

2.4.4 パワー半導体材料・デバイス

（1）研究開発領域の定義

高効率の電力変換を可能にする電力制御用半導体素子（パワーデバイス）を、その応用技術とともに研究開発する領域である。現在主流のSiパワーデバイスの性能向上に加え、SiC、GaN、Ga₂O₃、ダイヤモンドなどワイドギャップ半導体の結晶品質向上、ウエハーの大口径化、物性制御、デバイス構造、作製プロセスなど、材料・デバイス技術に関する研究開発課題がある。さらに、受動部品や制御技術、実装技術、応用技術など、システム化に関する研究開発課題もある。

（2）キーワード

直流送電、電動機駆動、系統連系パワーエレクトロニクス、半導体電力変換システム、パワーモジュール、デジタルゲートドライブ、パワーデバイス、パワー半導体、ワイドギャップ半導体、シリコン、Si、炭化ケイ素、SiC、窒化ガリウム、GaN、酸化ガリウム、Ga₂O₃、ダイヤモンド、PiNダイオード、ショットキーバリアダイオード（SBD）、MOSFET、IGBT、HEMT、スーパージャンクション、バイポーラ劣化、しきい値電圧シフト、結晶欠陥、界面欠陥、HVPE、アモノサーマル法、Naフラックス法

（3）研究開発領域の概要

【本領域の意義】

地球環境保全のため、カーボンニュートラル社会の実現に向けた取り組みがますます重要になっている。脱化石燃料のため太陽光発電に代表される再生可能エネルギーの導入やそれに伴う電力網のスマートグリッド化だけでなく、産業機器や輸送機器、各家庭での電力有効利用のため、電力変換技術、すなわちパワーエレクトロニクスは欠かせない。特に、最近では欧州を中心とした自動車の電動化の動きは避けられないものとなっており、パワーエレクトロニクスの高度化に対する要求は高まっている。

パワー半導体材料としては、これまでシリコン（Si）が用いられてきた。Siデバイスにも性能改善の余地はあるものの、特に中・高耐圧以上の領域では、ワイドギャップ半導体を用いることで大幅な高性能化（高耐圧、低損失、高速スイッチング）が可能となる。ワイドギャップ半導体で最も開発の進んでいる炭化ケイ素（SiC）は、ショットキーバリアダイオード（SBD）の実用化から20年、パワーMOSFETの実用化から10年が経過し、それらをパワーエレクトロニクス装置に組み込んで高効率化、小型化を達成した製品やシステムが多くみられるようになった。典型的な応用例は、電車（代表例：新幹線N700S、山手線、東京メトロ銀座線）と電気自動車（代表例：Tesla Model 3）である。しかし、SiCの基板・ウエハー作製技術やデバイス集積化などの技術レベルはSiには程遠く、コストの面も含めて改良の余地は大きい。また、他のワイドギャップ半導体と同様に学理の面でもまだ未解明な部分も多い。Siとワイドギャップ半導体を含めたパワー半導体全体で、学理と合わせた材料開発・デバイス開発をおこなうことで、パワー半導体デバイスだけでなく受動部品も加えた電気回路・モジュール・システムとしてのパワーエレクトロニクスの高性能化や低コスト化も可能となり、爆発的な普及によりカーボンニュートラル社会の実現に資することが期待される。

この研究開発領域では、パワーエレクトロニクスとして分類される、①パワー半導体の材料・プロセス研究、②パワー半導体材料を使用したパワー半導体デバイス・チップ・モジュールの研究、および③パワー半導体デバイスを使用した電力変換システムとその応用研究、の中で主に①と②について取り上げ、応用領域として③の一部を記述する。デバイスとしては製品化、実用化に向けた研究開発が世界的に活発に行われている、Si、SiC、GaN、Ga₂O₃を中心に、材料、デバイス、モジュール、システム化の研究開発の動向について記載する。また、前回は「環境・エネルギー」の俯瞰区分に入れていたが、インフラだけでなくモビリティへの応用も重要になってきたので「社会インフラ・モビリティ応用」の領域区分に変更した。

〔研究開発の動向〕

• 論文・特許動向

領域全体の論文数は2018年頃まで5年で2倍のペースで増加していたが、その後は飽和傾向にある。2018年にトップになった中国や、米国、欧州、日本も最近4年間の論文数はほぼ一定である。中国の論文数が大幅に増加したことで日米欧の論文数シェアは減少し、近年は中国と欧米の論文数シェアが同程度（約2割）で日本はそれらの半分程度になっている。論文の質を表すTop1%論文数・Top10%論文数でも中国は年々増加し、欧州を抜いてトップの米国に近づいている。国際共同研究の特徴として、多くの国で共著率のトップは米国だが、米国よりも中国との共著率が多い国（英国、カナダ、オーストラリア）もある。論文執筆者数は各国とも年々増加しているが、中国の増加割合が大きく、2016年頃からトップになっており、h5-index上位100位の研究者数も欧米と同程度になっている。領域全体の特許ファミリー件数は単調に増加している。日本のシェアが急速に低下して2021年に中国に逆転されたが、Patent Asset Indexではまだトップを保持している。Patent Assent Indexトップ3のオーナーは欧州（infineon：パワー半導体）、日本（三菱電機：パワー半導体）、韓国（サムソン：半導体）の企業であり、シリコンパワー半導体のトップメーカーが占めている。（詳細は「研究開発の俯瞰報告書 論文・特許データからみる研究開発動向（2024年）」を参照）

• Si

我が国のパワー半導体の特筆すべき特徴は、日本企業が強みを発揮し存在感を放っていることにある。業界トップは欧州のInfineon Technologies、2位は米国のON Semiconductorだが、上位10社のうち5社を我が国の企業が占めている。2022年の世界のパワー半導体市場は約2.3兆円であり、約95%をSiパワー半導体が占めている。2030年には5.4兆円規模が予想されており、SiC、GaN、Ga₂O₃等の新材料パワー半導体の伸びが著しいが、Siパワー半導体市場も拡大し、Siパワー半導体は80%以上を維持すると予測されている。

低耐压系（100V以下）では、現在普及しているSi-MOSFETのさらなる高性能化（低オン抵抗化）の開発が進んでいる。微細化・トレンチ構造などのMOSFETデバイス構造の改良とあわせて、Si基板抵抗の低抵抗化などによる性能向上が試みられている。中耐压系（100V～600V）でもSi-MOSFETのさらなる高性能化の開発が進んでいる。この耐压領域ではスーパージャンクション構造が用いられることが多く、トレンチ構造の最適化によるオン抵抗低減、プロセス技術の向上によるスーパージャンクション構造の微細化・最適化が進んでいる。高耐压系（1200V）は、Si-IGBTが主要パワーデバイスであり、世代アップを重ねてオン抵抗の低減、IGBTチップの小型化（高パワー密度化）を進めてきている。1200V系は自動車等の電動化に対応してこれから需要の急激な拡大が予想されている。超高耐压系（1700V以上）は、6.5kVまではSi-IGBT、それ以上ではSi-サイリスタが使われている。超高耐压系デバイスは電力グリッド、高速鉄道などの超高パワー応用に用いられることが多いため、高耐压とあわせて大電流容量が必須となっている。この領域のSiパワー半導体の技術開発は欧州・日本で競争となっている。

Siパワー半導体の最近の傾向は、大口径ウエハー量産技術開発により低コスト化が進んでいることである。これまでSiパワー半導体は200mm製造ラインが主流であったが、欧州のインフィニオンでは300mmラインでの製造が本格化しており、同社は2021年に2つめの300mmラインの操業を開始した。また、中国では複数の300mmラインが建設中である。一方、日本ではようやく300mmラインの建設が決定した。

• SiC

現在、SiCのウエハーは直径150mmの製品が中心に販売されており、デバイス作製に用いられている。200mmウエハーの開発も進んでおり、一部の企業からは2024年頃の製品化のスケジュールがアナウンスされ、デバイスメーカーからもそれに合わせて2025年頃に200mmプロセスラインの構築がアナウンスされて

いる。デバイスとしては、600V～1700Vで数Aから100A強のショットキーバリアダイオード（SBD）、MOSFETのディスクリット素子が、モジュール品では600V～3300V、1000A程度とより高耐圧、大電流の製品が販売されている。

ウエハーに関しては、昇華法によりインゴットを形成し、スライス・研磨した後にCVD法によるエピタキシャル成長層を成膜した150mm（6インチ）径が主流である。昇華法の坩堝を大型化して200mm（8インチ）化への動きもあるが、150mmウエハーの品不足がコロナパンデミック前から続いており、高品質ウエハーの供給体制の増強が図られている。デバイスメーカーがウエハーメーカーを自社グループに取り込む動きもみられる。2019年にはSiCデバイスの最大手のSTマイクロエレクトロニクス社がNorstel社を買収するなど、ローム、Wolfspeed（旧Cree）、ON Semiconductor などウエハーからデバイスまでを一気通貫で開発・製造する企業が増えている。昇華法は黒鉛坩堝の閉鎖空間内での結晶成長技術であるため、成長環境の制御が難しくこれまで研究者の経験に頼られていたが、最近ではコンピュータシミュレーションやAIを活用した機械学習を用いることで、高品質結晶成長の条件最適化が急速に進展している。低コスト化や高品質化を狙って昇華法以外のウエハー製造法として、ガス成長法、溶液法、貼り合わせ法などが国プロなどの支援を受けて研究開発がなされているが、まだ量産に至っていない。また、基板品質が悪くてもエピ前処理やエピ条件の最適化によりデバイスの信頼性（バイポーラ劣化）に影響する基底面転位（Basal Plane Dislocation, BPD）に影響しない欠陥である貫通刃状転位（Threading Edge Dislocation, TED）に転換する技術や、高品質単結晶にイオン注入して多結晶支持基板に転写し、高品質単結晶は再利用するといった低コスト化技術が研究開発されている。

SBDに関しては、技術的には成熟して以前よりも低コスト化も進み、Siのファストリカバリダイオード（FRD）に対する高速スイッチングなどの優位性も十分にあるため、置き換えが進むと考えられる。逆方向リーク電流を抑え、順方向でもサージ耐量を高めるためにショットキー電極下にp型層を配置したJBS（Junction Barrier controlled Schottky）やMPS（Merged PiN Schottky）構造、さらには低抵抗化の要望に応えるための基板の薄化などが行われている。パワーMOSFETは、1200V級を中心に各社が最も力を入れて研究開発しているデバイスである。デバイス構造は、プレーナ型のDMOS構造とトレンチ型に大別される。トレンチ型の方がオン抵抗の低減には有利であるが、トレンチ底部の電界集中緩和構造の導入など、高度な設計・プロセス技術が必要となる。SiCのMOSチャネル移動度が低いことから、1200V級素子ではオン抵抗に対してチャネル抵抗の占める割合が半分程度と大きく、信頼性と両立したプロセス技術の開発が待たれる。3300kV級以上になるとドリフト層の抵抗が主成分となる。このドリフト層の抵抗を下げるために超接合（Super-Junction, SJ）構造の導入も検討され、開発されている。SJ構造の作り方にはマルチエピ法（エピとイオン注入を繰り返す）とトレンチ埋め込み法（深いトレンチ溝を作り、エピ成長で埋める）がある。マルチエピ法は特に高耐圧素子になるほど繰り返し回数が増えるためトレンチ埋め込み法が望ましいが、技術的な難易度が高い。しきい値電圧変動の課題も依然として残っている。変動メカニズムの解明は現在各機関で行われているところであり、詳細な分析結果が待たれる。パワーMOSFETをインバータに適用する際に、内蔵ボディダイオードに電流が導通すると、バイポーラ劣化を起こす恐れがある。これを避けるために、SBDを内蔵したパワーMOSFETが開発され市販されているが、SBD内蔵の追加コストとバイポーラ劣化対策のコストで企業の戦略が分かれている。デバイスの短絡耐量も重要な指標であり、オン抵抗とトレードオフになるのが一般的である。Si-IGBTと同等の短絡耐量を得るのは難しいが、素子単体だけでなくシステム全体としての開発が重要であり、近年ではゲート保護回路が高速化しており、短絡後2～3マイクロ秒以内に回路を遮断できるようになってきている。

パッケージについても、従来の3端子（TO-247）品だけでなく、ケルビン接続した4端子とすることでソースインダクタンスを低減して高速動作を可能とした製品も用意されるようになった。面実装タイプのTO-263の採用も増えている。大電流化のためにはチップを並列に多数接続したモジュールにする必要があるが、低インダクタンス化や両面冷却化に向けた開発が行われ、一部実際に使用されている。今後、機電一体型を目指

した開発が増えると考えられ、デバイス単体の研究開発だけでなく、実装技術の開発も重要課題となる。

SiC-MOSFET/SBDモジュールを使用したパワーエレクトロニクス機器・システムは基礎研究から応用研究に移行している。具体的には、1.2kV SiCモジュール（電流定格は100～1200A）を容易に入手できるようになり、さらに1.7kV 300A SiCモジュールを国内外の複数の企業が市場に投入している。同一電圧・電流定格のSiC-MOSFET/SBDモジュールとSi-IGBT/PNDモジュールの価格を比較すると、現時点ではSiCモジュールが4～8倍高価であるが、その差は縮小傾向にある。2020年7月から営業運転を開始した新幹線電車N700SはSiCモジュールを使用したインバータを採用し、N700系のSi-IGBTインバータと比較して55%の小型化と約600kgの軽量化を実現している。

• GaN

Siに比べて低オン抵抗、高速スイッチングが可能でキャパシタやインダクタの大幅な小型化が可能なため、2019年頃からGaN横型パワーデバイスは、65W以上の大容量のUSB充電器に搭載された製品が登場し急速に広まっている。GaN横型パワーデバイスを高速動作させることは回路的に難しいことがあったが、各社が、専用の駆動回路をセットにしたGaNパワーICを開発し、回路技術者はパワーICを利用することでGaN横型パワーデバイスの良さを引き出した回路を容易に設計することができるようになった。

• Ga₂O₃

最安定結晶構造に相当する β -Ga₂O₃のバルク単結晶融液成長に関しては、既存のチョクラルスキー（CZ）、Edge-defined Film-fed Growth（EFG）、ブリッジマン技術が着実に進展している。米国ノースロップ・グラマン子会社のSynopticsは、CZ育成したGa₂O₃単結晶バルクから2インチ径半絶縁Ga₂O₃（010）ウエハーの製造に成功している。また、Ga₂O₃ウエハー製造の最大手であるノベルクリスタルテクノロジーは、現在EFG育成単結晶バルクから製造した4インチバルクおよびエピウエハーを市販している。

デバイス開発も、これまでの日本、米国に加えて、中国を中心に活発化しており、トランジスタ、ダイオードの開発成果がこの2年でこれまで以上に多く発表されるようになった。パワーデバイスとして有用な縦型構造に関しては、特にショットキーバリアダイオードのデバイス性能に着実な進展が見られる。横型トランジスタもFin-FETを主流に次々と報告されており、耐圧に代表されるデバイス特性において改善が見られる。ただし、デバイス構造としては、フィールドプレートによる端部終端を施すなど、従来とは大きく変わっていない。縦型トランジスタ開発に関しては、米国、ドイツ、中国、日本でこの2年で開発を行う機関が増加している。

また、準安定構造に相当する α -Ga₂O₃の薄膜結晶成長やデバイス開発も活発化している。日米欧に加えてアジアでも韓国、中国、台湾、シンガポール、インドなどにおいて α -Ga₂O₃研究開発が開始され、特に中国においてはこの1～2年で多くの大学、研究所が研究開発を開始して急激な盛り上がりを見せている。 α -Ga₂O₃は、主にサファイア基板上的ヘテロエピタキシャル成長で得られる結晶構造であるため、準安定構造の中では最も研究が進んでいる。FLOSFIAでは、 α -Ga₂O₃を用いたショットキーバリアダイオード、トランジスタ開発が進められており、 α -Ga₂O₃ SBDを用いたDC/DC降圧コンバーターの販売を開始している。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

• Si

最近の我が国発のIGBT新技術として、「IGBTスケールリング」と「ダブルゲートIGBT」がある。IGBTスケールリングでは、IGBT性能向上の基本原則であるInjection Enhancement（IE）効果を起こすため、MOS駆動部の密度は上げずMOS駆動部の間隔（セルピッチ）は一定とすることで、MOSゲート部の性能を向上させつつMOS駆動部でのキャリアの逆注入を抑え、キャリア注入レベルを向上させることができる。これにより高電流時でも導通抵抗を低減でき、1200V系でも3300V系でも従来IGBTと比較して約35%のターンオ

フ損失を実現できている。IGBT スケーリングのもう一つの特徴はゲート駆動電圧を従来の15Vから5Vに低減することであり、デジタルゲートドライブと極めて相性が良い。ダブルゲートIGBTは損失低減と高周波化の切り札と言える技術である。IGBTはバイポーラデバイスのため、ターンオフ時にキャリアがn型のベース層に残り、電流が完全にオフになるのに時間を要する課題があり、このためにターンオフ損失の増大や高周波化が困難という問題にもつながっている。この問題を克服する方法として、基板表面に第一のメインゲートに加えて第二のゲートを設け、第一のメインゲートとタイミングをずらしてnベース内のキャリアの動きを制御する方法(デュアルゲートIGBT)が提案され、3300V系で28%程度のターンオフ損失低減が実現されている。「ダブルゲートIGBT」は第二のゲートを基板裏面に設けたものである。ターンオフ時のキャリア蓄積はMOS表面ではなく裏面側で起こるので、裏面に第二ゲートを設ける方がはるかにキャリアの排出が効果的である。ダブルゲートにより3300V系で65%ものターンオフ損失低減が確認されている。

IGBTのゲートを駆動するゲート駆動集積回路は15Vという高いゲート電圧が必要なこともあり、アナログ回路ベースで構成されている。ゲート駆動電圧が5Vに低減されればゲート駆動集積回路をデジタル化することが容易になり、人工知能(AI)などの最先端情報技術を用いてパワーエレクトロニクスをインテリジェント化することができる。デジタルゲートドライブ技術を用いて、AI技術でゲート駆動波形の最適化を実現する研究もおこなわれており、従来のベテラン技術者の勘と経験を頼りに最適化されてきたパワーエレクトロニクスにもデジタル化による新しい技術の波が押し寄せている。

• SiC

SiCデバイスのバイポーラ劣化の原因となるSiC基板のBPDをなくす技術として、2021年に関西学院大学と豊田通商がDynamic AGE-ingと呼ばれる独自技術を報告した。本手法では基板に内在するBPDや加工ひずみ層を除去し、BPDフリーとなる表面層を形成できる。これにより、BPD密度の多い低品位な基板でもBPDをゼロとすることが可能となり、高品位基板を低コストで実現することが可能になる。6インチ基板で実証されているが、8インチの開発がなされている。

京都大学のグループでは、SiC-MOSFETを作製する際にSiCの酸化を徹底的に排除するプロセスを考案し、チャンネル移動度を大幅に高めることに成功した。これは、SiCが酸化されると残留Cによる欠陥が発生するという第一原理計算に基づく結果を踏まえたものである。さらに、高温水素エッチングによる表面ダメージ層の除去及び平坦化が加わり、Si面だけでなくトレンチMOSFETでチャンネル面となるa面、m面での効果が大きいことが示された。これにより、従来手法に比べて6~80倍の大きなチャンネル移動度が得られ、実デバイスへの適用が期待されている。

トレンチMOSFETの高いチャンネル移動度を利用し、かつトレンチ底部の電界集中を避けるため構造として、チャンネル部をFin形状とするデバイスが日立製作所より提案され、他のグループからも、電流駆動能力を向上させるためにチャンネルにFin構造を取り入れる研究開発例が報告されている。さらに、Fin幅を55nmと狭くして非常に狭いボディ領域とすることで、チャンネルを界面から遠ざけて界面散乱の影響を避け、電流駆動能力が大幅に向上する例が方向されている。

パワーMOSFETと駆動回路をモノリシックに形成できると、配線の寄生インダクタンス低減や素子の小型化が可能になる。産総研では、初めて縦型パワーMOSFETと、CMOS駆動回路を同一チップ上に集積したデバイスを開発した。SiCの耐熱性や高速性をフルに発揮するには、このようなモノリシック化は有効であり、パワーICの開発も含めて機能を統合したパワーデバイスの開発が加速されと考えられる。

600V系のスイッチングデバイスの半導体材料はSi、SiC、GaNの三つ巴の戦いに突入しているが、1200V以上のスイッチングデバイスとしては既存のSi-IGBTと新規参入のSiC-MOSFETとの戦いになりつつある。欧州の大学はEUや自国の公的機関から研究資金を獲得し、米国の大学はNSF(National Science Foundation)などから研究資金を獲得して、10kV耐圧のSiC-MOSFET/SBDモジュールを使用したSST(Solid-State Transformer)の研究を実施しているが、定格電流は小さく、まだ基礎研究の域を出ていない。

• GaN

GaN 自立基板についても近年進展が著しい。HVPE 法では、n 型の 2 インチ、4 インチ基板が多くメーカーから販売されている。アモノサーマル法では、ポーランドのアモノ社、米国 sixpoints 社、三菱ケミカルなどが GaN 基板の製造販売を行っており、三菱ケミカルと日本製鋼は共同で低圧アモノサーマル法による 4 インチ GaN のパイロット量産ラインを立ち上げ、商品化を進めている。Na 金属融液を媒質に用いる Na フラックス法はスケーリングが容易であり大口径の結晶成長を実現しやすいことから、大阪大学で精力的な技術開発が進められており、豊田合成と共同で 6 インチを超える GaN バルクの結晶成長に成功している。また、GaN 基板製造においては種結晶の確保が問題となるが、大阪大学はマルチポイントシード法というサファイア基板上への形成方法を開発しており、8 インチサファイア基板を使うことで 8 インチ GaN 基板の作製も可能と考えられる。

シリコン基板上に作製した横型 GaN-HEMT (GaN on Si) は移動体通信の基地局に使用され始めているが、最近では SiC 基板上に作製した GaN-HEMT (GaN on SiC) の使用も検討されている。GaN on SiC は GaN on Si よりも高価であるが、SiC の熱伝導率は Si や GaN の 3 倍以上あって放熱効果が格段に優れていることが注目される。欧州企業は GaN-HEMT を使用した 400 Vdc、2.5 kW、100 kHz 双方向チョップの評価ボードを市販している。2022 年 9 月開催の EPE (European Power Electronics) Conference では、欧州の大学と企業から GaN-HEMT の応用に関する多数の研究論文が発表され、欧州の活発な研究開発活動が伺える。米国企業は GaN-HEMT を使用したサーバー用電源 (3kW) を開発し、寿命部品である冷却ファンを除去することに成功している。カナダの GaN Systems Inc. は 600V/150A の GaN-HEMT 2-in-1 モジュールを市場に投入している。

• Ga₂O₃

単結晶バルク育成の新しい動きとしては、東北大学発ベンチャーである C&A からは、貴金属ルツボを使用しない新規結晶育成手法 Oxide Crystal growth from Cold Crucible (OCCC) 法による、単結晶 Ga₂O₃ バルク育成が報告された。OCCC 法では、隙間の空いたバスケットの中に充填した Ga₂O₃ 原料を、高周波コイルにより発生する磁場で直接加熱して溶融させるが、バスケットを水冷することで周辺部の Ga₂O₃ を固化させ、この固化した周辺部をルツボの代わりに使用している。

一般的なエピタキシャル成長手法である MOCVD Ga₂O₃ 成長技術の進展が著しい。主に、米国の大学と企業 (MOCVD 装置メーカー) の努力により、Ga₂O₃ MOCVD 技術および MOCVD 成長した Ga₂O₃ エピ膜の品質は、この 2 年間で大きく改善し、結晶品質は HVPE 成長膜と同等程度以上になっている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

欧州では、2017 年度から STMicroelectronics がコーディネータとなって R3-Powerup コンソーシアムが始まり、Si-300mm パイロットラインを活用して個別半導体素子開発からロジック、アナログデバイスとパワーデバイスの統合によるシステムオンチップ、パワー IC 開発を進めている。また、「Power2Power」プロジェクトが 2019 年 6 月から 3 年間、7400 万ユーロの予算でスタートし、300mm ウエハーによる 1700V Si-IGBT 技術、200°C 動作による電力密度 20% 向上、キャリアライフタイムの 50% 向上などの目標を掲げている。コーディネータをインフィニオンが務め、8 か国の 43 機関が参加している。Ga₂O₃ 関係では、ドイツ ベルリン地区の国研、大学らのグループにより、GraFOx (Growth and fundamentals of oxides for electronic applications) という Ga₂O₃ 結晶成長、物性研究に関する大型研究ファンド (4 年総額 1.1 M ユーロ) が 2016 年から 2020 年まで実施され、その後継プロジェクト (GraFOx2) が 2020 年 7 月にスタートしている。

米国では、2019 年から米国の複数大学が研究チームを結成し、ARPA-E からのファンディングを受けて中電圧・高電圧高速直流遮断器の研究に着手している。これは現在の交流給電ネットワークの一部を直流送電・配電に置換あるいは併用の実現を目指したもので、その要の技術が高速直流遮断器である。2018 年ス

タートのGa₂O₃結晶成長、物性研究に関する2件のAir Force Office of Scientific Research (AFOSR) Multidisciplinary University Research Initiatives (MURI) プログラム“The Gallium Oxide Materials Science and Engineering (GAME)”(5年総額 750万ドル)、“Fundamentals of Doping and Defects in Ga₂O₃ for High Breakdown Field”(3年総額 150万ドル)が継続している。

国内のパワーエレクトロニクスの機器・システム・デバイスを対象とした研究開発プロジェクトとしては、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)が行われ、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。最近では、Si関係としては2021年度からNEDOの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において、「大口径インテリジェント・シリコンパワー半導体の開発」プロジェクトが行われている。また、NEDO「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」(2021～2030年度)において、8インチの高品質低コストSiC単結晶/ウエハー製造技術開発および8インチ次世代SiC MOSFETの開発や次世代高耐压電力変換機器向けモジュールの開発などが取り組まれている。第2期SIPの「IoT社会のエネルギーシステム」(2018年～)のサブテーマ「IoT共通基盤技術」において、ワイドギャップ半導体を用いたユニバーサルスマートパワーモジュール(USPM)の開発、その応用を目指したコランダム型 α -Ga₂O₃パワートランジスタ開発、ワイヤレス電力伝送システムの基盤技術として、GaNデバイスの研究開発が行われている。学理に関しては、文科省の「革新的パワーエレクトロニクス創出基板技術研究開発事業」(2021～2025年)において、大阪大学を中心に産総研、複数の大学と協力してSiCのMOS界面科学の構築と新規MOS構造形成技術の探索が取り組まれている。

(5) 科学技術的課題

Siパワー半導体では、我が国の強みを今後維持していくための課題として、(i) 個別半導体デバイスとしての性能向上、(ii) 個別半導体デバイスからモジュール化・システム化への変化への対応、(iii) 需要拡大に対応する量産化技術などがある。これらは相互に関連しており、パワー半導体の川上にあるSi基板、デバイスプロセス技術、また川下にある回路、システム技術、応用技術との連携が必須である。特に、パワーデバイスの300mmウエハー化を我が国でも早急に進めるとともに、我が国が先行しているパワーデバイス向け300mm Siウエハー技術については、引き続き開発を継続していく必要がある。例えば、ウエハー材料技術では酸素・炭素などの軽元素不純物濃度の低減、低濃度の軽元素を正確に測定する評価技術の確立が求められており、これらへの対応などが重要になっている。

SiCデバイスが広く世の中で使われるためには、さらなる低コスト化やデバイスの使いこなし技術の開発が必要である。ウエハーの低コスト化のためには、従来法である昇華法による結晶の長尺化や高速成長に加え、ガス法や溶液法の研究開発も重要である。SiC MOSFETにおける共通の課題は、MOS界面欠陥に起因した特性劣化(低チャネル移動度、しきい値電圧変動)の解決である。SiC-MOS界面欠陥に関する学理がまだ不十分であるため、欠陥の正体や発生原因を突き止め、Si-MOS界面と同等の高品質界面を実現するための基礎研究が必要である。3300V～6500V級ではドリフト層の抵抗が大きくなるため、その低減のためのスーパー Junction構造を形成するマルチエピ法、超高加速電圧のイオン注入(10MeVなど)、トレンチ埋め込みエピ技術などの開発が必要である。10kV超ではPiNダイオードやIGBTなどバイポーラデバイスが必要であり、SiC固有の問題であったバイポーラ劣化の解明と対策法が進んだ後として、バイポーラデバイスをより高性能化するためのキャリア密度分布の制御技術、や高速エピ成長技術の開発が必要になっている。

GaNデバイスでは、大電流化、高耐压化などのパワーデバイスとしての性能向上・低コスト化に加え、信頼性の向上、特性ばらつきの低減などについても電気自動車などへの応用上は極めて重要な課題となる。パワーデバイスの性能や信頼性の向上という観点では、コスト的には大きな問題ではあるがGaN基板上のGaN横型が最も素直なアプローチとなる。GaN基板自体も耐压維持に活用できるので高耐压化が容易であり、結

晶欠陥の大幅な低減による大電流化（チップサイズ拡大時の歩留まり向上）や信頼性向上、ばらつき抑制も期待できる。

Ga₂O₃ デバイスについては、バルク・薄膜結晶成長、デバイスプロセスなどの基盤技術を、今後の応用を見据えて厚く進めていくことが必要である。材料面ではウエハーの大口径・高品質化、エピタキシャル薄膜の導電性制御、ヘテロ構造、表面・界面制御などがあり、デバイスプロセス開発では基板・エピ層エッチング加工技術、ゲート絶縁膜、エッジ終端などがある。また、Ga₂O₃ デバイスのその物性上抱える本質的な技術的課題として、p 型 Ga₂O₃ の実現と Ga₂O₃ デバイスの放熱がある。これらに対しは、p 型を用いずにデバイス構造・回路の設計を考慮ことや、水冷配置等の実装技術、高熱伝導率および電気伝導率を有する異種材料基板への直接接合技術などを開発することが重要になる。

（6）その他の課題

半導体技術は日本の経済安全保障の視点が重要になっており、先端ロジック半導体だけでなくパワー半導体なども含めて「マイクロプロセッサ・半導体技術」として特定重要技術 20 分野に指定されている。パワー半導体は 日米欧がリードし、SiC 基板は米国が過半数を占めるが国内にも供給元が存在して現状のサプライチェーンは確保されているが、今後重要になる GaN や Ga₂O₃ などの新たなワイドバンドギャップ半導体の研究開発に向けては、材料、ウエハー、成膜・プロセス装置などが国内や有志国から調達できるか注意を払っておく必要がある。

我が国が競争力を持つ Si パワー半導体企業は、量産工場は有するものの、専用の Si 研究開発ラインを有していない。量産工場で新規 Si パワーデバイスの開発を行うことは困難であり、大学等における Si パワーデバイス研究拠点の整備が必要と考えられる。Si パワー半導体の研究開発には汚染のない専用クリーンルームと大型装置が必須であり、要素プロセス研究だけではなく、デバイスの性能実証を総合的に行えるような Si パワーデバイス研究拠点を設け、共通プラットフォームの整備が求められる。

パワーデバイスは材料だけ、デバイスだけといった特定分野のみ着目するのではなく、回路やシステムなどの応用分野まで全体を見据えて研究開発をすることも重要である。SiC をはじめワイドギャップ半導体のキラーアプリとなる応用を創出することで、デバイスや材料技術も発展すると考えられるので、技術分野の枠を超えて議論する場を増やす必要がある。

GaN 横型パワーデバイスは我が国が先行していたものの、今日の大ブームを前にしてほとんどの企業が撤退してしまった。GaN 縦型パワーデバイスについてはこれからであるが、量産化のためにはいくつかの技術課題があり、継続した研究開発が必要である。我が国では国家プロジェクトで継続的に GaN 縦型パワーデバイスの研究開発がサポートされ多くの技術的蓄積、人的ネットワークがあるので、これをうまく産業へとつなげる取り組みが極めて重要である。縦型デバイス特有の信頼性に関する技術、生産技術、製造装置などの開発も必要であるが、これらの技術は GaN 横型パワーデバイスや GaN マイクロ波トランジスタなど他の GaN デバイスにも展開・利用可能な技術にもなるので、全体を見渡した研究開発の戦略が求められる。

海外、特に米国においては、Ga₂O₃ を含む "Ultrawide bandgap (UWBG)" と呼ばれる、SiC, GaN よりもバンドギャップの大きな半導体材料の研究に対する注目が高まり、それに伴いこの分野への研究ファンドが拡大し、アカデミア（大学、国研）に所属する Ga₂O₃ 研究者人口は増加している。一方、日本国内での Ga₂O₃ パワーデバイス研究開発に対する研究開発ファンドは増えてきてはいるが、ベンチャー企業への助成が多く、基礎・基盤技術を担当するアカデミック機関を対象とするものが少ない。また、パワーデバイスメーカーの Ga₂O₃ パワーデバイスへの本格的参入がまだ行われていないことも、実用化に向けては大きな課題である。Ga₂O₃ は日本発の新半導体材料であり、今後も我が国が研究開発で優位性を持ち、産業化を早期に進めていくためには、アカデミアの研究開発を活発化し、企業の本格的な参入を加速する公的資金のサポートが重要になる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	・SiC国際会議(ICSCRM/ECSCRM)、パワーデバイス国際会議(ISPSPD)をはじめ、基礎研究に関する発表件数、評価の高い論文は依然として多い。 ・GaN-HEMT（横型）を使用したパワエレ機器・システムの基礎研究を行っている日本の大学は限られている。一方、GaN縦型パワーデバイスに関しては文科省プロジェクトや環境省プロジェクトでさまざまな成果がでている。 ・バルク・薄膜結晶成長、物性基礎研究などの材料研究、およびデバイス基盤技術開発が着実な進展を見せている。
	応用研究・開発	◎	→	・ロームをはじめ三菱電機、富士電機、日立製作所、東芝などでデバイス・モジュールの量産及びそれを使ったシステム開発が行われている。 ・企業を中心にSiC-MOSFET/SBDモジュールの応用が進展している。 ・GaN基板について、HVPE技術の洗練、Naフラックス技術、アモノサーマル技術などの開発が進んでいる。 ・GaN横型パワーデバイスについては、日本のメーカーの撤退があったが、東芝がGaN-on-Si事業を再開した。 ・世界で唯一、ベンチャー企業（ノベルクリスタルテクノロジー）が、Ga₂O₃バルク・およびエピ基板の製造販売をしている。
米国	基礎研究	◎	→	・大学や軍関係の研究所、Wolfspeedなどの会社やコンソーシアムで、レベルの高い基礎研究に取り組んでいる。 ・一部の研究拠点大学で10kV以上の高耐圧SiC-MOSFET/SBDモジュールを使用したパワエレ機器の基礎研究を行っている。 ・GaN-HEMT（横型）を使用した機器・システムの基礎研究を行っている大学は増加している。 ・Ultrawide bandgap 半導体への注目の高まり、およびそれに伴う新規研究ファンドのスタート等に引っ張られる形で、その研究開発人口は多い。
	応用研究・開発	◎	→	・産業用から軍事応用まで、幅広く研究開発がなされている。特に超高耐圧デバイスは、軍関係のサポートにより進んでいる。Power AmericaやFREEDMといったコンソーシアムが中心的な役割を果たしている。 ・SiC-MOSFET/SBDモジュールの応用研究・開発は、性能と小型・軽量化を優先した医療機器、さらに損失低減を重視した大容量太陽光発電などを対象に進められている。軍事産業を対象としたパワエレ機器・システムの研究も積極的に推進しているが、論文発表は限定的である。 ・一部の米国企業はGaN-HEMTを使用したサーバー用電源を製品化し、応用は着実に進展している。 ・Nexgen power systemsは縦型GaNパワーデバイスを用いたモジュール、ACアダプターの商品化段階にある。 ・Ga₂O₃デバイスは、基盤技術開発の段階にある。
欧州	基礎研究	◎	→	・複数の研究拠点大学ではパワエレ機器・システムの研究を活発に行っている。 ・大きな国プロは見当たらず、大学や国研のSiC研究者は次の材料（Ga₂O₃など）に研究対象を変えている。 ・企業との共同研究または企業研究所において、SiCの信頼性などに関する基礎研究は依然として深く行われている。 ・GaNデバイスでは基礎研究のプロジェクトよりむしろ応用研究・開発に比重が移りつつある ・Ga₂O₃デバイスではドイツ ベルリン地区の大学・国研が一体となった材料・デバイス研究開発プロジェクト（GraFOx 2）が進められている。
	応用研究・開発	◎	↗	・STMicroはSiC MOSFETがTesla Model3に採用されて躍進しており、8インチウエハー製造やチップ工場の拡張などを進めている。 ・GaN-HEMT（横型）の応用研究は着実に進展しており、GaN-on-Si横型パワーデバイスに関してInfineonなど企業の製品化が進んでいる。 ・Ga₂O₃デバイスは、基盤技術開発の段階にある。

中国	基礎研究	○	↗	- 学会・論文発表件数は増加している。デバイス関連では、TCADによるデバイス特性解析や新規構造設計に関するものが目立つ。 - 新規性はあまりないものが多いが、材料・デバイスの特性自体は優れたものも多い。 - パワーデバイス関連国際会議の中国開催も増えつつある。 - 政府や地方自治体の補助により、国内でデバイス作製環境が整いつつある。 - GaN-on-Si 横型パワーデバイスに関して多額の研究費が投入されており、GaN-on-GaNの研究も増えている。
	応用研究・開発	○	↗	- 中国中社（鉄道）やEVメーカーなど、SiC採用を検討するユーザーが多数存在し、それらに向けて、ウエハーからデバイス、モジュールまで全方位での研究開発が行われている。 - HVPE法によるGaNウエハーメーカーが健闘している。 - GaN-on-Si 横型パワーデバイスを利用した製品（PC用ACアダプター）の企業が多数でている。チップメーカーと連携し着実に技術を高度化させている。
韓国	基礎研究	△	→	- KERIを中心にデバイス開発が行われているが、学会発表や論文数に大きな増加は見られず、目立った動きはない。 - GaN HEMTパワーデバイスを研究しているグループがあるが、活動は限定的である。 - Ga₂O₃パワーデバイス開発の国プロがスタートしているが、まだ新規的なものではない。
	応用研究・開発	△	→	- SK SiltronによるDuPont社のSiCウエハー事業の買収や、Onsemi社の富川工場でSiCデバイス生産など、ウエハー・デバイスの製造が増えている。 - 産業界でのGaNパワーデバイスについての積極的な動きは見られない。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) テレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考・引用文献

1) T. Saraya, et al., “Demonstration of 1200V Scaled IGBTs Driven by 5V Gate Voltage with Superiorly Low Switching Loss,” in *2018 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)* (IEEE, 2018), 8.4.1-8.4.4., <https://doi.org/10.1109/IEDM.2018.8614491>.

2) Takuya Saraya, et al., “3300V Scaled IGBTs Driven by 5V Gate Voltage,” in *2019 31st International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)* (IEEE, 2019), 43-46., <https://doi.org/10.1109/ISPSD.2019.8757626>.

3) T. Saraya, et al., “3.3 kV Back-Gate-Controlled IGBT (BC-IGBT) Using Manufacturable Double-Side Process Technology,” in *2020 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)* (IEEE, 2020), 5.3.1-5.3.4., <https://doi.org/10.1109/IEDM13553.2020.9371909>.

4) 平本俊郎, 大村一郎「スケーリングIGBTが拓くパワーエレクトロニクスの新しいパラダイム」『応用物理』86巻11号 (2017) : 956-961.

5) Koutarou Miyazaki, et al., “General-Purpose Clocked Gate Driver IC With Programmable 63-Level Drivability to Optimize Overshoot and Energy Loss in Switching by a Simulated

- Annealing Algorithm,” *IEEE Transactions on Industry Applications* 53, no. 3 (2017) : 2350-2357., <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2674601>.
- 6) Yifan Dang, et al., “Adaptive process control for crystal growth using machine learning for high-speed prediction: application to SiC solution growth,” *CrystEngComm* 23, no. 9 (2021): 1982-1990., <https://doi.org/10.1039/D0CE01824D>.
 - 7) Keita Tachiki, et al., “Mobility enhancement in heavily doped 4H-SiC (0001), (11-20), and (1-100) MOSFETs via an oxidation-minimizing process,” *Applied Physics Express* 15 (2022): 071001., <https://doi.org/10.35848/1882-0786/ac7197>.
 - 8) Yuki Mori, et al., “Device design to achieve low loss and high short-circuit capability for SiC Trench MOSFET,” in *2021 33rd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)* (IEEE, 2021), 111-114., <https://doi.org/10.23919/ISPSD50666.2021.9452303>.
 - 9) T. Kato, et al., “Enhanced Performance of 50 nm Ultra-Narrow-Body Silicon Carbide MOSFETs based on FinFET effect,” in *2020 32nd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)* (IEEE, 2020), 62-65., <https://doi.org/10.1109/ISPSD46842.2020.9170182>.
 - 10) Mitsuo Okamoto, et al., “First Demonstration of a Monolithic SiC Power IC Integrating a Vertical MOSFET with a CMOS Gate Buffer,” in *2021 33rd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)* (IEEE, 2020), 71-74., <https://doi.org/10.23919/ISPSD50666.2021.9452262>.
 - 11) Hirofumi Akagi, “Multilevel Converters: Fundamental Circuits and Systems,” *Proceedings of the IEEE* 105, no. 11 (2017) : 2048-2065., <https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2682105>.
 - 12) Ryo Haneda and Hirofumi Akagi, “Design and Performance of the 850-V 100-kW 16-kHz Bidirectional Isolated DC-DC Converter Using SiC-MOSFET/SBD H-Bridge Modules,” *IEEE Transactions on Power Electronics* 35, no. 10 (2020) : 10013-10025., <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2975256>.
 - 13) Fabian Sommer, et al., “Design and Characterization of a 500 kW 20 kHz Dual Active Bridge using 1.2 kV SiC MOSFETs,” in *2022 International Power Electronics Conference (IPEC-Himeji 2022-ECCE-Asia)* (IEEE, 2022), 1390-1397., <https://doi.org/10.23919/IPEC-Himeji2022-ECCE53331.2022.9807023>.
 - 14) Ryo Tanaka, et al., “Mg implantation dose dependence of MOS channel characteristics in GaN double-implanted MOSFETs,” *Applied Physics Express* 12, no. 5 (2019) : 054001., <https://doi.org/10.7567/1882-0786/ab0c2c>.
 - 15) 国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター「LCS-FY2017-PP-11 GaN系半導体デバイスの技術開発課題とその新しい応用の展望 (Vol. 2) —GaN結晶と基板製造コスト— (平成30年2月)」国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST), <https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2017-pp-11.pdf>, (2022年12月27日アクセス)。
 - 16) 栗本浩平他「低圧酸性アモノサル法によるGaN単結晶成長技術の開発」『日本製鋼所技報』72巻 (2021) : 13-20.
 - 17) Takeyoshi Onuma, et al., “Valence band ordering in β -Ga₂O₃ studied by polarized transmittance and reflectance spectroscopy,” *Japanese Journal of Applied Physics* 54, no. 11 (2015) 112601., <https://doi.org/10.7567/JJAP.54.112601>.
 - 18) J. L. Hudgins, et al., “An assessment of wide bandgap semiconductors for power devices,”

IEEE Transactions on Power Electron 18, no. 3 (2003) : 907-914., <https://doi.org/10.1109/TPEL.2003.810840>.

- 19) Masataka Higashiwaki, et al., “Gallium oxide (Ga_2O_3) metal-semiconductor field-effect transistors on single-crystal $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (010) substrates,” *Applied Physics Letters* 100, no. 1 (2012) : 013504., <https://doi.org/10.1063/1.3674287>.
- 20) J. Blevins, et al., “Manufacturing Challenges of Czochralski Growth and Fabrication of 2-inch Semi-Insulating $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ Substrates,” CS-MANTECH Conference 2022, <https://csmantech.org/paper/manufacturing-challenges-of-czochralski-growth-and-fabrication-of-2-inch-semi-insulating-beta-gallium-oxide-substrates/>, (2022年12月27日アクセス) .
- 21) Fumio Otsuka, et al., “Large-size ($1.7 \times 1.7 \text{ mm}^2$) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ field-plated trench MOS-type Schottky barrier diodes with 1.2 kV breakdown voltage and 109 high on/off current ratio,” *Applied Physics Express* 15, no. 1 (2022) : 016501., <https://doi.org/10.35848/1882-0786/ac4080>.
- 22) Arkka Bhattacharyya, et al., “4.4 kV $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ MESFETs with power figure of merit exceeding 100 MW cm^{-2} ,” *Applied Physics Express* 15, no. 6 (2022) : 061001., <https://doi.org/10.35848/1882-0786/ac6729>.