

フォトニックバンドギャップファイバーと応用技術

松尾 昌一郎

Photonic Band Gap Fiber and Its Application Technology

Shoichiro MATSUO

An introduction and recent topics on photonic band gap fibers (PBGFs) are presented. The PBGF involves periodic structure in a cladding and confines light thanks to photonic band gap effect. A hollow-core PBGF (HC-PBGF) has periodically arranged air holes in a cladding and an air hole as a core. The HC-PBGF is expected to overcome the nonlinear limitation of a silica core fiber. The reduction of attenuation and the control of high-order modes are issues for a practical use. An all-solid PBGF (AS-PBGF) has periodically arranged high-index rods in a cladding and a solid glass core. The AS-PBGF is expected to be a device for a fiber laser thanks to the wavelength filtering function of the PBGF. Lasing wavelength control for a visible light laser is presented as an attractive application.

Key words: photonic band gap fiber, hollow-core photonics band gap fiber, all-solid photonic band gap fiber, fiber laser

フォトニックバンドギャップファイバー (photonic band gap fiber; PBGF) は、クラッド領域に形成された周期構造により形成されるフォトニックバンドギャップ (photonic band gap; PBG)¹⁾ を利用して、クラッドより低屈折率のコア領域に光を閉じ込める光ファイバーである。コアとクラッドの比屈折率差を用いて、クラッドより高屈折率のコアに光を閉じ込めるといった従来の光ファイバーとは全く異なる導波原理、構造を有している。1995年にシリカと空気からなる構造による PBGF の理論的な提案がなされた後²⁾、1998年にクラッドよりも低屈折率コアを有するファイバーでの PBG による導波³⁾、翌年には空気コア型の PBGF (hollow-core PBGF; HC-PBGF) による導波結果が報告され⁴⁾、2000年以降、PBGF の理論解析や試作による実証が活発化していった。また、すべて固体ガラスからなるファイバーでも PBG のような閉じ込め効果を示す全固体 PBGF (all-solid PBGF; AS-PBGF) が提案され⁵⁻⁷⁾、その応用の範囲を広げている。

本稿では、PBGF の特徴を簡単に説明した後に、それぞれの PBGF の特徴および最近の研究動向を述べる。

1. 概 論

PBGF の構造例を図 1 に示す。コアの構造により大きく 2 つに分類できる。

HC-PBGF は、周期的に配置された空孔からなるクラッドとクラッドの空孔よりも大きな径を有する中空コアにより構成されている。図に示したファイバーの場合、クラッドの空孔直径は $3.5 \mu\text{m}$ 程度である。HC-PBGF では光の大半が中空のコアに存在するために、その非線形性は空気とほぼ同程度になるといわれており、ガラスのコアでは実現できない超低非線形ファイバーや超低損失ファイバーとしての応用が期待されている。

一方、AS-PBGF は、コアも含めてすべて固体ガラスで形成された PBGF である。HC-PBGF が周期的に配列された空孔により PBG を生じさせるのに対して、AS-PBGF ではクラッド部に高屈折率のロッドを周期的に配置することにより PBG を発生させ、低屈折率のコア部への光を閉じ込める。AS-PBGF の光の閉じ込めは高屈折率部での反共鳴反射に由来し、HC-PBGF と異なりクラッドの周期性は必要ないといわれている⁵⁾ が、本稿では PBGF に分類して紹介する。AS-PBGF の最初の実証⁶⁾ は屈折率が 1.79 と

(株)フジクラ 光電子技術研究所 (〒285-8550 佐倉市六崎 1440 番地) E-mail: shoichiro.matsuo@jp.fujikura.com

タイプ	Hollow-core PBGF (HC-PBGF)	All-Solid PBGF (AS-PBGF)
構造	ガラス 空孔	低屈折率ガラス 高屈折率ガラス
コア	空孔	低屈折率ガラス
クラッド	空孔, ガラス	高屈折率ガラス, 低屈折率ガラス

図1 フォトニックバンドギャップファイバーの構造による分類。

1.54 の silicate glass を用いて行われた。その後、従来の光ファイバー製造プロセスで製造可能な 1% 程度の屈折率差でも PBG が発生することが実証され⁷⁾、実用を視野に入れた研究が活発化した。コアを含めて固体であるという AS-PBGF の構造は、HC-PBGF に対するメリットでもありデメリットでもある。メリットとしては、コア領域に種々のドーパントが添加できることと、接続の容易さがあげられる。これらの特徴を生かして、後述のようにファイバレーザの分野での応用が注目されている。デメリットとしては、コアが固体ガラスであるためにガラスの非線形性からは逃げられないことがあげられる。

PBGF が通常のファイバーと最も異なる点は、光を透過する波長帯と遮断する波長帯が交互に現れる点である。図 2 に AS-PBGF の構造 (a) と特性の例 (b) を示す。図 2 (b) で点が帯状に並んでいる領域は、規則的に配置されたクラッドによるバンドであり、周期構造による閉じ込めが発生しない領域であることを示す。点がない領域は規則的に配置されたクラッドによるバンドが存在しない領域であり、周期構造による閉じ込めが発生する領域である。等価屈折率 1.45 の破線は、コア領域の屈折率に相当する。この図の例では、1150~1700 nm, 650~900 nm, 450~580 nm

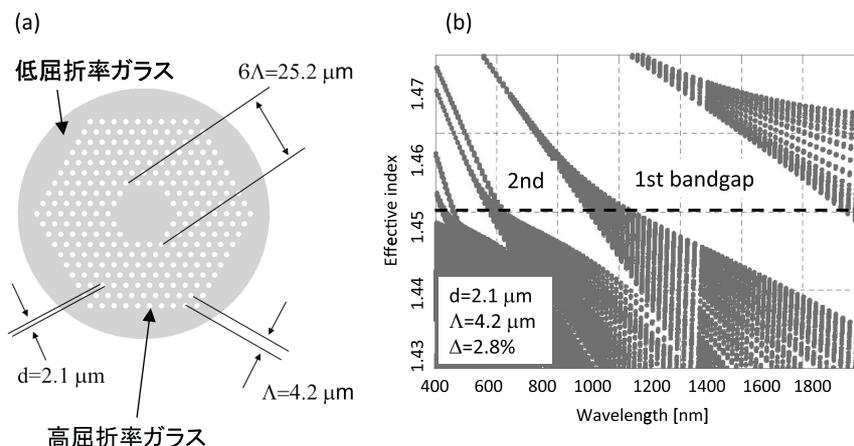


図2 フォトニックバンドギャップファイバーの特性例。

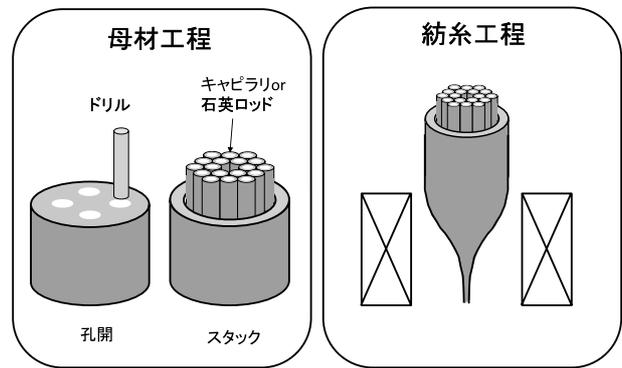


図3 フォトニックバンドギャップファイバーの製造方法。

の範囲ではコアに光が閉じ込められるが、それ以外の領域では光がクラッドに散逸し、コアには導光されない帯域となることを示している。この例では高屈折率ロッドの直径 d は $2.1 \mu\text{m}$ となっており、通常のシングルモード光ファイバーのコア直径が $9 \mu\text{m}$ 程度であるのに比べると、非常に小さいことがわかる。

PBGF の製造方法には、図 3 に示すようなスタック & ドローとよばれる方法を用いるのが一般的である。これは、クラッドの周期構造を構成するキャピラリー(中空パイプ)や高屈折率部を有するロッドとコア領域の部材を最外周クラッドとなる管内に並べて母材を作製し(スタック)、ファイバーとして線引きする(ドロー)方法である。空孔を有する HC-PBGF は母材作製過程や線引き時の条件により空孔のサイズが大きく変化するため、製造に際しては従来のファイバーの製造工程にはない技術が必要となる。

PBGF としては、同心円状に高屈折率部と低屈折率部を配置したブラッグファイバーとよばれる構造もある⁸⁾。ブラッグファイバーは、通常の光ファイバーの製造で用いられる MCVD (modified chemical vapor deposition) を用いて形成することが可能である。

2. 空気コア型フォトニックバンドギャップファイバー (HC-PBGF)

図1に示したように、HC-PBGFは周期的に配置された空孔クラッドに対して、7つもしくは19個のクラッド単格格子(セル)に相当する空孔を有するコアにより形成される。PBGFの光学特性は、空孔直径 d 、空孔間隔 Λ の比 d/Λ により強く支配される。透過帯域の広いバンドギャップを得るためには、 d/Λ が1に近い、つまり非常に中空部分の比率の大きな設計とする必要がある。また、コア周囲のシリカリングに局在する表面モードとよばれる伝搬モードの存在も、設計上の課題となる。周期構造の乱れにより表面モードとコアモードとの結合が発生すると、透過帯域内に損失が高い波長が存在する問題が発生する。この表面モードは、コア周囲のシリカリングの厚さを適切に設定することにより抑圧できることが示されている⁹⁾。また、構造により表面モードの影響を低減する方法も提案されている¹⁰⁾。

HC-PBGFは、シリカガラスファイバーよりも低損失な伝送路になることが期待されているが、今のところ報告されている伝送損失は1.2 dB/kmにとどまっている。HC-PBGFの損失要因については詳しい解析がなされており¹¹⁾、空孔の内壁面の粗さやコアの大きさに依存することが指摘されている。理論上最低損失を示す波長は通常のファイバーよりも長波長側にシフトし、1900 nmにおいて0.13 dB/kmになるといわれている。

HC-PBGFの低損失化のためにはコア径を7セル、19セルと大きくするとよいことが知られており、前述の最低損失のPBGFも19セルの構造を有している。しかしながら、伝送用ファイバーとして考えた場合、コア径の拡大に伴いマルチモード動作になる傾向がある点が課題であるといえる。7セルコアの場合でも10以上のモードが存在するが、高次モードの漏洩損失、散乱損失が大きいため実効的にシングルモードとなる設計が可能である。しかしながら、さらにコアを大きくすると高次モードの漏洩損失も小さくなり、実効的なシングルモード動作も困難になってしまい、低損失化とトレードオフの関係にある。低損失化のためのコア拡大とシングルモード動作を両立させるために、クラッドに7セルのコアを配置する構造によりコアの高次モードを抑圧する手法が提案されている^{12,13)}。図4に高次モード抑圧のための構造例を示す。19セルコアのPBGFのクラッド部に7セルのコアを6つ配置した構造になっている。この構造では、19セルの中心コアの高次モードと7セルの周囲コアの基本モードの伝搬定数はほぼ等しくなるため、中心コアの高次モードと外側コア高次

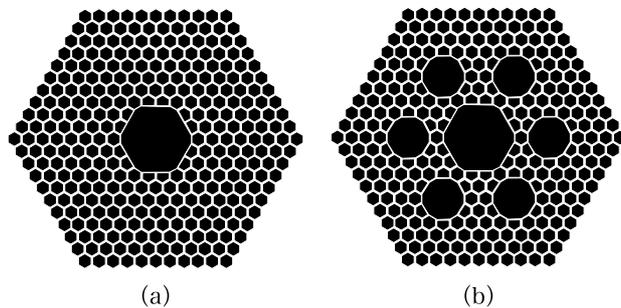


図4 高次モード抑制型フォトニックバンドギャップファイバー。(a)一般的なPBGFの構造例、(b)高次モード抑圧型PBGFの構造例。

モードの共振結合が発生し、中心コアの高次モードの漏洩損失を4桁程度大きくすることができ、実効的なシングルモード伝搬が実現できるとしている。

3. 全固体フォトニックバンドギャップファイバー (AS-PBGF)

AS-PBGFは伝送用ファイバーとして検討された例もあるが^{14,15)}、本稿では、PBGFのフィルターとしての機能を生かしたファイバーレーザーの分野での応用例を紹介する。

ファイバーレーザーの構成の一例を図5(a)に示す。ファイバーレーザーは、LD以外はファイバーで構成され、融着接続による安定した共振器となっている。また、ファイバーの広大な表面積を生かしたレーザー媒質からの効率のよい放熱や、ファイバー内への光閉じ込めによる高い励起光吸収効率により、従来のレーザーよりも低消費電力になるといわれている。ファイバーレーザーは、ファイバーの設計によりモードを制御できるために、すぐれたビーム品質のレーザー光を得ることができる点が特徴である。レーザー媒質としては、ytterbium (Yb)をコアに添加したYbDF (ytterbium doped fiber)が用いられる。YbDFはクラッドを2層有するダブルクラッド構造となっており(図5(b))、LDからの励起光は第一クラッドに入射され、第一クラッド内を導波しながらYbが添加されたコアにトラップされるようになっている(図5(c))。

シングルモードで発振するファイバーレーザーは集光性にすぐれるため、微細加工分野で注目されている。しかしながら、シングルモード動作の光ファイバーはコア径を細くする必要があり、高強度のレーザー光を伝搬させると非線形光学現象の発生が避けられなくなる。このため、高出力ファイバーレーザーの出力上限値は、誘導ラマン散乱(stimulated Raman scattering; SRS)により決定されている。SRSの影響を低減する方法として、曲げ損失が許容される範囲でコアクラッド間の比屈折率差を小さくしてコア

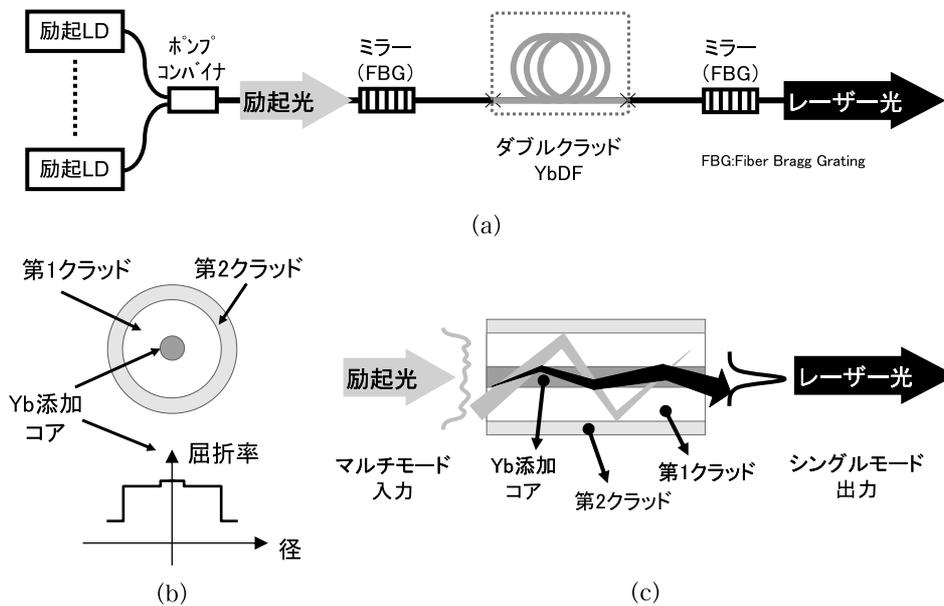


図5 ファイバーレーザーの構成と YbDF の構造. (a) ファイバーレーザーの構成例, (b) ダブルクラッド YbDF の断面と屈折率分布, (c) ダブルクラッド YbDF による増幅.

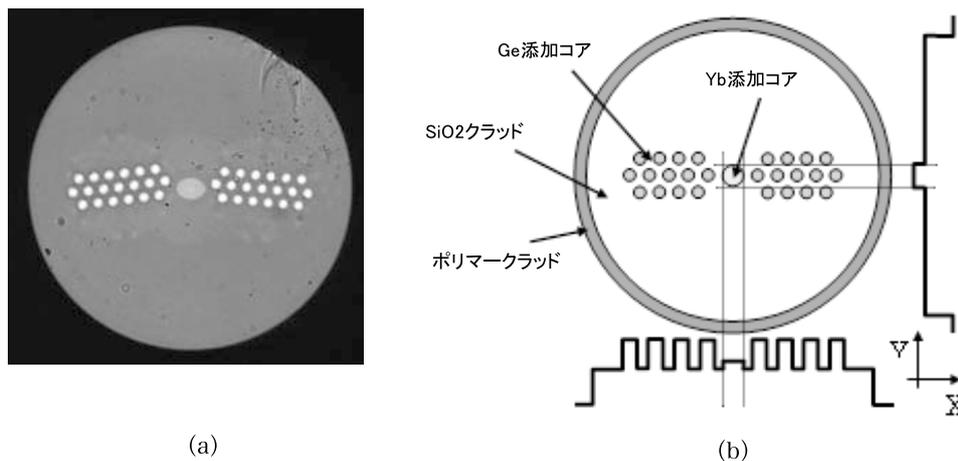


図6 ハイブリッドフォトリックバンドギャップファイバーの構造例. (a) 試作ファイバーの断面写真, (b) 試作ファイバーの構成.

径を拡大する方法や、多モード設計とすることでファイバーの基本モードのフィールド径を拡大し、基本モードのみを励振してシングルモードファイバーとして利用する方法などが用いられてきた。この SRS 低減に、PBGF を用いる方法が提案されている。本方法では、PBGF をローパスフィルターとして機能させることで SRS を抑圧する¹⁶⁾。通常のファイバーでは、レーザー光とストークス光がコア内を同時に伝搬し相互作用することで SRS が発生する。しかしながら、レーザー光は透過し、レーザー光より長波長側に発生するストークス光を遮断するような特性を有する PBGF を用いることにより、発生したストークス光を選択的に漏洩させ、SRS の発生を抑えることが可能になる。

ファイバーレーザー分野でのもうひとつの応用例として、発振波長の制御を紹介する。ファイバーレーザーの発振媒体として用いられる YbDF は 1000~1200 nm 付近の波長領域で利得を有するレーザー媒質であるが、1050 nm 付近での利得が非常に高く、一般的にはこの波長での発振が用いられている。また、レーザー光を非線形光学結晶に入射させ波長変換することにより、倍波の光を得ることができる。YbDF の発振波長である 1000 nm 付近の光を SHG (second harmonic generation) 素子に入射させることにより、500 nm 近辺の可視光を得ることができる。YbDF で一般的に用いられる 1050 nm の発振光では、520 nm 付近の緑の光が発生する。近年、医療分野や天文分野などで、黄

色や橙色の高出力レーザー光源が注目されている。YbDFを用いて黄色や橙色の光を発生させるためには、YbDFを1150~1200 nmの波長で発振させてSHG素子に投入すればよい。しかしながら、このような長波長側でのYbDFの利得は非常に小さく、長波長で発振するような共振器を組んでも、より利得の高い1050 nm付近での寄生発振が発生するという問題が発生してしまう。

このような問題を解決するために、PBGFをハイパスフィルターとして機能させる方法が提案されている^{17,18)}。図6は、このような発振波長制御のために開発されたファイバーの一例である¹⁹⁾。このファイバーは、通常ファイバーのような屈折率導波と、PBGによる導波のハイブリッド構造となっている。X軸方向は、高屈折率ロッドが周期的に配列されたクラッド構造となっており、この高屈折率クラッド層に由来するPBGにより光を閉じ込める。Y軸方向へは、通常のコアクラッド構造により光の閉じ込めが発生する。このようなハイブリッド構造には2つのメリットがある。ひとつはポンプ効率の向上である。ファイバーレーザー用のファイバーはダブルクラッド構造になっており、第一クラッドに入射された励起光が軸方向に伝搬していくうちにコアにトラップされる。図1に示したような構造のAS-PBGFではクラッドに高屈折率ロッドが存在するために、クラッドに入射した光が、コアではなく高屈折率層にトラップされる可能性がある。本ファイバーのようなハイブリッド構造では、少ない高屈折率ロッドで十分な波長フィルター特性を維持しつつ、高屈折率ロッドによるポンプ光のトラップを抑えてポンプ光の利用効率を高めることが可能である。もうひとつの特徴は、偏波面保存ファイバーとしての機能である。本ファイバーは27 dB程度の偏波消光比を示し²⁰⁾、偏波面保存ファイバーとして十分機能する能力を有する。したがって、本ファイバーにより構成したレーザー光は、偏波面の制御された入射光が必

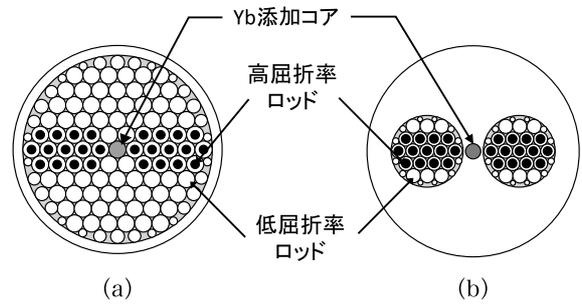


図7 ハイブリッドフォトニックバンドギャップファイバーの製造方法。(a) スタック法による詰め込みの例、(b) 孔開&スタック法による詰め込みの例。

要となるSHGを用いた波長変換素子用の光源として、非常に適した特性を有しているといえる。

また、このファイバーはユニークな方法で作製されている。図7に示すように、本ファイバーもPBGFの製法として一般的なスタック法により母材を組み上げることが可能である。しかしながら、図3に示した孔開法とスタック法を組み合わせることで、少ない手間でも母材の組み上げと損失低減が期待できる。本方法では、最初に孔開法によりYbコアを有する母材に2つの空孔を作製する。次に、この部分にバンドギャップを構成する高屈折率ロッドと隙間調整用の低屈折率ロッドを詰め込み一体化する。スタック法のみで組み上げた場合に比べて、詰め込むべきロッドの本数が大幅に少なくなっていることがわかる。また、本方法では組み上げ時にYbコアの周囲がクラッドガラスに守られた状態が保たれており、ファイバーの損失を低減するうえで有利である。

図8(a)に本ファイバーの透過損失特性を示す。本ファイバーは1150 nm以上の光を透過するのに対して、1110 nm以下の領域では20 dB以上の損失が発生しており、ハイパスフィルターとして動作可能な特性であることがわかる。図8(b)は本ファイバーを用いたファイバーレーザー

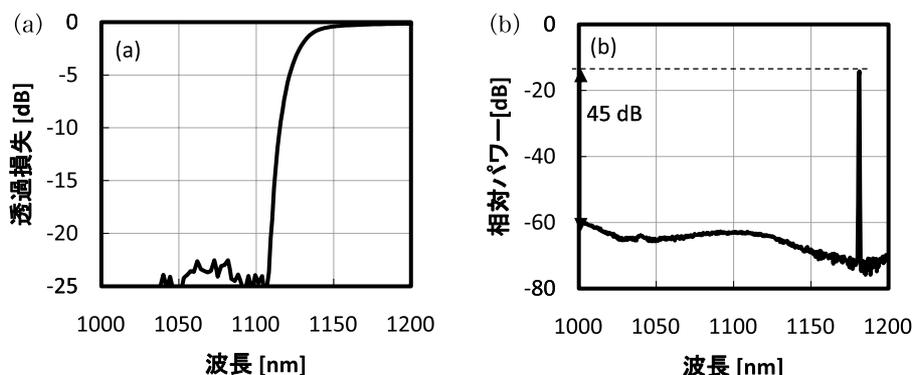


図8 試作ファイバーの透過損失特性 (a) と発振スペクトル (b)。

の発振スペクトラムを示す。1050 nm 付近に寄生発振が発生することなく、1180 nm で発振していることがわかる²¹⁾。

本稿では、PBGF の現時点までの研究開発動向や課題を、筆者らの研究成果を交えて紹介した。PBGF は従来のファイバーと全く異なる導波原理に基づくファイバーであるが、その存在が示されて以来 15 年を経過し解析も進み、ファイバーレーザーのように PBGF ならではのアプリケーションが立ち上がりつつあり、部品用ファイバーとして実用化に向けた進展が期待される。

伝送用光ファイバーとしては、屈折率導波型のシングルモードファイバーが確固たる地位を築いているのが現状である。しかしながら、今後の伝送容量拡大に向けて、ファイバーの耐パワー性や非線形性低減が要求されており、HC-PBGF が有する特徴が望まれている状況になりつつある。次世代の伝送用ファイバーとしての HC-PBGF の研究開発が活発化することを期待する。

文 献

- 1) E. Yablonovitch: "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics," *Phys. Rev. Lett.*, **58** (1987) 2059–2062.
- 2) T. A. Birks, P. J. Roberts, P. St. J. Russell, D. M. Atkin and T. J. Shepherd: "Full 2-D photonic band gaps in silica/air structures," *Electron. Lett.*, **31** (1995) 1941–1942.
- 3) J. C. Knight, J. Broeng, T. A. Birks and P. St. J. Russell: "Photonic band gap guidance in optical fibres," *Science*, **282** (1998) 1476–1478.
- 4) R. F. Cregan, B. J. Mangan, J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell, P. J. Roberts and D. C. Allan: "Single-mode photonic band gap guidance of light in air," *Science*, **285** (1999) 1537–1539.
- 5) N. M. Litchinnister, A. K. Abeeluck, C. Headley and B. J. Eggleton: "Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguides," *Opt. Lett.*, **27** (2002) 1592–1594.
- 6) F. Luan, A. K. George, T. D. Hedley, G. J. Pearce, D. M. Bird, J. C. Knight and P. St. J. Russell: "All-solid photonic bandgap fiber," *Opt. Lett.*, **29** (2004) 2369–2371.
- 7) A. Argyros, T. Birks, S. Leon-Saval, C. M. Cordeiro, F. Luan and P. St. J. Russell: "Photonic bandgap with an index step of one percent," *Opt. Express*, **13** (2005) 309–314.
- 8) S. Février, R. Jamier, J.-M. Blondy, S. L. Semjonov, M. E. Likhachev, M. M. Bubnov, E. M. Dianov, V. F. Khopin, M. Y. Salganskii and A. N. Guryanov: "Low-loss singlemode large mode area all-silica photonic bandgap fiber," *Opt. Express*, **14** (2006) 562–569.
- 9) T. Murao, K. Saitoh and M. Koshiba: "Structural optimization of air-guiding photonic bandgap fibers for realizing ultimate low loss waveguides," *J. Lightwave Technol.*, **26** (2008) 1602–1612.
- 10) K. Takenaga, N. Guan, R. Goto, S. Matsuo and K. Himeno: "A new photonic bandgap fibre with extended triangular lattice and capillary core," *ECOC 2005*, Tu1.4.2 (Glasgow, 2005).
- 11) P. Roberts, F. Couny, H. Sabert, B. Mangan, D. Williams, L. Farr, M. Mason, A. Tomlinson, T. Birks, J. Knight and P. St. J. Russell: "Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibres," *Opt. Express*, **13** (2005) 236–244.
- 12) K. Saitoh, N. J. Florous, T. Murao and M. Koshiba: "Design of photonic band gap fibers with suppressed higher-order modes: Towards the development of effectively single mode large hollow-core fiber platforms," *Opt. Express*, **14** (2006) 7342–7352.
- 13) J. M. Fini: "Aircore microstructure fibers with suppressed higher-order modes," *Opt. Express*, **14** (2006) 11354–11361.
- 14) R. Goto, K. Takenaga, S. Matsuo and K. Himeno: "Solid photonic band-gap fiber with 400 nm bandwidth and loss below 4 dB/km at 1520 nm," *OFC/NFOEC 2007*, OML7 (Anaheim, 2007).
- 15) H. Wei, W. Tong, J. Guo, F. Zhang, Q. Han and J. Luo: "Ultra-low loss all solid photonic bandgap fibre," *ECOC 2009*, 2.1.6 (Vienna, 2009).
- 16) T. Taru, J. Hou and J. C. Knight: "Raman gain suppression in all-solid photonics bandgap fiber," *ECOC 2007*, 7.1.1 (Berlin, 2007).
- 17) R. Goto, K. Takenaga, K. Okada, M. Kashiwagi, T. Kitabayashi, S. Tanigawa, K. Shima, S. Matsuo and K. Himeno: "Cladding-pumped Yb-Doped solid photonic bandgap fiber for ASE suppression in shorter wavelength region," *OFC 2008*, OTuJ5 (San Diego, 2008).
- 18) C. B. Olausson, C. I. Falk, J. K. Lyngsø, B. B. Jensen, K. T. Therkildsen, J. W. Thomsen, K. P. Hansen, A. Bjarklev and J. Broeng: "Amplification and ASE suppression in a polarization-maintaining ytterbium-doped all solid photonic bandgap fibre," *Opt. Express*, **16** (2008) 13657–13662.
- 19) K. Takenaga, M. Kashiwagi, S. Tanigawa, S. Matsuo and M. Fujimaki: "Low-loss ytterbium-doped polarization maintaining solid photonic bandgap fiber," *OECC 2009*, FM4 (Hong Kong, 2009).
- 20) M. Kashiwagi, K. Takenaga, K. Ichii, T. Kitabayashi, S. Tanigawa, K. Shima, S. Matsuo, M. Fujimaki and K. Himeno: "5.6-W linearly-polarized fiber laser at 1180 nm employing low-loss ytterbium-doped polarization maintaining solid photonic bandgap fiber," *OECC 2010*, 7C4-2 (Sapporo, 2010).
- 21) M. Kashiwagi, K. Takenaga, K. Ichii, T. Kitabayashi, S. Tanigawa, K. Shima, S. Matsuo, M. Fujimaki and K. Himeno: "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," *ECOC 2010*, Tu.5.D.3 (Torino, 2010).

(2011年1月11日受理)