(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
2005 年2 月24 日 (24.02.2005)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2005/017582 A1

(51) 国際特許分類[7]: G02B 6/00, G02F 1/365

(21) 国際出願番号: PCT/JP2004/011625

(22) 国際出願日: 2004 年8 月12 日 (12.08.2004)

(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2003-293141	2003 年8 月13 日 (13.08.2003)	JP
特願2004-045500	2004 年2 月20 日 (20.02.2004)	JP
特願2004-202954	2004 年7 月9 日 (09.07.2004)	JP
特願2004-207728	2004 年7 月14 日 (14.07.2004)	JP

(71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 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２丁目３－１ Tokyo (JP).

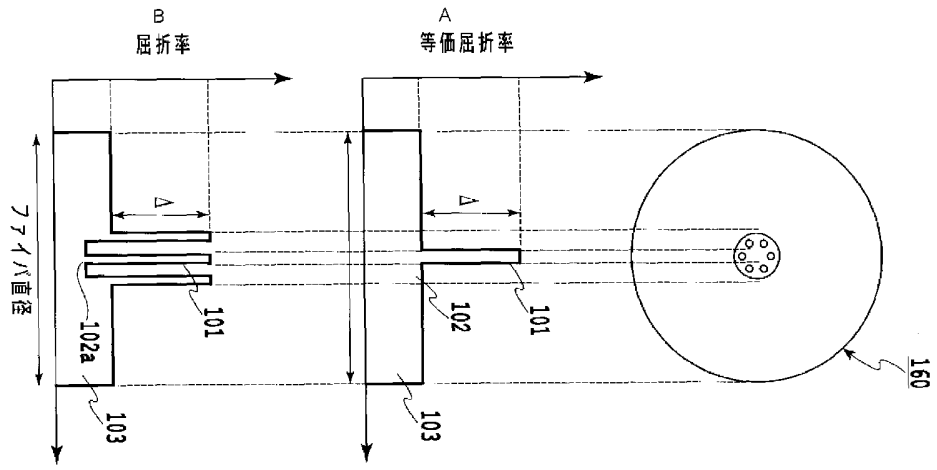
(72) 発明者; および

(75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 森 淳 (MORI, Atsushi) [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). 加藤 正夫 (KATO, Masao) [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). 圓佛 晃次 (ENBUTSU, Kouji) [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). 青笹 真一 (AOZASA, Shinichi) [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). 及川

[続葉有]

(54) Title: OPTICAL FIBER AND PRODUCTION METHOD THEREOF

(54) 発明の名称: 光ファイバおよびその製造方法



A...EQUIVALENT REFRACTIVE INDEX
B...REFRACTIVE INDEX
C...FIBER DIAMETER

(57) Abstract: An optical fiber using tellurite glass having a zero material dispersion wavelength of at least 2 μm, a non-linear sensitive rate X^3 of as high as at least 1×10^{-12} esu, and a heat stability sufficient to be processed into a low-loss fiber, wherein a PCF structure or an HF structure having a strong confinement to a core area is employed, thereby enabling light to be wave-guided at a low loss. A zero dispersion wavelength is controlled to within a communication wavelength band (1.2-1.7 μm) by the size and shape of a hole formed in the core area and by the interval between adjacent holes, and a large non-linearity having a non-linearity constant γ of at least 500 $W^{-1}k^{-1}$ is provided.

(57) 要約: 零材料分散波長が２μｍ以上であり、非線形感受率χ３が１ｘ１０－１２ｅｓｕ以上と高く、低損失ファイバに加工するのに十分な熱安定性を有するテルライトガラスを用いた光フ

[続葉有]

WO 2005/017582 A1

喜良 (OIKAWA, Kiyoshi) [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). 栗原 隆 (KURIHARA, 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). 藤浦 和夫 (FUJIURA, Kazuo) [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). 清水 誠 (SHIMIZU, Makoto) [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). 鹿野 弘二 (SHIKANO, Kouji) [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: 谷 義一 (TANI, Yoshikazu); 〒1070052 東京都港区赤坂２丁目６－２０ Tokyo (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, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, 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, 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 (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:
— 国際調査報告書

２文字コード及び他の略語については、定期発行される各*PCT*ガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

ァイバにおいて、コア領域への閉じ込めの強いＰＣＦ構造またはＨＦ構造を採用した。これにより光が低損失で導波しうる。コア領域に設けた空孔の大きさおよび形状、ならびに隣接した空孔同士の間隔により、零分散波長を通信波長帯（１．２～１．７μｍ）内に制御すると共に、非線形定数γが５００$W^{-1}km^{-1}$以上の大きな非線形性を持つ。

明 細 書

光ファイバおよびその製造方法

技術分野

[0001] 本発明は、通信波長帯に零分散波長が制御された高非線形性を有するテルライトガラス製の光ファイバおよびその製造方法に関する。さらに詳しくは、本発明は、テルライトガラスファイバの屈折率、構造、材料を設計することにより、光通信波長帯である1．2ー1．7μm帯の零分散波長を有する光ファイバ及びその製造方法に関する。

背景技術

[0002] 近年、インターネットの急速な普及に起因する爆発的な通信需要の増加と、光通信システムの低コスト化の要求により、光通信システムの大容量化の検討がなされている。従来、大容量化の手段として検討されてきた時分割多重伝送方式に加えて、1本の光ファイバに複数の異なる波長の信号光を多重して伝送する波長分割多重(WDM:Wavelength Division Multiplexing)伝送方式が開発され、加速度的に普及している。WDM伝送方式は、変調方式の異なる信号を合波することも、また新たな波長を用いてシステムの増設を行なうこともできるので、より柔軟な光通信システムを構築することができる。

[0003] WDM伝送方式のネットワークを、さらに柔軟に拡張・高機能化するためには、波長変換素子、高速光スイッチ、スーパーコンティニューム光源等の機能性光デバイスが、必要不可欠となる。これらの機能性光デバイスの開発において、光ファイバ中の非線形光学効果を利用した非線形光デバイスの検討が積極的に行なわれている。

[0004] 光ファイバ中の非線形光学効果の発生量は、非線形光学定数γに比例する。非線形光学定数γは、有効コア断面積A_{eff}および非線形屈折率n_2との間に、

$$\gamma \propto n_2 / A_{eff}$$

の関係がある。従って、大きな非線形性を得るためには、大きい非線形屈折率n_2を有した光学材料を用い、かつA_{eff}を小さくすることが必要となる。ここで、有効コア断面積A_{eff}は、下式で与えられる(例えば、非特許文献1を参照)。

[0005] [数1]

$$A_{eff} = \frac{\left(\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |F(x,y)|^2 \, dxdy \right)^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |F(x,y)|^4 \, dxdy}$$

[0006] 現在報告されている石英ガラスを用いた非線形光ファイバの多くは、非線形性を高めるため、コアにゲルマニウム等を添加して石英ガラス自体の非線形屈折率を高めること、また、クラッドにフッ素を添加し、比屈折率差を高めることにより有効コア断面積の狭面積化を図ること、を行なっている。さらに、光通信の波長帯域において、非線形効果を高効率に発生させるためには、位相整合条件を満足するように、光ファイバの零分散波長を1．2μmー1．7μmにしなければならない。

[0007] しかしながら、石英ファイバの場合、零材料分散波長はおよそ1．2μmであり、添加物によってこの零材料分散波長を大きくシフトさせることは難しい。そこで、光ファイバの構造パラメータを最適化することにより、1．55μm帯での波長分散値を零に近づけるという手法がとられている（例えば、非特許文献2を参照）。

[0008] 一方、現在フォトニッククリスタルファイバ（photonic crystal fiber）（以下、PCFと略す）、或いはホーリーファイバ（holey fiber）（以下、HFと略す）と呼ばれる、主として石英ガラスを用い、石英ファイバ内部の長手方向に意図的に空孔（air hole）を多数形成した光ファイバが報告されている（例えば、非特許文献3を参照）。

[0009] 上記のような空孔を形成したファイバ構造を用いることにより、従来のコア・クラッド構造を有する光ファイバでは実現できない様々な特性を付与することができ、非線形性の高い光ファイバへの応用が期待されている。

[0010] しかし、零分散波長が1．2μmー1．7μmであり、かつ高い非線形性を有する石英系PCF、あるいはHFはいまだに実現されていない。また、石英ガラスは透明性に優れるものの、非線形性はさほど大きくないので、非線形光学効果に必要な相互作用長を確保するため、相互作用長を長くとることが行われている。例えば、ファイバ長が数100mに及ぶ長尺の光ファイバを用いる場合である。そこで、より高い非線形性を有する光学材料を用いて、より高効率かつよりコンパクトな非線形光デバイスの実現が待望されてきた。

[0011] 一方、近年、テルライトEDFA(Erbium-Doped Fiber Amplifier、エルビウム添加光ファイバ増幅器)を光通信分野に応用するための技術開発が進められている。テルライトとは、TeO_2を主成分とするテルライト系ガラスである。テルライトEDFAは、テルライト系ガラスにエルビウムを添加してなるテルライト製エルビウム添加光ファイバからなり、この光ファイバ内を数十m導波させることにより光を増幅させる増幅器である。このテルライトEDFAを用いると、従来の石英系EDFAやフッ化物EDFAにより増幅することができる1．53μmから1．56μmまでの波長帯域よりも2倍以上広い1．53μmから1．61μmまでの波長帯域を一括で増幅することができるようになる(非特許文献1を参照)。さらに、このテルライトEDFAを用いることにより、1．6μm帯の波長での増幅器を製造することができるようになる(非特許文献4を参照)。従って、テルライトEDFAは、将来の超大容量WDMシステム用EDFAとして注目されている。

[0012] 図1に示すように、従来のテルライトガラスからなる光増幅器用の光ファイバ4の断面は、中心に円形状のコア1と、その周りを同心円状に覆うクラッド2と、さらにその周りを同心円状に覆うジャケット3とからなる。図2には、この光ファイバ4の屈折率分布を示す。ここで、コア1の屈折率とクラッド2の屈折率との差をΔ1とし、コア1の屈折率とジャケット3の屈折率との差をΔ3とし、クラッド2の屈折率とジャケット3の屈折率の差をΔ2とすると、Δ1はΔ2よりもはるかに大きいので、コア1に光が強く閉じ込められる。

[0013] このような光ファイバ4では、コア1に添加物などを加えて、コア1の屈折率がクラッド2の屈折率よりも十分に大きくなっている。そのため、コア1とクラッド2との界面で光が全反射して、コア1の中を光が伝搬する。また、コア1の屈折率およびコア1の直径を変化させることにより、ある程度分散を制御することができる。しかし、コア1の直径を大きくすると、単一モード条件が満たされなくなり、複数のモードが存在する多モード光ファイバとなって、伝送特性が劣化してしまう。逆に、コア1の直径を小さくすると他のデバイスとの接続の整合が取れなくなってしまう。以上のような理由から、従来のテルライトガラスからなる光ファイバでは、分散の制御範囲を広く取ることができない。

[0014] ところで、テルライトガラスの3次非線形性が大きいため(非特許文献5を参照)、パルス圧縮、光パラメトリック増幅(OPA:Optical Parametric Amplification)、第3高調

波発生(THG:Third Harmonic Generation)などにテルライトガラスを応用することが期待されている。なお、テルライトガラスの材料分散値が零となる波長は2μmよりも長波長帯に位置する。

[0015] ここで、光増幅器用に使用する高NA(Numerical Aperture:開口数)ファイバの1.55μm帯における波長分散値は、通常、−100ps/km/nm程度の値である。そのため、光ファイバを10m程度の短尺で用いたときでも、波長分散値は−1ps/nm程度の大きな値となってしまう。

[0016] また、光ファイバを長距離で使用したり、高速波長多重伝送で使用したりするためには、この光ファイバの波長分散値をできるだけ零に近づける必要がある。ところが、テルライトガラスからなる光ファイバの零分散の波長は、上記のように、2μm以上の波長帯であり、そのため石英ファイバで用いられる周知の構造分散による最適化の手法を用いても、テルライトガラスからなる光ファイバでは、1.55μm帯で波長分散値が零にならない。

[0017] このため、テルライトガラスが有する高い非線形性を利用して、現在の光ファイバ通信波長帯で上述した応用を実現することは困難であった。

[0018] 前述のPCF(或いはHF)は、導波原理により2つに分類される。その一つはフォトニックバンドギャップにより光が閉じ込められるフォトニックバンドギャップ型PCFである。このPCFは、周期的な空孔配置と均一な空孔サイズとを有する構造を有する。もう一つは空孔を有した媒質の実効的な屈折率から得られる全反射により光を閉じ込める屈折率導波型PCFである。この屈折率導波型PCFは、周期的な空孔配置と均一な空孔サイズとを必ずしも有しない構造のものである。

[0019] このようなPCFあるいはHFでは、従来の光ファイバに比べて一桁以上、屈折率差を大きくでき、大きな構造分散を得ることができる。この構造分散により、石英からなるPCFあるいはHFでは、零分散波長が短波長側にシフトする。M.J.Ganderらは非特許文献6において、空孔を設けないコア部分と、空孔を六角形に配列したクラッド部分とを具えた石英ガラスから成る光ファイバの分散特性を実験により測定し、その結果を開示した。この文献によれば、813nm帯における分散値は約−77ps/km/nmであった。また、Birksらは非特許文献7において、単一材料からなる光ファイバで

ある、PCFの分散を算出して、PCFの分散補償の効果を唱えている。このように、PCF構造あるはいHF構造は、テルライトガラスを用いた光ファイバの分散補償方法の一つとして期待されている。

[0020] N.G.R. Broderickらは、特許文献1において、多成分ガラスを用いて、PCF構造あるいはHF構造を形成したファイバについて開示した。この文献によれば多成分ガラスの例としてテルライトガラスの記述があり、その成分としてNa_2O、Li_2O、Al_2O_3、CaO、Ga_2O_3、GeO_2、As_2O_3、SrO_2、Y_2O_3、Sb_2O_5、In_2O_3、ZnO、BaO、La_2O_3、TeO_2、TiO_2から選んだ組成であることが示されている。しかしながら、特許文献1には、これらのガラスに対する熱安定性、非線形特性やテルライトファイバの分散に関する記述は見られない。

[0021] E.S.Huらは、非特許文献8において、テルライトガラスを用いて、PCF構造あるいはHF構造を設計し、零分散波長を1．55μmにシフトさせたファイバについて開示した。この文献によれば、零材料分散波長が1．7μmであるテルライトガラスを用いて3つの異なるPCF構造あるいはHF構造を形成し、それぞれの構造において零分散波長を1．55μmにシフト可能なことが示されている。しかしながら、非特許文献8に開示されているファイバでは、用いているテルライトガラスの非線形感受率が低く、しかも零材料分散波長が1．7μmであるため、コア領域への光閉じ込めが不十分であり、そのため十分大きな非線形性を得ることができない（報告された非線形定数γは最大で260$W^{-1}km^{-1}$であった）。

[0022] テルライトガラスは大きい3次の非線形性を有しているため、この高非線形性を有するテルライトガラスからなる光ファイバを利用したシステムが検討されている。例えば、図3に示すように、テルライトガラスからなるコア5及びクラッド6で光ファイバ8を構成することにより、ラマン増幅器などのような光増幅用に利用することが提案されている（例えば、非特許文献9を参照）。

[0023] また、テルライトEDFAにおける長波長側の利得の得られる限界は、石英系EDFAやフッ化物EDFAに比べて、7ー9nm広がっている。このため、従来利用できなかった1．6μm帯の波長における増幅器を実現することができる（例えば、非特許文献4を参照）。従って、テルライトEDFAは、将来の超大容量WDM伝送システムにおけ

るEDFAとして注目されている。

[0024] テルライトガラスを用いたファイバは、これまでEr^{3+}添加ファイバ増幅器やラマン増幅器に応用され、広帯域増幅を実現している(非特許文献1、非特許文献8を参照)。テルライトガラスは、石英ガラスと比べて10倍以上の大きな非線形光学効果を有すると同時に、ラマン増幅器への応用の際には、損失が20dB／kmの低損失ファイバを実現している。このようにテルライトガラスは、広帯域光増幅特性および高い透明性を有している。加えて、大きい光非線形感受率χ^{3}を有している(例えば、非特許文献5を参照)。従って、これまでにないコンパクトで高効率な非線形デバイスが期待できる。

[0025] しかしながら、テルライトガラス製の光ファイバは、材料分散が零となる波長が2μmよりも長波長帯に位置するため、通信波長帯である1．55μm帯信号光とポンプ光との位相整合条件を満足させることが難しく、より積極的に非線形性を利用することが困難となっている。例えば、光増幅器用に使用するテルライトガラス製の光ファイバは、波長1.55μmにおいて、波長分散値は−100ps／km／nm程度である。

[0026] また、分散シフト光ファイバや分散補償光ファイバのように、従来の光ファイバの構造を適用することにより、コアとクラッドとの比屈折率差を高くして分散を制御しようとしても、テルライトガラス製の光ファイバでは、零分散波長がさらに長波長側にシフトしてしまう。このため、テルライトガラス製の光ファイバは、通信波長帯である1．55μm帯での零分散を実現することが極めて困難であり、高い非線形性を有するテルライトガラスからなる光ファイバを利用した通信システムを実現することができなかった。

[0027] 作製方法に関しては、石英系ガラス以外の酸化物ガラスからなるフォトニッククリスタルファイバまたはホーリーファイバの作製方法として、押し出し法が報告されている(非特許文献10、非特許文献11を参照)。この押し出し法では、作製したバルクガラス(bulk glass)を、変形可能な粘度になるまで高温に加熱し、型に押し込んで押し出すことにより、空孔を有する母材を作製する。押し出し法は、ガラスが長い時間高温に保持され、さらに変形されるため、ガラス中に結晶核が成長しやすく、低損失なファイバを作製することが難しい。そのため、非特許文献10、非特許文献11に記載されたファイバの損失値は、いずれも1000dB／kmを超え、実用的なデバイスとして使用

できる損失を有するファイバは得られていない。

[0028] 特許文献1:EP1313676, US 2003/0161599 “Holy optical fiber of non-silica based glass” Southampton University

特許文献2:特開2003−149464号公報

特許文献3:特開2000−356719号公報

非特許文献1:A.Mori, Y.Ohishi, M.Yamada, H.Ono, Y.Nishida, K.Oikawa, and S.Sudo, “1.5 μ m broadband amplification by tellurite-based DFAs,”in OFC’97, 1997, Paper PD1.

非特許文献2:川上彰二郎、白石和男、大橋正治著、「光ファイバとファイバ型デバイス」、培風館、p97

非特許文献3:A.Bjarklev, et al., “Photo Crystal Fibers The State of The Art”, Holy fibers Symposium vol.1.1, ECOC2002

非特許文献4:A.Mori, Y.Ohishi, M.Yamada, H.Ono and S.Sudo,“Broadband amplification characteristics of tellurite-based EDFAs,” inECOC’97, vol.3, 1997, Paper We2C.4, pp.135-138

非特許文献5:S.Kim T.Yoko and S Sakka, “Linear and Nonlinear Optical Properties of TeO2Glass”, J. Am. Ceram. Soc., Vol.76, No.10, pp.2486-2490, 1993

非特許文献6:M.J.Gander, R.McBride, J.D.C.Jones, D.Mogilevtsev,T.A.Birks, J.C.Knigth, and P.St.J.Russell,“Experimantal measurement of group velocity dispersion in photonic crystal fibre,”Electron.Lett.,Jan.1999, vol.35, no.1, pp.63-64

非特許文献7:T.A.Birks, D.Mogilevtsev, J.C.Knight, P.St.J.Russell,“Dispersion compensation using single-material fibers”Opt.Lett.22,1997,pp.961-963

非特許文献8:ECOC2002 Nonlinerity-Parametric Amplifiers 3.2.3 泥esign of Highly-Nonlinear tellurite fibers with Zero Dispersion Near 1550 nm・Stanford University

非特許文献9:″Journal of Lightwave Technology″,2003,Vol.21,No.5,p.1300-1306

非特許文献10:P.Petropoulos, et al., “Soliton-self-frequency-shift effects and pulse compression in an anomalously dispersive high nonlinearity lead silicate holy fiber”,

PD3-1, OFC2003

非特許文献11:V.V.Ravi Kanth Kunth, et al., "Tellurite glass photonic crystal fiber" PD3 ECOC2003

非特許文献12:Gorachand Ghosh, "Sellmeier Coefficients and Chromatic Dispersiond for Some Tellurite Glasses", J. Am. Soc., 78(10) 2828-2830, 1995

非特許文献13:"Photonics Technology Letters",1999,Vol.11,No.6,p.674-676

非特許文献14:A.Mori, et al., "Ultra-wideband tellurite-Based Raman fibre amplifier", Electronics Letter vol.37, No.24, pp.1442-1443, 2001

非特許文献15:Govind P.Agrawal, "Nolinear Fiber Optics", 2nd edition, Academic Press, pp.42-43

発明の開示

発明が解決しようとする課題

[0029] 本発明は、従来技術における上述のような課題に鑑みてなされたもので、その第1の目的は、材料分散の影響を避けることができ、且つ非線形性を利用した光信号処理などに大きな効果をもたらし、通信波長帯での広帯域な零分散を実現できる、高非線形を有するテルライトガラスからなる光ファイバを提供することにある。

[0030] 本発明の第2の目的は、通信波長帯である1．2ー1．7μm帯に零分散波長が制御され、テルライトガラスを用いた低損失で高効率の光ファイバの製造方法を提供することにある。

課題を解決するための手段

[0031] 一般にガラスの非線形感受率は、その値が高くなるほど零材料分散波長が長波長へシフトする。その零分散波長をPCF構造あるいはHF構造の強い閉じ込めにより、通信波長帯へシフトさせる手法は、非線形ファイバ応用として効果的である。

[0032] 本発明者らは、零材料分散波長が2μm以上であり、非線形感受率χ^{3}が$1x10^{-12}$esu以上と高く、低損失ファイバに加工するのに十分な熱安定性を有するテルライトガラスを用いた光ファイバにおいて、コア領域への閉じ込めの強いPCF構造またはHF構造を採用することにより、従来技術による上述した課題を解決できることを示した。すなわち、光が低損失で導波しうることを見出し、空孔の大きさおよび形状、なら

びに隣接した空孔同士の間隔により零分散波長を通信波長帯（1．2ー1．7μm）内へ制御すると共に、非線形定数γが500$W^{-1}km^{-1}$以上の大きな非線形性を持つことができることを見出した。

[0033] 上記第1の目的を達成するため、本発明の第1態様に係る光ファイバは、光ファイバ通信または光デバイスで用いる光を伝搬する光ファイバであって、光ファイバの少なくともコア領域が2μm以上の零材料分散波長を持つテルライトガラスからなり、その光ファイバの中心に光を閉じ込めるようにその光ファイバ内に空孔を配列することにより、零分散波長を1．2ー1．7μm帯に制御する。

[0034] ここで、好ましくは、光の波長をλ、円周率をπとしたとき、光ファイバの中心にπλ^2の0．1倍から5倍の面積を有する領域を設け、その領域を除くその光ファイバの断面における全域あるいはその領域を囲む位置に空孔を配列したことにより、その領域が光を閉じ込めるコアとなる。

[0035] また、好ましくは、2μm以上の零材料分散波長を持つテルライトガラスであり、TeO_2－Bi_2O_3－LO－M_2O－N_2O_3－Q_2O_5からなる組成（LはZn、Ba、Mgのうち少なくとも1種類以上、MはLi、Na、K、Rb、Csのうち少なくとも一種類以上のアルカリ元素、NはB、La、Ga、Al、Yのうち少なくとも一種類以上、QはP、Nbのうち少なくとも一種類以上）を持ち、その成分が

$50 < TeO_2 < 90$ （モル%）

$1 < Bi_2O_3 < 30$ （モル%）

$1 < LO + M_2O + N_2O_3 + Q_2O_5 < 50$ （モル%）

である。

[0036] また、好ましくは、テルライト材料ガラスに希土類イオンとしてCe^{3+}、Pr^{3+}、Nd^{3+}、Pm^{3+}、Sm^{3+}、Eu^{3+}、Tb^{3+}、Dy^{3+}、Ho^{3+}、Er^{3+}、Tm^{3+}、Yb^{3+}の内から選ばれた少なくとも一種を添加する。

[0037] 上記第1の目的を達成するため、本発明の第2態様に係る光ファイバは、テルライトガラスからなる光ファイバであって、コア領域と、コア領域を包囲するように配設されて、当該コア領域の軸方向に沿った空孔を当該コア領域の周方向にわたって複数有する第1のクラッド部と、第1のクラッド部を包囲するように配設されて、当該第1のクラ

ッド部の等価屈折率と略等しい屈折率を有する第2のクラッド部とを備える。

[0038] また、好ましくは、第1のクラッド部の空孔が、コア領域の周方向に沿って一定の間隔で複数形成されている。また、好ましくは、第1のクラッド部の空孔が、当該第1クラッド部の半径方向にわたって複数形成されている。また、好ましくは、第1のクラッド部の空孔内部が、第2クラッド部の屈折率よりも低い屈折率を有する材料で充填されている。また、好ましくは、コア領域の屈折率が、第1クラッド部の材料の屈折率よりも高い。また、好ましくは、コアとなる中心部に、テルライトガラスの屈折率と異なる屈折率を有するテルライトガラスが埋め込まれている。

[0039] また、好ましくは、コア領域と第1クラッド部との比屈折率差が2%以上である。

[0040] また、好ましくは、コアとなる領域の中心部に、空孔が設けられている。

[0041] また、好ましくは、コアとなる領域以外に形成された空孔を三角格子状または四角格子状またはハニカム形状のいずれかの形状に配列している。また、好ましくは、その空孔が円柱または楕円柱または多角柱いずれかの形状からなる。

[0042] また、好ましくは、コアとなる領域以外に形成された空孔の数が3個であり、コアとなる領域の直径が0．6ー6．5μmである。また、好ましくは、その空孔の数が4個であり、コアとなる領域の直径が0．6ー5μmである。

[0043] 上記第2の目的を達成するため、本発明の第3態様に係る光ファイバの製造方法は、光ファイバが2μm以上の零材料分散波長を持つテルライトガラスであり、TeO_2 $-Bi_2O_3-LO-M_2O-N_2O_3-Q_2O_5$からなる組成（LはZn、Ba、Mgのうち少なくとも1種類以上、MはLi、Na、K、Rb、Csのうち少なくとも一種類以上のアルカリ元素、NはB、La、Ga、Al、Yのうち少なくとも一種類以上、QはP、Nbのうち少なくとも一種類以上）を持ち、その成分が

$50 < TeO_2 < 90$ （モル%）

$1 < Bi_2O_3 < 30$ （モル%）

$1 < LO + M_2O + N_2O_3 + Q_2O_5 < 50$ （モル%）

であるテルライトガラス（以下、本発明で特定されたテルライトガラスと称する）を少なくともコア材料とし、内壁の内側に凸となる部分を複数形成されたモールドに、テルライトガラス融液を注入成型して母材を作製する第1工程と、その第1工程で作製された

ガラス母材を、テルライトガラスからなる円筒状のジャケット管に挿入し、ガラス母材とジャケット管との隙間の空孔を維持又は拡大するように加圧線引きする第2工程とを備えている。

[0044] 上記第2の目的を達成するため、本発明の第4態様に係る光ファイバの製造方法は、光ファイバが本発明で特定された上記のテルライトガラスを少なくともコア材料とし、内壁の内側に凸となる部分を複数形成され、内壁が底部に向かって円錐状に拡大加工されたモールドに、テルライトガラス融液を注入成型して母材を作製する第1工程と、さらにテルライトガラスからなるコアガラスのガラス融液を注入し、クラッドガラスの体積収縮によりコアガラスを円錐状に吸い込み成型したガラス母材を作製する第2工程と、第2工程で作製されたガラス母材を、テルライトガラスからなる円筒状のジャケット管に挿入し、ガラス母材とジャケット管との隙間の空孔を維持又は拡大するように加圧線引きする第3工程とを備えている。

[0045] 上記第2の目的を達成するため、本発明の第5態様に係る光ファイバの製造方法は、光ファイバ本発明で特定された上記のテルライトガラスを少なくともコア材料とし、内壁の内側に凸となる部分を複数形成され、内壁が底部に向かって円錐状に拡大加工され、底部に穴を有するモールドに、テルライトガラス融液を注入成型して母材を作製する第1工程と、さらにテルライトガラスからなるコアガラスのガラス融液を注入し、クラッドガラスの体積収縮と、穴からクラッドガラスが流れ出すことによりコアガラスを円錐状に吸い込み成型したガラス母材を作製する第2工程と、第2工程で作製されたガラス母材を、テルライトガラスからなる円筒状のジャケット管に挿入し、ガラス母材とジャケット管との隙間の空孔を維持又は拡大するように加圧線引きする第3工程とを備えている。ここで、好ましくは、その第2工程は、穴から真空脱気を行って、クラッドガラスが流れ出すようにしている。

[0046] 上記第2の目的を達成するため、本発明の第6態様に係る光ファイバの製造方法は、光ファイバが本発明で特定された上記のテルライトガラスを少なくともコア材料とし、テルライトガラスからなるガラス融液をモールドに注入成型して円柱状のガラスブロックを作製する第1工程と、その第1工程で作製されたガラスブロックの長手方向に穴あけ加工して、空孔が形成されたガラス母材を作製する第2工程と、第2工程で作

製されたガラス母材を、テルライトガラスからなる円筒状のジャケット管に挿入し、空孔を維持又は拡大するように加圧線引きする第3工程を備えている。

[0047] 上記第2の目的を達成するため、本発明の第7態様に係る光ファイバの製造方法は、光ファイバが本発明で特定された上記のテルライトガラスを少なくともコア材料とし、テルライトガラスからなるガラス融液を、基台から円柱棒状のピンが複数内側に整列した冶具を底面に有するモールドに注入し、冶具を引き抜くことにより空孔を形成された母材を作製する第1工程と、第1工程で作製されたガラス母材を、テルライトガラスからなる円筒状のジャケット管に挿入し、空孔を維持又は拡大するように加圧線引きする第2工程とを備えている。

発明の効果

[0048] 本発明の第1の態様にかかる光ファイバによれば、光ファイバ通信または光デバイスで用いる光を伝搬する光ファイバであって、この光ファイバの少なくともコア領域が2μm以上の零材料分散波長を持つ高非線形性テルライトガラスからなり、光ファイバの中心に光を閉じ込めるように光ファイバ内に空孔を配列することにより、コア領域に光が伝搬し、構造分散により零材料分散波長を1．2ー1．7μm帯に制御することができると共に、高い非線形定数を得ることができる。従って、コンパクトで高効率な非線形デバイスである光ファイバを提供することが可能となる。

[0049] ここで、光の波長をλ、円周率をπとしたとき、上記光ファイバの中心$\pi\lambda^2$の0．1倍から5倍の面積を有する領域を設け、領域を除く光ファイバの断面における全域あるいは領域を囲む位置に上記の空孔を配列することにより、この領域からなるコアに光が閉じ込められ、光ファイバのコア内を光が伝搬する。したがって、効果的に高次モードを抑制することができる。

[0050] また、テルライトガラスの組成を適切に選択することにより、ファイバ化加工に対して十分熱的に安定であり、非線形定数が高く、低損失なファイバを作製することができる。このうちTeO_2とBi_2O_3は、高非線形性を付与するための必須成分であるが、

$50 < TeO_2 < 90$（モル%）

$1 < Bi_2O_3 < 30$（モル%）

の範囲を逸脱すると熱的に安定で透過特性の良いガラスを得ることができない。その

他の成分はガラスを熱的に安定にし、粘性を下げて加工しやすくするために添加する。

[0051] また、テルライトガラス材料に希土類イオンとしてCe^{3+}、Pr^{3+}、Nd^{3+}、Pm^{3+}、Sm^{3+}、Eu^{3+}、Tb^{3+}、Dy^{3+}、Ho^{3+}、Er^{3+}、Tm^{3+}、Yb^{3+}のうち少なくとも1つを添加させることにより、非線形性と同時に光増幅、吸収によるフィルタリング効果などの特性を付与することができる。

[0052] 上記光ファイバは、テルライトガラスからなる光ファイバであって、コア領域と、当該コア領域を包囲するように配設されて当該コア領域の軸方向に沿った空孔を当該領域の周方向にわたって複数有する第1クラッド部と、第1クラッド部を包囲するように配設されて、当該第1クラッド部の等価屈折率と略等しい屈折率を有する第2クラッド部を備えているため、通信波長帯での広帯域な零分散を実現できる高非線形なテルライトファイバとなる。また、空孔の数を減らすことができるので、低コストで、高精度な光ファイバが容易に製造することができる。

[0053] また、上記コア領域にテルライトガラスよりも屈折率の高い組成のテルライトガラスを埋め込むことにより、埋め込まれた屈折率の高いルライトガラスとその周囲のテルライトガラスとで形成される界面でコア領域を伝搬する光が全反射し、光ファイバのコア内を光が伝搬するので、光の伝送損失が低減される。

[0054] また、上記空孔にテルライトガラスの有する屈折率より低い屈折率の材料を埋め込むことにより、光ファイバ全体の機械的強度が向上する。さらに、光ファイバの母材であるプリフォームから光ファイバを線引きする工程において、空孔に空気を充填したときより、空孔の形状を一定に保ち易くなり、製造品質が向上する。また、空孔に空気を充填するときに比べて、光の散乱損失を低減することができる。

[0055] また、上記空孔を三角格子状または四角格子状またはハニカム形状の何れかの形状に配列することにより、空孔で囲まれてなるコアに光が集中し、コア内を光が伝搬する。したがって、光ファイバを高精度で製造する必要がないので、製造コストを抑えることができる。

[0056] また、上記空孔が円柱または楕円柱または多角柱の何れかの形状からなることにより、コアに光が集中し、コア内を光が伝搬する。したがって、光ファイバを高精度で製

造する必要がないので、製造コストを抑えることができる。

[0057] 本発明の第3ー7の態様にかかる光ファイバの製造方法によれば、石英ガラスと比べて30倍以上の非線形感受率(χ^3)を有する熱安定性の良いテルライトガラス組成を用いて、ガラス母材を注入成型により作製することで、従来の押し出し法と比較して、ガラス母材に対する加熱工程の時間が短いために、低損失のテルライトファイバを大量に作製できると共に光通信波長帯である1．2ー1．7μm帯に零分散をシフトすることができるのでコンパクトで高効率な非線形デバイスである光ファイバを提供することが可能となる。

図面の簡単な説明

[0058] [図1]図1は従来のテルライトガラス光ファイバを示す断面図である。

[図2]図2は図1に示した光ファイバの屈折分布図である。

[図3]図3は従来の光ファイバの一例の概略構造を表わす径方向の断面図である。

[図4]図4は本発明の実施例1に係る光ファイバの断面図である。

[図5]図5は本発明の実施例1に係る光ファイバにおいて、零分散領域を示すグラフである。

[図6]図6は本発明の実施例1に係る光ファイバによる波長分散特性を示すグラフである。

[図7]図7は本発明の実施例1に係る光ファイバにおけるコア周辺の電界状態を示す電解分布図である。

[図8A]図8Aは本発明の実施例2に係る光ファイバの断面図である。

[図8B]図8Bは図8Aの主要部の拡大図である。

[図9]図9は本発明の実施例2に係る光ファイバによる波長分散特性を示すグラフである。

[図10A]図10Aは本発明の実施例3に係る光ファイバの断面図である。

[図10B]図10Bは図10Aの主要部の拡大図である。

[図11A]図11Aは本発明の実施例4に係る光ファイバの断面図である。

[図11B]図11Bは図11Aの主要部の拡大図である。

[図12]図12は本発明の実施例5に係る光ファイバの断面図である。

[図13]図13は本発明の実施例6に係る光ファイバのコア周辺の断面図である。

[図14]図14は本発明の実施例7に係る光ファイバのコア周辺の断面図である。

[図15]図15は本発明の実施例8に係る光ファイバのコア周辺の断面図である。

[図16]図16は本発明の実施例9に係る光ファイバの概略構造を表わす径方向の断面図である。

[図17]図17は図16の光ファイバの等価屈折率分布を示すグラフである。

[図18]図18は図16の光ファイバの分散特性を表わすグラフである。

[図19]図19は図16の光ファイバの屈折率分布を表わすグラフである。

[図20]図20は従来の光ファイバの他の例の屈折率分布を表わすグラフである。

[図21]図21は従来の光ファイバの他の例の屈折率分布を表わすグラフである。

[図22]図22は本発明の実施例10に係る光ファイバの概略構造を表わす径方向の断面図である。

[図23]図23は本発明の実施例10に係る光ファイバの他の概略構造を表わす径方向の断面図である。

[図24]図24は本発明の実施例11に係る光ファイバの等価屈折率分布および屈折率分布を表わすグラフである。

[図25]図25は本発明の実施例12に係る光ファイバの概略構造を表わす径方向の断面図である。

[図26A]図26Aは本発明の実施例13、並びに実施例20にかかるフォトニッククリスタルファイバの作製方法の第1の工程を示す工程図である。

[図26B]図26Bは本発明の実施例13、並びに実施例20にかかるフォトニッククリスタルファイバの作製方法の第2の工程を示す工程図である。

[図26C]図26Cは本発明の実施例13、並びに実施例20にかかるフォトニッククリスタルファイバの作製方法の第3の工程を示す工程図である。

[図26D]図26Dは本発明の実施例13、並びに実施例20にかかるフォトニッククリスタルファイバの作製方法の第4の工程を示す工程図である。

[図26E]図26Eは本発明の実施例13、並びに実施例20にかかるフォトニッククリスタルファイバの作製方法の第5の工程を示す工程図である。

[図27A]図27Aは本発明の実施例13にかかるフォトニッククリスタルファイバを示す断面図である。

[図27B]図27Bは図27Aの主要部を示す拡大図である。

[図28]図28は本発明の実施例13にかかるフォトニッククリスタルファイバの分散を示すグラフである。

[図29]図29は本発明の実施例13にかかるフォトニッククリスタルファイバのコア径と零分散波長の関係を示すグラフである。

[図30]図30は本発明の実施例13にかかる波長変換装置を示す構成図である。

[図31]図31は図30の波長変換装置の出力スペクトルを示す特性図である。

[図32A]図32Aは本発明の実施例15にかかるフォトニッククリスタルファイバの作製方法の第1の工程を示す工程図である。

[図32B]図32Bは本発明の実施例15にかかるフォトニッククリスタルファイバの作製方法の第2の工程を示す工程図である。

[図32C]図32Cは本発明の実施例15にかかるフォトニッククリスタルファイバの作製方法の第3の工程を示す工程図である。

[図33]図33は本発明の実施例15にかかるフォトニッククリスタルファイバを示す断面図である。

[図34]図34は発明の実施例15にかかるフォトニッククリスタルファイバで発生したスーパーコンティニューム光のスペクトルを示す図である。

[図35A]図35Aは本発明の実施例16にかかるフォトニッククリスタルファイバの作製方法を示す工程図である。

[図35B]図35Bは図35Aの工程で得られるフォトニッククリスタルファイバを示す図である。

[図36]図36は本発明の実施例16にかかる波長可変パルス光源を示す構成図である。

[図37]図37は本発明の実施例16にかかるパラメトリック光増幅器を示す構成図である。

[図38]図38は図37のパラメトリック光増幅器の出力スペクトルを示すグラフである。

[図39A]図39Aは本発明の実施例17にかかるフォトニッククリスタルファイバの作製方法の第1の工程を示す工程図である。

[図39B]図39Bは本発明の実施例17にかかるフォトニッククリスタルファイバの作製方法の第2の工程を示す工程図である。

[図40A]図40Aは本発明の実施例17にかかるフォトニッククリスタルファイバの断面を示す断面図である。

[図40B]図40Bは図40Aの主要部の拡大図である。

[図41A]図41Aは本発明の実施例18にかかるフォトニッククリスタルファイバの作製方法を示す工程図である。

[図41B]図41Bは図41Aの作製装置の主要部の構造を示す図である。

[図41C]図41Cは図41Aの工程で得られるフォトニッククリスタルファイバを示す図である。

[図42]図42は本発明の実施例18にかかる光カーシャッタ実験系を示す構成図である。

[図43A]図43Aは本発明の実施例19にかかるフォトニッククリスタルファイバの作製方法を示す工程図である。

[図43B]図43Bは図43Aの作製装置の主要部の構造を示す図である。

[図43C]図43Cは図43Aの工程で得られるフォトニッククリスタルファイバを示す図である。

[図44]図44は本発明の実施例19にかかる非線形ファイバーループミラーを示す構成図である。

[図45]図45は本発明の実施例19にかかるクロック再生装置を示す構成図である。

[図46]図46は本発明の実施例20にかかる光ファイバを示す断面図である。

[図47]図47は本発明の実施例20にかかる光ファイバの光電界分布を示す図である。

[図48]図48は本発明の実施例20にかかる光ファイバの波長分散を示すグラフである。

[図49]図49は本発明の実施例21にかかる光ファイバを示す断面図である。

[図50]図50は本発明の実施例21にかかる光ファイバの光電界分布を示す図である。

[図51]図51は本発明の実施例21にかかる光ファイバの波長分散を示すグラフである。

[図52]図52は本発明の実施例22にかかる光ファイバを示す断面図である。

[図53]図53は本発明の実施例22にかかる光ファイバの光電界分布を示す図である。

[図54]図54は本発明の実施例22にかかる光ファイバの波長分散を示すグラフである。

[図55]図55は本発明の実施例23にかかる光ファイバを示す断面図である。

[図56]図56は本発明の実施例23にかかる光ファイバの光電界分布を示す図である。

[図57]図57は本発明の実施例23にかかる光ファイバの波長分散を示すグラフである。

[図58]図58は本発明の実施例24にかかる光ファイバを示す断面図である。

[図59]図59は本発明の実施例24にかかる光ファイバの波長分散を示すグラフである。

[図60]図60は本発明の実施例25にかかる光ファイバを示す断面図である。

[図61]図61は本発明の実施例25にかかる光ファイバの波長分散を示すグラフである。

[図62]図62は本発明の実施例26にかかる光ファイバを示す断面図である。

[図63]図63は本発明の実施例26にかかる光ファイバの波長分散を示すグラフである。

[図64]図64は本発明の実施例27にかかる光ファイバを示す断面図である。

[図65]図65は本発明の実施例27にかかる光ファイバの波長分散を示すグラフである。

[図66]図66は本発明の実施例28にかかる光ファイバを示す断面図である。

[図67]図67は図66の光ファイバのコアとなる領域を示す拡大図である。

[図68]図68は本発明の実施例28にかかる光ファイバの零分散波長とコアサイズとの関係を示すグラフである。

[図69]図69は本発明の実施例29にかかる光ファイバを示す断面図である。

[図70]図70は図69の光ファイバのコアとなる領域を示す拡大図である。

[図71]図71は本発明の実施例29にかかる光ファイバの零分散波長とコアサイズとの関係を示すグラフである。

[図72]図72は本発明の実施例30にかかる光ファイバを示す断面図である。

[図73]図73は図72の光ファイバのコアとなる領域を示す拡大図である。

[図74]図74は本発明の実施例30にかかる光ファイバの零分散波長とコアサイズとの関係を示すグラフである。

[図75]図75は本発明の実施例31にかかる光ファイバを示す断面図である。

[図76]図76は図75の光ファイバのコアとなる領域を示す拡大図である。

[図77]図77は本発明の実施例31にかかる光ファイバの零分散波長とコアサイズとの関係を示すグラフである。

符号の説明

[0059] 10 光ファイバ

11 空孔

12 コア

13 クラッド

100, 120, 130, 140, 150, 160, 170 光ファイバ

101, 111 コア部

102 第1のクラッド部

102a 空孔

103 第2のクラッド部

201 金属モールド

202 ガラス融液

203 ガラス母材

204 ジャケット管

205 延伸した母材

206 線径の一定した部分

207 フォトニッククリスタルファイバ

208 ホールの形成された部分

2101, 2301, 2305, 2401, 2405, 2501, 2601, 2701, 2801, 2805, 2901, 2905, 3001, 3101, 3201, 3205, 3301, 3305 テルライトガラス

2102, 2302, 2402, 2502, 2602, 2702, 2802, 2902, 3002, 3102, 3202, 3302 コアとなる領域

2103, 2303, 2403, 2503, 2505, 2603, 2703, 2803, 2903, 3003, 3005, 3103, 3203, 3303 空孔

2104, 2304, 2404, 2504, 2604, 2704, 2804, 2904, 3004, 3104, 3204, 3304 ジャケット管

発明を実施するための最良の形態

[0060] 本発明の一実施形態では、テルライトガラスを用いたフォトニッククリスタルファイバにおいて、コアに相当する部分の周囲に、屈折率1の空孔を複数個設ける構造とし、零分散波長を光通信帯である1．2ー1．7μm帯に制御する。特に、空孔を4つとし、コアに相当する部分を十字型のクラッドガラスで支える構造が好ましい。空孔を偶数として構造の対称性を保つことにより、偏波依存性を軽減することができる。また、4つという簡易な構造とし、延伸工程の制御を容易にするとともに、母材を作製するモールドを4分割することにより、ガラス母材を取り出しやすくすることができる。

[0061] 本発明の一実施形態において、テルライトガラスの組成を適切に選択することにより、ファイバ化加工に対して十分熱的に安定であり、非線形定数が高く、低損失なファイバを作製することができる。このうちTeO_2とBi_2O_3は、高非線形性を付与するための必須成分であるが、

$50 < TeO_2 < 90$（モル%）

$1 < Bi_2O_3 < 30$（モル%）

の範囲を逸脱すると熱的に安定で透過特性の良いガラスを得ることができない。これ以外の成分はガラスを熱的に安定にし、粘性を下げて加工しやすくするために添加

する。

[0062] 本発明の一実施形態において、テルライトガラス材料に希土類イオンとしてCe^{3+}、Pr^{3+}、Nd^{3+}、Pm^{3+}、Sm^{3+}、Eu^{3+}、Tb^{3+}、Dy^{3+}、Ho^{3+}、Er^{3+}、Tm^{3+}、Yb^{3+}のうち少なくとも1つを添加させることにより、非線形性と同時に光増幅、吸収によるフィルタリング効果などの特性を付与することができる。

[0063] 本発明の一実施形態にかかるテルライトファイバについて説明する。TeO_2を主成分とするガラスは、屈折率n_Dが2程度を有するのと同時に、材料波長分散は1．2ー1．7μm帯で大きく負分散を有し、零分散波長は2μmを超えた長波長側に位置する（例えば、非特許文献12参照）。従って、テルライトガラスを用いてステップインデックス型のコア／クラッド屈折率プロファイルを有するファイバを作製しても、そのファイバの波長分散特性を材料波長分散の特性から大きく変化させることはできない。

[0064] 本発明の一実施形態にかかるテルライトフォトニッククルスタルファイバに使用されるガラス組成（mol%表示）の一例と、各々のガラス組成の熱安定性（Tx−Tg:℃）、屈折率n_D、非線形感受率χ^3(esu)、紫外吸収端UV(nm)、零材料分散波長（μm）について、測定した試験結果を表1に記す。

[0065] [表1]

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
TeO_2	75	80	70	65	55	40	60	65	65	70	70	70	70	75	75	75	75	80	80	80	80	85	85	90
Bi_2O_3	0	2	10	20	30	10	8	15	12	12	7	8	10	15	10	10	7	7	8	7	7	5	5	5
ZnO	5		5					7	5		8				5		5	5				3		
BaO		5			5	20	7			5						5			5		5			
MgO				5								5								5				
Li2O	10					10			13			10					12	8						
Na2O		7			5	6					5			5							5			
K2O			8				5						7						7			7		
Rb2O				5			10			10						10								5
Cs2O					5			8							5					5				
B2O3	5					4							5											
La2O3							5				5												5	
Ga2O3		6							5			2		5										
Al2O3			7							3														
Y2O3				5			5				5				5								5	
P2O5	5											5									3			
Nb2O3						10		5					8							3				
Tx−Tg	90	150	120	140	70	80	150	140	180	160	150	160	170	150	300<	140	300<	300<	300<	160	180	140	130	50
nD	1.98	2.07	2.18	2.21	2.23	1.85	2.15	2.2	2.18	2.13	2.1	2.05	2.09	2.2	2.09	2.03	2.07	2.12	2.11	2.13	2.08	2.12	2.13	2.16
$\chi 3(\times 10^{-12})$	0.5	1	1.2	2	2.6	0.6	1.2	2	1.8	1.3	1.2	1.1	1.5	2	1.6	1.4	1.3	1.7	1.5	1.8	1.5	1.6	1.5	2
UV (nm)	360	365	370	378	410	390	380	390	385	375	370	380	375	380	375	380	370	375	370	380	370	365	380	390
Zero (μm)	1.8	2.1	2.4	2.7	3	1.9	2.2	2.6	2.4	2.3	2.2	2.15	2.3	2.5	2.3	2.2	2.3	2.5	2.4	2.6	2.2	2.5	2.6	2.8

[0066] ガラス試料は、次の手順で作製した。窒素ガスを充填したグローブボックス内で原料を混合し、金又は白金坩堝を用いて酸素雰囲気のもとに800ー1100℃で溶融し、その後、300ー400℃に予加熱した鋳型中に融液を流し込んだ。ファイバへの加工には、ガラス母材の延伸・線引きなどの再加熱が必要となるため、損失が低く、強度の強いファイバを実現するには、熱安定性が重要なファクタとなる。テルライトガラスは、一般的に、ガラス転移温度Tgから30ー80℃高い温度で延伸・線引き加工されるため、熱安定性の指標であるTx(結晶化温度)ーTg(ガラス転移温度)が100℃以上であることが望ましい。

[0067] 表1のガラス組成のうち、No. 1ー5は、Bi_2O_3の添加量が0ー30mol%まで変化しているが、No. 1の0mol%とNo. 5の30mol%とでは、熱安定性の指標であるTxーTgが100℃以下であり、熱安定性が不十分であることが分かる。また、No. 6はTeO_2が50mol%以下であり、No. 24はTeO_2が90mol%以上となっており、この場合にもそれぞれTx−Tgが100℃以下であり、熱安定性が不十分であることがわかる。TeO_2とBi_2O_3は、本実施形態において高非線形性をもたらす必須成分であり、以上の点から、

$50 < TeO_2 < 90$(モル%)

$1 < Bi_2O_3 < 30$(モル%)

$1 < LO + M_2O + Q_2O_3 + R_2O_5 < 50$(モル%)

の範囲にあることが必要となる。上記にあげた以外の組成例では、ファイバに加工するのに十分な熱安定性を有していないことが分かる。

[0068] 表1の組成をまとめると、テルライトガラスは、TeO_2−Bi_2O_3−LO−M_2O−Q_2O_3−R_2O_5からなる組成を有し、ここで、LはZn、Ba、Mgのうち少なくとも1種類以上であり、MはLi、Na、K、Rb、Csのうち少なくとも1種類以上であり、QはB、La、Ga、Al、Yのうち少なくとも1種類以上であり，RはP、Nbのうち少なくとも1種類以上である。これらの高非線形性と熱安定性を同時に有するテルライトガラスは、材料分散が零となる波長が2μm以上となっており、ファイバの零分散波長を制御するように構造設計する際に、重要な物性値となる。

[0069] 以下、図面を参照して、本発明の実施例を詳述する。本発明に係る光ファイバの実

施形態として、実施例を用いて説明するが、本発明は下記実施例に限定されるものではない。さらに、下記実施例はフォトニックバンドギャップ構造を導波原理の基本とした光ファイバであるが、コア・クラッドの実行屈折率差による全反射構造も同時に具備されている。そのため、光ファイバにはフォトニックバンドギャップ条件や周期性・均一性を必ずしも厳密に必要としない。

実施例 1

[0070] 本発明の実施例1に係る光ファイバの断面を図4に示す。図4に示すように、零材料分散波長が2．08μmのテルライトガラスからなる光ファイバ10は、多数の円形状の空孔11を有する。これらの空孔11の中は、空気で満たされている。これらの空孔11における光の屈折率は、真空における光の屈折率である1にほぼ等しい。

[0071] 空孔11の配列は、その光ファイバ10の直径方向の断面において、規則的（周期的）に隣接するように配置される多数の三角形の各頂点からなる三角格子状の配列である。これらの空孔11は、光ファイバ10の長手方向に同一構造を有する。つまり、空孔11は三次元的に配列されるフォトニックバンドギャップではなく、長手方向に均一に配置される。したがって、この光ファイバの断面は、光ファイバ10の作成プロセスによる形状の揺らぎ（歪み）を無視すれば、光ファイバ10の長手方向に亘って同じ構造であり、光ファイバ10の長手方向に直交するまたは斜交するように空孔が配置される構造は存在しない。つまり、光ファイバ10に配置される空孔11はその光ファイバ10の長手方向に連続して延在し、長手方向の何れの箇所で切断しても同一の切断面となる。

[0072] ただし、光ファイバ10の中心において、空孔11の配列は周期性を欠いている。周期性を欠いて配列される空孔11で囲まれる領域は、光の波長をλ、円周率をπとしたときにコア領域を$\pi\lambda^2$の0．1から5倍の大きさである。この領域は光が集中するコア12となり、その領域からその光ファイバ10の半径方向には光が伝搬しない。即ち、光ファイバ10は、空孔11が周期的に配列されてなる回折格子を有するフォトニックバンドギャップ構造である。つまり、光ファイバ10は、光ファイバ10の中心にコア12と、コア12の周りに周期的に配列される空孔11からなるクラッド13とを有する。なお、隣接する空孔同士の間隔を変えることにより、周期性を欠いて配列される空孔11で囲

まれる領域、即ちコア12の直径を変えることができる。

[0073] 隣接する空孔同士の間隔をΔ、空孔の直径をdとする。光ファイバ10において、零分散となる領域は、図5に示すように、(Δ、d)が(0、0)と(5、5)とを結んでなる直線と、(Δ、d)が(2、0)と(5、4)とを結んでなる直線とで囲まれる領域Bとなる。点Aは、(Δ、d)が(2．3、2．0)であり、零分散となる領域である領域B内にある。

[0074] なお、テルライトガラスの材料の組成が変わると、分散が零となる波長が1．3μmから1．6μmの範囲内で変化する。このとき、隣接する空孔同士の間隔Δ及び空孔の直径dの範囲も変化するが、概ね図5に示した領域B内になる。

[0075] 図6には、図5における点A、即ち隣接する空孔の間隔Δが2．3μmであり、空孔の直径dが2．0μmである光ファイバ10による波長分散特性が示される。図6に示すように、このような光ファイバ10では、波長1．56μmで零分散となる。また、この光ファイバ10を数値計算法の一つである差分法を用いて求めた光ファイバ10のコア周辺における光電界分布を図7に示す。なお、図7中の実線は、電界変化が10%毎の等高線である。図7に示すように、通常の光ファイバと同様に、この光ファイバ10のコア12に光が閉じ込められる構造となっている。

[0076] よって、このような光ファイバ10によれば、光はフォトニックバンドギャップあるいは全反射作用によりコア12に閉じ込められ、効果的に高次モードを抑制することができ、コア12の直径を拡大しても単一モード条件を維持することができるようになる。

実施例 2

[0077] 本発明の実施例2による光ファイバ断面を図8A−図8Bに示す。図8A−図8Bにおいて、21は空孔であり、中は空気で満たされており屈折率は1にほぼ等しい。22は表1におけるNo．18の組成のテルライトガラスである。本実施例のファイバ20では中心を除く断面全域に多数の空孔21を三角格子状に配置した。さらに、零材料分散波長が2．1μmでテルライトガラス22に対して比屈折率差として1．1%高い屈折率を有するテルライトガラスをファイバ中心部23の位置に埋め込んだファイバ、およびテルライトガラス22に対して比屈折率差として0．5%低い屈折率を有するテルライトガラスをファイバ中心部23の位置に埋め込むことで、光が伝搬するコアとなる領域を設けたファイバの2種類を作製した。それぞれのファイバ外径は105μm、空孔径dは1

．6μm、空孔間隔Λは2．2μm、埋め込んだ中心部23のテルライトガラス径bは1．5μm、光が伝搬するコア径aは2．8μmである。

[0078] 押し出し法で作製した上記2種類のファイバを切断・研磨後、近視野像（NFP）、遠視野像（FFP）を観察して、ファイバ中心部23に光が閉じ込められ、それぞれ単一モード化が達成できていることが確認できた。図9に本光ファイバの波長分散の測定結果を示す。本実施例の零分散波長λ_0は、1．1％高い屈折率のテルライトを埋め込んだファイバ、0．5％低い屈折率のテルライトを埋め込んだファイバのそれぞれで、図9に示すように波長1．63μm、および1．58μmであった。また、有効コア断面積A_{eff}はそれぞれ3．7μm^2、3．9μm^2であり，非線形係数γ値はそれぞれ650$W^{-1}km^{-1}$、610$W^{-1}km^{-1}$であった。

実施例 3

[0079] 本発明の実施例3による光ファイバ断面を図10Aに示す。図10Aにおいて、21は空孔であり、中は空気で満たされており屈折率は1にほぼ等しい。22は表1におけるNo．15の組成のテルライトガラスである。本実施例のファイバでは中心を除く断面全域に多数の空孔21を三角格子状に配置し、光が伝搬するコアとなる領域24を設けた。ファイバ外径Dは105μmである。また、図10Bに示すように、空孔径dは1．2μm、空孔間隔Λは1．5μmとし、光が伝搬するコア径aは1．8μmである。

[0080] 作製したファイバを切断・研磨後、近視野像（NFP）、遠視野像（FFP）を観察し、ファイバ中心部に光が閉じ込められ、単一モード化が確認できた。本実施例の零分散波長λ_0は、波長1．3μmであった。コア径a、円周率をπとすると、コア領域24はおよそ$\pi(a/2)^2$で表わされ、この領域は波長をλとすると、$\pi\lambda^2$の0．1ー5倍の面積であることが必要とされる。0．1倍以下では、モードが立つことができないと同時に石英ファイバとの接続が困難になり、また5倍以上では零分散が1．7μm以上となると共に多モード伝搬となる。

実施例 4

[0081] 本発明の実施例4による光ファイバ断面を図11Aに示す。図11Aにおいて、44はジャケットである。41は空孔であり、中は空気で満たされており屈折率は1にほぼ等しい。45は零材料分散波長が2．18μmのテルライトガラスである。本実施例のファイ

バでは内部に孔41を4個配置し、光が伝搬するコアとなる領域46を設けた。ファイバ外径Dは120μmであり、空孔の内径は、40μmである。また、コア領域の大きさとして、図11Bに示すコア領域に内接する正四角形の一辺aを2．0μmとした。

[0082] 作製したファイバを切断・研磨後、近視野像（NFP）、遠視野像（FFP）を観察し、ファイバ中心部に光が閉じ込められ、単一モード化が確認できた。本実施例の零分散波長λ_0は、波長1．46μmであった。コア径a、円周率をπとすると、コア領域24はおよそ$\pi(a/2)^2$で表わされ、この領域は波長をλとすると、$\pi\lambda^2$の0．1ー5倍の面積であることが必要とされる。0．1倍以下では、モードが立つことができないと同時に石英ファイバとの接続が困難になり、また5倍以上では零分散が1．7μm以上となると共に多モード伝搬となる。

実施例 5

[0083] 本発明の実施例5に係る光ファイバ断面を図12に示す。図12に示すように、零材料分散波長が2．1μmのテルライトガラスからなる光ファイバ30は、上記実施例1と同様に、三角格子状配列、即ち周期的に配列される多数の円形状の空孔31を有する。ただし、光ファイバ30の中心において、空孔31の配列は周期性を欠いている。また、空孔31にはテルライトガラス33よりも屈折率がΔnだけ低いガラス材料が埋め込まれる。光ファイバ30の中心部から離れた空孔31は周期的に配列されるので、光を全反射するクラッド33となり、光ファイバ30の中心部で周期性を欠いて配列される空孔31で囲まれる領域は、光が導波するコア32となる。この領域は、光の波長をλ、円周率をπとしたときにコア領域を$\pi\lambda^2$の0．1から5倍の大きさである。

[0084] したがって、この光ファイバ30によれば、フォトニックギャップを構成する空孔31にテルライトガラス33よりも低い屈折率の材料が充填されているため、光ファイバ全体の機械的強度が大きくなる。さらに、その材料充填の結果、光ファイバ30の母材であるプリフォームから光ファイバ30を線引きする工程において、空孔31に空気を充填したときよりも、空孔31の形状を一定に保ちやすく、製造品質が向上する。また、空孔31に空気を充填してなる光ファイバに比べて、光の散乱損失を低減することができる。

実施例 6

[0085] 本発明の実施例6に係る光ファイバを図13に示す。図13に示すように、テルライト

ガラスからなる光ファイバ40は、上記実施例5に説明した光ファイバ30の有する空孔31の配列状態を変形したものである。光ファイバ40における空孔41の配列は、光ファイバ40の直径方向の断面において、規則的（周期的）に隣接するように配置される多数の四角形の頂点からなる四角格子状の配列である。ただし、光ファイバ40の中心において、空孔41の配列は周期性を欠いている。光ファイバ40の中心部から離れた空孔41は周期的に配列されるので、光を全反射するクラッド43となり、光ファイバ40の中心部で周期性を欠いて配列される空孔41で囲まれる領域は、光が導波するコア42となる。この領域は光の波長をλ、円周率をπとしたときにコア領域を$\pi\lambda^2$の0．1から5倍の大きさである。なお、空孔41には、テルライトガラスよりも屈折率の低い材料が充填されている。

[0086] したがって、この光ファイバ40によれば、上記実施例5で説明した光ファイバ30と同様の作用効果を奏する。

[0087] なお、空孔41に空気を充填した全くの空孔としても良く、その場合も含めてコア42に光が閉じ込められ、効果的に高次モードを抑制することができ、コア42の直径を拡大しても単一モード条件を維持することができるようになる。

実施例 7

[0088] 本発明の実施例7に係る光ファイバを図14に示す。図14に示すように、テルライトガラスからなる光ファイバ50は、上記実施例6に説明した光ファイバ40の有する空孔41の配列状態を変形したものである。光ファイバ50における空孔51は、光ファイバ50の直径方向の断面において、規則的（周期的）に隣接するように配置される六角形（ハニカム）の各頂点に配列される。ただし、光ファイバ50の中心において、空孔51の配列は周期性を欠いている。光ファイバ50の中心から離れた空孔51は周期的に配列されるので、光を全反射するクラッド53となり、光ファイバ50の中心で周期性を欠いて配列される空孔51で囲まれる領域は、光が導波するコア52となる。この領域は光の波長をλ、円周率をπとしたときにコア領域を$\pi\lambda^2$の0．1から5倍の大きさである。なお、空孔51には、テルライトガラスよりも屈折率の低い材料が充填されている。

[0089] したがって、この光ファイバ50によれば、上記実施例6で説明した光ファイバ40と同

様の作用効果を奏する。

[0090] なお、空孔51に空気を充填した全くの空孔としても良く、この場合も含めてコア52に光が閉じ込められ、効果的に高次モードを抑制することができ、コア52の直径を拡大しても単一モード条件を維持することができるようになる。

実施例 8

[0091] 本発明の実施例8に係る光ファイバを図15に示す。図15に示すように、テルライトガラスからなる光ファイバ60は、上記実施例5に説明した光ファイバ30に配列される空孔31の形状を変形したものである。光ファイバ60では、その光ファイバ60の長手方向に直交する断面において、空孔61の形状が六角形である。光ファイバ60では、多数の空孔61が三角格子状配列、即ち周期的に配列される。ただし、光ファイバ60の中心において、空孔71の配列が周期性を欠いている。光ファイバ60の中心から離れた空孔61は周期的に配列されるので、光を全反射するクラッド63となり、光ファイバ60の中心で周期性を欠いて配列される空孔61で囲まれる領域は、光が導波するコア62となる。この領域は光の波長をλ、円周率をπとしたときにコア領域を$\pi\lambda^2$の0．1から5倍の大きさである。なお、空孔61には、テルライトガラスよりも屈折率の低い材料が充填されている。

[0092] したがって、この光ファイバ60によれば、上記実施例5で説明した光ファイバ30と同様の作用効果を奏する。

[0093] なお、空孔61に空気を充填した全くの空孔としても良く、その場合も含めてコア62に光が閉じ込められ、効果的に高次モードを抑制することができ、コア62の直径を拡大しても単一モード条件を維持することができるようになる。

[0094] なお、フォトニックバンドギャップを構成するフォトニック結晶の回折格子をなす空孔の配列は、光ファイバのコアの中心から半径方向に光が伝搬しないようにコア内に閉じ込めることができ、周期的配置、即ち規則的な格子状の配置であれば、特に限定されない。

[0095] また、空孔の形状は、円柱（円形状の空孔）に限定されることはなく、三角柱（三角形状の空孔）、四角柱（四角形状の空孔）、六角柱（六角形状の空孔）などの形状としても良く、いずれの形状でもフォトニックバンドギャップによる導波構造を実現すること

ができる。

実施例 9

[0096] 次に、本発明の実施例9に係る光ファイバを図16から図19に基づいて説明する。なお、このときテルライトガラスは2μm以上に零分散波長を有する請求項1に記載のガラスを用いる。また、特に上記の表1に記載のガラス組成比のうちNo. 1とNo. 6以外の組成比を用いることが効果的であり、さらに請求項3に記載のガラス材料のように希土類を添加したものにも有効である。図16は、光ファイバの概略構造を表わす径方向の断面図、図17は、図16の光ファイバの等価屈折率分布を示すグラフ、図18は、図16の光ファイバの分散特性を表わすグラフ、図19は、図16の光ファイバの屈折率分布を表わすグラフである。なお、本発明において、等価屈折率とは、光に実質的に作用する屈折率のことである。

[0097] 本発明の実施例9に係る光ファイバは、図16に示すように、テルライトガラスからなる光ファイバ100であって、コア部101と、コア部101を包囲するように配設されて、コア部101の軸方向に沿った円形の空孔102aをコア部101の周方向にわたって複数有する第1のクラッド部102と、第1のクラッド部102を包囲するように配設されて、第1のクラッド部102の等価屈折率と略等しい屈折率を有する第2のクラッド部103とを備えている。

[0098] 第1のクラッド部102の空孔102aは、コア部101の周方向に沿って一定の間隔で複数(本実施例では6つ)形成されている。第1のクラッド部102の空孔102aは、内部が空気で満たされており、屈折率が真空の屈折率である1と略等しい大きさとなっている。コア部101の屈折率と第1のクラッド部102の等価屈折率とは、比屈折率差(Δ)が2%以上となっている。第2のクラッド部103は、コア部101のテルライトガラスと異なる組成のテルライトガラスを用いて、コア部101の屈折率よりも低い屈折率とすると共に、第1のクラッド部102の等価屈折率と略等しい屈折率としている。

[0099] 本発明の実施例9に係る光ファイバ100においては、空孔102aの半径rを0. 5ー1. 0μmとし、空孔102aの間のピッチγを1. 0ー2. 0μmとし、第1のクラッド部102の半径rrを3μm以下とするように設計している。

[0100] なお、光ファイバ100は、軸方向に同一の構造を維持しているので、作製プロセス

による形状のゆらぎを無視すれば、径方向の断面構造が軸方向全長にわたって同一であり、軸方向に直交又は斜交するような構造が存在しないものである。

[0101] このような本発明の実施例9に係る光ファイバ100においては、空孔102aを一重に正六角形の頂点位置に配置することによって第1のクラッド部102を形成し、中心部のコア部101に空孔102aを形成していないため、当該コア部101が最も高い屈折率となり、図17に示すように、コア部101に光が集中するようになる。

[0102] 本発明の実施例9に係る光ファイバ100においては、図18に示すように、零分散波長において極性が反転し、特定の波長域において分散が平坦となることが明らかとなった。よって、本発明の実施例9に係る光ファイバ100によれば、広帯域な零分散波長域を実現することができる。

[0103] 従来技術の欄で既述したように、近年、主に石英ガラスを用いて意図的に空孔を形成したフォトニッククリスタルファイバ(PCF)或いはホーリーファイバ(HF)とよばれる光ファイバが開発されている。このPCFやHFは、導波原理から二種類に分類されている。一つは、フォトニックバンドギャップによって光を閉じ込めるフォトニックバンドギャップ型であり、その構造において、厳格な周期性や空孔サイズの均一性が要求されるものである。もう一つは、空孔を有した媒質の実効的な屈折率差から得られる全反射によって光を閉じ込める屈折率導波型であり、その構造において、厳格な周期性や空孔サイズの均一性が必ずしも要求されるものではない。

[0104] 例えば、前述の非特許文献6においては、空孔を設けないコア部と、空孔を六角形に配列したクラッド部とを備えた石英ガラスからなる光ファイバの分散特性を実験的に測定した結果を報告している。この非特許文献6で報告されている光ファイバは、813nmの波長における分散値が約−77ps／km／nmとなっている。また、例えば、非特許文献13においては、単一材料からなる光ファイバ(PCF)の分散を算出して、PCFの分散補償効果を報告している。

[0105] そこで、本発明者らは、鋭意研究した結果、テルライトガラスを用いた光ファイバをPCFやHF構造とすることにより、上述の課題を解決できることを見出した。すなわち、本発明者らは、前述したように、空孔102aのないコア部101部分の屈折率と第1のクラッド部102の等価屈折率との比屈折率差(Δ)を2%以上とすると共に、第1のクラッ

ド部102の等価屈折率と第2のクラッド部103の屈折率とを同程度とすることにより、通信波長帯である1．55μm帯における広帯域な零分散波長を実現でき、かつ光の閉じ込め効果の高い高非線形の光ファイバ100を実現できることを確認した。また、本発明者らは、空孔102aの大きさや間隔等によって零分散波長や光の閉じ込め効果が広範囲に制御可能であることを見出した。さらに、本発明者らは、コア部101に用いたテルライトガラスの組成と異なる組成のテルライトガラスを第2のクラッド部103に用いることにより、低屈折率を実現できるようにした。加えて、本発明者らは、第2のクラッド部103に空孔を形成しないことにより、低コストで容易に製造できるようにした。

[0106] なお、特許文献2では、図20に示すように、コア部121及びクラッド部122を有する石英ガラスからなる光ファイバ120に空孔122aを形成することにより、波長1400ー1800nmにおいて、＋80ps／nm／km以上の波長分散を有する分散補償型のものを提案しており、当該光ファイバ120は、光非線形特性を低減するためにコア121の直径が20μm程度にまで広げられると共に、コア121とクラッド122との比屈折率差（Δ）が1％以下の低Δ構造となっている。

[0107] これに対し、本発明の実施例9に係る光ファイバ100は、先に説明したように、高非線形性の実現を目的としたものであり、図19に示すように、比屈折率差Δを2ー4％程度まで高くすることで、コア部101の直径を1ー2μm程度まで小さい構造を有することから、上記の従来例の光ファイバ120と構造も目的も大きく異なるものである。

[0108] また、特許文献3では、図21に示すように、コア部131とクラッド部132との間の有効屈折率差を5％よりも大きくするように、三つ若しくは六つの空孔132aを形成した光ファイバ130を提案している。この光ファイバ130は、同一のガラス材料（単一のガラス）からコア部131及びクラッド部132の両方が形成されていることから、中心部のコア部131と空孔132aの外側のクラッド部132との屈折率が等しい、一般にW型とよばれる構造を有するものである。しかしながら、本発明の実施例9に係る光ファイバ100は、先に説明したと同様に、従来例の光ファイバ130と構造が異なるものである。

実施例 10

[0109] 本発明の実施例10として、例えば、図22、図23に示すように、第1のクラッド部102

の空孔102aが、第1のクラッド部102の半径方向にわたって複数形成されている（二重に形成されている）光ファイバ140、150とすることも可能である。

[0110] また、本発明の実施例10の変形として、例えば、第1のクラッド部102の空孔102aの径方向の断面形状を楕円形や多角形とすることも可能である。

実施例 11

[0111] 本発明の実施例11として、図24に示すように、例えば、第1のクラッド部102の空孔102aの内部に、第2のクラッド部103を構成するテルライトガラスの屈折率よりもΔnだけ低い屈折率を有するガラス材料を埋め込んで充填することにより、第1のクラッド部102の等価屈折率と第2のクラッド部103の屈折率とを同程度にすることも可能である。なお、このときテルライトガラスは2μm以上に零分散波長を有する請求項1に記載のガラスを用いる。また、特に上記の表1に記載のガラス組成比のうちNo. 1とNo. 6以外の組成比を用いることが効果的であり、さらに請求項3に記載のガラス材料のように希土類を添加したものにも有効である。

[0112] このように構成した光ファイバ160においては、空孔102a内に空気ではなくガラス材料を充填していることから、空気を充填している場合よりも、全体的な機械的強度を向上させることができると共に、プリフォームから線引きして製造する際に、空孔102aを一定形状に保持することが容易にできるだけでなく、散乱損失を低減することも可能となる。

実施例 12

[0113] 本発明の実施例12として、例えば、図25に示すように、コア部111の屈折率が、第1のクラッド部102の材料の屈折率よりも高い光ファイバ170とする、すなわち、空孔102aを形成されていない軸中心部分を、Δnだけ屈折率の高いコア部（センタコア）111として、より強い光の閉じ込め効果を実施できるようにすることも可能である。なお、このときテルライトガラスは2μm以上の零分散波長を有する請求項1に記載のガラスを用いる。また、特に表1に記載のガラス組成比のうちNo. 1とNo. 6以外の組成比を用いることが効果的であり、さらに請求項3に記載のガラス材料のように希土類を添加したものにも有効である。

[0114] なお、空孔102aの数や形状等は、第1のクラッド部102の等価屈折率が第2のクラ

ッド部103の屈折率と略等しくなるように適宜選定されるものである。

[0115] また、本発明に係る光ファイバにおいては、上記コア部や上記クラッド部の実効的な屈折率差による全反射構造が具備されていれば、厳密なフォトニックバンドギャップ条件や周期性や均一性等の条件を必ずしも満たす必要はない。

実施例 13

[0116] 以下の本発明の実施例13ー19では、テルライトガラスを用いて、空孔(エアホール)を有するファイバ構造を作製する際のガラス母材の作製方法を説明する。

[0117] 本発明の実施例13は、ガラス融液を注入成型する際に使用するモールドとして、内壁の内側に凸となる部分が複数形成されたモールドを用いる。このモールドを用いて成型したガラス母材を、円筒状のテルライトガラスからなるジャケット管に挿入することにより、ガラス母材とジャケット管との隙間に空孔部を形成する。

[0118] 図26A—図26Eに、本発明の実施例13にかかるフォトニッククリスタルファイバの作製方法を示す。熱安定性の指標Tx—Tgが300℃以上である、表1に記載のガラス組成比のうちNo. 19の組成のガラス原料を溶融したガラス融液202を、300ー400℃に予加熱したモールド201内に注入する(図26A)。モールド201は、内壁の内側に凸となる部分が4つ形成され、注入されたガラス母材が断面十字型となるように形成されている。ガラス融液の注入後300℃付近の温度で10時間以上アニールし、ガラス母材203を作製する(図26B)。その際、モールド201を4分割して、ガラス母材203を取り出しやすくしているので、ガラス母材203の欠け、クラックを防ぐことができる。上記と同様にガラス原料を溶融し、それを300ー400℃に予加熱した円筒状のモールド(図示しない)に流し込んだ後、このモールドを水平に保持したまま高速回転させるローテーショナルキャスティング(rotational casting)法により、円筒状のジャケット管204を作製する(図26C)。

[0119] ジャケット管204内にガラス母材203を挿入して延伸する(図26D)。延伸した母材205の断面は、正確に対称となる。延伸した母材205の線径の一定した部分206を切り出し、再び別のジャケット管(図示しない)に挿入して延伸する。ガラス母材203とジャケット管との隙間に空孔(エアホール)が形成され、延伸・線引きを行う際に、ホールの形成された部分208を加圧して、空孔を維持又は拡大するように加圧線引きす

る。線引き張力を樹脂被服するダイスを通す前の値で50g以上になるように調整しながら、外径110μmに線引き加工して(図26E)、フォトニッククリスタルファイバ207を作製する。

[0120] 本実施例の延伸工程では、延伸加重が200g程度において、10ー20mmφの母材を3ー6mmφへ延伸できる粘度である10^{9}ー10^{10}P(ポアズ)となるように加熱する。一方、従来の押し出し法により、バルクガラスからホール構造を持つ母材へと加工するためには、バルクガラスを粘度として10^{6}P(ポアズ)程度に軟らかくする必要がある。従って、本実施例の方法によれば、押し出し法と比較して、加熱する温度が低いので、結晶核の成長を抑えることができ、低損失のファイバを作製するのに適している。

[0121] 図27Aに、作製したフォトニッククリスタルファイバの断面図を示す。フォトニッククリスタルファイバ207の外径は110μm、空孔の内径が26μmである。図27Bは、光の伝播するコアに相当する部分の拡大図であり、コア径は2.6μmである。光出力がピークの$1/e^{2}$となる断面積A_{eff}は3.54μm^{2}であり、そのγ値(非線形を表す:$2\pi n^{2}/\lambda A_{eff}$)は675$W^{-1}km^{-1}$である。

[0122] コア径や空孔内径を制御するためには、ジャケット管204の肉厚を変化させたり、延伸回数を増やしたりすることにより可能である。本実施例にかかるフォトニッククリスタルファイバの損失は、1.55μmで60dB/kmであり、零分散波長は、材料分散での値2.29μmから1.57μmにシフトする(図28を参照)。空孔の形状は、対称に作製されているため、偏波依存性は発生しない。

[0123] 図29に、本実施例13にかかるフォトニッククリスタルファイバのコア径と零分散波長の関係を示す。図29を参照すると、零分散波長を1.2ー1.7μmに制御するためには、コア径を0.8ー3.4μmに制御する必要がある。また、零分散波長を1.55μmとするためには、コア径を2.45μmとする必要がある。

[0124] 図30に、本実施例13にかかるフォトニッククリスタルファイバを用いた波長変換装置の構成例を示す。この波長変換装置は、1530ー1560nmの波長帯に100GHz間隔に32波のWDM信号を出力する光源301ー332と、1565nmの励起光を出力する光源333とを有する。さらに、光源301ー332の出力を合波するAWG(Arrayed

Waveguide Grating）341と、合波されたWDM信号光Esと励起光Epとを合波する光カプラ342と、長さ50mの本実施例13にかかるフォトニッククリスタルファイバ343とを備えている。このような構成により、波長変換装置は、32波のWDM信号の波長を一括変換して、変換光Ecを出力する。

[0125] 図31に、上記の波長変換装置の出力スペクトルを示す。励起光Epのパワー40mWに対して、変換効率−15dBであり、帯域幅70nmの波長一括変換を行うことができる。

実施例 14

[0126] 本発明の実施例14では、ガラス組成としてNO. 14を用い、Erを5000ppm添加すること以外は、実施例13と同様なファイバを作成した。

[0127] このフォトニッククリスタルファイバを用いて、図30と同じ構成の波長変換装置を作製する。光源として、1530ー1560nmの波長帯に100GHz間隔に32波のWDM信号を出力する光源301ー332と、1480nmの励起光と1565nmの励起光とを出力する光源333とを用いる。長さ15mの実施例14にかかるフォトニッククリスタルファイバ343を用いて、信号増幅すると同時に波長一括変換を行う。1480nmの励起光のパワー50mW、1565nmの励起光のパワー50mWに対して、変換効率5dBであり、帯域幅70nmの波長一括変換を行うことができる。

[0128] なお、図44を参照して後述する非線形ファイバーループミラーに、長さ15mの本実施例14のフォトニッククリスタルファイバを適用すると、繰り返し周波数80GHz、パルス幅8psの高速変調した信号光に対して、ゲート光のパワー10mWにより、信号光のスイッチングを行うことができる。

[0129] 図37に、本実施例14にかかるフォトニッククリスタルファイバを用いたパラメトリック光増幅器を示す。このパラメトリック光増幅器は、波長可変光源1301に、アイソレータ1302と、長さ150mの本実施例14にかかるフォトニッククリスタルファイバ1303と、光カプラ1304とを縦続接続する。光カプラ1304には、波長1560nm、励起光パワー1. 5Wの光源1305の出力を、EDFA増幅器1306を介して後方から入射する。

[0130] 図38に、上記パラメトリック光増幅器の出力スペクトルを示す。この出力スペクトルは、−30dBmの信号光を用いて波長スキャン測定を行った結果を示ものであり、150

0ー1620nmにわたる120nmの波長帯において20dB以上の利得を得た。

実施例 15

[0131] 本発明の実施例15の方法は、テルライトガラスからなる円柱状のガラスブロックを作製し、ガラスブロックの長手方向にドリルで穴を開けて、空孔部を有するガラス母材を作製する。このガラス母材を、円筒状のテルライトガラスからなるジャケット管に挿入して線引きする方法である。

[0132] 図32A−図32Cに、本発明の実施例15にかかるフォトニッククリスタルファイバの作製方法を示す。前述の表1において、熱安定性の指標Tx−Tgが300℃以上であるNo. 15の組成のガラス原料を溶融したガラス融液を、300ー400℃に予加熱したモールド内に注入する。注入後、300℃付近の温度で10時間以上アニールし、円柱状のガラスブロック601を作製する(図32A)。ガラスブロック601の長手方向に、3mmφのドリル602で複数の穴を開け、ガラス母材603を作製する(図32B)。ガラス母材603を、3mmφまで延伸加工し、延伸した母材の線径の一定した部分604を切り出して、フォトニッククリスタルファイバを作製する(図32C)。

[0133] 図33に、作製した当該フォトニッククリスタルファイバの断面図を示す。フォトニッククリスタルファイバの外径は110μm、空孔直径dは1. 6μm、空孔間ピッチΔは2. 3μmであり、d／Δ＝0. 7となる。MFD(Mode Field Diameter:モードフィールド径)は3μmであり、ファイバの損失は1. 55μmで40dB／kmであり、零分散波長は、1. 55μmである。

[0134] 長さ150mの当該フォトニッククリスタルファイバに、波長1. 55μm、パルス幅0. 5ps、ピークパワー30Wのパルス励起光を入射する。フォトニッククリスタルファイバは、図34に示すように、1. 7μm帯域(0. 7ー2. 4μm)にわたるスーパーコンティニューム光を出力した。

実施例 16

[0135] 本発明の実施例16では、ガラス融液を注入成型する際に使用するモールドにおいて、底面から円柱棒状のピンを複数内側に整列させる。注入成型した後、すばやく予加熱しておいたピンを引き抜くことにより、空孔部を形成する。

[0136] 図35A−図35Bに、本発明の実施例16にかかるフォトニッククリスタルファイバの作

製方法を示す。前述の表1において、熱安定性の指標Tx−Tgが180℃であるNo．9の組成のガラス原料を溶融したガラス融液802を、300ー400℃に予加熱したモールド801a、801b（以下、総括番号を801と表わす）内に注入する（図35A）。モールド801の底面には、基台804から円柱棒状のピン805を複数内側に整列させた治具（jig）が設置されている。モールド801にガラス融液802を注入成型した後、すばやくピン805を引き抜くことにより、空孔を形成したガラス母材803を作製する（図35B）。

[0137] ガラス母材803を用いて、前述の実施例15と同様に延伸・線引きすることにより、フォトニッククリスタルファイバを作製する。作製されたフォトニッククリスタルファイバの断面は、図33と同様であり、外径は120μm、空孔直径dは1．5μm、空孔間ピッチΔは2．3μmであり、d／Δ＝0．65となる。MFDは2．5μmであり、ファイバの損失は1．55μmで65dB／kmであり、零分散波長は、1．55μmである。

[0138] 長さ50mの当該フォトニッククリスタルファイバに、波長1．55μm、パルス幅0．5ps、ピークパワー30Wのパルス励起光を入射する。パルスがソリトン効果を受けると共に、ファイバ内を伝搬するにつれパルススペクトルが長波長側にシフトする「ソリトン自己位相シフト」が観測される。

[0139] 図36に、本実施例16にかかるフォトニッククリスタルファイバを用いた波長可変パルス光源を示す。この光源は、入射パルスのピークパワーを変化させることにより、スペクトルシフト量が変化する効果を利用した波長可変パルス光源である。波長可変パルス光源は、10GHzで変調されたパルス光源901に、光増幅器902と、長さ50mの本実施例16にかかるフォトニッククリスタルファイバ903と、プログラマブルPLC（planer lightwave circuit）合分波器904とを縦続接続する。

[0140] さらに、プログラマブルPLC合分波器904の出力に、光増幅器905と、長さ50mの本実施例16に係るフォトニッククリスタルファイバ906とを縦続接続する。このような構成により、波長可変パルス光源は、10ー100Gbit／sのチャンネルレートで、波長可変範囲が150nm（1550ー1700nm）で、光パルスを出力する。

[0141] このフォトニッククリスタルファイバを用いて、図30と同じ構成の波長変換装置を作製する。光源として、1530ー1560nmの波長帯に100GHz間隔に32波のWDM信号を出力する光源301ー332と、1480nmの励起光と1565nmの励起光とを出力す

る光源333とを用いる。長さ15mの実施例16にかかるフォトニッククリスタルファイバ343を用いて、信号増幅すると同時に波長一括変換を行う。1480nmの励起光のパワー50mW、1565nmの励起光のパワー50mWに対して、変換効率5dBであり、帯域幅70nmの波長一括変換を行うことができる。

[0142] なお、図44を参照して後述する非線形ファイバーループミラーに、長さ15mの本実施例16のフォトニッククリスタルファイバを適用すると、繰り返し周波数80GHz、パルス幅8psの高速変調した信号光に対して、ゲート光のパワー10mWにより、信号光のスイッチングを行うことができる。

[0143] 図37に、本実施例16にかかるフォトニッククリスタルファイバを用いたパラメトリック光増幅器を示す。このパラメトリック光増幅器は、波長可変光源1301に、アイソレータ1302と、長さ150mの本実施例16にかかるフォトニッククリスタルファイバ1303と、光カプラ1304とを縦続接続する。光カプラ1304には、波長1560nm、励起光パワー1．5Wの光源1305の出力を、EDFA増幅器1306を介して後方から入射する。

[0144] 図38に、上記パラメトリック光増幅器の出力スペクトルを示す。この出力スペクトルは、−30dBmの信号光を用いて波長スキャン測定を行った結果を示ものであり、1500ー1620nmにわたる120nmの波長帯において20dB以上の利得を得た。

実施例 17

[0145] 本発明の実施例17では、単一組成のテルライトガラスでフォトニッククリスタルファイバを構成するのではなく、さらに屈折率の違う組成でコア／クラッド構造を形成する。

[0146] さらに、本発明の実施例17では、ガラス融液を注入成型する際に使用するモールドの下部を円錐状に拡大加工する。このモールドを用いてクラッド及びコアの順に注入し、クラッドガラスの体積収縮によりコアガラスを円錐状に吸い込み成型した母材を用いる。このとき、モールド上部は、内壁が内側に凸となっており、コアガラスが吸い込まれるエリアが小さいため、効果的にコアを吸い込ませるには、注入温度等の最適化が必要になる。

[0147] 図39A−図39B、および図40A−図40Bに、本発明の実施例17にかかるフォトニッククリスタルファイバの作製方法を示す。コアガラスは、前述の表1のNo．18の組成を用い、Tmを4000ppm添加する。クラッドガラスは、前述の表1のNo．17の組成を

用いる。モールド1501は、上述の図26Aに示したモールドと同様に、内壁の内側に凸となる部分が複数形成され、その底部に向かって円錐状に拡大加工してある(図39A)。モールド1501を300ー400℃に予加熱し、クラッドのガラス融液1502、コアのガラス融液1503の順に注入し、クラッドガラスの体積収縮によりコアガラスを円錐状に吸い込み成型したガラス母材1504を作製する(図39B)。コアガラスの吸い込み長さは、15mmである。

[0148] ガラス母材1504を用いて、前述の実施例13と同様な延伸・線引き加工を行い、フォトニッククリスタルファイバ1505を作製する。図40Aにそのフォトニッククリスタルファイバ1505の断面図を示す。フォトニッククリスタルファイバ1505の外径は110μm、空孔内径は35μm、十字の中心部分は2．4μm、Tmの添加されたコア径は1．5μmである。MFDは2．9μmであり、ファイバの損失は1．55μmで30dB／kmであり、コアとしてクラッドと異なるガラス成分を導入したことにより、コア／クラッド構造を有しない場合と比べて低損失化が可能である。零分散波長は、1．52μmである。

[0149] 本実施例17にかかるフォトニッククリスタルファイバを、市販の融着接続機を用いて、石英ファイバ(比屈折率4%、MFD3μm)と接続を行うと、0．2dBの損失および−50dB以下の反射減衰量で接続することができる。比較のために、前述の実施例13にかかる単一組成のフォトニッククリスタルファイバと上記石英ファイバとを接続すると、コア形状が崩れるため、2dBの損失、−19dBの反射減衰量となる。

[0150] 本実施例17にかかるフォトニッククリスタルファイバを20m用いて、前述の図30に示した波長変換装置に適用する。波長変換装置のAWG341で合波されたWDM信号光Esは、1480ー1510nmの波長帯に100GHz間隔に32波のWDM信号を多重した信号である。励起光Epは、Tmの励起に用いる1410nmの励起光と、波長変換およびTmの励起の両方に用いる1520nmの励起光である。波長変換装置は、信号増幅すると同時に32波のWDM信号の波長を一括変換して、変換光Ecを出力する。そして波長変換装置は、1420nmの励起光のパワー50mW、波長変換の励起光のパワー50mWに対して、変換効率5dB、帯域幅70nmの波長一括変換を行うことができる。

実施例 18

[0151] 本発明の実施例18では、上記の実施例17と比較して、コアの吸い込みを容易にするために、モールド下部の円錐状部分の底にガラスを注入した後に、穴が開く構造を設けている。この穴にガラスが漏れ出すことにより、ガラスの収縮との相乗効果を起こす。この穴にガラスが漏れ出すように真空に引くことにより、ガラスの収縮との相乗効果を起こす。

[0152] 図41A−図41Cに、本発明の実施例18にかかるフォトニッククリスタルファイバの作製方法を示す。コアガラスは、前述の表1のNo. 20の組成を用い、クラッドガラスは、前述の表1のNo. 21の組成を用いる。モールド1601は、前述の図39Aに示したモールドと同様に、内壁の内側に凸となる部分が複数形成され、底部に向かって円錐状に拡大加工してある(図41A)。さらに、モールド1601の底の部分には、基台1602が設置され、基台1602の中央の可動部材1603をスライドさせることにより、モールド1601の底の部分に貫通穴ができる形状を有している(図41B)。

[0153] モールド1601を300ー400℃に予加熱し、基台1602を別に350ー450℃に予加熱し、クラッドのガラス融液1604、コアのガラス融液1605の順に注入する(図41A)。クラッドガラスの体積収縮と底面に穴があくことにより(図41B)、クラッドガラスの中心部が流れ出し、コアガラスを吸い込い込んで成型したガラス母材1606を得ることができる(図41C)。コアの吸い込み長さは25mmである。

[0154] このように成型したガラス母材1606を用いて、前述の実施例13と同様な延伸・線引き加工を行い、フォトニッククリスタルファイバを作製した。このフォトニッククリスタルファイバの構造は、前述の図40Aと同じであり、ファイバの外径は115μm、空孔内径は20μm、十字の中心部分は2. 8μm、コア径は1. 2μmである。MFDは2. 5μmであり、ファイバの損失は1. 55μmで25dB／kmであり、零分散波長は、1. 55μmである。

[0155] 図42に、本実施例18にかかるフォトニッククリスタルファイバを用いた光カーシャッタ実験系を示す。光カーシャッタ実験系は、波長1552nmの制御光を出力するDFBーLD(distributed feedback laser diode)1701と、波長1535nmの信号光を出力するDFB−LD1702と、制御光を増幅するErドープファイバアンプ1703とを備え、それら制御光と信号光とが、互いに偏波方向が45度の角度をなすように、長さ10mの本

実施例18にかかるフォトニッククリスタルファイバ1704に入力される。フォトニッククリスタルファイバ1704の出力から、信号光を分岐して、偏光子1705を介してストリークカメラ1706に入力する。

[0156] このような構成により、制御光を入射しない場合には、信号光の偏波はある一定の方向でフォトニッククリスタルファイバ1704中を伝播し、偏光子1705で遮断される。一方、制御光を入射した場合には、フォトニッククリスタルファイバ1704の非線形屈折率効果により、信号光の偏波成分が変化して、偏光子1705を透過する。このようにして、幅8psの信号光パルスをスイッチングすることができる。

実施例 19

[0157] 本発明の実施例19では、コアの吸い込みを容易にするために、モールド下部の円錐状部分の底にガラスを注入した後に、穴が開く構造を設け、この穴にガラスが漏れ出すように真空に引くことにより、ガラスの収縮との相乗効果を起こす。

[0158] また、本発明の実施例19は、母材に形成された空孔を保持または拡大するように加圧線引きする際、線引きの張力を50g以上とすることによりホールの形成及びホール径の制御を容易にする。

[0159] 図43A−図43Cに、本発明の実施例19にかかるフォトニッククリスタルファイバの作製方法を示す。コアガラスは、前述の表1のNo. 13の組成を用い、クラッドガラスは、前述の表1のNo. 16の組成を用いる。モールド1801は、図39Aに示したモールドと同様に、内壁の内側に凸となる部分が複数形成され、下部を円錐状に拡大加工してある(図43A)。さらに、モールド1801の底の部分には、基台1802が設置され、基台1802中央の可動部材1803をスライドさせることにより、モールド1801の底の部分に穴ができる(図43B)。この穴を用いて、モールド1801の下から真空脱気を行う。

[0160] モールド1801を300ー400℃予加熱し、基台1802を別に350ー450℃に予加熱し、クラッドのガラス融液1804、コアのガラス融液1805の順に注入する(図43A)。クラッドガラスの体積収縮と底面の穴から真空脱気することにより(図43B)、クラッドガラスの中心部が流れ出し、コアガラスを吸い込いこみ、成型したガラス母材1806を得ることができる(図43C)。コアの吸い込み長さは、50mmである。

[0161] ガラス母材1806を用いて、前述の実施例13と同様な延伸・線引き加工を行い、フ

ォトニッククリスタルファイバを作製した。このフォトニッククリスタルファイバの構造は、図40A、図40Bと同じであり、ファイバの外径は120μm、空孔内径は28μm、十字の中心部分は2．6μm、コア径は1．3μmである。MFDは2．3μmであり、ファイバの損失は1．55μmで28dB／kmであり、零分散波長は、1．56μmである。

[0162] 図44に、本実施例19にかかるフォトニッククリスタルファイバを用いた非線形ファイバーループミラーを示す。非線形ファイバーループミラーは、ゲート光を入力する光カプラ1901と、長さ15mの本実施例19にかかるフォトニッククリスタルファイバ1902と、ゲート光を出力する光カプラ1903と、信号光を入出力する光カプラ1904とが縦続接続されてループを構成している。

[0163] 信号光は、光カプラ1904で2分岐されて、フォトニッククリスタルファイバ1902を順方向と逆方向に伝播する。信号光は、再び、光カプラ1904に入力されて、互いに干渉し、出力される。このとき、光カプラ1901から入力するゲート光により、フォトニッククリスタルファイバ1902における信号光の位相変化を制御してスイッチングを行う。ゲート光のパワー200mWにより、繰り返し周波数80GHz、パルス幅8psの高速変調された信号光のスイッチングを行うことができる。

[0164] 前述の図26A―図26Eに示した実施例13と同じ作製方法を用いて、前述の表1のNo．11の組成のジャケット管に挿入した後に延伸工程までを行った。本実施例19では空孔に対する加圧を一定にし、線引き張力を樹脂被服するダイスを通す前の値で50g以上になるように調整した。図27A―図27Bに示したように、フォトニッククリスタルファイバの外径は、110μmである。この方法で作製したファイバ＃1（1000m）と、線引き張力を30gで加工したファイバ＃2（1000m）とについて、空孔内径の長手方向の安定性について比較した。

[0165] ファイバ＃1は、空孔内径の設計値が26μmに対して誤差が±5μmある。実際に使うことのできる26μm±1μm以内の箇所は、全体の70％であり、短いものでも50m以上採ることができる。一方、ファイバ＃2は、空孔内径は設計値の26μmに対して誤差が±20μmある。実際に使うことのできる26μm±1μm以内の箇所は、全体の20％であり、50m以上採ることができる部分は数箇所にとどまった。

[0166] 以上の比較から、空孔のサイズを設計値と合せ、一定保持できるように線引きする

工程において、線引き張力を樹脂被服するダイスを通す前の値で50g以上に設定することが重要である。また、他のフォトニックスリスタルファイバの線引き工程においてもこの設定が重要である。ファイバ＃1の十字の中心部分は2．6μmであった。MFDは2．4μmであり、ファイバの損失は1．55μmで24dB／kmであり、零分散波長は、1．56μmである。

[0167] 図45に、本発明の実施例19にかかるフォトニックスリスタルファイバを用いたクロック再生装置を示す。WDM伝送システムのクロック再生装置2003は、トランスミッタ2001から送信されたWDM信号を入力する波長選択フィルタ2002から選択された1波長信号を、クロック再生部2201で受信し、RFクロックを抽出する。抽出したクロックをクロック再生部2201内のモードロックファイバレーザにて光パルスに再生し、この光パルスをEDFA2204にて増幅して、長さ30mの本実施例19にかかるフォトニックスリスタルファイバ2203に入射する。フォトニックスリスタルファイバ2203にて発生する1．5ー1．6μmの100nm帯域にわたるスーパーコンティニューム光を、AWG2204に入力する。AWG2204によってフィルタリングされることにより、単一チャンネルのクロック再生により波長多重されたチャンネル分のクロックパルスを再生することができる。

[0168] 任意の1チャンネルのクロックパルスを、長さ50mの本実施例19にかかるフォトニックスリスタルファイバを用いた非線形ループミラー2004に入射する。トランスミッタ2001から送信されたWDM信号の対応するチャンネルをゲート光として、非線形ループミラー2004に入力することで、劣化した信号品質を復元する、光3R再生を実現することができる。

[0169] 以上の実施例13ー19において、モールドの内壁の内側に凸となる部分が複数形成され、4つの空孔(エアホール)が作製されたが、その空孔の個数についてはこれに限定されるものではない。また、本ファイバを用いた光デバイスは、本ファイバを高非線形ファイバとして利用する光デバイスであって、上述した実施例13ー19に限定されるものではない。

[0170] 以上説明したように、本発明の実施例13ー19にかかる光ファイバの製造方法においては、ガラス母材を注入成型または圧縮成型により作製する。従って、いずれの成

型方法においても、従来の押し出し法と比較して、ガラス母材に対する加熱工程の時間が短いために、ガラス中の結晶化を抑えることができ、低損失の光ファイバを作製することができる。

実施例 20

[0171] 以下に説明する本発明の実施例20ー31においては、テルライトガラス製光ファイバの中心近傍に複数の空孔を配置して、空孔に囲まれた領域の大きさにより、ファイバの分散特性を制御する方法を開示する。

[0172] 図46に、本発明の実施例20にかかる光ファイバの断面構造を示す。ジャケット管2104に挿入された零材料分散波長が2．08μmのテルライトガラス2101には、4つの空孔2103aー2103d（以下、総括番号を2103と表わす）が形成されており、それぞれの空孔2103は空気で満たされておりその屈折率は1にほぼ等しい。これら4つの空孔2103に囲まれた部分は、光が伝搬するコアとなる領域2102である。テルライトガラス2101の外径は2100μm、空孔2103の内径が40μmであり、コア径は4．5μmである。光出力がピークの1／e2となる断面積A_{eff}は4．1μm^2であり、そのγ値は590$W^{-1}km^{-1}$である。

[0173] 本実施例20にかかるフォトニッククリスタルファイバの作製工程は、前述の図26Aー24Eに示す作製工程と同様のものである。重複説明となるが、念のため、図26Aー24Eを参照して、本実施例20にかかるフォトニッククリスタルファイバの作製方法を説明する。テルライトガラス原料を溶融したガラス融液202を、300ー400℃に予加熱したモールド201内に注入する（図26A）。モールド201は、内壁の内側に凸となる部分が4つ形成され、注入されたガラス母材が断面十字型となるように形成されている。ガラス融液の注入後、300℃付近の温度で10時間以上アニールし、ガラス母材203を作製する（図26B）。その際、上記モールド201を4分割して、ガラス母材203を取り出しやすくしているので、ガラス母材203の欠け、クラックを防ぐことができる。上記と同様にガラス原料を溶融し、300ー400℃に予加熱した円筒状のモールド（図示しない）に流し込んだ後、このモールドを水平に保持したまま高速回転させるローテーショナルキャスティング法により、円筒状のジャケット管204を作製する（図26C）。

[0174] ジャケット管204にガラス母材203を挿入して延伸する（図26D）。延伸した母材20

5の断面は、正確に対称となる。延伸した母材205の線径の一定した部分206を切り出し、再び別のジャケット管（図示しない）に挿入して延伸する。ガラス母材203とジャケット管との隙間に空孔が形成され、延伸・線引きを行う際に、空孔の形成された部分208を加圧して、空孔を維持又は拡大するように加圧線引きして、空孔を形成する。線引き張力を樹脂被服するダイスを通す前の値で50g以上になるように調整しながら、外径105μmに線引き加工して（図26E）、光ファイバ207を作製する。

[0175] 本実施例20の延伸工程では、延伸加重が200g程度において、10ー20mmφの母材を3ー6mmφへ延伸できる粘度である10^{9}ー10^{10}P（ポアズ）となるように加熱する。一方、従来の押し出し法により、バルクがラスからホール構造を持つ母材へと加工するためには、粘度として10^{6}P（ポアズ）程度に軟らかくする必要がある。従って、本実施例によれば、従来の押し出し法と比較して、加熱する温度が低いので、結晶核の成長を抑えることができ、低損失のファイバを作製するのに適している。

[0176] 図47に、本実施例20にかかる光ファイバの光電界分布を示す。この光電界分布は、数値計算法の一つである差分法を用いて求めた光電界分布である。電界が10パーセント変化するごとに、等高線を一本引いて表している。実施例20にかかる光ファイバは、計算結果から、中央のコアの領域2102に光が閉じ込められ、光がコアに沿って伝搬しうることが分かる。光ファイバを切断・研磨した後、近視野像（NFP）と遠視野像（FFP）とを観察すれば、光ファイバ中心部に光が閉じ込められ、単一モード化されていることが確認できる。

[0177] 図48に、本実施例20にかかる光ファイバの波長分散を示す。実施例20にかかる光ファイバの零分散波長λ_0は、波長1．56μmである。

実施例 21

[0178] 図49に、本発明の実施例21にかかる光ファイバを示す。ジャケット管2304に挿入された前述の表1におけるNo．15の組成のテルライトガラス2301には、4つの空孔2303aー2303d（総括番号を2303と表わす）が形成され、それら空孔2303は空気で満たされており、その屈折率は1にほぼ等しい。4つの空孔2303に囲まれた部分は、光が伝搬するコアとなる領域2302である。領域2302の内部には、テルライトガラスの組成を変化させて、零材料分散波長が2．1μmでテルライトガラス2301に対して

比屈折率差が1．1％高い屈折率のテルライトガラス2305を埋め込んでいる。本実施例21では、キャピラリー法（capillary method：毛管法）により光ファイバを作製した。テルライトガラス2301の外径は110μm、空孔2303の内径が35μmであり、コア径は3．0μmである。光出力がピークの1／e2となる断面積A_{eff}は2．6μm^2であり、そのγ値は940$W^{-1}km^{-1}$である。

[0179] 図50に、本実施例21にかかる光ファイバの光電界分布を示す。この光電界分布は、数値計算法の一つである差分法を用いて求めた光電界分布である。電界が10パーセント変化するごとに、等高線を一本引いて表している。実施例21にかかる光ファイバは、計算結果から、中央のコアの領域2302に光が閉じ込められ、光がコアに沿って伝搬しうることが分かる。光ファイバを切断・研磨した後、近視野像（NFP）と遠視野像（FFP）とを観察すれば、光ファイバ中心部に光が閉じ込められ、単一モード化されていることが確認できる。

[0180] 図51に、本実施例21にかかる光ファイバの波長分散を示す。実施例21にかかる光ファイバの零分散波長λ_0は、波長1．30μmである。

実施例 22

[0181] 図52に、本発明の実施例22にかかる光ファイバを示す。ジャケット管2404に挿入された前述の表1におけるNo．18の組成のテルライトガラス2401には、4つの空孔2403aー2403d（総括番号を2403と表わす）が形成され、それら空孔2403は空気で満たされており、その屈折率は1にほぼ等しい。4つの空孔2403に囲まれた部分は、光が伝搬するコアとなる領域2402である。領域2402の内部には、テルライトガラスの組成を変化させて、零材料分散波長が2．05μmでテルライトガラス2401に対して比屈折率差が2．2％低い屈折率のテルライトガラス2405を埋め込んでいる。本実施例22では、キャピラリー法により光ファイバを作製した。テルライトガラス2401の外径は90μm、空孔2403の内径が45μmであり、コア径は2．7μmである。光出力がピークの1／e2となる断面積A_{eff}は2．5μm^2であり、そのγ値は930$W^{-1}km^{-1}$である。

[0182] 図53に、本実施例22にかかる光ファイバの光電界分布を示す。この光電解分布は、数値計算法の一つである差分法を用いて求めた光電界分布である。電界が10パ

ーセント変化するごとに、等高線を一本引いて表している。実施例22にかかる光ファイバは、計算結果から、中央のコアの領域2402に光が閉じ込められ、光がコアに沿って伝搬しうることが分かる。光ファイバを切断・研磨した後、近視野像(NFP)と遠視野像(FFP)とを観察すれば、光ファイバ中心部に光が閉じ込められ、単一モード化されていることが確認できる。

[0183] 図54に、本実施例22にかかる光ファイバの波長分散を示す。実施例22にかかる光ファイバの零分散波長λ_0は、波長1．52μmである。

実施例 23

[0184] 図55に、本発明の実施例23にかかる光ファイバを示す。ジャケット管2504に挿入された前述の表1におけるNo．17の組成のテルライトガラス2501には、4つの空孔2503aー2503d(総括番号を2503と表わす)が形成され、それら空孔2503は空気で満たされており、その屈折率は1にほぼ等しい。4つの空孔2503に囲まれた部分は、光が伝搬するコアとなる領域2502である。この領域2502の内部には、中心空孔2505が設けられている。本実施例23では、キャピラリー法により光ファイバを作製した。テルライトガラス2501の外径は105μm、空孔2503の内径が40μmであり、コア径は3．1μmである。光出力がピークの1／e2となる断面積A_{eff}は2．8μm^2であり、そのγ値は810$W^{-1}km^{-1}$である。

[0185] 図56に、本実施例23にかかる光ファイバの光電界分布を示す。この光電界分布は、数値計算法の一つである差分法を用いて求めた光電界分布である。電界が10パーセント変化するごとに、等高線を一本引いて表している。実施例23にかかる光ファイバは、計算結果から、中央のコアの領域2502に光が閉じ込められ、光がコアに沿って伝搬しうることが分かる。光ファイバを切断・研磨した後、近視野像(NFP)と遠視野像(FFP)とを観察すれば、光ファイバ中心部に光が閉じ込められ、単一モード化されていることが確認できる。

[0186] 図57に、本実施例23にかかる光ファイバの波長分散を示す。実施例23にかかる光ファイバの零分散波長λ_0は、波長1．41μmである。

実施例 24

[0187] 図58に、本発明の実施例24にかかる光ファイバを示す。ジャケット管2604に挿入

された前述の表1におけるNo．14の組成のテルライトガラス2601には、3つの空孔2603aー2603c（総括番号を2603と表わす）が形成され、それら空孔2603は空気で満たされており、その屈折率は1にほぼ等しい。3つの空孔2603に囲まれた部分は、光が伝搬するコアとなる領域2602である。本実施例24では、押し出し法により光ファイバを作製した。テルライトガラス2601の外径は110μm、空孔2603の内径が40μmであり、コア径は5．5μmである。光出力がピークの1／e2となる断面積A_{eff}は4．5μm^2であり、そのγ値は520$W^{-1}km^{-1}$である。

[0188] 光ファイバを切断・研磨した後、近視野像（NFP）と遠視野像（FFP）とを観察すれば、光ファイバ中心部に光が閉じ込められ、単一モード化されていることが確認できる。

[0189] 図59に、本実施例24にかかる光ファイバの波長分散を示す。実施例24にかかる光ファイバの零分散波長λ_0は、波長1．65μmである。

実施例 25

[0190] 図60に、本発明の実施例25にかかる光ファイバを示す。ジャケット管2704に挿入された前述の表1におけるNo．16の組成のテルライトガラス2701には、4つの空孔2703aー2703d（総括番号を2703と表わす）が形成され、それら空孔2703は空気で満たされており、その屈折率は1にほぼ等しい。4つの空孔2703に囲まれた部分は、光が伝搬するコアとなる領域2702である。本実施例25では、押し出し法により光ファイバを作製した。テルライトガラス2701の外径は110μm、空孔2703の内径が40μmであり、コア径は2．2μmである。光出力がピークの1／e2となる断面積A_{eff}は2．0μm^2であり、そのγ値は1200$W^{-1}km^{-1}$である。

[0191] 光ファイバを切断・研磨した後、近視野像（NFP）と遠視野像（FFP）とを観察すれば、光ファイバ中心部に光が閉じ込められ、単一モード化されていることが確認できる。

[0192] 図61に、本実施例25にかかる光ファイバの波長分散を示す。実施例25にかかる光ファイバの零分散波長λ_0は、波長1．22μmである。

実施例 26

[0193] 図62に、本発明の実施例26にかかる光ファイバを示す。ジャケット管2804に挿入

された前述の表1におけるNo．18の組成のテルライトガラス2801には、5つの空孔2803aー2803e（総括番号を2803と表わす）が形成され、それら空孔2803は空気で満たされており、その屈折率は1にほぼ等しい。5つの空孔2803に囲まれた部分は、光が伝搬するコアとなる領域2802である。領域2802の内部には、テルライトガラスの組成を変化させて、零材料分散波長が2．1μmでテルライトガラス2801に対して比屈折率差が1．1%高い屈折率のテルライトガラス2805を埋め込んでいる。本実施例26では、押し出し法により光ファイバを作製した。テルライトガラス2801の外径は110μm、空孔2803の内径が40μmであり、コア径は4．1μmである。テルライトガラス2805の直径は1．0μmである。光出力がピークの1／e2となる断面積A_{eff}は3．5μm^2であり、そのγ値は$680W^{-1}km^{-1}$である。

[0194] 光ファイバを切断・研磨した後、近視野像（NFP）と遠視野像（FFP）とを観察すれば、光ファイバ中心部に光が閉じ込められ、単一モード化されていることが確認できる。

[0195] 図63に、本実施例26にかかる光ファイバの波長分散を示す。実施例26にかかる光ファイバの零分散波長λ_0は、波長1．61μmである。

実施例 27

[0196] 図64に、本発明の実施例27にかかる光ファイバを示す。ジャケット管2904に挿入された前述の表1におけるNo．12の組成のテルライトガラス2901には、6つの空孔2903aー2903f（総括番号を2903と表わす）が形成され、それら空孔2903は空気で満たされており、その屈折率は1にほぼ等しい。6つの空孔2903に囲まれた部分は、光が伝搬するコアとなる領域2902である。領域2902の内部には、テルライトガラスの組成を変化させて、零材料分散波長が2．15μmでテルライトガラス2901に対して比屈折率差が1．5%低い屈折率のテルライトガラス2905を埋め込んでいる。本実施例27では、押し出し法により光ファイバを作製した。テルライトガラス2901の外径は110μm、空孔2903の内径が40μmであり、コア径は3．5μmである。テルライトガラス2905の直径は1．5μmである。光出力がピークの1／e2となる断面積A_{eff}は3．4μm^2であり、そのγ値は$670W^{-1}km^{-1}$である。

[0197] 光ファイバを切断・研磨した後、近視野像（NFP）と遠視野像（FFP）とを観察すれ

ば、光ファイバ中心部に光が閉じ込められ、単一モード化されていることが確認できる。

[0198] 図65に、本実施例27にかかる光ファイバの波長分散を示す。実施例27にかかる光ファイバの零分散波長λ_0は、波長1．70μmである。

実施例 28

[0199] 図66に、本発明の実施例28にかかる光ファイバを示す。ジャケット管3004に挿入された前述の表1におけるNo．10の組成のテルライトガラス3001には、3つの空孔3003aー3003c（総括番号を3003と表わす）が形成され、それら空孔3003は空気で満たされており、その屈折率は1にほぼ等しい。3つの空孔3003に囲まれた部分は、光が伝搬するコアとなる領域3002である。

[0200] 図67に、図66の光ファイバのコアとなる領域の拡大図を示す。本実施例28では、超音波ドリル法（ultrasonic drilling）により光ファイバを作製した。テルライトガラス3001の外径は100μm、空孔3003の内径が35μmであり、コア径aは5．5μmである。空孔3005の直径dは0．5μmである。光出力がピークの1／e2となる断面積A_{eff}は3．0μm^2であり、そのγ値は780$W^{-1}km^{-1}$である。

[0201] 光ファイバを切断・研磨した後、近視野像（NFP）と遠視野像（FFP）とを観察すれば、光ファイバ中心部に光が閉じ込められ、単一モード化されていることが確認できる。

[0202] 図68に、本実施例28で得られた光ファイバの零分散波長とコアサイズとの関係を示す。零分散波長を1．2μmー1．7μm帯内に収めるためには、空孔に囲まれて光を閉じ込めるコアとなる領域の大きさ、すなわちコア径aを0．6μmー6．5μmの範囲に制御すればよいことが分かる。

実施例 29

[0203] 図69に、本発明の実施例29にかかる光ファイバを示す。ジャケット管3104に挿入された前述の表1におけるNo．11の組成のテルライトガラス3101には、4つの空孔3103aー3103dが形成され、それら空孔3103は空気で満たされており、その屈折率は1にほぼ等しい。4つの空孔3103に囲まれた部分は、光が伝搬するコアとなる領域3102である。

[0204] 図70に、図69の光ファイバのコアとなる領域の拡大図を示す。本実施例29では、超音波ドリル法により光ファイバを作製した。テルライトガラス3101の外径は125μm、空孔3103の内径が50μmであり、コア径は3．5μmである。光出力がピークの1／e2となる断面積A_{eff}は3．2μm^2であり、そのγ値は770$W^{-1}km^{-1}$である。

[0205] 光ファイバを切断・研磨した後、近視野像（NFP）と遠視野像（FFP）とを観察すれば、光ファイバ中心部に光が閉じ込められ、単一モード化されていることが確認できる。

[0206] 図71に、本実施例29で得られた零分散波長とコアサイズとの関係を示す。零分散波長を1．2μmー1．7μm帯内に収めるためには、空孔に囲まれて光を閉じ込めるコアとなる領域の大きさ、すなわちコア径aを0．6μmー5．0μmの範囲に制御すればよいことが分かる。

実施例 30

[0207] 図72に、本発明の実施例30にかかる光ファイバを示す。ジャケット管3204に挿入された前述の表1におけるNo．17の組成のテルライトガラス3201には、5つの空孔3203aー3303d（総括番号を3203と表わす）が形成され、それら空孔3203は空気で満たされており、その屈折率は1にほぼ等しい。5つの空孔3203に囲まれた部分は、光が伝搬するコアとなる領域3202である。

[0208] 図73に、図72の光ファイバのコアとなる領域の拡大図を示す。領域3202の内部には、テルライトガラスの組成を変化させ、零材料分散波長が2．2μmでテルライトガラス3201に対して比屈折率差が1．1％高い屈折率のテルライトガラス3205を埋め込んでいる。本実施例30では、押し出し法により光ファイバを作製した。テルライトガラス3201の外径は80μm、空孔3203の内径が35μmであり、コア径は3．9μmである。テルライトガラス3205の直径は1．0μmである。光出力がピークの1／e2となる断面積A_{eff}は3．4μm^2であり、そのγ値は690$W^{-1}km^{-1}$である。

[0209] 光ファイバを切断・研磨した後、近視野像（NFP）と遠視野像（FFP）とを観察すれば、光ファイバ中心部に光が閉じ込められ、単一モード化されていることが確認できる。

[0210] 図74に、本実施例30で得られた零分散波長とコアサイズとの関係を示す。零分散

波長を1．2μmー1．7μm帯内に収めるためには、空孔に囲まれて光を閉じ込めるコアとなる領域の大きさ、すなわちコア径aを0．4μmー5．0μmの範囲に制御すればよいことが分かる。

実施例 31

[0211] 図75に、本発明の実施例31にかかる光ファイバを示す。ジャケット管3304に挿入された前述の表1におけるNo．17の組成のテルライトガラス3301には、6つの空孔3303aー3303f（総括番号を3303と表わす）が形成され、それら空孔3303は空気で満たされており、その屈折率は1にほぼ等しい。これら6つの空孔3303に囲まれた部分は、光が伝搬するコアとなる領域3302である。

[0212] 図76に、図75の光ファイバのコアとなる領域の拡大図を示す。領域3302の内部には、テルライトガラスの組成を変化させ、零材料分散波長が2．3μmでテルライトガラス3301に対して比屈折率差が1．5%低い屈折率のテルライトガラス3305を埋め込んでいる。本実施例31では、押し出し法により光ファイバを作製した。テルライトガラス3301の外径は95μm、空孔3303の内径が50μmであり、コア径は3．0μmである。テルライトガラス3305の直径は1．5μmである。光出力がピークの1／e2となる断面積A_{eff}は3．5μm^2であり、そのγ値は680$W^{-1}km^{-1}$である。

[0213] 光ファイバを切断・研磨した後、近視野像（NFP）と遠視野像（FFP）とを観察すれば、光ファイバ中心部に光が閉じ込められ、単一モード化されていることが確認できる。

[0214] 図77に、本実施例31で得られた零分散波長とコアサイズとの関係を示す。零分散波長を1．2μmー1．7μm帯内に収めるためには、空孔に囲まれて光を閉じ込めるコアとなる領域の大きさ、すなわちコア径aを0．3μmー4．0μmの範囲に制御すればよいことが分かる。

産業上の利用可能性

[0215] 本発明の光ファイバ及びその製造方法に基づいて作製された非線形デバイスは、光通信システムにおいて高性能化、大容量化、低価格化を進めることに有効であり、その結果、それらのシステムを用いたサービスの高度化、経済化に大きく寄与でき、光通信産業に極めて有益に利用することができる。

請求の範囲

[1] 光ファイバ通信または光デバイスで用いる光を伝搬する光ファイバであって、前記光ファイバの少なくともコア領域が2μm以上の零材料分散波長を持つテルライトガラスからなり、該光ファイバの中心に光を閉じ込めるように該光ファイバ内に空孔を配列することにより、零分散波長を1．2ー1．7μm帯に制御することを特徴とする光ファイバ。

[2] 光の波長をλ、円周率をπとしたとき、前記光ファイバの中心にπλ^{2}の0．1倍から5倍の面積を有する領域を設け、該領域を除く該光ファイバの断面における全域あるいは該領域を囲む位置に前記空孔を配列したことにより、該領域が光を閉じ込めるコアとなることを特徴とする請求項1に記載の光ファイバ。

[3] 2μm以上の零材料分散波長を持つテルライトガラスであり、TeO_2－Bi_2O_3－LO－M_2O－N_2O_3－Q_2O_5からなる組成（LはZn、Ba、Mgのうち少なくとも1種類以上、MはLi、Na、K、Rb、Csのうち少なくとも一種類以上のアルカリ元素、NはB、La、Ga、Al、Yのうち少なくとも一種類以上、QはP、Nbのうち少なくとも一種類以上）を持ち、その成分が

$50 < TeO_2 < 90$ （モル%）

$1 < Bi_2O_3 < 30$ （モル%）

$1 < LO + M_2O + N_2O_3 + Q_2O_5 < 50$ （モル%）

を特徴とする請求項1に記載の光ファイバ。

[4] 2μm以上の零材料分散波長を持つテルライトガラスであり、TeO_2－Bi_2O_3－LO－M_2O－N_2O_3－Q_2O_5からなる組成（LはZn、Ba、Mgのうち少なくとも1種類以上、MはLi、Na、K、Rb、Csのうち少なくとも一種類以上のアルカリ元素、NはB、La、Ga、Al、Yのうち少なくとも一種類以上、QはP、Nbのうち少なくとも一種類以上）を持ち、その成分が

$50 < TeO_2 < 90$ （モル%）

$1 < Bi_2O_3 < 30$（モル%）

$1 < LO + M_2O + N_2O_3 + Q_2O_5 < 50$（モル%）

を特徴とする請求項2に記載の光ファイバ。

[5] テルライト材料ガラスに希土類イオンとしてCe^{3+}、Pr^{3+}、Nd^{3+}、Pm^{3+}、Sm^{3+}、Eu^{3+}、Tb^{3+}、Dy^{3+}、Ho^{3+}、Er^{3+}、Tm^{3+}、Yb^{3+}の内から選ばれた少なくとも一種を添加することを特徴とする請求項3に記載の光ファイバ。

[6] テルライト材料ガラスに希土類イオンとしてCe^{3+}、Pr^{3+}、Nd^{3+}、Pm^{3+}、Sm^{3+}、Eu^{3+}、Tb^{3+}、Dy^{3+}、Ho^{3+}、Er^{3+}、Tm^{3+}、Yb^{3+}の内から選ばれた少なくとも一種を添加することを特徴とする請求項4に記載の光ファイバ。

[7] テルライトガラスからなる光ファイバであって、コア領域と、前記コア領域を包囲するように配設されて、当該コア領域の軸方向に沿った空孔を当該コア領域の周方向にわたって複数有する第1のクラッド部と、前記第1のクラッド部を包囲するように配設されて、当該第1のクラッド部の等価屈折率と略等しい屈折率を有する第2のクラッド部とを備えてなることを特徴とする請求項1に記載の光ファイバ。

[8] テルライトガラスからなる光ファイバであって、コア領域と、前記コア領域を包囲するように配設されて、当該コア領域の軸方向に沿った空孔を当該コア領域の周方向にわたって複数有する第1のクラッド部と、前記第1のクラッド部を包囲するように配設されて、当該第1のクラッド部の等価屈折率と略等しい屈折率を有する第2のクラッド部とを備えてなることを特徴とする請求項3に記載の光ファイバ。

[9] テルライトガラスからなる光ファイバであって、コア領域と、前記コア領域を包囲するように配設されて、当該コア領域の軸方向に沿った空孔を当該コア領域の周方向にわたって複数有する第1のクラッド部と、前記第1のクラッド部を包囲するように配設されて、当該第1のクラッド部の等価屈折率と略等しい屈折率を有する第2のクラッド部とを備えてなることを特徴とする請求項6に記載の光ファイバ。

[10] 前記第1のクラッド部の前記空孔が、前記コア領域の周方向に沿って一定の間隔で複数形成されていることを特徴とする請求項7から9のいずれかに記載の光ファイバ。

[11] 前記第1のクラッド部の前記空孔が、当該第1クラッド部の半径方向にわたって複数形成されていることを特徴とする請求項7から9のいずれかに記載の光ファイバ。

[12] 前記第1のクラッド部の前記空孔内部が、前記第2クラッド部の屈折率よりも低い屈折率を有する材料で充填されていることを特徴とする請求項7から9のいずれかに記

載の光ファイバ。

[13] 前記コア領域の屈折率が、前記第1クラッド部の材料の屈折率よりも高いことを特徴とする請求項7から9のいずれかに記載の光ファイバ。

[14] 前記コア領域と前記第1クラッド部との比屈折率差が2%以上であることを特徴とする請求項7から9のいずれかに記載の光ファイバ。

[15] 前記コアとなる中心部に、前記テルライトガラスの屈折率と異なる屈折率を有するテルライトガラスが埋め込まれていることを特徴とする請求項7から9のいずれかに記載の光ファイバ。

[16] 前記コアとなる領域の中心部に、空孔が設けられていることを特徴とする請求項2から6のいずれかに記載の光ファイバ。

[17] 前記空孔を三角格子状または四角格子状またはハニカム形状のいずれかの形状に配列したことを特徴とする請求項2に記載の光ファイバ。

[18] 前記空孔が円柱または楕円柱または多角柱いずれかの形状からなることを特徴とする請求項2に記載の光ファイバ。

[19] 前記空孔の数が3個であり、コアとなる領域の直径が0．6ー6．5μmであることを特徴とする請求項2から6のいずれかに記載の光ファイバ。

[20] 前記空孔の数が4個であり、コアとなる領域の直径が0．6ー5μmであることを特徴とする請求項2から6のいずれかに記載の光ファイバ。

[21] 2μm以上の零材料分散波長を持つテルライトガラスであり、TeO_2－Bi_2O_3－LO－M_2O－N_2O_3－Q_2O_5からなる組成（LはZn、Ba、Mgのうち少なくとも1種類以上、MはLi、Na、K、Rb、Csのうち少なくとも一種類以上のアルカリ元素、NはB、La、Ga、Al、Yのうち少なくとも一種類以上、QはP、Nbのうち少なくとも一種類以上）を持ち、その成分が

$50 < TeO_2 < 90$ （モル%）

$1 < Bi_2O_3 < 30$ （モル%）

$1 < LO + M_2O + N_2O_3 + Q_2O_5 < 50$ （モル%）

であるテルライトガラスを少なくともコア材料とし、内壁の内側に凸となる部分を複数形成されたモールドに、前記テルライトガラス融液を注入成型して母材を作製する第

1工程と、該第1工程で作製された前記ガラス母材を、テルライトガラスからなる円筒状のジャケット管に挿入し、前記ガラス母材と前記ジャケット管との隙間の空孔を維持又は拡大するように加圧線引きする第2工程とを備えた

ことを特徴とする光ファイバの製造方法。

[22] 2μm以上の零材料分散波長を持つテルライトガラスであり、TeO_2－Bi_2O_3－LO－M_2O－N_2O_3－Q_2O_5からなる組成（LはZn、Ba、Mgのうち少なくとも1種類以上、MはLi、Na、K、Rb、Csのうち少なくとも一種類以上のアルカリ元素、NはB、La、Ga、Al、Yのうち少なくとも一種類以上、QはP、Nbのうち少なくとも一種類以上）を持ち、その成分が

$50 < TeO_2 < 90$ （モル%）

$1 < Bi_2O_3 < 30$ （モル%）

$1 < LO + M_2O + N_2O_3 + Q_2O_5 < 50$ （モル%）

であるテルライトガラスを少なくともコア材料とし、内壁の内側に凸となる部分を複数形成され、前記内壁が底部に向かって円錐状に拡大加工されたモールドに、前記テルライトガラス融液を注入成型して母材を作製する第1工程と、さらにテルライトガラスからなるコアガラスのガラス融液を注入し、クラッドガラスの体積収縮によりコアガラスを円錐状に吸い込み成型したガラス母材を作製する第2工程と、第2工程で作製された前記ガラス母材を、テルライトガラスからなる円筒状のジャケット管に挿入し、前記ガラス母材と前記ジャケット管との隙間の空孔を維持又は拡大するように加圧線引きする第3工程とを備えた

ことを特徴とする光ファイバの製造方法。

[23] 2μm以上の零材料分散波長を持つテルライトガラスであり、TeO_2－Bi_2O_3－LO－M_2O－N_2O_3－Q_2O_5からなる組成（LはZn、Ba、Mgのうち少なくとも1種類以上、MはLi、Na、K、Rb、Csのうち少なくとも一種類以上のアルカリ元素、NはB、La、Ga、Al、Yのうち少なくとも一種類以上、QはP、Nbのうち少なくとも一種類以上）を持ち、その成分が

$50 < TeO_2 < 90$ （モル%）

$1 < Bi_2O_3 < 30$ （モル%）

$1<LO+M_2O+N_2O_3+Q_2O_5<50$ （モル%）

であるテルライトガラスを少なくともコア材料とし、内壁の内側に凸となる部分を複数形成され、前記内壁が底部に向かって円錐状に拡大加工され、前記底部に穴を有するモールドに、前記テルライトガラス融液を注入成型して母材を作製する第1工程と、さらにテルライトガラスからなるコアガラスのガラス融液を注入し、クラッドガラスの体積収縮と、前記穴から前記クラッドガラスが流れ出すことによりコアガラスを円錐状に吸い込み成型したガラス母材を作製する第2工程と、第2工程で作製された前記ガラス母材を、テルライトガラスからなる円筒状のジャケット管に挿入し、前記ガラス母材と前記ジャケット管との隙間の空孔を維持又は拡大するように加圧線引きする第3工程とを備えた

ことを特徴とする光ファイバの製造方法。

[24] 前記モールドは、内壁の内側に凸となる部分が4つ形成され、前記光ファイバのクラッドは、4つの空孔を有することを特徴とする請求項21から23のいずれかに記載の光ファイバの製造方法。

[25] 前記第2工程は、前記穴から真空脱気を行って、前記クラッドガラスが流れ出すようにしたことを特徴とする請求項23に記載の光ファイバの製造方法。

[26] 2μm以上の零材料分散波長を持つテルライトガラスであり、TeO_2—Bi_2O_3—LO—M_2O—N_2O_3—Q_2O_5からなる組成（LはZn、Ba、Mgのうち少なくとも1種類以上、MはLi、Na、K、Rb、Csのうち少なくとも一種類以上のアルカリ元素、NはB、La、Ga、Al、Yのうち少なくとも一種類以上、QはP、Nbのうち少なくとも一種類以上）を持ち、その成分が

$50<TeO_2<90$ （モル%）

$1<Bi_2O_3<30$ （モル%）

$1<LO+M_2O+N_2O_3+Q_2O_5<50$ （モル%）

であるテルライトガラスを少なくともコア材料とし、前記テルライトガラスからなるガラス融液をモールドに注入成型して円柱状のガラスブロックを作製する第1工程と、該第1工程で作製された前記ガラスブロックの長手方向に穴あけ加工して、空孔が形成されたガラス母材を作製する第2工程と、第2工程で作製された前記ガラス母材を、テ

ルライトガラスからなる円筒状のジャケット管に挿入し、前記空孔を維持又は拡大するように加圧線引きする第3工程とを備えた

ことを特徴とする光ファイバの製造方法。

[27] 2μm以上の零材料分散波長を持つテルライトガラスであり、TeO_2－Bi_2O_3－LO－M_2O－N_2O_3－Q_2O_5からなる組成（LはZn、Ba、Mgのうち少なくとも1種類以上、MはLi、Na、K、Rb、Csのうち少なくとも一種類以上のアルカリ元素、NはB、La、Ga、Al、Yのうち少なくとも一種類以上、QはP、Nbのうち少なくとも一種類以上）を持ち、その成分が

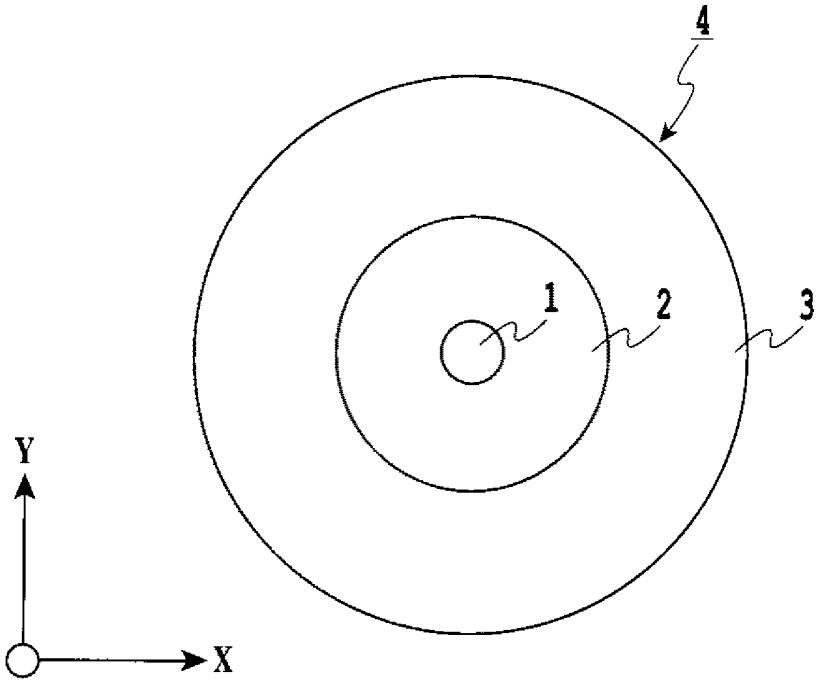
$50 < TeO_2 < 90$ （モル%）

$1 < Bi_2O_3 < 30$ （モル%）

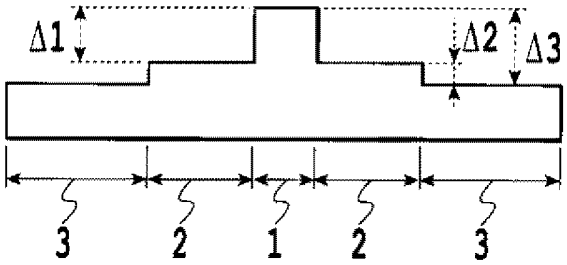
$1 < LO + M_2O + N_2O_3 + Q_2O_5 < 50$ （モル%）

であるテルライトガラスを少なくともコア材料とし、前記テルライトガラスからなるガラス融液を、基台から円柱棒状のピンが複数内側に整列した冶具を底面に有するモールドに注入し、前記冶具を引き抜くことにより空孔を形成された母材を作製する第1工程と、第1工程で作製された前記ガラス母材を、テルライトガラスからなる円筒状のジャケット管に挿入し、前記空孔を維持又は拡大するように加圧線引きする第2工程と、を備えたことを特徴とする光ファイバの製造方法。

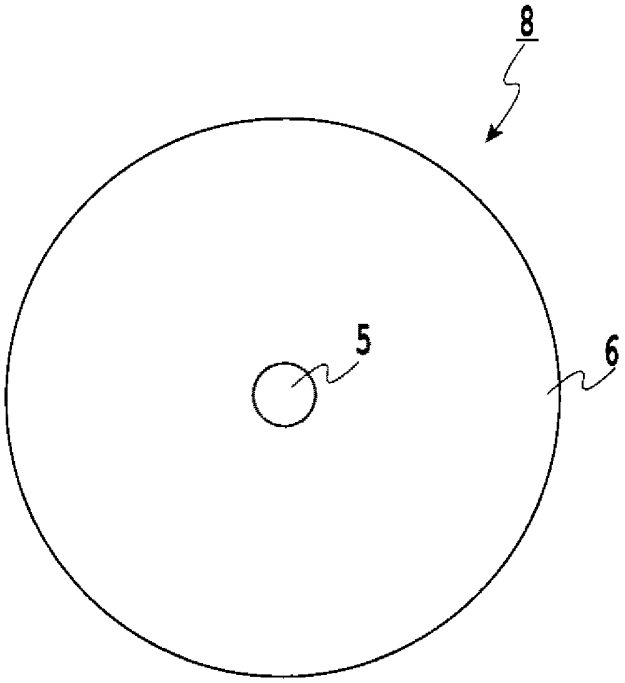
[図1]



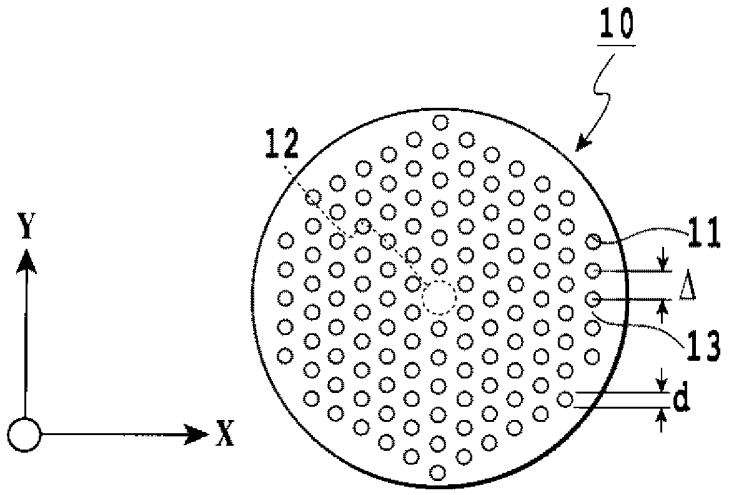
[図2]



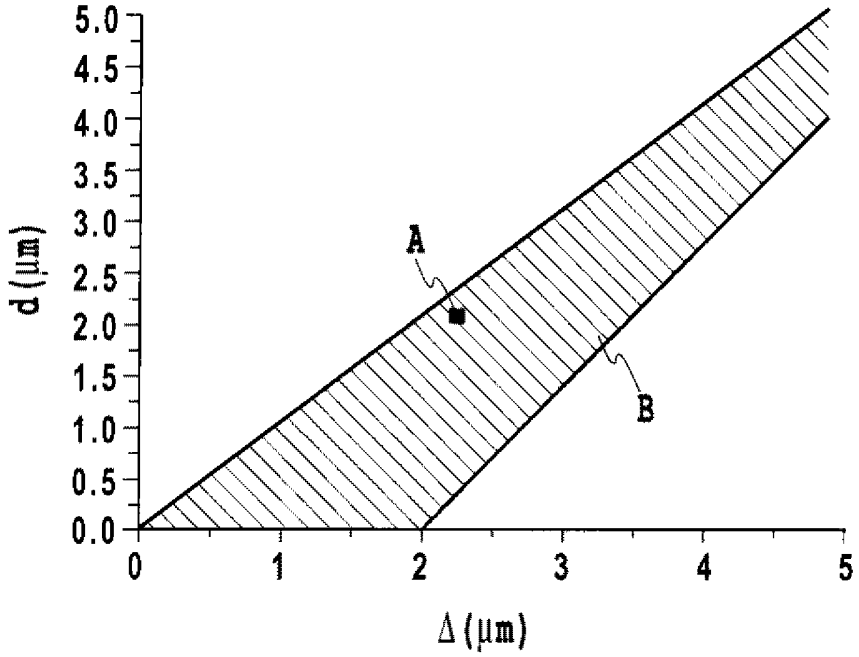
[図3]



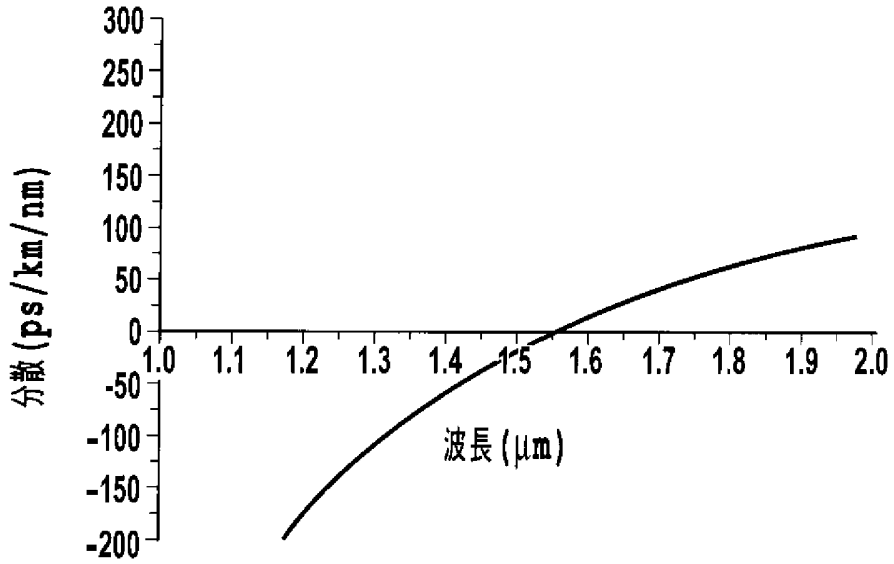
[図4]



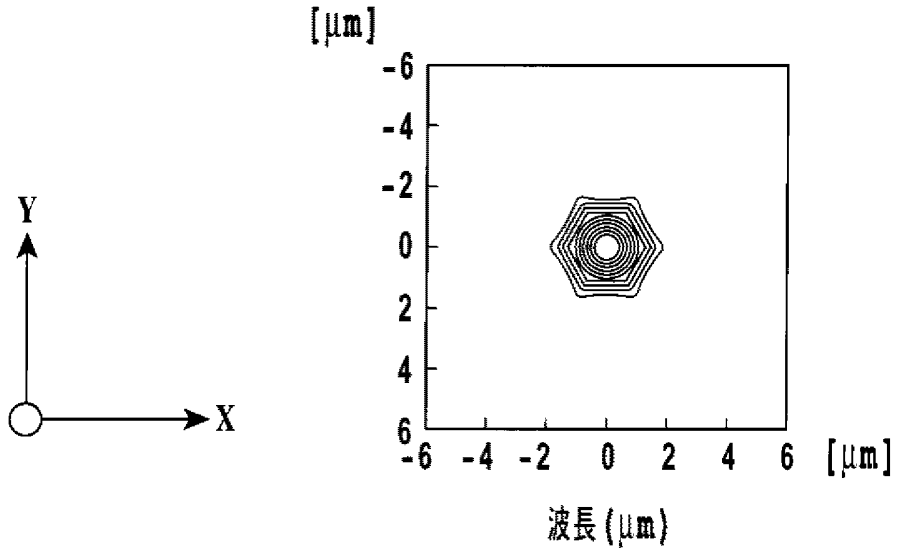
[図5]



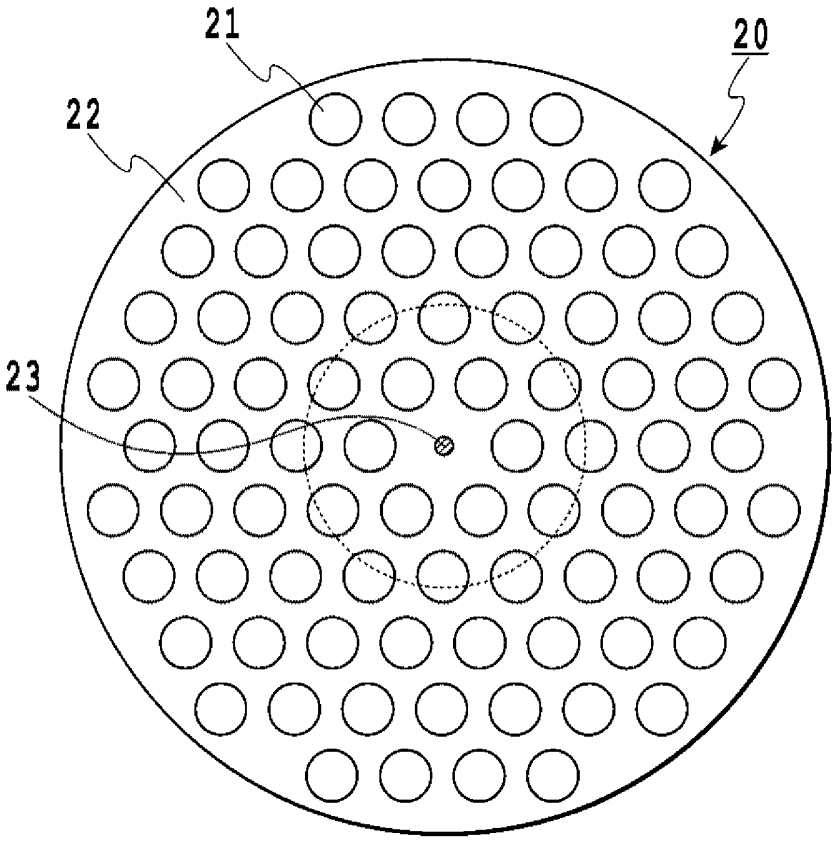
[図6]


300
250
200
150
100
50
0
-50
-100
-150
-200
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
1.6
1.7
1.8
1.9
2.0
分散 (ps/km/nm)
波長 (μm)

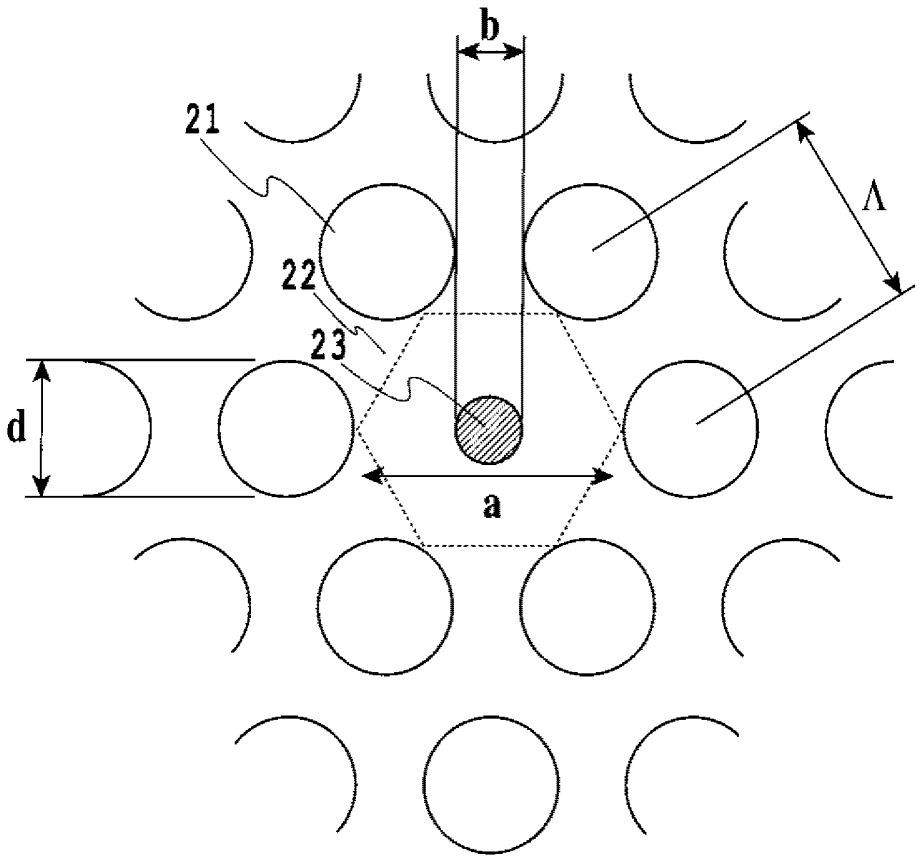
[図7]


[μm]
-6
-4
-2
0
2
4
6
-6
-4
-2
0
2
4
6
[μm]
波長 (μm)
Y
X

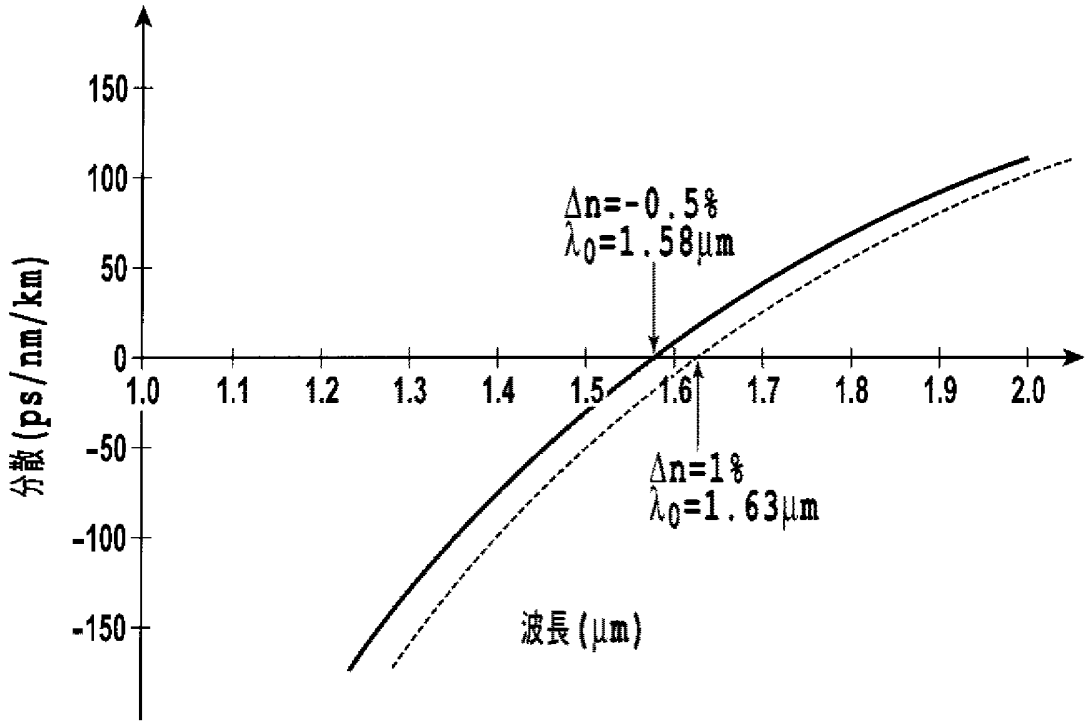
[図8A]



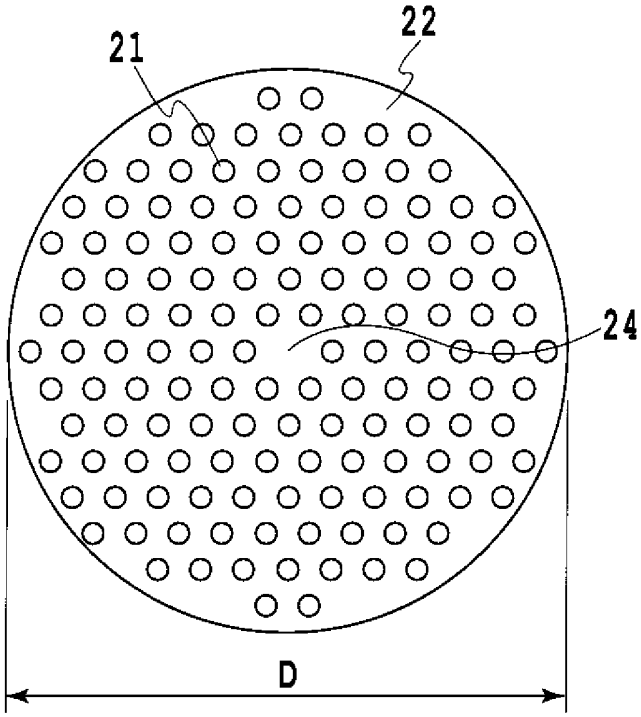
[図8B]



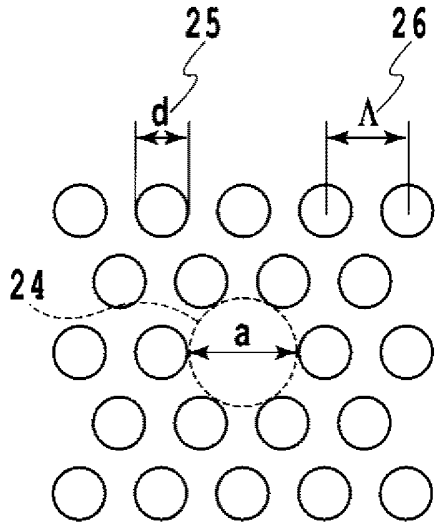
[図9]


150
100
50
0
-50
-100
-150
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
1.6
1.7
1.8
1.9
2.0
分散(ps/nm/km)
波長(μm)
Δn=-0.5%
λ0=1.58μm
Δn=1%
λ0=1.63μm

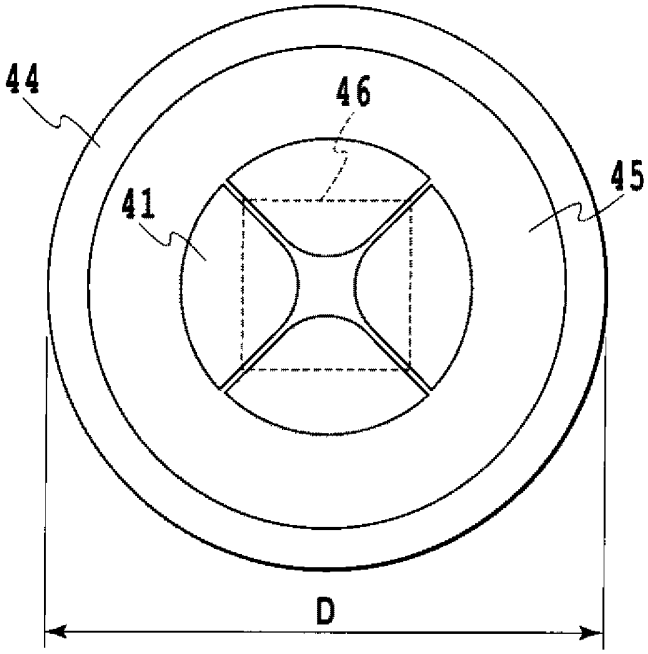
[図10A]



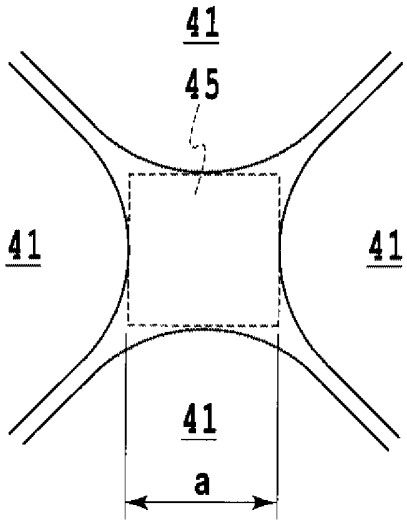
[図10B]



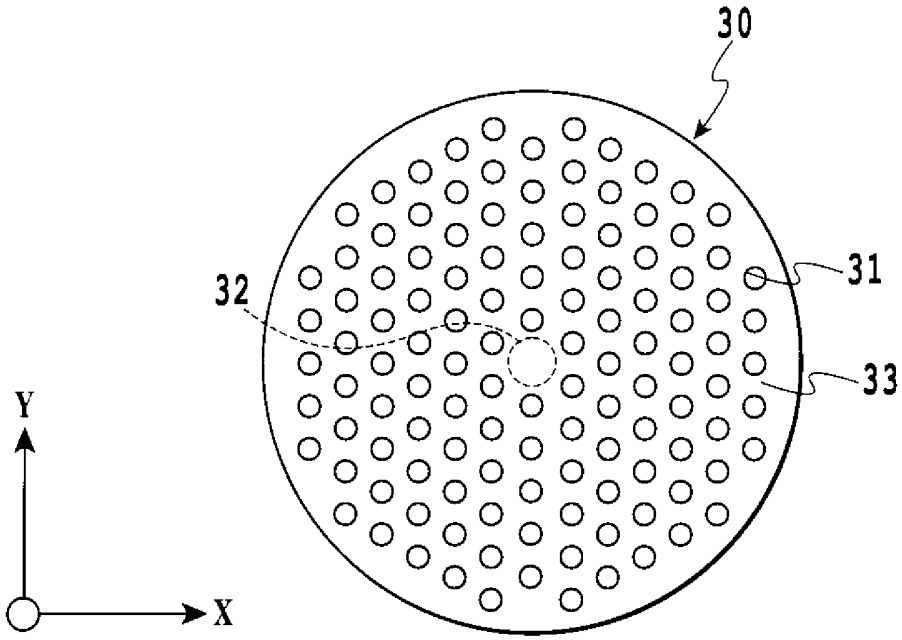
[図11A]



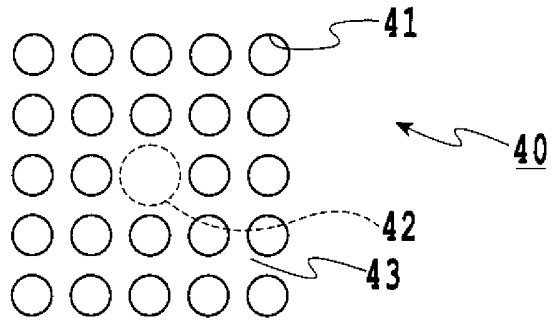
[図11B]



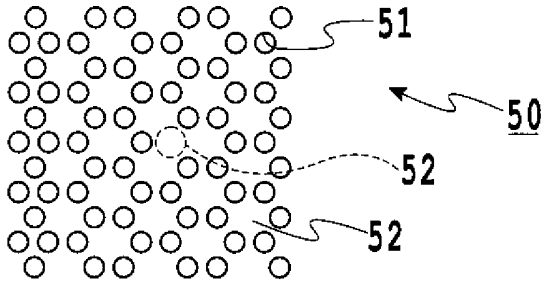
[図12]



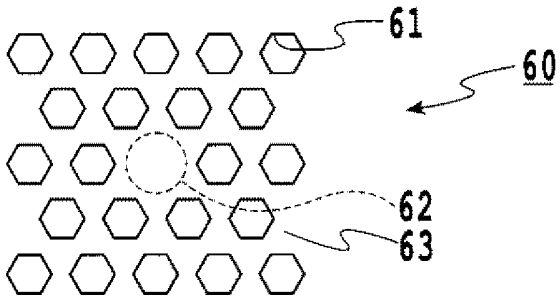
[図13]



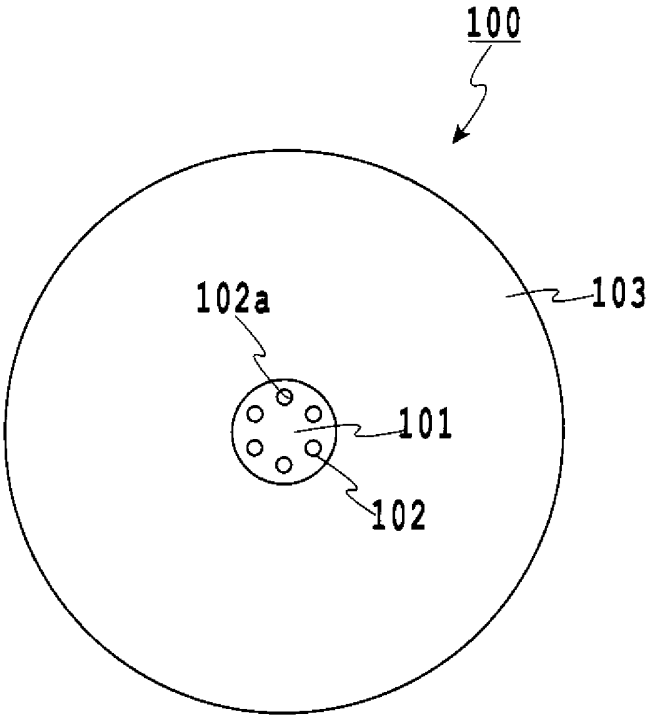
[図14]



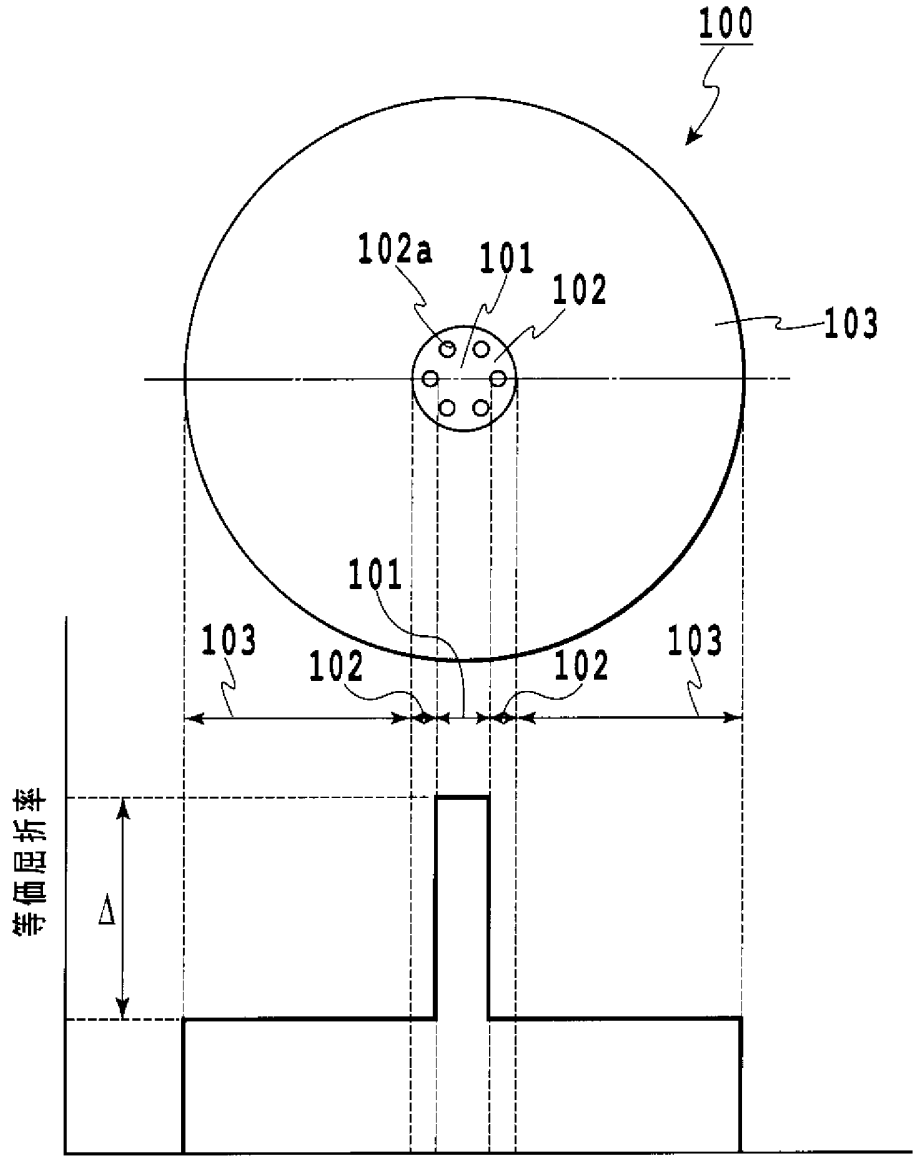
[図15]



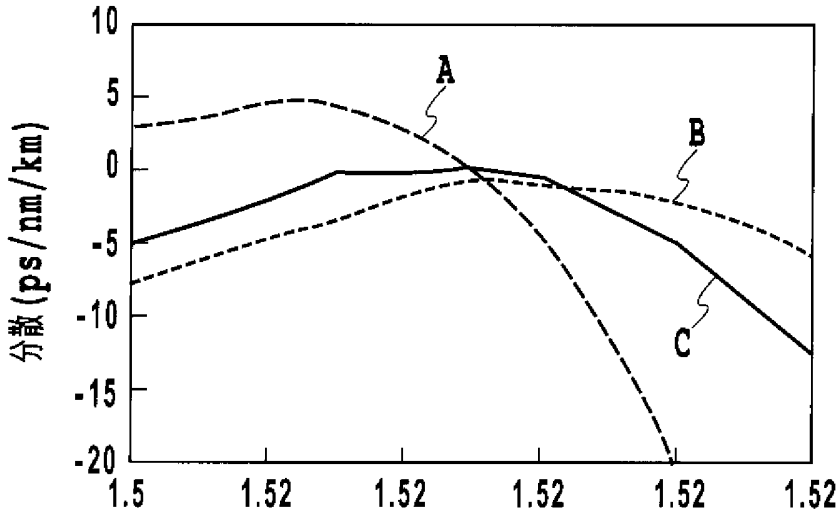
[図16]



[図17]

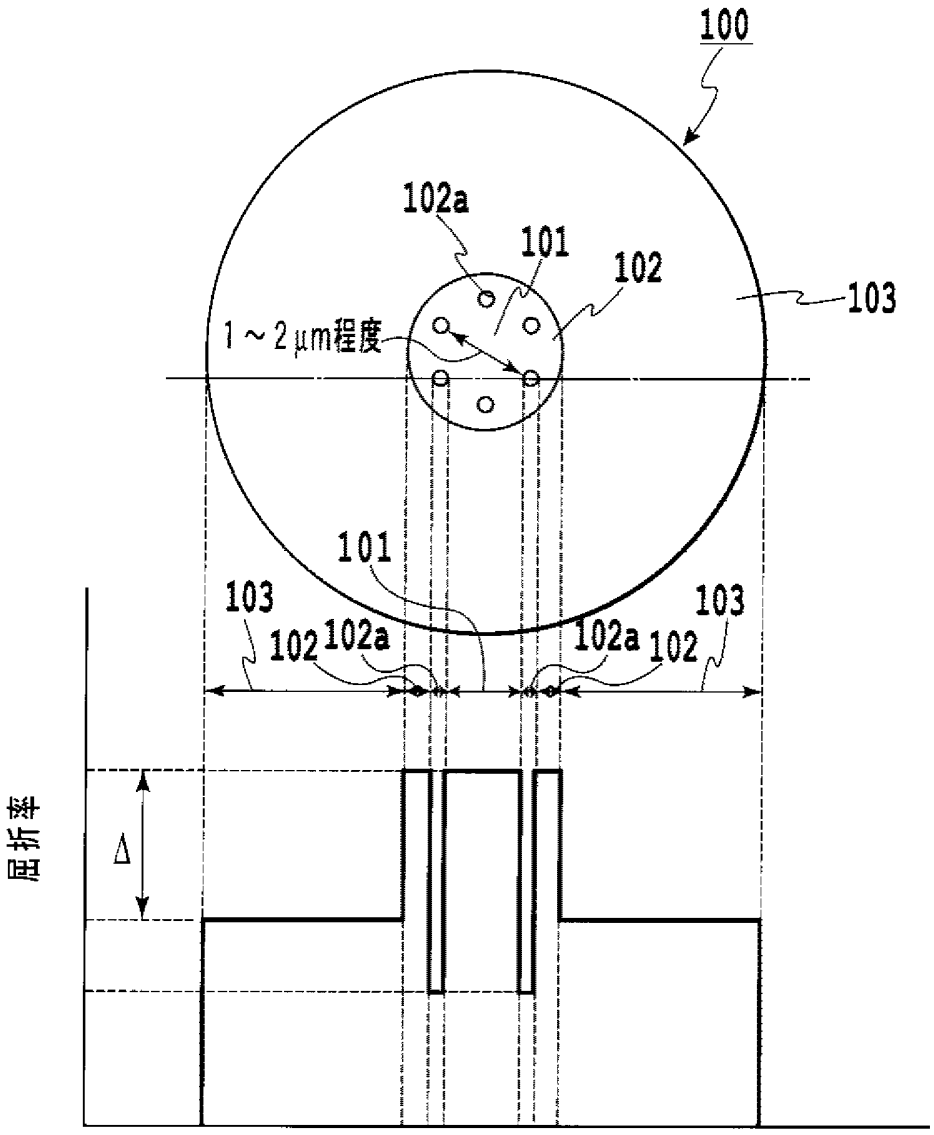


[図18]



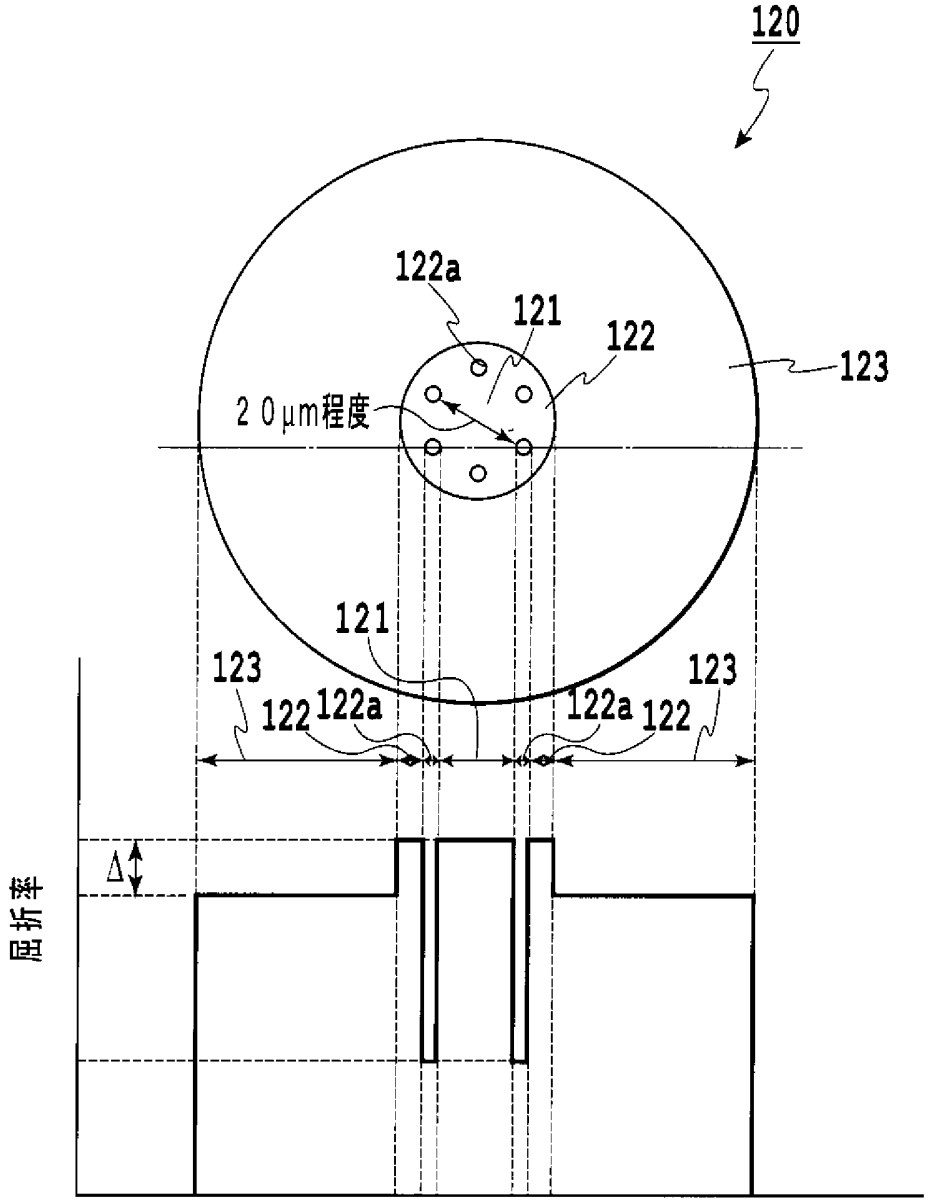
A:r=0.54,y=1.41,rr=2.0
B:r=0.54,y=1.45,rr=2.0
C:r=0.52,y=1.43,rr=2.0

[図19]


100
102a
101
102
103
1～2μm程度
101
103
102
102a
102a
102
103
屈折率
Δ
光ファイバ径方向位置

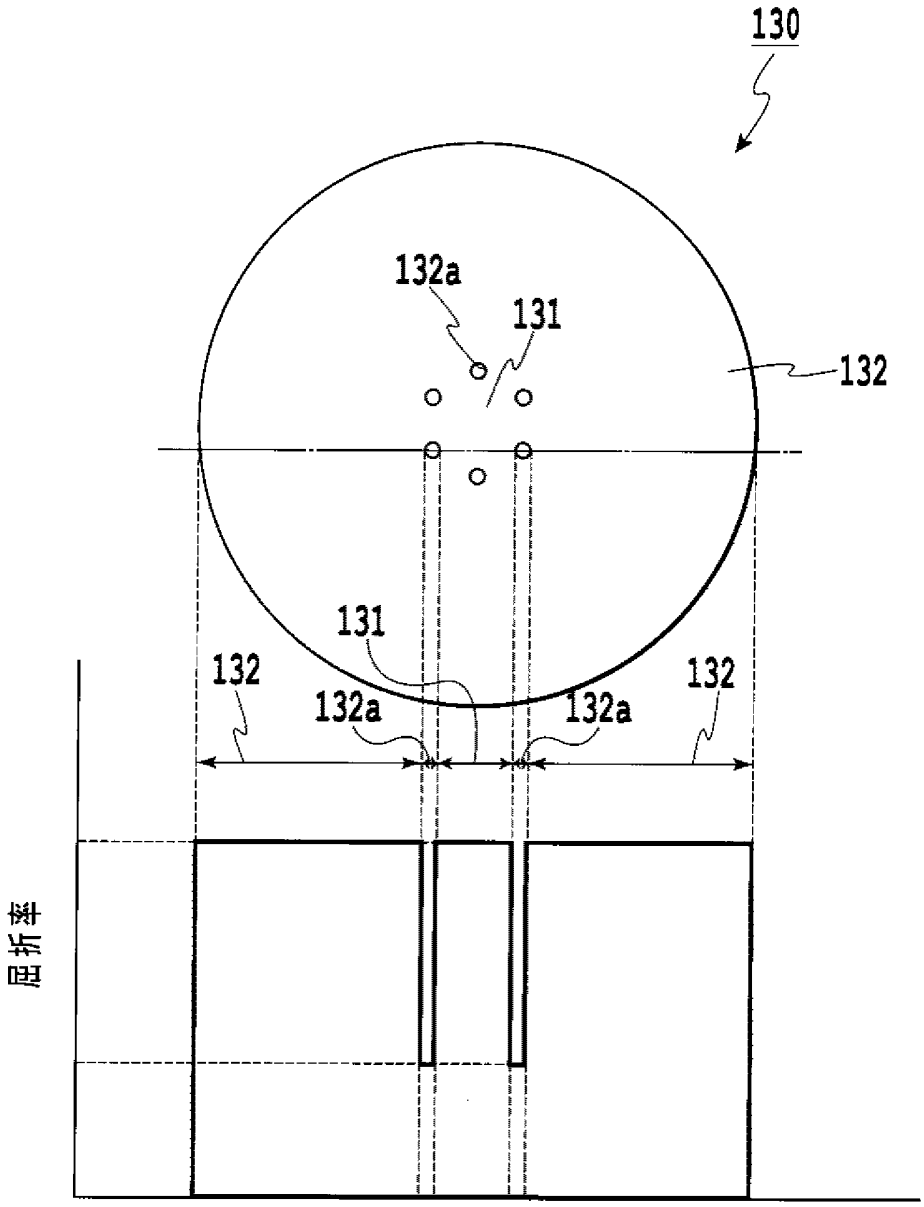
(Δ=2~4%程度)

[図20]

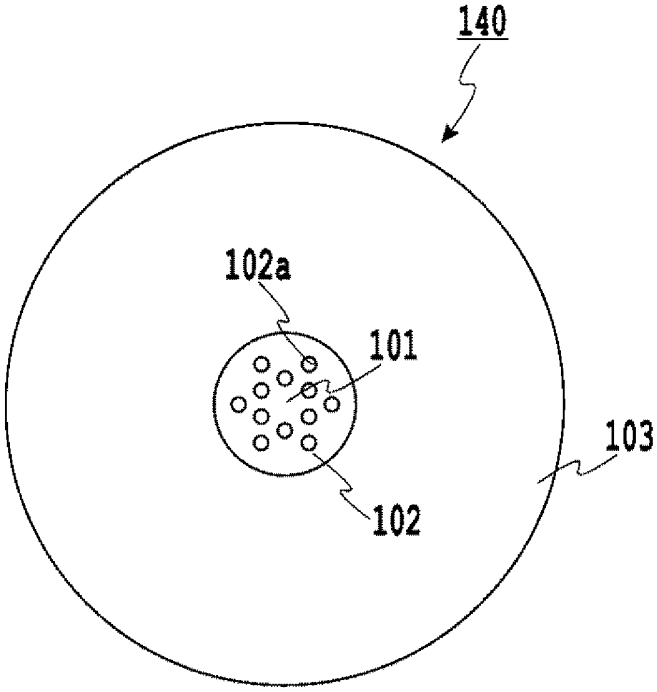

120
122a
121
122
123
20μm程度
121
123
122
122a
122a
122
123
Δ
屈折率
光ファイバ径方向位置

(Δ≦1%)

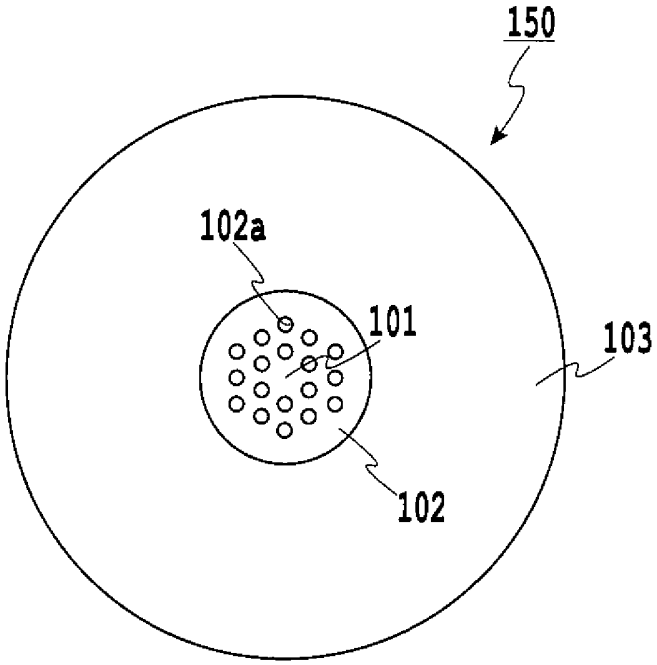
[図21]



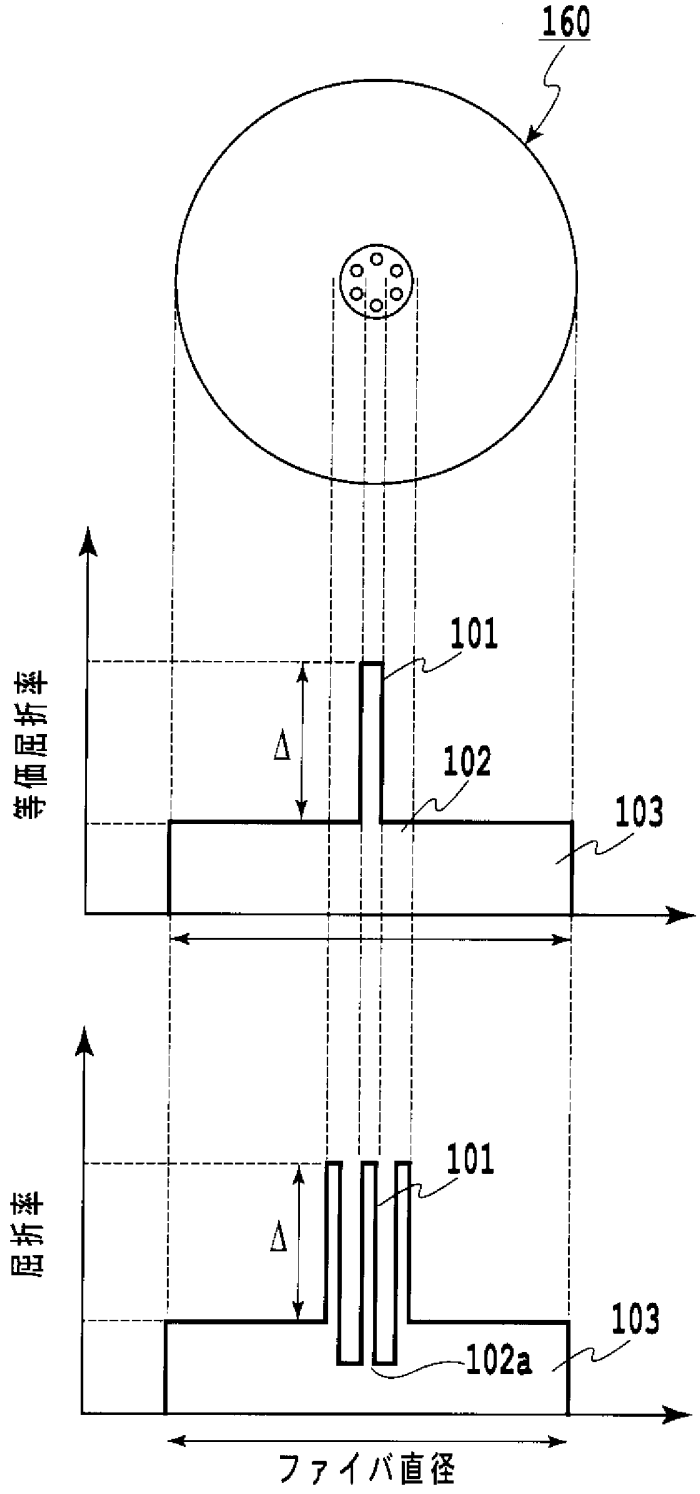
[図22]



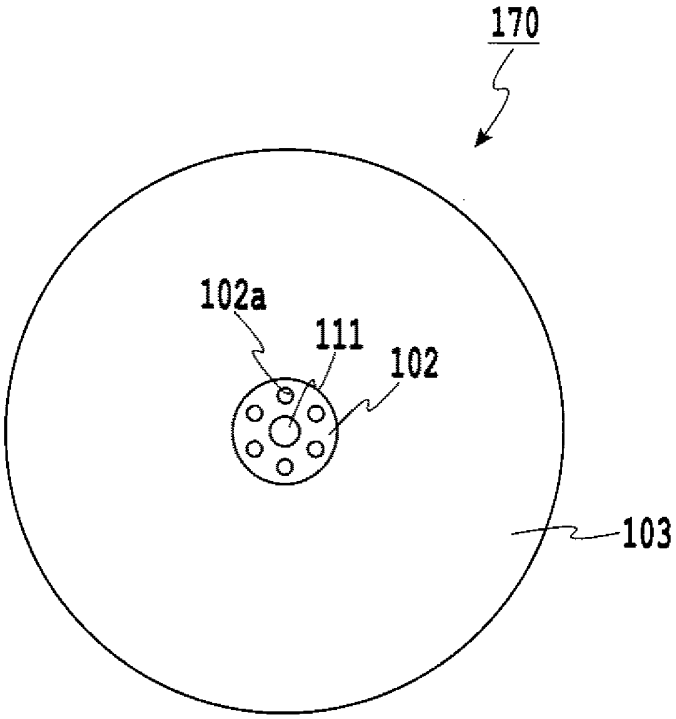
[図23]



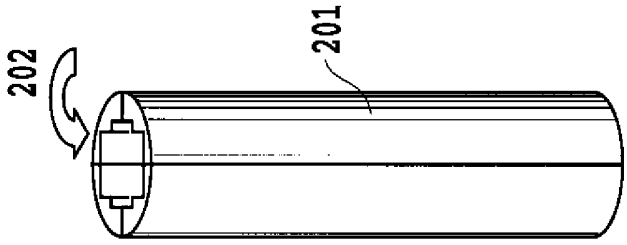
[図24]



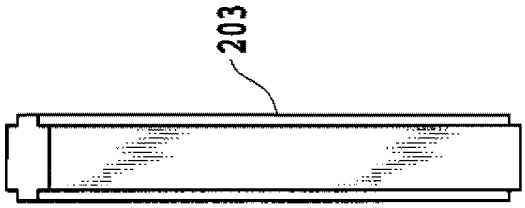
[図25]



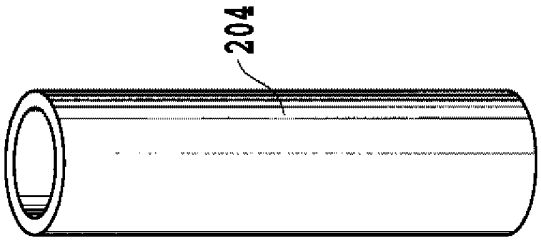
[図26A]



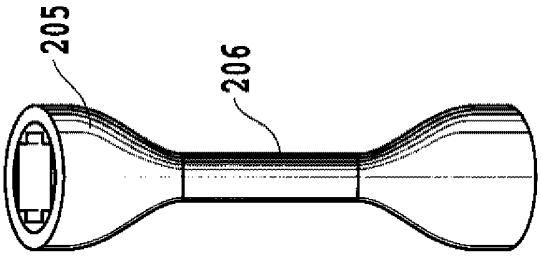
[図26B]



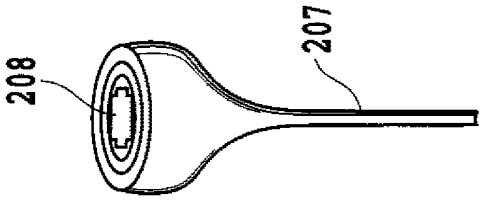
[図26C]



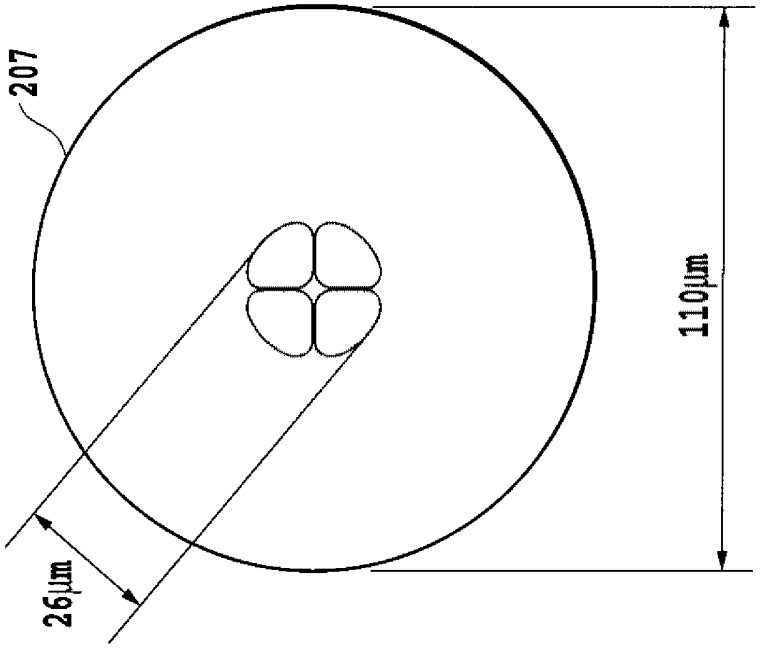
[図26D]



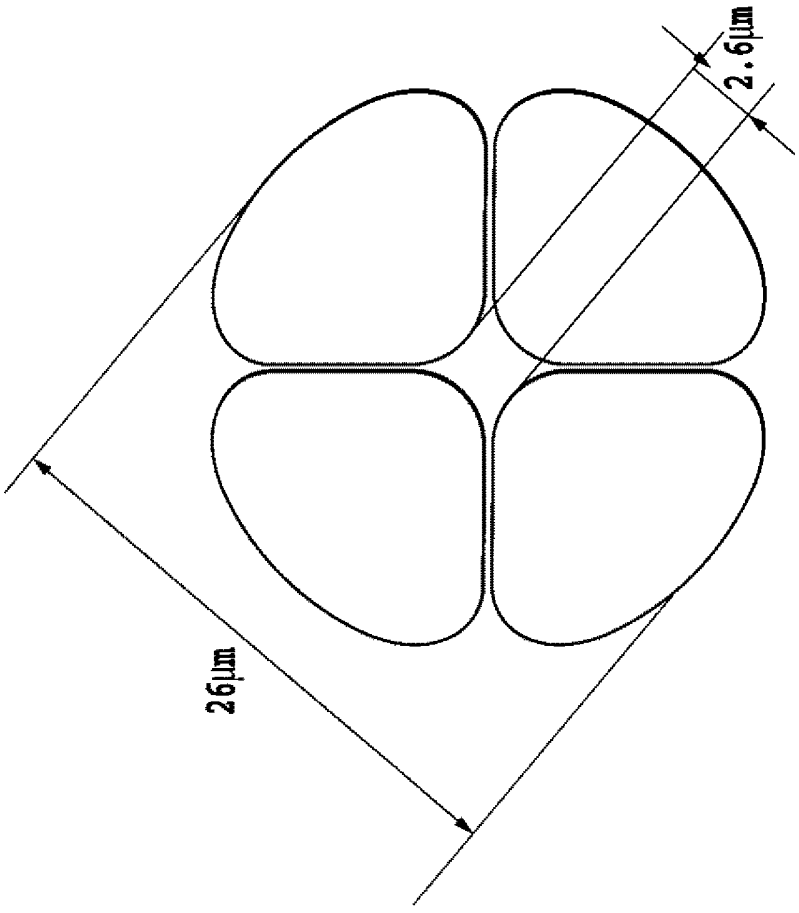
[図26E]



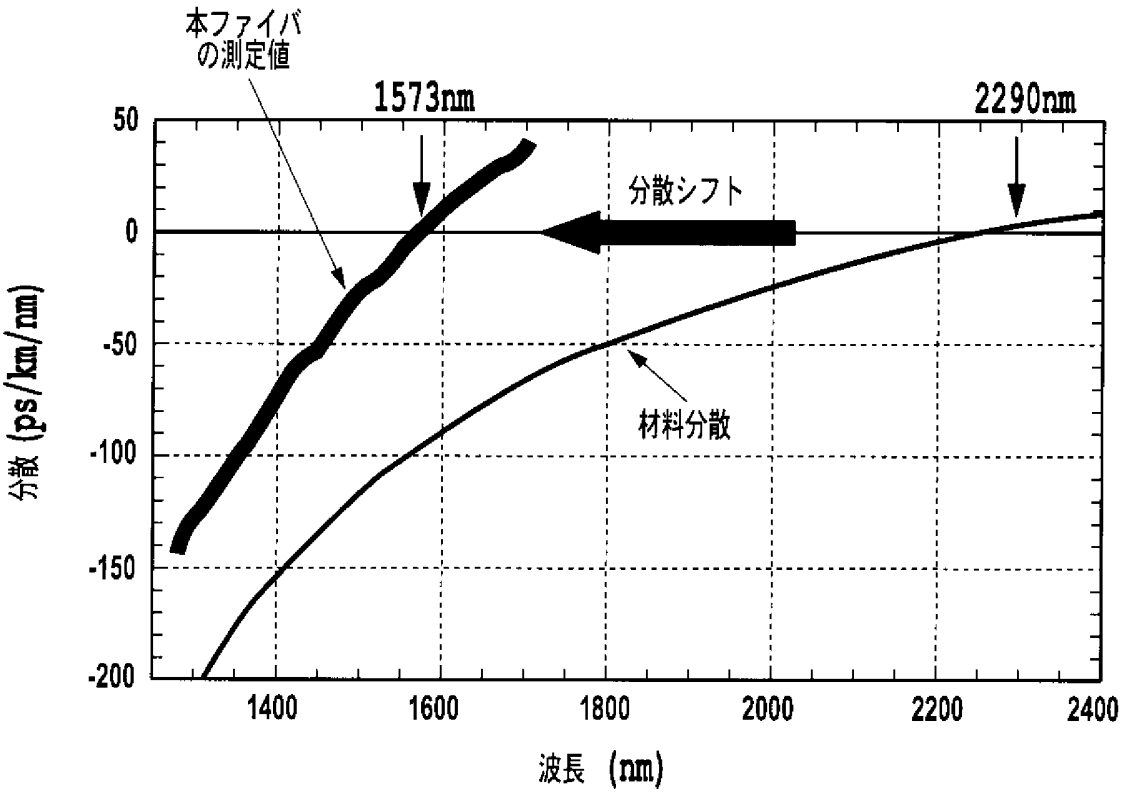
[図27A]



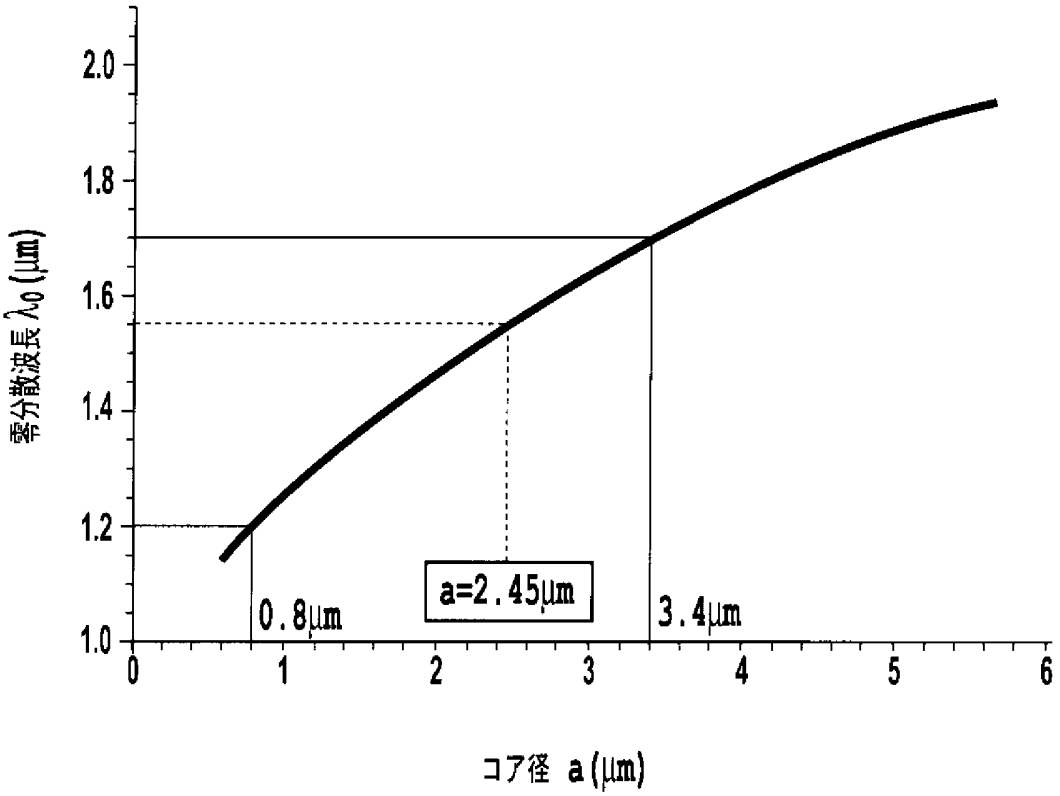
[図27B]



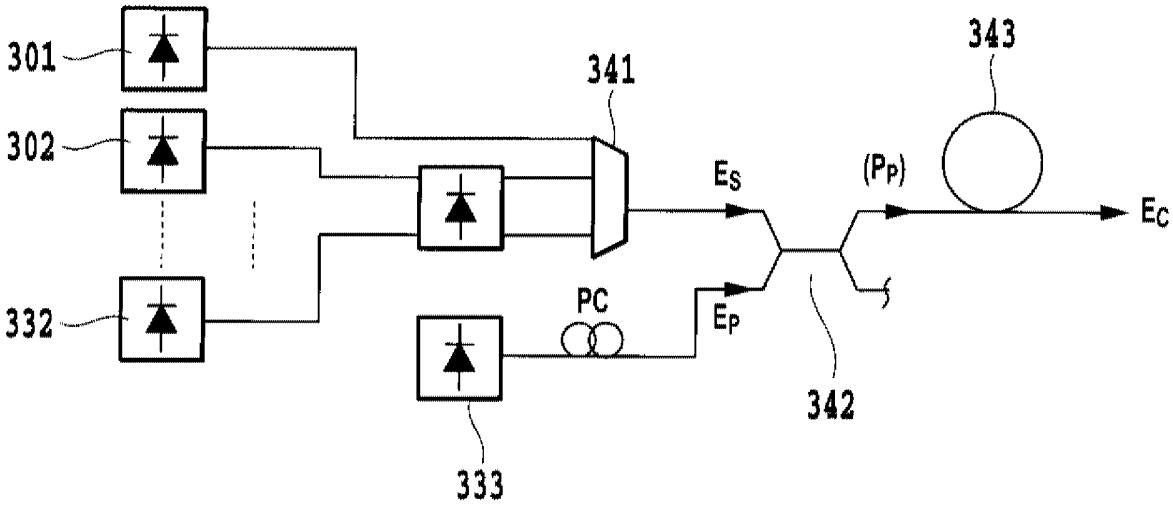
[図28]


本ファイバ
の測定値
1573nm
2290nm
分散シフト
材料分散
50
0
-50
-100
-150
-200
1400
1600
1800
2000
2200
2400
分散 (ps/km/nm)
波長 (nm)

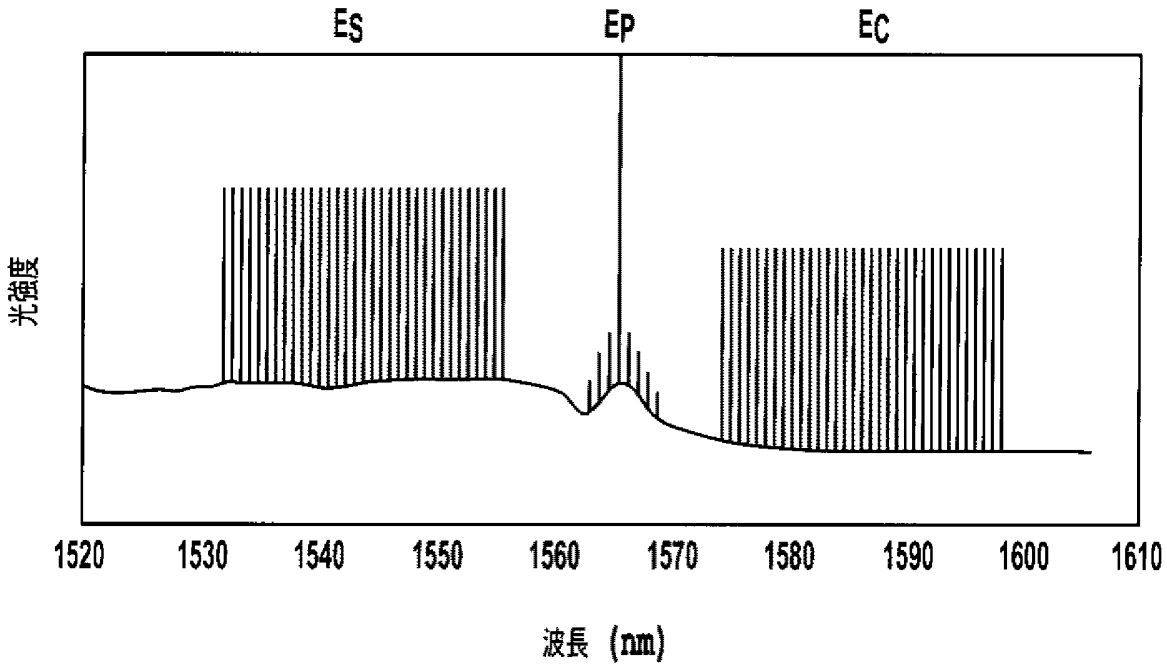
[図29]



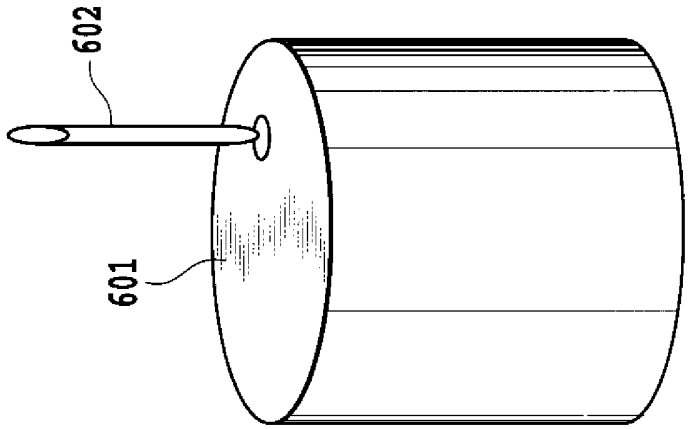
[図30]



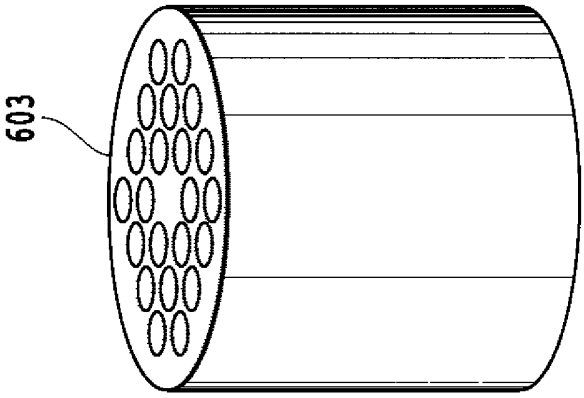
[図31]


Es
Ep
Ec
光強度
1520
1530
1540
1550
1560
1570
1580
1590
1600
1610
波長 (nm)

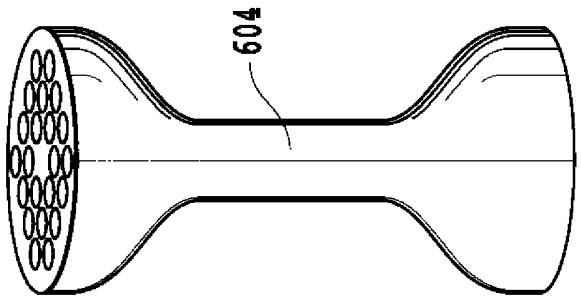
[図32A]



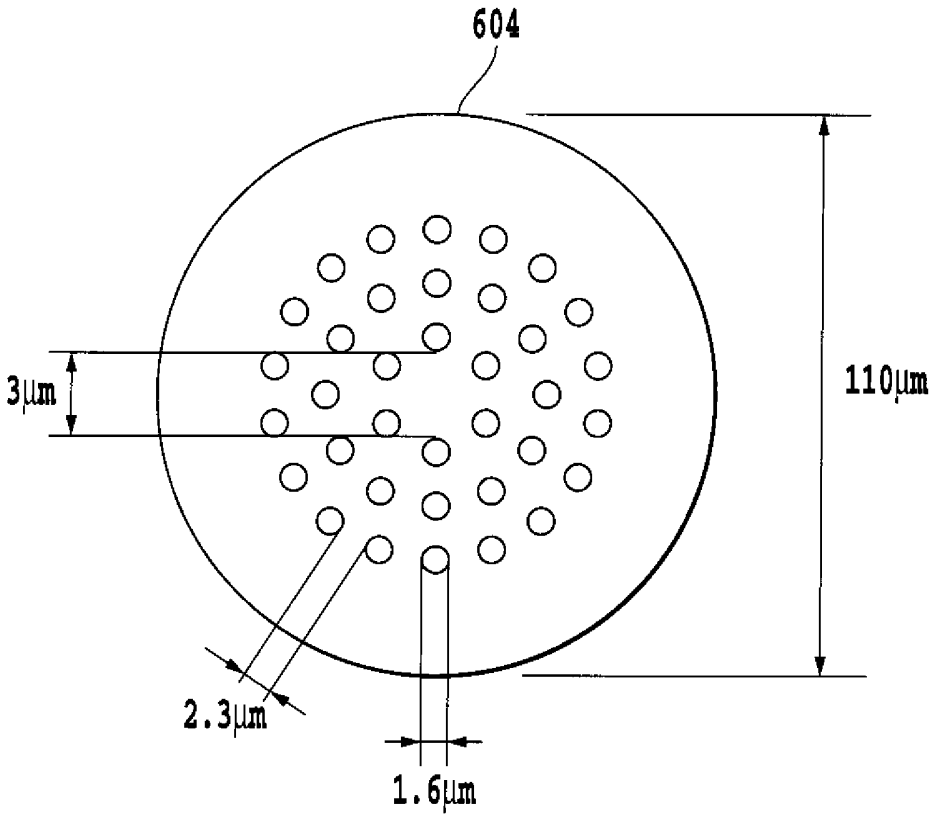
[図32B]



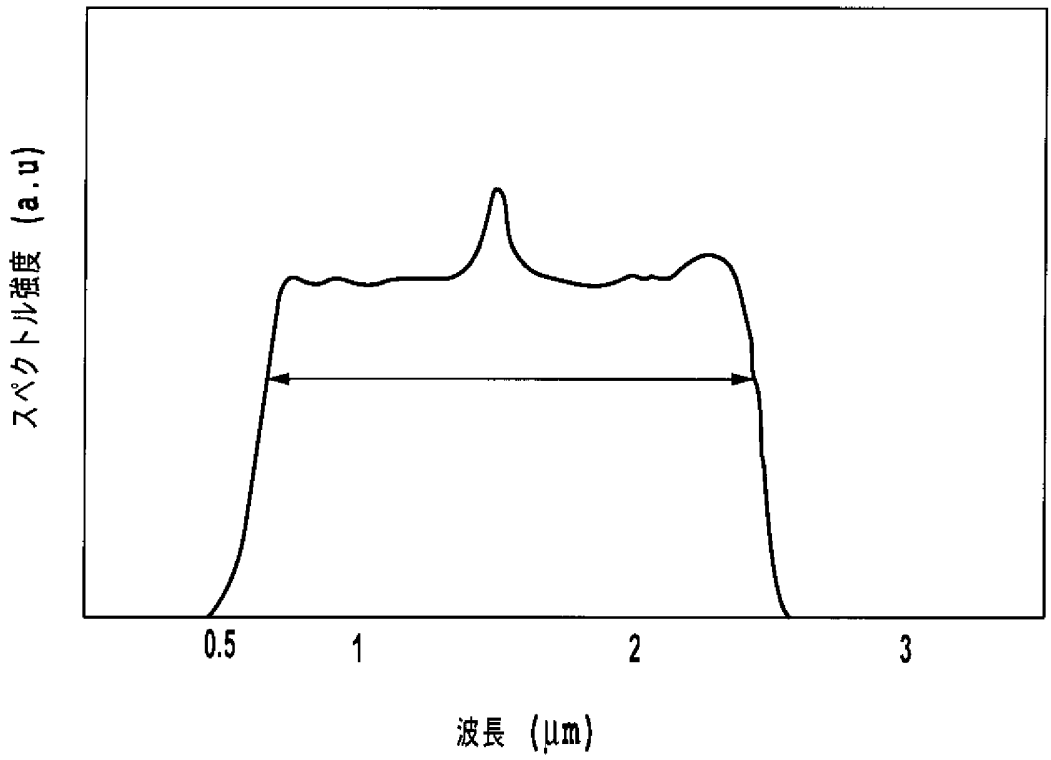
[図32C]



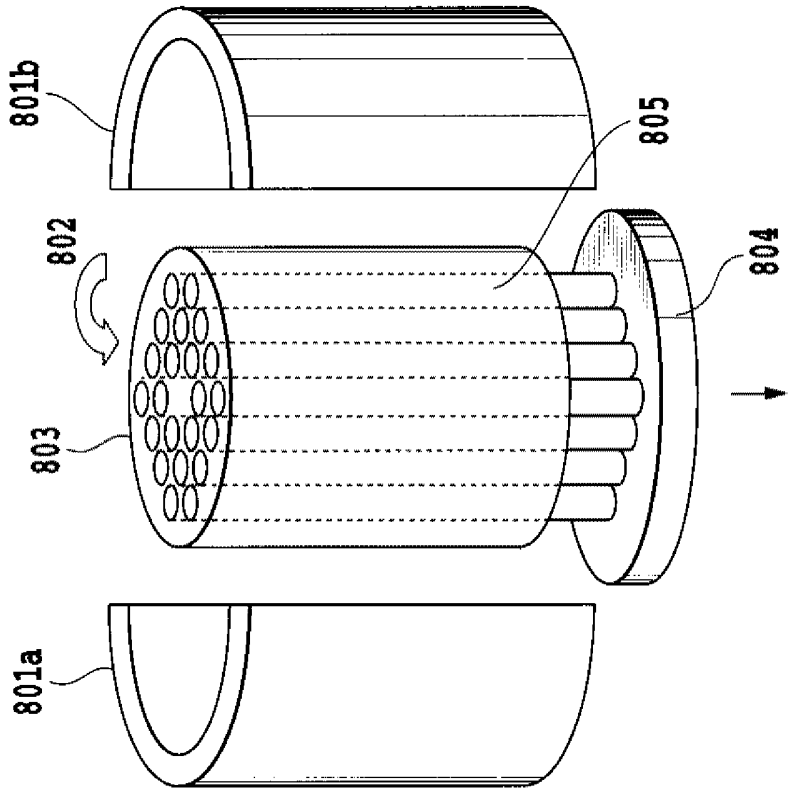
[図33]



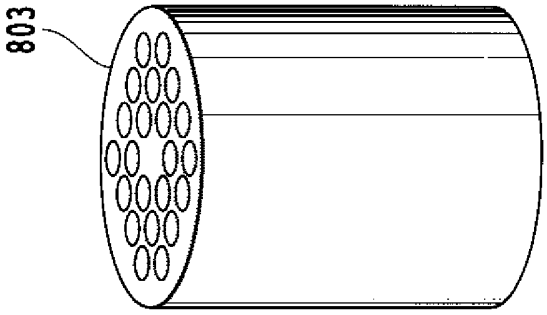
[図34]



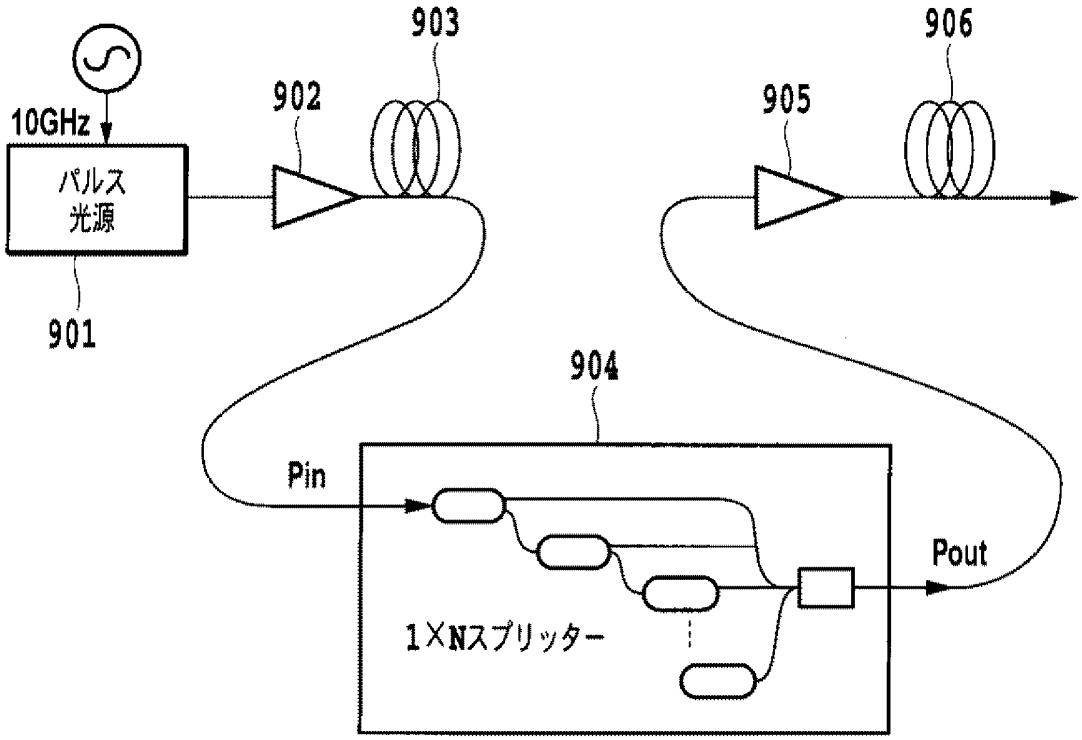
[図35A]



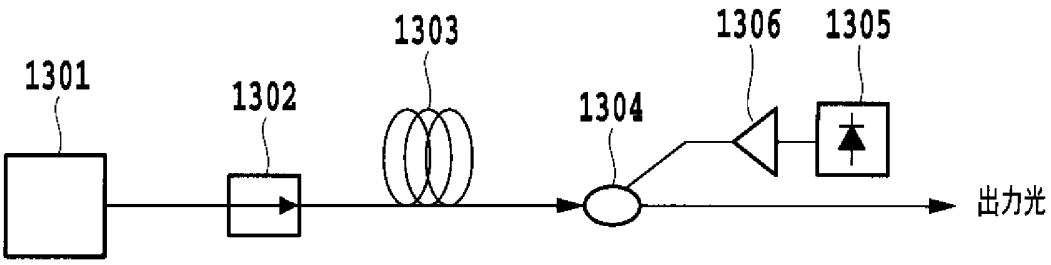
[図35B]



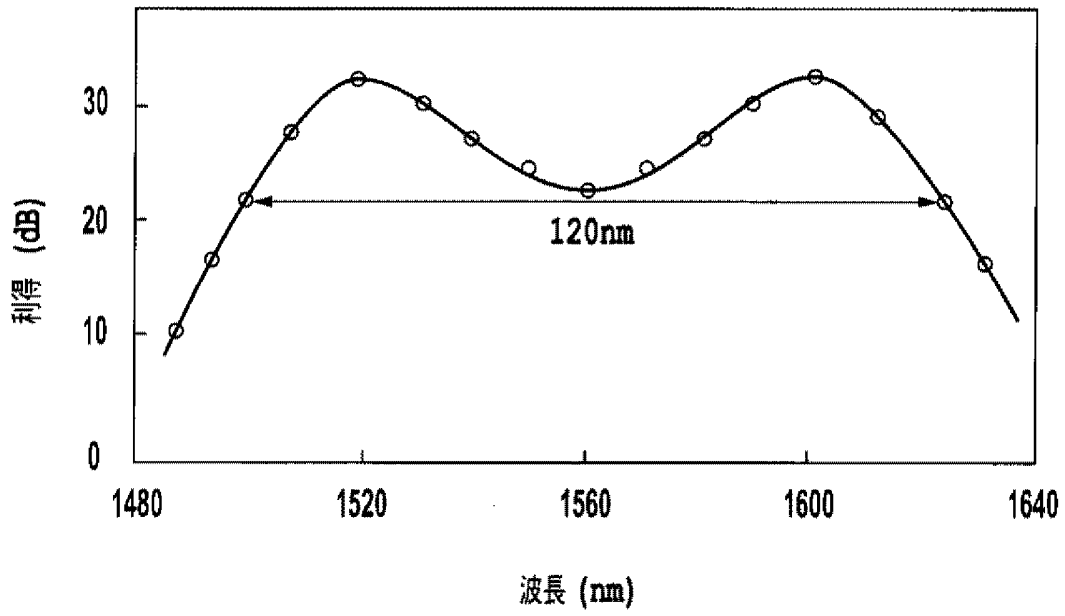
[図36]



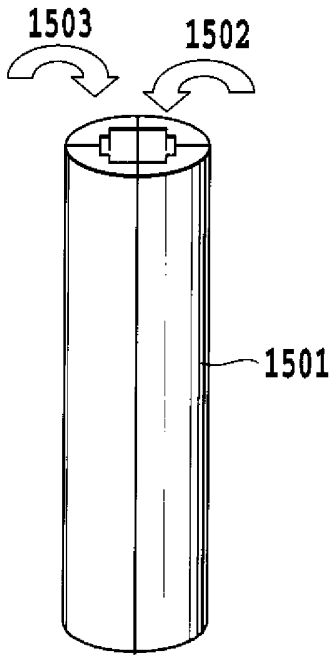
[図37]



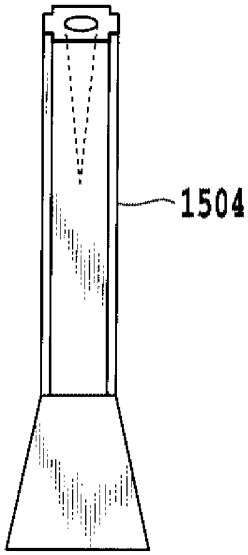
[図38]



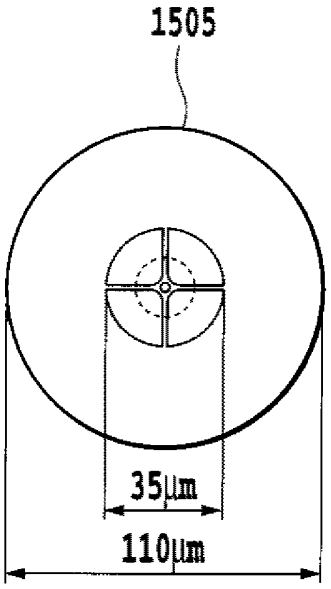
[図39A]



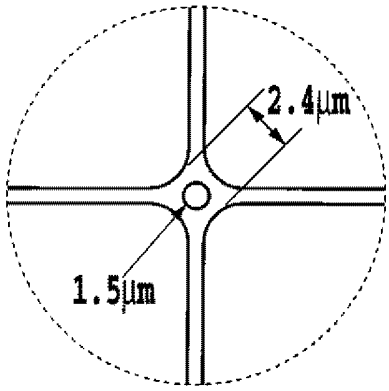
[図39B]



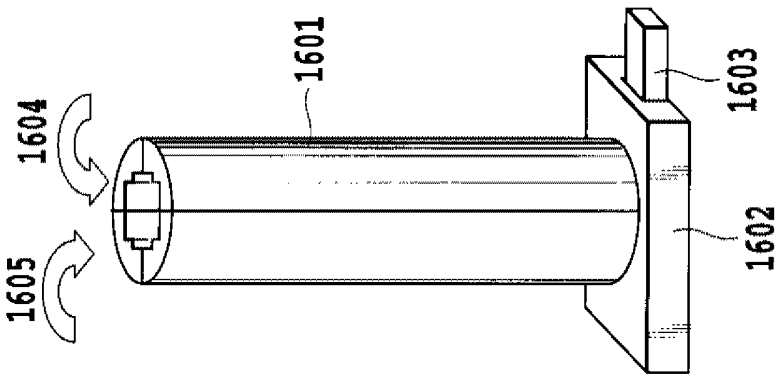
[図40A]



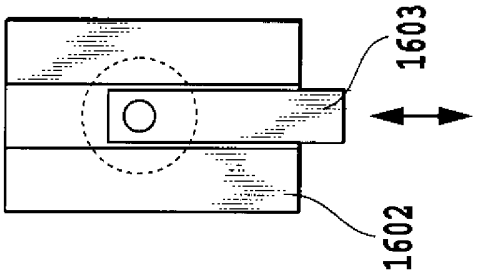
[図40B]



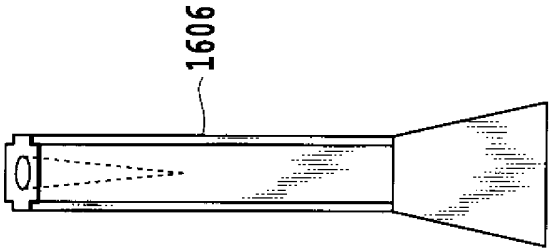
[図41A]



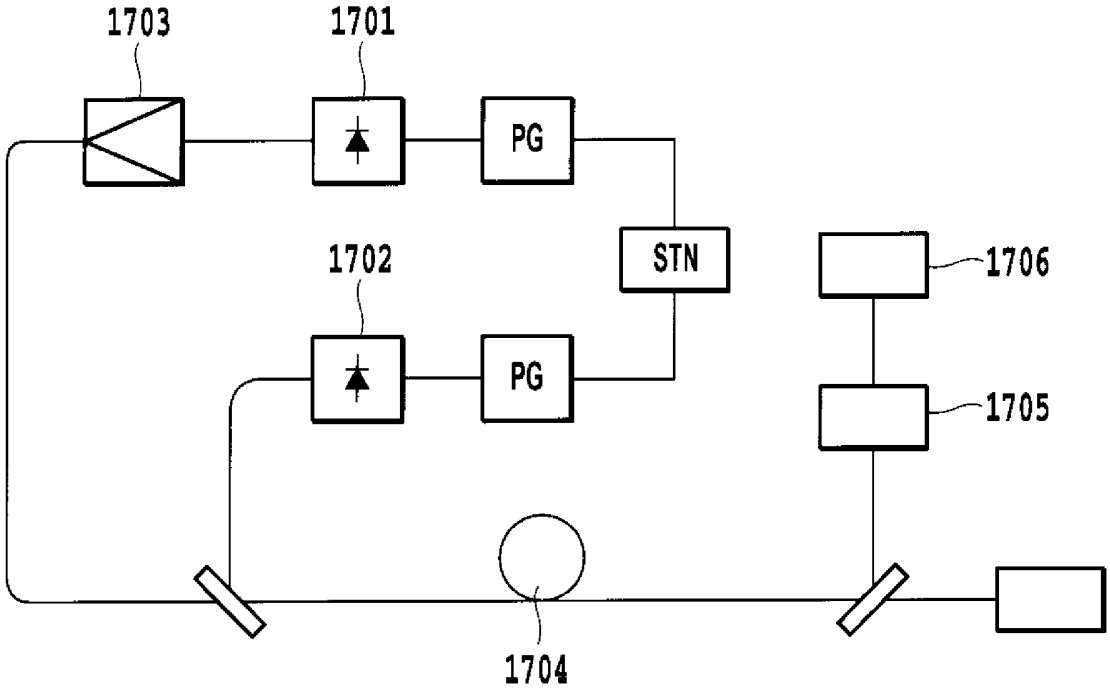
[図41B]



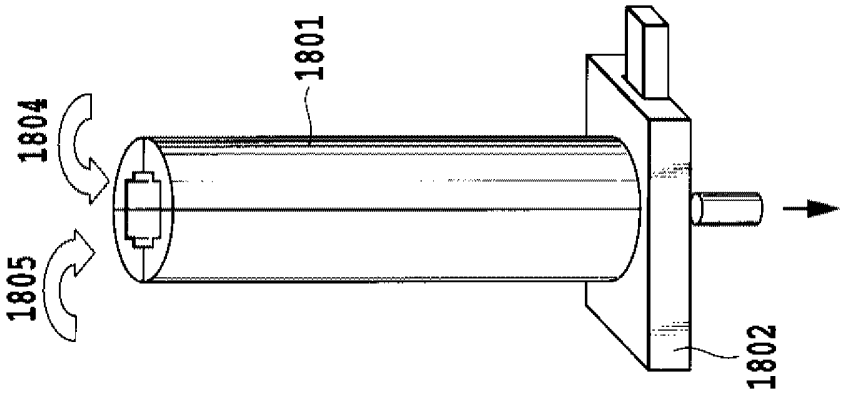
[図41C]



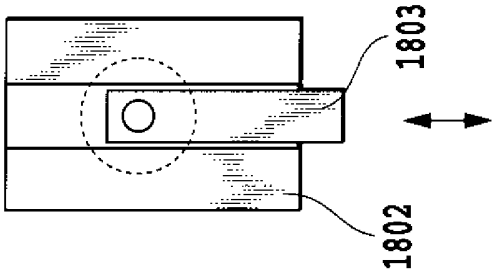
[図42]



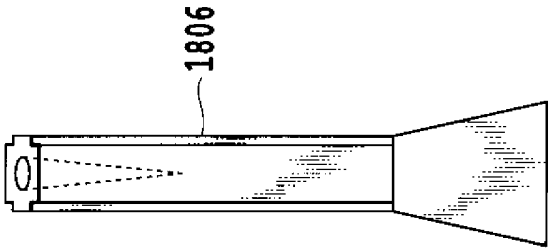
[図43A]



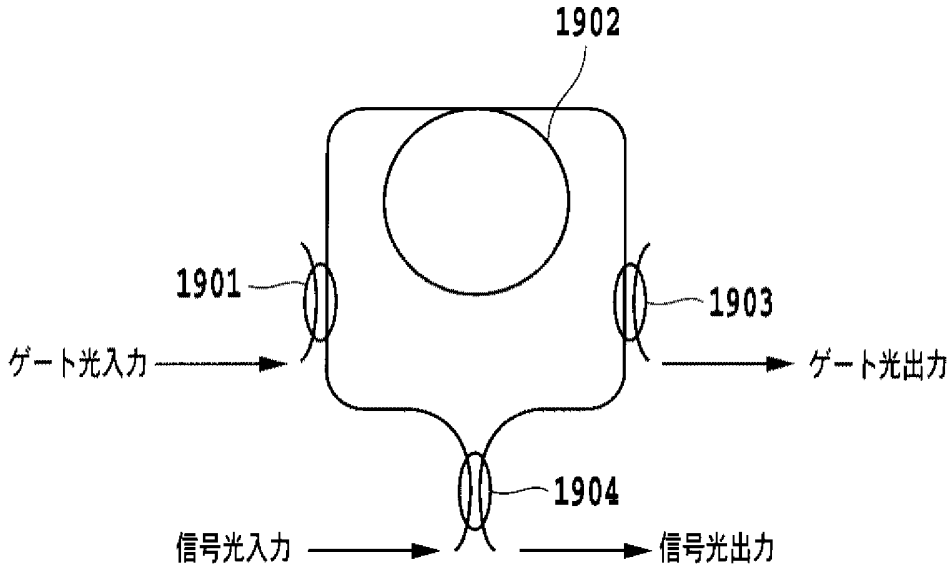
[図43B]



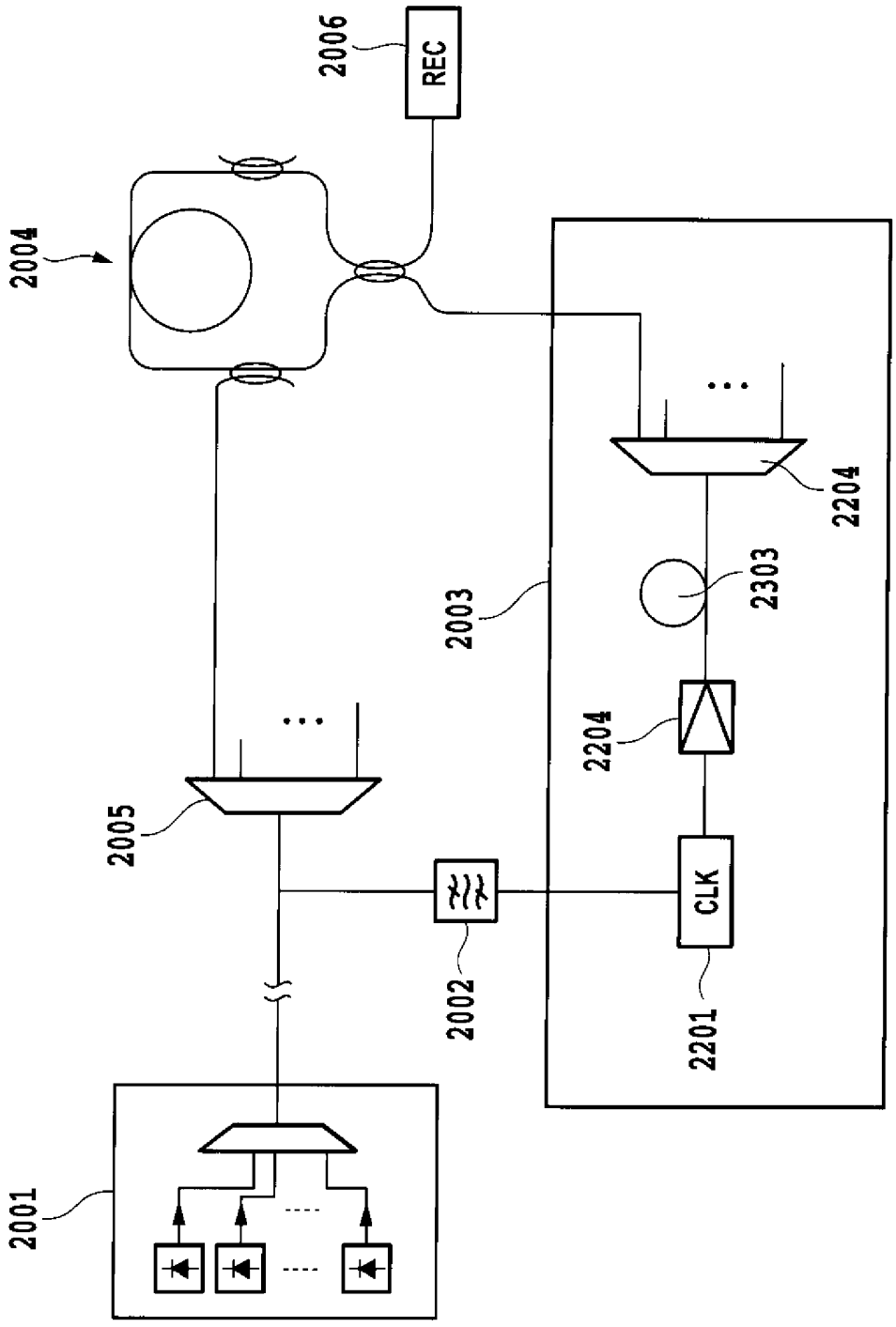
[図43C]



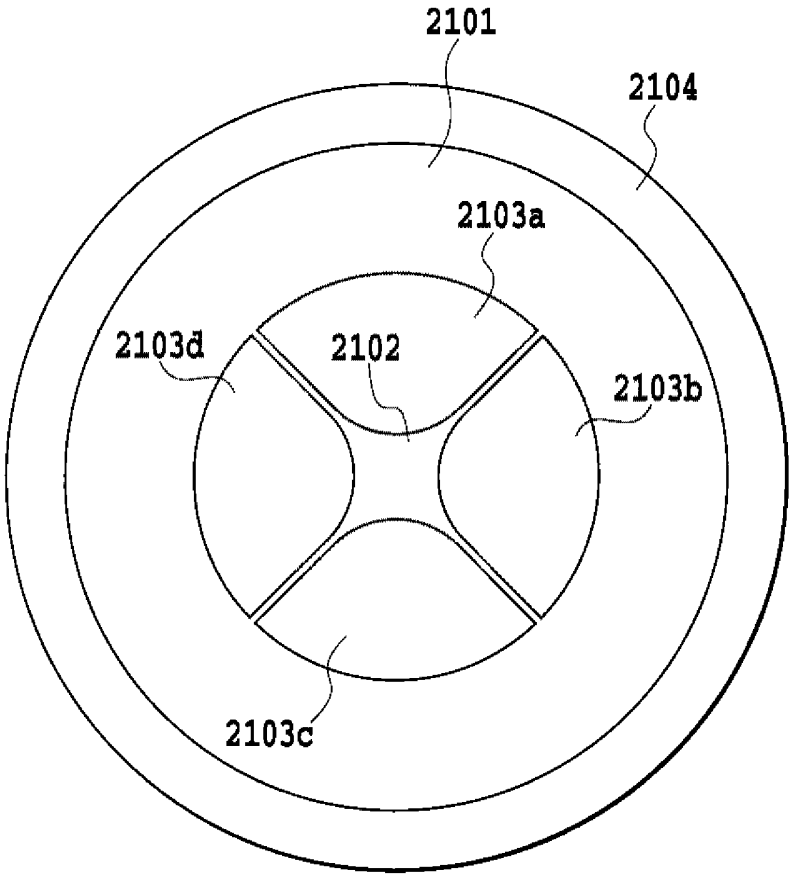
[図44]



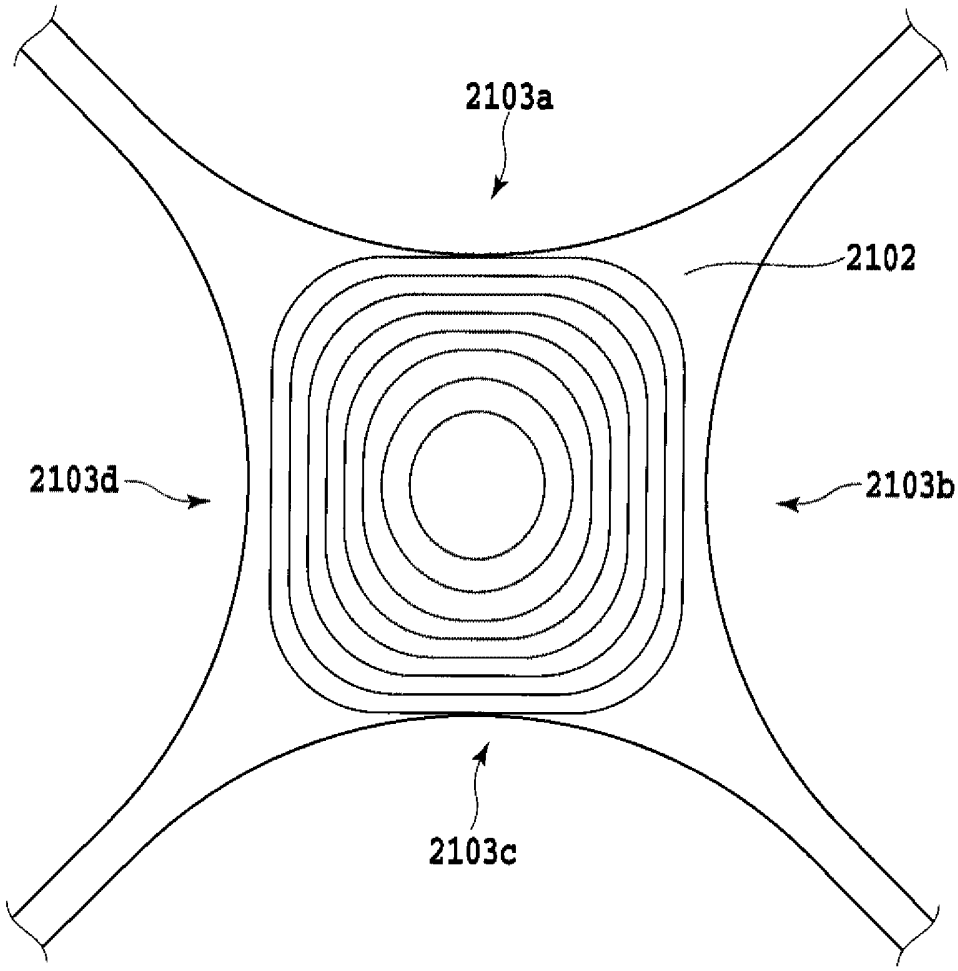
[図45]



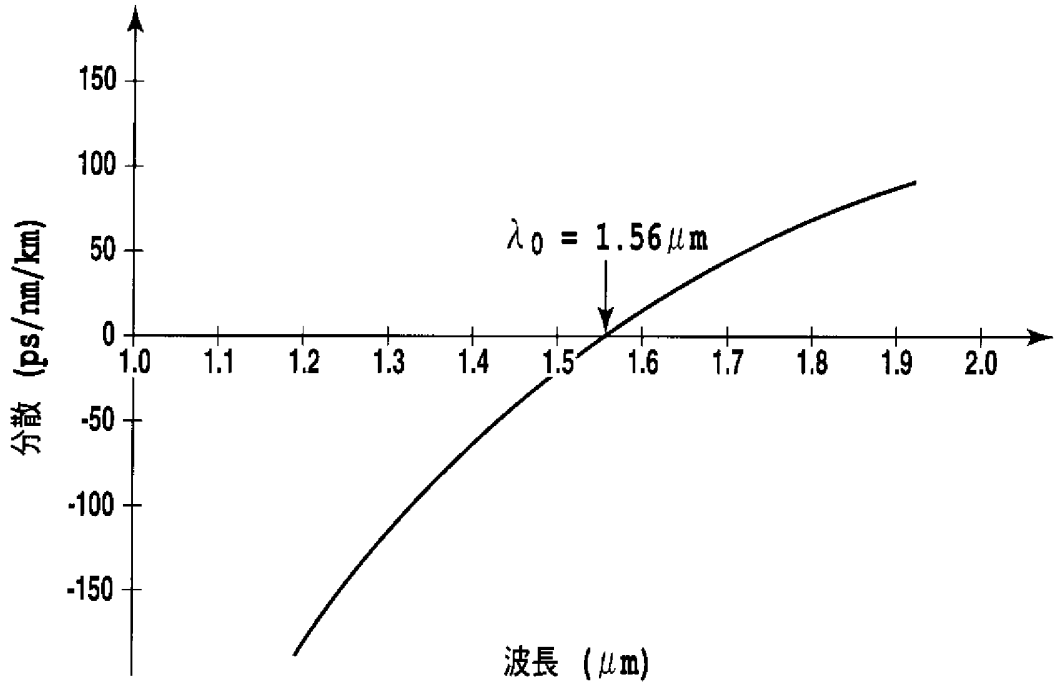
[図46]



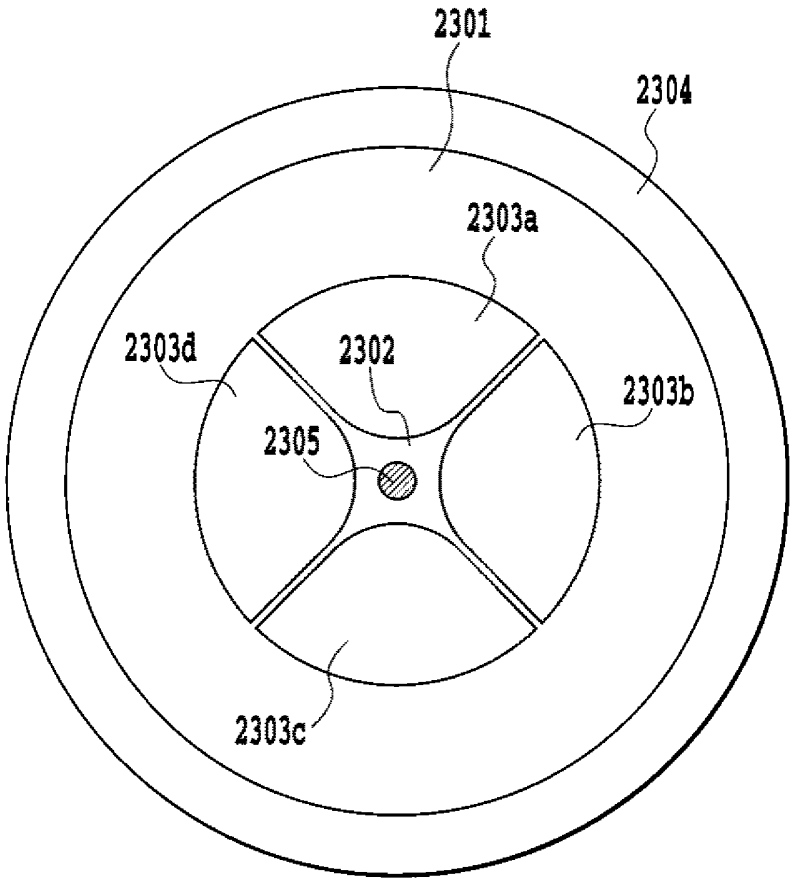
[図47]



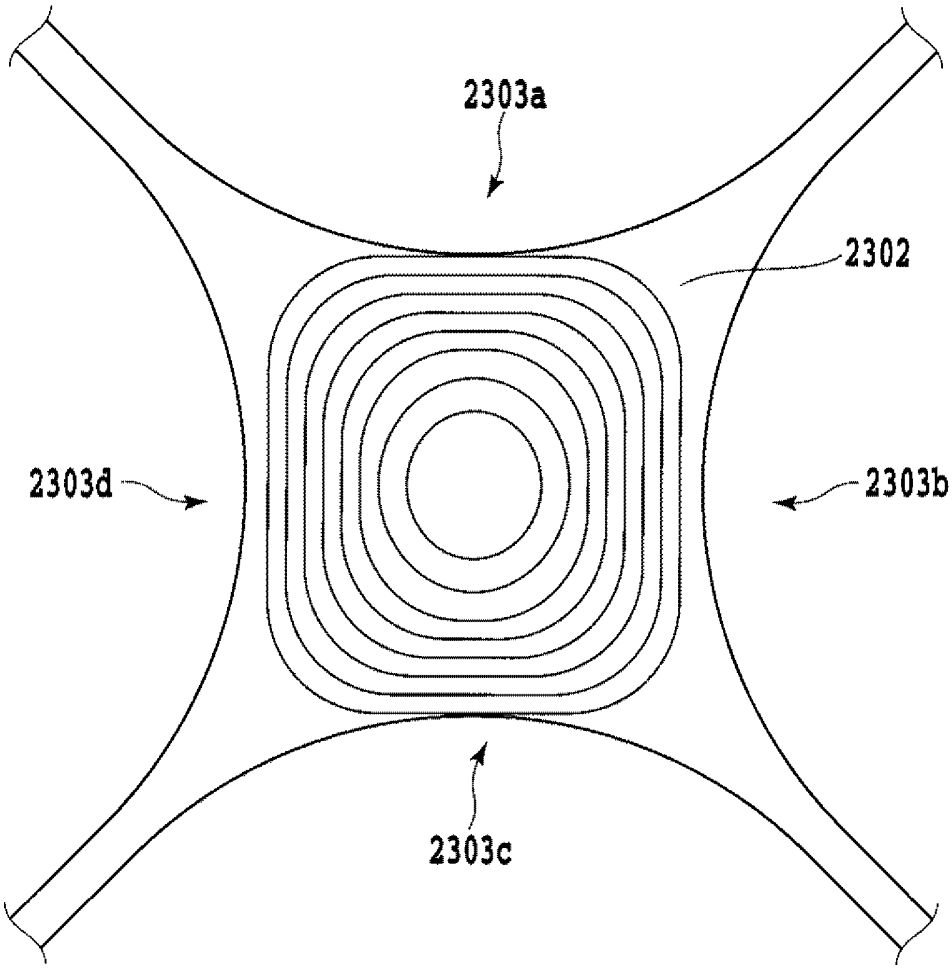
[図48]


150
100
50
0
-50
-100
-150
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
1.6
1.7
1.8
1.9
2.0
λ0 = 1.56μm
分散 (ps/nm/km)
波長 (μm)

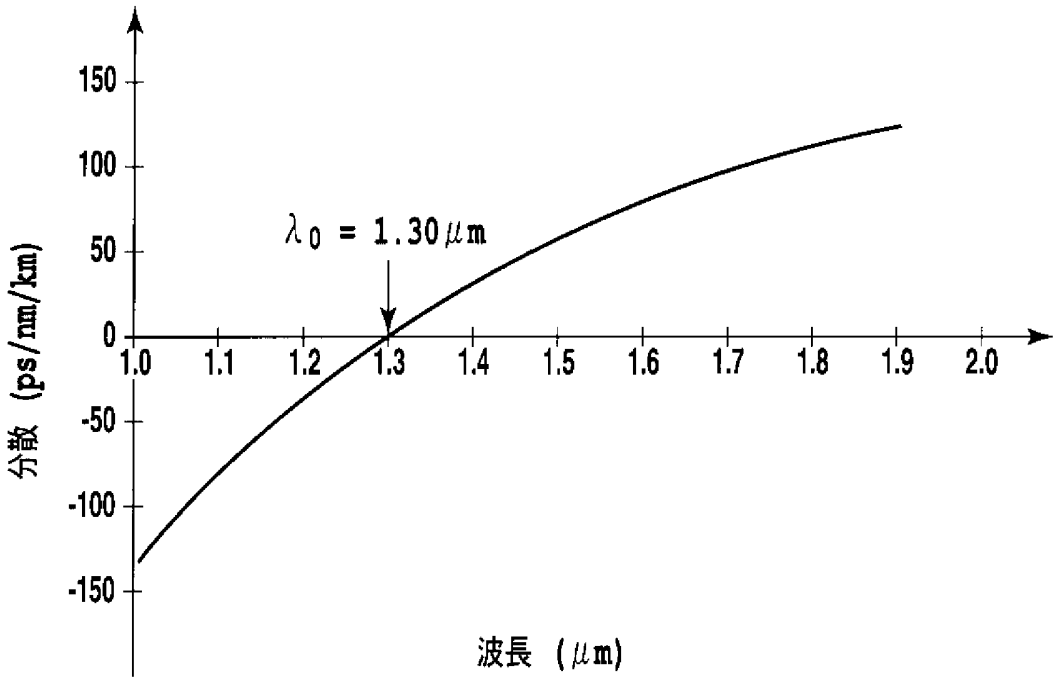
[図49]



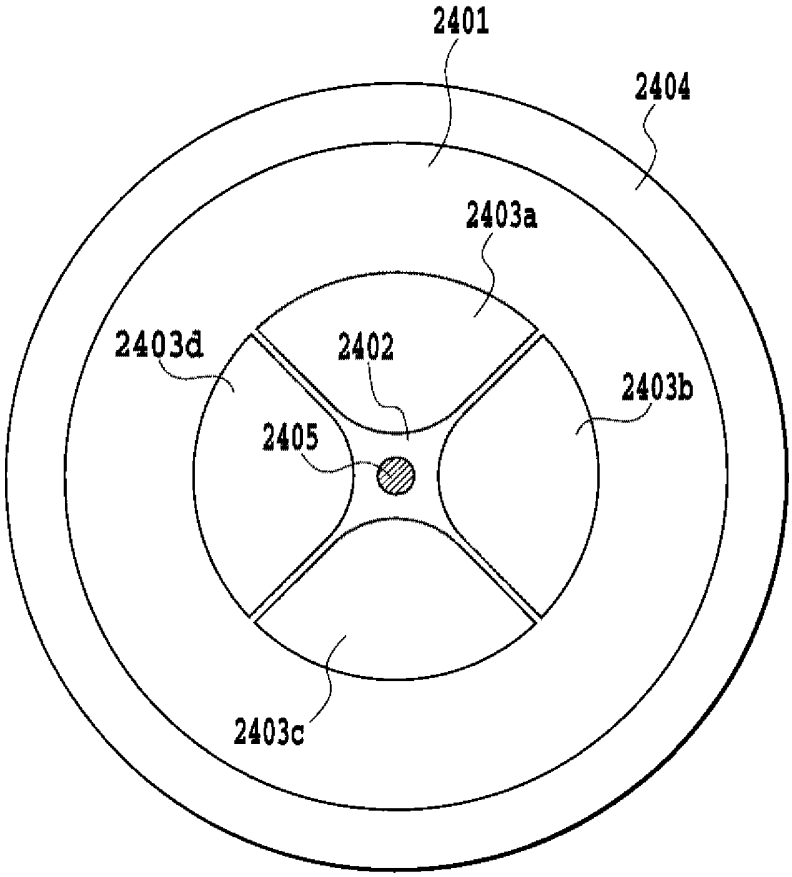
[図50]



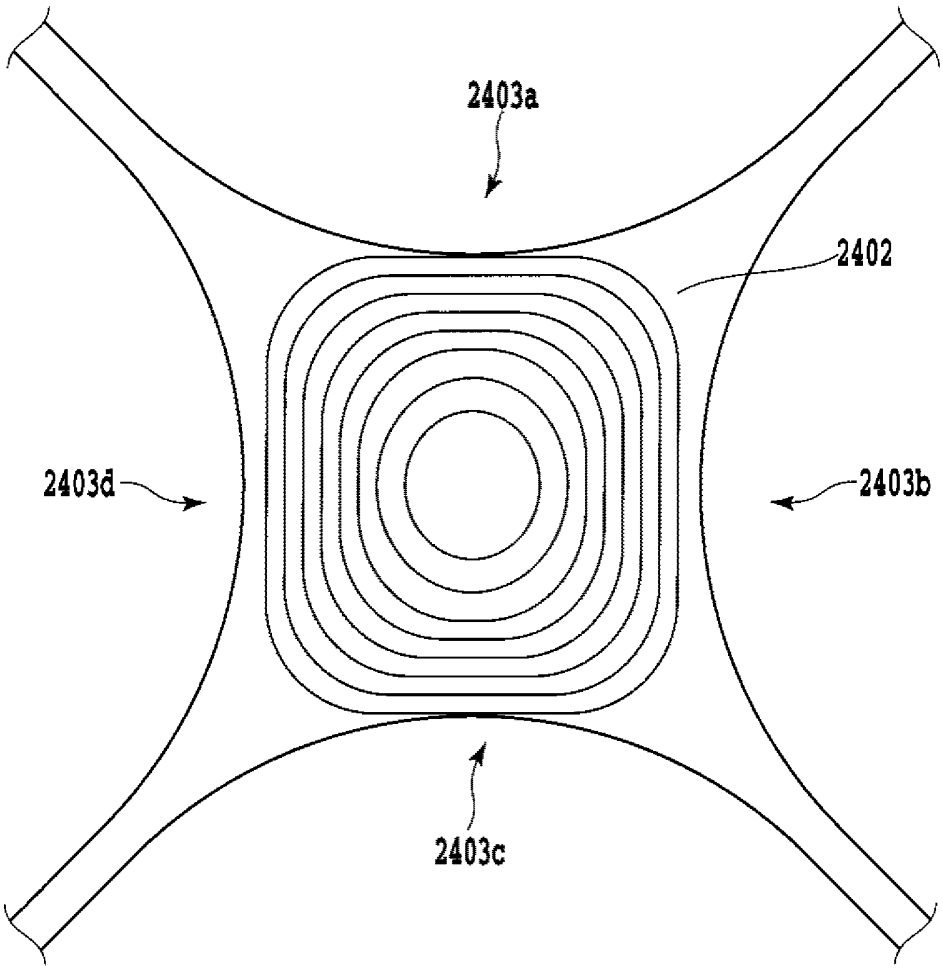
[図51]


150
100
50
0
-50
-100
-150
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
1.6
1.7
1.8
1.9
2.0
λ0 = 1.30μm
分散 (ps/nm/km)
波長 (μm)

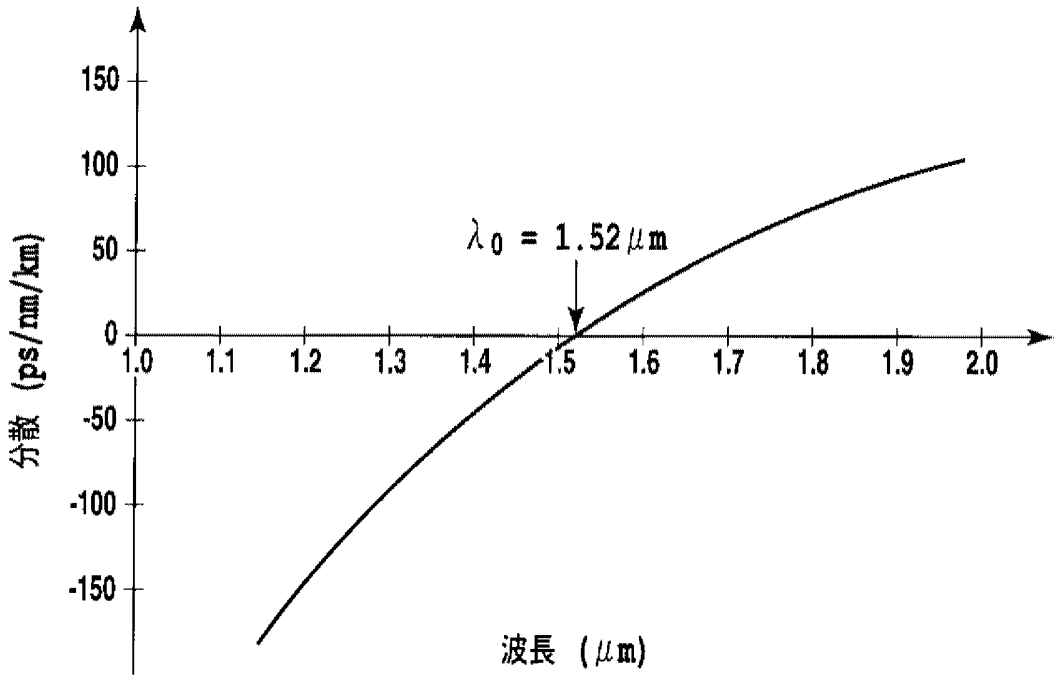
[図52]



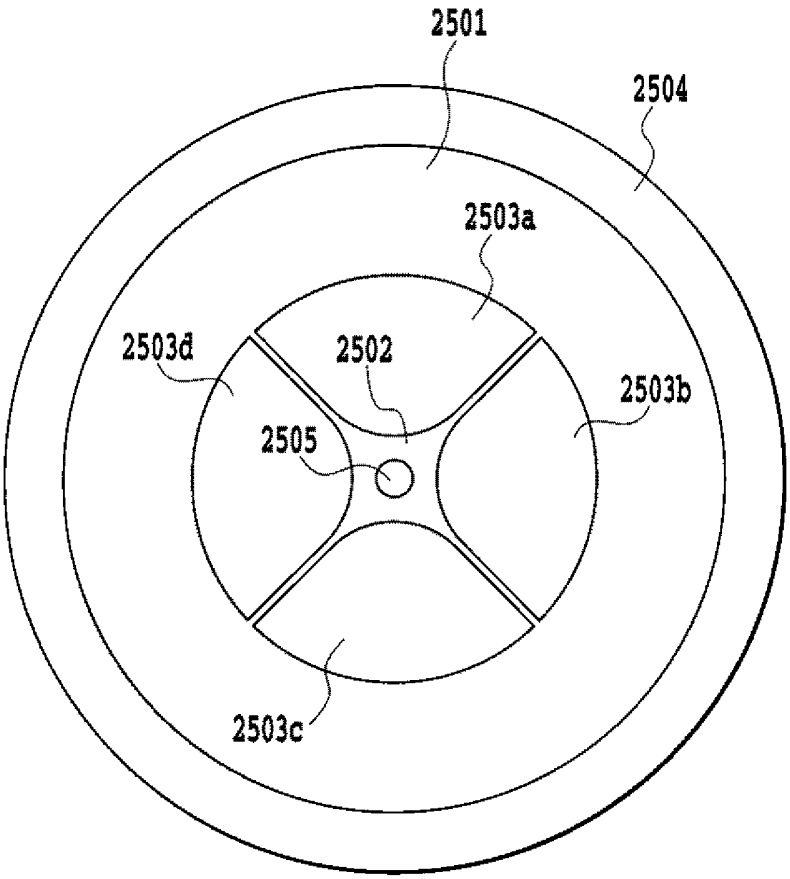
[図53]


2403a
2402
2403d
2403b
2403c

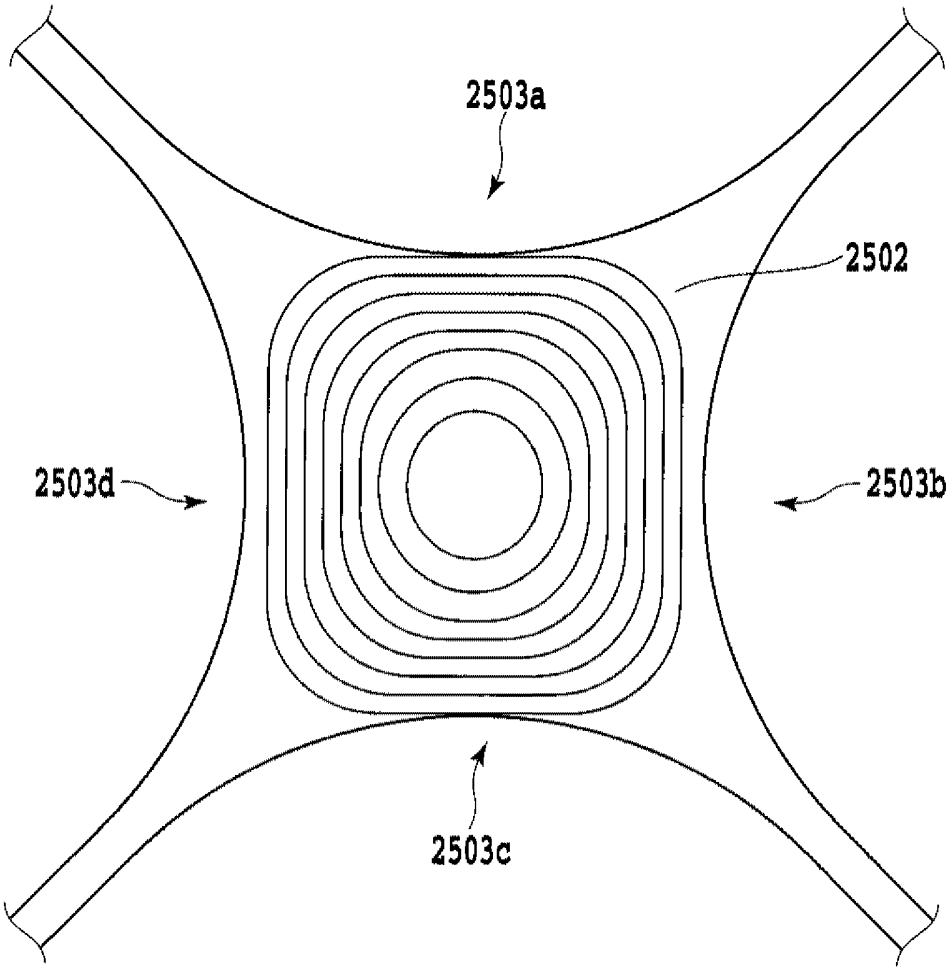
[図54]


150
100
50
0
-50
-100
-150
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
1.6
1.7
1.8
1.9
2.0
λ0 = 1.52μm
分散 (ps/nm/km)
波長 (μm)

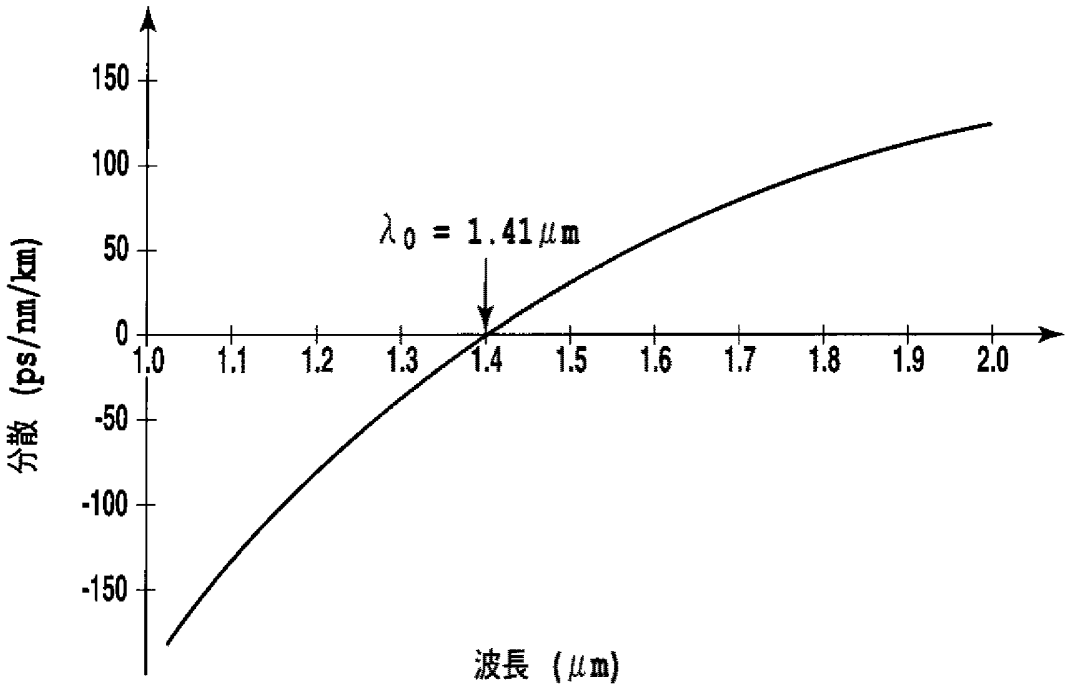
[図55]



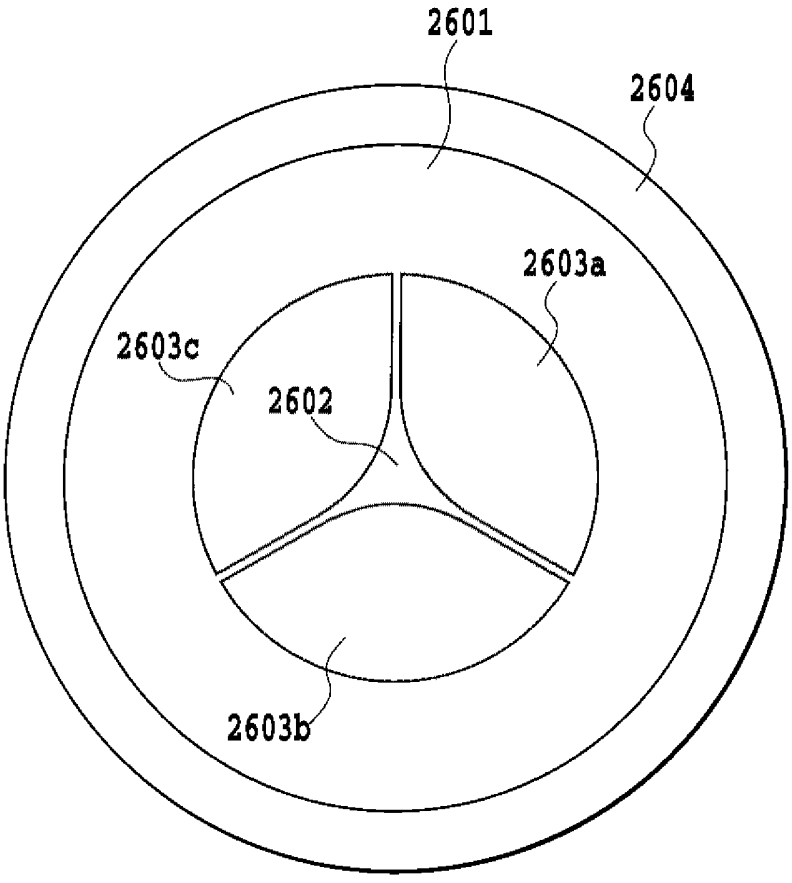
[図56]



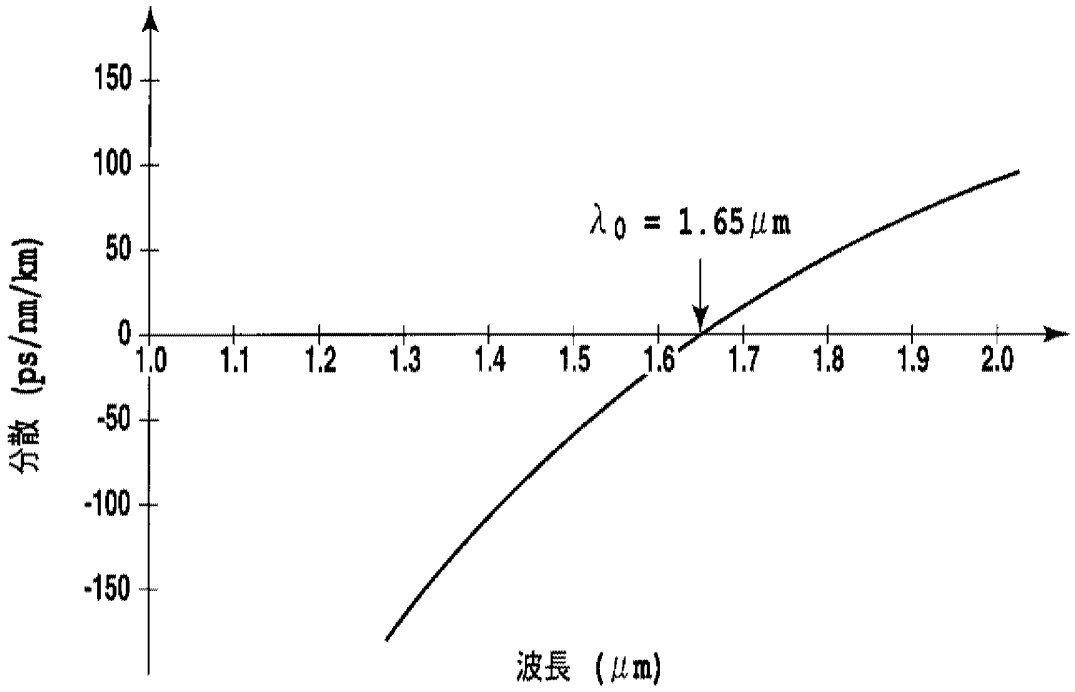
[図57]


150
100
50
0
-50
-100
-150
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
1.6
1.7
1.8
1.9
2.0
λ0 = 1.41μm
分散 (ps/nm/km)
波長 (μm)

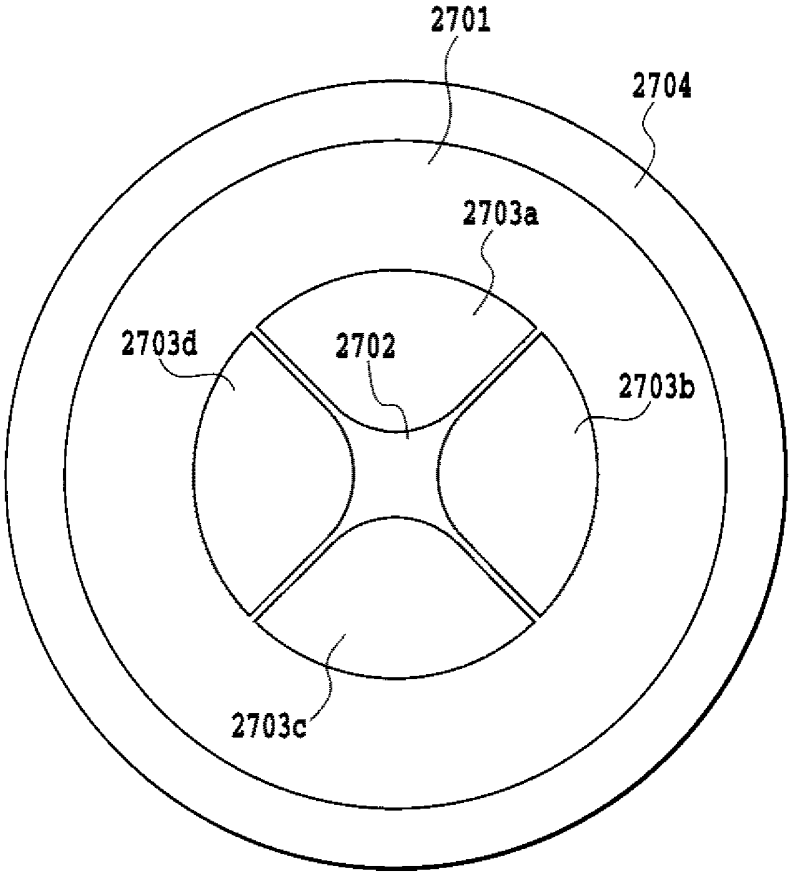
[図58]


2601
2604
2603a
2603c
2602
2603b

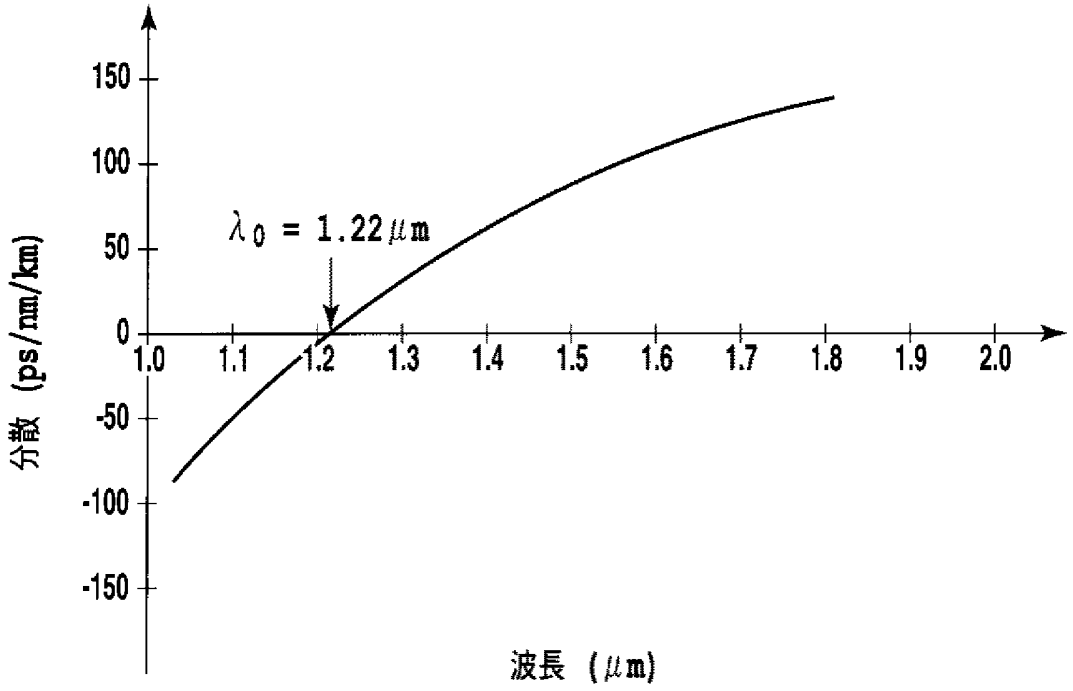
[図59]


150
100
50
0
-50
-100
-150
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
1.6
1.7
1.8
1.9
2.0
λ0 = 1.65μm
分散 (ps/nm/km)
波長 (μm)

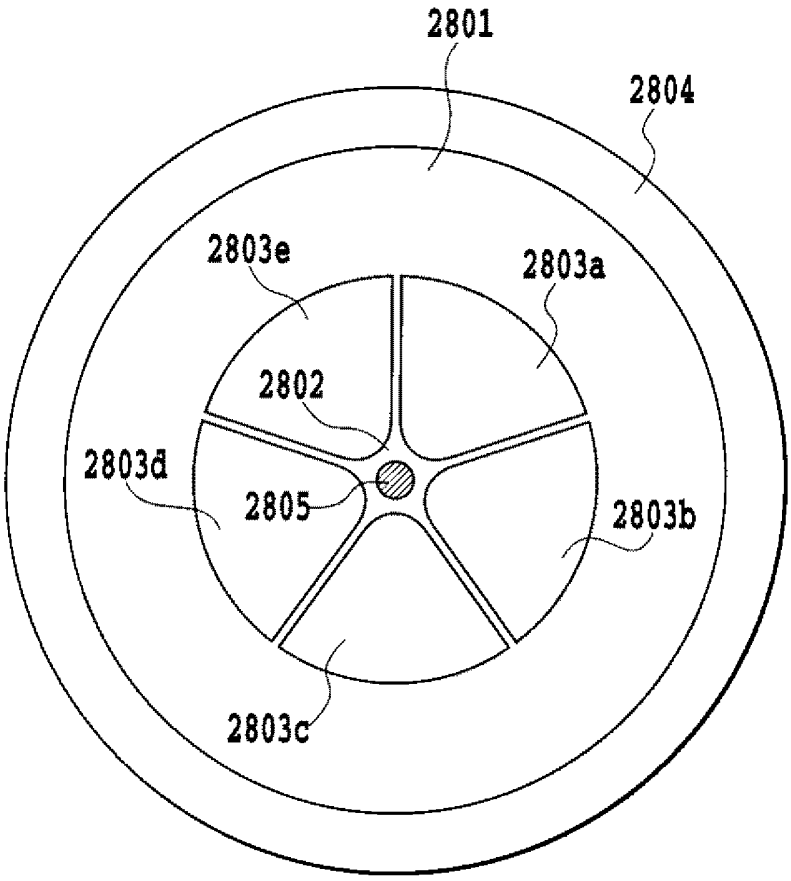
[図60]



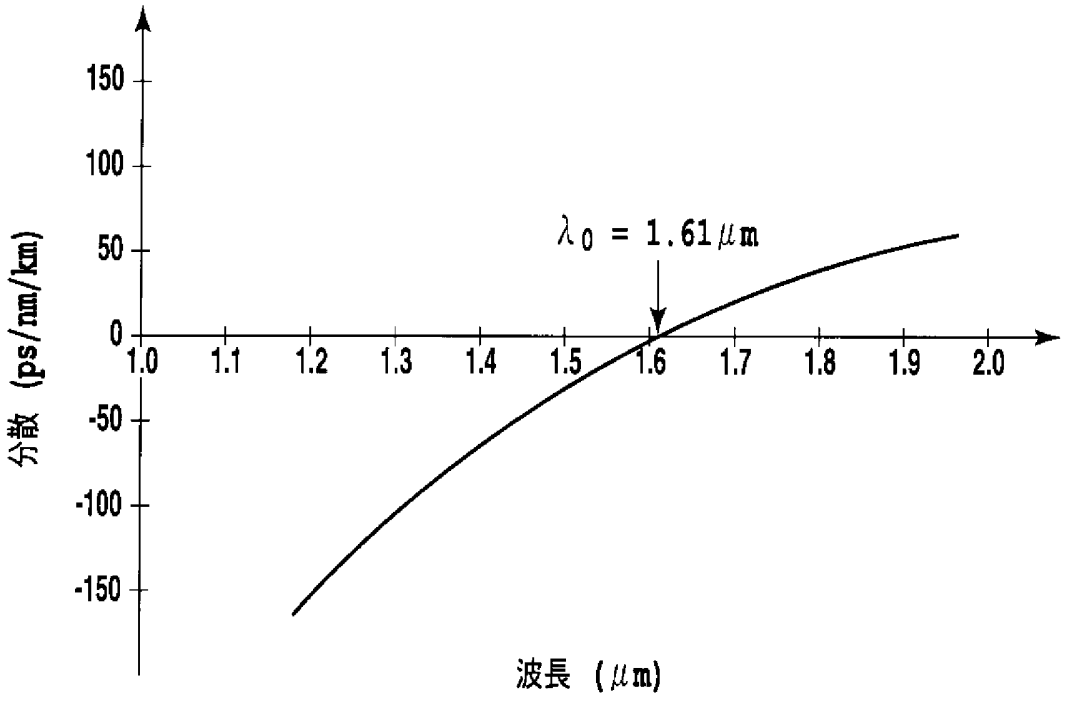
[図61]


150
100
50
0
-50
-100
-150
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
1.6
1.7
1.8
1.9
2.0
λ0 = 1.22μm
分散 (ps/nm/km)
波長 (μm)

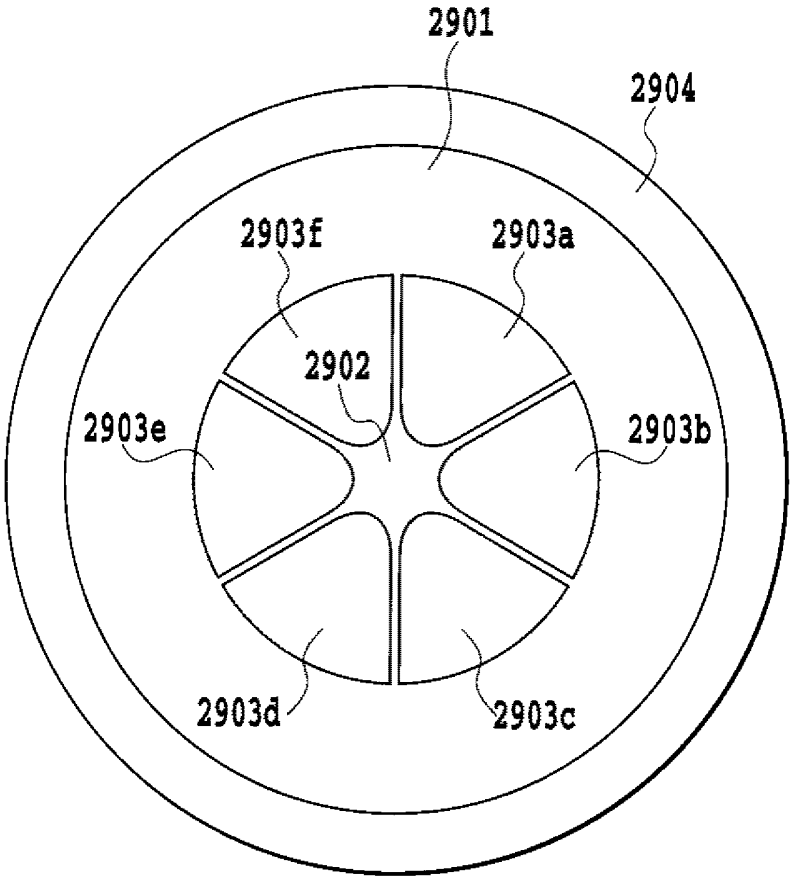
[図62]



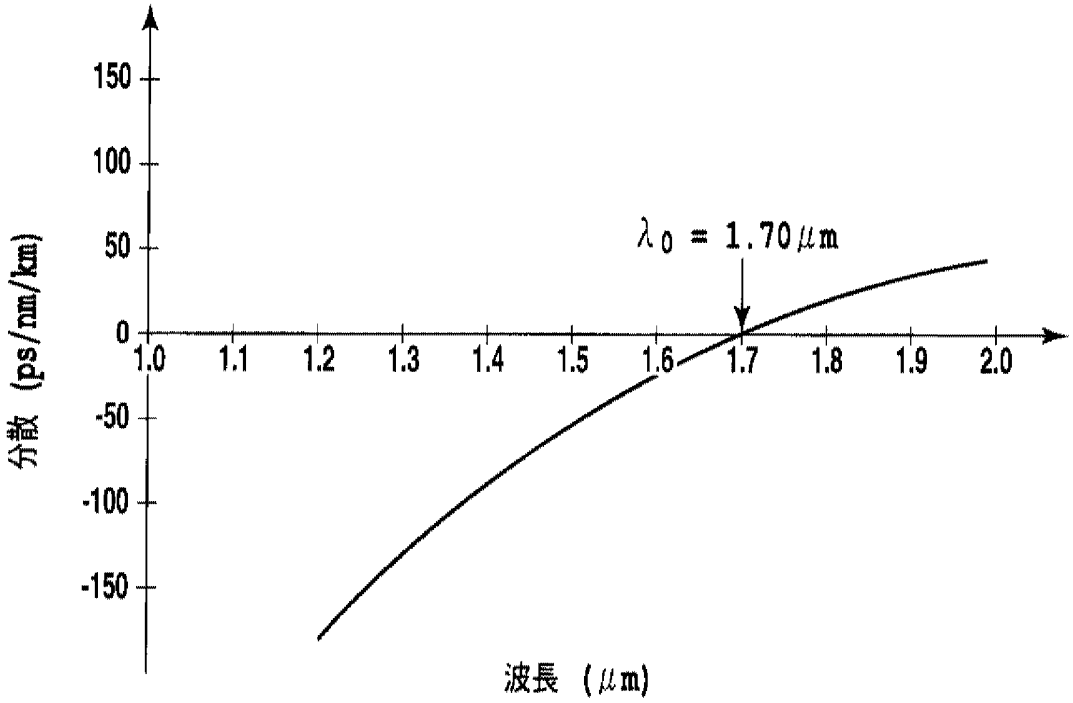
[図63]


150
100
50
0
-50
-100
-150
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
1.6
1.7
1.8
1.9
2.0
λ0 = 1.61μm
分散 (ps/nm/km)
波長 (μm)

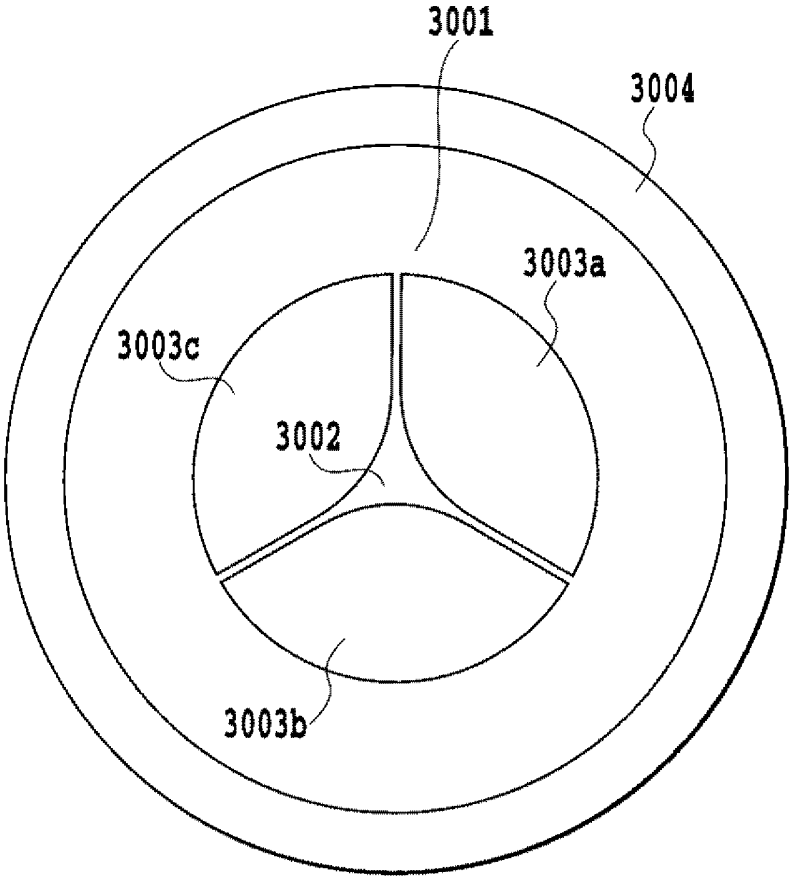
[図64]



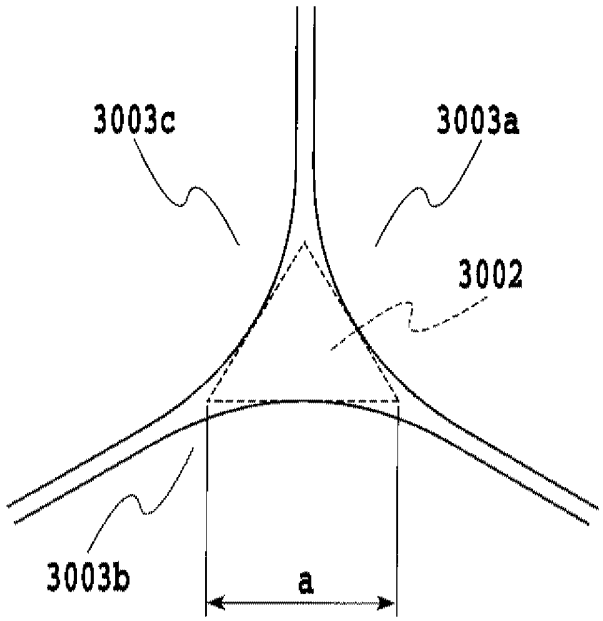
[図65]


150
100
50
0
-50
-100
-150
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
1.6
1.7
1.8
1.9
2.0
λ0 = 1.70μm
分散 (ps/nm/km)
波長 (μm)

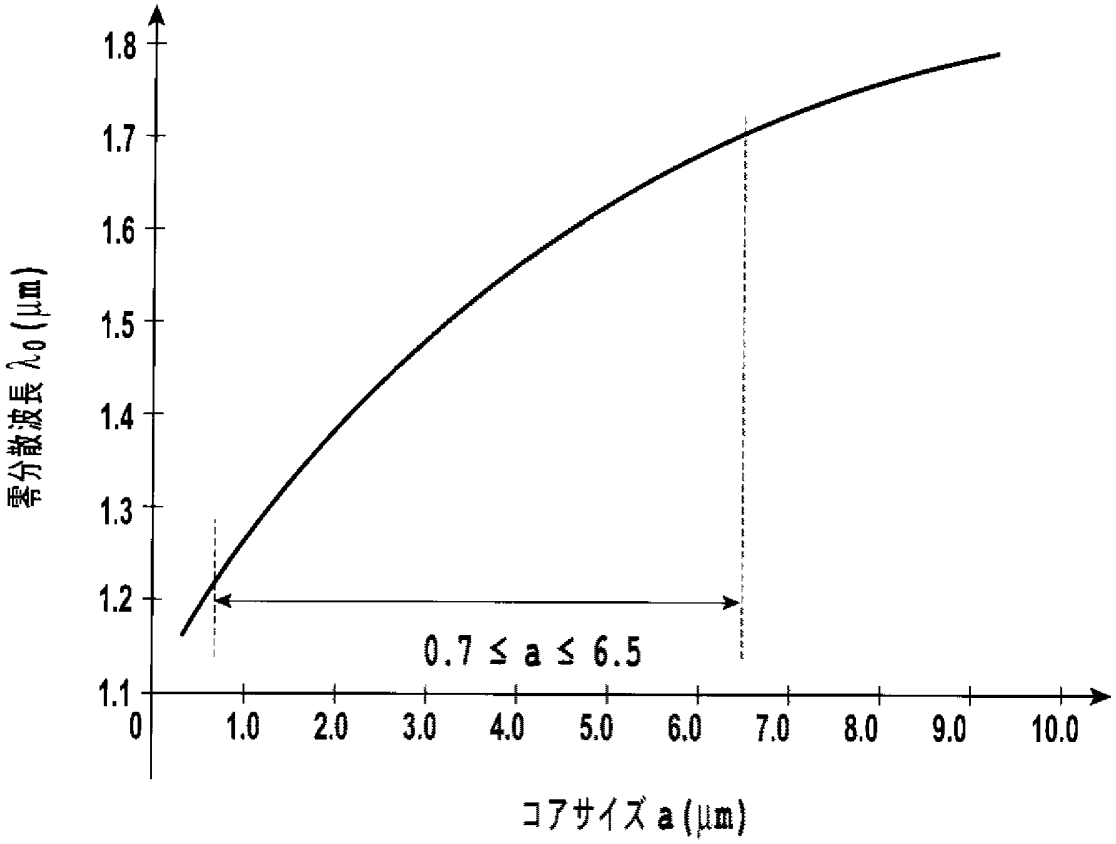
[図66]



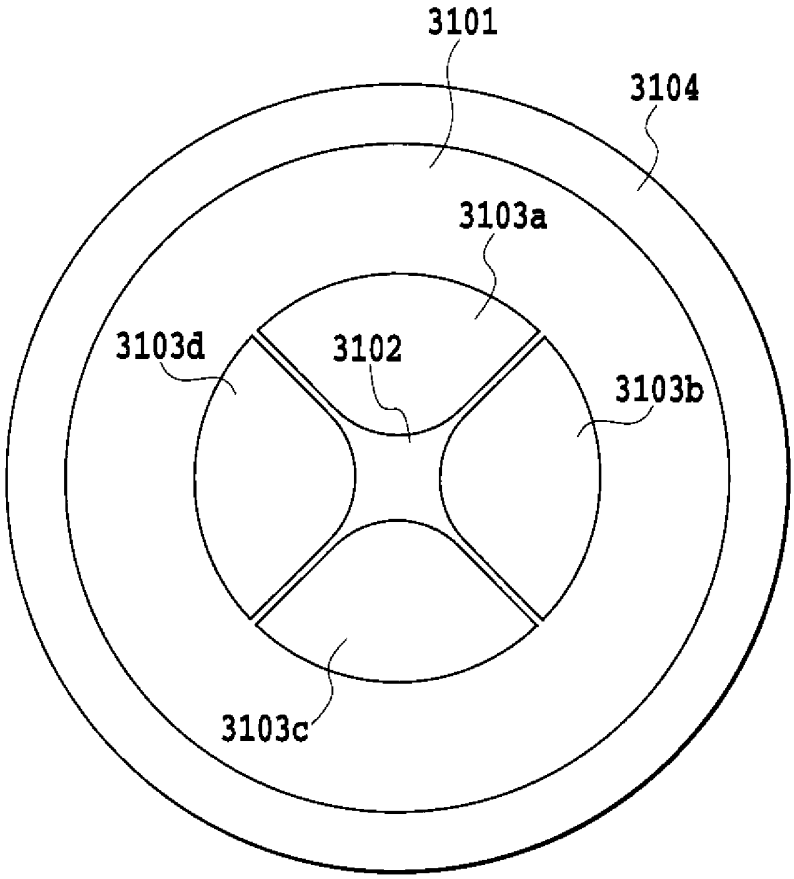
[図67]



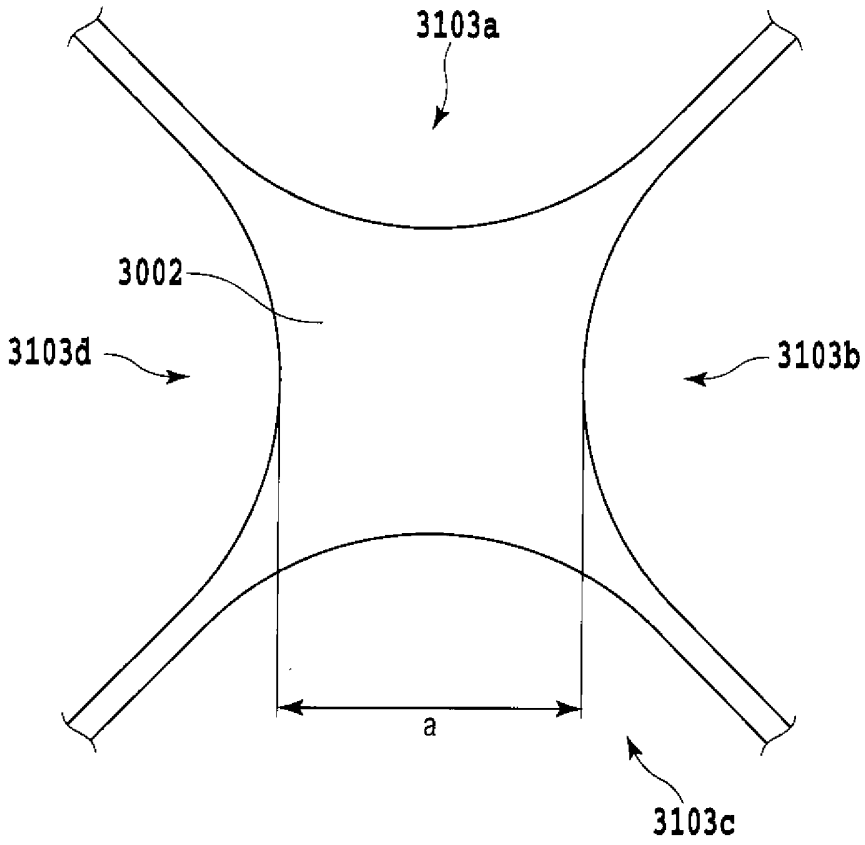
[図68]


1.8
1.7
1.6
1.5
1.4
1.3
1.2
1.1
0
1.0
2.0
3.0
4.0
5.0
6.0
7.0
8.0
9.0
10.0
零分散波長 λ0 (μm)
0.7 ≤ a ≤ 6.5
コアサイズ a (μm)

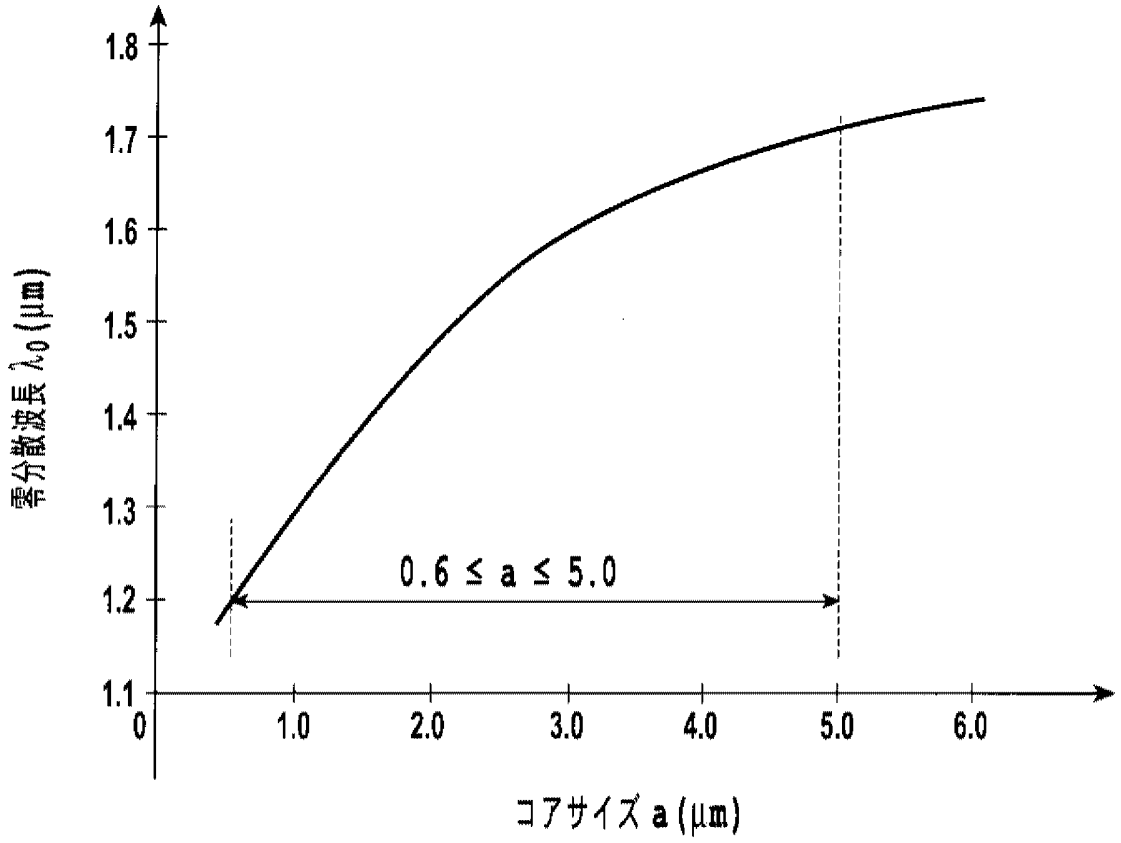
[図69]



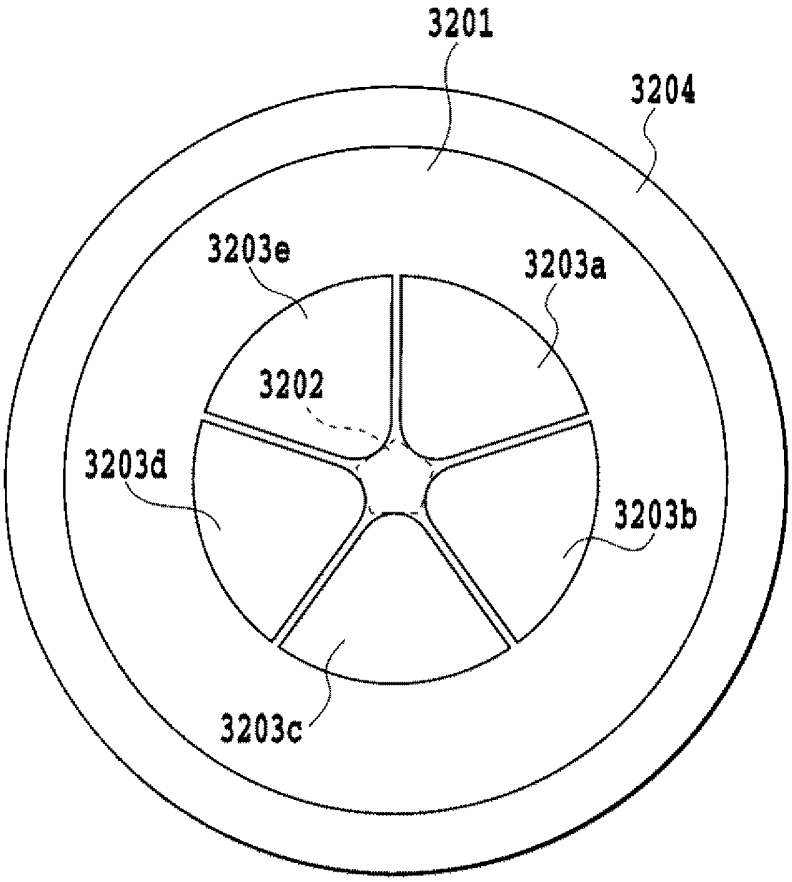
[図70]



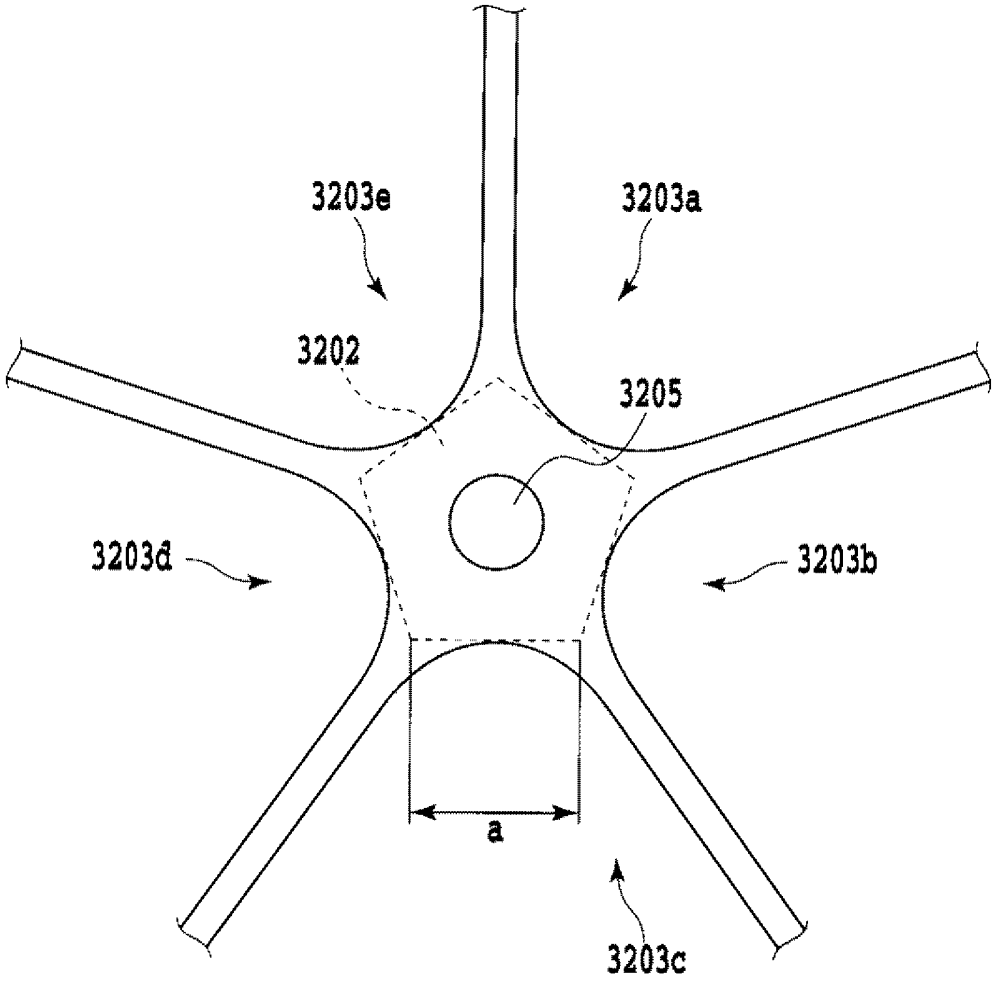
[図71]


1.8
1.7
1.6
1.5
1.4
1.3
1.2
1.1
0
1.0
2.0
3.0
4.0
5.0
6.0
零分散波長 λ0 (μm)
0.6 ≤ a ≤ 5.0
コアサイズ a (μm)

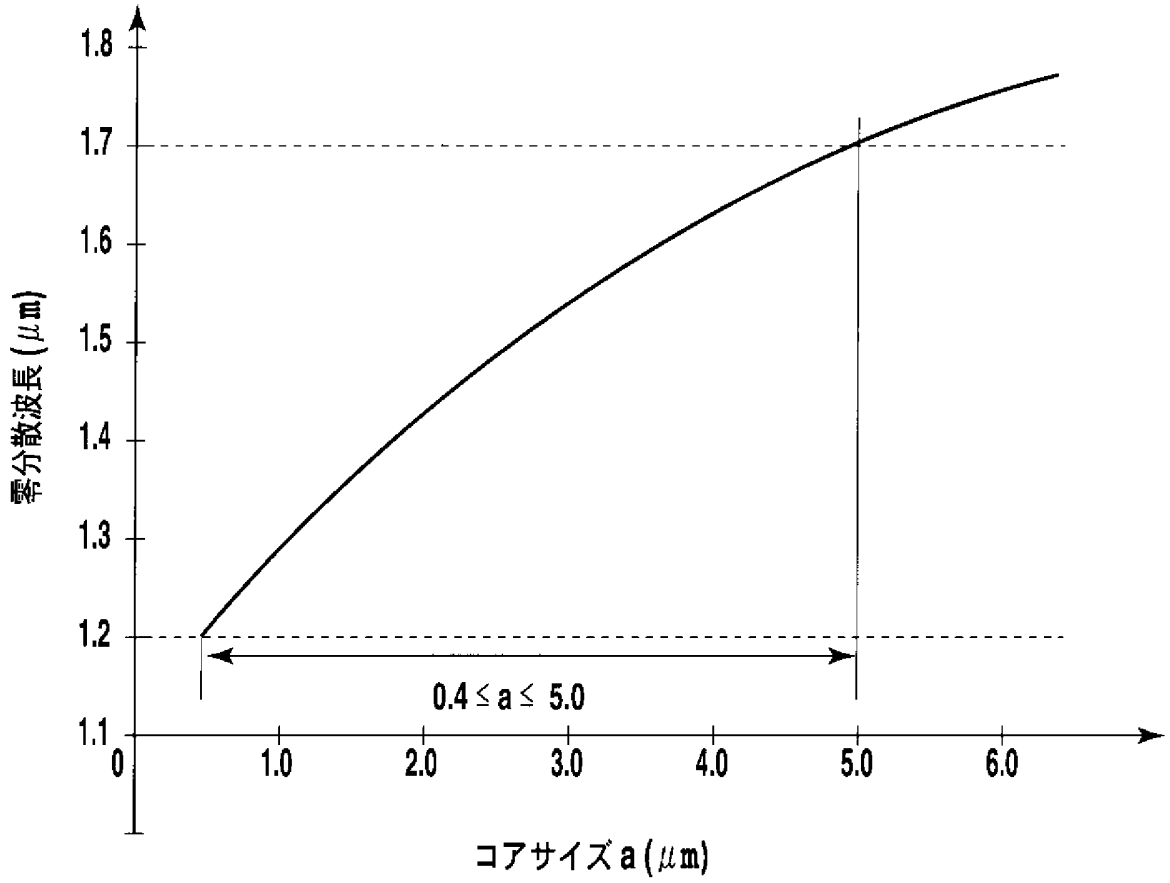
[図72]



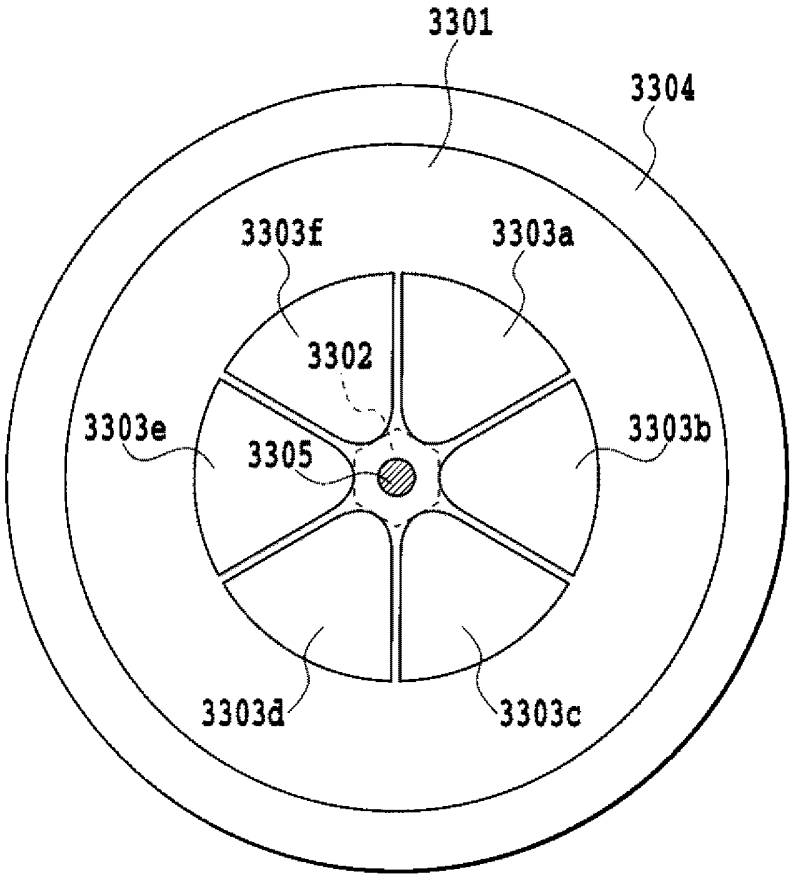
[図73]



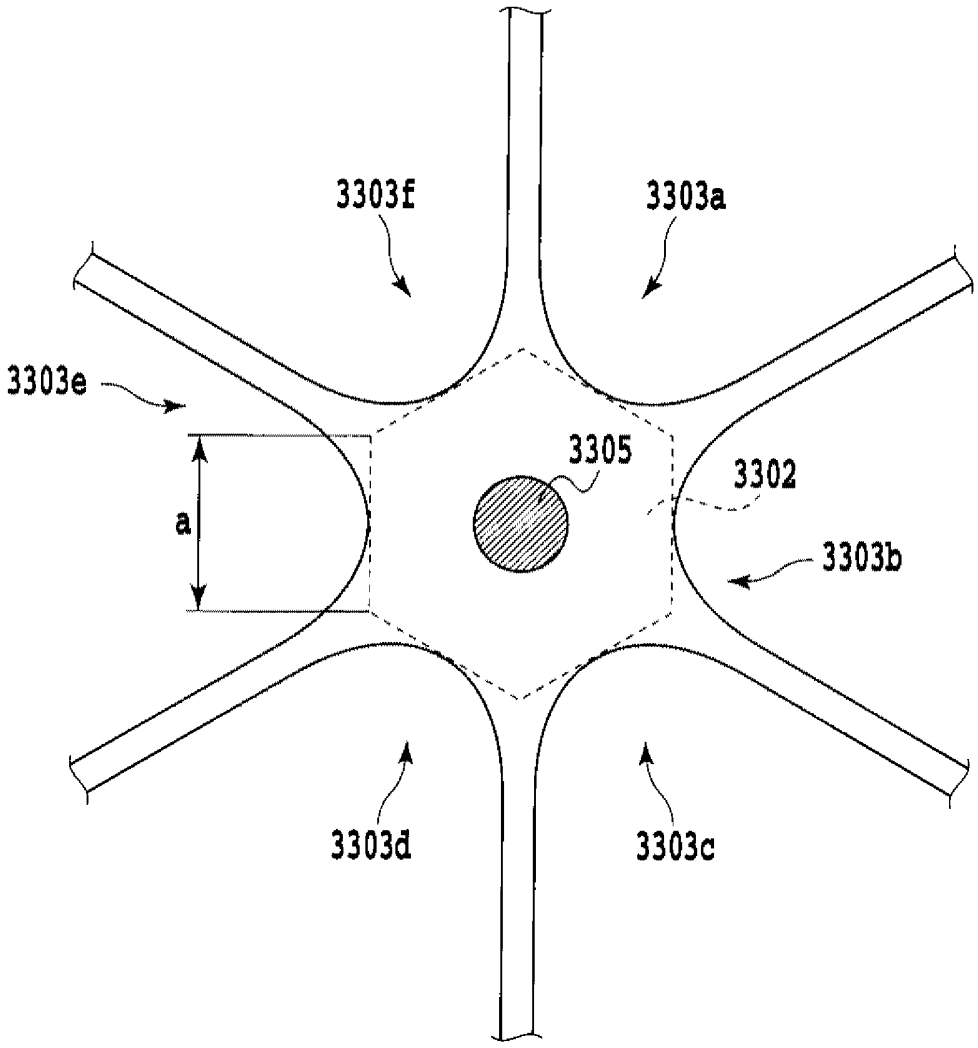
[図74]



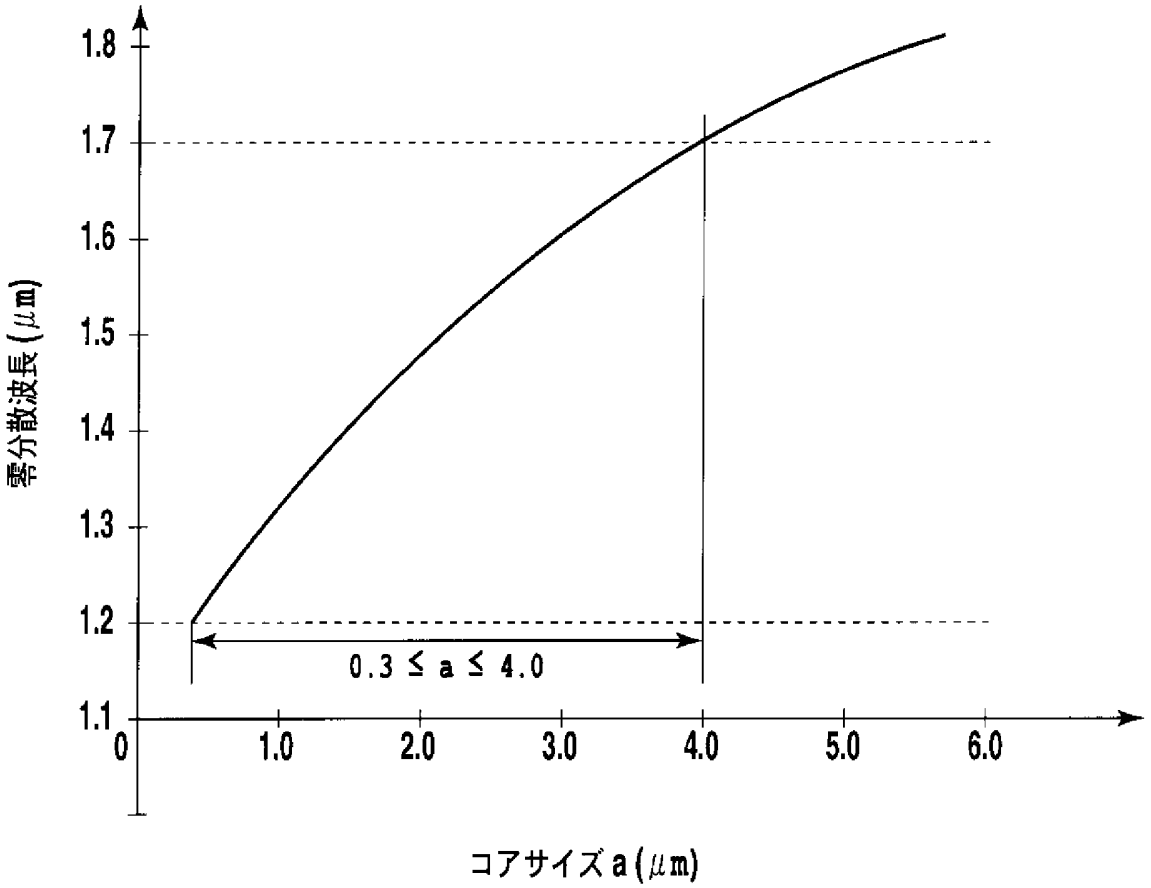
[図75]



[図76]



[図77]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2004/011625

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
Int.Cl[7] G02B6/00, G02F1/365

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)
Int.Cl[7] G02B6/00, G02F1/365

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2004
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2004 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2004

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
JOIS(JSTPLUS), IEEEXplore

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	HU, Eric S. et al., Design of Highly-Nonlinear TelluriteFibers with Zero Dispersion Near 1550nm., In: ECOC 2002, September, 2002, Nonlinearities-Parametric Amplifiers 3.2.3	1-27
Y	JP 11-236240 A (Nippon Telegraph And Telephone Corp.), 31 August, 1999 (31.08.99), Full text; all drawings (particularly, Claims; Par. No. [0033]) & EP 1285891 A1 (particularly, Par. No. [0020]) & US 6356387 B1	1-27

[X] 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	Date of mailing of the international search report
11 November, 2004 (11.11.04)	30 November, 2004 (22.11.04)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office	Authorized officer
Facsimile No.	Telephone No.

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (January 2004)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2004/011625

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	GHOSH, Gorachand et al., Sellmeier Coefficients and Chromatic Dispersions, for Some Tellurite Glasses In: Journal of the American Ceramic Society, October, 1995, Vol.78, No.10, pages 2828 to 2830	1-27
Y	JP 2003-149464 A (Fujikura Ltd.), 21 May, 2003 (21.05.03), Claim 1; Figs. 1, 3 (Family: none)	7-15
Y	Nei Kan et al., 'Kyokai Yosoho ni yoru Field Tojikomegata Holey Fiber no Kaiseki', The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers Gijutsu Kenkyu Hokoku, 31 May, 2002 (31.05.02), Vol.102, No.106, (OFT 2002-9~17), pages 9 to 14	7-15
Y	GUAN, N. et al., Characteristics of field confined holey fiber analyzed by boundary element method, In: Optical Fiber Communications Conference (OFC), 2002, pages 525 to 527(ThS5)	7-15
Y	JP 2000-35521 A (Nippon Telegraph And Telephone Corp.), 02 February, 2000 (02.02.00), Full text; all drawings (particularly, Par. No. [0016]) & US 6404966 B1	16
Y	JP 2000-356719 A (Lucent Technologies Inc.), 26 December, 2000 (26.12.00), Full text; all drawings (particularly, Fig. 3), & US 6097870 A1 & EP 1054273 A2	19
Y	WO 2002/095460 A1 (REDFERN POLYMER OPTICS PTY LTD.), 28 November, 2002 (28.11.02), Full text; all drawings (particularly, page 7, lines 10 to 29) & JP 2004-527007 A	21-25,27
Y	Knight J.C. et al., Two-Dimensional Photonic Crystal Material in Fibre Form In: Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, 1996, CLEO/Europe. 8-13, September, 1996, page 75	26
Y	JP 2002-293562 A (Sumitomo Electric Industries, Ltd.), 09 October, 2002 (09.10.02), Figs. 1 to 4 (Family: none)	26

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2004/011625

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:

This international application includes three inventions that do not fulfill the unity of invention for the following reasons.
Main invention: "claims 1-6, 16-20, 26"
Second invention: "claims 7-15" Third invention: "claims 21-25, 27"
In the followings, documents cited in the international search report are called document 1, document 2, document 3 ------- respectively in the order cited.
Our search has found that the technical feature in claim 1 is disclosed in document 1,
(See extra sheet.)

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 an additional fee, this Authority did not invite payment of any additional fee.

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.

☒ No protest accompanied the payment of additional search fees.

Continuation of Box No.III of continuation of first sheet(2)

and therefore it has evidently no special technical feature within the meaning of PCT Rule 13.2, second sentence. In addition, "tellurite glass having a zero material dispersion wavelength of at least 2 μm" is well known as disclosed also in documents 2 and 3.

Claims 7-15 have a special technical feature of "providing a core area, a first clad portion having a plurality of holes, and a second clad portion having a refractive index nearly equal to the equivalent refractive index of the first clad portion".

Claims 21-25, 27 have a special technical feature of a production method for a photonic crystal optical fiber consisting of tellurite glass, wherein a hole is formed by using a convex portion on the inner side of an inner wall or a jig arranged on a bottom surface.

Claims other than claims 7-15, 21-25, 27 have their technical features disclosed in document 1, or could be searched without effort justifying an additional fee, therefore they are to be included in the main invention.

国際調査報告

国際出願番号　ＰＣＴ／ＪＰ２００４／０１１６２５

Ａ．　発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

Ｉｎｔ．Ｃｌ⁷　Ｇ０２Ｂ６／００，Ｇ０２Ｆ１／３６５

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．Ｃｌ⁷　Ｇ０２Ｂ６／００，Ｇ０２Ｆ１／３６５

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	１９７１－２００４年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２００４年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２００４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）
JOIS(JSTPLUS)
IEEEXplore

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	関連する請求の範囲の番号
Ｙ	HU, Eric S. et al., Design of Highly-Nonlinear TelluriteFibers with Zero Dispersion Near 1550nm. In: ECOC 2002, September 2002, Nonlinearities - Parametric Amplifiers 3.2.3	１－２７
Ｙ	ＪＰ　１１－２３６２４０　Ａ（日本電信電話株式会社） １９９９．０８．３１ 全文，全図（特に、特許請求の範囲、段落３３） & EP 1285891 A1(特に、段落20)　& US 6356387 B1	１－２７

☒ 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 １１．１１．２００４	国際調査報告の発送日 30.11.2004
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） 髙　芳徳　　２Ｋ　３１０３ 電話番号　０３－３５８１－１１０１　内線　３２５３

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	関連する請求の範囲の番号
Ｙ	GHOSH, Gorachand et al., Sellmeier Coefficients and Chromatic Dispersions for Some Tellurite Glasses In: Journal of the American Ceramic Society, October 1995, Volume 78, Number 10, Pages 2828-2830	１－２７
Ｙ	ＪＰ　２００３－１４９４６４　Ａ（株式会社フジクラ）　２００３．０５．２１　請求項１および図１，３　（ファミリーなし）	７－１５
Ｙ	官寧ほか、「境界要素法によるフィールド閉じ込め型ホーリーファイバの解析」、電子情報通信学会技術研究報告、２００２年５月３１日、Ｖｏｌ．１０２、Ｎｏ．１０６（ＯＦＴ２００２－９～１７）、第９－１４頁	７－１５
Ｙ	GUAN, N. et al., Charcteristics of field confined holey fiber analyzed by boundary element method. In: Optical Fiber Communications Conference (OFC), 2002, Pages 525-527 (ThS5)	７－１５
Ｙ	ＪＰ　２０００－３５５２１　Ａ（日本電信電話株式会社）　２０００．０２．０２　全文，全図（特に、段落１６）　＆ US 6404966 B1	１６
Ｙ	ＪＰ　２０００－３５６７１９　Ａ（ルーセント　テクノロジーズ　インコーポレイテッド）　２０００．１２．２６　全文，全図（特に、図３）　＆ US 6097870 A1　＆ EP 1054273 A2	１９
Ｙ	ＷＯ　２００２／０９５４６０　Ａ１（REDFERN POLYMER OPTICS PTY LTD）　２００２．１１．２８　全文，全図（特に、第７頁第１０－２９行）　＆ JP 2004-527007 A	21-25,27
Ｙ	Knight, J.C. et al., Two-Dimensional Photonic Crystal Material in Fibre Form In: Conference on Lasers and Electro-optics Europe, 1996. CLEO/Europe, 8-13 Sept. 1996, Page 75	２６
Ｙ	ＪＰ　２００２－２９３５６２　Ａ（住友電気工業株式会社）　２００２．１０．０９　図１－４　（ファミリーなし）	２６

国際調査報告

国際出願番号　ＰＣＴ／ＪＰ２００４／０１１６２５

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．☐ 請求の範囲 _____ 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．☐ 請求の範囲 _____ 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．☐ 請求の範囲 _____ 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　発明の単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。

以下の理由によりこの国際出願は発明の単一性を満たさない３つの発明を含む。
主発明　：「クレーム１－６，１６－２０，２６」
第２発明：「クレーム７－１５」　第３発明：「クレーム２１－２５，２７」
以下において、国際調査報告に掲げる文献を、掲載の順に、それぞれ、文献１、文献２、文献３・・・という。
調査の結果、請求の範囲１は、その技術的特徴が文献１に記載されており、ＰＣＴ規則１３．２の第２文の意味における特別な技術的特徴を有しないことが明らかとなった。なお、「２μｍ以上の零材料分散波長を持つテルライトガラス」は、文献２及び３にも記載されているように周知である。
特別ページに続く。

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の範囲について作成した。

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の範囲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の範囲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の範囲について作成した。

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なかった。

第Ⅲ欄の続き

請求の範囲７－１５は、「コア領域と、複数の空孔を有する第１のクラッド部と、当該第１のクラッド部の等価屈折率と略等しい屈折率を有する第２のクラッド部とを備える」という特別な技術的特徴を有する。

請求の範囲２１－２５，２７は、テルライトガラスからなるフォトニック結晶光ファイバの製造方法であって、内壁の内側の凸となる部分、又は、底面に整列した冶具を利用して空孔を形成するという特別な技術的特徴を有する。

請求の範囲７－１５，２１－２５，２７以外の請求の範囲は、その技術的特徴が文献１に記載されているか、又は、追加調査手数料を要求するまでもなく調査することができたので、主発明に含めることとする。