

金属/高濃度ドーピング SiC 界面キャリア輸送の 理解に基づく低抵抗オーミック接合の形成

電子工学専攻 半導体物性工学研究室
博士後期課程 3 回生 原 征大

1. 研究背景

パワーエレクトロニクスは、AC アダプタによる電子機器への電力供給、自動車や鉄道車両のモータ駆動、送電系統における電力制御など、非常に多様な機器・システムを支える基盤技術です。燃料価格の高騰と電力逼迫が深刻化する現代社会において、パワーエレクトロニクスと、その中枢を担う半導体パワーデバイスの高性能化(通電損失の低減)が喫緊の課題となっています。現在主流のシリコン(Si)を用いたパワーデバイスの性能は、長年の研究開発により、Si の材料物性で決まる理論限界に達しつつあります。しかしながら、電力変換時の損失は 10–15%程度と依然として大きく、省エネルギーの観点で十分な性能とは言えません。そこで、この“Si 限界”を打破し、飛躍的な低損失化を実現可能な半導体材料として、ワイドギャップ半導体である炭化ケイ素(SiC)が注目を集めています。SiC は絶縁破壊に対する耐性が Si と比較して約 10 倍高いことから、同じ耐電圧の Si デバイスと比べて通電損失を約 1/500 にまで大幅に低減可能です。 SiC パワーデバイスは既に実用化が開始され、車載用インバータを中心に大きな省エネ効果を発揮している一方で、SiC デバイス作製技術が十分に成熟していないことが問題となっています。中でも、簡素なプロセスによる SiC への低抵抗オーミック接合の形成は、SiC デバイスのさらなる高性能化と、作製コスト低減によるさらなる普及のために解決すべき最重要課題の一つです。

オーミック接合は金属/半導体接合の一種であり、半導体デバイスを外部回路に接続する役割を担う、最も基本的かつ重要な構成要素です。オーミック接合に対しては、その接触抵抗率(ρ_c)を十分に低くすることが要求されますが、SiC はバンドギャップが広く、Ni や Ti などの典型的な金属を堆積したのみでは界面に高いエネルギー障壁が形成されるため、低い ρ_c を得るのが本質的に困難です。そこで、高濃度に不純物をドーピングした SiC 上に電極金属を堆積後、高温熱処理(~1000°C)を施すプロセスが業界標準となっています。しかし、このような高温熱処理によりオーミック接合が形成されるメカニズムが依然として不明であり、低抵抗化のための設計指針がありません。また、本プロセスはコストが高いだけでなく、デバイス特性に悪影響を与えるため、 ρ_c 低減のための新規低温プロセスの開拓が急務です。

2. 研究内容

SiC オーミック接合に関する多くの先行研究では、高温熱処理を前提として ρ_c の低減方法を実験的に探索する試みがなされてきましたが、20 年来にわたり顕著な進展はありませんでした。そこで、一度基本に立ち返り、高温熱処理を施さずに形成した金属/高濃度ドーピング SiC 界面(非合金化界面)における電気伝導機構を解明した上で、その理解に基づいて低抵抗化のための設計指針を確立すべきであると考えて研究に取り組みました(図 1)。

本研究では、高いドーピング密度(N_d)を有する SiC として、結晶成長中に不純物を多量に添加したエピタキシャル成長層(エピ層)と、不純物(リン, P)原子を高エネルギーで注入したイオン注入層の 2 種類を用意しました。これらの試料上に電極を形成して評価用素子を作製し、その電流-電圧(I-V)特性の測定および解析を行いました。従来、エネルギー障壁が存在する金属/半導体界面における電気伝導は、障壁を越えるエネルギーを有する電子による熱電子放出(TE)モデルに基づいて解析されてきました。一方、 N_d が高い場合にはエネルギー障壁が数十 nm 以下($<10^{-8}$ m)と非常に薄くなることに着目し、金属/高濃度ドーピング SiC 界面における電気伝導が、この薄い障壁をすり抜ける電子による量子力学的トンネルにより説明できるのではないかと考えました。トンネル電流を精密に計算するためには、半導体中のエネル

ギ一障壁の形状を厳密に定義した上で、電子の位置やエネルギーに関する数値積分を複数回にわたって計算する必要があります。本研究では、このようなトンネル電流の数値計算プログラムを、プログラミング言語(Python)を活用して一から実装しました。

本プログラムに基づく直接トンネル(DT)電流の計算値を、図2中に青実線で示しています。計算値は、高濃度ドーパ SiC エピ層を用いた場合の実験 I-V 特性(図2 中青シンボル)を広い電圧範囲において精度良く再現できていることがわかります。これにより、金属/高濃度ドーパ SiC エピ層界面における電気伝導が直接トンネルにより定量的に説明できることが明らかになりました。一方で、P イオン注入 SiC を用いた場合には、図2 中赤シンボルで示すように、同一 N_d のエピ層の場合と比較して電流が数桁大きくなることがわかりました。界面のエネルギー障壁高さを詳細に解析した結果、エピ層とイオン注入層でトンネル障壁の厚さがほぼ同一であることを明らかにし、イオン注入層を用いた場合には DT とは異なる電気伝導機構が支配的であることを突き止めました。エピ層は結晶欠陥が非常に少なく高品質であるのに対し、イオン注入時には P 原子を高エネルギーで SiC に衝突させることにより様々な欠陥が生成することに着目し、P イオン注入 SiC 上電極での電流増大が、イオン注入誘起欠陥が形成するエネルギー準位を介したトラップアシストトンネル(TAT)により説明できることを見出しました。さらに、このような TAT による電流増大を活用することにより、Mg/P イオン注入 SiC 界面において、高温熱処理を施すことなく、 $10^{-6} \Omega\text{cm}^2$ という実用レベルに低い ρ_c を実証することに成功しました。

以上の成果は、電気伝導機構の理解に基づいた理論的な ρ_c の予測と低抵抗オーミック接合の設計を可能にするのみならず、高温熱処理に頼らない新規プロセスの提案にもつながります。本研究を足がかりに、SiC デバイスのさらなる性能向上と作製コストの大幅な低減が実現できれば、SiC デバイスの広範な普及により省エネルギー社会の実現に大きく貢献することができます。

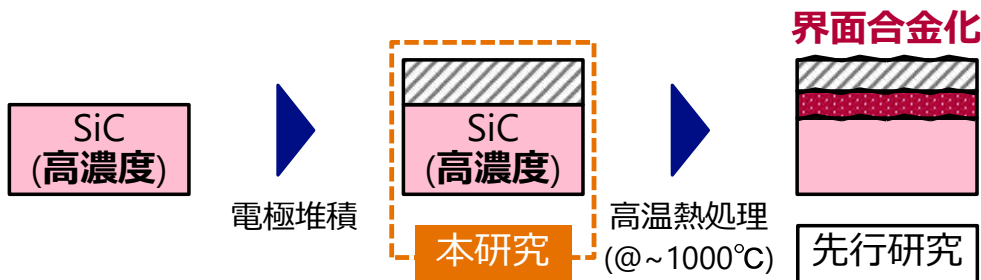


図1: 低抵抗 SiC オーミック接合形成のための業界標準プロセスと、先行研究および本研究の研究対象。

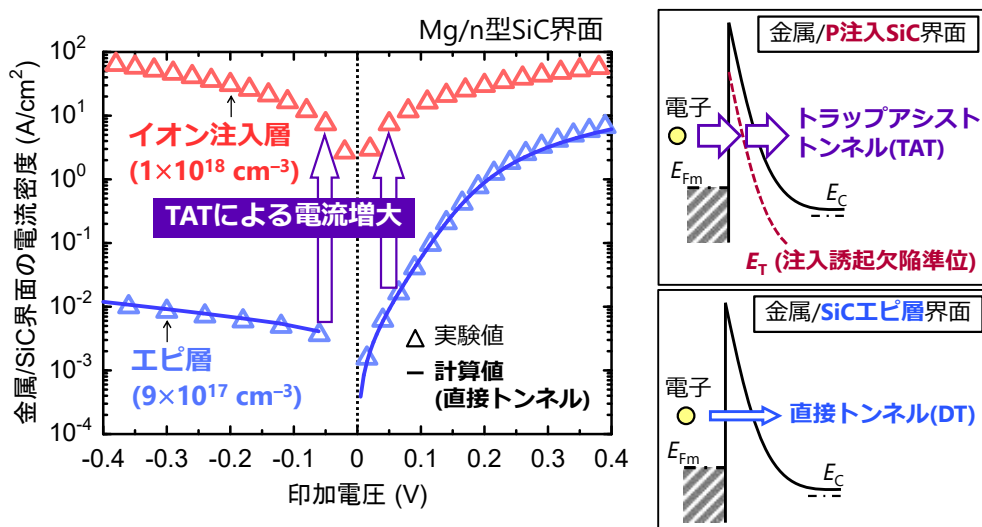


図2: 金属/高濃度ドーパ SiC 界面における電流-電圧特性(実験, 計算)とトンネル電流の概念図。