ファイバレーザの基礎と将来

植田 憲一

電通大レーザー新世代研究センター (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1)

The Prospects of High Power Fiber Lasers

Ken-ichi UEDA

Institute for Laser Science, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585

(Received October 30, 2000)

Double clad fiber lasers open the new world of high power lasers for industrial applications with high beam quality power delivering. The physics in the absorption process of double clad fiber is described related to the spatial hole burning effect. The homogeneous absorption is essential to achieve high saturation power. The basic physics of fiber lasers is described in a manner of general physics of lasers. A fiber-embedded disk in a side pumping scheme is proposed from the basic principle. The fiber disk laser is promising for the kW output from a single fiber with multimode core. A photonic fiber is introduced as a future model of high power and high performance fiber lasers.

Key Words: Fiber lasers, Double clad pumping, Laser diode pumping, Fiber disk, Photonic fiber

1. まえがき

ファイバをレーザー増幅媒体やレーザー発振器の対象として考えることは、1980年代の後半¹⁾になって考案され、始めて現実的なものとなった。そして、110Wの出力が報告²⁾されるにいたって、高出力レーザーとして大きな可能性を持っていることが広く認識されるようになった。10ミクロン以下という極小のコアを持つ光ファイバは、信号伝送の手段とは考えられても、高出力レーザーやエネルギー伝送の手段とは考えられてこなかった。しかし、レーザー発振器や増幅器の物理からすると、超低損失という特性は高出力レーザーにとって最も重要な性質であり、高出力に向かない、というのは、科学的根拠に基づかない単なる思いこみであった。最先端の科学技術の分野でも、様々な思いこみ、常識が発展を阻害することが起こりうるひとつの証拠である。本論文では、光通信以外の分野に応用される高出力ファイバレーザの原理と特徴を見直し、その将来について検討する。

2. 二重クラッドファイバレーザの励起光吸収

高出力ファイバレーザを実現した最大の技術的進歩は、Fig.1に示した2重クラッドファイバとクラッド励起の開発である。励起用LDのビームは第1クラッド内をマルチモード伝播し、次第に中心コアに吸収されて減衰する。この結果、ファイバレーザはクラッドとコアの断面積比に量子効率をかけたパワー圧縮を実現でき、空間パワー密度

で効力が決まるような産業応用分野に有用なレーザーとなる。長大な利得長を持つファイバレーザは発振が容易で両端4%のフレネル端面反射で十分である。このため、ファイバレーザにとって、最も重要な機構は、効率よい吸収システムであり、コアが励起光を吸収さえすれば、高効率発振は自動的に行われる。

高出力ファイバレーザ用の第1クラッドでは光通信のような同軸円形断面は不適切となる。なぜなら、円形同軸2重クラッドファイバでは、励起光吸収に横モードの空間的ホールバーニングが生じるからである。Fig.2は第1クラッド内をジグザグ状に伝播している励起ビームを断面方向から描いたものだが、断面内の反射の法則(入射角=出射角)から、円周上で反射するすべてのビームは、光軸からの距離を一定に保つ。すなわち、最初にコアに入射する光線は、反射してもコアを照射し続けるので、効果的に吸収さ

Fig.1 The double clad fiber laser compresses the beam brightness by pumping LD beams into the high quality laser output from the fiber core.

Fig.2 Spatial hole burning effect in the pumping absorption of circular fibers.

れ、すぐになくなってしまいます。一方、最初にコアを外れた光線は、いくら反射を重ねても、コアに遭遇することはない、吸収されない。もし、断面上に照射される励起光が完全に均一で、光線方向も均等だとすると、ほとんどの光は吸収されずにファイバを通過する。この機構をファイバ伝播のモードで表現すると、マルチモードファイバの伝播モードの多くが、中心部分にモードパターンのピークを持っていないので、細いファイバコアとのモード整合が悪く、吸収係数が小さいということになる。コアが中心を外れた軸外れファイバ系を含む、実際の吸収飽和レベルの詳しい解析は、参考論文³⁾を参考にされたい。

矩形断面の場合 (Fig.3) を考察しよう。矩形断面の1点から入射した光線は、コーナーの直角を考慮すると、4回の反射をして、元と同じ方向に伝播するときには、 $\Delta y = 2(a \tan \theta - b)$ だけの平行移動をする。すなわち、中心コアとの距離でいうと、 $\Delta y \cdot \cos \theta = 2 \cos \theta (a \tan \theta - b)$ となって、入射点 (x_0, y_0) とは無関係になる。例外としては、 $\Delta y = 0$ の時、すなわち矩形断面内で同じ場所を通る共振モードを取った場合であるが、それは確率としてほとんどゼロである。入射点の位置にかかわらず、一定の速度で平行移動するということは、入射光線はすべて平等に吸収されることを意味し、完全な均一吸収系であることを意味する。したがって、矩形断面の2重クラッドファイバは円形同軸ファイバと対照的な均一吸収系だと理解できる。さらに、D断面形状などもよく用いられるが、これらも変形断面内に、平面反射系を導入することで、ビームを平行移動させ、それによって効果的なモード変換を実現している。矩形断面が均一吸収の理論極限だとしても、それがもっとも効率的だということの意味しない。実際にはD型断面、花びら型などいろい

Fig.3 Shifting rate of pumping beams is constant for rectangular clad fiber lasers.

ろな形状が試みられ、いずれも大差ない吸収効率を実現している。

以上の考察を発展させると、均一吸収系を実現できるならば、その実効的吸収係数は、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} として $\alpha_{eff} = \alpha A_{core} / A_{clad}$ となる。2重クラッドファイバを束ねたマルチコアファイバの場合も、コア・クラッドの断面積比は同じなので、前述の関係は成立する。

したがって、ファイバレーザの最も重要なパラメータは、吸収係数の大小ではなく、Fig.4に示したように、吸収飽和することなく、すべての励起光を吸収できるかどうかだということが分かる。

励起光を完全に吸収するには、 A_{clad} / A_{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倍であり、コアが5cmの吸収長を持つ濃度では、50mの長さのファイバレーザが励起光を完全に吸収する。伝播損失のほとんどない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Fig.5に示した。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

Fig.4 Saturation level is most important for the absorption process of fiber lasers.

Fig.5 Laser performance of clad pumped fiber lasers. Maximum extraction efficiency of 73 % is close to the quantum defect of Nd-ion of 76 %.

合, 58.6%のスロープ効率で発振した⁴⁾. 発振しきい値(P_{th})は200mWでファイバレーザの損失は少ない. 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%のスロープ効率でレーザ光はレーザ媒質からエネルギーを引き抜いた. Ndイオンの量子効率が76%であることを考えると, ほとんど理想的にレーザ発振光にエネルギーが移行した. 出力(P_o)は1.86W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, 励起光はクラッドを均一照射する低品質ビームで, 励起光からレーザ発振までの輝度圧縮率は700倍以上であった. パワー密度は100MW/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応用加工には影響がない.

3. ファイバレーザの励起方式

必要な励起密度を与えると, ファイバレーザは理論効率通りにレーザ光を発生する. 問題は効果的な励起方法とその拡大則にある. Fig.6に励起方式を示したが, コア励起方式はチタンサファイアレーザなどの高品質ビームで用いられるが, LD励起では不可能である. クラッド励起は高効率で励起できる優れた方法であるが, 励起光の入射断面が狭いので, その拡大則に限界がある. V溝方式は側面励起の形を取ったクラッド励起と見ることができる. 入射端面をいくらかでも増やせるので, 高出力が期待できる. しかし, V溝からファイバが破断しやすい欠点を持っている. (d)に示したファイバ結合によって励起光を随時導入して行く方法は, ファイバ接合部の融着技術などがむずかしいが, 原理的に優れた方法である. 高輝度ファイバ結合型LDを一つの部品と考え, 単純に数を増やして, 高出力化を実現できる. LD, ファイバ伝送の特質を活かした方法だといえる. これらは実用化され, 100W級の出力を実現している. 1kWを越える出力も実験室レベルで報告されているが, 方式上, 製造コスト面で難しい問題を抱えている.

一方, 高出力LDの技術からすると, 輝度は低いが高出力が実現できるLDバーやそのスタックを利用する方法が考えられる. 固体レーザの励起入射面積は, 端面励

Fig.6 Various pumping schemes of fiber lasers.

起より側面励起が必ず大きい. 直径を d , 長さを L とすれば, 側面・断面積比は $dL/(\pi d^2/4) \approx L/d$ となるので, 長大な長さを持つファイバレーザは側面励起に適している. ではなぜ, ファイバレーザの側面励起が試みられなかったのだろう. 極細のファイバでは励起光の利用効率が低くて, 実用にならないからだ, ファイバを重ねて(e)のように光学厚さを増せば問題は解決する. ファイバで作ったディスクや円筒は, 光学的に厚い構造を取りながら, 実体は1本のファイバレーザで構成することができる. コア対クラッド比が1/2のマルチモードファイバで構成すれば, 実効的吸収率が1/4のガラスレーザと同等となる. 今後, 産業応用にはキロワット級の出力が必要とされるようになる. その場合は, ファイバレーザの側面励起^{4,7)}がもっとも有望な方式となるだろう. その具体例がFig.7に見るようなファイバディスクレーザで, 我が国で開発が続けられている. この方式では, 励起光は平面導波路に閉じ込められたまま, ファイバレーザを励起するので, クラッド励起と同じ原理を保持し続けている.

4. 高効率・高出力レーザの条件

レーザの基本原則からファイバレーザを再チェックしてみよう. 最初に確認すべき事は, 完全飽和条件における高効率動作の可能性である.

もっとも単純なレーザ増幅の式を検討する.

$$\frac{dI}{dz} = \left(\frac{g_0}{1 + I/I_s} - \alpha \right) I \quad (1)$$

は単位長あたりの光増幅, すなわち, レーザ媒質からレーザ光にパワー供給される割合である. ただし, I は入力パワー, g_0 , α , I_s は小信号利得係数, 損失係数, 飽和強度である. レーザ材料の損失は通常, 吸収で決まるので, 利得損失比 γ は $\gamma = g_0/\alpha$ で表されることが多い. しかし, 吸収が少なく散乱損失が重要となるファイバレーザでは, 従来の表記法との接続性を考慮して, 非飽和損失全体を α として表現する.

飽和強度 I_s は $I_s = \frac{h\nu}{\sigma\tau}$ で決まるように, 光子エネルギー $h\nu$ と誘導放出断面積 σ , 上準位寿命 τ で決まるレーザ媒質固有の量である. (1)式から, 増幅媒質内に蓄積されたエネルギー(反転分布)からレーザ光に変換される効率, 引き出し効率の最適条件($\frac{\partial}{\partial I} \left(\frac{dI}{dz} \right) = 0$)を求めると, 最

Fig.7 Edge pumping of fiber-embedded disk laser.

大引き出し効率を与えるレーザー入力は

$$I_{\text{opt}} = I_s \left(\sqrt{\frac{g_0}{\alpha}} - 1 \right) \quad (2)$$

一方、レーザー発振に関係する2準位間のエネルギーフローを考える。励起パワー密度を R_p とすると、レーザー上準位に供給される励起パワー R_p と、脱励起によって減少するパワー $h\nu n_0/\tau$ は定常状態において平衡状態にある。ただし、 n_0 は小信号利得を与える反転分布量である。これは小信号利得状態でも、完全飽和状態でも変わらない。したがって、

$$R_p = h\nu \frac{n_0}{\tau} = \sigma n_0 \frac{h\nu}{\sigma\tau} = g_0 I_s \quad (3)$$

の関係となつて、励起強度と小信号利得係数は比例関係にある。(2)(3)式から最大効率を求めると、

$$\eta_{\text{opt}} = \frac{\left(\frac{dI}{dz} \right)_{I=I_{\text{opt}}}}{R_p} = \frac{(\sqrt{\gamma} - 1)^2}{\gamma}, \quad \gamma = \frac{g_0}{\alpha} \quad (4)$$

の関係を得る。(4)式は、引き出し効率が利得損失比 $\gamma = \frac{g_0}{\alpha}$ だけで決まる事を意味する。最適引き出し効率の理論曲線をFig.8に示した。 $\gamma = 10$ 程度の弱い励起では、最大引き出し効率は50%にも達しないことが分かる。これはレーザー一般を支配する原理であり、損失のもっとも少ない媒質であるファイバレーザーは、レーザー材料に与えた励起パワーをもっとも効率よくレーザー光に変換できるよいレーザーであることを示している。

最適効率動作を考える限り、ファイバレーザー、ロッド

Fig.8 Extraction efficiency vs gain-to-loss ratio.

レーザー、スラブレーザー、薄板レーザーのどれをとっても、一定の出力を発生するのに必要なレーザー体積は同じである。最大出力を決定するのは最大励起入力であり、入力可能なパワーは、冷却、損傷、破壊、励起方式などの要因で決まる。冷却や励起の拡大則はレーザー媒質の体積・表面積比で決まるので、長尺のファイバ型とアクティブミラー型(薄板レーザー型)が高出力レーザーとして優れている。これは高出力レーザーが太いロッドやスラブで実現されている現在の固体レーザーの常識と違うように見えるかも知れない。しかし、それはロッドやスラブ型のレーザーの冷却効率が悪いから、同じ熱流を実現するために、大きな熱勾配が必要となり、結果として内部応力限界に達しているからにすぎない。アクティブミラー型レーザーではすでに高効率kW出力が実現⁸⁾しているが、ファイバレーザーでは励起体積の100%完全利用ができるので、さらに優れた特性が期待できる。

前述の利得・損失比の考察からすると、通常のレーザーが共振器内にロッドとミラーを別々に持ち、レーザー光が往復する毎にロッド端面の反射、散乱損失を受けているのは、本来のレーザーからすれば、無駄な損失である。長大な利得長を持つファイバレーザーは、回折損失を含め、無駄な共振器損失を持たないという点で、もっとも原理に忠実なレーザーだといえることができる。そして、それが高効率発振の理論的根拠となっている。

5. ファイバレーザーの将来像

ラマンファイバレーザーでは、各種ガラスのラマン利得を利用して、広い範囲の波長可変性を持ったレーザー光を発生することができる。その際、利得内で任意の波長を高効率に発生させるために有用なものがFBG (Fiber Bragg Grating) であり、低損失で狭帯域の光共振器を実現できる。そのため、高次ストークスであっても高効率ラマン発振⁹⁾が可能なので、特に赤外領域における高輝度レーザー光源として応用が期待できる。

これまで高出力ファイバレーザーはCW出力で発展してきた。極小のコア断面積は高出力を連続光で発生することは許しても、パルスレーザーになるとレーザー損傷という困難な問題が発生する。しかし、最近では、パルスレーザーの要求、特にサブピコ秒のモードロックレーザー出力の要求^{10,11)}が厳しくなってきた。そして、応用が始まれば、次第に高出力の要求が強まることは避けられない。

ファイバレーザーの特質に戻って考える。ファイバ

Table 1 Properties of solid state lasers.

	Cooling	Pump input area	Gain-to-loss ratio	Spatial mode control	Volume availability
Rod	×	○ (side pump)	△	×	△
Slab	△	○ (side pump)	△	×	○
Thin disk	○	△ (end pump)	△	×	×
Clad-pumped fiber laser	◎	×	○	○	◎
Side-pumped fiber laser	◎	○ (side pump)	○	○	◎

レーザーはLD光を吸収し、それを高輝度のレーザー光に変える高効率ビーム品質変換器である。パルス発振に利用する場合には、レーザー媒質のエネルギー蓄積、超短パルス発振の特徴を利用するべきで、ファイバレーザー励起固体レーザーの組み合わせが研究されるだろう。実際、パルス圧縮をテーパ型ファイバで行うこともできるし、Chirped PPLN (Periodic Poled Lithium Niobate) 結晶中¹²⁾で行うこともできる。超短パルス生成で開発されたCPA (Chirped Pulse Amplification) の考えは、ファイバレーザーを使ってパルス出力を取り出すときに参考になる。

もちろん、もっと革新的な技術を使って、ファイバレーザーが超短パルスを発生するようになることも期待できる。光ファイバが光をコア内に閉じ込めて伝播させているが、クラッド内に様々な規則的屈折率分布を形成することにより、光伝播を人工的に制御するフォトニックファイバ^{13,14)}の開発が進んでいる。光通信の分野では、群速度分散補正など、超広帯域光通信を目指した研究が盛んで、フォトニックファイバはクラッド内に広がった光電界を制御している。モード体積の大きな単一モード光伝播を応用すれば、パルス発振の高出力化に有利となる。これらの研究は、ある意味で大学における手作りの研究技術が生み出した新しい技術ということもできる。最先端を切り開くには、最新技術のみでなく、基礎的な考察に基づいたアイデアを生み出すための頭脳作業が必要である。その意味で、大学と企業が各々の特長を生かす研究を要求される好例となっている。

空間モードの制御には、マルチコアファイバ間のエバネッセント結合も利用できる。モノサイクル近くの超短パルスで、パルス内電界の位相制御¹⁵⁾ができるようになってきた。空間的に離れたレーザー発振器間の位相制御は次世代の課題だが、ファイバレーザーは2次元フォトニック結晶として、その最前線に立ちうるレーザーだと考えられる。

6. おわりに

高出力ファイバレーザーは従来の光通信ファイバレーザーの常識を打ち破るところから発達した。そして、実際に高出力レーザーとしての産業応用が始まろうとしている。しかし、ファイバレーザーそのものの可能性は、さらに広い分野に広げることができる。それは光伝播の完全制御と、それらの理論的な特性を実現させる低損失特性に起因している。巨視的なサイズで作りあげた断面形状が、そのままマイクロな形状に保存されるというファイバ生成のメカニズムは、新しいフォトニックファイバも実現した。これらの新しい知識と技術を応用すれば、産業応用のみならず、科学応用においても大きな可能性が広がっている。現代のレーザー技術の最先端を担うファイバレーザーの現状とその発展の根拠を紹介した。我が国におけるファイバレーザー研究が発展することを期待する。

参考文献

- 1) H. Po, J. Cao, B. Lalibertee, R. Minns, R. Robinson, B. Rockney, R. Tricca, and Y. Zhang: *Electron. Lett.* **17** (1993) 1500.
- 2) V. Dominik, S. MacCormack, R. Waarts, S. Sanders, S. Bicknese, R. Dohle, E. Wolak, P. Yeh, and E. Zuker: CPD11, CLEO'99, Baltimore (1999).
- 3) A. Liu and K. Ueda: *Opt. Comm.* **152** (1996) 511.
- 4) 劉安平, 亀谷幸一, 植田憲一: レーザー研究 **25** (1997) 702.
- 5) K. Ueda and A. Liu: *Laser Physics* **8** (1998) 774.
- 6) K. Ueda: *Laser Resonators*, Chapter 6 Optical Cavity for High Power Fiber Lasers (edited by Kudryashov & Weber, SPIE Press, 1999) p.125.
- 7) K. Ueda: Jpn-Patent, No.9-174450 & No.9-289851
- 8) A. Giesen: WeA1-14, *Laser Optics 2000*, St. Petersburg, June **28** (2000).
- 9) M. Prabhu, N. S. Kim, and K. Ueda: *Opt. Comm.* **182** (2000) 305.
- 10) 植田憲一: レーザー研究 **27** (1999) 805.
- 11) 三澤弘明: レーザー研究 **27** (1999) 817.
- 12) M. Fermann, A. Galvanauskas, M. Stock, K. Wong, D. Harter, and Goldberg: CPD9, CLEO'99, Baltimore (1999).
- 13) 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: *Opt. Lett.* **24** (1999) 1017.
- 14) N. Broderick, T. Monro, P. Nennett, and D. Richardson: *Opt. Lett.* **24** (1999) 1395.
- 15) A. Apolonski, A. Poppe, G. Tempea, Ch. Spielmann, Th. Udem, R. Holzwarth, T. Hansch, and F. Krausz: *Phys. Rev. Lett.* **85** (2000) 740.