

氏名	付 巍
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第 9380 号
学位授与年月日	令和2年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	

Study of biaxial stress effect on electronic properties at the 4H-SiC-MOS interface
(4H-SiC-MOS 界面の電子特性に及ぼす二軸応力の影響に関する研究)

主査	筑波大学 准教授	博士(理学)	櫻井 岳暁
副査	筑波大学 教授	博士(工学)	岩室 憲幸
副査	筑波大学 准教授	博士(工学)	矢野 裕司
副査	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 上席研究員	博士(工学)	大島 武
副査	ゼット・エフ・ジャパン株式会社研究員	博士(工学)	小松 雄爾

論文の要旨

炭化ケイ素(SiC)は熱酸化により良質な酸化ケイ素(SiO₂)膜を形成することが可能であり、これを用いたパワーMetal-Oxide-Semiconductor (MOS)素子の開発が脚光を浴びている。パワーMOS素子は、電気自動車や電力変換器など省エネルギー機器に幅広く用いられており、SiCには既存のSiを用いた素子を凌駕する性能が求められている。しかし、SiC-MOS構造界面では移動度が理論値から大幅に低下し、素子性能が移動度の影響を受けるため、低移動度の原因追求と改善が課題と見做されている。本論文では、SiCの高温熱酸化時に発生する二軸応力に着目し、残留応力が移動度に与える影響の解析と、その改善法の開発を目的としている。

まず、SiC/SiO₂界面の二軸応力を顕微ラマン分光で検出した結果が議論されている。SiC基板の熱酸化は、Siより300°C程度高温の1200°Cで行う必要がある。この時、SiO₂膜とSiC基板では熱膨張係数が大きく異なるため、室温まで冷却した際SiC/SiO₂界面に残留応力が生じる。なお、顕微ラマン分光ではスネルの法則に基づき光学侵入長、すなわち応力の検出深さが決まる。このことは、共焦点光学系ではレンズの開口数(NA)が大きくなると、入射光に対する焦点距離が浅くなることから、ごく界面の情報が得られることを示唆する。著者はNAの異なる二つのレンズを利用して、応力の深さ分布を解析し、SiC/SiO₂界面近傍に100 MPa程度の応力が生じる様子を明らかにしている。一方、移動度向上に効果的とされるNOアニール処理に、界面応力を緩和する効果がない結果も併せて説明している。

続いて、ボルツマン方程式を基に理論解析した結果を用い、SiC界面に生じた二軸応力が移動度に与える影響について論じている。著者は変形ポテンシャルを考慮し、二軸応力の大きさをパラメータとして、音響ならびに光学フォノン散乱による移動度変化を計算した。このとき、三角ポテンシャルの導入による

SiC/SiO₂ 界面の二次元電気伝導についても考慮し、応力が移動度を与える影響を検討している。その結果、実験で求められた 100MPa 程度の二軸応力では顕著な移動度変化は起きないことを説明している。著者は解析結果を踏まえ、熱酸化により界面に生じた応力自体が移動度に直接影響を与えるのではなく、応力により生じた欠陥がキャリアの散乱源となり、移動度に影響を与えると結論づけている。

続いて本論文では、硝酸水溶液を利用して形成した SiC 界面極薄 SiO₂ 酸化膜と、原子層堆積法 (ALD) の組み合わせにより作製する SiC-MOS 構造を、新たに提案している。当手法は酸化温度が 120°C 以下の低温化学酸化法であり、SiC/SiO₂ 界面応力の解消に効果的であることを確認している。Si の場合、本手法を用いて作製した MOS 界面は少数キャリアが長寿命化しており、良質な界面形成に効果的であることが示されている。一方、SiC は化学耐性が強く、共沸点に近い温度まで硝酸を加熱しないと酸化膜が形成せず、さらに 800°C 近い温度でのアニールが必要である結果が示されている。蛍光を利用した界面評価において、提案した手法では SiC/SiO₂ 界面の改質を示す信号が得られ、SiC-MOS 構造の移動度の改善に有効な手法になりうると結論づけている。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

高温での酸化膜形成プロセスにより SiC-MOS 構造界面に生じる応力の存在は、近年様々な機関から問題提起が行われている。しかし、応力によりどの程度の影響が電気特性にもたらされるかについて解析した結果がほとんどなく、物理機構が十分理解されていなかった。本論文において、著者が分析ならびに解析した結果には、系統的な数値と電気特性の相関が示されており、今後研究開発者が素子を開発するのに有効な知見となりうる。実際の素子では酸化膜がパターン状に形成されるため、素子内部の応力分布が不均一になるが、本論文で得られた応力と電気特性の関連性はそのような事例にも適用可能な知見を与えると評価できる。

また、著者が新たに提案した、低温化学酸化膜と原子層堆積法の組み合わせを用いた SiC-MOS 構造では、界面応力の生成を防ぎながら絶縁膜の耐圧を確保することが可能である。実際の素子製造プロセスに適用するには段階を踏む必要があるが、今後の試験結果によっては SiC-MOS 界面の移動度を改善する、研究開発の新たな潮流になりうる。

これらの研究業績は、しかるべき論文誌を通して公開され、短期間ながらサイテーションが記録されるなど、同様の研究を行う研究開発者にインパクトを与える結果であることが示されている。

〔最終試験結果〕

令和 2 年 2 月 20 日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。