「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」

事後評価報告書

表　紙

平成２５年１１月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

研究評価委員会

平成２５年１１月

独立行政法人新エネルギー･産業技術総合開発機構
　理事長　古川　一夫　殿

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会 委員長 西村　吉雄

ＮＥＤＯ技術委員・技術委員会等規程第３３条の規定に基づき、別添のとおり評価結果について報告します。

「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」事後評価報告書

平成２５年１１月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

研究評価委員会

目　次

はじめに　1
分科会委員名簿　2
審議経過　3
評価概要　4
研究評価委員会におけるコメント　7
研究評価委員会委員名簿　8

第１章　評価
１．プロジェクト全体に関する評価結果　1-1
１．１　総論
１．２　各論
２．個別テーマに関する評価結果　1-20
２．１　高品質大口径単結晶基板の開発
２．２　大口径基板上の高品質エピタキシャル結晶成長技術
２．３　窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価
３．評点結果　1-30

第２章　評価対象プロジェクト
１．事業原簿　2-1
２．分科会における説明資料　2-2

参考資料１　評価の実施方法　参考資料 1-1
参考資料２　評価に係る被評価者意見　参考資料 2-1
参考資料３　分科会議事録　参考資料 3-1
参考資料４　評価結果を受けた今後の取り組み方針について　参考資料 4-1

はじめに

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構においては、被評価プロジェクトごとに当該技術の外部専門家、有識者等によって構成される研究評価分科会を研究評価委員会によって設置し、同分科会にて被評価対象プロジェクトの研究評価を行い、評価報告書案を策定の上、研究評価委員会において確定している。

本書は、「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」の事後評価報告書であり、第３５回研究評価委員会において設置された「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」（事後評価）研究評価分科会において評価報告書案を策定し、第３６回研究評価委員会（平成２５年１１月６日）に諮り、確定されたものである。

平成２５年１１月
独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

「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」

事後評価分科会委員名簿

（平成２５年６月現在）

	氏　名	所　属、役　職
分科会長	よしかわ　あきひこ 吉川　明彦	千葉大学　産学連携・知的財産機構 スマートグリーンイノベーション研究拠点　特任教授・名誉教授
分科会長代理	おくむら　つぐのり 奥村　次徳	首都大学東京　副学長 （首都大学東京大学院　理工学研究科　電気電子工学専攻　教授）
委員	きっかわ　としひで 吉川　俊英	株式会社富士通研究所　基盤技術研究所　先端デバイス研究部 主管研究員
	ただとも　かずゆき 只友　一行	山口大学　大学院理工学研究科　教授
	つじ　しんじ 辻　伸二	独立行政法人科学技術振興機構　戦略研究推進部（兼）経営企画部 科学技術イノベーション企画推進室　主任調査員
	つだ　くにお 津田　邦男	株式会社東芝　研究開発センター　電子デバイスラボラトリー 研究主幹
	はしづめ　たもつ 橋詰　保	北海道大学　量子集積エレクトロニクス研究センター 量子結晶フォトニクス研究分野　教授

敬称略、五十音順

審議経過

● 第１回　分科会（平成２５年６月２４日）

公開セッション

１．開会、分科会の設置、資料の確認

２．分科会の公開について

３．評価の実施方法と評価報告書の構成について

４．プロジェクトの概要説明

非公開セッション

５．プロジェクトの詳細説明

６．全体を通しての質疑

公開セッション

７．まとめ・講評

８．今後の予定

９．閉会

● 第３６回研究評価委員会（平成２５年１１月６日）

評価概要

１．総論

１）総合評価

窒化物半導体関連の結晶成長・物性制御関連の基盤技術開拓とデバイス展開は、我が国が世界を先導してきたが、バルク結晶成長や一部のデバイス開発分野では国外機関の健闘もめざましい点があり、さらにグローバルな事業化としては新興国による低価格戦略による展開が顕著である。さらに、パワー半導体の省電力化は、CO_2削減という社会的な期待に応えるものであり、重要な課題である。

本プロジェクトは、バルク基板成長、高品質エピ成長、デバイス作製・評価を柱として、産学連携のもとに、低損失・大電力 GaN(窒化ガリウム)電子デバイスの開発を通じて省エネルギー技術革新に寄与することを目的としており、NEDO のプロジェクトとして緊急性・重要性が高い。また、GaN のバルク基板結晶育成、高品質エピタキシャル成長、デバイス特性評価という技術の垂直統合を行った連携は有効であり、世界最高レベルの大きな成果を生み出した点は高く評価できる。

但し、バルク基板結晶の供給量が十分ではなかったため、下流側であるエピタキシャル成長層の結晶品質およびデバイス特性に対するバルク基板の優位性が必ずしもクリアに示されたとはいえない。また、デバイス性能として、Si や SiC デバイスを凌駕する優位性を示す成果が得られておれば、なお価値の高い研究開発になった。事業化に向けては、GaN 素子の安定性・信頼性の確立など、新たに開発が必要な関連技術もまだ多い。

２）今後に対する提言

大電力縦型デバイスが開発技術の重要な出口として大いに期待されている。本プロジェクトによって、性能達成に向けた基礎技術はほぼ出来ているが、今後、大電力縦型デバイスとしての性能の優位性をきちんと実証する必要がある。また、同様の出口を狙うものとしては SiC もあるが、パワー系の Si デバイスを GaN デバイスで置き換えるためには、Si ベースの従来技術も含め、コストパーフォーマンスでこれらを凌駕する必要がある。

また、本プロジェクトで得られた成果を踏まえ、基板結晶や GaN 素子性能や評価手法に関する標準化を推し進め、我が国の優位性を担保することが必要と考える。

２．各論

１）事業の位置付け・必要性について

本プロジェクトは、省エネルギー・低炭素社会実現のために必要かつ有効な、次

世代の低損失・大電力 GaN 電子デバイスの基盤となる技術を開発するものであり、社会的必要性は極めて高い。また、エネルギー産業分野での大きな経済効果も見込めるため、世界各国が猛烈な開発競争を行っており、我が国の国際競争力を高める上でも緊急性の高い重要な課題である。

実用化に至っていない材料の開発とそれを用いたデバイス開発を先駆的に行うことは民間企業にとってハードルが高く、根幹となる材料技術からデバイスまでを一体化して取り組んだ本プロジェクトは NEDO 事業として妥当である。

２）研究開発マネジメントについて

本プロジェクトでは、低炭素社会を担う省エネデバイス実現および実用化・事業化のための適切な目標設定とそれを実現するための事業体制、研究フローなど、適切なマネジメントがなされている。特に、高品質大口径 GaN バルク基板開発、エピタキシャル成長技術開発、およびデバイス化の 3 グループに、第一人者の研究者を配置し、それを軸として有機的な産学連携体制をくみ上げてシームレスなプロジェクトを遂行したことは目標達成の上で有効に機能した。また、中間評価結果を踏まえて、体制・運営の改善により基板供給のスピードアップや基板ごとの履歴管理などが進み、プロジェクト進捗が改善された点は評価できる。

一方、基板結晶の供給不足は、中間評価時に明確になった課題であるが、もし結晶成長から電子デバイス生成までの最先端の総合技術を保有する外部の専門家の意見を聴取していれば当初から想定される可能性のあるリスクであったとも言える。最終的に効果のあった基板単位の工程管理対策等の対策がより早い段階で施策されていれば、デバイス特性に対するエピタキシャル成長層の結晶品質およびバルク基板を用いることの優位性を示す、という当初の重要な目標をより速く、明確に示すことが出来たのではないかと考える。

３）研究開発成果について

バルク基板成長、高品質エピタキシャル成長、デバイス作製・評価に関してチャレンジングな目標を掲げ、それぞれ非常に重要な成果を出しており、GaN 系先端デバイスの研究開発を加速する効果があると考える。

特に、HVPE（ハイドライド気相成長）法による 4 インチと大口径で低転位の有極性 GaN 基板の作製に成功したことは、まさに世界でトップの快挙である。さらにこれを種結晶に用い、実用化において重要な鍵となる低コスト化を実現し得る結晶成長方式として､Na フラックス法による大口径 GaN 結晶基板成長技術を開発した。エピタキシャル成長技術においては、極めて独自性の高い加圧下での原子層成長技術を開拓し、当初目標の平坦性、組成均一性、およびドーピング制御を実現した。GaN バルク基板上への電子デバイス作製では、低転位化を実現したバルク基板上に

デバイスを作製して評価することにより、はじめてリーク電流と転位の関係の精密な考察を可能とし、低欠陥密度の基板結晶の必要性を明らかにしている点など、それぞれの成果は評価できる。

但し、本プロジェクトは、結晶成長が主たるテーマであるため、デバイスグループは評価中心の検討主体にならざるを得なかった。GaN デバイスによる優位性は示せたものの、Na フラックス法で生成した GaN 基板ベースのデバイス性能として、Si や SiC デバイスを凌駕する優位性を示す成果が得られておれば、なお価値の高い研究開発になったと考える。

４）実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

本プロジェクトでは、大口径高品質 GaN バルク基板の開発が基盤技術となっており、特にこの点においての独自性が高い。また、バルク基板成長、高品質エピタキシャル成長、デバイス開発に参画した実施者が、それぞれ実用化・事業化に向けた具体的な計画を提案している。日本がこの分野でイニシアチブを取るためには、事業化が不可欠であるため、今回提案されている計画が一歩一歩具体化することを期待する。

但し、得られた成果は、現時点で実用化に向けて必要な技術にまで高まっていると言えるが、事業化に向けては、新たに開発が必要な関連技術もまだ多い。真の実用化・事業化に向けては、素子の安定性・信頼性の確立が最も重要となり、結晶中の欠陥や構造設計などと密接に関連しているため、これらの内容についての検討も必要と考える。

研究評価委員会におけるコメント

第３６回研究評価委員会（平成２５年１１月６日開催）に諮り、本評価報告書は確定された。研究評価委員会からのコメントは特になし。

研究評価委員会

委員名簿（敬称略、五十音順）

職　位	氏　名	所属、役職
委員長	西村　吉雄	技術ジャーナリスト
委員長代理	吉原　一紘	オミクロンナノテクノロジージャパン株式会社 最高顧問
委員	安宅　龍明	独立行政法人産業技術総合研究所　つくばイノベーションアリーナ推進本部　共用施設調整室　招聘研究員
	伊東　弘一	学校法人早稲田大学　理工学術院　招聘研究員 公立大学法人大阪府立大学　名誉教授
	稲葉　陽二	学校法人日本大学　法学部　教授
	小林　直人	学校法人早稲田大学　研究戦略センター　副所長／教授
	佐久間一郎	国立大学法人東京大学　大学院工学系研究科　附属医療福祉工学開発評価研究センター　センター長／教授
	佐藤　了平	国立大学法人大阪大学　産学連携本部　名誉教授／特任教授
	菅野　純夫	国立大学法人東京大学　大学院新領域創成科学研究科 メディカルゲノム専攻　教授
	宮島　　篤	国立大学法人東京大学　分子細胞生物学研究所　教授
	吉川　典彦	国立大学法人名古屋大学　大学院工学研究科　マイクロ・ナノシステム工学専攻　教授

第１章　　評価

この章では、分科会の総意である評価結果を枠内に掲載している。なお、枠の下の「○」「●」「・」が付された箇条書きは、評価委員の主な指摘事項を、参考として掲載したものである。

１．プロジェクト全体に関する評価結果

１．１　総論

１）総合評価

窒化物半導体関連の結晶成長・物性制御関連の基盤技術開拓とデバイス展開は、我が国が世界を先導してきたが、バルク結晶成長や一部のデバイス開発分野では国外機関の健闘もめざましい点があり、さらにグローバルな事業化としては新興国による低価格戦略による展開が顕著である。さらに、パワー半導体の省電力化は、CO_2 削減という社会的な期待に応えるものであり、重要な課題である。

本プロジェクトは、バルク基板成長、高品質エピ成長、デバイス作製・評価を柱として、産学連携のもとに、低損失・大電力 GaN(窒化ガリウム)電子デバイスの開発を通じて省エネルギー技術革新に寄与することを目的としており、NEDO のプロジェクトとして緊急性・重要性が高い。また、GaN のバルク基板結晶育成、高品質エピタキシャル成長、デバイス特性評価という技術の垂直統合を行った連携は有効であり、世界最高レベルの大きな成果を生み出した点は高く評価できる。

但し、バルク基板結晶の供給量が十分ではなかったため、下流側であるエピタキシャル成長層の結晶品質およびデバイス特性に対するバルク基板の優位性が必ずしもクリアに示されたとはいえない。また、デバイス性能として、Si や SiC デバイスを凌駕する優位性を示す成果が得られておれば、なお価値の高い研究開発になった。事業化に向けては、ＧaN 素子の安定性・信頼性の確立など、新たに開発が必要な関連技術もまだ多い。

〈主な肯定的意見〉

○ パワー半導体の省電力化は、CO_2 削減という社会的な期待に応えるものであり、また産業競争力を生む源泉でもあり、重要な課題である。その実現の鍵として先行する SiC デバイスへの期待感がより高い中で、GaN デバイスの実用化の鍵となる高品質の大口径 GaN 結晶基板形成技術の開発にチャレンジし、HVPE 法による 4 インチ自立基板の実現ならびにこれを種結晶に用いて、実用化において重要な鍵となる低コスト化を実現し得る結晶成長方式として、Na フラックス法による大口径 GaN 結晶基板成長技術の基礎技術を開発し、面内分布と言った課題は残しつつも、「高品質の大口径 GaN 結晶基板の実現」といったコンセプトの実証（POC）はほぼ達成されたものと評価したい。
エピタキシャル成長技術に関しては、世界初の AlGaN の原子レベル成長技術を開発し、特徴ある装置の事業化につなげている。

また、1200V 以上の耐圧性を示すなど、GaN デバイスの期待感を高めるデータが得られている。

○ 個別企業ではハードルの高い、材料からデバイスまでの垂直統合型プロジェクトを NEDO 事業として進めることで、一体となった運営がなされ、世界最高レベルの大きな成果を生み出した点を高く評価する。

○ 本プロジェクトは、バルク基板成長、高品質エピ成長、デバイス作製・評価を柱として、産学連携のもとに、低損失・大電力 GaN 電子デバイスの開発を通じて省エネルギー技術革新に寄与することを目的としており、NEDO の事業として緊急性・重要性が高い。３つのテーマがそれぞれに重要な研究成果を挙げている。また、実用化への行程も示されており、参加企業における事業化が期待される。

○ 非常に多くの機関が協力し、日本発の GaN 技術力を高める成果を出したと思う。特に基板、エピ成長、デバイスという技術の垂直統合を行った連携は有効であったと思う。世界の最先端の基盤技術開発はできていたと考える。

○ 本プロジェクトは、Na フラックス法という極めて独自性の高い窒化ガリウム（GaN）バルク単結晶成長法による GaN 基板結晶の大口径高品質化（４インチ、転位密度＜103cm^{-2}）の基盤技術開拓をベースとし、この基板結晶上への高品質エピタキシャル成長技術開発を通じ、将来の低炭素社会実現に大きく貢献可能な省エネ電子デバイス開発を目指すものであり、NEDO で推進する事業として適切である。また、これらの３つに大別したそれぞれの研究開発グループのリーダーに、この研究分野で世界を牽引している我が国を代表する研究者を配置し、適切な目標設定とともに、有機的な産学連携組織を構築して検討を進めたといえる。

設定した高い目標をほぼ全て達成しており、実用化・事業化への期待も高い。

さらに、このプロジェクトは低炭素社会実現に大きく歩を進めることを可能とする成果を上げたと評価できる。

窒化物半導体関連の結晶成長・物性制御関連の基盤技術開拓とデバイス展開は、我が国が世界を先導してきたが、バルク結晶成長や一部のデバイス開発分野では国外機関の健闘もめざましい点があり、さらにグローバルな事業化としては新興国による低価格戦略による展開が顕著である。本プロジェクトは、その成果をますます発展させることにより、我が国の科学技術および産業の発展を図る上での一翼を担うものと評価する。

○ 窒化ガリウムのバルク基板結晶育成、高品質エピタキシャル成長、デバイス特性評価を通しての成長条件へのフィードバックを分担する３者が、い

ずれも意欲的に取り組み、高めの設定目標を概ね達成したといえる。

〈主な問題点・改善すべき点〉

- 本プロジェクトでは各グループ共に当初目標に沿って顕著な成果を得られといえ、実用化の点での見通しはよいと言えるが、実際の事業化の点ではやや危惧される点が垣間見られた。本プロジェクトに参画している企業は，その得意分野やこれまでの歴史により、興味あるそれぞれの成果での事業化に温度差があるのは当然と言えよう。また、事業化に当たっては、例えば光デバイス応用なども考慮しつつ適切なタイミングを計ることも必要であろう。しかし、事業化に当たっての温度差が企業間ではっきりしすぎている印象が少し感じられた。
- 基板開発に重きを置き過ぎた。新しいデバイス開発を目論むなど、テーマ設定に課題が残る。
  事業化の主役になる参画企業の顔が十分に見えない。役割分担などもう少し明確になっても良いと思われる（特に基板開発）。
- 技術開発項目がやや多すぎの印象がある。本プロジェクトは基礎・基盤技術の研究開発の側面が強いことから、項目と数値目標だけではなく、メカニズム解明に踏み込んだ研究を深めることが望まれた。
- SiC に比して基礎フェーズという意識が高かったためであろうが、初期の技術開発が大学中心であり、少なくとも中間評価までは総花的な開発になってしまった。中間評価以降、これを改める種々の手は打たれたものの、その影響を引きずってしまったように思える。
- 最上流のバルク基板結晶の供給量が十分ではなかったため、下流側であるエピタキシャル成長層の結晶品質、およびデバイス特性に対するバルク基板の優位性が必ずしもクリアに示されたとはいえないのが残念である。本プロジェクトのような、ある意味で垂直統合型の性格の場合には、最上流（最も基盤となる技術）の開発を少し先行させて進め、一定程度の供給体制が整ってから下流側を立ち上げるような研究開発体制（進め方）を検討する必要がある。
- 国際的特許戦略をもっと強めてほしい。各社連携の PDCA が見えにくかったと思う。GaN 基板の供給が全ての開発を律速しており、プロジェクト後半になっても基板やエピタキシャル結晶を購入するなどしていた点は、開発費の有効活用になっていたかに疑問を残す。各事業者の事業計画においてビジネスモデルの完成度が低いと感じた。

〈主なその他の意見〉

・　世界の同類プロジェクトとのベンチマークをしっかりと行い、本成果の特長と足らない点を冷静に分析しておくべきである。特に一年の延長の効果を明確化してほしいと思う。

２）今後に対する提言

大電力縦型デバイスが開発技術の重要な出口として大いに期待されている。本プロジェクトによって、性能達成に向けた基礎技術はほぼ出来ているが、今後、大電力縦型デバイスとしての性能の優位性をきちんと実証する必要がある。また、同様の出口を狙うものとしてはSiCもあるが、パワー系のSiデバイスをGaNデバイスで置き換えるためには、Siベースの従来技術も含め、コストパーフォーマンスでこれらを凌駕する必要がある。 また、本プロジェクトで得られた成果を踏まえ、基板結晶やGaN素子性能や評価手法に関する標準化を推し進め、我が国の優位性を担保することが必要と考える。

〈主な今後に対する提言〉

- 本プロジェクトは基礎・基盤技術の研究開発の側面が強く、今回の成果だけでGaN基板やそれを活用したデバイスの製品化が直ちに進む状況にはない。関連する企業の一層の努力を望みたい。また、GaN 基板を活かしたデバイスの開発はこれからの課題であり、今後の活動に期待したい。
- 技術の競争力を確保しつつ（守るべきノウハウを守り、取るべき知財を権利化）国際的な市場を育て、標準化の主導権を確保していくことが重要である。そのためにはビジネス化のノウハウを持った人材を結集した組織体の形成、運営が必要と思う。つまり、事業経営の専門家を投入することが重要と思う。
  アプリケーションの人材が加わった新しい組織体の活動が重要と思われる。
- 大口径高品質バルクGaN結晶グループの研究成果・知的財産権をどのように守るのかは大きな課題であろう。つまり、本プロジェクトの研究遂行の道筋・展開手法を見ても明らかなように、まず“高品質の種結晶”を作ることが肝要で有り、この種結晶上にNaフラックス法で高品質大口径バルク結晶成長の成長を実現している。言うまでも無く、この考え方は、本プロジェクトに限ったことではない。現状で、最高値は“転位ゼロ”としており、この結晶を入手して“種・基板”とすれば、いろいろな結晶成長法で同等の高品質の結晶の作製（複製）はどこででも容易に可能となる。実際、すでに世界の諸研究機関で同様な考え方でさらなる“高品質化”を図りたいとの意向を聞いている。
  これまでの歴史を振り返れば、高品質の種結晶の拡散を防ぐことは実際には至難の業と思われるが、NEDO サイド他においても、どのようにしてこのような研究成果を知的財産権として守ることができるかの検討が必

要と思われる。

- ３つのサブプロジェクトにおいて開発された各要素技術は、国際的に見て高水準であり大きな競争力をもっている。「技術で勝ってビジネスで負ける」ことを繰り返さないように、本プロジェクトによる成果を戦略的技術として位置づけ、今後の産業政策を考えて行ってもらいたい。
- 実用化に向けたアプリケーションへの具体的展開を期待する。その実現のための次のアプリケーション側との共同プロジェクトが必要であれば、そのような提案が必要である。材料開発への投資は国家戦略上重要と考える。GaN 基板仕様の標準化ができないかの検討をお願いしたい。
- 多くの参画企業からのコメントにもあったように、大電力縦型デバイスが開発技術の重要な出口として大いに期待されている。同様の出口を狙うものとしては SiC もあるが、Si ベースの従来技術も含め、コストパーフォーマンスでこれらを凌駕する必要がある。本開発によって、性能達成に向けた基礎技術はほぼ出来てきつつあるようにも思うが、大電力縦型デバイスとしての性能の優位性をきちんと実証する必要がある。
  さらに、コスト面ではユーザーの要求と製造する側では一桁程度の大きな開きがある。パワー系の Si デバイスを GaN デバイスで置き換えるためには、その大きな溝をできるだけ埋めるような技術開発を進める必要があり、個々のデバイスメーカーに任せて進めるだけでは不十分と考えられ、死の谷を渡ることができない。今後は、本技術開発をベースとして、大きな市場を形成する可能性のあるユーザーメーカーをリーダーに据えて、組織的な実用化開発を国の支援のもとに進めることが望まれる。

〈主なその他の意見〉

- 技術論では本プロジェクトでは信頼度、コストについての知見がなく、実用化に向けてのこの 2 点の詳細検討をさらに進める必要を感じる。
  全ての参加事業者が Win-Win となる垂直統合型ビジネスモデルまで考えたプロジェクト立案を今後期待する。そのためには設備投資とその償却に対する国の施策が必要と考える。また人件費に対してももっとフレキシブルに使え、実用事業と基礎研究を並行してすすめられる国家プロジェクトが必要である。
- 本プロジェクトについて、すでに中間評価段階でもコメントが出ていたようであるが、まず省エネルギー関連や低炭素化の国策での様々な政策・企画の中で、関連のプロジェクトに対してどのような位置づけのものか？また、材料観点でも SiC、および GaN でも光デバイス関連でのプロジェクトと、さらには異種基板利用での同種目的のプロジェクトと、時間的・

空間的に当該プロジェクトの位置づけを明確にして、プロジェクトの遂行および評価が進むことが望ましいと考える。

・ 本技術開発で得られた成果を踏まえ、基板結晶や GaN 素子性能や評価手法に関する標準化を推し進め、我が国の優位性を担保することが必要に思われる。
また、現時点では、基板結晶の事業化を複数のメーカーが実施することとしているが、ジョイントベンチャーを組むなどして、技術開発の尖鋭化を進めることも必要ではなかろうか。

１．２　各論

１）事業の位置付け・必要性について

本プロジェクトは、省エネルギー・低炭素社会実現のために必要かつ有効な、次世代の低損失・大電力 GaN 電子デバイスの基盤となる技術を開発するものであり、社会的必要性は極めて高い。また、エネルギー産業分野での大きな経済効果も見込めるため、世界各国が猛烈な開発競争を行っており、我が国の国際競争力を高める上でも緊急性の高い重要な課題である。 実用化に至っていない材料の開発とそれを用いたデバイス開発を先駆的に行うことは民間企業にとってハードルが高く、根幹となる材料技術からデバイスまでを一体化して取り組んだ本プロジェクトは NEDO 事業として妥当である。

〈主な肯定的意見〉

○　低損失・大電力 GaN 電子デバイスの開発を通じて、省エネルギー技術革新を目指すもので、NEDO の事業として緊急性・重要性が高い。関連研究は、パワー素子技術のパラダイムシフトを生む可能性があり、かつ、エネルギー産業分野での大きな経済効果も見込めるため、世界各国が猛烈な開発競争を行っている。このような背景から、今回のプロジェクトの目的は極めて妥当である。また、今回の成果を、この分野の新たなプロジェクトにつなげるべきである。

○　本来、規模の大きく資金と知の集積が必要な研究は国家が関与しないとできるものではない。それを進めるのが大学や国立研究所の役割である。
本研究課題も NEDO の積極的な関与が必要な課題である。

○　パワー半導体の省電力化は、CO_2 削減という社会的な期待に応えるものであり、また産業競争力を生む源泉でもあり、重要な課題である。その実現の鍵として先行する SiC デバイスへの期待感がより高い中で、企業が控えめにしか手を出していない本開発にチャレンジされたことは、NEDO 事業として妥当であると判断する。
また、デバイス化において重要な鍵となる大口径 GaN 基板結晶成長技術を中心に据えて開発に取り組まれた事業目的は妥当であり、意義が高い。

○　この分野の技術レベルの現状からすると、目標設定が高く、多様なアプローチの有り得る挑戦的な課題であるため、個々の企業体や研究機関のみの取組ではリスクが大きいので、NEDO プロジェクトとして進めることに大きな意義があったといえる。
東日本大震災と福島原発事故が発生し、節電意識が大きく高まっている。本プロジェクトは発災前にスタートしたわけだが、結果としてかもしれないが、時宜を得たプロジェクトであったと言えるかもしれない。

○ パワーデバイス用 GaN は今後 10 年間で飛躍的に市場が伸びると予想されているが、各社別々では資金的、人的に開発能力に限界がある。よって本プロジェクトのように各社のコアコンピタンスを持ち寄った開発は非常に有用である。各国でも類似のプロジェクトがあり、日本の国力増強のために必須のプロジェクトであったといえる。

○ 省エネルギー・低炭素社会実現という地球規模の目標実現に向け、根幹となる材料技術からデバイスまでを一体化して取り組んだ本プロジェクトは NEDO 事業にふさわしいと考える。
実用化に至っていない材料の開発とそれを用いたデバイス開発を先駆的に行うことは民間企業にとってハードルが高く、NEDO 事業として複数企業・大学研究機関が連携して推進した本プロジェクトの意義は大きいといえる。

○ 本プロジェクトは、低炭素社会実現のために必要かつ有効な、次世代省エネデバイスの基盤となる科学技術を開拓しようとするものであり、社会的必要性は極めて高いと言える。一方、3 研究課題グループのうちで、特に大口径高品質 GaN バルク基板結晶の難易度は高く、民間企業のみで開発を進めることは困難性とリスクが高くなるため、我が国の国際競争力を高める上で、有機的な産学連携組織を構築して NEDO の事業と展開することは妥当である。

〈主な問題点・改善すべき点〉

● パワーデバイスとしてはシリコンカーバイド（SiC）の方が実用化の点で先行している。一方、窒化物半導体はパワーデバイスだけではなく、高周波デバイスや発光デバイスとしてのポテンシャルも非常に高い。本プロジェクトで得られた技術成果は、パワー、高周波、発・受光などの分野のいずれのデバイスの高性能化に大きく資するものであるが、プロジェクトの背景や効果の説明で大きくうたっている、例えば汎用インバータ分野において SiC と窒化物系の役割分担（あるいは競合関係）についての NEDO の立場をもう少し明確にして欲しい。

● 国際競争力を高めるための技術開発にはシーズ志向、ニーズ志向の 2 種類があるが本プロジェクトはシーズ志向と言える。シーズ志向の開発なしに日本の技術力向上はないと言えるが、NEDO としてはニーズ志向のファクタ（参画企業）も追加した方が良い。すでに市場にある基板との差別化がはっきりしていないために国際的ベンチマークが難しい。

● NEDO 内のみでもよいが、本プロジェクトの他の関連プロジェクトとの位置づけなどをわかりやすく説明することが望まれる。

● 投資を強化し、もう少しデバイス技術開発を強化できればなお良かった。

〈主なその他の意見〉

・ 本プロジェクトは基礎研究に近いフェーズであり、実用化・事業化に向けては何らかの形で後継プロジェクトを企画することも必要ではないか。
・ 予算規模としては適正であろう。ただしビジネスモデルが不明確のためROI の算出は難しい。エネルギーの高効率利用の観点での技術開発にはまだ至っていないが、参画企業での限界かもしれない。

２）研究開発マネジメントについて

本プロジェクトでは、低炭素社会を担う省エネデバイス実現および実用化・事業化のための適切な目標設定とそれを実現するための事業体制、研究フローなど、適切なマネジメントがなされている。特に、高品質大口径 GaN バルク基板開発、エピタキシャル成長技術開発、およびデバイス化の３グループに、第一人者の研究者を配置し、それを軸として有機的な産学連携体制をくみ上げてシームレスなプロジェクトを遂行したことは目標達成の上で有効に機能した。また、中間評価結果を踏まえて、体制・運営の改善により基板供給のスピードアップや基板ごとの履歴管理などが進み、プロジェクト進捗が改善された点は評価できる。

一方、基板結晶の供給不足は、中間評価時に明確になった課題であるが、もし結晶成長から電子デバイス生成までの最先端の総合技術を保有する外部の専門家の意見を聴取していれば当初から想定される可能性のあるリスクであったとも言える。最終的に効果のあった基板単位の工程管理対策等の対策がより早い段階で施策されていれば、デバイス特性に対するエピタキシャル成長層の結晶品質およびバルク基板を用いることの優位性を示す、という当初の重要な目標をより速く、明確に示すことが出来たのではないかと考える。

〈主な肯定的意見〉

○ 特許や発表は各機関から適正になされている。技術ターゲットは明確であり、その各要素性能は実用化の必要条件である。プロジェクトリーダーの強力なリーダーシップのもと、基板、エピタキシャル、プロセス、デバイスの開発がシームレスに行われた。その場合の情報コンタミをうまくコントロールできていたといえる。

○ 後半のプロジェクトマネジメントは評価できる。
プロジェクト管理のノウハウは「(垂直統合型) プロジェクトマネジメント論」として纏めて置き、更に発展させることを期待する。

○ 技術推進委員会での意見や中間評価結果を踏まえ、プロジェクトフォーメーションを変えるなどフレキシブルな措置を取っており、それによるプロジェクト推進の効果が得られたものと評価できる。

○ 技術推進委員会の提言に対して適切な対応がとられ、体制・運営の改善によって基板供給のスピードアップや基板ごとの履歴管理などが進み、プロジェクト進捗が改善された点は評価できる。
当初計画からプロジェクト期間を１年間延長することで、デバイスまでを含んだ本来の成果目標を達成しており、柔軟なプロジェクト運営は評価できる。

○ バルク結晶の欠陥密度、エピタキシャル成長におけるドーピング技術・電気的特性、HEMT の耐圧・オン抵抗・高温特性など、実用化に向けた戦力的目標が設定されており、これに従って、各サブプロジェクトが重要な成果を挙げている。また、第一線で開発研究を行っている企業が参画しており、事業化につながる成果も得ている。プロジェクトの後半では、進捗状況に応じた NEDO のマネジメントが実施されていた。

○ 本プロジェクトでは、低炭素社会を担う省エネデバイス実現および実用化・事業化のための適切な目標設定とそれを実現するための事業体制、研究フローなど、適切なマネジメントがなされている。特に、大口径高品質 GaN バルク基板開発、エピタキシャル成長技術開発、およびデバイス化の３グループに、世界を先導する第一人者の研究者を配置し、それを軸として有機的な産学連携体制をくみ上げてプロジェクトを遂行したことは目標達成の上で有効に機能した。また、情勢変化の対応の点でも、例えば、大口径高品質基板開発グループにおいて、当初は“再委託”であった研究機関を直接委託にして NEDO で直接的にプロジェクト遂行に関与する形に対応していったことは、バルク基板グループの目標達成の上で顕著に有効であったことなどからもマネジメントの適切さがうかがい知れる。

○ 次世代省エネルギーデバイス技術を確立する上で必須の条件（仕様）が盛り込まれた目標設定になっている。また、バルク基板結晶育成、高品質エピタキシャル成長、電子デバイス作製プロセスと評価の実施責任者は、３者とも各分野での第一人者であり、それぞれにベストエフォートを尽くした。

〈主な問題点・改善すべき点〉

● 本研究の実施スピードは、最上流の基板結晶の供給量により律速されることは分かっていたはずであるし、中間評価等でも指摘された点である。プロジェクトの後半は NEDO によるサンプルフロー管理によりかなり改善が見られたが、エピタキシャル成長層の結晶品質、およびデバイス特性に対するバルク基板を用いることの優位性を示す、という当初の重要な目標が必ずしもクリアに示されたとはいえない。本プロジェクトのような、ある意味で垂直統合型の性格の場合には、最上流（最も基盤となる技術）の開発を少し先行させて進め、一定程度の供給体制が整ってから下流側を立ち上げるような研究開発体制（進め方）を検討する必要がある。

● エピタキシャル成長技術開拓グループの目標において、例えば、AlxGa1-xN および InxGa1-x N 共に、Al および In 組成 x を単純に 0.5≦x≦1 の範囲で達成すべき目標を設定しているなど、ややおざなりともと

れる点が気になった。窒化物系ではこのような組成範囲でもその物理的・化学的性質は大きく異なるので、実質的には極めて広い“組成”範囲で目標達成を約束したのと同じになる。つまり、目標をこの組成域全体で達成するのは容易とは言えず、たとえば他の III-V 族三元混晶系での場合と同列に扱うことは難しい。これはエピタキシャルグループの当事者が十分理解しているであろう。

- テーマリーダーの一人が、全体を統括するプロジェクトリーダーを兼任する体制では、開発項目のレビューやこれに伴う開発投資の重点化といった判断が難しく、総花的な開発になることが多い。基板結晶技術、エピタキシャル結晶技術、デバイス化評価技術といったプロセス的にフェーズの異なる技術開発を同時進行し、それぞれの技術課題が大きい本開発では、特に留意すべきであったように思う。

  基板結晶の供給不足は、開発課題が大きい中では当然起こりうることであり、当初から想定すべきリスクである。その対応が当初より整えられておれば、デバイスからみた結晶課題や、デバイスとしての有用性をより速く、また明確に示すことが出来たのではないか。

〈主なその他の意見〉

- 各要素技術別にリーダーがおり、責任が不明確になっていなかったかの懸念がある。GaN 基板がベースのプロジェクトであるが、一部 AlN 基板などが入っており、その戦略性が明瞭でない。
- 公平性の観点からプロジェクトリーダーを学界から選任するケースが多いが、産業競争力強化の柱となるような本件では、産業界からの選任が望ましいように思われる。

３）研究開発成果について

バルク基板成長、高品質エピタキシャル成長、デバイス作製・評価に関してチャレンジングな目標を掲げ、それぞれ非常に重要な成果を出しており、GaN系先端デバイスの研究開発を加速する効果があると考える。

特に、HVPE(ハイドライド気相成長)法による４インチと大口径で低転位の有極性 GaN 基板の作製に成功したことは、まさに世界でトップの快挙である。さらにこれを種結晶に用い、実用化において重要な鍵となる低コスト化を実現し得る結晶成長方式として、Na フラックス法による大口径 GaN 結晶基板成長技術を開発した。エピタキシャル成長技術においては、極めて独自性の高い加圧下での原子層成長技術を開拓し、当初目標の平坦性、組成均一性、およびドーピング制御を実現した。GaN バルク基板上への電子デバイス作製では、低転位化を実現したバルク基板上にデバイスを作製して評価することにより、はじめてリーク電流と転位の関係の精密な考察を可能とし、低欠陥密度の基板結晶の必要性を明らかにしている点など、それぞれの成果は評価できる。

但し、本プロジェクトは、結晶成長が主たるテーマであるため、デバイスグループは評価中心の検討主体にならざるを得なかった。GaN デバイスによる優位性は示せたものの、Na フラックス法で生成した GaN 基板ベースのデバイス性能として、Si や SiC デバイスを凌駕する優位性を示す成果が得られておれば、なお価値の高い研究開発になったと考える。

〈主な肯定的意見〉

○ 本プロジェクトでは、各研究項目グループ共に、極めて高い目標を設定していながら、いずれもその目標を達成しているといってよい。特に、Na フラックス法は極めて独自性の高い技術開拓であり、その手法本来の低転位化特性も幸いし、４インチと大口径で低転位の有極性 GaN 基板の作製に成功したことは、まさに世界でトップの快挙で有り、本プロジェクトの最大の成果であると言っても過言ではなかろう。さらに、Na フラックス法によるドーピング制御において、多くの成長実験・評価から、高導電性および高抵抗性両方について、設定目標を十分クリアする成果を達成していることは高く評価する。

エピタキシャル成長制御においては、やはり極めて独自性の高い、加圧下での原子層成長技術を開拓し、当初目標の平坦性、組成均一性、およびドーピング制御を実現しており、高く評価に値する。

GaN バルク基板上への電子デバイス作製では、低転位化を実現したバルク基板上にデバイスを作製して評価することにより、はじめてリーク電流と転位の関係の精密な考察を可能とし、低欠陥密度の基板結晶の必要性を

明らかにしている点を評価する。
なお、これら3グループにおいて、いずれも知的財産権の登録、論文発表、およびこの分野で主要な国際会議などでの学会発表なども適切に行われているといえる。

○ HVPE法による4インチ自立基板の実現ならびにこれを種結晶に用いて、実用化において重要な鍵となる低コスト化を実現し得る結晶成長方式として、Na フラックス法による大口径 GaN 結晶基板成長技術の基礎技術を開発し、面内分布と言った課題は残しつつも、「高品質の大口径GaN結晶基板の実現」といったコンセプトの実証（POC）はほぼ達成されたものと評価したい。
エピタキシャル成長技術に関しては、世界初のAlGaNの原子レベル成長技術を開発し、特徴ある装置の事業化につなげている。
また、1200V以上の耐圧性を示すなど、GaNデバイスの期待感を高めるデータが得られている。

○ バルク基板成長、高品質エピタキシャル成長、デバイス作製・評価に関してチャレンジングな目標を掲げ、それぞれ非常に重要な成果を出しており、GaN系先端デバイスの研究開発を加速する効果があると考える。

○ 高い設定目標であったにも拘わらず、概ね目標は達成されている。バルク単結晶・エピタキシャル結晶ともに、現状では世界最高水準品質のものが得られている。当初のターゲットには具体的に示されてなかったもので特筆すべき成果としては、ポイントシード法という新規なバルク成長法を見出し無転位結晶の育成が可能であることを示したこと、エピタキシャル成長では C_2H_2 を炭素源として高品質の高抵抗バッファ層を実現したこと、デバイスではAlGaNチャネルHEMTの高温特性などが挙げられる。

○ 世界最高水準の高耐圧・高温デバイスができており、資金を投入した効果がみえている。基板の口径に関しては完全に完成とは言えないが、大口径化の目途はたったといえる。特許出願は各ユニット技術別にできている。論文は積極的に発表しており、展示会も利用して産業界へアピールできている。

〈主な問題点・改善すべき点〉

● 成果発表に関して、論文公表総数が55件は少ない感じを受ける。より多くの論文を公表して、成果のアピールを行うべきであった。

● エピタキシャル成長層の結晶品質、およびデバイス特性に対するバルク基板を用いることの優位性を示す、という当初の重要な目標が必ずしもクリアに示されたとはいえなかったのが残念である。

- アンダーワンルーフの思想でのプロジェクト運営なので仕方がないのかも知れないが、参画企業の貢献が見え難い。
  特許の内容までは分からないが、実戦経験の乏しい大学が単独で特許出願した場合、権利化出来ても権利行使ができないなど、実効性に乏しい特許になっている場合がある。このプロジェクトでは大丈夫かどうか、事後の追跡調査と、改善する必要が生じた時の改善策の構築が必要になると考える。
- 結晶成長が主たるテーマであるため、デバイスグループが評価中心の検討主体にならざるを得なかったように思う。デバイス性能として、Si や SiC デバイスを凌駕する成果が得られておれば、なお価値の高い開発になった。
- ベンチマークをもっと応用の視点で作ってほしい。このデバイスを用いたらここまで応用は改善できると。技術的には大口径基板の完成度が不明瞭に感じられた。特許では外国出願が少ない点が気になる。まだ出願から 1 年以内であれば外国出願を今からでも検討すべき。

〈主なその他の意見〉

- 他の競合技術との優劣を競うよりも、技術の組み合わせ（連携）を模索するべきである（MOVPE→Na フラックス→アモノサーマル→HVPE 等）。
- 特許出願件数がやや少ないように思われるが、ノウハウの不開示など戦略的な判断に基づいた結果であれば良い。
- 実用化視点の目標がもともとなく、基盤技術視点の目標だったので、中間評価後に目標を追加してもよかったといえる。

４）実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

本プロジェクトでは、大口径高品質 GaN バルク基板の開発が基盤技術となっており、特にこの点においての独自性が高い。また、バルク基板成長、高品質エピタキシャル成長、デバイス開発に参画した実施者が、それぞれ実用化・事業化に向けた具体的な計画を提案している。日本がこの分野でイニシアチブを取るためには、事業化が不可欠であるため、今回提案されている計画が一歩一歩具体化することを期待する。

但し、得られた成果は、現時点で実用化に向けて必要な技術にまで高まっていると言えるが、事業化に向けては、新たに開発が必要な関連技術もまだ多い。真の実用化・事業化に向けては、素子の安定性・信頼性の確立が最も重要となり、結晶中の欠陥や構造設計などと密接に関連しているため、これらの内容についての検討も必要と考える。

〈主な肯定的意見〉

○ バルク基板成長、高品質エピタキシャル成長、デバイス開発のサブプロジェクトに参画した企業が、それぞれ実用化・事業化に向けた具体的な計画を提案している。日本がこの分野でイニシアチブを取るためには、事業化が不可欠であるため、今回提案されている計画が一歩一歩具体化することを期待する。

○ 本プロジェクトでは、大口径高品質 GaN バルク基板の開発が基盤技術となっており、特にこの点においての独自性が高く、また実用化を十分保証する成果が得られているとともに、ニーズも高く、実用化が急がれる社会的状況であるとも言える。GaN 種基板結晶の作製も含め、参画企業を中心とした事業化が期待される。
また、新たに開発された加圧下での原子層成長モードでのエピタキシャル成長技術（デジタル MOVPE：Metal Organic Vapor Phase Epitaxy）も必要性が高い上に、実用化を保証・可能とするレベルまでの成果が得られている。エピタキシャル成長技術は、様々なノウハウを含んだ展開が有り、実際には各企業・各機関で独自の方法を採用しているところが多い状況であるが、新規に参入あるいは同様な状況で参入する場合には、デジタル MOVPE は成長制御の原理が単純明快でその効果も高いことから、ニーズは少なからずあると考えられ、事業化が急がれよう。

○ デバイス側での実用化担当の企業体が明確化できている。その場合の製品は明確といえる。今後の実用化課題もコストと信頼度とビジネスモデルとなっており、明確化している。産学官が連携したために、大学の学生から企業体の中堅研究者まで、人材の育成に貢献できている。

○ これからのことなので、結果に期待し、ウオッチしていきたい。
量産化を勘案した装置開発となっており、その点は高く評価できる。また、Na フラックス法はコスト競争力があり、技術が完成すれば産業への展開は速いであろう。
技術の海外への安易な流出に注意が必要である。

〈主な問題点・改善すべき点〉

- 事業化には、先ずは競合する SiC や Si デバイスとの優位性を早急にデバイスレベルで実証する必要がある。
実用化に関し、エンドユーザーの求める価格と、供給側の想定価格には、相当の開きがある。そのギャップを埋めるための技術開発と支援が必要になろう。
- 「バルク GaN 基板上の○○○」というとまだまだ道のりは長いように感じる。Na フラックス LPE で育成された種結晶と他のバルク成長法を含めた組み合わせによるバルク基板の大口径化と量産化の開発の加速が必要である。また、高抵抗バルク結晶はパワー・高周波デバイスの両分野においてニーズは大きい。Zn ドープの可能性が見えたので実用化レベルに引き上げる開発研究が必要である。エピタキシャル成長においては、高 In 組成側の品質をデバイスグレードに届くように更なる開発が必要である。
- 基板とエピタキシャル結晶の事業者は実用化を見極められていない。あと数年の開発が必要なロードマップとなっており、今後の追跡評価が重要である。デバイス企業においても当初は本プロジェクトの GaN 基板を使わないビジネスを検討しており、本プロジェクトの成果を利用していくロードマップ作成が必要である。コスト面の検討が未完了であり、事業計画がまだ具体化できない障害になっている。
- 各企業の意気込みにはずいぶん温度差を感じる。
企業の事業化戦略は公開できない面も多分にあると思われるが、意気込みはもう少し欲しい。
- 大口径高品質バルク GaN 基板作製およびエピタキシャル成長技術は、共に、電子デバイスのみならず光デバイス開発・作製にもそのまま展開が可能である。得られた成果は、現時点で実用化に向けて必要な技術にまで高まっていると言えるが、事業化に向けては、他のデバイス作製の可能性やマーケットサイズはもちろんのこと、新たに開発が必要な関連技術もまだ多い。このためか、本プロジェクトへの少なからぬ参画企業が、本プロジェクトのみの成果で実用化・事業化を図るのではなく、今後の他のプロジェクトの成果や、この産業分野での社会情勢を見ながら、“やや長い目”

でそのタイミングを図って行く状況の様に見受けられた。

〈主なその他の意見〉

- 本プロジェクトは基礎研究に近いフェーズであり、実用化・事業化に向けては何らかの形で後継プロジェクトを企画することも必要ではないか。
- 今回提案されている事業化計画が具体化するように、新たに NEDO のサポートを考えていただきたい。特に、真の実用化・事業化に向けては、素子の安定性・信頼性の確立が最も重要となり、結晶中の欠陥や構造設計などと密接に関連しているため、これらの内容を含むプロジェクトの立案やサポートを行ってほしい。
- コストをベストケースとワーストケースに分けていいので、事業化検討をもっと具体化してほしい。
- Na フラックス法に基づく基板結晶のビジネス化に関しては、国際的な競争力のある強い事業に育てる必要がある。大学発ベンチャーの設立の可能性について言及されているが、ジョイントベンチャーを設立して、各社が協力する方策もあり得るのではないか。

２．個別テーマに関する評価結果

２．１　高品質大口径単結晶基板の開発

本プロジェクトで開拓された、Na フラックス法による４インチまでの大口径高品質 GaN 基板作製は、極めて独自性の高い、世界初、世界最高水準の技術であり、高品質化（低転位化）と不純物ドーピング制御も実現しており、得られた成果は十分目標を達成している。他の競合技術と比較しても優位性が高く、将来的に市場の拡大につながることが期待できる画期的な成果といえる。

また、成果の実用化・事業化に関しては、比較的具体的な計画を立案している実施者もあり、今後の展開に期待する。

但し、達成された４インチでも十分大きいと言えるが、採算を十分考慮した事業化への将来見通しとしては、さらなる大口径化へつながる技術開発が必要である。Na フラックス法で高品質化の上で重要な要素となる溶液の撹拌等、大口径化に向けてどのように対応していくのかを考えて行くべきである。

〈主な肯定的意見〉

○ Na フラックス法により転位密度を 106cm^{-2} 程度に減少させ（4 インチ）、Ga および Zn ドーピングの効果も検証しつつある。さらに、ポイントシード法を開発し、高品質基板実現への道を拓いた点は、すばらしい成果と言える。また、これらの成果を２社の企業が事業化に展開する計画を持っており、着実な研究開発・事業展開を期待する。

○ 本プロジェクトで開拓された、Na フラックス法による４インチまでの大口径高品質 GaN 基板作製は、極めて独自性の高い、世界初、世界最高水準の技術であり、高品質化（低転位化）と不純物ドーピング制御も実現しており、得られた成果は十分目標を達成している。他の競合技術と比較しても優位性が高く、将来的に市場の拡大につながることが期待できる画期的な成果といえよう。

○ GaNデバイスの実用化の鍵となる高品質の大口径GaN結晶基板形成技術の開発にチャレンジし、HVPE 法による 4 インチ自立基板の実現ならびにこれを種結晶に用いて、実用化において重要な鍵となる低コスト化を実現し得る結晶成長方式として、Na フラックス法による大口径 GaN 結晶基板成長技術の基礎技術を開発し、面内分布と言った課題は残しつつも、有極性、無極性への対応、転位密度の低減、ドーピングなどの技術を含め、「高品質の大口径 GaN 結晶基板の実現」といったコンセプトの実証（POC）はほぼ達成されたものと評価したい。

プロジェクト終了後に、本開発成果を発展させることによって、そりのない GaN 結晶基板を得ている。これは、デバイス性能の面内ばらつきを抑

え、量産につなげるための大きな成果であり、その元となったポイントシード法の創出を高く評価したい。
成果の事業化に関しては、比較的具体的な計画を立案しているメーカーもあり、今後の展開に期待したい。

○ 溶液組成（Na／Ga）に着目して、成長メカニズムの解明を図りながら低転位化の目標値を達成した。大口径化に関しては、シミュレーションの援用も取り入れながら揺動装置を開発し、４インチの大口径化を果たした。ドーピング制御に関して、低抵抗側／高抵抗側の双方について目標を達成した。
また、ポイントシード法およびマルチシードからの成長結晶の合体という斬新な発想により、低転位（無転位）あるいは大口径化が可能であることを実証した。

○ 概ね目標を達成しており、可能性を示した点では評価できる。
Na フラックス法の特徴を活かした、種基板→エッチング→Na フラックス成長による転位の低減、及びポイントシード法の発明は高く評価する。これらは我が国の産業競争力の源泉の一つになると思われる。
サンプルの提供を出し渋る企業が多い中、種結晶基板の開発を担当し、サンプルの提供を担った古河機械金属の貢献は大きい。

〈主な問題点・改善すべき点〉

● 大口径化、無極性基板、高抵抗化、低抵抗化、エピタキシャルグループ／デバイスグループへの供給と手を広げすぎたきらいがある。それぞれに高水準の成果を上げているが、絞り込むことでより高いレベル／実用化に近いレベルの成果が得られた可能性があるのではないか。

● 各評価項目の達成は個別のものが多く、全体としては可能性を示したに留まっている。今後の進展が期待される。
ポイントシード法による反り無し基板のようにアイデア段階のものもあり、早期の実証が期待される。
古河機械金属以外の企業の貢献が見えない。人的支援だけかと思われる。

● 開発中の技術であるので、やむを得ない点はあるが、エピタキシャル結晶グループへの基板結晶供給が遅れたことで、デバイス性能での優位性実証と課題の抽出が不十分となったことは、今後の開発を進めるうえでも反省点であろう。

● 達成された４インチ（有極性の場合）でも十分大きいと言えるが、採算を十分考慮した事業化への将来見通しとしては、さらなる大口径化へつながる技術開発が必要なようである。Na フラックス法で高品質化の上で重要

な要素となる溶液の撹拌等、大口径化に向けてどのように対応していくのかを考えて行くべき段階になってきているといえよう。

● プロジェクト開始前に出願済の特許が多いためか、本プロジェクトの成果に基づく特許が少ない点が残念である。本プロジェクトによる大口径基板のデータが少なく、大口径基板データの積み増しが必要である。かつ大口径基板のコスト試算が概要にとどまっており具体性をもたせてほしい。AlN 基板との棲み分けも不明確である。

〈主なその他の意見〉

・ 現在流通している GaN バルク基板は、その多くが２インチ程度で転位密度も $10^6 cm^{-2}$ 程度のものである。本プロジェクトの目標として設定かつ達成された大口径高品質（４インチ・低転位）GaN バルク基板結晶は、本プロジェクトに参画の大きな企業から見ると、事業化に当たっては、採算ベースの点から、さらなる大口径化や様々な要解決事項があろう。しかし、研究開発には勿論のこと、現時点でのデバイス作製においても、２－４インチサイズで低転位・高品質の GaN バルク基板結晶のニーズも少なからずあるものと考える。当該のグループリーダーグループでは既に取り組んでいるようにも見受けられるが、そのようなニーズに応えるべく、ベンチャー的企業レベルでも本手法による GaN バルク基板の作製と供給を可能な限り早くに開始して欲しいと思う人が少なからずいるものと思われる。また、そのように展開することにより、本研究がさらに進展すると共に、事業化への道筋としても順当かつ近道であるように考える。
なお、基板結晶は表面処理が極めて重要である。本プロジェクトでは Na フラックス法の際にピロリン酸による表面処理が有効であるとされている。現状 GaN バルク基板の表面処理技術は全く不十分で有り、今後の見通しも得られていない。特にエピタキシャル成長に用いることの可能なレベルの表面処理技術の開発は全く遅れており、バルク基板結晶供給のためには合わせて検討・開拓が必要な要素技術である。

・ プロジェクトの開始時点で他のチームに基板結晶提供遅延のリスクが十分に共有されていたのか、また開発期間中に情報提供、これに基づく議論が十分であったのか再検討願いたい。

・ ポイントシード法およびマルチシードにより育成した非 c 面バルク結晶の大面積化と高品質化をさらに進めることができれば、エピタキシャルグループへの供給、その上へのデバイス作製と特性評価といった、本プロジェクトならではの面白い結果が期待できたはずなので残念である。
長尺化、複数枚同時成長など、量産化にからんだ課題抽出を是非して欲し

い。高品質の種結晶があれば（入手できれば)、バルク結晶を量産するための成長法には､本プロジェクトにおいて開発された Na フラックス LPE 法以外にもいくつかの選択肢があるので､エピタキシャル基板としてのバルク結晶の供給体制のトータルプランの検討が必要である。

２．２　大口径基板上の高品質エピタキシャル結晶成長技術

本プロジェクトで開発された、加圧下での原子層成長モードを利用したデジタル MOVPE (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy)法は、AlGaN および InGaN 三元混晶半導体の膜厚、組成、および不純物濃度の均一性増大に極めて優れ、設定した目標を達成したエピタキシャル成長技術となっている。また、これまで懸案事項になっていた InGaN 混晶成長での In 組成の増大にも十分な効果が認められる有効なエピタキシャル技術となっている。

さらに、アセチレンを用いた炭素ドーピング制御は独創的で、これにより高品質の高抵抗バッファ層を実現したことは、高耐圧デバイスの実現に大いに貢献でき、実用的に高い価値がある。大口径 ALE(Atomic Layer Epitaxy)装置と高品質エピタキシャル膜製造に関して、事業展開を計画している点も高く評価できる。

但し、高 In 組成および高 Al 組成のエピタキシャル成長において、GaN バルク基板を用いることの優位性が必ずしも明瞭に示されていない。バルク GaN を基板とするエピタキシャル成長（特に縦型デバイス用）では、エピタキシャル／基板界面の電気的性質が問題になるが、今後、この影響や解決法についての検討が必要である。

〈主な肯定的意見〉

○ デジタル MOVPE を開発し、原子レベルでの界面急峻性を有するヘテロ構造を世界で初めて実現し、企業との共同開発により、当技術に基づいたエピタキシャル成長装置の製品化が進められている。
高耐圧素子実現に向けて、高抵抗エピタキシャル成長技術の開発を進め、従来の Si 基板上 HEMT の特性を十分に超えた高い絶縁破壊横耐圧を確認。（ただし、今後重要性が増すと考える縦型耐圧に関しては、実証レベルに至っていない）
高 In 組成の InGaN、高 Al 組成の AlGaN の結晶成長に取り組み、目標をほぼ満足する成果が得られている。

○ 高移動度 GaN 結晶や AlGaN、InGaN チャネルなどの斬新な構造検討など世界で最先端の研究成果を残した。高均一結晶成長技術は今後の事業化に必須の技術である。

○ AlGaN 原子層エピタキシー（ALE）の実現は優れた成果であり、今後、AlGaN/GaN ヘテロ接合の電気的特性が格段に飛躍することを期待したい。また、アセチレンを用いた炭素ドーピング制御は独創的で、かつ実用的に高い価値がある。大口径 ALE 装置と高品質エピタキシャル膜製造に関して、３社の企業が事業展開を計画している点も高く評価できる。

○ 本プロジェクトで開発された、加圧下での原子層成長モードを利用したデジタル MOVPE 法は、AlGaN および InGaN 三元混晶半導体の膜厚、組成、および不純物濃度の均一性増大に極めて優れ、設定した目標を達成したエピタキシャル成長技術となっている。また、これまで懸案事項になっていた InGaN 混晶成長での In 組成の増大にも十分な効果が認められる有効なエピタキシャル技術となっている。
実際のデバイス作製で用いているエピタキシャル成長技術は、様々なノウハウを含んだ展開が有り、各企業・各機関で独自の方法を採用しているところが多い状況であるが、成長制御の原理が単純明快でその効果も高いことから、新規に参入あるいは同様な状況で参入する場合には極めて有効であろうと考える。実用化を保証できる結果も得られており、高く評価できる成果といえよう。

○ 窒化物半導体の原子層エピタキシャル成長が可能な、高速バルブスイッチ装置を開発した。この装置により、高 Al 組成および高 In 組成の窒化ガリウム系混晶薄膜を原子層レベルでヘテロ成長できることが示された。高 Al 組成および高 In 組成のエピタキシャル成長層の組成と膜厚を原子レベルで制御できれば、電子デバイス・光デバイスを問わずデバイス構造のバリエーションは大きく拡がる。
また、C_2H_2 を炭素源として高品質の高抵抗バッファ層を実現したことは、高耐圧デバイスの実現に大いに貢献できる。

〈主な問題点・改善すべき点〉

● エピタキシャル成長で達成すべき目標として、AlxGa1-xN および InxGa1-x N 共に、Al および In 組成 x を単純に 0.5≦x≦1 の全域で、多くの評価事項が設定されている。本プロジェクトの当事者が十分理解しているように、窒化物系ではこのような組成範囲でもその物理的・化学的性質は大きく異なるので、目標をこの組成域全体で達成するのは容易とは言えない。特に InGaN 三元混晶ではそのように言えよう。成果報告としては、In 組成が 75%において、転位密度、組成均一性、不純物添加均一性などでの設定目標を達成したとしている。これだけの結果であっても、十分高いハードルを越えた成果であると理解はするが、必ずしも 0.5≦x≦1 の全域で目標を達成したとは言えない。

● プロジェクト全体の中で、この技術によって今までに無いどのようなデバイス特性が得られたのかといった、エピタキシャル成長の技術開発とデバイス特性との連関が見えない。

● 事後評価で示されたエピタキシャル成長層のうち、どれが本プロジェクト

の中で提供されたGaNバルク基板上のものなのかがはっきりしなかった印象がある。また、高Al組成および高In組成のエピタキシャル成長において、GaN バルク基板を用いることの優位性が必ずしも明瞭に示されていない。

バルク GaN を基板とするエピタキシャル成長（特に縦型デバイス用）では、エピタキシャル／基板界面の電気的性質が問題になると思うが、この影響や解決法についての検討を行って欲しかった。

- 本プロジェクトによる大口径 GaN 基板で成長したエピタキシャル結晶のデータがどれにあたるかが不明確である。目標設定での混晶範囲が広く、アプリからのニーズに基づいた必要性とは別で、材料の興味からの目標になっていたかもしれない。エピタキシャル結晶企業体のビジネスが本プロジェクトの根幹である GaN 基板からは離れ、独自のエピタキシャル結晶ビジネスとなっている。GaN 基板を採用したビジネスモデルの可否を検討する必要がある。
- 種々の検討に取り組み、それぞれに成果が得られているが、GaN 基板上の高耐圧素子としての優位性が発揮できる縦型素子に向けたドーピング技術の開発が十分ではないのが残念である。

〈主なその他の意見〉

- AlN 基板結晶技術の開発において、良い成果が得られたのは認められるが、本プロジェクトで進められるべきであったか、プロジェクト全体の方針からみて疑問の点もある。
- 本プロジェクトから生み出された有力技術の一つである加圧デジタル MOVPE 装置／ALE 成長技術については装置開発が必要であり、成果の波及効果の観点では複数の企業の参入が望ましい。
- エピタキシャル結晶はノウハウの塊であるため、国際競争力を維持するには秘匿しなければならないノウハウも多い。技術が大学内にとどまることなく日本の企業体にノウハウをうまく開示できる仕組みが必要であろう。

２．３　窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価

４インチサイズの低転位・高品質化 GaN 基板上に縦型と横型の電子デバイスを作製し、低転位・低欠陥密度基板結晶を用いることの有効性・必要性の検討を進めた。これにより転位とは異なる欠陥が縦型素子のリーク電流の原因となりうることを見出し、GaN 基板結晶の表面仕上げにフィードバックした。また、欠陥密度が下がると 1200V 以上の耐圧が出せることを実証し、GaN 基板適用の優位性が発揮できる縦型素子の実用化への期待を高めた。

さらに、研究に参画した実施者が、横型 AlGaN/GaN HEMT（高電子移動度トランジスタ）のサンプル出荷を開始したことは、事業化加速を示している。

但し、基板の供給が律速となり、基板の特性がデバイス特性に十分に反映されず、新しいデバイス構造の提案と実証が十分に出来なかった。多くの試料での評価を進めるために、さらに信頼性への影響の検討などのデバイス評価に向けた次段階の組織的対応を継続研究として期待する。

〈主な肯定的意見〉

○ 高温特性や高耐圧特性などで顕著な成果を残しており、かつ転位と耐圧の関係など基礎メカニズム検討まで掘り下げた成果を残した。デバイス企業体も展示会対応を含めて、応用の観点を含んだ開発を行った。

○ デバイス担当としては最大限の努力と業績を挙げられたと高く評価する。欠陥密度が下がると 1200V 以上の耐圧が出せることを実証している。実用化に向けて大きな励みになるデータであり、今後の更なる改善が期待される。

非極性面（a 面）での特性をある程度引き出したのはプロジェクトの大きな成果である。今後の励みになるであろう。

○ デバイス特性を通して、基板結晶およびエピタキシャル成長の品質に対する情報をフィードバックするためのデバイスプロセスと特性評価手法を確立した。

Na フラックス法により作製されたバルク GaN 基板上のパワーデバイスが、これまで他機関から報告されている最高性能のデバイスに匹敵することを示した。また、AlGaN チャネル HEMT が高温領域で良好な特性を示すことを実証した。

○ プロセス技術の優劣の差が出にくい結晶評価用のパタンを参画企業各社のフォトマスクに導入することで、統一的な結晶評価を可能とした。

結晶供給が不十分な中で、転位とは異なる欠陥が縦型素子のリーク電流の原因となりうることを見出し、GaN 基板結晶の表面仕上げにフィードバックした。これにより、GaN 基板適用の優位性が発揮できる縦型素子の

実用化への期待を高めた。

○ バルク基板、エピタキシャル成長の 2 つのテーマの成果を踏まえた目標と独立した目標を設定し、それぞれ目標を達成している。
異なる基板上のエピタキシャルをデバイス特性の観点で客観的に比較し、課題とその克服法をエピタキシャルチームとの協力によって明らかにし、GaN 基板の優位性を示した。
また、InGaN チャネル HEMT や AlN 基板上の AlGaN チャネル HEMT 等、世界初の成果を上げている。

○ Na フラックス法により育成した基板にエピタキシャル成長した AlGaN/GaN 構造・AlGaN/AlN 構造を用いて、HEMT の作製と評価を行い、基板/エピタキシャル膜/デバイスの各特性の関連性を得た点は高く評価できる。チャレンジングな目標設定にも関わらず、これまでの報告値と同等のオン抵抗・耐圧を達成した点も優れた成果と言える。研究に参画した企業が、横型 AlGaN/GaN HEMT のサンプル出荷を開始したことは、事業化加速を示していると思われる。

○ ４インチサイズの低転位・高品質化 GaN 基板上に縦型と横型の電子デバイスを作製し、低転位・低欠陥密度基板結晶を用いることの有効性・必要性の検討を進め、当初の設定目標を達成している。具体的には、混合転位と刃状転位は縦型デバイスでのリークの原因とはならないこと、また低欠陥密度の基板を利用することが、横型デバイスのリーク電流の飛躍的低減につながることが確認されている。また、GaN インバータを作製し、実機動作により実用性を確認していることも評価する。

〈主な問題点・改善すべき点〉

● デバイスによる結晶評価が主体となって、新しいデバイス構造の提案と実証が出来ておらず、残念である。
デバイス特性と転位密度との関係などの定量的な評価、リーク電流に伴う発光欠陥の物理像解明などが手つかずで残された。今後の継続的な検討を期待したい。

● リーク電流や耐圧に対する転位密度の影響を明らかにした点は大きな成果であるが、更に進めて信頼性への影響を追究できればさらによかった。

● 大口径高品質 GaN バルク基板上への電子デバイスの試作評価は、大口径高品質 GaN バルク基板、およびエピタキシャル成長の２つのグループの供給が律速したものであろうが、さらに多くの試料での評価が進めば、例えばオン抵抗と耐圧の関係などでも、他の基板利用の場合との比較等においても、より本質的な結果とその考察が可能であったことと推定される。

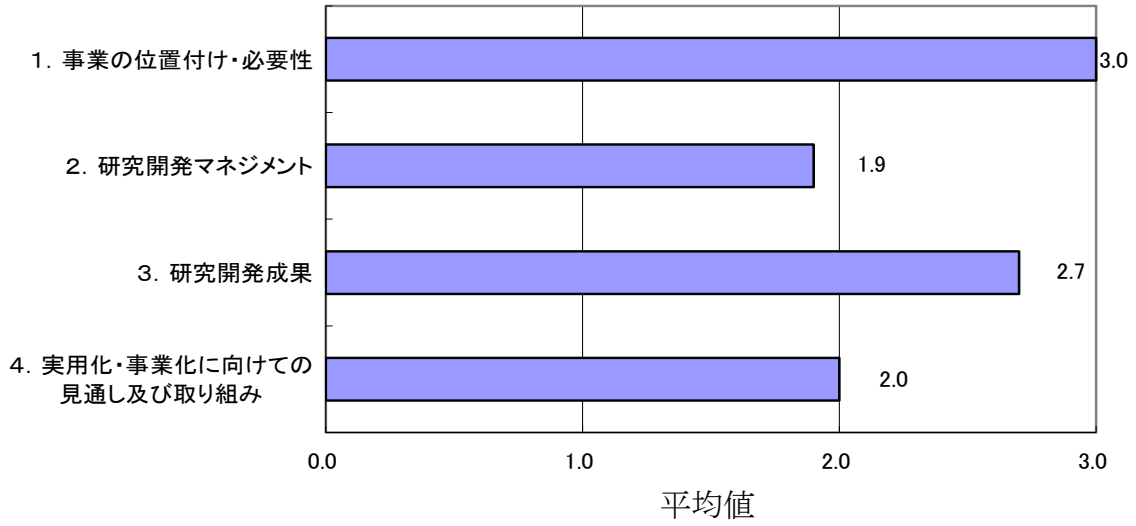
- 信頼度とコストが不明である。本プロジェクトの目標はそこまで踏み込んだものでないため、今後の検討課題である。追加プロジェクトの必要性を感じる。参画したデバイス企業体の事業見極めが一社としてできていない。追跡評価での確認が重要である。
- 単に前工程の評価担当ではなく、新しいデバイス開発をミッションとするべきである。初期のテーマ設定のミスである。
  基板の特性がデバイス特性に十分に反映されていないのは残念である。
  デバイス特性と試用された基板の特性との相関が十分示されていない。
  Na フラックス法で作製した基板と言っても、基板の所でも紹介されたように種々の特性の基板が存在している。
  プロジェクトの後半から始まった基板の調達は、初期から行うべきであった。GaN 基板上のデバイス開発が更に進んだものと思われる。
  SiC には作れない HEMT による高周波特性をもう少し引き出し、優位性を示すことができればよかった。

〈主なその他の意見〉

- Ⅲ族窒化物のバルク単結晶とエピタキシャル成長は、本プロジェクトの出口イメージとして強調されている次世代パワーデバイスのみならず、照明用 LED を広く普及する上でも必須技術である。低抵抗のバルク結晶について、光デバイスの観点からの特性評価とフィードバックがあってもよい。
- 材料開発中心のプロジェクトにデバイスの視点が入ったことの意義は大きいと考える。バルク結晶及びエピタキシャル技術の水準が向上した段階で、デバイス中心の新たなプロジェクトが期待される。また、低転位密度バルク結晶の効果について、特に信頼性の観点からの評価を期待したい。

３．評点結果

３．１　プロジェクト全体



評価項目	平均値	素点（注）						
１．事業の位置付け・必要性について	3.0	A	A	A	A	A	A	A
２．研究開発マネジメントについて	1.9	B	A	C	B	B	C	B
３．研究開発成果について	2.7	A	A	B	A	A	B	A
４．実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて	2.0	B	A	B	C	B	B	B

（注）A=3，B=2，C=1，D=0 として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

〈判定基準〉

１．事業の位置付け・必要性について

・非常に重要　→A
・重要　→B
・概ね妥当　→C
・妥当性がない、又は失われた　→D

２．研究開発マネジメントについて

・非常によい　→A
・よい　→B
・概ね適切　→C
・適切とはいえない　→D

３．研究開発成果について

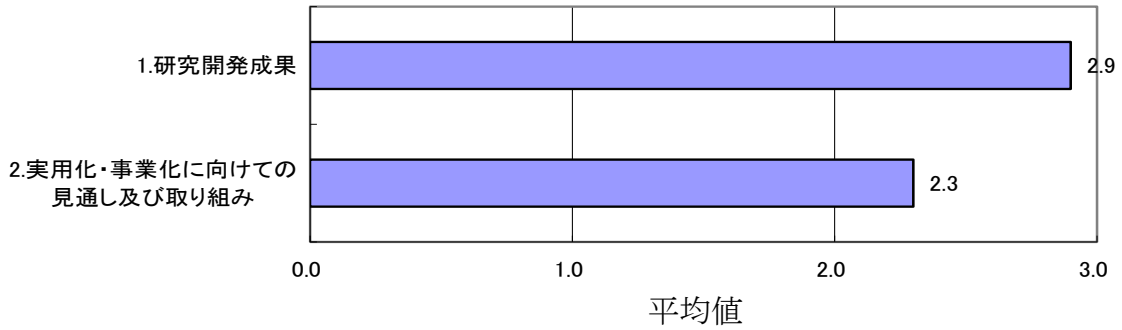
・非常によい　→A
・よい　→B
・概ね妥当　→C
・妥当とはいえない　→D

４．実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

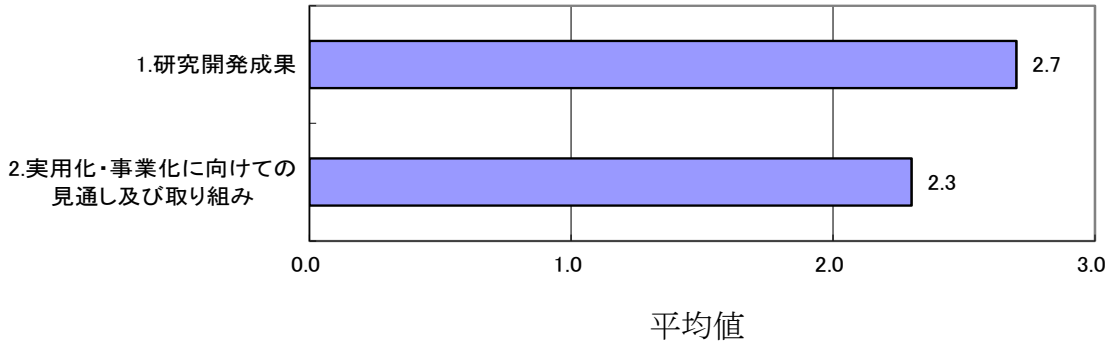
・明確　→A
・妥当　→B
・概ね妥当　→C
・見通しが不明　→D

３．２　個別テーマ

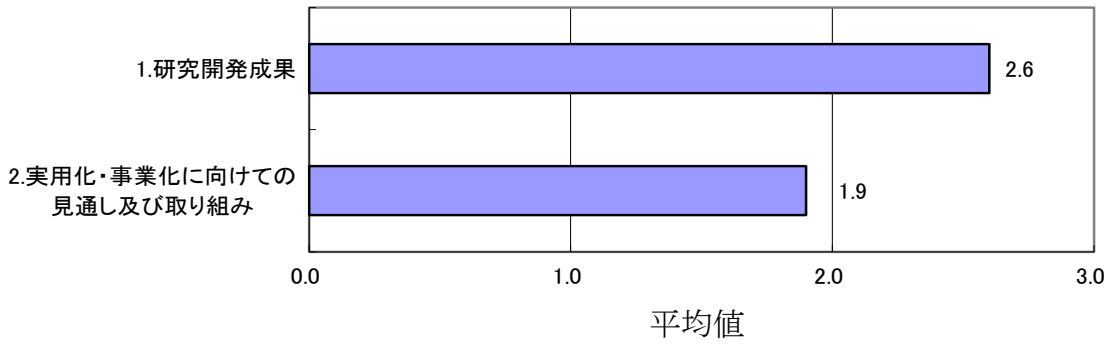
３．２．１　高品質大口径単結晶基板の開発



３．２．２　大口径基板上の高品質エピタキシャル結晶成長技術



３．２．３　窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価



個別テーマ名と評価項目		平均値	素点（注）						
３．２．１　高品質大口径単結晶基板の開発									
	１．研究開発成果について	2.9	A	A	A	B	A	A	A
	２．実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて	2.3	A	A	B	C	A	B	B
３．２．２　大口径基板上の高品質エピタキシャル結晶成長技術									
	１．研究開発成果について	2.7	A	A	B	A	A	B	A
	２．実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて	2.3	A	B	B	C	A	A	B
３．２．３　窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価									
	１．研究開発成果について	2.6	A	A	B	A	A	C	A
	２．実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて	1.9	B	B	B	C	B	B	B

（注）A=3，B=2，C=1，D=0 として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

〈判定基準〉

１．研究開発成果について

・非常によい　→A
・よい　→B
・概ね適切　→C
・適切とはいえない　→D

２．実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

・明確　→A
・妥当　→B
・概ね妥当　→C
・見通しが不明　→D

第２章　　評価対象プロジェクト

１．事業原簿

次ページより、当該事業の事業原簿を示す。

「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	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・エネルギーイノベーションプログラム		
プログラム名	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	Ｐ０７０３０
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
Ｏ．事業の概要	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。 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。
Ⅰ．事業の位置付け・必要性について	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。 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且つ効率的である。
	Ⅱ．研究開発マネジメントについて
事業の目標	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。 ①　高出力デバイス作製に必要な大型／高品質窒化物単結晶基板を作製する。 ②　新たなエピタキシャル成長法を開発し、①で作製した口径４インチの有極性、及び口径３～４インチの無極性窒化物半導体バルク基板上において、低欠陥高品質GaNエピ層を実現する。加えて、AlN-GaN-InN混晶エピ層を実現する。 ③ ①②を用いて有極性単結晶基板上FET(電界効果型トランジスタ)と無極性単結晶基板上FETを作製し、特性の差違、及びその利害得失の明確化する。また、広い混晶組成域における耐圧と結晶欠陥の相関を明確化し①、②へフィードバックする。 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。

	主な実施事項		２００７	２００８	２００９	２０１０	２０１１	２０１２
事業の計画内容	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）		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） 管理法人：（財）金属系材料研究開発センター（参加４社） 豊田合成(株)、日本ガイシ(株)、シャープ(株)、(株)豊田中央研究所 再委託先：古河機械金属（株）　、（学）名城大学					
情勢変化への対応	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。 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$5x10^3cm^{-2}$ 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。 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。						
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						

<table>
<tr><td rowspan="4">Ⅲ．研究開発成果について</td><td colspan="3">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。
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 InGaN 層や AlGaN 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 基板上の高 Al 組成の AlGaN チャネルデバイスや、高移動度が期待される InGaN 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。
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 基板上の GaN デバイスとの比較評価では、自立 GaN 基板上の 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。

以上から、各Gとも最終研究開発目標は達成した。</td></tr>
<tr><td>投稿論文</td><td></td><td>５５件（内　「査読付き」１０件）</td></tr>
<tr><td>特　　許</td><td></td><td>９４件（内「登録済」１０件）（内 国際出願 ５３件）</td></tr>
<tr><td>その他の外部発表
（プレス発表等）</td><td></td><td>２００件（内　外部発表　180 件、プレス他　20 件）</td></tr>
<tr><td>Ⅳ．実用化・事業化に向けた見通しについて</td><td colspan="3">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。</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Ⅴ．基本計画に関する事項</td><td>作成時期</td><td colspan="2">平成１９年３月　制定　平成２３年３月改訂</td></tr>
<tr><td rowspan="3">変更履歴</td><td colspan="2">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 colspan="2">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 colspan="2">平成２４年３月　期間延長及び目標を追加</td></tr>
</table>

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jこむ電極
2	エピタキシャル	Epitaxial とは軸の上にという意味で、基板結晶の上に、基板結晶の軸と同じ方位関係になるような結晶を成長すること、またはその状態である。
3	オーミック	電圧－電流特性が比例する特性。金属と半導体の接合が良好な場合に 現れる特性。
4	オン抵抗	FET（電界効果トランジスタ）のドレイン電極とソース電極間の抵抗値の事。オン抵抗が小さいほどFETの損失が小さくなる。
5	欠陥	半導体結晶は原子が規則正しく整列した構造からなる。しかし実際には完全に規則正しく並んでいるのではなく、各種の欠陥が存在する。不純物が混じった欠陥、正規の位置が空になった欠陥、少しずれた欠陥（以上点欠陥）、それが面状に集合した欠陥（転位欠陥）等が知られている。欠陥は半導体の特性に大きな影響をおよぼす。
6	カソード電極	素子から電流が流れ出す電極
7	グレイン	結晶粒のことで、一つ一つのグレインは単結晶である。
8	ゲート	FET（電界効果トランジスタ）の端子の一つで、電圧を印加してFETに流れる電流を制御する電極。
9	コラプス	トランジスタにおいては大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	気相法の一種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（フリースタンディング）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 Forcce Microscoppe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）密度の事であり、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関門（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AlN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）	Photoluminescene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線ロッキングカーブの事で、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且つ効率的である。

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)

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（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CO_2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

↓

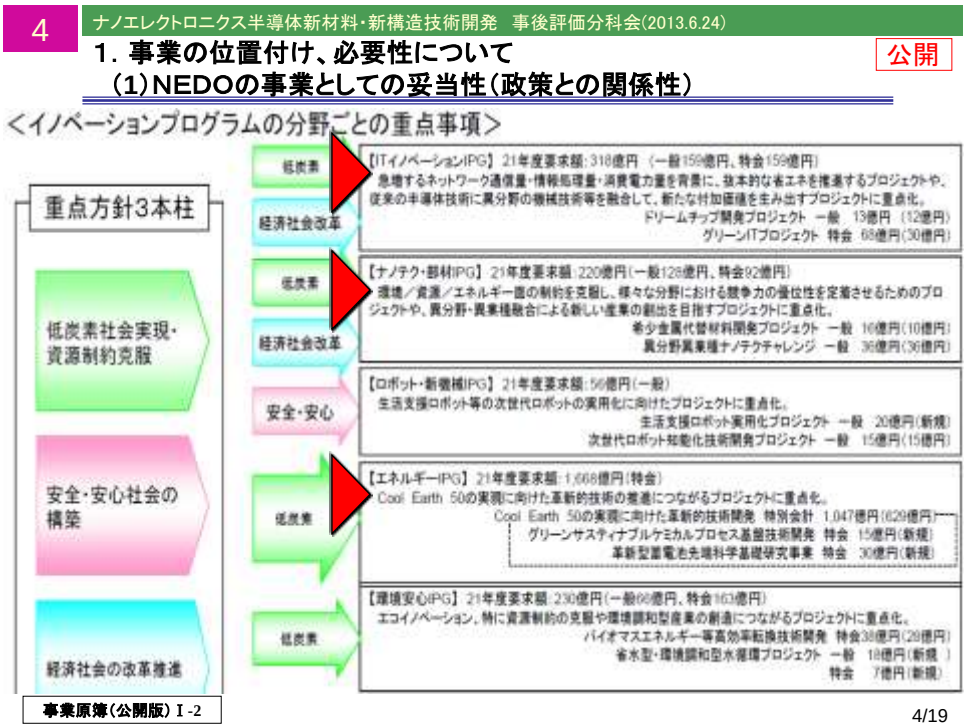
従来の半導体材料では実現できない超高効率の電力機器等を実現するため、
優れた材料特性が期待されるGaNを対象とし、
結晶成長・エピタキシャル成長技術を中心に開発する

「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

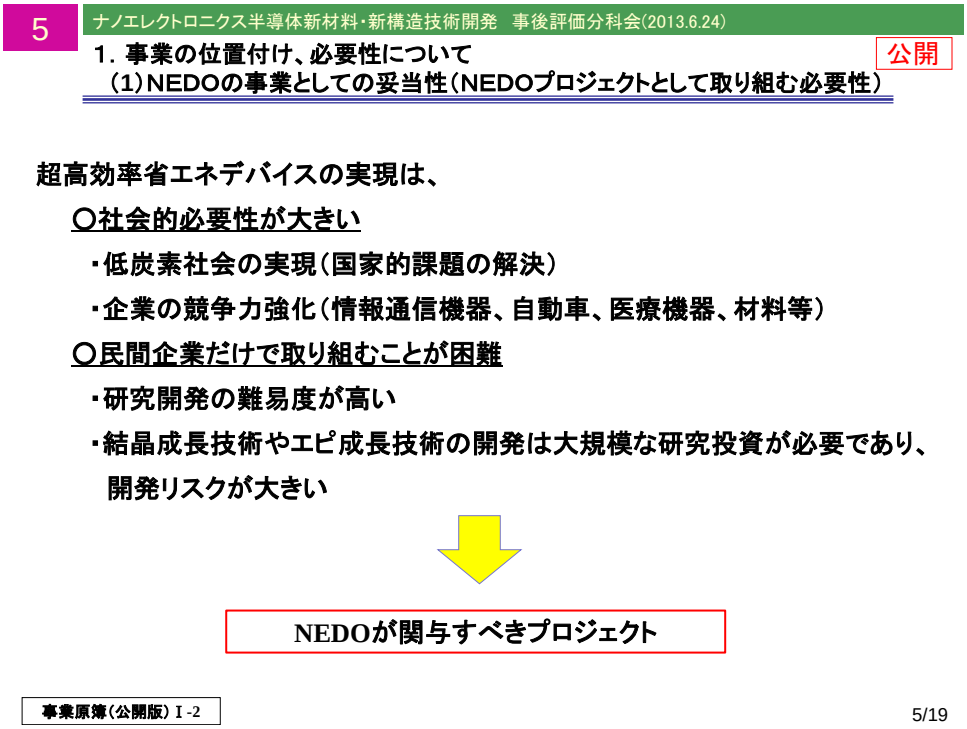
エネルギー資源の約8割を海外に依存する我が国にとって、これを効率的に利用すること、即ち「省エネルギー」を図ることは、エネルギー政策上の重要な課題である。このため更なる省エネルギー技術の開発・導入を進め、もって我が国におけるエネルギーの安定供給の確保を図ることを目的とする「エネルギーイノベーションプログラム」の一環として本プロジェクトを実施する。

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。



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、家電機器においての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。



1-2 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)

公開

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）

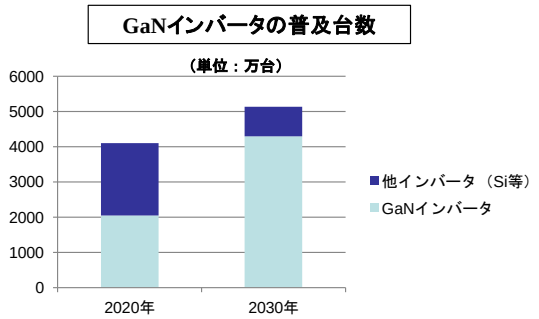
期待される市場創出効果・省エネ効果：インバータの事例

●市場創出効果(汎用インバータ)

2020年：GaNインバータ

普及台数：2，050万台

売上規模：4，700億円



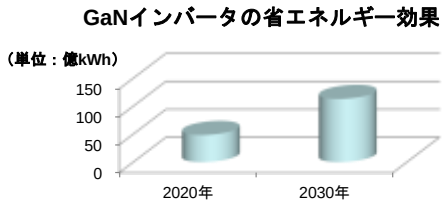
●省エネルギー効果（消費電力量）*)

2020年：電力削減　49億kWh/年

（原発約1基分）

CO_2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

9 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
(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

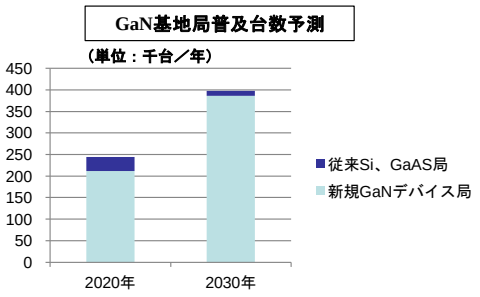
期待される市場創出効果・省エネ効果：携帯基地局向け高周波デバイスの事例

●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



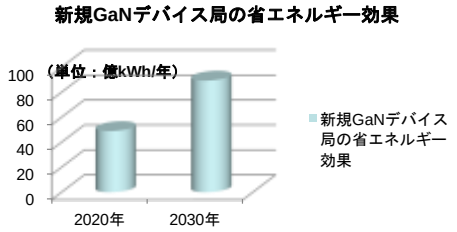
●省エネルギー効果（消費電力量）*)

2020年：電力削減　50億kWh/年

（原発約1基分）

CO_2排出削減換算　272万トン/年

原油換算　104万キロリットル/年



＊）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、富士キメラ総研「「2010ワイヤレスBB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、そしてアモノサーマル法によるGaN基板とがサンプル供給段階であるとし、これまでの研究開発における成果を認める一方で、実用化のスピードとしては決して十分ではなかった。

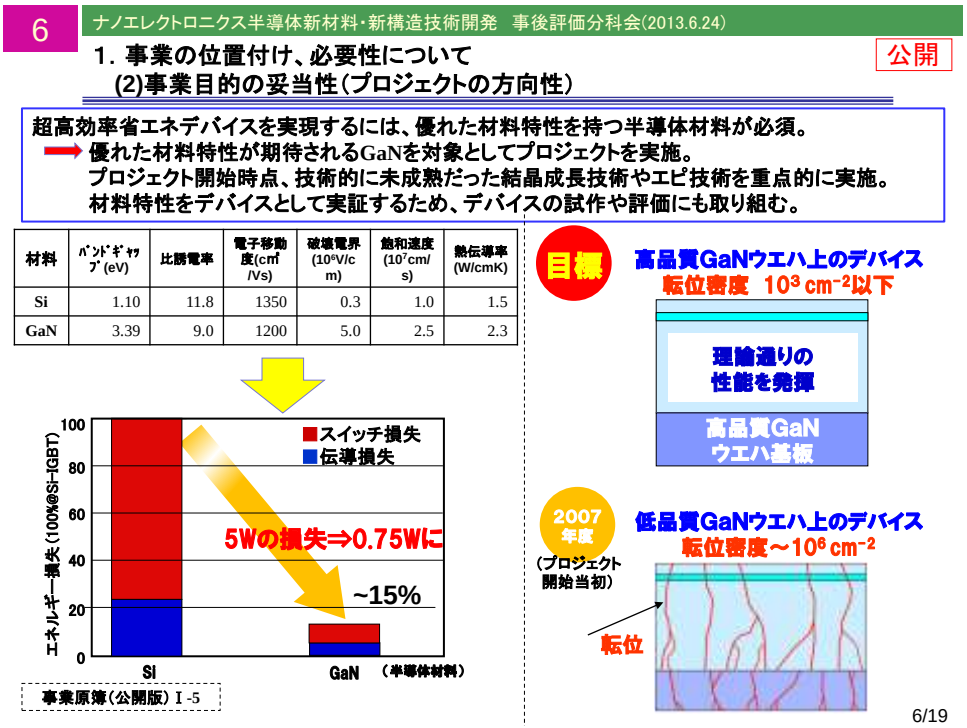
このため本プロジェクトでは従来の半導体材料では実現できない領域で動作可能なハイパワー・超高効率の電力素子、超高速電子素子などの作製に必要な窒化物半導体結晶成長技術の確立を目指し、従来の製造技術では達成し得ないレベルの高品質大口径（3～4インチ）の窒化物半導体バルク基板及びエピタキシャル基板（高In組成及び高Al組成）の製造技術開発を進めるとともに、従来の半導体材料では実現できない領域で動作可能なハイパワー・超高効率の電力素子、超高速電子素子等の実現に向けた基盤技術開発に本事業で取り組むこととした。

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。

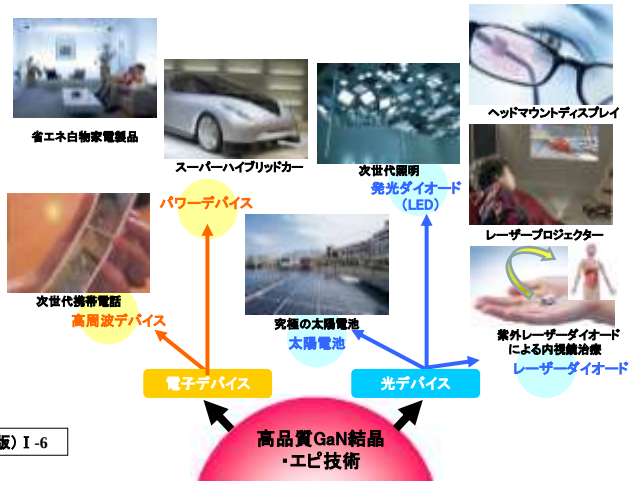


これまでの研究の多くは、結晶の高品質化に焦点を当てた内容が発表されているが、良質なGaN基板を効率的に生成するために、大型で高品質な結晶成長技術に注目して、さらにその実用化事業化につながる研究開発が必要となる。そのために本事業では、2011年度末までにGaN基板で4インチ大口径化を実現するという高い目標が設定された。さらに2012年度に一年延長して、GaNデバイスの実用化事業化促進のために、GaNデバイスの優位性を示す試作・評価の目標を追加設定した。本プロジェクトにより、幅広い用途により省エネルギー化が期待されるGaNデバイスの実用化事業化実現に貢献する。

公開

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）

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＜$5\times10^{3}cm^{-2}$、無極性単結晶基板では転位密度＜$10^{5}cm^{-2}$、積層欠陥密度＜$10^{3}cm^{-1}$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＜$10^{-2}\Omega\cdot cm$、高抵抗基板では比抵抗＞$10^{6}\Omega\cdot cm$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 $1\geqq x\geqq0.5$ で
転位密度＜$10^{6}cm^{-2}$
ドーピング不純物濃度 N 型＞$10^{18}cm^{-3}$ P 型＞$10^{17}cm^{-3}$
口径4インチ基板状にて、面内均一度：厚み±10%、組成：±10%、ドーピング不純物濃度±20%
また、GaNエピ成長層において
残留ドナー濃度＜$10^{15}/cm^{3}$
転位密度：有極性基板上で＜$5\times10^{3}cm^{-2}$、無極性基板上で＜$10^{5}cm^{-2}$
口径4インチ基板状にて、面内均一度：厚み±5%、ドーピング不純物濃度±10%、
ドーピング精度±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＞$2,500cm^{2}/Vs$

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、GaN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GaN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 GaN 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GaN結晶成長技術開発を実施した。
デバイスメーカのニーズも考慮し、GaN基板の大口径化（4 inch）と低欠陥化（ $5\times10^{3}cm^{2}$ ）を中心にプロジェクトを推進した。 併せて、GaN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 GaN デバイスの試作及び特性評価を実施した。
GaN 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＜1.5mΩ・cm^2、耐圧＞2kV 、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ェハとしては、厚みやキャリア濃度等のウェハ特性に関して、4インチ級の大口径にわたる均一性が要求される。

③ 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価

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、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GaNが有利または不利な点を明らかにする。

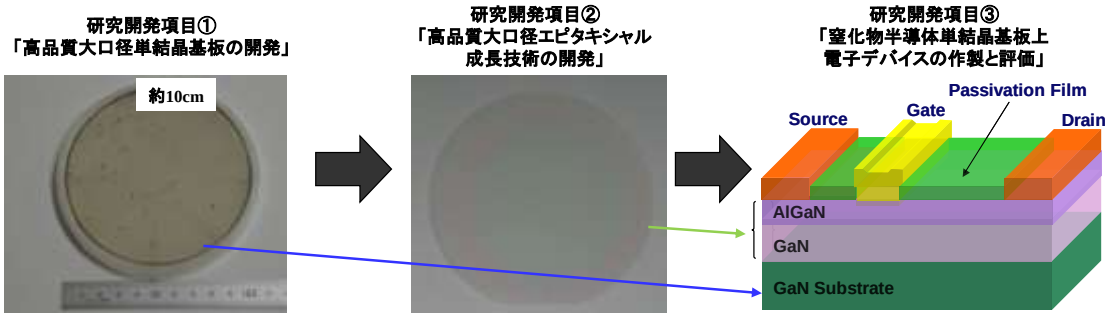
10

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)

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）

公開

- 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。



事業原簿（公開版）Ⅱ-3

10/19

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
(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）

公開

- **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撹拌条件の検討、装置開発 （２６４百万円）	（１９４百万円）	大型装置による溶液撹拌条件の最適化（2インチ） （２６１百万円）	大型装置による溶液撹拌条件の最適化（3インチ）、低転移化 （１２０百万円）	大型装置による溶液撹拌条件の最適化（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ピ技術の開発	MOVPE装置のガス流制御等による高品質エピ成膜技術の開発 （２８５百万円）	超高速バルブ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 装置による大口径エピ技術の開発（AlGaN、InGaNエピの組成・膜圧均一性向上、及び大口径基板への対応等） （２４３百万円）	（７４百万円）	（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）	（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）	（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処を行った。

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しする連携をとった。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、GaN基板を利用する立場でのデバイスグループリーダであり、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。

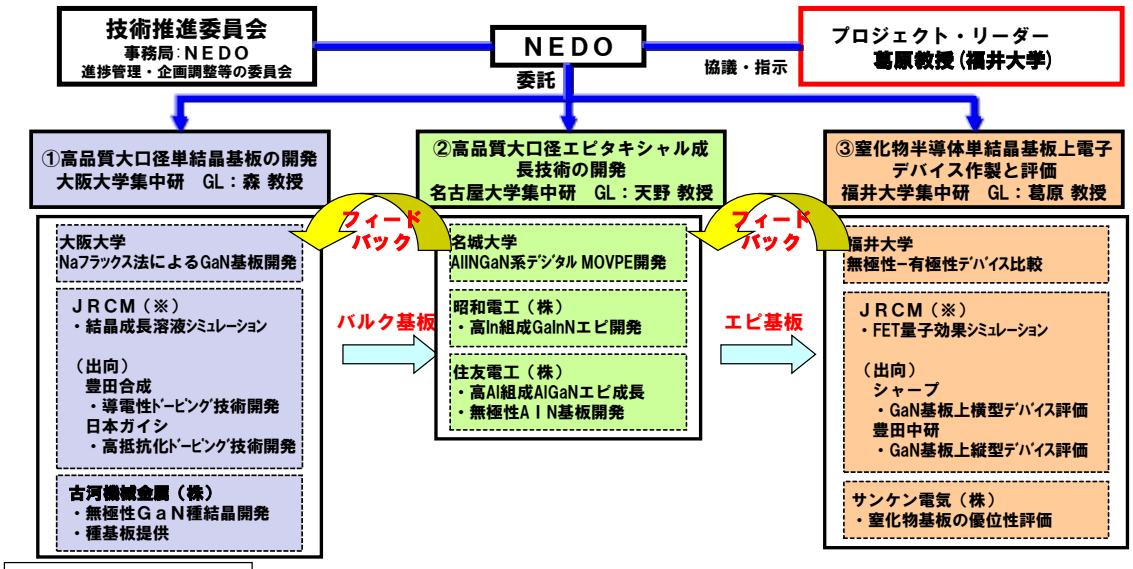
体制についても、当初、基板グループの再委託先であった古河機械金属（株）、（財団法人）金属材料開発研究センター（略称JRCM）への出向社員としてデバイスグループに参画していた（株）シャープ、豊田中央研究所（株）に対して、本プロジェクトの成果を生かして実用化事業化の検討の責任を明確とするために、（独）NEDOの直接の委託先として参画するように更する等、随時、体制の見直し・改善を行った。

公開

2. 研究開発マネジメントについて
(3)研究開発実施の事業体制の妥当性（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



事業原簿（公開版）Ⅱ-8　※（財）金属系材料研究開発センター

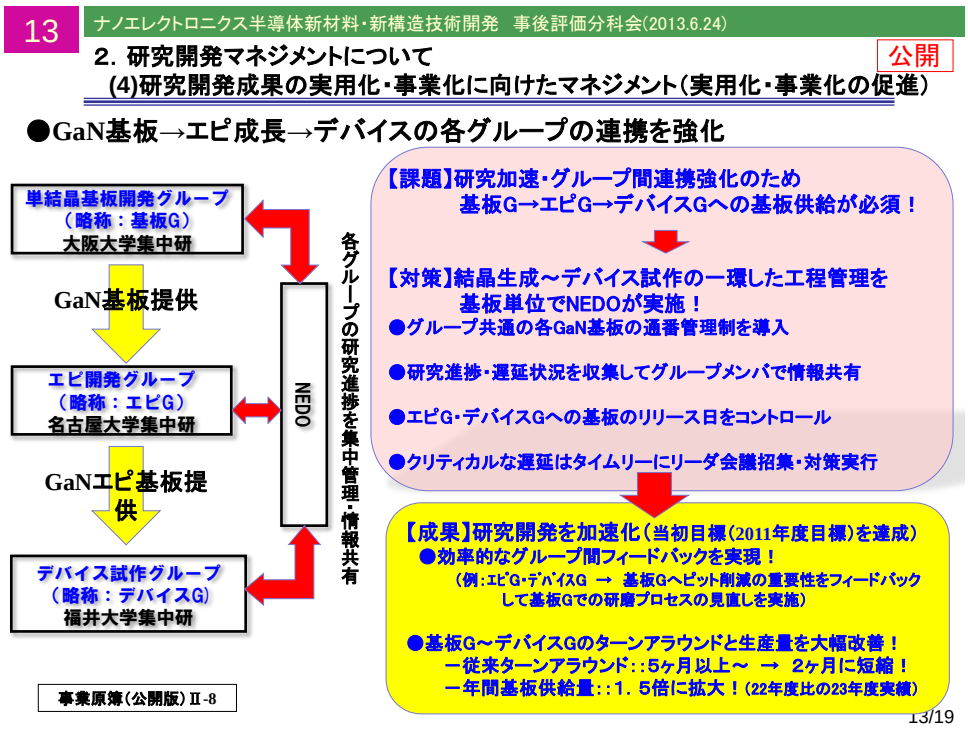
12/19

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

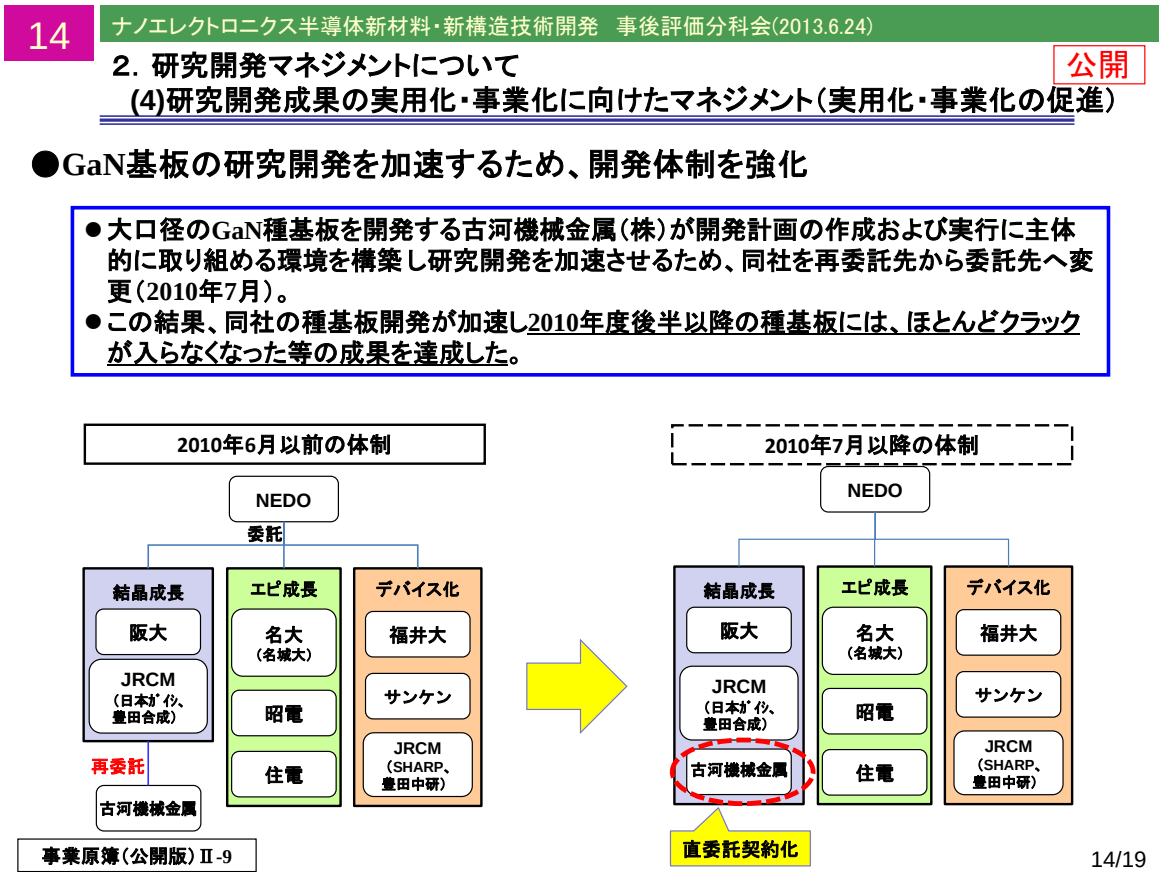
（1）研究開発の加速化に向けた基板ベースの NEDO による進捗工程管理強化

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図った。

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ケ月以上かかっていたのに対して2ケ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。



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GaN基板を供給することが可能となった。



(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、GaN結晶成長・エピタキシャル成長・デバイス分野においては、GaN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転を促進。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。

事業原簿(公開版)Ⅱ-10　　15/19

(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

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)

公開

2. 研究開発マネジメントについて
(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：JRCM）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JRCM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からも提供できる複数調達ルートを確立して、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)

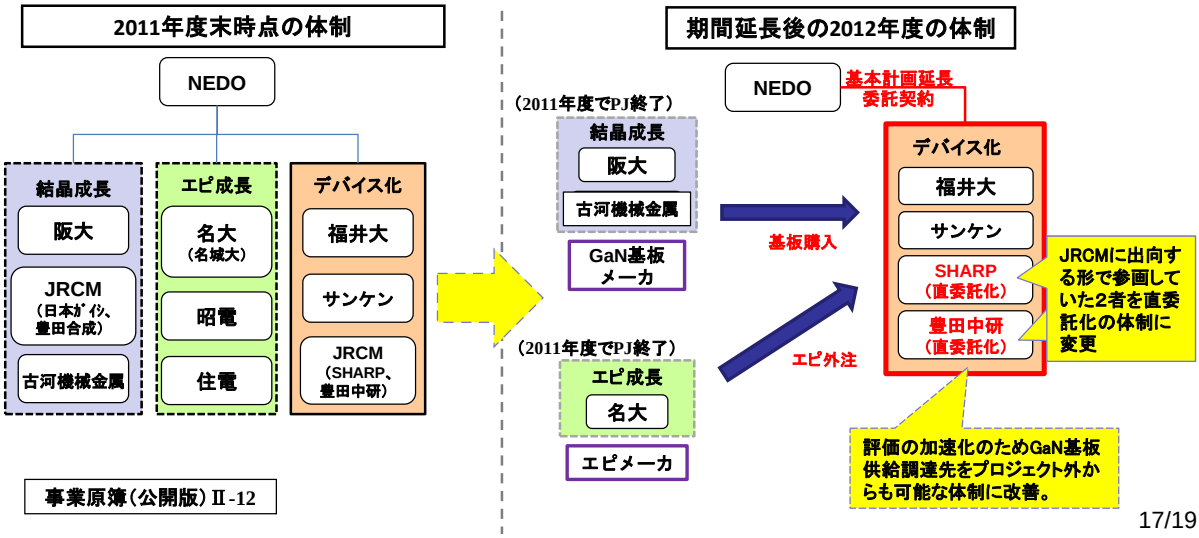
公開

2. 研究開発マネジメントについて

(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



(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。

18 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
(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	主席研究員

◆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（$4\times10^3/cm^2$）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 基板提供メーカに対する基板提供の調整とデバイスメーカ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
(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）

公開

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
・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。	・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。**
・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良い。	・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。**
・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。	・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。

事業原簿（公開版）Ⅱ-14

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 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。

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 InGaN 層や AlGaN 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 基板上の高 Al 組成の AlGaN チャネルデバイスや、高移動度が期待される InGaN 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 GaN デバイスと、本プロジェクトで開発した自立 GaN 基板上の GaN デバイスとの比較評価では、自立 GaN 基板上の 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、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-FIELO 法により、歪みの低減と転位密度を $3x10^6cm^{-3}$ 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、$4\times10^3cm^{-2}$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10φmm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 0.01Ω・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 10^8Ω・cm、無極性面でも 10^5Ω・cm の目標値の比抵抗を有する、φ44 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言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ネルおよびテーパー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 AlGaN 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±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±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。

無極性基板上の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 InGaN、AlGaN 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と成長が難しかった高 In 組成の InGaN 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±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立し、Si においては 19 乗以上、Mg においては 20 乗以上ドープした 4 インチエピ基板で、濃度分布の目標値の±5%以下を達成した。

さらに、InGaN チャネル 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 $9.6\times10^{12}cm^{-2}$ において、高いチャネル移動度 $2160cm^2/Vs$ 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 $2.0\times10^{12}cm^{-2}$ とすることにより、チャネル移動度の目標値 2500 cm^2／Vs をクリアできる可能性を示している。

現在、HEMT 構造は AlGaN/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～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、InGaN 層の高いチャネル移動度を引き出すことが期待できる。試作したエピで 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 AlGaN 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±3.7%、Al 組成分布±0.6%と、目標値の±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 $9\times10^{19}cm^{-3}$ まで、Mg については $2\times10^{18}cm^{-3}$ から $2\times10^{19}cm^{-3}$ 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±7.4%、Mg 濃度分布±12.6%と、目標の±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プされる Fe や Mg は偏析しやすく、チャ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プが難しかった 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ネルとの界面への偏析することなく所定量ドープすることに成功した。実際の HEMT 構造において、$1x10^{19}$ atoms・cm^{-3} 以上の C をドープ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 AlGaN 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 $5\times10^4cm^{-2}$ 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 基板上の AlGaN チャネル 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、サファイヤ基板上の 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 AlGaN/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｡特にチャネル下の緩衝層として Mg をドープ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 12μｍ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 AlGaN/GaN チャネル 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 AlGaN/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、AlGaN/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 AlGaN 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 AlGaN チャネル 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 AlGaN 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 9μｍ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℃から 300℃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 AlGaN/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 AlGaN 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 3～4mΩcm^2 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$Al_{0.36}Ga_{0.64}N$/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$3.5x10^{19}cm^{-3}$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$400cm^2/Vs$、$2x10^{13}cm^{-2}$であり、ゲート長2・mのHFETにおいて、最大ドレイン電流220mA/mm、最大相互コンダクタンス57mS/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AlInN/InGaN/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＜5×103cm−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、3.9×10^3cm^{-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＜10^5cm^{-2} ・積層欠陥密度＜10^3cm^{-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＜10^3cm^{-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＜10^8cm^{-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＜10−2Ω・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}Ω・cm、ｷｬﾘｱ密度＝3x10^{18}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＜10−2Ω・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～10−2Ω・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＞106Ω・cm）	・Znを2×1019atoms・cm−3添加したサンプルで～108Ω・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、1.5×10^5Ω・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)大口径基板上の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。	○
	・窒化物基板上のGaNエピタキシャル成長技術 ・残留ドナー濃度＜$10^{15}cm^{-3}$ ・転位密度: － 有極性＜$5x10^{3}cm^{-2}$、－ 無極性＜$10^{5}cm^{-2}$ ・面内均一性(4″φ 基板上): － 厚み＜±5% － ドーピング不純物濃度±10% － ドーピング精度±20%	・GaN基板上アンドープGaNエピ層で、残留ドナー濃度＝1～$2x10^{12}cm^{-3}$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＜$5x10^{3}cm^{-2}$、－ 無極性＜$10^{5}cm^{-2}$ ・4インチφ アンドープGaNエピ層で、 － 膜厚均一性＜±5%を達成。 － Si及びMgドーピング濃度均一性＜±5%を達成。 － Si及びMgドーピング精度＜±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立。 ・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≧x≧0.5 － 転位密度＜$10^{6}cm^{-2}$ － 厚み:±10%、組成:±10% (面内均一性(4″φ 基板上))	・InGaNエピ(In組成＞0.5)の成長技術を確立。 － In 組成 1≧x≧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＜$10^{6}cm^{-2}$)。 ・4インチφ InGaNエピ層(In組成＞0.5)で、 － 膜厚均一性＜±5%、組成均一性＜±0.5%を達成。	○
	・Si及びMgドーピング制御技術の開発 － N 型＞$10^{18}cm^{-3}$ － P 型＞$10^{17}cm^{-3}$ － ドーピング不純物濃度±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: －【Si】＞$10^{19}cm^{-3}$ －【Mg】＞$10^{20}cm^{-3}$ Siドーピング濃度均一性＜5%、Mgドーピング濃度均一性＜±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＞$2,500cm^{2}/Vs$ (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(Ns)=$9.6\times10^{12}cm^{-2}$と高濃度において、移動度(μ)＝$2160cm^{2}/Vs$を確認。 ・上記結果より、Ns～$2\times10^{12}cm^{-2}$において、μ ＞$2500cm^{2}/Vs$の可能性を実証。	△
	(3)高Al組の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≧x≧0.5 － 転位密度＜$10^{6}cm^{-2}$ － 厚み:±10%、組成:±10% (面内均一性(4″φ 基板上))	・AlGaNエピ(Al組成＞0.5)の成長技術を確立。 － Al 組成 1≧x≧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＜$10^{6}cm^{-2}$)。 ・4インチφ AlGaNエピ層(Al組成＞0.5)で、 － 膜厚均一性＜±3.7%、組成均一性＜±0.6%を達成。	○
	・Si及びMgドーピング制御技術の開発 － N 型＞$10^{18}cm^{-3}$ － P 型＞$10^{17}cm^{-3}$ － ドーピング不純物濃度±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: －【Si】＞$10^{19}cm^{-3}$ －【Mg】＞$10^{18}cm^{-3}$ Siドーピング濃度均一性＝7.4%、Mgドーピング濃度均一性＝±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$5\times10^{4}cm^{-2}$の低転位AlN結晶を得る技術を確立。 ・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**		○
	・有極性GaN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Si,SiC等他種半導体に対する優位性の確認 ・基板・エピ技術開発チームへのフィードバック	・AlGaNチャネル、GaN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フラックス有極性GaN基板上に、AlGaN/GaN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。 ・AlN基板上AlGaN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 GaN、GaN on SiC、GaN on Si FET試作でいずれも耐圧1200Vを達成。 ・GaN on GaN、GaN on SiCでGaN on Siと同等以上の低オン抵抗特性を確認。 ・NaフラックスGaN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		○
	・有極性GaN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・エピ技術開発チームへのフィードバック	・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。 ・転位密度とリーク電流の関係を調べ、NaフラックスGaN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		○
	・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・エピ技術開発チームへのフィードバック	・窒化物半導体エピ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フラックス基板上(Cドープ緩衝層)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		○
	・有極性と無極性の比較評価 ・基板・エピ技術開発チームへのフィードバック	・ゲート長0.25・mのAlGaN/GaN 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倍程度小さくなることが判明した。 ・無極性GaN基板上InGaN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。

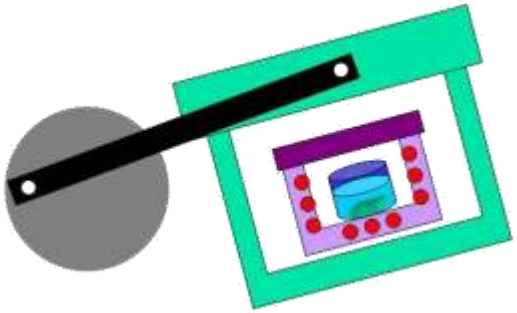


図１－１　機械式揺動装置の概略図

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。

(a)　(b)

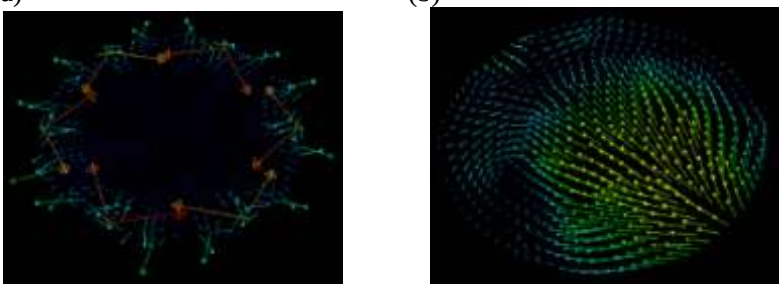


図１－２　(a)揺動無し、(b)揺動有り(1rpm)条件での基板表面における流れの計算結果

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を調べた。育成温度は 860℃、育成窒素圧力は 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、有りで成長した GaN 結晶写真である。揺動無しの条件で成長した GaN 結晶(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。

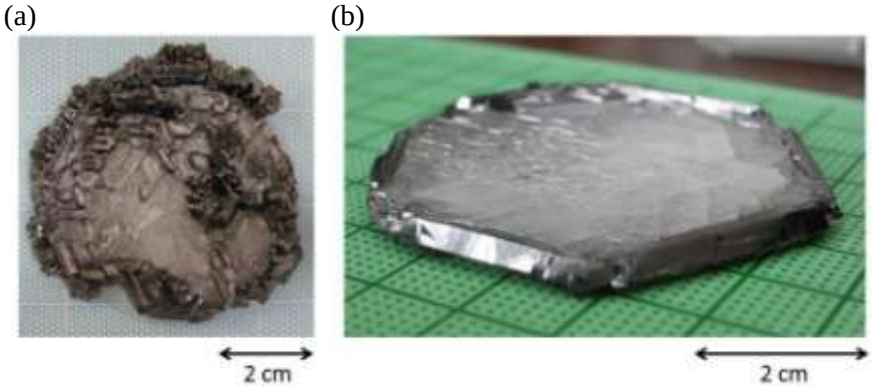


図１－３　(a)攪拌なし、及び(b)攪拌を行った条件で成長した結晶写真

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。

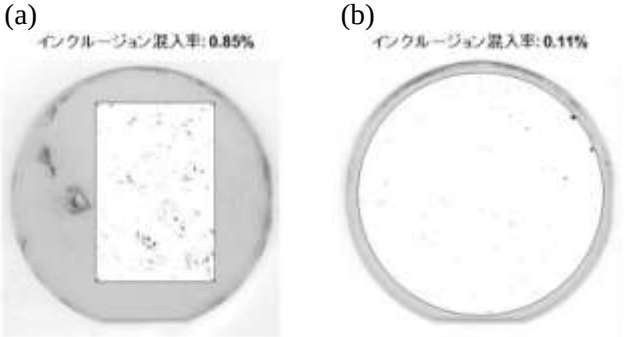


図１－４　(a)攪拌速度 2rpm、及び(b)5rpm で成長した結晶の透過写真と
インクルージョン混入率

（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。

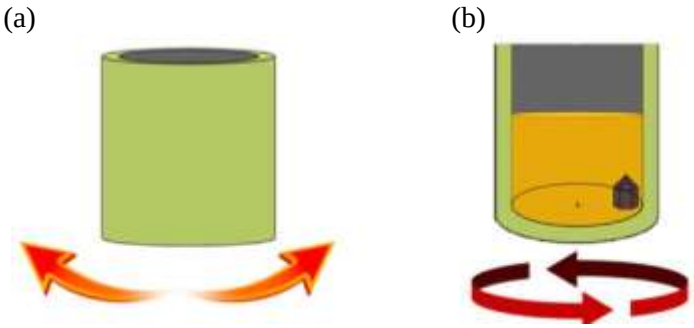


図１－５　(a)揺動攪拌、及び(b)回転攪拌の概略図

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。

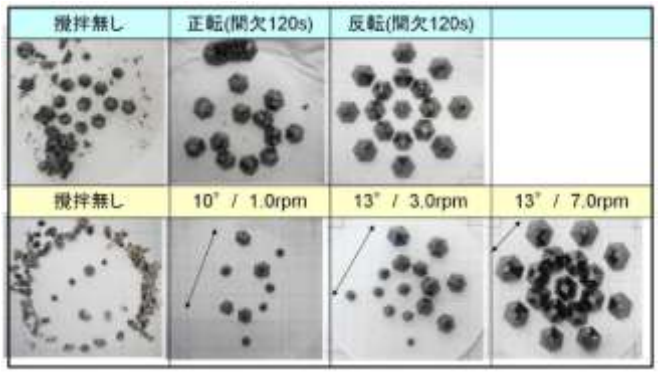


図１－６　成長後の結晶の攪拌方法・速度依存性

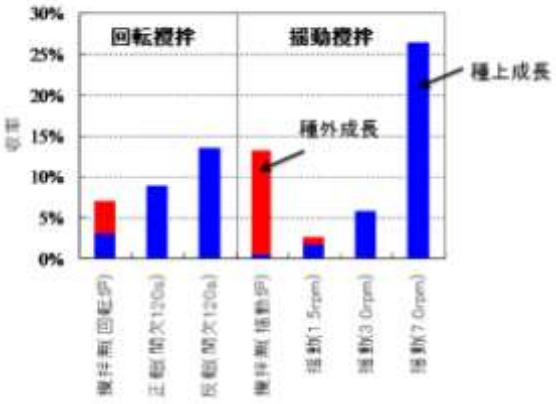


図１－７　LPE 収率、及び種結晶外収率の攪拌方法・速度依存性

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なっているが、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

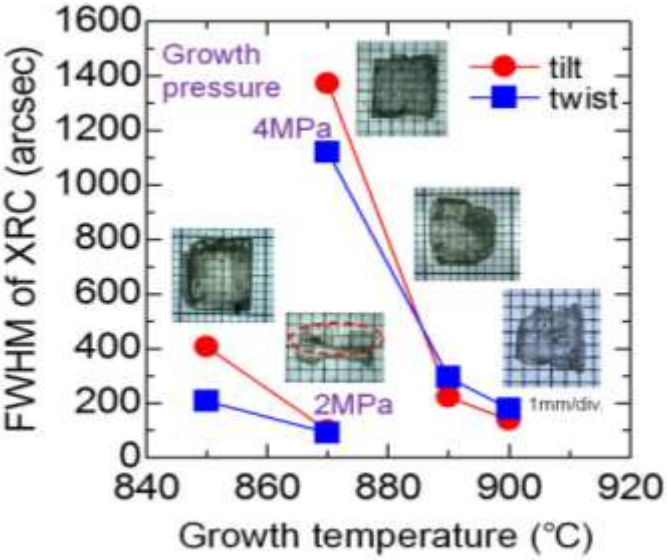


図１－９　Ca-Li 添加系 m 面 GaN 結晶の XRC-FWHM の成長温度依存性

果が得られている。

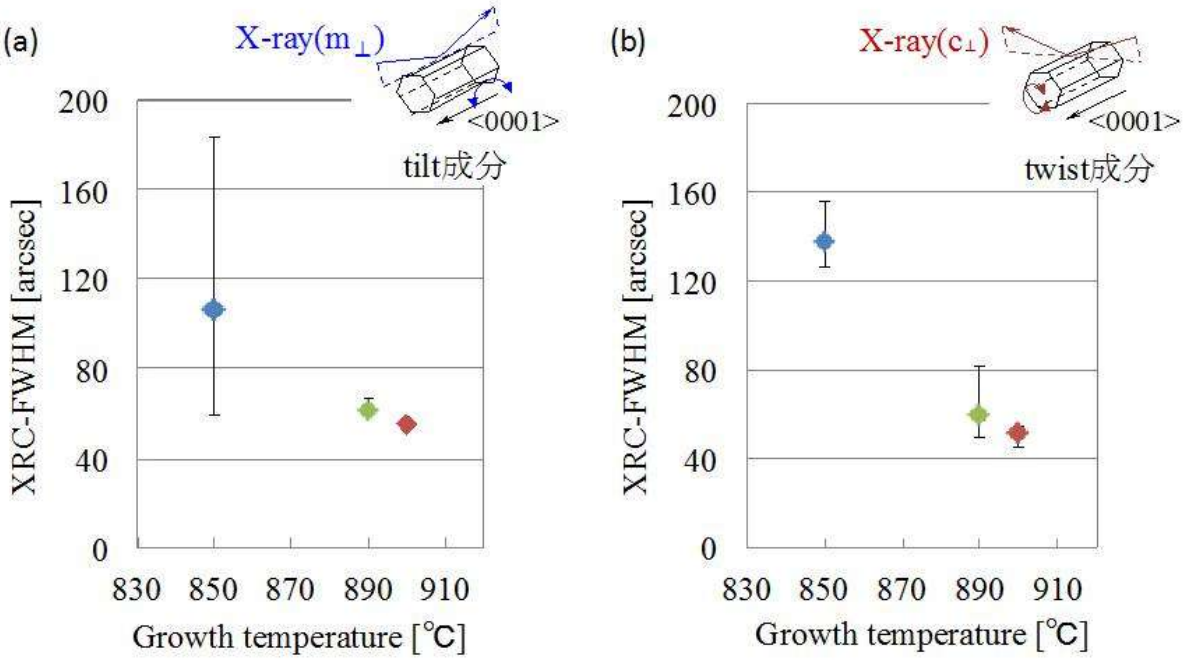


図１－１０　微小種結晶を用いて育成したバルク GaN 結晶の XRC-FWHM の成長温度依存

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℃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/cm^3 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℃、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℃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 100μm 以上の厚みにおいては、10^{15}atoms/cm^3 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℃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 結晶表面をパンクロマンティッ

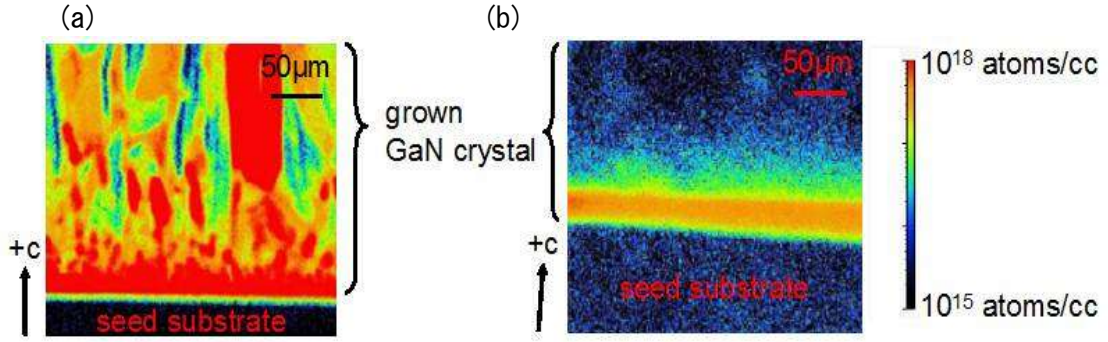


図１－１１　Li 添加系において育成した c 面 GaN 結晶への Li 取り込み量の温度依存性

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℃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℃ 2MPa →	890℃ 4MPa
Ca	7.4×10^{17} cm^{-3} >	1.8×10^{16} cm^{-3}
Li	1.5×10^{16} cm^{-3} >	3.0×10^{15} cm^{-3}
O	8.6×10^{18} cm^{-3} >	4.2×10^{17} cm^{-3}

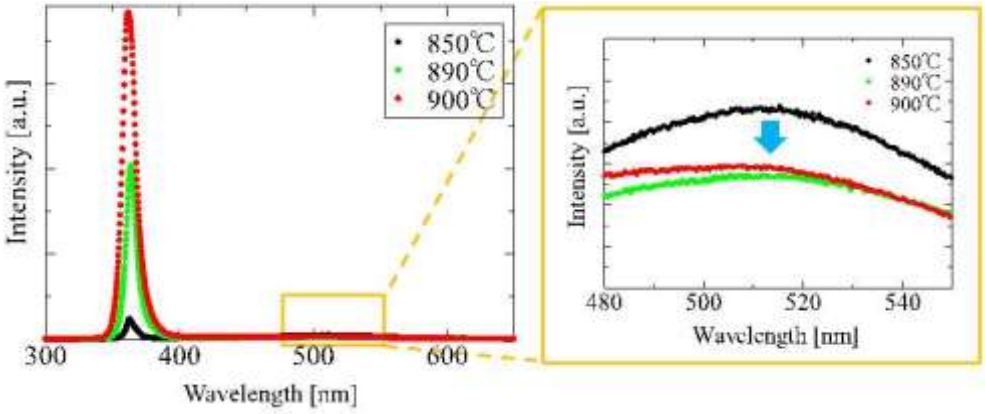


図１－１２　Ca 添加系で育成したバルク単結晶 m 面の PL スペクトル(室温測定)

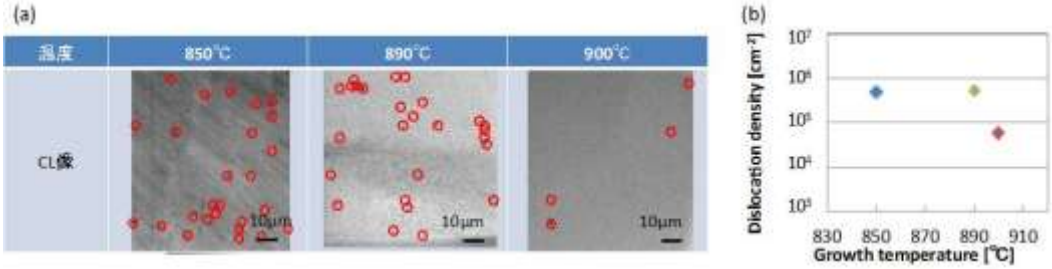


図１－１３　(a) Ca 添加系で育成したバルク単結晶 m 面の CL 像
(b) 各育成温度における転位密度

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。

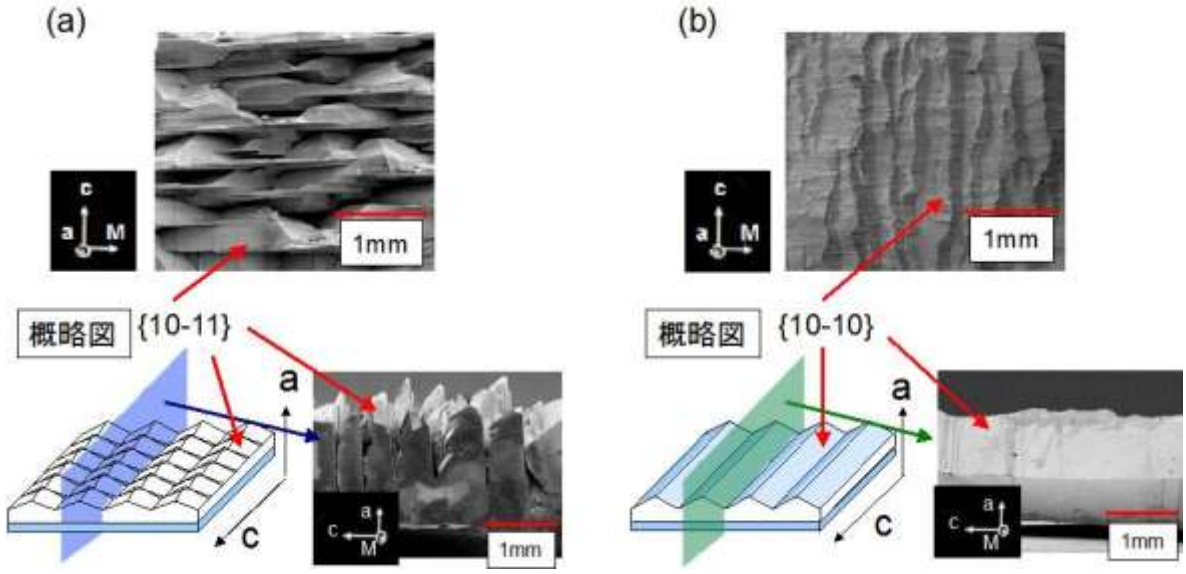
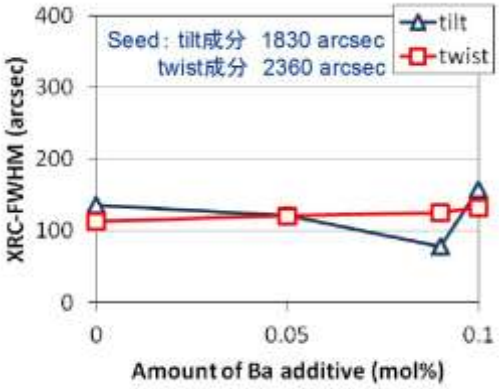


図１－１４　(a) Ba 無添加系：a 面 GaN 結晶の俯瞰 SEM 像、断面 SEM 像および結晶の概略図
(b)Ba 添加系(0.05mol%)：a 面 GaN 結晶の俯瞰 SEM 像、断面 SEM 像および結晶の概略図

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φ1 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)）。

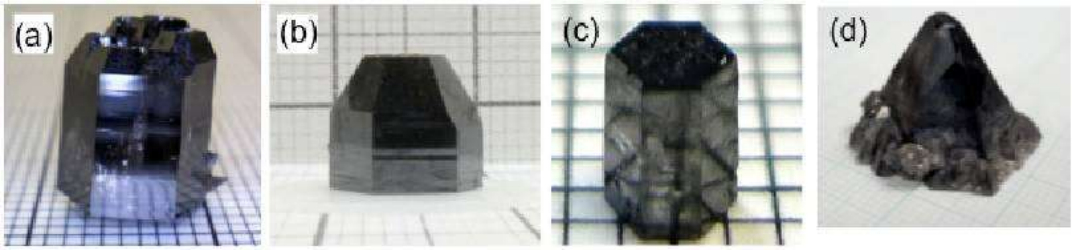


図１－１６　Na フラックス法において微小 GaN 単結晶上に成長させた六角柱状 GaN 単結晶
(a)Sr 添加系、(b)Ba 添加系、(c)Ca 添加系、及び(d)長時間成長で得られた GaN 単結晶写真

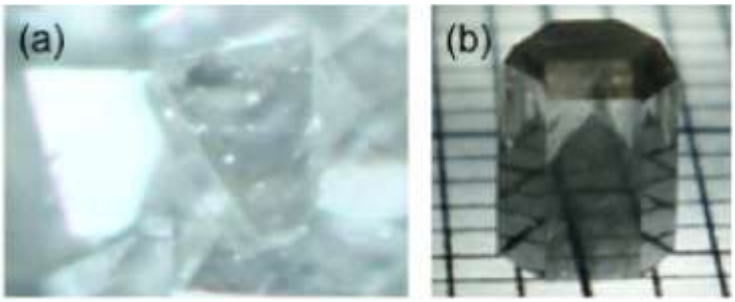


図１－１７　(a)Li 添加系、 (b) Ca-Li 共添加系で得られた GaN 結晶の写真

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。

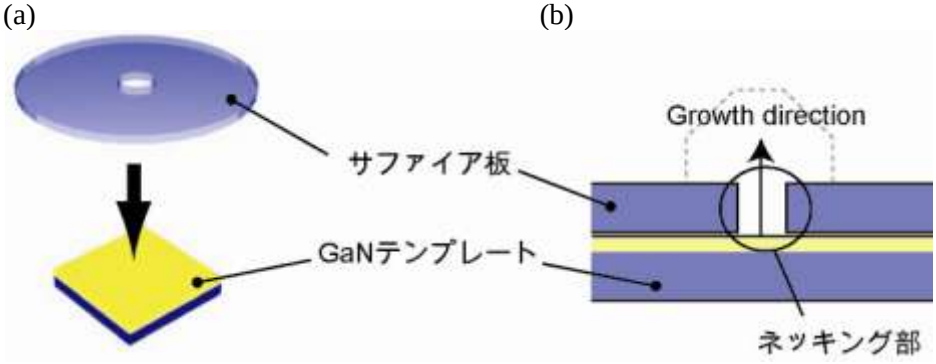


図１－１８　(a)ポイントシードの設置方法、及び(b)断面概略図

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 線ロッキングカーブ半値幅は 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。

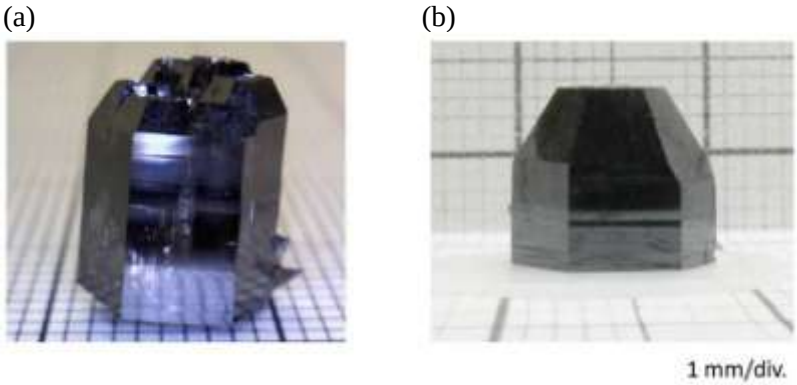


図１－１９　(a)Sr 添加、及び(b)Ba 添加条件で得られた六角柱状 GaN 単結晶写真

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}に平行なストリエ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。

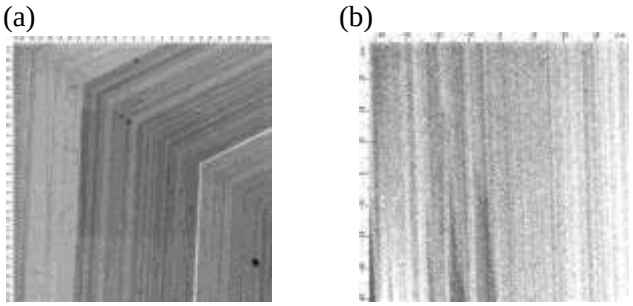


図１－２０　(a)：c 面の CL 像（□120μm）、
(b)：m 面スライス基板の CL 像（□80μm）

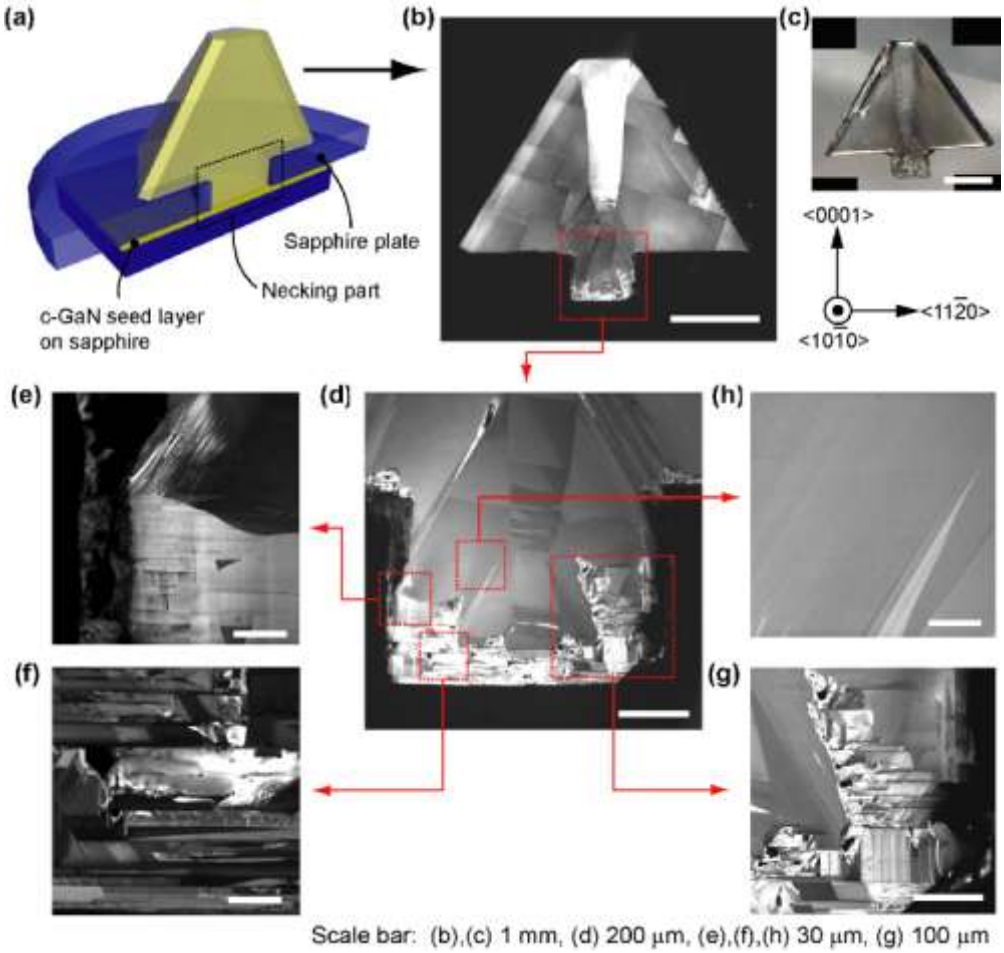


図１－２１　ポイントシード上に成長した GaN 単結晶の断面 CL マッピング像
(a)：評価サンプルの概略図、(b)：全体 CL 像、(c)：全体写真、
(d)：ネッキング部の CL 像、(e)、(g)：孔側壁付近の CL 像、
(f)：GaN 種層と成長結晶界面付近の CL 像、(h) 孔中央部の CL 像

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キングと同様であり、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。

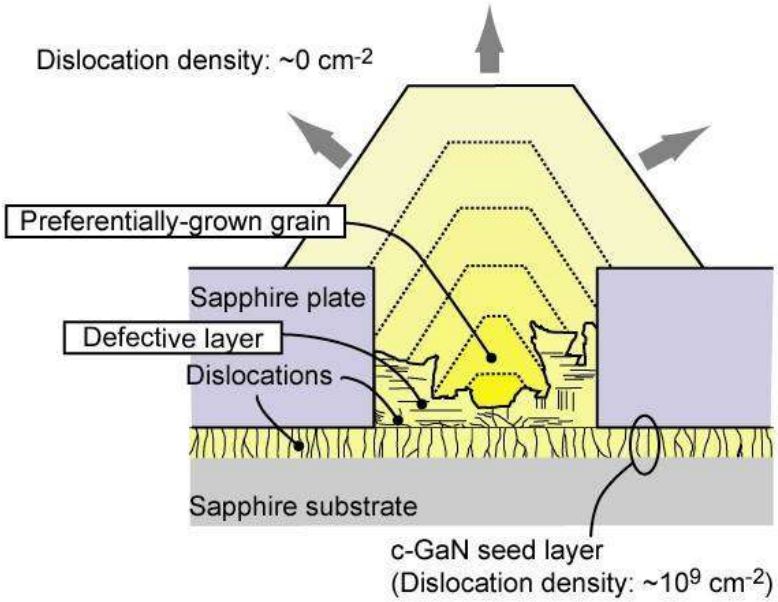


図１－２２　ポイントシード上成長モデルの概略図

(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℃～900℃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$10^{8\sim9}cm^{-2}$）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、ダイヤラップ処理・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線ロッキングカーブの半値幅(XRC-FWHM)を示す。ダイヤラップ処理基板に比べ、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。ダイヤラップ処理では、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。

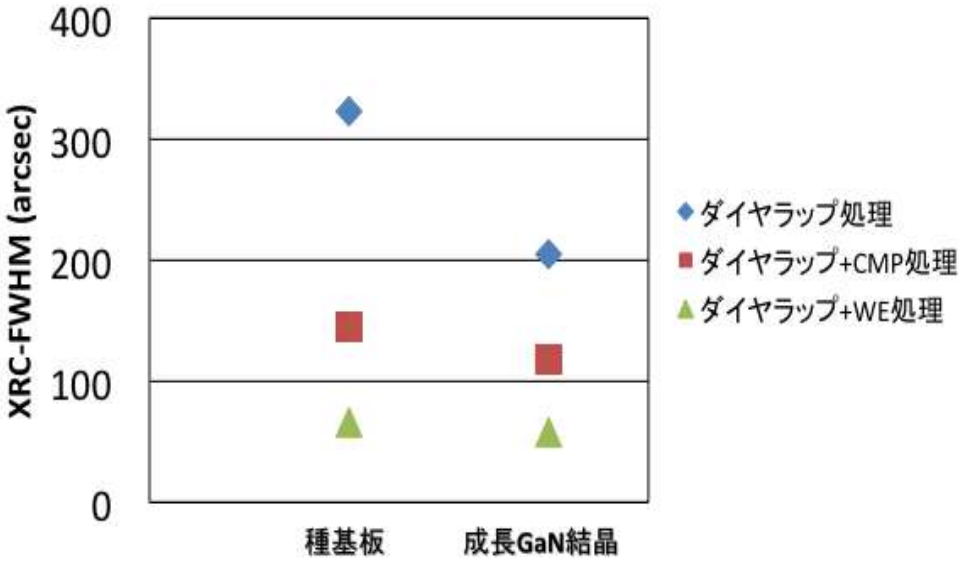


図１－２３　表面処理を施した GaN 種基板および GaN 種基板上に成長した GaN 結晶(0002)の X 線ロッキングカーブの半値幅

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~10^7 cm^{-2} の種結晶上成長において、表面にダイヤラップ処理後成長した結晶の転位密度は~10^6 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~10^5 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~10^4 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~10^4 cm^{-2} オーダー、繰り返し成長 2 回目は~$10^3$$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。

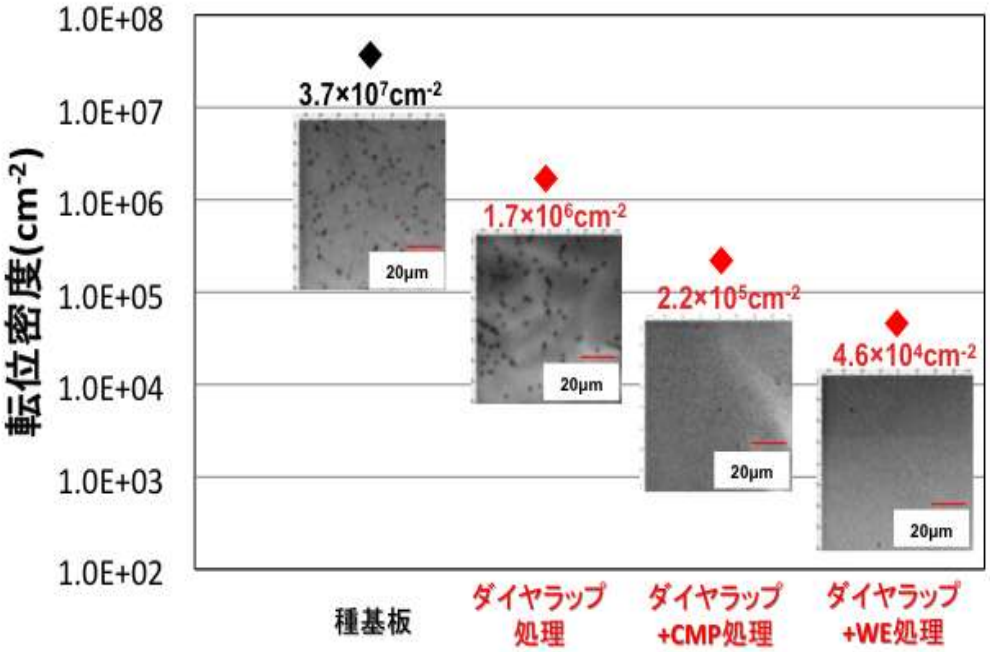


図１－２４　種結晶および成長した GaN 結晶(0001)の表面 CL 像と転位密度

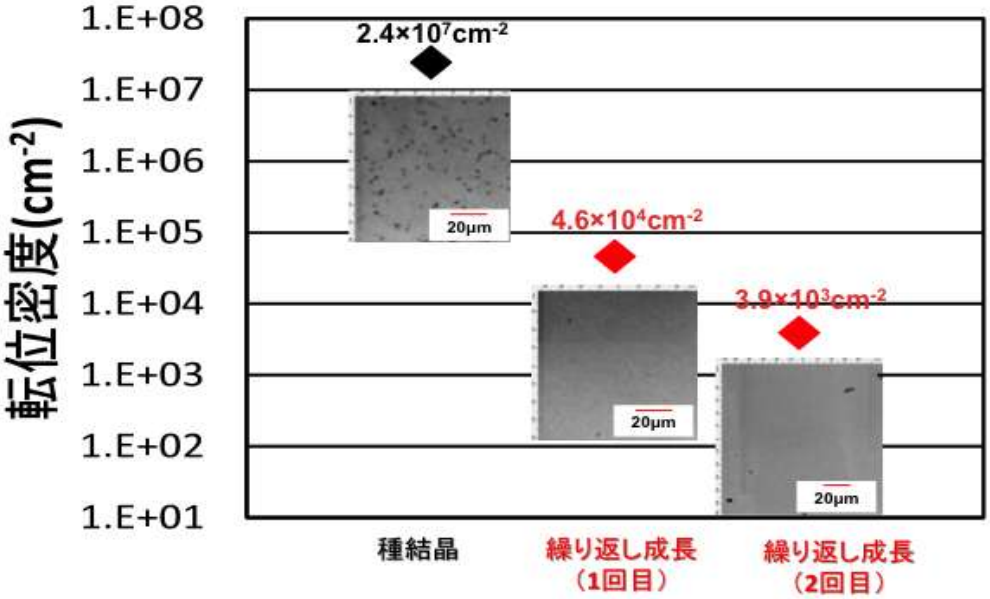


図１－２５　種結晶および成長した GaN 結晶(0001)の表面 CL 像と転位密度

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撹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℃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℃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、φ2 インチ、φ3 インチ、及びφ4 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、φ2 インチ、及びφ4 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。

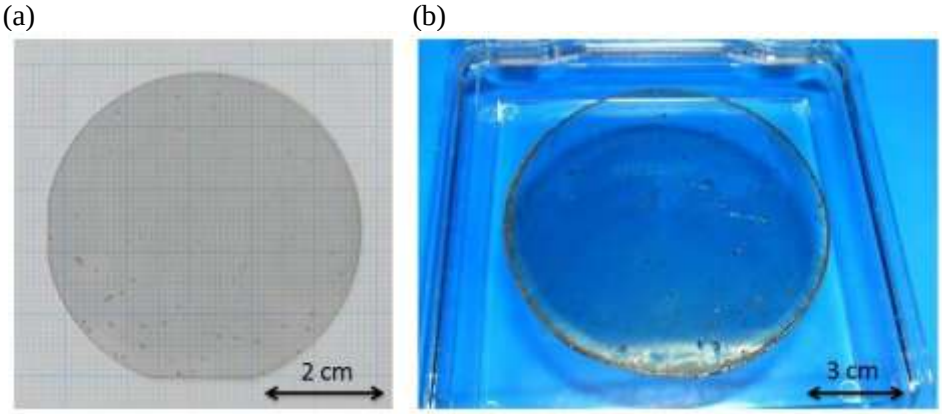


図１－２６　高温成長により得られたクラックフリー
(a)：φ2 インチ、(b)：φ4 インチウェハ写真

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

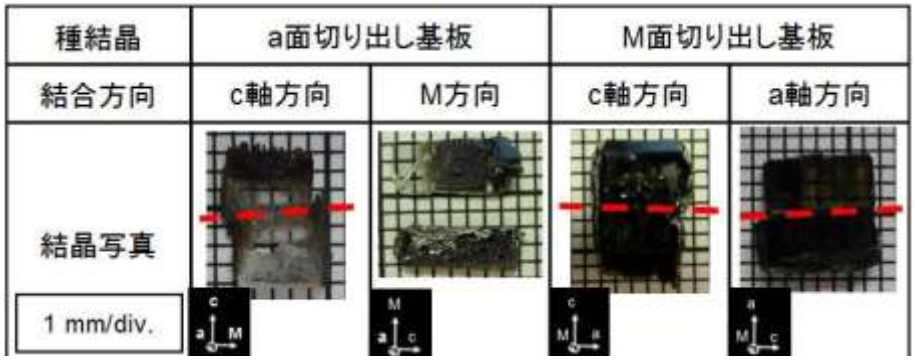


図１－２７に、m 面切り出し基板を c 軸方向に結合成長させ、一体化した結晶を c 軸に平行に切断した加工模式図（a）と、その断面の SEM 像(b)および CL 像(c)を示した。SEM 像(b)より、二つの結晶の結合面に溝や空洞が発生することなく一体化している様子が分かる。切断後に CMP 処理した断面の CL 像（c）から、結合界面は二つの種結晶の直上に伸びていくのではなく、膜厚が厚くなるにつれて徐々に+c 方向に向かって前進（横成長）している様子が分かる。-c 方向の成長速度よりも+c 方向への成長速度が大きく、結果として斜めの結合面が得られる。

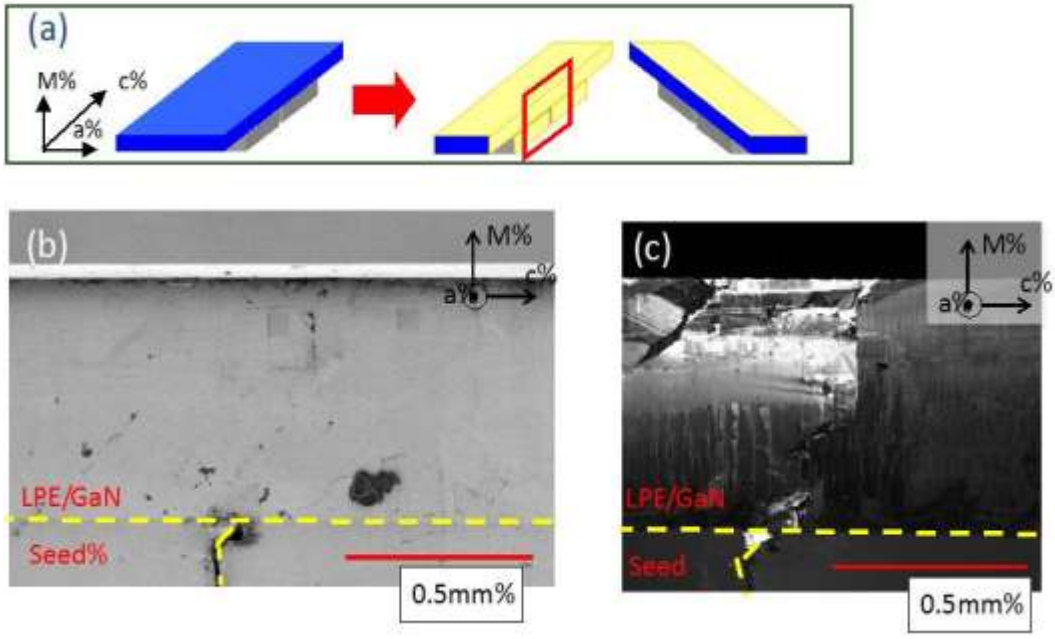


図１－２７　m 面切り出し基板を c 軸方向に結合成長させた結晶の断面評価
(a)：一体化した結晶の加工模式図 (b)：切断面の SEM 像 (c)：切断面の CL 像

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リ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 2.8×10^{5} 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 100μm 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 $1\times10^{4}cm^{-2}$ 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、$1\times10^{4}cm^{-2}$ 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。

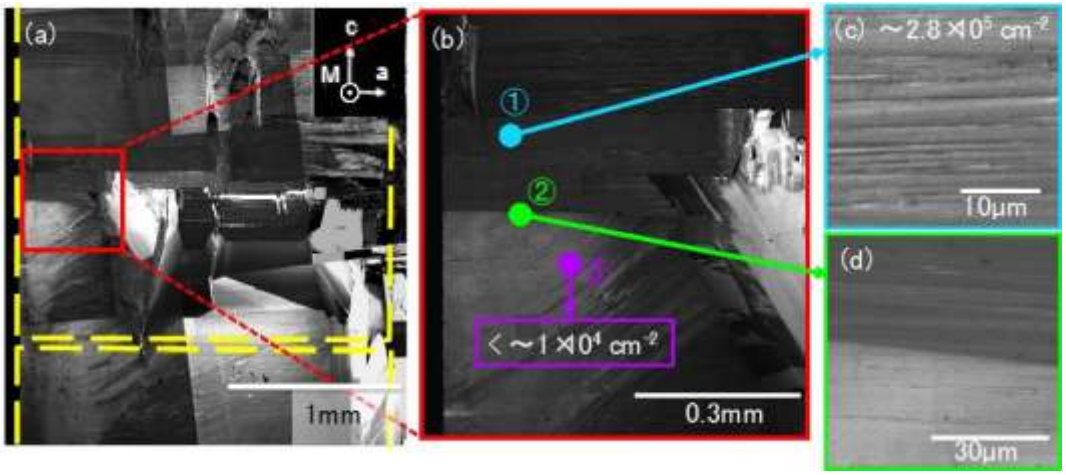


図１－２８ (a) 二つの結晶の結合部分を含む CL 像　(b)、(c) 高倍率の CL 像

・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に成長した。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に(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。

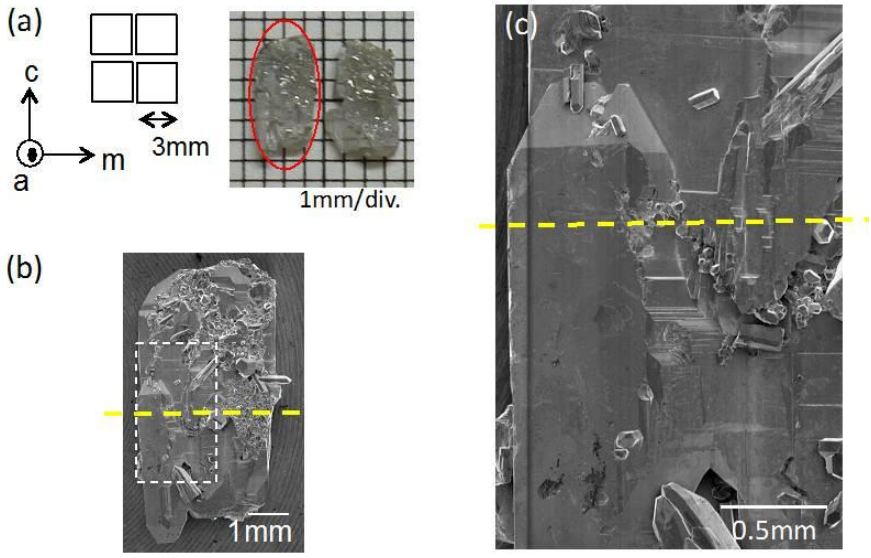


図１－２９　(a)：a 面切り出し基板の配置図および結合成長後の結晶写真
(b)：c 軸方向に一体化した結晶の SEM 像、(c)：(b)における点線部分の拡大 SEM 像

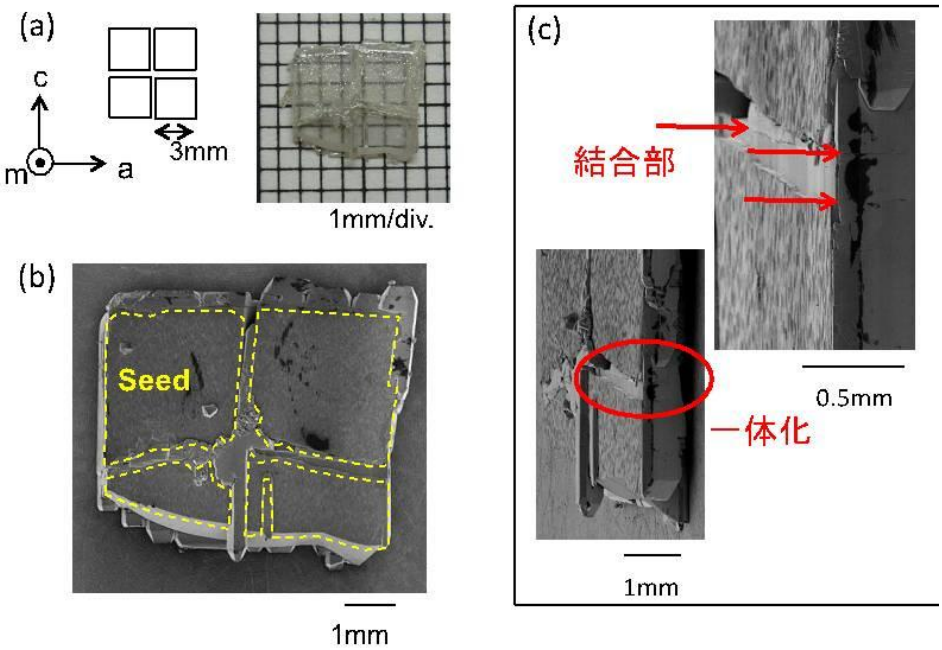


図１－３０　Ca-Li 添加系における無極性面 GaN 結晶の結合成長の様子
(a)：m 面切り出し基板の配置図および結合成長後の結晶写真
(b)：c 軸および a 軸方向に一体化した結晶の SEM 像、
(c)：結合部を 75 度斜めから観察した拡大鳥瞰 SEM 像

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-FIELO 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)- FIELO 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℃）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。

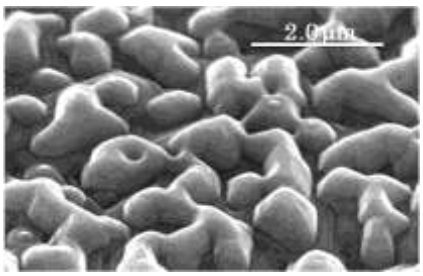


図１－３１　r-FIELO 法による
低温 GaN 層表面の SEM 写真

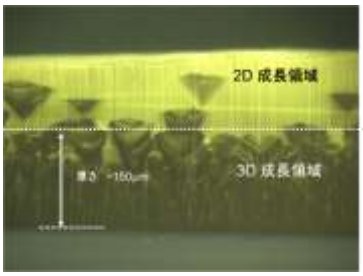


図１－３２　r-FIELO 法による
高温 GaN 層の断面蛍光顕微鏡写真

この低温バッファ層の上に、高温（約 1040℃）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 $3x10^6$ cm^{-2} まで小さくなった。

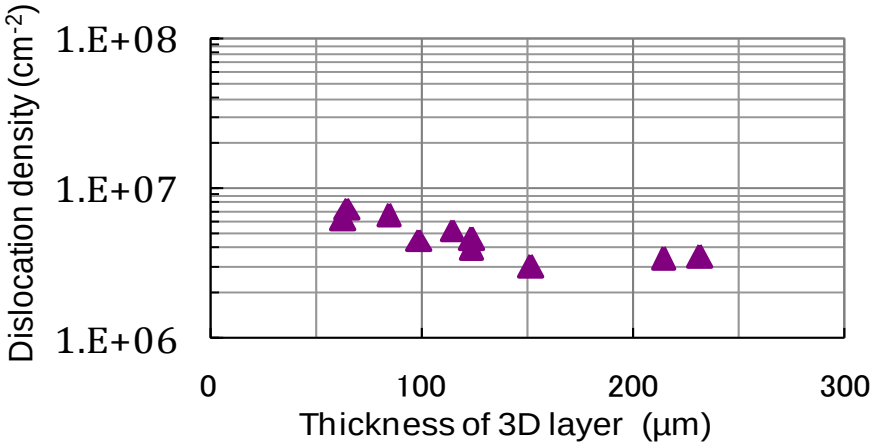


図１－３３　　3D 膜厚と転位密度との関係

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 150μm 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。

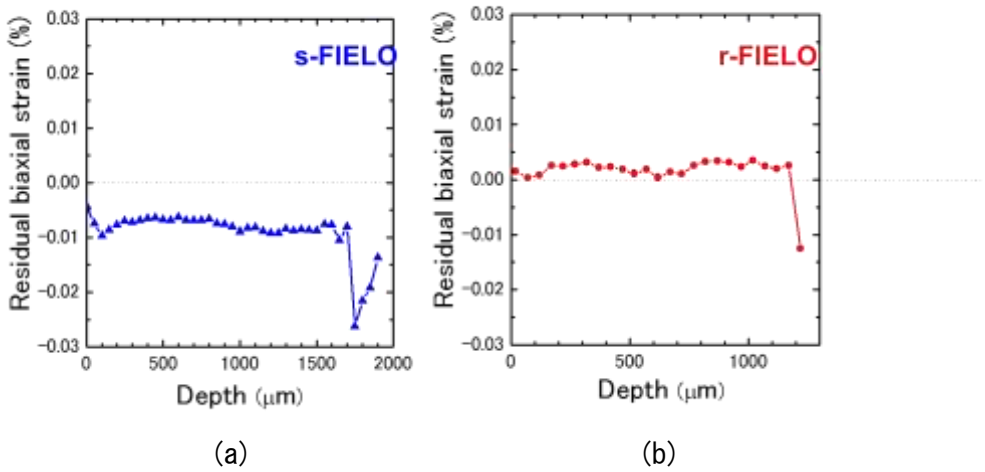


図１－３４　顕微反射スペクトル法により測定した
(a)：s-FIELO 法, (b)：r-FIELO 法による GaN 結晶の残留歪分布

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-FIELO 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 $2x10^6cm^{-2}$ と低く、結晶の曲率半径も５m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 2inchφGaN 結と
有極性 4inchφGaN 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よる無極性種結晶の作製

前述の r-FIELO 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、⊥c 軸入射、//c 軸入射のどちらも 40arcsec 程度と狭い値が得られている。

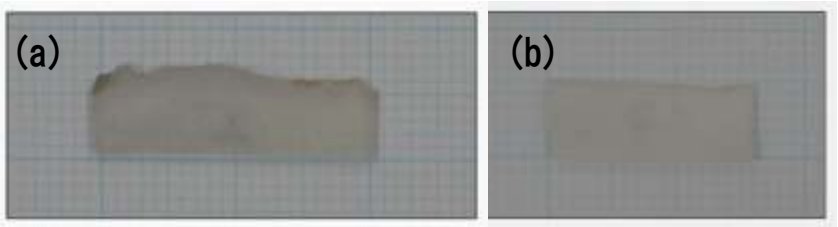


図　１－３６　c 面有極性結晶のクロスカットにより作製した無極性 GaN 結晶
(a)：m 面 GaN 結晶、(b)：a 面 GaN 結晶

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-$LiAlO_2$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（Al_4C_3）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; $Al(CH_3)_3$) を原料として MOCVD 成長により約 70nm 厚の Al_4C_3 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℃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℃、成長速度約 100μm/h で厚さ 500μm 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。

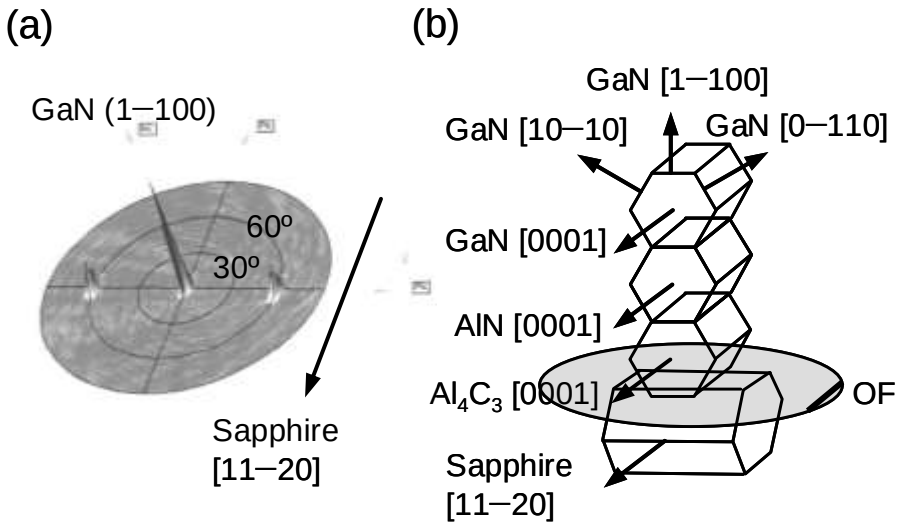


図１－３７ (a)：サファイア m 面上に HVPE 成長した m 面 GaN 結晶 X 線極点図
(b)：m 面サファイヤ基板上の成膜層の結晶軸配向関係の模式図.

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　73mmφの m 面 GaN 結晶で、(b)は研磨した得られた 45mmφの m 面 GaN 結晶である。

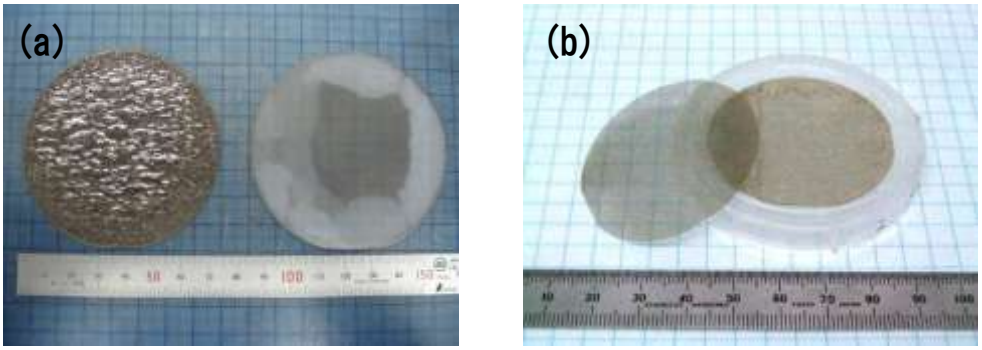


図１－３８　HVPE 法により作製した m 面 GaN 結晶の外観
(a)：73mmφ　m 面 as-grown GaN 結晶（右は剥離したサファイア基板）
(b)：45mmφ　m 面 GaN 結晶（研磨加工済）

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⊥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 $3\times10^{5}cm^{-1}$ 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 $2\times10^{18}cm^{-3}$ 未満に、また、シリコン濃度を $5\times10^{17}cm^{-3}$ 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⊥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 $8\times10^{7}cm^{-2}$ 程度と、欠陥密度も比較的少ない結晶を実現した。

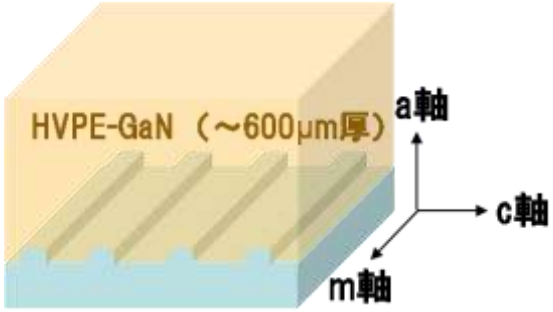


図１－３９ HVPE 法による a 面 GaN 結晶成長構造（溝付き r 面サファイア基板を使用）

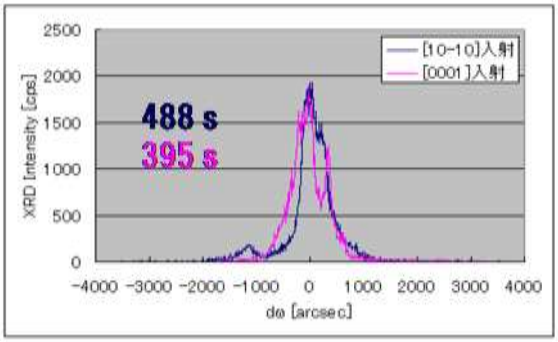


図１－４０　HVPE 法により作製した a 面 GaN 結晶
(a)：外観写真、(b)：X 線ロッキングカーブ（数字は半値幅）

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。

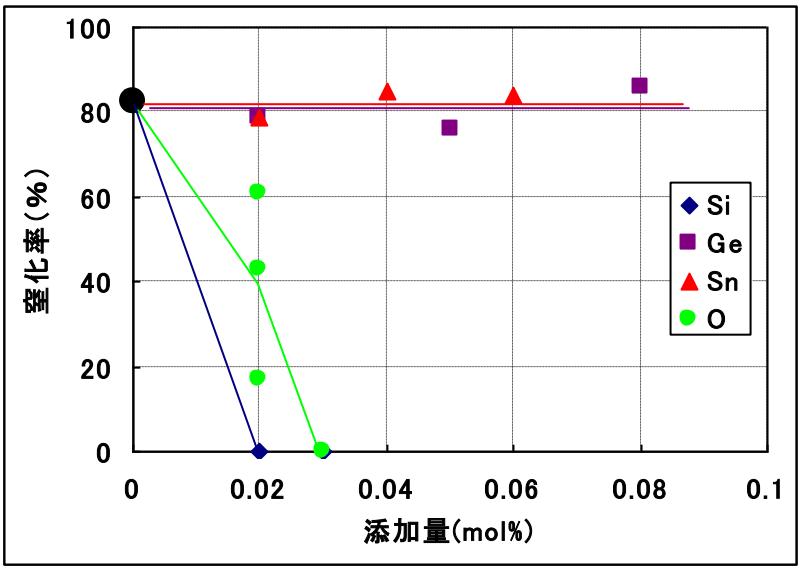


図１－４１　各種ドーパント添加量と窒化率

図１－４１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%では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がこれ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 $1.9\times10^{17}cm^{-3}$ であった。そのため、目標とする抵抗率 0.01 Ω・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１－４２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 $1\times10^{18}cm^{-3}$ 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。

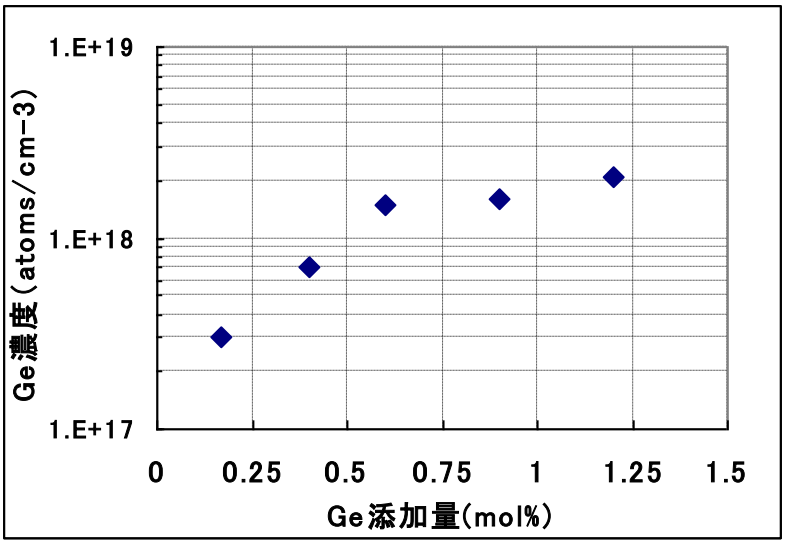


図１－４２ Ge 添加量と結晶中の Ge 濃度の関係

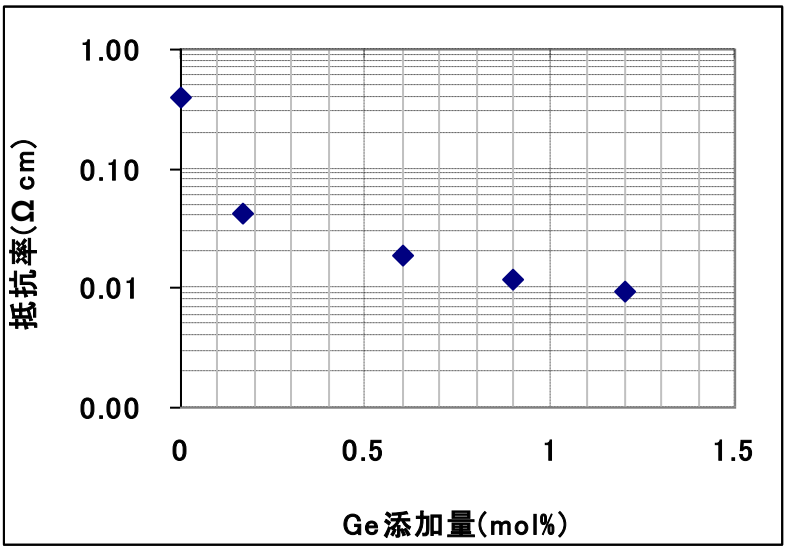


図１－４３　Ge 添加量と抵抗率の関係

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 0.01Ω・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 0.01Ω・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 GaN 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 GaN 結晶の SIMS 分析結果を示す。ゲルマニウムが $1x10^{18}cm^{-3}$ 以上取り込まれている結晶においても、酸素濃度は $5x10^{16}cm^{-3}$、シリコン濃度は $4x10^{15}cm^{-3}$、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 GaN 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。

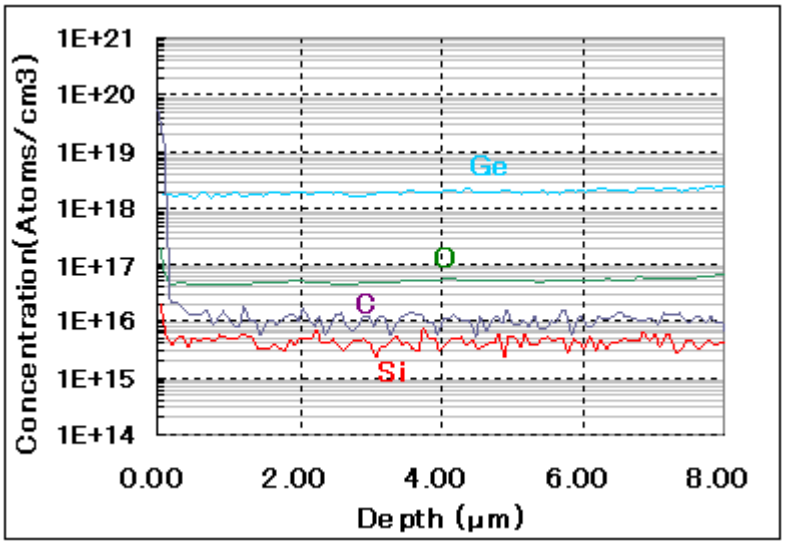


図１－４４　Ge 添加 GaN 結晶の SIMS 分析結果

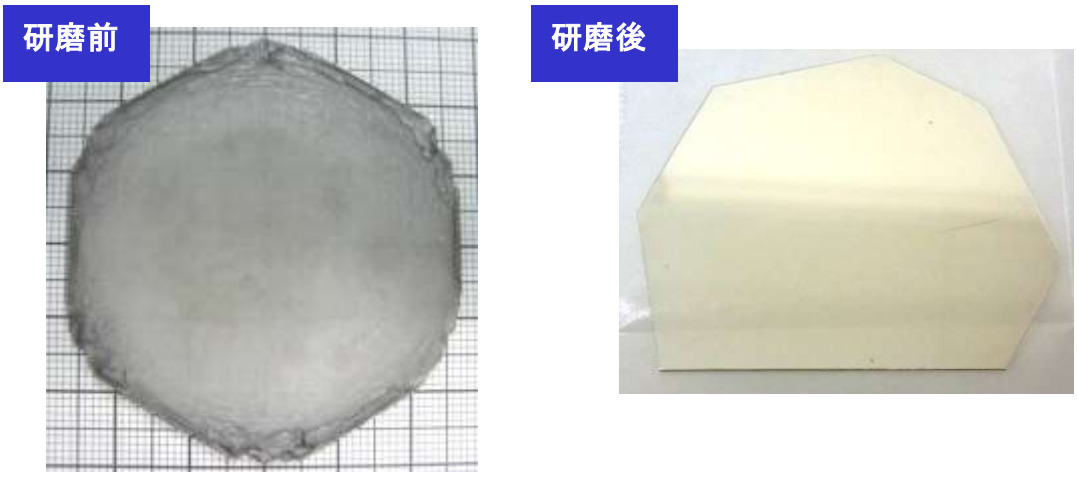


図１－４５　ゲルマニウム添加の低抵抗 GaN 結晶（2 インチΦ）

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を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を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。

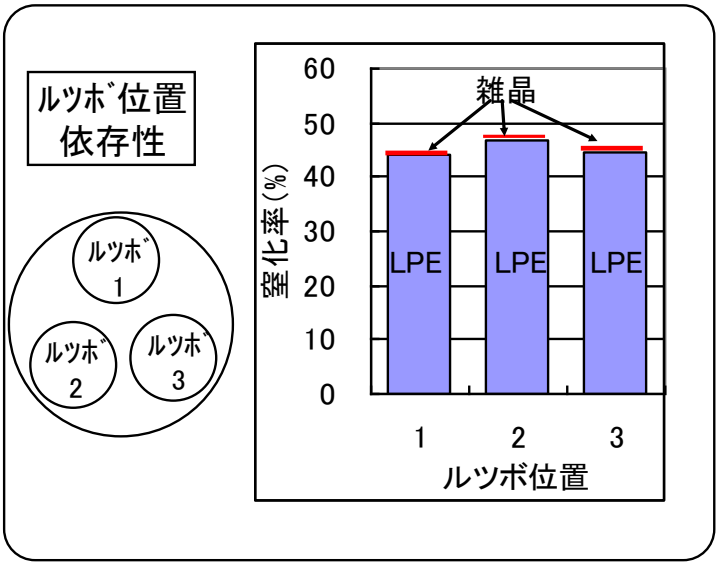


図１－４６　大型育成装置-位置依存性

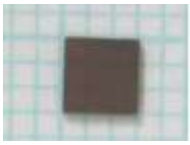
２－１－４　高抵抗化窒化物単結晶基板の開発

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、10^8Ω・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} 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 10^6Ω･cm 以上を２桁上回る、10^8Ω･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 10^8Ω･cm 以上であると推定された。

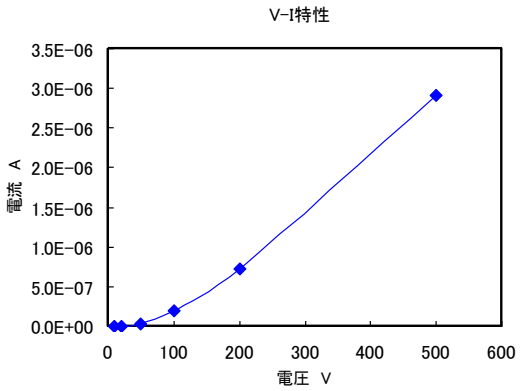


Zn 濃度

表：1×10^{19}atoms/cm^3

裏：2×10^{19}atoms/cm^3

サンプルサイズ：3×3×0.



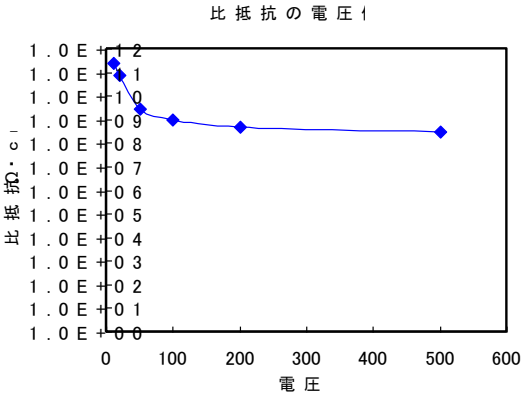
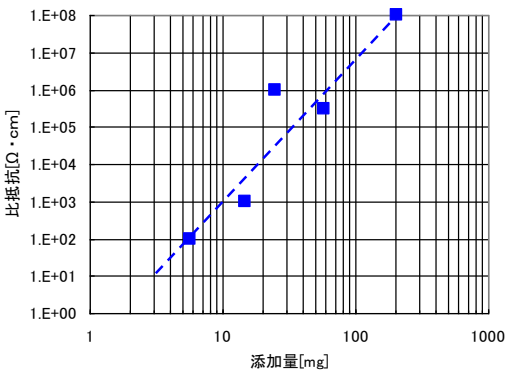


図１－４７　Zn 高濃度添加 GaN 結晶の電圧-電流特性および比抵抗の電圧依存性

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} atoms/cm^3 後半の Zn 濃度で、最終目標である 10^6Ω･cm の比抵抗が得られることがわかった。



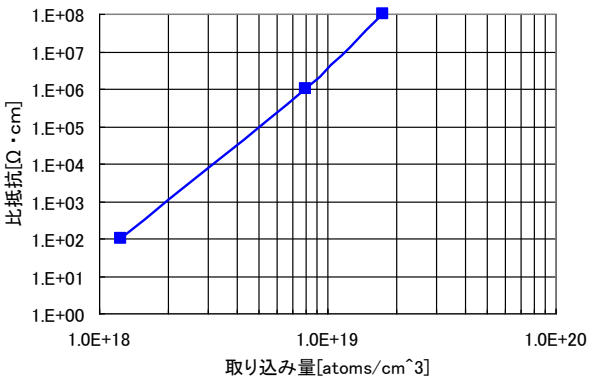


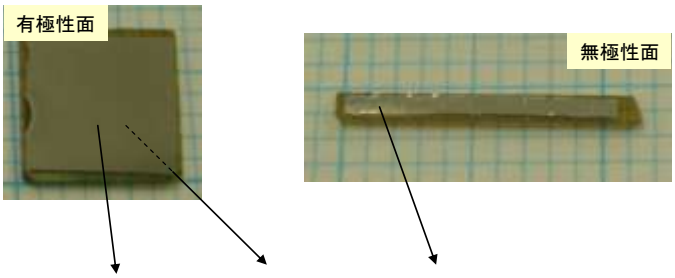
図１－４８　Zn 添加量および結晶中の取り込み量と比抵抗の関係

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（＞10^5Ω・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 4×10^{18}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。



	Zn添加(YAGｾﾗﾐｯｸｽ坩堝使用)			
元素	成長後期	成長初期	成長中期	検出下限
C	検出下限以下	検出下限以下	検出下限以下	2.E+16
O	4.E+16	4.E+16	4.E+16	2.E+16
Mg	5.E+16	3.E+16	4.E+16	9.E+15
Si	5.E+15	検出下限以下	検出下限以下	5.E+14
Zn	4.E+18	4.E+18	5.E+18	2.E+15

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

10^4～10^6Ω・ｃｍが期待される Zn 濃度で、大型炉にて、φ44mm 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１－５１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 線ロッキングカーブを測定した（図１－５１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１－５２）。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。

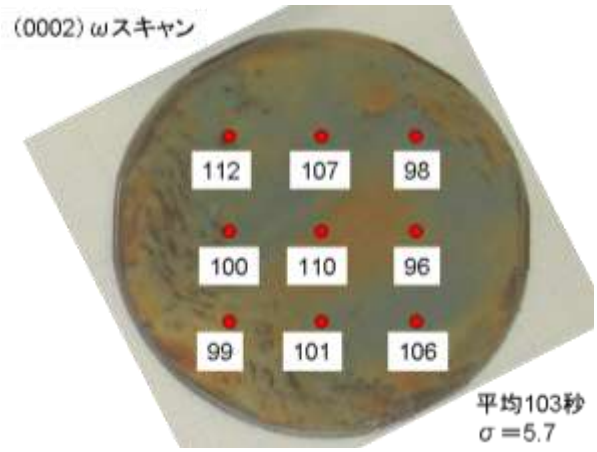
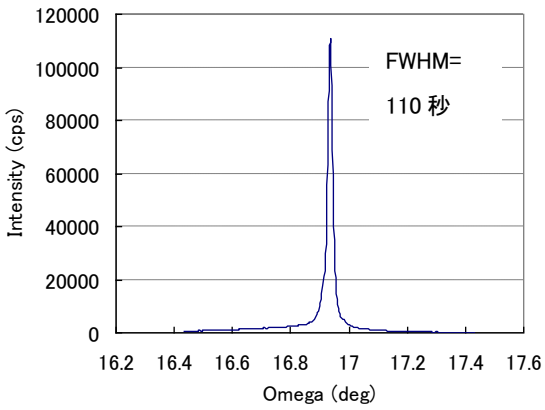


図１－５１　育成したφ44 亜鉛添加 GaN 結晶（研磨後）と XRC 半値幅の分布



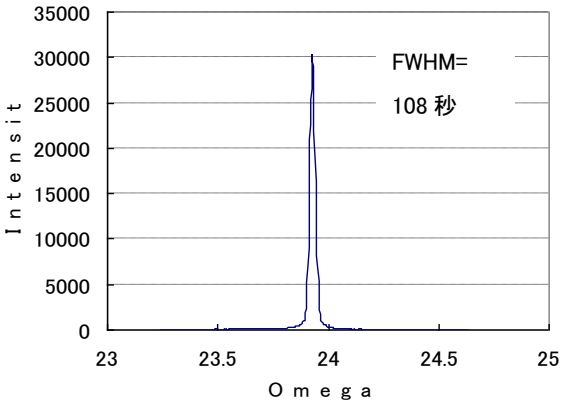


図１－５２　（0002）反射、（10-12）反射の X 線ロッキングカーブ測定結果

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は窒化阻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）。

Zn:1.5mol%　0.73mm 成長　　Zn:2.0mol%　0.59mm 成長　　Zn:3.0mol%　0.40mm 成長

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10^5Ω・cm台と推定した。

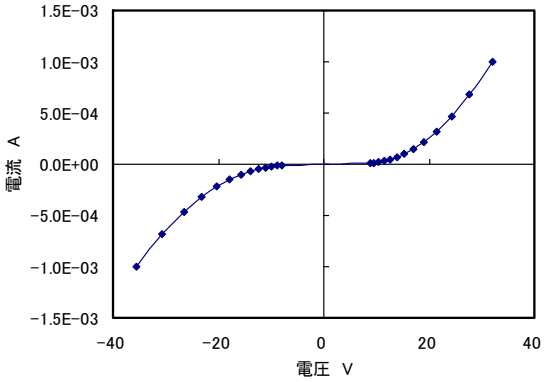


図１－５４　φ4インチGaNから切出したサンプルのI-V特性

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。

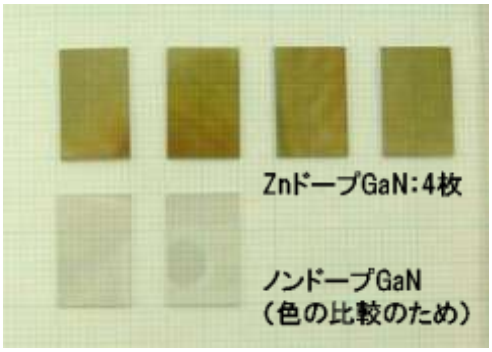


図１－６１　エピグループに提供供したZnドープGaNサンプルの一例

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 (μ m/h)	備考
c面基板	Flux法	大阪大学	4inchΦ	$10^{2\sim5}$	―	30	
	アモノサーマル法	Ammono zoo	2inchΦ	$5x10^3$	17	(1)	米国 曲率半径＞1000m
		三菱化学/UCSB	2inchΦ	―	―	25	‘10/12/08新聞発表）
		UCSB	(5mmΦ) x 2.3mm	―	(200)	2～3.5	米国
		AFRL	10x10mm	―	65	―	米国
		東北大学	46mmΦ	―	104	―	金属、酸素等の不純物含有量に課題
	高圧法	Unipress	10x15mm	$\sim10^6$	54	―	ポーランド HVPE種基板上
	HVPE法	古河機械金属	4inchΦ	$\sim10^6$	40	―	
		住友電気工業	4inchΦ (6inchΦ)	―	―	―	6インチ: ‘10/11/16新聞発表
		日立電線	3inchΦ	$10^5\sim10^6$	100	100～1870	
		三菱化学	3inchΦ	$\sim10^6$	―	―	
		Kyma	2inchΦ x 10mm厚	3E5～1E6	70-214	100	米国
		Unipress	1.5inchΦ x 5mm厚	$\sim10^6$	―	200	ポーランド
		Nanowin	1.5～2nchΦ	$\sim10^7$	―	200	中国
m面基板	Flux法	大阪大学	6x6mm	―	―	―	HVPE-GaN上
	アモノサーマル法	Ammono zoo	1inchΦ、11x22mm	―	15	―	―
		UCSB	―	―	30 (a面方向off:～200)	―	HVPE-GaN上
	HVPE法	古河機械金属	＞45mmΦ	―	～800	―	m面サファイア上
		住友電気工業	2inchΦ	―	―	―	-
		三菱化学	12x20mm	$\sim10^6$	―	―	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　大口径基板上の高品質エピタキシャル結晶成長技術

2-2-1-1　窒化物基板上の高均一・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圧デバイスの実現、更に GaN 基板上の特性を最大限生かすための高移動度チャ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 基板上に、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、耐圧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。ウェハ全面に亙って残留ドナー濃度 1.5～2×10^{12} 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

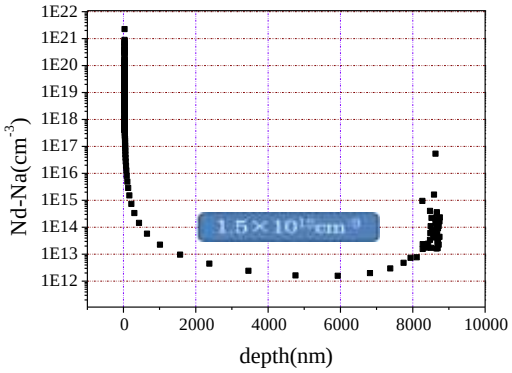


図２－２　左図(MJ0158)の残留ドナー濃度プロファイル（C-V 測定より）

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の違いよるものであり、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

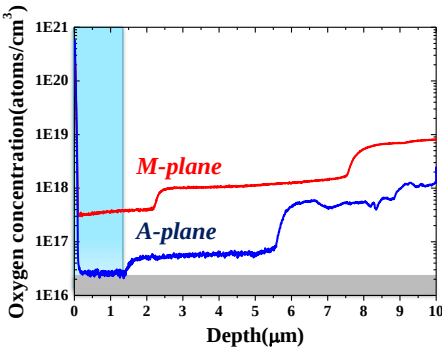


図２－４ m 面及び a 面 GaN 基板上のアンドープ AlGaN/GaN 層の酸素濃度プロファイル（SIMS 分析より）
※それぞれ段があるのは、成長条件を変化させているため。

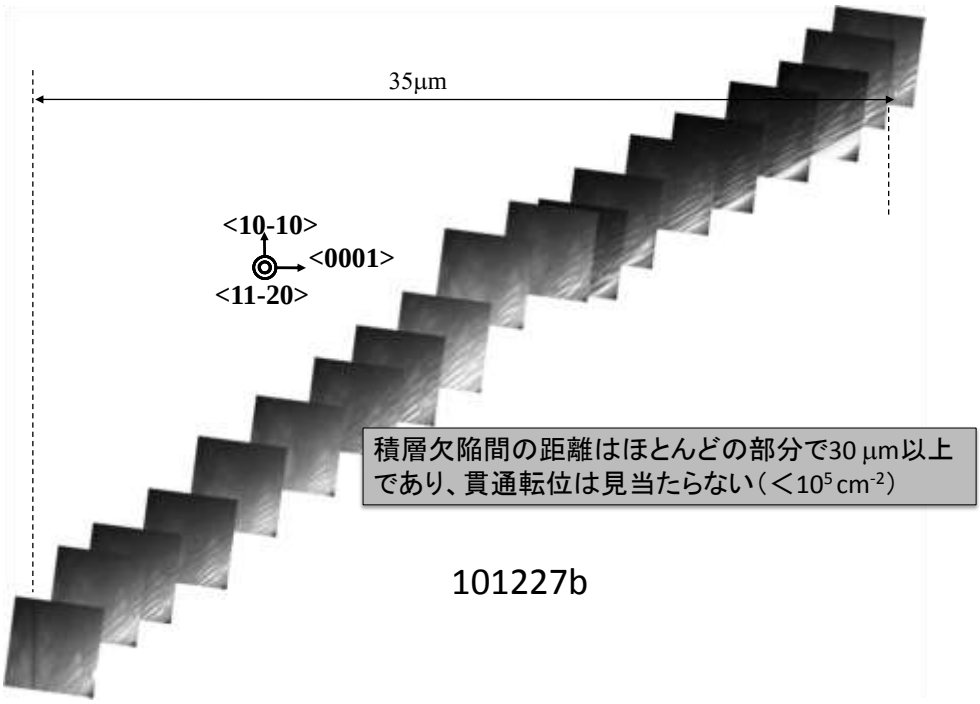


図２－５　Na フラックス a 面 GaN 基板上の HFET 構造の断面透過電子顕微鏡写真群

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。

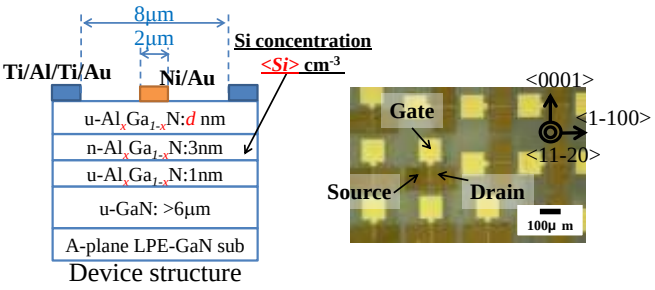
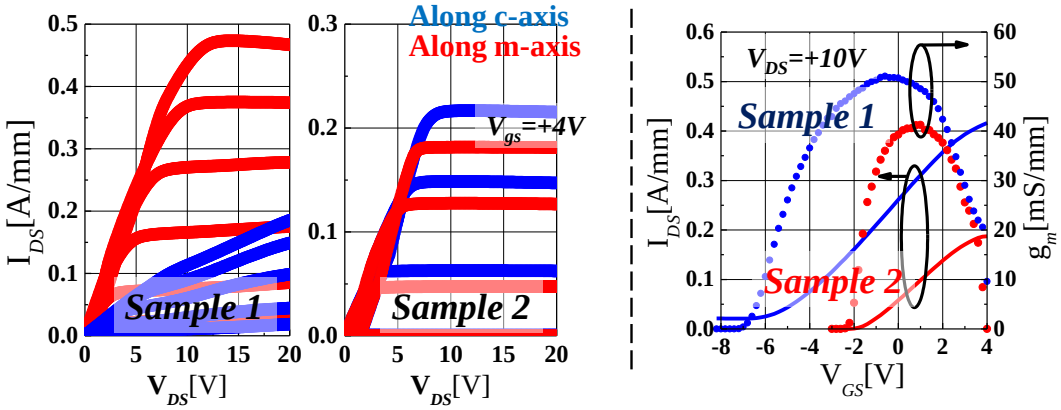


図２－６　Na フラックス a 面 GaN 基板上 HFET 構造（左）と電極パターン（右）



	AlN molar fraction	u-AlGaN thickness	Si concentration	I_{DMAX}[mA/mm] (V_{GS}:+4V)		V_{th} [V]	I_{Gleak}[A/mm] (V_{GS}:-20V)
	X	d [nm]	<Si> [cm^{-3}]	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

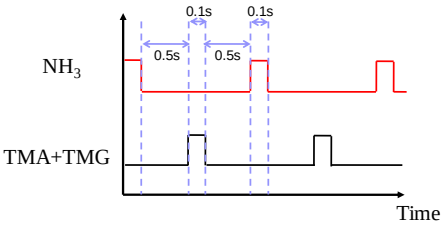
表２－１　HFET（無極性面上）の移動度および２次元電子ガス濃度の比較
（赤字：Na フラックス a 面上の結果、黒字：他機関の報告）

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



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

図２－８　ALE 法による AlGaN 成長のガス切り替えシーケンス

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℃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。

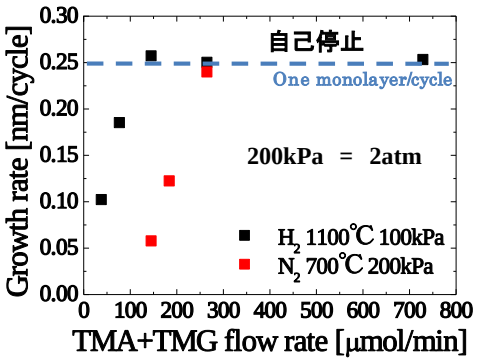


図２－９　ガス１パルス当たりの $Al_{0.16}Ga_{0.84}N$ の成長速度の原料ガス供給モル量依存性

図２－１０には、窒素２気圧中、700℃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。

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）

AFM像　5 μm×5 μm

2-2-1-3　Na フラックス法 GaN 基板上 AlGaN/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２－１１に、基板温度 1,080℃における C 濃度の制御性、及び C_2H_2 流量 0 及び 90μmol/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。

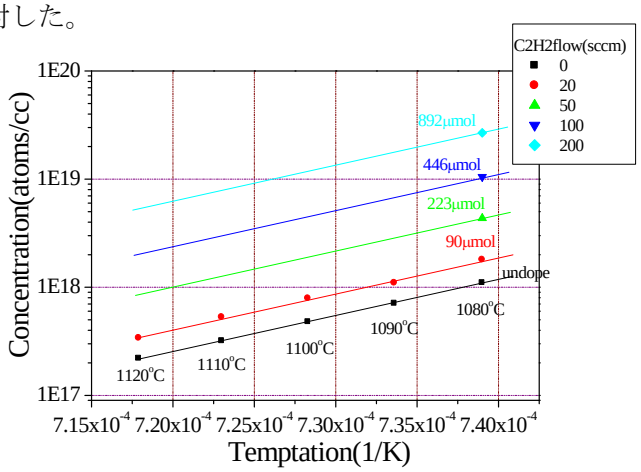


図２－１１　基板温度 1080℃における C 濃度の C_2H_2 流量依存性、及び C_2H_2 流量ゼロ及び 90μmol/min. 供給時の C 濃度の基板温度依存性

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２－１２、及び図２－１３に示す。図からわかるとおり、従来の Si 基板上の 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 基板上の絶縁破壊電界の 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 $10^{19}cm^{-3}$ 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。

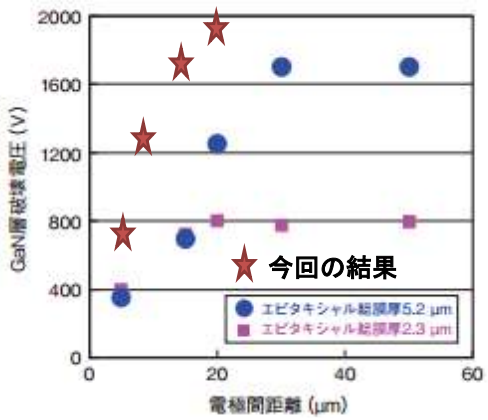


図２－１２　今回試作した C ドープ GaN を有する HFET の横耐圧の電極間距離依存性、（従来の Si 基板上 HFET との比較）

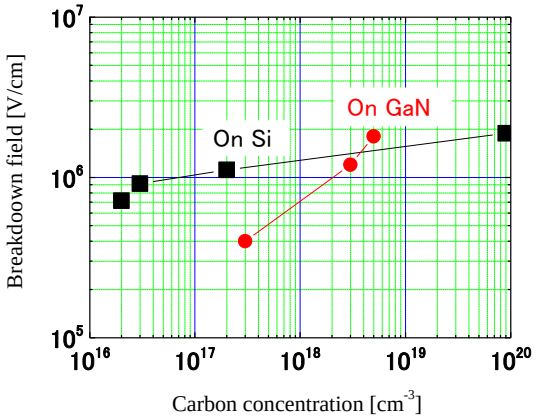


図２－１３　今回試作した C ドープ GaN を有する HFET の縦耐圧の C 濃度依存性、（従来の Si 基板上 HFET との比較）

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。

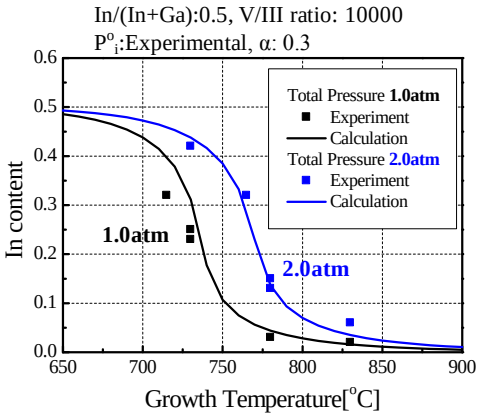


図２－１４　1 気圧及び 2 気圧の MOVPE による InGaN 成長の固相 In 組成の成長温度依存性（熱力学計算と実験結果）

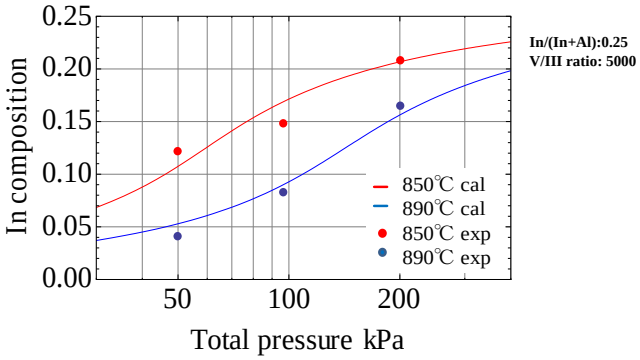
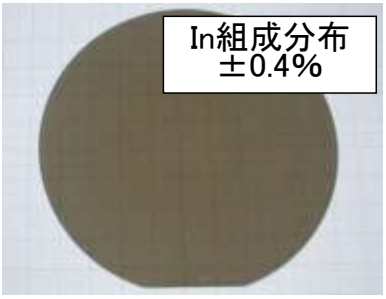


図２－１５　1 気圧、1.5 気圧及び 2 気圧の MOVPE による AlInN 成長の固相 In 組成成長温度２水準（熱力学計算と実験結果）

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＜±5%、In 組成バラツキ＜±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 $In_{0.75}Ga_{0.25}N$ 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±5%以下の InGaN の作製に成功した。



4インチ　$In_{0.75}Ga_{0.25}N$

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

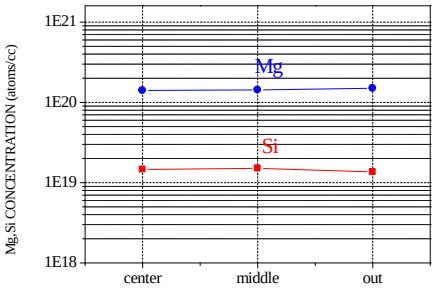


図２－１７　4 インチ基板上 $In_{0.75}Ga_{0.25}N$ エピタキシャル層への Si ドーピング及び Mg ドーピングの均一性

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、$In_{0.6}Ga_{0.4}N$ チャネル層または $In_{0.3}Ga_{0.7}N$ チャネル層を有する 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。

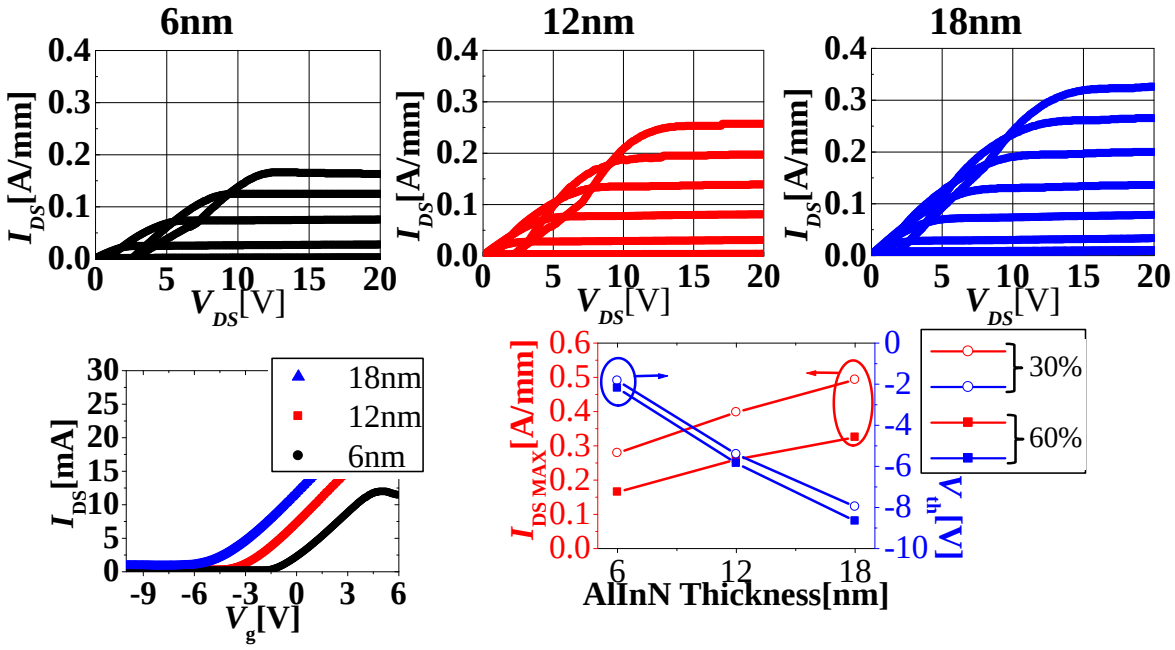


図２－１８　GaN 基板上の AlInN/InGaN/GaN 構造の HFET の静特性
(AlInN バリア層の膜厚：6、12、18 nm)

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 9.6×10^{12} cm^{-2} と極めて高いにもかかわらず、2160 cm^2／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 $2.0\times10^{12}cm^{-2}$ 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 cm^2／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

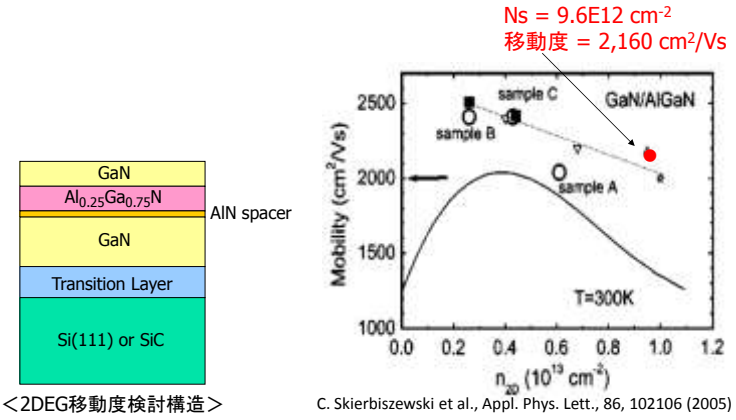


図２－１９　Si 基板上または SiC 基板上の AlGaN/GaN HFET 構造の２次元電子ガス移動度の２次元電子ガス濃度依存性

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＜$10^6 cm^{-2}$ の高品質 GaN 基板を用いることで、高 In 組成 InGaN の転位密度 $10^6 cm^{-2}$ 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℃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。

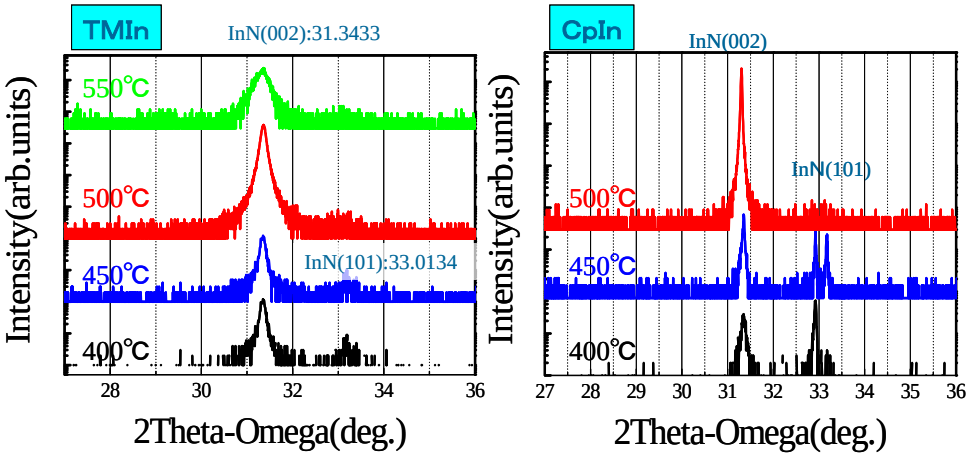


図２－２１　加圧，低温 InN 成長における TMIn と CpIn 比較（XRD 評価）

・温度：400～500℃，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。

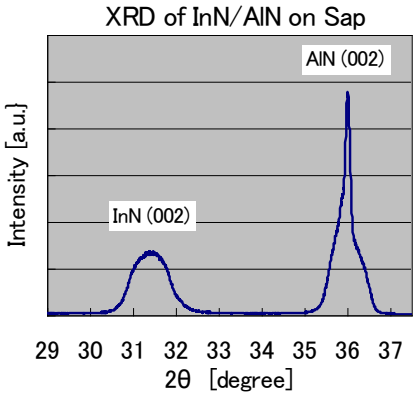


図２－２２　MBE 法で成長した InN エピの XRD

２ － ３　高 Al 組成窒化物層成長技術

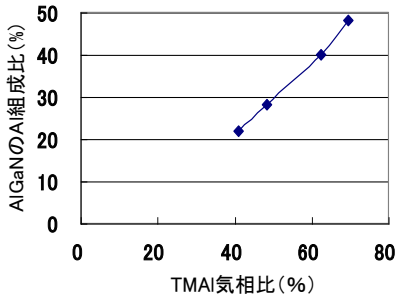
2-3-1　高 Al 組成 AlGaN エピタキシャル成長技術の開発

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

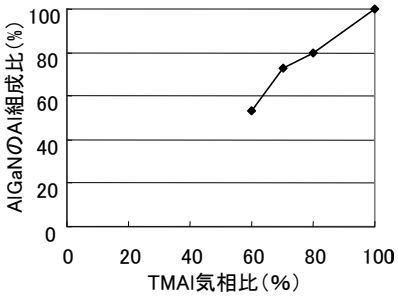
（ａ）高 Al 組成 AlGaN の Al 組成制御技術の開発

Al 組成 0.2≦Al≦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（TMAl）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℃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、TMAl 気相比に対する AlGaN の Al 組成比の関係である。約 1100℃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≦Al≦0.5



（ｂ）：0.5≦Al≦1.0

図２－２３　TMAl 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２θ－ω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≦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。

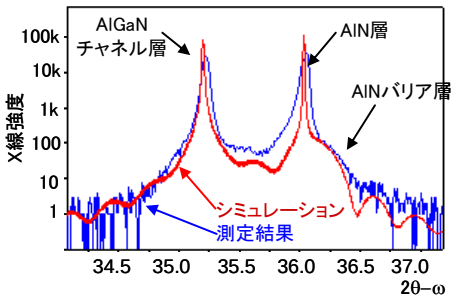


図２－２４　AlN/AlGaN HEMT エピの XRD（２θ－ω）
（Al 組成=51%）

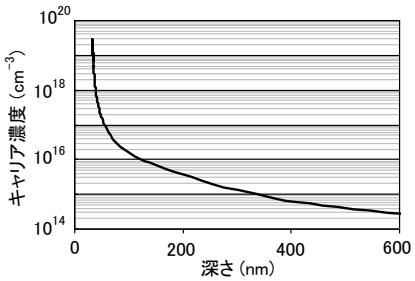


図２－２５　AlN/AlGaN HEMT エピの
キャリア濃度プロファイル

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こるため、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。

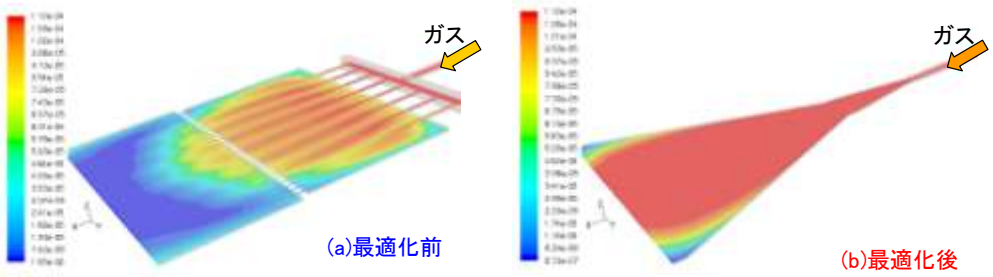


図２－２６　炉内のガス流れのシミュレーション解析による新炉インジェクターの設計

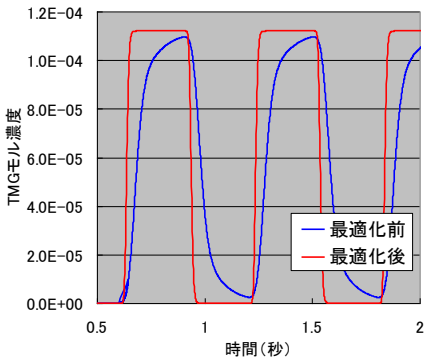


図２－２７　バルブスイッチング時のインジェクター出口での

原料ガスのモル濃度の時間変化（最適化前後の計算値）

３）　AlGaN 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≦Al≦0.5 の AlGaN エピタキシャル層の Al 組成均一性・膜厚均一性

２インチ基板上の Al 組成 0.2≦Al≦0.5 の AlGaN 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 AlGaN 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 AlGaN 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 AlGaN 層の膜厚分布を±4.9%、Al 組成分布を±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インチ基板上における、AlGaN 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。

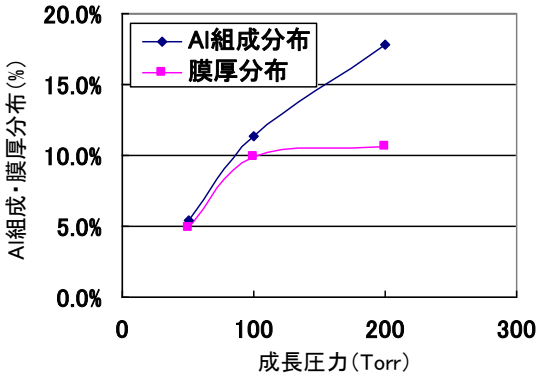


図２－２８　AlGaN の成長圧力と
Al 組成分布・膜厚分布の関係

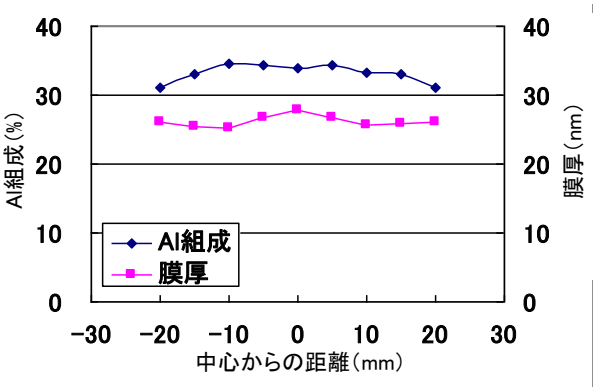
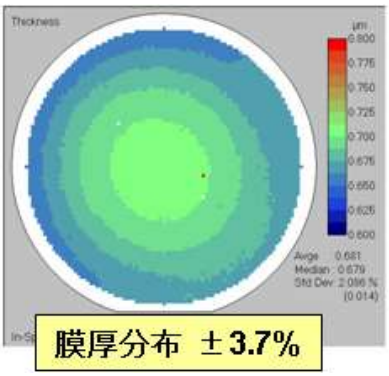


図２－２９　AlGaN の Al 組成・膜厚の面内分布
（成長圧力は 50torr）

（ｂ）Al 組成 0.5＜Al≦1.0 の AlGaN エピタキシャル層の Al 組成均一性・膜厚均一性

４インチ基板上の Al 組成 0.5＜Al≦1.0 の AlGaN 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インチ基板上における Al 組成分布は、成長条件の最適化等により±1.3%と良好であったが、その膜厚分布は±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±0.6%、膜厚均一性が±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。



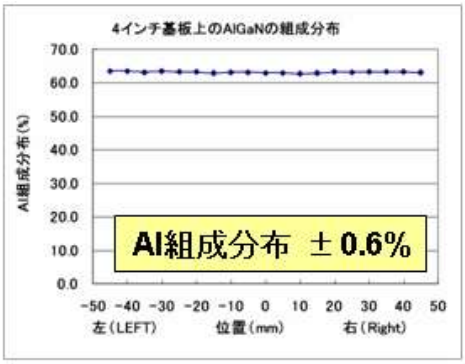


図２－３０　４インチ基板上のAlGaNの膜厚均一性・Al組成均一性（改善後）

４）　AlGaN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）AlGaNエピタキシャル層のドーピング制御

AlGaN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（$EtCp_2Mg$）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AlGaN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AlGaN中のSi濃度の関係である。TMSi流量とAlGaN中のSi濃度がほぼ比例しており、AlGaNのSi濃度を1×10^{18}から$9\times10^{19}cm^{-3}$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$2\times10^{18}cm^{-3}$から$2\times10^{19}cm^{-3}$までドーピング制御性を確認した。

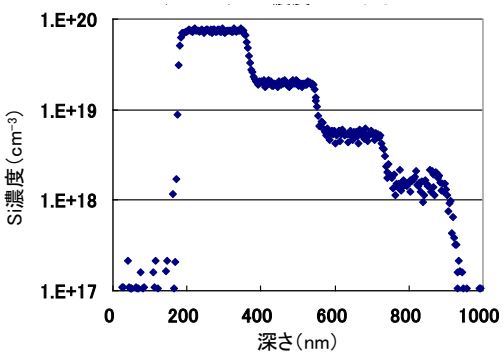


図２－３１　階段状にSiドープしたAlGaNのSIMS分析結果

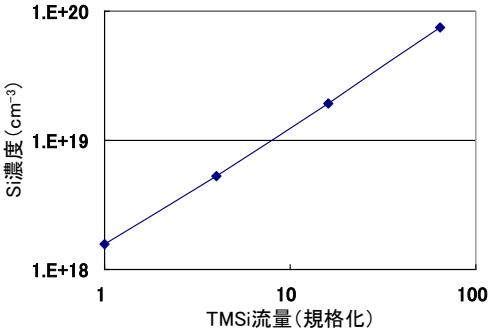


図２－３２　AlGaN 中のSi濃度のTMSi流量依存性

（ｂ）AlGaNエピタキシャル層のドーピング均一性

ドーピングのウエ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＜Al≦1.0のAlGaN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±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、AlGaN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。

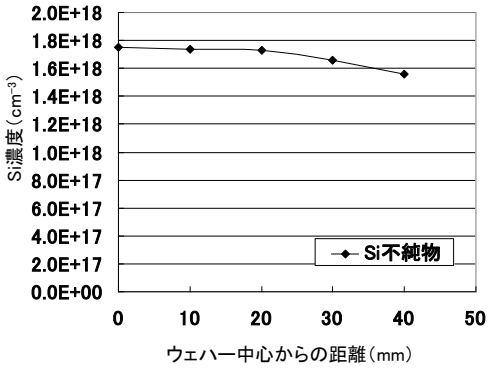


図２－３３　AlGaN中のSi濃度の分布（４インチ）

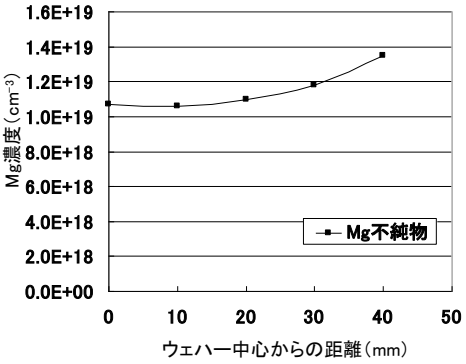


図２－３４　AlGaN中のMg濃度の分布（４インチ）

図２－３３は、４インチ基板における AlGaN の Si 濃度の分布であり、その濃度は約 $1.7\times10^{18}cm^{-3}$、分布は±7.4%である。図２－３４は、４インチ基板における AlGaN の Mg 濃度の分布であり、その濃度は約 $1.1\times10^{19}cm^{-3}$、分布は±12.6%である。このようにして、４インチ基板上のＡｌＧａＮ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）　高速バルブスイッチングの有用性確認

高速バルブ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、高速バルブ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、高速バルブ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±7.7%に対し、後者では±4.7%と改善しており、高速バルブスイッチングの有用性が確認できた。

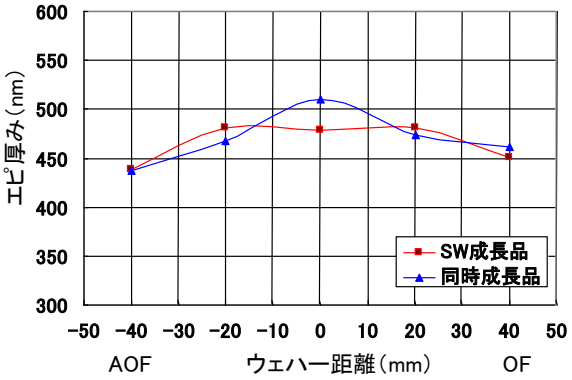


図２－３５　同時成長及び高速バルブスイッチングを用いた場合の膜厚分布（4 インチ基板上）

2-3-2　有極性面・無極性面 AlN 基板の有用性確認

１）　AlGaN（0.5＜Al≦1.0）低転位化の確認

今回、低転位 AlN 基板上に AlGaN（0.5＜Al≦1.0）のエピタキシャル層を成長し、その転位密度と AlGaN 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 AlGaN 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。

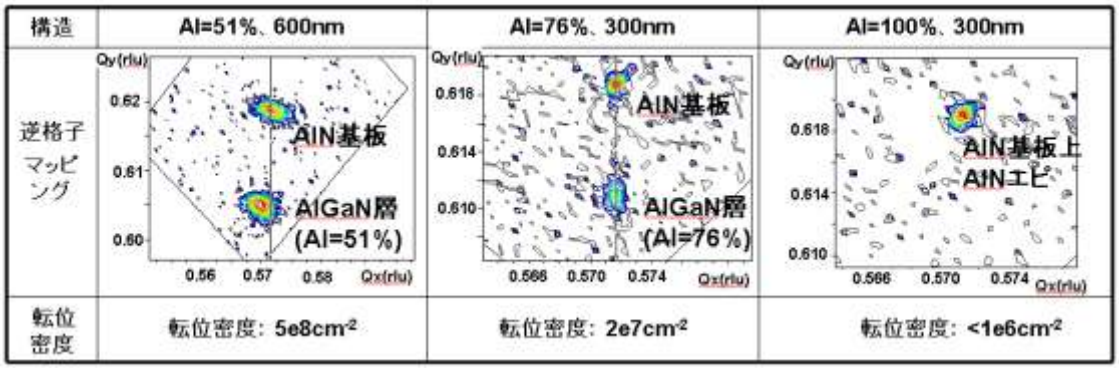


図２－３６　AlN 基板上 AlGaN エピ各種構造の逆格子マッピングと転位密度

Al=51%、厚み600nmのAlGaN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AlGaN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、AlGaN層には$5\times10^{8}cm^{-2}$の転位が発生した。Al=76%、厚み300nmのAlGaNの場合、AlNに対しAlGaN層がコヒーレントに成長しているが、AlGaN層には$2\times10^{7}cm^{-2}$の転位が発生した。この原因は明らかではないが、AlNとAlGaN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、$1\times10^{6}cm^{-2}$未満の転位密度を達成できた。

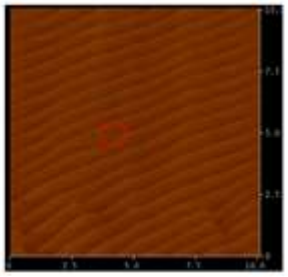


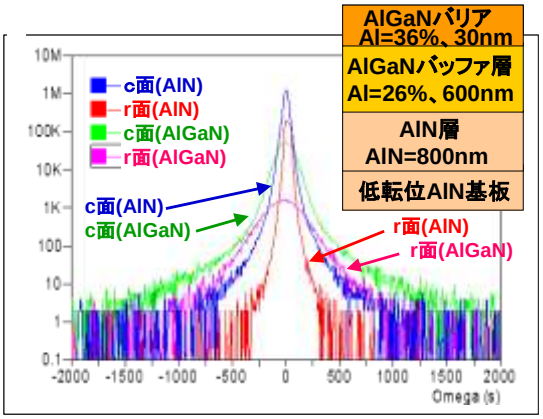
図２－３７　AlN基板上AlNエピの表面（AFM像）

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

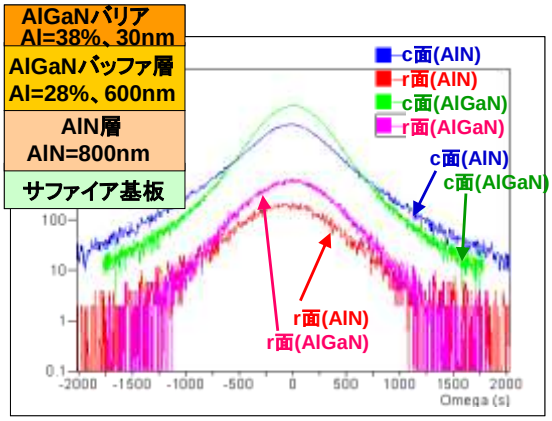
AlGaNエピにおけるAlN基板の有用性を示すため、有極性AlN基板上に、AlGaN（0.2≦Al≦0.5）をチャネルに有する、ヘテロ接合電界効果トランジスタ（HFET）構造のエピを作製した。なお、有極性AlN基板との比較のためにサファイア基板上AlNテンプレート（以降サファイア基板上）を用いた。図２－３８に、作製したエピ構造と、X線ロッキングカーブ（XRC）、また下表には半値幅をまとめた。XRCの半値幅より明らかなように、結晶性の優れたAlN基板を用いることで、AlGaN層のXRC半値幅を大幅に低減できること、故にAlN基板は結晶性の向上に大きな効果があることが確認できた。高Al組成AlGaN（0.5＜Al≦1.0）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

【AlN基板上AlN,AlGaNエピの構造とX線回折】



	c面 (0002)	r面 (10-12)
AlN層 [arcsec]	47	67
AlGaNバッファ層 [arcsec]	177	326

【AlNテンプレート上AlN,AlGaNエピの構造とX線回折】



	c面 (0002)	r面 (10-12)
AlN層 [arcsec]	567	725
AlGaNバッファ層 [arcsec]	516	661

図２－３８　AlN基板及びサファイア基板上のAlN、AlGaNエピの構造とXRC（0.2<Al≦0.5）
（下の表はAlN、AlGaN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、AlGaNチャネル層の結晶性とAlGaNチャネル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、AlGaNチャ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。AlGaNをチャネルに用いたHFETでは、そのデバイス特性を向上させるためにはAlGaN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。

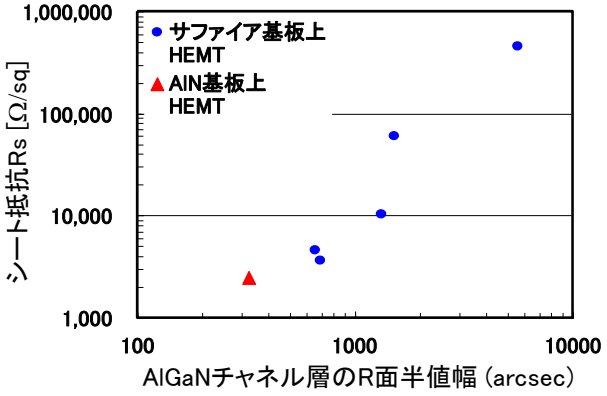


図２－３９　AlGaN チャネル HFET エピの結晶性とシート抵抗の相関

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、AlGaN 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 像から明らかなように、AlN エピ・AlGaN 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、AlGaN 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、AlGaN エピの成長のために、極めて有用であることが分かった。

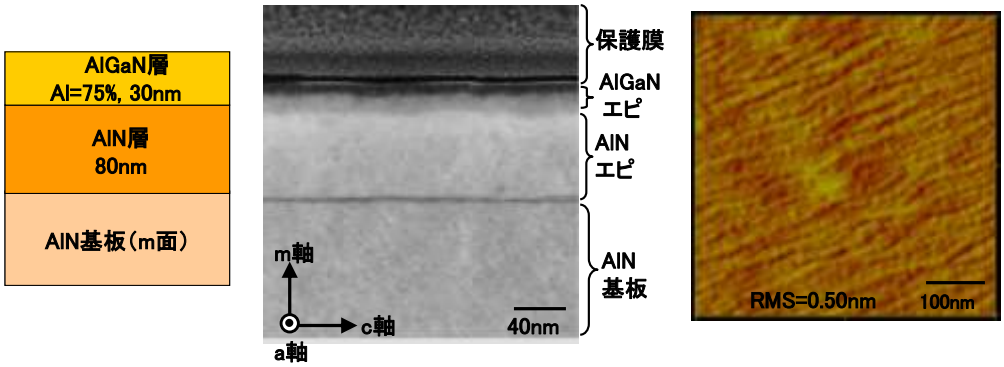


図２－４０　m 面 AlN 基板上に作製した AlGaN/AlN エピ構造と断面 TEM 像、AFM 像

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に成長表面のノマル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）。

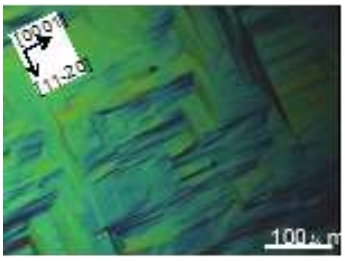


図２－４１　AlN 成長表面写真

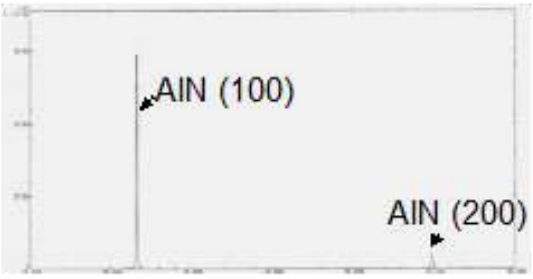


図２－４２　X 線回折（θ -2θ ）による評価結果

・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。

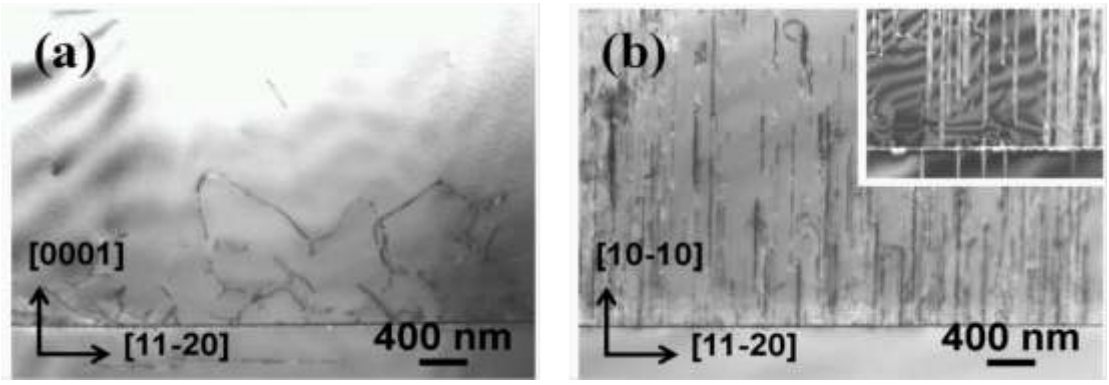


図２－４３　AlN 単結晶の断面 TEM 観察像：（a）　SiC（0001）面上。（b）SiC（10-10）面上

(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 の熱膨脹係数の比が、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。無極性面上ヘテロ成長は、積層欠陥発生するものの、熱膨脹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。

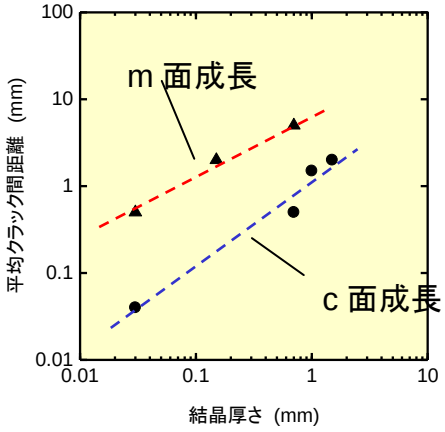


図２－４４　クラック間距離の結晶厚さ依存性

表２－２　AlN と SiC の熱膨脹係数

（×10^6 /K）

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

(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長時間安定化・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) AlGaN 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 AlGaN 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、AlGaN 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、有極性面基板上の高 Al 組成 AlGaN 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 ×10^6/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 5×10^4/cm^2 であり、長尺成長による低転位化を確認した。

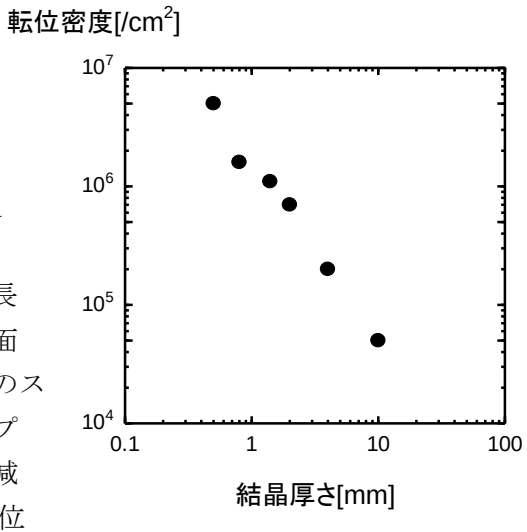


図２－４５　AlN 単結晶における転位密度の結晶厚さ依存性

(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、5～10mm 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。

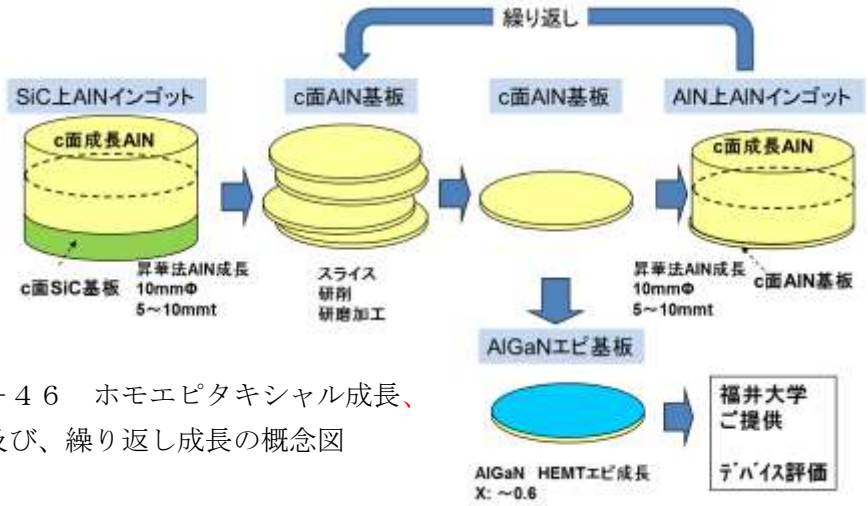
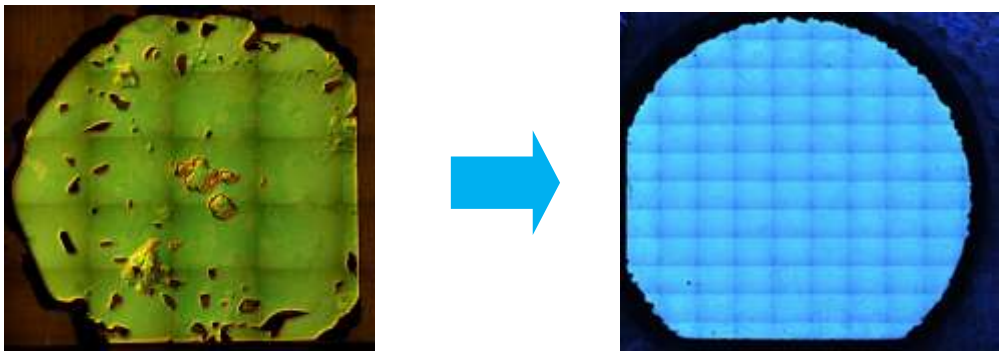


図２－４６　ホモエピタキシャル成長、及び、繰り返し成長の概念図



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。

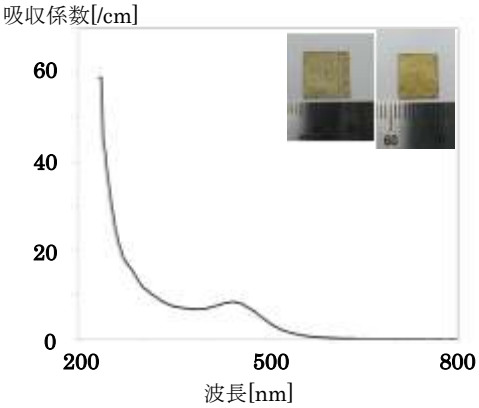


図２－４８　ホモエピ成長による
AlN 基板の光吸収特性

（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）AlGaN 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 AlGaN 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/秒で回転しているので、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、ｺﾘﾒｰﾀﾚﾝｽﾞの焦点距離を 2 m とすると、CCD 面上のスポットの位置差は 10μm 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。

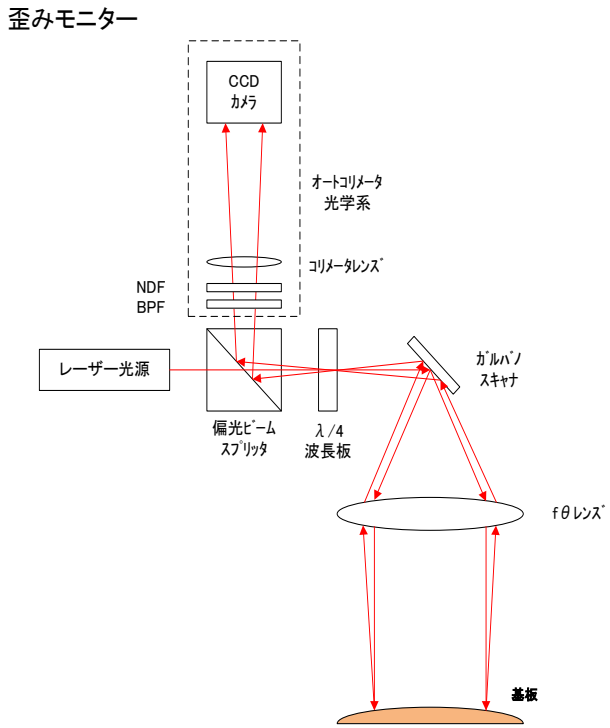


図２－４９　開発した二次元ウェハ反り精密測定装置の測定原理図

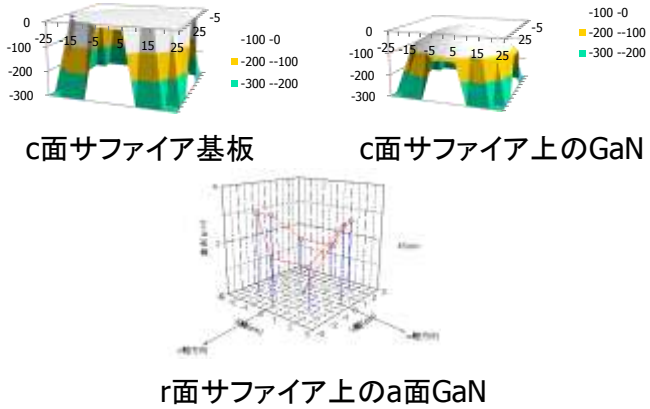


図２－５０　開発したその場観察装置を用いたｃ面サファイア、ｃ面サファイア上の GaN 及びｒ面サファイア上の GaN のウェハ形状測定

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
	Round-FET Linear-FET	耐圧、オン抵抗
		ｹﾞｰﾄ/ﾄﾞﾚｲﾝﾘｰｸ電流
		閾値電圧、ｻﾌﾞｽﾚｼｮﾙﾄﾞ特性
FET 以外	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	ｼｮｯﾄｷｰﾀﾞｲｵｰﾄﾞ特性、
	その他	基板ﾌﾞﾚｰｸﾀﾞｳﾝ評価 ｱｲｿﾚｰｼｮﾝﾁｪｯｸ 断面 SEM 観察用ﾊﾟﾀｰﾝ 段差評価ﾊﾟﾀｰﾝ,他

表３－１　マスク搭載主要パターンリスト

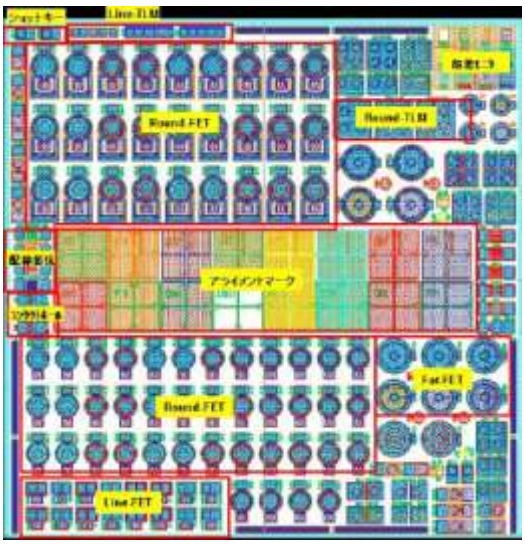


図３－１　マスク全体レイアウト

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 AlGaN/GaN HEMT 構造であり、AlGaN 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℃/s で昇温、N_2 雰囲気中で 600℃から 950℃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 0.48Ωmm(アニール温度 650℃)、Ti/Al/Mo/Au オーミック電極で 0.52Ωmm（アニール温度 800℃）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℃/s、900℃アニールによりオーミック抵抗 0.09Ωmm 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℃-650℃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。

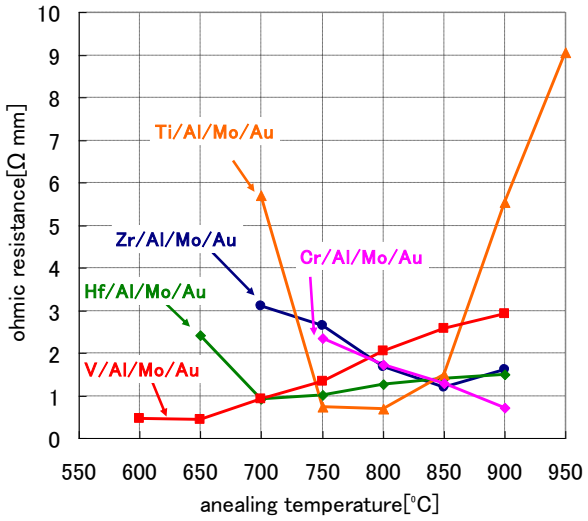


図３－２　オーミック抵抗のアニール温度依存性

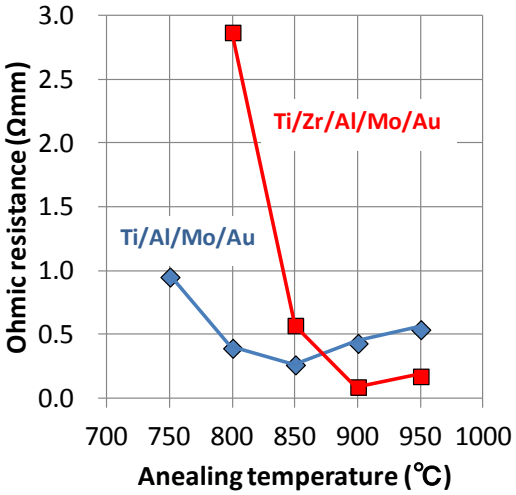


図３－３　Ti/Zr/Mo/Au のオーミック抵抗のアニール温度依存性

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、V/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 $Al_{0.21}Ga_{0.79}N$(30nm) / GaN(1um) 構造、下地基板は Si であり、FET の各電極間隔は、Lsg=3um, Lg=3um, Lgd=5um 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。

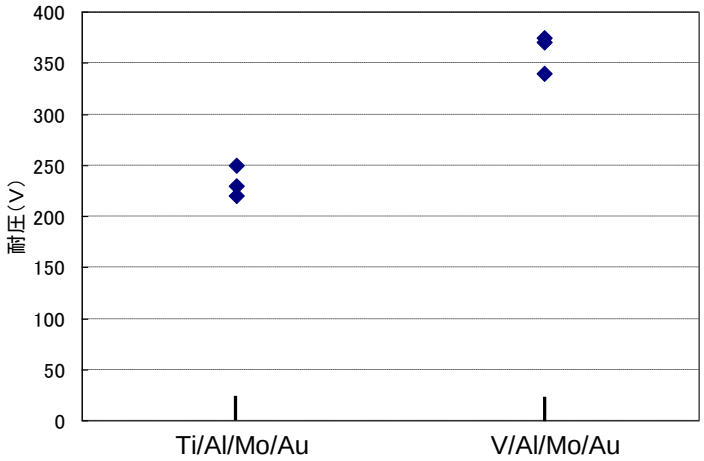


図３－４　オーミック電極材料による FET 耐圧の違い

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。

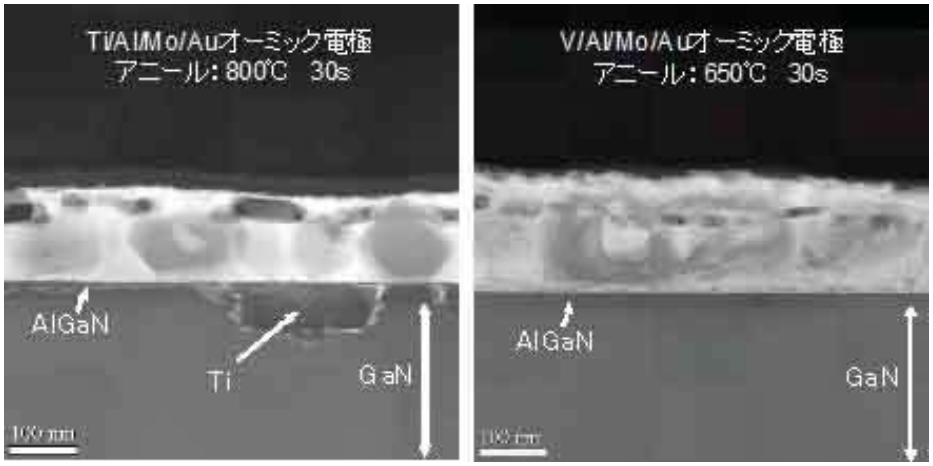


図３－５　アニール後のオーミック電極の断面 TEM 像
Ti/Al/Mo/Au（左）、V/Al/Mo/Au（右）

2-3-1-2　Na フラックス法 GaN 基板上 AlGaN/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 AlGaN/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 AlGaN/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 AlGaN/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 AlGaN/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 AlGaN/GaN エピ基板を用いた横型 HEMT 形状は Round-FET であり、Lsg=2um, Lg=3um, Lgd=5um, Wg=515um、また AlGaN の Al 組成比は 0.27 である。

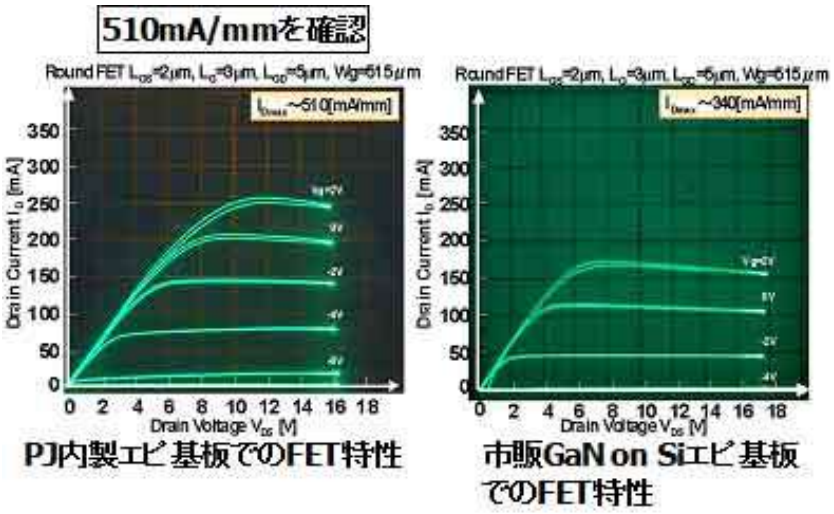


図３－６　Na フラックス法・有極性基板上エピ、および異種（Si）基板上の
市販 AlGaN/GaN エピを用いて試作した横型 FETT の電流-電圧特性実測値

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 AlGaN/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。

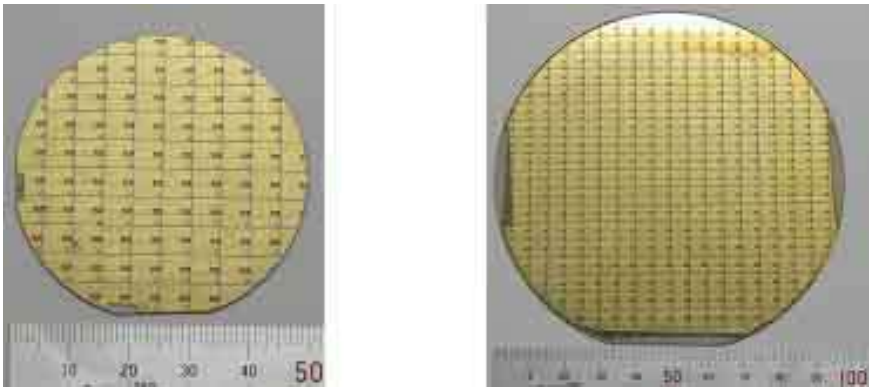


図３－７　FET を試作したプロセス済み基板（２インチ（左）、４インチ（右））

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。測定はウエ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。このように試作ウエハごとに各種測定データのウエ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。

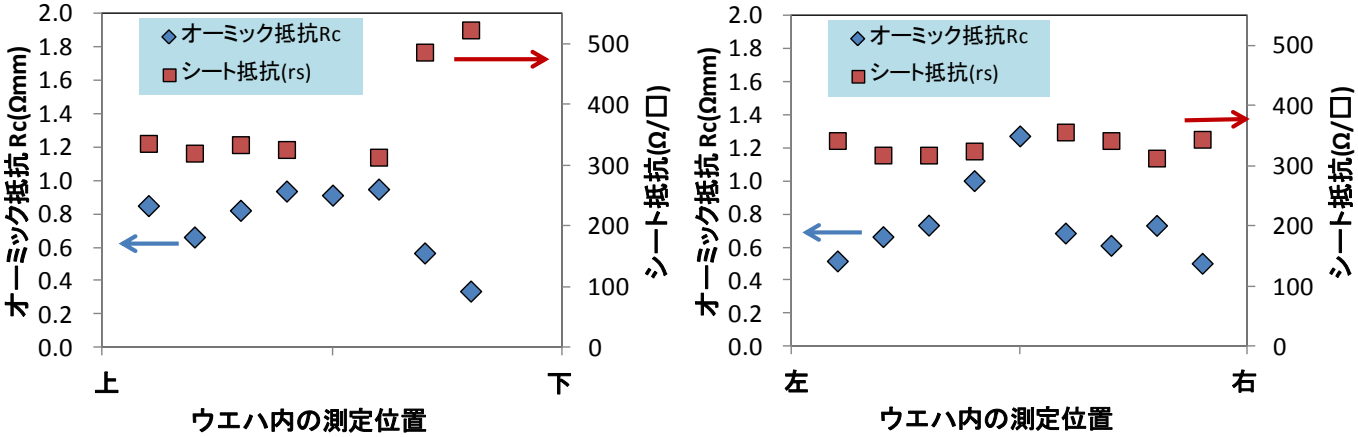


図３－８　試作した４インチ基板上 FET のオーミック抵抗およびシート抵抗の分布

2-3-1-4　Na フラックス法 GaN 基板上 AlGaN/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 AlGaN/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℃）でウエ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 $1\times10^4/cm^2$ 程度で、市販の Si 基板上 AlGaN/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。）

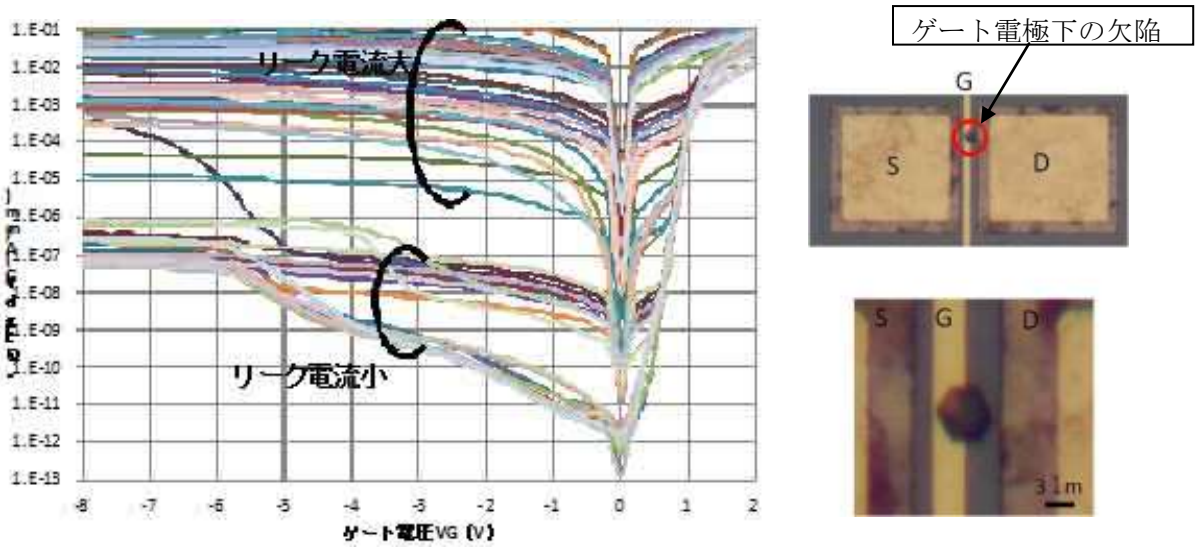
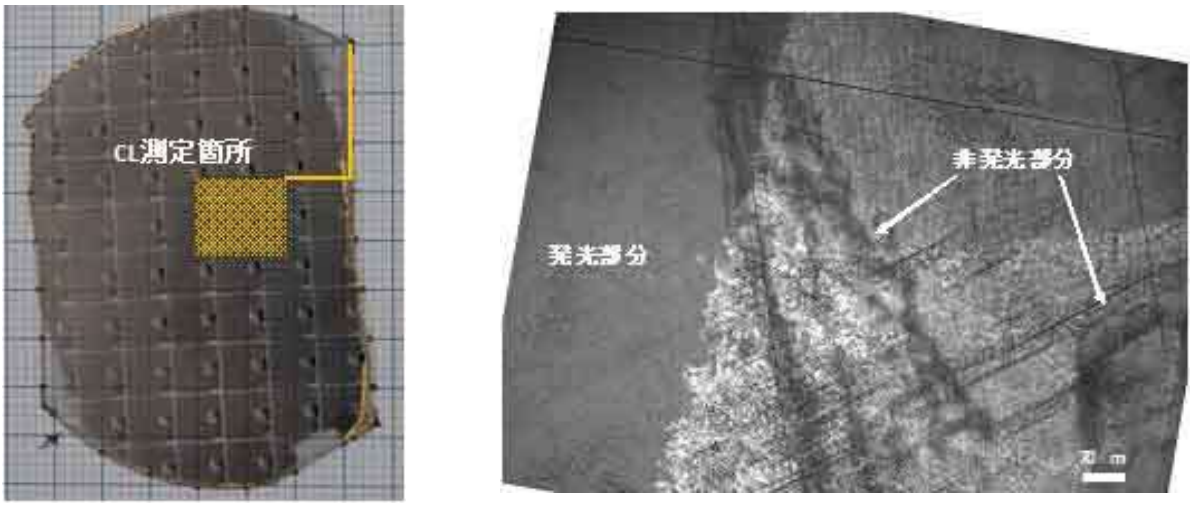


図３－９　２インチ基板上 FET の Ig-Vg 特性とゲート電極下の欠陥

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 7×7mm^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。



(a)　　(b)

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

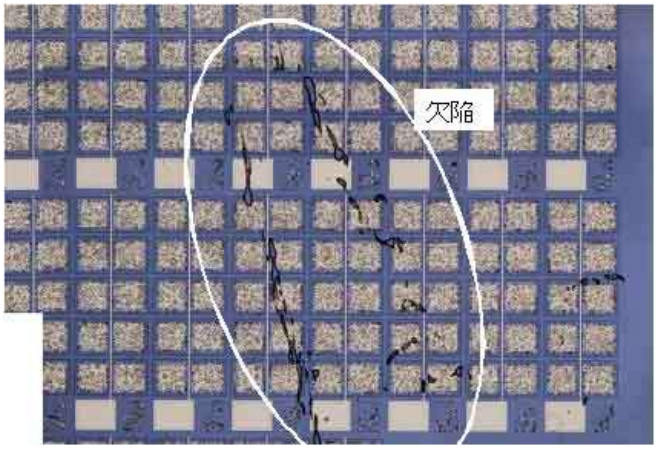
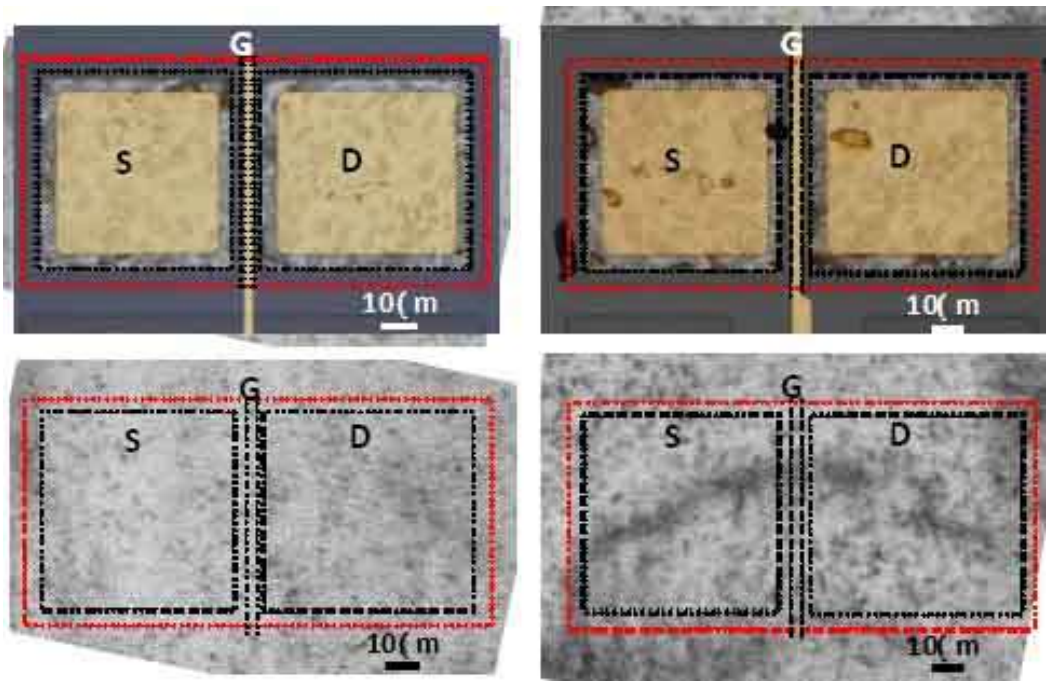


図３－１１　図３－１０のウエハに FET を形成した表面写真

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。



(a)　　(b)

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１μｍ程度の６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 100μｍ程度の大きな欠陥も数多く見られている。

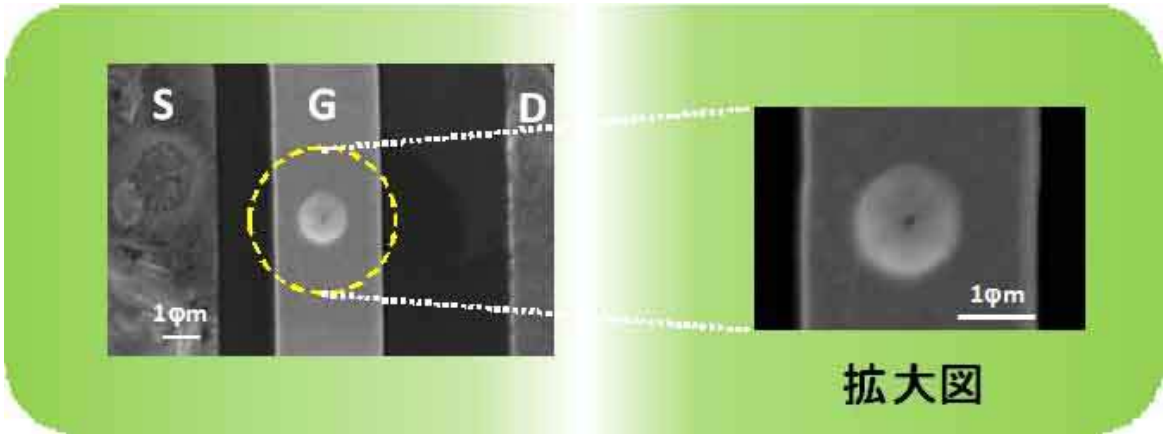


図３－１３　欠陥の SEM 像。ここに示す欠陥は一例で、様々な形状がある。

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（Id-Vgs 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。

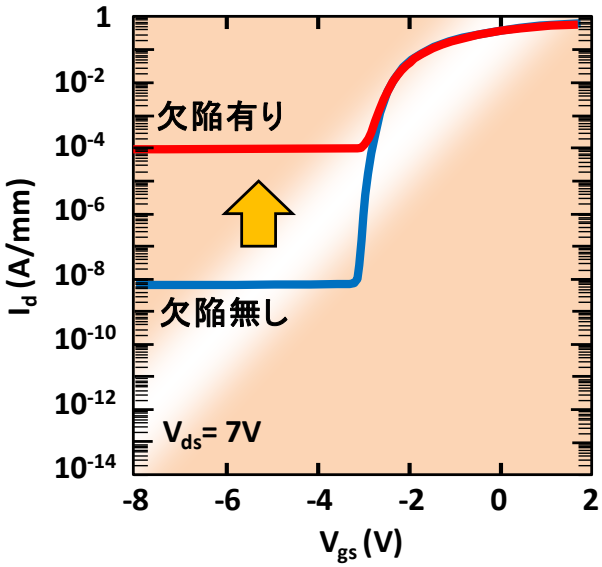


図３－１４　ゲートに欠陥のが有る個所と無い個所での FET の伝達特性の比較

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　AlGaN チャネル横型 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、AlN 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、AlN 基板上 AlGaN 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、チャネル層の Al 混晶比は 0.23～0.6 である。

AlGaN チャ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℃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=3um、Lg=6um、Lgd=10um 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=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。

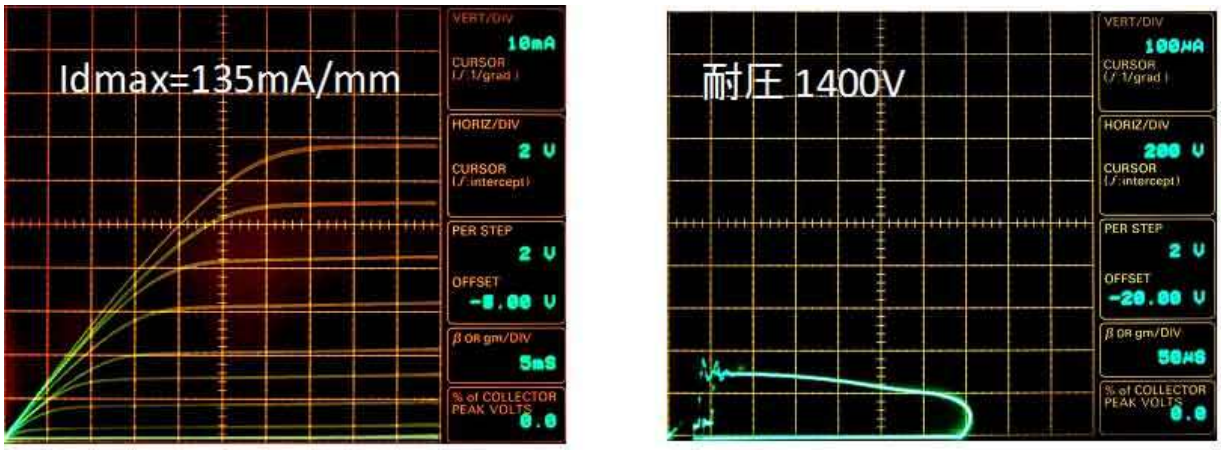


図３－１５　$Al_{0.54}Ga_{0.46}N/Al_{0.28}Ga_{0.72}N$ on AlN の Id-Vds 特性（左）と off 耐圧特性（右）

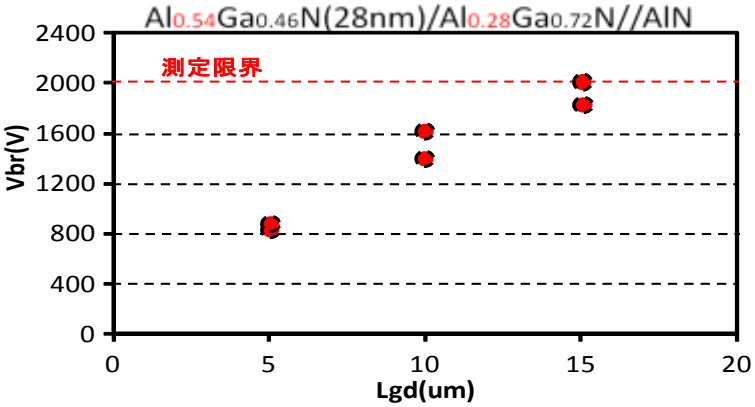


図３－１６　$Al_{0.54}Ga_{0.46}N/Al_{0.28}Ga_{0.72}N$ on AlN の FET の耐圧の Lgd 依存性

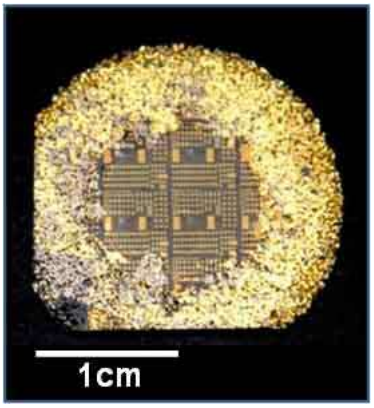


図３－１７　AlN/AlGaN on AlN 上 FET プロセス済み基板の写真

AlGaN チャネルエピ基板では 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 AlGaN チャ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℃/s、900℃30 s アニールにより、オーミック抵抗率 $4.3\times10^{-3}\,\Omega\,cm^2$ 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 $Al_{0.5}Ga_{0.5}N/Al_{0.26}Ga_{0.74}N$ on AlN FET の室温と 300℃の IV 特性を示した。測定したデバイスは Lsg=3um、Lg=9um、 Lgd=10um である。Idmax（Vg=2V の最大電流）と Idss（Vg=0V の最大電流）はそれぞれ 70 mA、55mA（25℃）、45mA、33mA（300℃）で、減少率にすると 36%、40%であった。

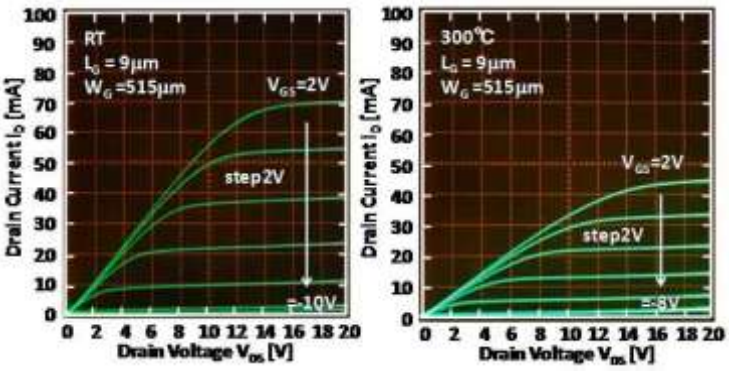


図３－１８　$Al_{0.5}Ga_{0.5}N/Al_{0.26}Ga_{0.74}N$ on AlN FET の室温（左）と 300℃（右）の IV 特性

図３－１９に $Al_{0.25}Ga_{0.75}N/GaN$ on Si と $Al_{0.5}Ga_{0.5}N/Al_{0.26}Ga_{0.74}N$ on AlN の Idss の温度特性を示した。$Al_{0.25}Ga_{0.75}N/GaN$ の Idss における室温から 300℃での減少率は 75%であった。$Al_{0.5}Ga_{0.5}N/Al_{0.26}Ga_{0.74}N$ は 150～300℃の環境では、$Al_{0.25}Ga_{0.75}N/GaN$ を超える Idss を示した。$AlN/Al_{0.6}Ga_{0.4}N$ では電流値は低いものの、300℃以下までほぼ減少のない 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。

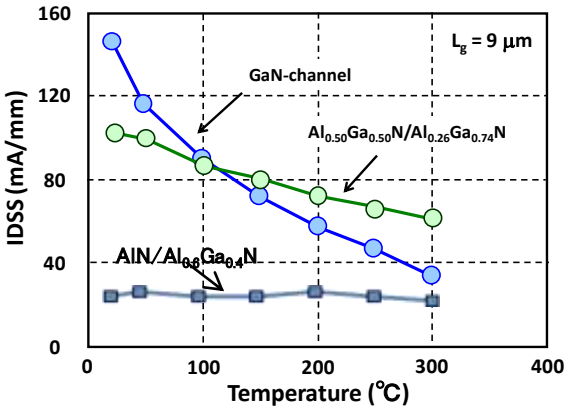


図３－１９　$Al_{0.5}Ga_{0.5}N/Al_{0.26}Ga_{0.74}N$ on AlN FET の Idss の温度依存性

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、AlGaN/GaN HEMT で AlGaN 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 AlGaN 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（Lgd）を変えて試作を行い、オン抵抗と耐圧の Lgd 依存性を調べた。また、(2)AlGaN 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、AlGaN/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 3mΩcm^2 以下という目標を付け加えた。

1)　耐圧（Vbr）、オン抵抗(Ron)の Lgd 依存性

図３－２０に、耐圧の Lgd 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 Lgd にほぼ比例して増加し、Lgd が 25μm で 1900V の耐圧が得られた。直線の傾きより求めた平均電界（Vbr/Lgd）は、0.8～0.9MV/cm であった。この結果より 1200V 以上の Vbr を得るためには、Lgd を 15μm 以上にする必要があることが判った。次に、Ron の Lgd 依存性を図３－２１に示す。この図より、Lgd を長くすると Ron はほぼ比例して増加すること、また Ron を 3mΩcm^2 以下にするためには Lgd を 18μm 以下にする必要があることが判った。

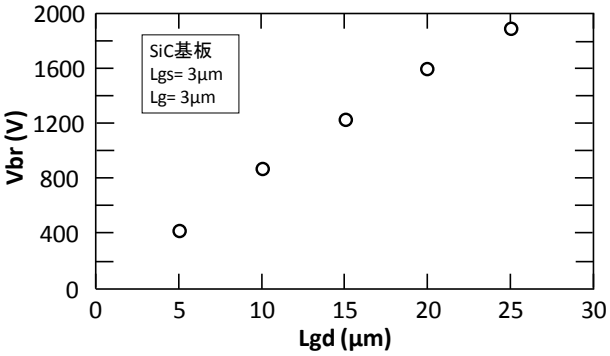


図３-２０ AlGaN/GaN HEMT の Vbr の Lgd 依存性

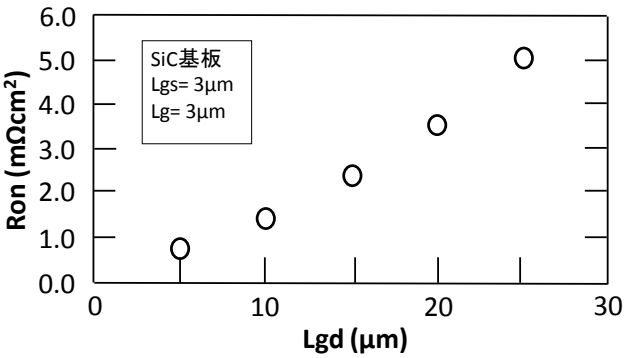


図３-２１ AlGaN/GaN HEMT の Ron の Lgd 依存性

2) 耐圧（Vbr）、オン抵抗(Ron)の Al 組成依存性

$Al_xGa_{1-x}N$/GaN エピ層において、Vbr、Ron の AlGaN 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、Ron 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 Vbr、3mΩcm^2 以下の Ron 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%、Lgd=10mm の AlGaN/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。

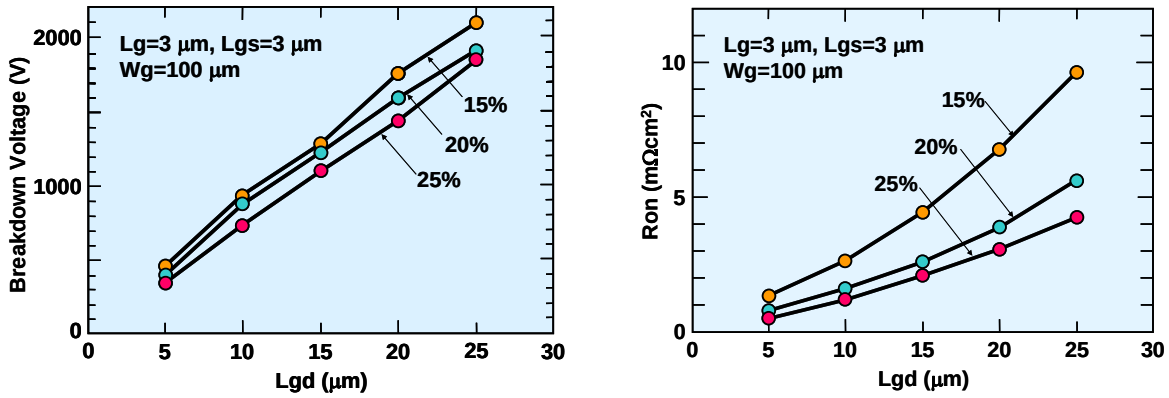


図３－２２ 耐圧とオン抵抗の AlGaN 障壁層 Al 組成依存性

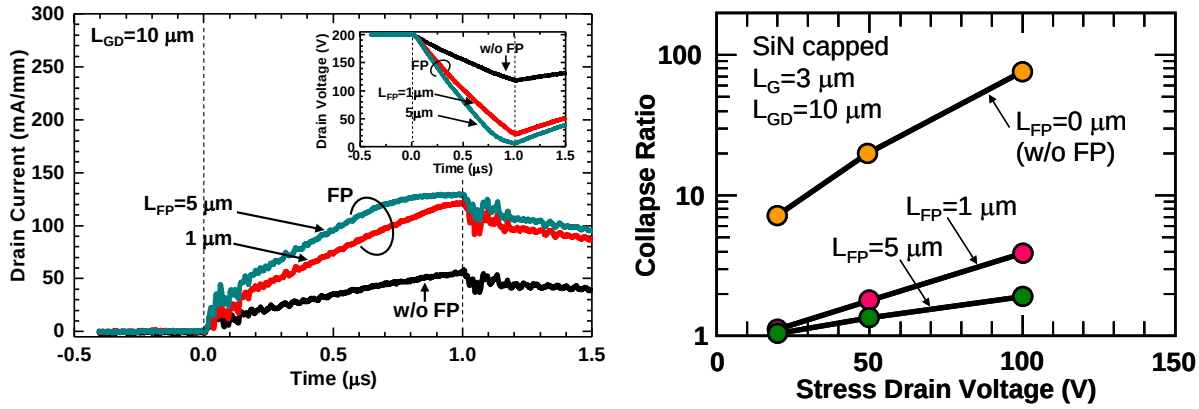


図３－２３ 電流コラプスの測定波形とコラプス比のドレイン電圧依存性

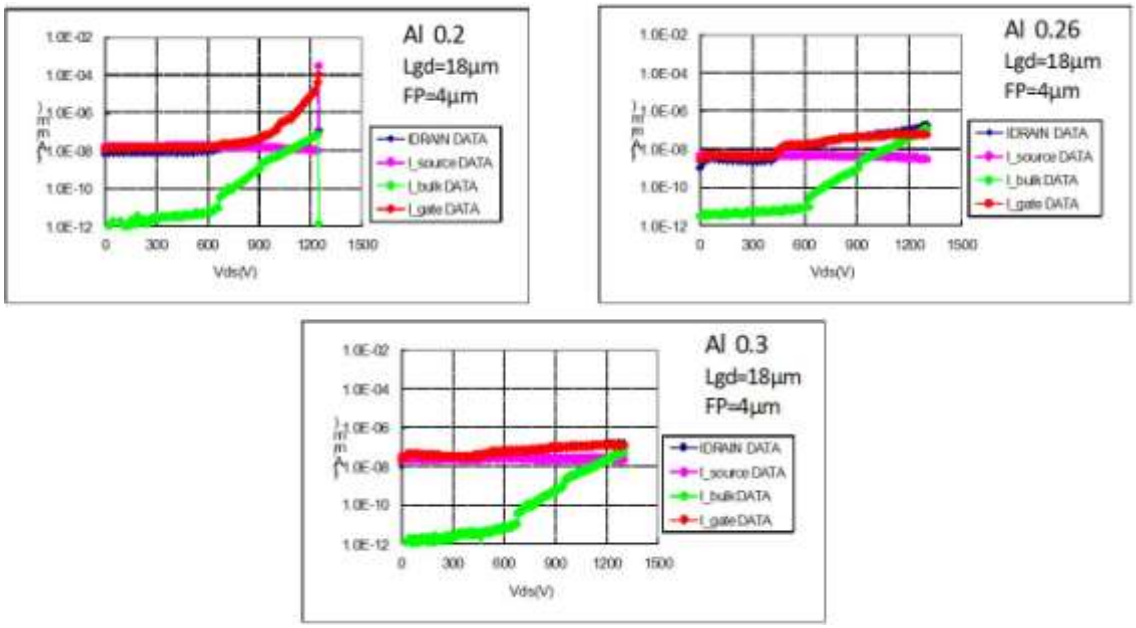


図３－２４　AlGaN の Al 組成とリーク電流の関係

3) 耐圧（Vbr）、オン抵抗(Ron)の基板依存性

Na フラックス GaN、HVPE 法 GaN、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 GaN 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、GaN 層に炭素（C）をドーピングして高抵抗 GaN 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 GaN 基板上 AlGaN/GaN 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 AlGaN/GaN エピに比べて、全ての基板で表面荒れが生じている。（C ドープ濃度、層厚）＝（5×10^{18} cm^{-3}, 5um)、(1×10^{19} cm^{-3}, 2um)の試料は表面荒れはあるが、(3×10^{19} cm^{-3}, 5um)、(1×10^{19} cm^{-3}, 10um)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 ドープ濃度が高く、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。

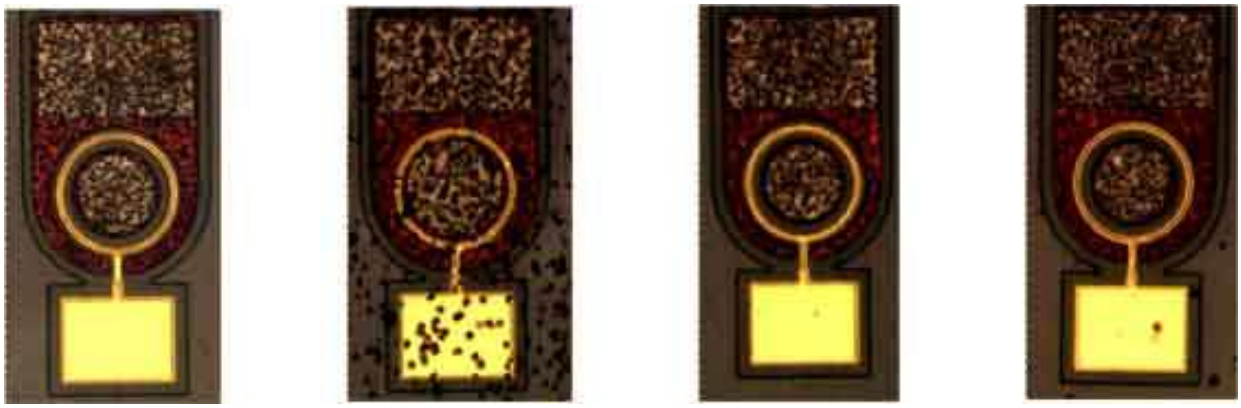
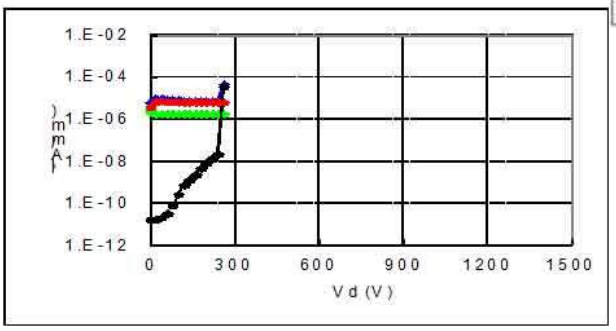


図３―２５　Na フラックス GaN 基板上 AlGaN/GaN エピ FET の表面モフォロジー
左から順に（C ドープ濃度、層厚）＝（5×10^{18} cm^{-3}, 5um)、(3×10^{19} cm^{-3}, 5um)、(1×10^{19} cm^{-3}, 2um)、(1×10^{19} cm^{-3}, 10um)である。

Na フラックス基板で試作した AlGaN/GaN HEMT の Vbr 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 Vbr 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。



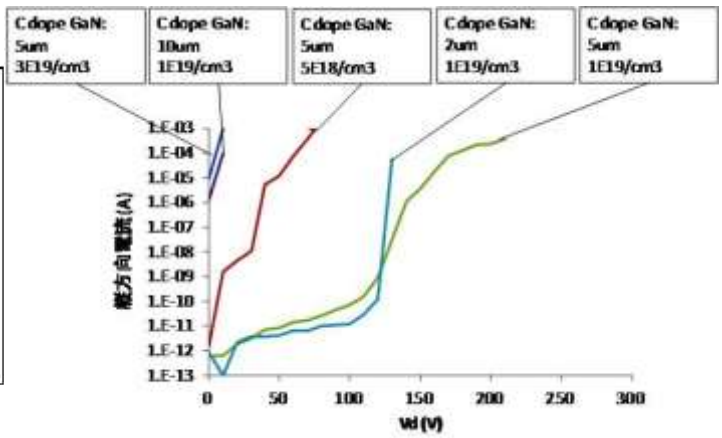
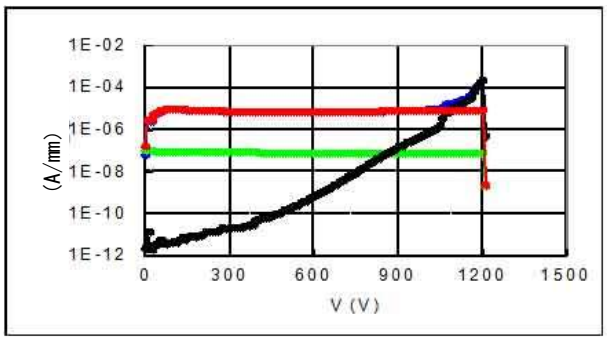


図３-２６ Na フラックス基板 HEMT の耐圧特性　図３-２７ Na フラックス基板 HEMT のリーク電流特性

(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 10μm である。一方、B 社製基板は un-dope 高抵抗 GaN チャネル層を形成しており、厚みは 1μm 以下である。耐圧特性を図３－２８と図３－２９に比較して示す。



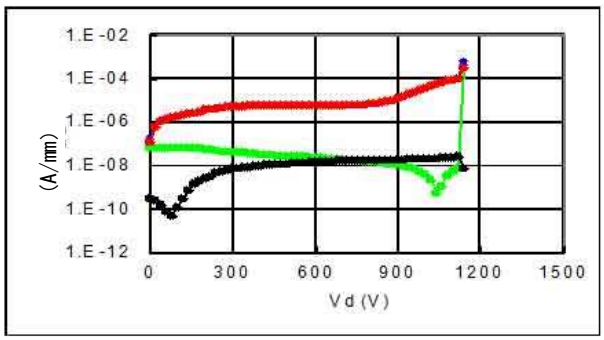


図３-２８　A 社製 HVPE 法 GaN 基板 HEMT の耐圧特性

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 Vbr 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、バッファー層のリーク電流を抑えれば充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 基板ではバッファー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 基板ともに試作に充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、バッファー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。

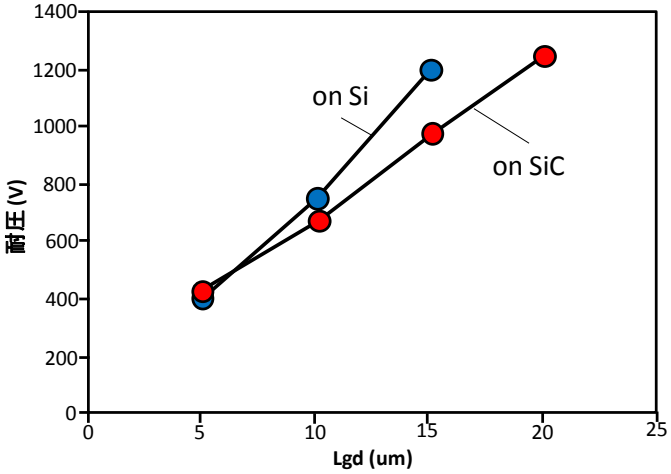


図３－３０　耐圧の Lgd 依存性

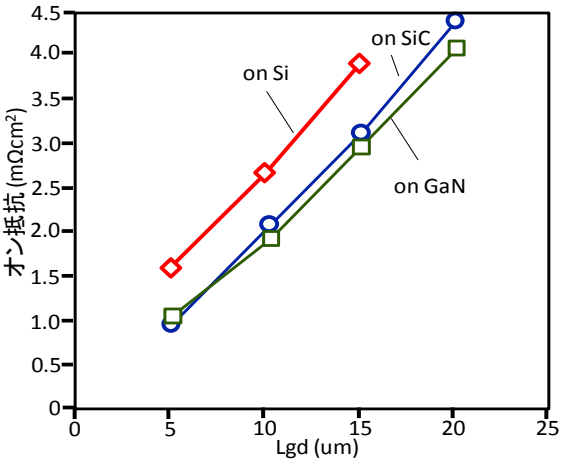


図３－３１　オン抵抗の Lgd 依存性

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ー層の低リーク電流＆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、バッファー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 m・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。

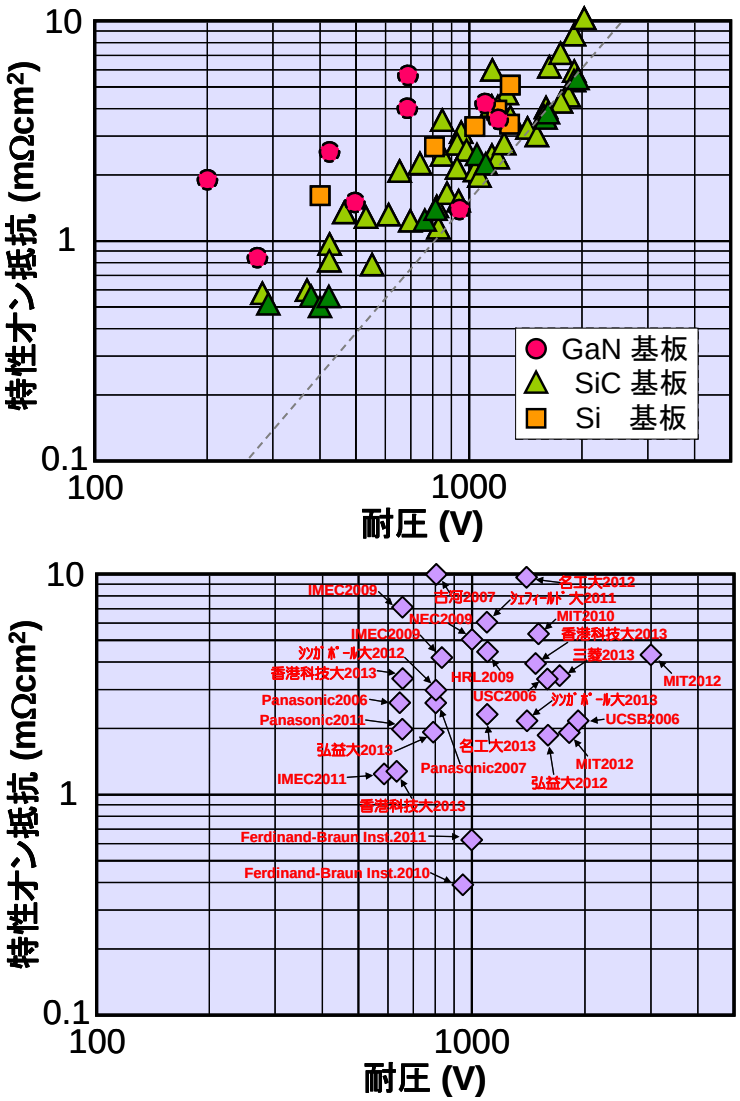


図３－３２　耐圧とオン抵抗の関係　（ａ）本Ｐｊの実験結果，（ｂ）報告値

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（1kHe～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３－３３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、～10^6 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。

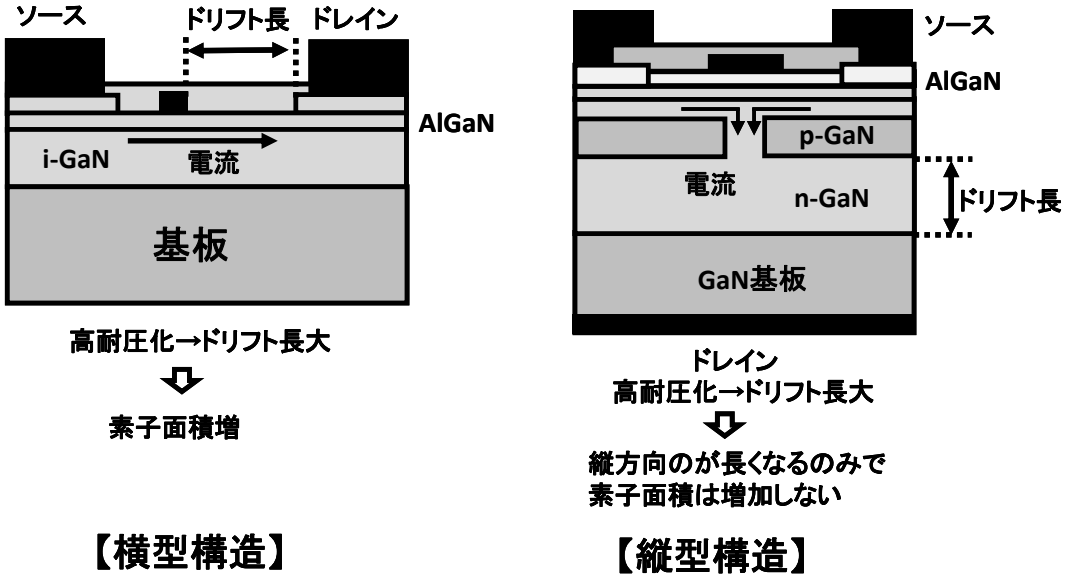
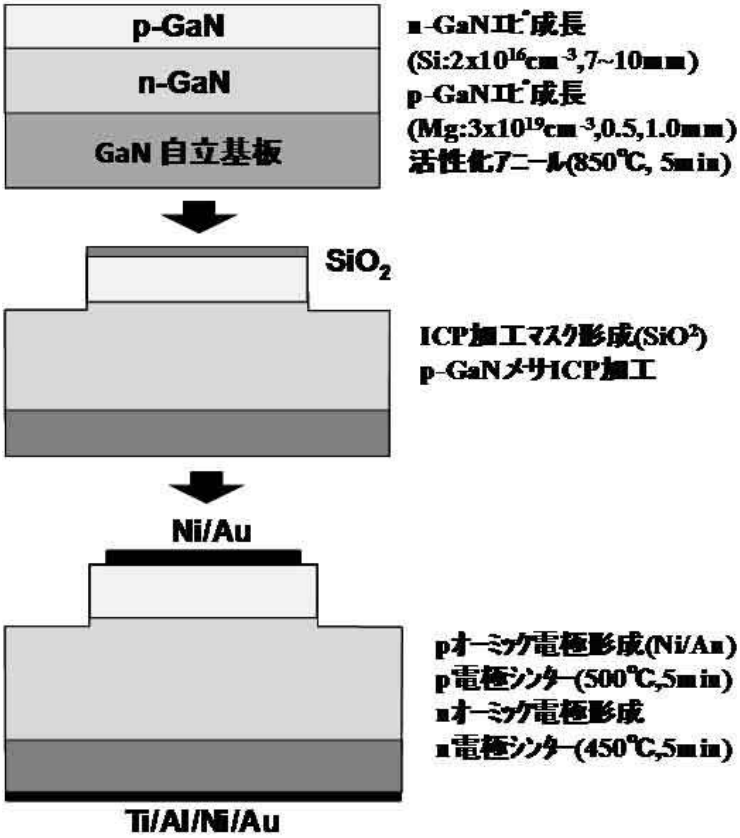


図３－３３　横型・縦型 GaN パワーデバイスの構造

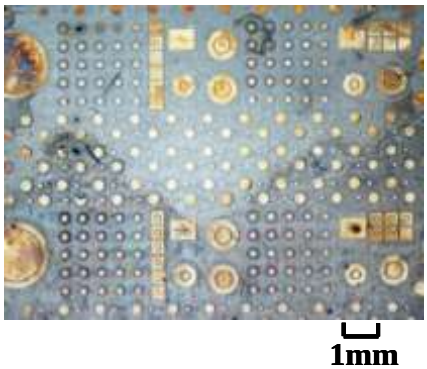
2-3-2-1　Na フラックス法 GaN 基板上 pn ダイオードの試作

縦型構造では、図３－３３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３－３４（a）に示す。まず GaN 基板上に Si を $2x10^{16}$ cm^{-3} ドープした n-GaN を 7～10μm、次に Mg を $3x10^{19}$ cm^{-3} ドープした p-GaN を 0.5 または 1.0 μm 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℃、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 $3x10^{17}cm^{-3}$ 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℃、5 分シンター）、n 電極として Ti/Al（窒素中、450℃、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３－３４（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、0V～1000V 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ことが必要である。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、エチング条件は HCl+N_2 雰囲気中で、600℃，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 線ロッキング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

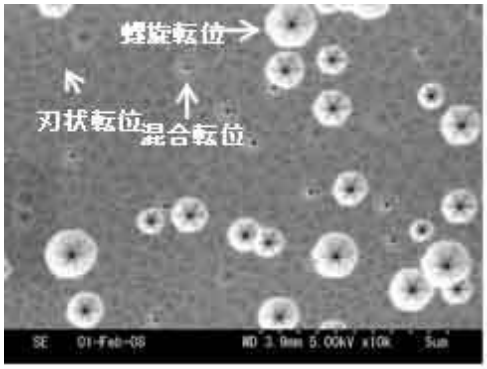


図３－３５　サファイア基板上 GaN を
HCl ガスでエッチングした表面

多くの（～10^9cm^{-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 基板上の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～10^6cm^{-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．H_2SO_4:H_3PO_4= 1:3，250℃，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。

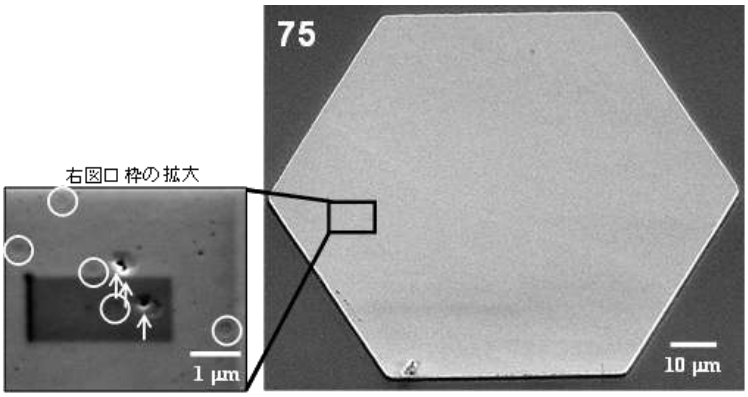


図３－３６　HVPE 法 GaN 基板上 pn ダイオードの HCl エッチング後の表面.
図中、○は刃状転位、→は混合転位を示す。

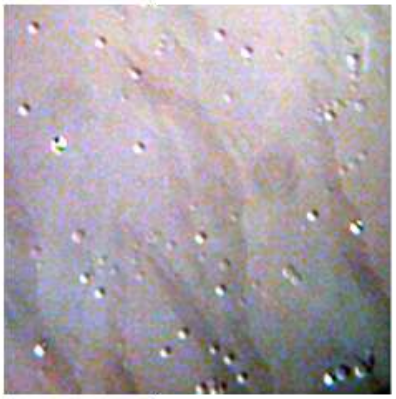


図３－３７　ウエットエッチで顕在化したエッチピット

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、H_2SO_4:H_2PO_4=1:3 のエッチング液で、 250℃、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

1ｋＶ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 0.32A/cm^2, 3.2x10^{-3}A/cm^2　となり、順方向の電流密度を＞500A/cm^2 程度を仮定すると、オン・オフ比は 10^3～10^5 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。

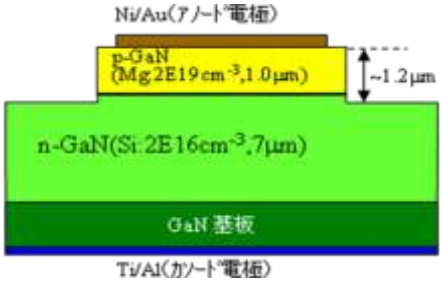


図３－３８　試作したダイオードの構造

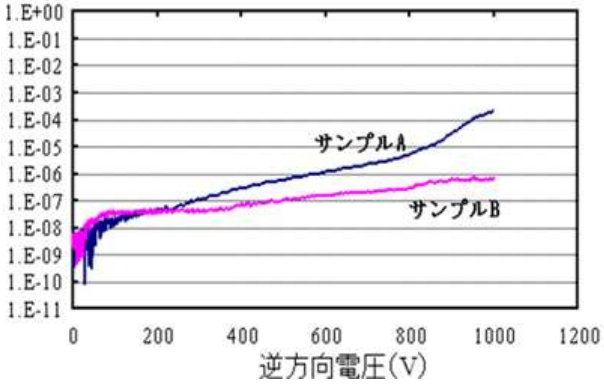


図３－３９　試作ダイオードのリーク特性

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。

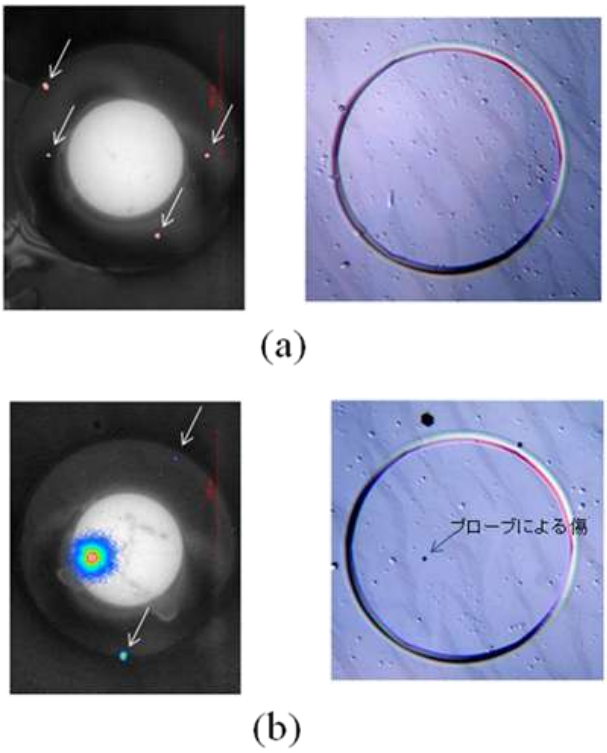


図３－４０　pn ダイオードの発光観察(左）およびエッチピットの写真（右）両方が対応するように示す。(a)：サンプルＡ　(b)：サンプルＢ

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。ただ少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＞10^6cm^{-2}、～2x10^5 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) 10^5～10^6cm^{-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ヤ高さ 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

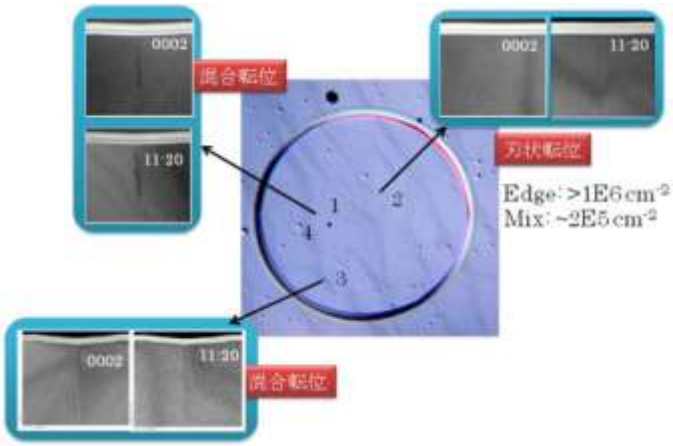


図３－４１　エッチピットとその原因となる転位の同定

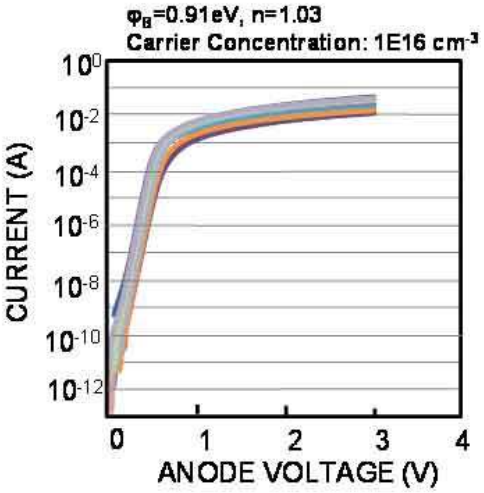


図３－４２　ｼｮｯﾄｷｰﾀﾞｲｵｰﾄﾞの順方向特性

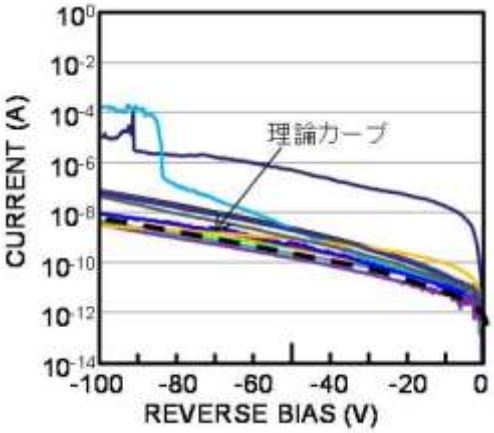


図３－４３　ｼｮｯﾄｷｰﾀﾞｲｵｰﾄﾞの逆方向特性

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～10^5cm^{-2}、刃状転位密度～10^6 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。

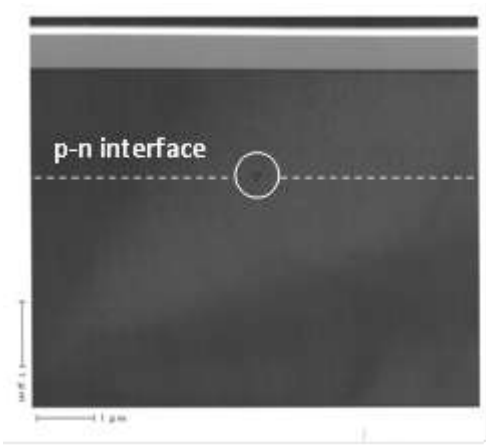


図３－４４　エピ成長時に pn 接合界面に取り込まれた異物

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。

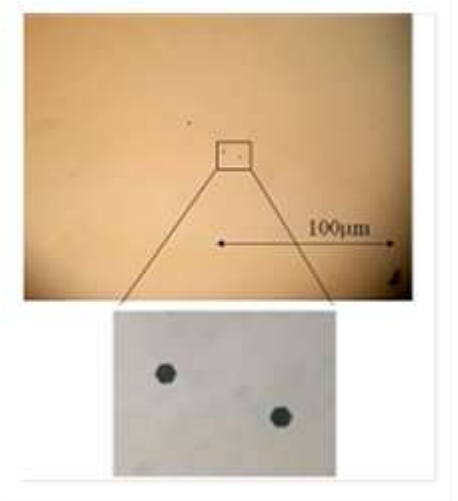


図３－４５　エピタキシャル成長後に観察されるピット

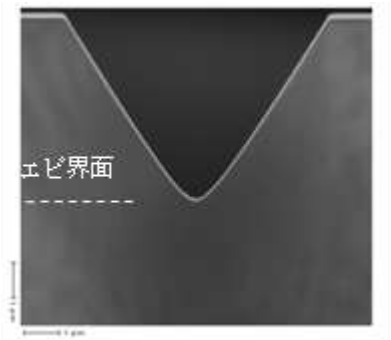


図３－４６　ピットの断面 TEM 像

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 AlGaN/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 $1 \times 10^{15} cm^{-2}$ 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，AlGaN 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、AlGaN 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。

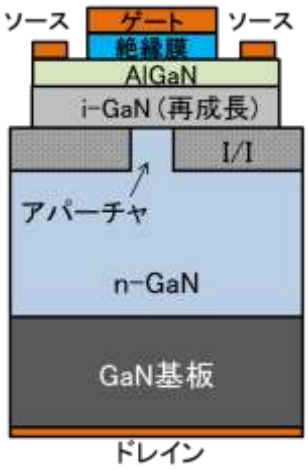


図３－４７　試作した縦型トランジスタの構造

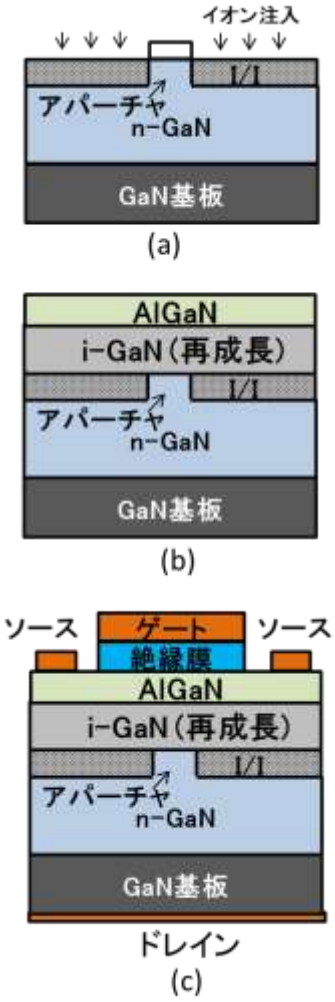


図３－４８　縦型トランジスタの作製プロセス

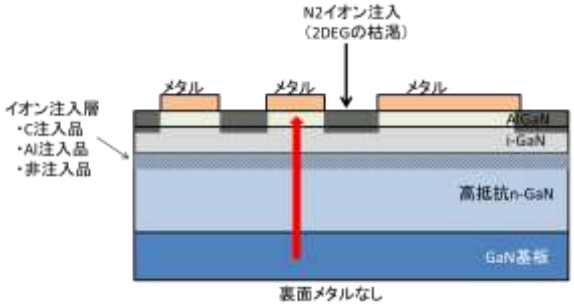


図３－４９　イオン注入層の絶縁特性を測定する為の試料構造

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。

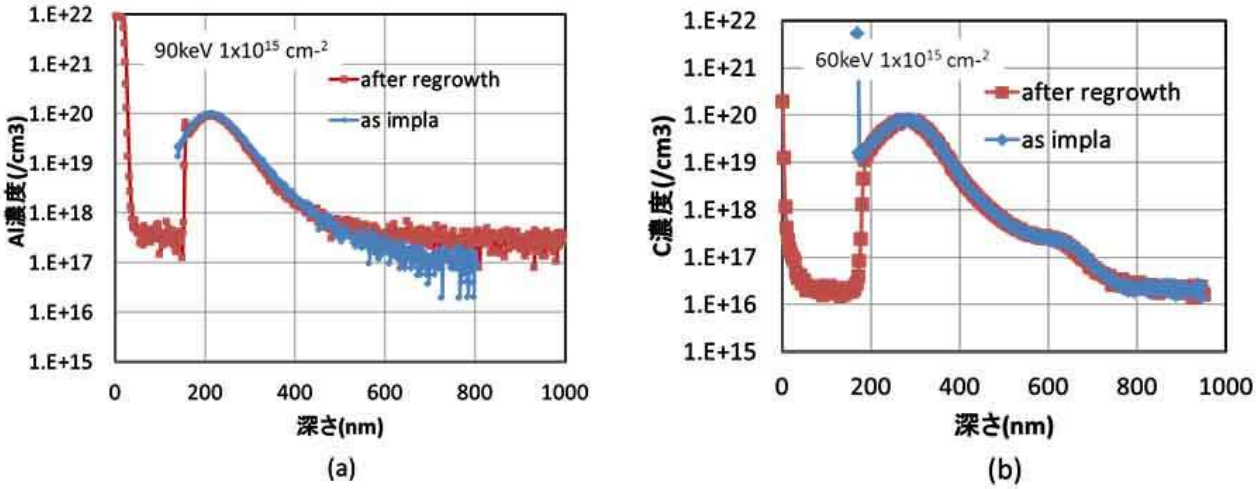


図３－５０　イオン注入層の(a) Al，(b) C の濃度分布．　再成長前の分布も合わせて示す．

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。

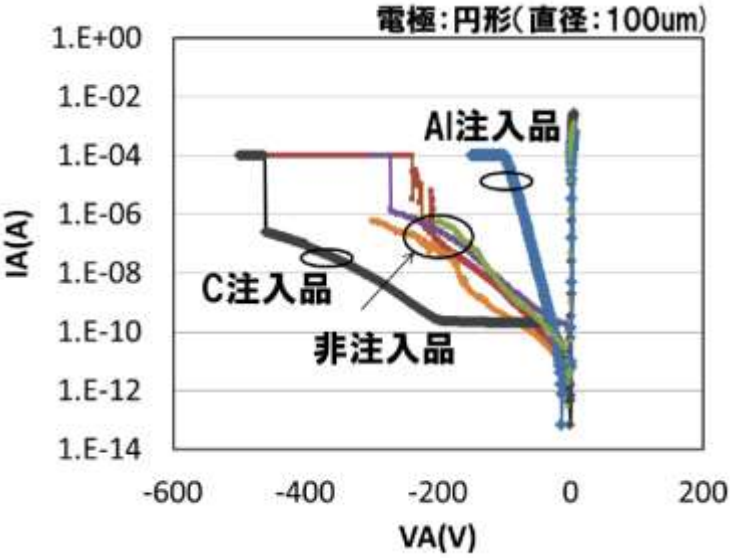


図３－５１　イオン注入層のリーク電流特性

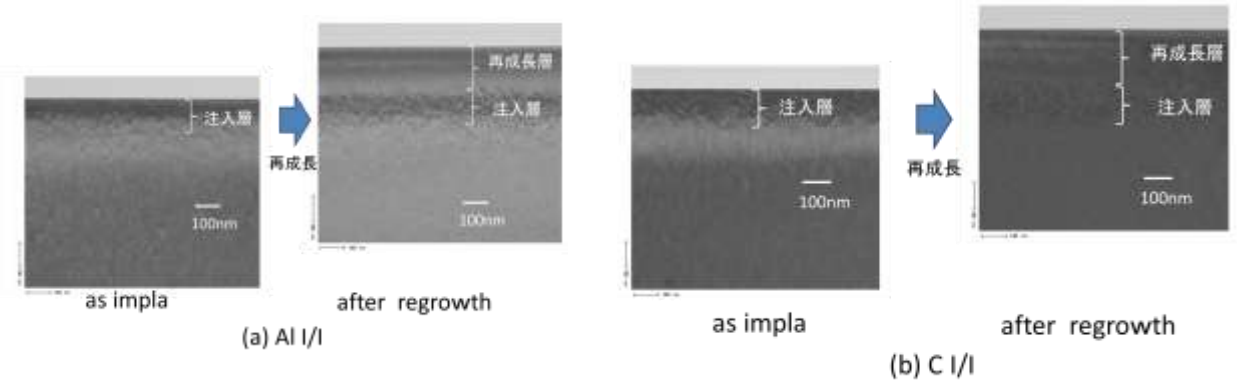


図３－５２　イオン注入層の断面 TEM

次に，図３-４８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３－５３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．

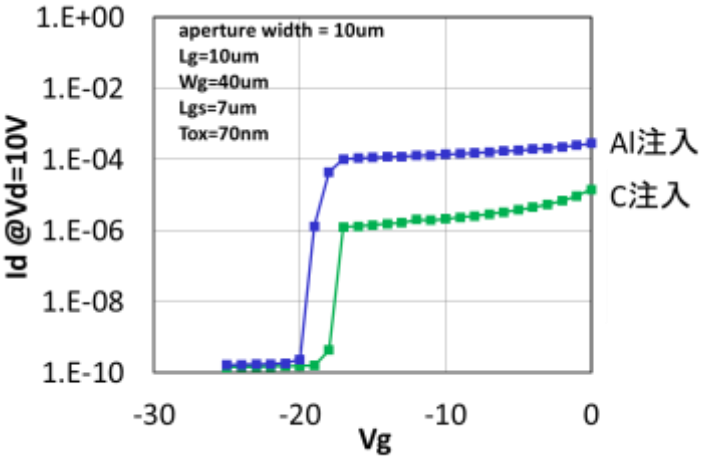


図３－５３　試作トランジスタの伝達特性

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３－５４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。

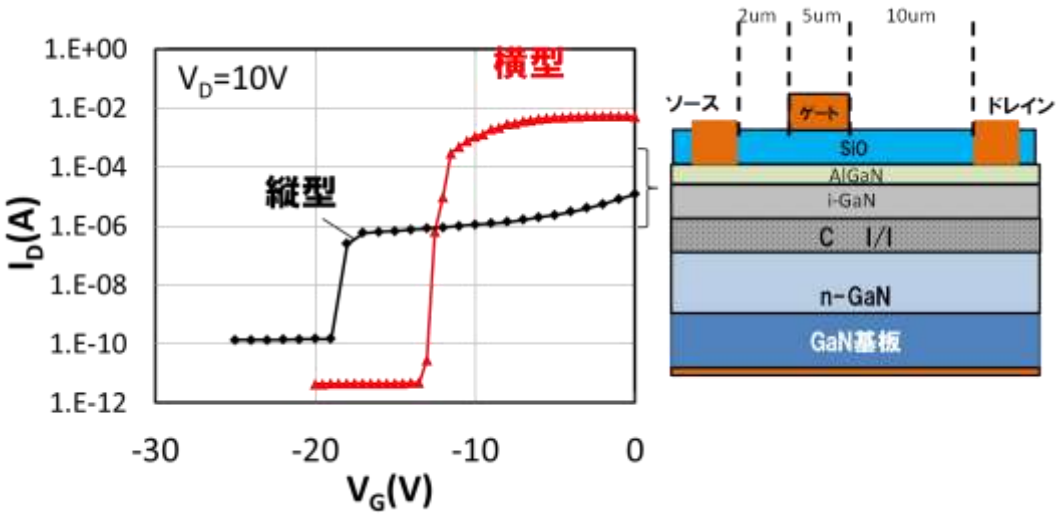


図３－５４　同一基板に形成された横型デバイスの特性

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.

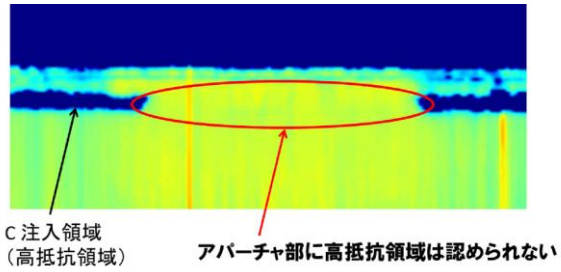


図３－５５　アパーチャ周辺の抵抗の分布. 色が青色ほど高抵抗

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$2 \times 10^{16}cm^{-3}$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、低ドープの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。

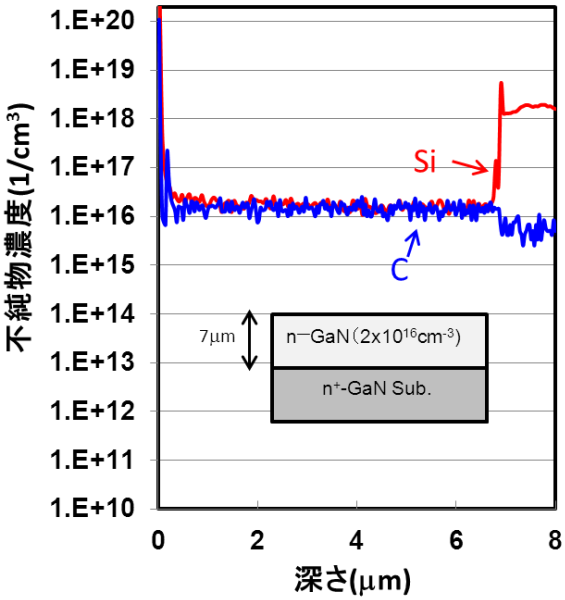


図３－５６　ドリフト層に含まれる不純物の分布

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。

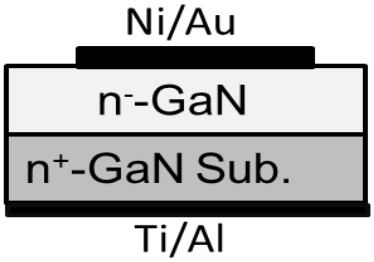


図３－５７　ショットキーダイオードの構造

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、ダイオードをフォ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、高耐圧に耐えう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 6mΩ･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。

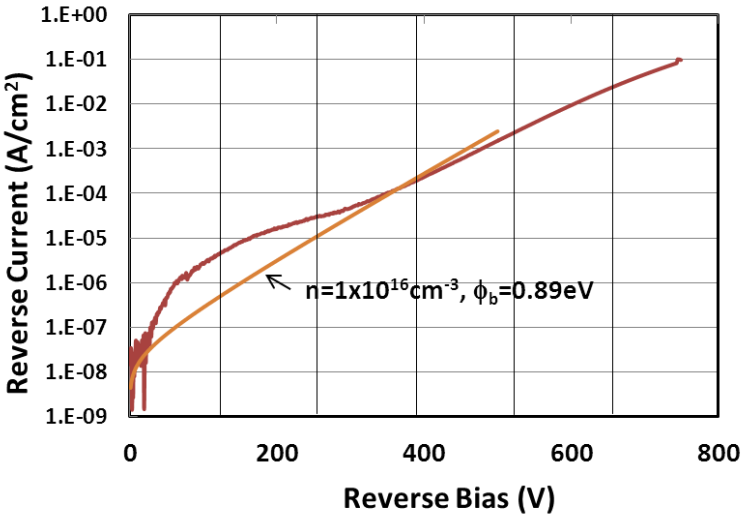


図３－５８　ショットキーダイオードの
リーク・耐圧特性

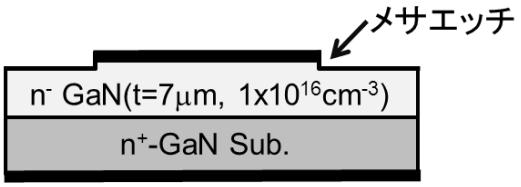


図３－５９　メサ構造を持つ
ショットキーダイオード

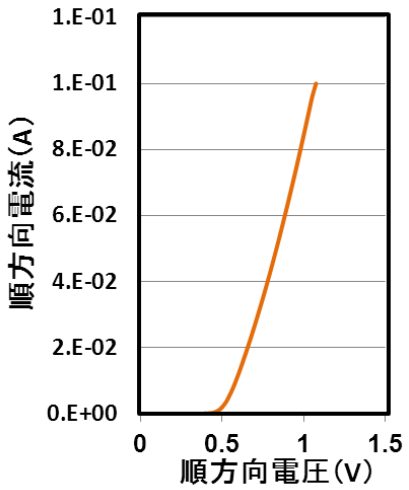


図３－６０　ショットキーダイオードの
純方向特性

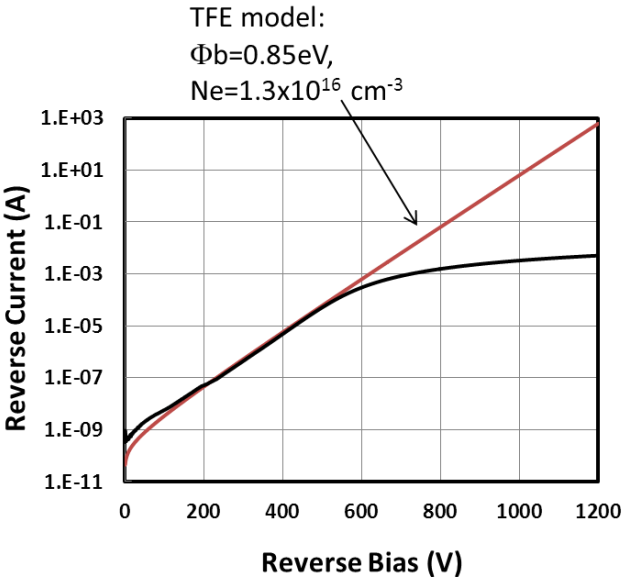


図３－６１　ショットキーダイオードの
耐圧特性

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、$1 \times 10^{16} cm^{-3}$ 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、1.2ｋＶ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３－６２）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。

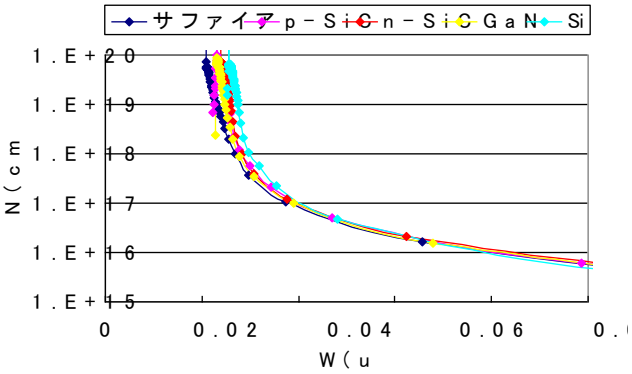


図３－６２．各種基板のエピタキシャルウエハのキャリアプロファイル

2-3-3-2　横型 HEMT 構造のデバイスプロセスの確立

横型 NEMT 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	150μm	O-S 間距離、FP 条件	福井大 ref
r-FET	円形	150μm	G-D 間距離、G 長、FP 条件、ﾊﾟｼﾍﾞｰｼｮﾝ	福井大 ref
i-FET	ライン	100μm	G-D 間距離、FP 有無、ﾊﾟｼﾍﾞｰｼｮﾝ	福井大 ref
FET	櫛歯	3mm	G-D 間距離、G 長、FP 条件、ﾊﾟｼﾍﾞｰｼｮﾝ	標準素子
SBD	櫛歯	3mm	O-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	O-S 間距離	

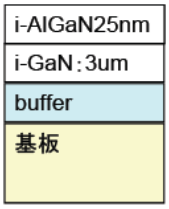
2-3-3-3　各種基板上への HEMT 構造のエピ成長およびデバイス試作

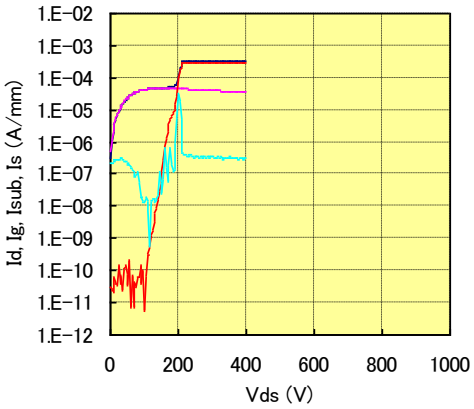
GaN 基板、及び SiC 等多種基板上に自社でのエピタキシャル成長により、GaN HEMT 構造のエピウエハの作製を行い、デバイス試作を実施した（表３－３参照）。

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 をドープすることで耐圧向上する傾向が見られた（図３－６３）。

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	φ2	HT-AlN, i-GaN, Mg ﾄﾞｰﾌﾟ	95～182	380～796	0.7～1.99
Si	φ5	多層	409	386～394	0.8～0.94
n-SiC	φ2	HT-AlN	189～236	386～454	0.58～0.86
SI-SiC	φ2	HT-AlN	221	368～388	0.69～0.86
ｻﾌｧｲｱ	φ2	LT-AlN	697	866～1246	1.38～2.13





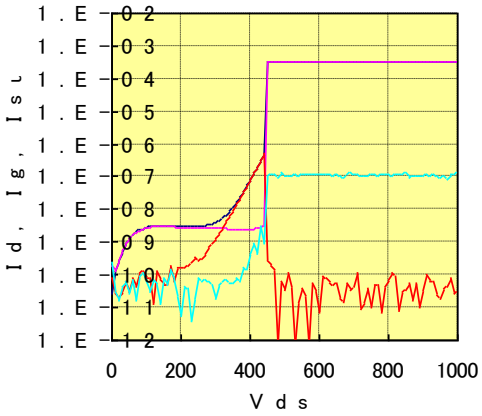


図３－６３．バッファ層の違いによる n-GaN FET のリーク電流（左：i-GaN、右：Mg ドープ）

2-3-3-4　熱抵抗測定の検討

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。

熱抵抗＝（ΔT/W)＝（ジャンクション温度-室温)/(引加電圧×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

SiC ＜ GaN ＜ Si(薄) ＜ Si(厚) ＜ 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℃)	厚さ (μm)	熱抵抗測定結果 ℃/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ﾄﾞｰﾌﾟ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AlGaN/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３－６４）。耐圧向上のため、バッファ層には Mg や C（後述）をﾄﾞｰﾌﾟした。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３－６５）、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。

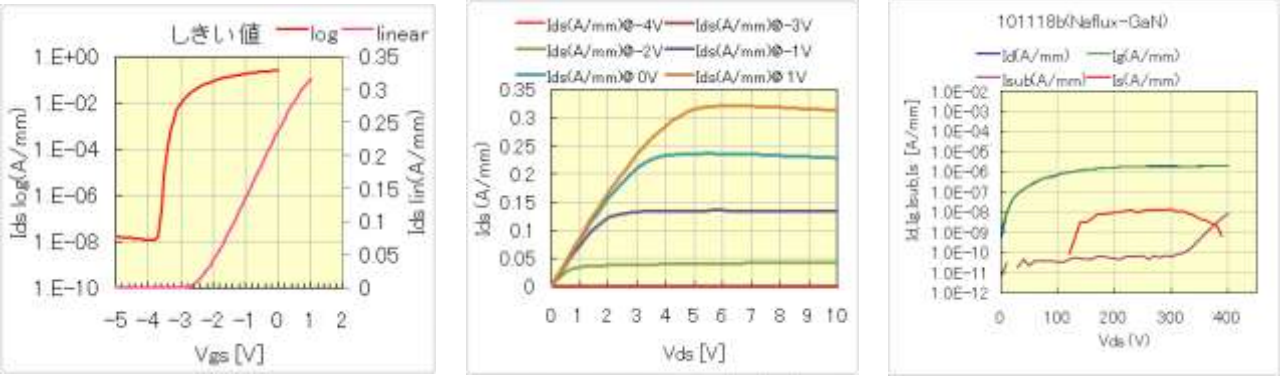


図３－６４．Na フラックス GaN 基板（④101118b）の FET 特性

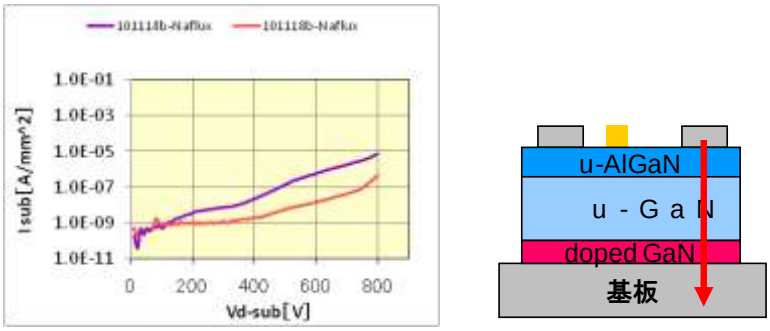


図３－６５．　Na フラックス GaN 基板（④101118b）の縦方向耐圧

表３－５．デバイス試作結果のまとめ

No	ｴﾋﾟ ID	基板	構造	ｵｰﾐｯｸ	耐圧	ｺﾗﾌﾟｽ
Ref	―	Si	AlGaN/GaN(6μm)	○	○	○
①	101115b	HVPE（市販 GaN）	AlGaN/GaN(8μm)/GaN:Mg ﾄﾞｰﾌﾟ(2μm)	○	△	△
②	V5047	HVPE（市販 GaN）	AlGaN/GaN(8μm)/GaN:Mg ﾄﾞｰﾌﾟ(2μm)	△	×	△
③	V5027	HVPE（市販 GaN）	AlGaN/GaN(8μm)/GaN:C ﾄﾞｰﾌﾟ(2μm)	×	試作中止	
④	101118b	Na ﾌﾗｯｸｽ	AlGaN/GaN(8μm)/GaN:Mg ﾄﾞｰﾌﾟ(2μm)	○	○	△

２）　Cﾄﾞｰﾌﾟ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 AlGaN/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 12μm 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（40μm 位）ができ、レジストのパターニング不良で実機動作用の大チップを得ることが出来なかった。

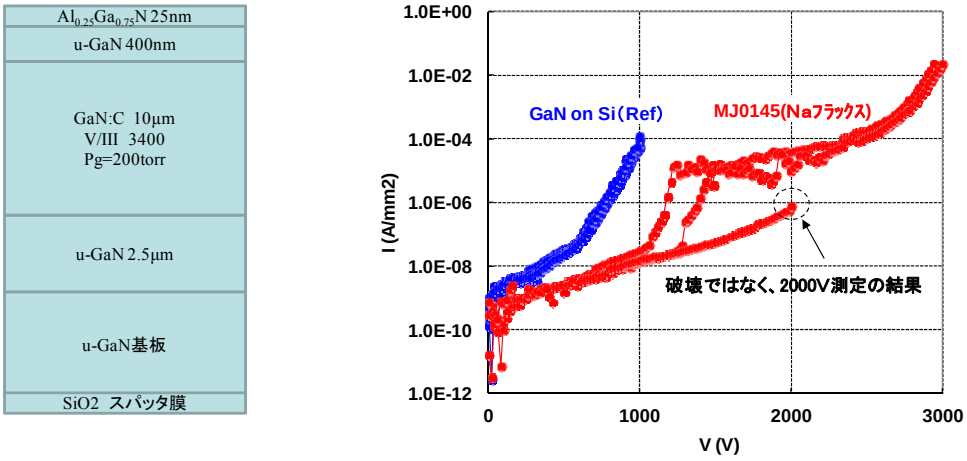


図３－６６．試作デバイスのエピ構造と縦方向耐圧

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合展)にて展示および実機デモを行った。

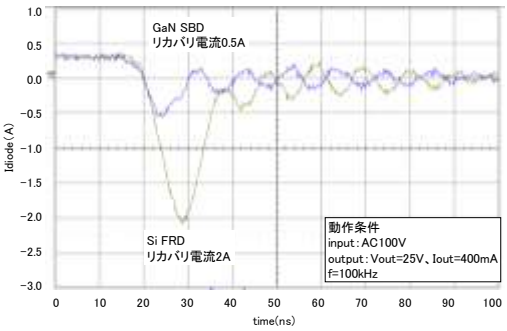


図３－６７．　試作 SBD のリカバリ特性

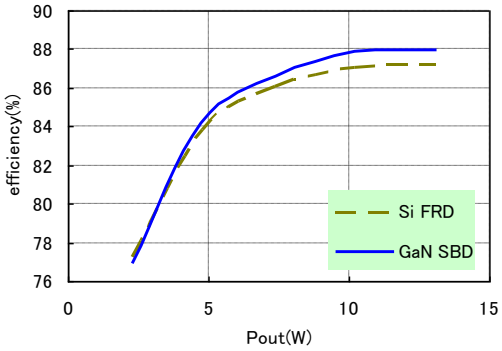
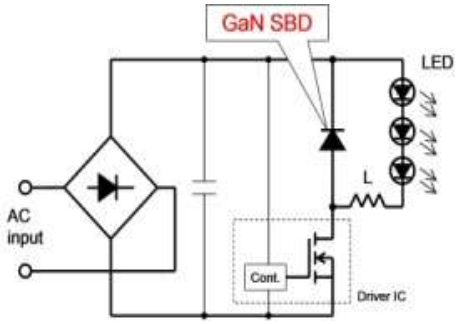
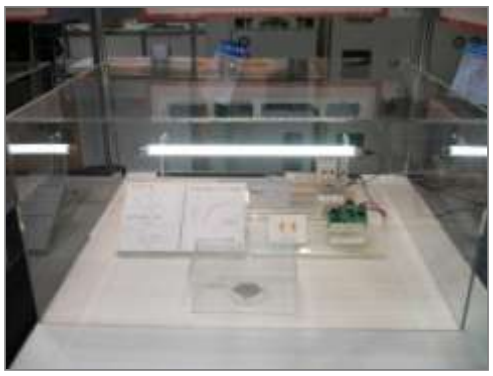


図３－６８．LED ドライバの電力変換効率の比較





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。

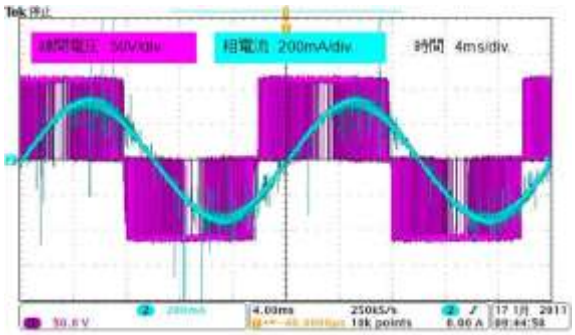


図３－７０．　GaN 基板上 FET を利用したインバータ回路による三相誘導モータ駆動デモ
とインバータ動作時の出力波形

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３－７１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１１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。

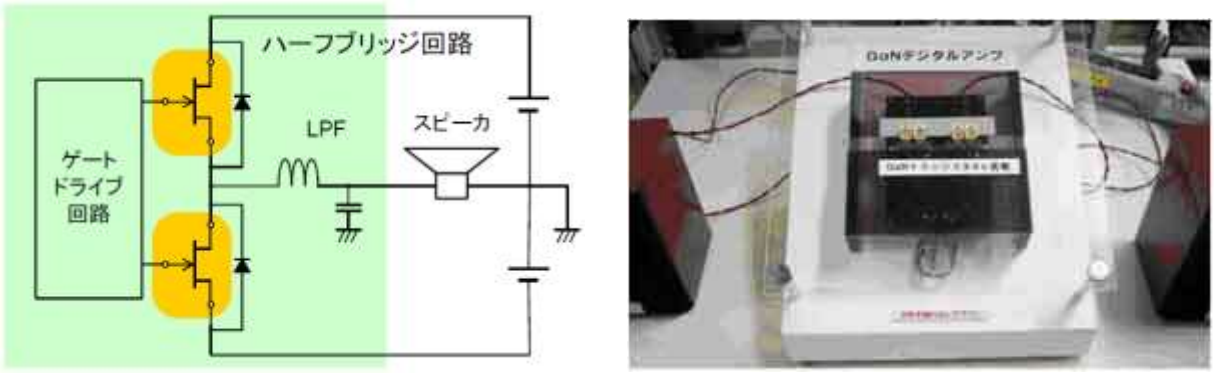


図３－７１．GaN 基板上 FET を利用したデジタルアンプ

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３－７２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３－７３にインバータ動作時の出力波形を、図３－７４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１２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。

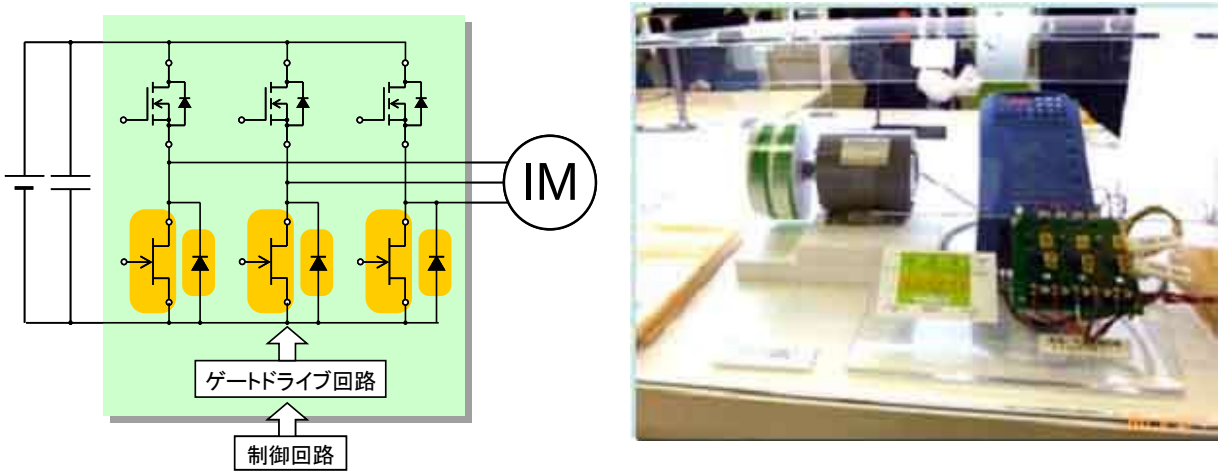


図３－７２．　GaN 基板上 FET、及び SBD を利用したインバータ回路と交流モータ駆動デモ

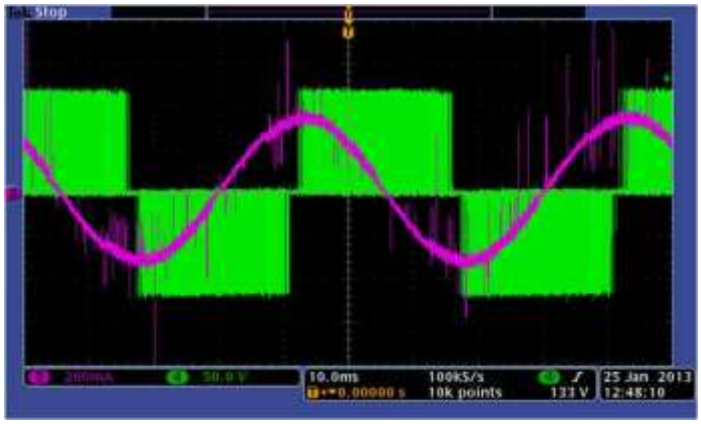


図３－７３．インバータ動作時の出力波形

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、及び他種種基板上に作製した FET の信頼性試験（高温逆バイアス試験 600V、150℃）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 ｳｴﾊ、②：HVPE-GaN（Mgﾄﾞｰﾌﾟ）、及び③：Na ﾌﾗｯｸｽ基板（Mgﾄﾞｰﾌﾟ）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。沿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ﾄﾞｰﾌﾟ）は 2/5 合格、③：Na ﾌﾗｯｸｽ GaN（Mgﾄﾞｰﾌﾟ）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上に作製した 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	－	AlGaN/GaN（6μm）/Si 基板
②	HVPE-GaN	101115b	AlGaN/GaN（8μm）/Mgﾄﾞｰﾌﾟ GaN（2μm）/HVPE GaN 基板
③	Na ﾌﾗｯｸｽ	101118b	AlGaN/GaN（8μm）/Mgﾄﾞｰﾌﾟ GaN（2μm）/Na ﾌﾗｯｸｽ GaN 基板

①　Ref GaN on Si ＞ ②：HVPE-GaN（Mgﾄﾞｰﾌﾟ）＞ ③：Na ﾌﾗｯｸｽ GaN（Mgﾄﾞｰﾌﾟ）

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 ウエ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 AlGaN 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８μｍ以上とすることで、電圧 1200V での縦リーク電流を１μＡ以下にできることがわかった。

図３－７５　評価デバイス

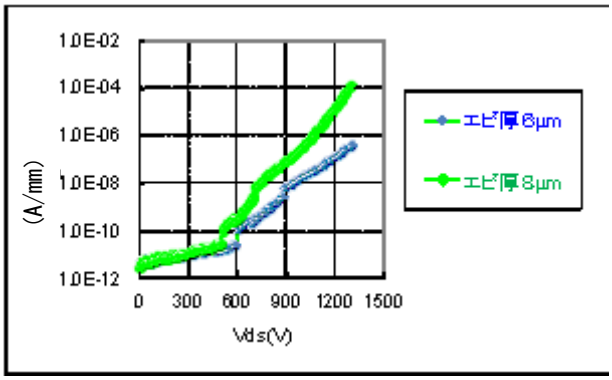


図３－７６　エピタキシャル膜厚と縦リークの関係

図３－７７にゲート・ドレイン間距離 Lgd 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８μｍ、FP 長は４μｍである。　Lgd が 12μｍ、18μｍ、24μｍ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、Lgd 18μｍ以上が必要であることがわかった。

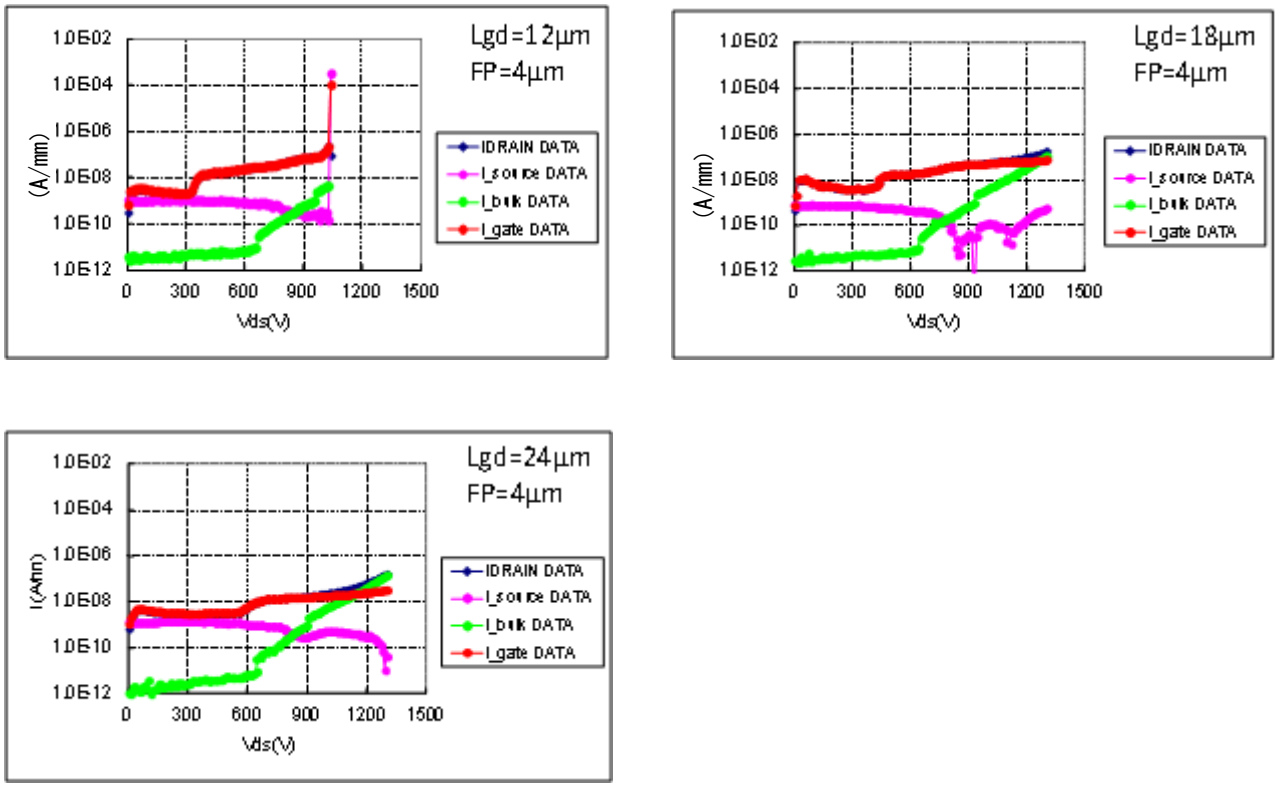


図３－７７　ゲート・ドレイン間距離 Lgd とリーク電流の関係

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。

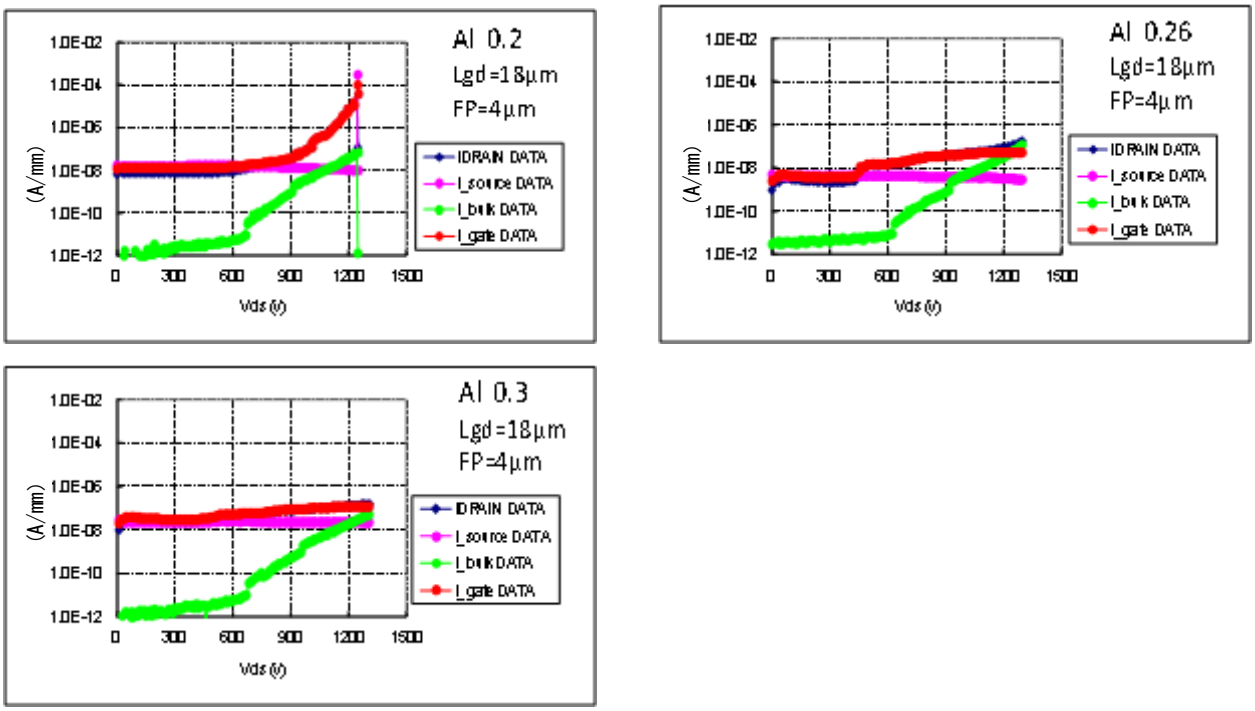
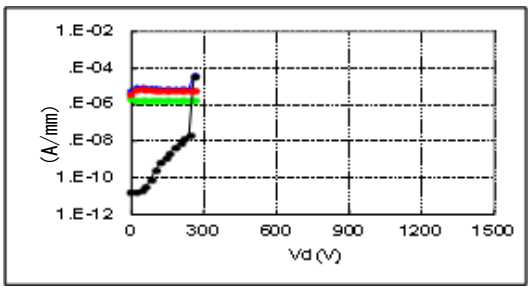


図３－７８　AlGaNのAl組成とリーク電流の関係

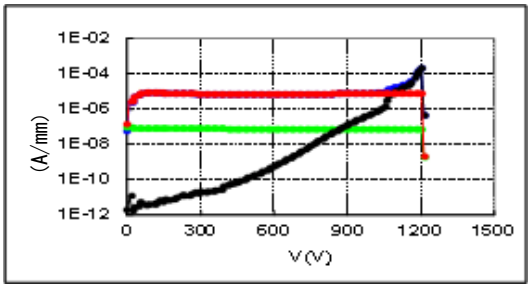
２）GaN基板、及び、各種基板上のデバイス試作

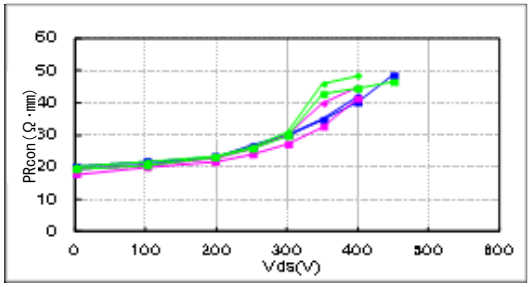
GaN基板、及び各種基板上のGaNデバイスの試作を行った。基板としてNaフラックスGaN基板、市販GaN基板（Ａ社製、Ｂ社製）、市販SiC基板（Ｂ社製）、及びGaN on Si基板（サンケン電気）を用いた。Naフッラクス GaN基板、及び市販HVPE-GaN基板（Ａ社製）は、名古屋大学にてエピタキシャル成長を行った。縦耐圧向上のため、Cドープ層を10μｍとした。Ｂ社のGaN基板、及びSiC基板は、Ｂ社にてエピタキシャル成長を行った。高抵抗GaN基板や半絶縁性SiC基板であるので、GaNエピタキシャル膜は1μｍと薄い。GaN on Siはエピタキシャル膜厚8μｍとした。図３－７９に各種基板のエピ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

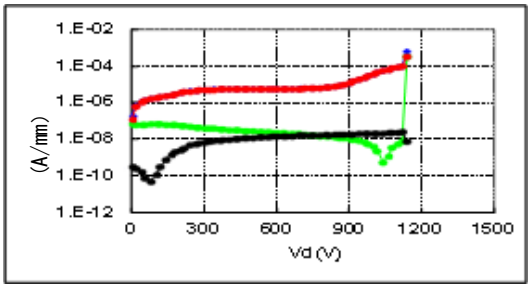


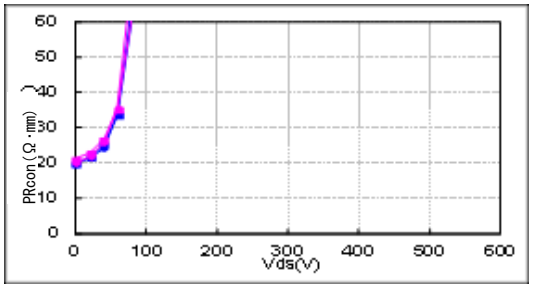
（１）FRC2-44 Na ﾌﾗｯｸｽ GaN（大阪大学）



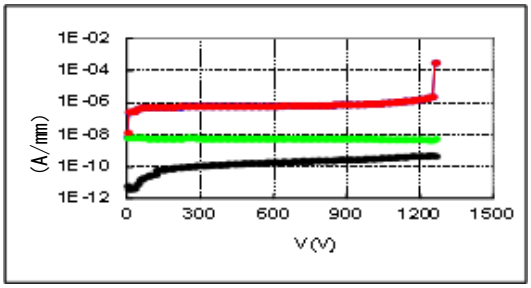


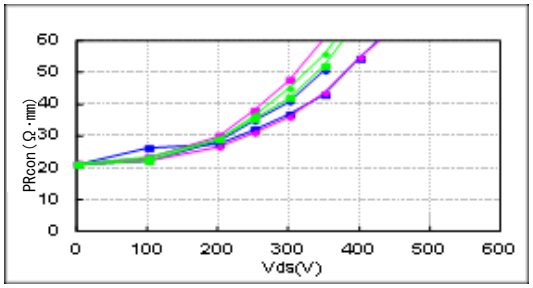
（２）110145N HVPE-GaN　（Ａ社製）



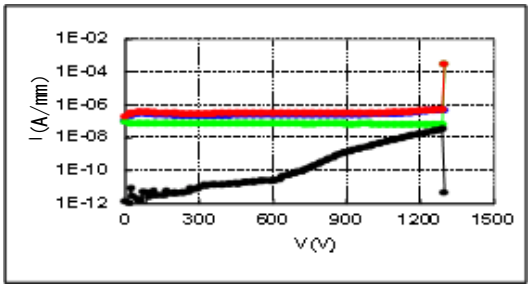


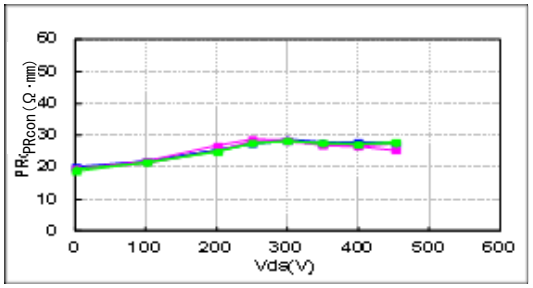
（３）MZZ30744-1 高抵抗 GaN　（Ｂ社製）





（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（Id、Is、Ig、Isub）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）MZZ 30744-1 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（名古屋大ｴﾋﾟ）	200V	測定不可
(2)	110145N	HVPE-GaN（A社）	C-dope GaN 10um（名古屋大ｴﾋﾟ）	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）	ｴﾋﾟ厚 8.5μm、cap有（ｻﾝｹﾝ社内ｴﾋﾟ）	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　AlGaN/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 AlGaN/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、AlGaN/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 ℃で 30 秒間の熱処理を窒素雰囲気中にて行う。次に、ホトレジスト・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 ・m）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 AlGaN/GaN HEMT の断面構造と平面 SEM 写真を図３－８１に示す。

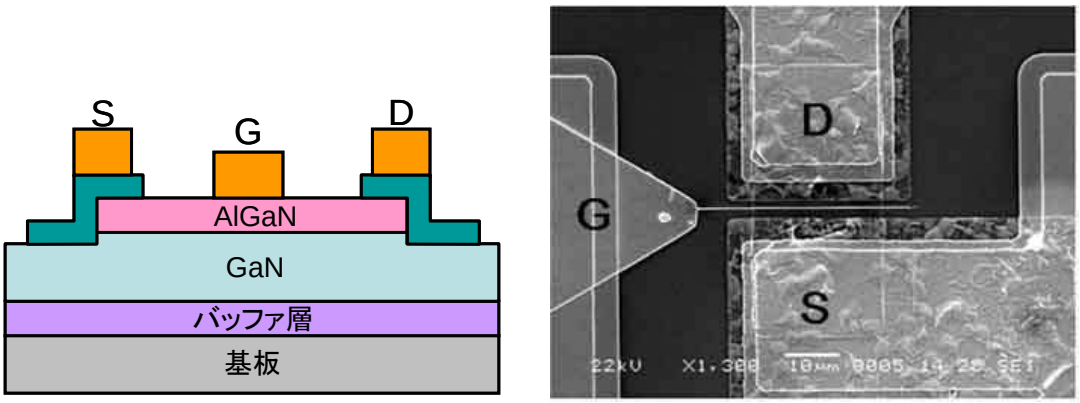


図３－８１　試作した AlGaN/GaN HEMT の断面構造と平面 SEM 写真

2-3-4-2　AlGaN/GaN ヘテロ接合界面の解析

AlGaN/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ことが不可欠である。本研究では、77 K から 1023 K（750 ℃）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、サファイア基板上に、MOCVD 法によりバッファ層、GaN チャネル層（厚さ 1μm）、$Al_{0.25}Ga_{0.75}N$ 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パラレル伝導によるものと推測している。いずれにしても、700 K（427 ℃）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。

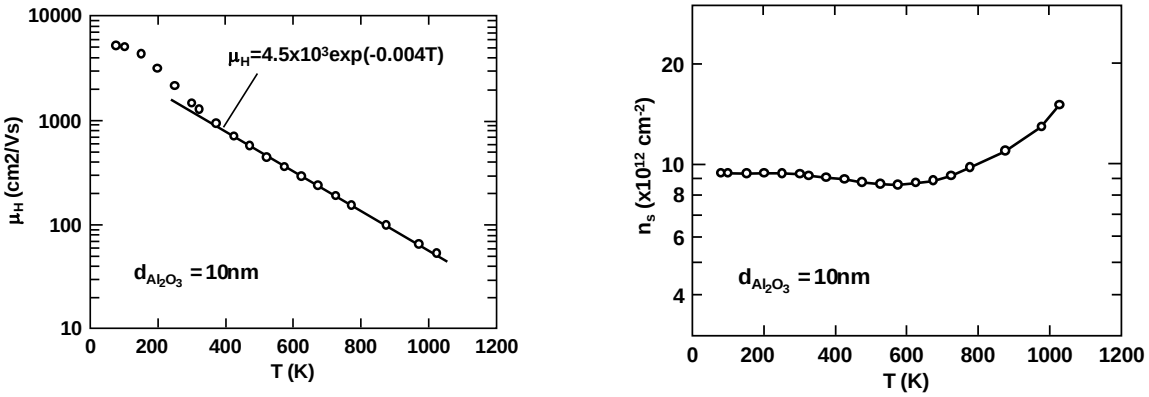


図３－８２　AlGaN/GaN ヘテロ構造における電子移動度とシート電子濃度の温度依存性

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、AlGaN/GaN ヘテロ接合に加え、n-GaN 層（厚さ 0.5 μm、キャリア濃度 5×10^{17} cm^{-3}）の結果も同時に示す。図に示すように、AlGaN/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 AlGaN/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、AlGaN/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、AlGaN/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。

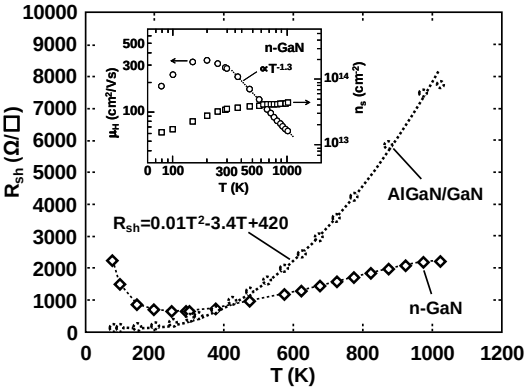


図３－８３　AlGaN/GaN および n-GaN におけるシート抵抗の温度依存性

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

GaN と InN の三元混晶である InGaN 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 InGaN 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/InGaN/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。

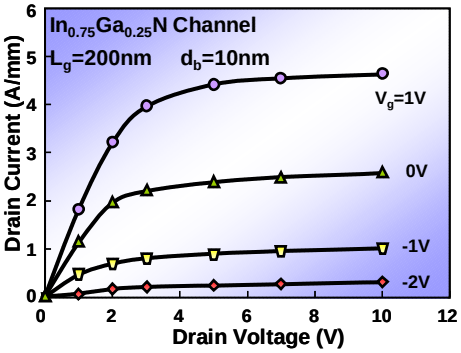


図３－８４　無極性 AlInN/InGaN HEMT のドレイン特性

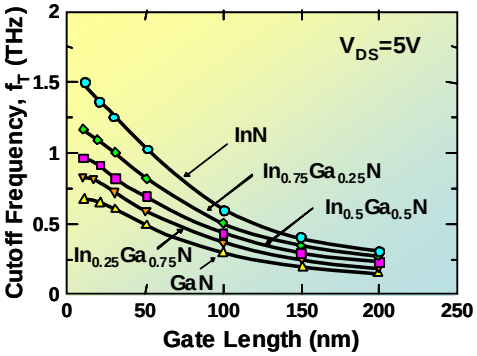


図３－８５　電流利得遮断周波数

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 を用い、AlGaN 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。

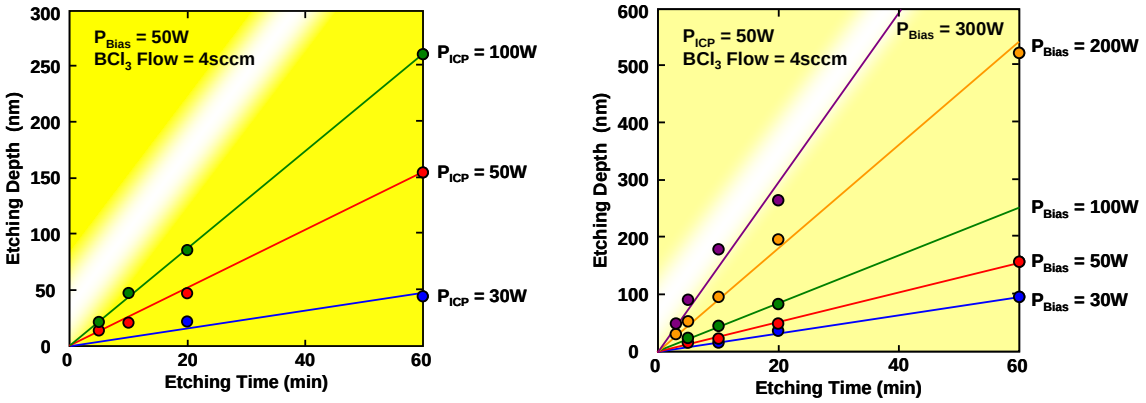


図３－８６　BCl_3ガスを用いた ICP エッチング深さのエッチング時間依存性。
ICP パワー依存性（左）とバイアスパワー依存性（右）

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、BCl_3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 2μm、ゲート幅 100μm の AlGaN/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。

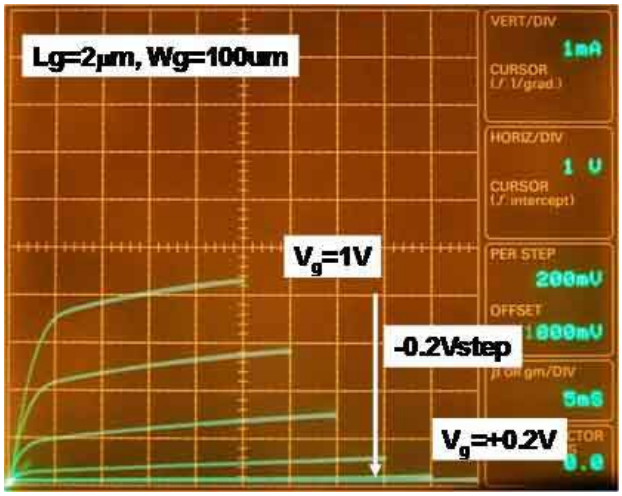


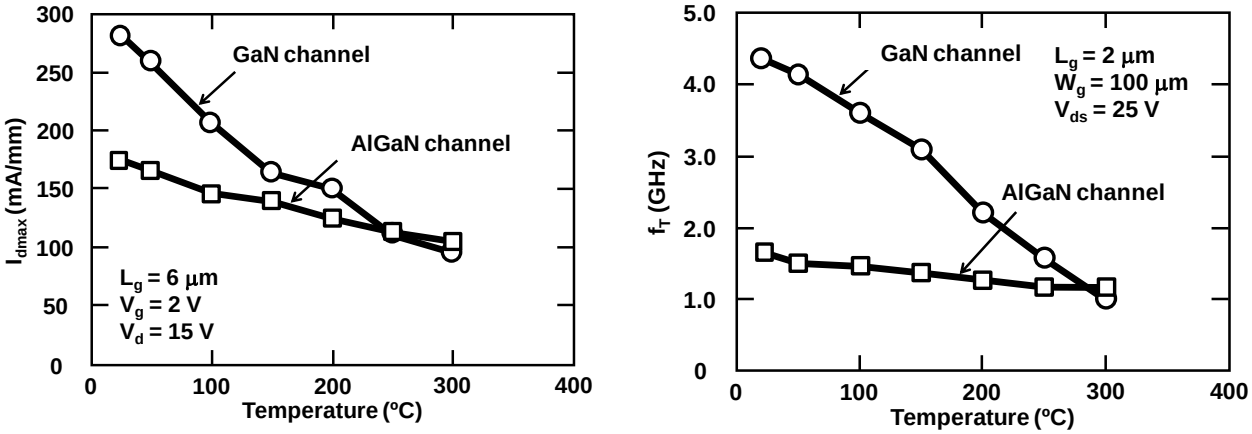
図３－８７　ICP ドライエッチングを用いて作製したリセス構造 HEMT のドレイン特性

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℃までの範囲で温度制御できるヒーターステージを準備し、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、AlGaN 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）を用い、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、AlGaN チャネル HEMT の方が、GaN チャネル 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、AlGaN チャネル 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 GaN チャ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。



(a) (b)

図３－８８　AlGaN/GaN HEMT、AlGaN/AlGaN 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 GaN 基板上に AlGaN/GaN HEMT 構造を試作した。AlGaN 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 3.5×10^{19} 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 cm^2/Vs, 2×10^{13} cm^{-2} であった。試作したゲート長 2 μm 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 $10^6/cm^2$		6” 欠陥 $10^5/cm^2$
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 （本ﾌﾟﾛｼﾞｪｸﾄ） ②委託研究終了 ③商品開発研究			研究開発 ▼			商品開発研究		
④ｻﾝﾌﾟﾙ供試開始 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 ﾄﾞｰﾋﾟﾝｸﾞ濃度均一性<±5%、④Mg ﾄﾞｰﾋﾟﾝｸﾞ濃度均一性<±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、多くの電気メーカ，デバイスメー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	ﾌﾟﾛｼﾞｪｸﾄ 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 ﾊﾟﾜｰﾃﾞﾊﾞ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エピ技術，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 AlGaN 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 AlGaN 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・多数枚でのエピ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 AlGaN 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 AlGaN 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・エピ成長 →				
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

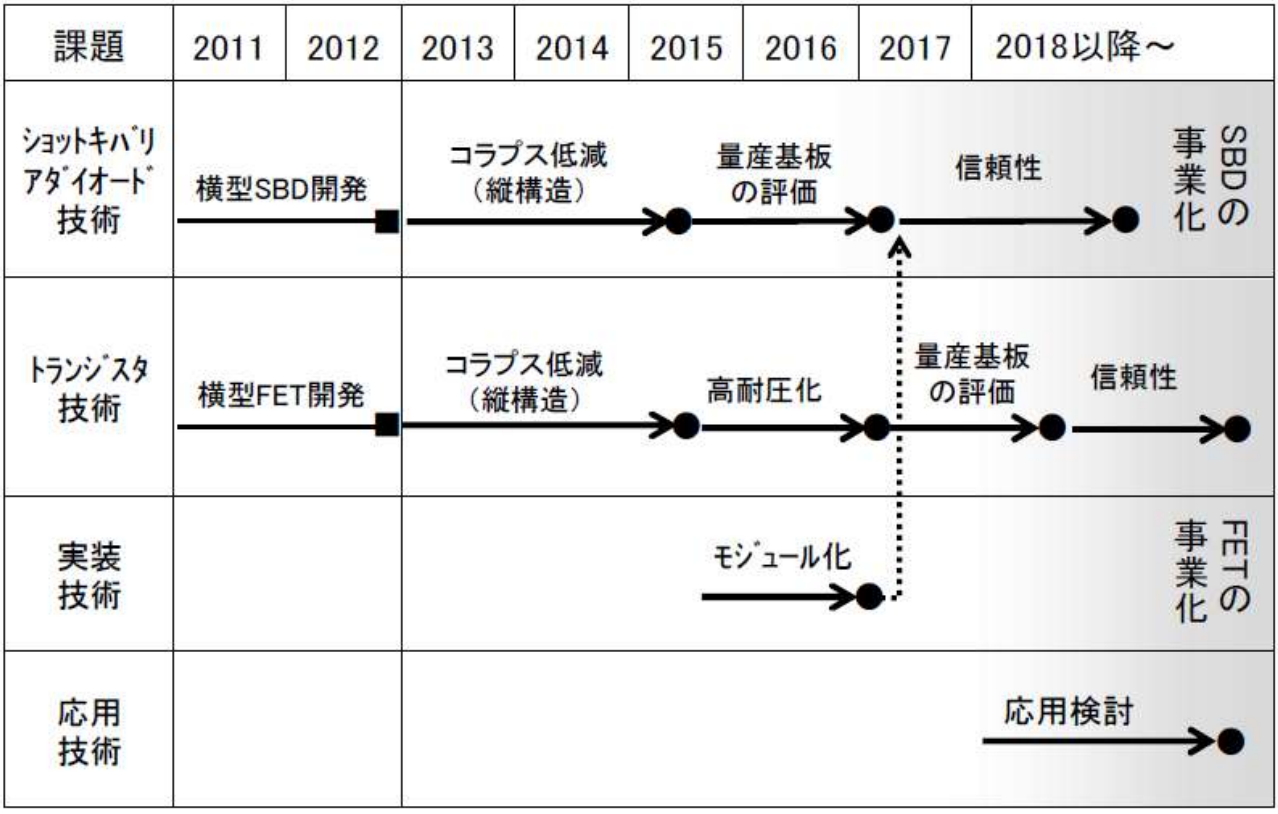
当社は、研究開発を業務とする会社であるため、本プロジェクトの成果を自社で事業化する立場には無いが、弊社と関連するグループ企業にて、ハイブリッド車用パワーデバイスとして実用化を目指す予定である。縦型デバイス構造は，プロセス技術開発が遅れているため、さらに開発時間を要し、平成32 年（2020 年）後の早い時期の実用化を目指す。また本プロジェクトで開発された基板は、高性能パワーデバイスの基板として、実用化した基板メーカから購入・活用し，開発に役立てる予定である。

	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 （2013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。



添付資料１

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 ２ ０ 年 ４ 月 １ 日

ＩＴ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、ＩＴ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、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。

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）

ＩＴ革新による競争力強化、ＩＴ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。

○「ＩＴ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ＩＴ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立する。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立する。

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。

【プロジェクト等の間の連携について】
　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。

平成 20･03･24 産局第１号
平 成 ２ ０ 年 ４ 月 １ 日

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、他国の追随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

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て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（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り組みが重要である。
・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。

平成２０・０３・２５産局第５号
平　成　２　０　年　４　月　１　日

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付けられている。

○ 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年度までに少なくても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（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

（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以細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板）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－Ｉ．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。

添付資料２

プロジェクト基本計画

P09024
P07030

（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）大口径基板上の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

（別紙）　研究開発計画

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型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　ｌ

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　1,000ｃｄ/m^2 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 100ｃm^2以上で発光効率　130　ｌｍ／W以上、平均演色評価数　80 以上、輝度　1,000ｃｄ/m^2 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 25ｃm^2以上で発光効率 50　ｌｍ／W以上、平均演色評価数　80 以上、輝度　1,000ｃｄ/m^2 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 100ｃm^2以上で発光効率　130　ｌｍ／W以上、平均演色評価数　80 以上、輝度　1,000ｃｄ/m^2 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、白熱電球や蛍光ランプ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ランプや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ランプとは発光形態が大きく異なるため、白熱電球や蛍光ランプ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、本照明が生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。

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

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インチ級の究極的高品質有極性バルク単結晶、及び無極性バルク単結晶を育成する技術を開発し、Ｓｉデバイスと同等、或いはそれ以上の安定性を有する高出力デバイスの実用化に資する。

（２）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-Ａｌ Ｎ-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＜1.5ｍΩ・ｃｍ2、耐圧＞2KV 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チャネルを用いた FET 構造のみである。その応用は 2-5ＧＨｚの携帯電話基地局用の 200-400W 増幅器と 30ＧＨｚ帯の小型 20W 級増幅器に限定されている。窒化物系半導体が元来有する物性を考慮すると、今後はＡｌＮ-ＧａＮ-ＩｎＮ系材料を広範囲に自由に組み合わせたヘテロ接合トランジスタの実現が望まれ、その応用は高周波高出力ばかりでなく、高温動作デバイス、高耐圧デバイス、超高速デバイスなど、広い応用範囲が実現可能である。

例えば 2-5ＧＨｚでは１ｋＷ以上の増幅器が実現可能となり、基地局ばかりでなく、固体デバイスを用いた超小型マイクロ波加熱（電子レンジ、半導体プロセス装置）、マイクロ波送電などに応用可能である。

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

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

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

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μm厚結晶自立基板を作製する。V/Ⅲ比、成長温度などの成長条件の最適化、横方向成長等の結晶欠陥低減手法の導入、また成長の阻害となる不純物の低減など、表面性や結晶欠陥制御を検討して２～４インチ種結晶の実現を図る。

(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ＡｌＧａＮ/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。

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＜5×10^{3}ｃｍ$^{-2}$、無極性単結晶基板では転位密度＜10^{5}ｃｍ$^{-2}$、積層欠陥密度＜10^{3}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}Ω・ｃｍ、高抵抗基板では比抵抗＞10^{6}Ω・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≧ｘ≧0.5で

転位密度＜10^{6}ｃｍ$^{-2}$

ドーピング不純物濃度　Ｎ型＞10^{18}ｃｍ$^{-3}$　Ｐ型＞10^{17}ｃｍ$^{-3}$

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

また、ＧａＮエピ成長層において

残留ドナー濃度＜10^{15}/ｃｍ^{3}

転位密度：有極性基板上で＜5×10^{3}ｃｍ$^{-2}$、無極性基板上で＜10^{5}ｃｍ$^{-2}$

口径４インチ基板状にて、面内均一度：厚み±５％、ドーピング不純物濃度±１０％、

ドーピング精度±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＞2,500ｃｍ^{2}/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、ＧａＮ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ＧａＮが有利または不利な点を明らかにする。

添付資料３

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	（１） 概要 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。 （２）事業規模：総事業費　　３０億円 （３）事業期間：平成１９年度～２３年度（５年間）

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$<10^5 cm^{-2}$、無極性基板$<10^6 cm^{-2}$

(3)　抵抗率：導電性基板$<10^{-1}\Omega cm$、高抵抗基板$>10^5\Omega cm$

(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＜$5x10^3cm^{-2}$、無極性基板＜10^5cm^{-2}

(3)　積層欠陥密度：＜10^3cm^{-1}

(4)　抵抗率：導電性基板＜$10^{-2}\Omega cm$、高抵抗基板＞$10^6\Omega cm$

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)　$AlxGa_{1-x}N$及び$InxGa_{1-x}N$混晶

（ｉ）　組成：0.5≧ｘ≧0.2

（ii）　転位密度：＜10^8cm^{-2}

（iii）　ドーピング不純物濃度：ｎ型＞$10^{18}cm^{-3}$、ｐ型＞$10^{17}cm^{-3}$

（iv）　面内均一度：厚さ±５%、組成±５%、ドーピング不純物濃度：±１０%

(2)　ＧａＮホモエピ層

（ｉ）　残留ドナー濃度：＜$5x10^{15}cm^{-3}$

（ii）　転位密度：有極性基板＜10^5cm^{-2}、無極性基板＜10^6cm^{-2}

（iii）　面内均一度：厚さ±５%、ドーピング不純物濃度±１０%

（iv）　ドーピング精度：±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)　$AlxGa_{1-x}N$及び$InxGa_{1-x}N$混晶

（ｉ）　組成：1≧ｘ≧0.5

（ii）　転位密度：＜10^6cm^{-2}

（iii）　ドーピング不純物濃度：ｎ型＞$10^{18}cm^{-3}$、ｐ型＞$10^{17}cm^{-3}$

（iv）　面内均一度：厚さ±５%、組成±５%、ドーピング不純物濃度：±１０%

(2)　ＧａＮホモエピ層

（ｉ）　残留ドナー濃度：＜$5x10^{15}cm^{-3}$

（ii）　転位密度：有極性基板＜$5x10^3cm^{-2}$、無極性基板＜10^5cm^{-2}

（iii）　面内均一度：厚さ±５%、ドーピング不純物濃度±１０%

（iv）　ドーピング精度：±２０%

（ｖ）　２次元電子ガス移動度：＞2,500cm^2/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ＡｌＧａＮエ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ＩｎＧａＮエ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量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ＧａＮ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

２．分科会における説明資料

次ページより、プロジェクト推進・実施者が、分科会においてプロジェクトを説明する際に使用した資料を示す。

公開

「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」（事後評価）

（2007年度～2012年度　6年間）

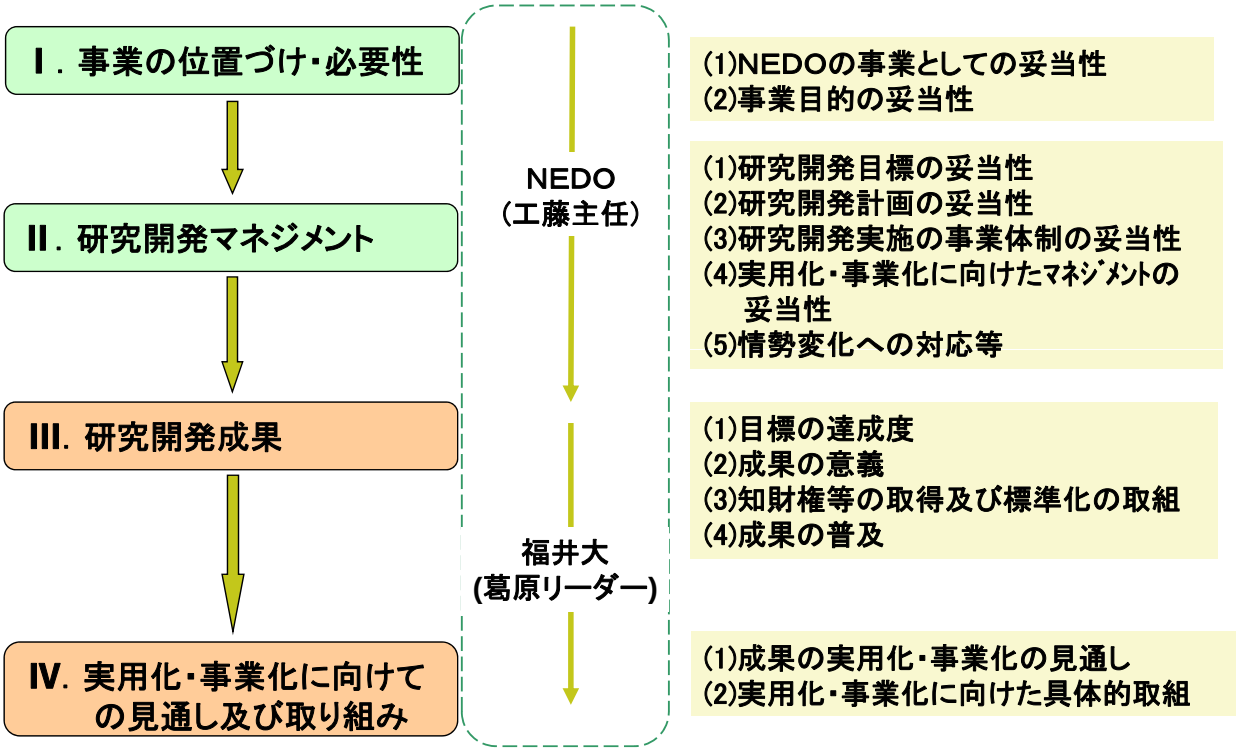
プロジェクトの概要（公開）

Ⅰ．事業の位置付け・必要性について
Ⅱ．研究開発マネジメントについて

2013年 6月24日

公開

発表内容



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CO_2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

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(政策上の位置づけ)

「第三期科学技術基本計画」や「新・国家エネルギー戦略」等の政策目標を実現する「イノベーションプログラム」のうち、「ITイノベーション」、「ナノテク・部材イノベーション」、「エネルギーイノベーション」プログラムとして実施。

＜イノベーションプログラムの分野ごとの重点事項＞

重点方針3本柱

- 低炭素社会実現・資源制約克服
- 安全・安心社会の構築
- 経済社会の改革推進

低炭素 / 経済社会改革

【ITイノベーションIPG】 21年度要求額:318億円 (一般159億円、特会159億円)
急増するネットワーク通信量・情報処理量・消費電力量を背景に、抜本的な省エネを推進するプロジェクトや、従来の半導体技術に異分野の機械技術等を融合して、新たな付加価値を生み出すプロジェクトに重点化。
ドリームチップ開発プロジェクト　一般　13億円　(12億円)
グリーンITプロジェクト　特会　68億円(30億円)

低炭素 / 経済社会改革

【ナノテク・部材IPG】 21年度要求額:220億円(一般128億円、特会92億円)
環境／資源／エネルギー面の制約を克服し、様々な分野における競争力の優位性を定着させるためのプロジェクトや、異分野・異業種融合による新しい産業の創出を目指すプロジェクトに重点化。
希少金属代替材料開発プロジェクト　一般　16億円(10億円)
異分野異業種ナノテクチャレンジ　一般　36億円(36億円)

安全・安心

【ロボット・新機械IPG】 21年度要求額:56億円(一般)
生活支援ロボット等の次世代ロボットの実用化に向けたプロジェクトに重点化。
生活支援ロボット実用化プロジェクト　一般　20億円(新規)
次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト　一般　15億円(15億円)

低炭素

【エネルギーIPG】 21年度要求額:1,668億円(特会)
Cool Earth 50の実現に向けた革新的技術の推進につながるプロジェクトに重点化。
Cool Earth 50の実現に向けた革新的技術開発　特別会計　1,047億円(629億円)
グリーンサスティナブルケミカルプロセス基盤技術開発　特会　15億円(新規)
革新型蓄電池先端科学基礎研究事業　特会　30億円(新規)

低炭素

【環境安心IPG】 21年度要求額:230億円(一般66億円、特会163億円)
エコイノベーション、特に資源制約の克服や環境調和型産業の創造につながるプロジェクトに重点化。
バイオマスエネルギー等高効率転換技術開発　特会38億円(28億円)
省水型・環境調和型水循環プロジェクト　一般　18億円(新規)
特会　7億円(新規)

事業原簿(公開版) Ⅰ-2

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(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

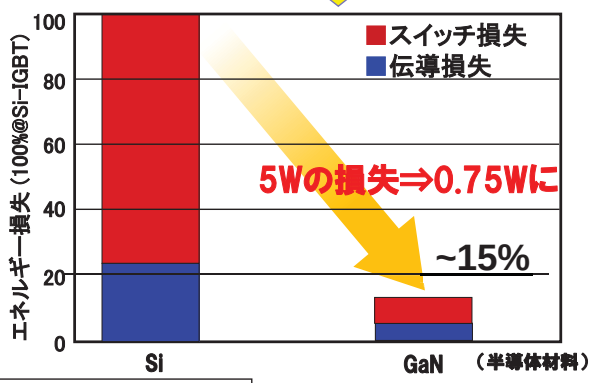
事業原簿(公開版) I -2

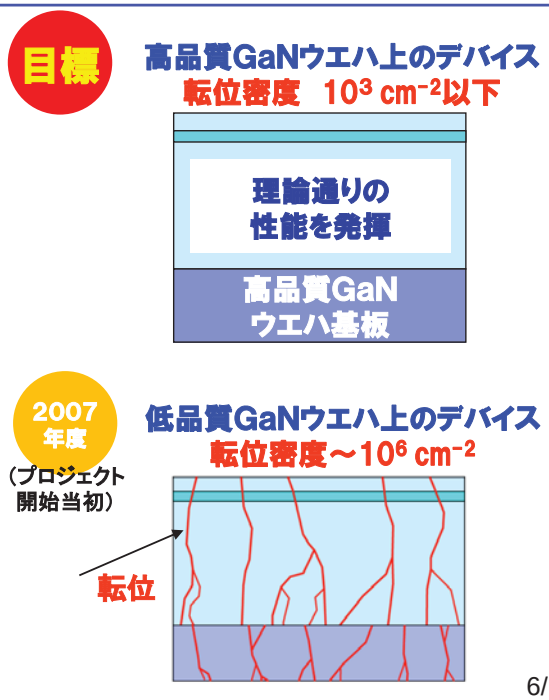
公開

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)

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	ﾊﾞﾝﾄﾞｷﾞｬｯﾌﾟ(eV)	比誘電率	電子移動度(cm²/Vs)	破壊電界(10⁶V/cm)	飽和速度(10⁷cm/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





事業原簿(公開版) I -5

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

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：インバータの事例

●市場創出効果(汎用インバータ)

2020年：GaNインバータ

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）*)

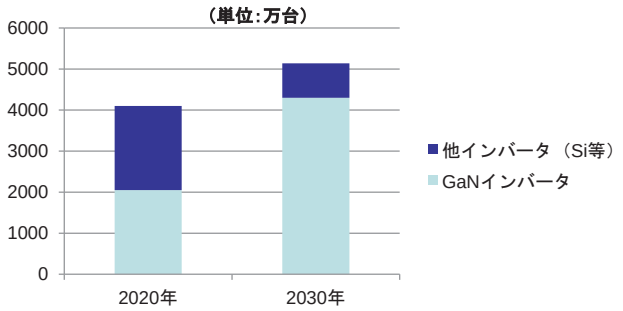
2020年：電力削減　49億kWh/年

（原発約1基分）

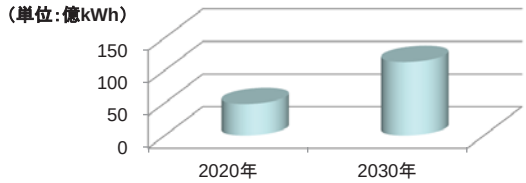
CO_2排出削減換算　270万トン/年

原油換算　103万キロリットル/年

GaNインバータの普及台数



GaNインバータの省エネルギー効果



*)　Siインバータ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

公開

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)

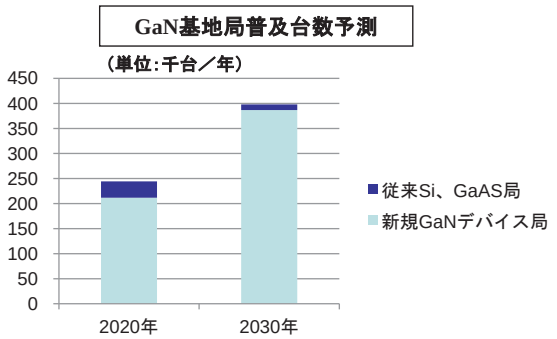
期待される市場創出効果・省エネ効果:携帯基地局向け高周波デバイスの事例

●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



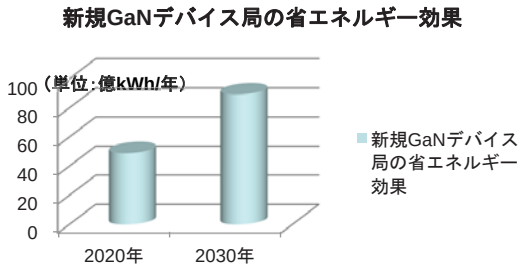
●省エネルギー効果(消費電力量)*)

2020年:電力削減　50億kWh/年

(原発約1基分)

CO_2排出削減換算　272万トン/年

原油換算　104万キロリットル/年



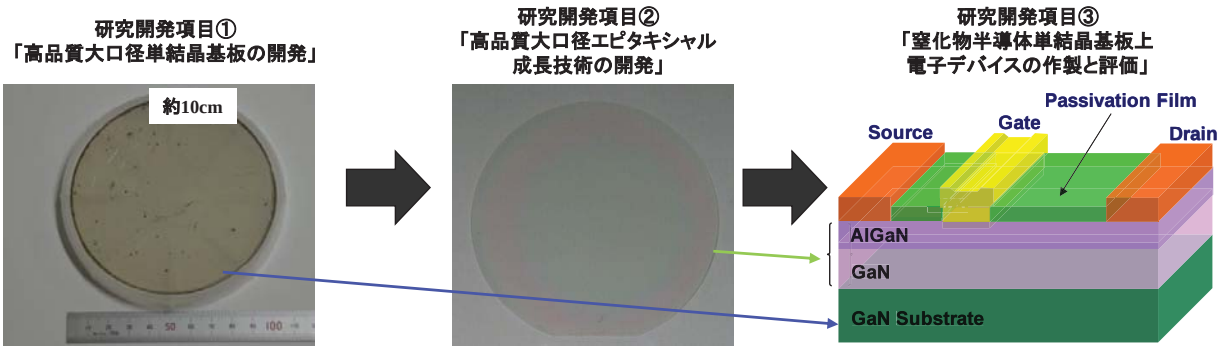
＊) GaAs、Si基地局置換普及による省エネ効果
(出典:(社)日本機械工業連合会[日機連18 先端-9]報告書、富士キメラ総研「「2010ワイヤレスBBアプリケーション市場調査総覧」、東京電力 「平成21年度福島原発1号機データ」)

事業原簿(公開版)Ⅰ-4

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。
- 超高効率省エネデバイスは実現にはGaN基板の実用化が重要であるため、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。
- 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(後述する1年間の期間延長において実施)。



事業原簿(公開版)Ⅱ-3

公開

2. 研究開発マネジメントについて
(2)研究開発計画の妥当性（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撹拌条件の検討、装置開発 （２６４百万円）	（１９４百万円）	大型装置による溶液撹拌条件の最適化（2インチ） （２６１百万円）	大型装置による溶液撹拌条件の最適化（3インチ）、低転移化 （１２０百万円）	大型装置による溶液撹拌条件の最適化（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ピ技術の開発	MOVPE装置のガス流制御等による高品質エピ成膜技術の開発 （２８５百万円）	超高速バルブ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 装置による大口径エピ技術の開発（AlGaN、InGaNエピの組成・膜圧均一性向上、及び大口径基板への対応等） （２４３百万円）	（７４百万円）	（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）	（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）	（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）

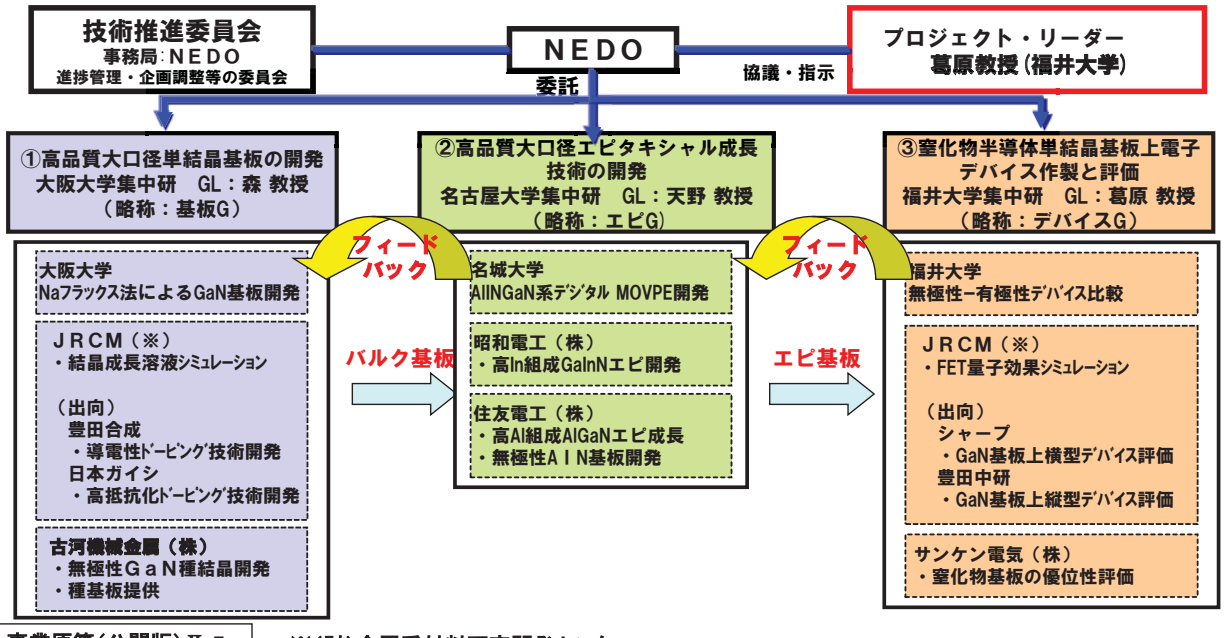
事業原簿（公開版）Ⅱ-6

公開

2. 研究開発マネジメントについて
(3)研究開発実施の事業体制の妥当性（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



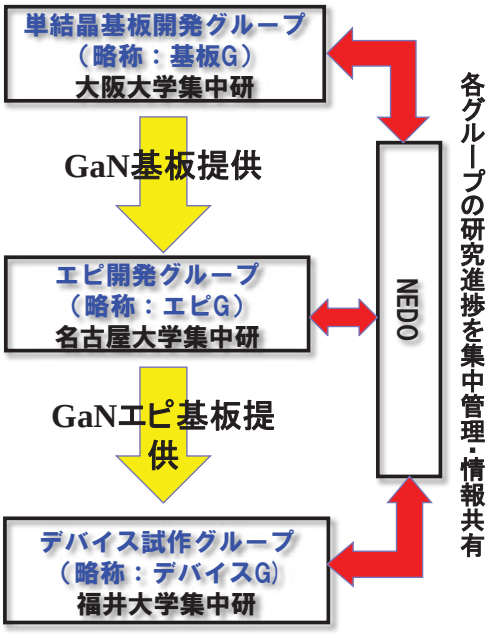
事業原簿（公開版）Ⅱ-7

※（財）金属系材料研究開発センター

公開

2. 研究開発マネジメントについて
(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



【課題】研究加速・グループ間連携強化のため
基板G→エピG→デバイスGへの基板供給が必須！

【対策】結晶生成～デバイス試作の一環した工程管理を
基板単位でNEDOが実施！

- ●グループ共通の各GaN基板の通番管理制を導入
- ●研究進捗・遅延状況を収集してグループメンバで情報共有
- ●エピG・デバイスGへの基板のリリース日をコントロール
- ●クリティカルな遅延はタイムリーにリーダ会議招集・対策実行

【成果】研究開発を加速化(当初目標(2011年度目標)を達成)

- ●効率的なグループ間フィードバックを実現！
  (例：ｴﾋﾟG･ﾃﾞﾊﾞｲｽG → 基板Gへピット削減の重要性をフィードバックして基板Gでの研磨プロセスの見直しを実施)
- ●基板G～デバイスGのターンアラウンドと生産量を大幅改善！
  ー従来ターンアラウンド：：5ヶ月以上～ → 2ヶ月に短縮！
  ー年間基板供給量：：1．5倍に拡大！(22年度比の23年度実績)

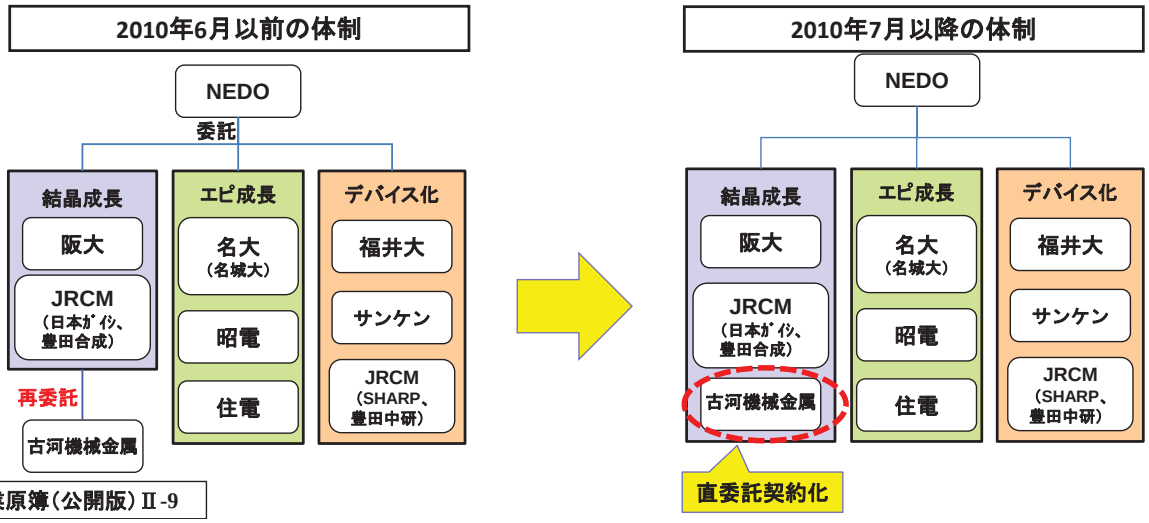
事業原簿(公開版)Ⅱ-8

公開

2. 研究開発マネジメントについて
(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基板の研究開発を加速するため、開発体制を強化

- ●大口径のGaN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<u>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</u>。



事業原簿(公開版)Ⅱ-9

公開

2. 研究開発マネジメントについて
(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転を促進。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。

公開

2. 研究開発マネジメントについて
(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

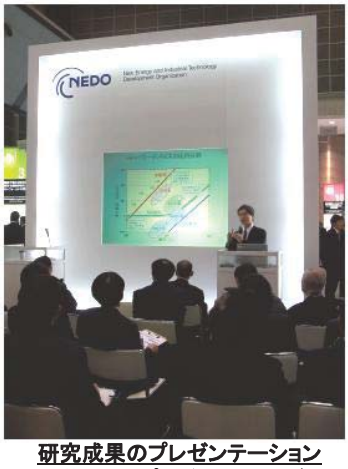
CEATEC（2011～2012年の2回）、nanotech（2008～2013年の6回）のNEDOブース等にて、GaN結晶・エピ・デバイスの研究開発成果について、展示やプレゼンテーションを実施

→ 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



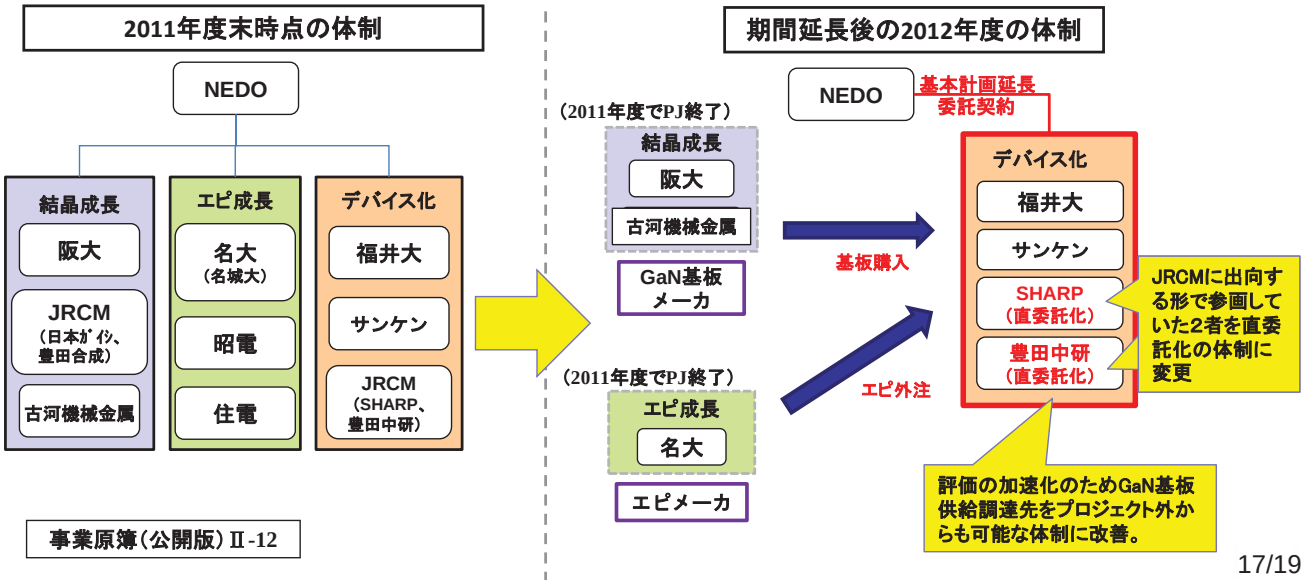
研究成果のプレゼンテーション
を実施（葛原プロジェクトリーダー）

2. 研究開発マネジメントについて
(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）

公開

●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ﾃﾞﾊﾞ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



事業原簿（公開版）Ⅱ-12

2. 研究開発マネジメントについて
(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）

公開

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	主席研究員

◆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-13

公開

2. 研究開発マネジメントについて
(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
・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。	・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。**
・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良い。	・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。**
・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。	・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。

事業原簿（公開版）Ⅱ-15

公開

「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」

（事後評価）

（2007年度～2012年度　6年間）
プロジェクトの概要　（公開）

III. 研究開発成果について
IV. 実用化・事業化の見通し及び取り組みについて

2013年 6月24日

プロジェクトリーダー　福井大学　　葛原　正明

- 高品質大口径単結晶基板Gリーダー　大阪大学　森　勇介
- 高品質大口径エピタキシャル成長技術Gリーダー　名古屋大学　天野　浩
- 電子デバイス作製と評価Gリーダー　福井大学　葛原　正明

公開

3. 研究開発成果について
（1）最終目標と達成状況

GaN結晶成長、およびGaN基板上のエピタキシャル成長技術やデバイス技術で多くの成果を創出。最終的にはバッファ耐圧改善により、GaNデバイスで耐圧1200V、オン抵抗2～3 mΩcm^{2}を実証。

次世代省エネルギーデバイスの実用化を促進

主要な成果

＜GaN結晶成長＞
開始当初2インチ結晶だったものが、4インチまで作れるようになり、欠陥も減少。

＜エピタキシャル成長技術＞
GaN基板上に組成・膜厚の均一性が高く、バッファ耐圧の高いエピ成長が可能となった。

＜デバイス開発＞
GaN基板上エピ上デバイス（縦型，横型）において低リーク・高耐圧特性を実証した。

3. 研究開発成果について
(1) 最終目標と達成状況

公開

開始当初2インチ結晶だったのが、4インチまで作れるようになり、欠陥も低減。

(1)-1. 高品質大口径単結晶基板の開発の最終目標と達成状況

最終目標	成果	達成度
・有極性面(4"φ)転位密度<5×10^3cm^{-2} ・無極性面(>3"φ)転位密度<10^5cm^{-2} ・LPE成長に適したHVPE法の下地GaN基板の開発	・大口径(4"φ)有極性GaN基板を実現。・ 転位密度<5×10^3cm^{-2} ・高品質 無極性GaN基板(6mm□)を実現。・ 転位密度<10^3cm^{-2} ・HVPE法による有極性GaN基板(4"φ)、無極性GaN基板(2"φ)を開発、下地基板として供給。	○
・伝導度制御技術の開発 ・導電性基板 比抵抗ρ<10^{-2}Ω・cm ・高抵抗基板 比抵抗ρ >10^6 Ω・cm	・Geﾄﾞｰﾋﾟﾝｸﾞ制御技術を開発し、導電性GaN結晶(2"φ)を実現(ρ<10^{-2}Ω・cm)。 ・Znﾄﾞｰﾋﾟﾝｸﾞ制御技術を開発し、高抵抗GaN結晶(2"φ)を実現(ρ～10^8Ω・cm)。 ・導電性基板、高抵抗基板をｴﾋﾟ/ﾃﾞﾊﾞｲｽGへ提供。	○

3. 研究開発成果について
(1) 最終目標と達成状況

公開

GaN基板上に組成・膜厚の均一性が高く、バッファ耐圧の高いエピ成長が可能となった。

(1)-2. 大口径基板上の高品質エピタキシャル結晶成長技術の開発の最終目標と達成状況

最終目標	成果	達成度
・デジタルMOVPE装置の開発 ・高品質GaNエピタキシャル成長技術 残留ドナー濃度<10^{15}cm^{-3} ・ 厚み<±5% 転位密度 ： 有極性<5x10^3cm^{-2}、無極性<10^5cm^{-2} ドーピング不純物濃度±10% ・ ドーピング精度±20% ・結晶成長その場観察評価技術の開発	・超高速ﾊﾞﾙﾌﾞｽｲｯﾁﾝｸﾞ-加圧ﾃﾞｼﾞﾀﾙMOVPE装置を開発 （高温成長対応、4インチ可）。 ・高品質GaNエピタキシャル成長技術を確立。 残留ドナー濃度＝1～2x10^{12}cm^{-3} ・ 厚み<±5% 転位密度 ： 有極性<5x10^3cm^{-2}、無極性<10^5cm^{-2} 【Si】、【Mg】 ： ドーピング不純物濃度<±5% ・ ドーピング精度<±10% ・高精度二次元ウェハ形状その場観察装置を開発。	○
・高In組成のInGaNエピタキシャル成長技術 In組成 1≧x≧0.5 ・ 転位密度<10^6cm^{-2} 厚み：±10% ・ 組成：±10% （@4"φ基板） N 型>10^{18}cm^{-3} ・ P 型>10^{17}cm^{-3} （高均一） ・ HEMT構造エピ成長と評価(μ＝2500cm^2/Vs)。	・高In組成のInGaNエピタキシャル成長技術 を確立。 In組成 1≧x≧0.5 ・ 転位密度<10^6cm^{-2} 厚み<±5% ・ 組成<±0.5% （@4"φ基板） 【Si】>10^{19}cm^{-3} ・【Mg】>10^{20}cm^{-3} （σ<±5% ） ・HEMT構造エピ：Ns=9.6×10^{12}cm^{-2}、μ＝2160cm^2/Vs。	△
・高Al組成のAlGaNエピタキシャル成長技術 Al組成 1≧x≧0.5 ・ 転位密度<10^6cm^{-2} 厚み：±10% ・ 組成：±10% （@4"φ基板） N 型>10^{18}cm^{-3} ・ P 型>10^{17}cm^{-3} （高均一） ・AlN基板の開発と有用性の確認。	・高Al組のAlGaNエピタキシャル成長技術 を確立。 Al組成 1≧x≧0.5 ・ 転位密度<10^6cm^{-2} 厚み：±3.7% ・ 組成： <±0.6% （@4"φ基板） 【Si】>10^{19}cm^{-3}(σ＝± 7.4%) ・【Mg】>10^{18}cm^{-3}(σ＝±12.6%) ・昇華法により低転位(5×10^4cm^{-2})AlN結晶を開発し、高Al組成エピを成長して有用性を確認。	○

3. 研究開発成果について
(1) 最終目標と達成状況

公開

GaN基板上エピ上デバイス(縦型，横型)において低リーク・高耐圧特性を実証した。

(1)-3. 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価の最終目標と達成状況

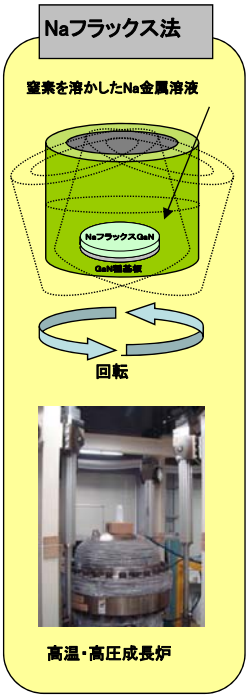
最終目標	成果	達成度
・横型電子デバイスの製作と評価	・2″φ有極性GaN基板上全面にAlGaN/GaNチャネルFETを試作し良好な動作を確認。 ・Cドープ緩衝層により、ドレイン横方向耐圧600V、縦方向耐圧1000V以上の可能性を確認。	○
・縦型電子デバイスの製作と評価	・縦型ダイオードを試作し、転位密度とリーク電流の関係を解析、1200V以上の耐圧確認。	
・窒化物単結晶基板上デバイスの比較評価	・GaN、SiC、Si基板を用いて試作を行い、耐圧1200V以上、オン抵抗3～4mΩcm^{2}の特性確認。	
・有極性及び無極性デバイス構造の比較	・無極性a面基板上にHEMTを試作し、a面基板上としては例のない優れた特性を確認。	
・基板/エピ技術開発チームへのフィードバック	・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。信頼性評価を実施。	

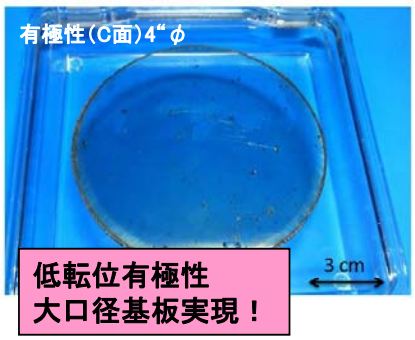
事業原簿(公開版)Ⅲ-6

3. 研究開発成果について
(2)成果の意義　～ ①大口径単結晶基板の開発(1) ～

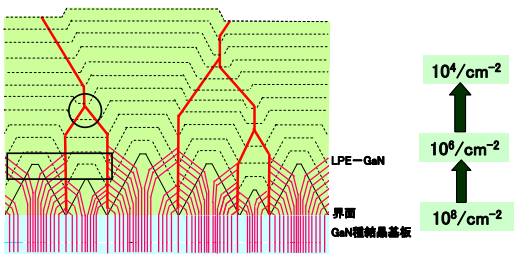
公開

■ Naフラックス法　有極性大口径基板の開発

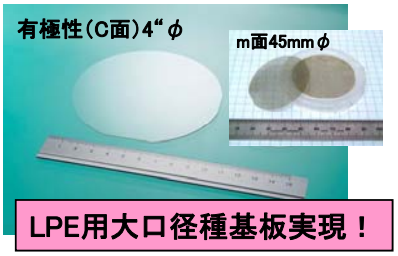




■ Naフラックス法の低転位化の機構

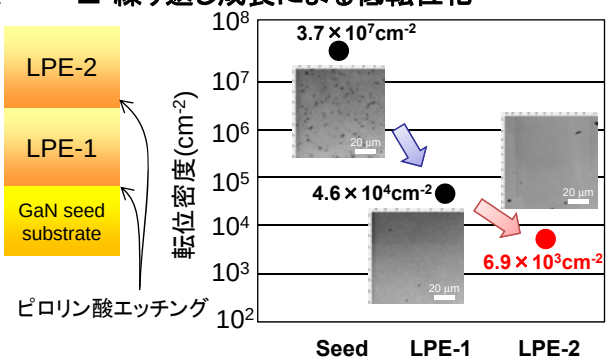


■ 大口径HVPE法種基板の開発



- X線ロッキングカーブ半値幅:40arcsec @(0002)反射、75arcsec @(10−12)反射
- 転位密度も2x10⁶cm⁻²(カソードルミネッセンス測定)
- 結晶曲率半径:＞5m以上

■ 繰り返し成長による低転位化



事業原簿(公開版)Ⅲ-2

3. 研究開発成果について
（2）成果の意義　～ ①大口径単結晶基板の開発（2） ～

公開

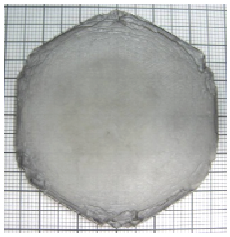
■ Naフラックス法　伝導性制御技術の開発

Geドーピング　→　高導電性(～10^{-3} Ω・cm)
Znドーピング　→　高抵抗化(～10^{8} Ω・cm)

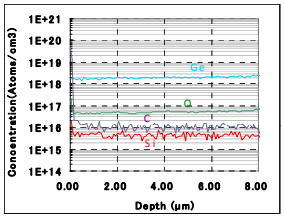
	キャリア濃度 (atoms/cm³)	抵抗率 (Ω・cm)	移動度 (cm²/Vs)
ノンドープ	~ 4 x 10^{16}	~ 0.2	930
Geドープ	~ 6 x 10^{17}	~ 10^{-2}	430
	~ 6 x 10^{18}	~ 10^{-3}	250
Znドープ	~ 10^{19}	~ 10^{8}	---

事業原簿（公開版）Ⅲ-33~38

■ 導電性基板（ 2”φ　Geドープ）



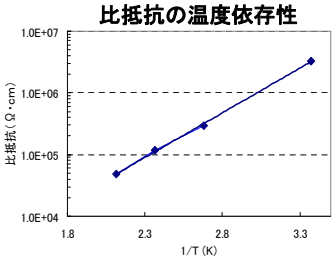
SIMSによる分析結果



導電性GaN基板実現　（室温で　0.01Ω・cm以下を達成）

■ 高抵抗基板（2”φ　Znドープ）

比抵抗の温度依存性

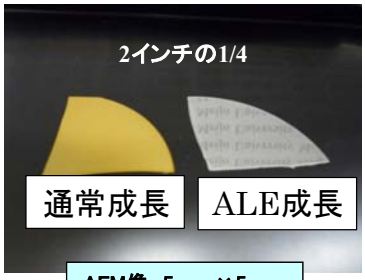


高抵抗GaN基板実現　（室温で3×10^{6}Ω・cmを達成）
Zn準位の活性化エネルギー：0.57eV

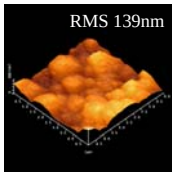
3. 研究開発成果について
（2）成果の意義　～ ②エピタキシャル成長技術の開発（1） ～

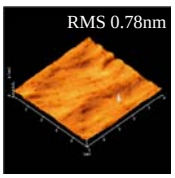
公開

■ デジタルMOVPEの開発



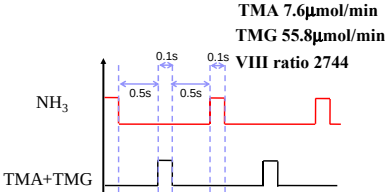
AFM像　5 mm×5 mm

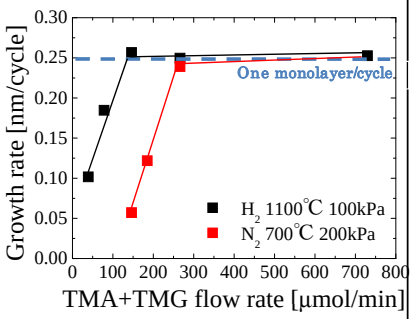




XRC　FWHM:
>2,000 arcsec.

XRC　FWHM:
160 arcsec.

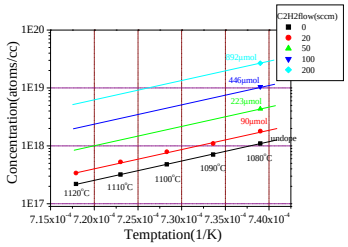


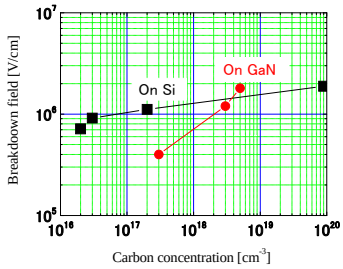


世界初、加圧下でAlGaNの原子層エピタキシャル成長に成功！
→InGaNチャネル、AlGaNバリア層作製法確立！

窒化物半導体で初めて自己停止機能を確認！
→ 1原子層ずつの成長制御が可能！

■ Cドープ緩衝層の成長技術開発





■ C_2H_2による高精度C濃度制御を実証
■ C濃度＞10^{19}cm^{-3}によりGaNの破壊電界強度の理論限界3.3MV/cmの可能性を示唆！

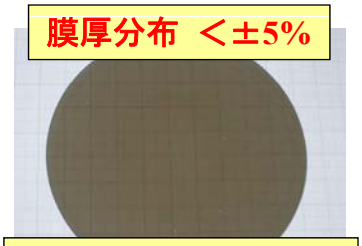
3. 研究開発成果について
(2)成果の意義　～ ②エピタキシャル成長技術の開発(2) ～

公開

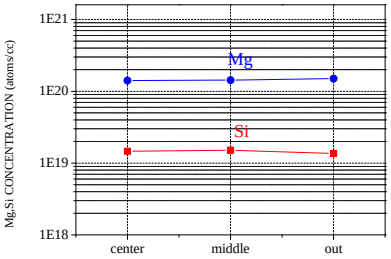
■ 高In組成InGaN層、高Al組成のAlGaN層のエピ成長

4インチ　$In_{0.75}Ga_{0.25}N$

膜厚分布 ＜±5%

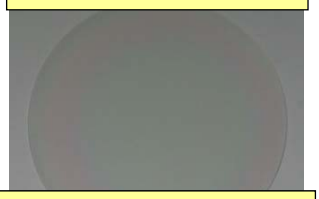


In組成分布 ＜±0.5%

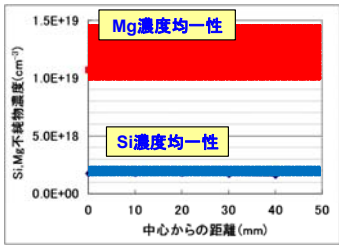


4インチ　$Al_{0.6}Ga_{0.4}N$

膜厚分布 ±3.7%



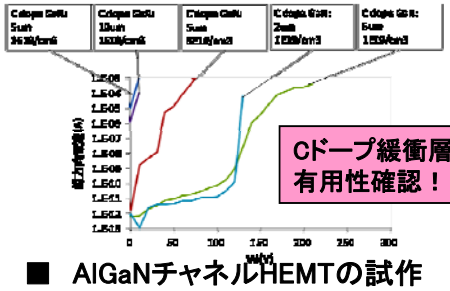
Al組成分布 ±0.6%



4インチにて高均一ドーピング技術確立！
- $In_{0.75}Ga_{0.25}N$ エピ(Si, Mg ばらつき＜±5%)
- $Al_{0.6}Ga_{0.4}N$エピ(Si±7.4%、Mg±12.6%)

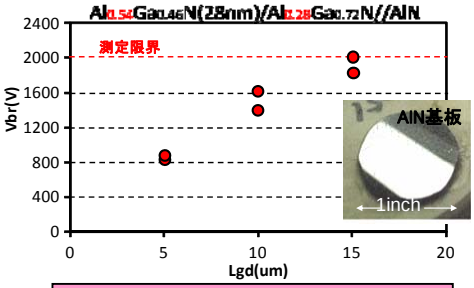
事業原簿(公開版)Ⅲ-45~59

■ Cドープ緩衝層の厚膜化による AlGaN/GaN系HEMTの縦方向耐圧改善



Cドープ緩衝層の有用性確認！

■ AlGaNチャネルHEMTの試作 (AlN基板上)

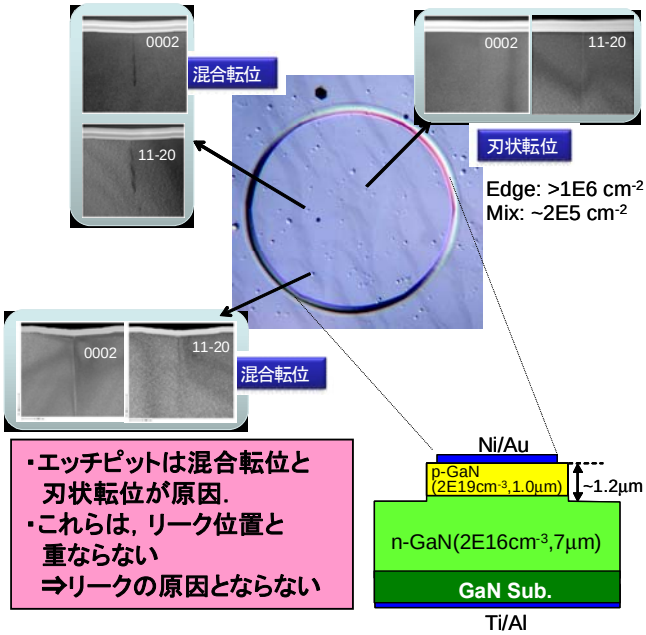


AlGaNチャネル/AlN基板で、2000Vを超える耐圧確認！

3. 研究開発成果について
(2)成果の意義　～ ③GaN基板上電子デバイスの評価(1) ～

公開

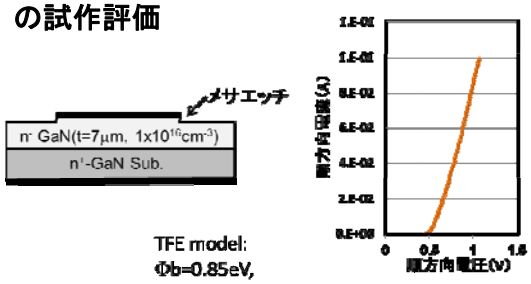
■ 縦型デバイス(pnダイオード)の リーク電流と転位密度の解析

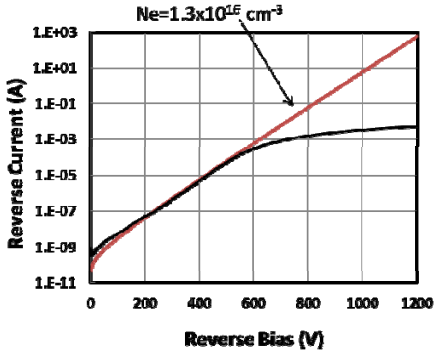


- エッチピットは混合転位と刃状転位が原因.
- これらは, リーク位置と重ならない
  ⇒リークの原因とならない

エッチピットとその原因となる転位の同定

■ 縦型デバイス(ショットキーダイオード) の試作評価





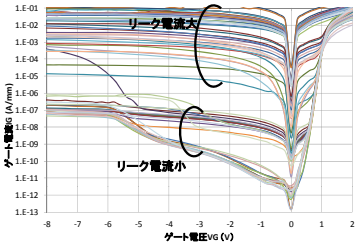
GaN基板上の縦型ダイオードで、1200V以上の耐圧確認。

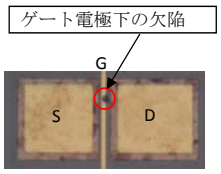
事業原簿(公開版)Ⅲ-78~84

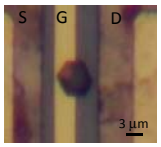
3. 研究開発成果について
(2)成果の意義　～　③GaN基板上電子デバイスの評価(2)　～

公開

■ 横型デバイスの試作評価

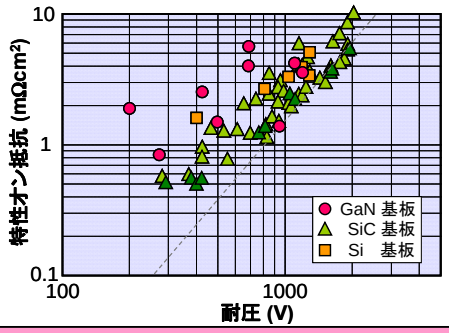






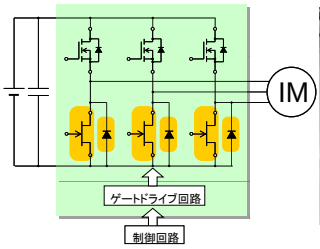
2インチ基板上FETのIg-Vg特性と
ゲート電極下の欠陥

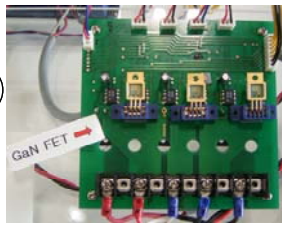
低欠陥密度基板の必要性を確認！

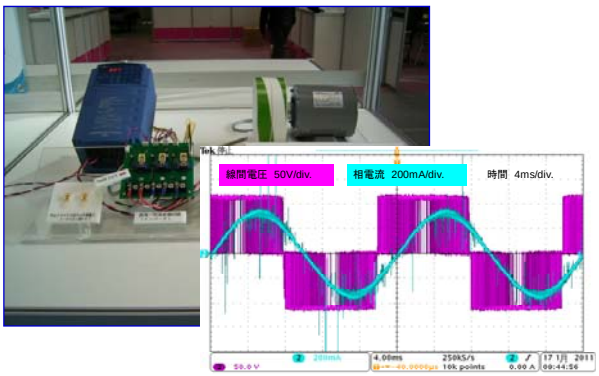


GaN基板上FET、オン抵抗(Ron)と耐圧(Vbr)の関係良好！

■ GaNインバータによる実機動作







GaNインバータ実機動作により実用性を確認！

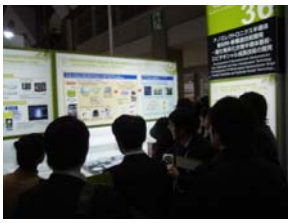
事業原簿(公開版)Ⅲ-64~91

3. 研究開発成果について
(3)知的財産権等の取得、(4)成果の普及

公開

■ 知的財産権、成果の普及における実績

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



nanotech展

※ nanotech展は毎年出展

■ 成果普及を行った主な窒化物半導体に関する国際学会

IWN-2008

IWN-2010

ICNS-9

IWN-2012

事業原簿(公開版)Ⅲ-8

4. 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）実用化の見通し　～ ①大口径単結晶基板の開発 ～

公開

■ Naフラックス法　導電性GaN基板（豊田合成株式会社）

	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/cm²		6" 欠陥 10^5/cm²
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	

■ Naフラックス法　高抵抗GaN基板（日本ガイシ株式会社）

年度 / 項目	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（本ﾌﾟﾛｼﾞｪｸﾄ） ②委託研究終了 ③商品開発		研究開発	▼			商品開発		
④ｻﾝﾌﾟﾙ供試開始 ⑤品質改善 ⑥量産技術検討 ⑦事業化判断					○		△	
⑧事業化								事業化

■ HVPE法GaN種基板 （古河機械金属株式会社）

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	

事業原簿（公開版）Ⅳ-1~2

4. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて
（2）実用化の見通し　～ ②エピタキシャル成長技術の開発 ～

公開

■ エピタキシャルウエハ （昭和電工株式会社）

課題	ﾌﾟﾛｼﾞｪｸﾄ 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●			

■ エピタキシャルウエハ/AlN基板 （住友電気工業株式会社）

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・エピ成長				
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	

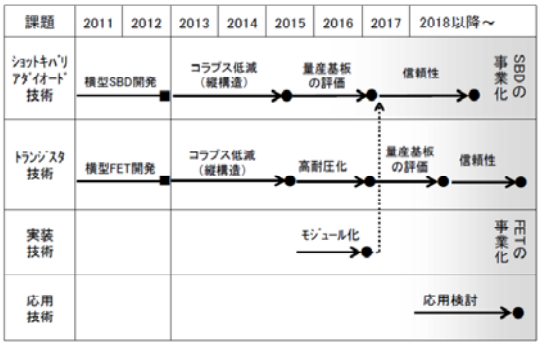
事業原簿（公開版）Ⅳ-2~3

4. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて
（3）実用化の見通し　～　③GaN基板上電子デバイスの評価　～

公開

■ GaN電子デバイス（横型/縦型）（サンケン電気株式会社）

事業化までのマイルストーン



■ GaN電子デバイス（縦型）（株式会社豊田中央研究所）

	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（2013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

■ GaNデバイス（横型）（シャープ株式会社）

	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

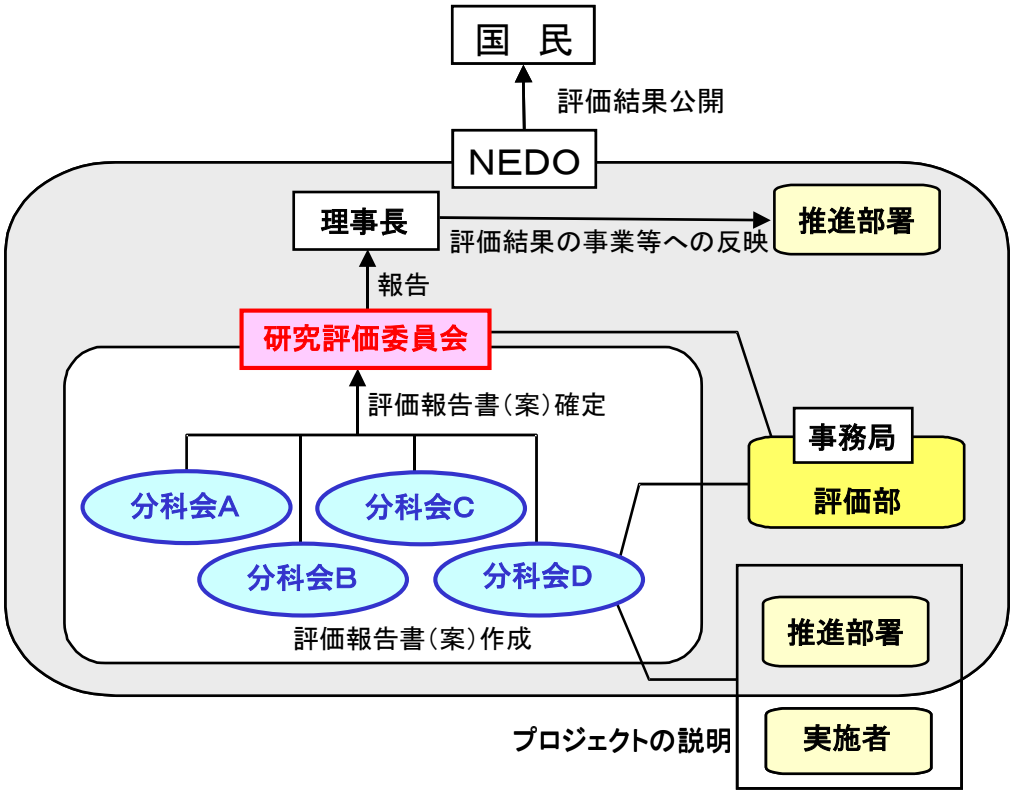
事業原簿（公開版）Ⅳ-5~6

参考資料１　　評価の実施方法

本評価は、「技術評価実施規程」（平成 15 年 10 月制定）に基づいて研究評価を実施する。

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）における研究評価の手順は、以下のように被評価プロジェクトごとに分科会を設置し、同分科会にて研究評価を行い、評価報告書（案）を策定の上、研究評価委員会において確定している。

- 「NEDO 技術委員・技術委員会等規程」に基づき研究評価委員会を設置
- 研究評価委員会はその下に分科会を設置



１．評価の目的

評価の目的は「技術評価実施規程」において。

- 業務の高度化等の自己改革を促進する
- 社会に対する説明責任を履行するとともに、
  経済・社会ニーズを取り込む
- 評価結果を資源配分に反映させ、資源の重点化及び業務の効率化を
  促進する

としている。

本評価においては、この趣旨を踏まえ、本事業の意義、研究開発目標・計画の妥当性、計画を比較した達成度、成果の意義、成果の実用化の可能性等について検討・評価した。

２．評価者

技術評価実施規程に基づき、事業の目的や態様に即した外部の専門家、有識者からなる委員会方式により評価を行う。分科会委員選定に当たっては以下の事項に配慮して行う。

- 科学技術全般に知見のある専門家、有識者
- 当該研究開発の分野の知見を有する専門家
- 研究開発マネジメントの専門家、経済学、環境問題、国際標準、その他
  社会的ニーズ関連の専門家、有識者
- 産業界の専門家、有識者

また、評価に対する中立性確保の観点から事業の推進側関係者を選任対象から除外し、また、事前評価の妥当性を判断するとの側面にかんがみ、事前評価に関与していない者を主体とする。

これらに基づき、分科会委員名簿にある７名を選任した。

なお、本分科会の事務局については、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構評価部が担当した。

３．評価対象

平成１９年度に開始された「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」プロジェクトを評価対象とした。

なお、分科会においては、当該事業の推進部署から提出された事業原簿、プロジェクトの内容、成果に関する資料をもって評価した。

４．評価方法

分科会においては、当該事業の推進部署及び実施者からのヒアリングと、それを踏まえた分科会委員による評価コメント作成、評点法による評価及び実施者側等との議論等により評価作業を進めた。

なお、評価の透明性確保の観点から、知的財産保護の上で支障が生じると認められる場合等を除き、原則として分科会は公開とし、実施者と意見を交換する形で審議を行うこととした。

５．評価項目・評価基準

分科会においては、次に掲げる「評価項目・評価基準」で評価を行った。これは、NEDO が定める「標準的評価項目・評価基準」（参考資料 1-7 頁参照）をもとに、当該事業の特性を踏まえ、評価事務局がカスタマイズしたものである。

プロジェクト全体に関わる評価については、主に事業の目的、計画、運営、達成度、成果の意義、実用化に向けての見通しや取り組み等を評価した。各個別テーマに係る評価については、主に、その目標に対する達成度、成果の意義、実用化に向けての見通しや取り組み等を評価した。

評価項目・評価基準

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

- 「ＩＴイノベーションプログラム」の目標達成のために寄与しているか。
- 民間活動のみでは改善できないものであること、又は公共性が高いことにより、NEDO の関与が必要とされる事業か。
- 当該事業を実施することによりもたらされる効果が、投じた予算との比較において十分であるか。

(2) 事業目的の妥当性

- 内外の技術開発動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献の可能性等から見て、事業の目的は妥当か。

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

- 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- 目標達成度を測定・判断できる具体的かつ明確な開発目標を設定しているか。

(2) 研究開発計画の妥当性

- 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマごとの配分を含む）となっているか。
- 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

(3) 研究開発実施の事業体制の妥当性

- 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- 適切な研究開発実施体制になっており、指令命令系統及び責任体制が明確になっているか。

・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携が十分に行われる体制となっているか。
・ 知的財産取扱（実施者間の情報管理、秘密保持、出願・活用ルール含む）に関する考え方は整備され、適切に運用されているか。

(4) 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性
・ 成果の実用化・事業化につなげる戦略が明確になっているか。
・ 成果の実用化・事業化シナリオに基づき、成果の活用・実用化の担い手、ユーザーが関与する体制を構築しているか。
・ 全体を統括するプロジェクトリーダーが選任されている場合、成果の実用化・事業化シナリオに基づき、適切な研究開発のマネジメントが行われているか。
・ 成果の実用化・事業化につなげる知財戦略（オープン／クローズ戦略等）や標準化戦略が明確になっており、かつ妥当なものか。

(5) 情勢変化への対応等
・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向等に機敏かつ適切に対応しているか。

３．研究開発成果について

(1) 目標の達成度と成果の意義
・ 成果は目標を達成しているか。
・ 成果は将来的に市場の拡大あるいは市場の創造につながることが期待できるか。
・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。
・ 目標未達成の場合、達成できなかった原因が明らかで、かつ目標達成までの課題を把握し、この課題解決の方針が明確になっているなど、成果として評価できるか。
・ 設定された目標以外に技術的成果があれば付加的に評価する。
・ 世界初、世界最高水準、新たな技術領域の開拓、又は汎用性のある成果については、将来の産業につながる観点から特に顕著な成果が上がっている場合は、海外ベンチマークと比較の上で付加的に評価する。
・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
・ 大学または公的研究機関で企業の開発を支援する取り組みを行った場合には、具体的に企業の取り組みに貢献しているか。

(2)知的財産権等の取得及び標準化の取組

・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。

(3)成果の普及

・ 論文等の対外的な発表は、将来の産業につながる観点から戦略的に行われているか。
・ 成果の活用・実用化の担い手・ユーザー等に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

４．実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

本項目における「実用化・事業化」の考え方

当該研究開発に係る要素技術、試作品等が事業会社の事業責任部門に移管され、量産化にむけた開発が開始されること。さらに、要素技術、製品等の販売(ライセンスを含む)や利用により、企業活動(売り上げ等)に貢献すること。

(1)成果の実用化・事業化の見通し

・ 産業技術としての見極め（適用可能性の明確化）ができているか。
・ 実用化に向けて課題が明確になっているか。課題解決の方針が明確になっているか。
・ 成果は市場やユーザーのニーズに合致しているか。
・ 実用化に向けて、競合技術と比較し性能面、コスト面を含み優位性は確保される見通しはあるか。
・ 量産化技術が確立する見通しはあるか。
・ 事業化した場合に対象となる市場規模や成長性等により経済効果等が見込まれるものとなっているか。
・ プロジェクトの直接の成果ではないが、特に顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)がある場合には付加的に評価する。

(2)実用化・事業化に向けた具体的取り組み

・プロジェクト終了後において実用化・事業化に向けて取り組む者が明確になっているか。また、取り組み計画、事業化までのマイルストーン、事業化する製品・サービス等の具体的な見通し等は立っているか。

標準的評価項目・評価基準

平成２５年５月１６日
NEDO

は じ め に

本「標準的評価項目･評価基準」は、「技術評価実施規程」に定める技術評価の目的※を踏まえ､NEDO として評価を行う上での標準的な評価項目及び評価基準として用いる。

本文中の「実用化・事業化」に係る考え方及び評価の視点に関しては、対象となるプロジェクトの特性を踏まえ必要に応じ評価事務局がカスタマイズする。

※「技術評価実施規程」第 5 条(技術評価の目的) ①業務の高度化等自己改革の促進、②社会への説明責任、経済･社会ニーズの取り込み、③評価結果の資源配分反映による、資源の重点化及び業務の効率化促進

なお「評価項目」、「評価基準」、「評価の視点」は、以下のとおり。

◆評 価 項 目 ：「１．・・・」
◆評 価 基 準 ：上記、各項目中の「（１）・・・」
◆評価の視点：上記、各基準中の 「・」

評価項目・基準・視点

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

・ 特定の施策（プログラム)、制度の下で実施する事業の場合、当該施策・制度の目標達成のために寄与しているか。
・ 民間活動のみでは改善できないものであること、又は公共性が高いことにより、ＮＥＤＯの関与が必要とされる事業か。
・ 当該事業を実施することによりもたらされる効果が、投じた予算との比較において十分であるか。

(2) 事業目的の妥当性

・ 内外の技術開発動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献の可能性等から見て、事業の目的は妥当か。

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

・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。

・ 目標達成度を測定・判断できる具体的かつ明確な開発目標を設定しているか。

(2) 研究開発計画の妥当性

・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマごとの配分を含む）となっているか。

・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。

・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。

・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

(3) 研究開発実施の事業体制の妥当性

・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。

・ 適切な研究開発実施体制になっており、指揮命令系統及び責任体制が明確になっているか。

・ 研究管理法人を経由する場合、研究管理法人が真に必要な役割を担っているか。

・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携 and／or 競争が十分に行われる体制となっているか。

・知的財産取扱（実施者間の情報管理、秘密保持、出願・活用ルール含む）に関する考え方は整備され、適切に運用されているか。

(4) 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

（基礎的・基盤的研究開発及び知的基盤・標準整備等研究開発の場合は、「事業化」を除く）

・ 成果の実用化・事業化につなげる戦略が明確になっているか。

・ 成果の実用化・事業化シナリオに基づき、成果の活用・実用化の担い手、ユーザーが関与する体制を構築しているか。

・ 全体を統括するプロジェクトリーダーが選任されている場合、成果の実用化・事業化シナリオに基づき、適切な研究開発のマネジメントが行われているか。

・ 成果の実用化・事業化につなげる知財戦略(オープン／クローズ戦略等) や標準化戦略が明確になっており、かつ妥当なものか。

(5) 情勢変化への対応等

・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向等に機敏かつ適切に対応しているか。

３．研究開発成果について

(1) 目標の達成度と成果の意義

・ 成果は目標を達成しているか。
・ 成果は将来的に市場の拡大あるいは市場の創造につながることが期待できるか。
・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。
・ 目標未達成の場合、達成できなかった原因が明らかで、かつ目標達成までの課題を把握し、この課題解決の方針が明確になっているなど、成果として評価できるか。
・ 設定された目標以外に技術的成果があれば付加的に評価する。
・ 世界初、世界最高水準、新たな技術領域の開拓、又は汎用性のある成果については、将来の産業につながる観点から特に顕著な成果が上がっている場合は、海外ベンチマークと比較の上で付加的に評価する。
・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
・ 大学又は公的研究機関で企業の開発を支援する取り組みを行った場合には、具体的に企業の取り組みに貢献しているか。

(2) 知的財産権等の取得及び標準化の取組

・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、又は実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

(3) 成果の普及

・ 論文等の対外的な発表は、将来の産業につながる観点から戦略的に行われているか。
・ 成果の活用・実用化の担い手・ユーザー等に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。

・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

(4) 成果の最終目標の達成可能性(中間評価のみ設定)

・ 最終目標を達成できる見込みか。
・ 最終目標に向け、課題とその解決の道筋が明確に示され、かつ妥当なものか。

4．実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

本項目における「実用化・事業化」の考え方

当該研究開発に係る試作品、サービス等の社会的利用(顧客への提供等)が開始されることであり、さらに、当該研究開発に係る商品、製品、サービス等の販売や利用により、企業活動(売り上げ等)に貢献することを言う。

なお、評価の対象となるプロジェクトは、その意図する効果の範囲や時間軸に多様性を有することから、上記「実用化・事業化」の考え方はこうした各プロジェクトの性格を踏まえ必要に応じカスタマイズして用いる。

(1)成果の実用化・事業化の見通し

・ 産業技術としての見極め（適用可能性の明確化）ができているか。
・ 実用化に向けて課題が明確になっているか。課題解決の方針が明確になっているか。
・ 成果は市場やユーザーのニーズに合致しているか。
・ 実用化に向けて、競合技術と比較し性能面、コスト面を含み優位性は確保される見通しはあるか。
・ 量産化技術が確立される見通しはあるか。
・ 事業化した場合に対象となる市場規模や成長性等により経済効果等が見込めるものとなっているか。
・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。
・ プロジェクトの直接の成果ではないが、特に顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)がある場合には付加的に評価する。

(2)実用化・事業化に向けた具体的取り組み

・ プロジェクト終了後において実用化・事業化に向けて取り組む者が明確

になっているか。また、取り組み計画、事業化までのマイルストーン、事業化する製品・サービス等の具体的な見通し等は立っているか。

◆プロジェクトの性格が「基礎的・基盤的研究開発」である場合は以下を適用

４．実用化に向けての見通し及び取り組みについて

(1)成果の実用化の見通し

・ 実用化イメージに基づき、課題及びマイルストーンが明確になっているか。
・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。
・ プロジェクトの直接の成果ではないが、特に顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)がある場合には付加的に評価する。

(2) 実用化に向けた具体的取り組み

・ 成果の実用化に向けて、誰がどのように引き続き研究開発を取り組むのか明確になっているか。

◆プロジェクトの性格が「知的基盤・標準整備等の研究開発」である場合は以下を適用

４．実用化に向けての見通し及び取り組みについて

(1)成果の実用化の見通し

・ 整備した知的基盤についての利用は実際にあるか、その見通しが得られているか。
・ 公共財として知的基盤を供給、維持するための体制は整備されているか、その見込みはあるか。
・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。
・ ＪＩＳ化、標準整備に向けた見通しが得られているか。注）国内標準に限る
・ 一般向け広報は積極的になされているか。
・ プロジェクトの直接の成果ではないが、特に顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)がある場合には付加的に評価する。

(2) 実用化に向けた具体的取り組み

・ 成果の実用化に向けて、誰がどのように引き続き研究開発を取り組むの

か明確になっているか。

参考資料２　　評価に係る被評価者意見

研究評価委員会（分科会）は、評価結果を確定するにあたり、あらかじめ当該実施者に対して評価結果を示し、その内容が、事実関係から正確性を欠くなどの意見がある場合に、補足説明、反論などの意見を求めた。研究評価委員会（分科会）では、意見があったものに対し、必要に応じて評価結果を修正の上、最終的な評価結果を確定した。

評価結果に対する被評価者意見は全て反映された。

参考資料３　分科会議事録

研究評価委員会
「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」（事後評価）分科会
議事録

日　時：平成25年6月24日（月）10：00～17：20
場　所：東京国際フォーラム　G409会議室

出席者（敬称略、順不同）

＜分科会委員＞

分科会長　吉川　明彦　千葉大学　産学連携・知的財産機構　スマートグリーンイノベーション研究拠点　特任教授・名誉教授
分科会長代理　奥村　次徳　首都大学東京　副学長（首都大学東京大学院　理工学研究科　電気電子工学専攻　教授）
委員　吉川　俊英　株式会社富士通研究所 基盤技術研究所 先端デバイス研究部　主管研究員
委員　只友　一行　山口大学大学院　理工学研究科　教授
委員　辻　伸二　独立行政法人科学技術振興機構　戦略研究推進部　（兼）経営企画部　科学技術イノベーション企画推進室　主任調査員
委員　津田　邦男　株式会社東芝　研究開発センター　電子デバイスラボラトリー　研究主幹
委員　橋詰　保　北海道大学　量子集積エレクトロニクス研究センター　量子結晶フォトニクス研究分野　教授

＜推進者＞

和泉　章　NEDO　電子・材料・ナノテクノロジー部　部長
関根　久　NEDO　電子・材料・ナノテクノロジー部　統括研究員
吉木　政行　NEDO　電子・材料・ナノテクノロジー部　主幹
吉田　学　NEDO　電子・材料・ナノテクノロジー部　主任研究員
工藤　祥裕　NEDO　電子・材料・ナノテクノロジー部　主任
高井　伸之　NEDO　電子・材料・ナノテクノロジー部　主査

＜実施者＞

葛原　正明　福井大学大学院　工学研究科　電気・電子工学専攻　教授（PL）
天野　浩　名古屋大学大学院　工学研究科　電子情報システム専攻　教授（SPL）
森　勇介　大阪大学大学院　工学研究科　電気電子情報工学専攻　教授（SPL）
徳田　博邦　福井大学大学院　工学研究科　電気・電子工学専攻　特任教授
小柴　正樹　一般財団法人金属系材料研究開発センター　専務理事
松沼　健二　一般財団法人金属系材料研究開発センター　非鉄材料研究部　主席研究員
荒尾　浩三　豊田合成株式会社　研究開発部　部長
永井　誠二　豊田合成株式会社　研究開発部　TL
岩井　真　日本ガイシ株式会社　研究開発本部　ウェハープロジェクト　マネージャー
碓井　彰　古河機械金属株式会社　研究開発本部　ナイトライド事業室　室長
松枝　敏晴　古河機械金属株式会社　研究開発本部　ナイトライド事業室　副室長

作野　圭一　　シャープ株式会社　電子デバイス事業本部　A1277 プロジェクトチーム　参事
矢船　憲成　　シャープ株式会社　研究開発本部　基盤技術研究所　主事
加地　徹　　株式会社豊田中研　電子デバイス研究部　パワーデバイス研究室　主監
上杉　勉　　株式会社豊田中研　電子デバイス研究部　主席研究員
坂東　章　　昭和電工株式会社　事業開発センター　パワー半導体プロジェクト　秩父ユニット
　　チームリーダー
山本　喜之　　住友電気工業株式会社　半導体技術研究所　結晶技術研究部　グループ長
中村　孝夫　　住友電気工業株式会社　半導体技術研究所　半導体 デバイス研究部　部長
後藤　博一　　サンケン電気株式会社　技術本部　開発統括部　グループリーダー

＜企画調整＞
中谷　充良　　NEDO　総務企画部　課長代理

＜事務局＞
竹下　満　　NEDO　評価部　部長
保坂　尚子　　NEDO　評価部　主幹
梶田　保之　　NEDO　評価部　主査
中村　茉央　　NEDO　評価部　職員

＜オブザーバ＞
浦田　治彦　　経済産業省　製造産業局　係長
鈴木　俊男　　経済産業省　製造産業局　産業技術調査員

一般傍聴者　2 名

議事次第

＜公開の部＞

１．開会

２．分科会の設置、資料の確認

３．分科会の公開について

４．評価の実施方法と評価報告書の構成について

５．プロジェクトの概要説明（公開）

　５．１「事業の位置付け･必要性」及び「研究開発マネジメント」

　５．２「研究開発成果」及び「実用化･事業化に向けての見通し及び取り組みについて」

　５．３　質疑

・非公開資料取扱いの説明

－ 昼食 －

＜非公開の部＞

６．プロジェクトの詳細説明

　６．１　高品質大口径単結晶基板の開発（大阪大学　森教授）

　6.1.1　実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（古河機械金属）

　6.1.2　実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（豊田合成）

　6.1.3　実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（日本ガイシ）

－ 休憩 －

　６．２　大口径基板上の高品質エピタキシャル結晶成長技術（名古屋大学　天野教授）

　6.2.1　実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（住友電工）

　6.2.2　実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（昭和電工）

－ 休憩 －

　６．３　窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価（福井大学　葛原教授）

　6.3.1　実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（サンケン電気）

　6.3.2　実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（シャープ）

　6.3.3　実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（豊田中研）

７．全体を通しての質疑

＜公開の部＞

８．まとめ・講評

９．今後の予定

10.　閉会

議事内容

＜公開の部＞

１．開会

・開会宣言（事務局）

２．分科会の設置、資料の確認

・研究評価委員会分科会の設置について、資料1-1、資料1-2に基づき事務局より説明および成立の確認。

・吉川 明彦 分科会長挨拶

・出席者（委員、推進者、実施者、事務局）の紹介（事務局、推進者）

・配布資料確認（事務局）

３．分科会の公開について

事務局より資料2-1に基づき説明し、「議題６．プロジェクトの詳細説明」および「議題７．全体を通しての質疑」を非公開とすることが了承された。

４．評価の実施方法と評価報告書の構成について

評価の進め方および評価報告書の構成を事務局より資料3-1～資料3-5および資料4に基づき作成されたパワーポイントで説明し、事務局案通り了承された。

５．プロジェクトの概要説明（公開）

５．１「事業の位置づけ・必要性」及び「研究開発マネジメント」

推進者より資料7の「5.1 事業の位置付け・必要性、研究開発マネジメント」に基づき、パワーポイントで説明が行われた。

５．２「研究開発成果」及び「実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて」

実施者(葛原PL)より資料7の「5-2 研究開発成果及び実用化・事業化に向けての見通し及び取り組み」に基づき、パワーポイントで説明が行われた。

５．３　質疑

これらの発表に対し、以下の質疑応答が行われた。

【吉川分科会長】　ただ今のご説明に対してご意見、ご質問等がございましたらお願い致します。なお技術の詳細については、後ほど議題６で議論致しますので、ここでは主に事業の位置付け・必要性、マネジメントについてご意見をお願い致します。

【橋詰委員】　組織、運営についてお聞きしたいのですが、ご説明にもありましたが、古河機械金属の直接委託の例にありますように、当初は JRCM が単結晶基板とデバイスの両方に入っていて、そこから出向されていますが、この必要性と効果に関してお聞きしたいのですが。

【工藤(推進者)】　当初は大学の知見を中心にして、集中研の体制を取って来たことを申し上げましたが、その段階ではJRCMに入って頂いて、各大学に分室を作り、かついろいろな企業からの出向で一緒に研究をして行くという体制を構築して来ていたので、そこに対しては一定の効果があったと思っています。

【橋詰委員】　それはNEDOの方針でそうしたのですか。

【工藤(推進者)】　当初からNEDOの方針としてそのように進めてきました。ただ大学での集中研がある一定の成果を出して来た段階で、実際にJRCMは事業化をする訳ではないので、そこから企業主体の研究に切り分けて行く必要があると判断して、徐々に集中研参画企業を外出しして、NEDOと各企業が直接契約をする形に移してきました。

【橋詰委員】　そうすると主として技術移転などに対するマネジメント的な効果や存在だったのですか。

【工藤(推進者)】　各集中研で研究を進めて行く上でのマネジメントはNEDOでもして来ていましたが、かなり異なる出身の人がいろいろ参画をして研究を進めて来るというところにおいて、事務的な負担

が大きかったため、調達などをJRCMに手伝って頂いたこともありました。

【吉川分科会長】　今の件ですが、書面上の構成は分かりましたが、集中研に参加していることとNEDOとの直接契約関係を結ぶこととは、具体的にあまり変わらないのではないかと思えるところもあるのですが、研究がやり易くなったのか、どこが変わったのかがちょっと見えなかったのですが。

【工藤(推進者)】　一つ具体的に考えている事例としては、古河機械金属の時にも事例として出しましたが、出向企業の形では、やはり直接の実施計画の作成に着手をすることはなかなか出来ないので、そこに各企業の戦略が乗せづらいという状況がありました。ですので、直接にNEDOと契約を結んで、各社の戦略に沿った実施計画が作れるようになるとやはりいろいろ違って来ると思います。この点は午後の非公開セッションの際にまた説明があると思います。

【吉川俊英委員】　世界にもいろいろなプロジェクトがあるかと思うのですが、例えばアメリカやヨーロッパのプロジェクトと比較して、このプロジェクトは進んでいるのか、位置付けはどうなのか、例えば成果は世界に対してどれぐらいのものなのか、細かな話は午後で結構ですが、例えば投資金額に見合ったものだったのか、その辺は何かコメントはありますか。

【工藤(推進者)】　世界との比較に関して、技術的な面での比較は午後にまた説明があると思いますが、投資金額で比較するとした場合、日本のこのプロジェクトは必ずしも多いとは思っていなくて、名前は忘れしてしまいましたが、アメリカのDODなどがやっている次のプロジェクトはもっと金額が大きいと思っています。

このプロジェクトの一番の強みは、海外と比較した場合、我々には高品質な基板が作れる技術があることで、ウェハがしっかり出来るという基盤技術を持っていますし、今回のプロジェクトはパワー向けのデバイス開発をいち早く行って、そこを実証するというところ迄やりました。その1200Vという耐圧は、GaNデバイスで実現した初めての事例だと思います。そういった点では外国よりも金額は小さく、かつ、日本の強みである基板のところをうまく活かして、最終的にパワーデバイス分野において電子デバイス実証まで行ったということで、しっかり成果を出しているプロジェクトであると思っています。

【吉川分科会長】　今のことに関連しますが、省エネ関係は、日本の中でも新材料も含めていろいろな観点で走っていると思います。そういう点で、本当は少し位置付けが分かるとありがたいと思ったのですが、たぶん時間もないので、それだけでたくさん時間がかかると思うのですが、もし差支えなければ簡単に説明できますか。

【工藤(推進者)】　NEDOのITエレクトロニクス関係の取り組みとして、例えばパワー半導体、ディスプレイ、LED等色々ありますが、いずれにしても省エネ技術は切っても切り離せないので、全般的に省エネ技術については取り組んで来ています。

このうち、パワーデバイスや高周波デバイスの分野に関しては、今回のプロジェクトのような化合物を使った電子デバイスにおいて、SiCについても取り組んでいますし、ガリウムオキサイドについても提案があります。そこはいろいろなプロジェクトを実施していますが、整理上はパワーや高周波デバイスに関してどれが一番優れたアプローチであるのかは、未だに分かっていない状況であると思います。費用負担の重み付け等いろいろあるとは思いますが、今の時点では幅広く実施していて、その成果を見極めようとしている状況です。

【奥村分科会長代理】　研究開発マネジメントについてお伺いします。特に各グループ間の連携について、効果的なフィードバックの例としてピットの例を挙げられていましたが、先ず一つは、日常的に三つの研究グループ間でどういう情報交換・共有をされていたか。ピットは、ピットを減らす研磨を良くすることは最初からそれを目標にすべき話で、グループ間が日常的に連携した結果、研究、あるいは開発がスピードアップしたとか、そういった例があれば教えて頂きたいのですが。

【工藤(推進者)】　先ず連携の実態に関しては、基板、エピタキシャル、デバイスの各グループにに分かれて、その中で各研究者が集中研の方式で日常的な連携がありました。

但し、各グループ間の連携ということになると、例えば月１回の全体的な会合などの機会は設けていましたが、それだけではなかなか見えて来ない、あるいはその場で議論はされても、いったいどの基板に対してやっているのか意外と良く分からない、そういったところがでてきました。これを反省して研究加速とグループ間連携のために、かなり泥臭いですが、13 頁目記載のようにグループ間で共通の基板番号を各基板に割り当てて、NEDO が直接、基板単位の通番管理・進捗管理を行い逐次情報収集を行って、各基板に関する進捗状況やスペックを全グループメンバで情報共有できるような取り組みをやってきました。

効果に関しては、基板のピットの話は当たり前ではないかという話も確かにありますが、GaN の材料を使ってデバイスを作るという取り組みを初めてやる中で、どのピットがクリティカルなのかも分からない状態でやって来ていたので、これは一つ具体的な事例として挙げても良いのではないかと考えています。

【葛原(実施者)】　今、話のあった通りですが、実際にやっていた立場から話しますと基板が出来上がってエピタキシャルが終わって、それからデバイスに回って来る迄の間にそれなりに時間があって、お互いその一つのデバイスだけを見ている訳ではありませんので、先出しでどんどん出て来るわけで、中には先出しが後で出て来る場合もあります。

そういったことも含めてやってみると非常に入り組んでいて、意図的にやったものもあれば、意図的でないものもあり、途中で割れてしまったら、またそれを二つに割ってコントロールする場合もありました。やっている側からすると非常にたくさんの枚数が一度に流れて来ます。それをどこかで管理して欲しくなり、そこを NEDO にやって頂いた結果、最初の上流から最後までの対応をさっと見ることが出来るようになりました。その辺りはマネジメント上でやって頂いたことのメリットではないかと思います。

【奥村分科会長代理】　今後、別のプロジェクトが走る時に、こういうレイヤ、ステージ毎に別のグループで組んで連携する時に、こういうやり方を取ったら良いのではないかという提案、提言などは何かありますか。

【工藤(推進者)】　今回は、基板、エピタキシャル、デバイスと見た目上は美しい垂直連携の体制になっていますが、もう少しそれぞれ技術の成熟度を見極めた上で、こういう垂直統合にしないといけなかったのではないかと考えています。例えば最初は基板がうまく回らないとデバイスの開発がうまく行かないのであれば、今回もプロジェクトではやって来ましたが、もう少し材料のところをしっかりやって、成果が出る段階でデバイスに入ってもらうとか、いきなり全部をひっくるめてやるという体制ではなくて、もう少し厳密に技術の進捗度合いを見て行かなければいけなかったことは今後の我々の反省だと思っています。

また我々もマネジメントをすることを考えていく上で、カッコいいマネジメントというものはなかなか無いと思いました。逐次電話やメールで情報収集やヒアリングをして、問題が発生する都度対処を考えて処置する等の泥臭い取り組みが意外と効いて来ることも今回勉強になりましたので、こういうことは次回に活かして行きたいと思っています。

【高井(推進者)】　あともう一つ説明させて頂くと、ご存じのように通常は工程管理、進捗管理をする時に作業単位、タスク単位で行います。。例えば研磨作業を何月何日までにどういうことでやるというようにタスク単位で行いますが、今回の場合は３グループ間で基板が一番重要な共通のファクターになっていて、最初は作業単位で進捗管理をしていましたが、最終的には基板をベースにして、その基板単位で、その基板がどこまで進んでいるのか、研磨は進んでいるのか、どういう品質のどういうスペ

ックに変わっているのかというところをデータベース化して、3 グループ間で見えるようなかたちにしました。

最初から分かっていれば良かったのですが、試行錯誤でやりながらですが、そういったところが非常に良いところだったと思います。その意味で、今後役立つプロジェクトマネジメントの教訓として、そのプロジェクトにおけるキーファクターが何であるかというところを最初から見極めることは非常に重要だと再認識しました。

【辻委員】 具体的に連携度合いを測る手段としては、例えば特許を共同で取得した例が具体的にあるのか、あるいは論文や発表を共同でやった例がどれだけあるか、それを具体的に教えて頂いた方が分かり易いかと思いますが。

【工藤(推進者)】 特許や論文の詳細の話は、後半戦でまたご報告できると思いますので、そこでまた説明をさせて頂ければと思います。実際に共同で出した論文の記憶はあり、連名で一緒に出したという事例はあります。

【吉川分科会長】 ディテールは別として、今の質問に対しては、結構たくさんあったのか、ないのか、そういう形での回答をここで頂ければと思います。

【工藤(推進者)】 特に基板のエピタキシャル、デバイス、お互い相談をしながら報告、経過発表をしていますので、かなり出ていると思いますが、具体的な数字が出なくて申し訳ありません。

【吉川分科会長】 では、これはまた午後に関連して質問して頂きます。他にいかがでしょうか。

【只友委員】 今回三つのグループからの発表があって、たぶんそれぞれは非常に立派なデータが出て来ているのですが、今日の議論に関係しているのですが、それぞれのデータが、例えばエピタキシャルの段階はどのスペックの基板が使われているのか。デバイスはどのスペックの基板が使われて、どのエピタキシャルが使われているのかが良く見えません。それを昼からの個別の話でクリアにして頂けたら、我々としては非常に見易くなると思います。

もう一つ、いろいろな競争という意味ですが、我々がやっている窒化ガリウムは、例えば電子デバイス分野ではSiCがライバルであり、最近はシリコンも非常に特性を上げて来ているという段階です。そういった他の材料との競争という意味では、どういった位置付けであるか。それから GaN の基板を一つとっても、ここでは Na フラックス法でやっていますが、他にもいろいろなライバルの方法があります。それと比べてどういう位置付けなのかをクリアにして頂けたら、我々としても非常にありがたいと思います。

【工藤(推進者)】 1 点目ですが、どういう基板とエピタキシャル条件でという話は午後の説明の際にはディテールに注意してやるようにしたいと思います。

2 点目の位置付けの話は、先ほど分科会長からも質問がありましたので、だいたい似たような回答になりますが、やはり今の時点ではどれが一番なのかというところは分かりません。SiC が良いのか、GaN が良いのか、まだまだ分からない状況ですので、引き続き技術の進展度合いを見ながら NEDO としてどれに力を入れて行くのかを考えて行くということだと思っています。

このプロジェクトを開始した時点においては、一応大口径化の可能性があり、かつ低欠陥化の両立できる技術として Na フラックス法に注力をして来ましたが、HVPE もそうですが、いろいろ進展している状況ですので、それはそのプロジェクトを実施するその時、その時に応じて適切なものをチョイスして行くという考え方でプロジェクトを推進しています、この考え方は、当初もそうでしたし、今も変わっていません。

【吉川分科会長】葛原先生から説明頂きました 4/15 頁の最終目標についてですが、高 In 組成の GaN エピタキシャル成長技術の最終目標の欄の条件として記載されている『In 組成 x≧50%』は、すべての InGaN エピタキシャル成長技術の目標の条件と読んでよろしいですか。例えば転位密度の目標に対する条件

になりますか。
それからもう一つ関連して質問させて頂きますが、高 Al 組成の AlGaN エピタキシャル成長技術の最終目標の欄には N 型、P 型の均一性の記載があり、私が見ると電子濃度、正孔濃度と読んだのですが、成果の欄では不純物濃度の記載がされていると思います。私は良く理解していないところがあって、要するに質問は InGaN、AlGaN については組成範囲全域でこの下に被さっているのか、電子濃度、正孔濃度なのかということは結構重要なところなので、これはどうなっているのでしょうか。

【天野(実施者)】　最終目標のところで、In、Al、N 型、P 型と書いてありますが、これは不純物濃度を最初から表していました。N 型ではシリコン、P 型ではマグネシウムの均一性を確認することが最終目標で、その成果がその右に書かれています。

【吉川分科会長】　ということは、典型的なドーパントとしては、N 型はシリコンで、P 型はマグネシウムであるということを決めて。

【天野(実施者)】　そうです。

【吉川分科会長】　ということは、この最終目標自体もマグネシウム濃度がいくつ以上と書く方が分かり易いということでしょうか。

【天野(実施者)】　そうです。

【吉川分科会長】　そしてこれは In 組成全域で、この 0.5 以上まで。

【天野(実施者)】　In 組成は 0.5 以上で 1 までということです。その通りです。

【吉川分科会長】　In 組成 0.5 以上、この領域で転位も 10 の 6 乗以下と。

【天野(実施者)】　その通りです。

【橋詰委員】　事業原簿に加速予算が初年度から付いているというのが、ちょっと違和感を覚えるのですが。通常は少しやって、後半、あるいは中盤に付くというのは分かりますが。
この加速予算ですが、結構な額が初年度のスタート当初から付いているのは、どういう背景なのかお聞きしたいと思います。

【工藤(推進者)】　中身としては、主に結晶成長とエピタキシャルの成長のところの装置開発をより強化しないといけないということで。

【橋詰委員】　でもスタートですから。最初の計画で、初年度からそれも含めた計画が立てられていると一般的には理解できると思うのですが。

【工藤(推進者)】　言われる通りだと思いますが、加速もそのプロジェクトを開始して数カ月行った後に実施している内容となっています。一応最初の段階でそれなりに成果が出て来ていて、最初の計画上では入れなかった装置の開発を、その後、加速の予算を使って実施したという事例になっています。確かに 1 年目ということに違和感があるかも知れませんが、最初実施計画上では入れていなかった内容で、初年度に効果が確認できたので、加速を活用したという考え方で、この時はやらせて頂きました。

【橋詰委員】　例えば 1 年目を終了して 2 年目に入ったというのであれば、今のような理由が理解できるのですが。そのような事なのですね。

【吉川分科会長】　他にもいろいろと意見があるかと思いますが、本プロジェクトの詳細については、この後、午後にありますので、その際に詳細な質問等を頂くことに致します。

・非公開資料取扱いの説明
非公開資料取扱いについて、事務局より資料 2-3、資料 2-4 に基づき説明が行われた。

－ 昼食 －

＜非公開の部＞

６．プロジェクトの詳細説明

６．１　高品質大口径単結晶基板の開発（大阪大学　森教授）

6.1.1　実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（古河機械金属）

6.1.2　実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（豊田合成）

6.1.3　実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（日本ガイシ）

省略

－ 休憩 －

６．２　大口径基板上の高品質エピタキシャル結晶成長技術（名古屋大学　天野教授）

6.2.1　実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（住友電工）

6.2.2　実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（昭和電工）

省略

－ 休憩 －

６．３　窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価（福井大学　葛原教授）

6.3.1　実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（サンケン電気）

6.3.2　実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（シャープ）

6.3.3　実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（豊田中研）

省略

７．全体を通しての質疑

省略

＜公開の部＞

８．まとめ・講評

【吉川分科会長】　それでは各委員の皆様から講評を頂きたいと思います。

【津田委員】　全体を通して、基本的に新規の材料開発から実際のデバイスの応用まで、非常に広い範囲を中に盛り込んだプロジェクトというところで、実際の運営には大変苦労されたことがうかがえました。いろいろな質疑の中でもありましたが、一つ基本的にはこのプロジェクトのスケジューリングで最初の計画の段階でもう少し考慮の余地があったのではないかと思いました。

終わってからの話で大変恐縮ですが、中間評価が確か３年目でしたか。その後、もう少しフレキシブルに年度毎に計画の見直しが出来て、フェーズチェンジが出来ていれば、さらにもっと効率の良い開発が出来たのではないかと思いました。

こういったところは今後も材料と実際のデバイスと、さらには応用までというプロジェクトが想定される場合には、今回のプロジェクト運営でいろいろな考慮をされた内容を活かして、次のプロジェクトを進めて頂きたいと思いました。

【辻委員】　私が特に感じましたのは、チャレンジングな課題に果敢に取り組んで頂いて、結晶の基板技術、エピタキシャル、その課題を発掘するためのデバイス評価ということで、良くここまで出来たものだと思って大変感銘を受けました。

この成果を本当に物にするというところは、それぞれの結晶技術もありますが、やはりデバイスで優位性を示して行くというところで、ある意味では今後最も重要になると思いますので、その辺を今後どのように進めるかが大事です。いろいろな有力メーカーに参加して頂いていますので、うまくリードして頂いて、より強く物にして頂ければ、このプロジェクトは非常に良かったということになると思います

ので、是非よろしくお願い致します。

【只友委員】　上流から下流まで、一部アプリケーションまで含めて、目標に向かって本当にきっちり仕事をされていたと感じました。

ただ全般で感じたことですが、先ほどの知財の話にもありましたが、海外戦略が良く見えませんでした。私も別のプロジェクトで評価される側にいた時に、対外的な特許出願もやって、守るものは守れとしっかりと言われました。その辺のことも触れて頂けたら良かったと思います。

この後の事業化については、いろいろな温度差があると感じました。それも含めてこれからのことなので、NEDO としてもしっかり指導されれば良いと感じました。

【吉川俊英委員】　窒化ガリウムは LED をはじめ、日本発の材料技術だと思いますので、そうそうたるメンバーのプロジェクトで、本当にいろいろな成果が出ていることを感じています。

やはり材料からアプリに近いデバイスまでやるという垂直統合型プロジェクトは、最近少なくなっているかも知れませんが、やはりこれは重要で、世界的にもまだ続いていると思います。最近日本のプロジェクトは一歩間違うと出口、出口だけで、材料に対するお金が果たして出るのだろうかという心配もあるのかと感じていますが、やはりこういうプロジェクトの成果をもっと前面に押し出して、材料からデバイスまで含めてやって頂きたいと思います。

もう一つは、もう少しアプリの人がいても良いのかも知れないと思いました。もちろんスケジュール的には難しいのですが、アプリがあって、それを材料まで戻して欲しい。逆に言えば材料の人が見ているのは、得てしてトランジスタ性能ぐらいまでで、トランジスタの人はアプリまで見るのかも知れませんが、逆に材料の人は何をやって良いか分からない。そうでないとコストターゲットも分からないとか、アプリの人と話すとコストターゲットも分かった上での技術開発が出来るので、そういったことがもっともっと出来ると良いと思います。逆にアプリとデバイスの人だけでやると材料の人が抜けるので、そうすると夢の世界で語るだけになるので、やはりそういうことも重要ではないかと思います。

コストの話も聞きましたが、技術的な信頼度の話が未だなので、今後、信頼度を期待しています。

そしてビジネスモデルと特許です。でも海外には教えないようにノウハウ漏れのしない特許の書き方を是非重視して期待しています。後は使いこなしで何か標準化があるならば、ぜひ標準化もやって欲しい。その上で日本の技術を守ることも期待しています。

【奥村分科会長代理】　Na フラックス法を最初に知った時には、こんな小さな結晶で、当初の 4 インチという目標設定が本当に行くのか、非常にチャレンジングなターゲットだと思っていました。それを搖動、ポイントシードというアイディアで検討を進めて大口径化、無転位を示した。非常に良い仕事をされたと思います。

惜しむらくはプロジェクトとして供給量が必ずしも十分ではなくて、その後のエピタキシャルグループ、デバイス評価グループとの連携のパイプが少し細かったのが残念でした。

それからエピタキシャルグループは、加圧のデジタルエピタキシー、ALE という方法で In 組成、高い Al 組成のエピタキシャルを開発することで組成範囲を大きく広げた。そして平坦性、大口径化が可能な技術を開発したことで、これもまた良い仕事であったかと思います。

ただ GaN 基板との関係の成果というところが、この原簿を読ませて頂いても、また今日のプレゼンテーションを見てもちょっと対応がはっきりとしないところがあったと思います。

デバイス評価グループですが、デバイスの特性の評価を通して基板グループ、エピタキシャルグループにフィードバックをかけることが一番重要な目的で、そのために TEG のパターンを始めとして基板技術をきちんと確立されたと思っています。

全体を通しての感想ですが、もう少し時間があればデバイス特性との関係で GaN のバルク基板を用いる優位性をもう少しクリアに実証するところまで行けたのではないかと思っています。そこのところが

少し残念であったということです。

【吉川分科会長】　それでは最後に私から簡単に講評をさせて頂きたいと思います。

前に座っておられる実施者３名の方々は、日本を代表し、世界を引っ張って行っておられる研究者の方であり、これが日本独自の技術として益々発展することを祈念したいと思いますし、これ迄の実施者の方々のご努力､関係の会社の方も含めて最大の敬意を表したいと思います｡本当にご苦労さまでした。益々差別化をしてやって行ける足掛りが出来て来たと本当に実感しています。この３名の実施者のプロジェクトリーダーが葛原先生で、デバイス評価、あるいはそれをフィードバックするということで、お二人の先生以上に、葛原先生の努力と心労に思い至るところがあって、本当にご苦労さまでした。

今日、途中でもありましたが、GaN の基板を作って、低転位化して、もう絶対に良い筈であるという前提でプロジェクトは出来ています。ただ実際にはメリット、デメリットがあって、メリットをここで良い筈だとうたっているのは良いのですが、デメリットも必ずあって、デバイスの場合には、オーバーオールの特性がすべて効いて特性になって来ています。それを私は良く知っている上でご質問させて頂いたつもりですが、やはりプロセス上で GaN 基板を使ったら絶対に良い筈だと、私個人も自分自身のプロジェクトでもそう思っていましたが、やってみると結構いろいろ問題点があります。それで是非デメリットについても拾い上げて、最終的なメリットをうたい上げて頂く方が、実際上良いデバイスが出来て来るのではないかと思いました。プロセスも含めていろいろなことがあると思います。

ただ、最後に締めるとなれば、当初話しましたように、この技術を日本独自のものとして本当に謳い揚げて行けるだけの素地が出来たので、関係者の方々に本当に御礼を申し上げたいと思っていますし、益々の発展を期待している次第です。

その後、推進者の電子・材料・ナノテクノロジー部の和泉部長および実施者の葛原 PL からの一言があった。

【和泉(推進者)】　委員の皆様、実施者の皆様、１日どうもありがとうございました。このプロジェクトも、これまでの話にありましたように、部材からデバイスまでの非常に幅広く優れた企業と、世界をリードする研究をされている先生方がおられるという、ある意味、日本の置かれたその状況をうまく使ったプロジェクトではないかと考え、これに取り組ませて頂いています。

私共も出来る限り柔軟な見直し、フレキシブルな対応をさせて頂いており、共通して皆さんが集まって行う技術開発と、それからそれを各企業がどういうふうにうまく活かして頂くかというところで、集まるところとそれぞれ分かれるところ、そして今後プロジェクトが終わった後、どのように企業でうまく使って頂くかということなどを配慮したマネジメントをさせて頂いたつもりです。

私共はこれとは別にシリコンカーバイドのプロジェクトも進めさせて頂いています｡今日頂いた議論も、そちらの方に活かして行きたいと考えています。

昨年、シリコンカーバイドの中間評価があり、今日とやや反対のような議論が行われたところもありましたが、まだ分からない状況であるのかと思っており、その辺りは良く注意して見て行きたいと思います。

最後に実施者の皆様にお願いです。今日お話し頂きましたように、プロジェクトの成果を企業の中で将来の実用化に向かってどう活かして頂くかということが我々の一番のポイントです。

私共はこれからも追跡調査を通じて皆様がどのように取り組まれているかをまた議論させて頂きたいと思いますし、今後の私共の取り組みで何か必要なことがありましたら、議論して頂ければありがたいと思います。是非このプロジェクトの結果が将来の日本の経済、ビジネスの繁栄につながることを願っていますので、今後ともよろしくお願い致します。

【葛原(PL)】　皆さんを代表して一言だけ申し上げます。

今日１日、我々の話がどれだけ伝わっているかが非常に疑問ですし、私自身も皆さんそれぞれの方がお持ちの内容をうまく代弁出来たかどうかも疑問が残っております。時間が非常に短くて、直ぐに鐘が

鳴って終わらなければいけないという印象でした。もう少し時間があればと思います。
裏の部分がたくさんあります。こういう制限のあるプレゼンですから決していろいろな多面からお話し出来ないのが残念でしたが、その中で委員の皆さまから頂いた意見について、私も本当にその通りだなと思う部分がたくさんありました。また、我々にとって一つ一つ心の中に染み込む言葉もたくさんありました。
また先ほど吉川委員から出ていましたが、この技術は日本国産の本当に大事にして来た技術です。これを途中で放ってしまう訳には行かないではないかということを私も本当に心の中に強く思っています。その気持ちと実際の運営をどのようにつなげて行くかを肝に銘じて、ここでこのプロジェクトは終わりますが、決してこの輪を消すことなく、その結束はきちっと出来たと思っていますので、今後も是非温かく、厳しく見て頂きたいと思います。

9．今後の予定

事務局より資料９に基づいて説明が行われ、今後の予定が了承された。

10. 閉会

事務局の竹下部長からの挨拶の後、閉会した。

配布資料

資料 1-1　研究評価委員会分科会の設置について
資料 1-2　NEDO 技術委員・技術委員会等規程
資料 2-1　研究評価委員会分科会の公開について（案）
資料 2-2　研究評価委員会関係の公開について
資料 2-3　研究評価委員会分科会における秘密情報の守秘について
資料 2-4　研究評価委員会分科会における非公開資料の取り扱いについて
資料 3-1　NEDO における研究評価について
資料 3-2　技術評価実施規程
資料 3-3　評価項目・評価基準
資料 3-4　評点法の実施について（案）
資料 3-5　評価コメント及び評点票（案）
資料　4　評価報告書の構成について（案）
資料　5　事業原簿（公開）
資料 6-1-1　事業原簿（非公開）
高品質大口径単結晶基板の開発
実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（古河機械金属）
資料 6-1-2　事業原簿（非公開）
高品質大口径単結晶基板の開発
実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（豊田合成）
資料 6-1-3　事業原簿（非公開）
高品質大口径単結晶基板の開発
実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（日本ガイシ）
資料 6-2-1　事業原簿（非公開）
大口径基板上の高品質エピタキシャル結晶成長技術
実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（住友電工）

資料 6-2-2　事業原簿（非公開）
大口径基板上の高品質エピタキシャル結晶成長技術
実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（昭和電工）
資料 6-3-1　事業原簿（非公開）
窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価
実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（サンケン電気）
資料 6-3-2　事業原簿（非公開）
窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価
実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（シャープ）
資料 6-3-3　事業原簿（非公開）
窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価
実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（豊田中研）
資料　7　プロジェクトの概要説明資料（公開）
5.1 事業の位置付け・必要性及び研究開発マネジメント
5.2 研究開発成果及び実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて
資料 8-1　プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
高品質大口径単結晶基板の開発
資料 8-1-1　プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（古河機械金属）
資料 8-1-2　プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（豊田合成）
資料 8-1-3　プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（日本ガイシ）
資料 8-2　プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
大口径基板上の高品質エピタキシャル結晶成長技術
資料 8-2-1　プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（住友電工）
資料 8-2-2　プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（昭和電工）
資料 8-3　プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価
資料 8-3-1　プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（サンケン電気）
資料 8-3-2　プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（シャープ）
資料 8-3-3　プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて（豊田中研）
資料 9　今後の予定

以上

参考資料４

評価結果を受けた今後の取り組み方針について

評価結果を受けた今後の取り組み方針について

評価における主な今後の提言	今後の取り組み方針
○大電力縦型デバイスが開発技術の出口として大いに期待されている。他に SiC もあるが、パワー系の Si デバイスを GaN デバイスで置き換えるためには、Si ベースの従来技術も含め、コストパーフォーマンスでこれらを凌駕する必要がある。 ○基板結晶や GaN 素子性能や評価手法に関する標準化を推し進め、我が国の優位性を担保することが必要である。	○本プロジェクトの開発成果であるＧａＮ結晶生成技術については「次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発」において継続的に研究開発を行い、ＧａＮデバイスのコスト要因であるＧａＮ結晶成長技術の大口径化に取り組み、コストパフォーマンスの向上に繋げる。 ○ＧａＮ基板を用いた電子デバイス試作・評価については継続研究を行い、ＧａＮデバイスの評価手法の確立及びＧａＮデバイスの優位性担保に努める。

本研究評価委員会報告は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）評価部が委員会の事務局として編集しています。

平成２５年１１月

NEDO 評価部
部長　竹下　　満
主幹　保坂　尚子
担当　梶田　保之

＊研究評価委員会に関する情報は NEDO のホームページに掲載しています。

（http://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_index.html）

〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地
ミューザ川崎セントラルタワー20F
TEL 044-520-5161　FAX 044-520-5162