

広帯域偏波保持フォトニック結晶ファイバ

光電子技術研究所 竹永勝宏*1・官寧*2・井添克昭*3・松尾昌一郎*1・姫野邦治*4

Highly Birefringent Photonic Crystal Fiber for a Wide Wavelength Range

K. Takenaga, Dr. N. Guan, K. Izoë, S. Matsuo & K. Himeno

コア領域の周りに孔径が異なる空孔を非対称に配置した偏波保持型フォトニック結晶ファイバを開発した。試作したファイバは波長1,620nmにおいて、 2.1×10^{-3} の複屈折および-48dBの偏波クロストークを示し、さらに、480nmから1,620nmまでの広い波長領域にわたり、高い複屈折を保持した。また、極めて小さな曲げ径に対しても、広い波長領域において、ファイバの偏波クロストークはほとんど劣化しなかった。

We have fabricated a highly birefringent photonic crystal fiber which has a modal birefringence of 2.1×10^{-3} and a polarization crosstalk of -48dB at 1,620nm and maintains polarization for a wide wavelength range from 480nm to 1,620nm. Little deterioration of the crosstalk occurred even an extremely small bending diameter was applied to the fiber.

1. ま え が き

近年、フォトニック結晶ファイバ（PCF：Photonic crystal fiber）あるいはホーリーファイバと呼ばれる光ファイバは、基礎研究だけでなく、実用の観点からも大変注目を集めている¹⁾。PCFは従来のファイバでは持ち得ない数多くのユニークな特性が実現できる。高い複屈折もその一つである。PCFの空孔配列を2回以下の回転対称性に配置すると、直交する軸に対応する伝搬モードの等価屈折率に大きな差を持たせることができる。これはPANDAファイバ²⁾のような応力による複屈折の生成と基本的に異なる。これまでに、オーダーが 10^{-3} になる従来の偏波保持ファイバより一桁大きい複屈折が報告され^{3) 4) 5)}、単一偏波しか存在しないような絶対単一偏波も実現されている⁶⁾。

われわれはコア領域の周りに孔径が異なる空孔を非対称に配置した偏波保持型PCF（PM-PCF：Polarization-maintaining PCF）の設計と試作をおこなった。試作したファイバは480nmから1,620nmまでの広い波長領域にわたり、高い複屈折と低い偏波クロストークを実現している。またこのファイバは、コア領域の近傍に大きな空孔が多数配置されており、伝搬モードのフィールドがコア領域に強く閉じ込められるため、良好な曲げ特性を有する。さらにファイバを極めて小さな曲げ径で曲げても、広い波長領域において偏波クロストークがほとんど劣化しない特徴を備えている。

2. ファイバの構造

今回検討したPM-PCFの断面構造を図1に示す。図のようにコア領域は三角格子構造状に配置される空孔配列によって囲まれているが、コア近傍にある8つの空孔は他の空孔より大きくなっている。小さい空孔と大きい空孔の直径をそれぞれ d と d_2 とし、空孔のピッチは大小空孔共通で Λ としている。この構成はすでに絶対単一偏波を実現する構造として提案されており⁷⁾、コア近傍に大きな空孔を多数配置することで、高い複屈折が得られるだけでなく、フィールドを強くコアに閉じ込め良好な曲げ特性が得られることが期待される。われわれは境界要素法⁸⁾を用いて本ファイバを解析した。図2にPM-PCFのslow軸とfast軸に対応する伝搬モードの等価屈折率、およびクラッドの屈折率を示す。ただし、クラッドが小さな空孔の配列で形成されているとし、その屈折率はその領域におけるスペース充填（space-filling）モードの等価屈折率とした。各寸法は、 $d=1.4 \mu\text{m}$ 、 $d_2=2.3 \mu\text{m}$ 、 $\Lambda=2.7 \mu\text{m}$ とした。また、この寸法では図2の波長範囲において、屈折率がクラッドよりも大きいほかの伝搬モードが存在しないことが確認されている。図3、4はそれぞれslow軸、fast軸モードの波長1,550nmにおけるパワー分布を表し、図中の等高線は3dB間隔である。両モードのフィールドはともにx方向に細長く分布していることがわかる。また伝搬モードの電界成分が、slow軸でほぼx方向に向き、fast軸でy方向に向いているため、slow軸モードのフィールドはfast軸モードに比べx方向でより空孔によって束縛されるが、逆にy方向でより空孔内に浸み出している。図5に両モードのx、y方向のモードスポット直径⁹⁾の波長依存性を示す。波長が

*1 光技術研究所

*2 光技術研究所（工博）

*3 光機器事業部光応用製品部

*4 光技術研究所グループ長

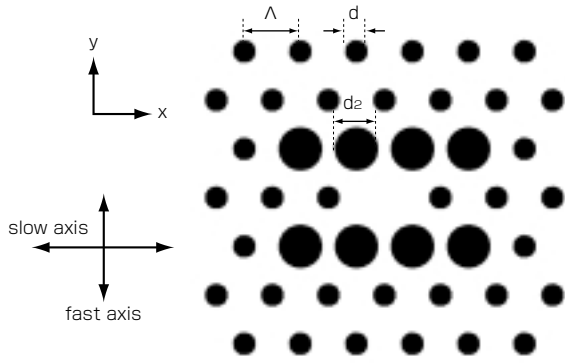


図1 PM-PCFの構造
Configuration of PM-PCF

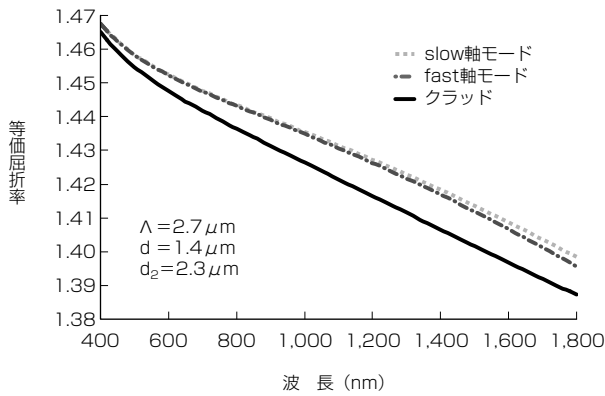


図2 PM-PCFの両直交偏波モードおよびクラッドの
等価屈折率の波長依存性

Effective index dependences on wavelength for two orthogonal polarization modes and cladding of PM-PCF

400nm~1800nmに変化してもモードスポットの直径の変化は、おおよそ0.3 μm~0.4 μm程度であることがわかる。

3. 偏波特性

前項での設計に基づき実際にファイバを試作した。試作ファイバの断面写真を図6に示す。ファイバの寸法は図2の計算で使用したものと同程度のものが得られた。

ファイバの複屈折は波長掃引法¹⁰⁾を用いて測定した。この方法ではファイバの偏波主軸に対して45度傾けた直線偏波光をファイバに入射し、出力端でこれと直交した方向に置いた偏光子を通った出力光のパワーの波長依存性を測定して、その測定結果から偏波ビート長を算出する。図7に測定の一例を示す。

この方法で測定したビート長 L_{B^*} から群複屈折 B^* が得られる：

$$B^* = \left| \frac{d\beta_s}{dk} - \frac{d\beta_f}{dk} \right| = \frac{\lambda}{L_{B^*}}$$

ただし、 $k = 2\pi/\lambda$ 、 λ は波長を表し、 β_s 、 β_f はそれぞれslow軸モードとfast軸モードの位相定数を表す。また、 $B = |\beta_s/k - \beta_f/k|$ で定義される通常の複屈折から、群複屈折は次のように求められる：

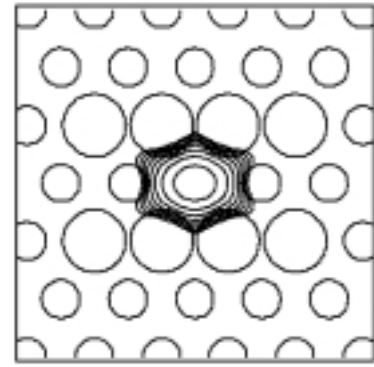


図3 PM-PCFのslow軸モードのパワー分布
Power distribution of slow-axis mode of PM-PCF

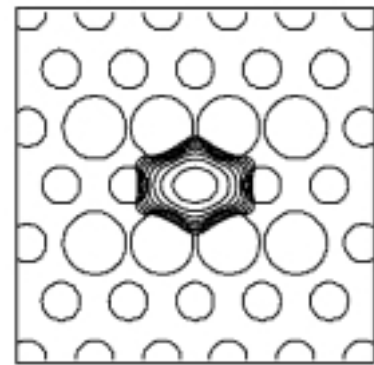


図4 PM-PCFのfast軸モードのパワー分布
Power distribution of fast-axis mode of PM-PCF

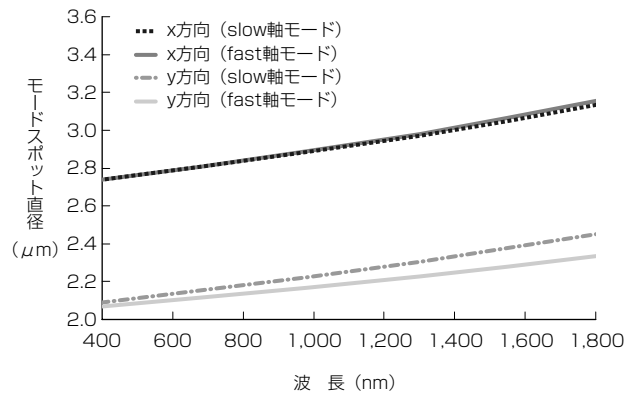


図5 PM-PCFのモードスポット直径
Modal spot diameters of PM-PCF

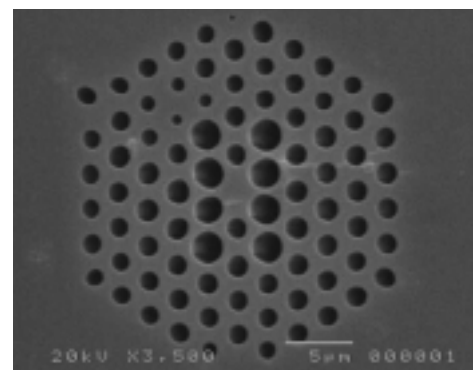


図6 試作したPM-PCFの断面写真
Picture of cross-section of fabricated PM-PCF

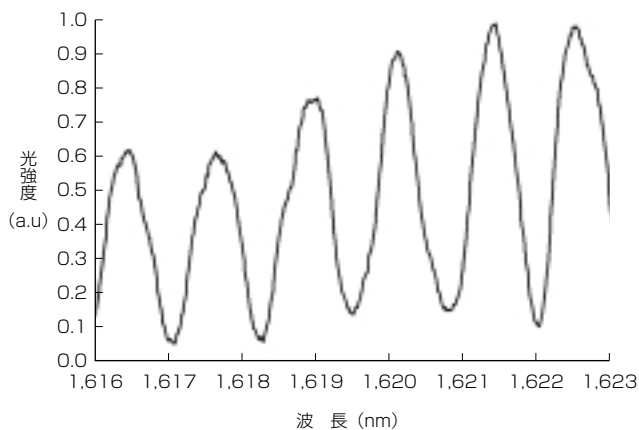


図 7 PM-PCFの波長掃引測定例

A typical wavelength scanning diagram of PM-PCF

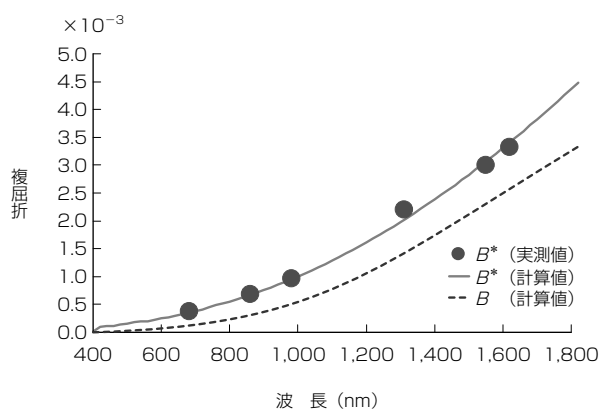


図 8 PM-PCFの複屈折の比較

Birefringence comparison between theory and measurement

$$B^* = \left| B - \lambda \frac{dB}{d\lambda} \right|$$

Bの波長変動が小さく上式右辺の第2項が無視できる場合、 B^* とBはほぼ同じ値になるが、本PM-PCFの場合、両者の値が大きく異なる。図8に群複屈折の測定値と計算値、さらに複屈折の計算値を示す。群複屈折の計算値と測定値がよく一致しており、波長1,620nmにおいて、群複屈折が 3.3×10^{-3} になるとともに、複屈折が 2.1×10^{-3} になることを示している。

長さ2mのPM-PCFの偏波クロストーク測定結果を図9に示す。図のように、480nmから1,620nmまでの広い波長領域において、クロストークは-25dB以下であった。また、測定範囲の波長領域では、両偏波モード以外の伝搬モードは観測されなかった。

本PM-PCFはコア領域の近傍に大きな空孔が8つ設置されており、伝搬モードのフィールドがコア領域によく閉じ込められるため、各伝搬モードの曲げ損失が非常に小さい。したがってファイバを極めて小さな曲げ径で曲げても、偏波クロストークは曲げの影響を受けにくい。

図10に480nmと1,550nmの両波長における偏波クロス

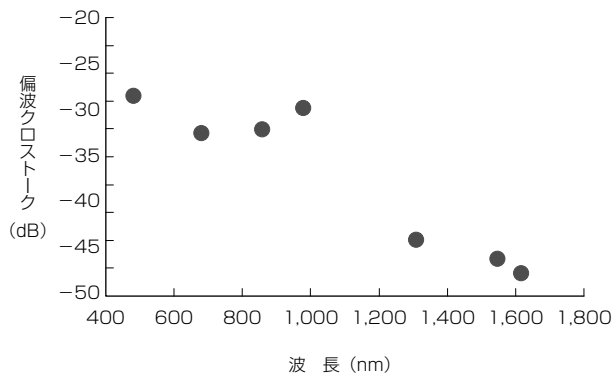


図 9 PM-PCFの偏波クロストークの波長依存性
Polarization crosstalk dependence on wavelength

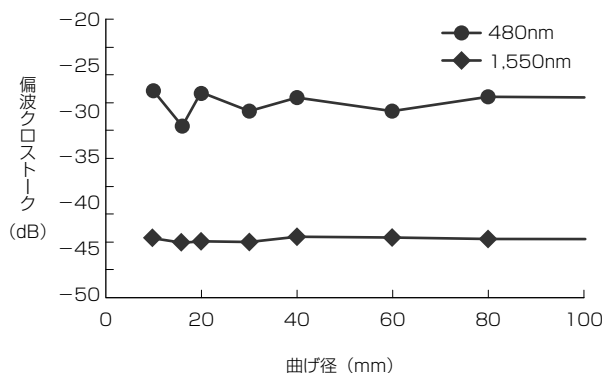


図10 PM-PCFの偏波クロストークの曲げ径依存性
Polarization crosstalk dependence on bending diameter

トークの曲げ径依存性を示す。測定は長さ6mのファイバを使用し、そのうちの4mをマンドレルに巻いて行った。図のように、曲げ直径を10mmにしても、両波長における偏波クロストークはほとんど劣化しないことがわかる。この広い波長範囲での良好な曲げ特性は、PCF構造で得られる大きな特徴であり、偏波保持ファイバの応用を拡大する意味において重要であると考えられる。

4. む す び

われわれは高い複屈折を有する偏波保持型フォトニック結晶ファイバを開発した。試作したファイバは非常に広い波長領域において、高い複屈折と低い偏波クロストークを示した。また、ファイバを極めて小さな曲げ径で曲げても、広い波長範囲で偏波クロストークがほとんど劣化しないことを確認した。このファイバは、従来からある偏波依存性のある光部品間の接続に用いられるだけでなく、コンパクトかつ広帯域伝送を必要とする光回路での応用に用いられることが期待される。

参 考 文 献

1) T. A. Birks, J. C. Knight, B. J. Mangan and P. St.

- J. Russell : Photonic crystal fibres : an endless variety, IEICE Trans. Commun., Vol. E84-B, No. 5, pp.1211-1218, 2001
- 2) J. Noda, K. Okamoto and Y. Sasaki : Polarization-maintaining fibers and their applications, J. Lightwave Technol., Vol. LT-4, No. 8, pp.1071-1089, 1986
- 3) A. Ortigosa-Blanch, J. C. Knight, W. J. Wadsworth, J. Arriaga, B. J. Mangan, T. A. Birks and P. St. J. Russell : Highly birefringent photonic crystal fibers, Optics Lett., Vol. 25, No. 18, pp.1325-1327, 2000
- 4) T. P. Hansen, J. Broeng, S. E. B. Libori, E. Knudsen, A. Bjarklev, J. R. Jensen and H. Simonsen : Highly birefringent index-guiding photonic crystal fibers, IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 13, No. 6, pp.588-590, 2001
- 5) G. Melin, O. Cavani, L. Gasca, A. Peyrilloux, L. Provost and X. Rejeaunier : Characterization of a polarization maintaining microstructured fiber, ECOC-IOOC 2003, We1.7.4, 2003
- 6) H. Kubota, S. Kawanishi, S. Koyanagi, M. Tanaka and S. Yamaguchi : Absolutely single polarization photonic crystal fiber, IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 16, No. 1, pp.182-184, 2004
- 7) K. Saitoh and M. Koshiba : Single-polarization single-mode photonic crystal fibers, IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 15, No. 10, pp.1384-1386, 2003
- 8) N. Guan, S. Habu, K. Takenaga, K. Himeno and A. Wada : Boundary element method for analysis of holey optical fibers, J. Lightwave Technol., Vol. 21, pp.1787-1792, 2003
- 9) M. Koshiba and K. Saitoh : Structural dependence of effective area and mode field diameter for holey fibers, Opt. Express, Vol. 11, No. 15, pp.1746-1756, 2003
- 10) K. Kikuchi and T. Okoshi : Wavelength-sweeping technique for measuring the beat length of linearly birefringent optical fibers, Optics Lett., Vol. 8, No. 2, pp.122-123, 1983