

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

中間評価報告書

平成21年10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21年10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 村田 成二 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32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。

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 | 1-16 |
| 2. 1 高品質大口径単結晶基板の開発 | |
| 2. 2 高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発 | |
| 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 | |
| 3. 評点結果 | 1-32 |
| | |
| 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 |

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、「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」の中間評価報告書であり、第18回研究評価委員会において設置された「ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発－窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発」(中間評価)研究評価分科会において評価報告書案を策定し、第23回研究評価委員会(平成21年10月29日)に諮り、確定されたものである。

平成21年10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

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

中間評価分科会委員名簿

(平成21年8月現在)

| | 氏名 | 所属、役職 |
|----------------|---------------------|--|
| 分科 会長 | こうきつ あきのり 瀨 明伯 | 東京農工大学 工学府 応用化学専攻 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 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 |
| | こじま いくたろう 小島 郁太郎 | 日経 BP 社 電子・機械局 編集委員 |
| | すずき としかず 鈴木 寿一 | 北陸先端科学技術大学院大学 ナノマテリアルテクノロジーセンター 准教授 |
| | 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 | 株式会社日立製作所 中央研究所 ソリューションLSI研究センタ 主管研究員 |

敬称略、五十音順

審議経過

- 第1回 分科会（平成21年8月31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. 評価の実施方法について
 4. 評価報告書の構成について
 5. プロジェクトの概要説明
 6. プロジェクトの詳細説明
 7. 全体を通しての質疑
 8. まとめ・講評
 9. 今後の予定、その他、閉会

- 現地調査会（平成21年9月3日）
大阪大学先端科学イノベーションセンター（吹田キャンパス）

- 第23回研究評価委員会（平成21年10月29日）

評価概要

1. 総論

1) 総合評価

本プロジェクトは、エネルギーおよび省電力ITイノベーションを達成するキーデバイスの一つとしての期待が集まっている窒化物半導体基板結晶製造技術を日本で早期に確立することを目指すもので、日本の国際競争力の源泉になることが期待され、産学連携のもとNEDOの事業とすることが適切である。

次世代デバイス技術を確立する上での適切な目標が設定され、バルク基板結晶育成、高品質エピ成長、デバイス特性評価を分担する3者が、相互に有機的に連携できる体制のもと、基礎基盤研究ではあるが実用化を意識した検討を進めている。

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。

また、企業研究者のみならず大学での若手研究者の人材育成に関してもその波及効果は大きく、我国の科学技術の発展に寄与するものと評価する。

しかし、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、外部状況の変化を見ながら、必要であれば修正していくのが良い。

2) 今後に対する提言

今後はグループ間の連携を更に活発化することが期待されるが、このためには、結晶基板の供給能力を高める必要があり、小口径でもよいので準量産体制を整えるなど、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構築が望まれる。また種結晶に関しては、再委託先における検討と並行して、自前で供給を進めることにより、より高品質結晶の成長が可能になると思われる。

無極性基板技術開発においては、種結晶の低転位化を目的とする結晶の長尺化技術開発が不可欠であり、極性基板においても長尺化技術開発が低コスト化の鍵となる。基板グループにおける長尺化技術の開発を検討願いたい。

パワーデバイスと電子デバイスではあるべき基板結晶が異なるものと考えられ、またパワーデバイス分野においては SiC との協調や住み分けなどもよく見定めて技術開発項目の優先度を明確にし、場合によっては最終目標の設定を見直すことも考慮すべきである。

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、エネルギーおよび省電力ITイノベーションを達成するキーデバイスの一つとしての期待が集まっている窒化物半導体基板結晶製造技術を日本で早期に確立することを目指し、この分野での世界的な優位性を保つことを目的とするもので、エネルギー、ナノテク・部材およびITの各イノベーションプログラムの目標達成に寄与している。

内外の技術開発動向を踏まえた挑戦的な課題への取り組みは、日本の国際競争力の源泉になることが期待されるが、個々の企業体や研究機関のみの取組ではリスクが大きく、産学連携のもと NEDO の事業とすることが適切である。

本プロジェクトは基盤研究に軸足を置くものであるが、今後バルク単結晶成長における長尺化や複数枚同時成長などの量産化技術が次の課題となり、そこでは何らかの形の支援が必要である。

一方、有力な競合材料である SiC または GaN on Si といった他の GaN 系 NEDO プロジェクトとの関係を分かり易く整理すべきである。

2) 研究開発マネジメントについて

本プロジェクトでは、次世代デバイス技術を確立する上で必須の条件が盛り込まれた適切な目標が設定されている。結晶成長技術開発だけでなく、その主要な応用先である電子デバイスとして評価するグループを含めた体制で、バルク基板結晶育成、高品質エピ成長、電子デバイス作製・評価の各テーマに各分野での第一人者を実施責任者として配置し、産学が連携した体制がとられている。垂直連携テーマを並行して検討し、テーマ間でのフィードバックを進めながら課題解決を図る仕組みができています。プロジェクトとしては基礎基盤研究としての位置付けではあるが、実用化を意識した検討が進められている。全体として、研究開発の目標・予算および実施組織など良くマネジメントされている。しかし、技術開発項目が多く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、優先度を明確にして進めるべきである。特に、「パワーデバイス」分野においては、SiC との協調や住み分けもよく見定めて二重投資にならないような俯瞰力を持つことも必要である。また、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。

3) 研究開発成果について

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り、順調に成果が得られている。未達成の項目においても検討すべき課題が明確になっており、最終目標の達成見込みは高い。知的財産等の取得および論文公表および学会発表なども適切に行われている。

本プロジェクトで得られたバルク単結晶とエピタキシャル結晶は、現状ではともに世界最高水準の品質であり、電子デバイスに適合可能な大口径（4インチ）GaN 基板結晶技術は世界トップの快挙といえる。また、加圧下での AlGaIn 原子層エピタキシャル成長に世界で初めて成功しており、GaInN チャネル形成と整合する結晶成長技術として注目される。

今後は、グループ間の連携を更に活発化することが期待されるが、このためには、結晶基板の供給能力を高める必要がある。また、基板結晶に関する研究には、低転移化、面方位、伝導制御など多くが求められているが、エピおよびデバイス側から単結晶側への基板仕様の提示も必要であろう。

4) 実用化の見通しについて

本研究開発は「実用化」のための基盤研究として位置付けられているが、実用化に向けたロードマップが、単結晶成長／エピタキシャル成長／デバイス評価の各要素技術及びお互いの連携において明確になっており、最終目標への課題も明確になってきており、実用化につながる期待は高い。また、照明用 LED などの光デバイスへの応用など関連分野への波及効果も十分期待できる。

さらに、参加・協力している企業研究者のみならず、大学での若手研究者の人材育成に関してもその波及効果は高く、この分野のみならず我国の科学技術の発展に寄与するものと評価する。

一方、出口イメージは明確であるが大電力用途と高周波用途に跨っており、このために開発技術の優先度があいまいになったところがある。開発項目の優先度を明確にして、開発状況、外部状況の変化を見ながら、必要であれば修正していくのが良い。

研究評価委員会におけるコメント

第23回研究評価委員会（平成21年10月29日開催）に諮り、了承された。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 | 早稲田大学大学院 政治学研究科 (科学技術ジャーナリスト養成プログラム) 客員教授 |
| 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 | オリンパス株式会社 新規中核事業企画本部 ヘルスケア事業開発部 企画グループ コーディネーター |
| | 伊東 弘一 | 早稲田大学 理工学術院総合研究所 客員教授（専任） |
| | 稲葉 陽二 | 日本大学 法学部 教授 |
| | 大西 優 | 株式会社カネカ 顧問 |
| | 尾形 仁士 | 三菱電機エンジニアリング株式会社 取締役社長 |
| | 小林 直人 | 早稲田大学 研究戦略センター 教授 |
| | 小柳 光正 | 東北大学大学院 工学研究科 バイオリボティクス専攻 教授 |
| | 佐久間一郎 | 東京大学大学院 工学系研究科 精密機械工学 精密機械工学専攻 教授 |
| | 菅野 純夫 | 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 |
| | 富田 房男 | 放送大学 北海道学習センター 所長 |
| | 架谷 昌信 | 愛知工業大学 工学機械学科 教授・総合技術研究所所長 |
| 宮島 篤 | 東京大学 分子細胞生物学研究所 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、評価委員のコメントを原文のまま、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

本プロジェクトは、エネルギーおよび省電力ITイノベーションを達成するキーデバイスの一つとしての期待が集まっている窒化物半導体基板結晶製造技術を日本で早期に確立することを目指すもので、日本の国際競争力の源泉になることが期待され、産学連携のもとNEDOの事業とすることが適切である。

次世代デバイス技術を確立する上での適切な目標が設定され、バルク基板結晶育成、高品質エピ成長、デバイス特性評価を分担する3者が、相互に有機的に連携できる体制のもと、基礎基盤研究ではあるが実用化を意識した検討を進めている。

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。

また、企業研究者のみならず大学での若手研究者の人材育成に関してもその波及効果は大きく、我国の科学技術の発展に寄与するものと評価する。

しかし、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、外部状況の変化を見ながら、必要であれば修正していくのが良い。

〈肯定的意見〉

- 実用化の鍵となる窒化物化合物半導体結晶基板技術開発にチャレンジしており、NEDOの実施する事業としてふさわしいテーマ設定である。
- 研究リスクの高い重要な研究課題である。
- 中間目標を達成する成果が概ね得られている。
- 個別技術が高度に進展しており、優れた成果が得られていると考えます。
- 適切な研究開発マネジメントの下、達成度から判断して本研究開発は順調に進展していると評価する。特に本研究開発では、基板結晶成長、エピタキシャル成長、デバイス作製の各グループ間のサンプル供給も含めた連携が最重要と考えられるが、各グループ相互の連携も十分になされていると判断する。
- 特に、結晶基板技術開発において、中間目標・最終目標に高いハードルを設け、中間目標においてほぼ達成するとの見込みを付けた。
- バルク基板結晶育成、高品質エピ成長、デバイス特性評価と成長条件へのフィードバックを分担する3者が、お互いに有機的に連携できる研究体制作りができています。少し高めの目標設定によっても感じられるが、いずれ

も意欲的に取り組んでいる。

- 垂直連携テーマを並行検討し、フィードバックを進めながら課題解決を図る仕組みができており、機能しつつある。
- 三つのサブプロジェクトが上手く連携している。さらに、協力企業数も多く、かなり積極的である。
- 運営面では、外部評価委員会の助言に基づいた方向付けをしており、プロジェクトとしては基礎基盤研究としての位置づけではあるが、実用化を意識した検討が進みつつある。
- 垂直統合型のプロジェクトでは、下流側にサンプルが流れず実際の進捗が大幅に遅れるケースが見られる。逆に下流側へのサンプル提供が過剰に期待されると本来の研究が進まなくなる。したがって、全体の情報の流れ、サンプルの流れのマネジメントが重要になる。今回、最下流の福井大への先回り研究支援は必要であるし、それを行った点は評価される項目である。
- プロジェクトリーダーが、最結晶品質が（要確認）デバイス特性として評価でき、さらに得てしてサンプルが来ない最下流の葛原先生にシフトしたのは、全体のマネジメントを円滑にする上で評価される点であろう。
- 基板からデバイスまでの垂直統合型プロジェクトが立ち上がっている。

〈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構築が望まれる。
- 報告書の見せ方だけの問題かもしれないが、成果の応用先のイメージがやや定性的な感がある。
- 基板技術開発において、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、外部評価委員会の助言にある項目を含め、優先度を明確にして進めるのが良い。
- 上記先回り研究を実効性のあるものにする資源配分など工夫を期待する。
- 基板の供給がボトルネックであるため、その供給安定化が必須である。
- フィードバックループがまだ機能していない。

〈その他の意見〉

- ・ 世界の情勢との比較検討が必要である。
- ・ 国家の安全保障上、エネルギー戦略はますます重要な課題となっていくなかで、キーデバイスの一つとして期待が集まっている窒化物半導体の基板結晶製造技術を我が国で早期に確立することを目的とする本プロジェクト

トは非常に大きな意味を持つ。SiC 基板供給を Cree 社に押さえられるような轍を再び踏んではならない。

- 個々の技術的な内容はともかく、研究プロジェクトとして上手く運営されているので、続けて欲しい。さらに、そのノウハウを将来の各種プロジェクトに伝授できる仕組みを考えて欲しい。
- 学会発表や知財がまだ足りない。
- 本プロジェクト期間後の最終目標は、再現性に秀でた実用化直前のレベルなのか、あるいは実験室レベルでの達成値で実際には実用化の想定者がプロジェクト終了後に実用化を行うのか、見えにくい部分がある。

2) 今後に対する提言

今後はグループ間の連携を更に活発化することが期待されるが、このためには、結晶基板の供給能力を高める必要があり、小口径でもよいので準量産体制を整えるなど、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構築が望まれる。また種結晶に関しては、再委託先における検討と並行して、自前で供給を進めることにより、より高品質結晶の成長が可能になると思われる。

無極性基板技術開発においては、種結晶の低転位化を目的とする結晶の長尺化技術開発が不可欠であり、極性基板においても長尺化技術開発が低コスト化の鍵となる。基板グループにおける長尺化技術の開発を検討願いたい。

パワーデバイスと電子デバイスではあるべき基板結晶が異なるものと考えられ、またパワーデバイス分野においては SiC との協調や住み分けなどもよく見定めて技術開発項目の優先度を明確にし、場合によっては最終目標の設定を見直すことも考慮すべきである。

〈今後に対する提言〉

- ・ 研究マネジメントがかなり上手くいっているようなので、研究成果だけでなく、マネジメントの観点で何らかの報告(書)をまとめると良いと思う。
- ・ 技術の高度化が進むことは常に望ましいことではありますが、どの程度の高度化が必要なのかは応用に依存しています。どの応用にどこまでの高度化が必要なのかについて知見が得られれば、実用化が促進されると考えます。
- ・ 本研究開発では実用化ではなく基盤研究に軸足を持っている。その方針で研究開発を推進することが必要と考える。
- ・ バルク基板の供給量を増加するためには、小口径(例えば 10mm 角~2 インチ)でもよいので、別途、準量産体制を整えるようなことも考えられるのではないだろうか。Na フラックス法と HVPE をうまく組み合わせることの有効かもしれない。
- ・ 基板開発にフィードバックできるエピタキシャル成長及びデバイス評価の充実が必要。
- ・ 結晶基板技術開発：特に無極性基板技術開発においては、種結晶の低転位化を目的とする結晶の長尺化技術開発が不可欠である。また、実用化に近いと思われる極性基板においても低コスト化の鍵となる。まずは、基板グループにおける長尺化技術開発が重要であり、そのための予算の追加を含めて検討願いたい。
- ・ 種結晶を協力企業に依存しているが、名城大学でも検討を進めてはどうか。
- ・ 基板の大口径化時には、品質の均質化に期待する。

〈その他の意見〉

- 本プロジェクトでは、Na フラックス法を GaN 高品質大口径基板結晶の唯一の成長法として一丸となって研究が推進されている。反面、種結晶は別企業の HVPE 法により供給されるとともに、その企業からエピグループに GaN が供給されている。Na フラックス法が唯一である明確な説明が必要と考える。
- ベンチマークをもっと取り入れて、情勢変化に臨機応変に対応するべきである。
- 今回のプロジェクトに限った話ではないが、公的なプロジェクトでも、他のプロジェクトとして進んでいる研究の成果との役割分担を積極的に見せる必要があるだろう。

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、エネルギーおよび省電力ITイノベーションを達成するキーデバイスの一つとしての期待が集まっている窒化物半導体基板結晶製造技術を日本で早期に確立することを目指し、この分野での世界的な優位性を保つことを目的とするもので、エネルギー、ナノテク・部材およびITの各イノベーションプログラムの目標達成に寄与している。

内外の技術開発動向を踏まえた挑戦的な課題への取り組みは、日本の国際競争力の源泉になることが期待されるが、個々の企業体や研究機関のみの取組ではリスクが大きく、産学連携のもと **NEDO** の事業とすることが適切である。

本プロジェクトは基盤研究に軸足を置くものであるが、今後バルク単結晶成長における長尺化や複数枚同時成長などの量産化技術が次の課題となり、そこでは何らかの形の支援が必要である。

一方、有力な競合材料である **SiC** または **GaN on Si** といった他の **GaN** 系 **NEDO** プロジェクトとの関係を分かり易く整理すべきである。

〈肯定的意見〉

- 高品質の結晶基板の有無がエネルギーイノベーション、省電力 IT イノベーションを達成する技術開発や実用化の鍵となる。ナノテク・部材イノベーションそのものでもあり、本事業がこれらのプログラムの目標達成に寄与していることは言うまでもない。
- 日本の国際競争力の源泉になることが期待される事業であると考えます。
- 地球規模での低炭素化社会実現という人類目標に即した技術開発であり、わが国の産業競争力を将来的に高める上でも妥当な事業目的である。
- 研究リスクが高く、民間活動のみでは研究推進は難しいと思われる。したがって、**NEDO** の関与は必要である。成功すれば十分回収できる市場があり、光デバイスへの波及も含めて期待される効果は十分であろう。総合的に勘案して事業目的は妥当である。
- 地球規模での低炭素化社会実現という人類目標に即した技術開発であり、わが国の産業競争力を将来的に高める上でも妥当な事業目的である。
- 本プロジェクトは、**NEDO** 事業として妥当な内容である。かつ基礎技術の確立が重要であり、**NEDO** の関与によって加速が期待できる。
- **GaN** 基板は世界的にみても今後の低炭素社会の中心となりうる可能性があり、本事業の継続は必須である。
- 本プロジェクトが目指している研究開発は社会に対する貢献度が高く、さらにこの分野の我国の世界的な優位性を保つためにも、**NEDO** の事業と

して相応しいと考える。費用対効果も十分であると評価する。

- 大学発の技術開発に企業が協力する基礎的な段階にあり、NEDO の関与は適切である。
- さらに、国際競争力を保つための若手研究者の人材育成の観点からも、妥当な事業であると評価する。
- 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 のプロジェクトとすることが適切である。
- 学学連携、産学連携が上手く機能しており、NEDO 主導プロジェクトらしい。
- 研究リスクが高く、民間活動のみでは研究推進は難しいと思われる。したがって、NEDO の関与は必要である。成功すれば十分回収できる市場があり、光デバイスへの波及も含めて期待される効果は十分であろう。総合的に勘案して事業目的は妥当である。
- 内外の技術開発動向を把握し、なお競争力のある技術となっている。期待できる技術と評価する。

〈問題点・改善すべき点〉

- 致し方ないことではあるが、社会に対する説明責任に配慮するあまり、多くの目標を設定し過ぎている感がある。最終目標に向かって、着実な進展を望む。特に、材料研究では重要な点であろう。
- バルク単結晶の供給は、それが最上流に位置するため量産化技術が確立されないことには始まらない。バルク単結晶成長における長尺化や複数枚同時成長などが次の課題となろう。本プロジェクトには、こうした量産化の基盤技術の開発はターゲットになっていないが、何らかの形の後継プロジェクトによる支援が必要になってくるのではないだろうか。
- 妥当性に関しては定性的には示されているが、もう少し定量的に見せることが望ましい。
- 本予算は基礎技術確立に重点がおかれており、本予算のみで実用化にいたるかは不明である。

〈その他の意見〉

- ・ 他の有力なワイドギャップ材料に SiC がありその関連の NEDO プロジェクト、また GaN on Si といった GaN 系他プロジェクトとの関係をわかりやすくしておくことが必要と思われる。

- 国家の安全保障上、エネルギー戦略はますます重要な課題となっていくなかで、キーデバイスの一つとして期待が集まっている窒化物半導体の基板結晶製造技術を我が国で早期に確立することを目的とする本プロジェクトは非常に大きな意味を持つ。SiC 基板供給を Cree 社に押さえられるような轍を再び踏んではならない。
- 基礎技術確立を念頭においているため、低コスト化に関する技術が不明である。
- NEDO の研究なので、致し方ないが、NEDO のプログラムに無理に結びつけなくても良いのでは。NEDO の期待を超える部分をもっと説明しても良いと感じた。

2) 研究開発マネジメントについて

本プロジェクトでは、次世代デバイス技術を確立する上で必須の条件が盛り込まれた適切な目標が設定されている。結晶成長技術開発だけでなく、その主要な応用先である電子デバイスとして評価するグループを含めた体制で、バルク基板結晶育成、高品質エピ成長、電子デバイス作製・評価の各テーマに各分野での第一人者を実施責任者として配置し、産学が連携した体制がとられている。垂直連携テーマを並行して検討し、テーマ間でのフィードバックを進めながら課題解決を図る仕組みができています。プロジェクトとしては基礎基盤研究としての位置付けではあるが、実用化を意識した検討が進められている。全体として、研究開発の目標・予算および実施組織など良くマネジメントされている。

しかし、技術開発項目が多く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、優先度を明確にして進めるべきである。特に、「パワーデバイス」分野においては、SiC との協調や住み分けもよく見定めて二重投資にならないような俯瞰力を持つことも必要である。また、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。

〈肯定的意見〉

- プロジェクトが、結晶成長技術開発グループのみでなく、その主要な応用先である電子デバイスとして評価するグループを含めた体制となっており、適切な目標設定がなされている。
- 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連携体制にも問題はない。
- 状況による研究の見直しは必要であろうが、ここまで来た技術であるので、脈々と継続することを期待する。
- 目標、計画は妥当であるが、デバイスが材料評価だけは面白みに欠ける。
- 基板、エピタキシャル成長、デバイス評価と、事業化へ必須なグループが全て揃っており、フローも適切である。実施者のレベルも高く、プロジェクトリーダーも十分に活躍している。
- 研究開発の目標・予算および実施組織など良くマネジメントされていると評価する。さらに、内外の状況などを把握するなど適切に対応している。
- マネジメントはかなり上手くいっていると思われる。進捗に応じてリーダーが代わるのは、いい試みである。
- 個別技術の進展を促進するという点では、適切なマネジメントが行われて

いると考えます。

- 外部評価委員会の助言に基づいてグループ間連携を深めるなどの方向付けがなされており、プロジェクトとしては基礎基盤研究としての位置づけではあるが、実用化を意識した検討が進みつつある。
- 垂直連携テーマを並行検討し、フィードバックを進めながら課題解決を図る仕組みができており、機能しつつある。
- 事業体制に関しては概ね妥当である。
- 事業者間の連携は技術推進委員会の提言もあってか、上手く行くように改善されている。

〈問題点・改善すべき点〉

- 目標の数値化は完全とはいえない。世界の技術動向の動きに対しての対応があまりみえない。
- 技術の優先度や位置付けについてやや曖昧さがあると思います。個別技術が大きく進展した現段階以降で明確にされることを期待します。また、項目間のより密接な連携の推進を期待します。
- デバイス関係が材料評価だけの目標設定は物足りない。新規デバイスの開発を目標設定するべきではないか。
- 基板技術開発において、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、外部評価委員会の助言にある項目を含め、優先度を明確にして進めるのが良い。
- (総合評価におけるコメントの再掲) 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構築が望まれる。
- 基礎研究の域を超えるかもしれないが、期待される成果のもう少し定量的な予測が望ましい。

〈その他の意見〉

- ・ 組織的な点であるが、実際に研究場所で研究開発を行っている企業と間接的に参加をしている企業がある。現地（阪大）にて補足説明を受けたが、報告書などにも説明が必要であろう。
- ・ 情報通信網の益々のワイヤレス化に伴い、高周波電子デバイスを窒化物系半導体に置き換えていくことによる省電力化は非常に大きい。ただし、いわゆる「パワーデバイス」分野においては、Si デバイス物理やプロセス技術の豊富な蓄積を活かせる SiC の方が、圧倒的に優位にあるように思われる。国プロとしては、SiC との協調や住み分けもよく見定めて、決して

二重投資にならないような（基盤技術として多様な展開がある場合には「並行投資」があってもよい）俯瞰力をもつことも必要である。

3) 研究開発成果について

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り、順調に成果が得られている。未達成の項目においても検討すべき課題が明確になっており、最終目標の達成見込みは高い。知的財産等の取得および論文公表および学会発表なども適切に行われている。

本プロジェクトで得られたバルク単結晶とエピタキシャル結晶は、現状ではともに世界最高水準の品質であり、電子デバイスに適合可能な大口径（4 インチ）Ga₂N 基板結晶技術は世界トップの快挙といえる。また、加圧下での AlGa₂N 原子層エピタキシャル成長に世界で初めて成功しており、GaInN チャネル形成と整合する結晶成長技術として注目される。

今後は、グループ間の連携を更に活発化することが期待されるが、このためには、結晶基板の供給能力を高める必要がある。また、基板結晶に関する研究には、低転移化、面方位、伝導制御など多くが求められているが、エピおよびデバイス側から単結晶側への基板仕様の提示も必要であろう。

〈肯定的意見〉

- 目標がほぼ達成され、意義のある成果が得られていると考えます。
- 高い目標設定にも関わらず、中間目標をほぼ達成する見込みであり、現時点で未達成の項目も検討すべき課題が明確になっている。
- 当初の目標を全てクリアするなど、順調に成果が得られていると評価する。さらに、知的財産等の取得および論文公表および学会発表など適切に行われている。中間評価から判断して、最終目標の達成には不安は見当たらない。
- 概ね中間目標はクリアされている。課題によっては最終目標値の水準に届いているものもある。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であろう。転位密度や残留不純物密度の低減化がなされたことで、その上に作製されたデバイスには、「品質のそれ程良くなかった結晶」ではこれまで見えなかった特性が現れているようで興味深い。
- 成果は概ね達成している。また、技術の派生効果も十分期待できる。
- 成果は目標を概ね達成しており、最終目標も達成見込みは高い。競合基板に対しての優位性もみえている。
- 電子デバイスに適合可能な大口径（4 インチ）Ga₂N 基板結晶技術は世界トップの快挙といえる。
- 三つのプロジェクトが連携している一方で、後段のサブプロジェクトは前段の成果なしでも並行的にも進められていて、無駄がない。
- また、加圧下での AlGa₂N 原子層エピタキシャル成長に世界で初めて成功

しており、GaInN チャネル形成と整合する結晶成長技術として注目される。

- 最終的には達成の目処は立つものと期待される。
- 基板結晶成長技術開発においては、以前に実施されたプロジェクトを含めて適切な知的財産の取得がなされている。

〈問題点・改善すべき点〉

- 内部では作られているかもしれないが、個々のプロジェクトのサブ目標を明確にして、それらの進捗度によって、成果の活用方法が明確に見えるようにすると良いだろう。
- グループ間連携をさらに活発化することが期待されるが、このためには、結晶基板の供給能力を高める必要がある。
- 本プロジェクトの重要なスキームは「基板結晶 ⇒ エピ成長 ⇒ デバイス作製」と説明されている。一方、基板結晶に関する研究には、低転移化、面方位、伝導制御など多くが求められている。エピおよびデバイス側から必要な基板仕様の提示（順番も含めて）も必要であろう。
- Na フラックス法に関する基本特許は阪大・NEDO にはないが、(株)リコー／東北大・山根教授からの許諾はあり、事業化において特段の問題はないとの説明があったと記憶しているが、もう少し説明が欲しい。
- 特に、無極性面ではグループとして特徴的なデバイス実証につながる可能性が高い。そのためにも、無極性面では、転位密度低減のための対策を強化してもらいたい。
- 特許出願件数も若干少ないようにも見えるが、ノウハウとして外部に出さないのも戦略である。情報マネジメントをしっかりと行う必要がある。知財の管理は大学では難しい面もあるので、工夫が必要。
- 知的財産権取得の戦略の議論が必要である。ノウハウとするのか特許出願するのかなどの方針の明確化が必須である。

〈その他の意見〉

- ・ 世界最高水準といえる成果かが明確ではないため、ベンチマークの充実化を望む。
- ・ 研究成果だけでなく、学学連携の成果など、マネジメントの成果も見せる手段を考えて欲しい。また、評価委員だけではなく、参加企業（協賛企業）の評価もうまく見せる仕組みがあると良い。

4) 実用化の見通しについて

本研究開発は「実用化」のための基盤研究として位置付けられているが、実用化に向けたロードマップが、単結晶成長／エピタキシャル成長／デバイス評価の各要素技術及びお互いの連携において明確になっており、最終目標への課題も明確になってきており、実用化につながる期待は高い。また、照明用 LED などの光デバイスへの応用など関連分野への波及効果も十分期待できる。

さらに、参加・協力している企業研究者のみならず、大学での若手研究者の人材育成に関してもその波及効果は高く、この分野のみならず我国の科学技術の発展に寄与するものと評価する。

一方、出口イメージは明確であるが大電力用途と高周波用途に跨っており、このために開発技術の優先度があいまいになったところがある。開発項目の優先度を明確にして、開発状況、外部状況の変化を見ながら、必要であれば修正していくのが良い。

〈肯定的意見〉

- 全体としての出口イメージは明確であるし、ずれてはいない。
- 長い目で見れば実用化につながる成果が得られていると言えらると思いません。
- 基礎研究としては、通常の研究プロジェクトよりも出口イメージは明確である。
- ワイドギャップ半導体は、今後のエネルギー政策上のキーマテリアルであり、実用化に向けたロードマップが、単結晶／エピ／デバイス評価の要素技術ごと及びお互いの連携において明確になっている。
- 本研究開発は「実用化への道」のための基盤研究に重点が置かれていると認識しているが、実用化に向けた計画的な研究目標が立てられている。特に、基盤的な研究のために、この成果の社会に与える波及効果は絶大であると考える。
- さらに、参加・協力している企業研究者のみならず、大学での博士課程学生を含む若手研究者の人材育成に関してもその波及効果は高く、このプロジェクトで育成された若手人材が社会に輩出されることにより、この分野のみならず我国の科学技術の発展に寄与するものと評価する。
- ワイドギャップ半導体は、今後のエネルギー政策上のキーマテリアルであり、実用化に向けたロードマップが、単結晶／エピ／デバイス評価の要素技術ごと及びお互いの連携において明確になっている。
- 本プロジェクトは基礎・基盤研究としての位置づけであるが、実用化に向けて重要でかつ困難な課題に取り組んでいる。マイルストーンとして、中

間評価ならびに最終評価に高い目標を立てているが前者については、ほぼ達成の見通しであり、また課題も明確になってきており、実用化につながる期待値は高いものと評価できる。

- 本成果の波及効果は非常に大きい。あらゆるパワーデバイスへの応用が可能である。
- このテーマは電子デバイス用となっているが、光デバイス応用も十分期待されるし、関連分野への波及効果は十分期待できる。

〈問題点・改善すべき点〉

- 出口が大電力用途と高周波用途に跨っており、このために開発技術の優先度があいまいになったところがある。基礎技術開発であるため、用途を絞り込む必要はないが、その整理をしたうえで、開発項目の優先度を明確にしておき、開発状況、外部状況の変化を見ながら、必要であれば修正していくのが良い。
- 基礎技術確立を目標とするプロジェクトであるため、実用化イメージは完全ではない。実用化には製品イメージ（具体的市場規模）とコストイメージが必須である。
- どの分野でまず実用化が可能なのか、という点を明確にすることが期待されます。
- 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。照明用 LED はパワーデバイスと並んで省エネに大きく貢献する重要なデバイスであるため、出口として電子デバイスを強調しすぎるのはいかがなものかと感じる。
- 定性的なイメージなので、もう少し定量的に波及効果を見せた方が良い。これは、直接の研究者よりも、NEDO の重要な役割だと考える。

〈その他の意見〉

- ・ 今後、欧米では当然であるが、このようなプロジェクトから博士課程学生への RA などを通じた支援が充実されることを期待する。

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

1) 成果に関する評価

本テーマでは低転移化、面極性、導電性制御など多くの成果が得られ、大口径化ではシミュレーションを活用して開発した揺動装置により単結晶基板の4インチ化に目途を付けるなど、中間目標は概ね達成されている。得られた GaN 基板結晶は Na フラックス法としては世界初であり、高く評価される。未達成項目に対する技術課題も明らかとなっており、最終目標達成の期待も高い。競合技術との厳密な比較は今後の課題であるが、他の方法に比較して優位性が高いと判断する。

知的財産の取得や成果発表なども適切になされており、成果は新しい発光デバイスや太陽電池などの市場領域も開拓することが期待される。

しかながら、検討項目が多岐にわたりすぎ、基礎的な研究に加えエピグループへの基板供給の役割も求められているため、後半は項目を絞るとともに、基板供給のために更なる企業の協力を求めることも必要である。

また種結晶に関しては、再委託先における検討と並行して、高品質化のためにも溶液成長結晶を種結晶とすることも検討すべきである。

〈肯定的意見〉

- 高いハードルを設定したと思われる中間評価目標は、現時点での未達成項目の技術課題が明らかとなっており、ほぼ達成可能であると判断される。
- 概ね目標は達成している。
- 中間目標に対して達成度はクリアしているとともに、当初の目標以上である伝導性制御実現に関する成果も得られている。得られた GaN 基板結晶は Na フラックス法としては世界初であり、高く評価される。
- 種結晶や溶液各般条件等の条件を明らかにしており、これを踏まえて有極性面では低転位の2インチ結晶の実現、4インチ結晶の予備試作に成功するなどの世界初の技術成果が得られている。
- 目標がほぼ達成され、意義のある成果が得られていると考えます。
- 成果は中間目標を概ねクリアしている。独自の知的財産を有している。
- 世界に類を見ない国産と言っても良い技術を育てている。
- 基板結晶は各種デバイスの基盤となる要素であり、波及効果や汎用性は非常に高い。中間評価から判断して、他の方法に比較して優位性が高いと判断する。知的財産の取得や成果発表など、適切になされており、最終目標のクリアの期待も高い。
- 溶液組成 (Na/Ga) に着目して、メカニズムの改名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インチ化の目途も付けている。

- 成果は出ているように見受けられる。
- 無極性面においても基本的な成長条件を明らかとするなどの成果が得られている。
- ドーピング技術と低転位化技術の進展は著しい。
- 泥臭いが重要な研磨の達人を雇用しているのは、上手い方法である。大学の苦手な所を上手く補完している。
- 成果は新しい市場領域（発光デバイス、太陽電池など）も開拓することが期待される。

〈問題点・改善すべき点〉

- 低転位レベルが世界最高であるかのベンチマークが完全ではない。
- 大口径化／無極性バルク成長／半絶縁化／低抵抗化と、検討（目標）項目が多岐にわたりすぎているように思う。こうした基礎的な研究に加え、エピグループへの基板供給の役割も求められているため、後半のエフォートを、項目を絞り集中した方がよいのではないかと思う。
- 無極性面では、種結晶の大きな転位密度に支配された結果と、その解決が不可欠であるが、再委託先における検討に並行して、溶液成長結晶を種結晶とする検討を強化すべきである。
- 最終成果の道筋は明確だが、その難易度は、専門家でないと今一步、分からない。
- 競合技術との厳密な比較は今後の課題であると思います。
- 基板の供給が潤沢でなく、他のグループの開発に支障がでている。

〈その他の意見〉

- ・ このプロジェクトだけが目的とは思えないが、成果を向上させる技術（具体的には、研磨）を常備しているのは良い試みである。
- ・ 低転移化、面極性、導電性制御など多くの成果が得られており、その指導力と研究者の努力を評価したい。一方、大学での量産は難しく、エピグループが要求する基板供給のために、さらなる企業の協力が必要ではないかと考える。
- ・ 結晶品質の均一化には溶液攪拌条件の最適化が不可欠とされるが、より高度なシミュレーション開発を並行して進めることも視野に入れてほしい。

2) 実用化の見通しに関する評価

本テーマでは、結晶口径、転位密度、低抵抗側／高抵抗側明のドーピング制御について（実用化を踏まえた）明確な目標が設定され、出口イメージおよび過程も明確である。今後、Na フラックス法は GaN 基板作製の有力な方法の一つになると確信される。また、透明基板が得られることから、パワーデバイス・電子デバイスに加えて、光デバイス用基板としての活用の広がりが期待される。

また、今後の我国の科学分野の発展に貢献する挑戦的なテーマに取り組み、企業を含めての人材育成に、非常に有用なプロジェクトになっている。

一方、パワーデバイスと高周波デバイスでは、あるべき基板結晶が異なるものと考えられ、技術開発項目の優先度を明確にして、場合によっては、最終目標の設定を見直すことも考慮すべきである。

また、長尺化、複数枚同時成長、HVPE との組合せなど量産化にからんだ課題の抽出を実施して欲しい。

〈肯定的意見〉

- 大口径化による実用化イメージは的確である。
- 研究そのもののマイルストーンは明確。
- 明確な目標が設定されており、出口のイメージおよび過程も明確である。企業も含めて多くの人材が阪大に集結し、当該の研究推進は当然であるが、今後の我国の科学分野への貢献は大きい。大学での大きな使命の一つであろう。
- 結晶品質など、当初想像していた以上のレベルに育っており、GaN 基板作製の有力な方法の一つになると確信した。
- 長い目で見れば実用化につながる成果が得られていると言えると思います。
- 出口イメージは明確である。挑戦的なテーマであるので、人材育成を促進すると思われる。
- 省電力イノベーションを達成するための基板技術であり、技術開発の必然性は高い。
- 結晶口径と転位密度の目標設定値は適切である。また、ドーピング制御に関して、低抵抗側／高抵抗側の目標設定値も適切である。

〈問題点・改善すべき点〉

- 長尺化、複数枚同時成長、HVPE との組合せなど、量産化にからんだ課題抽出（本プロジェクトでの実施は必ずしも必要ではない）を是非して欲しい。

- いくつかのマイルストーンでは、最終目標だけでなく、その時点での成果の応用を見せた方が良い。
- GaAs 基板でも応用によって基板作製法を使い分けています。この作製法による GaN 基板に適した応用を明らかにすることで、実用化が早まることが期待されます。
- SiC と競合するような大電流スイッチを想定した場合と、高周波用途ではあるべき基板結晶が異なるものと思われる。実用化の出口と技術開発項目との関係を整理したうえで、技術開発項目の優先度を明確にすることが望ましい。場合によっては、最終目標の設定を見直すことも考慮すべきである。
- 研究の進み方は決して速いとは言えない。進捗速度を上げる工夫が必要である。
- 多くの企業が関わっていることを考えると知財の出願件数が少ない。
- 出口の製品をみたコスト戦略は完全ではない。

〈その他の意見〉

- ・ 透明基板が得られることから、光デバイスへの適用性に優れており、光デバイス用基板としての活用の広がりが期待される。
- ・ 人材育成には非常に有用なプロジェクトとなっている。
- ・ 自前で初期基板結晶（種結晶）の供給を進めることにより、より高品質結晶の成長が可能になると思われる。このような方向性の研究も世界最高水準の結晶のためには必要ではないでしょうか。

3) 今後に対する提言

現状は、検討項目が多岐にわたりすぎているため、今後は目的を絞って研究推進することも必要ではないか。ドーピング制御に関しては、2インチ径に関しては既に目標値を達成しているため、プロジェクトの後半では極性面の大口径化／低転位化に集中し、無極性面に関しては、電子デバイスが実現できるような低転位化の実現化を優先課題とするのが適切である。また、エピグループへの基板の供給を増やす手立ての確立が必要である。更に、自前で初期基板結晶（種結晶）の供給を進めることにより、より高品質結晶の成長が可能になると思われる。

一方、競合技術と比較して強みと弱みを明確にすることも、実用化に向けて重要な取り組みであり、それによって実用化を促進することが期待できると考える。

〈今後に対する提言〉

- ・ 基板の供給量を増やす手立ての確立が必要である。
- ・ 競合技術と比較してあらゆる点で優位性を有していなければならない訳ではなく、寧ろ強みと弱みを明確にすることも重要な成果だと思います。それによって実用化を促進することが期待できると考えます。
- ・ 有極性面に関しては、設定された最終目標実現に向けた研究を遂行いただくのが良いと思われる。ただ、無極性面に関しては、再委託先で実施される種結晶品質への依存度が高すぎるため、これを大口径化に進めるのは如何なものか。あるべき開発は少なくとも電子デバイスが実現できるような低転位化であり、それを優先課題とするのが適切であると思われる。特に無極性面の低転位化を図る手段としては、長尺化の検討が必要と思われる。取り組みの具体化を図っていただきたい。
- ・ 欲を言えば、目的を絞って研究推進することも必要ではないかと考える。
- ・ ドーピング制御に関して、2インチ径に関しては既に目標値を達成しているため、プロジェクトの後半では極性面及び無極性面の大口径化／低転位化に集中するくらいのもりでもよいのではないだろうか。
- ・ 研究開発プロジェクトの活用にかけていると思われ、そのノウハウを他の研究者にも伝授して欲しい（公開して欲しい、と言っているわけではありません）。
- ・ まだ、内部の融液の攪拌など工夫の余地は多々あるように思われる。

〈その他の意見〉

- ・ これまでの推進状況から判断して、最終目標のクリアには不安はない。
- ・ 論文発表をもっと増やしてもよい。

2. 2 高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発

1) 成果に関する評価

高速バルブスイッチ装置開発による AlGa₂N 三元混晶の ALE レベル成長の成功、n および p タイプ不純物制御の成功および高品質 GaN のエピタキシャル成長の成功など、当初の目標を上回る世界最高水準の成果が得られている。特に、高 In 組成窒化物、高 Al 組成窒化物という二つの方向での成果は、電子デバイスの枠を越えた大きな意義があると考えられる。最終目標に向けて道筋も明確に示され、達成の見込みも高い。さらに、知的財産取得および論文発表なども適切に行われている。

また、前段からの基板の供給があまりない状況でも、サブプロジェクトとして研究を進め、デバイス評価グループとの連携によるエピタキシャル成長上の課題抽出と対策が行われている。今後、基板グループとの連携を強め、フィードバックを強化していただきたい。

今後、デジタル成長のメカニズムの詳細など、個々の技術の原理的な考察、掘り下げを期待する。また、エピ/サブ界面での Si 蓄積層の存在は、将来の問題になりそうなので、システムティックな検討を通して原因の解明が必要である。

〈肯定的意見〉

- 高速バルブスイッチ装置を開発して、窒化物半導体の原子層エピタキシャル成長を始めて可能にした。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。
- AlGa₂N 三元混晶の ALE レベル成長の成功、n および p タイプ不純物制御の成功および高品質 GaN のエピタキシャル成長の成功など、当初の目標を上回る世界最高水準の成果が得られていると評価する。さらに、知的財産取得および論文発表など適切になされている。
- 10 ミリ秒という高速でガス流量を制御可能な高速バルブや2気圧まで加圧可能な MOVPE 炉を開発し、加圧下での AlGa₂N 原子層エピタキシャル成長を世界で初めて成功した。これによって、GaInNチャネル、AlGa₂Nバリア層を構成することを可能とした。また、窒素化合物成長としては新しい In 源にチャレンジし、高圧下での気相反応を抑制した成長を可能とするなどの成果が得られている。成長条件を最適化することによって、本年度末には中間目標の達成が見込まれる。
- 目標がほぼ達成され、大きな成果が得られています。高 In 組成窒化物、高 Al 組成窒化物という二つの方向での成果は、電子デバイスの枠を越えた大きな意義を有していると考えます。

- 中間目標を概ね達成している。ALE など世界初の技術成果が得られている。
- 概ね目標は達成している。
- 最終目標に向けて道筋も明確に示されており、達成の見込みも高い。
- 前段の基板があまりない状況でも、サブプロジェクトとして研究を進めているのは良い。
- デバイス評価グループとの連携によるエピタキシャル成長上の課題抽出と対策がなされている。
- レベルの高いテーマに挑戦している。これが、技術レベルを底上げし、人材を育てる。

〈問題点・改善すべき点〉

- 個々の技術の原理的な考察、掘り下げはまだ十分ではないように思われる。例えば、デジタル成長のメカニズムの詳細など。
- 基板グループとの連携を強め、フィードバックを強化していただきたい。
- ALE 技術を基板開発にどのようにフィードバックして活かしていくかが不明確である。GaN 基板だからこそ ALE が達成されたのかななどを明確化し、今後の知的財産権化を期待する。
- 見せ方だけの問題かもしれないが、個々の成果がプロジェクト全体としてどのように（どの程度）寄与しているのかが分からなかった。

〈その他の意見〉

- ・ エピ／サブ界面にクリヤーに見えた Si 蓄積層の存在は、バルク GaN を基板とするエピ成長（特に縦型デバイス）では悩ましい問題になりそうな感触をもっている。プロジェクトにおけるシステムティックな検討を通して原因を解明して欲しい。
- ・ エピグループの問題ではないが、本プロジェクトでの主のスキームである、基板結晶 ⇒ エピタキシャル成長、の成果と他社の基板結晶（あるいは GaN 以外の基板結晶）を用いた成果との区別を明確化することが必要ではないであろうか？
- ・ 種結晶供給として参加している企業から供給される基板結晶を用いてエピタキシャル成長がなされていると推測されるが、今後の GaN 基板供給の主となる成長技術のさらなる明確化が必要ではないであろうか？
- ・ 基板とエピタキシャル成長界面の不純物コントロールは実用化には必須でありその技術確立を期待したい。

2) 実用化の見通しに関する評価

明確な出口イメージも示され、実用化に向けての研究開発過程も明確である。世界最高水準の成果の我国の関連分野への波及効果は非常に大きいと期待される。特に、高 Al 組成および高 In 組成の窒化ガリウム系ヘテロ構造を ALE 成長できれば、電子デバイス・光デバイスを問わず窒化物半導体のデバイス応用分野は大きく広がることから、その可能性が示された意味は大きい。

参加企業はそれぞれの事業構造に即した技術開発を担当しており、個別技術に関しては、プロジェクト終了後数年内の事業化が期待できる。さらに、企業研究者のみならず、大学での若手研究者がこのプロジェクトで育成され、社会に輩出されることにより、今後、我国の科学技術の発展に大きく寄与するものと評価する。

一方、実用化で重要となる無極性面上の DH-HEMT 用のエピタキシャル基板を作製するには、今後は、無極性面上の ALE およびデルタドーピングの可能性を示す必要がある。

〈肯定的意見〉

- エピタキシャル成長を用いた結晶構造としての実用化イメージは確立している。
- 参加企業はそれぞれの事業構造に即した技術開発を担当しており、個別技術に関しては、プロジェクト終了後数年内の事業化が期待できる。
- 高 Al 組成および高 In 組成の窒化ガリウム系ヘテロ構造を ALE 成長できれば、電子デバイス・光デバイスを問わず、窒化物半導体のデバイス応用分野は大きく広がることから、その可能性が示されたことで大きな意味がある。
- 実用化につながる成果であり、波及効果が大きいと考えます。
- 明確な出口イメージも示され、研究開発過程も明確である。世界最高水準である成果から、我国の関連分野への波及効果は非常に大きいと判断する。
- 先進的エピタキシャル成長技術の世界的波及効果は高い。
- 企業研究者のみならず、大学での博士課程学生を含む若手研究者がこのプロジェクトで育成され、社会に輩出されることにより、今後、我国の科学技術の発展に大きく寄与するものと評価する。
- 出口イメージは明確である。人材を育成するのはテーマであり、このプロジェクトが人材を育てているのは間違いない。
- 複数の成果が出ているようである。

〈問題点・改善すべき点〉

- 無極性面上のDH-HEMT用のエピを作製するには、非極性面上のAL Eおよびデルタドーピングの可能性を示す必要がある。
- 個々の成果のインパクトは不明。私一人だけかも知れないが、測定結果のグラフよりも、個々の成果のインパクトが分かる図が欲しかった。

〈その他の意見〉

- ・ (中間) 成果報告書に、本研究開発により育成された人材を人数だけでも表記されることを期待します。

3) 今後に対する提言

本プロジェクトの成果として得られる基板結晶と他社の基板結晶（あるいは GaN 以外の基板結晶）を用いた場合のエピタキシャル成長の差異を具体的に示し、今後の GaN 基板供給の主となる成長技術を明確に示すことが必要と考える。

また、大口径・均一なエピ成長はもちろん重要ではあるが、たとえ口径が小さくとも、無極性基板上への AlGaIn/InGaIn ヘテロエピタキシャル成長の可能性を示す取り組みも期待する。

一方、パワーデバイス関係では、実用の判断を SiC と比較して行うことが必要である。

〈今後に対する提言〉

- ・ 高品質 InGaIn も含めて、今後の世界初の成果を期待します。
- ・ バルク単結晶成長同様、このサブテーマについても検討（目標）項目が多岐にわたりすぎているように思う。大口径・均一なエピ成長ももちろん大事ではあるが、たとえ口径が小さくとも、AlGaIn/InGaIn（できれば非極性基板上）ヘテロエピの可能性をデモンストレーションするようなことも意味があるのでは無かろうか。
- ・ 前段のサブプロジェクトが期待したほど進まなかった場合でも、このサブプロジェクトが成果を出せるように（出せたように見える）、まとめて行って欲しい。
- ・ 得られた成果が幅広い応用に生かされることを期待します。
- ・ 特にパワー関係では SiC との比較において実用化には判断を要するという立場であることが推定される。評価グループとしては、他のデバイスとの比較から、実用化課題を抽出可能な立場にあるはずである。プロジェクト全体の方向付けを期待する。
- ・ PL 交代後の体制が不安。 来年からの体制を明確にしておいてください。
- ・ 転位の効果の基礎的解析や、基板の何がエピタキシャル成長に効いているかの解析を期待したい。

〈その他の意見〉

- ・ 学生がやる気を出す方法の伝授にも期待する。
- ・ グループ間のさらなる人材交流を期待する。

2. 3 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価

1) 成果に関する評価

GaN 基板上 FET での高いドレイン電流の確認および基板結晶－エピ層界面での品質と耐圧の関係の明確化など、中間目標を超える成果が得られている。また、評価デバイスの試作と評価により、前段の二つのグループにフィードバックして、結晶成長技術の改善やデバイス特性の向上などの成果が得られている。知的財産取得や論文公表・学会発表なども適切に行われている。

本テーマの成果は、基板グループおよびエピグループの研究開発の進展に大きく影響されるが、両グループとも順調に研究が推進されており、本テーマの最終目標は達成されることを確信している。

一方、本テーマの目標設定は上流側の結晶基板やエピ基板の評価に重きが置かれている。デバイス作製という担当から、基板結晶およびエピタキシャル成長に強く依存することは理解できるが、これらのグループに依存しないデバイス本来のあるべき特性を出すこと、あるいは新しいデバイスの提案などにも注力するなどして、個別テーマとしての成果の推進も重要である。

〈肯定的意見〉

- 目標がほぼ達成され、意義のある成果が得られていると考えます。
- GaN 基板上 FET での高いドレイン電流の確認および基板結晶－エピ層界面での品質と耐圧の関係の明確化など、中間目標を超える成果が得られている。知的財産取得や論文公表・学会発表なども適切に行われていると判断する。
- 基板結晶の異なるエピ上の H F E T の特性比較を行えるデバイスプロセスと特性評価手法を確立し、Na フラックス法により作製されたバルク GaN 結晶が、高性能パワーデバイス用の基板として優れていることを示した。
- 中間目標は概ね達成している。異種基板との比較による高ドレイン電流の実証は意義深い。また高耐圧ダイオードを高歩留まりで達成している点は高く評価できる。新しい構造の提案は興味深い。
- 評価デバイスの試作と評価により、エピグループへのフィードバックが適宜なされており、これによって、結晶成長技術の改善、デバイス特性の向上などの効果が得られている。
- 前段の二つのサブプロジェクトにフィードバックするという意味では、大きな成果が出ている。市販品など、他の成果との比較もしている点は良い。
- 概ね目標は達成されている。ただし、目標の設定に課題がある。
- 最終目標のクリヤーは、上流の研究開発の進展により大きく影響されることは理解されるが、基板グループ、エピグループも順調に研究が推進されていることから、デバイスグループの最終目標のクリヤーも達成されることを

確信している。

〈問題点・改善すべき点〉

- デバイス作製という担当から、基板結晶およびエピタキシャル成長に強く依存することは理解できるが、これらのグループに依存しない独立的な成果の推進も重要であろう。
- 予算の関係もあろうが、このプロジェクト専用になっていて、もったいないように思われる。
- 目標設定が上流側の基板なりエピ基板の評価に重きが置かれている。デバイス本来のあるべき特性を出すこと、あるいは新しいデバイスの提案などに目標をシフトさせるべきではないか。
- 目標設定の進捗が遅いのではないか。また、目標を前倒しして、先行研究をさらにアクティブに進めるべきであった。最近になって、市販の基板を活用して研究を進めているようであるが、上流側の進捗を待っていたのでは研究は進まない。
- メカニズムの追求が未完であり、本プロジェクトの主眼である基板やエピタキシャル成長へのフィードバックができていない。GaN 基板ならではの世界最高の成果にはまだ至っていないように思われる。
- 基板グループへの直接的なフィードバック手法を検討いただきたい。
- 基板結晶／エピグループからの試料提供のループの回り時間・量的に不十分であるため、デバイス評価側から結晶へのフィードバックが必ずしもうまく行われていない。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構築が望まれる。
- プロジェクトリーダーが葛原先生にチェンジしたとのこと。全体のシナリオをデバイス寄りにしても良いのではないか。

〈その他の意見〉

- ・ このサブプロジェクトがあるおかげで、プロジェクト全体が上手く回っていると思われる。
- ・ 新しい構造の実現が未完であるため、その成果を注視したい。
- ・ プロジェクトをけん引するテーマ設定の修正を行うべき。

2) 実用化の見通しに関する評価

デバイスの特性評価や信頼性の評価で順調な成果が得られ、デバイスそのものとしての実用化可能性は明確であると考えます。デバイス企業が参加していることから、実用化の可能性も高いと評価する。また、垂直統合的なプロジェクト運営によって他分野との交流の場が増加し、産学の若手研究者の人材育成に寄与している。

また、本プロジェクトの窒化物のバルク単結晶とエピタキシャル成長は出口イメージと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り、光デバイスの観点からも期待できる。

〈肯定的意見〉

- 順調な成果が得られている点、およびデバイス企業が参加していることから、実用化の可能性も高いと評価する。省エネルギー・排出カーボン削減に関して大きな効果が期待できるデバイスの実現は社会に対する波及効果は非常に高いものと判断する。
- 研究段階の不安定なデバイスの特性評価や信頼性を評価しており、実用的と言えるだろう。
- デバイスそのものとしての実用化可能性は明確であると考えます。
- 垂直統合的なプロジェクト運営によって、他分野との交流の場が増加したようで、学生の人材育成に寄与している。
- 一般的ではあるが、出口イメージは明確である。
- オーミック電極の開発や耐圧の検討など実用化イメージのある成果が得られている。

〈問題点・改善すべき点〉

- 現時点では止むを得ないかもしれないが、デバイス単体ではなく、システム（モジュール）としての評価にもリーチを広げて欲しい。
- 基板とデバイスの関係で解明されていない事柄に関する知見を深めることが期待されます。
- 研究開発を通じて新しい応用展開の提案を行うべきである。
- 出口の製品イメージがあいまいであるため、最終目標の必然性がわかりにくい。

〈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。

3) 今後に対する提言

本研究の実施スピードは、最上流の基板結晶の供給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構築が望まれる。

デバイス評価においては、窒化物半導体単結晶基板を用いる効果が非常に大きいデバイスの種類や構造を明らかにすることにより本プロジェクトでの開発技術の優先順位を示したり、SiC との競合点や優位点などを明らかにして電子デバイスとして最終目標を達成するための条件の明確化するなどの取り組みが期待される。

それと同時に、開発目標をデバイス評価だけに限定せずに、デバイスの開発も含めるなど、他のグループの開発動向に依存しない研究推進の方法を考えることも必要であろう。

〈今後に対する提言〉

- ・ デバイス試作や評価だけでなく、実用化に向けた結晶開発課題を明確にするなどして、プロジェクト全体をリードする立場としての活躍を期待したい。
- ・ 窒化物半導体単結晶基板を用いることの効果が非常に大きいデバイスの種類や構造を明らかにすることで、技術の優先順位が明確になると考えます。
- ・ 他のグループに依存しない研究推進の方法を模索することも重要であろう。
- ・ 評価することを目標にするのではなく（それはそれで重要であるが）、デバイスの開発も目標にするべきではないでしょうか。
- ・ 出口製品に近いレベルの世界最高デバイス成果を期待する。
- ・ 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構築が望まれる。
- ・ このサブ・プロジェクトの範囲を超えるのかもしれないが、研究段階の不安定なデバイスの特性評価法や信頼性評価法の一般化を考えて欲しい。
- ・ メカニズムの追求が基礎技術開発には必要であり、基板開発へ積極的にフィードバックしてほしい。

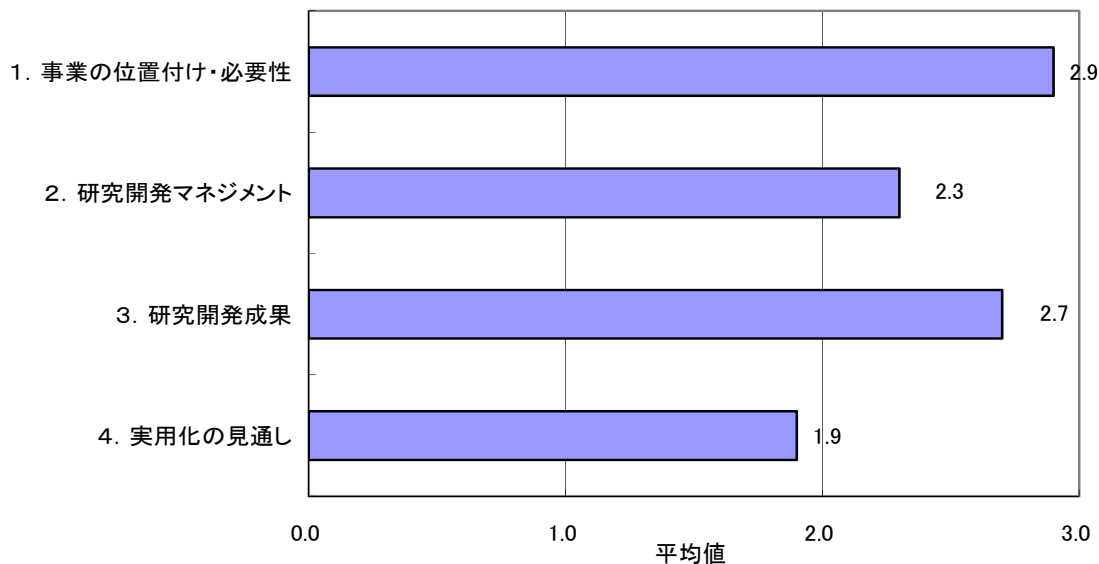
〈その他の意見〉

- ・ 電子デバイスとして、SiC との競合部分や優位点などを明らかにするとともに、最終目標クリヤーのために必要な必要条件の明確化も必要と思われる。

- る。
- ・ 他のグループとの人材交流を期待します。

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) | | | | | | | |
|--------------------|-----|--------|---|---|---|---|---|---|---|
| | | B | A | A | A | A | A | A | A |
| 1. 事業の位置付け・必要性について | 2.9 | B | A | A | A | A | A | A | A |
| 2. 研究開発マネジメントについて | 2.3 | B | B | B | A | B | A | B | B |
| 3. 研究開発成果について | 2.7 | A | A | A | B | A | B | A | A |
| 4. 実用化の見通しについて | 1.9 | B | C | B | B | B | B | B | B |

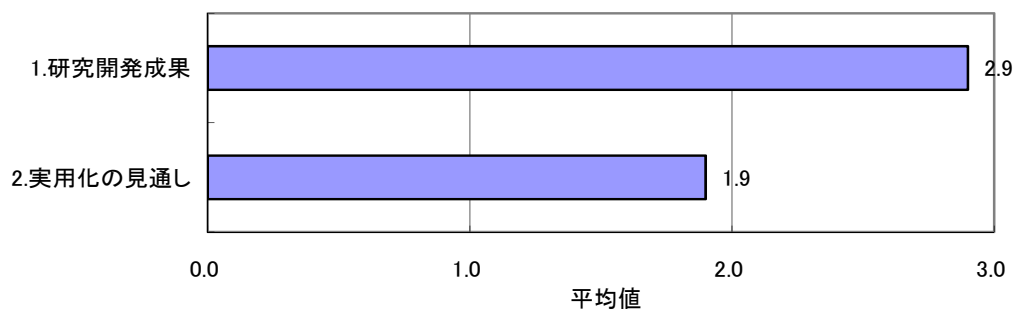
(注) A=3, B=2, C=1, D=0 として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

〈判定基準〉

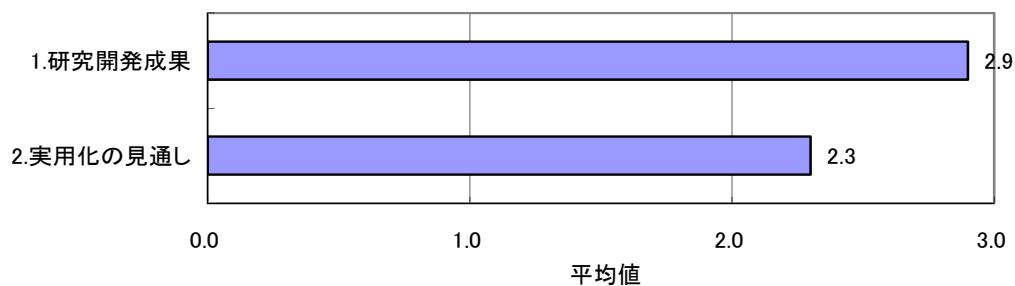
| | |
|--------------------|-------------------|
| 1. 事業の位置付け・必要性について | 3. 研究開発成果について |
| ・非常に重要 →A | ・非常によい →A |
| ・重要 →B | ・よい →B |
| ・概ね妥当 →C | ・概ね妥当 →C |
| ・妥当性がない、又は失われた →D | ・妥当とはいえない →D |
| 2. 研究開発マネジメントについて | 4. 実用化の見通しについて |
| ・非常によい →A | ・明確 →A |
| ・よい →B | ・妥当 →B |
| ・概ね適切 →C | ・概ね妥当であるが、課題あり →C |
| ・適切とはいえない →D | ・見通しが不明 →D |

3. 2 個別テーマ

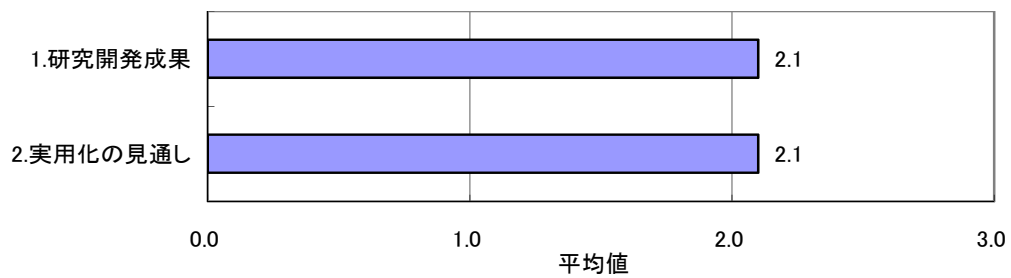
3. 2. 1 高品質大口径単結晶基板の開発



3. 2. 2 高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発



3. 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



| 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. 実用化の見通しについて | 1.9 | B | C | B | B | B | B | B |
| 3. 2. 2 高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発 | | | | | | | | |
| 1. 研究開発成果について | 2.9 | A | A | A | B | A | A | A |
| 2. 実用化の見通しについて | 2.3 | B | B | B | B | 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作製と評価 | | | | | | | | |
| 1. 研究開発成果について | 2.1 | B | B | B | B | A | B | B |
| 2. 実用化の見通しについて | 2.1 | B | B | B | B | B | A | 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
- ・よい
- ・概ね適切
- ・適切とはいえない

2. 実用化の見通しについて

- A ・明確 →A
- B ・妥当 →B
- C ・概ね妥当であるが、課題あり →C
- D ・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。

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

事業原簿
(公開)

| | |
|-----|---|
| 担当部 | 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 ナノテクノロジー・材料技術開発部 |
|-----|---|

—目次—

概要

プロジェクト用語集

I. 事業の位置付け・必要性について

- 1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性…………… I-1-1
 - 1.1 NEDOが関与することの意義…………… I-1-1
 - 1.2 実施の効果(費用対効果)…………… I-2-1
- 2. 事業の背景・目的・位置付け…………… I-3-1

II. 研究開発マネジメントについて

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

III. 研究開発成果について

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

IV. 実用化の見通しについて

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

(添付資料)

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

概要

| | |
|-------|------------|
| 最終更新日 | 平成21年8月20日 |
|-------|------------|

| | | | | | | |
|--------------------|--|----------|--------|----|----|-------|
| プログラム(又は施策)名 | I Tイノベーションプログラム・ナノテク・部材イノベーションプログラム・エネルギーイノベーションプログラム | | | | | |
| プロジェクト名 | ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発ー窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発 | プロジェクト番号 | P07030 | | | |
| 担当推進部/担当者 | ナノテクノロジー・材料技術開発部 担当者 大井川欽哉(平成21年8月現在) ナノテクノロジー・材料技術開発部 担当者 福井 徹(平成19年6月~平成19年9月) | | | | | |
| 0. 事業の概要 | <p>高周波デバイス、高出力デバイス等の高性能電子デバイスは今後の21世紀社会を支える情報家電、コンピュータ、情報通信機器から自動車、医療機器に至るまで極めて広範な分野の製品の高機能化や制御を実現する中核的役割を果たす存在で、窒化物半導体はそれを実現する材料として大きな期待が寄せられています。しかし、既存の結晶作成技術ではこれらのデバイス用に求められる品質レベルに十分対応できず、その実用化に大きな制約となっている。</p> <p>本プロジェクトでは、従来の半導体材料では実現できない領域で動作可能な高出力・超高効率の電力素子、超高速電子素子などの作製に必要な窒化物半導体結晶成長技術の確立を目指し、①高品質大口径単結晶基板の開発、②高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発、および③窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作成と評価に取り組み、我が国のエネルギー削減に大きく貢献することを目的とする。</p> | | | | | |
| I. 事業の位置付け・必要性について | <p>新・国家エネルギー戦略(2006年5月経済産業省)では、2030年に30%以上のエネルギー消費効率の改善を目標として掲げている。本目標を達成するためには、次世代省エネデバイスである窒化物系化合物半導体の早期実用化が望まれているところであるが、既存の単結晶基板成長技術やエピタキシャル成長技術では、従来の半導体では実現できない領域で動作可能なハイパワー、超高効率デバイス性能を十分に引き出すには至っていない。しかし、現段階で市場が存在しない中での大規模な設備投資が必要な材料開発となることから研究開発のリスクが高く、このため民間企業のみで事業を行うことは困難である。</p> <p>また、本事業は最先端のナノエレクトロニクスの研究開発のため、技術的に見ても企業等の競争に委ねるよりも大学あるいは研究所を拠点に材料メーカー、デバイスメーカー、装置メーカー等が総合的に各々のシーズを動員活用して相互連携の下に競争前段階の基盤技術(窒化物半導体の結晶欠陥低減技術やナノ構造作製技術等)の革新を国家プロジェクトとして推進することが効率的である。</p> | | | | | |
| II. 研究開発マネジメントについて | | | | | | |
| 事業の目標 | <p>本事業(以下の①②③)を実施し、2014年頃から従来の半導体材料では実現できない領域で動作可能なハイパワー・超高効率の電力素子、超高速電子素子が実用化され、我が国のエネルギー消費量削減に大きく貢献する。省エネ効果は、汎用インバーターのみをとっても2030年において原油換算281万kL(インバーター用電力:8,785万kL 普及率:80% 削減率:4%=省電力(281万kL)に相当する。</p> <p>① 高出力デバイス作製に必要な大型/高品質窒化物単結晶基板を作製する。 ② 新たなエピタキシャル成長法を開発し、①で作製した口径4インチの有極性、及び口径3~4インチの無極性窒化物半導体バルク基板上において、低欠陥高品質 GaN、及び AlN-GaN-InN 混晶エピ層を実現する。 ③ ①②を用いて有極性単結晶基板上 FET(電界効果型トランジスタ)と無極性単結晶基板上 FET を作製し、特性の差違、及びその利害得失の明確化する。また、広い混晶組成域における耐圧と結晶欠陥の相関を明確化し①、②へフィードバックする。</p> <p>また、国際標準化に向け、窒化物半導体材料の特性評価の最適手法等の検討を行うと共に、非鉄金属産業戦略(平成18年5月)の「化合物半導体産業戦略」に則り、化合物半導体ロードマップの策定等を通じ、シリコンでは提供できない特性を有する半導体ウェーハ需要の開拓を行う。</p> | | | | | |
| 事業 | 主な実施事項 | H1 | H2 | H3 | H4 | H2011 |

| | | | | | | |
|-----------------------|--|--|-------------|-------------|------------------|------------|
| 計画内容 | ①高品質大口径単結 | → | → | → | → | → |
| | ②高品質大口径エピ | → | → | → | → | → |
| | ③窒化物半導体単結晶基板 と電子成果とりまとめ | → | → | → | → | → |
| | | | | | | → |
| 開発予算 (会計・勘定別に事業費の) | 会計・勘定 | H 1 | H 0 | H 0 | H 0 | H 2 0.5 |
| | 一般会計 | | | | | |
| | 特別会計 (需給) | 4 7 8 | 8 6 0 | 3 2 0 | (3 3 0 | |
| | 加速予算 | 1 0 8 | 4 0 | | | |
| | 総予算額 | 5 8 6 | 9 0 0 | 3 2 0 | (3 3 | |
| 開発体制 | 経産省担当原課 | 製造産業局非鉄金属課 | | | | |
| | プロジェクトリーダー | 福井大学 葛原正明 (平成21年7月～) 名城大学 天野 浩 (平成19年6月～平成21年7月) サブリーダー 大阪大学 森勇介、名城大学 天野浩 | | | | |
| | 委託先 (*委託先が法人の場合は参加企業数および参加企業名も記載) | 企業、研究機関：(国)大阪大学、(国)福井大学、(学)名城大学 昭和電工(株)、住友電気工業(株)、サンケン電気(株) 管理法人：(財)金属系材料研究開発センター(参加4社) 豊田合成(株)、日本ガイシ(株)、シャープ(株)、(株)豊田中央研究所 再委託先：古河機械金属(株) | | | | |
| 情勢変化への対応 | <p>ナノテクノロジー・材料技術開発部主催による「技術推進委員会(年1回)」を開催して外部有識者の意見を運営管理に反映している。</p> <p>平成19年度の第一回技術推進委員会では、委員会提言として「基板・エピグループから【基板】が流れ出るためのグループ間の連携強化」がなされ、対応策として「研究加速による基板供給スピードのアップ」の見直しを行った。</p> <p>その結果、加速資金等の支援を得て基板供給がスピードアップし、展示会ナノテック2009では①「世界最高品質2インチ有極性GaN基板の実現」、②「世界初めてAlGaInの原子レベル成長の実現」、③「内製有極性AlGaIn/GaNエピ上にHEMTで高ドレイン電流の実現」の3つの世界初の成果について広く情報発信を行った。</p> <p>また、平成20年度の第二回技術推進委員会では、「バルク基板の実用化を前倒しする単結晶長尺化等の取り組みが必要」との委員会提言があり、現在、窒化物結晶長尺化技術開発のためのGa連続供給機能付結晶育成装置導入について検討を行っており、機械装置及び消耗品等の費用増が今後の課題である。</p> | | | | | |
| 評価に関する | 事前 | 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 | | | | |

| 事項 | 事後評価 | 平成23年度 事後評価実施予定 |
|-----------------|--|---|
| III. 研究開発成果について | <p>研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」においては、溶液攪拌強化による面内成長厚さ、品質バラツキ低減を実施したところ、機械的揺動と熱対流の組み合わせによる攪拌において、各種揺動条件を検討することにより、φ3インチ基板の全面にLPE成長することができた。面内の厚さバラツキはφ2インチと同等であった。φ2インチ高品質有極性基板、無極性基板の結晶性改善を実現し、導電性制御技術を確立した。</p> <p>研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」においては、高速バルブスイッチングで良好なHFET構造を実現し、またAlN基板の有用性を世界で初めて実証した。加圧システムへの窒素及び水素の安定供給実現したところ、Al_{0.25}Ga_{0.75}N(100nm)/GaNでX線半値幅160秒、AFM荒さ指数0.7nmを達成し、大口径基板上の高均一・高品質結晶成長技術を開発した。また、圧力印加により、GaInN中のInNモル分率の増加を実証し、圧力印加成長の有用性確認した。</p> <p>研究開発項目③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価」においては、研究開発項目①で育成したGaN基板上に研究開発項目②でAlGaN/GaNヘテロ接合をエピタキシャル成長し、その上にプロセス要因を極力排除した標準プロセスを用いて、プレーナ円形ゲート構造の電界効果トランジスタを作製した。試作したゲート長3μmの素子において、最大ドレイン電流510mA/mmの良好な特性を確認した。また、同GaN基板上に作製した縦型p-nダイオードにおいて、1kVを超える逆耐圧が実測され、市販HVPE基板に対する逆耐圧特性の優位性を確認した。</p> <p>以上から、各Gとも平成20年度の研究開発目標は達成し、平成21年度目標の早期達成に向けて研究開発を実施中である。</p> | |
| | 投稿論文 | 「査読付き」10件、「その他」40件 |
| | 特許 | 「出願済」32件、「登録」0件、「実施」0件 |
| | その他の外部発表 (プレス発表等) | COMPOUND SEMICONDUCTOR、Volume14 No. 4. P. 20 (2008) |
| IV. 実用化の見通しについて | <p>プロジェクトリーダーとともに著名な研究者をグループリーダーとして配し、基板、エピ、デバイスの各グループの有する研究開発ポテンシャルを最大限活用することにより効率的な研究開発を実施し、従来の半導体材料では実現できない領域で動作可能なハイパワー・超高効率の電力素子、超高速電子素子等の作製に必要な窒化物半導体結晶成長技術の確立を行うことにより、2014年頃からハイパワー・超高効率の電力素子、超高速電子素子が実用化され、我が国のエネルギー消費量削減に大きく貢献する。汎用インバータのみをとってみても、省エネ効果は2030年において原油換算281万kLに相当することが期待される。</p> | |
| V. 基本計画に関する事項 | 作成時 | 平成19年3月 制定 |
| | 変更履歴 | 平成20年7月 イノベーションプログラム基本計画の制定により「(1)研究開発の目的」を改訂 |

プロジェクト用語集

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

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

| | | |
|----|------------------------|---|
| | (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AIN厚膜を成長する方法で、成長速度が数百 $\mu\text{m}/\text{時}$ とMOVPEと比べて、10~100倍と高く、単結晶基板作製の工法の一つ。 |
| 40 | LPE (液相エピタキシ) | Liquid phase epitaxyの略。結晶成長の方法として、溶液から固相結晶を基板の配向性を維持させながら晶出させる方法である。 |
| 41 | MOVPE (有機金属気相エピタキシ) | Metal-Organic Vapor Phase Epitaxyの略。原料として有機金属やガスを用いた結晶成長方法原子層オーダで膜厚を制御することができるため、半導体レーザを初めとする数nmの設計が必要な分野で用いられる。 |
| 42 | PL (フォトルミネセンス) | Photoluminescenceの略。半導体に光を照射した際に生じる発光現象で、半導体中の不純物評価等に用いられる。 |
| 43 | SIMS | Secondary Ion-microprobe Mass Spectrometerの略。試料にイオンビームを照射して飛び出したイオンの数を数えることによって、試料の化学組成などを評価する方法。 |
| 44 | TEM | Transmission Electron Microscopeの略。透過型の電子顕微鏡観察方法。 |
| 45 | 2DEG (2次元電子ガス) | Two Dimensional Electron Gasの略。半導体中で二次元状に電子が分布する状態を示す。半導体同士や半導体と絶縁体を接合することで、半導体中に電子が充満する。これを電子ガスといい、これが通常、二次元状に分布するため、二次元電子ガスと言う。 |
| 46 | XRC | X-Ray Rocking Curveの略。X線ロックンクカーブの事で、X線回折強度の角度分布を精密に測定した曲線を指す。 |
| 47 | XRD | X-Ray Diffractionの略 X線の回折により結晶性を評価する方法。 |

I. 事業の位置付け・必要性について

1. NEDO の事業としての妥当性

1.1 NEDO が関与することの意義

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

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

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

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

社会的背景
地球温暖化対策は喫緊の世界的、国家的課題

↓

抜本的CO₂排出抑制、省エネ技術の必要性

事業の目的
次世代省エネデバイスの実現による電力損失の削減

↓

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

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

3/56

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

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

4 エネルギーイノベーションプログラム
①総合エネルギー効率の向上

基礎研究

ナノエレクトロニクス
半導体新材料・新構造
5.5億円(5.0億円)

7/56

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

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

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

2. ナノテク・部材イノベーションプログラム

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

6/56

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

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

1. ITイノベーションプログラム

省エネを支える
7コア基盤技術
GaN (ナニル)
5.5(5.0)

5/56

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

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

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

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

公開

＜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 | 【ITイノベーションPG】21年度要求額:310億円(一般150億円、特命160億円) 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。 ドリームマップ開発プロジェクト 一般 15億円(12億円) グリーンITプロジェクト 特命 60億円(30億円) |
| 低炭素社会実現・資源制約克服 | 低炭素 | 【ナノテク・部材PG】21年度要求額:220億円(一般120億円、特命100億円) 省エネ・省資源・省エネルギー等の制約克服、異分野・異業種との連携による新たな付加価値を生み出すプロジェクトに重点化。 異分野連携ナノテクイノベーション 一般 10億円(10億円) 異分野連携ナノテクイノベーション 特命 30億円(30億円) |
| 安全・安心社会の構築 | 安全・安心 | 【ロボット・新機械PG】21年度要求額:50億円(一般) 生活支援ロボット等の次世代ロボットの活用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(新機) 次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト 一般 10億円(10億円) |
| 経済社会の改善推進 | 低炭素 | 【エネルギーPG】21年度要求額:1,668億円(特命) 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 特命100億円(100億円) グリーンITイノベーションPG/ナノエレクトロニクス基盤技術開発 特命 10億円(新機) 革新的蓄電池先端科学基礎研究事業 特命 30億円(新機) |
| | 低炭素 | 【環境対応PG】21年度要求額:230億円(一般60億円、特命170億円) 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出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革新的エネルギー技術開発 特命10億円(10億円) バイオマスエネルギー等革新的エネルギー技術開発 一般 10億円(新機) 省エネ・環境調和型産業推進プロジェクト 一般 7億円(新機) 特命 7億円(新機) |

4/56

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

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

公開

高周波・パワーデバイス用としての省エネデバイスの実現は、

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

↓

NEDOがもつこれまでの知識、実績を活かして推進すべき事業

1.2 実施の効果(費用対効果)

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

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

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

| 9 | ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 中間評価委員会(2009.8.31) 事業原簿 I-3-1 | 10 | ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 中間評価委員会(2009.8.31) 事業原簿 I-3-1 |
|---|--|---|--|
| 1. 事業の位置付け、必要性について (1) NEDOの事業としての妥当性(事業予算に対する効果) | | 1. 事業の位置付け、必要性について (1) NEDOの事業としての妥当性(事業予算に対する効果) | |
| 事業費用の総額 30億円/5年 | | 市場の効果(携帯基地局の送信用増幅器) 2020年基地局 従来Si & GaAs 3万局 新規GaNデバイス 2.1万局 | |
| 市場の効果(汎用インバータ(3.7kW級)@2020年) 製品販売額 250億円/年(年間25万台で計算) 普及台数 1200万台/計4100万台 削減電力 49億kWh/年 削減電気代 490億円/年(10円/kWhで計算) | | 省エネルギー効果(消費電力量) 従来Si & GaAs 4.2kW/局 新規GaNデバイス 1.6kW/局 2020年電力削減 50億kWh/年 ⇒ 500億円/年 | |
| 省エネルギー効果 80万kI/年(2020年推定、原油換算) 280万kI/年(2030年推定、原油換算) 2002年全産業モータ比では、約3%相当 730万トン/年(2030年推定、CO₂換算) | | 省エネルギー効果(CO₂排出削減) 2020年推定 270万トン/年(原油換算 100万kl/年) 2030年推定 500万トン/年(原油換算 190万kl/年) | |
| (参考) 我が国のCO ₂ 発生量=20.5億トン(2002年) 内、全産業モータのCO ₂ 発生量=2.5億トン | | | |
| (出典: (社)日本機械工業協会[日機連]8先導-9]報告書) | | (出典: (社)日本機械工業協会[日機連]8先導-9]報告書) | |

I-12. 事業の背景・目的・位置づけ

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

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

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

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

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

1. 事業の位置付け、必要性について (公開)

(2) 事業目的の妥当性(国内外の動向)

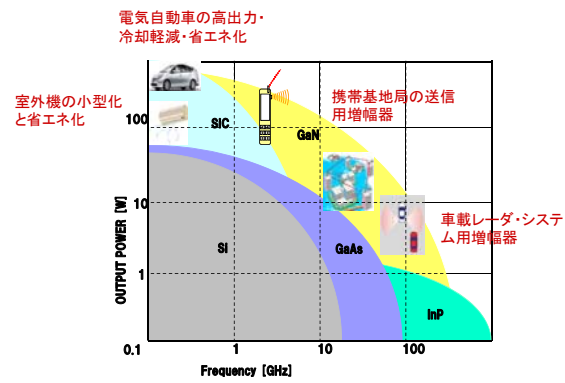
| 有極性GaN基板 | | | 無極性基板 | |
|----------|-------|---------|---------|-------|
| 成長方法 | 基板サイズ | 成長速度 | 成長方法 | 基板サイズ |
| HVPE法 | 4インチ | 400μm/h | HVPE | 2インチ |
| アモノサーマル | 4インチ | 4μm/h | アモノサーマル | 4インチ |
| 高圧HVPE | 30mm | 2μm/h | | |
| Naフラックス | 4インチ | 30μm/h | Naフラックス | 2インチ |

2011年数値目標(出典:IMN2008 古河機械金属(株) 堀井氏資料)

| 有極性大型GaN基板の開発実績 | | | |
|-----------------|----------|------------|-----------------|
| 成長方法 | 開発年 | 基板サイズ | 実施者 |
| HVPE | 2007 | 2インチ | 日立化成 |
| | 2008 | 2インチ | 住友電工 |
| | 2010(計画) | 4インチ | 住友電工 |
| アモノサーマル | 2008 | 1インチ | Ammono SP. Z0.0 |
| Naフラックス | 2008 | 2インチ×厚3mm | 大阪大学 |
| HVPE | 2008 | 40mm□×厚7mm | 古河機械金属 |

2008年の達成状況(出典:IMN2008 古河機械金属(株) 堀井氏資料)

12/56



13/56

2016年に期待される窒化系基板サイズと価格の動向に関する見通しについて、窒化物半導体国際ワークショップ(International Workshop on Nitride semiconductor 2008、略称IWN2008)は、窒化物基板サイズと価格動向を報告し、2008年と2016年とのギャップを示した。具体的には、基板サイズは現行2インチから4~6インチへ大型化し、価格は現行1枚1万ドルから1枚数百ドルまで引き下げる必要があることが述べられ、実用化に向けた研究開発の必要性を唱えた。また、2008年においてコマースナルサンプルが開始された基板を紹介し、HVPE法による有極性GaN基板(サイズ2インチ未満)と無極性GaN基板(小サイズ)が、そしてアモノサーマル法によるGaN基板とがサンプル供給段階であるとし、これまでの研究開発における成果を認める一方で、実用化のスピードとしては決して十分ではないとした。

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

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

11/56

II. 研究開発マネジメントについて

II 1. 事業の目標

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

15

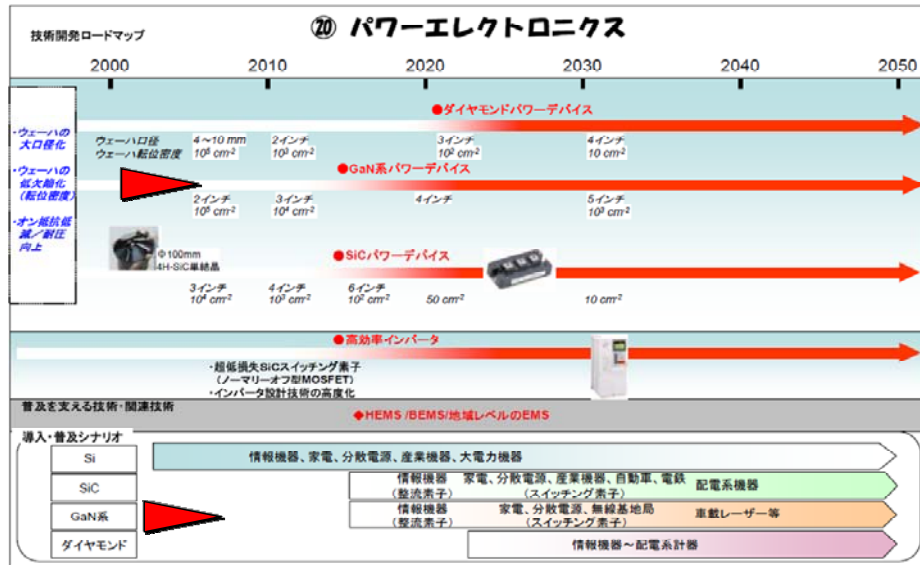
ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 中間評価委員会(2009.8.31)

事業原簿 II-1-1

2. 研究開発マネジメントについて

公開

(1) 研究開発目標の妥当性(事業の目標設定/Cool Earth)



15/56

① 高品質大口径単結晶基板の開発

中間目標:平成21年度

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

最終目標:平成23年度

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

② 高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発

中間目標:平成21年度

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

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

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

最終目標:平成23 年度

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

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

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

③ 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価

中間目標:平成21 年度

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

最終目標:平成23 年度

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

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

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

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

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

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

基本計画に反映

2007年(PJ前) NEDO POST デバイスの参画

(出典:JWN2008 古河機械金属(株) 磯井氏資料)

14/56

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

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

16/56

① 高品質大口径単結晶基板の開発

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

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

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

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

③ 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価

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

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

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

II.2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

本事業の目標を達成するために、以下の研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を委託により実施する。本研究開発の期間は、平成19年度から平成23年度までの5年間とする。

17

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

事業原簿 II-2-1

2. 研究開発マネジメントについて

公開

(2)研究開発計画の妥当性(目標達成のスケジュール)



17/56

① 高品質大口径単結晶基板の開発

(1) 窒化物単結晶成長における基礎技術の検討

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

(2) 大口径種結晶の開発

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

(3) 高導電性窒化物単結晶基板の開発

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

(4) 高抵抗化窒化物単結晶基板の開発

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

② 高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発

(1) 大口径基板上の高品質エピタキシャル結晶成長技術

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

(2) 高In 組成窒化物層成長技術

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

(3) 高Al 組成窒化物層成長技術

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

(4) 結晶成長その場観察評価技術

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

③ 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価

(1) 横型電子デバイスの評価

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

(2) 縦型電子デバイスの評価

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

(3) 窒化物単結晶基板上デバイスの優位性確認

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

(4) 有極性、及び無極性デバイス構造の比較

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

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

公開

| 研究開発項目 | 19年度 | 20年度 | 21年度 | 22年度 | 23年度 | 合計(百万円) |
|---|--------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| ① 高品質大口径単結晶基板の研究開発 有極性・無極性 低抵抗・高抵抗 | 249 | 171 (+85) | 177 | 169 | 259 | 1110 |
| ② 高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発 AlGaIn・InGaIn GaInホモエピ | 285 | 288 (+126) | 117 | 113 | 179 | 1108 |
| ③ 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイス作製と評価 FET試作評価 | 52 | 81 (+149) | 26 | 50 | 26 | 384 |
| 合計 (提案時要求額) | 586 (470) | 540 (740) (+360) | 320 (701) | 332 (629) | 464 (460) | 2602 (3000) |

18/56

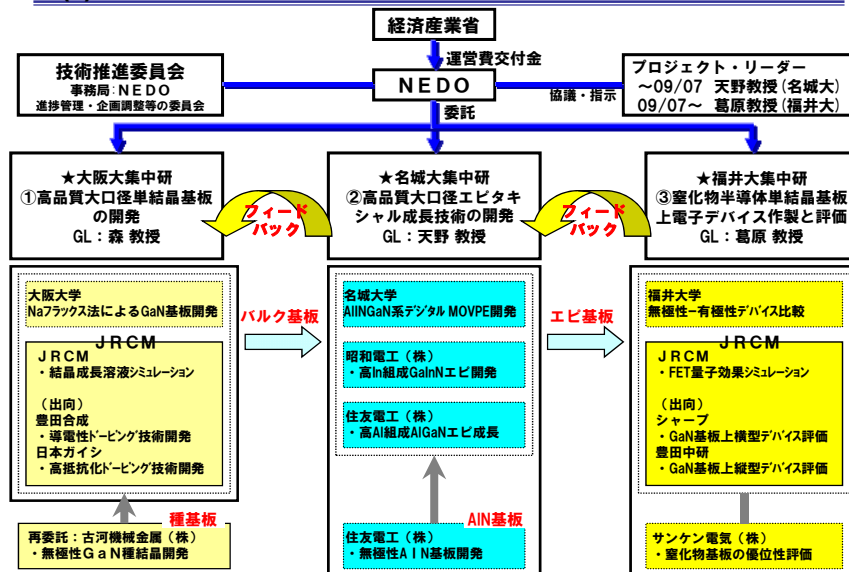
2.2 研究開発の実施体制

本研究開発は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(以下、「NEDO技術開発機構」という。)が、単独ないし複数の原則本邦の企業、研究組合、公益法人等の研究機関(原則、国内に研究開発拠点を有していること。ただし、国外企業の特別な研究開発能力、研究施設等の活用あるいは国際標準獲得の観点からの国外企業との連携が必要な場合はこの限りではない。)から公募によって研究開発実施者を選定し実施する。

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

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

公開



19/56

2.3 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDO技術開発機構は、経済産業省および研究開発責任者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的および目標、並びに、本研究開発の目的および目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて設置される技術検討委員会等における外部有識者の意見を運営管理に反映させる他、四半期に一回程度プロジェクトリーダー等を通じてプロジェクトの進捗について報告を受けること等を行う。

21

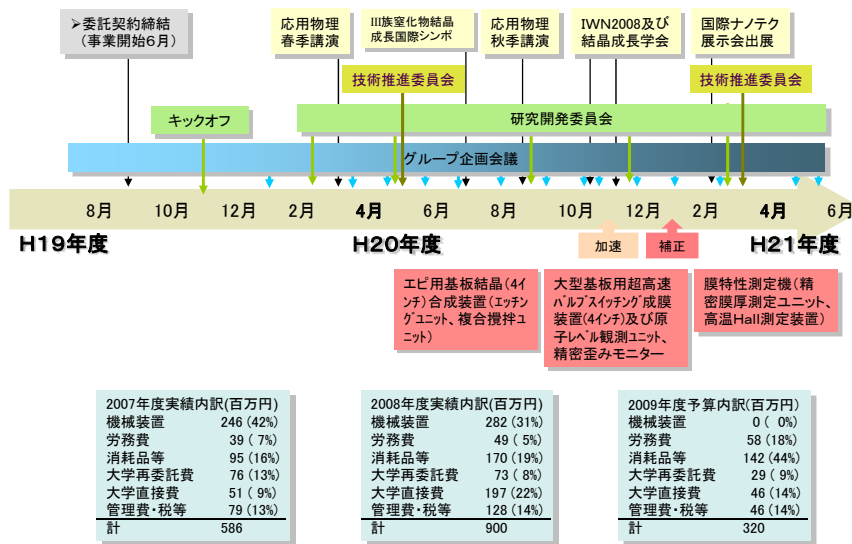
ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 中間評価委員会(2009.8.31)

事業原簿 II-4-1

2. 研究開発マネジメントについて

公開

(3) 研究開発実施の事業体制の妥当性(実施者間の連携)



21/56

NEDO技術開発機構は、技術的および政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義ならびに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成21年度、事後評価を平成24年度に実施する。また、中間評価結果を踏まえ必要に応じプロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

20

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

事業原簿 II-4-1

2. 研究開発マネジメントについて

公開

(3) 研究開発実施の事業体制の妥当性(実用化の想定者)

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

20/56

3. 情勢変化への対応

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

(1) 平成19年度・技術推進委員会(平成20年5月9日)

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

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

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

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

24

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

事業原簿 II-5-1

2. 研究開発マネジメントについて

公開

(4) 情勢変化への対応等(進捗状況の把握と対応)

平成19年度・技術推進委員会(平成20年5月9日)

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

(反映内容) 研究加速による基板供給スピードのアップ。

(委員会提言)

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

(対処方針)

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

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

24/56

(2) 平成20年度・技術推進委員会(平成21年3月23日)

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

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

以下、平成20年度の成果

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

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

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

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

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

26/56

III 研究開発成果について

III-1 事業全体の成果

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

詳細は「Ⅲ.2 研究開発項目毎の成果」で述べるが、その概要は以下のとおりである。

研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」

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

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

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

研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」

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

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

研究開発項目③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価」

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

表1 研究開発項目毎の目標に対する達成度

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

次頁へ続く

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

前頁から続く

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

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

プロジェクト全体の成果発表内訳

特許, 論文, 外部発表等の件数(内訳)

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

III-2 研究開発項目毎の成果

III-2-1 高品質大口径単結晶基板の開発

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

(1) 窒化物単結晶成長における基礎技術の検討

① 溶液状態制御技術の開発

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

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

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

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

② 核発生・成長方位・転位制御技術

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

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

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

(2) 大口径種結晶の開発

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

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

(3) 高導電性窒化物単結晶基板の開発

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

(4)高抵抗化窒化物単結晶基板の開発

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

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

表 1 目標に対して得られた成果, 達成度, 及び今後の課題

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

(1)窒化物単結晶成長における基礎技術の検討

① 溶液状態制御技術の開発

・溶液攪拌条件の検討

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

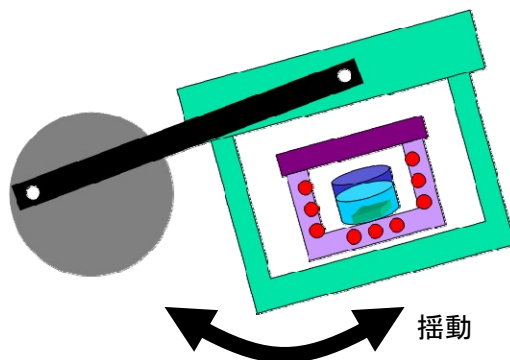


図 1 機械式揺動育成炉の概略図

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

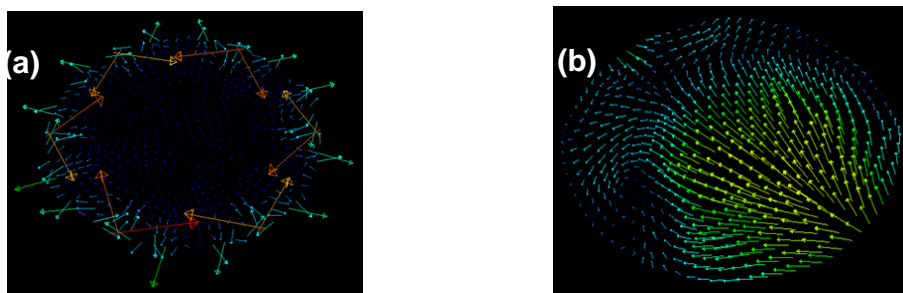


図 2 (a)揺動無し、(b)揺動有り(1rpm)条件での基板表面における流れの計算結果

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

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

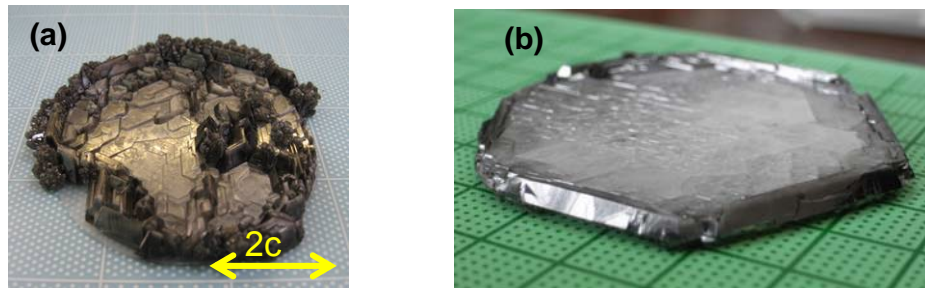


図3 (a)揺動無し、(b)揺動有り(1rpm)条件で成長した GaN 結晶写真

・大口径化にむけた大型育成装置開発

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



図4 大型 GaN 結晶育成装置

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

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

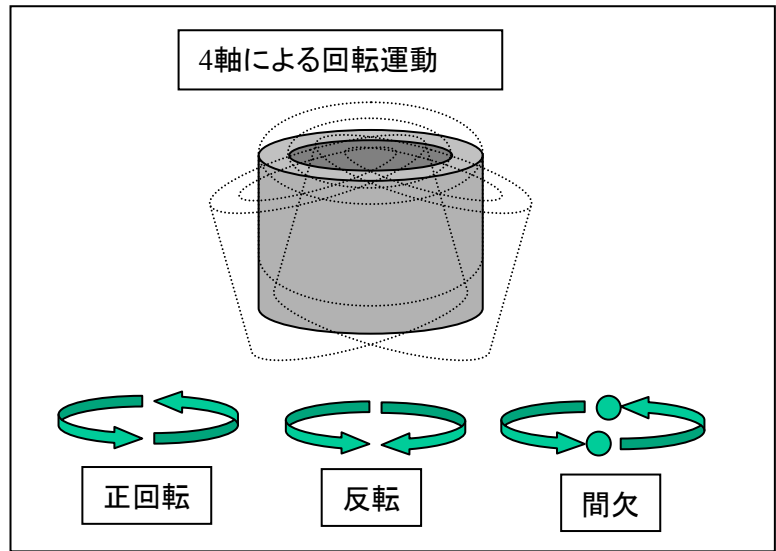


図5 4軸揺動機構付大型 GaN 結晶育成装置と揺動パターン

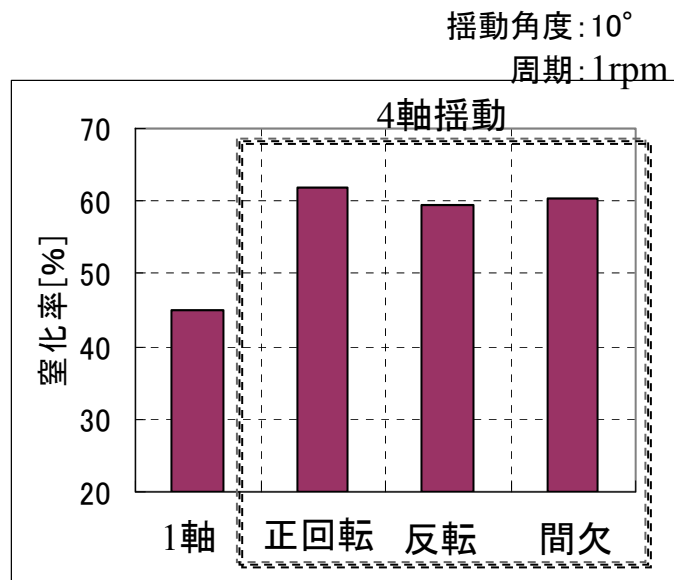


図6 揺動パターンと窒化率の相関

育成した2"結晶の膜厚分布(0.1mm等高線)

揺動角度: 10°
周期: 1rpm

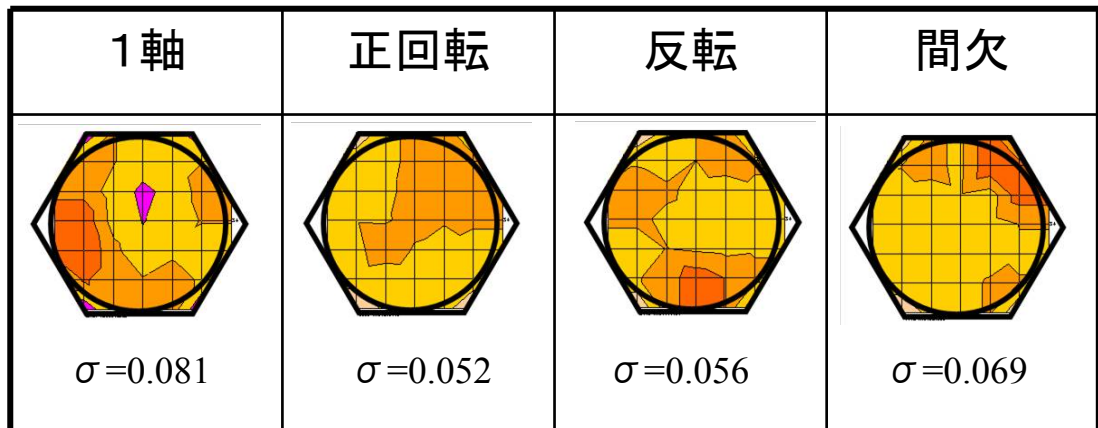


図7 揺動パターンと GaN 結晶膜厚分布の相関



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

②核発生・成長方位・転位制御の開発

・転位減少機構の解明

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

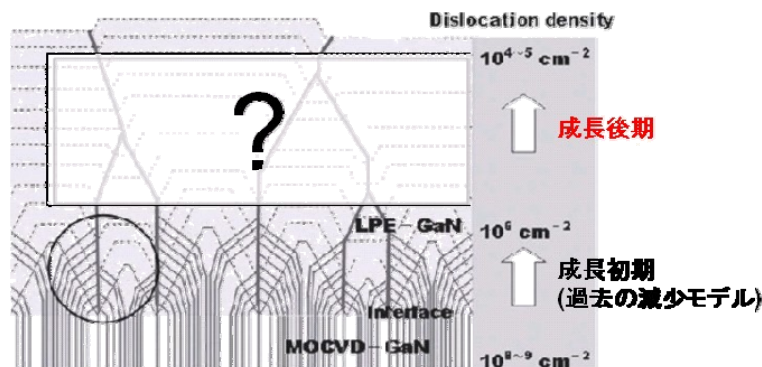


図 9 Na フラックス法における自発的転位減少モデル

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

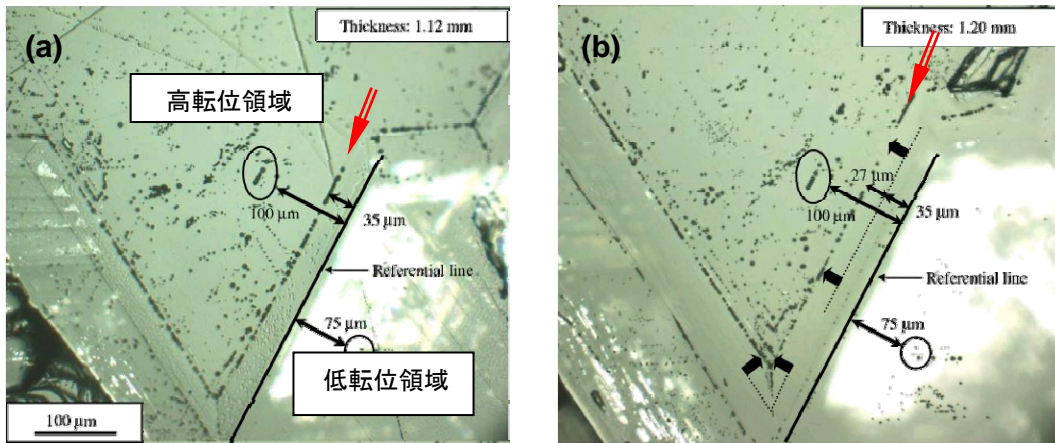


図 10 (a)1.12mm、(b)1.2mm 厚さ表面におけるエッチング後の顕微鏡写真

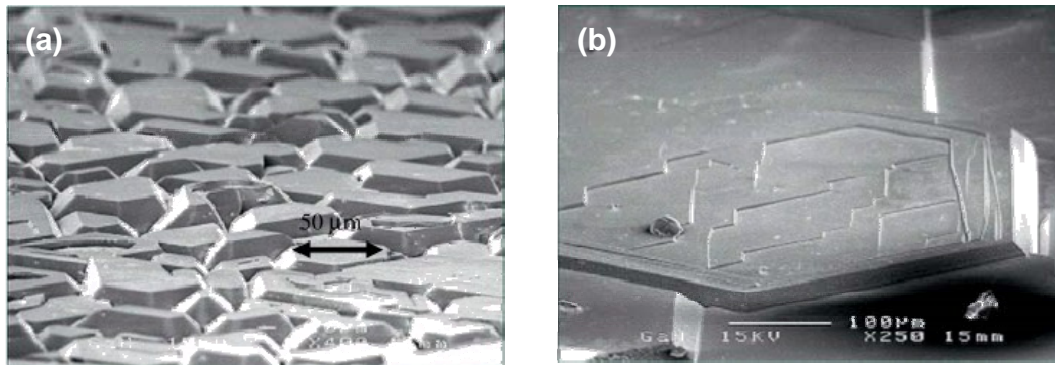


図 11 成長(a)初期、(b)後期の結晶表面の電子顕微鏡像

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

・転位減少機構の制御

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

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

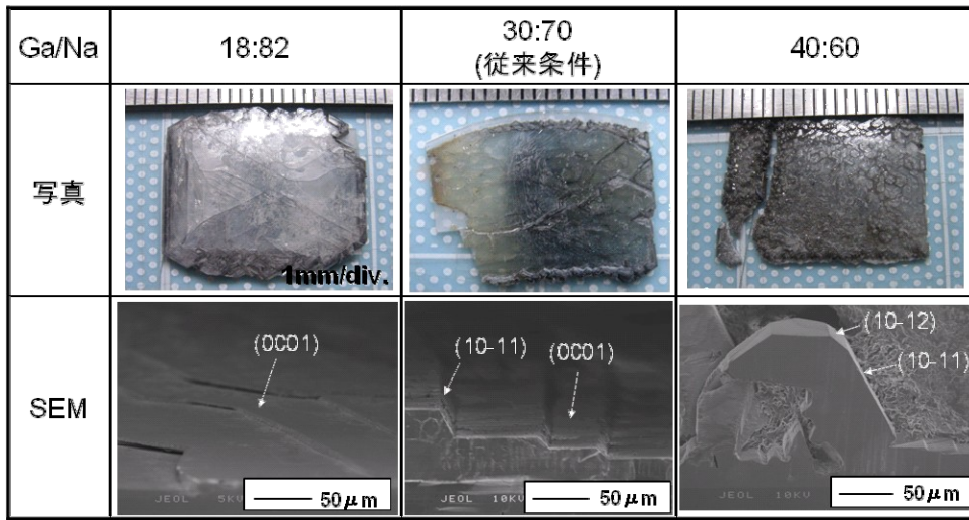


図 12 各 Ga/Na 比で成長した GaN 結晶の写真と鳥瞰電子顕微鏡写真

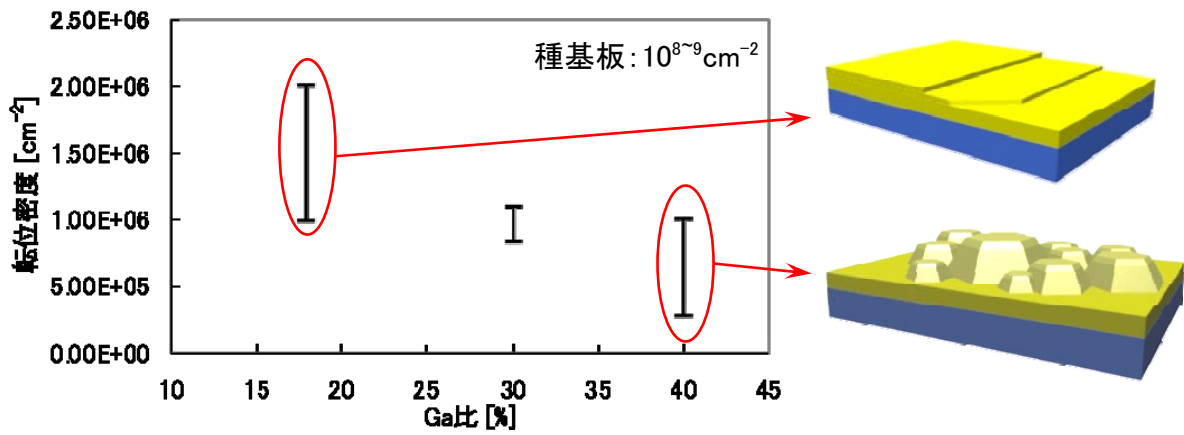


図 13 各 Ga/Na 比で成長した GaN 結晶の転位密度とモフォロジー

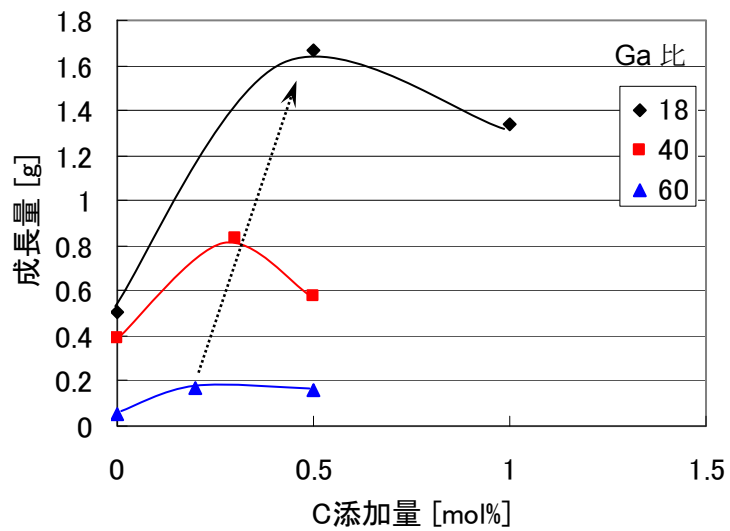


図 14 成長量の溶液組成・C 添加量依存性

図 14 は成長量(成長速度)の Ga 組成・C 添加量依存性である。成長量(成長速度)は、低 Ga 組成条件ほど増加することが明らかになった。

以上の結果より、前項で示した転位減少メカニズムにおける二段階成長は、Ga/Na 組成の時間変化により引き起こされると予測される。GaN の成長とともに溶液中の Ga が消費されるため、Ga/Na 組成は時間的に変化する。つまり、成長初期は Ga 組成が高いため(10-11)面が成長し、成長後期は Ga 組成が低下するため横方向成長が支配的になると考えられる。Na フラックス法での自発的な転位低減は以上のようなメカニズムで進行することが考えられる。

今後、低品質種基板上において、さらに転位密度が低いバルク GaN 単結晶成長を実現するためには、Ga 原料や Na の連続供給機構を導入し、転位が減少しやすい成長モード(高 Ga 組成)と高速成長が期待できる成長モード(低 Ga 組成)を人為的に制御することが必要である。また、今後、繰り返し成長などにより高品質種基板が作製されると、その場合は、転位減少よりも成長量(成長速度)の増大を優先する成長モードを維持することになると考えられる。

・育成圧力制御によるインクルージョン低減

インクルージョンの取り込み抑制に向けて育成条件(窒素圧力)と成長様式の相関を調べた。2 インチ以下の結晶成長では、攪拌を導入することでインクルージョンはほとんど取り込まれないことが明らかになっているが、本研究ではインクルージョンの取り込みに対する育成窒素圧力の影響を明確にするため、攪拌の無い小型育成炉を用いて調べた。

育成窒素圧力 2.7MPa~3.8MPa の各条件で成長した GaN 結晶のインクルージョン率を図 15 に示す。インクルージョン率は基板面積に対するインクルージョン混入領域の面積比率を表す。従来条件(>3.7MPa)では 40~60%の領域にインクルージョンが混入したが、育成窒素圧力の減少とともにインクルージョン率は低下し、2.7MPa の条件でインクルージョン率 5%以下を達成した。

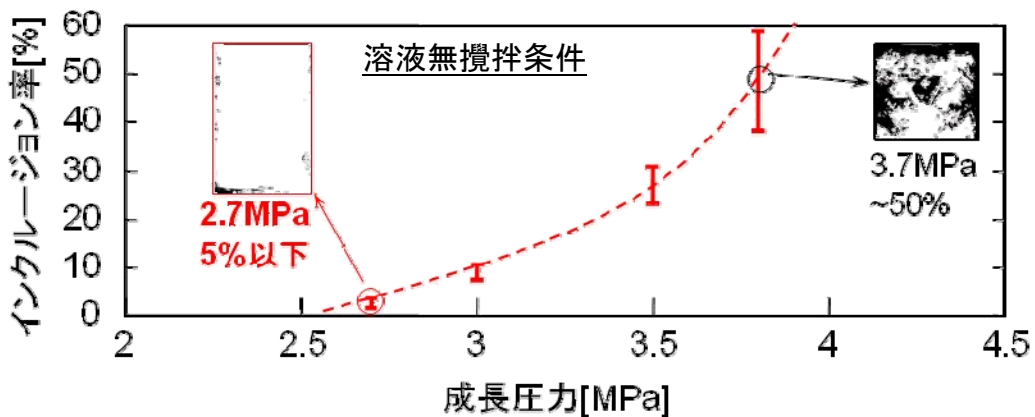


図 15 インクルージョン率の育成窒素圧力依存性



図 16 インクルージョンの混入モデル

図 16 は本研究より予想されるインクルージョンの混入モデルである。各圧力で成長した GaN 結晶表面の電子顕微鏡観察の結果、高圧条件で成長した GaN 結晶はステップ高さが高く、ステップ上部が張り出す現象(オ

オーバーハング、図 16②)が見られた。これは、ステップ上部と下部の窒素濃度の差に起因すると考えられる。オーバーハングが起こると張り出したステップによって溶液成分が覆われてインクルージョンとして結晶中に残留する(図 16④)。低圧条件ではステップ付近の窒素濃度分布が生じにくく、オーバーハングがほとんど起こらなかったため、インクルージョンが減少したと予測される。

以上の結果より、インクルージョンの低減には、溶液攪拌や低圧育成で実現される基板表面の窒素濃度均一化が重要であることが分かった。

核発生制御、熱対流攪拌、機械式揺動攪拌、溶液組成制御、窒素圧力制御で得られた知見をもとに、育成した2インチ有極性Ga₂O₃基板を図17に示す。これらの結晶は、2009年2月に東京ビッグサイトで開催された展示会ナノテク2009フェアにて展示された。

現在、2インチφ有極性基板上における転位密度は $10^4\text{cm}^{-2}\sim 10^5\text{cm}^{-2}$ 台とほぼ中間目標通りの値を達成しているが、今後、上記知見を更に検討することで転位密度の低減を目指していく。



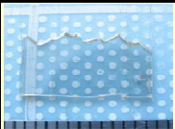
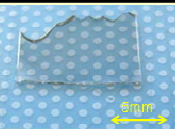
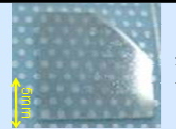


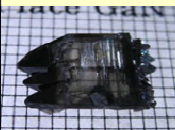
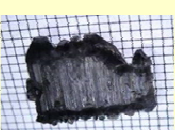

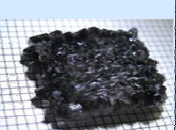

図 17 揺動式溶液攪拌法により育成した 2 インチ有極性 GaN 基板

・各種無極性種基板結晶上での成長

Naフラックス法により低転位無極性基板を得るため、様々な無極性面種基板上へのLPE成長を行い結晶性(X線ロッキングカーブ半値幅)と転位密度を比較した。使用した基板とX線ロッキングカーブ半値幅を表1(上段)に示す。種基板には以下に示す5種類の基板を使用した。

- i) m-切り出し基板:5mm厚さの有極性Ga₂O₃基板(HVPE法で作製)をm方向と垂直な面でスライスした基板。結晶性良好。大面積化が困難。
- ii) a-切り出し基板:5mm厚さの有極性Ga₂O₃基板(HVPE法で作製)をa方向と垂直な面でスライスした基板。結晶性良好。大面積化が困難。
- iii) a-MOVPE基板(ELO):r面サファイア上にMOVPE+ELO法で製膜したa-GaN膜。大面積化可能。
- iv) a-MOVPE基板(SELO):r面サファイア上にMOVPE+SELO法で製膜したa-GaN膜。大面積化可能。
- v) m-HVPE基板:HVPE法で作製したm-GaN自立基板。大面積化可能。

表 I 各種基板と X 線ロックアップカーブ半値幅(上段)と各種基板上に成長した GaN 結晶の写真と X 線ロックアップカーブ半値幅(下段)

| | m-切り出し基板 | a-切り出し基板 | a-MOCVD基板 (ELO) | a-MOCVD基板 (SELO) | m-HVPE基板 |
|---------|---|---|---|--|---|
| 種基板 |  |  |  |  |  |
| XRC 半値幅 | 72 arcsec | 52 arcsec | 652 arcsec | 1358 arcsec | 830 arcsec |
| 成長結晶 |  |  |  |  |  |
| XRC 半値幅 | 100 arcsec | 46.8 arcsec | 52.2 arcsec | 102 arcsec | 1300 arcsec |

育成温度 850°C, 育成窒素圧力 40atm, 育成時間 96 時間, Sr 無添加の条件で各種基板上に LPE 成長を行った。表 I(下段)に成長した GaN 結晶写真と X 線ロックアップカーブ半値幅を示す。切り出し基板上に成長した GaN 結晶は透明, かつ表面モフォロジー, 結晶性(FWHM<100arcsec)ともに極めて良好であった。a-MOVPE 基板上に育成した結晶は個々のグレインの結晶性は良好(FWHM<100arcsec)であったが, グレイン同士の配向性が悪く, 切り出し基板上での育成と比較してグレインの開合が起こりにくいと言える。m-HVPE 基板上に育成した結晶はグレインサイズが小さく, グレイン同士の開合は起こらなかった。

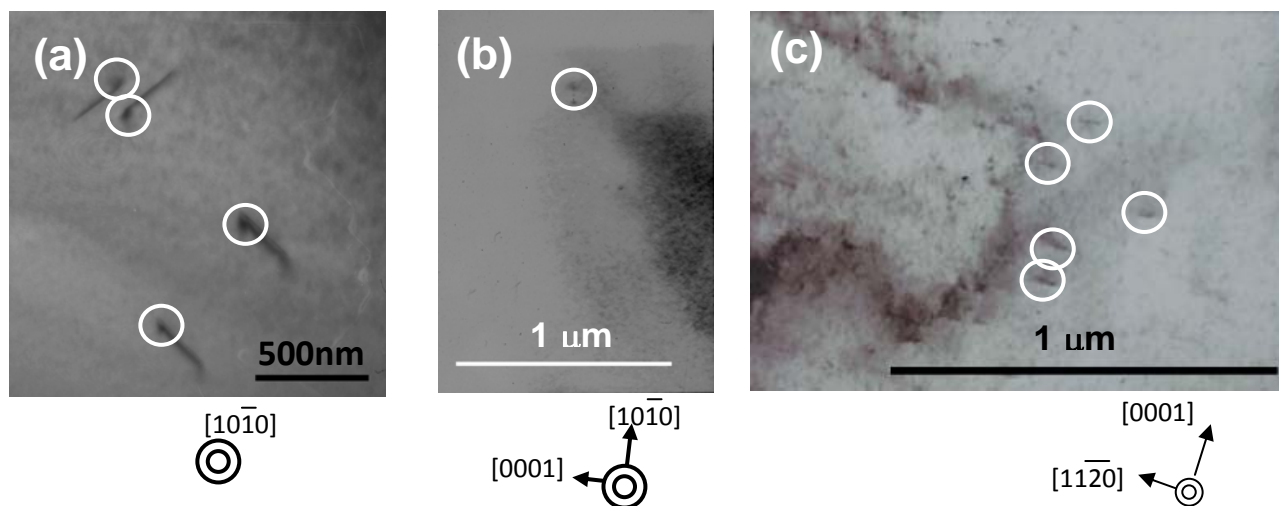


図 18 (a)m-切り出し基板上、(b)a-切り出し基板上、(c)m-HVPE 基板上に成長した GaN 結晶の表面 TEM 像

図 18 はそれぞれ m-切り出し基板、a-切り出し基板、m-HVPE 基板上に LPE 成長した結晶の表面 TEM 像である。白丸で示される暗点は転位を示している。TEM 像より見積もった転位密度は、a-切り出し基板、及び m-切り出し基板上に LPE 育成した結晶では、多いところでも $\sim 1 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$ であり、部分的には $< 10^6 \text{cm}^{-2}$ であった。一方、m-HVPE 基板上に LPE 育成した結晶では、多くの粒界が観測され、転位密度も $\sim 10^8 \text{cm}^{-2}$ であったが、m-HVPE 基板の転位密度は計測が困難なほど多数存在しているとみられることから、Na フラックス法により転位は低減していることが分かった。

これらの結果は、Na フラックス法を用いて無極性面成長を行った場合でも、有極性面成長と同様に転位密度が減少し、結晶性が改善されることを示す。特に、a 面、及び m 面成長において、種基板結晶の転位密度が低いほど、低転位無極性単結晶成長に有用であることが明らかになった。

・Sr 添加による成長方位制御

大面積化が容易な m-HVPE 基板を用いた場合、m 面がほとんど現れず、グレイン同士の開合も起こりにくい。そこで、成長方位制御元素である Sr を添加することで、m-HVPE 基板上 GaN 結晶のモフォロジー改善を試みた。フラックスに対する Sr の添加量を 0~30mmol%とし、各 Sr 添加量条件で成長した GaN 結晶のアスペクト比 (c 軸方向長さ/a 軸方向長さ)を 図 19 にプロットした。図 19 より、Sr 添加量の増加とともにアスペクト比が増大、つまり、m 面が広く出現することが確認された。

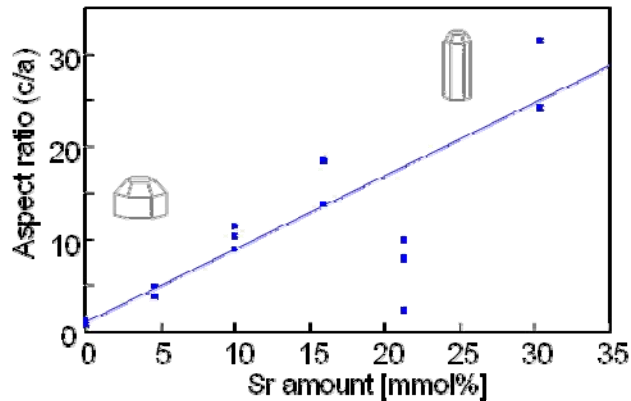


図 19 坩堝上に成長した GaN 結晶のアスペクト比の Sr 添加量依存性

・Sr-C 同時添加効果

Sr-C 添加系において、m 面 HVPE 自立基板上への無極性 GaN 結晶成長を行った。図 20 に、LPE 収率、坩堝壁上多結晶収率の Sr 添加量依存性を示す。Sr 添加量の増加とともに LPE 収率が減少し、15mmol%以上の Sr 添加量では、核発生抑制元素である C 添加に関わらず多結晶成長が顕著になった。アスペクト比、LPE 収率、多結晶収率を考慮すると、Sr 添加量は 5~10mmol%が適していることが分かった。

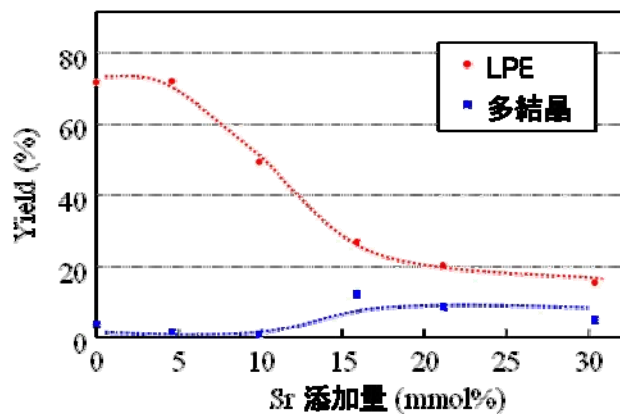


図 20 LPE 収率・多結晶収率の Sr 添加量依存性

図 21 は Sr 無添加、5mmol%添加の条件で成長した GaN 結晶写真、断面蛍光顕微鏡写真の比較である。m 面 HVPE 自立基板上に成長した GaN 結晶は Sr 添加有無に関わらず多数のグレインが集まったモフォロジーを形成した。Sr 無添加条件ではグレインサイズが小さく、m 面はほとんど現れなかった。一方、Sr 5mmol%添加では、無添加で成長した GaN 結晶と比較してサイズが大きく m 面が広く現れたグレインが成長した。

m 面 HVPE 自立基板と Sr 添加条件で成長した GaN 結晶の表面 CL 像をそれぞれ図 22(a), (b)に示す。CL 像より、m-HVPE 自立基板に見られた多数の粒界(図 22(a))は、GaN 結晶ではほとんど存在しなかった。図

22(b)において c 軸方向に垂直な暗線は積層欠陥であると考えられる。

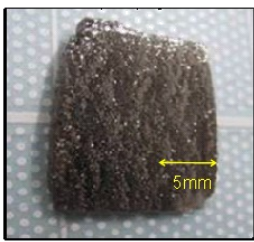
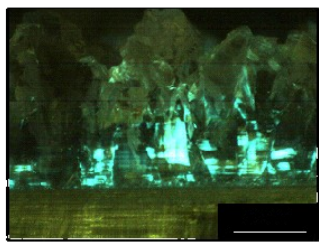
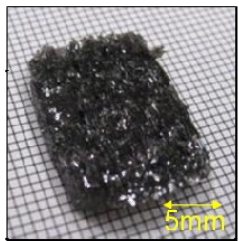
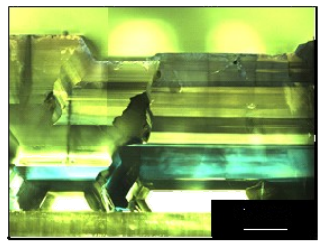
| Sr添加量 | 結晶写真 | 断面蛍光像 |
|---------|---|--|
| 無添加 |  |  GaN 結晶 種基板 |
| 5 mmol% |  |  GaN 結晶 種基板 |

図 21 Sr 無添加、5mmol%添加条件で成長した GaN 結晶写真と断面蛍光写真

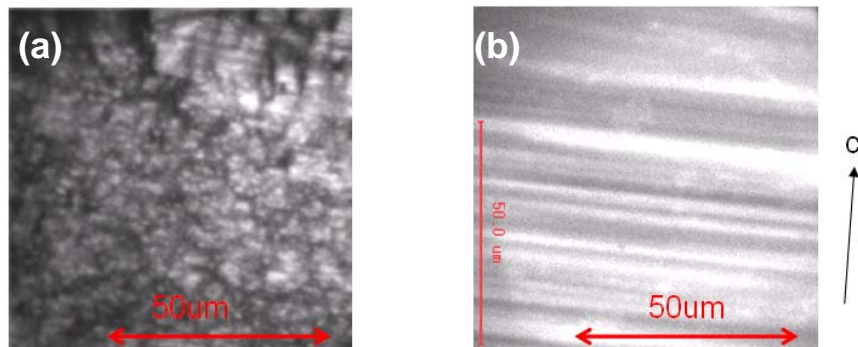


図 22 (a)m 面 HVPE 自立基板、(b)成長した GaN 結晶の表面 CL 像

以上の結果より、Sr は種基板の結晶性によらず、グレインの開合を促進する有用な添加物であることが分かった。

・無極性 a-GaN 自立基板、半極性(11-22)GaN 基板上への LPE 成長

様々な種基板結晶を用いるために、古河機械金属株式会社にて作製された a-GaN 自立基板((11-20)半値幅:464arcsec、“(2)大口径種結晶の開発”参照)、及び半極性面である GaN(11-22)上へ LPE 成長を行った結果を示す。a-GaN 自立基板を用いることで、グレインが開合し m 面が広く現れた無極性 GaN 単結晶の作製に成功した(図 23)。

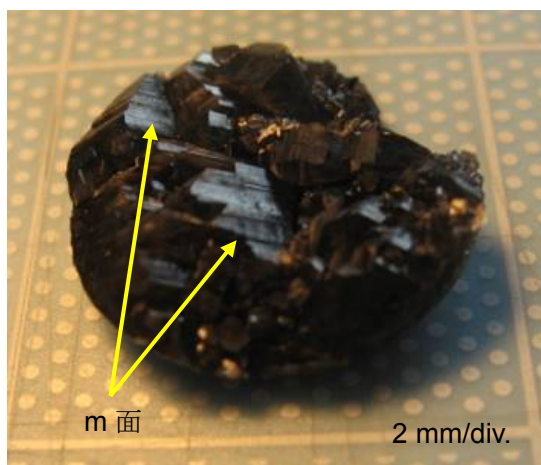


図 23 a-GaN 自立基板上に成長した GaN 結晶写真

半極性(11-22)GaN 基板を用いた場合でも、グレインの開合が進行した透明な GaN 結晶が得られることが分かった(図 24)。今後、(11-22)GaN においてもデバイスの試作・評価を行い、有極性面・無極性面デバイスとの比較、検討を行う予定である。



図 24 (11-22)GaN 基板上に成長した GaN 結晶写真

(2)大口径種結晶の開発

NaフラックスLPE法(以下、LPE法とよぶ)においては、種基板結晶の品質が重要となる。ここでは、HVPE法を用いて、LPE法に適した無極性GaN基板結晶育成技術の開発を行っている。

{10-10}m面サファイヤ基板の上にバッファ層を工夫することで、図25に示すようにHVPE法によるm面GaN成長に成功し、10mm□以上のm面GaN結晶(図25(a))をNaフラックス種結晶として合計52枚供給した。さらに、世界最大級となるφ45mmのm面自立基板の作製にも成功した(図25(b))。また、図26に示すように、膜厚とともに結晶性の改善が期待されることから、φ2inchテンプレート(サファイヤ基板上のGaN薄膜成長基板:図25(c))の作製も行った。さらに、SIMS分析などの結果から、c面より高濃度のSiやO不純物混入が認められた。これらの不純物はLPE成長に影響を及ぼすことが懸念されることから、反応管構造、材質などを工夫することで、図27に示すように、Si濃度 $<5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 、酸素濃度 $<2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ まで低減した。

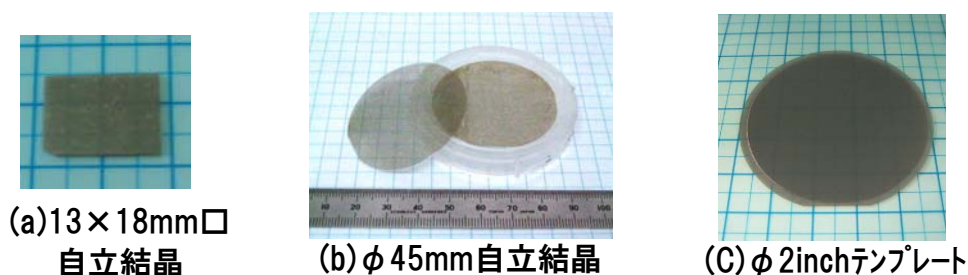


図25 HVPE法によるm面GaN結晶

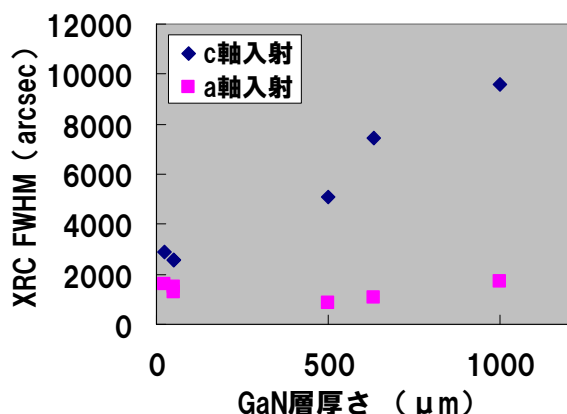


図26 m面GaN結晶XRC半値幅の膜厚依存性

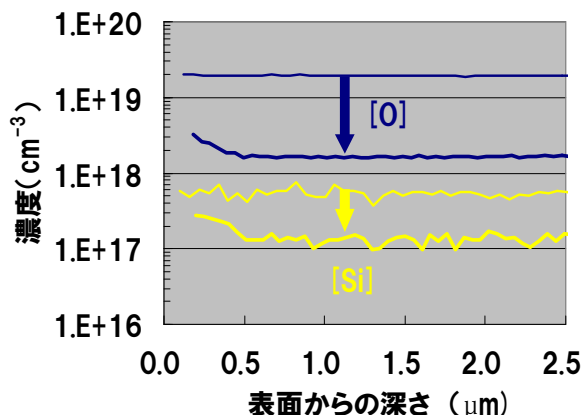


図27 m面GaN結晶の不純物濃度

m面GaNに加えて、{11-20}a面GaN結晶の開発も進めている。現在まで、HVPE厚膜成長により、図28に示すように、18×13mm²のa面GaN自立基板の試作にも成功した。この自立結晶のXRC半値幅を図29に示す。半値幅は500arcsec以下であり、良好な結晶性を有することがわかる。

さらに、半極性面GaN結晶の成長も試みた。図30はサファイヤm面上にHVPE成長で作製したφ2inch{11-22}面GaNテンプレートである。図31にはこの結晶のXRCを示したが、横方向成長(ELO)の適用などにより、さらに半値幅の狭い結晶も得られている。

以上のm面、a面、および{11-22}面GaN結晶のXRCプロファイルを図32に比較して示した。これら無極性・半極性面GaN結晶をLPE用種結晶として供給した。a面GaN結晶の品質が比較的良好であるが、{11-22}面GaN結晶もさらなる改善が期待できる。これらの高品質結晶の大口径化、自立化を進める。また、m面GaN結晶に関しても、下地基板の傾斜カットや表面加工などを利用した品質改善を継続して行う。

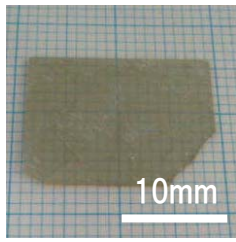


図28 13×18mm
a面GaN自立結晶

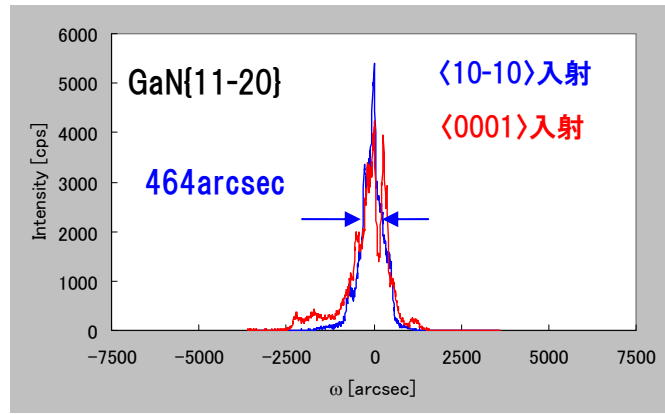


図29 a面GaN自立結晶のXRC

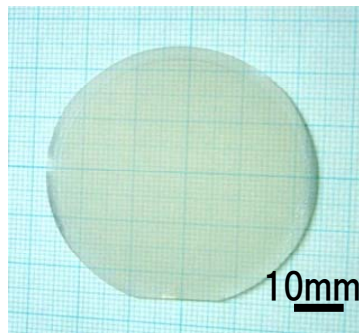


図30 φ2inch {11-22}面GaN
テンプレート

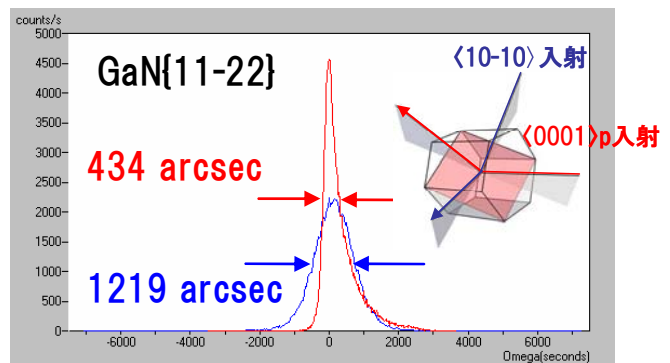
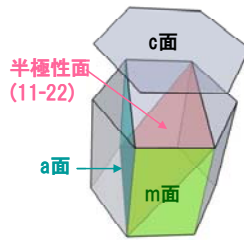


図31 {11-22}面GaNテンプレートのXRC



GaN結晶面

青 : ⊥c軸入射
赤 : //c軸入射
単位: arcsec

| | m {10-10}面 | a {11-20}面 | {11-22}面 |
|---|------------|------------|----------|
| 自立結晶 (500μm厚) 13x18mm ~φ45mm | | | |
| テンプレート (25μm厚) φ2" | | | |

図32 各種GaN種結晶のXRC

(3) 高導電性窒化物単結晶基板の開発

・添加元素の検討

GaN 結晶の高導電性化を目指し、不純物添加検討用小型育成装置を用いて、n型不純物として期待される Si, Ge, Sn, O を微量添加した育成を検討した。それらの結果を下記に示す。

Si 添加:

小型炉標準条件において、Si を Ga に対して 0.03mol%, 0.07mol% 添加して育成を行った。図 33 に示すとおり、いずれも全く GaN が生成されず、種結晶(テンプレート)がすべてメルトバックした。Si は微量添加でも窒化を阻害し、フラックス法における n 型ドーパントとしては適さない。


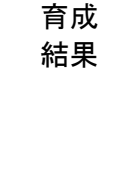

| 添加物 mol% | 無添加 | Si 0.03 | Si 0.07 |
|----------|---|---|---|
| 育成結果 |  |  |  |
| 窒化率 | 83% | 0% | 0% |

図 33 Si 添加条件で成長した GaN 結晶

Ge 添加:

小型炉標準条件において、Ge を Ga に対して 0.05mol%, 0.08mol% 添加して育成を行った。いずれの条件でも無添加の場合と同様に GaN が育成し、窒化率は 80% 程度であった。

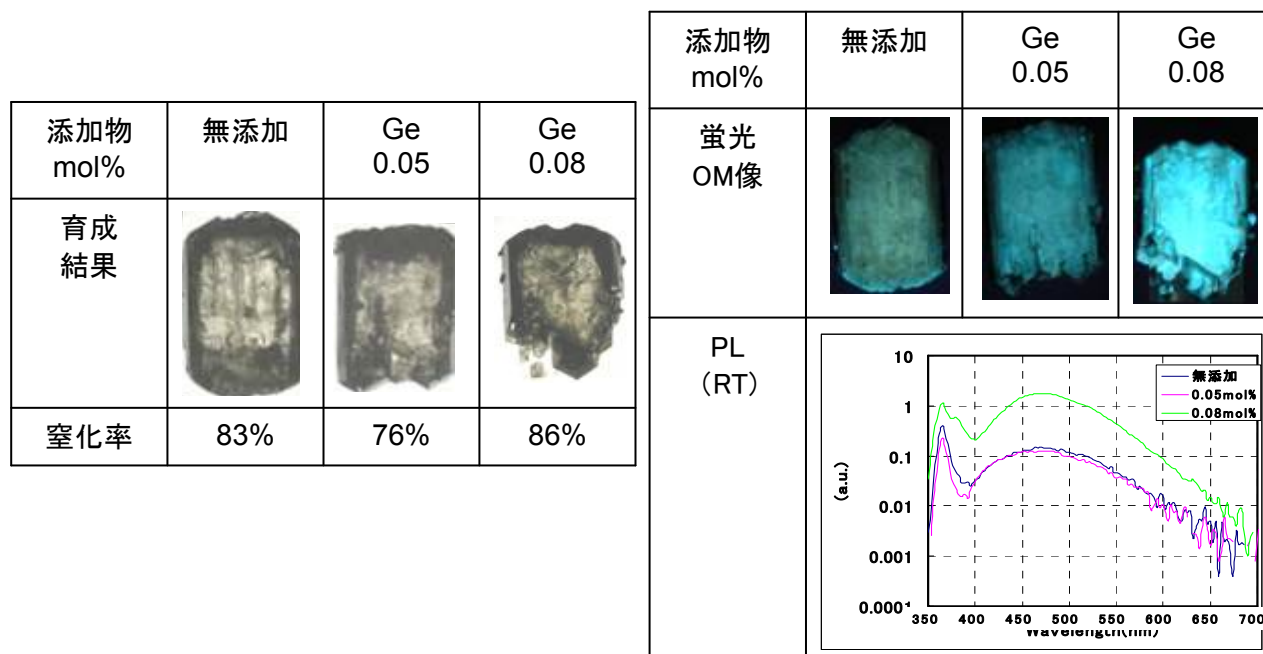


図 34 Ge 添加条件で成長した GaN 結晶

得られた結晶の蛍光顕微鏡像、PL スペクトルを図 34 に示す。0.05mol% 添加では、無添加のものと同様の結果であったが、0.08mol% 添加ではバンド端近傍の発光、及び、470nm 付近の deep レベルの発光強度が大幅に増大した。このことは、Ge 添加によりキャリア密度が増大している可能性が高く、n 型不純物として Ge は有望でありことが分かった。

Sn 添加:

小型炉標準条件において, Sn を Ga に対して 0.01mol%, 0.04mol%添加して育成を行った。いずれの条件でも無添加の場合と同様に GaN が育成し, 窒化率は 80%程度であった。

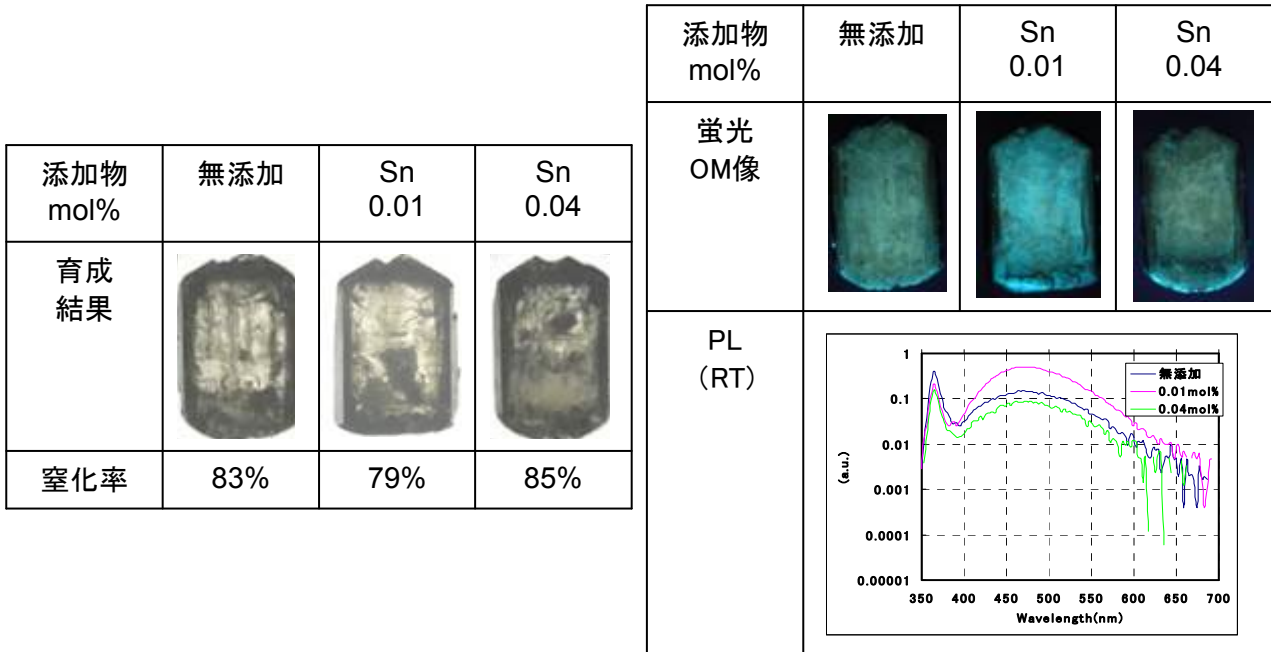


図 35 Sn 添加条件で成長した GaN 結晶

得られた結晶の蛍光顕微鏡像, PL スペクトルを図 35 に示す。両サンプルともに大きな発光強度の増大は見られず, n 型不純物として結晶中に高濃度で取り込まれていないものと考えられる。さらに添加量を上げて実験を行ったが, 窒化率が下がり始めるまで添加しても PL 強度の増大は確認できなかった。

O 添加:

酸素添加用の原料として Ga₂O₃ を用い, 小型炉標準条件において, Ga₂O₃ を Ga に対して 0.02mol%, 0.03mol% 添加して育成を行った。0.02mol% の添加で窒化率は 61%まで低下し, 0.03mol% 添加では, 全く窒化しなかった。

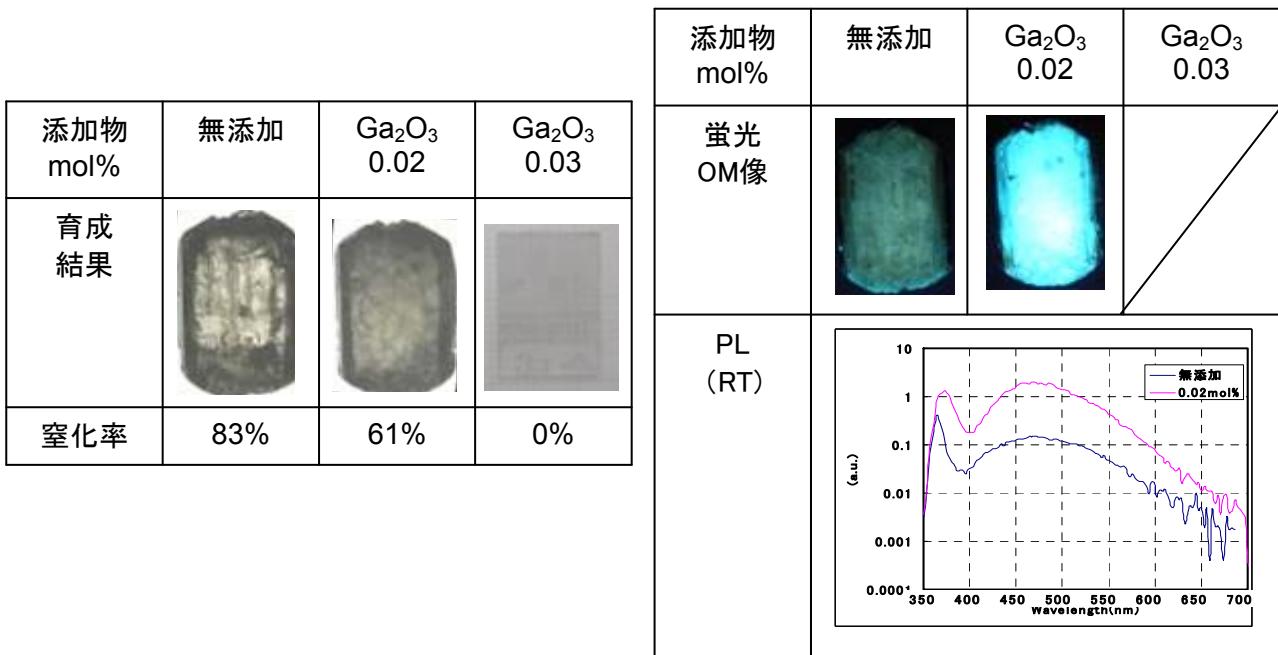


図 36 O 添加条件で成長した GaN 結晶

得られた結晶の蛍光顕微鏡像, PL スペクトルを図 36 に示す。Ga₂O₃ 0.02mol%添加でもバンド端近傍の発光, 及び, 470nm 付近の deep レベルの発光強度が大幅に増大し, キャリア密度が増大している可能性が高い。しかし, 上記のように酸素は窒化を阻害する傾向にあり, これ以上の酸素添加は困難であると思われる。

以上の検討結果をまとめると図 37 のようになる。育成阻害, PL 強度の観点から, n 型不純物として Ge が最も有望であるものと思われる。

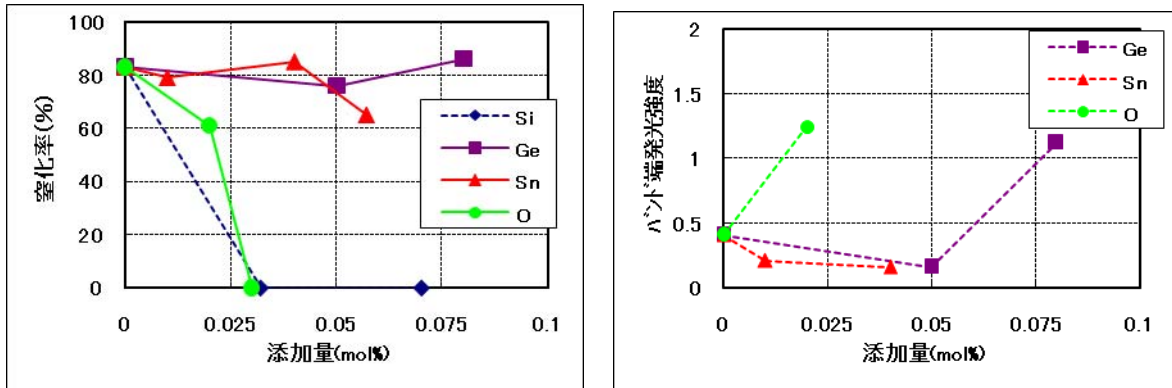


図 37 各種元素添加が GaN 結晶育成と発光特性に及ぼす影響

・Ge 添加による GaN 結晶育成

Ge の添加量と結晶中への取込量, 抵抗率を評価するため, まず, Ge 添加量と LPE 率の調査を行った。図 38 に示すように Ge が 0.19mol%までは LPE 率の低下は見られず, 得られた結晶も無色透明であった。Ge の添加量を 0.3mol%まで増大させると LPE 率の低下が見られ, それ以上の添加では結晶が着色した。

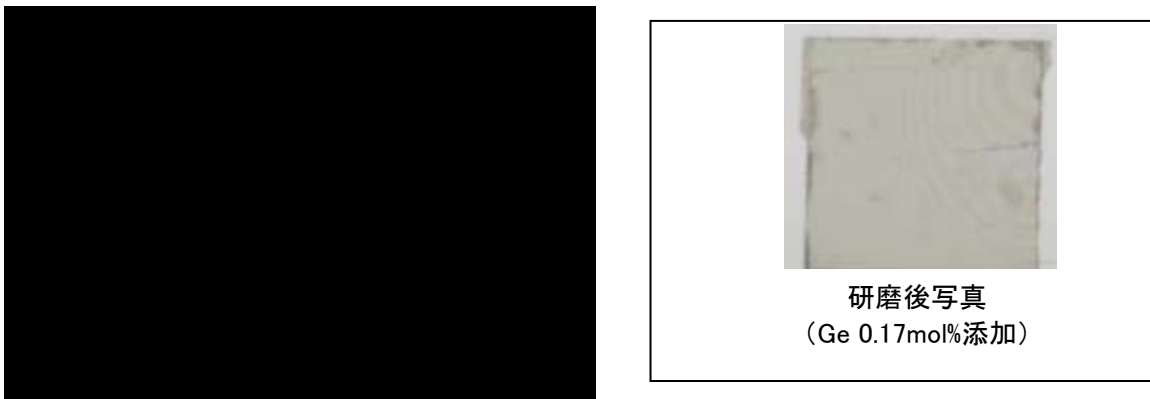


図 38 Ge 添加が GaN 結晶育成に及ぼす影響

SIMS 分析により, 結晶中への Ge 取込量を評価したところ, 取込量は添加量とともに増大し, 0.17mol%添加で $3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 0.3mol%添加で $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ であった。また, その他不純物として Si, O が確認され, Ge 0.30mol%添加では 10^{17} オーダー前半の Si, 10^{17} オーダー後半の O が検出された。

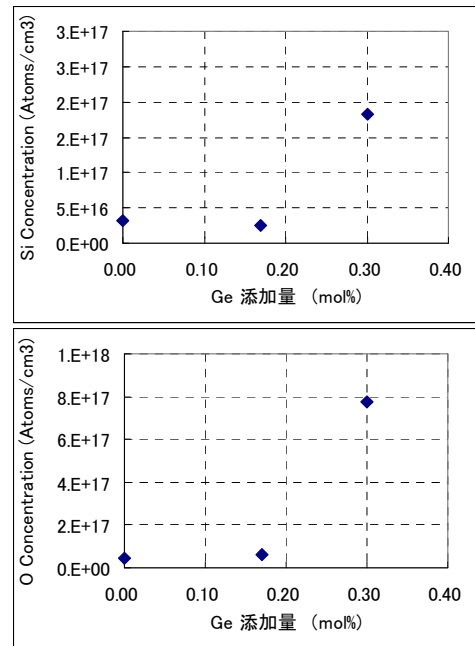
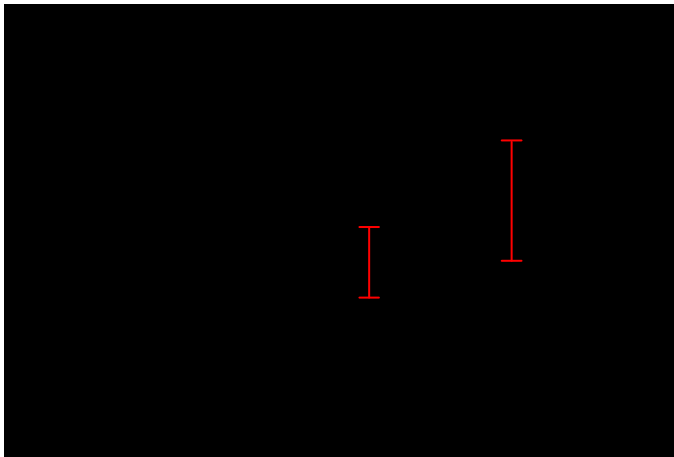


図 39 Ge 添加 GaN 結晶の不純物

ホール測定にて抵抗率を測定したところ、0.17mol%添加で $0.043 \Omega \cdot \text{cm}$ 、0.3mol%添加で $0.017 \Omega \cdot \text{cm}$ であった。0.3mol%添加したものは結晶中に取り込まれた酸素の影響が大きいものと思われる。また、0.17mol%添加した結晶の XRC 評価を行ったが、無添加と同等の結果であった。

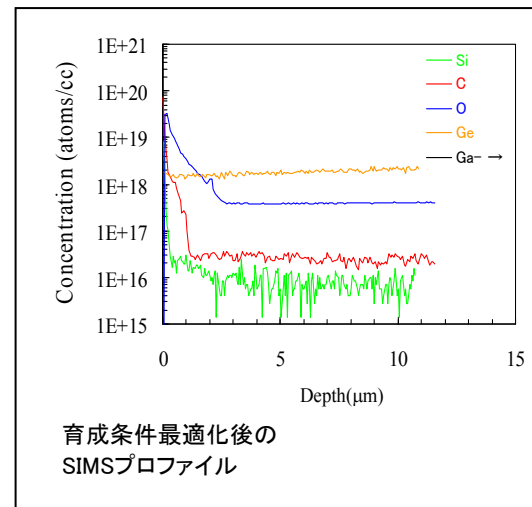
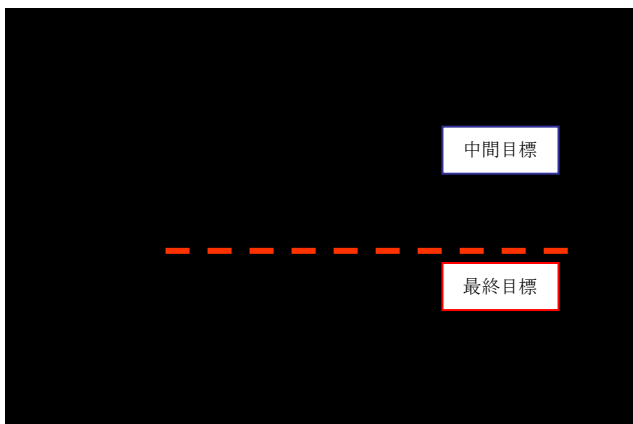


図 40 Ge 添加 GaN 結晶中の電気特性

さらに、カーボン量、育成温度の最適化を行った結果、結晶中への Ge 取込量 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ を実現した。抵抗率は現在評価中である。また、無極性面の育成時に Ge を添加し、結晶中への Ge の取込を SIMS にて確認した。

以上の結果を基に、大型機械式揺動機能付 GaN 結晶育成装置を用いて、2 インチ自立基板上への Ge 添加 GaN 結晶育成を行った。揺動条件は反転揺動と1軸揺動の 2 パターンで行ったところ、図 41 に示す 2 インチ GaN 結晶が育成できた。今後、インクルージョンの評価、Ge 濃度分布を評価し、さらに揺動周期等を最適化していくことにより、大面積の n 型 GaN 結晶の育成技術を確認し、高導電性 GaN 結晶をエピ G へ供給していく。

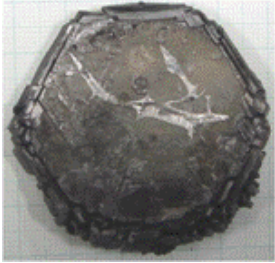


| | 揺動:1軸 Ge 0.15mol% | 揺動:反転 Ge:0.15mol% | 揺動:反転 Ge:0.15mol% (原料組成変更) |
|---------------|---|---|---|
| 結晶写真 (育成後) |  |  |  |
| 窒化率 | 51% (38g) | 74%(55g) | 40%(18.3g) |
| LPE率 | 37%(28g) | 34%(25g) | 39%(17.7g) |
| 平均膜厚 | 2.2mm | 2.0mm | 1.6mm |

図 41 Ge 添加 2 インチ GaN 結晶

(4) 高抵抗化窒化物単結晶基板の開発

・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順位を形成するアクセプタの候補として、図 42 に示したように 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。

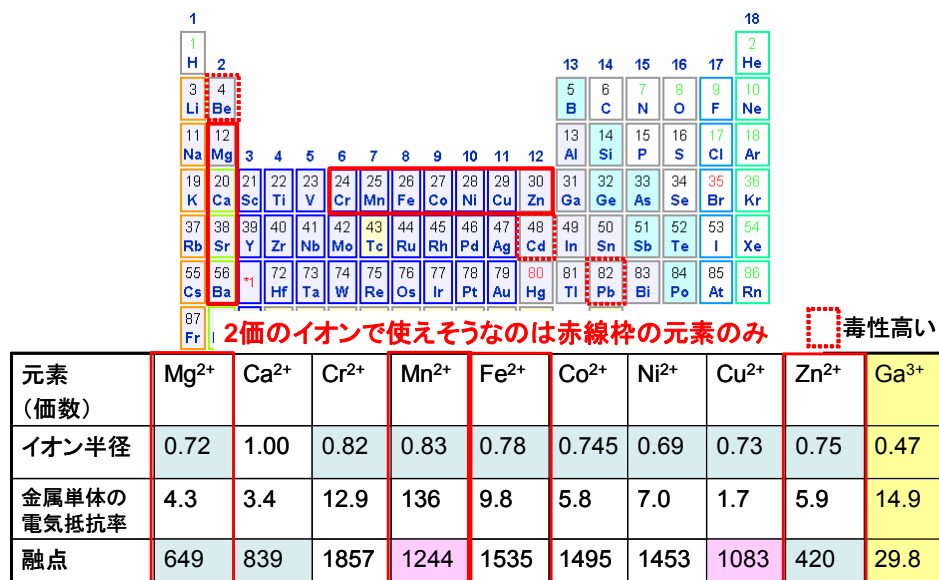
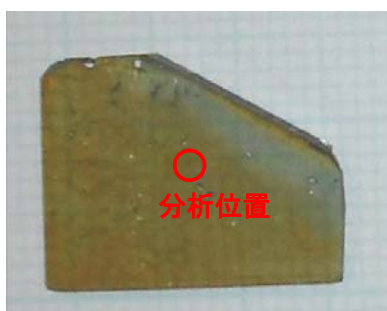


図 42 高抵抗化のための元素候補

・Mg 添加

Mg をごく微量 (0.8mg) 添加して育成した結晶の写真を図 43 に示す。結晶は黄色に着色していた。このサンプルを研磨し、6mm 角に切り出し、SIMS 分析とホール測定を行った。その結果、Mg 取込量は $10^{18} \sim 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 台であり、残留キャリア濃度に対し過剰であった。また、Mg 濃度は成長に伴って減少しており、実効偏析係数は >1 であることがわかった。比抵抗は $80 \sim 100 \Omega \cdot \text{cm}$ であり、ノドープ ($0.2 \Omega \cdot \text{cm}$) に比べて 2 桁以上高抵抗化していることがわかった。



Mgを極微量(0.8mg)添加して育成したGaN結晶

| | Mg添加 実測値 | | 判定 |
|----|-------------|--------|-------|
| | 育成初期 | 育成後期 | |
| Li | 2.E+15 | 2.E+15 | 検出 |
| C | 3.E+16 | | 検出されず |
| O | 8.E+16 | | 検出 |
| Na | 4.E+15 | 2.E+15 | 検出 |
| Mg | 2.E+19 | 6.E+18 | 検出 |
| Al | 2.E+17 | 3.E+17 | 検出 |
| Si | 5.E+16 | | 検出 |
| Ca | 8.E+15 | 1.E+15 | 検出 |
| In | | | |
| K | 4.E+15 | 8.E+13 | 検出 |

| | ノドープ | |
|----|--------|-------|
| | 実測値 | 判定 |
| Li | 2.E+14 | 検出 |
| C | 2.E+16 | 検出されず |
| O | 1.E+17 | 検出 |
| Na | 6.E+14 | 検出されず |
| Mg | 8.E+15 | 検出されず |
| Al | 2.E+17 | 検出 |
| Si | 5.E+16 | 検出 |
| Ca | 6.E+16 | 検出 |
| In | 4.E+16 | 検出されず |

■ ノドープより増加
■ ノドープより減少

図 43 Mg 添加実験

・Fe 添加実験

気相法にて高抵抗化の文献が多い Fe 添加をフラックス法にて検討した。純鉄のチップを細かく切断して、実験に用いた。得られた結晶を研磨し、6mm 角に切断し、顕微鏡(OM)観察、ホール測定、SIMS 分析を行った。透過光 OM 像より、インクルージョンが観察された。蛍光 OM 像より、不純物帯発光は弱いことがわかった。ホール測定の結果、比抵抗は $5.5 \Omega \cdot \text{cm}$ とノドープに比べて、約 25 倍に高抵抗化していることがわかった。Fe 濃度は $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ であり、Si 濃度と同程度であった。酸素は検出下限以下であった。

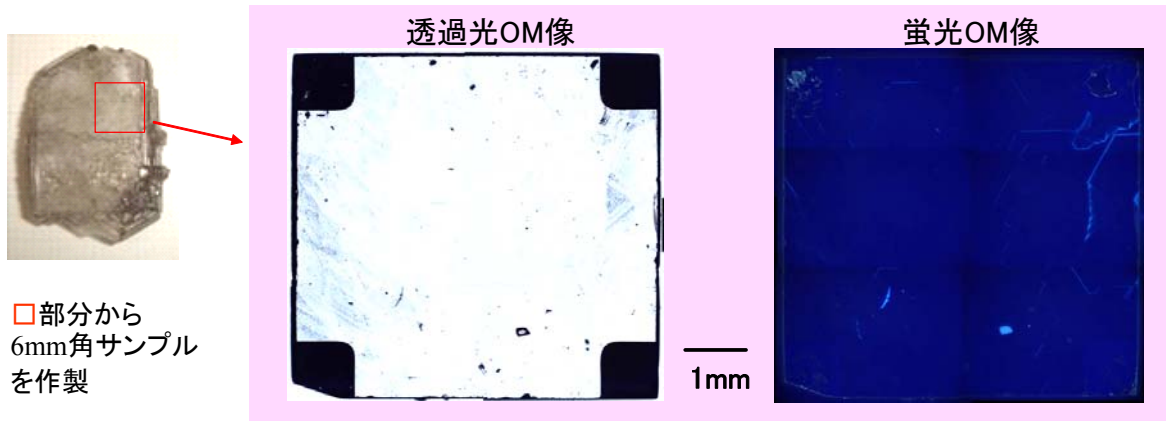


図 44 Fe 添加実験

| Fe添加 | | | ノドープ | | |
|------|--------|-------|------|--------|-------|
| | 実測値 | 判定 | | 実測値 | 判定 |
| Li | 1.E+13 | 検出されず | Li | 2.E+14 | 検出 |
| C | 1.E+16 | 検出されず | C | 2E+16 | 検出されず |
| O | 3.E+16 | 検出されず | O | 1.E+17 | 検出 |
| Na | 4.E+14 | 検出されず | Na | 6E+14 | 検出されず |
| Mg | 4.E+15 | 検出 | Mg | 8E+15 | 検出されず |
| Al | 1.E+17 | 検出 | Al | 2.E+17 | 検出 |
| Si | 5.E+16 | 検出 | Si | 5.E+16 | 検出 |
| Ca | 5.E+15 | 検出 | Ca | 6.E+16 | 検出 |
| In | | | In | 4E+16 | 検出されず |
| K | 7.E+13 | 検出されず | | | |
| Fe | 1.E+17 | 検出 | | | |

ノドープより増加
 ノドープより減少

図 45 Fe 添加 GaN 結晶の SIMS 分析結果

次に、鉄の添加量をさらに増やして、育成実験を行ったところ、テンプレートがメルトバックし、実験は失敗した。また、鉄チップでは、坩堝底に溶け残りが見られたため、溶けやすいように、砂鉄を用いて実験を行った(図 46)が、ドーパ量に差はなく、鉄の高濃度添加は困難であることが判明した。

| | 砂鉄(150ミクロン) (表面積:大) | 顆粒 (表面積:小) |
|------|------------------------|--------------------|
| 外観 | | |
| 原料 | 溶け残りは見えず | 溶け残りあり |
| ドーパ量 | 1×10^{17} | 1×10^{17} |

図 46 Fe 添加濃度増大検討結果

・Mn 添加

これまでに、日本ガイシ社内で高抵抗化に対する知見のあった、Mn 添加を検討した。Mn、SUS310S (Mn 含有オーテスナイト系ステンレス合金) を数 mg 添加して、育成した結晶を研磨し、6mm 角に切り出したサンプルのホール測定、SIMS 分析を行った(図 47)。Mn 濃度が高濃度ほど比抵抗が高くなり、 5×10^{18} で $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ が得られた(図 48)。一方で、Mn は偏析が大きく、成長厚さ方向(サンプルの表と裏)で 1 桁 Mn 濃度が異なることがわかった。



図 47 Mn 添加 GaN 結晶のサンプル外観、SIMS 分析結果と比抵抗

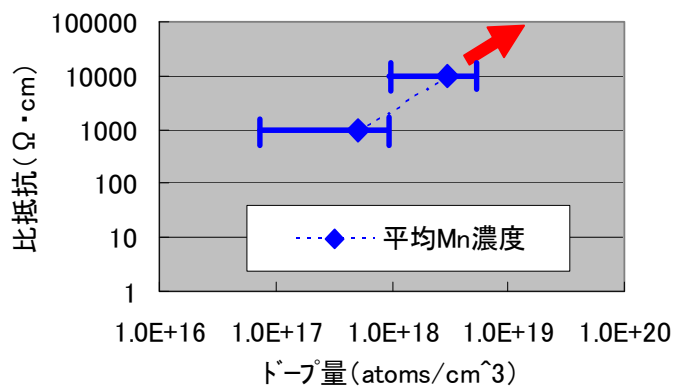


図 48 Mn 添加濃度と比抵抗の関係
(バーはサンプル表面と裏面の Mn 濃度を示す)

・Zn 添加

Zn 添加にて、プロジェクト最終目標を大幅に上回る、 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ を達成した。以下、開発の経緯によって、詳細を述べる。

i) Zn 添加予備実験

これまでの知見から、亜鉛は窒化を阻害する元素であることがわかってきたため、まずは予備試験として、窒化阻害が起きない程度の微量を添加し、結晶育成実験を行った。得られた結晶を研磨し、6mm 角に切り出し、顕微鏡(OM)観察、ホール測定、SIMS 分析を行った。透過光 OM 像より、インクルージョンが中央部に観察された。蛍光 OM 像より、不純物帯発光は Fe 添加よりも強いことがわかった(図 49)。ホール測定の結果、比抵抗は $1.1 \Omega \cdot \text{cm}$ とノドープに比べて、約 5 倍に高抵抗化していることがわかった。SIMS 分析結果を図 50 に示す。Zn 濃度は $3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ であり、Si 濃度と程度であった。酸素は検出下限以下であった。

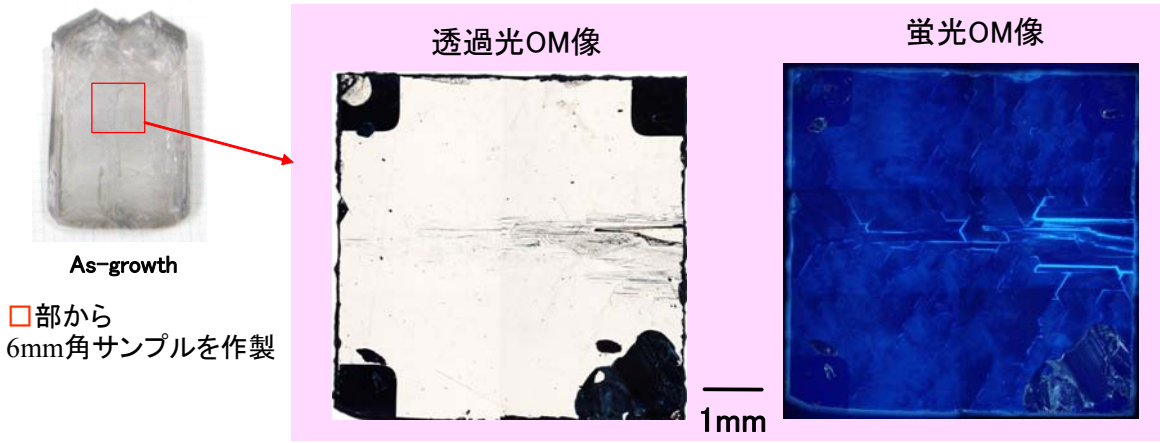


図 49 Zn 添加予備実験結果

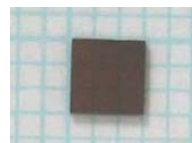
| Zn添加 | | | バンドープ | | |
|------|--------|-------|-------|--------|-------|
| | 実測値 | 判定 | | 実測値 | 判定 |
| Li | 1.E+13 | 検出されず | Li | 2.E+14 | 検出 |
| C | 1.E+16 | 検出されず | C | 2.E+16 | 検出されず |
| O | 4.E+16 | 検出されず | O | 1.E+17 | 検出 |
| Na | 4.E+14 | 検出されず | Na | 6.E+14 | 検出されず |
| Mg | 1.E+16 | 検出 | Mg | 8.E+15 | 検出されず |
| Al | 1.E+17 | 検出 | Al | 2.E+17 | 検出 |
| Si | 4.E+16 | 検出 | Si | 5.E+16 | 検出 |
| Ca | 4.E+15 | 検出 | Ca | 6.E+16 | 検出 |
| In | | | In | 4.E+16 | 検出されず |
| Zn | 3.E+16 | 検出 | | | |

バンドープより増加
 バンドープより減少

図 50 Zn 添加予備実験サンプルの SIMS 分析結果

ii) Zn 高濃度添加実験

亜鉛濃度を増加させると、窒化が阻害され、結晶成長ができなくなる問題点がみられた。しかしながら、添加濃度と育成圧力を最適化し、SIMS 分析により 10^{19} オーダーの濃度で亜鉛が添加された 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、目標値を大幅に上回る、 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ という高い抵抗値を示した。図 51 にサンプルの外観と、電圧-電流特性、比抵抗の電圧依存性を示す。



Zn 濃度
 表: $1 \times 10^{19} \text{ atoms/cm}^3$
 裏: $2 \times 10^{19} \text{ atoms/cm}^3$
 サンプルサイズ: $3 \times 3 \times 0.5 \text{ t}$

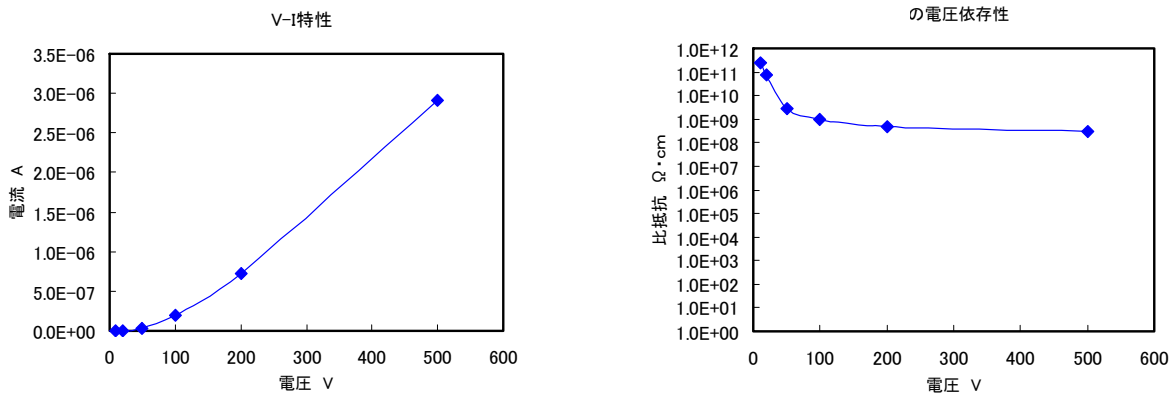


図 51 Zn 高濃度添加サンプルの GaN 結晶中の Zn 濃度および比抵抗測定結果

出発原料中の亜鉛濃度と比抵抗の関係、また、取り込まれた亜鉛濃度と比抵抗の関係を図 52 に示す。およそ 10^{18} 後半の亜鉛濃度で最終目標である $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ の比抵抗が得られることがわかった。

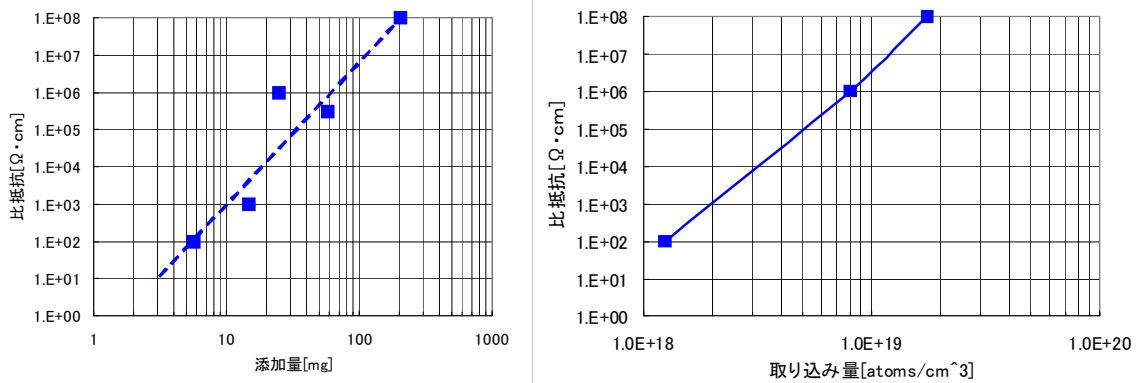
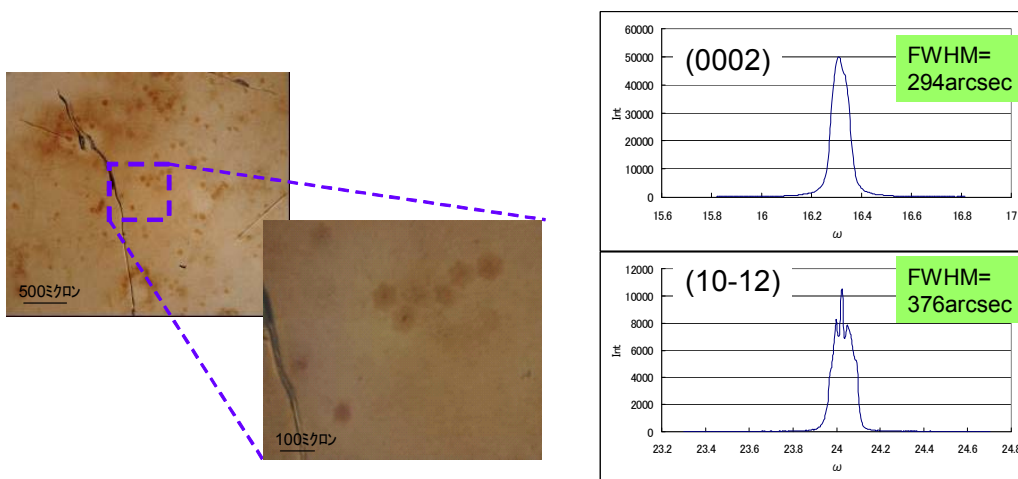


図 52 Zn 添加濃度と結晶中の取り込み量、比抵抗の関係

一方で、亜鉛濃度にムラがあることや、高濃度に添加するほど結晶性が劣化することが判明した(図 53)。今後の課題と対策は以下のとおりであり、現在取り組んでいる。①結晶中の Zn 濃度の均一性向上→攪拌促進、②高濃度添加時の結晶性劣化防止→ドーピング量の適正化、③結晶のサイズアップ→大型炉での育成。



【透過OM像】⇒ 取り込み量の場所依存性 【XRC】⇒ 高濃度添加による結晶性の劣化

図 53 Zn 添加結晶の残課題

iii) 大口径化検討

上述の小型炉で見出した $10^4 \sim 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ が期待される亜鉛濃度で、大型炉にて、 $\phi 44$ 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・周期 10 度・1rpm)とした。得られた結晶(研磨後)の外観を図 54 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。これから、亜鉛濃度が不均一であることが示唆された。この結晶の中央部とその周囲の計 9 箇所の X 線ロックンガークを測定した(図 54 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)とよりも若干半値幅が狭かった(図 55)。結晶格子の反りの曲率半径を測定したところ、約 4.2m であり、種基板のそれ(約 1.3m)よりも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して、亜鉛添加時の結晶性の劣化は抑制できたが、依然として亜鉛濃度ムラが観察されることから、さらに攪拌強化する必要があることがわかった。

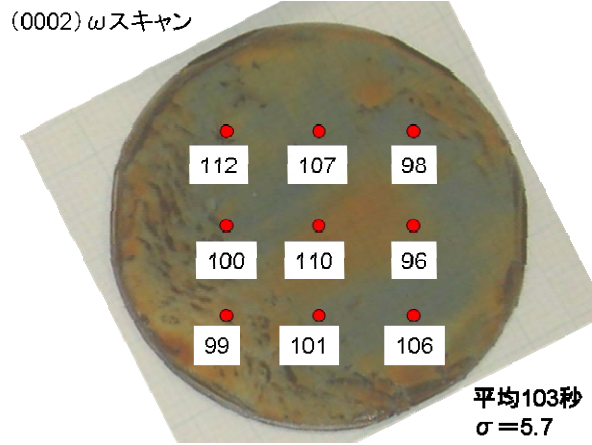


図 54 育成したφ44 亜鉛添加 GaN 結晶(研磨後)と XRC 半値幅の分布

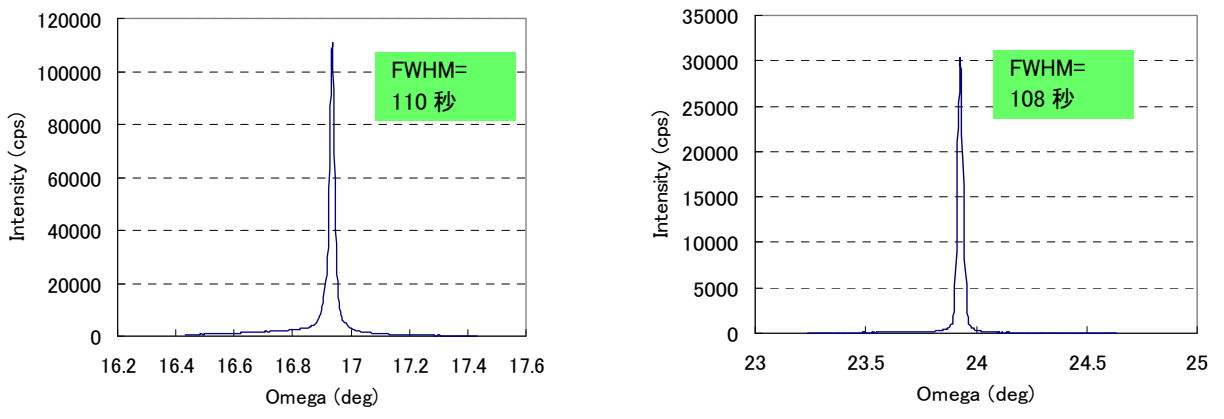


図 55 (0002) 反射、(10-12) 反射の X 線ロックアップカーブ測定結果

・まとめ

以上の高抵抗化を検討した結果を図 56 にまとめた。どの 2 価イオンでも、残留キャリア濃度以上添加することで高抵抗化すること、また、マンガンと亜鉛においては、結晶中の濃度が高濃度ほど高抵抗になる傾向があることがわかった。

| | Fe | Mg | Zn | Mn | SUS310S | ノドープ° |
|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|---|--------------------|
| ドーパ量 | 1×10^{17} | 1×10^{19} | 3×10^{16} | 5×10^{17} 、 3×10^{18} | Mn 5×10^{17} Fe 6×10^{16} Cr 3×10^{15} | - |
| 比抵抗 | 5.5 | 100 | 1.1 | 1000、 10200 | 288 | 0.2 |
| 残留 キャリア 濃度 | 6×10^{15} | 7×10^{16} | 1×10^{16} | 測定不可 | 測定不可 | 4×10^{16} |
| 極性 | n型 | 不明 | n型 | 不明 | 不明 | n型 |

図 56 高抵抗化実験結果一覧

成果発表内訳

特許, 論文, 外部発表等の件数(内訳)

| 区分 年度 | 特許出願 | | | 論文 | | その他外部発表 (プレス発表等) |
|----------|------|-----|-------------------------|------|-----|---------------------|
| | 国内 | 外国 | PCT [※] 出 願 | 査読付き | その他 | |
| H19FY | 0 件 | 0 件 | 0 件 | 0 件 | 0 件 | 9 件 |
| H20FY | 4 件 | 0 件 | 0 件 | 1 件 | 0 件 | 10 件 |
| H21FY | 3 件 | 1 件 | 0 件 | 4 件 | 0 件 | 4 件 |

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)