

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：11401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17931

研究課題名(和文) 極微小次世代低温はんだの高密度電流下損傷機構の解明と応用展開

研究課題名(英文) Clarification of Damage Mechanism of Micro-sized Next-generation Low-temperature Solder under High Current Density and its Applications

研究代表者

趙 旭 (Xu, ZHAO)

秋田大学・理工学研究科・助教

研究者番号：20650790

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では次世代低温はんだであるSn58Bi (wt%)はんだの高密度電流下エレクトロマイグレーション(EM)損傷機構を解明し、はんだ接合の信頼性向上対策および金属リサイクル技術への応用を提案した。開発した最小長さが50 μ mはんだ接合を含め、異なる長さを有するはんだ接合試験片に基づいて、EM損傷発生の臨界条件を高精度に推定することを実現した。これと共に、はんだの寸法減少による金属間化合物層の成長挙動および局所的電気抵抗・温度の変化も調査した。さらに、人工保護膜コーティングまたは微量元素の添加によるSn58BiはんだのEM耐性向上対策を提案し、その効果を実証した。

研究成果の概要(英文)：Electromigration (EM) damage mechanism of Sn58Bi (wt%) solder, which is so called next-generation low-temperature solder, was clarified. In addition, in terms of EM reliability issues in solder joint, several countermeasures for enhancing EM resistance of Sn58Bi solder were proposed, as well as the proposition of applying EM mechanism to new metal recycle technology.

On the basis of a developed test structure, in which different micro-sized solder strips were jointed and the minimum solder length was 50 μ m, the critical condition for initiation of EM damage was investigated with a high degree of accuracy. The variations in growth of intermetallic compound layer and local electrical resistance and temperature with the decreasing solder size, were investigated. Moreover, coating of artificial passivation layer and addition of microelements for enhancing EM resistance were proposed, and their effects were verified.

研究分野：機械材料・材料力学

キーワード：低温はんだ エレクトロマイグレーション バックフロー Sn58Bi

1. 研究開始当初の背景

電子部品の接合にて従来使われる共晶錫鉛はんだは、鉛含有により環境および健康への有害性があるため、2006年より電子機器への使用が原則として禁止され、鉛フリーはんだの開発と普及が急務とされる。現在、種々の開発品の中、「低温はんだ」と呼ばれる Sn58Bi (wt%) はんだは有力な代替品の一種として注目されている。当該はんだは 139°C の融点を持つため、他のほとんどの開発品より融点が低く(例えば、Sn3Ag0.5Cu、融点 219°C)、かつ引張強度が優れており、低温接合、省エネルギー化および熱損傷に弱いプロセスなど広範囲に適用されている。一方、Bi は脆くてせん断衝撃に弱い。近年、Sn58Bi はんだにおけるエレクトロマイグレーション(EM)により Bi 原子が陽極側に拡散し、接合界面にて蓄積することにより連続的な Bi-rich 層が形成され、はんだ接合の信頼性を脅すことが報告された。EM とは、高密度電子流を駆動力とする金属原子の拡散現象であり、電子デバイスの信頼性に関わる深刻な問題として知られている。

Sn58Bi はんだの EM に関する研究が少ない一方、高密度電子流下 Sn と Bi 原子の拡散機構や、原子拡散によるはんだ接合の鍵である金属間化合物層(IMC 層、硬くて脆い)成長の有無や、局所的電気抵抗の上昇(Bi の電気抵抗率が Sn より約 10 倍高い)によるジュール熱に起因する溶断の有無など、未だ解明されていない点が多く存在する。さらに、電子デバイスの微細化と高集積化の進展に伴い、近いうちにはんだバンプの長径が現在の数百 μm から数~数十 μm に減少し、電流密度の増加および原子拡散経路の短縮により上記の問題点が深く懸念され、それらの解明は緊急課題となる。

2. 研究の目的

本研究は、電子デバイスの微細化によるはんだの寸法減少を想定し、先駆けて長さが数十 μm という極微小な Sn58Bi はんだの高密度電流下 EM 損傷機構を解明すると共に、はんだ接合の信頼性向上対策および金属回収への応用展開を提案することを目的とする。

3. 研究の方法

長さが数十 μm という極微小な Sn58Bi はんだの高密度電流下 EM 損傷機構の解明と定量的評価を行い、はんだ接合の信頼性向上対策および金属リサイクル技術の開発への応用展開を提案した。特に、本研究の遂行の鍵となる EM 評価方法に関し、従来のはんだ EM 研究の問題点を打開し、かつ評価効率に優れた新規試験片を開発した。2年継続で、(1)高密度電流下 Sn と Bi 原子の拡散機構の解明、(2)寸法減少による IMC 層の成長挙動および定量的評価、(3)寸法減少による局所的電気抵抗・温度の変化および定量的評価、(4)EM 耐性向上対策の提案、(5)二元共晶系合金の

原子拡散機構の応用展開、となる 5 項目の研究を推進し、目的の達成を図った。

4. 研究成果

(1) 高密度電流下 Sn と Bi 原子の拡散機構の解明

従来のはんだ EM 研究の問題点を打開し、かつ評価効率に優れた試験片構造を新規に提案した(図 1 参照)。最小長さが 50 μm のはんだ接合を含め、異なる長さを有する直線型 Sn58Bi はんだの EM 同時評価を行い、はんだの寸法減少による EM 挙動の変化を調査した。

Sn58Bi はんだにおける自然酸化膜の存在

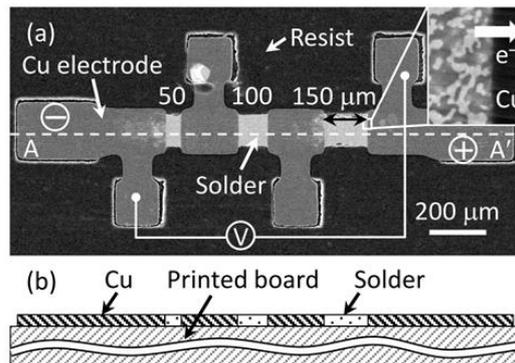


図 1 開発した試験片の例: (a)平面図、(b) A-A'断面の模式図(Reprinted with permission from (2). Copyright (2016), The Minerals, Metals & Materials Society)

によりバックフローと呼ばれる原子流(EM と逆方向の原子流)が生じ、はんだの EM 挙動は長さに依存することを見出した(図 2 参照)。はんだが短ければ短いほど、バックフローの影響が大きくなり、EM が起きにくくなる。ところで EM による原子流束とバックフローがバランスすると EM 損傷が発生しない。構築した理論モデルとともに、EM およびバックフローに支配される Bi 原子ドリフト速度を測定することにより、EM 損傷発生時の臨界条件(はんだの臨界長さ×電流密度の積)が 38~43 A/cm であると高精度に推定することを実現した(図 3 参照)。これにより、任意長さの Sn58Bi はんだに対してその EM 発生に必要な電流密度を予測できる。逆に、ある電流密度に対して EM 損傷発生のはんだの臨界長さを推定することも可能であり、現在微細化の進んでいる電子デバイスの信頼性設計に指針を与えられる。

高密度電流下 Sn と Bi 原子の拡散経路を追跡し、Sn58Bi はんだの EM 拡散機構を実験的に解明した。Bi 原子は電子流により、Bi 層だけでなく、Sn 層にも介して陽極側に拡散できる(図 4(d)参照)。一方、Sn 原子は Bi 層に溶解できないため、陽極側における Bi 原子の蓄積により Sn 原子が排除されて陰極側に拡散する。このような原子拡散が進行すると、最終的に Sn 層と Bi 層が完全に分離する。これに基づいて、陰極側における Sn 層の形成によ

り IMC 層の成長が促進される恐れがあるというはんだ接合部での新たな信頼性問題を予測した。

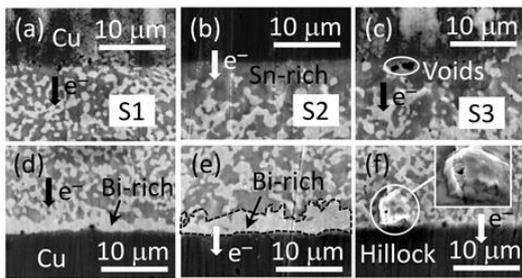


図 2 通電後の試験片の表面形態: (a)長さ 50 μm 、(b) 100 μm 、(c) 150 μm のはんだの陰極側; (d)長さ 50 μm 、(e) 100 μm 、(f) 150 μm のはんだの陽極側(Reprinted with permission from (2). Copyright (2016), The Minerals, Metals & Materials Society)

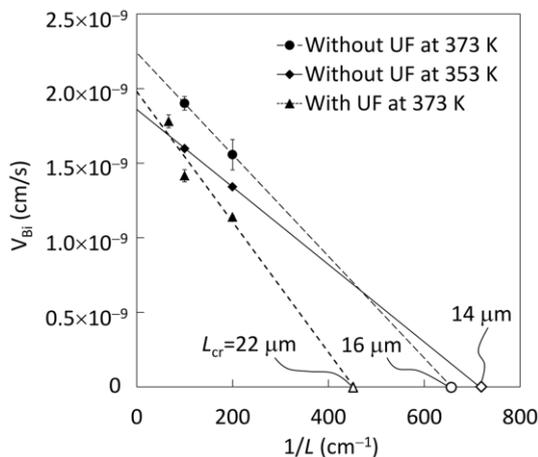


図 3 Sn58Bi はんだの長さによる Bi ドリフト速度の変化。すべての電流密度は 27 kA/cm^2 である (Reprinted with permission from (1). Copyright (2017), The Minerals, Metals & Materials Society)

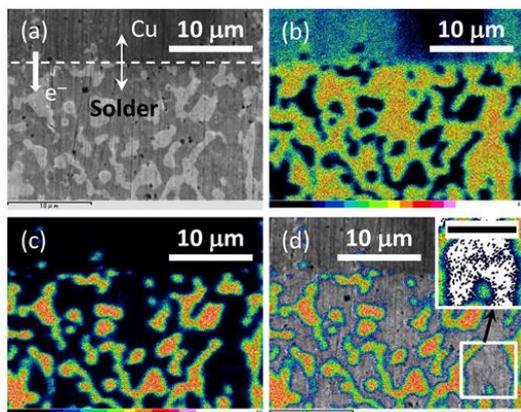


図 4 はんだ接合陰極側の EDX 分析結果: (a) SEM 画像、(b) Sn および(c) Bi 分布マップ、(d) Bi 分布の強調図(Reprinted with permission from (1). Copyright (2017), The Minerals, Metals & Materials Society)

(2) 寸法減少による IMC 層の成長挙動および定量的評価

最小長さが 50 μm を含め、異なる長さを有する複数のはんだ接合サンプルの通電実験を同時に行い、接合界面に着目して定期的に IMC 層を観察した。種々の電流密度と加熱温度の組合せかつ通電時間が 30–90 時間にて、陽極側には Bi-rich 層が顕著に成長したが、陰極側と陽極側両方ともにはんだの寸法減少による IMC 層の成長が見られなかった。しかし、研究成果(1)に記述した通り、より長時間通電下にて陰極側における Sn 層の形成により IMC 層の成長が促進される恐れがあることを否定できない。

(3) 寸法減少による局所的電気抵抗・温度の変化および定量的評価

マイクロ四端子法を利用して通電中の各長さの Sn58Bi はんだの電気抵抗変化を独立に測定した。Bi-rich 層の成長により電気抵抗が上昇し、はんだが長ければ長いほど、電気抵抗の上昇量大きい。これとともに、温度上昇によるはんだの溶断場所についても検討した。電流密度の違いにより Sn58Bi はんだの溶断特性が異なることを見出した。

はんだの中央部の電流密度が他の部分よりはるかに大きい場合(例えば、くびれのある中央部)、陽極側にて Bi-rich 層が形成せず、中央部が短時間で溶断した(図 5(a)参照)。これは、中央部にて局所的電流密度の増大により原子流束発散が大きくなり、原子損失によるポイド(空孔)が多く生じたとともに、電気抵抗の顕著上昇により溶断したと考えられる。一方、はんだ全体にて電流密度がより均一に分布した場合、EM がゆっくり進行し、陽極側にて成長した Bi-rich 層のジュール熱により溶断が発生しやすい。Bi が融点約 270 $^{\circ}\text{C}$ で溶けにくい、Bi-rich 層の温度上昇に伴い周囲の Sn58Bi はんだの温度が先に融点(139 $^{\circ}\text{C}$)に達し、溶断したと考えられる(図 5(b)参照)。また、一般的にはんだ接合に使用されているはんだボールは、中央部の幅が接合部の幅より大きい、中央部における局所的電流密度の増大による溶断は発生しにくい。どちらかという、図 5(b)に示すような溶断特性により近いと思われる。

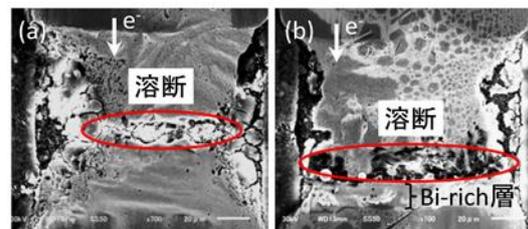


図 5 (a)中央部の溶断例、(b) 陽極側の溶断例

なお、面内自走式精密位置決め装置を開発した(図 6 参照)。これにより、極微小はんだにおける場所による温度分布を高精度に測

定することを可能にした。

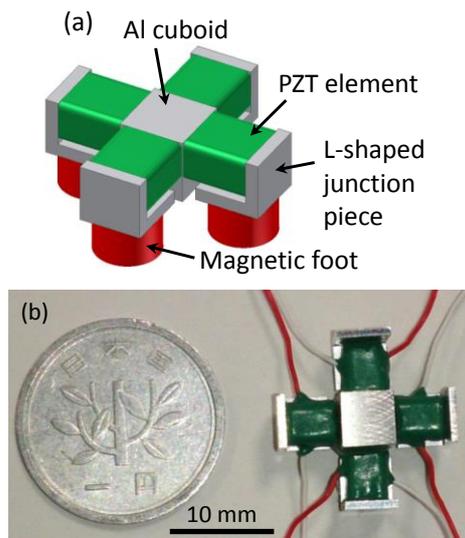


図 6 開発した面内自走式小型位置決め装置

(4) EM 耐性向上対策の提案

研究成果(1)で解明したバックフローの影響および EM 拡散機構に基づき、人工保護膜コーティングまたは微量元素の添加による Sn58Bi はんだの EM 耐性向上対策を提案した。

人工保護膜のコーティングについて、前述した EM 損傷発生の臨界条件から求めた EM 損傷が生じる臨界の電流密度であるしきい電流密度を評価指針とし、保護膜における EM 耐性強化効果の評価手法を確立した。集積回路の封止に用いられるアンダーフィル材を人工保護膜として Sn58Bi はんだに被覆し(図 7(a)参照)、酸化膜の場合(人工保護膜なしの場合)と比較した。被覆ありの Sn58Bi はんだではしきい電流密度が 37-55% 向上したことを見出し(図 3 参照)、アンダーフィル材を保護膜とすることによる EM 耐性強化効果を実証した。また、アンダーフィル材がヒートシンクとして機能し、はんだの溶断耐性を向上させることも見出した。

図 1 に示す試験片構造に基づいて、はんだボールを模擬したたる型サンプルの作製にも成功した(図 7(b)参照)。理論的考察と数値シミュレーションにより、直線型サンプルの場合に比べ、たる型サンプルではしきい電流密度が向上するという推測を得た。これとともに、直線型はんだの EM 損傷発生の臨界条件に基づいて、直線型およびたる型はんだの電気問題を扱った数値シミュレーションの解析結果より、複雑な形状により解析が従来困難であったたる型はんだの EM 損傷発生の臨界条件を簡潔に予測できる手法を開発した。

微量元素の添加について、Bi 原子が Sn 層にも介して拡散することを鑑み、Sn 層内に Bi 拡散の障害物を形成させることを考案した。微量な Ag、Ni など Sn と反応して IMC

を形成する元素を添加することにより、Bi 原子の拡散を抑制するとともに、EM 耐性向上対策を提案した。より EM 耐性の強い SnBi 基低温はんだの組成設計の基盤を築いた。

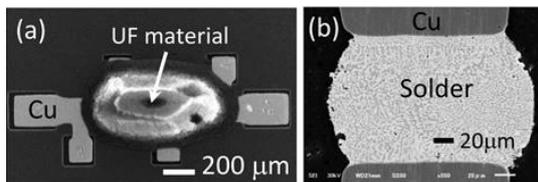


図 7 (a)アンダーフィル材被覆した直線型試験片、(b)被覆なしのたる型サンプル(a) is reprinted with permission from (1). Copyright (2017), The Minerals, Metals & Materials Society

(5) 二元共晶系合金の原子拡散機構の応用展開

解明した Sn と Bi 原子拡散機構を基にした二元共晶合金のリサイクル技術の理論基盤を構築した。これにより、金属リサイクルにおける従来の方法では回収が困難なプリント回路基板に含まれる合金を高密度電流を印加することにより分離させ、回収することが可能である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- (1) X. Zhao, S. Takaya, M. Muraoka, Electromigration critical product to measure effect of underfill material in suppressing Bi segregation in Sn-58Bi solder, Journal of Electronic Materials, 査読有, 2017, 8 pages, 印刷中
DOI: 10.1007/s11664-017-5507-8
- (2) X. Zhao, M. Muraoka, M. Saka, Length-dependent electromigration behavior of Sn58Bi solder and critical length of electromigration, Journal of Electronic Materials, 査読有, Vol.46, No.2, 2017, pp.1287-1292
DOI: 10.1007/s11664-016-5093-1
- (3) M. Muraoka, X. Zhao, S. Liu, Ultracompact planar positioner driven by unbalanced frictional forces, Actuators, 査読有, Vol.4, No.3, 2015, pp.172-181
DOI: 10.3390/act4030172

[学会発表] (計 4 件)

- (1) X. Zhao, S. Takaya, M. Muraoka, Electromigration in eutectic Sn58Bi solder strips, 2016 M&M International Symposium for Young Researchers (国際学会), 2016 年 8 月 10~12 日, State University of New York at Stony Brook, New York (USA)
- (2) 高屋 理志, 趙 旭, 村岡 幹夫, 次世

代低温はんだにおけるエレクトロマイグレーション損傷発生の臨界条件, 日本機械学会東北支部第 51 期総会・講演会, 2016 年 3 月 11 日, 東北大学工学部青葉記念会館(宮城県・仙台市)

- (3) 趙 旭, 村岡 幹夫, 異なる長さを有する極微小はんだ接合における高密度電流下の損傷の同時評価, 日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス, 2015 年 11 月 21~23 日, 慶応義塾大学(神奈川県・横浜市)
- (4) 趙 旭, 村岡 幹夫, 高密度電流下 Sn58Bi はんだのエレクトロマイグレーション発生の臨界長さ, 日本機械学会第 23 回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2015), 2015 年 11 月 13~15 日, 広島大学(広島県・東広島市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

趙 旭 (ZHAO, Xu)

秋田大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号: 20650790