

3.3 kV IGBT モジュール

3.3 kV IGBT Modules

古閑 丈晴 Takeharu Koga

有田 康彦 Yasuhiko Arita

小林 孝敏 Takatoshi Kobayashi

産業用インバータや車両インバータなどの市場ニーズに応えるため、3.3 kV 耐圧、1.2 kA 電流定格の大容量 IGBT モジュールを開発してきた。今回、パッケージに IGBT ハイパワーモジュールの技術を適用したモジュールを開発した。改良前に比べ、内部インダクタンスを 33% 低減し、絶縁基板間の電流均一化も良好である。このモジュールで、パワーサイクル試験を実施し、十分な耐量を持つことを確認した。また、製品ラインアップとして、3.3 kV-1.5 kA および 3.3 kV-0.8 kA IGBT モジュールを開発中である。

Fuji Electric has developed a 3.3 kV-1.2 kA IGBT module in response to market needs for inverters suitable for industrial and vehicle applications. The package of the newly developed module incorporates IGBT high-power module technology. Compared to previous modules, internal inductance has been reduced by 33% and the current flow to chips on each isolation substrates shows good uniformity. Power cycle tests were implemented with this module, and sufficient durability was verified. 3.3 kV-1.5 kA and 3.3 kV-0.8 kA IGBT modules are also being developed to expand the product lineup.

① まえがき

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールは、その低損失性、駆動回路の容易さ、高破壊耐量から広く普及している。高耐圧・大容量分野においても、これまで広く適用されてきた GTO (Gate Turn-Off) サイリスタから IGBT モジュールへ置き換えられてきており、大容量インバータや高圧インバータ装置などに広く応用されている。特に近年の地球温暖化防止のため、新エネルギー (風力・太陽光発電) の市場が急速に伸びており、この分野で適用されるインバータ装置の大容量化が進み、大容量 IGBT モジュールのニーズは大いに拡大している。

富士電機では、これまで大容量分野への適用を狙った IGBT ハイパワーモジュールを製品展開してきた。2007 年には、それまでの 1.2 kV および 1.7 kV 耐圧の IGBT ハイパワーモジュールのチップおよびパッケージ設計・製造技術を 3.3 kV 耐圧まで発展させて、性能に優れた 3.3 kV 耐圧、1.2 kA 電流定格の大容量 IGBT モジュールを開発した⁽¹⁾。2008 年には、1.2 kV および 1.7 kV 耐圧において、低損失化、

放熱特性の向上、かつ耐環境性能を大幅に改善した IGBT ハイパワーモジュールを新たに開発し、製品展開している。このモジュールのパッケージは、低インダクタンスで、電流バランスに優れている。

今回開発した 3.3 kV 1.2 kA IGBT モジュールには、このパッケージ技術を適用した。3.3 kV IGBT モジュールは、産業用途のみならず、車両用途へも適用できる仕様として

図 1 3.3 kV 1.2 kA IGBT モジュールの外観

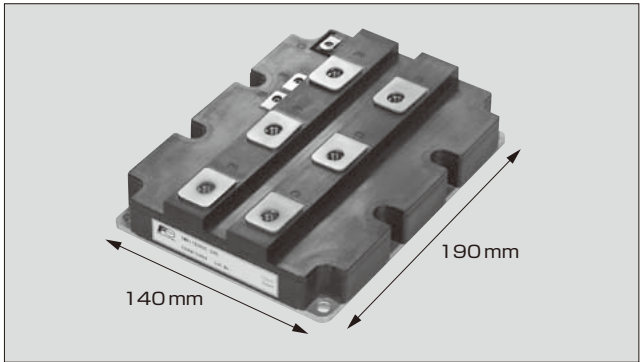


表 1 3.3 kV IGBT モジュールの目標仕様 (1.5 kA、0.8 kA は開発中)

項 目		記 号	1MBI1200UE-330	1MBI1500UE-330	1MBI800UG-330	単 位
コレクタ電流		I_c	1,200	1,500	800	A
パッケージサイズ		—	190×140	190×140	130×140	mm
コレクター-エミッタ間飽和電圧 (補助端子)		$V_{CE(sat)}$	3.15 V (標準値) (150℃, 1,200 A のとき)	3.15 V (標準値) (150℃, 1,500 A のとき)	3.15 V (標準値) (150℃, 800 A のとき)	V
順電圧 (補助端子)		V_F	2.75 V (標準値) (150℃, 1,200 A のとき)	2.75 V (標準値) (150℃, 1,500 A のとき)	2.75 V (標準値) (150℃, 800 A のとき)	V
熱抵抗	IGBT	$R_{th(j-c)}$	8.5	8.0	13.0	K/kW
	FWD		17.0	15.0	25.0	K/kW
絶縁耐圧		V_{iso}	6.0	6.0	6.0	kV

いる。本稿では、最新の 3.3 kV IGBT モジュールの概要、性能について紹介する。

② 3.3 kV IGBT モジュールの仕様

図 1 に 3.3 kV 1.2 kA IGBT モジュールの外観を示す。190 mm × 140 mm のパッケージで、他社モジュールとの互換性を持っている。表 1 に、3.3 kV モジュールの目標仕様を示す。

③ 電気的特性

3.1 IGBT および FWD の特長

(1) IGBT チップの特長

IGBT チップは、飽和電圧 $V_{CE(sat)}$ - ターンオフ損失 E_{off} のトレードオフに優れたトレンチ構造とフィールドストップ (FS) 構造「U シリーズ IGBT」を適用し、3.3 kV 用にセルピッチなどを最適化して低損失化を図った。また、大容量分野においては、高信頼性のため IGBT チップが高いスイッチング破壊耐量〔広い逆バイアス安全動作領域 (RBSOA) や短絡耐量〕を持つことは必須である。広い RBSOA を持たせるため、チップの活性部エッジ領域での電流集中を抑制した構造とした。また、コレクタ側のキャ

リア注入を調整することで、十分な短絡耐量を確保できるようにした。

(2) FWD (Free Wheeling Diode) チップの特長

FWD チップは、①低損失化、②低電流時の逆回復による振動やサージ電圧の抑制、を考慮して、ウェーハ結晶の最適化を図り、深いコレクタ側 n^+ 層濃度プロファイルとした。また、高い逆回復耐量 (高 di/dt 耐量) を持たせるため、カソード側は活性部エッジ領域への電流集中を抑制した構造とした。

3.2 $V_{CE(sat)}$ - I_C 特性および V_F - I_F 特性

図 2 に $V_{CE(sat)}$ - I_C 特性を示す。富士電機の低耐圧クラスのトレンチ IGBT 同様、正の温度特性が得られている。並列接続時の電流アンバランスが緩和され、大電流化に必要な並列接続適用が容易になる。

図 3 に V_F - I_F 特性を示す。FWD の順電圧も定格の半分の電流以上で正の温度特性を持っており、並列接続が容易になる。

3.3 スイッチング特性

図 4 にターンオンとターンオフおよび逆回復スイッチング波形を示す。ノイズがなく、大きなサージ電圧も発生しておらず、問題ない波形である。

図 2 $V_{CE(sat)}$ - I_C 特性

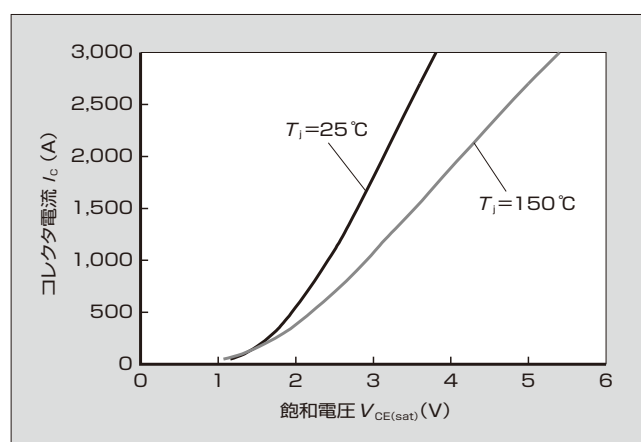
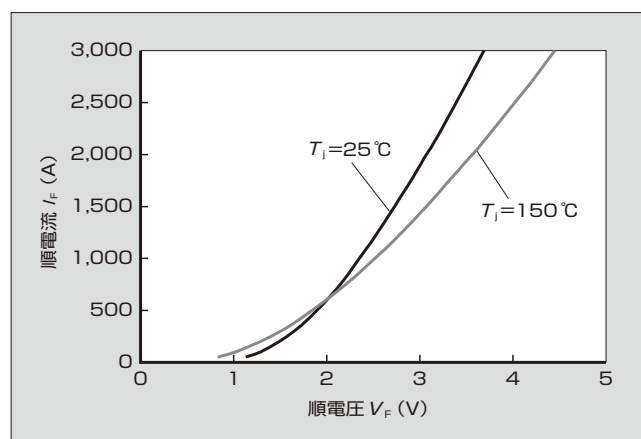


図 3 V_F - I_F 特性



④ パッケージ構造

大容量インバータ装置に使用される大容量モジュールには、高信頼性、高放熱能力 (低熱抵抗) が求められる。また大電流化のために、モジュール内のチップ間の電流アンバランス低減やパッケージ内の発熱低減が重要である。

4.1 パッケージ内部の概略構造

図 5 に 3.3 kV IGBT モジュール内部の概略構造を示す。3.3 kV モジュールでは、絶縁基板の放熱能力向上のため、

図 4 スイッチング波形

($V_{CC} = 1,800$ V, $I_C = 1,200$ A, $T_J = 150^\circ$ C)

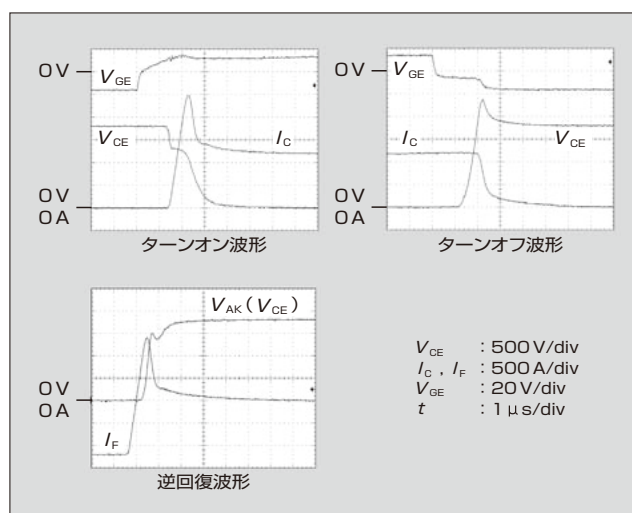


図5 3.3 kV IGBT モジュールの内部の概略構造

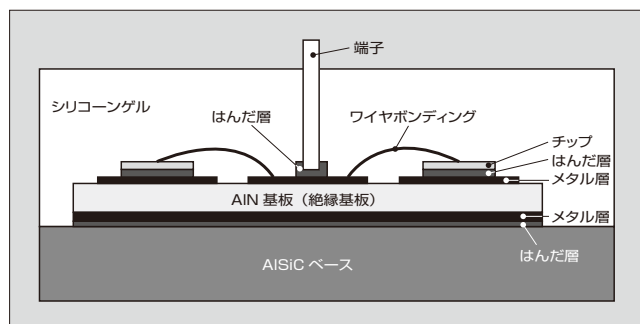
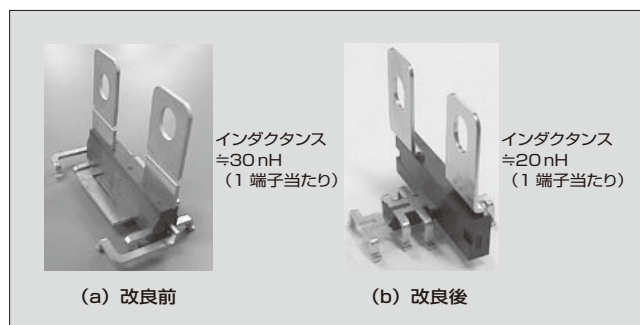


図6 改良前と改良後の主端子部



低耐压モジュールで一般に採用されているアルミナや窒化けい素より熱伝導率が2.5～8倍高いAIN基板を採用した。その結果、表1に示す低熱抵抗を実現した。

ベース材料は、低耐压モジュールでは一般に銅（Cu）ベースが採用されている。3.3 kV IGBT モジュールでは、高い信頼性を確保するために、AISiCベースを採用した。AISiCはAlとSiCの複合材料であり、熱膨張率がAIN基板に近いため、Cuベースに比べ、ヒートサイクル寿命やパワーサイクル寿命が数倍向上する。

4.2 主端子構造の改良

主端子の設計では、次の3点が重要である。

- (a) 内部インダクタンスの低減
- (b) 絶縁基板間の電流アンバランス低減
- (c) 絶縁基板への接続部の応力緩和（ヒートサイクルやパワーサイクルの寿命向上につながる）

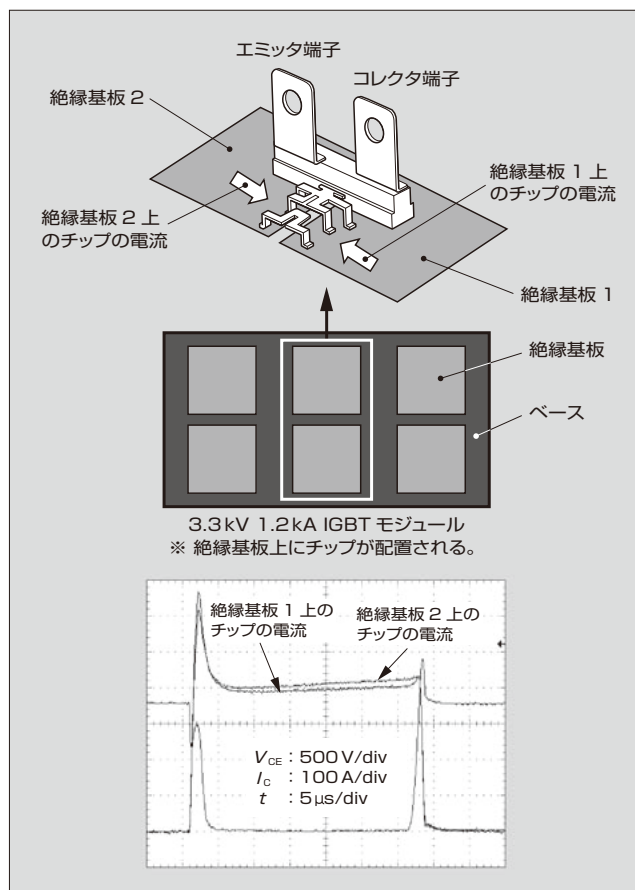
今回、主端子をIGBTハイパワーモジュールと共通の最新構造に変更した。図6に改良前と改良後の主端子部を示す。

(1) 内部インダクタンスの低減

主端子の足の長さを最短にするとともに、コレクタ用の足とエミッタ用の足の通電部分を上下に配線し、磁界の相互作用を積極的に活用することで配線インダクタンスを低減させた。

測定の結果、内部インダクタンスを従来端子の30 nHから20 nHへ低減した。内部インダクタンス L は、スイッチング時の電流変化 di/dt により、端子接続部とチップ間に、 $\Delta V = L \cdot di/dt$ の電圧が発生するので、内部インダクタンス低減はチップへの過電圧低減となる。

図7 絶縁基板間の電流分担測定結果



(2) 絶縁基板間の電流アンバランス低減

絶縁基板はモジュールの主端子配置から、エミッタ端子直下に位置するものとコレクタ端子直下に位置するものとに分かれ、それらを最短配線で並列接続しているため、絶縁基板間で電流の不均一が生じやすい構造である。エミッタ端子およびコレクタ端子内部の電流経路を分析し、均等電流になるように設計した。

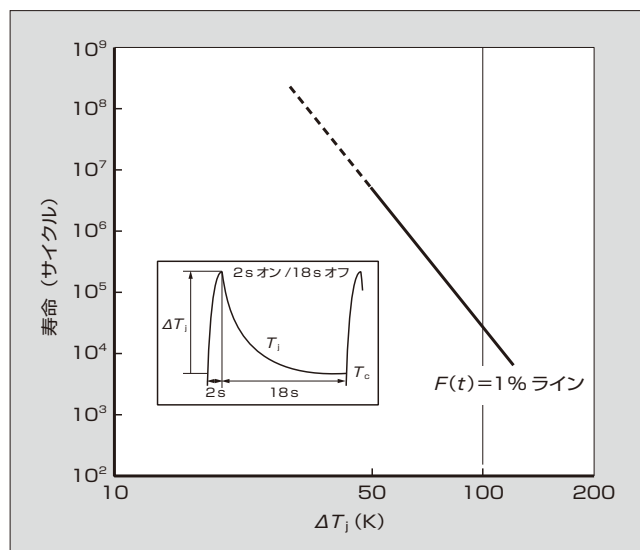
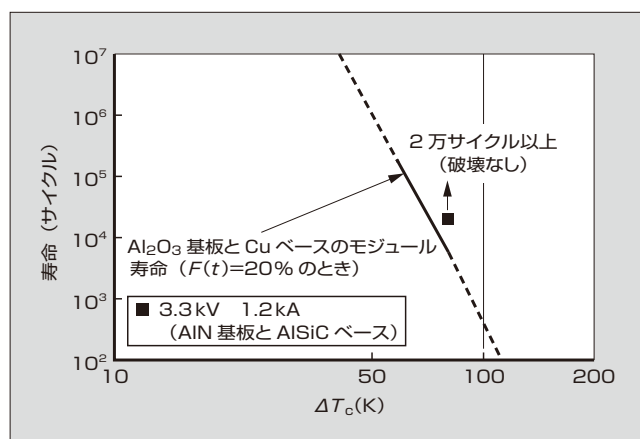
図7に絶縁基板間の電流分担を測定した波形を示す。測定の結果、絶縁基板間の電流分担は良好であった。

(3) 絶縁基板への接続部の応力緩和

絶縁基板への接続部の応力緩和のため、主端子部材は熱処理の最適化により軟らかくしている。また、主端子は端子ケースと一体成形し、主端子への応力発生を抑制している。

⑤ パワーサイクル耐量の確保

高耐压モジュールは、その用途から高信頼性が要求される。市場が重要視する信頼性には、パワーサイクル耐量がある。パワーサイクル試験（断続通電試験）は、IGBTモジュールを放熱フィンに固定した状態で通電・遮断の電気的負荷を与え、IGBTチップの接合温度 T_j を上昇・下降させることにより熱ストレスを発生させ、熱ストレスで破壊するまで行う。パワーサイクル試験には、接合温度を比較的短時間の周期で上昇・下降させる ΔT_j パワーサイク

図8 ΔT_j パワーサイクル試験結果図9 ΔT_c パワーサイクル試験結果

ル試験と、長時間の周期でケース温度 T_c を所定の温度まで上下させる ΔT_c パワーサイクル試験がある。

5.1 ΔT_j パワーサイクル評価結果

富士電機では、IGBT モジュールにおけるパワーサイクル試験後のモジュール解析から、 ΔT_j パワーサイクル耐量はチップ下のはんだとアルミニウムワイヤ接合部の寿命で決まることを確認している⁽³⁾。

図8に3.3 kV モジュールの ΔT_j パワーサイクル試験結果を示す。3.3 kV モジュールは、1.2 kV および1.7 kV 耐圧のIGBT ハイパワーモジュールと同様に、チップ下のはんだに高剛性材料のSn-Ag はんだを適用し、また絶縁基板間電流を均等化したことにより、1.2 kV および1.7 kV 耐圧のIGBT ハイパワーモジュールと同等の ΔT_j パワーサイクル試験結果を確認した。

5.2 ΔT_c パワーサイクル試験結果

図9に示すように $\Delta T_c = 80$ K の条件で、2万サイクル以上の実力を確認した。3.3 kV モジュールは、AlSiC ベースを適用しているのて、Cu ベースの場合に対して3倍以

上の ΔT_c パワーサイクル耐量を持つ。

6 製品ラインアップ

現在、3.3 kV 1.2 kA IGBT モジュールと同じパッケージ外形 (190 mm × 140 mm) で、搭載する IGBT および FWD のチップサイズを大きくした 3.3 kV 1.5 kA IGBT モジュールと、130 mm × 140 mm パッケージ外形の 3.3 kV 800 A IGBT モジュールも開発中である。各 3.3 kV IGBT モジュールの目標仕様は表1に示した。

7 あとがき

今回、パッケージに IGBT ハイパワーモジュールを適用した 3.3 kV 1.2 kA IGBT モジュールを開発した。改良前に比べ、内部インダクタンスを 33% 低減し、絶縁基板間の電流均一化も良好である。このモジュールでパワーサイクル試験を実施し、十分な耐量を持つことを確認した。3.3 kV 1.2 kA IGBT モジュールは、2010 年製品化の予定である。

参考文献

- (1) 古閑 丈晴ほか. 3.3 kV IGBTモジュール. 富士時報. 2007, vol.80, no.6, p.397-401.
- (2) 西村 孝司ほか. IGBTハイパワーモジュール. 富士時報. 2008, vol.81, no.6, p.390-394.
- (3) Morozumi, A. et al. Reliability of Power Cycling for IGBT Power Semiconductor Module. Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Cof. 36th. 2001, p.1912-1918.



古閑 丈晴

パワー半導体デバイスの開発・設計に従事。現在、富士電機システムズ株式会社半導体事業本部半導体統括部モジュール開発部。電気学会会員。



有田 康彦

パワー半導体デバイスの開発・設計に従事。現在、富士電機システムズ株式会社半導体事業本部半導体統括部モジュール開発部。



小林 孝敏

IGBT モジュールの構造開発・設計に従事。現在、富士電機システムズ株式会社半導体事業本部半導体統括部パッケージ設計・実装技術部。



＊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。