

氏名 タナカ カズヒロ
氏名 田中 和裕
学位の種類 博士（工学）
学位記番号 博第1322号
学位授与の日付 2024年3月31日
学位授与の条件 学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目 SiC結晶における高注入条件下でのキャリア再結合過程に関する研究
(Study on carrier recombination processes in SiC crystals under the high injection condition)

論文審査委員 主査 教授 加藤 正史
教授 三好 実人
教授 須田 淳
(名古屋大学)

論文内容の要旨

SiCはパワーデバイスとして期待されている半導体材料であり、ユニポーラデバイスが普及をはじめている。一方で、超高耐圧パワーデバイスを作製する場合、バイポーラデバイスの構造が適しているが、SiCバイポーラデバイスは未だ研究開発段階である。ここでパワーデバイスの性能は耐圧とオン抵抗で議論されるが、バイポーラデバイスのオン抵抗はキャリアの再結合過程に依存する。したがって、SiCによるバイポーラデバイスを実用化レベルの性能にするには、SiCにおけるキャリア再結合の律速因子の理解が必要である。さらにバイポーラデバイスの性能を限界まで引き出すには、高注入条件下でのキャリア再結合の制御が重要である。そこで本論文ではSiCの高注入条件下でのキャリア再結合過程を調査した。

第1章では、パワーデバイスの産業的状況およびSiCパワーデバイスの重要性を述べた。

第2章では、半導体中のキャリア再結合の理論の概要を述べた。

第3章ではキャリア寿命の実験的な測定手法についての概要を述べた。

第4章では比較的高純度の4H-SiCに対して高い励起キャリア濃度(N)での再結合過程を調べた結果を述べた。半導体中のキャリア再結合はショックレー・リードホール(SRH)再結合、表面再結合、輻射再結合、オージェ再結合過程によって決定される。ただし高純度か

つ厚膜の半導体における高注入条件でのキャリア再結合では、SRH 再結合および表面再結合は支配的ではなくなる。したがって、高純度・厚膜の半導体のキャリア再結合では、輻射再結合係数 B およびオージェ再結合係数 C の値が重要になってくる。本章では 4H-SiC の C が励起キャリア濃度 N に依存することを見出し、 C は $N > 5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ で $7.4 \times 10^{-19} N^{0.68} \text{cm}^6 \text{s}^{-1}$ となった。

この N 依存性はオージェ再結合過程のクーロンエンハンスメントがスクリーニングされることによるものだと考えられる。一方、欠陥を意図的に導入した 4H-SiC において C の値に変化は見えず、4H-SiC においてトラップアシストオージェ過程は支配的ではないことが確認された。本研究で得られた C の値 $7.4 \times 10^{-19} N^{0.68} \text{cm}^6 \text{s}^{-1}$ は従来の報告値より小さく、 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 以上のキャリアが注入されれば SiC バイポーラデバイスのオン抵抗を低減することが可能であることがわかった。

第 5 章においては n 型の 6H-, 3C-, 4H-SiC 試料の輻射およびオージェ再結合過程の調査の結果を述べた。マイクロ時間分解自由キャリア吸収法を用いて 6H-, 3C-, 4H-SiC の B と C を見積もった。結果としてこれらのポリタイプの間で 3C-SiC は B と C が最も小さく、4H-SiC が最も大きかった。4H-SiC の積層欠陥は構造的には他のポリタイプの混入と考えることができ、積層欠陥では再結合速度が速いことが報告されている。しかしながら、ポリタイプの間で 4H-SiC の再結合係数が最も大きいことを考えると、4H-SiC の積層欠陥の再結合は他のポリタイプの介在物による本質的な再結合とは考えられない。したがって積層欠陥に生じる自発分極、もしくは積層欠陥周辺に偏析する点欠陥が再結合を促進している可能性がある事が分かった。

第 6 章においては p 型 4H-SiC におけるキャリア再結合を調査した。従来 p 型 4H-SiC では自由電子とアクセプター準位の正孔との間の再結合 (e-A 再結合) か SRH 再結合かで議論が分かれていた。そこで本章では Al を高濃度にドーピングした p 型 4H-SiC の再結合過程を調べた。低注入条件下では、e-A 再結合が優勢であり、弱い温度依存性を示した。対照的に、高注入条件下では SRH の再結合が優先され、温度が上昇するにつれてわずかながらキャリア寿命が短くなっていった。この温度依存性は、正孔の熱速度と再結合中心の捕獲断面積の弱い温度依存性に起因すると考えられる。この発見は、従来の報告で用いられた実験条件と e-A 再結合および SRH 再結合の観測結果と対応している。したがって、この結果より報告されてきた 2 つの再結合過程を説明可能である。本研究結果は、高濃度 Al ドープ層を用いた SiC デバイスの設計に役立つと考える。

第 7 章においては本論文で得られた成果のまとめを論じた。

論文審査結果の要旨

本論文は、超高耐圧パワーデバイスとして期待されるSiCバイポーラデバイスに向けた、高注入条件下でのSiCにおけるキャリア再結合過程を調査したものである。以下に論文内容の要旨と審査結果を述べる。

第1章では、パワーデバイスの産業的状況およびSiCパワーデバイスの重要性が述べられている。

第2章では、半導体中のキャリア再結合の理論の概要が述べられている。

第3章ではキャリア寿命の実験的な測定手法についての概要が述べられている。

第4章では4H-SiCに対して高注入条件下での輻射再結合係数およびオージェ再結合係数の値の調査結果が述べられており、オージェ再結合係数が励起キャリア濃度に依存することを見出し、その経験的な関係式を得ている。また、欠陥によるトラップアシストオージェ再結合現象は観測されないことを述べている。これらの結果により、高い濃度でのキャリア注入が可能な構造のバイポーラデバイスにおける性能予測が可能となるということが述べられている。

第5章においてはn型の6H-, 3C-, 4H-SiC試料の輻射およびオージェ再結合過程の調査の結果が述べられている。そしてこれらのポリタイプの間で3C-SiCは輻射およびオージェ再結合係数が最も小さく、4H-SiCが最も大きかった。4H-SiCの積層欠陥は構造的には他のポリタイプの混入と考えることができ、積層欠陥では再結合速度が速いことが従来報告されている。しかしながら、ポリタイプの間で4H-SiCの再結合係数が最も大きいことを考えると、4H-SiCの積層欠陥の再結合は他のポリタイプの介在物による本質的な再結合とは考えられず、積層欠陥に生じる自発分極、もしくは積層欠陥周辺に偏析する点欠陥が再結合を促進している可能性がある事を述べている。

第6章においてはp型4H-SiCにおけるキャリア再結合を調査した。従来p型4H-SiCでは自由電子とアクセプター準位の正孔との間の再結合(e-A再結合)かショックレーリードホール(SRH)再結合かで議論が分かれていた。低注入条件下では、e-A再結合が優勢であり、弱い温度依存性を示した。対照的に、高注入条件下ではSRH再結合が優先され、温度が上昇するにつれてわずかながらキャリア寿命が短くなっていった。この温度依存性は、正孔の熱速度と再結合中心の捕獲断面積の弱い温度依存性に起因すると述べている。この発見は、従来の報告で用いられた実験条件とe-A再結合およびSRH再結合の観測結果と対応しており、高濃度Alドープ層を用いたSiCデバイスの設計に役立つと述べられている。

第7章においては本論文で得られた成果のまとめが述べられている。

上記のように論文内で示された高注入条件下でのSiC結晶のキャリア再結合過程に関する調査結果は、SiCバイポーラデバイスの設計に有用なものであると言える。したがって、本論文は博士論文として認めるのに相応しいものであると考える。