超高速コンピュータ実装技術と マイクロ接合の課題

佐藤了平*

1. はじめに

高度情報化社会、マルチメディア社会の創出に向けて電子産業は今、活況を呈しているが、アジア諸国の台頭、アメリカの再生およびそれに関連した価格破壊、製造業の空洞化の進行により、経済的には厳しい状況に立たされている。日本の電子産業を再生・発展させるには、ボーダーレス社会を考慮した高付加価値製品の創出とそれを実現する、まねることのできない高度技術の開発が必須である。本稿では、実装技術として先頭を走る超高速コンピュータの実装技術を概説し、マイクロ接合技術の現状と今後の展開について簡単に述べてみたい。

2. エレクトロニクス製品の実装動向と超高速コンピュータの実装技術

ラジオ、テレビから始まったエレクトロニクス製品は、IC・LSIの出現から急速に進歩し、コンピュータ、通信、ビデオ、カメラ、高機能テレビなど、エレクトロニクス社会を支える多くの製品群を生み出した。これら各種電子機器は高速化と高密度化(小型化)が絶えず要求されており大型コンピュータやスーパーコンピュータはその先頭を走っている(図1)。このようなインフラの下でアナログからデジタル化が進み、現在および今後、通信とコンピュータと音声・画像を複合したマルチメディア機器を創出しつつある。この進展はエレクトロニクスコマースやインターネットに代表される

図1 電子機器の高度化。

双方向通信を生み出し、ボーダーレスな経済活動そのものを革新させつつあり、この波に乗りあるいは先に進むことなくして電子産業の展望はない。

一方、実装技術は回路のIC・LSI化とともに大きく変化した。基板で見ると片面プリント板実装から、両面多層プリント板実装、セラミックを用いた乾式ハイブリッド実装、湿式多層基板実装へ進み、さらに薄膜・厚膜混成基板実装、薄膜・プリント板混成実装へ高密度化がなされている。部品から見ると受動・能動部品の挿入実装から表面実装へと進み、さらにベアチップ実装からそれらをフル搭載したMCM(マルチチップモジュール)実装という究極の高密度実装へと変化して来ている。高密度実装が必要な理由は携帯端末や携帯電

* (株)日立製作所生産技術研究所計算機実装センタセンタ長(〒244 横浜市戸塚区吉田町292)
High Speed Computer Packaging Technology and Issues in Microjoining Technology; Ryohei Sato(Production Engineering Research Laboratory, Hitachi Ltd., Yokohama)
Keywords: computer packaging, microbonding, flip chip, wire bonding, tape automated bonding, multi chip module, solder
1996年2月8日受理

話のような小型・高速化が要求される機器と、マイクロプロセッサを用いた超高速処理機器の分野が増大していることによる。全分野に渡って実装方式の傾向を表すことは難しいが、これらをパラメータにした実装方式を示すと図2のようなになる。多ピン化はLSIのゲート数の増大と入出力端子の増大に依存し、数百ピンから数千ピンに達している。高速化

図2 多端子, 高速化に対する実装方式のトレンド。

はデータ処理量の増大や画像処理などに依存し、駆動周波数にして数百 MHz から数 GHz に達し、増々高密度実装方式を要求している。このような実装動向の中で、スピードと大規模データ処理に優る超大型コンピュータは最も高密度な実装技術が要求されている。

図3はこの超高速コンピュータを構成するに必要な実装技術の概要を示したものである。電子回路などの設計技術、LSIなどの電子部品、それらを搭載して全体の回路を形成する基板形成技術、部品を搭載する微細接合、組立て・検査技術、さらに冷却や高効率生産技術など、現代工学のハードウェア技術が凝縮されていると言っても過言ではない。

コンピュータの性能は通常1秒間にできる命令実行回数、MIPS (Million Instruction Per Second) で表すことができる。ハード的には信号が伝播するに要する時間(信号伝播遅延時間(図4))で決まり、実装系ではLSI間距離やリード長を短くする高密度実装と、低誘電率な高密度配線基板の開発が重要である。この高密度実装を実現するkey技術の1つがマイクロ接合と基板を含む各種界面の問題である。

汎用大型コンピュータ M-880 の実装例を図5に示す⁽¹⁾。1枚の大型樹脂基板上に20個の高密度モジュール(MCM)を搭載し、MCMに36~41個のLSIをはんだボールを用いたフリップチップ接続により高密度実装を達成している。LSI論理ゲート数の増大により、入出力端子が増大するため、

図3 コンピュータ実装技術。

コンピュータの性能

$$\text{MIPS} = \frac{1}{\text{論理方法} \times \text{マシンサイクル}}$$

マシンサイクル時間 = システム遅延時間 × 平均論理段数 + クロスキュー
システム遅延時間 = LSI 遅延時間 + LSI 間遅延時間

$$(1) \text{ 信号伝搬速度 } v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

$$(2) \text{ 伝搬遅延速度 } T_D$$

$$T_D = \frac{1}{V} \cdot l + \Delta T_0 \\ \approx l\sqrt{LC} + CR/2$$

図 4 信号の伝搬遅延時間.

LSI 全面から端子を引出すことのできるフリップチップ接続が、ワイヤボンディング(W. B.)や TAB 接続方式に比べ高密度実装に有利である(図 6)②. このように、LSI 接続処理方式は全体の性能を左右する程重要で、クロック周波数や端子数との関係を考慮した種々のパッケージング/ボンディング方式が提案されて来ている.

3. マイクロ接合技術の現状と展開

表 1 は LSI の接合方式を中心にマイクロ接合例をまとめたものである(3)-(5).

高速、高密度、小型、薄型などの観点から、種々の接合方式が提案され、開発されている. 特に先に述べた多ピン化と高速化に対応できるマイクロ接合の課題が大きいので、その接合方式の現状と展開を中心に述べる. ベースとなる接合方式は先に述べたペアチップの接合に見られ、Wire Bonding(以下、WB)、Tape Automated Bonding (TAB)、Flip Chip (FC)/Ball Grid Array (BGA) の 3 方式で代表される. チップコストや受ける基板コストなどの全体のバランスを考

図 5 M-880 命令プロセッサの実装構造.

えてこれらの方式が目的に応じて使い分けられているのが現状である. また、それぞれの特徴を生かして、これらの接合方式を組合せた方式が数多く提案されている. TAB と BGA の複合、WB と FC or BGA の複合、FC と BGA の複合などがある. これ以外に導電性接着剤を用いたペアチップ接合や Au/Au どうしの圧接接合方式がある. いずれも樹脂系の接着剤を用いているため、低電流の実装系に限定される場合が多い. このように、多くのマイクロ接合方式が提案され実用化されて来ているが、すべてにオールマイティな方式

図6 LSIの接続方式における端子数とチップサイズの関係。

はなく、今後実装に必要な他の条件との適合性を考慮することによって革新的な方式に進化すると考えられる。

一方、これらのマイクロ接合方式を実現する課題はまだ多い。個々の課題を述べる余裕はないのでマクロにとらえて示したのが表2である。外部条件に大きく左右されるコストを除くと、課題は大別して①高速・多ピン化対応の高密度化、②高信頼性化、③高生産性、④対環境性に分けられる。

高密度化に対応して接続を微細・狭ピッチ化していくとどうなるか。プロセス的にはブリッジや未接続といった欠陥発生が問題となる。この欠陥防止には構造やプロセス条件の適

正設計と同時に、これらの精度向上が必須である。特に接合材料の高精度供給(微小印刷、パンピング、めっきなど)が重要である。実現不可能であれば、新しい接続方式の開発が望まれる。さらに、これまでに問題とならなかったマイクロな接合性が重要で、拡散・反応といった接合メカニズムの解明に基づくプロセス設計が必要となる。これまでのマイクロ接合の5割以上を占めるソルダーリングプロセスは、フラックスを用いているため、フロンやクロロセンといった洗浄剤による環境汚染が問題となっている⁽⁶⁾。この環境汚染の問題に対しては無洗浄化とクリーン接合の開発が望まれている。無洗浄化は、弱酸性の還元剤が添加されているため、フラックス作用で余った溶剤が溶ダにアタックし、腐食やケミカルマイグレーションを引き起こす可能性がある。微細・狭ピッチ化すればする程、この問題が厳しい。これらを解決する究極の接続プロセスがクリーン接合である⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾。Au系ろう材では還元雰囲気中ですでに実用化されているが、酸化しやすいPb-Sn系などの溶ダでは難しい。溶ダの酸化・還元、溶融時の挙動などを詳細に調べ、不活性雰囲気でのクリーンな接合を実現している。洗浄プロセスなどを無くすことができ、設備コストの削減や生産性にも非常に優れている。FCのフラックスレスソルダーリングについては、溶ダの表面張力による形状の球帯化やセルフアライメントが実現されており、今後の接合プロセスの主流になる可能性がある。材料の問題としては、接続面積やリード断面積の減少に伴って絶対強度の低下が避けられない。特に、リードの断線、接合界面の剝離、ろう材の熱疲労破壊といった問題が発生しやすい。

表1 LSIのマイクロ接合方式。

基本接合方式	複 合 方 式		そ の 他
	TAB-F.C or BGA	W.B.-F.C or BGA	
1. Wire Bonding (W.B.) 2. Tape Automated Bonding (T.A.B.) (1) Face up (2) Face down 3. Flip Chip (F.C.), BGA	1. TAB-BGA-1 (1) シングル COCB (2) 2チップ COCB 2. TAB-BGA-2	1. W.B.-F.C. 2. W.B.-BGA 3. F.C.-F.C.	1. Conductive Adhesion. 2. W.B.-F.C. / C.A. 3. Micro Bump

表2 マクロ接合の課題.

項 目	主要課題	解決の方向
(1) 高密度化	(1) 新接合法の開発 (2) 各種材料の高密度化 (3) ミクロ接合制御の高度化	(1) 低温・低加圧接合法 (2) リード、ワイヤ、パンプの微細化、高強度化、高靱性化 (3) 接合材料の高精度供給法(微小印刷、バンピング、めっき、等)
(2) 高信頼性化	(1) 接合要因の明確化と材料・プロセス・構造の最適化 (2) 接合設計手法の確立 (3) 接合メカニズムと評価手法の確立	(1) 熱機械的、電気・化学的、破壊クラテリアの明確化、定量化 (2) 高度シミュレーション手法の適用 (熱・応力シミュレーションの高度化、量子化学シミュレーションの高度化) (3) 各種分析手法による接合メカニズム解明(TEM, SIMS, XPS, 等)
(3) 高生産性	(1) 高スループット接合設備の開発 (2) 低欠陥・高歩留安定制御プロセス・生産方式の実現	同 左
(4) 対環境性 〔各種環境規制への対応 (フロン規制) (有機溶剤規制) (Pbフリー、等)〕	(1) 新接合プロセス、材料の開発 (2) 信頼性の確保	(1) 代替洗浄(水系洗浄剤、プロセス) (2) 無洗浄化 (3) フラックスレス化 (4) Sn系合金材料の実用化 (5) 非溶融接合法(導電性接着方式)

そのため、比強度の大きな接合材料の開発や適正材料の設計などが重要な技術課題となる⁽³⁾⁽¹¹⁾。次の大きな問題がやはり信頼性である。何十万、何百万といったマイクロボンディングを一点の断線もなく長時間、信頼性を確保することはエレクトロニクス社会の機能を維持する上でも必須である。信頼性は熱機械的と電気化学的な信頼性に大別される(表3)⁽¹²⁾。微細・狭ピッチ化するといずれの信頼性も低下する。したがって、表3に示すような物理、化学的意味が明らかな加速式(寿命式)を用いた高精度な信頼性設計が必須である。図5に示した大型コンピュータには100~300 μm径のマイクロはんだ接続が数百万点使用されているが、精密なプロセス設計、寿命設計、信頼性試験・評価などを行うことにより、現在一点の不良もなく極めて高い信頼性を確保し続けている。しかし、今後更なる微細化、低コスト化に対応した限界設計を行うためには、より接続の本質に基づく一般式への展開が非常に重要である。特に破壊のメカニズムとそれに基づく信頼性設計手法の開発が急務である。また、微細であ

表3 マイクロボンディングの信頼性と評価式.

大分類	項 目	評価(寿命)式
初期品質	(1) むれ性	
	(2) 金属間化合物成長	放物線則 $x = \sqrt{2D \cdot t} \quad D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{kT}\right)$ $(x: \text{化合物の厚さ}, D: \text{拡散定数}, t: \text{時間}, D_0: \text{頻度因子}, Q: \text{活性化エネルギー}, k: \text{ボルツマン定数}, T: \text{絶対温度})$
	(1) 静的破壊	$\sigma = E\epsilon^n$ $(\sigma: \text{応力}, E: \text{ヤング率}, \epsilon: \text{ひずみ}, n: \text{加工硬化係数})$
	(2) 熱疲労破壊	マンソン・コーフィンの修正式 $N_f = C \cdot f^m (\Delta\epsilon_p)^{-n} \exp\left(\frac{Q}{kT_{\max}}\right)$ $(N_f: \text{寿命}, C: \text{材料定数}, m, n: \text{指数}, f: \text{繰返し周波数}, \Delta\epsilon_p: \text{塑性ひずみ振幅}, Q: \text{活性化エネルギー}, k: \text{ボルツマン定数}, T_{\max}: \text{使用最高温度})$
熱機械的信頼性	(3) クリープ破壊	ラーソン・ミラーの式 $T(\ln t_R + A) = B - C\tau_e$ $(T: \text{使用温度}, t_R: \text{破断までの時間}, A, B, C: \text{材料定数}, \tau_e: \text{クリープ強度})$ $\dot{\epsilon} = B \cdot (\sigma/E)^n D_0 \exp(-Q_{SD}/kT)$ $(\dot{\epsilon}: \text{クリープひずみ速度}, B: \text{定数}, D_0: \text{頻度因子}, \sigma: \text{負荷応力}, E: \text{ヤング率}, T: \text{絶対温度}, n: \text{指数}, Q_{SD}: \text{自己拡散の活性化エネルギー}, k: \text{ボルツマン定数})$
	(4) 振動破壊	$f = \frac{1}{2\tau} \sqrt{\frac{k}{m}}$ $(f: \text{固有振動数}, k: \text{バネ定数}, m: \text{質量})$
電気・化学的信頼性	(1) 腐食	
	(2) マイグレーション	$N_m = C \cdot E^{-m} \cdot H^{-n} \exp\left(\frac{Q}{kT}\right)$ $(H_m: \text{マイグレーション寿命}, C: \text{定数}, E: \text{電界強度}, H: \text{相対湿度}, m, n: \text{指数}, k: \text{ボルツマン定数}, T: \text{温度}, Q: \text{活性化エネルギー})$
	(3) エレクトロマイグレーション	$N_{em} = A \cdot J^{-n} \cdot \exp(Q/kT)$ $(N_{em}: \text{断線寿命}, A: \text{定数}, J: \text{電流密度}, k: \text{ボルツマン定数}, T: \text{絶対温度}, Q: \text{活性化エネルギー})$

るためすべてのストレスやその分布を実測することは非常に難しい。これらを正確に予測するために、FEMなどの高精度・高速なシミュレーション技術の開発が必須である⁽¹³⁾。また高スループット、クリーン化などを実現できる生産設備が期待されている。全体のシステムを考えて最も効率の良い生産方式がこの分野でも強く望まれている。

最後に接合界面の問題に言及する。

今後マイクロ接合の極限を追求して行くためにはやはり接合のメカニズム解明が重要である。図7は各種メタライズに対する各種ろう材による接合部を観察したものである。硬いメタライズと軟いろう材との接合層を確実に出すために、断

メタライズ	Ni 板(純度 99.99%)	Ni-B 系めっきメタライズ	Ni 板(純度 99.99%)	Ni-B 系めっきメタライズ
ろう材	Au-Sn 系		Au-Ge 系	
接合状態
接合メカニズム(推定)

図7 Au-Sn 系, Au-Ge 系ろう材と Ni メタライズとの接合界面状態の比較。

面研磨後アルゴン原子を斜方照射している。組合せにより、化合物の種類、カーケンダーボイドの生成、不純物原子の界面への濃縮などの差により、接合の良否が決定される。特にメタライズ中の不純物原子の挙動が重要で、生成化合物中への拡散の可否が接合界面の良否を決定していることは注目される。非溶融接合では表面の汚染度、酸化などの影響が大きい。また、 Al_2O_3 に対する薄膜の接続例のように、Ti 側への酸素のケミカルシフトの存在は多くの接合系に対する重要な指針を与えている。今後無機、有機材料を問わず接合メカニズムの統一的解釈が強く望まれる。

4. 終 わ り に

マイクロエレクトロニクスの電子デバイスにおける接合はあくまでも電子機器・システムの一部である。革新的マイクロ接合を実現しようとするれば、むしろ半導体側あるいは基板側への要求が強い。したがってトータルシステムとしてバランスのとれた接合方式の選定が強くなされるべきである。基板の中に能動素子を作り込むことやシステムオンチップのように回路を集約して行く。これまでの開発では、Wafer Scale Integration (WSI) のようにほとんど失敗して来ているが、修正や補修といった技術の進歩、半導体の進歩の中でどの階層で切り分けることが良いのか、接続屋の立場を離れて全体を見た発想の転換が要求されている。さらにそのための

技術的、経済的な課題を考えることが重要である。

文 献

- (1) 小林二三幸, 村田慎吾, 渡辺 裕, 頭士鎮夫, 山本雅一, 小林 徹, 小高雅則: 日経エレクトロニクス, 515 (1990. 12. 10), p. 226.
- (2) 佐藤了平: サーフェスマウントテクノロジー93年度号プレスジャーナル, (1993-1), p. 131.
- (3) 溶接学会: シンポジウム「マイクロエレクトロニクスにおける超微細接合」, (1993-10).
- (4) 春日壽夫: 溶接学会マイクロ接合研究委員会資料, MJ-245-95, (1995-9).
- (5) 滑川正敏: 溶接学会マイクロ接合研究委員会資料, MJ-245-95 (1995-9).
- (6) 一山靖友: 溶接学会誌, 63, No. 3, (1994), 202.
- (7) 本多 進編: プリント配線板の無洗浄化技術, トリケプス, (1992).
- (8) 西川 徹, 佐藤了平, 佐原邦造, 河野顕臣: 溶接学会全国大会講演概要, 第49集, (1991-9), p. 394.
- (9) 西川 徹, 伊集院正仁, 佐藤了平: 溶接学会全国大会講演概要, 第53集, (1993-9), p. 198.
- (10) 須賀唯知, 藤若貴生, 佐々木 元: 第5回マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集, (1993-6), p. 59.
- (11) T. Suga, Y. Takahashi and E. Hosomi: Proc. 6th IMC, Tokyo, (1990), p. 228.
- (12) 仲田周次: 溶接学会誌, 63, No. 3, (1994-4), 162.
- (13) 竹本 正, 佐藤了平: 工業調査会, (1991-1), 205.
- (14) 河合通文, 原田正英, 佐藤了平: 溶接学会, Mate '96 シンポジウム "Microjoining and Assembly Technology in Electronics", (1996-2).