導電接着材による端子接続の高周波導通特性の実験的検証

大塚 寛治*, 渡辺 伊津夫**, Richard H. ESTES***, 和田 稔***

Experimental Verification of High Frequency Conduction Characteristics of Terminal Connections by Conductive Adhesive Materials

Kanji OTSUKA*, Itsuo WATANABE**, Richard H. ESTES*** and Minoru WADA***

*明星大学情報学部電子情報学科（〒198 東京都青梅市長瀬2-590）

**日立化成工業株式会社筑波開発研究所（〒300-42 茨城県つくば市和台48）

***エポキシ・テクノロジー社（アメリカ・マサチューセッツ州）

*Dept. of Electronics and Computer Science, College of Informatics, Meisei University (2-590 Nagabuchi, Ome-shi, Tokyo 198)

**Tsukuba Research Laboratory, Hitachi Chemical Co., Ltd. (48 Wadai, Tsukuba-shi, Ibaraki 300-42)

***Epoxy Technology Inc. (14 Fortune Drive, Billerica, MA. 01821-3672 USA)

Abstract

When film or paste of an organic adhesive material, in which metallic balls or flakes of approximately $5\mu\text{m}$ in diameter have been dispersed, is used as an electrical connection material, the electrical junction is considered to be free from causing environmental pollution and capable of finer-pitch connection than the conventionally-used solder-joint electrical connections, and thus has attracted attention. In the past, dc resistance has been well verified, and its problem is thought to have been solved. However, in spite of the fact that it is the junction where high frequency pulse signals flow in real applications, its high frequency characteristics have not been verified. The purpose of this study is to make actual measurement of the transmission characteristics of high frequency pulses through this junction and verify the practicability of the connection method. Applied pulse was of 2ns rise and fall time. When the peak voltage of the pulses was going down, the interconnection would be unstable in sometime, where points were measured. From this measurement data, it was found that conductive paste would show high-frequency transmission characteristics (over 100MHz) that are trouble-free with respect to the connection mesh like network having distances of $50\mu\text{m}$ or so. The reason for the stability despite the large number of contacts chained together can be deduced from the action of mechanical compressive force due to the resin filling, which resulted in the stable existence of each contact as a metallic (ohmic) contact.

Key Words: Anisotropic Conductive Film, Isotropic Conductive Paste, Electrical Contact by Organic Conductive Adhesives, High Frequency Characteristics on Contacts

1. はじめに

約 $5\mu\text{m}$ 直径の金属ボールまたはフレークを有機接着剤に分散させたフィルムまたはペーストを電氣的接続材として使用したとき、その電気接続点は、従来一般に用いられていたはんだによる電気接続点より、無公害で微細ピッチ接続が可能であるとして、注目されている。徐々に実用化された例が発表されているが、信頼度上の不安を完全に払拭されないままであり、今一つ普及の速度が遅いのが現状である。

従来、直流抵抗がよく確認されていて、その問題はほぼクリアされていると思われる^{1)~3)}。しかし、実用レベルでは高周波パルス信号の流れる接点であるにも関わらず、その高周波特性が確認されていない。これが普及に対する一つの大きな不安となっている。本研究ではこの接点

に対する高周波パルスの伝送特性を実測し、この接続方法の実用性を検証することにある。

本研究の一部の概要はすでに報告されているが^{4), 5)}、複数の材料と構造で確認する必要があり、それを追加して、ここではそのまとめを述べる。

図1に実験に供した2つの接続構造を示す。この構造はいずれもチップをダイレクトにプリント配線板に接続するフリップチップ構造である。その接続材料がそれぞれ異なり、その1つは異方性導電フィルムを使用した。フィルム内の分散金属ボールはニッケルボールと金めっきプラスチックボールを使用した。いずれも平均径が $5\mu\text{m}$ である。もう1つは等方性導電ペーストを使用した。この内容は銀フレーク分散のエポキシ樹脂である。

実験サンプル（以下テストクーポンと呼ぶ）は、図1のように、プリント配線板の配線の先端にそれぞれのチ

図1. 導電接着材によるフリップチップ接着構造

チップ電極を導電性接続材で接続している。このテストクーポンのチップ側に設けられた隣接の2つの電極を短絡し、コの字型の回路を作り、高周波パルス印加して、その伝送特性をみたものである。印加電圧をどんどん下げていくと接続部のオーミックコンタクト状態が不完全であれば、電圧印加時間より電流が遅延する現象、すなわち、フリッティング現象 (fritting phenomena⁶⁾またはre-ignition phenomena⁷⁾と呼ばれ、コネクタ分野では一般的に理解されている現象) が起こる。金属接触点の薄い絶縁層や不純物層が存在すると、通電するためには、これを電界で破壊しなければならず、破壊電圧に達するまで電流が流れない現象である。これで電磁エネルギーが乱れるため、電圧波形も変形する。電圧により絶縁破壊されたところはその通電中は変化がないが、通電をやめると、接触点金属が近づいたわけではないため、往々にして、次の通電時は別の接触点で同じ現象が起こる。このフリッティング現象の有無を高周波で調べることが本研究の目的である。

今回の実験方法はパルスのオン・オフの繰り返しによる接点の安定性を直接的にみるものである。今まで行われていた一定電圧印加によるネットワークアナライザの伝送損失測定 (Sパラメータ法)⁸⁾ではみられない現象、すなわち、オーミックコンタクトの繰り返しパルスの安定性をみるものである。これは過去行われておらず、本研究が最初の試みと考えられる。非常に単純な実験であるが、新しい知見が得られる可能性がある。

2. 実験方法

図2に本実験の測定状態を示す。(a)はテストクーポンの断面状態とそのプローブ位置を示す。信号源供給点の内側を測定のプロープ点とした。図2(b)は(a)の上面図である。チップ内は隣接電極間に短絡配線が施され、プリ

図2. 測定構造を説明する図

ント配線板の往路復路に接続されている。したがって、測定回路には、2つの導電接着材の接続点が含まれることになる。プローブ点には1MΩのインピーダンスを持つプローブチップを直接あて、寄生インダクタンスの影響をできるだけ、小さくする配慮をした。

なお、等方性導電ペーストのクーポンはその構造から、信号源供給点の直内を測定のプロープ点とした。チップの短絡配線点からプローブ点までの距離は、異方性導電フィルムクーポン群が10.7mm、等方性導電ペーストクーポンが6.3mmである。

図2(c)にその等価回路を示す。チップ側のパッドピッチ (約150μm) からプローブ点 (約0.5mmピッチ) にゆるやかに広がったファンアウト構造のため、ライン幅/スペース幅比率の変化が少ない。これは伝送線路としての特性インピーダンスの変化が少ないことになるため、このループ回路は高速伝送が可能な構造となっている。伝送線路としてみたとき、チップ側が短絡終端となっているため、信号は反射係数-1の全反射をする。送端の抵抗を線路の特性インピーダンスに近づけ、その反射エネルギーを吸収する必要がある。そこで、線路の特性インピーダンスを150Ωと想定して (これが主題でないため、測定を省略した)、送端抵抗も150Ωを挿入した。チップの配線がオープンになっている回路の測定例を図3上に示す。きれいな測定波形が得られているため、反射波は挿入抵抗で吸収されていると判断できる。

2ns立ち上がり、立ち下がり、200~250nsの保持時間の電圧方形波を高周波パルスとして印加した。立ち上がり、立ち下がりのレートから80~160MHzの周波数をシミュレーションしたことになる。この方形波の電圧をどんどん下げていったとき、接続部の金属接触部が不安定であると、伝送波形にノイズがのるはずである。パルスオ

チップ配線オープンなどの典型的波形

150MHzが想定できる立ち上がり時間

立ち上がり、立ち下がり時間一定

図3. 立ち上がり時間を一定とする印加パルスプロファイル

ン・オフの回数は5分間で $1.2 \times 10^9 \sim 3 \times 10^9$ 回であり、短時間に膨大な回数のスイッチング安定性の確認が可能である。電圧が低い状態で、オン・オフを繰り返すとき、金属接点が不安定であれば、当然、短絡端の抵抗値が変化するため、波形変形が認められるはずである。なお、ここでは1つの実験の観測時間を5分と定めて行った。

オシロスコープはワントタイムノイズを捕捉できるように、1GSa/sの観測レートを持つHewlett Packard社製54512B(300MHz)を使用した。また、信号波形を安定にすること、電圧を変えても図3下のように立ち上がり時間を一定に保てるようプログラムパルスジェネレータ；同社製8161Aを使用した。

導電性接着材の接触する電極の表面仕上げは、両者共に金仕上げである。異方性導電フィルムクーポンは上下電極共にバンプ状になっていて、この間に約 $3 \mu\text{m}$ (Ni)、約 $5 \mu\text{m}$ (Auめっき)の金属ボールが数十個のオーダで、平面的に一層に散らばって電極間に挟み込まれている。等方性導電ペーストは、平滑上部と下部電極間に $50 \mu\text{m}$ の厚みのバンプ状となって接続されている。

異方性導電フィルムの材料構成はエポキシ系樹脂をベースにしたもので、ニッケル金属粒子を分散したもの、プラスチックボールに金めっきを施したものの2種類を用いた。等方性導電ペーストの材料構成は、エポキシ樹脂を用い、フレーク状の銀を分散したものである。これを接続して硬化させ、その後、エポキシ系アンダーフィルム材をすき間に充てんする。

両材料系ともにすき間に充てんされている樹脂の硬化収縮で、常時、接続端に圧縮応力がかかっている、接触金属部の力学的安定が図られている。

3. 実験結果と考察

3.1 異方性導電接着フィルムを使用したクーポンについて

ニッケルボールを使用した異方性導電フィルムのクーポンの測定結果を、図4にまとめた。印加電圧の立ち上がり時間は測定系の寄生素子の影響で4 nsになっているが、概略良好な方形波が得られている。測定端の電圧変化は、パルス変化したところで大きなオーバーシュートをしている。これは短絡端の電流全反射によるスパイクであり、回路中の寄生インダクタンス、キャパシタンスによる共振現象である。安定したところは回路のわずかな直流抵抗成分による微小電圧変化を示している。

各電圧の測定波形は、印加電圧が0.725Vまでは正常な伝送特性を示すが、72.5mVで、図4(d)のように、48mVのノイズが時々発生することが判明した。これはニッケルボールの表面酸化物層の影響で、フリッピング電圧効果を示した結果と考えられる。

図5にフリッピング現象で起こる電圧電流変化のモデルを示す。金属接触部に介在する絶縁物や半導体の破壊電圧に応じて、電流の立ち上がりは遅延するが、耐圧の大きな絶縁層の破壊、すなわち電流遅延が大きいほど、電流の立ち上がり (di/dt) は急峻である。その結果、回路内の寄生インダクタンスLで大きなノイズ電圧 $v_n = L(di/dt)$ が発生する。この電圧が寄生キャパシタンスCとLの影響で共振を起こす (共振周波数 $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$)。この現象により、図4(d)のような共振ノイズとなったものと思われる。

フリッピング現象であると確認するにはこのデータ

図4. ニッケル粒子の異方性導電フィルムクーポンの測定電圧プロファイル

(a) フリッティング現象を説明する電流・電圧プロファイル

(b) フリッティング現象の起こる条件

(c) フリッティング現象の起こらない条件

図5. フリッティング現象を説明するモデル図

図6. Niボール入り等方導電接着フィルムクーポンのフリッティング現象を確認するデータ

だけでは不足であると思われるため、ニッケルボールのクーポンについて徐々に電圧を上昇させたときのプローブ点の電圧を見た。これを図6に示す。入力電圧波形(a)でわかるように、800 μ sで110mVまで直線的に上昇する波形を5msで繰り返すものである。1クーポンの測定箇所は64個あるが、ほとんどの測定点は図6(b) (オフセットを多少下げて、0レベルが重ならないようにした) のように短絡現象を示す (正常な接続状態を示す) 波形が測定点で得られた。チップのコーナの測定点で、波形(c)のように多少抵抗を示す箇所を発見し、この観測を30分間続けた。30秒に1回ぐらいの割合で、波形(d) (これが最大で、大部分は(c)と(d)の間) が現れた。これが図5のモデルを表す現象、すなわち、ある電圧上昇まで電流の流れない領域を示すものと思われる。いくつかの例の記録を行ったが、電圧の急激な降下を示さず、図5(a)のdi/dtの急峻なところを立証できなかった。しかし、ある電圧に達するまで導通がとれないというフリッティング電圧の直接観測ができ、高周波測定での電流遅延によるオーバーシュート/アンダーシュートの可能性があると考えられる。

また、この測定波形は全般にノイズが大きく、ニッケル金属接続点が不安定であることを示すと思われる。ニッケル表面は一般に酸化膜で覆われていることから、この酸化膜の影響がでたものと思われる。すなわち電流パスは一番耐圧の小さなところを選んでいるため、通常は多少のノイズ増大程度で収まっているが、ときどき耐圧の大きな酸化膜の部分を選ぶことから、このノイズが観測されることになる。雷がかならずしも最も抵抗の少ないところに落ちない現象と類似されるものである。数分に1回程度の頻度で現れる。

これより1桁高い電圧0.725Vでは、この現象が観測できない。この観測系で検出できないということは、現実には問題がないということである。それはノイズレベルにも現れていて、72.5mV印加のものより絶対値で小さくなっ

表1. ニッケルボール異方性導電接着接続点の高周波測定結果のまとめ

実験番号	入力パルス電圧 (V)	プローブ点測定電圧 (mV)	測定から導出した抵抗値 (Ω)	オーバーシュート・アンダーシュートノイズ	フリットティングノイズレベル (mV)
(a)	4	12.5	0.47	変化直後大	微小
(b)	1.5	6	0.60	小	微小
(c)	0.725	2.5	0.51	小	微小
(d)	0.0725	微小	…(294)	全面で大	48 (p-to-p)

図7. 金導電性被膜プラスチックボールの異方性導電フィルムクーポンの測定電圧プロフィール

ている。したがって、3.3V電源電圧が一般的なCMOS回路ではまったく問題がないと思われる。

ここで図4のデータをまとめると表1のようになる。測定電圧差から回路全体の直流抵抗を計算すると約0.5 Ω となる。直流での接続点あたりの抵抗は数ミリ Ω と測定されている⁹⁾ため、その差は配線の抵抗であろうと推定される。なお72.5mV印加の平均ノイズレベルを抵抗による誘起電圧であると予測すると、表1のカッコで示した抵抗となる。

一方、金めっきプラスチックボールでは、すべてが金-金接続のため、酸化膜は界面になく、図7に示したように、72.5mVでもこの現象は発生しなかったばかりでなく平均ノイズも小さなレベルで、安定な接続点であることがわかった(図5(c))。この結果と対応して、表面酸化層の影響を傍証できた。繰り返すが、現状の回路の平均的電圧は3.3Vであるため、ここで供した異方性導電接着材はいずれも問題なく高周波装置に適用できることが判明した。

3.2 等方性導電ペーストを使用したクーポンについて

等方性導電ペーストのクーポンは接続系は金-銀-銀-金系であり、これも上記金系と同様ほとんど酸化物が介在しない。しかし銀フレークが網目状に50 μm の厚みにわたって接触する多くの接点系であるため、違った影響を示す可能性がある。ここでは、異方性導電フィルムクーポンの測定波形の安定化が約50nsと速かったため、パルス保持時間を250nsから100nsに速めて同様な測定をした。5分間のオン・オフ観測では異方性導電フィルムクーポンの2.5倍の安定性をみたことになる。これを図8に示す。

異方性導電フィルムクーポンとほとんど同様な変化を

示していて、電圧を変えても、ニッケル接点のような不安定ノイズがでないことが判明した。測定点のスパイクは異方性のそれとほぼ同じである。ループ回路の伝送距離はこのクーポンの方が短く、寄生インダクタンスとキャパシタンスが小さいように思われるが、配線が細く互いにやや離れているため、ループ回路の往路と復路のカップリングがやや弱い。このため寄生素子群がやや高くなり、実効的に異方性導電クーポンのそれと同じになって、同じ程度のスパイク強度となったものと思われる。これをまとめると表2のようになる。7V印加で36mVの変化が現れたため、回路の直流抵抗は0.81 Ω となる。マルチメータで測定しても0.8 Ω であったため、ほぼ正しい値を示している。より低い電圧のときのデータから抵抗を算出すると、やや高い傾向となっているが、電圧の誤差が大きくなっているため、これらの抵抗の誤差も大きい。抵抗が異方性のそれより高い理由は、前述のように、配線の幅が細く、それが効いていると思われた。

この測定データから、等方性導電ペーストは50 μm 程度の距離をもつ接続網に対して、なんら問題のない高周波伝送特性を示すことが判明した。接触点が多数連鎖しているにもかかわらず安定な理由は充てん樹脂による力学的圧縮力が働いていて、それぞれの接触点が金属接続(オーミックコンタクト)として安定に存在するからと推測できる。

4. 結 言

導電性樹脂接続材料を使用したフリップチップ型接続端子の高速パルススイッチングの安定性を、実験的に観測した。そのデータから；

(1) ニッケル粒子を接点とする導電性接続材(ニッケ

図8. 等方性導電ペースト（銀ペースト）テストクーポンの測定電圧プロフィール

表2. 等方性導電ペースト仕様クーポンの測定電圧のまとめ

クーポン番号	印加電圧	測定電圧	計算抵抗	出力波形のノイズ
単位	V	mV	Ω	
(a)	7	36	0.81	初期スパイク大、安定波形はノイズ小さい
(b)	4.5	27.3	0.91	
(c)	3	15.6	0.79	
(d)	1.75	8.36	0.72	
(e)	0.75	3.64	0.73	
(f)	0.4	2.30	0.89	
(g)	0.22	1.82	1.25	ノイズが小さく安定
(h)	0.15	1.27	1.28	
(i)	0.1	0.91	1.38	
(j)	0.075	—	—	

ルー金系)は、非常に低い電圧(0.07V程度)でニッケルの表面酸化が原因と思われるフリッティング現象が観察され、印加電圧に近いノイズが観測された。

(2) 金—金接続系、金—銀連鎖型接続系ではニッケル接続系のようなフリッティング現象は観測されず安定な高周波特性を得た。

(3) ニッケル系でも0.7Vより上の電圧印加ではフリッティング現象を示さず、3.3V系電子回路ではなんら問題のな

いことが確かめられた。

これらの事実は、はんだ接続代替技術の普及を加速する実験事実として、世の中に貢献するものと思われる。

導電接着剤は、直流抵抗をパラメータとして環境安定性(信頼性)がすでに確かめられている^{1)~3)}。ほとんど問題のないデータが多く発表されているが、多少でも抵抗値が増大方向に劣化しているデータが多い。高周波特性では、この問題がより顕著に現れ、フリッティング電圧

の増大方向となるかも知れない。残された課題である。

なお、こんぺい糖のような形をしたニッケル粒子を異方性導電フィルムに混入した製品⁹⁾、同じく異方性導電ペースト材¹⁰⁾が発表され、その直流の信頼度データはニッケルボールより安定な状態を表している。こんぺい糖の突起が金の電極に食い込み、酸化膜が破れ、安定な金属接続を保っている可能性がある。これら材料は本研究のようにフリッティング現象を示さない可能性がある。この測定も今後の課題としたい。

さらに電極表面が貴金属でないか、導電接着剤の金属がはんだなどの材料のときは直流の信頼度データもよくないことが発表されている¹¹⁾。フリッティング電圧が実用電圧と等価になったためではないかと想像する。もしこれを実用化するためには、金属の塑性変形を起こさせ、酸化膜を破るプロセスが必要な気がする。この分野ではコネクタやソケットの考え方が手本となると思われる。

5. その他

テストクーポンの構造やプロセスに関してはノウハウの関係で記述を避けた。これら仕様に関する問い合わせは直接クーポン提供者に連絡いただきたい。下記に連絡先を示す。

- ・日立化成工業(株)筑波開発研究所、渡辺伊津夫氏
(〒300-42, つくば市和台48) Fax. 0298-64-4008
- ・EpoTech. 和田 稔氏 (14 Fortune Drive, Billerica, MA
01821-3672 USA) Fax. (508) 633-9782
(1997.6.2-受理 1997.10.23-再受理)

文 献

- 1) I. Watanabe, et al.: "Flip-Chip Interconnection to Various Substrates Using Anisotropic Conductive Adhesive Film", Journal of Electronics Manufacturing, Vol.5, No.4, pp.273-276, (1995)
- 2) K. Kusagaya, H. Kira, K. Tsunoi: "Flip Chip Mounting Using Stud Bumps and Adhesives for Encapsulation", Proceedings of International Conference on Multichip Modules, pp.587-595, (1993)
- 3) B. Viertl, B. Rosner: "Flip Chip with Polymer Bumps on Various Substrates", Proceedings of First International Conference on Adhesives in Electronics, Berlin, (1994)
- 4) K. Otsuka, I. Watanabe, K. Takemura: "High Frequency Characterization of Conductive Adhesive and Its Interconnection Technology", Proceedings of Adhesive in Electronics '96, pp.114-125, 1996.6
- 5) K. Otsuka, I. Watanabe, K. Takemura: "High Frequency Characterization of Conductive Adhesive", Extended Abstract of Third VLSI Packaging Workshop of Japan, pp.87-91, 1996.12
- 6) Gizella Kovacs: "Failure Analysis of Contaminated Gold-Plated Connector Contacts from Operating Communication Equipment", IEEE Trans. CHMT, Vol.5, No.1, pp.95-101, (1982)
- 7) Manfred Lindmayer, Ernst-Dieter Wilkening, "The Influence of Circuit Parameters and Contact Materials on the Re-ignition of High Frequency Vacuum Arcs", IEEE Trans. CHMT, Vol.13, No.1, pp.69-73, (1990)
- 8) C. E. Abernethy, A. C. Cangellaris, J. L. Prince: "A Novel Method of Measuring Microelectronic Interconnect Transmission Line Parameters and Discontinuity Equivalent Electrical Parameters Using Multiple Reflections", Proceedings of 45th ECTC, pp.329-342, (1995)
- 9) 太田共久: "異方導電フィルム", プリント回路学会, 先進実装研究部会報告, 接続の低温化とソルダレスボンディング, pp.59-62, (1993.7)
- 10) T. Komukai, M. Miyazaki, Y. Samejima: "An Approach to the Anisotropic Conductive Adhesives for Micro-Interconnection Technology", Proceedings of Surface Mount International, pp.402-407, (1996.12)
- 11) M. Zwolinski, et al.: "Electrically Conductive Adhesives for Surface Mount Solder Replacement", ibid, pp.391-401, (1996.12)