

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 22 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13951

研究課題名(和文) ビーム励起界面反応によるSiC-MOS界面欠陥の崩壊と選択修復

研究課題名(英文) Improvement of SiO<sub>2</sub>/SiC interface properties with beam induced interface reactions and subsequent defect passivation

研究代表者

渡部 平司 (WATANABE, HEIJI)

大阪大学・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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：シリコンカーバイドは、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。しかし、熱酸化で形成したSiO<sub>2</sub>/SiC界面には多量の欠陥が存在し、素子性能や信頼性が劣化することが問題となっている。本研究では、SiO<sub>2</sub>/SiC構造への電子線や光照射によってMOS界面の欠陥構造を改質し、その後の欠陥修復により特性に優れたSiC-MOSデバイスを実現することを最終的な目標としている。当該研究期間では、熱酸化SiO<sub>2</sub>/SiC界面に存在する発光性欠陥の詳細な評価と構造モデルを構築すると共に、紫外線照射を併用した熱酸化プロセスの基礎検討を実施した。

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. However, SiC-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 interface reactions and subsequent defect passivation to overcome these problems. For this purpose, we evaluated interaction between high-energy electron beam and defects at thermally-grown SiO<sub>2</sub>/SiC interfaces by means of cathodoluminescence technique. We revealed that there exist radiative defect centers with an extremely high luminescent efficiency that were localized near the oxide interface of a few nm thick and discussed possible physical origins of the radiative defects in thermally-grown SiO<sub>2</sub>/SiC structures. Moreover, we conducted dry oxidation of SiC surfaces with UV-light illumination in order to validate our proposed method.

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

シリコンカーバイド (SiC) は高い絶縁破壊耐圧や熱伝導度を有し、次世代のパワーデバイス用半導体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 SiO<sub>2</sub> 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 SiO<sub>2</sub>/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の増大や、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は、炭素不純物の影響が指摘されているが、その詳細は不明である。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研究テーマである。

### 2. 研究の目的

本研究では、SiO<sub>2</sub>/SiC ヘテロ構造に対して、外部からのビーム照射により MOS 界面の構造欠陥を狙い撃ちして修復が容易な原子配置に整えた後、欠陥終端することで MOS デバイス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 パワーデバイスの実現を目指す。我々の先行研究(挑戦的萌芽研究:H25~H26)から、熱酸化 SiO<sub>2</sub>/SiC 構造に紫外線を照射することで酸化膜界面に大量の電氣的欠陥が発生することを示した。また、この欠陥生成反応は 5~6eV のエネルギーに閾値を有することから、SiO<sub>2</sub>/SiC 界面欠陥の起源として C=C 二重結合を含んだ炭素欠陥が考えられる。一方、先行研究では、紫外線に対して反応断面積が大きい電子線照射効果についても基礎検討を進めた。その結果、熱酸化 SiO<sub>2</sub>/SiC 界面数 nm の領域から明瞭なイエロールミネッセンスを観測し、試料への電子線照射で発光強度が低下することから、界面欠陥と電子線との相互作用により、その原子構造が変化することを明らかにした。これらの基礎検討結果に基づき、本研究提案ではビーム励起界面反応により通常の熱プロセスでは解消不可能な強固な界面欠陥を狙い撃ちし、その後の欠陥終端処理で電氣的欠陥を不活性化して高品質な SiC-MOS デバイスを実現することを最終的な目標としている。加えて、各種励起ビームと SiO<sub>2</sub>/SiC 界面欠陥との相互作用を詳細に評価することで、熱酸化過程で界面に形成される電氣的欠陥の起源を明らかにする。

### 3. 研究の方法

期間前半では、電子線と SiO<sub>2</sub>/SiC 界面との相互作用を詳細に評価し、発光性界面欠陥の評価と発光モデルの構築に注力した。具体的には、カソードルミネッセンス (CL) 装置を用

いて熱酸化 SiO<sub>2</sub>/SiC 界面からの発光を評価した。熱酸化 SiO<sub>2</sub> 層の薄層化や、不活性ガス或いは水素雰囲気中での高温熱処理を実施し、界面欠陥からの発光特性を調べた。また、これらの実験結果に基づいて、SiO<sub>2</sub>/SiC 界面に局在する界面欠陥構造について考察した。一方、ビーム励起界面反応に伴う欠陥崩壊と修復による高品質 MOS デバイス作製技術の検討では、高温酸化装置に紫外線を導入し、光照射下での酸化膜形成過程と、SiC-MOS キャパシタの特性評価を行った。

### 4. 研究成果

(1) 図 1 は熱酸化 SiO<sub>2</sub>/SiC 試料から取得した CL スペクトルである。図中の OVC は酸化膜中の酸素欠損由来、NBOHC は非架橋酸素由来の発光である。酸化膜が薄くなるに従ってこれらの発光強度は低下するが、代わって 600nm 付近にイエロールミネッセンスが観測された。また酸化膜を剥離すると発光が殆ど消失することから、イエロールミネッセンスの起源は SiO<sub>2</sub>/SiC 界面の数 nm に局在する発光性の界面欠陥であると考えられる。また、SiO<sub>2</sub> 膜中欠陥からの発光強度に比べて界面欠陥からのイエロールミネッセンスが非常に強いことも特徴的である。さらに、試料の同一箇所でも CL 測定を継続して、電子線照射効果を評価したところ、界面欠陥からの発光が電子線ドーズの増加に伴って徐々に低下し、電子線との相互作用で界面欠陥に構造変化が生じたと結論できる。

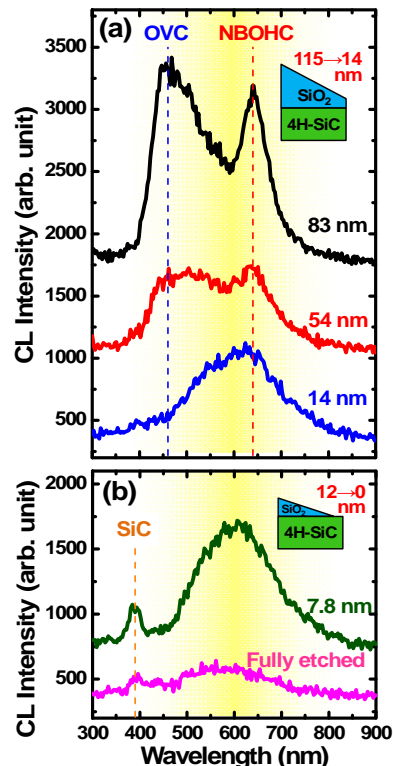
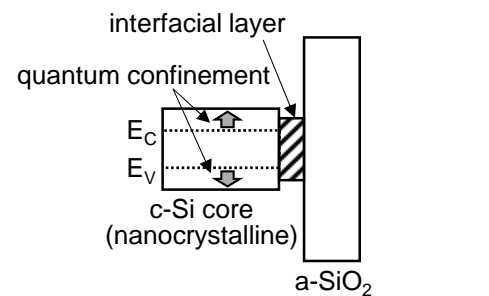


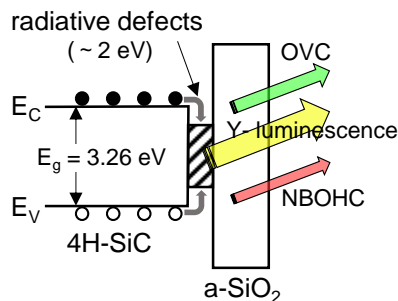
図 1. SiO<sub>2</sub>/SiC 試料のカソードルミネッセンス測定結果。初期膜厚(a)115nm 及び(b)12nm の試料に対して希フッ酸で酸化膜層を薄層化した後に CL 測定を実施した。

(2) 酸化膜界面からの可視光発光は、Si 基板の陽極酸化でも報告されている。この可視光発光メカニズムとしては、図 2(a)に示すような酸化膜界面でのシロキセン等の直接遷移バンド構造を有した Si ネットワーク構造の存在を考慮したモデルが提案されている。その際、Si 基板側に極微細構造が生じると量子閉じ込めでバンドギャップが広がり、半導体中のキャリアが酸化膜との界面層での発光強度増大に寄与する。図 2(b)は、このモデルを参照して我々が提案する熱酸化 SiO<sub>2</sub>/SiC 界面欠陥からの可視光発光モデルである。我々は SiC の熱酸化でもシロキセンに類似した Si ネットワーク構造が界面に形成されると考えている。この界面層へのキャリア供給は、Si の場合では量子化によるバンドギャップ変調が必要であるが、4H-SiC のバンドギャップが十分に広いことから、電子線照射でバルク中に生成されたキャリアが発光性の界面層(界面欠陥)に効率的に供給される結果、高い発光効率を得られたと考えている。

さらに、これらの SiO<sub>2</sub>/SiC 試料に対して Ar 等の不活性ガス雰囲気や、希釈水素雰囲気中で 1000 以上の後熱処理を行っても界面からのイエローluminescence強度に変化が無いことを確認している。この結果は、シロキセンに類似したネットワーク構造が還元性雰囲気中での高温熱処理に対しても高い安定性を有することを意味する。一方、C 面に形成した熱酸化膜界面からはイエローluminescenceは観測されず、発光性の界面欠陥構造は Si 面の熱酸化過程に特有な現象であることも確認している。



(a) oxidized Si nanostructure



(b) thermal-SiO<sub>2</sub>/4H-SiC(0001)<sub>Si</sub>

図 2. 熱酸化 SiO<sub>2</sub>/SiC 界面からの可視光発光過程を示すモデル図。

(3) SiO<sub>2</sub>/SiC 界面特性改善手法としては、NO 雰囲気中での高温アニールによる酸化膜界面への窒素導入が主流となっている。先述のように、熱酸化 SiO<sub>2</sub>/SiC 界面の電氣的欠陥の起源については、未だに様々な議論がなされているが、実用化がはじまった SiC-MOSFET において界面窒化が基盤技術となっている。よって、我々は、SiO<sub>2</sub>/SiC 界面への窒素導入の有無によるイエローluminescence強度の変化を評価した。図 3 に示すように、ウェットエッチングで酸化膜を薄層化し、界面からのイエローluminescenceを評価した結果、ドライ酸化界面に対して NO 窒化処理を施した試料では界面欠陥からの発光強度が半分程度に減少した。また、図 4 は NO 窒化処理を施した SiO<sub>2</sub>/SiC 試料に対して CL 測定を継続し、電子線ドーズの増加に伴う発光強度変化を調べた結果である。これらの結果より、イエローluminescenceを示すシロキセン等のネットワーク構造が SiC-MOSFET の移動度劣化の直接的な要因であると結論することは出来ないものの、1200~1300 の SiC 熱酸化工程でも取り除くことができない発光性の界面欠陥に対して、窒素導入や、外部からの電子線照射で非発光性へと改質できることが明らかとなった。

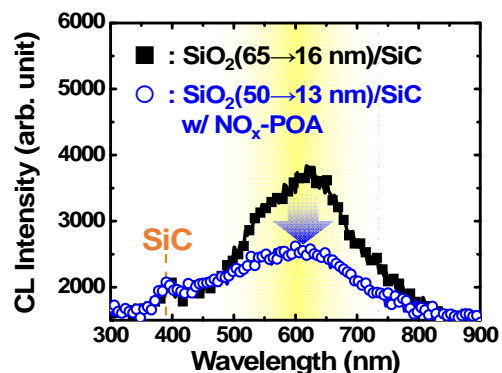


図 3. 界面窒化処理の有無に伴うイエローluminescence強度の変化。各試料に対して希フッ酸処理で酸化膜を薄層化後、CL 測定を実施した。

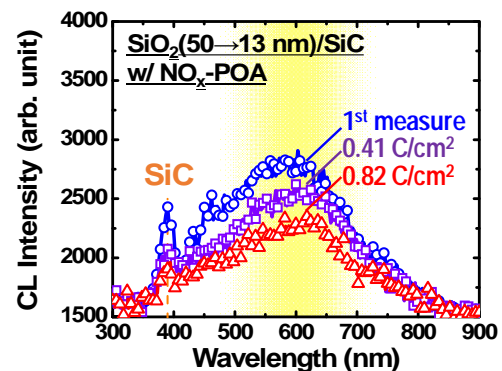


図 4. 界面窒化を施した SiO<sub>2</sub>/SiC 試料からの電子線照射に伴うイエローluminescence強度の減衰。

(4) 研究期間の後半では、紫外線照射を中心としたビーム励起界面反応による SiC-MOS 界面欠陥の崩壊と欠陥修復による界面電気特性改善技術の基礎検討に着手した。具体的には、現有装置に改造を施し、高温ドライ酸化中に紫外線照射を行うことで、熱酸化時に形成される界面欠陥の崩壊とその酸素末端を試みた。紫外線照射下で形成した熱酸化膜を用いて MOS キャパシタを作製し、C-V 測定から界面欠陥密度を評価したところ、紫外線照射の有無で顕著な差異は認められなかった。その理由として、紫外線は電子線に対して反応断面積が小さいことから、今回の簡易的な装置構成では、熱酸化中の欠陥生成が優勢となり、有意な差が得られなかったと考えている。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計2件)

A. Chanthaphan, Y. Fukushima, K. Yamamoto, M. Aketa, H. Asahara, T. Nakamura, T. Hosoi, T. Shimura, and H. Watanabe: Cathodoluminescence study of SiO<sub>2</sub>/4H-SiC structures treated with high-temperature post-oxidation annealing, Materials Science Forum, 査読有, 858, pp. 445-448 (2016).  
DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.858.445

Y. Fukushima, A. Chanthaphan, T. Hosoi, T. Shimura, and H. Watanabe: Cathodoluminescence study of radiative interface defects in thermally grown SiO<sub>2</sub>/4H-SiC(0001) structures, Applied Physics Letters, 査読有, 106, 261604 (2015).  
DOI: 10.1063/1.4923470

### 〔学会発表〕(計1件)

A. Chanthaphan, Y. Fukushima, K. Yamamoto, M. Aketa, H. Asahara, T. Nakamura, T. Hosoi, T. Shimura, and H. Watanabe: Cathodoluminescence study of SiO<sub>2</sub>/4H-SiC structures treated with high-temperature post-oxidation annealing, International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM 2015), October 5, 2015, Giardini Naxos (Italy)

### 〔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