

学 位 論 文 の 要 旨

ピラー状金属間化合物を生成させた鉛フリーはんだ接合部の耐熱疲労性向上に関する研究

(Study on improvement of thermal fatigue resistance of lead-free solder joint formed pillar-shaped intermetallic compounds)

氏 名 中田 裕輔 印

本研究では、パワーモジュール製品における絶縁基板とヒートシンクの接合に用いるはんだ接合部の熱疲労耐久性を向上させるため、ピラー状金属間化合物(Intermetallic compound (IMC))を生成させたはんだ接合部に関する研究を行った。はんだ接合部内に生成させるピラー状 IMC の生成メカニズムを明らかにして、ピラー状 IMC の生成が熱疲労耐久性に与える影響を調査した。さらに、ピラー状 IMC を生成させることで高い接合強度が得られる合金を選定し、既存 Sn-3.0Ag-0.5Cu(mass%)合金に対するはんだ接合部の熱疲労耐久性向上策を検討した。

第 1 章では、地球温暖化問題、大気汚染問題から自動車における排ガス規制やガソリンエンジン規制について概説し、自動車の電動化の必要性を説いた。自動車電動化のコア部品の一つであるインバータ向けパワーモジュールの役割から、製品の進化を支える接合技術に注目し、高熱疲労耐久性を実現するいくつかの接合材料から、はんだにピラー状 IMC を生成させることで今までにない熱疲労耐久性が得られる可能性を示した。

第 2 章では、ピラー状 IMC の生成に及ぼす接合時のはんだ溶融条件及び冷却条件の影響について調査し、ピラー状 IMC の生成メカニズムを考察した。Sn-3.0Ag-0.5Cu と Cu 基板との接合部を対象として、ピラー状 IMC の形状及び構造を解析し、 Cu_6Sn_5 であることを明らかにした。また、ピラー状 IMC の生成角度は接合界面に対して 0 度から 90 度まで広く分布するが 90 度付近が最大となることを明らかにした。はんだ中への Cu の溶解度は Sn-Cu 系平衡状態図の液相線に沿って変化することから、接合温度によりピラー状 IMC の生成量が決まることを示した。さらに、ピラー状 IMC は溶融はんだの冷却時に、溶融はんだの固液共存相への相変化が始まることにより Cu_6Sn_5 が晶出し、液相の方向へ成長することにより、冷却方向に長いピラー状 IMC が生成することを明らかにした。

第 3 章では、ピラー状 IMC を生成させることにより熱疲労耐久性が向上することを確

認し、そのメカニズムをマイクロ組織観察及び FEM 解析からピラー状 IMC の機械的特性を明らかにして考察した。はんだ接合部に縦弾性係数の高いピラー状 IMC が強化材として機能することで、ピラー状 IMC はんだ接合部の縦弾性係数及びせん断強度は向上することを明らかにした。また、接合部の縦弾性係数はピラー状 IMC の生成方向に対して高くなる傾向があることから、機械的特性に異方性があることを示した。さらに、熱サイクル試験においてははんだ接合部に発生するき裂は、ピラー状 IMC への到達を境に多方向へ分散することで接合部のせん断方向への進展が抑制され、接合界面に対し平行方向へのき裂進展速度が小さくなることを明らかにした。

第 4 章では、ピラー状 IMC の生成に加えてはんだ合金による強化を加えることで更なる優れた熱疲労耐久性が期待できると考え、Sn-3.0Ag-0.5Cu 以外の 4 種のはんだ合金(Sn-0.7Cu-0.05Ni, Sn-5Sb, Sn-3.0Ag-0.5Cu-2.0Bi, Sn-3.0Ag-0.5Cu-5.0In)を比較評価し、最適な合金材を選定した。接合部のマイクロ組織観察より、全ての合金において 100 μm 以上の長さのピラー状 IMC が生成することを示した。各合金の接合強度は、Sn-3.0Ag-0.5Cu-2.0Bi 以外の合金はピラー状 IMC を生成させることで向上し、Sn-3.0Ag-0.5Cu-5.0In が最も高強度な接合部を形成することを明らかにした。

第 5 章では、第 4 章で最も高い接合強度が得られた Sn-3.0Ag-0.5Cu-5.0In を用いて、接合部にピラー状 IMC を生成させ、はんだ接合部の熱疲労耐久性を調査した。ピラー状 IMC を生成させることで、熱サイクル試験時に接合部に発生する非弾性歪み範囲は小さくなり、耐久性が向上した。これは、ピラー状 IMC を生成させることにより機械的特性が向上したことによる効果と考えられる。パワーモジュールを想定した接合試験片の熱サイクル試験から、ピラー状 IMC を生成させることにより熱疲労寿命が約 2 倍に向上することを示した。熱疲労解析より算出した非弾性歪み範囲と熱サイクル試験から得られた寿命から非弾性歪み範囲-寿命線図を作成した。その結果、ピラー状 IMC を生成させた Sn-3.0Ag-0.5Cu-5.0In は、Sn-3.0Ag-0.5Cu と比べ、パワーモジュールで想定される非弾性歪み範囲において総じて高寿命を示すことを明らかにした。

第 6 章では、本研究を総括した。

学 位 論 文 の 要 旨

ピラー状金属間化合物を生成させた鉛フリーはんだ接合部の耐熱疲労性向上に関する研究

(Study on improvement of thermal fatigue resistance of lead-free solder joint formed pillar-shaped intermetallic compounds)

氏 名 中田 裕輔 印

The aim of this study is to improve the thermal fatigue durability of the solder joints used to join the insulated substrate and the heat sink in power module products. A study on the solder joint formed pillar-shaped intermetallic compounds (IMCs) was conducted. The mechanism of the formation of pillar-shaped IMCs in the solder joint was clarified, and the effect of the formation of pillar-shaped IMCs on thermal fatigue durability was investigated. Furthermore, an alloy that obtains high joining strength by generating pillar-shaped IMCs was selected, and the improvement method for the thermal fatigue durability of the solder joint was investigated compared with the conventional Sn-3.0Ag-0.5Cu (mass%) alloy.

In chapter 1, the exhaust gas regulations and gasoline engine regulations for automobiles from the issues of global warming and air pollution were outlined, and the necessity of electrification of automobiles was explained. Considering the role of power modules for inverters, which are one of the core components for automobile electrification, the joining technology that supports the evolution of the products was focused on. It was shown that the formation of pillar-shaped IMCs in the solder joint could obtain higher thermal fatigue durability, considering several joining materials that could realize high thermal fatigue durability.

In chapter 2, the effects of the melting and cooling conditions of solder in the joining process on the formation of pillar-shaped IMCs were investigated, and the mechanism of formation of pillar-shaped IMCs was discussed. The shape and structure of the pillar-shaped IMCs were analyzed at the joint with Sn-3.0Ag-0.5Cu and a Cu substrate. It was found that the pillar-shaped IMCs are Cu_6Sn_5 , and the formation angles of them toward to the joining interface are widely distributed from 0 degree to 90 degree and becomes the maximum at around 90 degree. Also, it was found that the generation volume of pillar-shaped IMCs is determined by the joining temperature since the solubility of Cu in the solder changes along the liquidus in the Sn-Cu equilibrium phase diagram. Moreover, the mechanism of the formation of pillar-shaped IMCs grown up in the cooling direction was clarified as follows.

1. Cu_6Sn_5 crystallizes in the molten solder due to the phase transformation of molten solder

to the solid-liquid coexisting range in the cooling process of the molten solder.

2. Cu_6Sn_5 grows in the direction of the liquid phase.

3. The pillar-shaped IMCs grown up in the cooling direction were generated.

In Chapter 3, it was confirmed that the thermal fatigue durability is improved by generating pillar-shaped IMCs, and the mechanism was discussed by investigating the mechanical properties of pillar-shaped IMCs from microstructure observation and FEM analysis. It was found that the elastic modulus and shear strength of the solder joint with pillar-shaped IMCs are improved since the pillar-shaped IMCs having a high elastic modulus function as reinforcing materials in the solder joint. Also, it was found that the elastic modulus of the joint with pillar-shaped IMCs tends to be high with toward to the formation direction of the pillar-shaped IMCs, and thus the joint has anisotropic mechanical properties. The result of the thermal cycle test showed that cracks generated in the solder joint are restrained to progress in the shear direction of the joint due to dispersion of the cracks in multiple directions at the pillar-shaped IMCs. As a result, it was found that the crack growth rate in the direction parallel to the joining interface decreases.

In Chapter 4, further improvement of thermal fatigue durability by strengthening of solder itself in addition to forming pillar-shaped IMCs was conducted. Four types of solder alloys (Sn-0.7Cu-0.05Ni, Sn-5Sb, Sn-3.0Ag-0.5Cu-2.0Bi and Sn-3.0Ag-0.5Cu-5.0In) other than Sn-3.0Ag-0.5Cu were evaluated, and the optimum alloy was selected. The microstructure observation of the joints showed that pillar-shaped IMCs with a length of 100 μm or more were formed in all alloys. The strength of the joint with each alloy was improved by generating pillar-shaped IMCs except Sn-3.0Ag-0.5Cu-2.0Bi. As a result, it was clarified that Sn-3.0Ag-0.5Cu-5.0In forms the joint with the highest joint strength.

In Chapter 5, the joint with pillar-shaped IMCs was formed with Sn-3.0Ag-0.5Cu-5.0In and the thermal fatigue durability of the joint was investigated. The inelastic strain range generated at the joint during the thermal cycle test was reduced by the formation of pillar-shaped IMCs, and thus the thermal fatigue durability of the joint was improved. This is because those mechanical characteristics are improved due to the formation of pillar-shaped IMCs. Moreover, it was shown that the thermal fatigue life is improved to approximately double by generating the pillar-shaped IMCs from the result of the thermal cycle test of the joint assuming the power module. An inelastic strain range-thermal fatigue life diagram was created with the inelastic strain range calculated by thermal fatigue analysis and the thermal fatigue life investigated by the thermal cycle test. As a result, it was clarified that the Sn-3.0Ag-0.5Cu-5.0In joint with pillar-shaped IMCs has superior thermal fatigue life to that with Sn-3.0Ag-0.5Cu in a wider inelastic strain range assumed in the power module.

In Chapter 6, this study was summarized.