

京都大学	博士（工学）	氏名	小林 拓真
論文題目	Study on Defects in SiC MOS Structures and Mobility-Limiting Factors of MOSFETs (SiC MOS 構造における欠陥および MOSFET の移動度支配要因に関する研究)		
(論文内容の要旨) 本論文は、SiC（炭化珪素）パワーMOSFETの高性能化を目指して、酸化膜/SiC界面近傍の欠陥評価、界面特性改善とnチャネルMOSFETの移動度支配要因に関する研究をまとめたもので、6章からなる。 第1章では、電力変換機器で用いられる半導体パワーデバイスの重要性とパワーデバイスに要求される性能を紹介した後、SiC半導体の性質とSiCパワーデバイスの有用性を述べている。特に、産業応用上最も重要なSiCパワーMOSFET（金属-酸化膜-半導体・電界効果トランジスタ）の特徴と優位性を現行のSiパワーデバイスと比較しながら論じている。次に、SiCパワーMOSFETの研究開発の現状と研究課題、特にSiC MOSFET特有の低いチャネル移動度の問題に焦点を当てながら材料、デバイスの両方の観点で概説し、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。 第2章では、様々なドーピング密度を有するp型ボディ領域上に作製したSiC MOSFETの特性とチャネル移動度を詳細に調べ、移動度の支配要因について考察した結果を述べている。半導体MOS界面評価の分野では、室温におけるMOSキャパシタの容量-電圧特性の解析から界面欠陥密度を評価するのが標準であるが、SiC MOSFET特性に大きな影響を与える伝導帯端近傍の界面欠陥密度を求められないという課題があった。本研究において、極低温におけるMOSFETのサブスレッショルド特性を解析することによって伝導帯端近傍の界面欠陥密度を正確に求め、この界面欠陥密度とチャネル移動度がSiCのドーピング密度や結晶面によらない普遍的な相関を示すことを見出したことは特筆に値する。また、界面欠陥密度や移動度のドーピング密度依存性を反転層内の量子閉じ込め効果を考慮することで定性的に説明できることを提示している。これらの結果から、SiC MOSFETの性能を制限している最大の要因は界面ラフネスやSiC結晶内の欠陥ではなく、MOS界面近傍に存在する欠陥であることを明らかにしている。 第3章では、熱酸化により形成したSiO ₂ /SiC構造のMOS界面物性と構造評価について述べている。SiO ₂ /SiCのMOS界面に存在する欠陥の起源として、従来からSiCに起因する炭素関連欠陥が疑われてきたが、これを電子顕微鏡、光電子分光、イオン散乱などの機器分析により直接観察することは困難を極めた。本研究では、様々な条件でSiO ₂ /SiC試料を作製し、酸素を徹底的に排除した高純度アルゴン(Ar)ガス雰囲気中で高温熱処理を施すことによって、SiO ₂ /SiC界面近傍に蓄積されていた炭素原子がSiO ₂ 膜中に拡散することを二次イオン質量分析により明確に観測することに成功した。このMOS界面からSiO ₂ 中に放出される炭素原子の量は酸化膜の形成条件に依存すること、およびこの放出された炭素原子密度の積分値と電気的手法により評価した界面欠陥密度に相関があることを見出している。			

京都大学	博士（工学）	氏名	小林 拓真
<p>また、高分解能を有する走査型断面電子顕微鏡およびエネルギー分散型X線分光により、熱酸化を施した試料ではSiCバルク側にも炭素原子が数十nmに亘って拡散していることを見出している。これは熱酸化によるSiCバルク結晶内の点欠陥の生成と消滅に関する過去の実験結果を直接的に支持する重要な知見である。</p> <p>第4章では、SiC MOS界面欠陥の低減に有効なリン(P)拡散処理に着目し、第一原理計算によって界面近傍の炭素原子の挙動を調べた結果をまとめている。まず、十分なリン拡散が施された場合のSiO₂膜の安定構造を計算により求め、P原子の配置や化学結合に関する知見を得ている。次に、このリン拡散処理されたSiO₂膜中に一酸化炭素(CO)分子が供給された場合のCO分子の挙動を計算している。この結果、リン拡散処理によってSiO₂膜中に-O₃PO構造が形成され、これがMOS界面から脱離するCO分子を吸着することで界面の残留炭素が低減されることを見出し、リン拡散処理によるMOS界面欠陥低減メカニズムについて、原子レベルで説明するモデルを提案している。さらに、リン拡散処理の有効性はその処理温度に強く依存し、約1000℃のリン拡散処理により界面からの炭素除去が顕著になるという計算結果を提示している。この結果は、実験的に得られるMOS界面欠陥密度のリン拡散処理温度依存性とよく整合しており、特筆すべき成果と言える。</p> <p>第5章では、第3章で述べた高温Ar熱処理による界面からの炭素原子放出をMOS界面の高品質化に繋げた成果についてまとめている。SiO₂/SiC MOS構造を有する試料を高純度不活性ガス(Arなど)中、1300℃以上の温度で熱処理を施すと、MOS界面に蓄積された炭素原子がSiO₂膜中に拡散する。この炭素放出によりMOS界面欠陥が低減されると期待されるが、炭素を大量に含むSiO₂膜は電氣的絶縁性が低く、正常なMOS素子として動作しないことが判明した。そこで、高温熱処理時、Arに微量の酸素ガスを意図的に混ぜることによってSiO₂膜中に拡散した炭素原子をCOあるいはCO₂として除去することに成功し、MOS界面からは炭素が除去され、かつ炭素残留のないSiO₂膜が得られることを見出している。本手法により、リン拡散処理や窒化処理など異種原子の導入を用いずにMOS界面欠陥を大幅に低減できることを見出している。また、SiO₂膜中の炭素残留をなくすことによって、電氣的絶縁性に優れた酸化膜を得ることに成功している。本研究成果は、界面物理、デバイス工学の両面で、今後のSiC MOSFET研究の指針を与えるものと期待される。</p> <p>第6章は結論であり、SiC MOSFETのチャネル移動度の制限要因、MOS界面欠陥のミクロな構造、リン処理および窒化処理による界面欠陥低減メカニズム、および独自手法によるMOS界面欠陥の大幅低減など、本研究を通じて得られたSiC MOS界面欠陥およびMOSFETに関する新しい知見を整理して述べている。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指針を提案している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、高耐圧・低損失パワー半導体デバイスとして有望な炭化珪素(SiC)パワーMOSFET(金属-酸化膜-半導体・電界効果トランジスタ)の高性能化を目指して、酸化膜/SiC界面近傍の欠陥評価、欠陥低減とMOSFETのチャネル移動度支配要因に関する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. 熱酸化により形成したSiO₂膜をゲート酸化膜とするSiC MOSFETの特性とチャネル移動度を詳細に調べ、SiCの伝導帯端近傍の界面欠陥密度と移動度がドーピング密度や結晶面によらない普遍的な相関を示すことを見出した。また、界面欠陥密度や移動度のドーピング密度依存性を反転層内の量子閉じ込め効果を考慮することで半定量的に説明できることを提示した。この結果から、SiC MOSFETの性能を制限している最大の要因は界面ラフネスやSiC結晶内の欠陥ではなく、MOS界面近傍に存在する欠陥であることを明らかにした。
2. 熱酸化により形成したSiO₂/SiC構造のMOS界面物性と構造評価の相関について調べ、酸素を排除した高純度アルゴン(Ar)ガス雰囲気中で高温熱処理を施すことによって、SiO₂/SiC界面近傍に蓄積されていた炭素原子がSiO₂膜中に拡散することを見出した。また、この界面から放出される炭素原子の量と電気的手法により評価した界面欠陥密度に相関があることを明らかにした。
3. MOS界面欠陥の低減に有効なリン(P)拡散処理に着目し、第一原理計算によって界面近傍の炭素原子の挙動を調べ、P拡散処理によってSiO₂膜中に-O₃PO構造が形成され、これがMOS界面から脱離するCO分子を吸着することで界面の残留炭素が低減されるという重要な知見を得た。約1000℃のP処理により界面からの炭素除去が顕著になるという計算結果を提示し、これが実験的に得られる界面欠陥密度のP処理温度依存性と合致することを見出した。
4. 上記の成果を集約し、高温Ar熱処理時に微量の酸素ガスを混ぜることによってSiO₂膜中に拡散した炭素原子をCOあるいはCO₂として除去することに成功した。この結果、リン拡散処理や窒化など異種原子を用いずに良質のMOS界面と絶縁特性に優れた酸化膜が得られることを見出している。

以上、要するに、本論文はSiC MOSFETにおける移動度制限要因を解明し、その主たる要因であるMOS界面欠陥が炭素由来であることを明らかにすると共に、独自の手法によって良質のMOS界面と絶縁特性を有する酸化膜を形成することに成功したもので、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、平成30年2月21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。