ファイバレーザーマーカとその加工応用における現状と今後の展望

神谷 東志一

SUNX(株) LMP事業部 (〒486-0901 愛知県春日井市牛山町2431-1)

Current State and Future Prospect of Fiber Laser Marker and Its Processing Application

Toshikazu KAMIYA

SUNX Limited LMP Div, 2341-1 Ushiyama-cho, Kasugai, Aichi 486-0901

(Received October 1, 2007)

It is almost a decade since SUNX Ltd. started distributing the Fiber Laser Marker to FA market. In this discourse, we introduce our effort, history, and actual cases of developing and distributing fiber laser marker based on the actual performance of handling thousands of fiber lasers. Besides, we describe the outlook for the following competitive aspects of the pulse fiber laser: short-wavelength, short-pulse, and high-power, for meeting the needs of the market.

Key Words: Fiber laser, MOPA, Laser marker, High peak power, Factory automation (FA)

1. はじめに

近年、ファイバレーザーはその特徴である小型、高効率、高ビーム品質、メンテナンスフリー、高寿命が目ざされ、レーザーマーキングを主として、溶接、切断などの加工用にも多く使用されている。マーキング用に開発されたファイバレーザーは、20 kW以上のピークパワーが出力できるようになり、また、溶接用においてもCW数kWクラスが市販されており、CW100 kWクラスのファイバレーザーが市場に出回る日も遠くはない状況である。わずか10年前は、10~20 W程度のCWレーザー出力しか出せなかったファイバレーザーであるが、急激な技術進歩は目を見張るものがある。現在では、国内外のレーザーメーカーが競って商品化してきており、私の知る限りでも10社程度がビジネスに結びつける試みを行なっている。

この状況の中、当社は10年前に、ドイツのIPG Laser社(現IPG Photonics)とパルスファイバレーザーの開発をスタートさせた。約2年に渡る開発期間を経てパルスファイバレーザーは完成し、パルスファイバレーザーを搭載したレーザーマーカを世界に先駆けてFA市場に投入した。当時、市場に与えたインパクトは大きかったが、ファイバの先端からピークパワーが数kWのレーザーが出力されることを信用して頂くのにかなりの時間を要した。その後も改良を重ね8年が経ち、市場への出荷台数は数千台を超え、ファイバレーザーマーカのFAにおける地位は確固たるものとなった。

本稿では、FA市場を中心に、当社のこれまでの取り組みと事例を紹介し、FA市場におけるファイバレーザー(主

にパルスファイバレーザー)の今後の展望を概説する。

2. FAでの要求と当社の取り組み

FAの現場環境は想像以上に厳しく、研究室とは大きく異なることは推測頂けると思う。ここではレーザーマーカを使用する現場の環境を考慮した上で、レーザー装置を開発する上で配慮すべき点を紹介する。

レーザーマーカが使用される周囲環境で考慮すべき点は温度、湿度、ノイズ(電源ライン、輻射など)、塵、振動、電源の安定度(瞬停、ふらつきなど)、オイルミスト、接地の有無など多岐に及ぶ。また、要求されるレベルも高く、これらの解決に向けての技術開発に多くの時間を要している。例えば、ファイバとファイバをスプライシング(融着)した後の保護や固定するための構造設計、固定するための接着剤の選定と評価など、FA現場の要求を満たすためには、レーザー発振技術以外に、エンジニアリング分野での検討や開発も必要となる。単にファイバレーザーが机上で発振すれば使用できるということではないことがご理解頂けると思う。

このような環境下であってもさらにファイバレーザー(レーザーマーカ)の要求性能は年々高くなりつつある。例を挙げると、レーザー出力の安定性は少なくとも5%以下であること、レーザーマーカを使用する担当は技術者でないため、安全面では最大限の対策がされていること、24時間稼働を止めることができないため、メンテナンスフリーであること、そして最後に低価格化など、要求が多様化している。

この様な背景の下、弊社が最初に市場投入した第1世代ファイバレーザーマーカ(LP-F10)から現在の主力機の第3世代ファイバレーザーマーカ(LP-V10)について、紹介する。

Fig. 1に第1世代ファイバレーザーマーカの概観、Fig. 2に第1世代ファイバレーザのブロック図を示す。

LP-F10で開発したファイバレーザは、MOPA方式を採用し、MO部分には1060 nmのLDを使用し、2段のプリアンプと1段のパワーアンプ部で構成されている。5 mの伝送ファイバを通してスキャナヘッドにレーザを伝送している。レーザの仕様は、平均パワー10 W、繰り返し周期20 kHz~80 kHz可変である。パルスエネルギーは500 μ J、パルス幅は30 nsecでピークパワーは20 kWに相当する。F160 mmのF θ レンズを搭載し、加工径は ϕ 60 μ mを実現し、ビームモードもM²が1.3以下とシングルモードに近いプロファイルを達成した。

Fig. 3にレーザ波形とプロファイルを示す。MOPA方式を採用したファイバレーザにより、金属にマーキング可能なファイバレーザーマーカが実現した。また、マーキングの分野では金属だけではなく、ICパッケージや樹脂に発色印字するアプリケーションがあり、主にYAGレーザーマーカが使用されていた中で、ファイバレーザーマーカでも同様に樹脂への発色印字が可能となった。

励起用LDも数W(2~4 W程度)の物で長時間のスクリーニングを実施し、故障までの平均時間(MTBF)で数十万時間以上のLDを使用することで、励起用LDの交換を実質上不要なレベルまで上げることが可能となった。当初、LDの寿命はレーザ照射時間の累計で30,000時間と市場にPRしていたが、この数値は、当時では考えられない値であり、信用を得るまでには1年以上の月日を必要とした。1999年の発売以来、現在までに数千台のファイバレー

ザーを搭載したレーザーマーカが市場で使用されているが、励起用のLDが破損したのは数個程度であり破損原因は外的要因で、LDの寿命ではなかった。

この様にFA現場の要求を満たしたファイバレーザーマーカは発売当初より市場に与えたインパクトは大きく、ファイバレーザの優位性は、当社シェアの上昇により証明されたと考えている。

しかし、ファイバレーザでの課題もいくつか出てきている。以下にその一例を説明する。

ファイバレーザにより、金属印字や樹脂発色印字ができるようになったが、Fig. 3に示す波形でも判るように、最初にピークパワーが高いレーザが出て、その裾野を引くようにペDESTELが発生しており、ガウシアンに近い波形にはなっていなかった。この影響で、一部の樹脂に印字した場合、最初のピークパワーで発色し、ペDESTEL部分の熱によって変色する現象が現れた。当時の設計では、MO用LDの出力波形の立ち上がりで、ファイバ増幅器内のゲインを吸収してしまいMO光の後半部分ではゲインが下がってしまったのが原因の1つとして挙げられた。

この問題を改善したのが、第2世代のファイバレーザーマーカLP-F10R(概観はFig. 1と同じ)である。改善点としては、ファイバレーザのMO部をLDから、Fig. 4に示すリング型の共振器に変更し、その後増幅する構成にした。これによりFig. 5に示すガウシアンに近づいた波形を得ることができた。第2世代ファイバレーザの主な仕様は、第1世代ファイバレーザ(MOPA方式)とほぼ同一だが、相違点は、第1世代ファイバレーザよりピークパワーが高いエネルギーを加工(マーキング)に有効に使用できる様になった事である。つまり、物体表面にマーキング(アブレーション)するしきい値以上のピークパワーで使

Fig. 1 Fiber laser marker "LP-F10".

Fig. 2 1st generation of pulsed fiber laser.

Fig. 3 Fiber laser waveform and 3D profile.

Fig. 4 Fiber master oscillator.

Fig. 5 Waveform of 2nd generation Q-sw fiber laser.

用できるエネルギーが増えた結果、樹脂や金属に対して視認性の高いマーキングや一部加工用途にアプリケーションが拡大していった。

第2世代ファイバレーザの波形は、パルス幅が80～100 nsec、ピークパワーは約6 kWである。6 kWという値であれば、十分に金属に加工、マーキングは可能である。また、加工、マーキングに使用できるエネルギーは第1世代ファイバレーザと比べ数倍となり、特に金属へのマーキングの速度を200文字/秒から300文字/秒へ上げる事ができた。

第2世代のファイバレーザーマーカにより課題を解決し、ユーザもファイバレーザの良い部分を肌で感じ認知され、より一層市場に浸透していった。

市場に浸透するにつれて、新たな課題も生まれてきた。その1つは、ユーザサイドの要求がさらに厳しくなってきた事である。マーキングは表面アブレーション加工の1種であるため、削られた部分の状態について、もっとシャープに削って(マーキングして)欲しいという要求であった。また、第1世代ファイバレーザ時の加工用途は、薄板のベンディング加工だけだったが、第2世代ファイバレーザに移行した後、切断/表面除去/穴あけ用途などの加工用途で使用され始めてきた。これは、前述した様にユーザがファイバレーザの良さを認知し、マーキング用途だけでなく、加工用途で使用する事に目を向け始めたと言える。

加工用途として使用するには、マーキングでの要求と同じく、加工痕の状態をいかに良くするかが、課題となる。これらを解決する為の絶対条件はピークパワーを上げることである。パルス幅を狭くする取り組みについて述べると、パルス幅の制限は、前述した伝送ファイバの5 mという長さで起因しており、この長さはユーザの設備環境を考えると最低限必要であり短くすることはできな

い。また、レーザーマーカとしても使用するのでF θ レンズを通してのスポット径が大きくなってしまえばマーキングできない。当社では60 μ m以下のスポット径を結ぶてかつ5 mの伝送が可能な条件を導く必要があった。

伝送ファイバはガラスファイバであり、これ以上パルス幅を狭くすること(ピークパワーを上げる)は非線形効果によるスペクトル幅のみだれや、レーザ波形のみだれ、モードの悪化に直結し、最終的には条件を満たすことができなくなる。そこで、考案したのが現在主流になっている第3世代ファイバレーザーマーカ(LP-V10)である。Fig. 6に第3世代ファイバレーザーマーカの概観を示す。

第3世代ファイバレーザ最大の特徴は、メインの光増幅部を伝送ファイバの先であるスキャナヘッドに組み込んだ事である。これによりFig. 7で示すようなパルス幅30 nsecで20 kWのピークパワーを得られるようになった。パルスエネルギーも約500 μ Jで第2世代ファイバレーザと同じエネルギーにて約3倍以上のピークパワーを得られる結果になった。

このファイバレーザにより、課題であった加工痕の品質向上を実現する事ができた。また、1パルス当たりの加工量が増えたため、マーキング出来るスピードも、700文字/秒と印字スピードを2倍以上に上げる事ができた。

参考までにFig. 8にて各スピードで印字した文字を示す。線幅50 μ m、1×1 mm²の文字‘S’を印字させた例である。700文字/sまでは、視認性の良い条件を保っているが、800文字/sまでくると文字の形が崩れてきていることが判る。文字の崩れはレーザの問題ではなく、ガルバノスキャナとそれをドライブする制御系の課題であると認識している。

Fig. 6 3rd generation of Fiber laser marker.

Fig. 7 Waveform of 3rd generation of fiber laser.

Fig. 8 High speed marking sample.

3. マーキング、加工事例

ここでは、最近のマーキングや加工用途の事例を紹介・解説する。

Fig. 9はステープラーに印字した小文字印字例である。小文字のサイズは $0.2 \times 0.2 \text{ mm}^2$ 、スポット径は約 $30 \mu\text{m}$ で、主に小型の半導体パッケージにマーキングされている。また、小文字印字はコピー品(偽物)との見分けをするために隠し文字印字する用途としても使用されている。

Fig. 10は通常のマーキングではなく金属に直接カラーマーキングをした例である。金属にレーザーを照射し、表面に酸化膜を形成しその厚みを制御して光の干渉を使い、色が付いたかのように見せている。膜厚をnmオーダーで制御しながら色に応じた厚みを成長させている。例えば、酸化膜の厚みが、30 nm:ブラウン、80 nm:ライトブルー、155 nm:ピンク、210 nm:グリーンといった様々な色を表現できている^{1,2)}。

カラー印字に関してはまだ成熟しておらず、今後のアプリケーション開発が待たれる。

Fig. 11は、自動車部品の塗装を剥がすアプリケーションである。白い樹脂の上に黒色の樹脂がコートされており、その樹脂をレーザーで剥離することで下地を出す。そしてバックライトによりマークを浮き出させている。

Fig. 9 Marking sample on staple.

Fig. 10 Color marking sample.

この他に表面剥離(アブレーション)の例としては、透明電極に良く使われるITO膜の除去、銅薄膜の除去によるトリミング、銅ニッケルクロムの除去など、ユーザー側でさまざまなアプリケーション開発が進んできている。

Fig. 12は溶接の社内実験結果を示す。材質はSUS304、厚みは $10 \mu\text{m}$ と $40 \mu\text{m}$ を重ね溶接した例である。50 WのCWファイバレーザを使用し、出力50%で溶接した断面の写真を示す。アシストガスはArを使用し溶接スピードは500 mm/sでの結果である。このように、ファイバレーザの安定度や特徴を生かすことで、高速で薄物の溶接が可能となることを検証できた。

Fig. 13は、切断の社内実験の結果を示す。厚みが $100 \mu\text{m}$ のSUS304を、200 Wのファイバレーザを使用し、2000 mm/sの高速で切断した断面の写真を示す。ドロスが右下方へ流れているのが高速切断を物語っている。

この他にもたくさんの応用例がありここに一部を列記する。ファイバレーザマーカによるマーキング、加工応用として、セラミックのスクライビング、セラミックシート穴あけ、ベンディング、同軸フラットケーブルのストリッピング、バリ取り(半導体部品、樹脂部品、金属部品)、半田付け、そして、樹脂溶着などがある。

Fig. 11 Laser ablation sample for car parts.

Fig. 12 Thin metal welding sample.

Fig. 13 High speed laser cutting sample.

4. ファイバレーザの今後の展開

ファイバレーザーマーカがマーキングだけではなく、加工用途として使用される頻度が上がり、ユーザにおいて既存設備の改良などの検討が盛んに行なわれている。

それらを背景にファイバレーザの今後の展開について3つキーワードを挙げて記述したいと思う。キーワードとして、短波長化、高出力化、そしてそれらを支える要素技術の3つを挙げた。

1つ目の短波長化について述べる。固体レーザのSHG/THGの市場動向では、最近、THGレーザの市場が拡大傾向にあり、矢野経済研究所の推定では2007年度に650台の市場規模と推測している³⁾。この理由として、THGレーザの小型化、高機能化、取り扱い性の向上が挙げられエキシマレーザからの置き換えが進んでいると報告されている。

この現象は、前述してきた、ファイバレーザーマーカが市場に浸透していった過程と似ており、同様のことが、ファイバレーザの短波長化に繋がっていくと考えられる。

ファイバレーザの中で短波長を作り出すことは困難であるが、ファイバレーザによる1064 nm光を元にSHG光を発生させ、それを外部共振器にて266 nm光に変換する技術が紹介されている⁴⁾。短波長化によってTFT(Thin Film Transistor: TFT)基板のアニーリングやセラミック、サファイヤ基板などの切断加工など、半導体、FPD(Flat Panel Display: FPD)分野の市場を獲得していくと考えられる。また、MEMSを含む超小型機能部品への微細加工分野への展開が進むと思われる。

2つ目の高出力化においては、2つの路線があり、いわゆる熱加工分野と非熱加工分野である。熱加工ではkW級のファイバレーザが既に市販されるようになり自動車のボディー溶接や厚板の切断、溶接、アルミ溶接、などほとんどの溶接と切断に利用できるところまで来ている⁵⁾。

また、その牽引役であるIPGホトニクス社においては、米国海軍と380万ドルの契約が成立し、44 kWのファイバレーザシステムを提供する記事が発表され、100 kWクラスのファイバレーザも現実のものになりつつあると感じる。高出力のファイバレーザを使用した加工分野での研究論文も多数見受けられ、熱加工分野でのファイバレーザは数年で確固たる地位を築くことは間違いないと感じる。

これらは、全てCWファイバレーザであり、パルスファイバレーザにおける高出力化は少し遅れ気味な感じを受けるが、MOにリング型ファイバ共振器構造と2段のアンブを備え、バンドル部分に工夫をし、戻り光を抑えた30 WのQ-SWファイバレーザが紹介されており⁶⁾ IPGホトニクスでは100 Wクラスのファイバレーザがすでに発売され始めてきている。いずれも、数十ナノ秒オーダーのレーザではあり、これも熱加工用途として固体レーザの置き換えが可能となっていくと思われる。

高出力における非熱加工という点で最近ではより高いピークパワーを得る研究が活発化してきており、いわゆるピコ秒、フェムト秒といった超短パルス化の研究が多

く見受けられる。超短パルスファイバレーザによる加工は非熱加工の代表のように言われ、その加工例も多く報告されている。特にアイシン精機(株)(IMRA社)のフェムト秒ファイバレーザは、チタンサファイヤレーザと同等の1 W、10 μ J、繰返し周波数100 kHz、700 fsというスペックのレーザをコンパクトにまとめ市販されるまでになった。

このレーザによって、透明ガラスへの穴あけ、硬脆材料への加工などさまざまな実験がされている⁷⁾。その加工品質には非常に素晴らしいものがあるが、加工レートは、まだまだ実用化の領域には達していなく、高出力化が望まれている。

3つ目の要素技術について、短波長化、超短パルス化において重要なのがファイバであり、素材メーカーではPANDAファイバやPCFの開発に力をそそいでいる。

しかし、冒頭で論じたFA市場での要求は厳しいものであり、これに応えるためにはファイバの研究開発だけではなく、短波長化、超短パルス化においてもキーワードとなってくるのが光学部品における損傷の解明と損傷しきい値のレベルアップと考えている。

国際会議等ではなかなか目につかないのが損傷に関する研究であり、唯一アメリカのボルダーで開催されるダメージシンポジウムがこれに相当している。

高出力下でのファイバ損傷の解析⁸⁾、ファイバレーザの損傷メカニズムの検討⁹⁾がなされているが、まだ、全て解明されている訳ではない。ファイバヒューズ、ホットダークニングにしても同様だ。誘電体多層膜ミラーの耐力にしても、ブレイクスルーする技術は未だ出てきてはいない¹⁰⁾。

最後に、ファイバレーザの今後の展望すると、熱加工分野においては近い内にCO₂や固体レーザに置き換わっていくであろうし、その後、短波長、超短パルスファイバレーザによって、計測応用、 μ TAS(Micro Total Analysis System: μ TAS)、MEMSなどの微細加工応用、分析応用などの新しい市場で実用化されて行くと推測される。現在は海外がファイバレーザの牽引役となっているが、是非、研究機関と企業側で力を合わせ推進して日本が次の牽引役になれる事を願う。

参考文献

- 1) 品田 正人, 田辺 郁男, 高橋 智: 日本機械学会論文集 C編 72 (2006) 235.
- 2) 品田 正人, 田辺 郁男, 須貝 裕之, 井山 徹郎: 日本機械学会論文集 C編 72 (2007) 583.
- 3) (株)矢野経済研究所: レーザユーザー/アプリケーション動向調査(矢野経済研究所, 2007).
- 4) 黄 聖鴻, 佐久間 純, 安藤 哲生, 住吉 哲実: 第68回応用物理学会学術講演会講演予稿集(2007) 7a-F-4.
- 5) 福部 博: *Optronics* 304 (2007) 180.
- 6) M. Nakai, K. Shima, M. Saito, and T. Kitabayashi: *Proc. SPIE* 6453 (2007).
- 7) 吉田 睦: *Optronics* 304 (2007) 168.
- 8) S. L. Logunov, G. S. Glaesemann, M. J. Winningham, and D. A. Clark: *Proc. SPIE* 5991 (2005) 713.
- 9) A. Carter, B. Samson, K. Tankala, D. P. Machewirth, V. Khitrov, U. H. Manyam, F. Gonthier, and F. Seguin: *Proc. SPIE* 5647 (2005) 561.
- 10) 木村 信二, 伊沢 孝男: レーザ研究 35 (2007) 142.