

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289242

研究課題名(和文) 多層金属薄膜を用いたマルチフェイズ接合法による3次元ウェハレベル実装

研究課題名(英文) 3D wafer-scale packaging by multiphase bonding using layered metal films

研究代表者

藤本 公三 (FUJIMOTO, Kozo)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70135664

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)： 現在、電子部品の高集積化が進み、BGAなどの表面実装から3次元実装に向けて研究が加速している。この場合に必要となるのはウェハの面実装であり、微細Cu電極間の接合がキーテクノロジーとなる。また他方、パワー半導体も汎用Siから高温動作可能なSiCへの変化が進んでおり、その周辺技術としての高耐熱性を有するダイボンド技術の開発が必要とされている。いずれの接合においても基本は銅同士の接合であるが、ここでは低融点金属薄膜を利用し、多相間の反応現象を利用した銅の接合を行った。接合層の微細組織形成過程、接合時に生じる熱応力問題について詳細に研究し、マルチフェイズ接合法の適用可能性を追求した。

研究成果の概要(英文)： Recently, as integration requirement for electronic devices grows more than ever, 3D-packaging technology instead of conventional 2D surface mounting is expected. On the other hand, since SiC power semiconductor which can work at high temperature is expected instead of Si, a novel die-bond with higher melting point than conventional solder joint is necessary to get better performance out of SiC. In both cases, Cu-to-Cu bonding in micro-scale must be a key technology. In this work, Cu-to-Cu bonding was carried out using low melting metals as filler metals. During the bonding process, several phases react each other, resulting in formation of intermetallic compounds as bond layers. Microstructural developments of the bond layers and thermal stress evolution during bonding process and use have been studied to clarify feasibility of application of the multi-phase bonding to either die-bond or 3D packaging technologies.

研究分野：電子システムインテグレーション

キーワード：低融点金属薄膜 固液共存 ダイボンド サイズ効果 有限要素法 熱応力 割れ

1. 研究開始当初の背景

半導体デバイスはその小型化・高速化・大容量化・低消費電力化および高機能化の要求が高まっており、複数のLSIからなるシステムを1つのパッケージに収めるSiPやセンサ、機構部品を組み込んだMEMSデバイスの開発が進められている。これらデバイスにおける実装は、従来の表面実装から3次元実装に向けて急速にシフトしている。一方、パワーデバイスにおいては従来のSiからさらに高効率で作動するSiCへの移行が求められている。高温動作可能なSiCでは足回りである接合技術が遅れており、耐熱性と信頼性を有するダイボンド技術が求められている。3次元実装における電極間接合もパワーデバイスのダイボンドも、局部的には銅と銅の接合である。ただし接合層の厚みは μm オーダーにする必要があり、従来のはんだ接続や導電性樹脂接続では困難である。

これらの接合では、面精度の確保、低熱抵抗、高電気伝導の確保が必要なのは言うまでもなく、そのためにボイドや中間層がほとんど残留しないような銅同士の直接低温(250以下)接合が理想となる。しかしながら、銅の融点から考えられる固相拡散接合温度は少なくとも700-800と非常に高温であり、低温で接合するためには接合面粗さの仕上げ精度、スパッタリングといった前処理あるいは超高真空といった雰囲気制御が必須で実験室レベルからの脱却が困難である。そのためこの“微細”銅接合を低温かつ低荷重下で接合するプロセスの開発が非常に重要となっている。

2. 研究の目的

高温使用が想定されるデバイスにおける鉛フリーの銅接合技術としては、ナノ粒子焼結接合が上げられるが、接合プロセスに要求される低温かつ低下圧力の条件、それに加えて接合部に要求される(i)高い面精度(ii)高電気伝導性(iv)低熱抵抗を考慮した場合、接合中に液相が生成するプロセスが望ましい。

そこで本研究では低融点の金属をインサート層として使い、固液反応拡散現象を利用した接合プロセスを検討した。本法はFig.1に示すようにインサート金属の融点以上で保持することで、液相を生成させる。液相により低下圧力で被接合材の密着性が確保される。固液反応拡散によって等温凝固が開始し、最終的には接合温度以上の融点を有する接合層が形成される。本プロセスを微細領域に適用するにあたり、低融点金属を“薄膜で供給する”ことを試みた。また、接合温度で凝固が完了するため、ダイボンドのように異材接合に適用する場合には高い熱応力の発生が問題となり得る。

そこで本研究では、本接合法の微細領域への適用について組織学的検討を行い、また異材接合時の熱応力について詳細に調べた。

3. 研究の方法

(1) 供試材料と接合方法

無酸素銅(C1020, 板材, 丸棒材)を供試材料として用いた。接合面はダイヤモンドペーストで鏡面に仕上げた。その後、接合面を1.5%塩酸による酸化膜除去処理、さらにエタノールによる超音波洗浄を行った。またCu電極付きTEG-SiチップおよびCu膜付きSiチップを用いた。TEGチップのCu電極は $\phi 38\mu\text{m}$ 、高さ $10\mu\text{m}$ とした(Fig. 2)。Siチップは $2 \times 2 \sim 8 \times 8\text{mm}$ 、厚さ0.2-0.5mmと種々のサイズで準備した。また窒化ケイ素の銅板を貼り付けた絶縁基板を用いた(以降、DBC基板とする)。

これら試料の接合面に抵抗加熱方式の蒸着装置を用いSnのCuの真空蒸着を行った。これらの元素の蒸着量および膜の層構成を変化させた。蒸着面同士をつきあわせて、赤外線加熱炉を用いてAr雰囲気中で接合した。接合条件は加圧力、接合温度、接合時間を変化させた。接合界面は走査型電子顕微鏡(SEM)および透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて観察した。その他の条件については、成果欄に別途記載した。

(2) 有限要素法解析

CuとSiチップの接合およびDBC基板を含む構造解析モデルの模式図をFig. 3に示す。対称性を考慮して1/2モデルとした。左下の点を原点として固定し、y軸を対称軸とした。その他は固定せず、荷重やひずみ等の境界条件は与えていない。接合層にはSn系のインサート材を用いた低融点薄膜接合で形成される Cu_3Sn の物性を用いた。Cuは弾塑性体とし、それ以外は弾性体として扱った。接合温度300から室温25に冷却されるまでの熱応力を解析により求めた。なお解析にはANSYS 14.5を使用した。

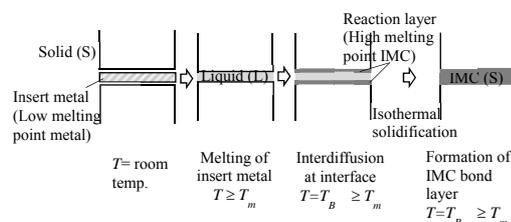


Fig. 1 低融点金属をインサート層とした場合の固液反応拡散接合の模式図

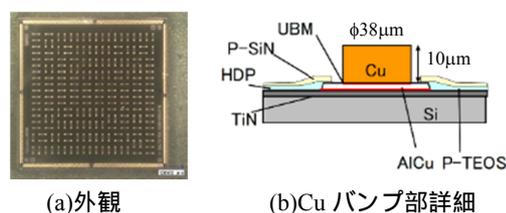


Fig. 2 Cu パンプ付き TEG-Si チップ

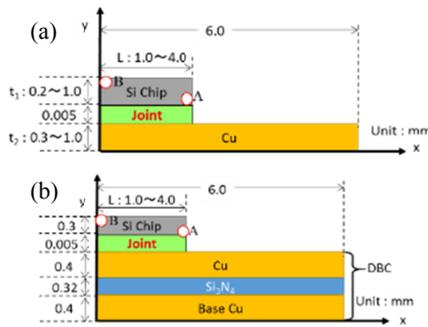


Fig. 3 (a)Si/Cuおよび(b)Si/DBC基板の有限要素法解析モデル

4. 研究成果

(1) TEG チップ/Cu の接合

Cu バンプ付き TEG チップおよび Cu 板上に Sn を蒸着し、300 で接合を行った。また同様に Sn/Cu/Sn と接合面に 3 層積層蒸着して接合に供した。それぞれの接合断面を Fig. 4 に示す。接合初期の接合層は液相 Sn と固相 Cu との反応拡散により Cu_6Sn_5 と Cu_3Sn で構成されており、接合時間の経過とともに Cu_3Sn 単相へと変化した。Sn 単層蒸着で Cu バンプと相手 Cu 板とのギャップを埋めるためには、Sn の蒸着膜厚を 1.9 μm 以上にする必要があり、必要以上の Sn 液相がバンプ外へと排出された。これに対して、Sn/Cu/Sn 3 層積層することで、金属間化合物を生成するための Cu 供給源を被接合材 (Cu) からだけでなく、インサート層内部から供給することが可能となり、液相の Sn を無駄なく Cu-Sn 金属間化合物の形成に消費することができた。結果として液相の排出量が軽減された。またこのときの接合層を形成する Cu_6Sn_5 と Cu_3Sn の厚さを Fig. 5 に示す。Sn/Cu/Sn 3 層薄膜をインサート層として用いた方が、短時間で接合層全体を Cu_3Sn にすることが可能であった。つまり接合層内部に Cu 供給源を配するように接合面をデザインすることで短時間で接合を完了させることができることを示した。本接合面デザインの利点は、簡便な蒸着法で微量元素を接合部に添加できる点である。この方法によって Sn, Cu 以外に Zn, Ag 添加の効果も報告している。

(2) ダイボンドにおける熱応力

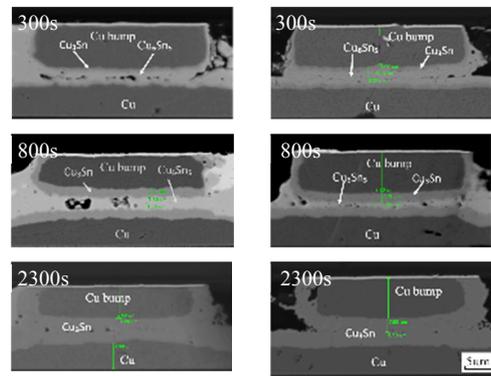
Si/Cu 接合

Sn 単層蒸着膜をインサート層として Si と Cu を接合した接合材の断面写真を Fig. 6 に示す。接合界面は前述と同じ Cu_3Sn 層で構成されており、十分な接合強度を示した。しかしながら、接合部端部のチップ角部に斜め方向への割れ、またチップ上部から垂直方向へ割れが生じた。これは、Si チップと Cu の線膨張係数の差に起因する熱応力が原因である。熱応力は接合温度および被接合材の厚さ、大きさに影響を受ける。そこで接合温度は 300 一定とし、種々のサイズ、厚さの Si チップ、Cu 板を用いて接合を行い、その割れ発生について調べた。Fig. 7 はその結果をまと

めたものである。Si チップが薄く、Cu 板が厚い方が割れが生じない傾向が見られた。また Si チップサイズに対しては傾向が見られなかった。

そこで有限要素法解析によって接合時に生じる熱応力の解析を行った。Fig. 8 はチップ全体の相当応力分布を示している。チップ上部中央部 (領域 B) には反りによる引張応力が発生し、チップ角部 (領域 A) には応力集中し、その主応力の方向は割れに対して垂直であった。

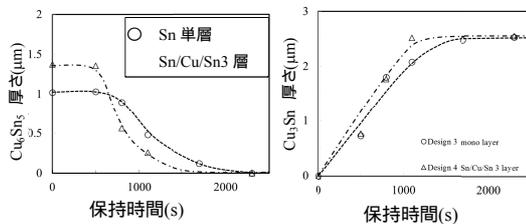
この領域 A および B について Si チップおよび Cu 厚さを変化させて熱応力を算出した。Fig. 9 に Si および Cu の厚さ、Si サイズを変化させた場合の領域 A, B の主応力をそれぞれ示した。白抜きの \circ , Δ , \square で示したのが領域 A, 黒塗りの \bullet , \blacktriangle , \blacksquare で示したのが領域 B における主応力の大きさである。A, B どちらの領域においてもチップサイズが変化するために応力値の変化はほとんど見られなかったことから、領域 A, B の応力の大きさに対するチップサイズの影響は小さいと考えられる。



(a) Sn 単層蒸着膜

(b) Sn/Cu/Sn 積層蒸着膜

Fig. 4 Cu バンプ/Cu 板間の接合層の形成過程 (接合温度 300 , 時間 300 ~ 2300s)



(a) Cu_6Sn_5 厚さ

(b) Cu_3Sn 層厚さ

Fig. 5 Cu バンプ/Cu 間の接合層における Cu_6Sn_5 および Cu_3Sn 層の厚さ変化

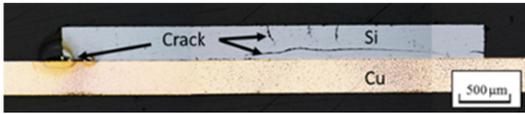


Fig. 6 Sn 膜をインサート材とした Si/Cu 接合 (温度 300 , 加圧力 8MPa, 時間 300s)

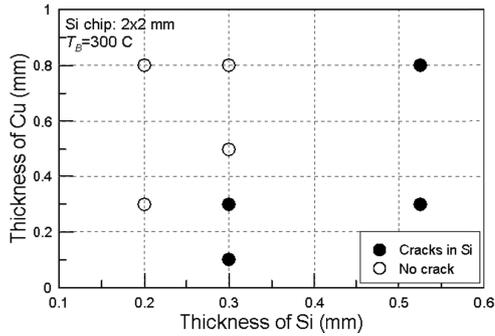


Fig. 7 Si/Cu 接合における被接合材厚さに対するチップ割れ範囲 (温度 300 , Si チップサイズ: 2×2mm)

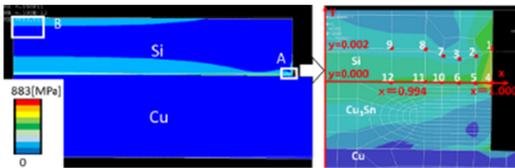


Fig. 8 接合時に Si/Cu 間に発生する熱応力分布 (300 25)

一方 Si チップの厚みに対しては A, B 共に主応力に変化が現れている. Si チップ端部の領域 A については Si チップが薄くなるにつれて減少しており, Si 厚さを 1.0 mm から 0.2 mm まで小さくすると主応力は 28% 減少する. Si チップ厚さによって Si 端部の主応力が変化する原因としては, Si チップが厚くなることにより曲げモーメントが増加するためであると考えられる. Si チップを薄くすることで Si チップ端部から入るクラックの軽減が期待できる. Si チップ中央上部の領域 B に関しては Si チップが厚くなるにつれて主応力が減少していた. Si 厚さが 0.2 mm から 1.0 mm に増加すると領域 B の主応力は 87% 減少していた. これは Si チップが厚くなることで全体の反りが軽減されたことが原因と考えられる. 一方, 評価領域 A では Cu の厚さを 0.3 mm から 1.0 mm に増加させると主応力は 6% 減少していた. 評価領域 B については Cu が厚くなるにつれて大幅に減少しており, 一番変化の大きい 2 mm 角チップにおいて Cu 厚さが 0.2 mm から 1.0 mm に増加すると主応力は 87% 減少していた. Cu が厚くなることで反りが減少し, Si チップの縦割れの軽減が期待できる. これらの結果は Fig. 6 で示した接合時に生じるチップ割れの傾向とよく一致して

いた.

Fig. 10 に種々のチップサイズに対して接合を行った際のチップに生じる割れの有無を超音波映像装置 (SAT) によって非破壊検査した結果を示す. Si 0.2mm 厚/Cu 0.8mm 厚の組み合わせではクラックは生じず, Si 0.3mm 厚/Cu 0.3mm 厚の組み合わせでは, すべての場合で Si にクラックが生じた.

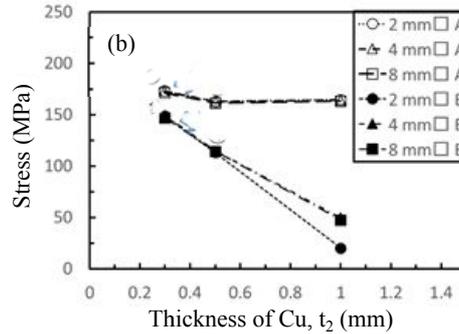
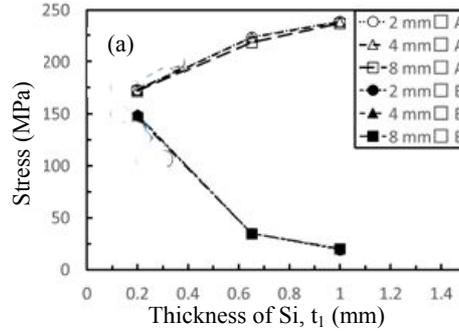


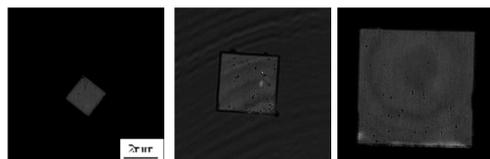
Fig. 9 チップ角部 (領域 A) およびチップ上部 (領域 B) に生じる主応力 (a) チップ厚さの影響, (b) Cu 厚さの影響

このように Si チップのサイズを変化させても, クラックの生じる傾向には影響が見られなかった. 接合時の熱応力に対しては, Si チップと Cu の厚みが最も影響が大きいことが示された.

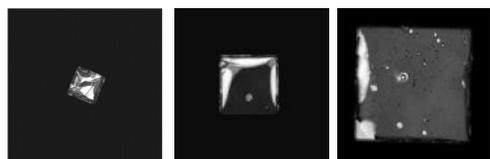
Si/DBC 基板の接合

Si と Cu の組み合わせでは線膨張係数差に起因する割れが生じる場合があることが明らかになった. そこでパワーデバイスのダイボンドで相手材として用いられる絶縁基板と接合した. 絶縁基板はセラミックス板の両面に Cu 板を貼り付けたクラッド材である. それゆえ, Si との線膨張係数差は非常に小さい. 有限要素法解析においても, Si チップ上部および角部に発生する熱応力が大幅に軽減することが明らかになった. 実際に Si/DBC 基板を接合したときの断面を Fig. 11 に示す. Si/Cu の組み合わせでは割れが生じていた接合条件でも, Si/DBC 基板では割れない健全な接合部が得られた.

以上の結果より, Snのような低融点金属を薄膜として接合部に供給し, 複数相を早期に反応拡散させるマルチフェイズ接合法が高精度な面実装およびパワーデバイスのダイボンドに有効であることが示唆された。



(a) Si チップ 0.2mm 厚 / Cu 0.8mm 厚



(b) Si チップ 0.3mm 厚 / Cu 0.3mm 厚

Fig. 10 Si/Cu 接合体の超音波非破壊検査 (SAT)画像 (接合温度 300 , 時間 300s) 明るいコントラスト部が Si に生じたクラックを示している。

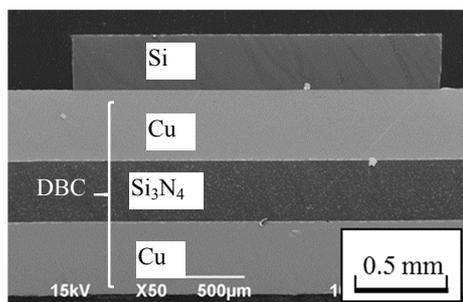


Fig. 11 Si/DBC 基板接合部 (Si: 0.3mm 厚, Cu: 0.4mm 厚, Si₃N₄: 0.32mm 厚, 接合温度 300)

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 2 件)

(1) S. Fukumoto, T. Miyazaki, M. Matsushima and K. Fujimoto,

“Effect of Zinc Addition on Void Formation in Solid-Liquid Interdiffusion Bonding of Copper”, Materials Transactions, 57(6), 2016, 846-852.

(2) S. Fukumoto, K. Miyake, S. Tataru, M. Matsushima and K. Fujimoto,

“Solid-Liquid Interdiffusion Bonding of Copper Using Ag-Sn Layered Films”, Materials Transactions, 56(7), 2015, 1019-1024.

〔学会発表〕(計 2 件)

(1) 多田羅哲, 渡邊佑人, 福本信次, 松嶋道

也 藤本公三 “低融点金属薄膜を用いた Si/Cu 接合における熱応力” 第 22 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, 横浜, 2月2日~3日, 2016.

(2) S. Fukumoto, K. Miyake, S. Tataru, M. Matsushima and K. Fujimoto,

“Solide-liquid interdiffusion bonding of copper using Ag-Sn layered films”, 2nd International Conference on Nanoining and Microjoining (NMJ2014), Emmetten, Switzerland, 7-10th Dec, 2014.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

藤本公三 (FUJIMOTO KOZO)

大阪大学大学院工学研究科・教授

研究者番号: 70135664

(2)研究分担者

福本信次 (FUKUMOTO SHINJI)

大阪大学大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 60275310

松嶋道也 (MATSUSHIMA MICHIIYA)

大阪大学大学院工学研究科・助教

研究者番号: 90403154

(3)連携研究者

()

研究者番号: