「高出力・高効率なパワーデバイス/高周波デバイス向け材料技術開発」に 関する研究開発構想(個別研究型)

令和5年10月

内閣府 経済産業省

目次

1. 事業の背景、目的、内容
(1)事業の目的
①政策的な重要性:
②我が国の状況
③世界の取組状況
④本事業のねらい
(2)事業の目標10
①アウトプット目標10
②アウトカム目標10
(3)事業の内容10
研究開発項目①「 β - Ga_2O_3 ウエハ及びパワーデバイス、パワーモジュールの
開発」10
研究開発項目②「GaN-on-GaN ウエハ及び高周波デバイスの開発」 1:
2. 実施方法、実施期間、評価
2. 大肥力压、大肥剂的、叶闸
(1) 事業の実施・体制
(1) 事業の実施・体制1
(1)事業の実施・体制
(1)事業の実施・体制 15 (2)事業の実施期間 16 (3)評価に関する事項 17
(1)事業の実施・体制 15 (2)事業の実施期間 16 (3)評価に関する事項 17 (4)社会実装に向けた取組 17
(1)事業の実施・体制 15 (2)事業の実施期間 16 (3)評価に関する事項 17 (4)社会実装に向けた取組 17 (5)総予算 18
(1)事業の実施・体制 15 (2)事業の実施期間 16 (3)評価に関する事項 17 (4)社会実装に向けた取組 17 (5)総予算 18 (6)経済産業省の担当課室 18
(1)事業の実施・体制 15 (2)事業の実施期間 16 (3)評価に関する事項 17 (4)社会実装に向けた取組 17 (5)総予算 18 (6)経済産業省の担当課室 18 3.その他重要事項 18
(1)事業の実施・体制 15 (2)事業の実施期間 16 (3)評価に関する事項 17 (4)社会実装に向けた取組 17 (5)総予算 18 (6)経済産業省の担当課室 18 3.その他重要事項 18 (1)研究開発成果の取扱い 18
(1)事業の実施・体制 15 (2)事業の実施期間 16 (3)評価に関する事項 17 (4)社会実装に向けた取組 17 (5)総予算 18 (6)経済産業省の担当課室 18 3.その他重要事項 18 (1)研究開発成果の取扱い 18 ①共通基盤技術の形成に資する成果の普及 18
(1)事業の実施・体制 15 (2)事業の実施期間 16 (3)評価に関する事項 17 (4)社会実装に向けた取組 17 (5)総予算 18 (6)経済産業省の担当課室 18 3.その他重要事項 18 (1)研究開発成果の取扱い 18 ①共通基盤技術の形成に資する成果の普及 18 ②標準化施策等との連携 18
(1)事業の実施・体制 15 (2)事業の実施期間 16 (3)評価に関する事項 17 (4)社会実装に向けた取組 17 (5)総予算 18 (6)経済産業省の担当課室 18 3.その他重要事項 18 (1)研究開発成果の取扱い 18 ①共通基盤技術の形成に資する成果の普及 18 ②標準化施策等との連携 18 ③知的財産権の帰属、管理等の取扱い 19

1. 事業の背景、目的、内容

(1) 事業の目的

①政策的な重要性

EV・再エネの普及や次世代情報通信網の実現が求められる中、高出力で動作し、かつ高効率(低損失・省エネ)な、電流制御が可能なパワーデバイス/高周波デバイスの実現が喫緊の課題となっている。さらに、既存の半導体材料では実現できない、若しくは実現できても損失の大きい超高電圧/高周波数領域や、過酷環境(高温・高放射線)での電力制御を行うデバイスのニーズも民生及び公的分野で増している。

今日のパワーデバイスでは、半導体としてシリコン(Si)が主として用いられているが、Si の物性の限界から、高耐圧、高出力化や低損失化といったデバイス性能の向上にも限界があることが指摘されている。高周波デバイスで用いられるガリウムヒ素(GaAs)についても同様の課題が存在する。

Si に替わるパワー半導体として期待されているのが、ワイドバンドギャップ半導体である。絶縁破壊強度が高いことからデバイスの高耐圧化が可能であり、また Si よりも損失を数百分の1~数千分の1の水準まで低減可能であることから、従来よりも高出力かつ省エネなデバイスを実現できる可能性がある。高周波デバイス向け材料については、高い電子移動速度などの高周波数・高速動作に適した物性も求められる。

現在、炭化ケイ素(SiC)や窒化ガリウム(GaN)などのワイドバンドギャップ半導体を用いたデバイスの開発が進められており、一部は社会実装段階にある。SiC については、産業機器や電鉄向け用途の $1700\sim3300V$ 耐圧デバイス、EV や充電設備向けの $650\sim900V$ 耐圧デバイスが実用化している。また、GaN については、Si 基板上に GaN 薄膜をヘテロエピタキシャル成長させ、これをデバイス層とした GaN-on-Si デバイスが、600V 耐圧の AC アダプタ(電源タップ)、サーバ電源などに実装されている。また、GaN-on-SiC は高周波デバイスとして無線基地局への採用が進んでいる。

図1にパワー/高周波デバイス・モジュールの製造プロセス、表1に主なワイドギャップ半導体ウエハ及びデバイス用途を示す。

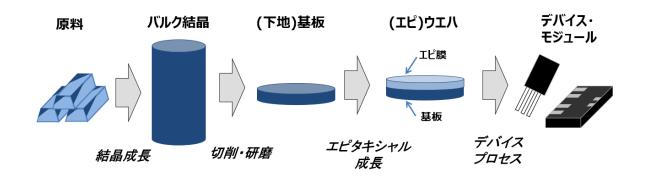


図1 パワー/高周波デバイス・モジュールの製造プロセス

ウエハ	SiC	GaN-on-Si	GaN-on-SiC	GaN-on-GaN	α-Ga ₂ O ₃	β-Ga ₂ O ₃
エピ膜	SiC	GaN	GaN	GaN	α -Ga ₂ O ₃	β-Ga ₂ O ₃
基板 (異種/同種)	SiC (同種)	Si (異種)	SiC (異種)	GaN (同種)	サファイア (異種)	β-Ga ₂ O ₃ (同種)
デバイス 用途	パワー (車・電車など)	パワー (電源タップな ど) 高周波	高周波 (無線基地局、 レーダーなど)	LD ※将来はパ ワー・高周波用 途に期待	開発段階 ※将来はパ ワー・高周波 用途に期待	開発段階 ※将来はパ ワー・高周波用 途に期待

表 1 主なワイドバンドギャップ半導体ウエハ及びデバイス用途1

しかしながら、GaN-on-Si デバイスや GaN-on-SiC デバイスは、結晶品質の問題(結晶中の欠陥密度の多さ)や、主として利用時の熱膨張の問題により基板に発生するそりの問題で、材料として本来有する耐圧性などのポテンシャルを引き出すことができていない。その一因として、Si や SiC など結晶格子のサイズが異なる異種基板上に GaN 膜を形成していることが挙げられる。また、異種基板では半導体層を厚くすることができないなどデバイス設計に制限が生じることにもつながっている。

他方、同種基板であれば上記の問題を解消できる期待がある。例えば、GaN エピタキシャル層を同種の GaN 下地基板上に形成する GaN-on-GaN ウエハは、結晶品質が格段に向上し、その結果デバイスの性能が大きく向上することが期待できる。また、耐圧性の高い縦型構造のデバイスを製造することも可能となる。GaN は Si や SiC に比べ電子移動度が非常に高いことから、GaN-on-GaN ウエハを用いることで、特に高周波数領域において、高出力なデバイスを実現できる可能性がある。

-

¹ 富士経済「2022 化合物半導体関連市場の現状と将来展望」などを参考に経済産業省作成

SiC や GaN などを超えるバンドギャップを有する半導体はウルトラワイドバンドギャップ半導体と呼ばれており、酸化ガリウム(Ga_2O_3)などが知られている。 Ga_2O_3 はパワーデバイスとしての理論的な性能値である Baliga 指数が Si よりも圧倒的に高く、SiC と GaN をも超えることから(Si を 1 としたときに、SiC は 340、GaN は 870、 Ga_2O_3 は 1570~1900)、他の材料では実現し得ない性能を発揮することが期待されている。具体的には、 Ga_2O_3 をパワーデバイスにした際に、SiC や GaN よりも高い電圧下での使用、及び低いオン抵抗(省エネ、高効率)を実現可能であるとされている。

現在、国内において開発されている Ga_2O_3 結晶は安定相の β タイプ(β - Ga_2O_3)と準安定相 α タイプ(α - Ga_2O_3)に分かれる。 α - Ga_2O_3 は、主にサファイア基板上のヘテロエピタキシャル成長で得られる結晶構造であり、ミスト CVD 法による低コストなエピウエハ製造が可能であることが特長である。現在、産業機械などを想定した中電圧帯(1200V 程度)に使用される素子の開発が進められている。

 β -Ga₂O₃は Si と同様の融液成長によりバルク単結晶を高速で育成することができることが特長であり、下地基板として β -Ga₂O₃ 単結晶基板をもちい、これに同種の β -Ga₂O₃をホモエピタキシャル成長させたエピウエハは、上下で結晶構造のずれがないため欠陥が発生しにくく、高品質化を追求できる。そのため、Ga₂O₃ のウルトラギャップ半導体としてのポテンシャルを発揮した用途、例えば再エネ設備など高電圧領域(例えば 3300V 以上)で用いられる高耐圧縦型パワーデバイスなどへの適用が期待されている。

GaN も β -Ga₂O₃ も、材料のポテンシャルを発揮したデバイスの実現には、 欠陥の少ない高品質なウエハがカギとなる。そしてそのためには、高品質の 同種基板を得る技術、ひいては高品質の GaN/β - Ga_2O_3 バルク単結晶の製造 技術を確立することが必要である。さらに、エピタキシャル成長技術、基板 /ウエハ加工技術、低コスト生産のための大口径化、製造効率向上、材料に 合わせたデバイス・モジュールの設計なども社会実装上の課題となっている。

我が国は GaN や Ga_2O_3 をはじめとするガリウム系半導体基板の研究開発及び供給において、他国に対し強みを有しているものの、材料のポテンシャルを完全に発揮した高出力・高効率なデバイスを実現可能なウエハの製作技術の確立には至っていない。ブレイクスルーとなる要素技術の開発が、特に材料分野において求められている。

本課題に関連する政府戦略としては、2021年6月に政府が発表した「2050

年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」 2 において、超高効率の次世代パワー半導体(GaN、SiC、 Ga_2O_3 など)の実用化に向けて研究開発を支援するとともに、導入促進のために半導体サプライチェーンの必要な部分に設備投資支援などを実施することで、2030 年までに省エネ率 50%以上の次世代パワー半導体の実用化・普及拡大を進めることとしている。

2023 年 5 月に経済産業省が改訂した「半導体・デジタル産業戦略」 3 では、次世代パワー半導体(SiC、GaN、Ga $_2$ O $_3$ 等)の高性能化を通じた次世代パワー半導体の競争力を強化すること、同時に次世代パワー半導体ではシェアを獲得できていないウエハ技術について、大口径化を進めるとともに、ユーザーニーズに即した超高品質化によるシェア獲得を目指すこと、2030 年以降に再生エネルギー関連設備等で、需要が拡大する GaN・Ga $_2$ O $_3$ パワー半導体等の実用化を進めていくこととしている。

2020年6月に総務省が発表した「Beyond 5G 推進戦略」 4 では、研究開発に重点的に取り組むべき分野としては、Beyond 5G が具備すべき機能のひとつとして、「現在の1/100の超低消費電力」を挙げ、それを実現する技術として Ga_2O_3 が挙げている。また、総務省における ICT 技術政策を再整理した上で、政府戦略への対応を検討するため行われた諮問への情報通信審議会中間答申「Beyond 5G に向けた情報通信技術戦略の在り方-強靱で活力のある 2030年代の社会を目指して-」 5 (2022年6月)では、Beyond 5G に向けて産学官全体で取り組むべき研究開発課題として、基地局から端末への超高速大容量な高周波無線通信を効率的かつ確実に接続するための無線ネットワーク技術が挙げられており、この分野において中高周波帯デバイス(GaN など)で我が国が強みを有している旨、我が国の強みを十分に活用して開発や実用化・社会実装でリードしていける戦略が必要である旨が記載されている。経済安全保障技術育成プログラムの研究開発ビジョン(第二次) 6 (2023

年 8 月)においても、領域横断・サイバー空間で支援対象とする技術として、

●次世代半導体材料・製造技術(高出力・高効率なパワーデバイス/高周波デバイス向け材料技術)

 $^{^2} https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_honbun.pdf$

³ https://www.meti.go.jp/press/2023/06/20230606003/20230606003-1.pdf

⁴ https://www.soumu.go.jp/main_content/000696613.pdf

⁵ https://www.soumu.go.jp/main_content/000823074.pdf

⁶ https://www8.cao.go.jp/cstp/anzen_anshin/siryo1.pdf

が挙げられており、次世代半導体技術のさらなる発展に向け、次世代半導体 微細加工プロセスやパワーデバイス/高周波デバイス材料といった、その製造 基板においてキーテクノロジーとなり得る革新的技術の確保・強化を通じた 優位性・不可欠性の獲得を狙うことが付言されている。

本研究開発構想では、研究開発ビジョン(第二次)を踏まえ、高出力・高効率のパワー/高周波デバイスの実現化のため、高品質・大口径なガリウム系半導体、特に同種バルク結晶基板を下地とした GaN 及び β - Ga_2O_3 ウエハ製造のための要素技術を確立する。また、これらウエハを用いたパワー/高周波デバイスの開発を行う。

②我が国の状況

NEDO の「低炭素社会を実現する次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト」(2009~2019年度)、内閣府の戦略的イノベーション創造プロジェクト(SIP)「次世代パワーエレクトロニクス」(2014~2018年度)では、アモノサーマル法や改良 HVPE 法による GaN 結晶の製造技術、 β -Ga $_2$ O $_3$ の大型結晶育成技術ほか、様々なパワー半導体技術における多くの成果が挙げられた。

環境省事業「GaN 技術による脱炭素社会・ライフスタイル先導イノベーション事業」($2014\sim2021$ 年度)では、ナトリウムフラックス法による GaN 基板種結晶の作成、及びこれを下地とした縦型トランジスタの作製や、省エネ電気自動車やマイクロ波加熱装置等の実機を用いた GaN デバイスの実証などの成果が挙げられた。さらに、環境省事業「革新的な省 CO_2 実現のための部材や素材の社会実装・普及展開加速化事業」($2020\sim2030$ 年度)においては、超低抵抗 GaN ウエハを用いた高効率インバータの開発・検証や、青色レーザ加工機、高効率基地・サーバ、気象・船舶用レーダー等の GaN ウエハを活用した製品の早期実用化に向けた実証が行われている。

総務省事業「次世代省エネ型デバイス関連技術の開発・実証事業」 (2021~2023 年度) では、「超低消費電力」及び「極限状況下での情報通信」 を実現し得る次世代半導体として期待される β - Ga_2O_3 を用いた、次世代省エネ型デバイス(高周波デバイス・パワーデバイス)及び関連技術(基板作製技術、薄膜形成技術等)についての研究開発及び実証が行われている。

ほか、NEDO 事業「戦略的省エネルギー技術革新プログラム」等を活用し、 β - Ga_2O_3/GaN のバルク結晶基板の育成製造やそれを用いたエピウエハ、デバイスの開発が行われてきた。

③世界の取組状況

米国では産業用から公的応用まで、幅広く GaN デバイスの研究開発がなされている。また、 Ga_2O_3 を含むウルトラワイドバンドギャップ半導体分野への研究ファンドが拡大している。米国の公的研究機関が、 Ga_2O_3 の結晶成長・物性研究に関し総額 900 万ドルを拠出。2023 年には DOD が、UWBG 用パワーデバイス及びマイクロ波デバイスの研究開発プロジェクトを開始している。欧州では、ドイツ ベルリン地区の大学・国研が一体となった Ga_2O_3 材料・デバイス研究開発プロジェクト (GraFOx2) が進められている。

中国は、2015 年以降、GaN 関連の特許出願件数が世界トップとなっており、GaN-on-GaN 基板の生産技術も獲得している。 Ga_2O_3 については、中国の論文数や国際会議に出席する中国研究者が急増しており、本分野における中国の存在感は増している。

パワー/高周波デバイスに用いる GaN-on-GaN ウエハの開発においては、現在、LD 向けに HVPE 法などで製造された GaN 基板が供給されているが、デバイスへの適用のためには、欠陥の少ない高品質な GaN バルク結晶育成に技術課題があり、ボトルネックとなっている。パワー/高周波デバイスへの展開に向けた高品質化・大口径化を目的として、アモノサーマル法、ナトリウムフラックス法などのバルク結晶成長法の開発が、国内メーカー・研究機関により進められている。

なお、GaN 基板の世界シェアは我が国のメーカーが 95%以上を占めており、 技術的優位性・不可欠性を有する。

 Ga_2O_3 についても、我が国が基板・ウエハ及びデバイスの研究開発で世界に先行しており、技術的優位性を持つ。 Ga_2O_3 のバルク結晶基板である β - Ga_2O_3 基板を量産する技術を有するのは世界で我が国のみであるから、不可欠性も有している。

4本事業のねらい

パワーデバイス分野については、EV や充電スタンド、鉄道、再エネ、系統電力設備など、電力需要の大きい中~高電圧領域から、既存の Si/SiC 半導体では効率的制御が難しい超高電圧・大電流化でのスイッチングが必要な機器など、広い用途で高効率に用いることができ、また宇宙空間や原子力発電所などの過酷条件下にも耐えられる半導体材料を実現することで、民生における EV・再エネの普及と、宇宙分野・公的分野における電力制御に関する課題の両面を克服することができ、我が国の優位性を確保できる。

また、電波の送受信のため電流と高周波信号を変換する高周波デバイスは、 移動体通信、衛星通信、各種レーダー、産業用マイクロ波加熱装置など様々 な技術に応用されている。高出力・高効率な高周波デバイスを実現すること は、省エネかつ信頼性の高いデジタル社会の実現に重要といえる。

我が国が技術的強みを有するガリウム化合物半導体(GaN、Ga₂O₃)は、そのようなパワー・高周波デバイスに適した物性を有しているが、これらの材料を用いたウエハやデバイスには、性能やコストの面で多くの課題が残されており、材料本来のポテンシャルを発揮できているとは言えない。

社会実装可能な低コストで材料本来のポテンシャルを発揮できるウエハ、すなわち大型で低欠陥のウエハを製造するためのバルク結晶成長技術及びエピタキシャル成長技術、加工技術、民生・公的利用を念頭に置いたデバイス設計技術等を確立することにより、デジタル社会を構成するコア電子部品であるパワー/高周波デバイスにおいて戦略的不可欠性を獲得することは、経済安全保障上の意義が大きい。特に、我が国は基板材料である β - Ga_2O_3 、GaN 材料及びデバイスのそれぞれの分野で技術的優位性を持ち、世界的市場で優先的地位を占めることができるポテンシャルを有していることから、基板材料メーカーとデバイスメーカーの協力関係を更に強化することで、将来にわたってトップランナーとしての地位を強固にする必要がある。

そこで本事業では、2030年代に、SiC よりもオン抵抗を低減でき省エネ効果の高い β -Ga₂O₃パワーデバイス、及び GaN-on-SiC よりも高耐圧で省エネ効果の高い GaN-on-GaN 高周波デバイスの本格的社会実装を目指した研究開発を行う。具体的には、各材料について、同種基板上にホモエピタキシャル成長薄膜を成長させた大口径・高品質ウエハの低コスト製造に関する要素技術開発を行う。また、 β - Ga₂O₃ウエハを用いたパワーデバイスの開発、及びGaN-on-GaN ウエハを用いた高周波デバイスの開発を行う。

本事業による成果として得られる、高品質ウエハ及び高性能デバイスを活用し、社会を構成する様々な電力設備の消費電力を低減することで CO₂ 排出削減に寄与するとともに、これまでの半導体材料では実現し得なかった高出力領域・過酷領域への半導体機器の展開を加速することを目指す。

例えば発電時の損失の少ない再エネ発電設備、運転・充電時に発熱の少ない xEV、損失の少ないエネルギーインフラ、高出力な気象用レーダー効率的な加熱が可能な産業用マイクロ波加熱装置、通信可能距離が長くかつ高効率な無線基地局、超高電圧化で使用される放送地上局、宇宙空間など過酷条件かつ高耐電圧での動作が要求される通信衛星、などへの展開が期待される。

さらに、こうした次世代の電子機器において必須となるガリウム半導体デバイスの自律性を確保するとともに、我が国が強みを有するコア材料(ウエハ)製造技術を一層磨き上げることで、技術面での優位性の獲得を目指す。 また、米国、欧州、韓国等、諸外国に展開することも視野に入れる。

(2) 事業の目標

①アウトプット目標

 β -Ga₂O₃ エピウエハ及びパワーデバイス、パワーモジュールを開発、並びに、GaN-on-GaN ウエハ及び高周波デバイスを開発する。詳細については(3) 事業内容に示す。

②アウトカム目標

本事業で開発した高抵抗 GaN 基板、 β - Ga_2O_3 基板及びこれらのエピウエ ハの供給をはかる。また、高電圧下での高出力な動作が要求される設備、例 えば電力インフラ(再生エネルギー関連設備など)、通信インフラ設備(通信 衛星や無線基地局など)、レーダーなどへの、 β - Ga_2O_3 パワーデバイス及び GaN-on-GaN 高周波デバイスの本格適用、その高性能化に寄与する。

両デバイスにより、これら設備での損失低減で見込まれている CO_2 削減量を更に加速させ、カーボンニュートラル実現に貢献する。

具体的には、両半導体材料を用いたデバイスの社会実装により、「グリーンイノベーション基金事業・次世代デジタルインフラの構築プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画」に記載のとおり、世界での 2050 年の CO_2 削減量 2700 万トン- CO_2 /年を 1.5 倍とすることに貢献する。

(3) 事業の内容

研究開発項目①「 β - Ga_2O_3 ウエハ及びパワーデバイス、パワーモジュールの開発」

ア、研究開発の必要性

 β - Ga_2O_3 パワーデバイスの広い社会実装に向けて、 β - Ga_2O_3 基板の大口径化と結晶品質の向上・保証、低コスト製造技術の構築が求められている。これまで、EFG 法を用いた高品質 4 インチ β - Ga_2O_3 基板が実証されているが、 β - Ga_2O_3 パワーデバイスを既存のプロセスラインを使って低投資で量産するためには、ウエハのサイズを 6 インチ以上へ拡大することが求められる。また、耐圧数 kV でアンペアクラスのパワーデバイスを実現するためには数 mm

角以上の大型素子が必要であり、そのような素子を高い歩留り、例えば 90% 以上で作製するためには、キラー欠陥密度を 0.1 個/cm²以下まで低減する必要がある。

加えて、デバイスの動作層となる β - Ga_2O_3 エピ膜は、高い面内均一性が求められる。また、 β - Ga_2O_3 基板が低コストであるという特徴を活用するため、エピ成膜コストの低減も重要である。 β - Ga_2O_3 トランジスタを実現するためには、不純物の高精度ドーピング技術も求められる。これらの課題を両立させる成膜スループットの高い技術を検討する必要がある。

また、 β - Ga_2O_3 エピウエハの品質を担保するため、ウエハ中のキラー欠陥の分布を出荷前に検査する非破壊検査技術が必要である。

さらに、本事業で開発する高品質、低コスト β - Ga_2O_3 ウエハを用いて、Siや SiC をしのぐ低損失と高耐圧を兼ね備えたデバイスを実現するには、 β - Ga_2O_3 半導体の持つ高い絶縁破壊電界強度を引き出すデバイス設計技術とプロセス技術の開発が必要となる。また実用化のためには信頼性検証も重要であり、MOS ゲート部に関連する信頼性を向上させるためには、MOS 界面制御技術の開発が必要となる。また、Si や SiC パワーモジュールの性能をしのぐ β - Ga_2O_3 パワーモジュールを実現するためには、 β - Ga_2O_3 の低い熱伝導度に対応した放熱設計など、モジュール化技術の開発が必要となる。

イ. 研究開発の具体的内容

(イ-1) β-Ga₂O₃結晶成長技術の開発

パワーデバイスへの実装を想定し、6インチ以上の高品質大口径 β - Ga_2O_3 ウエハ用結晶成長技術の開発を行う。また β - Ga_2O_3 ウエハ中に存在する粒界やボイドなどの欠陥の低減、低コスト化に取り組む。

(イ-2) β-Ga₂O₃エピ技術の開発

(イ-1)の成果も活用し、キラー欠陥密度が低く、かつスループットの高い 6 インチ基板に対するホモエピタキシャル成長のための技術及び装置を開発する。

(イ-3) β-Ga₂O₃欠陥検査技術の開発

従来の事業で明らかになった各種キラー欠陥について、非破壊かつ高速での 6 インチウエハ全面検査技術の構築に取り組む。また、いまだ明らかになっていない β - Ga_2O_3 中の点欠陥がデバイスの特性に与える影響を解明し、管

理すべき点欠陥種を同定する。

$(\Lambda-4)$ β -Ga₂O₃パワーデバイスの開発

(Υ -2)の成果も活用し、 β - $\mathrm{Ga}_2\mathrm{O}_3$ の特徴である高電界動作を可能とするデバイス構造を設計する。さらに、 MOS ゲートの高信頼化を実現するため MOS 界面制御技術の開発を行う。開発した各要素技術を組み合わせてデバイスの試作を行い、高耐圧基本素子にて SiC をしのぐ低損失化を実証する。また Υ 10 A 級以上の高耐圧 Γ 3 - Γ 3 - Γ 3 - Γ 4 - Γ 3 - Γ 5 - Γ 6 - Γ 7 - Γ 6 -

$(\Lambda-5)$ β -Ga₂O₃パワーモジュールの開発

 β -Ga₂O₃ の低い熱伝導度に対応した放熱設計などのパワーモジュール要素技術を開発する。さらに、 β -Ga₂O₃ 搭載パワーモジュールの社会実装を目指して、モジュールの大容量化に向けて β -Ga₂O₃ 素子を複数並列配置したパワーモジュールの設計と動作実証を行う。

ウ. 達成目標

【中間目標】

- 低コスト 6 インチバルク育成技術による β-Ga₂O₃ 単結晶育成の確認を行う。
- 6 インチ高スループットエピ成膜装置の動作確認を行う。
- 新規非破壊欠陥検査技術による欠陥検出の確認を行う。
- β -Ga₂O₃を利用したトランジスタについて、耐圧 2 kV 以上で SiC を下回るオン抵抗の実証を行う。

【最終目標】

- 口径 6 インチ以上のパワー半導体向け β - Ga_2O_3 バルク結晶のための低コスト育成技術を開発する。既存の β - Ga_2O_3 結晶成長技術と比較し、50%以上の低コスト化を目標とする。
- 口径 6 インチ以上かつエピ膜のキラー欠陥密度が 0.1 個/cm² 以下の β Ga_2O_3 エピウエハ製造技術を開発する。成膜スループットは従来技術の 3 倍を目標とする。
- 本事業の成果である β -Ga₂O₃ エピウエハを用いて、耐圧 3.3 kV 以上で SiC の 1/2 以下のオン抵抗を実現する β -Ga₂O₃トランジスタを開発する。

また、デバイスの信頼性向上、更なる高耐圧化(例えば 6.5 kV 以上など) を実現するための技術を開発する。

研究開発項目②「GaN-on-GaN ウエハ及び高周波デバイスの開発」

ア. 研究開発の必要性

半導体材料として広く普及している Si と比較して、バンドギャップが大きな GaN は、SiC と並んでワイドバンドギャップ半導体とも称され、その大きな絶縁破壊電界や、高い飽和ドリフト速度を生かした高性能電子デバイス用の材料として注目されている。低抵抗基板を用いるパワーデバイスや発光デバイス向けと異なり、横型 GaN デバイスの高周波動作には、高い電気抵抗率の基板を用いる必要がある。

高抵抗の自立 GaN 基板は n型キャリアを補償するドーパントを結晶成長過程に導入することで実現される。現在主流の結晶成長法である HVPE 法は、GaN 結晶を高い成長速度で成長でき、2~4 インチの GaN 基板の製造に実績がある手法であるが、大幅なコスト削減や、さらなる大口径での量産は難しいと考えられている。また、大口径化・高品質性を両立する結晶方法としてはナトリウムフラックス法があり、種結晶からバルク結晶を成長させる際の量産化に向けた課題はあるが、これを用いて 6 インチの低欠陥 GaN 種結晶の製造技術を確立することが期待されている。

以上のように、高品質 GaN 基板の製造技術の 4 インチ以上かつ高抵抗への拡張は、非連続的な技術進展を必要としており、それを実現する革新的なプロセス技術の確立が重要な課題となっている。そのような背景を踏まえて、4 インチ以上、将来的に 6 インチにつながる高抵抗 GaN 基板の量産に適した結晶成長の要素技術を開発する必要がある。

GaN 単結晶基板上に同種の GaN エピ層を設けた GaN-on-GaN 基板は、上記の格子定数や熱膨張差の問題がないことから、転位密度による電流コラプスや熱膨張差によるひずみを押さえることができ、GaN 材料のポテンシャルを発揮できるデバイス設計が可能となる。他方、エピ界面の不純物によるリークや、高抵抗基板の補償ドーパントがチャネル層へ拡散することを抑制するなどの課題を解決するため、適切な基板洗浄技術、エピの前処理技術、及び成膜技術の効率化と不純物制御の高度化を達成するための要素技術を開発する必要がある。

なお、GaN のモース硬度はダイヤモンドに次ぐ 9 であり、難加工材料として知られるほか、CMP(化学機械研磨)工程において、GaN デバイスで通常使用される Ga 極性面が化学的に極めて安定である点が GaN の加工を難しく、高コストにしている。高抵抗かつ大口径の GaN 基板の実現には、これらぜい性材料的な性質を有するバルク結晶を、高い効率でウエハに加工する技術が、もうひとつの要素技術として欠かせない。高抵抗 GaN 結晶の機械物性を把握し、実際の結晶を用いて適切な加工方法を選択、プロセス設計と加工条件の最適化を行う必要がある。

さらに、本事業で開発する高抵抗 GaN-on-GaN ウエハを用いて、通信、レーダーなど種々の用途に用いるための高周波デバイスを試作し、既存の GaN デバイスと比較した性能の向上について実証する必要がある。

イ、研究開発の具体的内容

(イ-1) 高抵抗 GaN 結晶成長技術の開発

高品質 GaN 結晶成長の実績がある手法を応用して、高抵抗 GaN バルク結晶を成長する技術を開発する。面内で均一に高い電気抵抗率を有する基板を実証する。既存の最先端 4 インチ高抵抗 GaN 結晶成長技術と比較して、50%以上の生産性改善を技術的に実証する。結晶成長は将来的に 6 インチ以上の基板を高い水準で量産可能な手法とする。

(イ-2)GaN-on-GaN エピ技術の開発

(イ-1)の成果も活用し、エピウエハを作製する。GaN-on-GaN エピの $10^{15}/cm^3$ 台での不純物制御を行うとともに、転位密度 $10^4/cm^2$ 台以下のGaN 基板を用い、同レベルの転位密度のエピ層を成膜する技術を開発するための要素技術を開発する。

(イ-3) 高抵抗 GaN 基板の加工技術開発

(イ-1)の成果も活用し、高抵抗 GaN 結晶のスライス工程の開発を行う。 また、既存の研削、研磨、洗浄などの技術を組み合わせた工程の設計、最適 化を行う。

(イ-4)GaN-on-GaN HEMT(高電子移動度トランジスタ)高周波デバイスの開発

通信インフラやレーダーへの適用を想定し、GaN-on-GaN に最適化された、

75V 以上の高電圧動作に適した高周波デバイス構造及びプロセス技術を開発し、 $(4-1) \sim (4 \sim 3)$ の成果も活用して試作を行う。また、既存の GaNon-SiC デバイスをしのぐ高効率化を実証する。

ウ. 達成目標

【中間目標】

- 口径 4 インチ以上の GaN バルク結晶を低コストで量産が可能な技術の検 証用装置を設計、製作し、高抵抗 GaN 結晶の成長を実証する。
- GaN 基板を使った GaN-on-GaN エピ技術の基礎技術を検証、開発する装置を設計製作し、エピウエハの前処理技術の基礎検討、及びプロセス設計を行う。

【最終目標】

- 口径 4 インチ以上の高周波デバイス向け高抵抗 GaN バルク結晶成長技術 を開発する。既存の高抵抗 GaN 結晶成長技術と比較し、50%以上の生産 性改善を目標とする。
- 口径 4 インチ以上かつエピ膜の貫通転位密度が 1×10^5 / cm² 以下の高周波 デバイス向け GaN-on-GaN エピウエハを開発する。
- 高抵抗 GaN 結晶の高速スライス技術を開発する。
- 本事業の成果である GaN-on-GaN エピウエハを用いて、75V 以上での高 電圧での高周波動作を可能とする HEMT デバイスを開発する。また、既 存の GaN-on-SiC デバイスをしのぐ高効率化を実証する。

2. 実施方法、実施期間、評価

(1) 事業の実施・体制

本事業は、内閣官房及び内閣府が定める「経済安全保障重要技術育成プログラムの運用・評価指針」に基づき事業を実施する。

研究推進法人(FundingAgency:FA)は、国から示された研究開発ビジョン及び研究開発構想に基づき、公募により研究開発課題を採択するとともに、その進捗管理・評価等の責務を担う。本事業のFAは、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)である。

研究開発課題の実施責任者(以下「研究代表者」という。)の所属する機関は、国内に研究開発拠点を有し、我が国の法律に基づく法人格を有している機関とする(以下「研究代表機関」という)。また、研究代表者及び主たる

研究分担者は我が国の居住者であることとする。(ここで言う居住者とは外為法の居住者(特定類型該当者を除く)であること。)

本事業の公募では、研究開発項目 ①及び②はそれぞれ別に事業を実施するものとする。

(2) 事業の実施期間

本研究開発構想に基づく、本事業は 2024 年度から 2028 年度にかけての 5年間とする。研究開発はステージゲート方式を採用し、図 2 に示す 2 つのフェーズで実施するものとする。





: 中間評価、ステージゲート : 事後評価

表 2 研究開発のスケジュール

なお、本スケジュールは研究開発課題の実施者決定後、経済産業省及び NEDO は、PO(プログラム・オフィサー)と協議の上、改めて見直すことが あり得る。

(3) 評価に関する事項

本事業は、「経済安全保障重要技術育成プログラムの運用・評価指針」に 基づき、評価を実施する。

研究代表者は自己評価を毎年実施し、PO に報告する。NEDO は外部評価として中間評価を 2026 年度 (事業開始から3年目)、事後評価を 2028 年度 (事業終了年)に実施することとし、事業の進捗等に応じて評価時期を早める場合は、PO及び所管省庁と連携して、あらかじめ適切な実施時期を定める。

(4) 社会実装に向けた取組

本事業は、経済施策を一体的に講ずることによる安全保障の確保の推進に 関する法律(令和4年法律第43号)に基づいて設置される指定基金協議会 の下で推進していく。

これにより、本事業によって生み出される研究成果等を活用し、民生及び公的な利用を促進するとともに社会実装につなげていくことを目指し、その実現に向け、潜在的な社会実装の担い手として想定される関係行政機関や民間企業等による伴走支援を可能とするとともに、参加者間で機微な情報も含む有用な情報の交換や協議を安心かつ円滑に行うことのできるパートナーシップを確立していく。

具体的には、本事業により開発を行う半導体材料及びこれにより実現され

る、高出力かつ高効率で、過酷条件での使用にも適するパワー/高周波デバイスを利用する場合の将来的に想定される具体的なユースケースやその実現のために必要な機能等の情報を共有しつつ研究開発を進めることは、研究開発成果を将来の社会実装に円滑につなげていく上で、大きな意義がある。またその際には、半導体が経済安全保障法上の特定重要物資として指定されていることや、「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」などの戦略において、半導体デバイスの省エネ化が、グリーン社会の実現において重要な位置づけをされていることに、十分留意する。

本事業に係る協議会については、研究開発課題の採択後に、関係行政機関、PO、研究代表者等の協議会への参画者における十分な相談を行いつつ、運営していく。なお、協議会の詳細は別に示す。

(5) 総予算

本事業の予算は、研究開発項目①については45億円を超えない範囲、研究開発項目②については35億円を超えない範囲とする。各研究開発項目、フェーズごとの配分については、必要に応じて、経済産業省からの指導に基づき目安を示す。これを変更する場合も同様とする。

(6)経済産業省の担当課室

本事業の運営に係る経済産業省の担当課室は、製造産業局素材産業課とする。

3. その他重要事項

(1)研究開発成果の取扱い

①共通基盤技術の形成に資する成果の普及

研究開発課題実施者は、研究成果を広範に普及するよう努めるものとする。 経済産業省及び NEDO は、経済安全保障の観点を留意しつつ、研究開発課題 実施者による研究成果の広範な普及を促進する。

経済安全保障の観点から、産業省は必要に応じて NEDO に対して助言を行い、NEDO は本助言を踏まえて、成果の普及について検討することとする。

②標準化施策等との連携

本事業で得られた研究開発成果については、我が国の標準化等との連携を図ることとし、標準化に向けて開発する評価手法の提案、データの提供等を

積極的に行い、事業終了後に必要な実施すべき取組の在り方及びより広範囲 に適用先を広げるためのビジネスモデルについて立案する。

経済産業省、NEDO 及び研究開発課題実施者は、国際標準化に向けて積極的に役割を果たしていく。

③知的財産権の帰属、管理等の取扱い

研究開発成果を民生利用のみならず公的利用につなげていくことを指向し、社会実装や市場の誘導につなげていく視点を重視するという本プログラムの趣旨にのっとり、研究代表機関者は PO 及び研究分担者との協議上、知的財産権の利活用方針を定めることとする。その際には、研究開発途中及び終了後を含め、知的財産権の利活用を円滑に進めることができるように努めることする。

なお、研究開発成果の利活用に当たりその成果にバックグラウンド知的財産権が含まれる場合には、その利活用についても同様努めること。

(2)「研究開発構想」の見直し

経済産業省は、NEDO、PO及び関連省庁と連携して、当該研究開発の進捗 状況及びその評価結果、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動 向、研究開発費の確保状況等、事業内外の情勢変化を総合的に勘案し、必要 に応じて、達成目標、実施期間等、本研究開発構想の見直しを行う。

(3) 研究開発の対象経費

「経済安全保障重要技術育成プログラムの運用・評価指針」に基づき、運用する。大学・研究開発法人等以外に関する間接経費の額の設定については、 事業の性質に応じて経済産業省の担当課室から別に示す場合を除き、業務委 託契約標準契約書に基づくものとする。

4. 研究開発構想の改定履歴

(1) 令和5年10月、制定。