OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Characterization and Mitigation of Defects in SiC MOS Structures for High-Performance and High-Reliability MOSFETs
Author(s)	藤本, 博貴
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/105429
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　藤本　博貴　）	
論文題名	Characterization and Mitigation of Defects in SiC MOS Structures for High-Performance and High-Reliability MOSFETs (高性能・高信頼性SiC MOSFET実現に向けたMOS構造中の欠陥評価と制御)

論文内容の要旨

近年、デジタルトランスフォーメーションや人工知能の進展に伴い電力需要が急激に増加し、省エネルギー技術の確立が喫緊の課題となっている。この課題解決のため、高効率電力変換を可能にするパワーデバイスの開発が不可欠である。しかし現状、電力変換時に生じる損失は大きく、技術的ブレークスルーが求められている。現在のパワーデバイスはシリコン（Si）半導体を用いて作製されているが、その性能は材料の物性限界に達している。そこで、物性の優れた炭化ケイ素（SiC）が次世代パワー半導体材料として注目されている。理論上、SiをSiCに置き代えることでパワーデバイスのオン抵抗を約1/600に低減できる。しかし、SiC MOSFETの心臓部であるMOS界面には高密度の欠陥が存在し、チャネル移動度が著しく劣化している。一酸化窒素（NO）アニールによる界面窒化により移動度は改善するが、バルク移動度の数%に留まり、特性改善効果が限定的である。加えて、NO窒化デバイスには長期信頼性に問題があることも知られている。

本論文ではSiC MOS構造中の欠陥評価と制御を通じて、高品質SiC MOS界面設計に向けた指針を得ることを目的とした。以下に本論文の構成を示す。

第一章では、研究背景としてSiC MOSFETの利点と課題を示した。

第二章では、NO窒化による信頼性劣化の知見を得るため、エキシマ紫外光照射によるNO窒化SiC MOSデバイスの電気特性変動を評価した。NO窒化SiO_2/SiC構造に対してエキシマ紫外光を照射することで、MOS構造中の電子トラップが顕著に増加し、界面特性と信頼性が著しく劣化した。一方で、非窒化試料に対するエキシマ紫外光照射の影響は軽微であった。信頼性劣化と界面近傍酸化膜中の窒素量の相関を評価したところ、両者の間に明確な相関が確認された。これにより、NO窒化で導入される酸化膜中窒素が信頼性に悪影響を及ぼすことが示唆され、NO窒化に代わる新たなMOS構造形成プロセスの必要性が明らかとなった。

第三章では、界面欠陥の除去および信頼性の改善に向けて窒素プロファイル制御技術を提案した。本手法はSiC表面のプラズマ窒化、スパッタSiO_2堆積、二酸化炭素（CO_2）中の堆積後アニールの3段階から成る。提案法により、標準NO窒化の約3倍の窒素をSiC表面に導入することに成功した。そして、NO窒化試料と比較し、伝導帯近傍の浅いエネルギー位置の界面準位密度を約1/3に低減した。また、界面準位密度を十分に低減するには、1250℃の高温CO_2アニールが必要であることも明らかとなった。長時間の正バイアスストレス印加下でも提案法で作製したMOSキャパシタの容量-電圧特性は安定しており、高い電子注入耐性を示した。さらに、NO窒化試料とは異なり、エキシマ紫外光を照射した場合でも優れた信頼性が得られた。これらの結果は、酸化膜中への窒素導入を抑制することが信頼性向上に寄与することを示している。

第四章では、希釈水素を用いた2段階水素熱処理を用い、窒化を排除しつつ、SiC MOSデバイスの性能および信頼性向上に取り組んだ。2段階水素熱処理では絶縁膜堆積前後に合計2回の希釈水素熱処理を行い、SiC表面欠陥の除去と界面欠陥の終端を行っている。本手法を用いることで、熱酸化試料と比べて界面準位密度を1桁以上低減することに成功した。一方、堆積前の希釈水素熱処理を行わない場合、あるいは堆積後の希釈水素熱処理をアルゴン熱処理に代えた場合には、界面準位密度が十分に低減しなかった。この結果より、堆積前と堆積後の双方で希釈水素処理を行うことが界面欠陥の制御に不可欠であることが明らかとなった。さらに、熱酸化試料と比べて、2段階水素熱処理で作製したSiC MOSFETの電界効果移動度は5倍以上に向上した。加えて、本手法は窒化排除プロセスであるため、MOSキャパシタの容量-電圧特性は正バイアスストレスを印加してもほとんど変化せず、負バイアス印加時においても特性変動はNO窒化試料の約1/4に抑制され、高い信頼性を実証した。

第五章では本研究の総括を述べた。

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　藤本　博貴　）			
論文審査担当者	（職）		氏　名
	主査	教授	渡部　平司
	副査	教授	大参　宏昌
	副査	教授	有馬　健太
	副査	教授	荻　博次
	副査	教授	桑原　裕司
	副査	教授	佐野　泰久
	副査	教授	森川　良忠
	副査	教授	山村　和也
	副査	准教授	小林　拓真

論文審査の結果の要旨

パワーデバイスは電力の変換と制御をつかさどり、省エネルギー社会実現に向けた重要技術に位置付けられている。炭化ケイ素（SiC）は、非常に高い絶縁破壊電界強度に加え、パワーデバイス応用において優れた物性を有しており、パワーモジュールを構成する金属-酸化物-半導体電界効果トランジスタ（MOSFET）にSiC半導体を用いることで、省エネ性能の飛躍的な向上が期待される。デバイスの製造工程では、SiC基板の酸化でSiO_2絶縁膜を形成可能であるが、SiCとの界面には電気的な欠陥が多数存在し、MOSFETの性能や信頼性を劣化させることが問題となっている。現在、SiO_2/SiC界面の欠陥終端技術としては、一酸化窒素（NO）雰囲気中での高温熱処理による界面窒化（NO窒化）が採用されているが、SiC MOS界面を流れる反転キャリアの電界効果移動度はバルク移動度の僅か数%に留まっている。加えて、NO窒化に伴うMOSFETの長期信頼性の劣化が指摘されている。本論文は、SiC MOSFETの高性能化と信頼性向上を目的として、SiO_2/SiC構造中の欠陥の評価と特性改善に取り組んでいる。

第一章では、SiC半導体の特徴や、パワーデバイス応用に際しての優位性ならびに技術課題をまとめている。

第二章では、NO窒化を施したSiC MOS構造へのエキシマ紫外光照射に伴う電気特性変動を詳細に評価している。窒化を施していないMOS構造ではエキシマ紫外光照射に伴う特性変動は軽微であるのに対して、NO窒化試料ではMOS構造中に多量の電子トラップが発生することを明らかにしている。また、光電子分光法で検出したSiO_2/SiC界面近傍の窒素量とエキシマ紫外光照射に伴う特性変動には明瞭な相関が観測されることから、従来のNO窒化技術の課題を明らかにすると共に、NO窒化に代わるSiC MOS界面の特性改善技術の必要性を指摘している。

第三章では、プラズマ窒化を施したSiC表面へSiO_2絶縁膜堆積と、二酸化炭素（CO_2）中での高温熱処理を組み合わせた手法を提案している。本手法によりNO窒化処理と比較して約３倍の窒素をSiO_2/SiC界面に導入し、伝導帯端近傍の欠陥準位密度を約1/3に低減することに成功している。また、エキシマ紫外光照射に伴う欠陥生成を抑制し、優れた電子注入耐性を実証している。これらの結果は、MOS界面の窒素濃度やプロファイル制御の重要性を示している。

第四章では、界面欠陥の起源となりえる窒素を完全に排除しつつ、SiC MOS界面の特性を改善する手法として、絶縁膜堆積前後に希釈水素雰囲気中で高温熱処理を施す新手法を提案している。絶縁膜堆積前の高温水素熱処理でSiC基板表面の欠陥を除去し、SiO_2堆積後には高温でのCO_2熱処理と水素処理を複合化することで界面特性と絶縁性の向上を図っている。本手法によりSiO_2/SiC界面に窒素を導入すること無しにNO窒化と同程度の低欠陥密度を達成すると共に、一般的な熱酸化で絶縁膜を形成したSiC MOSFETと比較して５倍以上の電界効果移動度を達成している。加えて、正負両バイアスでのストレス耐性が飛躍的に改善することを報告している。

第五章では、本研究の総括を述べている。

以上のように、本論文では、SiC MOS界面物性の理解を深めると共に、MOSFETの性能向上を可能にする革新的な技術を提案して、その優位性を実証している。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。