

### 2.1.3 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。SiC、GaN、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ダイヤモンドなど、原理的に高効率化に優れるワイドギャップ半導体の研究開発が進むなか、主流のSi（シリコン）パワーデバイスの性能向上も続けられている。ワイドギャップ半導体の結晶品質向上、ウェハの大口径化、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に加え、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がある。

#### (2) キーワード

パワーエレクトロニクス、電力変換、パワーモジュール、パワー半導体デバイス、IGBT、MOSFET、スーパージャンクション、高電子移動度トランジスタ、HEMT、SBD、PINダイオード、スケーリング、デジタルゲートドライブ、シリコン、Si、ワイドギャップ半導体、炭化ケイ素、SiC、窒化ガリウム、GaN、ダイヤモンド、酸化ガリウム、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、AlN、AlGaN、MOCVD、HVPE、アモノサーマル法、Naフラックス法、自立基板、転位

#### (3) 研究開発領域の概要

##### [本領域の意義]

地球温暖化の抑制に向けて二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出量の削減が世界的に強く求められており、従来の化石燃料エネルギーから太陽光、風力、地熱、潮流など再生可能エネルギーへの転換を促進するとともに、エネルギー消費の大幅な削減が必要となっている。全世界の最終エネルギー消費に占める電力の割合は年々上昇し続けており、電力の役割が増している現代において、電力を高い効率で利用し融通するパワーエレクトロニクス技術の研究開発と普及が重要となる。パワーエレクトロニクス技術は、省エネルギー化だけでなく、再生可能エネルギーの直接利用を実現し、化石燃料エネルギーへの過度な依存からの脱却に貢献する。

パワーエレクトロニクスの研究開発領域は、①Si、SiC、GaN、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ダイヤモンドなどのパワー半導体材料・プロセス技術、②IGBT、MOSFET、HEMT、サイリスタ、ダイオードなどパワー半導体デバイスのチップ・モジュール技術、③インバータやコンバータなど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、の3分野に大別できる。ここでは、ナノテクノロジー・材料分野と関係の深い①および②を中心にパワーエレクトロニクス分野を俯瞰する。

パワー半導体デバイスの開発の大きな目的は、電力密度を向上させ電力単価を低減させることである。そのためパワー半導体の動作特性として、導通時のオン抵抗低減およびスイッチング時の損失低減が研究開発目標となり、同時にオフ時の絶縁性能（オフ耐圧）を満たすことが要求される。今日のパワー半導体デバイスではSiが主として用いられているが、Siの材料定数の限界から来るデバイス性能の限界が指摘されており、高耐圧化と低損失化を両立できるワイドバンドギャップ半導体材料の研究開発が重要となる。SiCおよびGaNはすでに実用化フェーズに進んでおり、システムの高効率化と、高周波動作による小型化が可能となった。これに伴い、高周波対応の受動部品の開発、高周波回路技術、実装技術の開発も重要となっている。

パワー半導体デバイスの定格電圧は、IT産業に代表される低耐圧（100V以下）、民生・家電に代表される中耐圧（100V～600V）、産業ドライブ・運輸に代表される高耐圧（1200V）、鉄道・エネルギーグリッ

ドなどに代表される超高耐圧（1700V以上）と多岐にわたる。さらに、応用製品によって電流容量や周波数も大きく異なる。そのため、パワー半導体デバイスの研究開発動向は各耐圧領域に分けて議論することが適切といえる。また、整流・還流動作を目的としたダイオードと、スイッチング動作を目的としたサイリスタ・トランジスタ構造に分けての議論が必要である。パワー半導体デバイスは、一般にはパワーエレクトロニクス機器の中でダイオードとトランジスタを組み合わせさせたインバータ回路やコンバータ回路で用いられる。そのため、ダイオードおよびトランジスタの両者の性能向上が求められる。

### 【研究開発の動向】

世界のパワー半導体市場は2019年で約2.9兆円であり、このうち98%以上をSiパワー半導体が占める。2030年には4.3兆円に増大し、SiC、GaN、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等のワイドバンドギャップ半導体の市場が著しく伸びる見通しであるが、Siパワー半導体市場も拡大し93%程度を維持すると予測されている。原理的に優れた特性を有するワイドバンドギャップ半導体の研究開発を進めるとともに、性能面とコスト面で着実に進歩が続いているSiパワー半導体デバイスの高い競争力を維持していくこともわが国にとって極めて重要である。以下、半導体材料ごとに研究開発動向を述べる。

#### • Si (シリコン)

低耐圧系（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基板の低抵抗化などによる性能向上が試みられている。後述する横型GaNデバイス（HEMT）は、低耐圧系でのSiの競合技術である。

中耐圧系（100V～600V）でもSi-MOSFETのさらなる高性能化が進んでいる。この耐圧領域ではスーパージャンクション（SJ）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SJ構造の微細化・最適化が進んでいる。中耐圧系のうち600V付近ではSi-IGBTも普及している。今後、中耐圧領域の市場拡大は必然といわれており、この領域でも横型GaNデバイスが競合技術となる。

高耐圧系（1200V）ではSi-IGBTが主要パワーデバイスとして普及しており、フィールドストップ（FS）層導入、トレンチ構造の微細化、ウェハ薄膜化など、不連続技術の導入で性能向上を達成してきた。1200V系は、自動車等の電動化に伴って今後急激な需要の拡大が予想される。高耐圧系における競合技術はSiC-MOSFETである。

超高耐圧系（1700V以上）は、6.5kVまではSi-IGBT、それ以上ではSiサイリスタが主要なパワー半導体である。電力グリッド、電鉄などの超高パワー応用系に用いられることが多く、高耐圧とあわせて大電流容量が必須となる。超高パワー応用がゆえにパーセントレベルのわずかな損失も莫大な損失となるため、導通時のオン抵抗低減も必要である。再生可能エネルギーをはじめとする新電力エネルギーグリッドの拡大、世界規模での高速鉄道網など需要は大きく、この領域のSiパワー半導体技術開発は欧州・日本で競争となっている。超高耐圧系における競合技術もSiC-MOSFETである。

Siパワー半導体では、近年、大口径ウェハ量産技術開発により低コスト化が進んでいる。これまで200mm製造ラインが主流であったが、欧州のInfineonでは300mmラインでの製造が本格化している。米国ではLSI用の300mmラインをパワー向けに転用する動きがあり、中国では複数の300mmラインが建設中である。

## • SiC (炭化シリコン)

1200V 耐圧の SiC-MOSFET とショットキー・バリア・ダイオード (Schottky barrier diode : SBD) を使用したパワエレ機器・システムの研究が応用フェーズに移行している。同一電圧・電流定格の Si-IGBT/PND モジュールと比較すると SiC-MOSFET/SBD モジュールの価格は 4~8 倍であるが、一部の太陽光発電用連系インバータや在来線鉄道車両などで SiC-MOSFET/SBD モジュールが実際に使用されている。産業機器や電鉄向け用途の 1700~3300V 耐圧素子、電気自動車や充電設備向けの 650~900V 耐圧素子も多くの企業から提供されている。2020年7月から営業運転を開始した新幹線電車 N700S では SiC デバイスを使用したインバータが採用され、N700 系の Si-IGBT インバータと比較して大幅な小型・軽量化を実現している。米国はコンピュータ断層撮影装置 (CT) や核磁気共鳴画像装置 (MRI) など医療用機器への応用で世界をリードしている。

製造コストを下げるため、デバイス製造ラインの主流は 4 インチから 6 インチへと移行した。高品質 8 インチウエハの市場投入も始まっている。ただし、デバイスを高い歩留まりで形成できる高品質大口径ウエハの供給量は十分ではなく、その確保が課題となっている。現在ほとんどの SiC ウエハは昇華法により作製されており、長尺のインゴットを成長させることが難しい。成長速度の向上や長尺化、高品質化、さらなる大口径化をめざし、ガス法や溶液法による結晶成長技術の研究開発が進められている。

SiC-SBD は、技術的には高い完成度にあると考えられる。600V 以上の耐圧系のパワーモジュールでは、従来の Si の pn ダイオード (PND) に代わって SiC-SBD を採用したパワーモジュールが一般化してきている。PND と異なり SBD は蓄積キャリアが存在しないため、高速化・低損失化が可能となる。逆方向に高電圧が印加された際のショットキー障壁の電界を緩和してリーク電流を抑えるため、JBS (Junction Barrier Controlled Schottky) や MPS (Merged PIN Schottky) とよばれる p 型層を配置したデバイス構造が主流となっている。

SiC-MOSFET は、従来からの課題である低いチャネル移動度が解決されたわけではないが、短チャネル化やトレンチゲート化などデバイス構造の工夫により、Si デバイスに対して十分な低オン抵抗を実現している。しきい値電圧変動の抑制も従来から残っている課題である。特に負ゲートバイアスを印加した際の変動が大きく、このため負バイアス印加が -5V 程度に制限されているものが多い。MOSFET には pn 接合のボディダイオードが内蔵されているため、インバータ回路ではこれを積極的に活用したい場面がある。ボディダイオードに通電すると、電子・正孔の再結合エネルギーにより基底面転位 (basal plane dislocation : BPD) を起源として積層欠陥 (stacking fault : SF) が拡張する、いわゆるバイポーラ劣化と呼ばれる現象が起こり、MOSFET のオン抵抗増大につながる。BPD を低減した基板の開発や、エピ成長初期に BPD を貫通刃状転位 (threading edge dislocation : TED) に変換する技術が開発されている。どのような欠陥がバイポーラ劣化を引き起こすか、またはバイポーラ劣化を起こす再結合電流のしきい値などが研究されている。一方で、内蔵ダイオードの代わりに SBD を MOSFET に内蔵させる研究開発がさかんである。これまでは学会発表が主であったが、量産開始のアナウンスもされ始めた。用途によっては、今後の主流デバイス構造となる可能性がある。

10kV を超える超高耐圧 SiC パワーデバイスについては、日本では電力系統応用をめざした IGBT および PIN ダイオードの報告があり、米国では DARPA の支援により IGBT、GTO (Gate Turn-Off thyristor) などのバイポーラ型デバイスに加え、MOSFET も開発されている。

## • GaN (窒化ガリウム)

Si 基板上にヘテロエピタキシャル成長させた GaN 層を用いた横型パワーデバイスの開発がさかんに行われ

ている。これは高周波トランジスタのGaN-HEMT技術を活用したもので、GaN-on-Si横型パワーデバイスとよばれている。このデバイス開発の最大の課題は熱膨張係数差によるウェハの割れであったが、GaNとSi基板の間にAlGaN/GaN超格子などを導入し、成長温度において熱膨張係数差を相殺する歪をGaNデバイス層に意図的に与える技術が進展し、製品化が可能となった。米国のEPC、International Rectifier (IR)、Transphormがまず製品化を行い、現在では、Panasonic、GaNsystem、On semiconductorなども製品化している。600V耐圧品を中心に製品の出荷が始まっており、ACアダプタ、サーバ用電源、LED用電源、太陽光発電システム用パワーコントローラなどの製品が開発されている。プラグインハイブリッド自動車のチャージャーの試作展示も行われ、自動車分野への採用も目前に迫っている。

一方、縦型のGaNデバイスも最近大きく進展している。レーザ用に開発されたハイドライド気相成長 (hydride vapor phase epitaxy : HVPE) 法によるGaN自立基板を用いた縦型GaNパワーデバイスの研究開発がこの7年間で大きく進展した。日米欧のプロジェクトにおいて、ウェハ、エピ技術、デバイスプロセス技術、デバイス構造などの検討、デバイス試作によるデモンストレーションが進んでいる。最終的に普及の鍵となるのはコストパフォーマンスであるが、HVPE法によるGaNバルク結晶の作製技術が洗練されてきていることに加え、三菱ケミカルで開発されているアモノサーマル法や、大阪大学で開発されているNaフラックス法など、高い量産性が期待される技術が立ち上がりつつある。

#### • Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (酸化ガリウム)

Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に関しては、近年研究者人口、学術論文出版数の大幅な増加が認められる。最安定結晶構造に相当するβ-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>のバルク単結晶の融液成長技術開発に関しては、これまでのチョコラルスキー、Edge-defined Film-fed Growth (EFG)に加えて、ブリッジマン技術に進展が認められる。Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ウェハメーカーの最大手であるノベルクリスタルテクノロジーは、EFG単結晶バルクから6インチ径ウェハの製造に成功した。市販品として4インチウェハが生産されている。信州大学からは、水平ブリッジマン法による2インチ径単結晶バルクの育成が最近報告された。薄膜エピタキシャル成長に関しては、分子線エピタキシー (molecular beam epitaxy : MBE)、ハライド気相成長法、有機金属気相成長法 (metal organic CVD : MOCVD) などの開発競争が行われている。

日本や米国を中心にデバイス開発も活発化しており、トランジスタ、ダイオードの開発の成果がこの1~2年でさらに多く発表されるようになった。縦型構造に関してはトランジスタ、SBDともに着実な進展がみられるが、横型トランジスタについてはデバイス特性の小さな改善にとどまり大きな進展は認められない。

準安定構造に相当するα-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の薄膜結晶成長やデバイス開発も活発化している。α-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は、主にサファイア基板への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もっとも研究が進んでいる。FLOSIA社はα-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を用いたSBD、トランジスタの開発を進めている。その他、準安定構造であるε-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の薄膜結晶成長研究も、国内外機関から報告されている。

#### • ダイヤモンド

高耐圧・超高耐圧領域の将来技術として、優れた熱伝導性と大きなバンドギャップを有するダイヤモンドについても半導体物性の理解とあわせて、ダイヤモンド基板の合成、ダイオード、トランジスタ原理実証などが試みられている。日本にはダイヤモンドのCVD合成の先導的な研究、リンによるn型ドーピング、ノーマリーオフ特性を持つMOSFETの動作実証など、当該分野での画期的な先行研究が行われている。

#### (4) 注目動向

##### [新展開・技術トピックス]

Siパワーデバイスでは、わが国発のIGBT新技術「IGBTスケーリング」の効果実証がなされ注目を集めている。これはIGBTのMOS駆動部の密度を上げずに微細化（スケーリング）することで、MOS駆動の性能を向上させつつ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技術である。1200V系でも3300V系でも従来IGBTと比較して約35%のターンオフ損失が実現されている。IGBTスケーリングによりゲート駆動電圧を従来の15Vから5Vに低減できるため、ゲート駆動集積回路をデジタル化し、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機器をインテリジェント化することができる。

SiCパワーデバイスに関しては、Tesla製の電気自動車にSTMicroelectronics製のSiC-MOSFETが採用され、大きな話題となった。SiC-MOSFETチップにSBDを内蔵したモジュールの研究開発は完了し、量産のための技術開発に移行している。耐圧1700VまでのSiC-MOSFETチップではSBDを除去して製造コストを抑える実装技術が進展している。欧州の大学では域内の公的機関から、米国の大学はNSFなどからそれぞれ研究資金を獲得し、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。現在のSiC-MOSFETはプレーナゲート構造が一般的であるが、RohmとInfineonがトレンチゲート構造を採用したSiC-MOSFETのモジュールを市場に投入している。

GaNパワーデバイスに関しては、GaN-on-Si横型パワーデバイスが移動体通信の基地局に使用され始め、また小型で持ち運びが容易なUSB高出力充電器として販売されるなど、産業として本格的に立ち上がった。GaN-on-Siは高速スイッチング特性でSiに対し圧倒的な優位性があり、スイッチング周波数を1MHzまで引き上げることができる。高周波化によりトランスやコンデンサなどの受動部品を大幅に小型化できるため、システム全体の小型軽量化、コスト低減を実現できる。これに伴い、高周波対応の受動部品の開発、高周波回路技術、実装技術の開発が必要となる。また、極めて困難と考えられていたMgイオン注入によるGaNのp型化技術にも近年進展がみられた。2019年に名古屋大学のグループがポーランドの高圧物理研究所（UNIPRESS）と共同でMgイオン注入後の超高压窒素アニール（1万気圧）の研究を系統的に行い、低温から高温までホール効果測定が可能なp型化に成功した。再現性や均一性などの問題が完全にクリアされ、注入Mgの70～80%がアクセプタとして働いていることが確認されている。MOS界面に関しては、ノーマリーオフの反転チャンネルMOSFETでチャンネル移動度 $150\text{cm}^2/\text{Vs}$ を越えるものが報告されており、Mgイオン注入領域上への横型MOSFETの試作も報告されている。2020年には内閣府の戦略的イノベーション創造プロジェクト（SIP）の研究成果として、Mgイオン注入を用いた耐圧1200VのGaN-MOSFETの試作が富士電機より報告された。また、SiC基板上にGaN-HEMTを作製するGaN-on-SiCパワーデバイスも検討されている。SiCの熱伝導率はSiの3倍以上であり、放熱効果が格段に優れている。

Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>パワーデバイスに関しては、この2年間に縦型SBDに関する多くの開発報告がなされた。米コーネル大学はトレンチ構造を採用した優れた特性のSBDを報告している。縦型トランジスタ開発は、コーネル大と情報通信研究機構の2機関で行われている。コーネル大ではトレンチ構造を用いた縦型フィントランジスタ（FinFET）を開発した。情報通信研究機構において開発された縦型トランジスタでは低コストプロセスであるイオン注入ドーピングを用いている。Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜エピタキシャル成長に関しては、特にこの2年でMOCVD技術の進展が目覚ましく、米国の大学と企業による研究開発によってHVPE成長膜と同等程度以上の結晶品質が実現された。MOCVDは高品質（AlGa）<sub>2</sub>O<sub>3</sub>混晶薄膜を成長可能であることも大きな利点である。

ダイヤモンドパワーデバイスに関しては、産業技術総合研究所発のベンチャー企業であるEDPが、10mm×10mmの単結晶ダイヤモンドを量産しているほか、アダマンド並木精密宝石がマイクロニードル成長法を

複合させて大口径基板の安定製造を可能にするなど、ダイヤモンドウェハの大口径化が進展している。またSiウェハとの直接接合技術も進展している。欧州ではElement Sixがダイヤモンドウェハ開発を行っている。ダイヤモンドMOSFETの開発でも日本がリードしており、金沢大学や早稲田大学でノーマリーオフ特性を有するMOSFETの動作に成功している。非プラズマプロセスによるダイヤモンド基板の高速異方性エッチング技術が開発されるなど、加工プロセス技術の研究開発も進んでいる。

### 【注目すべき国内外のプロジェクト】

各国で進められてきた大型プロジェクトの多くが2020年頃までに終了を迎え、Si、SiC、GaNについては、企業における量産技術開発フェーズに移行しつつある。ただし、国内のTIAやTPEC、米国のFREEDMなど、産官学のコンソーシアムで様々な研究開発課題に取り組む体制が継続している。以下、国内外で進行中もしくは最近終了した注目プロジェクトを地域ごとにまとめる。

国内では、経済産業省の「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」でSi-IGBTの研究開発が2014年度から2019年度まで実施され、IGBTスケールングの実証やデジタルゲートドライブなどの成果をあげた。同プロジェクト内でSiCの応用技術開発も進められた。2014年度から2018年度まで内閣府が主導したSIPでは、SiC、GaN、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ダイヤモンドに関する包括的な研究開発が実施された。研究費のおよそ半分がSiC関係に投入され、高耐圧デバイス用の多層膜ウェハやその伝導度制御、6.5kV級のSJ-MOSFETおよび20kV級のバイポーラ（IGBT、PINダイオード）デバイス、小型・高温・高速動作が可能な次世代モジュール、SiC-MOSFET/SBDモジュールのパワーエレクトロニクス機器・システムへの応用研究が進められた。2018年11月からのSIP第2期では、ユニバーサルスマートパワーモジュール（USPM）への応用をめざしたα-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>パワートランジスタ開発が行われている。文部科学省、環境省でもGaNパワーデバイス関連プロジェクトが進行している。2016年には文部科学省「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」事業による結晶創製拠点（名古屋大学）や、名古屋大学と産総研との窒化物半導体先進デバイスオープンイノベーションラボラトリ（GaN-OIL）が発足し、名古屋大学を中心にGaNデバイスの研究開発が精力的に進められている。

欧州では、EU内のエネルギー融通、CO<sub>2</sub>削減などを主目的に、パワーエレクトロニクス機器・パワー半導体関連の技術革新のために、各種プロジェクトが展開されてきた。2017年度から始まったR3-Powerupでは、STMicroelectronicsがコーディネータとなり、Si-300mmパイロットラインを活用し、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。2019年からはInfineonがコーディネータを務めるPower2Powerがスタート、300mmウェハによる1700V Si-IGBT技術、200°C動作での電力密度20%向上、キャリアライフタイムの50%向上などを目標に掲げている。ドイツではGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>結晶成長および物性研究に関する大型研究プロジェクトGraFOxが2016年から実施された。GraFOxは最近終了したが、その後継に当たる新規プロジェクト（仮称：GraFOx 2）が計画されている。パワーエレクトロニクス機器・システム関連では、アーヘン工科大学がドイツ最大の電力・ガス供給会社エーオンからの研究資金を得て次世代直流電力供給ネットワークの研究プロジェクトを推進している。

米国では2016年のトランプ政権発足後、大学のパワーエレクトロニクス研究開発予算が削減されたが、エネルギー省（DOE）や国防総省（DOD）からの補助金による研究プロジェクトは継続している。DOEエネルギー高等研究計画局（ARPA-E：Advanced Research Projects Agency-Energy）では、CIRCUITS（Creating Innovative and Reliable Circuits Using Inventive Topologies and Semiconductors）や

BREAKERS (Building Reliable Electronics to Achieve Kilovolt Effective Ratings Safely) などのプログラムが実施され、SiやSiC、GaNパワーデバイスを用いた回路技術や実装技術が研究されている。また、米国でのハイテク製造業の雇用創出とパワーエレクトロニクスシステムへのワイドギャップ半導体 (SiC、GaN) の大規模適用により省エネルギー化をめざすプロジェクト PowerAmerica が、2015年から5年間、DOE主導で実施された。2019年から米国の複数大学が研究チームを結成し、ARPA-Eの資金援助を受けて、中電圧・高電圧高速直流遮断器に関する最長5年の研究プロジェクトを推進している。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めざしたもので、その要の技術が高速直流遮断器である。Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>結晶成長および物性研究にも、DODから大型研究ファンドが相次いで投入されている。2019年からは空軍研究所 (AFRL) とコーネル大の共同研究としてUCoE (University Center of Excellence) が始まり、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>材料およびデバイスの研究開発が行われている。

中国は、最近論文の発表件数が急増していることから、豊富な研究資金が各研究機関に配分されていると考えられる。SiCの材料、デバイス、システムの垂直統合開発をthe National Key Research and Development Program of Chinaの一環で行っており、多くの人材と予算が投入されているといわれている。また多くの大学や研究所がこの1~2年でGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の研究開発を始めており、急激な盛り上がりを見せている。韓国では MOTIE/KEIT と呼ばれるプロジェクトや、パワーデバイス応用に向けた研究開発ファンド Development of epitaxies and power devices technologiesが2017年より実施されている。

### (5) 科学技術的課題

Siパワー半導体デバイスは、すでに完成した技術と考えられることがあるが、わが国の強みを今後維持していくためには課題が山積している。特にSi-IGBTにはまだ性能向上の余地がある。その1つが高速化 (損失低減) である。バイポーラデバイスであるIGBTは、ターンオフ時にキャリアがnベース層に残り、電流が完全にオフになるまで時間を要する。オフ電流の切れの悪さは、そのままターンオフ損失の増大につながる。そこで第2のゲートを設け、第1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) が提案されている。Si-IGBTの定格電圧の上限は現状6500Vだが、さらに高い耐圧 (13000V) が達成できれば電力送電への応用も可能になる。また、わが国が圧倒的に強いSiウェハ技術にも多くの課題が残されている。Siパワーデバイスは縦型デバイスであり基板全体を活用するため、大規模集積回路 (LSI) よりもウェハに対する品質要求が厳しい。特に酸素・炭素などの軽元素濃度低減が課題となっている。現在、Siパワーデバイス用のウェハはフローティングゾーン (FZ) 法を用いて製造されているが、FZウェハは大口径化に対応できない。そこで大口径化が容易な磁場印加チヨクラルスキー (MCZ) 法によるウェハの高品質化が重要な研究開発課題となる。

SiCパワー半導体については、SiC基板製造技術がボトルネックとなっており、大口径化・高品質化・低コスト化を満足する結晶成長技術を開発する必要がある。現状使われている昇華法は、結晶成長科学としても、結晶成長技術としても、いまだ不明な点が多く、基礎的な観点から再構築する必要がある。また、Si-IGBTの代替として期待されるSiC-MOSFETは、MOS界面とイオン注入技術に課題が残されている。MOSチャネル抵抗成分は小さくなってきているが、依然として多くの界面準位、酸化膜欠陥、固定電荷が存在する。また、MOSFETのボディダイオードはイオン注入で形成されるが、イオン注入で形成したPINダイオードの順方向電流特性はエピ成長で形成したものに比べてオン電圧が高い。今後、pチャネルMOSFETやCMOS-ICへの展開、超高耐圧領域用のIGBTやPINダイオードなどバイポーラ素子の開発に向けて、MOS界面とイオン注入の基礎的な学理を構築する必要がある。

GaN パワー半導体については、p型イオン注入活性化技術、MOSFET 技術が整い、信頼性向上と GaN 基板の大口径化・低コスト化が次なる課題である。特に MOSFET では、MOS の信頼性と安定性の向上が極めて重要な課題となる。アバランシェ耐量を代表例として、GaN パワー半導体の破壊物理の検討も必要である。横型デバイスを念頭にした大口径ヘテロエピタキシャル基板作製技術、縦型デバイスを念頭にしたバルク基板作製技術、デバイス不良をもたらす貫通転位の特定と抑制など、いずれも結晶成長科学・欠陥物理などと合わせて、装置技術としての開発が必要である。

Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> については、本質的な課題として十分なホール濃度の p 型の実現が困難なことがある。このため、他の p 型材料を組み合わせる方法の検討も重要である。もう一つの大きな課題として Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> デバイスの放熱性の向上がある。Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の熱伝導率は Si、SiC、GaN と比較して 1 桁程度小さく、大電力動作時の自己発熱が問題となる。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も検討する必要がある。

ダイヤモンドパワーデバイスは既存のデバイスの性能を大きく上回る可能性があるが、ウェハ価格、成膜や研磨、エッチングなどのプロセス開発など、実用化に向けて解決すべき課題が多く残っている。デバイスの実用化には 2 インチウェハが必要とされており、2 インチウェハの実用化は 2025 年、デバイスの実用化は 2030 年と予測されている。

パワーエレクトロニクス機器・システムの実用化・製品化には最先端の高性能パワー半導体デバイスだけでなく、磁気部品（変圧器、リアクトル）やキャパシタ（コンデンサ）などの受動部品、各種センサ、デジタル信号処理技術（DSP、FPGA、A/D 変換器などを含む）、制御技術、実装技術、放熱・冷却技術なども重要である。実際の製品では、パワー半導体デバイスではなく、他の部品が機器・システム全体の性能・仕様を決定する、いわゆる「ボトルネック」が存在することが多い。このため、パワー半導体デバイスの特性を十分に引き出せるような受動部品や制御技術、実装技術などシステム化の研究開発にも取り組んでいく必要がある。

## (6) その他の課題

ワイドギャップ半導体材料は日本が主導的役割を果たして育ててきた技術であるが、欧米や中国が多額の研究資金を投入して研究開発を加速しており、今後も日本が技術優位性、産業競争力を維持していけるかどうか予断を許さない状況にある。特に米国では、Ultrawide bandgap (UWBG) と呼ばれる、SiC や GaN よりもバンドギャップの大きな半導体材料（Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ダイヤモンド、AlN、立方晶 BN など）に対する注目が高まっており、研究ファンドが拡大し研究者人口も増加している。Si パワーデバイスも着実に日々進化しており、常に新しい物理、科学、技術の導入が求められる。国内の量産工場で基礎的な検討や新規パワーデバイスの開発を行うことは困難であり、大学や公的研究所を中心に材料・デバイスの研究開発拠点体制、共通プラットフォームを整備していくことが重要である。次世代の研究開発を担う若手人材が不足していることも深刻な課題である。特にパワーエレクトロニクス機器・システムの研究開発には幅広い知識が必要であり、人材教育に時間を要し、企業の求人に対して大学からの人材供給が追い付いていない。大学におけるパワー半導体、パワーエレクトロニクス関係の教育を充実させ、産学官連携のプロジェクトの中で若手の学生、研究者、技術者に高度な研究開発の機会を提供することが望まれる。



(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	◎	→	Siパワーデバイス技術のポテンシャルは依然として高い。Si-IGBTスケールリング則の実証で世界をリードしている。SiC、GaN、Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、ダイヤモンドすべての材料で世界トップレベルにある。SiC、GaNでは基板の大口径化、欠陥密度低減、MOS界面準位密度の低減、イオン注入技術、縦型トレンチ構造 FET の開発が進展している。SiC-MOSFET/SBD モジュール技術の基礎研究が企業や大学を中心に進められている。GaN 縦型パワーデバイスに関して、国家プロジェクトの成果が多く出ており、システムの基礎研究を行っている大学も増えている。応用第2期SIPでも高速スイッチング GaN 縦型 MOSFET の開発が行われている。Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> の材料研究、デバイス基盤技術開発が、大学、国研、企業で広がりつつあり、発表論文数、国際会議の発表件数が増加している。ダイヤモンドでは、伝導型の制御、MOSFET の試作などで優れた結果が報告されている。
	応用研究・開発	◎	↗	Si-IGBTではデュアルゲート技術など新技術開発が進んでいる。欧米がSiパワー半導体のシステム化に移行しつつあるのに対し、日本の技術開発は総じて個別半導体デバイスにとどまる。一方SiCについては、SiC-MOSFET/SBD モジュールの応用研究・開発が企業を中心に活発に進展し、SiCインバータが新幹線車両 N700S に搭載されるなど、SiからSiCへと置き換えが進んでいる。GaN は低耐压品を主として市場への投入が進んでいる。低価格を指向した GaN-on-Si 基板と、縦型デバイスを指向した GaN 自立基板の2つの方向で応用研究が進められている。GaN 自立基板について、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。ベンチャー企業のノベルクリスタルテクノロジーが世界で唯一 Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> バルクおよびエピ基板の製造販売をスタートしている。
米国	基礎研究	◎	→	Ultrawide bandgap 半導体への注目が高まっており、Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 関連の研究者人口が急激に増加している。研究資金提供元としては、AFOSR、NSF、ONR、DOEなどがあげられる。Siでは目立った動きは少ないが、SiCについては企業と大学の共同研究やコンソーシアムにおける研究でトップレベルの報告が多い。GaNに関する基礎研究は縮小傾向にある。横型のGaN-HEMTを使用したシステムの基礎研究を行っている大学が増加している。
	応用研究・開発	◎	↗	Si-IGBTに関して、On semiconductor社がその製造を目的としてGlobalFoundries社の300mmラインを買収した。SiCについてはCree/Wolfspeedをはじめとする多くの企業でウェハやデバイスの研究開発および生産が行われている。ファウンドリも活用されている。DOEのCIRCUITS、BREAKERSプロジェクトではSiCおよびGaNパワーデバイスの応用技術の研究開発が進められている。主に性能と小型・軽量化を優先した医療機器、損失低減を重視した大容量太陽光発電を対象としている。横型のGaN-HEMについては、一部の米国企業はGaN-HEMTを使用したサーバ用電源を製品化している。
欧州	基礎研究	◎	→	【EU】パワー半導体関係のプロジェクトの多くが終了し、大学や国立研が企業と連携してパワーエレクトロニクス機器・システムの研究開発に比重を移しつつある。直近の製品化を見据えているため、Si-IGBTモジュールの使用を前提とした基礎研究が多く、SiC-MOSFET/SBDモジュールの応用に関する基礎研究は足踏み状態である。GaNについてはGaN-on-Siで低コストな縦型デバイスを開発するプロジェクトが進められている。 【ドイツ】Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> に関して、ベルリン地区で大学・国研が一体となって材料研究プロジェクトが進められている。

2.1

俯瞰区分と研究開発領域  
環境・エネルギー応用

	応用研究・開発	◎	↗	<p>【EU】産業競争力強化を念頭にして材料からデバイス、応用まで垂直統合的にカバーするプロジェクトが進められてきた。GaN-on-Si 横型パワーデバイスに関してIMECやフラウンホーファー研究所などで産学連携のプロジェクトが進行している。Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>デバイス開発は基盤技術開発の段階にある。</p> <p>【ドイツ】Infineon社が世界で唯一300mmラインでのSiパワーデバイスの製造を本格稼働させており、圧倒的な技術とコスト競争力をもつ。SiC、GaNのデバイス技術でも世界をリードしている。</p> <p>【スイス】STMicroelectronics製のSiC-MOSFETがTesla製の電気自動車に採用され、大きな話題となった。</p>
中国	基礎研究	○	↗	<p>欧米日から帰国した研究者が研究をリードし、かつ重点大学制度を活用した若手育成を徹底している。その結果、パワー半導体・パワーエレクトロニクスの国際学会における発表件数が著しく増加している。ただし、シミュレーションのみの研究や後追い研究が多く、オリジナリティやインパクトは高くない。SiCに関しては、日欧米から輸入した最新のSiC-MOSFET/SBDで小容量パワエレ機器・システムの基礎研究を行っているが、周辺部品がボトルネックとなっている。GaNに関しては、基幹研究大学にGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に関する研究費が投入されており、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に関する研究も増えている。Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>について多くの大学から報告されるようになり、科学的・技術的レベルは大きく上昇している。</p>
	応用研究・開発	○	↗	<p>国内製造技術の強化を図る「中国製造 2025」には直接パワー半導体は取り上げられていないが、新エネルギー自動車（NEV）や鉄道などで膨大なパワー半導体の内需があり、複数のSi-IGBT向け300mmラインが建設中との報道もある。量的には今後数年で中国の世界シェアが急増する可能性がある。</p> <p>SiCについても、ウェハ、デバイス、モジュールから最終製品まで一貫通貫で開発が行われており、非常に活発である。展示会等で多くのブースが出展されている。GaNについては、HVPE法によるGaN基板を作るメーカーが誕生し、創業から数年であるにも関わらずある程度の品質を実現している。GaNデバイスの市場投入の動きはまだ見られない。</p>
韓国	基礎研究	△	↘	<p>最近、国際学会で発表が低迷しているだけでなく、参加者（聴講者）数も低迷している。SiC-MOSFET/SBDやGaN-HEMTは輸入に頼っており、パワーエレクトロニクス機器・システムに関する基礎研究は低迷している。</p>
	応用研究・開発	△	↘	<p>これまでの財閥系の新材料開発の勢いはなく、低迷している。SiデバイスについてはOn semiconductorが富川市の工場で生産することを発表しており、今後の開発が加速する可能性がある。</p>

(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) トレンド ※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

### 関連する他の研究開発領域

・電気エネルギー利用（エネルギーマネジメントシステム）（環境・エネ分野 2.1.8）

## 参考・引用文献

- 1) 富士経済グループ『2020年版 次世代パワーデバイス&パワエレ関連機器市場の現状と将来展望』(東京: 富士経済, 2020), <http://www.fuji-keizai.co.jp/report/detail.html?code=141909826>.
- 2) 津田建二「パワー半導体の王者 Infineon は冬の時代に何を考えるのか?」マイナビニュース, <https://news.mynavi.jp/article/car-electronics-132/> (2021年1月27日アクセス).
- 3) 服部毅「半導体不況どこ吹く風の中国パワー半導体市場 - 2019年も12%成長の予測」マイナビニュース, <https://news.mynavi.jp/article/20190308-785604/> (2021年1月27日アクセス).
- 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 of 新しいパラダイム」『応用物理』86巻11号(2017): 956. [https://kyutech.repo.nii.ac.jp/index.php?action=pages\\_view\\_main&active\\_action=repository\\_action\\_common\\_download&item\\_id=5271&item\\_no=1&attribute\\_id=17&file\\_no=1&page\\_id=13&block\\_id=21](https://kyutech.repo.nii.ac.jp/index.php?action=pages_view_main&active_action=repository_action_common_download&item_id=5271&item_no=1&attribute_id=17&file_no=1&page_id=13&block_id=21)
- 5) T. Saraya, et al., “Demonstration of 1200V Scaled IGBTs Driven by 5V Gate Voltage with Superiorly Low Switching Loss”, *International Electron Devices Meeting, IEDM* 8614491 (2019): 8.4.1-8.4.4. doi: 10.1109/IEDM.2018.8614491
- 6) T. Saraya et al., “3300V Scaled IGBTs Driven by 5V Gate Voltage”, *2019 31<sup>st</sup> International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)* (2019): 43-46. doi: 10.1109/ISPSD.2019.8757626
- 7) ECSEL Joint Undertaking, “R3-Powerup”, COMODO, <https://www.ecsel.eu/projects/r3-powerup> (2021年1月27日アクセス).
- 8) Y. Takeuchi et al., “A Novel Hybrid Power Module with Dual Side-gate HiGT and SiC-SBD”, *IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)* (2017): 57. <https://www.hitachi-power-semiconductor-device.co.jp/event/symposium/ispsd2017/index.html>
- 9) H. Yano et al., “Fast 4H-SiC Bulk Growth by High-Temperature Gas Source Method”, *Mater. Sci. Forum* 1004 (2020): 5-13. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1004.5
- 10) K. Puschkarsky et al., “Review on SiC MOSFETs High-Voltage Device Reliability Focusing on Threshold Voltage Instability”, *IEEE Trans. Electron Devices* 66, no. 11 (2019): 4604-4616. doi: 10.1109/TED.2019.2938262
- 11) Y. Ebiike, et al., “Reliability Investigation with Accelerated Body Diode Current Stress for 3.3 kV 4H-SiC MOSFETs with Various Buffer Epilayer Thickness”, *Proc. 2018 IEEE 30<sup>th</sup> International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)* (2018): 447-450. doi: 10.1109/ISPSD.2018.8393699
- 12) H. Yano et al., “Towards Making SiC ICs Durable and Accessible for Use in the Most Extreme Environments (Including Venus)”, *Mater. Sci. Forum* 1004 (2020): 1057-1065. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1004.1057
- 13) R. Tanaka et al., “Mg implantation dose dependence of MOS channel characteristics in GaN doubleimplanted MOSFETs”, *Applied Physics Express* 12, no. 5 (2019): 054001 doi: 10.7567/1882-0786/ab0c2c
- 14) J. L. Hudgins et al., “An assessment of wide bandgap semiconductors for power devices”,

- IEEE Tran. Power Electron.* 18, no. 3 (2003) : 907-914. doi : 10.1109/TPEL.2003.810840
- 15) M. Higashiwaki et al., “Gallium oxide ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) metal-semiconductor field-effect transistors on single-crystal  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  (010) substrates”, *Appl. Phys. Lett.* 100, no. 1 (2012) : 013504. doi : 10.1063/1.3674287
- 16) K. Hoshikawa et al., “50 mm diameter Sn-doped (0 0 1)  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  crystal growth using the vertical Bridgeman technique in ambient air”, *J. Cryst. Growth* 546 (2020) : 125778. doi : 10.1016/j.jcrysgr.2020.125778
- 17) J. Y. Tsao et al., “Ultrawide-Bandgap Semiconductors : Research Opportunities and Challenges”, *Adv. Electron. Mater.* 4, no. 1 (2018) : 1600501. doi : 10.1002/aelm.201600501
- 18) H. Akagi, “Multilevel Converters : Fundamental Circuits and Systems”, *Proceedings of the IEEE* 105, no. 11 (2017) : 2048-2065. doi : 10.1109/JPROC.2017.2682105

## 2.1

俯瞰区分と研究開発領域  
環境・エネルギー応用