Sn-8Zn-3Bi はんだと Ni/Au めっき電極を用いた CSP 接合部の界面組織と接合信頼性^{*1}

山口 敦 史¹ 古 澤 彰 男¹ 西 田 一 人¹ 岩 西 宏 昭^{2,*2}
北 条 隆 志^{2,*3} 十 河 陽 介^{2,*4} 廣 瀬 明 夫² 小 林 紘 二 郎²

¹松下電器産業株式会社

²大阪大学大学院工学研究科

J. Japan Inst. Metals, Vol. 69, No. 1 (2005), pp. 132-138

© 2005 The Japan Institute of Metals

Interfacial Reaction Layer and Reliability of CSP Solder Joints using Sn-8Zn-3Bi Solder and Ni/Au Plating Pad

Atsushi Yamaguchi¹, Akio Furusawa¹, Kazuto Nishida¹, Hiroaki Iwanishi^{2,*2},
Takashi Hojo^{2,*3}, Yosuke Sogo^{2,*4}, Akio Hirose² and Kojiro F. Kobayashi²

¹Matsushita Electric Industrial Co., Ltd., Kadoma 571-8502

²Graduate School of Engineering, Suita 565-0871

In order to investigate the use of Sn-8Zn-3Bi solder as a potential substitute for Sn-Pb solder, which has lower melting point than Sn-Ag family solder, we studied interfacial microstructure and mechanical properties of CSP joints with various thickness of Au and Ni plated on Cu pad compared with Cu pad. Joint strength and other mechanical properties were evaluated in relation to reflow peak temperature. The combination of Au plating thickness of 0.05 μm and reflow peak temperature of 498 K resulted in the best joint reliability both as soldered and after aging treatment. The joint had thin Ni_3Sn_4 type interfacial reaction layer that included Cu and Zn between the solder and the Ni plating. This interfacial microstructure caused to improve the joint strength.

(Received August 11, 2004; Accepted November 22, 2004)

Keywords: lead-free solder, nickel/gold plating, chip size package (CSP), interfacial reaction layer, joint reliability

1. 緒 言

近年、携帯機器の小型化・軽量化に伴い、実装基板の高密度化が望まれている。チップ部品は 1005 タイプ (1 mm $\times$ 0.5 mm サイズ) から 0603 タイプ (0.6 mm $\times$ 0.3 mm サイズ) へと移行し、実装時の部品間距離は狭まる傾向にある。また、IC パッケージの小型・薄型化も進み、従来の QFP (Quad Flat Package) から BGA (Ball Grid Array) や CSP (Chip Size Package) へと移行しており、その BGA、CSP においても、0.8 mm ピッチから更に狭ピッチなものの採用へと進んでいる¹⁾。

また、世界的な環境問題に対する関心の高まりから、鉛フリーはんだ材料の実用化が進んでおり、熱的・機械的特性のバランスがとれた Sn-Ag-Cu はんだが Sn-Pb 共晶はんだに

代替する最有力候補となりつつある^{2,3)}。しかし、Sn-Ag-Cu はんだは、その融点の高さのため、部品耐熱温度によるリフロー温度プロファイルの制約からすべてのリフロープロセス適応商品に対して対応することは困難である。このような中、Sn-Zn-Bi はんだは、Sn-Pb 共晶はんだに融点が近く部品の熱損傷が少ない低融点はんだとして期待されている²⁾。しかし、Zn の Cu との強い反応性から Cu との界面に従来とは異なる Cu-Zn の反応層を形成し、高温下での接合特性の劣化が生じる⁴⁻⁶⁾。そこで、基板電極の表面処理として Ni/Au めっきを用いると、Sn-Zn-Bi はんだ接合界面の Cu-Zn 反応層の生成を防止でき、既にそれを用いた実用化事例が報告されている⁷⁾。しかし、その接合部の組織と継手特性については、十分明らかになっていない。

そこで本稿では、基板電極として Ni/Au めっき電極を用いた Sn-Zn-Bi はんだの CSP 接合部の組織と継手特性の関係を明らかにすることにより、実用化に向けためっき構成、プロセス条件の指針を見出すため、Sn-Zn-Bi はんだによる Ni/Au めっき電極上の CSP 接合部の継手特性について、Cu 電極上の CSP 接合部の継手特性と比較し、その接合部の界面組織と機械的特性について調べ、その適正リフロープロファイルについて検討した。

^{*1} Mater. Trans. **45** (2004) 134-140 に掲載

^{*2} 大阪大学大学院生、現在：本田技研工業㈱ (Graduate Student, Osaka University, Present address: Honda Motor Co., Ltd.)

^{*3} 大阪大学大学院生、現在：関西電力㈱ (Graduate Student, Osaka University, Present address: Kansai Electric Power Co. Inc.)

^{*4} 大阪大学大学院生 (Graduate Student, Osaka University)

Table 1 Basic physical properties of Sn-Zn-Bi solder.

	Alloy composition (mass%)						Melting temperature (°C)		Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)
	Sn	Ag	Bi	Pb	Cu	Zn	Solidus	Liquidus		
Sn-Zr-Bi	Bal.		3			8	187	197	7.1	23
Sn-Ag-Cu	Bal.	3			0.5		219	217	3.6	38
Sn-Pb	Bal.			37			183	183	4.3	32

Fig. 1 CSP structure.

Fig. 2 Schematic illustration of ball pull test sample.

Table 2 CSP specification.

Items	Specifications
CSP	
Size (mm)	8.97×8.97×0.57
Ball composition (mass%)	Sn-3Ag-0.5Cu Sn-37Pb
Ball diameter (mm)	0.32
Cu post diameter (mm)	0.23
Pitch (mm)	0.5
Number of balls	240

Table 3 PCB specification.

Items	Specifications
Substrate	
Material	FR-4
Size (mm)	127×22×0.8
Pad diameter (mm)	0.3
Pad structure	Cu Cu/Ni/Au

Table 4 Soldering condition.

Sample name	Solder paste	Solder ball	Reflow peak temperature	PCB pad plating
SZB-Cu-483				Cu
SZB-Au0.05-483			483 K	Cu/Ni-Au (0.05 μm)
SZB-Au0.05-503	Sn-8Zn-3Bi	Sn-3Ag-0.5Cu	503 K	Cu/Ni/Au (0.05 μm)
SZB-Au0.5-483			483 K	Cu/Ni/Au (0.5 μm)
SZB-Au0.5-503			503 K	Cu/Ni/Au (0.5 μm)
SP-Cu-483				Cu
SP-Au0.05-483	Sn-37Pb	Sn-37Pb	483 K	Cu/Ni/Au (0.05 μm)

2. 実験方法

2.1 供試材料

実装部品は 0.5 mm ピッチの CSP を用い、はんだ材に Sn-8Zn-3Bi はんだペースト、部品電極に Sn-3Ag-0.5Cu はんだボールを用いた。基板は FR-4 基板を用い、基板表面処理として Cu 耐熱ブリフラックス処理および Cu に無電解 Ni (5 μm)/Au めっきを施し、Au めっき厚を 0.05 μm および 0.5 μm と変化させた。なお、リファレンスとして、Sn-37Pb はんだペーストを用い、部品電極としては Sn-37Pb はんだボールを用いた。Table 1 に各はんだの特性を示す。Fig. 1, Table 2, Table 3 にそれぞれ CSP パッケージの模式図、その仕様および基板の仕様を示す。また、Fig. 2 にボール接合部単点強度評価用実装の模式図を示す。

2.2 ソルダリング条件

Table 4 にリフローソルダリング条件を示す。Sn-8Zn-

3Bi はんだペーストのリフローピーク温度は、Ni/Au めっき電極の継手は Sn-8Zn-3Bi の融点+10 K 以上 (483 K) と Sn-3Ag-0.5Cu はんだの融点+10 K 以上 (503 K) の 2 段階に変化させた。また、Cu 電極を用いた継手のリフローピーク温度は 503 K とした。なお、Sn-Pb ペーストのリフローピーク温度を 483 K とした。Fig. 3 にリフロープロファイルを示す。このとき、融点以上の温度で 20 s 以上保持するとともに、プリヒート温度を 403~423 K とし、60±20 s 保持とした。また、リフロー雰囲気は大気で行った。

2.3 高温放置試験

長時間使用環境を想定した継手特性評価を行うために、ソルダリング後の CSP および強度評価用基板について高温放置試験を行った。このとき保持温度は 398 K、保持時間は 1.8 Ms, 3.6 Ms, 5.4 Ms とした。

2.4 接合部組織観察および反応相の同定

試料を基板に対して垂直方向にファインカッターを用いて切断し、エメリー紙 (#2000) を用いて研磨し、その後ダイヤモンドペースト (1 μm) を用いてバフ研磨することで接合

部断面観察試料を作製した。作製した接合部断面を EPMA (Electron-probe Micro-analyzer JXA-8700 JEOL 製), 走査型電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscopy S-800 日立製) を用いて組織観察および反応層の同定を行った。また, 継手接合部の詳細な界面組織観察には, 収束イオンビーム加工装置 (FIB: Focus Ion Beam FB-2000A 日立製作所製) により接合部断面を切り出し, 得られた試料について透過型電子顕微鏡 (TEM: Transmission Electron Microscope H-3000 日立製作所製) により組織観察および反応層の同定を行った。

2.5 繰返し曲げ試験

ソルダリング後および高温放置後の試料についてパッケージレベルでの強度評価を行うために, Fig. 4 に示す繰返し曲げ試験を行い, CSP のすべての接合部を直列につないだ回路が破断に至るまでの曲げ回数を破断寿命とした。なお, 曲げ変位は 1 mm とし, 曲げ速度は 1.67 mm/s とした。測定はそれぞれの条件について 4 試料とした。

2.6 接合部強度試験

継手接合部の機械的特性評価として, BGA 加熱式バンププル (HBP: Hot Bump Pull) 試験を行った。試験は, 万能型ボンドテスター (DAGE-SERIES-4000P DAGE 社製) を用

Fig. 3 Reflow Profile.

Fig. 4 Bending fatigue test.

Fig. 5 Hot Bump Pull test.

いて, はんだ継手の破断荷重を測定した。引き上げ速度は 0.3 mm/s とした。Fig. 5 に HBP 試験の模式図を示す。

2.7 破面観察および破断経路の同定

繰返し曲げ試験, 加熱ボールプル試験後の試料について, 接合部組織と強度との関係を明確にするために 2.4 と同様の方法で破面に対して垂直に切断, 研磨し EPMA を用いて破面垂直断面を観察し, 破断経路について調べた。

3. 実験結果および考察

3.1 繰返し曲げ試験

Fig. 6 に繰返し曲げ試験の結果を示す。Sn-8Zn-3Bi はんだによる Cu 電極上の接合部の場合, 繰返し曲げ寿命は, 初期においては比較的良く, Sn-Pb はんだによる Cu 電極上の接合部の高温保持後と同等であったが, 高温保持時間が長くなるとその寿命は劣化する傾向があった。これに対して, Ni/Au (0.05 μm) めっき電極を用いて 483 K でリフローはんだ付けした接合部は, 初期において Cu 電極上にはんだ付けした場合よりもやや低寿命であった。しかし, 高温保持するにつれて, 寿命は回復した。Ni/Au (0.05 μm) めっき電極を用いてさらに高い 503 K でリフローはんだ付けした場合, やや高温保持後に寿命の低下はあったが, 最も高い寿命であった。Ni/Au (0.5 μm) めっき電極においては, はんだ付け温度によらず低い寿命を示した。これらのことから Sn-8Zn-3Bi はんだにより Ni/Au めっき電極上にはんだ付けする場合, Au めっき厚さは, 0.05 μm 程度に薄くつける必要がある。また, より高温ではんだ付けを行うか, または高温保持の方が寿命は延びると考えられる。

3.2 界面組織反応

3.2.1 Cu 電極

Cu 電極の場合の組織観察結果を Fig. 7 に示す。リフローソルダリング直後においてははんだと Cu の間で Cu_5Sn_8 層を形成していた⁸⁾。高温放置後においては, Sn に Cu 電極が侵食されており, Cu と Sn のあいだで Cu_6Sn_5 層を形成していた。

3.2.2 Ni/Au めっき電極

Ni/Au (0.05 μm) めっき電極接合部の組織観察結果を Fig. 8 に示す。リフローピーク温度 483 K の継手では, リフロー

Fig. 6 Relationship between soldering condition and fatigue cycle.

Fig. 7 BE images at joint interface of sample SZB-Cu-483.

Fig. 9 TEM image at interfacial reaction layer of sample SZB-Au0.05-483.

Fig. 8 BE images at joint interface of sample SZB-Au0.05-483 and sample SZB-Au0.05-503.

直後には Au-Zn 層を形成していた。リフローピーク温度 503 K の継手では、接合界面に Au-Zn 層は不均一に形成し、Ni-Sn-Cu-Zn からなる化合物層も形成していた。いずれのリフローピーク温度の場合でも高温放置後における組織の大きな変化は見られなかった。いずれの界面反応層も極めて薄かったので EPMA 分析では、その組成を同定することができなかった。そこで、TEM による観察を行った。

リフローピーク温度が 483 K で、Au めっき厚さ 0.05 μm の継手に対する TEM による接合界面の詳細な組織観察結果を Fig. 9 に示す。この結果から界面反応層は AuZn₃ 層のみが形成していた。このことから、リフロー温度が低い場合、Au めっきのはんだ中への溶解よりも Au めっきと Zn の反応が先行して進行し、界面に化合物層を形成したものと考えられる。

リフローピーク温度が 503 K のときの界面反応層を Fig. 10 に示す。リフロー温度が高い場合、Au-Zn 層は 483 K の場合よりも薄く、また、はんだ/Au-Zn 間で (Ni, Cu, Zn)₃Sn₄ と考えられる化合物層を形成していた。また、その界面には P リッチ層が形成していた。このことから、Au-Zn がはんだ中へ一部溶解するとともに、はんだ中の元素と Ni が相互拡散により、界面の Ni を消費して界面反応が進行したものと考えられる。リフローピーク温度が 483 K では P リッチ層が形成していないことからリフロー過程で形成する Au-Zn 層は、はんだと Ni の反応を防止するバリア層として働いていると考えられる。これらの結果から、リフロー温度は接合界面反応に大きく影響を与えているといえる。

次に Ni/Au(0.5 μm) めっき電極の接合部の組織観察結果

Fig. 10 TEM image at interfacial reaction layer of sample SZB-Au0.05-503.

Fig. 11 BE images at joint interface of sample SZB-Au0.5-483 and sample SZB-Au0.5-503.

を Fig. 11 に示す。483 K でリフローした場合は、接合界面で厚い Au-Zn 層が形成しており、また 503 K でリフローした継手については一部接合界面から離れた位置で厚い Au-Zn 層を形成していた。高温放置後においては、いずれのリフローピーク温度においても Au-Zn の反応層中で Ag の濃度が増加しており、局所的に Ag が濃化した AuAgZn₂ 層を

形成していた．より高いリフローピーク温度である 503 K において，Au-Zn 層が接合界面から剥離したのは，Au-Zn 層が，はんだ中へ溶解・拡散したためであると考えられる．これらのことから，Au めっきが $0.5\text{ }\mu\text{m}$ のように厚い場合，繰り返し曲げ寿命結果を踏まえると，リフローピーク温度が 483 K のように低いと界面の反応性が低いため界面強度が低く，リフローピーク温度が 503 K のように高くても，界面剥離が生じ，寿命が低下するといえる．

3.3 破断経路

3.3.1 Cu 電極

Cu 電極の継手についての破断経路を Fig. 12 に示す．リフロー直後では破壊は，はんだ中で進展しており，界面強度は十分であったが，高温放置試験により Cu_6Sn_5 層が形成され，破壊の起点もしくは伝播経路となっており，この高温放置に伴う Cu_6Sn_5 層の形成が継手強度劣化の原因と考えられる．

3.3.2 Ni/Au めっき電極

Ni/Au ($0.05\text{ }\mu\text{m}$) めっき電極で，483 K でリフローした接

Fig. 12 Crack path of sample SZB-Cu-483 after bending fatigue test.

Fig. 13 Crack path of sample SZB-Au0.05-483 after bending fatigue test.

合部の破断経路について Fig. 13 に示す．リフロー直後においては，はんだ中および界面反応層での破断の進展の両方が混在していたが，高温放置後においては，破断ははんだ中で進展していた．このことから，リフロー直後では Ni めっきとはんだとの界面強度が十分でなかったものと考えられる．すなわち，はんだと Ni 界面にリフロー過程の早い段階で形成する Au-Zn 層が，はんだと Ni の反応を防止するバリア層として働いたため，界面強度が低く，高温保持によりはんだと Ni の反応が促進され界面強度が向上したと考えられる．

Ni/Au ($0.05\text{ }\mu\text{m}$) めっき電極で，503 K でリフローした接合部の破断経路について Fig. 14 に示す．483 K でリフローした継手と異なり，リフロー直後および高温放置後のいずれにおいても破断ははんだ中で進展していた．このことから，リフロー温度を上昇させ，Ni とはんだ成分が相互拡散し Ni-Sn-Cu-Zn 層を形成するように界面反応を促進させた方が，Au-Zn 層が層状に形成した状態よりも，Ni めっきとはんだとの界面強度がより上昇するものと考えられる．

これまでに Sn-Ag 系のはんだの接合界面の Ni めっき層は，はんだ中の Sn と化合物層を形成する際に消費されるため，P リッチ層が界面に形成され，その接合信頼性は劣化することが知られている⁹⁻¹²⁾．この場合も，3.2.2 で述べたように接合界面には P リッチ層が形成していたが，その厚さが 30 nm と薄いため Sn-Ag 系のはんだのように接合信頼性への影響はなかったと考えられる．

Ni/Au ($0.5\text{ }\mu\text{m}$) めっき電極で，483 K でリフローした接合部の破断経路について Fig. 15 に示す．リフロー直後および高温放置後のいずれにおいても破断は Au-Zn と Ni めっき界面で進展していた．

Ni/Au ($0.5\text{ }\mu\text{m}$) めっき電極で，503 K でリフローした場合の破断経路についても 483 K でリフローした場合と同様，リフロー直後および高温放置後のいずれにおいても破断は Au-Zn と Ni めっき界面で進展していた．Au めっき厚さが $0.5\text{ }\mu\text{m}$ の場合，いずれも Au-Zn と Ni の界面で破断が進展していることから厚い Au-Zn 層と Ni の界面強度は弱いものと考えられる．この原因として，Fig. 16 に示すような接

Fig. 14 Crack path of sample SZB-Au0.05-503 after bending fatigue test.

Fig. 15 Crack path of sample SZB-Au0.5-483 after bending fatigue test.

Fig. 16 SE image at interfacial reaction layer of sample SZB-Au0.5-503.

合界面に形成した剥離の存在が影響したと考えられる。このような剥離は、Au-Zn 層と Ni めっきの反応が不十分で界面強度が弱いため、冷却過程において、Au-Zn 層と Ni めっきの熱膨張係数の差により界面剥離が生じたものであると考えられる。

以上のようなパッケージレベルの実験結果から、次のようなことがいえる。Ni/Au めっきを施さない Cu 電極の場合は Cu-Sn 層の形成による劣化が生じる。そのため、Ni/Au めっきを施す必要があり、Au めっきが厚い場合は、その界面強度が弱いため、Au めっきを 0.05 μm 程度に薄く施すことが適当であると考えられる。また、リフローピーク温度についてはリフロー温度を上昇させ界面反応を進行させるほうがより優れた継手特性を有するものと考えられる。

このように、Sn-8Zn-3Bi はんだの接合信頼性は基板電極との間に形成する界面反応層の影響を受け、リフローピーク温度は、この界面反応層に影響を与えることが明らかになった。そこで、適正リフロープロファイルを明らかにするため、リフローピーク温度を細かく変化させ、リフローピーク温度が界面反応と継手強度に及ぼす影響について、さらに詳細に検討した。

Fig. 17 Influence of the reflow peak temperature on joint strength on Ni/Au plating pad with Au plating of 0.05 μm thickness using Sn-8Zn-3Bi solder and Sn-3Ag-0.5Cu solder ball.

Fig. 18 Interfacial reaction layer of joints on Ni/Au plating pad with Au plating of 0.05 μm thickness soldered at various temperature using Sn-8Zn-3Bi solder and Sn-3Ag-0.5Cu solder ball.

3.4 適正リフロープロファイル

パッケージレベルの評価と同じはんだボールおよびはんだペーストを用い、Ni(5 μm)/Au(0.05 μm)めっき電極を用いて、ボール接合部単点強度評価を行った。リフロー条件は接合強度および界面反応に及ぼす影響を詳細に検討するため、483 K から 513 K の間で 5 K 刻みに変化させた。また強度試験方法として、界面強度の影響が出やすい加熱式バンプ試験で行った。

3.4.1 リフローピーク温度と接合強度

Fig. 17 にリフローピーク温度と接合強度の関係を示す。この結果から、リフローピーク温度の上昇とともに接合強度の上昇が認められた。なお、498 K 以上のピーク温度では大きな変化はなかった。

3.4.2 リフローピーク温度と界面組織

Fig. 18 にリフローピーク温度と接合部組織の変化を示す。この組織観察結果から、CSP パッケージレベルの評価で述べたのと同様、リフローピーク温度が上昇するに従い、Au-Zn 層ははんだ中へと溶解・拡散している様子が観察された。リフローピーク温度が 513 K になると完全に Au-Zn 層は界面から消失していた。

これらのことからリフローピーク温度を 483 K 以上にし、界面に Ni-Sn-Cu-Zn を形成させることで十分な継手強度が得られるようになると言える。そのため、はんだ付けプロセスの低温化が可能な Sn-8Zn-3Bi はんだの接合特性を最

大限引き出すためには、498 K 程度のリフローピーク温度をもつリフロープロファイルで実装することが適正であると言える。

4. 結 言

本研究では、Sn-8Zn-3Bi はんだペーストを用いて、Ni/Au めっき電極上に実装した CSP 接合部において、リフローピーク温度が接合信頼性に与える影響について、界面組織と継手特性から検討を行った。本研究で得られた主な結論は、以下の通りである。

1) Sn-8Zn-3Bi はんだを用いたはんだ付けにおいて、Cu 電極を用いた接合部については、界面に厚い Cu-Zn 層と Cu-Sn 層を形成するため、接合信頼性を低下させる。そのため、長期信頼性を確保するためには、Ni/Au めっきを Cu 電極に施す必要がある。

2) Ni/Au めっき電極で、Au めっき厚が 0.05 μm の場合、その接合界面には Au-Zn 層が形成する。この Au-Zn 層は、リフローピーク温度を上げていくと、はんだ中に溶解・拡散し、界面には Ni-Sn-Cu-Zn 層が形成する。この界面反応層は、はんだと Ni めっきとの界面強度を向上させ、接合信頼性を改善させる。

3) Ni/Au めっき電極で、Au めっき厚が 0.5 μm の場合、接合界面に剥離が起こり、Au-Zn 層と Ni との界面強度は低下する。

4) Sn-8Zn-3Bi はんだと Ni/Au めっき電極を用いた CSP 接合部の信頼性は基板電極との間に形成する界面反応層の影響を受け、リフローピーク温度は、この界面反応層に影響を与える。リフローピーク温度を上昇させ界面に Ni-

Sn-Cu-Zn を形成させることにより接合強度が上昇し、リフローピーク温度が 498 K で接合強度が最大となる。

5) はんだ付けプロセスの低温化が可能な Sn-8Zn-3Bi はんだによる CSP 実装においては、Ni/Au めっき電極を用い、その Au めっき厚を 0.05 μm とし、リフローピーク温度を 498 K とすることで高い接合信頼性を確保できる。

文 献

- 1) K. Nishi: J. Japan Inst. Electronics Packaging **4**(2001) pp. 22-25.
- 2) K. Suganuma: Current Opinion in Solid State & Material Science **5**(2001) 55-64.
- 3) M. Abtew and G. Selvanduray: Mater. Sci. Eng. **27**(2000) 95-141.
- 4) H. Iwanishi, T. Imamura, A. Hirose and K. F. Kobayashi: *Proc. 8th Symposium on Microjoining and Assembly Technology in Electronics*, (The Japan Welding Society, 2002) pp. 277-282.
- 5) A. Yamaguchi, A. Furusawa, H. Otani, J. Ikeda, H. Iwanishi, T. Hojo, A. Hirose and K. F. Kobayashi: *Proc. 8th Symposium on Microjoining and Assembly Technology in Electronics*, (The Japan Welding Society, 2002) pp. 295-300.
- 6) A. Yamaguchi, H. Iwanishi, T. Hojo, A. Hirose and K. F. Kobayashi: *8th Pan Pacific Microelectronics symposium*, (SMTA, 2003) pp. 87-93.
- 7) T. Takahashi, K. Toyofuku, H. Iida and K. Yamamoto: *Proc. 12th Symposium on Microelectronics Symposium*, (Japan Inst. Electronics Packaging, 2002) pp. 175-178.
- 8) K. Suganuma, K. Nishihara, T. Shoutoku and Y. Nakamura: J. Mater. Res. **13**(1998) 2859-2865.
- 9) S. Sakatani, Y. Kohara, T. Saeki, K. Uenishi and K. F. Kobayashi: *Proc. 12th Symposium on Microelectronics Symposium*, (Japan Inst. Electronics Packaging, 2002) pp. 127-130.
- 10) K. Uenishi, Y. Kohara, S. Sakatani and K. F. Kobayashi: *9th Symposium on Microjoining and Assembly Technology in Electronics*, (The Japan Welding Society, 2003) pp. 127-130.
- 11) S. J. Wang and C. Y. Liu: Scr. Mater. **49**(2003) 813-818.
- 12) H. Matsuki, H. Ibuka and H. Saka: Sci. Tech. Adv. Mater. **3**(2002) 261-270.