

高出力ファイバレーザの基礎と特徴

新規事業推進センター 姫野邦治¹

Basics and Features of High-Power Fiber Laser

K. Himeno

高出力ファイバレーザは、ビーム品質、エネルギー効率、スペース効率、出力パワーおよびビームの安定性、信頼性などのあらゆる面において、固体結晶や気体を増幅媒体とする他の高出力レーザより優れており、レーザ加工の分野で主役となりつつある。当社では、長年つちかかってきた光ファイバ関連の固有技術を核に高出力ファイバレーザの技術を蓄積し、今回の小特集に至った。本報告は、今回のファイバレーザ小特集の基礎情報の位置付けとして、高出力ファイバレーザの構成上の特徴について説明し、それらが生み出す利点について特性指標とともに紹介する。

The high-power fiber laser is superior to other high-power lasers with the gain media of solid crystal or gas in all aspects such as beam quality, energy efficiency, space efficiency, stability and reliability, and is getting the major position in laser processing field. Fujikura has grown up high-power fiber laser technologies on the basis of its proprietary optical fiber related technologies and one of the milestone is “special issues on fiber laser” in this Fujikura Technical Review. This report reviews structural features of high-power fiber lasers and the advantages of high-power fiber lasers together with parameters characterizing the advantages.

1. ま え が き

レーザが発明されて半世紀以上が経過し、レーザは光ファイバ通信、光記録、材料加工、医療、分析および計測の分野で著しい技術革新を生んできた。通信および記録とならぶ大きなレーザの応用分野であるレーザ加工の分野において、長らく主役であったのは気体レーザの炭酸ガス（CO₂）レーザや固体レーザのイットリウム・アルミニウム・ガーネット（Yttrium Aluminum Garnet, 以下 YAG と記す）レーザである。ところが、LD の高出力化により、高出力 LD と増幅用 Yb 添加 コア ダブル クラッドファイバを組み合わせた「高出力ファイバレーザ」が実用化され、レーザ加工の分野で主役となりつつある。実際、ファイバレーザの販売金額は、CO₂ レーザの販売金額に肉薄しており、2015 年には CO₂ レーザの販売金額を超えることが予測されている¹⁾。

当社は、光ファイバの研究開発開始から 40 年にわたって光ファイバ通信の分野において様々な光ファイバ関連技術をつちかかってきた。その結果、増幅用ファイバなどの特殊ファイバ技術、ファイバ・ブラッグ・グレーティング（Fiber Bragg's Grating, 以下 FBG と略す）や励

起コンバイナなどの光部品技術、各光部品や光ファイバを接続する光ファイバ接続技術、光通信装置を制御する制御技術といった、ファイバレーザに必要なすべての基盤技術を保有するに至った。

これらの光ファイバ関連技術をベースに当社では 2005 年から本格的に高出力ファイバレーザの研究開発に取り組んできた²⁾。現在では、高出力半導体レーザ（Laser Diode, 以下 LD と略す）、高出力対応光アイソレータなどファイバレーザの高出力化を支える新たな光の要素技術を獲得し、電力・電子分野で応用されてきた放熱技術とあわせて、高出力パルスファイバレーザ、高出力連続波（Continuous Wave, 以下 CW と略す）ファイバレーザ、直線偏光 CW ファイバレーザといった製品ラインアップをそろえるに至った。本小特集では、これらの最新技術および製品の一部を紹介している。

本報告では、高出力ファイバレーザに関する基礎と特徴を解説し、本特集の各報告をお読みいただく上での共通知識を提供する。まず、高出力ファイバレーザの構成を紹介し、高出力を実現する高出力ファイバレーザの構造上の特徴について述べる。次に、高出力化の手法について、レーザの動作モード毎に解説する。最後に高出力ファイバレーザの特性上の特徴および利点と関連する特性指数について述べる。

1) ファイバレーザ事業推進室副室長

略語・専門用語リスト		
略語・専門用語	正式表記	説明
モード	mode	レーザの発振形態。波動方程式の空間的な解（断面内の電磁界分布）を横モード、時間的な解（周波数上の発振スペクトル）を縦モードと呼ぶ。本報告中では横モードの意味で使っており、ある断面における光強度のピークが1か所の場合をシングルモード、複数か所の場合をマルチモードと呼ぶ。
エネルギー準位	energy level	原子などのミクロの粒子がとれる一連のとびとびのエネルギー。主に電子の軌道に依存する。最低のエネルギー準位に対応する準位を基底準位、それより高いエネルギーの状態になることを励起と呼ぶ。

2. ファイバレーザの構成

2.1 ファイバレーザの基本構成

ファイバレーザは、光ファイバを増幅媒体とするレーザであり、希土類元素を光ファイバのコアに添加するのが主流である。図1に希土類添加コア高出力ファイバレーザの光回路の基本構成を示す。複数の励起LDからの光は、励起コンバイナで集められ、増幅用ファイバに導入されコア中の活性元素を励起状態にする。つまり、励起光は励起波長に応じたエネルギー準位に電子を励起する。その後、電子はエネルギーが低く寿命の長い特定準位（準安定準位）に遷移する。十分な励起光強度がある場合、この準安定準位にある電子数は基底準位にある電子数を上回る、いわゆる反転分布を形成する。反転分布の有無にかかわらず、電子が基底準位に遷移する際、両準位間のエネルギー差に応じた波長の光を自然放出（発光）する。

活性元素としては加工用レーザの場合イッテルビウム (Yb) が用いられている。この場合、励起波長として使える光吸収波長は 900-1000 nm 帯に、レーザ発振できる蛍光波長は 1000 ~ 1100 nm に広がっている³⁾。この発光波長帯は、金属材料などにとって光吸収が比較的大きな波長帯であるため、従来のNd添加YAGレーザと同

様、Yb添加コアファイバレーザは材料加工に適したレーザである。

増幅用ファイバの両側に光ファイバのコアに回折格子を形成したFBGがある。FBGは、特定波長を反射するミラーとして働き、片側を高反射率、もう片側を低反射率とすることでレーザ共振器を構成する。この共振器中で、自然放出光のうちFBGで選択的に反射された特定波長成分の光を種として光の誘導放出が起こる。誘導放出された光は、共振器内部を伝搬し両FBGで反射される。この間誘導放出が繰り返されることでレーザ光が生成され、低反射率側のFBG出口よりレーザ光が射出される。

図1に示した光回路に加えて、励起LDを駆動するLDドライバおよびその電源、LDドライバを制御しレーザ光出力を制御する制御回路、励起LDと増幅用ファイバおよび各光ファイバの接続部を冷却する放熱部、これらの部品や回路を収納する筐体部によりファイバレーザは構成されている。

2.2 増幅用ファイバの構造

高出力ファイバレーザの大きな特徴である増幅用ダブルクラッドファイバ (Double Cladding Fiber, 以下DCFと記す) の構造、励起光とレーザ光伝搬の様子を図2に示す。レーザ光パワーの源となる励起光は、第一クラ

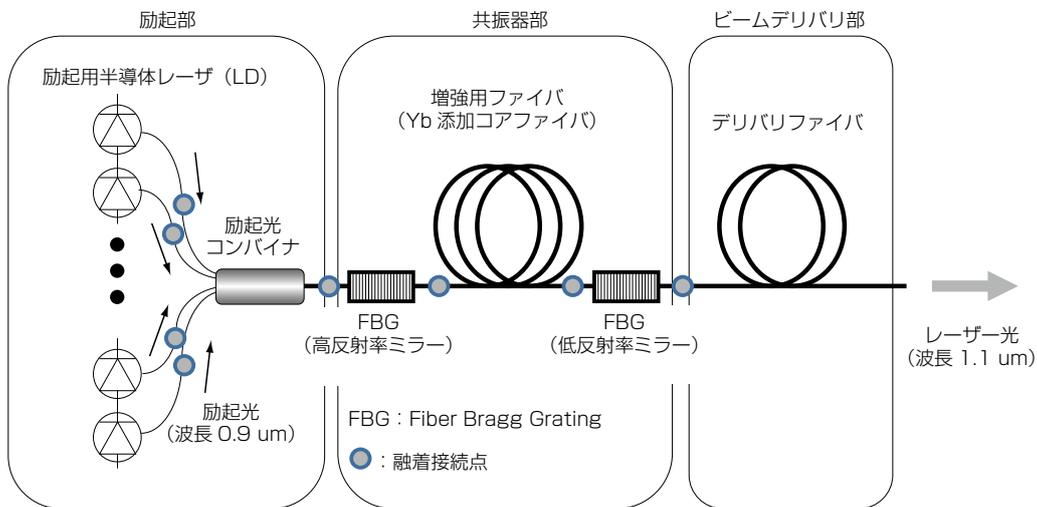


図1 高出力ファイバレーザの光回路の基本構成
Fig. 1. Basic configuration of optical part in high power fiber laser.

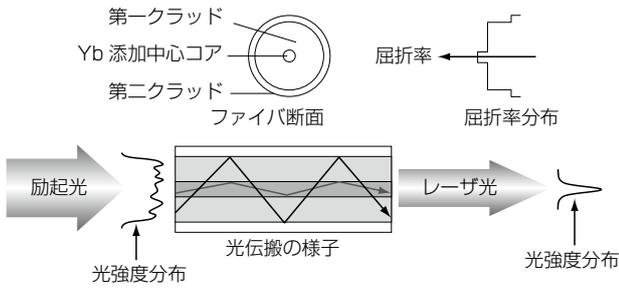


図2 ダブルクラッドファイバの構造と光ビーム伝搬
Fig. 2. Structure of double clad fiber and propagation of light beam.

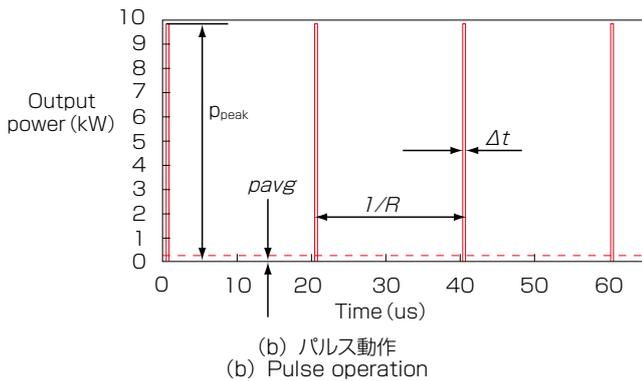
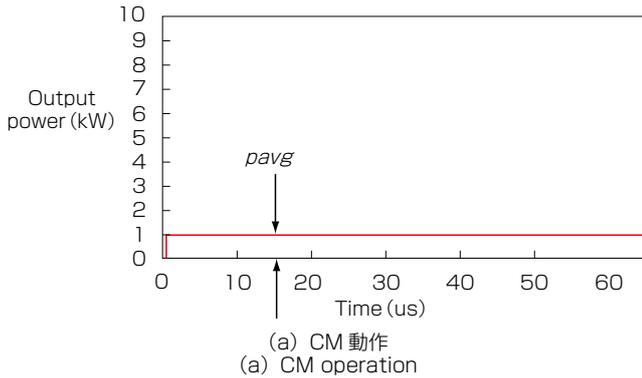


図3 レーザの動作モードに対するレーザ光の時間波形
Fig. 3. Waveform of laser light for respective operation mode.

ッドに入射され、第二クラッドに閉じ込められ伝搬する。コアを通過する際にYb元素を励起し前項で述べた通りFBGによる共振器構成によりレーザ光が発生する。レーザ光は第一クラッドにより中心コアに閉じ込められ、中心コアを伝搬する。

DCFはその第一クラッドの断面積を非常に広くできるため、図1に示すように多数の高出力マルチモードLDを励起コンバイナで結合することで多くの励起光を入射できる。一方で、中心コアの直径は小さくできるため、図1に示した構成のファイバレーザはシングルモード動作が可能である。このため、DCFは集光性に劣った多数のLDの光(マルチモード光)を集光性に優れたレーザ光(シングルモード光)に変換するモード変換器であるともいわれている。これが、DCFを用いたファイ

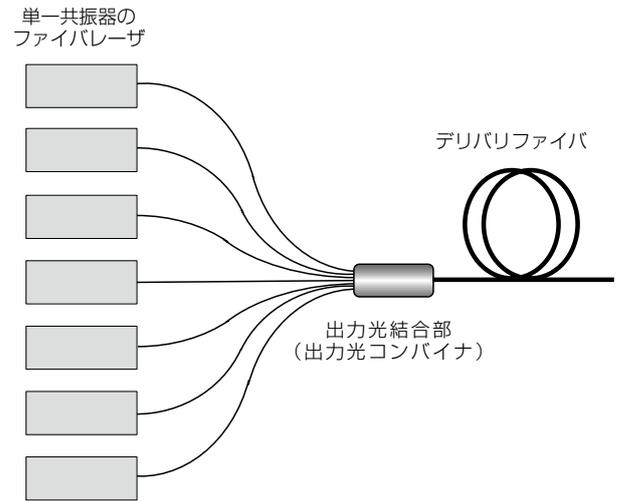


図4 単一共振器のファイバレーザの出力光結合によるファイバレーザの高出力化

Fig. 4. Power enhancement by output beam from single-oscillator fiber laser.

バレーザにより高出力ファイバレーザを実現できる要点である。

2.3 ファイバレーザの高出力化

図3にレーザの動作モードに対するレーザ光の時間波形を示す。図1に示した基本構成のファイバレーザは、一定のレーザパワーを出力するCW動作および数百kHz程度の低速変調動作を行う準CWレーザとして用いられている。CWレーザは切断・溶接などのマクロ的な材料加工に用いられる。

図1に示した基本構成においてCWレーザを高出力化するには、(1)励起LDの高輝度化(高出力化および低NA化)、(2)コンバイナの入力ポート数の増加とDCFのクラッド径の増加が主な方策となる。さらに、図4に示すような単一共振器のファイバレーザの出力ビームを結合させる方法が一般的に用いられている。後述するファイバレーザの特徴を生かすべく、出力結合部は空間での光結合ではなく光ファイバ型の部品で構成される。また、各単一共振器のレーザ出力がシングルモードであっても結合後の出力ビームはマルチモードとなる。

一方、マーキングやパターニングなどの表面加工・微細加工では、材料表面の温度を瞬時に上昇させ蒸発させることが必要となる。このため、図3(b)に示すような、高ピークパワーのパルス動作が必要となる。パルスレーザは、1パルスのエネルギー E 、あるいはピークパワー P_{peak} で特徴付けられ、これらは、平均パワー P_{avg} およびパルスの繰り返し周波数 R 、実効パルス幅 Δt を使って、以下の式で表せる。

$$E = \frac{P_{avg}}{R} \dots\dots\dots (1)$$

$$P_{peak} = \frac{E}{\Delta t} \dots\dots\dots (2)$$

図 1 に示した基本構成のレーザでは特にLDの動作速度の制限から高速なパルス動作が困難である。このため、図 5 に示すような Master Oscillator Power Amplifier (MOPA) 構成を用いることが一般的である。マスターオシレータ (Master Oscillator, 以下MOと記す) 部で生成したパルスのレーザ光を後段のパワーアンプ (Power Amplifier, 以下PAと記す) 部で増幅することにより、高出力のパルスファイバレーザが実現できる。

MO部には高速で直接変調が可能なLDやファイバレーザが用いられる。MO部に用いられるファイバレーザは、図 1 に示す共振器の内部に、音響光学効果や非線形光学効果を用いた変調用の光スイッチを設けてパルス光を生成する。

PA部の構成を図 6 に示す。図 1 の基本構成からFBGを取り除き、信号光パルスをYb添加コアファイバに導入する機構を励起光コンバイナ部に有する構成となっている。被加工物からの反射光パルスがPA部に戻ると、反射光パルスは増幅され高ピークパワーのパルスとなり前段のPA部あるいはMO部に戻る。このパルスが石英ガラスの破壊閾値を超えると、前段部の光部品や光ファイバが破壊されることになる。このため、反射光をPA部に戻さないように、高出力パルスファイバレーザの出射部には光アイソレータが備えられており、MOPA構造の高出力ファイバレーザにおいて、光アイソレータは重要な光部品である。

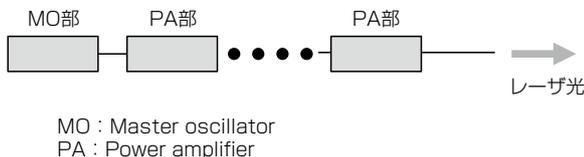


図5 Master Oscillator Power Amplifier (MOPA) 構造
Fig. 5. Master Oscillator Power Amplifier (MOPA) configuration.

3. ファイバレーザの特徴と特性指標

Ybファイバレーザは、出力パワー、レーザビームの集光性、電力効率、スペース効率、出力やビームの安定性、信頼性などのあらゆる面において、固体結晶や気体を増幅媒体とする既存のレーザより優れている。本項では、レーザの性能を示す特性指標について解説しながら、高出力ファイバレーザの特徴と利点を紹介する。

3. 1 高ビーム品質

ファイバレーザからの出射ビームのビーム品質は、共振器を構成するYbファイバの発振横モードが支配的である。コア径と比屈折率差を小さく適切に設計することにより横モード数を少なくすることができるために、ファイバレーザのビーム品質は非常に優れている。

レーザのビーム品質を表す特性指標として、 M^2 値がある。 M^2 値は回折限界の何倍までビームを絞ることができるかを示す。あるビームをレンズなどで絞った時のビームウエスト部分の様子を図 7 に示す。 M^2 は、理想ガウシャンビームと当該ビームのビームウエストでのスポットサイズをそれぞれ w_0 , w とし、理想ガウシャンビームと当該ビームのビームの広がり角をそれぞれ θ_0 , θ として、(3) 式で表される。

$$M^2 = \frac{w\theta}{w_0\theta_0} = w\theta \frac{\pi}{\lambda} \dots\dots\dots (3)$$

このとき、スポットサイズは、理想ガウシャンビームの場合は光強度がピーク強度の $1/e^2$ となるビーム半径で定義され、一般的なビームでは光強度の2次モーメントで定義される。

横モードがシングルモードのファイバレーザの場合 $M^2=1.1$ であり、ほぼ回折限界までビームを絞ることができる。この特性はマーキングやパターンニングなどの微細加工に有用である。また、被加工材料上でのレーザの照射パワー密度を上げることができるため、アルミニウムや銅など従来のレーザでは加工が困難であった材料の

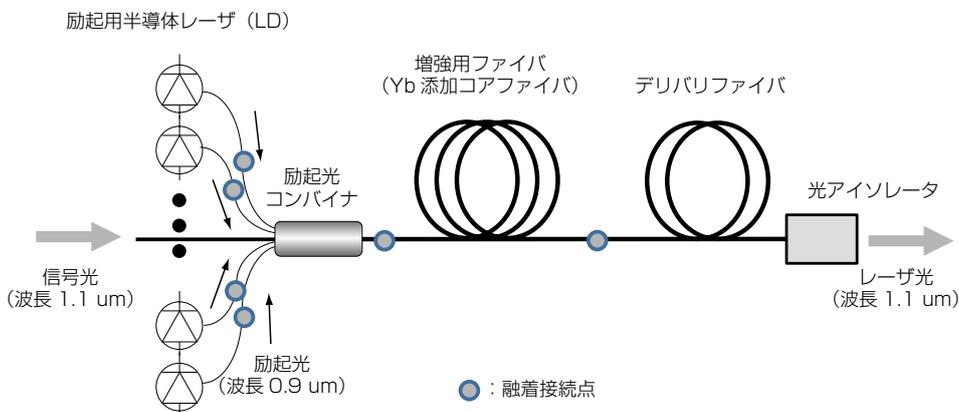


図6 Power Amplifier (PA) の基本構成
Fig. 6. Basic configuration of Power Amplifier (PA).

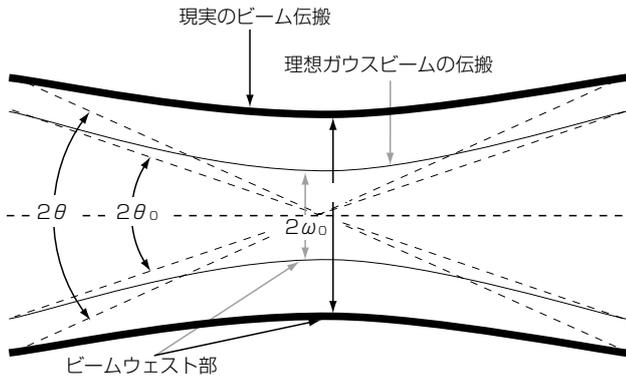


図7 ビームウエスト部のレーザビームの伝搬
Fig. 7. Laser beam propagation at beam waist.

加工も可能となる。逆に同じビーム径で比較した場合、ビームの広がり角を小さくする（焦点距離を長くする）ことができる。この特性は、被加工材料からレーザ出射端を離してガルバノミラーなどを用いて高速に加工を行うリモート加工といった新しいレーザ加工に有用となる。

実際にどの程度までビームを絞ることができるか、長焦点動作できるか、という観点では、ビームパラメータ積（Beam Parameter Product, 以下BPPと記す）という特性指標がもちいられる。BPPは M^2 と(4)式で示す関係がある。

$$BPP = w\theta = M^2 \frac{\lambda}{\pi} \dots\dots\dots (4)$$

CO₂ レーザもビーム品質が非常に優れたレーザであり、 $M^2=1$ も実現できる。しかし、CO₂ レーザの波長は10.6 μmと長いため、 $M^2=1$ のCO₂ レーザでもBPPでは3.4 mm.mradとなる。一方、ファイバレーザの場合、横シングルモードファイバレーザのBPPは0.34 mm.mrad、図3の方法で出力ビーム結合をしたマルチモードファイバレーザでも2.5 mm.mrad程度が得られる。このように実際に得られるビーム径という観点ではファイバレーザがCO₂ レーザよりも優れている。

3.2 高出力・高輝度

YAGレーザなどの従来の高出力固体レーザでは数100 Wを超える高出力になると熱レンズ効果によりビーム品質が低下する。一方、ファイバレーザは直径数100 μmという細い光ファイバを増幅媒体としているため、比表面積が大きく放熱が容易である。このため、ファイバレーザではビーム品質を維持したままでの高出力化が容易である。

ビーム品質を含めた光源としての特性指標が輝度 B であり(5)式で表される⁴⁾。

$$B = \frac{P}{\pi\omega^2 \times \pi\theta^2} = \frac{P}{\pi^2 BPP^2} = \frac{P}{M^4 \lambda^2} \dots\dots\dots (5)$$

前項で述べた通りファイバレーザでは他のレーザに比

べて高出力化の方策が多彩である。図1や図3において、励起LDからの光を出発点とした場合、励起コンバイナや出力コンバイナにおける光結合部では輝度 B は向上することがなく、唯一DCFを含む共振器部分のみに輝度 B を向上させる機能がある。例えば、高出力ファイバレーザの輝度は励起LDの輝度の5000倍以上である⁵⁾。DCFはモード変換器であると同時に高性能な輝度向上器である。

3.3 高エネルギー変換効率

ファイバレーザでは、励起光およびレーザ光が低損失な光ファイバのコアに閉じ込められ導波されるため、励起光およびレーザ光の損失が非常に低い。また、励起LDは電気—光の変換効率が40～50%程度と非常に高い。さらに、Ybファイバレーザでは、Ybの活性元素としての量子効率が非常に高いこともあり、励起光からレーザ光へのエネルギー変換効率は60～75%と非常に高い。これらの理由でファイバレーザは高ビーム品質を維持しながら、高いエネルギー変換効率で高出力レーザを実現できる。

レーザの総合的な効率を表す性能指数の一つとしてウォールプラグ効率（Wall Plug Efficiency, 以下WPEと略す）があり、これは商用電源からレーザ光までのエネルギー変換効率である。WPEは、レーザへの投入電力 P_i とレーザ出力パワー P_o の比で表され、電源およびLD駆動回路の電気—電気エネルギー変換効率を η_{EE} 、励起LDの電気—光エネルギー変換効率を η_{EP} 、励起光やレーザ光の損失を含むレーザ共振器の光—光エネルギー変換効率を η_{PP} として(8)式で表現できる。

$$WPE = \frac{P_o}{P_i} = \eta_{EE} \times \eta_{EP} \times \eta_{PP} \dots\dots\dots (8)$$

典型的な高出力ファイバレーザの場合、 $\eta_{EE}=0.8$ 、 $\eta_{EP}=0.5$ 、 $\eta_{PP}=0.7$ 程度でありWPEは28%となる。CO₂ レーザやYAGレーザの10%程度のWPEと比較すると、高出力ファイバレーザが非常に高効率であることがわかる。ちなみに、ファイバレーザの各部で損失となったエネルギーは熱に変わるため、他のレーザ同様に放熱機構が必要となる。

3.4 小型・軽量

高出力ファイバレーザの共振器は細いファイバと小型の光部品で構成されている。また前項で述べた通り、エネルギー変換効率が非常に高いため、放熱機構や電源を大幅に小型化できる。これらの特徴により、高出力ファイバレーザは従来の高出力レーザに比べて非常に小型・軽量である。

例えば、同じ300 W出力で比較すると、一般的なYAGレーザでは体積0.4 m³、質量300 kgであるのに対して、ファイバレーザでは体積0.08 m³、質量50 kgと大幅に小型・軽量化されている。また、この出力クラスのレーザであれば強制空冷で冷却できることもファイバレーザの大きな特徴であり、外付けチラーが不要とな

るためこの点でも省スペースに貢献する。さらに、4 kW出力で比較すると、CO₂ レーザの体積 2.5 m³、質量 1500 kgに対して、ファイバレーザは体積 1.2 m³、質量 650 kgと大幅に小型・軽量化されている。

3. 5 高安定性・高信頼性

従来のレーザでは、共振器を構成したりビームを加工場所まで伝搬させるために、レンズやミラーが必要である。これらの光学部品は機械的に筐体や定盤に固定されており、振動や衝撃、温度変化などにより位置がずれることがあるため、設置後および定期的にこれらの調整が必要となる。また、これらの光学部品は長期的な使用で汚れたり損傷したりするため、定期的な清掃や交換も必要である。一方、ファイバレーザは光ファイバを融着接続して構成されており、ビームの伝搬にも融着接続された光ファイバを用いる。融着接続箇所は振動や衝撃、温度変化などで動くことはないため、ファイバレーザではビーム品質・出力が安定である。また、空間にビーム通過部分が露出していないため、光部品の清掃や交換の必要がない。いわばメンテナンスフリーということもファイバレーザの大きな特長である。

高出力ファイバレーザが従来の固体レーザに比べて高信頼性である大きな要因は、使用する高出力励起LDの種類および励起LDのシステムとしての使い方にもある。従来のYAGレーザにおいても励起光源としてLDを用いることが可能であり、高出力のLD励起YAGレーザは高出力ファイバレーザ出現以前には材料加工の主流となると目されていた。このLD励起YAGレーザの場合、ほとんどが、1つのチップに発光部が複数あるマルチエミッタのLD (LDバー) を用いている。図8 (a)にLDバーのチップ構造を示す。複数のエミッタはチップ内部にあるため並列接続しかできず、一つのエミッタが故障するとエミッタ全部が光らなくなってしまう。

一方、高出力ファイバレーザでは、使用する高出力励起LDの内部において1チップに発光部が1か所というシングルエミッタタイプが使用される。図8 (b)にシングルエミッタのLDチップの構造を示す。このため、1チップ毎にスクリーニングが可能であり、欠陥の少ないLDチップを選定できる。またチップ間の熱影響がなくチップ設計と熱設計を分離できる。これらは、高出力励起LD自体に高い信頼性を担保している。また、複数の励起LDあるいはチップを用いる場合、各チップは電氣的に直列接続される。このため、1つのチップが故障(短絡)しても他のチップは故障の影響を受けな

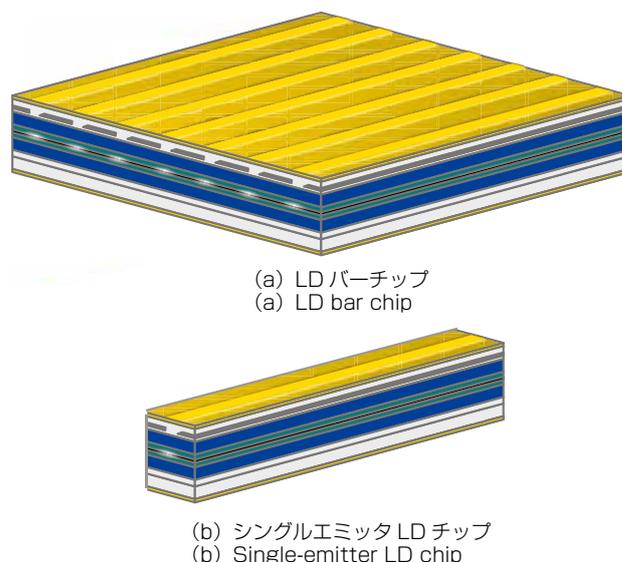


図8 LDチップの構造
Fig. 8. Structures of LD chips.

い。このように、高出力ファイバレーザは使用するLDおよびLDのシステムの観点からも高い信頼性を有する。

4. む す び

高出力ファイバレーザの基礎と特徴について解説した。本報告が今回の「ファイバレーザ小特集」における各報告を理解する一助となれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) A. Noguee: The Worldwide Market for Lasers-Market Review and Forecast 2014, Strategies Unlimited, pp.32, 2014
- 2) 姫野邦治:「ファイバレーザと先進的光技術」, フジクラ技報, pp.33-37, Vol.2, 123号, 2012
- 3) H. L. Pask et. al: "Ytterbium-Doped Silica Fiber Lasers: Versatile Sources for the 1-1.2 mm Region," IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electron., pp.3, Vol.1, No.1, 1995
- 4) 新井武二: レーザ加工の基礎工学, 丸善株式会社, pp.129-130, 2007
- 5) 住村和彦, 西浦匡則: ファイバーレーザー, オプトロニクス社, pp. 133, 2013