

| | |
|--------------|---|
| Title | Nanocomposite and Microcomposite Materials for Power Electronics Interconnections |
| Author(s) | 巽, 裕章 |
| Citation | |
| Issue Date | |
| Text Version | ETD |
| URL | https://doi.org/10.18910/77491 |
| DOI | 10.18910/77491 |
| rights | |
| Note | |

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論 文 内 容 の 要 旨

氏 名 (異 裕 章)

論文題名

Nanocomposite and Microcomposite Materials for Power Electronics Interconnections
(微細複合材料を用いたパワー半導体向け接合技術に関する研究)

論文内容の要旨

Nanocomposite (NC) and microcomposite (MC) materials are broad categories of composite materials consisting of two or more constituent materials characterized at nanoscale or microscale with significantly different physical or chemical properties. These materials are expected to enhance the properties of the individual ingredients. Monolithic solder alloys have been conventionally used for electronics interconnections. However, these alloys cannot meet all the requirements for state-of-the-art power electronics applications. In this dissertation, the concept of NC and MC materials tailored to various requirements for power electronics interconnections was verified through experimental and computational investigations.

In Chapter 1, the fundamentals of interconnections and assembly in power electronics were described. Subsequently, a wide variety of NC and MC interconnection materials were reviewed based on our morphological classification (i. e., matrix-dilute inclusion composites and bicontinuous composites).

In chapter 2, the effects of the material combination and geometrical arrangements on their composite properties were comprehensively discussed through finite element (FE) simulations using simplified representative volume element (RVE) models from a macroscopic perspective. Based on the FE simulations, three distinctive NC and MC candidates, promising the favorable material properties, were proposed as follows: porous Ag material, Cu-embedded solder composite, and Cu (and/or Cu_6Sn_5)-embedded polymer composite.

In chapter 3, an approach utilizing a sintered closed-porous Ag material was discussed. The closed-porous morphology was successfully realized by a pressure-assisted sintering process at 260 °C by employing a Ag nanoparticle paste. Metallurgical observations and tensile tests of the sintered Ag films revealed their nanocrystalline-unique properties. A thermal cycling test performed on die-attached specimens at a peak temperature of 250 °C showed their applicability to SiC high-temperature interconnections.

In Chapter 4, an approach utilizing a metallic mesh-embedded solder composite was described. The composite consisted of a Sn-based solder matrix and thin Cu or Ni meshes, which were expected to stabilize the solder matrix against mechanical and thermomechanical loadings and enhance the thermal conductivity of the composite. Microstructural observation, shear strength tests, and thermal and mechanical FE simulations verified good structural integrity of such metallic mesh-embedded solder composite joints. Furthermore, thermal aging and thermal cycling tests verified that the Cu mesh-embedded solder composite joint was an attractive joining solution for power modules at a maximum temperature below 200 °C.

In Chapter 5, an approach utilizing a Cu-intermetallic compound (IMC)-embedded polymer composite was detailed. A skeleton-shaped microstructure consisting of Cu particles connected with Cu-Sn IMC bridges embedded in a polyimide resin matrix was successfully fabricated by a pressureless transient liquid-phase sintering (TLPS) process using a Cu-solder-resin composite paste at 250 °C. Microstructural evaluation, joint strength tests, and thermal conductivity measurements verified its excellent performance. Furthermore, mechanical FE simulations revealed its significantly low stiffness. Thermal aging at 200 °C and thermal cycling tests of the die-attached specimens verified that this approach has a significant potential to be applied in TLPS techniques for thin-chip die-attachments of power modules.

The concept of NC and MC materials tailored to various requirements for electronics interconnections was comprehensively verified by the prediction of equivalent characteristics, and the experimental and computational evaluations of three specific NC and MC interconnection materials. This dissertation was expected to contribute to the further development of NC and MC materials in electronics interconnections.

論文審査の結果の要旨及び担当者

| 氏 名 (異 裕 章) | | | |
|---------------|-----|-----|-------|
| | (職) | 氏 名 | |
| 論文審査担当者 | 主 査 | 教授 | 廣瀬 明夫 |
| | 副 査 | 教授 | 福本 信次 |
| | 副 査 | 教授 | 西川 宏 |
| | 副 査 | 教授 | 佐野 智一 |

論文審査の結果の要旨

微細複合材料は、大きく特性の異なる 2 種類以上の材料から構成され、その形態がナノあるいはマイクロオーダーで特徴づけられる複合材料である。本材料は従来用いられてきたモノリシック材料では実現しえない様々な特性を発現することが期待される。本論文では、多様な特性が要求されるパワーモジュールのダイアタッチ部に対して、上記の微細複合材料の概念を適用しその有効性を実証することを目的としている。ここでは、微細複合材料の等価特性を予測する手法と、それに基づいた有望な微細複合材料を提案している。さらに、導出された微細複合材料を実現する接合材料と接合プロセスを考案し、得られた接合部の諸特性が各種パワーモジュールのダイアタッチ部に対して有望であることを明らかにしている。得られた知見の詳細は下記のとおりである。

1. 介在物の形態の異なる様々な微細複合材料について、これらの微細構造を包括的に表現できる代表体積要素モデルを考案し、微細複合材料の等価特性、すなわち等価ヤング率と等価熱伝導率を推定する有限要素法 (FEM) シミュレーションの手法を提案している。
2. 得られた等価特性の予測手法を用いることによって、焼結 Ag ポーラス材料、Cu メッシュ含有はんだ複合材料、および Cu-金属間化合物 (IMC)-樹脂複合材料が、それぞれ SiC パワーモジュール、次世代 Si パワーモジュールおよび薄型 Si チップ搭載パワーモジュールへの適用に対して有望であることを示している。
3. Ag ナノ粒子を用いた加熱加圧プロセスによって、ナノオーダーの結晶と閉気孔から構成される焼結 Ag ポーラス接合部の形成に成功している。本接合部の各種評価の結果、最高温度 250 °C の使用に耐えることを実証し、上述の適用対象にとって好ましい特性が得られることを示している。
4. Cu メッシュとはんだペーストを用いた無加圧下でのリフロープロセスによって、共連続構造を有する Cu メッシュ含有はんだ複合材料の形成に成功している。本微細複合材料により接合部の強化と熱伝導率の向上が可能であるとともに、はんだ母相でありながら最高温度 200 °C の使用に適することを示し、上述の適用対象にとって有望であることを明らかにしている。
5. Cu 粒子、はんだ粒子および熱硬化性樹脂を用いた無加圧下での液相拡散焼結プロセスによって、Cu と IMC からなる骨格と樹脂から構成される共連続型の微細構造の形成に成功している。特徴的な微細構造により、応力緩和性に優れた機械的特性が発現することを明らかにしている。加えて、200 °C における接合信頼性が得られることを明らかにし、上述の適用対象にとって有効な接合材料であることを示している。

以上のように、本論文はパワーモジュールのダイアタッチ部に対して微細複合材料の適用を提案し、継手要求に対応した材料設計の手法を考案するとともに、得られた微細複合材料の評価を通じてその有効性を実証している。本論文は、構成材料や形態といった諸因子を制御することで特異な特性を発現しうる微細複合材料の有用性を示すものであり、今後のエレクトロニクス実装材料の発展につながる知見を提示した点においてその成果は重要である。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。