

# 第2世代ハイブリッドSiC-IPM

2nd Generation Hybrid SiC-IPM

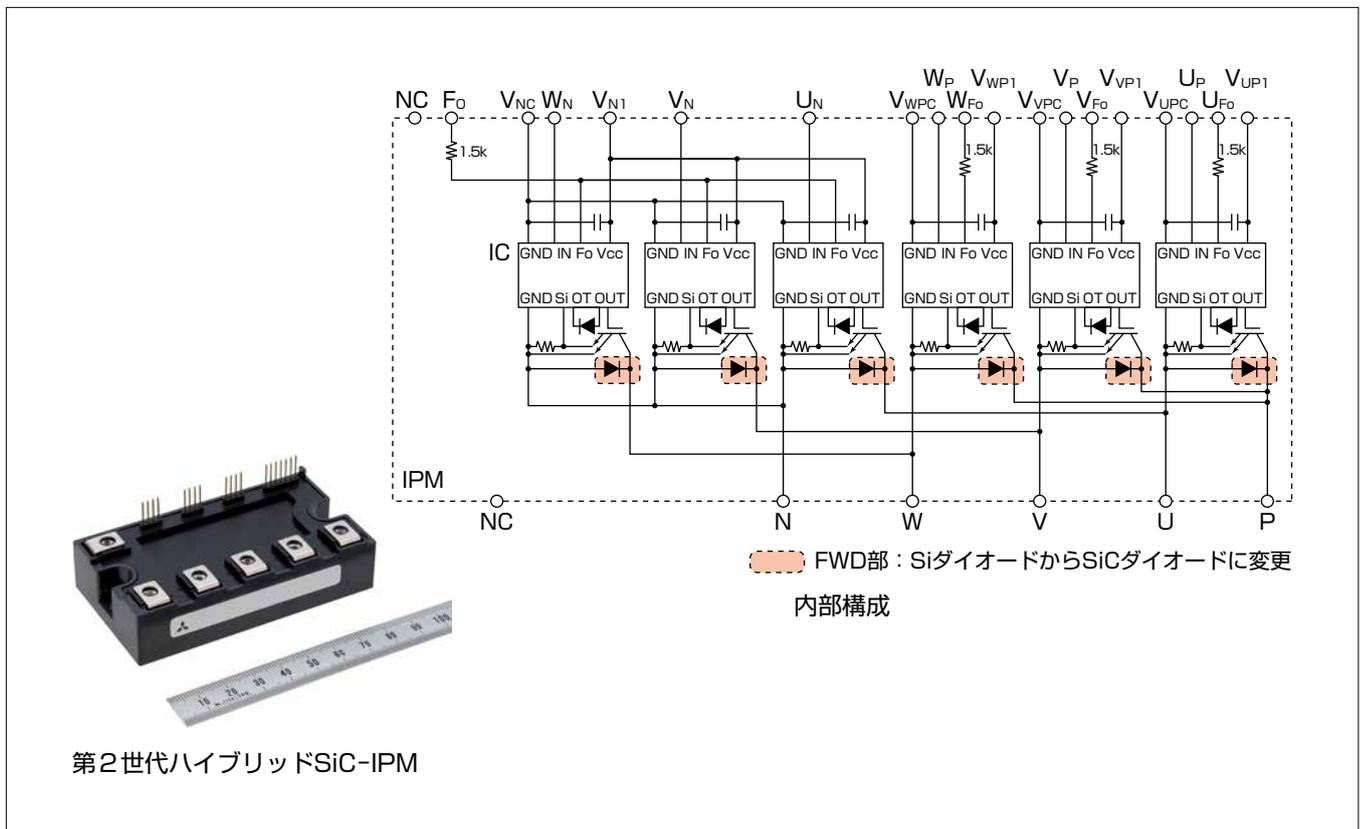
## 要 旨

近年、低炭素化社会に向けて、FA、家電、電鉄等のパワーエレクトロニクス機器の省エネルギー化・小型化競争が進んでいる。そのため、それら機器に搭載されるパワーデバイスに対しても、高性能化・小型化が求められるようになってきている。そのような状況の中、大幅な電力損失低減が期待できるSiC(シリコンカーバイド)は、次世代半導体デバイス材料として注目されており、パワーデバイスメーカー各社でSiCデバイスを搭載したパワーモジュール製品の開発が行われている。

三菱電機では、これまで、産業機器向けのインテリジェ

ントパワーモジュール(IPM)についても、FWD(Free Wheeling Diode)部にSiCダイオードを搭載した第1世代ハイブリッドSiC-IPMを提供してきた。現在、その後継としてSi-IPMの上位互換が可能な、第2世代ハイブリッドSiC-IPMを開発中であり、その主な特長は次のとおりである。

- (1) 外形はSi-IPM“G1シリーズ”のAパッケージと同等
- (2) 第2世代SiCダイオード搭載
- (3) 制御・保護回路はG1シリーズを踏襲
- (4) 電力損失は第1世代比約10%低減



## 第2世代ハイブリッドSiC-IPMの外観及び内部構成

開発中の第2世代ハイブリッドSiC-IPMは、Si-IPMの上位互換が可能で、①外形はSi-IPM“G1シリーズ”のAパッケージと同等、②第2世代SiCダイオード搭載、③制御・保護回路はG1シリーズを踏襲、④電力損失は第1世代比約10%低減、の四つの特長を持つ。左はその外観、右は内部構成である。

## 1. ま え が き

省エネルギー化の機運がますます高まる中、パワーデバイスが注目されて久しいが、現在主に使用されているSi（シリコン）デバイスはその材料物性で決まる理論限界に近い。今後そのSiに代わると期待されているものに、ワイドギャップ半導体であるSiCやGaN（窒化ガリウム）がある。当社では、全社的なプロジェクト体制を構築してSiCデバイスを搭載したパワーモジュールの開発を進めており、これまで、産業用IPMについても、市場への提供を行ってきた。

現在は、第2世代のSiCダイオードを搭載したIPMの開発を進めており、本稿ではその内容について述べる。

## 2. 第2世代ハイブリッドSiC-IPM

### 2.1 ラインアップ

第1世代のSiCダイオードを搭載したIPMの外形は、Si-IPMからの置き換えが容易にできるようにという観点から、当時の量産主力機種であったIPMの“L1シリーズ”と同一にした。今回、第2世代のSiCダイオードを搭載したIPMの開発を進めるに当たっても、同様の理由から、外形についてはSi-IPMと互換性を持たせることにした。

図1に、現在当社で量産している産業用Si-IPMの最新パッケージ“G1シリーズ”での1,200V系のラインアップ

を示す。今回、最も小型であるAパッケージの最大定格（1,200V/50A）の上位互換版という位置付けで、第2世代SiCダイオードを搭載した製品の開発を進めている。

### 2.2 IPMの内部構成

IPMの内部構成を図2に示す。本稿で述べる製品は3相ブリッジタイプの6in1であり、制御/保護回路についてはG1シリーズを踏襲している。

### 2.3 ハイブリッドSiC-IPM適用のメリット

ハイブリッドSiC-IPM適用によるメリットの一例として、モータ用途に対する事例を図3に示す。外形が変わることなく損失低減が期待できることから、ユーザーとしては、基板設計や放熱設計を変更することなく、高速化又はトルクアップの実現が見込める。

定格電圧	パッケージ	定格電流							
		25A	35A	50A	75A	100A	150A	200A	300A
1,200V	A	50×90(mm)							
	B	55×120(mm)							
	C				85×120(mm)				
	D						110×142(mm)		

図1. Si-IPM“G1シリーズ”での1,200V系のラインアップ

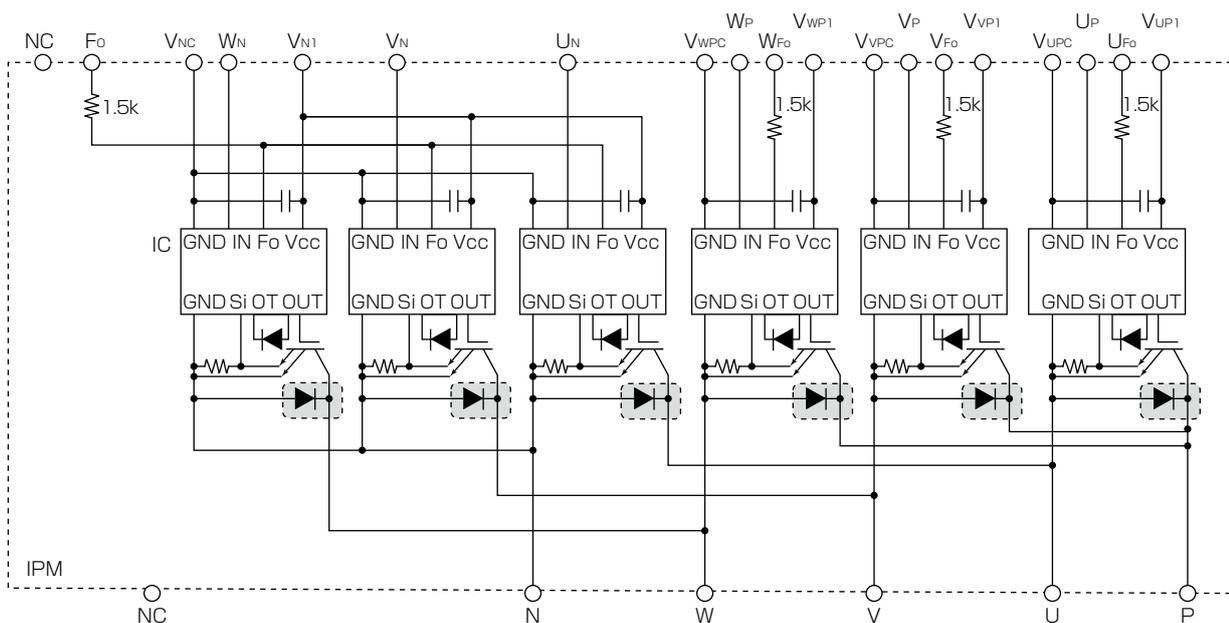


図2. ハイブリッドSiC-IPMの内部構成図

図2. ハイブリッドSiC-IPMの内部構成図

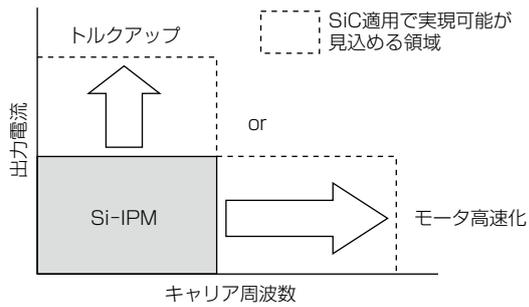


図3. SiCダイオード搭載によって得られる具体的効果

### 3. 第1世代ハイブリッドSiC-IPMとの相違点

これまで、産業機器向けに第1世代ハイブリッドSiC-IPMを提供してきたが、先に述べたメリットを更に活用するため、高キャリア周波数用途により適した仕様を目標として第2世代ハイブリッドSiC-IPMの開発を進めている。この第2世代品について、機能と性能面という観点から、第1世代品と大きく異なる次の2点について述べる。

- (1) エラーモード識別機能搭載
- (2) ダイオードの変更

#### 3.1 エラーモード識別機能搭載

第1世代品では、保護機能が働いている際にどの保護機能が動作しているかを、エラー信号だけでは識別できなかった。今回G1シリーズの保護回路を踏襲した第2世代品の保護回路では“エラーモード識別機能”を追加しており、各種保護でエラー信号出力時間が異なるように設計をしている(図4)<sup>(1)</sup>。この機能は、ユーザーのパワーエレクトロニクス機器開発時間の削減に寄与する。

#### 3.2 ダイオードの変更

IPMのFWD部のSiCダイオードについて、第1世代

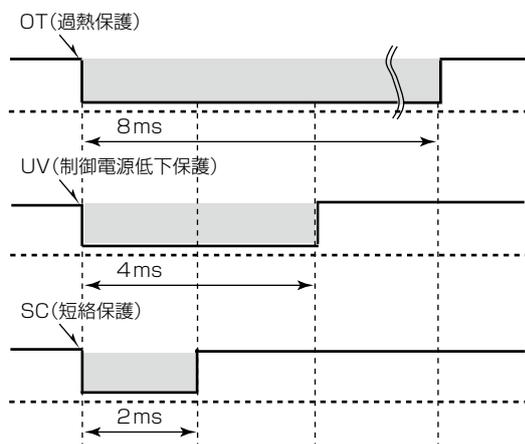


図4. 各保護時でのエラー信号の出力時間

品ではSBD(Schottky Barrier Diode)を採用していたが、第2世代品ではJBS(Junction Barrier controlled Schottky diode)を採用することとした。JBS構造を採用することでショットキー電極界面の電界強度が緩和でき、逆バイアス時のリーク電流低減が見込まれる。SBDとJBSの断面模式図を図5に示す。

また、JBS構造の採用及び第2世代化に伴うエピタキシャル層の厚み・濃度の最適化によって、定格電圧印加時のリーク電流抑制を実現しつつ、従来比同等の電圧-電流特性を実現した。(図6、図7)

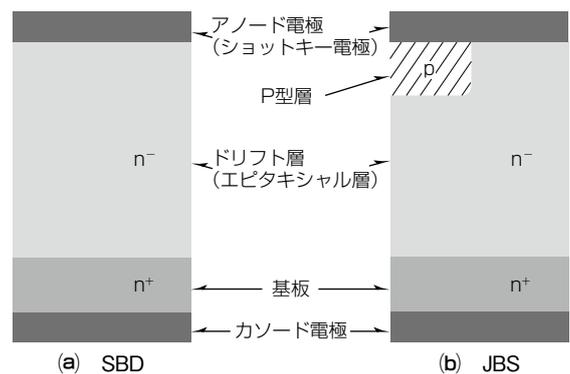


図5. SBDとJBSの断面模式図<sup>(2)</sup>

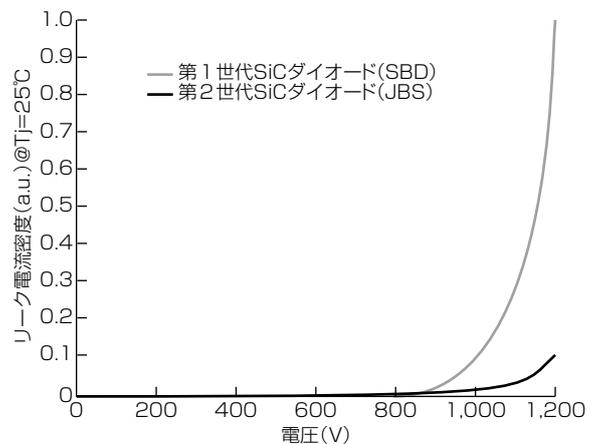


図6. 第1世代品と第2世代品のリーク電流密度比較

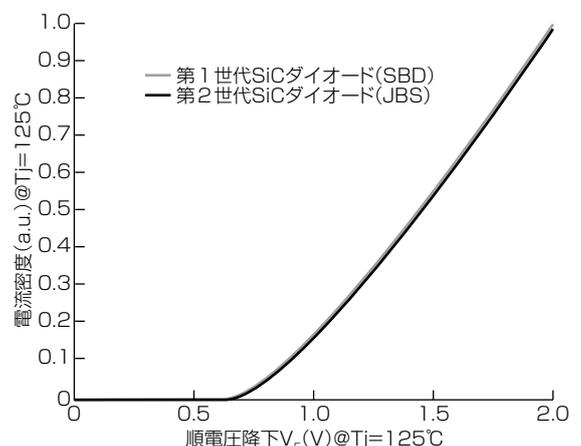


図7. 第1世代品と第2世代品の電圧-電流特性比較

## 4. 第2世代ハイブリッドSiC-IPMの特性

### 4.1 スイッチング波形

一般的に、IPMのFWD部のダイオードをSiからSiCに変更することで、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)のターンオンスイッチング時に発生するFWD部のリカバリ損失を減らせることが知られている。これによって、Si-IPMと比較して電力損失低減が見込まれる。図8に、Si-IPMとハイブリッドSiC-IPMの誘導負荷スイッチング時のターンオン波形の比較を示す。この波形から、Si-IPMではターンオン時にリカバリ電流が重畳されているが、ハイブリッドSiC-IPMでは、リカバリ電流重畳がほとんどなくなっていることを確認できる。

### 4.2 電力損失

一例として、15kWのインバータ動作を想定した条件では、先に述べたリカバリ電流低減効果によって、第1世代ハイブリッドSiC-IPMではSi-IPM比で約25%の電力損失低減効果を得られていた<sup>(3)</sup>。

今回、同条件で、第1世代ハイブリッドSiC-IPMと第2世代ハイブリッドSiC-IPMの電力損失を試算した結果を図9に示す。第2世代ハイブリッドSiC-IPMは高キャリア周波数用途に適した仕様になっていることもあり、この条件では電力損失を第1世代品比で約10%低減できていることが確認できる。

また、上記条件で、キャリア周波数以外の条件を固定して、キャリア周波数と電力損失の関係について試算した結果を図10に示す。この図から、損失同等を許容範囲とした場合には、第2世代ハイブリッドSiC-IPMは第1世代ハイブリッドSiC-IPMに対して、より高いキャリア周波数で動作可能であることが確認できる。

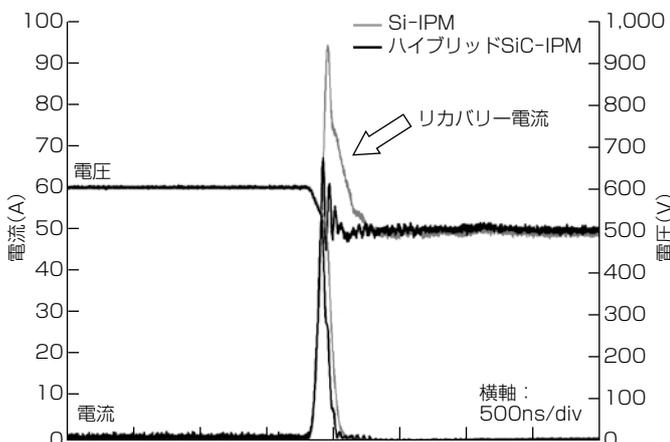


図8. 誘導負荷スイッチング時のターンオン波形の比較

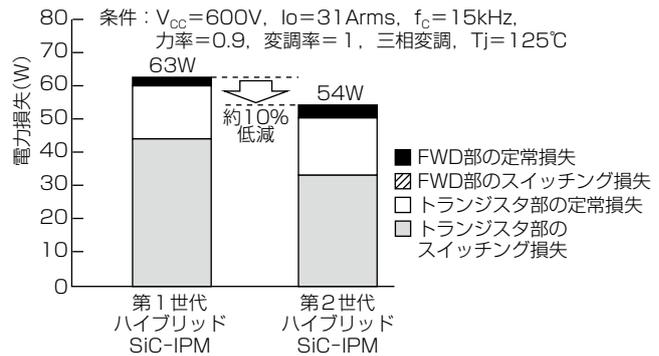


図9. 電力損失試算結果

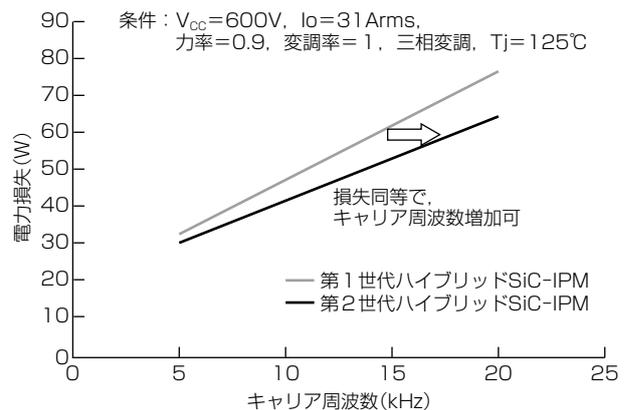


図10. キャリア周波数と電力損失の関係

## 5. むすび

開発中の産業用第2世代ハイブリッドSiC-IPMについて述べた。SiCを適用した今後の製品としては、ハイブリッドSiC-IPMに対して、さらにFWD部に逆並列接続されているSi-IGBTをSiC-MOSFETに置き換える第2世代フルSiC-IPMの提供を考えている。フルSiC-IPMではターンオフ時間の低減が見込まれ、より低損失なIPMの実現が可能と考える。また、ターンオフ時間が短くなることで、より高キャリア周波数での動作実現が見込まれ、トランスやリアクタの小型化実現が期待できる。

限りある資源を有効活用する省エネルギー製品のニーズが高まる中、SiCを適用した製品の開発は市場の期待に添うものと考えている。将来的にはSiに代わるデバイスとして期待されていることもあり、様々なニーズを満たすSiC適用製品を市場に送り出していくことで、更なる省エネルギー社会の実現に貢献していく。

### 参考文献

- (1) 木村義孝, ほか: 産業用第7世代IPM“G1シリーズ”, 三菱電機技報, 90, No.5, 299~302 (2016)
- (2) 松波弘之, ほか: 半導体SiC技術と応用, 日刊工業新聞社 (2003)
- (3) 大月高実, ほか: SiCパワーモジュール化技術, 三菱電機技報, 88, No.5, 301~304 (2014)