

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

日野泰成* 巽 裕章**
 長谷川 滋* 横村伸緒***
 山田浩司* 畑中康道***

Packaging Technologies for High Temperature Power Modules

Yasunari Hino, Shigeru Hasegawa, Koji Yamada, Hiroaki Tatsumi, Nobuo Yokomura, Yasumichi Hatanaka

要 旨

近年、環境保護と省エネルギーを背景にパワーエレクトロニクスは民生、産業用のインバータだけでなく、電鉄、自動車、太陽光発電、風力発電へと適用範囲が拡大している。

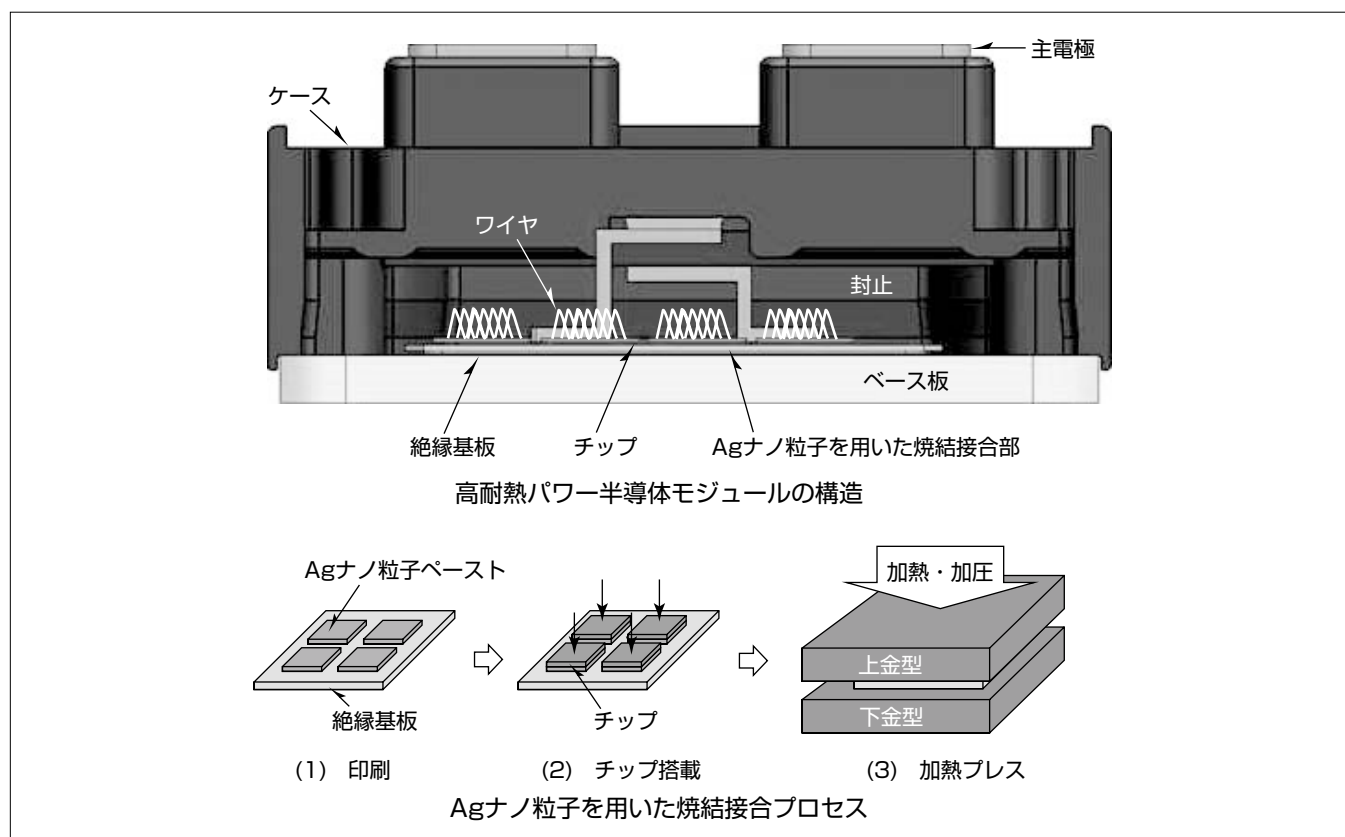
その中でパワーエレクトロニクスの基幹部品であるパワー半導体モジュールに対して、効率的な電流制御、厳しい使用環境下における耐久性及び小型化が要求されている。

特にSiC(Silicon Carbide)を用いたパワー半導体モジュールは、高速動作が可能で動作時の損失が少なく、飛躍的に特性の向上を図ることができる。さらに高温動作化が可能であり、冷却構造の小型化を図ることができるため、一段とパワー半導体モジュールの小型化が実現可能となる⁽¹⁾。

しかしながら、パワー半導体モジュールの高温動作化を実現するためには、チップの高温動作化だけでなく、パッケージ構造及び材料の高耐熱化が重要な技術課題となっている。

そこで、三菱電機では高耐熱パワー半導体モジュールの製品化に向けて、パッケージ構造、材料及びその要素技術開発を加速している。

本稿では、高耐熱化のために必要な高耐熱パワー半導体モジュールのパッケージング要素技術として、Agナノ粒子の低温焼結性を用いた接合技術及び封止技術について述べる。



高耐熱パワー半導体モジュール

高耐熱パワー半導体モジュールの構造を示す。絶縁基板上にチップを搭載する組立手法として、Agナノ粒子を用いた焼結接合を実施し、また高耐熱性の封止材でモジュール内部を充填する。これによって、高耐熱、高信頼性の接合部を得るとともに、高耐熱、高絶縁性を満たすモジュールを得ることができる。

1. ま え が き

近年、環境保護と省エネルギーを背景にパワーエレクトロニクスは民生、産業用のインバータだけでなく、電鉄、自動車、太陽光発電、風力発電へと適用範囲が拡大している。

その中でパワーエレクトロニクスの基幹部品であるパワー半導体モジュールに対して、効率的な電流制御、厳しい使用環境下における耐久性及び小型化が要求されている。

特にSiCを用いたパワー半導体モジュールは、高速動作が可能で動作時の損失が少なく、飛躍的に特性の向上を図ることができる。さらに高温動作化が可能であり、冷却構造の小型化を図ることができるため、一段とパワー半導体モジュールの小型化が実現可能となる。

しかしながら、パワー半導体モジュールの高温動作化を実現させるためには、チップの高温動作化だけでなく、パッケージ構造及び材料の高耐熱化が重要な技術課題となっている。

そこで、当社では高耐熱パワー半導体モジュールの製品化に向けて、パッケージ構造、材料及びその要素技術開発を加速している。

2. パワー半導体モジュール

パワー半導体モジュールのパッケージ外観を図1に、主要構造を図2に示す。ベース板上に絶縁基板が接合され、絶縁基板上にはチップが接合されている。チップ上面電極と絶縁基板上の配線パターン間にはアルミなどのワイヤで配



図1. パワー半導体モジュール

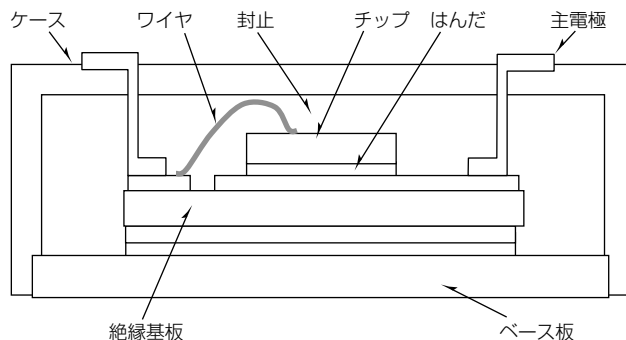


図2. パワー半導体モジュールの構造

線接続され、主電極が絶縁基板上の配線パターンに接合されている。ベース板には全体を覆うケースが嵌合(かんごう)／接合され、内部には封止材が充填されている。また絶縁基板上のチップ接合は、主にはんだ接合が適用されていた⁽²⁾。

そこで、パワー半導体モジュールの高温動作化のためには、接合材、封止材等各部材の耐熱性向上とともに、特に温度サイクルに対する接合部の信頼性、接合寿命の向上が必要となる⁽³⁾⁽⁴⁾。3章以降、高耐熱化のためのパッケージング要素技術として、Agナノ粒子の低温焼結性を用いた接合技術及び封止技術について述べる。

3. パッケージング要素技術

3.1 焼結接合技術

パワー半導体モジュールの動作温度の高温化に伴い、従来のSn系はんだ材では限界が予測される。そこで、有機保護被膜で覆われたナノサイズの金属微粒子を用いて、粒径が小さくなると融点が低下するという“融点降下現象”を用いた焼結接合を検討した。

接合材料は、有機保護被膜に覆われたAgナノ粒子に加えて、焼結分散性、粘性、耐乾燥性を考慮した数種類の溶剤から構成されている。加熱によって溶剤が揮発し、有機保護被膜を熱分解させることで、Agナノ粒子が接触し、Agの融点以下で焼結し合い接合するという原理である(図3)。これによって、金属固有の融点を持った高耐熱の

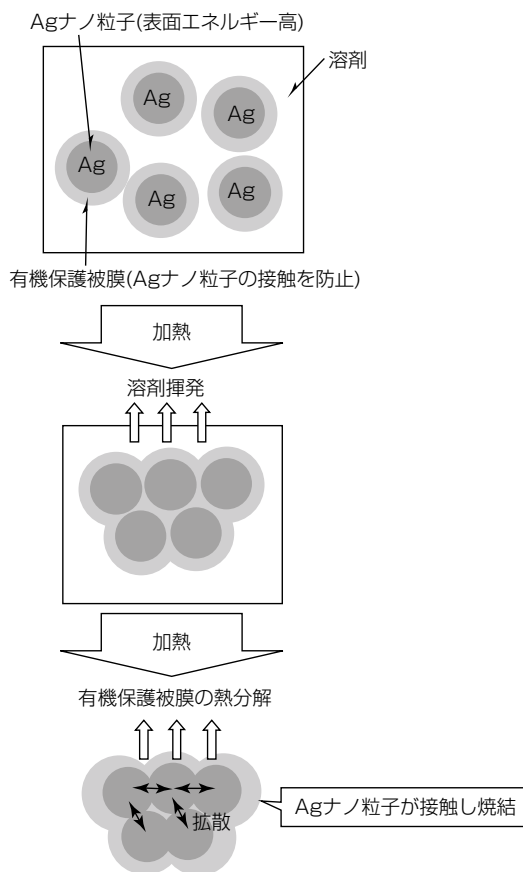


図3. Agナノ粒子の焼結接合模式図

接合部を得ることができる。今回、ナノサイズのAg粒子を適用しているため、従来のSn系はんだ材と同等レベルの加熱温度で接合が可能であり、接合後は900℃以上の融点を持った接合部を得ることができた。

3.1.1 Agナノ粒子を用いた焼結接合プロセス

図4に示すように、Agナノ粒子が分散されたペースト状の材料を用いて、絶縁基板上にスクリーン印刷する。次に、チップを所定の位置に搭載し、加熱プレスすることによって、焼結接合させる。なおチップ搭載及び加熱プレス工程は、焼結接合専用の試作設備を開発・導入し、複数チップの搭載及び一括加熱プレスを可能としている。チップ搭載機及び加熱プレス機を図5に示す。

次に、上記接合プロセス手法に基づいて、基礎評価用サンプルを作製し(図6)、Agナノ粒子を用いた焼結接合部に対する信頼性を確認した。

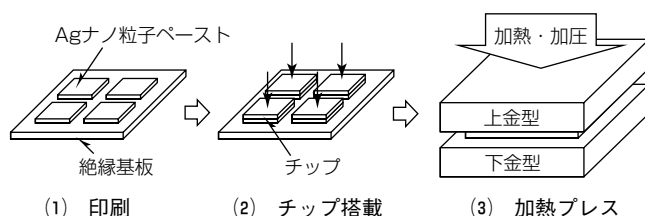


図4. Agナノ粒子を用いた焼結接合プロセス



(a) チップ搭載機 (b) 加熱プレス機

図5. 焼結接合の試作設備

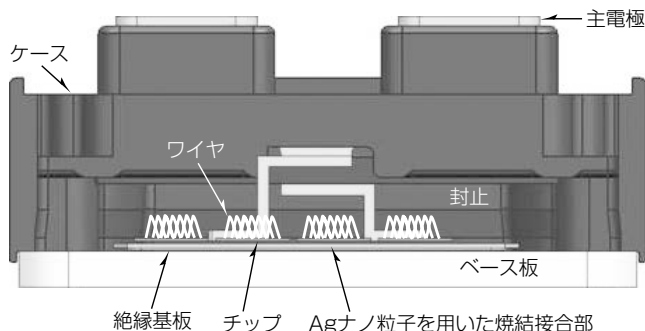


図6. 高耐熱パワー半導体モジュールの構造

3.1.2 信頼性試験

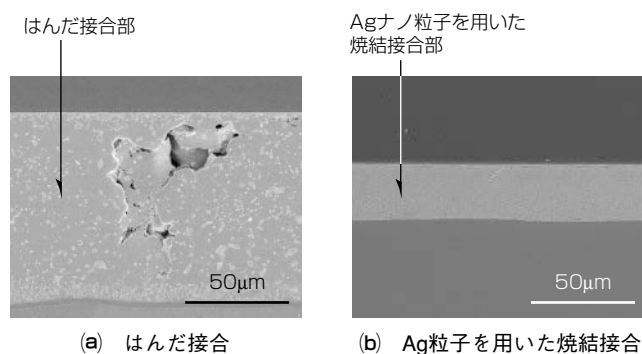
電鉄、自動車向け等、より厳しい温度環境下でパワー半導体モジュールを用いる場合、構成されるパッケージ内の各部材間の熱膨張差に起因した熱応力が、接合部に対し亀裂を生じさせるため、今回、信頼性試験として、パワーサイクル試験及び温度サイクル試験を実施した。

(1) パワーサイクル試験

Agナノ粒子を用いた材料に加えて、今回比較対象として、はんだ材(Sn-Ag-Cu-Sb系)を用いた基礎評価用サンプルを準備し、Agナノ粒子を用いた焼結接合同様にパワーサイクル試験($T_{jmax}=175^{\circ}\text{C}$, $\Delta T_j=90\text{K}$)を実施して検証を行った。その結果、Agナノ粒子を用いて焼結接合したサンプルは、はんだ材を用いて接合したサンプルと比較して約5倍のパワーサイクル寿命があることが分かった。次に、パワーサイクル試験後の接合部を検証するため断面観察を実施した。その結果を図7に示す。はんだ接合部では網目状の亀裂が認められたが、一方Agナノ粒子を用いた焼結接合部では、亀裂進展はなく良好な結果を得た。つまりAgナノ粒子を用いた焼結接合は、パワーサイクル寿命に対し支配因子にならないと考えられる。

(2) 温度サイクル試験

$-40\sim 175^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T=215\text{K}$)の温度変化を与える温度サイクル試験で、Agナノ粒子を用いた焼結接合部に対する亀裂進展を検証した。初期、300サイクル、600サイクル、900サイクル耐久後のSAT(Scanning Acoustic Tomography)画像を図8に示す。耐久サイクル数の増加に伴い接合部に対し極微小な白色部が確認されたが、目立った剥離はないことを確認した。次に、温度サイクル試験後(900サ



(a) はんだ接合 (b) Ag粒子を用いた焼結接合

図7. パワーサイクル試験後の断面

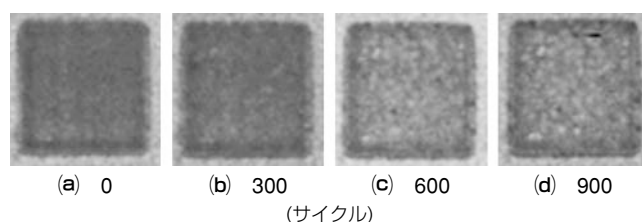


図8. 温度サイクル試験後のSAT画像

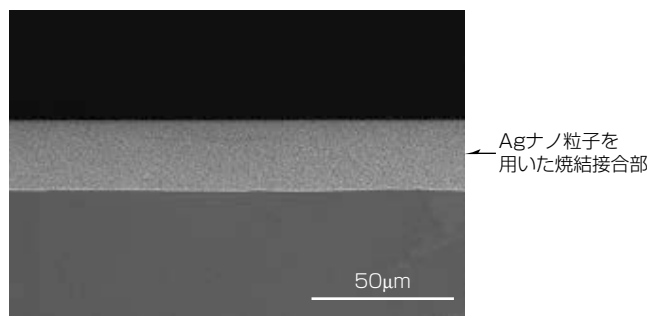


図9．温度サイクル試験後(900サイクル耐久後)の断面

表1．高耐熱性封止材の特性及び試験結果

		現行封止材	高耐熱封止材
耐熱付与剤		A	B
接着性	Cu箔(はく)ピール強度(gf/cm)	80	159
耐熱性	針入度 ^(注1) 変化(215℃-1,000hr)	半減	変化なし
部分放電特性	175℃測定r/n ^(注2)	5 hr	0 / 6
		10hr	2 / 6
		100hr	2 / 6

(注1) ゲル硬度を表す指標

(注2) 部分放電NG発生確率

イクル耐久後)の断面画像を図9に示す。Agナノ粒子を用いた焼結接合部で顕著な剥離進展は確認されなかった。

3.2 封止技術

パワー半導体モジュールの絶縁性を確保するために、封止(ゲル)が必要である。そこで、絶縁性を確保するとともに、高耐熱性の封止材を検討した。耐熱付与剤を改良することによって耐熱性を向上させ、また組成の適正化を図ることによって接着性を向上させ、剥離を抑制させることによって、部分放電特性の向上を図った。高耐熱性の封止材の特性及び試験結果を表1に示す。その結果、高耐熱、高絶縁性の封止を得ることができた。

4. むすび

パワー半導体モジュールの高温動作化を実現するために、高耐熱パワー半導体モジュールのパッケージング要素技術として、Agナノ粒子の低温焼結性を用いた接合技術及び封止技術について述べた。高信頼性、高寿命を達成したAgナノ粒子を用いた焼結接合技術、高耐熱、高絶縁性を達成した封止技術のように、高耐熱パワー半導体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の開発が必要であると考ええる。

今後、長年蓄積してきた、当社のパワー半導体モジュールのパッケージング要素技術及び量産技術を踏まえ、次世代の高耐熱パワー半導体モジュールの開発をさらに加速させ、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構築に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) マジウムダール ゴーラプ, 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) 加柴良裕, ほか: 半導体年鑑2014, 日経BP, 217～227 (2013)
- (4) 日経エレクトロニクス編: 次世代パワー半導体, 日経BP, 160～185 (2012)