マルチチップモジュールの放熱技術

Thermal Management of Multichip Modules for Telecom Applications

岸本 亨*

1. はじめに

高性能な電子装置を実現するには、LSIの高速化・高集積化と合わせて、LSI間を接続する配線などの信号伝搬遅延を極力低減する高密度実装技術が必須である。これに伴いLSI、装置の発熱密度は増加の一途をたどっている。大型計算機やスーパーコンピュータの分野では装置の小形化による性能向上を図るため、マルチチップモジュールを用いた高密度実装技術が多用されている^{1),2)}。

一方、通信系装置においても従来装置のマルチチップモジュール化によって装置の小形化・低消費電力化を図る検討が進められつつある^{3),4),5)}。さらに近年ではISDN (Integrated Service Digital Network) の新しいサービスとして、動画による画像データベース検索や映像分配 (ー100Mb/s)、数百Mb/sの伝送容量が必要となる高精細動画通信、大量データの高速転送等の高速度・広帯域なISDN (以下B-ISDN) に対する需要の顕在化が想定されている。B-ISDNでは、従来のN-ISDN (Narrowband ISDN) に比べ2桁以上高速な信号を扱う必要があることからマルチチップモジュールを用いた装置構成が検討されている⁶⁾。Fig.1は交換系装置のボードあるいはモジュールの発熱密度の推移予測を示したものであり、B-ISDNではモジュール当たりの発熱密度が 1 W/cm^2 を超し、液冷と空冷の境界領域に達するものと想定される。

そこで本稿では通信系装置のマルチチップモジュールに焦点を当てて、その空冷技術、ヒートパイプを併用した空冷技術、および液冷技術を概説するとともに、今後

必要となる技術を展望する。

2. 強制空冷を用いたマルチチップモジュールの放熱技術

強制空冷はその簡便さから多くのマルチチップモジュールの冷却法として採用されており、通信系装置用マルチチップモジュールにおいても多くの検討がなされている^{5),7),8)}。

Fig.2は空冷形マルチチップモジュール構造の一例を示したものである⁸⁾。配線基板にはLSIを高密度に搭載するために (配線の微細化) 低抵抗な銅を導体材料に用い、信号伝播遅延を低減し高速化を図るために低誘電率のポリイミド樹脂を絶縁層とした銅・ポリイミド多層配線技術を使用している。ポリイミド樹脂の熱伝導率はアルミナ基板に比べ2桁ほど低く、このため放熱用サーマルヴィアをLSIの直下に多数設け内部熱抵抗の低減を図った構造となっている。ベース基板はアルミナ基板であり、電源層などが設けられているとともにプレートフィン形ヒートシンクが高熱伝導性樹脂により裏面全面に接着されている。

Fig.3はFig.2に示すモジュールの放熱特性を示したものである。ここでチップの熱抵抗はチップのジャンクション温度から空気入口温度までの温度差を用いて定義している。放熱用サーマルヴィアを用いない場合、内部熱抵抗は全熱抵抗の $2/3$ (ポリイミド基板の熱抵抗は全体の $1/2$) を占めるが、放熱用サーマルヴィアを用いると内部熱抵抗は全体の $1/3$ 程度となるとともに、全熱抵抗を50%低減できる。

近年、銅・ポリイミド多層配線技術を用いたマルチチップモジュールの開発が盛んであるが、チップをフェー

*Tohru Kishimoto

NTT 交換システム研究所/NTT Communication Switching Labs.

Fig.1 Increasing module power dissipation in telecommunication equipment

スアッに搭載する場合はここに示した放熱用サーマル
ヴィアを用いる方法、あるいはチップ搭載領域のみ銅・
ポリイミド多層配線領域をくり抜きベース基板に直接搭
載する方法⁹⁾が内部熱抵抗低減に有効である。Fig.2の例
ではヒートシンクに沿って空気を流す方法であるため外
部熱抵抗が大きく、サーマルヴィアを用いた構成の場合
には熱抵抗の大半を占めている。またボード上に数個の
モジュールを実装し、これを一括して冷却する装置構成

を想定すると、下流に向かうほど空気温度が上昇し許容
される消費電力は最大30W 程度となる。

外部熱抵抗を低減する方法としては空気をモジュール
のヒートシンクに吹きつける強制空冷技術（噴流冷却）
があり、一部の計算機で実用化されている^{10),11)}。この場
合、高い熱伝達率が得られると同時にすべてのモジュ
ールに均一な冷たい空気を供給することが可能となり、許
容消費電力を大幅に増すことが可能となる。

Fig.2 Schematics of air cooled multichip module [S.Sasaki et al., IEEE CHMT Vol.12, No.4, 1989]

Fig.3 Cooling characteristics for air cooled multichip module with thermalvias [S.Sasaki et al., IEEE CHMT Vol.12, No.4, 1989]

Fig.4 Thermal resistance of air impingement jet cooled multichip module

Fig.4は10mm角チップを9個搭載したモジュールを吹きつけ形強制空冷およびFig.2のような一括送風形の強制空冷を用いた場合の放熱特性をそれぞれ示したものである。吹きつけ形強制空冷を用いると熱抵抗を2/3程度に低減でき、かつ許容消費電力は90W程度(発熱密度 $1.4\text{W}/\text{cm}^2$)に達する。このため、液冷に近い能力を得ることができ、B-ISDNに向けた冷却方式として有望視されている。ただし、モジュール上部に空気を送風するダクトが必要となることから平面実装に適した構成であり、通常通信系で使用されているブックシェルフ実装へは適合しにくいという問題を有している。

3. ヒートパイプ併用形強制空冷を用いたマルチチップモジュールの放熱技術

ヒートパイプの動作原理は、外部熱源から蒸発部に加えられた熱によって作動流体が蒸発し、その部分の蒸気圧が上がり、蒸気はコンテナ内を移動して凝縮部に流れ、そこで凝縮し蒸発潜熱を吸熱部に伝達することによる。潜熱の形で運ばれる熱量は、顕熱の形で運ばれる熱量に比べ数桁大きいので、小さな構造で大量の熱を輸送できる特長がある。また構造が簡単なこと、長距離を少ない温度差で熱輸送を行える、などの特長を有している。このため発熱が集中する装置からの放熱技術として通信系装置への適用性、およびマルチチップモジュールへの適用性が検討されている^{12),13),14)}。

Fig.5はヒートパイプを内蔵したマルチチップモジュールの構造を示したものであり、モジュールの端部に設けた空冷ヒートシンクにより放熱する構造である¹³⁾。本構造は多層配線構造を持つアルミナ基板と同じく、グリ

ーンシートを圧着形成する段階でヒートパイプ構造を一括して形成するものである。

Fig.6はヒートパイプを内蔵することの効果を、配線基板の厚さ一定の条件で評価したものであり、ヒートパイプ基板の作動流体には水を用いている。またチップの熱抵抗はチップのジャンクション温度からモジュール端部に設けた空冷ヒートシンクの空気入口温度までの温度差を用いて定義したものである。通常用いられるアルミナ基板のみでは熱伝導率が低く、基板およびチップ間に大きな温度差を生じる。これに対し、ヒートパイプを内蔵することにより見かけの熱伝導率を大きくすることができ、各チップ間の温度差を少なく(均熱化)、かつ温度上昇も低く抑えることが可能となる。

また高熱伝導性基板材料であるAlNを用いた基板に比べても、熱抵抗を1/2程度に低減できる。本方法では基本的にはモジュールにヒートシンクを搭載する必要はなく、このため本モジュールを密に実装し、モジュール

Fig.5 Multichip module with integral heat pipe

Fig.6 Thermal resistance as a function of chip mounting location with substrate material as a parameter

Fig.7 Effect of package orientation on thermal performance [E. Sasaki et al. 1979 Spring National Convention records, IECEJ, 166, 1979]

で生ずる熱は第2のヒートパイプをモジュールの端部に接続して外部へ熱輸送し、一括して空冷することも可能となる。このためブックシェルフ実装へも適用することができる。

一方、ヒートパイプコンテナ内にウィックを有する構造では、トップヒートモード（上部に蒸発部、下部に凝縮部を配置した構造）でも熱輸送量は少なくなるもののヒートパイプ動作をするが、ウィックのないサーモサイフンのような構造では凝縮した作動流体は重力落下により蒸発部へ帰還するため、ヒートパイプの傾斜角によ

ってその熱輸送特性が大きく影響される。Fig.7は本ヒートパイプ内蔵基板の基板傾斜角度依存性を示したものである。本ヒートパイプ基板では構造を簡単化するため、ウィックのない構造となっている。基板蒸発部を水平より僅かな角度傾けてボトムヒートの状態にすればチップの熱抵抗の変化は僅かである。一方、トップヒートの構成（傾斜角 $> 0^\circ$ 以上）ではヒートパイプが正常に動作しないため、熱抵抗は急激に上昇する。なお、傾斜角が 0° 、すなわち水平搭載状態ではヒートパイプ動作にはチップ電力依存性があり、消費電力の小さい領域ではヒ-

Fig.8 Schematics of liquid cooled multichip module. [T.Kishimoto et al., IEEE CHMT Vol.9, No.4, 1986]

トパイプ動作するものの、消費電力増大に伴って動作しなくなる傾向がある。

以上、ヒートパイプを用いることにより、小さな放熱空間を用いて大量の熱を輸送できることを示したが、ヒートパイプはあくまで熱輸送手段であり、最終的な放熱部へいかに接続するか(ヒートパイプコネクタなど)、あるいは搭載できる方向(一般的には垂直に搭載する)に制限があるなどの問題があり、これらをうまく解決して使用することが望まれる。

4. 液体冷却を用いたマルチチップモジュールの放熱技術

発熱密度が 1 W/cm^2 を超える領域は強制空冷の限界に近く、このため通信系装置に適合した間接液冷方式の検討が進められている^{15),16),17),18)}。ここでは一例として液体冷却機構内蔵形のマルチチップモジュールについて概説する^{15),16)}。

Fig.8は液体冷却を用いたマルチチップモジュールの構造を示したものである。積層セラミック基板下層部のスルーホールの間隙に数百 μm 角の断面を有する冷媒貫流管路を複数設けるとともに、冷媒分配・集合部を積層セラミック基板の両端に設けた構造となっている。また、積層セラミック基板の表裏面にはパッケージの入出力端子である接続用パッドが設けてある。なお接続用パッド部形成工程における表面凹凸の発生を防ぐため、冷媒分配・集合部は複数の管路で構成している。冷媒は冷媒入力用ポートより冷媒分配部に導かれ、各管路に等流量分配される。各管路を流れる冷媒はチップで生じた熱を奪った後、冷媒集合部で再び集められ、冷媒出力ポー

Fig.9 Thermal resistance as a function of total coolant flow rate with liquid coolant as a parameter.

トから外部へ流出する。

また管路および冷媒分配・集合部はスルーホール形成と同様のグリーンシートの打抜きにより形成でき、配線部と冷却部とを一体構成できるため高密度な実装が可能となる。なお熱容量の大きい液体を冷媒とすること、および微細な管路を用いることによって高い熱伝達率が得られることによって高い冷却能力を得ることができる。また、外部熱抵抗は全熱抵抗の10%程度にすぎず、熱抵抗の大半は基板内の熱伝導によって決定される。すなわち、内部熱抵抗の低減が冷却能力を増すための必須課題となる。

Fig.9は約100mm角のマルチチップ基板に8mm角の

チップを25個搭載した場合の冷却特性を冷媒の種類をパラメータとして示したものである。ここでFC72, FC77はパーフロロカーボン系冷媒（3M製品）であり、完全にフッ素化された絶縁性冷媒である。チップの熱抵抗はチップのジャンクション温度から冷媒入口温度までの温度差を用いて定義したものである。水はその熱伝導率が高いことに起因して熱抵抗低減に有効である。たとえば流量が1ℓ/minの場合、熱抵抗は3℃/Wと小さい値を実現できる。許容温度上昇を50℃と仮定するとチップ当たりおよそ16W、モジュール当たり400Wを許容でき、モジュール当たりの発熱密度は4W/cm²と高い冷却性能を得ることができる。

一方、パーフロロカーボン系冷媒であるFC72（1気圧で沸点は56℃、本実験結果は沸騰状態ではなく、強制対流の領域で使用した場合のものである）、FC77（沸点97℃）ではその熱伝導率が水に比べ約1桁小さいことに起因して熱抵抗も大きくなるものの、冷媒流量が1ℓ/minの場合それぞれ5℃/W、5.5℃/Wと低い値を得ることができ、先ほどと同様に許容温度上昇を50℃と仮定するとチップ当たりおよそ10W、9W、モジュール当たり250W、225Wをそれぞれ許容できる。このとき発熱密度は2.5W/cm²、2.25W/cm²となり、通信系装置への適用を考えると十分に高い性能を有していると考えられる。

一般的に液冷を用いると外部熱抵抗は無視しうる程度の小さな値となり、冷却性能を向上するには内部熱抵抗をいかに低減するかが重要なポイントとなる。本モジュールの場合には、チップをフェースアップで基板搭載し基板を介して液冷ヒートシンクに熱を伝える構造であることから、内部熱抵抗の低減には高熱伝導性基板を用いる、もしくは基板厚さを薄くすることが考えられる。

Fig.10は基板の厚さ（配線部の厚さ）とチップ熱抵抗の関係配線基板材料をパラメータとして示したものであ

Fig.10 Effect of base substrate material on thermal resistance

る。アルミナ基板を用いる場合では配線間のスペースが広く、収容する配線本数の増大に伴って基板層数が増し、基板厚さが増す。このため内部熱抵抗が増加する。

これに対し銅・ポリイミド多層配線基板を用いると、配線間のスペースをアルミナ基板に比べ1/10程度にすることができ、層数を低減できるとともに、絶縁層厚が薄いため、配線部の厚さを薄くできる。もちろん、ポリイミド樹脂の熱伝導率はアルミナの1/100と小さくサーマルヴィアを用いる必要がある。たとえば、アルミナ基板厚さが7mm程度の場合と比較すると、銅・ポリイミド多層配線基板では配線部（アルミナのベース基板を含む）の厚さを2mm程度にしても同一の配線収容能力を有している。

このため全熱抵抗はアルミナ基板に比べ同等もしくはそれ以下にすることが可能となり、高速かつ多数の信号配線が必要な基板には銅・ポリイミド多層配線技術を用

い、液冷を併用する方法が良いことがわかる。

Fig.11, Fig.12は本パッケージの応用例を示したもので、前者は従来から通信系装置で多用されているブックシェルフ実装に適合するモジュール構成であり、配線基板と冷却部を一体化したことによりパッケージ厚さを薄くできるため、パッケージ間のピッチを20mm程度まで小さくして実装することが可能である。一方、後者は平面実装に

Fig.11 Liquid cooled multichip module for 3 dimensional packaging systems

Fig.12 Liquid cooled multichip module for 2 dimensional packaging systems

適したモジュール構成であり、2.54mm ピッチで900本の I/O 端子をパッケージ裏面に設けることができる。

5. 今後の展望

以上、通信系装置用マルチチップモジュールの放熱技術を概説したが、将来の B-ISDN に向けた構成を考える場合、液冷技術を適用すれば要求性能を十分満足するモジュールを構成することが可能であるが、その保守性などを考慮すると可能な限り強制空冷を用いた構成が望ましいと考えられる。

一方、吹きつけ型の強制空冷では空気を送るダクトスペースが必要となることから、ブックシェルフ実装には適合しにくいという問題がある。このためヒートパイプを用いて装置架の一部に設けた空冷ヒートシンクまで熱を効率的に輸送するような冷却方法の開発、あるいは架内部のシェルフをヒートパイプと一体化するような方法の開発などが今後重要となろう。

また、液冷では通常ポンプなどの可動部が存在するため信頼度設計上の隘路となるが、たとえばサーモサイフォン形の強制対流沸騰冷却を使用したヒートシンクなどを用いれば可動部もなく、かつ沸騰を用いることから液冷以上の高い熱伝達率を得ることが可能となるとともに、ヒートシンクの温度をほぼ沸点に近い一定値に保つことができる。このため可動部がなく、かつ取替えの容易な液冷法の開発もますます重要となろう。

一方、通信系装置では一般の装置に比べ長期信頼性が要求される。このため強制空冷を用いるに際しては、ファン故障および発熱密度が高いことを十分考慮し、たとえ故障がおきても冷却性能の低下が少ない構成法を採用することがますます重要な課題となろう。

参考文献

- 1) M.Suzuki, Y.Udagawa, H.Yamamoto : "Conductive liquid cooling for the FACOM VP2000 supercomputer", 10th IEPC, pp.118-123 (1989)
- 2) A. Dohya, T.Watari, H.Nishimori : "Packaging technology for the NEC SX-3/SX-X supercomputer", 40th ECTC, pp.525-533 (1990)
- 3) Y.C.Lee, H.T.Ghaffari, J.M.Segelken : "Internal thermal resistance of a multichip packaging design for VLSI based systems", 38th ECC, pp.293-301 (1988)
- 4) K.Gustafsson, G.Flodman : "Multichip modules for telecom applications", IEMT Symposium, Italy, pp.43-52 (1990)
- 5) P.Hedemalm : "Build your own multichip module", IEEE Computer Packaging Workshop, Santa Cruz : Session 3.1, May2-4 (1989)
- 6) N.Yamanaka, S.Kikuchi, T.Kon, T.Ohsaki : "Multichip 1.8Gb/s high speed space division switching module using copper-polymide multilayer substrate", 40th ECTC, pp.562-570 (1990)
- 7) 細貝正男, 除村均, 落合良一 : "放熱フィンの接合方法に関する一考察", 信学総全大, C-143 (1989)
- 8) S.Sasaki, T.Kon, T.Ohsaki, T.Yasuda : "A new multichip module using a copper polymide multi-layer substrate", IEEE Trans. on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, Vol.12, No.4, pp.658-662 (1989)
- 9) S.G.Baust, R.J.Dischler, S.W.Westbrook : "Implementing a packaging strategy for high-performance computers", High Performance Systems, January, pp.28-31 (1990)
- 10) R.G.Biskeborn, J.L.Horvath, E.B.Kultmark : "Integral cap heat sink assembly for the IBM 4381 processor", 5th IEPS, pp.468-474 (1985)
- 11) S.Chan, R.Horst : "Building parallelism into the instruction pipeline", High Performance Systems, December, pp. 53-60 (1989)
- 12) J.Chiba, M.Ohara, M.Satoh, Y.Usui : "A distributed power supply system using new heat dissipation technique", IEEE INTELEC, 24.2 (1989)
- 13) 佐々木悦郎, 小木曾建 : "ヒートパイプ構造アルミナ配線基板", 信学総全大, 166 (1979)
- 14) T.Miyagi, K.Itoh, S.Kimijima : "GaAs multichip module for a parallel processing system", 40th ECTC, pp.580-585 (1990)
- 15) T.Kishimoto, T.Ohsaki : "VLSI packaging technique using liquid-cooled channels", IEEE Trans. on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, Vol.9, No. 4, pp.328-335 (1986)
- 16) 岸本亨, 佐々木伸一, 山口悟 : "間接液冷を用いたパッケージング技術", 研究実用化報告, 第37巻, 第11号, pp.747-754 (1988)
- 17) 荒井孝博, 栗坂勝, 篠塚孝, 武富剛 : "三次元実装における間接液冷方式の開発", 信学全大, C-83 (1989)
- 18) 荒井孝博, 栗坂勝, 武富剛, 田山幸治 : "交換システムの間接液冷に関する一考察", 信学技報, SSE89-158, pp.25-30 (1990)