

SiC パワーデバイスの特性予測を可能にする 高精度シミュレーション技術を開発

— 新型電力制御機器の実用化の加速に貢献 —

2026 年 9 月 7 日

一般財団法人電力中央研究所

【ポイント】

- シリコンカーバイド（SiC）絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ（IGBT）の基本要素である PiN ダイオードについて、通電特性を高精度に予測可能なシミュレーション技術を開発
- SiC 結晶の光学測定と電気特性評価から、従来決定が困難だった計算機シミュレーションに必要な物理パラメータ（キャリア寿命、真性キャリア密度）を導出し、SiC-PiN ダイオードの通電特性を広い温度範囲で高精度に予測できることを実証
- 本技術を適用することで、耐電圧 10 kV 超級の SiC-IGBT の高価な試作回数の削減や開発期間短縮につながり、半導体変圧器^{※1}等の新型電力制御機器の実用化の加速が期待される

【概要】

一般財団法人電力中央研究所（理事長：平岩芳朗、本部：東京都千代田区）エネルギー変換・エネルギー貯蔵研究本部の浅田聡志主任研究員、村田晃一上席研究員、土田秀一首席研究員らの研究グループは、高耐電圧パワーデバイスとして期待されている SiC-IGBT に向けて、計算機シミュレーションにより、IGBT の基本要素である PiN ダイオードの通電特性を高精度に再現する技術を開発しました。

耐電圧 10 kV 超級のパワーデバイスとして期待される SiC-IGBT は、電気伝導メカニズムが複雑であるため、通電特性をシミュレーションで再現することが難しく、最適なデバイス構造を設計することが困難でした。特に、キャリア再結合やキャリア注入を支配する物理パラメータを高精度に決定する手法が確立されていないことが、予測精度向上の大きな障壁となっていました。研究グループは、SiC-IGBT の母材となる SiC 結晶のキャリア寿命と真性キャリア密度を導出する手法を考案し、得られた値を計算機シミュレーションの入力値として用いました。その結果、SiC-IGBT の基本要素である PiN ダイオードの通電特性について、実測結果とシミュレーション結果が室温から 250℃までの広い温度範囲で高精度に一致することを確認しました。

本成果は、**2026 年 9 月 1 日付（米国東部標準時間）で、米国応用物理学会が刊行する Journal of Applied Physics に掲載**されました。

なお、この成果の一部は、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の委託業務（JPNP14004、NEDO 先導研究プログラム／エネルギー・環境新技術先導研究プログラム／次世代高電圧変換器向け超高耐圧 SiC デバイスの技術開発、委託期間：2025－2026 年度）の結果得られたものです。

1. 背景

シリコンカーバイド（SiC）パワーデバイスは、従来のシリコン（Si）パワーデバイスに比べ、特に高電圧用途で低損失性能に優れており、次世代の半導体電力変換技術を支えるキーデバイスとして期待されています。現在、小・中容量クラスの SiC 電界効果トランジスタ（MOSFET）やショットキーバリアダイオード（SBD）が製造され、太陽光発電や、産業用機器、電気自動車、プラグインハイブリッド車、鉄道車両等に適用されています。至近では、AI データセンターの給電設備での適用の拡大が見込まれています。一方で、これらの SiC パワー半導体は、1 素子あたりの耐電圧が 3.3 kV、電流容量が 1 kA 程度にとどまっており、半導体変圧器や、直流送電などの電力系統制御への適用に向けて、さらなる高耐電圧化・大容量化が求められています。

このため、耐電圧 10 kV 超級の SiC パワーデバイスとして、SiC 絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ（SiC-IGBT）の研究開発が国内外で進められています。しかし、SiC-IGBT の開発では、素子設計に必要な高精度シミュレーション技術の確立が大きな課題となっていました。本研究グループはこの課題の解決に向け、SiC-IGBT の基本要素である SiC-PiN ダイオードの通電特性を高精度に再現するシミュレーション技術の開発に取り組みました。

2. 研究手法・成果の特長

2-1. SiC 結晶の物理パラメータの導出

SiC-PiN ダイオードの通電特性に大きく影響する物理パラメータであるキャリア寿命^{※2}と真性キャリア密度^{※3}の導出を試みました。キャリア寿命の導出に向け、まず SiC 結晶に対して時間分解フォトルミネセンス（TRPL）測定^{※4}を実施しました（図 1、赤点）。次に、TRPL 測定で得られる PL 発光強度の減衰カーブを計算により求め、キャリア寿命をフィッティングパラメータとして実測結果に合わせ込むことで（図 1、黒破線）、評価対象の SiC 結晶のキャリア寿命を導出しました（図 2）。減衰カーブの計算では、光照射下における結晶中の直接再結合レート^{※5}の総和を PL 発光強度として扱うことで、TRPL 測定を模擬しました。

真性キャリア密度については、パラメータ導出用の SiC バイポーラトランジスタを別途作製し、電気特性（コレクタ電流）を解析することで導出しました^{※6}。

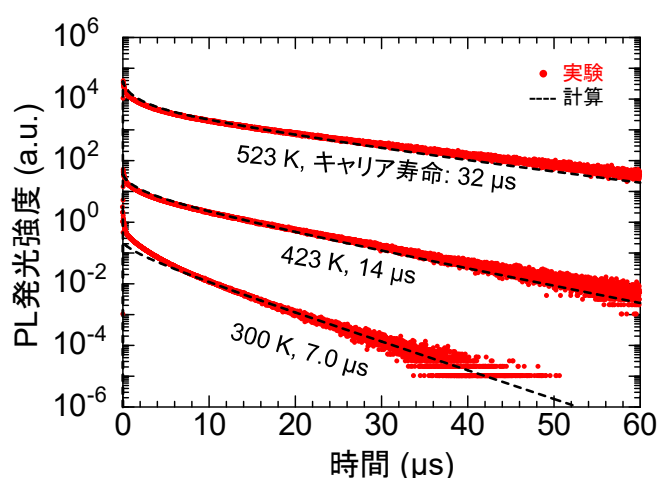


図 1 300 – 523 K における TRPL 測定の実測(赤点)および計算結果(黒破線)

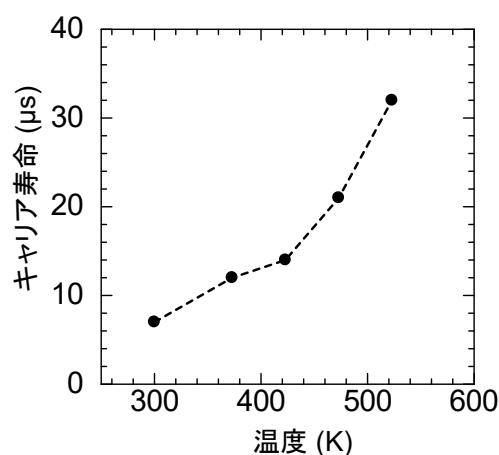


図 2 TRPL 測定結果の解析により得たキャリア寿命の温度依存性

2-2. 計算機シミュレーションによる SiC-PiN ダイオードの通電特性の再現

SiC-PiN ダイオード（図 3）を作製して通電特性の実測結果を得て、その素子構造に対する計算機シミュレーション結果と比較しました。その結果、本研究で導出したキャリア寿命および真性キャリア密度の値を用いた場合には両者がよく一致し、300–523 K の広い温度範囲で PiN ダイオードの通電特性を計算機シミュレーションにより高い精度で再現できることを確認しました（図 4）。以上により、TRPL 測定から得たキャリア寿命を用いて、SiC-PiN ダイオードの電気特性を広温度範囲で高精度に予測できることを示しました。また、従来より用いられてきた真性キャリア密度の値をシミュレーションに用いた場合には、いずれのキャリア寿命においても実測結果とシミュレーション結果に乖離が生じ、本研究で導出した真性キャリア密度の値を用いることの重要性も確認することができました（図 5）。

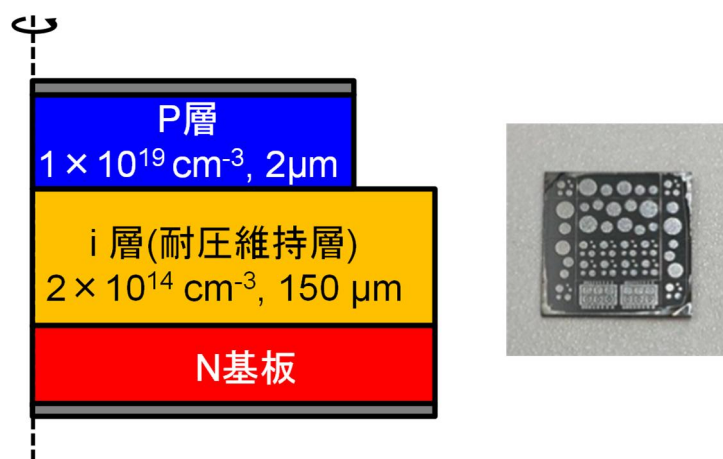


図 3 作製・実測およびシミュレーションを実施した SiC-PiN ダイオードの断面構造と上面写真

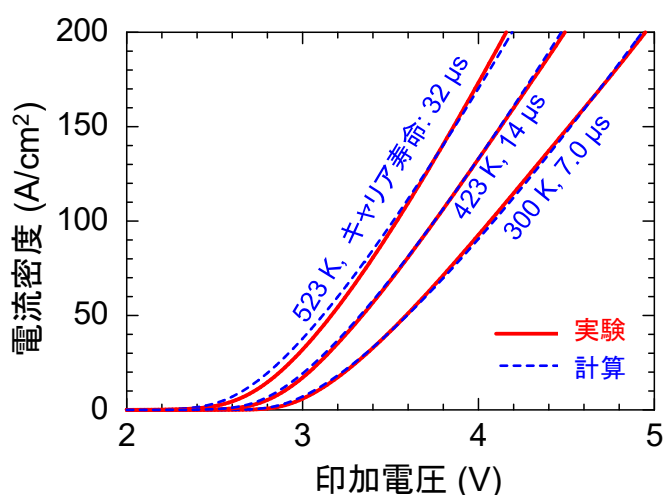


図 4 作製した SiC-PiN ダイオードの 300–523 K における通電特性の実測結果およびシミュレーション結果

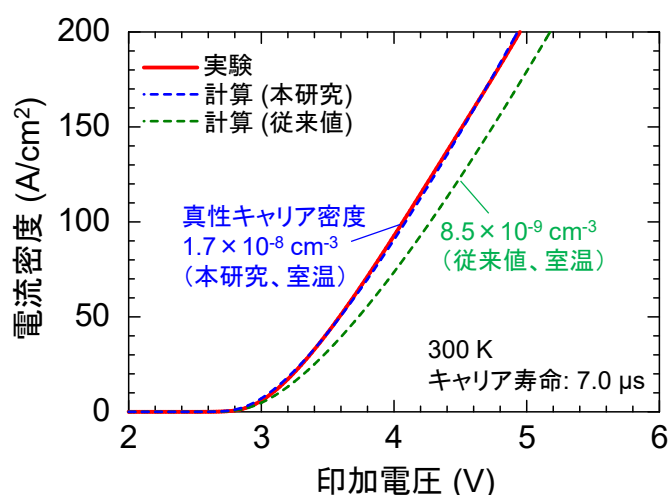


図 5 作製した SiC-PiN ダイオードの 300 K における通電特性の実測結果とシミュレーション結果の比較。真性キャリア密度に従来値を用いた場合には、実測結果とシミュレーション結果に乖離が生じる。

3. 本研究成果が社会に与える影響

本研究で確立した手法により、従来は決定が難しかった物理パラメータを実測に基づいて設定できるため、SiC-IGBT の特性予測精度向上が期待されます。これにより、試作と評価の繰り返しを低減しながらデバイス設計を進めることが可能となり、半導体変圧器や交直変換器等に利用される耐電圧 10 kV 超級 SiC パワーデバイスの開発加速に貢献すると期待されます。

<用語説明>

- ※¹ 半導体変圧器：パワー半導体を用いた高速スイッチング技術と高周波トランスを用いて電圧変換を行う次世代型の変圧器。従来の変圧器に用いられているトランスを大幅に小型・軽量化できる。
- ※² キャリア寿命：結晶中のキャリアである電子と正孔が、再結合過程により消滅するまでに要する時間。ここでは、結晶中の欠陥等に由来するエネルギー準位を介して電子と正孔が再結合する Shockley-Read-Hall 再結合により決まるキャリア寿命（SRH キャリア寿命）を示す。
- ※³ 真性キャリア密度：不純物のない状態における半導体において、熱により生じる電子正孔対の密度。材料固有に決まる値で、IGBT や PiN ダイオードにおいてはキャリア注入量に影響を与える。
- ※⁴ 時間分解フォトルミネセンス測定（TRPL）：パルス光により結晶中に電子と正孔を生成し、試料から放出されるフォトルミネセンス（PL）発光強度の時間変化を評価する手法。
- ※⁵ 直接再結合レート：結晶中の電子と正孔が欠陥等に由来するエネルギー準位を介さずに再結合する直接再結合において、その再結合過程が単位時間内に生じる頻度。直接再結合では、電子と正孔のエネルギー差に相当する波長の発光が生じる。
- ※⁶ 本研究グループは、バイポーラトランジスタのコレクタ電流から真性キャリア密度を決定する独自の手法を考案し、室温から 250℃における SiC の真性キャリア密度を導出しました。本成果は、以下の学術論文で報告しています。

S. Asada, K. Murata, H. Tanaka, and H. Tsuchida, "Experimental determination of intrinsic carrier density in 4H-SiC based on electron diffusion current in an npn bipolar junction transistor" *Journal of Applied Physics* **134**, 234502 (2023).

<論文タイトルと著者>

論文タイトル: Characterization and modeling of forward current conduction in 4H-SiC PiN diodes based on device simulation analysis

著者: Satoshi Asada, Koichi Murata, Tsubasa Shiono, Naoto Ishibashi, Yuichiro Mabuchi, Hidekazu Tsuchida

以 上

<お問い合わせ先>

一般財団法人電力中央研究所 広報グループ 担当：林田、藤本
電話：03-3201-5349（広報グループ直通）
E-mail：hodo-ml@criepi.denken.or.jp