

レーザー援用微粒子ジェット法により樹脂基板に

導線を平坦に埋込する技術の開発

仙台高等専門学校名取キャンパス 総合科学系理数科

教授 鈴木 勝彦

(平成 25 年度一般研究開発助成 AF-2013204)

キーワード：レーザー、微粒子、平坦溝

1. 研究目的と背景

従来よりプリント基板の材料は、ジュール熱対策などから熱硬化性樹脂基板が使用されている。しかし、加熱すると硬化するためリサイクルが困難なことから、最近では、リサイクルが可能な熱可塑性樹脂を基板材料に使用する例が急速に増えてきている。

この熱可塑性樹脂材料のリサイクル性を活かす技術として、(株)デンソーでは PALAP という技術¹⁾を開発している。配線は、従来通り基板上にメッキした銅膜に、レジストを塗布後エッチングして形成する。その後、受動素子として既製品のチップ抵抗、チップ積層キャパシタ等と、能動素子においても既製品の IC、LSI を使用して、導電ペーストの充填工程を経て、複数基板を加熱・圧縮して多層基板にする技術であり、基板のコンパクト化に成功している。この工法では加熱・圧縮工程があり、耐熱・応力ひずみの対策が必要とされる。また、受動素子において既製品を使用するので大量生産に適しているが、特注品などの少量多品種基板への対応には不向きな技術である。また、規定値の素子しか使用しないので、規定値以外の素子を使用する場合には、使用素子数が増加させる必要がある。

一方、最近インクジェット法により、配線や素子を形成する技術の開発が盛んに行われている。有機溶剤に金属ナノ微粒子を混合させたインクを使用するので配線は形成後、熱処理が必要とされる。そこで、配線時に有機溶剤を除去して成膜するレーザー援用インクジェット法²⁾が、最近産総研で研究開発されている。配線材料として、銀ナノ粒子をインクに混入させて使用し、単位長さの抵抗値が、60 Ω/cm の良質の配線形成に成功している。この方法は、

PALAP 技術の弱点である少量多品種対応に適した優れた技術であり、形成後の加熱・圧縮形成過程もない。しかし、インクの飛散防止からジェット流速が限られるため、基板への埋め込形成は不向きであり、この場合も基板表面に凸状に形成する方式で、多層化すると基板厚さ以上となる。

そこで、配線、素子を基板の表裏に埋込形成し、少量多品種にも対応可能で応力ひずみを与えず、配線・素子を基板に埋込形成する技術として、PJD 法³⁾を応用したレーザー援用微粒子ジェット法^{4,5,6,7)}の開発を進めている。本技術により、Cu 配線において 60 Ω/cm^2 より小さい値に形成可能なことが確認されている⁸⁾。また、混合微粒子の混合比を変化させることにより、指数関数的に抵抗値を変えて成膜できること（パーコレーション現象）も、確認している⁵⁾。更に、RC ローパスフィルター回路、増幅回路も基板の表裏に形成し、理論値と同じ特性も得られている⁹⁾。

一方、主要素子の積層キャパシタは 6 層まで形成し、積層数とキャパシタとの比例関係が確かめられている⁶⁾が、形成した素子の断面が半円状になるため、積層数が増加すると比例関係が崩れる恐れがある。それを避けるためベースとなる矩形溝に電極導線膜を形成し、積層させる必要がある。

今回、高価なフェムト秒やピコ秒レーザーや方形ファイバーを使用しない安価な方法で、矩形溝形成技術・積層キャパシタを形成する技術の開発を行った。

2. 実験方法

2.1 積層キャパシタ形成方法

レーザーを用いて熱可塑性樹脂として環境にやさしい非

石油系のポリアセタール (POM) の基板に、積層キャパシタのための溝を形成した後に、積層キャパシタを埋込形成した。過去にレーザーの照射において、強度がガウス分布様の通常の照射方法と方形ファイバーを用いた照射方法は過去実施したが、今回は、高価なフェムト秒やピコ秒レーザーを用いだけでなく、敢えて高価な方形ファイバーも用いない通常のレーザーを使用する方法の開発を行った。

したがって、レーザーは CW 型のグリーンレーザー (波長: 532 nm) 最大 2 W のものを使用し、光ファイバーは今回、通常のガウス分布様射出のものを使用した。微粒子ジェットのための Ar ガス噴射圧力を 0.9 MPa にして成膜し、微粒子は、電極用に平均粒径 5 μm 、純度 99.7 %up のカーボン微粒子を使用し、誘電用には、平均粒径 1 μm 、純度 99 %up の BaTiO₃ の微粒子を使用した。また、溝形成時は、レーザーの出力は約 2 W で実施し、積層キャパシタ形成時の出力は、約 1.6 W に落として行った。

2.2 矩形溝形成方式

2つのタイプの矩形溝形成方式を試みた。1つ目は、図1に示す基板固定-レーザー・ノズル振動方式で、XY ステージに基板を固定しておき、CW 型レーザーの照射点と微粒子噴射点を一致させて、バイモルフ圧電素子で支点を中心に振り子のように振動させる方式で矩形溝形成を行った。

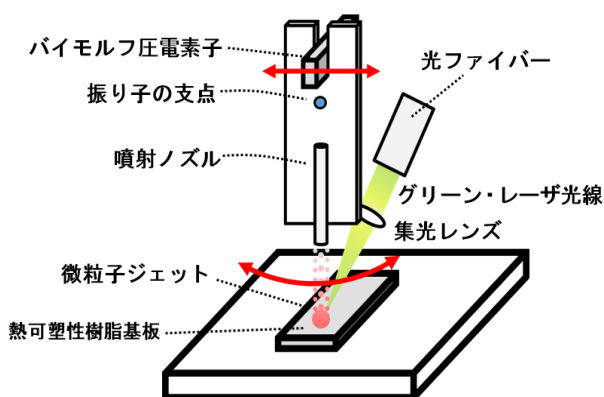


図1 基板固定-レーザー・ノズル振動方式

2つ目は図2に示すように、CW 型レーザーの照射点と微粒子噴射点を一致させた上で固定し、基板をバイモルフ圧電素子で素子1と素子2の励起電圧の位相を逆位相にする事により上下振動させるレーザー・ノズル固定-基板振動方式で矩形溝形成を試みた。

尚、両方式とも、Tectronix 社のデジタルオシロスコープで観察しながら、NF 回路ブロック製の ZWF194 の発振器と (株)エコー電子社の piezo 電源を用いて、バイモルフ圧電素子を励起して振動させた。

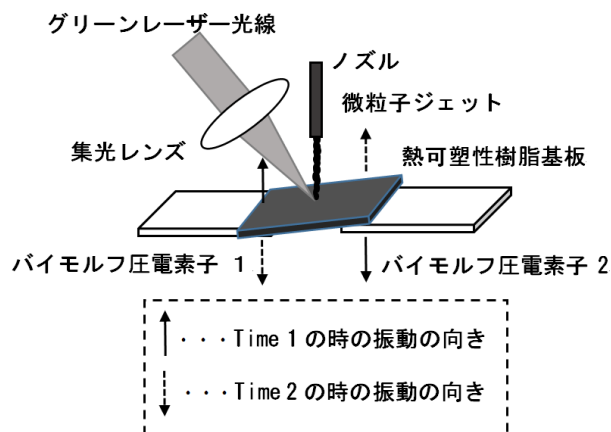


図2 レーザ・ノズル固定-基板振動方式

2.3 測定

試料の断面観察は、樹脂基板の端までレーザー援用微粒子ジェット法を適用させて観察し易くし、デジタルマイクロスコップ (Dio-Lite) で観察した。また、基板固定-レーザー・ノズル振動方式において、共振周波数で形成した溝は、レーザー顕微鏡 (オリンパス社製、OLS3100) により n 断面形状を計測した。さらに、形成した積層キャパシタの静電容量は、LCR メーター (NF 回路設計ブロック製の ZM-2371) を用いて、1 kHz の周波数で測定した。

3. 研究成果

3.1 基板固定-レーザー・ノズル振動方式

図1の示すように、樹脂基板を PC 制御する XY ステージに固定し、ジェット噴射するノズルと光ファイバーを一振動板に固定して一体化して、その振動板の上部を、発生力の大きい特長を活かしてバイモルフ圧電素子を、支点中心に振動させた。その際、微粒子噴射点とレーザー照射点を曲率半径の大きい円弧を描く形の運動になるように支点を上部に設け、近似的に左右運動させる方式で基板への矩形溝形成を試みた。バイモルフ圧電素子をシステムの最大ピークピーク励起電圧値の 100 V で振動させ、レーザー出力の 1 W 近傍で照射しながら形成された溝幅を計測したところ、図3の示すように、共振周波数が約 6.8 Hz となる

ことが分かった。この時の溝幅は、傾向の測定のため精度の低いデジタルマイクロスコープで観察・計測した。

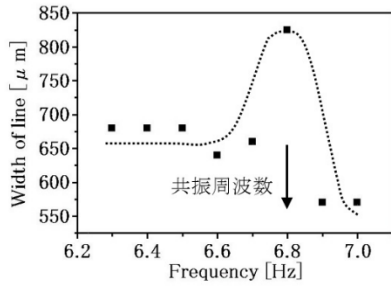


図3 溝幅の共振周波数依存性
(基板固定-レーザ・ノズル振動方式)

形成された溝の情報を詳しく調べるため、6.8 Hz でバイモルフ圧電素子振動させながら溝を形成した基板表面をレーザ顕微鏡で観測・計測した。その結果を図4に示す。

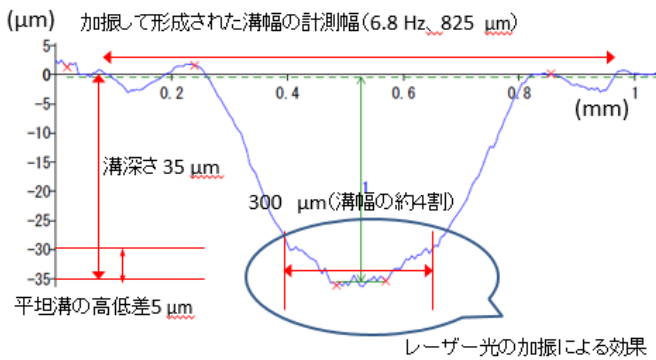


図4 レーザ加振・照射による溝形成結果

精度を落としてデジタルマイクロスコープで計測した結果は、溝形成時に生じた基板の盛り上がり部分も含めた幅とほぼ一致していることが図から分かる。溝底辺部分を見ると、約 300 μm の溝幅が形成されたにも関わらず、基板材料が熱可塑性樹脂のため、周辺の溶けた樹脂がその溝周辺になだれ込み、結果として、平坦部分は元の 1/3 程度の約 100 μm の幅に縮小されてしまったことが分かる。

また、矩形状態について、溝の傾斜を数値化すると、横約 240 μm に対して、縦約 35 μm となり、正接の値から計算すると傾斜角度は約 8.3° となり、矩形溝とは程遠い溝となっている。約 100 μm 幅に積層キャパシタを形成させることも可能ではあるが、形成された溝の 100/825 の割合しかキャパシタとして機能させられない。大きな溝を形成しても、積層キャパシタを埋込形成させる領域は限られることになり、占有面積の割には小さな容量のものしか形成

できなくなる。また、この方式では、バイモルフ圧電素子を大きな質量の振動板に設置させるので、共振周波数が大きくなってしまい、基板へのレーザの照射時間が小さくなるため、溝が深くできない。さらに、質量の大きな振動板に、硬くて脆いバイモルフ圧電素子を設置させるため、素子の設置が難しい。このように、この方式は多くの難点がある。

3.2 レーザ・ノズル固定-基板振動方式

基板固定-レーザ・ノズル振動方式では、上述のように難点が判明したので、今回の限られたシステム条件で、素子の破損が少なく設置しやすく、しかも、共振周波数を低くして溝を深く形成できれば矩形溝に近いものが形成できる方式を考えた。これは上述方式とは全く逆の、レーザ・ノズルを固定し、基板だけを振動させる方法である。図2から分かるように、質量はほぼ基板だけにする方式なので、共振周波数を小さくすることが可能で、バイモルフ圧電素子を破損させることを極力少なくして設置できる。

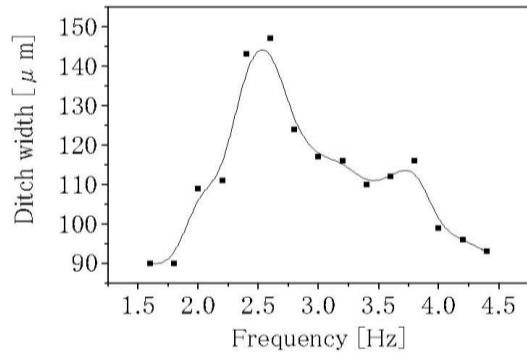


図5 溝幅の共振周波数依存性
(レーザ・ノズル固定-基板振動方式)

予測通り、図5に示すように共振周波数を約 2.6 Hz と低くすることができた。しかも、溝幅もレーザ加振の場合と比べて、約 2 倍近く制御できることが分かった。

前述の方式は、支点をなるべく高くして振れ幅を大きくするように増幅させる工夫をしたが、振動板をアルミ製にして軽くしたものの重かったため溝幅がそれほど大きくならなかったものと考えられる。振動板を軽い材料すると平坦溝もそれに応じて大きくでき、共振周波数も小さくできるかもしれない。しかし、やはりバイモルフ圧電素子の設置がしづらく、素子の破損し易さを考えると、レーザ・ノズル固定-基板振動方式の方が有利である。

過去、レーザ、ノズル、基板を固定し、基板のみ XY ステージを PC 制御させて積層キャパシタさせた場合の、積層数(4層)の静電容量(1 kHz)の結果は、決定係数 0.9890 であったが、方形光ファイバーを使用することにより、6層にまで再現性良くに形成可能で、決定係数が 0.9990 になる結果が得られている。参考のため、過去に形成した素子の断面結果を図7に示す。

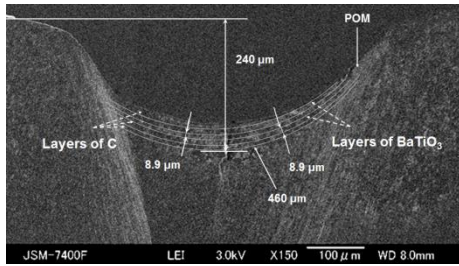


図6 方形ファイバーによる積層キャパシタ断面 (3層の断面 SEM 像) ⁶⁾

図6から分かるように、3層で既に円弧状態になっていることが分かる。6層まで決定係数の高い積層キャパシタが形成できるものの3層で既に円弧状態になっており、高層になるに従い、容量値の積層数との関係が比例関係からずれてきてしまうことは容易に予測できる。

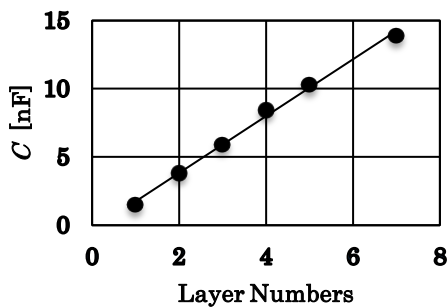


図7 静電容量の積層数変化 (レーザ・ノズル固定-基板振動方式形成)

一方、今回、レーザ・ノズル固定-基板振動方式で、7層まで積層キャパシタを形成したところ、決定係数が、0.9961 になることが分かった(図7)。方形ファイバーの結果と比べて決定係数は僅か 0.0029 の差で、大きな値の結果が得られた。これらの結果をまとめた値を表1に示す。表から分かるように、方形ファイバーの使用により、比例関係の良い積層キャパシタが形成できるので、基板の移動方向と積層キャパシタの形成方向を一致させるべく、方形

ファイバーの辺を一致させるため、基板を回転させる機構を付加させ、基板の回転に応じて、基板振動機構も回転可能にすれば、さらに高層の積層キャパシタ形成可能になる。

表1 試作した積層キャパシタの結果

配置・振動関係	決定係数	試作最大層数
方形ファイバー使用無し-ノズル・基板固定	0.9890	4
方形ファイバー使用-ノズル・基板固定	0.9990	6
レーザ・ノズル固定-基板振動	0.9961	7

共振周波数の 2.6 Hz で形成した溝の例を図8に示す。図5と比べて幅が小さいのは、周波数変化測定の時と比べて、基板移動時間を早めたためレーザ照射時間がわずかに少ないためである。

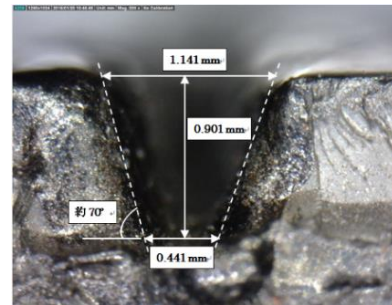


図8 デジタルマイクロスコープ断面写真 (レーザ・ノズル固定-基板振動方式)

レーザ・ノズル振動方式の場合は傾斜角が約 8.3° であった時と比べて、基板振動方式の場合は図8から分かるように、約 70° であり、かなり矩形溝に近い溝が形成されていることが分かる。

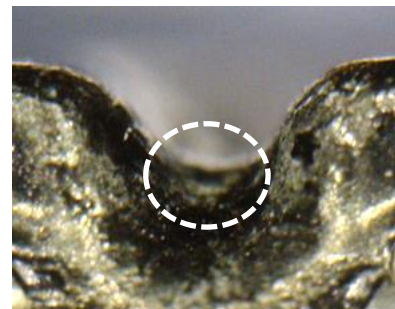


図9 4層の積層キャパシタの断面写真

図9に、形成された4層の積層キャパシタの断面写真を示す。写真からカーボン電極が矩形状に形成されているのが分かる。並列接続状に形成してあるので、5層の電極膜と4層のBaTiO₃膜の側面を観察していることになる。奥側に存在するので、実際の大きさより小さく観察されていることになる。

キャパシタの幅が小さく形成されているのは、矩形溝形成後、積層キャパシタの形成時は、基板を振動させないで形成したためである。断面の観察から積層キャパシタの形成できる矩形溝の平坦部分は、約溝幅の約1/4程度であり、基板固定方式の約1/8程度より基板振動方式の方が明らかに矩形溝形成に有利であると言える。

4. 結び

本研究において、POM基板にレーザを援用して微粒子をジェットして基板に矩形溝を形成する方法として、基板固定-レーザ・ノズル振動方式とレーザ・ノズル固定-基板振動方式を試みた。その結果を以下の3点にまとめることができる。

- 1) レーザ・ノズル固定-基板振動方式の方がより矩形に近い溝(傾斜角約70°)の形成が確認され、断面が矩形に近い導線形成の基礎技術を得ることができた。
- 2) 基板・レーザ、ノズルを固定し積層キャパシタを形成した場合と比べて、基板振動方式で形成した溝に、積層キャパシタ形成した方が、静電容量に対する積層数変化の比例関係(決定係数0.9961)が良く、高価な方形ファイバーを利用したとほぼ同等のものが得られた。
- 3) 共振周波数は小さい方が、より矩形に近い溝が形成できることが分かったが、今後、適切な

周波数を探索する必要がある。

謝辞

本研究の遂行にあたり、公益財団法人天田財団の一般研究開発助成を賜りましたことに対して、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) H. Kamiya, T. Miyake, H. Kobayashi and K. Kondo: Int. Symp. Electronics Materials and Packing (EMAP2005), p.183.
- 2) J. Akedo: Int. Conf. Electronics Packaging (ICEP2009).
- 3) N. Noji, M. S. S. Zahmaty, T. Shibuya, N. Yoshihara and T. Kuriyagawa: Proc. 3rd. Int. Conf. Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 2005, p.833.
- 4) K. Suzuki, M. Miura, A. Konno, K. Miura, T. Yuzawa, M. Watanabe and T. Kuriyagawa: Jpn. J. Appl. Phys. 49 (2010) 06GN09-1~4.
- 5) K. Suzuki, T. Saito, T. Sugai, S. Watanabe, S. Kameya, K. Miura and T. Kuriyagawa: Jpn. J. Appl. Phys. 50 (2011) 06GM12-1~5.
- 6) K. Suzuki, S. Kameya, T. Sugai, T. Ohuchi, K. Miura and T. Kuriyagawa: Jpn. J. Appl. Phys. 52 (2013) 06GL02_1~4.
- 7) 鈴木勝彦: プラスチックス 4月号、p.57~61.
- 8) Y. Kamei, K. Suzuki: private communication.
- 9) K. Suzuki, T. Takahashi, D. Katoh, R. Watanabe, K. Miura, T. Yuzawa, T. Kuriyagawa: 27th Int. Microprocesses and Nanotechnology Conf. 2014, 6P-7-97.