

令和 5 年 5 月 24 日現在

機関番号：14401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20429

研究課題名（和文）電子状態観察と分光学的解析による炭化珪素/酸化膜界面欠陥の起源解明

研究課題名（英文）Elucidation of defects at SiC/SiO₂ interfaces by electrical and spectroscopic measurements

研究代表者

小林 拓真（Kobayashi, Takuma）

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：20827711

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：炭化珪素（SiC）は広いバンドギャップおよび高い絶縁破壊電界を有し、パワーデバイス応用に有望な半導体材料である。本研究では、高性能・高信頼性SiC 金属-酸化膜-絶縁体（MOS）デバイスの実現に向け、デバイスの性能・信頼性の決定要因解明を目指した。結果、業界標準の一酸化窒素（NO）窒化プロセスは、界面欠陥のパッシベーションに有効である一方、MOS界面に電気的ストレスや紫外光照射で活性化す欠陥を生成することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、SiO₂/SiC構造の詳細な電気的評価および物理分析（X線光電子分光法）を実施し、SiO₂膜への過剰窒素導入がMOSデバイスの信頼性および安定性を劣化させることを指摘した。逆に言えば、膜中へ過剰窒素を導入しない窒化技術は、性能と信頼性を両立するSiC MOSデバイス実現の鍵となり得る。本研究で得られた知見は高性能・信頼性SiC MOSデバイスを実現する上で重要なものである。

研究成果の概要（英文）：Silicon carbide (SiC) is well-suited for power device applications because of its wide bandgap and high critical electric field. The aim of this study was to understand the factors that dominate the performance and reliability of metal-oxide-semiconductor (MOS) devices. It was found that, while nitridation in nitric oxide (NO) is effective in passivating the interface defects, it induces additional traps that are activated by electrical stress or ultraviolet light irradiation.

研究分野：半導体デバイス

キーワード：炭化珪素（SiC） 二酸化珪素（SiO₂） 電界効果トランジスタ（MOSFET） パワーデバイス 界面欠陥 窒化 信頼性

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電力の高効率利用に向け、電力変換（交流-直流変換や周波数変換）を担う半導体パワーデバイスの高性能化が不可欠である。現状主流の珪素（Si）パワーデバイスは、Siの物性により決定される理論限界に直面している。そこで、これを代替する材料として炭化珪素（SiC）が注目を集めている。SiCは広いバンドギャップ、高い絶縁破壊電界、および高い熱伝導率等の優れた物性を有し、パワーデバイス応用に適した半導体材料である。理論上、SiをSiCに置き換えることでパワーデバイスの通電損失を2桁以上削減できる。

このようにSiCはパワーデバイス応用に有望であるが、性能と信頼性を両立する金属-酸化膜-絶縁体（MOS）デバイスの実現が課題となっている。性能・信頼性向上の鍵は、デバイスの心臓部である二酸化珪素（SiO₂）/SiC構造の欠陥制御である。現状の業界標準は、一酸化窒素（NO）雰囲気での界面窒化処理であるが、窒化MOSデバイスには課題がある。例えばSiC（0001）面（Si面）では窒化の効果は限定的であり、一般にチャネル移動度は35 cm²V⁻¹s⁻¹程度に留まる。一方で（11-20）面（a面）や（1-100）面（m面）等の非基底面では、窒化を施すことで90 cm²V⁻¹s⁻¹を超える高いチャネル移動度が報告されているが、酸化膜絶縁性や閾値安定性に関しては十分に検討されていない。何よりもSiC MOSデバイスの信頼性決定要因の理解は未だ限定的であり、性能・信頼性を両立するデバイスの作製指針は明らかでない。

2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、本研究では物理分析と電気的評価の両手法を駆使してSiC MOSデバイスの性能・信頼性の決定要因に迫り、理想SiO₂/SiC構造の形成指針を確立することを目的とした。具体的には、期間中に（1）窒化を施した非基底面SiC MOSデバイスの信頼性制限要因の解明、および（2）エキシマ紫外光照射による窒化SiO₂/SiC構造の欠陥可視化の研究に取り組んだ。

3. 研究の方法

本研究の内、上記（1）に関しては、窒化条件を変えたSiO₂/SiC（11-20）構造を形成し、放射光X線光電子分光法（SR-XPS）によるバンドアライメント評価とMOSキャパシタの電気的評価を実施することで、窒化がデバイスの性能・信頼性に与える影響を評価した。試料にはn型SiC（11-20）エピ層（ドナー密度：1.5×10¹⁵ cm⁻³）を用い、1200℃酸化でSiO₂膜を形成後、1250℃で10, 30, 60, 120分のNO窒化を施した（試料：a10, a30, a60, a120）。また、比較用に1250℃60分のNO窒化を施したSiO₂/SiC（0001）試料も用意した（試料：Si60）。SR-XPS分析はSPring-8のビームラインBL23SUにて実施し、その際のX線エネルギーおよび光電子脱出角度はそれぞれ686.4 eV、90°とした。また、信頼性評価のため、MOSデバイスの電流-電圧（*I-V*）測定および容量-電圧（*C-V*）測定（バイアスストレス試験）を実施した。（2）では、窒化を施したSiO₂/SiC（11-20）構造にエキシマ紫外光（波長：172 nm）を照射し、信頼性に寄与する欠陥の可視化を試みた。本研究においては信頼性劣化とXPS分析で評価した界面窒素量との相関を議論した。この際のXPS分析は、X線エネルギー1486.6 eV（Al-Kα線）、光電子脱出角度90°の条件で実施した。

4. 研究成果

（1）窒化を施した非基底面SiC MOSデバイスの信頼性制限要因の解明

本研究では窒化が非基底面SiC MOSデバイスの信頼性に与える影響を調査した。まず、SR-XPS分析により評価したSiO₂/SiC構造のバンドアライメントを図1に示す。XPS測定ではSiO₂/SiC試料とSiC試料の価電子帯スペクトルを取得することで、価電子帯オフセット（ ΔE_V ）を評価し、SiO₂のバンドギャップ（8.7 eV）から差し引くことで伝導帯オフセット（ ΔE_C ）を決定して

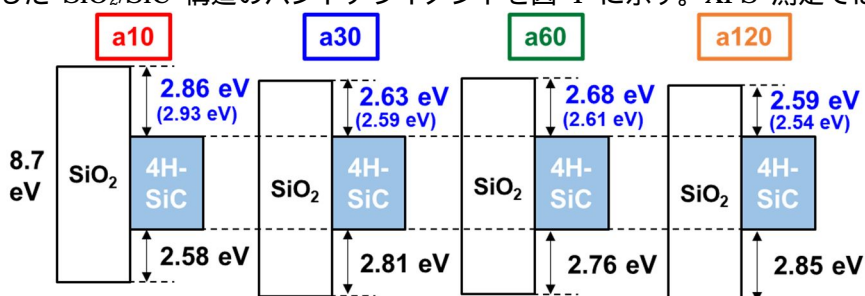


図1: SR-XPS分析により評価した窒化SiO₂/SiC(11-20)構造のバンドアライメント。括弧内の数値は*I-V*測定の解析により得られた ΔE_C 。

いる。図 1 の括弧内の数値は MOS デバイスの I - V 特性を *Fowler-Nordheim* (F - N) 伝導機構を仮定して解析することで求めた ΔE_c である。XPS と I - V 特性解析により得られた ΔE_c は 0.07 eV の範囲内でよく整合した。バンドアライメント評価の結果、30 分以上の窒化では ΔE_c が約 0.2 eV 低下することが明らかとなった。一方で SiO_2/SiC 界面の特性改善には 30 分以上の窒化が不可欠であることから、本オフセット低下に伴う絶縁性劣化は深刻な課題といえる。

図 2 に MOS キャパシタの正および負電圧ストレス試験の結果を示している。ここで、負電圧ストレスの印加時には紫外光を照射することで電極直下に少数キャリアである正孔を供給している。結果として、窒化が不十分な試料 (a10) では、電圧シフトは Si 面の標準試料 (Si60) と同等以下であった。しかし十分な窒化を施した試料では、Si60 に比べ顕著な電圧シフトが観察された。非基底面 SiO_2/SiC 界面では Si 面に比べ約 2.3 倍の窒素が NO 窒化で導入されるため、酸化膜中の過剰窒素が信頼性に悪影響を及ぼすと考えられる。なお、以上の信頼性劣化は (1-100) 面 (m 面) においても同様であった。すなわち過剰窒化は SiC MOS デバイスの絶縁性および閾値安定性を劣化させる。

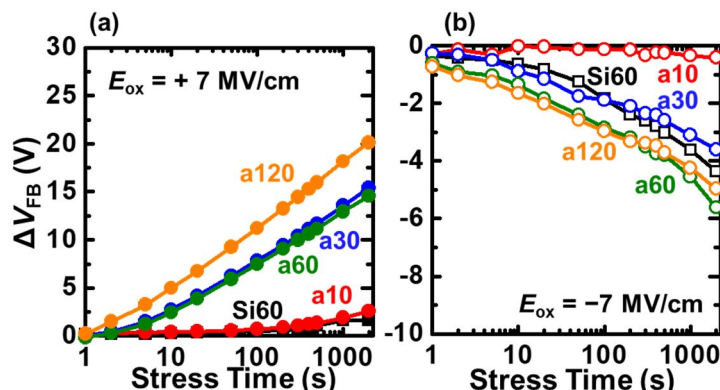


図 2: 窒化を施した SiC MOS キャパシタの (a) 正および (b) 負電圧ストレスに対するフラットバンド電圧変動。(b) ではストレス電圧印加時に紫外光 (波長: 250–450 nm) を照射し、MOS 界面に少数キャリア (正孔) を供給している。

(2) 紫外光照射による窒化 SiO_2/SiC 構造の欠陥可視化

界面窒化は上述の通り電氣的ストレスに対する信頼性劣化を引き起こすだけでなく、エキシマ紫外光照射で容易に活性化する欠陥も生成することを見出した。図 3(a) にエキシマ紫外光照射前後の試料のフラットバンド電圧変動の窒化時間依存性を示している。図に示す通り、エキシマ紫外光を照射することで同一のストレス条件 ($+6 \text{ MVcm}^{-1}$, 2000 s) でもフラットバンド電圧のシフト量が増加することが見て取れる。また、エキシマ紫外光照射後の電圧シフト量は窒化時間 10 分から 30 分にかけて増大し、30 分以上は飽和する傾向を示した。これは XPS 分析の窒素導入量の傾向と整合する。すなわち NO 窒化により導入される窒素量は窒化時間 10 分から 30 分の間に増加し、その後は飽和する。図 3(b) にエキシマ紫外光照射後の試料のフラットバンド電圧変動量と XPS により評価した酸化膜中の窒素信号強度 (界面から 1.5 nm の範囲の窒素由来) の関係を示している。図に示すように電圧シフト量と SiO_2 中への導入窒素量との間には明確な相関が見て取れる。すなわち a 面 SiO_2/SiC 界面近傍 (a30 – a120) には、Si 面 (Si60) の場合よりも高密度の窒素が NO 窒化により取り込まれることで、信頼性劣化が生じることが分かる。

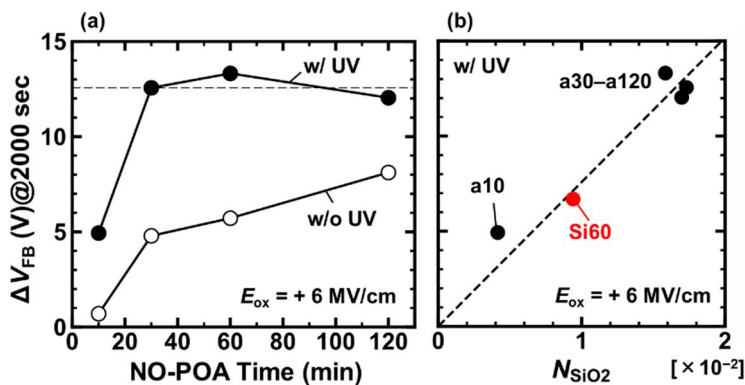


図 3: (a) エキシマ紫外光を照射した場合/しない場合の窒化 SiC MOS キャパシタのフラットバンド電圧変動の比較。(b) フラットバンド電圧変動と XPS により評価した SiO_2 中の窒素信号強度との相関。

上記 (1) (2) の研究を通じて、先行研究では十分に議論されていない NO 窒化プロセスの問題点を明確に指摘した。すなわち NO 窒化は界面欠陥のパッシベーションに有効である一方、酸化膜中に過剰窒素を導入する。この過剰窒素は外乱 (電氣的ストレスや紫外光照射) で容易に活性化することで、MOS デバイスの信頼性・安定性を劣化させる。裏を返せばこのような過剰窒素を導入しない界面窒化技術は、性能と信頼性を両立する SiC MOS デバイス実現の鍵となり得る。このように、学術的にも産業応用上も重要な知見を得た。関連の研究成果は、レター論文 Appl. Phys. Express 2 件に掲載済みであるとともに複数の学会にて報告を行っている。今後の展望として、膜中に余分な窒素を導入せずに SiC 表面のみを効率的に窒化する技術を確立したい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nakanuma Takato, Kobayashi Takuma, Hosoi Takuji, Sometani Mitsuru, Okamoto Mitsuo, Yoshigoe Akitaka, Shimura Takayoshi, Watanabe Heiji	4. 巻 15
2. 論文標題 Impact of nitridation on the reliability of 4H-SiC(11-20) MOS devices	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 041002 ~ 041002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac5ace	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fujimoto Hiroki, Kobayashi Takuma, Sometani Mitsuru, Okamoto Mitsuo, Shimura Takayoshi, Watanabe Heiji	4. 巻 15
2. 論文標題 Degradation of NO-nitrided SiC MOS interfaces by excimer ultraviolet light irradiation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 104004 ~ 104004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac926c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 藤本 博貴, 小林 拓真, 染谷 満, 岡本 光央, 細井 卓治, 志村 考功, 渡部 平司
2. 発表標題 エキシマ紫外光照射によるNO窒化SiC MOSデバイスの特性劣化
3. 学会等名 応用物理学会 先進パワー半導体分科会 第8回講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中沼 貴澄, 岩片 悠, 小林 拓真, 染谷 満, 岡本 光央, 吉越 章隆, 細井 卓治, 志村 考功, 渡部 平司
2. 発表標題 NO窒化処理を施した4H-SiC(11-20) MOSデバイスの絶縁性および閾値安定性の評価
3. 学会等名 電子デバイス界面テクノロジー研究会 - 材料・プロセス・デバイス特性の物理 - (第27回研究会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中沼貴澄, 小林拓真, 染谷満, 岡本光央, 吉越章隆, 細井卓治, 志村考功, 渡部平司
2. 発表標題 NO窒化処理を施した非基底面SiC MOSデバイスの信頼性
3. 学会等名 電気学会 電子デバイス研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤本 博貴, 小林 拓真, 染谷 満, 岡本 光央, 細井 卓治, 志村 孝功, 渡部 平司
2. 発表標題 NO窒化SiC MOSデバイスへのエキシマ紫外光照射の影響
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Nakanuma, A. Suzuki, Y. Iwakata, T. Kobayashi, T. Hosoi, T. Shimura, H. Watanabe
2. 発表標題 Investigation of reliability of NO nitrided SiC(1-100) MOS devices
3. 学会等名 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. Suzuki, T. Nakanuma, T. Kobayashi, M. Sometani, M. Okamoto, A. Yoshigoe, T. Shimura, H. Watanabe
2. 発表標題 Analysis of leakage current mechanisms in NO-nitrided SiC(1-100) MOS devices
3. 学会等名 2022 International Conference on Solid State Devices and Materials ((国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kobayashi, T. Nakanuma, A. Suzuki, M. Sometani, M. Okamoto, A. Yoshigoe, T. Shimura, H. Watanabe
2. 発表標題 Nitridation-induced degradation of SiC(1-100) MOS devices
3. 学会等名 19th International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Fujimoto, T. Kobayashi, M. Sometani, M. Okamoto, T. Shimura, H. Watanabe
2. 発表標題 Degradation of NO-Nitrided SiC MOS Devices Due to Excimer Ultraviolet Light Illumination
3. 学会等名 19th International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kobayashi, T. Nakanuma, A. Suzuki, M. Sometani, M. Okamoto, A. Yoshigoe, T. Hosoi, T. Shimura, H. Watanabe
2. 発表標題 Reliability Issues in Nitrided SiC MOS Devices
3. 学会等名 9th International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤本 博貴, 小林 拓真, 染谷 満, 岡本 光央, 志村 考功, 渡部 平司
2. 発表標題 NO 窒化 SiO ₂ /SiC(11-20) 界面へのエキシマ紫外光照射の影響
3. 学会等名 応用物理学会 先進パワー半導体分科会 第9回講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 亜沙人, 中沼 貴澄, 小林 拓真, 染谷 満, 岡本 光央, 吉越 章隆, 志村 考功, 渡部 平司
2. 発表標題 NO 窒化 SiC(1-100) MOS デバイスのリーク伝導機構
3. 学会等名 応用物理学会 先進パワー半導体分科会 第9回講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中沼 貴澄, 小林 拓真, 染谷 満, 岡本 光央, 吉越 章隆, 志村 考功, 渡部 平司
2. 発表標題 NO窒化を施した非基底面上SiO ₂ /SiC構造のバンドアライメント評価
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤本 博貴, 小林 拓真, 染谷 満, 岡本 光央, 志村 孝功, 渡部 平司
2. 発表標題 紫外光照射によるNO窒化4H-SiC(11-20) MOSデバイスの電気特性劣化
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 亜沙人, 小林 拓真, 染谷 満, 岡本 光央, 志村 考功, 渡部 平司
2. 発表標題 NO窒化処理を施したSiC(1-100) MOSデバイスのリーク電流特性
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------