

「次世代照明等の実現に向けた窒化物半導体等基盤技術開発
／ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発—窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発」
(事後評価)

(2007年度～2012年度 6年間)

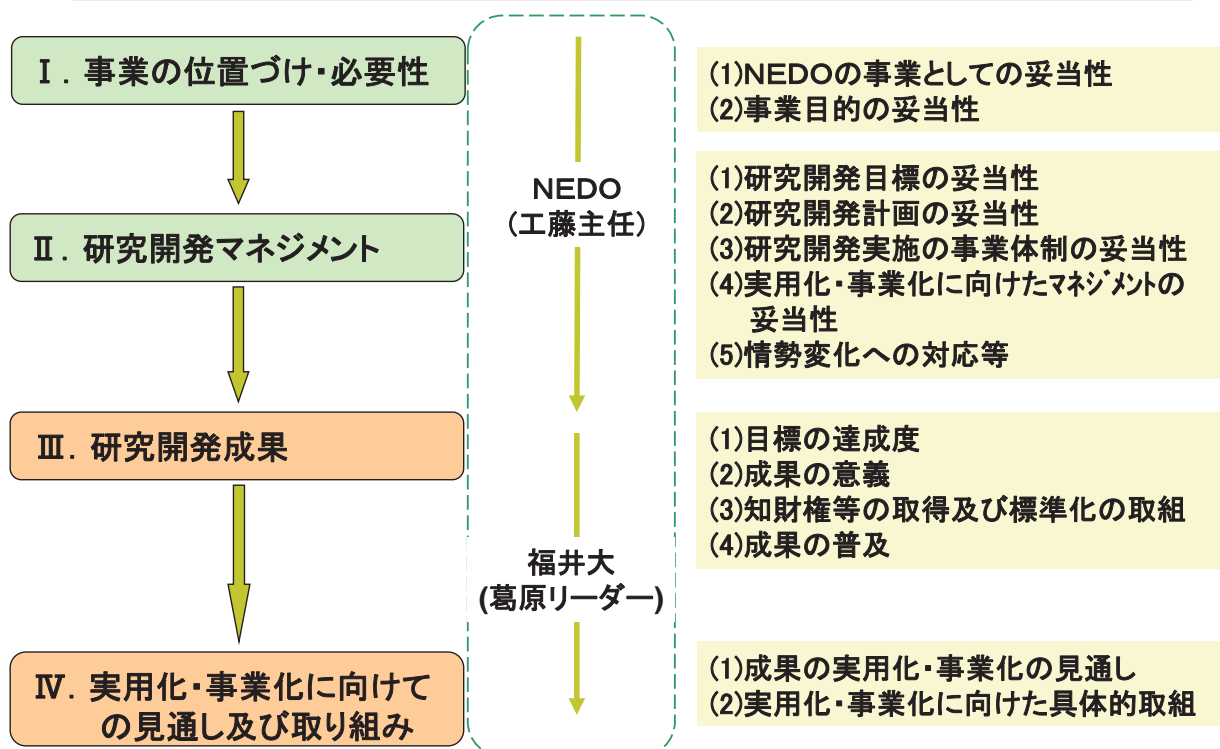
プロジェクトの概要(公開)

I. 事業の位置付け・必要性について
II. 研究開発マネジメントについて

2013年 6月24日

1/19

発表内容



2/19

1. 事業の位置付け、必要性について

公開

(1)NEDOの事業としての妥当性(プロジェクト実施の背景)

プロジェクト実施の社会的背景

地球温暖化対策は喫緊の世界的、国家的課題

抜本的CO₂排出抑制、省エネ技術の必要性

プロジェクトの目的

超高効率省エネデバイスの実現による電力損失の削減



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

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

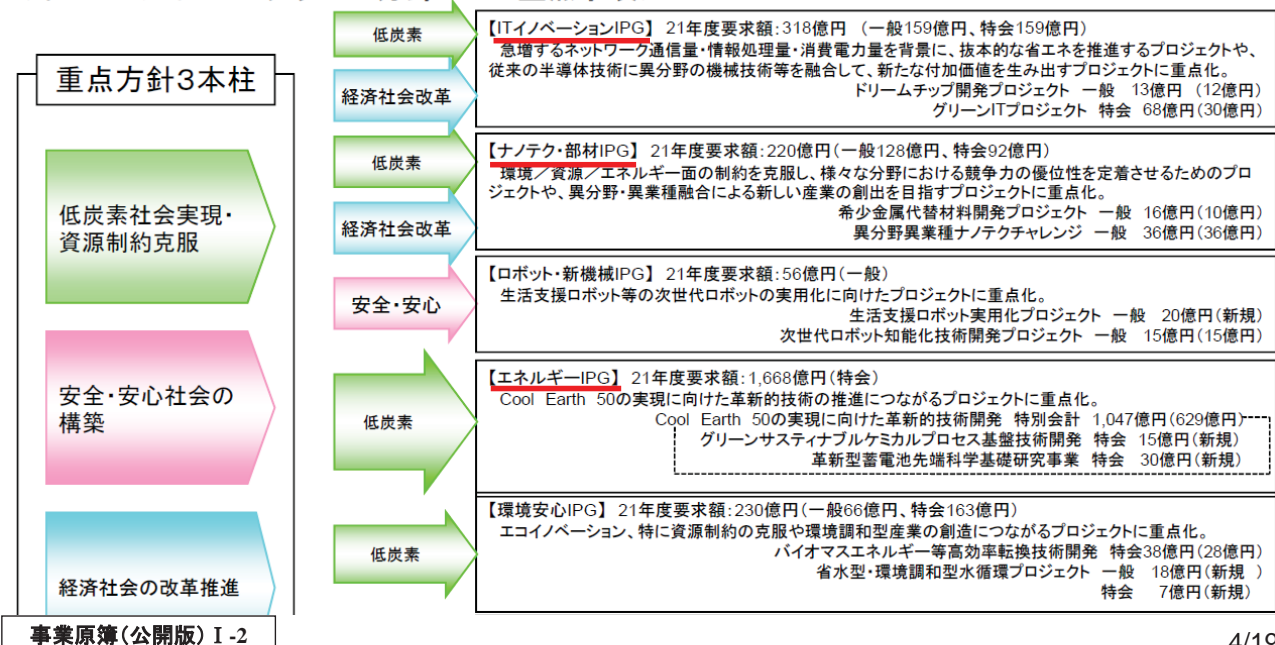
1. 事業の位置付け、必要性について

公開

(1)NEDOの事業としての妥当性(政策上の位置づけ)

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

<イノベーションプログラムの分野ごとの重点事項>



1. 事業の位置付け、必要性について

公開

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

超高効率省エネデバイスの実現は、

○社会的必要性が大きい

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

○民間企業だけで取り組むことが困難

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



NEDOが関与すべきプロジェクト

1. 事業の位置付け、必要性について

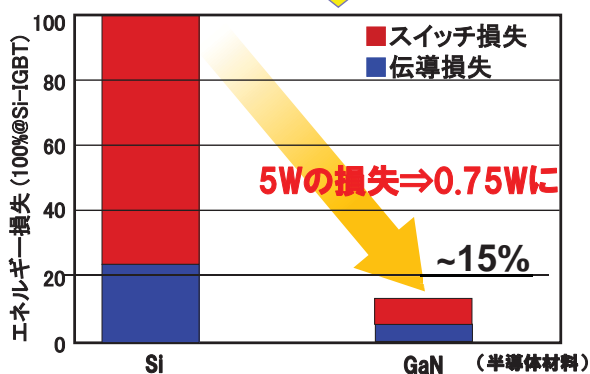
公開

(2) 事業目的の妥当性(プロジェクトの方向性)

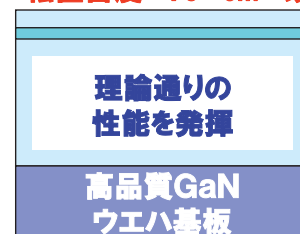
超高効率省エネデバイスを実現するには、優れた材料特性を持つ半導体材料が必須。

- 優れた材料特性が期待されるGa_Nを対象としてプロジェクトを実施。
- プロジェクト開始時点、技術的に未成熟だった結晶成長技術やエピ技術を重点的に実施。
- 材料特性をデバイスとして実証するため、デバイスの試作や評価にも取り組む。

材料	バンドギャップ(eV)	比誘電率	電子移動度(cm ² /Vs)	破壊電界(10 ⁶ V/cm)	飽和速度(10 ⁷ cm/s)	熱伝導率(W/cmK)
Si	1.10	11.8	1350	0.3	1.0	1.5
GaN	3.39	9.0	1200	5.0	2.5	2.3

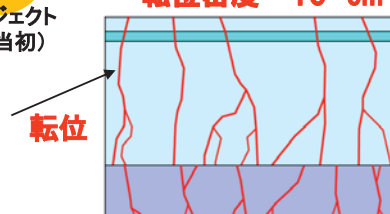


目標

高品質Ga_Nウエハ上のデバイス転位密度 10³ cm⁻²以下

2007年度

(プロジェクト開始当初)

低品質Ga_Nウエハ上のデバイス転位密度 ~10⁶ cm⁻²

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(幅広い用途が期待されるGaNデバイス)

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



事業原簿(公開版) I-6

7/19

1. 事業の位置付け、必要性について

公開

(2)事業目的の妥当性(プロジェクト実施により期待される効果)

期待される市場創出効果・省エネ効果:インバータの事例

●市場創出効果(汎用インバータ)

2020年: GaNインバータ

普及台数: 2,050万台

売上規模: 4,700億円

●省エネルギー効果(消費電力量)*

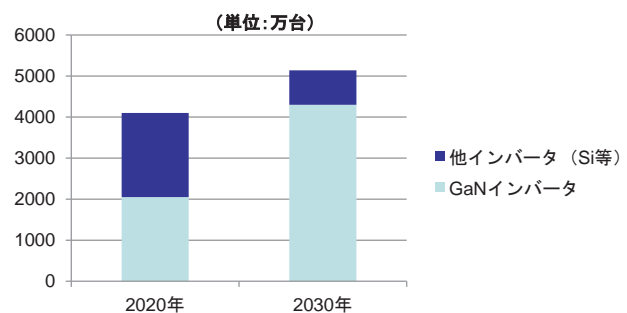
2020年: 電力削減 49億kWh/年

(原発約1基分)

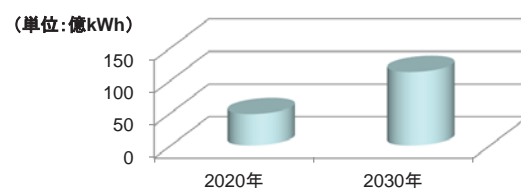
CO₂排出削減換算 270万トン/年

原油換算 103万キロリットル/年

GaNインバータの普及台数



GaNインバータの省エネルギー効果



*) Siインバータ置換普及による省エネ効果

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

事業原簿(公開版) I-3

8/19

1. 事業の位置付け、必要性について

(2)事業目的の妥当性(プロジェクト実施により期待される効果)

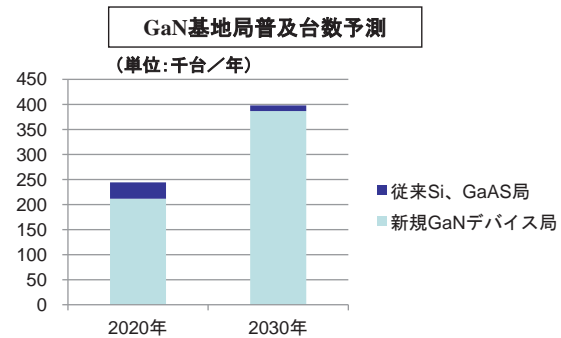
期待される市場創出効果・省エネ効果:携帯基地局向け高周波デバイスの事例

●市場創出効果(携帯基地局(送信増幅器))

2020年:新規GaN基地局

普及台数:21万局

売上規模:2,100億円



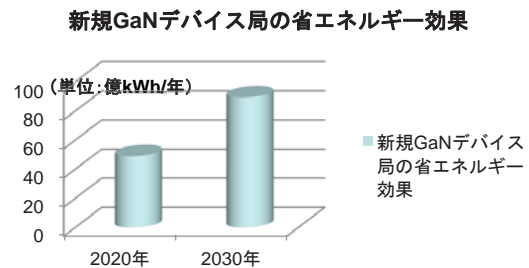
●省エネルギー効果(消費電力量)*)

2020年:電力削減 50億kWh/年

(原発約1基分)

CO₂排出削減換算 272万トン/年

原油換算 104万キロリットル/年



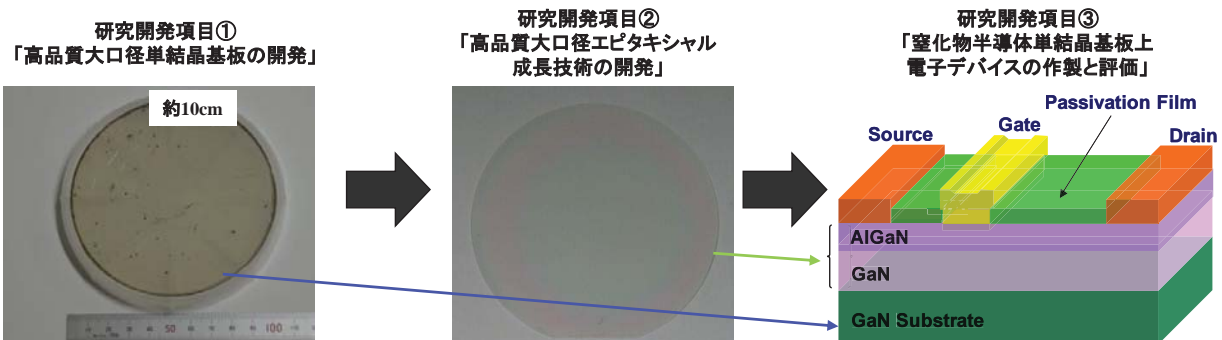
*) GaAs、Si基地局置換普及による省エネ効果

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

2. 研究開発マネジメントについて

(1)研究開発目標の妥当性(プロジェクト目標設定の狙いおよび背景)

- GaN基板の開発、エピタキシャル成長技術開発、デバイス開発の3つをプロジェクトで実施。
- 超高効率省エネデバイスは実現にはGaN基板の実用化が重要であるため、GaN基板の大口径化と低欠陥化をプロジェクトの中心的な課題として設定。
- 超高効率省エネデバイスの実用化促進のため、GaN基板の開発とあわせて、エピタキシャル成長技術の開発、ならびにデバイスの試作・評価を実施。
- 成果の実用化促進を狙い、参画した企業の意向も踏まえてデバイスの具体的な目標(耐圧1,200V級)を設定し、性能実証を実施(後述する1年間の期間延長において実施)。



2. 研究開発マネジメントについて

公開

(2)研究開発計画の妥当性(プロジェクト開発項目および実施計画)

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

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

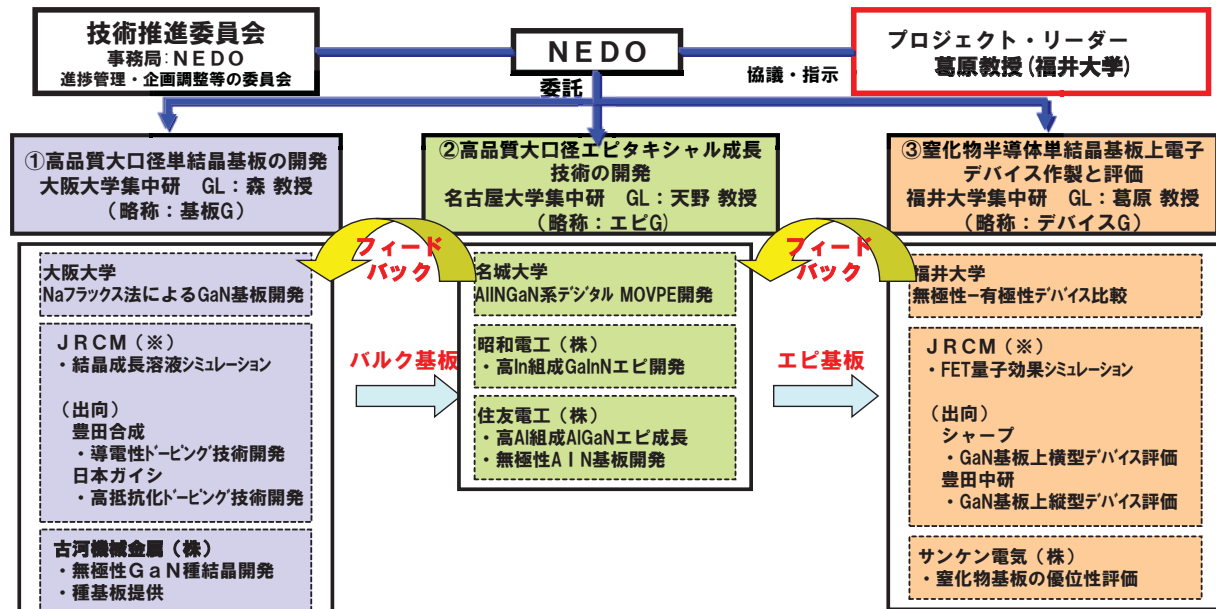
2. 研究開発マネジメントについて

公開

(3)研究開発実施の事業体制の妥当性(目標達成に向けた体制の構築)

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

2011年度の研究実施体制

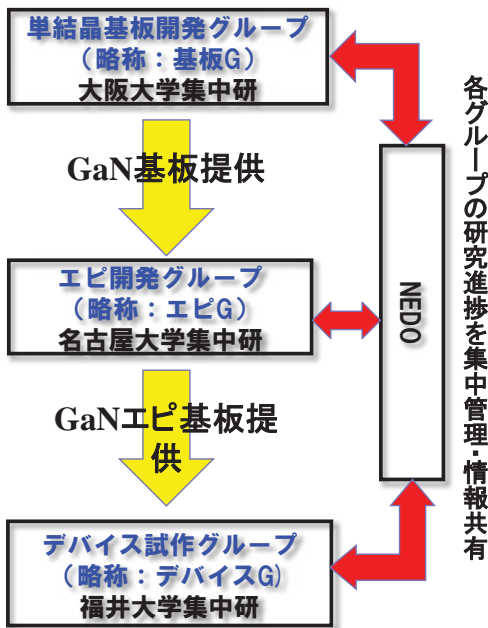


2. 研究開発マネジメントについて

公開

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

●GaN基板→エピ成長→デバイスの各グループの連携を強化



事業原簿(公開版) II-8

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

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

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

【成果】研究開発を加速化(当初目標(2011年度目標)を達成)

- 効率的なグループ間フィードバックを実現!
(例:エピG・デバイスG → 基板Gへピット削減の重要性をフィードバックして基板Gでの研磨プロセスの見直しを実施)
- 基板G～デバイスGのターンアラウンドと生産量を大幅改善!
-従来ターンアラウンド: :5ヶ月以上～ → 2ヶ月に短縮!
-年間基板供給量: :1.5倍に拡大!(22年度比の23年度実績)

13/19

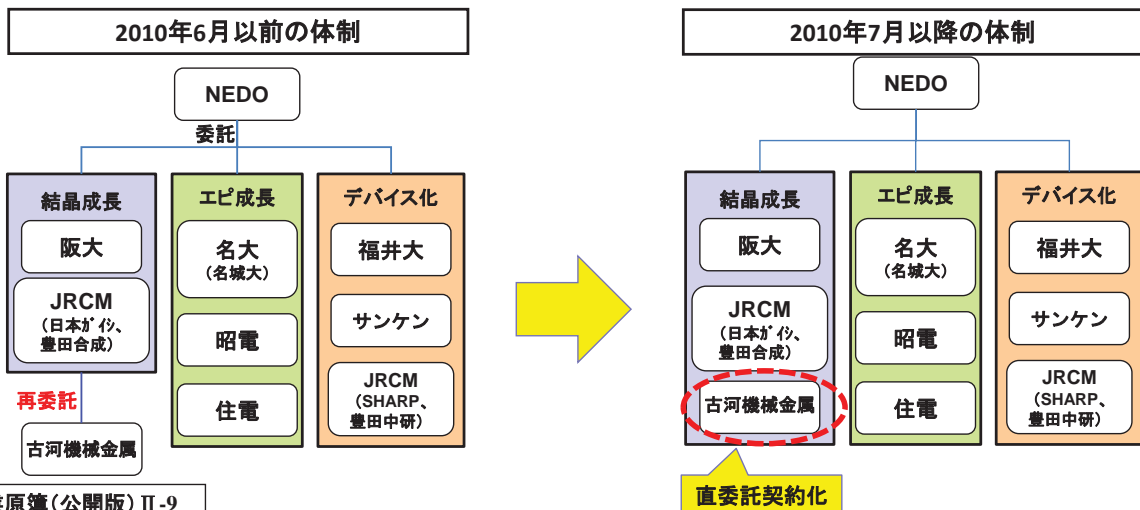
2. 研究開発マネジメントについて

公開

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

●GaN基板の研究開発を加速するため、開発体制を強化

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



事業原簿(公開版) II-9

14/19

2. 研究開発マネジメントについて

公開

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

●大学(集中研)→各企業への研究成果の活用・技術移管の促進

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

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

●実施者間の知財ルール of 策定

実施者間での覚え書き・ルールに基づく知財管理を徹底

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

2. 研究開発マネジメントについて

公開

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

●研究成果の社外へのアピールによる企業連携や事業化の促進

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

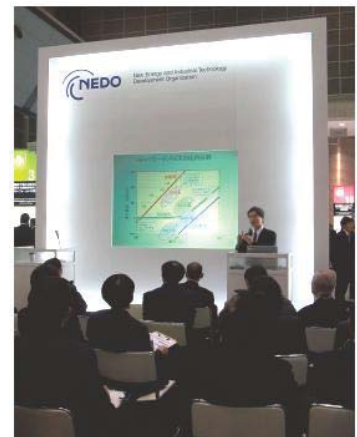
国内関連企業へのアピールによりGaN結晶・デバイス研究成果の活用・普及を促進

<nanotech2013の事例>

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



展示ブースの様子

GaN基板やバルク結晶等
研究成果を展示研究成果のプレゼンテーション
を実施(葛原プロジェクトリーダー)

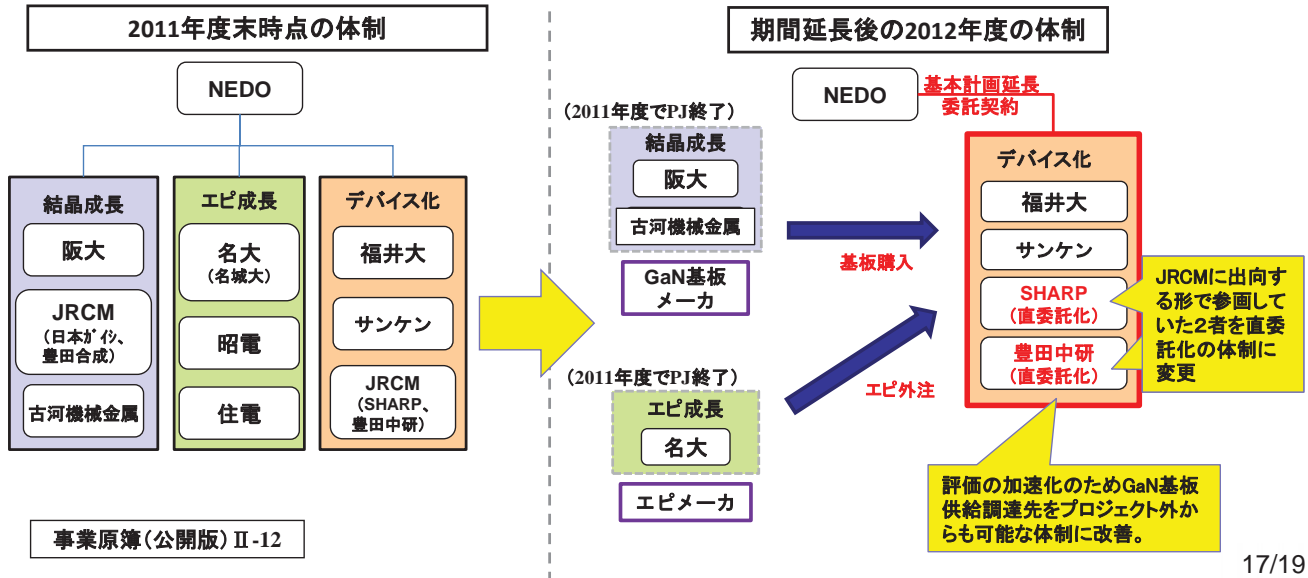
2. 研究開発マネジメントについて

公開

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

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

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



2. 研究開発マネジメントについて

公開

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

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

<技術推進委員>

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

◆中間評価以前に実施した技術推進委員会

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

(対策) 2007～2010年度は集中研による連携見直し、および予算追加によりGaN結晶・エピ技術のテーマの研究を加速。

2011年度以降は、プロジェクト内の基板供給に係る連携強化・加速化のため、NEDO直下でグループ間のウエハの流通の工程管理・フォローアップ実施し、研究開発を加速。

◆2011年度・技術推進委員ヒアリング(2011年11月～12月)

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

◆2012年度・技術推進委員会(2012年11月30日)

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

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

2. 研究開発マネジメントについて

公開

(5)情勢変化への対応等(中間評価結果を踏まえた取り組み)

2009年度・中間評価委員会 (平成21年(2009年)8月31日)

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

「次世代照明等の実現に向けた窒化物半導体等基盤技術開発
／ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発－窒化
物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発」

(事後評価)

(2007年度～2012年度 6年間)

プロジェクトの概要 (公開)

III. 研究開発成果について

IV. 実用化・事業化の見通し及び取り組みについて

2013年 6月24日

プロジェクトリーダー 福井大学 葛原 正明

- 高品質大口径単結晶基板リーダー
- 高品質大口径エピタキシャル成長技術リーダー
- 電子デバイス作製と評価リーダー

大阪大学 森 勇介
名古屋大学 天野 浩
福井大学 葛原 正明

1/15

3. 研究開発成果について

(1) 最終目標と達成状況

GaN結晶成長、およびGaN基板上的エピタキシャル成長技術やデバイス技術で多くの成果を創出。最終的にはバッファ耐圧改善により、GaNデバイスで耐圧1200V、オン抵抗2～3 mΩcm²を実証。



次世代省エネルギーデバイスの実用化を促進

主要な成果

< GaN結晶成長 >

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

< エピタキシャル成長技術 >

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

< デバイス開発 >

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

3. 研究開発成果について

公開

(1) 最終目標と達成状況

開始当初2インチ結晶だったのが、4インチまで作れるようになり、欠陥も低減。

(1)-1. 高品質大口径単結晶基板の開発の最終目標と達成状況

最終目標	成果	達成度
<ul style="list-style-type: none"> ・有極性面(4"φ)転位密度$<5 \times 10^3 \text{cm}^{-2}$ ・無極性面(>3"φ)転位密度$<10^5 \text{cm}^{-2}$ ・LPE成長に適したHVPE法の下地GaN基板の開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・大口径(4"φ)有極性GaN基板を実現。・転位密度$<5 \times 10^3 \text{cm}^{-2}$ ・高品質 無極性GaN基板(6mm□)を実現。・転位密度$<10^3 \text{cm}^{-2}$ ・HVPE法による有極性GaN基板(4"φ)、無極性GaN基板(2"φ)を開発、下地基板として供給。 	○
<ul style="list-style-type: none"> ・伝導制御技術の開発 ・導電性基板 比抵抗$\rho < 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ ・高抵抗基板 比抵抗$\rho > 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 	<ul style="list-style-type: none"> ・Ge^δ-ヒン^g制御技術を開発し、導電性GaN結晶(2"φ)を実現($\rho < 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$)。 ・Zn^δ-ヒン^g制御技術を開発し、高抵抗GaN結晶(2"φ)を実現($\rho \sim 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$)。 ・導電性基板、高抵抗基板をエビ/デバイスGへ提供。 	○

事業原簿(公開版) -6

3/15

3. 研究開発成果について

公開

(1) 最終目標と達成状況

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

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

最終目標	成果	達成度
<ul style="list-style-type: none"> ・デジタルMOVPE装置の開発 ・高品質GaNEビタキシャル成長技術 残留ドナー濃度$<10^{15} \text{cm}^{-3}$ ・ 厚み$<\pm 5\%$ 転位密度 : 有極性$<5 \times 10^3 \text{cm}^{-2}$、無極性$<10^5 \text{cm}^{-2}$ ドーピング不純物濃度$\pm 10\%$ ・ ドーピング精度$\pm 20\%$ ・結晶成長その場観察評価技術の開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・超高速ハルブスイッチング-加圧デジタルMOVPE装置を開発(高温成長対応、4インチ可)。 ・高品質GaNEビタキシャル成長技術を確立。 残留ドナー濃度$=1 \sim 2 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ ・ 厚み$<\pm 5\%$ 転位密度 : 有極性$<5 \times 10^3 \text{cm}^{-2}$、無極性$<10^5 \text{cm}^{-2}$ 【Si】、【Mg】 : ドーピング不純物濃度$<\pm 5\%$ ・ ドーピング精度$<\pm 10\%$ ・高精度二次元ウエハ形状その場観察装置を開発。 	○
<ul style="list-style-type: none"> ・高In組成のInGaNEビタキシャル成長技術 In組成$1 \geq x \geq 0.5$ ・ 転位密度$<10^6 \text{cm}^{-2}$ 厚み$<\pm 10\%$ ・ 組成$\pm 10\%$ (@4"φ基板) N型$>10^{18} \text{cm}^{-3}$ ・ P型$>10^{17} \text{cm}^{-3}$ (高均一) ・HEMT構造エビ成長と評価($\mu = 2500 \text{cm}^2/\text{Vs}$)。 	<ul style="list-style-type: none"> ・高In組成のInGaNEビタキシャル成長技術を確立。 In組成$1 \geq x \geq 0.5$ ・ 転位密度$<10^6 \text{cm}^{-2}$ 厚み$<\pm 5\%$ ・ 組成$<\pm 0.5\%$ (@4"φ基板) 【Si】$>10^{18} \text{cm}^{-3}$ ・ 【Mg】$>10^{20} \text{cm}^{-3}$ ($\sigma < \pm 5\%$) ・HEMT構造エビ: $N_s = 9.6 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$、$\mu = 2160 \text{cm}^2/\text{Vs}$。 	△
<ul style="list-style-type: none"> ・高Al組成のAlGaNEビタキシャル成長技術 Al組成$1 \geq x \geq 0.5$ ・ 転位密度$<10^6 \text{cm}^{-2}$ 厚み$\pm 10\%$ ・ 組成$\pm 10\%$ (@4"φ基板) N型$>10^{18} \text{cm}^{-3}$ ・ P型$>10^{17} \text{cm}^{-3}$ (高均一) ・AIN基板の開発と有用性の確認。 	<ul style="list-style-type: none"> ・高Al組のAlGaNEビタキシャル成長技術を確立。 Al組成$1 \geq x \geq 0.5$ ・ 転位密度$<10^6 \text{cm}^{-2}$ 厚み$\pm 3.7\%$ ・ 組成$<\pm 0.6\%$ (@4"φ基板) 【Si】$>10^{18} \text{cm}^{-3}$ ($\sigma = \pm 7.4\%$) ・ 【Mg】$>10^{18} \text{cm}^{-3}$ ($\sigma = \pm 12.6\%$) ・昇華法により低転位($5 \times 10^4 \text{cm}^{-2}$)AIN結晶を開発し、高Al組成エビを成長して有用性を確認。 	○

事業原簿(公開版) -6

4/15

3. 研究開発成果について

公開

(1) 最終目標と達成状況

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

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

最終目標	成果	達成度
・横型電子デバイスの製作と評価	・2"の有機性GaN基板上全面にAlGaN/GaNチャネルFETを試作し良好な動作を確認。	○
・縦型電子デバイスの製作と評価	・Drift層緩衝層により、ドレイン横方向耐圧600V、縦方向耐圧1000V以上の可能性を確認。	
・窒化物単結晶基板上デバイスの比較評価	・GaN, SiC, Si基板を用いて試作を行い、耐圧1200V以上、オン抵抗3~4mΩcm ² の特性確認。	
・有機性及び無有機性デバイス構造の比較	・無有機性a面基板上にHEMTを試作し、a面基板上としては例のない優れた特性を確認。	
・基板/エピ技術開発チームへのフィードバック	・LEDドライバ、インバータ、デジタルアンプの実機動作に成功。信頼性評価を実施。	

事業原簿(公開版) -6

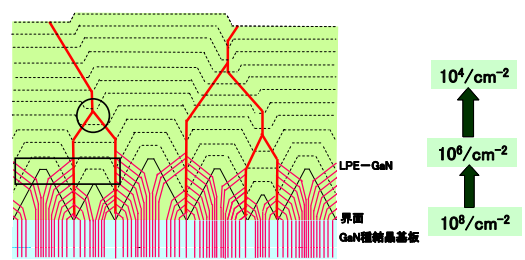
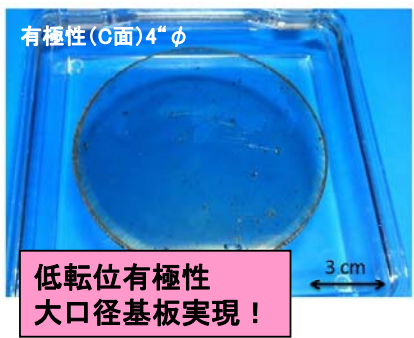
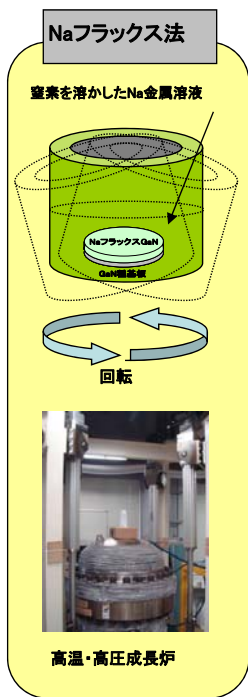
3. 研究開発成果について

公開

(2) 成果の意義 ~ ①大口径単結晶基板の開発(1) ~

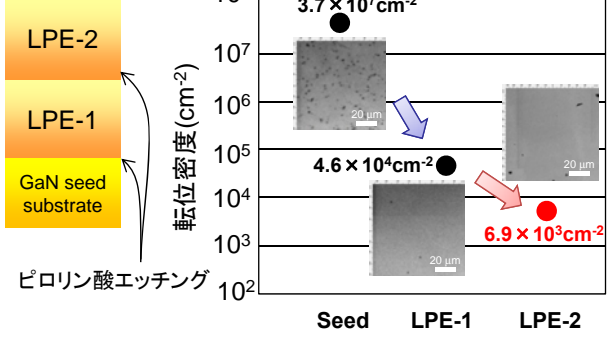
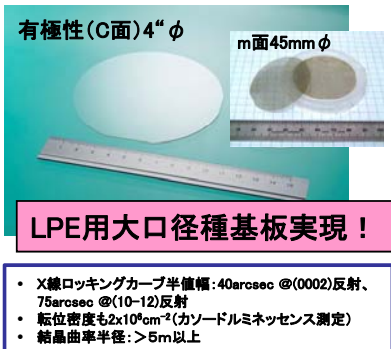
■ Naフラックス法 有機性大口径基板の開発

■ Naフラックス法の低転位化の機構



■ 大口径HVPE法種基板の開発

■ 繰り返し成長による低転位化



事業原簿(公開版) -2

3. 研究開発成果について

(2) 成果の意義 ~ ①大口径単結晶基板の開発(2) ~

公開

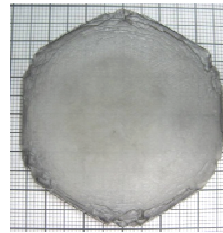
■ Naフラックス法 伝導性制御技術の開発

Geドーピング → 高導電性($\sim 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$)Znドーピング → 高抵抗化($\sim 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$)

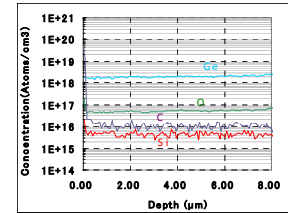
	キャリア濃度 (atoms/cm ³)	抵抗率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	移動度 (cm ² /Vs)
ノンドープ	$\sim 4 \times 10^{16}$	~ 0.2	930
Geドーピング	$\sim 6 \times 10^{17}$	$\sim 10^{-2}$	430
	$\sim 6 \times 10^{18}$	$\sim 10^{-3}$	250
Znドーピング	$\sim 10^{19}$	$\sim 10^8$	---

事業原簿(公開版) -33-38

■ 導電性基板(2"φ Geドーピング)



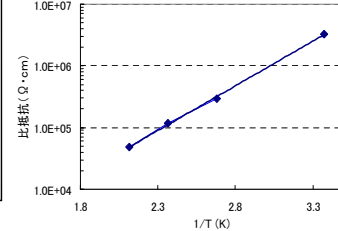
SIMSによる分析結果

導電性GaN基板実現 (室温で $0.01 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下を達成)

■ 高抵抗基板(2"φ Znドーピング)



比抵抗の温度依存性

高抵抗GaN基板実現 (室温で $3 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ を達成)
Zn準位の活性化エネルギー: 0.57eV

7/15

3. 研究開発成果について

(2) 成果の意義 ~ ②エピタキシャル成長技術の開発(1) ~

公開

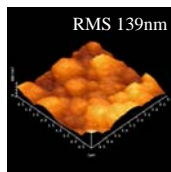
■ デジタルMOVPEの開発



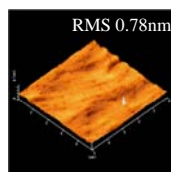
通常成長

ALE成長

AFM像 5 mm × 5 mm



RMS 139nm



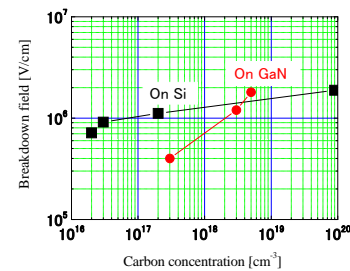
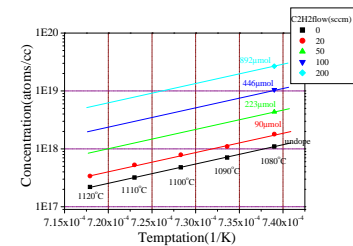
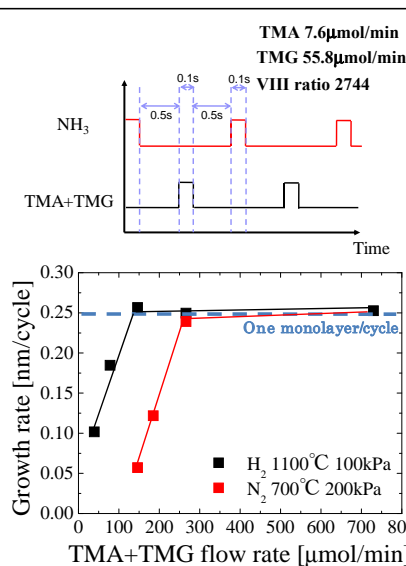
RMS 0.78nm

XRC FWHM:
>2,000 arcsec.XRC FWHM:
160 arcsec.

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

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

■ Cドーピング緩衝層の成長技術開発



■ C₂H₂による高精度C濃度制御を実証
■ C濃度 > 10¹⁹cm⁻³によりGaNの破壊電界強度の理論限界 3.3MV/cmの可能性を示唆!

8/15

3. 研究開発成果について

(2) 成果の意義 ~ ②エピタキシャル成長技術の開発(2) ~

公開

■ 高In組成InGaN層、高Al組成のAlGaIn層のエピ成長

4インチ $In_{0.75}Ga_{0.25}N$

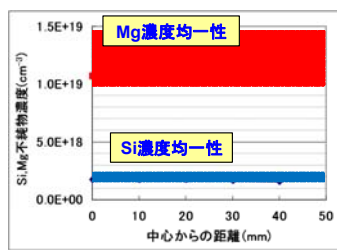
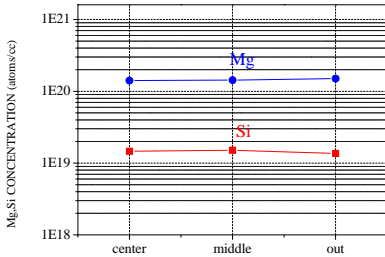
4インチ $Al_{0.6}Ga_{0.4}N$

膜厚分布 $< \pm 5\%$

膜厚分布 $\pm 3.7\%$

In組成分布 $< \pm 0.5\%$

Al組成分布 $\pm 0.6\%$

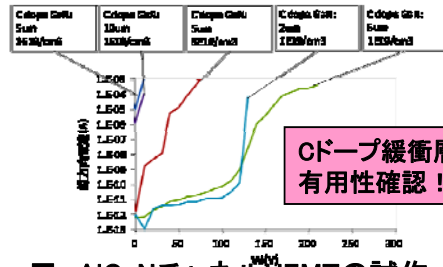


4インチにて高均ドーピング技術確立!

- $In_{0.75}Ga_{0.25}N$ エピ (Si, Mg ばらつき $< \pm 5\%$)
- $Al_{0.6}Ga_{0.4}N$ エピ (Si $\pm 7.4\%$, Mg $\pm 12.6\%$)

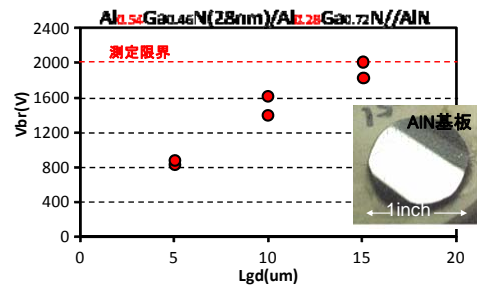
事業原簿(公開版) -45-59

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



ドーピング緩衝層の有用性確認!

■ AlGaInチャンネルHEMTの試作 (AlN基板上)



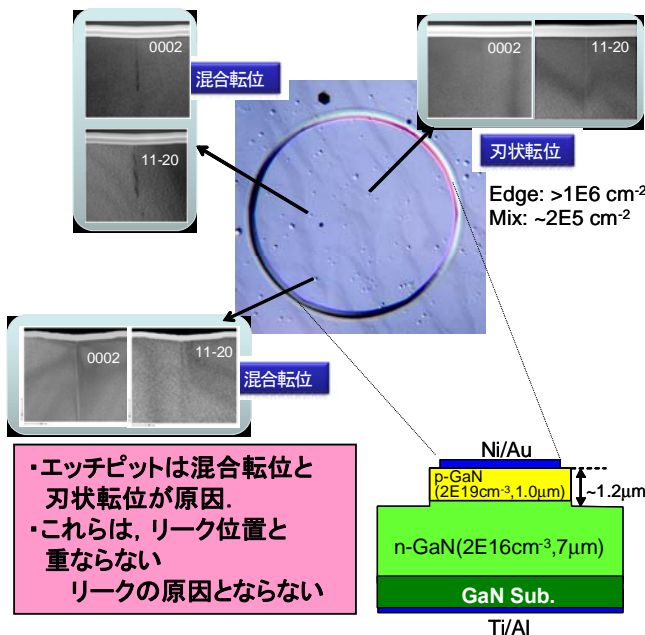
AlGaInチャンネル/AlN基板で、2000Vを超える耐圧確認!

3. 研究開発成果について

(2) 成果の意義 ~ ③GaN基板上電子デバイスの評価(1) ~

公開

■ 縦型デバイス(pnダイオード)のリーク電流と転位密度の解析

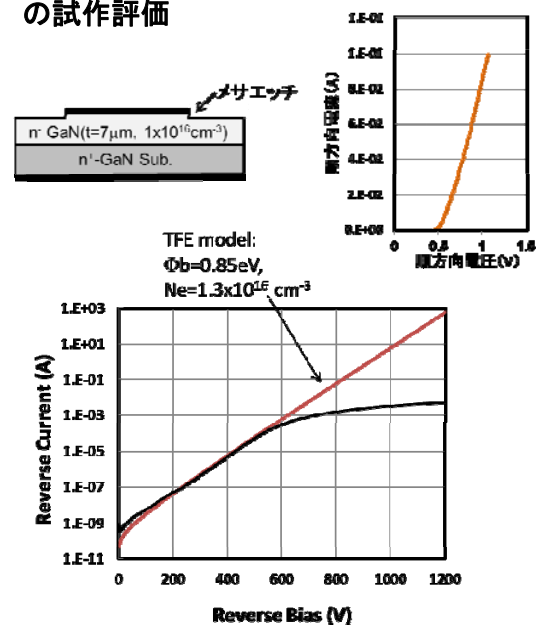


エッチピットは混合転位と刃状転位が原因。
これらは、リーク位置と重ならない
リークの原因とならない

エッチピットとその原因となる転位の同定

事業原簿(公開版) -78-84

■ 縦型デバイス(ショットキーダイオード)の試作評価



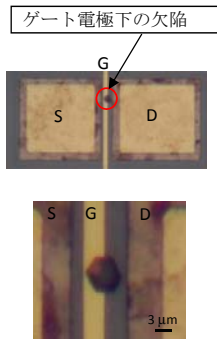
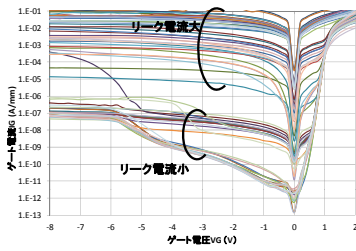
GaN基板上の縦型ダイオードで、1200V以上の耐圧確認。

3. 研究開発成果について

(2) 成果の意義 ~ ③GaN基板上電子デバイスの評価(2) ~

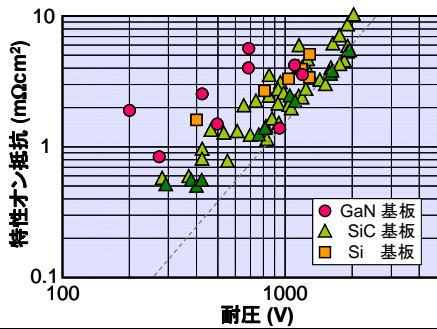
公開

■ 横型デバイスの試作評価



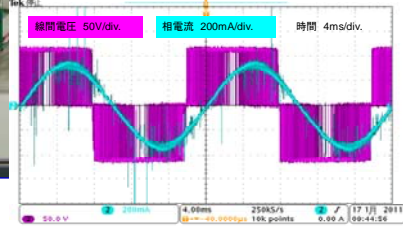
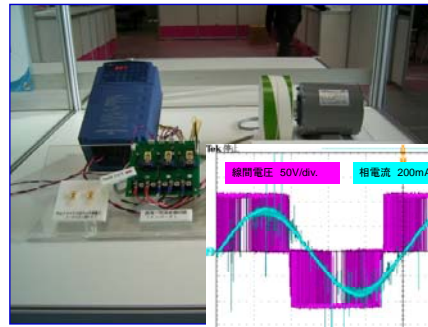
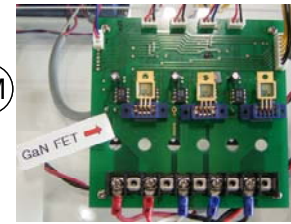
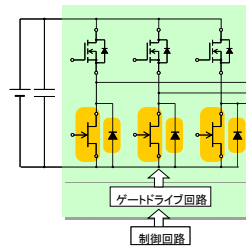
2インチ基板上FETの I_g - V_g 特性とゲート電極下の欠陥

低欠陥密度基板の必要性を確認!



GaN基板上FET、オン抵抗(R_{on})と耐圧(V_{br})の関係良好!

■ GaNインバータによる実機動作



GaNインバータ実機動作により実用性を確認!

事業原簿(公開版) -64-91

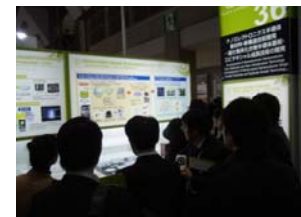
3. 研究開発成果について

(3) 知的財産権等の取得、(4) 成果の普及

公開

■ 知的財産権、成果の普及における実績

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



nanotech展

※ nanotech展は毎年出展

■ 成果普及を行った主な窒化物半導体に関する国際学会



IWN-2008



IWN-2010



ICNS-9



IWN-2012

事業原簿(公開版) -8

4. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

(1) 実用化の見通し ～ ①大口径単結晶基板の開発 ～

公開

■ Naフラックス法 導電性GaN基板 (豊田合成株式会社)

	2013	2014	2015	2016	2017
基板事業化			LED		パワーデバイス
基板仕様			e ⁺ 欠陥 10 ⁹ /cm ²		e ⁺ 欠陥 10 ⁹ /cm ²
基板コスト(対サファイア)			～4倍		～3倍
各コストダウン項目の検討		加工費、労務費、光熱費、償却費、材料費にわたる項目につき目標を設定し、検討を進める。			
装置&工程設計		装置基本構成検討(2世代相模)および総合設計実施	装置製作	装置スループット改良	

■ Naフラックス法 高抵抗GaN基板 (日本ガイシ株式会社)

項目	年度		平成19年(2007)	～	平成23年(2011)	平成24年(2012)	平成25年(2013)	平成26年(2014)	平成27年(2015)	平成28年(2016)
	①委託研究(本プロジェクト)				研究開発					
②委託研究終了										
③商品開発								商品開発		
④サンプル供試開始							○			
⑤品質改善										
⑥量産技術検討										
⑦事業化判断										△
⑧事業化										事業化

■ HVPE法GaN種基板 (古河機械金属株式会社)

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

事業原簿(公開版) -1~2

4. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

(2) 実用化の見通し ～ ②エピタキシャル成長技術の開発 ～

公開

■ エピタキシャルウエハ (昭和電気株式会社)

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

■ エピタキシャルウエハ/AIN基板 (住友電気工業株式会社)

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

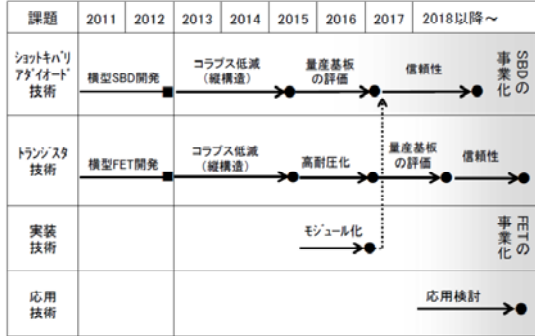
事業原簿(公開版) -2~3

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

公開

■ GaN電子デバイス(横型/縦型)
 (サンケン電気株式会社)

事業化までのマイルストーン



■ GaN電子デバイス(縦型)
 (株式会社豊田中央研究所)

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

■ GaNデバイス(横型)
 (シャープ株式会社)

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