

学 位 論 文 の 要 旨

論文題目 A Study on High-Mobility SiC MOSFETs with Interfacial Silicate Layer for Harsh Environment Electronics

(極限環境エレクトロニクス実現に向けた界面ケイ酸塩層を有する高移動度 SiC MOSFETs の研究)

氏名 村岡 幸輔

SiC (Silicon Carbide)半導体は広い禁制帯幅を始めとする優れた物性を示し、パワー半導体材料として非常に注目されている。近年、SiC 半導体の市場は航空宇宙産業や原子炉廃炉技術、医療応用といった分野にも広がりつつある。これは SiC の広い禁制帯幅等が、放射線や高温環境といった極限環境下においても安定なデバイス動作をもたらすためである。上述した広い用途の電子デバイスを作製する上で高移動度金属-酸化膜-半導体電界効果トランジスタ(MOSFET)の開発は必要不可欠である。従来の Si-MOS デバイスにおいては、熱酸化 SiO₂ 膜は良質な MOS 界面を作る。しかし、これを SiC MOSFETs に適用すると多くの界面欠陥が生じ、チャンネル移動度を大幅に低下させる。良質な SiC-MOS 界面を得る有力な方法の一つに、窒素やリン原子をゲート酸化膜/SiC 界面に導入する手法がある。この方法はしきい値電圧の低下を招くもの、大幅に移動度を向上させることが可能である。一方で水素を始めとする異種原子導入は放射線/高温耐性を大きく変化させうる。

本研究では、MOS 界面にバリウムケイ酸塩を有する SiC MOSFETs を開発し、チャンネル移動度改善効果について議論する。並びに放射線/高温環境がケイ酸塩層を配した SiC-MOS デバイスに与える影響を議論する。またバリウムケイ酸塩層及びバリウム原子の MOS 界面における挙動、役割を示す。

博士論文は 6 つの章により構成される。以下に各章の概要を述べる。

第 1 章では、本研究の詳細な背景、目的について述べる。まず放射線/高温環境が MOS デバイスに与える影響を総括し、物性的特徴から SiC 半導体が極限環境下においてもトランジスタ特性を維持し続ける理由を説明する。また SiC-MOS 界面における欠陥密度低減方法について概観し、バリウムケイ酸塩層を用いることの優位点等を述べる。

第 2 章から第 5 章に本研究成果を記載する。第 2 章では、キャップ SiO₂ 層及び界面 BaO₂ 層の膜厚変化が MOS 界面に与える効果について述べる。本研究において界面バリウムケイ酸塩層は BaO₂ 層と SiO₂ 層を化学反応させることで形成した。アルカリ土類金属やランタノイド系元素を用いてケイ酸塩層を MOS 界面に形成する場合、当原子層の上に 30 nm 以上のキャップ SiO₂ 層を積層させる必要があるがこの理由は明らかとなっていない。この章ではキャップ SiO₂ 層の堆積により、界面ケイ酸塩構造および界面準位密度が変化することを示した。加えて BaO₂ 層の膜厚が MOS 界面に与える効果について議論した。6 nm 以上の厚い BaO₂ 層は界面ケイ酸塩層の多結晶化を誘起し、ゲート絶縁膜として適当ではないことを示した。

第 3 章では、MOS 界面にバリウムケイ酸塩層を配した SiC MOSFETs の高温特性について述べる。プロービングにより室温から 500°C までのトランジスタ特性を測定した。バリウムを界面改善に用いる上で、バリウム原子が可動イオンとして振舞うかどうかは非常に重要である。過去に 175°C まで安定であることが報告されていたが、極限環境デバイスに要求されている接合温度 500°C まで耐えうるかは不明であった。500°C におい

て、当該 MOSFET のドレイン電流は時計回りのヒステリシスを示した。これは反転層電子がゲート絶縁膜に注入されたことを意味しており、同温度領域においてバリウムケイ酸塩構造が安定であることを示唆している。

第 4 章ではバリウムケイ酸塩層を有する SiC MOSFETs のガンマ線耐性について述べる。作製した MOSFETs を用いて ^{60}Co ガンマ線照射実験を行い、Total Ionizing Dose (TID) 効果によるトランジスタ特性の変動を示す。バリウムケイ酸塩層を配した MOSFET は熱酸化膜を用いた MOSFET より低い界面欠陥生成効率/酸化膜トラップ生成効率を示した。これはケイ酸塩層の TID 耐性が熱酸化膜よりも高いことを示している。また 830 kGy(SiC)の吸収線量にて、ドレイン電流-ドレイン電圧特性の飽和領域にキンク効果が現れることを明らかにした。これはガンマ線照射によって生じた二次電子によるはじき出し損傷が原因であると考えられる。ドレイン-SiC 基板間の pn 接合中に結晶欠陥が生じ、これを介したトンネル電流によって正孔が p 型 SiC 基板に蓄積し、キンク効果が現れたと説明できる。

第 5 章ではガンマ線誘起移動度増加現象について議論する。ケイ酸塩層を配した SiC MOSFET に 600 kGy(SiO_2)以上照射すると、電界効果移動度が $12 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ から $18 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ まで増加した。当現象はナトリウムを含む SiC MOSFET と類似した点が見受けられたが、バイアス温度ストレス試験の結果、この現象は可動イオンによって引き起こされたものではないことがわかった。また当移動度増加現象はトランジスタのチャネル幅に依存し、狭チャネルがより大きな移動度、しきい値電圧の変化を引き起こすことを明らかにした。これはチャネル幅の拡大が放射線耐性向上に繋がることを意味する。これらの実験結果から、ゲート金属端部の応力による移動度変調機構を提案した。

第 6 章で、本研究の総括を述べる。得られた成果は次の通りである。

- (1) キャップ SiO_2 膜厚/界面 BaO_2 膜厚が SiC-MOS デバイスの電気特性および界面に形成されるバリウムケイ酸塩構造を変化させる。
- (2) バリウムケイ酸塩構造を有する SiC MOSFETs は 500°C までトランジスタ動作を示す。また、 500°C におけるドレイン電流のヒステリシスは時計回りであり、バリウムは同温度領域においてバリウムケイ酸塩構造を維持し続ける。
- (3) バリウムケイ酸塩構造は熱酸化膜よりも低い界面欠陥生成効率を持つ。
- (4) 830 kGy(SiC)のガンマ線照射によって、ドレイン-基板間の接合リーク電流が流れ、これに伴いドレイン電流にキンク効果が現れる。
- (5) バリウムケイ酸塩構造を有する SiC MOSFETs にガンマ線を 600 kGy 以上照射すると、電界効果移動度が 1.5 倍まで増加する。また当現象はチャネル幅依存性を持つ。