

SiC単結晶内の電気伝導キャリアの評価および制御技術開発

名古屋工業大学 大学院工学研究科 准教授

加藤 正史

1. テーマ設定の背景

素形材であるシリコンカーバイド (SiC) は、単結晶として成形することで半導体パワーデバイスへの応用が可能である。ただしその材料のポテンシャルを引き出し、高性能なパワーデバイスを実現するには、SiC中の電子と正孔という電気伝導キャリアの制御が不可欠である。そこでこのテーマでは、非破壊で電気伝導キャリアを評価する技術を開発し、その評価技術を基に、電気伝導キャリアの制御を目指した。さらに、SiCの電気伝導キャリアを利用した新機能の発見に挑戦した。

2. 素形材分野との関連性

SiC単結晶において電気伝導キャリアの評価・制御技術を確立し、パワーデバイス機能を向上させ、さらに光触媒という新規機能を提案した。

3. 研究開発の成果

本研究開発は素形材であるSiC単結晶における電子と正孔という電気伝導キャリアに関するものであり、その成果は下記の3つの項目に細分化することができる。①SiC単結晶内部で電気伝導キャリアが消滅する速度 (キャリア寿命) を非破壊で正確に評価する技術を確立し、表面と内部を分離・定量評価した。②SiC内部の欠陥・不純物がキャリア寿命に与える影響を、筆者らが開発した新規装置により測定し、キャリア寿命の制御につなげた。③SiCの電気伝導キャリアを利用した光触媒効果の提案をした。

これらの成果は、素形材SiCにパワーデバイスとして高い機能を付加するとともに、光触媒という新たな機能の提案をするものであり、独創的なものである。

4. 訴求点

【背景】素形材であるSiCは古くからセラミックスとして利用されてきたが、単結晶として形成すれば半導体として高性能なパワーデバイスが作れる物性値を有する。それゆえ、自動車駆動や送配電系統に応用可能なパワーデバイス材料として普及・市場拡大が期待されている。一方で、SiCパワーデバイスは未だ物性から期待される理論性能に到達していない。例えば市販のSiCデバイスが耐えられる電圧は理論的最大値の10分の1程度であり利用範囲が限られているとともに、デバイスの長期信頼性への不安から普及型の自動車への搭載がなされていない。この課題を解決するには、SiC内部の電子と正孔という電気伝導キャリアの振る舞い (キャリア寿命) を把握し、制御することが重要である。またSiCの電気伝導キャリアを利用すれば、パワーデバイス以外の応用も可能である。そこで筆者は15年ほど前から、光を用いてSiC内部に電気伝導キャリアを作り出すという、非破壊技術によるSiCのキャリア寿命の評価を世界に先駆けて開始し、さらにSiCの応用分野を広げる取り組みをしてきた。そして現在までに、主に下記の3項目の成果をあげてきた。

成果① 評価技術の改良・開発による正確なキャリア寿命測定

【独創性】従来利用されてきた、マイクロ波を用いたキャリア寿命測定技術をSiCに適用する場合の課題とキャリアの生成量を制御することによる解決策を明らかにした。

【学術分野での先進性・優位性】解決策を用いた測定技術を基に、SiCの表面と内部におけるキャリア寿命を分離評価し、SiCのデバイス設計に恒久的に利用可能な定量値を公表した¹⁾。

成果② 不純物がキャリア寿命に与える影響の評価とその制御

【独創性】独自の技術を用いることで、高い時間分解能 (2ns) と世界最高の空間分解能 (3 μ m) を示すキャリア寿命評価装置を開発した。

【学術分野での先進性・優位性】 SiC内部に欠陥もしくは不純物を導入することで、キャリア寿命を制御可能であることを学術的に明確にした²⁾。

成果③ 光照射で生じたSiC中の電気伝導キャリアによる光触媒効果

【独創性】太陽光でSiC内部に作り出される電気伝導キャリアを利用した高効率の光触媒効果を世界で初めて発見した。

【学術分野での先進性・優位性】 化学反応であるSiCの光触媒効果がキャリア寿命に大きく影響を受けていること、および光触媒効率が結晶構造に依存することを物理的な解析により明らかにした³⁾。

【社会への貢献度・実用性、波及効果】 これらの成果はSiCがパワーデバイスもしくは光触媒として実用化されていく上での、基礎的な情報を与える提案であり、今後の研究開発において重要な指針となりうる。さらに成果は多数の論文として一流の学術雑誌に掲載されており、Optics & Photonics Newsなどの国際的なサイエンスニュースサイトに取り上げられたことから、注目度の高さが伺える。したがって社会への波及効果の高い研究成果を上げてきたと言える。現在も産業界と連携して、学術的な評価・解析技術を基に、SiCという素形材に高い機能を付加することを試みている。図1に本研究の成果と波及効果のイメージを示す。さらに現在これらの技術を利用して窒化ガリウムもしくは二酸化チタンなど他の素形材における電気伝導キャリアの振る舞いの理解を進めており、新たな学術的・社会的貢献を目指している。

得られた成果を用いて多くのキャリアを外部に出し高性能なパワーデバイスor光触媒を作る！



図1 本研究の成果と波及効果のイメージ

参考文献

- 1) “Surface recombination velocities for 4H-SiC: temperature dependence and difference in conductivity type at several crystal faces” Masashi Kato, Zhang Xinchu, Kimihiro Kohama, Shuhei Fukaya, Masaya Ichimura, Journal of Applied Physics 127, 195702 (2020).
- 2) “Observation of carrier lifetime distribution in 4H-SiC thick epilayers using microscopic time-resolved free carrier absorption system” K. Nagaya, T. Hirayama, T. Tawara, K. Murata, H. Tsuchida, A. Miyasaka, K. Kojima, T. Kato, H. Okumura, M. Kato, Journal of Applied Physics 128, 105702 (2020).
- 3) “Highly efficient 3C-SiC photocathodes with texture structures formed by electrochemical etching” Masashi Kato, Tomohiro Ambe, Applied Physics Express 13, 026506 (2020).