

マイクロボンディングについて

(株) 日立製作所 生産技術研究所 佐藤 了平

Microbonding Technology
Hitachi Ltd., Production Engineering
Research Laboratory
Ryohhei Satoh

1. はじめに

現在, 半導体集積回路を基本として, 高度情報化社会の構築が急速な勢いで進められている。それはより豊かな社会を目指して, 例えば, デジタル通信網の構築, 高機能・多機能コンピュータをもちいたホームオートメーション, ファクトリ・オフィスオートメーション, 各種家電製品, 医療機器, 自動車, 等あらゆる分野におよんでいる。

これらを実現するkey技術の一つに, 高密度実装技術がある。これはIC・LSIを組み込んで高機能・多機能電子回路を実現するハードウェア技術で, IC・LSIの性能を最大限引き出すための技術である。この高密度実装技術を大別すると, 高性能電子回路設計技術とその回路を構築するためのハード技術があり, さらにハード技術は回路基板形成技術, IC・LSIのマイクロボンディング技術, 冷却技術, 等に分けることができる。目的の性能を得るためには, これらの技術を開発して, バランスの良い高密度実装を実現することが重要である。

本題で対象とするマイクロボンディングは高速動作, 多端子化, 微細化する超高集積LSIを接続し, 組み立てるための必須技術となっている。生産性と信頼性を両立できるマイクロボンディングが高性能電子回路の実現の鍵を握っているといっても過言ではない。以下, このマイクロボンディングの現状と将来について, 概要を述べる。

2. 電子回路の動向

マイクロボンディングは電子回路装置の性能を最大限引き出すための接合技術であるから, 電子回路の動向を把握しておくことが重要である。しかし, 電子回路と言ってもその製品群は多種多様であり, これらをすべて説明することはできない。そこで, 高密度実装として最先端を行く大形コンピュータ¹⁾²⁾を中心に述べる。

Fig.1は大形汎用コンピュータとスーパーコンピュータの性能推移を示したものである。現在, その性能は, スーパーコンピュータで約2GFLOPS (一秒当りの浮動小数点演算回数), 汎用コンピュータで約200MIPS (一秒当りの命令回数) に達し, 10年間で一桁の性能向上の割合で推移しており, 21世紀には1TFLOPSの演算性能になる勢いである。この性能向上はこれまで不可能であった各種の計算, 例えば流体解析による自動車の最適設計や天気予報の高速, 高精度化, 量子化学計算での分子設計による新材料の探索, 有限要素法による各種の最適構造設計, 経済分野における銀行のオンラインシステムの高度化, 証券の高速予想システム, 等あらゆる

る分野に大きなインパクトを与える意味を持っている。

一方、これを実現するためのLSIの性能はFig.2に示すように、SiECL系論理LSIで500MHz、CMOS系LSIで100MHz、そして今後期待されているGaAs系LSIで数GHzの高速動作が可能となり、さらにより高速化、高集積化の開発が進められている。端子数は論理設計に依存するが、Fig.3に示すようにLSIのゲート数の増加とともに確実に増える傾向にあり、現在500~1000端子/LSIで、21世紀には3~4千端子になると予測されている。コンピュータシステム全体で見ると、最近発表した日立M-880³⁾の1CPUで、約100万点にもなり、システムを構成する上でマイクロボンディングがいかに重要であるかがわかる。

大形コンピュータを最先端実装技術とするならば、ワークステーションやパソコン、あるいは各種家電製品等の実装規模は劣るが、それでも多様なアセンブリ条件、使用環境条件、そして低コスト化を考えると、場合によってはより厳しい実装技術の開発が必要とされている。自動車の例において、その環境は通常電子製品の加速試験より厳しい-40~+120℃の温度変化があり、これに耐えられる信頼性が必要である。

以上の電子回路の動向を考慮すると、今後マイクロボンディング技術はFig.4に示すような高度化が必要であろう。

3. マイクロボンディングの種類と特徴

現在マイクロボンディングとして、Table 1に示す方法が提案され、実用化されている。以下、この種類と特徴について簡単に述べる。

マイクロボンディングの主要特性は①高密度実装、②取り出し可能入出力端子数、③電氣的性能（低抵抗、低インダクタンス等）④不良LSIのリペアビリティ、⑤検査の容易性、⑥高信頼性、等が考えられる。これらの主要特性について各ボンディング方式を比較すると、まず高密度実装の点ではLSIのアクティブエリアから端子を取り出しうるFlip Chip方式が最も優れ、以下Microbump, Conductive Adhesive Bonding, Wire Bonding, TAB, の順になる。取り出し可能な入出力端子数はArea Array方式のFlip ChipとMicrobumpが他の方式より非常に優れており、特にMicrobumpは30μmの微細ピッチが可能なることから、10mm² LSIで約11万点もの端子を取り出すことができる。電氣的性能はリードが無いという意味でやはりFlip Chipが優れている。数百MHz、数GHzの高速動作を行なう大形コンピュータでは今後この方式がより有効になることは間違い無い。ワークステーションレベルの数十MHzオーダに対してはWire BondingやTAB、あるいはパッケージLSIで十分である。しかし、この分野でも将来の高速動作に対して、リードレスボンディングが期待される。いつばう、MicrobumpやConductive Adhesive Bondingは接触方式のため、接触抵抗の増大が考えられ、抵抗が問題にならない電子回路には有効であろう。

リペアビリティはますます高機能・多機能化する電子回路の高付加価値に伴って、製造歩留まりの向上のため重要な特性になっている。Flip Chip方式ははんだバンブを溶かして取り外すことが可能なことから、最も容易である。他の方式は容易なリペア方法を開発することが今後の課題であろう。

検査は外観検査ができないフェースダウン方式(Flip Chip, Microbump, Conduct

ive Adhesive Bonding)が不利であり、未接続やブリッジに対する事前の接続構造設計を行なう必要がある。

信頼性は微細化、多端子化する、マイクロボンディングの最大の問題で後で述べる。

その他に素子ダメージがある。接続プロセス時に加圧加熱するワイヤボンディングやTABはよりSensitiveになっている素子に損傷を与える可能性があり、今後十分な対策が必要である。

以上、マイクロボンディングの特性比較を行なった。総合的にはFlip Chip方式が優れていると思われるが、素子の入手可能性を考えると、一般的にはTAB方式が有利であろう。今後、用途に応じた使いわけが必要であろう。

4. マイクロボンディングの信頼性

電子回路の接続は、信頼性を決定する因子がTable 2に示すごとく非常に多く、これらをすべて定量的に設計することが難しいためいまだ不良が多い。そこで益々微細化する接続に対して信頼性を十分確保しておくことが重要である。

接続の信頼性は、プロセス依存の初期信頼性と使用時の熱機械的・電気化学的ストレスに依存した長期信頼性、に大別される。

プロセス依存の初期信頼性は、微細接続部に形成される金属間化合物と異種金属拡散によるカーケンダルボイドなどの欠陥が支配的である。ワイヤボンディングでは過度の過熱によりパープルプレグと呼ばれるAu-A1系の脆い金属間化合物が形成され、問題になることは良く知られている。この化合物は体積膨張するため自然に自己破壊する恐ろしい現象で、適正なボンディング条件の把握が重要である。

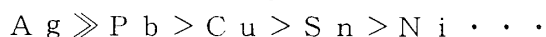
TABやFlip Chipにおいても、使用されるバリア金属(Ni, Cu等)とろう材(Au-Sn, Pb-Sn等)の組合せで脆い金属間化合物が形成されるため、同様に注意を要する。

被接続材の問題としてはNiやCu等のめっき品質に信頼性が大きく左右されるため、これに対する金属物理・化学を明らかにする必要がある。

このように初期信頼性は接合状態に依存しているので、それを正確に制御する、例えば新しいインプロセス制御法⁴⁾、等の開発が今後重要になると思われる。

長期信頼性の問題としては表2に示すように多くの項目があるが、特に熱疲労とマイグレーションが重要である。

マイグレーションは微細ピッチ化に伴って増大する電界強度と湿度、温度によりTable 2中の式に従って起こる。PbやSnでは非常に遅く、通常の使用条件では問題になっていない。しかし、結露して水滴が付くと数十～数百秒でショートしてしまうので、結露対策が必要である。各種金属の水中のマイグレーションスピードは以下の順になることが知られている。この対策としては樹脂コートやハーメチックシール、等を行なう必要がある。



一方、熱疲労は部材の熱膨張係数の違いや温度分布の発生により、相対変位が繰返し発生し、ろう材やリードが疲労破壊するものである。特に低融点のろう材は室温が高温状態にあるため、容易に変形し、歪が蓄積して疲労破壊に至る。この熱疲労破壊についてCCB(Flip Chip)を例として以下に述べる。

Fig.5はこの熱疲労破壊例⁵⁾⁶⁾を示したもので、SiチップとAl₂O₃基板の

熱膨張差により数千サイクルで破断に至る。マイクロボンディングではこの寿命を設計する必要がある。

そこでまず、この破壊メカニズムを調べたのがFig.6⁵⁾⁶⁾である。疲労破壊に特徴的な微細ストライエーションをはんだでは初めて観察に成功したもので、一サイクル、約0.15 μ mの間隔で亀裂が進展している様子がわかる。この亀裂進展方向はチップ中心と最遠はんだを結ぶ最大ストレス方向に一致している。その方向にはいく筋もの条痕が形成され、この条痕を境にある角度でストライエーションがつながっている。これはPbの結晶に依存した等価なすべり面でのすべりが活動した結果であり、あらゆる方向の変形ひずみが関与している。そこで熱疲労破壊の支配力学因子を、歪エネルギーに関係したミーゼス⁷⁾の相当歪と考えて有限要素法による解析を行なったのがFig.7である。最大相当歪と熱疲労破壊箇所が一致している。また、熱疲労寿命を最大相当歪振幅で整理したのがFig.8である。各種接続構造、チップサイズに対してCoffin-Manson型⁸⁾⁹⁾の次式が得られ、最大相当歪振幅が熱疲労の支配因子と考えられる。

$$N_f = C (\Delta \epsilon_{eqmax})$$

Fig.9に示した従来の評価法¹⁰⁾、最大剪断歪では直線関係が得られず、一般的な寿命評価は出来ない。

熱ストレスによる破壊はチップサイズの大形化や接続部の微細化により益々厳しくなり、接続の微細化限界を決める。特にリードの無いFlip Chipは厳しく、熱疲労の長寿命化が最重要課題である。それ以外では樹脂の影響が厳しく、樹脂を考慮した高精度な応力・歪解析による寿命設計が今後の決め手になるであろう。

5. おわりに

マイクロボンディングの現状と将来について簡単に述べた。高度情報化社会において、益々その重要性は高い。しかし、高信頼性と高生産性を確保するにはマイクロメタラジー、微細欠陥の影響度など、まだまだ不明な点が多く、あらゆる分野の学際的な研究開発が今後期待される。

6. 参考文献

- 1) 日経マイクロデバイス編：2000年へのLSI技術，8(1989)，42.
- 2) 日立製作所 半導体事業部編：表面実装パッケージの実装技術とその信頼性向上，技研情報センタ，11(1988).
- 3) 日経エレクトロニクス：NEレポート，503(1990.6.25)，104.
- 4) 西川，仲田：接合部品質のインプロセス制御に関する基礎的検討，溶接学会全国大会講演概要 46(1990).
- 5) 佐藤了平：Pb-Sn系合金による微細接続部の強度に関する研究，北海道大学学位論文，3(1988)，73.
- 6) 佐藤，他：電子回路におけるPb-Sn系合金微細接続部の熱疲労，日本金属学会講演予稿，11(1988).
- 7) R.Von Mises:Nachr.Ges.Wiss.Gott.,(1913),582.
- 8) S.S.Manson:Heat Transfer Symp.Univ.Michigan (1952).
- 9) L.F.Coffin:Trans.ASME 76(1954),931.
- 10) K.C.Norris,A.H.Landzberg:IBM J.Res.Dev.,13(1969),266.

Table 1 Characteristics of Various Microjoinings for LSIs

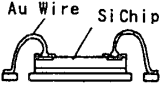
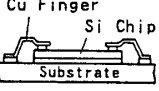
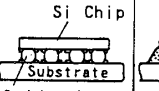
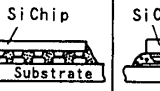
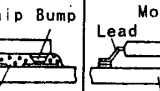
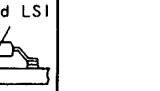
	Wire Bonding	TAB	Flip Chip	Microbump	Conductive Adhesive bonding	SMD (QFP)
Cross Section of Bonding						
1. Activity of Pin Count (10mm ² chip) (Mini. Pad. Dia. (μm)) (Mini. Pad. Pch. (μm))	300 (Perimeter) 70 135	500 (←) 50 70	2500 38800 (Area Array) 80 25 200 51	111000 (←) 10 30		130 (Perimeter) — 300
2. Electrical Performance ① Matching (GHz) (Low Inductivity) ② Contact or Bonding Electro-resistance	○ 10mΩ / 30 φμ	○ ←	◎ ←	? 10mΩ / 30 φμ	? 0.1~100 Ω / 120 φμ	△ —
3. Repairability	△	△	◎	?	△	○
4. Inspection	○	○	×	×	×	○
5. Reliability (Strength)	○ (9~14g/30 φAu)	◎ (15~100g/70 φ ²)	◎ (50~150g / 100 φμ)	? (—)	(○) (20~30g/120 φμ)	◎
6. Others (Element Damage)	△	△	◎	?	△	○

Table 2 はんだ接続信頼性における物理・化学的因子と評価式²⁾

大分類	項目	評価式 (寿命) 式
初期品質	(1) ぬれ性	
	(2) 金属間化合物成長	$x = \sqrt{2Dt}, D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{kT}\right)$ (x: 化合物の厚さ, D: 拡散定数, t: 時間, D_0: 頻度因子, Q: 活性化エネルギー k: ボルツマン定数, T: 絶対温度)
	(3) クリープ破壊	$\sigma = E\epsilon^n$ (σ: 応力, E: ヤング率, ϵ: ひずみ, n: 加工硬化係数)
	(4) 振動破壊	$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$ (f: 固有振動数, k: バネ定数, m: 重量)
電気・化学的信頼性	(1) 腐食	
	(2) マイグレーション	$N_m = C \cdot E^{-m} \cdot H^{+n} \exp\left(\frac{Q}{kT}\right)$ (H_m: マイグレーション寿命, C: 定数, E: 電界強度, H: 相対湿度, m, n: 指数, k: ボルツマン定数, T: 温度, Q: 活性化エネルギー)
	(3) エレクトロマイグレーション	$N_{em} = A \cdot J^{-n} \exp(Q/kT)$ (N_{em}: 断線寿命, A: 定数, J: 電流密度, k: ボルツマン定数, T: 絶対温度, Q: 活性化エネルギー)

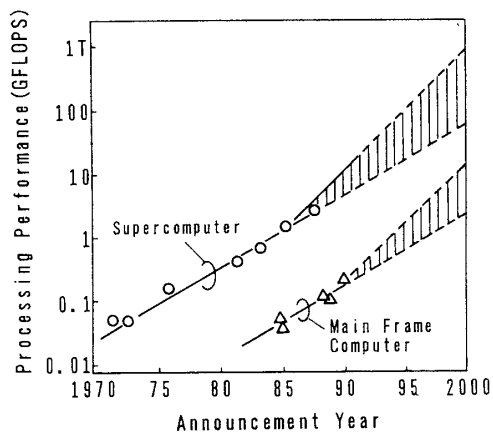


Fig.1 Trends in Main Frames and Super Computers

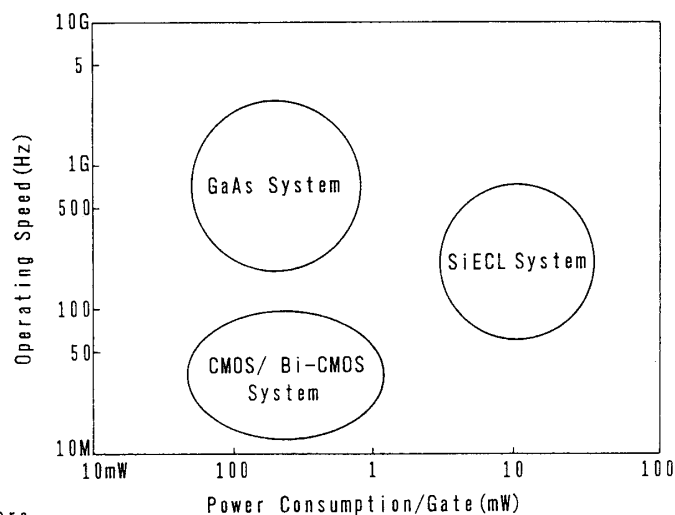


Fig.2 Speed vs. Power in Semiconductor Devices

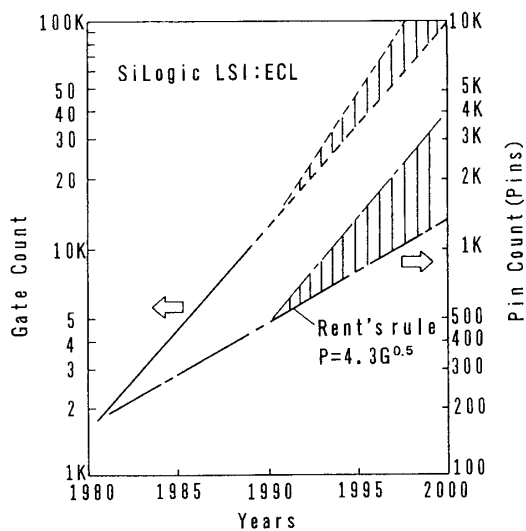


Fig.3 Trends in Gates and I/O Pin Counts

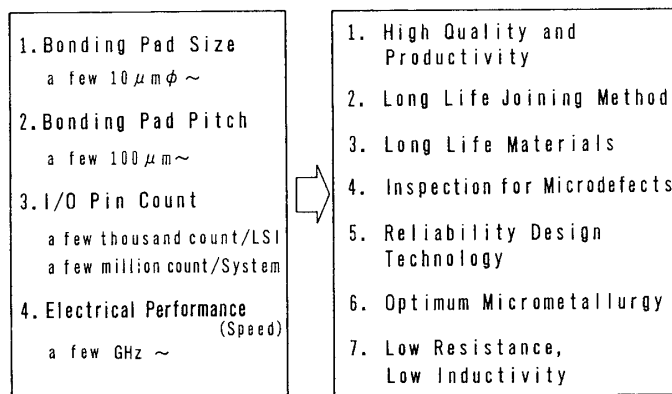


Fig.4 Future Requirements for Microjoining Technology in High Speed Computers

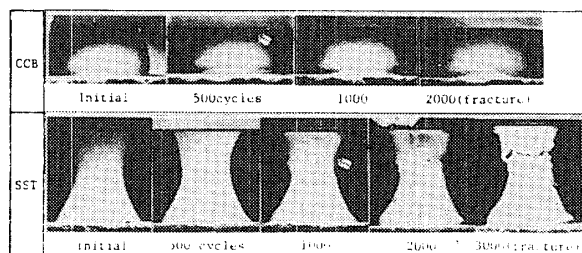
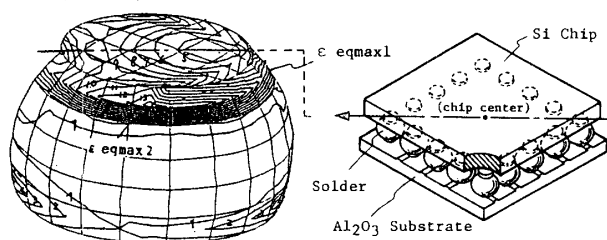
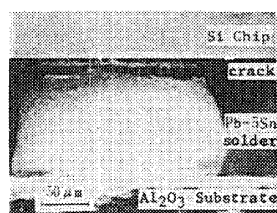


Fig.5 Thermal fatigue crack propagation in CCB and SST
(Test condition: -50 to $+150^{\circ}\text{C}$, $1^{\circ}\text{C}/\text{hour}$, Solder: Pb-5Sn alloy)
($\rightarrow$ crack)



Equivalent Strain Contour Line

Fig.7 equivalent strain distribution by FEM simulation (at 423K)



Thermal Fatigue Fracture
(After 3000 cycles)
(-50 to $+150^{\circ}\text{C}$, 1 cycle/hour)

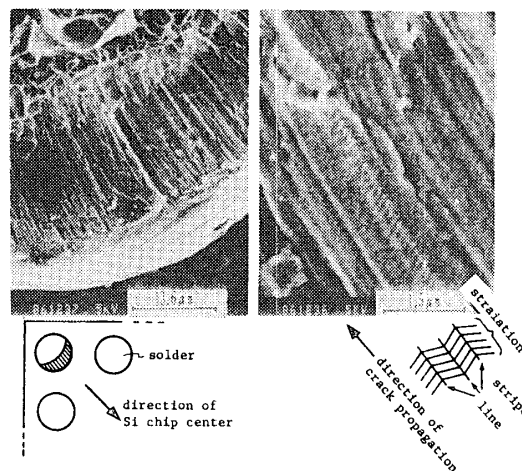
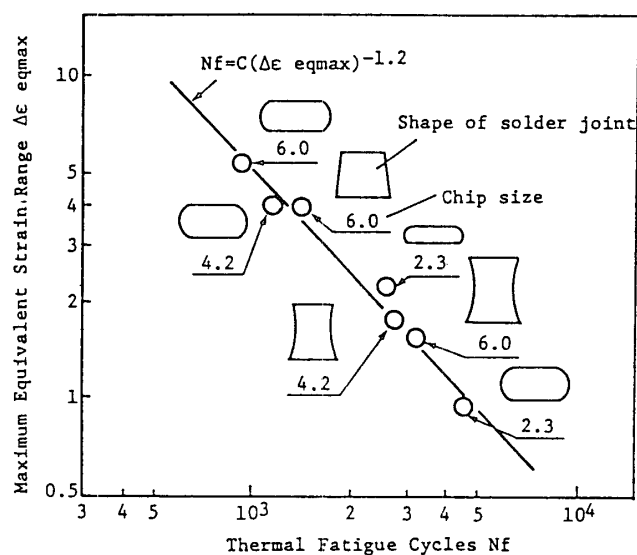
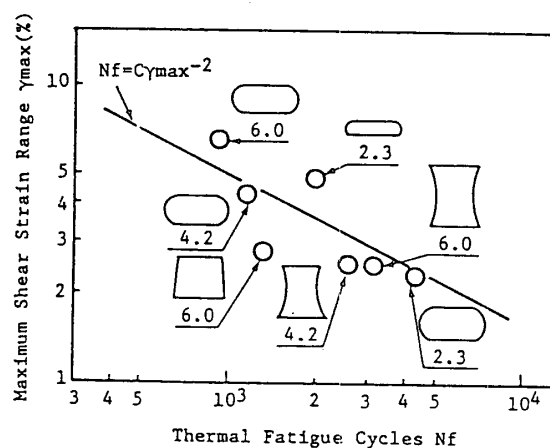


Fig.6 Typical thermal fatigue striation on a CCB fatigue fracture surface (Pb-5Sn alloy solder, after 176 cycles)



(a) N_f vs $\Delta \epsilon_{eqmax}$



(b) N_f vs γ_{max}

Fig.8 Thermal fatigue life of CCB microsoldier joints