

高ビーム品質ファイバーレーザーと加工への応用

吉 田 実

Technologies of High-Beam Quality Fiber Lasers and Their Applications

Minoru YOSHIDA

Fiber lasers are constructed by optical fiber laser medium. The fiber lasers have not only high beam quality but also high efficiency and high cooling efficiency. The beam quality M^2 of the single transversal mode fiber lasers are less than 1.05. Technologies both of the double clad fibers and the high power pumping systems increased fiber laser output power. Therefore, the replacements from the bulk lasers to a novel fiber lasers are being advanced in the industrial laser processing system. This paper will report about fundamental technologies of fiber laser and the recent applications with fiber lasers.

Key words: fiber laser, rare earth doped fiber, fiber amplifier, beam quality, double-clad fiber

産業分野で用いられているレーザー装置は、炭酸ガスやNd:YAGなどバルク型とよばれるものが主流であった。バルク型のレーザー装置は空間光を用いるため、塵埃、温度変化、振動などの使用環境とそれに起因するレーザー装置の光軸ずれ、端面ダメージなどの性能低下に注意を払わなければならない。また、冷却のための配慮が必要であり、付帯する冷却機構の体積がレーザーそのものを上回ることがしばしばであった。

産業分野における、特に固体レーザーの分野を大きく変化させているのが、ファイバーレーザーである。長尺の導波路構造を増幅媒質とすることにより、バルク型レーザーが有する問題点を解決するとともに、高いビーム品質を利用した従来にはない応用を展開しつつある。本稿では、これらの特長を有するファイバーレーザー開発に関して、これまでの流れと技術的な特長、産業応用上の特筆すべき点、ならびに今後の展開について述べる。

1. ファイバーレーザーの技術的背景

1.1 黎明期のファイバーレーザー

ファイバーレーザーが商用として活用されるに至ったのはごく最近であるが、開発の歴史は古く、レーザーが誕生

してわずか4年後の1964年には発振に必要な高利得の確認に成功している。フラッシュランプの周りを螺旋状のファイバーで取り囲み、それらを円筒状の鏡の中に挿入して励起光を閉じ込め、Ndによるパルス増幅を達成している¹⁾。今日のファイバーに求められる条件は満たしていないものの、ファイバーレーザーのコンセプトはレーザー開発の初期から存在していることになる。しかしながら、高効率な励起方式が存在しなかったため、ファイバーレーザーの実用化には時間を要した。

その後、光通信技術の立ち上がりにより、通信用ファイバーの損失が低下し、半導体レーザーの高出力化が進んだことで状況が変化した。基本モードしか伝搬できないシングルモードファイバー (SMF: single mode fiber) を産業ベースで量産できる高度な製造技術が整ったことから、ファイバーのコアに活性元素である希土類元素を高精度に制御してドーピングし、高効率なレーザー媒質を製造できるようになった。また、励起源として利用可能な半導体レーザーの登場により、希土類元素の励起に最適な波長を有する高輝度な励起光をファイバー端面から入射可能となり、励起光もコアに閉じ込めた現在のファイバーレーザーに近い構成による構築が容易となった²⁾。その後、ErをドーピングしたErドーピングファイバーアンプが石英系光ファイバーの

近畿大学理工学部電気電子工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1) E-mail: yoshida@ele.kindai.ac.jp

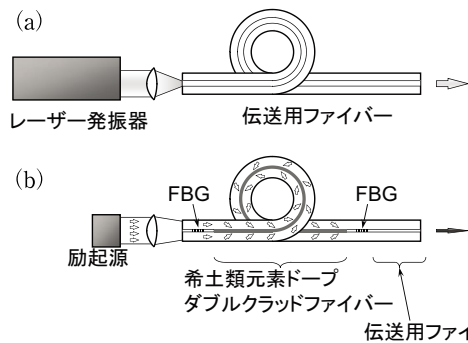


図1 ファイバー伝送型バルクレーザー (a) とファイバーレーザー (b) の相違. FBG: ファイバークレーティング.

最低損失波長である $1.55 \mu\text{m}$ 帯にて波長多重信号を高効率、低雑音、高利得で増幅可能であることから、通信分野において集中的に研究がなされた³⁾。国内においてもきわめて早い時期からこれらの研究を進めた結果、周辺デバイスも含めたファイバーステータ増幅技術の高度化と同時に量産効果も得られ、今日のファイバーレーザー開発のフェーズにつながっている⁴⁾。

1.2 ファイバーレーザーの構造と特長

しばしばファイバーレーザーと比較されるのが、バルク型のレーザー装置から得られたレーザービームをファイバーによりワークまで伝送するファイバー伝送レーザー、あるいはファイバーステータ増幅レーザーとよばれるシステムである⁵⁾。図1 (a) にファイバー伝送レーザーの、(b) にファイバーレーザーの概念図を示す。光ファイバーが伝送可能な光は、ファイバーが有する開口数 (NA) で決まる。しかしながら、厳密には、ファイバー中を伝搬可能なモードは離散的に存在し、ファイバーステータ増幅器から入射したレーザー光がすべての伝搬モードを励振できるわけではない。一方、ファイバーレーザーは増幅媒質がファイバーで作られており、ファイバー内部で発振しているため、多くのモードを高い出力で励振可能となる。そのため、ファイバーレーザーは高輝度な光源となる。

ファイバー中を伝送可能なモードは、ファイバーのおもな構造パラメータであるコア径 ($2a$) およびコアとクラッドの屈折率 (おのおの n_1, n_2) より、式 (1) から求められる規格化周波数 (V) でおおむね決定される。

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1)$$

ことに、 V 値が0次の第一種ベッセル関数が最初に零と交わる解である2.404826以下になると、最低次の基本モードしか伝搬できなくなるため単一モードファイバーとなり、出射パターンはほぼガウシアン状となる。このように、ファイバーレーザーは増幅媒質全体がスペーシャル

フィルターとして作用するため、きわめてビーム品質のよいレーザーを高効率で作成することができる。

高出力なファイバーレーザーは、後述するように、コア断面積を広げるためにコア径を太くしなければならない。その結果、 V 値は大きくなり、マルチモード伝送となる。マルチモード伝送の場合でも、コア内のレーザー輝度は高いため、高いビーム品質を得ることができる。ビーム品質の指標は、集光位置におけるビーム半径 w とビーム広がりの半角 θ の積で表されるビームパラメータ積 $BPP = w\theta$ 、あるいは、波長による最小スポット径の違いを考慮し、 $(\pi/\lambda)BPP$ を計算したビーム品質係数 M^2 で表される。理想的なガウシアンビームの M^2 は波長によらず1となる。シングルモードファイバーレーザーの M^2 はカタログ値などでは1.1未満を謳うようであるが、実力値としては1.03~1.05程度を得られることが多い。

2. ファイバーレーザーの高出力化

2.1 ダブルクラッド構造による高出力化

初期における半導体レーザー (LD) 励起ファイバーレーザーは、コアに LD 光を入射することにより励起を行っていた。励起レーザーは、1985年ごろの10 mW程度から高出力化が進み、横単一モードでも500 mWを超すようになり、さらには偏波合成や波長多重など励起構造の工夫により、コアを直接励起する方法による出力の増加が進められていた⁶⁾。しかしながら、高出力化のためにはさらに大励起入力が必要である。そのため、クラッドを励起光伝送用のマルチモードコア (第一クラッド、ポンプガイド等とよばれる) として扱い、大面積の第一クラッドに横マルチモードの大出力励起 LD から得られる大きな励起入力を入射させ、コアを側面から励起するダブルクラッドファイバーが考えられた⁷⁾。

ダブルクラッドファイバーの構造を図2に示す。右側のファイバー断面に示すようにコア、第一クラッド、第二クラッドの三重構造になっている。屈折率分布は左下にあるように、外側ほど低くなる。多くの場合、コアと第一クラッドには純粋石英を用い、コアに Ge 等をドープすることにより屈折率を高めている。できるだけ多くの励起入力を入射させるため、第一クラッドの NA を大きくしなければならない。そこで、第二クラッドには、低屈折率なポリマーが多用される。

右下に示すように第一クラッドが円形の場合、励起光の旋回成分 (スキュー (skew) 光) がコアと交差しない。すなわち励起に寄与しないので、スキュー光の伝搬を旋回状態から崩すために第一クラッド形状に工夫がなされる⁸⁾。

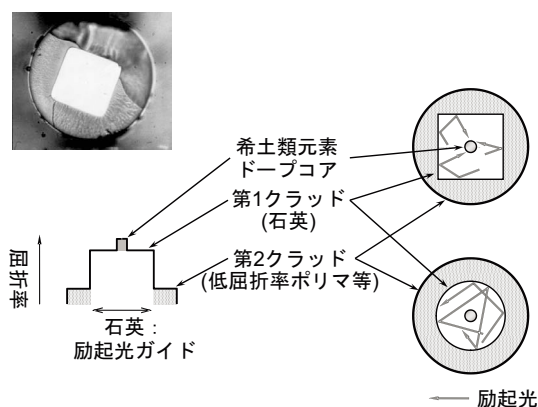


図2 ダブルクラッドファイバーの構造.

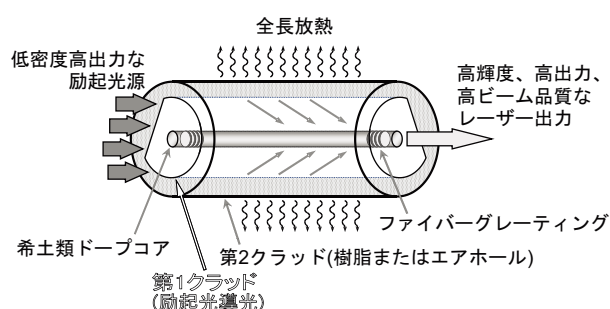


図3 ダブルクラッドファイバーレーザーの構成と特長.

右上は第一クラッドを方形とした模式図であり、左上の写真は方形の一边を $125\ \mu\text{m}$ にて試作したファイバーの断面である⁹⁾。ほかにも、励起効率を高めるためにコアを中心からずらしたり、第一クラッド内に励起光を屈折させたりする構造なども提案されている¹⁰⁻¹²⁾。また、第二クラッドを有しない方形ダブルクラッドファイバーを平面状に巻き取り、第二クラッドを一体化することにより円盤状のレーザー媒質をつくる方法も提案され、実用化されている¹³⁾。

ファイバーレーザーの特徴は図3に示すようなシンプルさにある。コアにファイバークレーティングを書き込めば、特定波長を反射する素子をコア内に作成できるので、外部に光学素子を設けることなく共振器を構成できる。なお、ここで示した第一クラッドの断面は、D型とよばれるスキュー対策を施している。

ダブルクラッドファイバーは、低輝度かつ低品質ではあるが高出力な励起光を、高輝度かつ高ビーム品質なレーザーに変換するビーム品質変換デバイスである。多くの場合、励起光入力はNAが0.5近くまで大きくなるが、コアから得られるレーザー出力は出射スポット径が10～数十 μm でNAは0.1台まで改善できる。また、図3にも示すように、媒質長が長いので、活性領域に比較して表面積が大きく、冷却も容易になる。高出力であり、かつ高いビーム

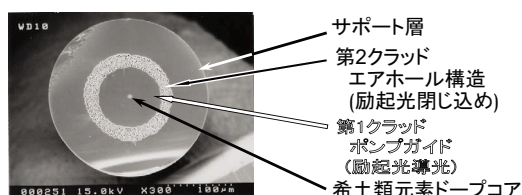


図4 エアホール構造により高NAな第二クラッドを有するダブルクラッドファイバー.

品質は、加工応用が展開する以前には通信用途でも活用が検討されており、数万 km 離れた衛星間の光通信にも展開が検討された¹⁴⁾。

2.2 高励起による出力の増加

ファイバーレーザー出力を高めるには、励起入力が高めなければならない。そのために2つの方向性がある。ひとつは第一クラッドのNAを拡大する方法、もうひとつは多くの励起源を結合する方法である。

第一クラッドのNAを拡大するためには第二クラッドの低屈折率化が必要である。そこで、石英の第二クラッドにエアホールを設けることにより平均屈折率を低下させた構造が開発されている¹⁵⁾。断面構造を図4に示す。エアホール径とピッチの最適化により、最大NAとして0.77を得られている。また、第一クラッド形状にD型などの複雑な形状を利用しなくともクラッド間の界面で散乱が生じるため、コアを効率よく励起できることが確認された¹⁶⁾。第一クラッドにエアホールを設けたダブルクラッドファイバーは、ファイバー端面から雰囲気の出入りが生じたり、通常ファイバーとの融着が困難となるなどの問題が生じたりする。これらの対策を実施した結果、60%を超えるスロープ効率を得られている^{17,18)}。また、伝送路にポリマーを用いていないため、放射線場や高温下あるいは低温下、真空下などにおける耐久性も向上していると考えられる。

多くの励起源を第一クラッドに入射させるには、励起LDをファイバーに結合する方法の開発が不可欠である。図5(a)～(e)に代表的な入射方式を示す。(a)と(b)は端面から励起光を直接入射させる方式である。(b)～(e)は種パルス入射などが可能であり、信号源とパワー増幅部を多段にしたMOPA (master-oscillator power-amplifier) 構造に利用でき、時間的に制御された高出力パルスレーザーにも活用できる。(c)は第二クラッドに設けられたV溝の全反射を利用しており、簡易な構造でありながら10 W程度までの出力を得られる^{19,20)}。(d)は、第一クラッド側にプリズムを設ける方法である²¹⁾。構造的に複雑なためか、多くは用いられていない。

図5(d)は、今日の高出力ファイバーレーザーで主流と

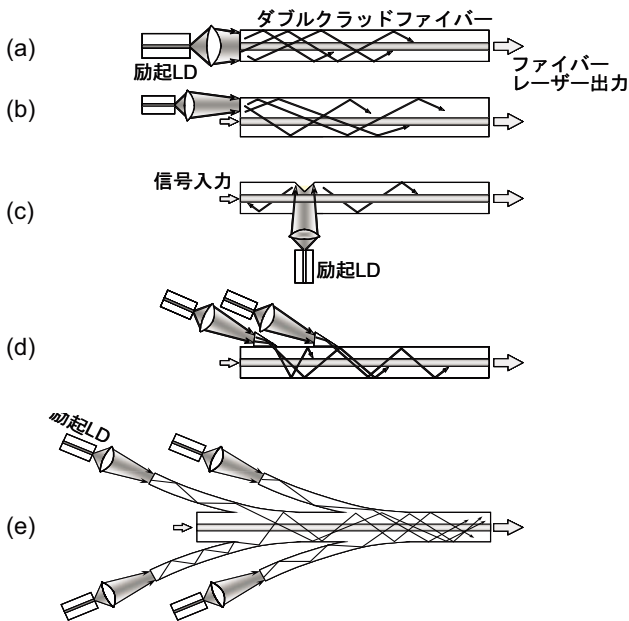


図5 励起入力をもつたための励起構成。

なっている方式である。ファイバー出力型 LD モジュールを単体あるいは多数の LD を束ねて高出力化したファイバー出力を、さらにコンバイナーとよばれるデバイスをもってダブルクラッドファイバーと結合させる。ファイバーを直接第一クラッド側面に突き合わせるように接続する方法も考えられたが²²⁾、実用域に入っているのは何らかの形でテーパ状の構造を作り、緩やかに LD モジュールのファイバーから第一クラッドに励起光をカップリングさせる方法である^{23,24)}。これらの励起方式に加えて、LD 出力ファイバーのコンバイニングにより作られた高出力ファイバーレーザーの出力をさらに束ねて励起源とすることにより²⁵⁾、展示会における発表値であるが、波長 1070 nm において横単一モード出力 9.6 kW のファイバーレーザーが 2009 年に報告されている。

2.3 高効率化のためのドーパントならびにコアの改良

多くの場合、産業用ファイバーレーザーには Yb をドーパしたファイバーが用いられる。Yb を用いる理由のひとつは、従来産業用に広く導入されていた Nd:YAG と発振波長が近い（あるいは含む）ため、置き換えが容易であったという点にある。さらに、発振波長に加えて、Yb にはほかに大きな2つの特長がある。ひとつは、図6の Yb ドープファイバーの分光損失（吸収）特性にみられる励起に利用できる吸収波長（920 nm, 980 nm など）と、発振波長域（1020~1100 nm 前後）が近い²⁶⁾、Nd（励起波長と発振波長がおおの 805 nm, 1050 nm）と比較すると量子欠損が少なく、高効率な励起光から発振光への波長変換、すなわちレーザー発振が可能となることにある。例えば、

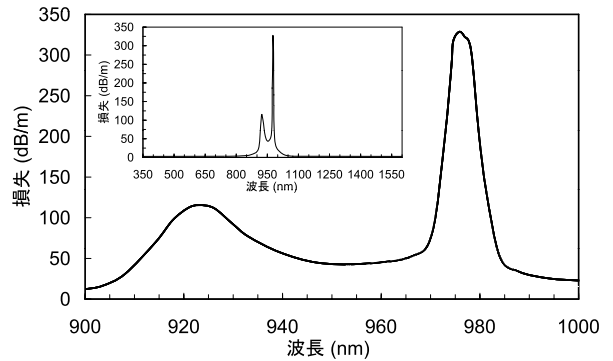


図6 Yb ドープファイバーの吸収損失スペクトル。

Nd の量子欠損が 24%程度に比較し、Yb の 980 nm 励起による 1070 nm 発振は 8%程度である。これにより、ファイバーの発熱も低減され、熱のマネージメントが容易になる。

もうひとつの特長は、吸収の大きさにある。ダブルクラッド構造は、励起光が伝搬する第一クラッドの断面積に対してコアの断面積が狭いためドーパント濃度が低下した状態と等価となり、単位長さあたりの励起光の吸収が低下する。そこで、ドーパントの励起光吸収が高く、かつ高濃度にドーピングできることが望まれる。濃度 1 ppm あたりの励起光の吸収を dB/km で表すと、Nd の 805 nm が約 20 に対して、Yb の 924 nm は約 7、また 977 nm が約 25 となり、Yb は Nd と同程度かそれを上回る吸収をもっている。

また、ドーパントによる吸収は、ドーパント濃度に比例する。Nd を石英にドーパすると 100 ppm 程度で濃度消光が発生する。その対策として Al などを共添加するが、それでも 1000 ppm 程度が上限である。一方、Yb は図6のはめ込み図からもわかるように濃度消光が生じにくく、10000 ppm においても良好にレーザー動作する。しかしながら、Yb を高濃度でドーパすると、フォトダークニングとよばれている出力低下の原因となる。これは、石英中の Yb³⁺イオンの近接により生じるとされており、母材中の Yb の分散状態を制御する方法が提案されている²⁷⁾。

一方、コアを伝搬するパワーが増加すると、ダメージ発生や誘導ラマン散乱 (SRS) に代表される非線形効果や発熱によるレンズ効果による障害が生じる。そこで、コア内の輝度を低減させるために、横単一モード状態を維持したまま、光の伝搬する実効コア断面積あるいは実効モード面積を拡大する方法が用いられる。V 値を 2.405 以下に保った状態でコア径を拡大するには、コアとクラッドの屈折率差を低下させなければならないため、励振方法やファイバー状態の管理を適切に行うことで、V 値を 2.405 よりも高めたファイバーにおいて高次モードの発生を抑えている。前述の

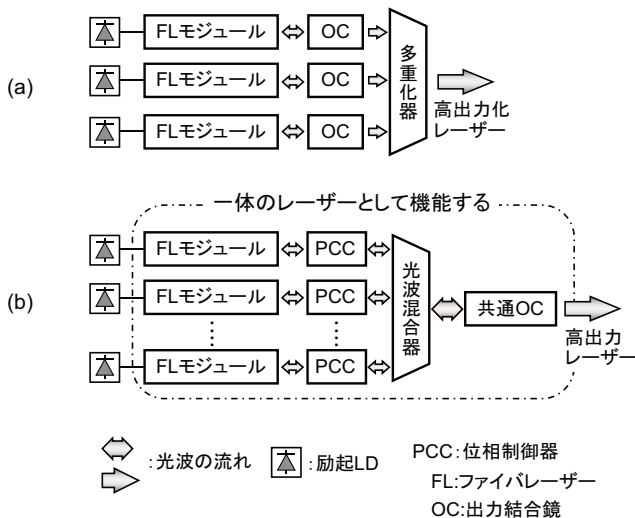


図7 複数のファイバーレーザーを用いた高出力ファイバーレーザーの構成。(a) 単独で発振しているファイバーレーザーモジュールの多重化による高出力化、(b) 複数のファイバーレーザーモジュールを一体の共振器として発振させ高出力化する多重化方式。

9.6 kW ファイバーレーザーではコア径が $30 \mu\text{m}$ といわれており、ピーク出力時に高輝度となるパルスレーザー用に $45 \mu\text{m}$ のファイバーも提案されている²⁸⁾。

2.4 出力の多重化による出力の増加

単一ファイバーからの出力を増加させるために、いくつかの手法がとられ、研究されている。ひとつは、図7 (a) に示すような、ファイバーレーザー発振によって NA の小さくなったレーザー光をファイバー型のコンバイナーで束ねる方式である。もうひとつは、図7 (b) に示すような位相結合方式を用いて複数のファイバーレーザーを単一のレーザーとして振る舞わせる方法である。また、複数のレーザーを単一のレーザーとして発振させる方法に、多波長同時発振がある²⁹⁾。図7 (b) の光波混合器の部分に、AWG (arrayed wave guide) に代表される波長の異なるファイバー出力を単一のファイバーに合波するデバイスを用いることにより、(位相制御器 (PCC) を用いずに) 単一の出力結合鏡 (OC) ですべてのファイバーレーザーモジュールを発振させ、波長多重化された高出力光を得る方式である。このとき、AWG が波長チューナーとして働き、各ファイバーレーザーモジュールは自動的に最適波長で発振し、効率よく波長合波される。

次に、8 台のファイバーレーザーモジュール (FLM) の位相結合を例に説明する。FLM は 2×2 (2 入力 2 出力) のファイバーカップラー 7 個をツリー状に多段構成し、次に各ファイバーカップラーにおける位相を PCC により制御することにより、カップラーの 2 入力を 2 出力のうちの 1 つの出力のみに結合する。順次結合を進め、最終的にす

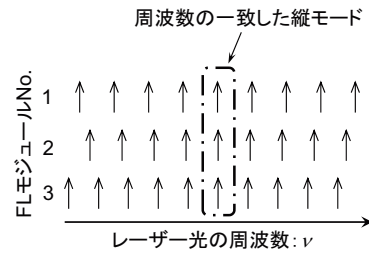


図8 縦モードの分布からみた位相結合の概念図。

べての発振を共通の OC によって生じさせる。この際、図8 に示すように、すべての FLM が発生させる縦モードのうち、周波数 (スペクトル) が一致する縦モードのみが位相結合可能な縦モードとなる。そのため、結合する FLM 数が増加するにしたがい位相結合に必要なスペクトルのエンベロープが広がり、次第に発振が困難となる。その結果、偏波モードに分離して時間的に不安定な動作をすることが明らかになっている³⁰⁾。現在、これらを解決するための手法も検討が進められている³¹⁾。

2.5 高出力パルスファイバーレーザー

ここまで高平均出力なファイバーレーザーについて述べてきたが、高利得なファイバー型増幅媒質を用いると、ピーク出力の高いパルスレーザーを構成可能である。しかしながら、ピーク出力を高めると SRS や誘導ブリュアン散乱 (SBS) によりファイバー出力が上がらなくなるので、この対策が重要となる。

非線形対策として、伝搬光の実効的な直径であるモードフィールド径 (MFD) を拡大して輝度を低下させなければならないが、コア径の縮小により単一モード状態を完全に維持したまま MFD のみを拡大する手法が提案されている。また、SRS 抑制のためにファイバー構造を制御し、ストークス光の発生する波長の損失を高め、さらには SBS 抑制のために種パルス光源にチャープを発生させる方法なども検討された。これらの対策を総合的に利用し、多段にファイバー増幅することによって、パルス幅約 1 ns でピーク出力 10 kW のパルスの発生に成功している³²⁾。

MFD が約 $10 \mu\text{m}$ のシングルモードコアから得られた 10 kW 出力は、集光位置において 13 GW/cm^2 のきわめて高い輝度を得られる。この高輝度を利用して難加工材料のひとつである厚さ $54 \mu\text{m}$ のタングステン板に穴開け加工を行った結果の、断面 SEM 写真を図9 に示す。直径約 $13 \mu\text{m}$ のストレートな穴開け加工ができており、入射端付近における溶融などの熱侵襲も生じていないことがわかる。フェムト秒レーザーによる加工には及ばないものの、ナノ秒のパルスでも高輝度化すれば分解能の高い加工が可能となることがわかる。

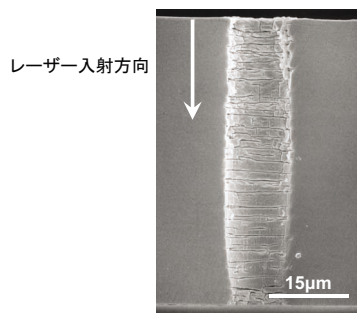


図9 シングルモードコアから得られた10 kWパルス光による微細加工. タングステン板に開けられた深穴の縦断. 穴径13 μm, タングステン厚54 μm.

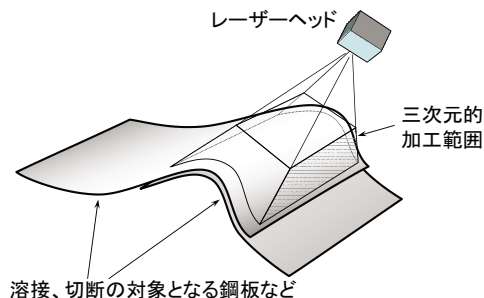


図10 ファイバーレーザーを利用したリモート溶接あるいはリモート切断の概念図.

3. ファイバーレーザーの応用と今後の展開

3.1 ファイバーレーザーの特長を利用した産業応用

ファイバーレーザーの最大の特長は、高輝度なレーザー光を、可撓性を有するファイバーにより伝送できる点にある。また、ファイバーレーザーを用いなくとも、レーザー溶接は抵抗スポット溶接と比較して速い打点速度をもつとともに、電極の届かない袋部分などの溶接が可能である。

従来のバルク型レーザーは、照射部位の輝度を高めるために F 値の小さな (すなわち NA の大きな) レンズを用いてワークに照射している。実用的な口径のレンズを使用すると、ワークとレーザーヘッドの距離は近くなり、レンズをスパッターから保護する目的を兼ねてアシストガスを吹き付ける必要がある。また、焦点深度が浅いため、レーザーヘッドをワークに対して仰るように移動させなければならない。

一方、ファイバーレーザーは輝度が高いため、 F 値の大きなレンズを用いることが可能となり、離れた位置からのレーザー照射が可能となると同時に、焦点深度が深くなる。この特長とガルバノミラーによるスキャニングとの併用によって、レーザーヘッドを移動させることなく、図10に示すような三次元的領域の加工が可能となる³³⁾。また同時に、レンズ保護のためのアシストガスは不要となる。このような溶接はリモート溶接あるいはスキャナー溶接等とよばれており、従来のレーザー溶接と比較してさらに溶接速度を高速化でき (打点速度は0.3 s/打点に達し、抵抗スポット溶接の約10倍となる)、生産性が向上する。なお、リモート溶接に必要なレーザー品質としてはBPPが8~9 mmmrad以下の輝度が必要である。また、自動車分野で用いられる厚さ2 mm程度までの鋼板の溶接には、4 kWの出力が求められる³⁴⁾。ビーム品質の高さだけを問えば、ディスクレーザーもこれに適用できるが、レーザーヘッド移動のフレキシビリティを考慮するとファイバーレーザーが有利と考えられる。

3.2 短波長発生

例えば電子産業では、銅の吸収が高いグリーンレーザーが求められる。バルクのレーザーは偏波面が安定であるため、高調波発生結晶などを利用することにより、Nd:YAGの二倍波を得ることは容易である。しかしながらファイバーレーザーは、偏波面保存ファイバーを用いない限り、偏波は不確定である。一方、偏波面保存ファイバーを用いて偏波を固定すると、非線形効果が生じやすくなる。そこで、ファイバーから基本波で可視レーザーを発振させる試みが進められている。

この分野で注目されるのが、非石英系の新しいレーザー媒質である。特に $\text{AlF}_3\text{-YF}_3\text{-PbF}_2$ はZBLANと比較してきわめて耐候性の高いフッ化物ガラスであり、Prをドープした媒質をGaN系の短波長LDにより励起し、488 nm, 523 nm, 605 nmの発振に成功しており、さらに高出力化の検討も進められている^{35,36)}。これらの材料をファイバー化できれば、結晶の寿命などを考えることなく高輝度、高効率かつメンテナンスフリーな可視光ファイバーレーザーを開発できるものと考えている。

ファイバーレーザーは、これまでのレーザーが有していた取り扱いにくさや耐久性、エネルギー効率などの問題点を解決し、新規な産業分野を切り開く新しいマザーマシンといえる。高出力化については横単一モードで10 kW、多モードで50 kWが報告されており、ほぼ達成した感がある。一方、発振波長域の展開とパルス波形などの時間制御にはまだ残された課題があると考えている。

日本は、通信分野におけるファイバー光増幅分野の研究開発では先進的な存在であった。同時に、これらの開発過程で培った高度な光技術と産業の裾野が存在する。しかしながら、新しい産業分野として単独で、あるいは他の技術や産業を支える基礎技術として重要な存在である光産業は、そのポテンシャルを生かし切ることができていない。

例えば、国内においてファイバーレーザーの今後の展開

を願うならば、光ファイバーを独自に開発できる設備が必要であるが、大学において大手ファイバーメーカーに伍する母材からファイバー線引きまでの一貫工程を有している研究施設は一か所しか思いつかない³⁷⁾。一方、政策的に光とレーザーの研究開発と産業展開を進めているドイツでは、高度な研究に対応できるファイバー開発施設が各所の大学等に設けられている³⁸⁾。今の段階であればまだ間に合う可能性は十分にある。本邦においても光産業の将来について十分な議論が求められる時期だと考える。

文 献

- C. J. Koester and E. Snitzer: "Amplification in a fiber laser," *Appl. Opt.*, **3** (1964) 1182-1186.
- R. J. Mears, L. Reekie, S. B. Poole and D. N. Payne: "Neodymium doped silica single-mode fibre lasers," *Electron. Lett.*, **21** (1985) 738-740.
- M. Yoshida, H. Ohizumi, T. Koyama, T. Gozen, H. Tanaka and M. Yotsuya: "Development of compact Er³⁺-doped fiber amplifiers for practical applications," *Optical Amplifiers and Their Applications*, WD1 (Optical Society of America, 1990).
- 吉田 実, 御前俊和, 田中紘幸: "光ファイバアンプ", レーザー研究, **22** (1994) 292-301.
- (財)製造科学技術センター: "高品質化した加工用レーザーと開拓される新加工領域に関する調査研究報告書", (財)機械システム振興協会 (2008) p. 87.
- 吉田 実: "高出力 Er ドープファイバアンプ", レーザー研究, **25** (1997) 114-120.
- H. Po, E. Snitzer, R. Tumminelli, L. Zenteno, F. Hakimi, N. M. Cho and T. Haw: "Double clad high brightness Nd fiber laser pumped by GaAlAs phased array," *Optical Fiber Communication Conference, Vol. 5, OSA Technical Digest Series*, paper PD7 (Optical Society of America, 1989).
- M. H. Muendel: U. S. Patent No. 5533163 (1996).
- Y. Hirano, Y. Shoji, K. Koyata, M. Yoshida, T. Araki and Y. Hisada: "Multiwatt operation of square-shaped double-clad Nd-doped fiber amplifier," *Conference on Laser and Electro-Optics, CTh058* (Optical Society of America, 1998).
- E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi, R. Tumminelli and B. C. McCollum: "Double clad, offset core Nd fiber laser," *Optical Fiber Sensors*, PD5-1 (New Orleans, 1998) pp. 533-537.
- A. Martinez-Rios, A. N. Starodumov, H. Po, Y. Wang, A. A. Demidov and X. Li: "Efficient operation of double-clad Yb³⁺-doped fiber lasers with a novel circular cladding geometry," *Opt. Lett.*, **28** (2003) 1642-1644.
- D. J. DiGiovanni: U. S. Patent No. 5949941 (1999).
- K. Ueda and A. Liu: "Future of high-power fiber lasers," *Laser Phys.*, **8** (1998) 774-781.
- T. Miyazaki, K. Inagaki, Y. Karasawa and M. Yoshida: "Nd-doped double-clad fiber amplifier at 1.06 μm ," *J. Lightwave Technol.*, **16** (1998) 562-566.
- 山本哲也, 楠 修一, 小柳繁樹, 伊藤秀明, 藤田盛行: "大口径マルチモードフォトニック結晶ファイバ", 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, C-3-36 (2003).
- 二口和督, 小柳繁樹, 山本哲也, 伊藤秀明, 藤田盛行: "ダブルクラッドファイバにおける第一クラッド形状による吸収損失の変化", 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集エレクトロニクス (1), C-3-65 (2003).
- J. Maeda and M. Yoshida: "Photonic crystal fiber laser," *Optical Fiber Communication*, OFB1 (Optical Society of America, 2005).
- 伊藤秀明, 山本哲也, 二口和督, 吉田 実, 藤田盛行: "ダブルクラッドファイバレーザーの開発", 三菱電線時報, **101** (2004) 21-24.
- L. Goldberg and M. L. Flohic: U. S. Patent No. 6603791B2 (2003).
- S. Bordais, S. Grot, Y. Jaouen, P. Besnard and M. L. Flohic: "Double-clad 10-W Yb³⁺-doped fiber master oscillator power amplifier for He³⁺ optical pumping," *Appl. Opt.*, **43** (2004) 2168-2174.
- Th. Weber, W. Luthy, H. P. Weber, V. Neuman, H. Berthou and G. Kotrotsios: "A longitudinal and side-pumped single transverse mode double-clad fiber laser with a special silicone coating," *Opt. Commun.*, **115** (1995) 99-104.
- E. Snitzer, H. Po, R. P. Tumminelli and F. Hakimi: U. S. Patent No. 4815079 (1989).
- V. P. Gapontsev and S. Igor: U. S. Patent No. 599673 (1999).
- D. J. DiGiovanni and A. J. Stentz: U. S. Patent No. 5864644 (1999).
- J. Hecht: "Fiber lasers ramp up the power," *Laser Focus World*, **45**, No. 12 (2009) 53-57.
- 金屋大祐, 二口和督, 前田純也, 山本哲也, 吉田 実: "1 μm 帯波長可変 Yb ドープファイバレーザー", 2003年電子情報通信学会総合大会 (2003) C-3-70.
- 杉山誠一, 堀内佑哉, 村上元一郎, 吉田 実, 中野人志, 藤本 靖, 前田純也, 菅 博文, 佐藤龍弘: "フォトダークニング抑制を目指した高濃度 Yb-Zeolite ドープシリカファイバの開発", 平成 22 年電気関係学会関西支部連合大会 (2010) 4A202-6.
- M. E. Fermann: "Single-mode excitation of multimode fibers with ultrashort pulses," *Opt. Lett.*, **23** (1998) 52-54.
- 河南慎哉, 吉田 実: "発振波長自動最適化波長多重ファイバレーザー", 電気学会論文誌 C, **129** (2009) 1985-1989.
- 吉田 実, 山本優生, 河南慎哉, 山本純平: "位相结合ファイバレーザーの波長ならびに偏波不安定性", レーザー研究, **38** (2010) 895-902.
- 山本優生, 吉田 実: "位相结合により多重化されたファイバレーザー出力の時間ならびに偏波不安定性", 平成 22 年電気関係学会関西支部連合大会 (2010) 4A202-5.
- 吉田 実, 澤田 久: "シングルモードファイバ出力 10 kW 高出力パルス光源の開発", レーザー研究, **35** (2007) 793-798.
- 森 清和: "自動車製造におけるレーザー加工技術の応用事例と展望", 第 71 回応用物理学学会学術講演会 (2010) 19p-M-2.
- (財)製造科学技術センター: "高品質化した加工用レーザーと開拓される新加工領域に関する調査研究報告書", (財)機械システム振興協会 (2008) pp. 58-60.
- Y. Fujimoto, O. Ishii and M. Yamazaki: "Multi-colour laser oscillation in Pr³⁺-doped fluoro-aluminate glass fiber pumped by 422.6 nm GaN-semiconductor laser," *Electron. Lett.*, **45** (2009) 1301-1302.
- J. Nakanishi, T. Yamada, Y. Fujimoto, O. Ishii and M. Yamazaki: "High-power red laser oscillation of 311.4 mW in Pr³⁺-doped waterproof fluoro-aluminate glass fiber excited by GaN laser diode," *Electron. Lett.*, **46** (2010) 1285-1286.
- 藤本 靖: "Bi ドープシリカガラスとその光ファイバ", レーザー研究, **38** (2010) 869-875.
- (財)製造科学技術センター: "産業用次世代レーザー応用・開発に関する調査研究報告書", (財)機械システム振興協会 (2009) pp. 194-199.

(2010年11月11日受理)