

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 3 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630124

研究課題名(和文) ビーム励起界面反応によるSiCパワーデバイスヘテロ界面改質技術

研究課題名(英文) Improvement of SiO₂/SiC interface quality by beam induced interface reactions

研究代表者

渡部 平司 (WATANABE, HEIJI)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90379115

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：シリコンカーバイド(SiC)は、高い絶縁破壊電界強度と熱伝導度を有し、次世代のパワーエレクトロニクス材料として期待されている。SiC-MOSFETはノーマリーオフ動作が可能な理想的なスイッチングデバイスであるが、MOS界面には多量の欠陥が存在し、素子性能や信頼性を劣化させることが問題となっている。本研究では、SiO₂/SiC構造に対して、外部からのビーム照射によりMOS界面の電気特性を改善するビーム励起界面反応技術を提案する。本研究期間では、熱酸化SiO₂/SiC構造に紫外線または電子線照射を行う事で、構造欠陥の起源を探ると共に、ビーム励起界面反応技術構築に向けた基礎データを取得した。

研究成果の概要(英文)：SiC has gained considerable attention as a promising material for next-generation power electronics due to its superior breakdown field and thermal conductivity over Si. Although SiC-MOSFETs provide normally-off characteristic, MOS devices have suffered from deteriorated interface properties leading to low channel mobility and poor reliability. In this study, we propose a novel method based on "beam induced MOS interface reactions" to overcome these problems. Impacts of single wavelength ultraviolet light and high-energy electron beam irradiation onto thermally-grown SiO₂/SiC structures were examined in order to understand role of energetic beams for improving MOS interface quality. Moreover, physical origins of MOS interface defects were discussed on the basis of experimental findings.

研究分野：薄膜工学

キーワード：電子・電気材料 パワーエレクトロニクス

1. 研究開始当初の背景

ワイドバンドギャップ半導体は、大電力を高速かつ低損失で変換・制御するパワーエレクトロニクス用材料として期待されている。シリコンカーバイド (SiC) は、高い絶縁破壊電界強度と熱伝導度を有し、次世代のパワー半導体用材料として期待されている。電力損失を極限にまで低減した SiC インバータ回路では、ダイオードに加えて、スイッチング損失や安全性に優れたノーマリーオフ型の MOS 型トランジスタの普及が切望されている。SiC は熱酸化によって SiO₂ 絶縁膜を形成可能であり、MOS 型デバイス作製の観点で有利である。しかし、熱酸化 SiO₂/SiC 界面には多量の欠陥が存在し、トランジスタのチャネル移動度低下によるエネルギー損失や、ゲート絶縁膜の信頼性劣化の問題が生じている。また、界面欠陥の物理的な起源として炭素不純物の影響が指摘されているが、詳細は不明である。つまり SiC-MOS 界面の特性改善技術の探索と界面欠陥構造の理解は、学術的にも社会的要請の観点からも極めて重要なテーマである。

2. 研究の目的

本研究では、SiC-MOS 構造に対して外部からの各種の励起ビームを照射することにより、MOS 界面の電気特性を改善する“ビーム励起界面反応技術”を提唱し、電気エネルギーの変換効率に優れた SiC-MOS パワーデバイスの実現を目指す。一方、外部からの入射ビームと SiO₂/SiC 界面欠陥との相互作用を詳細に解析することで、欠陥構造の物理的な起源を明らかにすることが可能となり、高品質 SiC-MOS 界面形成技術実現に向けた貴重な物性情報となる。

3. 研究の方法

研究期間の前半では、SiO₂ に対して透明でありながら、効果的な界面反応励起が可能となる紫外線を SiC-MOS 構造に照射し、MOS デバイスの特性劣化現象から、紫外光と SiO₂/SiC 界面欠陥との相互作用を詳細に評価した。さらに研究期間の後半では、紫外光と比較して界面欠陥との強い相互作用が期待される電子線照射を用いた SiC-MOS 界面評価ならびに界面欠陥崩壊過程の解析を行った。

具体的には、前者の紫外線照射実験では、波長可変紫外線レーザーを用いて、SiC-MOS 構造への光照射を実施し、MOS キャパシタの特性劣化が生じる閾値エネルギーから界面欠陥の起源を考察した。また、後者の実験では、まずはカソードルミネッセンスを用いて SiC-MOS 界面からの欠陥由来の発光検出を試みた。その結果、熱酸化膜を形成する SiC 基板の面方位に依存した発光性の構造欠陥の検出に成功する共に、これらの MOS 界面評価実験を通じて、熱酸化 SiO₂/Si 界面の欠陥構造について新たな知見を獲得した。

4. 研究成果

(1) SiC-MOS 構造への紫外線照射実験では、n 型 4H-SiC(0001) 基板を洗浄後、1150°C のドライ酸化により膜厚約 40 nm の熱酸化膜を形成し、全固体レーザーによる単色紫外線 ($\lambda = 193, 221, 257 \text{ nm}$) 照射を行った。その後、Al ゲート電極を形成して SiC-MOS キャパシタを作製した。強度 800 mW/cm² の紫外線を室温にて 1 時間照射 (照射量 2.88 kJ/cm²) した MOS キャパシタの容量-電圧 (C-V) 特性を図 1 に示す。紫外線波長が短くなるほど、フラットバンド電圧 (V_{FB}) の正方向シフトや C-V ヒステリシスの増大といった電気特性劣化が顕著になっていることがわかる。さらに、図 2 に示す V_{FB} と C-V ヒステリシスの照射量依存性から、波長 257 nm では特性劣化がほとんど見られないのに対し、221 nm 以下の短波長域においては照射量に依存した特性劣化が見られ、紫外線波長が短いほど MOS 界面の欠陥生成が顕著となった。

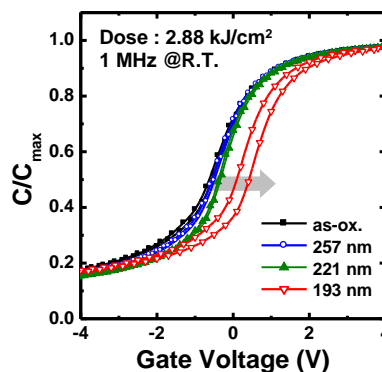


図 1. SiO₂/SiC 構造への紫外線照射効果

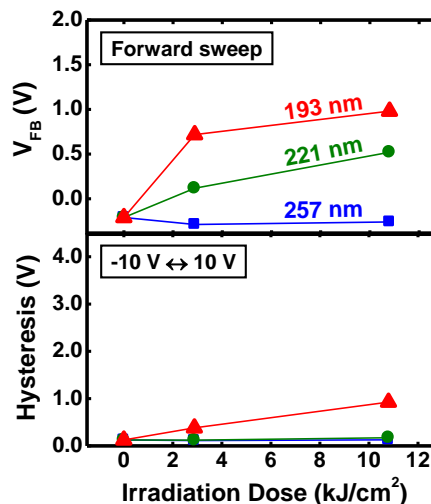


図 2. SiC-MOS 構造への紫外線劣化の入射光波長依存性

次に、紫外線照射時の基板温度が欠陥生成に与える影響について調べた。上記と同様の熱酸化膜付き SiC 基板を加熱 (R. T. ~200°C) し、強度 800 mW/cm² の紫外線を 1 時間照射した。その後、Al ゲート電極を形成して作製した MOS キャパシタの C-V 特性から算出した V_{FB}

と C-V ヒステリシスの基板温度依存性を図 3 に示す。紫外線照射時の基板温度が高くなるほど電気特性劣化が進行しており、多量の電氣的欠陥が生成されたと考えられる。

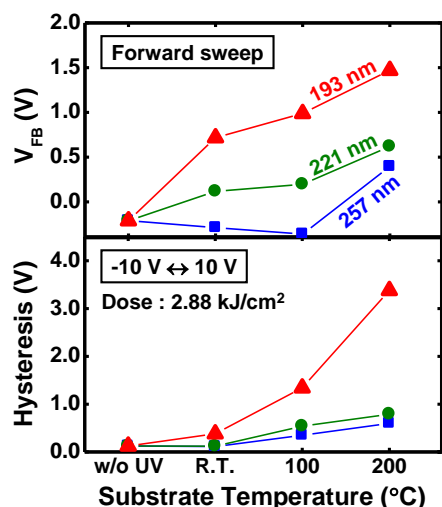


図 3. SiC-MOS 構造への紫外線照射劣化現象の基板温度依存性

これらの実験結果から、SiC-MOS 界面には励起波長 200 nm 程度の紫外線照射、つまり 5 ~ 6 eV 程度の反応励起によって活性化される構造欠陥が多量に存在することが明らかとなった。従来、SiO₂/SiC 界面には炭素起因の構造欠陥が存在することが指摘されているが、本実験結果を考慮すると、単純な C-C 結合ではなく、より強固な C=C 二重結合に類似した構造欠陥の存在が示唆される。つまり、C=C 二重結合のような強固な欠陥構造は熱酸化膜形成後の高温後アニールでも消滅させることは困難であるが、ビーム励起界面反応により、これらの強固な界面欠陥構造を選択的に崩壊させることができたと考えている。(D. Ikeguchi *et al.*, Appl. Phys. Lett. **104**, 12107 (2014).)

(2) 上記の紫外線照射実験では炭素起因の MOS 界面欠陥の存在が示されたが、紫外線照射では界面反応励起に長時間を要する。よって、研究期間の後半では、界面励起反応をより効率的に進める入射ビームとして高エネルギー電子線を選択した。一方、分析科学の観点からは、電子線照射に伴う発光 (カソードルミネッセンス) を観測することで、SiO₂/SiC 構造中の発光性の構造欠陥を検出できる可能性がある。

SiO₂/SiC 構造のカソードルミネッセンス測定は、4H-SiC(0001) 基板上に 115 nm の熱酸化膜を形成した後に、フッ酸溶液で SiO₂ 膜に傾斜エッチングを施した。さらに、酸化膜表面に多数の微小電極を形成し、これらの C-V 測定から容量等価膜厚 (CET) を求め、各電極の近傍で CL スペクトルを取得し、残存する酸化膜厚を決定した。図 4 に膜厚傾斜 SiO₂/SiC 構造から取得した CL スペクトルを

示す。酸化膜が厚い箇所では波長 460 nm 付近に酸素欠損由来の信号が、また 640 nm 付近には非架橋酸素に由来するピークが観測され、Si 上の熱酸化膜に類似した CL スペクトルが得られた。これらの SiO₂ パルク中の構造欠陥起因の信号は酸化膜厚の減少に伴って減少する一方、12 nm にまで酸化膜を薄膜化した領域からは、600 nm 付近にピークを持つブロードなルミネッセンスが観測された。このイエロールミネッセンスは酸化膜を完全に剥離した場合には観測されなかったことから、この信号は SiO₂/SiC 界面近傍に局在する構造欠陥からの発光であると結論した。さらに、同様の測定を 4H-SiC(000-1)C 面上に形成した熱酸化膜に対しても実施したところ、図 4 に類似したイエロールミネッセンスは観測されなかった。

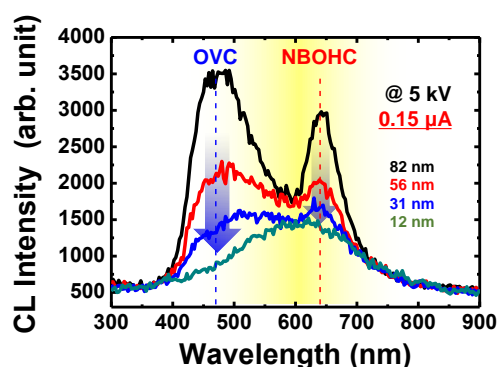


図 4. 熱酸化 SiO₂/SiC 構造のカソードルミネッセンス評価結果

上記のイエロールミネッセンスは、界面の極近傍からの発光であることを考慮すると、極めて高い発光効率を有した欠陥が熱酸化 SiO₂/SiC 界面に局在していることを意味する。過去の報告によれば、化学両論組成から大きく外れた酸素欠損を多量に含んだ堆積 SiO_x 膜に 1000°C 以上の高温熱処理を施した際に類似のイエロールミネッセンスが観測されている。従って、本実験結果は SiC(0001) Si 面の熱酸化過程において、類似の発光性の欠陥構造が形成されている可能性を示唆している。さらに、これらの SiO₂/SiC 構造に対してカソードルミネッセンス測定を繰り返し実施したところ、イエロールミネッセンスの強度が低下し、電子ビーム励起反応によって発光の起源となる欠陥構造が崩壊する様子も確認している。(Y. Fukushima *et al.*, 論文投稿中)

これらの実験結果は、SiC-MOS 界面への紫外線や電子ビーム照射により、炭素やシリコン原子を骨格とした界面欠陥構造を選択的に破壊できることを示しており、我々が提案するビーム励起界面反応技術の妥当性を示すものである。さらに、これらの界面反応評価実験によって熱酸化 SiO₂/SiC 界面の構造欠陥の詳細が明らかになると期待される。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

① D. Ikeguchi, T. Hosoi, Y. Nakano, T. Nakamura, T. Shimura, and H. Watanabe: Insights into ultraviolet-induced electrical degradation of thermally grown SiO₂/4H-SiC(0001) interface, Applied Physics Letters, 査読有, 104, 12107 (2014).

DOI:10.1063/1.4860987

② H. Watanabe, D. Ikeguchi, T. Kirino, S. Mitani, Y. Nakano, T. Nakamura, T. Hosoi, and T. Shimura: Novel approach for improving interface quality of 4H-SiC MOS devices with UV irradiation and subsequent thermal annealing, Materials Science Forum, 査読有, 740-742, 741 (2013).

DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.740-742.741

[学会発表] (計5件)

① 渡部 平司、細井 卓治、先進パワーデバイスにおける新規ゲート絶縁膜開発、第62回応用物理学関係連合講演会、2015年3月12日、東海大学(神奈川県・平塚市)

② 福島 悠太、チャンタパン アタウット、永井 大介、細井 卓治、志村 考功、渡部 平司、カソードルミネッセンス法による熱酸化 SiO₂/SiC 界面欠陥の検出、第62回応用物理学関係連合講演会、2015年3月13日、東海大学(神奈川県・平塚市)

③ 福島 悠太、アラン フルカン、樋口 直樹、チャンタパン アタウット、細井 卓治、志村 考功、渡部 平司、カソードルミネッセンス法による熱酸化 SiO₂/SiC 界面欠陥の検出、先進パワー半導体分科会第1回講演会、2014年11月19日、愛知県産業労働センターウインクあいち(愛知県・名古屋市)

④ 福島 悠太、アラン フルカン、樋口 直樹、チャンタパン アタウット、細井 卓治、志村 考功、渡部 平司、カソードルミネッセンス法による熱酸化 SiO₂/SiC 構造の評価、第75回応用物理学関係連合講演会、2014年9月18日、北海道大学(北海道・札幌市)

⑤ H. Watanabe, Implementation of high-k gate dielectrics in silicon carbide power MOS devices, Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD 2013), June 26, 2013, Seoul (Korea)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www-asf.mls.eng.osaka-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者 該当なし

(3) 連携研究者

志村 考功 (SHIMURA Takayoshi)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90252600

細井 卓治 (HOSOI Takuji)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：90452466