

高温動作パッケージ構造

中原賢太* 山口義弘*
境 紀和* 内田清宏*
西川和康*

Package Structure for High Temperature Operation

Kenta Nakahara, Norikazu Sakai, Kazuyasu Nishikawa, Yoshihiro Yamaguchi, Kiyohiro Uchida

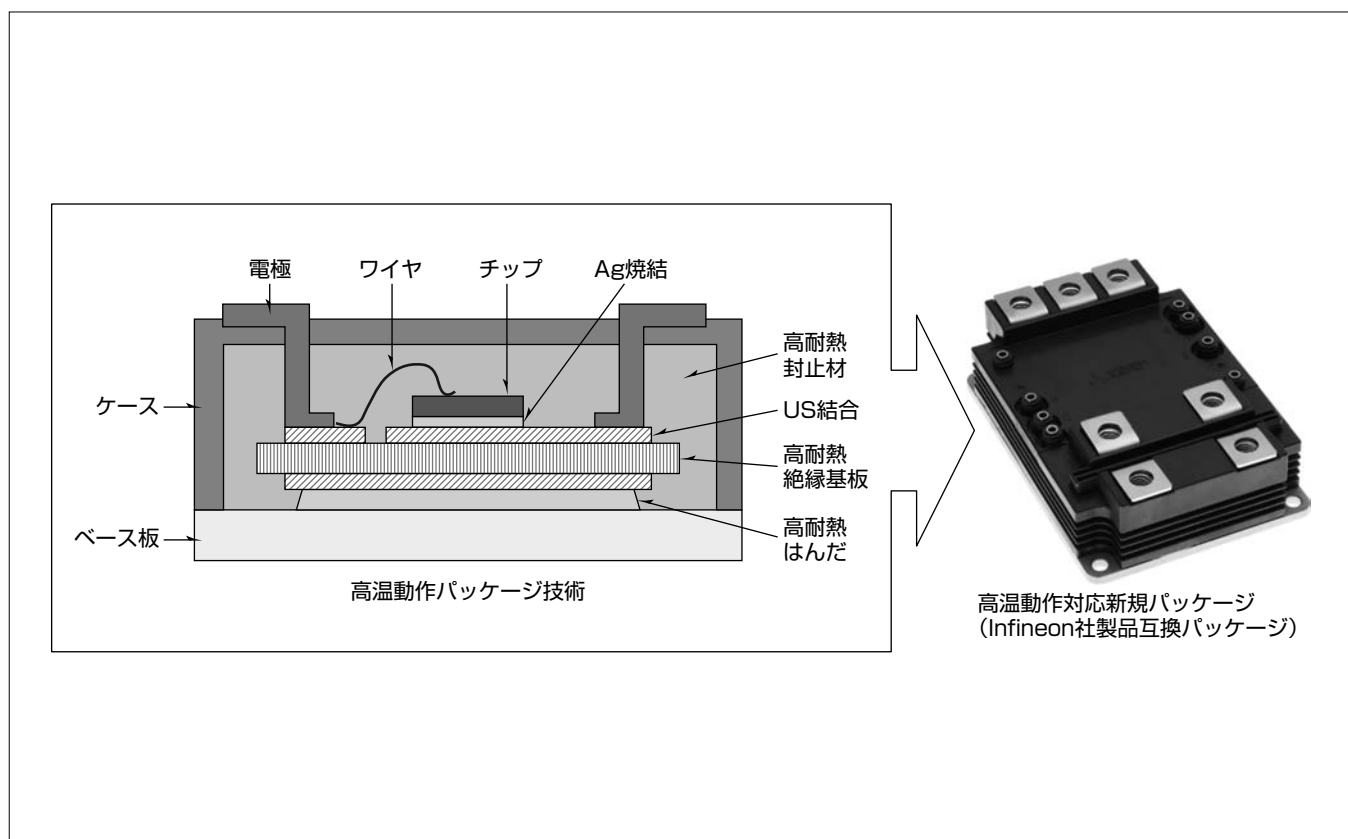
要 旨

近年、環境保護と省エネルギー社会の実現に向け、電気エネルギーを効率よく変換するパワーエレクトロニクスは民生、産業、電鉄、自動車、太陽光発電、風力発電など様々な分野へと適用範囲が拡大している。その中でも主要部品であるパワーモジュールに対して、小型化と高パワー密度が要求されており、それらを実現するため、高温動作が可能となるパッケージ材料、及び構造開発が必要となっている。

三菱電機では、チップの動作温度(T_{jop})が175℃以上対応とする製品を開発するため、材料、構造及びその要素技術開発によって高耐熱化をすることで、パッケージの高品質・高信頼性を実現した。

高温動作対応とするパッケージ要素技術として、Ag(銀)焼結接合、高耐熱絶縁基板、高耐熱はんだ材料、電極US(超音波)接合技術があり、これらの技術の評価・検討として、-40~175℃の温度変化を与える温度サイクルでの信頼性試験を行うことで、品質や寿命を確認した。その結果、600サイクル後でも材料や接合部に亀裂なども見られず良好な状態であり、高温動作対応が可能であると実証できた。

また高温動作対応の技術をInfineon社製品とパッケージの互換性がある新規パッケージに適用して製品化を進めている。



高温動作対応パワーモジュール

高温動作対応パワーモジュールに適用している断面構造とパッケージ外観を示す。従来のパワーモジュールに対して使用している部材の耐熱性向上やプロセスの改善を行うことで高温サイクルでの品質の向上と寿命改善を実施した。その結果チップの動作温度(T_{jop})が175℃以上に対応する製品の開発が可能となった。

1. ま え が き

近年、環境保護と省エネルギー社会の実現に向け、電気エネルギーを効率よく変換するパワーエレクトロニクスは民生、産業、電鉄、自動車、太陽光発電、風力発電など様々な分野へ適用範囲が拡大している。パワーモジュールはその中でも電流制御を行う重要な役割を持つため、動作時の損失低減・パッケージの小型化・高パワー密度などが要求されている。そのため、SiC(シリコンカーバイド)は次世代のパワーデバイスとして期待され、従来のSi(シリコン)に対して高速動作が可能かつ低損失という特長があり、特性を飛躍的に向上させることができる。またSiCは高温動作が可能のため、パッケージを小型化することで、パワーモジュールと搭載するユニットの小型化が可能になる⁽¹⁾⁽²⁾。

パワーモジュールの高温動作には、チップだけでなく、接合・配線・封止等の各パッケージ材料の選定とパッケージ技術の開発が必要であり、信頼性の向上と寿命の改善が課題となっている。

当社ではパッケージ開発の中で、接合材・封止材等の各部材の耐熱性向上やプロセスの開発によって、特に温度サイクルに対する接合部の信頼性、接合寿命の向上を行うことで、高品質・高信頼性を実現させた。そしてそれらの技術を適用して、チップの動作温度(T_{jop})が175℃以上を対応可能とする高温動作対応パッケージの開発を行った。

2. 高温動作パッケージ構造

今回新しく開発したパワーモジュールのパッケージ外観を図1に、主要構造の模式図を図2に示す。175℃以上での高温動作を想定した新規パッケージの構造として、ベース板上に高耐熱絶縁基板が高耐熱はんだで接合され、絶縁基板上にはチップがAg焼結技術によって接合されている。チップ上面電極と絶縁基板上の基板パターン間はAl(アルミニウム)等のワイヤで配線接続され、外部と電気的接続を行う電極が絶縁基板上の基板パターンにUS接合されている。ベース板には全体を覆うケースが勘合され、内部に



図1. 新規パッケージ

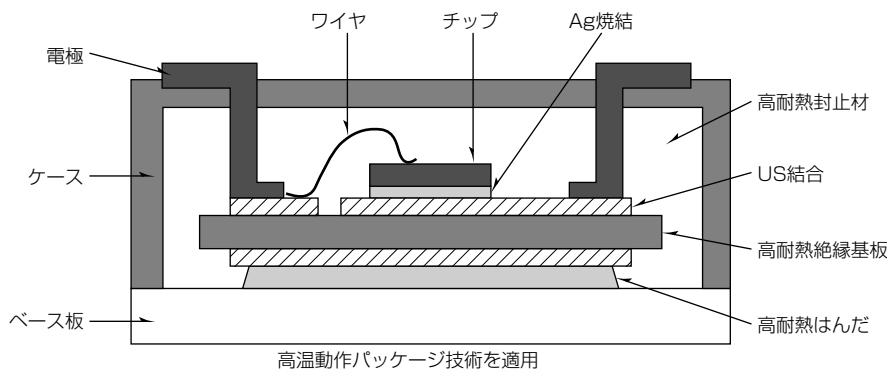


図2. 新規パッケージの主要構造

は高耐熱封止材⁽³⁾を充填している。

3章以降、高温動作に向けたパッケージ要素技術としてAg焼結接合、高耐熱絶縁基板、高耐熱はんだ材料、電極US接合技術について述べる。

3. パッケージ要素技術

3.1 Ag焼結接合技術

チップの高温動作を想定した場合、チップ下の接合に対して、はんだ材料では物性的限界があるため、新たな接合材料と材料に合わせたプロセスが必要となる。当社は、金属粒子による焼結接合に着目し、Ag粒子を用いた焼結接合プロセスを開発することで高耐熱・高品質化を実施した⁽³⁾。Ag焼結接合プロセスでは複数チップの搭載と一括接合を可能としている。そこで新規パッケージは従来パッケージに対して、チップをシュリンクし、図3に示すような4×3のチップ配列で一括接合による高密度化を検討した。図4にAg焼結による一括接合後のSAT(Scanning Acoustic Tomograph)画像と図5に接合断面画像を示す。SAT画像及び断面画像の結果から接合部からはボイドや亀裂等も見られず、良好な接合状態を得られた。結果として新規パッケージでは、Ag焼結によるチップの高密度化と高品質な接合が実現できた。

3.2 高耐熱絶縁基板

従来はAlN(窒化アルミニウム)セラミックを用いた絶縁基板を使用していたが、高温動作によってAlNセラミックに亀裂が発生することで、絶縁の確保ができなくなってしまう。そこで新規材料としてSi₃N₄(窒化ケイ素)セラミックを適用した高耐熱絶縁基板を検討した。高耐熱性の評価としてAlN絶縁基板とSi₃N₄絶縁基板を-40~175℃(ΔT=215K)の温度変化を与える温度サイクル試験で、セラミック部分や基板パターンとの接合部への亀裂進展を確認したところ、AlN絶縁基板ではセラミック部へ亀裂が進展しているのに対し、Si₃N₄絶縁基板では600サイクル後でも亀裂の発生はなく、絶縁特性にも異常は見られなかった(図6)。あわせて、FEM(Finite Element Method)解析で両者の破壊限界値を調査したところ、Si₃N₄絶縁基板はAlN絶縁

基板に対して2倍近くの裕度を持つことが確認でき、高耐熱・高信頼性を実現できた。

3.3 高耐熱はんだ材料

絶縁基板とベース板を接合するはんだ材料はチップの発熱に対してベース板への放熱性を維持するため、接合部に

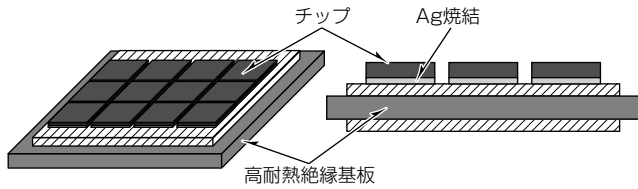


図3. Ag焼結による一括接合

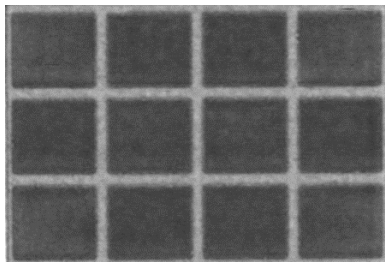


図4. 一括接合後のSAT画像

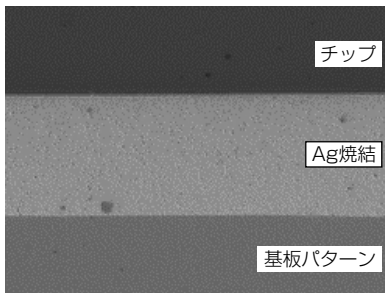
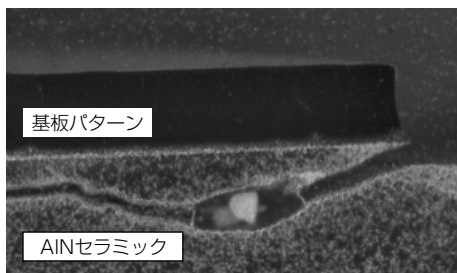
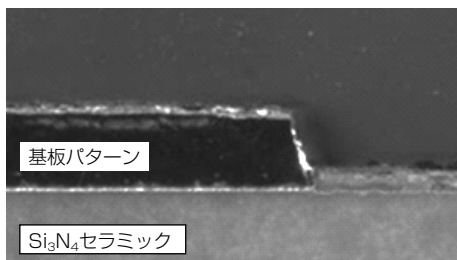


図5. Ag焼結接合の断面画像



(a) AlN絶縁基板



(b) Si₃N₄絶縁基板

図6. 温度サイクル試験後の絶縁基板断面

亀裂がない状態を保つ必要がある。従来までは製造面で取扱いのしやすい低融点のPb(鉛)入りはんだが用いられていたが、新たに高耐久・高耐熱のRoHS(the Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electronic equipment)はんだ材料の選定を検討した。高耐熱はんだは接合対象である絶縁基板とベース板の機械的物性に対して、表1に示す配合元素をベースに強度と延性のバランスを取るため、さらに追加で複数の元素を添加し、接合寿命の改善を図った。選定したはんだ材料で3.2節のSi₃N₄絶縁基板とベース板を接合して-40~175℃(ΔT=215K)の温度変化を与える温度サイクル試験を行い、はんだ接合部への亀裂有無を確認したところ、600サイクルでも接合部に亀裂発生は見られず、高耐熱はんだとして適用できることが確認できた(図7)。

3.4 電極US接合技術

外部と電気的接続をしている電極ははんだを用いて絶縁基板上の基板パターンと接合して通電を行っていた。しかしパワー密度の増加とともに電極の抵抗成分による発熱が増加し、電極と基板パターンの接合部の温度も上昇することから、高温サイクルでの接合寿命を確保する必要がある。当社では電極と基板パターンの接合にUS(超音波)接合技術を用いることで接合寿命の改善を行った。US接合では超音波エネルギーとともに加圧することで、接合面に形成された自然酸化膜等の不純物を取り除き、表面に清浄な金属を露出させ、塑性変形による固相接合を行っている。US接合による配線を行うことによって従来の接合で電極と基板パターンの間に存在したはんだを取り除き、直接接合させることで接合強度の高い状態を得ることができた。

また高パワー密度にするため、電極の厚みを厚くする必要があるが、接合箇所の電極厚みが増すと接合面に発生する応力が大きくなり寿命低下の要因となる。そこで当社では接合箇所での電極の厚みを部分的に薄くすることで、US接合時の接合性改善と温度サイクルでの接合部の応力

表1. 高耐熱はんだ材料の主配合元素と効果

配合元素	融点	効果
Sn(スズ)	231.9℃	-
Sb(アンチモン)	630.5℃	機械的強度向上
Cu(銅)	1,083.0℃	クリープ性向上

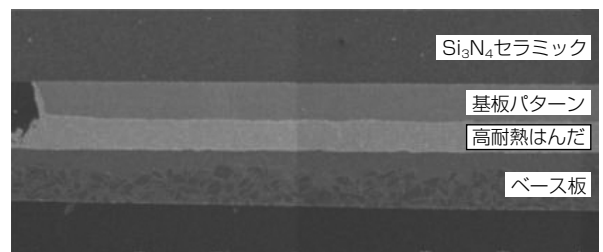


図7. 温度サイクル試験後のはんだ接合層断面

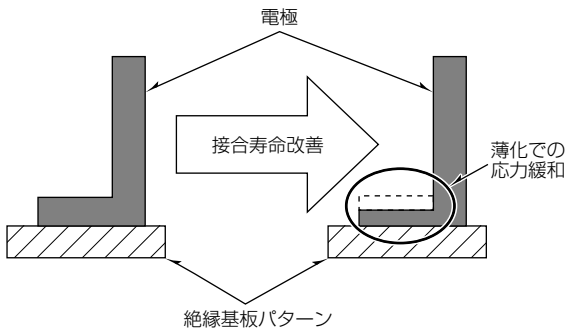


図8. 接合部薄化による接合寿命向上

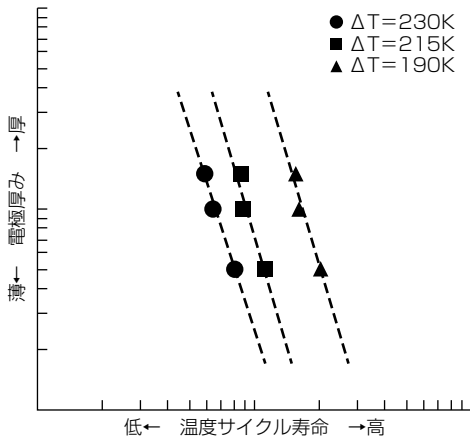


図9. 電極厚みと温度サイクル寿命の関係

低減を行うことで品質の向上を図った(図8)。図9に示す評価結果のグラフから判断できるとおり、接合部の電極厚みを薄くすることで応力が低減し、高温度サイクルに対する電極と絶縁基板の接合寿命改善を確認できた。

4. むすび

パワーモジュールの高温度動作を実現させるために、パッケージ要素技術の開発を継続している。高温度動作を可能と

表2. 従来パッケージと新規パッケージの違い

要素技術	従来パッケージ	新規パッケージ
チップ下DB	はんだ	Ag焼結
絶縁基板	AlNセラミック	Si ₃ N ₄ セラミック
基板下DB	鉛入りはんだ	高耐熱はんだ
電極-絶縁基板接合	はんだ	US(超音波)
封止 ⁽³⁾	従来封止材	高耐熱封止材

DB : Die Bond

するため、従来パッケージから新規パッケージへ変更・適用した技術を表2に示しており、これらの技術をInfineon社製品とパッケージの互換性がある次世代パッケージに適用して、製品化を進めている。今回はAg焼結接合、高耐熱絶縁基板、高耐熱はんだ材料、電極US接合に関する技術について述べたが、これらのほかにも高温動作対応のパワーモジュールの製品化実現には、革新的なパッケージ設計、材料及び製造プロセス開発が重要であると考えられる。

今後、当社で長年蓄積してきた、パワーモジュールのパッケージ要素技術及び量産技術を踏まえ、次世代の高温度動作かつ高品質となるパワーモジュールの開発を加速させ、製品化の推進に引き続き取り組み、環境保護及び省エネルギー社会の実現に向けて貢献していく。

参考文献

- (1) マジウムダール ゴーラブ, ほか: パワーモジュールの最新技術動向, 三菱電機技報, 86, No.5, 262~266 (2012)
- (2) 長谷川 滋, ほか: 1.7kV大容量ハイブリッドSiCモジュール, 三菱電機技報, 86, No.5, 287~290 (2012)
- (3) 日野泰成, ほか: 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, 88, No.5, 313~316 (2014)