# ファイバレーザの線幅制御と50 W出力偏波保持出力

50-W Output Polarization Maintaining Fiber Laser and Its Linewidth Control

藤崎 晃\*1 Akira Fujisaki 吉澤直人\*1 Naoto Yoshizawa 江森芳博\*1 Yoshihiro Emori

富永啓介\*2 Keisuke Tominaga 田中完二\*3 Kanji Tanaka 仁科 潤\*3

概要 通信用途のエルビウム添加ファイバ増幅器 (EDFA) により大きな発展を遂げた光ファイバ増幅技術は、イットリビウム (Yb, Ytterbium) ドープによる波長 1.0 μm帯で、クラッド励起技術により飛躍的にその出力を向上させている。ファイバレーザやファイバ増幅器に使われる光部品や励起半導体レーザも年々進化しており、ファイバレーザは大出力でかつ、波長制御性、線幅制御性及び偏光制御性の部分で優れた発振器へと発展してきている。本報告ではファイバレーザの基本構造を紹介し、その波長及び線幅の制御に関して議論し、波長 1083 nmにて出力 50 Wを実現した全光ファイバ構成の偏波保持型ファイバレーザについてその特性を紹介する。

#### 1. はじめに

通信用途のエルビウム添加ファイバ増幅器(EDFA)により 大きな発展を遂げた光ファイバ増幅技術は、イットリビウム (Yb, Ytterbium) ドープによる波長1.0 μm帯の発振において、 励起光源を励起ファイバのクラッド部分に導波するクラッド励 起技術により飛躍的にその出力を向上させている1)~4)。シン グルモードファイバを使ったファイバレーザでは、使われる光 ファイバの導波モード以外の光を存在させることが難しく. 出 力される光はそのモードフィールドに従った形で安定な横モー ドを形成する。この特長はファイバレーザの出力を外部の波長 変換素子と組み合わせて使う場合の大きなメリットとなってい る。ただし波長変換を前提にしたレーザの基本波としては光源 の波長安定性、線幅及び偏光についても設計に考慮する必要が あり、基本波の波長でそのまま使う場合とは異なる。本報告で はまずファイバレーザの基本動作を紹介し、波長変換の用途に 対して波長、線幅及び偏光の制御を施したファイバレーザの設 計と50 Wまでの出力特性例を報告する。

#### 2. 基本的な構成

図1はクラッド励起ファイバの断面図である。波長1.0 μm ではシングルモードファイバのモードフィールド径は6 μmになり、石英によるクラッドは励起光をガイドするために更に屈折率が低いフッ素系樹脂で被覆されている。図2は本ファイバレーザの基本構成である。励起光の波長は波長制御性を考慮し、Ybの吸収ピークがブロードな915 nmを採用した。励起半導体

レーザチップからの光は、マルチモードファイバ (コア径 105  $\mu$ m, NA=0.22) に結合され、Ybドープファイバのクラッド部分に導光される。レーザの共振器は99%以上の高反射率のHR-FBG (high reflectivity-fiber bragg grating) と 10%程度の反射率の出射側のOC-FBG (output coupler-FBG) により構成され、FBGの反射波長により選択される波長でレーザ発振する。FBGは直接ファイバガラスに、石英の構造欠陥を利用した周期的な干渉縞を発生させることにより形成する。

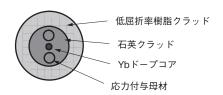
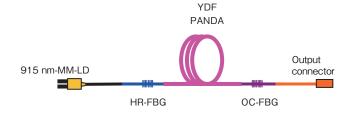


図1 ダブルクラッド偏波保持Ybドープファイバの断面図 Polarization maintaining double-clad Yb-doped fiber.



**図2** クラッド励起ファイバレーザの基本構成 Basic configuration of clad-pumped fiber laser.

FBGの中心波長 $\lambda_B$ , 反射帯域 $\Delta\lambda$ , 及び反射率 $R_B$ は以下のように設計される。

<sup>\*1</sup> 研究開発本部 ファイテルフォトニクス研究所

<sup>\*2</sup> 研究開発本部 ファイテルフォトニクス研究所 在OFS研究所(北米)

<sup>\*3</sup> 情報通信カンパニー ファイテル製品部

$$\begin{split} &\lambda_B = 2n\Lambda \\ &n = \frac{n_3 + n_2}{2} \\ &\Delta \lambda = \left[\frac{2\Delta n\eta}{\pi}\right] \lambda_B \\ &\Delta n = n_3 - n_2 \\ &R_B \approx \tanh^2 \left[\frac{\pi\eta L\Delta n}{\lambda}\right] \end{split}$$

ただし、 $n_2$ は書き込み部分の屈折率、 $n_3$ はファイバのコアの屈折率、 $\Lambda$ はFBGの書き込み間隔、 $\eta$ はコアへの閉じこめ率、Lは書き込み長である。

FBGは光ファイバのガラスに直接描画されている。したがってガラスの線膨張によりファイバが伸び縮みするので、温度変化により波長がシフトしてしまう。高い波長安定性を得るためには温度変化に対して補正をかけると効果がある。図3に示すようなFBGの温度補償パッケージを採用することによりFBGの温度上昇による伸びをキャンセルすることが可能であるので、この手法によりレーザの発振波長の安定化を図った。その例を次節で紹介する。

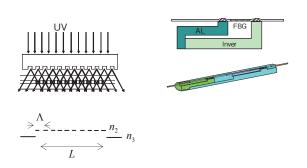
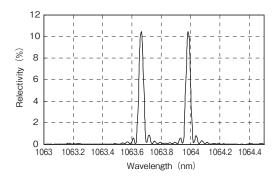


図3 FBGとその温度補償筐体の基本構造 Basic structure of FBG and temperature compensation package.

## 3. 6 W出力ファイバレーザの特性

前節2で述べた温度補償されたFBGを使うことにより波長安定化された図2のようなファイバレーザを作製した。図4は偏波保持ファイバに描画されたFBGの反射スペクトルである。



**図4** 偏波保持ファイバに描画されたFBGの反射スペクトル波形 Reflection spectrum of FBG (I).

直交する2軸に対して屈折率が異なるため、実際には反射光は 波長が0.3~nmほど離れて2つ存在する。我々のレーザでは HR-FBGの短波長側のピークとOC-FBGの長波長側のピークを オーバーラップさせることにより単一偏光発振を実現した。

図5はこのレーザの発振スペクトルである。また図6はこの レーザの駆動電流と出力の温度依存性、図7は駆動電流と発振

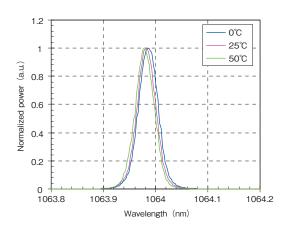


図5 6 W出力時の発振スペクトル Lasing spectrum at 6-W output.

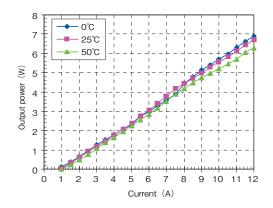
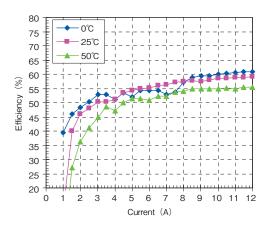


図6 駆動電流と出力特性 Pump current vs. output characteristics.



**図7** 駆動電流と効率 Pump current vs. efficiency

効率の関係である。図7のように励起光のパワーから内部部品の光損失も含めて60%強の効率でレーザ出力を得ることができる。しかし、レーザの線幅を制御するためにファイバ長を若干短い方向で調整しているため発振効率がやや小さめに出ている。

中心波長の温度依存性の測定結果を図8に示す。 $0\sim50$ ℃の温度領域でも6 W出力動作時に、中心波長は7 pm以内に制御され、線幅も35 pm程度であった。このような波長精度は特に第二次高調波発生 (SHG)素子と組み合わせた波長変換用途で要求されているものである。②9はこの6 W出力のレーザの収納筐体で、100 mm  $\times$  100 mm  $\times$  16 mm と小型にまとめることができた。

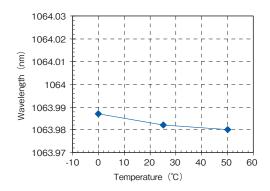


図8 中心波長温度特性 Temperature dependence of center wavelength.



**図9** 単一偏波小型ファイバレーザ外観 Appearance of compact single polarization fiber laser.

#### 4. 更なる高出力化と線幅広がり

ファイバレーザにおいて、励起光源を更に付加することによりその出力は更に増加する。利得飽和が生じても、更にファイバ長を長くすることにより出力を更に大きくすることができる。

図10は連続発振(CW)動作で高い出力を得るファイバレーザの構成例である。複数の励起半導体レーザからの光を効率良くファイバのクラッドに導入するために、テーパーファイババンドルと呼ばれるファイバ溶融型の光部品を使用し、総計36本の励起ポートから各々10 W級の波長915 nmの励起光を40mのYbドープダブルクラッドファイバのクラッド部分に導波している。Ybファイバのゲインピークである1085 nmに中心波長をもった99%以上の反射率のHRと10%程度の反射率の

OCによって共振器を構成している。**図11**に示すとおり総励起パワーが366 Wのとき、レーザ出力250 W、励起光からの変換効率68%が得られている。

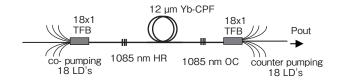
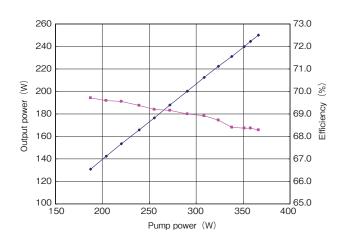


図10 CW動作ファイバレーザの構成 Configuration of CW fiber laser.



**図11** CW動作ファイバレーザの出力と効率 Output and efficiency of CW fiber laser.

このレーザの共振器長は40 mと非常に長いので、波長の整数倍で存在しうる共振モードで計算される縦モード間隔は0.1 pm程度と非常に狭くなる。一方でYbファイバの増幅帯域は非常に広く100 nmを超えるため、このレーザの発振スペクトル(線幅)は共振器の波長帯域で制限される。

図12はこのレーザに使われたFBGと同等な設計のFBG反射スペクトルの例である。FBGの波長半値幅は100 pm程度であった。

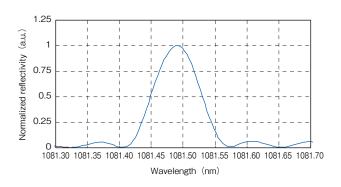
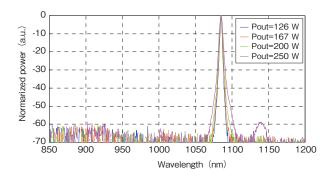
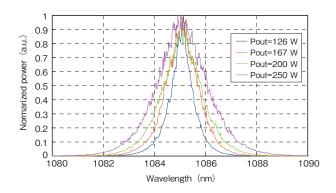


図12 FBGの反射スペクトル Reflection spectrum of FBG(II).

図13及び図14はこのレーザの出力が126 W, 167 W, 200 W及び250 Wのときの発振スペクトル波形である。FBGの波長帯域に比較して10倍以上に広がっていることが分かる。また出力が大きくなるにつれてスペクトル幅が広がっている。前述のとおり縦モードの間隔は0.1 pmであるから, 100 pmのFBGの帯域内には約1000本の縦モードが発生していることになる。これは各縦モードがもともと非常に狭線幅であるため、ファイバのガラス媒質内を伝搬して行くにしたがって自己位相変調(SPM; self phase modulation)により線幅が広がっているものであると考えられる。また図13からラマン散乱による1140 nm付近の発振ピークも観測されていることが分かる。



**図13** CW 発振ファイバレーザのスペクトル Output spectra of CW fiber laser.



**図14** CWファイバレーザの発振スペクトル (拡大図) Output spectra of CW fiber laser (enlarged view).

## 5. 50 W出力偏波保持ファイバレーザ

ファイバレーザの出力は前述のような構成によって高出化することが可能であるが、出力が高くなるに従い、SPMにより線幅が増大する。また、中心波長についてもパワーの大きな発振光がFBGを通過する際にわずかではあるがコアからの温度上昇がみられる。パッケージ側から温度補償してもその温度上昇により長波長側に波長がシフトしてしまう。また、効率の良い波長変換を行うにはその線幅を200 pm以下に制御することが望まれている。これらを実現するために、後置のファイバ増幅器によって比較的低い出力でファイバレーザを増幅するMOPA(master oscillator power amplifier)構造レーザを採用した。後段に接続した光増幅器は図15のように合計で3段である。

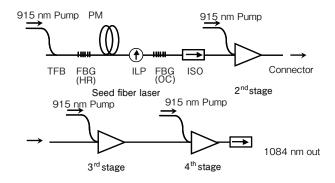


図15 50 W偏波保持レーザの構成 Configuration of 50-W polarization maintaining fiber laser

図16は初段のシードファイバレーザの発振波長 $\lambda c$ と FWHM線幅 $\Delta \lambda$ の関係をプロットしたものである。レーザの線幅を抑えるためにシードの出力は最大2 W程度と低く抑えた。

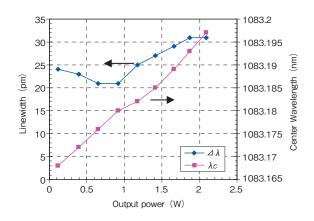


図16 初段シードファイバレーザの発振波長と線幅 Lasing wavelength and linewidth of the first-stage seed laser.

図17は2段目を、図18は3段目を、それぞれ配置した増幅器の出力と線幅及び発振波長の関係を示した図である。図19は4段最終段の励起光に対する出力特性(出力と効率)で、その

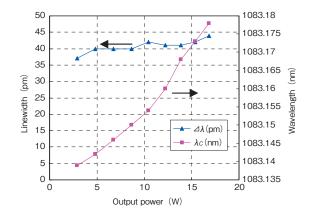


図17 2段目増幅器の出力特性 Output characteristics of the second-stage amplifier.

出力における線幅は**図20**に示した。中心波長は1083.151 nm で, どの出力でも一定であった。

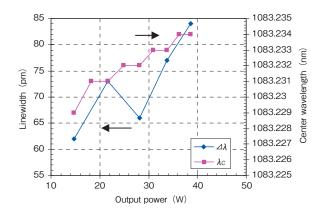


図18 3段目増幅器の出力特性 Output characteristics of the third-stage amplifier.

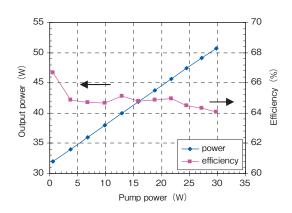


図19 4段目増幅器の励起光に対する出力と効率 Output and efficiency vs. pumping light power at the fourth-stage amplifier.

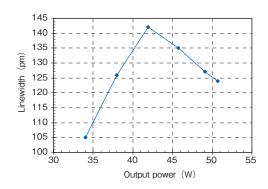


図20 出力と線幅 Output power vs. linewidth.

### 6. まとめ

FBGの波長安定化手法を駆使して、波長1064 nmにて線幅、波長ともに高い温度安定性と長期安定性を保つファイバレーザの開発に成功した。更にMOPA構成のファイバ増幅を行うことにより波長1083 nmにおいて線幅を200 pm以下に制御しながら50 Wまでの偏光保持出力を得ることができた。

この本レーザに周期分極ニオブ酸リチウム (PPLN; periodically poled lithium niobate) を主体とする SHG素子を後置するだけで容易に532 nmの緑色光を発生させることができ、通常30%程度の変換効率が得られていることが報告されている $^{8}$ 。

本レーザの特長の1つは、波長が特別な制御をしなくても非常に安定であり、更なる用途の拡大が期待できることである。また Ybの  $1.0~\mu m$ 帯のゲイン帯域は非常に広く、半導体では直接発生することが難しい  $500\sim600~n m$ 帯の基本波である  $1030~n m\sim1180~n m$ 付近の動作も現在検討中である。

## 参考文献

- David J. DiGiovanni and Martin H. Muendel: "High-power fiber lasers and amplifiers," Optics & Photonics News, (1999), 26.
- Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne, and J. Nilsson: "Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power," Opt. Express 12, (2004), 6088.
- 3) Y. Jeong, J. Nilsson, J. K. Sahu, D. B. S. Soh, C. Alegria, P. Dupriez, C. A. Codemard, D. N. Payne, R. Horley, L.M. B. Hickey, L. Wanzcyk, C. E. Chryssou, J. Alvarez-Chavez, and P. W. Turner: "Single-frequency, polarizedytterbium-doped fiber MOPA source with 264 W output power," Conference on Lasers and Electro-Optics 2004, (2004), postdeadline paper CPDD1
- 4) Gapontsev, V., Gapontsev, D., Platonov, N., Shkurikhin, O., Fomin, V., Mashkin, A., Abramov, M., and Ferin, S.: "2 kW CW ytterbium fiber laser with record diffraction-limited brightness", Lasers and Electro-Optics Europe, 2005. CLEO/ Europe. 2005 Conference on Volume, Issue, (2005), 508.
- 5) A. Liu, M. A. Norsen, and R. D. Mead: "60-W green output by frequency doubling of a polarized Yb-doped fiber laser," Opt. Lett. **30**, (2005), 67.
- 6) A. Shirakawa, K. Matsuo, and K. Ueda: "Fiber laser coherent array for power scaling, bandwidth narrowing, and coherent beam direction control," Proc. SPIE **5709**, (2005), 165.
- 7) A. Shirakawa, K. Hiwada, S. Hasegawa, K. Ueda, H. Takuma, K. Mizuuchi, K. Yamamoto, and Y. Ochi: "All-fiber linearly-polarized Yb-doped fiber laser yielding 2.2-W green second harmonics," CLEO-PR/IQEC 2005, (2005), CTuI4-4.
- 8) Sergey V. Tovstonog, Sunao Kurimura and Kenji Kitamura: "High power continuous-wave green light generation by quasiphase matching in Mg stoichiometric lithium tantalate," Appl. Phys. Lett., **90**, (2007) 051115.