

パワーモジュールの性能向上を実現する配線技術開発の取り組み

内田祥久*
Yoshihisa Uchida
柳本辰則†
Tatsunori Yanagimoto
菊池正雄*
Masao Kikuchi

Wiring Technologies Development to Improve Power Module Performance

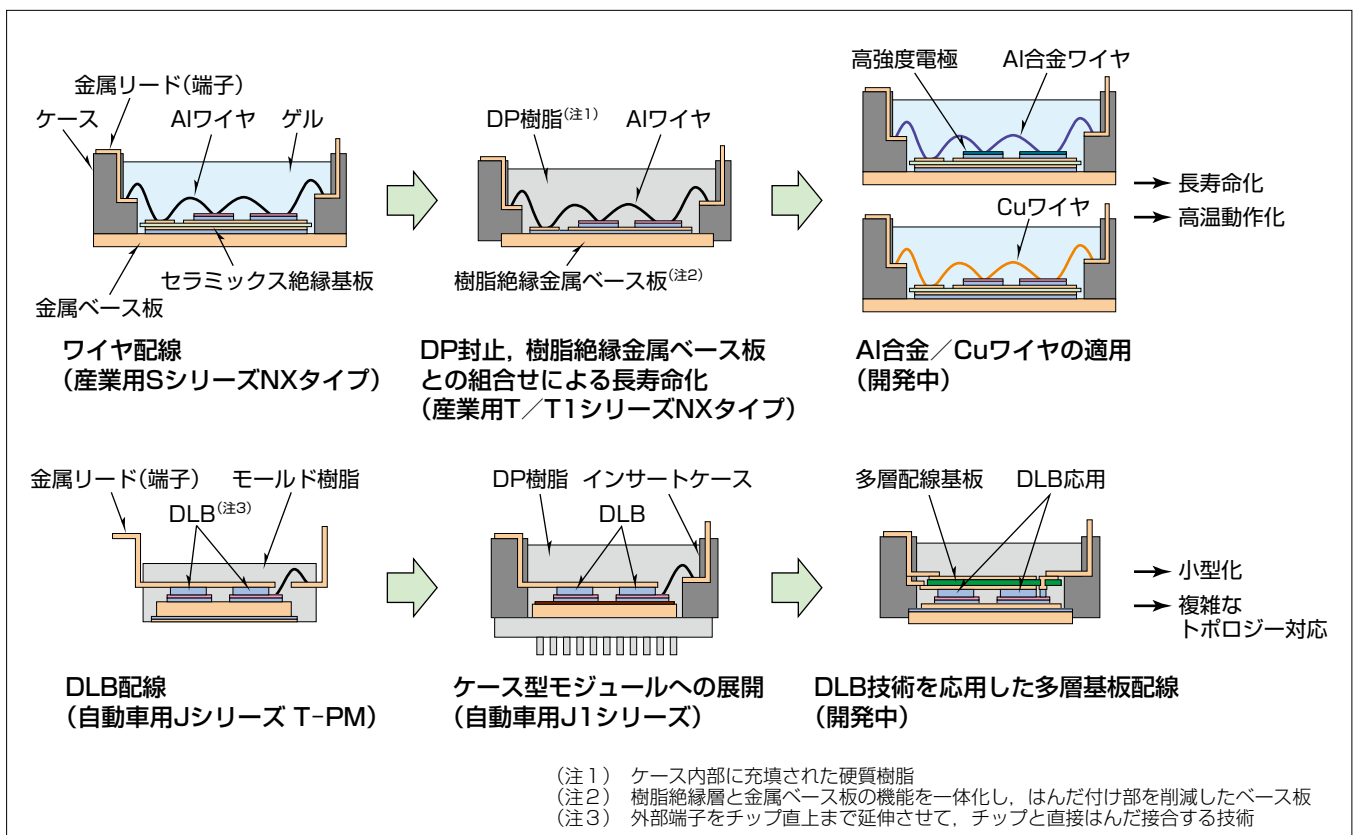
要旨

活用分野が拡大しているパワーモジュールでは、高電流密度化、長寿命化などの性能改善が求められている。これらの要求を達成する上で、製品寿命やパッケージサイズを大きく左右する内部配線技術の開発が重要となる。

パワーモジュールの内部配線では、Al(アルミニウム)ワイヤを用いたワイヤボンディング法が一般的で、三菱電機の多くの製品にも適用されている。しかし、Alワイヤの接合部寿命が信頼性のボトルネックとなる場合や、ワイヤ接合に必要な面積を確保するために、パッケージ小型化の制約になる場合が多い。この課題に対して、当社では、外部端子をチップ上に直接はんだ接合することで、小型化と高信頼性を実現したDLB(Direct Lead Bonding)技術を開発し、製品展開してきた。

今後、厳しくなる市場要求を満たすために、これら配線技術の進化が必要となる。産業用“T/T1シリーズ”では、Alワイヤの剥離を加速させる放熱経路の劣化を抑制し、製品寿命を改善した。さらに、より高強度なAl合金ワイヤやCu(銅)ワイヤを用いることで、更なる長寿命化が可能なことを実証した。自動車用“J1シリーズ”では、トランスファーモールド型モジュールに適用していたDLB技術をケース型モジュールに適用し、小型・高信頼性の利点を別パッケージへ展開した。チップ上に多層配線基板を直接接合し、小型かつ複雑な配線にも対応するDLB技術を応用した新しい配線構造も検討中である。

当社は、高電流密度化、長寿命化などを狙いとした配線技術開発を継続し、市場の要求に応える製品を提供していく。



パワーモジュールの内部配線技術トレンド

産業用T/T1シリーズNXタイプでは、DP(Direct Potting)樹脂封止と樹脂絶縁金属ベース板との組合せによって、従来のAlワイヤのまま製品寿命を向上させた。自動車用J1シリーズでは、トランスファーモールド型モジュールで適用していたDLB技術をケース型モジュールに展開した。さらに、Al合金/Cuワイヤ適用による長寿命化、DLB技術を応用して多層配線基板をチップ上に接合することで、更なる小型化や複雑なトポロジーに対応した配線技術を開発中である。

1. ま え が き

パワーエレクトロニクス分野で、省エネルギー・環境保護の観点から、家電製品を始め、産業機器・自動車・鉄道車両など、パワーモジュールの活用分野が拡大している。パワーモジュールでは、用途に応じて高電流密度化、長寿命化などの性能改善が求められるが、それらの要求に対応するためには、電流密度や製品寿命、パッケージサイズを左右する内部配線技術の開発が重要になる。

パワーモジュールでの代表的な内部配線材料を表1に示す。従来、Alワイヤを用いたワイヤボンディング法が一般的であったが、電流密度・接合部寿命の向上を目的に、Al合金ワイヤや、Cuワイヤの適用が本格化しつつある。さらに、チップ上に端子を直接はんだ付けするDLB構造の適用が拡大している。

本稿では、これらの内部配線技術を中心にしたパッケージング技術について述べる。

2. ワイヤボンディング技術

パワーモジュールの内部配線では、Alを主材料とした直径200~500 μm の金属ワイヤの両端を超音波接合するワイヤボンディング法が一般的である。この手法は、配線自由度が高い一方で、製品寿命がワイヤ接合部のリフトオフ寿命によって決定される場合が多い。リフトオフとは、ワイヤとチップの線膨張係数差に起因した応力によってワイヤ接合部に亀裂が進展し、最終的にワイヤが剥離する現象である。この課題に対して、モジュール構造の適正化や、ワイヤ材の変更による方策を検討してきた。

2.1 Alワイヤ

図1に示す従来構造のパワーモジュールで、ワイヤ接合部のリフトオフ寿命は、放熱経路の劣化による影響が大きい。主な発熱体であるチップで発生した熱は、金属ベース板裏面に取り付けられた冷却フィンへ放熱される。このとき、チップ/絶縁基板間及び絶縁基板/金属ベース板間のはんだ層が劣化すると、放熱性能が悪化してワイヤ接合部がより高温に晒(さら)され、リフトオフを加速させる。

そのため、第7世代IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)モジュール“T/T1シリーズNXタイプ”では、金属ベース板上に高放熱性の樹脂絶縁層と配線パターンを一体化した樹脂絶縁金属ベース板を採用することで、信頼性への影響因子の一つである絶縁基板/金属ベース板間のはんだ接合部を取り除いた⁽¹⁾。さらに、封止方法を従来のゲル封止から、硬質エポキシ樹脂を用いたDP樹脂封止に変

更することで、チップ/樹脂絶縁金属ベース板間のはんだ層に生じるひずみを低減させた。表2は、温度サイクル試験(85~175 $^{\circ}\text{C}$)で、従来のゲルと、DP樹脂で封止したサンプルのチップ/樹脂絶縁Cuベース板間のはんだ層の劣化状態を比較した結果である。DP樹脂封止サンプルでは、応力分散効果によって、はんだ層の剥離を大幅に改善できていることが確認できる。

このように、ワイヤ以外の構成部材やパッケージ構造を適正化することで、ワイヤ接合部寿命を低減させる放熱経路の劣化を抑制し、安価で汎用性の高い従来のAlワイヤを使用したまま長寿命化を実現できた。

表1. パワーモジュール内部配線材料

配線材料	Alワイヤ	Al合金ワイヤ	Cuワイヤ	Cu端子
構造				
接合方法	ワイヤボンディング	ワイヤボンディング	ワイヤボンディング	はんだ接合(DLB)
電流密度	Ref.	Alワイヤ同等	+	++
接合寿命	Ref.	+	++	++

+ : 性能改善の大きさを示す

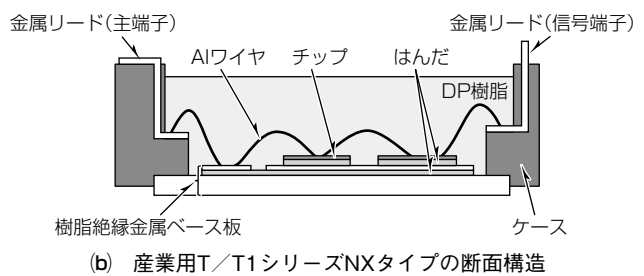
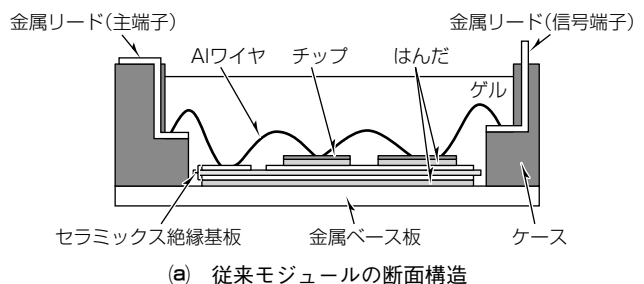


図1. モジュール断面構造

表2. 温度サイクル前後のチップ下はんだ層超音波探傷画像

	初期	5kサイクル	15kサイクル	50kサイクル
ゲル封止				
DP樹脂封止				

2.2 Al合金ワイヤ

Alワイヤに意図的に異種金属を微量添加し、ワイヤ材を高強度化することで、ワイヤ接合部の亀裂進展を抑制し、寿命改善を図ったAl合金ワイヤを開発している。

従来電極、めっき処理を施した高強度電極上に、従来のAlワイヤとAl合金ワイヤをそれぞれワイヤボンドしたサンプルで、温度サイクル試験(50~150℃)後の接合強度の低下率を比較した結果を図2に示す。従来電極上にAlワイヤを接合した従来構造に対して、ワイヤ材をAl合金ワイヤに変更しただけでは、接合寿命の改善がみられないが、電極材も高強度電極にすることで大幅にワイヤ接合部寿命を改善できることを実証できた。図3に示す温度サイクル試験後の接合部断面画像から、従来電極上にAl合金ワイヤを接合したサンプルは、電極部にひずみが集中したことによって、選択的に亀裂が進展している。一方、電極も高強度材料に変更することで、ワイヤ側に亀裂進展位置が変わり、合金化によるワイヤ材の高強度化の効果が発揮され、接合部寿命の改善が可能なことを確認できた。

2.3 Cuワイヤ

Alワイヤと比較して、Cuワイヤの再結晶温度は高く、チップとの線膨張係数差も小さいため、大幅な寿命改善が期待できる⁽²⁾。寿命改善効果の確認のため、従来構造のモジュールを用いて、AlワイヤとCuワイヤ配線でパワーサイクル寿命を比較した。図4にCuワイヤボンディング完了後のサンプル外観写真、図5にパワーサイクル試験結果を示す。Cuワイヤ配線したサンプルは、約35倍の寿命になり、大幅な寿命向上を確認できた。なお、このサンプルは、チップ接合部の劣化抑制のために、Ag(銀)焼結接合

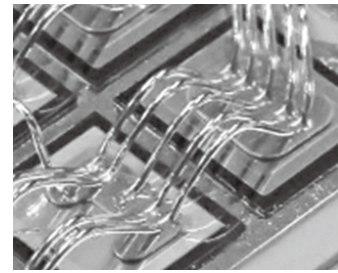


図4. Cuワイヤボンディング完了後のサンプル外観写真

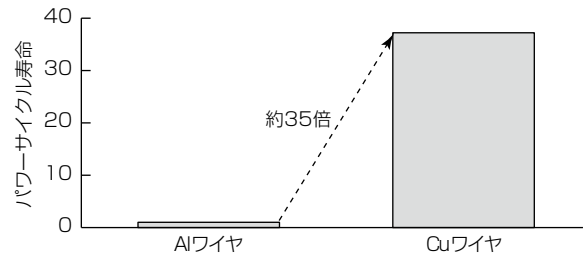


図5. Cuワイヤサンプルのパワーサイクル試験結果

を採用している⁽³⁾。

CuワイヤはAlワイヤと比較して硬く、接合に大きなエネルギーを要する。接合時にチップの素子構造が破壊されないように、チップ電極に厚膜めっきを施す方法や、電極上に緩衝板を搭載する方法が提案されている⁽²⁾。Cuワイヤを用いて製品寿命を改善する場合、Cuワイヤの延命効果を活用するためには、パッケージ構造の最適化が必要になる。

3. Direct Lead Bond技術

当社では、図6に示すように、外部端子をチップ直上まで延伸させ、チップ表面に直接はんだ付けするDLB技術を開発し⁽⁴⁾、自動車用「JシリーズT-PM(Transfer-molded Power Module)」に適用して2011年にリリースした。

DLB構造によって、主配線にワイヤボンドが不要となるため、ワイヤボンドに必要なスペースを削減でき、パッケージの小型化に有利となる。また、ワイヤと比較して大面積で接合できるため、配線の大電流化が期待できる。さらに、モールド封止による応力分散効果によってはんだ接合部のひずみを低減でき、長寿命化も可能になる。

3.1 ケース型モジュールへの展開

図7に断面構造を示す自動車用J1シリーズでは、DP樹脂封止技術との組合せによって、ケース型モジュールにDLB構造を適用した。これによって、より大型のモジュールでもDLBのメリットを活用した小型・高出力のモジュールの供給が可能になった。

大型のインサートケースタイプモジュールでDLB構造

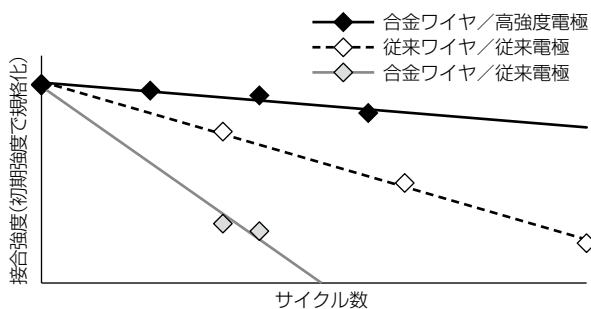


図2. Al合金ワイヤの温度サイクル試験結果

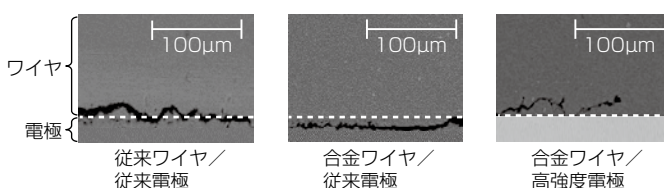


図3. 温度サイクル試験後の接合部断面画像

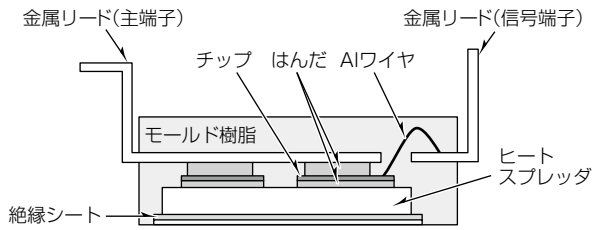


図6. JシリーズT-PMモジュール断面構造

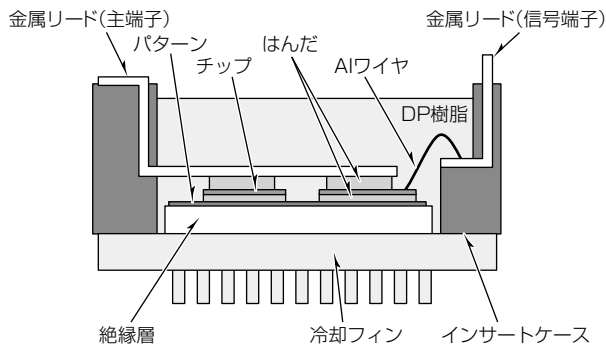


図7. J1シリーズモジュール断面構造

を適用するとき、端子を把持しているケースから端子先端までの距離が長くなるため、チップと端子のギャップの制御が課題になった。この課題に対する方策の一つとして、表3に示すように、端子のはんだ接合部に貫通穴を設けた。ギャップが小さくなった場合、余剰はんだを貫通穴に逃がすことで、電極外周へのはんだのはみ出しを防止できる。ギャップが大きくなった場合は、貫通穴直下のはんだが凹(へこ)むことでチップ電極外周まではんだが濡(ぬ)れ広がり、所望のはんだ付け面積が確保できる。このケース型モジュールでのDLB技術を他分野の製品にも適用し、より小型・長寿命なモジュールを展開する。

3.2 DLB技術を応用した多層基板配線構造

これまでCuリードを用いて二次元的に配線していたDLB技術を発展させ、図8、図9に示すような、大電流に耐え得る多層配線基板をチップ上に直接はんだ付けする配線構造を開発中である。絶縁層の上下に配線パターンを重ねて設計した基板は、信号配線も含めて上下2層で配線できるようになる。これによって、モジュールの更なる小型化と、電気的特性の最適化が可能になる。基板上下配線パターン間の相互インダクタンスを利用した寄生インダクタンスの低減や、配線長の調整によるチップ間の分流やスイッチングタイミングの適正化が容易になることを確認済みである。

このように、多層配線基板を用いることで、モジュールの小型化に加えて、電気的特性の最適化や、将来的な複雑なトポロジーへの対応が期待できる。

表3. 電極貫通穴の効果を示す模式図

	貫通穴なし	貫通穴あり
ギャップ小		
ギャップ大		



図8. 多層配線基板を用いた試作モジュールの外観写真

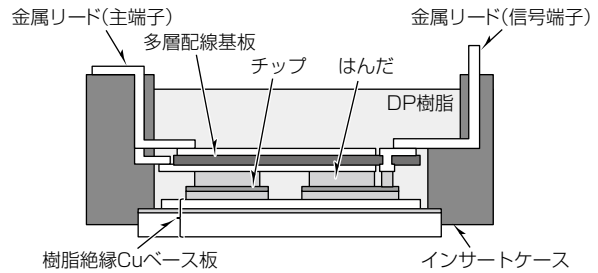


図9. DLB技術を応用した多層基板配線構造

4. むすび

当社は、高電流密度化、長寿命化などを目的とした次のような配線技術の開発を継続し、市場要求に応える製品を提供していく。

- (1) ワイヤボンディングへの新素材の適用と電極構造とのマッチングによる長寿命化
- (2) ケース型モジュールに対応したDLB技術の他製品群への展開による小型・長寿命化
- (3) DLB技術を応用した多層基板配線構造による小型化、特性向上、複雑なトポロジー対応

参考文献

- (1) 浅田晋助, ほか: 産業用高信頼性パッケージ技術, 三菱電機技報, 90, No.5, 291~294 (2016)
- (2) 内田祥久, ほか: パワーモジュールにおけるCuワイヤを用いた高耐久接合構造の検討, 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論文集, 24, 91~94 (2018)
- (3) 中原賢太, ほか: 高温動作パッケージ構造, 三菱電機技報, 92, No.3, 167~170 (2018)
- (4) Ueda, T., et al.: Simple, Compact, Robust and High-performance Power module T-PM(Transfer-molded Power Module), Proc. of The 22nd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs(ISPSD), 37~40 (2010)