ハイピークパワーCO₂レーザーによる電子基板穴あけ加工

佐藤 行雄, 西前 順一, 岩田 明彦, 竹野 祥瑞*, 福島 司**, 金岡 優**

三菱電機(株) 先端技術総合研究所 (〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1)

*三菱電機(株) 生産技術センター (〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1)

**三菱電機(株) 名古屋製作所 (〒461-8670 愛知県名古屋市東区矢田南5-1-14)

Micro-Drilling of Advanced Electric Boards with a High-Peak Power CO₂ laser

Yukio SATO, Juniti NISHIMAE, Akihiko IWATA, Shouzui TAKENO,*

Tsukasa FUKUSHIMA,** and Masaru KANAOKA**

Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation

8-1-1 Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki, Hyogo 661-8661

*Manufacturing Engineering Center, Mitsubishi Electric Corporation

8-1-1 Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki, Hyogo 661-8661

**Nagoya Works, Mitsubishi Electric Corporation, 5-1-14 Yadamami, Higashi-ku, Nagoya, Aichi 461-8670

(Received September 6, 1999)

Micro-hole drilling of advanced printed boards with a CO₂ laser is revealed. The applied high-peak power CO₂ laser has a pulse duration shorter than 100 μ s and a peak power level in the kW-range. The design of the laser system and its implementation into a processing system lead to an industrial laser drilling system which is able to process minimum hole diameters of 50 μ m. Some examples of micro-drilling results are described.

Key Words: Micro-hole drilling, Advanced printed boards, Pulse CO₂ laser, High-peak power CO₂ laser, CO₂ laser drilling system

1. はじめに

パソコン, 携帯電話, ハンディビデオ等, 近年の情報通信, 映像機器を中心とした電子機器の急激な小型軽量・高機能化の進展にともなう, プリント配線基板の高密度化が不可欠なものとなっている。パイアホールと呼ばれる多層基板の層間接続穴径に対しても, 従来の $\phi 300\mu\text{m}$ であったものが最近では $\phi 100\mu\text{m}$ 程度までに小径化し, さらに $\phi 50\mu\text{m}$ までの微細穴加工への要求が高まっている。

このような $\phi 100\mu\text{m}$ 以下の微細な穴開けでは, 従来のドリルによる方法では対応できず, フォトビア法¹⁾とともに, パルス幅100 μs 以下でピーク出力kW, もしくはそれ以上の性能を有する短パルス, 高ピーク出力CO₂レーザーによる穴あけ法²⁾が生産現場に導入されつつある。

ここでは, 最先端プリント基板におけるレーザー加工の必要性, および筆者等が開発しているプリント基板穴あけ用CO₂レーザーの発振器技術, 加工機システム, その加工例について紹介する。

2. 最先端プリント基板におけるレーザー加工の必要性

電子機器の小型化・高機能化に対応してLSI化されたチップ間の相互接続が問題となる。一昔前の基板では, LSIチップを樹脂でモールドし, ムカデの足状に出た接続ピンをソケットに挿入して素子間の接続を行うのが主流であった。この場合パッケージのサイズが大きく, 個々の素子はLSI化により小さくしても, 回路基板全体としては大きなものになってしまう。理想的には極力チップの大きさから大きくすることなくチップ間の接続を行いたい。一方で, メモリ, システムLSI等の高集積化により, 一つの半導体チップから数百ピン, さらに近い将来MPUでは1000ピンを超えるピン数を引き出す必要がある³⁾。そのような要求に対して回路基板(ドーターボード, マザーボード)との接続を容易にするパッケージ技術としてFig.1に示すようなBGA(Ball Grid Array)/CSP(Chip Size Package)技術⁴⁾が主流になりつつある。これらのパッケージ技術では多層のパッケージ基板を介することにより, ピッチ0.1mm程度で形成されたチップ上の出力端子をBGAでは1.5~1.0mmに, また, CSPでは0.8~0.5mm程度に変換し, 回路基板上での素子間接続を可能とする。

Fig.1 Construction of advanced packages of (a) BGA and (b) CSP.

さて、BGA/CSPで多ピン化が可能になるのは、従来のように周辺からだけではなく、面全体の格子点から引き出せるためである。一方で、0.8mm以下のピッチで回路基板との接続を実現するためには、配線ピッチ200 μ m以下、さらに密度の高いものでは50 μ m以下が必要となる。このためのパッケージ基板の製作手法としてビルトアップ手法が主流となりつつある。同手法ではコア材を中心層としてメッキ、プリント等によって順次導体層、絶縁層を積み上げていく。各層の基板を作って一括して積層する従来の方法に比べ、配線密度を大幅に高めることができる。その最大の理由は「レーザー法」の適用により微小径のバリードビア(埋め込み穴)、ブラインドビア(止まり穴)の形成が可能となったからである。Fig.2にレーザー法によるビルドアップ基板加工プロセス例を示す。同加工は「ドリル」でも可能であるが、コストが高くなり、現実的な適用が難しかった。また、「フォトビア」による方法も一方で適用されているが、樹脂材料として感光材料を使う必要があり、「レーザー法」は材料に対する自由度が大きいことも大きな特徴

Fig.2 Example of production process of a built-up electric board by laser drilling.

である。

3. プリント基板穴あけ用レーザー加工機

3.1 プリント基板穴あけ用CO₂レーザーの特徴

現状の電子基板ではエポキシ、ガラスエポキシ、ポリイミド等の材料が主流である。これらの材料に対しCO₂レーザーで穴あけを行う場合、従来の板金用レーザーに適用するようなミリ秒からサブミリ秒オーダーのレーザーパルスを使った場合は、穴周辺の炭化が多く基板として使用することはできない⁵⁾。しかしながら、パルス幅100 μ s以下でピーク出力kWオーダーの短パルス、高ピーク出力のCO₂レーザーを照射した場合には、レーザービームを照射した領域の周囲に熱伝導が起こる以前に局所的に樹脂材料が溶融、分解し、材料が蒸発する過程で入射エネルギーの一部も持ち去られる。このため加工穴周辺に対する熱影響・炭化が少ない加工が可能となる。

CO₂レーザー光による加工では1パルス当たりの加工深さ(エッチレート)は通常10 μ m以上の値が得られる。一方、YAGレーザーの3倍、もしくは4倍高調波、エキシマレーザー等の紫外線レーザー光では、樹脂材料に対する吸収係数が1桁以上高くなり、せいぜい数ミクロンオーダーしか深さ方向に浸透できないため、エッチレートも数ミクロン以下となる。この特性によりCO₂レーザーは生産性・ランニングコストの面で有利となる。反面、集光性の面で30~50 μ mの穴あけ径が限界と考えられ、近い将来必要とされる30 μ m級の超微細な穴あけ領域では紫外線レーザーが導入されると考えられている⁶⁾。

3.2 レーザー発振器

プリント基板に適用される短パルス・高ピークCO₂レーザーとしてはTEA CO₂レーザー⁷⁾、壁面冷却式スラブ型CO₂レーザー⁸⁾、または三軸直交型CO₂レーザー⁹⁾が採用されている。しかしながら、これらプリント基板用レーザーの特性に関しては極めて激しい競争が繰り返されている基板業界にあって、ほとんど公表されていないのが実体である。以下では筆者等が携わるレーザー装置の技術概要について紹介する。

(1) 放電励起方式

筆者等は、板金加工用レーザーとして多くの実績を有する無声放電(Silent Discharge)励起の三軸直交型CO₂レーザーを採用している^{9,10)}。同方式の特長は以下の通りである。

(a)高周波電源を変調することによりパルス幅を容易に制御することができ、加工材料に応じた短パルス・高ピーク出力を発生できる。

(b)電極表面の誘電体バリアーにより放電電流の均質化・放電安定化を図ることができ、kHzオーダーでの安定した繰り返し動作が可能となる。

発振器の電極構造をFig.3に示す。金属パイプの外周に誘電体をコーティングした電極を対向配置し、両電極間に交流高電圧を印加する。軸流ブロワと熱交換器からなる

Fig.3 Cross-sectional view of excitation region of silent-discharge excited CO₂ laser.

ガス循環系により冷却されたレーザーガスを放電部に流し込んでいる。

高ピーク出力発振を実現するためには必要なピーク出力よりほぼ1桁高い瞬時電力を投入する必要がある。無声放電励起CO₂レーザーにおける放電電力は以下の式によって表される。

$$W_d = \pi f C_g V^* (V_{op}^2 - V^{*2})^{1/2} \quad (1)$$

ここにおいて C_g ：電極の静電容量、 f ：電源周波数、 V^* ：放電電圧波高値、 V_{op} ：印加電圧波高値である。 C_g は誘電体材料の誘電率、絶縁耐力、放電面積で決まるもので、それ程大きな自由度はない。 V^* はガス混合比、ガス圧力、および出力ビームを取り出すのに必要な放電ギャップ長で決まる。ピーク電力の増大は主にガス圧力増大による V^* の増大、および励起電源の高周波化により実現している。従来のプリント基板用のレーザーでは数百kHzの電源でパルス幅15~100 μ s、kWレベルの出力が得られている。また、最近開発した装置ではMHzまで電源周波数を増大しパルス幅1~15 μ s、ピークで10kWを越す出力が得られている¹¹⁾。最大繰り返し周波数は4kHzである。

Fig.4は電極間に印加される電圧、放電電流とレーザー出力との関係を示している。

高周波電圧を電極間に印加した後ある遅れ時間を経た後にレーザー光が立ち上がる。この際のレーザー発振の遅れは、(a)放電エネルギーがN₂($v=1$)からCO₂(001)に移乗され、利得が発振しきい値に達するまでの時間、および(b)利得がしきい値に達した後にレーザー光が飽和強度のレベルに達するまでの時間により決定される。また、レ-

Fig.4 Relation of waveforms of an applied voltage between main electrodes, a discharge current and a laser output power.

ザー光が立ち上がるまでの遅れ(b)により、利得はその間にしきい値を越えていわゆるゲインスイッチングを生じ、レーザー光立ち上がり時には高ピーク出力(ファーストスパイク)が発生する。その後放電励起密度に応じた準定常的な発振が得られる。この領域では放電励起時間を制御することによりパルス幅を最適な値に制御することができる。

(2)MHz動作高周波電源

最新の発振器では最短1 μ sのパルスを発生するためにMHzの高い周波数で動作する高電圧電源を開発している。その回路図をFig.5に示す。従来の交流高電圧電源では200~400Vの交流電圧を高電圧トランスによって昇圧し、高電圧化するのが一般的である。しかしながら、このような電源に対して今回の放電負荷を接続した場合、昇圧トランスにおけるリークインダクタンスが大き過ぎるために、MHzの高周波動作時に必要な放電電流を流すことができないことが問題となる。このため、直流高電圧(6kV)をMOS-FETにより直接スイッチングして交流高電圧を取り出す電源(ダイレクトスイッチング方式トランスレス高周波電源)を開発した。この結果MHzによる高電力密度励起において短パルス・高ピーク出力発振を実現するとともに1~15 μ sの範囲で自由な発振パルス幅の制御を可能としている。

3.3 加工機システム

プリント基板用レーザーと組み合わせられたプリント基板加工機システムの構成をFig.6に示す。また、Table 1に加工機系の性能を示す。加工光学系はマスク形状をワーク上に転写する縮小転写光学系となっている。加工の穴径

Fig.5 Circuit diagram for a high frequency power supply.

Fig.6 System diagram of micro-drilling processing unit with a high-peak power CO₂ laser.

Table 1 Performance characteristics of a work table necessary for micro-drilling by a high-peak power CO₂ laser.

	Term	Specification
X-Y table	Work area (mm)	620 × 510
	Maximum feed speed (m/min)	90
	Positioning accuracy (mm) (X)	0.005/620
	(Y)	0.005/510
	Repetitive positioning accuracy (mm)	±0.002
Galvanic- scanner	Scanning area (mm)	50 × 50
	Positioning speed (point/sec)	800
	Positioning accuracy (mm)	±0.020
	Repetitive positioning accuracy (mm)	±0.010
Z axis stroke (mm)		80

は転写光学系のマスクをオートチェンジャーで交換することによって変化させる。収束性の高いTEM₀₀モードビームと比較的大きな集光NAを有する転写レンズを採用することにより、最小 $\phi 50\mu\text{m}$ までの微細穴加工に対応できる水準にある。

2軸のガルバノミラーと大口径の $f\theta$ レンズをよってワーク上50mm×50mmのエリアをスキャンする。生産性向上の観点からガルバノミラーの高速化に対する要求は大きい。最近では微細集光に適した大口径のスキャンミラーを用いながら、800Hzという高速の位置決め速度が実現されている。テーブル移動と組み合わせて $\square 50\text{mm}$ の領域をステップアンドリピート方式で加工し、基板全体の穴あけを行なう。

CCD顕微鏡カメラは、基板上のアライメントマークを画像処理によって認識し、ワークをテーブル上にセットする際の位置・角度ずれ、およびワークの伸縮誤差を補正する。また、実際に穴加工を行い、同カメラを用いて校正することによって、2軸スキャンでは不可避免的に発生する $f\theta$ レンズの非線形性などの光学系の誤差の補正も行なっている。

3.4 ビーム強度分布の制御による大口径加工特性の改善

レーザー法は先にも述べたようにブラインドピアーを形成できることが大きな特長である。このため、もともと $\phi 150\mu\text{m}$ 以下の微細穴あけへの適用を意図した技術であったが、 $\phi 300\mu\text{m}$ 程度の大口径ブラインドピアーを形成する要求も増えつつある。

大口径の加工ではビーム照射面積が大きいため、転写マスクにおける開孔径が大きくなり、シングルモードのビームを照射した場合には、必然的に中心部分が強い分布となる。このビームをワークに照射すると、穴の中心において内層銅箔にダメージを与えることがある。これを回避するために、ビーム強度分布を任意に変換するレンズを開発¹²⁾し、照射ビーム強度分布の均質化を図っている。強度分布を変換した場合と変換しない場合の加工結果を各々Fig.7 (a), (b)に示す。同図より強度分布の均質化により大

Fig.7 Comparison of processing results (a) with a beam homogenizer and (b) without a beam homogenizer.

口径の穴あけにおいて、底面がフラットな加工ができることがわかる。

4. プリント基板加工例¹³⁾

従来筆者等はパルス幅15~100 μs 、ピーク出力kWレベルのレーザー発振器を使ってプリント基板加工を行ってきた。ここでは新規に開発したパルス幅が1~15 μs 領域でかつピーク出力10 kWが得られるレーザー発振器を使った際の特徴的な加工結果について紹介する。この出力領域はいわゆるTEA CO₂レーザーよりもパルス幅的には1桁長く、また、ピーク出力的には1桁低い、従来にはない加工領域である。

4.1 エポキシ樹脂への微細穴あけ($\phi 50\mu\text{m}$)加工例

Fig.8 (a), (b)に銅箔を内層したエポキシ系樹脂に対して $\phi 50\mu\text{m}$ のビアホール加工を行った場合の結果を示す。樹脂の厚み50 μm 、内層銅箔の厚みは35 μm である。(a), (b)は各々パルス幅が8 μs 、48 μs の結果である。ピーク出力の観点からは、(a)の結果は(b)に対し6倍高いピーク出力を照射していることになる。

微細穴($\phi 50\mu\text{m}$)の加工の場合、加工穴周辺におけるダレを防ぐために必然的に照射エネルギーを低く抑える必要がある。この時内装銅箔が厚い($t = 35\mu\text{m}$)場合、銅箔を十分に加熱できず、その表面に樹脂残りが起こりやすい。樹脂残りが多いとプリント基板製作時に電氣的な接続不良を引き起こし、問題となる。8 μs における加工では短パルス・高ピーク出力効果により銅箔部分にレーザー照射エネルギーが熱伝導される前に樹脂部分が溶融・蒸発し、内層銅箔の厚みにあまり関係なく樹脂残りを低減できるこ

Fig.8 Results of micro-drilling of epoxy material with a diameter of 50 μm by a laser beam with a pulse duration of (a) 8 μs and (b) 48 μs .

Fig.9 Results of micro-drilling of polyimide material with a diameter of 300 μm by a laser with a pulse duration of (a) 8 μs and (b) 48 μs .

とが確認される。

4.2 ポリイミドの大口径穴あけ($\phi 500\mu\text{m}$)加工の例

Fig.9 (a), (b)に厚み60 μm のポリイミド材料に対し $\phi 500\mu\text{m}$ の穴あけ加工を行った際の結果を示す。(a)はパルス幅8 μs 、(b)はパルス幅48 μs の結果である。従来大口径の穴加工を行う際には、必要なエネルギーを与えるためにパルス幅を長く設定する($\sim 50\mu\text{s}$)必要があった。結果としてFig.9(b)に見られるようにポリイミド樹脂の炭化が多くなり加工直後の穴壁面に炭化物が付着するという問題が生じていた。また、穴周辺への熱影響も多くなる傾向も見られた。今回、同一パルスエネルギーでパルス幅の短いパルスを照射した結果、Fig.9 (a)に見られるように穴壁面における炭化物発生量を減少することができた。短パルス化により熱伝導領域を抑制した効果と考えられる。

4.3 ガラス基材入り基板の加工例

大口径のガラスエポキシ樹脂の加工ではガラスを溶解する必要から、入射エネルギーを高く設定する必要がある。例えば、厚さ100 μm 、穴径 $\phi 300\mu\text{m}$ のブラインドホールの加工例では、銅箔が薄い場合($t=18\mu\text{m}$ 以下)は銅箔に損傷し易いという問題があり、48 μs の結果では銅箔部に損傷が生じている。8 μs に設定した場合は、短い時間内に熔融・蒸発に必要なエネルギーを与えることができるため、このようなガラスエポキシ樹脂の大口径加工においても銅箔部に損傷を与えることなく高品質の加工ができることが確認された。

5. おわりに

最先端プリント基板におけるレーザー加工の必要性、および筆者等が開発したプリント基板穴あけ用CO₂レーザーの発振器技術、加工機システム、その加工例について紹介した。

板金加工において実績のある無声放電励起部に対してダイレクトスイッチング方式トランスレス高周波電源を適用することにより、パルス幅1 $\sim$ 15 μs 、ピーク出力10kWの発生を可能とした。この出力領域は従来のパルスCO₂レーザーでは得られない新規の動作領域であると考えられる。基板加工に適用した結果では、銅-エポキシ積層基板において $\phi 50\mu\text{m}$ までの微細なバイアホール加工を実現すると共に、ポリイミド、ガラスエポキシ基板における大口径穴加工においても照射条件の最適化により高品質加工が実現できることが実証された。

$\phi 150\mu\text{m}$ 以下の微細な穴あけ加工の分野では短パルス・高ピーク出力CO₂レーザー加工機が急速にラインに導入されつつあり、今後さらなる生産性向上、高品質加工に向けたハード、ソフト面での開発を続けていくことが必要である。また、 $\phi 50\mu\text{m}$ 未満の穴あけ領域ではYAGの3倍高調波、もしくは4倍高調波による加工が今後適用されることが考えられ、これらレーザーの高出力化、高信頼化に向けた技術開発が急速に発展することが期待される。

参考文献

- 堤 章, 有光 義雄: 電子材料9月号(1998) p.33.
- 水野 正紀, 福島 司, 金岡 優, 西前 順一, 今井 祥人, 竹野 祥瑞: 三菱電機技報 71 (1997) 395.
- 朝倉 博史: 日経マイクロデバイス12月号(1996) p.139.
- 春日 壽夫編著: 表面実装ポケットブック超小型パッケージ CSP/BGA技術(日刊工業新聞社, 1999) p.14.
- 岡村 寿郎: 電子材料5月号別冊(1999) p.32.
- 木内 浩: 電子技術6月号別冊(1999) p.88.
- 磯 圭二: 電子材料10月号(1996) p.101.
- 永井 治彦: レーザー研究 27 (1999) 156.
- 葛本 昌樹, 竹中 祐司, 田中 正明, 竹野 祥瑞, 森安 雅治, 平本 誠剛: レーザー研究 19 (1991) 901.
- 西前 順一, 葛本 昌樹, 福島 司: レーザー学会研究会報告 RTM-98-2 (1998).
- 佐藤 行雄, 西前 順一, 岩田 明彦, 竹野 祥瑞, 福島 司, 金岡 優: レーザー熱加工研究会誌 6 (1999) 28.
- 松原 真人, 竹中 祐司, 西前 順一: レーザー学会学術講演会第18回年次大会予稿集(1998年1月) p.153.
- 湯山 崇之, 廣崎 達也: 第44回レーザー熱加工研究会論文集(1998年7月) p.89.

レーザーワード

微細穴あけ加工(micro-hole drilling)

携帯電話、デジタルムービー、携帯パソコン等、近年電子機器の超小型化、高機能化にともない電子基板の多層化・高密度実装化が急激に進んでいる。これら多層電子基板製作に必要な高密度性と生産性が両立できる穴あけ加工技術。

従来直径200 μm 以上の穴あけでは機械的なドリルにより

対応してきたが、最近の基板の主流である150 μm 以下の領域ではレーザー法、またはフォトビア法が導入されている。現状直径50 μm 領域まで実用化の域に達しつつあるが、さらに数年後には30 μm 級の穴あけ加工が必要とされる。

(佐藤 行雄)