

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

光電子技術研究所 後藤 龍一郎¹・竹永 勝宏¹・岡田 健志¹・柏木 正浩²・北林 和 大³
谷川 庄 二¹・島 研 介⁴・松尾 昌一郎⁵・姫野 邦治⁶

Ytterbium-doped Solid Photonic Bandgap Fiber

R. Goto, K. Takenaga, K. Okada, M. Kashiwagi, T. Kitabayashi,
S. Tanigawa, K. Shima, S. Matsuo, and K. Himeno

近年、眼科治療や天体観測等に用いられる黄橙色レーザの第二次高調波発生用途に、1160 nm ~ 1180 nm で発振するワットクラスの高出力レーザが注目を集めている。当社では、同波長帯での高出力ファイバレーザの実現に向け、イッテルビウム (Ytterbium: Yb) 添加ソリッドフォトニックバンドギャップファイバ (Solid Photonic BandGap Fiber: S-PBGF) を開発した。本ファイバは増幅された自然放出光 (Amplified Spontaneous Emission: ASE) を、フォトニックバンドギャップの効果により抑制する効果を持つとともに、高出力ファイバレーザに適したダブルクラッド構造となっており、Yb添加ファイバによる同波長帯での高出力レーザ発振に適した構造である。

Watts-class high-power lasers lasing at 1160 nm-1180 nm have been of great interest for realizing high-power yellow-orange lasers by frequency doubling in ophthalmic surgery and astronomical applications. We have developed a ytterbium-doped (Yb-doped) solid photonic bandgap fiber (S-PBGF) for high-power lasers lasing at 1160 nm-1180 nm. This fiber can suppress amplified spontaneous emission (ASE) by the photonic bandgap effect. In addition, the fiber structure is a cladding-pumped structure, which is suitable for high-power lasers. This fiber is therefore suitable for high-power Yb-doped fiber lasers lasing at 1160 nm-1180 nm.

1. ま え が き

近年、眼科治療や天体観測といった用途に、580 nm ~ 590 nm 帯で発振する黄橙色レーザが注目を集めている。なかでも、ファイバレーザを用いた黄橙色レーザは、装置の小型化、メンテナンスの容易さといった点で有利であることから、従来用いられてきた色素レーザや固体レーザに代わるレーザ光源としての期待が高まっている。

ファイバレーザを用いた黄橙色レーザは、1160 nm ~ 1180 nm 帯 (以下、基本波と記す) で発振するファイバレーザからの出射光を第二次高調波発生により 580 nm ~ 590 nm 帯の光に変換する方法が一般的であり、大きく分けてふたつに分類される。ひとつは、ファイバマンレーザにより基本波を発生させる方法¹⁾である。しかし、ファイバマンレーザにより基本波を発生させる場合、非線形効果によるレーザ発振波長の広がり原因で、第二次

高調波発生効率低下するという問題が存在する。もうひとつは、基本波を直接発振させる方法であり、ファイバマンレーザと比較して発振波長を狭帯域にできることから、高効率な第二次高調波発生が期待できる。この方法には、イッテルビウム (Yb) 添加ファイバを用いる方法²⁾と、ビスマス (Bi) 添加ファイバを用いる方法³⁾が提案されており、Yb添加ファイバを用いる方法は、励起用の高出力な半導体レーザ光源等、信頼性の高い周辺部品が手に入りやすい点が大きな魅力である。しかし、Yb添加ファイバを前記基本波において高出力で発振させるためには、解決しなければならない課題が存在する。図1に一例を示すように、Yb添加ファイバの放出断面積は1030 nm付近において1160 nm ~ 1180 nm よりもはるかに大きいため、高出力な基本波を得るためには、1030 nm付近で発生する増幅された自然放出光 (Amplified Spontaneous Emission: ASE) を抑制し、1030 nm付近での発振を抑制しなければならない。

当社ではこの問題を解決するため、フォトニックバンドギャップファイバ (Photonic BandGap Fiber: PBGF) による ASE 抑制に注目した。PBGFとは、コアの周囲に周期構造を配置することによりブラッグ反射を導波原理として光が導波するファイバ⁴⁾であり、周期構造のブ

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

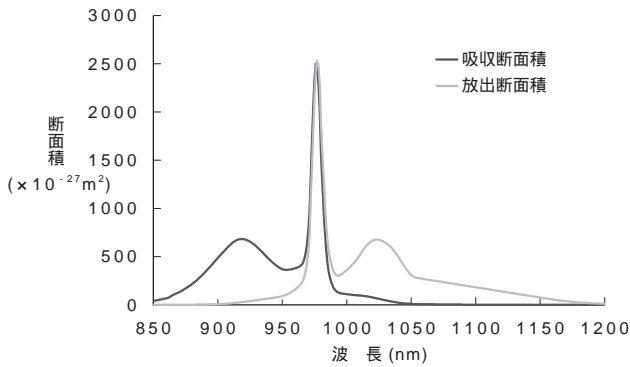


図 1 Yb添加ファイバの吸収・放出断面積

Fig. 1. Absorption and emission cross sections of Yb-doped fiber.

ラッグ条件を満たす特定の波長の光のみがコアを伝搬する。したがって、構造を最適化することで、1160 nm ~ 1180 nm 帯の光を伝搬させ、1030 nm 付近の光を遮断することが可能となり、Yb 添加ファイバにおける 1030 nm 付近の ASE を抑制することができる。なかでも、コアがガラスからなるソリッドフォトニックバンドギャップファイバ^{5),6)}(Solid Photonic BandGap Fiber : S-PBGF) は、コアに希土類が添加できることから本用途に非常に適しており、ASE の抑制に用いた報告例^{7),8)}がある。しかしながら、高出力ファイバレーザにとって不可欠であるダブルクラッドファイバと呼ばれる構造の希土類添加 S-PBGF は未だ実現されていなかった。今回当社では、高出力のファイバレーザにおける ASE 抑制を目的として、ダブルクラッド構造の Yb 添加 S-PBGF⁹⁾を開発したので報告する。

2. 一般的な S-PBGF の構造

石英系のガラスからなる一般的な S-PBGF の一例¹⁰⁾を 図 2 に示す。図 2 において、中心に存在するコアは純粋石英からなり、コアの周囲には、高濃度にゲルマニウムを添加して屈折率を上昇させた石英が周期的に配置されている。このような構造のファイバにおいてはコアよりもクラッドの屈折率が高く、全反射により光がコア中を導波することは不可能であるが、前章で述べたように、周期構造のブラッグ条件を満たす特定の波長の光は、ブラッグ反射を導波原理としてコアを伝搬する。一方、ブラッグ条件を満たさない波長の光はコアを伝搬することはできずに遮断される。図 2 のファイバのコア部を白色光源で励振し、スペクトラムアナライザの波長分解能を 10 nm に設定して透過特性を測定した結果を図 3 に示す。S-PBGF が波長フィルタとして機能している。

波長フィルタの機能を持つファイバは他にも、基本モードの曲げ損失を利用して波長フィルタ特性を持たせたファイバ¹¹⁾等が存在するが、曲げ損失を利用した場合、長波長の光を遮断することしかできないため、短波長の光を遮断するという今回の目的には適用が不可能である。

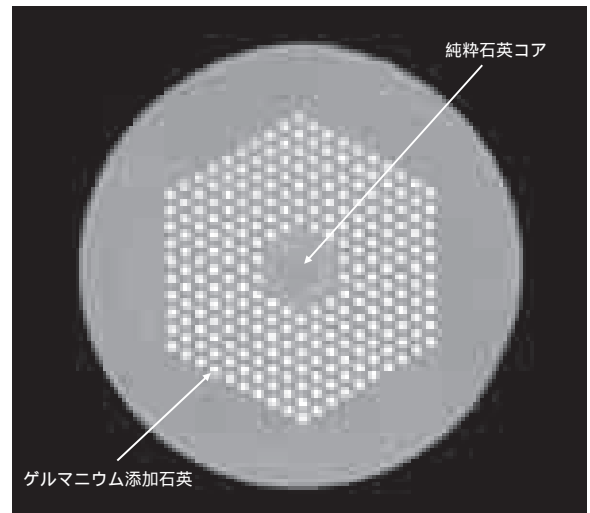


図 2 S-PBGF の断面の例

Fig. 2. Example of cross section of S-PBGF.

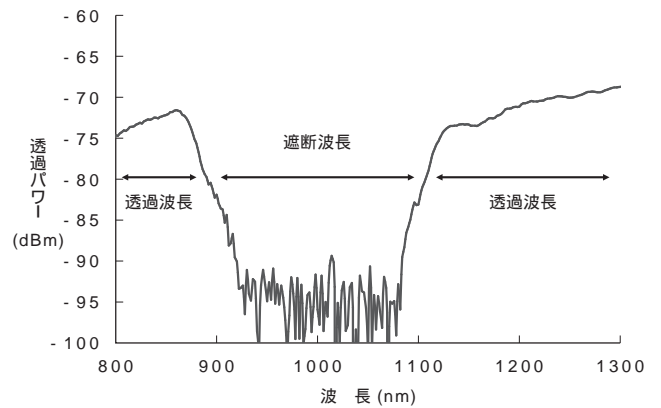


図 3 S-PBGF の波長フィルタ特性の例

Fig. 3. Example of wavelength filtering property of S-PBGF.

PBGF は、短波長の光も遮断することができ、波長フィルタとしての汎用性に優れる。

3. ダブルクラッド S-PBGF の構造

ダブルクラッドファイバとは、模式図を図 4 に示すように、信号光が導波するコアと、励起光が導波する第一クラッド、そして励起光にとってのクラッドとなる第二クラッドからなる。また、第二クラッドの外周には、ファイバ内部を保護する被覆がある。ダブルクラッドファイバは、多くの励起光をファイバ内に導入することが可能であるため、高出力のファイバレーザでは不可欠な構造であるが、図 2 に示す一般的な S-PBGF の構造をそのままダブルクラッド構造とすると、問題が発生する。励起光は、通常ダブルクラッドファイバの端面から第一クラッド全面へと入射するが、ゲルマニウム添加石英による周期構造部の屈折率は第一クラッドよりも高いため、周期構造部へと入射した励起光の一部は、周期構造中に閉じ

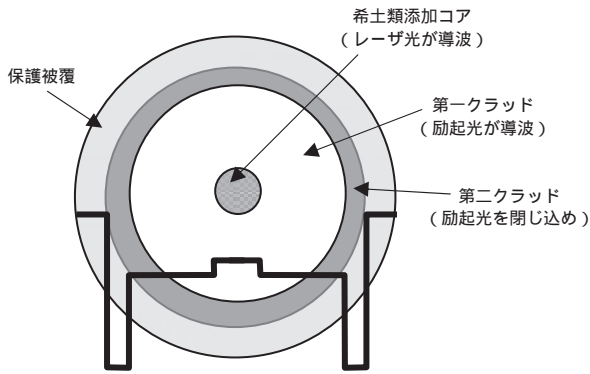


図4 ダブルクラッドファイバの断面形状と屈折率分布概念図
Fig. 4. Schematic diagram of cross section and refractive index profile of cladding-pumped fiber.

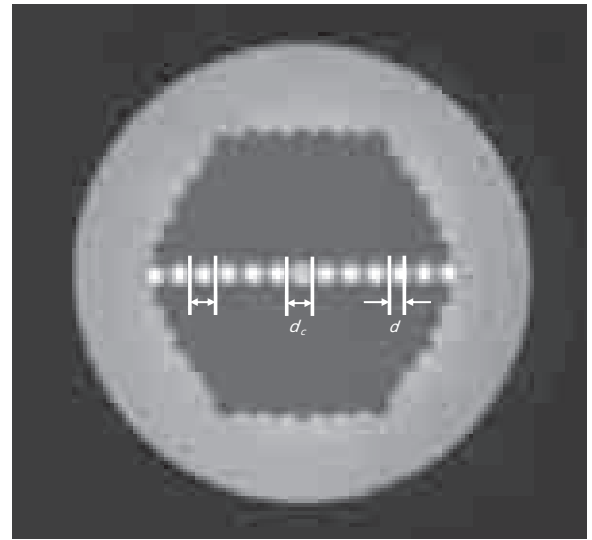


図6 作製したファイバの断面図
Fig. 6. Cross section of fabricated fiber.

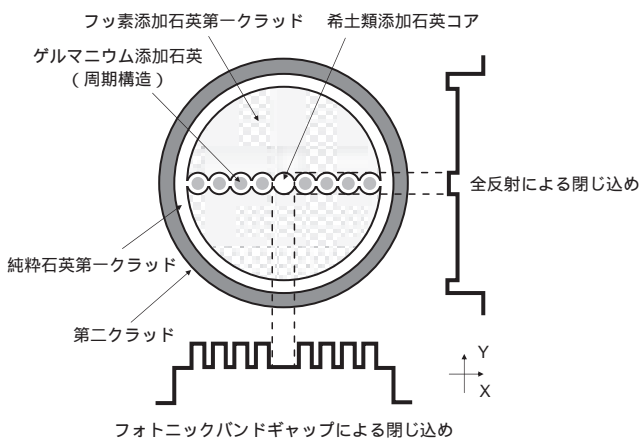


図5 ハイブリッド構造ダブルクラッドS-PBGFの断面形状と屈折率分布概念図
Fig. 5. Schematic diagram of cross section and refractive index profile of cladding-pumped S-PBGF.

込められてコアに到達しにくいいため、信号光の増幅に使用されず、励起光の利用効率の低下につながる。したがって、ゲルマニウム添加石英による周期構造部の数を少なくすることは、ダブルクラッドファイバの励起光利用効率を向上させる上で重要な点となる。

この問題を解決するため、当社では、ハイブリッド構造¹²⁾と呼ばれる構造を採用した。ハイブリッド構造とは、図5に示すように、X軸方向にはゲルマニウム添加石英による周期構造を配置してフォトニックバンドギャップの効果により光を閉じこめ、Y軸方向にはコアよりも屈折率の低いフッ素添加石英を配置して全反射により光を閉じこめる構造である。この構造を用いると、ゲルマニウム添加石英による周期構造部の数を大きく減らすことができるため、励起光の利用効率をあげることができる。しかも、X軸方向にはフォトニックバンドギャップによる光の閉じ込め構造が存在するため、フォトニックバンドギャップの効果によるASE抑制も同時に実現可能である。

4. ファイバの光学特性

本章では、ファイバの試作結果、光学特性について述べる。作製したファイバの断面を図6に示す。周期構造の周期は $7.3\ \mu\text{m}$ 、ゲルマニウムを添加した部位のクラッドに対する比屈折率差は最大で2.8%、直径 d は $3.7\ \mu\text{m}$ である。またコアの直径 d_c は $7.3\ \mu\text{m}$ 、第一クラッドの直径は $137\ \mu\text{m}$ である。コア部分にはイッテルビウムが添加されているために純粋石英よりも若干屈折率が上昇しているが、純粋石英との比屈折率差は0.1%以下と小さく、コアを伝搬するモードはX軸方向にはほぼフォトニックバンドギャップの効果により閉じこめられている。図6はファイバ被覆を除去したあとの断面写真であるために図中で確認することはできないが、クラッドは実際には屈折率1.38のフッ素系樹脂により被覆されたダブルクラッド構造となっており、さらにその外側には保護被覆が存在する。

作製したファイバ1mを3水準の直径でコイル状に巻き、コア部のみを白色光源で励振して波長フィルタ特性を測定した結果を図7に示す。図7において、測定に用いたスペクトラムアナライザの波長分解能は10nmに設定してある。1030nmにおける遮断効果は20dB/m以上存在することがわかる。また、フォトニックバンドギャップファイバは、ファイバに曲げを加えることにより透過帯域の両端において曲げ損失¹³⁾が発生するが、本ファイバの場合も、ファイバの巻き径の変化にともなって曲げ損失により波長フィルタ特性が変化している。したがって、ファイバの巻き径を変えることで、ASEの抑制波長を可変にできることが期待できる。

つづいて、作製したファイバを19m用い、ASEスペクトルの測定を行った。励起光は波長915nmのマルチモード半導体レーザを用い、励起方法はファイバ片側からの端面励起とした。励起光のパワーは0.45Wと1.8W

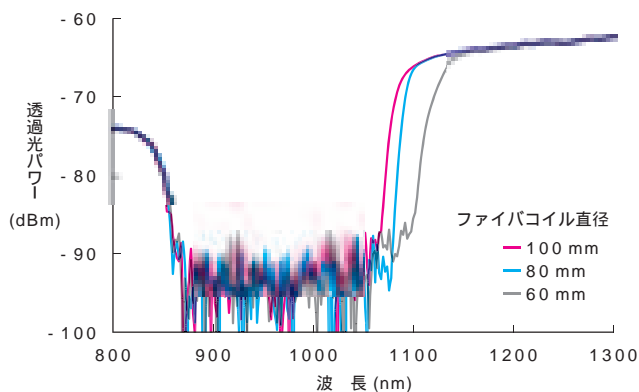


図7 作製したファイバの波長フィルタ特性
Fig. 7. Wavelength filtering property of fabricated fiber.

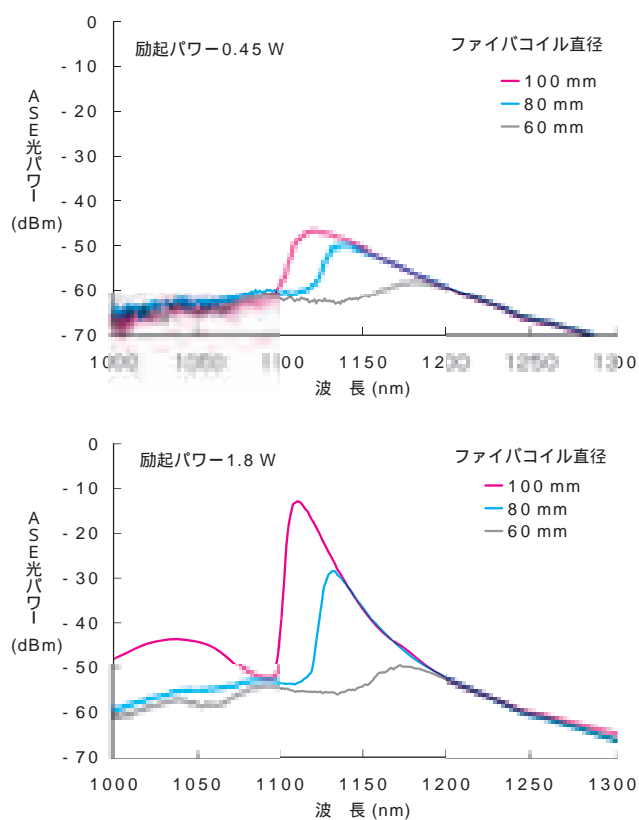


図8 作製したファイバのASEスペクトル
Fig. 8. ASE spectra of fabricated fiber.

の2水準とし、ファイバの巻き径も、直径100 mmから60 mmの間で3水準変化させた。測定結果を図8に示す。図8において、測定に用いたスペクトラムアナライザの波長分解能は0.2 nmに設定してある。いずれの場合においても、ASEのピーク波長は1100 nm以上に存在し、フォトニックバンドギャップの効果により、1030 nm付近のASEが抑制されていることがわかる。また、ファイバの巻き径を変化させることでASEが抑制される波長が変化しており、レーザ発振させたい波長に応じてASEの抑制

波長を可変にできることを示している。これらの結果より、本構造は、Yb添加ファイバで1160 nm～1180 nm帯の高出力レーザ発振を得るのに非常に適した構造であるといえる。

5. むすび

ダブルクラッド構造のYb添加S-PBGFを開発した。本ファイバはフォトニックバンドギャップの効果によるASE抑制効果をもち、Yb添加ファイバで1160 nm～1180 nm帯のレーザ発振を得るのに適した構造である。当社では現在、本ファイバを用いた1160 nm～1180 nm帯でのレーザ発振に向けた実験を進めており、本ファイバがYb添加ファイバレーザの新たな可能性を拓くことを期待している。

参考文献

- 1) D. Georgiev, et al. : Watts-level frequency doubling of a narrow line linearly polarized Raman fiber laser to 589 nm, *Optics Express*, Vol.13, pp.6772-6776, 2005
- 2) J. Ota, et al. : High-power Yb-doped double-clad fiber laser directly operating at 1178 nm, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.45, No.4, pp.L117-L119, 2006
- 3) A. B. Rulkov, et al. : Narrow-line, 1178 nm CW bismuth-doped fiber laser with 6.4 W output for direct frequency doubling, *Optics Express*, Vol.15, No.9, pp.5437-5476, 2007
- 4) J. C. Knight, et al. : Photonic band gap guidance in optical fibers, *Science*, 282, pp.1476-1478, 1998
- 5) A. Argyros, et al. : Photonic bandgap with an index step of one percent, *Optics Express*, Vol.13, pp.309-314, 2005
- 6) G. Bouwmans, et al. : Fabrication and characterization of an all-solid 2 D photonic bandgap fiber with a low-loss region (20 dB/km) around 1550 nm, *Optics Express*, Vol.13, pp.8452-8459, 2005
- 7) A. Wong, et al. : Three-level neodymium fiber laser incorporating photonic bandgap fiber, *Optics Letters*, Vol.31, pp.1388-1390, 2006
- 8) L. Bigot, et al. : Ytterbium-doped 2 D solid core photonic bandgap fiber for laser operation at 980 nm, *Proc. of ECOC2007*, paper 1.4.5, 2007
- 9) R. Goto, et al. : Cladding-pumped Yb-doped solid photonic bandgap fiber for ASE suppression in shorter wavelength region, *Proc. of OFC/NFOEC2008*, OTuJ5, 2008
- 10) R. Goto, et al. : Solid photonic band gap fiber with 400 nm bandwidth and loss below 4 dB/km at 1520 nm, *Proc. of OFC/NFOEC2007*, OML7, 2007
- 11) L. B. Fu, et al. : Compact high-power tunable three-level operation of double cladding Nd-doped fiber laser,

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

- Photonics Technology Letters, Vol.17, pp.306-308, 2005
- 12) A. Cerqueira S. Jr., et al. : Hybrid photonic crystal fiber,
Optics Express, Vol.14, pp.926-931, 2006
- 13) T. Birks, et al. : Bend loss in all-solid bandgap fibres,
Optics Express, Vol.14, pp.5688-5698, 2006