層間バンブ接続法（B²it™）配線板の熱特性評価

島田 修*, 久野 勝美**, 岩崎 秀夫**, 石塚 勝**, 福岡 義孝*

Thermal Management Estimations for B²it™ Printed Wiring Boards with Bump (Filled Via Hole) Interconnection

Osamu SHIMADA*, Katsumi HISANO**, Hideo IWASAKI**, Masaru ISHIZUKA** and Yoshitaka FUKUOKA*

*株式会社東芝半導体事業本部回路部品事業部（〒183 東京都府中市東芝町1）

**株式会社東芝研究開発センター（〒210 神奈川県川崎市幸区小向東芝町1）

*PWB & Module Division, Semiconductor Group, Toshiba Corporation (1 Toshiba-cho, Fuchu-shi, Tokyo 183)

**R&D Center, Toshiba Corporation (1 Komukai-Toshiba-cho, Saiwai-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 210)

Abstract

We have developed B²it™ (Buried Bump interconnection technology) printed wiring boards (PWB's) for high density and high performance wiring boards or substrates. Ordinary PWB's have low thermal conductivity because of their organic materials, compared with ceramic substrates and so on. The B²it™ PWB's have filled via holes by silver paste bumps to connect wiring lines between neighbor layers. The feature is different from ordinary PWB's having copper-plated through holes. This paper reports the thermal management properties for the B²it™ PWB's by measuring the thermal resistance of several filled via hole situation. And a thermal conductivity of the via hole material was simulated from the measurement values. As the results, the thermal conductivity of the via hole was very high to compare with that of the normal printed silver paste, and the B²it™ PWB's had good thermal management property enough to high density packaging.

Key Words: Printed Wiring Board, Silver Paste Bump, Thermal Management, Thermal Conductivity, Filled Via Hole

1. まえがき

近年の電子部品の高機能化・高密度化に伴って、これらを実装する配線板に配線の微細化などを含めた高機能化が要求されている。特に最近のプリント配線板のファイン化に対しては、フルアディティブ法¹⁾、サブトラクティブ法があるが、感光性樹脂により微小孔を形成してめっき法で接続するビルドアップ法²⁾、レーザー光で絶縁樹脂層に微小孔を形成してめっき法で接続する法³⁾、パターン転写法⁴⁾などの高密度配線板が研究され、実用化され始めた。しかし、まだ生産性、歩留まり、配線板構成、環境対策さらには実装対応など解決すべき課題も抱えている状況にある。そこでわれわれは、配線板の高機能化のために新しい層間接続法（B²it™；Buried Bump Interconnection Technology）によるプリント配線板を開発した^{5), 6)}。この配線板の構造上の大きな特徴は、配線層間の電氣的接続がバンブによるフィールドビア(Filled Via)構成をとることにある。

一方、半導体デバイスは高集積化・高密度化によって発熱量が増大してきている。また、配線板へのデバイス実装が高密度化してきており、さらなる放熱に対する対策が配線板に要求されている。プリント配線板は基材として有機

材料を用いるため、配線板の熱伝導性がセラミック基板などに比べて劣る。また、最近の新しいビルドアップ配線板では、ビルドアップ層の層間接続のほとんどがステップ構造のビアであり、導体の厚み分しか熱放散経路がないために配線板からのデバイスの熱放散が難しい構造になっている。しかしながら、開発したB²it™配線板はビア内部が導体で満たされたフィールドビア構造を持つため、その層間接続バンブをサーマルビアとして利用することが可能となる。このようなことから、今回B²it™配線板の熱特性を実際に測定し、サーマルビアの効果を評価したので、その結果について報告する。

2. B²it™配線板技術

B²it™配線板は、従来のプリント配線板にはない新しい発想に基づく配線板である。基本となるものは層間接続技術にあり、以下にその概略を説明する。

2.1 B²it™配線板プロセス

B²it™配線板の基本となるプロセスは、(a)導電性バンブ形成、(b)バンブ貫通、(c)積層プレス、(d)後工程であり、従来のプリント配線板に比べて非常にシンプルなプロセスとなっている。図1に概要を示すとともに、以下にその内

図1. B²it™配線板プロセスの概要

容を記載する。

(a) 導電性バンブの形成

導電性バンブの形成はスクリーン印刷法による。使用した導電性ペーストは、銀-樹脂系でチキソトロピック性(揺変性：機械的な力により粘性率が低下する性質)の比較的高いものを特別に調整した。この導電性ペーストを銅箔に印刷することによって、絶縁層に必要な層間接続バンブを一括形成する。印刷されたバンブは約300 μ m径の底面で、高さは約250 μ mのほぼ円錐形を形成している。次にこの印刷した導電性ペーストを加熱・乾燥して硬化させる。この導電性バンブ形状を図2 (a)に示す。

(b) バンブの貫通

絶縁樹脂層としてのプリプレグ材を短時間軟化状態にして、先の硬化した導電性バンブを貫通させる。導電性バンブは、容易にガラスクロスをかき分けてプリプレグの上に頭を出し、プリプレグは銅箔と密着して一体化したものとなる。図2 (b)はバンブのプリプレグ貫通後の外観である。なお、ガラスクロスのない樹脂フィルムの場合はこの工程は省略できる。

(c) 積層プレス

前記工程で銅箔とプリプレグをラミネートしたものに、さらに銅箔をレイアップして熱プレスする。通常のプリプレグに推奨される圧力よりもバンブを押しつぶす分だけ高めた圧力を作用させたが、基本的には通常の熱プレスと異なることはない。この熱プレス後のバンブ接続状態を図2 (c)に示す。

(d) 後工程

積層後のフォトリソ、エッチング、ソルダレジスト、表面処理、外形加工、電気検査などの各工程は、通常の銅ス

(a) バンブ印刷

(b) プリプレグ貫通

(c) 層間接続状態

図2. 導電性バンブ形状

ルーホール法の工程と同じであるので省略する。

(e) 多層化

図1の下方に示したように、上記プロセスで2および3層のコア層を形成し、別の導電性バンブ形成・プリプレグ貫通を行った銅箔を1層目と4層目としてそのコア層の両面にレイアップ・熱プレスする。1層目と4層目のパターン形成を行うことによって4層配線板ができる。また、これを繰り返すことによって多層化が達成される。

2.2 B²it™配線板の特徴

上記プロセスをもとに、B²it™配線板の特徴を従来の銅スルーホールめっき法によるプリント配線板などと比較して整理すると、以下のようにまとめられる。

(1) 層間接続用の穴あけが不要

従来は配線板の層間接続のために一穴一穴行っていた穴あけが、バンブ印刷・貫通という一括処理になり工程時間が短縮される。また、導電性バンブは印刷法によるため微小化が容易である。一方、B²it™配線板はバンブ貫通後に絶縁体を再溶融し、整形され硬化するので、ドリル穴あけ

法で問題になるCAF (Conductive Anodic Filament)現象(穴あけドリルによる機械的な力によってスルーホール壁面に応力やクラックが生じ、それによってスルーホールめっき時に絶縁層を構成するガラスクロスに沿って導体が成長する現象。スルーホール間あるいはスルーホールと配線間などのショート不良や層間絶縁不良を発生させる)が起これにくい。

(2) めっきが不要

スルーホールめっきを行わないので、銅箔が厚くならずにエッチングでき、ファインパターン形成が容易になる。化学的なプロセスが削減でき、導電性バンプの形状は外観形状管理となるので品質管理が容易になる。

(3) ランダム層間接続

必要な層間接続のみ自由に形成できるので、配線の引き回しが楽になり、設計上の制約が少なくなる。加えて、高密度な配線網が達成できる。

(4) パッドオンビア

従来のプリント配線板の層間接続部には、スルーホール穴があいていたが、導電性バンプ上の銅箔は実装パッドとして利用できる、部品実装密度が向上できる。

(5) その他

プリント配線板の必要特性に合わせて基材を選定できる。例えば、ガラスエポキシ樹脂、BT樹脂、PPE樹脂なども使用できる。また特に特殊な装置は必要なく、従来のプリント配線板製造装置が有効活用できる。積層プレス工程は従来と基本的に同じであるので銅箔(配線パターン)の接着強度も従来と同等であり、部品実装に対する新規な制約はない。

以上のような特徴をもつB²itTM配線板であるが、従来がない構成をもつため、その特性を把握する必要がある。今回は、以下のように熱特性について評価・解析した。

3. 熱特性評価方法

配線板の熱特性を把握する上で重要なことは、配線板を構成する材料の物性値を求めることである。材料の物性値である熱伝導率は、通常はカタログ等から引用される。しかし、B²itTM配線板では熱プレス工程を行うため、熱と圧力による影響によって特にバンプの熱伝導率がカタログ値と異なる可能性がある。そこで今回は、層間接続バンプの熱伝導率を求めるために、実際に試作したサンプルの熱抵抗値を測定した。後述するように、配線板の熱抵抗値を測定することによってバンプの熱伝導率を求められる。

3.1 評価サンプル

測定したサンプルは、配線板の基本の層構成となる両面板とした(図2(C))。これは、B²itTM配線板が導体層間ごとにバンプの形成ができるため、1層分の熱抵抗を評価すれば多層化したときの熱特性が把握できることによる。また、バンプの密度による熱抵抗の違いを同時に評価するこ

図3. 評価サンプルの概要

表1. 評価サンプルの各種寸法

バンプ数	row	バンプピッチ [mm]	測定絶縁層厚み [μm]
0	0	—	120
9	3×3	2.5	125
25	5×5	1.6	127
49	7×7	1.1	130
100	10×10	0.8	130

とによって、サーマルビアとしてのバンプの効果を評価できるようにした。このため両面に形成したダイ・パターン(8mm角)内に、このバンプを0、9、25、49、100個形成した各種サンプルを使用した。各バンプはサンプル内に等ピッチで配置してある。このサンプルの概要を図3に、バンプ配置仕様を表1に示す。なお、絶縁体としてのプリプレグ材料は、ガラスエポキシ(FR-4)材料を使用した。

3.2 熱抵抗測定方法

熱抵抗の測定は、実際に上記サンプルの片面に熱を与えて、サンプル両面の温度差を測定することによって行った。図4にこの測定装置の概略を示す。端部に加熱および冷却手段をもつ直径10mmの2本の銅製円柱を突き合わせ、その間にサンプルを挟む。サンプルと銅柱の接続には熱伝導グリスを用いた。銅柱には等距離に熱電対が取り付けられており、銅柱の温度分布が測定できる。加熱は電熱器で行い、冷却は水冷を用いて一定温度とし、測定は熱電対の温度が安定した平衡状態において行った。図5にこの測定装置の外観写真を示す。空気中への銅柱と測定部からの熱放出を防止するため、図5には示していないが測定時には銅柱およびサンプルの周囲に断熱材を配置した。

この測定装置を用いたサンプルの熱抵抗値の求め方は次のようになる。まず、測定した銅柱の温度分布からサンプルを通過した熱量Q(W)が求められる。銅柱の熱抵抗を

図4. 熱抵抗測定装置の概要

図5. 熱抵抗測定装置

R_{cu} (K/W)とすれば,

$$Q = (T_i - T_{i-1}) / R_{cu} \quad (1)$$

となる。 T は測定温度であり、添字の i は熱電対の位置番号(図4における熱電対#1, #2, #4)に相当する。今回の測定での通過熱量 Q (W)に対しては、それぞれのサンプルの測定ごとに熱電対#1-#2, #2-#3, #4-#5間を測定し、その平均値を測定したサンプルに対して用いた。サンプルごとに通過熱量を求めたのは、この装置に挿入したサンプルの熱抵抗値がそれぞれ異なり、通過熱量が異なるためである。また、ガラス転移点 T_g で材料特性が大幅に変化するため、今回はサンプルの温度が T_g 以下でかつ余裕をみて 100°C 以下になるようにした。銅柱の熱抵抗 R_{cu} (K/W)は、銅柱の熱伝導率 κ (W/mK)(今回使用した銅柱は 400W/mK)、銅柱の断面積 A (m^2)、および熱電対の間隔 L (m)から、

$$R_{cu} = L / (\kappa \cdot A) \quad (2)$$

によって求められる。

式(1)をもとにして、図4の#3と#4間の熱抵抗 R_{th} (K/W)が、その測定温度差から次の式(3)を使って求められる。

$$R_{th} = (T_3 - T_4) / Q \quad (3)$$

ここで、サンプルに対して非常に熱伝導率の高い薄いアルミ箔($t=15\mu\text{m}$)をサンプルの代わりに同条件で設置し、その測定値から求まる値を基準値(R_{H0})とした。この基準熱抵抗値には、熱電対#3と#4間の銅柱と熱伝導グリスの値が含まれる。この基準熱抵抗値との差がサンプルの熱抵抗値(R_{spi})となる。

$$R_{spi} = R_{th} - R_{H0} \quad (4)$$

また、測定装置とサンプル間の接触抵抗誤差が測定値に含まれるので、測定は複数回行った。

4. 測定結果

(4)式で求められる熱抵抗値は今回の各サンプルに限定対応しており、物理量として各種仕様の配線板に流用するには等価熱伝導率として求めた方が都合がよい。また、後述の B^2it^{TM} パンプ自体の熱伝導率を算出する上でも有効で

図6. 測定結果

ある。そこで、表1に示す配線板厚などを考慮して、測定した熱抵抗値から各サンプルの厚み方向の等価熱伝導率(κ_{eq})を求めた。

$$\kappa_{eq} = t / (A_{spi} \cdot R_{spi}) \quad (5)$$

ここで、 t はサンプル厚、 A_{spi} はサンプルの表面積である。

各種バンプピッチの異なるサンプルの等価熱伝導率の結果を図6に示す。この中で、バンプのないサンプルの熱伝導率は 0.32W/mK であった。これは、通常配線板の積層硬化時における熱伝導率(0.35W/mK ; カタログ値)とほぼ同じ値である。バンプがないサンプルに対しては、バンプピッチとしては無限大と位置づけられるが、図6では便宜上、バンプピッチがゼロの場所に図示した。

図6から、バンプピッチが小さくなるに従って等価熱伝導率は大きくなり、 B^2it^{TM} パンプはサーマルビアとしての効果が期待できることがよくわかる。また、バンプピッチが 1.2mm ピッチ付近で等価熱伝導率が急激に増大することもわかった。今回は、配線板として通常使用する隣接バンプピッチまでとした。これはバンプサイズ $300\mu\text{m}\phi$ 、ランド径 $650\mu\text{m}\phi$ 、ランド間スペース $150\mu\text{m}$ を想定している。しかし、サーマルビアとしては1つの電位に対して複数個を配置できるので、バンプピッチは $650\mu\text{m}$ ピッチまで小さくすることができる(バンプサイズ $300\mu\text{m}\phi$ の場合)。これによって、さらに等価熱伝導率を大きくすることができると思われる。

図6から、バンプピッチが小さくなるにつれて測定したサンプル間のばらつきが大きくなっていることがわかる。バンプピッチが小さくなると等価熱伝導率が大きくなり、サンプルの表裏面の温度差(実際の測定では、図4における#3と#4の測定温度差)が小さくなる。このことから、バンプピッチが小さくなるほど、温度の測定誤差が等価熱伝導率のばらつきに大きく現れたと考えられる。

5. 考察

今回のサンプルの放熱経路の領域内には、プリプレグと層間接続バンプが存在する。前述のように、特に接続バンプの熱伝導率が不明であるので、上記の測定結果をもとにその値を推定した。方法としては以下に記載するように、

熱抵抗測定状態をモデル化し、接続パンプの熱伝導率を変化させた場合のサンプルの等価熱伝導率をシミュレーションした。

5.1 サーマルビア構造のモデル化

モデル化した構造図を図7に示す。サンプルの接続パンプは、等ピッチ配置であるので、各接続パンプあたりの領域における構造をモデル化すれば、等価的に熱伝導率が求められる。加えて、接続パンプを中心としてそれを1/4にした領域を解析すれば、前記同様に等価的に解析が可能となる。図7の右上にこの解析領域を示した。またパンプは、ほぼ円錐形の銀ペーストが押しつぶされて成形されているので、直径が配線板の厚み方向の場所により異なる。しかし、解析を容易にするためにパンプの層間接続長さ中心点での値をもとにして、直径300 μ mの円柱と仮定した。さらに、この円柱と断面積が等価な角柱として接続パンプをモデル化することによって解析を簡略化した。

銅柱は実際には30mm以上あるが、パンプの配置ピッチと比較して十分大きな値であることと解析の容易さを考慮して、シミュレーションでは3mmに設定した。また、熱伝導グリースの厚みは、測定した平均値を基にして20 μ mに設定した。図7の上部は水冷部につながる銅柱で一定温度とし、下部に熱源を配置してある。

一方、プリプレグは繊維を含むため、繊維の方向に沿う方向の熱伝導率が高くなる。しかし、今回のモデルでは熱伝導率の等方性を仮定して、厚み方向の熱伝導率を優先した。また測定サンプルの他に、熱伝導率が非常に高く、薄い材料を配置した場合(アルミ箔)のシミュレーションも行

図7. 測定状態構造のモデル化

い、その結果を差し引いてサンプルの厚み方向の熱抵抗値を求めた。これにより、銅柱および熱伝導グリースの熱抵抗値を差し引くことができる。以上によって求められたサンプルの熱伝導率は、配線板の1層分を均質な材料とみなしたときの等価熱伝導率 κ_{eq} に相当する。

シミュレーション結果を図8に示す。実線はパンプの熱伝導率 κ_{via} を変化させた時のサンプルの等価熱伝導率 κ_{eq} の計算値、◆印は今回の測定値である。この図8から、最も測定値に近いパンプの熱伝導率は約10W/mKであることがわかった。

ここで得られたパンプの熱伝導率は、印刷(あるいは塗布)・硬化という通常の使用状態での銀ペーストの熱伝導率(2~3 W/mK)に比較して非常に大きな値であった。これは、パンプ接続を得るための積層・プレスによってパンプが圧縮され、銀粒子密度が増加したものと推測される。

5.2 サーマルビアとしての検討

ここで、パンプの熱伝導率を10W/mKとしたときの配線板1層あたりの等価熱伝導率 κ_{eq} と、配線板1cm²あたり1層分の厚さ方向の熱抵抗 r を計算すると表2のようになる。

表2の結果から、パンプがない場合のときに比べてパンプが0.8mmピッチで配置されている場合には、熱抵抗が約1/4になり、サーマルビアとしての効果があることがわかった。等価熱伝導率としてはセラミック基板などと比べて小さいが、プリント配線板としては大きいものと考えられる。さらに多層化した場合には、内層導体やガラスクロスなどによって配線板の平面方向の熱伝導が加わることも期待できるため、今後の高速化したベアチップ実装などにも

図8. 測定値とシミュレーション結果との比較

表2. パンプ熱伝導率が10W/mK時の等価熱伝導率と熱抵抗値 ($\kappa_{via}=10\text{W/mK}$)

パンプピッチ [mm]	等価熱伝導率 κ_{eq} [W/mK]	配線板 1cm ² あたりの熱抵抗 R_s [cm ² K/W]
パンプ無	0.32	3.8
2.5	0.41	3.0
1.6	0.55	2.3
1.1	0.83	1.6
0.8	1.31	1.0

対応できると考えられる。

一方、通常のプリント配線板ではスルーホールをサーマルビアとして用いることもある。このサーマルビアの熱伝導体となる材料構造(銅導体)を今回のB²itTM配線板(銀ペーストバンプ)と単純に比較すると、同じ配線板厚(熱伝導経路長が同じ)とした場合にB²itTMバンプの方が導体断面積が約3.3倍大きい。これはB²itTM配線板のビア内部が導電ペーストで満たされているためである。ところが、通常の配線板のスルーホール構成材料が、今回評価したB²itTMバンプ材料の約40倍の熱伝導率をもつ銅であるため、相対的にスルーホールの方が等価熱伝導率が大きいと考えられる。しかし、今回使用したバンプサイズは微細化することも可能なため、サーマルビアとしての領域を増加させられる。これにより等価熱伝導率値を大きくすることができ、銅スルーホール配線板並とはいわないまでも、配線板からの熱放散に対しては十分な効果が期待できる。

6. むすび

新規開発した新層間接続法によるB²itTM配線板の熱伝導特性として、サーマルビアの効果を評価した。バンプ密度が高くなるに従って、配線板の熱伝導率は大きくなることがわかった。またバンプがない場合に比べて、バンプ径が300 μ mのときでは熱抵抗が約1/4に低減した。さらなるバンプサイズの微細化により、見かけ上のバンプ密度が上昇することができ、さらに熱抵抗を低減することも可能となる。今後、接続バンプの微細化についての評価を行う予定である。以上の結果から、B²itTM配線板における層間接続バンプは、隣接層間の電氣的接続を達成するばかりでなく、サーマルビアとしての機能をもたせられることがわかつ

た。

また今回、接続バンプの熱伝導率を変化させ、サンプルの等価熱伝導率変化をシミュレーションした。その結果、接続バンプの熱伝導率が約10W/mKのときに測定値と一致することがわかった。この接続バンプの熱伝導率は、銀ペースト硬化物としては非常に大きい。これは、B²itTM配線板における製造プロセス上の積層・プレスによってバンプが圧縮され、バンプ中の銀粒子密度が上昇したものと推測できる。この接続バンプの熱伝導率がわかったことにより、今後の多層化などの各種配線板に対してのシミュレーション評価ができるようになった。このことは、事前に評価結果を予測できるため、今後の設計に対して非常に有益なデータとなる。

(1997.8.24-受理 1997.10.24-再受理)

文 献

- 1) 榎本 克, 他: “無電解めっきを用いたビルドアップ多層印刷配線板”, サークットテクノロジー, Vol.5, No.2, pp.90-93 (1990)
- 2) 塚田 裕: “ビルドアップ法プリント配線板”, サークットテクノロジー, Vol.9, No.5, pp.364-368 (1994)
- 3) 西浦慎一, 他: “プリント配線板のレーザ加工”, サークットテクノロジー, Vol.5, No.2, pp.82-89 (1990)
- 4) 福富直樹, 他: “転写法配線板”, サークットテクノロジー, Vol.9, No.5, pp.369-375 (1994)
- 5) 大平 洋, 他: “新製法(B²it)によるプリント配線板の提案”, 第9回路実装学術講演大会論文集, pp.55-56 (1995)
- 6) 大平 洋, 他: “新層間接続法による高密度プリント配線板の開発”, 回路実装学会誌, Vol.11, No.2, pp.106-112 (1996)