

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19760226  
 研究課題名（和文）フォトリックバンドギャップファイバカップラを利用した  
 新型光ファイバデバイスの開発  
 研究課題名（英文）Development of Novel Optical Fiber Devices Based on Photonic Band-Gap  
 Fiber Couplers  
 研究代表者  
 齊藤 晋聖（SAITOH KUNIMASA）  
 北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授  
 研究者番号：20333627

研究成果の概要：光ファイバのクラッド領域に空孔を周期的に配置し、その周期構造を乱す中空の欠陥領域をコアとして光波をファイバの長手方向へ伝搬させる空気コア型フォトリックバンドギャップファイバ中で生じる共振結合という新規現象を精査し、2つのコアの間に別の欠陥を導入することにより、コア間の結合がある特定の波長でのみ非常に強くなること、さらにその共振現象を利用して、狭帯域かつ低サイドローブの波長フィルタ特性を有するフォトリックバンドギャップファイバカップラが構成可能であることを明らかにした。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,100,000	0	2,100,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	330,000	3,530,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：フォトリック結晶ファイバ、フォトリックバンドギャップファイバ、有限要素法、光ファイバカップラ、光フィルタ

## 1. 研究開始当初の背景

(1) フォトリック結晶ファイバと呼ばれる新構造の光ファイバが、従来にない特性を実現可能な機能性光ファイバとして期待され、その研究開発が急速な勢いで進展している。このフォトリック結晶ファイバとは、クラッド領域に複数の空孔を有する光ファイバの総称であり、その動作原理の違いから、全反射現象による閉じ込め効果を利用した屈折率導波型フォトリック結晶ファイバと、フォトリックバンドギャップによる閉じ込め効果を利用したフォトリックバンドギャップ

ファイバとに大別される。特に、フォトリックバンドギャップファイバは導波原理が従来の光ファイバと大きく異なるため、まったく新しい機能性光デバイスを創生できる可能性を有している。

(2) フォトリックバンドギャップファイバは、通常、ファイバ中心に1つの欠陥を導入し、その欠陥領域をコアとして光波を長手方向へ伝搬させるが、欠陥領域を2つ導入することにより、2つのコアを有するフォトリックバンドギャップファイバ、いわゆるフォトリックバンドギャップファイバカップラを

容易に形成することができる。さらに、2つのコアの間に新たな欠陥構造を導入することにより、従来の光ファイバカップラとは大きく異なる結合特性を実現できる可能性がある。

## 2. 研究の目的

(1) フォトニックバンドギャップファイバカップラの基本特性、具体的には、結合長の波長依存性や偏波依存性、ファイバ損失などを高精度で算出できる理論の構築を図るとともに、これらの諸量のファイバ構造依存性を明らかにする。

(2) フォトニックバンドギャップファイバカップラ中で生じる共鳴結合という現象を駆使して、従来の光ファイバデバイスでは実現し得ない光学特性を備えたファイバ型光デバイス創生のための基盤技術を確認する。

## 3. 研究の方法

(1) フォトニックバンドギャップファイバを用いて光デバイスを構築する場合、フォトニックバンドギャップファイバそのものの伝送特性の向上を図る必要がある。本研究では、世界的にも未解決な問題である単一モード伝送の実現と表面モードの回避のための具体的な実現方法を提案し、高性能なフォトニックバンドギャップファイバの設計指針を確認する。

(2) ベクトル型の有限要素法を用いて、フォトニックバンドギャップファイバカップラの光学特性を高精度で算出できる数値計算手法の構築を図るとともに、数値計算と解析的アプローチとを融合した高速高精度計算が可能な新しい理論の枠組みを構築する。さらに、本計算理論を利用し、狭帯域かつ低サイドローブの波長フィルタ特性を有するフォトニックバンドギャップファイバカップラのごく具体的な構造を提案するとともにその最適化を行う。

(3) フォトニックバンドギャップファイバカップラ中で生じる共鳴結合現象が有する強い波長依存性を駆使して、光ファイバ型のコンパクトな波長合分波器など、さまざまな波長選択型光デバイスへの応用を検討する。また、欠陥部分に選択的に液晶などの熱光学係数や電気光学係数の大きな材料を注入することにより、光ファイバ型の可変波長フィルタの構成を目指す。

## 4. 研究成果

(1) 図1に、典型的な空気コアフォトニックバンドギャップファイバの断面構造を示す。(黒い部分が空気、白い部分がシリカガラスを表している。) 空気コアフォトニックバンドギャップファイバのコア領域は、通常、三角格子状に配置された単位セルを7個、あ

るいは19個取り除いて構成される。フォトニックバンドギャップファイバの構造を決定するパラメータは、空孔直径 $d$ 、空孔間隔 $\Lambda$ 、六角形の空孔の角の曲率直径 $d_c$ 、およびコア周囲のシリカリングの幅 $t$ である。実際に作製された空気コアフォトニックバンドギャップファイバにおいては、コア周囲の第1リングの周期構造が崩れるため、表面モードと呼ばれるコア周囲のシリカリングに局在する伝搬モードが存在し、この表面モードと空気コアを伝搬するコアモードとが結合する場合、広帯域な低損失伝送を実現することは困難となる。しかしながら、シリカリング幅 $t$ を適切に設定することによりフォトニックバンドギャップ内における表面モードを抑圧することができることを本研究では明らかにした。

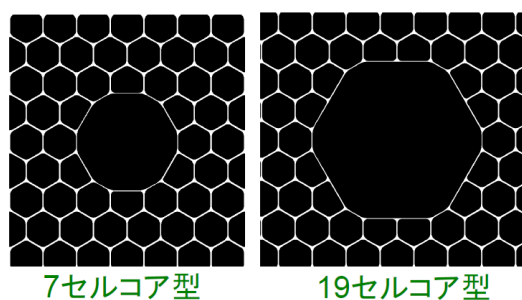


図1 空気コアフォトニックバンドギャップファイバの断面構造

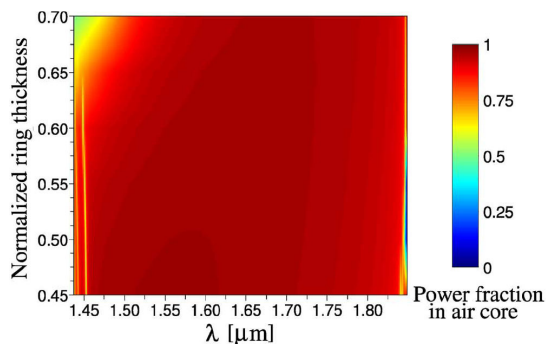


図2 7セルコア型のフォトニックバンドギャップファイバにおけるコアへの光パワーの閉込め率のファイバ構造依存性

図2に、7セルコア型の空気コアフォトニックバンドギャップファイバにおいて $d/\Lambda=0.97$ としたときの基本モードに対するコアへの光パワーの閉込め率の規格化シリカリング幅ならびに波長依存性を示す。ここで、空孔間隔は $\Lambda=4.0 \mu\text{m}$ であり、規格化シリカリング幅 $T$ は、 $0.45 < T < 0.70$ の間で変化させている。ただし、規格化シリカリング幅 $T$ は $T=t/(\Lambda-d)$ のように定義される。規格化シリカリング幅が大きいときは、短波長側の

領域において、表面モードとコアモードとの結合によってコアへの光パワーの閉込め率は減少しているが、 $T=0.50$  としたとき、つまり、シリカリング幅がクラッドの空孔間のシリカ厚の半分にほぼ等しいとき、表面モードはフォトニックバンドギャップ内からほぼ完全に抑圧されることがわかる。この表面モード抑圧条件は、クラッドの構造パラメータ  $d/\Lambda$  の値を変化させた場合にも有効である。

(2) 図2に、本研究で提案するフォトニックバンドギャップファイバカップラの断面構造の一例を示す。中心の空気コア(コアA)の周囲に4つの空気コア(コアB、C、D、E)が配置されており、それぞれのコア間に、周囲の空孔直径  $d$  とは大きさの異なる欠陥構造(空孔直径  $d_1, d_2, d_3, d_4$ )を導入している。フォトニックバンドギャップファイバにおいて、このような新たな欠陥構造を導入すると、この欠陥領域に局在する伝搬モード(欠陥モード)が存在することになる。この欠陥モードは非常に強い波長依存性を有しており、空気コアに局在する伝搬モード(空気コアモード)と特定の波長でのみ位相整合条件を満足することになる。中心の空気コアモードと外側の空気コアモードとは、欠陥モードとの位相整合条件が満足された波長でのみ強い結合を起こすことになるので、欠陥構造の大きさ(空孔直径  $d_1, d_2, d_3, d_4$ )を制御することにより、中心の空気コアに入射した光波のうち、空孔直径  $d_1, d_2, d_3, d_4$  と位相整合条件を満足する波長  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  の光波を、それぞれ外側の空気コア B、C、D、E から取り出すことができる。

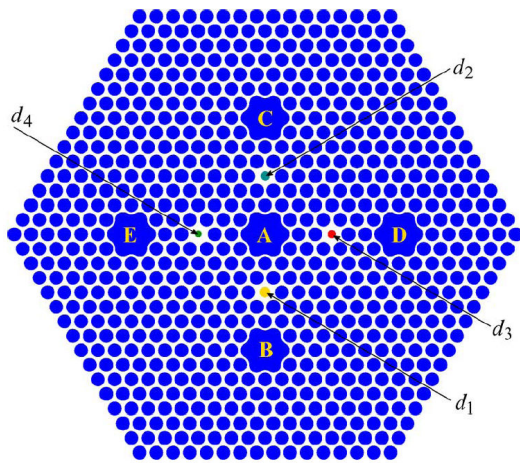


図2 フォトニックバンドギャップファイバカップラの断面構造

図3に、クラッド領域の空孔間隔を  $\Lambda=2 \mu\text{m}$ 、規格化空孔直径を  $d/\Lambda=0.9$  とし、4つの欠陥領域の規格化空孔直径をそれぞれ、 $d_1/\Lambda=0.82, d_2/\Lambda=0.80, d_3/\Lambda=0.76, d_4/\Lambda=0.73$

とした場合の、フォトニックバンドギャップファイバカップラの結合特性を示す。ここでは、中心の空気コアに基本モードを入射し、ファイバ長を  $3 \text{ mm}$  とした場合の外側の空気コア B、C、D、E から出射される光波の波長依存性を示している。規格化空孔直径  $d_1/\Lambda=0.82, d_2/\Lambda=0.80, d_3/\Lambda=0.76, d_4/\Lambda=0.73$  を有する欠陥領域に局在する欠陥モードと空気コアモードが位相整合する波長は、それぞれ  $\lambda_1=1.299 \mu\text{m}, \lambda_2=1.306 \mu\text{m}, \lambda_3=1.321 \mu\text{m}, \lambda_4=1.330 \mu\text{m}$  であり、外側の空気コア B、C、D、E では、それぞれ  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  を中心波長とする狭帯域の波長フィルタ特性が得られていることがわかる。

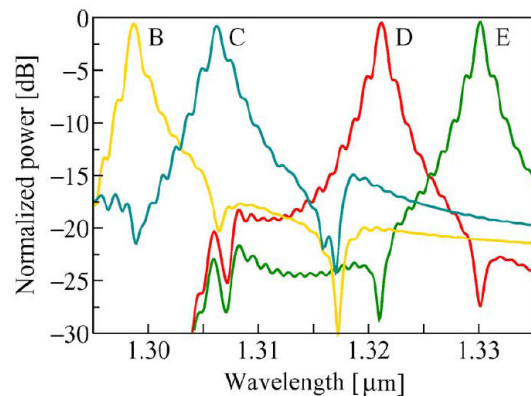


図3 フォトニックバンドギャップファイバカップラの波長フィルタ特性

(3) フォトニック結晶ファイバのクラッド領域に存在する空孔の一部に、液晶などの温度や外部電界によってその屈折率を制御できる流体を選択的に注入することにより、可変のファイバ型光デバイスを構成することができる。例えば、図4のように、フォトニック結晶ファイバカップラの2つのコアA、Cの間に存在する欠陥コアBの空孔内に液晶を注入することにより、欠陥コアB内に存在する欠陥モードと、外側のコアA、Cを伝搬するコアモードとが共振結合を起こす波長を外部温度により制御することができるので、全ファイバ型の温度可変狭帯域波長選択フィルタを構成することができる。

図5に、クラッド領域の空孔間隔を  $\Lambda=1 \mu\text{m}$ 、規格化空孔直径を  $d/\Lambda=0.45$  とし、2つのコア間に導入した欠陥領域の空孔内に液晶を注入した図4に示すようなフォトニック結晶ファイバカップラの結合特性を示す。ここでは、左側のコアAに基本モードを入射し、ファイバ長を  $23 \text{ mm}$  とした場合の右側のコアCから出射される光波の波長依存性を示している。液晶の温度を  $30^\circ\text{C}$  から  $50^\circ\text{C}$  まで変えることにより、狭帯域波長フィルタの中心波長を  $930 \text{ nm}$  から  $980 \text{ nm}$  まで約  $50 \text{ nm}$  シフトさせることができることがわかる。



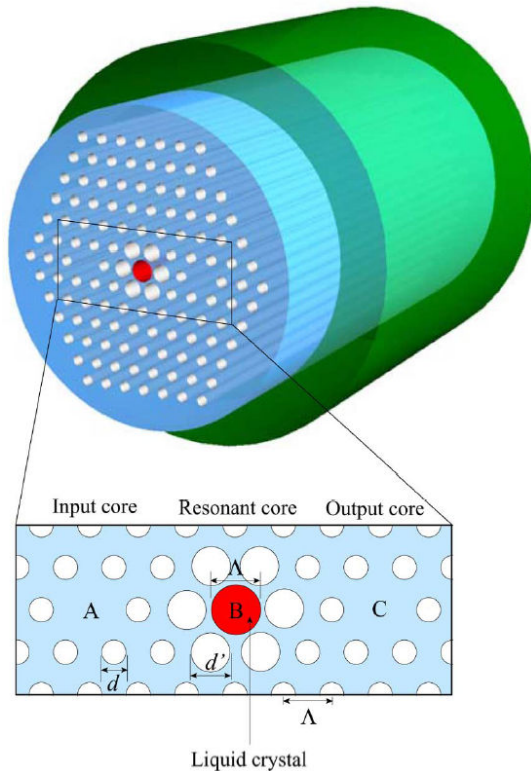


図 4 温度可変フォトニック結晶ファイバカップラの構成例

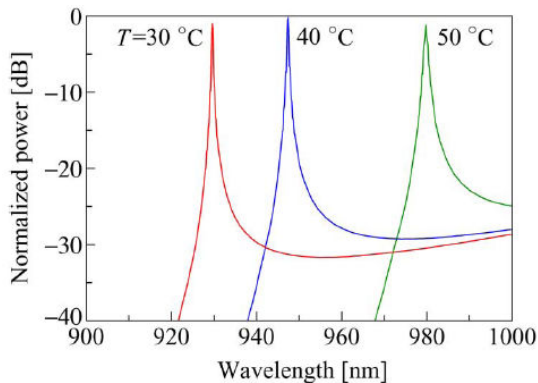


図 5 温度可変フォトニック結晶ファイバカップラの波長フィルタ特性

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① Z. Varallyay, K. Saitoh, J. Fekete, K. Kakihara, M. Koshiba, and R. Szipocs, Reversed dispersion slope photonic bandgap fibers for broadband dispersion control in femtosecond fiber lasers, *Optics Express*, Vol.16, pp. 15603-15616, 2008 【査読有】 .

- ② M. Skorobogatiy, K. Saitoh, and M. Koshiba, Full-vectorial coupled mode theory for the evaluation of macro-bending loss in multimode fibers, application to the hollow-core photonic bandgap fibers, *Optics Express*, Vol. 16, pp. 14945-14953, 2008 【査読有】 .
- ③ T. Murao, K. Saitoh, and M. Koshiba, Structural optimization of air-guiding photonic bandgap fibers for realizing ultimate low loss waveguides, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 26, pp. 1602-1612, 2008 【査読有】 .
- ④ K. Saitoh, N.J. Florous, S.K. Varshney, and M. Koshiba, Tunable photonic crystal fiber couplers with a thermo-responsive liquid crystal resonator, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 26, pp. 663-669, 2008 【査読有】 .
- ⑤ K. Saitoh, N.J. Florous, T. Murao, S.K. Varshney, and M. Koshiba, Photonic bandgap fiber filter design based on nonproximity resonant coupling mechanism, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 19, pp. 1547-1549, 2007 【査読有】 .
- ⑥ K. Saitoh, N.J. Florous, T. Murao, and M. Koshiba, Realistic design of large-hollow-core photonic band-gap fibers with suppressed higher order modes and surface modes, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 25, pp. 2440-2447, 2007 【査読有】 .
- ⑦ T. Murao, K. Saitoh, N.J. Florous, and M. Koshiba, Design of effectively single-mode air-core photonic bandgap fiber with improved transmission characteristics for the realization of ultimate low loss waveguide, *Optics Express*, Vol. 15, pp. 4268-4280, 2007 【査読有】 .

[学会発表] (計 9 件)

- ① K. Saitoh, T. Taru, T. Nagashima, T. Murao, K. Maeda, T. Sasaki, S.K. Varshney, and M. Koshiba, Control of transmission band in all-solid photonic bandgap fibers with novel hybridized bandgap structure, *Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC 2009)*, San Diego, California, USA, 26 Mar. 2009.
- ② Z. Varallyay, K. Saitoh, A. Szabo, K. Kakihara, M. Koshiba, and R. Szipocs,

- Reversed dispersion slope photonic bandgap fibers and femtosecond pulse propagation, Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC 2009), San Diego, California, USA, 26 Mar. 2009.
- ③ K. Saitoh and M. Koshiba, Microstructured optical fibers: From design to applications, International Conference on Fiber Optics and Photonics (PHOTONICS 2008), Delhi, India, 12 Dec. 2008.
- ④ S.K. Varshney, K. Saitoh, R.K. Sinha, and M. Koshiba, Theoretical design of multi-core photonic crystal fiber based  $1 \times 4$  power splitters, Optoelectronics and Communication Conference (OECC 2008)/ Australian Conference on Optical Fiber Technology (ACOFT 2008), Sydney, Australia, 9 July 2008.
- ⑤ K. Saitoh, K. Kakihara, S.K. Varshney, and M. Koshiba, Nonlinear enhancement and dispersion management in bismuth microstructured fibers with a filled slot defect, Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2008), San Jose, California, USA, 6 May 2008.
- ⑥ T. Murao, K. Saitoh, and M. Koshiba, Structural optimization of ultimate low loss air-guiding photonic bandgap fibers, Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC 2008), San Diego, California, USA, 27 Feb. 2008.
- ⑦ K. Saitoh, S.K. Varshney, and M. Koshiba, Resonant coupling in photonic crystal fibers, Optoelectronics and Communications Conference and International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (OECC/IOOC 2007), Yokohama, Japan, 10 July 2007 (Invited)
- ⑧ K. Saitoh, N.J. Florous, S.K. Varshney, and M. Koshiba, All-fiber integrated assemblies based on the resonant tunneling effect in multi-core photonic band-gap fibers, Conference on Lasers and Electro-Optics and Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2007), Baltimore, USA, 8 May 2007.
- ⑨ K. Saitoh, N.J. Florous, S.K. Varshney, and M. Koshiba, Tunable photonic crystal fiber couplers infiltrated with highly-thermo-responsive liquid crystal substances, Conference on Lasers and Electro-Optics and Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2007), Baltimore, USA, 8 May 2007.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齊藤 晋聖 (SAITOH KUNIMASA)

北海道大学・大学院情報科学研究科・  
准教授

研究者番号：20333627

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし