

新しいパワー半導体材料

ルチル構造二酸化ゲルマニウムの可能性と展望

金子 健太郎

立命館大学 総合科学技術研究機構

メモリーやロジック回路に用いられている半導体は Si であるが、機械や電気機器の中で電力変換を担う半導体であるパワー半導体分野では、Si のみならず様々な新材料が活躍している。パワー半導体は機器の低消費電力化に大きく貢献する要であり、また Si ロジック素子よりも集積度が圧倒的に低いため、材料によるゲームチェンジングが他の半導体分野よりも起きやすく、いわば「素材(半導体の石)の味で勝負する」半導体分野である。

新しいパワー半導体に求められる基本的な物性は、大きなバンドギャップに由来して逆方向耐圧が高い事、一方で順方向時の抵抗(オン抵抗)が低い、という一見すると矛盾した性質である。つまり、逆方向に電流を流した際は電気抵抗が理想的には ∞ であり、順方向に電流を流した際は出来るだけ低い電気抵抗値を示す事が好ましい。現在、パワー半導体の新材料として広く世の中に受け入れられている、SiC や GaN はこの2つの要求をバランスよく満たしている。次世代のパワー半導体材料は、まずこの先行する2材料よりも優れた性質をもつ必要がある。しかしながら産業界から見ると、パワー半導体の新材料が企業の生産ラインにおいて既存材料に取って代わるだけのメリットが見出されないと広く普及する事は困難である。そのためには以下の3つの条件をクリアする必要がある。

- ① 「ホモエピタキシャル成長のためのバルク基板が合成可能である。そして基板、薄膜の製造コストと前工程、後工程のコストがトータルで既存材料よりも安い。」
- ② 「ドーピングによる p 型と n 型の両伝導制御が可能である。そして最終的には Si や SiC のような正確なキャリア密度コントロールが出来る。」
- ③ 「(SiC や GaN を超える)パワー半導体材料としての高い電力変換効率をもつ。最低限バリガ性能指数が既存材料よりも高い事、そしてオン抵抗値等で優れた物性を示せること。」

この厳しい3条件を満たす材料は、いまのところ存在しない。それだけ SiC と GaN が30年近い研究開発において様々な研究課題を解決してきた証拠である。しかしながら、この3つの条件をバランスよく満たす材料として、当研究室ではルチル構造二酸化ゲルマニウム($r\text{-GeO}_2$)に注目し、研究を続けてきた。

$r\text{-GeO}_2$ は 4.6 eV という、 β 型 Ga_2O_3 と同様の巨大なバンドギャップをもちながら、ドーピングによるキャリアタイプ制御が可能である事が理論的に予想されている[1]。さらに、Flux 法[2]や CZ 法[3]による微小バルクの作製が報告されており、将来的には低コストでのバルク合成が予想されている。つまり、GaN や SiC よりも高性能なパワー半導体素子が低コストで実現できる事が期待されている。一方で、 GeO_2 は飽和蒸気圧が大きい事から、従来の真空装置を用いた薄膜の作製は非常に困難であった。しかし、2021年に低結晶化領域を含んではいるが、 $1\sim 2\mu\text{m/h}$ の成長速度による薄膜の合成を当研究室から報告し[4]、さらに混晶化によるバンド変調についても報告を行った[5]。今発表では、これまでの研究経緯と産業化の見通し、最新の研究成果について報告する。

[1] S. Chae, J. Lee, K. A. Mengle, J. T. Heron, and E. Kioupakis, Appl. Phys. Lett. 114, 102104 (2019).

[2] J. W. Goodrum, J. Cryst. Growth 7, 254 (1970).

[3] D. E. Swets, J. Cryst. Growth 8, 311 (1971).

[4] H. Takane and K. Kaneko, Appl. Phys. Lett. 119, 062104 (2021).

[5] H. Takane, Y. Ota, T. Wakamatsu, T. Araki, K. Tanaka, and K. Kaneko, Phys. Rev. Mat. 6, 084604 (2022).