

# 低損失・小型化を実現したCompact-IPM

Compact-IPM (Intelligent Power Module) Featuring High Efficiency and Small Package

宮崎 裕二  
MIYAZAKI Yuuji

近年、パワーデバイスの電力変換機器における応用分野の拡大は目覚ましく、産業用途だけにとどまらず、民生、交通、情報など幅広い分野への適用が進められている。その背景には、パワーデバイスの低損失化と高システム化の追求があり、これらの技術的進歩が、製品応用範囲の拡大をいっそう加速することは明らかである。

当社は、このような動向を踏まえ、数kW～数百kWクラスのインバータ、サーボアンプなどの分野をターゲットに、低損失、小型パッケージ、低ノイズの性能を併せ持つインテリジェントパワーモジュール(Compact-IPM)を開発した。

このデバイスの適用により、トータルシステムの小型化、高性能化に大きく貢献するものと考えている。

The fields of application of high-power electronics have expanded in recent years, to include not only industrial use but also a variety of other fields such as consumer products, transportation, and information. With this situation as a background, there is demand for low loss and high-level functions in power devices. Moreover, it is clear that the expansion of applications will further accelerate in the future with the continuing progress of technology.

Based on these trends, we have targeted our efforts at inverters from the several to several hundred kW class, as well as servo amplifiers. As a result, we have developed the Compact-IPM intelligent power module, which offers lower loss, a smaller package, and lower noise. This new-concept IPM will significantly contribute to the realization of compact application equipment as well as high performance for application systems.

## 1 まえがき

汎用インバータや産業用ロボットなどの応用機器において、出力パワーデバイスの果たす役割は大きく、機器のコスト、効率、信頼性を左右するキーデバイスであると言える。応用機器の高周波・高効率化が進むなか、大電流・高耐圧特性、駆動回路設計の容易さなどの利点から、現在ではIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)が主流となっている。一方当社では、各種保護回路、駆動回路などの周辺回路をモジュール内に取り込むことによって、より高機能・高信頼性を目指すと同時にデバイスの持つ性能を最大限に生かすため、IPM(Intelligent Power Module)の開発・製品化を進めてきた。

応用範囲の拡大に伴い、パワーデバイスへの更なる性能改善の要求に対応して、当社は、より低損失、小型、低ノイズを追求したCompact-IPMシリーズを開発した。以下に、IPM開発における当社の技術的取組みと、Compact-IPMシリーズの特長について述べる。

## 2 低損失化への取組み

インバータアプリケーションにおけるデバイスの発生損失は、定常損失とスイッチング損失を合計したものとなる。当

社は、新設計のIGBT及び新ゲートドライブ方式を導入することにより、飽和電圧 $V_{CE(sat)}$ とターンオンスイッチング損失 $E_{on}$ をそれぞれ低減した。

### 2.1 低損失IGBT

従来のプレーナ型に代わり、トレンチゲート型のIGBTを開発した。単位セル構造及びチップ外観を図1に示す。

トレンチゲート型では、MOS(Metal Oxide Semiconductor)部のチャンネル抵抗及びJFET(Junction Field Effect Transistor)抵抗が大幅に小さくなるため、 $V_{CE(sat)}$ の低減に

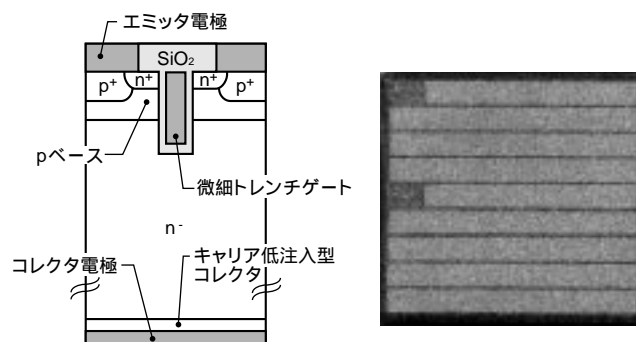


図1. 低損失IGBTの断面構造(1,200V定格)とチップ外観 トレンチゲート設計、ウエーハ構造の最適化により、十分な破壊耐量と低い飽和電圧を得ることができた。写真は1,200V/150A定格のチップを示す。  
Cross-sectional structure and top view of new IGBT

大きく貢献することができる。

また、ウェーハ構造に低注入NPT( Non Punch Through )技術を用いることによって、短絡耐量などの破壊耐量を犠牲にせず特性改善を図った。

以上の施策を盛り込んだうえで、セルデザイン、 $n^-$ 層の厚み、トレンチ形成プロセスをそれぞれ最適化した結果、十分な電流ラッチアップ耐量を確保すると同時にトレードオフを改善、600 V系においては1.6 V、1,200 V系においては1.8 Vと、従来に比べて約30%低い飽和電圧を実現した。

### 2.2 ターンオン スイッチング損失の低減

近年、EMC( Electro Magnetic Compatibility )に関する各種規制に見られるように、電磁環境に対する規制をクリアすることが一般的市場ニーズとなってきている。

パワーデバイスにとっては、高速動作が追求されている一方で、ノイズの発生原因となり得るスイッチング時の電流変化率(  $di/dt$  )の軽減、すなわちソフトスイッチング化が求められている。通常の場合、ゲート抵抗を選定し  $di/dt$  (  $dv/dt$  )を抑制する方法が採られるが、この場合おのずとスイッチング損失の増大を招く結果となる。このトレードオフを改善するために、IGBTの駆動方式を見直した。すなわち、従来のゲート抵抗を用いた電流制限方式に対し、低インピーダンス回路を用いたランプ電圧波形によりIGBTを駆動することにより、放射ノイズにもっとも影響するとされているターンオン時のソフトスイッチングを維持したまま、 $E_{on}$ を低減させることが可能となった。

従来型と新方式における波形比較を図2に示す。同一  $di/dt$ にて、 $E_{on}$ を約20%低減できた。

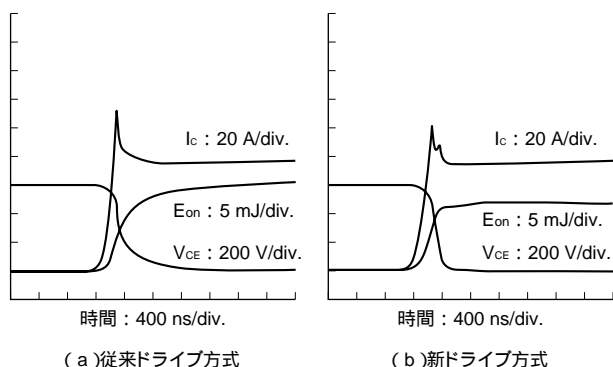


図2. ゲートドライブ方式の見直しによるターンオンロス低減  
低インピーダンス回路を用いたランプ電圧波形によりIGBTを駆動することにより、ターンオンスイッチングのソフト性を維持したまま、 $E_{on}$ を約20%低減することができた。  
IGBT turn-on switching waveforms

### 2.3 FWDのソフトリカバリ化

放射ノイズレベル改善に影響を及ぼす他要因としては、IGBTにアンチパラレルに接続されているFWD( Free

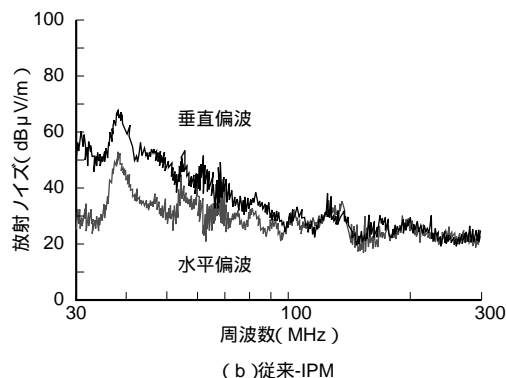
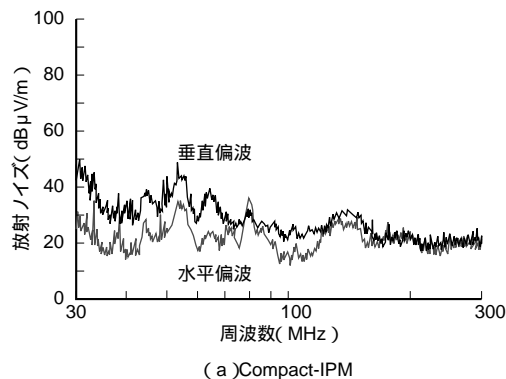


図3. 放射ノイズレベルの改善 IGBTゲート駆動方式の適正化及びFWDソフトリカバリ化により、放射ノイズを低減することができる。なお、比較スペクトル波形は、当社従来IPMの場合を示す。  
Results of radiant noise experiment

Wheeling Diode)のリカバリ特性が挙げられる。当社はソフトリカバリ化・低 $Q_{rr}$ (リカバリ電荷量)化に取り組み、低注入アノード構造と、ウェーハ厚、プロファイルの最適化により性能改善を達成した。これらIGBTゲート駆動方式の適正化、並びにFWDソフトリカバリ化により、図3に示すように当社従来IPM比にて放射ノイズレベルの改善が達成できた。

## 3 Compact-IPMの開発

先に述べた技術的成果を取り入れたうえで、現在Compact-IPMシリーズの製品化が進行中である。以下に、この製品の概要及び特長を述べる。

### 3.1 概要

定格電流75 ~ 600 A( 定格電圧600 V系 ), 75 ~ 400 A( 1,200 V系 )をカバーする13品種を、4種類のパッケージにてラインアップ化を行う。ラインアップ概要を表1に示す。

### 3.2 小型化

この製品開発にあたっては、従来のモジュールパッケージ設計を一新し、同一定格IPMの当社従来製品比で約1/2のサイズという大幅な小型・薄型化を実現した。

小型化に際し、モジュール内部電力ラインの立体配線構造を採用した。新規構造の特長として以下が挙げられる。

表1. Compact-IPMシリーズのラインアップ概要  
Lineup of Compact-IPM series

定格電流	定格電圧600V	定格電圧1,200V	共通仕様
75 A	(7 in1)	(7 in1)	・ドライブ回路内蔵
100 A	(7 in1)	(6 in1)	・保護機能
150 A	(7 in1)	(6 in1)	OC / SC(過電流 / 短絡保護)
200 A	(6 in1)	(2 in1)	UV(制御電源低下保護)
300 A	(2 in1)	(2 in1)	OT(過熱保護)
400 A	(2 in1)	(2 in1)	・エラー信号出力
600 A	(2 in1)		

: 製品あり ( )内は, 1モジュール当たりに含まれるIGBT(FWD)数を示す。

- (1) 主電極端子とDBC(Direct Bond Copper)<sup>(注1)</sup>間を超音波(US)接合技術にて接続
- (2) 信号用アルミニウム(AI)ワイヤを印刷回路基盤(PCB)のスルーホールを通してボンディング

それぞれの構造を, 図4に模式的に示す。これらの技術を採用するにあたり, 温度サイクル(TCT: -40 ~ 125)におけるDBC接合部への発生応力の解析, 並びに実際にTCTによる加速試験を実施し開発品の実力を定量化した。まず, TCT中のDBCへの応力履歴を三次元シミュレーションにより解析した。解析モデル(N, P, B各端子要素を含むモジュールの1/2モデル)を図5に示す。TCTにおける応力解析の結果から, 発生応力がDBCの抗折強度以内であるべき諸元を明らかにし, それらを開発品設計にフィードバックしてCompact-IPMの構造を決定した。実際のTCT試験結果でも, 300サイクル超のレベルを達成した。これは, 一般産業用としては十分なレベルである。

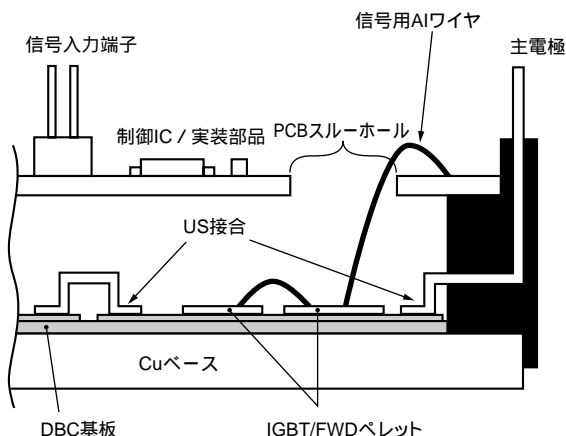


図4. モジュール構造の模式図 主電極端子とDBC間のUS接合技術, 及び信号用AIワイヤのスルーホールボンディング技術を導入することにより, パッケージサイズの縮小化を図った。

Structure of Compact-IPM using US junction and through-hole bonding techniques

(注1) セラミックスの板に, 銅の回路パターンを化学的に直接接合(接着剤を使用せず)したもの。

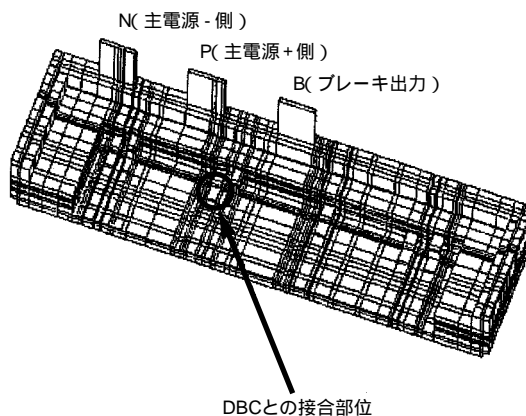


図5. 三次元シミュレーションによるTCT応力解析モデル N, P, B各端子要素を含む, モジュールの1/2モデル。TCT時にUS接合部分に発生する応力を定量的に見積もり, 設計へフィードバックをした。  
3-D model for analysis of TCT mechanical stress

### 3.3 Compact-IPMの熱解析

Compact-IPMは, 大幅なパッケージ小型化を実現した。小型化に伴う発熱上の問題点がないにつつき, シミュレーションを実施した。モチーフに1,200V/75A定格のモジュールを選定した。今回の熱解析モデルを図6に示す。発熱量見積りのための素子損失については,  $f_c = 12 \text{ kHz}$ ,  $15 \text{ kW}$ インバータ,  $3$ , modulation = 1を想定した。

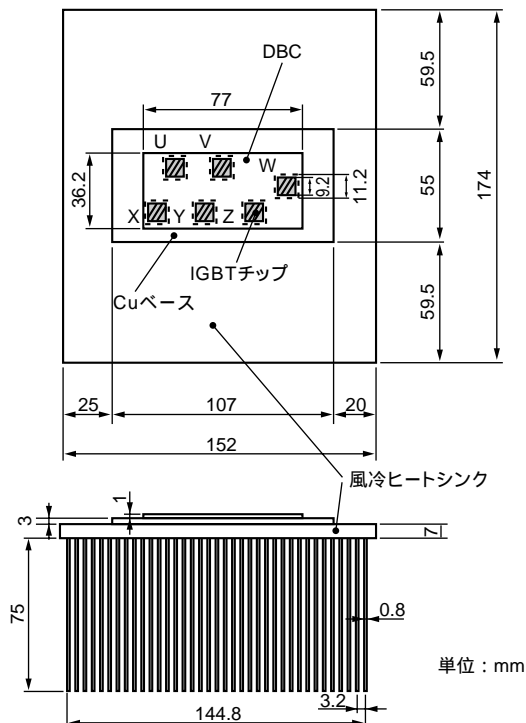


図6. 熱解析モデル 1,200V/75Aの素子をモチーフに, 冷却用ヒートシンク(風冷)を想定し, インバータ過負荷条件(発生損失), 冷却条件(風速)などをパラメータに, シミュレーションを実施した。  
Thermal analysis model including heat sink

100%定格負荷条件で $I_o = 33 A_{rms}$  ,1素子当り平均損失を65 W程度と見積もった。なお ,この発生損失量は当社従来IGBTを搭載した場合を想定しており ,Compact-IPMではIGBTの低損失化により更に20%程度の損失低減を見込むことができる。

この前提で素子内部 ,モジュールケース ,フィンなど各部位温度を解析した。解析結果の一例を図7に示す。更に ,インバータ過負荷条件 ,冷却条件( 風速 )などをパラメータにシミュレーションを実施し ,Compact-IPM実用化に伴う次のような知見を得た。

- (1) パッケージ内熱集中に関しては ,100%負荷条件でもモジュール内最大で5 °C以内の温度差を生ずるが ,実用上問題ないレベルである。
- (2) 従来型冷却フィンにて使用する場合は ,フィン上での

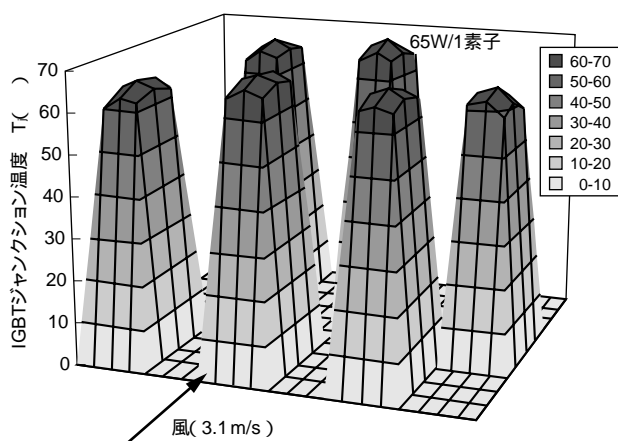


図7 . 熱解析結果の一例 平均損失1素子当たり65 W( 当社従来IGBTチップ搭載を想定 ) ,風速3.1 m/s時の温度上昇解析結果を示す。  
Results of thermal analysis simulation

熱干渉が若干見られる。小型化による熱干渉の問題は ,トレンチゲート化による20%の損失低減により対応できる。

以上述べてきたように ,Compact-IPMの小型化を実現するうえでの必要技術を明らかにし ,発熱シミュレーション及び実装評価により検証した。実用上は ,素子と冷却フィン間の接触熱抵抗が非常に大きな役割を担う。この面では ,モジュールCuベースの反り量及び放熱フィンの平面度を管理することによって ,素子性能を十分に引き出すことが可能である。

#### 4 あとがき

高性能・小型のCompact-IPMを開発した。取付け面積を対当社従来IPMに比較して約1/2化を実現した。

今後 ,Compact-IPM製品ラインアップの拡充を行い ,応用装置のより小型化・高機能化を追及し得る素子をユーザーへ提供することが可能となった。

#### 文 献

- (1) Nakanishi ,H . ,et al . Designs and Performance of Trench Gate IGBTs for Induction Heating ,Switching Power Supply and Motor Control Applications . PCIM '99 . 1999 ,p.247-253.
- (2) 角田哲次郎 ,他 . トレンチゲートIGBTとトレンチパワー-MOSFET . 東芝レビュー . 52 ,2 ,1997 ,p.47-50.



宮崎 裕二 MIYAZAKI Yuuji  
セミコンダクター社 ディスクリート半導体事業部 電力素子応用技術部。IGBTモジュール ,IPMの開発に従事。  
Discrete Semiconductor Div.