パワーエレクトロニクスの実装技術

Packaging Technology for Power Electronics

加 柴 良 裕*
Yoshihiro KASHIBA

(Received 9 July 2020, Accepted 17 August 2020)

Key Words: IGBT, SiC, Power Modules, Assembly, Inverter

1. はじめに

冷蔵庫、エアコン、ハイブリッドカー、太陽光発電等、パワーエレクトロニクス（以降、パワエレ）技術を利用した製品は我々の日常生活に深く入り込んでいる。また、このようなパワエレ製品は家庭だけでなくオフィスから産業、インフラ等、幅広い分野で適用拡大が進んでいる。

パワエレとはパワーデバイスをスイッチングすることによって電気を制御して、モータを駆動したり電力を変換したりする技術であり、世界の電力消費を抑え、地球温暖化防止のためにも欠くことのできない技術となっている。とくに近年では、Si 半導体の物性を大幅に凌駕できる化合物半導体の実用化開発が推進されており、革新的な技術として期待されるとともに、その適用が広がっている。これらパワエレ製品を支えている基本技術に回路設計や電気制御技術等があるが、小型・高機能化が進むにつれ重要視されてきたのがパワエレ実装技術である。

本稿では、これからの社会にとってますます重要となっていくパワエレの実装技術に関して現状とその動向について述べてみたい。

2. 実装の階層

エレクトロニクス製品における実装はその形態から4つの階層に分類することができる¹⁾。すなわち、階層Ⅰは半導体デバイス内部の相互接合・接続のための配線技術、階層Ⅱは半導体デバイスや電子部品のアセンブリ技術、階層Ⅲはプリント基板への主にはんだ付による実装技術、階層Ⅳはプリント基板間の配線や筐体組み立て技術である。

パワエレ実装においても実装の階層は同様にとらえることができ、Fig. 1 に示すように、階層Ⅰから階層Ⅳに分類することができる。とくにパワエレ製品では大電流や高電圧を取り扱うため、放熱技術や絶縁技術およびそれに関連する技術が実装にとってより重要となる。

階層Ⅰのパワーデバイスの上下面電極にはメタライズ層が形成されており、高温下での安定性が要求される。また、上下面電極とも階層Ⅱでのアセンブリ安定性が必要となり、上面はAl、下面はNi/Auを用いることが多い。デバイス機能に対して、市場から最も要求される性能は動作時に発生する熱を減らすこと、すなわち電力損失の低減である。パワーデバイスは数Aから数百A程度までの電流を制御するが、通電時や電流のオンオフ（スイッチング）時に電気エネルギーの一部が熱エネルギーに変換されてしまうことが避けられず、この電力損失を下げるのが大きな課題となっている。1980年代のパワーデバイスであるバイポーラトランジスタの動作時の電力損失に対して、IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）は世代を重ねる毎に電力損失の低減を実現してきた²⁾。当初のセル構造はプレーナー構造であったが、トレンチ構造が開発され、電力損失を大幅に低減することによってデバイスを小型化した。更に、その後、トレ

Fig. 1 Packaging level (Level I ~ Level IV) of power electronics.

* 大阪大学大学院 工学研究科（〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1）
Graduate School of Engineering, Osaka University（2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan）

ンチ間隔の狭ピッチ化及び薄ウエハ化が行われた。このような構造やプロセスの改善によってデバイス性能は大幅に向上している。さらに近年は、SiC など化合物半導体の開発が精力的に進められている。この化合物半導体を用いることによって電力損失は一気に 1/4 から 1/10 になるため、実用化が始まっている。この電力損失の低減は、次に述べる階層 II となるパワーデバイスのパッケージの小型化に直接影響する。

階層 II であるパッケージのアセンブリはその形態から、1 個のパワーデバイスをパッケージに収めたディスクリットと複数のパワーデバイスをパッケージに収めたモジュールに分けられる。電源等の比較的小容量の電力制御にはディスクリットが用いられるが、産業用のインバータやハイブリッドカーにはモジュールが用いられる。パワーデバイスの動作温度は上限が決まっているため、電力損失が低減したことによって、デバイスの温度上昇を抑えることが可能となり、モジュール内のデバイスを高密度に実装すること、すなわちパッケージの小型化が実現される。

階層 III はパワーモジュールをプリント基板に実装する階層である。汎用のプリント基板への実装は電流量や放熱性の課題のためエアコン等の比較的小容量のパワエレ機器に用いられる。熱容量や放熱との関係上パワーモジュールは DIP (Dual Inline Package) などの挿入部品が多く、実装時においても熱容量が大きい場合には他の制御用部品とは別に局所フローソルダリングが行われる。

階層 IV はモジュールとモータや制御回路基板を相互に接続し、それぞれの機能を有する部材をシステム化する階層である。パワエレ機器においては放熱部材であるヒートシンクを筐体の一部として使う実装形態、銅配線板を射出成型筐体に埋め込んで回路を形成した 3 次元実装の形態、モータとインバータを一体化した実装形態等、パワエレ機器の小型化ニーズに対応して多くの実装形態が開発されている。

以下、階層 II から IV について詳説する。

3. パッケージのアセンブリ技術 (階層 II)

ディスクリットパッケージとパワーモジュールのパッケージとの最大の違いは絶縁構造にある。パワーモジュールは複数のデバイスによる電気回路の形成、パッケージ外部との電気的絶縁、デバイス動作時に発生する熱の放散という複数の機能を有しているため階層 III における実装が簡便となり、多くの設計者から支持を得た。

パワーモジュールの構造はそのアセンブリ形態からさらに Fig. 2 に示すように、モールド構造とケース構造に分けることができる。モールド構造はリードフレーム上に複数のパワーデバイスを搭載して回路を形成した後、トランスファーモールドした構造である。ディスクリットと類似のアセンブリ工程を用いることができ、大量生産に適しているうえ、放熱性能を確保しつつ絶縁機能も有する構造に大きな特徴がある。絶縁を確保する構造としては、モールド

時の樹脂を絶縁材として用いる方法、シート状の絶縁部材を用いる方法、セラミック基板を用いる方法があり、放熱性能によって適宜選択される。モールドタイプの構造は比較的小電流の主に家電用途に用いられるが、この構造は 10 年間で約 1/4 のサイズとなっている。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。熱抵抗低減には高熱伝導樹脂やセラミック基板の採用等が有効であり、さらに大容量化が進んでいる。一方、ゲルなどで封止したケース構造は大電流や高電圧の主に産業用途に用いられる。樹脂絶縁された金属基板やセラミック基板上にパワーデバイスを複数搭載して回路を形成し、その後樹脂で封止した構造である。この樹脂封止型パワーモジュールは小型化、大容量化、高放熱化の流れがある。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、Fig. 3 に示すような、両面冷却³⁾、直接水冷⁴⁾、両面直接水冷⁵⁾ 等の新構造が開発されて

Fig. 2 Different 2 types of power module structure.

Fig. 3 Improvement of heat dissipation by power module structure development.

いる。とくに、両面直接水冷モジュールは、デバイスを両面から冷却しつつモジュールとヒートシンクを接続するための低熱伝導率の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可能となる。

パワーデバイス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電力密度の向上は年々進んでいる。さらに、損失を大幅低減できる SiC デバイスの開発が進んでおり、鉄道車両用のモジュールを適用することによって、高効率化・小型化が実現されている⁶⁾。

パワーモジュールの動向は小型化等の流れだけでなく、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等の流れがあるため、耐熱・信頼性設計が重要となっている。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デバイス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、それぞれの機能を有する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は熱疲労破壊に対する信頼性設計が大きな課題となる。すなわち、各部材の熱膨張係数が大きく異なるため、それぞれを接合する材料や積層構造の設計が重要である。また、200℃以上の高温下での使用を考えた場合、ケースやゲル等の有機材料やはんだ材料自身が劣化しないように寿命設計する必要があり、材料とくに接合材料の高耐熱化が検討されている。

まず、セラミックスと Cu 導体を接合して製造されるセラミック基板は DBC (Direct Bonded Copper) 基板と称され、パワーモジュールにとって不可欠の部材となっている。セラミック基材には高熱伝導性の AlN や高強度の Si₃N₄ が採用され、産業用や車載用等それぞれの製品要求に対応した DBC 基板が実用化されている。パワーモジュールの品質や機能にとってこの DBC 基板のセラミック・金属接合部には大きな熱応力が発生するため、脆性なセラミックが破壊しないようセラミック材料物性の改善が図られている。

パワーモジュールの心臓部にあたるデバイス上下の接合技術は、それぞれワイヤボンディングとダイボンディングである。

ワイヤボンディングの材料は直径 400 μm 程度のアルミニウムが多く用いられる。ワイヤボンド部は超音波接合によってパワーデバイス上の Al 電極と Al ワイヤを直接金属接合されているが、パワーデバイス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。この環境下で使用し続けると最終的にはワイヤとデバイスメタライズの界面近傍で破壊するため、高品質の接合ができるプロセスや長寿命が可能となるワイヤ材料やデバイスのメタライズ材料が開発されている⁷⁾。とくに、最近では Al ワイヤに替えて Cu ワイヤを用いることによって大幅な長寿命化を図る方法も開発されている⁸⁾。なお、Cu は Al に比べると低熱膨張・高電気伝導度である、というメリットを有するが、剛性が

高いためデバイスのダメージを防止する必要がある。また、ワイヤを用いない長寿命化方法としては、Cu リードを直接デバイス表面のメタライズ層にはんだ付する構造がとられることもある⁹⁾。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、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。

デバイス下の接合、いわゆるダイボンド部には基本的にはんだ付が用いられる。デバイスと DBC 基板の熱膨張差によって熱応力破壊が発生することがあるが、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。亀裂が進展した場合はパワーデバイスからの放熱経路が狭められる結果、パワーデバイスの熱破壊が生じるため、これを防止できるよう寿命設計を行う必要がある。また、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だとされている⁷⁾。さらに、信頼性向上のためにはエポキシ樹脂封止することもある。この構造では、はんだのひずみ量を比較的線膨張係数が高いエポキシ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⁹⁾。

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ド技術としては、Ag 焼結接合等のはんだ材料を用いない接合技術が開発されている¹⁰⁻¹⁴⁾。Ag 焼結接合の特徴としては 250℃ 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。Fig. 4 にナノ Ag 粒子を用いた接合過程を模式的に示す。まず有機膜で保護されたナノ Ag 粒子が加熱によって有機膜が分解され、次にさらに加熱下で保持することによってナノ Ag 粒子の焼結が進行する。300℃以下の接合プロセスであり、とくに近年では無加圧でも安定

Fig. 4 Schematic of nano-Ag sintering process.

した接合が可能となっているため、はんだ付の代替技術として用いることができる。20 nm の Ag 粒子を用いて温度 260℃、加圧力 30 MPa、時間 90 s の条件下で接合した接合部を Fig. 5 に示す¹²⁾。大きな欠陥は見られず、1 μm 以下の小さな空孔が接合部全体に対して分散していることがわかる。この接合部は最高温度 200℃ の繰り返し温度サイクル 6000 回においても焼結接合部に大きな劣化は見られず、はんだ材料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。以上のようなはんだ代替材料・プロセスの開発によって 200℃ レベルの高温動作下においても放熱経路として重要なダイボンド部の信頼性が確保できることが明らかとなっている。

また、環境温度の変化等比較的長時間の温度変化に対して劣化が懸念される DBC 基板とヒートシンクの接合材をはんだ付に替えて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. プリント基板の実装技術 (階層Ⅲ) および機器実装技術 (階層Ⅳ)

プリント基板への実装は冷蔵庫やエアコン等の家庭用インバータに主に用いられる。ただ、パワーデバイスの電力損失が低減した結果、比較的小容量であったモールド樹脂封止型パワーモジュールにおいても 50 A を超える大容量化が進んでおり、それを実装するプリント基板の電流量が問題となってくる。すなわち、汎用プリント基板の銅箔回路パターンに大電流を通電することによるジュール発熱の問題である。例えば銅箔厚さ 35 μm、幅 20 mm、長さ 100 mm の回路パターンの抵抗値は 2.4 mΩ であるが、50 A の電流を流すとその箇所の発熱量は 6 W となってしまう、放熱経路が確保されないと熱的に成立しない。そこで、プリント基板に通電・放熱のための補助部材を利用するほか、内層銅箔を放熱経路に利用することなどによって 100 A 程度の電流を汎用のプリント基板を用いて実装することが可能となっている¹⁵⁾。さらに、プリント基板を金属筐体と絶縁熱伝導材料を介して接触させることによって、銅箔回路パターンの温度上昇を大幅に低減することも可能となっている。

一方、大型のパワーモジュールをプリント基板にはんだ実装する場合、パワーモジュールの熱容量が大きいため基

Fig. 5 Cross section of sintered joint at 260℃ for 90 s with bonding pressure of 30 MPa.

板や周辺部品への熱ダメージ回避が容易ではなく、フラックス洗浄も環境問題の関係上から用いたくないという要求がある。これに対して、はんだ付に代わるプレスフィット技術が欧州を中心に開発注力されている。このプレスフィット技術は信号線の機械的接続技術として利用されてきたが、近年パワーモジュールの電力端子にも適用展開が進んでいる¹⁶⁻¹⁸⁾。課題としては大電流通電による接続部の発熱とモジュールとプリント基板の線膨張係数差による動作時の変位による接触状態の変化である。これに対して、接続部の解析が行われ、Fig. 6 に示すように、プリント基板のスルーホールの Cu めっきとプレスフィット端子の Sn めっきの接触界面には数 nm から数十 nm の結晶粒からなる混合層が形成されていることが明らかとなった。また、この接続部は、50 A 通電時においてもその温度上昇は許容内であり、-40 ~ 85℃、600 サイクルの温度サイクル後においても安定的な接続が実現できていることが確認され、実用的な接続技術であると判断できる。

また、パワエレ機器の小型化の一つの方策として、モータにインバータ機能を内蔵したインバータ一体型モータの検討がなされている。モータとインバータの組み合わせにおいて、インバータを円盤状に実装し、モータと一体化したシステム化構造においては、体積は 20% 減、質量は 31% 軽量化が達成されている¹⁹⁾。

5. おわりに

本解説では、パワエレ実装をその実装レベルに対応して 4 階層に分類し、その特徴および最近の技術動向を述べた。パワエレ製品は家庭からインフラまで様々な分野で用途拡大が進んでいる。とくに日本がリードしてきた省エネ技術は地球温暖化防止には不可欠の技術であり、パワエレの電気回路・制御技術とそれを引き出すパワエレ実装技術を総合的に推進していくことが必要である。

この解説を通してパワエレ実装に関係する研究・開発者が増加し、将来の地球に低炭素社会の構築という大きな財産を残していただければ幸いである。

Fig. 6 STEM image of contact pin and through-hole interface.

参考文献

- 1) (社) 溶接学会マイクロ接合研究委員会編：“マイクロ接合技術（第1編）”，溶接学会，(1987)，259.
- 2) 西原秀典，松岡徹：“パワーモジュールの最新動向と展望” 三菱電機技報，**94-3** (2020)，148-152.
- 3) 坂本善次，平野尚彦：“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，**80-4** (2011)，22-26.
- 4) 吉松直樹，碓井修，井本裕児，石山祐介：“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，**88-5** (2014)，321-324.
- 5) 木村隆志，斎藤隆一，久保謙二，中津欣也，石川秀明，佐々木要：“ハイブリッド電気自動車向け高電力密度インバータ” 日立評論，**95-11** (2012)，752-757.
- 6) 菅原徹大，山下良範，中嶋幸夫：“SiC パワーモジュールの主回路素子への適用技術”，三菱電機技報，**90-9** (2016)，517-520.
- 7) 両角朗，西村芳孝，池田良成，望月英二，高橋良和：“パワーモジュールにおける高耐熱パッケージ技術”，エレクトロニクス実装学会誌，**17-6** (2014)，464-468.
- 8) K. Guth, N. Heuck, CH. Stahlhut, A. Ciliox, N. Oeschler, L. Boewer, S. Tophinke, D. Bolowski, R. Speckels, CH. Kersting, S. Krasel and G. Strotmann: “End-of-life investigation on the .XT interconnect technology”, PCIM Europe 2015.
- 9) 中島泰，須藤進吾，多田和弘，鹿野武敏，佐々木太志，加柴良裕：“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”，第11回「エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術」シンポジウム，(2005)，433-436.
- 10) 廣瀬明夫：“銀ナノ粒子および酸化銀粒子を用いた低温焼結接合”，溶接学会誌，**80-8** (2011)，702-708.
- 11) H. Tatsumi, S. Kumada, A. Fukuda, H. Yamaguchi and Y. Kashiba: “Impact of Metallurgical and Mechanical Properties of Sintered Silver Joints on Die-Attach Reliability of High-Temperature Power Modules”, J of Microelectronics and Electronic Packaging, **13-3** (2016)，121-127.
- 12) Z. Shen, A. Reiderman and C. Anude: “Pressure-less AgNP Sintering for High-power MCM Assembly for Extreme Environment Applications”, 48th Annual International Symposium on Microelectronics, (2015)，342-348.
- 13) 木村良，荻谷義治，水村宜司，佐々木幸司：“Ag ナノ粒子焼結隊の疲労亀裂進展速度に及ぼす焼結温度の影響”，第24回「エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術」シンポジウム，(2018)，211-216.
- 14) 山際大貴，松田朋己，巽裕章，佐野智一，加柴良裕，古澤秀樹，佐藤賢次，廣瀬明夫：“サブミクロン銅粒子を用いた無加圧接合における焼結プロセスの検討”，第26回「エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術」シンポジウム，(2020)，323-328.
- 15) 白形雄二，藤井健太，中島浩二，佐藤翔太，熊谷隆：“プリント基板を活用したパワーエレクトロニクス機器の低コスト実装技術”，三菱電機技報，**91-7** (2017)，401-404.
- 16) G.J. Riedel: “Current capability of press-fit contacts of IGBT modules”, 6h IET International Conference on Power Electronics, Mechanism and Devices (2012)，1-6.
- 17) 江草稔，石橋英俊，大坪義貴，菊池正雄，加柴良裕：“大電流用プレスフィット部における界面状態と接触安定性に関する検討”，スマートプロセス学会誌，**7-4** (2018)，139-145.
- 18) M. Thoben, I. Graf and R. Tschirbs: “Press-fit Technology, a Solderless Method for Mounting Power Modules”, PCIM 2005.
- 19) 宇津野良，松井康平：“インバーター体型モータ”，富士電機技報，**88-1** (2015)，41-45.

代表者メールアドレス

加柴良裕 kashiba@mapse.eng.osaka-u.ac.jp