次世代高出力ファイバレーザ*

植田憲一**

What is the Next Generation of High Power Fiber Lasers ? /
Ken-ichi UEDA

Key words: fiber lasers, material processing, high power, laser-diode pumping

1. はじめに

1999年、米国ではファイバレーザの研究が大きな注目を浴びた。それは、単一モード110Wの高出力の達成¹⁾、超短パルスファイバレーザの高出力化²⁾、フォトリックファイバによるスーパー白色光の発生³⁾など、ファイバレーザの潜在能力が一斉に顕在化したからである。そして、ファイバレーザの出力がkW級⁴⁾に達するならば、加工用レーザの本命はファイバレーザとなる可能性がきわめて大きいことが、だれの目にも明らかになった年であった。

元来、光通信に開発されてきたファイバレーザは、光信号の増幅器として認識されたので、ソリトンのような超短パルスを増幅伝播させても、エネルギーを運んで高平均出力を発生するには不適であると考えられてきた。しかし、そのような考えは学問的な基礎から生まれたものではなく、単に光通信という応用の中だけで物事を見たことによる偏見であった。高出力ファイバレーザの発達の歴史は、従来のファイバレーザ技術そのものの偏見を打ち破る歴史であるともいえる。我が国でも工業技術院の支援の下、日本オリジナルのアイデアで世界初のkW出力ファイバレーザを目指した研究が進められている。

この解説では、kW出力ファイバレーザの概念と将来を紹介する。

2. レーザ加工とファイバレーザ

フォトン加工のプロジェクトを開始するに当たり、将来のレーザ加工のあり方について議論をした。レーザ加工の専門家にとって、高出力、高品質のレーザビームは必要だが、レーザ装置はむしろ邪魔である。同時に、レーザ加工の能率を決めるものは、加工ヘッドの質量であり、高速駆動のために軽量ヘッドが必要である。このような観点から、ファイバ導光が絶対的な要求であった。レーザ加工の現場で要求されていたものを具現化すると、図1のようになった。つまり、現在の電気配線のごとく、工場の一角に大出力のレーザステーションがあり、そこから加工現場まではファイバでレーザ光を供給する。この場合、ファイバそのものが発振するファイバレーザが加工用レーザとして最適なのは自明である。固体レーザを発振させて、それをファイバに分配しながら入射させるというのは、不合理である。

図1 レーザ加工の観点からはレーザパワーステーションで発生したレーザパワーをファイバで加工現場に供給するのが理想的である。

* 原稿受付 平成11年10月1日

** 電気通信大学レーザー新世代研究センター（調布市調布ヶ丘1-5-1）
大阪大学工学修士、東京大学理学博士、日本電子開発本部、上智大学助手、電通大レーザー研・助教授から教授、現在、レーザー新世代研究センター・センター長、核融合用レーザ、重力波検出用レーザ、LD励起固体レーザ、ファイバレーザ、超高性能光学素子などを研究

図2 矩形断面2重クラッドファイバレーザのクラッド励起は、LDの励起光から高品質のレーザ出力に効率的に輝度圧縮をする。

1993年にボラロイド社が矩形断面2重クラッドファイバレーザから5 W⁵⁾の出力を報告したのが、ファイバレーザがレーザ加工に利用可能だと示した最初かも知れない。それまでのEr添加とは異なりNd添加型であり、高出力半導体レーザ(LD)バーで励起されたからである。しかし、この論文では矩形断面の理由は、高出力LDバーの出力ビームが矩形状をしているので、結合効率を上げるために矩形断面を採用したとある。その後、我々が研究したところによると、励起ビームの吸収過程の理論的研究からは、矩形断面はLDバーとの結合効率というよりも、クラッド伝播する励起光を空間的ホールバーニングなく吸収するために最適形状⁶⁾であったことが分かった。この観点からいえば、正方形断面が理想的である。

改めて、クラッド励起ファイバレーザを見てみよう。図2に示すように、ビーム品質の悪いLDは10 μm 以下の直径のファイバコアに集光することは不可能である。しかし、数百 μm 角の第1クラッドに集光し、クラッド内を伝播させることは比較的容易である。励起光は第1クラッド内を伝播して行くうちに、中心コアに添加された希土類イオン(NdまたはYb)に吸収される。クラッドに入射した励起光が均一に吸収される場合には、コアの吸収係数を α 、コアとクラッドの断面積を A_{core} 、 A_{clad} とすると、実効的吸収係数は $\alpha_{\text{eff}} = \alpha A_{\text{core}} / A_{\text{clad}}$ と書ける。結局、励起光を完全に吸収するには、 $A_{\text{clad}} / A_{\text{core}}$ 倍の長さが必要になる。典型的な例では、クラッドとコアの断面積比は1000倍であるので、50 mの長さのファイバレーザは励起光を完全に吸収する。長大な増幅長を持つファイバレーザはわずかのフィードバックでレーザ発振をするので、共振器を構成するのはファイバ端面の表面反射である。実際に実験を行った結果を図3に示す。レーザ発振の波長に対する高反射率ミラー(HR)をつけて片側から出力させた場合、58.6%のスロープ効率で発振した。発振しきい値(P_{th})は200 mWでファイバレーザの損失の少なさを示している。両側をフレネル反射のみにした場合、一方向から36.6%の効率の出力、すなわち、両端の出力を合計すると73%の効率でレーザ光はレーザ媒質から光を引き抜いたことが分かる。Ndイオンの量子効率が78%であることを考えると、ほとんど理想的にレーザ発振にエネルギー

図3 クラッド励起ファイバレーザの出力特性
ファイバの端面反射だけで両端出力をして、スロープ効率73%はNdイオンの量子欠損78%にきわめて近い。

が移行した。出力(P_o)は1.86 Wと少ない。しかし、これは世界最高効率の発振であり、LDを増強して大きなパワーで励起すれば高出力が出ることは当然である。この時、励起光からレーザ発振までの輝度圧縮率は700倍⁷⁾であった。パワー密度は100 MW/cm²を上回るので、誘導ラマン散乱が発生して長波長ヘシフトするが、ラマン光も同じようにコアに閉じ込められて伝播するため、レーザ加工のようなパワー加工には影響がない。

3. キロワット出力ファイバレーザの概念⁸⁾⁹⁾

ファイバレーザの出力を制限するものは励起入力(P_p)である。クラッド励起はコアの直接励起に比べて1000倍も広い断面積から励起するが、それでも一種の端面励起であることに変わりない。そして、ファイバの端面は全体から見れば非常に小さな面積である。さらに大きな励起パワーを注入しようとする、ファイバの広大な側面を利用すべきである。しかし、これまでファイバレーザを側面励起する試みはなかった。なぜだろう。ファイバレーザを側面から見ると、コアの直径は10 μm 以下で励起パワーはほとんど透過してしまい、効率の良いレーザ発振を望むことはできないと考えられていた。これには通信用ファイバのイメージが強く影響していた。すなわち、通信におけるファイバとは信号を伝えるものなので、基本的に電線のように長く伸びた形状を思い浮かべてしまうからである。

しかし、ファイバレーザの特質をよく考えると、①レーザ発振はコアの内部に、②励起光は第1クラッドに閉じ込められているために、どのような形状をとっても低損失で光伝播が保証されている。さらに、③側面積が多

図4 ファイバ埋込み型ディスクは平面導波路となって励起光を効率よく吸収する。励起光の入射面積が拡大し、kW出力が可能となる。

いので、冷却能率に優れている、というのが、ファイバレーザが高出力を発生できる基本である。①と②の特質があるために、ファイバレーザは形状自由である。通常のレーザはレーザ発振に最適の形態を考える必要があるが、ファイバレーザは励起に最適な形を考えれば、それだけでよい。ファイバの側面励起が“光学的に薄い”ということが問題ならば、ファイバを渦巻き状に巻いてディスクとすれば、側面から見た“光学厚さ”は十分に厚くなる。問題はディスクを作るのに必要なだけの長さのファイバが、低損失なレーザ媒質になりうるか、ということだけである。しかし、光ファイバは太平洋を横断して通信信号を伝えていることを思い出して欲しい。光ファイバは物質の中でもっとも損失の少ない物質である。したがって、数百mの長さのファイバをレーザ発振させることには何の問題もない。実際、メーカと共同で開発中のファイバ材料は、Ndを添加したものでも、1dB/km、すなわち3km以上伝播して光の損失が半分にしかない。したがって、わずかな利得から容易に高出力を発生することができる。1kWの出力を発生するレーザディスクは、コア径50 μ m、外径125 μ mの単クラッドファイバを巻き込んで、図4のようにディスクにするが、長さ260m、ディスク外径が20cm程度のCD程度になる見込みである。レーザディスクでは、①レーザ発振はコア伝播で、②励起光は平面導波路に閉じ込められており、③薄板ディスクの冷却能力は大きい、というようにファイバレーザの特質をそのまま継承している。

4. 次世代ファイバディスクレーザの試作に向けて

レーザ物理から見ればファイバディスクレーザが、大きな励起パワーを得て、kW出力を発生できることは確実である。しかし、実際にファイバを製作し、石英ファイバを融着してレーザ発信するディスクを作るには、様々の技術的問題を解決する必要がある。しかし、それらはあくまで

図5 ファイバレーザは自由形状で、用途に応じた形状から出力を発生できる。

図6 シリンダ型ファイバレーザの試作と実験
出力光はアップコンバージョンファイバにより可視光に変換した。

も技術的問題である。技術的解決の前に、自由形状であるファイバレーザの特質を実験的に確かめる必要がある。そこで、開発された希土類添加低損失ファイバを使って、図5に例を示すような様々な形状のファイバレーザの実験を試みた。平面やロッドのようにファイバを束ねた場合には、クラッド領域を屈折率整合したオイルをしみ込ませればよい。その部分にLD光を導光したガラス棒(ϕ 0.6mm)を接触させると、ファイバ端面からレーザ発振の出力が発生する。一方、図6に示したのはその実施例であり、円柱に巻き付けたファイバは厚さ2mm、長さ10mmの円筒を形成している。クラッド部は光硬化型の樹脂で形成した。高出力LDをガラス棒から導入すると、808nmの励起光によって円筒形のファイバチューブが励起光で光っているのが見える。そして、ファイバレーザの端からは11Wの出力光が観測された。レーザ発振は1.06 μ mの赤外線の出力的なので、出力部にEr添加ファイバを追加して可視光にアップコンバージョンして出力を可視化した。この時の発振効率は30%であったが、光硬化樹脂のクラッドには気泡が存在し、写真のような強い散乱を生じている。本来の全石英製のファイバディスクレーザになれば、効率は60%以上になることは、クラッド励起の実験結果から自明である。現状では、さらに大きな励起パワーの注入をすると、吸収のために光硬化樹脂が黒く焦げてしまう。本年度は真空融着炉を導入して、全石英製の

図7 回路基板上に搭載されたファイバディスクレーザ

レーザディスクやチューブを製作する予定である。励起パワーに限界がなくなれば、kW出力を発生するのは容易である。実際、クラッド励起で110 Wを出力した例では内部パワーが330 MW/cm²になってもファイバには一切損傷が起こらないことが分かっている。このため、研究の発展によっては単一モードファイバから1 kWの出力を得ることも夢ではないというのが現状である。

5. 次・次世代のファイバレーザ

これまで、kW出力を可能にする次世代ファイバレーザを紹介してきた。しかし、ファイバレーザの可能性はさらに広がるのが確実である。より現実的なデザインをすると、図7のように回路基板上にファイバディスクを搭載することも可能である。ファイバディスクは金属基板上に密着させて冷却をする。2次元LDスタックから発生した励起光は、リボンファイバのような結合導波光学素子によってファイバディスクに導入する。この方式では、レーザを搭載した基板を並列にインストールするだけで、レーザワークステーションは実現することができる。

本稿で述べてきたことは、ファイバレーザを“糸”というイメージから離れて、自由な形状のレーザを作るための“素材”と考えることで、次世代の高出力産業用レーザが見えてくるということであった。しかし、ファイバレーザには、さらに大きな可能性がある。ファイバは人間がデザインして光伝播を制御する数少ない光学素子である。そして、それは断面内における屈折率分布の制御によって伝播成分や、伝播する電界強度分布をコントロールすることができる。ごく最近では、クラッド内に沢山の中空ファイバ

を配置することで、クラッドの実効的屈折率を制御して、伝播モードの分散制御を行うようなフォトニックファイバも開発されつつある。次世代ファイバレーザは、さらに新しい技術を取り込んで、CW発振だけでなく、高出力パルス発振やモードロックパルスの発生でも、さらに大きな進歩を遂げた次・次世代ファイバレーザを生み出す勢いである。

6. おわりに

次世代ファイバレーザは日本独自のアイデアに基づき、kW出力を目指して開発中である。2年後には、kW出力を達成し、高出力ファイバレーザを使ったレーザ加工の応用例が発表されるようになることを期待している。本研究は、通産省工業技術院産業科学技術研究開発制度に基づく「フォトン計測・加工技術」の一環として、HOYA、浜松ホトニクスが開発中の高出力ファイバレーザの研究成果を一部含んでいる。ここに記して感謝する。

参考文献

- 1) V. Dominik, S. MacCormack, R. Waarts, S. Sanders, S. Bicknese, R. Dohle, E. Wolak, P. Yeh and E. Zuker : 110 W Fiber Laser, CPD 11, CLEO '99, Baltimore, (1999).
- 2) M. Fermann, A. Galvanauskas, M. Stock, K. Wong, D. Harter and L. Goldberg : Tunable Er³⁺ Fiber Femtosecond Source Amplified to W-level Average Power at 1.03-1.06 μ m in Yb³⁺ Fiber, CPD 9, CLEO '99, Baltimore, (1999).
- 3) J. Ranka, R. Windeler and A. Stentz : Efficient Visible Continuum Generation in Air-silica Microstructure Optical Fibers with Anomalous Dispersion at 800 nm, CPD 8, CLEO '99, Baltimore, (1999).
- 4) K. Ueda and A. Liu : Future of High Power Fiber Lasers, Laser Phys., 8, (1998) 774.
- 5) H. Po, J. Cao, B. Lalibertee, R. Minns, R. Robinson, B. Rockney, R. Tricca and Y. Zhang : High Power Neodmium-doped Single Transverse Mode Fiber Laser, Electron. Lett., 17, (1993) 1500.
- 6) A. Liu and K. Ueda : The Absorption Characteristics of Circular, Offset, Rectangular Double-clad Fibers, Opt. Comm., 152, (1996) 511.
- 7) 劉 安平, 亀谷幸一, 植田憲一 : クラッド励起ファイバレーザ共振器の最適化と高輝度圧縮の実現, レーザ研究, 25 (1997) 702.
- 8) K. Ueda : Laser Resonators, Chapter 6, Optical Cavity for High Power Fiber Lasers, edited by Kudryashov & Weber, SPIE Press, (1999) 125-143.
- 9) K. Ueda : Jpn-Patent, No. 9-174450 & No. 9-289851.
- 10) M. J. Gander, R. McBride, J. D. C. Jones, T. A. Birks, J. C. Knight, P. St. J. Russell, P. M. Blanchard, J. G. Burnett and A. H. Greenaway : Measurement of the Wavelength Dependence of Beam Divergence for Photonic Crystal Fiber, Opt. Lett., 24, (1999) 1017.
- 11) N. Broderick, T. Monro, P. Nennett and D. Richardson : Nonlinearity in Hollow Optical Fiber: Measurement and Future Opportunities, Opt. Lett., 24, (1999) 1395.