

SiC へのイオン注入技術とデバイス応用 Ion Implantation into SiC and Device Applications

京大工¹ ○木本 恒暢¹
Kyoto Univ.¹, °Tsunenobu Kimoto
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。長年の基礎研究を経て、耐圧 600~3300V、定格電流 10~100A 級の SiC パワー MOSFET とショットキー障壁ダイオードの量産が始まり、情報機器用電源、太陽電池用パワコン、産業用モータ、電車、電気自動車等に搭載されて省エネ効果を実証している。これらの SiC パワーデバイスの実用化に至ったキーテクノロジーとして、もちろん大口径の単結晶ウエハ作製、高品質エピタキシャル成長、酸化膜/SiC 界面制御技術も重要であるが、イオン注入技術の成功が重要な役割を果たした。本報告では、SiC 半導体におけるイオン注入に関する基礎技術とその物理的理解、デバイス応用の上で鍵となったポイント、および今後の課題について概説する。

SiC へのイオン注入技術[1] SiC は化合物半導体の中ではほぼ例外的に、イオン注入によって広範囲の n 型/p 型の伝導性制御が可能である。SiC 中におけるドーパント不純物の拡散定数は極めて小さく、高温の活性化アニールを施しても注入分布はほとんど変化しない。ただし、注入により生成される点欠陥も熱的安定性が高いために、ほぼ完全な (95%以上) 電気的活性化率を得るためには 1650~1700°C という極めて高温の活性化アニールが必要である。Si へのイオン注入技術で見られる非晶質からの固相成長による単結晶化は困難であるため、イオン注入による完全な非晶質化を抑制する必要がある。したがって注入ドーズ量が著しく高い場合は 200~300°C の高温イオン注入が有効である。一方で注入ドーズ量が極端に高くない場合は室温イオン注入で十分であり、多くの SiC パワーデバイスの量産にもスループットの観点で室温イオン注入が多用されている。n 型、p 型とも不純物密度 $10^{15}\sim 10^{20}\text{ cm}^{-3}$ の広範囲で制御可能であり、n⁺型、p⁺型領域でそれぞれ約 80 Ω/□、2500 Ω/□ の低いシート抵抗を得ることができる。Si で使われる二重あるいは三重のウェル構造をイオン注入で形成することも容易である。なお、超高温の活性化アニール処理時の表面荒れを抑制するために、しばしばカーボンキャップが採用される。

SiC デバイスへの応用 最初にイオン注入が SiC デバイス量産に使われたのは、ショットキー障壁ダイオード端部の電界集中緩和構造 (ガードリング、JTE 等) の形成であった。その後、純粋なショットキー障壁では高電界によるトンネル効果に起因する漏れ電流が問題となり、これを低減するためにショットキー電極直下にイオン注入によって微細な p 型領域を形成する JBS 構造が量産されるに至った。並行して縦型パワー MOSFET の研究開発・量産が活発化し、p 型ボディ、n 型ソース領域 (および端部の電界集中緩和構造) の形成にイオン注入は必須の技術となっている。最近では半絶縁性 SiC 基板にイオン注入だけで FET を作製する研究報告もある。

SiC へのイオン注入技術の課題 適切な条件でイオン注入により作製した SiC pn 接合はエピタキシャル pn 接合同等の低い漏れ電流と理想的な耐圧を示す。しかしながら、注入領域内および接合界面近傍には様々な拡張欠陥および点欠陥が存在し、キャリア捕獲やキャリア再結合中心として強く働くことが分かっている。例えば、イオン注入で作製した SiC バイポーラトランジスタは良好な電流増幅が得られない (エピ成長により作製した場合は十分優れた性能を示す)。また、超高温アニール時の温度不均一性が大きい場合は、基底面転位のグライドが観測されることも報告されている。イオン注入および高温アニールプロセスにおける欠陥制御と低減は残された大きな課題である。

[1] T. Kimoto and J.A. Cooper, *Fundamentals of Silicon Carbide Technology* (Wiley, 2014), Chapter 6.