

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号
特許第5771569号
(P5771569)

(45) 発行日 平成27年9月2日(2015.9.2)

(24) 登録日 平成27年7月3日(2015.7.3)

(51) Int.Cl.

F I

G O 2 B 6/02 (2006.01)

G O 2 B 6/032 (2006.01)

G O 2 B 6/02 4 5 1

G O 2 B 6/032 Z

請求項の数 12 (全 16 頁)

(21) 出願番号	特願2012-141825 (P2012-141825)	(73) 特許権者	000004226
(22) 出願日	平成24年6月25日 (2012. 6. 25)		日本電信電話株式会社
(65) 公開番号	特開2014-6374 (P2014-6374A)		東京都千代田区大手町一丁目5番1号
(43) 公開日	平成26年1月16日 (2014. 1. 16)	(74) 代理人	100119677
審査請求日	平成26年6月26日 (2014. 6. 26)		弁理士 岡田 賢治
		(74) 代理人	100115794
			弁理士 今下 勝博
		(72) 発明者	森 崇嘉
			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	坂本 泰志
			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】 光ファイバ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

石英ガラスで形成されたファイバの断面内に複数の空孔を有することによって等価的にステップ型の屈折率分布が形成されている光ファイバであって、
使用波長帯 1 5 3 0 n m 以上 1 6 2 5 n m 以下に対し、
前記空孔の直径 d、前記空孔の間隔 Λ について $\Lambda \leq 1.3 \cdot 6 \mu m$ 、 $d / \Lambda \leq 0.66$ であり、伝搬モード数が 2 であることを特徴とする光ファイバ。

【請求項 2】

石英ガラスで形成されたファイバの断面内に複数の空孔を有することによって等価的にステップ型の屈折率分布が形成されている光ファイバであって、
使用波長帯 1 4 6 0 n m 以上 1 6 2 5 n m 以下に対し、
前記空孔の直径 d、前記空孔の間隔 Λ について $\Lambda \leq 1.3 \cdot 0 \mu m$ 、 $d / \Lambda \leq 0.66$ であり、伝搬モード数が 2 であることを特徴とする光ファイバ。

【請求項 3】

石英ガラスで形成されたファイバの断面内に複数の空孔を有することによって等価的にステップ型の屈折率分布が形成されている光ファイバであって、
使用波長帯 1 2 6 0 n m 以上 1 6 2 5 n m 以下に対し、
前記空孔の直径 d、前記空孔の間隔 Λ について $\Lambda \leq 1.1 \cdot 8 \mu m$ 、 $d / \Lambda \leq 0.66$ であり、伝搬モード数が 2 であることを特徴とする光ファイバ。

【請求項 4】

石英ガラスで形成されたファイバの断面内に複数の空孔を有することによって等価的にステップ型の屈折率分布が形成されている光ファイバであって、

使用波長帯 980 nm 以上 1625 nm 以下に対し、

前記空孔の直径 d 、前記空孔の間隔 Λ について $\Lambda = 10.0 \mu\text{m}$ 、 $d / \Lambda = 0.65$ であり、伝搬モード数が 2 であることを特徴とする光ファイバ。

【請求項 5】

石英ガラスで形成されたファイバの断面内に複数の空孔を有することによって等価的にステップ型の屈折率分布が形成されている光ファイバであって、

使用波長帯 1530 nm 以上 1625 nm 以下に対し、

前記空孔の直径 d 、前記空孔の間隔 Λ について $\Lambda = 13.9 \mu\text{m}$ 、 $d / \Lambda = 0.76$ であり、伝搬モード数が 4 であることを特徴とする光ファイバ。

10

【請求項 6】

石英ガラスで形成されたファイバの断面内に複数の空孔を有することによって等価的にステップ型の屈折率分布が形成されている光ファイバであって、

使用波長帯 1460 nm 以上 1625 nm 以下に対し、

前記空孔の直径 d 、前記空孔の間隔 Λ について $\Lambda = 13.5 \mu\text{m}$ 、 $d / \Lambda = 0.76$ であり、伝搬モード数が 4 であることを特徴とする光ファイバ。

【請求項 7】

石英ガラスで形成されたファイバの断面内に複数の空孔を有することによって等価的にステップ型の屈折率分布が形成されている光ファイバであって、

使用波長帯 1260 nm 以上 1625 nm 以下に対し、

前記空孔の直径 d 、前記空孔の間隔 Λ について $\Lambda = 12.3 \mu\text{m}$ 、 $d / \Lambda = 0.76$ であり、伝搬モード数が 4 であることを特徴とする光ファイバ。

20

【請求項 8】

石英ガラスで形成されたファイバの断面内に複数の空孔を有することによって等価的にステップ型の屈折率分布が形成されている光ファイバであって、

使用波長帯 980 nm 以上 1625 nm 以下に対し、

前記空孔の直径 d 、前記空孔の間隔 Λ について $\Lambda = 10.5 \mu\text{m}$ 、 $d / \Lambda = 0.76$ であり、伝搬モード数が 4 であることを特徴とする光ファイバ。

【請求項 9】

石英ガラスで形成されたファイバの断面内に複数の空孔を有することによって等価的にステップ型の屈折率分布が形成されている光ファイバであって、

使用波長帯 1530 nm 以上 1625 nm 以下に対し、

前記空孔の直径 d 、前記空孔の間隔 Λ について $\Lambda = 13.8 \mu\text{m}$ 、 $d / \Lambda = 0.83$ であり、伝搬モード数が 6 であることを特徴とする光ファイバ。

30

【請求項 10】

石英ガラスで形成されたファイバの断面内に複数の空孔を有することによって等価的にステップ型の屈折率分布が形成されている光ファイバであって、

使用波長帯 1460 nm 以上 1625 nm 以下に対し、

前記空孔の直径 d 、前記空孔の間隔 Λ について $\Lambda = 13.3 \mu\text{m}$ 、 $d / \Lambda = 0.83$ であり、伝搬モード数が 6 であることを特徴とする光ファイバ。

40

【請求項 11】

石英ガラスで形成されたファイバの断面内に複数の空孔を有することによって等価的にステップ型の屈折率分布が形成されている光ファイバであって、

使用波長帯 1260 nm 以上 1625 nm 以下に対し、

前記空孔の直径 d 、前記空孔の間隔 Λ について $\Lambda = 12.1 \mu\text{m}$ 、 $d / \Lambda = 0.83$ であり、伝搬モード数が 6 であることを特徴とする光ファイバ。

【請求項 12】

石英ガラスで形成されたファイバの断面内に複数の空孔を有することによって等価的にステップ型の屈折率分布が形成されている光ファイバであって、

50

使用波長帯 980 nm 以上 1625 nm 以下に対し、

前記空孔の直径 d 、前記空孔の間隔 Λ について $\Lambda = 10.2 \mu\text{m}$ 、 $d / \Lambda = 0.82$ であり、伝搬モード数が 6 であることを特徴とする光ファイバ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、通信用マルチモード光ファイバによる高次モードを利用した光ファイバに関するものである。

【背景技術】

【0002】

光ファイバ通信システムでは、光ファイバ中で発生する非線形効果やファイバヒューズが問題となり、伝送の大容量化および長距離化が制限されている。これらの制限を緩和するためには、光ファイバに導波する光の密度を低減する必要があり、非特許文献 1、2 に示すように大コアファイバが検討されている。

【0003】

しかし、曲げ損失低減、単一モード動作領域の拡大、実効断面積の拡大は互いにトレードオフの関係にあり、所定の条件下における実効断面積の拡大量には限界があるという課題があった。これらの制限を打破するために、これまで信号劣化要因であった高次モードを利用したモード多重技術が検討されている（例えば、非特許文献 3、4 参照。）。

【0004】

モード多重技術は伝送媒体としてマルチモード光ファイバを用い、伝送容量を拡大できるとともに、先に述べた大コア光ファイバで制限要因であった単一モード動作条件が不要になるため、さらなる大コア化が可能であることも特徴である。

【0005】

モード多重伝送システムにおいて、各送信信号はそれぞれ異なる伝搬モードを通じて伝搬することから、全てのモードが所望の曲げ損失を実現しなければならない。例えば、ITU-T G.652 で推奨される曲げ損失は、曲げ半径 30 mm において 0.1 dB / 100 turn 以下である。また、N 個の信号を用いたモード多重伝送を実現するためには、光ファイバは少なくとも N 以上の伝搬モードを有する必要がある。また、それぞれのモードの実効断面積は、光ファイバ中で発生する非線形効果を低減するために大きい方がよい。これまでに、モード数を限定した光ファイバの利用が提案されている（例えば、非特許文献 5、6）。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0006】

【非特許文献 1】T. Matsui, et al., "Applicability of Photonic Crystal Fiber With Uniform Air-Hole Structure to High-Speed and Wide-Band Transmission Over Conventional Telecommunication Bands," J. Lightwave Technol. 27, 5410-5416, 2009.

【非特許文献 2】K. Mukasa, et al., "Comparisons of merits on wide-band transmission systems between using extremely improved solid SMFs with Aeff of 160 μm^2 and loss of 0.175 dB/km and using large-Aeff holey fibers enabling transmission over 600 nm bandwidth," the Proceedings of OFC 2008, OthR1, Feb. 2008.

【非特許文献 3】N. Hanzawa, et al., "Demonstrati

10

20

30

40

50

on of mode-division multiplexing transmission over 10 km two-mode fiber with mode coupler," the Proceedings of OFC2011, OWA4, Mar.2011.

【非特許文献4】R. Ryf, et al., "Mode-Division Multiplexing Over 96 km of Few-Mode Fiber Using Coherent 6 x 6 MIMO Processing," J. Lightwave Technol. 30, 521-531, 2012.

【非特許文献5】P. Sillard, et al., "Few-Mode Fiber for Uncoupled Mode-Division Multiple 10
xing Transmissions," the Proceedings of ECOC2011, Tu.5.LcCervin.7, Sep.2011.

【非特許文献6】L. G.-Nielsen, et al., "Few Mode Transmission Fiber with low DGD, low Mode Coupling and low Loss," the Proceedings of OFC2012, PDP5A.1, Mar.2012.

【非特許文献7】K. Mukasa, et al., "Optimizing 2 mode fibers with Aeff of 170 μ m² for LP0 1 mode and studying a possibility of rea 20
lizing endlessly 2 mode operation using holey fibers," the Proceedings of OFC2012, JW2A.16, Mar.2012.

【非特許文献8】K. Saitoh, et al., "Empirical relations for simple design of photonic crystal fibers," Opt. Express 13, 267-274, 2005.

【非特許文献9】D. Marcuse, "Field deformation and loss caused by curvature of optical fibers," J. Opt. Soc. Am 66, 311-320, 1976 30

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

しかしながら、従来のマルチモード光ファイバは、モード数、使用波長帯域について適用可能な条件を有していたことから、適用可能なモード多重伝送には限界があった。

【0008】

そこで、本発明は、前記の課題に鑑みてなされたものであり、モード多重伝送技術を用いた伝送用光ファイバであって、モード数を2, 4, 6に、広帯域に伝搬モード数を保持することが可能なマルチモード光ファイバを提供するものである。

【課題を解決するための手段】 40

【0009】

本発明では、モード多重伝送において複数の空孔を有するマルチモード光ファイバの空孔構造を提案するパラメータに設計することで解決する。

【0010】

本発明に係る光ファイバは、石英ガラスで形成されたファイバの断面内に複数の空孔を有することによって等価的にステップ型の屈折率分布が形成されている光ファイバであって、使用波長帯1530nm以上1625nm以下に対し、前記空孔の直径d、前記空孔の間隔 Λ について $\Lambda = 13.6 \mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda = 0.66$ であり、伝搬モード数が2であることを特徴とする。

【0011】 50

本発明に係る光ファイバは、石英ガラスで形成されたファイバの断面内に複数の空孔を有することによって等価的にステップ型の屈折率分布が形成されている光ファイバであって、使用波長帯1460nm以上1625nm以下に対し、前記空孔の直径d、前記空孔の間隔Λについて $\Lambda = 13.0 \mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda = 0.66$ であり、伝搬モード数が2であることを特徴とする。

【0012】

本発明に係る光ファイバは、石英ガラスで形成されたファイバの断面内に複数の空孔を有することによって等価的にステップ型の屈折率分布が形成されている光ファイバであって、使用波長帯1260nm以上1625nm以下に対し、前記空孔の直径d、前記空孔の間隔Λについて $\Lambda = 11.8 \mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda = 0.66$ であり、伝搬モード数が2であることを特徴とする。

10

【0013】

本発明に係る光ファイバは、石英ガラスで形成されたファイバの断面内に複数の空孔を有することによって等価的にステップ型の屈折率分布が形成されている光ファイバであって、使用波長帯980nm以上1625nm以下に対し、前記空孔の直径d、前記空孔の間隔Λについて $\Lambda = 10.0 \mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda = 0.65$ であり、伝搬モード数が2であることを特徴とする。

【0014】

本発明に係る光ファイバは、石英ガラスで形成されたファイバの断面内に複数の空孔を有することによって等価的にステップ型の屈折率分布が形成されている光ファイバであって、使用波長帯1530nm以上1625nm以下に対し、前記空孔の直径d、前記空孔の間隔Λについて $\Lambda = 13.9 \mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda = 0.76$ であり、伝搬モード数が4であることを特徴とする。

20

【0015】

本発明に係る光ファイバは、石英ガラスで形成されたファイバの断面内に複数の空孔を有することによって等価的にステップ型の屈折率分布が形成されている光ファイバであって、使用波長帯1460nm以上1625nm以下に対し、前記空孔の直径d、前記空孔の間隔Λについて $\Lambda = 13.5 \mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda = 0.76$ であり、伝搬モード数が4であることを特徴とする。

【0016】

30

本発明に係る光ファイバは、石英ガラスで形成されたファイバの断面内に複数の空孔を有することによって等価的にステップ型の屈折率分布が形成されている光ファイバであって、使用波長帯1260nm以上1625nm以下に対し、前記空孔の直径d、前記空孔の間隔Λについて $\Lambda = 12.3 \mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda = 0.76$ であり、伝搬モード数が4であることを特徴とする。

【0017】

本発明に係る光ファイバは、石英ガラスで形成されたファイバの断面内に複数の空孔を有することによって等価的にステップ型の屈折率分布が形成されている光ファイバであって、使用波長帯980nm以上1625nm以下に対し、前記空孔の直径d、前記空孔の間隔Λについて $\Lambda = 10.5 \mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda = 0.76$ であり、伝搬モード数が4であることを特徴とする。

40

【0018】

本発明に係る光ファイバは、石英ガラスで形成されたファイバの断面内に複数の空孔を有することによって等価的にステップ型の屈折率分布が形成されている光ファイバであって、使用波長帯1530nm以上1625nm以下に対し、前記空孔の直径d、前記空孔の間隔Λについて $\Lambda = 13.8 \mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda = 0.83$ であり、伝搬モード数が6であることを特徴とする。

【0019】

本発明に係る光ファイバは、石英ガラスで形成されたファイバの断面内に複数の空孔を有することによって等価的にステップ型の屈折率分布が形成されている光ファイバであって、使用波長帯1530nm以上1625nm以下に対し、前記空孔の直径d、前記空孔の間隔Λについて $\Lambda = 13.8 \mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda = 0.83$ であり、伝搬モード数が6であることを特徴とする。

50

て、使用波長帯 1460 nm 以上 1625 nm 以下に対し、前記空孔の直径 d 、前記空孔の間隔 Λ について $\Lambda = 13.3\text{ }\mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda = 0.83$ であり、伝搬モード数が 6 であることを特徴とする。

【0020】

本発明に係る光ファイバは、石英ガラスで形成されたファイバの断面内に複数の空孔を有することによって等価的にステップ型の屈折率分布が形成されている光ファイバであって、使用波長帯 1260 nm 以上 1625 nm 以下に対し、前記空孔の直径 d 、前記空孔の間隔 Λ について $\Lambda = 12.1\text{ }\mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda = 0.83$ であり、伝搬モード数が 6 であることを特徴とする。

【0021】

本発明に係る光ファイバは、石英ガラスで形成されたファイバの断面内に複数の空孔を有することによって等価的にステップ型の屈折率分布が形成されている光ファイバであって、使用波長帯 980 nm 以上 1625 nm 以下に対し、前記空孔の直径 d 、前記空孔の間隔 Λ について $\Lambda = 10.2\text{ }\mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda = 0.82$ であり、伝搬モード数が 6 であることを特徴とする。

【発明の効果】

【0022】

本発明によれば、モード多重伝送技術を用いた伝送用光ファイバであって、モード数を 2, 4, 6 に、広帯域に伝搬モード数を保持することができる。これにより、本発明の光ファイバは、伝送容量の拡大および波長帯域の拡大が可能となる。

【図面の簡単な説明】

【0023】

【図 1】本実施形態に係るフォトニック結晶ファイバの断面構造を示す概略図を示す。

【図 2】実施形態 1 に係る使用波長帯 $1530 \sim 1625\text{ nm}$ において伝搬モード数を 2 とし、所望の曲げ損失を満たすための d と d/Λ の領域を示す。

【図 3】実施形態 2 に係る使用波長帯 $1460 \sim 1625\text{ nm}$ において伝搬モード数を 2 とし、所望の曲げ損失を満たすための d と d/Λ の領域を示す。

【図 4】実施形態 3 に係る使用波長帯 $1260 \sim 1625\text{ nm}$ において伝搬モード数を 2 とし、所望の曲げ損失を満たすための d と d/Λ の領域を示す。

【図 5】実施形態 4 に係る使用波長帯 $980 \sim 1625\text{ nm}$ において伝搬モード数を 2 とし、所望の曲げ損失を満たすための d と d/Λ の領域を示す。

【図 6】実施形態 5 に係る使用波長帯 $1530 \sim 1625\text{ nm}$ において伝搬モード数を 4 とし、所望の曲げ損失を満たすための d と d/Λ の領域を示す。

【図 7】実施形態 6 に係る使用波長帯 $1460 \sim 1625\text{ nm}$ において伝搬モード数を 4 とし、所望の曲げ損失を満たすための d と d/Λ の領域を示す。

【図 8】実施形態 7 に係る使用波長帯 $1260 \sim 1625\text{ nm}$ において伝搬モード数を 4 とし、所望の曲げ損失を満たすための d と d/Λ の領域を示す。

【図 9】実施形態 8 に係る使用波長帯 $980 \sim 1625\text{ nm}$ において伝搬モード数を 4 とし、所望の曲げ損失を満たすための d と d/Λ の領域を示す。

【図 10】実施形態 9 に係る使用波長帯 $1530 \sim 1625\text{ nm}$ において伝搬モード数を 6 とし、所望の曲げ損失を満たすための d と d/Λ の領域を示す。

【図 11】実施形態 10 に係る使用波長帯 $1460 \sim 1625\text{ nm}$ において伝搬モード数を 6 とし、所望の曲げ損失を満たすための d と d/Λ の領域を示す。

【図 12】実施形態 11 に係る使用波長帯 $1260 \sim 1625\text{ nm}$ において伝搬モード数を 6 とし、所望の曲げ損失を満たすための d と d/Λ の領域を示す。

【図 13】実施形態 12 に係る使用波長帯 $980 \sim 1625\text{ nm}$ において伝搬モード数を 6 とし、所望の曲げ損失を満たすための d と d/Λ の領域を示す。

【発明を実施するための形態】

【0024】

図面を参照して本発明の実施形態を説明する。以下に説明する実施形態は、本発明の実

10

20

30

40

50

施の例であり、本発明は以下の実施形態に制限されるものではない。

【 0 0 2 5 】

図 1 は、本実施形態に係る光ファイバの断面図の一例である。本実施形態に係る光ファイバは、石英ガラス 1 1 などの均一な材料で形成されているファイバ中に複数の空孔 1 2 を有するフォトニック結晶ファイバである。ここで、長軸方向に垂直な断面に形成されている空孔 1 2 の直径を d 、空孔 1 2 の間隔を Λ とする。非特許文献 8 にあるように均一な空孔構造を有するフォトニック結晶ファイバの等価的にみなせる屈折率分布すなわち実効的な屈折率分布は図 1 下部に示すようなステップ型となる。

【 0 0 2 6 】

本実施形態では、各空孔 1 2 の直径 d は等しくかつ等間隔で配置されている。例えば、光ファイバの中心軸に最も近い第 1 層目には、間隔 Λ で 6 つの空孔 1 2 が設けられており、第 2 層目には第 1 層目の空孔 1 2 との間隔が Λ となるようにかつ第 2 層目の空孔 1 2 同士の間隔が Λ となるように 1 2 個の空孔 1 2 が設けられており、第 3 層目には第 2 層目の空孔 1 2 との間隔が Λ となるようにかつ第 3 層目の空孔 1 2 同士の間隔が Λ となるように 1 8 個の空孔 1 2 が設けられている。

【 0 0 2 7 】

また、本実施形態では、光ファイバの中心軸に最も近い第 1 層目は、光ファイバの長軸からの距離が間隔 Λ に等しい同心円上に配置されている。本実施形態では、一例として、光ファイバの長軸に最も近い第 1 層目に 6 つの空孔 1 2 を設け、光ファイバの長軸から次に近い第 2 層目に 1 2 個の空孔 1 2 を設け、光ファイバの長軸から最も遠い第 3 層目に 1 8 個の空孔 1 2 を設ける例を示したが、ステップ型に近似できる屈折率分布を形成できればこれに限らない。

【 0 0 2 8 】

非特許文献 8 によるステップ近似により空孔 1 2 の直径を d 、空孔 1 2 の間隔を Λ からフォトニック結晶ファイバの v 値を求め、以下のカットオフ条件 v_c となる波長 λ_c を満たす空孔直径 d 、空孔間隔 Λ を以下の式により探索した。

(数 1)

$$v_c = j_{1, 1-1} \cdots LP_{0, 1} \text{モード}(1, 2)$$

$$v_c = j_{m-1, 1} \cdots LP_{m, 1} \text{モード}$$

なお、 $j_{n, 1}$ は n 次ベッセル関数 $J_n(x)$ の 1 番目の零点である。

【 0 0 2 9 】

【数 2】

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{v_c} a n_1 \sqrt{2\Delta}$$

【数 3】

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$$

ここで、 $a = \Lambda / \sqrt{3}$ 、 n_1 は石英ガラス 1 1 の屈折率である。

【 0 0 3 0 】

以下、実施形態 1 から実施形態 4 までは、伝搬モード数が 2 モード領域のフォトニック結晶ファイバの設計領域について説明する。

【 0 0 3 1 】

(実施形態 1)

使用波長帯を 1 5 3 0 ~ 1 6 2 5 nm (C - L バンド)、曲げ損失を 0 . 1 dB / 1 0 0 turn 以下、伝搬モード数が 2 となる設計範囲を図 2 に示す。空孔間隔 Λ は 5 μ m から 2 0 μ m まで計算した。

【 0 0 3 2 】

なお、使用波長帯において 2 モード目の伝搬モードである LP 1 1 モードが伝搬し、 3

10

20

30

40

50

つ目の伝搬モードであるLP21モードが伝搬しない条件として、波長1625nmにおけるLP11モードのカットオフ条件と波長1530nmにおけるLP21モードのカットオフ条件に囲まれた領域とした。さらに、使用波長帯において最も曲げ損失が大きくなる波長1530nmにおいてLP11モードの曲げ半径30mmにおける曲げ損失が0.1dB/m以下である条件を非特許文献9に記載の式により計算した。

【0033】

図2より、使用波長帯においてモード数を2に制限し、伝搬モードがすべて所望の曲げ損失を満たすことができる Λ と d/Λ の組み合わせは実線と点線に囲まれた $\Lambda < 13.6 \mu\text{m}$ 、 $0.57 < d/\Lambda < 0.70$ の領域とすることで実現できる。なお、図2より、得られる最大のLP01モードの実効断面積は、 $\Lambda = 13.6 \mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda = 0.66$ のときで波長1530nmにおいて $145 \mu\text{m}^2$ となる。

10

【0034】

(実施形態2)

実施形態1と同様に、使用波長帯を1460～1625nm(S-Lバンド)、曲げ損失を0.1dB/100turn以下、伝搬モード数が2となる設計範囲を図3に示す。塗りつぶされた部分が設計領域となる。

【0035】

なお、使用波長帯において2モード目の伝搬モードであるLP11モードが伝搬し、3つ目の伝搬モードであるLP21モードが伝搬しない条件として、波長1625nmにおけるLP11モードのカットオフ条件と波長1460nmにおけるLP21モードのカット

20

【0036】

図3より、使用波長帯においてモード数を2に制限し、伝搬モードがすべて所望の曲げ損失を満たすことができる Λ と d/Λ の組み合わせは実線と点線に囲まれた $\Lambda < 13.0 \mu\text{m}$ 、 $0.57 < d/\Lambda < 0.70$ の領域とすることで実現できる。なお、図3より、得られる最大のLP01モードの実効断面積は、 $\Lambda = 13.0 \mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda = 0.66$ のときで波長1460nmにおいて $133 \mu\text{m}^2$ となる。

30

【0037】

(実施形態3)

実施形態1と同様に、使用波長帯を1260～1625nm(O-Lバンド)、曲げ損失を0.1dB/100turn以下、伝搬モード数が2となる設計範囲を図4に示す。塗りつぶされた部分が設計領域となる。

【0038】

なお、使用波長帯において2モード目の伝搬モードであるLP11モードが伝搬し、3つ目の伝搬モードであるLP21モードが伝搬しない条件として、波長1625nmにおけるLP11モードのカットオフ条件と波長1260nmにおけるLP21モードのカット

40

【0039】

図4より、使用波長帯においてモード数を2に制限し、伝搬モードがすべて所望の曲げ損失を満たすことができる Λ と d/Λ の組み合わせは実線と点線に囲まれた $\Lambda < 11.8 \mu\text{m}$ 、 $0.57 < d/\Lambda < 0.69$ の領域とすることで実現できる。なお、図4より、得られる最大のLP01モードの実効断面積は、 $\Lambda = 11.8 \mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda = 0.66$ のときで波長1260nmにおいて $111 \mu\text{m}^2$ となる。

【0040】

(実施形態4)

実施形態1と同様に、使用波長帯を980～1625nm、曲げ損失を0.1dB/1

50

00turn以下、伝搬モード数が2となる設計範囲を図5に示す。塗りつぶされた部分が設計領域となる。

【0041】

なお、使用波長帯において2モード目の伝搬モードであるLP11モードが伝搬し、3つ目の伝搬モードであるLP21モードが伝搬しない条件として、波長1625nmにおけるLP11モードのカットオフ条件と波長980nmにおけるLP21モードのカットオフ条件に囲まれた領域とした。さらに、使用波長帯において最も曲げ損失が大きくなる波長980nmにおいてLP11モードの曲げ半径30mmにおける曲げ損失が0.1dB/m以下である条件を非特許文献9に記載の式により計算した。

【0042】

10

図5より、使用波長帯においてモード数を2に制限し、伝搬モードがすべて所望の曲げ損失を満たすことができる Λ と d/Λ の組み合わせは実線と点線に囲まれた $\Lambda < 10.0\mu\text{m}$ 、 $0.57 < d/\Lambda < 0.68$ の領域とすることで実現できる。なお、図5より、得られる最大のLP01モードの実効断面積は、 $\Lambda = 10.0\mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda = 0.65$ のときで波長980nmにおいて $77\mu\text{m}^2$ となる。

【0043】

次に、実施形態5から実施形態8までは、伝搬モード数が4モード領域のフォトニック結晶ファイバの設計領域について説明する。

【0044】

(実施形態5)

20

使用波長帯を1530~1625nm(C-Lバンド)、曲げ損失を0.1dB/100turn以下、伝搬モード数が4となる設計範囲を図6に示す。塗りつぶされた部分が設計領域となる。

【0045】

なお、使用波長帯において4モード目の伝搬モードであるLP02モードが伝搬し、5つ目の伝搬モードであるLP31モードが伝搬しない条件として、波長1625nmにおけるLP02モードのカットオフ条件と波長1530nmにおけるLP31モードのカットオフ条件に囲まれた領域とした。さらに、使用波長帯において最も曲げ損失が大きくなる波長1530nmにおいてLP02モードの曲げ半径30mmにおける曲げ損失が0.1dB/m以下である条件を非特許文献9に記載の式により計算した。

30

【0046】

図6より、使用波長帯においてモード数を4に制限し、伝搬モードがすべて所望の曲げ損失を満たすことができる Λ と d/Λ の組み合わせは実線と点線に囲まれた $\Lambda < 13.9\mu\text{m}$ 、 $0.73 < d/\Lambda < 0.80$ の領域とすることで実現できる。なお、図6より、得られる最大のLP01モードの実効断面積は、 $\Lambda = 13.9\mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda = 0.76$ のときで波長1530nmにおいて $126\mu\text{m}^2$ となる。

【0047】

(実施形態6)

実施形態5と同様に、使用波長帯を1460~1625nm(S-Lバンド)、曲げ損失を0.1dB/100turn以下、伝搬モード数が4となる設計範囲を図7に示す。塗りつぶされた部分が設計領域となる。

40

【0048】

なお、使用波長帯において4モード目の伝搬モードであるLP02モードが伝搬し、5つ目の伝搬モードであるLP31モードが伝搬しない条件として、波長1625nmにおけるLP02モードのカットオフ条件と波長1460nmにおけるLP31モードのカットオフ条件に囲まれた領域とした。さらに、使用波長帯において最も曲げ損失が大きくなる波長1460nmにおいてLP02モードの曲げ半径30mmにおける曲げ損失が0.1dB/m以下である条件を非特許文献9に記載の式により計算した。

【0049】

図7より、使用波長帯においてモード数を4に制限し、伝搬モードがすべて所望の曲げ

50

損失を満たすことができる Λ と d/Λ の組み合わせは実線と点線に囲まれた $\Lambda < 13.5 \mu\text{m}$ 、 $0.73 < d/\Lambda < 0.80$ の領域とすることで実現できる。なお、図7より、得られる最大のLP01モードの実効断面積は、 $\Lambda = 13.5 \mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda = 0.76$ のときで波長1460nmにおいて $119 \mu\text{m}^2$ となる。

【0050】

(実施形態7)

実施形態5と同様に、使用波長帯を1260～1625nm(O-Lバンド)、曲げ損失を0.1dB/100turn以下、伝搬モード数が4となる設計範囲を図8に示す。塗りつぶされた部分が設計領域となる。

【0051】

10

なお、使用波長帯において4モード目の伝搬モードであるLP02モードが伝搬し、5つ目の伝搬モードであるLP31モードが伝搬しない条件として、波長1625nmにおけるLP02モードのカットオフ条件と波長1260nmにおけるLP31モードのカットオフ条件に囲まれた領域とした。さらに、使用波長帯において最も曲げ損失が大きくなる波長1260nmにおいてLP02モードの曲げ半径30mmにおける曲げ損失が0.1dB/m以下である条件を非特許文献9に記載の式により計算した。

【0052】

図8より、使用波長帯においてモード数を4に制限し、伝搬モードがすべて所望の曲げ損失を満たすことができる Λ と d/Λ の組み合わせは実線と点線に囲まれた $\Lambda < 12.3 \mu\text{m}$ 、 $0.73 < d/\Lambda < 0.80$ の領域とすることで実現できる。なお、図8より、得られる最大のLP01モードの実効断面積は、 $\Lambda = 12.3 \mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda = 0.76$ のときで波長1260nmにおいて $99 \mu\text{m}^2$ となる。

20

【0053】

(実施形態8)

実施形態5と同様に、使用波長帯を980～1625nm、曲げ損失を0.1dB/100turn以下、伝搬モード数が4となる設計範囲を図9に示す。塗りつぶされた部分が設計領域となる。

【0054】

なお、使用波長帯において4モード目の伝搬モードであるLP02モードが伝搬し、5つ目の伝搬モードであるLP31モードが伝搬しない条件として、波長1625nmにおけるLP02モードのカットオフ条件と波長980nmにおけるLP31モードのカットオフ条件に囲まれた領域とした。さらに、使用波長帯において最も曲げ損失が大きくなる波長980nmにおいてLP02モードの曲げ半径30mmにおける曲げ損失が0.1dB/m以下である条件を非特許文献9に記載の式により計算した。

30

【0055】

図9より、使用波長帯においてモード数を4に制限し、伝搬モードがすべて所望の曲げ損失を満たすことができる Λ と d/Λ の組み合わせは実線と点線に囲まれた $\Lambda < 10.5 \mu\text{m}$ 、 $0.73 < d/\Lambda < 0.78$ の領域とすることで実現できる。なお、図9より、得られる最大のLP01モードの実効断面積は、 $\Lambda = 10.5 \mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda = 0.76$ のときで波長980nmにおいて $72 \mu\text{m}^2$ となる。

40

【0056】

次に、実施形態9から実施形態12までは、伝搬モード数が6モード領域のフォトニック結晶ファイバの設計領域について説明する。

【0057】

(実施形態9)

使用波長帯を1530～1625nm(C-Lバンド)、曲げ損失を0.1dB/100turn以下、伝搬モード数が6となる設計範囲を図10に示す。塗りつぶされた部分が設計領域となる。

【0058】

なお、使用波長帯において6モード目の伝搬モードであるLP12モードが伝搬し、7

50

7つ目の伝搬モードであるLP41モードが伝搬しない条件として、波長1625nmにおけるLP12モードのカットオフ条件と波長1530nmにおけるLP41モードのカットオフ条件に囲まれた領域とした。さらに、使用波長帯において最も曲げ損失が大きくなる波長1530nmにおいてLP12モードの曲げ半径30mmにおける曲げ損失が0.1dB/m以下である条件を非特許文献9に記載の式により計算した。

【0059】

図10より、使用波長帯においてモード数を6に制限し、伝搬モードがすべて所望の曲げ損失を満たすことができる Λ と d/Λ の組み合わせは実線と点線に囲まれた $\Lambda < 13.8\mu\text{m}$ 、 $0.82 < d/\Lambda < 0.88$ の領域とすることで実現できる。なお、図10より、得られる最大のLP01モードの実効断面積は、 $\Lambda = 13.8\mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda = 0.83$ のときで波長1530nmにおいて $112\mu\text{m}^2$ となる。

10

【0060】

(実施形態10)

実施形態9と同様に、使用波長帯を1460~1625nm(S-Lバンド)、曲げ損失を0.1dB/100turn以下、伝搬モード数が6となる設計範囲を図11に示す。塗りつぶされた部分が設計領域となる。

【0061】

なお、使用波長帯において6モード目の伝搬モードであるLP12モードが伝搬し、7つ目の伝搬モードであるLP41モードが伝搬しない条件として、波長1625nmにおけるLP12モードのカットオフ条件と波長1460nmにおけるLP41モードのカットオフ条件に囲まれた領域とした。さらに、使用波長帯において最も曲げ損失が大きくなる波長1460nmにおいてLP12モードの曲げ半径30mmにおける曲げ損失が0.1dB/m以下である条件を非特許文献9に記載の式により計算した。

20

【0062】

図11より、使用波長帯においてモード数を6に制限し、伝搬モードがすべて所望の曲げ損失を満たすことができる Λ と d/Λ の組み合わせは実線と点線に囲まれた $\Lambda < 13.3\mu\text{m}$ 、 $0.82 < d/\Lambda < 0.88$ の領域とすることで実現できる。なお、図11より、得られる最大のLP01モードの実効断面積は、 $\Lambda = 13.3\mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda = 0.83$ のときで波長1460nmにおいて $104\mu\text{m}^2$ となる。

30

【0063】

(実施形態11)

実施形態9と同様に、使用波長帯を1260~1625nm(O-Lバンド)、曲げ損失を0.1dB/100turn以下、伝搬モード数が6となる設計範囲を図12に示す。塗りつぶされた部分が設計領域となる。

【0064】

なお、使用波長帯において6モード目の伝搬モードであるLP12モードが伝搬し、7つ目の伝搬モードであるLP41モードが伝搬しない条件として、波長1625nmにおけるLP12モードのカットオフ条件と波長1260nmにおけるLP41モードのカットオフ条件に囲まれた領域とした。さらに、使用波長帯において最も曲げ損失が大きくなる波長1260nmにおいてLP12モードの曲げ半径30mmにおける曲げ損失が0.1dB/m以下である条件を非特許文献9に記載の式により計算した。

40

【0065】

図12より、使用波長帯においてモード数を6に制限し、伝搬モードがすべて所望の曲げ損失を満たすことができる Λ と d/Λ の組み合わせは実線と点線に囲まれた $\Lambda < 12.1\mu\text{m}$ 、 $0.82 < d/\Lambda < 0.87$ の領域とすることで実現できる。なお、図12より、得られる最大のLP01モードの実効断面積は、 $\Lambda = 12.1\mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda = 0.83$ のときで波長1260nmにおいて $86\mu\text{m}^2$ となる。

【0066】

(実施形態12)

実施形態9と同様に、使用波長帯を980~1625nm、曲げ損失を0.1dB/1

50

00turn以下、伝搬モード数が6となる設計範囲を図13に示す。塗りつぶされた部分が設計領域となる。

【0067】

なお、使用波長帯において6モード目の伝搬モードであるLP12モードが伝搬し、7つ目の伝搬モードであるLP41モードが伝搬しない条件として、波長1625nmにおけるLP12モードのカットオフ条件と波長980nmにおけるLP41モードのカットオフ条件に囲まれた領域とした。さらに、使用波長帯において最も曲げ損失が大きくなる波長980nmにおいてLP12モードの曲げ半径30mmにおける曲げ損失が0.1dB/m以下である条件を非特許文献9に記載の式により計算した。

【0068】

図13より、使用波長帯においてモード数を6に制限し、伝搬モードがすべて所望の曲げ損失を満たすことができる d と d/Λ の組み合わせは実線と点線に囲まれた $\Lambda < 10.2\mu\text{m}$ 、 $0.82 < d/\Lambda < 0.86$ の領域とすることで実現できる。なお、図13より、得られる最大のLP01モードの実効断面積は、 $\Lambda = 10.2\mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda = 0.82$ のときで波長980nmにおいて $61\mu\text{m}^2$ となる。

【産業上の利用可能性】

【0069】

本発明は、ファイバ中の高次モードを利用することにより、光ファイバ伝送の大容量化・長距離化を実現することができる。

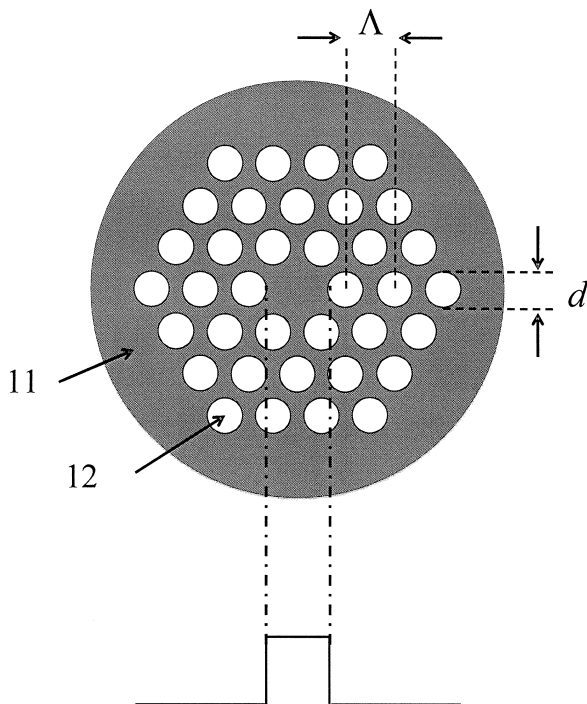
【符号の説明】

【0070】

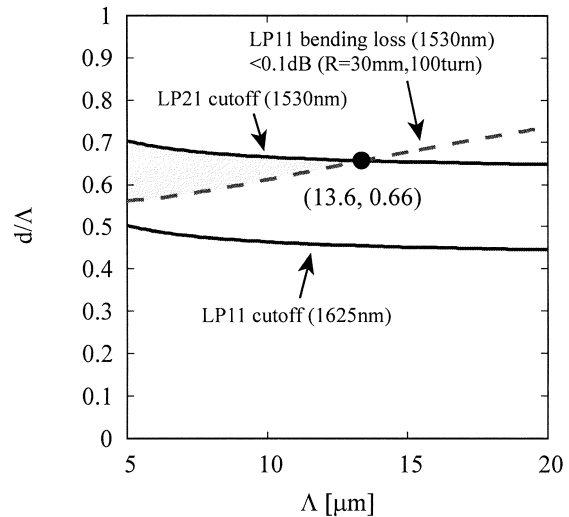
11：石英ガラス

12：空孔

【図1】



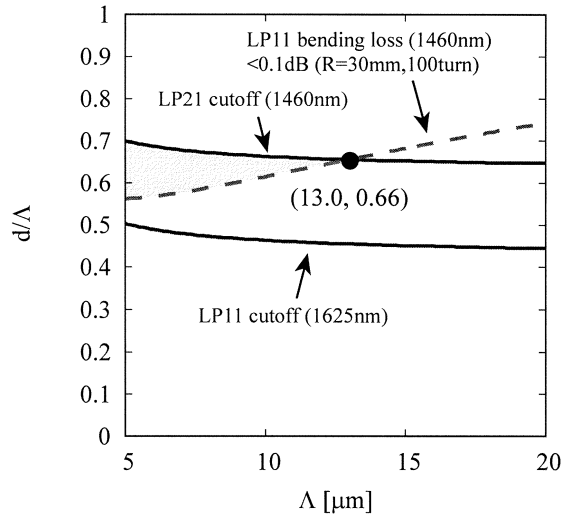
【図2】



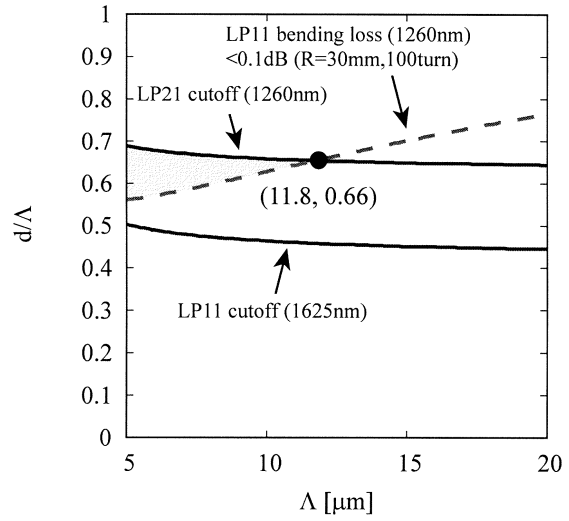
10

20

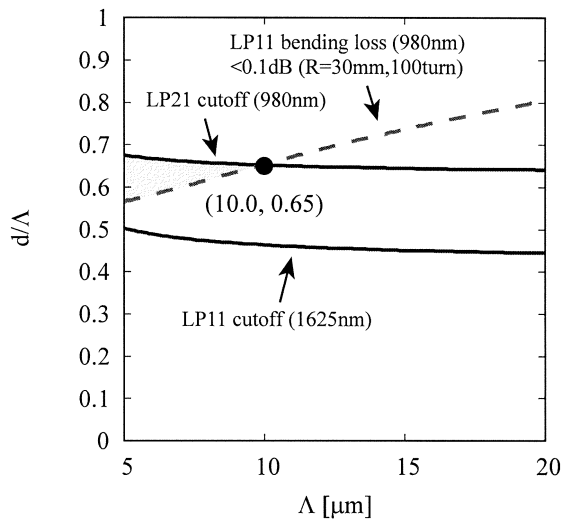
【 図 3 】



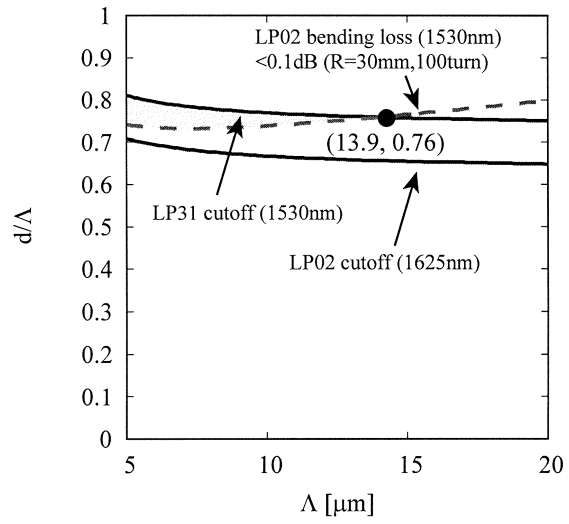
【 図 4 】



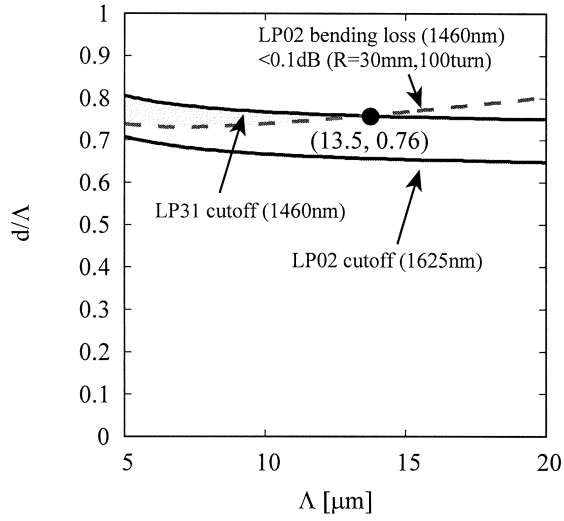
【 図 5 】



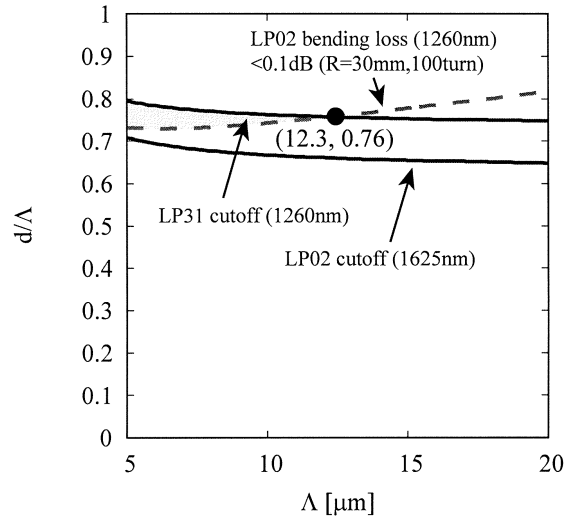
【 図 6 】



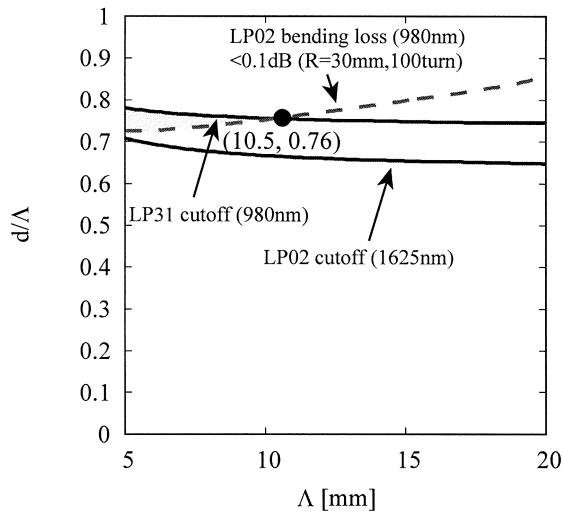
【図 7】



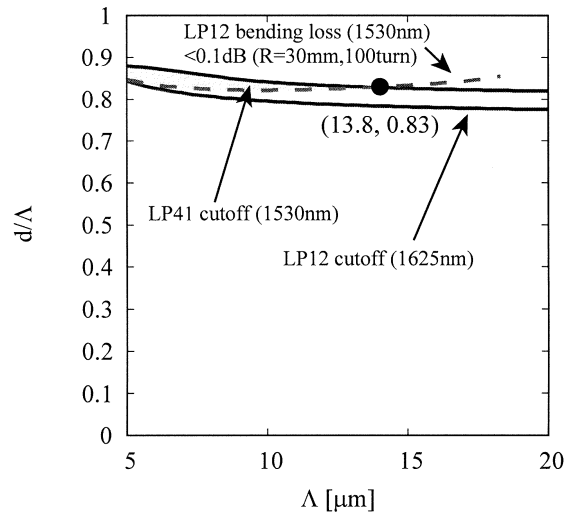
【図 8】



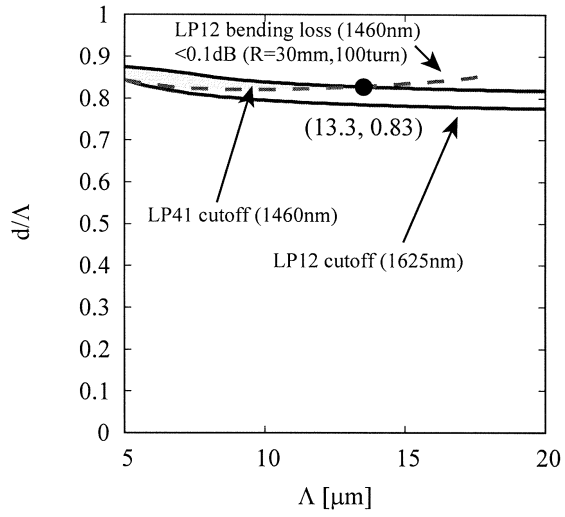
【図 9】



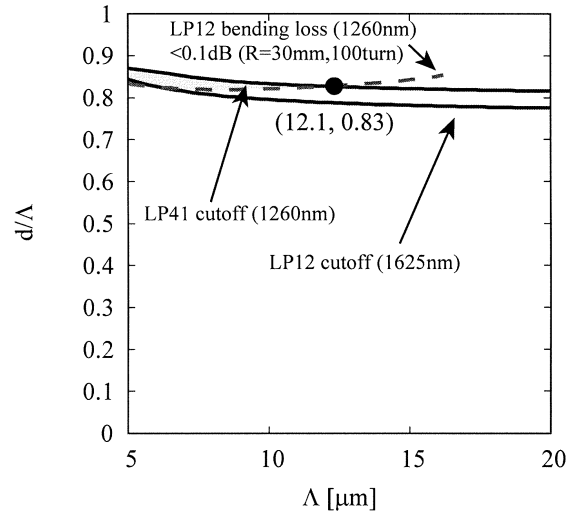
【図 10】



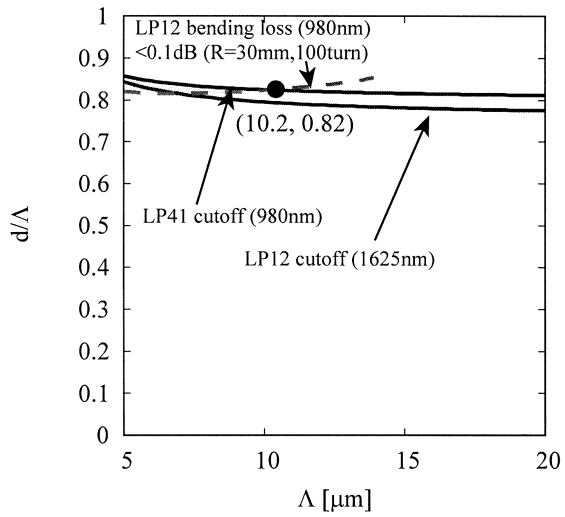
【図 1 1】



【図 1 2】



【図 1 3】



フロントページの続き

- (72)発明者 山本 貴司
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 半澤 信智
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 特開2010-197730(JP,A)
国際公開第2013/051295(WO,A1)
武笠和則、今村勝徳、杉崎隆一、2モード多重伝送用ファイバの最適化に関する検討、2012
年電子情報通信学会総合大会講演論文集、日本、社団法人電子情報通信学会、2012年 3月
6日、通信2, pp. 346

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G02B 6/02
G02B 6/032
JSTPlus(JDreamIII)
JST7580(JDreamIII)