サーバ/ワークステーション用 MCM

MCM for Server/Workstations

福永 尚美* 瀬山 清隆* 菊池 俊一*

1. はじめに

ビジネスサーバの K6000 シリーズに適用した高性能な MCM-D テクノロジは、CMOS CHIP を高密度に実装する技術として開発したものである。

MCM-D 用基板は、窒化アルミニウム板上に銅導体とポリイミド絶縁体からなる薄膜多層で構成されている。この上に搭載される CMOS LSI チップの端子は、全エリアにわたってはんだバンプが配列され、ベアチップによりフェースダウンで薄膜上に接合されている。

MCM-D テクノロジは高速伝送特性、多数 I/O、高性能冷却を可能とし、ワークステーションからメインフレームにわたる広範囲のコンピュータ製品に適用できる。

この技術の詳細について、MCM 実装技術、MCM 基板技術、冷却技術を中心に以下に述べる。

2. 実装技術

Fig.1 に、K6000 シリーズビジネスサーバに適用した MCM を示す。使用したテクノロジは MCM-D に分類される。実装仕様の概略を Tab.1 に示す。また、Fig.2 に実装構造の概念図を示す。

厚膜導体のない無垢の窒化アルミニウムのベース基板上に、銅を導体、ポリイミドを絶縁体として交互に形成されている。それに 0.5 μ m プロセス CMOS のエリアバンプ LSI チップ、抵抗・コンデンサ等のチップ部品、I/O ピンが搭載される。これらの部品はすべて同一面に実

Outer dimension	48 mm×67 mm×27 mm
MCM substrate	Aluminum nitride
Number of chips	6 pieces(3 sizes)
Number of transistors	12.5 MTrr
Number of bumps	6436 (sig.1556)
Number of I/O pins	719(sig.355)
Heat dissipation	18.8 Watts

Fig.1 Photograph of MCM applied to FUJITSU K6000 Series business server.

Tab.1 MCM packaging feature.

LSI chip	Flip chip bonding
	Area bump interconnection Bump pitch - 210 μ m
I/O pin	Surface mount pin grid array
	Butt soldering connection
	Pin pitch - 1.27mm grid 0.635mm staggered — selectable Mixed above —

* Naomi Fukunaga, Kiyotaka Seyama, Shun-ichi Kikuchi
富士通㈱テクノロジ開発部/FUJITSU LIMITED

Fig.2 MCM packaging structure.

装されるため、裏面には大型のヒートシンクを接合し、高発熱の冷却ができる。

LSI チップには、直径約 $100\mu\text{m}$ の Pb 系の高温はんだバンプが $210\mu\text{m}$ ピッチで全エリアに配列されている。

MCM は、表面実装ピングリッドアレイの I/O ピンによりプリント基板へはんだ付け実装される。MCM の I/O ピンの配列は 50mil (1.27mm) 格子配列、 25mil (0.635mm) 千鳥配列、および 50mil 格子/ 25mil 千鳥の混在したものが可能である。

このため、設計者は LSI チップと MCM の I/O ピンの配置設計の自由度が大きい。

Tab.2 にチップの許容入出力総数を示す。 $15\text{mm}\times 15$

Tab.2 Allowable I/O counts for chips.

Bump density	Number of bumps for $15\text{mm}\times 15\text{mm}$
$2267/\text{cm}^2$	4900max.

Fig.3 The relation between total I/O counts for a $67\text{mm}\times 67\text{mm}$ substrate and number of chips mounted for the substrate.

mm の LSI チップで最大4,900のはんだバンプが確保できる。また、Fig.3に基板の入出力総数とチップの数の関係を示す。 $67\text{mm}\times 67\text{mm}$ 基板上に $15\text{mm}\times 15\text{mm}$ のチップを4ヶ搭載した場合、 50mil 格子で約1,700の入出力ピンが確保できる。

このように本 MCM は特にチップと基板に多数の入出力ピンを許容できる。

また、本 MCM の部品実装は、高信頼性を得られるように実装設計、プロセス設計されている。

たとえば、I/O ピンの接合部はピンに低ヤング率材料を採用し、数値解析や評価試験を通してピンの直径と長さ、はんだ接合部のフィレット形状を最適化することによって高信頼度を確保している。LSI チップのはんだバンプ接合部も、解析・試験によって、チップ下部へのポッティングの有無に関係なく長期的信頼度を満足することを検証している。信頼性評価の概略を以下に示す。

SMPGA 接合の信頼性評価

$45\text{mm}\times 67\text{mm}\times 2\text{mm}$ の薄膜5層基板に719本の I/O ピンを実装し、基板裏面にはフィンを接着した。この MCM を厚さ 1.6mm の FR4プリント基板にはんだ付けしたサンプルを使用して、液相の熱衝撃試験、振動試験、機械的衝撃試験、はんだクリープ試験を行い、15年以上の実稼働で問題ないことを確認した。

バンプ接合の信頼性評価

2,401個のバンプをもつ $13\text{mm}\times 13\text{mm}$ の LSI チップ、および3,035個のバンプをもつ $16\text{mm}\times 16\text{mm}$ の LSI チップを、 $45\text{mm}\times 67\text{mm}\times 2\text{mm}$ の薄膜5層基板に実装したサンプルを使用し、 $-65^\circ\text{C}/+125^\circ\text{C}$ の液相の熱衝撃試験により評価し、15年以上の実稼働で問題ないことを確認した。

3. MCM 基板テクノロジー

MCM-D の基板材料としてはシリコンを使った適用事例等があるが¹⁾、新しく開発した MCM 基板は以下の理由から窒化アルミニウムを採用した。

- ① Si チップと熱的整合の取れた線膨張係数のため、チップと基板とのはんだ接合部に高い信頼性を確保できる。
- ② チップの熱流束を一様に広げる高い熱伝導率であるため、基板の高温箇所を除去し、ヒートシンクの冷却性能を高めることができる。
- ③ 高いヤング率のため、熱挙動に対して反りを小さく抑えられる。

Fig.5 Used analysis model and signal transmission wave inside an MCM.

Fig.4 Cross sectional view of the MCM substrate.

また、MCM 基板の最大サイズは135mm×135mm で、さまざまなサイズの MCM 基板を顧客の要求に対して提供することができる。

ベース基板の窒化アルミニウムにはビアとパターンが全くないため、窒化アルミニウムの代りに他の材料を使用することが可能である。たとえば、MCM の発熱量や実装チップのサイズの信頼度を考慮して一般のアルミナセラミック基板や金属基板を応用することができる。

現行の MCM パターン設計ルールは、最小パターン幅12μm、最小パターンピッチ27μm、最大パターン厚5μm である。層間の接続ビアの最小サイズは20μm の八角形である。また、一般的に5層板であるが、何層板にするかは配線密度の要求に従って自由に選択することができる。ポリイミド層の最大厚は10μm で、その誘電率は3.5である。Fig.4に MCM 基板の断面構造を示す。

なお、今後予想される高密度配線要求対策として、多くのチャンネルを保証するための新しいパターン形成テクノロジーを開発中である。

次に、製品に使用されているこの基板の電気特性を以下に示す。電源層とグランド層のシート抵抗は4mΩ/□で、パターン抵抗は4Ω/cm、電気容量は0.8pF/cm である。また、特性インピーダンスは絶縁層、パターン形状を任意に変更することにより50～75Ωが可能である。

導体に低抵抗である銅と、絶縁体に tan σ が小さいポリイミドを使用していることにより、今後要求される250MHz 以上の高速伝送系 MCM にも本構造で適用可能である。Fig.5に解析モデルと MCM 内の信号伝送シミュレーション結果を示す。なお、解析に用いた MCM 内のパターン長は5cm である。

4. 冷却技術

LSI の長期的な信頼性を維持し、MCM を安定に稼働させるために冷却にも工夫を凝らした。高発熱を許容し、安定動作を保証するためにはチップジャンクションから周囲冷媒（主に空気）に至る熱抵抗 R_{j-a} をできるだけ小さくすることと、チップ内部およびチップ間の温度差を一定範囲に抑えることが重要である。MCM の熱抵抗 R_{j-a} は以下の式で表される。

$$R_{j-a} = R_{j-c} + R_{c-a}$$

R_{j-c} は MCM 内部の熱抵抗で、はんだバンプ、薄膜ビア、ベース基板の熱抵抗が含まれる。 R_{c-a} は使用される環境下での周囲冷媒から MCM 表面までのヒートシンクを含む熱抵抗である。

R_{j-c} を低減するには、LSI チップのはんだバンプ数の増加以外に薄膜ビア自体の熱抵抗低減が必要である。 R_{c-a} を低減するには接合材の熱伝導率向上とヒートシン

Fig.6 Temperature contour map of cone via and spiral via.

ンク自体の高性能化が必要である。

まず、薄膜ビアの最適化の例を示す。絶縁層であるポリイミドの熱伝導率が極めて小さいため、最も効果の高いベース基板に近いランド層・電源層に接合されるビアの熱抵抗低減を検討した。Fig.6は有限要素法によるビアの熱伝導解析結果の一例である。(a)が各層でビアを乗り換えるスパイラル型、(b)がランド層または電源層から垂直につなげた円錐型である。解析結果では、円錐型のほうがスパイラル型の半分以下の熱抵抗であり、実際に製品に適用されている。

次にヒートシンクを説明する。これは低風速で冷却性能の高いフィンであり、アルミニウム合金を使用している。高さ22mmの標準的フィンで手前風速1m/sで0.7W/cm²の冷却を許容できる。フィンの天井部は冷却風の上方向への逃げを防ぎ、側面のスリットはフィン($\alpha=23.8\text{ppm}$)と窒化アルミニウム($\alpha=4.6\text{ppm}$)の線膨

Fig.7 Velocity vector and temperature contour map of an MCM by Computational Fluid Dynamics analysis.

Fig.8 Temperature contour map on the surface of an MCM.

張係数の差で接合部に発生する熱応力を緩和している。フィンは押し出し成形、またはダイカストで製造される。フィン厚とフィン間スペースは熱流体解析により、形状最適化を行った。Fig.7はMCMの1/2モデルであり、流線と等温線図を示す。最終段階でMCMレベル、ボード搭載レベルの熱解析・評価を実施し、最終的な検証を行った。Fig.8はMCMの熱解析結果を示す。

さらに本MCMは冷却構造を改善することで、より高い発熱密度を許容できる。Fig.9は67mm×67mmのMCM基板に15mm×15mmのLSIチップを4ヶ搭載し、周囲温度35℃、MCM手前までの空気温度上昇を5℃、ジャンクション温度85℃と仮定した場合の許容発熱密度を示す。各LSIチップのはんだバンプは4,000個と仮定した。標準フィンの緻密化で手前風速3m/s時に2.0W/cm²以上、ヒートパイプ、マイクロチャネル、コールドプレートを採用することで4.0W/cm²以上の発熱密度ま

Fig.10 Flowchart of MCM assembly process.

Fig.9 Allowable heat density for a 67mm×67mm substrate mounted with four 15mm×15mm chips.

Fig.11 Detailed flowchart of MCM test.

で許容できることを実験レベルで検証済である。

5. MCM 実装プロセス

Fig.10に MCM 実装プロセスのフローを示す。また、Fig.11に MCM の試験にかかわるフローを詳述する。

Burn-in 試験済の LSI チップは電気試験済の MCM 基板に仮圧着される。次に I/O ピンを治工具で位置出し、LSI チップとともに H₂-N₂のベルト炉でフラックスレス接合する。その後、抵抗・コンデンサのチップ

部品を接合し、裏面に冷却フィンに良熱伝導の接着剤で固定する。MCM は外観検査・電気試験を行い、合格後に樹脂またはフタで封止する。試験不合格の場合には異常 LSI を交換する。

6. おわりに

窒化アルミニウム基板上に銅とポリイミドからなる薄膜多層配線を有する高性能 MCM-D テクノロジを開発した。また、このテクノロジを富士通 K6000シリーズ

ビジネスサーバのプロセッサモジュールに採用した。

特徴として、高速伝送・多数 I/O・高発熱を許容できる。

MCM-D はワークステーション・サーバからスーパーコンピュータ・並列処理コンピュータに至る幅広い性能範囲をカバーできるテクノロジーである。したがって、今後はローコスト化と高性能化の 2 系統で開発を進める必要があろう。

高性能化には低誘電率絶縁材料を使い、さらに配線を微細化した基板の開発や高発熱を許容するヒートシンクの開発が望まれる。

ローコスト化では基板と冷却が大きなテーマである。基板側では金属基板の採用、パターン仕様の緩和、あるいは高密度化による薄膜層数の削減、冷却側ではプリント板等周囲への熱放散、簡易形状ヒートシンクの採用などが必要となろう。

参 考 文 献

- 1) M. Y. Lau, K. L. Tai, R. C. Frye, M. Saito and D. D. Bacon: 「A Versatile, IC Process Compatible MCM-D for High Performance and Low Cost Applications」, Proceedings of the 1993 INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON MULTICHIP MODULES, p.107-112
- 2) S. Kikuchi, H. Yamamoto, K. Seyama, M. Hirano, K. Moriizumi: 「High Performance MCM-D Technology」, Proceedings of 1994 IEEE Multi-Chip Module Conference, p.9-14
- 3) 大嶋 修, 吉村英明: 「MCM パッケージ及び MCM の PWB への最適実装」, 表面実装技術, 1994年7月号

【執筆者紹介】

福永尚美 (ふくなが なおみ)

1993年、富士通㈱入社。以来、実装技術の開発に従事。

瀬山清隆 (せやま きよたか)

1976年、富士通㈱入社。以来、実装技術の開発に従事。

菊池俊一 (きくち しゅんいち)

1981年、富士通㈱入社。以来、実装技術の開発に従事。

新 刊 紹 介

エレクトロニクス実装技術基礎講座 <全 6 巻>

第 4 巻 実 装 組 立 技 術

● (株)工業調査会 (1994年 7 月発行)

● 社団法人 SHM 編

● A 5 判 / 272 頁 / 定価 3,605 円

本格的なマルチメディア時代の到来とともに、LSI の大容量化、多ピン化、高速化、システムオンチップ化および商品側からのコンパクト化、使い易さへの要求に伴う実装技術への課題は、材料・プロセス・装置いずれの面でも大きくかつ重くなっている。

このような状況の中で実装技術者には、今までと質の違うインテリジェンスと自らの実装思想に基づく大胆な発想が今後一層要求され、この姿勢と実践こそが、次世代の商品性を高めることとなるように思われる。

そこで SHM では協会創立 25 周年を記念して「エレクトロニクス実装技術基礎講座 (全 6 巻)」を刊行することにし、まず第 1 巻《総論》と第 3 巻《膜回路形成技術》が発刊された ('94年 2 月)。

今回その第 2 弾として第 4 巻が刊行されたので、概略内容を紹介し、活用をおすすめする。

第 4 巻《実装組立技術》は、いわゆる“アSEMBル”と称される領域を対象とし、SMT やリードスルー実装などの LSI パッケージの搭載から各種ベアチップ実装、MCM 実装に至るまで幅広くデバイス搭載技術を解説す

るとともに、基板と基板との接続についても詳述してある。いずれも「基礎」に重点をおいているが、その技術の背景 (歴史) や応用例、技術開発の成果も取り入れている。

執筆陣は、エレクトロニクス実装技術の最先端に立って活躍されている方々で、これから実装技術分野に携わろうとする方はもちろん、エレクトロニクスに何らかの形で関わる方々にも、好適な参考書である。

目 次

- ① 概 論—半導体デバイス、一般電子部品の実装技術—
- ② パッケージ LSI、一般電子部品の実装技術
- ③ ベアチップの実装技術
- ④ マルチチップモジュール (Multi Chip Module: MCM) 技術
- ⑤ 半導体デバイスの封止技術・材料
- ⑥ 基板間接続技術

<今後の分冊発刊予定>

第 2 巻 実装基板	1995年 1 月 刊行予定
第 5 巻 搭載部品	1995年 1 月 刊行予定
第 6 巻 設計・信頼性評価技術	1995年 1 月 刊行予定

SHM 会誌