

# 高効率単一偏波ファイバレーザ

光電子技術研究所 柏木正浩<sup>1</sup>・三室将邦<sup>2</sup>・市井健太郎<sup>3</sup>・諸橋倫太郎<sup>4</sup>  
光応用製品事業推進室 島研介<sup>5</sup>・姫野邦治<sup>6</sup>  
井添克昭<sup>7</sup>

## Highly Efficient Linearly-Polarized Fiber Laser

M. Kashiwagi, M. Mimuro, K. Ichii, R. Morohashi,  
K. Shima, K. Himeno, and K. Izoë

近年、ディスプレイや医療などの分野において、波長変換を用いた高出力可視光源が注目されている。この光源を実現するためには、高出力で高効率、狭スペクトル幅、高偏波消光比を持つ単一偏波光源が必要となる。そこで当社では波長変換用の単一偏波ファイバレーザを検討した。試作品の特性を評価し、波長変換に好適であることを確認した。

Recently, high-power visible light sources using frequency doubling have been attracting great interest in display and medical applications. In order to realize these light sources, linearly polarized laser sources are required that have high output power, a high energy conversion efficiency, narrow spectral width, and a high polarization extinction ratio. We have studied a linearly polarized fiber laser for frequency doubling. We evaluated the characteristics of the prototype and confirmed that it was suitable for frequency doubling.

### 1. ま え が き

ディスプレイや医療などの分野において、緑色や黄色など波長 500 nm ~ 600 nm 帯のワットクラスの実用的な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。これに対して固体レーザや半導体レーザからの波長 1000 nm ~ 1200 nm 帯の光を波長変換することで、波長 500 nm ~ 600 nm 帯の光を生成する手法の実用化が検討されている。

この波長変換を用いた高出力可視光源の最も大きな課題は光源全体としての効率向上である。そのため波長 1000 nm ~ 1200 nm 帯の光源の効率と、波長変換の効率をそれぞれ向上させる必要がある。波長変換は、周期分極反転二オブ酸リチウム (PPLN) などの波長変換素子に波長 1000 nm ~ 1200 nm 帯の光を入射し、第二次高調波発生により波長 500 nm ~ 600 nm 帯の光に変換

することで行われる<sup>1)</sup>。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、効率向上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ことが求められる。また、波長変換素子は異方性結晶であることから、入射するレーザビームは直線偏光であることが求められる。

波長 1000 nm ~ 1200 nm 帯の光源としては YAG などの結晶を用いたレーザもあるが、ファイバレーザも有力視されている。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こと、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 1000 nm ~ 1200 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<sup>2)</sup>、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<sup>3)</sup>や 100 W の CW ファイバレーザを開発している<sup>4)</sup>。

当社ではこのような波長 1000 nm ~ 1200 nm 帯のファイバレーザの技術を波長変換用光源に応用すること

1 光技術研究部 (理学博士)  
2 光技術研究部  
3 光ファイバ技術研究部  
4 応用電子技術研究部  
5 光技術研究部グループ長  
6 光技術研究部長  
7 光応 F グループ

省略語・専門用語リスト		
省略語・専門用語	正式表記	説明
FBG	Fiber Bragg Grating	ファイバのコア中に形成されたブラッグ回折格子

を検討しており、Yb添加ソリッドフォトニックバンドギャップファイバの開発も行っている<sup>5)</sup>。そして今回、波長変換用光源として単一偏波ファイバレーザの高効率化を検討したので、その成果を報告する。

## 2. 単一偏波ファイバレーザの構成

図1に単一偏波ファイバレーザの構成を示す。高反射FBGと低反射FBGで共振器を構成し、共振器内に増幅媒体としてYb添加ファイバを配置した。高反射FBGのファイバにはポンプコンバイナを接続し、ポンプコンバイナに励起光源を接続した。

高出力化のためにYb添加ファイバはダブルクラッド構造とした。これに合わせて高反射FBGのファイバもダブルクラッド構造とした。励起光源から出てポンプコンバイナで合波された励起光は、高反射FBGのファイバのクラッドを通り、Yb添加ファイバのクラッドへ入射される。Yb添加ファイバのクラッドを導波している励起光は、Ybが添加されたコアを通過するたびに吸収される。吸収されなかった励起光については、Yb添

加ファイバを導波した後にファイバ外に放出されるようにした。励起光を吸収したYb添加ファイバのコアでは増幅された自然放出光（Amplified Spontaneous Emission：ASE）が発生する。このASEは共振器内を往復し、Yb添加ファイバを通過する時に増幅され、やがてレーザ発振する。レーザ発振した光は低反射FBG側より共振器の外に取り出した。

高反射FBGと低反射FBGはレーザ共振器が構成されるように、同一の波長に反射波長域を有するよう作製した。レーザの発振波長はFBGの反射波長で決定されるが、時間的コヒーレンスが良くなるようにFBGの反射帯域を狭くし、発振スペクトルが狭帯域となるようにした。

共振器を構成するファイバは、レーザ光の空間的コヒーレンスが良くなるように、発振波長で単一モードとなるよう設計した。また融着損失が小さくなるように各ファイバのコアは同じ屈折率構造とした。さらに、使用しているファイバは図2に示した断面構造を有した

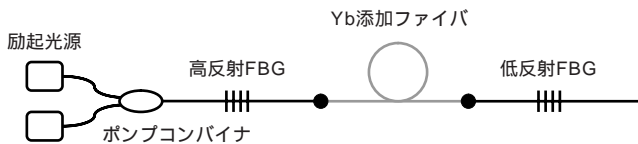


図1 単一偏波ファイバレーザの構成  
Fig. 1. Constitution of linearly-polarized fiber laser.

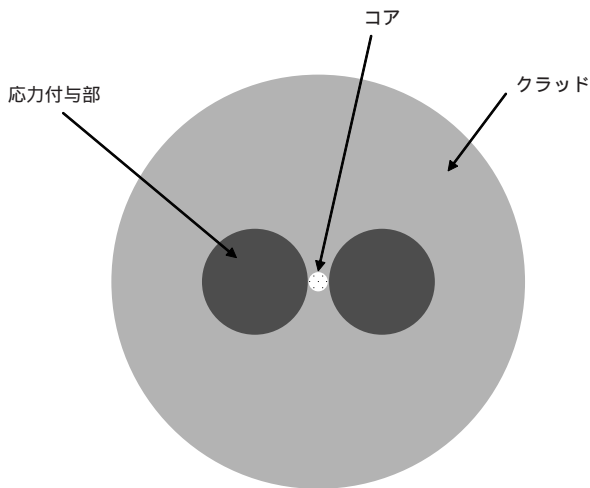


図2 ファイバの断面形状の概念図  
Fig. 2. Schematic diagram of cross section of fiber.

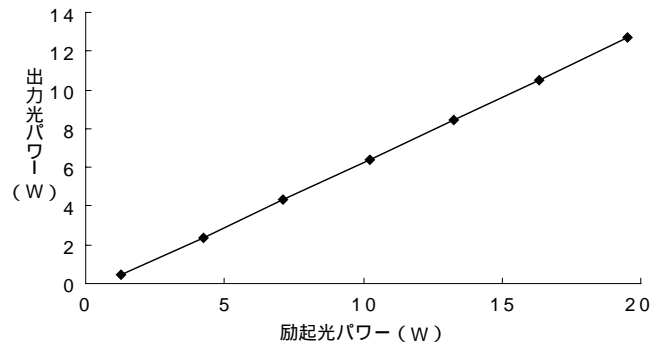


図3 励起光パワーと出力光パワーの関係  
Fig. 3. Relation between pump power and output power.

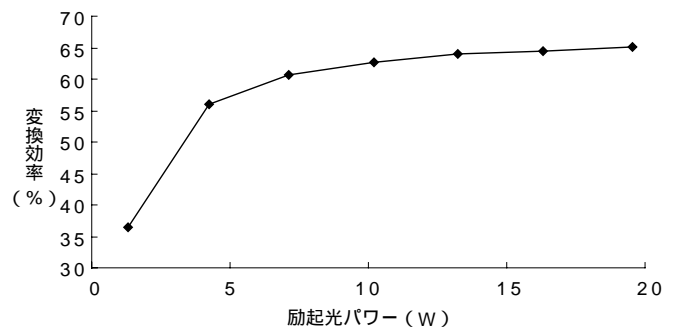


図4 励起光パワーと変換効率の関係  
Fig. 4. Relation between pump power and conversion efficiency.

PANDA 型のものであり、曲げ損失により一方の偏波成分の損失が大きくなるように、応力付与部材間の距離を通常の PANDA ファイバよりも狭くしている。偏波間の曲げ損失の違いにより、レーザ発振は、損失の低い偏波成分のみで選択的に生じる。これにより、バルク型の偏光子などの新たな光部品を用いることなく、レーザ共振器を構成するファイバを巻くだけで単一直線偏波発振するレーザが実現できる。この方式は、部品点数を少なくできることから、低損失なレーザ共振器を構成でき、ひいては高効率なレーザ光源が実現される。

上記で述べた構成の単一偏波ファイバレーザを試作した。使用する Yb 添加ファイバの長さおよび FBG の反射率は、高効率にレーザ発振が生じるように設計した。

### 3. 試作した単一偏波ファイバレーザの特性

図 3 に励起光パワーと出力光パワーの関係を示す。励起波長は温度などによる出力光パワーの変動を抑えるために 915 nm としている。励起光パワーの増加と共に出力光パワーも増加し、励起光パワー 19.6 W の時に出力光パワーは 12.8 W となった。出力光パワーが飽和する様子はないことから、励起光パワーを増やすことでさらなる高出力化が可能である。次に図 4 に励起光パワーに対する励起光 - 出力光変換効率を示す。励起光パワー

を上げると励起光 - 出力光変換効率は上昇し、励起光パワー 19.6 W の時に 65.1 % となった。この時、電気 - 光変換効率は約 31 % であった。

また図 5 に出力光のスペクトルを示す。励起光パワー 19.6 W において発振波長 1064.46 nm、スペクトル幅は 0.03 nm となった。一般に波長変換を効率良く行うには入射する光のスペクトル幅が 0.1 nm 以下が望ましいことから、今回のスペクトル幅は波長変換を行う上で十分に狭いものとなっている。

最後に出力光の偏光特性を評価した。図 6 に偏光子の角度と出力光の透過パワーを測定した結果を示す。偏波消光比は約 20 dB となった。波長変換では片方の偏波の光は波長変換に寄与しない。そのため、波長変換の効率を良くするには、出来るだけ高い偏波消光比が望ましい。偏波消光比が 20 dB の場合には波長変換されない偏波成分は 1 % 程度となるため、波長変換での効率の低下はほとんどない。

図 7 に開発した単一偏波ファイバレーザの外観写真

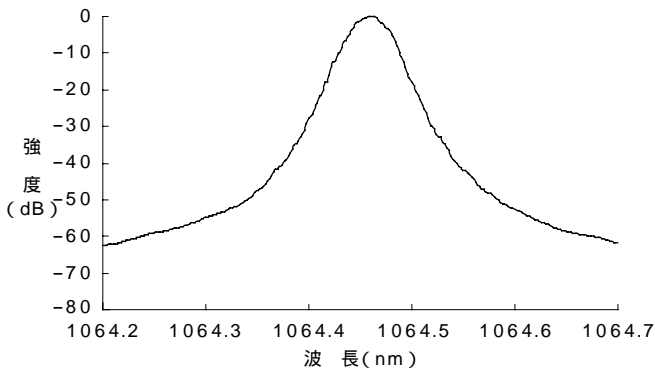


図 5 出力光スペクトラム  
Fig. 5. Measured spectra of output light.

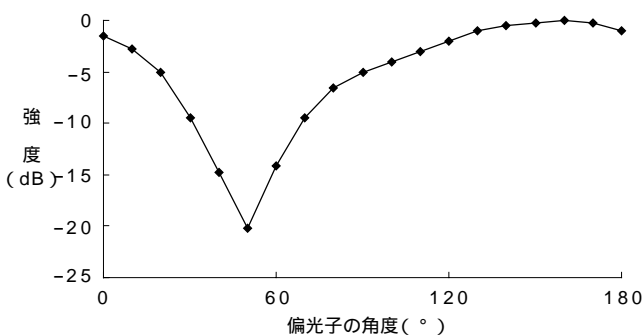


図 6 偏光子の角度と透過パワーの関係  
Fig. 6. Relation between rotation angle of polarizer and normalized transmitted power.

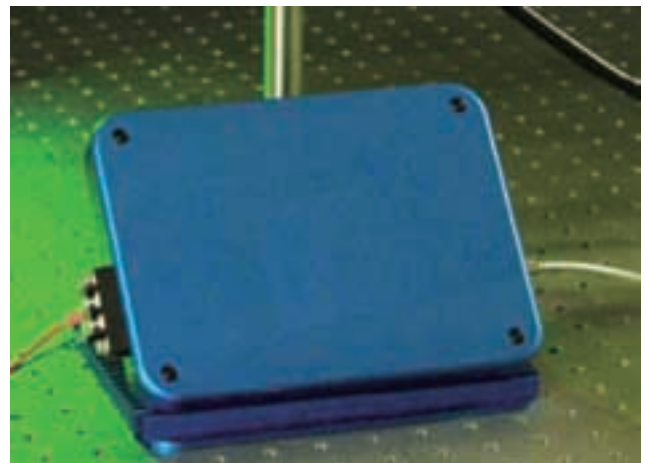


図 7 試作品の外観  
Fig. 7. Overview of prototype.

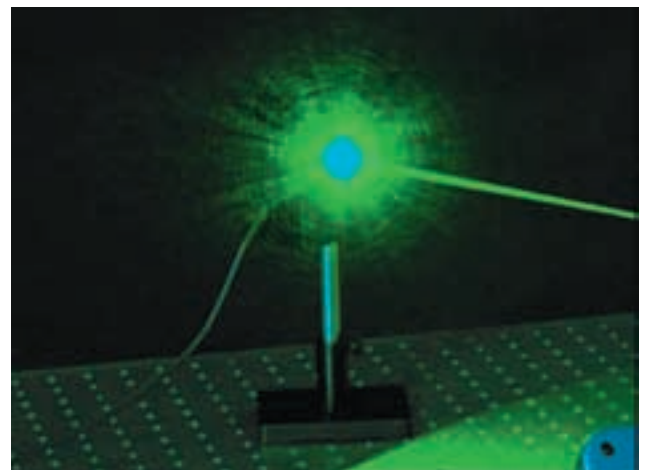


図 8 緑色光の発生  
Fig. 8. Green light generation.

を示す．内部には，励起用半導体レーザを含め，図 1 の光学部品がすべて収納されている．寸法は  $200(W) \times 150(D) \times 30(H)$  mm であり，従来の同一出力の固体レーザと比べて非常に小型である．また，さらなる小型化も可能である．図 8 に波長変換素子と組み合わせることで緑色の光を発生させた様子を示す．実験では，10 W のファイバレーザ光入力に対して，2 W の緑色出力が得られた．

#### 4. む す び

第二次高調波発生用の基本波光源として，単一偏波ファイバレーザの高効率化を検討した．試作したファイバレーザは出力光パワーが 12.8 W，電気-光変換効率が約 31%，スペクトル幅が 0.03 nm，偏波消光比が 20 dB であった．これらの特性は波長変換に好適である．この単一偏波ファイバレーザと波長変換素子を組み合わせることで，緑色出力が得られることも確認した．

#### 参 考 文 献

- 1) V. Pruneri, et al. : "Highly efficient green-light generation by quasi-phase-matched frequency doubling of picosecond pulses from an amplified mode-locked Nd:YLF laser", Optics Letters, Vol.21, No.6, pp.390-392, 1996
- 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 115 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) 後藤ほか : 「イッテルビウム添加ソリッドフォトニックバンドギャップファイバ」, フジクラ技報, 第 114 号, pp.1-5, 2008