ファイバードискレーザとその応用

Development of Fiber Disk Lasers and Their Applications

伊東勝久*・田中彰美*・加瀬彰紀*・小杉英徳*・海老原次郎*
大村和成*・瀬上英明*・宮島博文**・菅 博文**

Katsuhisa ITO, Akiyoshi TANAKA, Akinori KASE, Hidenori KOSUGI, Jiro EBIHARA,
Kazushige OMURA, Hideaki SEUE, Hirofumi MIYAJIMA and Hirofumi KAN

Key Words: Fiber laser, LD bar, Ytterbium, Cutting, Welding

1. 緒言

加工用高出力レーザは最近になって再び脚光を浴びつつある。切断においては従来からよく使用されているCO₂レーザに加え、ファイバー伝送が可能なNd (Yb) : YAG 結晶固体レーザによる3次元加工、溶接においては高速かつエネルギー効率の高いことを理由として、半導体レーザ (LD) 直接集光など、また、高速、高品質溶接を目的にNd (Yb) : YAG 結晶固体レーザ、ファイバーレーザが用いられつつある。これらのレーザの中でも特にファイバーレーザの成長はめざましい。Nd (Yb) : YAG 結晶固体レーザやファイバーレーザはロボットや遠隔で扱い易い石英系ガラスファイバーをレーザ伝送に利用でき、またビーム品質も高い。しかし、YAG 結晶固体レーザは振動に弱い・光軸調整に熟練が必要、出力調節が簡単ではない、などの理由から実際の現場での取扱いが難しいという問題点がある。

一方、ファイバーレーザは、集光性に優れ、発振効率が高く、また小型・軽量で衝撃にも強く、パワー伝送も当然ファイバーを利用できる。そのため産業用レーザとして高いポテンシャルをもっている。

さて、ファイバーレーザとは、光通信でよく知られている光ファイバーの光の通るコア部分に、レーザを発生、増幅させる物質 (レーザ活性物質; 通常 Yb³⁺ イオン) を添加した特殊ファイバーを用い、コア内部のみにレーザ光を発生させるものである。レーザ発生媒体自体が、生まれたレーザ光を閉じ込めて運ぶ性質を持ち、かつ長いので、通常、どのレーザにもつきものの、超高精度を必要とする共振器構造が必要ない。さらに、ファイバーのコアは数~数十 μ m であり、非常に小さいため、高いビーム品質を持つ。しかもビーム形状はほぼ完全な円形で振動、温度外乱などが

加わっても変化しない。そして、発振のエネルギー効率が低い。

従来ファイバーレーザの主流は Fig. 1 に示すようなダブルクラッド構造であり、端面励起であるために効率は 80 ~ 90% という理論値にほぼ近くとれる^{1),2)}。しかしながら、ファイバー端面という非常に狭い領域に励起光を導入する方法では、出力の拡張性が低く、複雑で高価な励起光集光系を必要とする。ファイバーレーザの上記の特徴を生かした加工用レーザを実現するには、ファイバーレーザの高出力化が必要であった。

2. ファイバードискレーザの原理および特徴

ファイバーレーザの高出力化という課題に対して、われわれは 1997 年から NEDO (独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構) の“フォトン計測・加工技術の研究開発”による支援により、ファイバードискレーザ (FDL) を開発してきた。FDL の概念図を Fig. 2 に示す。レーザの中心をなす構成物はわれわれが“ファイバードиск”と呼んでいるものであり、コアにレーザ活性物質を添加したレーザファイバーを渦巻き状に巻くことを基本に整形した“ファイバー構造体”である。このファイバードискには励起光をディスク内部へ導くための励起光導入ポートが数~十数カ所に設けられている。そして、これらのポートの先に励起用の高出力 LD モジュールが設置され、簡単な集光光学系によりポートへ励起光を入射する。ファイバードиск内部では励起光は数十本のドープコアを横断するようにディスクの外周から内周へ向かい、ディスク側面で反射されジグザグに伝搬するように設計、作製されている。励起光はこの伝搬課程でドープコアに少しずつ吸収され、誘導放出光へと変換される。このとき、コアは一つ

* 浜松ホトニクス株式会社レーザグループ (〒431-2103 静岡県浜松市北区新都田 1-8-3)
Hamamatsu Photonics K.K. (1-8-3 Shinmiyakoda, Kita-ku, Hamamatsu-City, Shizuoka, 431-2103 JAPAN)

** 浜松ホトニクス株式会社中央研究所 (〒434-8601 静岡県浜松市浜北区平口 5000)
Hamamatsu Photonics K.K. (5000 Hirakuchi, Hamakita-ku, Hamamatsu-City, 434-8601 JAPAN)

Fig. 1 Schematic diagram of the end pump fiber laser.

Fig. 3 Photograph of FDL module.

Fig. 2 Schematic diagram of the FDL.

ながらであるのがこの方式のエッセンスである。すなわち励起光にとっては数十本もの独立したコアであるが、それぞれの“コア”で吸収されたエネルギーは、結局一つのレーザー光の流れに付加されていくことになる。そのため、投入された励起光は、通常2カ所のファイバー端面からのみ出射される。このようにFDLは原理的にファイバーカプラーなどのコアだけに直接光を導入するビーム結合、整形コンポーネントとは全く異なり、本質的にファイバーレーザーの一種である。そのため、ファイバーディスクに投入する励起光のビーム品質に比べると出射ビーム品質は、指標であるB.P.P (Beam Product Parameter)で、およそ二桁以上の改善が望める。FDLは従来のファイバーレーザーに加えて固体レーザーに広く使われている側面励起による入力拡張性を併せ持った方式とも考えられる。この方法では、ファイバー端面やファイバー1本の側面に比べてはるかに広い面を励起光の導入に利用できるため、高出力のLDバー (LD発光源を横一文字に集積したもの)を励起用に用いることができる。そのため、原理的には低コストで励起パワーを大幅に増やすことが可能で、高出力化が容易である。なお、片方の端面に全反射のミラーのバッチジョイントまたはFBG (Fiber Bragg Gratings)を接続することによって片方からのみ両端面出力の合計を出力することも可能である。

一方、ファイバーレーザーの光-光変換効率は理想的には80%を超え、高効率であるが、数百~数千kWという高パワー励起ではその発熱は無視できない。この点、ファイバーディ

スクでは本体の効率的な冷却のために、作製が容易な平板状の冷却盤をヒートシンクとして使用できる。そして、ファイバーディスク、励起光導入ポート等の構成部品がこれら金属冷却盤間にリジッドに固定させる事が可能なために、振動に強いことも特徴である。このように、ファイバーディスクレーザーは取扱いが容易、高出力化への対応が可能、という設計思想に基づいて開発されてきた。

また、励起用LDモジュールに高出力LDを用いているため、少ない数のLDモジュールで高出力を実現しており、万一LDモジュールに障害が生じて、少ない数のLDモジュール交換でメンテナンスができるところがFDLの特長のひとつでもある。

このファイバーディスクレーザー (FDL)は電気通信大学植田憲一教授の発案からなり、浜松ホトニクス株式会社でレーザー装置として開発・作製してきた。われわれはこのFDLの開発にあたり、特殊ファイバー・高出力LDという素材・部品段階から手がけてきた。そのため、すべてのコンポーネントに関して、詳細な知識が蓄積されているため、購入部品を組み上げて作製したレーザーとは本質的に異なっている。すなわちFDLはアイディアの段階から純国産のファイバーレーザーである、といえる。

3. 500 W ファイバーディスクレーザー

Fig. 3に開発した水冷500 W出力ファイバーディスクレーザーのレーザーヘッド (励起光源とファイバー部品)および加工ヘッド (参考)の外観を示す。このレーザーヘッドは、一般的な19インチラックに収まるようなコンパクトなサイズで、高さは約100 mmである。また、このレーザーヘッドを組み込んだ電源・コントローラ外観をFig. 4に示す。そして、レーザーの主な仕様をTable 1に、また発振特性一例をFig. 5に示す。発振波長は約1100 nm (CO₂レーザーの約1/9、Nd:YAG固体レーザーに近い)、ファイバー端出力は最大CW:580 W、定格500 W、スロープ効率は約70%であった。NAは0.12で、出力ビーム径は64 μm、出射角は約5.1度である。

Fig. 4 Photograph of FDL system.

Table 1 Specification of 500W class FDL.

波長	約 1.1 μm
レーザ出力	CW : 500 W
	QCW : ピーク 500 W, $\sim 1\text{ ms}$, 1 kHz
パルス幅 (QCW)	0.05 $\sim$ 10 ms
周波数 (QCW)	2 Hz $\sim$ 10 kHz
コア径	85 μm
NA	0.12
冷却	水冷式

4. kW 級ファイバーディスクレーザ

ファイバーディスクレーザでは kW 級レーザの製品化も達成した。Fig. 6 に製品化したレーザの入出力特性を、また Table 2 には主な仕様を示す。100 $\sim$ 1000 W 程度まで出力を設定するためには LD への電流を調整するだけで簡単におこなえることもファイバーレーザの特徴の一つである。このレーザのビーム品質 B.P.P は 2.9 mm $\cdot$ mrad（コア径 85 μm のパワー伝送用ファイバー出力光）であり、Fig. 7 に示すように、現在最もポピュラーな高品質ビームの CO₂ 加工用レーザの極限值を上回る特性である。

5. ファイバーディスクレーザの応用例

次にファイバーディスクレーザによる厚さ 0.5 mm の鋼板の切断加工実験の様子および切断サンプルの一例を Fig. 8 に示す。約 120 μm 幅での切断が、最大 14 m/min の速度で可能であった。さらに、1 kW での厚さ 0.5 mm の鋼板と Al 合金：厚さ 1 mm の切断サンプルの写真を Fig. 9(a),(b) に示す。それぞれドロスの少ない切断面である。また、1

Fig. 5 Output characteristics of 500W class FDL.

Fig. 6 Output characteristics of 1kW class FDL.

Table 2 Specification of 1kW class FDL.

波長	約 1.1 μm
レーザ出力	CW : 最大約 1.3 kW, 定格 1 kW
	QCW : ピーク 1 kW, $\sim 10\text{ ms}$, 1 kHz
コア径	85 μm
NA	0.12
冷却	水冷式

kW についてビーム径 $\phi 0.16$ にて厚さ 0.8 mm の SUS 板の重ね溶接をした時の表面の様子 (a) と断面の溶接の様子 (b) を Fig. 10 に示す。Fig. 10(b) より、2 枚の SUS が貫通溶接されていることがわかる。Fig. 11 は FDL によるリモート溶接を行っている様子である。Fig. 12 は高ビーム品質 (2.9

Fig. 7 Beam quality as a function of laser power.

Fig. 8 Photographs of FDL cutting process (a) and cutting steel sample (b).

mm·mrad) の FDL で $\phi 8$ mm の SUS 管をカッティングしている写真である。SUS 管の真上からレーザを照射しているが、簡単に切断することができた。

このように新しい応用が益々進むものと考えられる。500 W 出力では金属薄板の切断加工、数 mm の硬質プラスチック切断加工などに、kW 級以上では精密溶接、重ね溶接に適していると思われる。

6. まとめ

我々は新しいコンセプトに基づいたファイバーレーザ、“ファイバーディスクレーザ”の開発を進めている。これはレーザファイバーをディスク状に巻回した媒体を形成し、非常に広い側面への励起光入力を可能とするものである。そのため励起入力を大幅に増やせ、高出力化が容易な構成である。

これまで、開発してきたファイバーディスクレーザは 1 台で定格出力 CW: 500 W と 1 kW クラスで製品化にも成功

cut surface : SPCC
(0.5mm², pulse mode, 2.4m/min, 1kW)

(a)

cut surface : Aluminum alloy(A5052)
(1mm², pulse mode, 1m/min, peak 1kW)

(b)

Fig. 9 Photographs of FDL cutting surfaces of SPCC (a) and A5052 (b).

lap welding (penetration bead)

SUS304 $t=0.8\text{mm} \times 2$
6m/min
Spot size $\phi 0.16$

(a)

material structure of penetration
welding : SUS304 (cross section)

(b)

Fig. 10 Photographs of lap weld bead surface (a) and cross section (b) of SUS 304.

Fig. 11 Photograph of remote welding by FDL, laser power: 1kW, f: 300mm.

Fig. 12 Photograph of stainless pipe $\phi 8$ cutting by FDL, laser power: 700W, f: 150mm.

した。そして、今後もファイバーディスクレーザの更なる高性能化・高出力化を目的とした開発、製品化を進めていく予定である。

7. 謝辞

本ファイバーディスクレーザの開発は NEDO（独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）の“フォトン計測・加工技術の研究開発”による支援に基づいておこなわれました。また本開発において、研究段階から一貫してご指導頂いた電気通信大学レーザ新世代研究センターの植田憲一教授に感謝致します。

参考文献

- 1) Po H., Cao J.D., Laliberte B.M., Minns R.A., Robinson R.F., Rockney B.H., Tricca R.R. and Zhang Y.H.: High power neodymium-doped single tranverse mode fiber laser, Electron. Lett., 29-17, (1993), 1500.
- 2) Zenteno L.: High-power double-clad fiber lasers, J. Lightwave Technol., 11-9, (1993), 1435.
- 3) Valentin Gapontsev. P. and Igor Samartsev, U.S.Patent, US5999673, (1999).
- 4) 関口宏、伊東勝久、田中彰美、山浦均、菅博文、植田憲一：1 kW 出力ファイバーレーザ、レーザ研究、31-8、(2003)、525.