特集 1

レーザーマイクロ加工

吉 川 省 吾 *

(1984年 9月15日 受理)

Laser Micro-Machining

Shōgo YOSHIKAWA*

(Received September 15, 1984)

1. はじめに

現在、レーザーマイクロ加工がレーザー応用の一つの柱を形成していると言って過言ではない。レーザー出現直後のルビーレーザーによる加工応用が必ずしも従来技術を凌駕できず、長い低迷期を経過したが、マイクロエレクトロニクスの発展、高出力Nd:YAGレーザー、CO₂レーザーの実用化、光ファイバーの実用化、などを契機に、今日の地位を築き上げた。

マイクロエレクトロニクスは小形・高集積化と同時に量産化による、低価格化を前提とした製造技術を要求した。これに対しレーザー加工の持つ微小加工、高速・高精度加工などの特徴と自動化のためのプログラム制御の容易さが活用され、実用化が急速に進展した。マイクロエレクトロニクスがトリミング、リペアリング、マーキングなどのレーザーマイクロ加工発展の原動力であったと言える。

オンラインの製造設備として信頼性の高い高出力Nd:YAGレーザー、CO₂レーザーおよび高出力用光ファイバーの実用化もまたレーザーマイクロ加工の発展に寄与した。スポット溶接、金属薄板の切断、ハンダ付けなど確立された既存技術のある分野におけるレーザーマイクロ加工

の普及が著しい。

本文では、マイクロ加工に应用されているレーザー発振器、レーザーマイクロ加工の特徴を簡単に述べ、特に実用化されている種々の応用例を紹介する。

2. レーザーマイクロ加工用の発振器と特徴

マイクロ加工用のレーザー発振器としては、平均出力が数Wから数百WまでのNd:YAGレーザーとCO₂レーザーが対象になる。以下にこれら発振器とそれによるマイクロ加工の特徴を記述する。

2.1 Nd:YAG レーザー

Nd:YAG レーザーは、Nd³⁺をドープしたY₃Al₅O₁₂結晶を活性媒質とする代表的固体レーザーである。その構成と外観例をFig. 1に示す。マイクロ加工への応用からみた特徴は、①発振波長が1.06μmであり、数μmから数十μmのビーム径に集光できる②四準位動作であるため、レーザー発振のしきい値が低く、効率が高い。また光学的に均一な大きな結晶が得られるため高出力発振が可能である。③連続発振、ノーマル発振、Qスイッチパルス発振と多様な発振形態が可能であり、応用範囲が広い、④

*日本電気(株) レーザー装置事業部 (〒211 川崎市中原区下沼部1753)

*Laser Equipment Division, NEC Corporation numabe, (1753, Shimonumabe, Nakahara-ku, Kawasaki 211)

Fig. 1 Nd: YAG レーザーの構成 (NEC 製 SL 120D, SL 234 ポッケルス Q スイッチ)

装置が小型で信頼性が高く、オンラインの製造設備として十分使用できるなどである。

次に励起方法の違いによる代表的な二つの例を紹介する。

連続励起Nd:YAG レーザー 直流放電のKr アークランプによって励起され、連続発振と高速繰返し Q スイッチ発振の二形態がある。前者

はシングルモード出力数Wから、マルチモード出力600W程度まで各出力レベルの発振器があり、ハンダ付け、溶接、切断に利用されている。一方Qスイッチパルス発振は、レーザー共振器内に音響光学効果を利用した変調器(超音波Qスイッチ素子)を挿入し、レーザー発振を制御するもので、その尖頭出力はシングルモードで20kW以上、マルチモードでは200kW以上、パルス幅は100nsec以下、繰返し周波数は数kHzから数10kHzが可能である。このQスイッチパルスは、トリミング、マーキング、スクライビングなど制御性と高速性の要求される気化加工に利用されている。

パルス励起Nd:YAG レーザー コンデンサからの放電、または直流電源の制御によってXeあるいはKrフラッシュランプを駆動してレーザー発振を行わせるタイプである。ランプ発光とほぼ同程度の発振持続時間のノーマル発振では、パルス幅0.1~10msec、出力エネルギー50J/パルス、平均出力400W、繰返し200pps等の性能が得られ、穴あけ加工、溶接などの用途に広く使われている。また、パルス励起Nd:YAG レーザーにポッケルスQスイッチを組合せた、パルス幅1nsec程度の光パルス、またはこの第二高調波(0.53 μ m)はICマスクのリペヤリング等超微細加工に用いられる。

Fig. 2 低速軸流CO₂ レーザーの構成

2.2 CO₂ レーザー

炭酸ガス (CO₂) レーザー発振器の最近の話題は、高速軸流形、3軸直交形、ヘリカルフロー形などの大出力レーザーに集っているが、マイクロ加工用のCO₂ レーザー発振器となるとCW出力で150W程度と小出力であるため、歴史の古い低速軸流形が用いられる。低速軸流形はCO₂、N₂、Heの混合ガスをロータリーポンプを用いて引きながら、レーザー管内に流れをつくり、放電させることによってCO₂ガスを励起して10.6 μ mの波長のレーザー発振を得る (Fig. 2)。

低速軸流形レーザーの特長は、①断面が円形のレーザー管内でレーザー媒質がつくられること、またレーザー発振にいたる光波の往来が行なわれることにより、集束性にすぐれたTEM₀₀モードが得やすい。②放電の安定性が高い、③パルス放電を行なわせることにより、CW放電時の5倍程度のピーク値をもつパルス出力が得られる、④歴史が古く信頼性、保守性にすぐれている、などがあげられる。10.6 μ mの波長がセラミックの加工に好適であること、鋭いパルス出力が得られることなどから、セラミックスクライバを柱とし、低速軸流レーザー (例 Fig. 3) も石英、有機材料、金属薄板などのマイクロ加工分野に用途をひろげつつある。

最近マーキング用の光源として、TEA (Transversely Excited Atmospheric Pressure) CO₂ レーザーが数多く使われた。これは、放電方向、ガス流の方向、光軸方向が互いに直交した (3軸直交形) レーザーである。大気圧レベルのガスを用いて、対向する電極間に均一にひろがったグロー放電を得るのはCWでは不可能で、予備放電々極を設けて紫外線を発生させ、この助けによりパルスグロー放電を安定に行なわせパルス出力 (例 出力2J/パルス、くりかえし10pps、パルス幅70nsec) を得ている (Fig. 4)。

3. レーザーマイクロ加工の実例

レーザーマイクロ加工が実用化されている分

Fig. 3 セラミック加工用CO₂ レーザー (NEC製CL115 D)

Fig. 4 TEA CO₂ レーザーの構成

野の中心は電子部品製造過程である。ここでは半導体集積回路に代表される小型・高集積化が課題であり、部品の性能向上と製造技術の向上とは表裏一体となっている。加工物に対し非接触で応力を与えることなく実現できるマイクロレーザー加工の重要性はますます高くなっている。

以下に主に電子部品製造過程で実用化されている例について紹介する。

3.1 トリミング

近年、電子回路の小型化、高性能化と価格低減の要求が強くなってきており、その実現のため厚膜のチップ抵抗、モジュール抵抗あるいはハイブリッドICが多量に製造され、使用されるようになってきている。これら素子や回路中の抵抗値の調整法として高速、高精度の特徴をもつレーザートリミングがハイブリッドICの製造技術として確立し、広く普及するようになってきている。

ハイブリッドICでは蒸着やスクリーン技術によって基板上に導体や抵抗体を形成するが、製造プロセス上の種々の変動要因があり、要求される精度内に各抵抗値を納めることは困難である。例えばアルミナセラミック上にAg, RuO₂などのペーストをスクリーン印刷し焼成する厚膜回路における抵抗値精度は±20%程度が現状技術の上限である。したがって要求抵抗値精度と歩留りを考えると、抵抗体の一部を除去することにより、抵抗値を所定の精度に仕上げる調整（トリミング）プロセスは厚膜ハイブリッドの製造技術として不可欠となっている。

抵抗体のトリミング法としてはレーザーによるもの以外にも電子ビーム法、グラインダ法などがあり、特に厚膜におけるアルミナの粉体を抵抗体に吹きつけて削り取るサンドブラスト法がよく知られているが、トリミングスピードの点や清浄性などを含むメンテナンスの優位性から現在ではレーザートリミングが主流となっている。レーザーを用いたトリミングの特徴は、①ドライプロセスであり保守が容易なこと、②微小のスポットに集光できるため加工幅を狭くでき、微小な回路の加工が可能なこと、③光による加工であるので電氣的接触を行わないでカッティングできるため、回路をアクティブにした状態での機能トリミングが可能なこと、④レーザーのオン・オフ制御が電氣的に可能で非常に高速にできるため、高速で精度のよいトリミ

ングが可能なこと、⑤レーザー以外の他の構成要素を含め、すべてコンピュータ制御が可能で自動化度が高い装置であること、などである。

薄膜回路のトリミングの一部でXeレーザーが用いられることもあるが、ほとんどの場合はQスイッチNd:YAGレーザーが使用される。これは、①固体レーザーであるためQスイッチにより、抵抗体を気化し除去するのに必要なピークパワーを持ったパルスが得られること、②超音波変調器を用いたQスイッチであるため、高いくり返しで、しかも電氣的にくり返し周波数が制御可能なパルス列が得られること、③信頼性の高い、また保守も容易な実用レベルのレーザー発振器であること、などの理由による。

レーザーによるトリミングはQスイッチ化され、高い尖頭出力を持つNd:YAGレーザー光を抵抗体にスポット状に当て、このレーザー光を走査し、スポットを重ね合わせることにより連続的な切り口を得ている。モジュール抵抗などの厚膜抵抗体では最高100mm/s程度のスピードでトリミングされる。除去される抵抗体の中心部では3000℃以上に加熱され気化がおこっているが、溝の周辺部では一度熔融がおこるが、レーザー光の通過後は急冷されるため内部応力を持つ。この内部応力は小さなマイクロクラックを発生させ、抵抗値を変化させる。レーザートリミングした抵抗体の抵抗値ドリフトの原因としては、レーザー照射時に発生したプラズマの消滅や、測定系の応答遅れ、抵抗体の化学的物理変化もあるが、このマイクロクラックはレーザートリミングに固有でもっとも重要なものと考えられている。このため抵抗材料の選択と印刷焼成工程、およびトリミング条件の管理が重要となっている。

トリミングの形状は抵抗体の形状や目標値と初期値との偏差、要求精度、ペーストの安定性などを考慮して選択される。実際のトリミング例をFig. 5に示す。

レーザートリマーの一例をFig. 6に示す。超音波Qスイッチ付Nd:YAGレーザーの他、レーザー光を走査集光するビームポジショナと

Fig.5 厚膜印刷抵抗のトリミング例

Fig.6 レーザトリマ (NEC SL432D)

集光系ワークを搬送するパーツハンドラ、抵抗値等を測定するためのプローブと測定器、およびこれらを制御するコンピュータとその入力装置から構成されている。

抵抗値などを所定の値に調整するのを素子トリミングと呼ぶのに対し、回路を動作させ特性を測りながら、特性そのものを所定の値に調整することを機能トリミングと呼ぶ。IC やトラン

ジスタ、ダイオードなどの半導体素子を含む回路では、これらの素子のバラつきによらずある一定の特性を得るために、ボリューム等を人手によって調整することが行われるが、自動化される点や、抵抗体自体の信頼性の点などの利点からレーザーによる機能トリミングが応用される事例が増している。

また抵抗トリミング以外で実用化の進んだトリミングとしては、時計用の水晶振動子の周波数調整があり、安価で高精度な水晶腕時計に寄与している。

3.2 リペアリング

レーザーを用いた修正技術は多種多様に及んでいるが、ここでは半導体製造に用いられるホトマスクに生じる欠陥のリペアリング（修正）に関して述べる。ホトマスクの製造プロセスで生じる欠陥の種類を大別すると、ピンホールやパターン欠落のような「欠損欠陥」と黒点や突起、ブリッジのような「残留欠陥」に分けられる。欠損欠陥に対してはスポット露光機による部分露光と、スパッタリングを用いたリフトオフ法に依っていたが、このような方法によると作業者の熟練が必要、作業が長時間を要する、などの欠点から修正コスト高となりすべてのホトマスクの欠陥を修正することは実際不可能であった。一方、残留欠陥はレーザーを用いることにより、敏速にリペアリングすることが可能になっている。

ホトマスクのように、ガラス基板上の金属薄膜を加工する際には、ガラスを損傷することなく金属膜のみを高精度で加工できるレーザーを選ばなければならない。その条件としてガラスに透明な波長で、熱影響を極力避けるため発振時間の短いことが必要であり、パルス励起型Nd:YAG レーザーのQスイッチ光またはそのSHG 光がこれらの条件を満たしている。

また、ホトマスクの修正加工の場合のレーザー制御は、修正すべき欠陥部だけにレーザーが照射され、それ以外の部分には影響をおよぼさ

ないようにすることが必要である。実際の場合には、さらに、欠陥を観察しながらレーザーの照射する位置や形状を制御するために、レーザービーム内に挿入されているスリットを調整し、修正が行われる。

Fig. 7はこのようにしてリペアリングを行った例であり、ホトマスク上のクロムの一部を除去したものである。なお、このパターンの線幅はそれぞれ $1\mu\text{m}$ で構成されている。

リペアリング装置としては作業能率を高める種々のインターフェイスを備え、作業者の安全を確保することが重要である。

Fig. 8は以上の点を考慮したホトマスクリペア装置の外観である。本装置はレーザーとしてNd:YAGレーザーQスイッチ、SHG光を採

Fig.8 レーザーマスクリペア (NEC SL452 C)

(a) 修正前

(b) 修正後

Fig.7 レーザーベアリングの例(a)修正前(b)修正後

用しており、サブミクロンの最小加工幅を実現している。

レーザーを用いた残留欠陥修正技術はホトマスクの品質向上に大きく寄与することができ、現在ではサブミクロンのリペアリングも可能になっている。しかし欠損欠陥は従来からのスポット露光に頼っているが今後光CVDを用いる方法が有望視されてきている。

3.3 マーキング

電子部品や機構部品に製品の型番、型名、ロット番号などを刻印するのにレーザー光が利用される。レーザーマーキングは、従来の方法である印刷や機械的彫刻に比較し、ドライプロセスであること、非接触であるため変形を起こさないこと、高速であること、消えにくいこと、超小型文字が可能であることなどの特徴をもっている。

レーザーマーキングにはマスク上に描かれた文字をレーザー光により投写するマスク方式とレーザー光をビームポジショナによって移動させながら文字を描く彫刻方式が実用化されている。前者はICパッケージなどに同一型名を高速・多量に印字する専用の用途に適し、後者は金属表面にロット番号など変化する文字の汎用

的用途に適する。以下にマスク方式の例としてパッケージ用のマーカと彫刻方式の汎用マーカを紹介する。

3.3.1 パッケージマーカ

近年IC製造工程の見直しが盛んに行われているが、その中で省力化、自動化が遅れている工程のひとつにICパッケージの表面に商標、品名やロット番号などを印刷する捺印工程がある。

捺印作業はインキの調整やパッケージ材料の表面処理、捺印検査などに熟練を要する作業であり、この工程にレーザーを導入して、自動化と捺印の信頼性の向上を図るものである。

レーザー捺印の原理は、Fig. 9 に示すようにスライド映写と同様の簡単なもので、広い光束のレーザー光をマーキングパターンのマスクに照射し、マスクを通過したレーザー光をレンズで集光し結像させる。プラスチックモールドのICパッケージの表面に焼付けるものである。レーザー光は表面の10~20 μm の深さで吸収されて、表面の光散乱状態変化、あるいは変色によってマーキングが行われる。

レーザーには、パルス励起のTEA-CO₂レーザーやNd:YAGレーザーが用いられる。パルス励起の繰返し周波数が約10ppsで、レーザー出力が約0.5~3J/パルス程度のものが用いられている。

パルスレーザーを用いることから、捺印作業は瞬時に行え、かつパッケージを搬送しながら捺印することもできる。捺印面積は30mm²程度から光束を振って100mm²以上の面積も可能であるが、捺印状態はパッケージ材料の組成に大きく依存する。TEA-CO₂レーザーは例えば、

Fig.9 マスク方式によるマーキング

ガラス材料や透明・着色プラスチック材料へのレーザーマーキングに、また、Nd:YAGレーザーは、通常のIC用エポキシ系プラスチックモールド材料に適している。また、近年紫外線領域のエキシマレーザーを用いて、シリコンウエハー上へのマスクマーキング方式のレーザーマーキング技術も開発されている。

マスクマーキング方式のレーザーマーキングは特に量産性を必要とするマーキング工程にレーザーのもつ高速処理性と、自動化・省力化に新しい波紋となって広まりつゝある。

3.3.2 汎用レーザーマーカ

彫刻式のレーザーマーカでは、連続励起QスイッチNd:YAGレーザーがガルバノメータ型ビームポジションによって光走査され、マーキングされる。マスク方式と異なり、集束光が連鎖して加工軌跡を作るため、深く、鮮明で、金属表面上へのマーキングに適している。この方式は文字の設定がコンピュータ制御により任意に高速であり、汎用性に富んでいる。サンプル毎に変化する測定値、例えば水晶振動子の周波数値をケースに刻印するなどに最適である。

汎用レーザーマーカの一例をFig. 10 に、マーキング例をFig. 11 に示す。この装置ではレーザーにマルチモード出力50WのNd:YAGレーザーと超音波Qスイッチ、光走査にガルバノメータ型ビームポジション、制御にパーソナルコンピュータが使用されている。本装置の特徴は

① OCR-Bフォントに準じた定体が用いられており、より自然な形態のマーキングが可

Fig.10 汎用レーザーマーカ (NEC SL475 C)

Fig. 11 レーザーマーキング例

能である。

② 対話形式によるターンキープログラムが標準実装されており、マーキングする文字や条件を容易に設定できる。

③ ユーザ作成の BASIC プログラムにより、直線と円弧からなる伝意のパターンをマーキングすることが可能である。

④ 外部機器制御用の入出力信号（各々負論理 TTL 8 ビット）が標準実装されているので、外部機器と接続しやすい。

⑤ 高速マーキングである。例えば $1.1\text{mm} \times 1.9\text{mm}$ の文字であれば毎秒12文字以上が可能である。

などがあげられる。

3.4 ハンダ付け

電子機器の小形・軽量・薄形化，システム化及び性能の高度化・高級化を目的として，電子部品の高密度実装が求められている。高密度実装を実現するには，①電子部品の小形化，チップ化さらにICのミニモールド化，フラットパッケージ化，リードレスチップキャリヤ化などの技術，②電子部品のプリント基板への供給技術，装着技術，③プリント基板の両面実装などの配線技術，④電子部品の基板へのハンダ付け技術の確立が必要である。

高密度回路のハンダ付け技術に関し，従来技術ではブリッジ発生や半導体集積回路に与える熱に帰因する信頼性の低下など問題が多く，レーザーによるハンダ付けが注目されている。

レーザーによるハンダ付けは，ハンダ付け

技術のなかで，reflow soldering (RS) 法に含まれる。RS 法とは，「被接合材料にあらかじめメッキなどの表面処理によってハンダをプリコートするか，または適当な形状（ペースト，プリフォームなど）のハンダを供給し，位置決めしたのちこれを瞬間的な熱単体，もしくは熱と圧力の両者を併用してハンダ付けを行なうもの」と定議されている¹⁾。RS 法には，レーザーによるハンダ付け以外に，ジュール熱，気化潜熱光ビームなどの各種熱源を使う方法がある¹⁾。

レーザーハンダ付けに使用されるレーザーには，Nd : YAG レーザーと CO₂ レーザーがある。CO₂ レーザーは，YAG レーザーと比較して，ハンダに対する反射率が高い，各種基板に対し吸収率が高いため基板に損傷を与えやすい，などの欠点を持ち，一般には Nd : YAG レーザーがむいていると言われている。

レーザーハンダ付けの特徴としては，他の RS 法の特徴と共通に，①不純物による汚染がない②部品材料に対する熱影響が少ない，③不必要な部分にハンダの付着がない，④ハンダ量を規制できブリッジがない，⑤自動化が容易，⑥部品の形状の影響がない，⑦個々の部品リードに適した最適ハンダ付け条件が選択できる，⑧面実装に適するなどがあげられる。

Fig. 12 に Nd : YAG レーザーを用いたハンダ付け装置の一例を示す。連続出力100W(マルチモード)の Nd : YAG レーザーを高出力用石英光ファイバーにより伝送し，出射光学部をロボットハンドに持たせることにより，その特徴をひきだすことができる。被加工物を動かすことなく，任意の加工点に出射光学部を動かすこ

Fig. 12 レーザーハンダ付け装置 (NEC SL477-5 E)

とができ、また焦点をはずすことにより任意のパワー密度を選べ異なる加工条件をもつ部品に対応でき、しかも出射光学部を傾け、斜め方向からレーザー光を照射することにより、リードレスチップキャリアタイプのICのハンダ付けも簡単にできる、またNd:YAG レーザーは、ガラスエポキシ材などのプリント基板を数十パーセント透過するため裏面からのハンダ付けも可能である。また、電気信号により、応答速度の速いシャッターのon, off が可能であり、自動化に適する。

さらに、レーザー光を分割し、同時多点レーザー加工、及び、光切換路を使用することにより、時分割レーザー加工などがおこなえ、効率良くレーザーの出力を使用することができる。Fig. 13 にフラットパックICのガラスエポキシ基板へのハンダ付け例を示す。

レーザーによるハンダ付けは、基本的に一点一点加工するため大きな基板になると、長い加工時間を有することになり、大量生産にはむかない。しかし、熱的に強い電子部品を他のハンダ付け技術によりおこない、熱的に弱い集積度の高いICに関しては、この部品をレーザーハンダ付けにより後付けする方法をとることにより、他の素子に影響を与えずハンダ付けすることが可能となり、その特徴をひきだせる。

Fig. 13 フラットパックICのハンダ付け例

3.5 溶接

Nd:YAG レーザーによるスポット溶接はレーザーマイクロ加工の中で広く普及した技術であり、微小電子部品や機構部品の組立に最適である。中でも高出力のパルス励起Nd:YAG レーザー、分割光学系とファイバー光学系を組合せたシステムには、①非接触、多点同時溶接のため、変形や歪みが極めて小さく、生産性が高い。②溶接の主条件はレーザー出力で、制御が容易であるため、再現性、品質に優れている。③溶接点ごとに加工サンプルを移動する必要がないため、載物台の機構が簡単で、自動化のコストが低減できる。④フレキシブルファイバーによりレーザービームを照射するため、立体的にいりくんだ個所まで溶接できる。また加工対象が変更され溶接個所が変わった場合でも出射光学系の取付け位置を変更するだけで対応できる。などの特徴がある。

レーザースポット溶接の実用例として、カラーテレビ用ブラウン管カソード部のキャップ溶接がある。

従来、抵抗溶接法が用いられていたが、電極によって溶接部を加圧するため変形の生ずる危険性があった。Fig. 14 に示す溶接装置はパルス励起のNd:YAG レーザー光を三分割し、光ファイバーによって三個所の溶接点に導き、同時に溶接を行うものである。この方法では、非接触であるためキャップに変形を生ずることがなく、また溶接ずれのない高真円度の溶接が実現できる。

また、ブラウン管の電子銃の組立ラインに一台のレーザー発振器に空間および時分割の光ファイバー光学系を組合せ、各加工ステーショ

Fig. 14 レーザースポット溶接装置の構成例

ンまで導じ、能率の良い、設備費と維持費の安い溶接システムを実用化している。

レーザースポット溶接のその他の応用例には磁気ディスク用ヘッド部の溶接、リチウム電池の端子電圧、プリンタヘッド部の板バネとアーマチュアの溶接など多くの例がある。

3.6 金属切断

レーザ切断といえば、現在その殆んどがCO₂レーザを使用したものであるが高出力のNd:YAGレーザが開発された事により、CO₂レーザの欠点を補う性能を持ったNd:YAGレーザ切断機が実用化されている。

切断加工を対象としたNd:YAGレーザのCO₂レーザに対する長所として

- ① Qスイッチ発振により高尖頭値のパルス発振
 - ② 光ファイバーによる伝送が可能
 - ③ 装置が非常にコンパクト
 - ④ 光学系は通常の光学ガラスを使用
 - ⑤ 加工状態をレーザと同軸でモニター可能
- などが挙げられ、一方短所としては

- ① マルチモードのため集光性が劣る。
 - ② 発振効率が低い
 - ③ 高出力化に限界がある
 - ④ 集光レンズが大きくなる
 - ⑤ アクリル、紙、布、木材等の切断不可能
- などである。これらの長短所からNd:YAGレーザの特徴を活かした切断加工の用途としては

- ① 厚さ2～3mm以下の主として金属薄板の切断
 - ② Al, Cu等の反射率の高い金属の切断
 - ③ 超硬、W等の高融点、高硬度材料の切断
 - ④ 光ファイバー伝送による三次元切断
- に向いており、以下に最大の特徴であるQスイッチ発振によるAl合金の切断と光ファイバー伝送による切断の現状について紹介する。

3.6.1 Al合金の切断加工

Nd:YAGレーザの共振器内に溶融石英を

素子とした超音波Qスイッチを挿入する事により尖頭値が100kW以上のパルス発振が可能であり、これを利用してレーザ光に対して高反射率を示すAl合金の切断を容易に行う事ができる。

Fig. 15 は耐蝕アルミニウム合金板 (A5052) の板厚と切断速度の関係を示すグラフであり、連続発振とQスイッチ発振での加工性能の差は顕著である。このQスイッチの特性は周波数20 kHz、尖頭出力100kW、平均出力440 Wである。切断品質については連続発振で切断したものは容易に取り難いドロスの付着が多いが、Qスイッチ発振の切断ではドロスの付着が少ない。またドロスの程度はアシスタントガスの種類によっても異なり、酸素と乾燥空気を比較すると乾燥空気の方がドロスは少ないが切断速度は酸素の1/3以下になってしまう。Fig. 16 はQスイッチの繰返し周波数と切断速度の関係を示すグラフであり、連続発振出力で470Wと280Wに対応した最適周波数を示している。Qスイッチ発振では尖頭値と平均出力は逆比例の関係にあるがAl合金の切断では、尖頭値が高くと平均出力が不足する場合及び平均出力が高くと尖頭値が低い場合は切断速度が遅くなり加工性が悪

Fig. 15 耐蝕アルミニウム合金の板厚と加工速度

Fig. 16 Qスイッチ周波数と切断速度

くなる事がわかる。Fig. 17 はQスイッチ発振により加工したサンプル例である。

Laser cut sample. Material : A5052
 Thickness : 1.5 mm. Speed : 2m/min
 Laser power : 100 kW peak
 440 W average
 Frequency : 20 kHz
 Assistant gas : O_2 (3 kg/cm²)
 Focal length : 100 mm

Fig. 17 耐蝕アルミニウム合金板の切断例

3.6.2 光ファイバーによるレーザー切断

Nd : YAG レーザーの波長 $1.06 \mu m$ は光通信に使われる石英系光ファイバーで伝送する事が可能であり、現在ではコア径 $400 \mu m$ の光ファイバーで連続出力600W以上のNd : YAG レーザー光を5 dB/km以内で伝送させる事ができる。光ファイバーによるレーザー伝送の最大の特長はフレキシビリティの良さにあるが、一方集光特性はファイバーのコア径に依存するため切断加工のように高集束性が要求されるものについては出射レンズでコア径以下に絞り込む必要がある。このため出射光学系で直接光を絞り込む方法に対して種々の制限を受ける。ファイバーのフレキシビリティを有効に活用させるため、例えばロボットハンドに出射レンズを把握して三次元加工を行なう場合、レンズは口径を小さくし焦点距離を長くし加工物の干渉を出来るだけ少なくしたいが、ファイバーのコア径よりも小さな集光径を得るため、レンズ口径が大きくなるとともに焦点距離を小さくしなければならず、現在実用的に使用されているものではコア径の0.65倍迄絞り込む光学系が有り厚さ2 mm以内の金属切断が可能である。

3.7 アルミナ基板のスクライビングと切断

ハイブリッドIC用のアルミナ基板の分割法としてパルス CO_2 レーザーを用いたスクライビングとカッティングが挙げられる。スクライビングとは基板をベレット状に分割するための溝入れ加工のことである。従来は焼結前に形成された溝に沿ってブレイクする方法がとられていたが、焼結後の寸法精度の問題や、多品種小量生産に際しての即応性などの観点から、最近急速にレーザースクライバが基板メーカー、電子部品メーカー等に導入されつつある。また、レーザースクライバ普及の背景には、試作が簡便で費用も安いハイブリッドICの利点が認められ、これに伴い試作件数が増加したものと推察される。

アルミナ基板加工用のレーザーとしては、高出力、高効率なパルス発振動作が可能でしかも

材料への吸収率の高い CO_2 レーザーが用いられるのが一般的である。以前は Q スイッチ Nd : YAG レーザーも使用されていたが、スクライビング時の溶融飛散物の基板表面への付着等が問題となり現在では特殊な目的にのみ使用されている。レーザーをパルス化する理由は、熱の加工部周囲への拡散を防止し材料内部に発生する熱ひずみ、マイクロクラックを抑制するためである。また、ビームモードは集光性の良い横方向単一モード (TEM_{00}) でなければならない。

スクライビングは切断に比べ加工速度が 100 倍近く大きいため極めて能率的である。Fig.18 に 0.635 mm 厚のアルミナをレーザー平均パワー 30 W、速度 12 m / min でスクライビングしたときの分割後の断面の様子を示した。穴の深さは 200 μm 弱、穴と穴の間隔は 160 μm 前後である。穴は深ければ深いほど分割しやすくなるが穴まわりの溶融物の盛り上りが印刷時に問題となる。通常は基板厚の 1 / 3 程度スクライビングされていれば十分である²⁾。

最近、アルミナの 10~100 倍の熱伝導率を有する SiC(Be O 添加)、ALN が開発されたが、これらの基板も Nd : YAG、 CO_2 レーザーにてアルミナと同等の速度でスクライビングできることがわかった。

ハイブリッド IC の試作、小量生産に特に有効なのが、スルーホールないしはリード端子用の穴あけ、曲線切断加工である。レーザー加工は材料の硬度に依存しない、CNC との結合に

Fig.18 アルミナ基板のスクライビング断面

Fig.19 アルミナ基板の切断例

よりプログラムを作りさえすれば、複雑な寸法、形状の切断が行える等の利点をもっているため大幅にリードタイムを短縮できる。但し、一枚の基板の切断加工に数分から数十分要するため量産向きとは言えない。Fig.19 に 100 mm/min で切断したときのサンプルを示す。切断裏面にはバリが付着するが、基板どうして軽くこすることにより容易に除去することができる。

レーザースクライバーは用途によって極めて有効な加工ツールであり、今後はオートロード、CAD 等との有機的な結合によりハイブリッド IC 生産の FMS を形成してゆくことは間違いない。

4. レーザーマイクロ加工の今後の課題

レーザーマイクロ加工が電子部品や精密機構部品の製造過程に導入され続けることは疑いない。しかし、加工対象の超小形化、超高集積比化、製造コストの低減、量産性などの要求に対して、レーザーマイクロ加工にも以下の課題が残されている。

① 加工の微細化

ミクロンオーダーの微細加工の実現には、
 ・安定で信頼性の高い短波長レーザー発振器、SHG、FHG の実用化
 ・パルス幅とエネルギーの高精度制御、
 ・高精度・高速度位置決めテーブル、
 ・自動焦点合わせなどが不可欠になる。

② 加工の高速化

製造コストの低減、量産化の要求から高速加工が追求される。このために、
 ・レーザー出力の

高出力化，高速パルス化，・レーザー光や加工対象の高速移動，・高速パーツハンドリング，・加工システムの高速制御，などが求められている。

③ FA, FMS への対応

加工の多様化・複合化，自動化，対象の変化に即応できるシステムが求められる。レーザー光ファイバー，ロボット，コンピュータの一体化されたシステムであり，使用者によって最適

な加工システムが独自の製造技術を持って構築されるものである。オプトエレクトロニクスとメカトロニクスの結合されたシステム化が今後のレーザーマイクロ加工の実用化に不可欠である。

参 考 文 献

- 1) 青野：電子材料，9(1984) 87.
- 2) 杉島，若林：機械技術，32(1984) 66.