SiC パワー半導体の進展と将来展望

Progress and Future Prospects of SiC Power Semiconductor

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

【はじめに】SiC パワーデバイス(MOSFET, ショットキー障壁ダイオード)の実用化が進み，各種機器で顕著な省エネ効果が示されている。著者は SiC 半導体の黎明期に本研究に着手し，結晶成長，物性解明，欠陥低減などの材料研究から，デバイス作製プロセス，各種デバイスの設計と実証に亘る基礎研究に従事する機会を得た。本講演では，SiC パワーデバイスの進展を著者の視点で概説した後，SiC パワー半導体の将来展望と課題について述べる。

【SiC 材料研究】今日の SiC 半導体の礎が，1980 年代の改良 Lely 法によるブール結晶の成長[1]とオフ基板上の高品質ホモエピタキシャル成長[2]にあることは言うまでもない。著者は 1990 年以降，CVD 法による SiC ホモエピ成長における結晶成長機構の解明と広範囲伝導性制御(n 型，p 型)の研究に取り組んだ[3]。高純度化に関しては，C/Si 比の調整[4]と低圧成長[5]により無添加で実効ドナー密度 1×10^{13} cm^{-3} の成長層が得られ，一定の目途が付いた。1990 年代の大きなブレークスルーは 4H 型ポリタイプの提唱と言える。1960~70 年代には，既に様々な SiC ポリタイプに対して主に光学的性質が調べられていたが，電子物性はほとんど未知であった。1990 年当時，SiC 半導体の研究対象は 6H 型と 3C 型に限られていたが，著者は 6H-SiC バルク成長時に適度な Ce を添加すると再現性良く 4H-SiC インゴットが成長することを見出し，この基板上のホモエピ成長層を活用して 4H-SiC の電子移動度が 6H-SiC に比べて 2 倍高いことを示した[6]。その後の SiC エピウェハにおけるデバイスキラー欠陥の同定と低減，基底面転位に起因するバイポーラ劣化現象の理解と低減，キャリアライフタイムキラーの同定とその低減に関しては，最近のレビュー論文を参照いただきたい[7-9]。電中研および産総研が SiC 材料研究に顕著な貢献をしたことも特筆される。

【SiC パワーデバイス研究】様々な半導体材料の物性値の比較から，SiC をパワーデバイスに適用すれば, Si デバイスを桁違いに凌駕する優れた特性が期待できるという定量的試算は 1980 年代に報告されていた[10]。しかし，当時は高電界に耐える良質の SiC 結晶が入手できず，デバイス研究は遅々として進展しなかった。著者は幸いにして，高品質ホモエピ成長が可能になった段階で本研究に着手したため，自作の基板とエピ成長層を用いて様々な高耐圧ダイオードの試作を始めることができた。世界初の高耐圧 SiC ショットキーダイオード(6H 型，Si 比 20 倍の性能) [11]，世界初の 4H-SiC ショットキーダイオード(Si 比 150 倍の性能) [12,13]がその一例である。当時の SiC デバイス研究は高温動作デバイスや青色発光デバイスが主流であったが，上記の発表を契機として SiC パワーデバイスの研究開発が急激に立ち上がった。一方，世界初の SiC パワーMOSFET 試作は Cree 社であるが[14]，後世へのインパクトという観点では Purdue 大学の寄与が大きい[15,16]。その後の SiC MOS 界面における高密度欠陥の問題とその低減，チャネル移動度の向上に対する取り組みについては，明らかに本紙面の制約を越えている[8]。なお，SiC では n 型および p 型領域をイオン注入により容易に形成できること[17,18]が，製品化の際に極めて重要となる信頼性向上に大きく寄与した。最近は産総研等を中心として世界初の SiC 超接合 MOSFET や超高耐圧(> 15 kV) IGBT が報告されるなど，SiC パワーデバイス開発が急速に進展している。

本研究の機会を与えてくださいました松波弘之 京都大学名誉教授に謝意を表します。また，本研究に貢献いただいた歴代の研究室メンバーの方々、および共同研究者の皆様に感謝いたします。

[1] Yu. M. Tairov and V. F. Tsvetkov, J. Crystal Growth **52**, 146 (1981).
[2] N. Kuroda et al., *19th SSDM* (1987), p. 227.
[3] T. Kimoto et al., Phys. Stat. Sol. (b) **202**, 247 (1997).
[4] D. J. Larkin et al., APL **65**, 1659 (1994).
[5] T. Kimoto et al., APL **79**, 2761 (2001).
[6] A. Itoh et al., APL **65**, 1400 (1994).
[7] T. Kimoto, JJAP **54**, 040103 (2015).
[8] T. Kimoto and H. Watanabe, APEX **13**, 120101 (2020).
[9] T. Kimoto et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **51**, 363001 (2018).
[10] B. J. Baliga, IEEE EDL **10**, 455 (1989).
[11] T. Kimoto et al., IEEE EDL **14**, 548 (1993).
[12] T. Kimoto et al., *21st Int. Symp. Compound Semicond. 1994,* WP2.5.
[13] A. Itoh et al., IEEE EDL **16**, 280 (1995).
[14] J. W. Palmour et al., *Silicon Carbide and Related Materials 1993*, WeA8.
[15] J. N. Shenoy et al., IEEE EDL **18**, 93 (1997).
[16] J. Tang et al., IEEE EDL **19**, 467 (1998).
[17] T. Kimoto et al., Phys. Stat. Sol. (a) **162**, 263 (1997).
[18] T. Troffer et al., Phys. Stat. Sol. (a) **162**, 277 (1997).

© 2022年 応用物理学会