

非基底面 SiC MOS デバイスの信頼性



若 者

小 林 拓 真*

Reliability of SiC MOS Devices on Non-basal Planes

Key Words : Silicon Carbide, MOSFETs, Reliability, Non-basal Planes

研究背景

サイバー空間とフィジカル空間が高度に融合した超スマート社会 (Society5.0^[1]) に向け、電力の高効率利用は最重要課題である。そのためには、電力の変換・制御を担うパワーデバイスの性能向上が不可欠である。現状の主流はケイ素 (Si) パワーデバイスであるが、Si の物性により決まる理論限界に直面している。そこで、Si を代替する材料の第一候補は、炭化ケイ素 (SiC) である。SiC は、高い絶縁破壊電界・熱伝導率等の優れた物性を示すワイドギャップ半導体である^[2]。さらに、SiC はワイドギャップ材料でありながら、 SiO_2 絶縁膜との間に十分な伝導帯 / 積電子帯オフセット (電子 / 正孔に対するエネルギー障壁) を確保できるため、金属 - 酸化膜 - 半導体 電界効果トランジスタ (MOSFET) の作製にも最適である。したがって、既存の Si サイリスタや絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ (IGBT) を SiC MOSFET に置き換えることができれば、大幅に電力損失を削減できる。

実際に Si デバイスの性能を凌駕する SiC MOSFET が実用化されたものの、未だ SiC の物性から期待される性能を発揮できていない。最大の課題は、MOSFET の高いチャネル抵抗である。実際に、民生品や産業機器への普及で期待される 0.6 – 1.2 kV 級デバイスでは、オン抵抗の大部分 (48 –

66%) をチャネル抵抗が占める^[3]。これが、デバイス通電時の電力損失を増大させている。

オン抵抗低減のためには、トレンチを有する縦型デバイス構造が有用である (図 1(a))。まず本構造の適用により、セルピッチを縮小可能であり、電流密度を稼げる。さらに本構造では (0001) 基底面にトレンチを形成するため、(11-20) 面 (a 面) や (1-100) 面 (m 面) などの非基底面 (図 1(b)) にチャネルが形成される。これらの非基底面上では、標準の NO 窒化処理 (NO ガス雰囲気中での熱処理)^[4,5] により、高いチャネル移動度 ($\sim 100 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$) が得られることが知られている^[6]。これにより、チャネル抵抗を大幅に低減できる。

以上のように窒化を施した非基底面 MOS デバイスは優れたオン特性を示すものの、デバイスの信頼性に関しては十分に検討されていない。特に窒化処理が酸化膜の絶縁性 (リーク電流特性) やデバイスの閾値安定性に与える影響は明らかでない。そこで本稿では、非基底面の中でも特に a 面に焦点を当て、SiC MOS デバイスの信頼性評価を行った結果^[7]について紹介する。

試料作製

実験試料には、a 面 SiC エピ層 (ドナー密度 : $1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) を用いた。1200°C の熱酸化および

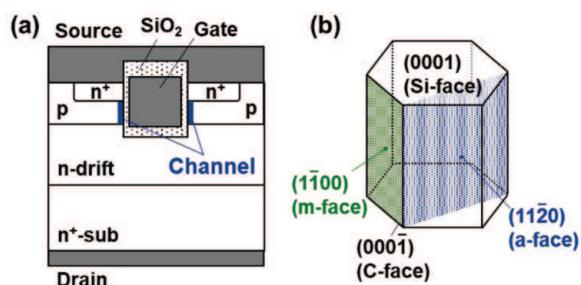


図 1 (a) 縦型トレンチ MOSFET の模式図と (b) SiC の結晶構造。



* Takuma KOBAYASHI

1990年7月生まれ
京都大学 大学院工学研究科 電子工学
専攻 博士後期課程 修了 (2018年)
現在、大阪大学 大学院工学研究科 物
理学系専攻 助教 博士 (工学)
専門／ワイドギャップ半導体
TEL : 06-6879-7282
FAX : 06-6879-7282
E-mail : kobayashi@prec.eng.osaka-u.ac.jp

Ar熱処理で約55 nmのベース酸化膜を形成後、1250°CのNO窒化を10、30、60、120分施した試料を用意した(試料名:a10、a30、a60、a120)。また、比較用に最適条件である1250°C 60分のNO窒化を施したSi面試料も用意した(試料名:Si60)。これらのSiO₂/SiC構造に対し、Alゲート電極を有するMOSキャパシタ(図2(a))を作製した。また、X線光電子分光(XPS)による評価のために、(i)1%希釈HFでSiO₂膜を約3 nmに薄層化したSiO₂/SiC試料および(ii)10%希釈HFでSiO₂膜を完全に除去したSiC試料を用意した。

ゲートリーク電流評価

まず、図2(b)にMOSキャパシタのリーク電流密度の測定結果を示す^[7]。図の横軸はゲート電圧を酸化膜電界に換算して示している。さらに図にはFowler-Nordheim電流(F-N電流)機構^[8]を仮定した計算値も示している。計算の際、簡単のため半導体から酸化膜に放出される電子は自由フェルミガスモデルに従うと仮定し、酸化膜中の電子有効質量を0.42 m_0 ^[8](m_0 は自由電子の質量)と仮定した。このような仮定の下、不確定なパラメータはSiO₂/SiC構造の伝導帯オフセット(ΔE_C)のみとなる。 ΔE_C は、電流の計算値が実験値と整合するよう、試料毎に決定した。図2(b)を見ると、試料によらず、計算値は幅広い電界範囲で実験値を再現できている。これは、リーク機構は、F-N電流が支配的であることを意味する。一方で試料間の差に着目すると、窒化が不十分なa面試料(a10)は、Si面標準試料(Si60)と同等の電界(約5.5 MVcm⁻¹)からリーク電流が開始することが見て取れる。しかし十分な窒化を施し

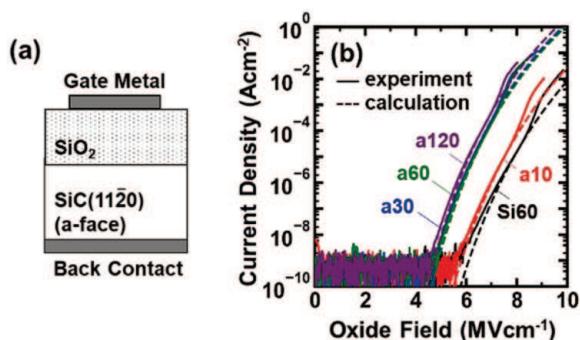


図2 (a) SiC MOS構造と(b)様々な窒化を施したSiC MOS構造のリーク電流密度の酸化膜電界依存性^[7]。実線は実験値、破線はF-N電流機構を仮定した計算値。

た試料(a30-a120)では、リーク電流の開始電界が1 MVcm⁻¹程度低くなっている。これは、a面においては、30分以上の窒化が伝導帯オフセットを低下させることを意味する。実際に図2(b)の計算値に対応する ΔE_C はa10、a30、a60、a120でそれぞれ2.93、2.59、2.61、2.54 eVとなり、30分以上の窒化により ΔE_C は約0.3 eV低下する。一方で、30分以上の窒化は界面特性の改善に必須であるため^[9]、本絶縁性劣化は深刻な課題といえる。

バンドアライメント評価

窒化進行による伝導帯オフセット低下の真偽を確かめるために、放射光XPSを用いたバンドアライメント評価を行った。測定は、SPring-8のビームラインBL23SU^[10]にて行い、X線エネルギーは686.4 eV、光電子脱出角度は90°とした。まず、SiO₂/SiC構造の価電子帯オフセット(ΔE_V)を(i)薄膜SiO₂/SiC試料と(ii)ペアSiC試料の価電子帯スペクトルを元に決定した。決定した ΔE_V を元に、SiO₂、SiCのバンドギャップを考慮の上、 ΔE_C を算出した。ここで、SiO₂バンドギャップはO1sエネルギー損失スペクトルから8.7 eVと決定し、SiCバンドギャップは文献値3.26 eV^[12]を仮定した。実際に評価したSiO₂/SiC構造のバンドアライメントを図3に示す^[7]。XPSの評価結果からも、やはり30分以上の窒化で ΔE_C が約0.2 eV低下することが見て取れる。なお、全試料において、 ΔE_C の評価結果はXPSと電流解析(括弧内の数値)で高い精度(0.07 eV以内)で一致している。したがって、図2(b)で観測された窒化進行に伴うリーク開始電界低下の起源は、やはり窒化による伝導帯オフセットの低下であるといえる。

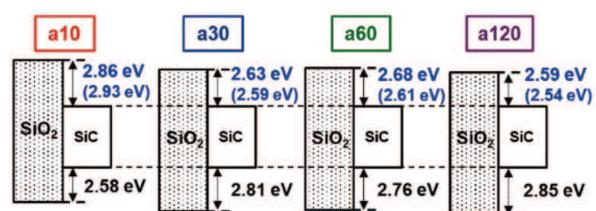


図3 放射光XPS測定により決定した窒化SiO₂/SiC構造のバンドアライメント^[7]。括弧内の数値は、リーク電流値のフィッティング(図2(b))により求めた伝導帯オフセット。

閾値安定性評価

窒化は絶縁性劣化を招くことが明らかとなったが、閾値安定性への影響は依然明らかでない。そこで、電子 / 正孔注入ストレス試験を行い、MOS デバイスの安定性を調査した。具体的には、電圧ストレスを最大 2000 s に亘って印可し、容量 - 電圧 ($C-V$) 特性を繰り返し取得することで、特性の変動を逐次観察した。特に負電圧ストレス印可時には、UV 光(波長 : 250 – 450 nm) を照射することで、電極周囲に電子 - 正孔対を生成し、電極下に正孔を送り込んだ^[11]。これにより、正孔の極端に少ない n 型 SiC において、正孔注入ストレス試験を可能にした。試料 a60 に対する評価結果を、例として図 4 に示す^[7]。正電圧ストレス(図 4(a)) の場合は電子注入に伴う特性の正方向シフト、負電圧ストレス(図 4(b)) の場合は正孔注入に伴う特性の負方向シフトが明瞭に確認される。 $C-V$ 特性からフラットバンド電圧(V_{FB}) を抽出し、ストレス印可に伴う電圧変動を観測した。

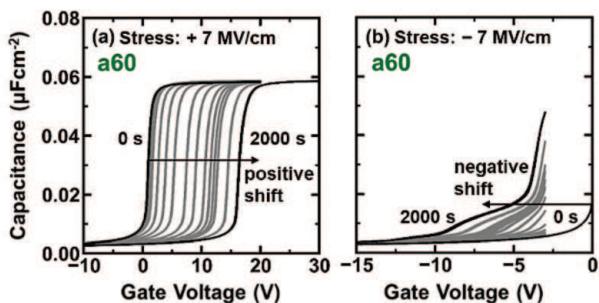


図 4 窒化を施した SiC MOS 構造 (a60) の $C-V$ 特性の電圧ストレスに対する経時変化^[7]：(a) ストレス電界： $+7 \text{ MVcm}^{-1}$ (電子注入)、(b) ストレス電界： -7 MVcm^{-1} (正孔注入)。

図 5 にフラットバンド電圧(V_{FB})変動のストレス時間依存性を示す^[7]。正・負いずれの電圧ストレスの場合も、ほぼ全ての a 面試料において Si 標準試料よりも大きな V_{FB} 変動が確認された。例外は 10 分窒化試料 (a10) であるが、この試料は窒化が不十分であり、界面特性が良好でない^[9]。窒化の進行とともに、電圧ストレス耐性が劣化する傾向が明確に見て取れる。このことから、窒化は界面特性改善に効果的なものの、電子 / 正孔注入に対するストレス耐性を劣化させ、信頼性に深刻な影響を及ぼすといえる。

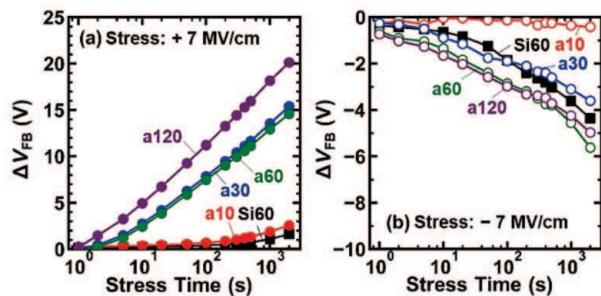


図 5 様々な窒化を施した SiC MOS 構造の V_{FB} 変動量のストレス時間依存性^[7]：(a) ストレス電界： $+7 \text{ MVcm}^{-1}$ (電子注入)、(b) ストレス電界： -7 MVcm^{-1} (正孔注入)。

結論

本稿では非基底面 SiC MOS デバイスの信頼性を調査した。これまで、高移動度を得るために NO 窒化プロセスが標準的に用いられてきたが、NO 窒化は SiO_2/SiC 構造の伝導帯オフセットを低下させ、 $F-N$ 电流の開始電界を低下させることが判明した。これは、酸化膜の絶縁性を劣化させ、リーク电流の増大を招く。また、窒化は正・負電圧ストレス(電子・正孔注入)に対するデバイス閾値電圧の変動を招くことも明らかとなった。なお、本稿では (11-20) a 面の評価結果を紹介したが、以上の窒化による信頼性劣化は (1-100) m 面でも同様である^[12]。このことから、非基底面に対する処理として、NO 窒化は最終解ではないといえる。界面特性だけでなく信頼性も担保した絶縁膜形成プロセスあるいは界面処理プロセスの探索が今後重要なとなる。

謝辞

本稿で紹介した内容は、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、および大阪大学の渡部平司教授、志村考功准教授、細井卓治助教(現・関西学院大学准教授)、中沼貴澄氏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] 内閣府ホームページ
(https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/)
- [2] T. Kimoto and J. A. Cooper, *Fundamentals of Silicon Carbide Technology* (Wiley, Singapore,

- 2014).
- [3] T. Kimoto and H. Watanabe, *Appl. Phys. Express* **13**, 120101 (2020).
 - [4] H. Li, S. Dimitrijev, H. B. Harrison and D. Sweatman, *Appl. Phys. Lett.* **70**, 2028 (1997).
 - [5] G. Y. Chung, C. C. Tin, J. R. Williams, K. McDonald, R. K. Chanana, R. A. Weller, S. T. Pantelides, L. C. Feldman, O. W. Holland, M. K. Das, J. W. Palmour, *IEEE Electron Device Lett.* **22**, 176 (2001).
 - [6] S. Nakazawa, T. Okuda, J. Suda, T. Nakamura, and T. Kimoto, *IEEE Trans. Electron Devices* **62**, 309 (2015).
 - [7] T. Nakanuma, T. Kobayashi, T. Hosoi, M. Sometani, M. Okamoto, A. Yoshigoe, T. Shimura, and H. Watanabe, *Appl. Phys. Express*, **15**, 041002 (2022).
 - [8] M. Lenzlinger and E. H. Snow, *J. Appl. Phys.* **40**, 278 (1969).
 - [9] T. Nakanuma, Y. Iwakata, A. Watanabe, T. Hosoi, T. Kobayashi, M. Sometani, M. Okamoto, A. Yoshigoe, T. Shimura, and H. Watanabe, *Jpn. J. Appl. Phys.* **61**, SC1065 (2022).
 - [10] Y. Teraoka and A. Yoshigoe, *Appl. Surf. Sci.* **169-170**, 738 (2001).
 - [11] Y. Katsu, T. Hosoi, Y. Nanen, T. Kimoto, T. Shimura, and H. Watanabe, *Mater. Sci. Forum* **858**, 599 (2016).
 - [12] T. Nakanuma, A. Suzuki, Y. Iwakata, T. Kobayashi, M. Sometani, M. Okamoto, T. Hosoi, T. Shimura, and H. Watanabe, *Proc. of Int. Reliability Phys. Sympo. 2022*, 3B.2-1.

