ピラー状 IMC 分散鉛フリーはんだ接合

IMC Pillar Dispersed Lead-free Solder Joint

中田 裕輔*・橋本 富仁*・林 和**・荘 司 郁夫**
Yusuke NAKATA, Tomihito HASHIMOTO, Yawara HAYASHI and Ikuo SHOHJI

(Received April 5, 2016)

The paper reports about fabrication process, characterizations and transmission properties of screen printed transmission lines. Large area joining between a substrate and a heat sink is desirable for high performance power modules. We found that intermetallic compound (IMC) pillar dispersed solder is highly durable joint to achieve large area joining. The aim of this study is to clarify the mechanism of the strength reinforcement by IMC pillars. The structural characteristic of the solder joint was examined by cross-sectional observation, and the durability characterization was examined by FEM analysis. IMC pillars restrained cracks by obstructing crack propagation in the solder layer.

Key Words: Power Module, Solder, Large Area Joining, Highly Durable Joining, Sn-Ag-Cu-In

1. 緒言

近年、環境規制の強化等の背景から、電動化車両の需要が増加している。その基幹部品の一つであるインバータは、コスト削減や小型化を目的に高パワー密度化が求められている¹⁾。インバータのコストと大きさを支配するのが、Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) と p-intrinsic-n (PIN) ダイオードで構成される 3 相ブリッジ回路を内蔵するパワーモジュールである。パワーモジュールは最大発熱動作時にこれらの素子の接合温度が最大定格温度 T_{jmax} を超えないように設計される²⁾。単位面積あたりの放熱性能（冷却性能）が良ければパワー素子における熱損失が同等でも接合温度 T_j が下がるのでモジュールをより小型にできる³⁾。冷却構造の進化として、パワーモジュールとヒートシンクの間に放熱グリースが充填される別体構造からはんだ等で接合された直接冷却構造となり、放熱性能の向上、小型化、軽量化及びコスト低減が図られている⁴⁾。しかし直接冷却構造の場合、線膨張係数 (CTE) の小さい絶縁基板と CTE の大きいアルミニウムや銅との接合構造では、接合部に大きな熱歪みが発生するので、はんだによる接合では十分な熱疲労寿命を確保するのが難しい⁵⁾。

この様な課題を解決して信頼性を向上するために

- ① 絶縁基板のサイズをハーフブリッジ単位に分割して、はんだにかかる歪みを低減する。

- ② はんだ接合層を厚くすることで歪みを低減する。

等の方策がある⁶⁾。しかし①のケースでは余計な配線が増加し、また②のケースでは、はんだ層の厚みによって放熱性能が低下してしまう。筆者らは、熱疲労寿命に優れた絶縁基板とヒートシンクの大面积接合を実現するための高耐久はんだマイクロ組織を見出し、その熱疲労寿命向上メカニズムを解明した。

2. 実験方法

2.1 供試品構造及び接合材料

Fig.1 に今回実験に使用したパワーモジュールを想定した積層構造を示す。モジュールの全体構成はグリースを使わない直接冷却構造を前提としている。チップが搭載される絶縁基板は $\text{Cu} / \text{Si}_3\text{N}_4 / \text{Cu}$ 、ヒートシンクはアルミニウム合金製とした。絶縁基板の Cu パターンは Ni めっき有り／無し仕様（以下 Ni 有／Ni 無）とし、ヒートシンクは Ni めっ

Fig.1 Schematic cross-sectional diagram.

* カルソニックカンセイ株式会社 グローバルテクノロジー 本部材料技術グループ（〒327-0816 栃木県佐野市栄町7-1 番地）

CALSONICKANSEI CORPORATION Global Technology Division Material Engineering Group (7-1 Sakae-cho, Sano, Tochigi, 327-0816 Japan)

** 群馬大学大学院 理工学府（〒376-8515 桐生市天神町1-5-1）

Faculty of Science and Technology, Gunma University (1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu, Gunma, 376-8515 Japan)

Table 1 Parts of cross-sectional diagram.

Parts	Materials	Size (mm)	Thickness (mm)
Subst-rate	Pattern	Cu	66.5×41.6
	Ceramics	Si ₃ N ₄	68.5×43.6
	Pattern	Cu	66.5×41.6
Solder	SAC SACI	68.5×43.6	0.4
Heat sink	Al	95×60	8

Fig.2 Temperature profile in reflow soldering.

き仕様とした。Niめっきはどちらも無電解Ni-Pめっき（P量：8 mass%，膜厚：4 μm）とした。

Table 1 に積層構成について示す。大面積接合であること、絶縁基板とヒートシンクの線膨張差が大きいことから、一般的な Pb フリーはんだである Sn-3.0Ag-0.5Cu（mass%、以下 SAC）に対し、In により固溶強化が期待される Sn-3.0Ag-0.7Cu-5.0In（mass%、以下 SACI）の耐久性を評価した。はんだ接合時のリフロープロファイルを **Fig.2** に示す。はんだ材は、シートはんだによる無加圧のフラックスストレス接合、プリヒート（180℃）及びピーク（295℃）時は H₂ 雰囲気（O₂ 濃度 2 ppm 以下、N₂ 濃度 40 ppm）とした。

2.2 熱疲労試験 (Thermal Cycle Test: TCT)

熱疲労試験条件及び評価項目については以下とした。
熱疲労試験条件：-40～120℃昇降温及び保持時間各 15 分
評価項目：はんだ接合率（Scanning Acoustic Tomograph (SAT) 画像を測定し、元の接合面積を 100 とした値からはんだ剥離率を引いた値）

2.3 はんだ接合部の断面組織観察

接合後の試験片を鏡面研磨し、Scanning Electron Microscope (SEM) により、断面組織観察を行った。

さらに intermetallic compound (IMC) の形態を調査する為、純水 100 ml、HCl (35%) 2 ml、塩化鉄 (III) 10 g を混合したエッチング液により、はんだ層をエッチングし、SEM にて組織

Fig.3 Deterioration diagram after TCT result.

観察を行った。

2.4 熱疲労試験後のクラック観察

熱疲労試験後の試験片を鏡面研磨し、SEM により断面観察を行い、クラックの進展度合いを調査した。

3. 実験結果及び考察

3.1 熱疲労試験結果

Fig.3 にはんだ合金及び表面処理仕様の違いによる熱疲労寿命試験結果を示す。はんだリフロー後の初期接合率については、全ての条件においてははんだが濡れていない箇所は確認されなかった為、100%とした。SAC に対し SACI は熱疲労寿命が高い傾向にあると同時に Cu パターン上の Ni 有／Ni 無の違いによって熱疲労寿命が異なることが確認された。Ni 有／Ni 無において 500 サイクル以降も差が大きくなる傾向にある。1000 サイクル後の接合率を比較すると、Ni 無の方が、接合面積が約 1.3 倍広いことが確認された。

3.2 はんだ接合部の断面組織観察結果

Cu パターン上の Ni 有／Ni 無において熱疲労寿命に差が確認された為、初期品の断面組織を調査した。

Fig.4 及び **Fig.5** に Ni 有／Ni 無における断面の SEM 画像を示す。Ni 有のはんだ層は界面のみに金属間化合物（以下 IMC）が形成されているのに対し、Ni 無では、はんだ層全体に IMC が形成されている。IMC の角度は様々な角度が存在するが 90 度に近い角度の IMC が多く確認出来た為、角度を測定した。角度の測定結果を **Fig.6** に示す。せん断方向に対する角度を測定し、>90 度の数値は反転させ<90 度になるよう算出した。測定結果からは 0 度から 90 度まで広く分布するが、80 度付近がピークであることを確認した。

IMC の形態を調査する為、Ni 無のはんだ層をエッチングし IMC を露出させた SEM 画像を **Fig.7**、IMC 長さの累積プロット結果を **Fig.8** に示す。IMC の測定結果から、半

Fig.4 Cross sectional SEM images of solder joints with Ni plating.

Fig.5 Cross sectional SEM images of solder joints without Ni plating.

数以上が 100 μm 以上、上位 5 % 以上が 200 μm 以上の IMC により構成されていることを確認した（これらを以下ピラー状 IMC とする）。

3.3 熱疲労試験後のクラック観察

Fig.9 及び Fig.10 に Cu パターン上の Ni 有 / Ni 無における熱疲労試験後の断面の観察結果を示す。Ni 有ではクラックが直線的に進行しているのに対し、Ni 無ではクラックが多方向に進展している。ピラー状 IMC の生成により、クラックの進展方向が分散されていることが確認された。

Fig.6 Frequency of IMC pillar angle.

Fig.7 Cross sectional SEM images after etching (joint with Cu pattern without Ni plating).

Fig.8 Cumulative IMC pillar length distribution.

3.4 ピラー状 IMC 生成メカニズムの検証

ピラー状 IMC の生成メカニズムを調査するために、Ni 無 Cu パターンを用いた接合部を対象として検討を行った。

Table 2 にピラー状 IMC の組成定量分析結果を示す。ピラー状 IMC の組成は Cu_6Sn_5 の Cu に Ni が固溶し Sn に In が固溶した $(\text{Cu},\text{Ni})_6(\text{Sn},\text{In})_5$ であると考えられる⁷⁾。

Fig.11 にはんだ層の組成定性分析結果を示す。Cu パターン界面に形成された IMC に Ni が検出された。Ni は接合前

Fig.9 Fracture in the solder layer with Ni plating after TCT.

Fig.10 Fracture in the solder layer without Ni plating after TCT.

の初期の状態では対面のヒートシンクの Ni めっき層にのみ存在していることから、ここからはんだ層全域に Ni が拡散したことを示唆している。

3.5 Finite Element Method (FEM) 解析による熱疲労寿命向上メカニズムの仮説と検証

一般的なはんだ中のクラックは、歪み集中部に沿って進展していく⁸⁾。一方、ピラー状 IMC を含有しているはんだ層は、クラックがピラー状 IMC によって進路を変えて、多方向へ分岐することが確認された。これにより個々のクラック先端の歪み値が低減し、クラックの進展が抑制されたと推測する。

FEM 解析により、仮説の検証を行った。ピラー状 IMC を配列させたモデルを作成し、局所相当歪み分布及び最大相当歪みを算出した。

FEM 解析では、接合体のマクロモデルとはんだ層のミク

Table 2 Quantitative analysis result of IMC pillar.

Element (at%)			
Sn	Cu	Ni	In
41.1	52.6	3.8	2.5

Fig.11 Elemental analysis map of solder joint with Cu pattern without Ni plating.

ロモデルを作成した。はじめに、等価物性値を適用しマクロモデルの均質化解析を行い、相当歪み分布及び最大相当歪み値を算出した。

次に、マクロモデル解析結果をズーミングし、ミクロモデルの局所化解析結果から局所相当歪み分布及び最大相当歪みを算出した。

3.5.1 FEM 解析条件

Table 3 に FEM 解析に使用した材料物性データを示す。Table 4 に IMC の形状パラメータを示す。IMC の角度及び長さは Fig.6 及び Fig.8 の測定結果より正規分布でなく、モデル化が困難なことから、角度は最も多く確認された 80 度、長さはマクロ及びミクロモデル解析による物性値に影響すると考えられる 200 μm とした。IMC 率は断面での IMC 面積率測定値を体積分率とした。ミクロモデルでは、Table 4 の形状パラメータを反映し、Multiscale.Sim 6.0 によりはんだ層内にピラー状 IMC を乱数で配置した。FEM 解析を行う断面モデル及び接合層のピラー IMC モデルを Fig.12 に示す。

熱 - 歪み解析は、Fig.13 に示した熱疲労試験条件を模擬

Table 3 Material properties for FEM analysis.

	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio [-]	Linear expansion coefficient [ppm/°C]
Cu	129	0.34	16.8
Al	70	0.33	23.5
Si ₃ N ₄	290	0.27	3.4
Solder: SAC1	58	0.36	22.7
IMC pillar	123	0.3	16.3

Fig.13 TCT program for FEM analysis.

Table 4 Dimensional parameter of IMC for FEM analysis.

Length [μm]	Diameter [μm]	Angle [deg.]	IMC ratio [%]
200	20	80	3.5

Fig.12 FEM analysis model of IMC pillar.

Fig.14 Contour figures of mises strain in IMC pillar joining during TCT.

した温度プロファイルにて、ANSYS 16.0 により行った。

3.5.2 FEM 解析結果と考察

温度プロファイルのリフロー後、低温時、高温時におけるマクロ解析結果を行った。**Fig.14** に接合層端部の断面におけるマクロ解析結果を示す。さらに、ピラー状 IMC による歪み影響を検証するために局所解析を行った。接合層端部付近の断面における局所解析結果を **Fig.15** に示す。マクロモデルでは 4 % 弱の最大歪みが発生しているが、ミクロモデルでははんだ層に分散したピラー状 IMC の周辺は歪み集中部が存在し、最大で約 14 % の歪みが発生しており、ピラー状 IMC が存在することで歪み集中部が分散することがわかる。

熱疲労時にクラックが発生すると歪みは緩和され、次の歪みの高い点へクラックは進展していく⁹⁾。

ピラー状 IMC を含有しないはんだ層は、クラックが発生するとクラックの先端に歪みが集中し、クラックが進展していく。ピラー状 IMC を含有しているはんだのクラック進展メカニズムは下記と考えており、クラック進展経路の図を **Fig.16** に示す。

- ① 熱疲労試験時にピラー状 IMC 周辺に歪みが集中する。
- ② 歪みの高いピラー状周辺にクラックが進展する。
- ③ ピラー状 IMC によりクラックが止まる。
- ④ 次に発生するクラックは周辺の歪みの高いピラー状 IMC 周辺に複数に分散する¹⁰⁾。

このようにクラックがピラー状 IMC への到達を境に多方向に分散していく為、接合部のせん断方向へのクラックの進展速度が抑制されたと考えられ、本製品の寿命はせん断方向のクラック長さをクラック進展範囲として定義してい

Fig.15 Micro analysis of IMC pillar joining during TCT.

ることから、熱疲労寿命が向上した¹¹⁾。

4. 結言

本研究では、パワーモジュール向け大面積接合において、ピラー状 IMC を形成させた組織により、熱疲労寿命が著しく向上することを見出した。併せてその熱疲労寿命向上メカニズムについて調査した。以下にその成果を示す。

- 1) はんだ層にピラー状 IMC を分散させることで従来ののはんだ接合層より熱疲労寿命が大きく改善する。
- 2) ピラー状 IMC の形成は、Ni が Cu_6Sn_5 の生成サイトとなり、はんだ中への固溶限以上の Cu の溶解が IMC の成長を促進することにより起こったものと考えられる。
- 3) 熱疲労寿命向上は、クラックがピラー状 IMC に向かって進展し、到達を境に多方向に分散していく為、接合部

Fig.16 Mechanism of crack propagation.

のせん断方向のクラックの進展速度が抑制され、熱疲労寿命が向上したと考えられる

参考文献

- 1) 加柴良裕、小野山歩、林建一、マジウムダールゴラフ：“パワーモジュールの電力損失低減と小型化技術”、三菱電機技報、**10** (2009) 611-615.
- 2) 三浦昭二、大倉康嗣、岡部好文、百田聖自：“パワーカード用半導体素子の設計”、デンソーテクニカルレビュー、**16** (2011) 38-45.
- 3) 木村隆志、齋藤隆一、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** (2013) 42-47.
- 4) 加柴良裕：“高信頼性パワーモジュール”、Proc. of MES2013 (2013) 29-32.
- 5) 村松佑哉、別芝範之、中島泰：“パワーモジュールのはんだ接合部の高信頼化に関する検討”、Proc. of Mate2014 (2014) 79-82.
- 6) 両角朗、西村芳孝、西浦彰：“電気自動車用高信頼パワーモジュール技術”、富士時報、**76-10** (2003) 630-633.
- 7) Ahmed Sharif and Y.C. Chan: “Effect of indium addition in Sn-rich solder on the dissolution of Cu metallization”, Journal of Alloys and Compounds, **390** (2005) 67-73.
- 8) 河合通文、佐藤了平：“はんだ疲労のメカニズムと熱疲労寿命”、SHM 会誌 **10-3** (1994) 2-8.
- 9) 久里裕二、若松健吾、齊藤友治：“はんだ接合部の劣化・寿命診断方法の開発”、東芝レビュー、**56-12** (2001) 60-61.
- 10) 辻井信博：“金型の損傷形態と寿命向上対策”、Sanyo Technical Report, **7-1** (2000) 65-71.
- 11) 山田卓陽、寺地巧、宮本友樹、有岡孝司：“脱気高温水中におけるステンレス鋼の応力腐食割れ一粒界炭化物析出による SCC 抑制効果、および Mo と Cr の影響評価”、INSS JOURNAL, **14** (2007) 197-210.