

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20480

研究課題名（和文）高熱伝導で低剛性な半導体接合部を実現する異方性微細複合構造の創出

研究課題名（英文）Development of highly heat-conductive and low stiffness joint utilizing anisotropic microcomposite structure

研究代表者

巽 裕章（Tatsumi, Hiroaki）

大阪大学・接合科学研究所・講師

研究者番号：00961757

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：内部にマイクロスケールの複合構造を形成し、優れた熱伝導性と高温安定性を持つ接合部を目指した。特に、高熱伝導材料を伝熱方向に配向させた異方的な複合構造の接合部を創出し、その接合プロセスの開発と性能の実証を目的とした。一方に配向した気孔を持つロータス型ポーラスCu（ロータスCu）シートの気孔に溶融はんだを浸透させて得た接合部について、熱伝導率の測定と耐熱性の評価を行った。その結果、ロータスCu・はんだ複合接合部が優れた熱伝導性と高温安定性を示した。また、異方的な複合構造の接合部が特性の制御に有効であることを示し、この取り組みが半導体デバイスの接合部の高機能化に貢献することが期待された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

半導体デバイスの高電流密度化と高性能化に際して求められる接合部の高熱伝導性と高温安定性を実現する手法として、高熱伝導材料を伝熱方向に配向させた異方的な複合構造の接合部を創出することの有効性を実証することができた。これは、近年の半導体デバイスの急速な発展を支える重要な接合技術として社会的に大きな貢献を果たすだけでなく、従来の金属組織制御では実現できない特性の大幅な改善が期待される新しい接合部の特性制御方法として学術的にも大きな意義がある。

研究成果の概要（英文）：The microscale composite structure within the bonding layer was evaluated for its excellent thermal conductivity and high-temperature stability. In particular, we aimed to develop a bonding process and demonstrate the performance of a joint with an anisotropic composite structure in which highly thermally conductive materials are oriented in the direction of heat transfer.

Thermal conductivity was measured and high-temperature stability was evaluated for the joints obtained by molten solder infiltrating into the unidirectionally oriented pores of a lotus-type porous Cu (Lotus Cu) sheet. The results showed that the Lotus Cu/solder composite joints exhibited excellent thermal conductivity and stable joint strength at 200 °C. It was also shown that the anisotropic composite structure of the joints is effective in controlling their properties, and it is expected that this approach will contribute to the enhancement of the functionality of the joints in semiconductor devices.

研究分野：材料科学

キーワード：エレクトロニクス実装 はんだ ポーラス材料 熱伝導性 接合 ロータス型ポーラス銅

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球環境問題への対応として、持続可能で効率的なエネルギー利用が求められている。電力変換デバイスとして用いられるパワーモジュールは、様々な産業分野における電力変換およびモーター制御システムに用いられる重要な半導体デバイスである。現在パワーモジュールには、高電流密度化や小型化が求められている。それに伴い、パワーモジュール内部の半導体 (Si) 素子における発熱量と熱密度は増加する傾向にある。また、Si に代わる次世代の半導体材料としてワイドバンドギャップ半導体材料、特に炭化ケイ素 (SiC) が適用されると高電流密度化が一層進展する可能性が高い。こうした発熱量の増大にともなう高温環境は、半導体素子や基板、冷却板などの構成要素を熱的・機械的につないでいる接合層の劣化、すなわちクラックや剥離などの故障を引き起こす可能性がある。また、一般的に半導体素子の安定動作が可能な上限温度は 200 程度である。したがって、半導体素子で発生した熱を速やかに外部に逃がす経路となる接合層には、高い熱伝導性と信頼性が求められている。従来の接合層には、Sn 基はんだ (例えば、Sn-3Ag-0.5Cu: SAC) が広く用いられている。しかしながら、その熱伝導率は約 55 W/m・K であり、半導体素子 (Si) や基板 (Cu) などの関連材料に比べて小さい。よって、接合部の熱伝導率の向上が求められている。こうした中、申請者はこれまで、複数の金属や樹脂材料を複合化することによって接合層の特性向上に取り組んできた。

2. 研究の目的

本研究では、Sn 基はんだと多孔質金属を複合化することにより、接合層内部にマイクロスケールの複合構造を形成し、優れた熱伝導性と高温安定性を発現する接合部を目指した。特に、伝熱方向に配向するように高熱伝導材料を配置した、異方的な複合構造からなる接合部の創出とその接合プロセスの開発、および得られた接合部の熱伝導性と高温安定性の実証を目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、一方向に配向した気孔を持つロータス型ポーラス Cu (ロータス Cu) シートを SAC はんだと複合化し、伝熱方向に Cu を配向した異方的な複合構造を有するロータス Cu・はんだ複合接合部を構築する。簡便なリフロー接合プロセスを通じて、ロータス Cu シートの気孔にはんだを溶融浸透させることで、熱伝導率の向上と 200 での耐熱性の確保を図る。さらには、ロータス Cu・はんだ複合接合部の熱伝導特性および高温安定性を評価し、それらに及ぼす接合部の諸構造の設計指針を明らかにする。

ロータス Cu シートとはんだシートを用いて接合部を作製した。厚さ 0.2 mm、開口率が約 50% のロータス Cu シートの外観を図 1 に示す。はんだシートには SAC305 はんだを用いた。接合プロセスの模式図を図 2 に示す。直径 10 mm の上下 Cu ディスクの間に挟むようにロータス Cu シートとはんだシートを積層して配置し、N₂ 中でリフローすることによって接合部を作製した。接合温度を 250、接合時間を 60 s とし、接合部のボイドを減らすためにはんだ溶融中に二度真空引きを行った。

得られた Cu-Cu ディスク接合部の定常熱伝導率測定を行った。定常法を用いた。接合サンプルを通る定常状態の熱流 Q を与えたときの距離 x に対する温度差 T を測定した。図 3(a) に測定時の構成を示す。熱電対を備えた 2 本の Cu ロッドと接合サンプルを、熱源とヒートシンクの間配置した。Cu ロッドおよびサンプルの直径は 10 mm とした。Cu ロッドとサンプルの界面は熱伝導グリースで充填した。各熱電対の温度は、熱源とヒートシンクの温度がそれぞれ 200 と 5 で定常状態に達した 600 s 後に測定した。測定された温度データの模式図を図 3(b) に示す。温度勾配に基づいて、フーリエの法則を使用してサンプルを通る熱量と接合部における熱抵抗を計算した。また、得られた熱抵抗から接合層のみかけの熱伝導率を試算した。

次に、接合サンプルは高温信頼性を評価するために、200 の空气中で 256、504、756、および 1008 h の高温保存試験に供した。接合部のせん断強度は、せん断試験機 (HLST1000、リスカ株式会社、日本) を使用して室温で評価した。せん断速度は 100 $\mu\text{m/s}$ とした。せん断強度は、最大せん断力を接合面積で割ることで求めた。

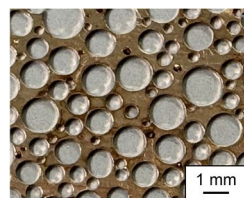


図 1 ロータス型ポーラス Cu シート [1]

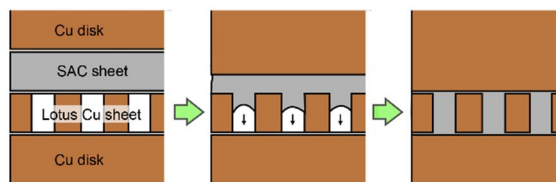


図 2 ロータス Cu・はんだ複合接合部の形成プロセスの模式図 [1]

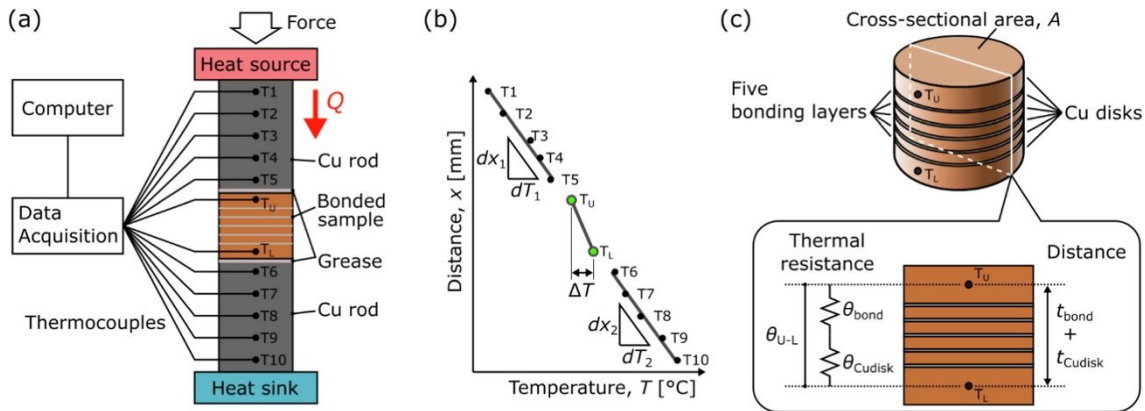


図3 定常法による熱伝導率測定方法 (a) 測定時の構成、(b) 得られる温度データの模式図、(c) 接合サンプルの模式図 [1]

4. 研究成果

簡便なリフロー接合プロセスを通じて、ロータス Cu シートの気孔にはんだを溶融浸透させて得られた接合部の断面観察結果を図4に示す。ロータス Cu の鉛直方向に配列した気孔に対して、はんだが良好に充填された複合構造が狙い通り得られることを示した。また、ロータス Cu と Cu 基材とが、約 5 μm 厚のはんだ層を介して接合されていることがわかった。Cu とはんだの各界面においては、スカラップ状の Cu₆Sn₅ の金属間化合物が約 2 μm 厚で形成していた。得られたロータス Cu・はんだ複合接合部の熱伝導率を定常法によって測定した。その結果、142.4 W/m・K の等価熱伝導率を得た。この値は、SAC はんだ(55 W/m・K)の 158%に相当する。したがって、簡便なリフロー工程によって得られる接合部でありながら、従来のはんだの約 2.5 倍の優れた熱伝導率が得られることを実証した[1]。

200 °C で最大 1008 h の高温保存試験後のロータス Cu・はんだ複合接合部のせん断強度の変化を図5に示す。SAC はんだ単体との結果と比較した。接合直後では、ロータス Cu・はんだ複合接合部と SAC はんだ接合部はそれぞれ 48.8 MPa と 49.4 MPa で同等であった。高温保存時間の増加に伴い、SAC はんだ接合部のせん断強度は減少し、1008 h 後には 36.5 MPa (-26.1%) に達した。一方、ロータス Cu・はんだ複合接合部のせん断強度は高温保存時間の増加とともにわずかに減少し、1008 h 後には 46.3 MPa (-5.2%) にとどまった。この結果は、ロータス Cu・はんだ複合接合部が 200 °C において SAC はんだ接合部と比較して優れた高温信頼性を有することを示した。

以上の研究を通じて、ロータス Cu・はんだ複合接合部が優れた熱伝導性と高温安定性を示すことを実証した。さらには、伝熱方向に配向するように高熱伝導材料を配置した、異方的な複合構造からなる接合部の創出が、接合部の特性の制御に有効であることを示した。本コンセプトに基づいた接合部内の構造の創出を目指した取り組みは、今後の半導体デバイスの接合部の高機能化に貢献できることが期待された。

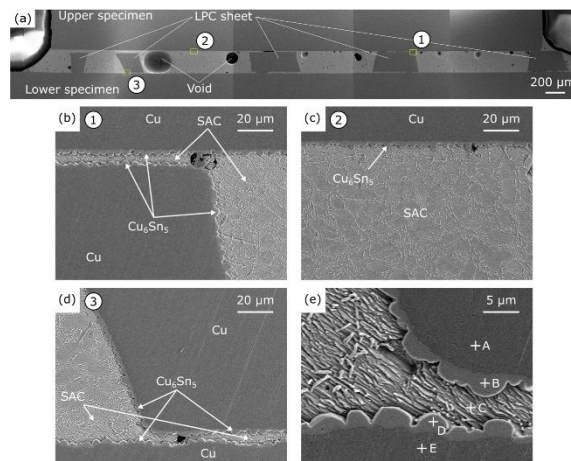


図4 ロータス Cu・はんだ複合接合部の断面観察結果 [1]

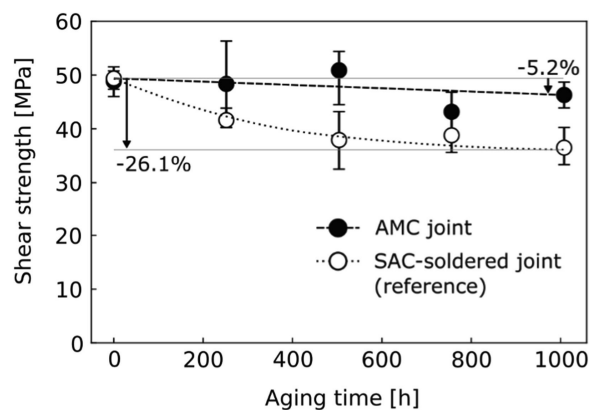


図5 高温保存試験後のロータス Cu・はんだ複合接合部のせん断強度 [1]

<引用文献>

[1] H. Tatsumi, H. Nishikawa, Mater. Des. 223, 111204 (2022).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tatsumi Hiroaki, Nishikawa Hiroshi	4. 巻 223
2. 論文標題 Anisotropic highly conductive joints utilizing Cu-solder microcomposite structure for high-temperature electronics packaging	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materials & Design	6. 最初と最後の頁 111204 ~ 111204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matdes.2022.111204	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hiroaki Tatsumi, Hiroshi Isono, Kana Hirase, Takuya Ide, Hiroshi Nishikawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Low Thermal Resistance Joint using Lotus-type Cu/Solder Composite	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proceedings of 2024 International Conference on Electronics Packaging (ICEP2024)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/ICEP61562.2024.10535580	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 巽 裕章, 磯野 浩, 平瀬 加奈, 井手 拓哉, 西川 宏	4. 巻 -
2. 論文標題 ロータス型ポーラス銅・はんだ複合構造を活用した高放熱モジュールの試作評価	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 第30回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム (Mate2024) 論文集	6. 最初と最後の頁 112 ~ 113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Tatsumi Hiroaki, Nishikawa Hiroshi
2. 発表標題 Thermal and Mechanical Evaluation of Anisotropic Cu-Solder Composite Joint on High Temperature Storage
3. 学会等名 TMS2023 152nd Annual Meeting Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroaki Tatsumi
2. 発表標題 High-Thermal-Performance Power Semiconductor Module using Solder/Copper Composite Joints
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Design & Engineering by Joint Inverse Innovation for Materials Architecture (DEJI2MA-3) (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tatsumi Hiroaki, Nishikawa Hiroshi
2. 発表標題 Enhanced Thermal Conductivity in Micro Composite Structure Joints Utilizing Porous Cu Sheets
3. 学会等名 The 5th International Conference on Nanojoining and Microjoining (NMJ 2023)(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroaki Tatsumi, Hiroshi Isono, Kana Hirase, Takuya Ide, Hiroshi Nishikawa
2. 発表標題 Low Thermal Resistance Joint using Lotus-type Cu/Solder Composite
3. 学会等名 2024 International Conference on Electronics Packaging (ICEP2024)(国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 巽 裕章, 磯野 浩, 平瀬 加奈, 井手 拓哉, 西川 宏
2. 発表標題 ロータス型ポーラス銅・はんだ複合構造を活用した高放熱モジュールの試作評価
3. 学会等名 第30回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム(Mate2024)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計4件

産業財産権の名称 熱伝導接合構造、熱伝導接合方法、該熱伝導接合構造を有するヒートシンク、並びに該熱伝導接合構造を有する半導体装置	発明者 巽裕章、井手拓哉、村上政明、沼田富行	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-133874	出願年 2022年	国内・外国の別 国内
産業財産権の名称 熱界面構造及び該熱界面構造の形成方法	発明者 巽裕章、井手拓哉、村上政明、沼田富行	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-66481	出願年 2023年	国内・外国の別 国内
産業財産権の名称 熱伝導接合構造、熱伝導接合方法、該熱伝導接合構造を有するヒートシンク、並びに該熱伝導接合構造を有する半導体装置	発明者 巽裕章、井手拓哉、村上政明、沼田富行	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願PCT/JP2023/018545	出願年 2023年	国内・外国の別 外国
産業財産権の名称 熱伝導接合構造、熱伝導接合方法、該熱伝導接合構造を有するヒートシンク、並びに該熱伝導接合構造を有する半導体装置	発明者 巽裕章、井手拓哉、村上政明、沼田富行	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願112127353(台湾)	出願年 2023年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

研究者HP https://hiroakitatsumi.com/
--

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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------