

「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」(事後評価)第一回分科会
資料5

「次世代照明等の実現に向けた窒化物半導体等基盤技術開発／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 電子・材料・ナノテクノロジー部
-----	--

—目次—

概要.....	i
プロジェクト用語集.....	iv
I. 事業の位置付け・必要性について	I-1
1. NEDO の事業としての妥当性.....	I-1
1-1 NEDO が関与することの意義.....	I-1
1-2 実施の効果(費用対効果).....	I-3
1-3 事業の背景・目的・位置づけ.....	I-4
II. 研究開発マネジメントについて	II-1
1. 事業の目標.....	II-1
2. 事業の計画内容.....	II-4
2-1 研究開発の内容.....	II-4
2-2 研究開発の実施計画.....	II-6
2-3 研究開発の実施体制.....	II-8
2-4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメント.....	II-9
2-5 情勢変化への対応等.....	II-11
III. 研究開発成果について	III-1
1 事業全体の成果.....	III-1
2 研究開発項目毎の成果.....	III-9
2-1 高品質大口径単結晶基板の開発.....	III-9
2-1-1 窒化物単結晶成長における基礎技術の検討および大口径化技術の開発.....	III-9
2-1-2 大口径種結晶の開発.....	III-26
2-1-3 高導電性窒化物単結晶基板の開発.....	III-31
2-1-4 高抵抗化窒化物単結晶基板の開発.....	III-35
2-1-5 新技術の調査、国内外の動向調査.....	III-39
2-2 高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発.....	III-40
2-2-1 大口径基板上の高品質エピタキシャル結晶成長技術.....	III-40
2-2-2 高 In 組成窒化物層成長技術.....	III-45
2-2-3 高 Al 組成窒化物層成長技術.....	III-48
2-2-4 結晶成長その場観察評価技術.....	III-59
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-60
2-3-1 横型電子デバイスの評価.....	III-60
2-3-2 縦型電子デバイスの評価.....	III-73
2-3-3 窒化物単結晶基板上デバイスの優位性確認.....	III-86
2-3-4 有極性及び無極性デバイス構造の比較.....	III-97
IV. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて	IV-1
1 高品質大口径単結晶基板の開発.....	IV-1
1-1 古河機械金属株式会社.....	IV-1
1-2 豊田合成株式会社.....	IV-1
1-3 日本ガイシ株式会社.....	IV-2
2 高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発.....	IV-3
2-1 昭和電工株式会社.....	IV-3
2-2 住友電気工業株式会社.....	IV-4
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-5
3-1 シャープ株式会社.....	IV-5
3-2 株式会社豊田中央研究所.....	IV-5
3-3 サンケン電気株式会社.....	IV-6

(添付資料)

- ・イノベーションプログラム基本計画・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・添付 1-1
- ・プロジェクト基本計画・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・添付 2-1
- ・事前評価関連資料(事前評価書)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・添付 3-1

概 要

最終更新日	平成25年 4月25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	次世代照明等の実現に向けた窒化物半導体等基盤技術 開発／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	P 0 7 0 3 0
担当推進部/ 担当者	電子・材料・ナノテクノロジー部 担当者：工藤 祥裕・高井 伸之（平成22年11月～平成25年2月） 電子・材料・ナノテクノロジー部 担当者 太田 雅彦 （平成21年9月～平成22年10月） 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19年10月～平成21年8月） 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）		
I. 事業の位置づけ・必要性について			
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、電子デバイス作製技術では、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であり、最先端のナノエレクトロニクスの研究開発のため企業のみで研究開発を行う ことはリスクが高い。</p> <p>また本技術開発により、高出力高周波デバイス、パワーデバイス、高電流密度LED等の市場が期待でき、 日本企業が国際競争力を確立できる新市場創出につながる。</p> <p>以上から国家プロジェクトとして大学、材料メーカー、デバイスメーカー、装置メーカー等が相互連携し て各々の技術を結集して基盤技術（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）の革新を推進 することが効果的且つ効率的である。</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、我が国のパワー半導 体市場での国際競争力強化に大きく貢献し、またエネルギー消費量削減に寄与する。省エネ効果は、 汎用インバータのみをとっても2030年において電力削減量 89億kWh/年、CO2削減量と しては496万トン/年、原油換算189万キロリットル/年に相当する。</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。</p> <p>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 エピ層を実現する。加 えて、AlN-GaN-InN 混晶エピ層を実現する。</p> <p>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		2007	2008	2009	2010	2011	2012
	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		→	→	→	→	→	→
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	合計	2007	2008	2009	2010	2011	2012
	一般会計							
	特別会計 (需給)	2,335	470	570	680	221	294	100
	加速予算	171	116				55	
	総予算額	2,506	586	570	680	221	349	100
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~) 名古屋大学 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、名古屋大学 天野浩(平成21年7月~))					
	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)	<p>企業、研究機関：(国)大阪大学、(国)福井大学、(国)名古屋大学 昭和電工(株)、住友電気工業(株)、サンケン電気(株) シャープ(株)、(株)豊田中央研究所、古河機械金属(株)</p> <p>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</p> <p>再委託先：古河機械金属(株)、(学)名城大学</p>						
情勢変化への対応	<p>電子・材料・ナノテクノロジー部主催による「技術推進委員会(年1回)」を適宜開催して外部有識者の意見をプロジェクト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】が速やかに提供できるようなグループ間の連携強化」が指摘され、対応策として平成19年度に「研究加速による基板供給スピードのアップ」の見直しの実施、平成21年度には「基板単位の進捗・リリース管理強化」を図った。その結果、基板供給がスピードアップし、①$5 \times 10^3 \text{cm}^2$以下の低転位な4インチ大口径 GaN 基板の作製、GaN デバイス試作・優位性評価を実現し、その成果を CEATEC2013、nanotech2013 展示会で発表し世界初の成果について広く情報発信を行った。</p> <p>平成24年度の第三回技術推進委員会では、委員会提言として「研究成果を高く評価しつつ実用化・事業化に向けた上電子デバイスによる特性の評価の加速化が重要」の指摘を受けて NEDO にて他の GaN 基板メーカーとの連携の働きかけを実施。その結果 GaN 基板ベースの電子デバイスの優位性を明確化することができた。</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25年度 事後評価実施						

<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」では、本プロジェクトで開発した HVPE 法による大口径の種結晶を用いることにより、低転位化に特徴がある Na フラックス法で4インチサイズの高品質・有極性 GaN 基板の開発に成功し、光デバイスや縦型電子デバイスに有用な導電性 GaN 基板、主に横型電子デバイスで必要となる高抵抗 GaN 基板を実現させた。また、さらなる低転位化や無極性基板の大口径化につながる、新しい結晶成長技術を提案した。</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」では、無欠陥ヘテロ接合構造を実現するために世界に先駆けて開発した加圧デジタル MOVPE 装置を用いて、成長シミュレーションなども駆使することにより、高い In 組成および高い Al 組成をもつ InGa_N 層や AlGa_N 層などの三元混晶の、高品質大口径エピタキシャル成長技術を確立した。そして、デバイスグループとの協業により、実際にヘテロ構造デバイスを試作することで、高耐圧化に有利な AlN 基板上的高 Al 組成の AlGa_N チャネルデバイスや、高移動度が期待される InGa_N 系デバイスなどの可能性を示した。さらに、横型デバイスにおいて重要な高抵抗緩衝層の新しい成長技術を提案した。</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」では、①および②で開発した低転位密度の単結晶基板やエピタキシャル基板を用いてデバイス評価を行うことで、基板開発やエピ成長技術開発にフィードバックを行った。横型デバイスおよび縦型デバイスの試作によるリーク電流と結晶欠陥の相関の解析では、電子デバイス用途における低欠陥基板の必要性を示した。パワーデバイスとして競合する Si 基板上や SiC 基板上の GaN デバイスと、本プロジェクトで開発した自立 GaN 基板上的 GaN デバイスとの比較評価では、自立 GaN 基板上的 GaN パワーデバイスが、オン抵抗と耐圧の関係において既に実用化されている前者と特性面でそん色がないことを示すとともに、さらなる特性を引き出すための今後の指針を示した。また、試作した GaN トランジスタや GaN ショットキーダイオードを用いたインバータによるモーター駆動などの実機動作を行い、GaN パワーデバイスの実用性を示した。無極性単結晶基板を用いたデバイスについても、課題と可能性を示した。</p> <p>以上から、各Gとも最終研究開発目標は達成した。</p>						
	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="384 1064 624 1099">投稿論文</td> <td data-bbox="624 1064 1532 1099">55件（内「査読付き」10件）</td> </tr> <tr> <td data-bbox="384 1099 624 1144">特許</td> <td data-bbox="624 1099 1532 1144">94件（内「登録済」10件）（内国際出願53件）</td> </tr> <tr> <td data-bbox="384 1144 624 1211">その他の外部発表（プレス発表等）</td> <td data-bbox="624 1144 1532 1211">200件（内外部発表180件、プレス他20件）</td> </tr> </table>	投稿論文	55件（内「査読付き」10件）	特許	94件（内「登録済」10件）（内国際出願53件）	その他の外部発表（プレス発表等）	200件（内外部発表180件、プレス他20件）
投稿論文	55件（内「査読付き」10件）						
特許	94件（内「登録済」10件）（内国際出願53件）						
その他の外部発表（プレス発表等）	200件（内外部発表180件、プレス他20件）						
<p>Ⅳ. 実用化・事業化に向けた見通しについて</p>	<p>プロジェクトリーダーとともに世界的に実績のある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した。本成果は参画企業（GaN基板、エピ成長、電子デバイス）に技術移管され、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及び新事業立ち上げに大きく貢献する。汎用インバータ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189万kLに相当し、また GaN デバイス市場でも1兆円規模の売上効果が期待できる。</p>						
<p>Ⅴ. 基本計画に関する事項</p>	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="384 1491 528 1570">作成時期</td> <td data-bbox="528 1491 1532 1570">平成19年3月 制定 平成23年3月改訂</td> </tr> <tr> <td data-bbox="384 1570 528 1852" rowspan="3">変更履歴</td> <td data-bbox="528 1570 1532 1659">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</td> </tr> <tr> <td data-bbox="528 1659 1532 1749">平成23年3月 「次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発」の統合改訂</td> </tr> <tr> <td data-bbox="528 1749 1532 1852">平成24年3月 期間延長及び目標を追加</td> </tr> </table>	作成時期	平成19年3月 制定 平成23年3月改訂	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	平成23年3月 「次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発」の統合改訂	平成24年3月 期間延長及び目標を追加
作成時期	平成19年3月 制定 平成23年3月改訂						
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						
	平成23年3月 「次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発」の統合改訂						
	平成24年3月 期間延長及び目標を追加						

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 μ m/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 (2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であり、また最先端のナノエレクトロニクスの研究開発のため、企業のみで研究開発を行うことはリスクが高い。

また本技術開発により、高出力高周波デバイス、パワーデバイス、高電流密度 LED 等の市場が期待でき、日本企業が国際競争力を確立できる新市場創出につながる。

以上から国家プロジェクトとして大学、材料メーカー、デバイスメーカー、装置メーカー等が相互連携して各々の技術を結集して基盤技術(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)の革新を推進することが効果的かつ効率的である。

3

ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 事後評価分科会(2013.6.24)

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(プロジェクト実施の背景)

プロジェクト実施の社会的背景

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

プロジェクトの目的

超高効率省エネデバイスの実現による電力損失の削減



従来の半導体材料では実現できない超高効率の電力機器等を実現するため、優れた材料特性が期待されるGaNを対象とし、結晶成長・エピタキシャル成長技術を中心に開発する

「第三期科学技術基本計画(2006年3月)」、「エネルギー技術戦略の基本的考え方(2006年5月)」、「新・国家エネルギー戦略(2006年5月)」等における重要な省エネ技術としての位置付け。

事業原簿(公開版) I-1

3/19

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。

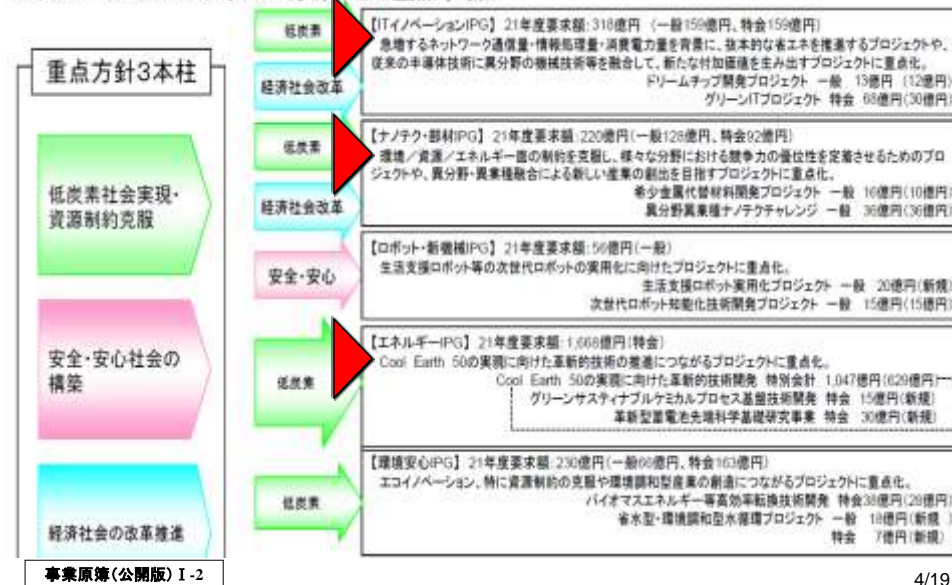
また21世紀の革新的技術として、情報、環境、安全・安心、エネルギー等の広範な分野の基盤技術である材料技術を根幹から変貌させることが期待されるナノテクノロジー(物質の構造をナノレベルで制御することにより、機能・特性の向上や新機能の発現を図る材料技術)の基盤技術を構築することを目的とする「ナノテク・部材イノベーションプログラム」及びITの利活用の深化・拡大を図り、より豊かな国民生活を実現するとともに、我が国の経済活力の向上を図ることを目的とする「ITイノベーションプログラム」の一環としても本プロジェクトを実施する。

1. 事業の位置付け、必要性について

公開

(1) NEDOの事業としての妥当性(政策との関係性)

<イノベーションプログラムの分野ごとの重点事項>



高周波、パワーデバイス用としての省エネルギーデバイスの実現は、低炭素社会の実現に向けて社会的にも重要であり、国家として取り組むべき課題である。また情報機器、家電機器におけるデバイスの省エネルギー化はデバイス事業においても、その実現に必要な関連部材事業においても企業競争力強化につながる。さらにその応用分野としては自動車産業、医療機器産業へも拡大が期待できる。

しかしながらこのような省エネルギー用のパワーデバイス実現の研究開発は難易度が高く、且大掛かりな投資規模が必要なため、開発リスクが高い。市場が不確定な状況での開発リスクの高い大規模な研究投資が要求されるため、本課題については国家プロジェクトとして取り組む必要があると判断される。

1. 事業の位置付け、必要性について

公開

(1) NEDOの事業としての妥当性(NEDOプロジェクトとして取り組む必要性)

超高効率省エネデバイスの実現は、

○社会的必要性が大きい

- ・低炭素社会の実現(国家的課題の解決)
- ・企業の競争力強化(情報通信機器、自動車、医療機器、材料等)

○民間企業だけで取り組むことが困難

- ・研究開発の難易度が高い
- ・結晶成長技術やエピ成長技術の開発は大規模な研究投資が必要であり、開発リスクが大きい



NEDOが関与すべきプロジェクト

1-2 実施の効果(費用対効果)

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、日本の半導体産業、情報機器・家電機器企業、関連材料企業、製造装置企業等の競争力強化と産業活性化を図るとともに、国内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。本事業の目的の詳細は1-3章に述べる。

事業の実施効果は以下に汎用インバーター、携帯電話基地局に高周波デバイス、パワーデバイス等の高性能電子デバイス向け材料として期待される窒化物半導体 GaN を適用した場合の効果を以下の通り見積もる。汎用インバーターのみをとっても、2020年には GaN インバーターの売り上げ 4,700 億円/年(販売台数 2,050 万台/年(*1)、2.3 万円/一台と想定(*3))、省エネ効果は49億kWh/年で(概ね原発 1 基分(*4))。CO2 削減量は269万トン/年、原油換算103万キロリットル/年(*1))が見積もられる。さらに2030年には GaN インバーター売り上げ 1兆円(4,760 万台/年*1)、2.3 万円/一台と想定(*3))、省エネ効果は89億kWh/年(CO2 削減量は496万トン/年、原油換算189万キロリットル/年 (*1))が期待できる。

携帯電話基地局市場については、さらに、2020年には売り上げ効果2,100億円(販売台数21万局/年(*1)、100万円/局と想定(*2))、省エネ効果は50億kWh/年(CO2 削減量は272万トン/年、原油換算104万キロリットル/年(*1))が見積もられる。さらに2030年には売り上げ効果3,900億円(販売台数39万局/年(*1)、100万円/局と想定(*2))、省エネ効果は90億kWh/年(CO2 削減量は500万トン/年、原油換算190万キロリットル/年(*1))が期待できる。

(*1)「日機連 18 先端-9 報告書」(社)日本機械工業連合会、(*2)「2013 有望電子部品材料調査総覧」(株)富士キメラ総研、(*3)「2010 ワイヤレスBBアプリケーション市場調査総覧」(株)富士キメラ総研、(*4)「2009 年度(平成 21 年度)福島原発 1 号機データ」東京電力 より)

8

ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 事後評価分科会(2013.6.24)

1. 事業の位置付け、必要性について

公開

(2)事業目的の妥当性(プロジェクト実施により期待される効果)

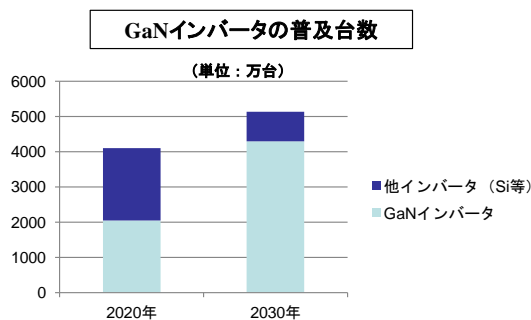
期待される市場創出効果・省エネ効果:インバーターの事例

●市場創出効果(汎用インバーター)

2020年: GaNインバーター

普及台数: **2,050万台**

売上規模: **4,700億円**



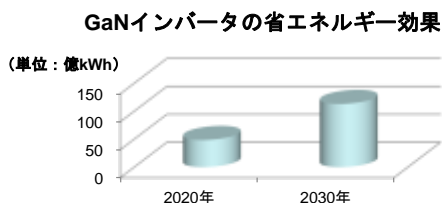
●省エネルギー効果(消費電力量)*)

2020年: 電力削減 **49億kWh/年**

(原発約1基分)

CO₂排出削減換算 **270万トン/年**

原油換算 **103万キロリットル/年**



* Siインバーター置換普及による省エネ効果

(出典: (社)日本機械工業連合会「日機連18先端-9」報告書、富士キメラ総研「2013有望電子部品材料調査総覧」、東京電力「平成21年度福島原発1号機データ」)

事業原簿(公開版) I-3

8/19

1. 事業の位置付け、必要性について

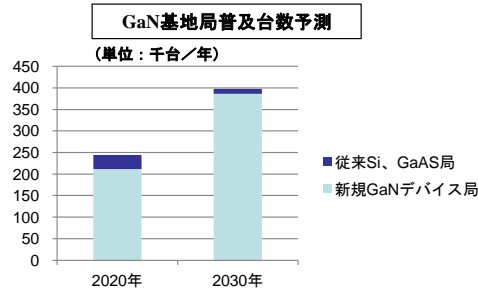
(2)事業目的の妥当性(プロジェクト実施により期待される効果)

公開

期待される市場創出効果・省エネ効果:携帯基地局向け高周波デバイスの事例

●市場創出効果(携帯基地局(送信増幅器))

2020年:新規GaN基地局

普及台数: **21万局**売上規模: **2,100億円**

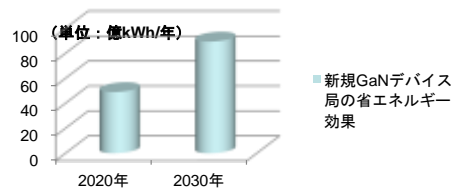
●省エネルギー効果(消費電力量)*)

2020年:電力削減 **50億kWh/年**

(原発約1基分)

CO₂排出削減換算 **272万トン/年**原油換算 **104万キロリットル/年**

新規GaNデバイス局の省エネルギー効果



*) GaAs, Si基地局置換普及による省エネ効果

(出典:(社)日本機械工業連合会[日機連18先端-9]報告書、富士キヤノ総研「2010ワイヤレスBB7アプリケーション市場調査総覧」、東京電力「平成21年度福島原発1号機データ」)

事業原簿(公開版) I-4

9/19

1-3. 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機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た。

このような省エネルギーパワーデバイス分野で高出力、高周波数特性、低損失性の特性に優れた材料特性をもつと期待されているGaNについては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た。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、そしてアモナル法による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かった。

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、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)の製造技術開発を進めるとともに、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に向けた基盤技術開発に本事業で取り組むこととした。

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こととした。本プロジェクトでは

- 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

の3つの課題に取り組むことにより、我が国の電子産業の競争力強化及びエネルギー消費量削減に大きく貢献することを目的とした。

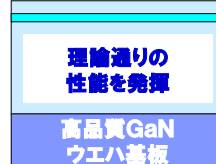
1. 事業の位置付け、必要性について
(2)事業目的の妥当性(プロジェクトの方向性)

公開

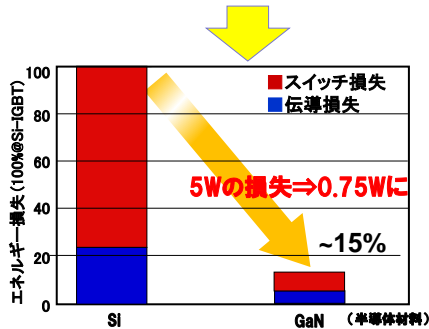
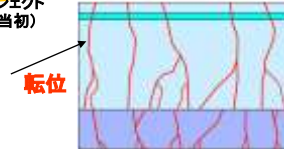
超高効率省エネデバイスを実現するには、優れた材料特性を持つ半導体材料が必須。
 →優れた材料特性が期待されるGaNを対象としてプロジェクトを実施。
 プロジェクト開始時点、技術的に未成熟だった結晶成長技術やエピ技術を重点的に実施。
 材料特性をデバイスとして実証するため、デバイスの試作や評価にも取り組む。

材料	n ⁺ ドギヤブ ¹⁾ (eV)	比誘電率	電子移動度(cm ² /Vs)	破壊電界(10 ⁴ V/cm)	飽和速度(10 ⁷ cm/s)	熱伝導率(W/cmK)
Si	1.10	11.8	1350	0.3	1.0	1.5
GaN	3.39	9.0	1200	5.0	2.5	2.3

目標 高品質GaNウエハ上のデバイス
転位密度 10³ cm⁻²以下



2007年度(プロジェクト開始当初) 低品質GaNウエハ上のデバイス
転位密度 ~10⁸ cm⁻²



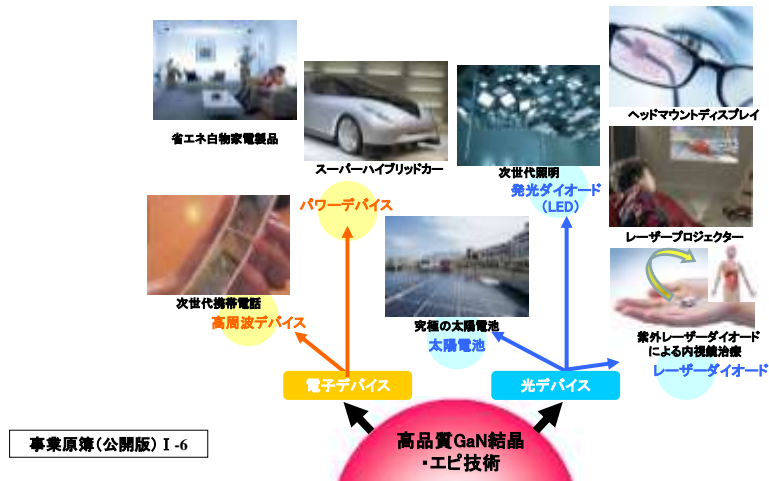
事業原簿(公開版) I-5

これまでの研究の多くは、結晶の高品質化に焦点を当てた内容が発表されているが、良質なGaN基板を効率的に生成するために、大型で高品質な結晶成長技術に注目して、さらにその実用化事業化につながる研究開発が必要となる。そのために本事業では、2011年度末までに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。さらに2012年度に一年延長して、GaNデバイスの実用化事業化促進のために、GaNデバイスの優位性を示す試作・評価の目標を追加設定した。本プロジェクトにより、幅広い用途により省エネルギー化が期待されるGaNデバイスの実用化事業化実現に貢献する。

1. 事業の位置付け、必要性について
 (2)事業目的の妥当性(幅広い用途が期待されるGaNデバイス)

公開

GaN結晶成長・エピ技術が高度化することで、様々な産業が省エネ等の恩恵を得られる。



事業原簿(公開版) I-6

II. 研究開発マネジメントについて

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、我が国のパワー半導体事業における産業競争力強化及びエネルギー消費量削減に大きく貢献する。

(1) 研究開発の最終目標

研究項目別の研究開発を以下に示す。

① 高品質大口径単結晶基板の開発

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する。有極性単結晶基板では転位密度 $<5 \times 10^3 \text{cm}^{-2}$ 、無極性単結晶基板では転位密度 $<10^5 \text{cm}^{-2}$ 、積層欠陥密度 $<10^3 \text{cm}^{-1}$ の特性を得る。また、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 大口径基板上の高品質エピタキシャル結晶成長技術

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、以下の低欠陥高品質Ga_xIn_{1-x}N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 $>10^{17} \text{cm}^{-3}$

口径4インチ基板状にて、面内均一度：厚み $\pm 10\%$ 、組成： $\pm 10\%$ 、ドーピング不純物濃度 $\pm 20\%$

また、Ga_xIn_{1-x}N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 $<10^5 \text{cm}^{-2}$

口径4インチ基板状にて、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

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を実施する。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を実施する。

また、Ga_xIn_{1-x}N基板を用いて、耐圧 $>1, 200\text{V}$ 級の縦型および横型トランジスタを試作・評価し、SiやSiC等多種基板との比較においてGa_xIn_{1-x}Nが有利または不利な点を明らかにする。

(2) 研究開発目標設定の背景

プロジェクト開始時点において理論的にはGa_xIn_{1-x}Nは当時高い材料特性を有する材料として認められていたが、これを実現する上で十分な品質の結晶が実現していなかった。そのため本プロジェクトでは、大口径高効率高成長速度による成長が期待される方式によりGa_xIn_{1-x}N結晶成長技術開発を実施した。

デバイスメーカーのニーズも考慮し、Ga_xIn_{1-x}N基板の大口径化(4 inch)と低欠陥化($5 \times 10^3 \text{cm}^2$)を中心にプロジェクトを推進した。併せて、Ga_xIn_{1-x}N基板の特性を最大限発揮することを目的としたエピタキシャル成長技術の開発、ならびにGa_xIn_{1-x}Nデバイスの試作及び特性評価を実施した。

Ga_xIn_{1-x}Nデバイスの開発に関しては、開発成果の実用化促進を狙い、参画した企業の意向も踏まえつつ、最終年度の平成22年度にはパワーデバイスとしての具体的な目標(耐圧1,200V級)を設定し、デバイスの試作まで実施した。

研究項目別の目標設定の背景を以下に示す。

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・電子デバイスは、現在GaN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かったため、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バルク単結晶を育成する技術を開発し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

化合物半導体エピタキシャル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 $>2\text{kV}$ 、また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。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エハとしては、厚みやキャリア濃度等のウエハ特性に関して、4インチ級の大口徑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

窒化物半導体電子デバイスは、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構造のみであった。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。

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。

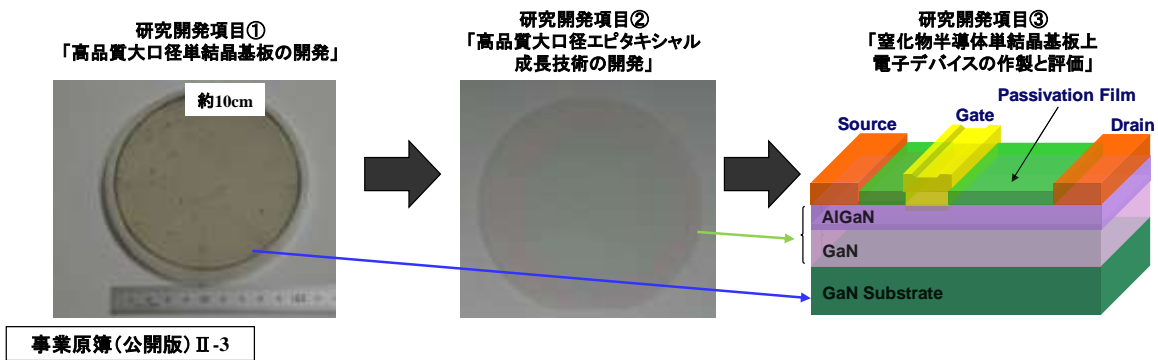
このような電子デバイスを実現するためには、高品質窒化物半導体基板の開発、及び理論的可能で現在ま

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、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。特に GaM 基板の実用化・事業化の観点での優位性を示すために 本基板を用いて、耐圧1, 200V級の縦型および横型トランジスタを試作・評価し、SiやSiC等多種基板との比較においてGaMが有利または不利な点を明らかにする。

10 ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 事後評価分科会(2013.6.24) 公開

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(プロジェクト目標設定の狙いおよび背景)

- GaN基板の開発、エピタキシャル成長技術開発、デバイス開発の3つをプロジェクトで実施。
- GaN基板が実用化しなければ超高効率省エネデバイスは実現しないため、GaN基板の大口径化と低欠陥化をプロジェクトの中心的な課題として設定。
- 超高効率省エネデバイスの実用化促進のため、GaN基板の開発とあわせて、エピタキシャル成長技術の開発、ならびにデバイスの試作・評価を実施。
- デバイス開発に関しては、最終年度の期間延長と目標引き上げを実施。成果の実用化促進を狙い、参画した企業の意向も踏まえてデバイスの具体的な目標(耐圧1,200V級)を設定し、性能実証を実施。



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24年度までの6年間とする。

(当初平成19年度から平成23年度までの5年間だったが、GaNデバイスの優位性を示すため③窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価に1年延長)

① 高品質大口径単結晶基板の開発

(a) 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。

(b) 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 μ m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。

(c) 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。

(d) 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 大口径基板上の高品質エピタキシャル結晶成長技術

(a) 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InGaN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InGaN層への不純物高濃度ドーピング技術を開発する。

(b) 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AlGaN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AlGaN層への不純物高濃度ドーピング技術を開発する

(c) 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AlGaN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AlGaN層への不純物高濃度ドーピング技術を開発する

(d) 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

(a) 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ー等を用い、簡素なソース/ゲート/ドレイン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的な特性の評価を行う。

(b) 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ェハー等を用い、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。

(c) 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ェハーをもとに、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。

(d) 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ェハーをもとに、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。

2-2 研究開発の実施計画

本事業は適宜体制を最適に変更しつつ、6年間にわたり、

- 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

3テーマに分けて連携しつつ並列的に研究開発を行うスケジュールとした。①②について、当初の予定どおり、2007年度～2011年度まで、③のテーマについては、2007年度～2012年度まで実施した。(③の2012年度までの1年期間延長の施策については後述する。)

11

ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 事後評価分科会(2013.6.24)

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(プロジェクト開発項目および実施計画)

- プロジェクト序盤は、GaN結晶成長とエピタキシャル成長の技術の高度化を重点課題として実施。
- プロジェクト後半は、GaNデバイスの実用化促進を重点化。2012年度には、プロジェクト予算の追加と期間延長を行い、GaNデバイスの性能実証まで目標を引き上げて実施。

開発項目	2007年度	2008年度	2009年度	2010年度	2011年度	2012年度(延長)
研究開発項目① 「高品質大口径単結晶基板の開発」 <目的> ・ GaN基板の大口径化 ・ GaN基板の低欠陥化	大型装置による溶液攪拌条件の検討、装置開発 (264百万円)	大型装置による溶液攪拌条件の最適化(2インチ) (194百万円)	大型装置による溶液攪拌条件の最適化(3インチ)、低転移化 (261百万円)	大型装置による溶液攪拌条件の最適化(4インチ)、低転移化 (120百万円)	大型装置による溶液攪拌条件の最適化(4インチ)、低転移化 (180百万円)	
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」 <目的> ・ 組成・膜圧の均一性が高いエビ技術の開発	MOVPE装置のガス流制御等による高品質エビ成膜技術の開発 (285百万円)	超高速パルスイッチング高温デジタルMOVPE装置の設計、導入 (288百万円)	デジタルMOVPE(AIGaN、InGaNエビの組成・膜圧均一性向上、及び大口径基板への対応等) (243百万円)	装置による大口径エビ技術の開発 (74百万円)	技術の開発 (99百万円)	
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」 <目的> ・ GaNデバイスの特性評価 ・ 高耐圧デバイスの特性実証	基本的な電気特性評価技術の開発 (37百万円)	トランジスタの試作による特性評価(GaNの特性評価、基板の種類による優位性比較等) (88百万円)	トランジスタの試作による特性評価(縦型と横型のデバイス特性比較、リーク低減等) (176百万円)	トランジスタの試作による特性評価(縦型と横型のデバイス特性比較、リーク低減等) (27百万円)	トランジスタの試作による特性評価(縦型と横型のデバイス特性比較、リーク低減等) (70百万円)	縦型・横型デバイスの試作による1200V級の耐圧実証 (100百万円)

事業原簿(公開版)II-6

11/19

情勢の変化や中間評価等の外部有識者の助言等に基づき、適宜追加資金により課題対策・解決を行った。詳細は2-5章に述べるが、平成22年度(2010年度)にはGaN基板の供給量不足によりデバイスの開発が停滞していたことから、追加的資金の投入により、GaN基板の外部調達およびリソース集中による研究加速を行い、デバイス開発の停滞を解決するなどの対応を行った。

2-3 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から公募によって研究開発実施者を選定し実施した。

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。以下、PLと略す）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した。PL下には、研究課題①～③各々を担当する以下の3つのグループに分けてグループ間でGaN基板を受け渡す垂直連携する体制とした。

－基板グループ：研究課題①高品質大口径単結晶基板の開発を担当してGaN基板を作成するグループ

－エピグループ：研究課題②高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発を担当して、結晶グループからGaN基板の提供を受けエピタキシャル成長させるグループ

－デバイスグループ：研究課題③窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価を担当して、エピグループからの基板の提供を受けてその上に電子デバイスを試作・評価するグループ

グループ間では、結晶グループ → エピグループ → デバイスグループの経路で、研究成果の基板を受け渡す連携をとった。また上流の研究により検出された課題を、適宜下流の基板提供側グループにフィードバックすることで研究開発を加速改善する運用とした。

PLに関しては前半は基板中心の研究を考慮してエピグループの名古屋大学 天野教授に委託したが、Ga N基板を利用する立場でのデバイスグループリーダーであり、電子デバイス評価に重点を移行して行く方針から後半に向けて平成21年（2009年）7月にデバイスグループの葛原教授に交代した。

体制についても、当初、基板グループの再委託先であった古河機械金属（株）、（財団法人）金属材料開発研究センター（略称JRKM）への出向社員としてデバイスグループに参画していた（株）シャープ、豊田中央研究所（株）に対して、本プロジェクトの成果を生かして実用化事業化の検討の責任を明確とするために、（独）NEDOの直接の委託先として参画するように更する等、随時、体制の見直し・改善を行った。

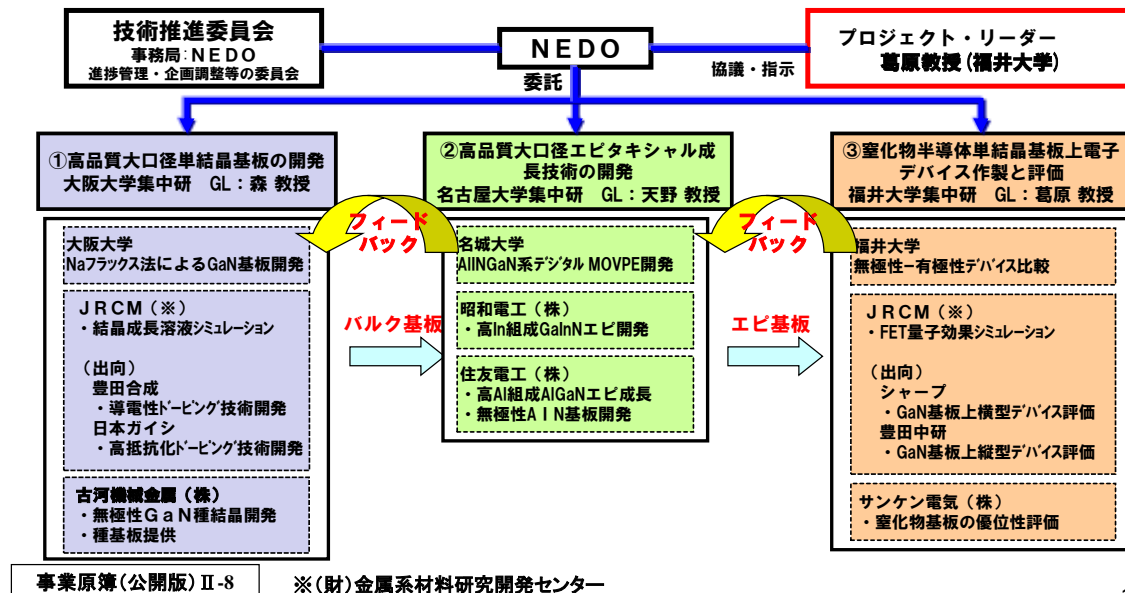
2. 研究開発マネジメントについて

公開

(3)研究開発実施の事業体制の妥当性(目標達成に向けた体制の構築)

- GaN基板、エピ、デバイス3グループが連携し、研究成果を互いにフィードバックできる体制を実現。
- 2009年度より、プロジェクトリーダーを天野先生から葛原教授へ変更。プロジェクトの重点課題を出口の電子デバイスへシフト。

2011年度の研究実施体制



12/19

2-4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメント

(1)研究開発の加速化に向けた基板ベースのNEDOによる進捗工程管理強化

目標達成に向けて基板グループ、エピグループ、デバイスグループ間で、基板の受け渡しがスムーズに実行される必要があるが、本受け渡しが律速となる傾向があった。本点については中間評価でも指摘を受け、研究開発のさらなる加速化のために基板ベースの工程管理の強化策を考えた。

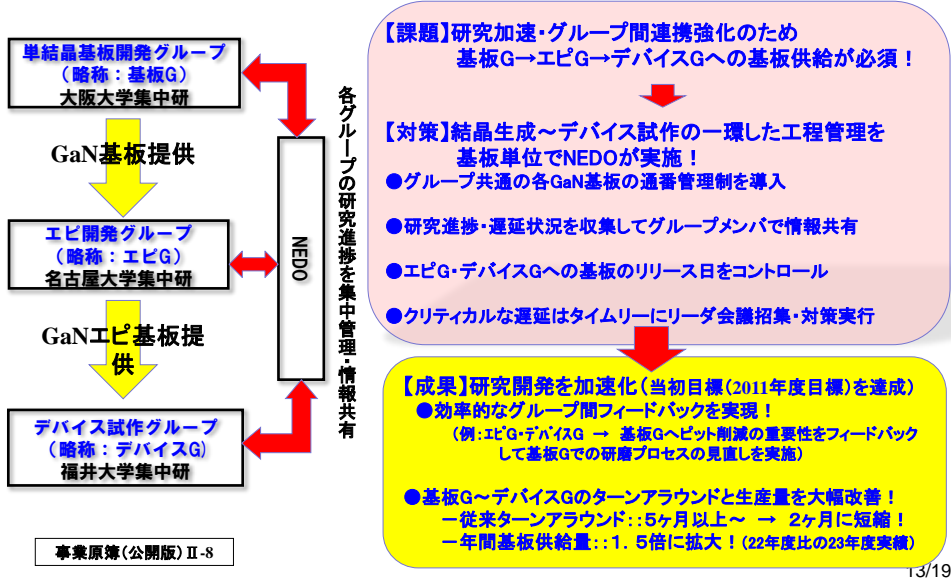
具体的には基板ベースに基板番号を採番(基板が割れた場合には各片単位で基板番号を追加採番)して各基板単位での品質情報を定期的に収集の上、グループ間を通して情報共有できるようにした。また週単位での基板成長・加工・研磨の状況、エピタキシャル成長の状況、上流グループへの基板リリースの状況をNEDOにて情報収集して日々の進捗管理を行い、基板リリース日など計画からの遅延が発生しないようにフォローアップした。事故や課題発生などにより基板提供が遅れる可能性が発生した場合には、適宜グループ間調整を行い、状況に応じて臨時のグループリーダ会議を開催して加速策、代替策を検討・実施した。その結果、従来は基板グループからデバイスグループへの基板提供ターンアラウンドが5ヶ月以上かかっていたのに対して2ヶ月に短縮させることができた。また年間基板適用枚数も1.5倍に拡大した(平成22年度比の平成23年度実績)。平成23年度末には当初目標としていた4インチGaN基板の結晶成長の実現、GaNデバイスの評価等のプロジェクト当初の目標を達成した。

2. 研究開発マネジメントについて

公開

(4)研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメント(実用化・事業化の促進)

●GaN基板→エピ成長→デバイスの各グループの連携を強化



13/19

また体制強化・実用化事業化マネジメントの一環で、種結晶作製を担当する古河機械金属を再委託先 から委託先へ変更し、体制の強化(リソース拡大等)を図った。(2010年7月)。この結果、同社の種基板開発が加速し、基板供給がスムーズとなり、研究が加速した。その結果、2010年度後半以降の種基板には、クラックを排除して、高品質のGa_N基板を供給することが可能となった。

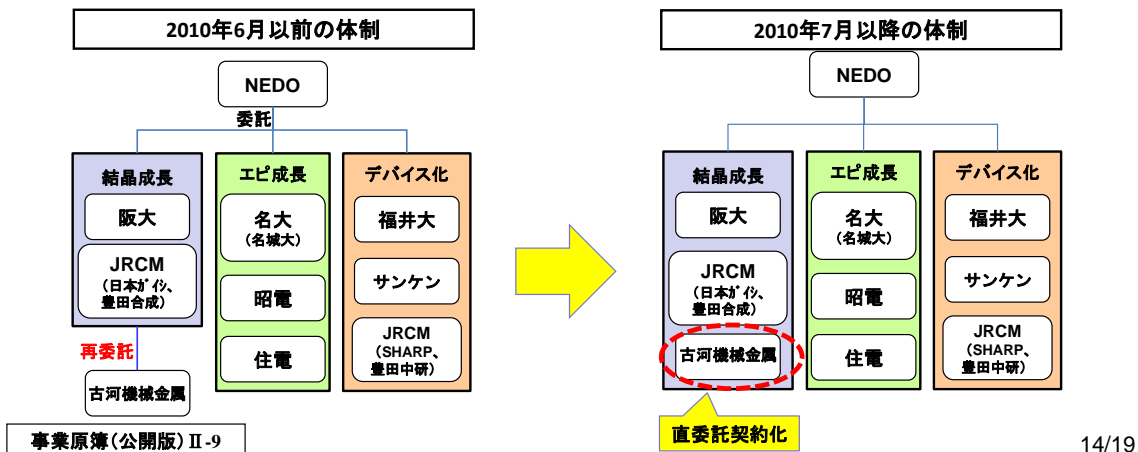
2. 研究開発マネジメントについて

公開

(4)研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメント(実用化・事業化の促進)

●Ga_N基板の研究開発を加速するため、開発体制を強化

- 大口径のGa_N種基板を開発する古河機械金属(株)が開発計画の作成および実行に主体的に取り組める環境を構築し研究開発を加速させるため、同社を再委託先から委託先へ変更(2010年7月)。
- この結果、同社の種基板開発が加速し2010年度後半以降の種基板には、ほとんどクラックが入らなくなった等の成果を達成した。



14/19

(2)大学の技術開発から企業主体の技術開発に向けた技術移管の促進

事業開始当時は、Ga_N結晶成長・エピタキシャル成長・デバイス分野においては、Ga_Nの優位性が明確に実

証されておらず実用化事業化の見通しが明らかではなかったために基盤技術研究の位置づけで、大学が研究開発の中心であった。本研究開発事業では各研究課題毎に大阪大学、名古屋大学、福井大学での集中研方式を採用してプロジェクトを推進した。本集中研方式を採用することにより、産学連携による効率的な研究開発を実施するとともに、大学の知見、研究成果を企業に技術移管して速やかに実用化事業化に結びつけることが可能と考えた。プロジェクト成果を生かして、実用化事業化に向けた研究開発を企業にて主体的に進められる状況になった時点で、企業に技術移管して企業にて研究開発を継続する分散研方式に移行するようにプロジェクトマネジメントを行った。具体的にはGaN結晶成長技術について大阪大学から豊田合成(株)、日本ガイシ(株)へ、エピタキシャル成長技術について名古屋大学から昭和電工(株)、住友電工(株)へ、電子デバイス技術について福井大学からサンケン電気(株)、(株)シャープ及び豊田中央研究所(株)へ技術移管して、実用化事業化に向けた技術開発を計画的に継続できるようにマネジメントした。

(3)実施者間の知財ルールに基づく知財管理

各企業が本プロジェクトを通じて、積極的戦略的に知財活用が可能となるように、プロジェクト開始当初から実施者相互で覚え書きを締結して、関係者が必要の都度、関係者連絡会にて協議して出願方式(出願内容のブラッシュアップ、単独出願/共同出願の形態、海外出願の有無など)について取り決める仕組み(関係者連絡会)を構築した。本知財管理により効率的且つ質の高い特許の申請が可能となり各企業戦略に基づき重要なアイデアの効率的な知財化を促進した。

15

ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 事後評価分科会(2013.6.24)

2. 研究開発マネジメントについて

公開

(4)研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメント(実用化・事業化の促進)

●大学(集中研)→各企業への研究成果の活用・技術移管の促進

各大学の集中研に各企業の研究者が参加する体制としたことで、大学から企業への技術移管を促進。プロジェクト後半は移転された技術をベースに、企業が主体的に実用化開発を実施。

- 阪大: GaN結晶成長技術(Naフラックス法) → 豊田合成、日本ガイシ、古河機械金属
- 名大: GaNエピ技術(InGaNエピ技術) → 昭和電工
(AlGaNエピ技術) → 住友電気工業
- 福井大: GaNデバイス技術(横型デバイス技術) → サンケン電気、シャープ
(縦型デバイス技術) → 豊田中央研究所

●実施者間の知財ルールの策定

実施者間での覚え書き・ルールに基づく知財管理を徹底

- 出願方式(出願内容のブラッシュアップ、単独出願/共同出願の形態、海外出願の有無など)について、関係者が協議の上で取り決める仕組み(関係者連絡会)を構築。

(4)研究成果の社外へのアピールによる企業連携・事業化促進

本事業の成果に基づき、プロジェクト外の国内関連企業についても成果の活用を促し、GaN事業化を加速化するために、プロジェクト研究開発成果の成果をCEATEC(2011~2012年の2回)、nanotech(2008~2013年の6回)のNEDOブース等にて展示した。またGaN結晶・エピ・デバイスの研究開発成果について、展示やプレゼンテーションを積極的に発表を行い、積極的に関連企業への情報発信アピールすることにより、関連企業との連携機会の創出、事業化の促進を図った。(nanotech2013の事例:ブース来場者数:1,500名。うち、約50名とプ

プロジェクト成果に関わる具体的な意見交換を実施した。)

16

ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 事後評価分科会(2013.6.24)

2. 研究開発マネジメントについて

公開

(4)研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメント(実用化・事業化の促進)

●研究成果の社外へのアピールによる企業連携や事業化の促進

CEATEC(2011～2012年の2回)、nanotech(2008～2013年の6回)のNEDOブース等にて、GaN結晶・エピ・デバイスの研究開発成果について、展示やプレゼンテーションを実施

国内関連企業へのアピールによりGaN結晶・デバイス研究成果の活用・普及を促進

<nanotech2013の事例>

ブース来場者数 約1500人、
うち約50人とプロジェクト成果に係る具体的な意見交換を実施



展示ブースの様子



GaN基板やバルク結晶等
研究成果を展示



研究成果のプレゼンテーション
を実施(葛原プロジェクトリーダー)

事業原簿(公開版) II-11

16/19

2-5情勢変化への対応等

(1)電子デバイス実証評価の強化

プロジェクト当初は、GaN結晶成長に重点を置くプロジェクト運営を行ってきた。最終的に5年間で当初目標を達成した。2010年～2011年にかけて、GaN結晶成長に関する研究開発も進展して、GaNデバイス実用化の可能性も高まりつつある中、2011年の東日本大震災により、省エネルギーデバイスに対する要求、重要性も高まった。このような状況を踏まえて、GaN基板による電子デバイスを実用化・事業化を促進するためには、プロジェクト終了後も企業が本デバイスの優位性、付加価値性を認識して、企業が主体となってその実用化・事業化に取り組む必要がある。そのために、GaNデバイス評価について、具体的な市場分野、目標に絞って、一年間、プロジェクトを延長する施策を行った。本延長に伴い、以下のようにプロジェクト運営を変更した。

① GaNデバイス企業の直委託化

平成23年度までは、本GaNデバイス評価事業の直接の委託先としては、福井大学、サンケン電気(株)、(財)金属材料研究開発センター(略称:JRMC)の3者に依頼していた。その際、(株)シャープと豊田中央研究所(株)はJRMCに出向という間接的な形式でプロジェクトに参加してきた。プロジェクト終了後には速やかに各企業にて責任をもってGaNデバイスの実用化・事業化に向けた技術開発を継続して実用化・事業化開発計画が検討される必要がある。そのため平成24年度においては福井大学、サンケン電気に加えて、(株)シャープと豊田中央研究所(株)の2社には直接の委託先として参画依頼することで、デバイス事業化の責任を明確にすることで各企業での実用化・事業化に向けた技術開発の取り組みを促進した。

② GaNデバイス評価の加速化

GaN基板提供ソースのオープン化これまでの基板提供遅れによる評価遅延に対しては、NEDOが基板のグループ間流通の進捗管理することにより解決した。延長した一年についてはさらにGaNデバイス試作評価を加速化する手段として、従来の結晶成長グループ・エピタキシャル成長グループからのGaN基板提供ルートだけでなく、現状GaN基板が提供できる他基板メーカーからも提供できる複数調達ルートを確認して、GaN基板による電子デバイス実証評価が効率的効果的に実証評価できる体制の構築を行った。本体制構築により、GaN電子デバイス評価が1年の期間で当初の目標を達成すべく効率的且つ確実に実施できるとともにGaN結晶成長方式の相違による品質評価も実現した。

17

ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 事後評価分科会(2013.6.24)

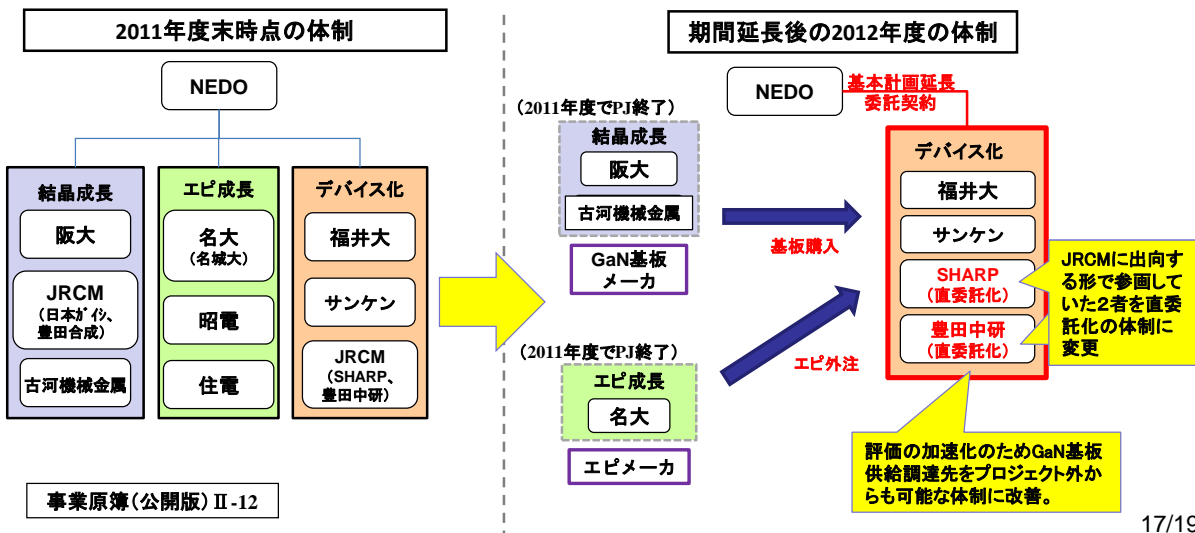
2. 研究開発マネジメントについて

公開

(5)情勢変化への対応等(GaNデバイスの実用化を促進に向けたプロジェクトの変更)

- 東日本大震災により、超高効率省エネデバイスの早期実用化の重要性・必要性が拡大。
 - ➡情勢の変化に対応し本成果のGaNデバイスの実用化促進を狙い研究開発計画を変更。
 - ・デバイスグループのみ研究開発を1年延長し、目標を追加*
 - ・プロジェクト成果の事業化を担う企業が積極的に参画できるよう、直委託化
 - ➡目標の耐圧1200V以上のGaNデバイスの優位性を実証！

※GaN基板を用いたEV・家電分野での活用を想定してパワーデバイスの試作・実証(耐圧1200V)の目標を追加



17/19

(2)技術委員会の活用と加速対策

状況の変化に対応して、課題の把握と対策を迅速且つ適切に実施するためにNEDO主催で下記のとおり外部有識者による技術推進委員会を以下のとおり必要に応じて開催し、その結果をプロジェクトに適宜反映した。

2. 研究開発マネジメントについて

公開

(5)情勢変化への対応等(外部有識者の意見をプロジェクトマネジメントに活用)

NEDO電子材料部主催で「技術推進委員会(年1回)」を開催。外部有識者の意見をプロジェクトに適宜反映。

<技術推進委員>

●豊橋技術科学大学	西永 頌	客員教授 (技術推進委員会委員長)
●パナソニック(株)先端技術研究所	上田 大助	所長
●産総研エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ	奥村 元	研究ラボ長
●三重大学大学院	平松 和政	教授
●NTT物性科学基礎研究所	牧本 俊樹	首席研究員

◆中間評価以前に実施した技術推進委員会

(委員会提言)デバイス評価のための基板供給が不十分で今の研究開発スピードでは物足りない。

(対策)2007～2010年度は集中研による連携見直し、および予算追加により**GaN結晶・エピ技術のテーマの研究を加速**。2011年度以降は、プロジェクト内の基板供給に係る連携強化・加速化のため、**NEDO直下でグループ間のウエハの流通の工程管理・フォローアップ実施し、研究開発を加速**。

◆2011年度・技術推進委員ヒアリング(2011年11月～12月)

(対策)東日本大震災により、次世代の省エネデバイスの早期実用化の必要性・重要性が高まり、かつGaNに関する研究がプロジェクト当初と比較して相当に進展。このような状況を踏まえて、研究成果の実用化促進を目的とした1年間の期間延長並びに目標引き上げの計画を打診。承諾が得られたため、**計画変更を実行**。

◆2012年度・技術推進委員会(2012年11月30日)

(委員会提言) 低欠陥GaN上電子デバイスによる特性の優位性を実証することが最大の課題。

(対策) 残りのプロジェクト期間において、**低欠陥GaN上電子デバイスによる特性の優位性を実証に注力**。

事業原簿(公開版)II-12

18/19

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】がデバイスグループに速やかに提供できるようにす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、世界最高品質2インチ有極性GaN基板出展を達成した。

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基板を実現した。

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AlGaNの原子レベル成長を実現した。

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AlGaN/GaNエピ上にHEMT試作、および高ドレイン電流実現を達成した。

② 平成20年度・技術推進委員会(平成21(2009年)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、AlGaN、InGaN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た。

③ 平成23年度・技術推進委員ヒアリング(平成23年(2012年)11月～12月)

これまでの施策により、平成23年度末の成果として世界で初めて液相成長法で大口径(4inch)高品質($4 \times 10^3/\text{cm}^2$) GaN 基板作製に成功した。また東日本大震災等により、省エネルギーデバイスに対する要望の高まり等の情勢を踏まえて、今後の日本での GaN 事業の優位性を生かす方策につながるマネジメントを検討するために、急遽各委員に11月から12月に掛けてヒアリングを実施した。その結果、委員会からの承認・後押

しを受けてこれまでGaN結晶成長・エピタキシャル成長技術に重点を置いたプロジェクトマネジメントを行ってきたが、その出口となる電子デバイスの試作実証評価に絞って、1年期間延長・目標引き上げを行い、実用化・業
化を促進する計画に変更した。

④ 平成24年度・技術推進委員会（平成24年（2012年）11月30日）

上記委員会では、結晶成長技術の向上、GaN デバイス評価による優位性の検証結果に対して高い評価を得ると同時にプロジェクト最終年度において低欠陥 GaN 上電子デバイスによる特性の優位性を実証することが最大の課題である点が指摘された。本対策として 大阪大、名古屋大からのデバイス提供スケジュールの工程管理を綿密にすると同時に、他の GaN 基板提供メーカーに対する基板提供の調整とデバイスメーカー実施者との連携を図って効率的な GaN デバイス試作・評価及び GaN 基板についての評価が効率的に実行できるようマネジメントを実施した。その結果、GaN デバイスの 1200V 以上の耐圧性を測定評価することに成功し、CEATEC2013、nanotech2013の各展示会にて本成果を発表した。

(3) 中間評価結果の反映

平成21年度は本プロジェクトに対する中間評価を行い、評価委員よりプロジェクト改善に向けた以下の指摘を受けた。

- ① 技術開発項目が多くて総花的。技術開発項目の整理が必要。
- ② 基板供給量が律速となるため、スループットを上げる結晶供給体制の構築が望ましい。

①については中間評価後、基板大口径化を継続しつつ、結晶生成の低転位密度化および無極性基板開発、エピ生成の低欠陥高品質GaNとInGaN混晶エピの開発の優先と注力化を図り、出口となる電子デバイスについても要件を基本計画上で明確とした。②については、古河機械金属を再委託先から委託先へ変更し、基板開発の体制を強化した。加えてプロジェクト内の基板供給の円滑化を目的とし、NEDOが基板単位での各グループでの技術開発の進捗工程管理を実施し、上流への基板リリース時のリリース日時と基板特性情報を連絡し、グループ間で情報共有してタイムリに研究開発を進められるように運営した。

2. 研究開発マネジメントについて

公開

(5)情勢変化への対応等(中間評価結果を踏まえた取り組み)

2009年度・中間評価委員会 (平成21年(2009年)8月31日)	
評価のポイント	反映(対処方針)のポイント
<p>・本研究の進捗は最上流の基板結晶の供給量により律速されるため、これまで以上に迅速でスループットの高い複数プランによる結晶供給体制の構築が望まれる。</p>	<p>・結晶基板開発の優先度を再考するなど、エピおよびデバイスグループへの結晶基板の供給確保に努める。外部調達を含む複数プランの必要性については、3グループ間で議論して進める。 ⇒古河機械金属を再委託先から委託先へ変更し、基板開発の体制を強化。 加えてプロジェクト内の基板供給の円滑化を目的とし、NEDOが基板供給の工程管理を実施。</p>
<p>・技術開発項目が多すぎて総花的な印象がある。想定する出口イメージと技術開発項目の関係を整理して開発項目の優先度を明確にし、開発状況、外部状況を見ながら必要であれば修正した方がよい。</p>	<p>・基板大口径化を継続しつつ、結晶生成の低転位密度化および無極性基板開発、エピ生成の低欠陥高品質GaNとInGaN混晶エピの開発の優先と注力化を図りデバイス評価への基板の供給をスピードアップ。 ⇒基本計画に上記内容を反映。</p>
<p>・高い目標設定にも関わらず中間目標はほぼ達成され、課題によっては最終目標の水準に届いているものもある。未達成の項目においても検討すべき課題が明確にされ、最終目標は達成の見込みが高く、実用化につながる期待も高い。</p>	<p>・現在の研究開発マネジメントを続けながら各企業での実用化・事業化に向けた事業活動の計画策定をフォローアップ。</p>

III 研究開発成果について

1 事業全体の成果

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機能化と省エネ化を実現するための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が、窒化物半導体デバイスの高性能化と量産に必要な品質やサイズに対応できているとは言えず、その実用化の大きな制約となっている。

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・超高効率の電力デバイス、超高速電子デバイスなどの作製に必要な窒化物半導体結晶成長技術を確立することにより、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して開発を進めた。

成果として具体的には、①「高品質大口径単結晶基板の開発」では、本プロジェクトで開発したHVPE法による大口径の種結晶を用いることにより、低転位化に特徴があるNaフラックス法で4インチサイズの高品質・有極性Ga₂N基板の開発に成功し、光デバイスや縦型電子デバイスに有用な導電性Ga₂N基板、主に横型電子デバイスで必要となる高抵抗Ga₂N基板を実現させた。また、さらなる低転位化や無極性基板の大口径化につながる、新しい結晶成長技術を提案した。

②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」では、無欠陥ヘテロ接合構造を実現するために世界に先駆けて開発した加圧デジタルMOVPE装置を用いて、成長シミュレーションなども駆使することにより、高いIn組成および高いAl組成をもつInGa₂N層やAlGa₂N層などの三元混晶の、高品質大口径エピタキシャル成長技術を確立した。そして、デバイスグループとの協業により、実際にヘテロ構造デバイスを試作することで、高耐圧化に有利なAlN基板上的高Al組成のAlGa₂Nチャンネルデバイスや、高移動度が期待されるInGa₂N系デバイスなどの可能性を示した。さらに、横型デバイスにおいて重要な高抵抗緩衝層の新しい成長技術を提案した。

また、③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価」では、①および②で開発した低転位密度の単結晶基板やエピタキシャル基板を用いてデバイス評価を行うことで、基板開発やエピ成長技術開発にフィードバックを行った。横型デバイスおよび縦型デバイスの試作によるリーク電流と結晶欠陥の相関の解析では、電子デバイス用途における低欠陥基板の必要性を示した。パワーデバイスとして競合するSi基板上やSiC基板上のGa₂Nデバイスと、本プロジェクトで開発した自立Ga₂N基板上のGa₂Nデバイスとの比較評価では、自立Ga₂N基板上のGa₂Nパワーデバイスが、オン抵抗と耐圧の関係において既に実用化されている前者と特性面で遜色がないことを示すとともに、さらなる特性を引き出すための今後の指針を示した。また、試作したGa₂NトランジスタやGa₂Nショットキーダイオードを用いたインバータによるモーター駆動などの実機動作を行い、Ga₂Nパワーデバイスの実用性を示した。無極性単結晶基板を用いたデバイスについても、十分とは言えないながらも課題と可能性を示した。

第III項では、以下に平成19年8月から平成24年度の約6年間の研究開発で得られた最終成果と、目的に対する達成状況を報告する。

詳細は「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」

Na フラックス法において、溶液攪拌技術の高度化と高温成長によって高速成長と結晶の高品質化を図り、HVPE 法により開発した、低歪み・大口径種基板を用いることで、最終目標であった4インチ径の有極性 GaN 自立基板の開発に成功した。種基板に用いた HVPE 法の4インチ自立基板は、本研究で開発した r-FIELD 法により、歪みの低減と転位密度を $3 \times 10^6 \text{cm}^{-3}$ まで低減した Na フラックス成長用に最適化を図ったもので、最終年度には外周研削・表面研磨加工の効率化も図り、2インチの無極性基板とともに定期的に Na フラックス成長グループに供給した。大口径化とともに課題とされる結晶の欠陥密度については、表面処理技術の開発と繰り返し成長により、 $4 \times 10^3 \text{cm}^{-2}$ の低転位密度結晶を実現した。特に、微小種結晶から成長させて転位低減を図るポイントシード法により、まだ $10 \phi \text{mm}$ に満たないサイズであるが、無転位領域を持つ高品質な結晶を得ることができた。

無極性基板の大口径化については、目標である3インチ級の基板の実現には至らなかった。しかし、複数の小径高品質基板を横に並べて種基板として、Na フラックス法の高速横成長を生かして結合させ大型化する結合成長技術の可能性を示した。有極性基板、無極性基板を問わず、今後、さらなる結晶の大口径化につながる成果であると考ええる。

導電性制御については、Ge 添加により、比抵抗の目標値である $0.01 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下の2インチ級の高導電性 GaN 結晶を実現した。また、高抵抗結晶についても、Zn 添加により、有極性面で $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 、無極性面でも $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ の目標値の比抵抗を有する、 $\phi 44$ の結晶の開発に成功した。これらの導電性を制御した3インチ級以上の基板の実現には、クラックの抑制や、面内分布などの課題がまだあるが、前述の、溶液攪拌技術の高度化と高温成長による成長条件の最適化で、今後、克服が可能であると考えられる。

開発した各種結晶や基板は、毎年2月に開催された国際ナノテクノロジー総合展の NEDO ブースにおいて展示を行い、成果のアピールとともに、関連技術の情報交換に努めた。

技術動向調査によってバルク結晶のベンチマークを行い、低転位、且つの大口径の GaN 基板が要求されているものの、まだ実現できていないことを示した。このことから、本研究の成果は、Na フラックス法は、低転位・大口径の GaN 基板の実現可能に向け有力な製法のひとつであり、窒化物半導体結晶の成長技術の確立に進展をもたらしたと考える。

開発した各種結晶は、外周研削加工、表面研磨を行い、後工程であるエピ成長技術チームまた、デバイス評価チームに適宜供給した。結晶および基板の歩留まり、加工品質を含めた面内均一性、高品質なエピタキシャル成長やサイズの大きなデバイス試作への適用性という観点においては、必ずしも十分な品質、有効サイズ、供給量を満たせたとはいえず技術課題はあるが、後述するエピ成長やデバイス試作による GaN パワーデバイスの有用性の実証という当初の役割を果たすことができた。

● 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」

4インチ対応、高温成長が可能な、超高速バルブスイッチング加圧デジタル MOVPE 装置を開発した。装置開発にあたっては、0.1秒以内にスイッチング可能な電磁弁を使用し、かつ短時間でガス切り替えが可能なフローチャンネルおよびテーパ型ガスインジェクションノズルを設計した。本装置は、原子層制御エピタキシー成長 (Atomic Layer Epitaxy : ALE) ができることから、原子レベルで急峻な界面を有するヘテロ接合の形成に有効である。実際、ガス供給量と成長速度をモニターすることで ALE 成長を確認し、量産性に優れる MOVPE 装置において、世界ではじめて AlN 及び AlGaIn の原子層エピタキシャル成長に成功した。

基板保持温度及び時間の適性化を図り、本装置で成膜したアンドープ GaN 層の残留ドナー濃度は 10^{13}cm^{-3} 以下と高純度であり、不純物ドーピングは $\pm 10\%$ の高い精度で制御が可能であることを確認した。4インチ c 面基板上の GaN 層の面内分布評価では、膜厚分布、また、Si 及び Mg ドーピング濃度分布はいずれも目標値の $\pm 5\%$ 以下と高均一であり、デジタル MOVPE の特徴を示すことができた。

無極性基板上的エピ成長技術の開発については、a 面基板上に成長したアンドープ GaN 層中の残留酸素濃度が 16 乗台と、m 面基板上の場合に比べて一桁小さいことを見出した。トランジスタの閾値の設計、製作において、高い酸素濃度をもつエピ層は好ましくないため、本研究では、Na フラックス法・無極性 a 面基板上へのエピ成長に注力した。成膜した断面 TEM 評価により、エピ層中の貫通転位密度は、 10^5 cm^{-2} 以下であることがわかった。

低欠陥ヘテロ接合構造の実現のため、上記装置により、高 In 組成、高 Al 組成の InGa_xN、AlGa_xN のエピタキシャル成長技術を開発した。本装置は 2 気圧（大気圧 + 1 気圧）で成長することが可能であり、これまで低温でない成長が難しかった高 In 組成の InGa_xN が、加圧により従来より高温での成長可能となり、高品質化に向けて成長条件の自由度が広がった。加圧成長に伴い促進される寄生反応の抑制のため、新しい In 原料の探索も進めた。

4 インチ c 面基板上に成膜した In_xGa_{1-x}N 層 ($x > 0.5$) では、膜厚分布、組成分布の目標値 $\pm 5\%$ 以下を達成し、特に組成分布は 0.5% 以下の高均一性が確認できた。不純物ドーピングの制御技術を確認し、Si においては 19 乗以上、Mg においては 20 乗以上ドーピングした 4 インチエピ基板で、濃度分布の目標値の $\pm 5\%$ 以下を達成した。

さらに、InGa_xN チャンネル HEMT（高電子移動度トランジスタ）の試作では、2 次元電子ガスのシートキャリア濃度 $9.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ において、高いチャンネル移動度 $2160 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を確認した。この結果は、移動度とトレードオフの関係にあるシートキャリア濃度を $2.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ とすることにより、チャンネル移動度の目標値 $2500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ をクリアできる可能性を示している。

現在、HEMT 構造は AlGa_xN/GaN 系が主流であるが、新構造の探索として、AlInN/In_xGa_{1-x}N ($x \sim 0.6$) 構造の HEMT の試作を試みた。GaN と格子整合する AlInN 層をバリア層とすることでエピ層の歪み低減を図り、InGa_xN 層の高いチャンネル移動度を引き出すことが期待できる。試作したエピ HEMT を動作させたところ、世界で初めて同構造の静特性を確認することができた。今後の新機能デバイスの創出につながる成果である。

高 Al 組成の AlGa_xN 成長については、4 インチ c 面基板上に成膜した Al_xGa_{1-x}N 層 ($x > 0.5$) において、膜厚分布 $\pm 3.7\%$ 、Al 組成分布 $\pm 0.6\%$ と、目標値の $\pm 5\%$ 以下を達成した。ガスの反応を考慮した熱流体シミュレーションを駆使してサセプタやフローチャンネル等の最適設計を行い、加えて不要なガス反応を抑制すべく減圧成長により分布改善を図った。不純物ドーピングについても、Si については 1×10^{18} から $9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ まで、Mg については $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ から $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ までの制御性を確認し、4 インチ面内において Si 濃度分布 $\pm 7.4\%$ 、Mg 濃度分布 $\pm 12.6\%$ と、目標の $\pm 20\%$ 以下を達成した。

GaN 基板を用いた HEMT において、高耐圧化の実現にはチャンネル下部の GaN 緩衝層の高抵抗化、高品質化が鍵となる。GaN 層の高抵抗化で一般にドーピングされる Fe や Mg は偏析しやすく、チャンネル層への拡散の懸念があった。本研究では、これまで低温成長でしかドーピングが難しかった C を、アセチレンを原料ソースとして用いることで、高品質化に有利な高温でもチャンネルとの界面への偏析することなく所定量ドーピングすることに成功した。実際の HEMT 構造において、 $1 \times 10^{19} \text{ atoms} \cdot \text{cm}^{-3}$ 以上の C をドーピングした高抵抗緩衝層において、耐圧の向上を確認した（後述）。

結晶成長その場観察評価技術の開発として、原子レベルで結晶成長膜厚を制御するため、曲率半径 10km 以上の分解能を有し、且つ半極性面、無極性面上の面内異方性のある結晶面の成長でも適用可能な、ウエハの反りその場測定装置を開発した。実施、各種基板のウエハ形状測定を行い、その実用性を確認した。

また、高 Al 組成の AlGa_xN 層の成長には、GaN 基板より格子定数の近い AlN 基板を用いるほうが高品質化に有利であると考えられる。そこで、本プロジェクトでは、昇華法により、低転位 AlN 基板の開発にも取り組んだ。厚膜成長による転位消失機構により、約 10mm 厚の結晶の最表面から採取した基板において、転位密度が $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ である、約 10mm 径の低転位 AlN 基板の開発に成功した。また、得られた AlN 結晶から切り出した基板を種としてその上に再成長することで、SiC 基板を種とした場合より高温成長が可能となり、面内の異常成長の抑制を図った。また、さらにこの工程を繰り返すプロセスを考案することで、さらなる低転位化を図った。開発した AlN 基板上的 AlGa_xN チャンネル HEMT の試作では、エピ層の X 線回折評価や 2 次元電子ガスの特性から、サファイヤ基板上的 HEMT に比較してエピ層の結晶性が優れていることが確認し、AlN 基板の有用性を示した。

無極性 AlN 結晶の作製については、SiC 基板を種基板とした m 面成長と c 面成長の比較検討を

行った。積層欠陥の抑制に有利な c 長尺成長の縦割り結晶において、高品質な無極性面結晶が得られた。しかし反面、c 面成長による大口径化にはクラックの課題があることがわかった。作製した有極性および無極性基板は、適宜表面加工を行い、デバイス試作用として、エピ成長技術チームまた、デバイス評価チームに供給した。

● 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」

横型デバイスとして、Na フラックス法・有極性 GaN 基板上に AlGaIn/GaN 構造の HEMT を試作し、FET の基本静特性および信頼性について、Si 基板上や市販の HVPE 法の基板上の同構造の HEMT と比較評価を行った。Na フラックス GaN 基板上の HEMT は、他の基板上の HEMT と同等の静特性を示したが、基板ごとにエピタキシャル膜の最適成膜条件があるものと思われ、本評価では Na フラックス GaN 基板の明確な優位性を引き出すには至らなかった。特にチャンネル下の緩衝層として Mg をドーパした層を用いたため、ドレイン耐圧は他基板上のデバイスと同程度の 400V にとどまった。アンドープ導電性基板上の横型デバイスにおいて、チャンネル下の緩衝層の品質は耐圧向上の鍵である。その後、エピ成長技術チームで開発した C ドープ緩衝層を用いることで、ドレイン耐圧は 600V に向上し、特に縦方向の耐圧は、最高値で 1000V 以上あることが確認できた。この結果は、GaN 基板を用いることにより Si 基板上のエピ結晶以上の高耐圧化が可能であることを示すものであり、緩衝層の C ドープ高抵抗化と緩衝層の 12 μm 厚膜化技術の有用性を実証することができた。

また、大面積 GaN 自立基板上でのデバイスの試作として、Na フラックス法・2 インチ有極性 GaN 基板上に AlGaIn/GaN チャンネル FET を試作し、基板全面で良好な FET 動作を確認した。ソース-ゲート間のショットキーリーク電流を基板全面で評価後、基板表面を熱リン酸で溶液エッチングを行うことにより結晶欠陥を顕在化させ、欠陥位置とショットキーリーク電流の相関を調査した。測定素子近傍の結晶欠陥の有無とリーク電流の大小に相関があることが判明した。この結果は、欠陥密度の少ない Na フラックス法 GaN 基板の使用により、リーク電流の低減が期待できることを示すものであり、GaN 基板の有用性を示す有力なデータだと考えられる。

Na フラックス GaN 基板上に試作したデバイスの実用性を実証するため、同基板上の AlGaIn/GaN 構造 HEMT を用いたスイッチング回路の実機動作デモを行った。具体的には、LED ドライバ、インバータ、デジタルアンプの実機動作に成功した。インバータの試作では、三相誘導モーターを駆動し、21 時間超の実機通電において劣化なく運転できることを実証した。さらに H24 年度には、AlGaIn/GaN 構造 HEMT に加え GaN 基板 SBD を搭載したインバータを試作し、三相誘導モーターを駆動できることを実証した。これらの成果を毎年開催される国際ナノテクノロジー総合展の NEDO ブースにおいて、実機動作のデモンストレーションを行い、成果のアピールとともに、関連技術の情報交換に努めた。

また、高 Al 組成 AlGaIn の特徴を生かしたデバイスにおける AlN 基板の有用性を確認するため、AlN 基板上の AlGaIn チャンネル HFET の試作を行った。FET の作製プロセス開発においては、ショットキー障壁の高い、Al 組成 50% 以上の AlGaIn 上でオーミックコンタクトをとるため、新たに耐熱性に優れた Zr/Al/Mo/Au 系の電極開発を行った。Al_{0.54}Ga_{0.46}N/Al_{0.28}Ga_{0.72}N に作製したゲート長 9 μm の FET において、最大ドレイン電流 135mA/mm、耐圧 1400V の特性が得られた。耐圧はゲート-ドレイン間隔 (Lgd) 依存性があり、Lgd=15um では測定装置の測定限界の 2000V を超える耐圧を確認した。また、同エピ構造の FET は、25°C から 300°C までドレイン電流の変動が少ない良好な温度特性を示すことがわかった。これらの結果は、高温動作に対する AlN 基板の有用性を示すものである。

さらにプロジェクト期間を延長し、H24 年度には横型 AlGaIn/GaN HEMT で高耐圧化と低オン抵抗化に関する開発を進めた。高耐圧と低オン抵抗を両立させるためには、Lgd と AlGaIn 層の Al 組成を最適化することが重要であることが判った。また GaN、SiC、Si の 3 種の基板を用いて試作を行い、オン抵抗と耐圧を比較した。その結果、いずれの基板においても耐圧 1200V 以上、オン抵抗 3~4mΩ cm² が得られることが判った。縦型デバイスも高耐圧化、低オン抵抗化の開発を進め、ダイオードで 1200V 以上の耐圧が得られることを示すことができた。

大電力を制御するパワーデバイスは、一般に横型構造より、ドリフト層の厚さで耐圧を持たせることができる縦型構造が有利である。縦型の GaN パワーデバイスには、導電性 GaN 基板が必須

であり、特に高耐圧化には、低転位の基板が必要だと考えられている。すなわち、低転位密度が特徴である Na フラックス基板の応用として、最重要の構造であるといえる。そこで、Na フラックス・有極性 GaN 基板上に、pn ダイオード、ショットキーダイオードを試作し、転位密度とリーク電流の関係を調べた。転位の種類を同定し個別にその影響を調べた結果、Na フラックス GaN 結晶中の刃状転位と混合転位は、リーク電流の主要因ではないことを明確化した。また、Na フラックス結晶中には、リークの原因になると考えられている螺旋転位が非常に少ない可能性が示唆された。

有極性基板と無極性基板の比較については、エピ成長技術グループにおいて残留酸素濃度が m 面エピ基板に比べて小さいことが見出された、Na フラックス法による、無極性 a 面基板上に $\text{Al}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{N}/\text{GaN}$ 構造の HEMT を試作して特性を調べた。分極効果がないため、ヘテロ界面近傍 3nm 厚に Si を $3.5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ドーピングした。Hall 測定から求めたチャネル移動度とシートキャリア濃度は、それぞれ $400 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 、 $2 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ であり、ゲート長 $2 \cdot \mu\text{m}$ の HFET において、最大ドレイン電流 $220 \text{mA}/\text{mm}$ 、最大相互コンダクタンス $57 \text{mS}/\text{mm}$ 、しきい値電圧 -1.6V が得られた。これらの結果は、これまで報告された無極性 a 面基板上 HEMT の中では優れた特性に対応するが、有極性デバイスに比べると電子移動度とドレイン電流がまだ小さく、その有用性の実証には至らなかった。

一方、無極性 GaN 基板上の分極効果のない $\text{AlInN}/\text{InGaN}/\text{AlInN}$ ダブルヘテロ構造を仮定して、二次元デバイスシミュレーション解析により、短チャネル時の電流利得遮断周波数を解析した。ゲート長 30nm 以下で、遮断周波数が 1THz 以上となることが予測され、無極性基板上電子デバイスの、高周波用途への応用の可能性を示した。

以上、基板開発グループ、エピ成長技術グループから供給された各種基板、各種エピ基板を用いて、各種構造のデバイスの試作により、Na フラックス法・GaN 基板、また AlN 基板の有用性を示す貴重なデータが得られた。しかしながら、他の基板上のデバイスに対する、Na フラックス GaN 基板の絶対的な優位性や、無極性基板上ならではの優れたデバイス特性を引き出すには至らなかった。その理由として、デバイス評価に用いる基板やエピ基板の品質、有効サイズ、供給量に限界があったことに加え、エピ構造やデバイス構造の設計や、デバイスプロセス上においても、まだ改善すべき開発課題があることが考えられる。引き続き、GaN パワーデバイスの有用性の実証に向けて、さらなる開発を進めていく必要がある。

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	成果	達成度
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		○
	・4インチφ 有極性単結晶基板の実現 ・転位密度 $< 5 \times 10^3 \text{cm}^{-2}$	・Naフラックス法の高温育成により、クラックフリー2~4インチGaN結晶の育成に成功し、2~4インチ4インチφ 有極性単結晶基板を実現。 ・種結晶表面処理により、 $3.9 \times 10^3 \text{cm}^{-2}$ の高品質GaN結晶育成に成功。	
	・核発生・成長方位・転位制御技術の開発	・高Ga組成の方が転位密度低減効果は大きく、低Ga組成の方が成長速度が速いことが分かった。 ・何れの組成においても、成長した結晶の厚みとともに転位密度が減少することが分かった。	
	・3~4インチ無極性単結晶基板の実現 ・転位密度 $< 10^5 \text{cm}^{-2}$ ・積層欠陥密度 $< 10^5 \text{cm}^{-1}$	・Naフラックス法による微小種結晶からのバルク状結晶育成技術を開発し、低転位の無極性単結晶を実現(6mm x 6mm自立基板実現)。 ・転位密度 $< 10^5 \text{cm}^{-2}$ を確認。 ・Ba添加系でc軸方向、及びa軸方向にGaN結晶の合体確認→大口径化の可能性確認。	○
	(2)大口径種基板の開発		○
	・NaフラックスLPE法に適した GaN下地種結晶の作製技術 ・大口径結晶成長技術の開発と供給 ・無極性種基板の供給	・3次元成長技術による歪緩和技術で、Naフラックス法に適したGaN下地種結晶開発。 ・大口径化を図り、4インチφ 有極性GaN種基板の開発に成功。 ・a面GaN結晶の転位密度 $< 10^5 \text{cm}^{-2}$ まで低減し、45mmφ 自立結晶の作製に成功。 ・各種有極性種基板、無極性種基板を、NaフラックスLPE成長グループへ供給。 - 4インチφ 種基板を開発、9枚供給、-73mmφ 種基板1枚供給 - m面2インチφ 基板開発、2枚供給、 m面、a面小片各種供給	
	(3)高導電性単結晶基板の開発		○
	・高導電性有極性GaN結晶の開発 (比抵抗 $< 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$)	・Ge添加条件、溶液攪拌条件を最適化し、Ge高濃度添加に成功、高導電性GaN結晶を実現。 ・比抵抗 $< 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 、キャリア密度 $= 3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ を確認。 ・Si、O、C濃度は無添加同等であることを確認。	
	・無極性GaN結晶・導電性制御技術の開発 (比抵抗 $< 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$)	・Geを高濃度添加したc面育成結晶のm面抵抗率測定より、c面と同等の高導電性を確認。 ・比抵抗 $\sim 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$	
	・エピタキシャル用高導電性基板の供給	・エピ・デバイス技術開発チームに研磨済みの各種GaN基板を提供。	○
	(4)高抵抗化単結晶基板の開発		○
	・高抵抗化有極性GaN結晶の開発 (比抵抗 $> 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$)	・Znを $2 \times 10^{19} \text{atoms} \cdot \text{cm}^{-3}$ 添加したサンプルで $\sim 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ の比抵抗を達成。	
・無極性GaN結晶・高抵抗化技術の開発	・Zn添加したGaN結晶のm面上において、 $1.5 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ の比抵抗を達成。		
・エピタキシャル用高抵抗基板の供給	・エピ・デバイス技術開発チームに研磨済みの各種GaN基板を提供。	○	

次頁へ続く

前頁から続く

研究項目	最終目標	成果	達成度
高品質・大口径エピタキシャル成長技術の開発	(1) 大口径基板上的高品質エピタキシャル結晶成長技術		
	・デジタルMOVPEの開発	・超高速バルブスイッチング加圧デジタルMOVPE装置を開発。 ・上記装置において、高温成長対応、加圧対応、4インチ化を図り、有用性を確認。	○
	・窒化物基板上的GaNEピタキシャル成長技術 ・残留ドナー濃度 $<10^{15} \text{cm}^{-3}$ ・転位密度: - 有極性 $<5 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$ 、- 無極性 $<10^9 \text{cm}^{-2}$ ・面内均一性(4"φ基板上): - 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基板上アンドープGaNエピ層で、残留ドナー濃度 $=1 \sim 2 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ を達成。 ・転位密度(GaN基板上のアンドープGaNエピ層で、GaN基板の貫通転位密度よりも増加なし) - 有極性 $<5 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$ 、- 無極性 $<10^9 \text{cm}^{-2}$ ・4インチφ アンドープGaNエピ層で、 - 膜厚均一性 $\pm 5\%$ を達成。 - Si及びMgドーピング濃度均一性 $\pm 5\%$ を達成。 - Si及びMgドーピング精度 $\pm 10\%$ を達成。	○
	・ヘテロ構造エピタキシャル層の成長と評価	・カーボン原料を用いた高温・高V/III比でのカーボンドーピング制御技術を確認。 ・AlInN/InGaN系HEMT構造のエピタキシャル成長を実現し、静特性を確認。 ・AlN及びAlGaNの原子層エピタキシャル成長実現(世界初)。	○
	(2) 高In組成のInGaNエピタキシャル成長技術		
	・高In組成制御技術の開発 - In組成 $1 \geq x \geq 0.5$ - 転位密度 $<10^9 \text{cm}^{-2}$ - 厚み: $\pm 10\%$ 、組成: $\pm 10\%$ (面内均一性(4"φ基板上))	・InGaNエピ(In組成 >0.5)の成長技術を確認。 - In組成 $1 \geq x \geq 0.5$ ・GaNテンプレート層上のInGaN混晶エピで新たな転位発生無しを確認(転位密度 $<10^9 \text{cm}^{-2}$)。 ・4インチφ InGaNエピ層(In組成 >0.5)で、 - 膜厚均一性 $\pm 5\%$ 、組成均一性 $\pm 0.5\%$ を達成。	○
	・Si及びMgドーピング制御技術の開発 - N型 $>10^{18} \text{cm}^{-3}$ - P型 $>10^{17} \text{cm}^{-3}$ - ドーピング不純物濃度 $\pm 20\%$ (面内均一性(4"φ基板上))	・4インチφ InGaNエピ層(In組成 >0.5)で、ドーピング濃度: - $[\text{Si}] > 10^{19} \text{cm}^{-3}$ - $[\text{Mg}] > 10^{20} \text{cm}^{-3}$ Siドーピング濃度均一性 $<5\%$ 、Mgドーピング濃度均一性 $\pm 5\%$ を達成。 (面内均一性(4"φ基板上))	○
	・ヘテロ構造エピタキシャル成長と評価 ・2次元電子ガス移動度 $>2,500 \text{cm}^2/\text{Vs}$ (面内均一性(4"φ基板上))	・2次元電子ガスのエピ構造を成長し、シートキャリア濃度(N_s) $=9.6 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ と高濃度において、移動度(μ) $=2160 \text{cm}^2/\text{Vs}$ を確認。 ・上記結果より、 $N_s \sim 2 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ において、 $\mu > 2500 \text{cm}^2/\text{Vs}$ の可能性を実証。	△
	(3) 高Al組成のAlGaNエピタキシャル成長技術		
	・高Al組成制御技術の開発 - Al組成 $1 \geq x \geq 0.5$ - 転位密度 $<10^9 \text{cm}^{-2}$ - 厚み: $\pm 10\%$ 、組成: $\pm 10\%$ (面内均一性(4"φ基板上))	・AlGaNエピ(Al組成 >0.5)の成長技術を確認。 - Al組成 $1 \geq x \geq 0.5$ ・GaNテンプレート層上のAlGaN混晶エピで新たな転位発生無しを確認(転位密度 $<10^9 \text{cm}^{-2}$)。 ・4インチφ AlGaNエピ層(Al組成 >0.5)で、 - 膜厚均一性 $\pm 3.7\%$ 、組成均一性 $\pm 0.6\%$ を達成。	○
	・Si及びMgドーピング制御技術の開発 - N型 $>10^{18} \text{cm}^{-3}$ - P型 $>10^{17} \text{cm}^{-3}$ - ドーピング不純物濃度 $\pm 20\%$ (面内均一性(4"φ基板上))	・4インチφ AlGaNエピ層(Al組成 >0.5)で、ドーピング濃度: - $[\text{Si}] > 10^{19} \text{cm}^{-3}$ - $[\text{Mg}] > 10^{19} \text{cm}^{-3}$ Siドーピング濃度均一性 $=7.4\%$ 、Mgドーピング濃度均一性 $=\pm 12.6\%$ を達成。 (面内均一性(4"φ基板上))	○
	・有(無)極性AlN基板の開発 ・有極性面・無極性面AlN基板の有用性確認	・昇華法により、転位密度 $5 \times 10^4 \text{cm}^{-2}$ の低転位AlN結晶を得る技術を確認。 ・エピ・デバイス技術開発チームに、研磨済みの有極性面、無極性面AlN基板を供給。 ・AlN基板上のAlGaNチャネルFETの試作により、AlN基板の有用性を確認。	○
(4) 結晶成長その場観察評価技術			
・結晶成長その場観察評価技術の開発	・二次元ウェハ形状その場観察装置を開発。 ・非等方的反りでも測定可能であり、且つ曲率半径10 km以上の精度。 ・上記装置にて、曲率半径3mの大きな反り測定が可能であることを確認。	○	

次頁へ続く

前頁から続く

研究項目	最終目標	成果	達成度
窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価	(1)横型電子デバイスの評価		○
	<ul style="list-style-type: none"> 有極性Ga_N自立基板上の横型デバイスの作製と評価 大口径基板面内でのFET特性の均一性に関する検証 広い混晶組成範囲の耐圧と結晶欠陥の相関の明確化 耐圧1200Vクラスの横型基本素子プロセスを開発 各種半導体基板での基本FETの試作・評価 窒化物系半導体のSi₃N₄等他種半導体に対する優位性の確認 基板・エビ技術開発チームへのフィードバック 	<ul style="list-style-type: none"> AlGa_Nチャネル、Ga_Nチャネル構造FETに対する低抵抗オーミック電極を開発。 2インチNaフลักス有極性Ga_N基板上に、AlGa_N/Ga_NチャネルHFETを試作し、ウエハ全面での動作を確認し、ソース-ゲート間のゲートリーク電流と転位密度の相関を解析。 Al_N基板上AlGa_NチャネルFET試作(世界初)、耐圧2000Vと、変動が少ない良好な温度特性を確認。 GaN on Ga_N、GaN on SiC、GaN on Si FET試作でいずれも耐圧1200Vを達成。 GaN on Ga_N、GaN on SiCでGaN on Siと同等以上の低オン抵抗特性を確認。 NaフลักスGa_N基板の高耐圧化への指針明確化(基板、バッファ層の高抵抗化によるリーク低減)。 	
	(2)縦型電子デバイスの評価		○
	<ul style="list-style-type: none"> 有極性Ga_N自立基板上の縦型デバイスの作製と評価 結晶欠陥評価技術の開発および欠陥密度・デバイス特性との関係の明確化 基板・エビ技術開発チームへのフィードバック 	<ul style="list-style-type: none"> Naフลักス有極性Ga_N基板上に、pnダイオード、ショットキーダイオードを試作。 転位密度とリーク電流の関係を調べ、NaフลักスGa_N基板に含まれる刃状転位、混合転位は、リーク電流に影響を及ぼさないことを明確化。 	
(3)窒化物単結晶基板上デバイスの優位性確認		○	
<ul style="list-style-type: none"> 自立基板上および各種基板上デバイスの比較評価 窒化物単結晶上デバイスを用いた実機評価 基板・エビ技術開発チームへのフィードバック 	<ul style="list-style-type: none"> 窒化物半導体エビを用いた横型電子デバイスの作製プロセスを確立。 窒化物単結晶上および各種基板上にデバイスを作製し、各種デバイス特性の比較評価を実施。 Naフลักス基板上(Cd⁺緩衝層)デバイスで、耐圧1000V以上の可能性を確認。 LEDドライバ、インバータ、デジタルアンプの実機動作を確認。 		
(4)有極性及び無極性デバイス構造の比較		○	
<ul style="list-style-type: none"> 有極性及び無極性の比較評価 基板・エビ技術開発チームへのフィードバック 	<ul style="list-style-type: none"> ゲート長0.25μmのAlGa_N/Ga_N HEMTのスループロセスを構築した。 有極性基板上と無極性基板上デバイスの比較の結果、無極性a面基板上HEMTの電子移動度とドレイン電流は、有極性デバイスに比べ、それぞれ1/3から1/4倍程度小さくなる事が判明した。 無極性Ga_N基板上InGa_NチャネルHEMTの高周波特性を二次元デバイスシミュレータを用いて解析した結果、ゲート長30nm以下にすることにより、1THz以上の遮断周波数を予測した。 		

プロジェクト全体の成果発表内訳

外部発表および論文、特許出願、その他の公表等の件数(内訳)

	H19年度	H20年度	H21年度	H22年度	H23年度	H24年度	計
外部発表・講演	13	19	28	46	66	8	180
論文等	1	3	6	20	21	4	55
特許等(国内)	3	11	17	4	4	2	41
特許等(外国)	7	0	35	11	0	0	53
その他の公表	1	4	5	5	4	1	20
計	25	37	91	86	95	15	349

2 研究開発項目毎の成果

2-1 「高品質大口径単結晶基板の開発」

2-1-1 窒化物単結晶成長における基礎技術の検討および大口径化技術の開発

2-1-1-1 溶液状態制御技術の開発

1) 溶液攪拌技術

(a) 板状種結晶上成長における攪拌効果の検証

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 1-1 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、インクルージョン混入率との相関を調べた。

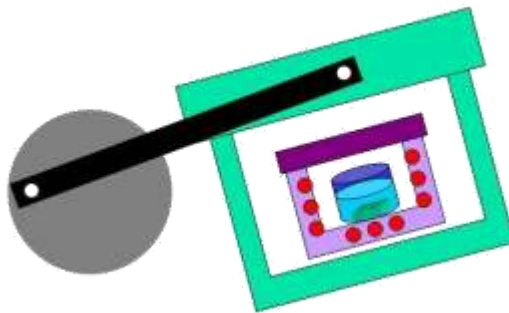


図 1-1 機械式揺動装置の概略図

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 1-2 (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 1-2 (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 1-2 (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 1-2 (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。

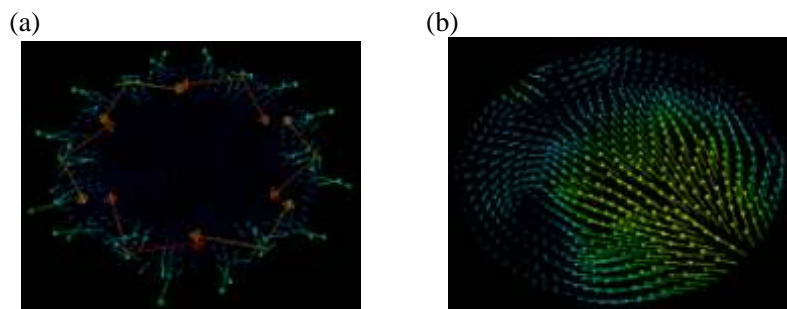


図 1-2 (a)揺動無し、(b)揺動有り (1rpm) 条件での基板表面における流れの計算結果

図1-1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調べた。育成温度は860℃、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1-3(a)、(b)はそれぞれ揺動無し、有りて成長した GaN 結晶写真である。揺動無しの条件で成長した GaN 結晶(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、揺動有りの条件で成長した GaN 結晶(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。

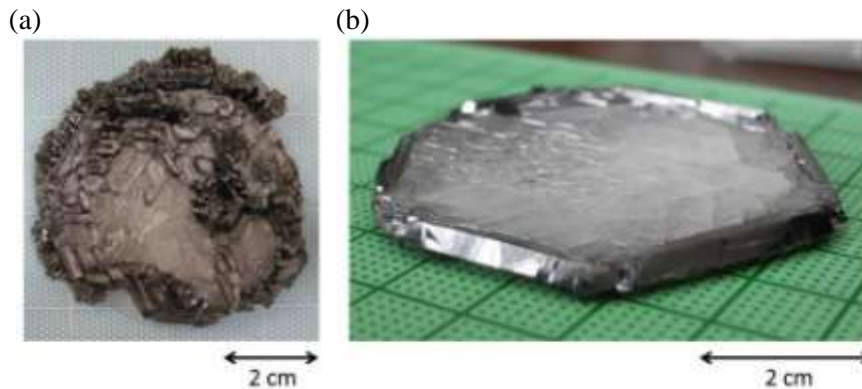


図1-3 (a)攪拌なし、及び(b)攪拌を行った条件で成長した結晶写真

次に、インクルージョン混入率と攪拌速度の相関を調査するため、各攪拌速度で成長した結晶の透過写真より、インクルージョン混入率(=インクルージョン混入領域面積/結晶面積)を見積もった。図1-4(a)、(b)に攪拌速度が2rpm、及び5rpmで成長した結晶の透過写真とインクルージョン混入率を示す。図中、黒色部がインクルージョンに対応する。攪拌のない条件で成長した結晶中のインクルージョン混入率は4%以上と高かったが、攪拌速度2rpmでは0.85%、5rpmでは0.11%まで低減することが明らかになった。

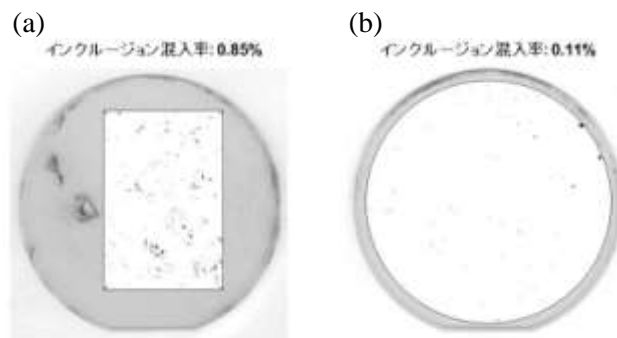


図1-4 (a)攪拌速度2rpm、及び(b)5rpmで成長した結晶の透過写真とインクルージョン混入率

(b) 点状種結晶上成長における攪拌効果の検証

高速、及び高品質化に向けて、攪拌手法・速度と成長速度、及び結晶形状の関係を調査した。攪拌手法として、図1-5(a)、(b)に示す一軸揺動機構および回転攪拌機を採用し、各攪拌手法において、攪拌速度と成長速度の関係を調査した。種結晶は点状 GaN 結晶を用い、2インチ径で17個の種結晶を同心円状に配置した。各攪拌パターンにおける結晶成長の様子、及び種結晶外多結晶と種結晶上結晶の収率の変化をそれぞれ図1-6、1-7に示す。また、各攪拌条件で種結晶上に得られた結晶写真を図1-8に示す。

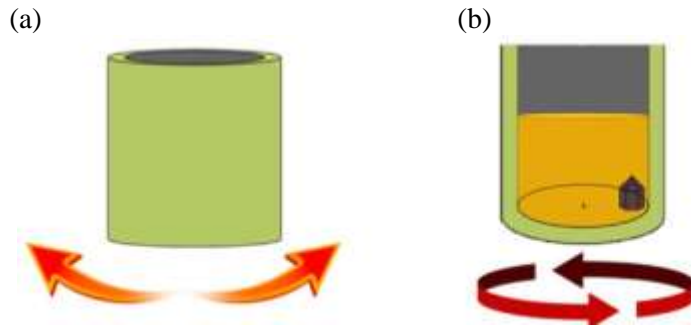


図 1-5 (a)揺動攪拌、及び(b)回転攪拌の概略図

図 1-6、1-7 より、攪拌のない条件では種結晶上の成長量が少なく、坩堝壁上に大量の多結晶が晶出した。加えて、種結晶上に成長した結晶のほとんどは骸晶化した。

揺動攪拌では 1rpm で多結晶が大幅に減少し、3.0rpm で多結晶の発生はなくなった。また、揺動周期が増すにつれて収率が上昇し、成長した結晶の骸晶化が改善した。7.0rpm で骸晶化が抑制され、各結晶の成長速度にばらつきがなく、総収率が最も高くなった。

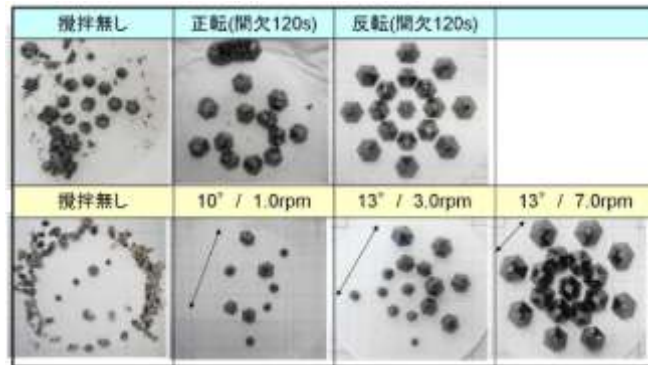


図 1-6 成長後の結晶の攪拌方法・速度依存性

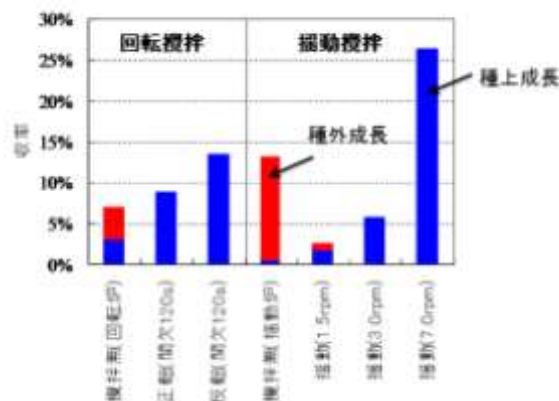


図 1-7 LPE 収率、及び種結晶外収率の攪拌方法・速度依存性

回転攪拌では回転周期を 30rpm 一定とし、常に一定方向に回転し、一定周期ごとに停止する正転パターン、一定周期ごとの停止に加え、回転方向を反転させる反転パターンを行った。育成の結果、正転パターンでは攪拌なしに比べ、多結晶発生が大幅に減少し、収率が上昇したが結晶は骸晶化した。反転パターンでは多結晶の発生はなく、正転パターンと比較し高い収率が得られた。また結晶の骸晶化も大幅に改善した(図1-8)。

以上の結果より、攪拌を導入することで、点状 GaN 種結晶上の成長が促進され、溶液中の窒素濃度分布の均一化が可能であることが示唆された。すなわち、Na フラックス法による GaN 結晶育成においては、溶液攪拌が成長速度向上、モロフォロジー向上、インクルージョン抑制に極めて効果的であることが明らかとなった。

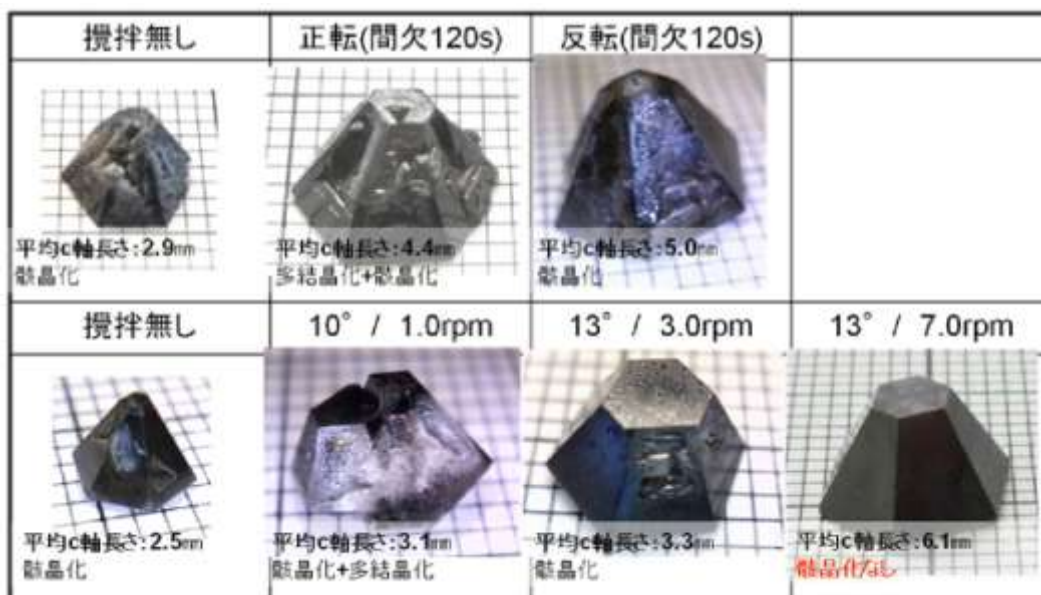


図1-8 種結晶上に成長した結晶の表面モフォロジーの攪拌方法・速度依存

2) 高温育成による GaN 高品質化

Na フラックス法を用いた結晶の育成において、結晶品質の更なる向上が課題である。また、GaN 結晶のモルフォロジー制御および透明化に向けて、種々の添加物を加えた結晶育成を行っているが、これらの系では添加物の結晶内部の取り込みが問題となることがある。これらの課題に対し、結晶成長温度を高温にすることで解決を試みた。

図1-9は、Ca-Li 添加系において育成した m 面 GaN 結晶の XRC-FWHM の成長温度依存性を示している。結晶の成長温度が高くなるにつれ、tilt 成分、twist 成分共に半値幅が狭くなっていることが分かる。微小種結晶を用いたバルク結晶の育成 (Ca 添加系で育成、m 面の結晶性を測定) においても、図1-10に示すように同様の結

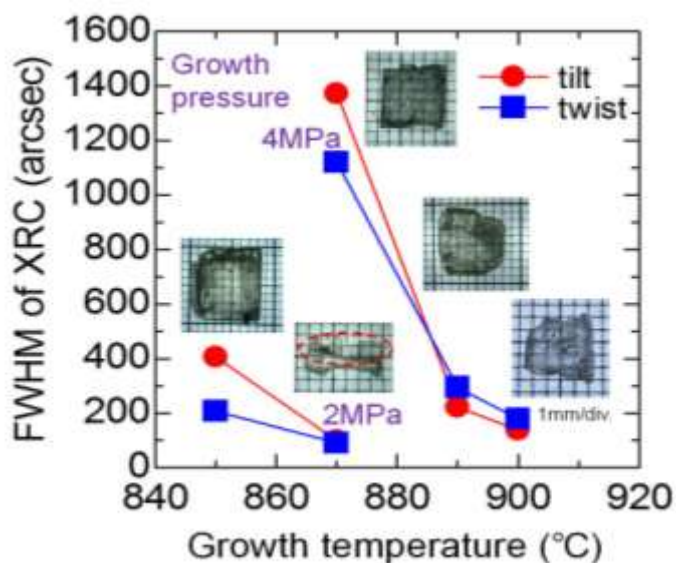


図1-9 Ca-Li 添加系 m 面 GaN 結晶の XRC-FWHM の成長温度依存性

果が得られている。

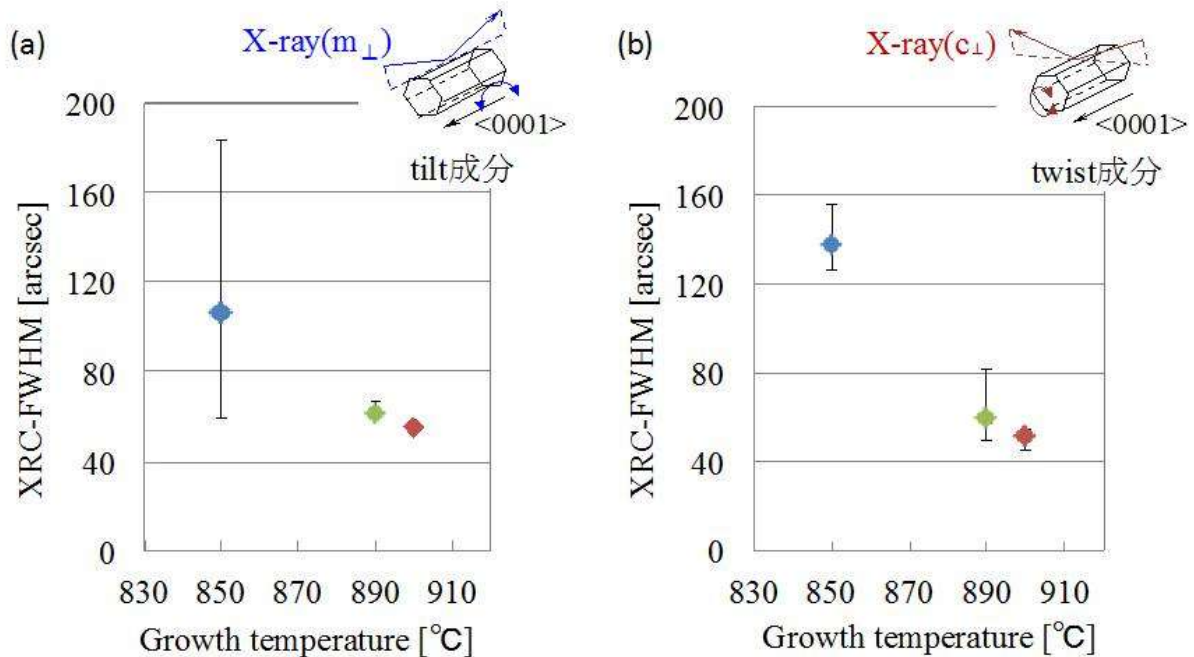


図 1-10 微小種結晶を用いて育成したバルク GaN 結晶の XRC-FWHM の成長温度依存

図 1-11 (a)、(b)は、Li 添加系 (Li 添加量 0.3mol%) において、c 面自立基板の上に GaN を育成した際の基板と LPE-GaN の界面付近における Li 濃度を SIMS によりマッピング分析した結果である。870°C 育成の場合、基板と LPE-GaN 界面近傍だけでなく、成長面全体に Li が 10^{18} atoms/cm³ のオーダーで取り込まれている (a)。これに対し、育成温度を 900°C、他の育成条件を統一した際の結果が (b) である。界面近傍には Li が偏析した領域が見られるが、870°C 育成と比較すると顕著に不純物の取り込み量が減少しており、界面から 100 μm 以上の厚みにおいては、 10^{15} atoms/cm³ のオーダーまで減少していた。表 1-1 に Ca-Li 添加系 (Ca 添加量 0.05mol%、Li 添加量 0.1mol%) において育成した m 面 GaN 結晶表面への不純物取り込み量を SIMS 分析した結果を示す。育成温度をわずか 40°C 上昇させただけで、Ca の取り込み量は 40 分の 1 に、Li の取り込み量は 5 分の 1 に、O の取り込み量は 20 分の 1 まで減少している。これらの結果は、高温成長では結晶内部への不純物の取り込み量が低減し、結果的に結晶品質が向上することを示している。

図 1-12 に、Ca 添加系で育成したバルク GaN 結晶の m 面におけるフォトルミネッセンススペクトル (室温測定) を示す。育成温度の上昇に従い、GaN のバンド端発光強度が強くなっている様子が分かる。一方、500~520nm の波長領域に見られる不純物由来の発光強度は、育成温度の上昇に従って弱くなる。図 1-13 は、各育成温度で得られた GaN 結晶表面をパングロマンティッ

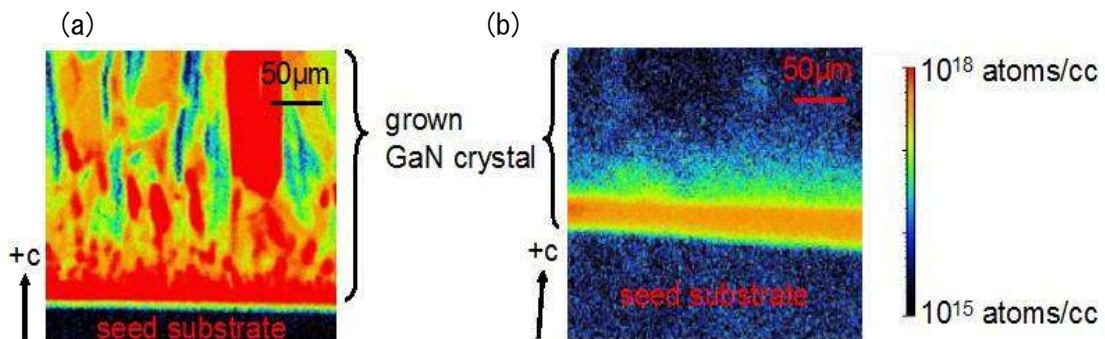


図 1-11 Li 添加系において育成した c 面 GaN 結晶への Li 取り込み量の温度依存性

クカソードルミネッセンス (CL) で観察した像と、そこから計算した転位密度を示す。特に 900°C 育成において転位密度の大幅な減少が起こっていることが分かる。高温育成による転位減少のメカニズムはまだ不明ではあるが、育成温度の上昇に伴って、転位密度が減少する可能性が示唆された。

表 1-1 Ca-Li 添加系において育成した m 面 GaN 結晶への不純物取り込み量の温度依存性

	850°C 2MPa	→	890°C 4MPa
Ca	$7.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	>	$1.8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
Li	$1.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	>	$3.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
O	$8.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	>	$4.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

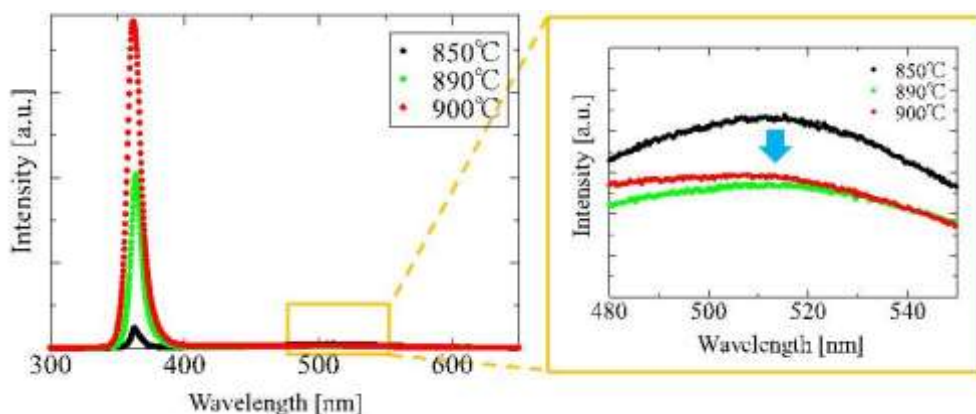


図 1-12 Ca 添加系で育成したバルク単結晶 m 面の PL スペクトル(室温測定)

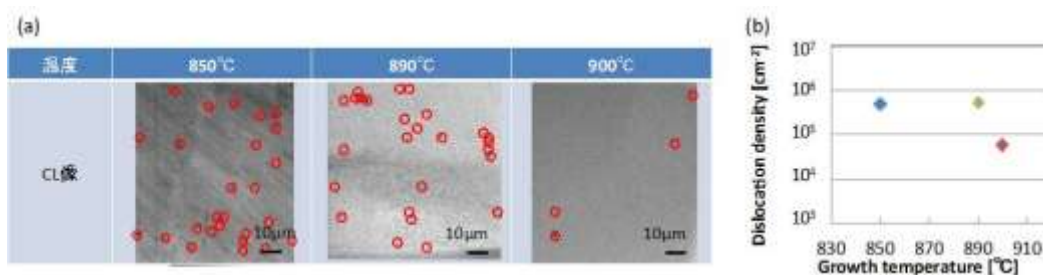


図 1-13 (a) Ca 添加系で育成したバルク単結晶 m 面の CL 像
(b) 各育成温度における転位密度

以上一連の結果より、結晶の成長温度を高くすることにより、結晶内部への不純物の取り込み抑制、結晶性の向上、転位密度の減少などの効果が確認された。このような一連の結晶品質向上は、次のようなメカニズムで起こると推察される。成長温度の上昇に従い、フラックス中への窒素溶解度が増加する。そのため、結晶内部の窒素欠陥が補完されて結晶品質向上につながると考えられる。これに加え、温度が高いほど、成長する結晶表面での原子の動きが速くなる。成長フロントにおける Ga、N 原子に加えて不純物原子の吸着、脱着の頻度が上がるので、その過程で不純物が結晶内部に取り込まれにくくなると考えられる。今後、育成温度をより高温にすることで、

更なる結晶品質の向上が期待できる。

2-1-1-2 核発生・成長方位・転位制御技術の開発

1) Ba 添加無極性基板上成長

Na フラックス法を用いて無極性面結晶を育成すると、c 面や{10-11}面が現れ、c 軸方向へグレインが結合しないという課題がある。そこで、グレインの結合を促進するために、Ba の添加物効果に着目した。Ga-Na 混合融液に Ba を添加すると、その添加量増加に伴い m 面に垂直な方位への成長が促進され、得られる GaN 結晶の形状が六角錘状から六角柱状に変化することが報告されている。本研究では、Ba 添加した Na フラックス法を用い、グレインが結合した a 面 GaN 結晶成長を試みた。

Ba 無添加系と Ba 添加系それぞれで得られた GaN 結晶の SEM 像を図 1-14 に示す。Ba 無添加での育成では、a 面 GaN 基板上においても -c 面および{10-11}面が出現し、グレイン同士が結合せず、グレイン間には溝や空洞などの構造が発達する。これに対し、Ba 添加系では、c 軸方向への成長が促進され、-c 面が発達する領域が極めて小さくなった。また、m 面が発達することで、山脈状に連なったようなモルフォロジーでグレインが結合した。c 軸に平行な面で結晶を切断しその断面を観察した結果、Ba 無添加では溝や空洞の発達が顕著であるのに対し、Ba の添加によってこれらの構造が改善され、空洞の無い結合が実現していることが分かる。

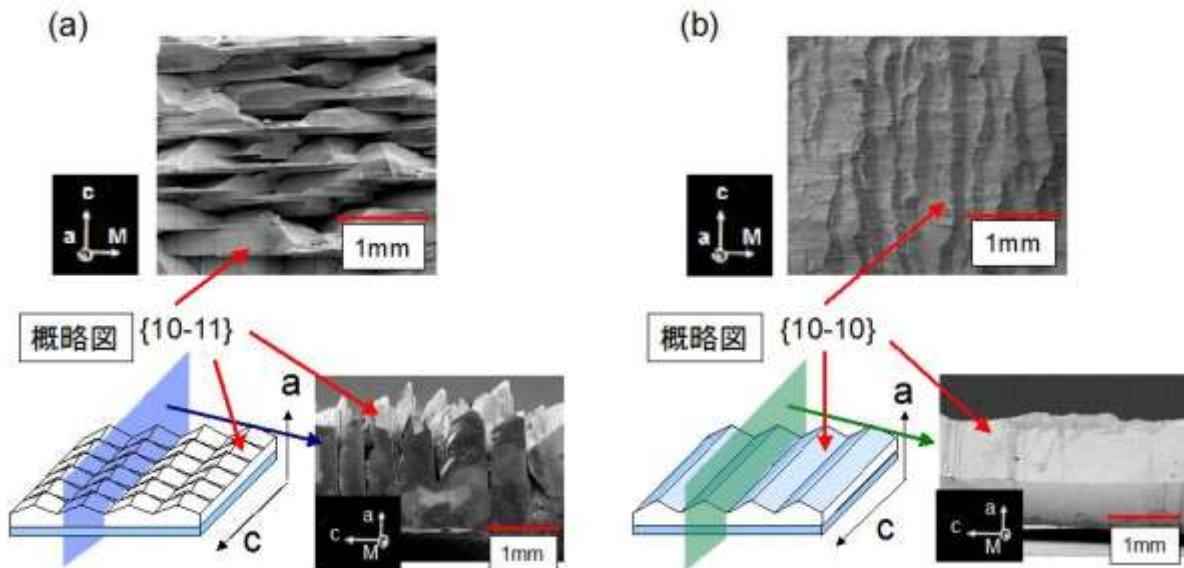
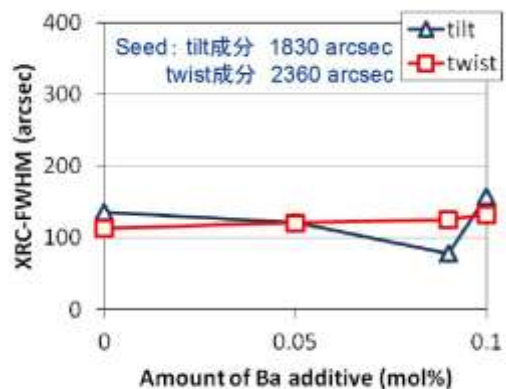


図 1-14 (a) Ba 無添加系：a 面 GaN 結晶の俯瞰 SEM 像、断面 SEM 像および結晶の概略図
(b) Ba 添加系(0.05mol%)：a 面 GaN 結晶の俯瞰 SEM 像、断面 SEM 像および結晶の概略図

図 1-15 に、得られた GaN 結晶の XRC-FWHM の Ba 添加量依存性を示す。Ba の添加、無添加に関わらず、種基板と比較して結晶性が大幅に向上した。Ba 添加による結晶性の低下は、0.1mol%以下の添加条件では確認されなかった。

以上の結果より、a 面 GaN 結晶成長において Ba 添加は LPE-GaN のグレイン結合促進に効果的な添加物であると言える。



1-15 Ba 添加系で得られた a 面 GaN 結晶の XRC-FWHM の Ba 添加量依存性

2) Ca-Li の添加による透明六角柱状結晶の育成

微小 GaN 単結晶上の成長では、極めて欠陥の少ない GaN 単結晶が得られるが錐状化しやすいという課題があった。バルク結晶からより多くの GaN 基板を切り出すためには、六角柱状に形状制御する必要がある。そこで、Ga-Na 融液へ様々な元素 (Sr, Ba, Ca) を添加したところ図 1-16 (a)~(c) に示すように六角柱状の GaN 単結晶が得られることが分かった。これらの結晶をスライスし、カソードルミネッセンス像を観察したところ、転位に由来するダークスポットは観測されず、極めて低転位であることが明らかになった。加えて、大口径化を目指し長時間成長 (400h 以上) を行ったところ、最大径で $\phi 1$ インチのバルク状 GaN 単結晶の成長に成功した (図 1-16 図 (d))。

微小 GaN 単結晶を用いた成長でのもう一つの課題は、結晶の黒色化であった。c 面板状の種基板を用いる場合には透明な単結晶を得ることが可能であるが、微小 GaN 単結晶上の成長では成長は c 面以外の面 (m 面、{10-11} 面など) でも成長が起こるため、結晶が黒色化しやすい。そこで、Ga-Na 融液への窒素溶解度を増加させる元素 Li を添加して結晶の育成を行った結果、透明度の向上が実現した (図 1-17 (a))。六角柱状かつ透明な結晶を育成するために、Ca と Li を Ga-Na 融液に共添加することで、Ca の形状制御効果と Li の透明化効果の両方の実現を試みた。その結果、透明かつ六角柱状の GaN バルク単結晶を得ることに成功した (図 1-17 (b))。

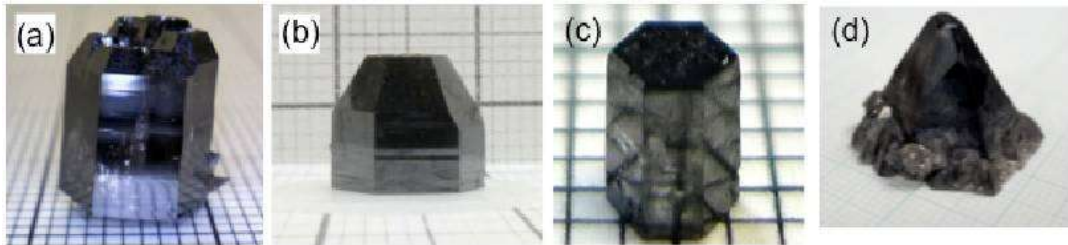


図 1-16 Na フラックス法において微小 GaN 単結晶上に成長させた六角柱状 GaN 単結晶 (a)Sr 添加系、(b)Ba 添加系、(c)Ca 添加系、及び(d)長時間成長で得られた GaN 単結晶写真

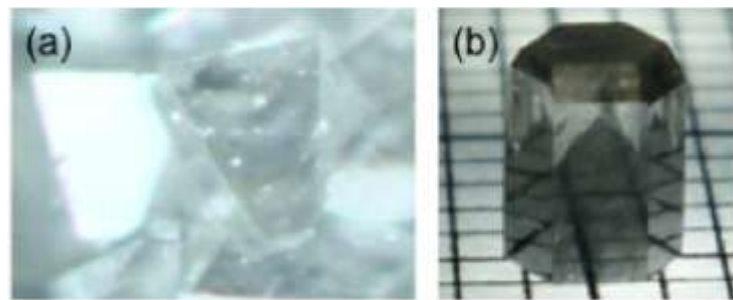


図 1-17 (a)Li 添加系、(b) Ca-Li 共添加系で得られた GaN 結晶の写真

3) ポイントシードの導入による無転位 GaN 単結晶成長

Na フラックス法では自発的な転位低減成長モードが存在するため、高転位密度 (10^9 cm^{-2}) の種基板から、低転位 (10^4 cm^{-2}) の LPE 結晶が得られる。更なる転位密度の低減には、種基板-LPE 界面で新たに発生する転位を極力低減し、自発的転位低減成長モードを促進する必要がある (後述)。

一方で、シリコンや KDP (KH_2PO_4) 等は、点状の種結晶 (ポイントシード) から目的とする結晶を育成することで、極めて転位密度の低い単結晶が作製されている。特に、シリコンにおいては「ネッキング」と呼ばれる育成初期の転位伝播制御技術により無転位単結晶が実現している。ここでは、Na フラックス法においてポイントシードを導入し、ネッキング技術による無転位 GaN 単結晶成長を試みたので報告する。

図1-18 (a)、(b)にポイントシードの概略図を示す。GaN 種層には c-GaN テンプレート(気相法にてサファイア基板上に成膜)を用い、(a) で示すようにその上に、直径 0.5~1.5mm の孔のあいたサファイア板を設置した。(b)に断面からみた様子をを示している。孔の中で露出している GaN 種層のみが種結晶となって成長することでネッキング領域が形成される。

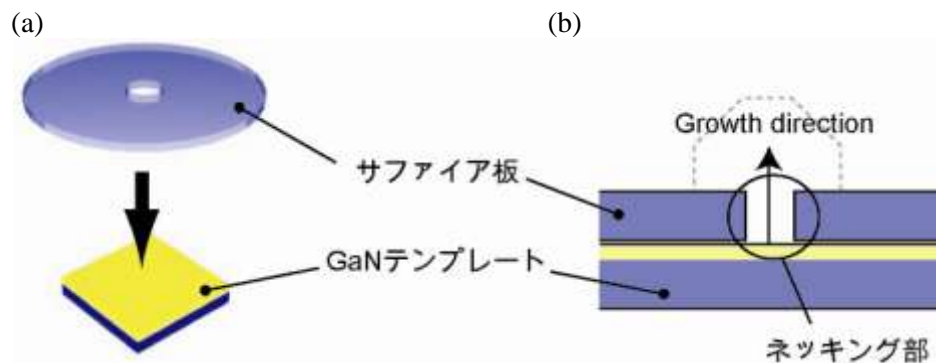


図1-18 (a)ポイントシードの設置方法、及び(b)断面概略図

成長方位制御元素として、Sr、及び Ba を添加して得られた結晶の写真をそれぞれ図1-19 (a)、(b)に示す。結晶サイズは最大で、幅 0.86cm、高さ 1cm に達した。m 面の X 線ロックアップカーブ半値幅は 50arcsec 前後であり、極めて高い結晶性を有することが分かった。

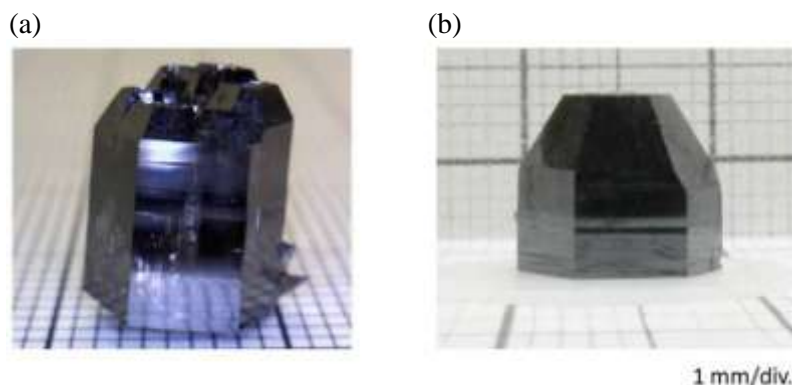


図1-19 (a)Sr 添加、及び(b)Ba 添加条件で得られた六角柱状 GaN 単結晶写真

得られた結晶の c 面、及び m 面スライス結晶の CL 像を図1-20 (a)、(b)に示す。c 面、及び m 面の大部分で転位に起因するダークスポットは観察されず、本手法で得られた結晶はほぼ無転位であることが明らかになった。そこで、転位消滅機構を明らかにするため、ネッキング部の詳細な断面 CL 観察を行った。図1-21は、ポイントシード上に成長した典型的な結晶の断面写真、及び CL マッピング像である。同図において、GaN 種層と成長結晶界面(f)、及び孔の側壁付近((e)、(g))では高いコントラストを示しており、マルチドメイン構造であることが予測される。

一方で、孔中心付近のコントラストは均一であり、かつ(0001)、及び{10-11}に平行なストリーションが観察されることから、この領域はシングルドメイン構造であることが分かる。また、マルチドメイン構造領域とシングルドメイン構造領域の境界が急峻であること、及び当該領域の SEM 観察結果から、各領域は空間的に分離しており結晶学的に結合していないと考えられる。マルチドメイン構造領域では、(f)ではダークスポットが、また((e)、(g))では<11-20>方向へのダークラインが観察され、これらはそれぞれ紙面に垂直、及び<11-20>方向に伝搬する転位に起因すると予測される。(h)で見られるシングルドメイン構造領域では、ダークスポット、及びダークラインは観察されなかった。

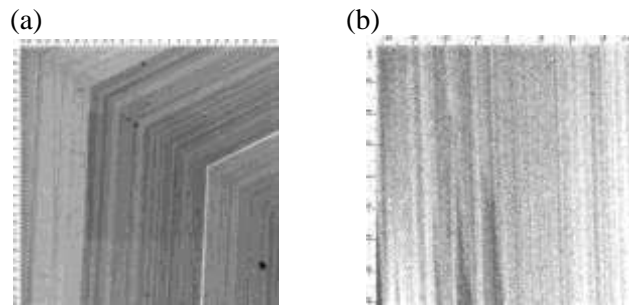


図 1-20 (a) : c 面の CL 像 (□120 μm)、
(b) : m 面スライス基板の CL 像 (□80 μm)

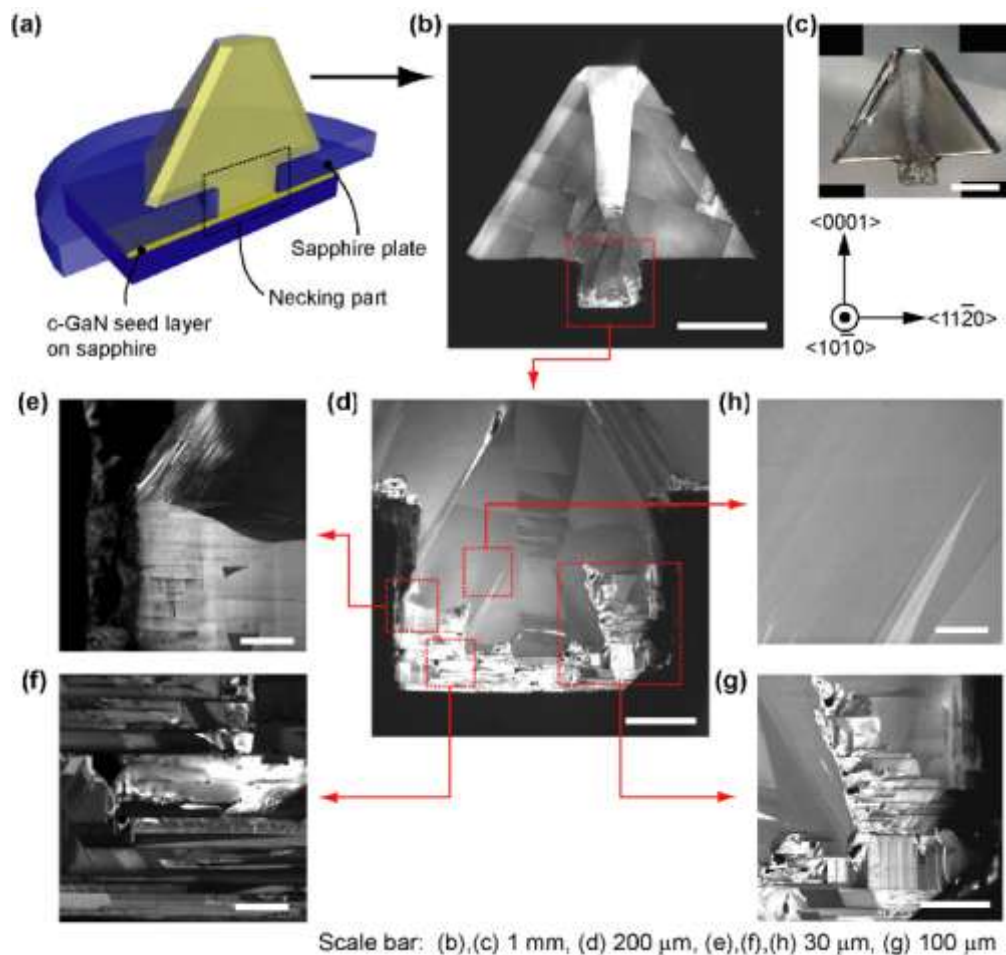


図 1-21 ポイントシード上に成長した GaN 単結晶の断面 CL マッピング像
(a) : 評価サンプルの概略図、(b) : 全体 CL 像、(c) : 全体写真、
(d) : ネッキング部の CL 像、(e)、(g) : 孔側壁付近の CL 像、
(f) : GaN 種層と成長結晶界面付近の CL 像、(h) 孔中央部の CL 像

以上の CL 観察結果から予測されるポイントシード上の成長モデルの概略図を図 1-22 に示す。成長初期は、通常の LPE 成長と同様に多数の(10-11)を持ったグレインが形成され(マルチグレイン構造)、それらが会合する過程で転位が曲げられ収束することで転位密度が減少する。その後、ある一点から、単一グレインの優先成長が起こる。優先成長したグレインは、マルチドメイン構造領域を覆うように成長し、かつマルチドメイン構造領域とは物理的に結合していない。マルチドメイン構造領域内で曲げられ横方向に伝搬する転位は、孔側壁により終端し、c 軸方向に伝搬する転位は、マルチドメイン構造領域と優先成長した単一グレインの境界で終端する。よって、ほとんど全ての転位が孔内で消滅し、成長した単結晶内には転位が伝播しない。この成長様式はまさしくシリコンのネックングと同様であり、GaN 結晶成長においても、本技術が無転位化に向けて極めて有用であることが示された。

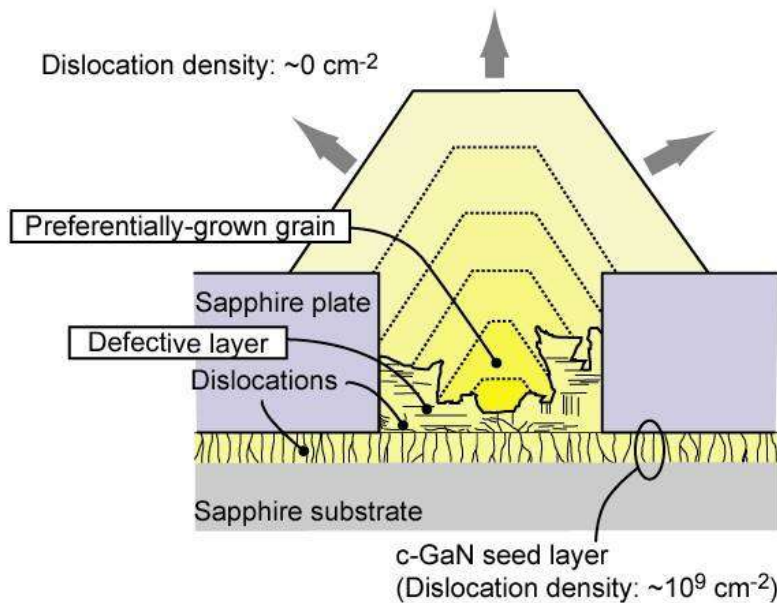


図 1-22 ポイントシード上成長モデルの概略図

(4) 成長初期過程制御による低転位 GaN 結晶の育成

Na フラックス法は、850°C~900°C に加熱した Ga-Na 融液中へ 3~4MPa の窒素を加圧することで、Ga-Na 溶液中で GaN 単結晶を育成する手法である。この方法は、結晶欠陥である転位を自然に低減させるメカニズムを有しており、高品質な GaN 単結晶を育成する有望な手法として着目されてきた。これまでに、MOCVD-GaN 結晶 (転位密度 $10^8 \sim 10^9 \text{ cm}^{-2}$) を種基板として Na フラックス法で育成した結果、部分的には 10^2 cm^{-2} オーダーまで減少させることができると報告されている。更なる転位密度の低減を目指し、育成前の GaN 種結晶の表面処理に着目した。表面処理方法として、ダイヤモンド処理・化学機械研磨 (CMP) 処理・ウェットエッチング (WE) 処理の 3 つの方法を検討した。これらの方法で表面処理を施した自立基板を評価し、さらにそれらの基板を用いて育成を試みた。

図 1-23 に、各表面処理を行った種基板及び成長した GaN 結晶 (0002) の X 線ロックアップカーブの半値幅 (XRC-FWHM) を示す。ダイヤモンド処理基板に比べ、CMP 処理および WE 処理をした基板のほうが XRC-FWHM が低下している。ダイヤモンド処理では、研磨ダメージ層が生じ、これを由来として新たな転位発生が起こるが、CMP 処理及び WE 処理によってこの研磨ダメージ層を除去することができたため、高効率な低転位化が実現したと考えられる。特に WE 処理は CMP 処理よりも XRC-FWHM の低下が顕著であり、簡便かつ有効な表面処理方法と言える。基板上に成長した GaN 結晶の XRC-FWHM の値も種基板と同様の傾向を示しており、WE 処理の優位性を示す。

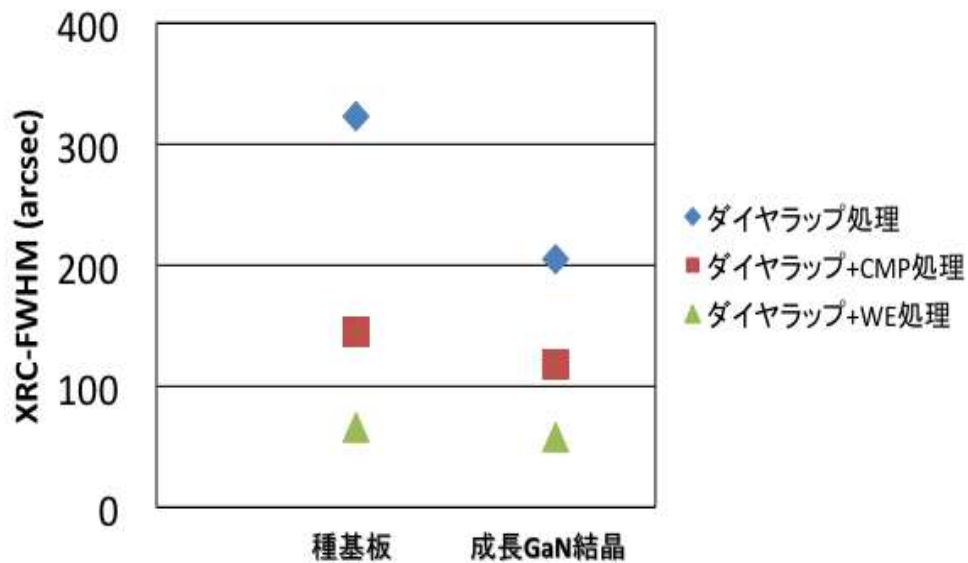


図1-23 表面処理を施した GaN 種基板および GaN 種基板上に成長した GaN 結晶(0002)の X 線ロックアップカーブの半値幅

各表面処理を施した種結晶上に成長した GaN 結晶の転位密度を評価した (図1-24)。転位密度が $\sim 10^7 \text{ cm}^{-2}$ の種結晶上成長において、表面にダイヤモンド処理後成長した結晶の転位密度は $\sim 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 、CMP 処理を行った基板上に成長した結晶の転位密度は $\sim 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 、WE 処理を行った基板上に成長した結晶の転位密度は $\sim 10^4 \text{ cm}^{-2}$ という結果が得られた。

WE 処理をした種結晶上に繰り返し成長した GaN 結晶の転位密度を評価した (図1-25)。繰り返し成長 1 回目は $\sim 10^4 \text{ cm}^{-2}$ オーダー、繰り返し成長 2 回目は $\sim 10^3 \text{ cm}^{-2}$ オーダーまで転位密度を減少させることができた。これは種結晶表面に WE 処理を施すことにより成長初期過程を制御し、転位密度が高効率に減少したと考えられる。

GaN 種基板の表面処理により成長初期過程を制御することで、結晶性の向上や転位密度の減少が実現した。特にピロリン酸による WE が簡便かつ有効な表面処理方法であることを示した。また、WE を用いた繰り返し成長は、低転位 GaN 結晶の作製に効果的であることを示した。

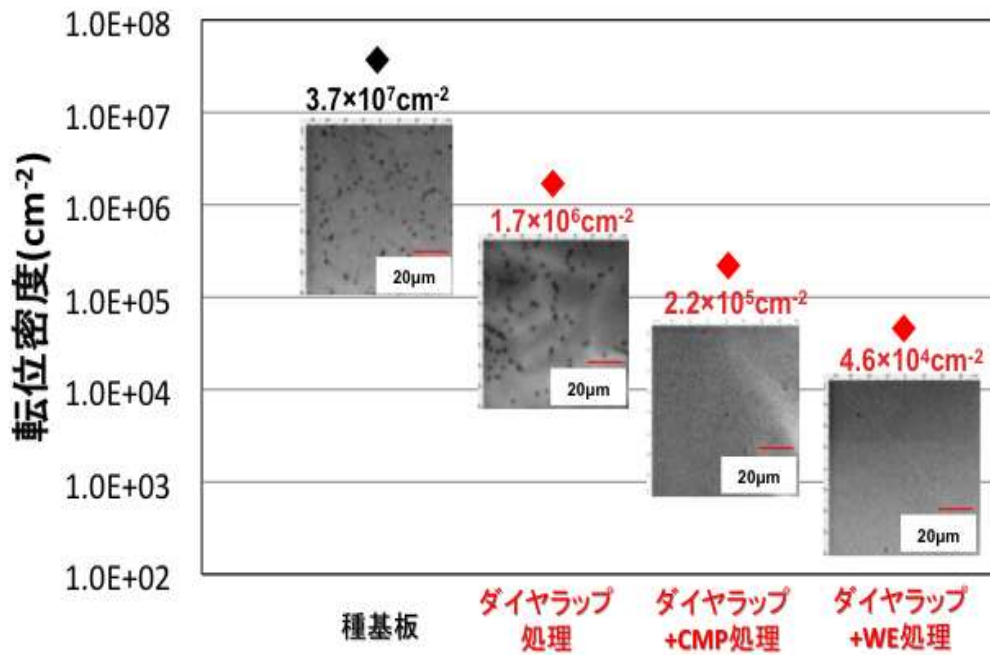


図1-24 種結晶および成長した GaN 結晶(0001)の表面 CL 像と転位密度

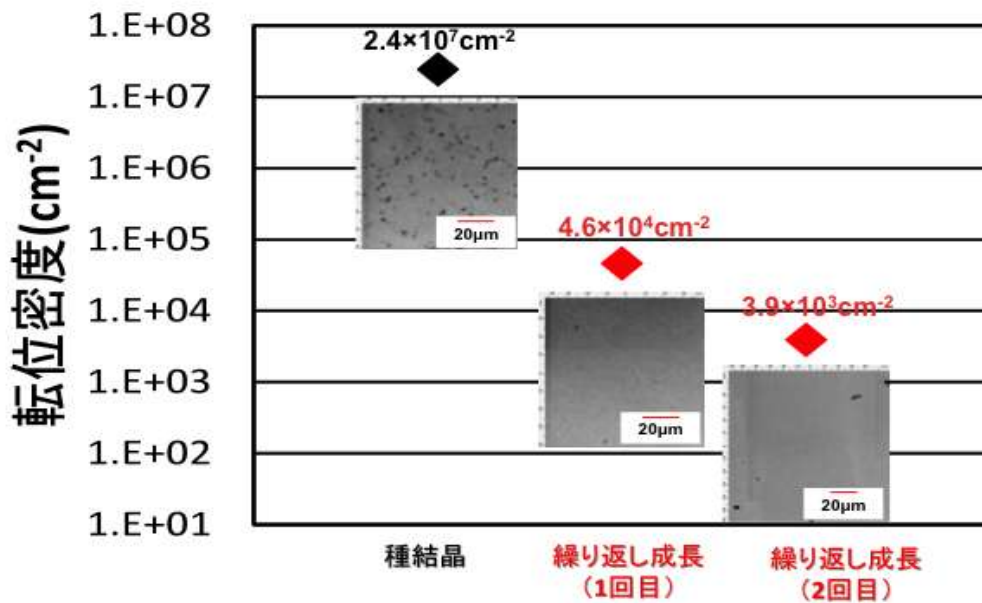


図1-25 種結晶および成長した GaN 結晶(0001)の表面 CL 像と転位密度

1-1-3 大口径化技術の開発

1) クラックフリーGaN ウェハ成長

HVPE 法で作製された種基板上への LPE 成長における課題は、LPE 結晶へのクラックの発生である。クラックは、昇温時の種基板自体の熱ショックや攪拌による物理的な衝撃による割れと、成長した LPE 結晶と種基板結晶間の歪に起因する割れに大別できる。前者は、昇温プログラムの最適化や攪拌開始時期の調整、及び種基板自体の強度増加により解決可能と考えられるが、後者については歪の発生原理等の詳細な調査が必要である。そこで、歪に最も関係すると思われる育成温度に着目し、育成温度とクラック発生確率の関係を調べた。その結果、従来の 870°C 育成では、クラック発生確率が約 5/6 であったのに対し、890°C で成長した結晶では、クラック発生確率は 4/7 に低下することが分かった。現在のところ詳細なメカニズムは不明であるが、さらなる高温育成により、クラック発生を抑制できる可能性が示唆された。

以上の検討を元に、 $\phi 2$ インチ、 $\phi 3$ インチ、及び $\phi 4$ インチ種基板上への LPE 成長を行った。図 1-26 (a)、(b) にそれぞれ、 $\phi 2$ インチ、及び $\phi 4$ インチウェハの写真を示す。口径によらずクラックフリーの GaN ウェハ作製に成功した。

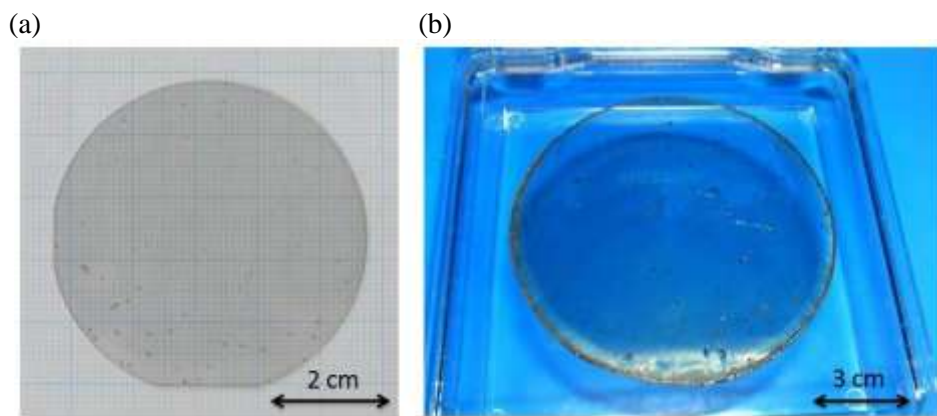


図 1-26 高温成長により得られたクラックフリー
(a) : $\phi 2$ インチ、(b) : $\phi 4$ インチウェハ写真

2) 無極性基板結合成長

無極性面 GaN 基板の作製に向けては、無極性面 GaN テンプレート、無極性面自立 GaN 基板、及び有極性厚膜 GaN 基板から切り出した小径高品質無極性基板を種に用いてそれぞれ LPE 成長を行った。その結果、GaN テンプレート、及び自立 GaN 基板上 LPE 成長では、種基板と比較して結晶品質が改善されるものの、クラックやボイドの発生が問題である。一方で、小径高品質基板を用いた場合、種結晶の品質と遜色ない LPE 結晶が得られ、クラックやボイドは発生しなかった。そこで、大口径の無極性 GaN 基板作成のアプローチとして、複数の小径高品質基板から成長した GaN 結晶を結合する結合成長を試みた。

結合成長には、HVPE 法により c 軸方向に厚膜成長した結晶から切り出した、無極性面 (a, m 面) 基板を用いた。a 面切り出し基板を c 軸及び m 方向に、m 面切り出し基板を c 軸及び a 軸方向に並べて育成を行い、結晶の結合を試みた。表 1-2 に、得られた GaN 結晶の写真をまとめて示した。赤点線は 2 つの種結晶の境界を示している。c 軸方向及び a 軸方向では GaN 結晶が一体化したが、m 方向においては一体化しなかった。これらのうち、一体化に成功した m 面切り出し基板 c 軸方向に一体化した結晶について、より詳細な評価を行った。

表 1-2 無極性面 GaN 結晶の結合成長の様子
 ・ a 面切り出し基板の c 軸方向結合および m 方向結合、
 ・ m 面切り出し基板の c 軸方向結合および a 軸方向結合

種結晶	a面切り出し基板		M面切り出し基板	
結合方向	c軸方向	M方向	c軸方向	a軸方向
結晶写真				
1 mm/div.				

図 1-27 に、m 面切り出し基板を c 軸方向に結合成長させ、一体化した結晶を c 軸に平行に切断した加工模式図 (a) と、その断面の SEM 像 (b) および CL 像 (c) を示した。SEM 像 (b) より、二つの結晶の結合面に溝や空洞が発生することなく一体化している様子が分かる。切断後に CMP 処理した断面の CL 像 (c) から、結合界面は二つの種結晶の直上に伸びていくのではなく、膜厚が厚くなるにつれて徐々に+c 方向に向かって前進 (横成長) している様子が分かる。-c 方向の成長速度よりも+c 方向への成長速度が大きく、結果として斜めの結合面が得られる。

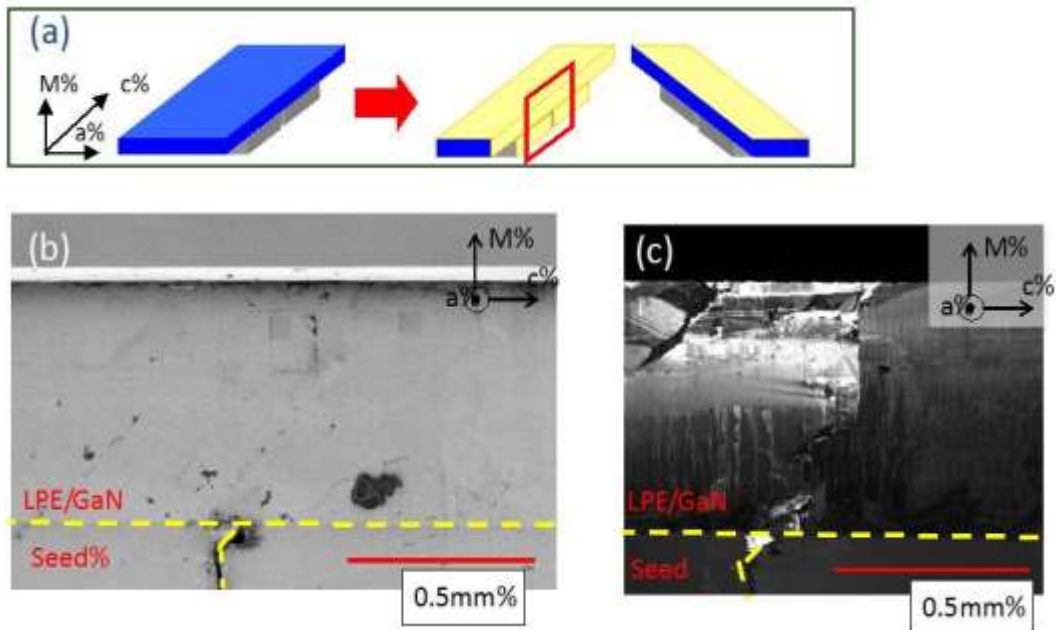


図 1-27 m 面切り出し基板を c 軸方向に結合成長させた結晶の断面評価
 (a) : 一体化した結晶の加工模式図 (b) : 切断面の SEM 像 (c) : 切断面の CL 像

図 1-28 (a) は、結晶表面を CMP 処理した二つの結晶の結合部を、m 軸方向から観察した CL 像である。2つの種結晶は黄色の破線で示している。結晶表面全体にコントラストが生じているのは、各エリアがどのような成長方位で形成されたかという成長履歴に対応するものと考えられる。また、成長速度のゆらぎに対応するストライエーションも観察できる。同図 (a) に赤い枠で囲んだ部分に結晶の結合部分が見られる。(b) はここを拡大した CL 像である。2つの結晶の結合部

分に着目すると、図1-27で示したように、結晶の結合部は+c方向に前進(横成長)しており、+c方向に前進しながら成長した部分は比較的輝度が高く、コントラストの違いによって境界線がはっきりと見て取れる。拡大CL像(b)の①、②(結合界面)、③の領域においてより詳細なCL観察を行い、転位密度を計算した。その結果、①の領域では転位密度が $2.8 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ であり(c)、下地切り出し基板直上に成長した結晶の大部分がこのオーダーの転位密度であった。また、横成長した③の領域では $100 \mu\text{m}$ 角の領域で転位に対応するダークスポットが観測されなかったため、転位密度は $1 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 以下であることが分かった。このような低転位領域が、育成した結晶内で複数点確認できた。特に、下地切り出し基板直上ではなく、横方向成長した結晶の転位密度は顕著に低く、 $1 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 以下の領域がほとんどであった。また、驚くべきことに、②の結晶の結合界面において新たな転位が発生している様子は観察されず(d)、①の領域(c)と同等の 10^5 cm^{-2} オーダーの転位密度であることが分かった。

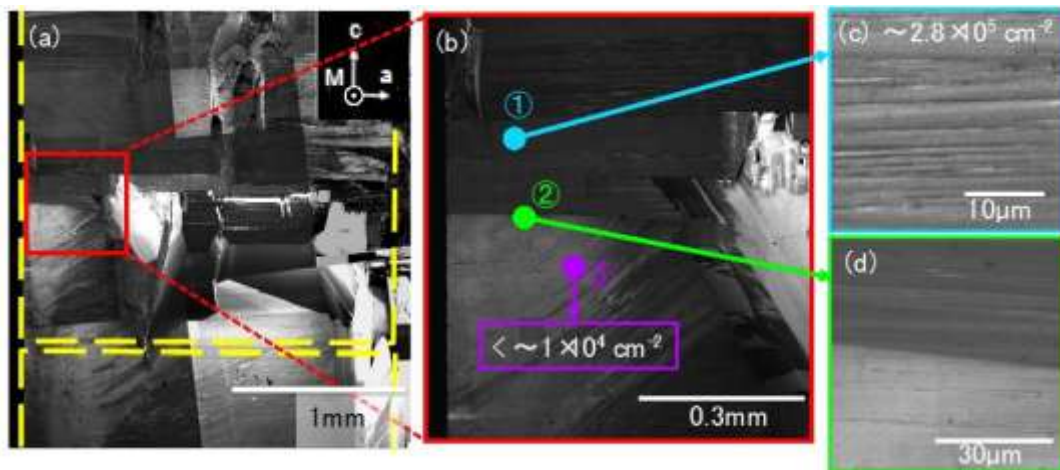


図1-28 (a) 二つの結晶の結合部分を含むCL像 (b)、(c) 高倍率のCL像

・Ca-Li 添加系における無極性基板結合成長

Ca-Li の共添加系では、Ba 添加系と同様に m 面が発達した六角柱状の GaN 結晶が得られることに加え、結晶の透明化が向上することを明らかにした。この Ca-Li の添加物効果を応用し、無極性基板の結合成長が実現可能か調査した。Ca の添加量は 0.05mol%、Li の添加量は 0.1mol% とした。

a 面切り出し基板を図1-29(a)に示したように4枚並べることで、c 軸方向結合および m 軸方向結合成長を試みた。その結果、c 軸方向に配置した結晶は一体化したが、m 軸方向に配置した結晶は一体化せず成長した。得られた結晶は、Ba 添加系で得られたものと比較して透明性が向上していた。c 軸方向に一体化した2対の結晶のうち、左側に配置していたものをSEMで詳細観察した(図1-29(b)、(c))。黄色い点線で示したのは、二つの基板結晶の境界である。左下に配置した結晶から+c 軸方向に結晶が成長し、左上に配置した基板上にオーバーラップして成長している様子が分かる。また、基板が結合したと思われる界面では多結晶化が見られている。

次に、m 面の切り出し基板を図1-30(a)に示したように4枚配置し、c 軸方向結合成長および a 軸方向結合成長を試みた。その結果、c 軸方向および a 軸方向ともに結晶が結合し、4つの基板が一つに一体化した結晶が得られた(a)。(b)は得られた結晶を m 軸方向から観察したSEM像である。配置した基板と基板の間に隙間が生じていたが、この隙間を橋渡しする形で結晶が横方向に成長し、一体化している様子が分かる。(c)に結合部を75度斜めから観察した鳥瞰SEM像を示した。二つの基板と基板の隙間を、横方向成長した GaN 結晶が結合させているが、結合部の下に空洞が見られる。この問題については、結晶の成長条件の最適化で解決できると考えている。

以上の結果から、Ca-Li 添加系においても、c 軸方向および a 軸方向であれば結晶を結合成長ができる可能性が示唆された。この系で結合成長が実現すれば、大型かつ透明な無極性基板の作製が可能となる。

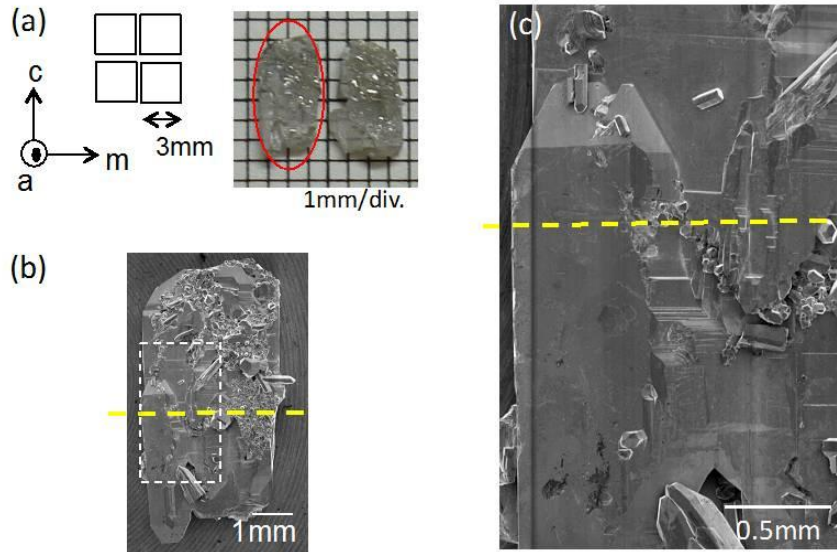


図 1 - 2 9 (a) : a 面切り出し基板の配置図および結合成長後の結晶写真
 (b) : c 軸方向に一体化した結晶の SEM 像、(c) : (b)における点線部分の拡大 SEM 像

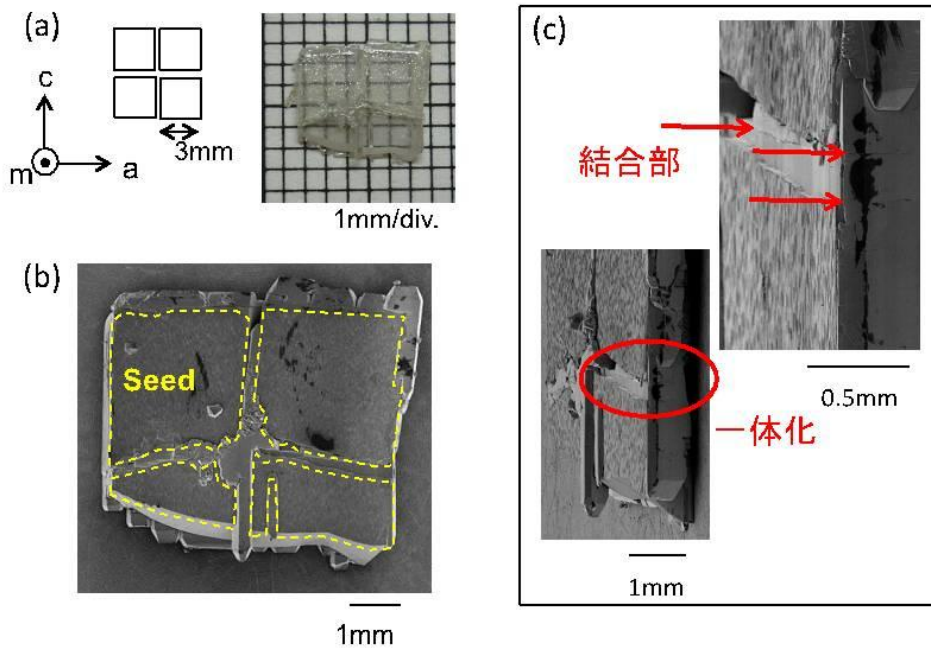


図 1 - 3 0 Ca-Li 添加系における無極性面 GaN 結晶の結合成長の様子
 (a) : m 面切り出し基板の配置図および結合成長後の結晶写真
 (b) : c 軸および a 軸方向に一体化した結晶の SEM 像、
 (c) : 結合部を 75 度斜めから観察した拡大鳥瞰 SEM 像

2-1-1-4 エピタキシャル用ノンドープ有極性および無極性 GaN 基板の作製と供給

開発した各種結晶は、外周研削加工、表面研磨を行い、デバイス試作用として、エピ成長技術チームまた、デバイス評価チームに供給した。

2-1-2 大口径種結晶の開発

2-1-2-1 Na フラックス LPE 法に適した GaN 下地種結晶の作製技術

1) r-FIELD 法による転位の削減

HVPE 法による有極性 GaN 下地結晶はサファイア基板上に育成しており、その成長界面から、格子不整合や島状成長による転位を含む高密度の欠陥が導入され、結晶歪みの原因ともなる。Na フラックス LPE 法の下地種結晶としては、クラックの発生を抑制するために歪みの少ない結晶が望まれていた。そこで歪みの原因ともなる欠陥の低減のために自然核発生したファセット面を有する島状成長から出発する r(random-islands)-FIELD 法の開発を行った。この成長では、まずサファイア基板上に最初に TiC 薄膜 (~100nm) を堆積させ、その上に比較的低温 (約 940°C) で GaN 層を 1-1.5μm 程度の厚さに堆積させた。得られた表面の様子を図 1-31 に示す。

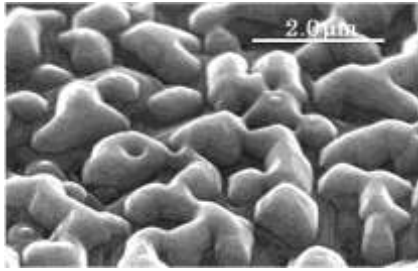


図 1-31 r-FIELD 法による低温 GaN 層表面の SEM 写真

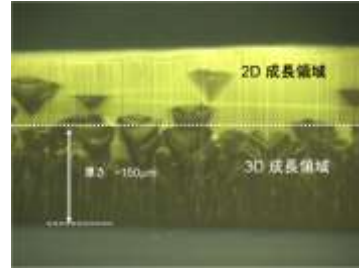


図 1-32 r-FIELD 法による高温 GaN 層の断面蛍光顕微鏡写真

この低温バッファ層の上に、高温 (約 1040°C) で GaN を成長させた結晶の断面蛍光顕微鏡写真を図 1-32 に示す。高温 GaN 層の成長領域は大きく二つに分けられる。成長界面に近い方は三次元 (3D) 成長が支配的であり、上部では二次元 (2D) 成長が支配的である。この試料では 3D 層の厚さは約 150μm であるが、この厚さと残留する貫通転位密度とは相関があり、図 1-33 にその結果を示す。3D 層厚の増加に伴い、貫通転位密度は減少傾向を示し、3D 層厚が 150μm 付近では、転位密度は $3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ まで小さくなった。

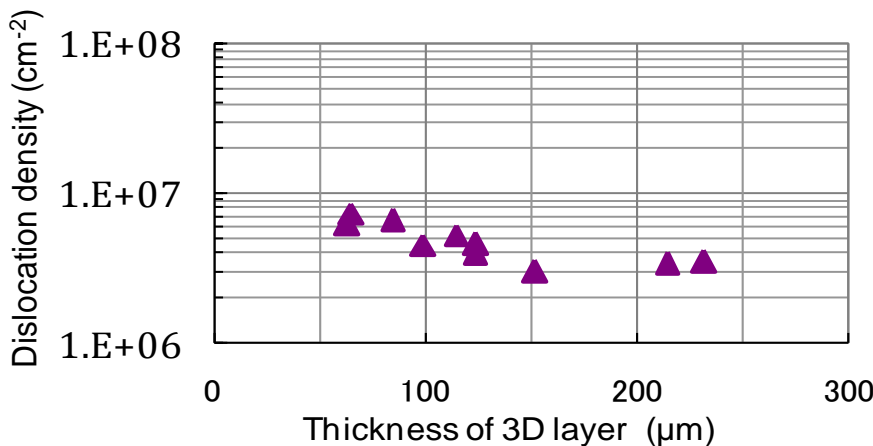


図 1-33 3D 膜厚と転位密度との関係

転位の挙動を調べるために断面 TEM 観察を行ったところ、低温 GaN 層の初期段階では大量の欠陥が観察されるが、次第に結晶性は改善され、低温 GaN 層から高温 GaN 層になると、欠陥の少ない領域が拡大していることがわかった。しかしこの領域にはカラム状の欠陥領域があり、これは inversion domain や、島状成長の横方向成長によりで合体した領域で転位の集中している領域と考えられる。転位はこの部分に向かって曲がっており、これが転位削減につながっていると考えられる。

2) 反り・歪みの低減

X 線の (0002) 面反射から結晶の反りに対応する C 軸の揺らぎを調べた結果、3D 層の厚さが増加すると反りの曲率は改善されることが分かり、3D 層厚が 150 μm の場合、曲率半径は 7-9m と小さく、良好な結果が得られた。この結果は結晶の歪も小さいことを示唆している。そこで、顕微反射スペクトル法を用いて結晶歪を測定した。原理的には反射スペクトルに現れる自由励起子信号のエネルギー位置が歪に非常に敏感であることを利用したもので[H. Geng et al., Jpn. J. Appl. Phys., **50**(2011)01AC01]、結晶の断面に沿ってビームスポットを移動させて自由励起子信号のエネルギー位置を測定した。得られた結晶の表面からの歪分布を図 1-34 に示す。ここでは、r-FIELO 法による GaN 結晶とストライプ状の開口部を有する従来型の FIELO(stripe(s)-FIELO)法による結晶の残留歪分布を比較して示した。

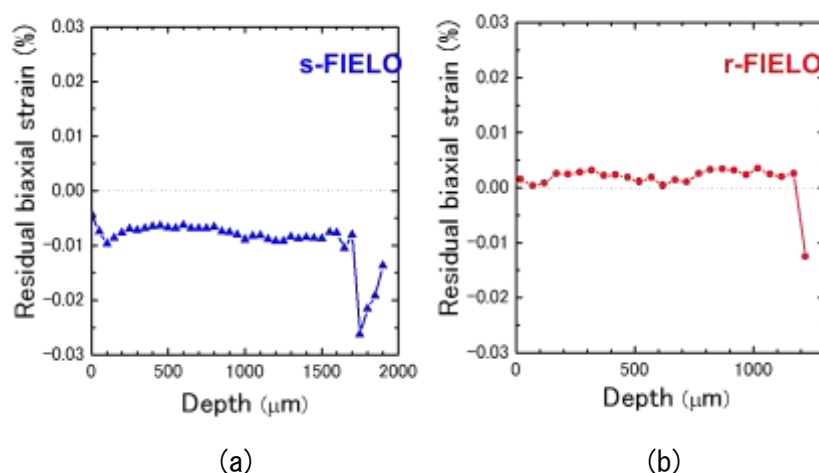


図 1-34 顕微反射スペクトル法により測定した
(a) : s-FIELO 法, (b) : r-FIELO 法による GaN 結晶の残留歪分布

この図からわかるように、両方の試料とも、残留歪量は 0.01%以下で小さいが、特に r-FIELO 法による GaN 結晶の歪みが小さい。この違いの原因としては、成長方向の転位の分布が異なることが原因しているのではないかと考えている。r-FIELO 法では 3D 層の効果により比較的結晶成長の初期段階から転位が少なく、結晶断面方向で転位分布はほとんどないが、s-FIELO 法では一桁程度の転位密度の分布を有していた。

以上、r-FIELO 法を用いることで、転位、歪みとも小さく Na フラックス LPE 法に適した有極性 2 インチから 4 インチ ϕ 下地種結晶を実現し、Na フラックス LPE 成長用に提供した。不純物濃度に関しても、残留 Si 濃度は 10^{16}cm^{-3} 台であり、Na フラックス成長に影響を及ぼさないレベルとなっている。

2-1-2-2 大口径有極性種結晶の開発

平成 21 年度に大口径種結晶用 HVPE 装置を導入し、1-2-1 に記載した r-FIELD 法を用いて、大口径 GaN 結晶を作製した。H22 年度に～3inchφまで、H23 年度に図 1-35 のような 4inchφ 有極性 GaN 基板の作製に成功した。これら GaN 結晶は、X線ロッキングカーブ測定では(0002)面で 40arcsec、(10-12)面反射で 75arcsec と狭い半値幅を有しており、また、カソードルミネッセンス評価から転位密度も $2 \times 10^6 \text{cm}^{-2}$ と低く、結晶の曲率半径も 5 m 以上と、高い結晶性を有していることがわかった。これら大口径有極性結晶については、本プロジェクトの計画に従って、種結晶として Na フラックス LPE 成長グループに提供した。また、その成果を nanotech 2012(第 11 回・国際ナノテクノロジー総合展)にて展示した。



図 1-35 有極性 2inchφ GaN 結と有極性 4inchφ GaN 結晶

2-1-2-3 高品質無極性種結晶の開発

HVPE 法を用いた無極性面 GaN 基板の作製では、現在、大きく分けて二つの方法が試みられている。数 mm から cm オーダーの c 面結晶を作成して無極性面でクロスカットする方法と、下地基板を選択することで、m 軸、a 軸方向に厚膜を成長させる方法である。前者は、c 面結晶と同様に比較的高品質な結晶を得ることができるが、ウエハの大きさは c 面結晶の厚さに依存しており、あまり大きくできない。それに比較して後者はウエハの面積を大きくすることはできるが、結晶性の改善が大きな課題である。将来的には後者の手法が望ましいのは言うまでもないが、現時点では確立された技術はまだない。本プロジェクトでは、この二つの方法を試みて無極性基板を作製し、Na フラックス LPE 成長の種基板として提供した。

1) 有極性結晶からのクロスカットによる無極性種結晶の作製

前述の r-FIELD 法によって比較的厚い c 面有極性結晶を育成し、その結晶のクロスカットで a 面または m 面を切り出すことにより高品質な無極性 GaN 種結晶を作製した。図 1-36 に作製した種結晶の外観を示す。作製した種結晶のサイズは概ね 5mm×15～20mm 程度である。結晶性は元の結晶に依存するが、X線ロッキングカーブの半値幅は、 \perp c 軸入射、 \parallel c 軸入射のどちらも 40arcsec 程度と狭い値が得られている。

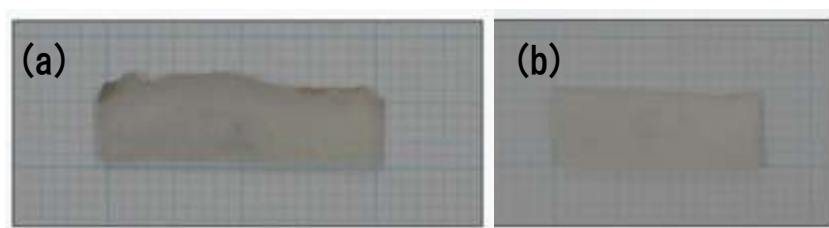


図 1-36 c 面有極性結晶のクロスカットにより作製した無極性 GaN 結晶
(a) : m 面 GaN 結晶、(b) : a 面 GaN 結晶

2) HVPE 成長による m 面種結晶の作製

m 面の HVPE 成長に関しては、これまで γ -LiAlO₂ 基板を用いた成長がいくつかの研究機関で試みられてきたが、ここでは比較的入手容易な m 面サファイア基板を用い、アルミカーバイド (Al₄C₃) バッファ層を組み合わせることで、m 面 GaN 結晶を得ることに成功した [H. Sasaki et al., phys. stat. sol. (a) 206 (2009) 1106]。この手法では、サファイア基板表面に、まず TMA (Trimethylaluminium; Al(C H₃)₃) を原料として MOCVD 成長により約 70nm 厚の Al₄C₃ 層を成膜し、成膜後のアルミカーバイド層の表面を窒化して AlN に変換し、この表面上に 500°C で低温 GaN (LT-GaN) 層を MOCVD 法で堆積させ、さらにその上に成長温度約 1050°C、成長速度約 100 μ m/h で厚さ 500 μ m 程度の GaN 厚膜を HVPE 成長させた。その結果、図 1-37 (a) のように X 線極点図で GaN 結晶は明確な m 面配向を示した。また図 1-37 (b) には、m 面サファイア上に積層したそれぞれの層の結晶方位関係を模式的に示した。

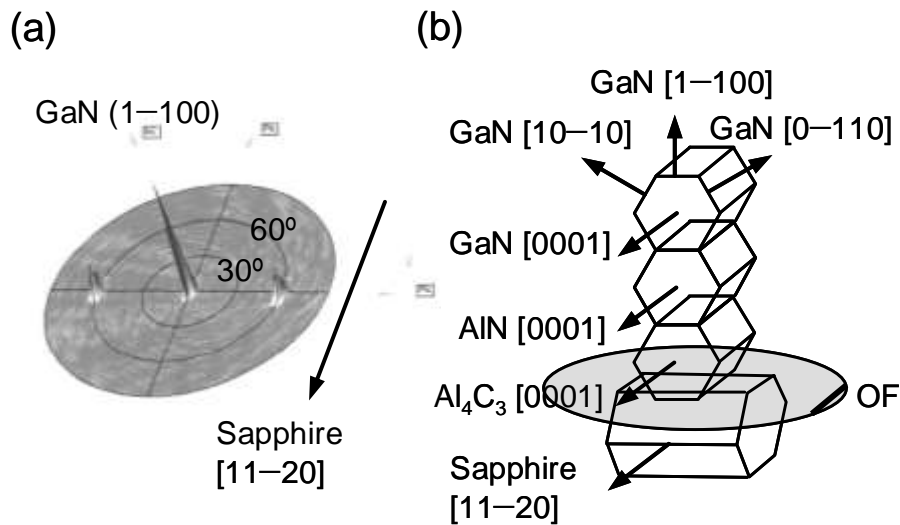


図 1-37 (a) : サファイア m 面上に HVPE 成長した m 面 GaN 結晶 X 線極点図
 (b) : m 面サファイア基板上の成膜層の結晶軸配向関係の模式図。

この手法により、HVPE 法で約 1mm 程度の厚膜を成長させた。この結晶は容易にサファイア基板から剥離した。図 1-38 に作製した m 面 GaN 結晶の外観を示す。(a) はサファイア基板と剥離して得られた as-grown 73mm ϕ の m 面 GaN 結晶で、(b) は研磨した得られた 45mm ϕ の m 面 GaN 結晶である。

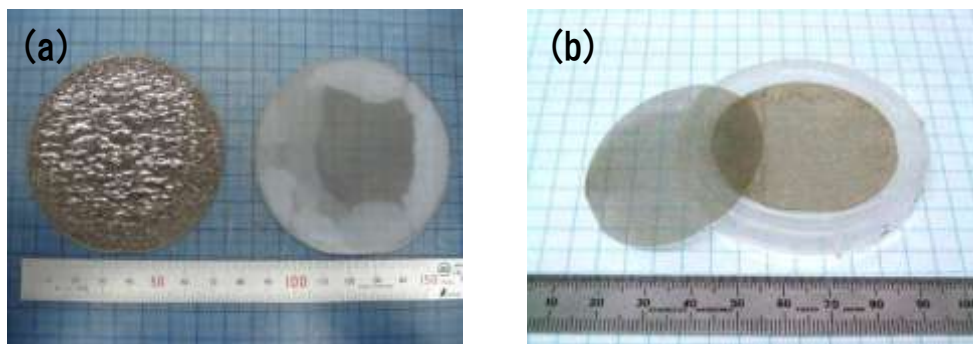


図 1-38 HVPE 法により作製した m 面 GaN 結晶の外観
 (a) : 73mm ϕ m 面 as-grown GaN 結晶 (右は剥離したサファイア基板)
 (b) : 45mm ϕ m 面 GaN 結晶 (研磨加工済)

作製した結晶の評価を実施した。GaN(1-100) X線ロッキングカーブ (XRC) の半値幅は、X線をGaNのc軸に対して垂直に入射し測定した場合 (以下 \perp c軸入射測定) で800arcsec程度、c軸に対して平行に入射し測定した場合 (以下//c軸入射測定) で2000~8000arcsec程度であった。入射方向によりXRCの半値幅が大きく変化する原因の一つとして、高密度の積層欠陥による影響が考えられる。断面TEM測定を行った結果、本手法により作製したm面種結晶中には $3 \times 10^5 \text{cm}^{-1}$ 程度の積層欠陥が存在することがわかった。不純物濃度については、反応炉構造の最適化と部材変更の実施により、酸素濃度を $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 未満に、また、シリコン濃度を $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 未満に低減した。

3) HVPE 成長による a 面種結晶の作製

a面結晶に関しては、図1-39のような表面にm軸方向に沿って溝加工したr面サファイア基板の上にHVPE法によりGaN厚膜を成長し、これを剥離自立化することで作製した。図1-40(a)に作製した45mmφのa面GaN結晶の外観写真を示す。結晶の成長表面側におけるXRCは図1-40(b)に示すようにマルチピーク形状となったが、半値幅は \perp c軸入射測定で395arcsec、//c軸入射測定で488arcsecと比較的良好な値を示した。また平面および断面のTEM測定から結晶中の短線状欠陥密度は $8 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$ 程度と、欠陥密度も比較的少ない結晶を実現した。

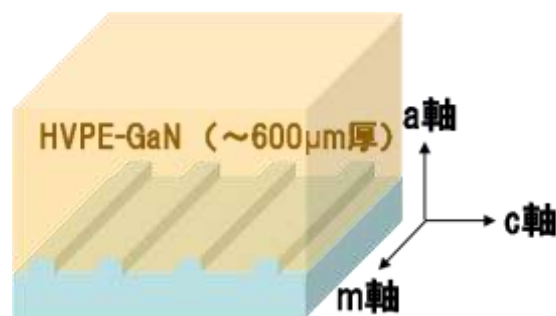


図1-39 HVPE法によるa面GaN結晶成長構造 (溝付きr面サファイア基板を使用)

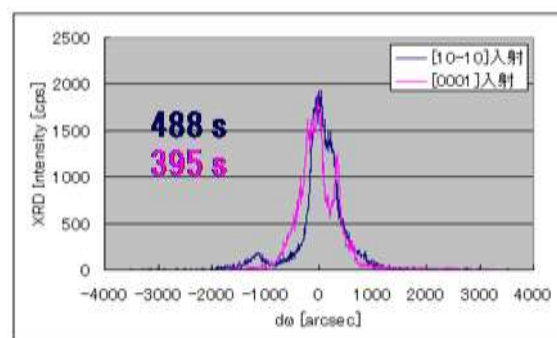


図1-40 HVPE法により作製したa面GaN結晶
(a) : 外観写真、(b) : X線ロッキングカーブ (数字は半値幅)

2-1-3 高導電性窒化物単結晶基板の開発

2-1-3-1 N型不純物（ドーパント）の選定

高導電性の GaN 結晶を実現するためには、高キャリア濃度の n 型 GaN 結晶を作製する必要がある。気相成長法において GaN の n 型ドーパントとしては一般的に IV 族元素のシリコンが用いられている。しかし、Na フラックス LPE 法ではシリコンを含む不純物は窒化を阻害することが知られており、育成への影響が懸念される。そこで、本研究ではまず Na フラックス LPE 法に適したドーパントの探索から行った。

Na フラックス LPE 法のドーパントの条件としては、結晶中に取り込まれてドナーとして働くことのほか、育成雰囲気に影響を与えず、安全で制御性に優れるといったことが求められる。本研究ではこれらの条件を満たす材料の候補として IV 族、VI 族元素の中からシリコン、ゲルマニウム、スズ、酸素を選択し検討を行った。ドーピング実験はこれらのドーパントを原料ガリウムやナトリウムとともに育成するルツボ内に所定量充填することで行った。酸素については坩堝内に直接充填することが困難であるため、固体原料の酸化ガリウム (Ga_2O_3) を用いて実験を行った。

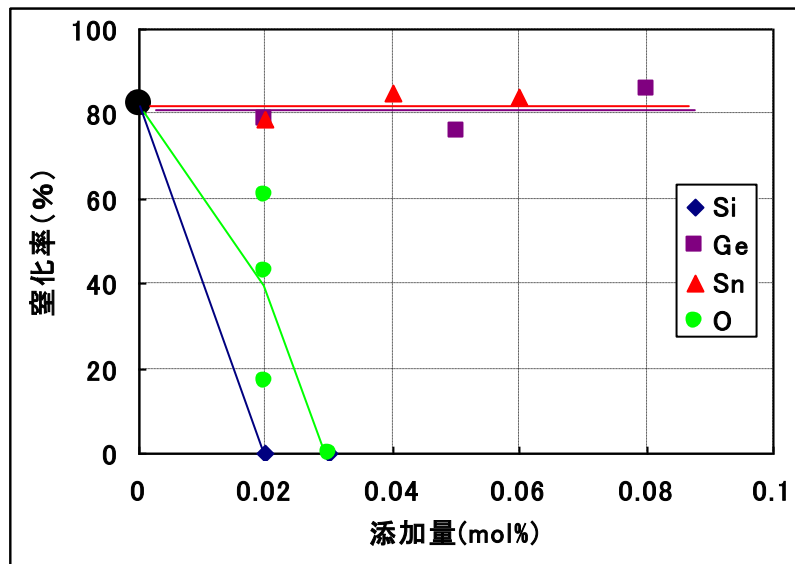


図 1-4-1 各種ドーパント添加量と窒化率

図 1-4-1 に、原料ガリウムに対するドーパント添加量と窒化率の関係を示す。シリコンは微量添加 (0.02mol%) であっても全く窒化が起こらなかった。酸素 (Ga_2O_3) については 0.02mol% までは育成が確認されたが、0.03mol% 以上では窒化が起こらなくなった。0.02mol% 添加でかなりバラツキが大きいのは秤量限界に近いために秤量の精度が下がったためである。以上のようにシリコン、酸素は 0.02mol% 以下の微量添加で窒化率が低下するため、安定したドーピングは困難であると考えられる。一方、ゲルマニウム、スズは 0.05mol% を越える添加量でも窒化率が低下することはなく、このレベルの添加では育成への影響がほとんど無いことが分った。

得られた結晶のフォトルミネッセンス評価と四探針法による抵抗率評価を行ったところ、酸素、ゲルマニウムを添加した結晶はフォトルミネッセンス発光強度が増大し、抵抗率も低下することが確認された。スズについてはフォトルミネッセンス発光強度増大や抵抗率の低下は確認できなかった。

以上の結果より Na フラックス LPE 法における n 型ドーパントとして、ゲルマニウムが有望であることが分った。

2-1-3-2 ゲルマニウム高濃度添加の検討

ゲルマニウム添加量 0.08mol% で育成した GaN 結晶中のゲルマニウム濃度を SIMS 分析で測定したところ、結晶中へのゲルマニウムの取り込み量は $1.9 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ であった。そのため、目標とする抵抗率 $0.01 \Omega \cdot \text{cm}$ を実現するためには、さらなる高濃度のゲルマニウムを導入する必要がある。しかし、0.3mol% 以上のゲルマニウムを添加すると、窒化率の低下や不純物の混入といった問題が発生することが分かった。そこで、ゲルマニウムの添加方法、育成条件、攪拌条件等の最適化を行った。図 1-4 2 に、育成条件最適化後のゲルマニウム添加量と、結晶中のゲルマニウム濃度の関係を示す。結晶中に取り込まれるゲルマニウムは添加量とともに増大し、0.6mol% 以上添加することで $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 以上のゲルマニウムが取り込まれることを確認した。0.9mol% 以上の高濃度添加した場合でも、窒化率の低下はわずかであり、結晶の表面状態も無添加で育成した結晶とほとんど変化は見られなかった。

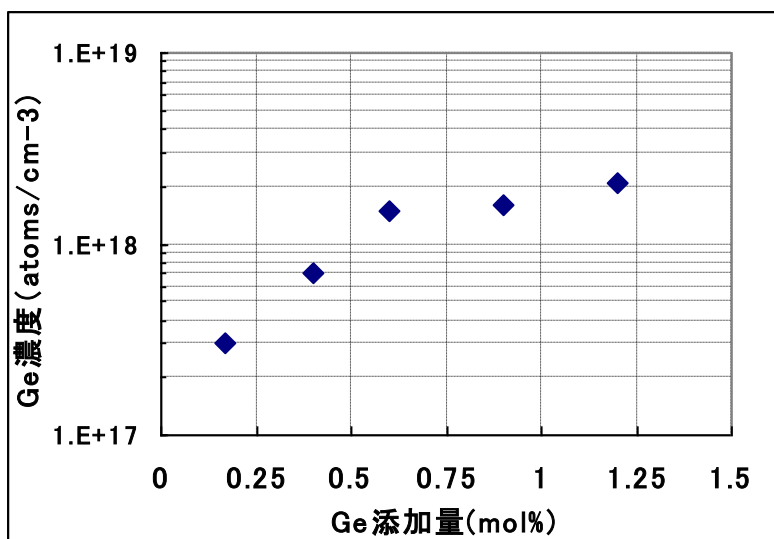


図 1-4 2 Ge 添加量と結晶中の Ge 濃度の関係

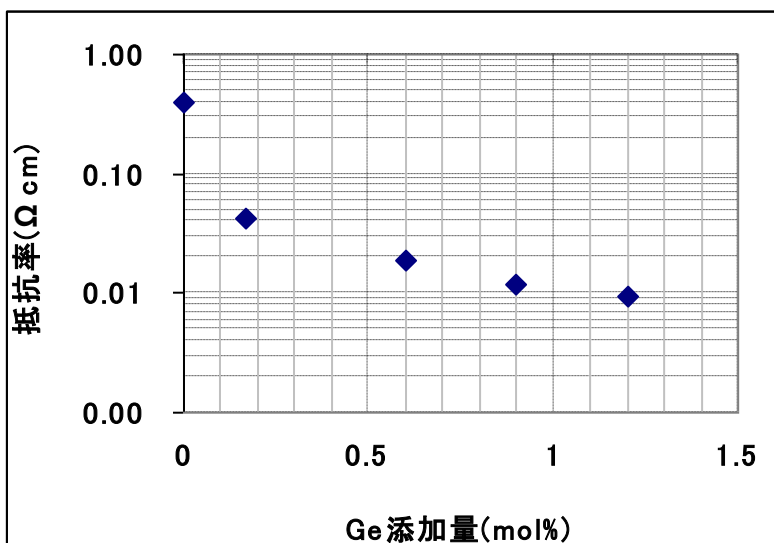


図 1-4 3 Ge 添加量と抵抗率の関係

これらの結晶のホール測定から求めた抵抗率とゲルマニウム添加量の関係を図1-43に示した。ゲルマニウム添加量1.2mol%で本研究の最終目標値である $0.01\Omega\cdot\text{cm}$ 以下が得られた。また、得られた結晶を縦方向(m面)に切り出し、四探針法により抵抗率を評価したところ、c面の測定結果とほぼ同様の値であり、m面においても $0.01\Omega\cdot\text{cm}$ 以下であることが分った。以上より、本条件にて育成したGa₂N結晶は有極性面、無極性面ともに低抵抗の結晶であることが確認された。

図1-44にゲルマニウムを添加して育成したGa₂N結晶のSIMS分析結果を示す。ゲルマニウムが $1\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 以上取り込まれている結晶においても、酸素濃度は $5\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 、シリコン濃度は $4\times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 、炭素は検出限界以下となっており、ゲルマニウム以外の不純物の少ない高品質結晶であることが確認された。図1-45にゲルマニウム添加の低抵抗Ga₂N結晶の写真を示す。研磨後の写真からわかるように、インクルージョン等の欠陥もなく、高い結晶性を有していることが分かった。

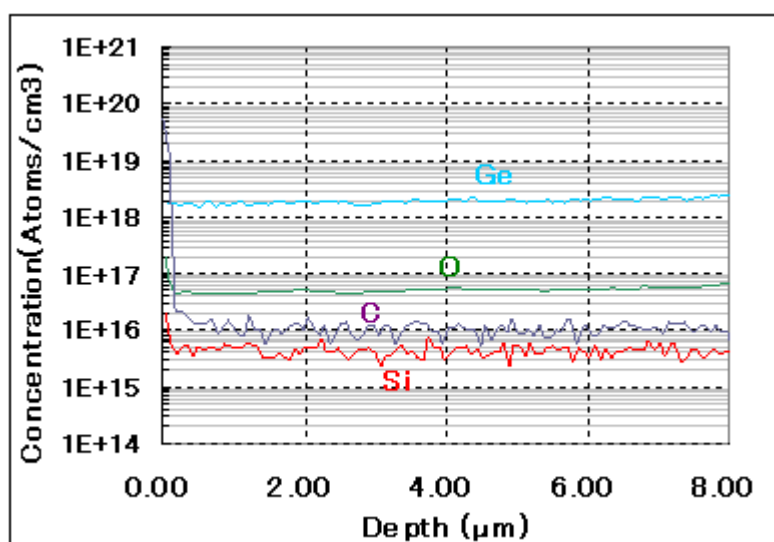


図1-44 Ge添加Ga₂N結晶のSIMS分析結果

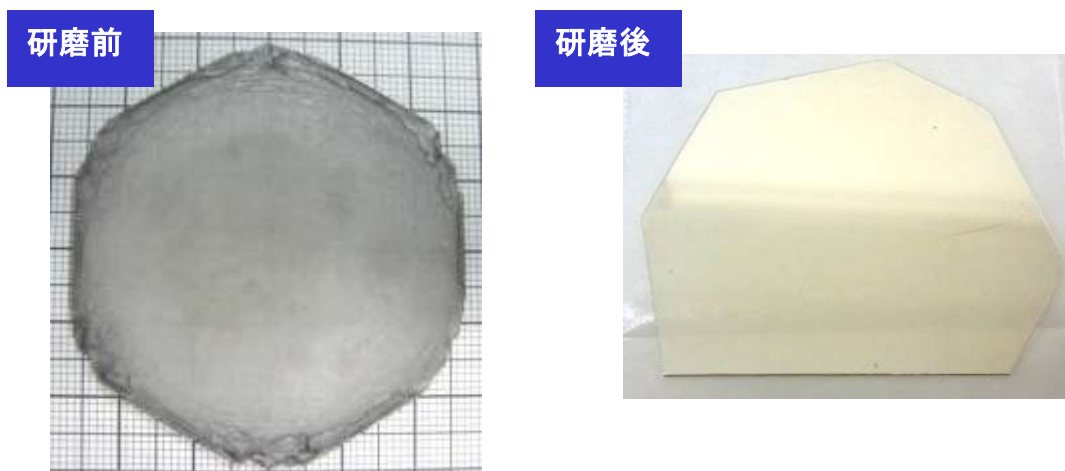


図1-45 ゲルマニウム添加の低抵抗Ga₂N結晶 (2インチΦ)

2-1-3-3 低抵抗 GaN 結晶の大口径化技術の開発

低抵抗 GaN 結晶の実用化のためには、大口径の結晶を複数枚同時に育成し、低コストで結晶を製造する技術確立しなければならない。そのためにはこれまで以上の大型の育成装置を導入し、炉内全体で均一な結晶を育成する技術確立することが必要となる。本研究では、4 インチ結晶を複数枚同時育成可能な大型育成装置を製作し、炉内温度分布の改善や育成条件の最適化を行ってきた。図 1-46 に、この大型育成装置を用いて 2 インチ結晶を 3 枚同時育成したときの育成結果を示す。すべてのルツボで雑晶の発生がほとんど無く、LPE 量のバラツキがほとんどない育成ができていていること分かる。

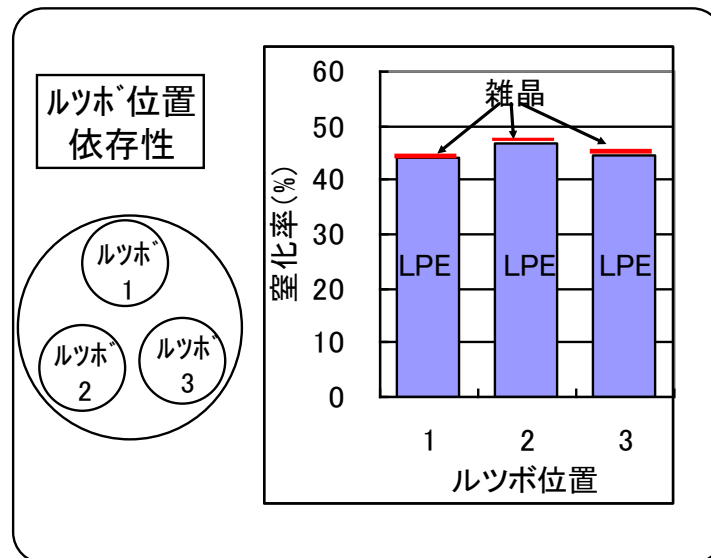


図 1-46 大型育成装置-位置依存性

2-1-4 高抵抗窒化物単結晶基板の開発

2-1-4-1 高抵抗化有極性 GaN 結晶の開発

1) 高抵抗化に向けた添加元素の検討

残留キャリアをトラップする深い準位を形成するアクセプタの候補として、2価のアルカリ土類、遷移金属イオンのうち、気相法の文献などを参考に、Mg、Mn、Fe、Znの4種類を検討した。その結果、Zn添加にてプロジェクト最終目標を大幅に上回る、 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ を達成した。以下詳細を述べる。

Naフラックス法では、Zn濃度を増加させると窒化が阻害され、結晶が成長しにくくなる問題点がある。そこで、Zn添加濃度と育成圧力を最適化することで、SIMS分析により $10^{19} \text{ atoms/cm}^3$ オーダーの濃度でZnが添加されたGaN結晶を得ることに成功した。得られた結晶を研磨し、2端子法によりその比抵抗を測定したところ、目標値の $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上を2桁上回る、 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上という高い抵抗値を示した。サンプルの外観（右図）と、図1-47に電圧-電流特性、および比抵抗の電圧依存性を示す。オーミックコンタクト不良により非線形性が観測されたため、コンタクト抵抗の正確な分離はできていないが、少なく見積もってもこのサンプルの比抵抗は $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上であると推定された。

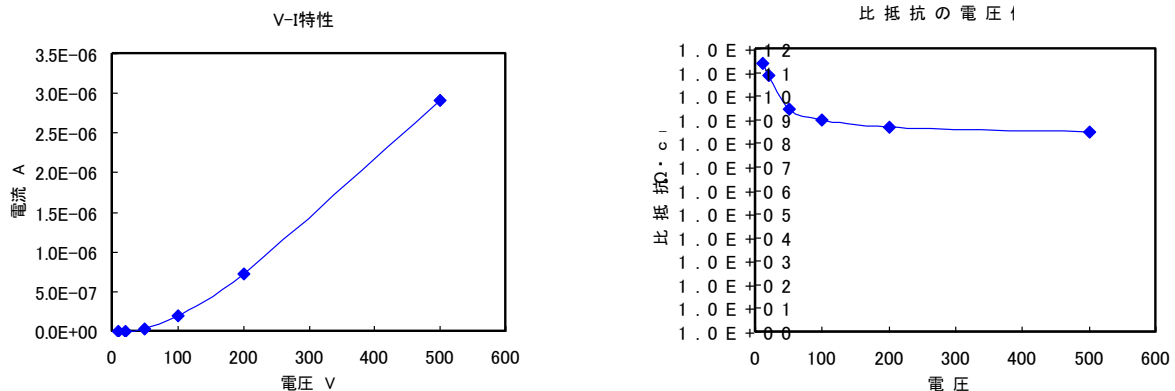
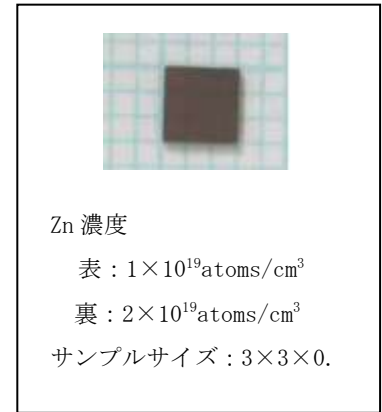


図1-47 Zn高濃度添加GaN結晶の電圧-電流特性および比抵抗の電圧依存性

出発原料中のZn濃度（添加量）と比抵抗の関係、また、結晶に取り込まれたZn濃度と比抵抗の関係を図1-48に示す。およそ $10^{18} \text{ atoms/cm}^3$ 後半のZn濃度で、最終目標である $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ の比抵抗が得られることがわかった。

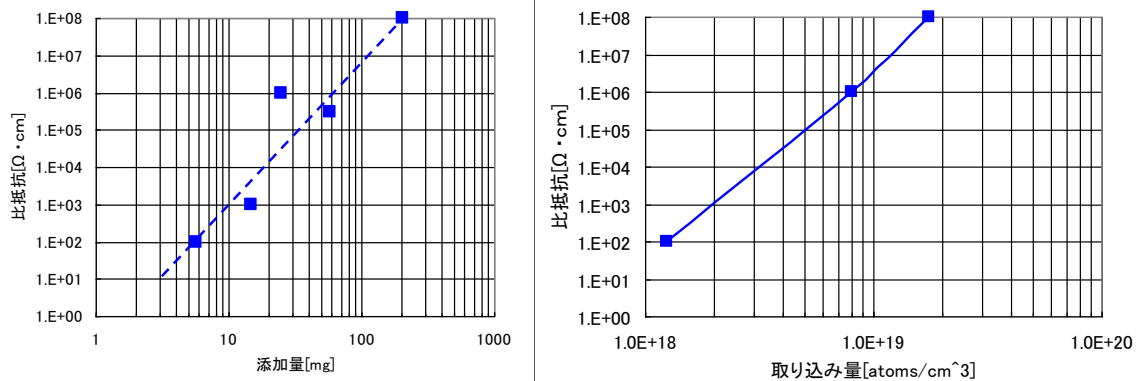


図1-48 Zn添加量および結晶中の取り込み量と比抵抗の関係

2-1-4-2 無極性 GaN 結晶・高抵抗化技術の開発

Zn 添加量 0.99mol% のサンプルにて有極性方向、無極性方向の両方の比抵抗を測定した(図 1-49)。無極性 GaN の高抵抗化数値目標 ($>10^5 \Omega \cdot \text{cm}$) を達成した。有極性方向よりも無極性方向の抵抗が 2 桁も高いことがわかった。この原因としては、有極性方向では転位(貫通転位)がリークパスとなり、高抵抗化への妨げになっていると考えている。



図 1-49 Zn 添加 GaN 基板から切り出したサンプルの比抵抗測定結果

このサンプルの SIMS 分析結果について図 1-50 にまとめた。Zn 仕込み濃度の増大により、結晶中の Zn 濃度が増加し、 2×10^{18} から $4 \times 10^{18} \text{atoms/cm}^3$ であった。一方、残留キャリアとなる酸素濃度は、YAG セラミックス坩堝を用いることで無添加結晶と同等レベルの 16 乗台半ばに低減することができた。残留キャリアとなる Si 濃度は従来と変化がなく、検出下限、もしくは 15 乗台半ばであった。Zn 濃度の増加と酸素濃度の低減は、比抵抗率の増大に寄与していると考えられる。

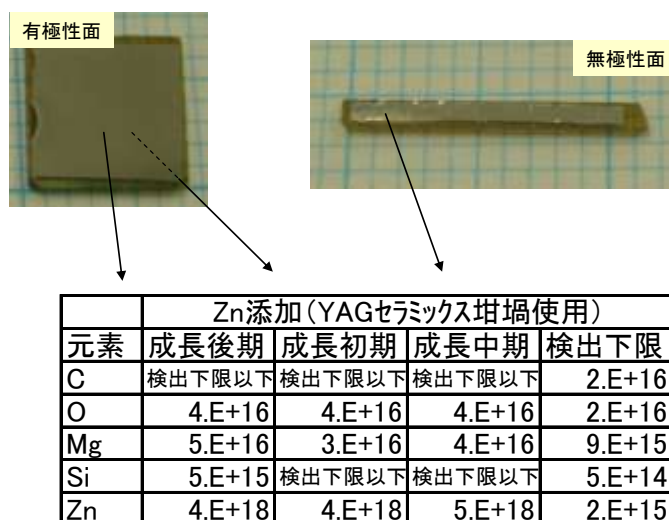


図 1-50 Zn 添加 GaN 結晶の比抵抗測定サンプルの SIMS 分析結果

2-1-4-3 高抵抗・有極性 GaN 結晶・大口径化技術の開発

$10^4 \sim 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ が期待される Zn 濃度で、大型炉にて、 $\phi 44\text{mm}$ の HVPE-GaN 自立基板を種基板にして育成を試みた。攪拌条件は 1 軸揺動（角度：10 度、周期：1rpm）とした。得られた結晶（研磨後）の外観を図 1-5 1 に示す。周辺部にインクルージョンが発生していることが見て取れるが、クラックのない 2 インチ級の結晶を得ることが出来た。結晶は茶色く着色した領域と、グレーに着色した領域に分かれていた。このことから、Zn 濃度が不均一であることが示唆された。この結晶の中央部とその周囲の計 9 箇所の X 線ロックアップカーブを測定した（図 1-5 1 の赤丸）。中央部の (0002)、(10-12) 反射の半値幅は 110 秒、108 秒であり、種基板の半値幅（(0002)：100~130 秒、(10-12)：140~230 秒）よりも若干狭かった（図 1-5 2）。結晶格子の反りの曲率半径を測定したところ、約 4.2m と種基板の約 1.3m より大きく、反りが低減していることがわかった。9 箇所の (0002) 半値幅の平均値は 103 秒、標準偏差は 5.7 秒であり、結晶性についてはばらつきが少ないことがわかった。

以上の結果から、1 軸揺動による攪拌を導入することにより、Zn 添加時の結晶性の劣化は抑制できたが、依然として Zn 濃度ムラが観察されたことから、さらに攪拌強化する必要があることがわかった。

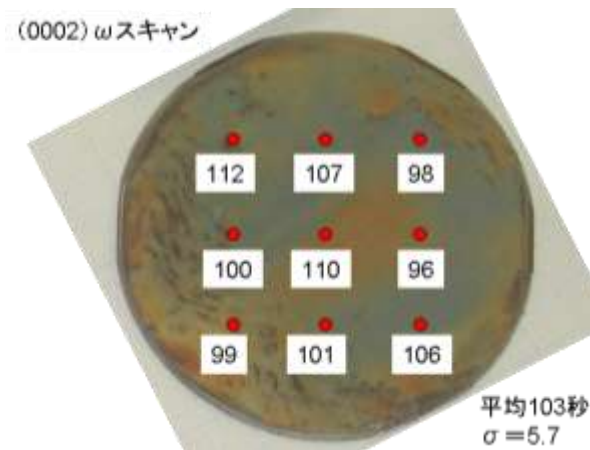


図 1-5 1 育成した $\phi 44$ 亜鉛添加 GaN 結晶（研磨後）と XRC 半値幅の分布

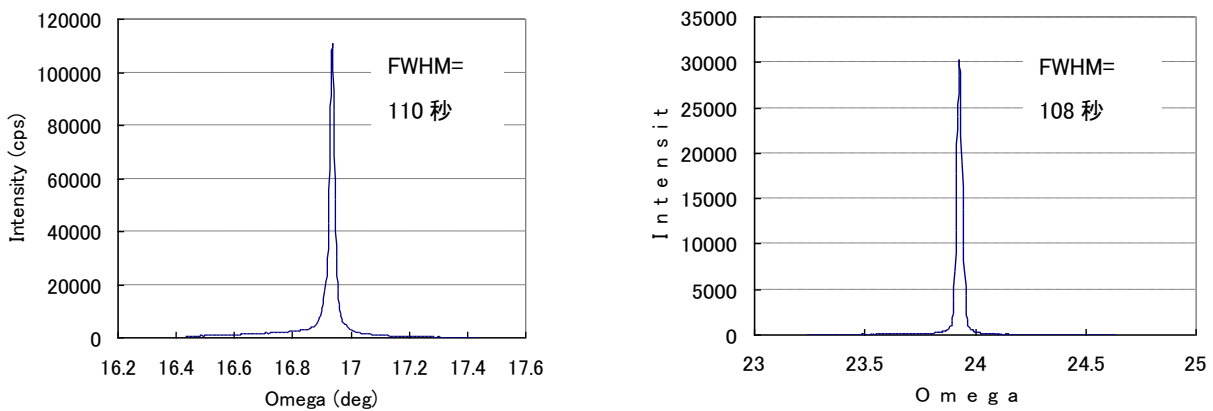


図 1-5 2 (0002) 反射、(10-12) 反射の X 線ロックアップカーブ測定結果

φ4 インチの GaN テンプレートを用いた大口径化試験結果について述べる。Zn 濃度を前節の仕込み濃度よりもさらに増大させ、原料中の Ga に対して、1.5、2.0、3.0mol% の 3 条件とし、無添加と同じ育成条件にて実験を行った。前述したように、Zn は窒化障害する元素であるため、Zn 仕込み濃度が高いほど窒化率が低く、得られた GaN 結晶の厚さが薄くなったが、全面 LPE 成長を達成した (図 1-53)。

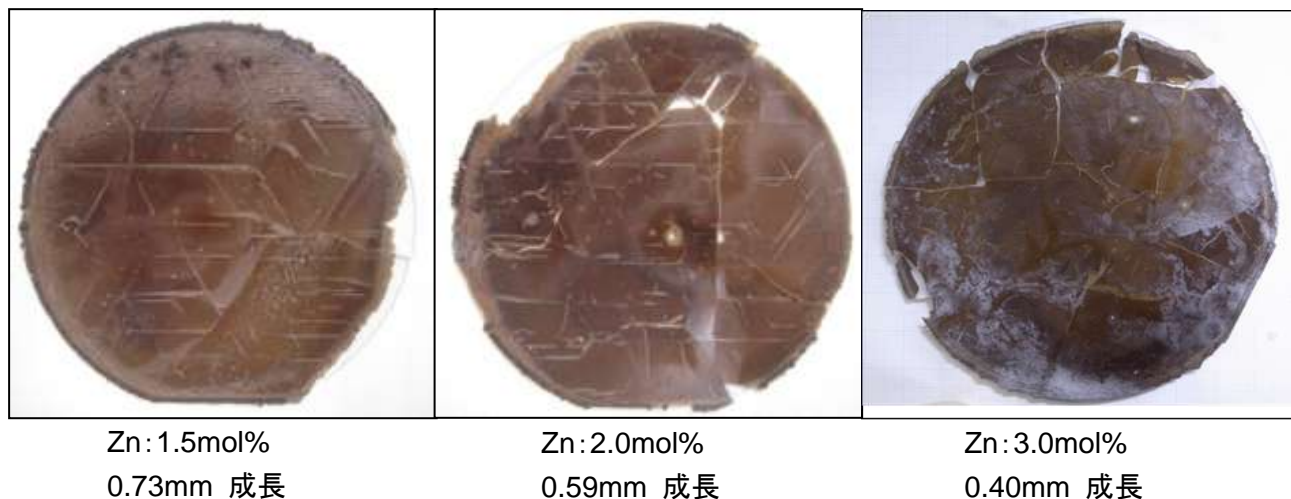


図1-53 φ4インチGaNテンプレート上に育成したZn添加GaNの外観

次に、このサンプルの比抵抗測定結果について述べる。電極は Ti/Al、合金化の熱処理温度 700℃とした。電極のオーミックコンタクトが取れず、非線形な I-V 特性を示した (図 1-54)。高抵抗 GaN 基板へのオーミック電極形成技術に関しては今後の課題である。データが非線形なため、正確な値は得られなかったが、概算で比抵抗は $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 台と推定した。

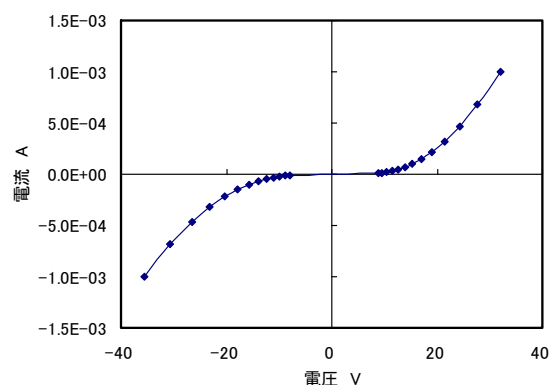


図1-54 φ4インチGaNから切出したサンプルのI-V特性

1-4-4 エピタキシャル用高抵抗・有極性 GaN 基板の作製と供給

育成したウェハから矩形基板を作製し、名古屋大・集中研のエピグループに提供した。その一例を図 1-61 に示す。写真からわかるように、Zn イオンによる茶色の色の濃さにムラがある様子が観察された。Zn 添加の有極性基板を 13 枚、エピグループに供給した。供給した Zn ドープ有極性 GaN 基板サンプルの詳細につき、表 1-3 ~ 表 1-10 にまとめて示した。

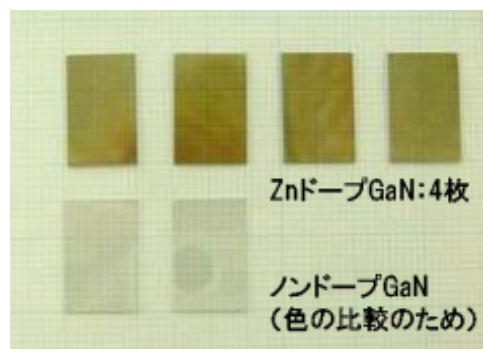


図1-61 エピグループに提供した Zn ドープ GaN サンプルの一例

2-1-5 新技術の調査、国内外の動向調査

国内外の学会等に参加し、研究成果の発表を行った（II 研究発表・講演、文献、特許等の状況 参照）。また、学会や展示会、また各種文献などから、窒化ガリウムのバルク結晶を中心とした、最新の技術動向調査を行った。表1-3に、国内外の窒化ガリウム結晶の開発状況をまとめた。

表1-3 国内外の窒化ガリウム基板の開発状況

面方位	手法	開発機関	特性				
			サイズ	転位密度 (cm^{-2})	XRC (arcsec)	速度 ($\mu\text{m/h}$)	備考
c 面 基 板	Flux法	大阪大学	4inch Φ	$10^2\sim 5$	—	30	
	アモ/サーマル法	Ammono zoo	2inch Φ	5×10^3	17	(1)	米国 曲率半径>1000m
		三菱化学/UCSB	2inch Φ	—	—	25	'10/12/08新聞発表)
		UCSB	(5mm Φ) x 2.3mm	—	(200)	2~3.5	米国
		AFRL	10x10mm	—	65	—	米国
		東北大学	46mm Φ	—	104	—	金属、酸素等の不純物含有量に課題
	高压法	Unipress	10x15mm	$\sim 10^6$	54	—	ポーランド HVPE種基板上
	HVPE法	古河機械金属	4inch Φ	$\sim 10^6$	40	—	
		住友電気工業	4inch Φ (6inch Φ)	—	—	—	6インチ: '10/11/18新聞発表
		日立電線	3inch Φ	$10^5\sim 10^6$	100	100~1870	
		三菱化学	3inch Φ	$\sim 10^6$	—	—	
		Kyma	2inch Φ x 10mm厚	$3E5\sim 1E6$	70-214	100	米国
		Unipress	1.5inch Φ x 5mm厚	$\sim 10^6$	—	200	ポーランド
Nanowin	1.5~2inch Φ	$\sim 10^7$	—	200	中国		
m 面 基 板	Flux法	大阪大学	6x6mm	—	—	—	HVPE-GaN上
	アモ/サーマル法	Ammono zoo	1inch Φ 、11x22mm	—	15	—	—
		UCSB	—	—	30 (a面方向 off: ~200)	—	HVPE-GaN上
	HVPE法	古河機械金属	>45mm Φ	—	~800	—	m面サファイア上
		住友電気工業	2inch Φ	—	—	—	—
		三菱化学	12x20mm	$\sim 10^6$	—	—	c面結晶のスライス
		Kyma	5x10mm	—	—	—	c面結晶のスライス
		Unipress	5x15mm	—	—	—	c面結晶のスライス

2-2 「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」

2-2-1 大口径基板上的高品質エピタキシャル結晶成長技術

2-2-1-1 窒化物基板上的高均一・高品質結晶成長技術

窒化物半導体電子デバイス作製において、安定した動作特性を示し、物性的潜在能力を生かす高耐压デバイスの実現、更に GaN 基板上的特性を最大限生かすための高移動度チャンネル層を有するデバイスの実現のためのアンドープ GaN エピタキシャル層として、残留不純物濃度が低く、且つ GaN 基板と同程度或いはそれ以下の結晶欠陥密度であること、更に、高抵抗層として用いる炭素ドープにおいても高いドーピング制御性と共に結晶欠陥密度が低いことが求められる。更に界面散乱及び合金散乱の抑制のため、原子レベルで急峻な界面を有するヘテロ接合形成が可能であること、及びウェハ面内で組成・膜厚及び不純物ドーピング濃度制御が均一であること、更にチャンネル層移動度ができる限り高いことが求められる。また、従来用いられている c 面に代わり、将来その異方性を生かした新機能性デバイスの実現が期待されている無極性面において、その成長時には異方性歪が発生するための、ウェハの反りも異方的になり、従来のその場観察装置では正確な測定ができない。

本プロジェクトでは、4 インチ径で(1)原子レベルで結晶成長制御が可能な装置の開発、(2)従来の有機金属化合物からの炭素混入による濃度制御では無く、如何なる成長条件でも自由に炭素濃度を制御する技術の開発、及び(3)ウェハ形状が精密にその場観察可能な装置の開発、を目的として行い、有機金属気相成長法（以下 MOVPE 法）により全て達成した。以下それぞれのテーマごとにそれらの成果と関連付け説明する。

Na フラックス法で作製された+c 面 GaN 基板に、アンドープ GaN を MOVPE 法によりエピタキシャル成長する際、成長直前に基板は高温で水素+アンモニアに晒される。基板温度が高すぎると大きく荒れ、耐压減少の起源であるピットが生じることが分かった。そのため、基板保持温度及び時間の適性化を図り、ピットの発生を抑制してアンドープ GaN の成長を行った。図 2-1 にウェハ外観写真を、図 2-2 には C-V 測定の結果の例を示す。ウェハ全面に亘って残留ドナー濃度 $1.5 \sim 2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ を確認した。



図 2-1 Na フラックス GaN 基板 (MJ0158) 上のアンドープ GaN/AlGaN

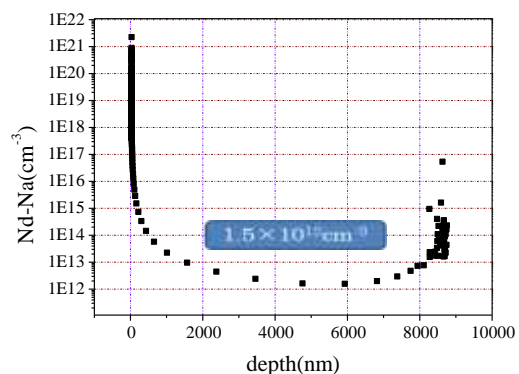


図 2-2 左図(MJ0158)の残留ドナー濃度プロファイル (C-V 測定より)

将来の新機能デバイス実現が期待される無極性面バルク GaN 基板上的のデバイスに関しては、世界中の殆どの研究機関では m 面を用いている。ところが、Na フラックス m 面及び a 面 GaN 基板を用いてアンドープ GaN 成長を行うと、m 面上の方が残留酸素濃度が高くなることが判明した。その理由は成長動力学的の違いによるものであり、詳細な定量解析は今後必要である。

酸素は浅いドナーとして働くので、酸素濃度が高くなるとピンチオフするトランジスタ（ヘテロ接合

電界効果トランジスタ、以下 HFET) の作製は困難になる。従って、本プロジェクトでは a 面を用いて HFET 構造の試作を行った。図 2-3 にウェハ外観写真を、図 2-4 には m 面上及び a 面上の酸素濃度の SIMS プロファイルの比較を示す。また、図 2-5 に、断面の透過電子顕微鏡像を示す。積層欠陥は 30 μm 以上捜査して 1 本観察されたが、貫通転位は発見できず貫通転位密度は 10^5 cm^{-2} 以下であった。



図 2-3 Na フラックス法 a 面 GaN 基板

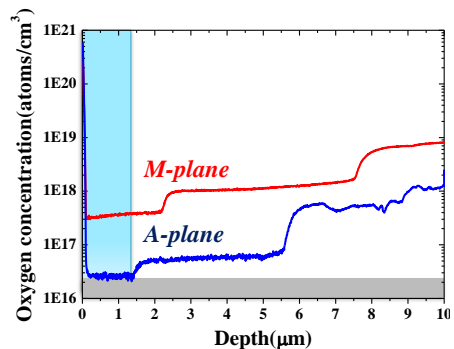


図 2-4 m 面及び a 面 GaN 基板上的の
アンドープ AlGaIn/GaN 層の酸素濃度
プロファイル (SIMS 分析より)
※それぞれ段があるのは、成長条件
を変化させているため。

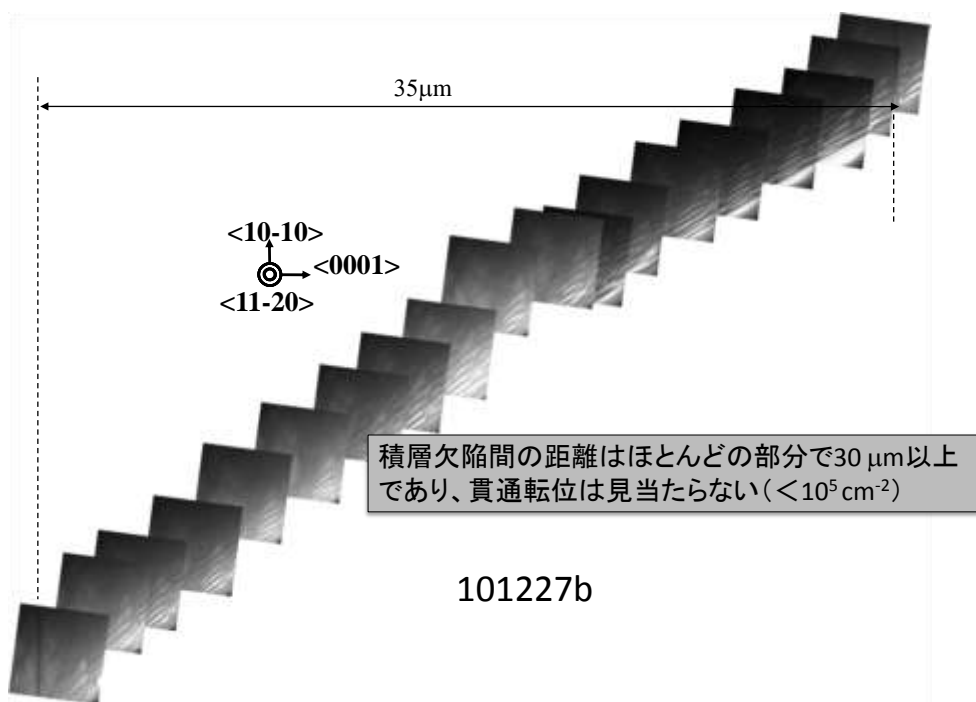


図 2-5 Na フラックス a 面 GaN 基板上的の HFET 構造の断面透過電子顕微鏡写真群

図2-6に、試作したHFET構造の概略図及び電極パターン、図2-7にはそれらの静特性を示す。無極性面の場合、面内に一軸異方性があるため、c軸に平行方向と垂直方向それぞれの向きでHFETを試作した。サンプル1において軸方向で大きな差が生じたのは、Al組成が高い場合c面内積層欠陥が発生し、c軸方向へのキャリアの輸送が妨げられるが、m軸方向では積層欠陥に平行の輸送であるため問題が無いためである。また、サンプル2において軸方向で若干の差があるのは、有効質量の異方性によるものかもしれない。

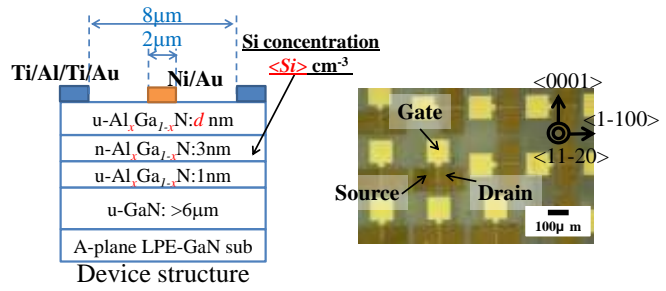
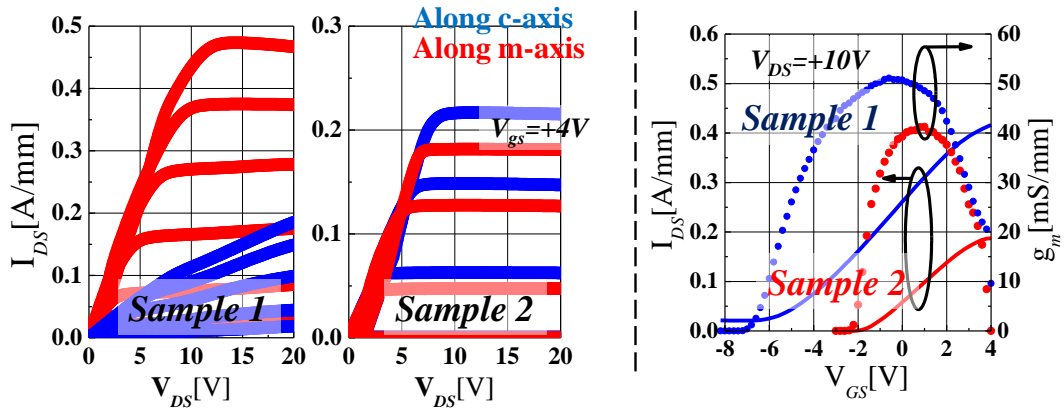


図2-6 Naフラックスa面GaN基板上HFET構造(左)と電極パターン(右)



	AlN molar fraction	u-AlGaN thickness	Si concentration	$I_{D_{MAX}}$ [mA/mm] ($V_{GS}: +4V$)		V_{th} [V]	$I_{G_{leak}}$ [A/mm] ($V_{GS}: -20V$)
				Along the c-axis	Along the m-axis		
Sample 1	0.36	26	7.5×10^{19}	198	467	-5.4	4.41×10^{-2}
Sample 2	0.28	21	3.5×10^{19}	217	182	-1.4	5.60×10^{-6}

図2-7 バリア層Al組成及びSi濃度の異なる2サンプルのc軸方向及びm軸方向デバイスの静特性

表2-1 HFET(無極性面上)の移動度および2次元電子ガス濃度の比較(赤字: Naフラックスa面上の結果、黒字: 他機関の報告)

Device structure	Gate/S-D length (µm)	Mobility of 300K (cm^2/Vs)	Sheet carrier density (cm^{-2})	$I_{D_{MAX}}$ (mA/mm)	V_{th} (V)
AlGaIn/GaN on r-plane sapphire ^[4]	1/5	46	1.64×10^{13}	19.5 ($V_{GS}: +1.6V$)	-0.5
AlGaIn/GaN MIS-HFET on r-plane sapphire ^[5]	1/3	87	-	112 ($V_{GS}: +4V$)	+1.3
AlGaIn/GaN on r-plane sapphire ^[5]	0.4/2	30-180	1.5×10^{13}	70 ($V_{GS}: +6V$)	-
AlGaIn/GaN on a-plane freestanding GaN (sample 1)	2/8	-	-	467 ($V_{GS}: +4V$)	-5.4
AlGaIn/GaN on a-plane freestanding GaN (sample 3)	2/8	400	2×10^{13}	217 ($V_{GS}: +4V$)	-1.4
AlGaIn/GaN on m-plane freestanding GaN ^[7]	1/3.4	-	-	340 ($V_{GS}: +1V$)	-3
AlGaIn/GaN on m-plane freestanding GaN ^[5]	1/3.4	-	-	138 ($V_{GS}: +7V$)	+3

表 2-1 に、今回 Na フラックス法 a 面 GaN 基板上に試作した HFET 構造の移動度及び 2 次元電子ガス濃度と他機関からの無極性面 HFET 報告の比較を示す。高品質 GaN 基板の利用及び急峻な界面形成により、世界で最も移動度の高い無極性面 HFET 試作が実現できた。

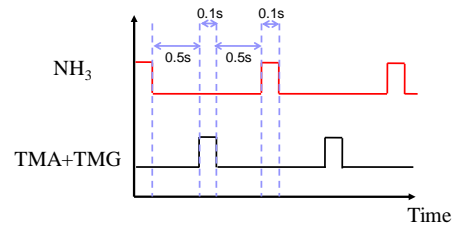
2-1-2 デジタル MOVPE の開発

量産性に優れる MOVPE 法により、原子レベルで急峻な界面を有するヘテロ接合形成技術の確立のため、原子層制御エピタキシー (Atomic Layer Epitaxy : ALE) 法による GaN、AlGa_N 及び AlN の成長を行った。装置は、ウェハの大きさを 4 インチとし、0.1 秒以内にスイッチング可能な電磁弁を使用し、かつ後述の通り短時間でガス切り替えが可能なフローチャネルおよびテーパ型ガスインジェクションノズルを設計し、ガスシミュレーション及び実際に成長を行った。

図 2-8 にガス切り替えシーケンスを示す。アンモニアと III 族原料ガスは、両方とも 0.1 秒のインジェクションで行い、パージ間隔は 0.5 秒とした。パージをゼロ秒とすると、セルフリミットは観測されなかった。

図 2-9 にガス 1 パルス当たりの Al_{0.16}Ga_{0.84}N の成長速度の、有機金属化合物原料ガス供給モル量依存性を示す。図から分かる通り、水素中大気圧下、通常の MOVPE 成長温度での Al_{0.16}Ga_{0.84}N の ALE、及び窒素中 2 気圧下、低温 700°C における Al_{0.16}Ga_{0.84}N の ALE の結果である。何れの場合も、III 族原料供給量がある一定以上になるとセルフリミット機が働き、成長速度が 1 原子層/サイクルで飽和しており、ALE が達成されていることが分かる。即ちデバイス構造成長のデジタル化を示した世界初の例であり、また原理的に装置を任意の大きさにしても、原子レベルの界面急峻性でヘテロ接合が形成可能であることを示しているため、特に量産化に適した技術確立が達成されたことを示している。

図 2-10 には、窒素 2 気圧中、700°C で通常成長、及び ALE 成長した Al_{0.16}Ga_{0.84}N の AFM 像及び外観写真を示す。通常成長では黄色く着色しており、表面も曇っていたが、ALE 成長した Al_{0.16}Ga_{0.84}N は鏡面であり、AFM 観察でも表面は原子レベルで平坦であった。



TMA 7.6μmol/min
TMG 55.8μmol/min
VIII ratio 2744

図 2-8 ALE 法による AlGa_N 成長のガス切り替えシーケンス

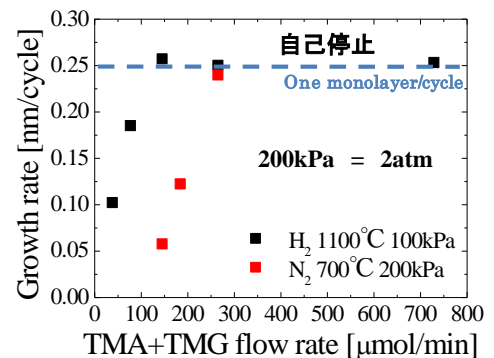


図 2-9 ガス 1 パルス当たりの Al_{0.16}Ga_{0.84}N の成長速度の原料ガス供給モル量依存性

図 2-10

Al_{0.16}Ga_{0.84}N の AFM 像及び外観写真 (通常成長と ALE 成長)



2-2-1-3 Na フラックス法 GaN 基板上 AlGaIn/GaN 系 HEMT 構造エピタキシャル結晶成長

GaN 基板は通常 n 型伝導性を有するため、高耐圧素子実現には、高抵抗層エピタキシャル成長が必須である。高抵抗層成長のためのドーパントとして Fe、Mg 及び C が検討されている。そのうち、Fe 及び Mg は表面偏析のためドーピングプロファイルの制御が容易ではなく、アンドープチャンネル層への混入により移動度が減少する恐れがある。C ドーピングは少なくとも +c 面では表面偏析はない。MOVPE 法では、これまで C ドーピングは Ga 原料であるトリメチルガリウムのメチル基を C 原料として利用し、低温・低 V/III 比での成長により濃度制御が行われていた。通常の成長条件とは大きく異なるため、より高濃度に行うと結晶欠陥を誘発し、表面平坦性が悪化するなど問題があった。本プロジェクトでは、GaN 基板の極めて高い品質を保ちながら高 C 濃度高抵抗層を成長させるため、アセチレンを C 原料として、高温・高 V/III 比での C ドーピングの制御性について検討した。

図 2-1-1 に、基板温度 1,080°C における C 濃度の制御性、及び C₂H₂ 流量 0 及び 90 μmol/min での C 濃度の基板温度依存性を示す。ドーピング濃度は精密に制御可能であり、SIMS 測定誤差範囲内に収まっていた。また、C 濃度分布を測定したところ、極めて急峻に濃度が変化しており、Mg や Fe とは大きく異なる特性を示した。これは、C が +c 面上で表面偏析を示さないためであり、Ga-C の強い結合に起因していると推測される。

次に Na フラックス法を用いて成長した +c 面 GaN 基板上に C ドーピングしたバッファ層を有する HFET 構造を作製し、表面電極間の横耐圧、及び基板裏面ソース電極間の縦耐圧の評価を行った。結果を図 2-1-2、及び図 2-1-3 に示す。図からわかるとおり、従来の Si 基板上的 HFET の特性を凌駕する高い絶縁破壊横耐圧を記録した。また、縦耐圧試験では、従来の Si 基板上的絶縁破壊電界の C 濃度依存性と大きく異なり、絶縁破壊電界は C 濃度の平方根に比例した。この結果から、C 濃度を 10¹⁹cm⁻³以上にすれば、容易に GaN の理論上の絶縁破壊電界 3MV/cm を達成できることが分かる。

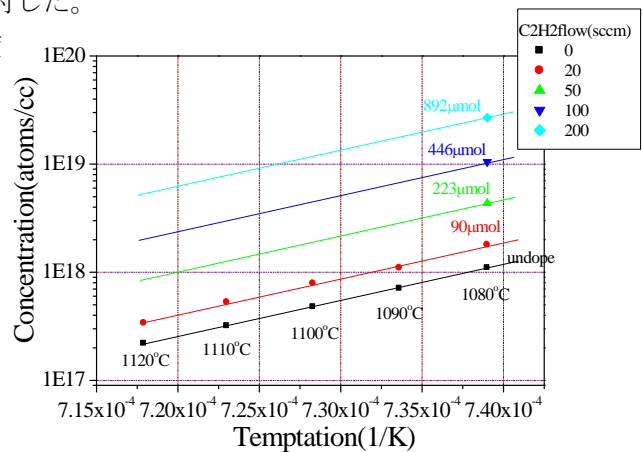


図 2-1-1 基板温度 1080°C における C 濃度の C₂H₂ 流量依存性、及び C₂H₂ 流量ゼロ及び 90 μmol/min. 供給時の C 濃度の基板温度依存性

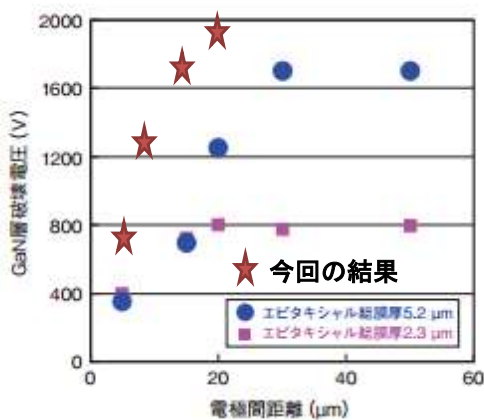


図 2-1-2 今回試作した C ドープ GaN を有する HFET の横耐圧の電極間距離依存性、(従来の Si 基板上 HFET との比較)

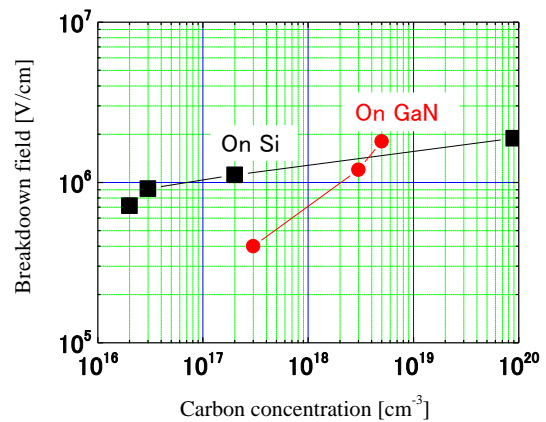


図 2-1-3 今回試作した C ドープ GaN を有する HFET の縦耐圧の C 濃度依存性、(従来の Si 基板上 HFET との比較)

2-2-2 高 In 組成窒化物層成長技術

2-2-2-1 加圧 MOVPE 法による高均一 InGaN 層成長技術の開発

従来の MOVPE 装置の圧力限界は 1 気圧までであったが、より高 In 組成で高均一の InGaN 及び InAlN 成長及びデバイス試作のため、2 気圧まで加圧可能な MOVPE 装置を新たに設計し、その成長特性評価を行った。その結果、図 2-14、及び図 2-15 に示す通り、InGaN 及び AlInN 共に熱力学計算に基づく予測と実験結果はほぼ一致し、1 気圧を超える MOVPE 成長においても、熱力学計算に基づき In 組成制御が可能であることを世界で初めて実証した。

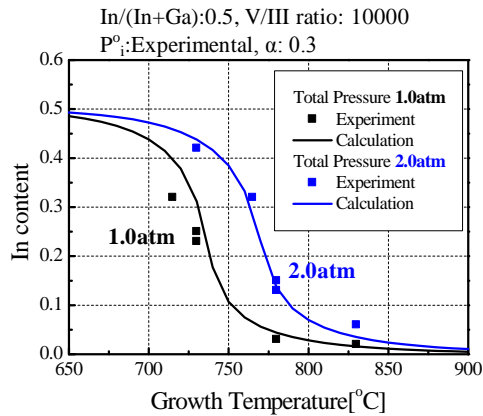


図 2-14 1 気圧及び 2 気圧の MOVPE による InGaN 成長の固相 In 組成の成長温度依存性 (熱力学計算と実験結果)

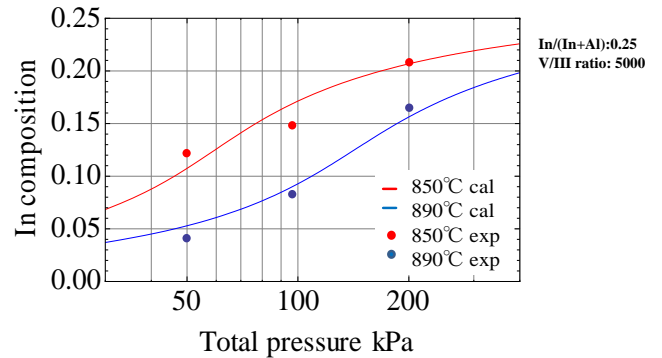
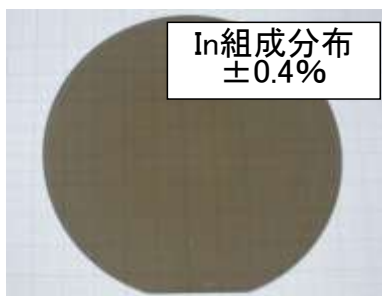


図 2-15 1 気圧、1.5 気圧及び 2 気圧の MOVPE による AlInN 成長の固相 In 組成成長温度 2 水準 (熱力学計算と実験結果)

2-2-2-2 In 組成及び層厚の均一性に優れる InGaN 層を成長させるための成長技術開発

設計・製作した MOVPE 装置により高 In 組成 InGaN 層の成長を実施した。図 2-16 に示す通り、成長条件の適正化により、4 インチ径基板の全面への、In 組成 0.75 高 In 組成高均一 InGaN 層の成長に成功した。X 線回折法などを利用して、In 組成および膜厚の面内均一性を評価し、膜厚ばらつき $\pm 5\%$ 、In 組成バラツキ $\pm 0.5\%$ と、極めて良好な均一性を示した。

図 2-17 に、4 インチ基板上の高 In 組成 $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{N}$ エピタキシャル層への Si ドーピング、及び Mg ドーピングの面内均一性の SIMS 分析結果を示す。Si 濃度に関しては 10^{19} cm^{-3} 以上、Mg 濃度は 10^{20} cm^{-3} 以上で、ばらつき $\pm 5\%$ 以下の InGaN の作製に成功した。



4 インチ $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{N}$

図 2-16 4 インチ基板上への $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{N}$ エピタキシャル層の外観写真

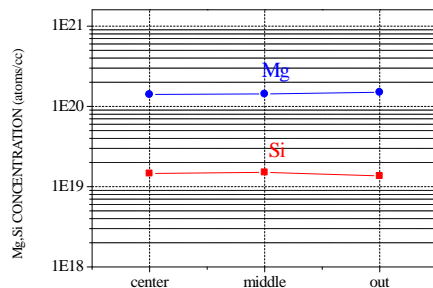


図 2-17 4 インチ基板上 $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{N}$ エピタキシャル層への Si ドーピング及び Mg ドーピングの均一性

2-2-2-3 GaN 基板上 AlInN/InGaN 系 HEMT 構造エピタキシャル結晶成長

次世代電子デバイス実現の基幹技術として、GaN 基板上に GaN に格子整合する AlInN バリア層および、 $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ チャンネル層または $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ チャンネル層を有する HFET 構造の試作にチャレンジした。AlInN バリア層の膜厚を変化させて評価を行った。図 2-18 にその結果をまとめる。本構造での HFET 静特性を示したのは、本プロジェクトが世界で初めてである。また、AlInN バリア膜厚により最大ドレイン電流を制御できることが分かり、将来のノーマリーオフ型 HFET 実現のための重要な結果を得た。

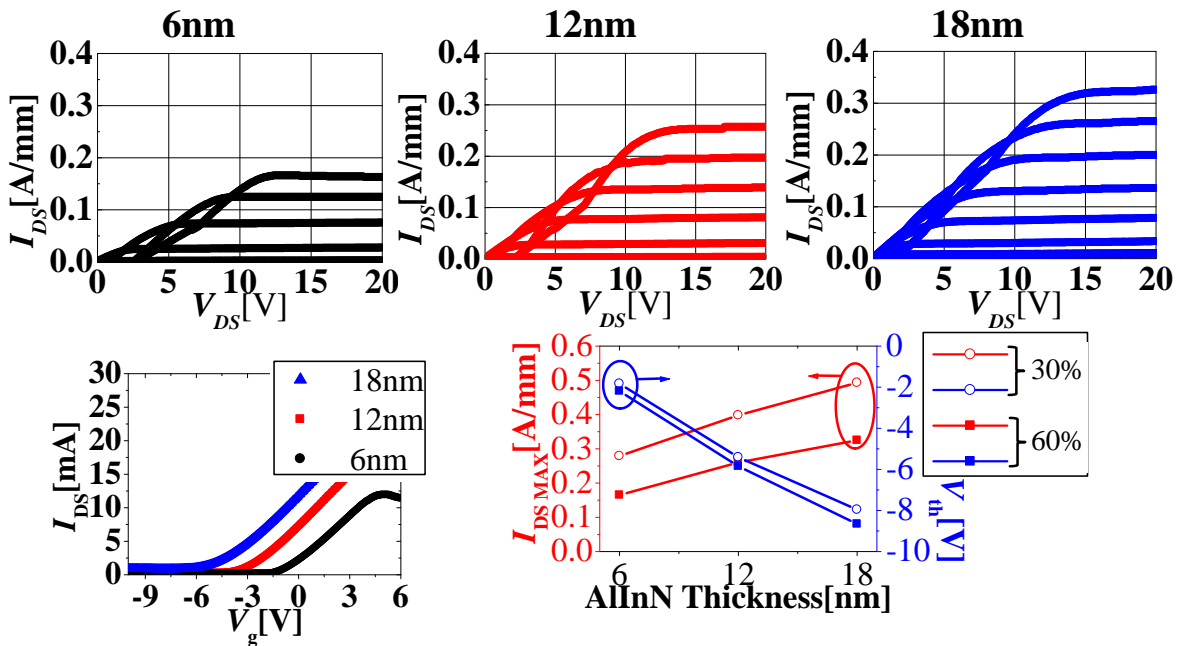


図 2-18 GaN 基板上の AlInN/InGaN/GaN 構造の HFET の静特性
(AlInN バリア層の膜厚：6、12、18 nm)

2-2-2-4 高電子移動度 2次元電子ガスを発現させるための高品質 GaInN 薄膜層を

GaN テンプレート上に成長させるために必要とされる成長条件模索

図 2-19 に、Si 基板上に作製した AlGaN/AlN/GaN HFET 構造の 2次元電子ガス移動度と 2次元電子ガス濃度の関係、及び論文の結果との比較を示す。2次元電子ガス濃度が $9.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ と極めて高いにもかかわらず、 $2160 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ と高い移動度を示していることがわかる。本結果、及び論文の結果より、2次元電子ガス濃度を $2.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ とすることにより、2次元電子ガス移動度の目標値である $2500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を達成できる可能性が高いことが分かった。特に GaN 基板を用いれば貫通転位による散乱が低減可能であ

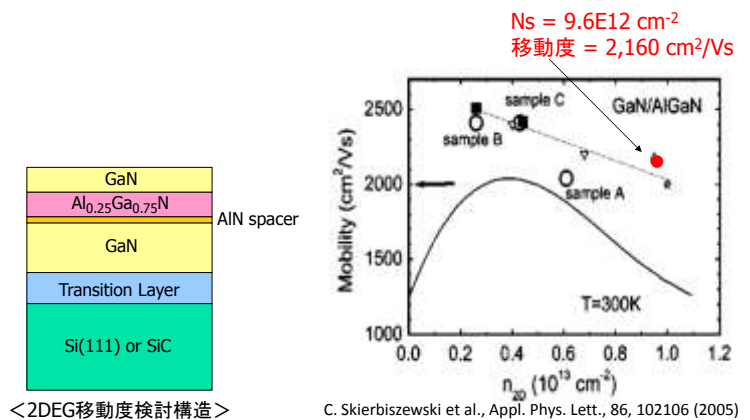


図 2-19 Si 基板上または SiC 基板上の AlGaN/GaN HFET 構造の 2次元電子ガス移動度の 2次元電子ガス濃度依存性

り、実現可能性が高い。

2-2-2-5 高品質 InGaN および InN 成長技術開発

1) 低転位 InGaN 結晶成長

アンドープ GaN (u-GaN) 結晶上に、高 In 組成 (In 組成 = 0.6) InGaN エピを成長した。図 2-20 にその断面 TEM 評価結果を示した。u-GaN/InGaN 界面での転位発生は見られず、高 In 組成 InGaN の転位密度は、下地の u-GaN と同等の密度であることを確認した。転位密度 $< 10^6 \text{cm}^{-2}$ の高品質 GaN 基板を用いることで、高 In 組成 InGaN の転位密度 10^6cm^{-2} 以下が可能であることを実証した。

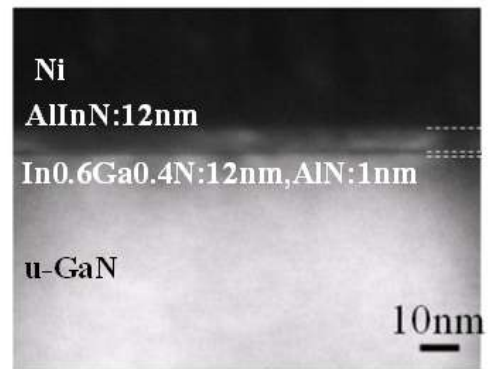


図 2-20 高 In 組成 InGaN エピの基板/エピ界面の断面 TEM 評価

2) 新 In 原料検討

加圧 MOCVD 成長では原料の気相反応が促進されることが懸念される。そこで、In 原料としてシクロペンタジエニルインジウム (CpIn) について検討を行った。従来から用いられているトリメチルインジウム (TMIn) はルイス酸であり、ルイス塩基であるアンモニア (NH_3) と結合し易いが、CpIn はルイス塩基の性質を持ち、 NH_3 との反応が抑制されることが期待できる。CpIn と TMIn を用いて InN を成長させた時の X 線回折測定の結果を図 2-21 に示す。CpIn を用いた場合、気相反応の様子は認められず、ピーク半値幅が狭く 500°C 以上の成長温度で良好な結晶が成長することが確認でき、加圧エピに用いる In 原料としての有効性を示した。ただし、CpIn は蒸気圧が低いいため成長速度が遅くなり、成長膜がアイランド状になり易いことも判り今後の課題である。これについては、CpIn より数倍蒸気圧が高い MeCpIn などを使うことで高品質な均一膜成長が期待できる。

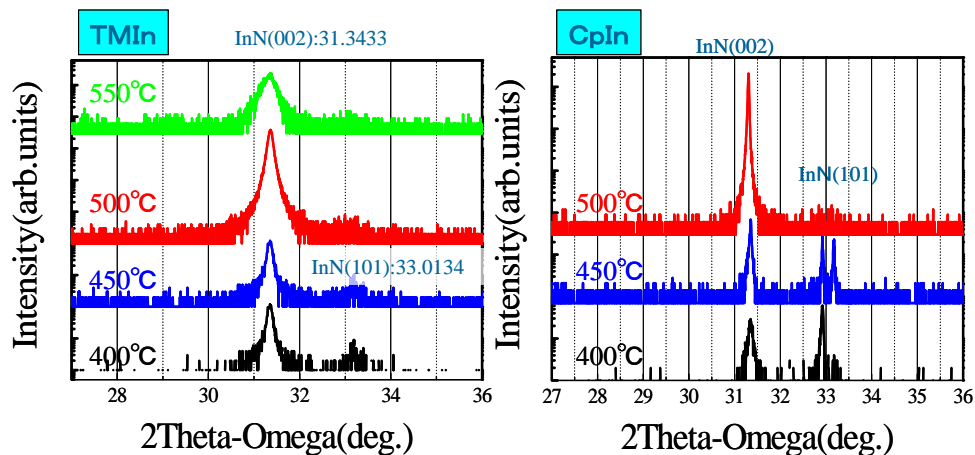
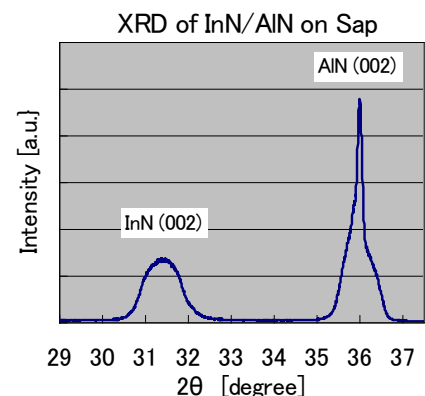


図 2-21 加圧、低温 InN 成長における TMIn と CpIn 比較 (XRD 評価)

- ・温度 : $400 \sim 500^\circ\text{C}$, 成長圧力 : 2.0 atm
- ・成長時間 : 2~6hr, V/III 比 : 50000

3) MBE 法による InN 成長検討

高移動度化のため、結晶中の酸素、炭素不純物濃度低減等の効果を狙い、MBE 法での InN 成長を AlN/サファイアテンプレート上で検討した。図 2-22 に示すとおり、単結晶成長が可能となったが、更なる結晶性向上が必要であり今後の課題である。



III-47 図 2-22 MBE 法で成長した InN エピの XRD

2-3 高 Al 組成窒化物層成長技術

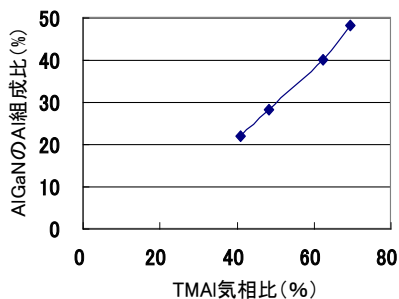
2-3-1 高 Al 組成 AlGaN エピタキシャル成長技術の開発

1) Al 組成 $0.2 \leq Al \leq 1.0$ の AlGaN エピタキシャル層の開発

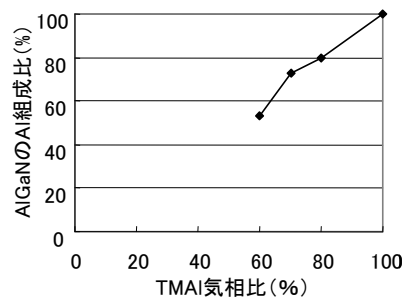
(a) 高 Al 組成 AlGaN の Al 組成制御技術の開発

Al 組成 $0.2 \leq Al \leq 1.0$ の AlGaN エピタキシャル層の成長の結果を以下に示す。AlGaN の成長のために、キャリアガスとして高純度水素ガス (H_2) を用い、V 族原料として高純度アンモニアガス (NH_3) を用いた。III 族原料として、トリメチルガリウム (TMGa) と、トリメチルアルミニウム (TMAI) を用いた。サセプタ上に設置した各種基板 (サファイア基板や GaN、AlN 等の窒化物基板) を $1100^\circ C$ 前後まで加熱し、基板上で原料を反応させることで AlGaN を成長させた。

図 2-23 (a)、(b) は、TMAI 気相比に対する AlGaN の Al 組成比の関係である。約 $1100^\circ C$ の基板温度で成長し、さらにガスの流量等のエピ成長条件の最適化を図ることで、Al 組成約 20% から 100% までの AlGaN で良好な Al 組成制御性を確認した。



(a) : $0.2 \leq Al \leq 0.5$



(b) : $0.5 \leq Al \leq 1.0$

図 2-23 TMAI 気相比と AlGaN の Al 組成の関係

(b) 高 Al 組成 AlN/AlGaN HEMT エピ構造の評価

更に作製した高 Al 組成の AlGaN エピタキシャル膜の品質、構造制御性を調べるために、Al 組成 51% の AlGaN 層をチャネル層に、AlN をバリア層に用いた AlN/AlGaN HEMT のエピタキシャル構造を作製、評価した。図 2-24 に、その XRD の $2\theta-\omega$ 測定の結果を示す。シミュレーションとほぼ一致する明瞭なピークが得られており、Al 組成 $0.5 < Al \leq 1.0$ の高 Al 組成 AlGaN であっても、良好な構造制御が可能である。図 2-25 は、C-V 測定から求めた 2 次元電子ガスのキャリア濃度プロファイルである。AlN バリア層と AlGaN チャネル層の界面に高濃度の 2 次元電子ガスが発生しており、低い残留キャリアを確認できた。以上の結果から、高品質な AlGaN エピタキシャル膜の成長技術を開発できた。

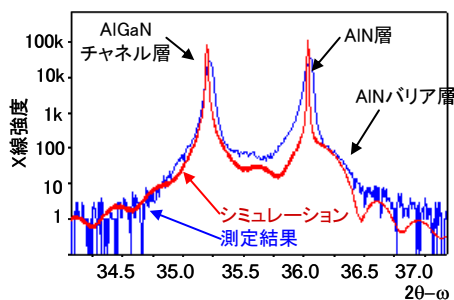


図 2-24 AlN/AlGaN HEMT エピの XRD ($2\theta-\omega$)
(Al 組成=51%)

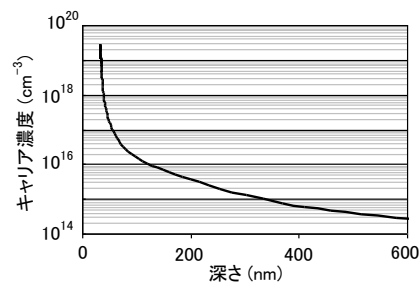


図 2-25 AlN/AlGaN HEMT エピの
キャリア濃度プロファイル

2) MOVPE シミュレーション

有機金属気相成長法 (MOVPE 法) ではV族原料ガス、III族原料ガスとこれらの反応副生成物の反応により成長膜の成長速度 (厚み)、Al 組成が大きく左右される。特に大口径化の際は、ガスの反応速度と流速の関係で成長膜の分布が大きく変化する。成長条件、成長装置造の最適化の加速のため熱流体解析とガス反応解析を組み合わせた MOVPE 成長シミュレーションを行った。

まず、2 種類の既存炉でシミュレーションと実験結果の対比からシミュレーションモデルの精度を向上させた後、新規導入炉の設計に応用した。新規導入の高温 MOVPE 装置では、V族ガスとIII族ガスを数十～数百ミリ秒の短周期で交互に供給できる高速バルブスイッチング機構を備えており、原料ガスの寄生反応を抑制することが可能である。従来、大口径化炉ではガス流れの均一化のため、ガス導入機構に整流板構造を用いていたが、高速バルブスイッチング時の影響を流体シミュレーションで確認し、更にスイッチング特性を改善できる導入機構の構造を設計した。

図 2-26 は 3 次元非定常計算により求めた、バルブスイッチング時の原料ガスの流れの様子を、ガス濃度分布で示した結果である。(a) が従来のガス導入機構、(b) が最適化後のガス導入機構の計算結果である。従来機構では、細い供給管から広範囲に原料ガスの流れを分散させるため 2 段の整流板構造を設けていたが、原料ガスの分布に不均一が生じ、更に後述するような、ガス濃度の応答波形のだれも生じることがシミュレーションより明らかになった。最適化後は整流板構造をなくし、薄い流路を流れ方向に徐々に広げていくことで、幅方向のガス流れの分散を図りながら原料ガス濃度の分布も均一になる。

図 2-27 に、シミュレーションで得られたバルブスイッチング時のインジェクター出口での原料ガスのモル濃度の時間変化を示す。従来構造 (青線) の場合、整流板で渦が発生しガスのミキシングが起るため、バルブスイッチング時のガス濃度の応答波形がだれる。改善設計 (赤線) では渦の発生が無いため、期待通りの応答波形が得られる。

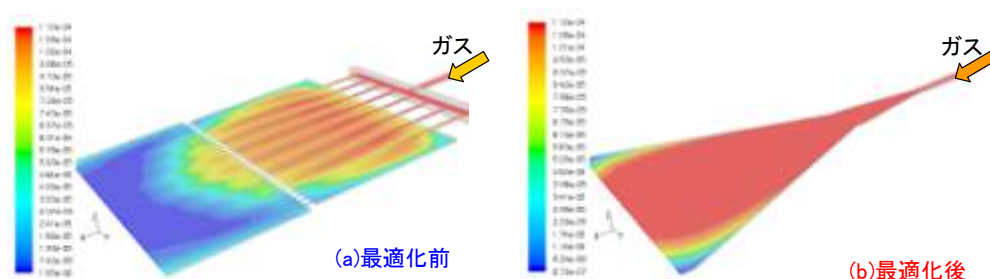


図 2-26 炉内のガス流れのシミュレーション解析による新炉インジェクターの設計

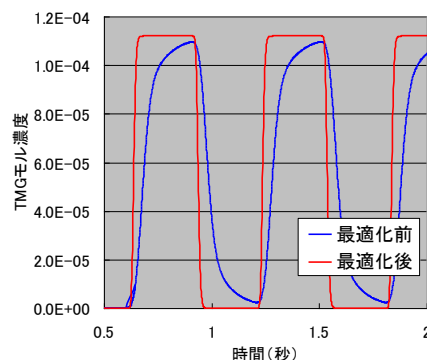


図 2-27 バルブスイッチング時のインジェクター出口での

原料ガスのモル濃度の時間変化（最適化前後の計算値）

3) AlGaIn エピタキシャル層の Al 組成均一性・膜厚均一性

(a) Al 組成 $0.2 \leq Al \leq 0.5$ の AlGaIn エピタキシャル層の Al 組成均一性・膜厚均一性

2 インチ基板上的 Al 組成 $0.2 \leq Al \leq 0.5$ の AlGaIn エピタキシャル層の Al 組成均一性・膜厚均一性の結果を以下に示す。シミュレーションから、成長圧力を下げることで Al 原料と NH_3 の気相反応が大幅に抑制され、ウエハ面内における AlGaIn の Al 組成・膜厚分布を大幅に改善できるとの知見が得られているため、成長圧力と AlGaIn の Al 組成分布・膜厚分布との相関について調べた。その実験結果を、図 2-28 に示す。成長圧力を 200Torr から 100Torr、50Torr と小さくするに従い、ウエハ面内の Al 組成・膜厚の均一性が大幅に改善し、成長圧力 50Torr で AlGaIn 層の膜厚分布を $\pm 4.9\%$ 、Al 組成分布を $\pm 5.4\%$ にすることができた（図 2-29）。シミュレーションの活用により、2 インチ基板上的における、AlGaIn の Al 組成均一性及び膜厚均一性に関する中間目標を達成できた。

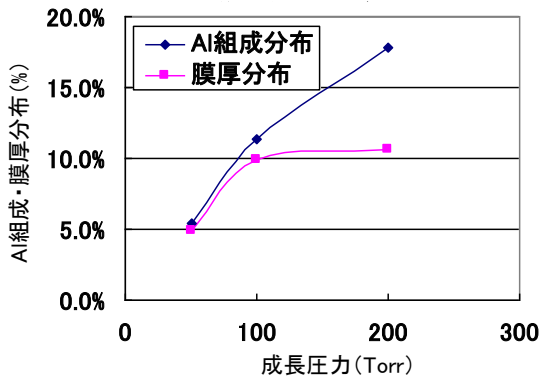


図 2-28 AlGaIn の成長圧力と Al 組成分布・膜厚分布の関係

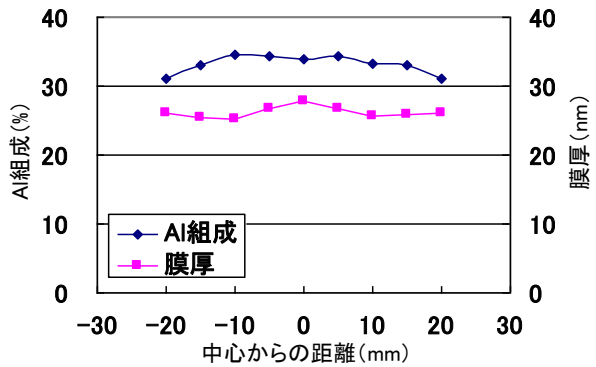


図 2-29 AlGaIn の Al 組成・膜厚の面内分布 (成長圧力は 50torr)

(b) Al 組成 $0.5 < Al \leq 1.0$ の AlGaIn エピタキシャル層の Al 組成均一性・膜厚均一性

4 インチ基板上的 Al 組成 $0.5 < Al \leq 1.0$ の AlGaIn エピタキシャル層の Al 組成均一性・膜厚均一性の結果を以下に示す。当初、4 インチ基板上的における Al 組成分布は、成長条件の最適化等により $\pm 1.3\%$ と良好であったが、その膜厚分布は $\pm 8.6\%$ だった。また、後述するようにドーピングの均一性も目標未達だった。サセプタやフローチャネル等の部材の改善を実施した結果、図 2-30 に示すように Al 組成均一性が $\pm 0.6\%$ 、膜厚均一性が $\pm 3.7\%$ と、十分良好な値を得ることができ、Al 組成均一性・膜厚均一性に関する最終目標を達成できた。

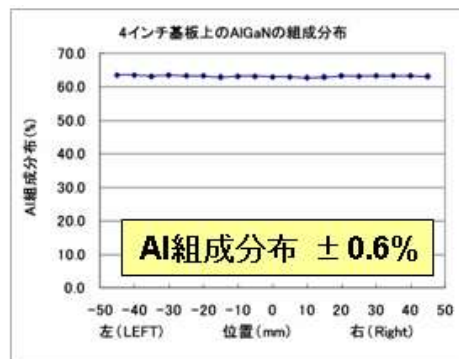
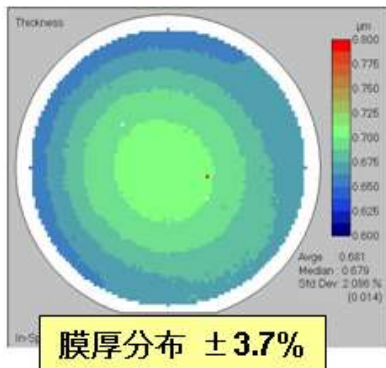


図 2-30 4 インチ基板上の AlGaIn の膜厚均一性・Al 組成均一性 (改善後)

4) AlGaIn エピタキシャル層のドーピング制御およびドーピング均一性の開発

(a) AlGaIn エピタキシャル層のドーピング制御

AlGaIn エピタキシャル層のドーピング制御の結果を以下に示す。なお、n 型不純物として Si をテトラメチルシラン (TMSi) を用いてドーピングした。p 型不純物として Mg をビスエチルシクロペンタジエニルマグネシウム (EtCp₂Mg) を用いてドーピングした。図 2-31 は、TMSi 流量を階段状に変化させることで Si を階段状にドーピングした AlGaIn の SIMS 分析結果である。急峻で安定したメモリ効果等のない良好なドーピング制御が実現できていることが分かる。また、図 2-32 は、TMSi 流量と AlGaIn 中の Si 濃度の関係である。TMSi 流量と AlGaIn 中の Si 濃度がほぼ比例しており、AlGaIn の Si 濃度を 1×10^{18} から $9 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ まで制御できている。また、Mg のドーピング制御に関しても、同様に $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ から $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ までドーピング制御性を確認した。

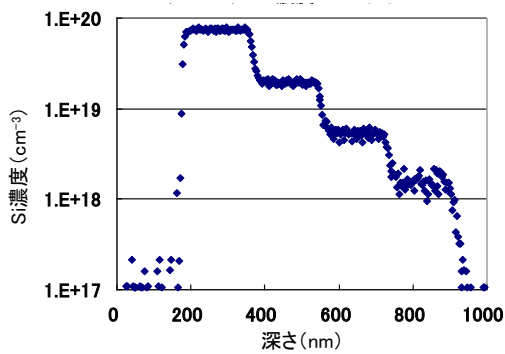


図 2-31 階段状に Si ドープした AlGaIn の SIMS 分析結果

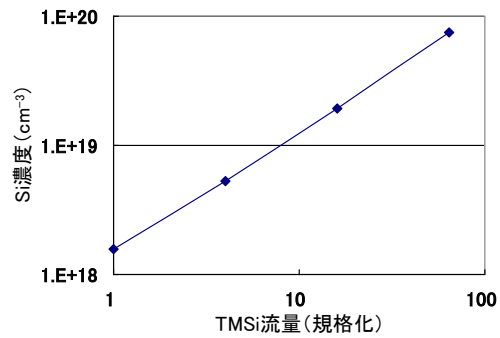


図 2-32 AlGaIn 中の Si 濃度の TMSi 流量依存性

(b) AlGaIn エピタキシャル層のドーピング均一性

ドーピングのウェハ面内の均一性に関しては、これまで開発した Al 組成・膜厚の均一性に関する知見を生かし、減圧成長で実験を行った。以下に 4 インチ基板上の Al 組成 $0.5 < \text{Al} \leq 1.0$ の AlGaIn エピタキシャル層のドーピング制御およびドーピング均一性の結果を示す。当初、不純物の均一性、特に Mg 濃度の均一性は $\pm 27.2\%$ と目標未達だった。これに対し、炉内の部材の改善により、AlGaIn の Al 組成均一性、膜厚均一性だけでなく、Si、Mg 濃度の均一性も同時に改善を図った。

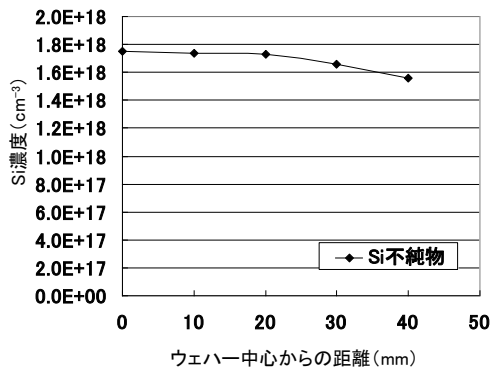


図 2-33 AlGaIn 中の Si 濃度の分布 (4 インチ)

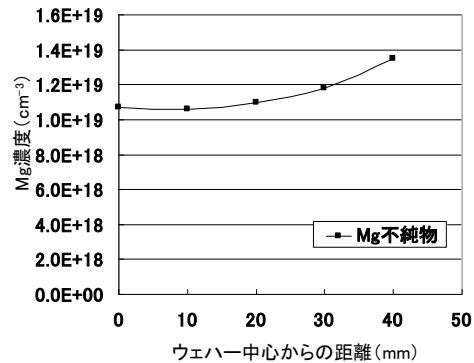


図 2-34 AlGaIn 中の Mg 濃度の分布 (4 インチ)

図2-33は、4インチ基板におけるAlGaInのSi濃度の分布であり、その濃度は約 $1.7 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 、分布は $\pm 7.4\%$ である。図2-34は、4インチ基板におけるAlGaInのMg濃度の分布であり、その濃度は約 $1.1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、分布は $\pm 12.6\%$ である。このようにして、4インチ基板上のAlGaInエピタキシャル膜の不純物濃度及びその均一性の最終目標を達成できた。

5) 高速パルススイッチングの有用性確認

高速パルススイッチングを用いたエピタキシャル成長の有用性については、名古屋大学のALD (Atomic Layer Deposition) が既報告であるが、ここでは均一性への効果について報告する。

窒化物半導体のMOVPEでは、成長圧力を高くしていくと、原料の NH_3 と有機金属原料が気相中で反応しやすくなり、成長レートの低下や膜厚均一性の悪化等の問題が起こる。原料間の気相反応を抑制するために、高速パルススイッチングを用いて膜厚均一性を改善できないか、4インチ基板を用いて実験を実施した。図2-35は、 NH_3 と有機金属原料の同時供給の場合の膜厚分布と、高速パルススイッチングを用いた場合の膜厚分布を示している。両者は同じ圧力で成長している。前者の膜厚分布が $\pm 7.7\%$ に対し、後者では $\pm 4.7\%$ と改善しており、高速パルススイッチングの有用性が確認できた。

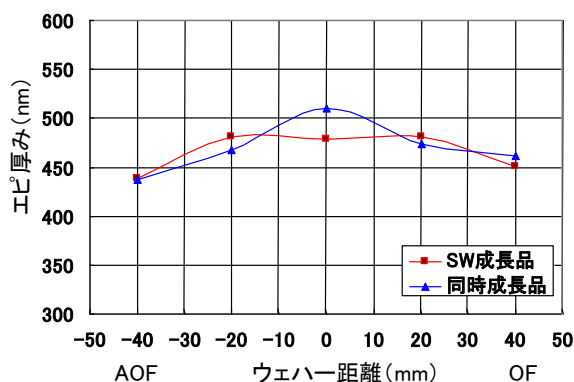


図2-35 同時成長及び高速パルススイッチングを用いた場合の膜厚分布 (4インチ基板上)

2-3-2 有極性面・無極性面 AlN 基板の有用性確認

1) AlGaIn ($0.5 < \text{Al} \leq 1.0$) 低転位化の確認

今回、低転位 AlN 基板上に AlGaIn ($0.5 < \text{Al} \leq 1.0$) のエピタキシャル層を成長し、その転位密度と AlGaIn 層の緩和状態を評価した。図2-36に、組成と厚みが異なる3種類の AlN 基板上 AlGaIn エピにつき、その転位密度と逆格子マッピング結果を示した。

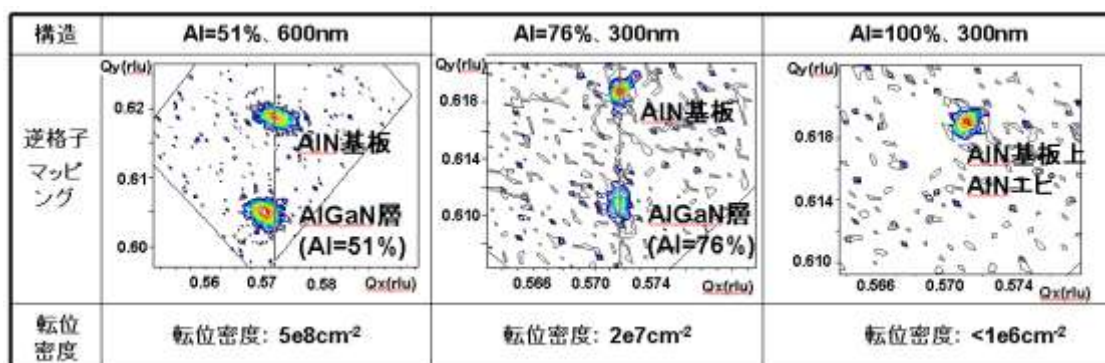


図2-36 AlN 基板上 AlGaIn エピ各種構造の逆格子マッピングと転位密度

Al=51%、厚み600nmのAlGaInの場合、逆格子マッピングから分かるように、下地のAlN基板に対しAlGaIn層が緩和している。そのため、ミスフィット転位等の発生で基板が低転位でも、AlGaIn層には $5 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ の転位が発生した。Al=76%、厚み300nmのAlGaInの場合、AlNに対しAlGaIn層がコヒーレントに成長しているが、AlGaIn層には $2 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$ の転位が発生した。この原因は明らかではないが、AlNとAlGaInではその成長条件が大きく異なるため、成長中断等を入れる必要があり、その際に発生した可能性が考えられる。そこで、AlN基板上にAlN (Al=100%)のエピタキシャル層を成長した結果、図2-37に示すように、 $1 \times 10^6 \text{cm}^{-2}$ 未満の転位密度を達成できた。

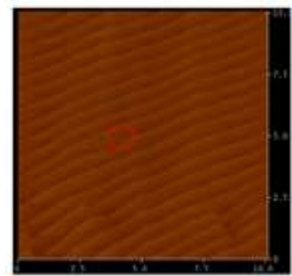


図2-37 AlN基板上 AlNエピの表面 (AFM像)

2) 有極性AlN基板を用いたエピ開発および有用性の確認

(a) AlGaIn (0.2 ≤ Al ≤ 1.0) を用いた HFET エピの開発及び有用性の確認

AlGaInエピにおけるAlN基板の有用性を示すため、有極性AlN基板上に、AlGaIn (0.2 ≤ Al ≤ 0.5) をチャンネルに有する、ヘテロ接合電界効果トランジスタ (HFET) 構造のエピを作製した。なお、有極性AlN基板との比較のためにサファイア基板上AlNテンプレート (以降サファイア基板上) を用いた。図2-38に、作製したエピ構造と、X線ロックアップカーブ (XRC)、また下表には半値幅をまとめた。XRCの半値幅より明らかのように、結晶性の優れたAlN基板を用いることで、AlGaIn層のXRC半値幅を大幅に低減できること、故にAlN基板は結晶性の向上に大きな効果があることが確認できた。高Al組成AlGaIn (0.5 < Al ≤ 1.0) においても同様である事を確認した。

【AlN基板上AlN,AlGaInエピの構造とX線回折】 【AlNテンプレート上AlN,AlGaInエピの構造とX線回折】

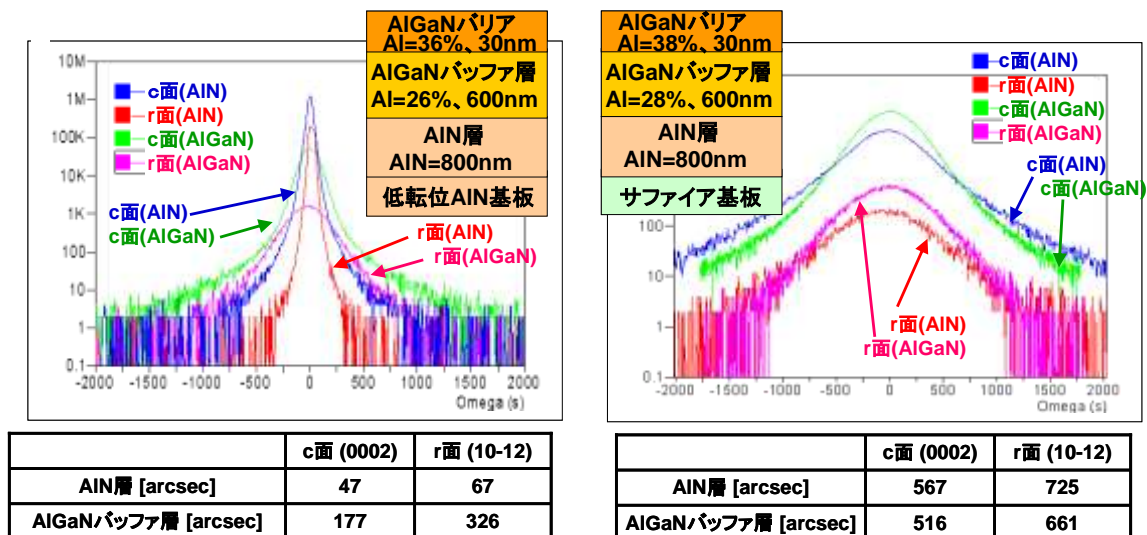


図2-38 AlN基板及びサファイア基板上のAlN、AlGaInエピの構造とXRC (0.2 < Al ≤ 0.5) (下の表はAlN、AlGaIn層のc面及びr面のXRC半値幅である)

更に、上記のHFETにおいて、AlGaInチャンネル層の結晶性とAlGaInチャンネルHFETエピのシート抵抗の関係を調べた。図2-39に示すように、AlGaInチャンネル層の結晶性の向上 (指標としたR面半値幅の減少) に伴ってシート抵抗が大幅に低減、すなわち、2次元電子ガスの特性が向上するという結果が得られた。AlGaInをチャンネルに用いたHFETでは、そのデバイス特性を向上させるためにはAlGaInの結晶性の向上が特に重要であり、AlN基板が極めて有効であることが明らかになった。

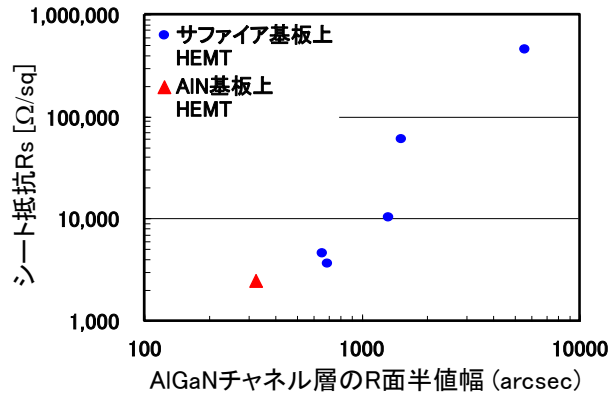


図 2-39 AlGaIn チャンネル HFET エピの結晶性とシート抵抗の相関

3) 無極性面 AlN 基板の有用性確認

無極性面 AlN 基板の有用性について報告する。窒化物半導体において、無極性面のエピの成長には、サファイア、SiC 基板等の特定方位を用いて異種基板上にエピ成長する方法と、無極性の窒化物基板を用い、その上に同じ方位のエピを成長する方法がある。前者は、高濃度の積層欠陥・貫通転位等が発生するため、優れた品質のエピを作製することは困難である。一方、後者は、用いる基板が低欠陥であれば、そのエピ膜も低欠陥のものを作製することが可能である。

今回、低欠陥の AlN 無極性面基板を後述のように作製できたため、その基板上に AlN、AlGaIn エピを成長した。そのエピ構造、断面 TEM 像、AFM 像の結果を図 2-40 に示す。XRC 半値幅は c 軸に垂直な方向で 266 秒、c 軸に並行な方向で 198 秒で、無極性面の窒化物エピとしては極めて良好である。また、断面 TEM 像から明らかのように、AlN エピ・AlGaIn エピには欠陥（積層欠陥・貫通転位）を見出せない。AFM 像から、良好なステップフローが実現しており、ピット等が全くなく、この無極性面 AlN、AlGaIn エピが低欠陥であることが分かる。これらの結果より、無極性面 AlN 基板が低欠陥の AlN、AlGaIn エピの成長のために、極めて有用であることが分かった。

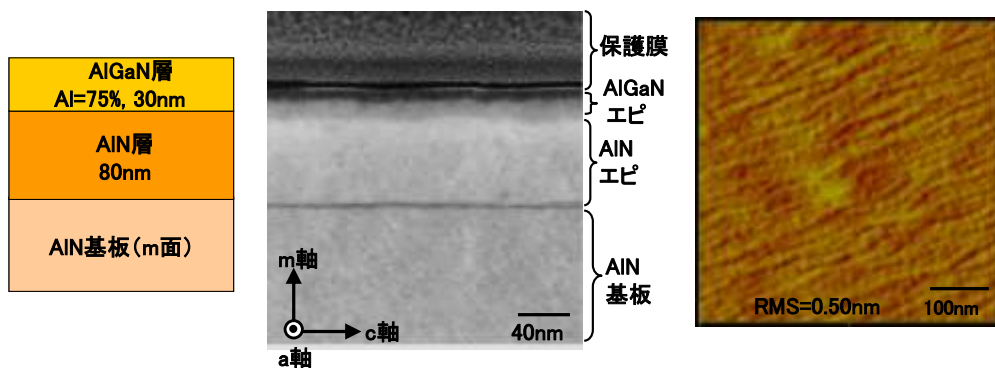


図 2-40 m 面 AlN 基板上に作製した AlGaIn/AlN エピ構造と断面 TEM 像、AFM 像

2-3-3 高 Al 組成 AlGaN エピタキシャル層成長用 AlN 基板の開発

1) 無極性面 AlN 基板の開発

大電力電子デバイスに適用可能な高 Al 組成 AlGaN エピタキシャル層成長用基板として、低欠陥で高抵抗な AlN 基板を開発した。大電力電子デバイスに応用する場合、ノーマリーオフ動作が要求され、非常に重要な開発課題となる。ノーマリーオフ動作デバイスの実現に有効な、無極性面 AlN 基板の開発内容について記す。当社では昇華法を用いて AlN 単結晶の開発を進めている。無極性面基板を得るための方策としては、①極性面を有する基板上での成長する方法と、②一般的な c 面（有極性面）成長を長尺化後、無極性面を切り出す方法、の 2 通りが考えられる。

(a) 成長方法比較の基礎検討

- ・無極性面 SiC 基板上への昇華法 AlN 成長

(10-10) 面 SiC 基板上に AlN を昇華法により成長させた。図 2-41 に成長表面のノルマスキー顕微鏡写真を示した。成長表面は 4 回対称状のモフォロジーを有し、X 線回折により無極性面(10-10)の AlN 単結晶が成長していることが確認された(図 2-42)。

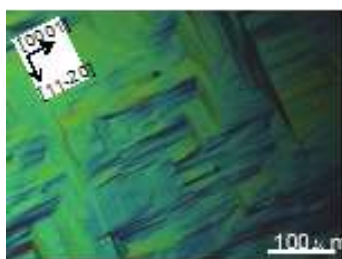


図 2-41 AlN 成長表面写真



図 2-42 X 線回折 (θ - 2θ) による評価結果

- ・有極性面 AlN 単結晶の長尺化と無極性面の切り出し

(0001) 面 SiC 基板上に AlN を昇華法により成長させ、(10-10) 面を主面とする基板を切り出した。得られた結晶は約 4 mm × 6 mm の無極性面単結晶であった。結晶の表面を研磨し、AFM により評価した結果、表面粗さの指標である RMS が 0.51 nm で、エピタキシャル成長用基板として適用可能なレベルであることが確認できた。

(b) 無極性面上成長における転位挙動の評価

(10-10) 面および(0001) 面の SiC 基板上に AlN を成長させた際の転位挙動を、TEM 観察により評価した。断面 TEM の観察結果を図 2-43 に示す。

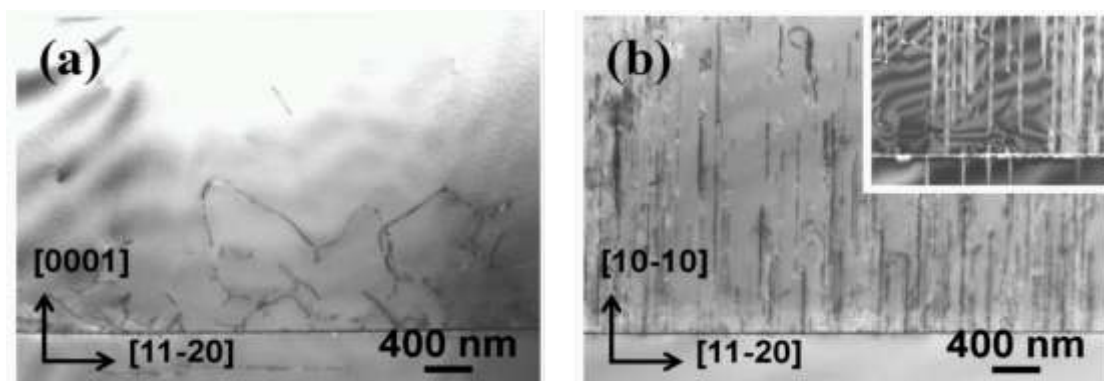


図 2-43 AlN 単結晶の断面 TEM 観察像：(a) SiC (0001) 面上。(b) SiC (10-10) 面上

(10-10)面上の成長では、AlN/SiC 界面から転位または面欠陥が成長表面に向かって伝播している。TEM 観察角度を僅かに傾斜させて観察すると（図2-43-b 挿入写真）、フリンジが発生することから、観察されている欠陥は積層欠陥であると推定される。転位密度の低減には、転位伝播方向の制御技術開発が必要と考えられる。一方、(0001)面上の成長では、転位は界面に局在し、成長表面近傍では転位等欠陥が極めて少ない領域が得られていることが分かった。これらの様子は平面 TEM 観察の結果からも伺える。以上より、(0001)面上に長尺結晶を成長して無極性面単結晶を切り出すことで、高品質な基板を得ることができるものと期待される。

(c) クラック挙動の評価

一方、光学顕微鏡により SiC(0001)面上、及び SiC(10-10)面上の AlN 成長表面を詳細に観察したところ、クラック間距離(密度)に差異がみられた。図2-44のように、(10-10)面 SiC 上の方が、(0001)面 SiC 基板上と比較して約1桁クラック間距離が大きい値となっている。これは、表2-2に示すように、SiC と AlN の熱膨張係数の比が、c 軸方向と m (a) 軸方向において異なっていることが要因のひとつと考えられる。無極性面上へテロ成長は、積層欠陥発生するものの、熱膨張差による反りやクラックの抑制については有利であると思われる。

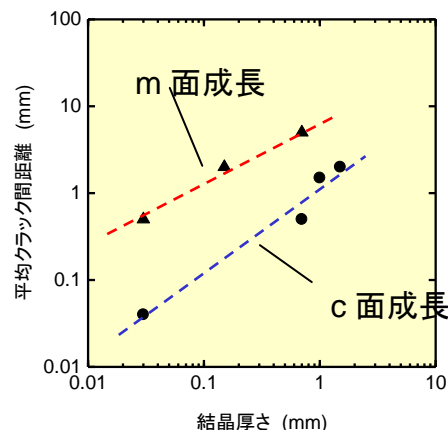


図2-44 クラック間距離の結晶厚さ依存性

表2-2 AlN と SiC の熱膨張係数

軸	AlN	SiC	差の率 (%)
c	4.96	4.75	4.23
a(m)	5.91	4.85	17.9

(×10⁶ /K)

(d) 「無極性面 AlN 基板開発装置」の導入

無極性 AlN 基板の成長基礎検討のために、無極性面 AlN 基板開発装置を設計、導入した。これまでの検討から、SiC(0001)面上の長尺成長により、低転位の無極性面 AlN 結晶が得られることが確認されたので、長尺成長の際に問題となる成長雰囲気の高純度化・高純度化、温度分布最適化による高速成長を図るべく、炉内構造を実験的に検討して導入した。また、適宜改造を行った。

(e) AlGaIn エピタキシャル層成長実験への提供

得られた AlN 結晶（～1 インチΦ、～10mmt）から、無極性面 AlN 基板を切り出し、高品位 AlGaIn エピタキシャル層成長用として提供した。平坦性を維持しつつ加工変質層を除去するために、CMP やドライエッチング工程を導入した。その結果、AlGaIn エピタキシャル層成長においてステップフロー成長が実現し、良好なエピタキシャル膜が形成できる表面であることを確認した。合計27個の基板を提供しデバイス評価にも適用された。

2) 有極性面 AlN 基板の開発

無極性面を利用した電子デバイスを動作させるためには、エピタキシャル層における高効率ドーピング技術等、解決すべき課題も多い。一方で、有極性面基板上的高 Al 組成 AlGaIn エピタキシャル層を用いた電子デバイスの優位性も未だ明確でなく、本プロジェクトにおいてこれに取り組む意義は大きい。ここでは、電子デバイスへの応用を前提とした有極性面 AlN 基板の開発の内容について記す。

(a) 転位密度低減への取り組み

SiC (0001) 面上に AlN 単結晶を昇華法により成長させた。1.4 mm 厚 AlN 単結晶の成長表面を研磨し、溶融アルカリエッチング法により転位密度を見積もったところ、as grown 表面における観察結果、及び平面 TEM 観察と同等の値 ($1.1 \times 10^6/\text{cm}^2$) が得られることを確認した。

次に、長時間成長で得られた 10 mm 厚の AlN 結晶を、成長軸に垂直にスライスして複数枚の基板を準備。各基板の表面を研磨して前述の方法により転位密度を評価した。各基板のスライス位置と転位密度から、成長厚みと転位密度の関係をプロットしたところ、転位密度は成長結晶の長尺化に伴って減少することが分かった (図 2-45)。10mm 厚における転位密度は $5 \times 10^4/\text{cm}^2$ であり、長尺成長による低転位化を確認した。

転位密度 [cm^{-2}]

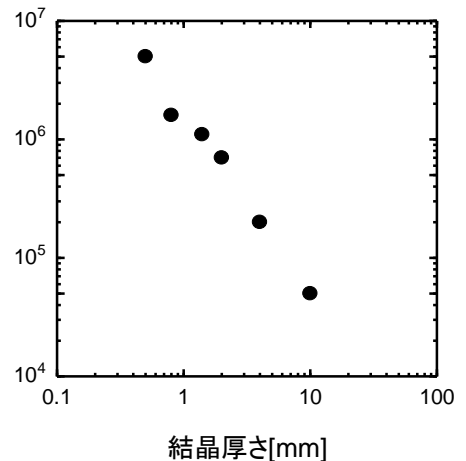


図 2-45 AlN 単結晶における転位密度の結晶厚さ依存性

(b) ホモエピタキシャル成長工程の導入

上記のように SiC 基板上への AlN 長尺成長により得た結晶から作製した有極性面 AlN 基板は、低転位ではあるものの、表面状態は穴や抉れが点在し、全面での均一成長には改善の余地があった。そこで、SiC 上のヘテロエピタキシャル成長により得られた結晶から切り出した AlN 基板を種基板として、その上に AlN 成長をさせる、ホモエピタキシャル成長工程の導入を検討した (図 2-46)。AlN を種基板とすることでより高温成長が可能となり、図 2-43 でみられた転位の消失機構がより有効に働くことや、ホモ成長の繰り返しにより、前述した長尺成長と同様な機構により、さらなる品質の向上が期待できる。

具体的には 10 mm ~ 1 インチ Φ サイズの SiC 基板上に、5 ~ 10 mm 厚程度の AlN 結晶を成長した。この結晶をスライス、表面研磨して得られた AlN 基板を種結晶として再度 AlN 結晶を成長させた。さらに、この結晶から基板を得る。この工程を複数回繰り返すことで、得られる基板の品質向上を狙った。

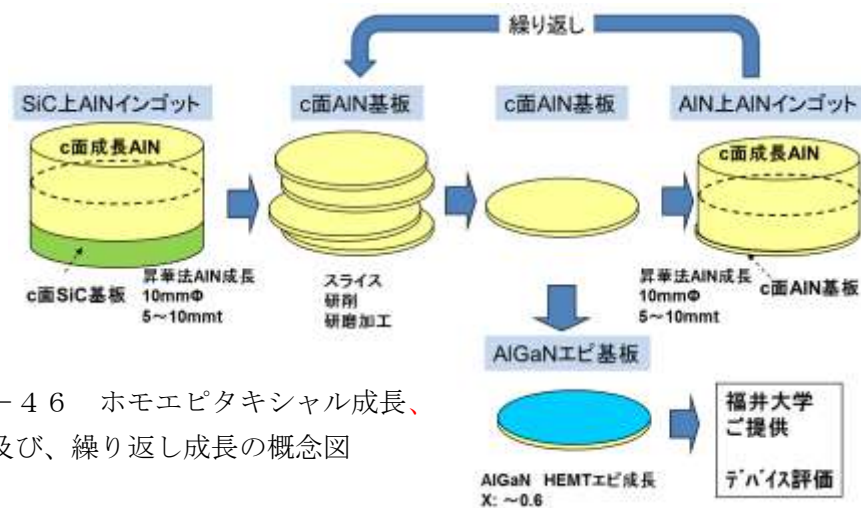
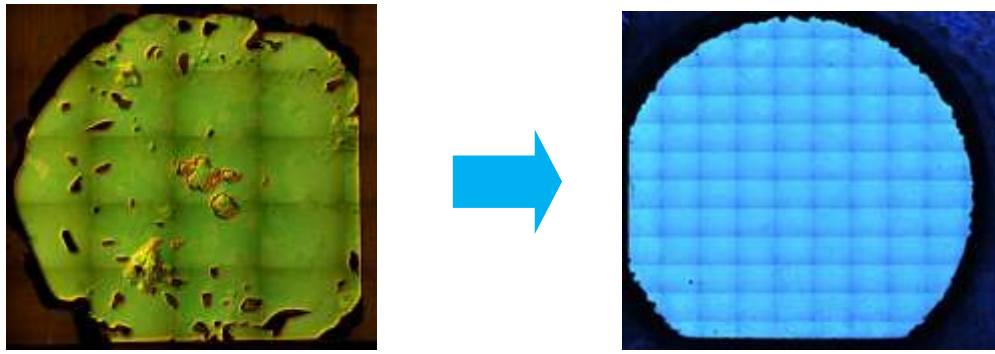


図 2-46 ホモエピタキシャル成長、及び、繰り返し成長の概念図



ヘテロ成長による AlN 基板

ホモ成長による AlN 基板

図 2-47 ホモエピ成長による基板表面の改善
(表面仕上げ加工後、ノマルスキー顕微鏡写真)

3回の繰り返しを行った後に得られた基板と、従来通りの基板の表面仕上げ後の基板表面を比較した。ノマルスキー顕微鏡写真を図 2-47 に示す。穴や抉れ等の表面欠陥がほとんどない（面積比 0.1%以下）、全面にわたり平坦な基板を得ることができた。また、高温成長を採用することにより、基板の透光性が向上した。このことは、電子デバイスのみならず、発光デバイスや光学部品としての応用展開に有用な成果である。図 2-48 に吸収係数の波長依存性を示した。

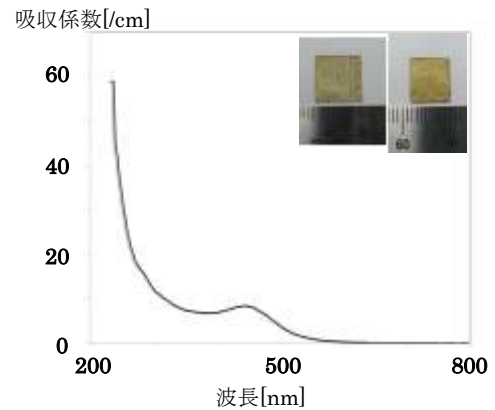


図 2-48 ホモエピ成長による AlN 基板の光吸収特性

(c) 大型昇華炉改造の実施

有極性面 AlN 基板の高品質化、無極性面基板の大型化を進めるために、有極性面基板上への長尺成長が有効である。長尺成長では、充填原料の増量、成長進行にともない変化する成長表面付近の熱環境の変動抑制が必要である。大型昇華炉の改造を行って対策を図った。具体的には、高周波コイルの長さを 150mm→300mm へ拡張し、基板保持部、原料部の温度環境を一定とするため、ホルダの上下移動機構を追加した。

(d) AlGaIn エピ成長実験への提供

上記のようにして得られた AlN 結晶（～1 インチΦ、～10mmt）から、有極性面の AlN 基板を切り出し、高品位 AlGaIn エピタキシャル層成長用として提供した。無極性面 AlN 基板と同様、CMP やイオンエッチングの技術を活用して、エピ成長に適した表面仕上げとなるように工夫した。ヘテロエピ成長による試料とあわせて合計 46 枚の基板（エピ成長、デバイス評価後に再研磨したものを含む）を提供し、有極性面上エピ成長、及びデバイス評価に適用された。

2-4 結晶成長その場観察評価技術

格子定数の異なるヘテロ接合において、原子レベルで結晶成長膜厚を制御するために、曲率半径が10 km以上の分解能を有し、且つ半極性面及び無極性面上の面内異方性のある結晶面の成長でも適用可能な、ウェハのその場反り測定装置の開発を行った。

図2-49にその原理図を示す。基板がレーザー光に対して垂直であり、かつフラットの場合は、CCDカメラの中心にレーザー光が集光する。基板が傾いている場合は、その傾斜角度分、レーザー光のスポット位置がシフトする。基板は成長中約1回/秒で回転しているため、その回転の同期信号に合わせて、ガルバノスキャナによりビームを走査して、基板の異なる2点にビームを照射する。基板がフラットな場合、2点からの戻り光は、理論上はCCD上の同じ位置に集光する。しかし、実際には、光学系における誤差を測定して補正することが必要である。基板が曲率半径10 kmで反った場合、2点間の間隔を50 mmとして、コリメータの焦点距離を2 mとすると、CCD面上のスポットの位置差は $10\mu\text{m}$ となる。曲率半径が3 mの場合、ビーム間隔を0.5 mmとすると、CCD面上でのスポット位置差は約3 mmとなる。即ち曲率半径3 mという極めて彎曲した状態から、曲率半径10 kmというほぼ平坦な状態まで本装置はモニター可能である。更に、成長中の基板回転を利用して、その場でウェハの二次元的形状を測定することができる。これは、世界初の機能である。これにより、従来極性面のみ適用可能であった反りのその場測定が半極性面や無極性面まで利用可能になった。

開発したその場観察装置を用いたc面サファイア、c面サファイア上のGaN及びr面サファイア上のGaNのウェハ形状測定の結果を示す(図2-50)。特にa面GaNの成長において異方性反りが明瞭に観察された。

歪みモニター

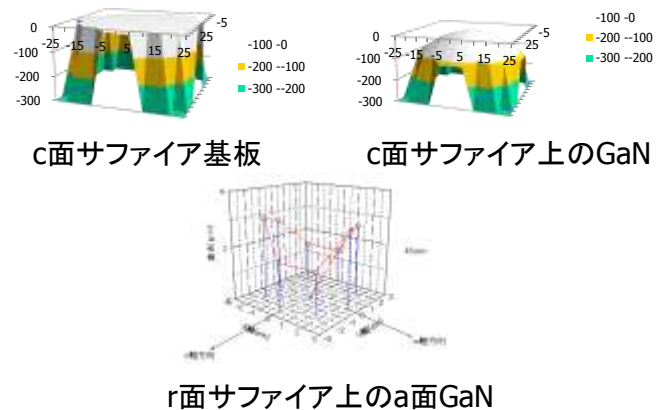
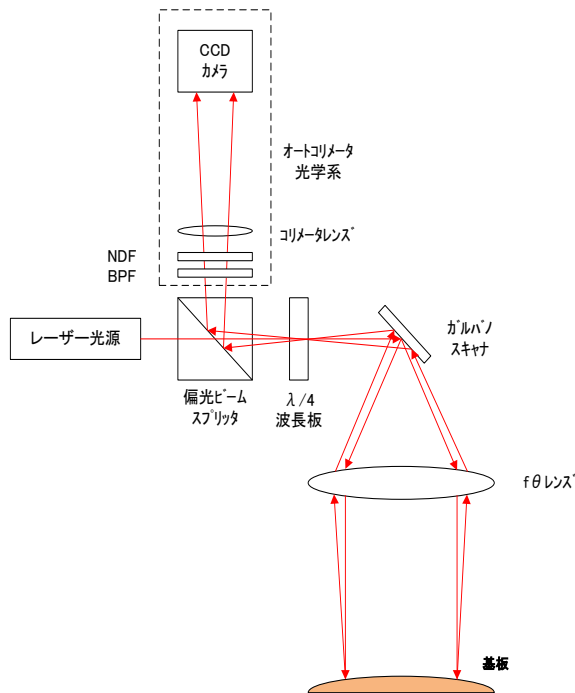


図2-50 開発したその場観察装置を用いたc面サファイア、c面サファイア上のGaN及びr面サファイア上のGaNのウェハ形状測定

図2-49 開発した二次元ウェハ反り精密測定装置の測定原理図

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

2-3-1 横型電子デバイスの評価

2-3-1-1 横型 FET プロセスの構築 (FET および TEG パターン設計など) (オーミック電極開発など)

1) FET 及び TEG パターン設計 (マスク設計)

トランジスタ/TEG パターンを標準化し、エピ材料、構造、品質とトランジスタ特性との相関関係について、プロセス要因を極力排除して評価していくためのマスクパターン (コンタクトアライナー用) を設計、作製した。表 3-1 にマスク搭載主要パターンリスト、図 3-1 に作成したマスク 1 ショットの全体レイアウトを示す。1 ショットのサイズは 5mm 角であり、アイソレーション、オーミックメタル、ゲートメタル、コンタクトホール、フィールドプレートを準備した。

	パターン名	評価項目
FET	fat-FET	チャネル移動度 vs シートキャリア濃度
		I-V 特性、C-V 特性
		深さ方向のキャリア濃度分布
FET 以外	Round-FET Linear-FET	耐圧、オン抵抗 ゲート/ドレインリーク電流 閾値電圧、サブスショルト特性
	Round-TLM Linear-TLM	コンタクト抵抗、シート抵抗 (ピッチ: 2, 4, 6, 8um 等)
	メタル抵抗評価	電極、配線メタルの抵抗
	ショットキー	ショットキーゲート特性、
	その他	基板ブレイクダウン評価 アイソレーションチェック 断面 SEM 観察用パターン 段差評価パターン、他

表 3-1 マスク搭載主要パターンリスト

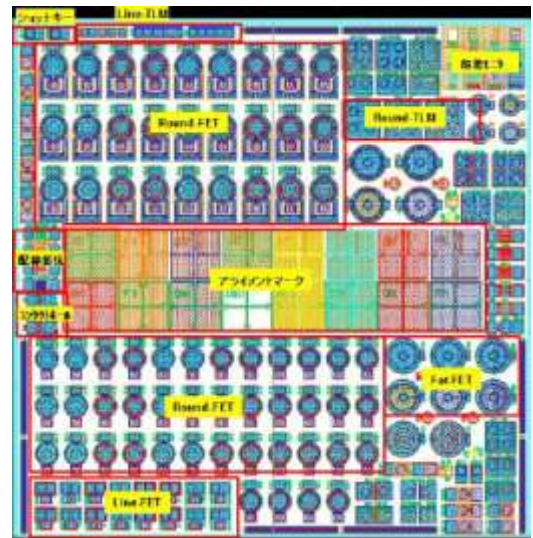


図 3-1 マスク全体レイアウト

2) FET のプロセス検討 (試作への適用)

横型電子デバイスの試作・評価は主として福井大学で保有/導入する装置を用いて行うため、福井大学と共同でオーミック/ショットキーメタル形成、露光条件等のプロセス条件検討を行い、これらのプロセス条件を適用して、上記マスクを用いた異種基板上窒化物半導体エピ基板での FET、TEG の試作を実施し、FET 動作を確認した。これにより、窒化物半導体基板を用いた横型電子デバイスの試作・評価・フィードバックの一連の流れに対応する試作環境を構築することができた。

3) オーミック電極形成プロセスの検討

窒化物系化合物半導体基板及びエピタキシャル成長膜に関し、その材料・構造・品質と横型電子デバイス (FET) 特性との相関関係をプロセス要因を極力排除して評価していくためには、マスク設計、試作環境構築に加え、プロセスの安定性・再現性も重要である。特に、一般に高温の熱処理工程が必要となるオーミック電極形成に関し、各種エピ基板に対して低抵抗で安定的に形成できることがプロセス要因を排除した評価を行う上で重要であり、オーミック電極材料、熱処理条件等の検討を行った。

オーミック電極材料として、Ti/Al/Mo/Au, V/Al/Mo/Au, Hf/Al/Mo/Au, Zr/Al/Mo/Au, Cr/Al/Mo/Au を検討した。電極材料の膜厚は、下層から 15nm、60nm、35nm、50nm とし、EB 蒸着装置で成膜を行った。オーミック電極を形成した半導体層は AlGaIn/GaN HEMT 構造であり、AlGaIn 層の Al 混晶比は 0.25、膜厚は 25nm である。オーミックメタル蒸着後、RTA 装置を用いて、80°C/s で昇温、N₂ 雰囲気中で 600°C から 950°C まで、温度条件を変えてアニール (アロイ化) を行った後に接触抵抗を測定した。アニール時間

は 30 秒である。各種オーミック電極に対する接触抵抗のアニール温度依存性を図 3-2 に示すが、V/Al/Mo/Au オーミック電極で接触抵抗 $0.48 \Omega \text{mm}$ (アニール温度 650°C)、Ti/Al/Mo/Au オーミック電極で $0.52 \Omega \text{mm}$ (アニール温度 800°C) と良好な特性が達成されている。

これらのオーミック電極材料の検討から、さらに低抵抗なオーミック電極の開発を行った。電極構造は、Ti/Zr/Al/Mo/Au 構造で、膜厚は下層から 12nm、8nm、120nm、35nm、50nm とし、昇温速度 $100^\circ\text{C}/\text{s}$ 、 900°C アニールによりオーミック抵抗 $0.09 \Omega \text{mm}$ を達成した (図 3-3)。Ti/Al/Mo/Au のオーミック抵抗が異なるのは、使用ウエハ、新旧 RTA 炉、昇温レートが異なることによる。

アニール温度が高いと、オーミック電極金属の凝集やアロイ層の不均一拡散などによってプロセス起因の特性ばらつきが生じることが懸念されるため、 600°C - 650°C という低温アニールで良好なオーミック特性が得られる V 系オーミックは横型電子デバイスの評価を行う上で好適である。

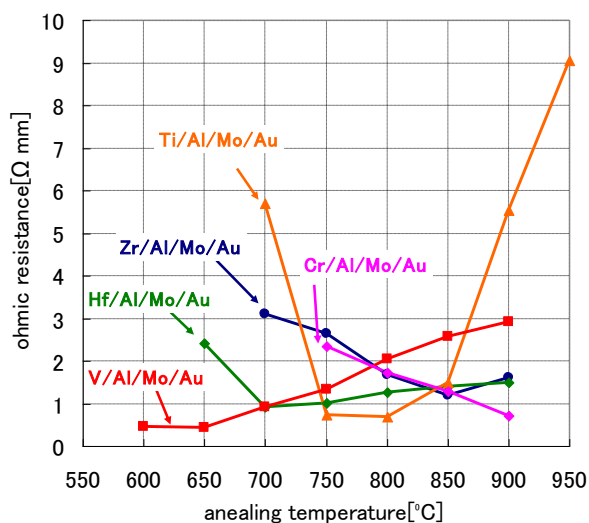


図 3-2 オーミック抵抗のアニール温度依存性

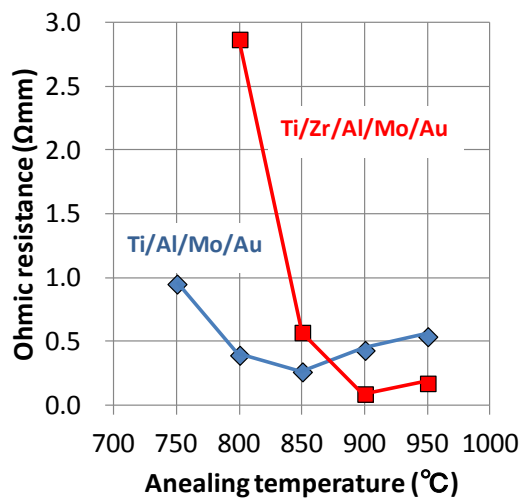


図 3-3 Ti/Zr/Al/Mo/Au のオーミック抵抗のアニール温度依存性

図 3-4 は、V/Al/Mo/Au オーミック電極を採用して試作した FET と、Ti/Al/Mo/Au オーミック電極を採用して試作した FET のドレイン耐圧を測定した結果である。エピ層は $\text{Al}_{0.21}\text{Ga}_{0.79}\text{N}$ (30nm) / GaN (1um) 構造、下地基板は Si であり、FET の各電極間隔は、 $L_{\text{sg}}=3\mu\text{m}$ 、 $L_{\text{g}}=3\mu\text{m}$ 、 $L_{\text{gd}}=5\mu\text{m}$ である。V/Al/Mo/Au オーミック電極を採用した FET の方が、Ti/Al/Mo/Au オーミック電極を採用した FET よりも約 50% 耐圧が高い結果となった。

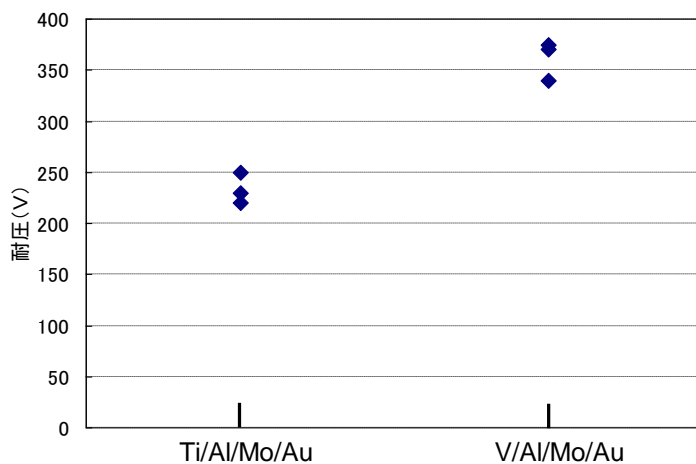


図 3-4 オーミック電極材料による FET 耐圧の違い

図3-5は、Ti/Al/Mo/AuとV/Al/Mo/Au オーミック電極のアニール後の断面 TEM 観測写真である。Ti/Al/Mo/Au オーミック電極では、Ti がスパイク状に半導体層に不均一に侵入しているのに対し、V/Al/Mo/Au オーミック電極の金属/半導体界面は良好な平坦性を保っており、均一なオーミック接触が得られていることを示唆している。スパイク状の金属拡散部には電界集中が生じる可能性があり、それが図3-4に示されるようなオーミック電極材料による耐圧の違いに現れているとも考えられる。

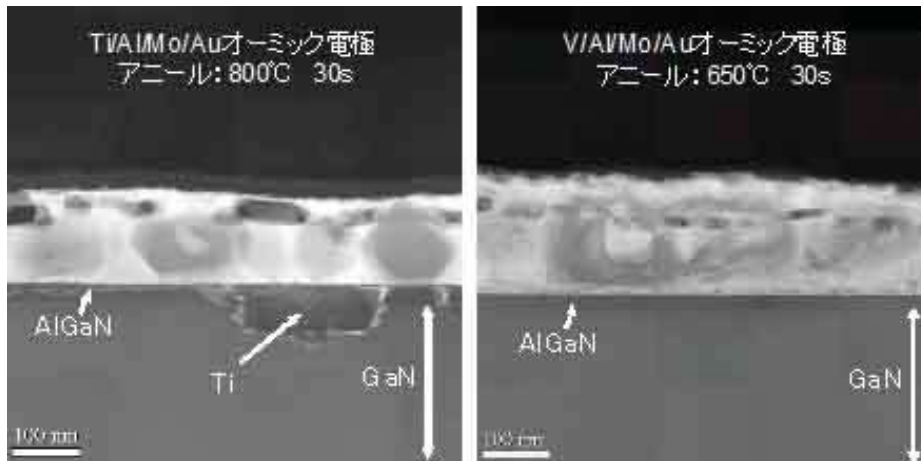


図3-5 アニール後のオーミック電極の断面 TEM 像
Ti/Al/Mo/Au (左)、V/Al/Mo/Au (右)

2-3-1-2 Na フラックス法 GaN 基板上 AlGaIn/GaN 系 FET の作製と評価

1) 極性 GaN 基板上横型電子デバイスの評価

設計・作成した FET 及び TEG マスク、および改善したオーミック電極形成プロセスを用いて、本プロジェクト内製の有極性 AlGaIn/GaN エピ基板を用いた横型 FET (HEMT) の試作、参照として異種 (Si) 基板上 AlGaIn/GaN FET (HEMT) の試作を行い、それらを共通の条件で評価した。

その結果、本プロジェクト内製の Na フラックス法の有極性基板上に成膜した AlGaIn/GaN エピ基板を用いた横型 HEMT において、参照試作した異種 (Si) 基板上 AlGaIn/GaN HEMT を上回る最大ドレイン電流 510mA/mm の特性を確認した (図3-6)。なお、有極性 AlGaIn/GaN エピ基板を用いた横型 HEMT 形状は Round-FET であり、 $L_{gs}=2\mu\text{m}$, $L_g=3\mu\text{m}$, $L_{gd}=5\mu\text{m}$, $W_g=515\mu\text{m}$ 、また AlGaIn の Al 組成比は 0.27 である。

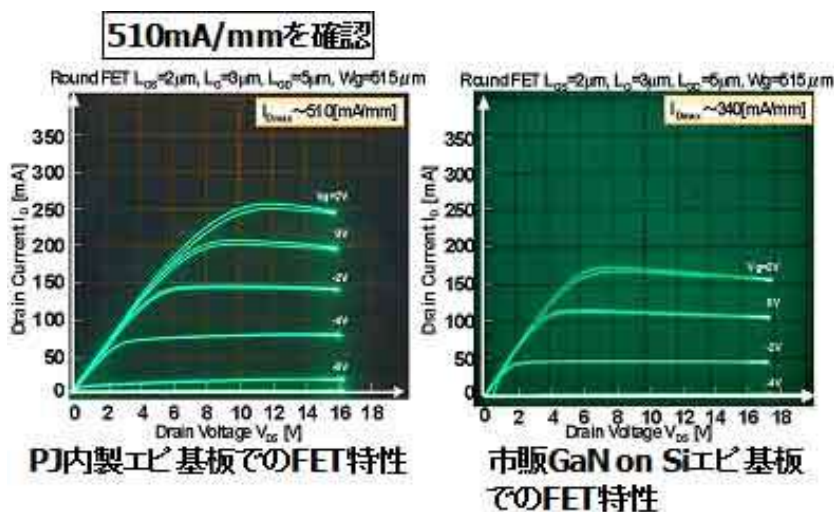


図3-6 Na フラックス法・有極性基板上エピ、および異種 (Si) 基板上の市販 AlGaIn/GaN エピを用いて試作した横型 FET の電流-電圧特性実測値

2-1-3 大口径 GaN 基板上横型 FET 作製と評価

設計・作成した FET 及び TEG マスクおよび改善したオーミック電極形成プロセスを用いて、本プロジェクト内製の Na フラックス GaN 基板 (2 インチ) およびサファイア基板 (4 インチ) 上の有極性 AlGaIn/GaN エピ基板を用いた横型 FET (HEMT) を試作し、FET の動作確認を行った。図 3-7 に試作したデバイスの写真を示す。試作プロセスに関しては面内不均一性を抑制するために、レジストパターニング工程やオーミックアニール条件などの検討を再度行い、全面での FET 動作を確認した。

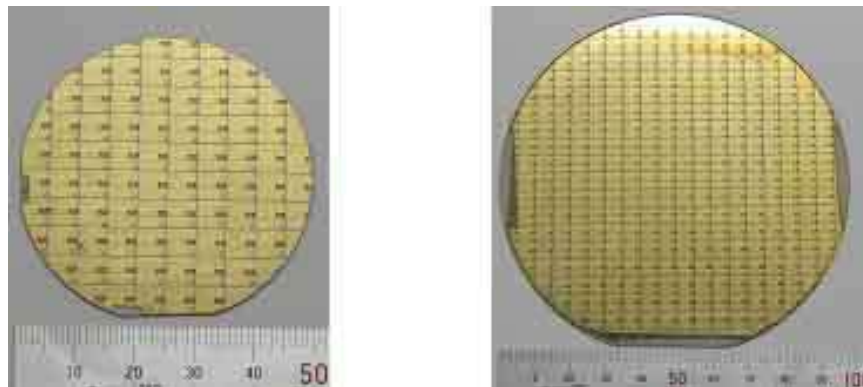


図 3-7 FET を試作したプロセス済み基板 (2 インチ (左)、4 インチ (右))

4 インチ基板内でのオーミック抵抗とシート抵抗の面内分布を図 3-8 に示す。測定はウェハ面内の中心を通る十字の方向に測定を行った。シート抵抗が中心から下方に向かって大きく上昇しているため、異常成長かエピ膜厚の不均一性が推定される。このように試作ウェハごとに各種測定データのウェハ上での面内マップや、特性のばらつき分布などの分析を行い、基板・エピ技術開発へのフィードバックを行った。

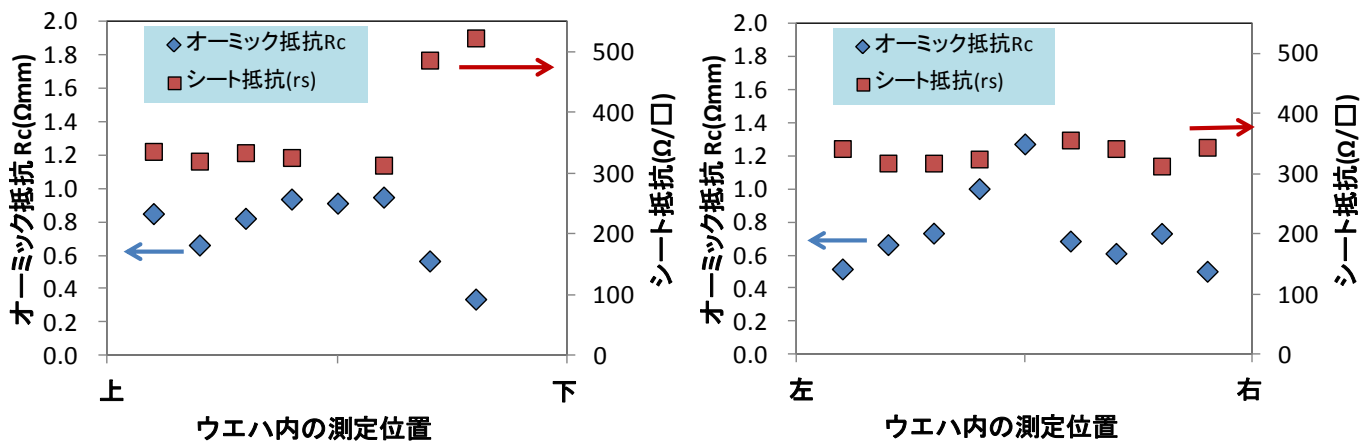


図 3-8 試作した 4 インチ基板上 FET のオーミック抵抗およびシート抵抗の分布

2-3-1-4 Na フラックス法 GaN 基板上 AlGaIn/GaN FET 特性の欠陥依存性評価

本プロジェクト内製の Na フラックス GaN 基板 (2 インチ) 上の有極性 AlGaIn/GaN エピ基板を用いた横型 FET (HEMT) の試作を行い、ソース-ゲート間のショットキーリーク電流を全面で行った。リーク電流測定後、基板表面を熱リン酸 (150°C) でウェットエッチングを行うことにより欠陥を顕在化させ、欠陥位置とショットキーリーク電流の相関を調査した。欠陥密度は $1 \times 10^4 / \text{cm}^2$ 程度で、市販の Si 基板上 AlGaIn/GaN よりも約 2 ケタ少なかった。ゲート電極下、又はソース-ゲート電極間に欠陥が存在する場合

はリーク電流が大きく、欠陥が存在しない場合はリーク電流が小さいという相関が確認できた。すなわち、欠陥の少ない Na フラックス法 GaN 基板ではリーク電流の低減が期待できると考えられる（図 3-9 参照。）

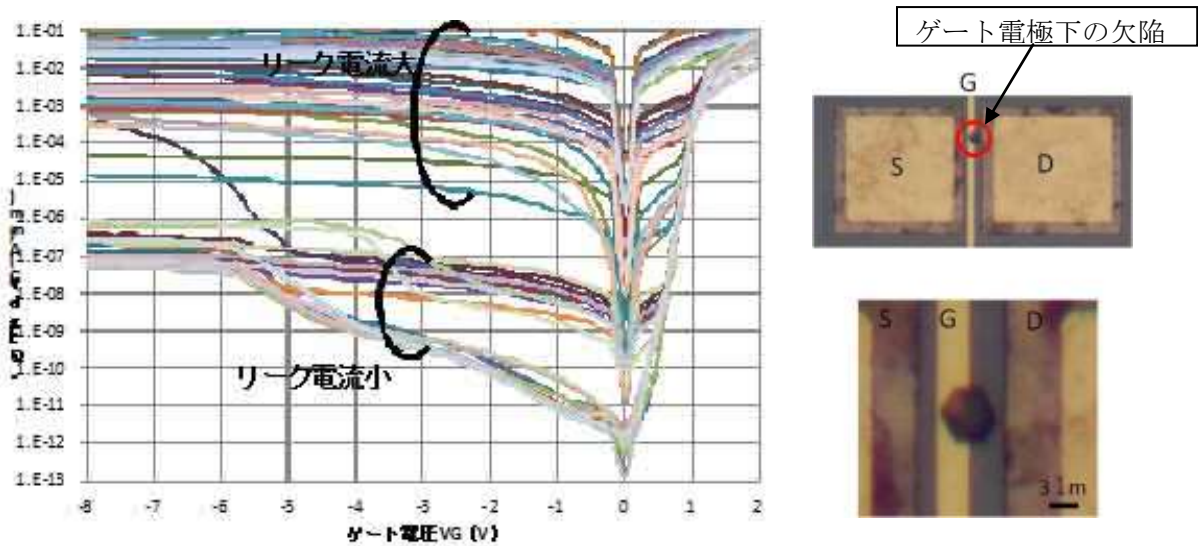


図 3-9 2 インチ基板上 FET の I_g - V_g 特性とゲート電極下の欠陥

図 3-9 に示す結果から、表面の欠陥と FET のゲートリーク電流とが対応することが判った。この欠陥が基板に起因するのかエピ層に起因するのかを調べるために、Na フラックス基板の CL (cathode luminescence) 像を撮影しておき、その基板にエピ成長を行い、FET を作成して、CL 像と FET 特性との対応を調べた。基板は阪大で成長させた Na フラックス基板で、エピ成長は名古屋大で行った。

図 3-10 (a) に基板の全体図と CL 像を測定した領域を示す。撮影範囲は約 $7 \times 7 \text{ mm}^2$ である。また図 3-10 (b) に CL 像を示す。図示する通り、CL 像では比較的明るい領域（発光部分）と暗い領域（非発光部分）が認められる。

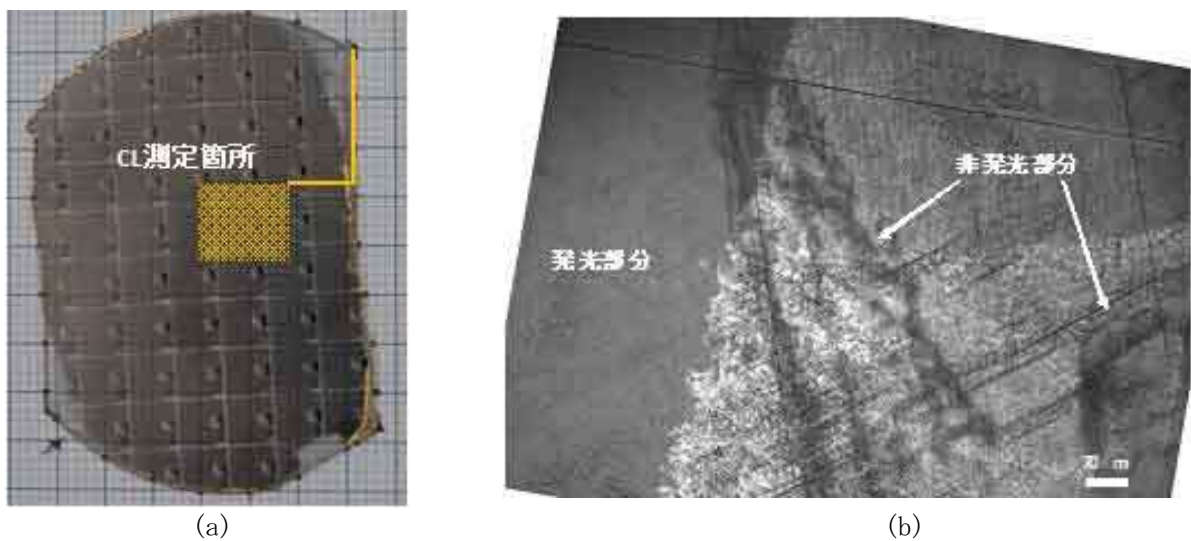


図 3-10 (a) Na フラックス基板（図は FET 作成後）全体図と CL 測定箇所。(b) CL 像

この基板にエピ成長を行い、FET を作成した。表面写真を図 3-11 に示す。図は、図 3-10 で CL 像が暗い領域を撮影したものである。図示する通り、CL 像が暗い領域は、ウエハ表面の欠陥と位置的に対応することが判った。

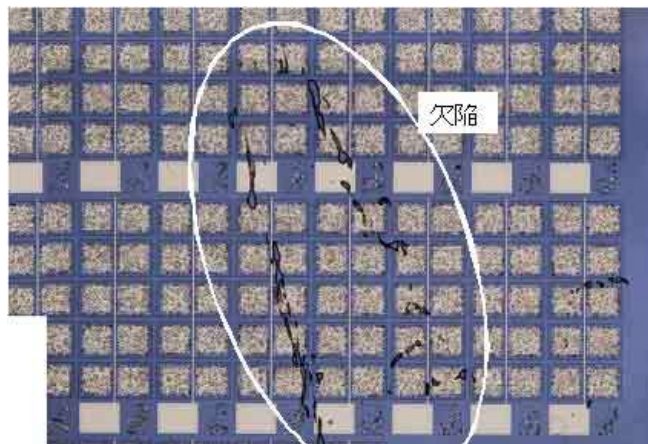


図 3-11 図 3-10 のウエハに FET を形成した表面写真

図 3-12 に、1 個の FET で欠陥が有る個所と無い個所を、CL 像と対応させた結果を示す。(a) は CL 像が明るい領域で、表面欠陥は見られない。一方 (b) は CL 像で中央に暗い領域が帯状に走っており、表面にも欠陥が帯状に存在することが判る。この結果より、表面の欠陥は基板に起因しており、CL 像の暗領域に対応することが判った。

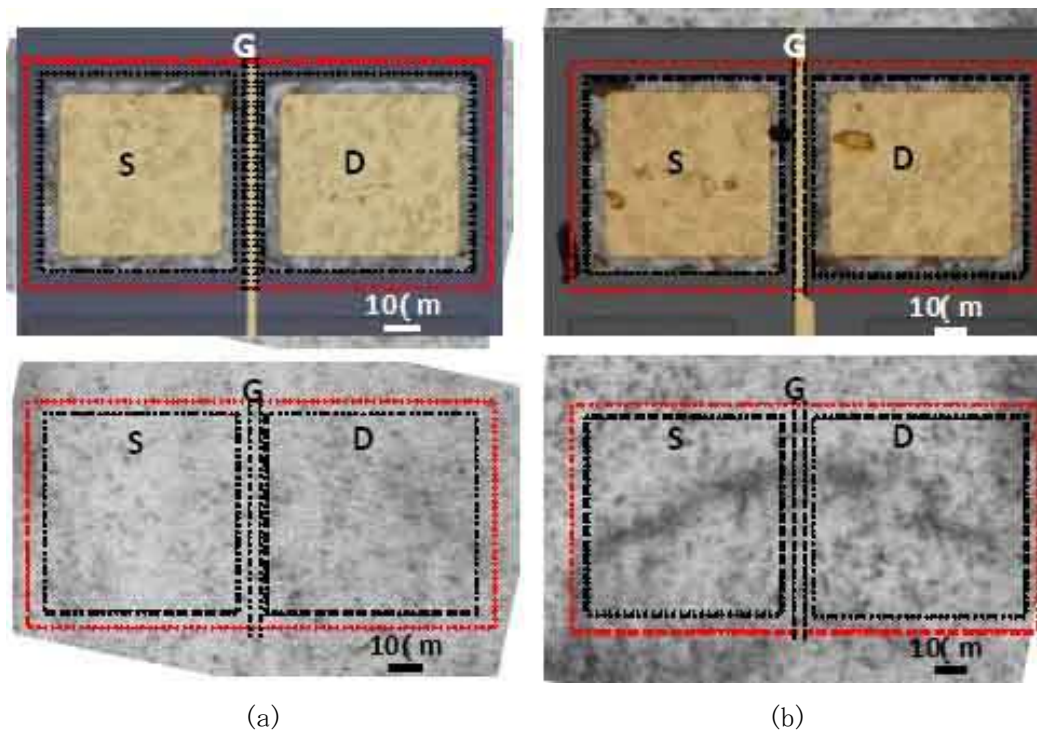


図 3-12 FET の表面欠陥と CL 像との対応。(a) CL 像が明るい個所。(b) CL 像に帯状の暗領域がある個所。

上記で表面欠陥について記したが、観察される欠陥には様々な形状がある。SEMで観察した欠陥の一例を図3-13に示す。このように径が1 μm 程度の六角形状が典型であるが、これらがいくつも重なりあったもの、また不定形で数100 μm 程度の大きな欠陥も数多く見られている。

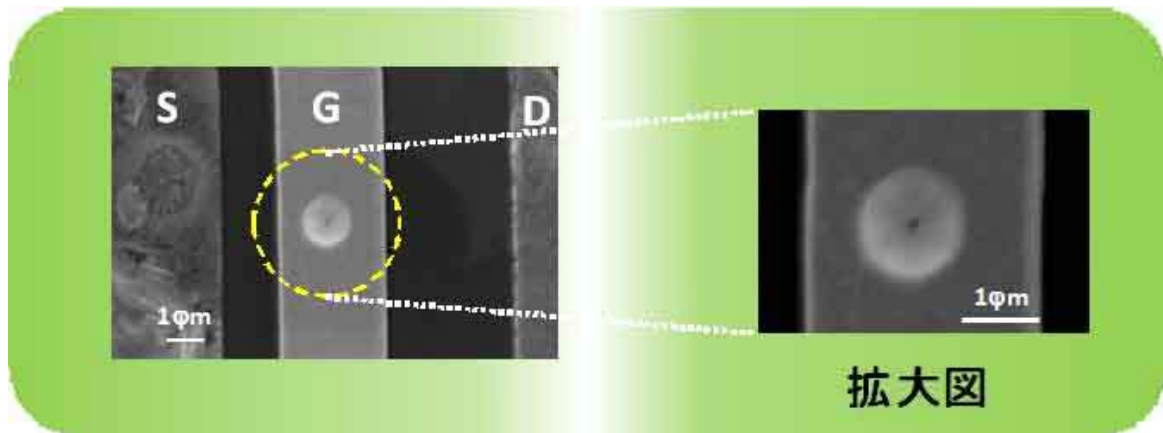


図3-13 欠陥のSEM像。ここに示す欠陥は一例で、様々な形状がある。

次に表面欠陥と、FET特性との対応を調べた。結果を図3-14に示す。図はFETの伝達特性(I_d - V_{gs} 特性)を、ゲート電極に欠陥がある個所と無い個所で測定した結果を示したものである。図示する通り、欠陥がある個所ではピンチオフ特性が悪くピンチオフより深いゲートバイアス電圧でも 10^{-4}A/mm 程度のドレイン電流が流れるが、欠陥の無い個所では良好なピンチオフ特性を示している。

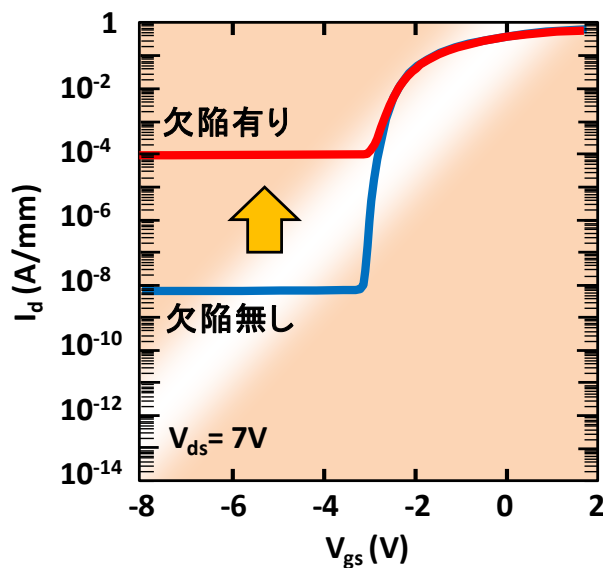


図3-14 ゲートに欠陥のがある個所と無い個所でのFETの伝達特性の比較

以上より表面に見られる欠陥は、CL像で暗領域として観察され基板に起因すること、また欠陥があるとFET特性のゲートリーク電流が増加し、ピンチオフ特性が悪くなることが判った。Naフラックス基板には今後も基板の欠陥の更なる低減が必要と思われる。

2-3-1-5 高Al組成 AlGa_Nチャネル模型FETの作製と評価

窒化物系化合物半導体エピ基板の高Al組成の極限としての、Al_N基板上にエピ成長した基板を用いたFETの試作・評価を試みた。名古屋大集中研のエピグループから提供された、Al_N基板上AlGa_Nチャネ

ル構造のエピ基板を用いて FET の試作・評価を行った。エピ構造はバリア層の Al 混晶比は 0.32~1.0、チャンネル層の Al 混晶比は 0.23~0.6 である。

AlGa_N チャンネルエピ基板のオーミック電極は、Al 組成が高いため通常の Ti/Al 系オーミック電極ではオーミック接触が得られず、電極構造、プロセスの再検討を行った。電極材料を Zr(15)/Al(60)/Mo(35)/Au(60) (nm) とし、合金化アニール温度を 900~950°C にすることで、オーミック接触が可能になった。

図 3-15 に、Al_{0.54}Ga_{0.46}N/Al_{0.28}Ga_{0.72}N on AlN の FET の Id-Vds 特性と OFF 耐圧特性を示す。Lsg=3μm、Lg=6μm、Lgd=10μm の FET で最大電流 135mA/mm、耐圧 1400V を達成した。また、図 3-16 には、耐圧と Lgd の相関を示した。lgd=15μm では測定装置の測定限界の 2000V を超える耐圧を確認した。

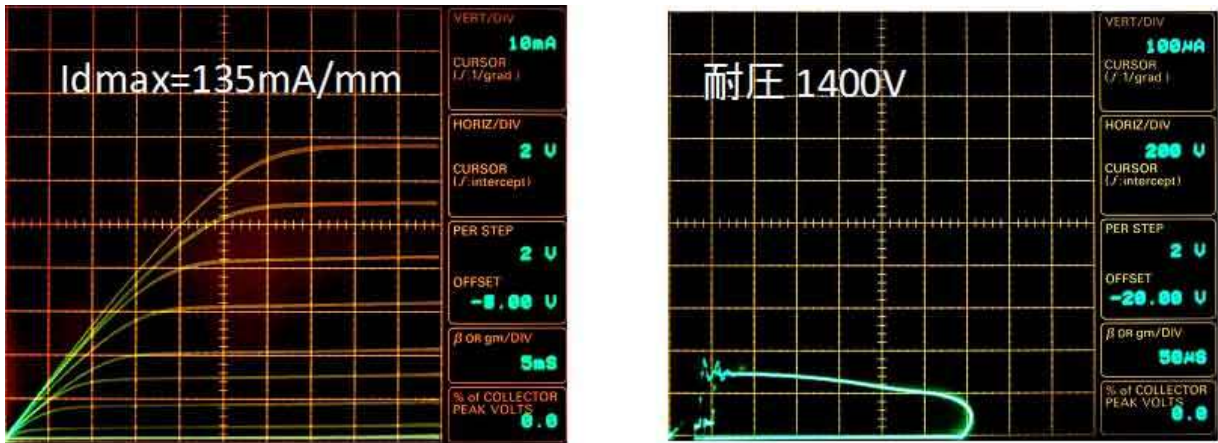


図 3-15 Al_{0.54}Ga_{0.46}N/Al_{0.28}Ga_{0.72}N on AlN の Id-Vds 特性 (左) と off 耐圧特性 (右)

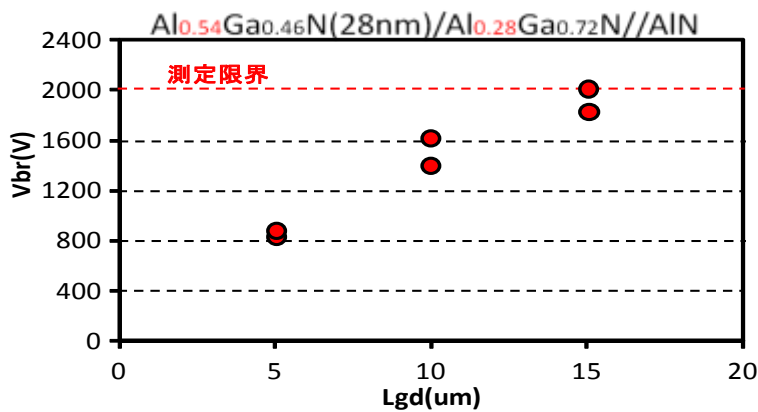


図 3-16 Al_{0.54}Ga_{0.46}N/Al_{0.28}Ga_{0.72}N on AlN の FET の耐圧の Lgd 依存性

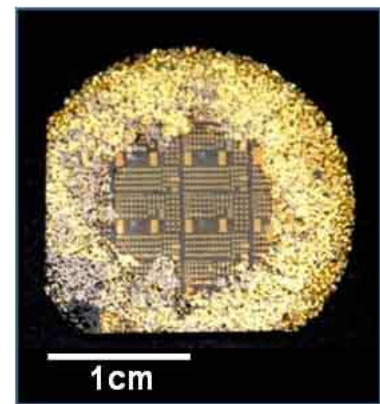


図 3-17 AlN/AlGa_N on AlN 上 FET プロセス済み基板の写真

AlGa_N チャンネルエピ基板では Al の混晶比の増加に従ってオーミック抵抗が増大する。AlN/Al_{0.6}Ga_{0.4}N では、従来の AlGa_N チャンネルエピに用いられていた Zr(15)/Al(60)/Mo(35)/Au(50) (nm) ではオーミック接触が得られなかったため、電極構造、プロセスの再検討を行った。Zr 膜厚、Al 膜厚、アニール温度、アニール昇温速度を検討し、Zr(15)/Al(120)/Mo(35)/Au(50) (nm)、昇温速度 100°C/s、900°C30 s アニールにより、オーミック抵抗率 $4.3 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}^2$ を確認した。図 3-17 に試作した AlN/Al_{0.6}Ga_{0.4}N on AlN の FET プロセス済み基板の写真を示した。

図3-18に $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}/\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{N}$ on AlN FET の室温と 300°C の IV 特性を示した。測定したデバイスは $L_{\text{sg}}=3\mu\text{m}$ 、 $L_{\text{g}}=9\mu\text{m}$ 、 $L_{\text{d}}=10\mu\text{m}$ である。 I_{dmax} ($V_{\text{g}}=2\text{V}$ の最大電流) と I_{dss} ($V_{\text{g}}=0\text{V}$ の最大電流) はそれぞれ 70mA 、 55mA (25°C)、 45mA 、 33mA (300°C) で、減少率にすると 36% 、 40% であった。

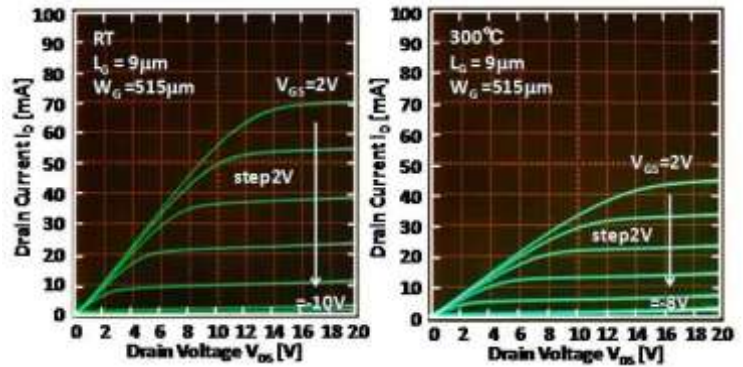


図3-18 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}/\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{N}$ on AlN FET の室温 (左) と 300°C (右) の IV 特性

図3-19に $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$ on Si と $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}/\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{N}$ on AlN の I_{dss} の温度特性を示した。 $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$ の I_{dss} における室温から 300°C での減少率は 75% であった。 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}/\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{N}$ は $150\sim 300^\circ\text{C}$ の環境では、 $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$ を超える I_{dss} を示した。 $\text{AlN}/\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ では電流値は低いものの、 300°C 以下まではほぼ減少のない I-V 特性を示した。今後 AlN 基板およびエピタキシー層の結晶性の向上により更なる特性改善が見込まれる。

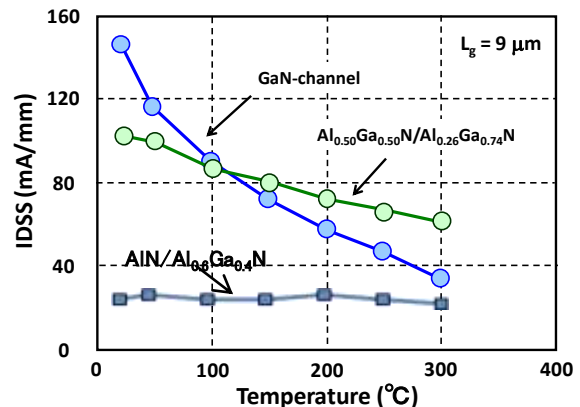


図3-19 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}/\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{N}$ on AlN FET の I_{dss} の温度依存性

2-3-1-6 横型デバイスの低オン抵抗、高耐圧化

2-3-1-5 に示したように、AlGaIn/GaN HEMT で AlGaIn バリア層の Al 組成を高め、かつチャネル層を GaN 層に替えて AlGaIn 層にすることにより、 2000V を超える耐圧が得られることが判った、しかしながら、バリア層、チャネル層の Al 組成を上げると、オーミック抵抗が高くなるという問題がある。この課題を解決するために、高耐圧を維持しつつ、オン抵抗の低減に取り組んだ。具体的には、チャネル層は GaN とし、(1) ゲート-ドレイン間の距離 (L_{gd}) を変えて試作を行い、オン抵抗と耐圧の L_{gd} 依存性を調べた。また、(2) AlGaIn バリア層の Al 組成を変え、オン抵抗と耐圧への依存性を調べた。さらに (3) 基板として Na フラックス GaN、Hydride Vapor Phase Epitaxy (HVPE) GaN、SiC、Si 基板の 4 種類の基板で試作を行い、耐圧とオン抵抗の基板種依存性についても調べた。なお本研究での目標は、基本計画で定める耐圧 1200V 以上の実現に加えて、AlGaIn/GaN が持つ高移動度という優位性を示すために、オン抵抗が $3\text{m}\Omega\text{cm}^2$ 以下という目標を付け加えた。

1) 耐圧 (V_{br})、オン抵抗 (R_{on}) の L_{gd} 依存性

図3-20に、耐圧の L_{gd} 依存性を示す。基板として SiC を用いた場合の結果である。図示する通り、耐圧は L_{gd} にほぼ比例して増加し、 L_{gd} が $25\mu\text{m}$ で 1900V の耐圧が得られた。直線の傾きより求めた平均電界 ($V_{\text{br}}/L_{\text{gd}}$) は、 $0.8\sim 0.9\text{MV}/\text{cm}$ であった。この結果より 1200V 以上の V_{br} を得るためには、 L_{gd} を $15\mu\text{m}$ 以上にする必要があることが判った。次に、 R_{on} の L_{gd} 依存性を図3-21に示す。この図より、 L_{gd} を長くすると R_{on} はほぼ比例して増加すること、また R_{on} を $3\text{m}\Omega\text{cm}^2$ 以下にするためには L_{gd} を $18\mu\text{m}$ 以下にする必要があることが判った。

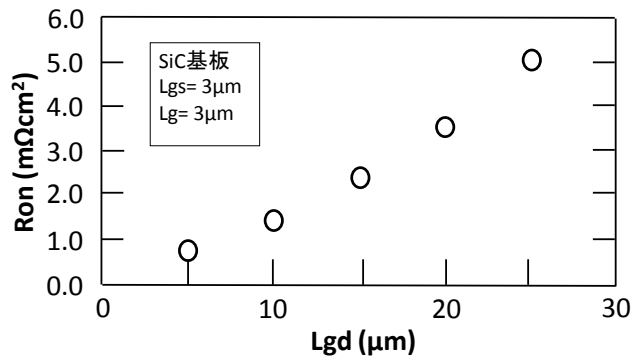
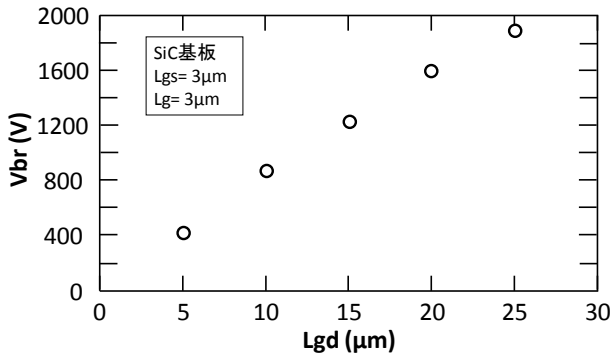


図 3-20 AlGaIn/GaN HEMT の V_{br} の L_{gd} 依存性

図 3-21 AlGaIn/GaN HEMT の R_{on} の L_{gd} 依存性

2) 耐圧 (V_{br})、オン抵抗 (R_{on}) の Al 組成依存性

$Al_xGa_{1-x}N/GaN$ エピ層において、 V_{br} 、 R_{on} の AlGaIn 層 Al 組成依存性を調べた。結果を図 3-22 に示す。用いた基板は SiC である。図より、Al 組成を低くするほど耐圧は上がるが、 R_{on} も増加することが判る。本プロジェクトの目標値、1200V 以上の V_{br} 、 $3m\Omega cm^2$ 以下の R_{on} を満足させるためには、Al 組成は 0.20 が最適であることが判った。Al 組成 25%、 $L_{gd}=10\mu m$ の AlGaIn/GaN HEMT について測定した電流コラプス波形とオン抵抗劣化比 (コラプス比) のドレイン電圧依存性を図 3-23 に示す。

また、基板が Si の場合の 3 端子ドレインリーク電流と Al 組成との関係を調べた。結果を図 3-24 に示す。Si 基板では、Al 組成 0.2、0.26、0.3 のいずれでも耐圧 1200V 以上が得られているが、Al 組成 0.2 の場合はリーク電流の増加が大きく、1250V 位で破壊している。この結果より、リーク電流を抑えるためには、Si 基板では Al 組成を 0.26 以上に設定することが望ましいことが判った。

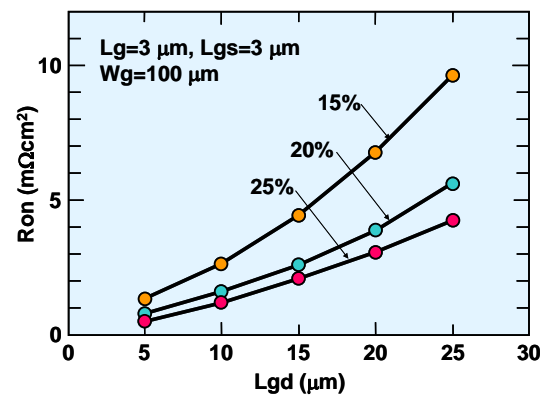
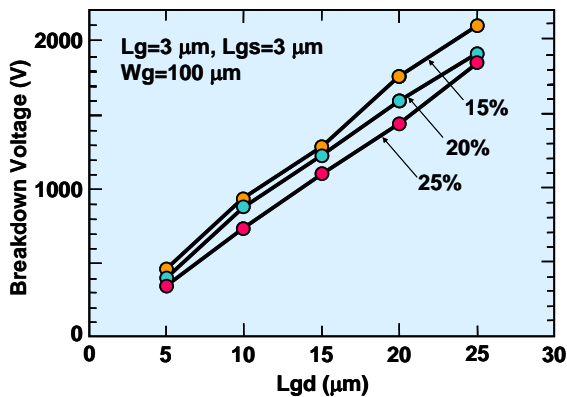


図 3-22 耐圧とオン抵抗の AlGaIn 障壁層 Al 組成依存性

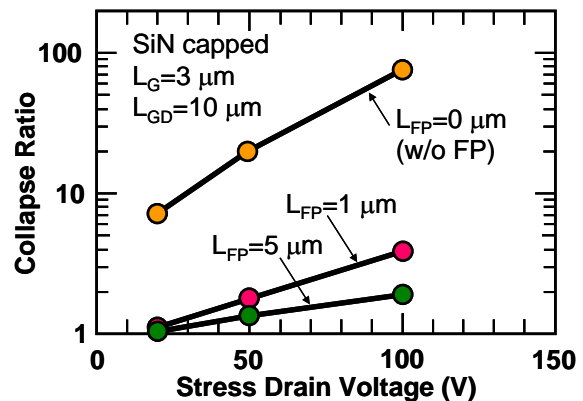
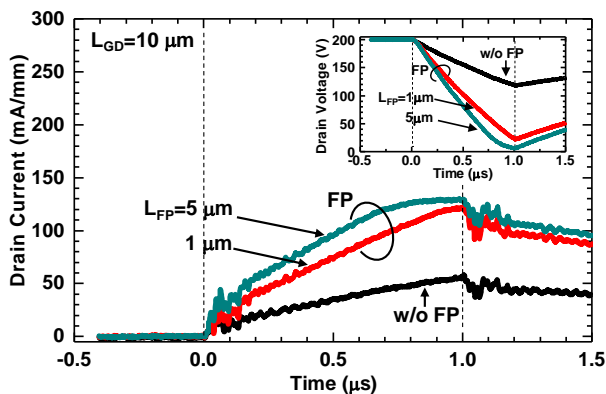


図 3-23 電流コラプスの測定波形とコラプス比のドレイン電圧依存性

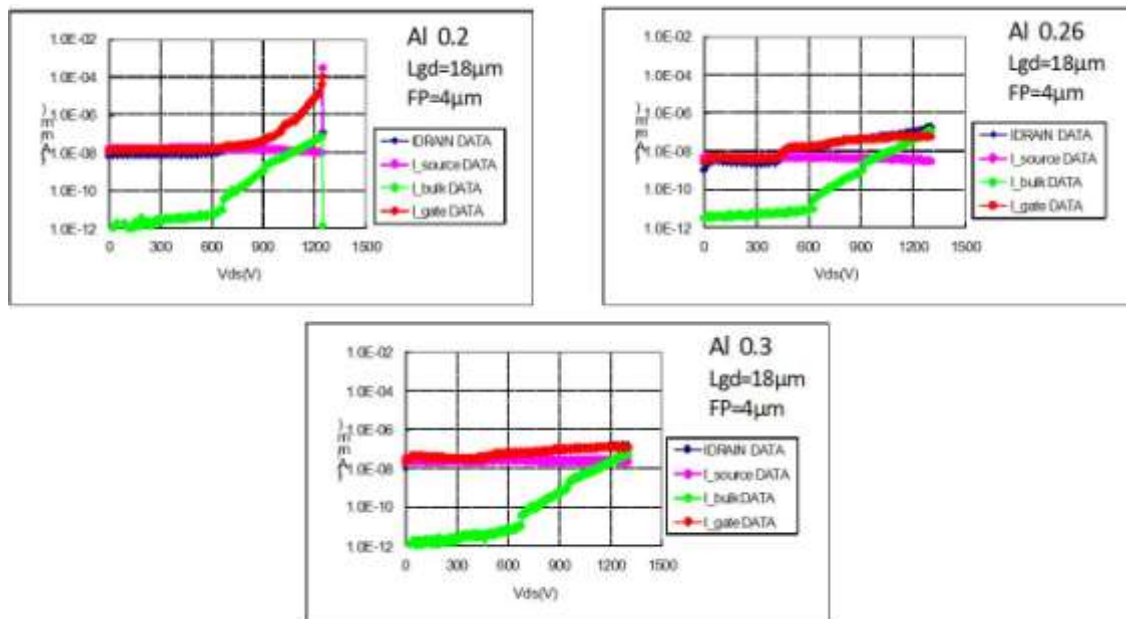


図3-24 AlGaInのAl組成とリーク電流の関係

3) 耐圧 (Vbr)、オン抵抗(Ron)の基板依存性

NaフラックスGaIn, HVPE法GaIn, SiC, Si基板の4種類の基板で試作を行い、VbrとRonを比較した。

(a) NaフラックスGaIn基板

現状のNaフラックス基板では高抵抗が得られないため、GaIn層に炭素(C)をドーピングして高抵抗GaInバッファ層を形成した。図3-25にバッファ層のドーピング濃度と厚みを変えたNaフラックスGaIn基板上AlGaIn/GaIn HEMTの表面モフォロジーを示す。表面モフォロジーは、Si基板上およびSiC基板上のAlGaIn/GaInエピに比べて、全ての基板で表面荒れが生じている。(Cドーピング濃度、層厚) = ($5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 5µm)、($1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 2µm)の試料は表面荒れはあるが、($3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 5µm)、($1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 10µm)の試料に見られるような大きな表面欠陥は見られない。Cドーピング濃度が高く、層厚が厚くなるほど表面荒れが激しくなり、表面欠陥密度が増えている。ただし、図に示した表面荒れが、基板、エピ層どちらに起因しているのかは今のところ不明である。

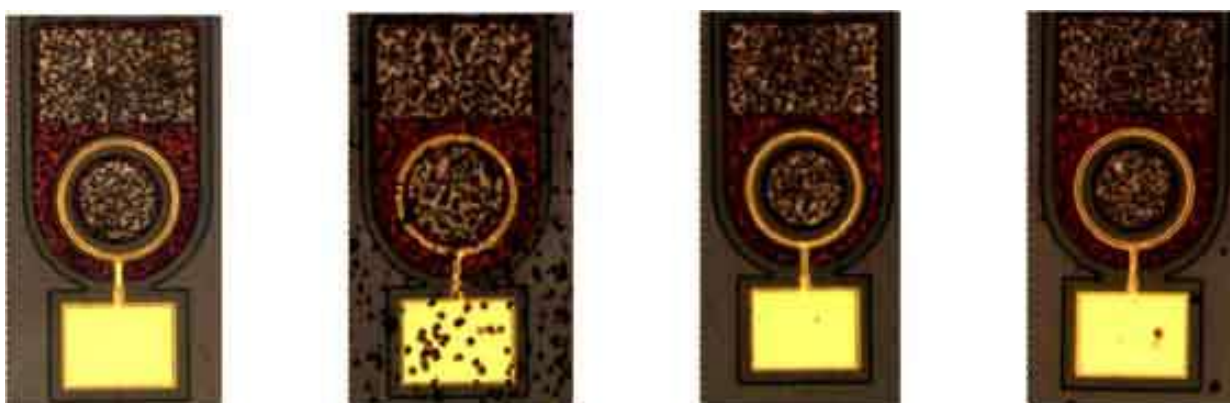


図3-25 NaフラックスGaIn基板上AlGaIn/GaInエピFETの表面モフォロジー
左から順に(Cドーピング濃度、層厚) = ($5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 5µm)、($3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 5µm)、($1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 2µm)、($1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 10µm)である。

Na フラックス基板で試作した AlGaIn/GaN HEMT の V_{br} の結果を図 3-26、3-27 に示す。ここで、図 3-26 は横方向リーク電流、図 3-27 は縦方向リーク電流である。本プロジェクトにおいては、複数の研究機関で試作を行ったが、いずれも V_{br} は 200~300V であった。これは、基板、バッファ層ともにリーク電流が大きいためと考えられる。Na フラックス基板/エピ層は、今後表面モフォロジーの改善に加えてリーク電流の低減、高抵抗化が課題である。

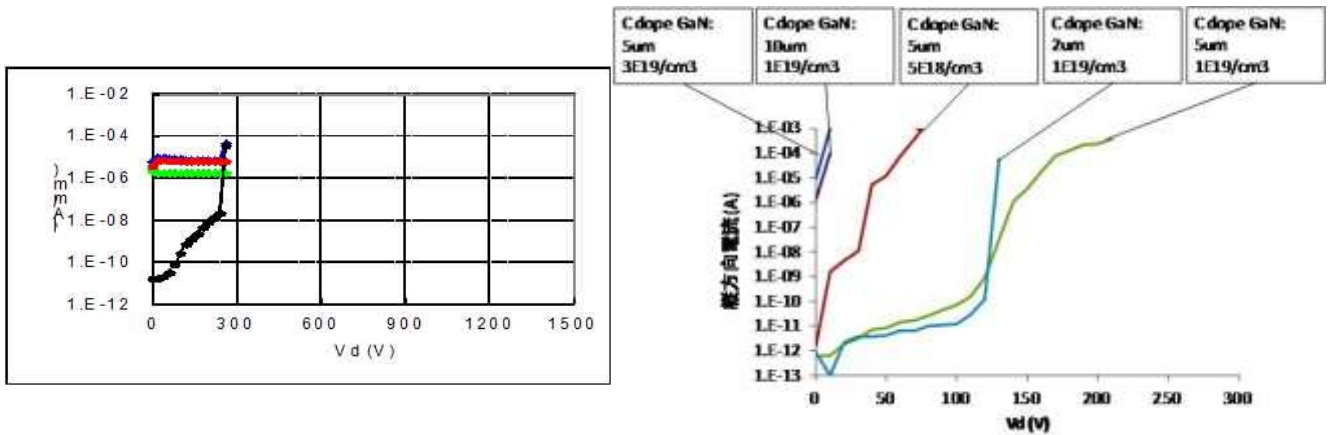


図 3-26 Na フラックス基板 HEMT の耐圧特性 図 3-27 Na フラックス基板 HEMT のリーク電流特性

(b) HVPE GaN 基板

Na フラックス法とは異なる製法の GaN 基板として、HVPE 法 GaN 基板を用いて HEMT を試作した。A 社製と B 社製の 2 種類の HVPE GaN 基板を用い、結果を比較した。ここで、A 社製基板は GaN チャネル層に C をドープし高抵抗としたもので（エピ成長は名古屋大学による）、チャネル層厚は $10\mu\text{m}$ である。一方、B 社製基板は un-doped 高抵抗 GaN チャネル層を形成しており、厚みは $1\mu\text{m}$ 以下である。耐圧特性を図 3-28 と図 3-29 に比較して示す。

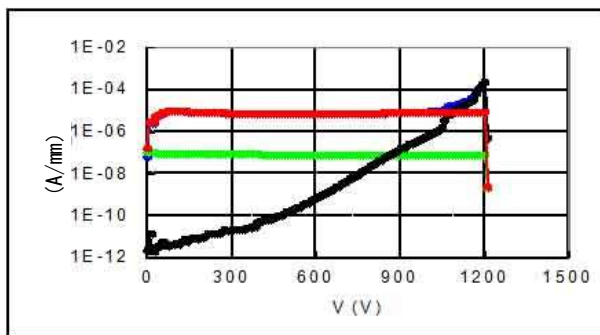


図 3-28 A 社製 HVPE 法 GaN 基板 HEMT の耐圧特性

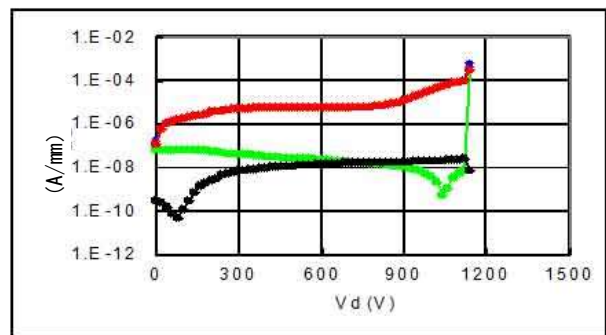


図 3-29 B 社製 HVPE 法 GaN 基板 HEMT の耐圧特性

図に示す通り、A 社製 HVPE 法 GaN 基板では 1200V 以上の V_{br} が、また B 社製 HVPE 法 GaN 基板でも 1100V 程度の値が得られている。このことは(a)項で示した Na フラックス法 GaN 基板の耐圧が低いことは、GaN 基板ということが本質ではなく、GaN 基板でも基板の抵抗を高め、バッファ層のリーク電流を抑えれば十分な耐圧が得られることを示している。Si や SiC 基板では、格子整合の制約から GaN バッファ層の厚さに制約を受けるが、GaN 基板ではバッファ層を厚く出来ることから、GaN 基板は他の基板に比べて優位性があると考えられる。

(c) SiC 基板

本プロジェクトの目的は、GaN 基板の優位性を示すことであるが、Na フラックス法 GaN 基板、HVPE 法 GaN 基板ともに試作に十分な枚数のウエハを入手できなかったため、SiC 基板を主に試作を進めざるを得なかった。SiC 基板で試作した結果は、図 3-20~図 3-23 に示した通りで、Lgd と Al 組成を最適化すれば 1200V 以上の耐圧を得られることが判った。SiC 基板でも所望の耐圧は得られるが、以下の Si 基板と同じく、格子整合の制約から厚い GaN 層をエピ成長できないため、横型デバイスとはともかく、縦型デバイスには適用できないという問題がある。また、SiC 基板の製造技術および関連特許が米国 Cree 社に抑えられている現状を勘案すると、SiC 基板を用いることは GaN HEMT を実用化する上で大きな制約になると思われる。

(c) Si 基板

Si 基板を用いて試作した HEMT の耐圧とオン抵抗の Lgd 依存性を図 3-30、3-31 に示す。図では、SiC 基板の結果も合わせて示す。Si 基板でも、バッファ層厚を最適化すれば 1200V を超える耐圧が得られるが、図 3-31 に示す通り、Si 基板では他基板に比べてオン抵抗が高くなる傾向にある。

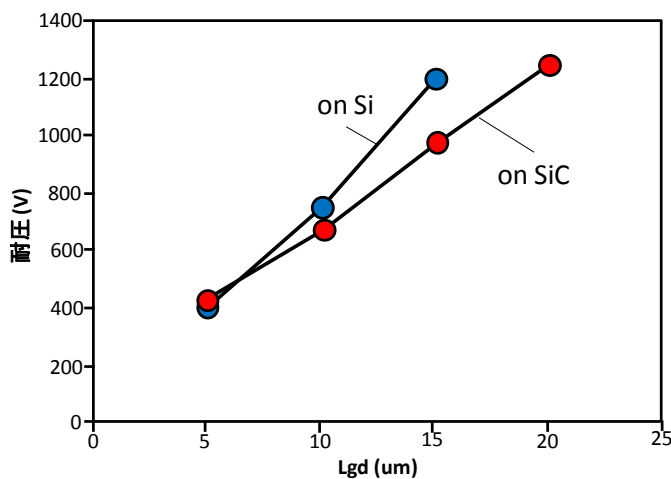


図 3-30 耐圧の Lgd 依存性

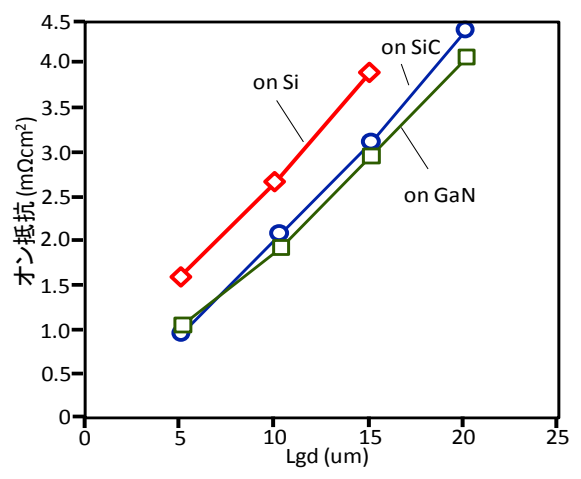


図 3-31 オン抵抗の Lgd 依存性

今回の多くのデバイス試作で得られたドレイン耐圧とオン抵抗の関係を、図 3-32 (a) に示す。また、従来の報告例を参考のため図 3-32 (b) に示す。

図に示すように、SiC、Si、GaN 基板いずれにおいても 1200V 以上の耐圧を得られることが判った。高耐圧、低オン抵抗を両立させるポイントは、Lgd と Al 組成の最適化である。また、重要なポイントとしてバッファ層の低リーク電流&高耐圧性が求められる。この点において、GaN 基板にはまだ技術的な改善が要求される。しかし、GaN 基板には、格子整合という制約を受けることなく、バッファ層を厚く形成することができ、かつ高品質化（高抵抗化）が可能であるため、高い将来性を持っているものと考えられる。実際、図 3-32 (a) に示した通り、GaN 基板上の HEMT 試作において、まだばらつきは大きいものの、ドレイン耐圧 935V、オン抵抗 $1.4 \text{ m} \cdot \text{cm}^2$ という世界最高水準のデータが得られたことは本プロジェクトの成果として特筆できるものである。

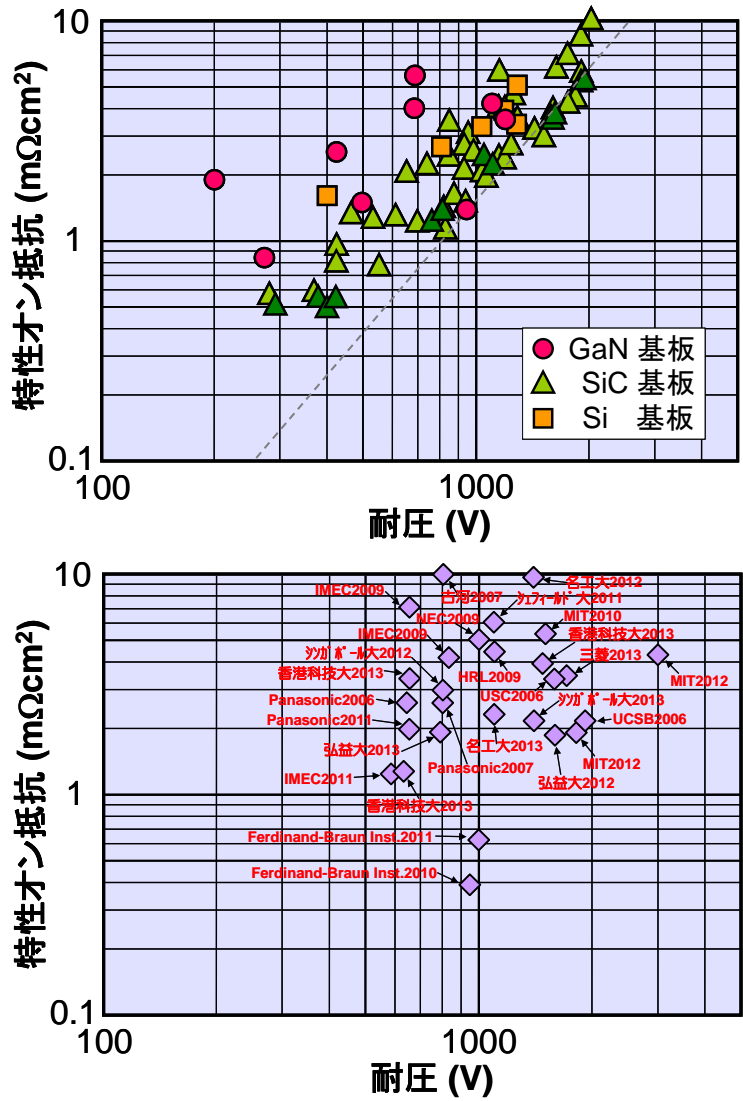


図3-3-2 耐圧とオン抵抗の関係 (a) 本Pjの実験結果, (b) 報告値

2-3-2 縦型電子デバイスの評価

電流をオン・オフして電力を制御する GaN パワーデバイスにおいて、多くは横型構造が採用されてきた。その理由として、横型 GaN-HFET の持つ高い周波数特性が高周波スイッチングに適していることが挙げられる。さらに、横型であれば、結晶に含まれる転位密度が高くても高耐圧が得られるため、基板として Si などが使用でき、低コストデバイスの可能性があることが挙げられる。

一方、数十 kW を超える大電力の制御では、スイッチング周波数はそれほど高くなく (1kHz~30kHz 程度)、横型構造よりむしろ縦型構造のメリットが生きてくる。実際、従来の高電力用 Si パワーデバイスでは、縦型構造が普通である。図3-3-3に横型構造と縦型構造の典型的なデバイス構造の断面図を示す。ここで縦型構造の横型構造に対するメリットをまとめると次のようになる。

- 1) 縦型ではドリフト層の厚さで耐圧を持たせるため、耐圧増加に伴う素子面積の増加が少ない。すなわちチップ面積を小さくできる。
- 2) 電極を基板の表・裏に形成するため、表面電極に大電流を流す必要がなく、配線の取り回し、層間絶縁膜の形成などが簡略化される。

- 3) 現状の大電力用スイッチングデバイス (Si 縦型デバイス) における実装技術を生かすことができる。
- 4) 縦型では、電流が表面を流れないため表面の影響を受けにくく、いわゆる電流コラプスを抑制できる。
- 5) 縦型では高電圧がかかるソース・ドレインが基板を挟んで存在するため、縁面放電が起きにくい。

高耐圧縦型構造の課題は、GaN 基板およびエピタキシャル成長層に含まれる結晶欠陥と耐圧、信頼性の関係が不明なことである。これまで利用できる GaN 基板は気相成長法によるもので、 $\sim 10^6 \text{ cm}^{-2}$ の貫通転位を含んでいる。縦型構造では、素子にかかる電圧の向きが貫通転位と同じ方向であるため、素子耐圧への影響は大きいと予想される。

本プロジェクトで我々は、Na フラックス法で作製した GaN 基板が縦型構造デバイス構造を作製するのに適した品質であるかを評価した。

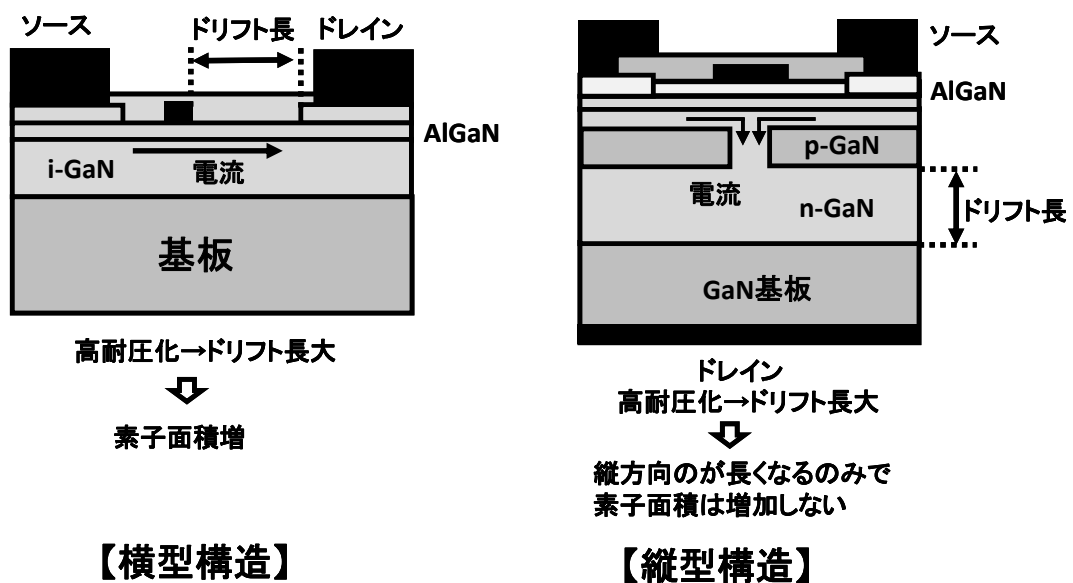
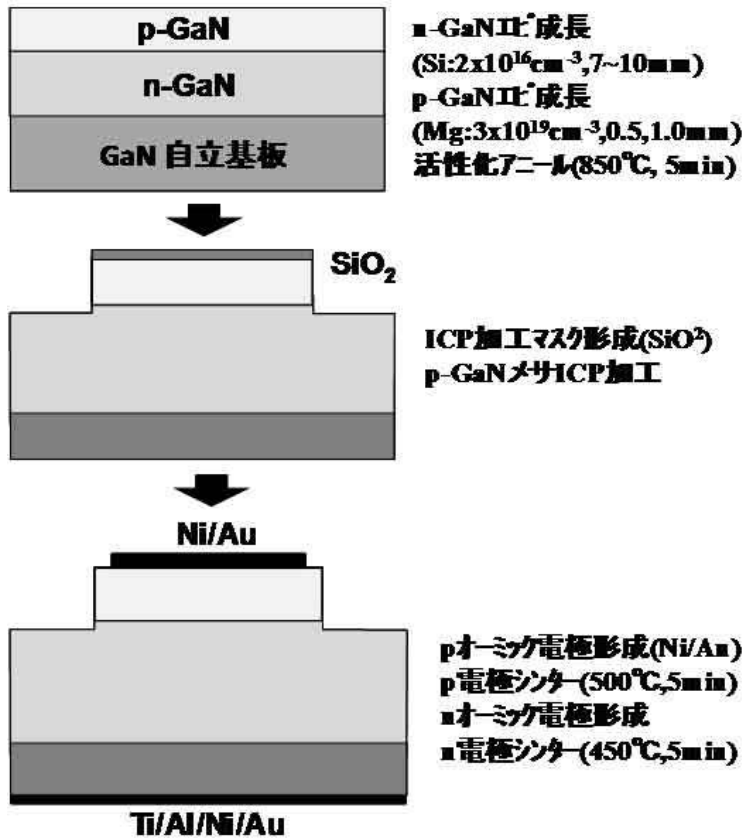


図 3-3-3 横型・縦型 GaN パワーデバイスの構造

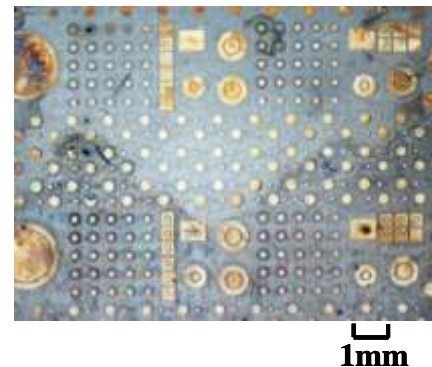
2-3-2-1 Na フラックス法 GaN 基板上 pn ダイオードの試作

縦型構造では、図 3-3-3 に示すようにデバイス構造に pn 接合を有し、オフ時にこの pn 接合に逆バイアスが印加され耐圧を保持する。そこで、縦型デバイス用の基板評価として、最も簡単な構造である pn ダイオードを作製し、その耐圧特性を評価した。

pn ダイオードの作製プロセスを図 3-3-4 (a) に示す。まず GaN 基板上に Si を $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ドープした n-GaN を $7 \sim 10 \mu\text{m}$ 、次に Mg を $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ドープした p-GaN を 0.5 または $1.0 \mu\text{m}$ MOCVD 法を用いて成長した。成長後 p-GaN の活性化のため、窒素中 850°C 、5 分アニールを行った。この処理によりホール濃度は室温で約 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ になる。その後、 SiO_2 をマスクとしてドライエッチングを行い、メサ構造を作製した。メサの深さは、p-GaN 層の厚さの 2 割増し程度とした。最後に電極形成を行い、p 型電極として、Ni/Au (酸素中、 500°C 、5 分シンター)、n 電極として Ti/Al (窒素中、 450°C 、5 分シンター) を形成した。試作したダイオードの表面写真を図 3-3-4 (b) に示す。ダイオードのメサ形状は円形と六角形を作製した。耐圧の評価はアノード、カソード間に逆バイアスを印加して、 $0\text{V} \sim 1000\text{V}$ まで電流-電圧特性を測定して行った。測定は縁面放電を避けるため、試料をフロリナートに浸けて行った。



(a)



(b)

図3-34 pnダイオードの作製プロセス (a) と
試作したダイオードの表面写真(b)

2-3-2-2 結晶欠陥評価技術の開発

GaN 基板に含まれる貫通転位は、刃状転位、螺旋転位、両者の混合転位の3種類である。リーク電流の起源が貫通転位による可能性が高いため、試料に含まれる転位を同定し、どの転位がリークに利くのかを調べる必要がある。そこで、報告されたのエッチピット観察例を調査し、HCl による気相エッチングが有用と考え、確認実験を行った。試料は、サファイア基板上に結晶成長した GaN 結晶を用い、条件の最適化を行なった。その結果、エッチング条件は HCl+N₂ 雰囲気中で、600°C、15分が最適であることが分かった。図3-35にその条件によるエッチピットのSEM写真を示す。大きな六角形は螺旋転位、それより小さな中心に穴のあるピットが混合転位、皿状の細かなピットが刃状転位である。またこの方法で計測した転位密度と、X線ロックアップカーブから計算される転位密度は一致し、この手法で転位の評価が可能であることが確認された。しかし、サファイア上の GaN は非常に

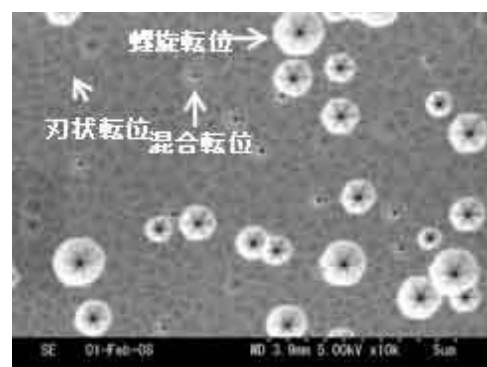


図3-35 サファイア基板上 GaN を
HCl ガスでエッチングした表面

多くの ($\sim 10^9 \text{cm}^{-2}$) 転位を含んでおり、この手法がそのまま、バルク GaN 基板に適用できるかの確認実験を行った。その上で、この手法を GaN 基板上的エピタキシャル成長層に適用し、エッチピットの観察を行った。用いた試料は HVPE 法の GaN 基板上 (転位密度 $\sim 10^6 \text{cm}^{-2}$) に形成した pn ダイオードである。図 3-36 にエッチングした表面写真を示す。写真では六角形状のダイオードの中に、刃状転位 (写真の○印) および混合転位 (写真の→) が観測された。しかし、サファイア基板上ほど明瞭にエッチピットが観測されず、このように転位密度の低い基板には HCl ガスエッチ法は必ずしも有効ではないことが分かった。

そこで、別の手法でエッチピットを顕在化する方法を検討した。過去の文献を調べ、燐酸と硫酸の混合溶液によるエッチングを試みた。試料は Na フラックス法で作製した GaN 基板である。H₂SO₄:H₃PO₄=1:3, 250°C, 120 分エッチングした表面のノマルスキー顕微鏡写真を図 3-37 に示す。写真に見られるように、明瞭なエッチピットが得られた。以下では、この手法でエッチピットの観察を行った。

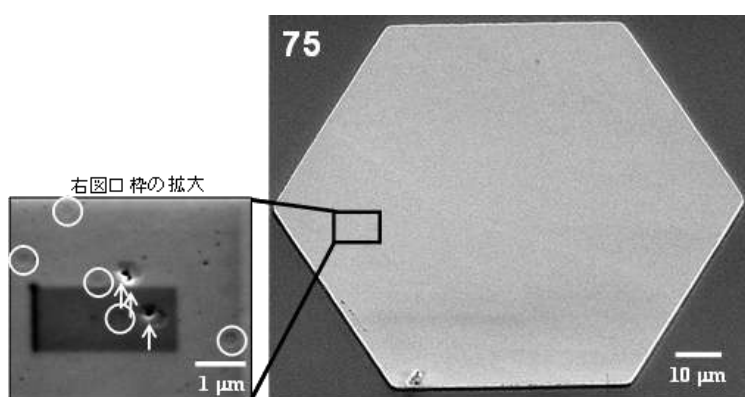


図 3-36 HVPE 法 GaN 基板上 pn ダイオードの HCl エッチング後の表面。
 図中、○は刃状転位、→は混合転位を示す。

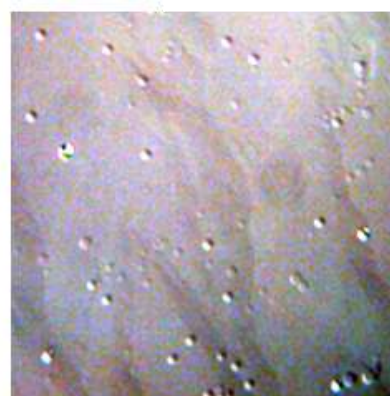


図 3-37 ウエットエッチで顕在化したエッチピット

2-3-2-3 Na フラックス法 GaN 基板上 p-n ダイオードのリーク特性と転位の評価

Na フラックス法で作製した GaN 基板上に pn ダイオードを作製した。作製プロセスは図 3-34 と同様である。試作したダイオードの断面構造を図 3-38 に示す。

評価方法は、ダイオードに逆バイアスを印加し、その時のリーク電流を測定し、さらに、リーク箇所を特定するために、逆バイアスを印加したときリーク電流による発光を観察した。その後、電極を剥離して、H₂SO₄:H₂PO₄=1:3 のエッチング液で、250°C、120 分エッチングしてエッチピットを形成し、リーク箇所と発光点との対応を観察した。

まず、試作したダイオードのリーク特性を図 3-39 に示す。バイアスは 1kV まで印加した。この値は測定器の最大値である。図では典型的な 2 種類の特性を示す。いずれも耐圧は 1kV 以上で、この範囲では破壊していない。サンプル A、B とも構造は同じで、メサの直径は 200μm である。バイアス

1 kV のときリーク電流はそれぞれ、およそ 10^{-4} A, 10^{-6} A で、約二桁の違いがある。また電流密度に直すと 0.32 A/cm², 3.2×10^{-3} A/cm² となり、順方向の電流密度を >500 A/cm² 程度を仮定すると、オン・オフ比は $10^3 \sim 10^5$ となる。一般にオン・オフ比として 10^6 程度は必要とされることから、さらなる低リーク化をする必要がある。

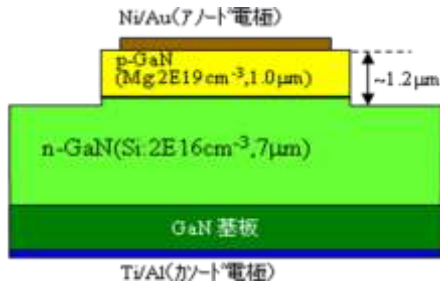


図 3-38 試作したダイオードの構造

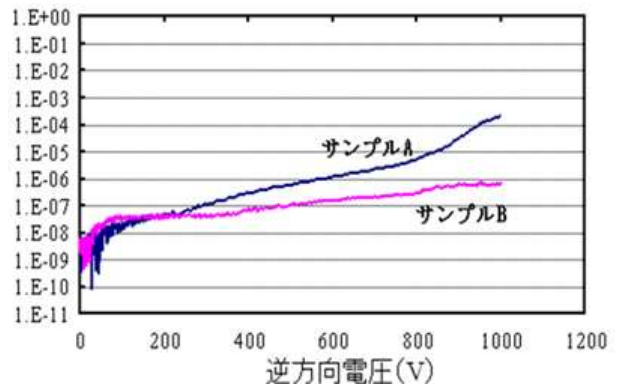


図 3-39 試作ダイオードのリーク特性

次にこのダイオードに対し、リーク点の発光を観察した。基板側（カソード）電極の一部を除去して、基板側から発光を観察した。発光の様子を、発光観察後のエッチピットの様子と対比させて、図 3-40 に示した。サンプル B の強い発光は、測定プローブによる傷が原因で、本質的ではない。サンプル A では 4 点、サンプル B では 2 点発光点が観察される。発光は電流がおよそ 10^{-6} A となる条件で観察した。

これらの発光点とエッチピットとの対応より、いずれのサンプルにおいても、発光点に相当するところにエッチピットは存在しない。すなわちリークはエッチピット以外の点で発生していることが分かった。

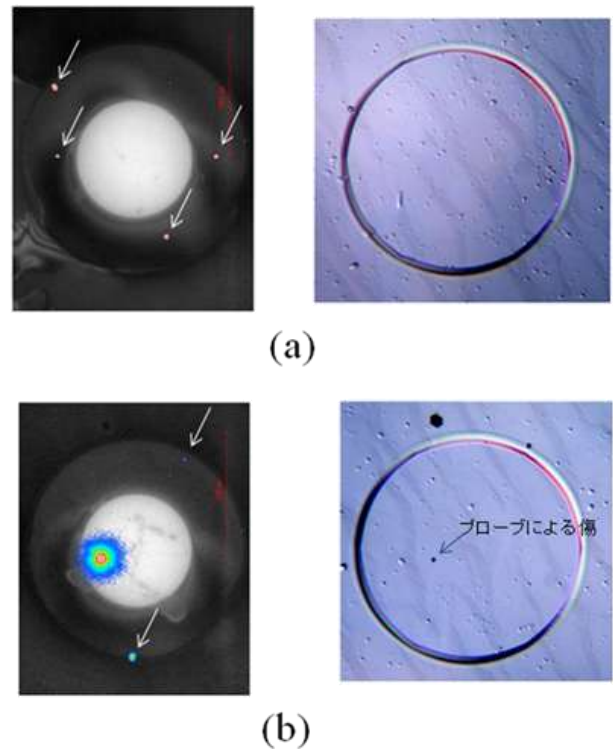


図 3-40 pn ダイオードの発光観察(左) およびエッチピットの写真(右) 両方が対応するように示す。(a) : サンプル A (b) : サンプル B

次にエッチピットが現れた点にどのような転位が存在するかを、断面 TEM を用いて調べた。エッチピットを観察すると、大きく分けて 4 種類の形(大きさ)のエッチピットが存在することから、1~4 とマーキングしたそれぞれのエッチピットに対し、異なる 2 方向からの断面 TEM 観察を行った(図 3-41)。断面 TEM より転位の同定を行った結果、1 は刃状転位と螺旋転位の合わさった混合転位、2 は刃状転位、また、3 は 1 および 2 と比較しても少し大きく、螺旋転位かと予想したが、測定結果は 1 と同じ混合転

位であった。4は比較的大きなエッチピットであるがその直下に転位は観察されなかった。ただし下にインクルージョンと思われる影が観察された。したがって、成長時に何らかのゴミが混入し、その上の結晶性に影響を与えた可能性が考えられる。

このように、エッチピットから分類した転位には螺旋転位が見られなかった。すべてのエッチピットを調べたわけではないので、断定はできないが、Naフラックス法で作製した基板には、純粋な螺旋転位は非常に少ないことが示唆される。また、刃状転位と混合転位の密度は、それぞれ $>10^6\text{cm}^{-2}$ 、 $\sim 2 \times 10^5\text{cm}^{-2}$ と計算される。刃状転位はエッチピットのコントラストが低く計測誤差が大きい。

以上の結果を総合すると下記の結論が導かれる。

- 1) pnダイオードのリーク電流は、貫通転位が原因ではない。
- 2) エピ層に存在する転位は刃状転位および混合転位で螺旋転位は観測されない。
- 3) $10^5 \sim 10^6\text{cm}^{-2}$ の転位密度でも螺旋転位がなければ1kV以上の電圧においてもリークは発生しない。

次に、転位がリークを発生しないことを、別の角度から確認するために、Naフラックス法で作製したGaN基板に、直接縦型ショットキーダイオードを作製し、基板の評価を行った。GaN基板表面にショットキー電極(Ni/Au)、裏面にオーミック電極(Ti/Al)を直接形成し、順方向、逆方向の電気的特性を測定した。測定結果をそれぞれ、図3-42、図3-43に示す。その結果、順方向の特性からショットキーバリア高さ0.91eV、n値1.03と良好な値を得た。また逆方向特性からリーク電流は熱電子電界放出機構を考慮した理論カーブに近い特性を

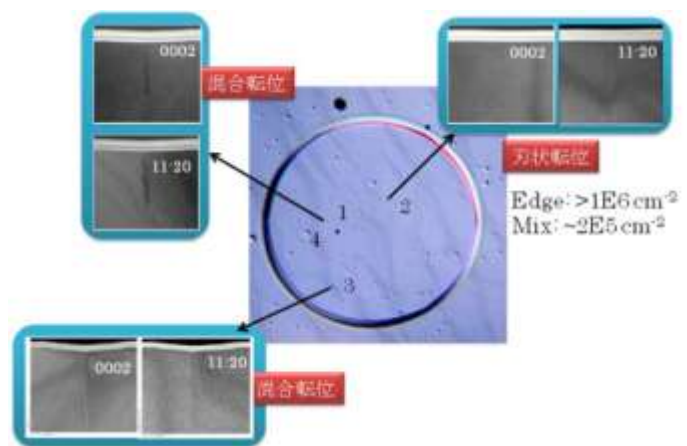


図3-41 エッチピットとその原因となる転位の同定

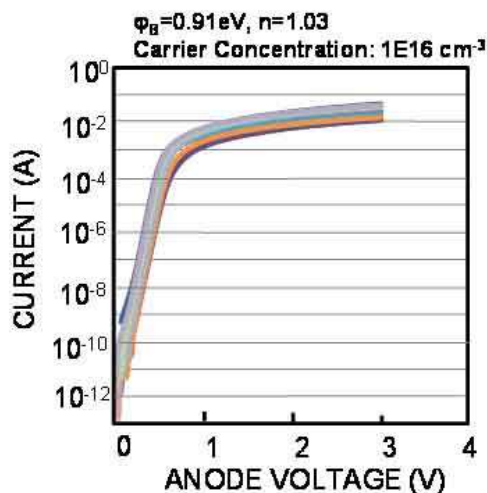


図3-42 ショットキーダイオードの順方向特性

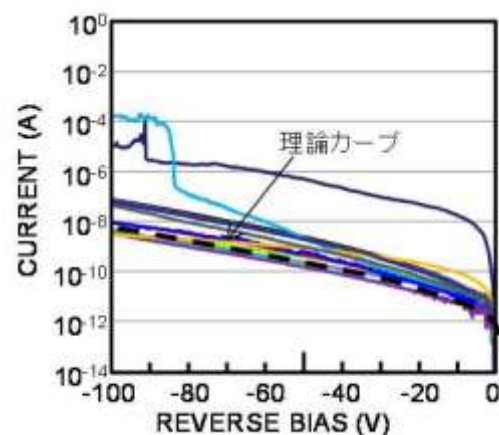


図3-43 ショットキーダイオードの逆方向特性

示すことが確認された。基板に含まれる転位密度は同様に混合転位密度 $\sim 10^5\text{cm}^{-2}$ 、刃状転位密度 $\sim 10^6\text{cm}^{-2}$ であるが、これらの転位はリーク電流の原因とならないことが示唆され、pnダイオードでの結果を支持するデータが得られた。

最後にリーク電流に関する課題について述べる。

まず、前述したように、貫通転位はリーク電流に対し悪影響与えないことは確認されたが、図3-42で観測された発光をともなうリーク電流の起源は明らかになっていない。しかし、他で行ったリーク電流の起源に対する実験で、図3-44の写真に示す現象が得られている。これは、リークによる発光箇所を断面TEMで観察したもので、pn接合界面に何かの影が観察される。すなわち、結晶成長の段階で、pn接合の界面あるいはその近くに、何かのごみ、埃、析出物などが取り込まれると、接合界面が乱されリークの原因となっている可能性が考えられる。これは成長装置、あるいは成長技術の課題で、出来るだけ埃を巻き込まない成長が必要である。

もう一つの課題は、成長界面から発生する六角推状のピットである。図3-45にエピタキシャル成長後に発生したピットの様子を示す。このようなピットは、開発初期に、基板表面に研磨痕などがあると研磨痕に沿って多数現れた。しかし、表面研磨技術が向上して、研磨痕が見られなくなっても、図3-45に示すように少数ではあるが観察される。可能性として、基板表面に付着物がある、あるいは基板に転位などの欠陥があることが考えられ、断面TEM観察を実施した。結果を図3-46に示す。ピットは確かにエピ界面から発生しているのがわかる。しかし、起点となるところに付着物の痕跡、あるいは基板中の欠陥などは見られない。ピットが存在するとそこは電流のリークパスとなり、デバイスは機能しなくなる。したがって、このピットはゼロにする必要があり、今後引き続き原因の解明と対策の検討が必要である。

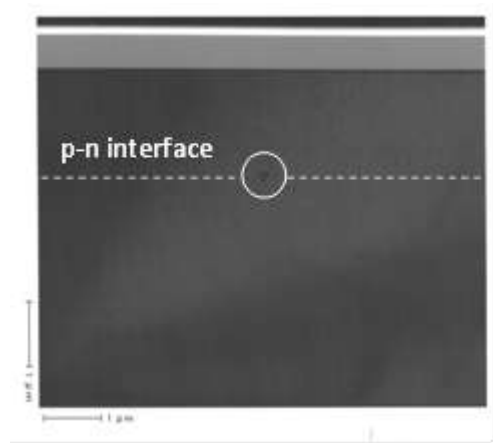


図3-44 エピ成長時にpn接合界面に取り込まれた異物

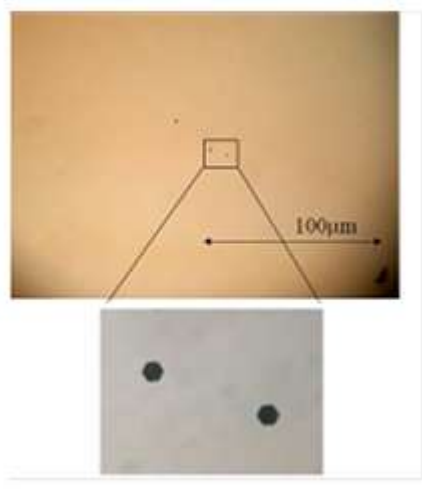


図3-45 エピタキシャル成長後に観察されるピット

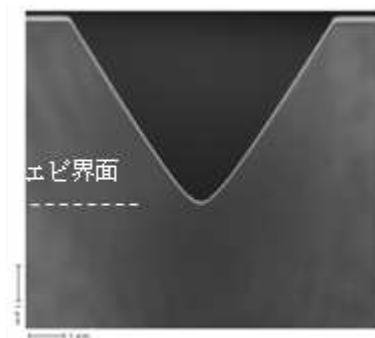


図3-46 ピットの断面TEM像

2-3-2-4 縦型デバイスの低オン抵抗、高耐圧化

以上の基礎的検討を踏まえ、縦型トランジスタ及びショットキーダイオードの試作を行い、高耐圧化、低オン抵抗化への課題の抽出を行った。

試作したトランジスタの断面構造を図3-47に示す。このトランジスタ構造において電子は、ソースからAlGaIn/GaN界面に形成される2次元電子ガス層を流れ、イオン注入(I/I)により形成された高抵抗領域の中央にあるアパーチャを通してn型GaNのドリフト層に流れ込み、ドレイン電極に達する。ゲートはアパーチャを覆うように形成され、電流のオン、オフを行なう。ゲート構造は絶縁ゲート構造で、動作はノーマリオンである。

トランジスタの作製手順は図3-48に示す通りである。まずn-GaN基板上にn-GaNをMOCVD法で成長し、次にデバイス中央に電流通路として作製するアパーチャ部にマスクをして、イオン注入を行った。注入した原子は、III族原子であるAl及びIV族原子であるCの2種類である。ドーズ量は共に $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ で、注入エネルギーはAl: 90keV, C: 60keVでイオン注入を行った。マスクを除去した後、MOCVD成長装置に戻し、GaN, AlGaInを順次成長した。この時ドーピングはしていない。GaN層の厚さは140nm、AlGaIn層のAl組成、厚さはそれぞれ、25%, 15nmとした。再成長の後、ゲート絶縁膜(SiO_2 :70nm)を形成し、さらにソース、ドレインのオーミック電極(Ti/Al)を形成、アニールの後、ゲート電極(Al)を形成した。

このデバイス構造を作製する前に、イオン注入層がどの程度の絶縁能力を持つかを調べた。もともとアパーチャを取り囲む領域はp-GaNが理想的であるが、p型のドーパントとして用いられるMgは同様なプロセスを行うと再成長層側に大量のMgが拡散し、再成長の2DEG層を壊すという性質を持つ。そのため電流阻止層としては用い難く、今回はイオン注入で絶縁層を形成し、電流をブロックする構造とした。図3-49にイオン注入層の電気的特性を調べる試料の構造を示す。ここではアパーチャは形成せず、全面にイオン注入、再成長をして、層構造をトランジスタと同じとした。試料の上下に電極を付け、上下のI-V特性を測定した。また、電極間を分離するためにNのイオン注入を行って、リーク電流を防止した。

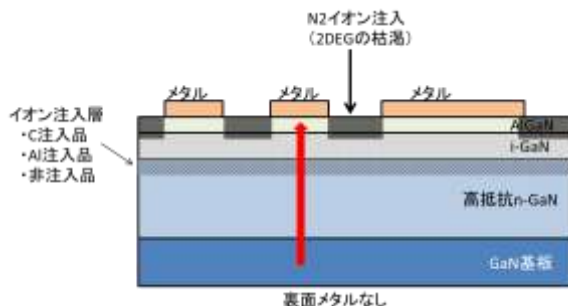


図3-49 イオン注入層の絶縁特性を測定する為の試料構造

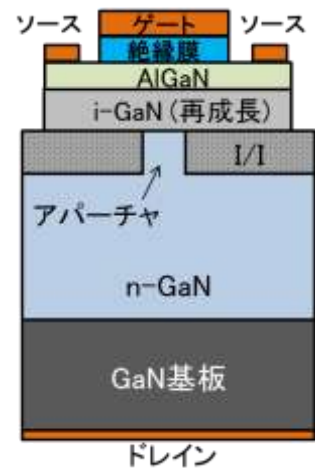
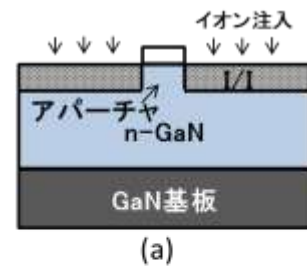
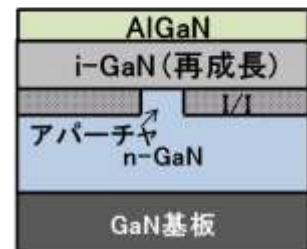


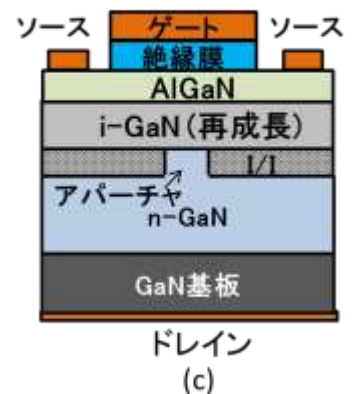
図3-47 試作した縦型トランジスタの構造



(a)



(b)



(c)

図3-48 縦型トランジスタの作製プロセス

最初にイオン注入した原子が再成長時の温度（～1100℃）により、成長部、あるいはドリフト層へ拡散していないか、SIMS を用いて確認した。

図3-50に、Al およびCの深さ方向の濃度分布を示す。Al、C共にイオン注入の濃度分布が、結晶成長後も変化ないことが見て取れる。したがって、再成長層に影響を及ぼすことはなく、Mgとは異なる性質を示している。

図3-51に上部電極に負のバイアスを掛けたときのリーク電流の測定結果を示す。Al注入品は非常にリーク電流が大きく、この特性では、耐圧を確保することが困難である。一方Cのイオン注入品はリーク電流も低く、高耐圧を確保できる可能性を示している。AlとCのイオン注入層の違いを調べるために、断面TEMによって、結晶欠陥の様子を観察した。断面TEMの写真を図3-52に示す。図3-52(a)はAlのイオン注入領域の注入後および再成長後の断面TEM写真である。注入後に多くの欠陥が導入されていることがわかる。また、再成長によって高温処理が掛かったのちも、欠陥の様子はほとんど変わっていない。したがって、注入領域に多くの欠陥が残り、欠陥を介してリーク電流が流れる構造となっていることが予想される。

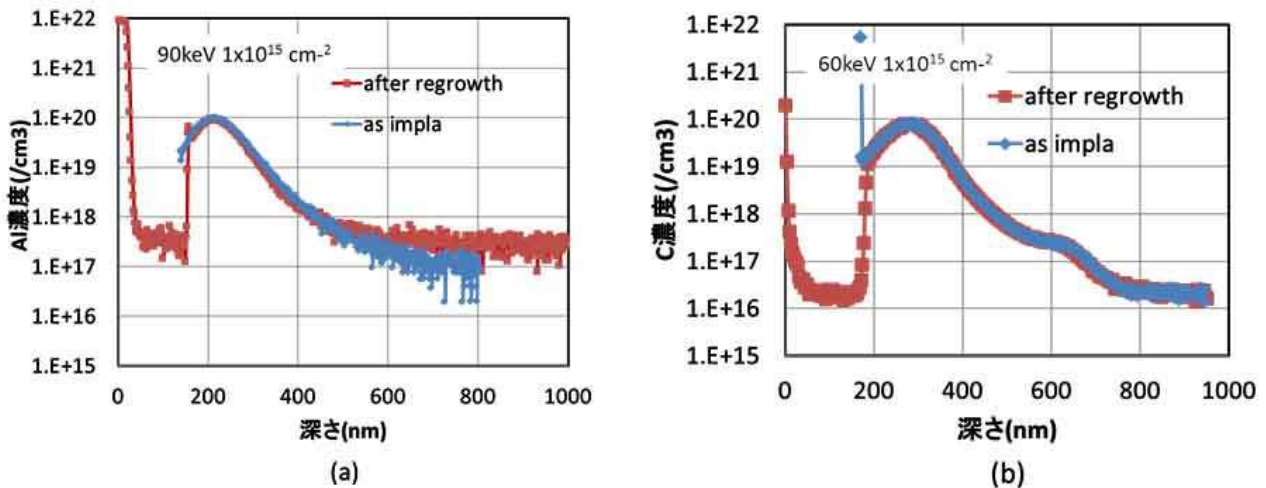


図3-50 イオン注入層の(a) Al、(b) Cの濃度分布。再成長前の分布も合わせて示す。

一方Cの注入層は注入後は欠陥が多く誘起されているが、再成長のアニールが掛かった後の注入領域は、Alと比較して欠陥が減少していることがみられる。Cの場合、欠陥が回復し、Cが深い準位を形成することで、高抵抗化しているものと考えられる。これまでの評価から、電流を制限する絶縁層の形成はCのイオン注入の方が有効であることが分かった。

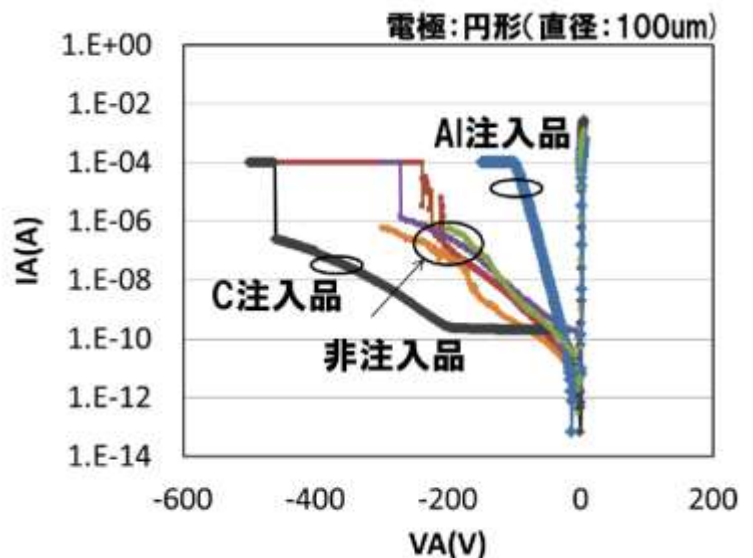


図3-51 イオン注入層のリーク電流特性

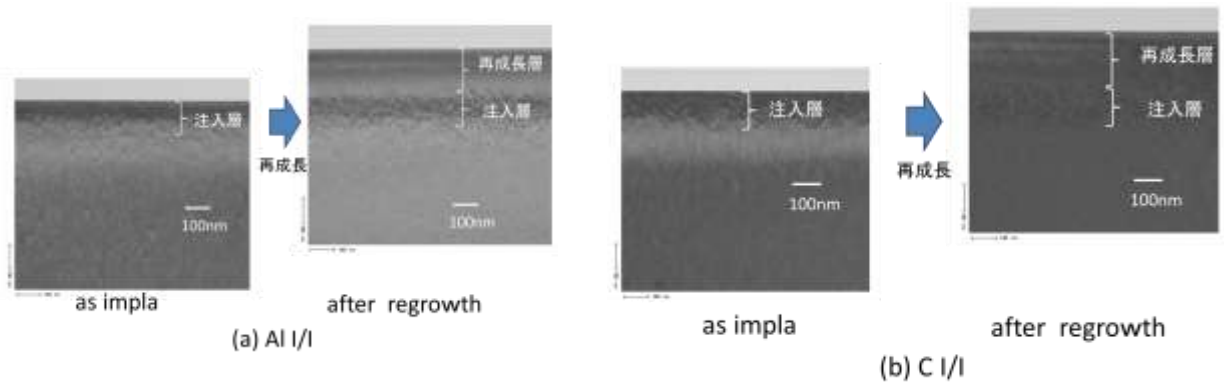


図 3-52 イオン注入層の断面 TEM

次に、図 3-4 8 に示す工程によってトランジスタの試作を行った。イオン注入層は Al, C 両方について実施した。試作したトランジスタの伝達特性を図 3-5 3 に示す。図から、Al, C 両方とも閾値 -20V 付近のトランジスタ動作していることがわかる。しかし、ドレイン電流は当初予測したものと比較して 2~3 桁低く、デバイス構造のどこかに高抵抗な領域が含まれていることを示す特性を示している。その原因を探るためいくつかの検証実験を行った。

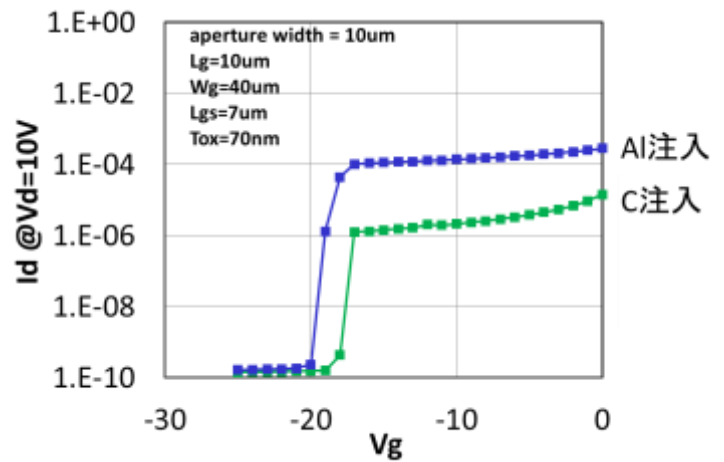


図 3-53 試作トランジスタの伝達特性

まずチャンネル部の特性を調べるために、同一基板上に形成した横型デバイスの特性を調べた。デバイス構造は図 3-5 4 に示す通りであるが、良好な特性を示しており、縦型より二桁以上電流が流れている。またリーク電流も低い値を示している。このことから、再成長部に異常は無いことが分かった。

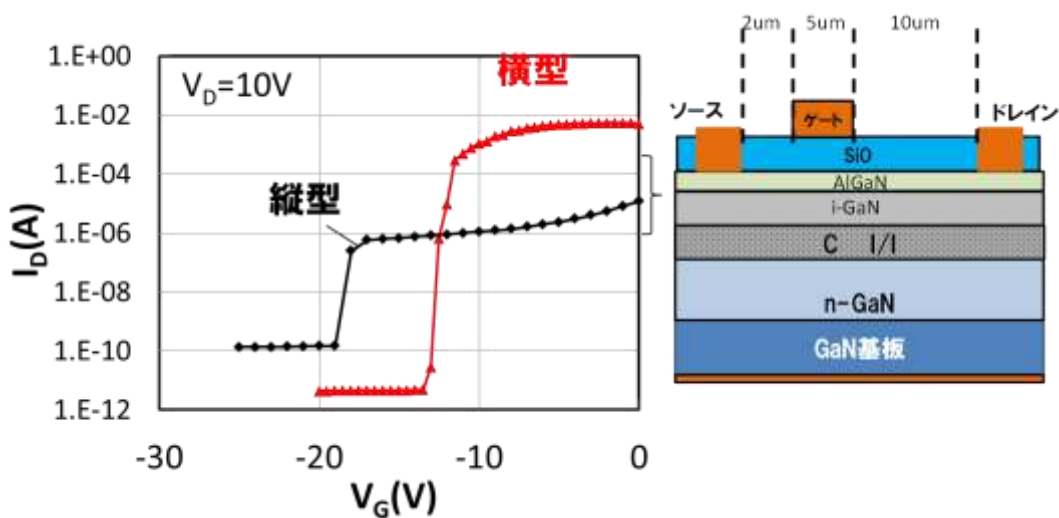


図 3-54 同一基板上に形成された横型デバイスの特性

次に、イオン注入で形成したアパーチャ部周辺の抵抗分布をみるために、SSRM (Scanning Spreading Resistance Microscopy) 法を用いて観察した。図3-55にその結果を示す。中央がアパーチャ部で、その周辺がイオン注入により高抵抗化した領域である。この測定結果から、アパーチャ部には、イオン注入及び再成長により異常が起きている様子は見られない。

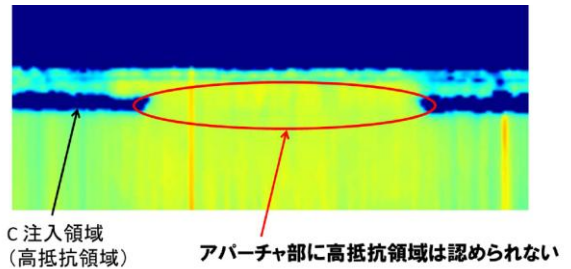


図3-55 アパーチャ周辺の抵抗の分布。色が青色ほど高抵抗

基板上にはショットキーダイオードも形成されており、ショットキーダイオード部を使ってドリフト層の評価を行うことができる。そのショットキーダイオードのI-V特性を測定すると、非常に高抵抗であることが分かり、ドリフト層が高抵抗化していることが判明した。そこで、ドリフト領域に含まれるドーパントであるSiの濃度分布をSIMSで調べた。結晶成長時のドーピング量の設定は $2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ であるが、ほぼ設定どおりのSiが含まれていることが分かった(図3-56)。したがってそのままであれば、高抵抗にはならないはずである。そこで、他の不純物としてSiを補償する可能性のあるCの濃度分布も調べた。その結果、図3-56に示すように、ほぼ全域に渡りSiと同量のCが含まれていることが分かった。このことから、トランジスタ高抵抗化の原因は、MOCVD法によるn-GaN層の結晶成長中に、Siと同時に混入したCが、ドナーとなるSiを補償したために起きたと推測される。Cの混入はGa原料のTMGからと考えられる。今回は、時間の関係から再試作はできなかったが、高耐圧化には、 10^{15}cm^{-3} 台の低濃度のn型ドリフト層が必要で、低ドーピングのn-GaNの成長技術が今後の課題となることを示唆している。

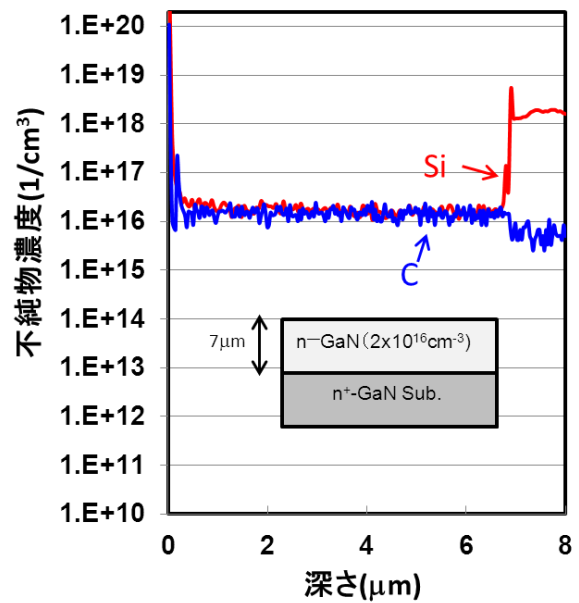


図3-56 ドリフト層に含まれる不純物の分布

パワーデバイスはトランジスタと共に、ショットキーダイオードも重要なデバイスである。応答速度の速いスイッチングを高効率に行うには、低抵抗、高耐圧のショットキーダイオードの開発が必須となる。そこで、GaN基板上のショットキーダイオードを試作し、高耐圧化、低抵抗化への課題を探った。ショットキーダイオードは構造が簡単であるが、その分、表面、コンタクトなどの影響も受けやすい。また耐圧に関しても、逆方向のリーク電流が大きくなりやすく、高性能なショットキーダイオードの作製はトランジスタに劣らず課題がある。

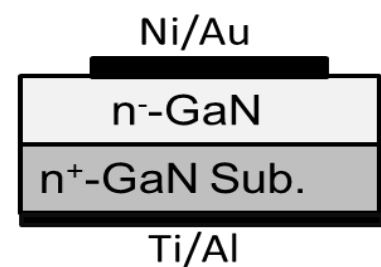


図3-57 ショットキーダイオードの構造

まず最も単純なショットキーダイオードを試作してその特性を評価した。2-3-2-3で示したように、螺旋転位を含まない基板は、高耐圧化が可能であることが分かったので、図3-57に示す、単純なショットキーダイオードを作製し耐圧を調べた。耐圧の測定は、ダイオードをフロンブリンオイルに浸して行った。結果を図3-58に示す。電極周辺の電界緩和構造を形成していないにもかかわらず、750V以上の耐圧が得られた。これは、電極周辺から空乏層が横方向に広が

り、電界が緩和されたためと考えられる。また、リーク電流特性も、理論から計算される値とよく一致し、高耐圧に耐える良好な結晶ができていることがわかる。しかし、終端構造が無いと、1kV以上の耐圧は困難であるため、終端構造を形成したショットキーダイオードを作製した。通常、終端構造は、電極端部にp型領域を形成して作製する。この構造では、逆バイアス印加時にp領域から空乏層が広がりリーク電流を低減するとともに、耐圧を保持することができる。しかし、GaNの場合、p型のイオン注入は困難で、このタイプの終端構造は簡単ではない。そこで、電極周辺をメサエッチし、メサ型のダイオードを形成して終端構造とした。図3-59にその構造を示す。試作したダイオードの順方向特性を図3-60に示す。この特性から、規格化オン抵抗は約 $6\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ と計算される。この値は計算値に比べ一桁以上高く、改良の余地を残している。最大の原因はショットキー電極の厚さが薄く、抵抗が高いためと考えている。一方耐圧特性を図3-61に示すが、耐圧1.2kVが達成されている。これは終端構造により、電極周辺の電界緩和が起きているためと考えられる。

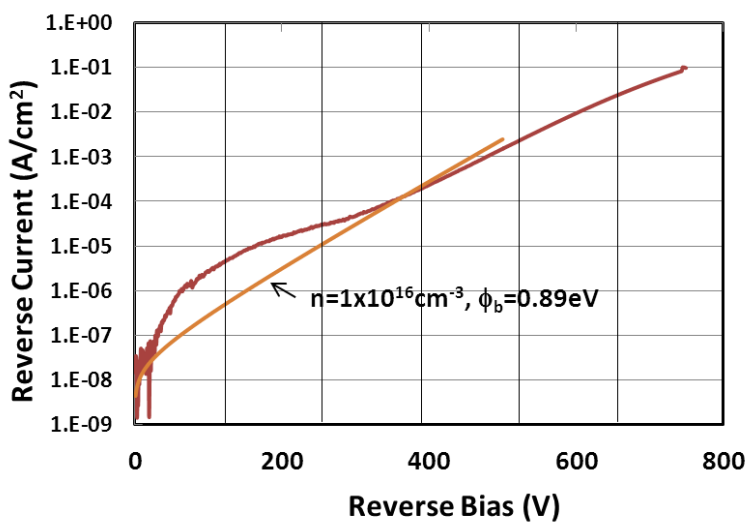


図3-58 ショットキーダイオードのリーク・耐圧特性

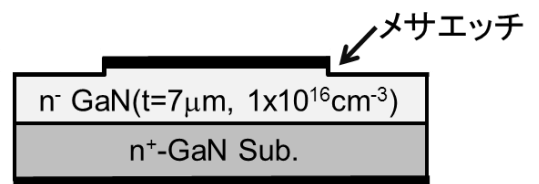


図3-59 メサ構造を持つショットキーダイオード

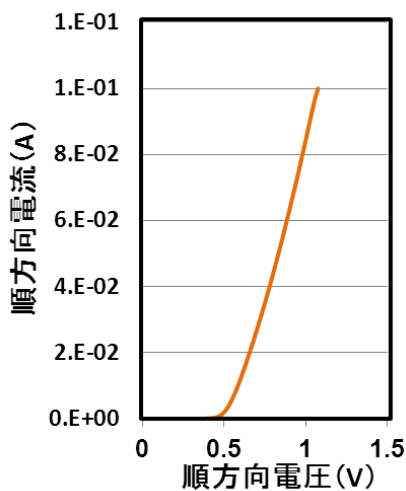


図3-60 ショットキーダイオードの純方向特性

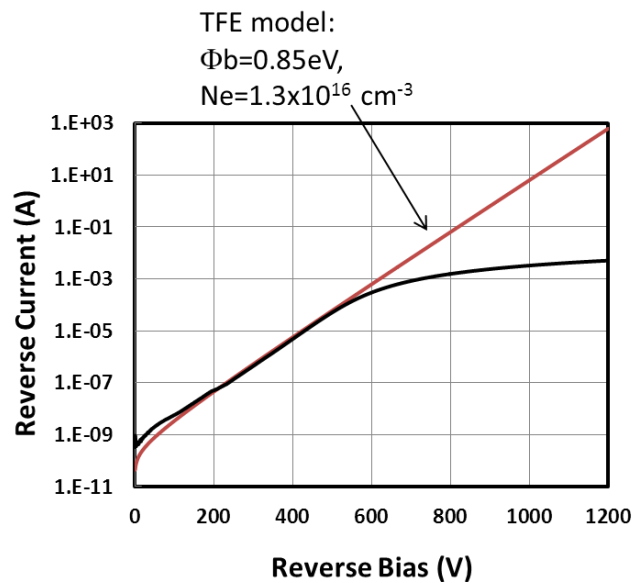


図3-61 ショットキーダイオードの耐圧特性

以上のように、GaN 基板上に縦型トランジスタ、ショットキーダイオードを試作し、高耐圧化の可能性を実証するとともに、プロセス上の課題を明らかにすることができた。縦型トランジスタに関しては、最適なデバイス構造の考案と作製プロセスの課題が残っている。特にエピに関しては、 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 以下のドーピングを安定にコントロールできる成長技術の確立が急務である。また、エピ成長時発生するピットの課題は解決が必須のものであり、原因の特定、対策が必要である。ショットキーダイオードは、1.2 kV の動作を達成したが、オン抵抗の観点からは性能が不十分で、さらに低抵抗化が必要である。本試作においては、ショットキー電極の厚さが薄く、電極の抵抗が大きく支配している。厚膜電極の形成とその加工の課題、また、耐圧は出てもリーク電流が大きいため、ドリフト層の低濃度化、p-GaN を用いた終端構造の最適化などの課題を解決してゆく必要がある。

2-3-3 窒化物単結晶基板上デバイスの優位性確認

2-3-3-1 横型 HEMT 構造のデバイスエピタキシャル層の評価技術の確立

水銀プローブ装置を用い GaN エピタキシャルウエハの HEMT 構造を非破壊評価する手法を確立した。GaN HEMT ウエハの CV 特性からキャリアプロファイル (図 3-6 2) を算出し、閾値電圧、2次元電子ガス (2DEG) 層のピークキャリア濃度、バリア層厚など HEMT の基本特性に関する情報が得られることを確認した。また、水銀プローブ装置に IV 測定を追加し HEMT のリーク特性を評価する手法を確立した。

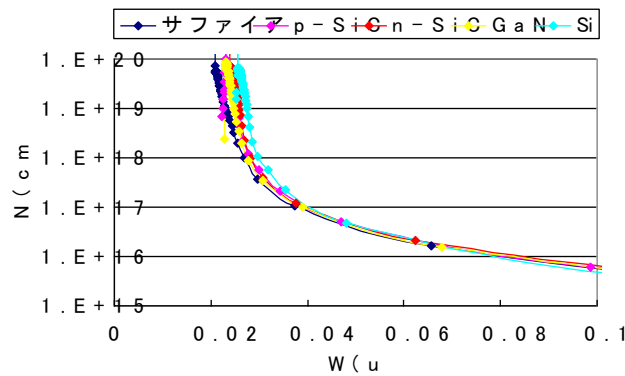


図 3-6 2. 各種基板のエピタキシャルウエハのキャリアプロファイル

2-3-3-2 横型 HEMT 構造のデバイスプロセスの確立

横型 HEMT 構造デバイスの作製プロセスを確立した。TEG マスクには、小素子を中心に設計し、一部熱抵抗の測定を行うための大型デバイスを入れた。また、福井大学の評価結果と比較できるように、同大学と同等の TEG を含めた (表 3-2)。プロセスは、オーミックコンタクト形成、パッシベーション形成、ショットキー形成パッド部開口、素子分離からなり、フィールドプレート構造の作製ができるようにした。

表 3-2. TEG マスクの構成

Name	素子形状	総ゲート幅	パラメータ	備考
r-SBD	円形	150 μm	0-S 間距離、FP 条件	福井大 ref
r-FET	円形	150 μm	G-D 間距離、G 長、FP 条件、パッシベーション	福井大 ref
i-FET	ライン	100 μm	G-D 間距離、FP 有無、パッシベーション	福井大 ref
FET	櫛歯	3mm	G-D 間距離、G 長、FP 条件、パッシベーション	標準素子
SBD	櫛歯	3mm	0-S 間距離、FP 条件	標準素子
FET	櫛歯	6mm、10mm	G-D 間距離	
SBD	櫛歯	6mm、10mm	0-S 間距離	

2-3-3-3 各種基板上への HEMT 構造のエピ成長およびデバイス試作

GaN 基板、及び SiC 等多種基板上に自社でのエピタキシャル成長により、GaN HEMT 構造のエピウエハの作製を行い、デバイス試作を実施した (表 3-3 参照)。

デバイス特性の比較をしたところ、n 型 GaN 基板を用いた HEMT において、Si 基板上の HEMT に比べて、高い順方向特性が得られる一方で、耐圧、特に基板を経由する縦方向の耐圧が低いという問題が確認された。バッファ層に Mg をドーピングすることで耐圧向上する傾向が見られた (図 3-6 3)。

表 3-3. 各種基板上へのデバイス試作と評価

基板	基板径 (インチ)	バッファ	FWHM(002) (arcsec)	Rs (Ω/□)	Rc (Ωmm)
n-GaN	φ 2	HT-AlN, i-GaN, Mg ドープ	95~182	380~796	0.7~1.99
Si	φ 5	多層	409	386~394	0.8~0.94
n-SiC	φ 2	HT-AlN	189~236	386~454	0.58~0.86
SI-SiC	φ 2	HT-AlN	221	368~388	0.69~0.86
サファイア	φ 2	LT-AlN	697	866~124 6	1.38~2.13

i-AlGaIn25nm
i-GaN:3um
buffer
基板

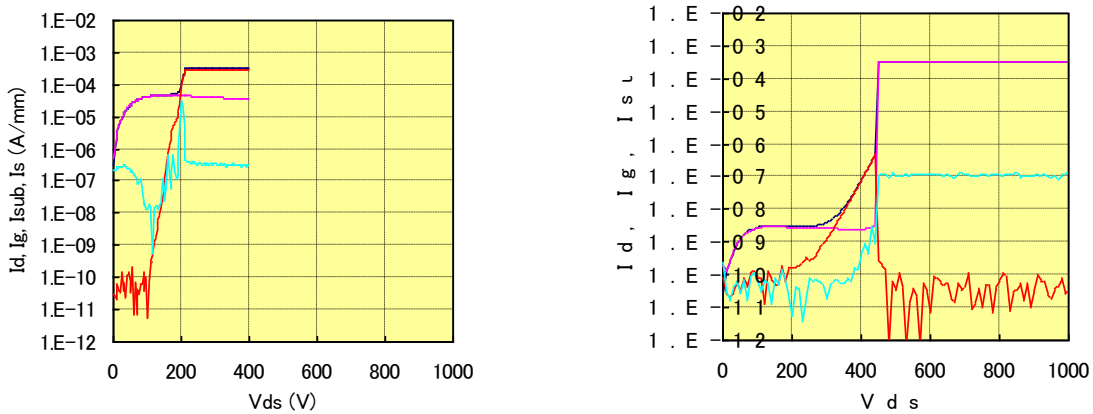


図 3-63. バッファ層の違いによる n-GaN FET のリーク電流 (左: i-GaN、右: Mg ドープ)

2-3-3-4 熱抵抗測定の見直し

GaN 基板、SiC 基板、サファイア基板、及び Si 基板上に作製したデバイスの熱抵抗を測定した。まず、恒温槽内でパルス測定で I-V の温度特性を測定し、電流とジャンクション温度の関係を求めた。次に大型ヒートシンクに試作デバイスを取り付け、DC 電流により自己発熱が安定した時点の I-V を先の温度特性に外挿し、ジャンクション温度を求め、下式により熱抵抗を求めた。

$$\text{熱抵抗} = (\Delta T/W) = (\text{ジャンクション温度} - \text{室温}) / (\text{引加電圧} \times \text{引加電流})$$

表 3-4 にまとめた結果からわかるように、熱抵抗は熱伝導率を反映し

$$\text{SiC} < \text{GaN} < \text{Si(薄)} < \text{Si(厚)} < \text{サファイア}$$

の順番になった。

表 3-4. 各種基板の熱抵抗の測定結果

基板	熱伝導率 (W/cm ² °C)	厚さ (μm)	熱抵抗測定結果 °C/W
GaN	1.3~2	320	2.75~2.95
SiC	4.9	400	1.95~2.07
サファイア	0.42	400	8.2~9.13
Si (薄)	1.3	320	3.25~3.79
Si (厚)	1.3	400	4.57~4.69

2-3-3-5 Na フラックス GaN 基板上 FET の作製と評価

1) Mg ドープによる縦方向耐圧改善

Na フラックス GaN 基板上に名古屋大学でエピタキシャル成長した AlGaIn/GaN エピ基板で FET を作製し、I-V 特性や耐圧特性の基本特性を評価した (図 3-6 4)。耐圧向上のため、バッファ層には Mg や C (後述) をドープした。最大ドレイン電流は 320mA/mm、耐圧は 400V 以上であった。縦方向耐圧は 800V 以上と良好であったが (図 3-6 5)、電流コラプスは 300V 印加で、初期値に対し抵抗増加が 4 倍と大きかった。Na フラックス GaN 基板以外についても試作を行い、比較評価結果のまとめを表 3-5 に示した。

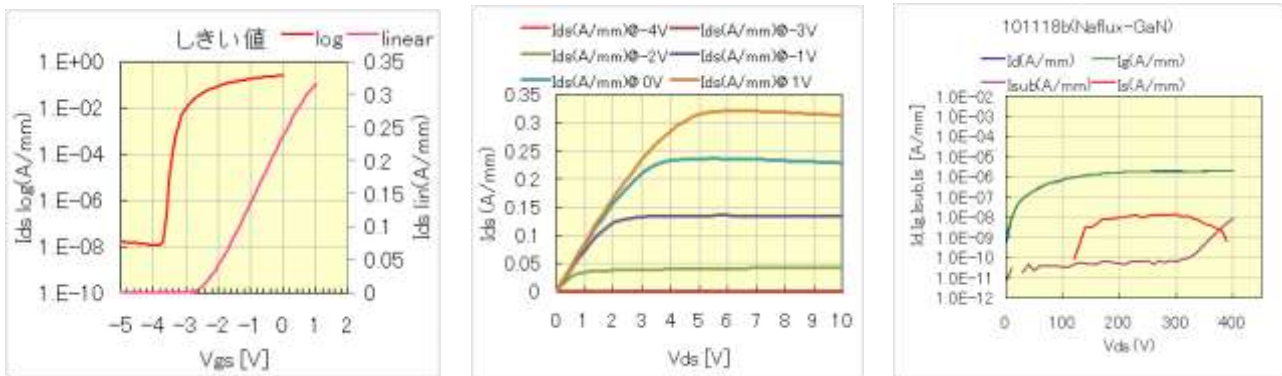


図 3-6 4. Na フラックス GaN 基板 (④101118b) の FET 特性

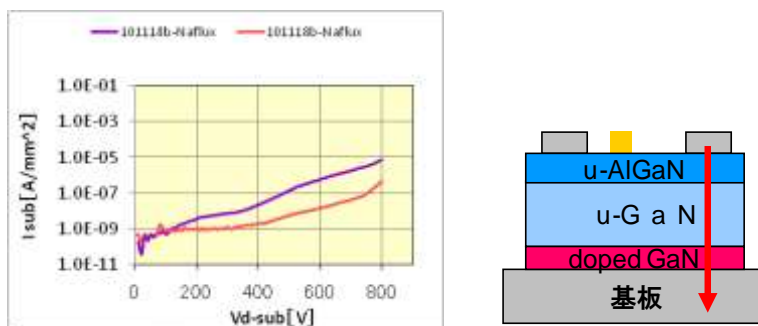


図 3-6 5. Na フラックス GaN 基板 (④101118b) の縦方向耐圧

表 3-5. デバイス試作結果のまとめ

No	エビ ID	基板	構造	オーミック	耐圧	コラプス
Ref		Si	AlGaIn/GaN(6 μm)			
	101115b	HVPE (市販 GaN)	AlGaIn/GaN(8 μm)/GaN:Mgドープ(2 μm)			
	V5047	HVPE (市販 GaN)	AlGaIn/GaN(8 μm)/GaN:Mgドープ(2 μm)		×	
	V5027	HVPE (市販 GaN)	AlGaIn/GaN(8 μm)/GaN:Cドープ(2 μm)	×	試作中止	
	101118b	Na フラックス	AlGaIn/GaN(8 μm)/GaN:Mgドープ(2 μm)			

2) Cドープによる縦方向耐圧改善

Na フラックス GaN 基板上に名古屋大学でエピタキシャル成長した AlGaIn/GaN エピ基板において、縦方向の耐圧向上のため、バッファ層にアセチレン (C2H2) により C をドープした構造においても、FET を作製して I-V 特性や耐圧特性の基本特性を評価した。耐圧は 600V 以上と良好であった。縦方向耐圧は今までの最高の 1000V 以上が得られた (図 3-66)。これはバッファ層を C ドープで高抵抗化できたこと、及び 12 μm と厚膜化できたことによる。GaN 基板は、GaN エピタキシャル膜との格子不整合や熱膨張係数の違いの問題がなく、厚膜化への大きなメリットになる。今回の試作では、エピ成長治具の不具合でエピタキシャルウエハ端部に凸部 (40 μm 位) ができ、レジストのパターニング不良で実機動作の大チップを得ることが出来なかった。

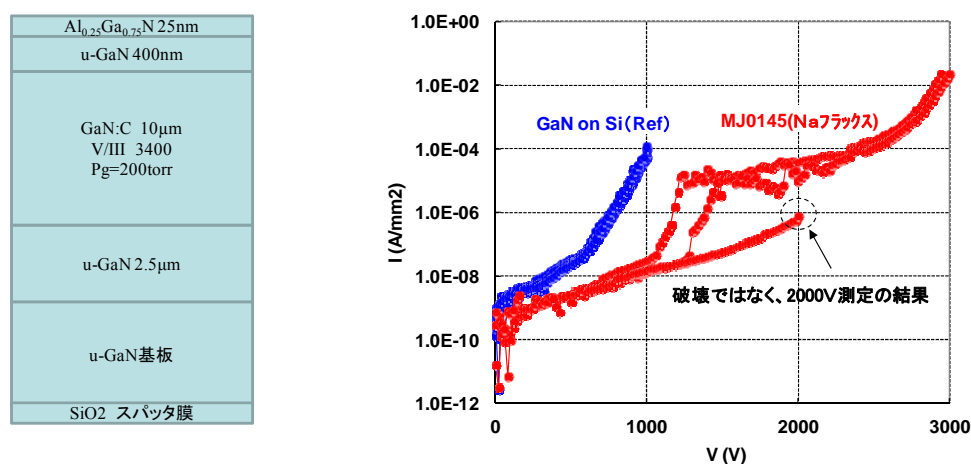


図 3-66. 試作デバイスのエピ構造と縦方向耐圧

2-3-3-6 Na フラックス GaN 基板上 FET を用いた実機動作

1) LED ドライバ

H21 年度には、GaN 基板上にショットキーバリアダイオード (SBD) を作製し、LED ドライバによる実機動作検証を実施した。図 3-67 に試作した SBD のリカバリ特性を、図 3-68 には LED ドライバ駆動時の電力変換効率を、Si FRD の場合と比較して示した。GaN を用いた SBD のリカバリの向上による電力変換効率の向上を確認した。また、20 時間超の実機通電で、大きな初期特性の劣化がないことを確認した。図 3-69 に作製した LED ドライバの回路図および写真を示した。nanotech 2010(第 9 回・国際ナノテクノロジー総展)にて展示および実機デモを行った。

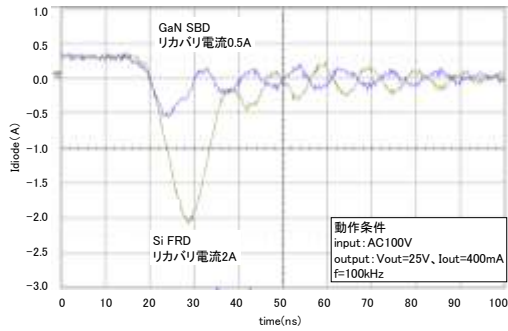


図 3-67. 試作 SBD のリカバリ特性

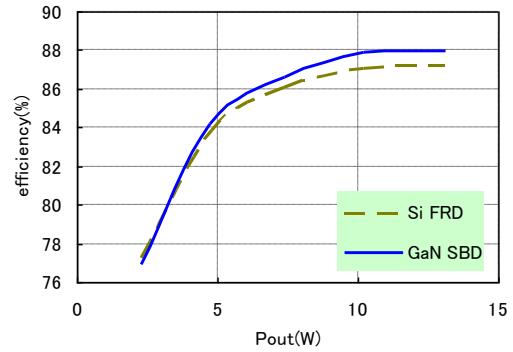


図 3-68. LED ドライバの電力変換効率の比較

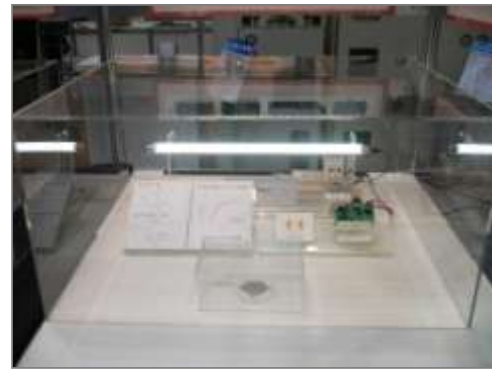
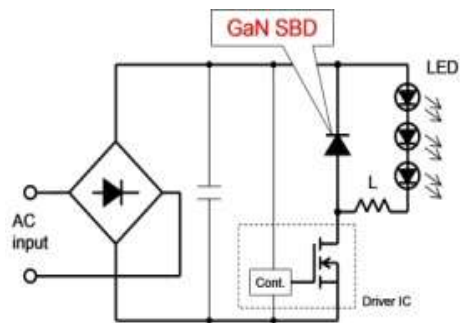


図. 3-69. GaN 基板上 SBD を利用した LED ドライバによる LED 点灯デモ

2) GaN インバータ

H22 年度には、Na フラックス GaN 基板上の FET を用いて直流-交流変換回路（インバータ）を作製し、三相誘導モータの駆動を試みた。21 時間超の実機通電で劣化なく運転できることを実証した。図 3-70 に作製したインバータ、および三相誘導モータ駆動の写真とインバータ動作時の出力波形を示した。nanotech 2011(第 10 回・国際ナノテクノロジー総合展)にて展示および駆動のデモを行った。

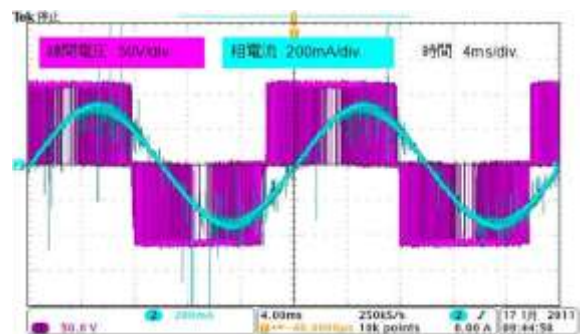


図 3-70. GaN 基板上 FET を利用したインバータ回路による三相誘導モータ駆動デモとインバータ動作時の出力波形

3) GaN デジタルアンプ

H23 年度には、GaN 基板上 FET を用いて GaN デジタルアンプを作製し、音楽を流す実機動作を行った。21 時間超の実機通電で劣化なく運転できることを実証した。図 3-7 1 に作製したデジタルアンプの回路図および写真を示した。nanotech 2012(第 1 1 回・国際ナノテクノロジー総合展)にて展示および実機デモを行った。

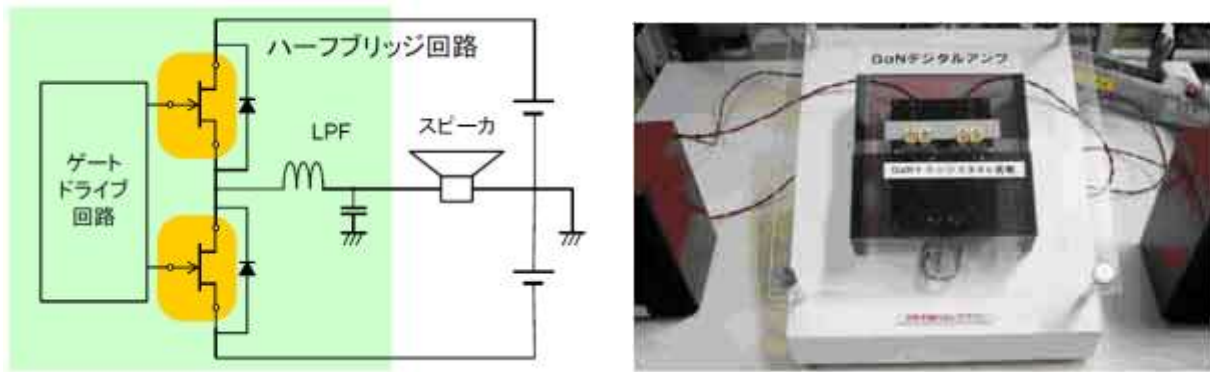


図 3-7 1. GaN 基板上 FET を利用したデジタルアンプ

4) GaN インバータ

H24 年度には、GaN 基板上の FET、及び GaN 基板上 SBD を用いて直流-交流変換回路（インバータ）を作製し、三相誘導モータの駆動を行った。H22 年度のときは、FET のみであったが、今回は SBD も搭載した。図 3-7 2 に作製したインバータ、および三相誘導モータ駆動の写真を、図 3-7 3 にインバータ動作時の出力波形を、図 3-7 4 にセラミックパッケージに組み込んだ GaN 基板上 FET と GaN 基板上 SBD を示す。nanotech 2013(第 1 2 回・国際ナノテクノロジー総合展)にて展示および駆動のデモを行った。3 日間の展示期間中において、実機通電で劣化なく運転できることを実証した。

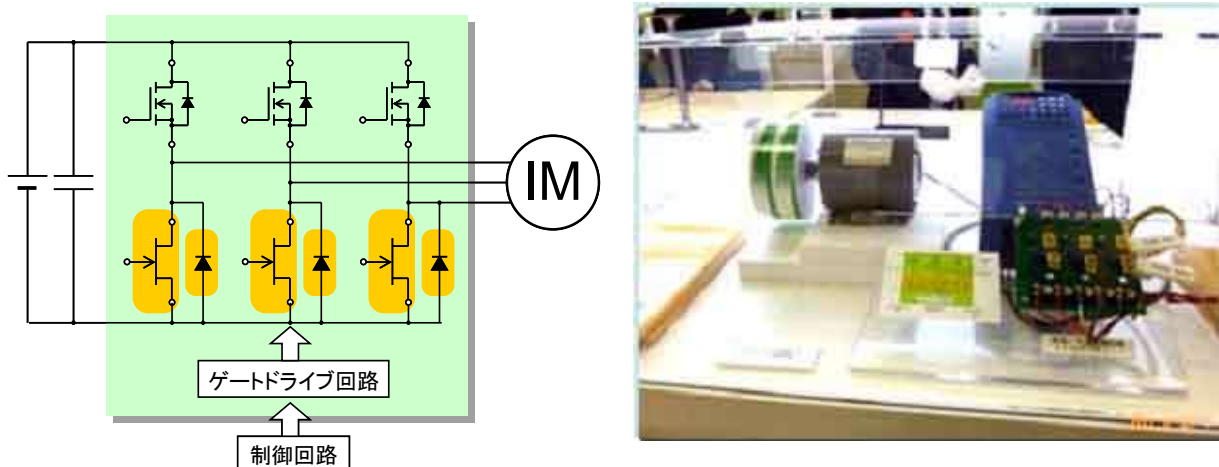


図 3-7 2. GaN 基板上 FET、及び SBD を利用したインバータ回路と交流モータ駆動デモ

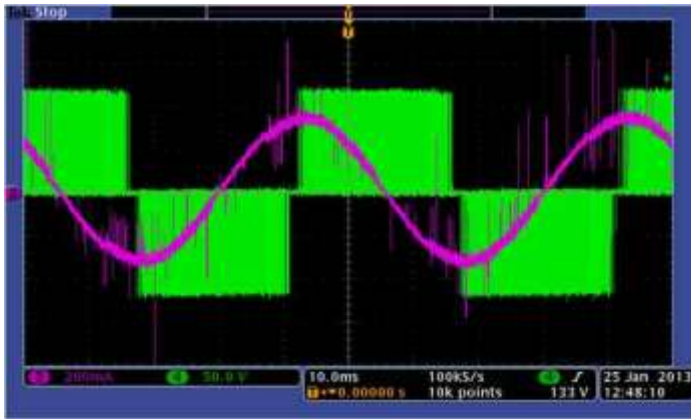


図 3-73. インバータ動作時の出力波形



図 3-74. 搭載した GaN 基板上 FET と SBD

2-3-3-7 GaN 基板上 HEMT 構造のデバイスの信頼性評価

窒化物単結晶基板、及び他種基板に作製した FET の信頼性試験 (高温逆バイアス試験 600V、150°C) を行った。今回試験に使用した基板、及びエピの仕様を表 3-6 に示す。試験は①: Ref GaN on Si ウェハ、②: HVPE-GaN (Mgドープ)、及び③: Na フラックス基板 (Mgドープ) の 3 種類の構造で実施した。試験デバイスは FET (Wg=3mm) をキャンパッケージに組み込み、ドレインパッドとチップ基板裏面間に高電圧 (600V) を印加した。浴面放電防止のため樹脂を塗布し、チップを保護した。

信頼性試験の結果、①: Ref GaN on Si は 5/5 合格、②: HVPE-GaN (Mgドープ) は 2/5 合格、③: Na フラックス GaN (Mgドープ) は 1/5 合格となり、信頼性の高い順番は下記のような結果となった。これは窒化物単結晶基板に作製した FET の信頼性が悪いというより、窒化物単結晶基板に適したエピ構造となっていないためと考えられる。

表 3-6. 信頼性試験を行ったデバイス

No.	基板	エピ ID	エピ構造
①	Si	—	AlGaIn/GaN (6 μm) /Si 基板
②	HVPE-GaN	101115b	AlGaIn/GaN (8 μm) /Mgドープ GaN (2 μm) /HVPE GaN 基板
③	Na フラックス	101118b	AlGaIn/GaN (8 μm) /Mgドープ GaN (2 μm) /Na フラックス GaN 基板

① Ref GaN on Si > ②: HVPE-GaN (Mgドープ) > ③: Na フラックス GaN (Mgドープ)

2-3-3-8 横型デバイスの高耐圧への取り組み

1) デバイス構造の最適化

横型デバイスの高耐圧化を図るため、GaN on Si ウェハを用いデバイス構造の最適化を図った。エピタキシャル膜厚、ゲート・ドレイン間距離 Lgd、及び AlGaIn の Al 組成、との関係を調べた。評価デバイスは図 3-75 に示すゲート幅 3mm 素子を用いた。

図3-76にエピタキシャル膜厚と縦リークの関係を示す。GaN on Si の場合、エピタキシャル膜厚 $8\mu\text{m}$ 以上とすることで、電圧 1200V での縦リーク電流を $1\mu\text{A}$ 以下にできることがわかった。

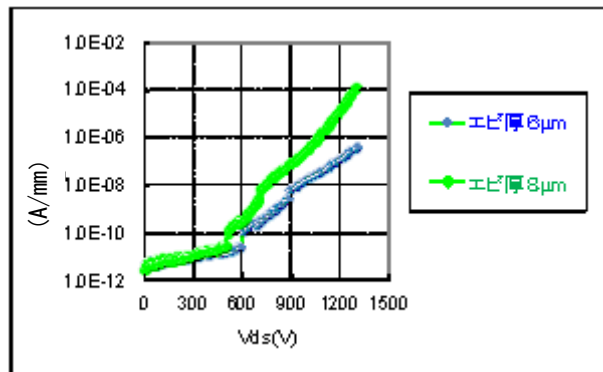


図3-75 評価デバイス

図3-76 エピタキシャル膜厚と縦リークの関係

図3-77にゲート・ドレイン間距離 L_{gd} とリーク電流の関係を示す。いずれもエピタキシャル膜厚は $8\mu\text{m}$ 、FP長は $4\mu\text{m}$ である。 L_{gd} が $12\mu\text{m}$ 、 $18\mu\text{m}$ 、 $24\mu\text{m}$ のとき、耐圧はそれぞれ、 1050V 、 1300V 、 1300V となった。耐圧 1200V 以上を得るには、 L_{gd} $18\mu\text{m}$ 以上が必要であることがわかった。

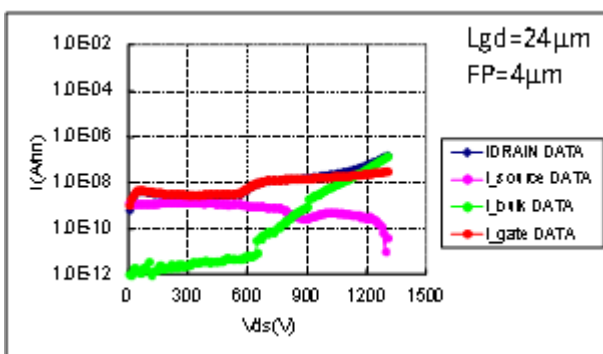
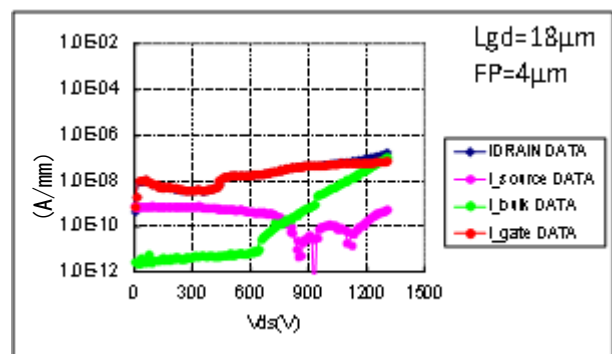
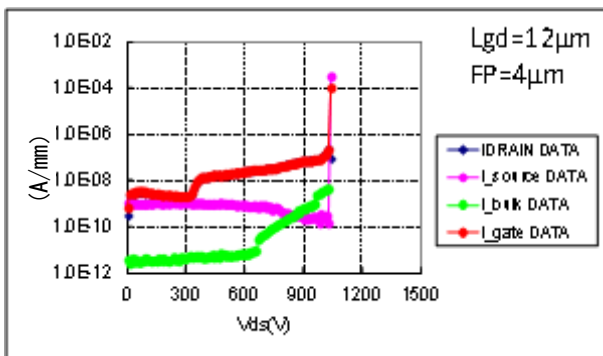


図3-77 ゲート・ドレイン間距離 L_{gd} とリーク電流の関係

図3-78にAlGaNのAl組成とリーク電流の関係を示す。Al組成0.2、0.26、0.3のいずれでも耐圧1200V以上が得られているが、Al組成0.2のものは、リーク電流の増加が大きく、1250V位で破壊している。今回のデバイス構造においては、高耐圧化には、Al組成0.26以上が望ましい。

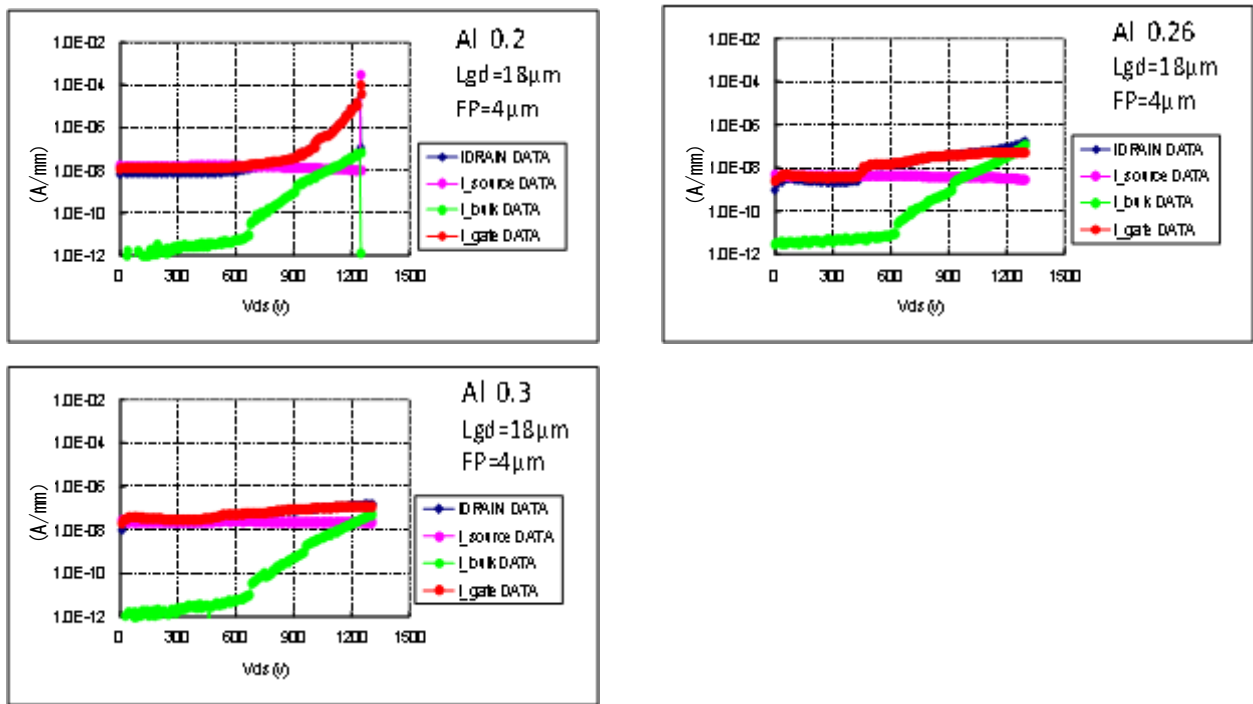


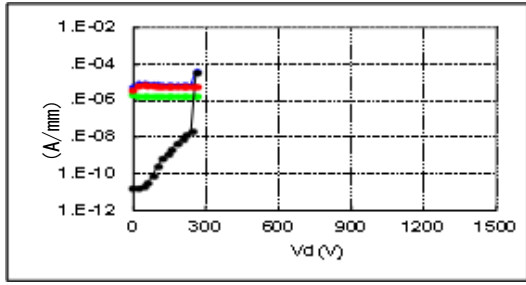
図3-78 AlGaNのAl組成とリーク電流の関係

2) GaN基板、及び、各種基板上的デバイス試作

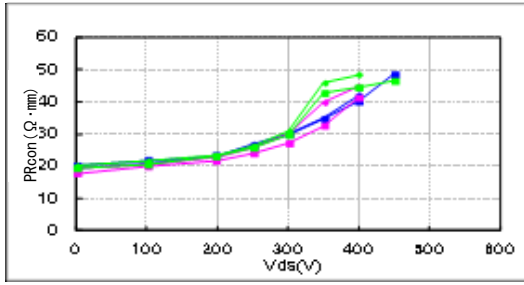
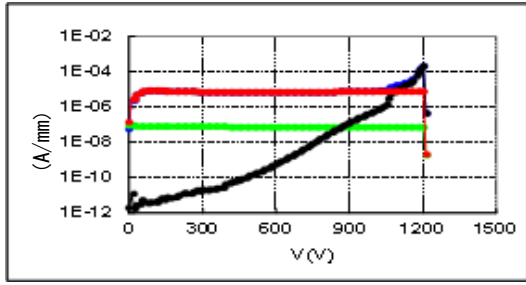
GaN基板、及び各種基板上的GaNデバイスの試作を行った。基板としてNaフラックスGaN基板、市販GaN基板（A社製、B社製）、市販SiC基板（B社製）、及びGaN on Si基板（サンケン電気）を用いた。NaフラックスGaN基板、及び市販HVPE-GaN基板（A社製）は、名古屋大学にてエピタキシャル成長を行った。縦耐圧向上のため、Cドープ層を10μmとした。B社のGaN基板、及びSiC基板は、B社にてエピタキシャル成長を行った。高抵抗GaN基板や半絶縁性SiC基板であるので、GaNエピタキシャル膜は1μmと薄い。GaN on Siはエピタキシャル膜厚8μmとした。図3-79に各種基板のエピタキシャル構造を示す。左からそれぞれ、Naフラックス法GaN基板上エピ、HVPE法GaN基板上エピ（A社製）、HVPE法GaN基板上エピ（B社製）、SiC基板上エピ（B社製）、Si基板上エピである。



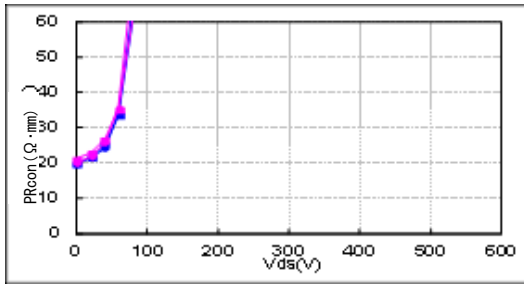
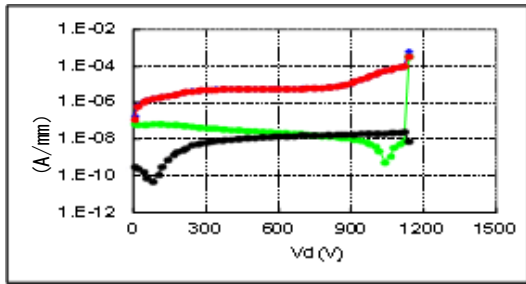
図3-79 各種基板のエピタキシャル構造



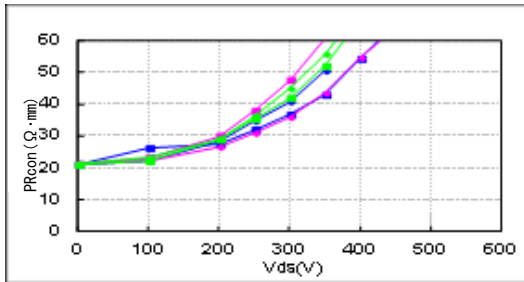
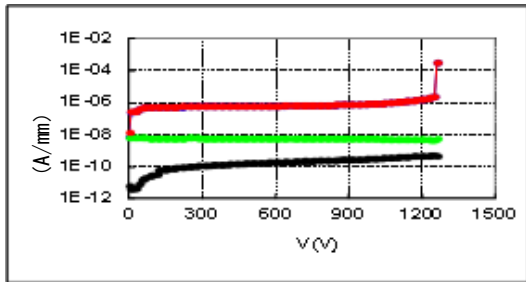
(1) FRC2-44 Na フラックス GaN (大阪大学)



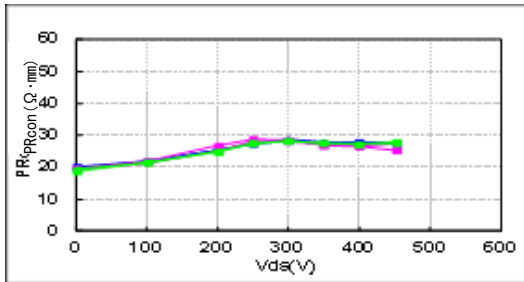
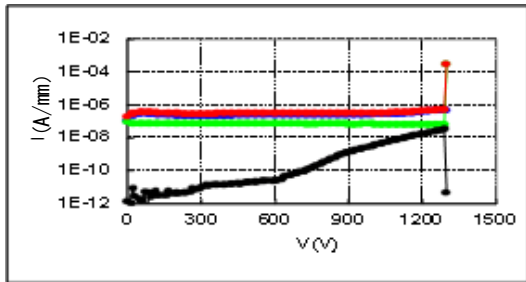
(2) 110145N HVPE-GaN (A社製)



(3) MZZ30744-1 高抵抗 GaN (B社製)



(4) MZZ307371 半絶縁 SiC (B社製)



(5) NE7410 GaN on Si (サンケン電気製)

図3-80 横型トランジスタの試作結果 左：リーク特性、右：コラプス特性

図3-80に横型トランジスタの試作結果を示す。左図はリーク電流特性 (I_d , I_s , I_g , I_{sub}) を右図は電流コラプス特性を示している。(1) FRC2-44のNaフラックス GaN 基板は、耐圧が200V以下となった。耐圧が低く、電流コラプスは測定できていない。(2) 110145N HVPE-GaN 基板は耐圧1200Vが得られ、目標を達成できた。電流コラプスは、印加電圧400Vでオン抵抗が4倍以上と悪い。(3) MZZ30744-1 高抵抗 GaN 基板は耐圧1100Vと目標に近い値が得られている。電流コラプスは印加電圧100Vでオン抵抗が3倍以上と悪い。(4) MZZ307371 半絶縁性 SiC 基板は、耐圧1200V以上と目標を達成できている。電流コラプスは印加電圧400Vでオン抵抗が2.5倍と悪い。(5) NE7410 GaN on Si は耐圧1300Vと目標を達成できている。電流コラプスは印加電圧400Vでオン抵抗1.5倍以下と小さい。表3-7に各種基板のエピタキシャル構造と試作結果まとめを示す。

以上まとめると、GaN 基板、SiC 基板、及び Si 基板で目標耐圧1200V以上を達成できた。電流コラプスは、GaN 基板を用いたもの、及び SiC 基板を用いたものが、Si 基板を用いたものに比較して悪い結果となった。GaN 基板については、耐圧、リーク特性、コラプス特性ともに今後バッファ構造のさらなる改良が必要であるものと考えられる。

表3-7 各種基板のエピタキシャル構造と試作結果まとめ

	投入ウエハ	基板	エピ仕様	結果	
				耐圧	コラプス
(1)	FRC2-44	Naフラックス (大阪大学)	C-dope GaN 10um (名古屋大工)	200V	測定不可
(2)	110145N	HVPE-GaN (A社)	C-dope GaN 10um (名古屋大工)	1200V	大
(3)	MZZ30744-1	高抵抗GaN (B社)	uid-GaN 1μm (B社)	1100V	大
(4)	MZZ307371	高抵抗SiC (B社)	uid-GaN 0.5nm (B社)	1200V	大
(5)	NE7410	Si (信越)	工厚8.5μm, cap有 (サンケン社内工)	1300V	小

2-3-4 有極性及び無極性デバイス構造の比較

2-3-4-1 AlGaIn/GaN 系 HEMT 作製のためのスループロセスの構築

サブミクロン長の微細ゲート構造をもつ高周波用途にも対応可能な AlGaIn/GaN HEMT 作製のためのスループロセスを構築した。全体行程を以下に順に説明する。まず、AlGaIn/GaN エピタキシャル基板の表面洗浄を行った後、光学露光装置を用いてホットレジスト・パターンを形成し、 BCl_3 ガスによる反応性イオンエッチング (ICP-RIE) を用いて素子間分離を行う。次に、ホットレジスト工程を用いて、オーミック電極形成のためのパターン形成を行い、電子線蒸着装置を用いて Ti/Al/Mo/Au 電極を真空蒸着し、リフトオフ工程により電極パターンを形成する。その後、オーミック接触抵抗低減のため、850 °C で 30 秒間の熱処理を窒素雰囲気中にて行う。次に、ホットレジスト・パターンを形成後に、Ti/Au 電極から成るバッド電極を真空蒸着する。ここで、微細ゲート電極パターンを電子線露光法にて描画するため、目合わせ用マークパターンを同時に形成する。続いて、電子線露光用レジストとして ZEP/PMGI/ZEP から成る 3 層膜構造を形成し、目合わせマークを参照して電子線描画を行い、所望のゲート長 (約 0.25 μm) をもつゲート電極パターンを形成する。次にゲート金属として Ni/Au を真空蒸着し、リフトオフ工程とゲートバッド金属形成工程を経て、デバイスが完成する。完成した AlGaIn/GaN HEMT の断面構造と平面 SEM 写真を図 3-81 に示す。

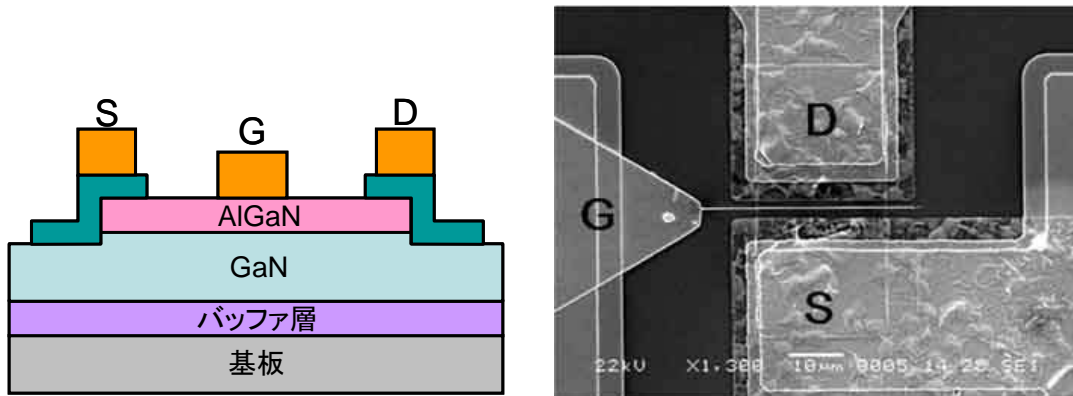


図 3-81 試作した AlGaIn/GaN HEMT の断面構造と平面 SEM 写真

2-3-4-2 AlGaIn/GaN ヘテロ接合界面の解析

AlGaIn/GaN ヘテロ接合界面に誘起される電子の輸送特性 (電子移動度、シート電子濃度) については、従来 10K 程度の極低温での測定と理論解析が主であった。これは 2 次元電子ガスの散乱機構を調べることを主な目的としていたためである。しかし、実用上のデバイス動作と関連づけるためには、室温より高温での輸送特性を調べるのが不可欠である。本研究では、77 K から 1023 K (750 °C) の温度範囲で、電子移動度とシート電子濃度の温度依存性を Hall 効果により測定し、結果を解析した。用いた試料は、サファイア基板に、MOCVD 法によりバッファ層、GaN チャネル層 (厚さ 1 μm)、 $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ バリア層 (厚さ 25nm) を順次成長させたものである。

移動度 (μ_{H}) とシート電子濃度 (n_{s}) の温度依存性を図 3-82 に示す。実験結果をまとめると以下の通りである。(i) 移動度は、温度 (T) の上昇とともに単調に減少する。その依存性は $\exp(-0.004T)$ で近似できる。従来は、室温以上の高温域での移動度は、極性光学フォノンによる散乱が支配的であるとされていた。その温度依存性は $T^{-1.5}$ であるとされるが、今回の結果はこの予測と異なるものである。様々な散乱機構を考慮して解析を行った結果、移動度の温度依存性を説明するためには、700 K 以上の高温で、極性光学フォノンだけでなく変形ポテンシャル散乱の影響を考慮する必要があることが予測された。

(ii)シート電子濃度は、77～700 K でほぼ一定であるが、それ以上で増加する。シート電子濃度の温度依存性を計算から求めると、77～1000 K でほぼ一定値となり、上記の高温での増加を説明できない。この増加の理由は今のところ不明であるが、GaN チャネル層とバッファ層との界面を電子が流れる平行伝導によるものと推測している。いずれにしても、700 K (427 °C) 以上でのデバイス動作においては、シート電子濃度が増加することを考慮する必要があることが指摘された。

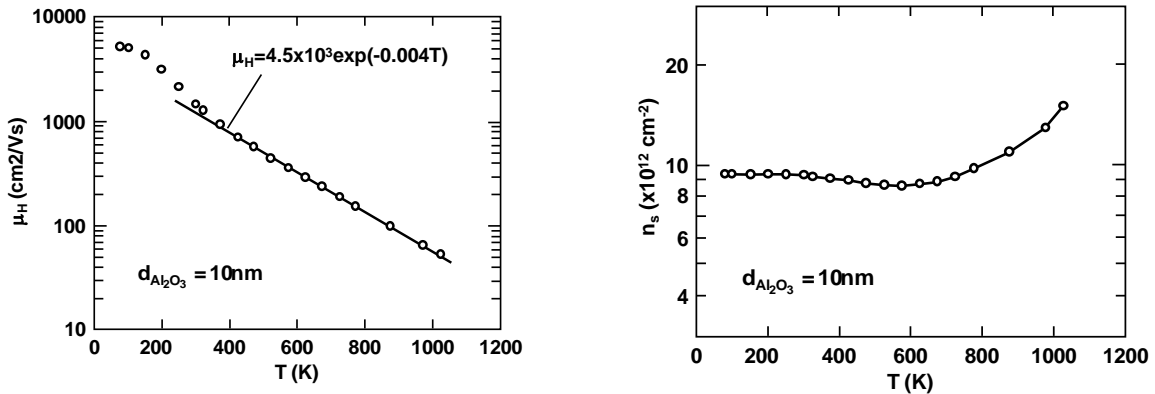


図 3-82 AlGaIn/GaN ヘテロ構造における電子移動度とシート電子濃度の温度依存性

次にシート抵抗 ($R_{sh}=1/qn_s\mu_H$) の温度依存性を図 3-83 に示す。図には、AlGaIn/GaN ヘテロ接合に加え、n-GaN 層 (厚さ 0.5 μm 、キャリア濃度 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) の結果も同時に示す。図に示すように、AlGaIn/GaN では、シート抵抗は温度の増加とともに単調に増加する。また n-GaN 層の結果と比べると、420 K 付近までは AlGaIn/GaN の方がシート抵抗は小さいが、それ以上の温度では n-GaN 層の方が小さくなることが判った。さらに、AlGaIn/GaN のシート抵抗は、温度に対し 2 次関数で良く近似できることを見出した。以上の結果から、AlGaIn/GaN HEMT デバイスを設計する上で、温度特性に関して重要な知見を得た。

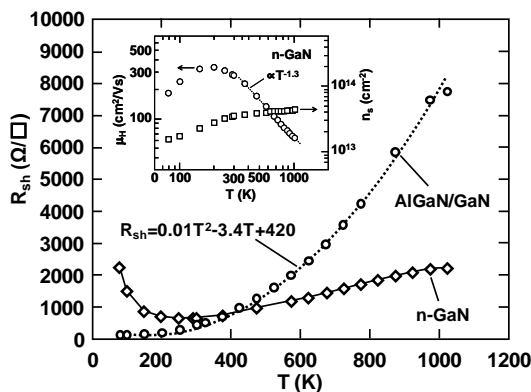


図 3-83 AlGaIn/GaN および n-GaN におけるシート抵抗の温度依存性

2-3-4-3 無極性 GaN 基板上 InGaIn チャネル HEMT の高周波解析

GaN と InN の三元混晶である InGaIn は GaN より電子輸送特性に優れるため、ミリ波からテラヘルツ波領域で動作する高速トランジスタのチャネル材料として期待されている。しかし、高 In 組成 InGaIn は、良質の結晶成長が困難なため、電子デバイス試作の報告例は極めて少ない。そこで、無極性 GaN 基板の利用を仮定し、分極効果のない AlInN/InGaIn/AlInN ダブルヘテロ構造 HEMT について、短チャネル時の

電流利得遮断周波数を解析した。計算には、福井大学で独自に開発した二次元アンサンブルモンテカルロシミュレータを使用し、ボルツマン輸送方程式とポアソン方程式を連立させて解いた。半導体バンド構造には、3谷解析バンドを使用したが、一部、擬ポテンシャル法より求めたフルバンドについても検討した。散乱過程として、有極性光学フォノン散乱、音響フォノン散乱、谷間フォノン散乱、イオン化不純物散乱を考慮した。用いた粒子数はバイアス条件によっても変化するが、約20000個とした。ゲート長10 nm のとき、GaN、InGaN (In 組成=50%)、InN 各チャンネルについて、得られた最高ドリフト速度はそれぞれ、 4.6×10^7 、 5.3×10^7 、 6.4×10^7 cm/s であった。計算の結果、In 組成が50%以上の高In組成InGaNをチャンネル層に用いたとき、ゲート長が50 nm以下になると1THzを超える電流利得遮断周波数が実現できる可能性が示された。特に、チャンネル材料にInNを用いると、ゲート長10 nmにおいて1.5 THzの電流利得遮断周波数が予測された。図3-84に計算から求めたゲート長200 nmのHEMTのドレイン特性を示す。また、図3-85に電流利得遮断周波数のゲート長依存性の計算結果を示す。

なお、ダブルヘテロ構造は無極性基板を使用したときにのみ有効であり、分極効果を有する有極性基板の上に形成すると著しく電流電圧特性が劣化することも同時に明らかとなった。実験では、無極性面GaN基板上にエピ構造を作製し、実際にダブルヘテロ接合HEMTの試作を試みたが、結晶欠陥密度が高く、デバイス動作の確認には至らなかった。

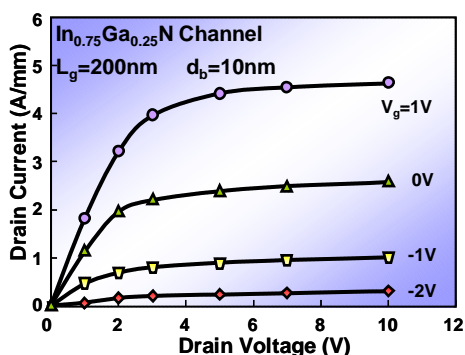


図3-84 無極性AlInN/InGaN HEMTのドレイン特性

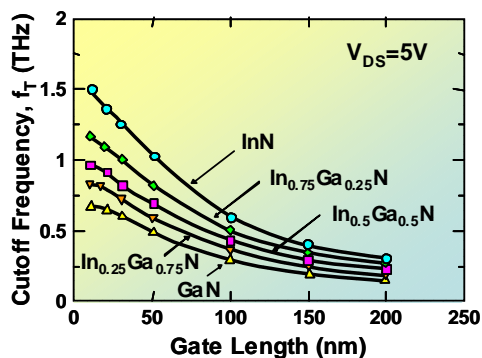


図3-85 電流利得遮断周波数

2-3-4-4 リセス構造 FET プロセス技術

無極性ダブルヘテロ構造を用いたノーマリーオフ HEMT の試作に向けて、ICP 方式の反応性ドライエッチング装置 (ICP-RIE, SAMCO 製 RIE-200iP) を導入し、反応ガスに BCl_3 を使い、AlGaIn および、GaN のエッチング条件を検討した。ICP パワー50 W、バイアスパワー=50W、 BCl_3 流量4 sccm のエッチング条件にて3.5 nm/min のエッチング条件を確認した。図3-86 (左図) に、ICP パワーを変化させた場合のエッチング深さとエッチング時間の依存性を示す。バイアスパワー、ガス流量は一定とした。エッチング時間に対して深さは、ほぼ線形に変化していることがわかる。ICP パワーの増加とともに、エッチング速度は増加し、両者はほぼ線形の関係にあった。ICP パワーを任意で変化させることにより、任意のエッチング速度が得られることが分かった。図3-86 (右図) に、バイアスパワーを変化させた場合のエッチング深さとエッチング時間の依存性を示す。ICP パワー、ガス流量は一定とした。バイアスパワーが30、50、100、200 Wでは、エッチング時間に対してエッチング深さがほぼ線形に変化することがわかる。300 Wでは、20分間のエッチングにより飽和傾向が見られるが、短時間のエッチングでは、ほぼ線形に変化することが分かった。

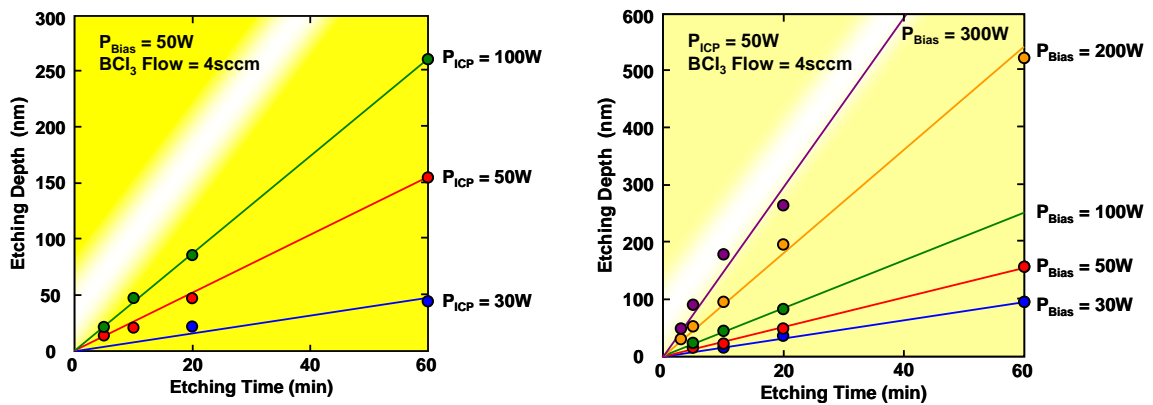


図 3-86 BCl₃ ガスを用いた ICP エッチング深さのエッチング時間依存性。
ICP パワー依存性 (左) とバイアスパワー依存性 (右)

本装置を HEMT のリセスエッチングに適用した。ICP パワー 50 W、バイアスパワー 30 W、BCl₃ 流量 4 sccm で 8.5 分間リセスエッチングを行うことにより、E モード特性の実現に成功した (図 3-87)。ゲート長 2 μ m、ゲート幅 100 μ m の AlGa_{0.25}N/GaN 構造である。しきい値電圧は +0.3 V を得ることができ、ノーマリーオフ動作をした。ゲート電圧 +1 V のときの最大ドレイン電流は、40 mA/mm で、最大相互コンダクタンスは、49 mS/mm であった。

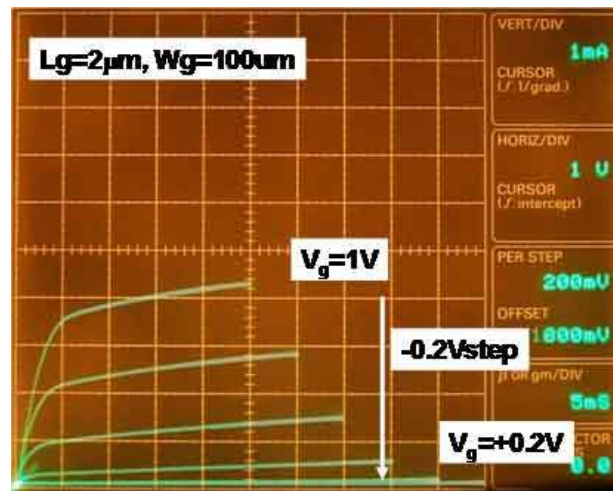


図 3-87 ICP ドライエッチングを用いて作製したリセス構造 HEMT のドレイン特性

2-3-4-5 HEMT 構造における電気的特性の高温評価技術

デバイスを実用化するに際し、その温度特性を調べることは重要である。本研究においては、室温から 300 $^{\circ}$ C までの範囲で温度制御できるヒータステージを準備し、半導体パラメータアナライザで DC 特性を、ネットワークアナライザで RF 特性を測定できる測定系を構築した。

デバイスの温度特性の一例を図 3-88 に示す。図で (a)、(b) は各々、DC 特性 (最大ドレイン電流: I_{dmax}) および RF 特性 (遮断周波数: f_T) の温度依存性を示したものである。試料には、通常の GaN チャネル HEMT (Al_{0.25}Ga_{0.75}N (25 nm) / GaN/Si 基板) と、AlGa_{0.25}N チャネル HEMT (Al_{0.5}Ga_{0.5}N (27 nm) / Al_{0.26}Ga_{0.74}N (600 nm) / AlN 基板) を使い、結果を比較した。図に示すように、DC、RF 特性どちらにお

いても、AlGaIn チャンネル HEMT の方が、GaIn チャンネル HEMT に比べて温度依存性が小さいということが判った。この結果は、AlGaIn チャンネル HEMT の高温動作での優位性を示すものであるが、まだドレイン電流、遮断周波数ともに GaIn チャンネルに比べて低いため、今後さらに特性の向上が必要である。また、図 3-88 に示した結果を、高周波特性評価結果と比較検討した結果、この温度特性を決定する要因が、移動度ではなく実効電子速度であることが明らかになった。

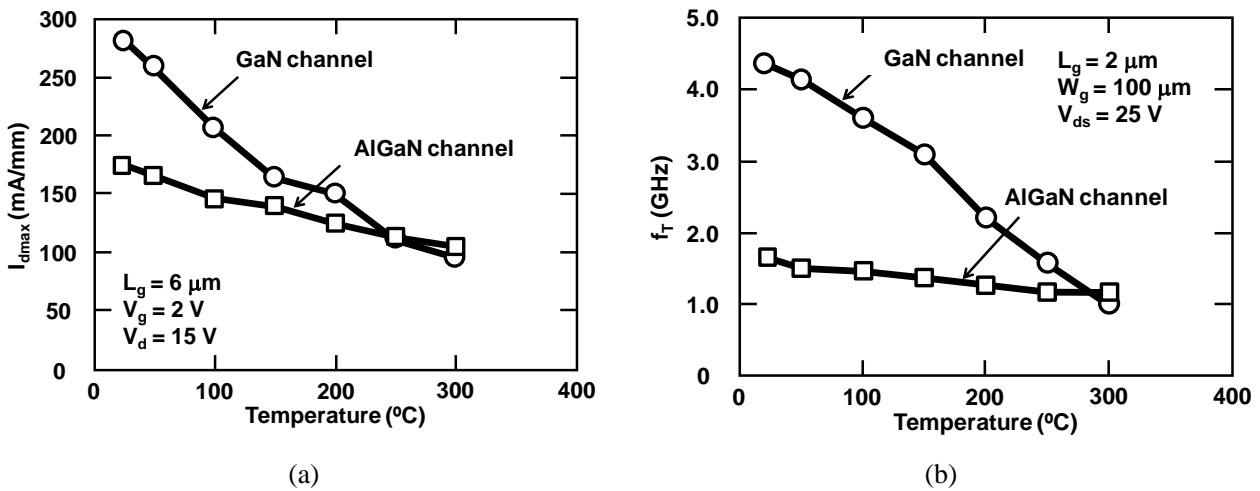


図 3-88 AlGaIn/GaN HEMT、AlGaIn/AlGaIn HEMT の温度特性
最大ドレイン電流 (a)、および遮断周波数 (b)

2-3-4-6 無極性基板と有極性基板の比較評価

Na フラックス法 a 面 GaIn 基板上に AlGaIn/GaN HEMT 構造を試作した。AlGaIn の Al 組成は 36 % とし、厚さは 20 nm とした。ヘテロ界面近傍 3 nm 厚に Si を $3.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ドーピングした。Hall 測定から求めた電子移動度とシート電子濃度はそれぞれ $400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 、 $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ であった。試作したゲート長 $2 \mu\text{m}$ の HEMT において、最大ドレイン電流 220 mA/mm、最大相互コンダクタンス 57 mS/mm、しきい値電圧 -1.6V が得られた。これらの結果は、これまで報告された無極性 a 面基板上 HEMT の中で最高の特性である。しかし、有極性基板上デバイスと比較すると、電子移動度とドレイン電流において、いずれも 1/3 から 1/4 倍程度小さな値となっており、エピ結晶の高品質化とデバイス構造の最適化が必要であることがわかった。

<研究発表・講演、文献、特許等の状況>

「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価」における実績を以下の表にまとめた。

	H19年度	H20年度	H21年度	H22年度	H23年度	H24年度	計
外部発表・講演	4	5	3	10	10	8	40
文献	1	2	2	4	2	4	15
特許等(国内)	0	1	3	0	0	2	6
特許等(外国)	0	0	0	0	0	0	0
その他の公表	0	1	1	1	1	1	5
計	5	9	9	15	13	15	66

以上

IV 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

1. 高品質大口径単結晶基板の開発

1-1 古河機械金属株式会社

研究開発終了後、自社での開発を引き続き行い、最初の2、3年ではサンプル展開を図りながら、基板ユーザスペックとのマッチングを図る。また、低コスト化に向けて結晶作製プロセスの簡素化と歩留まり向上に注力する。さらに、転位密度や欠陥密度の低減に向けての自社開発を引き続き行う。その後ユーザの動向、市場規模を見ながら事業化の判断を行い、本研究開発終了後三年後を目処に、まずは百枚/月程度を供給できる量産設備の増強を進める。

年度	平成24年 (2012年)	平成25年 (2013年)	平成26年 (2014年)	平成27年 (2015年)	平成28年 (2016年)
サンプル展開		→			
歩留改善	→				
プロセス簡素化		→			
量産化技術検討		→			
結晶高品質化	→				
事業化				→ 製品化	

1-2 豊田合成株式会社

プロジェクト終了後、引き続き自社にてコストダウンの検討と量産に向けた装置開発、工程設計を行う。2015年までにコスト目標をクリアーし、LED用のGaN基板での実用化を目指す。さらに装置スループットを改良し、2017年以降のパワーデバイス用GaN基板の事業化を実現する。

	2013	2014	2015	2016	2017
基板事業化			LED		パワーデバイス
基板仕様			6" 欠陥 $10^6/\text{cm}^2$		6" 欠陥 $10^5/\text{cm}^2$
基板コスト(対サファイア)			~4倍		~3倍
各コストダウン項目の検討	加工費、労務費、光熱費、償却費、材料費にわたる項目につき目標を設定し、検討を進める。				
装置&工程設計	装置基本構成検討 (['次世代照明']) および 統合設計実施		装置製作	装置スループット改良	

1-3 日本ガイシ株式会社

プロジェクト終了後、自社開発研究に移行し、2年間で大口径化・導電性制御に関する残課題と、再現性・信頼性向上の課題を解決し、サンプル供試を開始する。この間、デバイスメーカーと協力して基板評価を実施し、実用化に向けての品質改善を進めると共に、6インチ高品質基板の量産要素技術検討および生産技術検討を行う。客先需要が見込め、かつ客先における量産認定が取得できた場合、プロジェクト終了後3年目から、年間数百枚の規模での生産を開始し、パワーデバイス用基板市場にφ6インチの高品質 GaN 基板の供給することを目指す。

項目 \ 年度	平成19年 (2007)	~	平成23年 (2011)	平成24年 (2012)	平成25年 (2013)	平成26年 (2014)	平成27年 (2015)	平成28年 (2016)
①委託研究 (本プロジェクト)	→ 研究開発							
②委託研究終了			▼					
③商品開発研究						→ 商品開発研究		
④サンプル供試開始					○			
⑤品質改善					→			
⑥量産技術検討						→		
⑦事業化判断							△	
⑨事業化								→ 事業化

2. 高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発

2-1 昭和電工株式会社

1-1 事業化イメージ

プロジェクトの最終目標である4インチ InGaN エピ (In 組成>0.5) において、①厚均一性<±5%、②成均一性<±0.5%、③Siドープ濃度均一性<±5%、④Mgドープ濃度均一性<±5%を達成した。

In 組成>0.5 の高 In 組成 InGaN 成長を成功させ、さらに、4インチウェハで膜厚、組成、キャリア濃度の均一性を±5%以内の高均一性エピ成長技術を構築したことは、大口径ウェハを必要とする電子デバイス用エピウェハの実用化の観点で非常に重要である。

事業化は、本プロジェクトで取得したエピ技術を社内エピ成長炉に展開し、高品質 GaN 基板が製品化された段階でその基板を利用したエピウェハを製造・販売する。社内エピ展開においては、加圧炉の調達が必要になる。当社製品イメージとしては、高品質基板上に顧客指定エピ構造を成膜し、エピウェハとしてデバイスメーカーに販売することである。

1-2 競合他社の技術・事業とのベンチマーク

- (1) 技術の優位性：昭和電工は、GaAs, InP から GaN, SiC にわたる多様な化合物の CVD エピ成膜技術を有するエピベンダーであり、高度なエピウェハ製造技術を有する。
- (2) 市場の優位性：従来事業である LED, 通信系デバイス, パワーデバイス (SiC) 用のエピウェハ製造・販売を通じて、多くの電気メカ, デバイスメカを顧客に持つため、GaN 系パワーデバイスについても市場動向の把握、市場へ参入を的確に行えると考えている。
- (3) 省エネ効果：Si デバイスでは達成し得ない特性もしくはエネルギーロスの小さなデバイスを社会インフラ, 自動車産業に提供することで、省エネ社会に貢献する。
- (4) 製造コスト削減：従来から蓄積したエピウェハ製造技術を生かし低コスト化を可能にする。

1-3 市場動向と損益の見通し

- (1) 市場動向：GaN 系パワーデバイスエピ市場は、デバイス市場に連動するが、GaN on Si 基板デバイス等が 2013 年以降立上がりの兆しを見せている。次世代パワー半導体 (GaN 系) について、2020 年で数百億円市場との予測もある。この中のエピウェハ市場は、数十億円程度と予想される。本格的立ち上がりは今後 5 年程度は要すると思われ、2018 年以降、家電, 自動車, 通信などの分野で幅広く採用されることを期待する。現状での市場参入はリスク大きく検討を要する。
- (2) 損益の見通し：既存設備による開発継続・生産体制整備で、損益検討する。新規設備投資は現状リスク大きく、事業化の見通しを得た時点で検討する。

1-4 事業化までのマイルストーン

下表の示す通り、市場立ち上がりおよび大口径 GaN 基板供給の状況を見ながら、開発継続する。2018 年以降の事業化を目指す。

課題	プロジェクト 2007~2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018 以降～
エピ成膜技術	成長基礎開発●	エピ技術開発継続			生産技術開発●	サンプル配布・顧客評価●		●事業化→
市場立上がり		市場動向ウォッチ			事業化判断●			
高品質 GaN 基板供給		開発状況・低コスト高品質基板調査			採用判断●			

1-5 事業化に向けた対応策

- (1) 課題：①InGaN エピ成膜技術の高度化、装置導入、②GaN パワーデバイスの市場立上がり見極め、③GaN 基板（4インチ以上）の安定供給など。
- (2) 対応策：①エピ成膜技術開発継続、②エビ技術、コストダウン技術、安定操業技術、品質保証
③市場動向・顧客動向調査継続、④GaN 基板開発・上市状況ウォッチを実施する。

2-2 住友電気工業株式会社

一般に窒化物薄膜成長に用いられる有機金属気相成長法では、Al 有機原料（TMA）の気相中での反応が激しく、高品位で均一な薄膜を得ることが難しい。さらに気相中の反応に起因するパーティクルも多い。チップサイズが大きく大口径基板を用いる電子デバイス分野では、高 Al 組成 AlGaIn 成長技術は最も難易度が高い。本プロジェクトでは、高品位で均一性の良好な高 Al 組成 AlGaIn エピタキシャル薄膜成長技術を開発できたが、この技術はどのような窒化物エピタキシャル膜に適用できる汎用的で拡がりのある技術である。さらに、今回良好な均一性を得るため、成長条件最適化だけではなく、反応シミュレーションによる反応炉設計にまで踏み込み開発を行うことで設備技術も高めることができた。電子デバイス実用化に向け、低コスト化が必須であり、大口径・多数枚でのエビ生産を行う必要がある。本プロジェクトで開発した成長技術、設備技術を盛り込んだ多数枚量産炉 MOVPE 装置の開発を行い、市場の立ち上がりを見極めつつ製品の投入を計画する。

より具体的なターゲットとしては、当社で事業化に成功している大口径窒化物半導体基板上の各種電子デバイスのエピタキシャル膜の実用化を目指す。本プロジェクトで開発した高 Al 組成 AlGaIn 薄膜については、HEMT 構造に適用することで、高い耐電圧と小さな動作抵抗といった大きな魅力を有する大電力駆動用の電子デバイスへの適用が可能である。さらに AlGaIn に限らず均一な薄膜成長技術を適用することで各種デバイスへ適用できる。本プロジェクト終了後は既存炉の改造に加え、多数枚 MOVPE 装置を2年程度の期間で開発し、エピタキシャル基板や関連デバイスの商品化を目指す。市場の立ち上がりとしては平成 27 年（2015 年）200 枚/月程度から立ち上げ、平成 29 年（2017 年）には 800 枚/月程度の量産へ移行する。

無極性 AlN 基板に関しては、本プロジェクトで低欠陥基板の開発が完了した後は、実用化に向けて大口径無極性 AlN 基板の技術開発に取り組む。これらの開発には、プロジェクト終了後さらに3年程度の期間が必要と認識しており、平成 27 年（2015 年）頃には開発を完了させる。結晶成長に関しては、成長炉の大型化、炉内温度分布制御の更なる向上等の技術開発が必要と想定している。そこで、本プロジェクトで開発した技術をベースに結晶の大口径化、均一性向上、低コスト化に向けて展開していく。一方加工技術に関しても、高 Al 組成窒化物エピタキシャル膜成長用基板として仕上げ加工技術を中心に、大面積化、均質化、歩留向上等を含め開発を進める。その際、他材料の量産において当社に蓄積された技術と本プロジェクトで得られる技術の融合を図りながら、量産工程を確立してゆく計画である。

大電力素子用基板としては、無極性 AlN 基板は優れた性能を有すると予想され、コスト面の課題が解決できれば基板市場において大きなシェアを獲得できると考えられる。AlN 基板市場立ち上がりとしては平成 27 年（2015 年）頃を想定している。

開発項目	平成 25 年 (2013 年)	平成 26 年 (2014 年)	平成 27 年 (2015 年)	平成 28 年 (2016 年)	平成 29 年 (2017 年)
既存炉改造	改造・エビ成長				
QC・品質保証		仕様決め、量試	少量生産		
	ユーザ評価	事業化判断			
量産炉開発	要素技術開発	炉設計・作製	立上げ・評価	量産移行	本格量産
AlN 基板	大口径化	加工技術開発	ユーザ評価	量産炉移行	本格量産
			事業化判断	少量生産	

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

3-1 シャープ株式会社

本プロジェクトの成果をインバータや電源用等のパワーデバイスに活用し、エアコン、冷蔵庫、洗濯機、ソーラーパワーコンディショナーシステム、スイッチング電源等への適用を検討していくことにより、省エネ性能に優れた環境配慮型商品を実現し、民生用エレクトロニクス商品事業・部品事業の両面からの事業展開を目指す。

プロジェクト終了後、基板の大口径化や低コスト化の推移を睨みながら、既存デバイスとのコストパフォーマンスメリットや信頼性等、実用化・事業化のために必要なポイントを明確にした上で、民生用エレクトロニクス商品に組込まれるパワーデバイスとして、平成25年度（2013年度）以降実用化・事業化の検討を推進していく。

	平成19年度-平成24年度 (2007年度-2012年度)	平成25年度以降 (2013年度以降)
計画	本プロジェクトの推進	実用化・事業化課題の明確化 (コスト, 性能, 信頼性) 2015年度以降 事業化検討

3-2 株式会社豊田中央研究所

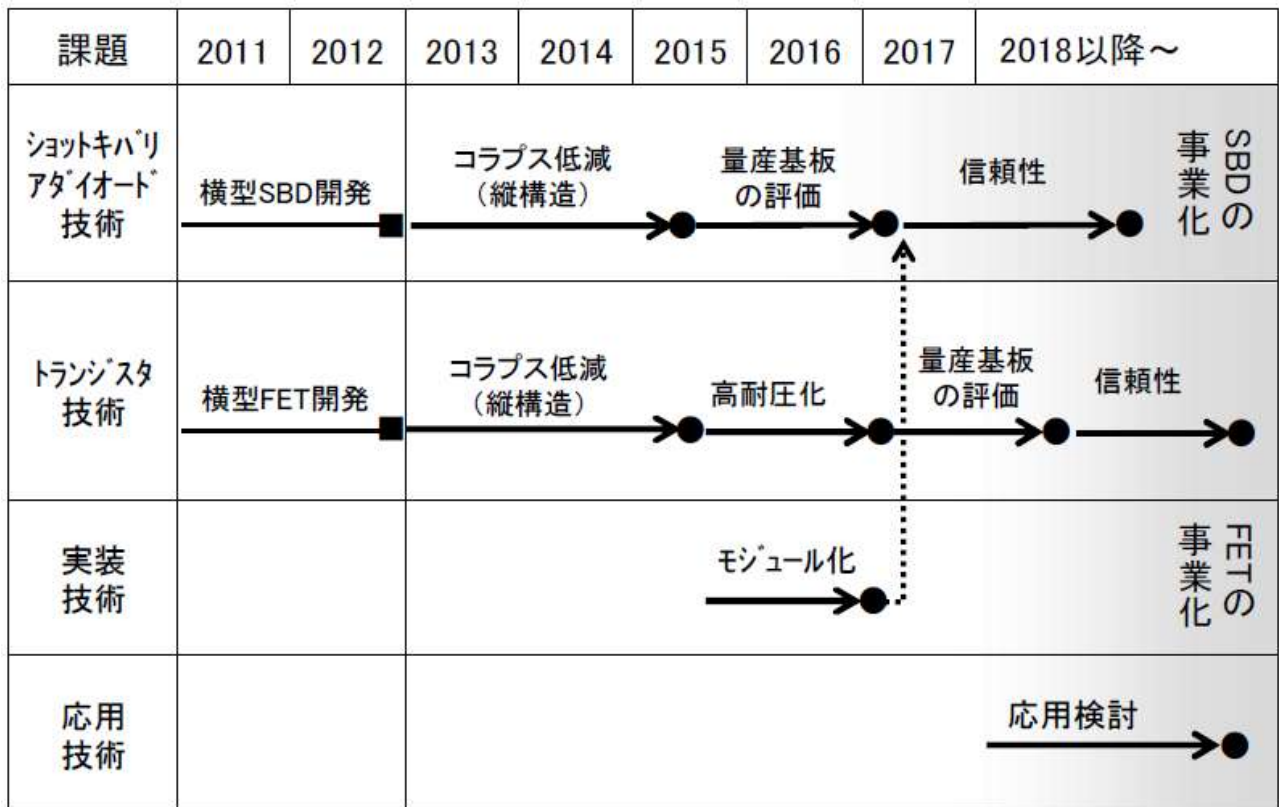
当社は、研究開発を業務とする会社であるため、本プロジェクトの成果を自社で事業化する立場には無いが、弊社と関連するグループ企業にて、ハイブリッド車用パワーデバイスとして実用化を目指す予定である。縦型デバイス構造は、プロセス技術開発が遅れているため、さらに開発時間を要し、平成32年（2020年）後の早い時期の実用化を目指す。また本プロジェクトで開発された基板は、高性能パワーデバイスの基板として、実用化した基板メーカーから購入・活用し、開発に役立てる予定である。

	平成25年度-平成28年度 (2013年度-2015年度)	平成29年度-平成31年度 (2017年度-2019年度)
計画	基本プロセスの開発	作製プロセス開発, デバイス開発, 信頼性試験実施 (グループ企業にてハイブリッド車用 パワーデバイスとして実用化をめざす) 平成32年度後の早い時期に実用化の目標

3-3 サンケン電気株式会社

本プロジェクト終了後に、自社での開発を継続して行い、本研究開発で明らかになった窒化物半導体基板上デバイスの電流コラプス問題の解決を図る。2015年には、各社の窒化物半導体基板の量産試作品を入手し、窒化物半導体基板の評価を進める。有望な窒化物半導体基板を用い、まずショットキーバリアダイオードを作成し、窒化物半導体基板の仕様、エピタキシャル膜の仕様のマッチングを図る。並行して窒化物半導体基板デバイスの実装方法の検討を進める。信頼性試験等を通して、不具合を明確にし、窒化物半導体基板、エピタキシャル膜、デバイス構造、プロセス等の改善を行う。また、サンプル活動を通して、ユーザーの要望を取り込み製品の完成度を高め、ショットキーバリアダイオードの事業化を先行させる。続いてトランジスタの開発を進め事業化を図る。ショットキーバリアダイオード、トランジスタ、及びコントロール IC を一体化したモジュール化を図り、ユーザーの利便性を図り、他社品との差別化を図る。

当社は、半導体デバイスの他、スイッチング電源、無停電電源装置、パワーコンディショナー、インバータ、直流電源装置、車載モジュール等の製造販売も行っている。よってデバイス単体での販売と並行して、モジュール品、応用製品の事業化も進める。



イノベーションプログラム基本計画

(別 添)

平成 20・03・27 産局第 1 号

平成 20 年 4 月 1 日

I T イノベーションプログラム基本計画

1. 目的

我が国が目指す高度情報通信ネットワーク社会の構築に向け、経済成長戦略大綱、I T 新改革戦略、科学技術基本計画及び技術戦略マップ等に基づき、情報化の進展に伴うエネルギー消費量の増大等の課題にも考慮しつつ、その基盤となる情報通信機器・デバイス等の情報通信技術を開発し、実社会への利用を促進する。また、情報システム・ソフトウェアについて品質、信頼性及び生産性の向上を推進し、組込みソフトウェア産業強化、オープンソースソフトウェアを安心して活用するための環境整備、独創的な人材の発掘等、我が国産業競争力強化のための必要な基盤整備を実施することによって、I T 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。

2. 政策的位置付け

- 「経済成長戦略大綱」(2006年7月財政・経済一体改革会議。2007年6月改訂、経済財政諮問会議報告)
I T 革新による競争力強化、I T 革新を支える産業・基盤の強化に必要な研究開発の推進に対応
- 「第3期科学技術基本計画」(2006年3月閣議決定)
国家的・社会的課題に対応した研究開発の重点推進4分野である情報通信分野、分野別推進戦略(2006年3月総合科学技術会議)における重点分野である情報通信分野に位置づけられるもの。
- 「I T 新改革戦略」(2006年1月高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部)
次世代のI T 社会の基礎となる研究開発の推進等に対応。

3. 達成目標

- (1) 情報経済社会を形成する上で必要不可欠な基盤技術である情報通信機器・デバイス等に関しては、「革新的な技術の確立」と「その開発成果の普及促進」を図る。

【目標】

- ・情報通信機器・デバイス産業の付加価値額を、2020年度において、2007年度比で、約50%増加させる。
- ・半導体の微細化に係る革新的基盤技術の開発(テクノロジーノード45nm以細)
- ・情報家電の音声認識のタスク率(95%以上の達成)
- ・革新的な大型ディスプレイ技術の開発(消費電力を現状機器と比較して約50%以下)
- ・革新的なネットワーク機器技術の開発(消費電力を現状機器と比較して60%以下)

- (2) 経済社会システムの信頼性確保に大きく寄与する情報システム・ソフトウェアに関しては、品質、信頼性及び生産性の向上や産学官の開発リソースの連携強化により、「人材育成」と「ソフトウェア工学の開発」等を積極的に推進する。

【目標】

- ・情報サービス・ソフトウェア産業の付加価値額を、2015年度において、2004年度比で、約25%増加させる。
- ・組込みシステム等の不具合発生率(2011年度までに2006年度比50%減)

4. 研究開発内容 [プロジェクト]

－ 中 略 －

II. 省エネ革新

[i] 情報ネットワークシステムの徹底的省エネの実現

(1) グリーンITプロジェクト（運営費交付金）（再掲）

①概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、IT化の進展によりネットワークを流れるデータ量が大幅に増加する中で、IT機器による消費電力量の大幅な増大に対応し、環境調和型IT社会の構築を図るため、個別のデバイスや機器に加え、ネットワーク全体での革新的な省エネルギー技術の開発を行う。

②技術目標及び達成時期

2012年度までに、IT機器・システムのエネルギー消費効率を2倍に向上させる基盤技術を開発する。

③研究開発期間

2008年度～2012年度

(2) 次世代高効率ネットワークデバイス技術開発（運営費交付金）（再掲）

①概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、ネットワークで伝送されるデータ量の爆発的増加に伴い、関連機器の消費エネルギーが増大している中で、ネットワーク全体の消費電力量を抑制することが喫緊の課題であり、消費エネルギーの低減に大きく貢献するルータ・スイッチの高速化のための研究開発を実施するとともに、機器そのものの消費エネルギーを低減するための研究開発を実施する。

②技術的目標及び達成時期

2011年度までに、1チャンネルあたり40Gbps超の通信速度に対応するトラフィック計測・分析・管理技術や40Gbpsのインターフェース、さらなる通信速度向上（100Gbps超）を実現するハードウェア技術、SFQ（単一磁束量子）スイッチに関する基盤技術を開発する。

③研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) ITSの規格化事業（第2フェーズ）

①概要

我が国ITS産業の振興と国際競争力強化に貢献するため、これまでの個別システム等の規格化から共通基盤の構築のための規格化に重点を移し、ITS情報通信基盤の規格化、情報収集・活用基盤の規格化、システム社会導入条件の整備等ISO/TC204に対応したITSの国際規格化等を実施。

②技術的目標及び達成時期

平成22年度までにITSに係る標準化案を作成しISOに対して提案又は国際規格として制定する。また自動車の電子化技術に関して、次世代では日本が主導をとるべく戦略を策定。

③研究開発期間

2006年度～2010年度

[ii] 情報機器の徹底的省エネの実現

(1) 次世代大型低消費電力ディスプレイ基盤技術開発（運営費交付金）（再掲）

①概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、次世代の大型液晶及び大型プラズマディスプレイに関する低消費電力ディスプレイを実現するための研究開発を行う。

②技術的目標及び達成時期

2011年度までに、液晶に関しては、高効率バックライト、革新的なTFTアレイプロセス技術・製造装置及び低消費電力型の画像処理エンジン等に係る技術を確認する。また、プラズマディスプレイに関しては、超低電圧駆動等に係る技術を確認する。

③研究開発期間

2007年度～2011年度

[iii] 省エネを支えるプロセス基盤技術

(1) パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発（運営費交付金）（再掲）

①概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、省エネルギーを進めるために、シリコンよりも材料特性に優れたワイドギャップ半導体デバイスを用いた高効率インバータ等の実用パワーエレクトロニクス機器システムの基盤技術の開発を行う。

②技術目標及び達成時期

2008年度までに、ワイドギャップ半導体デバイスを用いた高効率インバータ等の実用パワーエレクトロニクス技術を開発する。

③研究開発期間

2006年度～2008年度

(2) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発—うち窒化物系化合物半導体基盤・エピタキシャル成長技術の開発（運営費交付金）（再掲）

①概要

窒化物系化合物半導体は日本が強みを有し、パワーデバイス、高周波デバイス、発光デバイス等、今後のIT社会を支えとなることを期待されている分野である。しかし、既存のバルク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。

これを突破するため、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、装置メーカー等が相互連携して、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図り、これらデバイスの飛躍的な性能向上と消費電力削減の実現を図る。

②技術目標及び達成時期

2011年度までに、次世代窒化物系半導体デバイスを実現する以下結晶作製技術を開発する。

●基板技術（GaN、AlNバルク結晶作製技術）

・ 口径2～4インチで高品質エピ成膜を可能とする低コストの単結晶基板作製技術の確立。

●エピ技術（エピタキシャル成膜及び計測評価技術）

- ・ 低欠陥高品質エピ層を実現する成膜技術及び膜成長過程を計測評価する技術の確立。
- ・ 高出力かつ高安定動作可能なエピ層の実現
- ・ 高耐圧超高速な新しいデバイス構造の開発

③研究開発期間

2007年度～2011年度

— 中 略 —

5. 政策目標の実現に向けた環境整備

【法律】

- ・ 情報処理の振興を目的に、昭和45年に情報処理の促進に関する法律が制定。
- ・ 半導体集積回路の回路配置の適正な利用の確保を目的に、昭和63年に半導体集積回路の回路配置に関する法律が制定。

【税制】

- ・ 情報セキュリティ強化を確保しつつ生産性の向上を図るためのIT投資に対し、35%特別償却又は7%税額控除（情報基盤強化税制）。
- ・ ソフトウェアを含む機械装置等に対し、30%特別償却又は7%税額控除（中小企業投資促進税制）。

【国際標準化】

各プロジェクトで得られた成果のうち、標準化すべきものについては、適切な標準化活動（国際規格（ISO/IEC）、日本工業規格（JIS）、その他国際的に認知された標準の提案等）を実施する。特に、産学連携ソフトウェア工学の実践における組込みソフトウェア開発については、国際標準の動向を踏まえた開発を促進することにより、プロジェクトの成果の幅広い普及を促進する。

【関係機関との連携】

各プロジェクトのうち、研究開発を効率的・効果的に推進する観点から関係機関との連携が必要なものについては、これを積極的に行う。

但し、関係機関が行う研究開発等の独自性を妨げるものではない。

【導入普及促進】

成果の普及を図るため、これまでの終了プロジェクトの成果の全部または、一部についてはオープンソースソフトウェアとして公開する。

【プロジェクト等との連携について】

高信頼な組込みソフトウェアの開発では、ソフトウェアエンジニアリングセンター（SEC）において提供される各種エンジニアリング手法を開発現場に適用し、当該技術の効果を明らかにしながら開発を進める。

【その他】

・ グラント事業

NEDOの産業技術研究助成事業を活用し、萌芽的・革新的な情報通信関係の技術シーズの発掘を行う。また、ソフトウェア分野の独創的な技術やビジネスシーズを有した人材を発掘する。

・ 事業終了後の連携

産学官連携の研究体制を通して活動を行い、これらの事業の終了後も各分野の研究者・技術者が有機的に連携し、更に新たな研究を作り出す環境を構築する。

・ 人材育成

ハードウェア分野においては、出来る限り大学との連携を重視し、各種フェローシップ制度を活用しつつ、最先端の情報通信基盤研究現場への学生等の参画を推進することにより次世代の研究開発人材の育成を図る。また、ソフトウェア分野における独創的な人材を発掘し、育成するとともに、優秀な人材が集うコミュニティを構築するなど、発掘された人材の才能をさらに伸ばすための取組を進める。

・ 広報／啓発

毎年10月を「情報化月間」としている。

6. 研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金により実施されるもの（事業名に（運営費交付金）と記載したものは、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で、当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

7. 改訂履歴

- (1) 平成12年12月28日付け、情報通信基盤高度化プログラム基本計画を制定。
- (2) 平成14年2月28日付け、情報通信基盤高度化プログラム基本計画及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画を制定。情報通信基盤高度化プログラム基本計画（平成12・12・27工総第12号）は廃止。
- (3) 平成15年1月31日付け、情報通信基盤高度化プログラム基本計画及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画を制定。情報通信基盤高度化プログラム基本計画（平成14・02・25産局第17号）及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画（平成14・02・25産局第18号）は、廃止。

- (4) 平成15年3月10日付け、情報通信基盤高度化プログラム基本計画、次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画、次世代ディスプレイ技術開発プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。情報通信基盤高度化プログラム基本計画（平成15・01・29産局第1号）及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画（平成15・01・29産局第2号）は、廃止。
- なお、情報通信機器高度化プログラム基本計画（平成15・01・29産局第1号）及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画（平成15・01・29産局第2号）の一部は、次世代ディスプレイ技術開発プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画へ移行。
- (5) 平成16年2月3日付け、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。情報通信機器高度化プログラム基本計画（平成15・03・07産局第14号）、次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画（平成15・03・07産局第7号）、次世代ディスプレイ技術開発プログラム基本計画（平成15・03・07産局第4号）は、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画に統合することとし、廃止。また、情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成15・03・07産局第14号）は、廃止。
- (6) 平成17年3月25日付け、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画を制定。高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画（平成16・02・03産局第1号）は廃止。また、平成17年3月31日付け、情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成16・02・03産局第2号）は廃止。
- (7) 平成18年3月31日付け、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画（平成17・03・25産局第7号）及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成17・03・25産局第6号）は廃止。
- (8) 平成19年4月2日付け、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画（平成18・03・31産局第4号）及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成18・03・31産局第5号）は廃止。
- (9) 平成20年4月1日付け、ITイノベーションプログラム基本計画を制定。情報通信機器高度化・デバイス基盤プログラム基本計画（平成19・03・12産局第7号）及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成19・03・12産局第8号）は、本プログラム基本計画に統合することとし、廃止。

ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画

1. 目的

このプログラムは、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなど、あらゆる分野に対して高度化あるいは不連続な革新（ジャンプアップ）をもたらすナノテクノロジー及び革新的部材技術を確立するとともに、その実用化や市場化を促進することで、我が国産業の国際競争力の維持・強化や解決困難な社会的課題の克服等を可能とすることを目的とする。

2. 政策的位置付け

○第3期科学技術基本計画（2006年3月閣議決定）

- ・「ナノテクノロジー・材料分野」は、特に重点的に研究開発を推進すべき分野（重点推進4分野）の一つに指定されていて、優先的に資源配分することとされている。
- ・我が国の材料技術は、基礎研究から応用研究、素材、部材の実用化に至るまでの全ての段階において世界のトップレベルを堅持しており、我が国製造業の国際競争力の源泉となっている。

○「イノベーション25」（2007年6月閣議決定）

- ・「ナノテクノロジー・材料分野」は、中長期的に取り組むべき課題として、「1. 生涯健康な社会形成」、「2. 安全・安心な社会形成」、「4. 世界的課題解決に貢献する社会形成」、及び「5. 世界に開かれた社会形成」の分野に位置付けられている。
- ・所要の措置を講じていくことが必要である事項として以下の点が指摘されている。
 - ・学際領域・融合領域における教育等人材育成、拠点形成
 - ・社会受容を促すための積極的な取り組み
 - ・知的財産確保のための戦略的な取り組み

○「経済成長戦略大綱」（2006年7月財政・経済一体改革会議）

- ・「我が国の国際競争力の強化」の取り組みとして、高度な部品・材料産業やモノ作り中小企業の強化が掲げられている。
- ・「技術戦略マップ」の活用等により、ユーザー企業との垂直連携による研究開発を推進することを通して、我が国経済発展の基盤である高品質、高性能な部品・材料産業の強化を図ることが今後の取組として記載されている。

○「新産業創造戦略2005」（2005年6月経済産業省）

- ・部材分野は、新産業群の創出を支える共通基盤技術として位置づけられている。
- ・「高度部材・基盤産業」の集積を形成していることが、「ものづくり」に不可欠な基盤技術のネットワーク化を通じた現場レベルでの迅速かつ高度な摺り合わせを可能としており、我が国「ものづくり」の強みの源泉となっていると記載されている。

3. 達成目標

- ・世界に先駆けて、ナノテクノロジーを活用した非連続な技術革新を実現する。
- ・我が国部材産業の強みを更に強化することで、他国の追従を許さない競争優位を確保するとともに部材産業の付加価値の増大を図る。
- ・ナノテクノロジーや高機能部材の革新を先導することで、これら部材を活用した情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなどの幅広い産業の付加価値の増大を図る。
- ・希少金属などの資源制約の打破、圧倒的な省エネルギー社会の実現など、解決困難な社会的課題の克服を目指す。

4. 研究開発内容

[プロジェクト]

I. ナノテクノロジーの加速化領域

ナノテクノロジーを活用した不連続な技術革新を加速・促進する。

(1) 異分野異業種融合ナノテクチャレンジ（運営費交付金）

①概要

革新的なナノテクノロジーを活用し、川上と川下の連携、異業種異分野の連携で行う部材開発に
添付 1-6

対して支援を行い、燃料電池、ロボット、情報家電、健康・福祉・機器・サービス、環境・エネルギー・機器・サービスの5分野に資するキーデバイスの実現を目指す。

②技術目標及び達成時期

マテリアル・プロセス研究、加工・計測技術研究、昨今の環境意識向上に対応した研究、社会課題を解決するための基盤技術研究に加え、異分野等の融合研究を推進することにより、2011年度までにナノテクノロジーの産業化のための基盤的技術を確立し、実用化を図る。

③研究開発期間

2007年度～2011年度

(2) ナノテク・先端部材実用化研究開発（運営費交付金）

①概要

新産業創造戦略の趣旨に則り、革新的なナノテクノロジーを活用し、川上と川下の連携、異業種・異分野の連携で行うデバイス化開発の支援を行うため、

○ナノテクノロジー活用による材料・部材の高度化を図る先導的研究開発（ステージⅠ）

○ナノテクノロジー研究成果の部材等への課題設定型実用化により目指した開発支援（ステージⅡ）

について提案公募を実施する。

②技術目標及び達成時期

2010年頃に想定される半導体微細加工の限界を克服するため、分子・原子を1つずつ制御し部品部材に組み上げる「ボトムアップ型」のナノテクノロジーなど革新的なナノテクノロジー等の活用により、情報家電・ロボット、燃料電池等新規産業5分野等において、従来の性能・効率を大幅に改善するナノテク・先端部材技術を開発し、我が国が優位にあるナノテクノロジーを基盤とした国際的な産業競争力を強化することを目標とする。

③研究開発期間

2005年度～2011年度

II. 情報通信領域

ナノテクノロジーや革新的部材開発技術を駆使して既存技術の微細化の壁を突破し、電子デバイス・光デバイスで世界をリードするとともに、高度化された製造技術の開発を行う。

(1) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発—うち新材料・新構造ナノ電子デバイス

①概要

ナノエレクトロニクスは、ナノテクノロジーの最大の応用領域の一つであり、デジタル・デバイスのCMOS構造というアーキテクチャは、優れた工学概念である。また、これまでの半導体技術の微細化に基づく高集積化・高速化・低消費電力化の追求は、シリコン材料をベースとするプレーナ構造を基本とした微細加工プロセスの高度化にあった。

しかし、さらなる微細化によるデバイスのパフォーマンス向上は物理的限界に直面しつつあり、問題は、FETを、シリコン材料をベースとして作製することにより現出していると考えられる。

そのため、次世代の電子デバイスのために「シリコンで培った微細化技術やデバイス原理をこれまで同様に活用しながら、シリコンという材料の物理的限界を突破するための“新材料”や“新(デバイス)構造”を実現すること」、すなわち、「New Nano Materials/Structure on Silicon for “More Moore”」の半導体技術を、ナノテクノロジーを最大限に活用することによって研究開発を行い、将来の産業応用への目を見出し、いく取りかかりとする。

②技術目標及び達成時期

2011年度までに、産業界が10年後を見据えた将来の電子デバイスを開発する際に、産業技術として活用できるかどうかの実現可能性を見極め、また技術シーズを確立する。

③研究開発期間

2007年度～2011年度

(2) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発—うち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（運営費交付金）（再掲）

①概要

窒化物系化合物半導体は日本が強みを有し、パワーデバイス、高周波デバイス、発光デバイス等、

今後のIT社会を支えとなることを期待されている分野である。しかし、既存のバルク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。

これを突破するため、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、装置メーカー等が相互連携して、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図り、これらデバイスの飛躍的な性能向上と消費電力削減の実現を図る。

②技術目標及び達成時期

2011年度までに、次世代窒化物系半導体デバイスを実現する以下結晶作製技術を開発する。

1) 基板技術 (GaN, AlNバルク結晶作製技術)

- ・口径2～4インチで高品質エピ成膜を可能とする低コストの単結晶基板作製技術の確立。

2) エピ技術 (エピタキシャル成膜及び計測評価技術)

- ・低欠陥高品質エピ層を実現する成膜技術及び膜成長過程を計測評価する技術の確立。
- ・高出力かつ高安定動作可能なエピ層の実現
- ・高耐压超高速な新しいデバイス構造の開発

③研究開発期間

2007年度～2011年度

－ 中 略 －

5. 政策目標の実現に向けた環境整備 (関連施策)

ナノテクノロジーは、情報通信、環境、エネルギーなどの分野における科学技術の進歩や課題解決に貢献する重要な技術シーズである。そのため、ナノテクノロジーの研究開発と一体となった関連施策を実施することで、その成果を市場に出していくことが重要である。主な関連施策を、以下に示す。

[技術戦略マップ]

- ・NEDO及び経済産業省では、技術戦略マップを策定、毎年改訂し、ナノテク・部材分野の将来の方向性を見定めながら、合理的かつ効果的な研究開発プロジェクトを推進しているところ。また、技術戦略マップを活用して、多様な連携(川上川下の垂直連携、異業種間の水平連携など)による研究開発を促進、支援し、当該分野の技術革新を促進する。

[サンプル提供・実用化促進]

- ・NEDOでは、実施するナノテクノロジー関連の研究開発プロジェクト成果のサンプルを対象として、それらを活用した用途の開発、実用化ないし製品化提案を有する企業とのマッチングを図ることで、プロジェクトの事業化を促進する取組みを実施しているところ。

[基準・標準化]

- ・ナノテクノロジーの標準化については、研究開発プロジェクトを推進する上で、適切な活動(国際規格ISO/IEC、日本工業規格JIS、その他)を実施し、我が国のナノテクノロジー分野の研究開発、産業活動の効率向上を図り、研究開発の成果が社会で普及する環境を整備する意味でも重要である。これまでの主な取組みについては、下記のとおり。
- ・2005年5月にナノテクノロジーの標準化に向けてISO/TC229の設立がされ、「用語と命名法」、「計測とキャラクタリゼーション」、「健康・安全・環境」の3つのWGにおいて、国際標準化の策定に向けて議論が開始された。
- ・また、2007年6月にシンガポールで開催された第5回総会以降、「材料規格」の分科会の設立に向けて対応しているところ。
- ・さらに、2006年9月にはナノテクノロジーに関する電気電子技術の標準化に向けてIEC/TC113が設立され、「用語と命名法※」、「計測とキャラクタリゼーション※」、「性能評価」の3つのWGにおいて、国際標準化の策定に向けて議論が開始されている。(なお、※はISO/TC229とのジョイントWGとなっている。)

[広報]

- ・ナノテクノロジーに関する先端技術及び製品等の世界最大の展示会である「nano tech」が毎年日本で開催されている。2002年に開催された第1回以降、出展者来場者ともに増加傾向にあり、近年は海外、とくにヨーロッパ・アジア等の出展が目立つようになってきている。

[社会受容]

- ・ナノテクノロジーの社会受容に対する取組みは、ナノテクノロジーの産業化を推進するため、例えば工業ナノ粒子のキャラクタリゼーション技術や人の健康や環境に及ぼす影響など、潜在的な課題に関する知見を蓄積する取組みが重要である。
- ・経済産業省では、2006年度から「ナノ粒子特性評価手法の研究開発」を開始し、工業ナノ粒子の有害性評価手法、また、そのリスク評価手法の確立を目標としたプロジェクトを開始しているところ。

[人材育成]

- ・経済産業省では、「製造中核人材育成事業」を実施しており、産学連携による波及効果の高い人材育成プログラムを開発、実践している。ナノテクノロジー関連の人材育成プログラムも複数実施しているところ。

(例) ナノテク製造中核人材の養成プログラム

概要：情報家電、燃料電池、ロボット、医療機器、バイオ等の応用分野において、その産業の基盤と創出を支える中堅企業を対象として、「基礎加工技能・技術、特殊な要素技能・技術に習熟し、製造技術の高度化を図る人材」及び「豊富なナノ加工プロセスの知識や先端機器を使いこなすノウハウ等を習熟し、製造現場の技能・技術を統括できます人材」を育成するもの。

- ・NEDOでは、我が国の産業技術の発展のため、先端分野や融合分野の技術を支える人材の育成と、人的交流の面から産学連携を促進するための「場」の形成を促進する取組みを実施している（NEDO特別講座）。具体的には、優れた成果を生み出しつつあり、大学が技術の中核となっている研究開発プロジェクトをコアプロジェクトとし、そのプロジェクトリーダーの所属大学に拠点を設置し、関連技術の人材育成、人的交流の拡大、周辺研究の実施を行うもの。ナノテクノロジー関連の研究開発プロジェクトも複数実施しているところ。

[他省庁との連携]

- ・総合科学技術会議／連携施策群において、「ナノバイオテクノロジー」「ナノテク研究推進と社会受容」が設置され、関係省庁と連携して実施しているところ。
- ・経済産業省が実施する研究開発プロジェクトにおいては、文部科学省など他省庁との連携の可能性について検討を行い、研究開発プロジェクトの立案、推進しているところ。

(例) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発－うち新材料・新構造ナノ電子デバイスプロジェクト、希少金属代替材料開発プロジェクト など

6. 研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金により実施されるもの（事業に（運営費交付金）と記載したものは、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で、当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

7. 改訂履歴

- (1) 平成12年12月28日付け制定。
- (2) 平成14年2月28日付け制定。材料ナノテクノロジープログラム基本計画（平成12・12・27工総第16号）は、廃止。
- (3) 平成15年3月10日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成14・02・25産局第8号）は、廃止。
- (4) 平成16年2月3日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成15・03・07産局第1号）は、廃止。
- (5) 平成17年3月31日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成16・02・03産局第7号）は、廃止。
- (6) 平成18年3月31日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成17・03・25産局第4号）は、廃止。
- (7) 平成19年4月2日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成18・03・31産局第13号）は、廃止。
- (8) 平成14年2月28日付け制定。
- (9) 平成15年3月10日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成14・02・25産局第9号）は、廃止。
- (10) 平成16年3月7日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成15・03・07産局第5号）は、廃止。
- (11) 平成17年3月31日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成16・03・07産局第5号）は、廃止。
- (12) 平成18年3月31日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成17・03・25産局第3号）は、廃止。
- (13) 平成19年4月2日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成18・03・31産局第14号）は、廃止。
- (14) 平成20年4月1日付け、ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成19・03・20産局第1号）および革新的部材プログラム基本計画（平成19・03・19産局第4号）は、本イノベーションプログラム基本計画に統合することとし、廃止。

エネルギーイノベーションプログラム基本計画

1. 目的

資源に乏しい我が国が、将来にわたり持続的発展を達成するためには、革新的なエネルギー技術の開発、導入・普及によって、各国に先んじて次世代型のエネルギー利用社会の構築に取り組んでいくことが不可欠である。他方、エネルギー技術開発は、長期間を要するとともに大規模投資を伴う一方で将来の不確実性が大きいことから、民間企業が持続的な取組を行うことは必ずしも容易ではない。このため、政府が長期を見据えた将来の技術進展の方向性を示し、官民双方がこの方向性を共有することで、将来の不確実性に対する懸念が緩和され、官民において長期にわたり軸のぶれない取組の実施が可能となる。以下に5つの政策の柱毎に目的を示す。

1-I. 総合エネルギー効率の向上

1970年代以来、官民をあげて省エネルギーに取り組み、産業構造の転換や新たな製造技術の導入、民生機器の効率改善等により世界最高水準の省エネルギーを達成している。今後、「新・国家エネルギー戦略」に掲げる、2030年までにGDPあたりのエネルギー利用効率を約30%向上を実現していくためには、産業部門はもとより、全部門において、総合エネルギー効率の向上に資する技術開発とその成果の導入を促進する。

1-II. 運輸部門の燃料多様化

ほぼ100%を石油に依存する運輸部門は、我が国エネルギー需給構造上、最も脆弱性が高く、その需給構造の次世代化は、将来に向けた早急な対策が不可欠な課題となっている。

「新・国家エネルギー戦略」に掲げる目標（2030年に向け、運輸部門の石油依存度が80%程度となることを目指す）の実現のためにも、官民が中長期的な展望・方向性を共有しつつ、技術開発と関連施策を推進する。

1-III. 新エネルギー等の開発・導入促進

太陽光、風力、バイオマスなどの新エネルギーは、エネルギー源の多様化や地球温暖化対策の観点から重要である。しかし、現時点では経済性や出力安定性といった普及へ向けての課題が存在する。

そのため、これらの課題解決に向けた技術開発の推進及び新エネルギーの導入促進のための関連施策の実施により、更なる新エネルギーの普及を推進する。

1-IV. 原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保

原子力発電は供給安定性に優れ、運用時にCO₂を排出しないクリーンなエネルギー源である。安全確保を大前提に核燃料サイクルを含む原子力発電を着実に推進する。

1-V. 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

化石燃料資源の大宗を輸入に依存する我が国にとって、その安定供給の確保は国家安全保障に直結する課題である。このため、石油・天然ガス等の安定供給確保を目指し、我が国企業による資源国における資源開発等に対する支援等の施策を進めるとともに、その有効かつクリーンな利用を図る。

2. 政策的位置付け

- エネルギー基本計画（2007年3月閣議決定）

重点的に研究開発のための施策を講ずべきエネルギーに関する技術及びその施策として、

 1. 総合エネルギー効率の向上に資する技術
 2. 原子力利用の推進とその大前提となる安全の確保に資する技術
 3. 運輸部門のエネルギー多様化に資する技術
 4. 新エネルギーに関する技術
 5. 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用に資する技術

以上が位置づけられている。
- 新・国家エネルギー戦略（2006年5月）

世界最先端のエネルギー需給構造の実現を図るため

 1. 省エネルギーフロントランナー計画
 2. 運輸エネルギーの次世代化計画
 3. 新エネルギーイノベーション計画
 4. 原子力立国計画

以上の計画が位置づけられている。また、資源外交、エネルギー環境協力の総合的な強化を図るため、「総合資源確保戦略」が位置づけられている。
- 第3期科学技術基本計画（2006年3月閣議決定）

国の存立にとって基盤的であり国として取り組むことが不可欠な研究開発課題を重視して研究開発を推進する「推進4分野」であるエネルギー分野、分野別推進戦略（2006年3月総合科学技術会議）における「推進4分野」であるエネルギー分野に位置づけられている。
- 経済成長戦略大綱（2006年7月財政・経済一体改革会議）

資源・エネルギー政策の戦略的展開として

 1. 省エネルギーフロントランナー計画
 2. 次世代自動車・燃料イニシアティブ等による運輸エネルギー次世代化
 3. 新エネルギーイノベーション計画
 4. 原子力立国計画
 5. 資源外交、環境・エネルギー協力等の総合的な強化

以上が位置づけられている。
- 京都議定書目標達成計画（2005年4月閣議決定）

「京都議定書の約束を達成するとともに、更に「脱温暖化社会」に向けて長期的・継続的な排出削減を進めるには、究極的には化石燃料への依存を減らすことが必要である。環境と経済の両立を図りつつ、これらの目標を達成するため、省エネルギー、未利用エネルギーの利用等の技術革新を加速し、効率的な機器や先進的なシステムの普及を図り、世界をリードする環境立国を目指す。」とされている。

3. 達成目標

3-I. 総合エネルギー効率の向上

転換部門における「エネルギー転換効率向上」、産業部門における「製造プロセス向上」、民生・運輸部門における「省エネルギー」などにより、エネルギー消費効率を2030年度までに少なくとも30%改善することを目指す。

3-II. 運輸部門の燃料多様化

バイオマス由来燃料、GTL、BTL、CTLなどの新燃料、電気自動車や燃料電池自動車などの導入により、現在ほぼ100%の運輸部門の石油依存度を2030年までに80%程度とすることを目指す。

3-III. 新エネルギー等の開発・導入促進

太陽光、風力、バイオマスなどの新エネルギーの技術開発や燃料電池など革新的なエネルギー高度利用を促進することにより、新エネルギー等の自立的な普及を目指すことで、エネルギー源の多様化及び地球温暖化対策に貢献する。

3-IV. 原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保

2030年以降においても、発電電力量に占める比率を30～40%程度以上とすることを目指すため、高速増殖炉サイクルの早期実用化、既設軽水炉代替へ対応する次世代軽水炉の開発、軽水炉技術を前提とした核燃料サイクルの確立、放射性廃棄物対策などの技術開発を推進する。

3-V. 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

石油・天然ガスの化石燃料の安定供給確保を目指し、資源獲得能力の強化に資する先端的な技術開発を推進するとともに、環境負荷低減のために化石燃料の効率的かつクリーンな利用を促進するための技術開発・導入を目指す。

4. 研究開発内容

4-I. 総合エネルギー効率の向上

— 中 略 —

4-I-vi. 次世代省エネデバイス技術

(1) パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発（運営費交付金）

①概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、省エネルギーを進めるために、シリコンよりも材料特性に優れたワイドギャップ半導体デバイスを用いた高効率インバータ等の実用パワーエレクトロニクス機器システムの基盤技術の開発を行う。

②技術目標及び達成時期

2008年度までに、ワイドギャップ半導体デバイスを用いた高効率インバータ等の実用パワーエレクトロニクス技術を開発する。

③研究開発期間

2006年度～2008年度

(2) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 —うち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（運営費交付金）

①概要

窒化物系化合物半導体は日本が強みを有し、パワーデバイス、高周波デバイス、発光デバイス等、今後のIT社会を支えとなることを期待されている分野である。しかし、既存のバルク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。

これを突破するため、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、装置メーカー等が相互連携して、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図り、これらデバイスの飛躍的な性能向上と消費電力削減の実現を図る。

②技術目標及び達成時期

2011年度までに、次世代窒化物系半導体デバイスを実現する以下結晶作製技術を開発する。

- ・ 基板技術（Ga₂N、AlNバルク結晶作製技術）

- 口径2～4インチで高品質エピ成膜を可能とする低コストの単結晶基板作製技術の確立。

- ・ エピ技術（エピタキシャル成膜及び計測評価技術）

- 低欠陥高品質エピ層を実現する成膜技術及び膜成長過程を計測評価する技術の確立。
- 高出力かつ高安定動作可能なエピ層の実現
- 高耐圧超高速な新しいデバイス構造の開発

③研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) 次世代低消費電力半導体基盤技術開発（MIRAI）（運営費交付金）

①概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、IT化の進展、IT利活用の高度化を支え、あらゆる機器に組み込まれている半導体の低消費電力化を図るため、テクノロジーノード（微細化レベル）45nm以下の次世代低消費電力半導体を実現するため、微細加工の基盤技術やマスク（半導体素子製造過程で用いる原版）の低コスト化・製造時間短縮に必要な基盤技術の開発等を行う。

②技術目標及び達成時期

2010年度までに、マスク設計・描画・検査の各工程に共通的なマスクデータ処理技術、繰り返しパターンやパターン重要度を利用した描画・検査高速化技術等の基本的な開発及びEUVLマスク基盤技術として、許容欠陥の指標明確化、ブランクスの位相欠陥検査技術の確立等を完了する。

③研究開発期間

2001年度～2010年度

(4) 半導体アプリケーションチッププロジェクト（運営費交付金）

①概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、IT化の進展、IT利活用の高度化を支え、あらゆる機器に組み込まれている半導体の低消費電力化を図るため、情報通信機器、特に、情報家電の低消費電力化を実現できる半導体アプリケーションチップ技術の開発を行う。

②技術目標及び達成時期

2009年度までに、情報家電の低消費電力化を実現できるアプリケーションチップ技術を開発する。

③研究開発期間

2003年度～2009年度

(5) 次世代高度部材開発評価基盤の開発（CASMAT2）（運営費交付金）

①概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。半導体産業分野で、集積回路の消費電力低減に必要な配線形成用各種材料等の開発のネックとなっているナノレベルでの材料間の相互影響を評価可能な統合部材開発支援ツールを開発する。これにより、集積回路の種類やデザインルールに応じて、配線形成用各種材料とプロセスの最適な組み合わせの提案技術（統合的材料ソリューション提案技術）を確立する。

②技術的目標及び達成時期

2008年度までに、半導体材料開発に貢献する材料評価基盤を構築するとともに、上記の統合的材料ソリューション提案技術を確立する。また、本プロジェクトを通して得られた基礎データ等については、プロジェクト実施期間中にデータを体系的に整理し、幅広く社会に提供を図る。

③研究開発期間

2006年度～2008年度

(6) 次世代プロセスフレンドリー設計技術開発（運営費交付金）

①概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、IT化の進展、IT利活用の高度化を支え、あらゆる機器に組み込まれている半導体の低消費電力化を図るため、テクノロジーノード45nm以降の半導体に対応するSoC(System on Chip)設計技術を開発する。具体的には、テクノロジーノード45nm以細の半導体の共通設計基盤技術開発として、DFM(Design For Manufacturing)基盤技術を中核とした設計及び製造の全体最適を確保する全く新しいSoC製造フローを開発する。

②技術目標及び達成時期

テクノロジーノード45nm以細のSoC開発において製造性を考慮した共通設計基盤技術を確立し、システムLSIデバイスの省エネルギーを実現するとともに、設計生産性を従来予想に比べ2倍にすることを目標とする。

③研究開発期間

2006年度～2010年度

— 中 略 —

5. 政策目標の実現に向けた環境整備（成果の実用化、導入普及に向けた取組）

5-1. 総合エネルギー効率の向上

- 事業者単位の規制体系の導入
- 住宅・建築物に係る省エネルギー対策の強化
- セクター別ベンチマークアプローチの導入と初期需要創出（高効率機器の導入補助等）
- トップランナー基準の対象機器の拡充等
- アジアにおける省エネルギー対策の推進を通じた我が国の国際競争力の向上

- 国民の省エネルギー意識の高まりに向けた取組

5-Ⅱ. 運輸部門の燃料多様化

- 公共的車両への積極的導入
- 燃費基準の策定・改定
- アジアにおける新エネルギー協力
- 国際標準化による国際競争力向上

5-Ⅲ. 新エネルギー等の開発・導入促進

- 事業者支援補助金等による初期需要創出
- 新エネルギーベンチャービジネスに対する支援の拡大
- 新エネルギー産業構造の形成
- 電気事業制度・ガス事業制度の在り方の検討

5-Ⅳ. 原子力利用の推進とその大前提となる安全の確保

- 電力自由化環境下での原子力発電の新・増設の実現
- 資源確保戦略の展開
- 次世代を支える人材育成
- 中小型炉の海外市場への展開、我が国原子力産業の国際展開支援
- 原子力発電拡大と核不拡散の両立に向けた国際的枠組み作りへの積極的関与
- 国と地域の信頼強化

5-Ⅴ. 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

- 資源国等との総合的な関係強化（研究開発の推進・協力、人材育成・技術移転、経済関係強化など）
- 化石燃料のクリーンな利用の開拓

6. 研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金による実施されるもの（事業名に（運営費交付金）と記載したもの）は、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

また、事業名に（採択テーマ）と記載された事業は、提案公募事業により採択されたテーマを記載したものであり、その採択や評価等は、提案公募事業の実施機関の責任の下、実施されるものである。

(エネルギーイノベーションプログラム・IT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)

「次世代照明等の実現に向けた窒化物半導体等基盤技術開発」基本計画

電子・材料・ナノテクノロジー部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

地球温暖化問題は、世界全体で早急に取り組むべき最重要課題であり、経済・社会活動と地球環境との調和を実現することが求められており、情報、環境、安全・安心、エネルギー等、経済・社会活動を支えるあらゆる分野で省エネルギー化を図る画期的な技術革新が求められている。

これを実現するためには、従来のデバイスと比較して、機能・特性の向上や新機能の発現により、更なる省エネルギー化が期待できる化合物半導体や有機物半導体などの新材料を用いたデバイスに関する基盤技術を推進する必要がある。

新材料デバイスの適用領域としては、白熱電球や蛍光灯といった従来照明をLEDや有機ELへ置き換えることにより省エネルギー化や高機能化が期待できる照明分野や、情報通信機器のみならず自動車や医療機器など広範な分野の製品の省エネルギー化、高機能化が期待される窒化物半導体を用いたワイドバンドギャップ半導体の分野がターゲットとなる。

しかし、照明に関しては、寿命・発光効率・演色性の観点で高効率・高品質な性能に加えて、材料、並びに製造プロセスのコストを低減させる必要があり、その為には既存技術の改良にとどまらない基盤的な研究開発が不可欠である。また、LEDや有機ELといった次世代照明の普及促進のためには、国際標準化フォローアップ活動や次世代照明の用途探索活動など、研究開発以外の側面支援も必要である。

また、窒化物半導体に関しては、高周波演算素子やパワーデバイス等の高性能デバイスを実現する上で十分な品質の結晶作製が実現しておらず、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を超える基盤技術の確立が不可欠である。

本プロジェクトでは、これら課題を解決するための基盤技術開発ならびに国際標準化等の研究開発支援を行うことにより、我が国のエネルギー消費量削減に貢献するとともに、地球温暖化抑制につなげることを目的として実施する。

(2) 研究開発の目標

蛍光灯と比較して消費電力を半分にする発光効率(130 lm/W以上)の高さと自然光に限りなく近い演色性(平均演色評価数80以上)を両立しつつ、蛍光灯並みのコスト(寿命年数及び光束当たりのコスト0.3円/lm・年以下)で量産可能な次世代照明の実現を目指すための基盤技術開発を行い、当該照明の早期実用化を図る。併せて、今後我が国が次世代照明を健全に普及させるとともに、海外市場を開拓して産業を発展させていくために、性能評価等の国際規格策定に関する活動を行い、次世代照明の国際標準を確立するための側面支援を行う。

また、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成に必要な窒化物半導体結晶成長技術を目指して、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の開発、並びに無欠陥ヘテロ接合構造実現のための低欠陥高品質GaN及び混晶エピ層を実現するエピタキシャル成長法をそれぞれ開発するとともに、窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価として、有極性、無極性それぞれの単結晶基板で作成したFETの特性の差違、利害得失の明確化や、広い混晶範囲における耐圧と結晶欠陥の相関の明確化を行う。

(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。

- 研究開発項目① 次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発
- (1) LED照明の高効率・高品質化に係る基盤技術開発
[委託][共同研究 (NEDO負担率: 1/2)]
 - (2) 有機EL照明の高効率・高品質化に係る基盤技術開発
[委託][共同研究 (NEDO負担率: 1/2)]
 - (3) 戦略的国際標準化推進事業[委託]

- 研究開発項目② 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
- (1) 高品質大口径単結晶基板の開発[委託]
 - (2) 大口径基板上的高品質エピタキシャル結晶成長技術[委託]
 - (3) 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価[委託]

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、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。）が、単独ないし複数の原則本邦の企業等の研究機関（原則、本邦の企業等で日本国内に研究開発拠点を有していること。なお、国外企業等（大学、研究機関を含む）の特別の研究開発能力、研究施設等の活用または国際標準獲得の観点から国外企業等との連携が必要な部分を国外企業等との連携により実施することができる。）から公募によって研究開発実施者を選定し、委託して実施する。

また、研究開発項目②については、研究開発に参加する各グループの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の推進を図る観点から、NEDOが委嘱する研究開発責任者（プロジェクトリーダー）として、国立大学法人福井大学 葛原 正明氏を置き、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、必要に応じて設置される技術推進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、四半期に一回以上、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

研究開発は、平成 19～25 年度に実施する。

研究開発項目①次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発の（1）、（2）は、ステージ I として 2 年間（平成 21～22 年度）、ステージ II として 3 年間（平成 23～25 年度）それぞれ実施する。（3）については、平成 22～25 年度の 4 年間実施する。

研究開発項目②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は、6 年間（平成 19～24 年度）実施する。

4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的および政策的観点から見た技術開発の意義、目的達成度、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を行い、必要に応じてプロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。研究開発項目①次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発のうち、（1）（2）については平成 23 年度、研究開発項目②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については平成 21 年度に中間評価を実施する。

また、事後評価については、研究開発項目①次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発については

平成 26 年度に、研究開発項目②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については平成 25 年度に実施する。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などに応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

また、研究実施主体が競争的に研究開発を行うことによりイノベーションを加速させることを目的として、研究開発項目①次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発の（１）、（２）については「ステージゲート制度」を導入する。具体的には、プロジェクト実施期間を前半 2 年間の「ステージ I」（平成 21～22 年度）と後半 3 年間の「ステージ II」（平成 23～25 年度）に分割し、「ステージ I」の最終段階（平成 22 年度）にステージゲート評価を実施する。ステージゲート評価では、「ステージ I」の研究目標に対する達成度、「ステージ II」の研究目標に対する実現性を中心に、定性的・定量的に評価を行い、「ステージ II」における研究開発主体の選定を行う。「ステージ II」へ移行するにあたり、研究開発の進捗状況を踏まえ、必要に応じて、ミッション及び実施体制を見直すこととする。また、本プロジェクト終了後に事後評価を実施し、最終的なミッションの達成度を定性的・定量的に評価する。

5. その他の重要事項

(1) 研究開発成果の取り扱い

①成果の普及

得られた研究開発成果のうち、共通基盤技術に係るものについては、プロジェクト内で速やかに共有した後、NEDOおよび実施者が協力して普及に努めるものとする。

そのために、次世代照明の健全普及と海外市場の開拓により産業を発展させていくために、性能評価等の国際規格策定に関する活動を行い、次世代照明の国際標準を確立していくための側面支援を行う。

②知的財産権の帰属

委託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 26 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。

なお、国際展開を見据えた次世代照明技術に係る知財管理を適切に行うこととする。

(2) 基本計画の変更

NEDOは、基本計画の内容の妥当性を確保するために、社会・経済的状況、内外の技術開発動向、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。

(3) 根拠法

本プロジェクトは、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 号二に基づき実施する。

6. 基本計画の改訂履歴

(1) 平成 23 年 3 月 「次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発」と「ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発」及び「戦略的国際標準化推進事業」（LED及び有機ELに関する標準化）の基本計画の統合

(2) 平成 24 年 3 月 次の項目を修正

①「次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発」に中間評価結果を反映

- ・ 「（１）LED照明の高効率・高品質照明の基盤技術開発」に目標を追加
- ・ 「（３）戦略的国際標準化推進事業」に「(c)次世代照明を用いた評価実証」を追加

②「ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発」の目標追加及び期間延長

研究開発項目① 次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発

(1) LED照明の高効率・高品質化に係る基盤技術開発

1. 研究開発の必要性

LED照明を高効率かつ高品質にするには、現在一般的にLED照明用基板の材料として使われているサファイアを窒化物材料等にするなど、基板部分を高性能な材料にすることが有効であるが、サファイア以外の基板については、基板の価格が非常に高額であるため、バルク化や大口径化等、基板の低コスト化に繋がる手法の確立が求められている。同時に、照明用LEDとして高効率な性能を実現するために、基板の結晶欠陥を極力減少させることも求められている。

これらの問題を解決し、高効率かつ高品質LED照明の作製を低コスト化することを目的として、LED照明用窒化物等基板の製造等に関する研究開発を実施する。

2. 研究開発の具体的内容

高効率(LEDデバイスレベルで200 lm/W以上)かつ高品質(平均演色評価数80以上)LED照明の低コスト化を実現するため、窒化物等の照明用基板の生産性向上を目的とした結晶成長技術の開発やLED素子構成構造の最適化等デバイスの高度化についての技術開発を行う。

(a) 窒化物等結晶成長手法の高度化に関する基盤技術開発

バルク結晶方式、板状結晶方式等の手法を用いて、低歪・低転位窒化物等結晶成長技術を高度化するための開発を実施する。

具体的には、結晶核から大口径の低歪・低転位種結晶作製のための成長方位制御や大口径種結晶基板上に窒化物等結晶を高速・長時間成長を目指すバルク結晶方式、異種基板上での大口径窒化物等結晶低歪化技術及び大口径窒化物等結晶の高速・長時間成長技術を目指す板状結晶方式等、結晶成長手法の高度化を可能とするための技術を開発する。

あわせて、発光効率200 lm/W以上かつ平均演色評価数80以上を達成するLEDデバイスを実現するための技術開発を行う。

(b) 基板の応用によるデバイス技術の開発

基板の特殊ドーピングやLEDデバイス構造の最適化等、窒化物等結晶成長技術の高度化以外のアプローチにより、発光効率200 lm/W以上かつ平均演色評価数80以上のLED照明を低コスト化するための技術開発を行う。

3. 達成目標

それぞれの方式について、以下の目標を達成する。

(a) 窒化物等結晶成長手法の高度化に関する基盤技術開発

<ステージI 達成目標(平成22年度末)>

5~10mm角サイズの結晶の作成およびLEDデバイスとしての評価を行い、発光効率175 lm/W以上、平均演色評価数80以上の達成可否を検証する。

<ステージII 達成目標(平成25年度末)>

バルク結晶成長方式で、結晶欠陥 10^4 cm^{-2} 以下、LED発光波長領域において光吸収が極めて少なく、かつ研磨後の基板サイズが4インチ以上となる結晶成長技術を、板状結晶成長方式で、結晶欠陥が 10^6 cm^{-2} 以下、LED発光波長領域において光吸収が極めて少なく、かつ研磨後の基板サイズが6インチ以上となる結晶成長技術を、それ以外の手法においては、上記基板サイズの大口径化に相当する生産性を実現する技術をそれぞれ確立する。

いずれの手法においても、LEDデバイスとして電流値350mA以上で発光効率200 lm/W以上かつ平均演色評価数80以上を達成する。またLEDデバイスにした場合のコストを評価するための試算を行う。

(b) 基板の応用によるデバイス技術の開発

<ステージI 達成目標(平成22年度末)>

5~10mm角サイズの結晶の作成およびLEDデバイスとしての評価を行い、発光効率175 lm/W

m/W以上、平均演色評価数 80 以上の達成可否を検証する。

<ステージ II 達成目標（平成 25 年度末）>

LEDデバイスとして発光効率 200 lm/W以上、平均演色評価数 80 以上を達成する。また LEDデバイスにした場合のコストを評価するための試算を行う。

(注) ステージゲート評価の結果、本研究テーマについては平成 22 年度末をもって終了した。

(2) 有機EL照明の高効率・高品質化に係る基盤技術開発

1. 研究開発の必要性

有機EL照明は、均一発光が可能な効率的な面発光光源であるため、今後の省エネルギー化を促進する照明として期待されている。

現在の有機EL照明技術は、課題とされていた演色性、寿命等において蛍光灯と同等以上の性能を実現できるレベルにある。今後、有機EL照明が蛍光灯を代替するためには、演色性、寿命のみならず、さらに効率性においても蛍光灯を大幅に凌ぐ性能向上が要求される。さらに普及の観点からは蛍光灯と同等以上の低コスト化も望まれる。

有機EL照明の効率性を大幅に向上させると同時に低コスト化を図ることができれば、蛍光灯の代替普及が急速に進み、省エネルギー化に貢献できる。そのために、高効率・高品質及び低コスト化を同時に実現する革新的な技術開発を行う。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 高効率・高品質有機EL照明デバイス技術開発

高効率（発光効率 130 lm/W以上）高品質（平均演色評価数 80 以上、輝度 1,000 cd/m² 以上、輝度半減寿命 4 万時間以上）を実現する有機EL照明デバイス技術開発を行う。具体的には、光学干渉の影響を抑制して効率を向上させる光取り出し技術、気密性を高めて品質を向上させる封止技術、製造工程の高速化を図るプロセス制御技術、材料の利用効率向上を図る薄膜層形成技術等の技術開発を行う。加えて有機ELを構成する基板・透明電極・有機層等について高効率・高品質化且つ低コスト化に向けた材料開発を行う。

3. 達成目標

(1) 高効率・高品質有機EL照明デバイス技術開発

<ステージ I 達成目標（平成 22 年度末）>

発光面積 100 cm² 以上で発光効率 130 lm/W以上、平均演色評価数 80 以上、輝度 1,000 cd/m² 以上、輝度半減寿命 4 万時間以上の有機EL照明実現の技術課題を明確にして、具体化する実行計画を策定する。理論解析・光学シミュレーション等により実現方式の光学設計を行い、プロトタイプ試作により発光面積 25 cm² 以上で発光効率 50 lm/W以上、平均演色評価数 80 以上、輝度 1,000 cd/m² 以上、輝度半減寿命 1 万時間以上の有機EL照明光源を実現する。

また高効率な製造プロセス実現に必要なとされる要件を明確にして設計・製作及び基本データの収集を行い、要件を充足していることを検証する。

<ステージ II 達成目標（平成 25 年度末）>

発光面積 100 cm² 以上で発光効率 130 lm/W以上、平均演色評価数 80 以上、輝度 1,000 cd/m² 以上、輝度半減寿命 4 万時間以上の有機EL照明光源を実現すると同時に、コストを評価するための試算を行う。

(3) 戦略的国際標準化推進事業

(a) LED光源並びにLED照明器具の性能評価方法の国際標準化に係る研究開発

1. 研究開発の必要性

近年、白熱電球や蛍光灯に代わる省エネルギー光源として、LED光源およびLED照明器具（以下、LED照明）は国内外で広く普及しつつある。性能の向上は著しく、また今後も、現在主に用いられている蛍光灯やHIDランプ（高輝度放電ランプ）の性能を超えるような著しい性能向上が期待されることから、二酸化炭素の大幅な排出削減が見込まれる次世代の照明として、LED照明の世界市場が急速に拡大していくことが予想される。

しかし、LED照明は半導体の固体発光素子に基づく全く新しい光源であり、従来の白熱電球や蛍光灯とは発光形態が大きく異なるため、白熱電球や蛍光灯で定められた国際規格および国内規格による定義、測定方法、照明方法などは、多くの場合、そのまま適用できない。すなわち現在、LED照明の性能を評価する基準の多くには、国際的な統一基準が存在していないため、消費者がLED照明器具を同じ基準で比較検討し適切に選択することができず、LED照明の世界的な普及の阻害要因となっている。

今後我が国のLED照明等の次世代照明を健全に普及させるとともに、海外市場を開拓して産業を発展させていくためには、LED照明の性能が正しく評価される世界共通の「ものさし」をつくることが重要であるとともに、性能評価の国際標準化の分野において主導的役割を果たせるようにすることが必要である。

そのため、本事業は、LED照明の性能評価方法に関する基盤技術を開発し、国際標準化に向けた活動に繋げることを目的とする。

2. 研究開発の具体的内容

本事業は、我が国の研究開発による成果を国際市場に普及していくために、国際標準化に向けた研究開発等を実施することで、研究開発成果を早期に上市し、国際市場の獲得に結びつけるための環境作りに寄与することを目標とし、事業を実施する。

具体的には、国際標準化獲得に向けた戦略を十分に検討した上で、光の強さ、色、寿命等、LED照明の性能を正しく試験評価するために必要な課題を設定し、これを克服するための研究開発を実施するとともに標準化に向けた活動を行う。

3. 達成目標

LED照明の評価技術に関して、それぞれ以下の課題を達成することを目標とする。

(i) LED照明利用技術に関わる評価技術開発

(ア) LED照明の色再現性能評価技術開発

現在CIEで検討が行われている現行の演色性評価方法の改訂を踏まえて、LED照明の特徴を踏まえた新しい演色性評価方法の確立に向けて、試験色の選定、視感評価を行うと共に、LED用の演色性評価方式についての検討を行う。

(イ) LED照明のグレア評価技術開発

LED照明は高輝度発光体の集合体で構成されていることから、現行のCIEによるグレア評価方法では正確に評価出来ず、照明設計の実際面において大きな支障になっています。そのような課題を踏まえ、LED照明に特徴に対応した新しい評価手法の確立を検討する。具体的には、評価用の照明器具を試作すると共にLED照明のグレアの評価実験を行い、現行法の課題を整理する。併せて、CIE等の動向も踏まえつつLED用計測システムの検討を行い、技術開発の方向性や現状の問題点の明確化を行う。

(ii) LED照明の測光技術開発

(ア) LED照明の配光測定技術開発

現状測定が不可能とされているLED照明の全光束、配光、器具効率の測定を実現するため、多受光方式配光測定装置による配光・全光束一括測定技術の検討および手法の確立を行う。併せ

て、より汎用的な測光技術の確立についても検討を行う。

(イ) LED照明環境における視作業効率測光技術

現在CIEにおいて検討されている屋外照明の明るさ効率評価方法に対する規格変更に対応するため、薄暮から夜間における視作業効率に関する測光方法の確立を目指す。視作業効率測光装置を設計・試作するとともに、現在当該分野で主導的な位置付けにあるNIST等とも意見交換を行いつつ、本装置の評価を行う。

(b) 有機EL照明に関する標準化

1. 研究開発の必要性

有機EL照明は、一般照明である蛍光灯を将来代替する高効率の次世代照明として急速に進化しつつある。現在は研究開発段階であるが、一部のパネルメーカーからはサンプル出荷が始まっており、数年以内には次世代照明として製品化されて国際的な競争が始まろうとしている。

有機EL照明は日本が世界に先駆けて開発し、現在も研究開発の最先端を走っている技術分野である。今後、製品化段階で日本の有機EL照明技術が生かされるためには、製品を規定する国際標準が本技術レベルを踏まえて決定されなければならない。照明の国際標準規定には通常は3～4年を要することを考慮すると、現段階から標準化活動を開始することが必須である。

また有機EL照明の標準化は、照明業界にとっては世界に先駆けて日本から初めて発信する先取り標準化活動であり、照明業界での日本の国際的な地位向上にもつながる。

2. 研究開発の具体的内容

従来の照明器具の標準を土台に、有機EL照明の課題に絞り標準化を進める。標準化の課題として光源／器具の測光方法、光源／器具の性能に取り組む。

3. 達成目標

標準推進団体にて標準規格化を行う際に必要な光源／器具測光方法・測色方法の研究として、測光設備を利用した測光方法の検討・試験・評価・検証を行い、標準化を提案に必要な裏付けデータを集積して報告する。本活動結果は、照明学会ガイドライン委員会にて平成23年度末に作成される標準化ガイドラインに反映され、国際照明委員会での日本規格提案の根拠として活用される予定である。さらに国際照明委員会での情報収集、提案支援を行い国際標準化活動に貢献する。

(c) 次世代照明を用いた評価検証

1. 研究開発の必要性

LED照明と有機EL照明は、発光原理が既存照明と異なる新しい照明であることから、人体に与える生体的影響については十分把握されていない。今後、これら新しい照明の普及がますます加速していくと予想されることから、本照明が人体に与える影響を調査分析し、その特質を明確にすることは、LED照明と有機EL照明の健全な普及促進に重要である。

2. 研究開発の具体的内容

LED照明または有機EL照明が人体に与える影響について、医学的工学的観点から調査分析することを目的とした評価検証等を行い、次世代照明の基盤技術開発、国際標準化事業のプロジェクト推進方針変更や規格整備等に活用する。

3. 達成目標

LED照明、有機EL照明を適用した照明空間を設営の上で評価検証を実施し、これらの照明が人体に与える影響について客観的に評価することが可能な検証結果を示すとともに、国際規格化等を検討する。

1. 研究開発の必要性

(1) 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ェハは、現在 GaN 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ェハ、縦型デバイス用の低抵抗ウェハ実現に向けて、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 インチ級の究極の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) 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) 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 2-5 GHz の携帯電話基地局用の 200-400W 増幅器と 30 GHz 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 2-5 GHz では 1 kW 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エハや各種窒化物半導体ウエ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。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 高品質大口径単結晶基板の開発

(a) 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。

(b) 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 μ m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。

(c) 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。

(d) 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) 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AlGaInN/InGaNなどのヘテロ接合を実現する成長技術を開発する

(a) 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。

(b) 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

(c) 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

(d) 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

(a) 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ェハー等を用い、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。

(b) 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ェハー等を用い、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。

(c) 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ェハーをもとに、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。

(d) 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ェハーをもとに、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。

3. 達成目標

(1) 高品質大口径単結晶基板の開発

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する。有極性単結晶基板では転位密度 $<5 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$ 、無極性単結晶基板では転位密度 $<10^5 \text{ cm}^{-2}$ 、積層欠陥密度 $<10^3 \text{ cm}^{-1}$ の特性を得る。また、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) 大口径基板上の高品質エピタキシャル結晶成長技術

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、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 $1 \geq x \geq 0.5$ 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 $>10^{17} \text{ cm}^{-3}$

口径4インチ基板状にて、面内均一度：厚み $\pm 10\%$ 、組成： $\pm 10\%$ 、ドーピング不純物濃度 $\pm 20\%$

また、GaN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 $<10^5 \text{ cm}^{-2}$

口径4インチ基板状にて、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

有極性単結晶基板上F E Tと無極性単結晶基板上F E Tの特性の差違、及びその利害得失の明確化を実施する。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を実施する。

また、G a N基板を用いて、耐圧 $> 1, 200$ V級の縦型および横型トランジスタを試作・評価し、S iやS i C等多種基板との比較においてG a Nが有利または不利な点を明らかにする。

事前評価関連資料

事前評価書

	作成日	平成 19 年 3 月 2 日
1. 事業名称 (コード番号)	ナノエレクトロニクス半導体新材料・ナノデバイス新構造技術開発 ーうち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	
2. 推進部署名	ナノテクノロジー・材料技術開発部	
3. 事業概要	<p>(1) 概要</p> <p>高周波デバイス、パワーデバイス等、今後の 21 世紀社会を支える重要半導体デバイスの飛躍的な性能向上と適用製品の消費電力削減を図るため、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を開発する。現状技術では実現困難な電子デバイス用高品質大口径窒化物半導体バルク単結晶基板の作製技術および高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発を行う。また、これら窒化物単結晶基板上に作成した無極性構造の電子デバイスの評価を行う。</p> <p>(2) 事業規模：総事業費 30 億円</p> <p>(3) 事業期間：平成 19 年度～23 年度（5 年間）</p>	

4. 評価の検討状況

(1) 事業の位置付け・必要性

① 事業の位置付け

本事業は、「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を踏まえた事業である。

研究開発プログラムとしては「省エネルギープログラム」及び「ナノテクノロジープログラム」に位置付けられる。

② 事業の必要性

窒化物半導体は日本が強みを有する分野であるが、今後要求される情報通信の高速・大容量化や省エネに対応したデバイスを実現していくには、既存のバルク単結晶基板成長技術やエピタキシャル成長技術では対応できず限界に達している状況である。

総合科学技術会議「分野別推進戦略（H18.3）」や「エネルギー技術戦略の基本的考え方（H18.5）」にあるとおり、高性能デバイスは情報家電、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機能化や制御を実現する上で中核的役割を果たす存在であり、その実用化を図るうえで制約の一つとなっているのが高品質窒化物半導体結晶である。従ってこの作製技術を開発することは、民生、運輸、産業の各部門における省電力化に貢献することとなり、抜本的な省エネ対策強化を求められている現状において必要不可欠である。

なお、開発対象とする技術は民間各社が至近の実用化を狙って熾烈な競争を行っている現状の延長線上にある技術ではなく、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、装置メーカー等が連携して行う競争前段階の基盤技術であり、リスクも大きい。

従ってこれらの開発を効率的に行い、我が国化合物半導体産業の国際競争力を維持強化するという方針からも国からの一定の関与によって研究開発を推進することが是非共必要である。

(2) 研究開発目標の妥当性

<目標>

中間目標はH21年度、最終目標はH23年度末とする。

① 高品質大口径単結晶基板の開発

(中間目標)

- (1) 基板口径：2インチ
- (2) 転位密度：有極性基板 $<10^5\text{cm}^{-2}$ 、無極性基板 $<10^6\text{cm}^{-2}$
- (3) 抵抗率：導電性基板 $<10^{-1}\Omega\text{cm}$ 、高抵抗基板 $>10^5\Omega\text{cm}$
- (4) 結晶大型化（3~4"φ）に必要な要素技術の明確化

(最終目標)

- (1) 基板口径：3~4インチ

- (2) 転位密度：有極性基板 $<5 \times 10^3 \text{cm}^{-2}$ 、無極性基板 $<10^5 \text{cm}^{-2}$
- (3) 積層欠陥密度： $<10^3 \text{cm}^{-1}$
- (4) 抵抗率：導電性基板 $<10^{-2} \Omega \text{cm}$ 、高抵抗基板 $>10^6 \Omega \text{cm}$

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)

2 “ ϕ 窒化物単結晶有極性及び無極性バルク基板上エピ成長：

- (1) $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 及び $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 混晶
 - (i) 組成： $0.5 \geq x \geq 0.2$
 - (ii) 転位密度： $<10^8 \text{cm}^{-2}$
 - (iii) ドーピング不純物濃度：n型 $>10^{18} \text{cm}^{-3}$ 、p型 $>10^{17} \text{cm}^{-3}$
 - (iv) 面内均一度：厚さ $\pm 5\%$ 、組成 $\pm 5\%$ 、ドーピング不純物濃度： $\pm 10\%$
- (2) GaNホモエピ層
 - (i) 残留ドナー濃度： $<5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$
 - (ii) 転位密度：有極性基板 $<10^5 \text{cm}^{-2}$ 、無極性基板 $<10^6 \text{cm}^{-2}$
 - (iii) 面内均一度：厚さ $\pm 5\%$ 、ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$
 - (iv) ドーピング精度： $\pm 20\%$

(最終目標)

3～4 “ ϕ 窒化物単結晶有極性及び無極性バルク基板上エピ製膜

- (1) $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 及び $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 混晶
 - (i) 組成： $1 \geq x \geq 0.5$
 - (ii) 転位密度： $<10^6 \text{cm}^{-2}$
 - (iii) ドーピング不純物濃度：n型 $>10^{18} \text{cm}^{-3}$ 、p型 $>10^{17} \text{cm}^{-3}$
 - (iv) 面内均一度：厚さ $\pm 5\%$ 、組成 $\pm 5\%$ 、ドーピング不純物濃度： $\pm 10\%$
- (2) GaNホモエピ層
 - (i) 残留ドナー濃度： $<5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$
 - (ii) 転位密度：有極性基板 $<5 \times 10^3 \text{cm}^{-2}$ 、無極性基板 $<10^5 \text{cm}^{-2}$
 - (iii) 面内均一度：厚さ $\pm 5\%$ 、ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$
 - (iv) ドーピング精度： $\pm 20\%$
 - (v) 2次元電子ガス移動度： $>2,500 \text{cm}^2/\text{Vsec}$

③ 窒化物単結晶基板上電子デバイスの評価

(中間目標)

- (1) 窒化物単結晶基板上FETと他種基板上FETの特性の差異、及びその利害特質の明確化
- (2) 基板/エピ層の品質とデバイス特性との関係の明確化と項目①②へのフィードバック

(最終目標)

- (1) 有極性単結晶基板上FETと無極性単結晶基板上FETの特性の差異、及びその利害**特性**

の明確化

- (2) 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項目①②へのフィードバック

<妥当性>

目標として世界トップクラスの技術的に非常に高いレベルを狙っており、多大な産業上への効果が期待できるので妥当なところである。

(3) 研究開発マネジメント

公募により事業委託先を決定し最適な研究開発体制を構築する。プロジェクトリーダーを選定し、それを中心として運営する。また研究開発委員会を2～3回/年開催し、事業の進捗状況及び進め方について検討、管理していく。事業開始後3年目において中間評価を行い、その評価結果を踏まえ以降の事業の進め方について見直しを行う。

(4) 研究開発成果

本事業の成果として期待される高品質大口径窒化物単結晶基板上のAlGaNEピタキシャル成長技術を用いたパワーデバイスを応用したインバーターが実用化されることにより、生産現場および家庭で用いられる多くの小中出力の電気製品の低消費電力化や今後さらに需要が拡大すると考えられるハイブリッドカー電源システムの小型化が図られ、エネルギー消費量を大幅に削減することが可能となる。またInGaNEピタキシャル成長技術を用いた高周波デバイスが実用化されると、次世代携帯端末、車載用ミリ波・マイクロ波レーダ等での高効率化が図られ、省エネルギー・高性能・小型化が可能となる。

その他これらデバイスの応用分野を含め広範な領域での一層のエネルギー消費削減が実現されるので、本事業の寄与は非常に高いものが期待される。

(5) 実用化・事業化の見通し

実用化は2015年以降の見通しであるが、これによる省エネ効果（原油換算値）は2020年に130万kl/年（汎用インバーターにおけるGaNE化率50%を仮定）、2030年に300万kl/年（同85%）である。

(6) その他特記事項

特になし

5. 総合評価

NEDOの実施する事業として適切であると判断する