

SiC パワーデバイス開発における欠陥制御の重要性

Defect Engineering in SiC Technology for High-voltage Power Devices

阪大院工¹, 京大院工² °渡部 平司¹, 木本 恒暢²

Osaka Univ.¹, Kyoto Univ.², °Heiji Watanabe¹, Tsunenobu Kimoto²

E-mail: watanabe@prec.eng.osaka-u.ac.jp

炭化ケイ素 (SiC) 半導体は、高い絶縁破壊電界強度をはじめ優れた物性を有し、従来のシリコン半導体デバイスを凌駕する高耐圧、低損失、そして高速動作が可能なパワーデバイスを実現することができる。SiC ウェハの高品質化と低コスト化、さらには結晶成長や各種プロセス技術の進展と共に、次世代パワーデバイス材料としての優位性をデバイスレベルで実証してきた。2000年代以降、ショットキーバリアダイオード(SBD)に続き、MOS型電界効果トランジスタ(MOSFET)の実用化により、SiC パワーモジュールの実用化が進んでおり、最近では新幹線や電気自動車へのSiC パワーデバイス応用が記憶に新しい。

一方、これまでも SiC 半導体の優位性やパワーデバイス応用に関する議論がなされてきたが[1]、SiC パワーデバイスの広範な普及が期待される現在においても、その高性能化と信頼性向上には多くの課題が残されている。特に SiC は多くの結晶多形を持つ化合物材料であり、様々な結晶欠陥が存在するだけでなく、デバイス動作時の結晶欠陥の拡張には注意が必要である。また、MOS構造を構成する絶縁膜/SiC 界面には電気的な欠陥が高密度に存在し、MOSFET の低オン抵抗化や信頼性向上を妨げている。今回の解説論文賞の対象となったレビュー論文では、SiC 材料中のバルク欠陥や MOS 界面の欠陥について、最近の研究開発動向に加え、欠陥制御に向けた著者らの研究開発成果を紹介した[2]。SiC 半導体については、その基礎物性からデバイス応用に亘り、これまでに優れたレビュー論文が数多く発表されているが、当該論文が多く読者の目に留まっている事からも、SiC パワーデバイスへの期待に加え、まだまだ材料本来の性能を引き出せていない現状を感じ取る事ができる。

本講演では、SiC MOS 界面欠陥の理解に加え、最近の欠陥終端技術を紹介する[2]。SiC 半導体は、表面酸化で SiO₂ 絶縁膜の形成が可能な化合物半導体であり、通常は 1200°C 以上の高温酸化で MOS デバイス用途のゲート絶縁膜を形成する。SiC を構成する炭素の大部分は高温酸化時に気相中に放出されるが、その一部が SiO₂/SiC 界面に残留し、SiC の伝導帯及び価電子帯近傍に欠陥準位を形成する事が様々な物理分析や MOS 界面の電気特性評価、さらには理論計算から明らかにされている。NO ガス雰囲気中の高温熱処理は、SiC MOS 界面の高品質化に欠かせないコア技術となっているが、MOS 界面の炭素不純物低減との相関は見られるものの、特性改善機構については NO 窒化技術の提案から 25 年以上経過した現在でも決定的な機構解明には至っていない。また、界面に多量の窒素を含む SiC MOSFET は動作時に絶縁膜界面への電荷捕獲が生じ、トランジスタの閾値電圧が変動して信頼性確保の観点から大きな問題を有している。従って、NO 窒化技術に代わる MOS 界面欠陥終端技術として、窒化手法の改善や他元素の導入効果、或いは酸化剤の変更や超高温酸化などが検討されている。しかし、デバイス性能と信頼性の向上を同時に達成する実用化技術の構築には至っておらず、SiC パワーデバイスのさらなる普及に向けた最重要課題として多くの機関で研究開発が続けられている。講演当日は、界面欠陥の物理的な起源解明への取り組みも含め、MOS 界面欠陥の制御に関する研究開発事例を紹介したい。

[1] T. Kimoto, Jpn. J. Appl. Phys. **54**, 040103 (2015).

[2] T. Kimoto and H. Watanabe, Appl. Phys. Express **13**, 120101 (2020).