マルチコアフォトニック結晶ファイバと そのファイバ型光デバイスへの応用

小柴 正則, 齊藤 晋聖

北海道大学大学院 情報科学研究科 (〒060-0814 北海道札幌市北区北14条西9丁目)

Multi-Core Photonic Crystal Fibers and Their Applications to Fiber Devices

Masanori KOSHIBA and Kunimasa SAITOH

Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University,

West 9, North 14, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0814

(Received July 25, 2005)

Photonic crystal fibers (PCFs) have recently attracted considerable attention because of their interesting and unconventional optical properties. Particularly, multi-core photonic crystal fibers (MCPCFs) have several potential advantages making them excellent candidates for applications such as, wavelength multiplexer-demultiplexer (MUX-DEMUX) devices, polarization splitters (PSs), dispersion-compensating fibers (DCFs), curvature sensors, vector bend sensors, Doppler difference velocimeters, phase-locked high-power lasers, optical frequency comb generators, and so on. In this paper MCPCF-structures and some potential applications are reviewed, and in addition design principles for constructing wavelength MUX-DEMUX, PS, DCF based on, two-core, three-core, and dual-concentric-core PCFs respectively, are introduced.

Key Words: Photonic crystal fiber (PCF), Multi-core PCF (MCPCF), Two-core PCF, Three-core PCF, Dual-concentric-core PCF

1. はじめに

1996年, 従来の光ファイバのクラッドに相当する領域に多数の空孔を三角格子状に配列したフォトニック結晶ファイバ¹⁾と呼ばれる新型の光ファイバが登場した. フォトニック結晶ファイバも, 通常の光ファイバも, 導波原理はいずれもコアとクラッドの屈折率の差を利用した全反射であることに変わりはないが, フォトニック結晶ファイバの場合には, 空孔が存在するクラッド領域の実効的な屈折率が波長によって大きく変化し, しかもコアとクラッドの屈折率差を通常の光ファイバよりもはるかに大きくできる. このため, 波長がどんなに短くなっても, また, モードフィールドがどんなに大きくなっても, 単一モード動作させることができたり, 可視光まで含めて広帯域にわたって分散制御することができるといった通常の光ファイバではとても考えられない特異な性質が発現することになる.

ところで, フォトニック結晶ファイバには, 全反射を利用するのではなく, フォトニックバンドギャップによって光をコア内に閉じ込めるものがある. こうしたフォトニック結晶ファイバはフォトニックバンドギャップファイバと呼ばれ, 低屈折率コア型のもの²⁾が1998年に

発表され, コアを空気としたもの³⁾が1999年に発表された. 特に, コアを空気とすることによって, 低損失で低分散の光伝送, さらに非線形光学効果の抑制が可能になると期待されている. このように, フォトニックバンドギャップによる光閉じ込めを利用したフォトニック結晶ファイバもあるので, 全反射を利用したものはホーリーファイバと呼んで, フォトニックバンドギャップファイバと区別することが多い.

さて, フォトニック結晶ファイバが登場してほぼ10年近くになり, 単一コアフォトニック結晶ファイバの特異な性質が次々と明らかになる中, 最近, 複数のコアを有するフォトニック結晶ファイバに関する研究が活発化している. 2000年に, 2つのコアを有する二重コアフォトニック結晶ファイバの試作結果⁴⁾が初めて報告されて以来, 実に様々な構造のマルチコアフォトニック結晶ファイバが考案され, 波長フィルター, 偏波スプリッター, 分散補償ファイバ, ファイバセンサーといったファイバ型光デバイスへの応用が理論的, 実験的に検討されてきた. こうしたマルチコアフォトニック結晶ファイバを利用したファイバ型光デバイスは, フォトニック結晶ファイバ特有の性質をそのまま引き継ぐと同時に, 通常の光ファイバを利用したものに比べて, 小型化も期待できる.

本論文では、マルチコアフォトニック結晶ファイバとそのファイバ型光デバイスへの応用について述べる。まず、これまで考案されてきたマルチコアフォトニック結晶ファイバの構造を、応用と関連付けながら紹介する。次に、筆者らが検討してきた二重コアファイバを用いた波長フィルター⁵⁾、三重コアファイバを用いた偏波スプリッター⁶⁾、同心コアファイバを用いた分散補償ファイバ⁷⁾の構成法を具体的に示す。

2. マルチコアフォトニック結晶ファイバの構造

マルチコアフォトニック結晶ファイバとして初めて試作されたファイバ⁴⁾は、Fig. 1 (a), (b)に示すように、コア間隔が $\sqrt{3}\Lambda$ 、 $\sqrt{7}\Lambda$ の二重コアファイバであった。ここに Λ は空孔間隔で格子定数と呼ばれる。このように、フォトニック結晶ファイバでは、空孔を適宜取り除いてコア領域を簡単に形成できるため、マルチコアフォトニック結晶ファイバの作製は極めて容易である。こうした二重コアファイバは分布結合型カップラーとして機能し、その結合長が波長に依存することから、Fig. 1 (c)に示すようなコア間隔が 2Λ のカップラーも含めて、波長フィルターへの応用が検討されてきた^{5,8)}。また、フォトニック

結晶ファイバの材料は一般にシリカであるが、不純物を添加してコア部の屈折率をシリカの屈折率よりも小さくし(Fig. 1 (c)の破線部)、広帯域にわたって結合長をほぼ一定とするような設計も行われている⁹⁾。なお、空孔の位置や大きさがランダムになっていると、通常の分布結合とは違って、トンネル効果による特異な結合が生じることが報告されている¹⁰⁾。

ところで、空孔を三角格子状に配列した単一コアフォトニック結晶ファイバに存在する2つの基本直交偏波は互いに縮退している¹¹⁾が、Fig. 1 (a)~(c)に示したカップラーはいずれも6回対称性がなく、偏波依存性を有する。しかし、このままでは偏波依存性はそれほど大きくはないので、例えばFig. 1 (d)に示すように、コア周囲の空孔の大きさをいろいろと変えて個々のコアのモード複屈折率を大きくし、偏波スプリッターを構成する試みが数多く報告されている¹²⁻¹⁵⁾。なお、個々のコアのモード複屈折率を大きくするための一方法として、クラッド領域の空孔を長方形格子状に配列することも試みられている¹⁶⁾。

Fig. 1 (a)~(d)に示したカップラーでは、2つのコアを近接して配置するが、互いの影響がない程度にコア間隔を広げて、湾曲した面の曲率測定¹⁷⁾やドップラー効果を利用した速度測定¹⁸⁾への応用も検討されている。また、ファイバ材料も、シリカのみならず、ポリマーを用いたものも検討されており¹⁹⁾、作成法についても、熔融法や研磨法を用いて二本のフォトニック結晶ファイバを側面結合させることが試みられている^{20,21)}。

最近、同じ二重コアフォトニック結晶ファイバであっても、Fig. 1 (e), (f)に示すように、中心コアとリングコアとからなる同心コアファイバ^{7,22-24)}に対する関心が高まっている。こうした二重コアファイバのそれぞれのコアを伝搬する導波モード間で位相整合条件が満たされると、分散が負の方向に非常に大きくなる。このため、分散補償ファイバとしての応用が期待されており、フェーズドアレイアンテナシステムへの搭載も検討されている²⁵⁾。

さて、フォトニック結晶ファイバでは、コアを2個のみならず、3個、6個、7個、場合によっては、10数個のコアを任意の位置に自在に配置することが容易である。3個のコアを線状アレイ配置したものは、コア周囲の空孔の大きさを適当に変えると、共振結合型カップラーとして機能し、偏波スプリッターとしての応用が検討されている⁶⁾。また、3個のコアを三角配置したものは、互いの影響がない程度にコア間隔を広げて、構造物の2次元的な曲げを検出するセンサーとしての応用が検討されている²⁶⁾。多数のコアを有するフォトニック結晶ファイバの導波特性を算出のための理論の開発も進められており^{27,28)}、モードフィールドがどんなに大きくなっても単一モード動作させることができるフォトニック結晶ファイバの特徴を活かした高出力位相同期ファイバレーザー^{29,30)}や、逆にモードフィールドを小さくして容易に非線形性を増強できるフォトニック結晶ファイバの特徴を活かした多チャンネル光周波数コム発生³¹⁾への応用が検討されている。

Fig. 1 Two-core PCFs with inter-core spacing of (a) $\sqrt{3}\Lambda$, (b) $\sqrt{7}\Lambda$, and (c) 2Λ , and with (d) high-birefringent cores. Dual-concentric-core PCFs composed of central core and ring core (e) without and (f) with small air holes.

3. 分布結合ファイバ型光デバイス

Fig. 2に示すような二つのコア(コアA, B)を有する二重コアフォトニック結晶ファイバを考える. ここで, Λ は格子定数, d は空孔直径であり, コア間隔は $\sqrt{3}\Lambda$ である. 光波が一方のコアへ入射されると, 伝搬とともに他方のコアに移行し, 光ファイバカップラーとして動作する. Fig. 3に, 光波が一方のコアから他方のコアに移行する最小距離, いわゆる結合長 $L_{c,2\text{-core}}$ の波長依存性を示す. ここで, λ は動作波長, シリカ, 空気の屈折率はそれぞれ1.45, 1.0であり, 空孔の大きさ d/Λ をパラメータとしている. また, $L_{c,2\text{-core}}$ は, カップラーの偶モードの実効屈折率を n_{even} , 奇モードの実効屈折率を n_{odd} とした場合,

$$L_{c,2\text{-core}} = \frac{\lambda}{2(n_{\text{even}} - n_{\text{odd}})} \quad (1)$$

で与えられ, n_{even} , n_{odd} の計算にはベクトル有限要素法³²⁾を用いた. コアの配置が x 軸方向に平行であるため, 水平偏波(x 偏波)の方が垂直偏波(y 偏波)に比べてコア間の結合が強くなり, x 偏波の結合長の方が短くなっている. また, 空孔直径, 格子定数が大きいほど結合長は長くなるが, 結合長の波長依存性が強くなることがわかる. こう

Fig. 2 Cross section of a MUX-DEMUX based on two-core PCF, where the core distance is $\sqrt{3}\Lambda$.

Fig. 3 Normalized wavelength dependence of coupling length, taking the value of d/Λ as a parameter.

した動作原理は, 従来型のファイバカップラーと同じであるが, フォトニック結晶ファイバにおいては, クラッド領域の等価的な屈折率が高い波長依存性を有しているため, Fig. 2に示すような二重コアフォトニック結晶ファイバを用いることにより, 波長依存性の強い結合長を有するファイバカップラーを簡単に実現できるといった特徴がある. ここでは, この特徴を利用して, 波長 $1.3\mu\text{m}$ の光信号と波長 $1.55\mu\text{m}$ の光信号を合分波できる波長フィルターを構成することを考える.

波長 $1.3\mu\text{m}$, $1.55\mu\text{m}$ の光波に対する結合長を, それぞれ $L_{c,1.3}$, $L_{c,1.55}$ とし, ファイバ長を L としたとき,

$$L = mL_{c,1.3} = (m+n)L_{c,1.55} \quad (2)$$

となるような整数 m , n (n : 奇数)の値が存在すれば, これらの2波長の光信号を合分波できることになる. Fig. 4に, $\Lambda = 2.0\mu\text{m}$ としたときの $L_{c,1.3}$ と $L_{c,1.55}$ の比($L_{c,1.3}/L_{c,1.55}$)の空孔直径依存性を示す. x 偏波に対しては $d/L = 0.58$, y 偏波に対しては $d/L = 0.55$ とすれば, これらの整数は, $m=2$, $n=1$ ($L_{c,1.3}/L_{c,1.55} = 1.5$)のように定めることができることがわかる. ここで, ファイバ長 L は x , y 偏波に対して, それぞれ $1044\mu\text{m}$, $1110\mu\text{m}$ である. コアAを入力コアとした場合, 出力側では $1.3\mu\text{m}$ 帯の光波をコアAから, $1.55\mu\text{m}$ 帯の光波をコアBから取り出すことができる. Fig. 5に, コアA, Bにおけるクロストークの波長依存性を示す. ここで, 計算にはビーム伝搬法³³⁾を用いている. コアAにおいては, $1.540\mu\text{m} \sim 1.558\mu\text{m}$ の約 18nm の範囲で, コアBにおいては, $1.285\mu\text{m} \sim 1.314\mu\text{m}$ の約 29nm の範囲で -20dB 以上のクロストークが得られることがわかる. 通常の光ファイバでは, 二つのコア間の結合が弱いいため, 結合長が長くなり, それだけ合分波回路として動作するのに必要なファイバ長が長くなる. これに対して, フォトニック結晶ファイバでは, コア間の結合が強いため, 結合長が短くなり, ファイバ長 1mm 程度の超小型合分波回路を実現できる可能性がある.

4. 共振結合ファイバ型光デバイス

Fig. 1 (a)~(c)に示したようなカップラーにおいては,

Fig. 4 Coupling length ratio as a function of the value of d/Λ at wavelengths of $1.3\mu\text{m}$ and $1.55\mu\text{m}$.

Fig. 5 Crosstalk between the two cores for (a) core A and (b) core B.

各偏波の結合長の差はそれほど大きくはないが、Fig. 1 (d)に示すように、各コアに構造複屈折性を導入することにより、偏波による結合長の差を大きくすることができ、偏波スプリッターを構成することができる¹²⁻¹⁵⁾。しかしながら、小型の偏波スプリッターを実現しようとするとき、Fig. 1 (d)に示すような分布結合型のカップラーでは、偏波消光比が劣化してしまうという問題がある。そこで、ここではまず、共振結合を利用した偏波スプリッターの構成法について説明する。

Fig. 6に示すような3個のコア(コアA, B, C)を線状アレイ配置したマルチコアフォトニック結晶ファイバを考える。コアAおよびコアCにおいては、水平方向に直径 d_1 の大きな空孔を、垂直方向に直径 d_3 の小さな空孔を配置している。コアBにおいては、水平方向に直径 d_4 の小さな空孔を、垂直方向に直径 d_2 の大きな空孔を配置している。また、クラッド領域の空孔直径は d_5 である。この場合、コアA(あるいはコアC)では、x偏波の実効屈折率 $n_{x,A}$ ($n_{x,C}$)がy偏波の実効屈折率 $n_{y,A}$ ($n_{y,C}$)よりも小さく

$$n_{x,A} < n_{y,A}, \quad n_{x,C} < n_{y,C} \quad (3)$$

となる。一方、コアBでは、x偏波の実効屈折率 $n_{x,B}$ がy偏波の実効屈折率 $n_{y,B}$ よりも大きく

$$n_{x,B} > n_{y,B} \quad (4)$$

となる。いま、実効屈折率の関係が共振波長 λ_R において

Fig. 6 The upper panel shows the schematic cross section of a polarization splitter in three-core PCF. The lower panels show the close up around the cores A and B.

$$n_{x,A} = n_{x,B} = n_{x,C} \quad (5)$$

$$n_{y,A} = n_{y,C} \gg n_{y,B} \quad (6)$$

となるように構造設計を行うと、x偏波に対してのみコアAとコアCの間で共振結合が生じる。したがって、共振波長 λ_R の付近では、コアAへ入射したx偏波がコアB、そしてコアCへと結合するのに対して、y偏波はコアAにとどまることになるので、偏波スプリッターとして動作することになる。

この偏波スプリッターの結合長を見積もるには、Fig. 6のマルチコアフォトニック結晶ファイバを3つのコアを有する方向性結合器として評価する必要がある。3つのコアA, B, Cがそれぞれシングルモードである場合、このカップラーには、各偏波に対してそれぞれ2つの対称モード、および1つの反対称モード、すなわち合計3つのスーパーモードが存在することになる。いま、2つの対称モードの実効屈折率を $n_{\text{eff},1}$, $n_{\text{eff},2}$, 反対称モードの実効屈折率を $n_{\text{eff},3}$ とすると、共振波長 λ_R において

$$n_{\text{eff},1} - n_{\text{eff},3} = n_{\text{eff},3} - n_{\text{eff},2} \quad (7)$$

の関係が満足されたとき、コアAへ入射した基本モードがコアCへ完全結合することになり³⁴⁾、このときの結合長 $L_{\text{c,3-core}}$ は

$$L_{\text{c,3-core}} = \frac{\lambda_R}{2(n_{\text{eff},1} - n_{\text{eff},3})} \quad (8)$$

与えられる。Fig. 6に示したフォトニック結晶ファイバでは、共振波長 λ_R においてx偏波に対して式(7)を満足するように構造設計を行うと、y偏波に対しては

$$n_{\text{eff},1} - n_{\text{eff},3} \ll n_{\text{eff},3} - n_{\text{eff},2} \quad (9)$$

とすることができるため、偏波消光比の優れた偏波スプリッターを設計することができる。

構造パラメータを $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$, $d_1/\Lambda = 0.95$, $d_3/\Lambda =$

Fig. 7 Variation of the effective refractive indices of the supermodes of the three-core PCF for the x-polarization state as a function of d_2/Λ , where the operating wavelength is $1.55 \mu\text{m}$.

0.3, $d_4/\Lambda = 0.2$, $d_5/\Lambda = 0.5$, 動作波長を $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ としたときのx偏波の実効屈折率 $n_{\text{eff},1}$, $n_{\text{eff},2}$, $n_{\text{eff},3}$ の空孔直径 d_2 依存性をFig. 7に示す. 波長 $1.55 \mu\text{m}$ において, x偏波に対して式(7)を満足させるには, $d_2/\Lambda = 0.747$ とすればよいことがわかる. ここで, 完全結合長は $1930 \mu\text{m}$ であり, コアA, B, Cは $1.55 \mu\text{m}$ 帯でシングルモード動作となっている. Fig. 8に, $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$, $d_1/\Lambda = 0.95$, $d_2/\Lambda = 0.747$, $d_3/\Lambda = 0.3$, $d_4/\Lambda = 0.2$, $d_5/\Lambda = 0.5$, ファイバ長を $1930 \mu\text{m}$ としたときのx, y偏波の消光比を示す. x偏波において, -20 dB 以上の消光比が得られるバンド幅は, およそ $1.536 \mu\text{m} \sim 1.573 \mu\text{m}$ の約 37 nm となっている. 一方, y偏波においては, この波長帯域では常に -20 dB 以上の消光比となっている. このように, 三重コアファイバにおける共振結合を利用することにより, 小型で高性能な偏波スプリッターを構成できる可能性がある. なお, 式(3)~(5)の条件を満たすためだけであれば, d_3 と d_4 が必ずしも異なる必要はない. しかしながら, y偏波に対し良好な消光比を得るためには, d_1 , d_2 はなるべく大きくする必要がある. すなわち, 式(3)~(5)だけでなく, 式(6)も考慮しなければy偏波の消光比を改善することはできない. そこで, ここでは d_2/Λ を0.75程度という大きい値とし, d_3 と d_4 を異なる値に設定することにより, 式(3)~(6)を満足するように構造設

Fig. 8 Wavelength dependence of the extinction ratios at a PCF length of 1.93 mm .

Fig. 9 Transverse cross section of dual-concentric-core PCF and its schematic refractive index profile.

計している.

次に, Fig. 9 (a)に示すような2つの同心コアを有するマルチコアフォトニック結晶ファイバについて考える. ここで, d はクラッド領域の空孔直径である. また, クラッド領域の空孔径よりも小さな空孔を導入すると, その領域の等価的な屈折率を大きくすることができ, Fig. 9 (a)では, 第4層目に小さな空孔直径 d_s を導入して, 等価的にリング状のコア領域を形成している. Fig. 9 (b)は, このフォトニック結晶ファイバの等価屈折率分布を示している. このように, フォトニック結晶ファイバを用いると, Fig. 9 (b)のような屈折率分布をシリカガラスだけを用いて簡単に形成することができる. 中心コアとリングコアを別個の導波路として見た場合, それぞれのコアモードの実効屈折率は異なった波長依存性をもつことになる. いま, 中心コアモードとリングコアモードの実効屈折率が共振波長 λ_0 において等しくなるように, すなわち λ_0 において中心コアとリングコアが共振結合を起こすように構造設計を行うと, 2つの導波路系全体の固有モード, いわゆるスーパーモードの波長分散特性が共振波長 λ_0 付近で非常に大きな負の分散を有することになる. この性質を利用して, 同心コアフォトニック結晶ファイバによる分散補償ファイバへの応用が種々検討されている²²⁻²⁴⁾.

Fig. 10に, 構造パラメータを $\Lambda = 1.8 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.4$, $d_s/\Lambda = 0.246$ としたときの波長分散特性を示す. ここで, シリカの材料分散を考慮してベクトル有限要素法³²⁾により実効屈折率を算出しており, 共振波長は $\lambda_0 \approx 1.57 \mu\text{m}$ となるように設定している. 波長 $1.55 \mu\text{m}$ における分散値が約 $-250 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$, 実効コア断面積が約 $20 \mu\text{m}^2$ であり, Cバンド(波長 $1.53 \mu\text{m} \sim 1.565 \mu\text{m}$)全体にわたってシングルモードファイバの分散補償が可能な分散補償ファイバとなっている. こうした分散特性は従来の光ファイバを用

Fig. 10 Chromatic dispersion as a function of wavelength for dispersion-compensating PCF.

いても実現することができるが、ごく最近、同心コアフォトニック結晶ファイバの波長分散特性と実効コア断面積の波長依存性を適切に設定することにより、Cバンド全体にわたってフラットなラマン増幅特性を有する分散補償フォトニック結晶ファイバへの応用の可能性が報告されており⁷⁾、今後、こうした同心コアフォトニック結晶ファイバのさらなる発展が期待される。

5. まとめ

マルチコアフォトニック結晶ファイバの構造とそのファイバ型光デバイスへの応用の現状について述べた。また、筆者らが検討してきた二重コアファイバを用いた波長フィルター、三重コアファイバを用いた偏波スプリッター、同心コアファイバを用いた分散補償ファイバの設計事例を紹介した。

マルチコアフォトニック結晶ファイバの研究は、ここ数年の間に急速に活発化した。最近では、非線形結合特性についての検証も進められている^{35,36)}。フォトニック結晶ファイバでは、任意の個数のコアを任意の位置に自在に配置でき、また、必要に応じてコア領域の屈折率も制御できるので、従来の光ファイバでは実現できない新規なファイバ型光デバイスの創成が期待される。

参考文献

- 1) J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell, and D. M. Atkin: Opt. Lett. **21** (1996) 1547.
- 2) J. C. Knight, J. Broeng, T. A. Birks, and P. St. J. Russell: Science

- 282 (1998) 1476.
- 3) R. F. Cregan, B. J. Mangan, J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell, P. J. Roberts, and D. C. Allan: Science **285** (1999) 1537.
- 4) B. J. Mangan, J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell, and A. H. Greenaway: Electron. Lett. **36** (2000) 1358.
- 5) K. Saitoh, Y. Sato, and M. Koshiba: Opt. Express **11** (2003) 3188.
- 6) K. Saitoh, Y. Sato, and M. Koshiba: Opt. Express **12** (2004) 3940.
- 7) S. K. Varshney, K. Saitoh, and M. Koshiba: IEEE Photon. Technol. Lett. **17** (2005) 2062.
- 8) F. Fogli, L. Saccomandi, P. Bassi, G. Bellanca, and S. Trillo: Opt. Express **10** (2002) 54.
- 9) J. Lægsgaard, O. Bang, and A. Bjarklev: Opt. Lett. **29** (2004) 2473.
- 10) J. Canning, M. A. van Eijkelenborg, T. Ryan, M. Kristensen, and K. Lyytikäinen: Opt. Commun. **185** (2000) 321.
- 11) M. Koshiba and K. Saitoh: IEEE Photon. Technol. Lett. **13** (2001) 1313.
- 12) L. Zhang and C. Yang: Opt. Express **11** (2003) 1015.
- 13) L. Zhang and C. Yang: Opt. Express **12** (2004) 2371.
- 14) L. Zhang and C. Yang: J. Lightwave Technol. **22** (2004) 1367.
- 15) L. Zhang and C. Yang: IEEE Photon. Technol. Lett. **16** (2004) 1670.
- 16) M. -Y. Chen and R. -J. Yu: J. Opt. A: Pure Appl. Opt. **6** (2004) 805.
- 17) W. N. MacPherson, M. J. Gander, R. McBride, J. D. C. Jones, P. M. Blanchard, J. G. Burnett, A. H. Greenaway, B. Mangan, T. A. Birks, J. C. Knight, and P. St. J. Russell: Opt. Commun. **193** (2001) 97.
- 18) W. N. MacPherson, J. D. C. Jones, B. J. Mangan, J. C. Knight, and P. St. J. Russell: Opt. Commun. **223** (2003) 375.
- 19) W. E. P. Padden, M. A. van Eijkelenborg, A. Argyros, and N. A. Assa: Appl. Phys. Lett. **84** (2004) 1689.
- 20) B. H. Lee, J. B. Eom, J. Kim, D. S. Moon, U. -C. Paek, and G. -H. Yang: Opt. Lett. **27** (2002) 812.
- 21) H. Kim, J. Kim, U. -C. Paek, B. H. Lee, and K. T. Kim: Opt. Lett. **29** (2004) 1194.
- 22) Y. N. L. Zhang, L. An, J. Peng, and C. Fan: IEEE Photon. Technol. Lett. **16** (2004) 1516.
- 23) F. Gérôme, J. L. Auguste, and J. M. Blondy: Opt. Lett. **29** (2004) 2725.
- 24) A. Huttunen and P. Torma: Opt. Express **13** (2005) 627.
- 25) Y. Jiang, B. Howley, Z. Shi, Q. Zhou, R. T. Chen, M. Y. Chen, G. Brost, and C. Lee: IEEE Photon. Technol. Lett. **17** (2005) 187.
- 26) P. M. Blanchard, J. G. Burnett, G. R. Erry, A. H. Greenaway, P. Harrison, B. Mangan, J. C. Knight, P. St. J. Russell, M. J. Gander, R. McBride, and J. D. C. Jones: Smart Mater. Struct. **9** (2000) 132.
- 27) P. J. Roberts and T. J. Shepherd: J. Opt. A: Pure Appl. Opt. **3** (2001) S133.
- 28) A. Mafi and J. V. Moloney: IEEE Photon. Technol. Lett. **17** (2005) 348.
- 29) A. Mafi and J. V. Moloney: J. Opt. Soc. Am. B **21** (2004) 897.
- 30) L. Michaille, C. R. Bennett, D. M. Tayler, T. J. Shepherd, J. Broeng, H. R. Simonsen, and A. Petersson: Opt. Lett. **30** (2005) 1668.
- 31) A. V. Husakou and J. Herrmann: Appl. Phys. Lett. **83** (2003) 3867.
- 32) K. Saitoh and M. Koshiba: IEEE J. Quantum Electron. **38** (2002) 927.
- 33) K. Saitoh and M. Koshiba: J. Lightwave Technol. **19** (2001) 405.
- 34) J. P. Donnelly, H. A. Haus, and N. Whitaker: IEEE J. Quantum Electron. **23** (1987) 401.
- 35) I. D. Chremmons, G. Kakarantzas, and N. K. Uzunoglu: Opt. Commun. **251** (2005) 339.
- 36) J. R. Salgueiro and Y. S. Kivshar: Opt. Lett. **30** (2005) 1858.

レーザーワード

マルチコアフォトニック結晶ファイバ
(multi-core photonic crystal fiber: MCPCF)

クラッド領域にフォトニック結晶構造を有し、複数の欠陥部分をコア領域として導入した光ファイバ。通常は、クラッド領域に多数の空孔を周期的に配列し、空孔を適宜取り除いてコア領域を形成する。クラッド領域の実効的な屈折率が波長によって大きく変化することや、個々のコアに大きな構造複屈折性を持たせることが容易

であり、波長依存性や偏波依存性の強いファイバカップラーを単一材料で簡単に実現できるのが特徴である。また、複数のコアを任意の位置に自在に配置することができ、波長フィルター、偏波スプリッター、分散補償ファイバ、ファイバセンサーなどといったファイバ型光デバイスの小型化や高性能化が期待できる。(齊藤 晋聖)