

# 1,700V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール

## 1,700 V Withstand Voltage SiC Hybrid Module

小林 邦雄 KOBAYASHI Kunio

北村 祥司 KITAMURA Shoji

安達 和哉 ADACHI Kazuya

Si デバイスに替わり、耐熱性と高破壊電界耐量を持った SiC デバイスが、装置の高効率化や小型化を実現するものとして有望視されている。富士電機では、高効率インバータ（690 V 系）向けに 1,700 V 耐圧の SiC ハイブリッドモジュールの開発を推進している。FWD には、独立行政法人産業技術総合研究所と共同で開発した SiC-SBD チップを適用し、IGBT には、富士電機製「V シリーズ」IGBT チップを適用した。漏れ電流特性やスイッチング特性を改善することにより、300 A 品において、従来の Si モジュールに比べて発生損失を約 26% 低減できることを確認した。

In place of Si devices, silicon carbide devices (SiC devices) featuring heat resistance and high breakdown field tolerance are raising expectations for efficiency improvement and miniaturization of equipment. Fuji Electric is moving ahead with the development of a 1,700 V withstand voltage SiC hybrid module for high-efficiency inverters (690 V series). A SiC-SBD chip jointly developed with the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology has been applied to a freewheeling diode (FWD), and a Fuji Electric's "V-Series" IGBT chip has been applied to an insulated gate bipolar transistor (IGBT). By improving leakage current and switching characteristics, the module has been verified to be capable of reducing generated loss by approximately 26% in a 300A product compared to the conventional Si modules.

### 1 まえがき

地球温暖化を防止するために、これまで以上に CO<sub>2</sub> などの温室効果ガスの削減が迫られている。温室効果ガスを削減する手段の一つとして、パワーエレクトロニクス機器の省エネルギー化がある。その中で重要なアイテムがインバータの高効率化であり、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。特に、インバータの主要な素子であるパワーデバイスでは、低損失の要求が強い。代表的なパワーデバイスである IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールは、今までシリコン (Si) の IGBT チップと FWD (Free Wheeling Diode) チップを用いてきた。しかし、Si デバイスの性能は、物性に基づく理論的限界に近づきつつある。そこで、耐熱性と高破壊電界耐量を持った SiC デバイスが、装置の高効率化や小型化を実現するものとして有望視されている。

本稿では、SiC デバイスを用いた 1,700 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュールについて述べる。

### 2 製品の構成

富士電機では、これまで 200 V 系用の 600 V 耐圧 SiC-SBD (Schottky Barrier Diode)、ならびに 440 V 系の 1,200 V 耐圧 SiC-SBD の開発を完了し、これらの SiC-SBD と Si-IGBT とを組み合わせて搭載した SiC ハイブリッドモジュールを製品化している。高耐圧の FWD として従来使用していた Si-PIN ダイオードに比べ、SiC-SBD は低抵抗かつスイッチング特性に優れている。このため、SiC ハイブリッドモジュールは、従来の Si-IGBT モジュールに比べて発生損失を約 26% 低減できる。

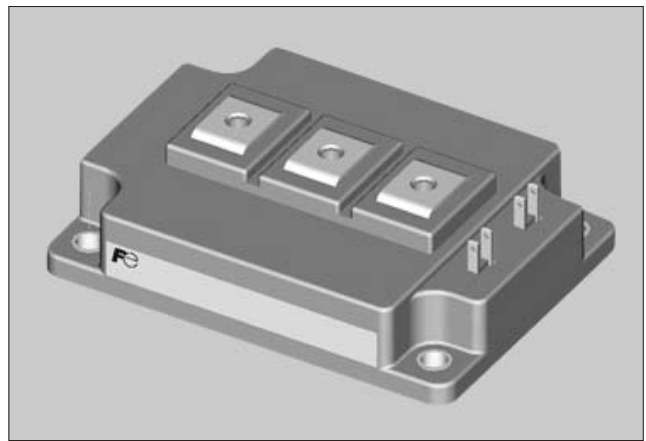


図1 M277パッケージ

現在、690 V 入力インバータ向けに 1,700 V 耐圧の SiC ハイブリッドモジュールの開発を推進している。SiC ハイブリッドモジュールは、従来の Si モジュールから容易に置き換えてできるように、Si モジュールと同じ M277 パッケージ (図 1) を採用した。FWD には、独立行政法人産業技術総合研究所と共同で開発して、富士電機で量産立ち上げを行った SiC-SBD チップを適用し、IGBT には、富士電機製で最新の第 6 世代「V シリーズ」IGBT チップを適用した。

### 3 特性

#### 3.1 FWD の順方向特性

図 2 に SiC ハイブリッドモジュールと Si モジュールの FWD の順方向特性を、図 3 に温度依存性を示す。ジャンクション温度が 150 °C で定格電流 300 A のときの SiC ハイブリッドモジュールの順方向電圧  $V_F$  は、Si モジュールの

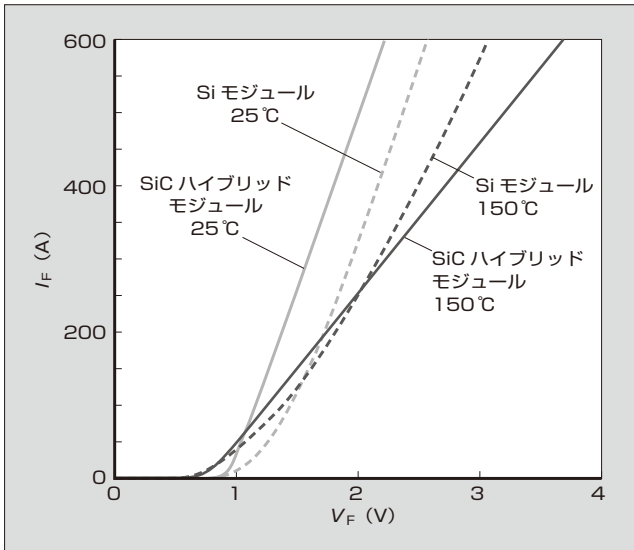


図2 FWDの順方向特性

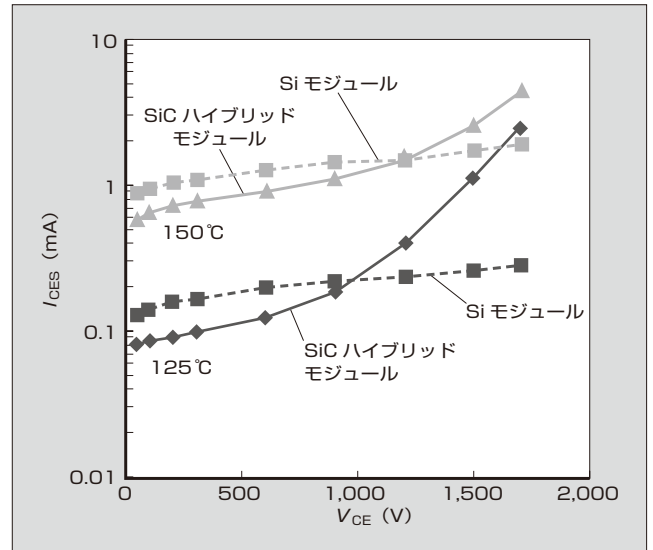


図4 漏れ電流温度依存性

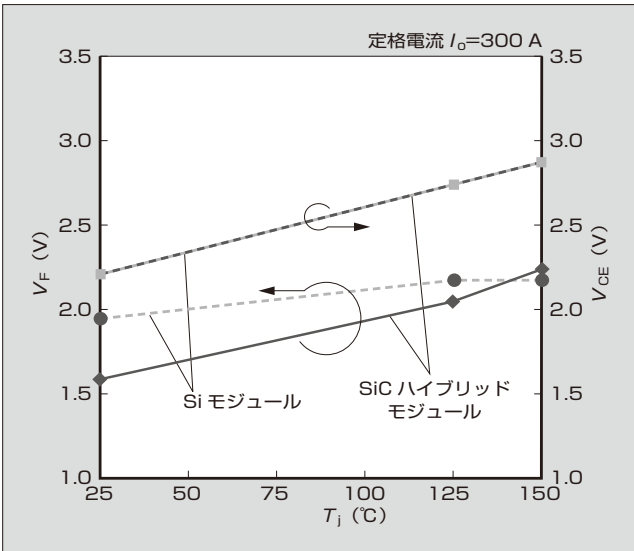


図3 FWDの温度依存性

$V_F$  と同等である。SiC ハイブリッドモジュールは、強い正の温度特性を持っているので、多並列接続使用した場合でも電流アンバランスは発生しにくい。

### 3.2 漏れ電流特性

図4にSiCハイブリッドモジュールとSiモジュールの漏れ電流温度依存性を示す。125°Cの定格電圧(1,700V)印加におけるSiCハイブリッドモジュールの漏れ電流  $I_{CES}$  は、Siモジュールの漏れ電流に対し10倍程度大きいのが、150°CではSiモジュールに対し2倍程度の値を示す。また定格電圧印加におけるSiCハイブリッドモジュールの漏れ電流値は、Siモジュールの漏れ電流と比べ125°Cと150°Cの差が小さい。このように、SiC-SBDの漏れ電流温度依存性は、Si-FWDに比べて小さい。これは、SiCのバンドギャップがSiの約3倍と広く、SiC-SBDはSi-FWDに比べて高電界で動作することにより、SiC-SBDの漏れ電流成分はトンネル電流が支配的になり、温度の影響を受け

にくいからである。したがって、SiCハイブリッドモジュールは、Vシリーズと同様に高温動作が可能である。

### 3.3 スイッチング特性

#### (1) 逆回復損失特性

図5に、SiCハイブリッドモジュールとSiモジュールの逆回復損失特性を示す。SiC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が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。300A品の逆回復損失はSiモジュールと比べて約83%低い。

#### (2) ターンオン損失特性

図6に、SiCハイブリッドモジュールとSiモジュールのターンオン損失特性を示す。SiC-SBDの逆回復ピーク電流は対向アーム側のIGBTターンオン電流に影響し、ターンオン損失の低減につながる。300A品のターンオン損失は、Siモジュールと比べて約40%低い。

#### (3) ターンオフ損失特性

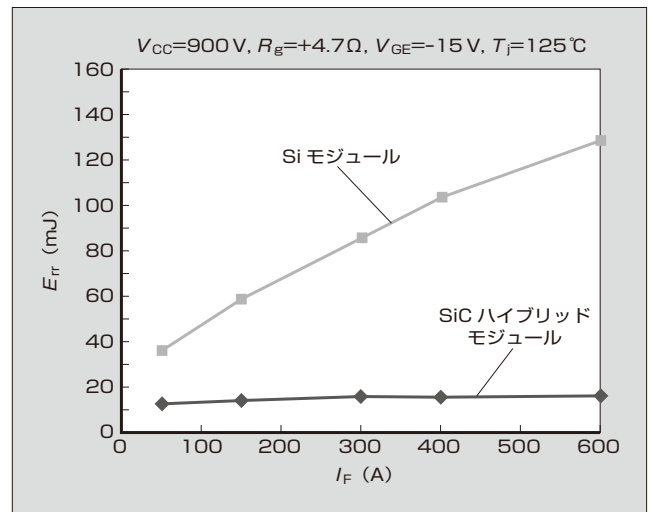


図5 逆回復損失特性

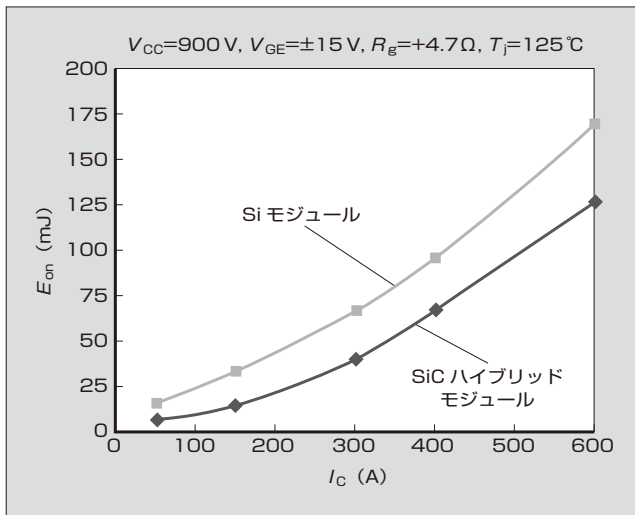


図6 ターンオン損失特性

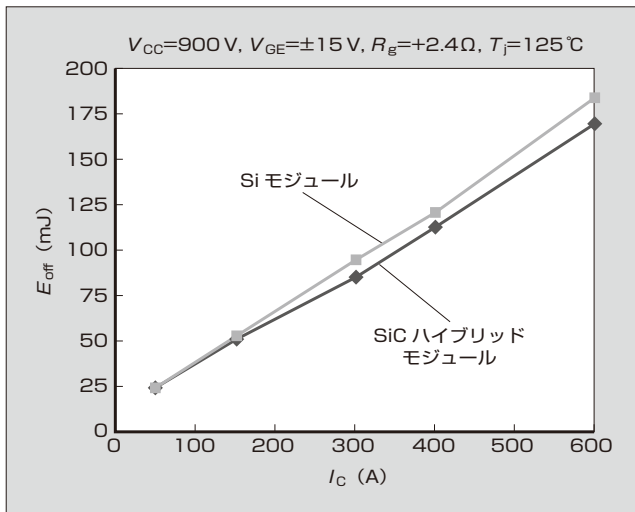


図7 ターンオフ損失特性

図7に、SiCハイブリッドモジュールとSiモジュールのターンオフ損失特性を示す。SiCハイブリッドモジュールのターンオフ時のサージピーク電圧は、式(1)で表すことができる。IGBTの素子特性と主回路の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。SiC-SBDはSi-FWDと比較してドリフト層が非常に低抵抗であるため、過渡オン電圧が低減される。したがって、ターンオフ時のサージ電圧が低く抑えられ、ターンオフ損失も低い。

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

- $V_{sp}$ : サージピーク電圧
- $V_{cc}$ : 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

### 3.4 インバータ発生損失

図8に、SiCハイブリッドモジュールとSiモジュール

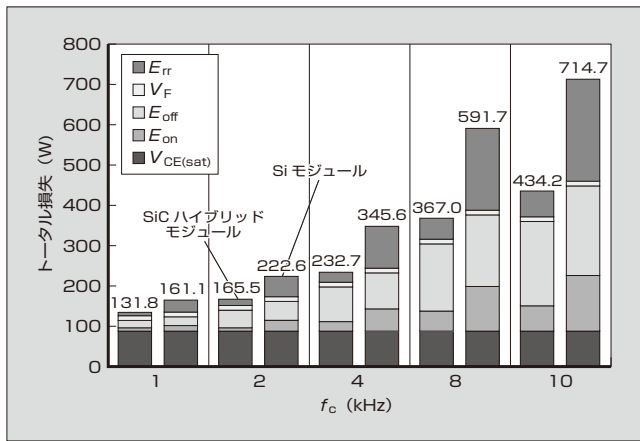


図8 インバータ発生損失

のインバータ発生損失を示す。キャリア周波数 $f_c$ が2kHzのとき、SiCハイブリッドモジュールの総損失は、Siモジュールに比べて約26%低い。また、キャリア周波数が高くなったとき、SiCハイブリッドモジュールの損失増加率はSiモジュールより抑制されるため、高周波動作に有利である。

### 4 あとがき

SiCハイブリッドモジュールは、独立行政法人産業技術総合研究所と共同で開発したSiC-SBDと、富士電機の最新Si-IGBTである第6世代「Vシリーズ」を適用したものである。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。今後、SiCチップ適用製品の拡大と系列化を進め、省エネルギー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。

### 参考文献

- (1) 木下明将ほか。“高温での $V_T$ を特徴とした600V/1,200V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。
- (2) 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。



小林 邦雄

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事業統括部産業モジュール技術部。



**北村 祥司**

半導体デバイスの開発・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デバイス開発部。



**安達 和哉**

感光体の開発，有機 EL の開発および IGBT モジュールのパッケージ設計に従事。現在，富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所パワエレ技術開発センター応用技術開発部。





\*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。