

## 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<sup>a</sup>, 石川 誠治<sup>ab</sup>, Wijemuni Milantha De Silva<sup>a</sup>, Nguyen Thi Thuy<sup>a</sup>,

村岡 幸輔<sup>a</sup>, 小早川 貴一<sup>a</sup>, 小金澤 智之<sup>c</sup>, 安野 聡<sup>c</sup>

Shin-Ichiro Kuroki<sup>a</sup>, Seiji Ishikawa<sup>b</sup>, Wijemuni Milantha De Silva<sup>a</sup>, Nguyen Thi Thuy<sup>a</sup>,

Kousuke Muraoka<sup>a</sup>, Kiichi Kobayakawa<sup>a</sup>, Tomoyuki Koganesawa<sup>c</sup>, and Satoshi Yasuno<sup>c</sup>

<sup>a</sup>広島大学ナノデバイス・バイオ融合科学研究所,

<sup>b</sup>フェニテックセミコンダクター株式会社,

<sup>c</sup>(公財)高輝度光科学研究センター

<sup>a</sup>Research Institute for Nanodevice and Bio Systems, Hiroshima University,

<sup>b</sup>Phenitec Semiconductor Co.,Ltd, <sup>c</sup>JASRI

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)異種元素による界面制御を行った 4H-SiC MOSFETs ゲート酸化膜の評価、(2)4H-SiC MOSFETs ソース/ドレイン領域オーミックコンタクト Ni-Si-Nb-C 電極の評価の研究を行った。

**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[1-8]。

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 界面設計、4H-SiC 上の金属合金設計の研究を行った。特に 4H-SiC CMOS 集積回路の高温特性では、4H-SiC とシリサイド電極間のオーミックコンタクトの信頼性が問題となる。400°C での熱的ストレス後の電気特性を、HAX-PES および 2D-XRD 測定によって得られた知見と対応させ、特性改善のための開発指針を得た。

### 実験：

**試料：** 異種元素による界面制御を行った 4H-SiC MOSFETs ゲート酸化膜の評価(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, Ba3d 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 12.398KeV(1Å)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 mm×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：4H-SiC MOSFETs ソース/ドレイン領域オーミックコンタクト Ni-Si-Nb-C 電極の評価

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, Ni2p3/2, 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：

SiC MOSFETsのチャネル移動度を向上のため、異種元素導入、特にバリウム(Ba)による界面制御を行った絶縁膜を形成し、評価を進めている。Ba導入により酸化膜/SiC界面に存在する欠陥準位の不活性化を行い、Ba導入による欠陥準位低減、移動度向上を示した。またBaによる界面制御の前処理として、フッ素(CF<sub>4</sub>)プラズマ処理をSiC表面に行い、表面のフッ素終端を行い、この効果を評価した。これら異種元素導入による界面状態変化を得、また熱ストレス印可による状態変化を評価するために、HAXPESおよび2D-XRD測定を行った。Ba導入酸化膜においては、堆積SiO<sub>2</sub>に対応して、Ba3d軌道の結合エネルギーが低エネルギー側にシフトしており、これは膜中のBaシリケート領域がBa-Oリッチの状態になっていることが示唆された。フッ素(CF<sub>4</sub>)プラズマ処理のSiC表面への処理においてはフッ素がSiC基板中にも深く侵入していることが確認され、この知見によりより信頼性の高いSiC酸化膜形成への指針を得た。

4H-SiCのオーミック電極材料として、Ni-Si-Nb-C合金を提案し、低抵抗化に成功している。4H-SiC MOSFETsのソース/ドレイン領域へのオーミックコンタクト形成では、例えばNiシリサイドを形成しようとする、SiCのSiはNiと反応しシリサイドを形成するが、残った炭素はNiと反応しないため、シリサイドとSiCとの界面とシリサイドの表面に析出し炭素凝集を形成する。この炭素凝集はソース/ドレインへのコンタクト抵抗を増大させ、多くの場合コンタクト不良に陥る。そのため本研究では新たに炭素侵入型金属であるニオブ(Nb)を導入し、Nb-Cをシリサイド中に形成することで低抵抗化および信頼性を確保している。今回4H-SiC上にNiNbシリサイド電極(Ni-Si-Nb-C電極)を形成し、これを窒素雰囲気400°Cで最大100時間まで加熱を行い、電極の組成・結晶性変化を2D-XRDおよびHAXPESで評価した。Fig.1に2D-XRDの結果を示す。Fig.1(a)にシリサイド化後(Rapid-Thermal-Annealing, RTA後)の結果を示す。Ni<sub>2</sub>Si, Nb<sub>6</sub>C<sub>5</sub>, およびNb<sub>2</sub>O, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>のピークが確認される。400°C窒素雰囲気50時間、100時間とエージングを行うと、Ni<sub>2</sub>Siのピーク幅がより狭くなり、より結晶性が向上した一方、Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>およびNbOの強度が増加した。Nb酸化物の増加はエージング環境に不純物として含まれていた酸素によると思われるが、別途TEM評価解析ではこれがよりシリサイド表面での発生であることが判明している。

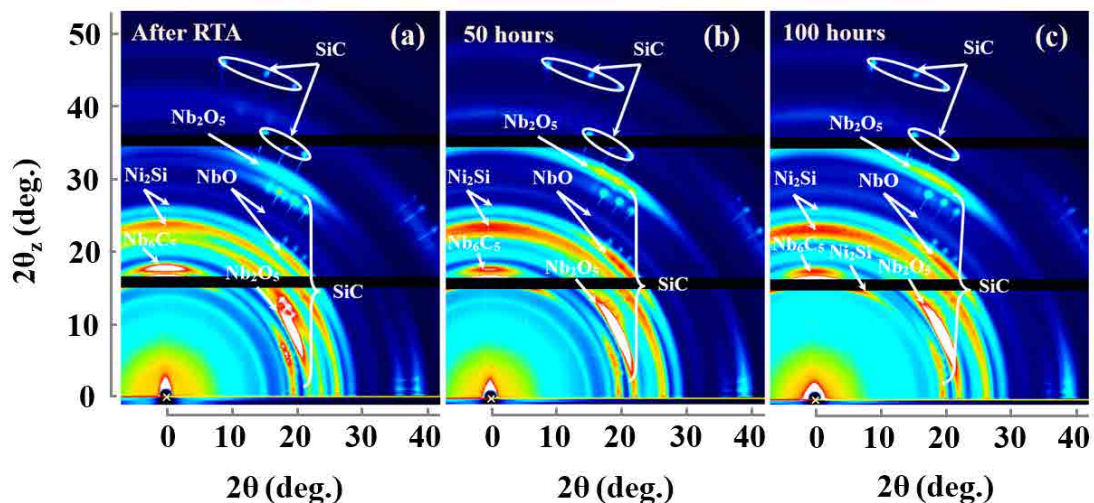


Fig. 1 2D-XRD images of the Ni/Nb/4H-SiC contact (a) after RTA, and after aging at 400°C (b) for 50 hours, and (c) for 100 hours.

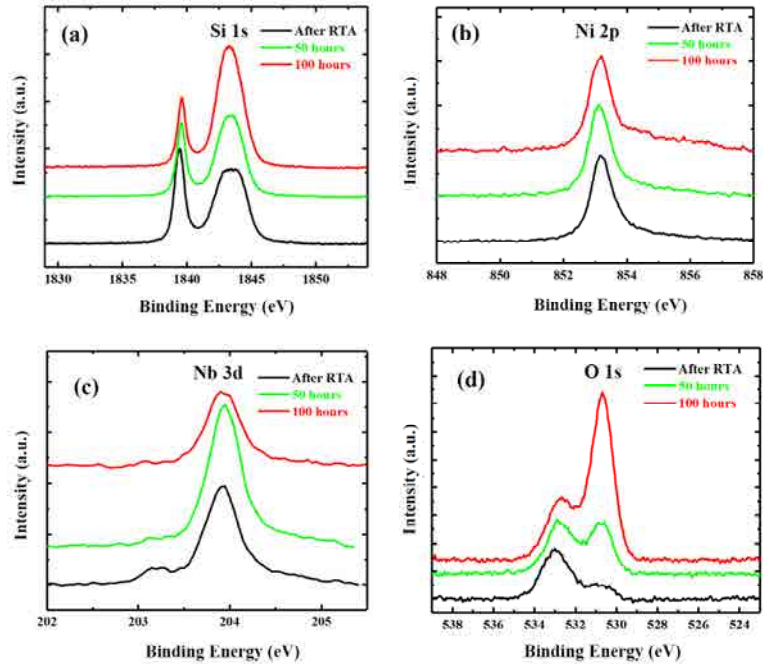


Fig. 2 HAXPES spectra of the Ni/Nb/4H-SiC sample after RTA and after various aging time: (a) Si 1s, (b) Ni 2p, (c) Nb 3d, and O 1s.

Fig.2 に 4H-SiC 上に NiNb シリサイド電極(Ni-Si-Nb-C 電極)における HAXPES 測定結果を示す。Fig.2(a)に示す Si 1s は束縛エネルギー1839.6, 1843.4 eV に大きなピークが確認された。これは Ni<sub>2</sub>Si および SiC 基板からのものである。Ni<sub>2</sub>Si の存在は、Fig.2(b)の 853.1 eV のピークからも示されている。O1S ピークは 400°C エージングを行うことにより 530.7 eV のピークが増加しているが、これは Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> が増加したためと考えられる。

#### 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).
- [4] S. S. Suvanam, S-I. Kuroki, L. Lanni, R. Hadayati, T. Ohshima, T. Makino, A. Hallen, C.-M. Zetterling, "High Gamma Ray Tolerance for 4H-SiC Bipolar Circuits," *IEEE Tran. Nucl. Sci.*, 64, 852-858 (2017).
- [5] Kosuke Muraoka, Hiroshi Sezaki, Seiji Ishikawa, Tomonori Maeda, Tadashi Sato, Takamaro Kikkawa, and Shin-Ichiro Kuroki, "Enhanced-Oxidation and Interface Modification on 4H-SiC(0001) Substrate Using Alkaline Earth Metal," *Mat. Sci. Forum*, 897, pp348-351 (2017).
- [6] Milantha De Silva, Teruhisa Kawasaki, Takamaro Kikkawa, and Shin-Ichiro Kuroki, "Low Resistance Ti-Si-C Ohmic Contacts for 4H-SiC Power Devices Using Laser Annealing," *Mat. Sci. Forum*, 897, pp399-402 (2017).
- [7] S-I. Kuroki, T. Kurose, H. Nagatsuma, S. Ishikawa, T. Maeda, H. Sezaki, T. Kikkawa, T. Makino, T. Ohshima, M. Östling, and C.-M. Zetterling, "4H-SiC Pseudo-CMOS Logic Inverters for Harsh Environment Electronics," *Mat. Sci. Forum*, 897, pp669-672 (2017).
- [8] Milantha De Silva, Teruhisa Kawasaki, Takamichi Miyazaki, Tomoyuki Koganezawa, Satoshi Yasuno, and Shin-Ichiro Kuroki, "Formation of epitaxial Ti-Si-C Ohmic contact on 4H-SiC C face using pulsed-laser annealing," *Appl. Phys. Lett.* 110, 252108-1 - 252108-5 (2017).