

## 炭化ケイ素MOS界面の欠陥制御と量子デバイスへの展開

物理学系専攻 精密工学コース

先進デバイス工学領域 渡部研究室 中沼 貴澄

## 1. SiC MOS デバイスの信頼性劣化機構に関する研究

持続可能な開発目標 (SDGs) の実現には、電力変換を担うパワーデバイスの高性能化が重要である。従来はケイ素 (Si) パワーデバイスが用いられてきたが、更なる高性能化に向け、炭化ケイ素 (SiC) の利用が期待されている。SiC は広いバンドギャップを有する半導体 (WBG 半導体) であり、絶縁破壊電界も高いため、理論上デバイスの通電損失を大幅に削減できる。また、窒化ガリウム (GaN) などの他の WBG 半導体と異なり、熱酸化で絶縁膜である二酸化ケイ素 ( $\text{SiO}_2$ ) を形成できるため、金属-酸化膜-半導体電界効果トランジスタ (MOSFET) の作製に適する。しかし、熱酸化で形成した MOS 構造界面には高密度の欠陥が存在し[1]、一酸化窒素 (NO) 熱処理による欠陥失活化が業界標準となっている[2]。一方で、実デバイスでは、セルピッチ縮小のためにトレンチゲート構造を有する縦型 MOSFET が有用である。この場合、MOSFET のチャネルは、(11-20)面 (a 面) や(1-100)面 (m 面) などの非基底面に形成される (図 1)。幸い、NO 窒化処理を施した非基底面 SiC MOSFET は、基底面である(0001)面 (Si 面) 上のデバイスと比較して遥かに高い移動度を示す[3]。しかし、非基底面 SiC MOS デバイスの信頼性に関する知見は少ない。そこで、本研究では物理分析及び電気的評価を駆使し、非基底面 MOS デバイスの信頼性評価を行った。

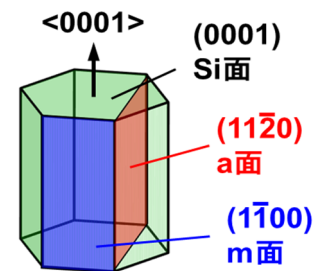


図 1 4H-SiC の結晶面

まず、X線光電子分光法 (XPS) によって、非基底面  $\text{SiO}_2/\text{SiC}$  構造の NO 窒化過程を観察した。窒化過程の観察では深さ方向の元素プロファイル評価が肝となるが、一般的な二次イオン質量分析 (SIMS) では深さ方向分解能が nm オーダしかない。そこで、本研究では、フッ酸エッチングにより傾斜状の  $\text{SiO}_2/\text{SiC}$  構造を形成し、走査 XPS 測定を行うことで、サブ nm オーダでの詳細な窒素プロファイル評価を行った。本評価の結果、窒化の初期段階では窒素は界面 SiC 側に優先的に導入され、その後  $\text{SiO}_2$  側にも導入されることが分かった。さらに、非基底面への窒素導入は Si 面の場合と比較して約 2.3 倍であることが明らかとなった[4]。一方で、非基底面 MOS デバイスの特性改善には十分な窒化が必要である。そこで、高密度窒素の影響を調べるため、非基底面窒化デバイスの信頼性を評価した。まず、図 2(a) に Si 面および非基底面上に作製した MOS デバイスの酸化膜絶縁性を示す。Si 面試料と比較して、非基底面試料では、より低電界側から Fowler-Nordheim トンネル (F-N) 機構に起因するリーク電流が流れた。この原因として、 $\text{SiO}_2/\text{SiC}$  構造の伝導帯オフセット ( $\Delta E_c$ ) の低下が考えられる。そ

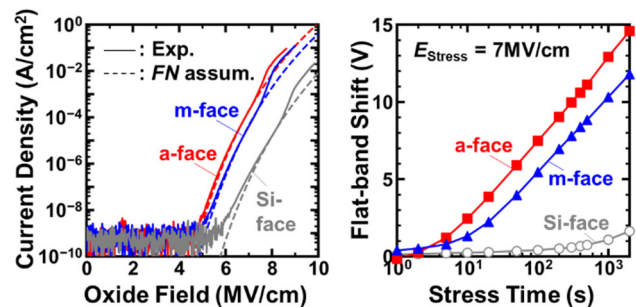


図 2 NO 処理を施した Si, a および m 面 MOS キャパクタの (a) リーク電流密度の酸化膜電界依存性、および (b) フラットバンド電圧のストレス時間依存性

ここで、大型放射光施設 Spring-8 BL23SU の表面化学実験ステーション (SUREAC 2000) [5] にて SiO<sub>2</sub>/SiC 構造の XPS 測定を実施し、伝導帯オフセットを実験的に評価した。結果として窒化を施した非基底面 SiO<sub>2</sub>/SiC 構造の  $\Delta E_c$  は Si 面と比較して 0.3–0.4 eV 程度低いことが判明した。また、長時間のゲートストレス電圧印可に伴うフラットバンド電圧 ( $V_{FB}$ ) 変動を評価したところ、図 2(b) に示す結果の通り、非基底面試料では Si 面に比べて  $V_{FB}$  が大きく変動した。以上から、非基底面 MOS デバイスへの NO 処理は、高移動度を達成する一方で、酸化膜絶縁性の劣化や閾値電圧変動を招くことを明らかにした[6,7]。

## 2. SiO<sub>2</sub>/SiC 界面欠陥の量子応用に関する研究

ここまでは SiO<sub>2</sub>/SiC 界面欠陥の負の側面を紹介してきたが、逆に欠陥を積極的に活用することで、量子デバイス応用につながる可能性がある。特に量子情報通信や量子センシング等は、エレクトロニクスに代わる次世代の革新的技術として注目を集めている。量子デバイスの室温・大気圧動作に向け、光子を量子ビットとして扱う方式が注目を集めており、単一光子源 (SPS) としては固体中の点欠陥が有望である[8]。近年、MOS デバイス応用で重要な SiO<sub>2</sub>/SiC 界面において、室温でも極めて高輝度な SPS が発見された[9]。しかし、発光中心の密度や光学特性の制御に課題がある。そこで本研究では、酸化および熱処理プロセスにより、界面 SPS の密度・光学特性の制御を試みた。

図 3(a)に、1200°C 熱酸化で形成した SiO<sub>2</sub>/SiC 構造の典型的な共焦点フォトルミネッセンス (PL) マッピング像を示す。暗いバックグラウンド中に多数の発光中心が確認できる。しかし、観測された発光中心のいくつかに対して Hanbury-Brown Twiss (HBT) 測定を実施したところ、必ずしも SPS と断定できないことが分かった。これは欠陥同士の発光の干渉が原因であると考え、発光中心密度低減が必要だと考えた。そこで、界面欠陥の低減に有効と知られる CO<sub>2</sub> 熱処理プロセス[10]の適用を検討した。図 3(b)に、PL マッピング像を二値化画像処理することで、発光中心の面密度を算出した結果を示す。熱酸化温度の上昇に伴い発光中心密度は低減するが、CO<sub>2</sub> 熱処理プロセスでは更なる低減が見られた。さらに CO<sub>2</sub> 熱処理試料では、11 個の発光中心に対して HBT 測定を実施したところ、全てが SPS であった。このように CO<sub>2</sub> 熱処理プロセスにより、

孤立した界面 SPS の形成が可能であることを示した[11]。

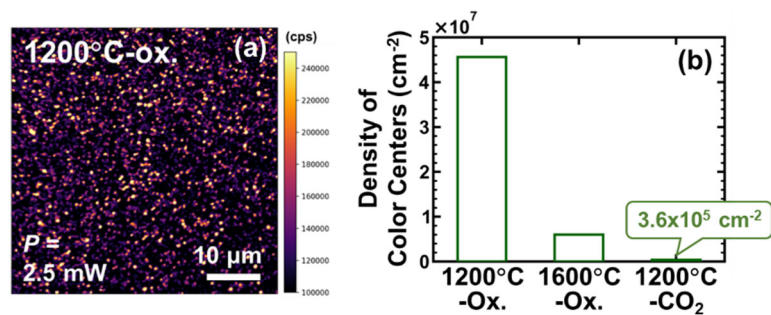


図 3 (a)1200°C 熱酸化試料の共焦点 PL マッピング像。(b)1200°C、1600°C 熱酸化、および 1200°C CO<sub>2</sub> 熱処理試料の発光中心密度。

### 謝辞

本稿 1 章の内容は大阪大学の渡部平司 教授、小林拓真 助教、細井卓治 助教 (現・関西学院大学 准教授)、志村考功 准教授、鈴木亜沙人 氏、岩片悠 氏、渡部ありさ 氏、産業技術総合研究所の岡本光央 博士、染谷満 博士、日本原子力研究開発機構の吉越章隆 博士との共同研究による成果です。また、2 章の内容は大阪大学の小林拓真 助教、渡部平司 教授、志村考功 准教授、豊田中央研究所の朽木克博 博士、田原康佐 博士、木村大至 博士との共同研究による成果です。関係各位に深く感謝申し上げます。

### 参考文献

- [1] T. Kimoto and H. Watanabe, *Appl. Phys. Express* **13**, 120101 (2020).
- [2] G. Y. Chung *et al.*, *IEEE Elec. Dev. Lett.* **22**, 176 (2001).
- [3] S. Nakazawa *et al.*, *IEEE Trans. Elec. Dev.* **62**, 309 (2015).
- [4] T. Nakanuma *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **61**, SC1065 (2022).
- [5] Y. Teraoka and A. Yoshigoe, *Appl. Surf. Sci.* **169**, 738 (2001).
- [6] T. Nakanuma *et al.*, *Appl. Phys. Express* **15**, 041002 (2022).
- [7] T. Nakanuma *et al.*, *Proc. IEEE IRPS* **3B.2-1** (2022).
- [8] M. Atatüre *et al.*, *Nat. Rev. Mater.* **3**, 208 (2018).
- [9] A. Lohrmann *et al.*, *Nat. Commun.* **6**, 7783 (2015).
- [10] T. Hosoi *et al.*, *Appl. Phys. Express* **14**, 101001 (2021).
- [11] T. Nakanuma *et al.*, *ICSCRM 2022, We-2-A.4* (2022).