

パワーエレクトロニクス等の研究開発の 在り方に関する検討会 中間まとめ

令和7年7月

パワーエレクトロニクス等の研究開発の在り方に関する検討会

パワーエレクトロニクス等の研究開発の在り方に関する検討会
中間まとめ

1. はじめに	3
1. 1. パワーエレクトロニクスの定義	3
1. 2. パワエレの意義	3
1. 3. 経済安全保障上の位置付け	3
1. 4. 次世代パワー半導体の登場	4
1. 5. 国際的な研究開発競争の激化	4
1. 6. パワー半導体における市場環境の変化	5
2. 我が国におけるパワエレ関連の取組と成果	6
2. 1. 我が国におけるパワエレ関連の取組の全体像	6
2. 1. 1. 内閣府の取組	6
2. 1. 2. 総務省の取組	7
2. 1. 3. 文部科学省の取組	7
2. 1. 4. 経済産業省の取組	8
2. 1. 5. 環境省の取組	8
2. 2. INNOPEL の取組:全体像	8
2. 2. 1. パワエレ回路システム領域	9
(1) AIデータセンター用サーバー電源システム	9
(2) EV 等中容量電源システム	10
(3) 高効率電動機駆動システム	11
2. 2. 2. パワーデバイス領域	11
(1) 炭化ケイ素 (SiC)	12
(2) 窒化ガリウム (GaN)	12
(3) 酸化ガリウム (Ga ₂ O ₃)	14
(4) ダイヤモンド	15

2. 2. 3. 受動素子領域	16
(1)トランス・インダクタ	16
(2)コンデンサ.....	18
3. 課題と今後の方向性	19
3. 1. 次世代パワーデバイス競争の本格化.....	19
3. 2. DX/GX の両立に向けた GaN パワーデバイス実用化加速	19
3. 3. GaN を用いたパワエレ機器トータルとしての実証の重要性	20
3. 4. パワエレ産業の状況分析	20
3. 5. AI 技術の活用	21
4. 具体的取組方針.....	22
4. 1. 方針の全体像.....	22
4. 2. GaN パワーデバイスの作り込み技術.....	23
4. 3. GaN パワエレ機器トータルとしての実証.....	24
4. 4. データマネジメント・データセキュリティ.....	26
4. 5. デバイス・材料レベルの基礎研究の推進.....	27
4. 6. まとめ.....	28

1. はじめに

1. 1. パワーエレクトロニクスの定義

パワーエレクトロニクス(以下「パワエレ」という。)は、電圧、電流、周波数等を制御して、交流から直流への変換などの電力変換を行う技術であり、その中でも、特に電力用半導体素子(以下「パワーデバイス」という。)を用いた技術の総称である。

1. 2. パワエレの意義

一般に、発電所からは、一定の周波数を持つ交流の電気が、需要者である家庭や工場等に供給されている。一方の需要者側では、家電製品やモーターをはじめとする産業機械類など、交流で駆動するもの、直流で駆動するもの、さらに適切な電圧や電流量が異なるものが様々に混在している。そのため、需要者側は発電所から送られてくる電気をそのままの形で利用することはできず、それぞれの機器が要求する適切な形に低損失で変換する工程が不可欠である。この電力変換を担う技術がパワエレであり、電化・情報化が進む現代社会を支える基盤技術であるとともに、電力利用の効率性を左右する重要な省エネ技術である。

パワエレ産業は、集積回路とともに半導体の代表的な応用分野・産業でもあり、電力用半導体(以下「パワー半導体」という。)市場は、世界全体で約 189 億ドル(約3兆円)、2030 年には5兆円、2050 年には 10 兆円市場になると試算¹される、成長市場である。

1. 3. 経済安全保障上の位置付け

グローバル供給網の脆弱性、省エネ性能の向上によるエネルギー安全保障への寄与等の観点から、パワー半導体は経済安全保障上の重要物資・技術の一つとして位置付けられている。2022 年 12 月には、経済安全保障推進法に基づき、特定重要物資として半導体が指定された。さらに、パワー半導体を含む従来型半導体及び半導体のサプライチェーンを構成する製造装置・部素材・原料の製造能力の強化等を図ることで、各種半導体の国内生産能力を維持・強

¹ 半導体・デジタル産業戦略(令和5年6月 経済産業省策定)

化する旨が盛り込まれた、半導体の安定供給確保に向けた取組方針が 2023 年 1 月に公表されている。

1. 4. 次世代パワー半導体の登場

パワエレの研究開発において、全電力損失の5割～6割がパワーデバイスに由来することから、パワーデバイスの中核であるパワー半導体が重視されてきた。材料の面からは、集積回路用途にも広く利用されているシリコン(ケイ素、Si)がパワー半導体においても主流となっており、現在でも市場全体の約 9 割が Si 系となっている。Si は、鉄道や電気自動車(以下「EV」という。)等に用いられる高電圧な電力を低損失で取り扱うことが難しい(高い電圧に耐えられるようにすると、比例して抵抗が増大してしまうことを避けられない)。そのため、高耐電圧と低損失のトレードオフを乗り越えるため、より大きなバンドギャップ²を有する新材料(ワイドバンドギャップ(WBG)半導体)を用いたパワー半導体への期待が高まっている。

次世代パワー半導体として、炭化ケイ素(SiC)と窒化ガリウム(GaN)の二つが注目されている。SiC については、例えば新幹線 N700S において、高耐電圧性に優れた SiC インバーター³が採用され、それまでの Si インバーターに比べて省エネルギー性能の向上(低損失化)と 55%の小型化を実現している。GaN については、横型 GaN(GaN-on-Si)パワーデバイスを用いた 65W 以上の USB 小型充電器やデータセンター等での省スペースな電源ユニット等が製品化されている。

1. 5. 国際的な研究開発競争の激化

既に次世代パワー半導体の社会実装は始まっているものの、SiC も GaN もいまだその材料のポテンシャルの 10 分の1以下の性能しか引き出せていない。基礎的な研究開発課題が多く残されており、技術向上の余地は大きい。SiC は製造コストが Si に比べて高く、4～8倍程度の価格差があるため、用途拡大のためには、製造コストの低減が必要となっている。GaN は、同様の製造コストの課題のほか、Si や SiC でも用いられる半導体構造の高度化の鍵となるイオン注

² 価電子帯の上部から伝導帯の下部までのエネルギー差のこと。禁制帯。この差に相当する以上のエネルギーを外部から与えることで、半導体では一時的に電気が流れるようになる。

³ 直流を交流に変換するパワエレ機器のこと。

入技術が確立しておらず、これを用いることなく作製可能な HEMT⁴構造デバイスしか実装できていない。

将来の次世代パワー半導体市場獲得には技術水準の向上が極めて重要であり、研究開発競争が国際的に激化⁵している。また、より長期的な将来を見据え、SiC や GaN を超える大きさのバンドギャップを持つ酸化ガリウム(Ga₂O₃)やダイヤモンド等のウルトラワイドバンドギャップ(UWBG)半導体も次々世代パワー半導体として研究開発競争が加熱している。

1. 6. パワー半導体における市場環境の変化

現在、パワー半導体を取り巻く市場環境がダイナミックに変化している。次世代パワー半導体である SiC の産業応用が先行しているが、2025 年7月、米国 SiC 半導体大手のウルフスピード社が米連邦破産法適用を申請したことが大きな話題となっている。この背景には EV 市場の世界的不透明感の影響、米国の政策変更、中国メーカーなどによる追い上げ等、様々な要因が指摘されている。一方で AI 技術の急速な進展に伴い、AI データセンターにおける計算処理能力の需要が急激に拡大することが見込まれている。これは AI データセンターにおける電力消費密度の増大を意味しており、これを支える適切な給電システムの構築が困難になりつつある。この課題に対応するパワエレ機器の更なる低損失化、発熱量低減、小型化といった高性能化への技術革新要求が強まっているなど、次世代パワー半導体の適用が求められる市場は多様化している。

このような中、GaN は SiC に比べてデバイス(MOSFET⁶)として低抵抗(チャネル移動度が高い)にできる可能性があるため、コンパクトなパワエレ機器で、

⁴ High Electron Mobility Transistor(高電子移動度トランジスタ)。半導体ヘテロ(異種)接合に誘起された高移動度を持つ二次元電子ガスをチャネル(電子の通り道)とする電界効果トランジスタ(電圧の印可によって電流のオン・オフを切り替える素子、Field Effect Transistor; FET)の一種。

⁵ 米国では、CHIPS 法に基づく総額 527 億ドルのマイクロエレクトロニクス全般の研究開発・製造基盤強化の一部としてパワエレ分野の研究開発を支援している他、これとは別に、エネルギー技術を推進する“The Energy Act of 2020”や“Wide Bandgap Power Electronics Strategic Framework”の枠組みに基づく政策的支援が展開されている。EU では、新産業政策・デジタルコンパス 2030 等の中長期的な政策の下、主にホライゾン・ヨーロッパや“CHIPS Joint Undertaking”において複数のプログラムが実施されている。中国では、中国国内企業による SiC の積極的な採用が見られるほか、GaN についても基礎研究・製品開発が進んでいる。さらに、5か年計画等の国家計画を中心として、IGBT(絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ)のブレイクスルー、ワイドバンドギャップ半導体への研究開発が進められている。産業政策の面でも、中央政府・地方政府が国家集成电路産業投資基金等を用いて精力的に推進している。韓国では、これまで DRAM、フラッシュメモリに主眼が置かれてきたものの、2022 年以降、パワー半導体分野に 4,500 億ウォンが投資され、SiC、GaN 関連の研究が推進されている。

⁶ Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor(金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ)。電界効果トランジスタ(電圧の印可によって電流のオン・オフを切り替える素子、Field Effect Transistor; FET)の一種で、近年の主力の一つ。

中小容量の電力をより低損失かつ緻密に制御できる利点があり、かつ原理的には EV 用途の電圧の制御にも耐えることが可能であるなど、その潜在的な適用範囲は広い。

GaN は、青色発光ダイオードの発明から連なる我が国発の技術であり、現在でもその技術水準は世界の先頭を走っている。市場環境の変化の追い風も踏まえながら、高度な技術を世界に先行して確立し、実用化を進めることが、我が国の社会全体の省エネ化、パワー半導体産業の振興、経済安全保障、いずれの政策的観点からも極めて重要である。

2. 我が国におけるパワエレ関連の取組と成果

2. 1. 我が国におけるパワエレ関連の取組の全体像

我が国では、これまで複数の府省において、それぞれの観点からパワエレ・パワー半導体に関する研究開発の取組が進められてきた。以下、各府省⁷の取組を俯瞰した上で、文部科学省において取組を進めている「革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業」(以下「INNOPEL」という。)に焦点を当てて、その成果や課題等を詳述する。

2. 1. 1. 内閣府の取組

経済安全保障重要技術育成プログラム(K プログラム)において、2024 年度から「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」を実施している。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おり、かつ既存の半導体材料では実現できない、あるい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)下での電力制御を行うデバイスのニーズが増しているという課題認識の下、上記ニーズに応え得るガリウム系材料に関する技術開発を行っている。具体的には、酸化ガリウムについて、実用を見据えたサイズ・品質・コストでウェハを生産する技術、またそのウェハを用いた高電圧帯での使用を想定したパワーデバイス・モジュールの開発を行っている。また GaN については、同一基板ウェハ(GaN-on-GaN)について、

⁷ 各府省の取組は建制順

実用を見据えたサイズ・品質・コストで生産する技術、さらに、そのウェハを用い、高電圧帯での使用を想定した高周波 HEMT デバイスの開発を行っている。

2. 1. 2. 総務省の取組

2021 年度から 2025 年度までの5年間の環境省連携プロジェクトとして「次世代省エネ型デバイス関連技術の開発・実証事業」を実施している。具体的には、高出力・高周波対応が可能でオン抵抗が低いという強みを持つ酸化ガリウムに着目し、酸化ガリウム (β -Ga₂O₃ (010⁸)) デバイスに関する結晶・ウェハ・エピウェハ製造及び各種デバイス製造に関する研究開発を実施している。

2. 1. 3. 文部科学省の取組

文部科学省では、2016 年度から 2020 年度までの5年間のプロジェクトである「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」、さらに 2021 年度から 2025 年度までの5年間プロジェクトである「革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業 (INNOPEL)」を推進している。「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」においては、GaN 等の次世代半導体を用いたパワーデバイス等の 2030 年の実用化に向けて、事業期間 (~2020 年度) までに GaN の結晶作製技術の創出と GaN パワーデバイス作製方法の目途をたてることを目標に研究開発を行った。イオン注入による p 型⁹GaN の作製や世界最小しきい値電流密度の「トンネル接合 GaN レーザー」を開発するなどの世界初・世界最高水準の成果をはじめ、大電力用デバイスの歩留まりの向上への貢献が期待できる高品質結晶製造の基盤技術の確立や、高品質結晶製造に寄与するシミュレーション技術の確立など、多数の研究成果を創出した。そして、INNOPEL では、GaN 等の次世代半導体の優れた材料特性を実現できる「縦型パワーデバイス」、その特性を最大限に生かすことができる「パワエレ回路システム」、その回路動作に対応できる「受動素子¹⁰」を創出し、超省エネルギー・高性能なパワエレ技術の創出を目指した研究開発を実施している(詳細は後述)。

⁸ ミラー指数(結晶の格子面を示す表記法)による表記。以下同様。

⁹ 電荷を運ぶキャリアとして正孔(ホール、価電子帯の電子が不足した状態のこと)が使われる半導体。

¹⁰ キャパシタやコンデンサなどの供給された電力を消費・蓄積・放出する素子。パワーデバイスによる電流の切り替えによって生じる電力の変動を滑らかにする、エネルギーを一時的に蓄積して電圧の変化をもたらすといった効果を得るために用いられる。

2. 1. 4. 経済産業省の取組

経済産業省では、2014年度から2019年度までの6年間のプロジェクトである「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」、2021年度から5年間のプロジェクトである「省エネエレクトロニクスの製造基盤強化に向けた技術開発事業」を実施している。さらに、パワー半導体については、グリーン・イノベーション基金において、SiCを中心に、更なる高性能化、高効率化、低コスト化を実現するため、ユースケースに適した革新的なデバイス、モジュールの開発を進めるための「次世代パワー半導体デバイス製造技術開発」や次世代半導体材料ウェハの大口径化等の開発を進めるための「次世代パワー半導体に用いるウェハ技術開発」を実施している。

2. 1. 5. 環境省の取組

省 CO₂性能の高い革新的な部材や素材(GaN 及びセルロースナノファイバー)を活用し、実機搭載における低コスト化、安全性、信頼性、省エネ効果、品質向上策等に関する実現可能性調査(FS)及び技術開発・実証を実施し、これらの部材や素材の早期の社会実装による大幅な CO₂排出削減を実現することを目的とし、「革新的な省 CO₂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」を実施。これまで GaN 結晶の低欠陥・高品質・大口径化の手法開発を進めるとともに、GaN 基板を用いた縦型 GaN デバイスの産業用電力変換機器や車載機器への搭載、実証に取り組んでいる。

2. 2. INNOPEL の取組:全体像

INNOPEL では、個別の用途(ユースケース)を想定した回路システム設計研究、GaN を中心に、SiC や次々世代パワー半導体として期待される Ga₂O₃やダイヤモンドを用いたパワーデバイス研究、受動素子研究の三つの研究領域を設定している。基本的には、それぞれの領域で研究開発が進められているものの、事業開始当初から掲げる「パワーエレクトロニクス機器トータルとしてまとめあげる」という理念に基づき、「紳士な研究者として公明正大でオリジナリティを尊重しつつ情報交換・連携して革新的パワエレ技術を構築する」との運営方針に従って、事業マネジメントを担うPD・POの助言・指導の下、例えば、回路設計の

要求をパワーデバイスや受動素子の研究領域側へフィードバックするなど、研究領域間を横断した連携が試行されてきた。この連携の成果として、これまで回路設計の研究では困難と思われていた事項(飽和磁束密度¹¹を保ちつつ、一定の範囲内で透磁率¹²を変更すること¹³)が実は受動素子側で解決できる可能性があることが見出されるなど、重要な進捗が得られている。また、PD・PO のマネジメント理念の個々の研究者への浸透も進んでおり、自発的な領域横断的なコミュニケーションも新たに生じるようになってきている。以下に、パワエレ回路システム、パワーデバイス、受動素子のそれぞれの領域での研究開発の進捗を踏まえた今後の技術課題について整理する。

2. 2. 1 パワエレ回路システム領域

パワエレ回路システム技術の本質は、電力を高効率に供給・制御することである。常に新たな技術分野を取り込みながら、様々なアプリケーションに対し、高度に統合的な技術開発を進めることが求められる。具体的には、小型化、省エネルギー化といった基本的要求に加え、パワエレ機器の信頼性や寿命・故障推定、ライフサイクル負荷低減やリサイクル適性等の環境適応性、高調波¹⁴・電磁界ノイズ(EMC: Electro Magnetic Compatibility)対策等がアプリケーションに応じて要求される。以下に INNOPEL での取組と社会状況を踏まえ、今後より重要と考えられるパワエレ回路システムの現状と課題を述べる。

(1) AIデータセンター用サーバー電源システム

社会全体の DX 化(デジタルトランスフォーメーション)及びその中核を担う AI 技術の進展によって、AI データセンターの需要が急伸している。2030 年には、世界の AI 関連の計算に必要とする電力量は日本の年間総消費電力量を上回る規模となる可能性¹⁵がある。気候変動への対策として社会のGX化(グリーントランスフォーメーション)も同時に求められる中、この電力需要の急伸を満たす

¹¹ 外部磁場を印加してもそれ以上磁束密度が増加しなくなる(飽和する)磁束密度のこと。飽和磁束密度が高いと強力な磁石となる。

¹² 印加する磁場の強さと磁束密度の間の比例定数。透磁率が高いと印加する磁場の強さに対して、磁束密度が大きく増加することになる。

¹³ 言い換えれば、磁石としての最大の強さは保ったまま、その強度に達するまでに必要な磁場の強さをある程度変更できること。

¹⁴ 交流の基本波に対する整数倍の周波数成分をもつ波形のこと。交流から直流への変換の際に発生し、機器の故障等の原因となる。

¹⁵ 半導体・デジタル産業戦略(令和5年6月 経済産業省策定)

ように電力供給を増加させることは極めて困難であり、省エネ化が強く求められている。そのためには、計算用集積回路(IC)の省電力化に加えて、計算用 IC に電力供給を行う電源システムで生じる電力損失の低減(高効率化)が不可欠である。また、計算用 IC の超高集積化に伴い、サーバーラック当たりの電力消費量も増大しており、これ以上の集積化が進むと大電力を供給するサーバーラック側のコンバーター¹⁶が大型化してサーバーラックの体積を圧迫し、結果的にかえって AI データセンターの面積当たりの計算効率の低下をもたらすという可能性が指摘されている。その解決には、例えば、サーバーラックへの供給電圧の高電圧化など、大電力に対応した小型化と高効率化を両立した新しい電源システムの開発が求められる。

(2)EV 等中容量電源システム

EV 等の比較的大きな電力を扱う用途では、電力損失に伴う発熱が大きい。熱による抵抗の増大は電力効率の低下をもたらすし、また部品の劣化・損傷などにもつながることから、冷却が重要である。これらの用途では、放熱器の体積の増大などの問題から冷却効率の良い水冷式が採用されることが多くなっているが、水タンクや循環させる機構などの装置でやはり体積や重量を一定程度圧迫することになり、車体の軽量化や燃費の向上といった面で不利な要素となっている。

パワエレ機器の小型化にはパワーデバイスの高周波動作などのアプローチがあり得るが、高周波動作は損失量を増大させ、冷却システムの大型化をもたらす可能性がある。そのため、もう一つの損失減である受動素子の損失低減等によって高周波動作によるパワエレ機器の小型化と損失量の低減を両立させ、冷却システムまでを含めた電源システムトータルでの効率化と小型化を実現することが求められている。このような冷却システムまで含めた高効率化と小型化が実現することによって、ドローンのように重量が特に課題となる機器においても大型化の可能性が見いだせるなど波及効果が見込まれる。

¹⁶ 交流を直流に変換するパワエレ機器。

(3) 高効率電動機駆動システム

産業用電力の過半はモーター用途に消費されており、省エネ化の観点からはモーター給電の効率化は極めて重要な課題である。また EV 用途ではモーターの効率化に加え、小型化・軽量化等への要請からインバーターとモーターがモジュールとして一体化した機電一体型モーターも注目を浴びている。これらの用途のパワー半導体には、高耐電圧・低損失・高周波動作に加え、モーターからの回生電力によって一瞬だけ生じる短時間過電圧に対するアバランシェ耐性も重要である。また、我が国が世界の 47%(2020 年)の生産量を占める産業用ロボットにおいても、その動力源であるモーターの小型化・効率化が重要な競争軸となっており、やはり機電一体型モーターが注目を浴びている。

加えて、今後の展開が期待されているサービスロボットでは、触覚センサー等を駆使し、ロボットハンドの握力を操作者に逆伝搬するハプティクス技術が手術用ロボットの鉗子(かんし)制御に導入されるなど、新しい技術が進展しており、これを支える緻密な電力制御などの新たな需要も生まれている。

2. 2. 2. パワーデバイス領域

新たなパワエレ機器の社会実装を加速していくためには、INNOPEL における取組の経験を踏まえ、パワーデバイス(FET¹⁷、ダイオード)等の要素技術開発の段階からシステム応用の開発を並行してスタートすることが肝要であり、パワーデバイスの完成度が十分ではない段階からでも可能な限りシステム応用に展開して技術課題をパワーデバイス開発へフィードバックしていく取組が重要である。

次世代・次々世代パワーデバイスの普及が進むと、汎用化による競争の激化が想定されるため、HVPE¹⁸による低コストのエピタキシャル結晶成長技術などのプロセス技術や周辺技術の研究開発も並行して進めることが重要である。さらに、次々世代パワー半導体では、p 型または n 型¹⁹半導体の作製が困難という課題も生じていることから、HVPE や MistCVD²⁰の多元混晶、ヘテロ接合へ

¹⁷ Field Effect Transistor(電界効果トランジスタ)

¹⁸ Halide/Hydride Vapor-Phase Epitaxy

¹⁹ 電荷を運ぶキャリアとして自由電子が使われる半導体。

²⁰ Mist Chemical Vapor Deposition

の展開に向けた新しいアプローチでの研究開発も期待される。以下、次世代・次々世代パワー半導体材料ごとにこれまでの取組と今後の課題をまとめる。

(1)炭化ケイ素(SiC)

理論的には現在主流のSiに比べ大幅な省エネルギー化・高性能化が可能である。大きいバンドギャップに由来する優れた耐電圧性を活かし、中耐電圧領域(EV、鉄道車両等)において、SiC-MOSFET パワーデバイス製品の普及が急速に進みつつある。一方、実用化されているパワーデバイスのチャネル移動度は材料特性から期待される値の10分の1以下であり、その性能を引き出すには遠く及んでいない。そのため、SiCの性能を引き出すための基礎研究が行われているが、十分な解決策が見いだせていない状況であり、継続的な取組が求められている。また、SiC基板も含めた製造コストの高さは、適用拡大に向けた大きな課題となっている。今後は、電力ネットワーク等への高耐電圧領域への適用も期待されるが、高品質SiC厚膜成長技術・キャリア寿命制御技術・実装技術等にも課題が残されている。

(2)窒化ガリウム(GaN)

理論的には現在主流のSiに比べ大幅な省エネルギー化・高性能化が可能である。さらに、SiCと異なり、横型GaN構造(GaN-on-Si)のパワーデバイスで高速スイッチングが可能という特性があり、この特性を活かした小型の高速充電器が市販されている。

さらに、最近の研究成果でデバイス(MOSFET)としてチャネル移動度をSiCの数倍程度にできることが明らかになった。これは、中・低耐電圧領域(1kV程度以下)では、高いチャネル移動度を生かして、SiC以上の低損失化を実現できる可能性があることを示唆している。

我が国は、GaNの結晶創生・デバイス作製の基礎研究において世界トップレベルである。INNOPELでは、低損失・大容量・高耐電圧パワーデバイスとなり得るGaN-on-GaN縦型パワーデバイスの研究開発に取り組んできた。名古屋大学が世界で初めて開発したp型イオン注入技術を発展させ、パワーデバイス作

製に利用可能な制御性の実現に取り組み、縦型 GaN JBS²¹ダイオードを試作し、その実装・評価を実施中である。INNOPEL 終了時までには 10 A クラスの縦型パワーMOSFET でのデバイス実証まで進める予定である。また、MOS 界面²²の制御により、チャンネル高移動度化において世界トップレベルの成果を創出している。

今後、我が国が蓄積してきた GaN の技術を活かし、多くの応用分野における革新的な省エネ・高性能化につなげていくことが重要である。そのためには、イオン注入技術の完成が不可欠である。イオン注入技術は、Si や SiC でも活用されている、複雑な構造を持つパワー半導体素子を作製するための重要技術である。実際、実用化されている GaN パワーデバイスは、イオン注入技術を使わずに作製可能な HEMT 構造のデバイスのみである。イオン注入技術が確立することで、例えば、耐電圧性を保ったままオン抵抗を引き下げる超接合構造のように Si や SiC で用いられている多様な構造を形成できるようになり、GaN の持つ可能性²³を一気に拡大させることが可能となる。イオン注入技術の完成のためには、ボトルネックとなっているイオン注入後のアニーリング(焼きなまし)プロセスの高度化が必要である。現在は、既存の装置を INNOPEL で改修したものをを用いて研究が行われているが、GaN 専用の装置ではないためアニーリングの際の不純物の混入等の問題が生じており、イオン注入技術の確立に向けた研究開発のボトルネックとなっている。そのため、世界初となる GaN 専用の高温高圧アニーリング装置²⁴を開発し、このボトルネックの解消が不可欠である。

GaN 基板については、我が国の企業が世界のトップシェアを誇っており、今後求められる安価・高品質・大口径の GaN 基板製造に向けた技術開発も進められている。高品質・高生産性を併せ持つ低コスト製造技術である低圧アモノサーマル法により、4インチ GaN 基板の商品化が進められている他、6インチ基板の開発も進んでいる。ただし、GaN 基板の価格は非常に高価であり、GaN の利用拡大によって一定の価格低下が期待されるが、Si との競合との観点からは SiC と同様にボトルネックとなり得る課題である。レーザースライス技術の応用

²¹ Junction Barrier Schottky

²² MOSFET における半導体とその酸化膜との界面

²³ 例示した超接合構造を縦型 GaN パワーデバイスに導入できるようになった場合、既存の SiC パワーデバイスと同程度のコストで、オン抵抗が 10 分の 1 のデバイスを作製できる可能性があると試算。

²⁴ GaN は加熱すると窒素が脱離してしまうため、高圧高純度の窒素ガス条件下で加熱する必要がある。

可能性の実証などに並行して取り組むことで、技術とコスト見通しの両面から民間企業が GaN パワーデバイスへ参入するための障壁の打破に取り組み、我が国が育ててきた GaN パワーデバイス技術を次世代パワー半導体産業、次世代パワエレ産業へ橋渡すことが重要である。

他方、GaN の材料面の基礎研究を着実に進めていくことも重要である。特に、EV等の中電力容量での産業応用では、故障が致命的な事故につながるものがしばしばあり、材料としての安全性・信頼性が強く求められる。そのような観点からは、GaN はSiやSiCに比べて結晶欠陥等に関する基礎的な知見が少なく、産業応用に向けた知見の蓄積を着実に進めていくことは非常に重要である。また、GaN 本来の強みを生かし得る中・低耐電圧領域での省エネルギー性能を高めるための MOS チャネル抵抗低減としきい値電圧の低下や、その温度依存性の抑制の両立に向けた GaN の分極の抑制等の基礎研究も重要である。さらに、GaN は材料特性として電子移動度の高さに強みがあるが、これを高周波動作などの形でメリットとして十分に引き出すためには回路設計や受動素子の高度化も不可欠である。INNOPEL では、このことを念頭に回路システム領域や受動素子領域の研究開発のマネジメントを行ってきたが、GaN パワーデバイスの実物を供給するには至っていないため、INNOPEL の全体としては残された重要な課題である。

(3) 酸化ガリウム (Ga_2O_3)

高品質なエピタキシャル結晶成長技術²⁵が開発されており、デバイス応用も進められているが、基礎物性の解明が不十分である。また、デバイス応用において、p 型結晶が得られないことが大きなボトルネックとなっており、p 型結晶を作製可能な異種材料とのヘテロ接合等が想定されるが、複数の選択肢が存在するため、得られる可能性のある特性の幅が非常に広くなることが予想される。基礎物性の解明、より優れた材料特性を得るための探索的な基礎研究が重要な段階にある。

²⁵ 基板上に薄い単結晶半導体結晶層を形成させる技術。

また、酸化ガリウムはバルク結晶を融液から作製可能なため、原理的にはバルク結晶作製コストを低く抑えることができることが大きな魅力となっているものの、既存の EFG²⁶法や垂直ブリッジマン法²⁷では、白金族元素であるイリジウムるつぼや白金/ロジウムるつぼが必要となり、いずれも極めて高価であることから、現状、その作製コストは極めて高い。INNOPEL ではこのコスト低減に向けたるつぼフリーの結晶作製法の確立に向けた基礎研究を進めている。

(4)ダイヤモンド

ダイヤモンドは極めて大きなバンドギャップに加え、高い熱伝導性等を兼ね備えた究極のパワー半導体材料として期待されている。INNOPEL では、パワーデバイス作製に向けた基礎研究を進めている。

現在、p 型 MOSFET 用のダイヤモンド単結晶基板として、(001)面のものが市販されているが、パワーデバイス応用の前提となる反転層ダイヤモンド MOSFET を実現するためには(111)面のダイヤモンド単結晶基板が望ましく、その開発が期待される。現在はヘテロエピタキシャル基板で1インチ径、単結晶基板ではハーフインチ径であることから、更なる大口径基盤の開発も望まれる。水素ターミネート²⁸の p 型 MOSFET 構造デバイスの応用が盛んであり、2 kV 以上の耐電圧性も得られている。近年では、しきい値電圧の大きなノーマリーオフ動作の実現のためにシリコン終端チャンネルの開発が始まっている。大電流化に向けて縦型 MOSFET の開発も開始され、5 A 以上の実電流が得られている。

ダイヤモンドでは十分な特性を持つ n 型結晶が作製できないという課題があり、n 型結晶材料とのヘテロ接合等による応用可能性の探索・拡大と機能実証も重要な課題である。他の材料と異なり p 型デバイスが実現できるため、n 型デバイスとの共有など従来と異なる視点でのパワエレ機器への適用の可能性の検討は、他の化合物半導体への貢献の意味からも今後重要となると考えられる。

²⁶ Edge-defined Film-fed Growth 法。引き上げ法による単結晶育成方法の一種。結晶方位制御が容易・育成速度が速い・断面形状の制御が可能といった特徴がある。

²⁷ 単結晶育成方法の一種。原料を坩堝の中で溶融させた後、坩堝を一定速度で下方に移動させながら融液を下端から固化させて単結晶を作製する方法。作製する基板の大口径化・高品質化が期待できる。

²⁸ 最表面の炭素原子が水素と結合して安定化している状態。

2. 2. 3. 受動素子領域

受動素子には、開発するシステムごとに全く異なるパラメーター、異なる特性の組み合わせが要求される。しかしながら、これまでの受動素子開発では、素子開発側と回路システム側それぞれから他方への一方通行の関係しか築かれていないことがしばしばあり、相互のニーズを汲み取り切れない関係が続いてきた。磁気素子の開発を例にとれば、回路システム側では開発するシステムごとに求められる具体的な特性を十分に明らかにできないまま、低損失性・飽和磁束密度・透磁率という三つのパラメーターを高めるという大枠の開発方針の下で磁気素子開発を期待してきた。一方、磁気素子開発側では、特に磁性材料の飽和磁束密度を高めることを目指す伝統の下に材料開発を継続してきた。そのため、回路システム側の開発方針、例えば、用途に応じて高飽和磁束密度よりも低鉄損を求めるといった要求とは十分に一致しないまま研究開発が進められるといったことが生じ、隘路に陥っていた。INNOPEL では、素子の材料のレベルに踏み込んで受動素子の多様な特性を引き出す基礎研究を行うとともに、回路システム領域との連携を促し、回路動作の要件を材料・素子開発にフィードバックする体制を構築している。以下に受動素子ごとの研究開発の現状と課題を述べる。

(1) トランス・インダクタ

日本発で世界に普及した材料である鉄基ナノ結晶材料について、INNOPEL では従来素子の損失を更に半分にする成果を挙げている。産業上の強みに結びつけるため、微結晶化技術・脆化抑制技術・低応力磁心形成技術等の量産化に向けた技術課題の解決に取り組むことが重要である。また、未解明の部分が多い粒子径バラツキと材料の磁気特性、デバイス特性との関係等の解明も重要な課題である。

磁性体の損失発生機構の解明は、過去 30 年以上大きな進展がなかったものの、最近になって磁歪²⁹(じわい)が損失の原因となるという理論が提唱された。INNOPEL では、この理論を検証し、磁歪起因損失理論の確からしさが実証された。この成果は、主要国際学会での基調講演・招待講演にも多く招待されるなど、国際的にも高く評価されている。磁歪起因損失理論の適用可能範囲を

²⁹ 磁場を与えると磁性体が伸縮する現象

明らかにすることができれば、パワエレ用磁気素子の低損失化に寄与することが期待される。

また、磁気素子の温度上昇を低減するためには、磁心形状の設計自由度を十分に確保し、磁性体、巻線、実装を横断して放熱性の高い磁気素子としてまとめ上げることが重要である。フェライト磁性材料は磁心形状の設計自由度が他の磁性材料に比べて格段に高いため、この目的に最適である。そのため、今後は、フェライト材料の低損失化のための研究開発に注力することが重要と考えられる。特に、MnZn フェライト材料ではヒステリシス損失の低減（保磁力の低減）、NiZn フェライト材料では高周波帯における残留損失の低減が、パワエレ回路システムにとって有効である。この際、INNOEL で開発された時間分解ベクトル磁区観察装置によって、従来多年にわたり不可能とされてきたフェライトの磁区観察が可能となったことと、磁歪起因損失理論等を活用し、理論と実測の両面から研究開発を進めることは今後の我が国の強みとなり得る方向性である。

さらに、直接的なパワエレの研究開発とは異なるが、最近、IPM³⁰モーターの課題解決のため、理想的な軟磁性材料の特性をトップダウンで示し、この方針に則った新しい軟磁性材料開発で成果を挙げた事例が出てきている。これまでのモーター開発は、無方向性電磁鋼板やアモルファス/ナノ結晶合金などの今ある材料を前提に、モーターの試作と評価を行うボトムアップ型のアプローチが主な形であったことと対比して、新しい発想に基づく方向性となっている。同様の発想はパワエレの研究開発において幅広く適用可能と考えられるところであり、注目する価値がある。また、モーターはパワエレで駆動する産業機械の中でも主要なものであるとともに、磁性材料という側面からは共通した応用分野であることから、双方を横断的・俯瞰的に眺める視点も今後の研究開発では重要である。

上記を横断的に踏まえて、今後はパワエレ回路システム側での AI の活用、受動素子側での MI (Materials Informatics) の活用を連携させ、両者がシームレスにつながることを重要である。現状では、回路システム側では、設計・制御・保守等に AI が活用されているのに対して、磁気素子側では、磁性体の物理基

³⁰ Interior Permanent Magnet (磁石埋め込み式の同期モーター)

礎特性と機械特性との関係が MI を用いて主に議論されており、パワエレ用途での活用としては飽和磁束密度を目的関数とした MI の活用が一部始まった段階に留まっている。しかし、回路システム側から見れば、磁気素子側の目的関数には透磁率と損失も不可欠であり、しかもインダクタ、トランス、モーター等の用途によってそれらの重要性は異なる。そのため、回路システム側の定性的な要求を磁気素子のパラメーター（飽和磁束密度、透磁率、損失等）にAIで翻訳し、さらにこれに応える磁性体の開発指針を、MIを活用して具体的に見いだすことができるような研究開発の在り方の構築を目指していくことが重要である。

(2) コンデンサ

フィルムコンデンサは、車載用主機インバーターの直流電源接続用 DC リンク回路、スナバ回路³¹などに用いられている。直流用途の誘電体としてはポリプロピレンの薄膜が主流であったが、瞬間的な高電圧・高電流への耐性を維持した薄膜化への限界が近づいていることから、新たなアプローチが求められている。具体的には、フィルムコンデンサ素子内での空間電荷分布が均一になるように設計することで、薄膜上の絶縁破壊箇所を減らし、一層の薄膜化を許容できるようにするアプローチなどが考えられるが、その場合の薄膜材料には高い耐熱性と、大きな誘電率が必要となり、そのような特性を満足する材料開発が並行して求められている。

セラミックコンデンサは、小型で高信頼性（長寿命）、低 ESR³²のため、幅広い電子機器に用いられている。今後も情報端末の薄型化や高性能化、また電子機器や自動車等の高性能化の進展により使用品数の増加が見込まれるが、そのためには更なる小型化・大容量化が求められる。これを実現するためには誘電体層の薄膜化と高信頼性の両立を目指した材料とプロセス技術の開発が必要となる。INNOPEL では、高温・高電圧下での安定性や信頼性劣化を大幅に改善した新材料を開発したが、新材料の有する特性を積極的に用いた用途開拓のためには誘電率の変化率の向上など、更なる研究開発が必要な状況である。

³¹ 電気回路中で、スイッチの遮断時に生じるスパイク状の高電圧を吸収し、スイッチ自身や周辺の電子部品の損傷を防ぎ電磁ノイズを最小化するための回路。

³² Equivalent Series Resistance: 等価直列抵抗(コンデンサ自身が持つ抵抗の大きさ)

アルミ電解コンデンサは、大容量・安価という特長を有し、PWM³³インバーターなどに広く利用されている。低寿命で損失も大きいという欠点は過去のものとなり、105°C、10,000 時間品や、車載向けの 135°C品の製品化が実現されている。また、機能性高分子とのハイブリッド化により 80 V まで製品化されており、アルミ電解コンデンサの電解液による温度特性が克服されて、DC-DC 電源の DC リンク(平滑回路)などに利用されている。INNOPEL では、導電性高分子タイプ電解コンデンサについて、ESR が小さく高周波特性に優れる特長に加えて、高耐電圧化・高耐熱化に取り組んでいる。誘電体電極皮膜へのナノボイド分散層導入や、アルキル基導入 PEDOT:PSS³⁴高分子開発により 450 V、150°Cの積層型コンデンサの性能検証が進んでいる。ただし、EV 等への需要に応えるためには、更なる高耐電圧化(1,000 V)が必要である。

3. 課題と今後の方向性

3. 1. 次世代パワーデバイス競争の本格化

INNOPEL によって縦型 GaN パワーデバイスの実証ができれば、技術成熟度としては不十分ではあるものの、次世代パワー半導体である SiC と GaN の双方で、基本的なパワーデバイスの選択肢がそろうことになる。SiC は高耐電圧領域、GaN は小容量で小型化が重要な領域と、それぞれが特性を生かすことができる領域で市場投入が始まっているものの、既存市場の9割はいまだ Si パワー半導体が占めているのが現状であるが、いよいよこの大市場を次世代パワー半導体で置き換えていく環境が整いつつある。

3. 2. DX/GX の両立に向けた GaN パワーデバイス実用化加速

社会全体のDX化の進展に伴い、AIデータセンターの需要が急伸し、このままでは電力需要が供給力を大幅に超過することが見込まれる中、社会全体の省エネ化・GX化を積極的に進めていくためには、既存の Si パワー半導体市場から次世代パワー半導体への置換えを政策的に加速することが必要。GaN は、SiC ほどの高耐電圧性を実現することは困難だが、既存市場の置換えを想定す

³³ Pulse Width Modulation

³⁴ ポリ(3,4-エチレンジオキシチオフェン)(PEDOT)とポリスチレンスルホン酸(PSS)から成る複合物。導電性ポリマーの一種。

ると、その多くの部分と重なる中小容量に適性が高く、重要な新市場である EV 用途にも適用可能であり、新たな付加価値によるイノベーションをもたらし得る。また、半導体産業は、非常に大きな初期投資が必要なため、可能な限り単一の半導体材料で多くの市場を獲得することが産業構造上重要であり、その観点からも市場の大部分に適性が高い GaN は有望である。しかし、先述のとおり、GaN の技術水準は、SiC に比べて未熟であり、産業界が本格的に GaN の研究開発・実用化に参入するよう、少なくとも SiC と同程度の技術成熟度、特有の優位性の実証まで加速することが必要である。

3. 3. GaN を用いたパワエレ機器トータルとしての実証の重要性

パワエレの性能は、デバイスの性能の単純な足し算として決まるものではなく、多数のパラメーターを持つ最適化問題として考えなければならないものである。そのため、Si から GaN のように大幅に性能が向上したパワーデバイスをパワエレ機器に実装するに当たっては、ただ旧来のパワーデバイスを新しいパワーデバイスに入れ替えれば、機能が向上するというわけではない。GaN パワーデバイスを適用しようとする具体的な機器ごとに、GaN パワーデバイスの特性に合わせた回路構成や受動素子等の最適化が行われることが必要である。また、その結果を GaN パワーデバイスの研究開発にフィードバックしていくことも重要である。このサイクルが、企業活動として自律的・継続的に回されていくことが理想的状態であるが、以下述べるように現在のパワエレ産業の特性から、自発的にこのサイクルが始動することは困難であると考えられることから、その始動を政策的に後押しすることが必要である。

3. 4. パワエレ産業の状況分析

我が国において、パワエレ産業が大きく成長した 1970～1980 年代には鉄道等のインフラ整備における明確なパワエレ需要が研究開発を牽引し、その成果である優れたパワエレ製品が市場に投入され、次の研究開発につながるという好循環が成長を促した。その後は、家電製品の領域へと需要がシフトし、更なる研究開発と市場の拡大へつながった。大きな成長市場が見えていたことで、人・時間・予算面で高コストなパワエレ開発に投資することが可能であり、それが技術的な成長を支えていた。しかし、その後、市場の多様化が進み、投資回

収が困難になり、技術開発への投資も先細るとい流れに移ってしまった。現在、我が国のパワエレ産業は明確な次の大需要を見出すことができていない一方で、海外の競合は新たな需要先と密接な関係を築き、求められるパワエレ機器の具体的な要求性能の情報を先んじて入手し、研究開発に早期に着手することで、新たな需要を囲い込んでいる。

このような構造は、技術的な観点からは、パワエレ機器の開発が技術者の経験と勘に大きく依存していることに一因を求めることができる。パワエレ機器の開発において、学理に基づくシミュレーション技術は多用されており、技術的成熟も進んでいる。このような開発方法は、技術者の経験と勘に基づき、様々な候補の中から初めに要求を満たすような回路方式・制御方式、さらにパワーデバイスや受動素子の候補を選定し、設計を仮定し、それを出発点として徐々に完成形に近づけるというプロセスを前提としている。そのため、技術者の経験と勘に基づく、初めの仮説設定がうまく働かない場合には、このプロセスは十分に機能しない。すなわち、新しい需要を満たすパワエレ機器には、多くの場合、これまでにない性能要求が課されることになるため、この開発は技術者の経験と勘に基づく初めの仮説設定がうまく働かない典型的なパターンとなる。このため、新たな需要、これまでにない性能要求をできるだけ早期に、かつ具体的に捉え、開発のリードタイムを確保することが、技術競争における決定的なアドバンテージをもたらすことになる。

3. 5. AI 技術の活用

上記の分析に基づくと、今後更なるパワエレの活用範囲の多様化が進む中、技術者の勘と経験に過度に頼らず、どのようなパワエレ機器の要求に対しても、一定の精度をもって仮説となる初期設計を効率よく提案でき、それに基づき多様なデバイス等を適切に開発あるいは組み合わせる新たなパワエレ機器を開発できる技術や研究開発体制があれば、我が国のパワエレ産業の長期的な競争力を確立するとともに、イノベーション基盤の高度化による波及効果、経済安全保障の強化などに資するものとなることが期待される。

この観点から、パワエレ分野ではこれまであまり活用されてこなかった AI・数理モデルの活用で解決の道筋を見出すことができる。機械学習(AI の一種)は、大量のデータの組から、その具体的な相関関係を推定する技術である。そのた

め、具体的な設計とそれに基づき実際に組み立てられたパワエレ機器の性能データの組を機械学習することで、目指す対応関係を見出すことができると考えられる。このような取組は産業界において重要であるのみならず、パワエレ研究開発の在り方を変革し、新たな成果の創出のみならず、成果創出の循環を加速することが期待されることから、積極的に取り組むことが必要である。

この際、従来 AI とは別個に進展してきた MI と連携推進することが、低損失な受動素子を開発しパワエレ分野に資するために有効である。磁気素子等の材料分野でも日本が強いことは国際的に認知されており、その強みを生かすことが可能となる。

また、今後の人口減少を踏まえ、国内での熟練したパワエレ技術者の確保が困難になることが見込まれることから、技術者個々人の能力への依存を低減していくことが重要である。

4. 具体的取組方針

4. 1. 方針の全体像

社会全体の急速な DX 化とそれに伴う電力需要の急伸により、社会の GX 化との両立が困難なものとなりつつある。パワエレの高度化により、社会全体の省エネ化を強力に推進することが必要である。そのための鍵となるのは、既存市場の太宗を占める Si パワー半導体の GaN パワー半導体への置換えであり、それによるパワエレ技術の次世代化である。これを達成するため、今後取り組むべき研究開発として INNOPEL の成果を踏まえ、以下残されたボトルネック課題の解消を図ることが必要である。その際、若年層の減少による技術者不足が問題となる中、AI 技術を活用し、勤と経験に過度に頼ることなく、パワエレ機器側の性能要求に応える新たな研究開発の在り方の確立を図ることも重要である。

① GaN パワーデバイスの作り込み技術

- GaN のイオン注入技術を完成させるため、産業応用も見据えた6インチウェハ対応の世界唯一の高温高圧アニーリング装置の開発
- 我が国が開発したイオン注入技術の高度化
- 通電時の抵抗(オン抵抗)の更なる低減に向けた超接合構造作製技

術の確立

② GaN パワエレ機器トータルとしての実証

- GaN パワーデバイスのポテンシャルを引き出すための複雑な最適化問題を効果的に解決するため、AI・数理分野の知見・技術を取り入れつつ、研究者がチームを組んで GaN パワーデバイスの特性を引き出す回路・受動素子等を開発するとともに、GaN パワーデバイスを用いたパワエレ実機を試作・検証。

4. 2. GaN パワーデバイスの作り込み技術

イオン注入技術は、半導体結晶に目的とするドーパントを導入した後、加熱して活性化する一連の加工技術のことである。本来の意味での半導体とは、導体と絶縁体の中間的な抵抗値を示す物質のことであり、ここに適切な不純物を適切な量添加することで、必要に応じて電流を流す・流さないという状態を切り替えることができるようになるというのが、半導体素子の重要な点である。そのため、イオン注入技術は、半導体素子作製の中核的な技術であり、これが適用できないと半導体素子作製の幅は著しく制限される。そのため、GaN パワーデバイスの市場拡大のためには、GaN 用イオン注入技術が決定的なボトルネック課題となっている。

INNOPELをはじめとするこれまでの研究開発の成果によって、ドーパントにマグネシウム(Mg)を使用したイオン注入技術の基本的な仕組み(Mg イオンを高電圧で加速し、イオンビームとして GaN 基板へ照射し、照射後の GaN 基板を高温高圧アニーリング処理)が構築されている。最後の高温高圧アニーリングについては、数千気圧以上もの高純度窒素ガス条件下で、1,500°C程度に加熱するという GaN 特有の条件での処理が必要であり、これを可能とする汎用機器は存在していない。現在の研究開発は、既存装置を改修したものを用いて進められているが、元々の装置の性能に由来して、高圧・高純度窒素ガス条件を維持することが難しいなどの限界がある。このため、アニーリング処理に際して意図しない不純物が混入して試作デバイスの機能が著しく低下するといった問題が生じ、研究開発が停滞している。そのため、この高温高圧アニーリング装置が今後の発展へのボトルネックとなっており、専用機の開発を急ぐ必要がある。

開発に当たっては、処理可能なウェハのサイズを6インチとすることが重要である。今後、パワーデバイスの試作品を他のアカデミアや産業界といった外部に提供することが求められていくことになるが、現在の装置では小サイズのウェハしかアニーリング処理できず、量産性に著しい課題がある。将来の産業化においても、アニーリング処理の量産性の打破は重要な課題になることが予想されることから、開発する高温高圧アニーリング装置には産業化に最低限必要とされる6インチウェハを一括処理できるスペックが必要である。また、高温高圧アニーリング装置の開発に当たっては、その超高圧に耐えられるよう原子炉と同様に金属の塊を削り出して炉を作る必要があり、技術的な難易度が非常に高い。6インチウェハを処理できる装置開発を行うことは、将来、海外が追い付くことが困難な高い技術的優位性を形成することにもつながるものであり、極めて重要なポイントである。

イオン注入技術は、多様なデバイス構造を形成するための鍵となる技術であり、その基本技術を完成させるとともに、早期に Si パワー半導体の置換えを進めていくためには、イオン注入技術を用いて新しい GaN パワーデバイスの価値を実証していくことも重要である。取り得る選択肢は多いが、GaN はその結晶構造に由来して、一度のイオン注入で結晶の深い位置にまでイオンが注入される特徴を活かし得る超接合構造が有力な候補となる。超接合とは、結晶中に p 型半導体の性質を持つ部分と n 型半導体の性質を持つ部分を交互に形成した構造であり、耐電圧性を一定程度保ったまま電流の抵抗を引き下げることが可能である。そのため、縦型 GaN パワーデバイスに適用した場合、高い耐電圧性を持ち、かつ競合する SiC より大幅に損失が少ない超高機能なパワーデバイスを安価で提供できるようになることが期待される。

4. 3. GaN パワエレ機器トータルとしての実証

GaN パワーデバイスの作り込み技術が完成しても、パワエレ機器の性能はデバイスの性能の単純な足し算として決まるものではない。例えば高周波動作が可能であるということは一般的には電力制御を滑らかにし、体積の多くを占める受動素子の体積を小さくすることができるようになることからメリットの多い特性である。しかし、そのメリットを十分に引き出すためには回路設計や受動素子の最適化が不可欠である。現在のパワエレ機器において、トランジスタ・ダイオー

ド・インダクタ・トランスの各要素由来の損失はほぼ同程度となっており、素子ごとのメリット・デメリットを総合的に勘案した上で全体のメリットを最大化するための回路設計、さらに適切な受動素子(インダクタ・トランス)の選択や開発が不可欠である。また、メリットだけでなく、大きな電力を高周波動作させると強い電磁波が発生するため、電磁ノイズ抑制が必要になるなどのデメリットもあるため、パワエレ機器としては、メリット・デメリット双方を勘案した総合的な検討が必要である。

そのため、GaN パワーデバイスが完成しても、それがパワエレ機器に実装され、実際の社会の省エネ化につながるまでのハードルは依然として高いと考えられる。GaN の特性を生かす初期需要をつかめるよう、「2. 我が国におけるパワエレ関連の取組と成果」で述べたような今後必要と思われるいくつかの具体的用途³⁵を特定し、GaN パワーデバイスを用いたパワエレ機器の試作と実証の研究開発を行い、GaN パワーデバイスを用いたパワエレの基礎的な知見の蓄積を図ることが政策的に期待される。

GaN パワーデバイスを用いたパワエレ機器の研究開発においては、チーム型研究開発体制を構築することが重要である。INNOPEL では、PD・PO のマネジメントによって、パワエレ機器としてまとめあげてを志向して回路設計・デバイス領域を横断した連携等が促進され、優れた成果を挙げてきたが、基本的には回路設計・デバイスの研究開発を行うプロジェクトである。しかし、今後の研究開発においては、実際のパワエレ機器を組み上げて、その性能を測定・評価し、相互に共有・分析が可能な形式でデータとして蓄積するとともに、パワーデバイスや受動素子用材料技術の性能向上に迅速にフィードバックすることが重要となる。INNOPEL で行ってきたような回路設計・デバイスの研究開発を主とするのではなく、回路設計・パワーデバイス・受動素子・その他構成要素の研究がチームを組んで、実際のパワエレ機器を組み上げる体制を作ることが必要である。INNOPEL 以前には、アカデミア側にこのようなチーム型体制を構築する意識は希薄であったが、INNOPEL を通じて、パワエレ分野の研究者に広くパワエレ機器としてまとめあげるといった視点が共有され、チーム型研究開発を実施

³⁵ 「AI データセンター用サーバー電源システム」、「EV 等中容量電源システム」、「高効率電動機駆動システム」の三つ。

する素地が形成されたことを踏まえ、これを生かして次の段階へ進めていくことが重要である。

また、分野間の連携は他の分野を知る機会につながり、広い視野を持った人材育成にも極めて有効である。後述する AI・数理分野の知見・技術を取り入れることは当然必要だが、それを最大限活用するためにはパワエレの適用範囲が広がっていく中で新しい発想を生み出せる人材が必要となる。このためチーム型研究開発を通じて、高度なパワエレ人材を育成することも併せて意識することが重要である。

チーム作りの新たな視点として、AI・数理分野の知見・技術を取り入れることが必要である。これまでのパワエレの研究開発においては、技術者の経験と勘に負うところが大きかったが、GaN パワーデバイスのように特性が大きく変わるデバイスを使うことを前提にすると、そもそもの経験自体が必然的に少ないため、従来のアプローチがうまく働かない可能性が高い。パワエレ分野においても AI・数理分野の知を取り入れつつ、経験と勘からより理論的なアプローチを活用するよう、パワエレ分野の研究開発の在り方を変革していくことが必要である。また、今後若年層の減少による技術者不足が問題となることがほぼ確実視され、パワエレ機器開発の抜本的効率化への期待も高まる中、このような新しい理論モデル主導型の研究開発の在り方を探求することは、今後の我が国のパワエレ分野の研究開発や人材育成の将来を考える上でも重要である。

4. 4. データマネジメント・データセキュリティ

データの取扱いは非常に重要である。民間企業はもちろんのこと、近年、アカデミアにおいても、研究情報の漏洩につながるリスクを考慮して、新規開発あるいは研究成果のデータを外部に渡すことや、知財中核部分が漏洩しないように論文における公表データを慎重に選択するということが一般的となっている。その一方で、データの共有は、特に物理的拠点を設けないチーム型研究開発体制を構築する上で、重要な要素であり、データマネジメント・データセキュリティの方針があらかじめ明確化され、事前に共有されていることが不可欠である。また、スタートアップとの協働を視野に入れる場合、スタートアップが外国企業に買収された場合のデータ資産の管理については、規制の穴となっていること

が指摘されており、適切なマネジメントが行われない場合には、公的資金によって得られたデータが格安で外国企業に篡奪される可能性もある。このような観点からも適切なデータマネジメント・データセキュリティに関する枠組みを設けることが必要である。

4. 5. デバイス・材料レベルの基礎研究の推進

GaN 等の次世代パワー半導体について、パワーデバイスとしての活用は可能であるが、その潜在能力を十分に引き出すことはできていない。さらに次世代・次々世代パワー半導体の材料特性のポテンシャルは、Si と比較して最大で2～3桁程度高いと予測されており、そのポテンシャルを十分に引き出すことができるようになれば、それによって拡大するパワエレの可能性は大きい。そのためには、結晶欠陥への理解の深化やその制御のための技術開発のための基礎研究が必要であるが、このような領域は民間企業の研究開発の対象とはなりづらい領域であり、アカデミアの力を生かすべき領域である。

また、受動素子については、INNOPEL における材料レベルからのアプローチによって、長年解決が難しいとされていたいくつかの課題について、ブレークスルーとなり得る成果が得られた。この成果を具体的なデバイスとして活用可能な水準にまで技術開発を進めていくことで、パワーデバイスと同様に、新たなパワエレの可能性を大きく拡大する要素となり得る。ただし、この実現のためには、材料開発と試験デバイス作製の間にある大きなギャップを埋めることが不可欠である。材料としては数 g のサンプルで試験を行うことが通常である一方で、試験デバイスとしては数 kg の材料が必要であり、このギャップを埋めることができず、実際のデバイスとしての実証ができずに足踏みしている成果が少なくない。この事例に見られるように、受動素子開発では、材料系や回路システム側の用途を問わず共通基盤的に研究開発を推進し、出口部分を用途に応じて特化することが有効な場合がある。このギャップを克服し、デバイス・材料分野における我が国の伝統的な強みを、我が国のパワエレ産業の競争力強化につなげていくことが重要である。

4. 6. まとめ

DX/GXの両立に向け、次世代パワー半導体(特に GaN)によるSiパワーデバイスの置換えとそれを用いた次世代パワエレの実装拡大による社会全体の省エネ化を達成することが必要である。そのためには我が国の研究開発として INNOPEL 等これまでの研究開発の取組の成果を踏まえつつ、

- ① GaN パワーデバイスの作り込み技術
- ② GaN パワエレ機器トータルとしての実証

に取り組むことが重要である。これらの取組によって、GaN パワーデバイスの性能向上と提供体制の構築、GaN パワエレ実用化研究開発、最適化コスト低減のための AI・数理モデル開発を行い、GaN パワーデバイスの潜在性能を引き出すとともに、パワエレとしての GaN 実機の実用化を加速する。併せて AI・数理モデル主導の研究開発アプローチの導入によりパワエレ研究の在り方を変え、実装を加速する。このような研究開発の在り方の変革は、今後の技術者不足への対応や GaN のみならず次々世代以降のパワー半導体の実用化の際にも大いに役立つものとなるはずである。

さらに、喫緊の課題解決と並行して、我が国の長期的な発展を支える基礎研究を推進することも重要である。製品の安全性や信頼性の向上を支える GaN の結晶欠陥の理解・制御等に係る基礎的な知見の蓄積、また将来を見据えてパワーデバイスとしての実証に向けたダイヤモンドや酸化ガリウム等の次々世代パワー半導体の基礎的な研究開発、材料に立ち戻った基礎研究によって得られた今後の新たな素子開発のブレイクスルーとなり得る成果やパワエレ回路システム領域との対話によって得られた気付きを生かして具体的な受動素子へ着実に結びつける基礎研究など、優れた成果を伸ばす研究開発を着実に進め、パワエレ分野の持続的な高度化や経済安全保障へ貢献する。

これらの取組を総合的に進めることにより、パワエレ研究の在り方の変革とそれを通じた研究水準の高度化、高度パワエレ人材の育成を図り、DX/GXが両立した社会の実現及び我が国の産業競争力の向上に貢献するとともに、我が国の半導体産業の再興につなげることを目指す。

パワーエレクトロニクス等の研究開発の在り方に関する検討会
委員名簿

伊東 淳一 長岡技術科学大学大学院 工学研究科
技術科学イノベーション専攻 教授

江戸 雅晴 富士電機株式会社 技術開発本部 先端技術研究所長

○ 大森 達夫 三菱電機株式会社 研究開発本部 研究開発戦略部
主席技監

小笠原 悟司 北海道大学 名誉教授

恩田 謙一 元日本ケミコン株式会社 フェロー

川原田 洋 早稲田大学 特命教授

佐藤 敏郎 信州大学工学部 次世代空モビリティシステム研究拠点
特任教授

田中 保宣 産業技術総合研究所
先進パワーエレクトロニクス研究センター長

○:主査
※五十音順、敬称略

謝辞

本検討会を進めるに当たっては、検討会委員のほか以下の方々に御発表を頂きました。御協力に感謝いたします。

<第1回(2025年4月15日)>

JST CRDS 馬場 寿夫「パワー半導体の研究開発動向(2024年版ナノテクノロジー・材料分野の俯瞰報告書より)」

経済産業省 商務情報政策局情報産業課

「第1回パワーエレクトロニクス等の研究開発の在り方に関する検討会 発表資料」

環境省 地球環境局地球温暖化対策課地球温暖化対策事業室

「環境省のパワーエレクトロニクスに関する技術開発事業」

総務省 国際戦略局技術政策課研究推進室

「酸化ガリウムパワー半導体に関する総務省の取組とアカデミアへの期待」

三菱総合研究所

「革新的パワーエレクトロニクス研究開発事業支援出口戦略の検討に係る調査報告」

○革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業 PDPO からの発表

プログラムディレクター 三菱電機株式会社 大森 達夫

「革新的パワーエレクトロニクス創出基盤研究開発事業(INNOPEL)の概要、成果と今後の課題について～概要～」

プログラムオフィサー(回路システム領域) 東京都立大学 清水 敏久

「INNOPEL(パワエレ回路システム領域)進捗状況と今後の課題」

プログラムオフィサー(パワーデバイス領域) 名古屋大学 松本 功

「INNOPEL パワエレ検討案 デバイス」

プログラムオフィサー(受動素子領域) 東北大学 山口 正洋
「文部科学省 INNOPEL 事業の進捗状況と今後の課題 パ
ワエレ回路のための受動素子を中心として」

<第2回(2025年4月24日)>

古河電気工業 水谷 良治 「パワーエレクトロニクス等の研究開発の在り方に関する
検討会資料 -電気自動車におけるパワエレの今後の
課題- (BEV,HEV,PHEV,FCV)」

東京大学 高宮 真 「日本が強い新パワー半導体を賢く使いこなす Sense &
Drive IC」

名古屋大学 天野 浩 「縦型 GaN パワーデバイス 10年間の研究の進展と今後の
展開」

京都大学 藤田 静雄 「酸化ガリウム(Ga_2O_3)デバイスの将来に向けて」

日本ボンド磁性材料協会 諏訪部 繁和
「パワエレ用受動素子に適する軟磁性材料の研究開発につ
いて」

指月電機製作所 西村大、平上克之 「受動素子(コンデンサ)からの話題提供」

※各回における発表順、敬称略