氏　　名	張 旭芳 (Zhang Xufang)
学 位 の 種 類	博 士 (工学)
学 位 記 番 号	博 甲 第　8808　号
学位授与年月日	平成 30年 9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	Modeling and Characterization of Near-Interface Traps in SiC Metal-Oxide-Semiconductor Devices (シリコンカーバイド金属-酸化膜-半導体デバイスにおける界面近傍酸化膜トラップのモデリングと評価)

主　査	筑波大学教授	博士(工学)	岩室 憲幸
副　査	筑波大学教授	工学博士	只野 博
副　査	筑波大学准教授	博士(工学)	梅田 享英
副　査	筑波大学准教授	博士(工学)	矢野 裕司
副　査	埼玉大学准教授	博士(工学)	土方 泰斗

論　文　の　要　旨

エネルギー・環境問題が世界共通の課題となっており、エネルギーの有効利用への取り組みが社会から求められている。電気エネルギーを有効利用するためには、パワーエレクトロニクス技術を駆使し、電力変換効率を改善していく必要がある。このような中、優れた物性値を持つシリコンカーバイド(SiC)を用いたパワー半導体デバイスが注目を集めている。近年、SiC を用いた金属-酸化膜-半導体電界効果トランジスタ(MOSFET)が実用化され、電車や電気自動車への SiC インバータの適用が多く検討されるようになった。しかし、市販されている SiC MOSFET においても、低いチャネル移動度と、素子にストレスを印加した際のしきい値電圧の変動が大きな問題となっている。SiC MOS デバイスにおけるこれらの問題は、SiO_2/SiC 界面における高密度の界面トラップが主原因であると考えられてきた。特に、SiO_2/SiC 界面から SiO_2 側に数 nm 以内の箇所に、界面近傍酸化膜トラップ(Near Interface Trap: NIT)と呼ばれるトラップが存在していることが報告されており、これが 4H-SiC の伝導帯端付近に存在する高密度の界面準位の起源ではないかと推測され、NIT の密度を定量化する研究が行われてきた。しかし、先行研究においては、NIT 密度の分布に関する解析は行われていないなど、NIT の性質の解明は不十分であった。また、これまで NIT は伝導帯側に存在することが報告されてきたが、価電子帯側の NIT の存在に関してはほとんど報告されていない。SiO_2/SiC 界面構造を理解し、MOSFET の特性を向上していくためには、NIT の性質を理解することが重要であると考えられる。

本博士論文は、上述した NIT の性質の解明を目指し、分布定数回路モデルおよびコンダクタンス法に

より伝導帯付近および価電子帯付近に存在する NIT の解析を行った張旭芳氏の研究をまとめたものである。

第一章の序論においては、SiC MOS 界面物理や NIT 解析などの先行研究について述べられており、NIT を解析することが重要であることと課題について述べられている。

第二章においては、伝導帯付近の NIT を解析するためのアプローチとして、従来は InGaAs 基板上の絶縁膜のモデリング手法として用いられてきた分布定数回路モデルを SiC MOS デバイスに適用することが提案されている。このモデルにおいては、InGaAs 上の MIS 構造に対して、蓄積状態における容量-周波数(C-f)特性・コンダクタンス-周波数(G-f)特性の周波数依存性を説明するために、界面近傍の絶縁膜中に存在するトラップを仮定し、それを分布定数回路のアドミッタンス成分で表現している。まず、SiC MOS キャパシタを用いて蓄積状態の C-f 測定・G-f 測定を行い、InGaAs 素子で見られた周波数依存性が存在することを示している。この特性に対して、分布定数回路モデルを適用し NIT のモデリングを行った。その結果 InGaAs 素子に対しては均一なトラップ密度分布が仮定されていたが、この分布では SiC MOS キャパシタの特性を完全には説明できないことが明らかとなった。そこで、SiO_2/SiC 界面から指数関数的に NIT 密度が分布していると仮定したところ、C-f・G-f 特性の周波数依存性をよく説明できることが明らかとなった。ドライ酸化により作製した MOS キャパシタに加え、ドライ酸化後の NO アニール時間を変化させたサンプルを評価し、NO アニールの時間が長くなるほど NIT の密度は減少することが示されている。

第三章においては、分布回路定数モデルによる解析において仮定された指数関数的 NIT 分布の妥当性を検討するために、異なった SiO_2 膜厚を有する MOS キャパシタの評価結果について述べられている。まず、SiO_2 膜厚を変化させることにより、全体の膜厚に対して NIT が存在している領域の割合が変化するため、指数関数的 NIT 分布の検証が可能であるアイディアについて述べられている。ただし、ドライ酸化の時間が長くなるほど界面準位密度が変化することが報告されているため、NIT 密度自体が変化している可能性に注意が必要なことが指摘されている。次に、異なった膜厚を有する MOS キャパシタに対する測定を行い、指数関数的 NIT 分布により全ての膜厚に対する特性をよく説明できることが記述されている。また、指数関数的分布以外にいくつかの分布を適用し比較も行っており、指数関数的分布が真の NIT 分布を近似する最も良い近似関数であることが示されている。また、酸化時間が長くなると、NIT 密度が増加する傾向も示されている。これらの結果を基に、熱酸化中に SiO_2 放出された Si もしくは C 原子が界面付近に滞留して NIT の原因となっている可能性について議論されている。

第四章においては、価電子帯側 NIT の評価を行うためにコンダクタンス法を適用することが提案されている。まず、通常のコンダクタンス曲線（G_p/ω-f 曲線）はガウシアン分布となるが、ドライ酸化で作製した p 型 SiC MOS キャパシタを用いた測定においては、左右非対称な G_p/ω-f 曲線が得られることが示されている。この非対称な特性を解析するため、早いトラップ成分と遅いトラップ成分に分離して考えることが提案されている。早いトラップ成分は、従来のガウシアン分布に基づくコンダクタンス解析によりトラップ密度などの定量化を行っている。一方、遅い応答に対しては、Cooper らによって提案された界面近傍トラップを考慮したコンダクタンスモデルを適用した解析が試みられている。これらの組み合わせにより、界面準位に起因すると考えられる早い応答のトラップと、NIT に起因する遅い応答のトラップの双方の定量化が可能であることが示されている。

第五章においては、本博士論文で確立された NIT モデリング手法と今後の課題についてまとめられ、SiC MOS 界面物理の理解に重要な知見が得られたと結論付けられている。

審　　査　　の　　要　　旨

〔批評〕

本論文は、SiC MOSFET の特性劣化の原因のひとつと考えられる NIT をモデリングし、解析する手法について議論したものである。分布定数回路モデルを SiC MOS 界面に適用することで NIT のモデリングが可能であることを示したことは今後の SiC MOSFET の界面トラップ密度を低減し、デバイス特性改善を行っていくうえでの重要な知見であると考えられる。また、指数関数的 NIT 分布は NIT 生成メカニズムと関連している可能性があり、物理的起源を解明していくうえでの重要な手がかりとなる可能性がある。さらに価電子帯側のトラップの評価手法については、負方向しきい値変動の原因などを検討することに役立つものと考えられる。本博士論文で提案された手法による評価結果と実際のデバイス特性との相関については今後さらに解析を要する課題ではあるが、本研究成果はさらに研究を進めていくための方向付けを示したものであり、その工学的意義は大きい。

以上のように、張旭芳氏の博士論文では、新規に見出された科学的知見が十分に議論されており、学術的な貢献が認められる。

〔最終試験結果〕

平成 30 年 8 月 9 日、数理物質科学研究科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。