

# All-SiC 2 in 1 モジュール

## All-SiC 2-in-1 Module

蝶名林 幹也 CHONABAYASHI, Mikiya

大友 良則 OTOMO, Yoshinori

唐沢 達也 KARASAWA, Tatsuya

防じん防水型の高性能コンパクト型 IP65 対応インバータを実現するため、SiC デバイスを用いた All-SiC 2 in 1 モジュールを開発した。SiC デバイスは、Si デバイスに比べてスイッチング損失を大幅に低減できるが、これを用いるためには、モジュール内部の配線インダクタンスを低減するとともに、高温動作を保証する高い信頼性のパッケージ技術が必要である。富士電機は、これらを解決するために新構造のパッケージを開発した。IP65 対応インバータは、Si デバイスを用いた従来のインバータに比べて主回路の損失を 44% 低減した。

Fuji Electric has developed an All-SiC 2-in-1 module utilizing a SiC device that has been adopted in the development of a high-performance compact IP65-rated inverter characterized by its dustproof and waterproof features. In order to make use of the much lower switching loss of SiC devices compared with Si devices, it is necessary to create a highly reliable packaging technology that ensures high-temperature operation while also reducing wiring inductance inside the module. Fuji Electric has developed a package with a new structure to meet these requirements. As a result, the IP65-rated inverter reduces loss in the main circuit by 44% when compared with conventional inverters that use Si devices.

### 1 まえがき

低炭素社会を実現するために、再生可能エネルギーの積極的な活用や、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。パワエレ機器の電力変換において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）デバイスは特性改善が進められているが、既に物性に基づく理論的限界に近づきつつある。このような状況から、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）が注目されている。SiC デバイスは、Si デバイスよりも大幅に低損失化が可能であるため、さらなる省エネ化への貢献が期待されている。

富士電機は、メガソーラー用パワーコンディショナ（PCS：Power Conditioning Sub-system）向けに SiC-MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）と SiC-SBD（Schottky Barrier Diode）を組み合わせた All-SiC モジュールを開発し、量産している。All-SiC モジュールを PCS の昇圧回路に採用することで 20% の損失低減を実現し、変換効率は世界最高レベルの 98.8% を達成した。変換効率の向上と同時に回路を最適化し、従来機種を 2 台設置した場合と比較してフットプリントで約 60% の小型化を実現した。

今回、防じん防水型の高性能コンパクト型 IP65 対応インバータを実現するため、All-SiC 2 in 1 モジュールを開発した（図 1）。このインバータは、現場環境の壁に直接取り付けることができ、収納するための専用の電気盤が不要である。本稿では、この All-SiC 2 in 1 モジュールの要素技術と特性について述べる。

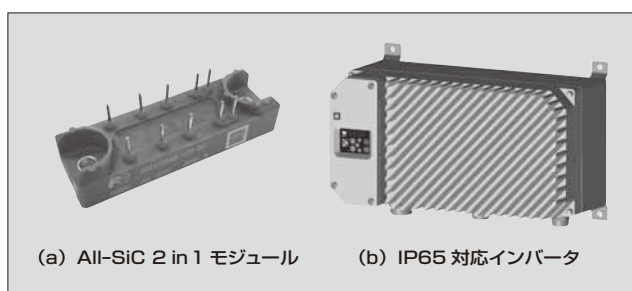


図 1 All-SiC 2 in 1 モジュールと IP65 対応インバータ

### 2 要素技術

#### 2.1 SiC デバイスの適用

SiC は、Si に比べて最大電界強度が約 10 倍高い。そのため、電気抵抗の主要因であるドリフト層を 1/10 程度の厚さにすることができ、電力損失を大幅に削減できる。また、Si では不可能であった高耐圧デバイスを実現することができる。さらに、SiC は Si に比べてバンドギャップが約 3 倍広いので、高温においても安定した動作が可能である。これに加えて、SiC の熱伝導率は Si の 3 倍以上であり、放熱性が高い。

従来の Si デバイスで低オン抵抗化を行うためには、バイポーラ動作が必要であった。そのため、スイッチング動作時にキャリアの注入や掃き出しが必要となるためスイッチング損失が大きかった。SiC デバイスは、前述の特性により、従来の Si デバイスでは実現不可能であった 1,200 V 以上の耐圧の MOSFET 構造や SBD 構造のデバイスを実現することが可能である。MOSFET や SBD は、IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）や pn ダイオードなどのバイポーラトランジスタと異なり、ユニポーラ動作のため非常に速いスイッチングが可能であり、スイッチング

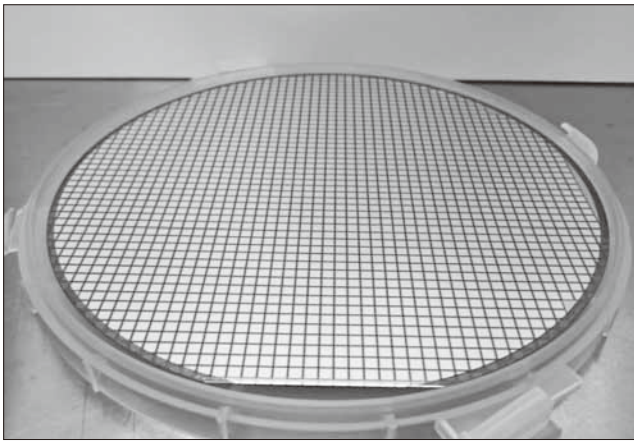


図2 6インチウェーハ

損失が大幅に低減できる。

富士電機では、2013年から松本工場にて世界初のSiC6インチウェーハの生産ラインを稼働している。図2に6インチウェーハの外観を示す。

## 2.2 新構造パッケージ

2.1節で述べたように、SiC-MOSFETはSi-IGBTに比べて高速スイッチングが可能である。しかし、スイッチング速度の高速化に伴ってサージ電圧が高くなるため、モジュール内部の配線インダクタンスを低減する必要がある。また、SiC-MOSFETなどのサイズの小さいチップを多数並列に接続でき、SiCデバイスの高温動作を保証する高い信頼性のモジュール用のパッケージ技術が必要である。

富士電機は、これらの課題を解決するために、All-SiC 2 in 1 モジュール用に新構造のパッケージを開発した(図3)。

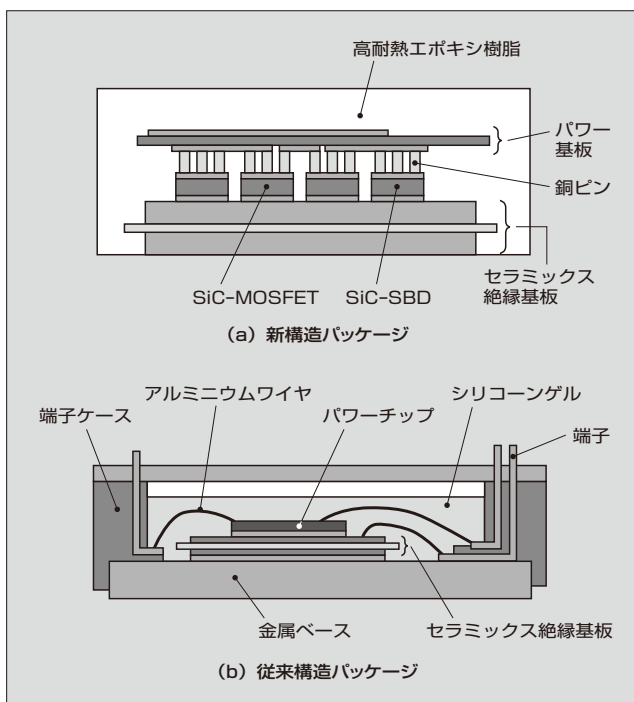


図3 新構造パッケージと従来構造パッケージの比較

図3(b)に示す従来のアルミニウムワイヤボンディングに替えて、図3(a)の新構造パッケージでは、SiCデバイス上に形成した銅ピンで配線しているため、大電流を流すことができる。また、サイズの小さなSiCチップを高密度で実装でき、多数並列に接続することができる。さらに、アルミニウムワイヤボンディングに比べ、内部のインダクタンスが約1/4に減少する。パワーチップを搭載する従来の絶縁基板に替えて、厚い銅板が接合されたセラミックス絶縁基板を採用し、低熱抵抗化を図っている。これに加えて、モジュール内部の封止材料である従来のシリコンゲルに替えて高耐熱エポキシ樹脂を採用することにより、チップと銅ピンの接合部などにおけるひずみの発生を抑制した。この構造の採用により、従来品に比べて $\Delta T_j$ パワーサイクル耐量が10倍という高い信頼性を確保している。

## ③ 特性

### 3.1 導通時のI-V特性

モジュール導通時に発生する損失(定常損失)を決める特性がI-V特性である。All-SiC 2 in 1 モジュールとSi-IGBTモジュールのI-V特性を図4に示す。MOSFETは、IGBTのようなビルトイン電圧がない。そのためAll-SiC 2 in 1 モジュールは、Si-IGBTに比べてある一定の電流以下で定常損失を低減することが可能である。

### 3.2 スイッチング特性

スイッチング損失は、ターンオン時に発生するターンオン損失、ターンオフ時に発生するターンオフ損失、逆回復時に発生する逆回復損失の三つに分けることができる。ターンオン損失を図5に、ターンオフ損失を図6に、逆回復損失を図7に、トータルスイッチング損失を図8に示す。All-SiC 2 in 1 モジュールは、Si-IGBTモジュールに対して、ターンオン損失が62%、ターンオフ損失が74%、逆回復損失が100%、それぞれ低減する。これによりAll-SiC 2 in 1 モジュールは、従来のSi-IGBTモジュールに対して、トータルスイッチング損失が75%低減する。

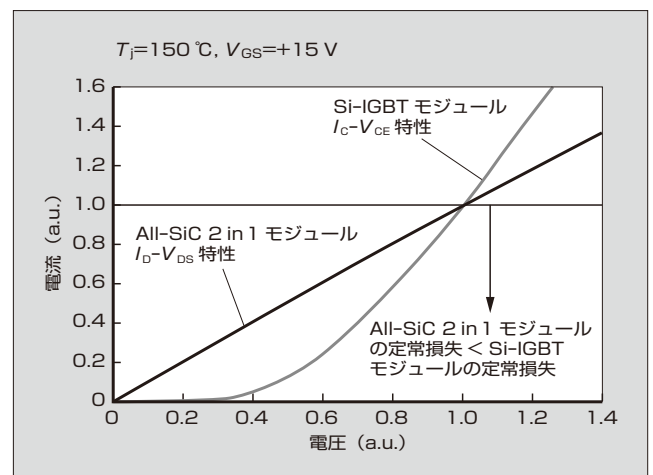


図4 I-V特性

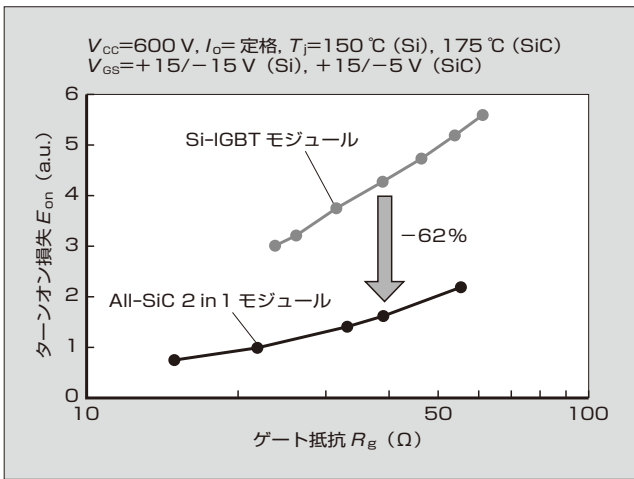


図5 ターンオン損失

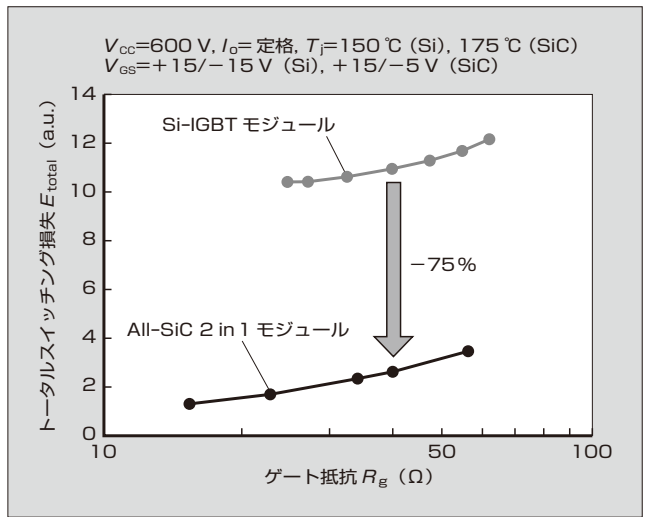


図8 トータルスイッチング損失

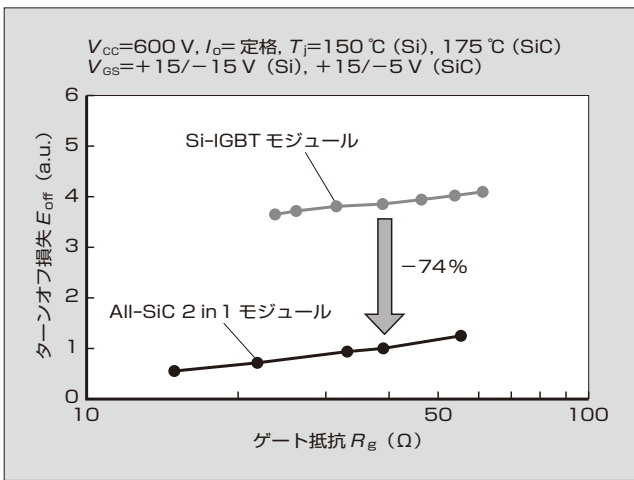


図6 ターンオフ損失

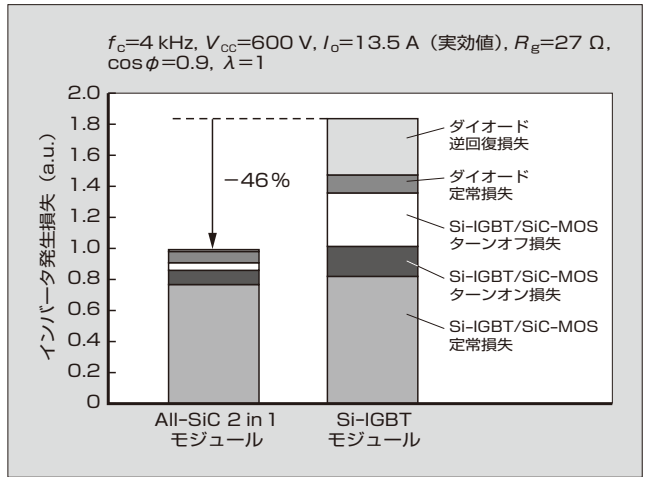


図9 インバータ発生損失シミュレーションの結果

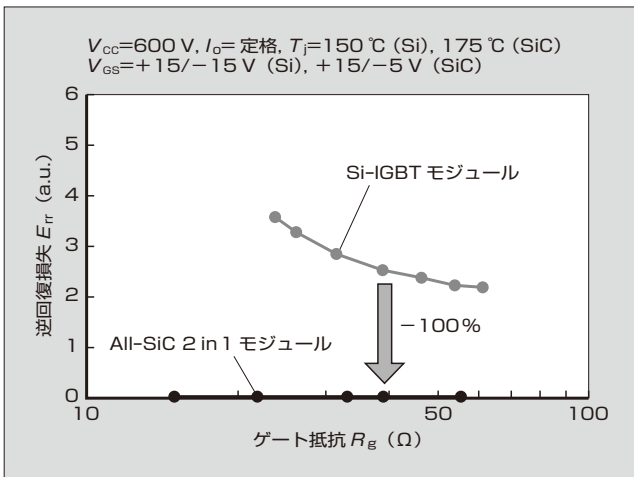


図7 逆回復損失

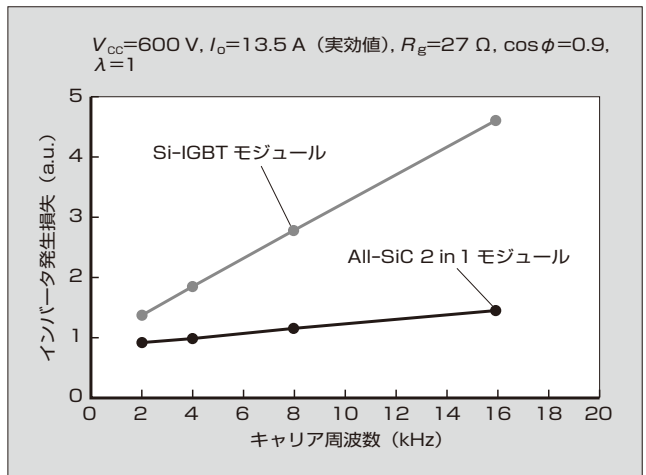


図10 インバータ発生損失のキャリア周波数依存性



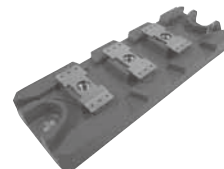
### 3.3 インバータ発生損失シミュレーション

インバータの一般的な使用条件において、All-SiC 2 in 1 モジュールと Si-IGBT モジュールについてインバータ発生損失シミュレーションを行った。キャリア周波数 4kHz におけるシミュレーションの結果を図 9 に示す。All-SiC

2 in 1 モジュールは、Si-IGBT モジュールに対してインバータ発生損失が 46% 低い。

図 10 にインバータ発生損失のキャリア周波数依存性を示す。All-SiC 2 in 1 モジュールは、Si-IGBT モジュールに比べてスイッチング損失が非常に小さいため、キャリア

表1 All-SiC 2 in 1 モジュールの系列展開

項目	タイプ1	タイプ2	タイプ3L
外観			
外形寸法 (mm)	W62 × D20 × H12	W68 × D26 × H13	W126 × D45 × H13
パッケージ	新構造パッケージ		
定格	定格電圧 (V)	1,200	
	定格電流 (A)	15, 35	50, 75, 150, 200, 320
適用素子	MOSFET	SiC-MOSFET	
	SBD	SiC-SBD	

周波数を上げてインバータ発生損失の増加は小さい。したがって、All-SiC 2 in 1 モジュールは、Si-IGBT よりも高いキャリア周波数でのスイッチング動作が可能となるため、フィルタなどの受動部品が小型になり、パワーエレクトロニクス機器の小型化につながる。

### 3.4 製品への適用

富士電機では、2章で述べた要素技術により All-SiC 2 in 1 モジュールを製品化し、表1に示す系列展開を行う。IP65 対応インバータには小型化のメリットが大きいタイプ1〔外形寸法：W62×D20×H12 (mm)〕を採用した。これにより、従来の Si-IGBT モジュール〔外形寸法：W94×D34×H30 (mm)〕に対し、モジュールのフットプリントを約 60% 低減した。

IP65 対応インバータは、食品加工ライン、工業炉、家畜厩舎（きゅうしゃ）など、厳しい環境で使用用途に向けて開発した。このような環境で使用用途には、小型化だけでなく、高い保護構造と自冷構造が要求される。

これらを実現するために、低損失、高温動作保証、高信頼性、低熱抵抗という All-SiC 2 in 1 モジュールの特性を生かし、IP65 対応インバータの開発に貢献した。All-SiC 2 in 1 モジュールの搭載により、従来の Si モジュールを搭載した製品に比べて主回路損失において 44% の低減を実現している。

## 4 あとがき

IP65 対応インバータを実現するための All-SiC 2 in 1 モジュールについて述べた。

現在、SiC-MOSFET ではゲートを基板の表面に形成するプレーナゲート型が主流である。さらなる省エネルギー化や低価格化の市場要求に応えるためには、SiC-MOSFET が導通する際のオン抵抗  $R_{on}$  を低減する必要がある。この実現のために、富士電機ではトレンチゲート MOSFET を開発中である<sup>(4)</sup>。トレンチゲート MOSFET を

All-SiC 2 in 1 モジュールに実装することにより、モジュールのいっそうの小型化と大容量化が可能となる。

今後も、All-SiC 2 in 1 モジュールをさまざまなパワーエレクトロニクス機器に搭載し、パワーエレクトロニクス技術の発展と低炭素社会の実現に貢献する所存である。

### 参考文献

- (1) 大島雅文ほか. All-SiCモジュール搭載のメガソーラー用 PCS 「PVI1000 AJ-3/1000」. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.1, p.13-17.
- (2) 梨子田典弘ほか. メガソーラー用パワーコンディショナ向け All-SiCモジュール. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.4, p.244-248.
- (3) 仲村秀世ほか. All-SiCモジュールのパッケージ技術. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.241-244.
- (4) 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.



### 蝶名林 幹也

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事業統括部モジュール技術部。



### 大友 良則

パワー半導体用パッケージ組立の開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部パッケージ実装開発部。



### 唐沢 達也

SiC の構造開発・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実装開発部。



\*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。