

シリコンカーバイド MOSFETs による極限環境エレクトロニクスの構築 Harsh Environment Electronics with Silicon Carbide MOSFETs

黒木伸一郎^a, 石川誠治^{a,b}, 村岡 幸輔^a, Wijemuni Milantha De Silva^a,
赤瀬 光^a, 小金澤智之^c, 安野聡^c

Shin-Ichiro Kuroki^a, Seiji Ishikawa^b, Kousuke Muraoka, Wijemuni Milantha De Silva,
Hikaru Akase, Tomoyuki Koganesawa, and Satoshi Yasuno.

^a 広島大学ナノデバイス・バイオ融合科学研究所,

^b フェニテックセミコンダクター株式会社,

^c (公財)高輝度光科学研究センター

^aResearch Institute of Nanodevice and Bio Systems, Hiroshima University,

^bPhenittec Semiconductor Co.,Ltd,

^cJASRI.

高温・高放射線環境下でも動作可能なシリコンカーバイド MOSFETs 集積回路の研究を進めている。本研究では高温・放射線耐性の使用可能領域を格段に広げるための、より革新的な界面設計のための研究を進めた。具体的には(1)バリウム原子を界面に導入した 4H-SiC 上の熱酸化膜、(2)SiC 上に形成したムライト $Al_6Si_2O_{13}$ ゲート絶縁膜、(3)SiC 上の Ni-Si-Nb-C 合金の研究を行った。

キーワード： 極限環境エレクトロニクス、4H-SiC MOSFETs、ゲート酸化膜、オーミック接触

背景と研究目的：

人の立ち入ることのできない極限環境では、より環境モニタリングや、ロボットなどが求められる。現在福島第一原発の廃炉活動では、高放射線環境での作業が必要であり、ロボット投入による速やかな廃炉活動が求められる。しかし通常ロボットの Si 半導体集積回路は、放射線耐性が低く、すぐに破損する。シリコンカーバイド (SiC) 半導体はバンドギャップが広いという特性から、高温・高放射線などの極限環境でも駆動可能なデバイスとして期待される。本研究では極限環境下でも駆動可能な 4H-SiC CMOS 集積回路システムの研究を進めている[1-3]。本研究では高温・放射線耐性の使用可能領域を格段に広げ、またこの領域での信頼性を確保するために、より革新的な 4H-SiC MOS および MIS 界面設計、4H-SiC 上の金属合金設計の研究を行った。

実験：

試料： アルカリ土類金属原子を界面に導入した 4H-SiC 上の熱酸化膜 (形状：プレート、サイズ：7 mm×7 mm、酸化膜厚：10 nm)

実験条件： BL46XU

・ HAXPES

HAXPES 測定は BL46XU に第二実験ハッチに設置された硬 X 線光電子分光装置 R-4000 を用いて行った。励起 X 線は BL46XU での HAXPES 測定の通常の手順で形成され、チャンネルカットモノクロにより約 8 keV に単色化されたものを使用した。TOA を 10°、30°、80°として測定を行い、C1s, O1s, Si1s, Ba の各電子状態の測定を実施した。

・ 2D-XRD

XRD 測定は BL46XU 第一実験ハッチに設置されている HUBER 社多軸回折計において実施した。挿入光源・2 結晶分光器は 12.398 KeV (1A) の X 線が最大になるようにセットし、2 結晶分光器下流側に設置されているミラーで高調波の除去と集光を行った。実験ハッチ最上流に設置している 4 象限スリットで試料に入射する X 線を H0.02×W0.3 mm 程度の成形し、入射 X 線強度はイオンチャンバーでカウントした。試料からの散乱/回折 X 線は回折計検出器軸に取り付けている二次元検出器 PILATUS300K で検出を行った。

試料：SiC上に形成したムライト Al₆Si₂O₁₃ 薄膜
(形状：プレート、サイズ：7 mm×7 mm、酸化膜膜厚：50 nm)

実験条件：BL46XU

• HAXPES

測定方法は上記アルカリ土類金属原子を界面に導入した 4H-SiC 上の熱酸化膜の場合と同様に行った。C1s, O1s, Si1s, Al1s の各電子状態の測定を実施した。

• 2D-XRD

測定方法は上記アルカリ土類金属原子を界面に導入した 4H-SiC 上の熱酸化膜の場合と同様に行った。

試料：SiC上の Ni-Si-Nb-C 合金 (形状：プレート、サイズ：7 mm×7 mm、酸化膜膜厚：100 nm)

実験条件：BL46XU

• HAXPES

測定方法は上記アルカリ土類金属原子を界面に導入した 4H-SiC 上の熱酸化膜の場合と同様に行った。C1s, O1s, Si1s, Ni2p_{3/2}, Nb3d の各電子状態の測定を実施した。

• 2D-XRD

測定方法は上記アルカリ土類金属原子を界面に導入した 4H-SiC 上の熱酸化膜の場合と同様に行った。

結果および考察：

アルカリ土類金属原子を界面に導入した 4H-SiC 上の熱酸化膜の HAXPES 及び 2D-XRD の結果を図 1 および図 2 に示す。サンプルは、4H-SiC 型 (0001)4° off 基板の Si 面 SiC エピタキシャル層 (ND=1.0×10¹⁶ cm⁻³) に、RF スパッタリング法により過酸化バリウム (BaO₂) を 2.8 nm, 6.4 nm, 7.8 nm の 3 条件で堆積させ、その後酸素雰囲気中で 950°C 数時間の加熱を行い、Ba が導入された絶縁膜を形成した。BaO 膜厚を 2.8 nm, 6.4 nm, 7.8 nm と変化させて、各元素に関わる電子状態の測定を行った。特に O1s に関しては、SiO₂ の結合に加えて、Ba の結合による BO (Bridged-Oxide) 状態が確認された。また BaO 膜厚 6.4 nm においては、予想に反して NBO (Non-Bridged-Oxide) 状態が確認された。このサンプルに関しての TOA 依存性を図 1 に示す。BO 状態および NBO 状態がどの TOA においても確認された。特に TOA=10° において NBO 状態が強く観察された。これはより表面近傍で Ba シリケートが形成されているためと考えられる。

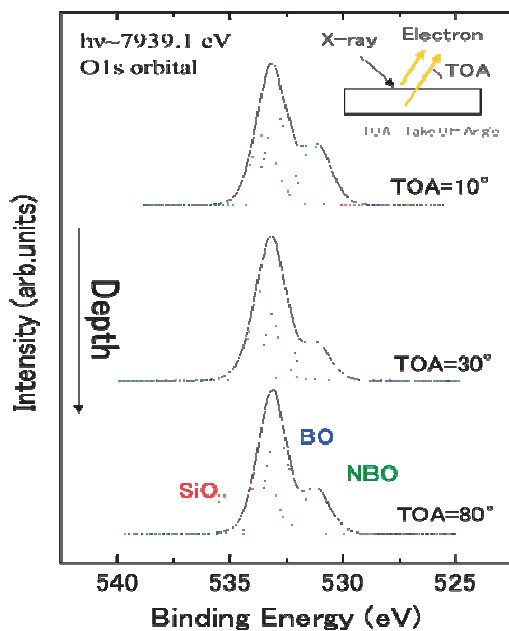


図1. HAXPES: O1s軌道のTOA依存性:
BaO膜厚6.4 nm.

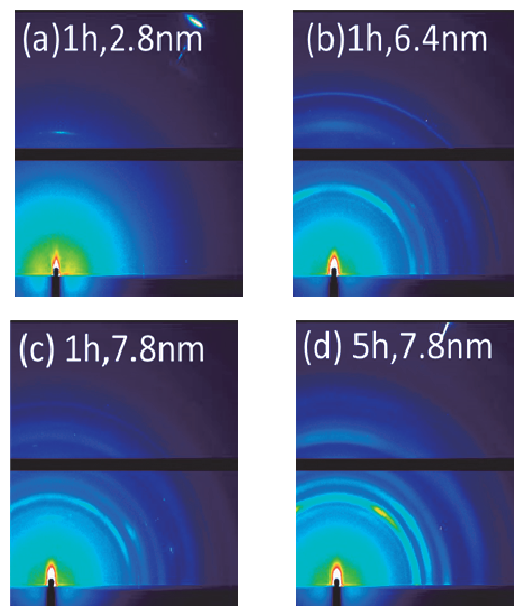


図2. 2D-XRD: BaO導入熱酸化膜のBaO膜厚・
酸化時間依存性.

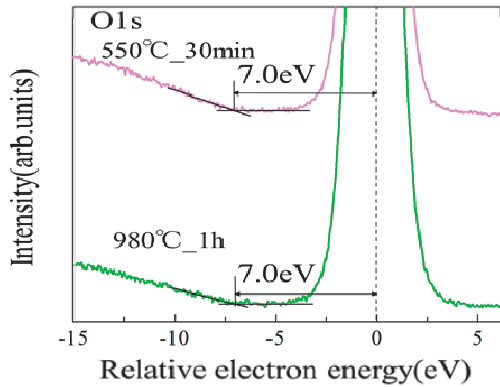


図3. HAXPES: O1sスペクトルによるAlSiOゲート絶縁膜のバンドギャップ測定.

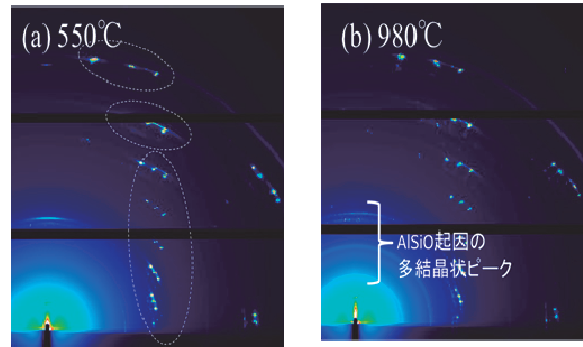


図4. 2D-XRD: AlSiOゲート絶縁膜の酸化処理依存性.

図2にBaO導入シリコン酸化膜における2D-XRD測定結果を示す。初期のBaO膜厚を増加させ、さらに長時間の酸化により、多結晶Baシリケートが確認された。この結果と電気特性の評価を合わせて評価することにより、よりSiO₂/4H-SiC界面の界面準位量低減のための指針が得られた。

図3と図4に4H-SiC上のムライトゲート絶縁膜のHAXPESおよび2D-XRD測定結果を示す。HAXPESにおいては550°C、980°C加熱サンプルに物性的な違いは確認されなかったが、2D-XRDにおいて980°Cサンプルにおいて、明確な多結晶ピークが得られた。電気特性では980°Cサンプルでリーク電流の大幅な低減が確認されており、多結晶化により電気特性が向上したと考えられる。

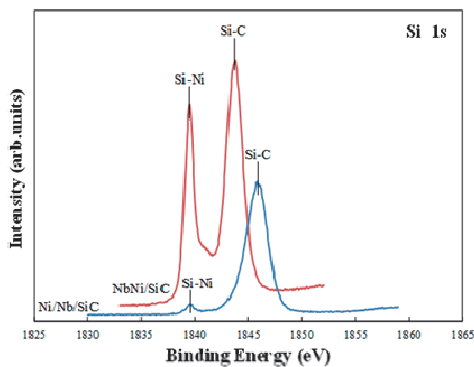


図5. HAXPES: 4H-SiC上のNb/NiおよびNbNiシリサイド膜のSi1sピーク.

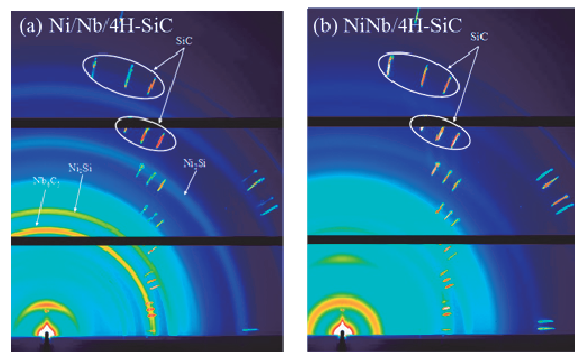


図6. 2D-XRD: 4H-SiC上の(a)Nb/Niおよび(b)NbNiシリサイド膜.

図5と図6に4H-SiC上のNb/Ni積層膜およびNbNi混合膜によるシリサイドのHAXPESおよび2D-XRDの結果を示す。HAXPESにおいてはNbNi膜において明確なSi-Ni結合が確認された。また2D-XRDではNb/Ni積層膜においてはNi₂SiおよびNb₆C₅の多結晶状のピークが確認されたが、これに対してNbNi膜では結晶性の低いプロファイルを示した。透過型電子顕微鏡(TEM)での電子線回折像観察によりNbNi膜がアモルファス状であることを示しているが[3]、この2D-XRD結果はこれを支持する結果を示した。

参考文献:

- [1] S-I. Kuroki, H. Nagatsuma, M. De Silva, S. Ishikawa, T. Maeda, H. Sezaki, T. Kikkawa, M. Östling, and C.-M. Zetterling, "Characterization of 4H-SiC nMOSFETs in Harsh Environments, High-Temperature and High Gamma-Ray Radiation," *Mat. Sci. Forum*, 858, pp864-867 (2016).
- [2] H. Nagatsuma, S-I. Kuroki, M. De Silva, S. Ishikawa, T. Maeda, H. Sezaki, T. Kikkawa, M. Östling, and C.-M. Zetterling, "4H-SiC nMOSFETs with As-doped S/D and NbNi Silicide ohmic contacts," *Mat. Sci. Forum*, 858, pp573-576 (2016).
- [3] Milantha De Silva, Seiji Ishikawa, Takamichi Miyazaki, Takamaro Kikkawa, and Shin-Ichiro Kuroki, "Formation of amorphous alloys on 4H-SiC with NbNi film using pulsed-laser annealing," *Appl. Phys. Lett.* 109, 012101-1 - 012101-5 (2016).