

「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)

(2007年度～2011年度 5年間)
プロジェクトの概要(公開)

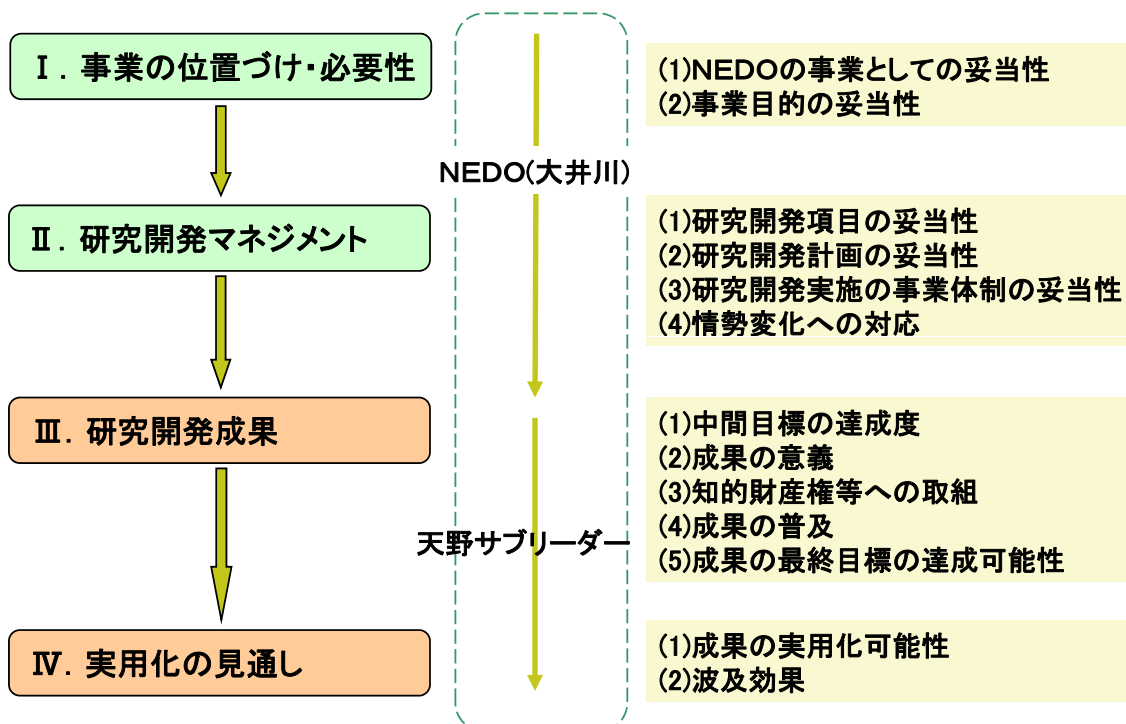
1. 事業の位置付け・必要性について
2. 研究開発マネジメントについて

NEDO技術開発機構
ナノテクノロジー・材料技術開発部
2009年 8月31日

「ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発—窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発」
(中間評価)第1回分科会 資料6

1/56

発表内容



2/56

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

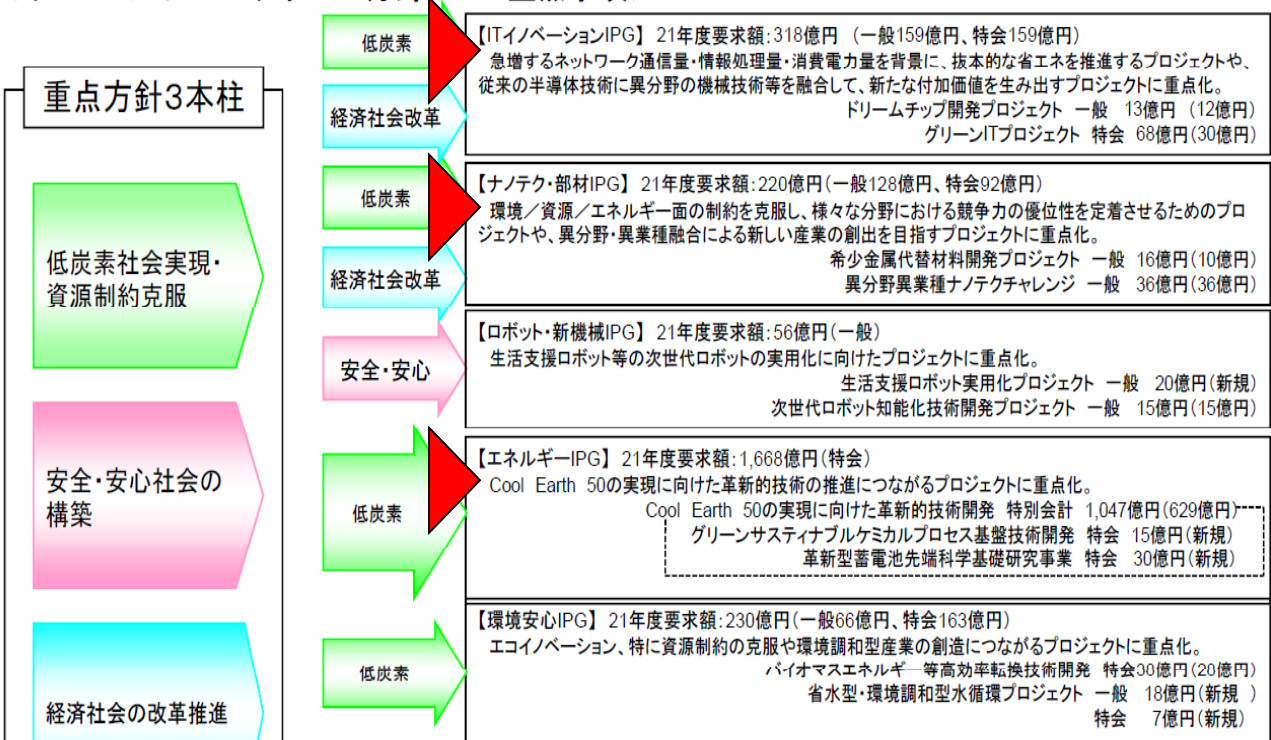
「第三期科学技術基本計画(H18. 3)」、「エネルギー技術戦略の基本的考え方(H18. 5)」、「新・国家エネルギー戦略(H18. 5)」等における重要な省エネ技術としての位置付け。

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(プログラムへの寄与)

＜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(プログラムへの寄与)

1. IT イノベーションプログラム

【21年度要求額 317.9億円】(20年度予算額 268.2億円)

高度情報通信社会の実現

社会基盤を支えるIT技術。これらを活かし、イノベーションを創出するとともに、IT産業再編を促し、選択と集中を図りつつ、持続的に競争力を強化する。

IT産業の国際競争力の強化

情報爆発への対応

今や知的活動時間に占める検索に費やす時間は、何と30%...

これら情報爆発による課題を解決

ITの利活用による知の創造

情報大航海

41.1(41.1)

いつでもどこでもあらゆる場面で情報の検索・解析・活用環境を実現。

ITとサービスの融合

18.8(新規)

ITによる生活の質の向上

New

0.5(新規)

New

3.0(新規)

IT コア技術の革新

最終製品に占める半導体の価格割合はこの10年で3割以上増加。今後、製品付加価値を高めるコアデバイスの開発。

世界最先端デバイスの先導開発

90 nm 65 nm 45 nm 32 nm 22 nm ...

光技術の革新利用

ナノ光デバイス

基盤技術

省エネを支えるプロセス基盤技術

GaN (ナノエ) 5.5(5.0)

省エネ革新

インターネットの普及により、このままでは2020年には国内総発電量の4.5%がルータで消える...

抜本的に解決

情報ネットワークシステムの徹底的省エネの実現

グリーンIT

68.0(30.0)

目標値！ 2.5倍(100倍)

次世代NWデバイス

10.4(10.4)

ネットワーク全体の消費電力削減

情報機器の徹底的省エネの実現

次世代大型ディスプレイ

11.7(11.7)

高精細大型ディスプレイの消費電力削減

省エネを支えるプロセス基盤技術

GaN (ナノエ) 5.5(5.0)

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

【平成21年度概算要求額：220.0億円】

(平成20年度予算額：183.2億円)

(再掲含む)

○あらゆる分野に対して高度化・非連続な革新をもたらすナノテクノロジー・革新的部材技術を確立！

○我が国産業の国際競争力の維持・強化や解決困難な社会的課題の克服！

IPGの目標

-ナノテクによる非連続技術革新-

世界に先駆けてナノテクノロジーを活用した非連続な技術革新を実現する！

-世界最強部材産業による価値創出-

我が国部材産業の強みを更に強化することで、他国の追随を許さない競争優位を確保するとともに、部材産業の付加価値の増大を図る！

-広範な産業分野での付加価値増大-

ナノテクノロジーや高機能部材の革新を先導することで、これら部材を活用した情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなどの幅広い産業の付加価値の増大を図る！

-エネルギー制約・資源制約などの課題解決-

希少金属などの資源制約の打破、圧倒的な省エネルギー社会の実現など、解決困難な社会的課題の克服を目指す！

I. ナノテクノロジーの加速化領域

-垂直連携・異分野融合型-nanotechnologyの加速化-

異分野異業種 ナノテクチャレンジ (ナノテク革新部材実用化研究開発) 36.46(36.46)

VI. 共通基盤領域

-ナノ材料の安全性評価- ナノ粒子特性評価 手法開発 4.5(3.74)

関連施策

○技術戦略マップの策定
-ナノテクノロジー分野
-部材分野
-ファイバー分野
-GSC分野 等

II. 情報通信領域

-世界最先端デバイスの先導開発-

ナノエレクトロニクス 新材料新構造 (More Moore) 7.0(5.0)

スピントロニクス 5.85(5.2)

-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)

光技術の革新利用

三次元光デバイス 3.6(3.6)

低損失光学デバイス 4.37(4.37)

-半導体材料評価技術-

半導体材料基盤技術 (CASMAT) 1.2(新規)

III. ライフサイエンス・健康・医療領域

-ナノテクノロジーを駆使した新しい-

次世代DDS 4.6(4.6)

個別化医療実現 3.4(3.4)

IV. エネルギー・資源・環境領域

I) エネルギー制約を乗り越える

-革新的な省エネ部材-

CNTキャパシタ 4.0(4.0)

サステナブル ハイバ-コンポジット 7.1(3.2)

マルチセラミクス膜 断熱材料 3.5(3.2)

-革新的な燃料電池-

セラミックIT 4.0(4.5)

-革新的な電力部材-

高温超電導 ケーブル実証 8.0(1.6)

発電プラント用 高純度金属 3.5(3.9)

ガラス溶融 4.8(3.5)

省エネセラミクス (製造技術) 3.0(新規)

希少金属代替 材料開発 16.0(10.0)

V. 材料・部材領域

-広範な産業に波及する基盤的革新材料-

金属材料

ナノファイバー

超ハイブリッド

超導材料

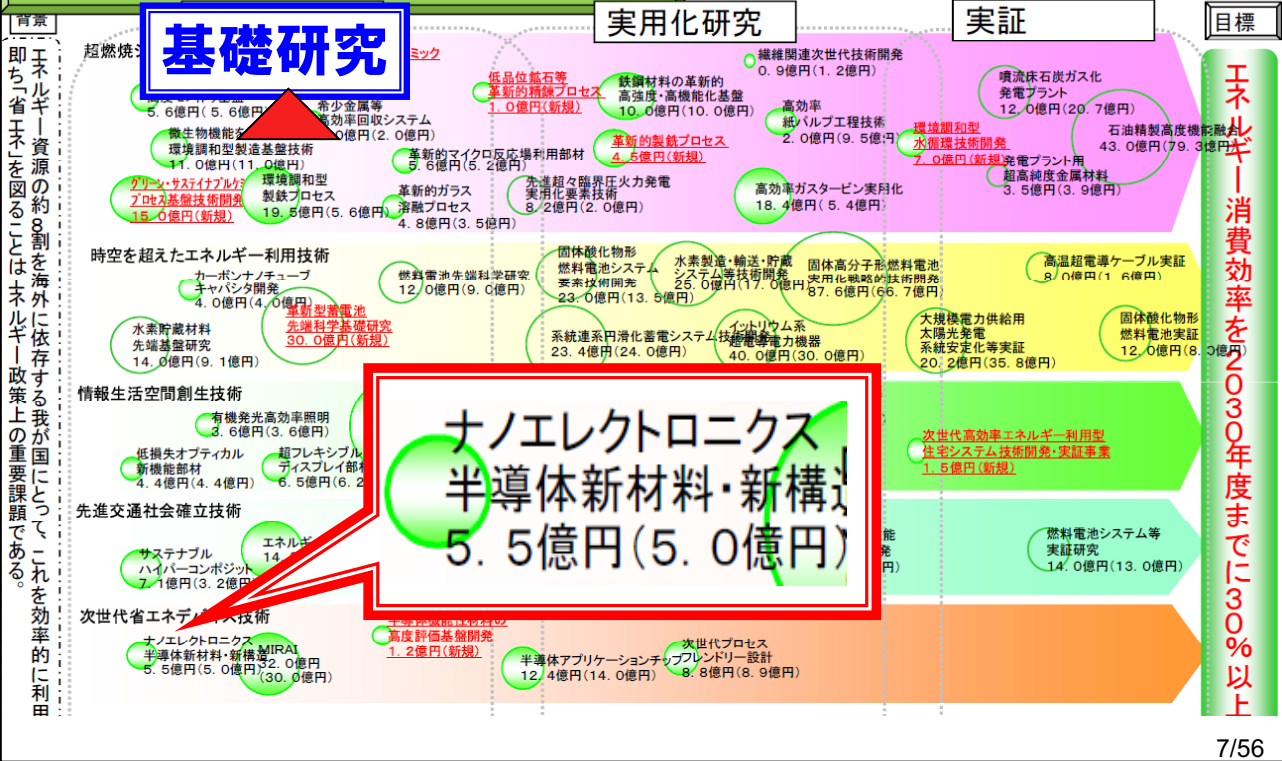
1. 事業の位置付け、必要性について

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

平成21年度要求948億円(20年度予算801億円) ※基礎、実用、実証の区分内は、任意に配置。



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関与の必要性)

高周波・パワーデバイス用としての省エネデバイスの実現は、

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

(市場が不確定の中での大規模な研究投資が必要)

NEDOがもつこれまでの知識、実績を活かして推進すべき事業

1. 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(事業予算に対する効果)

事業費用の総額 30億円/5年

市場の効果(汎用インバータ(3.7kW級)@2020年)

製品販売額 250億円/年(年間25万台で計算)

普及台数 1200万台/計4100万台

削減電力 49億kWh/年

削減電気代 490億円/年(10円/kWhで計算)

省エネルギー効果 80万kl/年(2020年推定、原油換算)

280万kl/年(2030年推定、原油換算)

2002年全産業モータ
比では、約3%相当730万トン/年(2030年推定、CO₂換算)(参考)我が国のCO₂発生量=20.5億トン(2002年)内、全産業モータのCO₂発生量=2.5億トン

(出典:(社)日本機械工業連合会[日機連18先端-9]報告書)

9/56

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(事業予算に対する効果)

市場の効果(携帯基地局の送信用増幅器)

2020年基地局 従来Si&GaAs 3万局

新規GaNデバイス 21万局

省エネルギー効果(消費電力量)

従来Si&GaAs 4.2kW/局

新規GaNデバイス 1.6kW/局

2020年電力削減 50億kWh/年 ⇒500億円/年

省エネルギー効果(CO₂排出削減)

2020年推定 270万トン/年(原油換算 100万kl/年)

2030年推定 500万トン/年(原油換算 190万kl/年)

(出典:(社)日本機械工業連合会[日機連18先端-9]報告書)

10/56

1. 事業の位置付け、必要性について

(2)事業目的の妥当性(国内外の動向)

公開

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

11/56

1. 事業の位置付け、必要性について

(2)事業目的の妥当性(国内外の動向)

公開

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	400 $\mu\text{m}/\text{h}$	HVPE	2インチ
アモノサーマル	4インチ	4 $\mu\text{m}/\text{h}$	アモノサーマル	4インチ
高圧HVPE	30mm	2 $\mu\text{m}/\text{h}$		
Naフラックス	4インチ	30 $\mu\text{m}/\text{h}$	Naフラックス	2インチ

2011年数値目標(出典:IWN2008 古河機械金属(株) 碓井氏資料)

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.ZO.0
Naフラックス	2008	2インチ×厚3mm	大阪大学
HVPE	2008	40mm□×厚7mm	古河機械金属

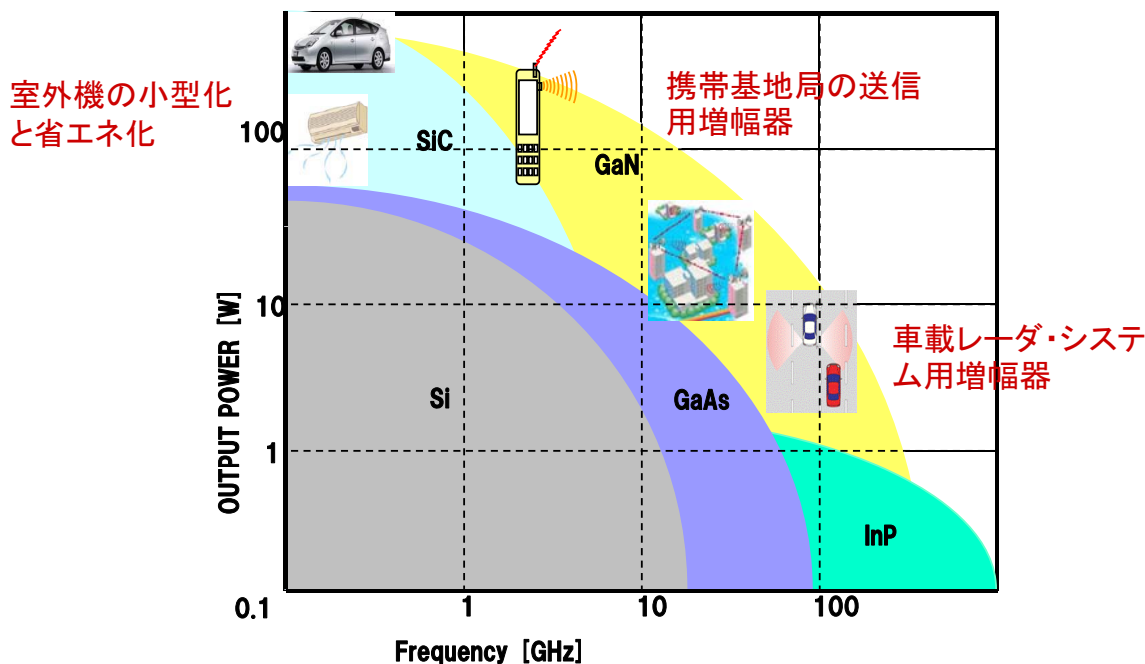
2008年の達成状況(出典:IWN2008 古河機械金属(株) 碓井氏資料)

12/56

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

公開

電気自動車の高出力・
 冷却軽減・省エネ化



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)

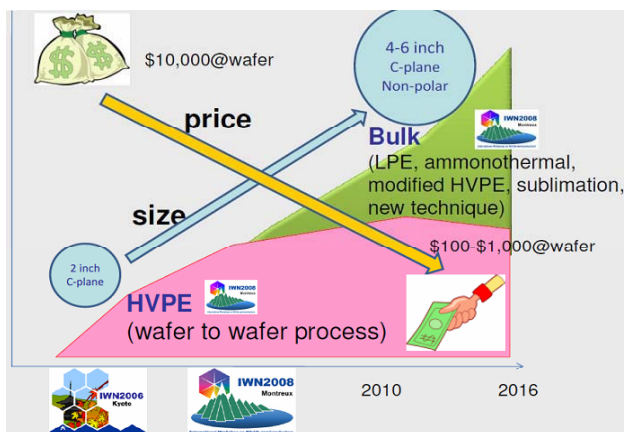
公開

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GaN、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**

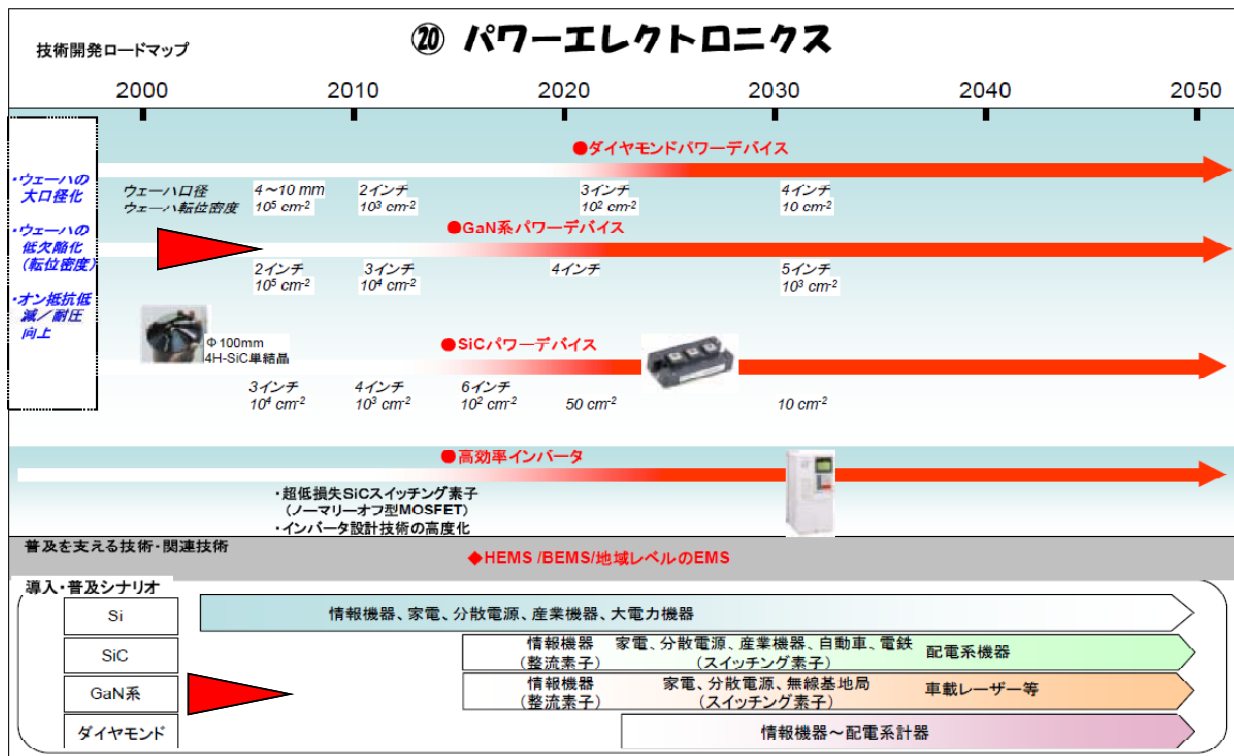
2007年(PJ前)
 NEDO POST
 ・デバイスの参画



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)



2. 研究開発マネジメントについて

公開

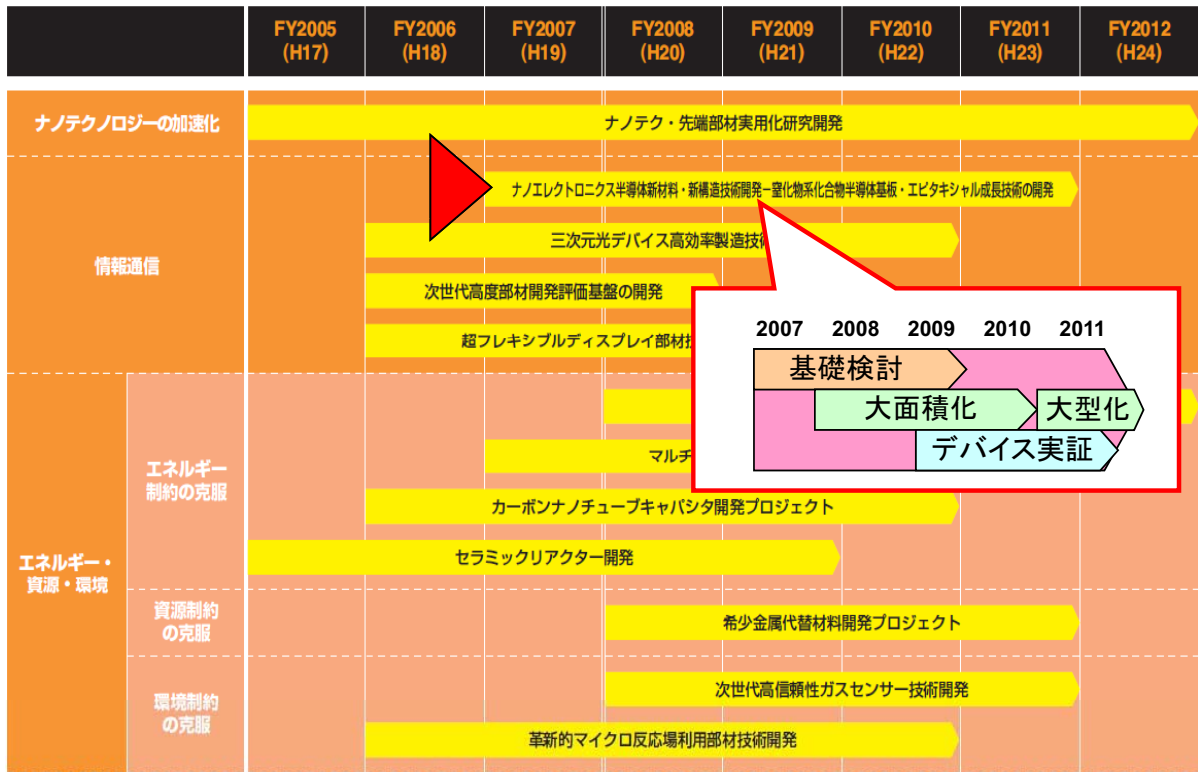
(1)研究開発計画の妥当性(中間・最終の目標設定)

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)

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)



2. 研究開発マネジメントについて

公開

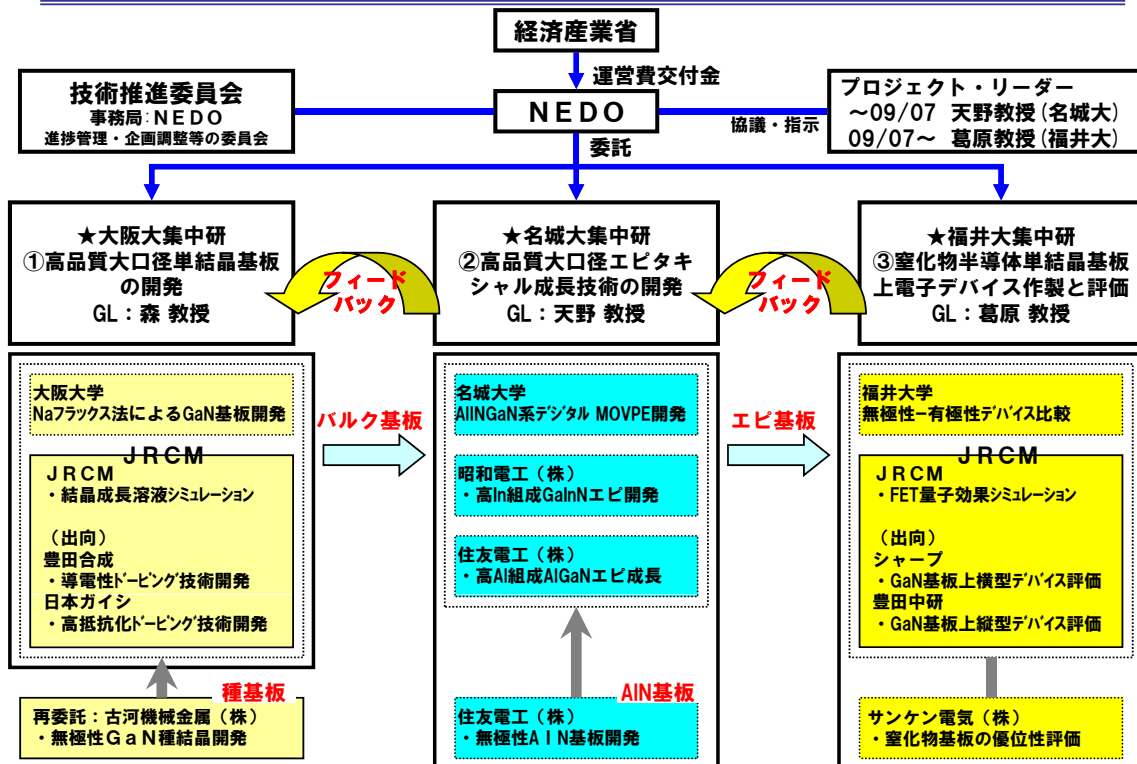
(2)研究開発計画の妥当性(目標達成の予算)

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 ・有極性4インチ ・無極性3インチ
② 高品質大口径エビタキシャル成長技術の開発 AlGaN・InGaN GaNホモエビ	285	288 (+126)	117	113	179	1108 ・低転位化 混晶10^6cm^{-2} 有極性ホモエビ$5 \times 10^3\text{cm}^{-2}$
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 ・エビ基板上電子デバイスの評価結果フィードバック
合計 (提案時要求額)	586 (470)	540 (740)	320 (701)	332 (629)	464 (460)	2602 (3000)

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(研究開発の実施体制)



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
昭和電気(株)	エピタキシャル基板
住友電気工業(株)	エピタキシャル基板
サンケン電気(株)	電源、インバータ等の応用製品

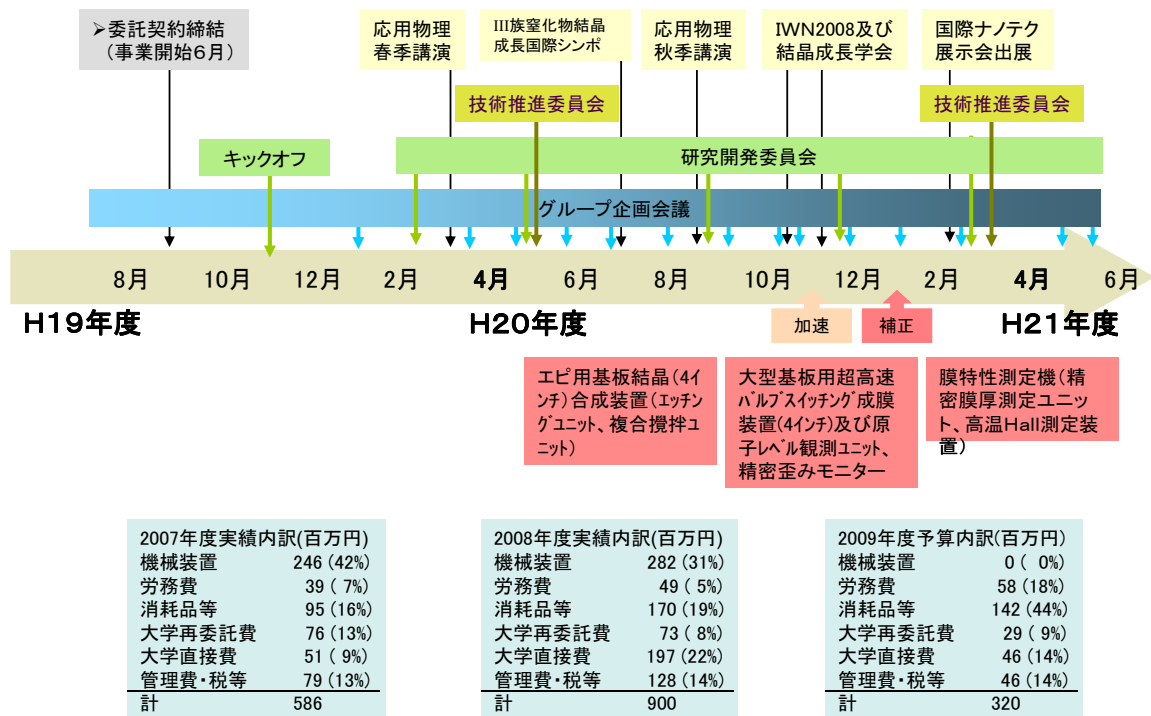
(波及効果)

豊田合成(株)	単結晶GaN基板
日本ガイシ(株)	単結晶GaN基板
古河機械金属(株)	種結晶基板
シャープ(株)	パワーデバイス
(株)豊田中研	パワーデバイス

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)



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)

・NEDOナノテク部主催による「技術推進委員会(年1回)」開催

外部有識者の意見を運営管理に反映

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

平成19年度・技術推進委員会(H20.5.9)

(委員会提言) 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。

(提言に対する対応) 連携見直し、および加速資金によるスピードアップ。

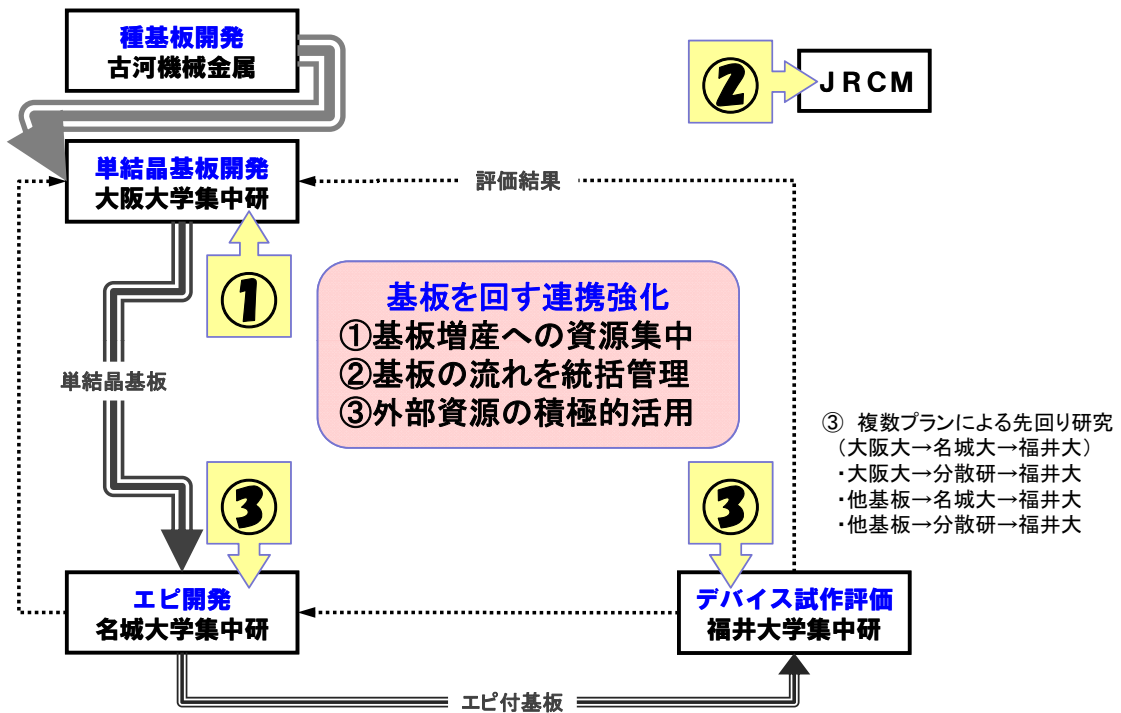
・その他、下記の委員会等を開催

「研究開発委員会(年4回)」 研究内容の進捗状況確認と今後の方針を協議

「グループ企画会議(適宜)」 各グループ毎に進捗状況確認と今後の方針を協議

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(進捗状況の把握と対応)



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(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GaN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AlGaN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AlGaN/GaNエピ上にHEMTを試作、高ドレイン電流実現の成果をナノテック2009に出展

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(計画見直しの方針)

公開

平成20年度・技術推進委員会(平成21年3月23日)

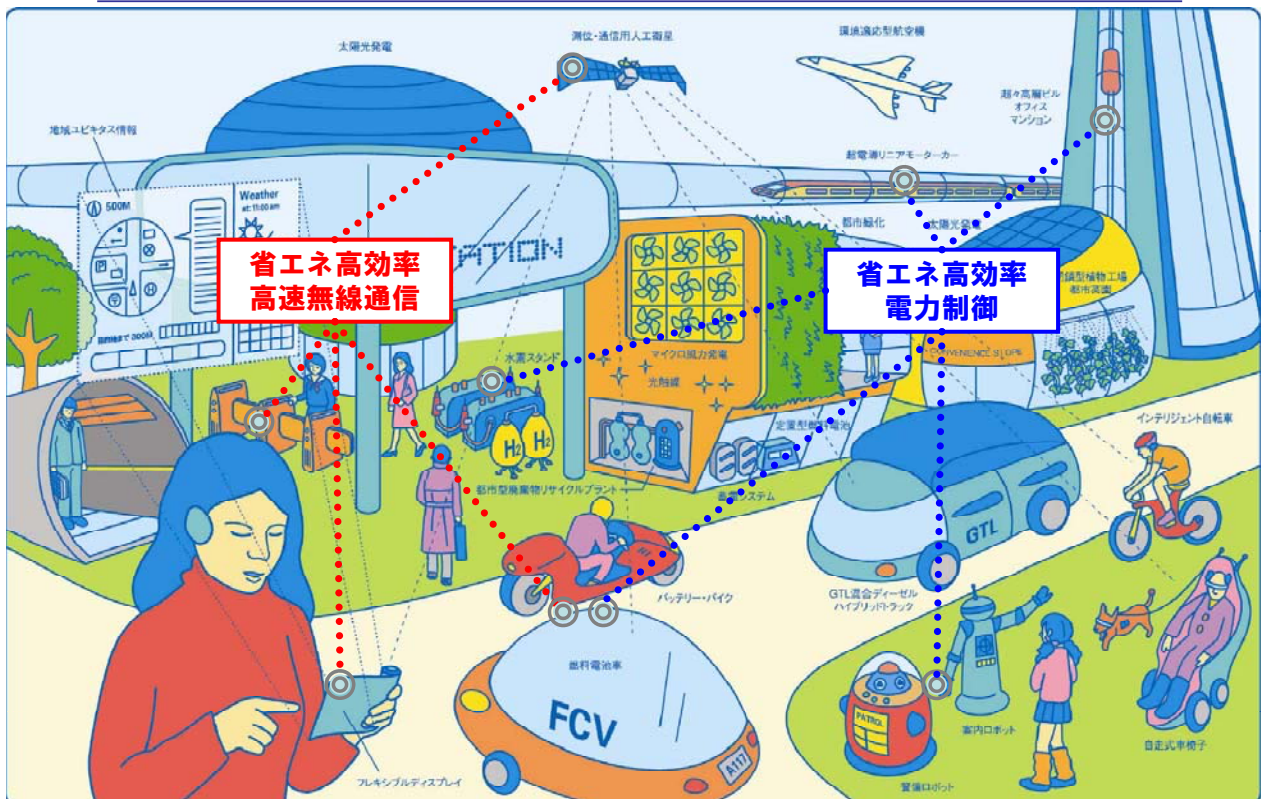
(委員会提言)

- ・現在までの目標は達成
- ・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
- ・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

対処方針	施策	H21加速要望
有極性結晶 ・早期に結晶大型化の検証	基板 ・有極性GaN大型化の早期課題抽出の加速	40百万
無極性結晶 ・基礎的研究課題への取組	エピ ・AlGa _N 、InGa _N エピ膜の大面積・高品質化加速 (デバイス試作用の基板増産)	57百万
デバイス・フィードバック ・高品質基板の供給加速	デバイス ・高耐圧試作評価システム等の構築加速	48百万

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)

公開



「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)

(2007年度～2011年度 5年間)
プロジェクトの概要 (公開)

3. 研究開発成果について 4. 実用化の見通しについて

2009年 8月31日

プロジェクトリーダー 福井大学 葛原 正明
サブリーダー 名城大学 天野 浩

3. 研究開発成果について

(1)中間目標の達成度(中間目標と達成状況)

研究開発項目	中間目標	成果	達成度
①高品質大口径 単結晶基板の開 発	有極性面(2インチ)転位密度 $<10^5\text{cm}^{-2}$ 無極性面 転位密度 $<10^6\text{cm}^{-2}$	$10^4\text{cm}^{-2} \sim 10^5\text{cm}^{-2}$ 台 $<10^6\text{cm}^{-2}$	○
	伝導度制御 ・導電性基板 比抵抗 $<10^{-1}\Omega \cdot \text{cm}$ ・高抵抗基板 比抵抗 $>10^5\Omega \cdot \text{cm}$	$2 \times 10^{-2}\Omega \cdot \text{cm}$ $10^8\Omega \cdot \text{cm}$	◎
②高品質大口径 エピタキシャル成 長の開発の開発	2インチ有極性、及び無極性窒化物基板上へ のエピタキシャル成長	世界初、AlGaInのALEに成功 AlGaInの低温成長に成功	◎
	AlGaIn混晶エピ成長層ドーピング不純物濃度 N型 $>10^{18}\text{cm}^{-3}$ P型 $>10^{17}\text{cm}^{-3}$	N型 $\sim 9 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ P型 $\sim 2 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$	○
③窒化物半導体 単結晶基板上電 子デバイスの評 価	GaNホモエピ成長層 残留ドナー濃度 $<5 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$	残留ドナー濃度 $<10^{14}\text{cm}^{-3}$	○
	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で高ドレイン電流 確認	○
	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	縦型ダイオードで基板・エピ界面の 品質と耐圧との相関確認	◎

◎:当初計画以上の成果 ○:今年度達成・達成見込み △:来年度以降

3. 研究開発成果について

公開

(1)中間目標の達成度(個別中間目標の達成状況)

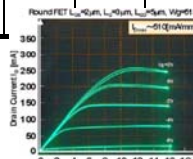
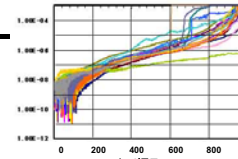
研究開発項目	中間目標	7月現在の進捗状況
①高品質大口径単結晶基板の開発	2インチ単結晶有極性面 転位密度 $<10^6\text{cm}^{-2}$ 無極性面 転位密度 $<10^6\text{cm}^{-2}$	中間目標値 10 ⁶ cm ⁻² ~ 10 ⁶ cm ⁻² 台 部分的に $<10^6\text{cm}^{-2}$ 要素技術確立
	3~4インチ結晶大型化に必要な要素技術 伝導率制御 ・導電性基板 比抵抗 $<10^{-1}\Omega\cdot\text{cm}$ ・高抵抗基板 比抵抗 $>10^5\Omega\cdot\text{cm}$	2x10 ⁻² Ω・cm 10 ⁸ Ω・cm
②高品質大口径エピタキシャル成長の開発	2インチ有極性、及び無極性窒化物基板上 AlGaIn、及びInGaIn 混晶エピ成長層 Al又はIn 組成 0.5 \geq x \geq 0.2 転位 $<10^8\text{cm}^{-2}$ 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 $\pm 10\%$ GaN GaNホモエピ成長層 残留ドーパ濃度 $<5 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ 転位密度: 有極性 $<10^5\text{cm}^{-2}$ 、無極性 $<10^6\text{cm}^{-2}$ 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 $\pm 20\%$ 。	加圧炉調整中 X線トポで確認中 ALEに成功! AlGaIn GaInN N _D $<10^{13}\text{cm}^{-3}$ 厚み $\pm 5\%$ 、 ドーピング精度 $\pm 1\%$
	③窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価	・窒化物単結晶基板上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

3. 研究開発成果について

公開

(1)中間目標の達成度(3グループ間の連携)

	平成20年						平成21年								
	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	
基板開発G 大阪大学 集中研	有極性 15mm角 3枚		有極性 15mm角 4枚	無極性 10mm角 4枚	有極性 15mm角 7枚		有極性 15mm角 2枚	有極性 15mm角 6枚			有極性 15mm角 9枚	無極性 10mm角 3枚	有極性 15mm角 9枚	有極性 24mmφ 2枚	
エピ開発G 名城大学 集中研											Siスパイク低減				
											無極性面 Siドーピング条件検討・確立				
デバイス評価G 福井大学 集中研			横型FET 高ドレイン電流確認					縦型ダイオード 高耐圧確認					横型FET 高耐圧確認		

3. 研究開発成果について
(2)成果の意義(市場創造への期待)

公開

揺動法で育成した2インチ有極性GaN結晶

2インチGaN結晶で世界最高品質!

→企業から問い合わせ殺到!



3. 研究開発成果について
(2)成果の意義(本事業の中間成果)

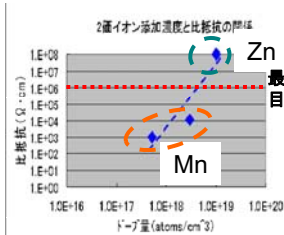
公開

基板開発グループ

m-GaN種基板上的LPE成長
転位密度 $<10^6/cm^2$ 達成

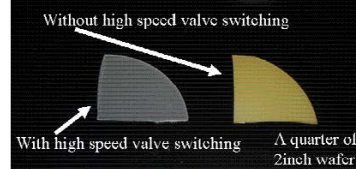


Zn添加による世界で初めて
高抵抗化($10^9 \Omega \cdot cm$)を実現



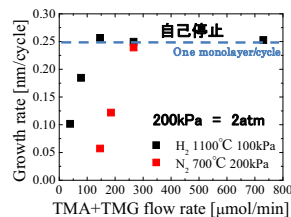
エピ技術開発グループ

超高速ガスバルブスイッチング
の有用性確認(世界初)



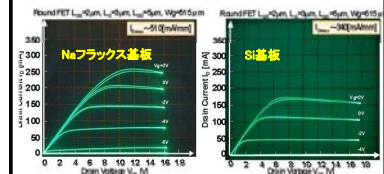
XRC(秒)	160	>1,800
AFM(nm)	0.7	140

窒化物半導体で初めて
自己停止機能を確認



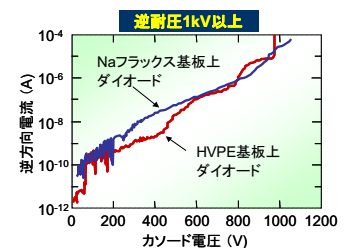
デバイス作製・評価グループ

NaフラックスGaN基板上ヘテロ
接合FETにて良好な直流特性を確認



	GaN基板	Si基板
I_{DS} (mA/mm)	510	340

p-nダイオードの逆方向特性にて
Naフラックス基板の優位性を確認



3. 研究開発成果について

公開

(2)成果の意義(開拓する新たな技術領域)

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
- (2)大口径種結晶の開発
- (3)高導電性窒化物単結晶基板の開発
- (4)高抵抗化窒化物単結晶基板の開発

②高品質大口径エピタキシャル成長の開発の開発

- (1)大口径基板上の高品質エピタキシャル結晶成長技術
- (2)高 In組成窒化物層成長技術
- (3)高 Al組成窒化物層成長技術
- (4)結晶成長その場観察評価技術

③窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価

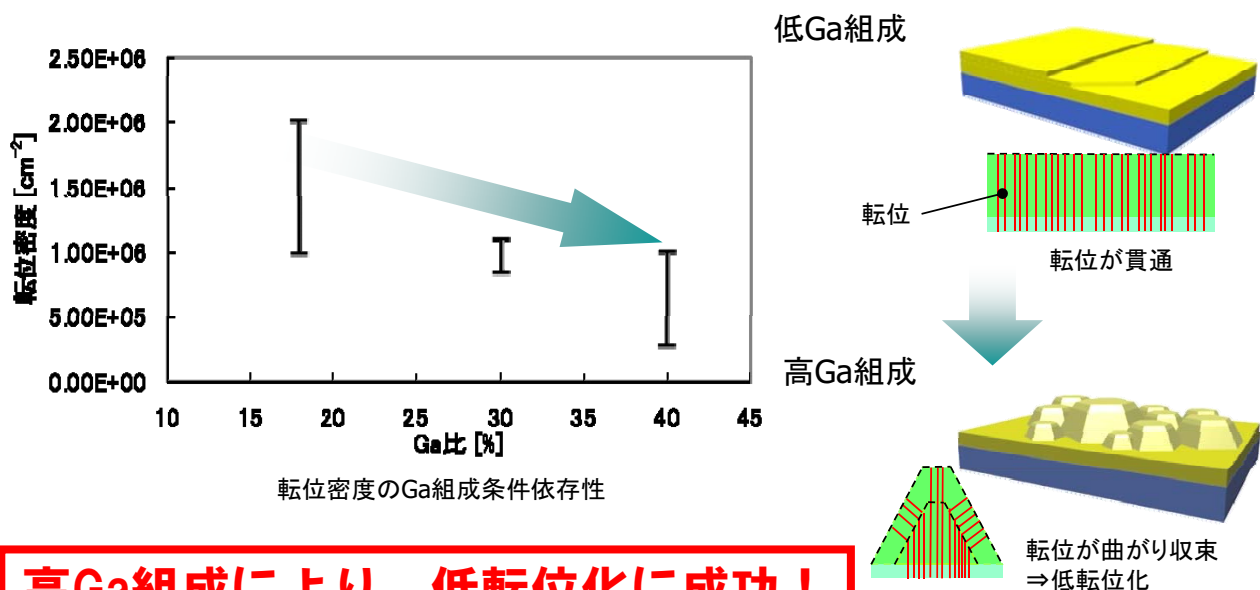
- (1)横型電子デバイスの評価
- (2)縦型電子デバイスの評価
- (3)窒化物単結晶基板上デバイスの優位性確認
- (4)有極性及び無極性デバイス構造の比較

33/56

3. 研究開発成果について

公開

(2)成果の意義(開拓する新たな技術領域)



高Ga組成により、低転位化に成功！

→基礎技術確立！汎用性確保！

34/56

3. 研究開発成果について

公開

(2)成果の意義(開拓する新たな技術領域)

	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
Seed 基板					
Seed XRC	72 arcsec	未測定	652 arcsec	1358 arcsec	830 arcsec
as-grown 結晶写真					
LPE XRC	100 arcsec	46.8 arcsec	52.2 arcsec	102 arcsec	1300 arcsec

・種結晶品質の必要仕様を確認
 ・LPE揺動により、大型無極性基板の高品質化に目途

3. 研究開発成果について

公開

(2)成果の意義(開拓する新たな技術領域)

(3)高導電性窒化物単結晶基板の開発

n型不純物(Si,Ge,Sn,O)の検討

添加物 mol%	無添加	Si 0.03	Si 0.07	Ge 0.05	Ge 0.08	Sn 0.01	Sn 0.04	Ga ₂ O ₃ 0.02	Ga ₂ O ₃ 0.03	
育成結果										
窒化率	83%	0%	0%	76%	86%	79%	85%	61%	0%	
蛍光 OM像		/							/	
PL (RT)	/								/	

Naフラックス法において、n型ドーパントとしてGeが最適！
 → 縦型デバイス用基板への道を拓く！

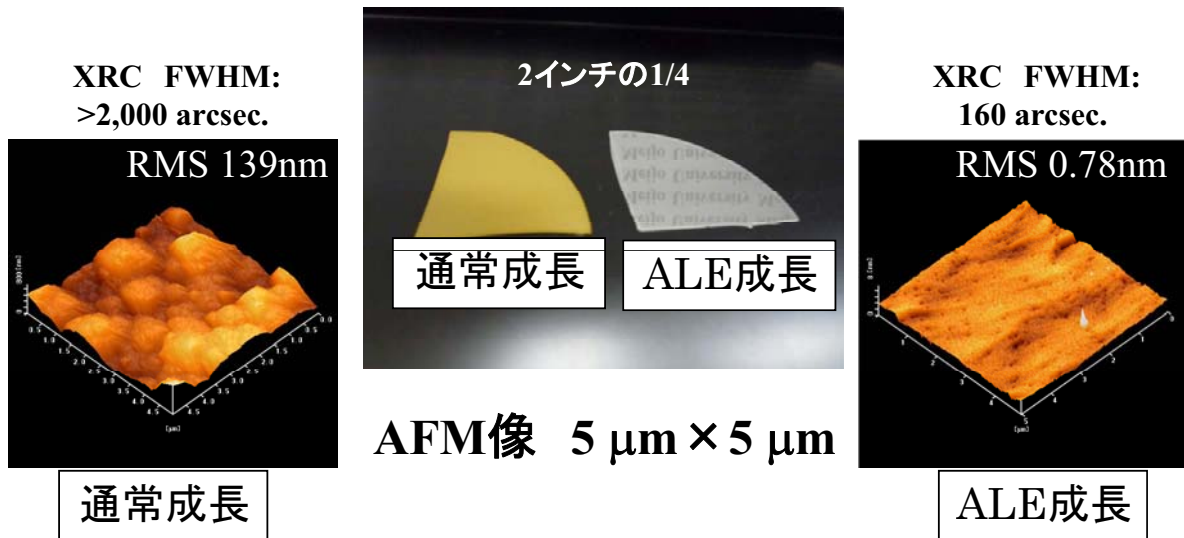
3. 研究開発成果について

公開

(2)成果の意義(開拓する新たな技術領域)

(1)大口径基板上的の高品質エピタキシャル結晶成長技術

デジタルMOVPEの開発



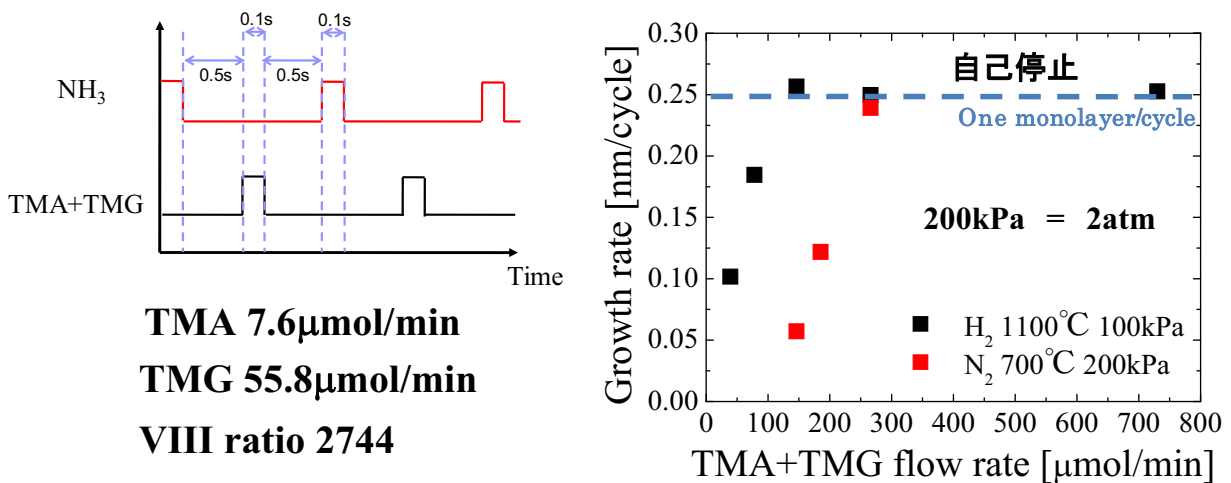
**世界初、加圧化でAlGaInの原子層エピタキシャル成長に成功！
→GalNチャネル、AlGaInバリア層作製法確立！**

原子層エピタキシー (Atomic Layer Epitaxy :ALE)

3. 研究開発成果について

公開

(2)成果の意義(開拓する新たな技術領域)



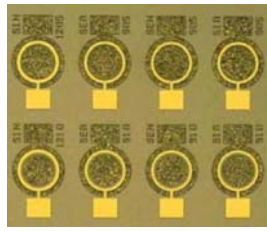
**窒化物半導体で初めて自己停止機能を確認！
→ 1原子層ずつの成長制御が可能！**

3. 研究開発成果について

公開

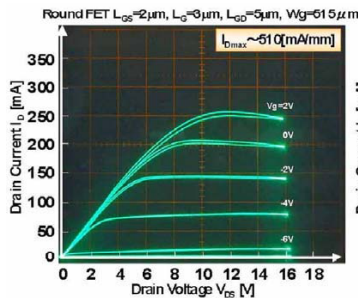
(2)成果の意義(開拓する新たな技術領域)

(1) 横型電子デバイスの評価

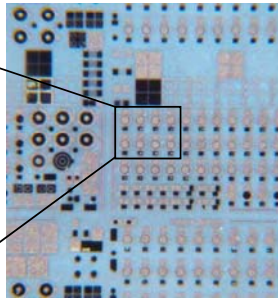


FET試作例

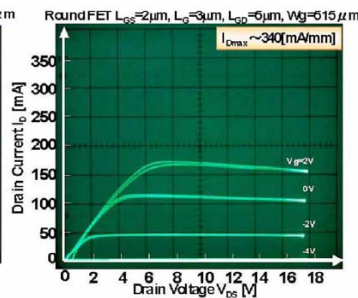
510mA/mmを確認



PJ内製エピ基板でのFET特性



共通TEG試作例



市販GaN on Siエピ基板でのFET特性

目的

- ・各種の窒化物エピ基板の上に横型デバイス試作・フィードバック

方法

- ・共通TEGマスクを使用
- ・内製基板とエピを使用試作・評価

成果

- ・Pj内製有極性AlGaN/GaNエピ上にHEMT試作

- ・ $I_{dmax}=510mA/mm$ 確認

展望

- ・2インチの窒化物基板上にFET試作・評価・フィードバック

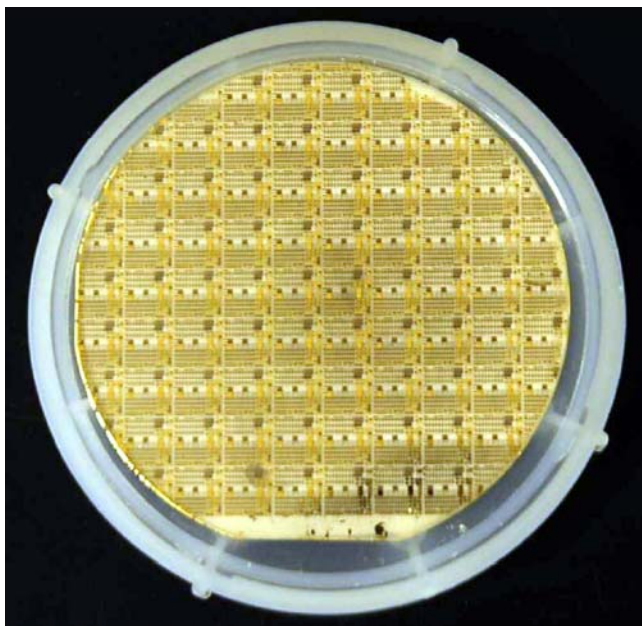
GaN基板上HFETで
高ドレイン電流を
確認！

3. 研究開発成果について

公開

(2)成果の意義(開拓する新たな技術領域)

(1) 横型電子デバイスの評価



2インチGaN有極性基板上のHEMT-TEG

目的

- ・2インチ有極性GaN基板とHEMTエピの品質と均一性をHEMT特性を通して評価

方法

- ・2インチGaN基板全面にFETを試作

成果

- ・良好な均一性を確認
- ・電流密度250mA/mm以上
- ・ドレイン耐圧350V以上確認

展望

- ・保護膜による動作安定化
- ・ドレイン電流密度の向上
- ・更なる耐圧向上

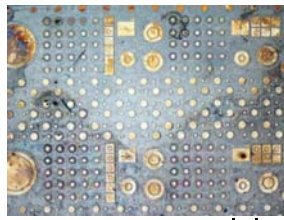
2インチGaN基板上
で均一なFET特性を
確認！

3. 研究開発成果について

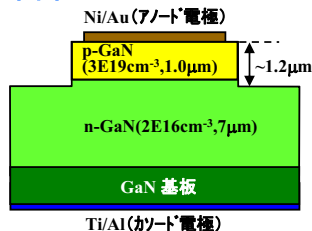
公開

(2)成果の意義(開拓する新たな技術領域)

(2)縦型電子デバイスの評価



試作ダイオードパターン



p-nダイオード断面構造

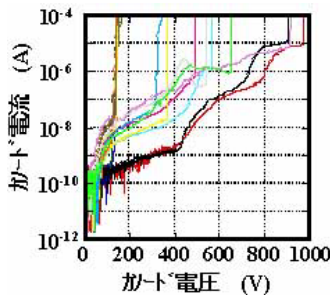
縁面放電抑制のため
フロンテート中で評価

成果

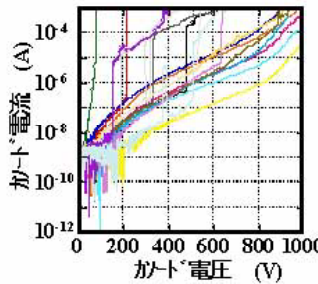
- ・耐圧1kV以上のダイオード特性を確認。
- ・市販HVPE基板に対し優位性ありと判断。

展望

- ・結晶品質・欠陥と耐圧特性との相関検討。



市販c面HVPE基板上
p-nダイオード耐圧特性



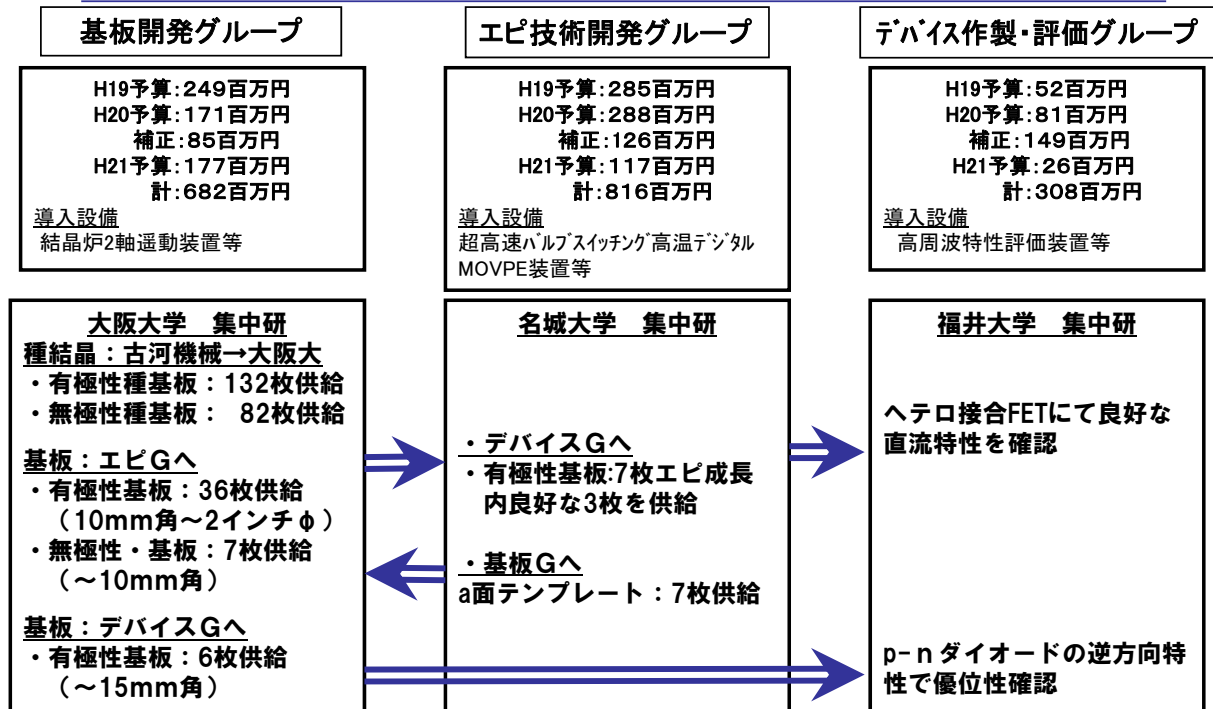
c面Naフラックス基板上
p-nダイオード耐圧特性

Naフラックス法GaN基板上p-n接合ダイオードで高耐圧を確認

3. 研究開発成果について

公開

(2)成果の意義(投入予算に対する成果)



- ・メンバー専用ホームページを開設し供給基板情報を共有化
- ・各集中研拠点での開催を含め研究開発委員会を4回開催
(大阪大学:平成20年12月4日、福井大学:平成21年3月17日、名城大学:平成21年8月21日)

3. 研究開発成果について

(2)成果の意義(競合技術との比較)

公開

調査・分析	
内外の競合技術の動向	<ul style="list-style-type: none"> ・HVPE法⇒有極性基板で最大3インチΦが実現しているが、転位密度が10^6cm^{-2}と高い。無極性基板はC面基板のスライス品を除くと、XRCが数1000arcsec台と結晶性が悪く実用レベルには達していない。 ・Naフラックス法⇒国内外で研究している機関は、大阪大学のグループと東北大学山根研がある。大阪大学のグループでは、複数の企業と一緒にNEDOプロジェクトと共同研究が実施されている。 ・安熱法⇒大学では、東北大学やUCSBが研究をしているが成長速度が遅く、結晶品質も種基板結晶と同等で良くない。企業では、ポーランドのアモノズー社が最も進んでいるようであるが、高品質結晶は育成できるものの、成長速度が遅いという問題がある。
内外の市場動向	<ul style="list-style-type: none"> ・有極性基板⇒ HVPE法GaN基板のみが出荷されており、ブルーレイディスク用青紫色LD用基板として量産化されている。また、電子デバイス用の基板としてはサンプル出荷の段階である。 ・無極性面基板⇒ HVPE 法C面GaN結晶のスライス品がサンプル出荷され、研究レベルではデバイス試作が活発に行われている。只、スライス品のためサンプルサイズが最大で10mm角程度と小さく、主にLDの発光効率改善用として使用されている。
本事業の国際競争力	<ul style="list-style-type: none"> ・大口径の無極性GaN結晶は依然実現されておらず、また実現可能性が高い手法は見当たらない。従って、本プロジェクトが目指す、Naフラックス法による大口径無極性GaN基板、及びそれを用いた高品質ヘテロエピ技術、電子デバイスの試作・評価技術が実現すれば、世界に類例を見ず非常に国際競争力の高いものである。

43/56

3. 研究開発成果について

(2)成果の意義(競合技術との比較)

公開

手法	機関	特性				備考	
		サイズ	転位密度 cm^{-2}	X R C Arcsec	速度 $\mu\text{m}/\text{h}$		
C面基板	HVPE法	三菱化学	2inchΦx 6mm厚	$\sim 10^6$	—	—	
		Kyma	2inchΦx 10mm厚	—	100	100	
		Unipress	1.5inchΦ x 5mm厚	$\sim 10^6$	—	200	
	アモノサル法	Ammono zoo	1.5inchΦ	5×10^3	17	(1)	
		UCSB	(5mmΦ) x 2.3mm	—	(200)	2~3.5	三菱化学の種を使用
		東北大	46mmΦ	—	104 (0002)面	—	EBL(Evaporating Buffer Layer)サファイア基板にパッファー層作成。高温でポイド
高圧法	Unipress	10x15mm	$\sim 10^6$	54	—	HVPE種基板上	
Flux法	大阪大	2inchΦ	$10^2 \sim 5$	—	30		
m面基板	HVPE法	古河機械	45mmΦ x 0.5mm厚	—	800~2800	—	m面サファイア+ Al_4C_3 パッファー
		EPF	20mmx20mmx数10 μm 厚	—	数1000	—	m面GaN直接成長/サファイア窒化基板
		三菱化学	12mmx20mm	$\sim 10^6$	—	—	C面結晶のスライス
		Kyma	7mmx(30)mm	—	—	—	C面結晶のスライス
		Unipress	5mmx15mm	—	—	—	C面結晶のスライス

44/56

3. 研究開発成果について

公開

(3)知的財産権等の取得、(4)成果の普及

知的財産権、成果の普及

	H19	H20	H21	計
特許出願(出願予定特許)	3	17	15(4)	35(4)件
論文(査読付き)	1(1)	7(7)	2(2)	10(10)件
研究発表・講演	13	21	6	38件
受賞実績	0	0	0	0件
新聞・雑誌等への掲載	0	1	0	1件
展示会への出展	0	1	0	1件

※ : 平成21年度8月28日現在

その他、ISCS2009、ICNS8、応用物理学会などで発表予定

45/56

3. 研究開発成果について

公開

(4)成果の普及(中間成果の情報発信)



IWN2008 (スイス・モントルー)
各大学の成果発表(左から名城大学、大阪大学、福井大学)



46/56

3. 研究開発成果について (4) 成果の普及(中間成果の情報発信)

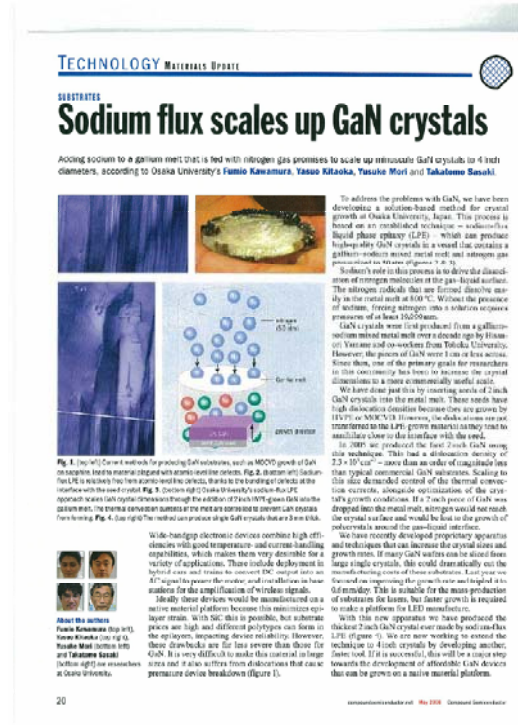
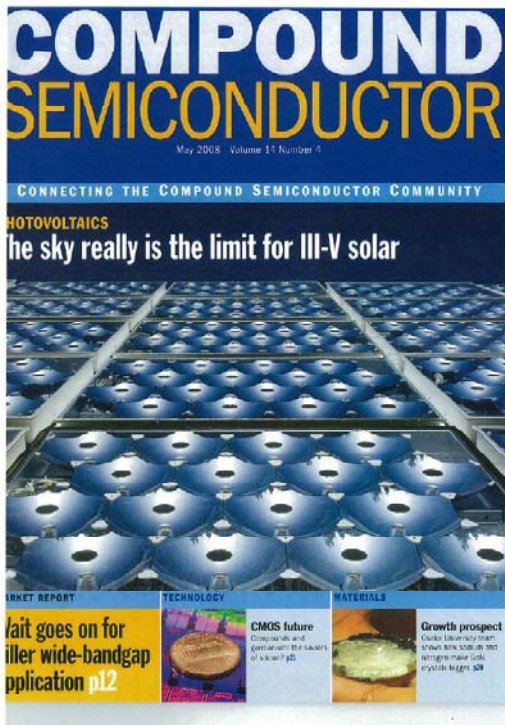
公開



平成21年2月18~20日, nano tech2009展示会(国際ナノテクノロジー総合展・技術会議) 出展

3. 研究開発成果について (4) 成果の普及(中間成果の情報発信)

公開



3. 研究開発成果について

公開

(5) 成果の最終目標の達成可能性(最終目標の達成見込)

研究開発項目	最終目標	今後の課題	達成見込
① 高品質大口径単結晶基板の開発	有極性面(4インチ)転位密度 $<5 \times 10^3 \text{cm}^{-2}$ 無極性面(>3インチ)転位密度 $<10^5 \text{cm}^{-2}$	高品質無極性GaN結晶育成に必要な条件の明確化	○
	伝導度制御 ・導電性基板 比抵抗 $<10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ ・高抵抗基板 比抵抗 $>10^6 \Omega \cdot \text{cm}$	ドーピング元素の高濃度添加	○
② 高品質大口径エピタキシャル成長の開発	4インチ有極性・無極性窒化物基板上へのエピタキシャル成長	エピ大口径化	○
	AlGaN混晶エピ成長層ドーピング不純物濃度 N型 $>10^{18} \text{cm}^{-3}$ P型 $>10^{17} \text{cm}^{-3}$	空洞発生抑制	○
	GaNホモエピ成長層 残留ドーナー濃度 $<5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$	残留不純物低減	○
③ 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価	・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	・無極性基板上のデバイス試作の加速 ・基板/エピ層の品質向上による耐圧向上の確認と考察	○

○:達成の見込あり △:達成が困難で要検討

3. 研究開発成果について

公開

(5) 成果の最終目標の達成可能性(課題解決の道筋)

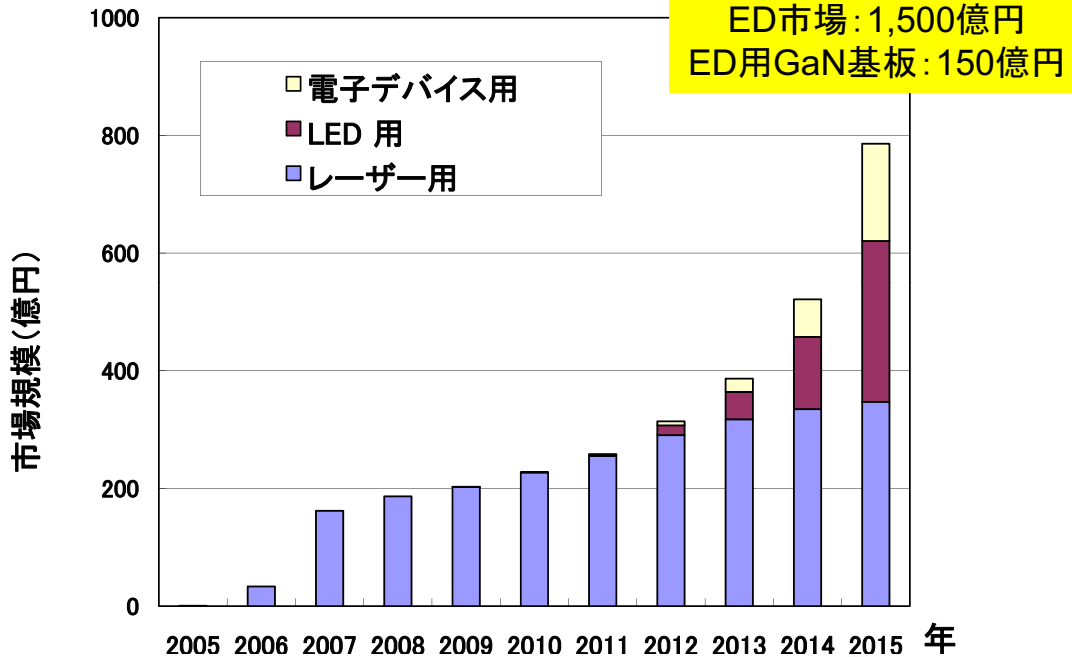
目的・意義	従来の半導体材料では実現できない領域で動作可能なハイパワー・超高効率の電力素子などの作製に必要な窒化物半導体結晶成長技術の確立を目指し、高品質大口径単結晶基板、エピの開発及び窒化物電子デバイスの作製と評価に取り組むことにより、我が国のエネルギー消費量削減に大きく貢献することを目的とする。
①H21中間目標 ②H23最終目標	①無極性2インチ、転位密度(基板 $<10^6 \text{cm}^{-2}$ 、混晶エピ $<10^8 \text{cm}^{-2}$)、導電性基板 $<10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$ ②無極性3~4インチ、転位密度(基板 $<10^5 \text{cm}^{-2}$ 、混晶エピ $<10^6 \text{cm}^{-2}$)、移動度 $>2500 \text{cm}^2/\text{Vs}$

項目	最終目標	平成19年度	平成20年度	平成21年度	平成22-23年度
研究開発項目① 「高品質大口径単結晶基板の開発」	・有極性基板: 4インチ 転位密度 $<5 \times 10^3 \text{cm}^{-2}$ ・無極性基板: 3~4インチ 転位密度 $<10^5 \text{cm}^{-2}$ ・導電性基板 $<10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ ・高抵抗基板 $>10^6 \Omega \cdot \text{cm}$	シミュレーションによる解析・大型装置開発	大型装置による溶液攪拌条件の検討	大型装置による溶液攪拌条件の最適化(2インチ)	大型装置による溶液攪拌条件の最適化(3~4インチ)
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」	・有極性エピ: 4インチ 混晶エピ $<10^6 \text{cm}^{-2}$ ホモエピ $<5 \times 10^3 \text{cm}^{-2}$ ・無極性エピ: 3~4インチ 混晶エピ $<10^6 \text{cm}^{-2}$ ホモエピ $<10^5 \text{cm}^{-2}$ ・移動度 $>2500 \text{cm}^2/\text{Vs}$	加圧・高速ガススイッチング装置設計	高温・高速ガススイッチング装置設計	2インチ Al(In) _x Ga _{1-x} N(0.2<x<0.5) ドーピング制御: n $>10^{18} \text{cm}^{-3}$ p $>10^{17} \text{cm}^{-3}$	4インチ Al(In) _x Ga _{1-x} N(x>0.5)
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」	・有極性単結晶基板上と無極性単結晶基板上FET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	プロセス環境整備 特性評価系整備	無極性基板DH構造検討 短ゲート化プロセス	短ゲートFET評価 無極性FETの基本特性評価	高周波特性評価 高Al障壁層FET

4. 実用化の見通しについて

(1) 成果の実用化可能性(実用化イメージ・出口イメージ)

GaN基板の市場予測



出典: Yole Development

Bulk GaN Market 09: Market analysis for free-standing bulk GaN substrates in various applications: Blue Laser Diodes, HB-LED and Power Electronics (1\$ = 95円で換算)



4. 実用化の見通し

(1) 成果の実用化可能性(エピグループの実用化見通し)

企業名	実用化の対象	平成24年	平成25年	平成26年	平成27年	平成28年
昭和電工株式会社	高In組成GaInNチャンネル層型ヘテロ接合エピタキシャル材料	量産基礎技術開発、設備投資・立ち上げ		製品化		

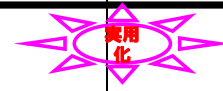
住友電気工業株式会社



4. 実用化の見通しについて

公開

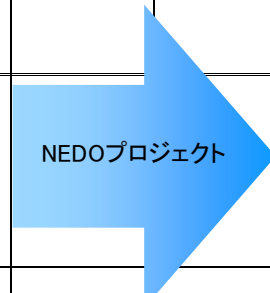
(1) 成果の実用化可能性(デバイスグループの実用化見通し)

	平成19~23年度	平成24年度	平成25年度	平成26年度以降
サンケン電気(株) 応用製品(電源、インバータ等)	本プロジェクトの推進 →	信頼性確認、サンプル出荷、試験生産、量産、スイッチング、電源・インバータ等の開発、実装/パッケージ		
				
		→		
		平成26年度までに一部実用化		

4. 実用化の見通しについて

公開

(2) 波及効果(基板グループの波及効果)

企業名	実用化の対象	平成22年(2010年)	平成23年(2011年)	平成24年(2012年)	平成25年(2013年)	平成26年(2014年)	平成27年(2015年)
豊田合成	高導電性無極性GaN基板			高品質化、サンプル展開		製品化	
日本ガイシ	高抵抗化GaN単結晶基板			高品質化、量産設備導入		製品化	
古河機械金属	種結晶基板			プロセス簡素化、量産技術検討			
				商品開発、品質改善、量産技術検討			製品化

4. 実用化の見通しについて

公開

(2) 波及効果(デバイスグループの波及効果)

	平成19～23年度	平成24年度	平成25年度	平成26年度以降
シャープ(株) パワーデバイス	→	実用化・事業化課題の明確化 (コスト、性能、信頼性など)	実用化 平成25年度以降 実用化検討	
(株)豊田中研 ハイブリッド車 用パワーデバ イス	→	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年度前後 実用化目標	

4. 実用化、事業化の見通しについて (3) 波及効果

公開

実用化のイメージ

家庭内発電配電システム

電気
燃料電池システム
蓄電池
インバータ
PEFC本機
都市ガス
燃料改質装置
排熱回収システム
貯湯槽
追い焚き
給湯
床暖房
エアコン
照明
TV

室外機の小型化と省エネ化

バッテリーアダプタの小型内蔵化

発電効率の向上と小型化

ハイブリッド車の高出力・冷却軽減・省エネ化