

次世代省エネ型デバイス関連技術の開発・実証事業

基本計画書

1. 目的

総務省では、未来の情報通信を実現するために必要な基盤的技術の研究開発の一環として、これまで次世代デバイスの基礎研究を推進してきた。

さらに、2020年10月26日に菅総理大臣より、2050年までに温室効果ガスである二酸化炭素(CO₂)ネット排出量ゼロ（カーボンニュートラル）を目指すという政策目標の宣言がなされる等、電子デバイス向けの超低消費電力に関する技術の進展及びその社会実装を図ることが、より一層喫緊性の高い政策課題となっている。

このような状況を背景として、本研究開発では、Society5.0の推進により、あらゆるものがICTでつながり電化していく社会においてエネルギーが制約要因にならないために、大幅な省エネ技術を確立することで情報通信由来のCO₂排出を減らす（Green of ICT）こと、及び次世代デバイスを用いた再生可能エネルギーの導入促進、情報通信機器の小型化、自動車等のワイヤーハーネスフリー化による軽量化、極限環境下で活動可能なロボットの実現による既存作業の高効率化等の様々な想定されうる用途においてCO₂排出を減らす（Green by ICT）ことを念頭におき、ワイドギャップ半導体の一種である酸化ガリウムを用いた次世代デバイス関連技術に取り組む。

上記の目的の実現に向けて、「超低消費電力」及び「極限環境下での情報通信」を実現しうる、酸化ガリウムを用いた様々な次世代デバイスの製品化に向けた民間事業者の事業予見性を高めるために必要な技術の開発・実証試験等を実施する。

また、日本が開拓してきた酸化ガリウム半導体分野について、世界に伍する重要な技術分野に関する論文の発表・特許取得や技術的貢献等を実現することで、国際産業競争力や気候変動枠組み条約等での国際交渉におけるプレゼンス向上のコベネフィットを獲得することも目指す。

2. 政策的位置付け

- 「統合イノベーション戦略 2020」（令和 2 年 7 月 17 日 閣議決定）では、「デジタル・トランスフォーメーション（DX）に必要な環境の整備の一環として、デジタル分野の気候変動対策を強化する。具体的には、社会の急速なデジタル化によって生じる通信トラヒックの増加に伴い、データセンター等における CO2 排出の増加が懸念されることから、省エネ技術の高度化・実装及び再生可能エネルギーの活用によるデータセンターのゼロエミッション化・レジリエンス機能強化を推進する。（担当 総務省・環境省）」と位置付けられている。
- また、「成長戦略実行計画、成長戦略フォローアップ、令和 2 年度革新的事業活動に関する実行計画」（令和 2 年 7 月 17 日 閣議決定）においても、「次世代材料・新構造の次世代パワーエレクトロニクスに関する技術開発等の推進」が掲げられている。
- 「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」（令和元年 6 月 11 日 閣議決定）においては、「次世代パワー半導体材料はまだ製造コストが高いという課題があり、大口径ウェハの製造プロセスや効率的な高品位結晶作製技術の開発が進められている。（中略）低コスト化、標準化できる部分を切り出すなど、既存技術で低コスト化を目指して導入を進めることが重要である。また、機械式のブレーカーなど半導体を導入可能だがまだ電化されていない領域を探すことも、省エネルギー技術の拡大につながる。」とされている。
- さらに「Beyond 5G 推進戦略 -6G へのロードマップ-」（令和 2 年 6 月 30 日 総務省取りまとめ）では、「酸化ガリウムデバイスは超低消費電力技術の 1 つとして官民間問わず積極的に進めるべき技術」と位置づけられている。
- 加えて、「革新的環境イノベーション戦略」（令和 2 年 1 月 21 日 統合イノベーション戦略推進会議決定）において、「デジタル技術を用いた強靱な電力ネットワークの構築、高効率・低コストなパワーエレクトロニクス技術等の開発の一環として、窒化ガリウム等の次世代半導体の開発技術を活かし、通信機器や、レーザー、ワイヤレス電力伝送へ応用可能な技術の研究開発から社会実装及び窒化ガリウム等の次世代パワー半導体の高性能化技術や低コスト化技術の開発に取り組む」とされている。

3. 目 標

(1) 政策目標（アウトカム目標）

現在、情報通信分野として懸念されるエネルギーに関連した課題として、2030年以降、5Gの浸透・普及やAI・IoTの進展に伴うネットワークへの接続機器数の増大により爆発的なトラヒックの増加や人工知能の学習のために多量の電力の消費が予想されており、国立研究開発法人科学技術振興機構の「低炭素社会の実現に向けた技術および経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書 技術普及編 情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響(Vo1.1)平成31年3月」によると、省電力技術が発達しないと、2030年には現在の総電力の倍近い電力をIT関連機器だけで消費する可能性があるとされている。

Society5.0の推進により、あらゆる分野の電化が進み、ICTはあらゆる分野と融合していく社会が想定される。各種機器が電化していく際に、省エネ性能が高く安価で多様なメリットを有する次世代半導体技術がなければ、情報通信インフラ及び将来的にICTと深く結びつく分野（例えば電気自動車等）由来のCO₂排出が情報通信の発展の阻害となりうることも懸念される。

こうした課題を踏まえて、情報通信社会のグリーン化を実現しうる次世代デバイスを実社会に実装するために必要な要素技術を確立するとともに、脱炭素化に向けた国際社会への技術イノベーション面での貢献に資する重要な論文・特許等につながる成果を生み出し、産業投資を促進することを狙いとする。

このような取組により、我が国の産業競争力及び国際社会における地位の向上等の国際交渉力の強化を図るとともに、政府としての重要課題である日本社会のデジタル化・グリーン化に貢献する。

(2) 研究開発目標（アウトプット目標）

「超低消費電力」及び「極限環境下での情報通信」を実現しうる次世代デバイスを開発するため、民間企業での投資判断・産業化の可能性を見極めるために必要なマイルストーンとしての位置づけで、国際市場が見込める2インチ以上の高品質酸化ガリウムウェハ作製、量産性に優れる薄膜成長技術の確立（例えば、固体状の三塩化ガリウムを用いたハライド気相成長(HVPE)技術において10 μ m/h以上の成長速度を有する技術)、及び耐圧1kV以上等のスペックを満たすデバイス作製技術等を確立するとともに、次世代半導体の省エネ効果を示すため、開発デバイスによる省エネ性能に基づくCO₂削減ポテンシャルを実証する。

また、当該技術に関する国際的に重要となる大きなインパクトを有する論文や国内外の特許等による成果を獲得し、国際学会や論文誌、プレスリリース等を通じてその有用性を国内外に積極的に発信し、次世代半導体関連分野における我が国の国際競争力の強化を図る。なお、その際、脱炭素社会に資する優れた技術を日本から発信していくことによる日本の国際的プレゼンスの向上等を含む。

4. 研究開発内容

(1) 概要

幅広い用途における電力変換損失の低減による、世界規模での省エネ、及び CO2 排出量の大幅削減を可能とする、酸化ガリウムデバイス（トランジスタ、ダイオード）基盤技術の研究開発を実施する。

同半導体デバイスは、シリコンの 1.2eV、窒化ガリウムの 3.4eV に比べて、さらに大きな 4.5eV 以上のバンドギャップを持つため、宇宙環境に代表される高温、放射線下等の極限環境においても長期間安定動作が可能と考えられており、再生可能エネルギーの導入促進、情報通信機器の小型化、自動車等のエンジン近傍における高周波デバイス制御によるワイヤーハーネスフリー化による軽量化、極限環境下で活動可能なロボットの実現による既存作業の高効率化等、2030 年以降の社会の様々な省 CO2 型/デジタル型社会の実現に大きく貢献することが期待される。このような、高度な ICT システムの実現を目指した極限環境下対応のデバイスとしての開発も併せて実施する。

(2) 技術課題

酸化ガリウムデバイス技術として、以下の 3 項目において技術の研究開発・実証に取り組む。

ア) 高品質な単結晶バルク、ウェハ製造技術の確立・実証

半導体デバイスの社会実装のためには、製造コストに大きく関係するウェハ径の大型化とデバイス性能を達成するために高品質化が可能な結晶断面を主面としたウェハの量産化が重要である。

現在、国内で製造されている試験研究用等で入手可能なサイズ 2 インチ径以上の酸化ガリウムウェハは、製造が比較的容易等のメリットがあるが、省エネ性能を含めたデバイスとして重要となる性能（例：熱伝導率・電子移動度等）が理論的に最大となる結晶断面のものではない。

他方で、省エネ性能を含めたデバイスとして重要となる性能が理論的に最大となる結晶断面（※）を持つ酸化ガリウムウェハ（以下、「高品質酸化ガリウムウェハ」と定義する。）は、国際的に研究開発が進められているが、現状では、最大でも 1 インチ径程度のウェハの製造に留まっている。

本研究開発では、国際的に広く市場が期待できる高品質酸化ガリウムウェハの大口径化を目的として、高品質な単結晶バルク、ウェハ製造基盤技術を実証、確立することにより、実用に耐えうる高い性能を有するデバイスの実現が期待できる。

※ 結晶断面がいわゆる B 面（ミラー指数が (010) を示す面が主面）のもの

イ) 薄膜エピタキシャル成長技術の確立・実証

現在、デバイス応用に向けた代表的な酸化ガリウム薄膜エピタキシャル成長技術には、分子線エピタキシー (MBE)、ハライド気相成長、有機金属化学気相成長 (MOCVD)、ミスト CVD がある。

HVPE 及び MOCVD は、縦型酸化ガリウムパワーデバイスの産業化に適した高速、高品質薄膜成長の実現が期待されており、ミスト CVD は、低温で反応が進み、簡便な装置で膜形成が可能である等、総じて環境負荷が小さい持続可能な製造方法である点等に強みがあるが、実用化のためには技術的な課題解決が必要である。

例えば、HVPE は高速成長を可能とするが、Ga 供給源の種類により、結晶の品質、結晶成長速度に加えて、実際の製造工程における量産性 (Ga 供給源の急激な反応の制御の要否、調達性、固体物質であるか等) が大きく変わる。したがって、民間企業において商用化に向けた HVPE 装置の製造・量産を行うために必要となる経済性と品質を両立するための技術を確立する必要がある。

MOCVD については、酸化ガリウムデバイスのための専用機器は国内に存在せず、外国において試験研究が行われている段階に留まっている。酸化ガリウムのための MOCVD 装置の技術を国内に保有しておくことは、産業利用・研究競争力の観点から必須である。このため、民間企業において経済性と品質を両立可能な MOCVD 装置の製造・量産技術を確立する必要がある。なお、民間企業において酸化ガリウムデバイス作製のための MOCVD 技術を確立することで、高周波デバイス関連技術への応用も期待され、幅広い無線通信の分野への裨益も大きく期待できる。

ミスト CVD は、簡便な装置及び手法で高品質な成膜が可能な点に特色があることに加えて、HVPE・MOCVD による手法とは異なった結晶構造である、準安定型の酸化ガリウム薄膜成長に適した手法である。準安定型の酸化ガリウム薄膜については、パワーデバイス、極限環境デバイス用途において大きな可能性を有するが、論文等の報告が少なく、民間企業の事業予見性が低い。

これらの複数の手法がある中で、諸外国に対して酸化ガリウムデバイス技術における我が国の多様な面での優位性を担保し、省エネ性能の高い次世代半導体を社会に普及させるためには、各薄膜エピタキシャル成長技術のコストとデバイスの生産性等の観点から技術開発を行うとともに、複数の候補となる成長技術を比較し、目的に応じた最適な手法を見出す必要がある。

ウ) 次世代デバイス技術の確立・実証

現在、酸化ガリウムパワーデバイス開発においては、プロセス要素技術の開発が進み、基礎的な縦型トランジスタ、ショットキーバリアダイオード構造の試作、動作実証が行われている段階にある。

今後、Society5.0 の推進によりあらゆるものが ICT でつながり電化してい

く社会を確立するには、より高性能な縦型パワーデバイスを実現し、様々な企業における実用化、産業化の可能性を高め、広く民間企業のデバイスビジネスに利活用できるようにすることが重要である。そのため、縦型トランジスタ、ショットキーバリアダイオードの高性能化に向けた基盤技術を確立するとともに、省エネ性能を示すため、CO2削減ポテンシャルを実証する。また、実際のデバイスとして活用するためには熱設計も重要な観点である。酸化ガリウムは熱伝導率については相対的に低く、デバイスとしての放熱性を上げるような取組も併せて重要である。

同時に、現状の半導体エレクトロニクスでは適用が困難な宇宙等の極限環境においても、長期間安定的に動作可能な ICT デバイス技術を確立するために横型トランジスタの開発も行うことで、革新的な IoT 社会の実現への寄与が期待できる。

(3) 到達目標

ア) 高品質な単結晶バルク、ウェハ製造技術の確立・実証

- ・ 高品質酸化ガリウムウェハ製造のためには、酸化ガリウムが有する劈開性に留意した上で、バルク育成手法や切断・研磨等の基板加工技術を開発し、ウェハ量産化を念頭に当該技術を確立する。
- ・ 2 インチ以上のサイズの単結晶酸化ガリウムバルク育成、及び 2 インチ径以上の高品質酸化ガリウムウェハを製造する単結晶バルク、ウェハ製造技術の確立を目標とする。加えて、高品質酸化ガリウムウェハの試作、結晶品質評価（表面平坦性、転位・欠陥密度、電気的特性評価等）を実施し、その特性を確認するとともに、イ) とウ) と連携することで、高性能デバイスへの適用が可能な結晶品質を実現する。

イ) 薄膜エピタキシャル成長技術の確立・実証

ウ) で実施する酸化ガリウムパワーデバイスの実現に必要な HVPE 及び MOCVD を含む薄膜エピタキシャル成長技術の開発を行うとともに、複数の候補となる成長技術を比較し、量産を念頭においたデバイス製造の最適な条件を明らかにし、目的に応じた最適な薄膜エピタキシャル成長技術を見出すことを目標とする。

- ・ HVPE を用いた技術の場合は、一塩化ガリウムを用いた他の方法に比べて取扱が容易であり、量産性に優れる固体状の三塩化ガリウムをガリウム源とする新規酸化ガリウム HVPE 成長技術 (THVPE) について、現行の HVPE を用いた酸化ガリウム層成長速度 ($5 \mu\text{m/h}$) を超える $10 \mu\text{m/h}$ 以上の成

長速度の薄膜成長技術を確立する。

- HVPE 及び THVPE によって製造されるデバイスの性能評価においては、n 型ドーピングによる電子濃度制御を 10^{15} cm^{-3} 以下に制御することや、デバイスへの適用を念頭においた段差基板上の酸化ガリウム選択成長技術の確立等の高品質なエピ基板作製に必要な薄膜成長関連の技術開発を実施する。
- MOCVD を用いた技術の場合は、現行の MOCVD を用いた酸化ガリウム層成長速度 ($3 \mu\text{m/h}$) を超える $5 \mu\text{m/h}$ 以上の成長速度の薄膜成長技術を確立し、原料ガスとして用いる III 族有機金属原料由来の不純物の薄膜成長への影響を抑制する技術を始めとして、薄膜成長関連の技術開発を実施する。
- MOCVD によって製造されるデバイスの性能評価においては、アンドープ酸化ガリウム層中残留キャリア密度 10^{15} cm^{-3} 以下の性能の実現を確認する等、高品質なエピ基板作製に必要な薄膜成長関連の技術開発を実施する。
- ミスト CVD を用いた技術の場合は、準安定酸化ガリウム薄膜成長を安定して実現するために必要な技術の確立を行うとともに、n 型ドーピングによる電子濃度を $10^{16} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ で精密に制御することを実現し、高品質なエピ基板作製に必要な薄膜成長関連の技術開発を実施する。また、結晶欠陥による影響の制御や熱伝導性を考慮した膜厚の制御を始めとした優れたデバイスプロセスの確立に必要な技術開発を行う。

優れたデバイス技術の実証・確立を念頭におき、上記の 3 手法に加えて MBE 等を含めた各種成長技術を用いて、上記に記載の課題を解決し、高品質なエピ基板を作製し、ウ) において記載した事項と密接に連携（製造した基板の提供・デバイスの性能を最大化するために必要な薄膜成長プロセスの高度化に必要な試験等）し、量産に必要なデバイス製造基盤技術を確立することを目標とする。

ウ) 次世代デバイス技術の確立・実証

家電製品や自動車等を始め、多種多様なパワーデバイスの適用が可能な範囲として広い需要が見込める耐圧 500V~2000V (2kV) 程度の領域を想定し、各活用先に応じて十分に機能を発揮することが可能な縦型トランジスタ、縦型ショットキーバリアダイオードを実現する。また、極限環境（高放射線下・

高温下)においても長期間安定的に作動可能な IoT/ICT デバイスに適用可能な横型トランジスタを製造する。

- ・縦型トランジスタについては、耐圧性能に優れるフィン電界効果トランジスタ等の開発を通じて、オン抵抗 $20 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 以下、耐圧 1 kV 以上のデバイス特性の実現を目標とするとともに、実用的なデバイスを見据えて熱設計、放熱性向上のための技術に関する調査・開発等も同時に検討する。
- ・縦型ショットキーバリアダイオードについては、オン抵抗 $10 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 以下、耐圧 2 kV 以上のデバイス特性を実現し、実際の製品として重要視される信頼性、耐久性試験を実施する。耐久性試験においては、 500 時間以上の通電時間試験を行い、通電試験後のデバイスの状態、特性、劣化具合を検証する。
- ・極限環境用の横型トランジスタについては、宇宙空間等の高放射線下での通信を長期間可能とするため、最大発振周波数 20GHz 以上の高周波電界効果トランジスタにおいて、ガンマ線耐量 1MGy 以上を実現する。また、地熱発電施設や砂漠での再生可能エネルギー発電施設の無線通信制御並びに機械エンジン部位周辺での無線通信制御等を実現可能とするために必要とされる 300°C 以上における高温環境での動作信頼性を評価する。

5. 実施期間

令和3年度から令和5年度までの3年間

6. その他 特記事項

(1) 提案及び研究開発に当たっての留意点

- ① 提案に当たっては、基本計画書に記されているアウトプット目標に対する達成度を評価することが可能な具体的な評価項目を設定し、各評価項目に対して可能な限り数値目標を定めるとともに、アウトカム目標の達成に向けた適切な研究成果（アウトプット等）の取扱方策（研究開発課題の分野の特性を踏まえたオープン・クローズ戦略等を含む）について提案すること。
- ② 実用化については、半導体関連技術に関するこれまでの内外の成果動向を記載の上、その点を踏まえて事業終了後の早期の実用化を念頭においた実用化目標年度、実用化に至るまでの段階を明示した取組計画等を記載し、提案するこ

と。また、製品・サービスの実現に向けたアプローチが考えられる場合には、製品として実装する際のコスト等（メンテナンス等の後年度負担や半導体産業への展開も含む）への配慮を含め、具体的な取組計画を記載しつつ、提案すること。

- ③ 目標を達成するための具体的な研究方法、実用的な成果を導出するための共同研究体制又は研究協力体制について提案書の中にできるだけ具体的に記載すること。複数機関による共同研究を提案する際には、分担する技術間の連携を明確にし、インタフェースを確保すること。
- ④ 研究開発の実施に当たっては、関連する要素技術間の調整、成果の取りまとめ方等、研究開発全体の方針について幅広い観点から助言を頂くと共に、実際の研究開発の進め方について適宜指導を頂くため、学識経験者、有識者（例えば、半導体業界の民間企業（メーカー）の研究者、技術者）等を含んだ研究開発運営委員会等を開催する等、外部の学識経験者、有識者等を参画させること。
- ⑤ 本研究開発は総務省施策の一環として取り組むものであることから、総務省が受託者に対して指示する、本研究開発に関する情報及び技術開発の成果の開示等に可能な限り応じること。

（２）人材の確保・育成への配慮

- ① 研究開発によって十分な成果が創出されるためには、優れた人材の確保が必要である。このため、本研究開発の実施に際し、人事、施設、予算等のあらゆる面で、優れた人材が確保される環境整備に関して具体的に提案書に記載すること。
- ② 若手の人材育成の観点から行う部外研究員受け入れや招へい制度、インターンシップ制度等による人員の活用を推奨する。また、可能な限り本研究開発の概要を学会誌の解説論文で公表する等、将来の人材育成に向けた啓発活動についても十分に配慮すること。これらの取組予定の有無や計画について提案書において提案すること。

（３）研究開発成果の情報発信

- ① 本研究開発で確立した技術の普及啓発活動を実施すると共に、実用に向けて必要と思われる研究開発課題への取組も実施し、その活動計画・方策については具体的に提案書に記載すること。
- ② 研究開発成果については、原則として、総務省及び連携先の環境省において

インターネット等により発信を行うとともに、マスコミを通じた研究開発成果の発表、講演会での発表等により、広く一般国民へ研究開発成果を分かりやすく伝える予定であることから、当該提案書には、研究成果に関する分かりやすい説明資料や図表等の素材、英訳文書等を作成し、研究成果報告書の一部として報告する旨の活動が含まれていること。さらに、総務省が別途指定する成果発表会等の場において研究開発の進捗状況や成果について説明等を行う旨を提案書に記載すること。

- ③ 本研究開発終了後に成果を論文発表、プレス発表、製品化、Web サイト掲載等を行う際には「本技術は、総務省・環境省連携事業の『次世代省エネ型デバイス関連技術の開発・実証事業』による委託を受けて実施した研究開発による成果です。」という内容の注記を発表資料等に都度付すこととする旨を提案書に明記すること。

(4) その他 特記事項

本研究開発は、環境省との連携事業の一環としてエネルギー対策特別会計エネルギー需給勘定により実施されるものであり、環境省が行う気候変動対策の政策立案・国際交渉等を実施するにあたって参考となる本研究開発の技術的進展の成果を、必要に応じて環境省へ情報提供すること。

以上