エアホール型ダブルクラッドファイバレーザの開発

正 員 前田 純也*

非会員 金屋 大祐*

非会員 澤田 久*

非会員 藤田 盛行*

正 員 山下 育男**

正 員 青海 恵之**

Development of Air-Hole Type Double-Clad Fiber Lasers

Junya Maeda*, Member, Daisuke Kanaya*, Non-member, Hisashi Sawada*, Non-member, Moriyuki Fujita*, Non-member, Ikuo Yamashita**, Member, Shigeyuki Seikai**, Member

Transversal single mode fiber laser at 1116nm constructed by both a high optical output diode laser and an air-hole type double-clad fiber has been developed for the 1310nm Raman amplification. The special edge filters without substrates make possible to manufacture the laser system using the air-hole type double-clad fiber easily. The laser system and its characteristics are introduced in this report.

キーワード：ファイバレーザ，ダブルクラッドファイバ，ラマン増幅

Keywords：fiber laser, double clad fiber, raman amplification

1. はじめに

従来の光ファイバの通信波長は $1.3\mu\text{m}$ が主流であり，既存の光ファイバ網では零分散波長が $1.3\mu\text{m}$ にあるシングルモードファイバが多く敷設されている。1990年に実用的な Er ドープファイバアンプ⁽¹⁾が開発されてから，その増幅帯域である $1.5\mu\text{m}$ 帯がにわかに注目され始め， $1.3\mu\text{m}$ 帯の既存の光伝送路に分散補償を行い， $1.5\mu\text{m}$ 帯の信号を伝送することが日常的に行われている。ここで $1.3\mu\text{m}$ 帯の光増幅器が存在するならば，分散補償を行う必要がなく，その伝送形態は非常に簡素化されることとなる。

$1.3\mu\text{m}$ 帯の光増幅法の一つとして，ラマン増幅という手段が考えられている⁽²⁾。石英のラマンシフトはおおよそ 13.2THz であることから， $1.064\mu\text{m}$ もしくは $1.116\mu\text{m}$ のポンプ光として用い，4 次もしくは 3 次のラマンシフト光を発生させ， $1.3\mu\text{m}$ 帯のラマン増幅を行うというものである。

この方式を実現するためには波長 $1.0\sim 1.1\mu\text{m}$ 帯でワット級の出力を有する横単一モードのレーザが必要であり，空間光の取り扱いがないファイバレーザを安価で構成することが求められている。この要求に応える技術として，ダ

図 1 エアホール型ダブルクラッドファイバ模式図

Fig. 1. Schematic illustration of the air-hole type double clad fiber.

ブルクラッドファイバレーザがある。ダブルクラッドファイバレーザは励起源として，安価で数ワット級の出力が得られる横マルチモードタイプのダイオードレーザを使用し，ファイバ内で横シングルモードという高ビーム品質のファイバ出力を作り出すレーザシステムである。

図 1 にエアホールタイプのダブルクラッドファイバ (Double Clad Fiber, 但し分散補償ファイバ Dispersion Compensating Fiber と区別するため，ここでは WCF と略す) の模式図を示す。中心部には横単一モードの導波路が形成されたコアがあり，この部分に希土類元素がドープされている。その周囲には励起光の通り道であるポンプガイドが配されている。ポンプガイドの周囲は微細穴からなる

* 三菱電線工業株式会社
〒664-0027 兵庫県伊丹市池尻 4-3
Mitsubishi Cable Industries, Ltd.
4-3 Ikejiri Itami-City, Hyogo 664-0027

** 関西電力株式会社
〒661-0974 兵庫県尼崎市若王寺 3 丁目 11 番 20 号
The Kansai Electric Power Co., Inc.
11-20, Nakoji, 3-Chome, Amagasaki, Hyogo 661-0974

エアホール層で囲むことにより、空気を持つ屈折率の低さを利用してこの層の実効屈折率を下げる事が出来、ポンプガイドに対するクラッドの役割を持たせられる^③。マルチモードダイオードレーザからの励起光がこのポンプガイドを伝搬していく中で、励起光がコアを横切るとコア中の希土類イオンを励起する。ここでこの励起光出力がレーザ発振閾値を超えると、横単一モードの誘導放出光を得ることが出来る。

従来の WCF ではポンプガイドのクラッドを低屈折率の樹脂で構成されていたが、エアホール型 WCF では石英と空気で構成されているため、①樹脂を除去して接着固定を行う必要があるコネクタ付けや、石英に直接メタライジングする必要がある気密封止に適用出来ること、②クラッドが樹脂で構成されていないためパワー耐性が高いこと、③ポンプガイドとエアホール層の界面が平滑でないことから、ポンプガイドの外周のみを旋回し、コアと交差せず励起に寄与しないスキュー光成分を抑制できることから、励起光吸収効率が高めることが出来ること、④樹脂と比較してクラッドの屈折率を小さくできるため、ポンプガイドの開口数 (NA) を大きくすることが容易である等の利点がある。一方短所としては①他のファイバとの接続する際にエアホールを潰さずに融着するためには熟練した技術が必要であること、②エアホール層があるためファイバブラックグレーティング (FBG) を形成することが難しいことが挙げられる。

通常の樹脂型ダブルクラッドファイバを用いたレーザではファイバ両端にファイバグレーティングなどの共振器を設けることが多いが、エアクラッド型ダブルクラッドファイバでは片端をコネクタ付出来ることから、後述する「基板レスフィルタを用いることにより、安易かつより高機能な共振器構成を作り出すことが出来る。また励起光導入部分をコネクタ化することにより、エアホール型ダブルクラッドファイバの最大の弱点である「エアホールを潰さずに融着するのは非常に難しい」という問題を回避出来る。

通常の樹脂型ダブルクラッドファイバでは、スキュー光を抑制するためにポンプガイドの断面を長方形や D 型にする

必要があるが、エアホール型ではその断面は円形で良い。横マルチモードのレーザモジュールのファイバコアは円形となっていることが殆どであるから、ポンプガイドが円形となっていることは効率を改善する上で好ましい。

2. 実験

〈2・1〉 使用ファイバ 今回使用したエアホール型 WCF の走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した断面写真を図 2 に示す。中心部には 20,000ppm の濃度で Yb がドーパされた $\phi 6.2 \mu\text{m}$ のシングルモードコアが存在する。その周囲には $\phi 100 \mu\text{m}$ のポンプガイドが、さらにその周囲にはエアクラッドとサポート層が形成されており、ファイバ外径は $\phi 250 \mu\text{m}$ に仕上げられている。なお SEM 観察の都合上、樹脂コーティングは除去されている。

ポンプガイドの NA は 633nm の測定波長で約 0.6 となっている。NA は図 1 に図示するようにポンプガイドとエアホール層の屈折率差が大きいほど大きくなる。ここで空気の屈折率は何の固体よりも小さい約 1 であり、エアホール層における石英壁を薄くさせることが NA を高める重要な鍵となる。NA の最大値としては 0.9 のものも得られており、必要に応じて NA の最適化は可能である。なお通常の樹脂型ダブルクラッドファイバのポンプガイドの NA は、樹脂の低屈折率化に限界があることから 0.4 程度のものが多い。

Yb の吸収断面積と蛍光断面積の波長依存性を図 3 に示す。Yb では吸収と蛍光断面積は重なりを持っており、必要波長で発振させるためにはファイバ長の最適化が重要になってくる。1.116 μm で発振させるためには、ファイバ長を長くすることにより短波側の蛍光を抑制しなければならない。本実験ではファイバ長を 32m にし、1116nm での FBG による波長ロックを可能にしている。

本 WCF においては、ポンプガイドに導入される 0.98 μm の励起光は 1 m あたり 1.7dB の吸収量で吸収されるため、ファイバ長 32m では導入された励起光は計算上殆ど全て吸収されており、ファイバレーザを構成後、出力スペクトルを光スペクトラムアナライザで測定しても励起光成分は殆

図 2 エアホール型 WCF 断面 SEM 写真

Fig. 2. The cross sectional SEM image of the Air-hole type Double Clad Fiber.

図 3 Yb³⁺の吸収・蛍光断面積

Fig. 3. Emission and absorption cross sections of Yb³⁺ ion.

ど検出されない。

〈2・2〉 レーザ構成 レーザ構成を図4に示す。マルチモードダイオードレーザモジュールのピグテールファイバは、 $\phi 100\mu\text{m}$ 、NA0.2のステップインデックス型マルチモードファイバであり、波長 $977\text{nm} \cdot 2.6\text{W}$ の出力光を発する。このファイバ端面にはFCコネクタが取り付けられている。WCFの片端にもFCコネクタがつけられており、基板レスタイプのエッジフィルタを介してコネクタ勘合されている。

この基板レスタイプのエッジフィルタとは、通常の誘電体多層膜で必要不可欠な蒸着基板を除することにより、厚さ約 $20\mu\text{m}$ という極薄化を可能にしたものである。このようにフィルタの厚さを極限まで薄くすることにより、マルチモードファイバからWCFへの励起光の漏れを最小限に抑えている。本フィルタは励起光（波長 $0.98\mu\text{m}$ ）を95%以上で透過、 $1.01\sim 1.40\mu\text{m}$ を99.999%以上反射する特性を有し、誘導放出光や後段で発生するラマンシフト光がマルチモードダイオードレーザへ戻ることを防ぐと共に、ファイバレーザにおける共振器の一旦を担っている。

類似構成として、WCFコネクタ端面にエッジフィルタを成膜することも考えられるが、励起光である $0.98\mu\text{m}$ を通過させ、 $1.0\sim 1.4\mu\text{m}$ を高反射率で反射するフィルタの成膜層数は非常に多くなってしまうことから、その蒸着物は高熱下にさらわれるため、技術面から非常に難しい。

WCF側のFCコネクタは特に平面研磨にする必要がある。これはエッジフィルタとWCFのシングルモードコアとの間に僅かな空隙を作ること、誘導放出光によるコネクタ端面の損傷を抑制する必要があるからである。

WCFの終端にはシングルモードファイバが融着されており、その一部には反射波長 $1.116\mu\text{m}$ で20%の反射率を有するFBGが形成されている。先述の $1.0\sim 1.4\mu\text{m}$ を反射するエッジフィルタとこのFBGにより共振器が形成されており、波長 $1.116\mu\text{m}$ で波長ロックさせる方式となっている。また出力ファイバ端では、励起光はほぼ完全にファイバ内で吸収されており、融着による穴潰れが問題とならないため、比較的容易に融着することが可能である。

類似構成として、WCF終端にエッジフィルタを成膜することも考えられるが、励起光である $0.98\mu\text{m}$ を通過させ、 $1.0\sim 1.4\mu\text{m}$ を高反射率で反射するフィルタの成膜層数は非常に多くなってしまうことから、ファイバが接着剤で固定されたコネクタ端面への蒸着は技術面、コスト面両面で非

図4 ダブルクラッドファイバレーザ構成

Fig. 4. Schematic illustration of the double clad fiber laser.

常に難しいのが現状である。

3. 結果・考察

図5にマルチモードダイオードレーザ出力に対するファイバレーザ出力の関係を示す。本図の中で発振閾値は 0.2W ，スロープ効率 η は53%と見積もられた。

エッジフィルタの透過損失を含む勘合部における励起光の損失は20%程度であることや、WCFとシングルモードファイバの融着損失が10%弱程度あること、反射率20%のFBGがつけられていること等から推測すると、実際ファイバ内に導入されている励起光に対する誘導放出光の変換効率は80%を超えるものと想像される。

図6に光スペクトラムアナライザで観測した発振波長のスペクトラムを示す。半値全幅 0.22nm （線幅約 50GHz ）のガウシアン分布的なスペクトラムが得られていることがわかる。なお自然放出光は $1.116\mu\text{m}$ の発振光に対して0.01%以下に抑圧されており、本図では確認出来ない。

但し共振器長は 32m であるから、共振器縦モード間隔（Free Spectral Range : FSR）は $13\text{fm}(=3.2\text{MHz})$ であり、本スペクトラムの中には数万本の縦モードが存在することが出来る。

なお必要に応じて出力端からの戻り光を防止するため、ファイバ出力側にアイソレータを導入することが可能である。但し $1.116\mu\text{m}$ で 1W の連続照射に耐えうるアイソレータを選択する必要がある、現状で対応出来るものはTGG結晶を用いたもののしか存在しない。周知のようにTGG結晶は

図5 ファイバレーザ出力特性

Fig. 5. Characteristic of the fiber laser output.

図6 発振波長スペクトラム

Fig. 6. Spectrum of fiber laser output.

ベルデ定数が 0.1min/Oe/cm と小さく、必要な回転角を得るためには、非常に強力な磁石が必要であることから、そのサイズは非常に大きくなってしまふ。また現状では $1.116\text{ }\mu\text{m}$ 専用のアイソレータは存在していないため、 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ のアイソレータで代用しているの、その挿入損失は 1dB (約 20% のロス) となってしまう。

将来、量産時に要求されるであろうコンパクト化に際しては、ファラデー回転子となる結晶材料の検討と、適用波長の最適化を行う必要がある。

この波長 $1.116\text{ }\mu\text{m}$ のファイバレーザ出力を、ファイバ長約 1km の高非線形ファイバに導入して、 1.174 , 1.238 , $1.31\text{ }\mu\text{m}$ のラマンシフトを発生させるが、その際に注意しなければならないのが、誘導ブリルアン散乱の問題である。誘導ブリルアン散乱が発生すると、ファイバ内で後方散乱光が発生し、その後方散乱光に対してエネルギーが消費されるため、誘導ブリルアン散乱が発生する閾値以上の励起光を導入してもラマン利得の向上に寄与しなくなってしまう。誘導ブリルアン散乱が発生する閾値はレーザ光の線幅に大きく依存する。概算で 1W のレーザ光を伝搬させるためには、線幅を 10GHz 以上に設定する必要がある。

石英ファイバのラマン利得に関しては、その利得帯域幅が数 THz と広いことから、線幅が数 10GHz 程度であれば線幅の影響は現れない。

4. 装 置

図7に本装置の外観写真を示す。外形は $422\text{W} \times 131\text{H} \times 400\text{D}(\text{mm})$ であり 19 インチ 3U ラックマウントに対応している。なお本レーザ装置は実験用として内部の光学構成の変更やラマンシフト用ファイバの追加、装置機能の拡張が容易となるようサイズに余裕を持たせて設計されており、最終的な量産品としてのサイズではない。重量は約 10kg 、消費電力約 50W である。なお内部の光学構成は図4の通りであるが、前述したように光アイソレータを内蔵することが可能である。

図7 $1\text{ }\mu\text{m}$ 帯ファイバレーザ装置
Fig. 7. $1\text{ }\mu\text{m}$ band fiber laser system.

本装置は励起ダイオードレーザ電流一定制御(ACC)、ファイバレーザ出力一定制御(ALC)を切り替えることが出来るのは勿論のこと、出力光強度、反射光強度の簡易モニタを有している。またコネクタの抜けを感知し、レーザの出力を停止させることでユーザにダメージを与えない機能を持たせることも可能である。

出力光のパワーは内蔵されている光センサで簡易表示されるため、実験・研究用の装置として非常に使い易いものである。本装置には RS232 インターフェースが内蔵されており、遠隔から動作状態の確認や出力調整等の設定を行うことが可能である。

ファイバレーザの最大の特徴としては、空間光を扱う部分がないため、衝撃・振動に強く、例えば宅急便の輸送に対しても、通常の電子製品と同様に易損品扱いであれば問題は生じないといった、従来のバルクレーザでは考えられない非常に頑丈な装置である。また同様にユーザが空間光を扱う必要が全くなく、例えばスイッチオンで設定した出力が設定した通りに得られるメンテナンスフリーな装置である。その他の特徴としては、バルクレーザと比較して長寿命(期待寿命数万時間)であり、ランニングコストでメリットを生み出せる。

5. まとめ

高出力ダイオードレーザとエアホール型ダブルクラッドファイバを使用した $1\text{ }\mu\text{m}$ 帯ファイバレーザについて、その光学構成と得られた特性について説明した。基板レスフィルタを使用することにより、エアホール型ダブルクラッドファイバレーザ構成で必要不可欠であった、熟練した融着接続技術を排除出来るとともに、容易に共振器構成を作ることが出来る。

本報告ではラマン増幅用励起光源としてのダブルクラッドファイバレーザを紹介したが、ファイバグレーティングの反射波長を変更することにより、必要な波長を作り出すことが出来る。

ファイバレーザは YAG 等のバルクレーザと比較すると空間光を扱わなくて済み、冷却水が不要等、非常に使いやすいことから、バルクレーザが用いられる用途に対しての置き換えが進むものと期待される。

謝 辞

エアホール型ダブルクラッドファイバは、三菱電線(株)スペシャルティファイバグループからの提供によるものである。また基板レスフィルタの開発を行っていただいた(株)ニコン様に厚くお礼申し上げます。

(平成 16 年 5 月 6 日受付, 平成 16 年 7 月 14 日再受付)

文 献

- (1) M.Yoshida, et al.: "Development of compact Er^{3+} -doped fiber amplifiers for practical applications, in Technical Digest on Optical Amplifiers and their Applications", 13, p.282 (Optical Society of America) (1990)

- (2) 小矢田康晴, ほか:「高次ラマン増幅器励起用2波長発振カスケード」, 信学技報, 8号, p.79-84 (2002年)
- (3) 山本哲也, ほか:「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)

前田 純也 (正員) 三菱電線工業(株) 光電子技術部所属, 光デバイス, ファイバレーザ, 光増幅器の開発に従事。工博。電子情報通信学会会員。

金屋 大祐 (非会員) 三菱電線工業(株)光電子技術部所属 光増幅器およびファイバレーザの研究・開発に従事。レーザー学会第22回年次大会にて優秀論文発表賞受賞(2002年)。電子情報通信学会会員。

澤田 久 (非会員) 三菱電線工業(株) 光電子技術部所属, 光ファイバ増幅器の開発・設計に従事。電子情報通信学会会員, IEEE Member。

藤田 盛行 (非会員) 三菱電線工業(株) 理事, 光電子技術部長。光関連製品(光ファイバ, レーザーガイド, ファイバ, バンドル, ファイバレーザ, 光増幅器)の研究・開発に従事。電子情報通信学会会員

山下 育男 (正員) 関西電力(株)電力技術研究所シニアリサーチャー, 光通信, 光増幅の研究に従事。工博。電子情報通信学会会員。

青海 恵之 (正員) 日本電信電話公社, 立命館大学理工学部電気工学科教授を経て, 現在, 関西電力(株)電力技術研究所チーフリサーチャー, 高速光通信の研究に従事。電子情報通信学会より82年度論文賞, 85年度業績賞を受賞。工博。OSA, 電子情報通信学会, 応用物理学会各会員。