

# 3.3 kV IGBT モジュール

古閑 文晴 (こが たけはる)

柿木 秀昭 (かきき ひであき)

小林 孝敏 (こぼやし たかとし)

特集

## ① まえがき

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールは、その低損失性、駆動回路構成の容易さ、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 モジュールへと変遷してきており、大容量インバータやコンバータなどに広く応用され、3.3kV 以上の高耐圧・大容量 IGBT モジュールの市場ニーズは大いに拡大している。

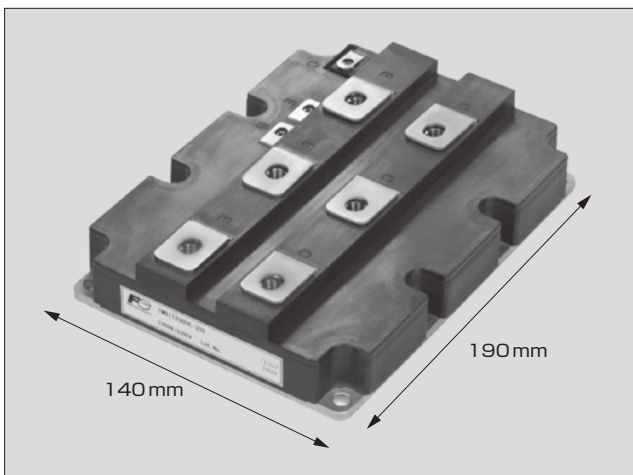
富士電機は、これまで 1.2kV 耐圧および 1.7kV 耐圧クラスの大容量モジュールの開発を行ってきた。今回、最新のチップおよびパッケージ設計・製造技術を 3.3kV 耐圧クラスまで発展させて、性能に優れた 3.3kV 耐圧、1.2kA 電流定格を持つ IGBT モジュールを開発した。

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

## ② 3.3kV IGBT モジュールの仕様

図 1 に 3.3kV 1.2kA モジュールの外観を示す。190 ×

図 1 3.3kV IGBT モジュールの外観



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。

3.3kV IGBT モジュールは、産業用ドライブシステムや電鉄駆動用などの大容量装置に適用されるため、高信頼性が要求される。また、低損失化、大電流化、高動作温度化などの性能向上も要望されている。

表 1 に、3.3kV 1.2kA モジュールの最大定格および特性の主な仕様を示す。

これまで、3.3kV モジュール動作温度としては最大 125℃であったが、応用装置側からインバータのパワーアップのため 150℃まで拡大する要望が強い。

表 1 の高温仕様は、接合温度 150℃での特性である。

## ③ 電気的特性

### 3.1 IGBT チップおよび FWD チップの特徴

#### (1) IGBT チップ

IGBT チップは、飽和電圧 ( $V_{CE(sat)}$ ) - ターンオフ損失 ( $E_{off}$ ) 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 (富士電機「U シリーズ」IGBT<sup>(2)</sup>) を適用し、3.3kV 用にセルピッチなどを最適化するなどして低損失化を図った。

また、チップが高いスイッチング破壊耐量 [広い RBSOA (Reverse Bias Safe Operation Area) や十分な短絡耐量] 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最適化することで、十分な短絡耐量を確保できるようにした。

#### (2) FWD チップ

FWD (Free Wheeling Diode) チップは、①低損失化、②低電流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、深いカソード側 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、アノード側は、活性部エッジ領域への電流集中を抑制した構造とした。



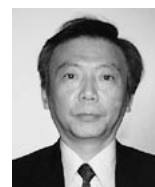
古閑 文晴

パワー半導体デバイスの開発・設計に従事。現在、富士電機デバイステクノロジー株式会社半導体事業本部産業事業部技術部。電気学会会員。



柿木 秀昭

パワー半導体デバイスの開発に従事。現在、富士電機デバイステクノロジー株式会社半導体事業本部産業事業部技術部。



小林 孝敏

IGBT モジュールの構造開発・設計に従事。現在、富士電機デバイステクノロジー株式会社半導体事業本部産業事業部技術部。

表 1 最大定格および特性 (型式: 1MBI1200UE-330)

(a) 最大定格 (指定ない場合は,  $T_j = T_c = 25^\circ\text{C}$ )

項目	記号	条件		最大定格	単位
コレクタ-エミッタ間電圧	$V_{CES}$	$V_{GE} = 0\text{V}$		3,300	V
ゲート-エミッタ間電圧	$V_{GES}$	—		$\pm 20$	V
コレクタ電流	$I_C$ (DC)	連続	$T_c = 80^\circ\text{C}$	1,200	A
	$I_C$ (pulse)	1 ms	$T_c = 80^\circ\text{C}$	2,400	
最大損失	$P_C$	1素子		14.7	kW
最大接合温度	$T_{jmax}$	—		150	$^\circ\text{C}$
保存温度	$T_{stg}$	—		-40~+125	$^\circ\text{C}$
絶縁耐圧	$V_{iso}$	AC: 1 min		6.0	kV
部分放電消滅電圧	$V_{PDoff}$	AC 50Hz, $Q \leq 10\text{pC}$		4.1	kV

(b) 電気的特性 (指定ない場合は,  $T_j = T_c = 25^\circ\text{C}$ )

項目	記号	条件		最小	標準	最大	単位
コレクタ-エミッタ間漏れ電流	$I_{CES}$	$V_{GE} = 0\text{V}, V_{CE} = 3,300\text{V}$		—	—	5.0	mA
ゲート-エミッタ間漏れ電流	$I_{GES}$	$V_{GE} = \pm 20\text{V}$		—	—	0.4	$\mu\text{A}$
ゲート-エミッタ間しきい値電圧	$V_{GE(th)}$	$V_{CE} = 20\text{V}, I_C = 1.2\text{A}$		5.5	6.5	8.5	V
コレクタ-エミッタ間飽和電圧 (補助端子)	$V_{CE(sat)}$	$V_{GE} = +15\text{V}$ $I_C = 1,200\text{A}$	$T_j = 25^\circ\text{C}$	—	2.60	—	V
			$T_j = 150^\circ\text{C}$	—	3.15	3.6	
入力容量	$C_{ies}$	$V_{GE} = 0\text{V}, V_{CE} = 10\text{V}, f = 1\text{MHz}$		—	240	—	nF
順電圧 (補助端子)	$V_F$	$I_F = 1,200\text{A}$	$T_j = 25^\circ\text{C}$	—	2.70	—	V
			$T_j = 150^\circ\text{C}$	—	2.75	3.10	

(c) 熱的特性

項目	記号	条件		最小	標準	最大	単位
熱抵抗	$R_{th(j-c)}$	IGBT		—	—	8.5	$^\circ\text{C}/\text{kW}$
		FWD		—	—	17.0	

### 3.2 コレクタ-エミッタ間電圧

図 2 に, 3.3kV IGBT モジュールのコレクタ-エミッタ間電圧 ( $V_{CES}$ ), コレクタ-エミッタ間漏れ電流 ( $I_{CES}$ ) の温度依存性を示す。

3.3kV IGBT および FWD チップのウェーハ結晶およびエッジ構造の最適化により,  $-40 \sim +150^\circ\text{C}$  の温度領域で, 3.3kV 以上の十分な耐圧を持っている。高温になると, チップ内部のキャリア増大により,  $I_{CES}$  は指数関数的に増大する。 $I_{CES}$  の増大は, モジュールの熱暴走や損失増加につながるため, 高温での  $I_{CES}$  低減は重要である。デバイス設計において, IGBT はライフタイムコントロールなし, FWD はライフタイムコントロールを極力抑えることで, 高温での  $I_{CES}$  を大幅に低減した。 $I_{CES}$  は, 他社の従来 3.3kV モジュールと比べても低いレベルにあり,  $150^\circ\text{C}$ , 3.3kV の印加電圧条件下でも安定している。

また, パッケージの構成部材も  $-40 \sim +150^\circ\text{C}$  の動作温度で, 十分な信頼性を確保できる材料を選定した。

### 3.3 $V_{CE(sat)} - I_C$ 特性および $V_F - I_F$ 特性

図 3 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

要な並列接続が容易になる。

図 4 に,  $V_F - I_F$  特性を示す。FWD の順電圧も IGBT と同様に正の温度特性を持っており, 並列接続が容易になる。

### 3.4 スイッチング特性および破壊耐量

図 5 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。

高耐圧モジュールは, その適用用途から高い信頼性が求められ, 高スイッチング破壊耐量を持つことが必須である。図 6 に, IGBT の大電流ターンオフ波形を示す。接合温度は  $150^\circ\text{C}$  で実施し, 定格の 2.5 倍以上の高い電流遮断能力を持っている。

高耐圧 IGBT の短絡において, 飽和電圧が高すぎると, 短絡開始直後のコレクタ電流により破壊する可能性がある。この現象は, 短絡モードで裏面からのホール注入が少ないとコレクタ側の電界が上昇し, アバランシェ電流が発生することに起因すると推測される。図 7 に, IGBT チップで, 飽和電圧と短絡耐量の関係を測定した結果を示す。短絡耐量試験は, 一般的には短絡時間を延ばす試験が用いられるが, 短絡開始直後の破壊を考察する場合, ゲート電圧を少しずつ上昇させて, 短絡ピーク電流を増やして破壊耐量との相関に着目した。同図から, 低飽和電圧ほど高い  $+V_{GE}$  の条件下でも破壊せず, 短絡に強いことが分かる。通常,

応用装置の $+V_{GE}$ は、15V程度であるが、短絡時の $V_{CE}$ 電圧やコレクタ電流に誘導され、20Vくらいまでゲート電圧が高くなる場合がある。ゲート電圧上昇が起きてても十分な短絡耐量を持つように考慮して、飽和電圧を最適化した。

図8に、IGBTモジュールでの短絡耐量のスイッチング波形を示す。接合温度条件は150℃で実施し、短絡耐量が10 $\mu$ s以上の目標仕様を満足する。

図9に、ダイオードの大電流（定格の2.5倍）かつ高 $di/dt$ 条件下での逆回復スイッチング波形を示す。接合温

度条件は150℃で実施した。推奨ゲート抵抗（1.6 $\Omega$ ）条件では、 $-di/dt = 4,000$  A/ $\mu$ sであるが、ゲート抵抗0 $\Omega$ での $-di/dt = 7,000$  A/ $\mu$ sでも破壊しない。ピークパワー

図2 コレクタ-エミッタ間電圧と漏れ電流の温度依存性

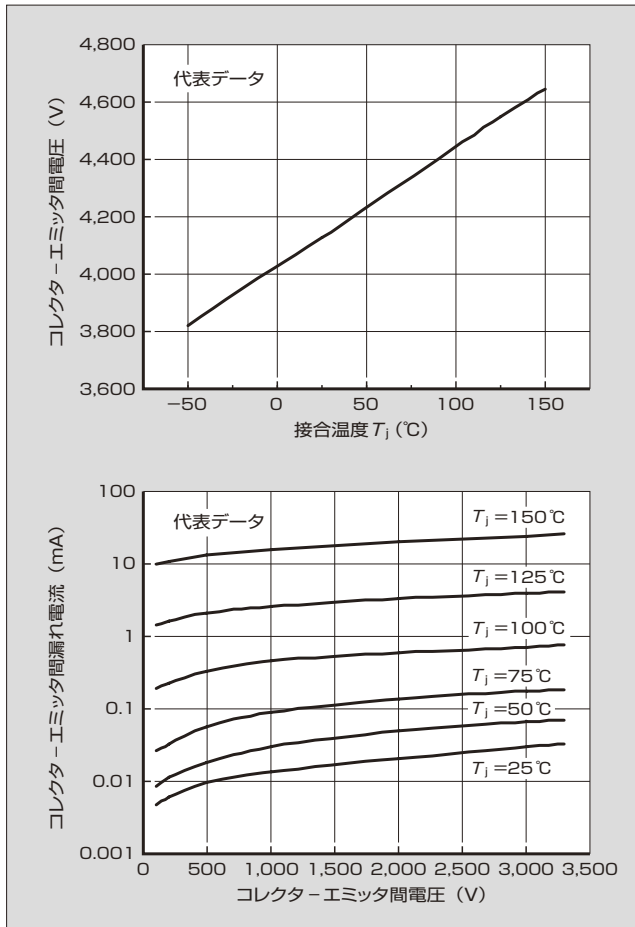


図3  $V_{CE(sat)} - I_C$  特性

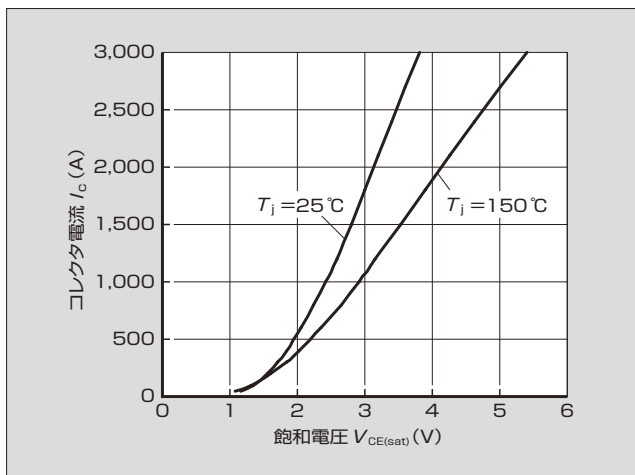


図4  $V_F - I_F$  特性

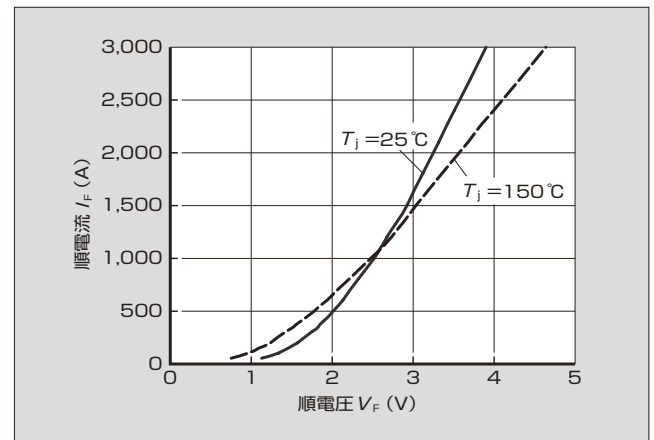


図5 スwitching波形 ( $V_{CC} = 1,800$  V,  $I_C = 1,200$  A,  $T_j = 150^\circ$  C)

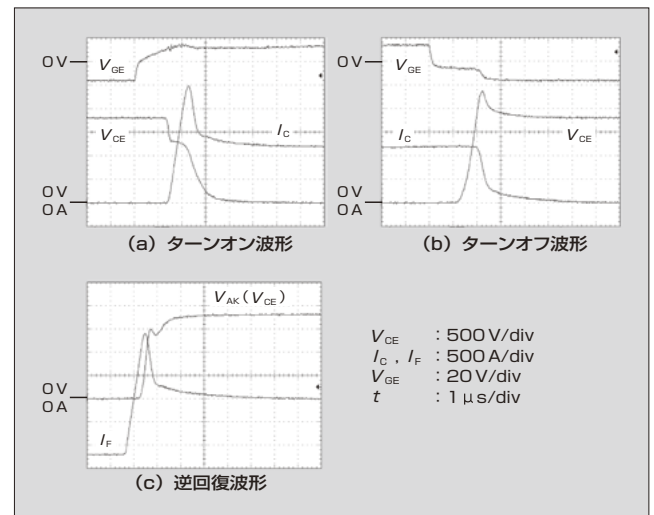


図6 大電流ターンオフ波形 ( $V_{CC} = 2,300$  V,  $I_C = 3,000$  A,  $T_j = 150^\circ$  C)

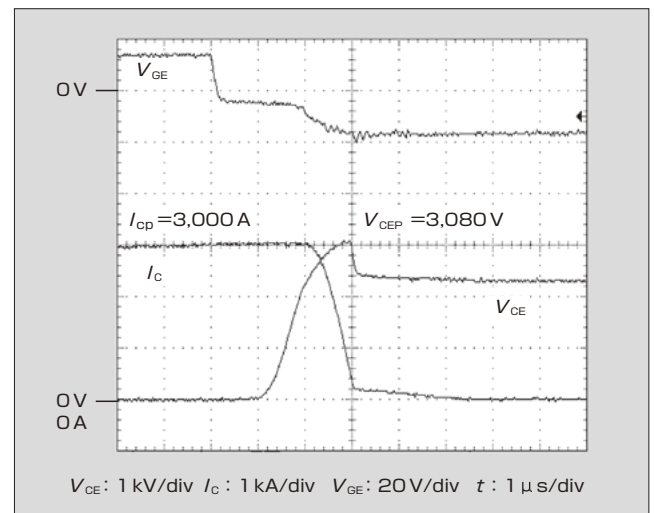


図7 短絡耐量の飽和電圧依存性 (チップ)

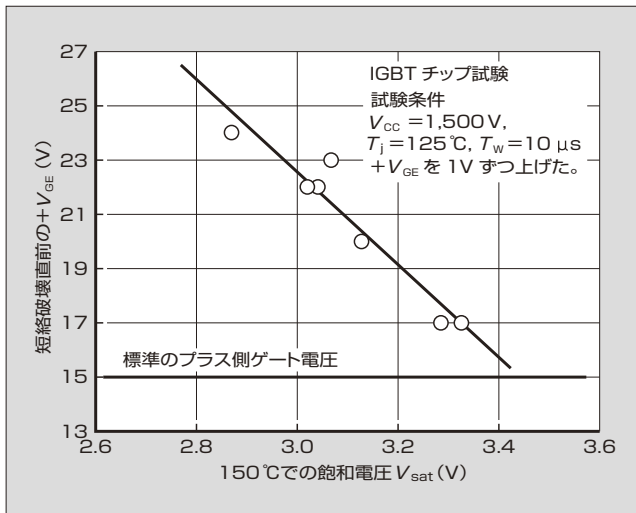
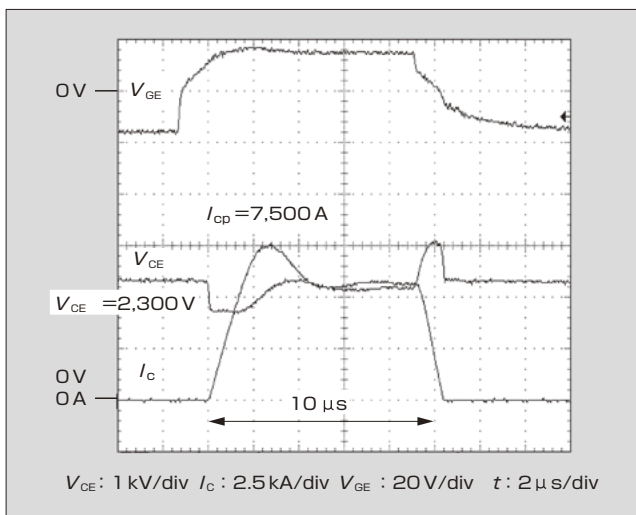


図8 短絡波形 ( $V_{CC} = 2,300V$ ,  $T_j = 150^\circ C$ ,  $t_w = 10\mu s$ )



で見ても、推奨ゲート抵抗時の2.5倍に耐えている。

4 パッケージ設計・アセンブリ技術

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、大電流化のためには、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。

図10に、3.3kV IGBT モジュール内部の概略構造を示す。

4.1 高熱伝導の AlN 絶縁基板採用

3.3kV IGBT モジュールは、1.2kV や 1.7kV 大容量モジュールと同様に絶縁基板を分割する構造を採用している。絶縁基板を分割することにより、モジュールの信頼性にとって非常に重要なヒートサイクル寿命やパワーサイクル寿命を確保できる。また、発熱の干渉を抑制でき、絶縁基板ごとの良否判定が可能のため製品製造効率の向上も図れる。

3.3kV モジュールは、6kV 以上の絶縁耐圧が必要なた

図9 大電流、高 di/dt 条件での逆回復波形 ( $V_{CC} = 2,300V$ ,  $I_F = 3,000A$ ,  $R_G = 0\Omega$ ,  $T_j = 150^\circ C$ )

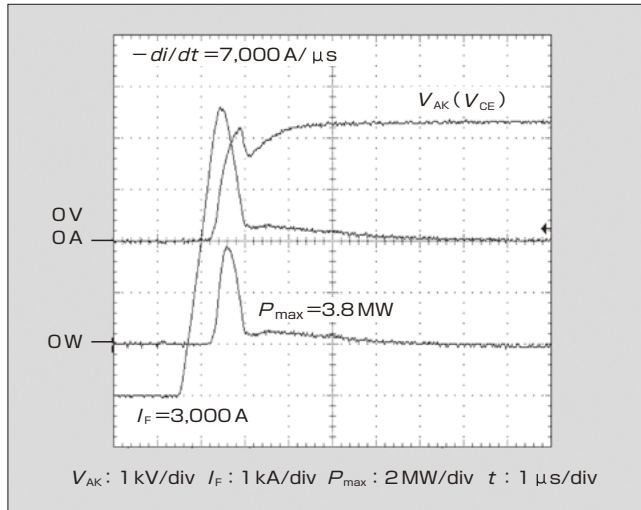
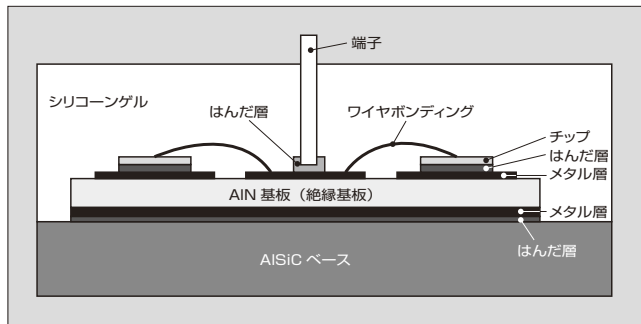


図10 3.3kV IGBT モジュール内部の概略構造



め、低耐圧モジュールに比べかなりの絶縁基板厚さが必要となる。絶縁基板の放熱能力向上のため、3.3kV モジュールでは、低耐圧モジュールで一般に採用されている  $Al_2O_3$  (アルミナ) や  $Si_3N_4$  (窒化けい素) より熱伝導率が 2.5 ~ 8 倍高い AlN (窒化アルミニウム) 基板を採用した。AlN 基板上の IGBT および FWD チップは発熱の干渉が少なくなるように配置した。それらの結果、表 1 に示す低熱抵抗を実現した。

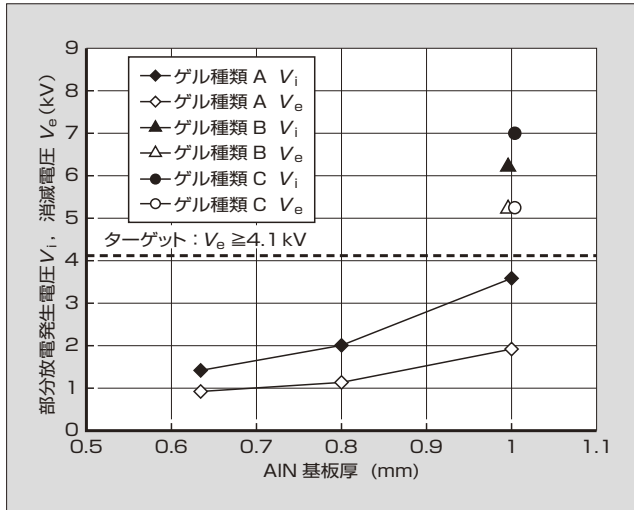
4.2 AISiC ベース採用による高信頼性

ベース材料は、低耐圧モジュールでは一般に Cu ベースが採用されているが、3.3kV 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 AlN 基板に近いため、Cu ベースの場合に比べヒートサイクル寿命やパワーサイクル寿命は数倍向上する。

4.3 主端子構造の最適化

主端子を設計するうえで、①絶縁基板間の電流アンバランスの低減、②内部インダクタンスの低減、③主端子発熱温度の抑制、④絶縁基板への接続部の応力緩和(ヒートサイクル寿命やパワーサイクル寿命向上につながる)が重要である。これらの課題は、トレードオフの関係にあるもの

図 11 3.3kV モジュールの部分放電測定結果  
(パラメータ：シリコンゲル種類および AlN 基板厚さ)



もあり、1.2kV や 1.7kV 大容量モジュール開発での知見やシミュレーション技術により、主端子形状の最適化を行った。

4.4 高い絶縁性能の確保

3.3kV モジュールのパッケージの絶縁能力として、応用装置サイドから、① AC 5.7kV 1分間の絶縁耐圧、② 高い部分放電耐量（部分放電消滅電圧目標 4.1kV 以上）の要求がある。

部分放電とは、電極間に電圧を加えたとき、その間の絶縁物中で部分的に発生する放電をいう。パッケージに使用される絶縁材料は、絶縁抵抗が非常に高く電流をほとんど流さないが、絶縁物中に微小な空げきや欠陥があると、その部分に電界が集中し、微弱な放電が発生する。これにより、絶縁物の侵食、発生熱による炭化物生成などで絶縁劣化が始まり、長時間経過後に絶縁破壊に至ることがある。

パッケージの絶縁設計は、IEC (International Electrotechnical Commission) 規格, EN (European Norm) 規格などに基づいて、①絶縁に優れた構成部材の採用、②パッケージ外面での十分な絶縁距離の確保、③パッケージ内面での十分な絶縁距離の確保および導電部と絶縁部の形状の最適化を行った。

特に、絶縁に優れた構成部材の選択にあたり、絶縁樹脂(シリコンゲル)および AlN 基板厚さが重要である。シリコンゲルは、材料メーカーの協力の下、改良を加えた。図 11 に、シリコンゲルの種類と AlN 基板厚さを変えて、同一条件下で部分放電を測定した結果を示す。AlN 基板を厚くしてゲル界面の電位分担を低くすることと、シリコンゲルの密着性を改善することにより、目標以上の絶縁性能を達成できた。

5 あとがき

電気的特性、熱的特性に優れた 3.3kV IGBT モジュールを開発した。現在、ヒートサイクル寿命やパワーサイクル寿命などの信頼性確認を行っており、製品化の予定である。この IGBT モジュールは、大容量インバータ装置の性能向上に大きく貢献できるものと考えている。

今後も素子の高性能化・高信頼化に取り組み、ニーズに応えた製品開発を行っていく所存である。

参考文献

- (1) 西村孝司ほか、産業用大容量 IGBT モジュール、富士時報、vol.78, no.4, 2005, p.264-268.
- (2) 宮下秀仁、U シリーズ IGBT モジュール、富士時報、vol.77, no.5, 2004, p.313-316.
- (3) 古閑丈晴ほか、高耐圧 IGBT チップの負荷短絡耐量、平成 15 年電気学会全国大会、vol.4, 2003, p.13.