Au バンプを用いたフリップチップ接合部の組織と熱疲労特性*

荘司 郁夫**, 折井 靖光***, 小林紘二郎****

Microstructure and Thermal Fatigue Behavior of Flip Chip Joint by Gold Bump*

by Ikuo SHOHJI**, Yasumitsu ORII*** and Kojiro F. KOBAYASHI****

Flip chip joints on the epoxy base substrates were formed with Au bumps and several lead-free solders in order to evaluate the thermal fatigue behavior of those joints. The thermal cycle test and the observation of microstructures were performed with them. It was cleared that the joint with Sn or Sn-3.5Ag solder was almost changed to the Au-Sn intermetallics just after reflow soldering. On the other hand, no excess formation of intermetallics was found on the joints with other solders except Sn and Sn-3.5Ag. As the results of the thermal cycle test, it was found the indium base solders, such as In-48Sn, In-3Ag and pure In, showed the excellent thermal fatigue lifetimes. In these solders, the deformation of solder itself were observed after the thermal cycle test, and the main fracture mode was the solder cracks in the joints. That result indicates the indium base solders, which shows the good lifetime, are easily deformed against the thermal stress and released the stress by the deformation itself.

Key Words: flip chip, thermal fatigue, Au, Pb free solder, epoxy base substrate, microstructure, intermetallics

1. 緒 言

近年、電子機器の軽薄短小化および低コスト化の両方の要求を満たす実装技術として、セラミック基板などよりもより安価な樹脂系プリント配線板上へのフリップチップ接合法が注目され、実用化されてきている^{1,2)}。フリップチップ接合法は、半導体チップの電極上に形成されたバンプをプリント配線板上に直接実装するため、配線長が短くなり電氣的パフォーマンスに優れることや実装面積を最小にできるなどの多くの長所を持つ。一般に、フリップチップ接合部においては、半導体チップのSiと基板材との熱膨張係数の差により生じる熱ストレスが問題となるため、基板側の材料としては熱膨張係数がチップのSi（熱膨張係数：3.5 ppm/℃）とできるだけ近い値を持つ高価なセラミック（熱膨張係数：7-9 ppm/℃）などの材料が使用されてきた。ところが、チップと基板の間の接合部を樹脂封止することにより接合部にかかる熱応力を緩和する工法が報告され^{3,4)}、樹脂系プリント配線板を用いたフリップチップ接合法が実用化されてきている³⁾。それらの接合部では一般にSn-Pb系のはんだ材が使用されている。

また、近年、Pbの人体および地球環境に対する有害性からPbフリーソルダに関する研究が盛んに行われている⁵⁻⁷⁾。これらの研究の多くはSMT (Surface Mount Technology) 実装に関するものがほとんどであり、フリップチップ実装に関するものは少ない。そのため、今後はフリップチップ接合部に対してもPbフリーソルダの展開を目指した研究開発が期待される。

一般に、フリップチップ接合部の熱疲労寿命に関しては経験的にコフィン・マンソン則⁸⁾が成立することが知られており、Sn-37Pb (mass %, 以下では特に断りのない限りすべてmass %とする) はんだについてはこれまでに多くの研究がなされており材料に起因する定数項等も調べられている。ところが、コフィン・マンソン則においては、はんだ材が変化した際の熱疲労寿命変化は材料定数項の変化として包括され、その値については一部のはんだ材においてしか明らかにされていないため、はんだ材の変化に伴う熱疲労寿命値の評価に対しては有効ではない。そのため、はんだ材の違いによる熱疲労寿命変化を評価するための有効因子を明らかにすることは、今後のPbフリーソルダの研究開発に関しても非常に有効となる。

そこで本研究では、まず、今後実用が期待されるPbフリーなフリップチップ接合部を各種はんだ材を用いて樹脂系プリント配線板上に形成し、熱サイクル試験を行うことにより接合部の熱疲労挙動を調べ、各接合部の熱疲労寿命値を検討することを目的とした。

*原稿受付 平成9年4月3日 平成9年度春季全国大会で発表、平成9年2月Mate '97シンポジウムで発表

**正 員 日本アイ・ビー・エム(株) Member, IBM Japan

*** 員 日本アイ・ビー・エム(株) IBM Japan

****正 員 大阪大学大学院工学研究科 Member, Faculty of Engineering, Osaka University

2. 実験方法

2.1 供試材

本研究で用いた基板材仕様を Table 1 に、半導体チップ仕様を Table 2 に示す。基板材としては、表層にビルドアップ構造（絶縁層と導体層を交互に積み上げた多層構造）を持つ樹脂系プリント配線板である SLC (Surface Laminar Circuit) 基板³⁾ を、半導体チップは peripheral 配置に Al パッド電極を配した構造を持つワイヤボンダ用に設計されたものを用いた。チップ側のバンプ材としては Pb フリーを考慮して、ワイヤボンダ法^{1,2)} やメッキ法⁹⁾ により容易に形成できる Au を選択し、ワイヤボンダ法により Table 2 に示すような寸法のバンプを形成した。基板側の

Table 1 Substrate type.

Type	SLC (Surface Laminar Circuit)
Thickness (mm)	0.7
*CTE (ppm)	16 (24-100℃)
Pad material	Cu
Bump material	refer to Table 3
Bump volume (mm ³)	2-4 x10 ⁻⁴

*: Coefficient of Thermal Expansion

Table 2 Chip type.

Size (mm)	6.25x3.25
I/O count	116
Pad placement	Peripheral
Bump material	Au
Bump diameter (μm)	ave. 75, σ 3.1
Bump height (μm)	ave. 51, σ 1.4

Table 3 Solder compositions¹⁰⁾.

Solder type (mass%)	Temperature (℃)	
	Solidus	Liquidus
Sn	232	232
Sn-3.5Ag	221	221
Sn-37Pb	183	183
Sn-18Pb-12In	162	162
In	157	157
In-3Ag	143	143
Bi-42Sn	138	138
In-40Sn-20Pb	121	130
In-48Sn	118	118

はんだ材としては Table 3 に示すような Pb フリーを考慮した工業的利用価値の高い 9 種類のはんだ材を用いた。Table 3 では、3 種類の Pb を含むはんだ材が含まれているが、それらは現在実用化されているはんだ材^{1,3)} あるいはそれと同元素成分系のものを比較のために加えたものである。フリップチップ接合部はリフローソルダリング方式により形成した。リフロー条件はピーク温度が各はんだ材の液相線温度+30±2℃、溶融時間が120±8 s となるような温度プロファイルを選択した。リフローの際は水溶性フラックスを使用しリフロー後に水洗浄することによりフラックスを除去した。

2.2 接合部初期組織観察

リフローソルダリング方式により形成したフリップチップ接合部の初期組織について、接合部を樹脂でモールドリングし機械研磨を施して SEM (Scanning Electron Microscope) により断面観察を行った。同時に X 線を用いた定量分析を行うことにより Au と各種はんだ材との反応により形成した生成層の同定を行った。

2.3 熱サイクル試験

2.1 で形成したフリップチップ接合部に対し、熱サイクル試験を行い各接合部の熱疲労寿命値を評価した。試験は、温度域が 0 ~ 100℃、サイクル頻度を 3 cycles/h の条件で行った。各サンプルとも所定のサイクル間隔毎に四端子法により接合部の電気抵抗値を測定し、クラックによる接合部の破断 (open failure) が発生するまで試験を続けた。破断した接合部については樹脂によりモールドリング後機械研磨を施し断面観察を行った。尚、各はんだ材毎のサンプル数はそれぞれ 4 個とした。

3. 実験結果および考察

3.1 初期組織

Fig. 1 に接合部初期組織の SEM による組成像観察結果を示す。Fig. 1 中に記された化合物組成は X 線による定量分析から得られた結果と各系の平衡状態図¹¹⁾ をもとに示したものである。以下で各はんだ材を用いた場合の初期組織観察結果について詳しく述べる。

3.1.1 Sn

はんだ材に Sn を用いた場合には、Au バンプのほとんどがはんだ中に溶解し接合部の大部分が Au-Sn 系の金属間化合物相に変化している (Fig. 1 (a) 参照)。この現象はリフローソルダリング時のはんだの溶融時間を 40 s にしたときにも観察された。接合後にリワークプロセスを考慮する必要がある場合には、はんだ相が金属間化合物に変化して接合部の溶融温度が上昇する (AuSn, AuSn₂, AuSn₄ の固相

Fig. 1 Micrographs of initial joints. (a) Sn, (b) Sn-3.5Ag, (c) Sn-37Pb, (d) Sn-18Pb-12In, (e) In, (f) In-3Ag, (g) Bi-42Sn, (h) In-40Sn-20Pb, (i) In-48Sn.

線温度はそれぞれ418, 309, 252℃¹¹⁾ことは生産プロセス上問題となる。従って、AuとSnによる接合部では、はんだの溶融時間が数十秒程度以上となるようリフロー方式は適さず、溶融時間を数秒程度に調整した方式²⁾の採用が望ましいものとする。

3.1.2 Sn-3.5Ag

Sn-3.5Ag はんだによる接合部もSn はんだを用いた時と同様、接合部の大部分がAu-Sn系の金属間化合物相に変化する(Fig. 1(b)参照)。また、Snの場合と同様にリフロー溶ダリング時の溶融時間を40 sにしても接合部の著しいAuの溶解を抑制することはできなかった。よって、AuとSn-3.5Ag はんだによる接合部においても、実用の際に

は、はんだの溶融時間を数秒程度に調整したようリフロー方式を選択する必要があるものとする。

Sn-3.5Ag はんだに含まれるAg成分は接合部中ではFig. 1(b)のように、一般にSn-3.5Ag はんだの組織中に見られる Ag_3Sn 金属間化合物相¹²⁾として存在することがわかった。この相は接合部中に分散せずFig. 1(b)のように接合部の外周部へ偏析する。そのため、Ag元素添加によるはんだ相中への Ag_3Sn 相の分散による接合部の強化効果は本接合部においてはあまり期待できないことがわかる。

3.1.3 Sn-37Pb

Sn-37Pb はんだによる接合部においては、Auとはんだの境界部にAu側からはんだ側に向かってAuSn, AuSn₂

の順に金属間化合物相が形成され、Sn および Sn-3.5Ag はんだで観られたような著しい Au の溶解は認められなかった。ただし、接合部のはんだ相 (β Sn, α Pb 2 相) 中には AuSn_4 の金属間化合物相が形成され、柱状晶状に成長している。これは、熔融はんだ中に溶解した Au が Sn と反応し AuSn_4 の核を生成し成長したものとする。 (Fig. 1(c) 参照)

3.1.4 Sn-18Pb-12In

Sn-18Pb-12In はんだの場合には Fig. 1(d) のように、Au とはんだ相との境界部には $10\text{ }\mu\text{m}$ 厚程度の Au-Sn-In 三元相が形成され、Au のはんだ中への著しい溶解は観察されなかった。この相は定量分析の結果 Au : Sn : In = 22 : 70 : 8 (at % 比) と同定されたので、 AuSn_4 中に In が含まれた $\text{Au}(\text{Sn}, \text{In})_4$ の構成比を持つ金属間化合物相であると考えられる。また、 $\text{Au}(\text{Sn}, \text{In})_4$ 相と Au との境界部にお

いては一部 AuSn_2 相が見られる。

Fig. 2(a) に接合部のはんだ相の SEM 組成像拡大図を示した。はんだ相は Sn 相をマトリックスとして Pb 相と AuIn_2 相との 3 相からなる。In は単体では存在せず $\text{Au}(\text{Sn}, \text{In})_4$ あるいは AuIn_2 の化合物に変化している。 AuIn_2 の生成は、熔融はんだ中に Au が拡散してきた際に Sn ではなく In と優先的に反応することにより AuIn_2 の核生成が起こるものとする。更に、Fig. 2(a) より AuIn_2 相は Sn マトリックス相中には単独では存在せず Pb 相中あるいは Pb 相に隣接する位置に存在していることから、Pb 相はもともと In を固溶した相であり、その相中に存在する In と Au が反応することによって AuIn_2 が核生成したものとする。

3.1.5 In

はんだ材に In を用いた場合には、Au とはんだ材の境界部に AuIn_2 相が形成され、はんだ相中への Au の著しい溶解およびはんだ相中での金属間化合物相の形成は認められなかった。 (Fig. 1(e) 参照) 尚、はんだ相中に見られる黒い部分は研磨紙の SiC およびバフ用研磨材の Al_2O_3 が組織中に残存したものである。

3.1.6 In-3Ag

In-3Ag はんだによる接合部では、Fig. 1(f) のように In の場合とほぼ同様の組織が観察された。Ag 原子は AgIn_2 として接合部の外周部に存在するため、Sn-3.5Ag はんだの場合と同様に Ag 元素の添加による接合部の強化効果はあまり期待できないことがわかった。はんだ相中の黒く見える部分は In の場合と同様、研磨の際の研磨粉が組織中に残存したものである。

3.1.7 Bi-42Sn

Bi-42Sn はんだを用いた場合も In や In-3Ag はんだの場合と同様に Au のはんだ相中への著しい溶解およびはんだ相中での金属間化合物相の形成は見られない。Au とはんだの境界部には Au-30at % Sn 相 (Au-Sn 共晶組成¹¹⁾) が形成され、はんだ相は Sn と Bi の 2 相からなる共晶組織となっている。

3.1.8 In-40Sn-20Pb

Fig. 1(h) に In-40Sn-20Pb はんだを用いた時の接合部の全体像を、Fig. 2(b) に接合部のはんだ相の拡大像を示した。Au と In-40Sn-20Pb はんだの境界部には AuIn_2 の金属間化合物相が形成される。はんだ相中での金属間化合物相の生成は見られなかった。はんだ相は Sn : In = 74 : 26 (at % 比) の組成をもつ相をマトリックスとし、この相は Fig. 3(a) に示した In-Sn 系の平衡状態図より Sn-rich 相である γ 相であるものと思われる。Fig. 2(b) 中の白く見える相は Pb : In = 76 : 24 (at % 比) の組成をもつ Pb-rich な相であり、Fig. 3(b) に示した In-Pb 系の平衡状態図より Pb 相中

Fig. 2 Micrographs of initial joints. (expansion image). (a) Sn-18Pb-12In, (b) In-40Sn-20Pb.

Fig. 3 Phase diagrams⁽¹⁾. (a) In-Sn, (b) In-Pb.

Fig. 4 Results of thermal cycle test. (a) Sn-rich solder, (b) In-rich solder.

に In が 24 at % 固溶した相であると思われる。Fig. 2 (b) 中に見られるもう一つの相は In/Pb/Sn の三元相でありその組成比は In : Pb : Sn = 49 : 35 : 16 (at %) であった。

3.1.9 In-48Sn

In-48Sn はんだによる接合部においても Au とはんだ相の境界部には In-40Sn-20Pb の場合と同様に AuIn_2 の金属間化合物相が形成し、はんだ相中には金属間化合物相の形成は見られなかった。はんだ相は組成比が Sn : In = 72 : 28 (at %) となる相と Sn : In = 28 : 72 (at %) となる相の二相からなることが定量分析結果よりわかった。Fig. 3 (a) の In-Sn 系の平衡状態図よりこれらの相は Sn-rich の γ 相と In-rich の β 相であるものとする。(Fig. 1 (i) 参照)

3.2 熱サイクル試験結果

Fig. 4 に熱サイクル試験結果を示す。Fig. 4 では、熱サイクル数に対するチップ数単位での累積 open failure 率をプロットした。open failure はクラックによる接合部の破断によるものである。In, In-48Sn はんだなどの In 系はんだが Sn-rich はんだに比べ優れた熱疲労寿命値を持つことがわかる。また、平均寿命値 (Fig. 4 中で累積オープンフェイル率が 50% となるサイクル数) で比較すると、今回の実験条件では In-48Sn はんだが最も長寿命値を示すことがわかる。

3.3 破断部観察結果

Fig. 5 に代表的な接合部の破断例を示す。今回の実験では Fig. 5 に示したような 4 つの破断モードが観察された。

Table 4 に各はんだ材における 4 種類の破断モードの発生率を示す。Fig. 4 と Table 4 より、熱疲労寿命値が劣る Sn-rich なはんだ材では、はんだ材以外の部分での破断が多いのに対し、優れた熱疲労寿命値を示す In 系のはんだ材では破断のほとんどは、はんだ材自身で起こっていることがわかる。また、Fig. 1 と Fig. 5 より熱サイクル試験前後における接合部の形状を比較すると、Sn-rich はんだでは、はんだ部の形状変化はほとんど観測されないが、In 系はんだにおいては熱サイクル試験中にははんだ材が変形した形跡が見られる。以上の結果から、本研究のように金属間化合物相が比較的多く形成される材料の組み合わせを用いる場合、金属間化合物相の形成量が少なく熱応力を吸収緩和できるはんだ相が多く残存する In 系はんだでは、はんだ材自身が変形することにより界面への応力集中を緩和し、優れた熱疲労寿命値を示すものと考えられる。

次に、接合部のはんだ相中に生じたクラックの観察結果について述べる。Fig. 6 に接合部のはんだ相中に生じたクラックの SEM 組成像を示した。Sn-37Pb はんだによる接合部においては、はんだ相中のクラックはあまり観察されなかったが、観察された場合には、Fig. 6 (a) のように AuSn_4

Fig. 5 Examples of failure mode. (a) Si cratering (Sn), (b) Al pad crack (Sn-3.5Ag), (c) boundary crack (Sn-18Pb-12In), (d) solder crack (In).

Table 4 Ratio of failure mode.

Solder type	**Failure mode ratio(%)			
	A	B	C	D
Sn	21	59	0	20
Sn-3.5Ag	9	68	0	23
Sn-37Pb	40	48	0	12
Sn-18Pb-12In	11	44	28	17
In	0	0	0	100
In-3Ag	0	0	0	100
Bi-42Sn	71	10	0	19
In-40Sn-20Pb	4	17	0	79
In-48Sn	0	0	0	100

** A: Si cratering, B: Al pad crack,

C: boundary crack between Au and solder

D: crack in solder

相とはんだ相である Sn 相あるいは Pb 相との境界部からクラックが生成し進展する様子が観察された。また、Sn-18Pb-12In はんだの場合には Au(Sn, In)_4 とはんだ相の境界付近の Sn 相中を (Fig. 6 (b) 参照), In-40Sn-20Pb と In-48Sn はんだの場合には AuIn_2 とはんだ相の境界近傍の γ 相中をクラックが進展していることがわかる (Fig. 6 (c), (d) 参照)。In-48Sn はんだにおいては初期組織中に観察されていた In-rich の β 相は観測されなかった。これは、熱サイクル

Fig. 6 Joint cracks. (a) Sn-37Pb, (b) Sn-18Pb-12In, (c) In-40Sn-20Pb, (d) In-48Sn, (e) Bi-42Sn.

試験中に AuIn_2 相が成長することにより In が消費され β 相が Sn-rich な γ 相に変化したためと思われる. In-40Sn-20Pb はんだにおいても, AuIn_2 相の成長により In が消費され, 初期組織中の Pb-24In, In-35Pb-16Sn (at %) 相がそれぞれ Pb-8In, In-41Pb-13Sn (at %) 相に変化していることが定量分析結果より示されたが, In-48Sn はんだの場合ほど消費されていない. これは, In-40Sn-20Pb はんだのほうが In-48Sn はんだよりもより短いサイクル数で破断しているため (Fig. 4 参照) AuIn_2 相が十分に成長しなかったためである. In および In-3Ag はんだによる接合部においてもクラックは AuIn_2 とはんだ相との境界部近傍に発生し進展していることが確認された. 一方, Fig. 6(e) より Bi-42Sn はんだの場合には基板側の Cu パッド上に形成された金属間化合物相の近傍でクラックが発生し進展していることがわかる. 以上述べたように, クラックは金属間化合物相とはんだ相との境界部あるいは金属間化合物相近傍のはんだ相中に発生し進展していることが示された. 一般に, 金属間化合物相はもとのはんだ相よりも硬くなるため, 金属間化合物相とはんだ相との境界部あるいはその近傍部に応力が集中し, その結果クラックが発生するものと考えられる.

Sn, Sn-3.5Ag はんだについては, 接合部のはんだ相はほとんど残留していないため (Fig. 1 参照), Table 4 中のは

Fig. 7 Joint cracks. (a) Sn, (b) Sn-3.5Ag.

はんだ材自身のクラックは, はんだ材のクラックではなく金属間化合物相のクラックに相当する. Sn, Sn-3.5Ag はんだの接合部中に観られたクラック例を Fig. 7 に示す. Fig. 7 に示したように接合部中の金属間化合物相である AuSn_2 にクラックが生じている. このことより AuSn_2 相は接合部に生じる他の Au-Sn 系の金属間化合物相である AuSn および AuSn_4 よりも低強度な相であるものと推定される.

4. 結 言

本研究では樹脂系プリント配線板を用いて Au バンプと各種はんだ材によりフリップチップ接合部を形成し、熱サイクル試験を行うことにより接合部の熱疲労挙動を調べた。得られた結果を以下に要約する。

接合部の初期組織観察結果よりのはんだ材に Sn, Sn-3.5Ag はんだを用いた場合には、熔融時間が数分程度となるような一般的な表面実装工程で使用されるような接合条件では接合部のほとんどが Au-Sn 系の金属間化合物に変化してしまうため、リワーク工程等を考慮する場合には、実用上困難であることがわかった。熱サイクル試験の結果から Sn-rich なはんだ材よりも In-rich なはんだ材のほうがより優れた熱疲労寿命値を示すことがわかった。また、今回の実験範囲においては In-48Sn はんだが最も長寿命値を示した。熱サイクル試験後の試料の破断部観察結果より、熱疲労寿命の劣る Sn-rich 系のはんだ材ではその破断モードのほとんどがはんだ材以外のチップ側の Si や Al におけるクラックであるのに対し、優れた熱疲労寿命値を示す In 系のはんだでは、はんだ材自身のクラックが破断モードのほとんどであることが示された。この結果から、熱疲労寿命に優れる In 系はんだでは熱サイクル試験中に生じる熱応力に対しはんだ材自身が変形し応力を緩和することにより優れた熱疲労寿命値を示すものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 莊司, 山田, 木村, 折井, 藤内, 酒井: ワイヤボンド用チップを用いたフリップチップアタッチ実装技術, 2nd Symp. Microjoining and Assem. Tech. in Electronics, (1996), 17-22.
- 2) 嶋田, 銅谷, 斉藤, 鈴木, 田島, 木村: リードレスベアチップ実装技術と MCM-L への適用, 2nd Symp. Microjoining and Assem. Tech. in Electronics, (1996), 193-196.
- 3) Y. Tsukada, S. Tsuchida and Y. Mashimoto: Surface Laminar Circuit and Flip Chip Attach Packaging, Proc. 7th IMC, (1992), 252-258.
- 4) 頼, 土津田, 貫井, 大西: PWB 上へのフリップチップ実装, サーキットテクノロジー 8 [2], (1993), 136-143.
- 5) 竹本: Pb フリーソルダ概論と今後の課題, 第19回マイクロ接合研究委員会ソルダリング分科会資料, (1995), 75-84.
- 6) Sung, K. Kang: Lead (Pb)-Free Solder for Electronic Packaging, Journal of Electronic Materials, Vol. 23 No. 8 (1994), 701-707.
- 7) I. Artaki and A.M. Jackson: Evaluation of Lead-Free Solder Joints in Electronic Assemblies, Journal of Electronic Materials, Vol. 23 No. 8 (1994), 757-764.
- 8) K.C. Norris and A.H. Landzberg: Reliability of Controlled Collapse Interconnections, IBM J. Res. Develop., (1969), 266-271.
- 9) 森, 梅寄: マルチメディア時代に向けたバンプ実装技術, SHM 会誌, vol. 13 No. 1 (1997), 25-31.
- 10) Indalloy Specialty Solders & Alloys, Indium Corporation of America.
- 11) 金属データブック, 日本金属学会, (1974).
- 12) 荻谷, 川又, 大塚: Sn-3.5mass % Ag 合金の等温疲労特性に及ぼす組織の影響, 3rd Symp. Microjoining and Assem. Tech. in Electronics, (1997), 89-94.