

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5000363号
(P5000363)

(45) 発行日 平成24年8月15日 (2012. 8. 15)

(24) 登録日 平成24年5月25日 (2012. 5. 25)

(51) Int. Cl.

F 1

G O 2 B 6/032 (2006.01)

G O 2 B 6/20

Z

G O 2 B 6/036 (2006.01)

G O 2 B 6/22

請求項の数 7 (全 21 頁)

(21) 出願番号 特願2007-102389 (P2007-102389)
 (22) 出願日 平成19年4月10日 (2007. 4. 10)
 (65) 公開番号 特開2008-261903 (P2008-261903A)
 (43) 公開日 平成20年10月30日 (2008. 10. 30)
 審査請求日 平成21年7月13日 (2009. 7. 13)

(73) 特許権者 000004226
 日本電信電話株式会社
 東京都千代田区大手町二丁目3番1号
 (74) 代理人 100078499
 弁理士 光石 俊郎
 (74) 代理人 100102945
 弁理士 田中 康幸
 (74) 代理人 100120673
 弁理士 松元 洋
 (72) 発明者 松井 隆
 東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日
 本電信電話株式会社内
 (72) 発明者 中島 和秀
 東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日
 本電信電話株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 空孔付き分散制御ファイバおよび光伝送システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

半径 a_1 の円形状コア領域と、前記円形状コア領域と同心円状に形成され、内径が前記 a_1 よりも大きい a_2 であり、外径が前記 a_2 よりも大きい a_3 であるリング状コア領域と、前記円形状コア領域と前記リング状コア領域の間に形成された複数の空孔と、前記リング状コア領域の外側を覆うクラッド領域とを有する空孔付き分散制御ファイバであって、

前記円形状コア領域および前記リング状コア領域における導波モードの伝搬定数が等しくなる結合波長 λ_p を使用波長帯域の近傍に有し、

前記空孔は3つ以上であり、

前記空孔の直径を d とし、軸心から前記空孔までの距離を $c/2$ とし、前記円形状コア領域および前記リング状コア領域が前記クラッド領域の屈折率に対してそれぞれ Δ_1 および Δ_2 の比屈折率差を有するとき、前記結合波長 λ_p が次式を満たし、

波長 1550 nm における波長分散の分散スロープに対する比が $230\text{ nm} \sim 530\text{ nm}$ の範囲内であり、

零分散波長が $1300\text{ nm} \sim 1324\text{ nm}$ の範囲内であることを特徴とする空孔付き分散制御ファイバ。

【数 1】

$$\lambda_p = k_1 \left(\frac{c}{2a_1} \right) + k_{2,1} \exp \left(-k_{2,2} \left(\frac{d}{2a_1} \right) \right) + k_3 \Delta_1 + (k_{4,1} \Delta_2 + k_{4,2} \Delta_2^2) \\ + \left(k_{5,1} \left(\frac{a_2}{a_1} \right) + k_{5,2} \left(\frac{a_2}{a_1} \right)^2 \right) + \left(k_{6,1} \left(\frac{a_3}{a_1} \right) + k_{6,2} \left(\frac{a_3}{a_1} \right)^2 \right) + k_0 \quad \dots (1)$$

【請求項 2】

請求項 1 に記載の空孔付き分散制御ファイバであって、
前記結合波長 λ_p が波長 1 2 6 0 nm から 1 6 2 5 nm の範囲であることを特徴とする空孔付き分散制御ファイバ。 10

【請求項 3】

請求項 2 に記載の空孔付き分散制御ファイバであって、
規格化空孔位置 $c / 2 a_1$ が 1 . 0 8 ~ 1 . 5 8 であり、かつ前記比屈折率差 Δ_1 が 1 . 0 ~ 1 . 6 % であり、かつ前記比屈折率差 Δ_2 が 0 . 0 ~ 0 . 7 8 % であり、かつ規格化リングコア内径 a_2 / a_1 が 5 以下であり、かつ規格化リングコア外径 a_3 / a_1 が 7 以下であることを特徴とする空孔付き分散制御ファイバ。 20

【請求項 4】

請求項 1 乃至請求項 3 の何れか一項に記載の空孔付き分散制御ファイバであって、
前記結合波長 λ_p における波長分散が - 2 0 0 p s / n m · k m 以下となることを特徴とする空孔付き分散制御ファイバ。 20

【請求項 5】

使用波長帯において正の分散を有する光ファイバと、請求項 1 に記載の空孔付き分散制御ファイバとを含む
ことを特徴とする光伝送システム。

【請求項 6】

請求項 5 に記載の光伝送システムであって、
前記使用波長帯において正の分散を有する光ファイバが、波長 1 3 0 0 nm ~ 1 3 2 4 nm で零分散波長を有する
ことを特徴とする光伝送システム。 30

【請求項 7】

波長 1 3 0 0 nm ~ 1 3 2 4 nm に零分散波長を有する光ファイバと、請求項 1 に記載の空孔付き分散制御ファイバとを含む
ことを特徴とする光伝送システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、空孔付き分散制御ファイバおよび光伝送システムに関する。 40

【背景技術】

【0002】

高速光伝送システムでは、波長分散の累積による波形の歪が信号誤りを生じ、伝送特性を劣化させる。また近年では波長分割多重 (WDM) 伝送が広く用いられており、使用波長帯は 1 波長ではなく、広い波長に亘っている。したがって、高速 WDM 伝送システムでは、広い波長帯に亘って累積分散を補償する必要がある。

【0003】

WDM 伝送システムにおける累積分散を補償する分散補償技術は、分散補償ファイバ (DCF)、ファイバブラッググレーティング、電気段での信号再生など様々な技術に基づいて検討されている。特に DCF は光ファイバ伝送路との接続性が良く、広帯域性を有し 50

ているため広く用いられている。DCFでは、損失がファイバ長に比例して増加するため、単位長さ当りの補償量が大きいことが望まれる。また使用波長帯の複数の波長チャンネルを一括で補償するためには、分散スロープを同時に補償することが望まれる。これまで、補償量が大きくスロープ補償を行える、様々な構造のDCFが報告されている。

【0004】

また、コアネットワークなど長距離伝送路では分散の影響を軽減するために、零分散波長を1550nm帯に有する分散シフトファイバ(DSF)が広く用いられている。DSFでは波長1310nm帯にて $-20\text{ ps/nm}\cdot\text{km}$ 程度の分散を有するため、当該波長帯での伝送特性が劣化する。そのためDSFに対しては波長1310nm帯で正の分散を有するDCFで分散補償を行う必要がある。しかしながら、従来のDCFでは1310nmでは材料分散が支配的となり、正の分散を実現することは難しい。ここで近年フォトニック結晶ファイバ(PCF)と呼ばれる、ファイバ内に空孔を有する光ファイバが関心を集めている。PCFでは零分散波長を短波長側へシフトさせることができるので、1310nm帯において正の分散を得ることができる。非特許文献1では、PCFを用いてDSFの1310nm帯における分散補償を実現している。

10

【0005】

さらに、高度な光伝送システムを実現するために、光信号のバッファに対する要求が高まっている。そのため近年、光ファイバや光デバイス中における非線形効果を利用した、光遅延回路が広く検討され、最近では800psの遅延が実現されている。

【0006】

20

なお、非特許文献2には、ホールアシストファイバにおいて、ファイバコアと当該ファイバコアの周囲に設けられた空孔と間の距離 c が曲げおよび接続の損失特性にて重要なパラメータであり、ファイバコアの半径 a に対する空孔距離 c の位置に前記空孔を2以上とすることで、空孔が設けられた領域を実効的に同じ屈折率とみなすことができるホールアシストファイバの設計技術が記載されている。

【0007】

【非特許文献1】K.Nakajima et al., "Dispersion Compesation of Dispersion-Shifted Fibre at 1310 nm using Photonic Crystal Fibre", ECOC2006 Proceeding, Tu.3.3.5, 2006年9月

【非特許文献2】K.Nakajima et al., "Hole-Assisted Fiber Design for Small Bending and Splice Losses", IEEE Photonics Technology Letters, vol.15, no.12, 2003年12月, p.1737-1739

30

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

しかしながら、一般的なDCFでは補償量は $-100\text{ ps/nm}\cdot\text{km} \sim -200\text{ ps/nm}\cdot\text{km}$ 程度であり、さらに大きな補償量とするためには、構造が複雑になってしまう。また、非特許文献1のPCFにおける1310nm帯の分散は数十 $\text{ps/nm}\cdot\text{km}$ 程度であり、かつ分散スロープも同時に制御することは難しい。また従来の非線形効果を用いた遅延回路では、遅延時間は0.01ns $\sim$ 1ns程度であり、かつその回路構成も複雑である。

40

【0009】

そこで、本発明は、前述した問題に鑑み提案されたもので、簡易な構造にて、分散の制御性を向上させた空孔付き分散制御ファイバおよび光伝送システムを提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0010】

上述した課題を解決する第1の発明に係る空孔付き分散制御ファイバは、半径 a_1 の円形状コア領域と、前記円形状コア領域と同心円状に形成され、内径が前記 a_1 よりも大きい a_2 であり、外径が前記 a_2 よりも大きい a_3 であるリング状コア領域と、

50

前記円形状コア領域と前記リング状コア領域の間に形成された複数の空孔と、前記リング状コア領域の外側を覆うクラッド領域とを有する空孔付き分散制御ファイバであって、

前記円形状コア領域および前記リング状コア領域における導波モードの伝搬定数が等しくなる結合波長 λ_p を使用波長帯域の近傍に有し、

前記空孔が3つ以上であり、

前記空孔の直径を d とし、軸心から前記空孔までの距離を $c/2$ とし、前記円形状コア領域および前記リング状コア領域が前記クラッド領域の屈折率に対してそれぞれ Δ_1 および Δ_2 の比屈折率差を有するとき、前記結合波長 λ_p が次式を満たし、

波長1550nmにおける波長分散の分散スロープに対する比が230nm~530nmの範囲内であり、

10

零分散波長が1300nm~1324nmの範囲内であることを特徴とする。

【数1】

$$\lambda_p = k_1 \left(\frac{c}{2a_1} \right) + k_{2,1} \exp \left(-k_{2,2} \left(\frac{d}{2a_1} \right) \right) + k_3 \Delta_1 + (k_{4,1} \Delta_2 + k_{4,2} \Delta_2^2) + \left(k_{5,1} \left(\frac{a_2}{a_1} \right) + k_{5,2} \left(\frac{a_2}{a_1} \right)^2 \right) + \left(k_{6,1} \left(\frac{a_3}{a_1} \right) + k_{6,2} \left(\frac{a_3}{a_1} \right)^2 \right) + k_0 \quad \dots (1)$$

20

【0011】

上述した課題を解決する第2の発明に係る空孔付き分散制御ファイバは、

第1の発明に係る空孔付き分散制御ファイバであって、

前記結合波長 λ_p が波長1260nmから1625nmの範囲であることを特徴とする。

【0012】

上述した課題を解決する第3の発明に係る空孔付き分散制御ファイバは、

第2の発明に係る空孔付き分散制御ファイバであって、

規格化空孔位置 $c/2a_1$ が1.08~1.58であり、かつ前記比屈折率差 Δ_1 が1.0~1.6%であり、かつ前記比屈折率差 Δ_2 が0.0~0.78%であり、かつ規格化リングコア内径 a_2/a_1 が5以下であり、かつ規格化リングコア外径 a_3/a_1 が7以下である

30

ことを特徴とする。

【0013】

上述した課題を解決する第4の発明に係る空孔付き分散制御ファイバは、

第1乃至第3の発明の何れか一つに係る空孔付き分散制御ファイバであって、

前記結合波長 λ_p における波長分散が-200ps/nm·km以下となることを特徴とする。

【0014】

上述した課題を解決する第5の発明に係る光伝送システムは、

使用波長帯において正の分散を有する光ファイバと、第1の発明に係る空孔付き分散制御ファイバを含む

40

ことを特徴とする。

【0015】

上述した課題を解決する第6の発明に係る光伝送システムは、

第5の発明に係る光伝送システムであって、

前記使用波長帯において正の分散を有する光ファイバが、波長1300nm~1324nmで零分散波長を有する

ことを特徴とする。

【0016】

50

上述した課題を解決する第 7 の発明に係る光伝送システムは、
波長 1300 nm ~ 1324 nm に零分散波長を有する光ファイバと、第 1 の発明に係る空孔付き分散制御ファイバとを含むことを特徴とする。

【発明の効果】

【0017】

本発明によれば、分散の制御性が高く設計が容易となり、簡易な構造のため製造性が良いという効果を奏する。

【0018】

さらには、従来の DCF と比べて大きな負または正の分散を実現でき、分散補償の効率が
高いという効果を奏する。 10

【0019】

さらには、使用波長帯を柔軟かつ容易に設計できるという効果も奏する。

【0020】

さらには、簡易な回路構成で従来に比べて大きな光信号の遅延を得られるという効果も奏する。

【発明を実施するための最良の形態】

【0021】

以下、本発明を実施するための最良の形態について、実施例に基づき詳細に説明する。

【実施例 1】

20

【0022】

以下に、本発明の第 1 の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバにつき、図面を参照して具体的に説明する。

図 1 は、本発明の第 1 の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバの概略断面図である。

【0023】

本実施例に係る空孔付き分散制御ファイバは、図 1 に示すように、長手方向と垂直をなす断面にて、中心に位置し、半径が a_1 のコア（円形状コア領域）1 と、このコア 1 の同心円状に形成され、内径が a_1 よりも大きい a_2 であり、外径が a_2 よりも大きい a_3 であるリングコア（リング状コア領域）2 と、このリングコア 2 の外側を覆うクラッド（クラッド領域）3 と、軸心から $c/2$ の距離に形成され、直径 d の空孔 4 とを有する。コア 1、
リングコア 2、およびクラッド 3 の屈折率をそれぞれ n_1 、 n_2 、 n_3 とする。コア 1 およ
びリングコア 2 のクラッド 3 に対する比屈折率差 Δ_1 および Δ_2 は以下の（2）式で定義される。 30

【0024】

【数 2】

$$\Delta_1 \equiv \frac{n_1^2 - n_3^2}{2n_1^2}$$

$$\Delta_2 \equiv \frac{n_2^2 - n_3^2}{2n_2^2} \quad \dots (2)$$

40

【0025】

ここで、空孔 4 が屈折率の異なる 2 つ以上の領域にまたがって配置されると、製造が非常に困難になるため、空孔 4 はコア 1 とリングコア 2 の間である $a_1 \sim a_2$ の範囲にあることが好ましい。

【0026】

ここで、図 2 に、本発明の第 1 の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバの半径方向における実効的な屈折率の分布を示す。上述した非特許文献 2 に記載されるように、 $a_1 \sim a_2$ の部分である空孔層 41 は、実効的に同じ屈折率の層とみなすことができる。したが 50

って、ここでは空孔数を6としているが、空孔数が6よりも少ない、または多い構造であっても同様の効果が得られる。ただし、空孔数が2の場合は複屈折の問題が生じるため、空孔数は3以上であることが好ましい。

【0027】

ここで、図3に、本発明の第1の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバの動作原理を説明するための概略を示す。図3(a)は、本発明の第1の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバの屈折率の分布図であり、図3(b)は、それがコア領域のみからなる導波路とした場合の導波モードの分布図であり、図3(c)は、それが空孔層およびリング状コア領域からなる導波路とした場合の導波モードの分布図であり、図3(d)は、波長 λ が結合波長 λ_p よりも小さい場合の導波モードの分布図であり、図3(e)は、波長 λ が結合波長 λ_p と同一である場合の導波モードの分布図であり、図3(f)は、波長 λ が結合波長 λ_p よりも大きい場合の導波モードの分布図である。図3中の点線は各導波路における導波モード分布を表す。結合波長 λ_p とは、図3(b)に示す導波路の導波モードの伝搬定数と、図3(c)に示す導波路の導波モードの伝搬定数が等しくなる波長をいう。

【0028】

本発明の第1の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバは、コア1のみで構成される導波路(図3(b)に示す実線を参照)と、空孔層41およびリングコア2で構成される導波路(図3(c)に示す実線を参照)の結合系であると見なすことができる。上記のような2つの導波路の結合系では、図3(d)、図3(e)、図3(f)に示すように、結合波長 λ_p において伝搬定数の急激な変化が生じ、結果として大きな分散値が得られる。図3(b)に示す導波路、および図3(c)に示す導波路において導波路を形成するためには、コア1の屈折率およびリングコア2の屈折率はクラッド3の屈折率よりも大きい必要がある。また、コア1とリングコア2の距離を大きくする、またはコア1とリングコア2の間の層(空孔層41)の屈折率を小さくすることで、 λ_p における分散の絶対値を大きくすることができる。従来のフッ素添加による屈折率の低減では、製造上添加量に限界があるため屈折率の低減量も限界があるが、本実施例では空孔4の大きさによって容易に空孔層41の屈折率を低減することが可能である。

【0029】

図4に、本発明の第1の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバにおける、空孔位置と波長分散との関係を示す。ここでは、コア1の半径 a_1 を $1.5\mu\text{m}$ とし、規格化リングコア内径 a_2/a_1 を3.0とし、規格化リングコア外径 a_3/a_1 を5.0とし、規格化空孔直径 $d/2a_1$ を0.4とし、コア1の比屈折率差 Δ_1 を1.5%とし、リングコア2の比屈折率差 Δ_2 を0.3%とした。図4中にて、実線、破線、点線、一点鎖線は規格化空孔位置 $c/2a_1$ がそれぞれ1.2、1.4、1.5、1.6の場合を表す。図4に示すように、空孔付き分散制御ファイバでは $-1000\text{ps/nm}\cdot\text{km} \sim -3000\text{ps/nm}\cdot\text{km}$ といった非常に大きな負の分散値が得られることが分かる。分散の絶対値が最も大きくなる波長が結合波長 λ_p に対応する。ここで、結合波長 λ_p と規格化空孔位置 $c/2a_1$ との関係を図5に示す。図5に示すように、空孔4の位置をコア1に近づけて空孔位置を変えることで、結合波長 λ_p は波長1310nm帯や1550nm帯などの任意の波長帯で設計することができる。したがって、本実施例に係る空孔付き分散制御ファイバによれば、任意の波長帯において絶対値の大きな負の分散を得ることが可能である。結合波長 λ_p は、図4および図5より以下の(3)式にて近似できる。

【0030】

【数3】

$$\lambda_p = k_{01} + k_1 \left(\frac{c}{2a_1} \right) \cdots (3)$$

【0031】

例えば、図4および図5では、 $k_{01} = 477.8$ 、 $k_1 = 725.4$ と求められる。

【 0 0 3 2 】

図 6 に、本発明の第 1 の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバにおける、空孔直径と波長分散との関係を示す。ここで、コア 1 の半径 a_1 、規格化リングコア内径 a_2 / a_1 、規格化リングコア外径 a_3 / a_1 、コア 1 の比屈折率差 Δ_1 、リングコア 2 の比屈折率差 Δ_2 は、図 4 と同様とし、規格化空孔位置 $c / 2 a_1$ を 1.5 とした。図中の実線、破線、点線、一点鎖線、二点鎖線は、規格化空孔直径 $d / 2 a_1$ がそれぞれ 0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 の場合を表す。

【 0 0 3 3 】

この図に示すように、空孔 4 を小さくするほど広帯域に負分散および負分散スロープが実現でき、空孔 4 を大きくするほど任意の波長での分散の絶対値が大きくなることができ

図 6 にて、図 4 と同様に、分散の絶対値が最も大きくなる波長が結合波長 λ_p に対応する。ここで、結合波長 λ_p と規格化空孔直径 $d / 2 a_1$ との関係を図 7 に示す。結合波長 λ_p は、図 6 および図 7 より以下の (4) 式にて近似できる。

【 0 0 3 4 】

【数 4】

$$\lambda_p = k_{02} + k_{21} \exp \left[-k_{22} \left(\frac{d}{2a_1} \right) \right] \quad \dots (4)$$

【 0 0 3 5 】

例えば、図 6 および図 7 では、 $k_{02} = 1556.3$ 、 $k_{21} = 849.6$ 、 $k_{22} = 11.14$ と求められる。

【 0 0 3 6 】

ここで、図 8 に本発明の第 1 の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバにおける、コア 1 の比屈折率差 Δ_1 と波長分散との関係を示す。ここで、規格化空孔直径 $d / 2 a_1$ 、コア 1 の半径 a_1 、規格化リングコア内径 a_2 / a_1 、規格化リングコア外径 a_3 / a_1 、リングコア 2 の比屈折率差 Δ_2 は、図 4 と同様とし、規格化空孔位置 $c / 2 a_1$ を 1.5 とした。図中の実線、破線、点線は、コア 1 の比屈折率差 Δ_1 がそれぞれ 1.4%、1.5%、1.6% の場合を表す。

【 0 0 3 7 】

この図に示すように、コア 1 の比屈折率差 Δ_1 を大きくすることで、結合波長 λ_p が長波長側になっていることが分かる。図 8 にて、図 4 と同様に、分散の絶対値が最も大きくなる波長が結合波長 λ_p に対応する。ここで、結合波長 λ_p とコア 1 の比屈折率差 Δ_1 との関係を図 9 に示す。結合波長 λ_p は、図 8 および図 9 より以下の (5) 式にて近似できる。

【 0 0 3 8 】

【数 5】

$$\lambda_p = k_{03} + k_3 \Delta_1 \quad \dots (5)$$

【 0 0 3 9 】

例えば、図 8 および図 9 では、 $k_{03} = 619.9$ 、 $k_3 = 63182$ と求められる。

【 0 0 4 0 】

図 10 に、本発明の第 1 の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバにおける、リングコア 2 の比屈折率差 Δ_2 と波長分散との関係を示す。ここで、規格化空孔位置 $c / 2 a_1$ 、規格化空孔直径 $d / 2 a_1$ 、コア 1 の半径 a_1 、規格化リングコア内径 a_2 / a_1 、規格化リングコア外径 a_3 / a_1 は、図 8 と同様とし、コア 1 の比屈折率差 Δ_1 を 1.5% とした。図中の実線、破線、点線、一点鎖線、二点鎖線は、リングコア 2 の比屈折率差 Δ_2 がそれぞれ 0.6%、0.4%、0.3%、0.2%、0.0% の場合を表す。

【 0 0 4 1 】

この図に示すように、リングコア 2 の比屈折率差 Δ_2 を大きくすることで、結合波長 λ_p

が短波長側になっていることが分かる。図 10 にて、図 4 と同様に、分散の絶対値が最も大きくなる波長が結合波長 λ_p に対応する。リングコア 2 の比屈折率差 Δ_2 が 0.2 % 以下となる場合には、結合波長 λ_p はほぼ一定であり、分散の絶対値が大きくなることが分かる。ここで、結合波長 λ_p とリングコア 2 の比屈折率差 Δ_2 との関係を図 11 に示す。結合波長 λ_p は、図 10 および図 11 より、 λ_p は以下の (6) 式にて近似できる。

【0042】

【数 6】

$$\lambda_p = k_{04} + k_{41}\Delta_2 + k_{42}\Delta_2^2 \quad \dots (6)$$

10

【0043】

例えば、図 10 および図 11 では、 $k_{04} = 1618.8$ 、 $k_{41} = 938.6$ 、 $k_{42} = -6.04 \times 10^6$ と求められる。

【0044】

図 12 に、本発明の第 1 の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバにおける、規格化リングコア内径 a_2/a_1 と波長分散との関係を示す。ここで、規格化空孔位置 $c/2a_1$ 、規格化空孔直径 $d/2a_1$ 、コア 1 の半径 a_1 、規格化リングコア外径 a_3/a_1 、コア 1 の比屈折率差 Δ_1 は、図 10 と同様とし、リングコア 2 の比屈折率差 Δ_2 を 0.3 % とした。図中の実線、破線、点線、一点鎖線は、規格化リングコア内径 a_2/a_1 がそれぞれ 2.5、3.0、3.5、4.0 の場合を表す。

20

【0045】

この図に示すように、規格化リングコア内径 a_2/a_1 を大きくすることで、結合波長 λ_p が長波長側になることが分かる。ここで、結合波長 λ_p と規格化リングコア内径 a_2/a_1 との関係を図 13 に示す。結合波長 λ_p は、図 12 および図 13 より、以下の (7) 式にて近似できる。

【0046】

【数 7】

$$\lambda_p = k_{05} + k_{51}\left(\frac{a_2}{a_1}\right) + k_{52}\left(\frac{a_2}{a_1}\right)^2 \quad \dots (7)$$

30

【0047】

例えば、図 12 および図 13 では、 $k_{05} = 1560.9$ 、 $k_{51} = -13.64$ 、 $k_{52} = 5.455$ と求められる。

【0048】

図 14 に、本発明の第 1 の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバにおける、規格化リングコア外径 a_3/a_1 と波長分散との関係を示す。ここで、規格化空孔位置 $c/2a_1$ 、規格化空孔直径 $d/2a_1$ 、コア 1 の半径 a_1 、コア 1 の比屈折率差 Δ_1 、リングコア 2 の比屈折率差 Δ_2 は、図 12 と同様とし、規格化リングコア内径 a_2/a_1 を 3 とした。図中の実線、破線、点線は、規格化リングコア外径 a_3/a_1 がそれぞれ 4.0、5.0、6.0 の場合を表す。

40

【0049】

この図に示すように、規格化リングコア外径 a_3/a_1 を大きくすることで、結合波長 λ_p が短波長側になることが分かる。図 14 にて、図 4 と同様に、分散の絶対値が最も大きくなる波長が結合波長 λ_p に対応する。ここで、結合波長 λ_p と規格化リングコア外径 a_3/a_1 との関係を図 15 に示す。結合波長 λ_p は、図 14 および図 15 より、以下の (8) 式にて近似できる。

【0050】

【数 8】

$$\lambda_p = k_{06} + k_{61} \left(\frac{a_3}{a_1} \right) + k_{62} \left(\frac{a_3}{a_1} \right)^2 \quad \dots (8)$$

【0051】

例えば、図14および図15では、 $k_{06} = 1010.5$ 、 $k_{61} = 178.8$ 、 $k_{62} = -13.41$ と求められる。

【0052】

ここで、結合波長 λ_p は、(3)式～(8)式で示した λ_p の個々のパラメータに対応する依存性の線形結合で表させると仮定すると、以下の(9)式にて表すことができる。

10

【0053】

【数 9】

$$\begin{aligned} \lambda_p = & k_1 \left(\frac{c}{2a_1} \right) + k_{21} \exp \left(-k_{22} \left(\frac{d}{2a_1} \right) \right) + k_3 \Delta_1 + (k_{41} \Delta_2 + k_{42} \Delta_2^2) \\ & + \left(k_{51} \left(\frac{a_2}{a_1} \right) + k_{52} \left(\frac{a_2}{a_1} \right)^2 \right) + \left(k_{61} \left(\frac{a_3}{a_1} \right) + k_{62} \left(\frac{a_3}{a_1} \right)^2 \right) + k_6 \quad \dots (9) \end{aligned}$$

【0054】

20

ここで一例として、図4～図15から係数 k_{ij} ($i = 1, 2, \dots, 6$ 、 $j = 1, 2$)を求めると前述の値と同様となる。また、 k_0 は -993.5 と求められる。このように、結合波長 λ_p の構造依存性を表す係数 k を求め、(9)式を用いることで、 λ_p を任意の波長に設計でき、結果として任意の波長帯で絶対値の大きな負の分散が得られる。

【0055】

使用波長帯を一般的に光通信で用いられる通信波長帯(O～Lバンド： $1260\text{nm} \sim 1625\text{nm}$)とすると、 λ_p を $1260\text{nm} \sim 1625\text{nm}$ の範囲内とするために、(3)式～(8)式を用いると構造パラメータの設計範囲は以下ようになる。

【0056】

【数10】

30

$$\begin{aligned} 1.08 & \leq c/2a_1 \leq 1.58 \\ 1.0\% & \leq \Delta_1 \leq 1.6\% \\ \Delta_2 & \leq 0.78 \quad \dots (10) \\ a_2/a_1 & \leq 5 \\ a_3/a_1 & \leq 7 \end{aligned}$$

【0057】

さらに、図1および図2で示した構造上の特性から、以下の(11)式となる。

【0058】

40

【数11】

$$\begin{aligned} 2a_1 & \leq c \\ c/2 + d & \leq a_2 \quad \dots (11) \\ a_2 & < a_3 \end{aligned}$$

【0059】

(10)式および(11)式から規格化空孔直径 $d/2a_1$ は、以下の(12)式として設計する必要がある。

【0060】

50

【数 1 2】

$$d/2a_1 \leq 1.7 \quad \dots (12)$$

【0061】

したがって、(10)式～(12)式を満たすことにより結合波長 λ_p を1260nm～1625nmに設計することが可能となる。ここで、製造上の観点からコア1の半径 a_1 は、0.5 μ m以上であることが好ましい。また、コア1が大きくなるとコアの導波モードが支配的となり、結合波長 λ_p の制御性が低下するため、 a_1 は2.0 μ m以下であることが好ましい。

【実施例2】

10

【0062】

以下に、本発明の第2の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバを用いた光伝送システムにつき、図面を参照して説明する。このシステムでは、上述した本発明の第1の実施例に係る空孔付き制御ファイバが用いられる。本実施例は、通常の単一モードファイバ(SMF)および分散シフトファイバ(DSF)の分散補償を行う一手法の光伝送システムである。

図16は、本発明の第2の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバを用いた光伝送システムの構成図である。

【0063】

一般的に、SMFの波長分散は、波長1300nm～1324nmにおいて零となり、波長に対して単調に増加し、波長1550nm帯において約17ps/nm・kmの正の値をとる。したがって、1550nmにおけるSMFの分散は、当該波長帯で負の分散を有する光ファイバを接続することで補償することができる。さらに当該波長を中心に広帯域に亘って補償するためには、SMFの分散スロープも同時に補償する必要がある。分散および分散スロープの補償性能を示すパラメータとして、以下の(13)式で表される分散補償率 η が知られている。

20

【0064】

【数 1 3】

$$\eta = \frac{D_c(\lambda)/S_c(\lambda)}{D_T(\lambda)/S_T(\lambda)} \quad \dots (13)$$

30

【0065】

ここで λ は波長であり、 D_T および S_T は被補償ファイバ(例えばSMF)の分散値および分散スロープを表し、 D_c および S_c は補償用ファイバ(例えば、本発明の第1の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバ)の分散値および分散スロープを表す。 η が1のとき補償性能が最も良くなる。ここで、SMFの波長1550nmにおける分散対分散スロープ比 D_T/S_T の値は一般的に約330nmとなる。

【0066】

ここで、本実施例に係る空孔付き分散制御ファイバは、実施例1で示したように結合波長 λ_p を所望の波長に設計することで、当該波長において大きな負の分散が得られる。したがって、結合波長 λ_p を1550nm帯にすることで、当該波長帯における正の分散を補償することが可能である。さらに結合波長 λ_p における分散が-200ps/nm・km以下になるように設計すると従来の分散補償ファイバ(DCF)に比べて効率良く分散補償が行えるため、より好ましい。また、波長1550nmにおける分散対分散スロープ比 D/S を230nm～530nmとすることでSMFに対する分散補償率が 1 ± 0.3 以内となり、広帯域な分散補償が行えるため、より好ましい。

40

【0067】

さらに、本実施例に係る空孔付き分散補償ファイバは、実施例1にて示した通り、結合波長 λ_p を零分散波長よりも長波長側に設定することで、零分散波長で負の分散スロープ

50

が得られる。S M F は前述の通り分散は波長に対して単調増加であるため、零分散波長における分散スロープは正となる。したがって、本実施例に係る空孔付き分散制御ファイバの零分散波長をS M F と同等の波長に設計し、当該S M F と接続することで、S M F の零分散波長近傍における分散補償を実現できる。ここでS M F の零分散波長は、 $1300\text{ nm} \sim 1324\text{ nm}$ であるため、S M F の零分散波長近傍の分散補償を行う場合には、本実施例に係る空孔付き分散制御ファイバの零分散波長を $1300\text{ nm} \sim 1324\text{ nm}$ の範囲とする必要がある。

【0068】

一方、D S F では零分散波長が 1550 nm 帯となり、零分散波長よりも長波長側での正の分散となる。D S F の零分散波長より長波長側における正の分散は、前記S M F の場合と同様に当該波長帯で負の分散を有する光ファイバによって補償することができる。本実施例に係る空孔付き分散制御ファイバを用いて結合波長 λ_p を前記零分散波長よりも長波長側に設計することで、当該波長帯において大きな負の分散が得られ、前述のS M F の場合と同様にして効率的な分散補償が行える。

【0069】

光伝送システムは、図16に示すように、光信号を出射する送信器51と、この送信器51に一端が接続された単一モードファイバ52と、この単一モード光ファイバ52の他端側に接続された空孔付き分散制御ファイバ53とを有する。この空孔付き分散制御ファイバ53の他端側には、これらファイバ内を透過した光信号を受光する受光器54が接続される。単一モードファイバ52は、例えばS M F またはD S F を表す。光信号は、送信器51から単一モードファイバ52に入射され、単一モードファイバ52を透過した光信号は空孔付き分散制御ファイバ53において分散が補償されて受信器54で受光される。ここでは、空孔付き分散制御ファイバ53を単一モードファイバ52の後段に配置した光伝送システムを用いて説明したが、この空孔付き分散制御ファイバを単一モードファイバの前段、または前段および後段の両方に配置した光伝送システムとしても構わない。また送信器51および受信器54は、光信号を単一モードファイバ52に導入する部分、および単一モードファイバ52を透過した光信号を受光する部分の一例であり、中継器、他の光ファイバや他の光ネットワークとの接続部とした光伝送システムとしても構わない。

【0070】

図17に、本実施例に係る光伝送システムにおける波長分散特性を示す。図17(a)は、空孔付き分散制御ファイバにおいて、コア1の半径 a_1 を $1.5\text{ }\mu\text{m}$ とし、規格化リングコア内径 a_2/a_1 を3.0とし、規格化リングコア内径 a_2/a_1 を5.0とし、規格化空孔位置 $c/2a_1$ を1.5とし、規格化空孔直径 $d/2a_1$ を0.4とし、コア1の比屈折率差 Δ_1 を1.5%とし、リングコア2の比屈折率差 Δ_2 を0.345%としたときの波長分散特性を表す図であり、図17(b)は分散補償を行う前のS M F の波長分散特性、および補償を行った後(S M F + 空孔付き分散制御ファイバ)の波長分散特性を表す図である。図17(a)に示すように、結合波長 λ_p は 1551 nm であった。本実施例に係る空孔付き分散制御ファイバは約 $-1500\text{ ps/nm}\cdot\text{km}$ の分散値を実現しており、S M F の距離に対して約 $1/100$ の長さの距離でS M F の補償を行うことができる。また、図17(b)に示すように、波長 $1550\text{ nm} \pm 6\text{ nm}$ の範囲において、波長分散の絶対値を $1\text{ ps/nm}\cdot\text{km}$ 以下に低減していることが分かる。

【0071】

図18に、本実施例に係る光伝送システムにおける、S M F の零分散波長付近を分散補償したときの波長分散特性を示す。ここで、空孔付き分散制御ファイバにおいて、コア1の半径 a_1 を $1.5\text{ }\mu\text{m}$ とし、規格化リングコア内径 a_2/a_1 を3.0とし、規格化リングコア外径 a_3/a_1 を5.0とし、規格化空孔位置 $c/2a_1$ を1.5とし、規格化空孔直径 $d/2a_1$ を0.4とし、コア1の比屈折率差 Δ_1 を1.5%、リングコア2の比屈折率差 $\Delta_2 = 0.6\%$ とした。このとき結合波長 λ_p は 1407 nm であった。実線、破線、点線はそれぞれ、S M F の分散補償前の波長分散、空孔付き分散制御ファイバの波長分散、補償後(S M F + 空孔付き分散制御ファイバ)の波長分散を表す。この図より、空孔付

き分散制御ファイバを用いることで、SMFの零分散波長 $\pm 10\text{ nm}$ において分散スロープの絶対値をSMFの半分以下である $0.04\text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以下に補償することができる。したがって、本実施例に係る空孔付き分散制御ファイバによれば、零分散波長を 1310 nm 帯に設計でき、かつ 1310 nm 帯において負の分散スロープを実現できるので、SMFの零分散波長付近における分散補償を実現できる。

【0072】

なお、本実施例では、零分散波長をSMFまたはDSFにおける 1310 nm 帯または 1550 nm 帯の分散補償の一手法について説明したが、本実施例に係る光伝送システムの単一モードファイバはSMFおよびDSFに限られず、空孔付き分散制御ファイバを適切に設計することで、任意の波長帯において任意の光ファイバの正の分散または零分散波長近傍の分散スロープの補償に有効である。

10

【参考例1】

【0073】

以下に、本発明の第1の参考例に係る光伝送システムにつき、図面を参照して説明する。本参考例は、空孔付き分散制御ファイバのLP02モードの波長分散を用い、一般的なDSFの 1310 nm 帯における分散補償を行う一手法の光伝送システムである。

【0074】

DSFの分散は波長に対して単調に増加し、一般的に 1550 nm 帯で零分散波長となる。そのため、 1310 nm 帯で $-20\text{ ps/nm}\cdot\text{km}$ 程度の負の分散を有する。したがって、DSFの 1310 nm 帯での分散を補償するためには、当該波長帯において正の分散を有する光ファイバが必要となる。さらに、DSFの 1310 nm 帯で広帯域に分散補償を行うためには分散および分散スロープを同時に補償する必要がある。上記(13)式にて示したとおり、当該波長帯における分散対分散スロープ比を補償用ファイバと被補償ファイバとで合わせることで、分散および分散スロープの補償が実現される。ここでDSFの 1310 nm における分散特性は負の分散および正の分散スロープであり、分散対分散スロープ比は約 $-220\text{ ps/nm}\cdot\text{km}$ である。

20

【0075】

図19に、本発明の第1の参考例に係る空孔付き分散制御ファイバにおける、LP01モードとLP02モードの波長分散特性を示す。ここで、本参考例に係る空孔付き分散制御ファイバにおいて、コア1の半径 a_1 を $1.5\text{ }\mu\text{m}$ とし、規格化リングコア内径 a_2/a_1 を 3.0 とし、規格化リングコア外径 a_3/a_1 を 5.0 とし、規格化空孔位置 $c/2a_1$ を 1.5 とし、規格化空孔直径 $d/2a_1$ を 0.4 とし、コア1の比屈折率差 Δ_1 を 1.5% とし、リングコア2の比屈折率差 Δ_2 を 0.7% とした。この図に示すように、LP02モードに対して、波長 1310 nm 帯で数百 $\text{ps/nm}\cdot\text{km}$ を超える大きな分散が得られることが分かる。LP02モードの分散特性は、LP01モードと対称となる。本参考例に係る空孔付き分散制御ファイバでは、結合波長 λ_p を波長 1310 nm 帯に設計することができるので、LP02モードを用いることで当該波長帯において大きな正の分散を実現できる。

30

【0076】

さらに、LP02モードの分散は結合波長 λ_p より長波長側では波長に対して単調に減少する。したがって、結合波長 λ_p を使用波長帯(例えば、 1310 nm)よりも短波長側に設計することで、使用波長帯において正の分散および負の分散スロープが得られ、DSFの分散または分散スロープの補償が可能である。より好ましくは、空孔付き分散制御ファイバの分散対分散スロープ比を $-150\text{ nm}\sim -280\text{ nm}$ の範囲内とすることで、DSFに対する 1310 nm における分散補償率 η を 1 ± 0.3 とできる。

40

【0077】

図20に、本発明の第1の参考例に係る空孔付き分散制御ファイバを用いて、波長 1310 nm 帯で負の分散を有する光ファイバの分散補償を行うときの光伝送システムの構成を示す。この図に示すように、光伝送システムは、光信号を出射する送信器61と、この送信器61に一端が接続された 1310 nm 帯で負の分散を有する負分散ファイバ62と

50

、この負分散ファイバ62の他端側に接続され、負分散ファイバ62を透過した光信号をLP02モードに変換するモード変換器63とを有する。このモード変換器63には、空孔付き分散制御ファイバ64の一端が接続される。この分散制御ファイバ64の他端側には、このファイバを透過した光信号を受光する受光器65が接続される。光信号は、送信器61から負分散ファイバ62に入射され、空孔付き分散制御ファイバ64において分散を補償され受光器65で受光される。より好ましくは、負分散ファイバ62を透過した光信号をモード変換器63にてLP02モードに変換することで、後段の空孔付き分散制御ファイバ64との接続特性が改善される。ここでは、モード変換器63および空孔付き分散制御ファイバ64を負分散ファイバ62の後段に配置した光伝送システムを用いて説明したが、モード変換器および空孔付き分散制御ファイバを負分散ファイバの前段、または前段および後段の両方に配置した光伝送システムとしても構わない。また、送信器61および受信器65は、光信号を負分散ファイバ62に導入する部分、および空孔付き分散制御ファイバを透過した光信号を受光する部分の一例であり、中継器、他の光ファイバや他の光ネットワークとの接続部とした光伝送システムとしても構わない。

【0078】

図21に、本発明の第1の参考例に係る空孔付き分散制御ファイバを用いて、DSFの波長1310nm帯における波長分散を補償したときの波長分散特性を示す。図21(a)は、本参考例に係る空孔付き分散制御ファイバにおいて、コア1の半径 a_1 を $1.5\mu\text{m}$ とし、規格化リングコア内径 a_2/a_1 を3.0とし、規格化リングコア外径 a_3/a_1 を5.0とし、規格化空孔位置 $c/2a_1$ を1.5とし、規格化空孔直径 $d/2a_1$ を0.4とし、コア1の比屈折率差 Δ_1 を1.5%とし、リングコア2の比屈折率差 Δ_2 を0.725%としたときのLP02モードの波長分散特性を表す図であり、図21(b)は、分散補償を行う前のDSFの波長分散特性、および補償を行った後(DSF+空孔付き分散制御ファイバ)の波長分散特性を表す図である。図21(a)に示すように、結合波長 λ_p は1309nmであった。本参考例に係る空孔付き分散制御ファイバは、約 $1400\text{ps/nm}\cdot\text{km}$ の分散値を実現しており、DSFのファイバ長に対して約1/70の長さでDSFの分散補償を行うことができる。また、図21(b)に示すように、波長 $1310\text{nm}\pm 4\text{nm}$ において分散の絶対値を $1\text{ps/nm}\cdot\text{km}$ 以下に補償している。

【0079】

なお、本参考例では、DSFを1310nmにおいて分散補償を行う一手法について説明したが、本参考例に係る手法および光伝送システムは上述の範囲に限られない。空孔付き分散制御ファイバを適切に設計することで、任意の波長において任意の光ファイバの負の分散を補償することが可能となる。

【参考例2】

【0080】

以下に、本発明の第2の参考例に係る光遅延回路につき、図面を参照して説明する。この回路では、任意の波長帯において 1nm/km 以上の群遅延を実現する一手法である。

【0081】

本参考例に係る空孔付き分散制御ファイバでは、結合波長 λ_p 付近では波長分散が急激に変化するため、光波の群速度も変化する。図22に、本発明の参考例に係る空孔付き分散制御ファイバにおける、群速度の波長特性を示す。ここで、本参考例に係る空孔付き分散制御ファイバにおいて、コア1の半径 a_1 を $1.5\mu\text{m}$ とし、規格化リングコア内径 a_2/a_1 を3.0とし、規格化リングコア外径 a_3/a_1 を5.0とし、規格化空孔位置 $c/2a_1$ を1.5とし、規格化空孔直径 $d/2a_1$ を0.6とし、コア1の比屈折率差 Δ_1 を1.5%とし、リングコア2の比屈折率差 Δ_2 を0.3%とした。このとき結合波長 λ_p は1555nmである。図22において、実線、破線はそれぞれ空孔付き分散制御ファイバおよびSMFを表す。図22に示すように、空孔付き分散制御ファイバの群速度は、波長1560nm以下ではSMFの群速度より遅くなっていることが分かる。したがって、本参考例に係る空孔付き分散制御ファイバを用いることで、従来の光ファイバ遅延器に比べて効率的に光の遅延を起こすことが可能である。波長1550nmにおいてSMFよりも

1 n s / k m以上の群遅延を得るためには、本参考例に係る空孔付き分散制御ファイバの結合波長 λ_p における群速度が 0.2043×10^6 k m / s 以下であることが好ましい。

【0082】

図23に、本参考例に係る空孔付き分散制御ファイバを用いた光遅延回路の構成を示す。この図に示すように、光遅延回路は、光信号71が入力される波長変換素子72と、波長変換素子72に一端が接続された空孔付き分散制御ファイバ73と、この空孔付き分散制御ファイバの他端側が接続され、光信号を出力する波長変換素子74とを有する。この光遅延回路では、波長変換素子（以下、素子と称す）72, 74の動作のON/OFFを制御する制御器76が設けられる。入力された光信号71および出力する光信号74の波長を λ_1 とし、制御器76によって素子72, 75がON状態のとき、素子72では波長 λ_1 が波長 λ_2 に変換し、素子75では波長 λ_2 が波長 λ_1 に変換するものとする。すなわち、素子72, 75がON状態のとき空孔付き分散制御ファイバ73には λ_2 の光信号が伝搬し、素子72, 75がOFF状態のとき λ_1 の光信号が伝搬する。ここで空孔付き分散制御ファイバ73におけるファイバ長をLとし、群速度を $v_g(\lambda)$ とすると、入力端から出力端への到達時間 τ は、以下の(14)式にて表される。

【0083】

【数14】

$$\begin{aligned} \text{ON状態のとき} \quad \tau_{\text{ON}} &= \frac{L}{v_g(\lambda_2)} \\ \text{OFF状態のとき} \quad \tau_{\text{OFF}} &= \frac{L}{v_g(\lambda_1)} \quad \dots (14) \end{aligned}$$

【0084】

ここで、素子72, 75を通過する時間は、ファイバ73中を伝搬する時間と比べて十分に小さく、無視できるものとする。上記(14)式より、以下の(15)式を得ることができる。素子72, 75をON状態とすることで、光の遅延を生じさせることができる。

【0085】

【数15】

$$\Delta\tau = L \left(\frac{1}{v_g(\lambda_2)} - \frac{1}{v_g(\lambda_1)} \right) \quad \dots (15)$$

【0086】

ここで、空孔付き分散制御ファイバ73は、結合波長 λ_p 付近で急激な群速度の変化を有するため、上記(15)式より大きな光遅延を生じることができるため、好ましい。

【0087】

ここで、例として図22で示した空孔付き分散制御ファイバを用いる場合を以下に示す。ファイバ長Lを1 kmとし、波長 λ_1 を1570 nmとし、波長 λ_2 を1540 nmとすると、図22より、約100 nsの光遅延を生じることができる。また、制御器76からの信号によって波長変換後の波長 λ_2 を変化させることで、遅延量を任意に設計することができる。

【産業上の利用可能性】

【0088】

本発明は、波長1310 nmにおける正の分散や波長1550 nmにおける負の分散を相殺する分散補償ファイバとして利用することができる。また光遅延器として利用することができる。

【図面の簡単な説明】

【0089】

10

20

30

40

50

【図 1】本発明の第 1 の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバの概略断面図である。

【図 2】本発明の第 1 の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバの半径方向における実効的な屈折率の分布図である。

【図 3】本発明の第 1 の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバの動作原理を説明するための概略図である。

【図 4】本発明の第 1 の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバにおける、空孔位置と波長分散との関係を示す図である。

【図 5】本発明の第 1 の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバにおける、結合波長 λ_p と規格化空孔位置 $c / 2 a_1$ との関係を示す図である。

【図 6】本発明の第 1 の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバにおける、空孔直径と波長分散との関係を示す図である。

10

【図 7】本発明の第 1 の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバにおける、結合波長 λ_p と規格化空孔直径 $d / 2 a_1$ との関係を示す図である。

【図 8】本発明の第 1 の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバにおける、コアの比屈折率差 Δ_1 と波長分散との関係を示す図である。

【図 9】本発明の第 1 の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバにおける、結合波長 λ_p とコアの比屈折率差 Δ_1 との関係を示す図である。

【図 10】本発明の第 1 の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバにおける、リングコアの比屈折率差 Δ_2 と波長分散との関係を示す図である。

【図 11】本発明の第 1 の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバにおける、結合波長 λ_p とリングコアの比屈折率差 Δ_2 との関係を示す図である。

20

【図 12】本発明の第 1 の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバにおける、規格化リングコア内径 a_2 / a_1 と波長分散との関係を示す図である。

【図 13】本発明の第 1 の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバにおける、結合波長 λ_p と規格化リングコア内径 a_2 / a_1 との関係を示す図である。

【図 14】本発明の第 1 の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバにおける、規格化リングコア外径 a_3 / a_1 と波長分散との関係を示す図である。

【図 15】本発明の第 1 の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバにおける、結合波長 λ_p と規格化リングコア外径 a_3 / a_1 との関係を示す図である。

【図 16】本発明の第 2 の実施例に係る空孔付き分散制御ファイバを用いた光伝送システムの構成図である。

30

【図 17】本発明の第 2 の実施例に係る光伝送システムにおける波長分散特性を示す図である。

【図 18】本発明の第 2 の実施例に係る光伝送システムにおける、単一モードファイバの零分散波長付近を分散補償したときの波長分散特性を示す図である。

【図 19】本発明の第 1 の参考例に係る空孔付き分散制御ファイバにおける、LP01 モードと LP02 モードの波長分散特性を示す図である。

【図 20】本発明の第 1 の参考例に係る空孔付き分散制御ファイバを用いて、波長 1310 nm 帯で負の分散を有する光ファイバの分散補償を行うときの光伝送システムの構成を示す図である。

40

【図 21】本発明の第 1 の参考例に係る空孔付き分散制御ファイバを用いて、DSF の波長 1310 nm 帯における波長分散を補償したときの波長分散特性を示す図である。

【図 22】本発明の第 2 の参考例に係る空孔付き分散制御ファイバにおける、群速度の波長特性を示す図である。

【図 23】本発明の第 2 の参考例に係る空孔付き分散制御ファイバを用いた光遅延回路の構成を示す図である。

【符号の説明】

【0090】

1 コア
2 リングコア

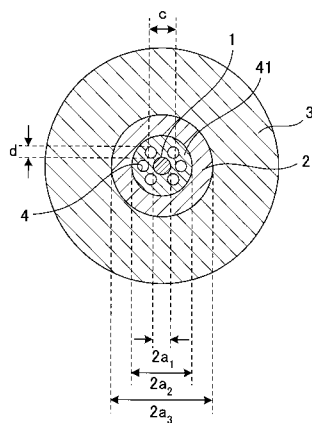
50

3	クラッド
4	空孔
4 1	空孔層
5 1 , 6 1	送信器
5 2	単一モードファイバ
5 3 , 6 4 , 7 3	空孔付き分散制御ファイバ
5 4 , 6 5	受信器
6 2	1 3 1 0 n m 負分散ファイバ
6 3	モード変換器
7 1	入力光信号
7 2 , 7 5	波長変換素子
7 4	出力光信号
7 6	制御器
a_1	コアの半径
a_2	リングコアの内径
a_3	リングコアの外径
c	空孔位置
d	空孔の直径
n_1	コアの屈折率
n_2	リングコアの屈折率
n_3	クラッドの屈折率

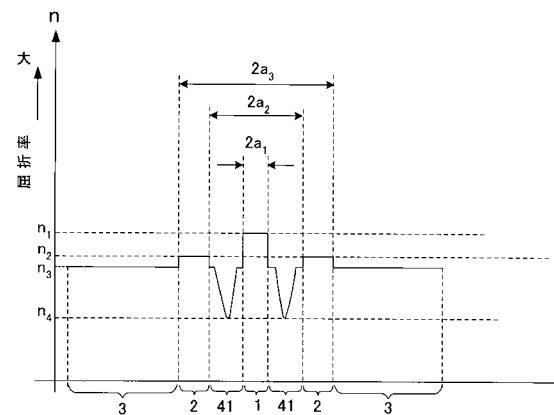
10

20

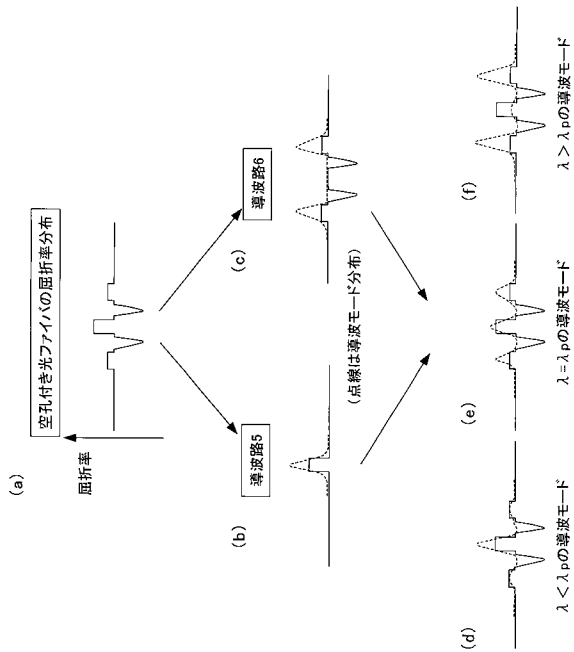
【図 1】



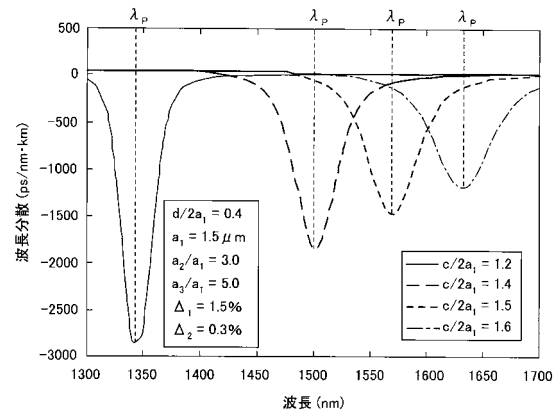
【図 2】



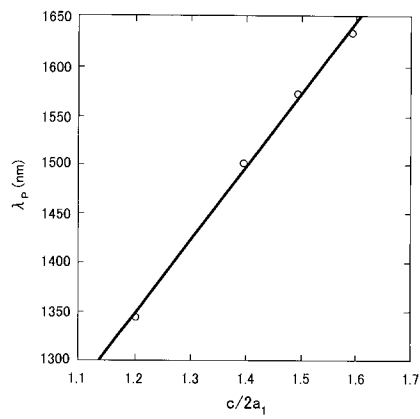
【図 3】



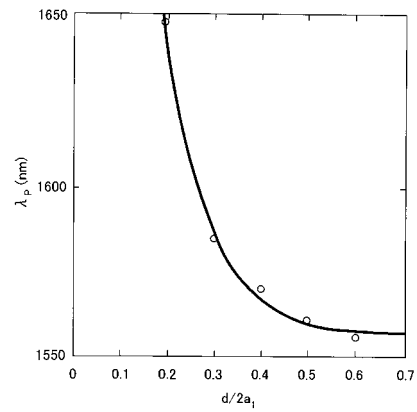
【図 4】



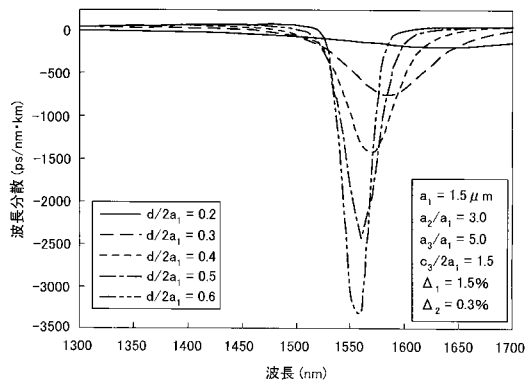
【図 5】



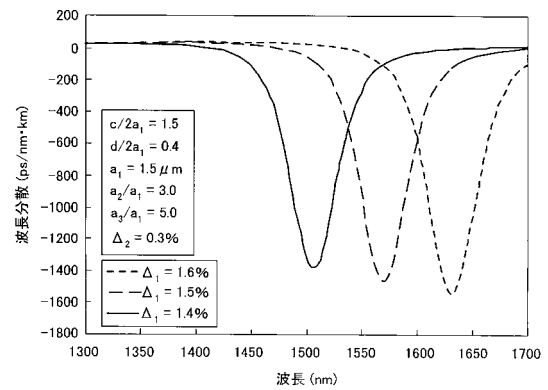
【図 7】



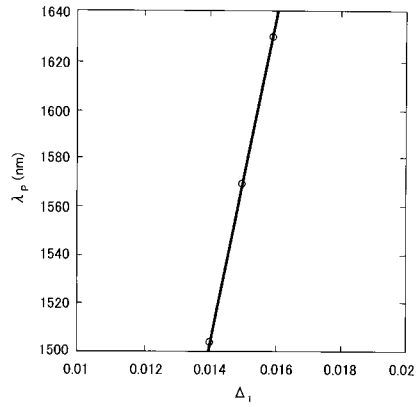
【図 6】



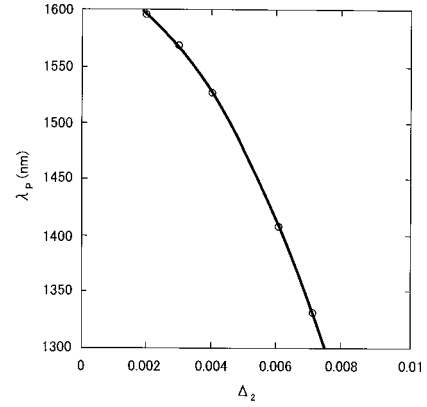
【図 8】



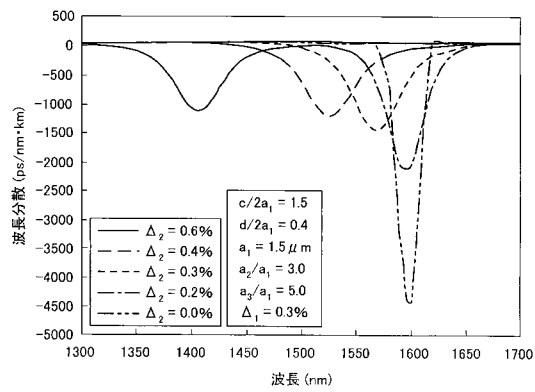
【図 9】



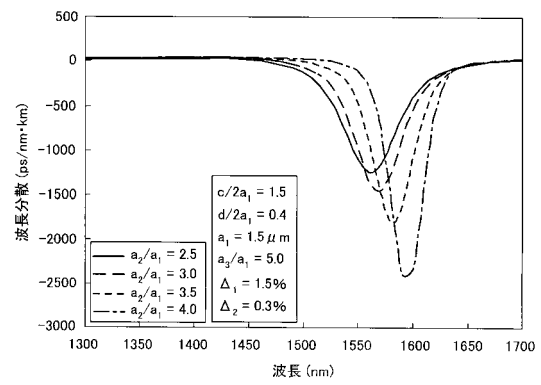
【図 11】



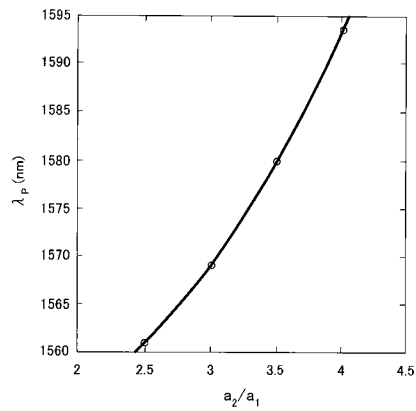
【図 10】



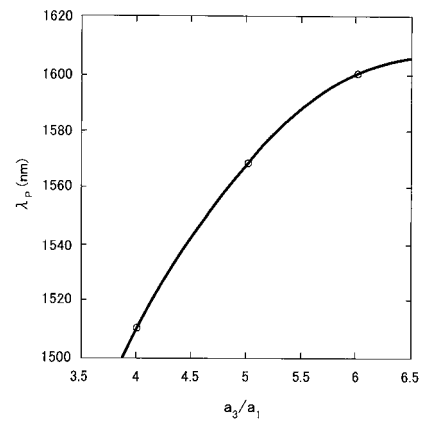
【図 12】



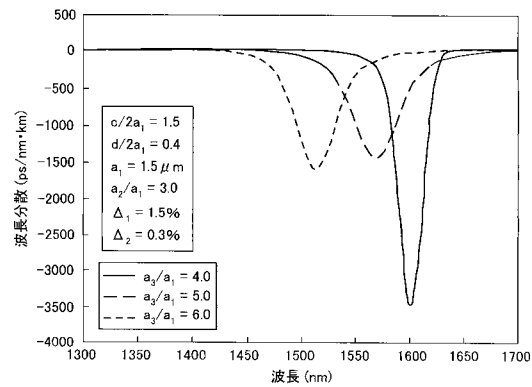
【図 13】



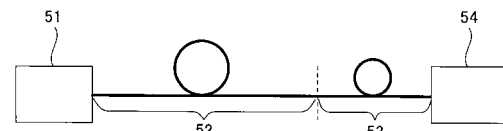
【図 15】



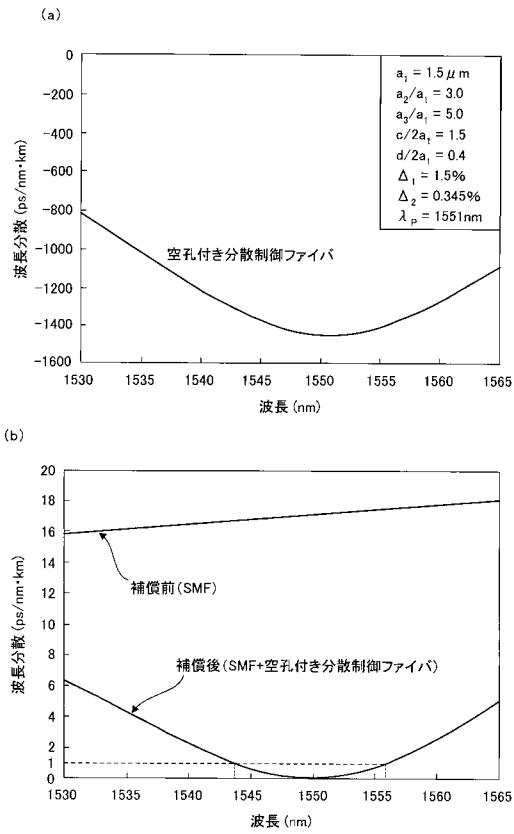
【図 14】



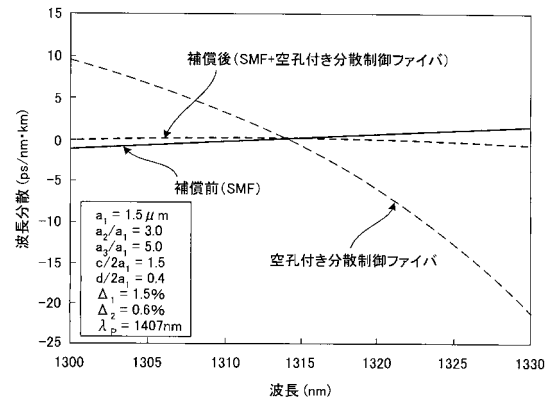
【図 16】



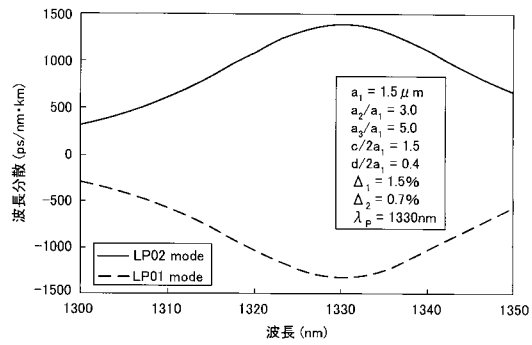
【図 17】



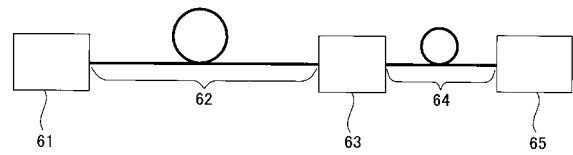
【図 18】



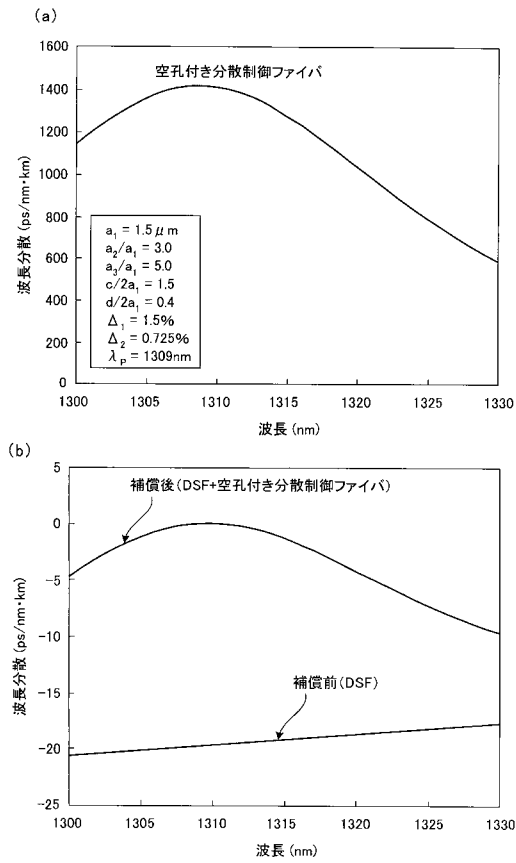
【図 19】



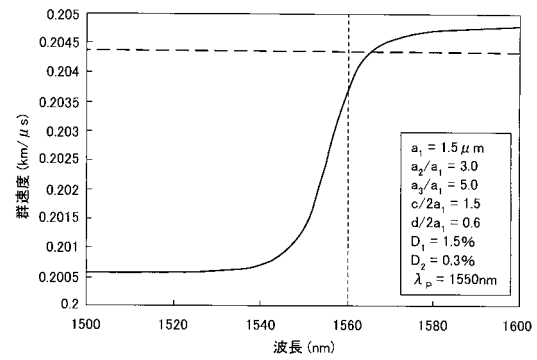
【図 20】



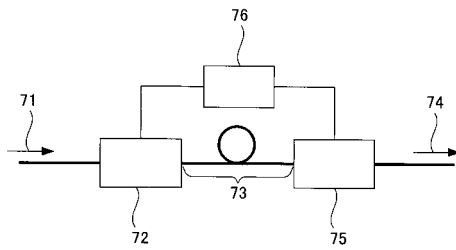
【図 2 1】



【図 2 2】



【図 2 3】



フロントページの続き

(72)発明者 白木 和之

東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内

(72)発明者 三川 泉

東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内

審査官 吉田 英一

(56)参考文献 特表2004-522195(JP,A)

特開2005-024623(JP,A)

特開2006-243423(JP,A)

国際公開第01/079902(WO,A1)

特開2006-232599(JP,A)

特表2002-533744(JP,A)

特開2004-286863(JP,A)

国際公開第01/063328(WO,A1)

特開2004-101565(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02B 6/032

G02B 6/036

JSTPlus(JDreamII)

JST7580(JDreamII)