パワーモジュールパッケージング技術の動向と課題

加柴 良裕*

Trend and Challenges of Packaging Technologies for Power Modules

Yoshihiro KASHIBA*

* 三菱電機株式会社 (〒 661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町 8-1-1)

* Mitsubishi Electric Corporation (8-1-1, Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki, Hyogo 661-8661)

1. まえがき

パワーエレクトロニクス分野においては、地球温暖化防止に向けて、省資源・省エネルギーの取り組みがより重要となっている。したがって、汎用インバータ、ハイブリッドカー、風力発電などのパワエレ機器においては、電気的特性だけでなく耐環境性などに対する性能要求がより高まっている。それに伴い、パワーモジュールにおいては、電流制御や放熱、絶縁などの基本性能と共に、高温下での使用や信頼性に対する改善が求められている。

このような市場要求に対して、パワーモジュールの構造や動向に関して述べるとともに、より高い耐熱性や信頼性を確保するための構造・プロセスに関して紹介する。

2. パワーモジュールの動向

パワーモジュールに用いられる IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) は高耐圧かつ大電流が流せるパワーデバイスであり、IGBT とダイオードを複数組み合わせる回路を形成したパワーモジュールは、エアコンなどの民生品か

ら電鉄用途まで幅広くパワエレ機器に用いられている。

図 1 にパワーモジュールのキーデバイスである IGBT の性能指数である FOM (Figure of Merit) の値を、第 1 世代を基準として各世代の改善状況とそのためのキーテクノロジーを示す¹⁾。FOM はパワーデバイスに流せる定格電流密度を導通時の電圧 (オン電圧) とスイッチング時の電力損失で割ったものである。第 1 世代から第 3 世代のセル構造はプレーナ構造で、パターンの微細化が進められた。第 4 世代でセル構造を溝 (トレンチ) を形成するトレンチ構造とし、セルサイズを大幅に縮小させた。第 5 世代では、濃度プロファイルを進化させたキャリア蓄積トレンチバイポーラートランジスタ構造とした。さらに、第 6 世代では、トレンチ間隔の狭ピッチ化および薄ウエハ化が行われた。このような構造の改善によってデバイス性能は大幅に向上した。具体的には、パッケージの放熱設計に重要となるパワーチップの発熱 (電力損失) は第 6 世代においては第 1 世代に比べて 1/4 のとなっている²⁾。また、SiC デバイスの実現により、電力損失はさらに大幅に低減できると思われる。これらのパワーチップの低損失化はパワーモジュールの小型化に貢献する。

パワーチップを複数搭載したパワーモジュールは、その構造で分けると、図 2 に示すように、大電流や高電圧の主に産業用途に用いられるゲル封止型と比較的小電流の主に家電用途に用いられるモールド樹脂封止型に分けられる。

ゲル封止型パワーモジュールは小型化、大容量化、高放熱化が進んでいる。この中でも、高放熱化の動きは構造の大幅な変更を伴って進んでおり、両面冷却³⁾、直接水冷⁴⁾、両面直接水冷⁵⁾などの新構造が開発されている。とくに、HEV 車などに用いられる水冷ヒートシンク一体型モジュールは、モジュールとヒートシンクを接続するための熱伝導率の低いグリースを排除することができるため、大幅な放熱特性改善が図れる。一方、モールド樹脂封止型パッケージは 10 年間で約 1/4 のサイズとなっているが、これはデバイスの電力損失が 1/2 になるとともに、パッケージの熱抵抗が 1/2 となったためである。熱抵抗低減には樹脂絶縁構

図 1. デバイス構造の進化による IGBT 性能向上

図2. パワーモジュールの断面構造

造の変更⁶⁾やセラミック基板の採用などが有効である。

パワーチップの低損失化やパッケージの高放熱化に伴ってパワーモジュールのパワー密度の向上は図3に示すように年々進んでいるが、進化の先には損失を大幅低減できるSiCデバイスがあり、一段と小型化・高温動作化が進むと考えられる。

3. 接合部の高耐熱化・高信頼化

近年、パワーモジュールに対する要求として、より厳しい環境下、たとえば高温となるエンジンルーム内での使用や長寿命化などがあり、これに対して、耐熱・信頼性設計が益々重要となっている。パワーモジュールでは、デバイスの動作に伴う熱によってパワーチップ近傍やパワーモジュール全体の温度が変化することは避けられない。しかし、パワーモジュールは、電気回路形成、放熱、電気絶縁の機能を発揮するため、図2に示したように種々の材料を複合化した構造をとっている。このような構造において、Si半導体の線膨張係数 $2.3 \times 10^{-6}/\text{K}$ に対しAlは $23 \times 10^{-6}/\text{K}$ 、絶縁基板は約 $10 \times 10^{-6}/\text{K}$ 、Cuは $17 \times 10^{-6}/\text{K}$ とそれぞれ極めて差が大きいことから、熱応力による疲労破壊に対する信頼性設計が重要な課題となる。また、500 K程度の高温下での使用を考えた場合、ケースやゲルなどの有機材料やはんだ材料自身が劣化する危険性がある。ここでは、パワーモジュールの高耐熱化・高信頼化にとって重要となる接合部に関して述べる。

チップ上の接合には主にAlワイヤボンディング技術が用いられる。ワイヤボンド部は超音波接合によってパワーチップ上のAl電極とAlワイヤを直接金属接合しているが、パワーチップの動作パターンに対応して比較的頻繁に温度変化が生じる。この環境を加速評価する方法がパワーサイ

図3. パワーモジュールの小型化の進展

クル試験である。たとえば、 $\Delta T_j = 80 \text{ K}$ において、ワイヤボンド部は約10万サイクルの寿命を有している。この寿命は温度スイング量によって大きく影響される。なお、このパワーサイクル寿命はワイヤの長さ、本数、配置、パワーチップの最高温度によっても影響を受ける。

一方、最近ではAlワイヤに替えてCuワイヤを用いる長寿命化方法も開発されている⁷⁾。CuはAlに比べると低熱膨張である、高電気伝導度である、というメリットを有するが、剛性が高いためチップのダメージを防止する必要がある。

また、 $\Delta T_j = 80 \text{ K}$ 時のゲル封止構造のパワーサイクル寿命を1としてゲル封止構造とモールド樹脂封止構造の寿命を相対比較した場合、モールド樹脂封止構造ではゲル封止構造に比べ3倍程度長寿命となる。

さらに、パワーサイクルを向上させる方法としては配線となるCuリードを直接チップ表面のメタライズ層にはんだ付する構造がとられる⁸⁾。このような配線構造とモールド樹脂による封止構造を合わせて適用することによって、パワーサイクル寿命はゲル封止のワイヤボンディング構造に比べると10倍程度まで伸びる。Cuを接合する構造においては、通電時の発熱においてデバイス上の温度分布が広がりかつ平坦化するため、亀裂の進行が抑制できるものと考えられる⁹⁾。

また、デバイスの動作温度が高くなった場合には、融点の低いはんだ材は限界を迎える。すなわち、耐熱性の高い材料で接合部を構成することが必要となる。図4はCu板(厚さ0.2 mm)とSiの接合に薄膜を用いた場合の、SAT (Scanning Acoustic Tomograph) による信頼性評価結果である¹⁰⁾。接合部にはCu板側に $4 \mu\text{m}$ のSnを、Si側には $2 \mu\text{m}$ のCuと $4 \mu\text{m}$ のSnをそれぞれ蒸着して供給した。温度サイクル条件は313~448 K ($\Delta T = 135 \text{ K}$)、保持時間は各2 sである。また、比較のため、高融点のはんだであるSn-5Sbを接合材として使用した場合の結果を示す。薄膜接合部は、573 Kで300 s保持することによって金属間化合物層となり融点が増加することが明らかとなっている。接合部の亀裂

は SAT 像で白く表れるが、1,000 サイクルでの亀裂の進展状況を比較すると、はんだ接合部では 50% 以上となっている。これに対して、薄膜接合部では一部亀裂が見られるものの、ほぼ健全な状態を維持できている。また、接合界面の断面観察によると、はんだ接合部は、はんだ内で破壊が進行しているのに対して、薄膜の場合は、接合部に金属間化合物が形成された結果、デバイス側の Al メタライズ層に進展しており、より強度の低い材料が信頼性の律則となることが明らかとなっている。

チップ上以外で課題となる接合部はチップ下と絶縁基板下の 2 箇所のはんだ付部となる。いずれの箇所においても接合材料間の熱膨張差に起因する熱応力による破壊であり、その寿命は、はんだのひずみ量と強い相関があることが知られている。たとえば、絶縁基板下のはんだは 1 周期 60 分程度の比較的長い時間をかけて 233~398 K 間の温度変化を与える温度サイクル試験によって亀裂が周辺部から進展し、最終的には剥離に至る。また、亀裂進展の過程でパワーチップからの放熱経路が狭められる結果、パワーチップの熱破壊が生じるため、これを防止できるよう信頼性設計を行う必要がある。

はんだひずみ量を低減させるには、低熱膨張材料や低剛性材料でモジュールを構成することで実現はできる。しかし、熱抵抗など他の特性への影響が大きくなるため、はんだ厚さを制御することによって、信頼性を確保することが基本となる¹¹⁾。ただし、一定のはんだ量を供給したとしても Cu ベース板に対して絶縁基板が傾くことによって、はんだ厚さの薄い箇所が形成されると、信頼性はこの箇所で律則される。したがって、はんだ付部全領域で一定以上のはんだ厚さを確保することが重要な管理パラメータである。

さらに、はんだ接合部の耐熱性・信頼性を向上するためには、はんだ材料の機械的特性を改善することが有効である¹²⁾。Sn-3Ag-0.5Cu はんだに融点上昇と機械的特性改善のため Sb 粉末を 7% 添加した材料の信頼性評価結果を図 5 に示す。Si₃N₄ セラミックスの両側に Cu 板を接合したセラ

ミックス基板と、Ni めっきした Al ヒートシンクを各はんだで接合し、233~398 K の温度サイクル試験を行った。図中示すように、250 サイクル後で Sn-3Ag-0.5Cu ではクラックが大きく進展しているのに対して、7.0%Sb 粉末添加 Sn-3Ag-0.5Cu は 1/5 しか亀裂が進展していない。なお、Sb 粉末を添加したはんだの融点は添加なしの場合に比べ 8 K 上昇することも確認されており、材料の改善による耐熱性・信頼性の向上が実証された。

パワーチップ下はんだ付部（ダイボンダ部）の信頼性向上のためにはモールド樹脂封止することが有効である。この構造では、はんだのひずみ量を比較的線膨張係数が大きいモールド樹脂も含めて構造体を形成するため、はんだのひずみ量低減すなわち信頼性の向上が実現できる。

SiC デバイスなど高温で用いることができるデバイス対応のダイボンダ技術としては、Ag 焼結接合などはんだレスでの接合技術も開発されている。Ag 焼結接合の特徴としては 523 K 程度の低温で接合した接合部は Ag の融点までは再溶融しないことであり、耐熱性・信頼性の向上が期待できる。図 6 は 233~448 K の条件にて温度サイクルを 900 サイクル加えた接合部の断面観察の結果である¹³⁾。焼結接合部に大きな劣化は見られず、はんだに対して大幅に耐熱性および信頼性が向上することが確認されている。

また、絶縁基板をヒートシンクと直接ろう付する構造も耐熱性向上や信頼性向上にとって有効な手段となる⁴⁾。

図 5. Sb 粉末添加による温度サイクル寿命の改善 (233K~398K)

図 6. 温度サイクル試験後の断面 (233K~448K, 900 サイクル)

接合部構成	サイクル数		
	0	1000	3000
Cu ₃ Sn + Au-Cu-Sn IMC 接合時間 : 1200 s			
Cu ₃ Sn + Cu 接合時間 : 3000 s			
Sn-5Sb はんだ			

図 4. 薄膜を用いた接合部の信頼性

4. まとめ

温度的に過酷な状態下で使用されるパワーモジュールに関して、ゲル封止構造やモールド樹脂封止構造の動向と耐熱性・信頼性、およびワイヤボンド部やダイボンド部など接合部の違いと耐熱性・信頼性に関して述べた。

パワーモジュールの小型・大容量化や使用用途の拡大に合わせて、信頼性設計は今後さらに重要となるものと思われる。また、パワーチップをより高い温度で動作させるためには、高性能パワーチップの開発と合わせてパッケージの構造設計、接合材料や絶縁材料の開発が必要となる。

さらには、Si デバイスの限界を打破する SiC デバイスの実用化によって、さらにパワーモジュールの用途拡大が進むものと期待される。

(2014.7.7- 受理)

文 献

- 1) 小野山, 他: “トレンチ IGBT の異物管理技術,” 三菱電機技報, Vol. **84**, No. 12, pp. 701–704, 2010
- 2) 加柴良裕, 他: “パワーモジュールの電力損失低減と小型化技術,” 三菱電機技報, Vol. **83**, No. 10, pp. 611–614, 2009
- 3) 坂本善次, 他: “車載用パワーエレクトロニクス製品の紐解きと, 両面放熱パワーモジュールの実装技術,” 溶接学会誌, Vol. **80**, No. 4, pp. 22–26, 2011
- 4) 吉松直樹, 他: “自動車用パワー半導体モジュール “J1 シリーズ” のパッケージ技術,” 三菱電機技報, Vol. **88**, No. 5, pp. 321–324, 2014
- 5) 中津欣也, 他: “環境対応自動車を支える次世代インバータ技術,” 日立評論, Vol. **94**, No. 4, pp. 34–37, 2012

- 6) 佐野 耕, 他: “パワーモジュール用トランスファーマーモールド超小型パッケージの開発,” Microjoining and Assembly Technology in Electronics, Vol. **14**, pp. 327–330, 2008
- 7) A. Ciliox, et al.: “New module generation for higher lifetime,” PCIM 2010, pp. 238–243
- 8) 中島 泰, 他: “リード接合を用いた大容量樹脂封止型パワーモジュール,” Microjoining and Assembly Technology in Electronics, Vol. **11**, pp. 433–436, 2005
- 9) 菊池正雄, 他: “ダイレクトリード接合型大容量パワーモジュール,” 三菱電機技報, Vol. **84**, No. 4, pp. 232–235, 2011
- 10) T. Fujimoto, et al.: “Bonding of Copper to Silicon Chips using Vapor-Deposited Tin Film,” ECO-MATE2011
- 11) 林 建一, 他: “ワイヤバンプによるはんだ接合部長寿命化技術の開発,” Microjoining and Assembly Technology in Electronics, Vol. **7**, pp. 347–350, 2001
- 12) 福田 敦, 他: “Sb 粉末を添加した Sn-3Ag-0.5Cu はんだの接合信頼性,” Microjoining and Assembly Technology in Electronics, Vol. **20**, pp. 241–246, 2014
- 13) 日野泰成, 他: “高耐熱パワー半導体モジュールパッケージング要素技術,” 三菱電機技報, Vol. **88**, No. 5, pp. 313–316, 2014

著者紹介

加柴良裕 (かしば よしひろ)

1983 年大阪大学大学院工学研究科博士前期課程修了, 同年三菱電機(株)生産技術研究所に入社。2012 年より同社生産技術センター主管技師長および大阪大学大学院工学研究科招へい教授。実装技術開発に従事。博士(工学)。溶接学会, スマートプロセス学会会員。