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

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50Wまでの出力特性例を報告する。

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

- *2 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)
- *3 情報通信カンパニー ファイテル製品部

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 μ 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 λ_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。

^{*1} 研究開発本部 ファイテルフォトニクス研究所

$$\lambda_{B} = 2n\Lambda$$

$$n = \frac{n_{3} + n_{2}}{2}$$

$$\Delta \lambda = \left[\frac{2\Delta n\eta}{\pi}\right]\lambda_{B}$$

$$\Delta n = n_{3} - n_{2}$$

$$R_{B} \approx \tanh^{2}\left[\frac{\pi\eta L\Delta n}{\lambda_{a}}\right]$$

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, Λ はFBGの書き込み間隔, η 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。0~50℃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。図9はこの6 W出力のレーザの収納 筐体で、100 mm×100 mm×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40 m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λcと FWHM線幅Δλ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2W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





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 μm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500~600 nm帯の基本波である1030 nm~1180 nm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: "Ytterbiumdoped 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.
- 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.
- 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.
- A. Shirakawa, K. Hiwada, S. Hasegawa, K. Ueda, H. Takuma, K. Mizuuchi, K. Yamamoto, and Y. Ochi: "All-fiber linearlypolarized Yb-doped fiber laser yielding 2.2-W green second harmonics," CLEO-PR/IQEC 2005, (2005), CTuI4-4.
- 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.