

第2世代 1,200 V All-SiC モジュールの系列拡大

1,200-V 2nd-Generation All-SiC Modules

高崎 愛子 TAKASAKI, Aiko

奥村 啓樹 OKUMURA, Keiji

丸山 力宏 MARUYAMA, Rikihiko

富士電機は、低炭素社会の実現に貢献するためにさまざまな電力変換装置に搭載する Si-IGBT モジュール製品を市場に展開してきた。今回、電力変換効率を改善するため、第2世代 1,200 V トレンチゲート構造の SiC-MOSFET チップを搭載した All-SiC モジュールを開発した。現行品と互換性を持ちつつ内部インダクタンスを低減するとともに、低オン抵抗の第2世代 SiC トレンチゲート MOSFET を採用することで、低損失化を達成した。これにより、従来の Si-IGBT モジュールに対してインバータ発生損失を 63 % 低減でき、パワーエレクトロニクス機器の高密度化と小型化に貢献する。

Fuji Electric has been commercializing Si-IGBT modules for use in a variety of power conversion systems to contribute to realizing a low-carbon society. We have recently developed All-SiC modules equipped with 2nd-generation trench gate SiC-MOSFET chips to improve power conversion efficiency. While maintaining compatibility with conventional products, they reduce internal inductance and power loss by taking advantage of the low on-resistance of the 2nd-generation SiC trench gate MOSFET. Compared with conventional Si-IGBT modules, they reduce inverter generated loss by 63%, contributing to the improved density and miniaturization of power electronics equipment.

① まえがき

低炭素社会を実現するために、パワーエレクトロニクス（パワエレ）機器の省エネルギー（省エネ）化が必要である。省エネ化のためには、パワエレ機器の電力変換効率を向上させることが必要であり、重要な役割を担っているのがパワー半導体である。現在、主流であるシリコン（Si）デバイスの特性は、物性で決まる限界に近づいており、大幅な特性改善が困難な状況になりつつある。このような中、次世代半導体材料としてワイドバンドギャップ半導体である炭化けい素（SiC）を使ったデバイスが注目されている。SiC デバイスは Si デバイスよりも大幅な低損失化が可能であり、パワエレ機器の電力変換効率の一層の改善と省エネの実現が期待されている。

富士電機は、SiC モジュールとして、2017 年にトレンチゲート構造を採用した第1世代 SiC-MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）チップ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾をフルモールドパッケージに搭載した、定格容量 1,200 V/400 A の All-SiC 2 in 1 モジュール⁽¹⁾⁽⁴⁾を市場に展開した。さらに、従来の Si-IGBT モジュールの 62 mm 2 in 1 標準パッケージ（W108 mm×D62 mm）を使って、外形および端子配置の互換性を確保した All-SiC 2 in 1 モジュールを開発した。

今回開発した第2世代 1,200 V All-SiC モジュールは、現行品と互換性を持ちつつ内部インダクタンスを低減した。また、第1世代よりも低オン抵抗の第2世代 SiC トレンチゲート MOSFET を採用することで、低損失化を達成している。

本稿では、Si-IGBT モジュールの 62 mm 2 in 1 標準パッケージと外形が同じ M295 パッケージ〔2 in 1 パッケージ（W108 mm、D62 mm）〕を採用した定格容量

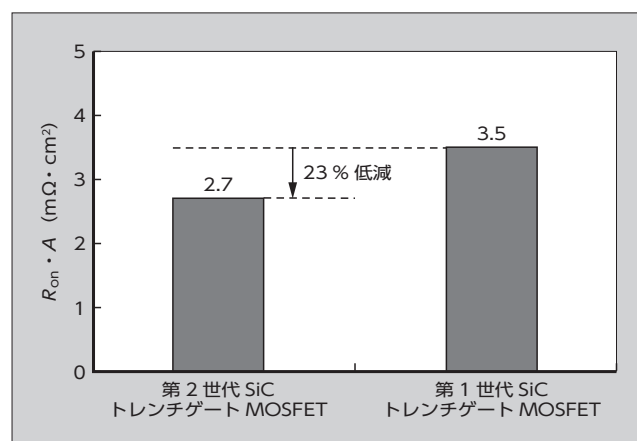


図1 第2世代 SiC トレンチゲートと第1世代 SiC トレンチゲートの $R_{on} \cdot A$ 比較

1,200 V/600 A の All-SiC モジュールについて述べる。

② 第2世代 SiC トレンチゲート MOSFET

第1世代から第2世代でチップ厚の薄化と、トレンチ構造のセルピッチを微細化したことにより、1,200 V 耐圧の第2世代 SiC トレンチゲート MOSFET⁽⁵⁾の規格化オン抵抗 $R_{on} \cdot A$ は第1世代 SiC トレンチゲート MOSFET に比べて 23% 低減した（図1）。また、第1世代 SiC トレンチゲート MOSFET からチャネル移動度を 20% 向上させた。

③ M295 パッケージ

SiC-MOSFET は多数キャリアデバイス（ユニポーラデバイス）であるため、少数キャリアデバイス（バイポーラデバイス）である Si-IGBT（Insulated Gate Bipolar

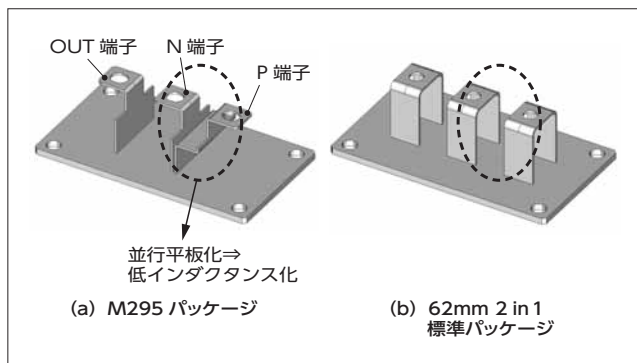


図2 M295 パッケージと 62mm 2 in 1 標準パッケージの内部構造の相違点

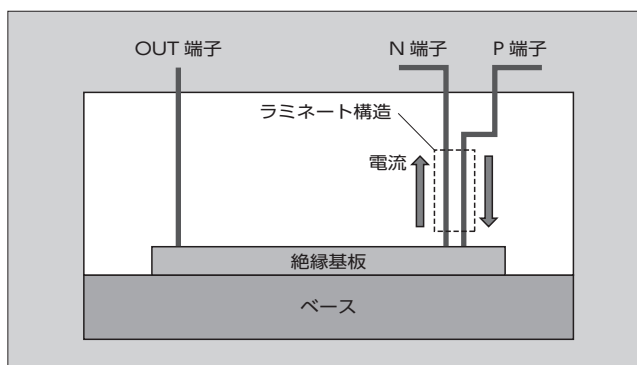


図3 モジュールの断面構造

Transistor) に比べて高速スイッチングが可能である。しかし、高速スイッチングはモジュール内部の配線インダクタンスの影響を受け、高いサージ電圧を引き起こすという弊害を持つ。

そこで、M295 パッケージでは、Si-IGBT 62mm 2 in 1 標準パッケージの外形および端子配置の互換性を確保しつつ、配線インダクタンスを低減するため、次のような工夫をした。Si-IGBT の 2 in 1 標準パッケージと今回開発した M295 パッケージの内部構造を図2に示す。M295 パッケージでは、図3に示すように隣接・並行する主端子の平板部分をできるだけ近づけて電磁相互誘導作用を活用できるようにするラミネート構造を採用し、内部インダクタンスを従来よりも 24% 低減した。

④ 第2世代 SiC トレンチゲート MOSFET 搭載 All-SiC モジュール (1,200 V/600 A 定格品) の電気特性

4.1 出力特性

第2世代 SiC トレンチゲート MOSFET を M295 パッケージに搭載した All-SiC モジュール (All-SiC モジュール) と、標準パッケージを採用した第7世代「X シリーズ」 Si-IGBT モジュール (Si-IGBT モジュール) の 1,200 V/600 A 定格品の出力特性の比較を図4に示す。一般に MOSFET は、IGBT のようなバイポーラデバイスで見られるビルトイン電圧がないといった特徴がある。こ

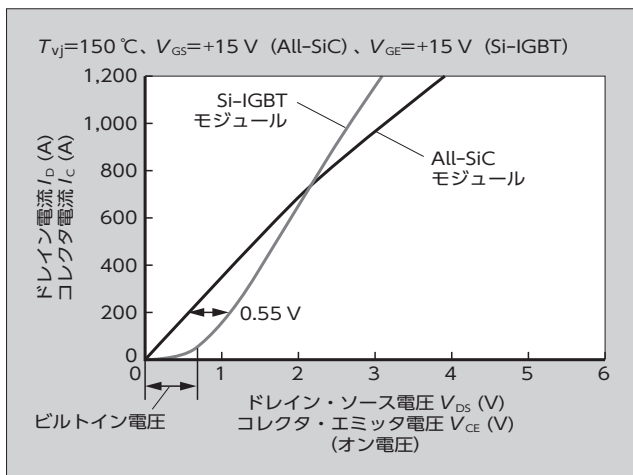


図4 出力特性の比較

れにより、定格電流 ($I_D=600\text{ A}$) 以下において、スイッチング素子として MOSFET を搭載している All-SiC モジュールは、Si-IGBT モジュールよりオン電圧が低い。

インバータなどの電力変換装置では、モジュールの電流定格の 30% 程度で通常運転することが一般的であるため、モジュールの電流定格の約 30% に相当する 200 A で比較した。その結果、All-SiC モジュールのオン電圧は Si-IGBT モジュールよりも約 0.55 V 低く、定常損失が約 50% に低減できる (図9の P_{sat})。

4.2 スwitching特性

一般に、図5に示すように Si-IGBT モジュールは温度が高くなるとスイッチング速度が遅くなる。

一方、図6に示すように All-SiC モジュールは、 $T_{vj}=25^\circ\text{C}$ と 150°C でスイッチング速度はほとんど変わらない。All-SiC モジュールには Si-IGBT モジュールで見られるようなターンオフ時や逆回復時のテール電流がほとんどなく、またキャリア移動度の温度依存性が小さいことなどが理由としてあげられる。

スイッチング速度の指標である dv/dt と di/dt が $T_{vj}=150^\circ\text{C}$ において、All-SiC モジュールと Si-IGBT モ

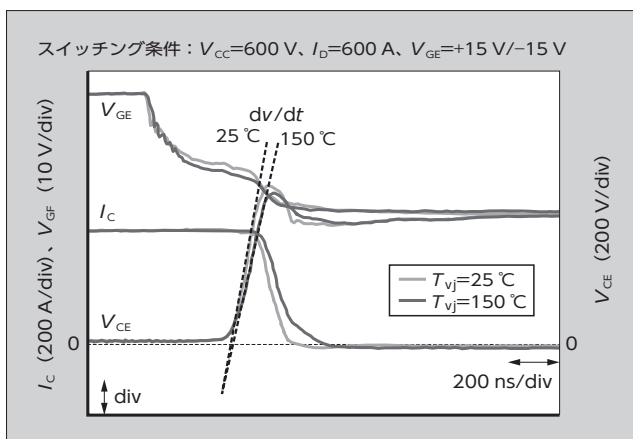


図5 Si-IGBT モジュールの $T_{vj}=25^\circ\text{C}$ と 150°C のスイッチング波形比較

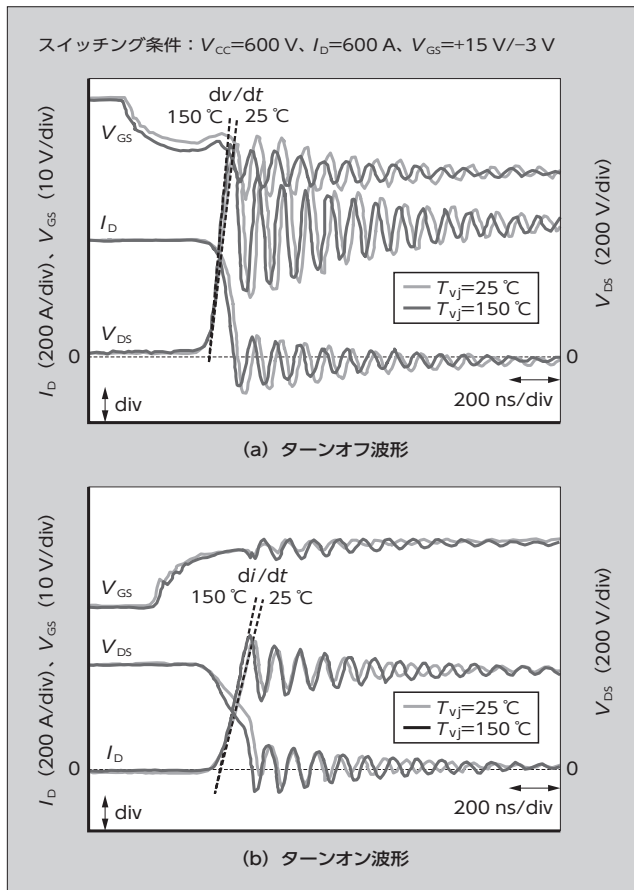


図6 All-SiC モジュールの $T_{vj}=25^\circ\text{C}$ と 150°C のスイッチング波形比較

ジュールでおおむね同等になるよう駆動ゲート抵抗 R_G を選定した上で、スイッチング特性を比較した結果を図7に示す。

All-SiC モジュールは、Si-IGBT モジュールに比べてターンオフ（図7(a)）時のテール電流が大幅に減少している。また、逆回復（図7(c)）時にはテール電流だけでなく、ピーク電流も大幅に減少している。これは、スイッチング時に Si-IGBT モジュールでは少数キャリアの注入で動作する一方、All-SiC モジュールでは多数キャリアだけで動作するためである。また、All-SiC モジュールはターンオフ時の di/dt が Si-IGBT モジュールに比べて速いが、ターンオフ時のサージ電圧はほぼ同等に抑えられている。これは3章で記載した M295 パッケージの低インダクタンス化の効果によるものである。

これらにより、All-SiC モジュールは Si-IGBT モジュールに比べて定格電流である 600 A において、ターンオフ損失 E_{off} を 25%、ターンオン損失 E_{on} を 72%、逆回復損失 E_{rr} を 90% 低減した（図8）。

このように、スイッチング速度を同等とした場合、All-SiC モジュールは Si-IGBT モジュールよりも総スイッチング損失が 57% 低い。

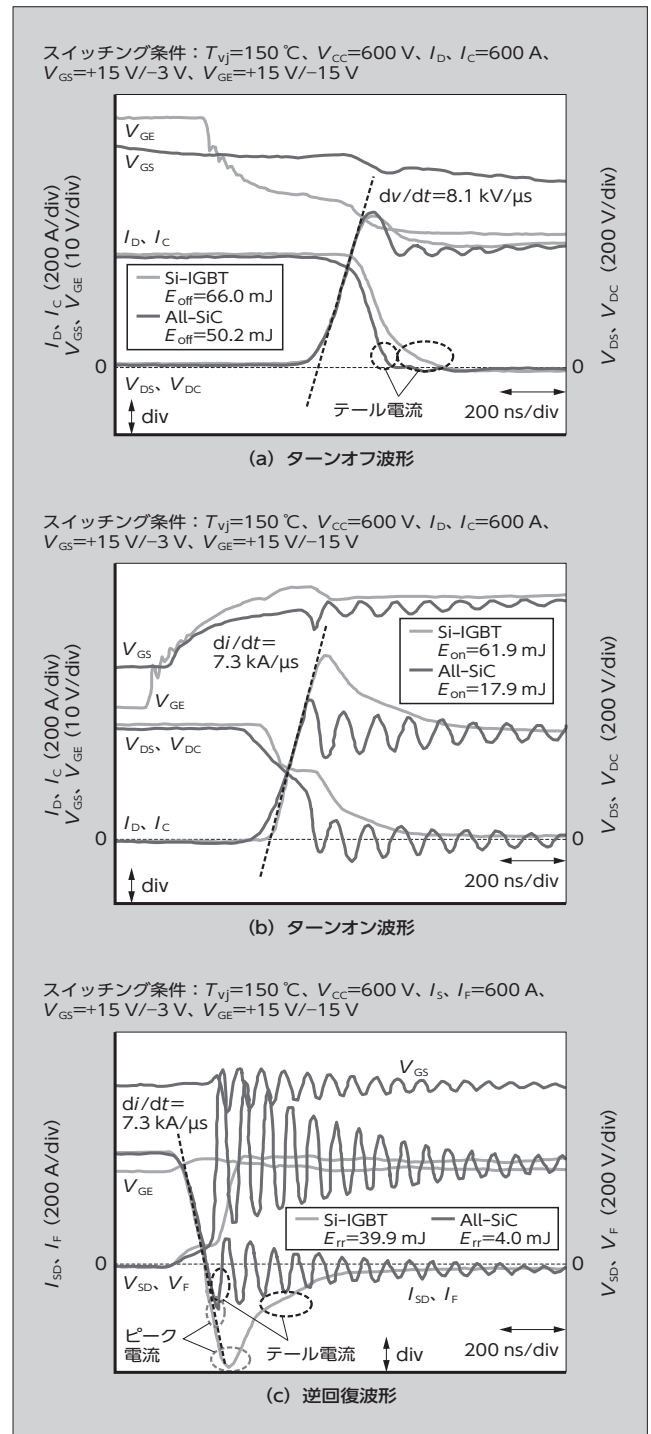


図7 1,200 V/600 A 定格の All-SiC モジュールと Si-IGBT モジュールのスイッチング波形

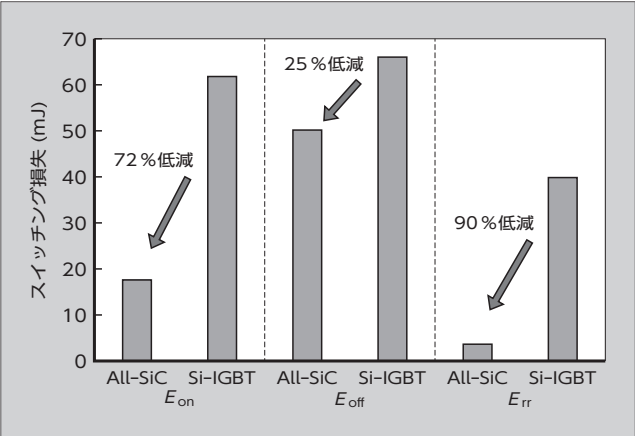


図8 1,200 V/600 A 定格の All-SiC モジュールと Si-IGBT モジュールのスイッチングロスの比較

5 インバータ発生損失結果

4章の All-SiC モジュールと Si-IGBT モジュールの dv/dt と di/dt をおおむね同等とした際の駆動ゲート条件にて、シミュレーションにより2レベルインバータの発生損失を計算した結果を図9に示す。同じ出力電流 [$I_{O(rms)}=200\text{ A}$] の条件において All-SiC モジュールを搭載した場合は、スイッチング損失の大幅な低減効果により、キャリア周波数 $fc=5\text{ kHz}$ ではインバータ発生損失が59%低減し、ジャンクション-ケース間温度 ΔT_{vj-c} が4℃低下する。また、高キャリア周波数条件である $fc=20\text{ kHz}$ でもインバータ発生損失が63%低減し、 ΔT_{vj-c} が14℃低下する。なお、All-SiC モジュールを搭載した場合の $fc=20\text{ kHz}$ における損失は、Si-IGBT モジュールを搭載した場合の $fc=5\text{ kHz}$ における損失とほぼ同じである。このように、第2世代 SiC トレンチゲート MOSFET を搭載した All-SiC モジュールを採用する

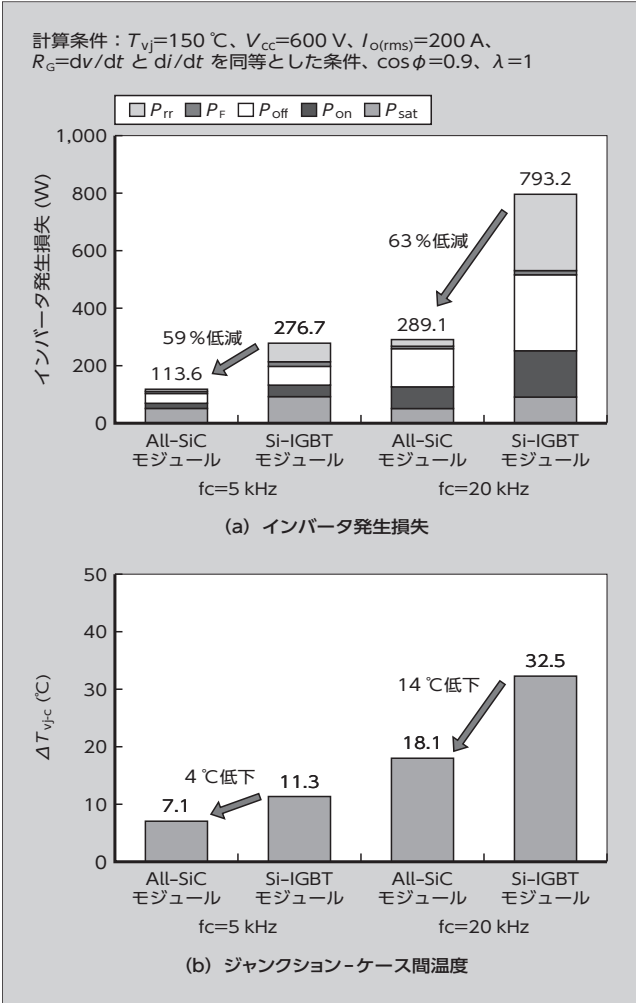


図9 インバータ発生損失のシミュレーション結果

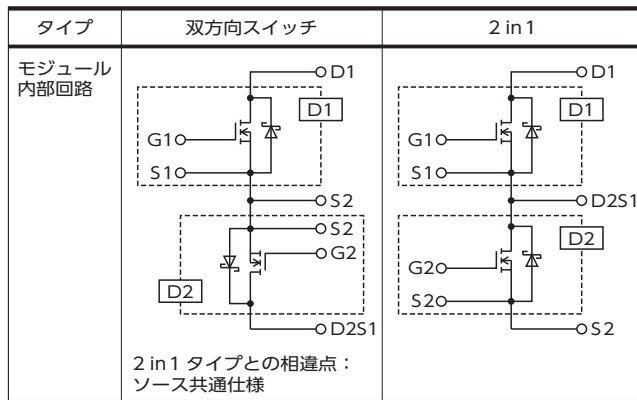
と、発生損失が小さくなり高密度化や大容量化が可能となる。また、高周波化によって小型の受動部品が使用できるようになり、パワエレ機器の小型化に貢献できる。

表1 第2世代 1,200 V All-SiC モジュールのラインアップ計画

パッケージ		外形寸法 W×D×H (mm)	回路パターン	定格電流							
				50 A	75 A	100 A	150 A	200 A	300 A	450 A	600 A
Small1B		33.8×62.8×12.0	2 in 1	○	○	○	—	—	—	—	—
			6 in 1	○	—	—	—	—	—	—	—
Small2B		56.7×62.8×12.0	2 in 1	—	—	○	○	○	—	—	—
			6 in 1	○	○	○	—	—	—	—	—
EconoPACK™*2		45.0×107.5×20.5	6 in 1	○	○	○	○	—	—	—	—
62mm (M295)		62.0×108.0×30.5	2 in 1	—	—	—	—	—	○	○	○
			双方向スイッチ	—	—	—	—	—	○	—	—

* EconoPACK™ : Infineon Technologies AGの商標または登録商標

表2 M295 62mm パッケージ搭載 All-SiC モジュールの内部回路



⑥ 第2世代 1,200 V All-SiC モジュールの系列拡大

表1に、1,200 V 耐圧の第2世代 MOSFET を搭載した All-SiC モジュールのラインアップ計画を示す。現在、小容量帯である Small 1B、Small 2B、EconoPACK™^(注)2 から中容量帯である M295 62 mm モジュールまで、系列開発を行っている。これらの製品は、従来の Si-IGBT モジュールと外形および端子配置に互換性を持ったパッケージとなっている。

また近年、再生可能エネルギーの分野で、インバータ回路に中性点を持たせた3レベルインバータの採用が進んでいる。これは、多くの電力変換装置で採用されている2レベルインバータと比べて、3レベルインバータは、出力側の高調波抑制と発生損失低減による高効率化が可能となるためである。そこで、本稿で述べた M295 の 62 mm パッケージを採用したモジュールでは、表2に示すように2 in 1 のほかに、3レベルインバータの構成が可能な双方向スイッチの内部回路を持ったモジュールも系列に加えることを計画している。

⑦ あとがき

第2世代 1,200 V All-SiC モジュールの系列拡大について述べた。

〈注〉 EconoPACK™ : Infineon Technologies AG の商標または登録商標

インバータ発生損失シミュレーション結果より大幅な発生損失の低減を達成し、高電力密度化や装置の小型・軽量化が実現できると考える。今後も、All-SiC モジュールがさまざまなパワーエレクトロニクス機器に搭載され、省エネルギー化が実現されるよう All-SiC 技術の発展に貢献する所存である。

参考文献

- (1) Iwasaki, Y. et al. "All-SiC Module with 1st Generation Trench Gate SiC MOSFETs and New Concept Package". PCIM Europe 2017. p.651-657.
- (2) 辻崇ほか. 1.2 kV SiCトレンチゲートMOSFET. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.234-237.
- (3) 小林勇介ほか. シミュレーションによるSiCトレンチ型 MOSFETの特性予測. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.1, p.11-15.
- (4) 中沢将剛ほか. SiCトレンチゲートMOSFET搭載All-SiC モジュール. 富士電機技報. 2017, vol.90, no.4, p.209-213.
- (5) 奥村啓樹ほか. 第2世代SiCトレンチゲートMOSFET. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.4, p.224-228.
- (6) 陳土爽清ほか. 3レベル電力変換器大容量IGBTモジュール. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.253-257.
- (7) 小松康佑ほか. アドバンスドNPC回路用IGBTモジュール. 富士時報. 2010, vol.83, no.6, p.362-365.



高崎 愛子

IGBT モジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部産業モジュール部。



奥村 啓樹

SiC パワー MOSFET、SBD の研究・開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部デバイス開発部。



丸山 力宏

SiC モジュールの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部パッケージ開発部。



＊本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。