SiC パワーデバイスの本格的実用化に向けた MOS 界面の課題
Progress and Challenges in SiC MOS Interface toward SiC Power Devices

○木本 恒暢（京大工）
°Tsunenobu Kimoto (Kyoto Univ.)
E-mail: kimoto@kuee.kyoto-u.ac.jp

はじめに SiC は次世代の高耐圧・低損失パワー半導体として注目されている[1]。特に Si と同様に熱酸化により SiO_2 を形成できることから、SiC パワーMOSFET は耐圧 600~6500V 領域のパワーデバイスの本命として研究開発が進められている。既に耐圧 630V－オン抵抗 0.79mΩcm² のトレンチ MOSFET が試作され[2]、定格電圧 600~1700V、定格電流 10~50A の SiC パワー MOSFET の小規模量産が開始された。また、3300V－1500A のパワーモジュールが鉄道に搭載され、顕著な省エネ効果を実証している[3]。しかしながら、SiC MOS 界面には依然として高密度の欠陥が存在し、SiC MOSFET の性能と信頼性に悪影響を与えている。本報告では、SiC パワーMOSFET の研究開発状況を紹介した後、その界面物理の理解と特性向上について概説する。

要求項目 SiC パワーMOSFET ではドリフト層（耐圧維持層）の抵抗を Si に比べて 1/100 以下に低減できるため、チャネル抵抗がオン抵抗を支配する成分となる。したがって、Si に対する圧倒的な優位性を確保するためには、高濃度ドープされた p 型ボディ上で約 50cm²/Vs 以上のチャネル移動度が求められる。また、高いしきい値電圧（3~6V）が要求されることが多い。ゲート絶縁膜の絶縁性やしきい値電圧の安定性に対する要求も厳しい。

MOS 界面特性の向上 上記の要求項目をある程度満足する代表的なプロセスは、SiC(0001)、(11$\bar{2}$0)、(1$\bar{1}$00)面のドライ酸化＋窒化である[4-6]。現在、このプロセスの改良が進められているものの、依然として界面近傍に高密度の界面準位や酸化膜トラップが存在し、十分な水準から遠いと言わざるを得ない。特定のプロセスにより、100cm²/Vs を越えるチャネル移動度も多数報告されているが、酸化膜および界面の信頼性やしきい値電圧に課題を残している。最近、SiC MOS 界面に適した界面準位密度の評価手法の開発により、チャネル移動度と界面準位密度の間にほぼ一対一の相関が見られるようになったが[6,7]、MOS チャネル内のキャリアの捕獲および散乱過程に関する基礎研究が大きく欠落している。

MOS 界面構造の解析 SiC の熱酸化により SiO_2 が形成されるものの、酸化膜中および界面近傍における炭素の残留や MOS 界面の急峻性に疑問が呈されてきた。近年の構造分析により、適切な条件で形成した熱酸化膜/SiC 界面は予想以上に急峻（界面遷移層や界面近傍の過剰炭素は、ほぼ検出限界以下）であり、酸化膜中の炭素汚染も SIMS 検出限界に近いことが判明した[6,8,9]。しかしながら、このような物理・化学分析の検出限界は電子的に十分な低欠陥密度を保証する訳ではない。基礎に立ち返ると、SiC の熱酸化メカニズムが依然として理解されているとは言えず、界面における酸化反応を原子レベルで解明することが重要である。近年、SiC の熱酸化機構に着目した界面特性向上が報告され、注目されている[10]。

まとめ SiC MOS 界面は次世代パワーデバイス、高温動作デバイスの鍵を握っているが、その酸化メカニズム解明、界面近傍に存在する複数種の欠陥の起源解明、MOS チャネルにおけるキャリア輸送特性を学理的に明らかにし、特性向上や特性予測の指針を確立することが重要である。

[1] T. Kimoto, Jpn. J. Appl. Phys., **54**, 040103 (2015). [2] T. Nakamura et al., *Tech. Dig. 2011 IEDM*, 26.5.1.
[3] 三菱電機 / 小田急電鉄 HP [4] G.Y. Chung et al., IEEE Electron Device Lett., **22**, 176 (2001).
[5] A.J. Lelis et al., IEEE Trans. Electron Devices, **55**, 1835 (2008).
[6] T. Kimoto and J.A. Cooper, *Fundamentals of Silicon Carbide Technology* (John Wiley & Sons, 2014).
[7] H. Yoshioka et al., AIP Advance, **5**, 017109 (2015). [8] H. Watanabe et al., Appl. Phys. Lett., **99**, 021907 (2011).
[9] X. Zhu et al., Appl. Phys. Lett., **97**, 071908 (2010). [10] R.H. Kikuchi et al., Appl. Phys. Lett., **105**, 032106 (2014).

© 2015年 応用物理学会