

令和 6 年 5 月 20 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18170

研究課題名（和文）炭化珪素半導体MOS界面科学と界面設計指針の再構築

研究課題名（英文）Reconsideration of interface science and engineering of silicon carbide-based metal-oxide-semiconductor interface

研究代表者

渡部 平司（Watanabe, Heiji）

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90379115

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 20,000,000円

研究成果の概要（和文）：炭化珪素は次世代のパワーデバイス用半導体として期待され、MOS型電界効果トランジスタの社会実装が進んでいる。しかし、MOS構造を構成する絶縁膜とSiCとの界面には多量の欠陥が存在し、デバイス性能や信頼性劣化の原因となっている。しかし、界面欠陥の全貌は未だに明らかになっておらず、絶縁膜界面の高品質化が求められている。本研究では、SiC MOS界面の特異性の理解と、界面設計指針の再構築を最終的な目標として、SiC表面の酸化を伴わないMOS構造作製技術の開拓や、界面物性解析に特化したMOSデバイスの試作と特性解析に取り組んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱酸化SiC MOS界面の欠陥については、酸化の進行に伴う炭素不純物の偏析に加えて、SiC半導体のエネルギーバンド構造の特異性を指摘する理論計算結果が報告されている。しかし、これらの影響を系統的に解き明かした報告は皆無であり、本研究は新規ヘテロ界面科学の再構築を目指す取り組みとして学術的にも大きな意義を有している。また、SiCパワーデバイスの高性能化と信頼性向上は、電気エネルギーの高効率利活用に貢献し、省エネ社会実現に向けた最重要課題として位置付けられる。

研究成果の概要（英文）：Silicon carbide (SiC) is a promising semiconductor material for power device applications, and SiC-based metal-oxide-semiconductor field-effect transistors (MOSFETs) are being implemented. However, a large number of defects exist at the interface between the SiC and the gate dielectric (MOS interface), leading to deteriorated device performance and poor long-term reliability. However, details of the interface defects have not yet been revealed, and the quality of SiC MOS interface needs to be further improved for the widespread implementation of SiC power devices. In this study, aiming at understanding the unique nature of the SiC MOS interface and establishing new guidelines for interface engineering, we explored a novel method for fabricating high-quality SiC MOS structure without oxidizing the SiC surface, and characterized specially designed SiC MOS devices for the analysis of interface properties.

研究分野：薄膜工学

キーワード：炭化珪素 パワーデバイス MOS構造 界面科学

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

省エネ社会の実現に向け、電気エネルギーの高効率利用が不可欠となっている。パワーデバイスは電力の変換と制御を司り、その省エネ性能と信頼性の向上が急務である。これまで、シリコン半導体を用いたパワーデバイスが広く用いられてきたが、性能向上限界が近づいている。炭化珪素 (SiC) はシリコンの約 3 倍のバンドギャップと 10 倍に近い絶縁破壊耐圧を有し、次世代のパワーデバイス用半導体として注目されている。鉄道や産業機器に用いられるパワーモジュールは、ショットキーバリアダイオード等の整流器とスイッチング素子で構成されている。SiC パワーデバイスの研究開発において、ショットキーバリアダイオードの実用化は早くから進み、材料物性から期待される優れた省エネ性能が得られている。一方、スイッチング素子ではフェイルセーフ (Fail Safe) の観点から、ノーマリーオフ (Normally-off) 動作に適した MOS 型電界効果トランジスタ (MOSFET) の普及が望まれているが、SiC MOSFET の性能は期待値に遥かに及ばない。具体的には、SiC MOSFET の電界効果移動度はバルク中の電子移動度の数%に留まり、MOS チャネルの抵抗成分で省エネ性能が律速されている。これは絶縁膜と SiC との界面に多量の電気的な欠陥が存在し、MOS 界面に蓄積した電子の大部分を捕獲する結果、トランジスタ動作に寄与する可動電子の密度が低下すると共に、欠陥に捕獲された電子が散乱源となって可動電子の伝導を妨げるためである。しかし、SiC MOS 界面での移動度劣化は異常であり、従来のシリコン半導体で構築された MOS 界面科学の理解を超えている。近年の第一原理計算から、SiC の伝導帯下端がフローティング状態で構成されることが報告され、SiC MOS 構造の界面物性の制御には、これら全ての影響を考慮した新たな MOS 界面科学の構築が必要となる。現在、鉄道や産業機器への導入が進む SiC MOSFET では、MOS 界面に多量の窒素を導入して電気的な欠陥を不活性化しているが、窒化技術の提案から約 30 年近く経つが、欠陥終端機構についても詳細なモデルが確立していない。従って、SiC MOS 構造の界面物性の特異性や、窒化に伴う欠陥終端機構の解明は、学術的にも極めて興味深い研究対象であると共に、SiC パワーデバイスの性能や信頼性向上に向けた研究開発指針の提示に繋がる。

2. 研究の目的

本研究では、SiC MOS 界面の特異性に関する議論に決着を付けると共に、界面設計指針の再構築を最終的な目標としている。その第一段階として、現在、実用化している唯一の界面欠陥終端技術である界面窒化技術への理解を深める。また上述のように、SiC MOSFET の性能や信頼性劣化の理解とモデル化には、炭素関連欠陥の影響と、理論計算から導かれた伝導帯端の特異性を切り分けて議論する必要がある。従って、SiC 表面の熱酸化に伴う MOS デバイスの特性劣化を観測すると共に、SiC 表面の酸化を伴わない MOS 構造作製技術を探索する。さらに、伝導帯端の特異性を検出するための MOS デバイスを試作し、低温測定を含む様々な動作条件でのデバイス特性を取得することを当該研究期間中の目的とした。

3. 研究の方法

SiC MOSFET の研究開発当初、SiC(0001)基底面上の MOS チャネルを有する平面型のデバイスの評価が進められたが、上記のように電界効果移動度は非常に低い。一方、(1-100)や(11-20)等の非基底面では(0001)基底面に対して数倍の移動度が報告されている。さらに、(0001)面と直交するこれらの非基底面は縦型 (トレンチ型) MOSFET のチャネル面に相当に、これら非基底面上 SiC MOS 構造の理解が求められている。本研究では、NO ガス雰囲気中での高温熱処理で作製した非基底面 NO 窒化 MOS 構造の物理分析ならびに電気特性評価を実施した。

また、SiC 表面の熱酸化に伴う MOS チャネルの特性変動を評価すると共に、非酸化 MOS 構造の形成に取り組んだ。具体的には、SiC 表面の酸化を伴わない条件下での絶縁膜堆積技術に加え、SiC 基板と SiO₂ 絶縁膜の直接接合を検討した。特に後者の取り組みは世界でも報告例が無く、極めて挑戦的な試みであったが、当該研究期間の間に後述の研究成果が得られた。さらに、SiC MOS 界面の特異性の解析では、温度可変ホール効果測定に加え極微細 SiC MOSFET の試作に挑戦したが、後者については引き続き素子構造の改良を進めている段階である。

4. 研究成果

(1) 窒化界面の理解 [1, 2]: NO 窒化非基底面 SiC MOS 界面の窒素濃度を、膜厚傾斜試料を用いて走査型 X 線光電子分光 (XPS) 測定から評価した。その結果、(1-100)や(11-20)面上の MOS 界面には(0001)面に対して数倍の窒素原子が存在することが明らかとなった。これは、非基底面上の熱酸化 SiO₂/SiC 界面の電気的な欠陥を窒素で終端する為には基底面よりも多くの窒素原子が必要である事を意味する。また、非基底面 MOS 構造のゲートリーク電流は基底面 MOS に対して低電界領域から急激に増大し、ストレス印加時の信頼性劣化を観測した。XPS を用いた絶縁膜界面のエネルギーバンド構造評価の結果、リーク電流の増大は伝導帯オフセットの減少が原因であることが明らかとなった。これらの実験結果は、非基底面 MOS 界面では移動度改善が期待されるが、MOSFET の長期信頼性確保において問題を抱えていることを示しており、界面への窒素導入を伴わない新規 MOS 構造作製技術の創出が必要であることを意味する。

(2) SiC 表面酸化に伴う MOS 界面劣化解析：SiC 表面の熱酸化に伴い SiO₂/SiC 界面に炭素関連欠陥が偏析することが以前から指摘されているが、我々は熱酸化の進行で SiC 基板側にも何らかの欠陥が導入されると考えた。この仮説を実証する為、MOSFET の作製に際して、チャンネル領域への追加の犠牲酸化の有無による特性変化を観測した。図 1 は 50nm 又は 300nm の犠牲酸化をゲート絶縁膜堆積前に施したデバイスの電界効果移動度を比較した結果である。これより、従来 SiC 表面の清浄化技術として用いられてきた犠牲酸化工程で電界効果移動度が劣化し、SiC 表面の酸化の影響が SiO₂/SiC 界面だけでなく、SiC 基板側にも及んでいることが分かる。本結果は、非酸化 MOS 構造形成技術開発の必要性を意味している。

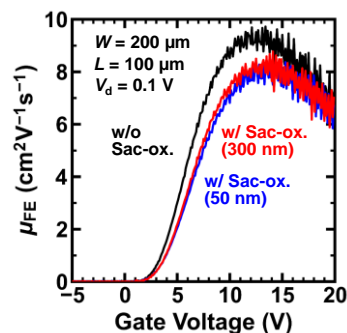


図1 SiC基板の熱酸化に伴うSiC MOSFETの電界効果移動度劣化

(3) 非酸化 MOS 構造形成（絶縁膜堆積）[3]：熱酸化に代わる MOS 構造形成法として SiC 上への絶縁膜の直接堆積が必要となるが、CVD 法に代表される SiO₂ 等の絶縁膜堆積は酸化性雰囲気で行われる為に SiC 表面の酸化は避けられない。よって、本研究では SiO₂ ターゲットを用いた低損傷スパッタ法で SiO₂ 絶縁膜を SiC 上に直接堆積した。その際、窒素ラジカル照射で SiC 表面の安定化を行うと共に、スパッタ SiO₂ 膜中の酸素欠損を独自の高温炭酸ガス熱処理で低減することで、絶縁性と界面特性に優れた SiC MOS 構造の作製に成功した。当該技術は、今後の高移動度 SiC MOSFET 開発の基盤技術として位置付けられる。

(4) 非酸化 MOS 構造形成（貼り合わせ）：近年、集積回路や多機能素子の 3 次元構造作製法として貼り合わせ技術に注目が集まっている。SiC MOS 構造の形成において、清浄な、或いは表面安定化を施した SiC 基板と高品質な絶縁膜を張り合わせる事ができれば非酸化 MOS 構造形成技術としての要求を満たす革新技術となる。本研究では、図 2 に示す手順で MOS キャパシタを作製し、界面電気特性を評価した。高品質な SiO₂ 絶縁膜を Si 基板の熱酸化で形成し、ウェット洗浄した SiC 基板に直接貼り付けた。その後、Si 基板を SiO₂ や SiC と十分な選択比を有する薬液で除去し、絶縁膜上にゲート電極を真空蒸着した。

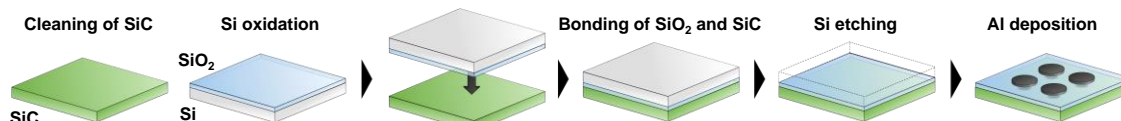


図 2 SiC 基板と Si 上の熱酸化 SiO₂ 絶縁膜との貼り合わせによる MOS キャパシタの作製

図 3 は貼り合わせで作製した SiC MOS キャパシタの C-V 特性評価結果である。直接接合だけでも正バイアス印加で電子蓄積が観測され、1200°C の希釈水素中の熱処理で双方向測定時のヒステリシスが小さい良好な C-V 特性が得られた。当該手法を応用すれば、貼り合わせ前の SiC 表面に対して様々な表面安定化処理を施すことが可能であり、新規 MOS 構造形成技術の基盤技術となる。

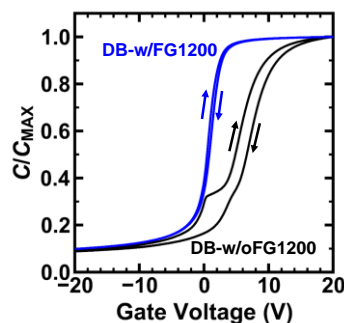


図3 SiCとSiO₂との貼り合わせで作製したMOSキャパシタのC-V特性評価

(5) MOS 界面伝導機構解析：温度可変ホール効果測定から反転キャリアの伝導機構を評価した。ストレス印加に伴う欠陥生成や移動度劣化の解析に加え、基板バイアス印加によって MOS 界面でのキャリアの存在位置を制御して、散乱機構のモデル化に取り組んだ。その結果、長時間のストレス印加により、SiO₂/SiC 界面での欠陥生成に加え、SiC 基板にも新たにキャリアの散乱要因となる欠陥が生成されることを明らかにした。

<引用文献>

- 1) T. Nakanuma, T. Kobayashi, T. Hosoi, M. Sometani, M. Okamoto, A. Yoshigoe, T. Shimura, and H. Watanabe, "Impact of nitridation on the reliability of 4H-SiC(11-20) MOS devices", *Applied Physics Express* **15**, 041002 (2022).
- 2) T. Kobayashi, A. Suzuki, T. Nakanuma, M. Sometani, M. Okamoto, A. Yoshigoe, T. Shimura, and H. Watanabe, "Characterization of nitrided SiC(1-100) MOS structures by means of electrical measurements and X-ray photoelectron spectroscopy", *Mater. Sci. in Semicond. Process.* **175**, 108251 (2024).
- 3) T. Kil, T. Kobayashi, T. Shimura, and H. Watanabe, "Design of SiO₂/4H-SiC MOS interfaces by sputter deposition of SiO₂ followed by high-temperature CO₂-post deposition annealing", *AIP Advances* **13**, 115304 (2023).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kil Tae-Hyeon, Kobayashi Takuma, Shimura Takayoshi, Watanabe Heiji	4. 巻 13
2. 論文標題 Design of SiO ₂ /4H-SiC MOS interfaces by sputter deposition of SiO ₂ followed by high-temperature CO ₂ -post deposition annealing	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 115304
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0169573	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kobayashi Takuma, Suzuki Asato, Nakanuma Takato, Sometani Mitsuru, Okamoto Mitsuo, Yoshigoe Akitaka, Shimura Takayoshi, Watanabe Heiji	4. 巻 175
2. 論文標題 Characterization of nitrided SiC(1-100) MOS structures by means of electrical measurements and X-ray photoelectron spectroscopy	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Materials Science in Semiconductor Processing	6. 最初と最後の頁 108251
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.mssp.2024.108251	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 T. Nakanuma, T. Kobayashi, T. Hosoi, M. Sometani, M. Okamoto, A. Yoshigoe, T. Shimura and H. Watanabe	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 041002-1-4
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 4件/うち国際学会 4件）

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 International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces (ISCSI-IX) (招待講演) (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 International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Watanabe, T. Kobayashi, T. Hosoi, T. Shimura
2. 発表標題 Recent progress and challenges in SiC and GaN MOS devices: understanding of physics and chemistry near the MOS interface
3. 学会等名 International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM) (招待講演) (国際学会)
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 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 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡部平司
2. 発表標題 ワイドバンドギャップ半導体MOS界面特性の類似性と相違点
3. 学会等名 先進パワー半導体分科会 第8回講演会（招待講演）
4. 発表年 2021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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

渡部研究室ホームページ http://www-ade.prec.eng.osaka-u.ac.jp/
--

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
---------	---------