

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：33908

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04272

研究課題名(和文)液体金属を用いた低温実装できる熱疲労破壊しないはんだ接合部の創成

研究課題名(英文)Creation of a solder joint using a liquid metal, which can be assembled at a low temperature and does not have a thermal fatigue.

研究代表者

山中 公博(Yamanaka, Kimihiro)

中京大学・工学部・教授

研究者番号：50609229

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：エレクトロニクス製品の主な故障原因に、はんだ接合部の温度サイクルによる疲労破壊がある。本研究では、はんだ接合部に、常温で液体であるGaを用い、固体接合部に特有の疲労破壊を失くすことを目指した。接合材として基本的な特性であるが、これまで取り組みがなかった電気機械設計に必要な「-40から200における、Gaの電気抵抗温度特性と過冷却特性」と信頼性を決める「Gaと電極金属との高温反応特性」を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

カーボンニュートラル社会を実現するため、自動車の電動化が加速している。モータ駆動用のパワーモジュールを、断線しない接合技術で実現するための基本的な成果を得た。また、人工知能コンピュータなどの高機能半導体デバイスは、10μm以下の微細はんだ接合が必須となる。これを実現するために必要な、省エネでもある80以下の低温実装技術の可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：A thermal fatigue of solder joints is one of major failure modes in electronics products. This research aims application of Ga to solder joints as a liquid metal joint at room temperature to overcome the thermal fatigue which happens because of solid solder joints. "Temperature characteristics (-40 and 200) of Ga electrical resistance and its super cooling characteristics" and "Reaction characteristics between Ga and electrode metals in high temperatures" were clarified.

研究分野：エレクトロニクス実装技術

キーワード：液体金属 低温実装 はんだ接合部 パワーモジュール 高機能半導体

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

車載用パワー半導体は、小型化（高電流密度化）と動作温度の高温化（175 以上）が必要とされる。また、マイクロプロセッサ等高性能ロジック半導体は、フリップチップ接合部の狭ピッチ化が加速している。さらに、脳コンピュータデバイスでは、10 μm レベルの狭ピッチが必要とされる。高温動作が進むと、動作時と非動作時の温度差が大きくなり、半導体接合部の熱疲労破壊（温度サイクル）寿命が短くなる問題が生じる。一方、狭ピッチ化が進むと、リフロー時に隣の接合部と接触し、接合部形成ができなくなる問題がある。いずれも、半導体とパッケージ基板の熱膨張係数差が原因である。

2. 研究の目的

上記のような高温、高密度実装に対応する接合技術として、接合部に融点 29.8°C である Ga を使用し、「50 の低温接合と熱疲労破壊しない」接合部を実現する。本研究では、Ga の広い温度範囲の電気特性と過冷却特性、Ga と接合材（Ni、Cu）の界面挙動を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) Ga の電気抵抗の温度特性と過冷却特性

電気抵抗率を、車載を視野に入れた -30°C から 200°C の範囲を連続計測する。液体 Ga は容易に形状を変えるため、形状保持機能が必要になる。また、Ga が液体から固体に相転移するときの約 3% の体積膨張を許容する必要がある。

図 1 にこれらの要求を満たすよう設計したサンプル概要を示す。両端を凹状にカットしたガラス管（内径 0.63 mm、外径 0.9 mm、長さ約 10 mm）に、50 の液体 Ga（純度 4N）をスポイトで注入した。このとき、Ga は内壁をよく濡らし、気泡は挟まない。次に、Ga の温度を測定するため、熱電対（先端直径 0.13 mm、ガラスコート）をガラス管中央まで挿入した。また、Ga の微小電気抵抗を四端子測定するため、電圧センス線と電流供給線（共に直径 0.1 mm Cu 線）を、前者は端面凹部分に固定し、後者は端面の Ga に接触させた。2 本の電圧センス線間を電流経路長とした。サンプルは温度コントローラに取り付け、温度変化させながら電気抵抗を測定した。

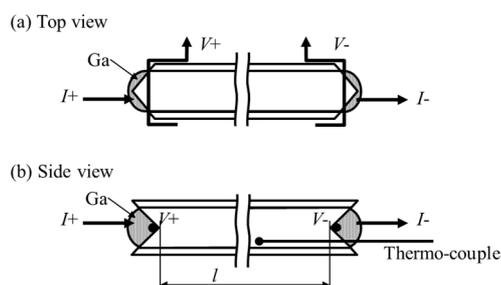


図 1 Ga 電気抵抗率測定用サンプル

(2) Ga と電極（Cu、Ni）界面の高温保持時の反応挙動

Ga を電極材に接合させた後、 150°C と 200°C の高温放置試験を実施し、界面の反応層を観測する。

図 2 にサンプル概要を示す。電極材に無酸素銅板（純度 4N）と Ni（純度 4N）を用いた。電極材表面はエメリー紙（2000 番）で研磨し、中性洗剤、イソプロピルアルコール（50%）、精製水の順に洗浄した。電極材の四辺には、Ga 広がり防止用にポリイミドテープを接着した。

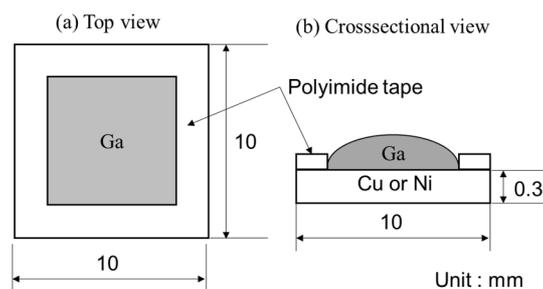


図 2 Ga/電極材の界面反応評価サンプル

今回初めて確立した 50 の低温接合プロセスで液体 Ga（純度 4N）を電極材に接合しサンプル作製を行った。このサンプルを用いた高温放置試験を、 150°C と 200°C で、3000 h 実施した。試験後のサンプルは、断面を鏡面研磨し、金属顕微鏡と電子顕微鏡で観察した。

4. 研究成果

(1) 50 の低温接合プロセス

本研究で、これまで取り組みのなかった Ga と電極材の低温接合プロセスを確立し、サンプルはこのプロセスで作製できるようになった。すなわち、 $1.45 \pm 5^\circ\text{C}$ に維持した保管容器中の Ga をスポイトで取り出す。2. これを約 12 秒後（このとき約 35°C ）に、ホットプレート上で $50 \pm 10^\circ\text{C}$ に維持した電極材表面に塗布する。3. 塗布した Ga に 4% 塩酸を滴下し、濡れ性を確保する。その後、 50°C で 20 分間サンプルを放置する。

(2) Ga の電気抵抗の温度特性と過冷却特性

外部で測定できる温度と電気抵抗率から、内部の Ga 相状態が判断する方法がわかった。

図3に-30 から 50 昇温時の電気抵抗率を示す。初期は固体で、昇温と共に電気抵抗率は上昇し、 28.5 ± 0.5 で停止後、急激に下がり、液体に相変化したことがわかる。そして、融点に近い 29.5 ± 0.5 で上昇に転じた。なお、グラフには示していないが、50 以上 200 までの電気抵抗率は、温度に対して線形に変化した。

図4に50 から-30 降温時の電気抵抗率を示す。初期は液体で、降温と共に電気抵抗率は減少した。3 個のサンプルで、それぞれ異なる過冷却が観察された。また、過冷却状態の電気抵抗率は、融点以上から連続性を示した。

その後、それぞれのサンプルは電気抵抗率が急激に上昇し、同時に温度も上昇し、凝固を開始したことがわかる。ここで、同じ温度では、固体と液体で異なる電気抵抗率を示すことがわかる。

図5に昇温時と降温時の電気抵抗率の変化を重ねて示す。昇温降温にかかわらず、固体と液体それぞれで、電気抵抗率は温度に対して線形に変化した。昇温降温にかかわらず、同じ温度では、固体と液体の電気抵抗率は異なる値を示した。したがって、「外部から測定できる温度と電気抵抗率」から、「内部の Ga の相状態が判断できる」ことがわかる。すなわち、境界線 1 より高い電気抵抗率では固体、境界線 2 より低い値では液体状態で、さらに、境界線 3 (融点) より低い温度では過冷却液体である。境界線 1 と 2 の間は固液共存状態である。

(3) Ga と電極材界面の反応挙動

Ni, Cu 電極材とも、Ga との反応で、Sn リッチはんだと比較して、数倍の速さで電極が溶解することがわかった。電極材を厚くできない製品では、保護膜を塗布するなどの対策が必要なのことがわかった。

図6に Ga/Ni 拡散対の高温放置試験 (150) 後の界面を示す。白線は初期の Ni 表面を示す。白線と下の Ni 表面の距離が Ni 溶解層厚を示す。

図7に Ni 溶解層厚の時間推移を示す。たとえば、150 , 1000 h の約 $15 \mu\text{m}$ 溶解厚は、Sn リッチはんだの場合と比較し、数倍大きいことがわかる。なお、Ga/Cu 拡散対も同様の傾向を示した。

(4) その他の成果として、1. Ga/W 拡散対では、Ga が W に侵入し、W の内部剥離が発生した。これは、W を層状に積層して板に作製する方法が原因であると推定した。2. 「Ga に溶解しない電極構造」が実現可能な材料を示唆した。3. 低抵抗を実現する伸縮可能な Ga 含侵 Cu 材料を目指し、純度 99% 以上の微細 Cu デンドライトを形成する工程を示した。4. エレクトロマイグレーション(EM) 起因で、Cu/Ga/Cu 接合部は Ga-Cu 合金の固体になる可能性を示した。5. エレクトロケミカルマイグレーションが起因する Ga-Ga 電極間の絶縁抵抗劣化時間は、Cu-Cu 電極間の場合と同等か長い可能性を示した。6. Ga を用いた低温固体接合部形成プロセスの可能性を示した。

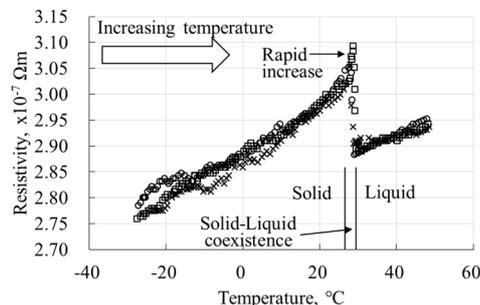


図3 Gaの電気抵抗率(昇温時)

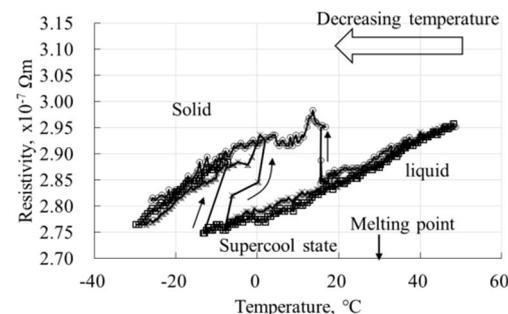


図4 Gaの電気抵抗率(降温時)

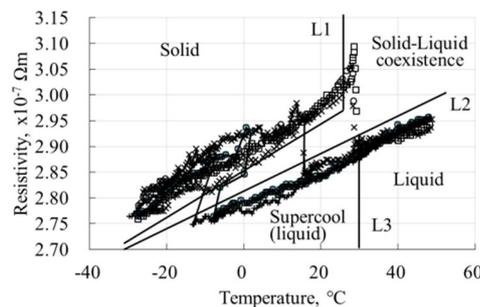


図5 Gaの相判別方法

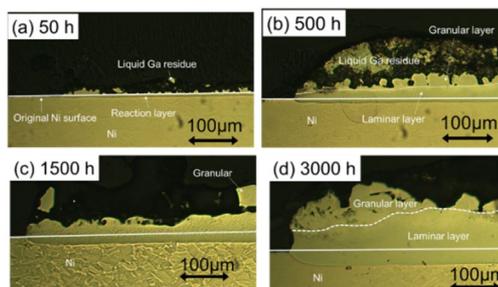


図6 温放置試験後 Ga/Ni 界面

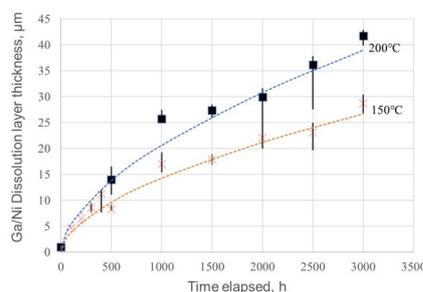


図7 Ni溶解層厚の時間推移

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 鈴木究, 福澤拓郎, 田口博久, 山中公博 |
| 2. 発表標題 低温接合を実現する液体金属Gaと電極材の界面反応 |
| 3. 学会等名 エレクトロニクス実装学会第29回マイクロエレクトロニクスシンポジウム, (研究奨励賞) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 牧田和也, 福澤拓郎, 鈴木究, 田口博久, 山中公博 |
| 2. 発表標題 低温実装を実現する液体金属Gaの電気抵抗の温度特性 |
| 3. 学会等名 スマートプロセス学会26th Symposium on Microjoining and Assembly Technology in Electronics |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 鈴木究, 田口博久, 山中公博 |
| 2. 発表標題 液体金属Gaによる低温接合について |
| 3. 学会等名 応用物理学会関西支部2019年度第3回講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Risa Uda, Junya Kuroda, Kimihiro Yamanaka, and Hirohisa Taguchi |
| 2. 発表標題 Formation and Mechanism of Cu Dendrite Crystal Thin Films by an Electrochemical Metal Deposition Method |
| 3. 学会等名 European Material Research Society, 2018 Fall Meeting (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Junya Kuroda, Risa Uda, Honoka Tanabe, Kimihiro Yamanaka, and Hirohisa Taguchi |
| 2. 発表標題 Formation of Cu microparticles and its application to printed electronics |
| 3. 学会等名 European Material Research Society, 2018 Fall Meeting (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 田邊ほの香、黒田純也、宇田里紗、山中公博、田口博久 |
| 2. 発表標題 高純度Cuデンドライト結晶を利用したCuマイクロ粒子の生成と伝導性塗料の開発 |
| 3. 学会等名 エレクトロニクス実装学会第28回マイクロエレクトロニクスシンポジウム |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|---|------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 田口 博久 (Taguchi Hirohisa) (30453830) | 中京大学・工学部・教授 (33908) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| | |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|