レーザー解説

固体レーザー加工の現状

鷲尾邦彦*

(1990年6月29日 受理)

Materials Processing with Solid-State Lasers

Kunihiko WASHIO*

(Received June 29, 1990)

Nd:YAG-laser-based materials processing has found remarkable acceptance in production today. Nd:YAG lasers are well suited to be incorporated to realize flexible manufacturing systems due to their flexibility in operation and variety in output performance. This paper briefly reviews present activities to extend the fields of application for materials processing, such as marking, trimming, welding and cutting with emphasis on the state of the arts of the advanced Nd:YAG lasers and various modern beam handling technologies.

Key Words: Materials processing, Nd:YAG laser, Marking, Trimming, Welding, Cutting, Optical fiber beam delivery, Flexible manufacturing.

1. まえがき

レーザー加工に用いられている固体レーザーには、Nd:YAGレーザー、アレキサンドライトレーザーなどがある。とくにNd:YAGレーザーは、連続発振、ノーマル発振、Qスイッチ発振などが容易に行なえ機種が豊富であり、その性能の向上・低価格化の進展とともに、半導体・電子部品工業および精密機械工業などで広く用いられている¹⁻³⁾。

Nd:YAGレーザー加工技術の種類を模式的にFig. 1に示す。Nd:YAGレーザー加工機は、加工対象や加工原理などによって用途別に専用機化が進んでいる。Nd:YAGレーザー加工機を、トリマ、マーカ、マスキリペア、メモリリペア、

切断、穴あけ用、溶接用、はんだ付け用、その他(スクライバ、アニールなど)に分けて調査した結果によれば⁴⁾、1988年度にはマーカが出荷台数ベースで32%の構成比を占めており、前年度のトリマを抜いて筆頭の機種となっている。トリマに次いで構成比が高いのは溶接用であり、当面はマーカや溶接用などが高い市場成長率を示すものと見られている。また最近では、Nd:YAGレーザーの大出力化が進展し、光ファイバ伝送などを利用して、鋼板の切断やシーム溶接などがフレキシブルに行なえるようになり、自動車工業や重機械工業、鉄鋼業などで、マクロ的な加工応用への取り組みも活発化している^{3, 5)}。

LD励起固体レーザーは、サブミクロンの位

*日本電気株式会社レーザー装置事業部(〒229 相模原市下九沢1120)

*Laser Equipment Division, NEC Corporation (1120, Shimokuzawa, Sagami-hara, Kanagawa 229)

Fig.1 Various laser materials processing technologies using Nd:YAG lasers.

置合わせ精度を必要とするハイエンドな加工機であるメモリリペアなどから、加工機への導入が始まっている⁶⁾。Qスイッチ光パルスが、線幅 $1.5\mu\text{m}$ 程度の微細なフューズの切断などに用いられている。LD励起固体レーザーの低価格化、高出力化とともに、アモルファス半導体デバイスや液晶デバイス等、やや大面積の薄膜加工用としても、その応用が除々に進むものと期待できる。しかし、これらハイエンド指向のレーザー加工機には、高機能・高精度な加工用光学系や位置決め機構が必要であり、レーザー加工機内でこれらが占めるコストの割合がかなり大きいため、LD励起固体レーザーの導入は価格的にはそれほど大きなインパクトにならないものと考えられる。

これに対して、マーカや溶接用などのややローエンドなレーザー加工機においては、レーザー発振機が加工装置全体に占める価格構成比が大きいため、LD励起固体レーザーの導入に

より加工機の低価格化に弾みがつけば、大きなブレイクスルーとなろう。しかし、このような用途では、CW励起レーザーの平均出力としては数十W程度、またパルス発振出力としてはピーク出力数kW、パルスエネルギー数J程度以上が必要である。現状のLD励起固体レーザーから得られる出力は、平均出力、パルスエネルギーとも一桁以上不足しており、LD励起固体レーザーの早期の大出力化の実現が望まれる。

以上述べたごとく、LD励起固体レーザーを搭載した加工機はまだわずかであるため、ここでは従来からあるランプ励起固体レーザーを用いた加工機に限り現状を簡単に解説する。また、マイクロ加工への応用に関しては、最近本誌にて紹介したばかりであるため大幅に省略し⁷⁾、ここではやや高出力なレーザーを必要とするマクロ加工にウェイトを置いて概説する。

2. レーザー加工用要素技術の現状

2.1 加工用Nd:YAGレーザー⁸⁾

現在最も多用されている加工用Nd:YAGレーザーはCW励起Qスイッチ発振Nd:YAGレーザーである。ピーク強度数kW、パルス幅数+ns程度的高速繰り返しパルスが容易に得られ、高速・高精度なトリミングやマーキングなどに広汎に用いられている。Qスイッチ発振の繰り返し周波数は50kHz程度までが可能である。

CW励起Qスイッチ発振レーザーについては、現在、そのピーク強度の向上、波長変換による第2高調波出力の向上などに関して開発がすすめられている。

連続発振レーザーやノーマル発振レーザーでは、加工速度や加工深さ等の改善を図るため、最近著しい技術的進展がなされている。ここではそのいくつかをとりあげて簡単に紹介する。

2.1.1 ロッドカスケード方式による大出力化^{9,10)}

レーザーロッドの単位長さあたりに得られる最大出力は、レーザー媒質に誘起される熱歪により制約され、Nd:YAGの場合は30W/cm程度以下である。レーザーロッド単体の長尺化には限界があるため、レーザー共振器内に複数のレーザーロッドを直列かつ周期的に配置するロッドカスケード方式のNd:YAGレーザーが開発されている。直系8mm、長さ152mmのレーザーロッドを6本用いた大出力Nd:YAGレーザー(SL117-6C, NEC製)では、トップデータとしてCW出力2.2kW(効率3.4%)が得られており、また励起ランプ電流を矩形波変調した場合には、パルス幅6ms、繰り返し40Hzのパルス動作でピーク出力4.4kWが得られている。

大出力Nd:YAGレーザーは通常マルチモードで発振し、そのビーム広がり角は励起入力とともに大きくなる。このため、単一ロッドを用いた場合には出力300W程度でビーム広がり角は30mrad程度とかなり大きい。しかし、ロッドカスケード方式の共振器構成を用いれば、光学的品質を損うことなく大出力化を図ることが可能である¹⁾。前述したSL117-6Cでは、平均出力

2kWという大出力動作時でビーム広がり角35mrad以下が得られており、また平均出力400W動作時には広がり角10mrad以下が得られている。

2.1.2 低広がり角・高輝度パルスレーザー

金属の穴あけ加工などで、加工速度、加工深さを高めるにはレーザー光の高輝度化を図ることが有効である。最近、リング方式の共振器構成を用いて、従来より7倍程度高輝度なパルス励起Nd:YAGレーザーが開発されており、輝度としては約62MW/cm²/steradianが得られている¹²⁾。本装置の主な仕様は、最大平均出力250W、最大ピーク出力50kW、パルス幅は0.6~20msの範囲で可変、最大繰り返し周波数は60pps、ビーム径は10mm、ビーム広がり角は3mrad以下である。これにより、例えば25.4mm厚のインコネル718は9mm/分の加工速度で切断できる。また、3mm厚のハステロイに0.5mmの細穴を加工する場合、従来は20秒程度もかかっていたのがわずかに1秒で加工できるなど、大幅に高速化されている。

2.1.3 パルス発振波形制御

銅合金の穴あけ加工や薄板複合材料の溶接加工などの加工特性改善を狙いとして、パルス励起Nd:YAGレーザーの発振波形制御とその応用実験が種々試みられている¹³⁾。波形の制御には、昨今技術的進歩が著しい半導体スイッチング素子が用いられており、これによりランプ励起電流を直接制御する方式が実用化されている。パルス発振波形のパラメータは数多くになり得るため、その加工用の最適化はそれほど容易ではない。

2.2 周辺要素技術

レーザー発振器以外でも、光学系、測定系、機構部、制御部など、レーザー加工機の種々の構成要素に関して多様な技術的進展が得られている。例えば、複雑な形状に対して迅速、かつ高精度に位置決めができるよう、パターン認識やオートフォーカス機能を含んだ自動制御技術が発達している¹⁴⁾。また、コンピュータが随

所に活用されており、カスタム対応をフレキシブルに行なえるよう、多品種少量生産に適したインテリジェントな加工用ソフトウェアが種々開発されている。

光ファイバとロボットとの組合せは、フレキシブルな3次元加工システムの構築に適しており、新しい自由度と新機能の付加により、今後レーザー切断やレーザー溶接などで、その需要が急増するものと期待される。

3. レーザー加工応用の最近の進展

3.1 マーキング^{15,16)}

レーザーマーキングは、集束光ビームを用いるスキャニング方式、パルスレーザーからのレーザービームを拡げて用いるマスク方式、およびこれら両者の併用方式の3方式がある。レーザーマーキングは、非接触で自動化が容易なマーキング方式であり、かつ薬品を用いないドライかつクリーンな方式であるため、環境対策上からも生産ラインへの導入に弾みがついてきている。このため現在、ワーク材料に適したマーキング条件の最適化、マーキング用各種ソフトウェアの高度化などが活発に進められている。

スキャニング方式のレーザーマーカは、汎用性が高く、最近その応用が目覚しく拡大している¹⁷⁾。マーキング用の図形処理技術などが発達しており、キートップや装飾品などへの図柄のマーキング、工具などへの刻印、銘板などへの型名や回路図などへのマーキングなど、多種多様なワークに対して広く用いられている。Fig. 2に、照光式スイッチ用キートップへの図柄のマーキング加工例を示す。

LSI製造では、プロセス途中の工程管理用などとして、ウェーハ表面を溶融してドットを形成する、飛沫を生じないクリーンなソフトマーキングのニーズが強まってきている。このようなSiウェーハ上に形成されたクリーンなドットの配列パターン例をFig. 3に示す。Qスイッチパルス出力の安定化などにより、形状が一様に揃ったドット(溶融痕)が再現性よく形成されて

Fig.2 Example of laser marking: Lighting switch.

Fig.3 Example of soft marking on a Si wafer.

いる¹⁵⁾。

LSIの品種の増大とともに、その多品種少量生産に適したフレキシブルなパッケージマーカの需要が強まってきている。これに対応すべく開発された文字抽出形高速レーザーマーカ(SL476A, NEC製)の光学系の構成図をFig. 4に、またマーキング加工例をFig. 5に示す。本

Fig.4 Schematic layout of optical unit of a character-selectable, flexible laser marker for marking IC package (NEC SL476A).

Fig.5 Example of laser marking: plastic-molded IC package.

装置では、マーキングに使用される文字や記号、商標など76種がフォントマスクにあらかじめ登録されており、このマスク内の文字などを、ガルバノメータでスキャンされるパルスレーザービームにより任意に抽出することにより、所望の文字配列が、毎秒100文字程度の高速度

で、マーキングされる¹⁸⁾。パッケージ上のマーキングエリアは50mm×50mmと、従来のマスク一括転写方式(5×15mm程度)に比べて大きくできる。マーキングデータはソフトウェアにより作成、保存が可能であり、マスク管理の合理化や、マーキング内容のカスタム対応、実時間処理などが容易に行なえ、高能率である。

3.2 トリミング

レーザートリミングは、チップ抵抗やハイブリッドICなどの製造技術として広く普及している¹⁹⁾。最近では、自動車用各種センサーや、アクティブフィルタ、オーディオ用パワーアンプなど、各種のハイブリッドICの製造用として、モジュールに測定回路やバイアス電源を接続して導通状態で回路調整を行なうファンクショントリミングが多用されている。このため、レーザートリマのファンクショントリミング対応が強化されてきており、DC電圧、AC電圧、周波数などの測定器のインナーボード化や、ソフトウェアの強化、平均化処理による測定精度の向上などが進展している。

また、チップ抵抗用トリマでは、ビームポジションナやプローブユニットなどの位置精度の向上などが進展し、1/16Wタイプ(1.0×0.5mmサイズ)の超小形な厚膜チップ抵抗の高速トリミングが実現している。

3.3 溶接

パルス励起Nd:YAGレーザーを用いたスポット溶接は、電子部品やOA機器部品などの精密組立用として広く普及しており、光半導体モジュール、フロッピーディスク装置磁気ヘッド、カラーブラウン管電子銃、リレー、コンデンサなど、各種の部品の組立に活用されている。レーザー出力は1パルスあたり1～20J程度で用いられることが多い。パルス励起Nd:YAGレーザーを用いたスポット溶接によれば、薄板の溶接や半導体ICなどの耐熱性の低い部品を内蔵したデバイスの組立てなどが容易に行なえ、部品の小形化、高精度化に役立てられる。レーザー

(a)

(b)

Fig. 6 Application of laser spot welding in electronic device assembling.

(a) Optical semiconductor module for fiber optics.

(b) Magnetic sensor head for hard disk.

スポット溶接の高精度の部品組立への応用例をFig. 6に示す。

パルス励起Nd:YAGレーザーは、その平均出力の増大に伴ない、シーム溶接への適用も目だって増えてきている。例えばリチウム電池、ガソリン噴射ノズル、圧力センサ、バルブ、マグネットなど、自動車電装品や電子機構部品の組立てに多用されている。

最近、Nd:YAGレーザーの大出力化の進展により光ファイバ出力も顕著に増大しており、コア径0.6mmの光ファイバ出力として2kWが得られるようになった²⁰⁾。ファイバ出力として平均出力2kWを得たときの、軟鋼に対する溶接性能測定例をFig. 7に示す。レーザー発振

Fig. 7 Laser welding of mild steel by a 2kW average power Nd:YAG laser.

の繰り返し周波数50pps、デューティ比50%の準CW発振（ピーク出力4kW）のとき、溶接速度0.6m/分にて溶け込み深さ4mmが得られている²⁰⁾。

光ファイバパワー伝送による遠隔地点のレーザー加工適用例として、蒸気発生器伝熱管のスリーブ施行が一例として挙げられる²¹⁾。レーザービームはコア径0.6mm長尺光ファイバを通してスリーブ内に導かれ、スリーブ内に挿入された集光レンズ、反射ミラーおよび回転駆動系で構成される先端工具によって集光される。これによりスリーブ内表面を回転しながら照射し、スリーブと伝熱管との重ね合せ溶接が施行される。このシステムでは、伝送損失10%程度以内でファイバ長200mに及ぶ長距離のエネルギー伝送が実現しており、遠隔・超狭あい部での溶接施行で顕著な効果が得られている。

3.4 切断・穴あけ

高ピーク強度の光パルスが高速の繰り返しで得られる連続励起QスイッチNd:YAGレーザーは、板厚0.6mm程度以下の薄板の微細加工に適しており、ステンレス、銅合金、セラミクスなどの穴あけ、切断加工に多用されている。例えば厚さ0.5mmのステンレス板に直径0.05mmの穴あけを施行した例では、真円度±0.003mm、

テーパー $\pm 0.001\text{mm}$, 加工時間5秒/穴程度の加工が実現している²²⁾。

切断加工用のパルス励起Nd:YAGレーザーとしては、ピーク出力20kW, 繰り返し300Hz, 平均出力450W程度までのものが種々開発されている²³⁾。Si₃N₄, Al₂O₃, AlN等種々のセラミックスの切断加工が試みられており, Si₃N₄では板厚9mmで切断速度10mm/min程度が, また, Al₂O₃では板厚4mmで切断速度10mm/min程度が得られている。切断幅は最大で板厚の1/20程度, また面粗度は20 μm 程度である²³⁾。

前述したごとく, Nd:YAGレーザーと光ファイバおよびロボットとの組合せによれば, フレキシブルな3次元加工システムが構築できる。平均出力150~200WのNd:YAGレーザーを用いれば, コア径0.3mm, NA0.25程度の光ファイバを介して, 厚さ0.8mm程度の自動車ボディ用銅板を1.5~2.5m/分程度の切断速度で良好な切断加工が行なえる²⁴⁾。Fig. 8に光ファイバとロボットとを組み合わせた3次元切断加工例を示す。このような銅板薄板の切断加工システム

Fig. 8 (a) Flexible, three-dimensional Nd:YAG laser cutting system using an articulated type industrial robot and a silica fiber.

Fig. 8 (b) Example of three-dimensional laser cutting.

SPCC $t=0.8\text{mm}$. Cutting speed 1 m/min at 100W average power.

は, 例えばオプション仕様等に関し迅速なカスタム対応をはかる必要のある大衆車やスポーツカーなどへの穴あけ加工に適しており, 生産ラインへの導入などが活発化し始めている。

4. あとがき

Nd:YAGレーザー加工は柔軟性, 多様性に富んでおり, ますます高度化, 多様化する加工ニーズに対応すべく, レーザー発振器技術や周辺技術は今後とも活発な研究開発がなされよう。

その開発のフロンティアは, 新素材の加工, 新加工原理に基づく新工法の開発, あるいは既存のレーザー加工の高速・高精度化, ソフトウェアによる図形処理等の高度化, 自己診断・検査機能の充実化, 3次元加工の高度化, 信頼性の向上など多方面に広がっている。

レーザー加工の適用対象も裾野が目だって広がってきている。また, 液晶デバイスやアモルファス太陽電池, 自動車部品等, 大きな発展が期待できそうな製品群への適用が新たに種々試みられており, 今後の展開はますます興味もたれる。

LD励起固体レーザーも, 優れた特長を有していることから, 今後レーザー加工機への適用はしだいにその普及のテンポを早めてゆくと期待される。

参考文献

- 1) C.J.Nonhof: *Materials Processing with Nd-Lasers* (Electrochemical Publications Limited, Ayr, Scotland, 1988)
- 2) レーザー学会編: レーザープロセッシング (日経技術図書, 東京, 1990)
- 3) 鷲尾邦彦: Nd:YAG レーザー加工, 国際レーザー/アプリケーション展'90技術セミナー資料 (東京, 1990)
- 4) '89年版レーザー産業年鑑 (矢野経済研究所, 名古屋, 1989) 118.
- 5) D.Belforte and M.Levitt Eds.: *The Industrial Laser Annual Handbook 1989 Edition* (Penn Well Books, Tulsa, Oklahoma, 1989) xiii.
- 6) J.Boogaad: *Lasers & Optronics* (May, 1989) 39.
- 7) 鷲尾邦彦: レーザー研究 16 (1988) 456.
- 8) 鷲尾邦彦: 光技術動向調査報告書VI (光産業技術振興協会, 東京, 1990) 268.
- 9) 沖野圭司, 櫻井融, 大森記代, 武中浩郎: NEC技報 42, No.8 (1989) 69.
- 10) S.Yoshida, S.Nishimura, S.Imai, Y.Fujimori, and K.Ishikawa: Digest of CLEO'90, CTUJ4 (1990) 188.
- 11) K.P.Driedger, R.M.Ifflander, and H.Weber: IEEE J. Quantum Electron. QE-24 (1988) 665.
- 12) デーナエルザ: レーザー協会会報 14, No.5 (1989) 15.
- 13) T.R.Kugler and T.J.Culkin: Photonics Spectra (Nov. 1989) 143.
- 14) 梶川敏和: レーザープロセッシング, レーザー学会編 (日経技術図書, 東京, 1990) 200.
- 15) 高橋利定, 宮川敏夫: Machinist (Dec. 1989) 68.
- 16) 川田正敏: Machinist (Dec. 1989) 72.
- 17) 杉島述昭, 高橋利定, 根岸明子, 篠塚幸義: NEC技報 41, No.5 (1988) 118.
- 18) 宮川敏夫, 中谷勝彦, 大森記代, 馬場美充, 坂本英夫: NEC技報 42, No.3 (1989) 65.
- 19) 高橋寿男: レーザープロセッシング, レーザー学会編 (日経技術図書, 東京, 1990) 265.
- 20) K.Okino, T.Sakurai, and H.Takenaka: ICALEO '89, Orland, Florida (Oct. 1989).
- 21) A.Yokoyama, T.Nagashima, O.Matsumoto, Y.Nagura and T.Ishide: 4th Symposium on Laser Material Processing Dec. 11-12, 1989) 77.
- 22) 松原俊夫: 機械技術 37, No.8 (1989) 59.
- 23) 児王誠, 堅川登, 目次善亮: 自動化技術 21, No.5 (1989) 26.
- 24) 武中浩郎: 自動化技術21, No.5 (1989) 31.