

# 研究開発課題の事後評価結果 (案)

令和3年11月

環境エネルギー科学技術委員会

# 省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発

## 事後評価調整グループ 構成員一覧

主査	大森 達夫	三菱電機 主席技監
主査代理	清水 敏久	東京都立大学 特任教授
	山口 正洋	東北大学大学院工学研究科 電気エネルギーシステム専攻 教授
	藤岡 洋	東京大学 生産技術研究所 教授
	岸野 克巳	上智大学 特任教授
	藤森 俊郎	IHI 技術開発本部 技監

# 省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発の概要

## 1. 課題実施期間及び評価実施時期

平成 28 年度～令和 2 年度

中間評価 平成 30 年 12 月、事後評価 令和 3 年 11 月

## 2. 研究開発概要・目的

本事業では、「窒化ガリウム (GaN) 等の次世代半導体に関して、材料創製からデバイス化・システム応用までの研究開発を一体的に行う研究開発拠点を構築し、理論・シミュレーションも活用した基礎基盤研究を実施することにより、実用化に向けた研究開発を加速すること」を目的としている。次世代半導体の実用化の加速による省エネルギー社会の早期実現に加えて、世界に先駆けた次世代半導体の市場投入による我が国の産業競争力の強化を目指している。

研究開発拠点の中核を担う「中核拠点」を設置し、各領域で行われる研究開発のとりまとめ等を行うとともに、結晶創製に係る研究開発を実施する。さらに、「評価基盤領域」において結晶及びデバイスの評価に係る研究開発を実施するとともに、「パワーデバイス・システム領域」、「レーザーデバイス・システム領域」、「高周波デバイス・システム領域」においては、各デバイスの作製にかかる研究開発を中核拠点及び評価基盤領域と連携しながら推進する。

## 3. 研究開発の必要性等

### (1) 必要性

地球温暖化対策や、エネルギーの安定確保等の観点から、これまでにない水準でエネルギーの経済効率性の確保と温室効果ガスの排出削減の両立を求められている我が国にとって、既存の省エネルギー技術のみならず、消費電力の劇的な低減を実現できる革新的な技術の研究開発及び早期の社会実装は必須であり、国が重点的に推進する必要がある。

### (2) 有効性

省エネルギー効果の高いシステムの実用化に向けて、材料創製からデバイス化・システム応用までの次世代半導体の研究開発を理論・シミュレーションも活用して一体的かつ総合的に推進することは、事業終了後の社会実装を早めることが期待でき、効果的である。

### (3) 効率性

本事業では、理論・シミュレーションも活用した材料創製からデバイス化・システム応用まで、次世代半導体の研究開発を一体的に加速するため、産学官が結集した研究開発拠点を構築し、産学官のそれぞれの強みを生かした研究開発体制を整備するとともに、技術的な強みが産業競争力の強化にもつながるよう、知的財産戦略等を合わせて一体的に検討・実施する体制を整えることとしており、効果的かつ効率的な研究開発の実施が期待できる。

## 4. 予算（執行額）の変遷

年度	H28年度 (初年度)	H29年度	H30年度	H31年度	R2年度	総額
予算額	1,000百万円	1,253百万円	1,440百万円	1,550百万円	1,468百万円	6,711百万円
執行額	999百万円	1,253百万円	1,438百万円	1,548百万円	1,467百万円	6,705百万円

## 5. 課題実施機関・体制

### (ア) プログラム・ディレクター (PD)、プログラム・オフィサー (PO)

- ① PD 谷口 研二 (大阪大学 名誉教授)
- ② PO 上田 大助 (京都工芸繊維大学 特任教授)
- ③ PO 松本 功 (大陽日酸(株) 技監)
- ④ PO 名西 愷之 (立命館大学 名誉教授)

### (イ) 中核拠点 (結晶創製・研究開発)、H28年度～

研究代表者 名古屋大学 未来材料・システム研究所 教授 天野 浩  
主管研究機関 名古屋大学  
共同研究機関 大阪大学、(株)豊田中央研究所、三重大学、山口大学

H28年度は中核拠点の下で以下のフェージビリティスタディ (FS) を実施。

研究代表者 東京工業大学 大学院理工学研究科 教授 宮本 恭幸  
主管研究機関 東京工業大学  
共同研究機関 佐賀大学

研究代表者 名城大学 理工学部 教授 竹内 哲也  
主管研究機関 名城大学  
共同研究機関 名古屋大学、三重大学、山口大学

研究代表者 東京大学 大学院工学系研究科 教授 須賀 唯知  
主管研究機関 東京大学  
共同研究機関 なし

(ウ) 評価基盤領域、H28 年度～

研究代表者 物質・材料研究機構 技術開発・共用部門長 小出 康夫  
主管研究機関 物質・材料研究機構  
共同研究機関 早稲田大学、東北大学、筑波大学、産業総合研究所、富士電機（株）、  
豊田合成（株）

(エ) パワーデバイス・システム領域、H28 年度～

研究代表者 名古屋大学 未来材料・システム研究所 特任教授 加地 徹  
主管研究機関 名古屋大学  
共同研究機関 愛知工業大学、京都大学、産業総合研究所、東北大学、  
（株）豊田中央研究所、法政大学、北海道大学

(オ) レーザーデバイス・システム領域、H29 年度～

研究代表者 名城大学 理工学部 教授 竹内 哲也  
主管研究機関 名城大学  
共同研究機関 名古屋大学、山口大学、三重大学、名古屋工業大学、産業総合研究所、  
（株）小糸製作所、ウシオオプトセミコンダクター（株）、  
スタンレー電気（株）、日機装（株）、豊田合成（株）

(カ) 高周波デバイス・システム領域、H30 年度～

研究代表者 名古屋大学 大学院工学研究科 教授 須田 淳  
主管研究機関 名古屋大学  
共同研究機関 名古屋工業大学、東京工業大学、佐賀大学、豊田工業大学、三菱電機（株）

(キ) フィージビリティスタディ（FS）実施機関、H29 年度

研究代表者 東京工業大学 大学院理工学研究科 教授 宮本 恭幸  
主管研究機関 東京工業大学  
共同研究機関 佐賀大学

研究代表者 名古屋大学 未来材料・システム研究所 教授 山本 真義  
主管研究機関 名古屋大学  
共同研究機関 なし

研究代表者 名古屋工業大学 大学院工学研究科 准教授 分島 彰男  
主管研究機関 名古屋工業大学  
共同研究機関 なし

# 事後評価票

(令和3年11月現在)

1. 課題名 省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発

2. 研究開発計画との関係

施策目標：創・蓄・省エネルギー等に係る革新的な技術の研究開発の推進

大目標（概要）：COP21で策定されたパリ協定を踏まえ、長期的視野に立って、CO<sub>2</sub>排出削減のイノベーションを実現するための中長期的なエネルギー・環境分野の研究開発を、産学官の英知を結集して強力に推進し、その成果を世界に展開していく。（「エネルギー・環境イノベーション戦略」（2016年4月総合科学技術・イノベーション会議決定））

中目標（概要）：温室効果ガスの抜本的な排出削減の実現に向けた革新的な技術の研究開発を推進する。

重点的に推進すべき研究開発の取組（概要）：

＜温室効果ガスの抜本的な排出削減に向けた明確な課題解決のための研究開発＞

温室効果ガスの抜本的な排出削減に向け、明確なターゲットを示し、その解決を図るための革新的な技術の研究開発を推進し、温室効果ガスの大幅な削減に貢献する。電力損失を大幅に削減できる次世代半導体の実現に向けて、青色発光ダイオード（LED）の研究開発に代表される窒化ガリウム（GaN）に関する我が国の強みを活かした研究開発等に取り組む。

本課題が関係するアウトプット指標：材料創製やデバイス化、システム応用等に関する研究開発テーマ数

	H28年度	H29年度	H30年度	H31年度	R2年度
活動実績(件)	11	15	18	18	18
目標値	9	14	18	18	18

本課題が関係するアウトカム指標①：特許出願累積件数

	H28年度	H29年度	H30年度	H31/R1年度	R2年度
活動実績(件)	2	11	42	58	71
目標値	1	7	20	50	70

本課題が関係するアウトカム指標②：ウエハ・デバイスの試作数

	H28 年度	H29 年度	H30 年度	H31/R1 年度	R2 年度
成果実績(件)	0	10	15	29	126
目標値		3	4	20	40

本課題が関係するアウトカム指標③：本事業による論文数

	H28 年度	H29 年度	H30 年度	H31/R1 年度	R2 年度
成果実績(報)	3	22	49	72	77
目標値	1	13	30	50	60

### 3. 評価結果

#### (1) 課題の達成状況

本事業では徹底した省エネルギー社会の実現に向けて、高電圧・大電流で使用でき、大きな省エネ効果が期待される高品質な GaN 等の次世代半導体の 2030 年の実用化に向けた基礎・基盤研究として、2020 年度までの事業期間中に結晶作製技術を創出するとともに、省エネルギー社会実現からの要請に資するデバイス作製方法の目途をたてることを目標としている。そのため、企業での事業化、研究マネジメントの経験を有するプログラム・ディレクター（PD）及びプログラム・オフィサー（PO）の下、理論・シミュレーションも活用した材料創製からデバイス化・システム応用まで一体となって研究開発するオールジャパン体制を産学官の協力で実現した。その研究実施体制としては、均一性の高い大口径 GaN 結晶基板の育成と、その基板上のエピタキシャル結晶成長（結晶基板の結晶面にそろえて単結晶を成長させる技術）に係る研究開発を実施する「中核拠点」を設置し、結晶及びデバイスの評価に係る「評価基盤領域」、各デバイスの作製にかかる研究開発を「中核拠点」及び「評価基盤領域」と連携しながら推進する「パワーデバイス・システム領域」、「レーザーデバイス・システム領域」、「高周波デバイス・システム領域」を形成した。本事業の必要性と有効性、効率性に関する評価は以下の通り。

#### <必要性>

##### 評価項目

科学的・技術的意義、社会的・経済的意義、国費を用いた研究開発としての意義

##### 評価基準

国費を投入する必要性はあるか

これまで半導体の材料としてはシリコン（Si）が主に用いられているが、パリ協定を踏まえた温室効果ガス削減と我が国の経済成長を両立させるためには、コストパフォーマンスと性能で Si 半導体を凌駕し、現状の削減努力の延長線上にない革新的な技術の創出が不可欠である。変動する再生可能エネルギーの有効利用を可能とするパワー安定化技術としても脚光を浴びる次世代半導体技術の国際的な研究開発の激化を受けて、2016 年 4 月に「エネルギー・環境イノベーション戦略」が策定され、2018 年 4 月には「環境基本計画」においても、GaN 等の新技術を用いた次世代パワーエレクトロニクス技術の開発等一層の省エネルギー技術等の研究開発を図ることが盛り込まれている。また、2020 年 10 月には菅総理が 2050 年までにカーボンニュートラルを達成することを宣言し、エネルギーの経済効率性の確保と温室効果ガスの排出削減の両立に資する次世代半導体技術の早期の社会実装に向けた研究開発を国が重点的に推進する必要性は事業開始当時と比較しても継続的に高まっている。

次世代半導体を用いたパワーエレクトロニクスやレーザー照明、高周波通信は、我が国の電力消費のうち大きな割合を占める動力と照明、更なる電力需要の増加が見込まれる情報通信機器の消費電力の低減に大きく寄与すると期待されている。今後応用の期待されているこれらの分野へ GaN 等の次世代半導体を本格的に展開するには、大電力で使用する際の耐圧などの性能面と価格競争力の面で大きな課題が存在する。従って、これまで以上に欠陥が少なく高品質、かつ大口径で低価格の GaN 結晶基板を育成する技術を確立し、高品質の GaN 結晶基板の上に欠陥の少ない GaN 等をエピタキシャルに結晶成長させる基礎・基盤研究開発が必要である。一方、材料としての GaN 等の次世代半導体の本質的な特徴を最大限に生かすための周辺技術、例えば、レーザーデバイスであれば発光効率を高めるデバイス構造自体やその製造プロセス、高周波デバイスであれば回路や周辺部材の開発も十分進んでいない状況にある。他方、実用化段階での低コスト化には製造プロセスにおける歩留まりの向上、デバイスの安定性・信頼性の担保も必要であるが、それには GaN 結晶の欠陥や種々の製造プロセスが最終的なデバイスの特性や劣化に及ぼす影響の相関を明確に紐付けしておくことが必須である。こうした革新的なデバイスの実現は、産業化による社会へのインパクトが非常に大きい一方で、企業が個々に投資をするにはリスクが高いチャレンジングなものであり、国が必要な要素技術の確立のための研究開発を推進することが必要である。新規デバイスの安定性・信頼性の評価は時間を要するため、その劣化メカニズムの解明と対応策の検討も含めて産学官が実際に連携・共働して基礎・基盤研究開発の段階から実施する必要がある。

我が国の半導体産業は 1980 年台には世界における過半数のシェアを有したものの、その後のバブル崩壊をきっかけとする長期にわたる不況、それに伴う新規投資抑制から抜け出すことが出来なかったことなど、苦しい局面に陥った。その間に中国・韓国・台湾などの激しい追い上げを受けた結果、現在では車載半導体など一部競争力を維持している分野は存在するものの、半導体デバイスの国際的なシェアは 10%程度にまで低下している。

青色 LED から実用化が始まった窒化ガリウム (GaN) は、上記の通り、その優れた半導体特性から、光デバイス用途のみならず、優れた省エネ性能を有するパワーデバイスや、高周波デバイスにも応用が可能であり、我が国の産業競争力強化という観点からも期待が非常に大きい。

本事業ではカーボンニュートラルの実現及び我が国の競争力強化という観点から重要である高性能パワーデバイスを中心とする次世代デバイスの実現に向け核となる要素技術の基礎・基盤研究を行ったものであり、企業における研究領域とは馴染まない面があることから、国の予算措置による研究の加速が極めて重要であった。

以上の理由から、本事業の必要性は非常に高いと結論付けられる。

#### <有効性>

##### 評価項目

実用化・事業化や社会実装に至る全段階を通じた取組

##### 評価基準

実用化に向けた必要な取組が実施されているか

#### 「中核拠点」

- ・本事業全体の効率性と各領域間の連携を高めるための研究マネジメントに加え、研究代表者や有識者からなる「出口戦略委員会」も設置し、研究領域毎の研究成果の出口・応用に特化した議論についても深め、研究成果の実用化に向けての活動に繋がるように努めた。
- ・これらの結果、インクルージョンフリーの GaN 種結晶の製造の成功、ランニングコストの目標以上の大幅削減の実現を受け、大阪大学でスタートアップが始まった。
- ・光デバイスへの応用も意図した新規ウエハ (GaInN: 山口大) 及び (AlGaIn テンプレート: 三重大) の作製を事業期間前半に進めた。
- ・事業最終年度では、山口大と三重大が本レーザーデバイス・システム領域に参画することで、強い赤色 (660nm) 発光を実現し、AlGaIn テンプレートを使用することにより深紫外領域 (264nm) において高い効率 (外部量子効率: 1.7%) の LED を実証した。高強度な深紫外発光 LED は、水銀規制に加えて殺菌・伝染病抑制に有効であり、近年特に実用化が強く求められており、インパクトのある成果であると認められる。

#### 「パワーデバイス・システム領域」

- ・開発項目を要素技術に分け、それぞれの課題に対し実績のある企業・大学が参画する体制を構築した。それぞれが保有する専門的な知見を共有し、効果的に研究を進めることで開発のスピードアップを図ったと認められる。
- ・さらに、結晶の各部において原子レベルの評価・解析において評価基盤領域と連携を取ることによって有効に研究が進められた。具体的には、絶縁ゲート膜新材料としてアモルファス AlSiO<sub>2</sub> 膜を開発し、高い破壊電界強度を達成し、併せて 20 年以上の長寿命を実証したことは、大電力 GaN トランジスタの実用化に向けた顕著な成果である。また、パワーデバイス信頼性において、GaN 膜中の C, Fe 点欠陥が関与していることを明らかとし、その上でそれら欠陥の低減を実証した。
- ・この他、特筆すべき成果として、イオン注入によって GaN 結晶中に Mg をドーピングした後に、高温・高圧力下でアニール処理することで局所 p 型構造の形成が可能であることを見出し、併せてこの技術を用いたデバイスの耐圧終端構造により高耐圧絶縁性能を実証した。

#### 「レーザーデバイス・システム領域」

・本領域は、2016 年度にフィージビリティスタディとして本事業に参画し、新規構造の形成が可能かつ期待される機能発現の見通しが明確になってから領域へと段階を経て、研究体制を構築した。

・評価基盤領域と中核拠点との効果的な連携も進めた。具体的には、高効率発光デバイスを目指して、評価基盤領域と連携し、構造的・光学的特性の評価を進めた。特に東北大における時間分解 PL (フォトルミネッセンス) と空間分解 CL (カソードルミネッセンス) により、光学的特性 (発光寿命) が 2 倍改善可能であることを明らかにした。

#### 「高周波デバイス・システム領域」

・本領域の目的とする理想的な GaN 系通信用トランジスタ (HEMT : High Electron Mobility Transistor) の評価を行うにあたり、中核拠点および評価基盤領域の研究成果を活用することで研究開発の有効性を高めた。一例として、GaN 系 HEMT 作製時に GaN 基板とチャネル層界面に炭素ドーピング GaN 層を挟むことでリーク電流の低減が可能であることを見出した。

・また、物性パラメータを反映したシミュレーション技術を開発し、熱設計を含むデバイス設計指針を導出した。GaN 系 HEMT の事業化という目的に向け、シミュレーションから得られた結果を共有し比較検討を行うことで、デバイス設計時の大きな障壁である熱損失を考慮したデバイス構造設計が可能となったことは事業化に大きく貢献する成果である。

・さらに、平成 31 年度からは無線通信分野における成果展開を視野に、回路設計に関する「高周波回路設計技術」をプロジェクトに追加し社会実装に向けた有効性を高めた。

#### 「評価基盤領域」

・評価基盤領域においても効率性を最大化する取り組みとして、PD・PO からの助言を基に、外部の専門家を招聘し的確で明瞭な実験指針と評価結果の解釈を与えられた他、デバイス工学的な取り組みに対しても企業の実用的視点から啓発的な助言を受けることで有効性を高めた。

・その結果、絶縁膜界面中間層という極めて薄い層がデバイス界面に存在していることが判明し、これは世界に先駆けて発見された事例である。これにより半導体/絶縁体界面を制御することにより、パワーデバイス動作時の抵抗を低減し、より大きな電流を流すための手がかりを獲得するという成果に至った。このような有効的な事業の運用によって、参画企業に対して早期にパワーデバイスの新たな設計指針を与えるという具体的な成果を得るに至った。

上述の通り、各拠点から将来的な社会実装に繋がる成果が数多く生み出された。省エネルギー社会実現への貢献が大きい GaN デバイス分野において、全ての GaN デバイスの実用化、普及拡大に大きく寄与する GaN ウエハの高品質化、低コスト化の目途が得られたことを筆頭に、高出力の縦型 GaN パワーデバイス実現に繋がる大きな課題解決の技術実証、新規レーザー構造の提唱と実証、熱損失シミュレーション法の開発を通じた最適高周波デバイス回路設計技術の開発、パワーデバイス劣化原因の特定といったインパクトのある多くの技術が創出され、社会実装に向けて本事業は高い有効性を示したと結論付けられる。

## <効率性>

### 評価項目

計画・実施体制の妥当性、目標・達成管理の向上方策の妥当性

### 評価基準

目標達成に向けて適切な事業の実施・運営が行われているか

#### 「中核拠点」

- ・本事業全体の効率性と各領域間の連携を高めるために、5年間を通じて「研究ヒアリング」を半期ごとに開催し（計10回開催）、PD・P0、ならびに事業参加者らと研究進捗を共有すると共に、研究を進める上での課題や次のアクションについての確認等を都度行っている。また、研究代表者、PD・P0、有識者がメンバーとなった「事業推進委員会」についても同じく半期ごとに開催し（計10回開催）、研究成果を早期に産業化に繋げるための課題を確認することに加え、別途、研究代表者や有識者からなる「出口戦略委員会」も設置し（計5回開催）、研究領域毎の研究成果の出口・応用に特化した議論についても深め、研究成果の実用化に向けてより実質的で効率的な運用に繋がるように努めている。その結果、各領域間の連携が進むことで多くの研究成果を生み出した。
- ・また、全ての GaN 系デバイスの特性を左右する GaN 単結晶基板育成技術開発も積極的に進めた結果、貫通転位密度  $10^4 \text{ cm}^{-2}$  という高品質な GaN 単結晶基板育成を液相成長によって達成した。

#### 「パワーデバイス・システム領域」

- ・実施期間である5年間を通じて、「研究ヒアリング」を半期ごとに開催し（計10回開催）、PD・P0、ならびに事業参加者らと研究進捗を共有すると共に、研究を進める上での課題や次のアクションについての確認等を都度行った。また、研究代表者、PD・P0、有識者がメンバーとなった「事業推進委員会」についても同じく半期ごとに開催し（計10回開催）、研究成果を早期に産業化に繋げるとの観点からの課題を確認するのに加え、別途、研究代表者や有識者からなる「出口戦略委員会」も設置し（計5回開催）、研究領域毎の研究成果の出口・応用に特化した議論についても深め、研究成果の実用化に向けてより実質的で有効性の高い運用に繋がるように努めたと認められる。
- ・その結果、イオン注入と超高压活性化アニール法によるデバイス GaN 層中の局所 p 型構造作成技術と、この技術を用いたデバイスの耐圧終端構造の有効性実証、新材料絶縁形成技術とデバイスの高破壊電界強度、長寿命の実証、低ダメージエッチング技術、の確立に繋がり、効率的に研究開発が進められた。

#### 「レーザーデバイス・システム領域」

- ・複数の民間企業が参画し、目標達成に向けた開発のみならず、事業期間内の技術移転も進めることで、事業後の技術開発へのシームレスな継続を目指して事業が進められた。具体的には、新規発光デバイス開発には複数の企業が参画し、各社で開発している既存レーザー構造などへの応用が進められた。
- ・その結果、GaN 青色レーザーに関して新規構造による世界初動作や世界最高性能実証に繋がった。

#### 「高周波デバイス・システム領域」

・高周波デバイス開発においても、研究開発の質の向上や成果の社会実装に向けた取り組みを実施した。①事業実施期間である3年間を通じて半期ごとに開催される「研究ヒアリング」(計6回)において、PD・POならびに事業参加者らと研究進捗を共有する。②研究を進める上での課題や次のアクションについての確認等を行う。③半期ごとに開催される中核拠点および各領域の研究代表者、PD・PO、有識者をメンバーとする「事業推進委員会」において、研究成果を早期に産業化に繋げるとの観点から、高周波デバイス・システム領域の課題を確認した。④研究代表者や有識者からなる「出口戦略委員会」(計3回開催)において、本研究領域の研究成果の出口・応用に特化した議論を深め、研究成果の実用化に向けて、より実質的かつ効率的な運用に繋がるように努めた。

・その結果、GaN 基板上にさまざまな条件で試作した通信用トランジスタを系統的に比較検討したことにより、トランジスタ内のリーク電流低減や高電圧駆動時のロスの低減に成功し、将来的な高速通信の事業化に有益な示唆を与えた。

#### 「評価基盤領域」

・評価基盤領域においては、国研や大学が持つ特徴ある最先端計測・評価装置及びその分野の専門家研究者を本事業に結集させ、デバイス評価とウエハ評価を両輪とすることで研究の効率性を高めた。その目的に沿って、原子レベル評価とマッピング可視化評価を進め、中核拠点、パワーデバイス・システム領域、およびレーザーデバイス・システム領域と相互的に研究を推進した。

・その結果、トランジスタの特性を左右する電子状態やドーピング原子の挙動と制御について確固たる成果の創出につながった。

上述の通り、本事業では、中核拠点を核とし各領域の連携を図りながら、各領域ともに優れた研究成果を挙げており、本事業は高い効率性を伴って進められたと結論付けられる。本事業の取組・成果は、企業・大学へチップの提供を可能とする一体型の拠点形成へと繋がりが、大学発のユニークで新しいアイデアのデバイスを形にすることを可能とするものと認められる。

#### (2) 科学技術基本計画又は科学技術・イノベーション基本計画等への貢献状況

「第5期科学技術基本計画」には、「産業、民生(家庭、業務)及び運輸(車両、船舶、航空機)の各部門において、より一層の省エネルギー技術等の研究開発及び普及を図る。」と示されており、本事業では、窒化ガリウム(GaN)基板の製造技術やデバイス作製時の結晶成長過程の解明を通じてパワーデバイス・短波長レーザー・高周波デバイスの発展により、省エネルギー社会の実現に向けた次世代半導体の研究開発の加速に寄与している。

### (3) 総合評価

#### ①総合評価

「中核拠点」では、GaN 結晶基板の大口径化を可能とする溶液成長法の開発を進めた結果、低欠陥化を実現している。さらに、低転位化した GaN 結晶基板上へ HVPE 法によって GaN を高速成長させる技術開発にも取り組んでおり、世界唯一の手法を用いて、研究だけにとどまらない実用化へ向けた積極的な研究開発も行っている。その他、「評価基盤領域」と「パワーデバイス・システム領域」との連携により、MOVPE 法による気相反応過程の高精度検証に成功している。特筆すべきは、企業・大学が広く利用できる国内の中核的 GaN 研究開発拠点である C-TEFs を整備し、拠点においてチップ供給可能な体制整備を進めた点である。研究開発において GaN デバイスの省エネ化に資する開発を行うという当初の目的を達成した他、中核拠点が今後果たす波及効果は非常に大きなものになることが期待される。さらに、成果の発信方法についても、技術流出を防ぎつつ最大限の PR を行うことが出来るように努められている。

「パワーデバイス・システム領域」においては、顕著な成果として、Mg イオン注入 GaN の高温・高圧アニールによる局所 p 型形成技術を開発している。これは、GaN 系デバイスを用いた高効率電力システムの実装や高効率電気自動車実現に向けた縦型 GaN パワーデバイスの鍵となる技術である。本開発にあたり 1 万気圧超の大型窒素アニール炉（世界に 1 台のみ）の使用が不可欠となるが、・キャップアニール、及び・複数枚同時アニールという低コスト化・簡便化についても多方面から検討を行っている。局所 p 型構造の実現は長年実現が求められてきた技術であり、その波及効果は極めて大きい。さらに、目的としていた・ゲート絶縁膜の高性能化や・エッチング技術向上についても、新材料アモルファス AlSiO 膜の開発による高絶縁耐性の実現、エッチング中の電力可変技術開発による低ダメージ化を達成している。本領域の当初の目的に対する達成度は十分であるが、得られた技術を統合化して縦型パワーデバイスとしての性能達成は不十分であり、実用化に向けての更なる研究開発が必要である。

「レーザーデバイス・システム領域」では、トンネル接合レーザーの実現及び量子殻トンネル接合レーザーの実現、という当初の目的に対して、低抵抗・低コストを両立する GaN トンネル接合形成技術を確立し、さらに量子殻構造の実現によって活性層体積を増大させることに成功し、世界初・世界最高水準の成果が得られている。波及効果として、高効率・長寿命 LED の実現が期待される段階にあり、今後の発展が十分に見込まれる。

「高周波デバイス・システム領域」においては、・ GaN 高周波デバイスの結晶に関する学理構築、・ デバイス特性評価解析、・ デバイスシミュレーションを当初目的として設定し研究開発が進められた結果、顕著な成果として、温度分布をシミュレーションに取り入れることで実デバイスと良好な整合性を示すシミュレーション手法を確立し、最適デバイス構造を検討した結果、高効率 GaN-HEMT 作製に成功している。当初の目的を達成したことのみならず、今後 5G 通信を超える Beyond5G 研究競争が激しくなっていく状況に対して、これらの成果は、大きな波及効果を持つことが予想される。

「評価基盤領域」においては、・ デバイス構造評価、・ 界面評価、・ 基板評価、・ マッピングによる可視化技術の確立、という指針の下で詳細な解析が行われた結果、GaN トランジスタのゲート絶縁膜/n 型 GaN 界面に自然酸化膜中間層が含まれていることを発見するとともに、発見した中間層がデバイス特性を低下させていることを見出した。本発見は、今後の

デバイス開発における重要な指針を示した。さらに SPring8 の高強度放射光を用いて、6 インチ GaN ウエハの持つ歪を数十分で解析・可視化する技術を確認した他、本技術をラボスケールに落とし込むために、企業((株)リガク)と共同研究を進めた。さらにラマン分光法によって6 インチ GaN ウエハの面内キャリア濃度分布・ひずみ同時測定技術を開発した。面内歪・キャリア濃度分布測定は実用化の際、デバイスの信頼性を左右する重要なファクターであり、本分野を大きく前進させたと認められる。当初目的の達成に加えて、企業との連携も十分に行われており、今後、研究・社会実装両面において大きな波及効果が期待される。

## ②評価概要

上述の通り、各領域ともに社会実装に今後展開しうる優れた研究成果を挙げている他研究開発テーマ数、特許出願数、デバイス試作数、論文数、のいずれも目標値を下回った年度が無く、本事業は GaN 系デバイスの技術力向上に大きく貢献したことは客観的評価として確固たるものである。また、領域間連携を行いつつ、新たな研究拠点の形成にも十分な配慮の下に事業が進められたと認められる。加えて、博士課程学生の本事業への参画等、若手の人材育成も進められたと認められる。以上により事業全体としては成功であったと評価することができるが、今後、SiC を超える技術として確立するためには本事業で得られた技術を統合化して縦型パワーデバイスとしての実現性を高めるための研究開発を更に進める必要がある。

## (4) 今後の展望

今後、カーボンニュートラル・省エネルギー社会を実現していくためには GaN 系半導体の性能向上機能の広範囲化が重要である。GaN 系パワーデバイスは太陽光・風力発電の高効率パワーコンディショナーや高性能 EV、あるいは鉄道等のインフラの省エネルギー化への寄与、さらには大量に電気を消費している照明デバイスの消費電力削減が期待され、今後社会的要請が急速に高まることは確実である。本事業によって生み出された成果である・短波長半導体レーザーの効率向上、・縦型 GaN パワーデバイスの実用化に繋がる基礎データの集積、・高速通信に向けた高周波デバイス開発研究が果たした役割は大きく、これらの成果は、評価技術の向上と共に進められた相乗効果であり、省エネルギー社会の実現、ひいては、数年後の日本の産業育成に繋がる十分な学術的価値を示した事業であったと認められる。基礎研究を中心とした成果を多数創出したことは、日本の半導体産業を下支えすることが期待される。本事業は、今後の国家的事業の手本と評することが出来る。