

# Si-IGBT・SiC-SBD ハイブリッドモジュール

## Hybrid Si-IGBT and SiC-SBD Modules

中沢 将剛 Masayoshi Nakazawa

三柳 俊之 Toshiyuki Miyanagi

岩本 進 Susumu Iwamoto

省エネルギーに貢献する高効率インバータに適用するため、Si-IGBT (Silicon-Insulated Gate Bipolar Transistor) と SiC-SBD (Silicon Carbide-Schottky Barrier Diode) を組み合わせた、Si-IGBT・SiC-SBD ハイブリッドモジュールを開発した。SiC-SBD には独立行政法人産業技術総合研究所と共同開発したチップを、Si-IGBT は富士電機製の最新チップである第6世代「Vシリーズ」IGBT チップを用いている。製品系列は600V系列50A、75A、100A 定格品、1,200V系列で35A、50A 定格品である。1,200V 50A 定格品において従来品に対し約23%の発生損失低減を実現した。

Fuji Electric has developed hybrid modules that combine Si-IGBT (silicon-insulated gate bipolar transistor) and SiC-SBD (silicon carbide-Schottky barrier diode) for high-efficiency inverter applications that contribute to energy savings. The SiC-SBD chip was developed jointly with the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, a public research institute, and the Si-IGBT chips are the latest 6th-generation “V-Series” IGBTs from Fuji Electric. The product lineup are 600 V class rated at 50/75/100 A, and 1,200 V class rated at 35/50 A. Loss in the 1,200 V 50 A class has been reduced by 23% compared to the previous model.

### 1 まえがき

地球温暖化を防止するために今まで以上の温室効果ガス(CO<sub>2</sub>など)の削減が迫られている。パワーエレクトロニクス技術を用いて温室効果ガスを削減する最大の効果は、電力の省エネルギー化である。その中で重要なアイテムの一つにインバータの高効率化がある。そのためにはインバータを構成するパワーデバイス、回路、制御などの技術革新が必要となる。パワーデバイスはインバータの主要な素子であるため、高効率化を実現する低損失なパワーデバイスの要求が強まっている。このパワーデバイスは、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールであり、シリコン (Si) の IGBT および FWD (Free Wheel Diode) チップを用いるのが一般的である。しかし、Si 半導体デバイスの性能は、その材料特性に基づく理論的境界に近づきつつあり、今後飛躍的な低損失化は期待できない。そこで、Si 半導体よりも優れた材料特性を持つワイドバンドギャップ (WBG) 半導体が期待されている。

富士電機では、WBG 半導体の一つである炭化けい素 (SiC) 半導体デバイスの開発を進めている。SiC デバイスは Si デバイスに対し、高耐圧かつ低オン抵抗化が可能である。理論的には、同耐圧での SiC デバイスのオン抵抗は、Si デバイスに対し低減できる。このため SiC デバイスでは、高耐圧 Si デバイスの低オン抵抗化に不可欠なバイポーラデバイス化が必ずしも必要ない。一般にバイポーラデバイスは少数キャリアの注入を伴うため、ユニポーラデバイスよりもスイッチング損失は大きい。このため低スイッチング損失化のためにはユニポーラデバイス化が望ましい。これにより SiC ユニポーラデバイスを適用することで低オン抵抗化と低スイッチング損失化が同時に達成できる。

### 2 製品の概要

図1に、PIM (Power Integrated Module) の内部回路図を示す。FWD にユニポーラデバイスである SiC-SBD (Schottky Barrier Diode) を適用し、従来よりも損失を抑えた Si-IGBT・SiC-SBD ハイブリッドモジュールを開発した。SiC-SBD には、独立行政法人産業技術総合研究所と共同開発したチップ<sup>(1)</sup>を適用し、Si-IGBT には、富士電機製の最新チップである第6世代「Vシリーズ」IGBT チップを適用した。

図2に Si-IGBT・SiC-SBD ハイブリッドモジュールの外観を、表1に系列を示す。高効率インバータ用途として600V系列で50A、75A、100A 定格品、1,200V系列で35A、50A 定格品を開発した。以降では、1,200V系列50A品を代表例として製品の性能と特徴について紹介する。

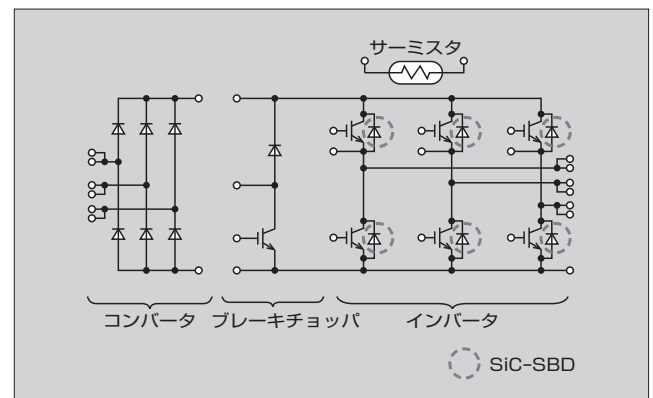


図1 PIM 内部回路図

特集

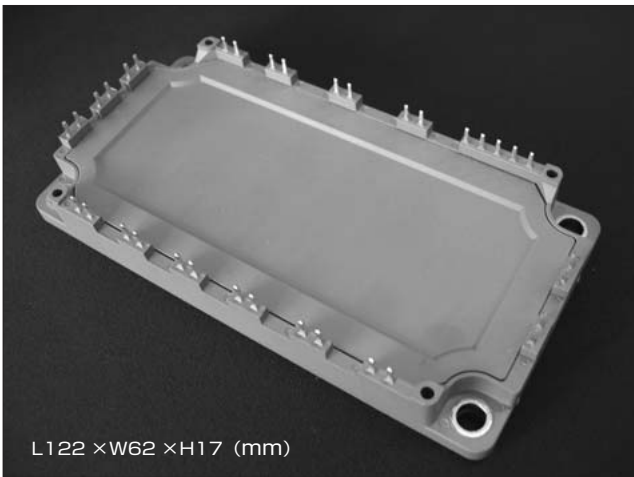


図2 Si-IGBT・SiC-SBD ハイブリッドモジュールの外観

表1 Si-IGBT・SiC-SBD ハイブリッドモジュールの系列

定格電圧 (V)	定格電流 (A)	ハイブリッドモジュール型式
600	50	7MBR50VB060S-50
	75	7MBR75VB060S-50
	100	7MBR100VB060S-50
1,200	25	7MBR25VB120S-50*
	35	7MBR35VB120S-50
	50	7MBR50VB120S-50

\* : To Be Determined

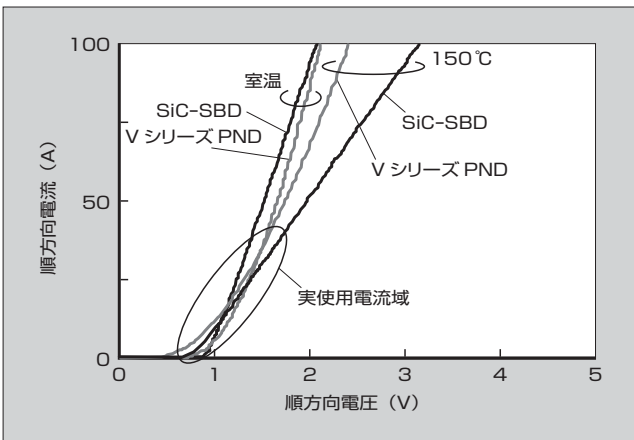


図3 順方向特性

3 静特性

3.1 順方向特性

図3にSiC-SBDとVシリーズPN接合ダイオード(VシリーズPND)の順方向特性を、図4に定格50Aにおける順方向電圧 $V_f$ の温度特性を示す。実使用電流域においてSiC-SBDの $V_f$ はVシリーズPNDと同等である。図4より、VシリーズPNDは100℃以上で $V_f$ が低減し、負の温度特性を示す。温度特性が負の場合は、多並列接続時に電流アンバランスを起しやす。一方、SiC-SBDは強い正の温度特性を持つため多並列接続においても電流アン

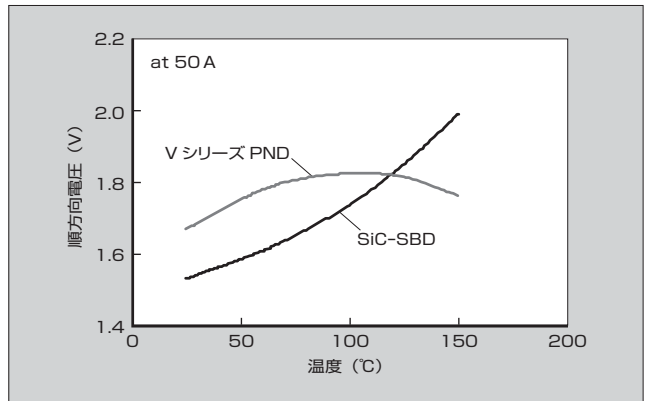


図4 順方向電圧の温度特性

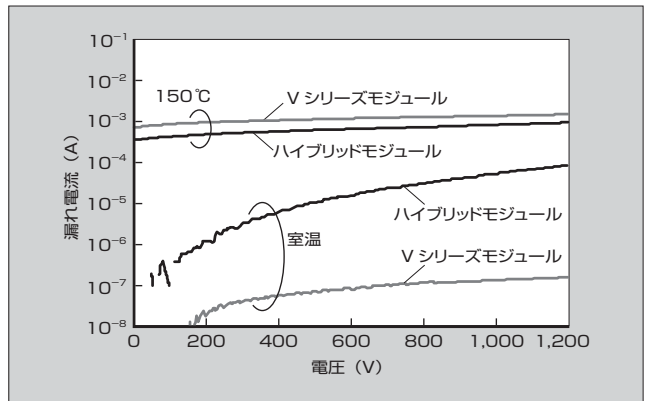


図5 漏れ電流特性

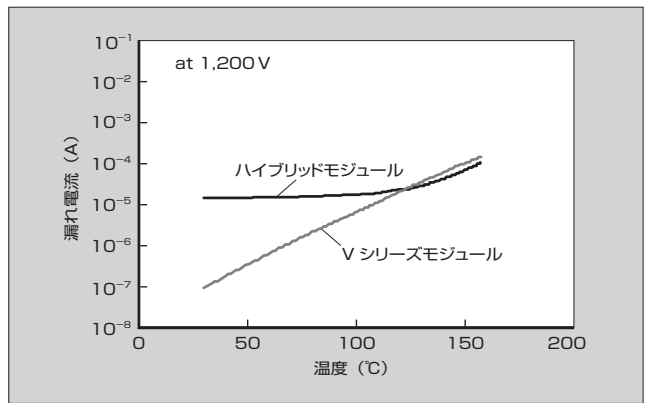


図6 漏れ電流の温度特性

バランスは発生しにくい。

3.2 漏れ電流特性

図5に、ハイブリッドモジュールとVシリーズモジュールの漏れ電流特性比較を示す。室温において、ハイブリッドモジュールの漏れ電流はVシリーズモジュールに対し1,000倍ほど大きい、150℃ではわずかながらVシリーズモジュールを下回る。図6に示すように、ハイブリッドモジュールの漏れ電流は約100℃以下ではおおむね一定であり、それ以上でVシリーズモジュールと同様に増加する。SiC-SBDは、バンドギャップが広いために熱励起されるキャリアが非常に少ないため温度上昇による影響を受

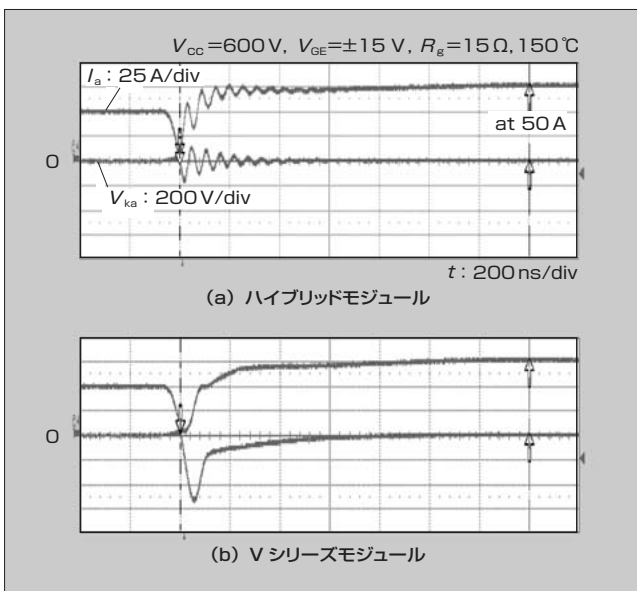


図7 逆回復波形

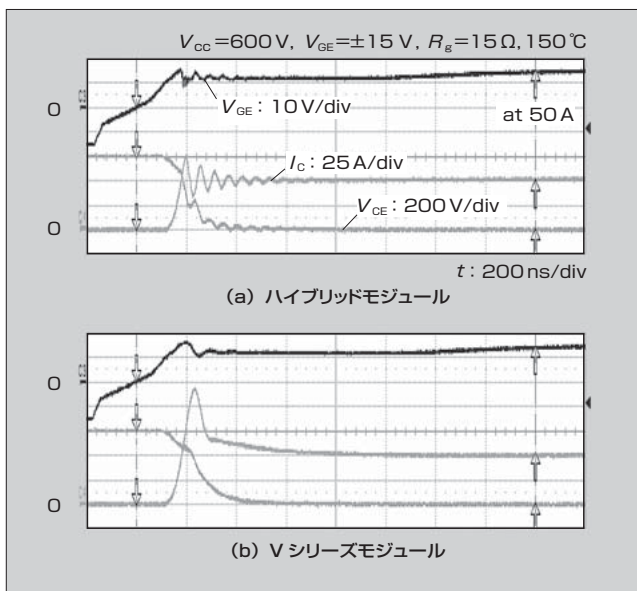


図9 ターンオン波形

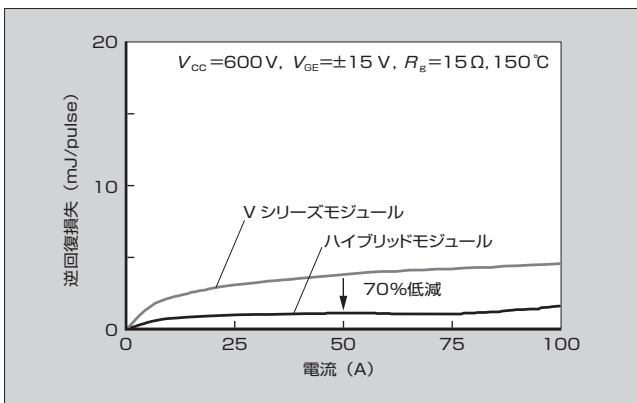


図8 逆回復損失の電流特性

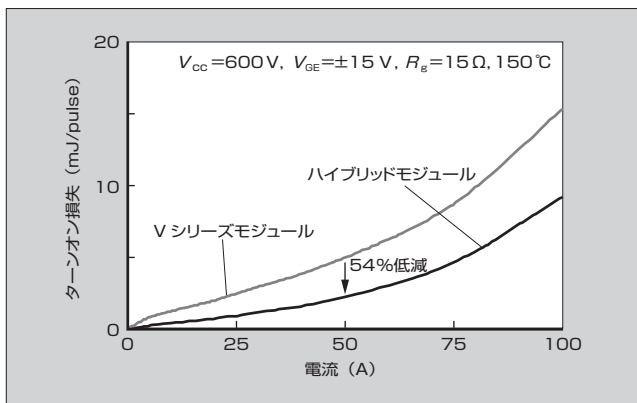


図10 ターンオン損失の電流特性

けにくい。100℃以上で漏れ電流が増加するのは、IGBTの漏れ電流が支配的になるためである。このように室温時の漏れ電流が大きくても高温動作時の漏れ電流が等しいことから、Vシリーズ同様に175℃までの接合温度での動作が可能である<sup>(2)</sup>。

4 スイッチング特性

4.1 逆回復特性

図7に、ハイブリッドモジュールとVシリーズモジュールの逆回復波形比較を示す。ハイブリッドモジュールは逆回復ピーク電流がほとんどない。これはSiC-SBDはユニポーラデバイスであるため、少数キャリアの注入が起きないことに起因する。図8に示すように、逆回復損失はVシリーズモジュールに対し定格50Aにて70%と大幅に低減できる。

4.2 ターンオン特性

FWDの逆回復ピーク電流は対向アームのIGBTのターンオンピーク電流に反映され、逆回復損失の低減はターン

オン損失の低減が達成できる。

図9に、ハイブリッドモジュールとVシリーズモジュールのターンオン波形の比較を示す。逆回復波形と同様にピーク電流がほとんどない。図10に示すように、ターンオン損失はVシリーズモジュールに対し定格50Aにて54%と大幅に低減できる。

4.3 ターンオフ特性

図11に、ハイブリッドモジュールとVシリーズモジュールのターンオフ波形比較を示す。ハイブリッドモジュールのターンオフサージ電圧はVシリーズモジュールに対し定格50Aにて47V低減している。一般にこのサージピーク電圧は式(1)で定義でき、IGBTの素子特性と主回路インダクタンスが同等であれば、ダイオードの過渡オン電圧の差がサージ電圧の差となる。ダイオードの過渡オン波形比較を図12に示す。SiC-SBDはVシリーズPNDと比較しドリフト層が非常に低抵抗であるため、過渡オン電圧が90Vから45V低減する。したがって、図13に示すようにターンオフ時のサージ電圧は低く抑えられ、ターンオフ損失も低減できる。

$$V_{Sp} = V_{CC} + L_s \cdot \frac{dI_C}{dt} + V_{FR} \dots \dots \dots (1)$$

- $V_{Sp}$  : サージピーク電圧
- $V_{CC}$  : 印加電圧
- $L_s$  : 主回路インダクタンス
- $I_C$  : コレクタ電流
- $V_{FR}$  : 過渡オン電圧

5 インバータ発生損失

図14に、今回開発したハイブリッドモジュールとVシリーズモジュールのインバータ発生損失計算結果を示す。キャリア周波数が8kHzのとき、ハイブリッドモジュールのトータル損失は、Vシリーズモジュールに対し23%と大幅に低減できる。また、キャリア周波数を高くすること

で、Vシリーズモジュールよりもハイブリッドモジュールの損失低減率は大きくなるため、高周波動作への適用が期

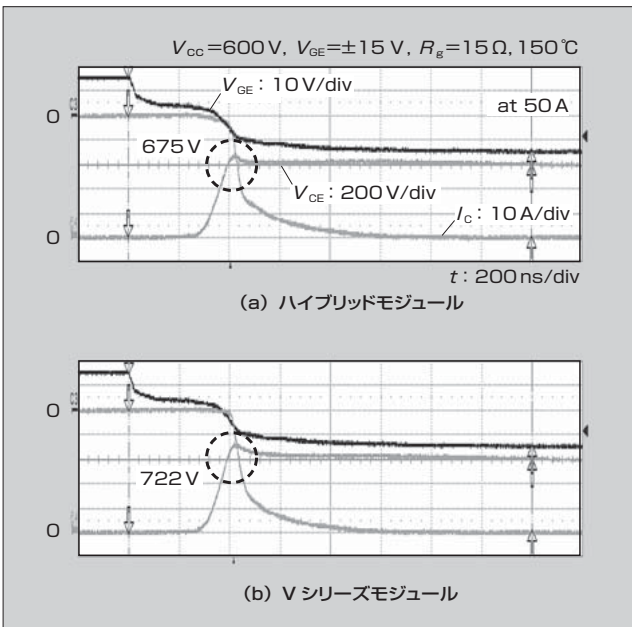


図11 ターンオフ波形

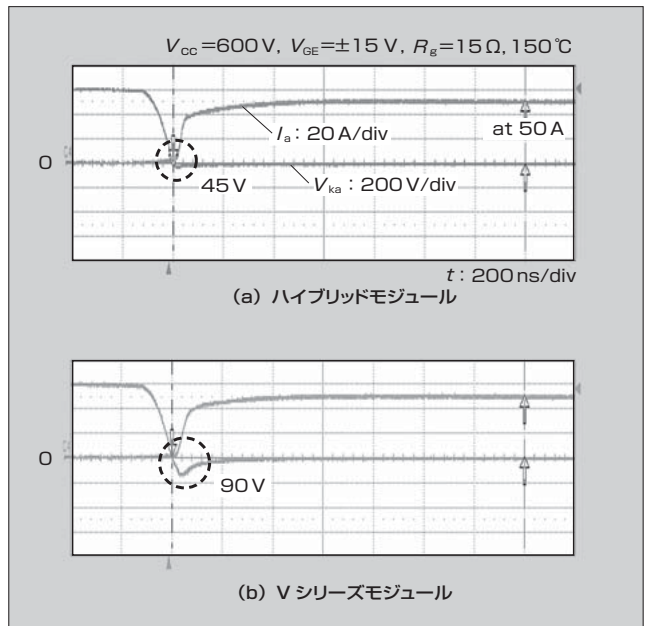


図12 ダイオードの過渡オン波形

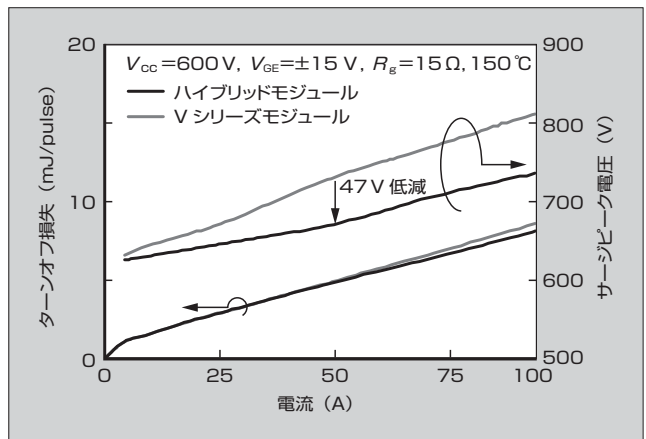


図13 ターンオフ損失とサージピーク電圧電流特性

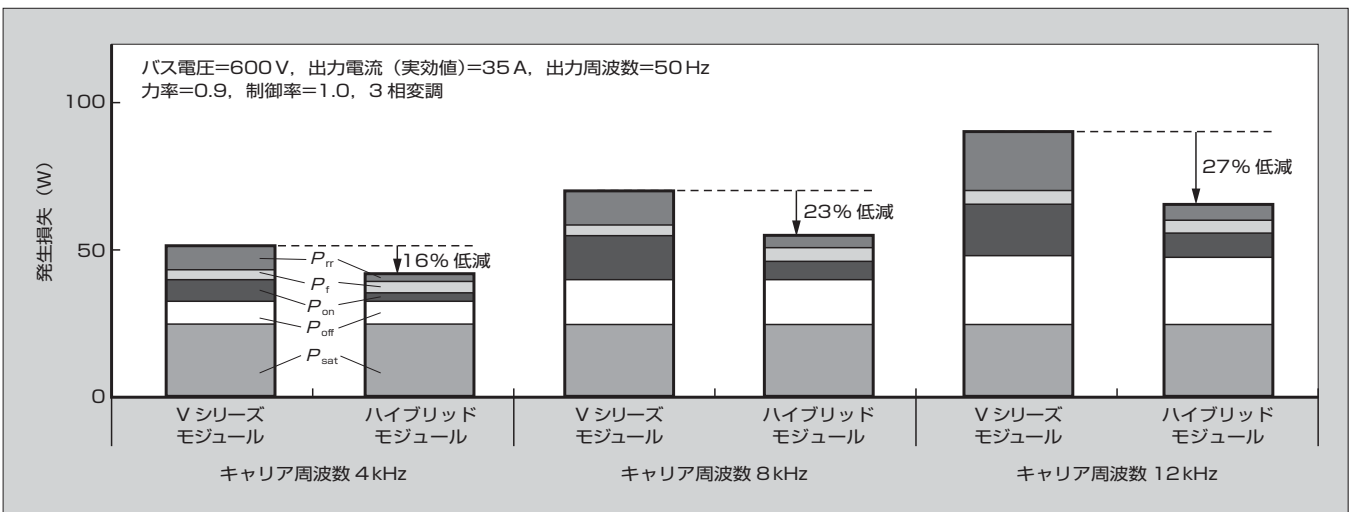


図14 インバータ発生損失

待できる。

## ⑥ あとがき

本稿では、独立行政法人産業技術総合研究所と共同開発した SiC-SBD と、富士電機の最新チップである第 6 世代「V シリーズ」IGBT チップを適用した Si-IGBT・SiC-SBD ハイブリッドモジュールについて紹介した。本製品はデバイス自身の大幅な損失低減により、インバータの高効率化に大きく貢献できるものとする。今後、富士電機では SiC チップ適用製品の系列化を進め、地球温暖化防止に貢献していく所存である。

SiC-SBD チップの開発にご協力いただいた独立行政法人産業技術総合研究所先進パワーエレクトロニクス研究センターの関係各位に謝意を表す。本開発の一部は、独立行政法人産業技術総合研究所産業変革研究イニシアティブ（平成 20 年度、21 年度および 22 年度）“SiC デバイスの量産試作による実用化検証”により行われた。

## 参考文献

- (1) 木下明将ほか. “高温での低  $V_f$  を特徴とした 600 V/1,200 V クラス SiC-SBD”. つくば市, 2010-10-21. 応用物理学会 SiC

及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第 19 回講演会.

- (2) 高橋考太ほか. IGBT モジュール「V シリーズ」の系列化. 富士時報. 2009, vol.82, no.6, p.380-382.



**中沢 将剛**

IGBT 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松本工場技術統括部モジュール技術部。



**三柳 俊之**

IGBT 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松本工場技術統括部モジュール技術部。



**岩本 進**

IGBT 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松本工場技術統括部モジュール技術部。博士（工学）。





\*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。