

京都大学	博士（工学）	氏名	立木 馨大
論文題目	Short Channel Effects and Mobility Improvement in SiC MOSFETs (SiC MOSFETにおける短チャネル効果と移動度向上に関する研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、高効率電力変換素子として有望な炭化珪素(SiC)パワートランジスタの高性能化を目指して、金属-酸化膜-半導体構造の電界効果トランジスタ(MOSFET)の短チャネル効果の解明およびチャネル移動度の向上に関する基礎研究をまとめたものであり、7章からなる。</p> <p>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。最近、実用化が始まったSiCパワーMOSFETの優位性と課題、および課題解決に向けた研究の現状を概説し、SiC MOSFETに関わる研究課題を整理している。特に、SiCパワーMOSFETの性能を決定する酸化膜/SiC界面近傍に存在する高密度欠陥に関する理解が極めて不十分であり、この欠陥がMOSFET特性に及ぼす影響や欠陥低減の指針が未確立であることを指摘し、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。</p> <p>第2章では、SiC MOSFETのチャネル長を短くした場合に発現する短チャネル効果を実験的に調べ、Siの場合との類似点と相違点を整理して論じている。SiCパワーMOSFETで問題となっている高いチャネル抵抗は、チャネル長の短縮により低減できるが、極端な短チャネル化は短チャネル効果を発現させ、デバイスの特性を劣化させる。しかしながら、SiC MOSFETにおける短チャネル効果に関する学術的理解は極めて不十分であり、短チャネル効果を抑制しつつデバイスを微細化するための設計指針は確立されていなかった。本研究では、SiC MOSFETに特有なしきい値電圧の変化の解明、およびSiC MOSFETにおける短チャネル効果が発現しない最小チャネル長（臨界チャネル長）の決定を目標とし、広い範囲でチャネル長とボディ領域のアクセプタ密度を変化させたSiC MOSFETを作製し、その電気的特性を評価・解析した。作製したMOSFETのゲート特性から抽出した界面準位のエネルギー密度分布を考慮することで、ドレイン端における界面準位からの電子放出によるしきい値電圧の低下を精度よく予測する物理モデルを確立した。また、MOSFETのドレイン電流の飽和特性に着目し、界面準位の影響を受けにくい臨界チャネル長の決定手法を提案した。本手法を用いて決定した臨界チャネル長は、界面準位の影響を受けてSiCの物性値から予測される臨界チャネル長からわずかに長くなるという結果が得られ、学術的に有用な知見を提供している。</p> <p>第3章では、SiCの熱酸化により酸化膜(SiO<sub>2</sub>)を形成した後、高温窒素処理によって酸化膜とSiCの界面を窒化した効果を調べている。SiC MOSFETでは、酸化膜/SiC界面に高密度の欠陥が存在し、これがMOSFETの性能と信頼性を低下させている。従来、界面欠陥の低減を目指した研究は、酸化膜形成後の熱処理手法を実験的に探索することで推し</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	立木 馨大
<p>進められてきた。その過程で一酸化窒素(NO)雰囲気における熱処理(NO処理)が界面欠陥低減に効果的であることが示され、界面欠陥低減の標準手法として広く用いられている。しかしながら、得られるチャネル移動度は非常に低く、根本的な界面欠陥低減とチャネル移動度の向上が強く望まれている。本研究では、SiCの熱酸化膜形成後の高温N<sub>2</sub>処理により、伝導帯および価電子帯端近傍の界面準位密度を大幅に低減することに成功した。特に、価電子帯端近傍の界面準位の低減効果は従来手法の2倍程度であった。また、高温N<sub>2</sub>処理を施した酸化膜の信頼性を調べたところ、室温・高温ともに正負バイアス印加に対するフラットバンド電圧のシフトは従来手法の場合より少なく（優れている）、絶縁破壊電界も十分に高い(10 MV/cm)ことを示している。</p> <p>第4章では、前章で確立した高温N<sub>2</sub>処理を施したゲート酸化膜を有するnチャネルおよびpチャネルSiC MOSFETを作製し、特性を評価した結果を述べている。高温N<sub>2</sub>処理を施した場合、nチャネルMOSFETでは従来の最良技術（熱酸化後のNO処理）の場合とほぼ同等のチャネル移動度(約30 cm<sup>2</sup>/Vs)、pチャネルMOSFETでは従来の最良技術より約30%高いチャネル移動度(17 cm<sup>2</sup>/Vs)を得ている。このpチャネルMOSFETの移動度は、報告されているSiC pチャネルMOSFETの中で最高の値である。さらに、チャネル移動度と界面準位密度の相関、しきい値電圧と界面固定電荷密度の相関、さらにはMOSFETのサブスレッショルド特性から見積もられる界面準位密度とMOSキャパシタの容量-電圧特性から算出される界面準位密度の比較を行い、SiC MOS界面物理に関する有用な学術的知見を提供している。</p> <p>第5章では、様々な実験結果や理論予測を元に、SiCを熱酸化すると不可避免的に高密度の界面欠陥が生成されるとの仮説を立て、SiCの酸化を極力排除しながら良質の酸化膜を形成する手法を模索している。まず、SiCの酸化を排除するために堆積酸化膜を採用し、酸化膜(SiO<sub>2</sub>)堆積後に様々な条件で熱処理を行ったところ、NO処理が有効であることを見出している。次に、酸化膜を堆積する前にSiC表面を高温H<sub>2</sub>雰囲気でもエッチングすることが界面準位の低減に効果的であることを見出すと共に、SiCの熱酸化を行うと界面準位の生成が誘起されることを明確に示している。これらの実験結果を基に、高品質酸化膜/SiC界面を得るためのポイントとして、(1) 酸化膜形成前のSiC表面の高温水素エッチング、(2) SiCを酸化させない手法によるSiO<sub>2</sub>形成(酸化膜の堆積など)、(3) 酸化膜形成後のNO窒化処理の3つのプロセスが重要であることを示している。本手法で酸化膜を形成したn型MOSキャパシタの電気的特性を解析することにより、SiCパワーMOSFETの動作に重要な伝導帯近傍の界面準位密度を約5×10<sup>10</sup> cm<sup>-2</sup>eV<sup>-1</sup>にまで低減することに成功している。この界面準位密度は、従来手法で形成した場合(熱酸化後のNO処理)と比較して約1/5以下であり、当該分野で最も高品質のSiC MOS構造の形成に成功したと言える。また、本手法で作製した酸化膜の絶縁耐性を調べ、酸化膜電界が約6 MV/cmまでは有意の漏れ電流は観測されず、絶縁破壊電界は11.2 MV/cmと極めて高いことも示している。</p> <p>第6章では、前章で提案した酸化排除プロセスを用いて形成したゲート酸化膜を有するSiC nチャネルMOSFETを様々な結晶面、ドーピング密度を有するp型SiC上に作</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏 名	立木 馨大
<p>製し、その特性を評価した結果について述べている。まず、低いドーピング密度を有するp型SiC(0001)面上の標準的なMOSFETでは、ノーマリオフ特性を維持しながら従来法と比較して2倍のチャネル移動度(80 cm<sup>2</sup>/Vs)を達成している。このMOSFETは優れたサブスレッショルド特性を示し、かつゲート電圧ストレスを印加してもゲート特性がほとんど変化せず、高い信頼性を示すことを明らかにしている。次に、究極構造と言われるSiCトレンチMOSFETで重要となる無極性面((11<math>\bar{2}</math>0)面、(1<math>\bar{1}</math>00)面)上のnチャネルMOSFETも作製して特性を評価している。この結果、これらの無極性面上のSiC MOSFETにおいても、本研究で提案する手法により形成した酸化膜を用いることにより、顕著なチャネル移動度の向上を達成できることを明らかにしている。例えば、p型ボディ領域のアクセプタ密度が1×10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup>と高い場合でも100~130 cm<sup>2</sup>/Vsという優れた移動度が得られている。アクセプタ密度を5×10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup>に上げた場合でも移動度の著しい低下は見られず、80 cm<sup>2</sup>/Vsという移動度を得ている。これらの値は、従来法により作製されたSiC MOSFET特性と比べて約6~100倍という特筆すべき性能である。</p> <p>第7章は結論であり、本研究を通じて得られたSiC MOSFETにおける短チャネル効果の理解、および酸化膜/SiC界面準位低減による移動度向上についての知見をまとめている。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、炭化珪素(SiC)パワートランジスタの高性能化を目指して、金属-酸化膜-半導体構造の電界効果トランジスタ(MOSFET)の短チャネル効果の解明およびチャネル移動度の向上に関する基礎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. SiC MOSFETのチャネル長を短くした場合に発現する短チャネル効果を実験的に調べ、Si MOSFETの場合との類似点と相違点を明らかにした。特に、酸化膜とSiC界面に存在する欠陥がドレイン電流やしきい値電圧に与える影響を定量的に示した。さらに、SiC MOSFETに適した短チャネル効果発現の判定手法を提案し、その有効性を示した。
2. SiCの熱酸化により酸化膜(SiO<sub>2</sub>)を形成した後、高温窒素処理によって酸化膜とSiCの界面を窒化した効果を調べ、伝導帯近傍、価電子帯近傍の両方のエネルギー領域において、高温窒素処理により界面欠陥を大幅に低減できることを見出した。
3. 高温窒素処理を施したゲート酸化膜を有するnチャネルおよびpチャネルSiC MOSFETを作製し、高温窒素処理によって、nチャネル、pチャネルMOSFET共に顕著な移動度の向上を達成した。特にpチャネル素子で得られた移動度(17 cm<sup>2</sup>/Vs)は当該分野で最も高い移動度である。さらに、高いゲート電圧を印加した場合のしきい値電圧シフトを評価し、高温窒素処理を施した素子では、従来素子に比べて電圧のシフト量を抑制できることを示した。
4. SiCの酸化を極力排除しながら良質の酸化膜を形成する独自の手法を開拓し、MOSFET動作と密接に関係する伝導帯端近傍の界面欠陥密度を約一桁低減して、10<sup>10</sup> cm<sup>-2</sup>eV<sup>-1</sup>という過去に報告の無い低欠陥密度の酸化膜/SiC界面を形成することに成功した。さらに、本手法により形成した酸化膜が非常に優れた絶縁特性を示すことを明らかにした。
5. 酸化排除プロセスを用いて様々な結晶面、ドーピング密度を有するSiC MOSFETを作製し、(0001)面では80 cm<sup>2</sup>/Vs、(11 $\bar{2}$ 0)面では130 cm<sup>2</sup>/Vs、(1 $\bar{1}$ 00)面では110 cm<sup>2</sup>/Vsという従来技術に比べて2~6倍の高いチャネル移動度を達成した。また、MOSFETの低温特性から(11 $\bar{2}$ 0)、(1 $\bar{1}$ 00)面では伝導帯端近傍の界面欠陥が極めて少ないことを示した。

以上、要するに、本論文は高電圧電力変換用デバイスとして有望なSiCパワートランジスタにおける短チャネル効果を解明し、長年の問題となっていた酸化膜/SiC界面欠陥を低減して高いチャネル移動度を達成したもので、学術上、実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、令和4年1月24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。