

SiC の材料・デバイス特性から見た点欠陥 Point Defects in SiC from a Perspective of Power Device Application

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

はじめに SiC は次世代のパワー半導体として注目されている[1]。近年の結晶成長技術の進展により、150 mm 径の単結晶ウェハが市販され、この上に高純度エピタキシャル成長層を形成することが可能である。少数キャリア注入を活用するバイポーラデバイス (PiN ダイオード、IGBT など) では、点欠陥を介したキャリア再結合の制御が重要となる。最近、SiC におけるキャリア寿命制限欠陥が同定され、その密度を意図的に制御することによってキャリア寿命制御も可能となった。本報告では、SiC のパワーデバイス応用を念頭に置いた点欠陥制御について概説する。

経緯 SiC (デバイス応用上、最も重要な 4H-SiC) の点欠陥研究に関しては、DLTS による深い準位の研究[2]、ESR による点欠陥解析の研究[3]、理論計算による研究に分かれていた。様々な試料 (as-grown、イオン注入、電子線照射など) の DLTS 測定により、多くの深い準位が検出され、そのエネルギー位置や熱的安定性が報告されたものの、欠陥の微視的構造は未知であった。一方で、SiC のキャリア寿命に関する研究が進み、まず n 型 SiC 中のキャリア寿命制限欠陥が、DLTS の分野で言われる $Z_{1/2}$ センター ($E_C - 0.63$ eV) であることが明らかになった[4]。この $Z_{1/2}$ センターは、多くの試料において最も高密度で観測される欠陥であり、熱的にも極めて安定である (1800°C の熱処理を施しても消滅しない)。そこで、この $Z_{1/2}$ センターに関する多角的な研究が進展し、炭素空孔のアクセプタ準位に由来することが解明された[5,6]。

炭素空孔の生成 SiC 中の炭素空孔を意図的に増大させる手法として、低エネルギー電子線照射と高温熱処理がある。電子線照射では、Si と C 原子の質量差を利用することにより、約 110~200 keV のエネルギーの電子線を照射することにより、シリコン空孔を生成することなく炭素空孔密度のみを増大させることができる[7]。一方、高温熱処理では SiC における熱平衡欠陥密度を活用することにより、炭素空孔を生成する[8]。両プロセスとも、同時に生成される格子間炭素原子は外方向拡散して結晶中には残留しない。これらの手法により、SiC 中の炭素空孔密度を 10^{12} ~ 10^{16} cm⁻³ の広い範囲で制御することが可能となった。

炭素空孔の低減 炭素空孔 ($Z_{1/2}$ センター) を低減する最も単純な手法は、結晶成長時の雰囲気をやや炭素過剰とすることである[9]。しかし、良好な表面モフォロジーを維持するためには一定の限度があり、as-grown 試料における炭素空孔密度は 1×10^{12} ~ 1×10^{13} cm⁻³ に留まる。そこで、成長後に炭素空孔を消滅させる 2 つの手法が提案された。それは炭素イオン注入 (+高温熱処理)[10]と高温における熱酸化[11]である。両プロセスとも SiC 結晶中に生成された過剰な炭素原子が格子間原子となって拡散し、炭層空孔を表面側から埋める。最適化することによって、表面から 100~200 μ m の深さまで、炭素空孔密度を 3×10^{10} cm⁻³ 以下に低減することが可能である。

まとめ 炭素空孔の低減により、キャリア寿命が約 1 μ s から 30 μ s 以上に改善され、高耐圧 PiN ダイオードの特性が大幅に向上された[12]。しかしながら、SiC の点欠陥研究は炭素空孔において漸く端緒に付いたばかりであり、他の多くの点欠陥の起源および性質の解明が俟たれる。

- [1] T. Kimoto, Jpn. J. Appl. Phys., **54**, 040103 (2015). [2] T. Dalibor et al., Phys. Stat. Sol. A **162**, 199 (1997).
[3] J. Isoya et al., Phys. Stat. Sol. B **245**, 1298 (2008). [4] K. Danno et al., Appl. Phys. Lett. **90**, 202109 (2007).
[5] N.T. Son et al., Phys. Rev. Lett. **109**, 187603 (2012). [6] K. Kawahara et al., J. Appl. Phys. **115**, 143705 (2014).
[7] H. Kaneko et al., Appl. Phys. Lett. **98**, 262106 (2011). [8] B. Zippelius et al., J. Appl. Phys. **111**, 033515 (2012).
[9] T. Kimoto et al., Jpn. J. Appl. Phys. **42**, 7294 (2003). [10] L. Storasta et al., Appl. Phys. Lett. **90**, 062116 (2007).
[11] T. Hiyoshi et al., Appl. Phys. Exp. **2**, 041101 (2009). [12] K. Nakayama et al., IEEE T-Electron Devices **59**, 895 (2012).