

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820136

研究課題名(和文)新規界面原子導入による高移動度SiC MOSFET作製技術の確立

研究課題名(英文)Development of SiC MOSFETs with High Channel Mobility by Incorporation of New Interface Passivation Elements

研究代表者

岡本 大 (Okamoto, Dai)

筑波大学・数理物質系・助教

研究者番号：50612181

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)：SiCパワーMOSFETにおいて問題となっている高いチャネル抵抗を改善するためには、高チャネル移動度が得られる新規酸化膜形成技術の確立が必要である。本研究では、SiO<sub>2</sub>/SiC界面へボロンを導入する新規手法を提案し、この手法によると界面欠陥密度を劇的に低減でき、102 cm<sup>2</sup>/Vsという高い電界効果移動度が得られることを初めて明らかにした。また、異原子による界面特性改善のメカニズムを検討し、異原子導入による界面歪低減が重要であるという材料選択指針を提示した。

研究成果の概要(英文)：In order to reduce the high on-resistance of SiC power MOSFETs, it is important to establish a new method to obtain high channel mobility in SiC MOSFETs. In this study, we proposed a new method to reduce the interface state density and obtain high channel mobility. In this method, boron (B) atoms are incorporated into the SiO<sub>2</sub>/SiC interface. By this method, the interface state density was significantly reduced and high field-effect mobility up to 102 cm<sup>2</sup>/Vs was obtained. We also investigated the mechanisms of the effect of incorporating other elements, and proposed that the relaxation of interface stress is important for improving interface quality.

研究分野：半導体工学

キーワード：炭化珪素 MOSFET 界面準位 ボロン

### 1. 研究開始当初の背景

電気エネルギーの高効率利用が、社会的に重要な課題となっているが、その中でパワーエレクトロニクスが近年注目を集めている。インバータなどのパワーエレクトロニクス機器の効率を決定付けるパワー半導体デバイスは、従来のシリコン (Si) デバイスからシリコンカーバイド (SiC) デバイスへ移行しつつある。SiC を用いた金属-酸化膜-半導体電界効果トランジスタ (MOSFET) は超低損失デバイスとして最も期待されており、国内・国外共に民間企業を中心に大学・公的機関で盛んに研究されており、重要課題との認識が強い。しかし、SiC MOSFET においては、低いチャネル移動度によるチャネル抵抗増大が問題となっている。SiC を用いた MOSFET の市販は 2010 年頃から開始されたが、実際の市販品においても、チャネル抵抗の低減は十分できておらず、本研究策定時においても、ブレイクスルーが必要な状況であった。

本研究の策定以前に、我々は SiC 上の熱酸化膜にリン (P) 原子を意図的に導入することにより、チャネル移動度が従来の標準プロセスの約 3 倍に向上することを発見していた。しかし、そのメカニズムについては明らかでなく、移動度もさらなる改善が必要な状況であった。P の導入による特性改善も十分とは言えない状況であったが、さらなる特性改善を目指した新規パッシベーション元素を探索する意欲的な試みは行われていなかった。そこで本研究では、SiC デバイスの特性向上に貢献することを目的とし、P 以外の新規界面導入原子の探索、界面原子導入による特性改善メカニズムの解明、新材料を用いた MOSFET の試作・解析に取り組んだ。

### 2. 研究の目的

パワーエレクトロニクス技術の更なる高効率化のためには、SiC MOSFET のチャネル移動度の改善が必要である。そのためには、従来とは異なる革新的な手法を用いることによって、界面準位密度を低減し、高いチャネル移動度を有する SiC MOSFET を実証することが極めて重要である。そのために本研究では、新規界面導入原子の探索、界面導入原子が界面構造に与える影響の解析、探索した新材料を用いた MOSFET の試作・実証を行うことを目的とし、研究を実施した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 新規界面導入原子の探索

本研究策定時までの我々の研究において、異原子を導入することによる界面歪みを低減することが、チャネル移動度に有効なのではないかという仮説が立てられていた。この仮説から導き出される指針に基づき、新しい界面導入元素の選定を行った。本研究では、界面応力の低減のやすさと、サンプル作製の容易さなどの理由から、半導体分野でよく用いられている元素である、ボロン (B) を

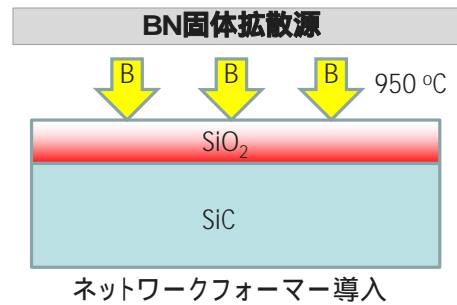


図1 B導入のための熱処理方法

界面へ導入するプロセスを試みることにした。酸化膜 SiO<sub>2</sub> へ B を導入するために、図1に示すように、熱酸化膜を形成した SiC チップと BN の平面拡散源を対向するように拡散炉内に配置し、熱拡散によって B を SiO<sub>2</sub> 中へ導入することを試みた。

このようにして B を導入した酸化膜を用いて MOS キャパシタを作製した。容量-電圧特性から界面準位密度の導出を行い、二次イオン質量分析法 (SIMS) によって、SiO<sub>2</sub> 中に導入された不純物の濃度の確認を行った。

#### (2) 新材料を用いた MOSFET の試作・実証

新しく探索を行った元素を用いて MOSFET の作製を行い、新元素がチャネル移動度へ与える効果を検証した。産総研のナノ棟ラインを用いて横型 MOSFET を作製した。電気特性評価より、チャネル移動度の導出を行い、新規プロセスの効果を検証した。

#### (3) 界面導入原子が界面構造に与える影響

熱刺激電流 (thermal stimulated current, TSC) 測定を行い、B 導入が SiO<sub>2</sub>/4H-SiC 界面に存在するトラップにどのような影響を与えるかについて詳細な解析を行った。熱刺激電流法を用いれば、遅い界面トラップの成分を検出することができ、界面近傍酸化膜トラップの増減について推測することができる。これらの測定結果を基にして、界面準位の原因と B によるパッシベーションメカニズムについて議論を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 新規界面導入原子の探索

B を界面へ導入した n 型 MOS キャパシタを作製し、電気特性測定により界面準位密度を導出した。図2に作製した MOS キャパシタの界面準位密度を示す。図中には比較のために、通常のドライ酸化と NO アニールにより作製した MOS キャパシタの結果も示している。通常のドライ酸化では界面準位密度は伝導帯付近で  $4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$  程度と極めて高い値となる。NO 窒化により、 $7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$  程度まで低減できるが、B 拡散を行えば  $7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$  以下まで低減することができる

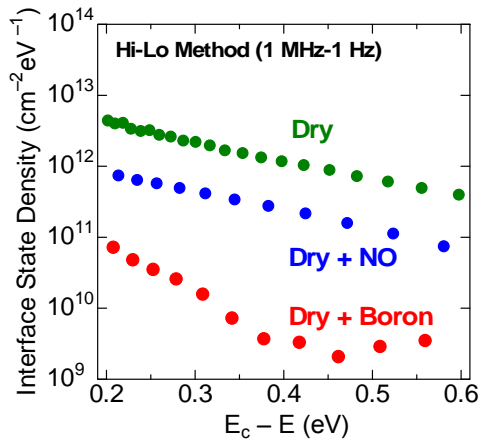


図2 界面準位密度の比較

ことが分かる。この実験において、Bによって界面準位密度を低減できることを初めて明らかにした。

界面にBがどのような分布で導入されているのかを調べるために、SIMS測定を行った。図3にB拡散を行ったサンプルのSIMS測定の結果を示す。BはSiO<sub>2</sub>中に比較的均一に導入されていることが分かる。このような均一かつ高濃度に導入されたBは信頼性には悪影響を及ぼすと考えられる。一方で、界面トラップを減少させることが知られているNaは、界面付近には含まれていないことが確認できるため、Bの効果によって界面準位が減少したといえる。

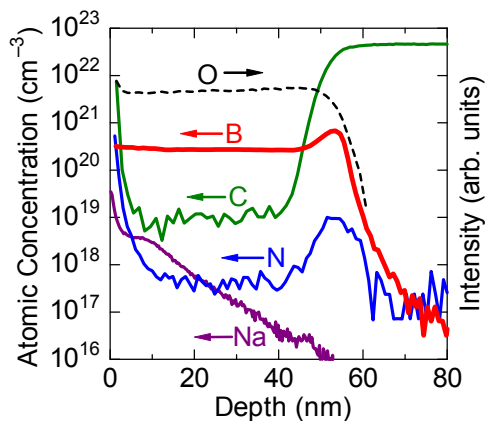


図3 異原子濃度分布

### (2) 新材料を用いたMOSFETの試作・実証

図4に作製した横型MOSFETの電界効果移動度の比較を示す。通常のドライ酸化では電界効果移動度のピーク値は4 cm<sup>2</sup>/Vs程度であるが、NOアニールを行うと20 cm<sup>2</sup>/Vsへ、B拡散を行うと102 cm<sup>2</sup>/Vsへ向上することが分かる。Bによって、チャネル移動度を大幅に向上できるということはこれまでに知られていなかった事実であるが、本研究により明らかにすることができた。また、得られたチャネル移動度は100 cm<sup>2</sup>/Vsを超える高い値で

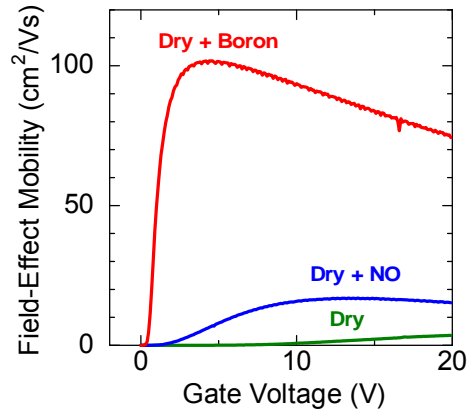


図4 チャネル移動度の比較

あった。産業的に標準的な窒素導入によって作製したSi面上に作製したMOSFETにおいては、移動度は20~50 cm<sup>2</sup>/Vs程度であり、それに比べて2~3倍程度高い。また、我々が以前報告したリン導入によるSiC MOSFETの移動度89 cm<sup>2</sup>/Vsよりも高い移動度を得ることができ、そのインパクトは大きいといえる。

### (3) 界面導入原子が界面構造に与える影響

遅い界面準位の成分を検出するため、TSC測定を行った。この測定では温度を変化させながらMOSキャパシタからの放電電流を測定するものであるが、温度変化および電流値の変化の様子を図5に示す。低温側から一定レートで温度を上げることにより、界面近傍酸化膜トラップ(near-interface trap; NIT)に捕獲されていた電子の密度を求めることができる。

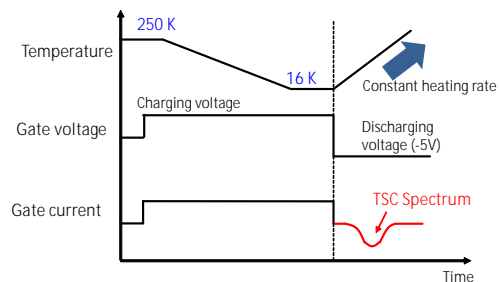


図5 TSC測定の概要

図6に酸化膜電界を3.0 MV/cmとして測定したTSC曲線を示す。ドライ酸化膜においては、NITに捕獲されていた負電荷に起因する大きなTSCが流れていることが分かる。NOアニールによって、TSCは抑制されているが、その効果は十分でない。一方、B導入を行ったサンプルにおいては、TSCは大きく低減されており、トラップに捕獲されていた電子が極めて少ないことが示唆される結果が得られた。また、Bを導入したサンプルのTSC曲線は、Pを導入した場合のTSC曲線と類似していることが分かる。

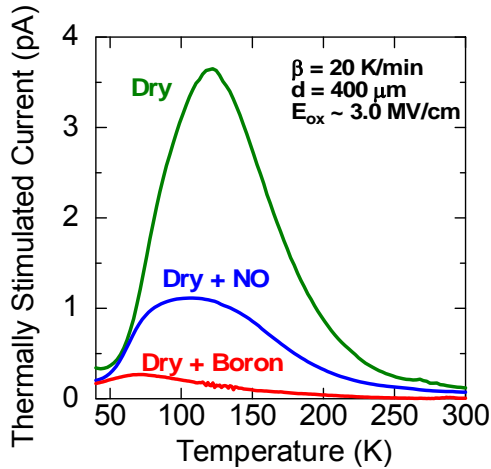


図6 TSC スペクトルの比較

SiO<sub>2</sub>/4H-SiC 構造において、50~250 K の範囲で観測される TSC スペクトルは、NIT に起因する遅い準位からの信号であることが過去の実験で示されている。TSC 曲線を積分すると、このような遅い準位に捕獲されていた電子の密度を求めることができる。得られた TSC ピークの温度範囲は、4H-SiC の伝導帯端から 0.1~0.7 eV 程度の範囲に存在し、図7のように3次的に分布する酸化膜トラップからの電子放出に相当すると考えられている。図8に放出電荷密度の酸化膜電界依存性を示す。正方向への充電バイアスを増加するにつれ、捕獲電荷密度が増加していることが分かる。電流の極性から、放出された電荷は負の電荷を持つ電子であり、高密度の電子トラップが 4H-SiC の伝導帯付近に存在すると考えられる。充電バイアスを増加すると、n型 MOS キャパシタの蓄積層の電子密度が増加し、トラップへ捕獲される電子が増えると考えられる。ドライ酸化膜においては、蓄積層に湧いた電子のほとんどが遅いトラップに捕獲されているが、B 導入により捕獲される電子密度が大幅に低減できていることが分かる。

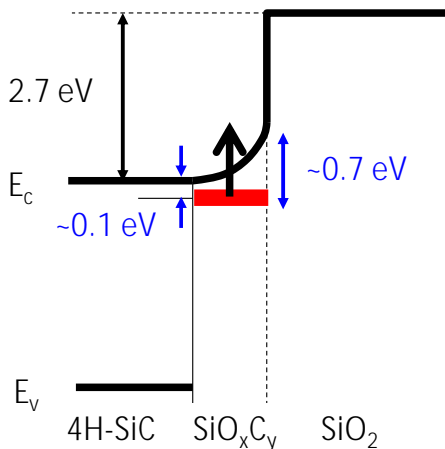


図7 NIT 分布の概念図

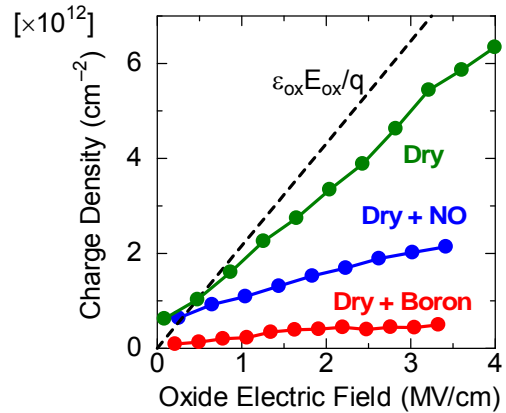


図8 NIT からの放出電荷密度

このような遅いトラップは、界面のみに存在する速い表面準位では説明することができず、界面から酸化膜側に数 程度離れた NIT の存在を考える必要がある。NIT は SiO<sub>2</sub> 膜固有の欠陥として知られ、基板の種類が Si, 6H-SiC, 4H-SiC と異なっていたとしても、SiO<sub>2</sub> の伝導帯端から約 2.8 eV 離れた位置に準位を作ることが報告されている。NIT のエネルギー位置は、4H-SiC の伝導帯端から 0.1 eV 程度低い位置に来るため、SiO<sub>2</sub>/4H-SiC 構造を形成すると伝導帯付近のバンドギャップ内に高密度の界面準位ができてしまう。基板の種類が Si であっても SiC であっても、SiO<sub>2</sub> の伝導帯端からは同一のエネルギー位置に準位を作ることから、NIT の起源は C 起因ではなく、Si に起因するものであると考えることができる。

ここで、Si と SiC のどちらにも共通する現象として、熱酸化の際の体積膨張を緩和するために、界面から Si 原子が放出されることに着目したい。SiC の場合は Si 原子と C 原子の双方が放出されると考えられるが、C 原子は酸化膜中を素早く抜けていくため、酸化膜中に均一に分布していると考えられている。一方で、界面付近に滞留するのは主に Si 原子であり、SiC の極めて低い酸化速度の主原因となっていると考えられる。界面付近で捕獲準位として働く可能性があるのは、膜中に分布していると考えられる C 原子よりも、むしろ界面付近の過剰 Si 原子のほうである。

SiC のヤング率は非常に大きな値であるため、Si の熱酸化の場合よりも多くの Si 原子が放出され、界面付近に滞留していると考えられるが、これが NIT として悪影響を与えている可能性がある。

硬い SiC 上に比較的硬い SiO<sub>2</sub> を成長させた組み合わせでは、熱酸化の際の酸素原子導入による体積膨張によるストレスを緩和するためには、界面から多量の Si 原子を放出するしかないと考えられる。一方、SiC 上に P や B を導入した低粘度の酸化膜を成膜すると、酸化膜の構造変化が容易であり、Si 原子

を放出しなくてもストレス緩和ができると推測される。その結果として Si 放出が少なくなれば、形成される NIT の密度も小さくなると考えられる。すなわち、SiC MOS 界面特性の改善のためには、NIT の密度を低減するために、界面歪を緩和できるような元素を選択し界面へ導入することが有効であると推測される。なお、最終的な結論を得るためには、物理的測定や理論的解析を継続的に行っていく必要がある。

以上に述べたように、本研究では従来知られていなかった B 導入法というオリジナルな手法を用いることで、高いチャネル移動度を有する SiC MOSFET が実現できることを初めて示した。また、界面特性の詳細な解析を行い、P や B による酸化膜の構造変化による界面ストレスの緩和が特性改善に有効であるのではないかと推測した。これらの知見は今後の SiC パワー MOSFET の開発において、材料選択の指針となるものであると考えられる。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

D. Okamoto, M. Sometani, S. Harada, R. Kosugi, Y. Yonezawa, and H. Yano, "Improved Channel Mobility in 4H-SiC MOSFETs by Boron Passivation", IEEE Electron Device Lett., Vol. 35, pp. 1176-1178 (2014).  
DOI: 10.1109/LED.2014.2362768

〔学会発表〕(計 2 件)

岡本 大、染谷 満、原田 信介、小杉 亮治、米澤 喜幸、矢野 裕司、"B 導入による高移動度 4H-SiC MOSFET の作製と界面トラップ評価", 第 20 回ゲートスタック研究会-材料・プロセス・評価の物理-, 東レ研修センター (静岡県 三島市), 2015/1/30

D. Okamoto, M. Sometani, S. Harada, R. Kosugi, Y. Yonezawa, and H. Yano "Demonstration of High Channel Mobility in 4H-SiC MOSFETs by Utilizing Boron-Doped Gate Oxide", 45th IEEE Semiconductor Interface Specialists Conference (SISC), San Diego (CA, USA), 2014/12/11

〔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://power.bk.tsukuba.ac.jp/>

## 6 . 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 大 (OKAMOTO, Dai)

筑波大学・数理物質系・助教

研究者番号 : 50612181