

京都大学	博士 (工学)	氏名	原 征大
論文題目	High-Field Transport at Heavily-Doped SiC Schottky Contacts and Formation of Non-Alloyed Ohmic Contacts (高濃度ドーピング SiC ショットキー接合における高電界輸送および非合金化オーミック接合の形成)		
(論文内容の要旨) <p>本論文は、高電圧電力変換用デバイスや高温動作集積回路用に有望な炭化珪素(SiC)半導体デバイスの重要な基本要素となる金属/SiC界面におけるキャリア輸送機構の理解、および金属膜堆積後に熱処理を加えない非合金化プロセスにより良好なオーム性電極を形成する技術に関する基礎研究をまとめたもので、6章からなる。</p> <p>第1章では、電力変換機器で用いられるパワー半導体デバイスおよび高温動作集積回路に用いられる微細半導体デバイスの重要性と要求される性能を紹介した後、SiC半導体の性質とSiCデバイスの有用性を述べている。この後、半導体デバイスにおけるオーミック接合の重要性を述べ、SiC半導体の分野で用いられている、金属薄膜を堆積後に約1000°Cの高温熱処理を要するオーム性電極形成プロセスを紹介している。さらに、得られている接触抵抗率のさらなる低減が必要であること、オーミック接合形成機構が不明であるために、低温熱処理で低抵抗オーミック接合を得るための指針が立たないことを述べて、当該分野における本研究の位置付けと目的を明らかにしている。</p> <p>第2章では、内部光電子放出(IPE)、容量-電圧(C-V)特性、および順方向電流-電圧(I-V)特性の測定という3つの異なる手法を用いて、金属/高濃度ドーピングn型SiCショットキー界面における障壁高さを詳細に調べた結果を述べている。高濃度ドーピングによる非常に薄い障壁(厚さ 約10~50 nm)と非常に高い電界(MV/cm)に起因して、10^{17} cm^{-3}台中盤以上のドーピング密度における順方向I-V特性が、一般的な熱電子放出(TE)モデルではなく、熱励起された電子の量子力学的トンネルによる熱電界放出(TFE)モデルにより説明できることを明らかにしている。さらに、TFEモデルに基づく解析により、3つの手法で一貫した精密な障壁高さの決定が可能であることを見出している。得られた障壁高さは、ドーピング密度の増加に伴って低下することがわかり、この障壁低下が、上述の高電界に起因した非常に強い鏡像力効果(~ 0.2 eV)により説明できることを定量的に示している。また、異なる3種のショットキー電極を用いることにより、ドーピング密度によらず、金属/n型SiC界面の障壁高さが広範囲(0.7-1.6 eV)で制御可能であることを明らかにしている。</p> <p>第3章では、様々なドーピング密度($N_d = 10^{17}-10^{19} \text{ cm}^{-3}$)を有するn型SiCエピタキシャル成長層(エピ層)を用いてショットキー障壁ダイオード(SBD)を作製し、その順・逆方向I-V特性をトンネル電流に着目して解析した結果について述べている。本解析においては、上述のTFE輸送に加え、熱励起を伴わないトンネルを記述する電界放出(FE)現象にも着目し、これら2種の伝導機構を包括的に記述する直接トンネル(DT)電流の数値計算式に基づく独自のプログラムを実装して解析している。本数値計算により、広範囲のドーピング密度、障壁高さ、印加電圧に対してI-V特性の実験値を精度良く再現することに成功し、金属/</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	原 征大
<p>高濃度ドーピングn型SiCエピ層界面の電気伝導がDTモデルにより定量的に説明可能であることを明らかにしている。また、計算した各電圧におけるトンネル電流のエネルギー分布から、最も頻繁に電子がトンネルするエネルギー(E_{peak})を抽出することで、TFEまたはFEのうち支配的なトンネル機構を特定することに成功している。その結果、順方向電圧下においてはTFEが優勢であるのに対し、逆バイアス下においては、さらなる高電界によりTFEからFEへの電気伝導機構の変化が生じることを見出している。さらに、高濃度ドーピングに伴う空乏層中の電界の急峻な変化を注意深く考慮することにより、TFE-FE遷移の臨界電界をドーピング密度によらず統一的に議論可能な新規解析手法を提案している。</p> <p>第4章では、実デバイスにおけるオーミック接合の多くが高濃度イオン注入層上に形成されることを念頭に置き、高濃度Pイオン注入n型SiC (P原子密度: $N_p = 1 \times 10^{17} - 8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) 上にショットキー接合を形成し、主にキャリア輸送特性について、エピ層を用いた場合との差異を詳細に調べた結果について述べている。縦型SBD構造に対するC-V測定により、Pイオン注入層において、$3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$程度の非常に高濃度条件においても、注入P原子の90%以上がドナーとして活性化していること、また、ショットキー界面障壁高さがエピ層を用いた場合とほぼ同一であることを明らかにしている。Pイオン注入を施した場合、ほぼ同濃度のエピ層を用いる場合と比較して、トンネル障壁厚さがほぼ同一であるにも関わらず、界面電流密度が数桁大きいことを示し、これがイオン注入誘起欠陥準位を介したトラップアシストトンネル(TAT)に起因する可能性を見出している。さらに、様々なトラップ準位を仮定したTAT電流の数値計算により、TAT電流に最も寄与する欠陥を推定している。</p> <p>第5章では、高濃度Pイオン注入n型SiC ($N_p = 4 \times 10^{18} - 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) 上に、TiおよびMgを電極として非合金化界面を形成し、接触抵抗率(ρ_c)を実験およびDT電流の数値計算により詳細に調べた結果を述べている。その結果、10^{19} cm^{-3}台中盤以下のドーピング密度範囲においては、ρ_cの測定値がDT電流に基づく計算値と比較して数桁低いことを明らかにし、これがTATの寄与により定性的に説明できると提案している。一方、10^{20} cm^{-3}を越える非常に高濃度の注入を行った場合、ρ_cの実験値と計算値は非常によく一致し、N_dの増加に伴い急激に減少した。特に、$2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$という高濃度注入により、MgおよびTi電極において、熱処理を施すことなく$1 - 2 \times 10^{-7} \text{ } \Omega \text{ cm}^2$という極めて低い$\rho_c$を達成している。以上の結果を基にして、DTおよびTATの寄与を考慮した、Pイオン注入SiC上非合金化オーミック接合におけるρ_c予測モデルを提案し、本モデルに基づいて、オーミック接合低抵抗化のための、障壁高さおよびドーピング密度に関する定量的な設計指針を提示している。</p> <p>第6章は結論であり、本研究を通じて得られた金属/SiC界面におけるショットキー障壁、量子力学的トンネル効果を考慮した電気伝導機構、非合金化プロセスにより形成したオーミック接合の接触抵抗率、低い接触抵抗率を達成するためのオーミック接合の設計指針についての知見をまとめている。また、当該分野における今後の研究課題を提示し、これらの課題解決に向けた研究の方向性を提案している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、炭化珪素(SiC)半導体デバイスの重要な基本要素となる金属/SiC界面におけるキャリア輸送機構の理解、および金属膜堆積後に熱処理を加えない非合金化プロセスにより良好なオーム性電極を形成する技術に関する基礎研究をまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. ドナー密度を広範囲で変化させたn型SiCエピタキシャル成長層を用いてMg、Ti、Niを金属電極とするショットキー障壁ダイオードを作製し、その障壁高さを精密に決定した。高濃度ドーピング試料における障壁高さの顕著な低下が、界面の高電界による鏡像力効果で定量的に説明できることを見出した。また、高濃度ドーピングSiC上でもショットキー障壁が金属の仕事関数に従ってほぼ理想的に変化することを示した。
2. 様々なドナー密度を有するn型SiCのショットキー障壁における電流-電圧特性を系統的に解析し、低濃度ドーピングSiCの場合は順方向特性が熱電子放出、逆方向特性が熱電界放出で記述できることを示した。一方、高濃度ドーピングSiCの場合は、ショットキー障壁が薄くなるため、電子のエネルギー分布を考慮した独自の直接トンネルモデルによって、順方向、逆方向特性ともに計算値が実測データを5桁以上の広い電流範囲で再現できることに成功した。
3. 実用上重要なリン(P)イオン注入により形成されたn型SiCを用いてショットキー障壁を形成し、その電流-電圧特性を詳細に解析した。注入したP原子がSiC中でほぼ100%活性化していること、イオン注入層上でもエピタキシャル成長層上と同じ障壁高さが得られることを明らかにした。次に、高濃度イオン注入層上に形成したショットキー障壁を流れる電流が同じドナー密度を有するエピタキシャル成長層上のもものと比べて桁違いに大きいことを見出し、これをトラップアシストトンネルモデルにより解析可能であることを提案した。
4. Pイオン注入により形成した高濃度n型SiC上にMgおよびTiを堆積して、その電流-電圧特性を解析した。ドナー密度を極限的に増大させることにより、金属堆積後の熱処理を一切行わない非合金化プロセスでも $10^{-7} \Omega\text{cm}^2$ という極めて低い接触抵抗率を有するオーム性接触を形成することに成功した。また、この金属/高濃度ドーピングSiC界面における電気伝導機構を元に解析を進め、非合金化プロセスによって十分低い接触抵抗率を達成する指針を提案した。

以上、要するに、本論文は高電圧電力変換用デバイスや高温動作集積回路用に有望なSiCデバイスの重要な基本構成である金属/SiC界面の電気伝導機構を、実験および理論的アプローチにより明らかにし、得られた学術的知見を基にして非合金化プロセスで最高水準の低抵抗接触率を達成したもので、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年1月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。