

## (12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局(43) 国際公開日  
2011年8月4日(04.08.2011)

PCT



(10) 国際公開番号

WO 2011/093349 A1

(51) 国際特許分類:

G02B 6/00 (2006.01) G02B 6/036 (2006.01)  
G02B 6/032 (2006.01)

(21) 国際出願番号:

PCT/JP2011/051524

(22) 国際出願日:

2011年1月26日(26.01.2011)

(25) 国際出願の言語:

日本語

(26) 国際公開の言語:

日本語

(30) 優先権データ:

特願 2010-015819 2010年1月27日(27.01.2010) JP

(71) 出願人(米国を除く全ての指定国について): 株式会社フジクラ(Fujikura Ltd.) [JP/JP]; 〒1358512 東京都江東区木場1丁目5番1号 Tokyo (JP). 日本電信電話株式会社(NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION) [JP/JP]; 〒1008116 東京都千代田区大手町二丁目3番1号 Tokyo (JP).

(72) 発明者; および

(75) 発明者/出願人(米国についてのみ): 谷川 庄二(TANIGAWA, Shoji). 竹永 勝宏(TAKENAGA, Katsuhiro). 松尾 昌一郎(MATSUO, Shoichiro). 松

井 隆(MATSUI, Takashi) [JP/JP]; 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 NTT 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 坂本 泰志(SAKAMOTO, Taiji) [JP/JP]; 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 NTT 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 辻川 恭三(TSUJIKAWA, Kyousou) [JP/JP]; 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 NTT 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 富田 茂(TOMITA, Shigeru) [JP/JP]; 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 NTT 知的財産センタ内 Tokyo (JP).

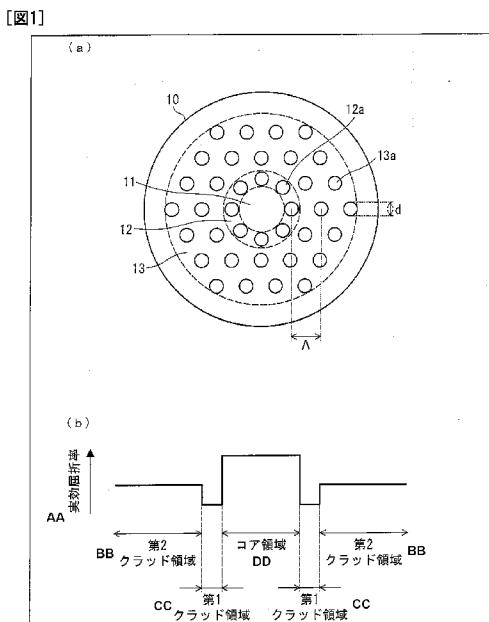
(74) 代理人: 特許業務法人原謙三国際特許事務所(HARAKENZO WORLD PATENT &amp; TRADE-MARK); 〒5300041 大阪府大阪市北区天神橋2丁目北2番6号 大和南森町ビル Osaka (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, 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, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST,

[結果有]

(54) Title: OPTICAL FIBER

(54) 発明の名称: 光ファイバ



AA EFFECTIVE REFRACTIVE INDEX  
BB SECOND CLAD REGION  
CC FIRST CLAD REGION  
DD CORE REGION

(57) Abstract: Holes (12a, 13a) with the same diameter ( $d$ ) are periodically disposed in a first clad region (12) and a second clad region (13) in such a manner that the effective refractive index of the first clad region (12) and the effective refractive index of the second clad region (13) are lower than the refractive index of a core region (11) and the effective refractive index of the first clad region (12) is lower than the effective refractive index of the second clad region (13).

(57) 要約: 第1のクラッド領域(12)の実効屈折率及び第2のクラッド領域(13)の実効屈折率がコア領域(11)の屈折率よりも低くなり、かつ、第1のクラッド領域(12)の実効屈折率が第2のクラッド領域(13)の実効屈折率よりも低くなるように、第1のクラッド領域(12)及び第2のクラッド領域(13)に直径  $d$  が同一の空孔(12a・13a)を周期的に配設する。



SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ,  
VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW,  
MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア  
(AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ  
(AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR,  
GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT,

NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI  
(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR,  
NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

- 國際調査報告 (条約第 21 条(3))
- 補正された請求の範囲 (条約第 19 条(1))

## 明 細 書

### 発明の名称：光ファイバ

### 技術分野

[0001] 本発明は、光ファイバ、特に、フォトニック結晶ファイバに関するものである。

### 背景技術

[0002] 光伝送システムにおいて伝送容量の大容量化及び伝送距離の長距離化を図るためには、伝送媒体である光ファイバの実効断面積を大きくすることが重要である。光ファイバの実効断面積が大きくなれば、非線形効果による伝送品質の劣化を生じさせることなく、伝送する光信号のパワーを大きくすることが可能になるためである。

[0003] 実効断面積が拡大された光ファイバとして、例えば、非特許文献1に記載の単一モードファイバが知られている。非特許文献1に記載の単一モードファイバは、W型の屈折率分布（クラッド領域の内周側の屈折率がクラッド領域の外周側の屈折率よりも低くなる屈折率分布）を採用することによって、実効断面積の拡大が図られた単一モードファイバである。同文献には、W型の屈折率分布を採用することによって、実効断面積を $150 \mu m^2$ まで拡大し得ることが示されている。コアネットワークや海底システムなどの長距離伝送システムで使用されている光ファイバは、主に、このようにして実効断面積が拡大された単一モードファイバである。

[0004] しかしながら、非特許文献1に記載の単一モードファイバのように、クラッド領域にドーパントを添加することによって、クラッド領域の内周側とクラッド領域の外周側との間に屈折率に差を付けた光ファイバでは、実効断面積の拡大に限界がある。このため、より大きな実効断面積を有する光ファイバとして、フォトニック結晶ファイバを利用する事が検討されている。ここで、フォトニック結晶ファイバとは、クラッド領域に空孔を設けることによって、コアとクラッドとの間に屈折率に差を付けた光ファイバのことを指

す。

[0005] 図11に、従来のフォトニック結晶ファイバ20の構成（非特許文献4参照）を示す。図11（a）は、フォトニック結晶ファイバ20の断面構造を示す断面図であり、図11（b）は、フォトニック結晶ファイバ20の実効屈折率分布を示すグラフである。

[0006] フォトニック結晶ファイバ20は、図11（a）に示すようにクラッド領域22に空孔22aを周期的に配置することによって、図11（b）に示すようにクラッド領域22の実効屈折率をコア領域21の屈折率よりも低くした光ファイバである。コア領域21及びクラッド領域22は、同一の材料（例えば純石英）により構成されており、コア領域21とクラッド領域22との間の屈折率差は、空孔の有無に由来する。なお、本明細書においては、コア領域21の屈折率とクラッド領域22の実効屈折率との差のことを、「コア領域21とクラッド領域22との間の屈折率差」と記載する。

[0007] このようなフォトニック結晶ファイバ20における光の閉じ込めは、コア領域21とクラッド領域22との間の屈折率差に起因する全反射によって実現される。このため、このようなフォトニック結晶ファイバ20を「屈折率導波型のフォトニック結晶ファイバ」と呼んで、フォトニックバンドギャップにより光を閉じ込める「フォトニックバンドギャップ型のフォトニック結晶ファイバ」と区別することもある。

[0008] 非特許文献2には、単一モードファイバと同様に単一モード伝送が可能であり、かつ、単一モードファイバと同等の曲げ損失特性をもつフォトニック結晶ファイバにおいて、実効断面積を $157\mu m^2$ まで拡大し得ることが示されている。また、非特許文献3には、単一モードファイバであっても、光学特性を最適化することによって実効断面積を $160\mu m^2$ まで拡大し得ることが報告されている。

## 先行技術文献

### 非特許文献

[0009] 非特許文献1：T. Kato et al, “Ultra-low nonlinearity low-loss pure si

llic core fiberfor long-haul WDM transmission” , Electronic Letters, vol. 35, no. 19, pp. 1615–1617, Sep. 1999.

非特許文献2：松井ら，“フォトニック液晶ファイバの実効断面積拡大に関する検討，” 2008年電子情報通信学会ソサイエティ大会, pp. 275, Sep. 2008.

非特許文献3：K. Mukasa et al, “Comparisons of merits on wide-band transmission systems between using extremely improved solid SMFs with A<sub>eff</sub> of  $\mu\text{m}^2$ and loss of 0.175dB/km and using large-A<sub>eff</sub> holey fibers enabling transmission over 600nm bandwidth” , Proceedings of OFC2008, 0thR1, Feb. 2008.

非特許文献4：T. Sorensen et al, “Macro-bending loss properties of photonic crystal fiber” , Electronic Letters, vol. 37, no. 5, pp. 387–289, Mar. 2001.

## 発明の概要

### 発明が解決しようとする課題

[0010] しかしながら、従来の単一モードファイバ及び従来のフォトニック結晶ファイバにおいては、実効断面積の上限が  $160 \mu\text{m}^2$  であり、これが伝送容量の更なる大容量化及び伝送距離の更なる長距離化の妨げになるという問題があった。

[0011] 単一モードファイバにおいては、クラッド領域にドーパントを添加することによって、クラッド領域の内周側とクラッド領域の外周側との間に屈折率に差を付ける構成を採用しているため、上述したように実効断面積のこれ以上の拡大は困難である。

[0012] また、フォトニック結晶ファイバにおいては、例えば、クラッド領域の内周側に配設する空孔の直径をクラッド領域の外周側に配設する空孔の直径よりも大きくすることによって実効断面積を拡大し得る可能性があるものの、その製造は極めて困難である。実効断面積が拡大されたフォトニック結晶ファイバを得るためににはクラッド領域の内外に配設する空孔の直径の比を最適

化する必要があるが、この比が所定の値になるようにフォトニック結晶ファイバを母材から線引きすることが極めて困難なためである。

[0013] 本発明は、上記の問題に鑑みてなされたものであり、その目的は、従来のフォトニック結晶ファイバと同様、単一モード伝送が可能であり、かつ、曲げ損失が小さい光ファイバでありながら、従来のフォトニック結晶ファイバよりも実効断面積が大きく、かつ、製造が容易な光ファイバを実現することにある。

## 課題を解決するための手段

[0014] 上記課題を解決するために、本発明に係る光ファイバは、コア領域と、該コア領域を取り囲む第1のクラッド領域と、該第1のクラッド領域を取り囲む第2のクラッド領域とを含む断面構造を有する光ファイバであって、上記第1のクラッド領域及び上記第2のクラッド領域には、上記第1のクラッド領域の実効屈折率及び上記第2のクラッド領域の実効屈折率が上記コア領域の屈折率よりも低くなるように、直径が同一の空孔が周期的に形成されており、上記第1のクラッド領域の実効屈折率が上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低いことを特徴としている。

[0015] 上記の構成によれば、周期的に空孔が配設されたクラッド領域（第1のクラッド領域及び第2のクラッド領域）にコア領域が取り囲まれているので、従来のフォトニック結晶ファイバと同様、全反射を原理とする光の閉じ込めが実現される。このため、従来のフォトニック結晶ファイバと同様、広い波長域で単一モード伝送が可能であり、かつ、曲げ損失が小さい光ファイバを実現することができる。しかも、上記第1のクラッド領域の実効屈折率を上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低くしているので、ステップ型の実効屈折率分布（図11（b）参照）をもつ従来のフォトニック結晶ファイバよりも大きい実効断面積を有する光ファイバを実現することができる。

[0016] 更に、上記の構成によれば、上記第1のクラッド領域及び上記第2のクラッド領域に配設する空孔の直径が同一であるため、上記第1のクラッド領域及び上記第2のクラッド領域に配設する空孔の直径を異ならせることによっ

て実効断面積の拡大を図る場合のように、その製造が困難になることはない。

[0017] したがって、上記の構成によれば、従来のフォトニック結晶ファイバと同様、単一モード伝送が可能であり、かつ、曲げ損失が小さい光ファイバでありながら、従来のフォトニック結晶ファイバよりも実効断面積が大きく、かつ、製造が容易な光ファイバを実現することができるという効果を奏する。

[0018] なお、「空孔が周期的に形成されている」とは、空孔が形成された光ファイバがフォトニック結晶ファイバとして機能する程度に空孔の配置が周期的であることを意味する。また、2つの空孔の直径が「同一」であるとは、これら2つの空孔の直径の差が製造誤差よりも小さいことを意味する。

[0019] なお、本発明に係る光ファイバにおいては、例えば、(1) 上記第1のクラッド領域における空孔の数密度を上記第2のクラッド領域における空孔の数密度よりも高くすることによって、上記第1のクラッド領域の実効屈折率を上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低くしてもよいし、(2) 上記第1のクラッド領域に屈折率を下げるためのドーパントを添加することによって、上記第1のクラッド領域の実効屈折率を上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低くしてもよいし、(3) これらの組み合わせによって、上記第1のクラッド領域の実効屈折率を上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低くしてもよい。なお、上記第1のクラッド領域における空孔の数密度を上記第2のクラッド領域における空孔の数密度よりも高くする構成を採用する場合、より低損失な光ファイバを実現することができる。何故なら、第1のクラッド領域と第2のクラッド領域との間に屈折率差を付けるためにドーパントを添加する必要がないので、ドーパントによる散乱に起因する損失が生じないためである。

[0020] 上記課題を解決するために、本発明に係る光ファイバは、コア領域と、該コア領域を取り囲む第1のクラッド領域と、該第1のクラッド領域を取り囲む第2のクラッド領域とを含む断面構造を有する光ファイバであって、上記第1のクラッド領域及び上記第2のクラッド領域に空孔を周期的に配設する

ことによって、上記第1のクラッド領域及び上記第2のクラッド領域の実効屈折率を上記コア領域の屈折率よりも低くし、かつ、上記第1のクラッド領域と上記第2のクラッド領域とにおける空孔の断面積占有率を異ならせることによって、上記第1のクラッド領域の実効屈折率を上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低くした、ことを特徴としている。

- [0021] 上記の構成によれば、周期的に空孔が配設されたクラッド領域（第1のクラッド領域及び第2のクラッド領域）にコア領域が取り囲まれているので、従来のフォトニック結晶ファイバと同様、全反射を原理とする光の閉じ込めが実現される。このため、従来のフォトニック結晶ファイバと同様、広い波長域で单一モード伝送が可能であり、かつ、曲げ損失が小さい光ファイバを実現することができる。しかも、上記第1のクラッド領域の実効屈折率を上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低くしているので、ステップ型の実効屈折率分布をもつ従来のフォトニック結晶ファイバよりも大きい実効断面積を有する光ファイバを実現することができる。
- [0022] 更に、上記の構成によれば、上記第1のクラッド領域と上記第2のクラッド領域とにおける空孔の断面積占有率を異ならせることによって上記第1のクラッド領域の実効屈折率を上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低くしているので、上記第1のクラッド領域の実効屈折率を上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低くするために上記第1のクラッド領域と上記第2のクラッド領域とにおける空孔の直径を異ならせる必要がない。したがって、上記第1のクラッド領域と上記第2のクラッド領域とにおける空孔の直径を異ならせることによって上記第1のクラッド領域の実効屈折率を上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低くした光ファイバよりも製造が容易である。
- [0023] したがって、上記の構成によれば、従来のフォトニック結晶ファイバと同様、单一モード伝送が可能であり、かつ、曲げ損失が小さい光ファイバでありながら、従来のフォトニック結晶ファイバよりも実効断面積が大きく、かつ、製造が容易な光ファイバを実現することができるという効果を奏する。

## 発明の効果

[0024] 本発明によれば、従来のフォトニック結晶ファイバと同様、単一モード伝送が可能であり、かつ、曲げ損失が小さい光ファイバでありながら、従来のフォトニック結晶ファイバよりも実効断面積が大きく、かつ、製造が容易な光ファイバを実現することができる。

## 図面の簡単な説明

[0025] [図1] (a) は、本発明の第1の実施形態に係る光ファイバの構成を示す断面図であり、(b) は、その光ファイバの実効屈折率分布を示すグラフである。

[図2] (a) は、本発明の第1の実施形態に係る光ファイバにおける曲げ損失特性（実線）と、従来のフォトニック結晶ファイバにおける曲げ損失特性（破線）とを示したグラフであり、(b) は、本発明の第1の実施形態に係る光ファイバにおける高次モードの閉じ込め損失特性（実線）と、従来のフォトニック結晶ファイバにおける高次モードの閉じ込め損失特性（破線）とを示したグラフである。

[図3] 本発明の第1の実施形態に係る光ファイバにおける基本モードに対する曲げ損失特性を示すグラフである。

[図4] 本発明の第1の実施形態に係る光ファイバにおける高次モードに対する曲げ損失特性を示すグラフである。

[図5] 本発明の第1の実施形態に係る光ファイバにおいて、曲げ損失条件を充足する空孔径  $d$  及び空孔間隔  $\Lambda$  の範囲と、単一モード条件を充足する空孔径  $d$  及び空孔間隔  $\Lambda$  の範囲とを示す特性図である。

[図6] 本発明の第1の実施形態に係る光ファイバにおける実効断面積の空孔間隔依存性を示すグラフである。

[図7] (a) は、本発明の第1の実施形態に係る光ファイバにおける基本モードに対する実効断面積（実線）及び曲げ損失（破線）の波長依存性を示すグラフであり、(b) は、図1に示した光ファイバにおける高次モードに対する閉じ込め損失（実線）及び曲げ損失（破線）の波長依存性を示すグラフで

ある。

[図8]本発明の第2の実施形態に係る光ファイバの構成を示す断面図である。

[図9] (a) は、本発明の第2の実施形態に係る光ファイバにおける曲げ損失特性（破線）と、従来のフォトニック結晶ファイバにおける曲げ損失特性（実線）とを示したグラフであり、(b) は、図7に示した光ファイバにおける高次モードの閉じ込め損失特性（破線）と、従来のフォトニック結晶ファイバにおける高次モードの閉じ込め損失特性（実線）とを示したグラフである。

[図10] (a) は、本発明の第2の実施形態に係る光ファイバにおける基本モードに対する実効断面積（実線）及び曲げ損失（破線）の波長依存性を示すグラフであり、(b) は、図7に示した光ファイバにおける高次モードに対する閉じ込め損失（実線）及び曲げ損失（破線）の波長依存性を示すグラフである。

[図11] (a) は、従来のフォトニック結晶ファイバの構成を示す断面図であり、(b) は、そのフォトニック結晶ファイバの実効屈折率分布を示すグラフである。

## 発明を実施するための形態

[0026] [実施形態1]

本発明の第1の実施形態について、図1～図7に基づいて説明する。

[0027] (光ファイバの構造)

第1の実施形態に係る光ファイバ10の構成について、図1を参照して説明する。図1(a) は、第1の実施形態に係る光ファイバ10の構成を示す断面図であり、図1(b) は、第1の実施形態に係る光ファイバ10の実効屈折率分布を示すグラフである。

[0028] 光ファイバ10は、図1(a) に示すように、円板状のコア領域11と、コア領域11を取り囲む円環状の第1のクラッド領域12と、第1のクラッド領域12を取り囲む円環状の第2のクラッド領域13とを含む断面構造を有している。光ファイバ10を構成する各領域は、同一の材料（例えば、純

石英) により構成されている。

- [0029] 第1のクラッド領域12及び第2のクラッド領域13には、それぞれ、同一の直径を有する空孔12a及び空孔13aが周期的に配設されている。したがって、図1(b)に示すように、第1のクラッド領域12の実効屈折率及び第2のクラッド領域13の実効屈折率は、それぞれ、空孔が配設されていないコア領域11の屈折率よりも低くなっている。これにより、光ファイバ10は、図11に示した従来のフォトニック結晶ファイバ20と同様、屈折率導波型のフォトニック結晶ファイバとして機能する。
- [0030] しかも、図1(a)に示すように、第1のクラッド領域における空孔12aの数密度(単位断面積あたりの空孔数)は、第2のクラッド領域13における空孔13aの数密度よりも高い。したがって、図1(b)に示すように、第1のクラッド領域12の実効屈折率は、第2のクラッド領域13の実効屈折率よりも低くなる。これにより、コア領域11の屈折率と第1のクラッド領域12の実効屈折率との差を、図11に示した従来のフォトニック結晶ファイバ20よりも大きくすることができる。したがって、コア領域11の断面積を広げて(直径を大きくして)光ファイバ10の実効断面積を図11に示した従来のフォトニック結晶ファイバ20よりも大きくしても、单一モード伝送が可能であり、かつ、曲げ損失が小さいというフォトニック結晶ファイバの性質が損なわれることはない。
- [0031] なお、第1のクラッド領域12と第2のクラッド領域13とは、その実効屈折率の違いによって互いに区別されるべきものである。第1の実施形態においては、第1のクラッド領域12と第2のクラッド領域13とを構成する材料を同一にしたうえで、空孔の数密度を異ならせることによって屈折率差を付けている。したがって、第1のクラッド領域12と第2のクラッド領域13とは、空孔の数密度の違いによって互いに区別されることになる。
- [0032] 光ファイバ10における空孔配置について、図1(a)を参照してもう少し詳しく説明すれば以下のとおりである。
- [0033] すなわち、第1のクラッド領域12には、中心—頂点間距離が $\lambda \times i$ の正

8角形上に配置された $8 \times i$ 個の空孔12aからなる空孔群がM層設けられている（iは1以上M以下の自然数）。なお、図1（a）においては、M=1の場合、すなわち、中心—頂点間距離が $\lambda$ の正8角形の各頂点上に配置された計8個の空孔12aからなる1層目の空孔群のみを設ける構成を例示しているが、M≥2であってもよい。一般に、第1のクラッド領域12を構成するi層目（i≥2）の空孔群は、中心—頂点間距離が $\lambda \times i$ の正8角形の各頂点上、及び、同正8角形の各辺のi等分点上に配置された計 $8 \times i$ 個の空孔12aにより構成することができる。

[0034] 一方、第2のクラッド領域13には、中心—頂点間距離が $\lambda \times j$ の正6角形上に配置された $6 \times j$ 個の空孔13aからなる空孔群がN層設けられている（jはM+1以上M+N以下の自然数）。図1（a）においては、N=2の場合、すなわち、中心—頂点間距離が $2 \times \lambda$ の正6角形の各頂点、及び、同正6角形の各辺の中点（2等分点）上に配置された計12個の空孔13aからなる2層目の空孔群を設け、更に、中心—頂点間距離が $3 \times \lambda$ の正6角形の各頂点、及び、同正6角形の各辺の3等分点上に配置された計18個の空孔13aからなる3層目の空孔群を設ける構成を例示しているが、N=1であってもN≥3であってもよい。一般に、第2のクラッド領域13を構成するj層目（j≥2）の空孔群は、中心—頂点間距離が $\lambda \times j$ の正6角形の各頂点上、及び、同正6角形の各辺のj等分点上に配置された計 $6 \times j$ 個の空孔13aにより構成することができる。第2のクラッド領域13において空孔13aをこのように配置した場合、上述した $\lambda$ は、第2のクラッド領域13における空孔間隔、すなわち、互いに隣接する2つの空孔13aの中心間距離に一致する。

[0035] なお、第1のクラッド領域12及び第2のクラッド領域13における空孔配置は、第1のクラッド領域12における空孔12aの数密度が第2のクラッド領域13における空孔13aの数密度よりも高くなる空孔配置であればよく、ここで説明した具体例に限定されるものではない。例えば、第2のクラッド領域13において、中心—頂点間距離が $\lambda \times j$ の正6角形上に配置さ

れた  $6 \times j$  個の空孔 13a からなる空孔群を N 層設ける構成を採用する場合、第 1 のクラッド領域 12においては、中心—頂点間距離が  $\lambda \times i$  の正 L 角形上に配置された  $L \times i$  個の空孔 12a からなる空孔群を M 層設ける構成を採用することができる（L は 7 以上の自然数）。この場合、第 1 のクラッド領域 12 及び第 2 のクラッド領域 13において、空孔 12a 及び空孔 13a が等方的に配置されることになる。また、第 2 のクラッドにおいて、空孔 13a が最密に配置されることになる。このため、これらの空孔を安定的に形成することができる。

[0036] 更に、第 1 のクラッド領域 12における空孔 12a の数密度が第 2 のクラッド領域 13における空孔 13a の数密度よりも高くなる空孔配置であれば、第 1 のクラッド領域 12において、各層を構成する空孔群を正 8 角形上に配置する代わりに、正 9 角形上に配置したり、正 10 角形上に配置したり、円周上に配置したりしてもよい。また、第 2 のクラッド領域 13において、各層を構成する空孔群を正 6 角形上に配置する代わりに、正 5 角形上に配置したり、正 4 角形（正方形）上に配置したり、円周上に配置したりしてもよい。第 1 のクラッド領域 12における空孔 12a の数密度が第 2 のクラッド領域 13における空孔 13a の数密度よりも高くなる空孔配置であれば、星型配置や籠目型配置を採用してもよい。

[0037] このように、第 1 のクラッド領域 12における空孔 12a の数密度が第 2 のクラッド領域 13における空孔 13a の数密度よりも高くなる空孔配置を採用することによって、第 1 のクラッド領域 12における空孔 12a の断面積占有率を第 2 のクラッド領域 13における空孔 13a の断面積占有率よりも高くし、もって、第 1 のクラッド領域 12 の実効屈折率を第 2 のクラッド領域 13 の実効屈折率よりも低くすることができる。換言すれば、図 1（b）に示した実効屈折率分布、すなわち、第 1 のクラッド領域 12 の実効屈折率、及び、第 2 のクラッド領域 13 の実効屈折率が、それぞれ、コア領域 1 の屈折率よりも低くなり、かつ、第 1 のクラッド領域 12 の実効屈折率が、第 2 のクラッド領域 13 の実効屈折率よりも低くなる W 型の実効屈折率分

布を実現することができる。

[0038] ドーパントを添加することによって屈折率差を付けた光ファイバにおいて、W型の屈折率分布を有する光ファイバ（例えば、非特許文献1に記載の単一モードファイバ）とステップ型の屈折率分布を有する光ファイバとを比較すると、次のことが言える。すなわち、W型の屈折率分布を有する光ファイバにおいては、コア領域の断面積を広げて（直径を大きくして）実効断面積を大きくしても、遮断波長、及び、曲げ損失を、ステップ型の屈折率分布を有する光ファイバと同等にすることができる。また、ステップ型の屈折率分布を有する光ファイバにおいて、空孔を形成することによって屈折率差を付けた光ファイバ（例えば、非特許文献2に記載のフォトニック結晶ファイバ）とフッ素を添加することによってファイバ内に屈折率差をつけた光ファイバとを比較すると、次のことが言える。すなわち、空孔を形成することによって屈折率差を付けた光ファイバにおいては、コア領域の断面積を広げて（直径を大きくして）実効断面積を大きくしても、遮断波長、及び、曲げ損失を、フッ素を添加することによって屈折率差を付けた光ファイバと同等とすることができる。したがって、W型の屈折率を有する光ファイバであって、かつ、空孔を形成することによって屈折率差を付けた光ファイバである第1の実施形態に係る光ファイバ10においては、遮断波長、及び、曲げ損失を、非特許文献1に記載の単一モードファイバや非特許文献2に記載のフォトニック結晶ファイバと同等に保ちつつ、実効断面積を、非特許文献1に記載の単一モードファイバや非特許文献2に記載のフォトニック結晶ファイバよりも大きくすることができる。

[0039] しかも、第1の実施形態に係る光ファイバ10は、第1のクラッド領域12と第2のクラッド領域13とにおける空孔の数密度を異ならせることによってW型の屈折率分布を実現しているので、（1）実効断面積の拡大を図るために第1のクラッド領域12と第2のクラッド領域13とにおける空孔径（空孔の直径）を異ならせたり、（2）第1のクラッド領域に屈折率を下げるためのドーパントを添加したりする必要がない。このため、（1）製造が

容易であり、かつ、(2) ドーパントによる散乱に起因する損失のない低損失な光ファイバを実現することができる。

[0040] (光ファイバの特性)

次に、第1の実施形態に係る光ファイバ10(図1参照)の特性について、図2～図7を参照して説明する。

[0041] 図2(a)は、第1の実施形態に係る光ファイバ10における曲げ損失特性(実線)と、従来のフォトニック結晶ファイバにおける曲げ損失特性(破線)とを示したグラフである。ここでは、波長 $\lambda$ を1550nmとし、空孔径dと空孔間隔 $\Lambda$ との比d/ $\Lambda$ を0.5とした場合の、曲げ半径30mmに対する計算結果を示している。なお、比較に用いた従来のフォトニック結晶ファイバは、第1のクラッド領域12の空孔数を6個にした点、すなわち、第1のクラッド領域12における空孔の数密度を第2のクラッド領域13における空孔の数密度と同じにした点を除き、第1の実施形態に係る光ファイバ10と同様に構成されたものである。

[0042] 図2(a)から、第1の実施形態に係る光ファイバ10の空孔配置、すなわち、第1のクラッド領域12における空孔の数密度を第2のクラッド領域13における空孔の数密度よりも高くする空孔配置を採用することによって、従来のフォトニック結晶ファイバよりも曲げ損失が小さくなることが確かめられる。

[0043] 図2(b)は、第1の実施形態に係る光ファイバ10における高次モード(第1高次モードあるいはLP11モード)の閉じ込め損失特性(実線)と、従来のフォトニック結晶ファイバにおける高次モード(第1高次モードあるいはLP11モード)の閉じ込め損失特性(破線)とを示したグラフである。ここでは、波長 $\lambda$ を1450nmとし、空孔径dの空孔間隔 $\Lambda$ に対する比d/ $\Lambda$ を0.5とした場合の計算結果を示す。なお、比較に用いた従来のフォトニック結晶ファイバは、第1のクラッド領域12の空孔数を6個にした点を除き、第1の実施形態に係る光ファイバ10と同様に構成されたものである。

[0044] 図2（b）から、第1の実施形態に係る光ファイバ10の空孔配置、すなわち、第1のクラッド領域12における空孔の数密度を第2のクラッド領域13における空孔の数密度よりも高くする空孔配置を採用することによって、従来のフォトニック結晶ファイバよりも高次モードの閉じ込め損失が大きくなることが確かめられる。一般に、高次モードの閉じ込め損失が大きくなるほど、高次モードが光ファイバ外に漏れ易くなつて単一モード伝送が実現され易くなる。従つて、第1の実施形態に係る光ファイバ10の空孔配置を採用することによって、従来のフォトニック結晶ファイバよりも単一モード伝送が実現され易い光ファイバを実現することができる。

[0045] ここで、第1のクラッド領域12における空孔の数密度を高くしても、実効的に第1のクラッド領域12の屈折率を低下させることができるので、従来のフォトニック結晶ファイバと比較して、コア領域11の断面積（直径）の減少、すなわち、実効断面積の減少は僅かである点に留意されたい。したがつて、図2に示した計算結果は、第1のクラッド領域12における空孔の数密度を高くすることによって、実効断面積を小さくすることなく、曲げ損失を小さくし、かつ、高次モードの閉じ込め損失を大きくし得ることを意味している。逆に言えば、第1のクラッド領域12における空孔の数密度を高くすることによって、曲げ損失を大きくしたり、高次モードの閉じ込め損失を小さくしたりすることなく、実効断面積を大きくし得ることを意味している。

[0046] 図3は、第1の実施形態に係る光ファイバ10における基本モードに対する曲げ損失特性を示すグラフである。実線、破線、及び点線は、それぞれ、空孔間隔 $\Delta$ が $14\mu m$ 、 $16\mu m$ 、及び $18\mu m$ の場合を示す。何れも、波長 $\lambda$ を $1450 nm$ とした場合の曲げ半径 $30 mm$ に対する計算結果である。

[0047] なお、伝送する光の波長 $\lambda$ を $1450 nm$ としたときの計算結果を示しているのは、長距離光伝送において広く用いられている波長帯であるS～Lバンド（ $1460 nm$ 以上 $1625 nm$ 以下）における利用を想定したこと

である。非特許文献4にも示されているように、フォトニック結晶ファイバにおいては、短波長側ほど曲げ損失が大きくなる。したがって、波長 $\lambda$ を1450 nmとしたときの曲げ損失の値が分かれば、S～Lバンドにおける曲げ損失がその値以下になることが分かる。

[0048] 図3から、空孔間隔 $\Lambda$ が一定であれば、空孔径 $d$ と空孔間隔 $\Lambda$ との比 $d/\Lambda$ を大きくするほど（すなわち、空孔径 $d$ を大きくするほど）、基本モードに対する閉じ込め効果が強くなり、曲げ損失が小さくなることが確かめられる。例えば、空孔間隔 $\Lambda$ が14 μm以下であれば、空孔径 $d$ と空孔間隔 $\Lambda$ との比 $d/\Lambda$ を0.505以上とすることによって、1450 nm以上の波長においてITU-T G.656において推奨された曲げ損失条件（曲げ半径30 mmに対する曲げ損失が100巻きあたり0.5 dB以下）を充足することが分かる。また、空孔間隔 $\Lambda$ が16 μm以下であれば、空孔径 $d$ と空孔間隔 $\Lambda$ との比 $d/\Lambda$ を0.525以上とすることによって、1450 nm以上の波長においてITU-T G.656において推奨された上記の曲げ損失条件を充足することが分かる。

[0049] 図4は、第1の実施形態に係る光ファイバ10における高次モード（第1高次モードあるいはLP11モード）に対する曲げ損失特性を示すグラフである。実線、破線、及び点線は、それぞれ、空孔間隔 $\Lambda$ が14 μm、16 μm、及び18 μmの場合を示す。何れも、波長 $\lambda$ を1625 nmとした場合の曲げ半径140 mmに対する計算結果である。

[0050] 図4から、空孔間隔 $\Lambda$ が一定であれば、空孔径 $d$ と空孔間隔 $\Lambda$ との比 $d/\Lambda$ を小さくするほど（すなわち、空孔径 $d$ を小さくするほど）、高次モードに対する閉じ込め効果が弱くなり、単一モード伝送が実現され易くなることが分かる。例えば、空孔間隔 $\Lambda$ が14 μmであれば、空孔径 $d$ と空孔間隔 $\Lambda$ との比 $d/\Lambda$ を0.515以下とすることによって、1625 nm以下の波長において非特許文献2に記載の单一モード条件（曲げ半径140 mmに対する曲げ損失が1 dB/m = 10<sup>3</sup> dB/km以上）を充足することが分かる。また、空孔間隔が16 μmであれば、空孔径 $d$ と空孔間隔 $\Lambda$ との比 $d/\Lambda$

を0.52以下とすることによって、1625nm以下の波長において非特許文献2に記載の上記の单一モード条件を充足することが分かる。

[0051] 図5は、第1の実施形態に係る光ファイバ10において、ITU-T656において推奨された曲げ損失条件を充足する空孔径d及び空孔間隔Λの範囲と、非特許文献2に記載の单一モード条件を充足する空孔径d及び空孔間隔Λの範囲とを示す特性図である。

[0052] 図5において、実線よりも上の領域が、基本モードに対する曲げ損失がITU-T656において推奨された曲げ損失条件（曲げ半径30mmに対する曲げ損失が100巻きあたり0.5dB以下）を充足する領域であり、破線よりも下の領域が高次モードに対する曲げ損失が非特許文献2に記載の单一モード条件（曲げ半径140mmに対する曲げ損失が1dB/m=10<sup>3</sup>dB/km以上）を充足する領域である。また、斜線を付した領域が曲げ損失条件と单一モード条件とを同時に充足する領域である。実線と破線との交点における空孔間隔Λは15.6μmであり、実線と破線との交点における空孔径dと空孔間隔Λとの比は0.521である。

[0053] 図5から、(1) 空孔間隔Λが15.6μm以下であれば、空孔径dを適宜設定することによって、曲げ損失条件と单一モード条件とを同時に充足する光ファイバを実現し得ること、及び、(2) 空孔径dと空孔間隔Λとの比d/Λが0.521以下であれば、空孔間隔Λを適宜設定することによって、曲げ損失条件と单一モード条件とを同時に充足する光ファイバを実現し得ることが分かる。更に、空孔間隔Λを大きくするほどコア領域11の断面積が大きくなることを考慮すれば、(3) 空孔間隔Λが15.6μmであり、かつ、空孔径dと空孔間隔Λとの比d/Λが0.521である場合に、曲げ損失条件と单一モード条件とを同時に充足する、最も実効断面積が大きい光ファイバが実現されることが分かる。

[0054] 図6は、第1の実施形態に係る光ファイバ10における実効断面積の空孔間隔依存性を示すグラフである。ここでd/Λは0.5とし、波長は1550nmとした。光ファイバ10において、コア断面積は空孔間隔Λの増加に

伴って増加するため、より大きな空孔間隔 $\Lambda$ をとるほどより大きな実効断面積を得られる。図6から、空孔間隔 $\Lambda$ が12.6 μm以上であれば、従来の光ファイバの限界であった160 μm<sup>2</sup>以上の実効断面積が実現されることが分かる。したがって、図5及び図6から、空孔間隔 $\Lambda$ が12.6 μm以上15.6 μm以下の範囲において、曲げ損失条件と単一モード条件とを同時に充足しながら、従来の光ファイバよりも大きな実効断面積を実現できることが分かる。

[0055] 図7(a)は、第1の実施形態に係る光ファイバ10における基本モードに対する実効断面積(実線)及び曲げ損失(破線)の波長依存性を示すグラフである。ここでは、曲げ損失条件と単一モード条件とを同時に充足する、最も実効断面積が大きい光ファイバ10、すなわち、空孔間隔 $\Lambda$ を15.6 μmとし、空孔径 $d$ と空孔間隔 $\Lambda$ との比 $d/\Lambda$ を0.521とした光ファイバ10に対する計算結果を示す。

[0056] 図7(a)から、1250 nm以上1650 nm以下の波長帯において、実効断面積が235 μm<sup>2</sup>程度となることが確かめられる。すなわち、第1の実施形態に係る光ファイバ10の空孔配置を採用することによって、1250 nm以上1650 nm以下の波長帯において、従来の単一モードファイバが有する実効断面積(約80 μm<sup>2</sup>)の約3倍、従来のフォトニック結晶ファイバが有する実効断面積(約157 μm<sup>2</sup>)の1.5倍に相当する、格段に大きな実効断面積を有する光ファイバを実現し得ることが分かる。また、図7(a)から、S～Lバンド(1460 nm以上1625 nm以下の波長帯)において、ITU-T G.656において推奨された曲げ損失条件(曲げ半径30 mmに対する曲げ損失が100巻きあたり0.5 dB以下)を充足していることが確かめられる。

[0057] 図7(b)は、第1の実施形態に係る光ファイバ10における高次モード(第1高次モードあるいはLP11モード)に対する閉じ込め損失(実線)及び曲げ損失(破線)の波長依存性を示すグラフである。ここでも、曲げ損失条件と単一モード条件とを同時に充足する、最も実効断面積が大きい光

アイバ10、すなわち、空孔間隔 $\Lambda$ を15.6 μmとし、空孔径dと空孔間隔 $\Lambda$ との比d/ $\Lambda$ を0.521とした光ファイバ10に対する計算結果を示す。

- [0058] 図7（b）から、1250 nm以上1650 nm以下の波長帯において、高次モードに対する曲げ損失（曲げ半径140 mm）が $10 dB/m = 10^3 dB/km$ 程度となることが確かめられる。すなわち、第1の実施形態に係る光ファイバ10の空孔配置を採用することによって、1250 nm以上1650 nm以下の波長帯において、非特許文献2に記載の単一モード条件（曲げ半径140 mmに対する曲げ損失が $1 dB/m = 10^3 dB/km$ 以上）を充足する光ファイバを実現し得ることが分かる。なお、高次モードに対する閉じ込め損失は $0.01 dB/m = 10 dB/km$ 程度の小さな値となるが、高次モードに対する曲げ損失（曲げ半径140 mm）が上述したよう十分に大きな値となるので、これにより単一モード伝送が実効的に阻害されることはない。
- [0059] なお、以上の説明においてはS～Lバンドにおける使用を想定して光ファイバ10の特性を示したが、光ファイバ10の使用可能範囲はS～Lバンド内に限定されるものではない。すなわち、光ファイバ10は、1.0 μm以上1.7 μm以下の波長帯、あるいは、それよりも広い波長帯において使用可能（曲げ損失条件を満たしつつ単一モード動作可能）である。

[0060] [実施形態2]

本発明の第2の実施形態について、図8～図10に基づいて説明する。

[0061] (光ファイバの構成)

第2の実施形態に係る光ファイバ10'の構成について、図8を参照して説明する。図8は、第2の実施形態に係る光ファイバ10'の構成を示す断面図である。

- [0062] 光ファイバ10'は、図8に示すように、円板状のコア領域11'、コア領域11'を取り囲む円環状の第1のクラッド領域12'、第1のクラッド領域12'を取り囲む円環状の第2のクラッド領域13'を含む断面

構造を有している。光ファイバ10'を構成する各領域は、第1のクラッド領域12'を除き、同一の材料（例えば、純石英）により構成されている。

[0063] 第1のクラッド領域12'及び第2のクラッド領域13'には、それぞれ、同一の直径を有する空孔12'a及び空孔13'aが周期的に配設されており、第1のクラッド領域12'の実効屈折率及び第2のクラッド領域13'の実効屈折率は、それぞれ、空孔が配設されていないコア領域11'の屈折率よりも低くなっている。これにより、光ファイバ10'は、図11に示した従来のフォトニック結晶ファイバ20と同様、屈折率導波型のフォトニック結晶ファイバとして機能する。

[0064] しかも、第1のクラッド領域12'には、ドーパント（添加物）が添加されている。このため、第1のクラッド領域12'を構成する構成材料の屈折率（空孔12'aを考慮に入れない屈折率）は、第2のクラッド領域13'を構成する構成材料の屈折率（空孔13'aを考慮に入れない屈折率）よりも低くなる。その結果、第1のクラッド領域12'の実効屈折率（空孔12'aを考慮に入れた屈折率）は、第2のクラッド領域13'の実効屈折率（空孔13'aを考慮に入れた屈折率）よりも低くなる。これにより、光ファイバ10'の実効断面積が、図11に示した従来のフォトニック結晶ファイバ20の実効断面積よりも大きくなる。なお、第1のクラッド領域12'を構成する構成材料の屈折率を低下させるためのドーパントとしては、例えば、フッ素やホウ素などを挙げることができる。

[0065] なお、第1のクラッド領域12'と第2のクラッド領域13'とは、実効屈折率の違いによって互いに区別されるべきものである。第2の実施形態においては、第1のクラッド領域12'と第2のクラッド領域13'とにおける空孔の数密度を同一にしたうえで、第1のクラッド領域12'にドーパントを添加することによって屈折率差を付けている。したがって、第1のクラッド領域12'と第2のクラッド領域13'とは、このドーパントの有無によって互いに区別される。

[0066] 光ファイバ10'の空孔配置は、従来のフォトニック結晶ファイバ20（

図11参照)と同様の空孔配置、すなわち、中心—頂点間距離が $\lambda \times i$ の正6角形上に配置された $6 \times i$ 個の空孔 $12' a \cdot 13' a$ からなる空孔群をN層設ける空孔配置である( $i$ は1以上N以下の自然数)。図8においては、 $N=3$ の場合、すなわち、中心—頂点間距離が $\lambda$ の正6角形の各頂点上に配置された計6個の空孔 $12' a$ からなる1層目の空孔群と、中心—頂点間距離が $2 \times \lambda$ の正6角形の各頂点、及び、同正6角形の各辺の中点(2等分点)上に配置された計12個の空孔 $13' a$ からなる2層目の空孔群と、中心—頂点間距離が $3 \times \lambda$ の正6角形の各頂点、及び、同正6角形の各辺の3等分点上に配置された計18個の空孔 $13' a$ からなる3層目の空孔群とを設ける構成を例示しているが、 $N=2$ であっても $N \geq 4$ であってもよい。一般に、 $i$ 層目( $i \geq 2$ )の空孔群は、中心—頂点間距離が $\lambda \times i$ の正6角形の各頂点上、及び、同正6角形の各辺の*i*等分点上に配置された計 $6 \times i$ 個の空孔 $12' a \cdot 13' a$ により構成することができる。

[0067] なお、図8においては、内周側から数えて1層目の空孔群のみを包含するようにドーパントを添加する領域を設ける構成を例示しているが、これに限定されるものではない。すなわち、内周側から数えてM層目( $N-1 \geq M \geq 1$ )まで空孔群を包含するようにドーパントを添加する領域を設けてよい。また、図8においては、第1のクラッド領域 $12'$ を構成する各空孔 $12' a$ を真に包含するようにドーパントを添加する領域を設けているが、これに限定されるものではない。すなわち、第1のクラッド領域 $12'$ を構成する空孔 $12' a$ のうち最内周又は最外周に配置されたものがドーパントの添加された領域とドーパントの添加されていない領域との境界を跨いでいてよい。

[0068] このように、第1のクラッド領域 $12'$ にフッ素やホウ素などのドーパントを添加する構成を採用することによって、第1のクラッド領域 $12'$ と第2のクラッド領域 $13'$ における空孔の数密度が同一であっても、第1のクラッド領域 $12'$ の実効屈折率を、第2のクラッド領域 $13'$ の実効屈折率よりも低くすることができる。換言すれば、第1の実施形態に係る光ファ

イバ10と同様の実効屈折率分布、すなわち、第1のクラッド領域12'の実効屈折率、及び、第2のクラッド領域13'の実効屈折率が、それぞれ、コア領域11'の屈折率よりも低くなり、かつ、第1のクラッド領域12'の実効屈折率が、第2のクラッド領域13'の実効屈折率よりも低くなるW型の実効屈折率分布を実現することができる。

[0069] なお、第2の実施形態においては、第1のクラッド領域12'にのみフッ素やホウ素などのドーパントを添加することによって、第1のクラッド領域12'の実効屈折率を第2のクラッド領域13'の実効屈折率よりも低くする構成について説明したが、これに限定されるものではない。例えば、第1のクラッド領域12'と第2のクラッド領域13'とに添加するドーパントの濃度を異ならせることによって、あるいは、第1のクラッド領域12'と第2のクラッド領域13'とに添加するドーパントの種類を異ならせることによって、第1のクラッド領域12'の実効屈折率を第2のクラッド領域13'の実効屈折率よりも低くする構成を採用してもよい。

[0070] (光ファイバの特性)

次に、第2の実施形態に係る光ファイバ10'（図8参照）の特性について、図9～図10を参照して説明する。

[0071] 図9（a）は、比屈折率差 $\Delta$ が-0.2%となるように第1のクラッド領域12'にフッ素を添加した光ファイバ10'における曲げ損失特性（破線）と、従来のフォトニック結晶ファイバにおける曲げ損失特性（実線）とを示したグラフである。ここでは、波長 $\lambda$ を1450 nmとし、空孔径 $d$ と空孔間隔 $\Lambda$ との比 $d/\Lambda$ を0.5とした場合の曲げ半径30 mmに対する計算結果を示している。なお、比較に用いた従来のフォトニック結晶ファイバは、第1のクラッド領域12'にドーパントが添加されていない（比屈折率差 $\Delta$ が0%である）点を除き、第2の実施形態に係る光ファイバ10'と同様に構成されたものである。

[0072] なお、比屈折率差 $\Delta$ は、純石英（コア領域11'の構成材料）の屈折率をn1、フッ素が添加された石英（第1のクラッド領域12'の構成材料）の

屈折率を  $n_2$  としたときに、 $(n_2 - n_1) / n_1$  を百分率で表したものである。

[0073] 図9 (a) から、第1のクラッド領域12'にフッ素を添加する構成を採用することによって、従来のフォトニック結晶ファイバよりも曲げ損失が小さくなることが確かめられる。

[0074] 図9 (b) は、比屈折率差  $\Delta$  が  $-0.2\%$  となるように第1のクラッド領域12'にフッ素を添加した光ファイバ10'における高次モード（第1高次モードあるいはLP11モード）の閉じ込め損失特性（破線）と、従来のフォトニック結晶ファイバにおける高次モード（第1高次モードあるいはLP11モード）の閉じ込め損失特性（実線）とを示したグラフである。ここでは、波長  $\lambda$  を  $1450 \text{ nm}$  とし、空孔直径  $d$  の空孔間隔  $\Lambda$  に対する比  $d/\Lambda$  を  $0.5$  とした場合の計算結果を示す。なお、比較に用いた従来のフォトニック結晶ファイバも、第1のクラッド領域12'にドーパントが添加されていない点を除き、第2の実施形態に係る光ファイバ10' と同様に構成されたものである。

[0075] 図9 (b) から、第1のクラッド領域12'にフッ素を添加する構成を採用することによって、従来のフォトニック結晶ファイバよりも高次モードの閉じ込め損失が大きくなること、すなわち、単一モード伝送が実現され易くなることが確かめられる。

[0076] 図10 (a) は、比屈折率差  $\Delta$  が  $-0.2\%$  となるように第1のクラッド領域12'にフッ素を添加した光ファイバ10'における基本モードに対する実効断面積（実線）及び曲げ損失（破線）の波長依存性を示すグラフである。ここでは、空孔間隔  $\Lambda$  を  $15.0 \mu\text{m}$  とし、空孔径  $d$  と空孔間隔  $\Lambda$  との比  $d/\Lambda$  を  $0.5$  とした光ファイバ10'に対する計算結果を示す。

[0077] 図10 (a) から、例えば、波長  $1550 \text{ nm}$ において、実効断面積が  $220 \mu\text{m}^2$  程度となることが確かめられる。すなわち、比屈折率差  $\Delta$  が  $-0.2\%$  となるように第1のクラッド領域12'にフッ素を添加することによって、例えば、波長  $1550 \text{ nm}$ において、従来のSMFが有する実効断面積

(約 $80 \mu\text{m}^2$ ) の約2.7倍、従来のフォトニック結晶ファイバが有する実効断面積(約 $157 \mu\text{m}^2$ )の1.4倍に相当する、大きな実効断面積を有する光ファイバを実現し得ることが分かる。また、図10(a)から、例えば、波長 $1550 \text{ nm}$ において、基本モードに対する曲げ損失(曲げ半径 $30 \text{ mm}$ )を100巻きあたり $0.3 \text{ dB}$ 以下に抑えられること、すなわち、ITU-T G.656において推奨された曲げ損失条件(曲げ半径 $30 \text{ mm}$ に対する曲げ損失が100巻きあたり $0.5 \text{ dB}$ 以下)を充足する光ファイバを実現し得ることが確かめられる。

[0078] 図10(b)は、比屈折率差 $\Delta$ が $-0.2\%$ となるように第1のクラッド領域 $12'$ にフッ素を添加した光ファイバ $10'$ における高次モード(第1高次モードあるいはLP11モード)に対する閉じ込め損失(実線)及び曲げ損失(破線)の波長依存性を示すグラフである。ここでも、空孔間隔 $\Lambda$ を $15.0 \mu\text{m}$ とし、空孔径 $d$ と空孔間隔 $\Lambda$ との比 $d/\Lambda$ を $0.5$ とした光ファイバ $10'$ に対する計算結果を示す。

[0079] 図10(b)から、S~Lバンド( $1460 \text{ nm}$ 以上 $1625 \text{ nm}$ 以下の波長帯)において、高次モードに対する閉じ込め損失及び曲げ損失が $1 \text{ dB}/\text{m}$ 程度となることが確かめられる。すなわち、比屈折率差 $\Delta$ が $-0.2\%$ となるように第1のクラッド領域 $12'$ にフッ素を添加する構成を採用することによって、S~Lバンドにおいて、非特許文献2に記載の単一モード条件(曲げ半径 $140 \text{ mm}$ に対する曲げ損失が $1 \text{ dB}/\text{m} = 10^3 \text{ dB}/\text{km}$ 以上)を概ね充足する、单一モード伝送可能な光ファイバを実現し得ることが確かめられる。

[0080] [まとめ]

以上のように、本発明に係る光ファイバは、コア領域と、該コア領域を取り囲む第1のクラッド領域と、該第1のクラッド領域を取り囲む第2のクラッド領域とを含む断面構造を有する光ファイバであって、上記第1のクラッド領域及び上記第2のクラッド領域には、上記第1のクラッド領域の実効屈折率及び上記第2のクラッド領域の実効屈折率が上記コア領域の屈折率より

も低くなるように、直径が同一の空孔が周期的に形成されており、上記第1のクラッド領域の実効屈折率が上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低いことを特徴としている。

- [0081] 上記の構成によれば、周期的に空孔が配設されたクラッド領域（第1のクラッド領域及び第2のクラッド領域）にコア領域が取り囲まれているので、従来のフォトニック結晶ファイバと同様、全反射を原理とする光の閉じ込めが実現される。このため、従来のフォトニック結晶ファイバと同様、広い波長域で单一モード伝送が可能であり、かつ、曲げ損失が小さい光ファイバを実現することができる。しかも、上記第1のクラッド領域の実効屈折率を上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低くしているので、ステップ型の実効屈折率分布（図11（b）参照）をもつ従来のフォトニック結晶ファイバよりも大きい実効断面積を有する光ファイバを実現することができる。
- [0082] 更に、上記の構成によれば、上記第1のクラッド領域及び上記第2のクラッド領域に配設する空孔の直径が同一であるため、上記第1のクラッド領域及び上記第2のクラッド領域に配設する空孔の直径を異ならせることによって実効断面積の拡大を図る場合のように、その製造が困難になることはない。
- [0083] したがって、上記の構成によれば、従来のフォトニック結晶ファイバと同様、单一モード伝送が可能であり、かつ、曲げ損失が小さい光ファイバでありながら、従来のフォトニック結晶ファイバよりも実効断面積が大きく、かつ、製造が容易な光ファイバを実現することができるという効果を奏する。
- [0084] なお、「空孔が周期的に形成されている」とは、空孔が形成された光ファイバがフォトニック結晶ファイバとして機能する程度に空孔の配置が周期的であることを意味する。また、2つの空孔の直径が「同一」であるとは、これら2つの空孔の直径の差が製造誤差よりも小さいことを意味する。
- [0085] なお、本発明に係る光ファイバにおいては、上記第1のクラッド領域における空孔の数密度を上記第2のクラッド領域における空孔の数密度よりも高くすることによって、上記第1のクラッド領域の実効屈折率を上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低くしておき、

ラッド領域の実効屈折率よりも低くしてもよいし、上記第1のクラッド領域に屈折率を下げるためのドーパントを添加することによって、上記第1のクラッド領域の実効屈折率を上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低くしてもよいし、あるいは、これらの組み合わせによって、上記第1のクラッド領域の実効屈折率を上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低くしてもよい。上記第1のクラッド領域における空孔の数密度を上記第2のクラッド領域における空孔の数密度よりも高くする構成を採用する場合には、ドーパントを添加する必要がないため、ドーパントによる散乱に起因する損失のない、より低損失な光ファイバを実現することができる。

[0086] 本発明に係る光ファイバにおいては、上記第1のクラッド領域にはM層の空孔群が形成されており（Mは任意の自然数）、上記第2のクラッド領域にはN層の空孔群が形成されており（Nは任意の自然数）、上記M+N層の空孔群のうち内周側から数えてi層目の空孔群は、中心と頂点との距離が $\Lambda \times i$ となる正L角形上に配置された $L \times i$ 個の空孔からなり（Lは7以上の自然数、iは1以上M以下の自然数）、上記M+N層の空孔群のうち内周側から数えてj層目の空孔群は、中心と頂点との距離が $\Lambda \times j$ となる正6角形上に配置された $6 \times j$ 個の空孔からなる（jはM+1以上M+N以下の自然数）、ことが好ましい。

[0087] 上記の構成によれば、上記第1のクラッド領域、及び、上記第2のクラッド領域において、空孔を等方的に配置することができる。しかも、上記第2のクラッド領域において、空孔を最密に配置しつつ、上記第1のクラッド領域における空孔の数密度を上記第2のクラッド領域における空孔の数密度よりも高くすることができる。

[0088] 本発明に係る光ファイバにおいては、上記M+N層の空孔群のうち内周側から数えてi層目の空孔群は、中心と頂点との距離が $\Lambda \times i$ となる正8角形上に配置された $8 \times i$ 個の空孔からなることが好ましい。

[0089] 上記の構成によれば、上記空孔の直径と、上記第2のクラッド領域において互いに隣接する2つの空孔の中心間距離 $\Lambda$ とを適宜調整することによって

、基本モードに対する曲げ損失がITU-T G.656において推奨された曲げ損失条件（曲げ半径30mmに対する曲げ損失が100巻きあたり0.5dB以下）と、非特許文献2に記載の単一モード条件（曲げ半径140mmに対する高次モードの曲げ損失が $1 \text{ dB}/\text{m} = 10^3 \text{ dB}/\text{km}$ 以上）とを同時に充足する光ファイバを実現することができるという更なる効果を奏する。

[0090] 本発明に係る光ファイバにおいては、上記第2のクラッド領域において互いに隣接する2つの空孔の中心間距離 $\Lambda$ が15.6μm以下であることが好ましい。

[0091] 上記の構成によれば、上記空孔の直径を適宜設定することによって、非特許文献2に記載の単一モード条件（曲げ半径140mmに対する高次モードの曲げ損失が $1 \text{ dB}/\text{m} = 10^3 \text{ dB}/\text{km}$ 以上）を充足しつつ、基本モードに対する曲げ損失がITU-T G.656において推奨された曲げ損失条件（曲げ半径30mmに対する曲げ損失が100巻きあたり0.5dB以下）を達成することができるという更なる効果を奏する。

[0092] 本発明に係る光ファイバにおいては、上記第2のクラッド領域において互いに隣接する2つの空孔の中心間距離 $\Lambda$ が12.6μm以上であることが好ましい。

[0093] 上記の構成によれば、従来の光ファイバの限界であった $160 \mu\text{m}^2$ 以上の実効断面積を実現することができる。

[0094] 本発明に係る光ファイバにおいては、上記第2のクラッド領域において互いに隣接する2つの空孔の中心間距離 $\Lambda$ と上記空孔の直径 $d$ との比 $d/\Lambda$ が0.521以下であることが好ましい。

[0095] 上記の構成によれば、上記第2のクラッド領域において互いに隣接する2つの空孔の中心間距離 $\Lambda$ を適宜設定することによって、基本モードに対する曲げ損失がITU-T G.656において推奨された曲げ損失条件（曲げ半径30mmに対する曲げ損失が100巻きあたり0.5dB以下）を充足しつつ、非特許文献2に記載の単一モード条件（曲げ半径140mmに対する高次モードの曲げ損失が $1 \text{ dB}/\text{m} = 10^3 \text{ dB}/\text{km}$ 以上）を達成することができ

きるという更なる効果を奏する。

- [0096] また、本発明に係る光ファイバは、コア領域と、該コア領域を取り囲む第1のクラッド領域と、該第1のクラッド領域を取り囲む第2のクラッド領域とを含む断面構造を有する光ファイバであって、上記第1のクラッド領域及び上記第2のクラッド領域に空孔を周期的に配設することによって、上記第1のクラッド領域及び上記第2のクラッド領域の実効屈折率を上記コア領域の屈折率よりも低くし、かつ、上記第1のクラッド領域と上記第2のクラッド領域とにおける空孔の断面積占有率を異ならせることによって、上記第1のクラッド領域の実効屈折率を上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低くした、ことを特徴とする光ファイバであると表現することもできる。
- [0097] 上記の構成によれば、周期的に空孔が配設されたクラッド領域（第1のクラッド領域及び第2のクラッド領域）にコア領域が取り囲まれているので、従来のフォトニック結晶ファイバと同様、全反射を原理とする光の閉じ込めが実現される。このため、従来のフォトニック結晶ファイバと同様、広い波長域で单一モード伝送が可能であり、かつ、曲げ損失が小さい光ファイバを実現することができる。しかも、上記第1のクラッド領域の実効屈折率を上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低くしているので、ステップ型の実効屈折率分布をもつ従来のフォトニック結晶ファイバよりも大きい実効断面積を有する光ファイバを実現することができる。
- [0098] 更に、上記の構成によれば、上記第1のクラッド領域と上記第2のクラッド領域とにおける空孔の断面積占有率を異ならせることによって上記第1のクラッド領域の実効屈折率を上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低くしているので、上記第1のクラッド領域の実効屈折率を上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低くするために上記第1のクラッド領域と上記第2のクラッド領域とにおける空孔の直径を異ならせる必要がない。したがって、上記第1のクラッド領域と上記第2のクラッド領域とにおける空孔の直径を異ならせることによって上記第1のクラッド領域の実効屈折率を上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低くした光ファイバよりも製造が容易

である。

- [0099] したがって、上記の構成によれば、従来のフォトニック結晶ファイバと同様、単一モード伝送が可能であり、かつ、曲げ損失が小さい光ファイバでありながら、従来のフォトニック結晶ファイバよりも実効断面積が大きく、かつ、製造が容易な光ファイバを実現することができるという効果を奏する。
- [0100] また、本発明に係る光ファイバは、コア領域と、該コア領域を取り囲む第1のクラッド領域と、該第1のクラッド領域を取り囲む第2のクラッド領域とを含む断面構造を有する光ファイバであって、上記第1のクラッド領域及び上記第2のクラッド領域に空孔を周期的に配設することによって、上記第1のクラッド領域及び上記第2のクラッド領域の実効屈折率を上記コア領域の屈折率よりも低くし、かつ、上記第1のクラッド領域と上記第2のクラッド領域とにおける空孔の数密度を異ならせることによって、上記第1のクラッド領域の実効屈折率を上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低くした、ことを特徴とする光ファイバであると表現することもできる。
- [0101] 上記の構成によれば、周期的に空孔が配設されたクラッド領域（第1のクラッド領域及び第2のクラッド領域）にコア領域が取り囲まれているので、従来のフォトニック結晶ファイバと同様、全反射を原理とする光の閉じ込めが実現される。このため、従来のフォトニック結晶ファイバと同様、広い波長域で単一モード伝送が可能であり、かつ、曲げ損失が小さい光ファイバを実現することができる。しかも、上記第1のクラッド領域の実効屈折率を上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低くしているので、ステップ型の実効屈折率分布をもつ従来のフォトニック結晶ファイバよりも大きい実効断面積を有する光ファイバを実現することができる。
- [0102] 更に、上記の構成によれば、上記第1のクラッド領域と上記第2のクラッド領域とにおける空孔の数密度を異ならせることによって上記第1のクラッド領域の実効屈折率を上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低くしているので、上記第1のクラッド領域の実効屈折率を上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低くするために上記第1のクラッド領域と上記第2のクラッド領域の実効屈折率を上記第2のクラッド領域よりも低くする。

ラッド領域における空孔の直径を異ならせる必要がない。したがって、上記第1のクラッド領域と上記第2のクラッド領域における空孔の直径を異ならせることによって上記第1のクラッド領域の実効屈折率を上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低くした光ファイバよりも製造が容易である。

[0103] したがって、上記の構成によれば、従来のフォトニック結晶ファイバと同様、単一モード伝送が可能であり、かつ、曲げ損失が小さい光ファイバでありながら、従来のフォトニック結晶ファイバよりも実効断面積が大きく、かつ、製造が容易な光ファイバを実現することができるという効果を奏する。

#### [0104] [付記事項]

本発明は上述した各実施形態に限定されるものではなく、請求項に示した範囲で種々の変更が可能であり、異なる実施形態にそれぞれ開示された技術的手段を適宜組み合わせて得られる実施形態についても本発明の技術的範囲に含まれる。

### 産業上の利用可能性

[0105] 本発明は、光信号を伝送する伝送媒体として用いられる光ファイバに利用することができる。特に、長距離伝送用の光ファイバに好適に利用することができる。

### 符号の説明

[0106]	10, 10'	光ファイバ
	11, 11'	コア領域
	12, 12'	第1のクラッド領域
	12a, 12'a	空孔
	13, 13'	第2のクラッド領域
	13a, 13'a	空孔

## 請求の範囲

- [請求項1] コア領域と、該コア領域を取り囲む第1のクラッド領域と、該第1のクラッド領域を取り囲む第2のクラッド領域とを含む断面構造を有する光ファイバであって、  
上記第1のクラッド領域の実効屈折率及び上記第2のクラッド領域の実効屈折率が上記コア領域の屈折率よりも低くなるように、上記第1のクラッド領域及び上記第2のクラッド領域に直径が同一の空孔が周期的に配設されており、上記第1のクラッド領域の実効屈折率が上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低い、ことを特徴とする光ファイバ。
- [請求項2] 上記第1のクラッド領域における空孔の数密度が上記第2のクラッド領域における空孔の数密度よりも高い、  
ことを特徴とする請求項1に記載の光ファイバ。
- [請求項3] 上記第1のクラッド領域にはM層の空孔群が形成されており（Mは任意の自然数）、  
上記第2のクラッド領域にはN層の空孔群が形成されており（Nは任意の自然数）、  
上記M+N層の空孔群のうち内周側から数えてi層目の空孔群は、中心と頂点との距離が $\lambda \times i$ となる正L角形上に配置された $L \times i$ 個の空孔からなる（Lは7以上の自然数、iは1以上M以下の自然数）  
、  
上記M+N層の空孔群のうち内周側から数えてj層目の空孔群は、中心と頂点との距離が $\lambda \times j$ となる正6角形上に配置された $6 \times j$ 個の空孔からなる（jはM+1以上M+N以下の自然数）、  
ことを特徴とする請求項2に記載の光ファイバ。
- [請求項4] 上記M+N層の空孔群のうち内周側から数えてi層目の空孔群は、中心と頂点との距離が $\lambda \times i$ となる正8角形上に配置された $8 \times i$ 個の空孔からなる、

ことを特徴とする請求項3に記載の光ファイバ。

[請求項5] 上記第2のクラッド領域において互いに隣接する2つの空孔の中心間距離 $\Lambda$ が15.6  $\mu\text{m}$ 以下である、

ことを特徴とする請求項4に記載の光ファイバ。

[請求項6] 上記第2のクラッド領域において互いに隣接する2つの空孔の中心間距離 $\Lambda$ が12.6  $\mu\text{m}$ 以上である、

ことを特徴とする請求項5に記載の光ファイバ。

[請求項7] 上記第2のクラッド領域において互いに隣接する2つの空孔の中心間距離 $\Lambda$ と上記空孔の直径 $d$ との比 $d/\Lambda$ が0.521以下である、  
ことを特徴とする請求項4から6までの何れか1項に記載の光ファイバ。

[請求項8] 上記第1のクラッド領域には、屈折率を下げるためのドーパントが添加されている、

ことを特徴とする請求項1から7までの何れか1項に記載の光ファイバ。

[請求項9] 波長1550 nmにおいて実効断面積が160  $\mu\text{m}^2$ 以上あり、  
1460 nm以上1625 nm以下の波長帯において、単一モード伝送が可能であり、かつ、基本モードに対する曲げ半径30 mmでの曲げ損失が100巻きあたり0.5 dB以下である、  
ことを特徴とする請求項1から8までの何れか1項に記載の光ファイバ。

[請求項10] コア領域と、該コア領域を取り囲む第1のクラッド領域と、該第1のクラッド領域を取り囲む第2のクラッド領域とを含む断面構造を有する光ファイバであって、

上記第1のクラッド領域及び上記第2のクラッド領域に空孔を周期的に配設することによって、上記第1のクラッド領域及び上記第2のクラッド領域の実効屈折率を上記コア領域の屈折率よりも低くし、かつ、上記第1のクラッド領域と上記第2のクラッド領域とにおける空

孔の断面積占有率を異ならせることによって、上記第1のクラッド領域の実効屈折率を上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低くした、ことを特徴とする光ファイバ。

[請求項11]

上記第1のクラッド領域と上記第2のクラッド領域とにおける空孔の数密度を異ならせることによって、上記第1のクラッド領域と上記第2のクラッド領域とにおける空孔の断面積占有率を異ならせた、ことを特徴とする請求項10に記載の光ファイバ。

補正された請求の範囲  
[2011年6月8日(08.06.2011)国際事務局受理]

1. (補正後)

コア領域と、該コア領域を取り囲む第1のクラッド領域と、該第1のクラッド領域を取り囲む第2のクラッド領域とを含む断面構造を有する光ファイバであつて、

上記第1のクラッド領域の実効屈折率及び上記第2のクラッド領域の実効屈折率が上記コア領域の屈折率よりも低くなるように、上記第1のクラッド領域及び上記第2のクラッド領域に直径が同一の複数の空孔が周期的に配設されており、

上記複数の空孔は、上記第1のクラッド領域におけるM層の空孔群（Mは任意の自然数）及び上記第2のクラッド領域におけるN層の空孔群（Nは任意の自然数）を構成し、

上記M+N層の空孔群のうち内周側から数えてi層目の空孔群は、中心と頂点との距離が $\Lambda \times i$ となる正L角形上に配置された $L \times i$ 個の空孔からなる（Lは7以上の自然数、iは1以上M以下の自然数）、

上記M+N層の空孔群のうち内周側から数えてj層目の空孔群は、中心と頂点との距離が $\Lambda \times j$ となる正6角形上に配置された $6 \times j$ 個の空孔からなる（jはM+1以上M+N以下の自然数）、ことを特徴とする光ファイバ。

2. (削除)

3. (削除)

4. (補正後)

上記M+N層の空孔群のうち内周側から数えてi層目の空孔群は、中心と頂点との距離が $\Lambda \times i$ となる正8角形上に配置された $8 \times i$ 個の空孔からなる、ことを特徴とする請求項1に記載の光ファイバ。

5.

上記第2のクラッド領域において互いに隣接する2つの空孔の中心間距離 $\Lambda$ が15.6 μm以下である、

ことを特徴とする請求項 4 に記載の光ファイバ。

6.

上記第 2 のクラッド領域において互いに隣接する 2 つの空孔の中心間距離  $\Lambda$  が  
12. 6  $\mu\text{m}$  以上である、

ことを特徴とする請求項 5 に記載の光ファイバ。

7.

上記第 2 のクラッド領域において互いに隣接する 2 つの空孔の中心間距離  $\Lambda$  と  
上記空孔の直径  $d$  との比  $d / \Lambda$  が 0. 521 以下である、

ことを特徴とする請求項 4 から 6 までの何れか 1 項に記載の光ファイバ。

8. (補正後)

上記第 1 のクラッド領域には、屈折率を下げるためのドーパントが添加されて  
いる、

ことを特徴とする請求項 1 及び 4 から 7 までの何れか 1 項に記載の光ファイバ。

9. (補正後)

波長 1550 nm において実効断面積が 160  $\mu\text{m}^2$  以上であり、  
1460 nm 以上 1625 nm 以下の波長帯において、単一モード伝送が可能  
であり、かつ、基本モードに対する曲げ半径 30 mm での曲げ損失が 100 巻き  
あたり 0. 5 dB 以下である、

ことを特徴とする請求項 1 及び 4 から 8 までの何れか 1 項に記載の光ファイバ。

10.

コア領域と、該コア領域を取り囲む第 1 のクラッド領域と、該第 1 のクラッド  
領域を取り囲む第 2 のクラッド領域とを含む断面構造を有する光ファイバであつ  
て、

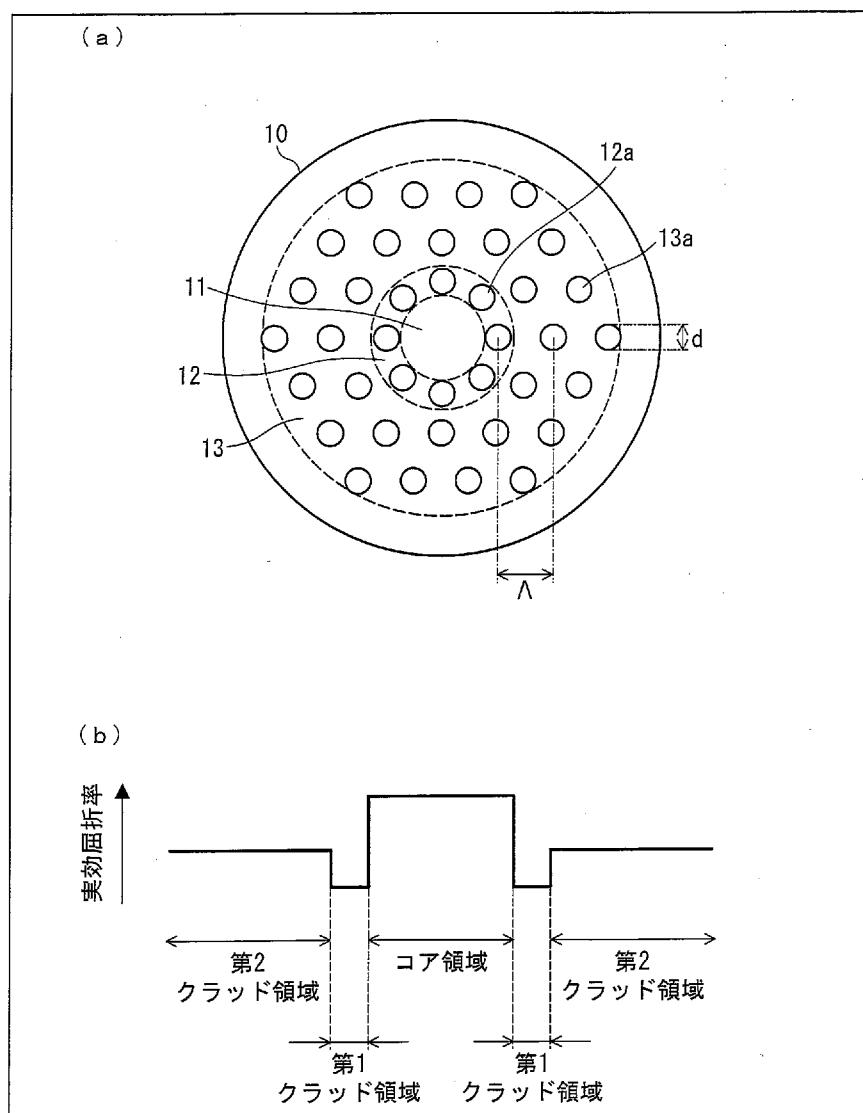
上記第 1 のクラッド領域及び上記第 2 のクラッド領域に空孔を周期的に配設す  
ることによって、上記第 1 のクラッド領域及び上記第 2 のクラッド領域の実効屈  
折率を上記コア領域の屈折率よりも低くし、かつ、上記第 1 のクラッド領域と上

記第2のクラッド領域における空孔の断面積占有率を異ならせることによって、上記第1のクラッド領域の実効屈折率を上記第2のクラッド領域の実効屈折率よりも低くした、ことを特徴とする光ファイバ。

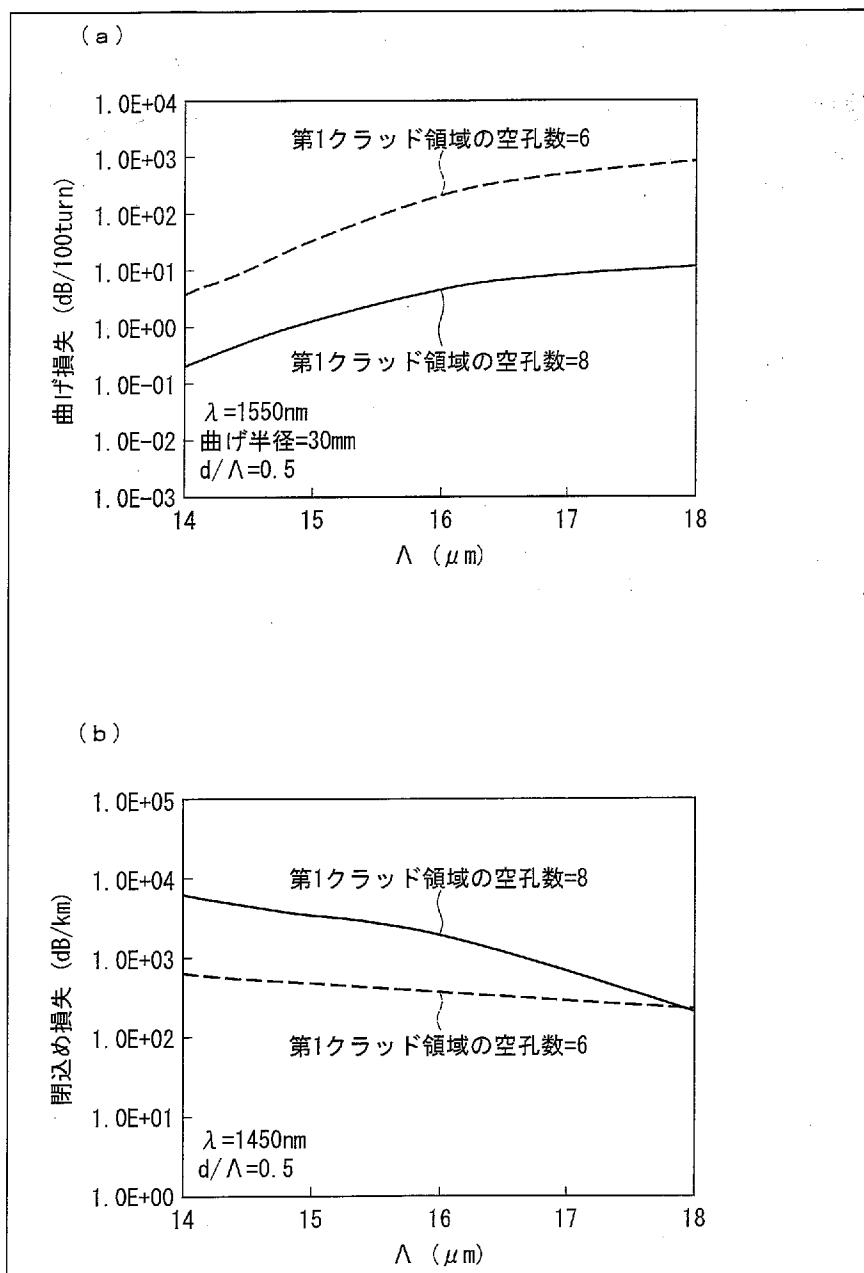
1 1.

上記第1のクラッド領域と上記第2のクラッド領域における空孔の数密度を異ならせることによって、上記第1のクラッド領域と上記第2のクラッド領域における空孔の断面積占有率を異ならせた、ことを特徴とする請求項10に記載の光ファイバ。

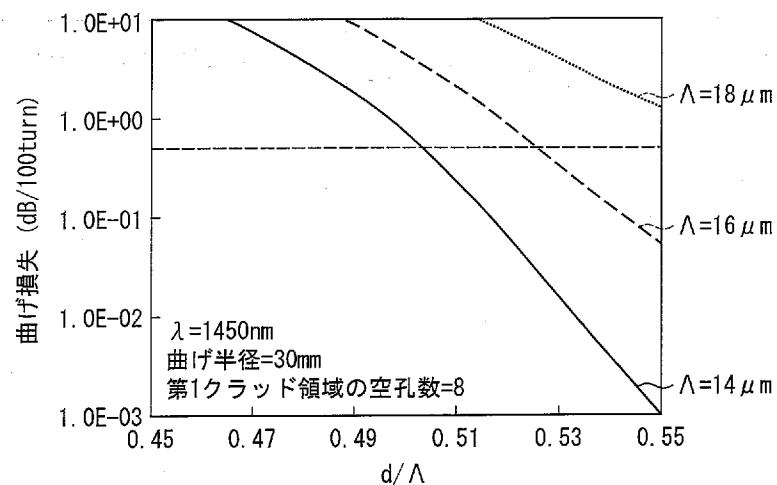
[図1]



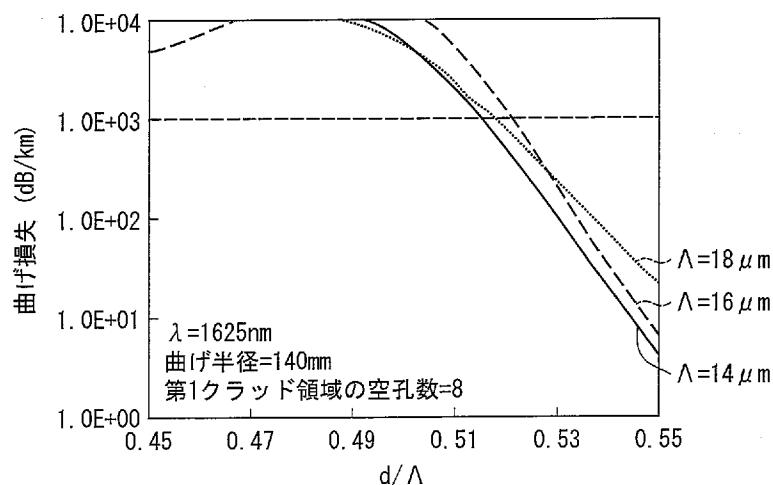
[図2]



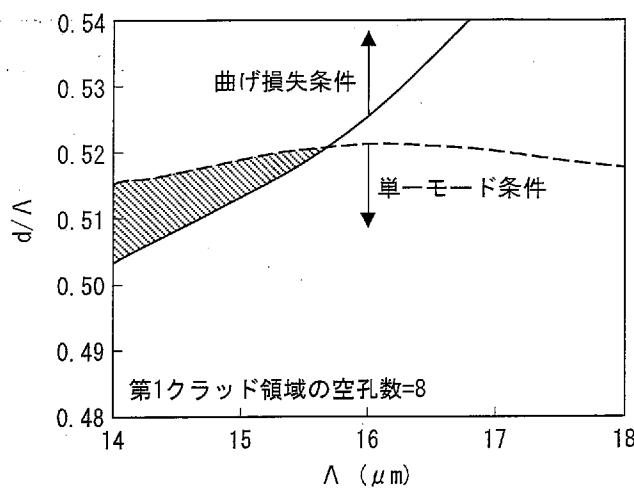
[図3]



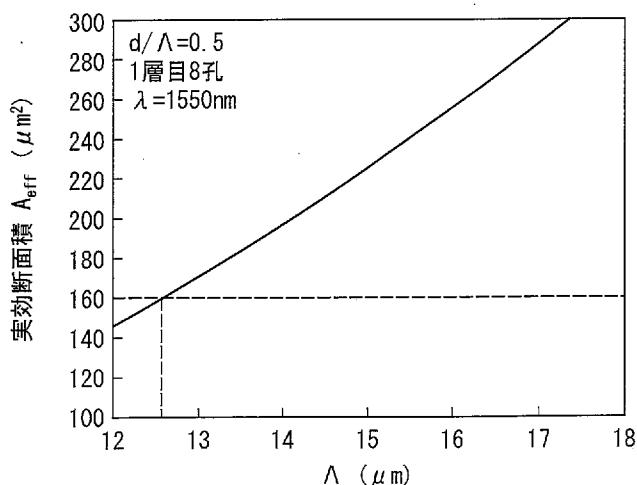
[図4]



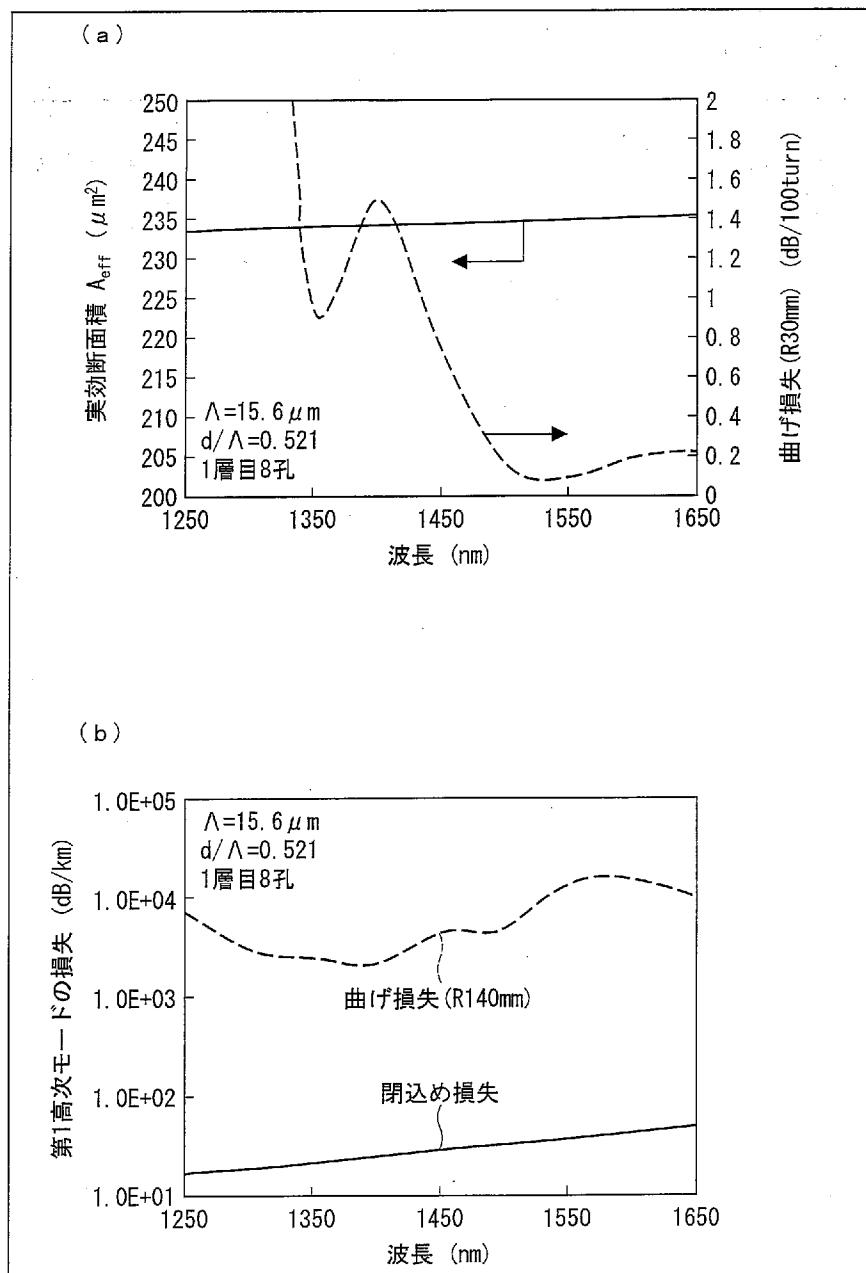
[図5]



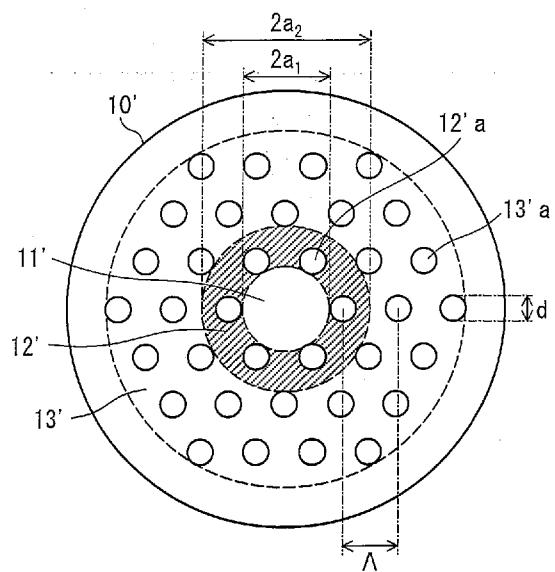
[図6]



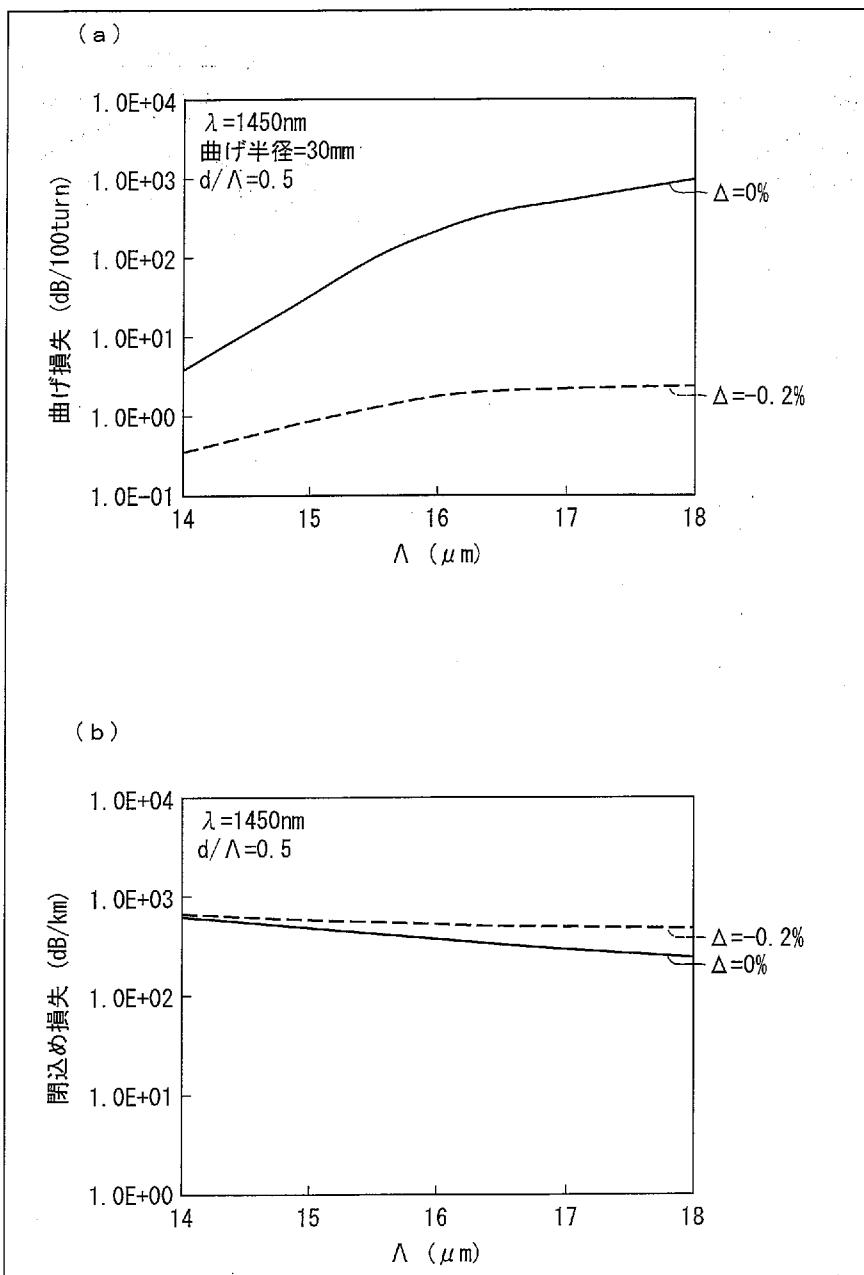
[図7]



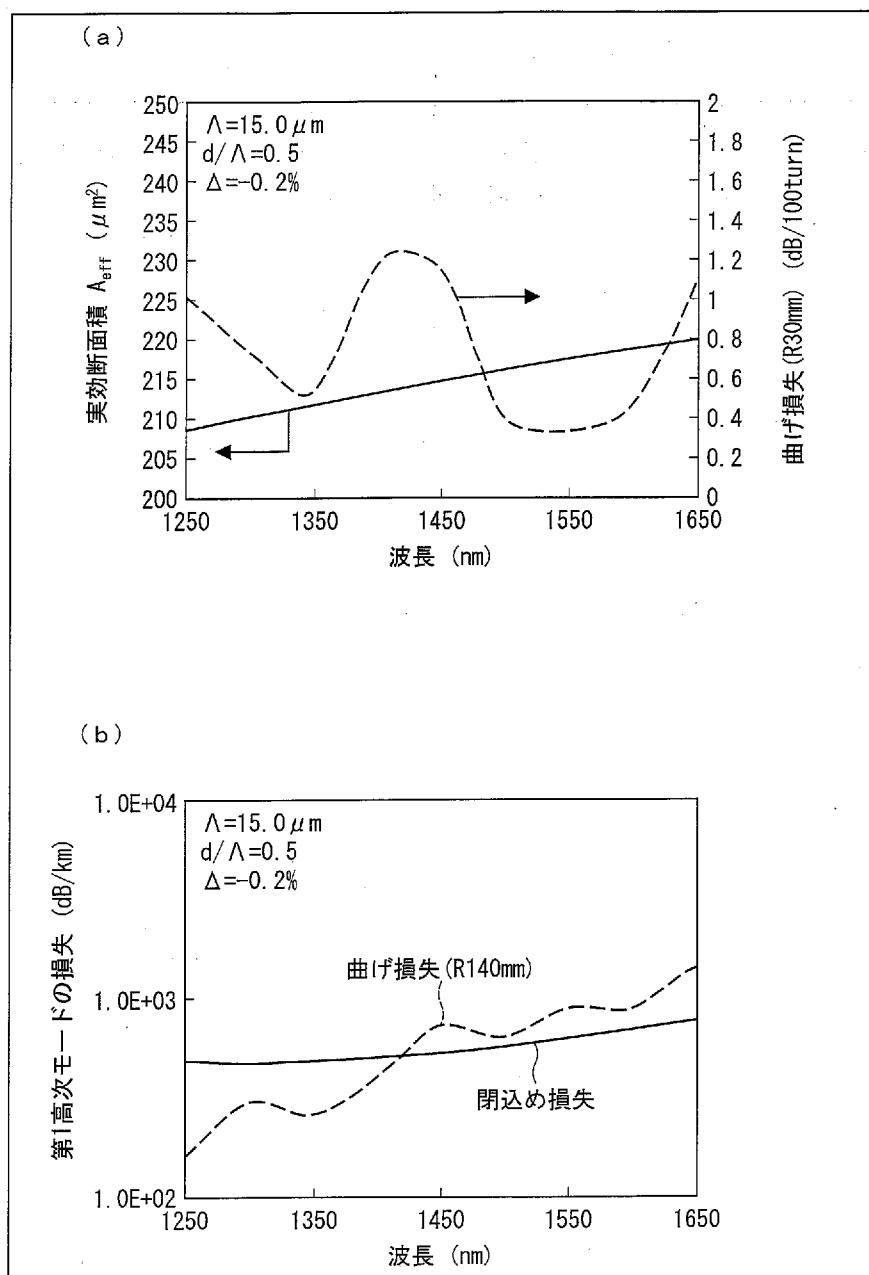
[図8]



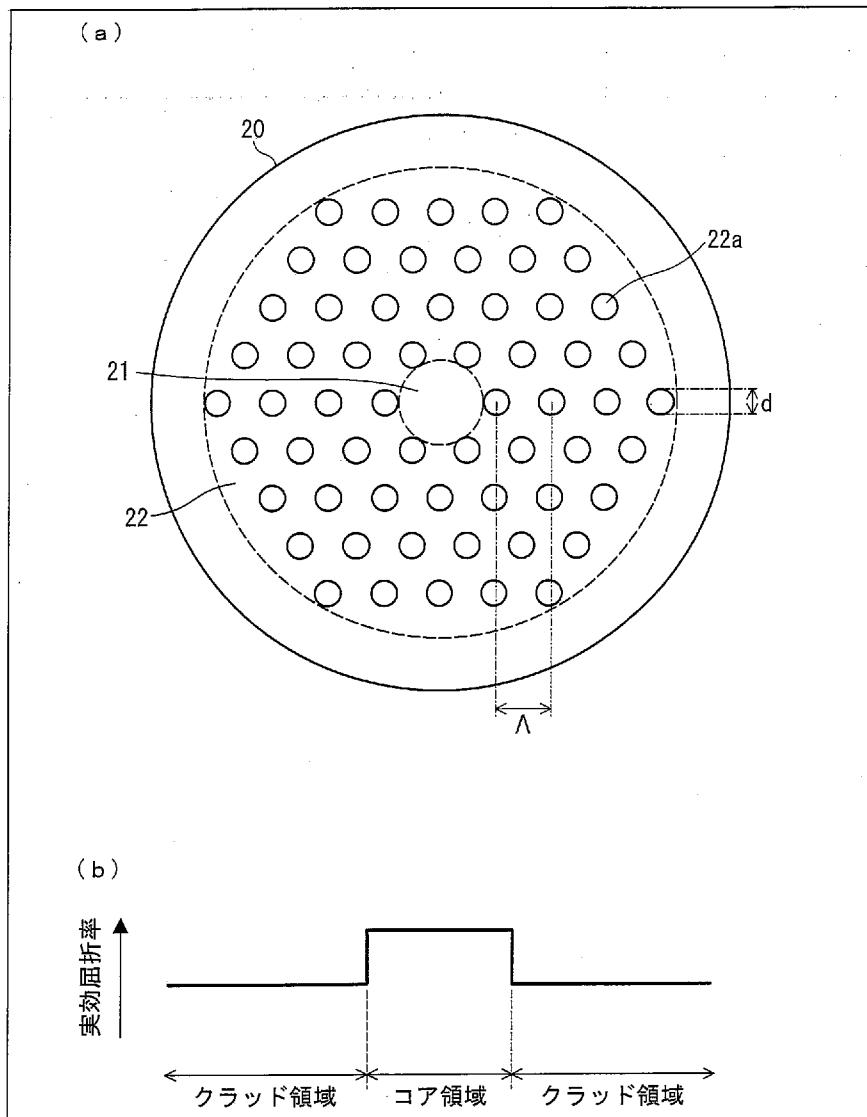
[図9]



[図10]



[図11]



**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.

PCT/JP2011/051524

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**
*G02B6/00 (2006.01) i, G02B6/032 (2006.01) i, G02B6/036 (2006.01) i*

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)  
*G02B6/00, G02B6/02-G02B6/036*

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

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2011
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2011	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2011

 Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)  
*Cinii, JST7580 (JDreamII), JSTPlus (JDreamII), IEEE Xplore*
**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	WO 01/063328 A1 (Sumitomo Electric Industries, Ltd.), 30 August 2001 (30.08.2001), page 8, line 3 to page 10, line 4; page 18, line 7 to page 19, line 9; fig. 1, 12A, 12B & US 2001/0028775 A1 & EP 1279978 A1	1-4, 10, 11 5-7, 9
Y	JP 2001-235649 A (Sumitomo Electric Industries, Ltd.), 31 August 2001 (31.08.2001), paragraphs [0037] to [0043] & US 2001/0031118 A1 & EP 1128195 A2	8

 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 application or patent 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

“&” document member of the same patent family

 Date of the actual completion of the international search  
 31 March, 2011 (31.03.11)

 Date of mailing of the international search report  
 12 April, 2011 (12.04.11)

 Name and mailing address of the ISA/  
 Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**International application No.  
PCT/JP2011/051524

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

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2008-310034 A (The Furukawa Electric Co., Ltd.), 25 December 2008 (25.12.2008), paragraphs [0033] to [0035]; fig. 1, 11 & US 2008/0310806 A1	1-11
Y	JP 2010-014893 A (The Furukawa Electric Co., Ltd.), 21 January 2010 (21.01.2010), fig. 3 & US 2010/0135628 A & WO 2010/001858 A1	5-7, 9

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**International application No.  
PCT/JP2011/051524**Box No. II Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of item 2 of first sheet)**

This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:

1.  Claims Nos.:  
because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:
  
2.  Claims Nos.:  
because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:
  
3.  Claims Nos.:  
because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).

**Box No. III Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 3 of first sheet)**

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:

The inventions in claims 1, 2, 10, 11 of the present application have already been described in the document 1 [WO 01/063328 A1 (page 8, line 3 – page 10, line 4, fig. 1)], and therefore, the matter to define the inventions set forth in claims 1, 2, 10, 11 do not make a contribution over the prior art, and consequently is not a special technical feature within the meaning of PCT Rule 13.2, second sentence.

Therefore, any technical relationship within the meaning of PCT Rule 13 cannot be found among the inventions in claims 1 – 11 of the present application.

Consequently, it is obvious that the inventions in claims 1 – 11 do not comply with the requirement of unity of invention.

1.  As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.
2.  As all searchable claims could be searched without effort justifying additional fees, this Authority did not invite payment of additional fees.
3.  As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:
  
4.  No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:

**Remark on Protest**

- The additional search fees were accompanied by the applicant's protest and, where applicable, the payment of a protest fee.
- The additional search fees were accompanied by the applicant's protest but the applicable protest fee was not paid within the time limit specified in the invitation.
- No protest accompanied the payment of additional search fees.

## A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G02B6/00(2006.01)i, G02B6/032(2006.01)i, G02B6/036(2006.01)i

## B. 調査を行った分野

## 調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G02B6/00, G02B6/02-G02B6/036

## 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2011年
日本国実用新案登録公報	1996-2011年
日本国登録実用新案公報	1994-2011年

## 国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

CiNii, JST7580(JDreamII), JSTPlus(JDreamII), IEEE Xplore

## C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X	WO 01/063328 A1 (住友電気工業株式会社) 2001.08.30, 第8頁第3行-第10頁第4行, 第18頁第7行-第19頁第9行, 図1, 図12A, 図12B	1-4, 10, 11
Y	& US 2001/0028775 A1 & EP 1279978 A1	5-7, 9
Y	JP 2001-235649 A (住友電気工業株式会社) 2001.08.31, 段落【0037】-【0043】& US 2001/0031118 A1 & EP 1128195 A2	8

 C欄の続きにも文献が列挙されている。 パテントファミリーに関する別紙を参照。

## \* 引用文献のカテゴリー

- 「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
- 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
- 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
- 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
- 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

## の日の後に公表された文献

- 「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
- 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
- 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
- 「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日 31.03.2011	国際調査報告の発送日 12.04.2011
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁（ISA/JP） 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	特許庁審査官（権限のある職員） 大石 敏弘 電話番号 03-3581-1101 内線 3294 <input type="checkbox"/> 2X <input type="checkbox"/> 3913

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	JP 2008-310034 A (古河電気工業株式会社) 2008. 12. 25, 段落【0033】 - 【0035】 , 【図1】 , 【図11】 & US 2008/0310806 A1	1-11
Y	JP 2010-014893 A (古河電気工業株式会社) 2010. 01. 21, 【図3】 & US 2010/0135628 A & WO 2010/001858 A1	5-7, 9

## 第II欄 請求の範囲の一部の調査ができないときの意見（第1ページの2の続き）

法第8条第3項（PCT17条(2)(a)）の規定により、この国際調査報告は次の理由により請求の範囲の一部について作成しなかった。

1.  請求項 \_\_\_\_\_ は、この国際調査機関が調査をすることを要しない対象に係るものである。  
つまり、

2.  請求項 \_\_\_\_\_ は、有意義な国際調査をすることができる程度まで所定の要件を満たしていない国際出願の部分に係るものである。つまり、

3.  請求項 \_\_\_\_\_ は、従属請求の範囲であってPCT規則6.4(a)の第2文及び第3文の規定に従って記載されていない。

## 第III欄 発明の单一性が欠如しているときの意見（第1ページの3の続き）

次に述べるようにこの国際出願に二以上の発明があるとこの国際調査機関は認めた。

本願請求項1, 2, 10, 11に係る発明は、既に、文献1[WO 01/063328 A1（第8頁第3行-第10頁第4行、図1)]に記載されているから、本願請求項1, 2, 10, 11に記載の発明特定事項は、先行技術の域を出す、従って、PCT規則13.2の第2文の意味における特別な技術的特徴でない。

従って、本願請求項1-11に係る発明の間にPCT規則13の意味における技術的な関連を見いだすことができない。

よって、本願請求項1-11に係る発明は、発明の单一性の要件を満たしていないことが明らかである。

1.  出願人が必要な追加調査手数料をすべて期間内に納付したので、この国際調査報告は、すべての調査可能な請求項について作成した。
2.  追加調査手数料を要求するまでもなく、すべての調査可能な請求項について調査することができたので、追加調査手数料の納付を求めなかった。
3.  出願人が必要な追加調査手数料を一部のみしか期間内に納付しなかったので、この国際調査報告は、手数料の納付のあった次の請求項のみについて作成した。
4.  出願人が必要な追加調査手数料を期間内に納付しなかったので、この国際調査報告は、請求の範囲の最初に記載されている発明に係る次の請求項について作成した。

## 追加調査手数料の異議の申立てに関する注意

- 追加調査手数料及び、該当する場合には、異議申立て手数料の納付と共に、出願人から異議申立てがあった。
- 追加調査手数料の納付と共に出願人から異議申立てがあったが、異議申立て手数料が納付命令書に示した期間内に支払われなかった。
- 追加調査手数料の納付はあったが、異議申立てはなかった。