

シンポジウム名：進化するパワー半導体・・・シリコンからワイドバンドギャップへ

本シンポジウムは、中分類 15.6「IV 族系化合物」の分科内シンポジウムとして、3月12日に開催された。

近年、現行のSiパワー半導体に加えて、ワイドバンドギャップ半導体であるSiCがパワー半導体として電源機器、モーター駆動、車両等に適用されている。またGaNも小容量、高速用途へと応用が始まろうとしている。一方で、更なる特性改善をめざして、Ga₂O₃、AlN、ダイヤモンドといったワイドバンドギャップ半導体もパワー半導体の観点からの研究が進められている。しかしながら、これら次世代、次々世代のパワー半導体が本来期待される性能を発揮し、これまで主流を占めてきたSiデバイスと肩を並べるまでには克服すべき課題が多く残されている。本学会でも、これまで個々の材料を個別に議論してきたが、この分野のより一層の発展には、これまで培ってきたSiの技術、あるいはSiCやGaN等の技術の横展開が不可欠と考えられる。そこで、本シンポジウムでは、パワー半導体を材料横断的に見たとき、共通点はなにか、それぞれの半導体の特徴はなにかを議論し、新たな展開を模索すると共に今後の研究開発の方向性を探ることを目的とした。

まず、シンポジウム冒頭に、本学会先進パワー半導体分科会の幹事長である京都大学・木本（敬称略、以下同様）より、近年の電力社会におけるパワーデバイスの重要性と本シンポジウムの狙いについて説明があった。ICTの爆発的普及など、我々の社会の電力需要が急速に高まる中、電力の有効利用の観点から、低損失・高速・大容量のパワー半導体が求められている。その担い手として、従来のSiパワー半導体に加えて、SiC、GaNといった新しいパワー半導体が出現してきた。これらの半導体が、それぞれの得意分野で力を発揮し、共存共栄していくことが、パワーエレクトロニクスの発展、さらには持続可能な社会の構築へと繋がっていくことが強調された。

引き続き、2015年度より内閣府「戦略的イノベーション創造プロジェクト」（通称SIP）の一課題としてスタートした「次世代パワーエレクトロニクス」プロジェクトの説明が内閣府の大森よりなされた。大森をプログラムディレクターとして進められている本プロジェクトの体制、狙い、目標などが説明されたが、本プロジェクトは、2020年までに現状に比して電力損失1/2、体積1/4の画期的なパワーエレクトロニクスを実現するという意欲的な内容である。半導体自体の開発にとどまらず、モジュール・機器の基盤技術開発にも取り組み、省エネ、CO₂削減、再生可能エネルギーの導入促進に寄与するとのことであった。

以後、シンポジウムの前半では、デバイス、結晶成長、結晶評価の各分野の専門家から、パワー半導体に関わるこれら技術の開発動向、課題について講演があった。

東芝の齋藤は、まずパワーデバイスの基礎的事項について解説した。パワーデバイスが動作する際に生じる損失（導通損失、スイッチング損失）、さらにはデバイスの特性オン抵抗と耐圧との間のトレードオフ関係が説明された。また、SiパワーMOSFETを例にとり、パワーデバイスの低オン抵抗化のためのこれまでの技術開発がレビューされた。ここでは、トレンチ構造やスパージャクション構造といった微細化技術に加えて、計算機を用いたデバイスシミュレーション技術が大きな役割を果たしてきたことが述べられた。これらSiデバイスを超えて、さらなる低オン抵抗化を実現し得るデバイスとして、SiC、GaNといったワイドギャップパワー半導体への期待が語られた。

九州大学の柿本は、Si、SiC、Ga₂O₃ といったパワー半導体材料の結晶成長について講演した。Si パワーデバイスでは主に FZ Si 結晶が使用されているが、この理由を述べるとともに、LSI 用 Si 結晶とパワーデバイス用 Si 結晶に求められる特性の違いを説明した。Si 結晶は完全結晶と思われがちだが、実際には点欠陥の密度分布にばらつきがあり、パワーデバイス用結晶としての重要な指標であるライフタイムが結晶部位によって変動する。この変動の原因は、Si 結晶中の酸素、炭素等の軽元素の挙動によって説明され、パワーデバイス用 Si 結晶の開発では、これら軽元素の制御が重要である。講演者は、九州大学で行われている計算機シミュレーションを用いたこれらの問題への取り組みを紹介し、この分野でのシミュレーション技術の重要性を示した。一方、SiC の昇華再結晶成長については、SiC 結晶の多形（ポリタイプ）制御について触れた。SiC 単結晶成長の総合伝熱解析に加えて、原料ガスの流動解析、表面反応解析を行い、結晶成長初期や結晶周辺部での異種ポリタイプ結晶発生を議論した。

前半最後の講演者として、千葉工業大学の山本は、パワー半導体材料の評価項目と評価技術について講演した。講演者はまず半導体デバイスにおける結晶欠陥の二面性とその評価の重要性について述べた。結晶欠陥の二面性とは、結晶欠陥には悪影響だけでなく、ゲッターリング効果のような良い影響もあることを意味している。パワーデバイス製造における結晶欠陥評価の例として、Si IGBT 製造時の高温処理に起因したスリップ転位発生やウェル拡散時の Fe 汚染に起因したライフタイム減少等について紹介し、これら結晶欠陥の評価がデバイスの歩留まり・信頼性向上に如何に寄与してきたかを述べた。ワイドギャップ半導体については、その結晶欠陥の多さから、従来のシリコンにも増して結晶欠陥評価が重要となる。結晶欠陥が存在しないチップ製造はありえないことから、結晶欠陥のデバイスへの影響を明確にし、影響の大きな欠陥から低減していくことの重要性が指摘された。

シンポジウム後半では、パワーデバイスとして要求される物性評価から、プロセス技術、応用技術へと話が展開した。

京都大学の須田は、パワーデバイスにおいて特に重要な物性として、最大電界強度 E_{max} があるが、これはあくまで近似的な考え方で、物理的に本質的なパラメータはインパクトイオン化率であることを説明した。インパクトイオン化率から計算される E_{max} は不純物濃度依存性があり、このため、耐圧クラスを限定して言及する必要がある。京大では SiC について、インパクトイオン化率を実験的に正確に測定し、各耐圧での E_{max} を求めて SiC の理論限界を示してきた。他の材料についても同様の実験に基づいた議論が必要であることを説明した。

次に、MOS デバイスにおいて最も重要なゲート絶縁膜と半導体の界面制御について、大阪大学の渡部が SiC を中心にその課題を議論した。界面遷移層に C 偏析層があってこれが影響しているとの議論がある一方、これまでの分析では界面は急峻で、界面の C=C 結合が影響している可能性を示唆するデータもある。また、シリコンでは界面の未結合ボンドを水素終端する手法があるが、SiC では結合が強く、その効果はほとんど期待できない。SiC においては NO アニールなどの窒化処理によって特性改善がなされているが、窒化はシリコンデバイスにおいて信頼性を低下させることが知られており、SiC はこのような危険をはらんだ状態でデバイスが作られていることに留意しておく必要がある、まだまだ今後の研究開発が必要である。GaN デバイスでは、熱酸化ができないため、堆積絶縁膜を用いることになるので、成膜技術に加え、GaN 表面の清浄化処理、表面終端処理が重要な技術となることを指摘した。

もう一つの重要な技術であるイオン注入について、豊田中研の加地が、Si、SiC、GaNについて、これまでの進展と課題を議論した。Siでは特にIGBTにおいて、裏面のFS層、アノード層にイオン注入技術が重要である。SiCにおいても高温で活性化処理することで、P、N領域を制御して形成することに成功している。一方、GaNにおいては、特にP型形成にBeやMgがイオン注入されているが、まともにP型になったという報告はない。これまで、高圧化、1400°Cまでのアニールを試みたことがあるが、PL測定ではDAPが確認されるものの、電氣的にP型の確認はできておらず、今後の重要な課題となっている。

このあとは、2件の応用技術の報告がなされた。富士電機の高橋は、Siパワーデバイスモジュール技術、SiCパワーモジュール技術について紹介した。特に自動車用では高パワー密度に伴う高い冷却能力が要求されるので、直接水冷の技術が取り入れられつつある。パワーモジュールは大きな構造を持っているため、試作回数を減らすことが重要であることから、流体、熱伝導等のパッケージシミュレーション技術が駆使されている。All SiCモジュールでは、熱抵抗を下げることのほかに、高速動作に対応できるようにインダクタンスを減らすためにワイヤボンディングからピンボンディングへと変更し、モジュールサイズを従来のIGBTから40%までの小型化に成功している。

シンポジウム最後として、最近のワイドバンドギャップ半導体のパワーエレクトロニクスへの実用化応用について、安川電機の川波から報告された。パワーデバイスの応用でもっとも重要なのは、家電からインフラまで多く使われているモーターの制御である。この小型効率化にこれまでシリコンデバイスの進展が貢献してきたが、これからはSiCやGaNが重要と考えている。SiCは中～大容量分野（1kV以上）、GaNは中～小容量分野（1kV以下）の領域で使用されていくととらえている。適用例をSiCで2つ、GaNでPCSへの適用例を示し、高効率化、装置サイズの大幅な削減に成功した。

本シンポジウムでは、190席の会場が満席となり、50名程度の立ち見で入口までふさぐほどの盛況ぶりであった。この分野における関心の高さがうかがわれた。

本シンポジウムの開催にあたり、ご講演いただいた皆様、ならびに企画段階での有意義なご議論をいただきました先進パワー半導体研究会幹事諸兄に感謝します。