

審査の結果の要旨

氏名 平井 悠久

4H-SiC は広いバンドギャップなどの物性から、電力変換用パワーデバイスに Si に代えて適用することで電力損失の低減が可能な半導体材料であり、徐々に実用化が開始されている。しかし現在の製造技術では、パワーデバイスの主要な構成素子である 4H-SiC パワーMOSFET（金属-酸化膜-半導体電界効果トランジスタ）のチャネル特性は、特にゲート絶縁膜との界面に形成される欠陥準位の存在によって大きく阻害されている。このような背景のもと、本論文は、熱酸化により形成される SiO₂ と 4H-SiC の界面構造を解析し、熱酸化プロセスの制御によって MOSFET チャネル特性を向上させる指針を明らかにしたものである。

本学位論文は 6 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、社会におけるパワーエレクトロニクスへの期待やパワーデバイスの役割を述べるとともに、4H-SiC の材料物性の特徴及び現在の 4H-SiC MOSFET 開発における技術的課題をまとめたものであり、特に SiO₂ をゲート絶縁膜とした MOS 界面形成プロセスの重要性を指摘している。

第 2 章は研究手法の説明であり、特に SiO₂ の構造に関する重要な解析手段となるフーリエ変換赤外分光法(FTIR)の測定手法や、インピーダンス測定から SiO₂ と SiC の界面欠陥準位を評価する手法、また MOSFET のチャネル特性を評価する手法について具体的に説明している。

第 3 章は、4H-SiC の熱酸化によって得られる SiO₂ 薄膜の、特に 4H-SiC との界面近傍の数 nm 程度の領域における構造の特徴を FTIR 測定におけるピーク振動数から解析し、その結果に基づいて理想的な酸化条件について考察している。まず、酸化剤を O₂ とした酸化（ドライ酸化）と H₂O とした酸化（ウェット酸化）による違いやその他の酸化条件について、密度や不定比性、及び構造の不均一性の深さ方向のプロファイルに見られる違いを明らかにしている。また界面近傍に残留する CO 結合によって生じるピークの強度も酸化条件によって異なることを発見、これらの結果を整理して理想的な酸化条件を議論している。続いて、各種の酸化条件を用いて作製した 4H-SiC MOS キャパシタの電

気特性から推定された界面近傍の SiO_2 中に存在する電子トラップ密度に着目し、FTIR 測定から得られた SiO_2 の構造的な違いと電子トラップ密度との相関の考察から、特にドライ酸化とウェット酸化という酸化手法の違いによって電子トラップ密度に大きな違いが生じる原因が、4H-SiC 界面近傍の SiO_2 の構造の違いにあることを明らかにしている。

第4章では、この MOS 界面の 4H-SiC 側に着目し、熱酸化によって 4H-SiC ウェハ内部で生じる変化について解析している。まず系統的に酸化履歴を変えた SiC ウェハを用いて作製した MOSFET の特性を比較し、熱酸化プロセスが SiC ウェハの特性劣化を引き起こすことを証明している。次に酸素の同位体を用いた昇温脱離測定によってその原因の究明を行っている。 $^{18}\text{O}_2$ 酸化及び H_2^{18}O 酸化を行った後のウェハの昇温脱離測定で C^{18}O の脱離が検出されることから、熱酸化の過程でウェハ内部へと酸素が侵入していることを発見、さらにその侵入量や侵入の形態が熱酸化条件によって異なることを明らかにしている。

第5章では、4H-SiC MOSFET のチャネル特性の向上のために、第3章及び第4章の知見を基に熱酸化プロセスを提案、その効果を検証している。まずウェット酸化による酸化膜成長の速度論的な特徴を検討し、界面近傍の電子トラップの低減に最も有利な条件として、 H_2O に少量の O_2 を含ませながら酸化温度を低温化した条件の選択を提案している。続いてこの条件で界面を形成した MOSFET を作製し、理想的な閾値電圧を維持したままでチャネル移動度が大幅に向上できることの実証に成功している。さらにホール効果測定を用いたチャネル移動度解析を行い、観察された移動度の向上は、主として SiO_2 中の電子トラップの低減によるものであることを示し、SiC との界面近傍における SiO_2 構造の制御の重要性を改めて指摘している。

第6章は、総括および将来展望を述べている。第3章から第5章で得られた結果を踏まえ、4H-SiC の熱酸化により形成される界面構造の特徴とそれが MOSFET 特性へ与える影響について総括している。また、将来の 4H-SiC MOSFET の MOS 形成プロセスの開発において考慮すべき視点を提示している。

以上のように本論文は、4H-SiC の熱酸化によって形成される MOS 界面近傍の構造的な特徴を系統的に解析し、それに基づいて MOSFET のチャネル特性を向上させるためのプロセスを提案、実証したものであり、4H-SiC パワーデバイスに関する技術的な観点のみならず、マテリアル工学の観点からも意義は大きい。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。