

SiC パワーモジュールのパッケージ技術

特集

Packaging Technologies for SiC Power Modules

堀尾 真史 Masafumi Horio

飯塚 祐二 Yuji Iizuka

池田 良成 Yoshinari Ikeda

次世代半導体デバイスとして、SiC（炭化けい素）や GaN（窒化ガリウム）などのワイドバンドギャップデバイスが注目されている。富士電機は、SiC デバイスの長所を最大限引き出すことのできる新しいパッケージ技術を開発している。現在主流であるアルミワイヤボンディング・はんだ接合・シリコンゲル封止構造を、銅ピン接続・銀焼結材接合・エポキシ樹脂封止構造に置き換え、パワーモジュールの小型化・低熱抵抗・高温駆動・高信頼性を実現した。この新しい構造による All-SiC モジュールと SiC ダイオードモジュールを試作し、特性改善を評価した。

Wide bandgap materials such as silicon carbide (SiC) and gallium nitride (GaN) are attracting attention as materials for next-generation power semiconductor devices. Fuji Electric is currently developing new packaging technologies to take full advantage of SiC devices. Compact and highly reliable power modules with low thermal impedance and high-temperature operating capability can be realized by replacing aluminium wire bonding, solder joints and silicone gel encapsulating structures with copper pin connections, silver sintering joints and epoxy resin molding structures. Improved performances of trial all-SiC modules and SiC diode modules with the new packaging technologies have been evaluated.

1 まえがき

近年、パワーモジュールは産業分野をはじめ、民生分野、車載分野などに幅広く適用されている。そのパワーモジュールに実装される Si デバイスが性能限界に近づく中、次世代デバイスとして SiC（炭化けい素）や GaN（窒化ガリウム）などのワイドバンドギャップ（WBG）デバイスが注目されている。この WBG デバイスは、Si デバイスと比較して高耐圧、低損失、さらに高周波・高温での動作が可能といった長所を持っている。

本稿では、WBG デバイス、特に SiC デバイスの長所を最大限引き出すことのできる新しいパッケージ技術について紹介する。

2 SiC パワーモジュールパッケージの特徴と技術

富士電機では、SiC パワーモジュールに搭載する SiC デバイスとして、SiC-MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）と SiC-SBD（Schottky Barrier Diode）を現在検討している。検討中の SiC パワーモジュールの技術は、パッケージ技術として SiC-IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）などへの対応も可能である。

図 1 に、現在のパワーモジュール構造の主流であるアルミワイヤボンディング構造と、開発中の新しいパッケージ構造を示す。

現行構造では、アルミワイヤボンディングと DCB（Direct Copper Bonding）基板が主なパワーモジュール内の配線経路を担っている。これに対し、新構造では DCB 基板とパワー基板、その間をつなぐ銅ピンが配線経路を形成しており、ワイヤボンディングレス構造である。また、

封止材料はシリコンゲルの代わりにエポキシ樹脂を適用している。次にこれらの新しい部材を適用した新構造の特徴と技術について述べる。

2.1 小型化

パワーチップのパワー密度の上昇、パッケージ構造の改善による熱抵抗の低減により、パワーモジュールの小型化はますます進んでいる。現行構造で配線を担うアルミワイヤは、一定のボンディング領域を必要とする。定格電流の大きいパワーモジュールほど多くのワイヤ本数が必要となり、DCB 基板上には多数のアルミワイヤが接続されることになる。このことはパワーチップの高密度実装、つまり

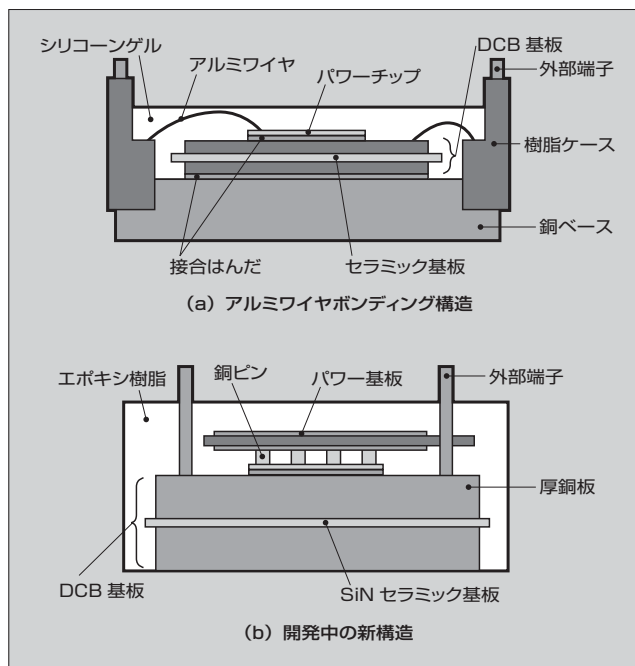


図 1 パワーモジュール構造の比較

パワーモジュールの小型化の障壁となる。

新構造では、アルミワイヤではなく銅ピンを備えたパワー基板をパワーチップ上に接続する構造を適用した。パワー基板はプリント基板構造をしており、電流をその銅パターン部分と銅ピンに流す。この構造では電流経路をパワーチップに対して垂直方向に取ることができるため、パワーチップを密集して配置することが可能となる。また、DCB 基板とパワー基板の両方に電流を流す経路を取れることも、パワーモジュールの小型化に寄与している。

2.2 低熱抵抗

集中するパワーチップの温度上昇を抑えパワーモジュールを小型化するためには、パッケージの熱抵抗の低減が必須である。図1に示した現行構造のセラミック基板には、アルミナを用いることが多い。しかし、アルミナ基板の熱伝導率は約 20 W/(m・K) と低く、現行構造の中では大きな熱抵抗層となってしまう。アルミナ基板の大きな熱抵抗を低減するため、これまでさまざまな開発を行ってきた。

このたび、さらなる熱抵抗の低減を実現するため、新構造ではさらに厚い銅板を窒化けい素 (SiN) セラミック基板に接合した構造を適用した。SiN セラミック基板を用いた理由は、アルミナ基板より高い熱伝導率を持つことと、この厚い銅板を貼り付けた構造での熱サイクル時において発生する応力に耐えられる強度を持つためである。図2に、同じサイズのパワーチップを実装した際のパワーモジュール熱抵抗の比較を示す。現行の銅ベース構造では大きな割合を占めていたセラミック基板の熱抵抗は、新構造ではその値は約 1/4 となり、全体の熱抵抗は半分以下を実現している。

2.3 高温駆動

SiC デバイスの長所の一つは、前述のように Si デバイスに比べて高温動作に向いていることである。パワーチップを高温で動作できることは、アプリケーションユーザはパワーモジュールの冷却コストを下げることができ、さらに冷却体サイズを小さくできれば、装置全体を小さくできることにつながる。そのためには、パワーモジュールの構

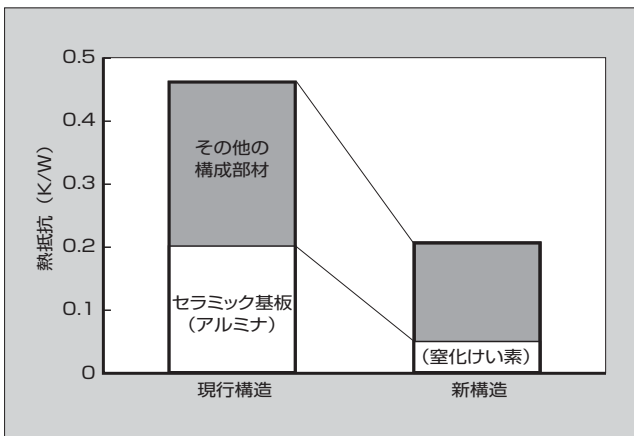


図2 パワーモジュール熱抵抗の比較

成部材、特に接合材料と封止材料の耐熱性の向上が必須である。

現在、パワーモジュールの接合材料には主に、すず-銀系の鉛フリーはんだを用いている。それらははんだの固相線温度^(注)は 250℃ 以下である。接合はんだは通常、温度が高いほど金属組織の劣化が進みやすくなるため、固相線温度や融点は高いものが望まれる。しかし、それらの温度が高くなると実装工程中に部材に発生する応力やひずみが大きくなるといった別の問題も発生する。この二つの相反する問題を解決するため、銀焼結材を接合材料として新構造に適用できるように開発を進めている。図3に、銀焼結材による接合部の断面を示す。

銀焼結材は比較的低温 (約 300℃) で接合でき、いったん焼結が進めば融点は銀のバルク材と同じ約 962℃ になるという優れた特性を持つ。また、熱伝導率も、すず-銀系はんだに比べると約 1 桁大きい。

封止材料に関しては、現行のシリコーンゲルでは通常 10 年といわれるパワーモジュール寿命を満足することができるのは、150℃ 以下の条件であり、駆動温度が高くなるとその寿命を満足することは難しい。そこで、200℃ 以上のガラス転移点を持つエポキシ樹脂を開発し、新構造に適用した。

2.4 高信頼性

SiC デバイス搭載用パワーモジュールの高温駆動を実現するためには高温領域での信頼性の向上が求められる。これまでのパワーモジュールの信頼性を決める大きな因子は、アルミワイヤとパワーチップ電極間の接合およびはんだ接合部の寿命であった。新構造においてアルミワイヤは銅ピンに、はんだは銀焼結材に置き換わり、信頼性を決定する因子はこれまでと異なる。まず、パワーモジュールの信頼性項目で最も重要なものの一つであるパワーサイクル試験にて、この新構造の信頼性評価を行った。現行構造との比較を行うために、Si デバイスを実装して試験を行った。図4に、パワーサイクル耐量の新構造と現行構造との比較結果を示す。

チップジャンクション温度の振幅 ΔT_j が 125 K と 150 K

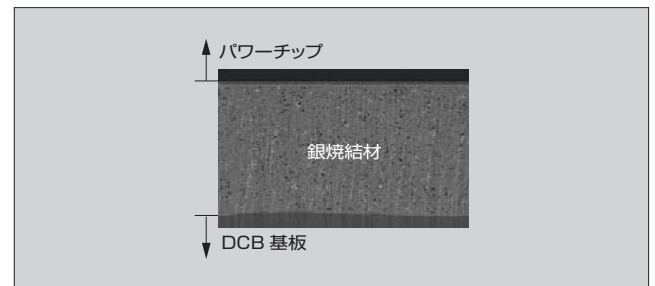


図3 銀焼結材による接合部の断面

<注> 固相線温度：合金を加熱するとき融け始める温度を固相線温度、さらに加熱して完全に液体となる温度を液相線温度と呼ぶ。純金属はこの二つの温度が同一であり、融点と呼ぶ。

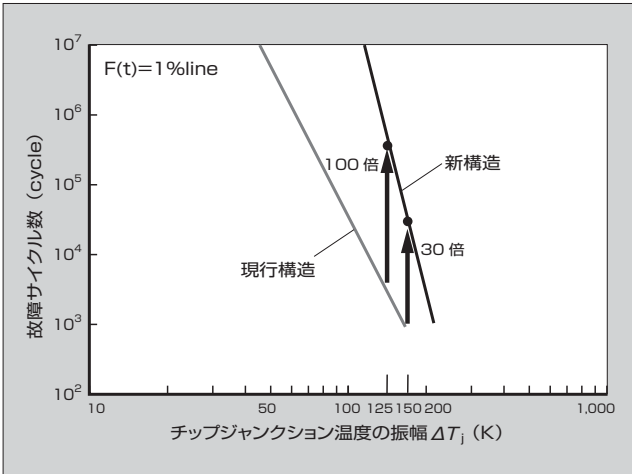


図4 パワーサイクル耐量の比較

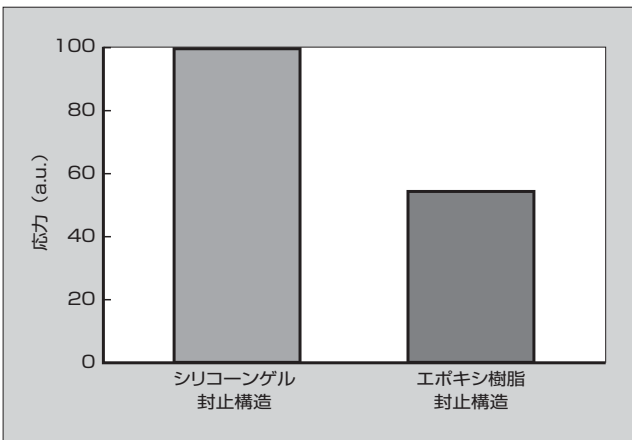


図5 チップ下接合材に発生する応力の比較

の条件で、新構造は現行構造に対して30倍以上のパワーサイクル耐量を持つ結果が得られた。パワーサイクル耐量が向上した理由の一つは、エポキシ樹脂封止構造としている点であると考えている。チップ下接合材に発生する応力値を、シリコンゲル封止構造とエポキシ樹脂封止構造で比較したFEM (Finite Element Method) 解析結果を図5に示す。縦軸は、シリコンゲル封止構造での応力値を100として表示している。

このようにエポキシ封止構造はパワーチップ接合材に発生する応力を半減することができる。シリコンゲル封止構造ではパワーチップとDCB基板がともに自由に膨張・収縮を繰り返すのに比べ、エポキシ樹脂封止構造ではその変形量を抑えることができ、結果としてチップ下接合材に発生する応力を小さくしていると推察できる。ヒートサイクル試験も同時に実施しており、低温側-40℃、高温側+150℃の試験条件において3,000サイクルという高い耐量を持つ結果を得た。

③ 新構造を適用したプロトタイプモジュール

②章で述べた小型化・低熱抵抗・高温駆動・高信頼性を

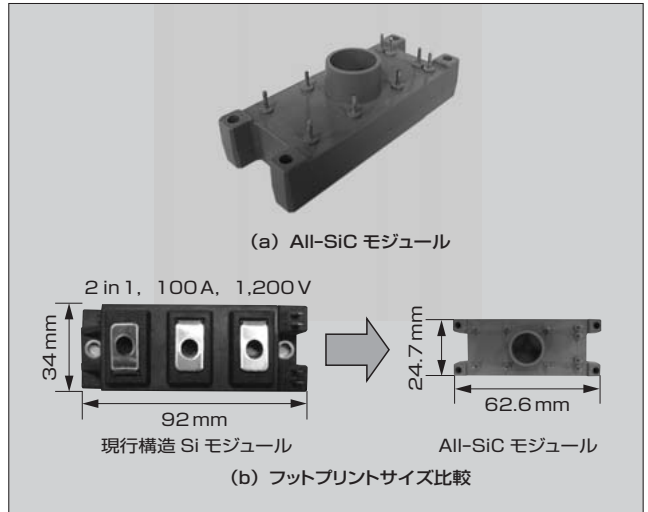


図6 All-SiC モジュールとそのフットプリントサイズ

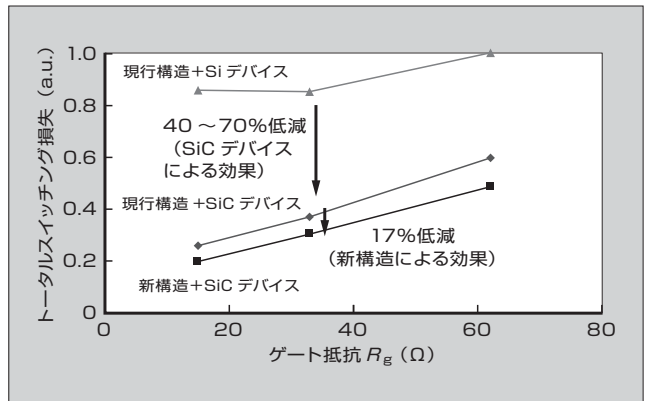


図7 スwitching試験による損失評価

実現した新構造を適用し、All-SiC モジュールと SiC ダイオードモジュールの2種類のプロトタイプモジュールを設計開発した^{(4)~(6)}。

3.1 All-SiC モジュール

図6(a)に示す All-SiC モジュールは定格 100 A, 1,200 V の 2 in 1 モジュールであり、SiC-MOSFET と SiC-SBD を実装している。外形サイズは、L62.6×W24.7×H19.0 (mm) である。現行構造の同じ定格の Si モジュールと比較すると、フットプリントサイズ (モジュール底面積) は半分である [図6(b)]。

フットプリントを半分まで小さくできた要因は、パワーチップを密集して配置できる銅ピン接続構造、その密集したパワーチップの温度上昇を抑える低熱抵抗構造、Si デバイスと比較して低損失で高温駆動が可能な SiC デバイスおよび高いパワーモジュール駆動温度でも十分な信頼性を持つ高耐熱部材である。

新構造と SiC デバイスによる特性向上を切り分けて評価するため、現行構造+Si デバイス、現行構造+SiC デバイス、新構造+SiC デバイスのサンプルを作製し、スイッチング試験による損失評価を行った。図7に、ゲート抵抗を

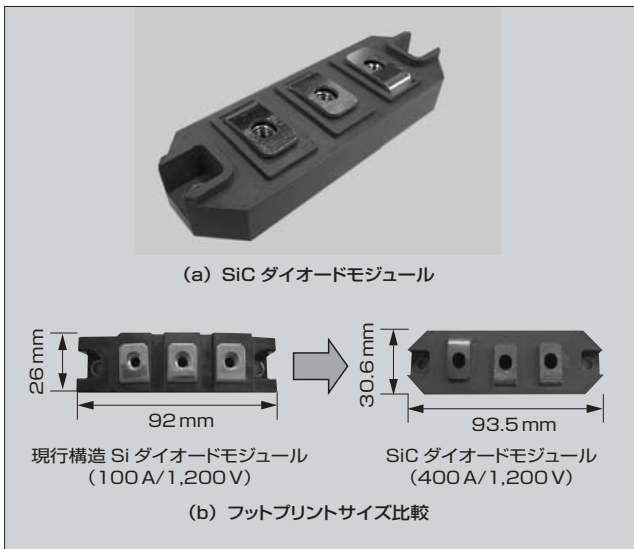


図8 SiC ダイオードモジュールとそのフットプリントサイズ

変化させて試験した結果を示す。

SiC デバイスによる損失低減は 40 ~ 70% である。そこからさらなる 17% の損失低減は新構造による効果である。この効果は、パワーモジュールが小型になったことで内部インダクタンスが小さくなり、サージ電圧の低下によるスイッチング損失低減に起因すると考えられる。内部インダクタンスを小さくすることに関してはまだ改善の余地が残されており、さらなる損失低減を今後図っていく。

3.2 SiC ダイオードモジュール

図 8 (a) に示す SiC ダイオードモジュールは、定格 400 A、1,200 V であり、直列に 2 アームを構成している。実装しているデバイスは SiC-SBD である。外形サイズは、L93.5 × W30.6 × H17.0 (mm) である。現行構造の Si ダイオードモジュールと比較すると 100 A 品とほぼ同じサイズでありながら、4 倍の電流密度を達成している [図 8 (b)]。

4 あとがき

銅ピン接続、銀焼結材接合、エポキシ樹脂封止構造を適用したパワーモジュールのパッケージ技術を開発した。この技術は、次世代デバイスとして期待されている SiC デバイスの長を生かすことができるものである。また、新構造による All-SiC モジュール、SiC ダイオードモジュールを設計し、特性改善を評価した。

今後は、アプリケーションでの実地試験を積み重ね、SiC デバイスにより、さらなる省エネルギー化へ貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 西村芳孝ほか. 新絶縁基板を用いた次世代 IGBT モジュール技術. 富士時報. 2004, vol.77, no.5, p.321-325.
- (2) 小林靖幸ほか. 最新技術を用いた新コンセプト IGBT-PIM. 富士時報. 2006, vol.79, no.5, p.358-361.
- (3) 両角朗ほか. パワー半導体モジュールにおける信頼性設計技術. 富士時報. 2001, vol.74, no.2, p.145-148.
- (4) Horio, M. et al. New Power Module Structure with Low Thermal Impedance and High Reliability for SiC Devices, PCIM Europe, 2011, Proceeding CD, p.229-234.
- (5) Ikeda, Y. et al. Investigation on Wirebond-less Power Module Structure with High-Density Packaging and High Reliability, International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, 2011, Proceeding CD, p.272-275.
- (6) Horio, M. et al. Ultra Compact, Low Thermal Impedance and High Reliability Module Structure with SiC Schottky Barrier Diodes, IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2011, Proceeding CD, p.1,298-1,300.



堀尾 真史

パワー半導体パッケージング構造の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所 Si デバイス開発センターパッケージ開発部。電気学会会員。



飯塚 祐二

パワー半導体デバイス用パッケージの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所 Si デバイス開発センターパッケージ開発部。



池田 良成

パワー半導体デバイス用パッケージの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所 Si デバイス開発センターパッケージ開発部マネージャー。日本機械学会会員、電気学会会員、エレクトロニクス実装学会会員。



*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。