

パワーモジュールの接合部での信頼性設計技術

福本晃久* 伊藤悠策**
 田中 陽* 小林 浩**
 花田隆一郎*

Reliability Design Technologies for Bonding Region of Power Modules

Akihisa Fukumoto, Yo Tanaka, Ryuichiro Hanada, Yusaku Ito, Hiroshi Kobayashi

要 旨

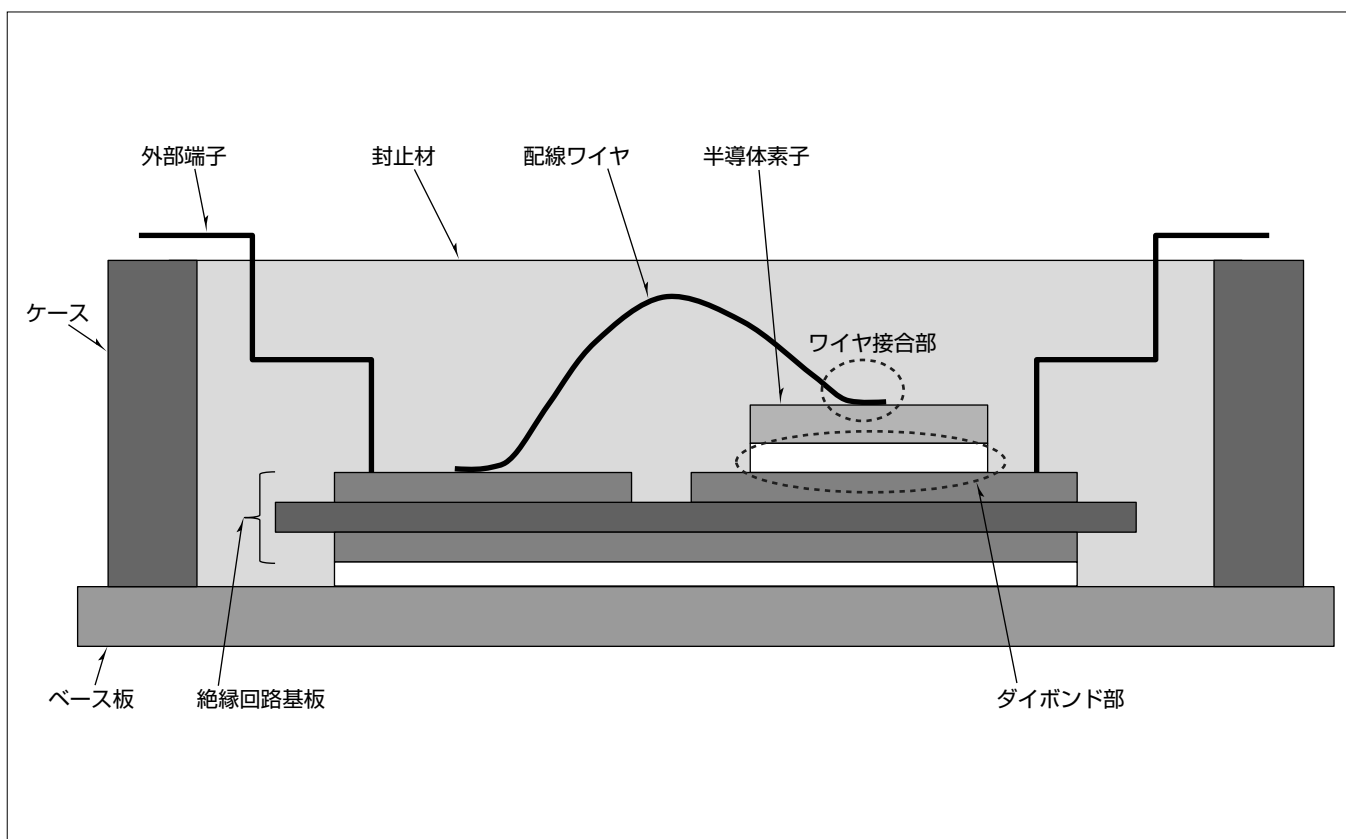
近年、パワーエレクトロニクスの応用がますます広がりを見せており、電力変換システムの進化軸として例えば高出力密度化(体積縮小)、長寿命化等が期待されている。

電力変換システムのキーコンポーネントの1つであるパワーモジュールは、その内部で半導体素子、絶縁回路基板、端子等の構成部材が電気的かつ機械的に接続されている。よって、パワーモジュールの内部には種々の接合部が存在する。高出力密度化、長寿命化のためには、パワーモジュールの接合部での信頼性設計のための技術が鍵になる。

パワーモジュールの接合部の中でも、半導体素子と配線ワイヤとの接合部(ワイヤ接合部)、及び半導体素子と絶縁

回路基板との接合部(ダイボンド部)は、発熱源である半導体素子と最近接しているために熱応力の影響が顕著であり、信頼性設計のための破壊メカニズム調査が特に重要となる。

今回は、ワイヤ接合部及びダイボンド部での信頼性設計に向けた破壊メカニズム調査の結果について述べる。ワイヤ接合部に関して、材料物性値とクラック進展部位との相関を調査し、信頼性設計の指針を得た。ダイボンド部に関して、はんだ接合部、焼結Ag(銀)接合部で接合層の鉛直方向にクラックが発生するモードに着目し、これまでに研究例の少なかったこのモードの破壊メカニズム調査を行い、信頼性設計の指針を得た。



パワーモジュールの接合部での信頼性設計に向けた破壊メカニズム調査

パワーモジュール断面に示されるのは、一般的なパワーモジュール構造である。ワイヤ接合部、ダイボンド部では大きな温度変化が繰り返し生じることで損傷が生じ、パワーモジュールの特性に規定の影響が及んだ時点でモジュールは寿命となる。ワイヤ接合部、ダイボンド部の信頼性設計技術に向けて、各接合部の破壊メカニズム調査を行った。

1. ま え が き

電力変換システムの進化の方向として高出力密度化(体積縮小)、長寿命化等が期待されている。電力変換システムのキーコンポーネントであるパワーモジュールに注目すると、パワーモジュール内部には種々の接合部が存在しており、それらの接合部の信頼性設計技術がシステムの高出力密度化、長寿命化を実現するための鍵となる。

パワーモジュールの接合部の中でも、半導体素子と配線ワイヤとの接合部(ワイヤ接合部)、及び半導体素子と絶縁回路基板との接合部(ダイボンド部)は、半導体素子と最近接しているために大きな温度変化に繰り返しさらされる。本稿ではワイヤ接合部とダイボンド部に着目し、まずは破壊メカニズムに関する基礎研究の結果を示し、次に破壊メカニズムの知見から導き出される信頼性設計の指針について述べる。

2. ワイヤ接合部

2.1 ワイヤ接合部の破壊メカニズム

ワイヤ接合部の信頼性を考える上で重要となるのは、ワイヤの材料特性⁽¹⁾と、被接合部材の半導体素子に形成された電極(チップ電極)の材料特性⁽²⁾であることが明らかになっている。封止材としてゲルを用いた場合、通常は、図1に示すようにワイヤ中をクラックが進展するモード(ワイヤクラックモード)が見られる。しかしワイヤ、チップ電極の構成を変えて検討を進めるうちに、構成次第ではチップ電極中をクラックが進展するモード(電極クラックモード)が確認された。そこで、ワイヤの引張強さ(MPa)をチップ電極のインデンテーション硬さ(MPa)で除した無次元の値(ワイヤ引張強さ/電極硬さ相対比)をもとにデータ整理した。ワイヤの引張強さを用いる理由は、データ取得の容易さによる。チップ電極に関してインデンテーション硬さを用いる理由は、チップ電極のような薄膜に対して引張試験を実施することは容易でなく、ゆえに強さと相関のある物理量である硬さを仮に指標とした。すると、ワイヤ引張強さ/電極硬さ相対比の一定値を境にワイヤクラックモードと電極クラックモードが切り替わった⁽²⁾。チップ電極がワイヤに比べて十分に強い場合はワイヤが最弱部となるためにワイヤ中をクラックが進展し、一方で電極のワイヤに対する強さが十分でないと最弱部がチップ電極となるためにチップ電極中をクラックが進展すると考えられる。

2.2 ワイヤ接合部の信頼性設計技術

ワイヤとチップ電極の構成を変えて信頼性試験を実施した結果を図2⁽²⁾に示す。図はワイヤ破断寿命とワイヤ引張強さ/電極硬さ相対比との相関を示しており、あるワイヤ引張強さ/電極硬さ相対比でワイヤ破断寿命が極大になっている(サンプルII)。また、破壊モードは図に示すとおり、

サンプルIがワイヤクラックモード、サンプルII、IIIが電極クラックモードであった。チップ電極がワイヤに比べて十分強い場合、すなわちワイヤクラックモードが生じる場合はワイヤを高強度化するほど寿命が延びるが、ワイヤ強度を高くしすぎると電極クラックモードになるため寿命が減少に転じると解釈できる。

この結果をもとに、ワイヤ接合部の信頼性設計手法を開発した⁽¹⁾。この手法は、ワイヤクラックモードを前提とする。検討の結果、ワイヤクラックモードが生じる条件下では、図3に示すように、ワイヤ素線の引張強さと高速ヒートサイクル試験によって得たワイヤ破断寿命との間に正の相関が確認された。図のような検量線を1度作成しておけば、次回以降に新たな種類のワイヤを検討する際は、ワイ

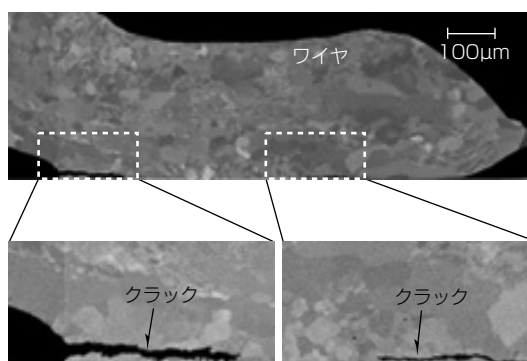


図1. ワイヤクラックモードの例

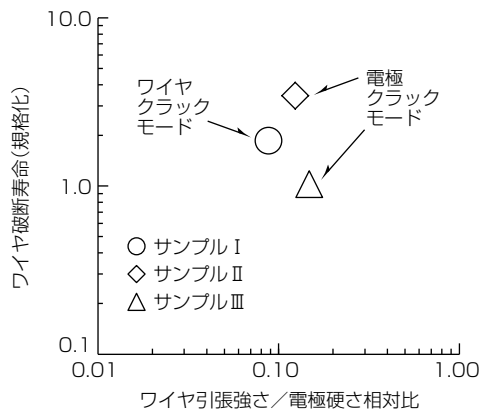


図2. ワイヤ破断寿命とワイヤ引張強さ/電極硬さ相対比との相関、及び各サンプルの破壊モード

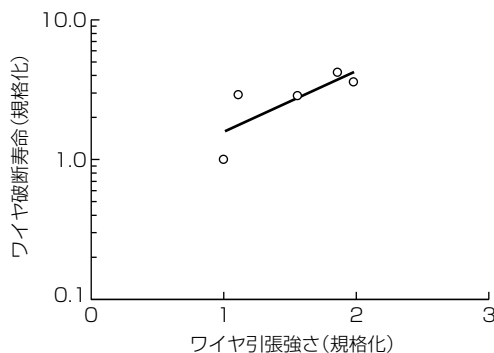


図3. ワイヤ破断寿命とワイヤ引張強さの相関

ヤ素線の引張試験を行うだけでワイヤ接合部の寿命推定ができる。パワーモジュールの信頼性設計にこの手法を適用することで、サンプル試作や信頼性試験の実施回数を低減できるため、開発期間を大幅に短縮できる。

3. ダイボンド部

この章では、ダイボンド材料の例として鉛フリーはんだ(Sn-Ag-Cu-Sb系)、及び焼結Agを取り上げる。焼結Ag接合は、パワー半導体素子の高温動作に対応できる高耐熱・高耐久接合技術である⁽³⁾。

3.1 鉛フリーはんだ接合部

3.1.1 はんだ接合部の破壊メカニズム

はんだ接合部の破壊メカニズムは大きく2種類あり、接合層の端部から水平にクラックが進展するモード(水平方向破壊)と、接合層のランダムな箇所から鉛直方向にクラックが発生するモード(鉛直方向破壊)が知られている。この2つの破壊モードは、基板の熱膨張率(CTE)に依存して切り替わる⁽⁴⁾。図4に信頼性試験後の評価用サンプルの透過X線像を示す。図4(a)のサンプルは基板として低CTEのCu/インバー/Cu(1:2:1)基板を用いており鉛直方向破壊が生じている。図4(b)のサンプルは基板として高CTEのCu基板を用いており水平方向破壊が生じている。

次にSn-Ag-Cu-Sb系はんだの鉛直方向破壊メカニズムの調査結果を述べる⁽⁴⁾。図5は信頼性試験後の評価用サンプルの断面観察像である。はんだ接合部には接合部を鉛直方向に貫通するようなクラックが発生していた(図5の左下)。また、新たに微小な破壊箇所を形成している箇所では、大きさが数μmから数10μmの微小なボイドが複数個形成されていることが分かった(図5の右下)。

図6は信頼性試験前後に評価用サンプルのはんだ接合部の断面を電子線後方散乱回折法(EBSD)によって分析した結果である。ここで、EBSDとは観察対象となるサンプルの表面での結晶方位をマッピングする手法である。図6(a)ははんだ接合直後の評価用サンプルの断面EBSD分析結果である。はんだ接合部は、観察領域が2つの結晶粒で占められており、接合時にはんだが一様な方位で凝固した組織であることが分かる。なお、分析結果に表れた棒状に見える物質は、Ag₃Snの析出物である。図6(b)は信頼性試験後の評価用サンプルの断面EBSD分析結果である。信頼性試験中に繰り返し熱応力が発生したことで、はんだ組織が動的回復によってサブグレインを生じ、その後粒界の角度が大きくなることで結晶粒界が形成されたと考えている。また、初期に生じたAg₃Snとは異なる合金相(IMC)が試験中に凝集したことも分かった。図6(b)に示すEBSDの分析結果から、はんだ組織中の結晶粒界やIMC周囲が微小なボイドの発生位置であることが分かった。はんだ接合部の

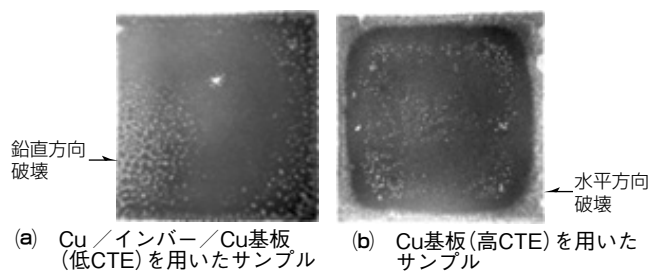


図4. はんだ接合部の破壊モードを示す透過X線像

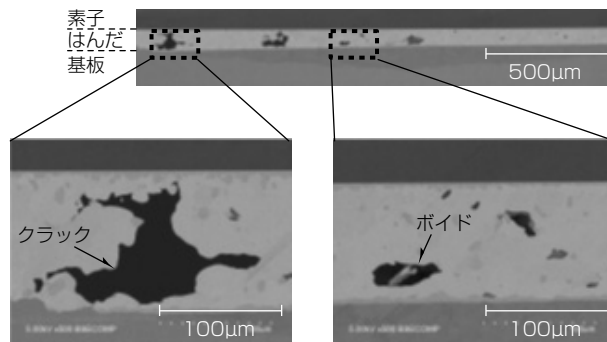


図5. 信頼性試験後の評価用サンプルの断面観察像

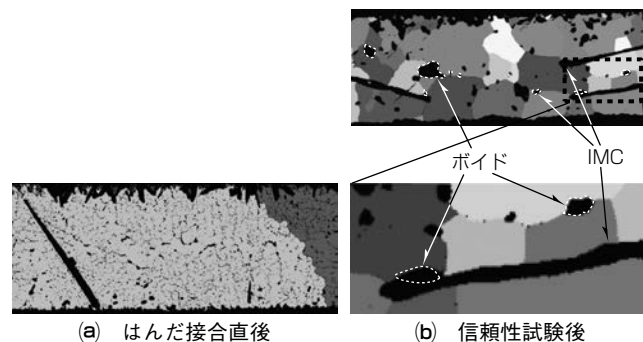


図6. 信頼性試験前後の評価用サンプルの電子線後方散乱回折法(EBSD)分析結果

鉛直方向破壊ははんだ組織中の結晶粒界やIMC周囲に発生した微小ボイドが成長又は連結することで接合部を鉛直方向に貫通するような破壊に至る機構であると考えられる。

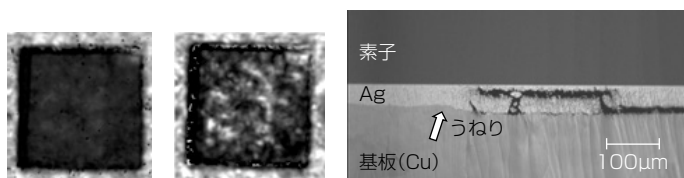
3.1.2 はんだ接合部の信頼性向上指針

はんだ組織に多数の粒界が生じたり、粗大IMCが析出したりすると、それらの微細構造から微小ボイドが生じ、鉛直方向破壊の原因となる。ゆえに信頼性向上のためにははんだ組織での結晶粒界の生成を低減し、はんだ接合直後の凝固組織(図6(a))をいかに保つかが重要となる。

3.2 焼結Ag接合部

3.2.1 焼結Ag接合部の破壊メカニズム

焼結Ag接合部も、はんだ接合部と同様に水平方向破壊と鉛直方向破壊の両方が起こる。本稿では焼結Ag接合部の鉛直方向破壊についてメカニズムの調査結果を述べる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。図7は評価用サンプルの超音波顕微鏡(SAM)像及び断面観察像である。図7(a)は初期のSAM像であり、半導体素子の箇所は一様な黒色である。しかし信頼性試験後は、



(a) 接合直後のSAM像 (b) 信頼性試験後のSAM像 (c) (b)で示すサンプルの断面観察像

図7. 焼結Ag接合部の破壊メカニズム調査結果

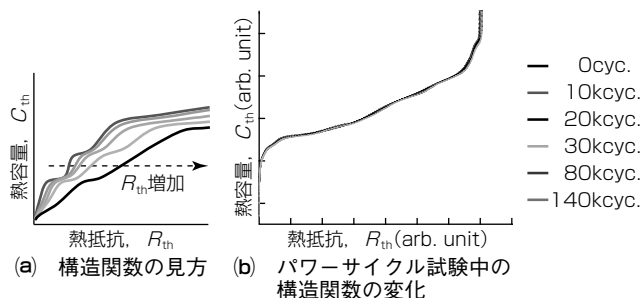


図8. 焼結Ag接合部の過渡熱抵抗解析

図7(b)に示すように焼結Ag接合部のランダムな箇所が白色となっている。白色領域の断面観察によって、図7(c)のような鉛直方向へのクラック進展と水平方向へのクラック進展が複合した破壊モードが確認された。破壊箇所では、絶縁回路基板のCuパターンが焼結Agとの界面でうねりを生じており、うねりの凹部でクラックが生じることが分かった。

3. 2. 2 焼結Ag接合部の信頼性設計指針

図7(c)の破壊モードについて、パワーモジュールの特性への影響が未知であったため熱抵抗を調査した⁽⁶⁾。熱抵抗の調査には過渡熱抵抗解析と呼ばれる手法を用いた⁽⁷⁾。この手法では、実験的に取得される冷却曲線をもとに、構造関数と呼ばれるプロットを算出する。構造関数は、サンプルの構成部材が損傷し熱抵抗値が増加したときに、図8(a)のようにグラフ上で右方にずれる特徴を持つ。図8(b)は焼結Ag接合部を持つ評価用パワーモジュールのパワーサイクル試験中に過渡熱抵抗解析を実施し、任意のサイクル数での構造関数を同時にプロットした結果である。この結果から、初期(0cyc.)から試験終了(140kcyc.)までの間に構造関数はほぼ変化しておらず、評価用パワーモジュールの熱抵抗は有意な変化をしていないことが明らかになった。パワーサイクル試験後には断面観察を実施しており、図7(c)に示されるのと同様の鉛直・水平方向へのクラック進展が

確認された。すなわち、この破壊モードは焼結Ag接合部の熱抵抗に対して影響が軽微であることが確認できた。この手法は、任意のパワーモジュールの焼結Ag接合部での信頼性設計指針の1つとなる。

4. む す び

パワーモジュールのワイヤ接合部に関して、クラックの進展部位を調査し、その結果をもとに信頼性設計方法を開発し、更に信頼性設計の指針を得た。ダイボンド部に関して、はんだ接合部、焼結Ag接合部で鉛直方向にクラックが発生するモードの破壊メカニズム調査を行い、その結果をもとに信頼性設計や信頼性向上の指針を得た。今後もパワーモジュールの接合部における信頼性設計技術の開発を通じて電力変換システムの高出力密度化、長寿命化に貢献する。

本稿の一部は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- (1) 伊藤悠策, ほか: パワーモジュールにおけるワイヤ接合部の簡易寿命推定手法の開発, Mate2016, 79 (2016)
- (2) 花田隆一郎, ほか: パワーモジュールにおけるワイヤ接合部の温度サイクル寿命と破壊モードの関係, Mate2017, 205 (2017)
- (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)
- (4) 田中 陽, ほか: 鉛フリーはんだ接合部の鉛直方向割れ耐性評価, Mate2016, 135 (2016)
- (5) 福本晃久, ほか: パワーモジュールの焼結Ag接合部の破壊メカニズムに関する調査, Mate2016, 125 (2016)
- (6) 福本晃久, ほか: パワーモジュールのチップ下接合層における鉛直方向破壊と熱抵抗との相関調査, Mate2017, 23 (2017)
- (7) Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction to Case of Semiconductor Devices with Heat Flow Through a Single Path, JESD51-14 (2010)