

3,300V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール技術

3,300-V Withstand Voltage SiC Hybrid Module Technology

金子 悟史 KANEKO, Satoshi

金井 直之 KANAI, Naoyuki

辻 崇 TSUJI, Takashi

パワーエレクトロニクス機器には、省エネルギー化に加えて小型・軽量化、高出力化などの性能向上が強く求められている。富士電機は、これに応えるため、3,300 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュールの開発を推進している。共同研究体 つくばパワーエレクトロニクスコンステレーションと共同で開発した SiC-SBD を適用することで、現行の Si モジュールと比較し、発生損失を 24% 低減した。また、Sn-Sb 系はんだを適用することで、高信頼性を確保して連続動作温度を 25℃ 向上させた。発生損失の低減効果と合わせることで高パワー密度化を実現し、フットプリントサイズを約 30% 低減した。

There has been increasing demand for electronics to achieve not only energy savings, but also be more compact, lightweight and improved performance such as high output. Fuji Electric is seeking to meet these demands by pursuing the development of a SiC hybrid module with a 3,300 V withstand voltage. By adopting the SiC-SBDs that we developed in partnership with the joint research body Tsukuba Power Electronics Constellation (TPEC), we have been able to reduce generated loss by 24% compared with current Si modules. In addition, we have also utilized Sn-Sb solder to ensure high reliability and have been able to improve continuous operation temperature by 25°C. Moreover, we made use of the reducing effect of generated loss to achieve improvements in power density while also reducing the footprint size by approximately 30%.

① まえがき

近年、世界で消費される資源・エネルギーは増大し、環境汚染や資源の枯渇が大きな問題となっており、省エネルギー（省エネ）化が強く求められている。これらの背景から、電力の輸送、変換、制御、供給において、省電力化を特徴とするパワーエレクトロニクス（パワエレ）機器に注目が集まっている。

パワエレ機器に対する要求は、省エネ化による環境負荷を軽減させる社会要請によるものから、高信頼性、制御性、小型・軽量化、高出力化などの性能向上に関わるものまで多岐にわたる。これらの要求に応えるためには、パワエレ機器を構成するパワーデバイス、回路、制御などの技術向上が必要不可欠となる。特に、基幹部品であるパワーデバイスでは、小型で低損失なパワーモジュールが求められている。

現在の代表的なパワーデバイスは、IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）を用いたパワーモジュールであり、一般的に Si（シリコン）の IGBT および FWD（Free Wheeling Diode）のチップが搭載されている。しかし、Si チップの性能は物性に基づく理論値限界に近づいており、これまでのように飛躍的な特性改善を期待することはできない。そこで、Si よりも優れた特性を持つワイドバンドギャップ半導体が注目されている。この半導体の一つである SiC（炭化けい素）は従来の Si と比較して高耐圧かつ低損失であることに加え、高温動作や高周波動作が可能となり、パワーモジュールのさらなる高パワー密度化による小型化が可能となる。

本稿では、この SiC チップを搭載した 3,300 V 耐圧 1,200 A の SiC ハイブリッドモジュール技術について述べる。

② SiC ハイブリッドモジュールの構成

富士電機では、SiC-SBD（Schottky Barrier Diode）と Si-IGBT を搭載した 600 V、1,200 V、1,700 V 耐圧の SiC ハイブリッドモジュールを製品化している。今回、さらなる高耐圧化の要求に応えるため、3,300 V 耐圧の SiC ハイブリッドモジュールを開発した。

図 1 に、3,300 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュールの外観・内部回路および Si-IGBT モジュールとのフットプリント

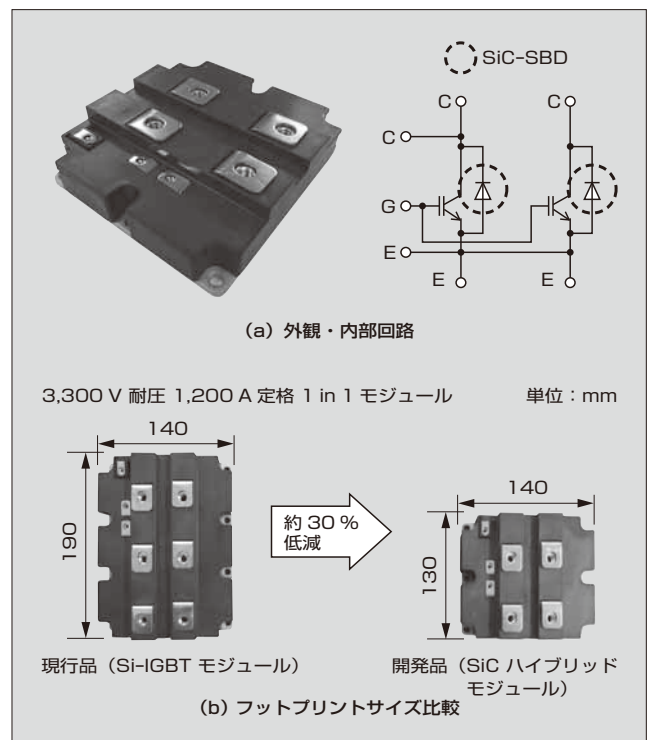


図 1 3,300 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュールの概要

ントサイズの比較を示す。FWD には、共同研究体 つくばパワーエレクトロニクスコンステレーションと共同で開発した SiC-SBD を適用することで、現行の Si-IGBT よりも発生損失を大幅に低減させた。チップ下のはんだには、第7世代「X シリーズ」IGBT モジュールのパッケージ技術の一つである Sn-Sb 系はんだを適用することで、高信頼性を確保し、連続動作温度を現行 Si-IGBT の 125℃から 150℃に向上させた⁽¹⁾⁽²⁾。これら発生損失の低減および動作温度の向上により、高パワー密度化を実現し、図 1 (b)に示すとおり、現行品と比較してモジュールのフットプリントサイズを約 30% 低減した。

③ ハイブリッド化に伴うパッケージ技術課題

3.1 多並列接続構造の課題と検討

ハイブリッド化において 1,200 A 定格を実現するためには、多数のチップを並列に接続する必要がある。このような多並列接続を持つパッケージ構造の場合、チップ特性のばらつきによる電流の不均衡が生じ、長期信頼性を低下させる懸念がある。そこで、シミュレーションによる熱解析を行い、各チップの温度や熱応力の状態を検証した。この検証結果から、チップ特性のばらつきがチップ温度の変動に及ぼす影響を模擬できることを確認した。この解析方法を用い、本開発品のパッケージ構造に反映させ、信頼性向上に役立てた。

3.2 パワーサイクル耐量の向上

ハイブリッド化によって小型化を実現するためには、チップ温度の上昇に対応したパッケージ構造が必須となる。チップ温度の上昇に伴って構成部材にかかる熱応力が増大すると同時に、運転・停止による温度変化が大きくなるため、より高い熱疲労に対しての性能を保証する必要がある。そこで、この保証の指針となる ΔT_j パワーサイクル耐量を向上させるため、第7世代 X シリーズ IGBT モジュールのパッケージ技術における Sn-Sb 系はんだをチップ下に適用した。Sn-Sb 系はんだは高強度であり、熱疲労から生じるクラックの進展を抑制する効果がある⁽¹⁾⁽²⁾。

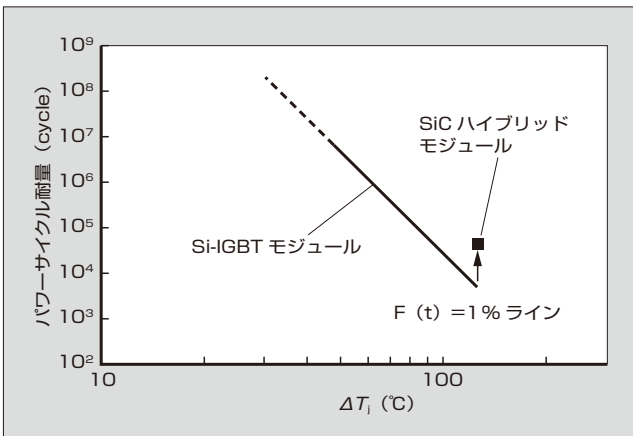


図2 ΔT_j パワーサイクル試験結果

図 2 に SiC ハイブリッドモジュールと Si-IGBT モジュールの ΔT_j パワーサイクル試験の結果を示す。SiC ハイブリッドモジュールは、Si-IGBT モジュールと比較して $\Delta T_j=125^\circ\text{C}$ 時に約 5 倍以上のパワーサイクル耐量がある。

④ 特性⁽³⁾⁽⁴⁾

4.1 順方向特性

図 3 に SiC ハイブリッドモジュールと Si-IGBT モジュールの順方向特性を、図 4 に 1,200 A 定格における順方向電圧 V_F の温度依存性を示す。図 4 に示すとおり、SiC ハイブリッドモジュールは、Si-IGBT モジュールと比較して、25℃で、 V_F が 29% 程度小さいが、150℃では逆転して 30% 程度大きくなる。しかし、Si-IGBT モジュールはチップ接合温度 T_j の上昇に伴い、 V_F が低下する負の温度特性であるのに対し、SiC ハイブリッドモジュールは正の温度特性を持っている。負の温度特性を持っているチップを多並列で接続すると、 T_j の上昇に伴って内部抵抗が小さくなるため電流がより流れやすくなり、一部のチップに電流が集中して電流の不均衡を起こしやすい。

これに対し、正の温度特性は T_j の上昇に伴って内部抵抗が大きくなるため、並列に接続されたチップ間で均一に電流を分担することになる。したがって、SiC ハイブリッド

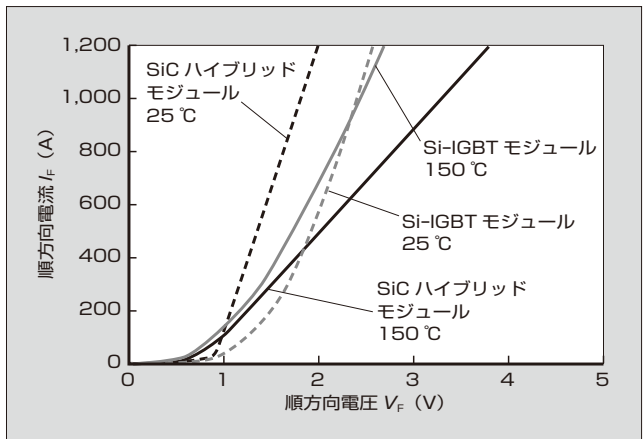


図3 順方向特性

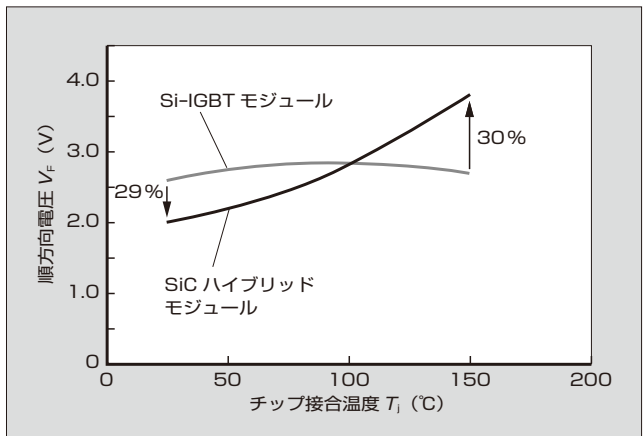


図4 順方向電圧の温度依存性

ドモジュールは、多並列接続に有利である。

4.2 漏れ電流特性

図5にSiCハイブリッドモジュールとSi-IGBTモジュールの漏れ電流特性を、図6に漏れ電流の温度依存性を示す。125℃でコレクタ電圧3,300Vのとき、SiCハイブリッドモジュールの漏れ電流 I_{CES} は、Si-IGBTモジュールと比較して11%程度小さい。150℃ではさらに差が広がり44%程度小さくなる。図6に示すとおり、Si-IGBTモジュールの I_{CES} は、温度によって大きく変動する。これに対し、SiCハイブリッドモジュールはおおむね一定であり、温度依存性が小さいことが分かる。これは、Siよりもバンドギャップが3倍程度大きい T_j の上昇に伴うキャリアの励起が少ないことに起因する。したがって、SiCハイブリッドモジュールはSi-IGBTモジュールと比べて、高温動作が可能である。

4.3 スイッチング特性

(1) 逆回復特性

図7に、SiCハイブリッドモジュールとSi-IGBTモジュールの逆回復波形の比較を示す。Si-IGBTモジュールと比較して、SiCハイブリッドモジュールは逆回復時のピーク電流がほとんど発生しない。これはSiC-SBDが

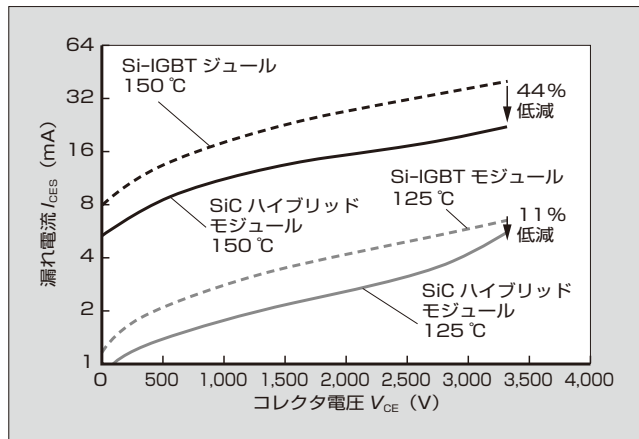


図5 漏れ電流の特性

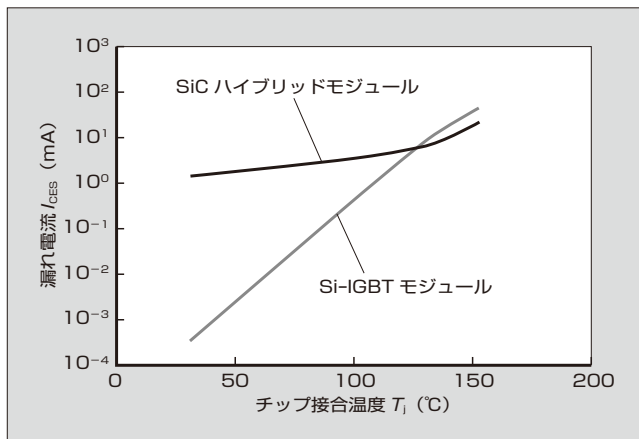


図6 漏れ電流の温度依存性

ニポーラデバイスであるため、少数キャリアによる蓄積効果がないことに起因する。図8に、逆回復損失 E_{rr} の電流依存性を示す。 E_{rr} は1,200A定格の場合、Si-IGBTモジュールと比較して発生損失を95%低減できる。さらに、300Aや1,800Aにおいても同様に、発生損失を同程度まで低減できる。したがって、低電流領域から大電流領域まで幅広く損失低減が可能である。

(2) ターンオン特性

図9に、SiCハイブリッドモジュールとSi-IGBTモジュールのターンオン波形の比較を示す。SiC-SBDの逆回復時のピーク電流は、対向アームのIGBTターンオン電流に反映されるため、ターンオンピーク電流も大幅に低減できる。図10に示すとおり、1,200A定格におけるターンオン損失 E_{on} は、Si-IGBTモジュールと比較して発生損失を28%低減できる。

(3) ターンオフ特性

図11に、SiCハイブリッドモジュールとSi-IGBTモジュールのターンオフ損失 E_{off} の電流依存性を示す。ター

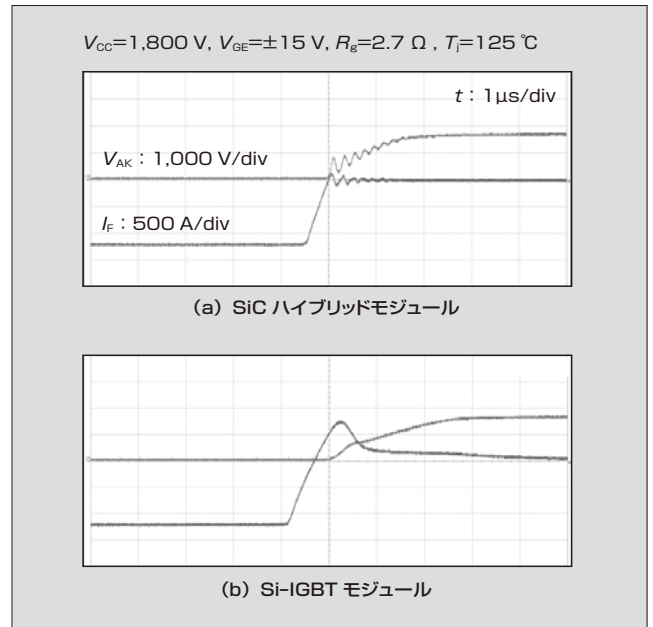


図7 逆回復波形

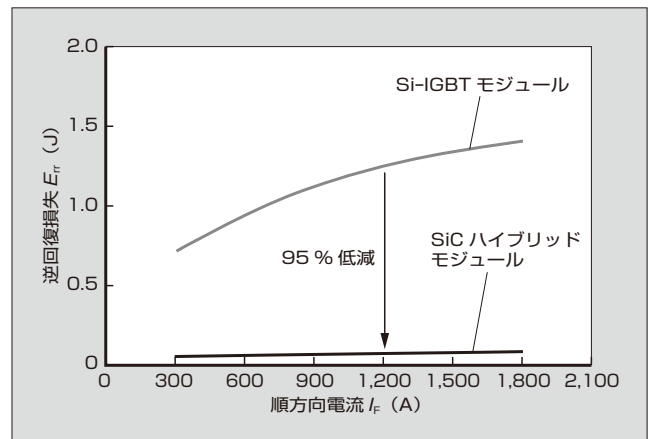


図8 逆回復損失の電流依存性

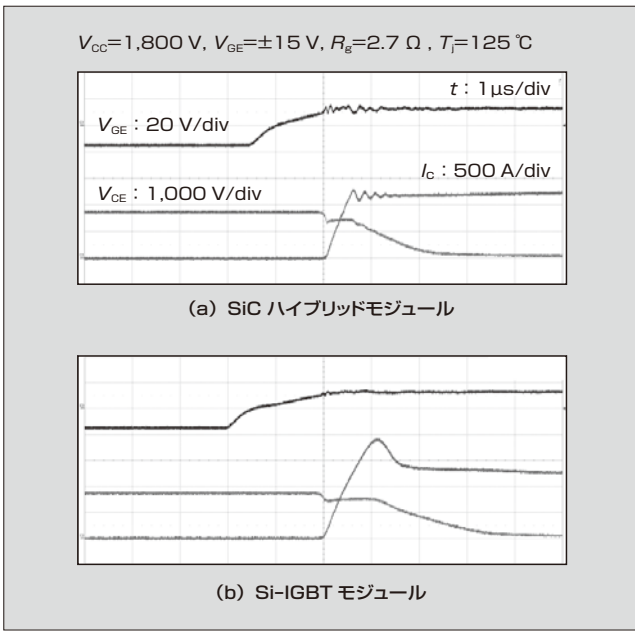


図9 ターンオン波形

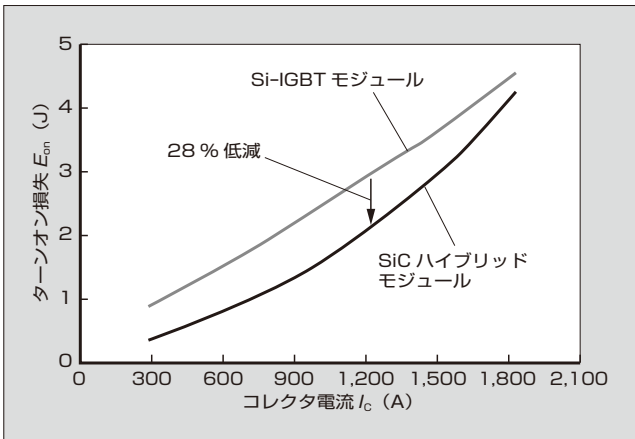


図10 ターンオン損失の電流依存性

ターンオフ時に発生するサージピーク電圧は、一般的に式(1)で定義できる。IGBTの電流変化率 dI_c/dt と評価回路の主回路インダクタンス L_s が同等であれば、ダイオードの過渡オン電圧の値がサージピーク電圧の差として現れる。SiC-SBDはSi-FWDと比較して、ドリフト層が低抵抗であるため、過渡オン電圧が低い。したがって、SiCハイブリッドモジュールはターンオフのサージピーク電圧が低く抑えられるため、 E_{off} も低減できる。

$$V_{sp} = V_{cc} + L_s \frac{dI_c}{dt} + V_{fr} \dots\dots\dots(1)$$

- V_{sp} : サージピーク電圧 (V)
- V_{cc} : 印加電圧 (V)
- L_s : 主回路インダクタンス (H)
- I_c : コレクタ電流 (A)
- V_{fr} : 過渡オン電圧 (V)

4.4 インバータ発生損失

図12にSiCハイブリッドモジュールとSi-IGBTモ

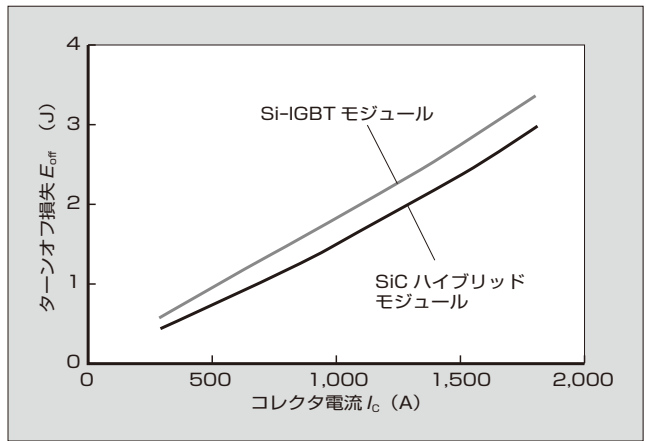


図11 ターンオフ損失の電流依存性

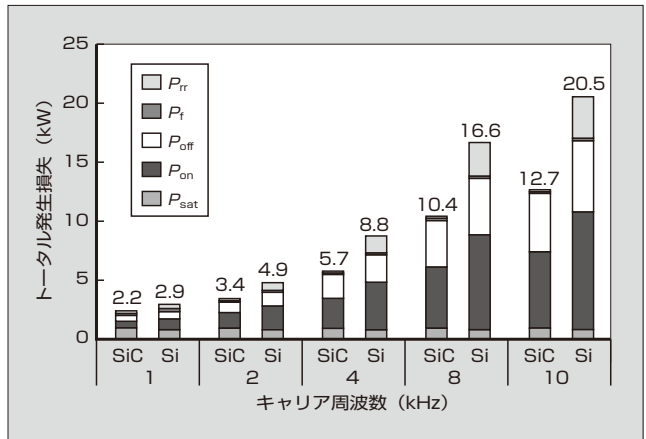


図12 インバータ発生損失の計算結果

ジュールのインバータ発生損失の計算結果を示す。キャリア周波数1kHzにおいて、SiCハイブリッドモジュールのトータル発生損失は、Si-IGBTモジュールと比較して24%低減できる。さらに、キャリア周波数を高くした場合、トータル発生損失の低減率は大きくなり、キャリア周波数10kHzでは38%低減できる。したがって、SiCハイブリッドモジュールは、高周波動作が必要な製品への適用が期待できる。

現在、本開発品を搭載した駆動用主変換装置（インバータ、コンバータ）を東海旅客鉄道株式会社向けに開発し、新幹線に搭載し走行試験を実施中である。

5 あとがき

本稿では、3,300V耐圧SiCハイブリッドモジュール技術について述べた。共同研究体 つくばパワーエレクトロニクスコンステレーションと共同で開発したSiC-SBDと、富士電機製Si-IGBTを適用した3,300V耐圧SiCハイブリッドモジュールに用いた技術である。本開発品は、SiC-SBDとSn-Sb系はんだを適用することで、高パワー密度化を実現し、パワーエレクトロニクス機器の高効率化、小型化に大きく貢献できる。今後、さらなる性能向上を実現するため、All-SiC化の開発検討を進め、省エネルギー

化を推進していく所存である。

SiC-SBD の開発にご協力いただいた共同研究体 つくば
パワーエレクトロニクスコンステレーションの関係各位に
謝意を表する。

参考文献

- (1) 百瀬文彦ほか. 175℃連続動作を保証するIGBTモジュール
のパッケージ技術. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.249-252.
- (2) 郷原広道ほか. ハイブリッド車用第2世代アルミニウム直接
水冷パッケージ技術. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.4, p.258-
262.
- (3) 中沢将剛ほか. Si-IGBT・SiC-SBDハイブリッドモジュ-
ール. 富士時報. 2011, vol.84, no.5, p.331-335.
- (4) 小林邦雄ほか. 1,700V耐圧SiCハイブリッドモジュール. 富
士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.240-243.



金子 悟史

SiC モジュールの開発・設計に従事。現在、富士
電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次
世代モジュール開発センターパッケージ開発部。



金井 直之

SiC モジュールの開発・設計に従事。現在、富士
電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次
世代モジュール開発センターパッケージ開発部。
応用物理学会会員。



辻 崇

SiC デバイスの開発・設計に従事。現在、富士電
機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世
代デバイス開発センター SiC 開発部主査。応用物
理学会会員。





*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。