

偏波保持フォトニックバンドギャップファイバを用いた 1180 nm ファイバレーザ

光電子技術研究所 柏木正浩¹・竹永勝宏²・市井健太郎²
谷川庄二²・北林和大³・松尾昌一郎⁴
島研介⁵・藤巻宗久⁶・姫野邦治⁷

1180-nm Fiber Laser Employing Polarization-maintaining Photonic Bandgap Fiber

M. Kashiwagi, K. Takenaga, K. Ichii, S. Tanigawa, T. Kitabayashi,
S. Matsuo, K. Shima, M. Fujimaki, and K. Himeno

近年、天文や医療、ディスプレイの分野において高出力黄色光源への期待が高まっている。波長 1160 nm から 1200 nm の近赤外光を波長変換する方法が有力視されているが、そのための実用的な高出力種光源が存在していない。そこで今回当社では偏波保持フォトニックバンドギャップファイバを用いて波長 1180 nm において 10 W を超える出力を持つファイバレーザの開発を目指し、その実現に成功した。出力は最大で 10.8 W、変換効率は 50 %、スロープ効率は 56 % であった。出力光は直線偏波で回折限界に近いことから波長変換に最適である。

Recently, high-power yellow-orange light sources are required in astronomical applications, medical applications, and display applications. Frequency doubling of laser light in the wavelength range from 1160 nm to 1200 nm is the promising way to realize high-power yellow-orange light sources. We have realized over 10-W fiber laser at 1180 nm employing an Yb-doped polarization-maintaining solid photonic bandgap fiber. The maximum output power was 10.8 W with slope efficiency of 56%. The conversion efficiency of 50% was successfully achieved. A linearly polarized and nearly diffraction-limited output beam was also obtained, which is suitable for efficient frequency doubling.

1. ま え が き

近年、天文や医療、ディスプレイなどの分野において、黄色や橙色など波長 580 nm ~ 600 nm 帯の高出力可視光源が必要とされている。このような波長では半導体レーザでの直接発振が困難であり、ガスレーザや色素レーザなどの大型のレーザ光源しか存在しなかった。これに対して波長 1160 nm ~ 1200 nm 帯の光を波長変換することで、波長 580 nm ~ 600 nm 帯の光を生成する手法がコンパクトな高出力可視光源を実現する方法として検討されている¹⁾。

波長変換では、波長 1160 nm ~ 1200 nm 帯の光を第二次高調波発生により波長 580 nm ~ 600 nm 帯の光に変換する。第二次高調波発生は二次の非線形光学効果であることから、変換効率には高いパワー密度および入射光と発生した高調波間の位相整合が重要とな

る。そのため、入射光にはパワーが高いこと、時間的および空間的コヒーレンスが良いたことが求められる。また、波長変換に用いられる周期分極反転ニオブ酸リチウム (PPLN) などの素子は異方性結晶であることから、入射するレーザ光は直線偏光であることが求められる。

波長 1160 nm ~ 1200 nm 帯では高出力の実用的な光源がないことから、これまでに様々な構成のレーザが提案されている。特にファイバレーザは空間的コヒーレンスが良く、高出力で高効率、単一偏波発振も可能なことから波長変換用の光源として非常に適している。さらに光学系のアライメントが不要なこと、熱放散性が優れている、長寿命、コンパクトなどの実用化に適した特徴も併せもっている。

波長 1030 nm ~ 1100 nm 帯のファイバレーザは一般的にコアにイッテルビウム (Yb) を添加したファイバを増幅媒体として用いており、波長 900 nm ~ 1000 nm の高出力、高効率、高信頼の半導体レーザを励起光源として使えるため、早くから高出力化に向けての研究が行われ²⁾、材料加工などの分野で実用化が進んでいる。当社でもこれまでに 10 W のパルスファイバレーザ³⁾ や 300 W の連続波ファイバレーザを開発し

1 光技術研究部 (博士 (理学))
2 光ファイバ技術研究部
3 光技術研究部
4 光ファイバ技術研究部グループ長 (博士 (工学))
5 光技術研究部グループ長
6 光ファイバ技術研究部長
7 光技術研究部長

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説明
Yb-PM-SPBGF	Yb-doped Polarization-Maintaining Solid Photonic Bandgap Fiber	偏波保持特性と波長フィルタ効果を持つ増幅用ファイバ
PPLN	Periodically Poled Lithium Niobate	擬似位相整合により高効率に波長変換を行う素子
ASE	Amplified Spontaneous Emission	励起された増幅用ファイバから出る増幅された自然放出光
FBG	Fiber Bragg Grating	ファイバのコアの屈折率を周期的に変化させることで特定の波長の光を反射するファイバ型デバイス

ている⁴⁾。

Yb をコアに添加したファイバは波長 1000 nm ~ 1200 nm 帯で発光することから波長 1160 nm ~ 1200 nm 帯でのレーザ発振も可能である。しかしながら波長 1000 nm 以下の光で励起した場合、波長 1030 nm ~ 1100 nm 帯での利得が非常に大きく、この波長域で寄生発振が起こるため不安定な発振状態となり高出力化が難しい。これを解決するために、波長 1090 nm 付近で励起する方法が提案されている⁵⁾。この方法によれば、寄生発振が起こることなく高出力化が可能となるが、波長 1090 nm の光は Yb 添加ファイバへの吸収が少ないことから、吸収を改善するために Yb 添加ファイバを 100℃ 以上に加熱する必要がある、ファイバの信頼性を低下させる問題がある。

その他の方法としてコアにビスマス (Bi) を添加したファイバが波長 1100 nm ~ 1200 nm において発光するため注目を集めている。この Bi 添加ファイバを増幅媒体に用いたファイバレーザも提案され、波長変換による黄色光の生成が報告されている⁶⁾。しかしながら Bi 添加ファイバレーザはレーザ発振の効率が低いため実用化にいたっていない。

また誘導ラマン散乱においてストークス光の波長がシフトすることを利用して、波長 1160 nm ~ 1200 nm 帯でレーザ発振を行うラマンファイバレーザも提案されている⁷⁾。しかし誘導ブリルアン散乱の影響で線幅を狭くすることが難しく、狭線幅が要求される高効率の波長変換用の種光源には適していない。

近年、偏波保持フォトニックバンドギャップ構造を持つ Yb 添加ファイバ (Yb-PM-SPBGF) が提案されている⁸⁾。フォトニックバンドギャップ構造を持つことでファイバの全長にわたって分布的な波長フィルタ特性を持たせることができるため、波長領域において利得特性を制御することができる。これにより波長 1030 nm ~ 1100 nm 帯の Amplified Spontaneous Emission (ASE) を除去することで寄生発振を抑圧し、波長 1160 nm ~ 1200 nm 帯での高出力なレーザ発振が可能となる。

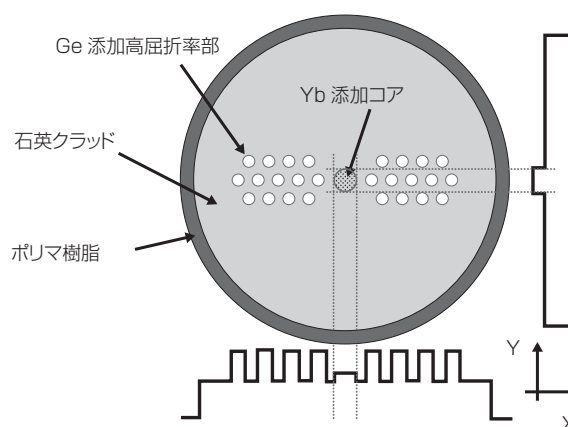


図1 Yb-PM-SPBGF の断面の概略図

Fig. 1. Schematic cross sectional view of Yb-PM-SPBGF.

当社では波長 1160 nm ~ 1200 nm で高出力化が可能なフォトニックバンドギャップ構造を持つ Yb 添加ファイバについて設計を行い、ついでファイバレーザでの実証実験を行ってきた⁹⁻¹³⁾。今回はその成果について紹介する。

2. 偏波保持フォトニックバンドギャップ構造を持つ Yb 添加ファイバ

図1に Yb-PM-SPBGF の断面の概略図を示す。中心に Yb を添加したコアがあり、その両側に Ge を高濃度に添加した高屈折率部を、フォトニックバンドギャップを形成するように周期的に並べている。石英クラッドを低屈折率のポリマ樹脂により覆うことでダブルクラッド構造としているので、励起光はクラッドを導波してコアを横切る際に Yb により吸収される。Yb を添加したコアはクラッドよりわずかに屈折率が高くなっており、コア内の光はコアとクラッドの屈折率差とフォトニックバンドギャップにより導波する。クラッドを導波する励起光の一部は高屈折率部のみを導波して Yb 添加コアに吸収されないことから、高屈

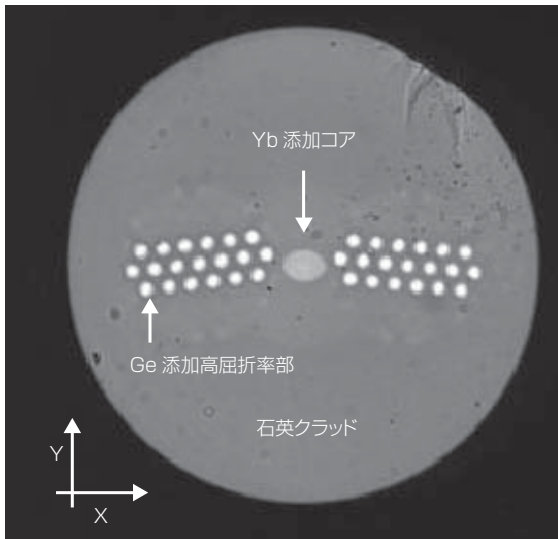


図 2 作製したファイバの断面図
Fig. 2. Cross sectional view of fabricated fiber.

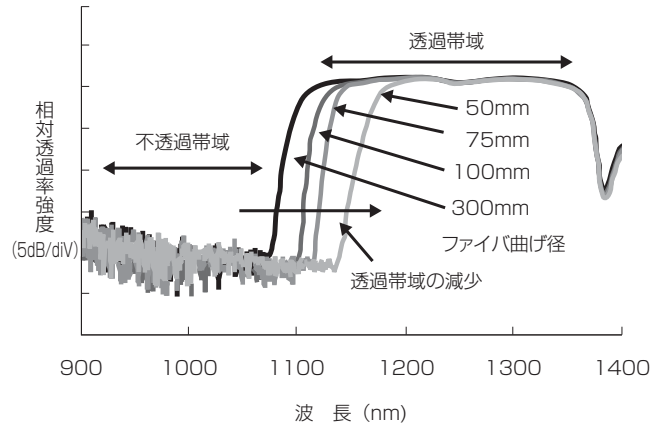


図 3 作製したファイバの透過スペクトル
Fig. 3. Transmission spectra of fabricated fiber.

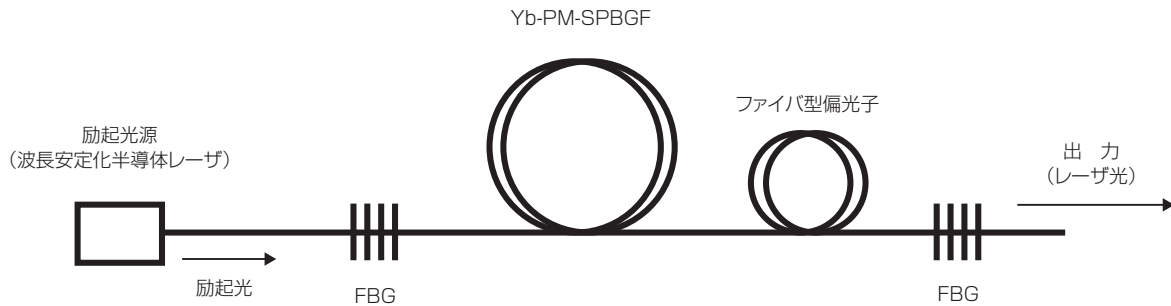


図 4 Yb-PM-SPBGF を用いた 1180 nm ファイバレーザ
Fig. 4. 1180 nm fiber laser employing Yb-PM-SPBGF.

折率部の割合が高いと励起光吸収率が低下する。そのためクラッド全体に対する高屈折率部の割合を減らすために Yb 添加コアの両側にだけ高屈折率部を周期的に並べた。また断面構造を非軸対称にすることで複屈折を発生させ偏波保持特性も持たせた。

図 2 に実際に作製した Yb-PM-SPBGF の断面図を示す。Yb 添加コアのコア径は約 $10 \mu\text{m}$ 、比屈折率差は 0.15%、高屈折率部の直径は $4.7 \mu\text{m}$ 、比屈折率差は 2.8%、高屈折率部の間隔は $7.5 \mu\text{m}$ である。図 3 にこのファイバの透過スペクトルを示す。波長 $1000 \text{ nm} \sim 1150 \text{ nm}$ の光はフォトニックバンドギャップの波長フィルタ効果により除去され透過していない。波長 $1160 \text{ nm} \sim 1200 \text{ nm}$ の光は透過しており、透過損失は波長 1180 nm で 20 dB/km である。周期構造を Yb 添加コアの両側だけに形成した場合でも十分な波長フィルタ特性を持つことがわかる。また、ファイバの巻き径を小さくしていくと周期構造が歪むことから透過帯域が狭まり、波長 $1160 \text{ nm} \sim 1200 \text{ nm}$ も不透過帯域となっ

てしまう。今回試作したファイバでは波長 1180 nm で使用する場合には巻き径 75 mm が最適である。

3. 偏波保持フォトニックバンドギャップファイバを用いた 1180 nm ファイバレーザ

図 4 に Yb-PM-SPBGF を用いた 1180 nm ファイバレーザの構成を示す。励起光源と共振器からなり、共振器の増幅用ファイバには前述の Yb-PM-SPBGF を用いた。共振器を構成する 2 つのファイバブラッググレーティング (FBG) を偏波保持ファイバに作製し、共振器内にファイバ型の偏光子を設置することで単一偏波発振を可能とした。また、シングルモード発振となるようにこれらのファイバは波長 1180 nm においてシングルモード条件となるファイバを使用した。FBG の反射波長は 1180 nm で片側は反射率 99%、もう片側は出力光を取り出せるように 20% とした。励起光源としては発振波長 976 nm の半導体レーザを使用した。

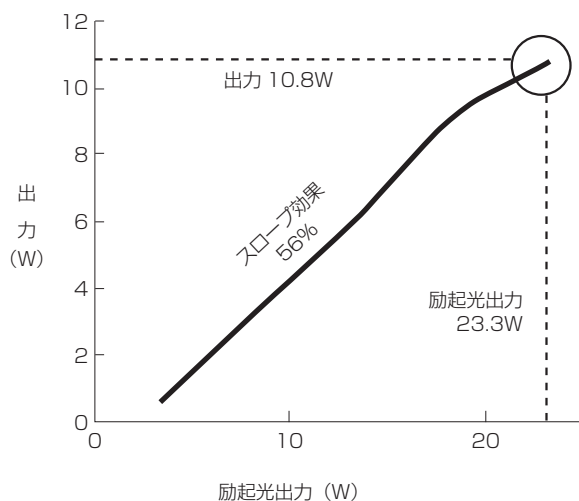


図5 出力パワー特性

Fig. 5. Output power of fiber laser.

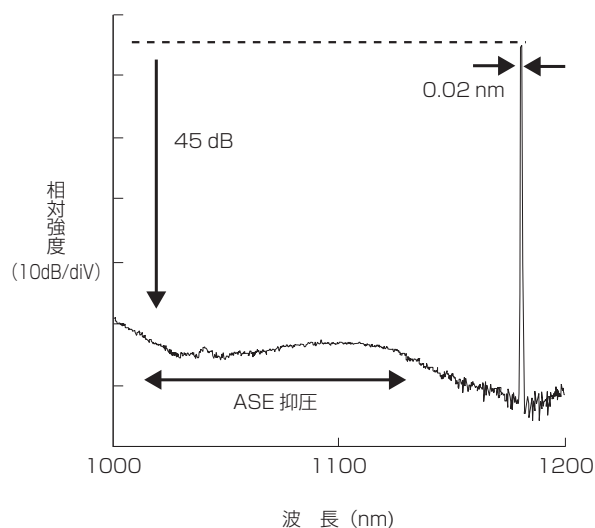


図6 出力スペクトラム

Fig. 6. Output spectrum of fiber laser.

Yb添加ファイバは波長976 nmでの吸収ピークが最も大きいことから短いファイバ長で共振器を構成できるようになる。これによりコンパクトな収納と効率向上が可能となる。使用したYb-PM-SPBGFは7.5 mである。また波長976 nmでの吸収ピークは非常に狭帯域であるため励起光源の発振波長変動による影響が大きい。そこで使用した半導体レーザには波長安定化、狭帯域化素子を備えるようにした。

図5に作製した1180 nmファイバレーザの出力パワー特性を示す。発振閾値は2.5 Wで、励起パワーに対して出力パワーは線形に増加した。最大出力パワーは励起パワーが23.3 Wの時に10.8 Wであった。Yb-PM-SPBGFを用いているため、波長1030 nm～1100 nmでの寄生発振は完全に抑圧することができた。励起光-出力光変換効率率は50%で、スロープ効率は56%であった。この出力パワーと変換効率、スロープ効率は波長変換用の光源として十分な特性である。図6に励起光パワーが23.3 Wの時の出力光のスペクトルを示す。波長1030 nm～1150 nmの帯域においてASEが非常によく抑圧されており、発振波長1180 nmとのパワー差は45 dBに達した。発振波長1180 nmでのスペクトル幅は0.02 nmと非常に狭く、高効率な波長変換が可能である。また、出力光は26 dBと高い偏波消光比を持つことから、波長変換時に寄与しない偏波成分は1%以下となる。波長変換にはビーム品質も重要であるが、作製したファイバレーザの出力光のビーム品質は回折限界に近い特性を持つ。上記のように当社が作製したYb-PM-SPBGFを用いた1180 nmファイバレーザは、寄生発振を抑制しながら10 Wを超える出力パワーを得ることができ、さらに高効率な波長変換に必要なスペクトル幅や偏波特性、ビーム品質を併せ持っている。

4. む す び

今回当社では医療、天文、ディスプレイに応用が可能な波長変換を用いた黄色光源の種光源向けとして1180 nmファイバレーザについて検討を行った。高出力化において問題となる波長1030 nm～1100 nmの寄生発振を抑圧することが可能なYb-PM-SPBGFを設計および作製した。さらにそのファイバを用いた1180 nmファイバレーザを作製し、寄生発振を起こすことなく10.8 Wの出力を得ることが可能であることを確認した。この時、励起光-出力光変換効率率は50%、スロープ効率は56%と高い効率であった。また出力光はスペクトル幅が0.02 nm、偏波消光比が26 dB、回折限界に近いビーム品質を有することから波長変換に好適である。このファイバレーザと波長変換素子を組み合わせることで、他の方法では難しかった高出力で高効率かつコンパクトな黄色レーザを実現することが可能となる。

参 考 文 献

- 1) Y. Feng, et al. : "589 nm light source based on Raman fiber laser," Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 43, No. 6A, pp. L722-L724, May 2004
- 2) J. Nilsson, et al. : "Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36kW continuous-wave output power", Optics Express, Vol.12, No.15, pp.6088-6092, 2004
- 3) 谷川ほか：「10W級レーザマーキング用ファイバレーザ」, フジクラ技報, 第111号, pp.5-10, 2006
- 4) 田中：「100ワット級CWファイバレーザ」, フジクラ技報, 第115号, pp. 63, 2008

- 5) M. P. Kalita, et al. : "Multi-watts narrow-line width all fiber Yb-doped laser operating at 1179 nm," *Opt. Express*, Vol. 18, No.6, pp. 5920-5925, March 2010
- 6) A. B. Rulkov, et al. : "Narrow-line, 1178 nm CW bismuth-doped fiber laser with 6.4 W output for direct frequency doubling," *Opt. Express*, Vol. 15, No.9, pp. 5473-5476, April 2007
- 7) D. Georgiev, et al. : "Watts-level frequency doubling of a narrow line linearly polarized Raman fibre laser to 589 nm," *Opt. Express*, Vol.13, No.18, pp.6772-6776, Sep. 2005
- 8) A. Shirakawa, et al. : "High-power Yb-doped photonic bandgap fiber amplifier at 1150-1200 nm ," *Opt. Express*, Vol.17, No.2, pp.447-454, Jan. 2009
- 9) R. Goto, et al. : "Cladding-Pumped Yb-Doped Solid Photonic Bandgap Fiber for ASE Suppression in Shorter Wavelength Region," the Optical Fiber Communication Conf. (OFC), San Diego, CA, Feb. 26, 2008, OTuJ5
- 10) K. Takenaga, et al. : "Linearly-Polarized Lasing at 1180 nm Using Polarization-Maintaining Yb-Doped Solid Photonic Bandgap Fiber," 35th European Conf. on Optical Communication (ECOC), Vienna, Austria, Sep. 23, 2009, P1.10
- 11) M. Kashiwagi, et al. : "1180 nm Linearly-Polarized Fiber Laser with High Slope Efficiency Employing Low-Loss Ytterbium-Doped Polarization Maintaining Solid Photonic Bandgap Fiber," *Lasers and Electro-Optics (CLEO) and Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS) 2010*, San Jose, USA, May 19, 2010, CWC7
- 12) M. Kashiwagi, et al. : "5.6-W Linearly-Polarized Fiber Laser at 1180 nm Employing Low-Loss Ytterbium-Doped Polarization Maintaining Solid Photonic Bandgap Fiber," 15th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2010) Technical Digest, July 2010, Sapporo Convention Center, Japan, 7C4-2
- 13) M. Kashiwagi, et al. : "Over 10-W Linearly-Polarized Single Cavity Fibre Laser at 1180 nm Wavelength with Slope Efficiency of 56 % using Yb-Doped Polarization-Maintaining Solid Photonic Bandgap Fibre," 36th European Conf. on Optical Communication (ECOC), Torino, Italy, Sep. 20, 2010, Tu.5.D.3