

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2010-534860

(P2010-534860A)

(43) 公表日 平成22年11月11日(2010.11.11)

(51) Int.Cl. F I テーマコード (参考)  
**G 0 2 B 6/00 (2006.01)** G 0 2 B 6/00 3 7 6 Z 2 H 1 5 O

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 27 頁)

(21) 出願番号 特願2010-517454 (P2010-517454)  
 (86) (22) 出願日 平成20年7月25日 (2008.7.25)  
 (85) 翻訳文提出日 平成22年2月12日 (2010.2.12)  
 (86) 国際出願番号 PCT/FR2008/001111  
 (87) 国際公開番号 W02009/047404  
 (87) 国際公開日 平成21年4月16日 (2009.4.16)  
 (31) 優先権主張番号 07370013.0  
 (32) 優先日 平成19年7月26日 (2007.7.26)  
 (33) 優先権主張国 欧州特許庁 (EP)

(71) 出願人 510024558  
 サントル ナショナル デ ラ ルシエル  
 シュ シアンティフィク  
 フランス, エフ-75794 パリ セ  
 デックス 16, リュ ミシエル アン  
 ジェ, 3  
 (74) 代理人 100103816  
 弁理士 風早 信昭  
 (74) 代理人 100120927  
 弁理士 浅野 典子  
 (72) 発明者 キケンボワ, イヴ  
 フランス, エフ-59520 マルケッ  
 ト レ リール, リュ ジャン フロワ  
 サール, 16

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 非線形応用のために最適化されたフォトニック禁制帯および全反射による導光用のハイブリッド  
 微細構造光ファイバ

## (57) 【要約】

屈折率 ( $n_1$ ) を有する背景材および少なくとも2種類の幾つかの介在物を備えたクラッド (1) の第1タイプの介在物 (2) が前記背景材の屈折率 ( $n_1$ ) より高い屈折率 ( $n_2$ ) を有し、第2タイプの介在物 (3) が前記背景材の屈折率 ( $n_1$ ) より低い屈折率 ( $n_3$ ) を有して成るクラッド (1) に包囲されたコア (4) を含み、光の基本モードのフォトニック禁制帯による導光を可能にする微細構造光ファイバ。前記クラッドの介在物 (2、3) は、波長  $R_{TI}$  を中心とする光の基本モードの全反射 ( $R_{TI}$ ) による導光を可能にし、かつ全反射 ( $R_{TI}$ ) によって導光される基本モードのこの  $R_{TI}$  より低い波長  $B_{G1}$  を中心とする第1フォトニック禁制帯 ( $B_{G1}$ ) での光の基本モードの導光を可能にするように、配列されかつ大きさを決定される。

【選択図】 図1

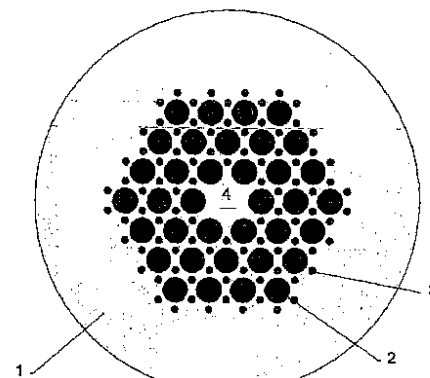


Fig.1

## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

屈折率 ( $n_1$ ) を有する背景材および少なくとも 2 種類の複数の介在物を備えたクラッド (1) の第 1 タイプの介在物 (2) が前記背景材の屈折率 ( $n_1$ ) より高い屈折率 ( $n_2$ ) を有し、第 2 タイプの介在物 (3) が前記背景材の屈折率 ( $n_1$ ) より低い屈折率 ( $n_3$ ) を有して成るクラッド (1) に包囲されたコア (4) を含み、光の基本モードのフォトリック禁制帯による導光を可能にする微細構造光ファイバであって、前記クラッドの介在物 (2、3) が、波長  $R_{TI}$  を中心とする光の基本モードの全反射 ( $R_{TI}$ ) による導光を可能にし、かつ全反射 ( $R_{TI}$ ) によって導光される基本モードのこの  $R_{TI}$  より低い波長  $B_{G1}$  を中心とする第 1 フォトリック禁制帯 ( $B_{G1}$ ) での光の基本モードの導光を可能にするように、配列されかつ大きさを決定されることを特徴とする微細構造光ファイバ。

10

## 【請求項 2】

前記クラッド (1) の平均実効屈折率 ( $n_{fsm}$ ) が、少なくとも波長  $B_{G1}$  より高い波長範囲では前記クラッド (1) の前記背景材の屈折率 ( $n_1$ ) より低いことを特徴とする、請求項 1 に記載の微細構造光ファイバ。

## 【請求項 3】

前記コア (4) が前記第 1 タイプの介在物 (2) によって構成される中央クラウンによって包囲され、前記第 2 タイプの全ての介在物 (3) がこの中央クラウンの外側に位置されることを特徴とする、請求項 1 または 2 のいずれか 1 項に記載の微細構造光ファイバ。

20

## 【請求項 4】

前記介在物 (2) の屈折率 ( $n_2$ ) が前記コア (4) の屈折率 ( $n_4$ ) より高いことを特徴とする、請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載の微細構造光ファイバ。

## 【請求項 5】

前記ファイバの前記コア (4) が前記クラッド (1) と同じ背景材を含むことを特徴とする、請求項 1 ~ 4 のいずれか 1 項に記載の微細構造光ファイバ。

## 【請求項 6】

前記コア (4) の屈折率 ( $n_4$ ) が前記クラッド (1) の前記背景材の屈折率 ( $n_1$ ) と等しいことを特徴とする、請求項 1 ~ 5 のいずれか 1 項に記載の微細構造光ファイバ。

## 【請求項 7】

前記ファイバの前記コア (4) が前記クラッド (1) の前記背景材と同一材料から構成されることを特徴とする、請求項 6 に記載の微細構造光ファイバ。

30

## 【請求項 8】

前記介在物 (2、3) が、一定ステップ ( ) によって特徴付けられる周期的ネットワークの形状に配列されることを特徴とする、請求項 1 ~ 7 のいずれか 1 項に記載の微細構造光ファイバ。

## 【請求項 9】

前記クラッド (1) の平均実効屈折率 ( $n_{fsm}$ ) が少なくとも波長  $B_{G1}$  より高い波長範囲では前記クラッド (1) の前記背景材の屈折率 ( $n_1$ ) より低くなるように、前記第 2 タイプの介在物 (3) の大きさおよび介在物のネットワークのステップ ( ) が選択されることを特徴とする、請求項 8 に記載の微細構造光ファイバ。

40

## 【請求項 10】

前記クラッドの前記介在物 (2、3) が、位相整合された  $m$  個の波 ( $m \geq 3$ ) の組合せを可能にするような仕方で配列されかつ大きさを決定され、これらの波のうちの少なくとも 2 つが異なる波長 ( $R_{TI}$ 、 $B_{G1}$ ) を有し、それぞれ全反射 ( $R_{TI}$ ) によって導光される基本モードおよび第 1 フォトリック禁制帯 ( $B_{G1}$ ) で導光される基本モードに属することを特徴とする、請求項 1 ~ 9 のいずれか 1 項に記載の微細構造光ファイバ。

## 【請求項 11】

第 1 禁制帯 ( $B_{G2}$ ) で導光される基本モードおよび全反射 ( $R_{TI}$ ) によって導光される基本モードが次の条件 (a) および (b)、すなわち

50

$$(a) \sum_{i=1}^m \frac{1}{\lambda_i} = 0$$

$$(b) \sum_{i=1}^m \frac{n_{\lambda_i}}{\lambda_i} = 0$$

を累積的に順守し、 $m$ が3以上の整数であり、 $n_i$ が波長 $\lambda_i$ で光ファイバを伝搬する基本モードの実効屈折率の値であること、ならびに

前記条件(a)および(b)を順守する波長 $\lambda_i$ のうち、少なくとも1つの波長( $\lambda_{RTI}$ )が全反射(RTI)によって導光される基本モードに属し、少なくとも1つの波長( $\lambda_{BG1}$ )が第1禁止帯(BG1)で導光される基本モードに属することを特徴とする、請求項1～10のいずれか1項に記載の微細構造光ファイバ。

10

#### 【請求項12】

全反射(RTI)によって導光される基本モードおよび第1フォトリック禁制帯(BG1)で導光される基本モードにそれぞれ属する少なくとも2つの異なる波長 $\lambda_{RTI}$ および $\lambda_{BG1}$ に対し、これら2つの波長 $\lambda_{RTI}$ および $\lambda_{BG1}$ におけるファイバの実効屈折率( $n_{RTI}$ ;  $n_{BG1}$ )が等しくかつ前記クラッドの前記背景材の屈折率( $n_1$ )より低くなるように、前記クラッドの前記介在物(2、3)が配列されかつ大きさを決定されることを特徴とする、請求項1～10のいずれか1項に記載の微細構造光ファイバ。

20

#### 【請求項13】

前記2つの波長 $\lambda_{RTI}$ および $\lambda_{BG1}$ が次の条件、すなわち $\lambda_{RTI} = k \times \lambda_{BG1}$ ( $k$ は2以上の整数である)を順守することを特徴とする、請求項1～12のいずれか1項に記載の微細構造光ファイバ。

#### 【請求項14】

前記2つの波長 $\lambda_{RTI}$ および $\lambda_{BG1}$ が次の条件、すなわち $\lambda_{RTI} = 2 \times \lambda_{BG1}$ を順守することを特徴とする、請求項13に記載の微細構造光ファイバ。

#### 【請求項15】

前記2つの波長 $\lambda_{RTI}$ および $\lambda_{BG1}$ が次の条件、すなわち $\lambda_{RTI} = 3 \times \lambda_{BG1}$ を順守することを特徴とする、請求項13に記載の微細構造光ファイバ。

30

#### 【請求項16】

全反射(RTI)によって導光される基本モードの波長 $\lambda_{RTI}$ が、第1禁制帯(BG1)で導光される基本モードの波長範囲の外側に位置されることを特徴とする、請求項1～15のいずれか1項に記載の微細構造光ファイバ。

#### 【請求項17】

介在物(2、3)のネットワークが六角形であり、ハチの巣型であることを特徴とする、請求項1～16のいずれか1項に記載の微細構造光ファイバ。

#### 【請求項18】

介在物(2、3)のネットワークが正方形を形成することを特徴とする、請求項1～16のいずれか1項に記載の微細構造光ファイバ。

40

#### 【請求項19】

介在物(2、3)のネットワークが、前記第1タイプの介在物(2)によって形成される少なくとも2つの同心クラウンを含み、前記中央クラウンの前記第1タイプの介在物(2)を除いて、前記第1タイプの各介在物(2)が前記第2タイプの複数の介在物(3)によって包囲されることを特徴とする、請求項1～18のいずれか1項に記載の微細構造光ファイバ。

#### 【請求項20】

前記クラッドの前記背景材がシリカから作られ、かつ前記第2タイプの介在物(3)が空気孔を含むことを特徴とする、請求項1～19のいずれか1項に記載の微細構造光ファイバ。

50

イバ。

【請求項 2 1】

前記クラッドの前記背景材がシリカから作られ、かつ前記第 1 タイプの介在物 ( 2 ) がドーブされたシリカの介在物を含むことを特徴とする、請求項 1 ~ 2 0 のいずれか 1 項に記載の微細構造光ファイバ。

【請求項 2 2】

前記第 1 タイプの介在物 ( 2 ) が、ゲルマニウムをドーブされたシリカまたはリンをドーブされたシリカから作られた介在物を含むことを特徴とする、請求項 2 1 に記載の微細構造光ファイバ。

【請求項 2 3】

前記クラッドの前記背景材がシリカから作られ、かつ前記第 1 タイプの介在物 ( 2 ) がテルライトガラスまたはカルコゲナイドガラスから作られた介在物を含むことを特徴とする、請求項 1 ~ 2 2 のいずれか 1 項に記載の微細構造光ファイバ。

【請求項 2 4】

前記第 1 タイプの介在物 ( 2 ) が、前記クラッド ( 1 ) の背景材の屈折率 (  $n_1$  ) より高い屈折率 (  $n_2$  ) を呈する液体または気体を包含する介在物を含むことを特徴とする、請求項 1 ~ 2 3 のいずれか 1 項に記載の微細構造光ファイバ。

【請求項 2 5】

前記第 2 タイプの介在物 ( 3 ) が、前記クラッド ( 1 ) の背景材の屈折率 (  $n_1$  ) より低い屈折率 (  $n_3$  ) を呈する液体または気体を包含する介在物を含むことを特徴とする、請求項 1 ~ 2 4 のいずれか 1 項に記載の微細構造光ファイバ。

【請求項 2 6】

非線形効果による周波数の発生のための、特に次の応用、すなわち双子の光子の発生、三つ子の光子の発生、複数の周波数の発生、特に周波数の 2 倍化および周波数の 3 倍化のうちの 1 つのための請求項 1 ~ 2 5 のいずれか 1 項に記載の微細構造光ファイバの使用。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、フォトニック禁制帯のメカニズムおよび全反射のメカニズムの両方によって光を導くためのハイブリッド微細構造光ファイバに関する。このハイブリッド微細構造光ファイバは、それを特に、例えば周波数の 2 倍化 (  $w + w \rightarrow 2w$  )、周波数の 3 倍化 (  $w + w + w \rightarrow 3w$  )、双子の光子の発生 (  $2w \rightarrow w + w$  )、三つ子の光子の発生 (  $3w \rightarrow w + w + w$  ) 等のような、しかしそれらに限らず、非線形応用に適したものにしている新しい断面が特徴である。この光ファイバは、例えば「全ファイバ」高出力レーザ、量子暗号を介する電気通信網のセキュリティゼーション ( securityization )、種々の技術分野および例えば電気通信または生物医学分野における非線形効果を介する新周波数の発生のような、多くの技術分野で有利に使用することができる。

【背景技術】

【0002】

光ファイバの分野の最近の研究は、フォトニック結晶ファイバ ( PCF )、またはフォトニックバンドギャップ ( 禁制帯 ) ファイバ ( または PBGF ) とも呼ばれる、新しいタイプのいわゆる微細構造ファイバの開発を導いた。

【0003】

一般的に、これらの微細構造ファイバは、クラッドによって囲まれたコアを含み、それは背景材内に、ほとんどの場合シリカ内に実現され、かつそれはクラッドの背景材の屈折率とは異なる屈折率を特徴とする長手方向介在物の横方向ネットワークを含む。

【0004】

光ファイバの背景材 ( 例えばシリカ ) の屈折率は、波長 ( 分散 ) に応じて変化する。ステップインデックス光ファイバとは対照的に、微細構造ファイバは有利なことに、様々な屈折率の前記介在物の存在のおかげで、この分散を著しく変化させることが可能である。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 0 5 】

第 1 実現型の介在物は、背景材の屈折率より高い屈折率を特徴とする介在物によって構成される。例えば、限定するものではないが、背景材がシリカである場合、第 1 型の高屈折率の介在物は、酸化ゲルマニウム ( $\text{GeO}_2$ ) をドーブしたシリカン介在物によって構成することができる。

## 【 0 0 0 6 】

第 2 実現型の介在物は、背景材の屈折率より低い屈折率を特徴とする介在物によって構成される。例えば、限定するものではないが、背景材がシリカである場合、第 2 型の低屈折率の介在物は、流体 (気体または液体) で満たされた、ほとんどの場合空気で満たされたキャピティまたは孔によって構成することができる。

10

## 【 0 0 0 7 】

場合によっては、クラッドはより高い屈折率の介在物だけ、もしくはより低い屈折率の介在物だけ、または 2 種類の介在物の組合せを含むことができる。

## 【 0 0 0 8 】

場合によっては、介在物は周期的ネットワークの形に配置されるか、または無作為に分散されるか、または周期的領域および非周期的領域の両方を含む構成に従って分散される。

## 【 0 0 0 9 】

これらの断面構造に応じて、微細構造光ファイバは光をファイバの長手軸に沿って伝搬させ、全反射によって導光させ、またはフォトリック禁制帯によって導光させることを可能にする。

20

## 【 0 0 1 0 】

2003 年に Jesper Laegsgaard および Anders Bjarklev は、「Doped photonic bandgap fibres for short-wavelength non linear devices」(Vol. 28, No. 10, p. 783 (2003), OPTICS LETTERS) と題する刊行物で、酸化ゲルマニウムをドーブしたシリカパッドおよび空気孔を含み、可視範囲で零分散を特徴とする微細構造光ファイバについて記載した。この刊行物に記載された微細構造光ファイバは、光をフォトリック禁制帯によってのみ導くことができ、6 つの中央空気孔が存在する結果、光を全反射によって導くことはできない。

30

## 【 0 0 1 1 】

2006 年に Arismar Cerqueira らは、「Hybrid photonic crystal fiber」(Vol. 14, No. 2, p. 926 (2006), OPTICS EXPRESS) と題する刊行物で、非ドーブシリカの背景材に挿入された空気孔およびゲルマニウムをドーブしたシリカパッドを含み、その断面構造が光を第 1 方向にはフォトリック禁制帯メカニズムによって、かつ前記第 1 方向に垂直な第 2 方向には全反射によって導光することを可能にする、微細構造光ファイバを記載した。このファイバ構造では、同一波長の場合、モードはフォトリック禁制帯および全反射の両方によって誘導される。

40

## 【 0 0 1 2 】

上記刊行物に記載された微細構造ファイバは、例えば周波数の 2 倍化 ( $w + w = 2w$ )、周波数の 3 倍化 ( $w + w + w = 3w$ )、双子の光子の発生 ( $2w = w + w$ )、三つ子の光子の発生 ( $3w = w + w + w$ ) 等のような、非線形応用には使用することができない。今日まで、これらの非線形光応用では、非線形結晶が使用されている。しかし、これらの非線形結晶は幾つかの欠点を呈する。そのような結晶では光波が導波されないため、非線形相互作用長は、光ファイバの数メートルとは対照的に、数センチメートルである。加えて、これらの非線形結晶を実現する塊状の構成要素の挿入は必然的に損失およびアラインメント問題、およびしたがって脆弱で高価なデバイスを導く。

## 【 0 0 1 3 】

「Phase matched third harmonics generati

50

on in microstructured fibers」(2003年10月6日、Vol. 11、No. 20、p. 2567 - OPTICS EXPRESS)と題する刊行物でA. Efimov、A. J. Taylor、F. G. Omenetto、J. C. Knight、W. J. Wadsworth、およびP. St. J. Russellによって発表されたさらなる研究は、位相屈折率整合による周波数の3倍化を得るための解決策を記載している。該解決策は、微細構造光ファイバで全反射によってそれ自体を伝搬する基本モードと、高次横モード、特に第3高調波モードとの間の位相整合を実行することにある。それにもかかわらず、第3高調波モードの断面構造が複数のローブを特徴とし、それはこの解決策の性能および使用にとって有害であるので、この研究で得られた結果は実際には満足のいくものではない。

10

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0014】

本発明の目的の1つは、双子の光子の発生( $c$ は真空中の光の速度であり、 $w = 2c$  / として、 $2w = w + w$ またはより一般的には $w_1 = w_2 + w_3$ )、三つ子の光子の発生( $3w = w + w + w$ またはより一般的には $w_1 = w_2 + w_3 + w_4$ )のような非線形光学応用、または非線形効果を介する周波数の発生、および特に3つの波長の結合( $w_1 = w_2 + w_3$ )またはさらに詳しくは周波数の2倍化( $w + w = 2w$ )、4つの波長の結合( $w_1 + w_2 + w_3 = w_4$ 、 $w_1 + w_2 = w_3 + w_4$ )またはさらに詳しくは周波数の3倍化( $w + w + w = 3w$ )のような応用において、非線形結晶に代って有利に使用することのできる新しい微細構造光ファイバを提案することである。

20

【課題を解決するための手段】

【0015】

この目的は、請求項1に記載する微細構造光ファイバによって達成される。

【0016】

本発明のこの微細構造光ファイバは、「Doped photonic band gap fibres for short-wavelength non linear devices」(Vol. 28、No. 10、p. 783 (2003)、OPTICS LETTERS)と題する上記刊行物にJesper LaegsgaardおよびAnders Bjarklevによって知られかつ記載された、次の技術的特性を特徴とする。それはクラッドによって囲まれたコアを含み、クラッドは屈折率( $n_1$ )を有する背景材および複数の少なくとも2種類の介在物を含み、第1型の介在物はクラッド材の屈折率( $n_1$ )より高い屈折率( $n_2$ )を有し、第2型の介在物は背景材の屈折率( $n_1$ )より低い屈折率( $n_3$ )を有し、前記ファイバは光の基本モードのフォトリック禁制帯によって導波を可能にする。

30

【0017】

本発明に係る特徴的な方法で、クラッドの介在物は、波長 $\lambda_{RTI}$ を中心に光の基本モードの全反射(RTI)による導光、および全反射(RTI)によって導光される基本モードのこの $\lambda_{RTI}$ より低い波長 $\lambda_{BG1}$ を中心に第1フォトリック禁制帯(BG1)における光の基本モードの導光を確実にするように配列され、かつ大きさを決定される。

40

【0018】

本発明の微細構造光ファイバはまた、添付する特許請求の範囲に示す他の追加的な光学技術的特徴をも含むことができる。

【0019】

本発明の特徴および利点は、本発明の非限定的かつ非網羅的实施例として添付の図面に関連して掲げる、本発明の微細構造光ファイバの好適な実施形態についての以下の詳細な説明を読むことにより、いっそう明瞭かつ完全に理解されるであろう。

【図面の簡単な説明】

【0020】

【図1】図1は、本発明の第1実施形態に係る微細構造光ファイバの断面図である。

50

【図 2】図 2 は、図 1 の断面の 1 領域の拡大図である。

【図 3】図 3 は、 $0.3 \mu\text{m}$  から  $3 \mu\text{m}$  までの間のポンプ波長  $\lambda_{\text{PTI}}$  に対し、2 つの波長  $\lambda_1$  /  $\lambda_2$  および  $\lambda_2$  /  $\lambda_3$  における純シリカの屈折率の差 ( ) の変動を表わす曲線であり、シリカの屈折率はセルマイヤの法則に従う。

【図 4】図 4 は、 $0.3 \mu\text{m}$  から  $3 \mu\text{m}$  までの間のポンプ波長  $\lambda_{\text{PTI}}$  に対し、2 つの波長  $\lambda_1$  /  $\lambda_3$  および  $\lambda_3$  /  $\lambda_2$  における純シリカの屈折率の差 ( ) の変動を表わす曲線であり、シリカの屈折率はセルマイヤの法則に従う。

【図 5】図 5 は、図 1 のファイバより高い屈折率を有する介在物の同一ネットワークを含むが、中央に欠陥が無く、かつ低屈折率の介在物 (空気孔) の無い光ファイバのフォトリック禁制帯の図表であり、シリカの屈折率は一定であり  $1.45$  に等しいと理解される。

【図 6】図 6 は、図 1 のファイバと同一の介在物ネットワークを含むが、中央に欠陥の無い光ファイバのフォトリック禁制帯の図表であり、屈折率  $n_3$  の介在物の比 ( $d_3 / d_2$ ) は  $0.04$  に等しく、シリカの屈折率は一定であり  $1.45$  に等しいと理解される。

【図 7】図 7 は、図 1 のファイバと同一の介在物ネットワークを含むが、中央に欠陥の無い光ファイバのフォトリック禁制帯の図表であり、ネットワークの屈折率  $n_3$  の介在物の比  $d_3 / d_2$  は  $0.1518$  に等しく、シリカの屈折率は一定であり  $1.45$  に等しいと理解される。

【図 8】図 8 は、図 1 に係る微細構造光ファイバの第 1 フォトリック禁制帯 (BG1) および全反射帯 (RTI) における基本モードの波長 ( $\mu\text{m}$  単位) の関数としての実効屈折率変動を示し、介在物のネットワークステップ  $d_3 / d_2$  が  $0.798 \mu\text{m}$  に等しく、かつ屈折率  $n_3$  の介在物の比  $d_3 / d_2$  が  $0.1518$  に等しいことを特徴とする図表であり、シリカの屈折率はセルマイヤの法則に従って変動する。

【図 9】図 9 は、図 1 に係る微細構造光ファイバの第 1 フォトリック禁制帯 (BG1) および全反射帯 (RTI) における基本モードの波長 ( $\mu\text{m}$  単位) の関数としての実効屈折率変動を示し、介在物のネットワークステップ  $d_3 / d_2$  が  $1.386 \mu\text{m}$  に等しく、かつ屈折率  $n_3$  の介在物の比  $d_3 / d_2$  が  $0.1518$  に等しいことを特徴とする図表であり、シリカの屈折率はセルマイヤの法則に従って変動する。

【図 10】図 10 は、図 1 に係る微細構造光ファイバの第 1 フォトリック禁制帯 (BG1) および全反射帯 (RTI) における基本モードの波長 ( $\mu\text{m}$  単位) の関数としての実効屈折率変動を示し、介在物のネットワークステップ  $d_3 / d_2$  が  $1.785 \mu\text{m}$  に等しく、かつ屈折率  $n_3$  の介在物の比  $d_3 / d_2$  が  $0.1518$  に等しいことを特徴とする図表であり、シリカの屈折率はセルマイヤの法則に従って変動する。

【図 11】図 11 は、図 1 に係る微細構造光ファイバの第 1 フォトリック禁制帯 (BG1) および全反射帯 (RTI) における基本モードの波長 ( $\mu\text{m}$  単位) の関数としての実効屈折率変動を示し、介在物のネットワークステップ  $d_3 / d_2$  が  $0.585 \mu\text{m}$  に等しく、かつ屈折率  $n_3$  の介在物の比  $d_3 / d_2$  が  $0.1518$  に等しいことを特徴とする図表であり、シリカの屈折率はセルマイヤの法則に従って変動する。

【図 12】図 12 は、図 1 に係る微細構造光ファイバの第 1 フォトリック禁制帯 (BG1) および全反射帯 (RTI) における基本モードの波長 ( $\mu\text{m}$  単位) の関数としての実効屈折率変動を示し、介在物のネットワークステップ  $d_3 / d_2$  が  $0.92 \mu\text{m}$  に等しく、かつ屈折率  $n_3$  の介在物の比  $d_3 / d_2$  が  $0.1518$  に等しいことを特徴とする図表であり、シリカの屈折率はセルマイヤの法則に従って変動する。

【図 13】図 13 は、 $0.6 \mu\text{m}$  から  $2 \mu\text{m}$  の間のポンプ波長  $\lambda_{\text{PTI}}$  から周波数の 2 倍化を得るために、この波長の関数として図 1 に係る光ファイバのネットワークステップの展開 ( $\mu\text{m}$  単位) を表わす曲線であり、シリカの屈折率はセルマイヤの法則に従って変動する。

【図 14】図 14 は、 $1 \mu\text{m}$  から  $2 \mu\text{m}$  の間のポンプ波長  $\lambda_{\text{PTI}}$  から周波数の 3 倍化を得るために、この波長の関数として図 1 に係る光ファイバのネットワークステップの展開 ( $\mu\text{m}$  単位) を表わす曲線であり、シリカの屈折率はセルマイヤの法則に従って変動する。

10

20

30

40

50

【図 1 5】図 1 5 は、本発明の第 2 実施形態に係る微細構造光ファイバの断面図である。

【図 1 6】図 1 6 は、図 1 5 の断面の 1 領域の拡大図である。

【図 1 7】図 1 7 は、本発明の第 3 実施形態に係る微細構造光ファイバの断面図である。

【図 1 8】図 1 8 は、図 1 7 に係る微細構造光ファイバの第 1 フォトニック禁制帯 ( B G 1 ) および全反射帯 ( R T I ) における基本モードの波長 (  $\mu\text{m}$  単位 ) の関数としての実効屈折率変動を示し、介在物のネットワークステップ が  $1.79\mu\text{m}$  に等しく、かつ屈折率  $n_3$  の介在物の比  $d_3 /$  が  $0.4$  に等しいことを特徴とする図表であり、シリカの屈折率はセルマイヤの法則に従って変動する。

【図 1 9】図 1 9 は、図 1 7 に係る微細構造光ファイバの第 1 フォトニック禁制帯 ( B G 1 ) および全反射帯 ( R T I ) における基本モードの波長 (  $\mu\text{m}$  単位 ) の関数としての実効屈折率変動を示し、介在物のネットワークステップ が  $2.06\mu\text{m}$  に等しく、かつ屈折率  $n_3$  の介在物の比  $d_3 /$  が  $0.4$  に等しいことを特徴とする図表であり、シリカの屈折率はセルマイヤの法則に従って変動する。

【図 2 0】図 2 0 は、図 1 7 に係る微細構造光ファイバの第 1 フォトニック禁制帯 ( B G 1 ) および全反射帯 ( R T I ) における基本モードの波長 (  $\mu\text{m}$  単位 ) の関数としての実効屈折率変動を示し、介在物のネットワークステップ が  $2.67\mu\text{m}$  に等しく、かつ屈折率  $n_3$  の介在物の比  $d_3 /$  が  $0.4$  に等しいことを特徴とする図表であり、シリカの屈折率はセルマイヤの法則に従って変動する。

【図 2 1】図 2 1 は、 $0.8\mu\text{m}$  から  $3\mu\text{m}$  の間のポンプ波長から周波数の 2 倍化を得るために、このポンプ波長の関数として図 1 7 に係る光ファイバのネットワークステップ の展開 (  $\mu\text{m}$  単位 ) を表わす曲線であり、シリカの屈折率はセルマイヤの法則に従って変動する。

【図 2 2】図 2 2 は、本発明の第 4 実施形態に係る微細構造光ファイバの断面図である。

【図 2 3】図 2 3 は、図 2 2 に係る微細構造光ファイバの第 1 フォトニック禁制帯 ( B G 1 ) および全反射帯 ( R T I ) における基本モードの波長 (  $\mu\text{m}$  単位 ) の関数としての実効屈折率変動を示し、介在物のネットワークステップ が  $1.22\mu\text{m}$  に等しく、かつ屈折率  $n_3$  の介在物の比  $d_3 /$  が  $0.32$  に等しいことを特徴とする図表であり、シリカの屈折率はセルマイヤの法則に従って変動する。

【図 2 4】図 2 4 は、図 2 2 に係る微細構造光ファイバの第 1 フォトニック禁制帯 ( B G 1 ) および全反射帯 ( R T I ) における基本モードの波長 (  $\mu\text{m}$  単位 ) の関数としての実効屈折率変動を示し、介在物のネットワークステップ が  $1.42\mu\text{m}$  に等しく、かつ屈折率  $n_3$  の介在物の比  $d_3 /$  が  $0.32$  に等しいことを特徴とする図表であり、シリカの屈折率はセルマイヤの法則に従って変動する。

【図 2 5】図 2 5 は、図 2 2 に係る微細構造光ファイバの第 1 フォトニック禁制帯 ( B G 1 ) および全反射帯 ( R T I ) における基本モードの波長 (  $\mu\text{m}$  単位 ) の関数としての実効屈折率変動を示し、介在物のネットワークステップ が  $1.86\mu\text{m}$  に等しく、かつ屈折率  $n_3$  の介在物の比  $d_3 /$  が  $0.32$  に等しいことを特徴とする図表であり、シリカの屈折率はセルマイヤの法則に従って変動する。

【図 2 6】図 2 6 は、 $0.8\mu\text{m}$  から  $2.5\mu\text{m}$  の間のポンプ波長から周波数の 2 倍化を得るために、このポンプ波長の関数として図 2 2 に係る光ファイバのネットワークステップ の展開を表わす曲線であり、シリカの屈折率はセルマイヤの法則に従って変動する。

【発明を実施するための形態】

【0021】

図 1 を参照すると、本発明のハイブリッド微細構造光ファイバの好適な実施形態は、屈折率 (  $n_1$  ) の背景材から作られたクラッド 1 を含み、その中にファイバの全長に沿って延びる介在物の周期的ネットワークが配置されている。ファイバの中心で、介在物 2、3 のこのネットワークは中央の欠陥 4 ( 介在物の不在 ) を特徴とし、光ファイバのコアを形成する。

【0022】

一般的に、介在物 2 はクラッド材の屈折率  $n_1$  より高い屈折率  $n_2$  を特徴とする。介在

10

20

30

40

50



物 3 は、クラッド 1 の背景材の屈折率  $n_1$  より低い屈折率  $n_3$  を特徴とする。

【 0 0 2 3 】

図面に示した実施形態では、ファイバのコア 4 はクラッド 1 の背景材と同じ材料から作られ、したがってクラッドの屈折率  $n_1$  と同一の屈折率  $n_4$  を呈する。しかし、これは本発明を制限するものではない。さらなる実施形態では、コア 4 はクラッドの背景材の屈折率  $n_1$  とは異なる屈折率  $n_4$  を持つことができる。全ての場合に、介在物 2 の屈折率  $n_2$  が好ましくはコア 4 の屈折率  $n_4$  より高いことを確実にするように注意されたい。コア 4 が均質な材料から作られる場合、その屈折率  $n_4$  は前記材料の屈折率と一致する。コア 4 が不均質である場合、コアの屈折率は平均屈折率になる。したがって、本明細書では、用語「屈折率  $n_4$ 」は、均質なコアの場合にはコア 4 の構成材料の屈折率を表わし、不均質なコア 4 の場合にはコア 4 の平均屈折率を表わす。

10

【 0 0 2 4 】

さらに詳しくは、クラッド 1 は例えばシリカから作られる。介在物 2 は、酸化ゲルマニウム ( $\text{GeO}_2$ ) をドーブした長手方向シリカパッドによって構成される。介在物 3 は長手方向空気孔である。

【 0 0 2 5 】

本発明はこの特定のタイプの介在物に限定されない。例えば、非網羅的に、リンをドーブしたシリカによって、またはテルライトガラスもしくはカルコゲナイドガラス等によって、より高い屈折率を持つ介在物 2 を構成することができる。空気孔 3 は、クラッド 1 の背景材の屈折率 ( $n_1$ ) より低い屈折率を呈する流体 (液体または空気以外の気体) が充填された長手方向キャビティに置き換えることができる (例えば水、エタノール)。空気孔 3 は、クラッド 1 の背景材の屈折率  $n_1$  より低い屈折率を呈する材料から作られた、例えばフッ素をドーブしたシリカもしくは酸化チタン ( $\text{TiO}_2$ ) をドーブしたシリカのような、固体の長手方向パッドに置き換えることができる。

20

【 0 0 2 6 】

本発明の実現のために、シリカはクラッド 1 を実現するのに特に適した材料であるという事実にもかかわらず、本発明はなおそれでもこの単独の材料に限定されない。例えば光ファイバのクラッドの背景材は、カルコゲナイドガラス、テルライトガラス、または本発明で考慮されるスペクトルゾーンで無視できるほど小さい吸収を示す任意の他のガラスによって構成することができる。

30

【 0 0 2 7 】

本発明は 2 種類の介在物 2 および 3 のみの実現に限定されず、他の実施形態では、本発明による光ファイバは 3 種類以上の介在物を含むことができる。

【 0 0 2 8 】

図 1 および 2 では、長手方向介在物 2 は直径  $d_2$  の円形断面を呈し、長手方向介在物 3 は直径  $d_3$  の円形断面を呈する。本発明はこれらの特定の形状のみに限定されず、介在物 2 および 3 は、図 1 に示すものとは全く異なる形状の断面を示すことができる。加えて、同一屈折率の介在物 2 (または 3) は必ずしも同一ではなく、異なる直径および/または形状の断面を呈することができる。

【 0 0 2 9 】

図 1 に本発明を限定することなく示す特定の例では、介在物 2、3 のネットワークは周期的であり、さらに詳しくはハチの巣型である。図 2 を参照すると、この周期的ネットワークは、一般的に「ピッチ」とも呼ばれ、この例で 2 つの隣接する介在物 2 の中心間の距離に対応する、ネットワークステップ によって特徴付けられる。

40

【 0 0 3 0 】

さらに詳しくは、ハチの巣型のこのネットワークの介在物では、介在物 2 は同心の六角形クラウン (図示する例では 3 つのクラウン) の形状に配列され、中央クラウンの介在物 2 を除いて、各介在物 2 はその周囲に規則的に分散された 6 つの介在物 3 によって包囲される。光ファイバのコア 4 (周期的ネットワークの欠陥) は、この周期的ネットワークの中心で 1 つの中央介在物 2 およびその 6 つの周辺介在物 3 を取り除くことによって得られ

50

る。

#### 【0031】

コア4を包囲する中央クラウンの介在物は、高屈折率 $n_2$ を持つ介在物2によって構成され、低屈折率 $n_3$ の全ての介在物は、コアに対して中央にあるこのクラウンの外側に位置することに留意されたい。したがって、コア4内に伝搬する光は、コア4の屈折率 $n_4$ より高い屈折率を持つ介在物に出会い、それは全反射による導光を得ることに寄与する。逆に、そのような周期的ネットワークで、コアを包囲する中央クラウンが、低屈折率 $n_3$  ( $n_3 < n_4$ ) の介在物3によって構成された場合、全反射によるそのような伝搬モードは達成することが難しくなる。

#### 【0032】

図1の例では、コア4は均質であり、クラッドの背景材と同一材料から構成される。本発明の文脈では、コア4を包囲する中央クラウンの介在物2の屈折率 $n_2$ がコア4の屈折率 $n_4$ より高いという条件で、非周期的であり得かつ特にネットワークのステップに対して非常に小さい寸法とすることのできる、微細空気孔などの欠陥をコア4に導入することが可能である。

#### 【0033】

特にハチの巣型の介在物の周期的ネットワークの実現は、本発明の微細構造光ファイバを実現するために特に適応されたものであるという事実にもかかわらず、本発明は単独の型の介在物の構成に限定されず、より一般的に、請求項1の技術的特徴を得ることを可能にする断面の介在物のいずれの分布（周期的、非周期的分布、または周期的領域および非周期的領域の両方を含む）にも拡張される。

#### 【0034】

説明の残部では、本発明の提示を明瞭かつ簡潔にするために、シリカクラッド1、酸化ゲルマニウム ( $\text{GeO}_2$ ) をドーブしたシリカの介在物2、および空気孔によって構成される介在物3を持ち、図1および2の断面を呈する微細構造光ファイバについて技術的に考察する。それでもなお、本発明に応じかつ異なる断面構造を示す光ファイバを実現するように、これらの技術的考察を適応させ、また、変形することは、直接本発明の範囲内であり、当業者の通常的能力の範囲内である。

#### 【0035】

図3および4は、シリカの屈折率がセルマイヤの法則に従うこと (I. H. Malitson, "Interspecimen Comparison of the Refractive Index of Fused Silica", JOSA 55, 1205 (1965)) を考慮しながら計算された。これらの図3および4は、屈折率 $n_1$ を持つ均質な材料では、屈折率の差 ( ) が決して零にならず、最低値と交差することを示す。その結果、2つの波長 および  $\lambda_2$  の屈折率 $n$  および  $n_{\lambda_2}$  は決して等しくならず、かつ2つの波長 および  $\lambda_3$  の屈折率 $n$  および  $n_{\lambda_3}$  は決して等しくならない。したがって、屈折率 $n_1$ の均質な材料では、2つの波長の間で位相屈折率整合を達成することは不可能である [ (図3 および  $\lambda_2$ ) ; (図4 および  $\lambda_3$ ) ] 。

#### 【0036】

本発明の光ファイバでは、介在物2および3は、第1フォトリック禁止帯 ( $BG_1$ ) で導光される基本モードおよび全反射で導光される基本モードがそれぞれ異なる波長  $BG_1$  および  $RTI$  を中心にして、同一伝搬方向搬 (ファイバの長手方向) に従って、前記ファイバがフォトリック禁制帯による基本モード (準ガウス型) の光の導光、および全反射による基本モード (準ガウス型) の光の導光を可能にするように寸法を決定され、配列される。

#### 【0037】

さらに詳しくは、任意の追加的特徴によると、本発明の光ファイバは、第1禁制帯 ( $BG_1$ ) で導光される基本モードと全反射によって導光される基本モードとの間でこれら2つの波長 ( $RTI$ ;  $BG_1$ ) に対し、特に2つの二波長または三波長 ( $RTI$ ;  $BG_1$ ) に対し、位相屈折率整合を可能にする。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 3 8 】

図 1 の特定の構造を呈する光ファイバでは、光のこれらの 2 つの導光モードの発生は特に、屈折率  $n_3$  の介在物の直径 ( $d_3$ ) に依存する。これは、後でさらに詳しく説明する図 5 ~ 1 2 を考慮することにより、いっそうよく理解されるであろう。

## 【 0 0 3 9 】

図 5 ~ 7 の曲線は、MIT フォトニックバンド (MPB) ソフトウェアを用いて得られた。このソフトウェアは平面波展開法を用いて、周期的構造におけるフォトニック禁制帯の構造を算出する。図 5 ~ 7 の図表の場合、シリカの屈折率は一定であり、1.45 であると想定されている。

## 【 0 0 4 0 】

Steven G. Johnson および J. D. Joannopoulos, 「Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis (<http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=OPEX-8-3-173>)」、Optics Express 8 (3) 173 - 190 (2001) を参照されたい。

## 【 0 0 4 1 】

図 8 ~ 1 2 の曲線の結果は、COMSOL multiphysics (商標) ソフトウェア (バージョン 3.3a) を用いて実現した有限要素のベクトル計算によって得られた。この計算法は、所与の波長に対しファイバの断面のヘルムホルツ方程式を解き、波長の関数として基本モードの実効屈折率を演繹することに存する。

## 【 0 0 4 2 】

これらの計算で、低屈折率の介在物 3 (空気孔) の場合、これらの介在物の屈折率は、1 に等しかった。高屈折率の介在物 2 の場合、高屈折率の各介在物 2 の屈折率を次の放物線則によってモデル化することによって、計算を実行した。

$$n(r) = -\frac{\Delta n}{R^2} r^2 + \Delta n + n_1$$

## 【 0 0 4 3 】

ここで  $r$  は介在物の中心からの距離であり、 $R$  は介在物の半径であり、 $n$  は高屈折率の介在物 2 とシリカの屈折率  $n_1$  との間の屈折率の差である。さらに、 $n_1$  はセルマイヤの法則に従うことを考慮する必要がある (I. H. Malitson, 「Interspecimen Comparison of the Refractive Index of Fused Silica」、JOSA 55、1205 (1965))。計算のために、 $n$  は一定であり  $3.2 \times 10^{-3}$  であった。

## 【 0 0 4 4 】

図 5 ~ 1 2 の曲線はさらに、介在物のネットワークが次の幾何学的特徴 (図 5 ~ 1 2 に共通) を呈する光ファイバに対して計算された。

$$d_2 / d_3 = 0.725$$

ここで：

$d_2$  は介在物 2 の直径であり、

$d_3$  は介在物 2 の 2 つの中心間の距離 (ネットワークステップ) である。

## 【 0 0 4 5 】

図 5 ~ 7 全反射による導光モードの発生に対する  $d_3 / d_2$  比の影響

図 5 ~ 7 のフォトニック禁制帯の図表は、図 1 の断面構造を含むが、介在物の周期的ネットワークに中央の欠陥 4 の無い光ファイバに対して計算されたものである。さらに、これらの図 5 ~ 7 には、フォトニック禁制帯 (BG1、BG2、BG3 等) に加えて、光ファイバのクラッドの平均実効屈折率 (すなわち、屈折率  $n_3$  および  $n_2$  の介在物の周期的ネットワークを特徴とするクラッドの微細構造材料に対応する均質な材料が有する平均屈

10

20

30

40

50

折率)の変動が、正規化された波長( )の関数として描かれている。計算は、シリカの屈折率が一定であり1.45と想定されることを追加的前提として実現されている。

#### 【0046】

さらに詳しくは、図5の場合、計算は、高屈折率の介在物2(ゲルマニウムをドープしたシリカ)のみを含み、空気孔3を含まないネットワークに対してだけ実行された。 $n_{fsm}$ 曲線は1.45(純シリカの屈折率)より高く維持され、それは、そのようなファイバでは全反射によって基本モードの光を導光することが不可能であることを立証している。

#### 【0047】

図6の場合、計算は、高屈折率の介在物2(ゲルマニウムをドープしたシリカ)および低屈折率の介在物3(空気孔)の両方を含むネットワークに対し、屈折率 $n_3$ の介在物の直径 $d_3$ のステップに対する比が0.04である場合に対して実行された。 $n_{fsm}$ 曲線は1.45(純シリカの屈折率)より高く維持され、それは、そのようなファイバでは全反射によって基本モードの光を導光することが不可能であり、平均屈折率 $n_{fsm}$ を著しく低下させるには屈折率 $n_3$ の介在物の半径が小さすぎることを立証している。

#### 【0048】

図7の場合、計算は、高屈折率の介在物2(ゲルマニウムをドープしたシリカ)および低屈折率の介在物3(空気孔)の両方を含むネットワークに対し、屈折率 $n_3$ の介在物の直径のステップに対する比が0.1518である場合に対して実行された。 $n_{fsm}$ 曲線は1.45(純シリカの屈折率)の下に通過し、それは、そのようなファイバでは、基本モードの光をフォトリック禁制帯によってだけでなく、全反射によっても導光することが可能であり、屈折率 $n_3$ の介在物の比 $d_3/\lambda$ が十分に大きく、特に、少なくとも第1フォトリック禁制帯(BG1)で導光される基本モードの波長 $\lambda_{BG1}$ より高い波長範囲に対して、クラッド1の平均実効屈折率( $n_{fsm}$ )をクラッドの背景材の屈折率 $n_1$ より低くするのに十分に大きいことを実証する。

#### 【0049】

図8~12 位相屈折率整合

図1および図2に係る光ファイバ(ゲルマニウムをドープした介在物2および空気孔によって形成される介在物3を持つ)について、第1フォトリック禁制帯(BG1)および全反射帯(RTI)における基本モードの実効屈折率( $n$ )の展開を、介在物のネットワークの様々なステップ( )値に対して計算した。これらの計算の結果は、図8~12の曲線に対応する。屈折率 $n_1$ は、セルマイヤの法則に従って展開する。介在物のネットワークのステップ( )の値は次の通りであった。

図8:  $\lambda = 0.798 \mu m$

図9:  $\lambda = 1.386 \mu m$

図10:  $\lambda = 1.785 \mu m$

図11:  $\lambda = 0.588 \mu m$

図12:  $\lambda = 0.92 \mu m$

#### 【0050】

これらの図8~12において、左側の参照曲線(BG1モード)は、第1フォトリック禁制帯(BG1)で導光される基本モード(準ガウス型)の実効屈折率( $n$ )の変動を波長( $\mu m$ 単位)の関数として示す。右側の参照曲線(RTIモード)は、全反射(RTI)によってコア内を導光される基本モード(準ガウス型)の実効屈折率( $n$ )の変動を波長( $\mu m$ 単位)の関数として示す。

#### 【0051】

本発明のこの微細構造光ファイバでは、高屈折率の介在物2は、フォトリック禁制帯による光の基本モードのファイバの長手軸に沿った導光メカニズムの発生に関係しており、低屈折率の介在物3は、全反射による光の基本モードのファイバの長手軸に沿った導光メカニズムの発生に関係している。

#### 【0052】

10

20

30

40

50

図 8 ~ 12 の曲線は、それぞれの場合に、この微細構造光ファイバでは、  
 ( i ) 2 つの異なる波長  $B_{G1}$  および  $R_{TI}$  で、  
 ( i i ) クラッド 1 の背景材の屈折率より低い実効屈折率 (  $n$  ) 値に対し、  
 基本モードの屈折率 (  $n$  ) の均一性を有することが可能であることを示している。

#### 【 0 0 5 3 】

結果は、それぞれ第 1 フォトニック禁制帯 (  $B_{G1}$  ) で導光される基本モードと、全反射によって導光される基本モードとの間の波長  $B_{G1}$  および  $R_{TI}$  における位相屈折率の整合である。また、図 8 ~ 12 では、前記波長  $B_{G1}$  と  $R_{TI}$  との間の差は、波長  $R_{TI}$  が第 1 フォトニック禁制帯 (  $B_{G1}$  ) で導光される基本モードの波長の範囲外に位置するようになっていることにも留意されたい。

10

#### 【 0 0 5 4 】

この位相屈折率整合は、位相整合された少なくとも 3 つの波の組合せに対し、これらの波の少なくとも 2 つがそれぞれ波長  $B_{G1}$  および  $R_{TI}$  を有する状態で、該光ファイバを使用することを可能にする。したがって該光ファイバは、高い光学収率で、高いポンプ波長  $R_{TI}$  を中心とする基本モードから波長  $B_{G1}$  を中心とする基本モードを発生させるために有利に使用することができる。明らかに、例えば周波数の 2 倍化 ( または周波数の 3 倍化 ) の場合、当業者にとって公知の方法で、光ファイバが感受率 ( <sup>2</sup> ) ( または ( <sup>3</sup> ) ) をも示すことを確実にしなければならず、それは、例えば P . G . K a z a n s k y 、 L . D o n g 、および P . R u s s e l l 、「 H i g h s e c o n d o r d e r n o n l i n e a r i t i e s i n p o l e d s i l i c a t e f i b e r 」、V o l . 1 9 、N o . 1 0 、p . 7 0 1 ( 1 9 9 4 ) 、O p t i c s L e t t e r s に教示されている、いわゆるポーリング法によって達成することができる。

20

#### 【 0 0 5 5 】

さらに詳しくは、図 8 ~ 12 の例では、次の波長で周波数の 2 倍化または 3 倍化による波の組合せのために、位相屈折率整合を有利に得ることができる。

図 8 :  $B_{G1} = 0.4 \mu m$  および  $R_{TI} = 0.8 \mu m$  ( 周波数の 2 倍化 )

図 9 :  $B_{G1} = 0.59 \mu m$  および  $R_{TI} = 1.18 \mu m$  ( 周波数の 2 倍化 )

図 10 :  $B_{G1} = 0.75 \mu m$  および  $R_{TI} = 1.5 \mu m$  ( 周波数の 2 倍化 )

図 11 :  $B_{G1} = 0.354 \mu m$  および  $R_{TI} = 1.064 \mu m$  ( 周波数の 3 倍化 )

図 12 :  $B_{G1} = 0.5 \mu m$  および  $R_{TI} = 1.5 \mu m$  ( 周波数の 3 倍化 )

30

#### 【 0 0 5 6 】

図 8 ~ 12 の例は本発明を限定するものではなく、本発明を完全に網羅するものでもない。より一般的に、位相屈折率整合に対応する波長 (  $R_{TI}$  ;  $B_{G1}$  ) は、相互の整数倍 (  $R_{TI} = k \times B_{G1}$  、  $k$  は 2 以上の整数 ) とすることができる。

#### 【 0 0 5 7 】

図 13 および 14 の曲線は、ポンプ波長  $R_{TI}$  からの周波数の 2 倍化または周波数の 3 倍化を得るために、このポンプ波長  $R_{TI}$  の関数として介在物 2、3 のネットワークのステップの展開を示す。図 13 および 14 のこれらの曲線は、介在物 2、3 のネットワークのステップの他の値に対し、周波数の 2 倍化または周波数の 3 倍化による位相屈折率整合を得ることも可能であることを示す。周波数の 3 倍化に関する限り、またはより一般的に、ポンプ周波数の整数倍である周波数の発生に関する限り、同じことが当てはまる。

40

#### 【 0 0 5 8 】

例として、本発明の光ファイバのさらなる実施形態を図 15 および 16 に示す。ここでは、屈折率 (  $n_3$  ) の介在物は、直径  $d_3$  の ( 仮想的 ) 円に内接する幅 (  $s$  ) の正三角形の形状の断面を呈する。

#### 【 0 0 5 9 】

本発明は、添付の図面に関連して記載し、非線形効果を通して周波数の 2 倍化または周波数の 3 倍化のみに使用可能である微細構造光ファイバに限定されない。より一般的に、本発明の微細構造光ファイバのクラッドの介在物 ( 2、3 ) は、非線形効果を通して (  $m$

50

個の) 波長の組合せが可能となるように、配列することができる。mは3以上の整数であり、本発明の光ファイバのクラッドの介在物は、第1フォトリック禁制帯(BG1)で導光される基本モードおよび全反射(RTI)によって導光される基本モードが次の条件(a)および(b)を累積的に順守する介在物である。

$$(a) \sum_{i=1}^m \frac{1}{\lambda_i} = 0$$

$$(b) \sum_{i=1}^m \frac{n_{\lambda_i}}{\lambda_i} = 0$$

10

ここでmは3以上の整数であり、 $n_i$ は波長 $\lambda_i$ で光ファイバを伝搬する基本モードの実効屈折率の値である。

【0060】

さらに、本発明では、条件(a)および(b)を満たす波長 $\lambda_i$ のうち、少なくとも1つの波長( $\lambda_{RTI}$ )は全反射(RTI)によって導光される基本モードに属し、少なくとも1つの波長( $\lambda_{BG1}$ )は第1禁制帯(BG1)で導光される基本モードに属する。

【0061】

上記の条件(a)および(b)はそれぞれ、次の符号規約で、光子のエネルギー保存の条件および波長ベクトルの保存の条件に対応する。すなわち、光子が消滅したときに波長は負とみなされ、光子がm個の波長の組合せメカニズムによって生成されたときに正とみなされる。

20

【0062】

例えば、特に3つの波長を組み合わせるとw<sub>3</sub>(m=3かつw<sub>1</sub>+w<sub>2</sub>-w<sub>3</sub>)で光子が生成する場合、上記の条件(a)および(b)は次のようになる。

$$(a) \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_3} = 0$$

$$(b) \frac{n_{\lambda_1}}{\lambda_1} + \frac{n_{\lambda_2}}{\lambda_2} - \frac{n_{\lambda_3}}{\lambda_3} = 0$$

30

【0063】

例えば、特に4つの波長を組み合わせるとw<sub>4</sub>(m=4かつw<sub>1</sub>+w<sub>2</sub>+w<sub>3</sub>-w<sub>4</sub>)で光子が生成する場合、上記の条件(a)および(b)は次のようになる。

$$(a) \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_3} - \frac{1}{\lambda_4} = 0$$

$$(b) \frac{n_{\lambda_1}}{\lambda_1} + \frac{n_{\lambda_2}}{\lambda_2} + \frac{n_{\lambda_3}}{\lambda_3} - \frac{n_{\lambda_4}}{\lambda_4} = 0$$

40

【0064】

図17および22は、周期的ステップ(ピッチ)のネットワークを形成する介在物2、3を含む、本発明のファイバの2つの他の実施形態を示す。

【0065】

図17の実施形態では、介在物2および3は大きさおよび形状が同じであり、それらのそれぞれの屈折率n<sub>2</sub>およびn<sub>3</sub>だけが異なる。図1および15の実施形態と同様の仕方で、コア4は、高屈折率n<sub>2</sub>の介在物2によって構成される中央の六角形クラウンによって包囲され、低屈折率n<sub>3</sub>の介在物3は全てこの中央クラウンの外側に位置する。高屈折

50

率  $n_2$  の介在物 2 は例えば、ゲルマニウムをドーブしたシリカの介在物であり、低屈折率  $n_3$  の介在物 3 は例えば空気孔である。

【0066】

図 18 ~ 20 の曲線は、図 17 に係る光ファイバ（ゲルマニウムをドーブしたシリカの介在物 2 および空気孔によって形成される介在物 3 を持つ）の場合の第 1 フォトニック禁制帯（BG1）における基本モードおよび全反射（RTI）によって導光される基本モードの実効屈折率（ $n$ ）の展開を示す。これらの曲線は、図 8 ~ 12 の曲線と同様の仕方、次のパラメータを用いて得られた。

$$d_2 / d_3 = 0.4$$

$$n = 3.2 \times 10^{-3}$$

図 18 :  $\lambda = 1.79 \mu\text{m}$

図 19 :  $\lambda = 2.06 \mu\text{m}$

図 20 :  $\lambda = 2.67 \mu\text{m}$

【0067】

図 18 ~ 21 の曲線は、異なるステップのネットワークに対し、3つの位相整合した縮退波長の組合せを実現することが可能であることを示す。これらの波長のうち2つは二波長  $\lambda_{RTI}$  および  $\lambda_{BG1}$  を有し [  $\lambda_{RTI} = 2 \times \lambda_{BG1}$  ]、それぞれ全反射（RTI）によって導光される基本モードおよび第 1 フォトニック禁制帯（BG1）で導光される基本モードに属する。

【0068】

図 22 の実施形態では、介在物 2 および 3 は大きさが異なり、正方形の周期的ネットワークを形成する。さらに詳しくは、コア 4 は正方形の中央クラウンによって包囲され、高屈折率  $n_2$  の介在物 2 によって構成され、低屈折率  $n_3$  の介在物 3 は全てこの中央クラウンの外側に位置する。高屈折率  $n_2$  の介在物 2 は例えばゲルマニウムをドーブしたシリカの介在物であり、低屈折率  $n_3$  の介在物 3 は例えば空気孔である。

【0069】

図 23 ~ 25 の曲線は、図 22 に係る光ファイバ（ゲルマニウムをドーブしたシリカの介在物 2 および空気孔によって形成される介在物 3 を持つ）の場合の第 1 フォトニック禁制帯（BG1）における基本モードおよび全反射（RTI）によって導光される基本モードの実効屈折率（ $n$ ）の展開を示す。これらの曲線は、図 8 ~ 12 の曲線と同様の仕方、次のパラメータを用いて得られた。

$$d_2 / d_3 = 0.72 ; d_3 / d_4 = 0.32$$

$$n = 3.0 \times 10^{-3}$$

図 23 :  $\lambda = 1.22 \mu\text{m}$

図 24 :  $\lambda = 1.42 \mu\text{m}$

図 25 :  $\lambda = 1.86 \mu\text{m}$

【0070】

図 22 ~ 26 の曲線は、異なるステップのネットワークに対し、3つの位相整合した波長の組合せを実現することが可能であることを示す。これらの波長のうち2つは二波長  $\lambda_{RTI}$  および  $\lambda_{BG1}$  を有し [  $\lambda_{RTI} = 2 \times \lambda_{BG1}$  ]、それぞれ全反射（RTI）によって導光される基本モードおよび第 1 フォトニック禁制帯（BG1）で導光される基本モードに属する。

【0071】

本発明は、添付する図面に関連して説明した特定の実施形態に限定されない。当業者の視野内および添付する特許請求の範囲に記載する他の実施形態は、本発明の文脈から逸脱しなければ、本発明の範囲内とみなすことができる。

10

20

30

40

【図 1】

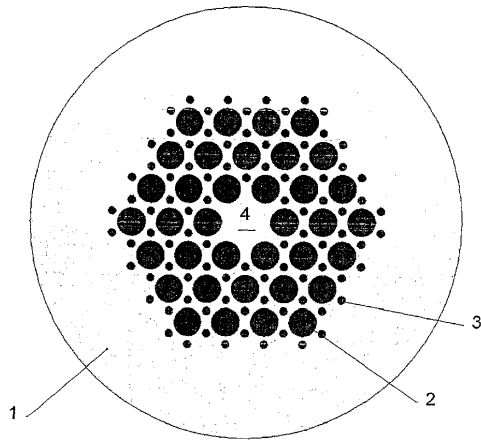


Fig.1

【図 2】

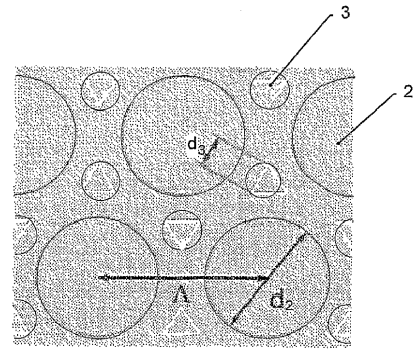


Fig.2

【図 3】

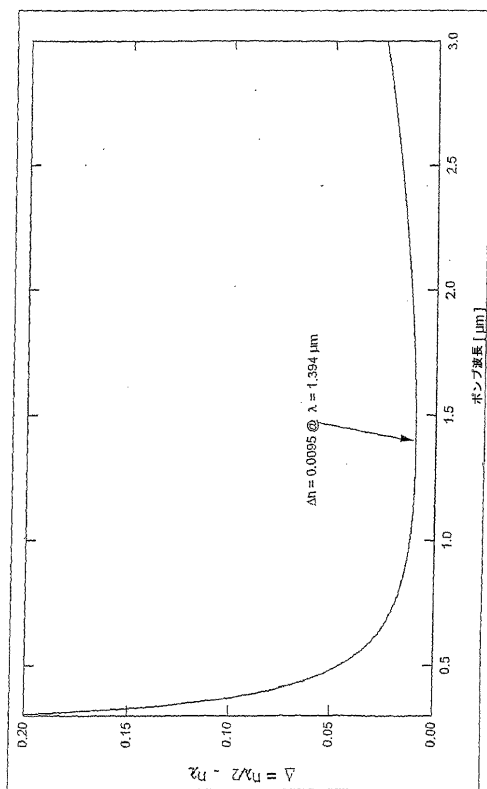


Fig.3

【図 4】

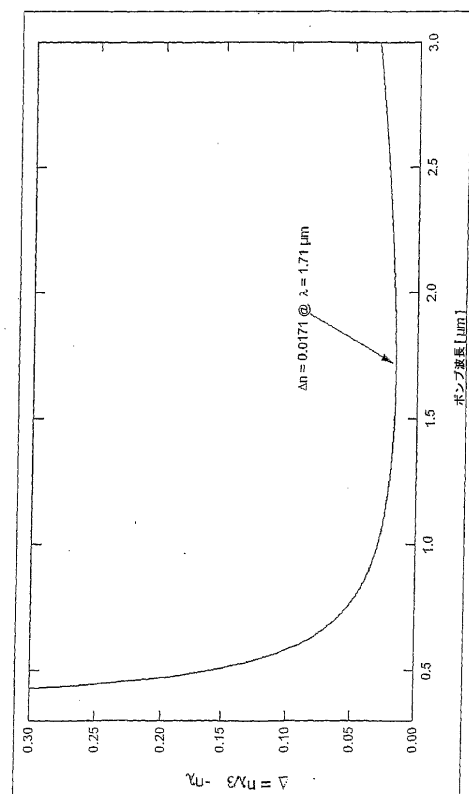
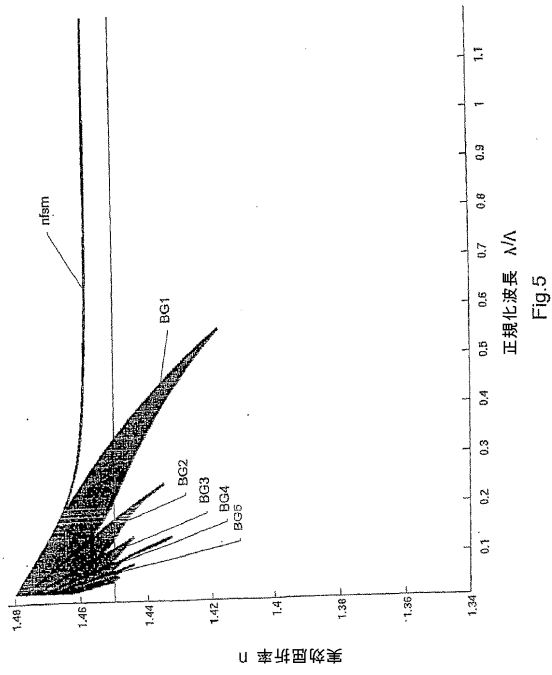


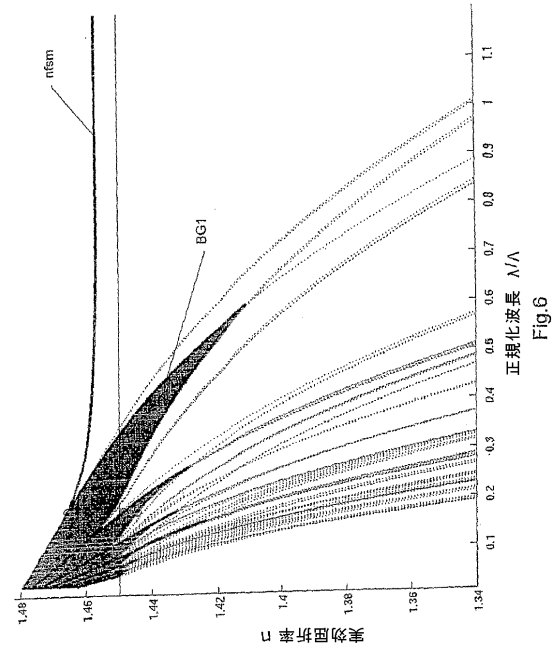
Fig.4



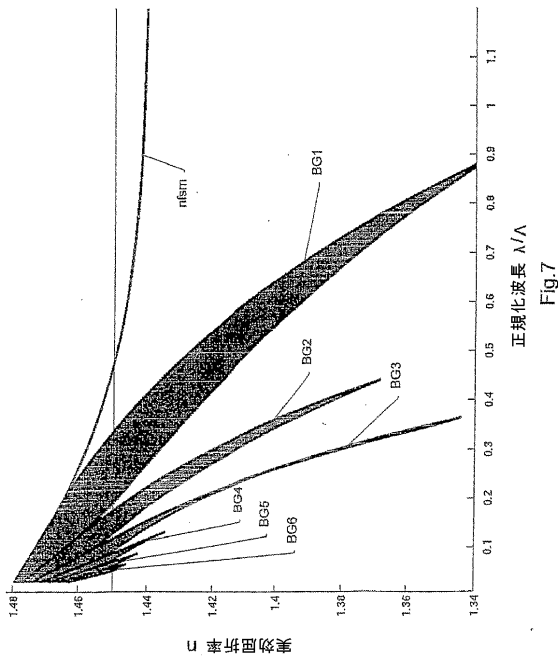
【図5】



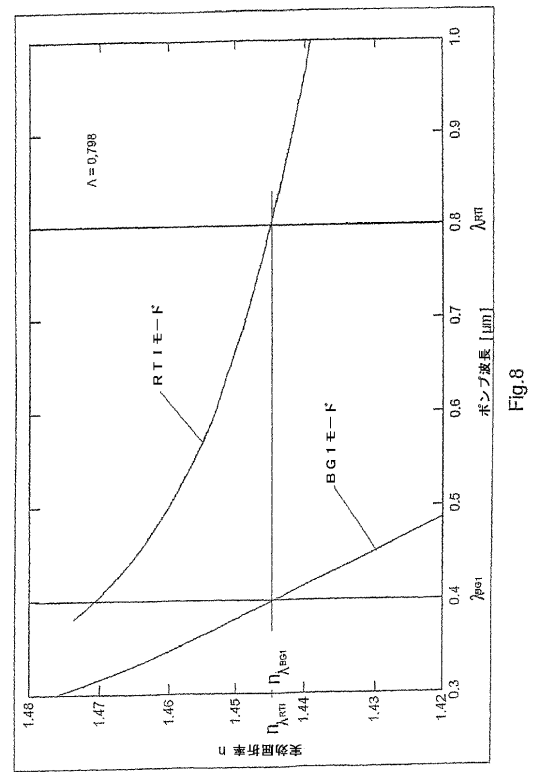
【図6】



【図7】



【図8】



【図 9】

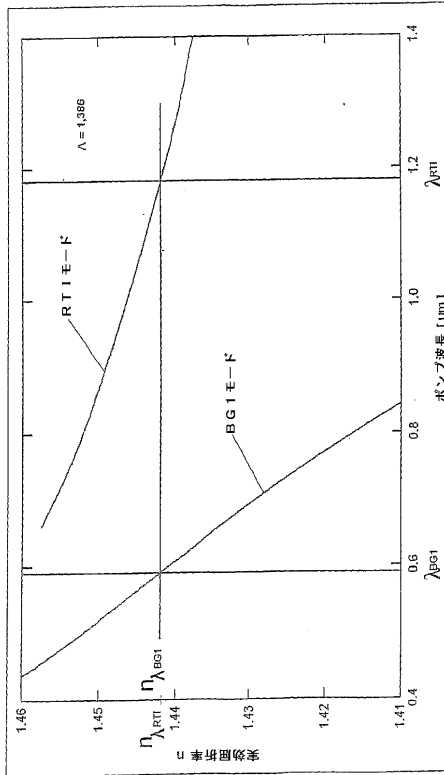


Fig.9

【図 10】

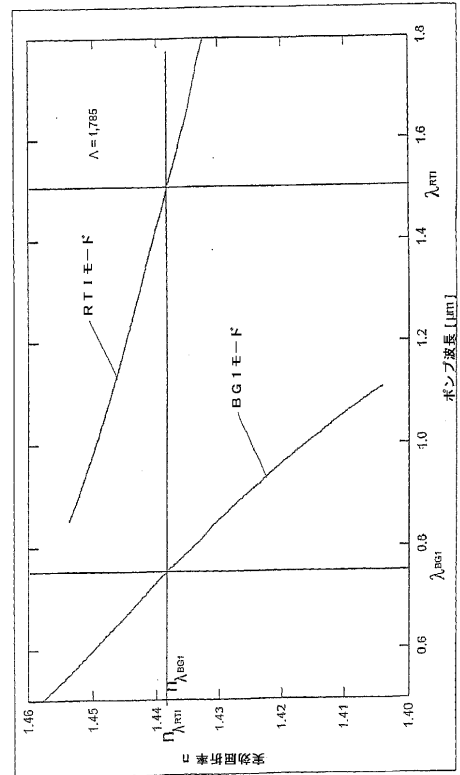


Fig.10

【図 11】

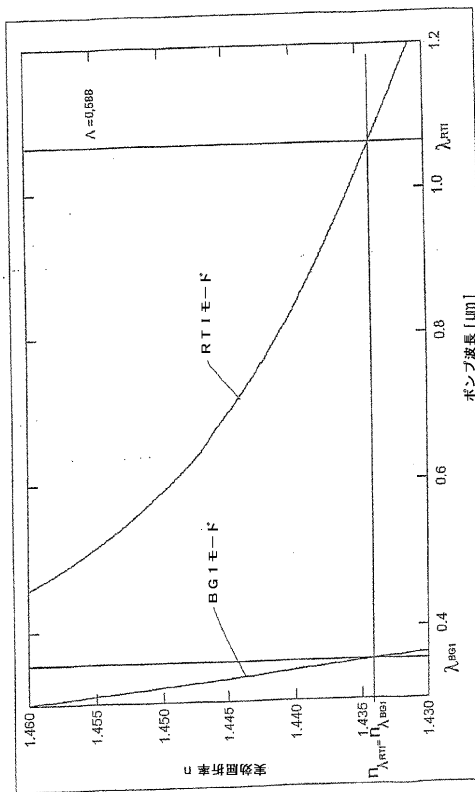


Fig.11

【図 12】

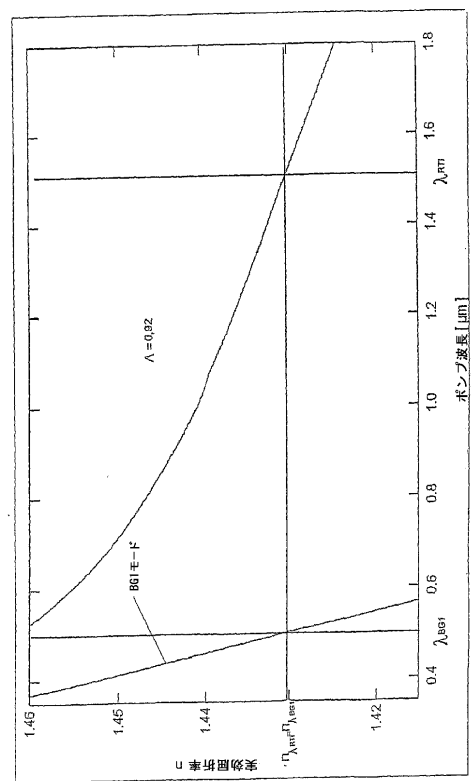
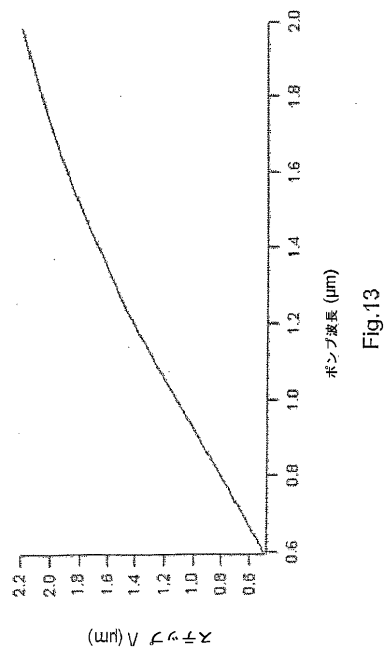
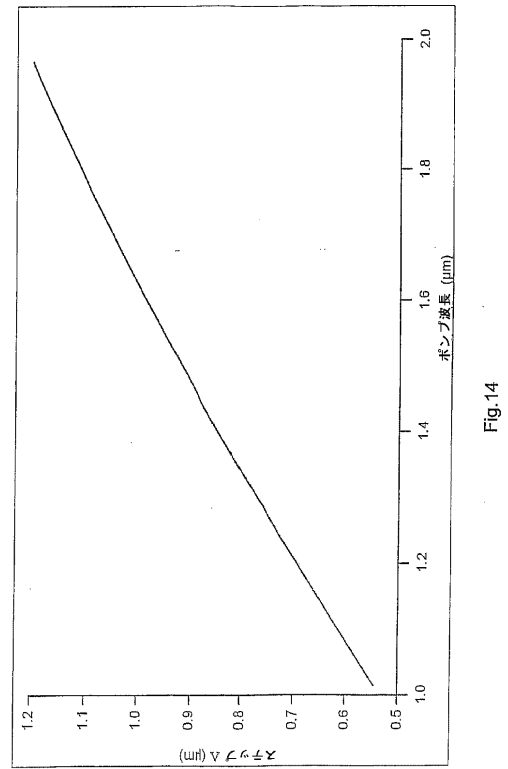


Fig.12

【図 13】



【図 14】



【図 15】

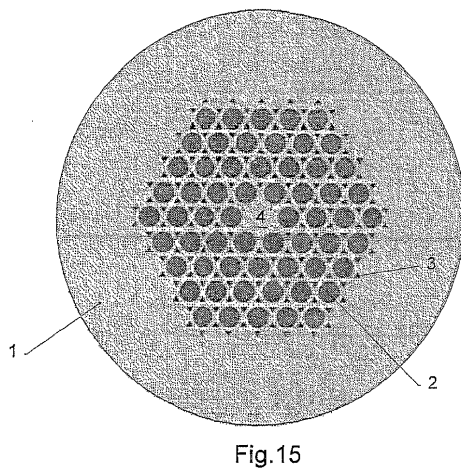


Fig. 15

【図 16】

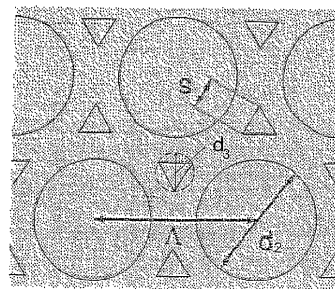


Fig. 16

【図 17】

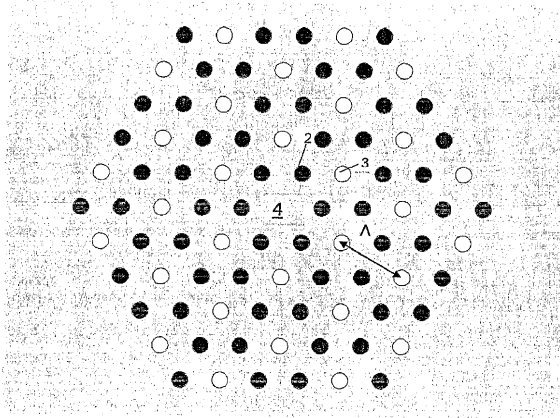


FIG.17

【図 18】

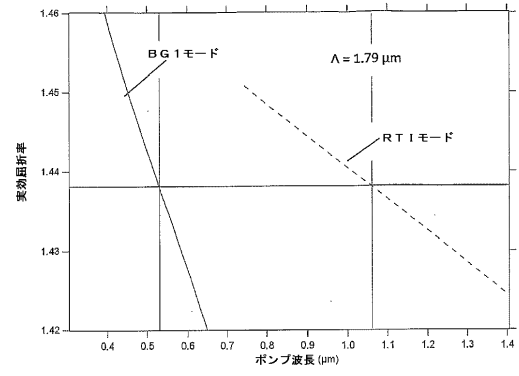


FIG.18

【図 19】

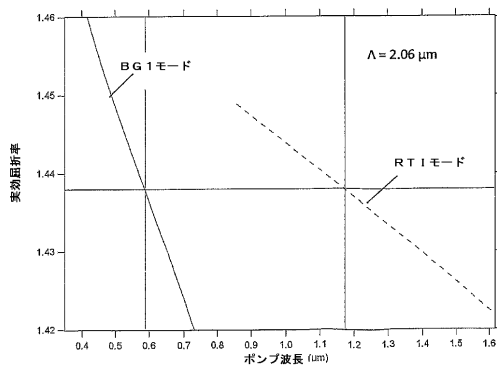


FIG.19

【図 20】

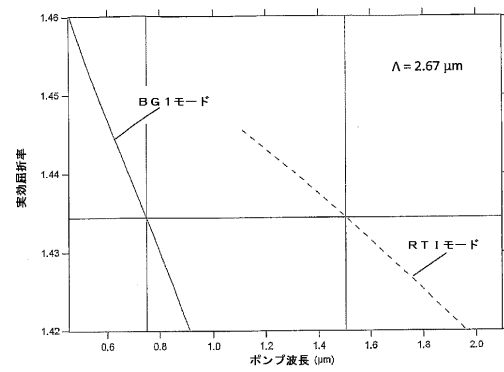


FIG.20

【図 2 1】

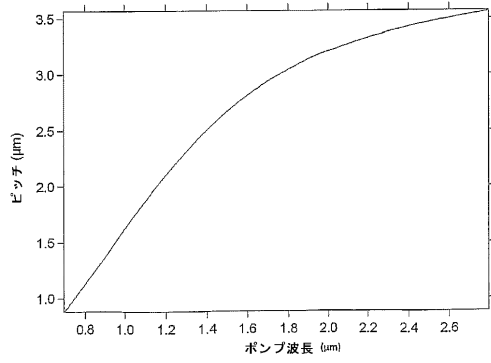


FIG.21

【図 2 2】

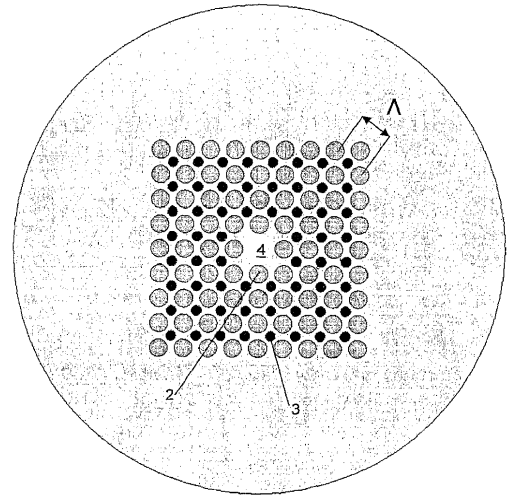


FIG.22

【図 2 3】

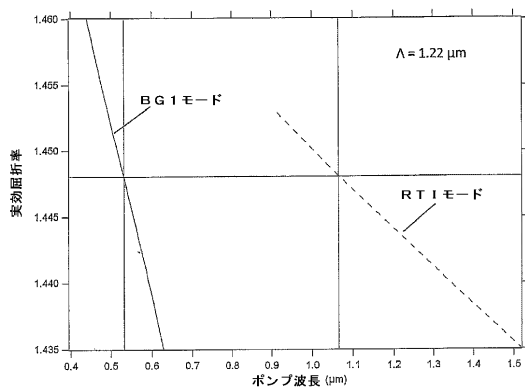


FIG.23

【図 2 4】

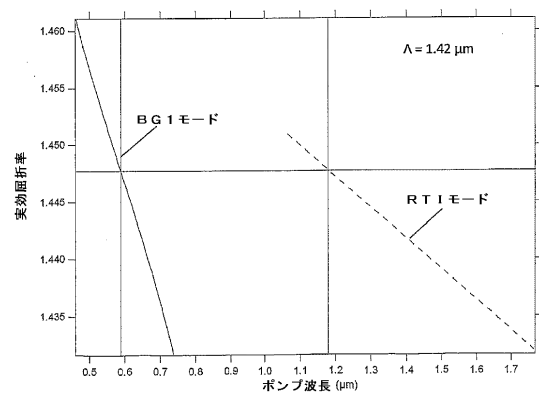


FIG.24

【図 25】

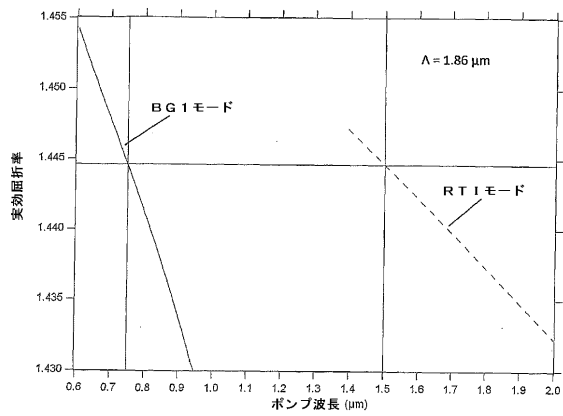


FIG.25

【図 26】

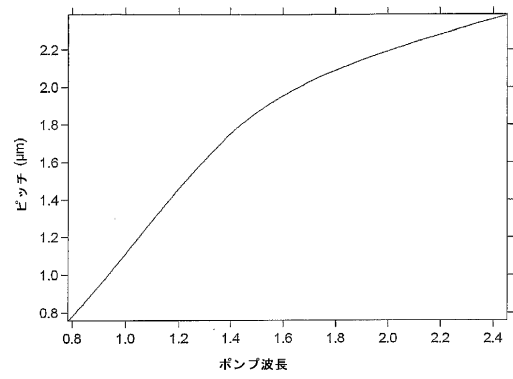


FIG.26

## 【 国際調査報告 】

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No  
PCT/FR2008/001111

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER  
INV. G02B6/02 G02F1/35

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)  
G02B G02F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, INSPEC

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	CERQUEIRA A S JR ET AL: "Hybrid photonic crystal fiber" OPTICS EXPRESS OPT. SOC. AMERICA USA, vol. 14, no. 2, January 2006 (2006-01), XP002464107 ISSN: 1094-4087 cited in the application the whole document	1-12, 17-26
A	BETOURNE A ET AL: "Solid photonic bandgap fiber assisted by an extra air-clad structure for low-loss operation around 1.5 [mu]m" OPTICS EXPRESS OPT. SOC. AMERICA USA, vol. 15, no. 2, January 2007 (2007-01), XP002464106 ISSN: 1094-4087 the whole document	1-26
-/-		

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

## \* Special categories of cited documents:

- \*A\* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- \*E\* earlier document but published on or after the international filing date
- \*L\* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- \*O\* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- \*P\* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

\*T\* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

\*X\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

\*Y\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

\*G\* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

19 mars 2009

Date of mailing of the international search report

30/03/2009

Name and mailing address of the ISA/  
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Jakober, François

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/FR2008/001111

## C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	MORTENSEN N A ET AL: "Photonic crystal fiber with a hybrid honeycomb cladding" OPTICS EXPRESS OPT. SOC. AMERICA USA, vol. 12, no. 3, 9 February 2004 (2004-02-09), XP002464105 ISSN: 1094-4087 the whole document	1-26
A	EFIMOV A ET AL: "Phase-matched third harmonic generation microstructured fibers" OPTICS EXPRESS OPT. SOC. AMERICA USA, vol. 11, no. 20, 6 October 2003 (2003-10-06), XP002464108 ISSN: 1094-4087 the whole document	1-26
A	LAEGSGAARD J ET AL: "Doped photonic bandgap fibers for short-wavelength nonlinear devices" OPTICS LETTERS, OSA, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, DC, US, vol. 28, no. 10, 15 May 2003 (2003-05-15), pages 783-785, XP002328354 ISSN: 0146-9592 cited in the application the whole document	1-26
X,P	MATHIAS PERRIN ET AL: "Coexistence of total internal reflexion and bandgap modes in solid core photonic bandgap fibre with interstitial air holes" OPTICS EXPRESS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, DC, US, vol. 15, no. 21, 15 October 2007 (2007-10-15), pages 13783-13795, XP007907699 ISSN: 1094-4087 the whole document	1-26



## RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2008/001111

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE  
INV. G02B6/02 G02F1/35

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

## B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)  
G02B G02F

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés)

EPO-Internal, INSPEC

## C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	CERQUEIRA A-S JR ET AL: "Hybrid photonic crystal fiber" OPTICS EXPRESS OPT. SOC. AMERICA USA, vol. 14, no. 2, janvier 2006 (2006-01), XP002464107 ISSN: 1094-4087 cité dans la demande le document en entier	1-12, 17-26
A	BETOURNE A ET AL: "Solid photonic bandgap fiber assisted by an extra air-clad structure for low-loss operation around 1.5 [mu]m" OPTICS EXPRESS OPT. SOC. AMERICA USA, vol. 15, no. 2, janvier 2007 (2007-01), XP002464106 ISSN: 1094-4087 le document en entier	1-26

☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☐ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

## \* Catégories spéciales de documents cités:

- \*A\* document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
- \*E\* document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
- \*L\* document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
- \*O\* document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
- \*P\* document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

- \*T\* document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention
- \*X\* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément
- \*Y\* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier
- \*Z\* document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

19 mars 2009

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

30/03/2009

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale  
Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Jakober, François

## RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2008/001111

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	MORTENSEN N A ET AL: "Photonic crystal fiber with a hybrid honeycomb cladding" OPTICS EXPRESS OPT. SOC. AMERICA USA, vol. 12, no. 3, 9 février 2004 (2004-02-09), XP002464105 ISSN: 1094-4087 le document en entier	1-26
A	EFIMOV A ET AL: "Phase-matched third harmonic generation microstructured fibers" OPTICS EXPRESS OPT. SOC. AMERICA USA, vol. 11, no. 20, 6 octobre 2003 (2003-10-06), XP002464108 ISSN: 1094-4087 le document en entier	1-26
A	LAEGSGAARD J ET AL: "Doped photonic bandgap fibers for short-wavelength nonlinear devices" OPTICS LETTERS, OSA, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, DC, US, vol. 28, no. 10, 15 mai 2003 (2003-05-15), pages 783-785, XP002328354 ISSN: 0146-9592 cité dans la demande le document en entier	1-26
X,P	MATHIAS PERRIN ET AL: "Coexistence of total internal reflexion and bandgap modes in solid core photonic bandgap fibre with interstitial air holes" OPTICS EXPRESS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, DC, US, vol. 15, no. 21, 15 octobre 2007 (2007-10-15), pages 13783-13795, XP007907699 ISSN: 1094-4087 le document en entier	1-26

## フロントページの続き

(81)指定国 AP(BW,GH,GM,KE,LS,MW,MZ,NA,SD,SL,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,MD,RU,TJ,TM),EP(AT,BE,BG,CH,CY,CZ,DE,DK,EE,ES,FI,FR,GB,GR,HR,HU,IE,IS,IT,LT,LU,LV,MC,MT,NL,NO,PL,PT,RO,SE,SI,SK,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW,ML,MR,NE,SN,TD,TG),AE,AG,AL,AM,AO,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BH,BR,BW,BY,BZ,CA,CH,CN,CO,CR,CU,CZ,DE,DK,DM,DO,DZ,EC,EE,EG,ES,FI,GB,GD,GE,GH,GM,GT,HN,HR,HU,ID,IL,IN,IS,JP,KE,KG,KM,KN,KP,KR,KZ,LA,LC,LK,LR,LS,LT,LU,LY,MA,MD,ME,MG,MK,MN,MW,MX,MY,MZ,NA,NG,NI,NO,NZ,OM,PG,PH,PL,PT,RO,RS,RU,SC,SD,SE,SG,SK,SL,SM,ST,SV,SY,TJ,TM,TN,TR,TT,TZ,UA,UG,US,UZ,VC,VN,ZA,ZM,ZW

(72)発明者 ボウマン, ジェロード

フランス, エフ - 5 9 0 0 0 リール, リュ ムーラン 8 6, アプ. 1 4 2

(72)発明者 ベラン, マシアス

フランス, エフ - 3 3 6 5 0 ラ ブレド, アヴニユ ドゥ レスプリ デ ロワ, 2, アプト ナンバー 9

(72)発明者 ブトゥルン, オーレリー

フランス, エフ - 5 9 0 0 0 リール, リュ ムルマン, 3 8, アプト. 3 1

(72)発明者 ドゥーイ, マルク

フランス, エフ - 5 9 0 0 0 リール, リュ デュ マレ ド ロム 9 2

(72)発明者 デルプラス, カレン

フランス, エフ - 5 9 9 4 0 エステール, リュ ドゥ メルヴィル 2 2 3

(72)発明者 ル ルージュ, アントワン

フランス, エフ - 5 9 8 0 0 リール, リュ ジャン ムーラン 2 6

(72)発明者 ビゴ, ローラン

フランス, エフ - 5 9 2 6 0 エレム - リール, リュ ドゥ ラ ギンゲット 3 1

Fターム(参考) 2H150 AB02 AB03 AB05 AB06 AB10 AF02 AF04 AF11 AF24 AF25

AF33 AH15