果を調べた。育成温度は 860°C、育成室素圧力は 45atm、育成時間は 96 時間で一定とした。揺動速度は 0(揺動無し)、1rpm(揺動あり)とした。図 3(a), (b)はそれぞれ揺動無し、有りで成長した GaN 結晶写真である。揺動無しの条件で成長した GaN 結晶(図 3(a))は、基板端部に異常成長が起こり、平坦性の低い表面モフォロジーとなった。一方で、揺動有りの条件で成長した GaN 結晶(図 3(b))には異常成長が見られず、揺動の導入により著しく表面平坦性が改善されることが明らかになった。

このことから、Na フラックス法による GaN 結晶育成においては、結晶成長表面における溶液流れ方向、及び流速の制御が重要であることが明らかとなった。

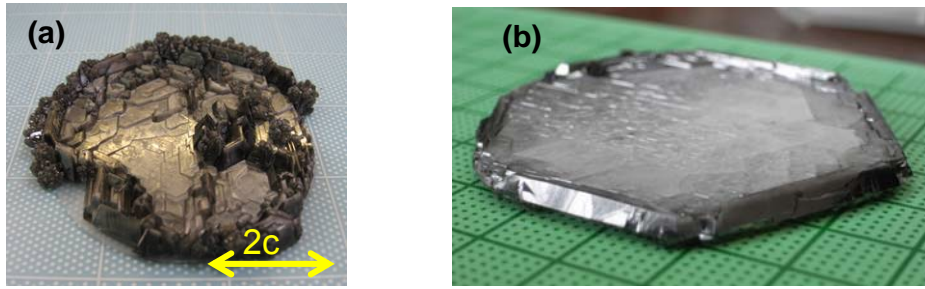


図3 (a)揺動無し、(b)揺動有り(1rpm)条件で成長した GaN 結晶写真

・大口径化にむけた大型育成装置開発

大口径化に必要な溶液攪拌条件を検討するため、図4に示す大型 GaN 結晶育成装置を設計、導入し育成条件の検討を行った。先ず始めに、育成条件(温度、圧力)の最適化、及び大型機育成で必要な育成雰囲気改善を行うことにより、透明な結晶を育成できる標準条件を確立した。



図4 大型 GaN 結晶育成装置

上述の揺動攪拌実験結果をもとに、より効果的な溶液攪拌を実現するために、図5に示すような4軸攪拌機構を導入した。この4軸揺動機構では、圧力容器4角にそれぞれ独立に上下運動できるロッドを配置し、それぞれのロッド高さを制御することで圧力容器を自在に揺動させることが可能となる。具体的には、従来の1方向揺動から、正回転、反転(一定周期ごとに回転方向変化)、間欠(一定周期ごとに回転、停止の繰返し)などの回転揺動が可能となり、また、ロッドのストローク長、サーボモータの回転速度を制御することで、揺動周期、揺動角度を変化させることも可能である。この4軸揺動機構で溶液攪拌の高度化し、大口径結晶の均一な育成が期待できる。

この4軸揺動機構にて、図5に示す各揺動パターンの攪拌効果を検証するための実験を、傾斜角 10° 、揺動周期1rpmの一定条件で行った。図6に示すように従来の1軸攪拌よりも回転攪拌は窒化率が上昇しており、より攪拌されていることが示唆される。また、膜厚分布も回転攪拌で改善され(図7)、大型結晶育成のために回転攪拌が有望であることが分かった。この回転揺動条件により、図8に示すように、 $\phi 4$ インチサファイアテンプレート GaN 基板上全面に LPE 成長することができた。まだ条件が十分に検討されていないため結晶に着色が見られるものの、平均膜厚は1.3mmで、面内の厚さバラツキは $\phi 2$ インチと同等であった。

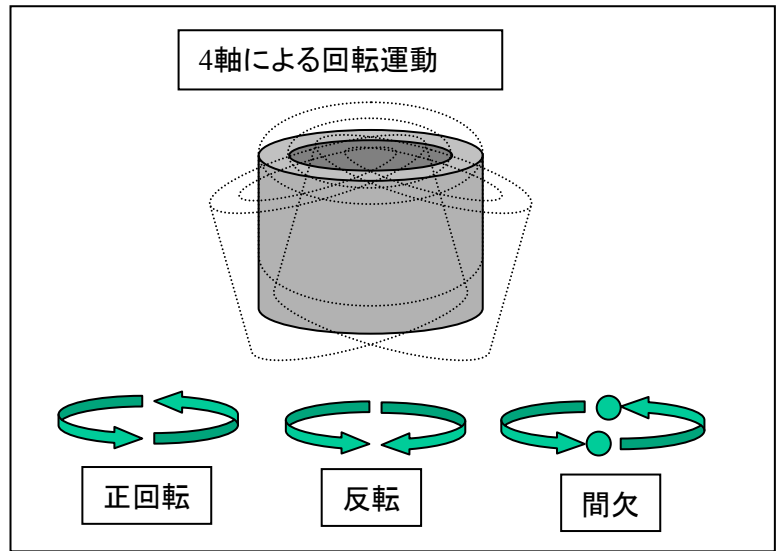


図5 4軸揺動機構付大型 GaN 結晶育成装置と揺動パターン

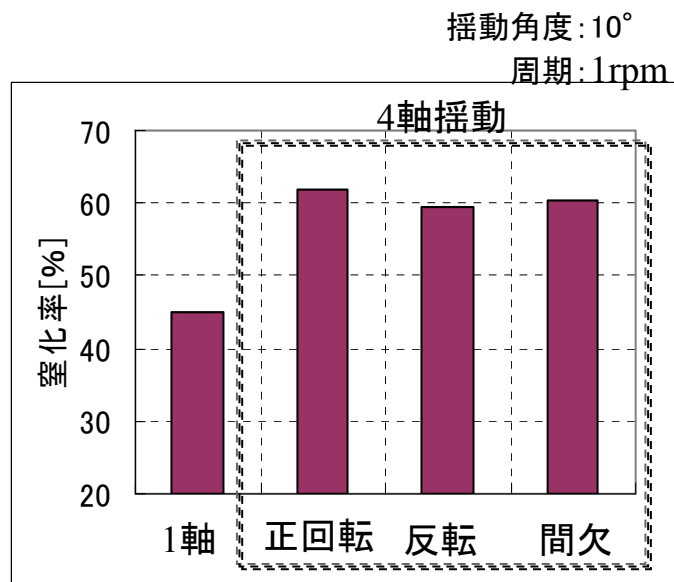


図6 揺動パターンと窒化率の相関

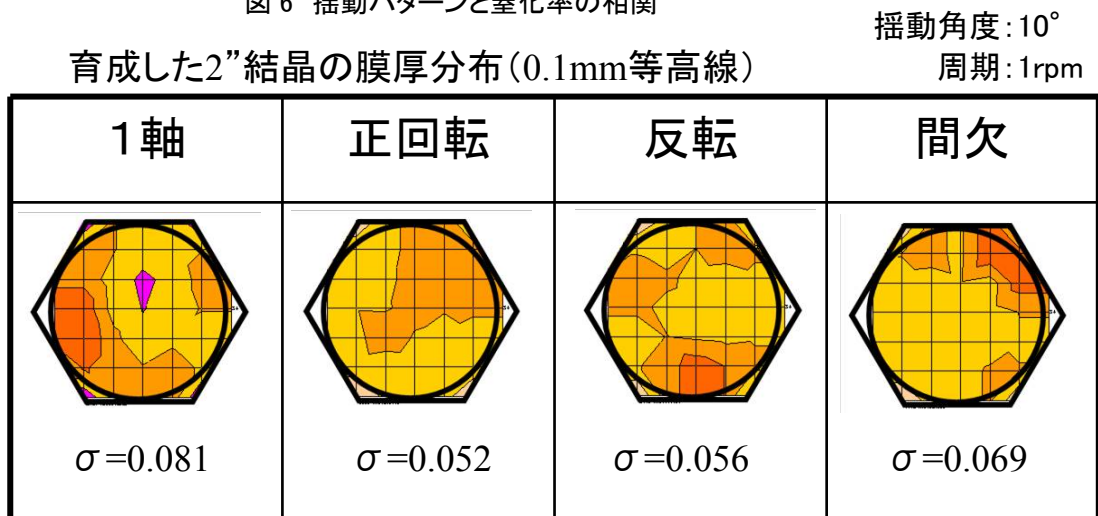


図7 揺動パターンと GaN 結晶膜厚分布の相関



図 8 4 インチサファイアテンプレート GaN 基板上に育成した GaN 結晶

②核発生・成長方位・転位制御の開発

・転位減少機構の解明

Na フラックス法の特徴として、高転位密度の種結晶基板上においても、育成中に自発的に転位密度が減少し $10^4 \sim 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 程度の低転位化が達成できる点が挙げられる。さらなる転位密度の低減に向けて、本手法における転位減少メカニズムを解明することは重要な課題である。これまで、成長初期に形成される(10-10)ファセットにより転位が減少するモデルを提唱してきた。しかし、過去のモデルで明らかになっているのは $10^8 \sim 10^9 \Rightarrow 10^6 \text{ cm}^{-2}$ の減少モデルであり、 10^6 cm^{-2} から実際の転位密度である $10^4 \sim 10^5 \text{ cm}^{-2}$ への減少モデルは未解明である。そこには、成長後期における別の転位減少メカニズムが働いていると考えられる(図9)。そこで、本研究では成長後期における転位の挙動を調査するため、GaN 結晶(転位密度: $10^4 \sim 10^5 \text{ cm}^{-2}$)中の転位を調査した。

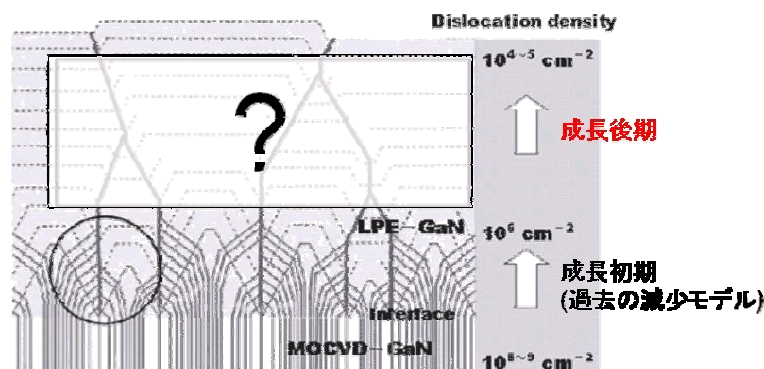


図 9 Na フラックス法における自発的転位減少モデル

成長後期の転位密度は 10^6 cm^{-2} 以下と低く、透過型電子顕微鏡で転位をトレースすることは困難である。そこで、GaN 結晶表面から研磨とエッチングを繰り返すことで、成長中の各時点における転位をプロットし、その軌跡を追った。図 10(a), (b)はそれぞれ 1.12mm, 1.2mm 厚さにおける、エッチング後の微分干渉顕微鏡像である。写真中の黒い点が転位である。図 10(a), (b)を比較すると、成長に伴い((a) \Rightarrow (b))転位列(図 10 中の" \Rightarrow ")が低転位領域から高転位領域へと他の転位をのみこみながら移動することが分かった。図 11(a), (b)は成長前期、後期の結晶表面モフォロジーであるが、成長後期ほど横方向成長が支配的になり、大きなグレインが小さなグレインをのみこみながら成長することが分かる。つまり、図 10に見られる転位列はグレイン間の境界と考えられ、成長後期では大きいグレインが小さいグレインをのみこみながら横方向成長し、同時にその境界で転位をのみこみながら成長すると考えられる。

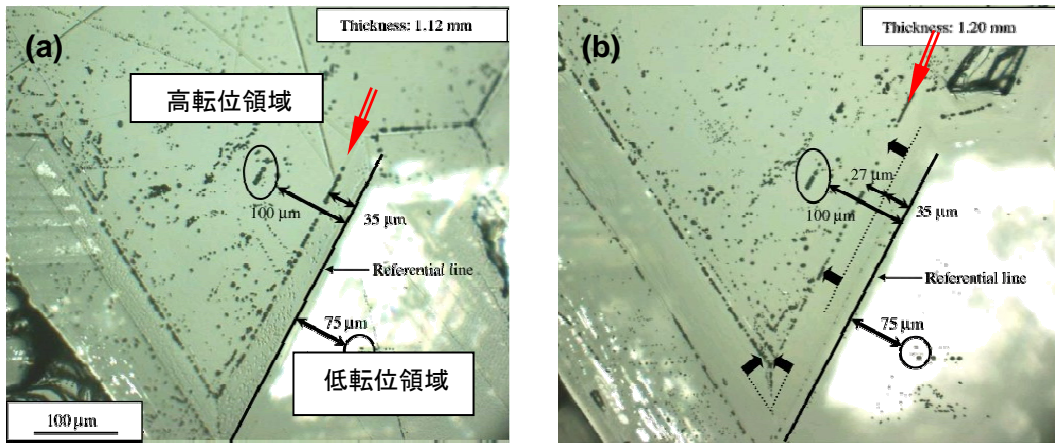


図 10 (a)1.12mm、(b)1.2mm 厚さ表面におけるエッチング後の顕微鏡写真

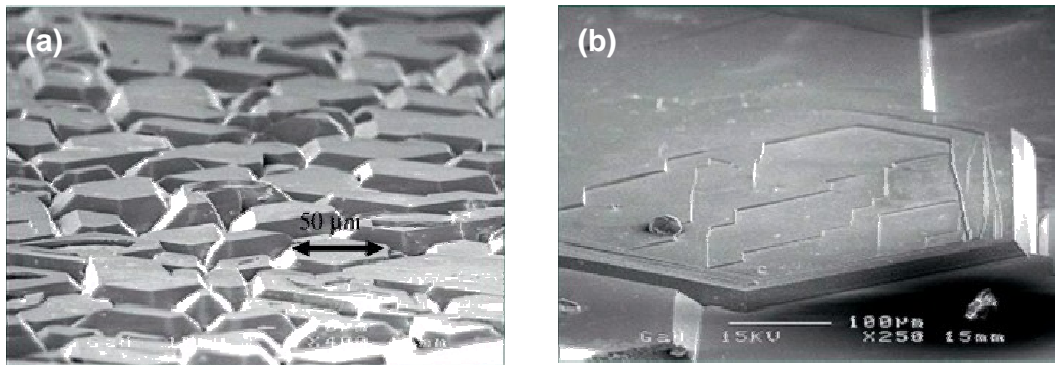


図 11 成長(a)初期、(b)後期の結晶表面の電子顕微鏡像

以上の結果から、Na フラックス法では成長初期に(10-11)面の成長が、成長後期に横方向成長が関与する2段階の転位減少メカニズムが働くことで、極めて低転位な結晶が実現することが明らかになった。

・転位減少機構の制御

さらなる低転位化と厚膜化を実現するためには、成長モードの制御が必要となる。そこで、Ga/Na 比条件と成長モード、転位密度、成長量(成長速度)の関係調べた。図 12 に様々な Ga/Na 比条件で成長した GaN 結晶の結晶写真と電子顕微鏡像を示す。低 Ga 組成(Ga:Na=18:82)では主に(0001)面が現れた二次元成長モードであるが、Ga 組成の増加とともに(10-11)、(10-12)面が広く出現し、成長モードは三次元成長モードに変化することが分かる。図 13 に各 Ga/Na 比条件で成長した GaN 結晶の転位密度を示す。

従来の条件(Ga:Na=30:70)では、成長初期の転位密度は $8.3 \times 10^5 \sim 1.1 \times 10^6 \text{cm}^{-2}$ であったが、(10-11)、(10-12)面が広く現れた高 Ga 組成条件(Ga:Na=40:60)で成長した GaN 結晶では、転位は最小で $3.0 \times 10^5 \text{cm}^{-2}$ まで低減することが分かった。転位の低減は(10-11)面の成長とともに転位が曲げられ一部に集中することで起こる。高 Ga 組成では(10-11)面の形成が従来の低 Ga 組成条件よりも促進されるため、より多くの転位が曲げられることで低転位化が進行したと考えられる。