

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5982992号
(P5982992)

(45) 発行日 平成28年8月31日(2016.8.31)

(24) 登録日 平成28年8月12日(2016.8.12)

(51) Int.Cl. F 1
G 0 2 B 6 / 0 2 (2 0 0 6 . 0 1) G O 2 B 6 / 0 2 4 6 1

請求項の数 11 (全 19 頁)

(21) 出願番号	特願2012-100200 (P2012-100200)	(73) 特許権者	000002130
(22) 出願日	平成24年4月25日 (2012.4.25)		住友電気工業株式会社
(65) 公開番号	特開2013-228548 (P2013-228548A)		大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号
(43) 公開日	平成25年11月7日 (2013.11.7)	(74) 代理人	100088155
審査請求日	平成27年3月26日 (2015.3.26)		弁理士 長谷川 芳樹
		(74) 代理人	100113435
			弁理士 黒木 義樹
		(74) 代理人	100108257
			弁理士 近藤 伊知良
		(74) 代理人	100110582
			弁理士 柴田 昌聰
		(72) 発明者	樽 稔樹
			神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電気工業株式会社横浜製作所内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 マルチコア光ファイバ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

ファイバ軸に沿って延在する複数のコアと、これら複数のコアの周囲を覆うクラッドと、を備えるマルチコア光ファイバであって、

前記複数のコアそれぞれを伝搬する信号光の間のスキューが 1 ps/m 以下であり、
前記複数のコアのうち互いに隣り合う2つのコアの間で比屈折率差および径を共通のスキュー等高線上またはその近傍で変化させて、これらの2つのコアの間で比屈折率差および径の双方が異なることで、これら2つのコアの間の伝搬定数差が0より大きく設定されており、

コアの比屈折率差の変化量(単位: %)を (n) とし、コアの径の変化量(単位: μm)を $(2a)$ としたときに、コア構造変化パラメータ $(n)/(2a)$ が負である

ことを特徴とするマルチコア光ファイバ。

【請求項2】

前記複数のコアのうち互いに隣り合う2つのコアの間で比屈折率差および径の双方が異なることで、これら2つのコアの間の伝搬定数差が設定されており、

前記複数のコアそれぞれを伝搬する信号光の間のスキューが、コアの比屈折率差および径のうち何れか一方のみを異ならせた場合より低減されている、

ことを特徴とする請求項1に記載のマルチコア光ファイバ。

【請求項3】

10

20

前記複数のコアのうち互いに隣り合う2つのコアの間の伝搬定数差が 0.0003 以上であり、

前記複数のコアそれぞれを伝搬する信号光の間のスキューが 0.1 ps/m 以下である、

ことを特徴とする請求項1に記載のマルチコア光ファイバ。

【請求項4】

前記複数のコアそれぞれが GeO_2 を添加された石英ガラスからなり、

コア構造変化パラメータ $(n)/(2a)$ が -1.5×10^{-2} 以上 -0.55×10^{-2} 以下である、

ことを特徴とする請求項1に記載のマルチコア光ファイバ。

10

【請求項5】

前記複数のコアそれぞれが純石英ガラスからなり、

光学クラッドがF元素を添加された石英ガラスからなり、

コア構造変化パラメータ $(n)/(2a)$ が -7.3×10^{-2} 以上 -3.8×10^{-2} 以下である、

ことを特徴とする請求項1に記載のマルチコア光ファイバ。

【請求項6】

前記複数のコアそれぞれが純石英ガラスからなり、

光学クラッドがF元素を添加された石英ガラスからなる、

ことを特徴とする請求項1に記載のマルチコア光ファイバ。

20

【請求項7】

前記複数のコアのうち互いに隣り合う2つのコアの間の伝搬定数差が 1×10^{-5} より大きいことを特徴とする請求項1に記載のマルチコア光ファイバ。

【請求項8】

前記複数のコアのうち互いに隣り合う2つのコアの間の伝搬定数差が 1×10^{-4} より大きいことを特徴とする請求項1に記載のマルチコア光ファイバ。

【請求項9】

前記複数のコアのうち互いに隣り合う2つのコアの間に、光学クラッドより低い屈折率を有する屈折率低減部が設けられている、ことを特徴とする請求項1に記載のマルチコア光ファイバ。

30

【請求項10】

前記複数のコアそれぞれが純石英ガラスからなり、

光学クラッドがF元素を添加された石英ガラスからなり、

前記複数のコアそれぞれを伝搬する信号光の間のスキューが 0.5 ps/m 以下である、

ことを特徴とする請求項1に記載のマルチコア光ファイバ。

【請求項11】

ファイバ軸に沿って延在する複数のコアと、これら複数のコアの周囲を覆うクラッドと、を含むマルチコア光ファイバと、

前記マルチコアファイバの各コアに光学的に接続されたピグテール光ファイバと、

を備える並列光伝送用光ファイバケーブルであって、

前記ピグテール光ファイバの一端が前記マルチコアファイバの各コアに光学的に接続され、前記ピグテール光ファイバの他端側が単心に分離されており、

前記ピグテール光ファイバの他端側の単心分離された部分の長さの調整によって前記マルチコア光ファイバのスキューが補償されており、ケーブル全体のスキューが 0.1 ps/m 以下である、

ことを特徴とする並列光伝送用光ファイバケーブル。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

50

本発明は、マルチコア光ファイバに関するものである。

【背景技術】

【0002】

ファイバ軸に沿って延在する複数のコアを有するマルチコア光ファイバは、複数のコアそれぞれを伝搬する信号光の間のスキューが小さいことが望まれており、この点では光ファイバテープ心線と同様である。コア間のスキューは、コアの長さの差に起因するものと、コアの構造の違いに起因するものがある。コア間のスキューが大きいと、複数のコアを用いた並列光伝送において問題が生じる。光ファイバテープ心線においてコア間のスキューの低減を意図した発明が特許文献1, 2に開示されている。しかしながら、より簡単にスキューを低減できる方法が求められる。また、光ファイバテープ心線は断面積が大きいことから、高密度化の点からも改善が望ましい。

10

【0003】

マルチコア光ファイバは、光ファイバテープ心線と比較すると、コアの長さの差に起因するスキューが小さい点で有利であり、また、高密度化の点でも有利である。しかし、マルチコア光ファイバは、コア間のスキューの低減が望まれる他、コア間のクロストークの低減も望まれる。特許文献3および非特許文献1には、マルチコア光ファイバにおいてコア間のクロストークの低減を意図した技術が記載されている。これらの文献には、マルチコア光ファイバにおいてコア間のクロストークの低減を図るには、コア間で伝搬定数を異ならせることが有効であると記載されている。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開平10-39185号公報

【特許文献2】特開2003-21763号公報

【特許文献3】特開2011-209702号公報

【非特許文献】

【0005】

【非特許文献1】IEICE Electronics Express, Vol.6, No.2, pp.98-103

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

30

【0006】

非特許文献1に記載されているようなコア間のクロストークの低減を図るための設計では、コア間で構造を意図的に異ならせており、それによってコア間のスキューが生じる。マルチコア光ファイバにおいてコア間スキューおよびコア間クロストークの双方を低減することは困難である。

【0007】

非特許文献1のFig.3(a),(b)の例では、全てのコアの径が9 μ mとして固定され、コアの比屈折率差が3種類(0.38%、0.39%、0.40%)の何れかとされている。この場合、波長1.31 μ mでのコア間スキューは1.1ps/mと見積もられ、波長1.55 μ mでのコア間スキューは1.1ps/mと見積もられ、また、波長1.625 μ mでのコア間スキューは1.2ps/mと見積もられる。

40

【0008】

また、非特許文献1のFig.3(c),(d)の例では、全てのコアの径が5 μ mとして固定され、コアの比屈折率差が3種類(1.15%、1.20%、1.25%)の何れかとされている。この場合、波長1.31 μ mでのコア間スキューは5.7ps/mと見積もられ、波長1.55 μ mでのコア間スキューは5.9ps/mと見積もられ、また、波長1.625 μ mでのコア間スキューは6.0ps/mと見積もられる。

【0009】

本発明は、上記問題点を解消する為になされたものであり、コア間スキューおよびコア間クロストークの双方を低減することができるマルチコア光ファイバを提供することを目

50

的とする。

【課題を解決するための手段】

【0010】

本発明のマルチコア光ファイバは、ファイバ軸に沿って延在する複数のコアと、これら複数のコアの周囲を覆うクラッドと、を備えるマルチコア光ファイバであって、複数のコアそれぞれを伝搬する信号光の間のスキューが 1 ps/m 以下であり、複数のコアのうち互いに隣り合う2つのコアの間で比屈折率差および径を共通のスキュー等高線上またはその近傍で変化させて、これらの2つのコアの間で比屈折率差および径の双方が異なることで、これら2つのコアの間の伝搬定数差が0より大きく設定されており、コアの比屈折率差の変化量(単位:%)を (n) とし、コアの径の変化量(単位: μm)を $(2a)$ としたときに、コア構造変化パラメータ $(n)/(2a)$ が負であることを特徴とする。

10

【0011】

本発明のマルチコア光ファイバは、複数のコアのうち互いに隣り合う2つのコアの間で比屈折率差および径の双方が異なることで、これら2つのコアの間の伝搬定数差が設定されており、複数のコアそれぞれを伝搬する信号光の間のスキューが、コアの比屈折率差および径のうち何れか一方のみを異ならせた場合より低減されているのが好適である。

【0013】

本発明のマルチコア光ファイバは、複数のコアのうち互いに隣り合う2つのコアの間の伝搬定数差が 0.0003 以上であり、複数のコアそれぞれを伝搬する信号光の間のスキューが 0.1 ps/m 以下であるのが好適である。複数のコアそれぞれが GeO_2 を添加された石英ガラスからなり、コア構造変化パラメータ $(n)/(2a)$ が -1.5×10^{-2} 以上 -0.55×10^{-2} 以下であるのが好適である。または、複数のコアそれぞれが純石英ガラスからなり、光学クラッドがF元素を添加された石英ガラスからなり、コア構造変化パラメータ $(n)/(2a)$ が -7.3×10^{-2} 以上 -3.8×10^{-2} 以下であるのが好適である。複数のコアそれぞれが純石英ガラスからなり、光学クラッドがF元素を添加された石英ガラスからなるのも好適である。

20

【0014】

本発明のマルチコア光ファイバは、複数のコアのうち互いに隣り合う2つのコアの間の伝搬定数差が 1×10^{-5} より大きいのが好適である。複数のコアのうち互いに隣り合う2つのコアの間の伝搬定数差が 1×10^{-4} より大きいのが更に好適である。複数のコアのうち互いに隣り合う2つのコアの間に、光学クラッドより低い屈折率を有する屈折率低減部が設けられているのが好適である。また、複数のコアそれぞれが純石英ガラスからなり、光学クラッドがF元素を添加された石英ガラスからなり、複数のコアそれぞれを伝搬する信号光の間のスキューが 0.5 ps/m 以下であるのが好適である。

30

【0015】

本発明の並列光伝送用光ファイバケーブルは、ファイバ軸に沿って延在する複数のコアと、これら複数のコアの周囲を覆うクラッドと、を含むマルチコア光ファイバと、マルチコアファイバの各コアに光学的に接続されたピグテール光ファイバと、を備える並列光伝送用光ファイバケーブルであって、ピグテール光ファイバの一端がマルチコアファイバの各コアに光学的に接続され、ピグテール光ファイバの他端側が単心に分離されており、ピグテール光ファイバの他端側の単心分離された部分の長さの調整によってマルチコア光ファイバのスキューが補償されており、ケーブル全体のスキューが 0.1 ps/m 以下であることを特徴とする。

40

【発明の効果】

【0016】

本発明によれば、コア間スキューおよびコア間クロストークの双方を低減することができる。

【図面の簡単な説明】

【0017】

50

【図 1】マルチコア光ファイバの構成例を示す断面図である。

【図 2】マルチコア光ファイバの他の構成例を示す断面図である。

【図 3】第 1 実施形態においてコア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n と群遅延 (@ 波長 $1.31 \mu\text{m}$) との関係を示す図である。

【図 4】第 1 実施形態においてコア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n と群遅延 (@ 波長 $1.55 \mu\text{m}$) との関係を示す図である。

【図 5】第 1 実施形態においてコア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n と群遅延 (@ 波長 $1.625 \mu\text{m}$) との関係を示す図である。

【図 6】第 1 実施形態においてコア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n とスキュー (@ 波長 $1.31 \mu\text{m}$) との関係を示す図である。

10

【図 7】第 1 実施形態においてコア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n とスキュー (@ 波長 $1.55 \mu\text{m}$) との関係を示す図である。

【図 8】第 1 実施形態においてコア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n とスキュー (@ 波長 $1.625 \mu\text{m}$) との関係を示す図である。

【図 9】第 1 実施形態においてコア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n と伝搬定数差 (@ 波長 $1.31 \mu\text{m}$) との関係を示す図である。

【図 10】第 1 実施形態においてコア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n と伝搬定数差 (@ 波長 $1.55 \mu\text{m}$) との関係を示す図である。

【図 11】第 1 実施形態においてコア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n と伝搬定数差 (@ 波長 $1.625 \mu\text{m}$) との関係を示す図である。

20

【図 12】図 7 においてタイプ A ~ C の位置を示す図である。

【図 13】図 10 においてタイプ A ~ C の位置を示す図である。

【図 14】第 2 実施形態においてコア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n と群遅延 (@ 波長 $1.31 \mu\text{m}$) との関係を示す図である。

【図 15】第 2 実施形態においてコア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n と群遅延 (@ 波長 $1.55 \mu\text{m}$) との関係を示す図である。

【図 16】第 2 実施形態においてコア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n と群遅延 (@ 波長 $1.625 \mu\text{m}$) との関係を示す図である。

【図 17】第 2 実施形態においてコア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n とスキュー (@ 波長 $1.31 \mu\text{m}$) との関係を示す図である。

30

【図 18】第 2 実施形態においてコア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n とスキュー (@ 波長 $1.55 \mu\text{m}$) との関係を示す図である。

【図 19】第 2 実施形態においてコア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n とスキュー (@ 波長 $1.625 \mu\text{m}$) との関係を示す図である。

【図 20】第 2 実施形態においてコア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n と伝搬定数差 (@ 波長 $1.31 \mu\text{m}$) との関係を示す図である。

【図 21】第 2 実施形態においてコア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n と伝搬定数差 (@ 波長 $1.55 \mu\text{m}$) との関係を示す図である。

【図 22】第 2 実施形態においてコア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n と伝搬定数差 (@ 波長 $1.625 \mu\text{m}$) との関係を示す図である。

40

【図 23】図 18 においてタイプ A ~ C の位置を示す図である。

【図 24】図 21 においてタイプ A ~ C の位置を示す図である。

【図 25】第 3 実施形態の並列光伝送用光ファイバケーブルの構成を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0018】

以下、添付図面を参照して、本発明を実施するための形態を詳細に説明する。なお、図面の説明において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

【0019】

図 1 は、マルチコア光ファイバの構成例を示す断面図である。同図に示されるマルチコア光ファイバ 1 は、ファイバ軸に沿って延在する 7 本のコア $10_1 \sim 10_7$ がジャケット

50

20により覆われており、また各コア 10_m が光学クラッド 11_m により覆われている。光学クラッド 11_m とジャケット20の屈折率は等しい。マルチコア光ファイバ1のファイバ軸に垂直な断面において、コア 10_1 は中心に位置し、他の6本のコア $10_2 \sim 10_7$ はコア 10_1 を中心とする円の周上に等間隔で位置する。コア $10_1 \sim 10_7$ それぞれは、周囲を覆う光学クラッドの屈折率より高い屈折率を有し、光を導波させることができる。

【0020】

図2は、マルチコア光ファイバの他の構成例を示す断面図である。同図に示されるマルチコア光ファイバ2は、ファイバ軸に沿って延在する7本のコア $10_1 \sim 10_7$ がジャケット20により覆われており、また、各コア 10_m が光学クラッド 11_m により覆われ更に屈折率低減部 12_m により覆われている。なお、 m は1～7の各整数である。マルチコア光ファイバ2のファイバ軸に垂直な断面において、コア 10_1 は中心に位置し、他の6本のコア $10_2 \sim 10_7$ はコア 10_1 を中心とする円の周上に等間隔で位置する。各コア 10_m は、周囲を覆う光学クラッド 11_m の屈折率より高い屈折率を有し、光を導波させることができる。

10

【0021】

また、各光学クラッド 11_m の周囲を覆う屈折率低減部 12_m は、光学クラッド 11_n およびジャケット20より低い屈折率を有する。互いに隣り合う2つのコアの間に屈折率低減部が設けられていることにより、コア間のクロストークが低減され、また、このことから、コア間隔を狭くでき高密度化が可能である。さらに、曲げ損失の低減が可能であり、取り扱い性が向上する。

20

【0022】

以下では、コアが GeO_2 添加の石英ガラスであって光学クラッドが純石英ガラスである場合を第1実施形態として説明し、また、コアが純石英ガラスであって光学クラッドがF元素添加の石英ガラスである場合を第2実施形態として説明する。何れの場合にも、各コアが単純なステップインデックス型の屈折率分布を有しシングルモードであるとする。また、コア径(単位： μm)を $2a$ で表し、光学クラッドに対するコアの比屈折率差(単位： $\%$)を n で表し、コア間のスキュー(単位： ps/m)を S で表し、伝搬定数差(単位： $1/\mu m$)を $\Delta\beta$ で表す。

【0023】

(第1実施形態)

【0024】

本実施形態のマルチコア光ファイバは、コアが GeO_2 添加の石英ガラスであって、光学クラッドが純石英ガラスであり、クロストークの抑制のために隣り合う2つのコアの間で伝搬定数が異なっている。

【0025】

マルチコア光ファイバにおけるスキューは、コア間の群遅延差であり、単位長さ当りの遅延時間差で与えられる。マルチコア光ファイバで生じるスキューは、コア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n などの構造の違いに起因する。以下では、コア径 $2a$ が $8.5\mu m$ であってコア比屈折率差 n が 0.35% である場合が基準条件とされ、この基準条件の場合との差としてスキューおよび伝搬定数差が計算により求められた。

40

【0026】

図3～図5は、コア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n と群遅延との関係を示す図である。図3は波長 $1.31\mu m$ の場合を示し、図4は波長 $1.55\mu m$ の場合を示し、図5は波長 $1.625\mu m$ の場合を示す。これらの図には群遅延の等高線が示されている。等高線の間隔は $1ps/m$ である。

【0027】

図6～図8は、コア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n とスキューとの関係を示す図である。図6は波長 $1.31\mu m$ の場合を示し、図7は波長 $1.55\mu m$ の場合を示し、図8は波長 $1.625\mu m$ の場合を示す。これらの図にはスキューの等高線が示されている。等

50

高線の間隔は 1 ps/m である。これら図 6 ~ 図 8 は図 3 ~ 図 5 から得られた。基準条件の場合の群遅延が基準とされて各条件でのスキューが求められた。これらの図から判るように、何れの波長においてもコア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n によってはスキューが生じる。

【 0 0 2 8 】

図 9 ~ 図 11 は、コア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n と伝搬定数差との関係を示す図である。図 9 は波長 $1.31 \mu\text{m}$ の場合を示し、図 10 は波長 $1.55 \mu\text{m}$ の場合を示し、図 11 は波長 $1.625 \mu\text{m}$ の場合を示す。これらの図には伝搬定数差の等高線が示されている。等高線の間隔は $0.001 / \mu\text{m}$ である。基準条件の場合の伝搬定数が基準とされて各条件での伝搬定数差が求められた。

10

【 0 0 2 9 】

本実施形態では、マルチコア光ファイバは、コア間で伝搬定数が異なることを前提として、コア間のスキューを抑制することができるように設計・製造される。そのために、マルチコア光ファイバでは、各コアを導波する光の群屈折率が可能な限り揃えられる。7本のコアについて上記基準条件が設計中心とされる。

【 0 0 3 0 】

本実施形態のマルチコア光ファイバを製造するに際しては、公知の製造方法が採用され得る。例えば、中心に GeO_2 が添加されたコアと、その周囲を取り囲む GeO_2 が添加されていない光学クラッドとからなり、伝搬定数が異なる複数のコアロッドが準備される。異なるロットから複数のコアロッドが選別されても良い。また、同一のロットが長手方向に分割されて複数のコアロッドが準備され、各コアロッドの延伸や外周研削が行われて伝搬定数に差が付けられても良い。

20

【 0 0 3 1 】

図 2 に示されるように屈折率低減部を有するマルチコア光ファイバを製造する場合には、中心に GeO_2 が添加されたコアと、その周囲を取り囲む GeO_2 が添加されていない光学クラッドと、更に周囲を取り囲む F 元素が添加された屈折率低減部とからなり、伝搬定数が異なる複数のコアロッドが準備される。光学クラッドに対する屈折率低減部の比屈折率差は -0.3% 以下であるのが好ましい。

【 0 0 3 2 】

これら複数のコアロッドを取り囲むジャケット材が用意される。例えば、円柱形状のガラス体に対して長手方向に延在する複数の孔が形成されてジャケット材が作製される。このジャケット材の複数の孔それぞれにコアロッドが挿入され、これらが一体化されることで光ファイバ母材が作製される。そして、この光ファイバ母材が線引されることでマルチコア光ファイバが製造される。

30

【 0 0 3 3 】

スキューは、マルチコア光ファイバの全長で決まるパラメータであるので、製造時のマルチコア光ファイバの長手方向ばらつきを平均化した特性に依存する。各コアについて長手方向で平均化して算出したコア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n を図 6 ~ 図 8 に当てはめることで、各コアのスキューの見積もりが可能である。図 6 ~ 図 8 によると、特定のコア構造 (コア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n) の変化であればスキューが変化しない (または、スキューの変化が小さい) ことが判る。

40

【 0 0 3 4 】

図 6 ~ 図 8 の例で、 1 ps/m 以下のスキューを実現する為には、コア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n は、スキュー = $+1 \text{ ps/m}$ の等高線とスキュー = -1 ps/m の等高線との間の範囲に位置することが必要である。これは、光ファイバテーブ心線では非常に緻密に線長を管理しなければ実現できないが、マルチコア光ファイバでは上記製法などにより容易に実現が可能である。スキューが許容される範囲でクロストークを低減することも可能である。

【 0 0 3 5 】

クロストークの抑制のためには積極的に異種コアを使用することが好ましい。この場合

50

、全てのコアが異種であってもよいが、任意の隣り合う2つのコアが異種であればよい、クロストークの抑制のために必要な条件は、異種コア間で伝搬定数が互いに異なることである。また、伝搬定数差が大きいほど、クロストークをより低減することができる。

【0036】

コア構造とスキューとの関係を示す図6～図8とコア構造と伝搬定数との関係を示す図9～図11とを対比すれば明らかなように、コア構造の変化に対するスキューおよび伝搬定数それぞれの変化は互いに異なっている。したがって、コア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n の双方を変化させることにより、スキューを一定範囲に保った状態で、伝搬定数に差を設けるような設計が可能である。クロストーク低減およびスキュー低減を両立させる目的で、異種コアのパラメータを以下のように限定する。

【0037】

本実施形態では、中心に位置するコア 10_1 をタイプAとし、円周上に位置する3つのコア 10_2 、 10_4 、 10_6 をタイプBとし、円周上に位置する他の3つのコア 10_3 、 10_5 、 10_7 をタイプCとして、任意の隣り合う2つのコアが異種となるようにする。タイプAのコアについては、径 $2a$ を $8.5\mu\text{m}$ とし、比屈折率差 n を 0.35% とする。タイプBのコアについては、径 $2a$ を $8.1\mu\text{m}$ とし、比屈折率差 n を 0.355% とする。また、タイプCのコアについては、径 $2a$ を $8.9\mu\text{m}$ とし、比屈折率差 n を 0.345% とする。

【0038】

図12は、図7（スキュー@波長 $1.55\mu\text{m}$ ）においてタイプA～Cの位置を示す図である。また、図13は、図10（伝搬定数差@波長 $1.55\mu\text{m}$ ）においてタイプA～Cの位置を示す図である。図12に示されるように、タイプA～Cそれぞれは、波長 $1.55\mu\text{m}$ において共通のスキュー等高線の上であり、コア間スキューが 0.1ps/m 以下である。一方、図13に示されるように、波長 $1.55\mu\text{m}$ において隣接コア間の伝搬定数差が 0.0003 以上となっている。よって、コア間スキューを低い値に維持しつつ、製造ばらつきでは得られないレベルのコア間の伝搬定数差が得られ、クロストークが低減される。

【0039】

コア構造（コア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n ）の変化に対するスキュー変化（図6～図8）および伝搬定数差変化（図9～図11）から、以下のようにして、低スキューおよび低クロストークの双方を実現することができる最適なコア構造条件を定量的に求めることができる。

【0040】

図6（スキュー@波長 $1.31\mu\text{m}$ ）から、波長 $1.31\mu\text{m}$ でのスキュー S は、コア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n の関数として下記（1a）式で近似的に表される。また、図9（伝搬定数差@波長 $1.31\mu\text{m}$ ）から、波長 $1.31\mu\text{m}$ での伝搬定数差 $\Delta\beta$ は、コア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n の関数として下記（1b）式で近似的に表される。

$$S = 0.3916 \times (2a) + 57.22 \times (n) - 22.77 \quad \dots (1a)$$

$$= 1.620 \times 10^{-3} \times (2a) + 5.740 \times 10^{-2} \times (n) - 3.386 \times 10^{-2} \quad \dots (1b)$$

【0041】

これらの式から、スキュー S の絶対値を小さくするとともに伝搬定数差 $\Delta\beta$ の絶対値を大きくするようにコア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n を設計することにより、波長 $1.31\mu\text{m}$ において目標の特性を定量的に予測し実現することができる。ここで、コア径 $3a$ およびコア比屈折率差 n それぞれの変化方法として、コア径変化量（ $(2a)$ ：単位 μm ）およびコア比屈折率差変化量（ (n) ：単位 $\%$ ）を用いたコア構造変化パラメータ $(n)/(2a)$ を定義すると、上記（1a）式および（1b）式から、波長 $1.31\mu\text{m}$ では、 $(n)/(2a) = -0.55 \times 10^{-2}$ が低スキューの観点から望ましく、 $(n)/(2a) = -2.8 \times 10^{-2}$ は低クロストークの観点から避ける必要がある。

【0042】

10

20

30

40

50

図7 (スキュー@波長1.55 μm) から、波長1.55 μmでのスキューSは、コア径2aおよびコア比屈折率差nの関数として下記(2a)式で近似的に表される。また、図10 (伝搬定数差@波長1.55 μm) から、波長1.55 μmでの伝搬定数差は、コア径2aおよびコア比屈折率差nの関数として下記(2b)式で近似的に表される。これらの式から、波長1.55 μmでは、 $(n)/(2a) = -1.2 \times 10^{-2}$ が低スキューの観点から望ましく、 $(n)/(2a) = -3.4 \times 10^{-2}$ は低クロストークの観点から避ける必要がある。

$$S = 0.7402 \times (2a) + 59.69 \times (n) - 27.22 \quad \dots (2a)$$

$$= 1.505 \times 10^{-3} \times (2a) + 4.448 \times 10^{-2} \times (n) - 2.385 \times 10^{-2} \quad \dots (2b)$$

【0043】

図8 (スキュー@波長1.625 μm) から、波長1.625 μmでのスキューSは、コア径2aおよびコア比屈折率差nの関数として下記(3a)式で近似的に表される。また、図11 (伝搬定数差@波長1.625 μm) から、波長1.625 μmでの伝搬定数差は、コア径2aおよびコア比屈折率差nの関数として下記(3b)式で近似的に表される。これらの式から、波長1.625 μmでは、 $(n)/(2a) = -1.5 \times 10^{-2}$ が低スキューの観点から望ましく、 $(n)/(2a) = -3.6 \times 10^{-2}$ は低クロストークの観点から避ける必要がある。

$$S = 0.8865 \times (2a) + 60.41 \times (n) - 26.86 \quad \dots (3a)$$

$$= 1.467 \times 10^{-3} \times (2a) + 4.117 \times 10^{-2} \times (n) - 3.386 \times 10^{-2} \quad \dots (3b)$$

【0044】

以上のように、コア径2aおよびコア比屈折率差nの双方を変化させてコア構造変化パラメータ $(n)/(2a)$ を適切に設定することによって、スキューおよびクロストークの双方を低減することができる。スキュー低減の観点から、コア構造変化パラメータ $(n)/(2a)$ は負の値であることが望ましい。また、クロストーク低減の観点から、コア構造変化パラメータ $(n)/(2a)$ は、使用波長によって、 $-3.6 \times 10^{-2} \sim -2.8 \times 10^{-2}$ の範囲を避けるように考慮して下限に設定されるのが望ましい。さらに、コア構造変化パラメータ $(n)/(2a)$ を -1.5×10^{-2} 以上 -0.55×10^{-2} 以下の範囲とすることで、通信波長帯において低スキュー特性を得ることができる。

【0045】

(第2実施形態)

【0046】

本実施形態のマルチコア光ファイバは、コアが純石英ガラスであって、光学クラッドがF元素添加の石英ガラスであり、クロストークの抑制のために隣り合う2つのコアの間で伝搬定数が異なっている。本実施形態でも、コア径2aが8.5 μmであってコア比屈折率差nが0.35%である場合が基準条件とされ、この基準条件の場合との差としてスキューおよび伝搬定数差が計算により求められた。

【0047】

図14～図16は、コア径2aおよびコア比屈折率差nと群遅延との関係を示す図である。図14は波長1.31 μmの場合を示し、図15は波長1.55 μmの場合を示し、図16は波長1.625 μmの場合を示す。これらの図には群遅延の等高線が示されている。等高線の間隔は1 ps/mである。

【0048】

図17～図19は、コア径2aおよびコア比屈折率差nとスキューとの関係を示す図である。図17は波長1.31 μmの場合を示し、図18は波長1.55 μmの場合を示し、図19は波長1.625 μmの場合を示す。これらの図にはスキューの等高線が示されている。等高線の間隔は1 ps/mである。これら図17～図19は図14～図16から得られた。基準条件の場合の群遅延が基準とされて各条件でのスキューが求められた。これらの図から判るように、何れの波長においてもコア径2aおよびコア比屈折率差nによってはスキューが生じる。

10

20

30

40

50

【 0 0 4 9 】

図 2 0 ~ 図 2 2 は、コア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n と伝搬定数差との関係を示す図である。図 2 0 は波長 $1.31 \mu\text{m}$ の場合を示し、図 2 1 は波長 $1.55 \mu\text{m}$ の場合を示し、図 2 2 は波長 $1.625 \mu\text{m}$ の場合を示す。これらの図には伝搬定数差の等高線が示されている。等高線の間隔は $0.001 / \mu\text{m}$ である。基準条件の場合の伝搬定数が基準とされて各条件での伝搬定数差が求められた。

【 0 0 5 0 】

第 1 実施形態と比較すると、第 2 実施形態では、同一範囲のコア構造変化に対するスキューおよび伝搬定数差の何れの変化も小さくなっており、また、コア構造と伝搬定数差との関係においてコア比屈折率差 n (グラフ縦軸) 依存性が逆になっている。したがって、コアが純石英ガラスである第 2 実施形態では、スキューを一定に維持するためスキュー等高線に沿ってコア構造を変化させたときに、伝搬定数差が変化し易い。

10

【 0 0 5 1 】

本実施形態では、中心に位置するコア 10_1 をタイプ A とし、円周上に位置する 3 つのコア $10_2, 10_4, 10_6$ をタイプ B とし、円周上に位置する他の 3 つのコア $10_3, 10_5, 10_7$ をタイプ C とし、任意の隣り合う 2 つのコアが異種となるようにする。タイプ A のコアについては、径 $2a$ を $8.5 \mu\text{m}$ とし、比屈折率差 n を 0.35% とする。タイプ B のコアについては、径 $2a$ を $8.35 \mu\text{m}$ とし、比屈折率差 n を 0.36% とする。また、タイプ C のコアについては、径 $2a$ を $8.65 \mu\text{m}$ とし、比屈折率差 n を 0.34% とする。

20

【 0 0 5 2 】

図 2 3 は、図 1 8 (スキュー@波長 $1.55 \mu\text{m}$) においてタイプ A ~ C の位置を示す図である。また、図 2 4 は、図 2 1 (伝搬定数差@波長 $1.55 \mu\text{m}$) においてタイプ A ~ C の位置を示す図である。図 2 3 に示されるように、タイプ A ~ C それぞれは、波長 $1.55 \mu\text{m}$ において共通のスキュー等高線の上であり、コア間スキューが 0.1ps/m 以下である。一方、図 2 4 に示されるように、波長 $1.55 \mu\text{m}$ において隣接コア間の伝搬定数差が 0.0003 以上となっている。よって、コア間スキューを低い値に維持しつつ、製造ばらつきでは得られないレベルのコア間の伝搬定数差が得られ、クロストークが低減される。

【 0 0 5 3 】

本実施形態においても、コア構造 (コア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n) の変化に対するスキュー変化 (図 1 7 ~ 図 1 9) および伝搬定数差変化 (図 2 0 ~ 図 2 2) から、以下のようにして、低スキューおよび低クロストークの双方を実現することができる最適なコア構造条件を定量的に求めることができる。

30

【 0 0 5 4 】

図 1 7 (スキュー@波長 $1.31 \mu\text{m}$) から、波長 $1.31 \mu\text{m}$ でのスキュー S は、コア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n の関数として下記 (4a) 式で近似的に表される。また、図 2 0 (伝搬定数差@波長 $1.31 \mu\text{m}$) から、波長 $1.31 \mu\text{m}$ での伝搬定数差 $\Delta\beta$ は、コア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n の関数として下記 (4b) 式で近似的に表される。これらの式から、波長 $1.31 \mu\text{m}$ では、 $(n)/(2a) = -3.8 \times 10^{-2}$ が低スキューの観点から望ましく、 $(n)/(2a) = +0.14$ は低クロストークの観点から避ける必要がある。

40

$$S = 0.3195 \times (2a) + 10.29 \times (n) - 6.964 \quad \dots (4a)$$

$$= 1.595 \times 10^{-3} \times (2a) - 1.145 \times 10^{-2} \times (n) - 0.954 \times 10^{-2} \quad \dots (4b)$$

【 0 0 5 5 】

図 1 8 (スキュー@波長 $1.55 \mu\text{m}$) から、波長 $1.55 \mu\text{m}$ でのスキュー S は、コア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n の関数として下記 (5a) 式で近似的に表される。また、図 2 1 (伝搬定数差@波長 $1.55 \mu\text{m}$) から、波長 $1.55 \mu\text{m}$ での伝搬定数差 $\Delta\beta$ は、コア径 $2a$ およびコア比屈折率差 n の関数として下記 (5b) 式で近似的に表される。これらの式から、波長 $1.55 \mu\text{m}$ では、 $(n)/(2a) = -6.5 \times 10^{-2}$ が低

50

スキューの観点から望ましく、 $(n)/(2a) = +0.10$ は低クロストークの観点から避ける必要がある。

$$S = 0.8818 \times (2a) + 13.52 \times (n) - 12.27 \quad \dots (5a)$$

$$= 1.458 \times 10^{-3} \times (2a) - 1.408 \times 10^{-2} \times (n) - 0.745 \times 10^{-2} \quad \dots (5b)$$

【0056】

図19(スキュー@波長1.625 μm)から、波長1.625 μmでのスキューSは、コア径2aおよびコア比屈折率差nの関数として下記(6a)式で近似的に表される。また、図22(伝搬定数差@波長1.625 μm)から、波長1.625 μmでの伝搬定数差は、コア径2aおよびコア比屈折率差nの関数として下記(6b)式で近似的に表される。これらの式から、波長1.625 μmでは、 $(n)/(2a) = -7.3 \times 10^{-2}$ が低スキューの観点から望ましく、 $(n)/(2a) = +0.095$ は低クロストークの観点から避ける必要がある。

$$S = 1.054 \times (2a) + 14.41 \times (n) - 14.05 \quad \dots (6a)$$

$$= 1.404 \times 10^{-3} \times (2a) - 1.485 \times 10^{-2} \times (n) - 0.672 \times 10^{-2} \quad \dots (6b)$$

【0057】

本実施形態でも、コア径2aおよびコア比屈折率差nの双方を変化させてコア構造変化パラメータ $(n)/(2a)$ を適切に設定することによって、スキューおよびクロストークの双方を低減することができる。スキュー低減およびクロストーク低減の観点から、コア構造変化パラメータ $(n)/(2a)$ は負の値であることが望ましい。また、コア構造変化パラメータ $(n)/(2a)$ を -7.3×10^{-2} 以上 -3.8×10^{-2} 以下の範囲とすることで、通信波長帯において低スキュー特性を得ることができる。

【0058】

第1実施形態と比較すると、第2実施形態では伝送遅延の観点でも有利である。第1実施形態における群遅延変化(図3~図5)を見ると、GeO₂添加コア構造では、図示されているコア構造の範囲において、波長1.31 μmにおいて群遅延が4891~4897 ps/mであり、波長1.55 μmにおいて群遅延が4893~4900 ps/mであり、波長1.625 μmにおいて群遅延が4894~4901 ps/mである。これに対して、第2実施形態における群遅延変化(図14~図16)を見ると、純シリカコア構造では、図示されているコア構造の範囲において、波長1.31 μmにおいて群遅延が4877~4878 ps/mであり、波長1.55 μmにおいて群遅延が4878~4881 ps/mであり、波長1.625 μmにおいて群遅延が4880~4882 ps/mである。第2実施形態の方が、14~19 ps/m程度、遅延が小さく、低遅延を特徴とする伝送システムの構築に有利である。

【0059】

(第3実施形態)

【0060】

上記の第1または第2の実施形態の方法で、マルチコア光ファイバ自体のスキューは低減され得る。しかし、特に使用長が長い場合等では、累積によって一定量のスキューが残存する場合が想定される。また、ケーブル化工程および敷設状態などによっては、ファイバ状態では予測できなかったスキューが発生する場合も想定される。第3実施形態では、マルチコア光ファイバに取り付けるピグテールファイバによってスキューを低減する。

【0061】

図25は、第3実施形態の並列光伝送用光ファイバケーブルの構成を示す図である。同図に示される並列光伝送用光ファイバケーブル5は、ファイバ軸に沿って延在する複数のコアを含むマルチコア光ファイバ3と、マルチコアファイバ3の各コアに光学的に接続されたピグテール光ファイバ4₁~4₃と、を備える。ピグテール光ファイバ4₁~4₃の一端はマルチコアファイバ3の各コアに光学的に接続され、ピグテール光ファイバ4₁~4₃の他端側は単心に分離されている。ピグテール光ファイバ4₁~4₃の他端側の単心分離された部分の長さの調整によってマルチコア光ファイバ3のスキューが補償されており、ケーブル5全体のスキューが0.1 ps/m以下である。

10

20

30

40

50

【 0 0 6 2 】

ピグテール光ファイバ $4_1 \sim 4_3$ は、マルチコア光ファイバ 3 の特定コアへの信号光の入射および取り出しの機能も兼ね備えている。ピグテール光ファイバ $4_1 \sim 4_3$ は、マルチコア光ファイバ 3 側ではマルチコア光ファイバ 3 のコアに合わせた配列になってまとめられている。反対側ではピグテール光ファイバ $4_1 \sim 4_3$ は単心に分離されている。マルチコア光ファイバ 3 とピグテール光ファイバ $4_1 \sim 4_3$ とは、コネクタまたは融着によって互いに接続されている。

【 0 0 6 3 】

ピグテール光ファイバ $4_1 \sim 4_3$ は、通常の光ファイバと同様のコアおよびクラッドによる光導波構造を有し、長さ 1 m 当り 4.9 ns 程度の遅延を与える。よって、分離部において各ピグテール光ファイバの長さを調整することで、ケーブル 5 全体のスキューを低減することができる。

10

【 0 0 6 4 】

例えば、スキューが 0.2 ps / m 程度の長さ 10 km のマルチコア光ファイバ 3 を使用する場合、マルチコア光ファイバ 3 において 2 ns 程度のスキューが発生する。この場合、ピグテール光ファイバ $4_1 \sim 4_3$ の単心分離された部分の長さを最大 0.4 m 程度変える（遅延の大きいコアのピグテール長を相対的に長くする）ことで、スキューをほぼ解消することができる。さらに、本実施形態では、実際にスキューを確認しながらピグテール光ファイバの長さを調整することで、光ケーブル 5 だけでなく伝送システム全体のスキューを調整することができる。

20

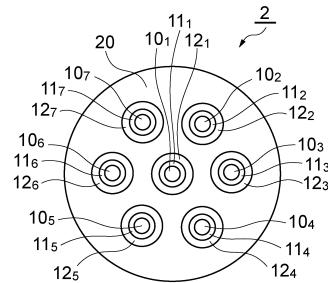
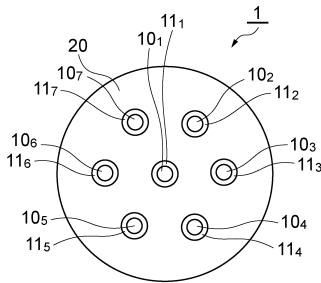
【 符号の説明 】

【 0 0 6 5 】

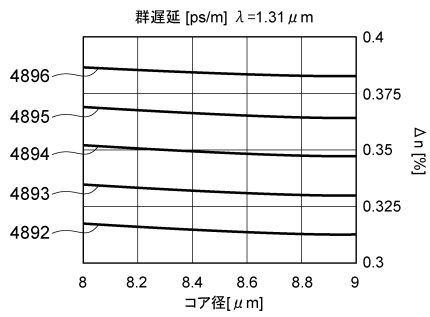
1 ~ 3 ... マルチコア光ファイバ、 $4_1 \sim 4_3$... ピグテール光ファイバ、 5 ... 並列光伝送用光ファイバケーブル、 $10_1 \sim 10_7$... コア、 $11_1 \sim 11_7$... 光学クラッド、 $12_1 \sim 12_7$... 屈折率低減部、 20 ... ジャケット。

【 図 1 】

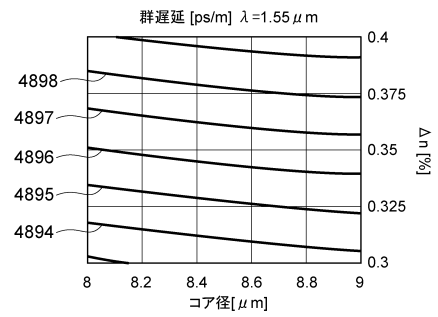
【 図 2 】



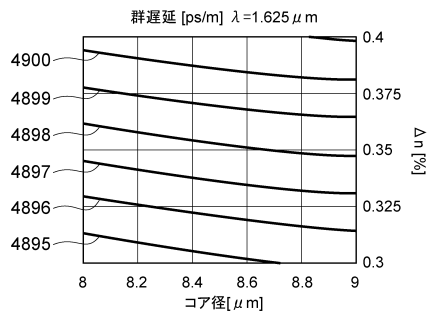
【 図 3 】



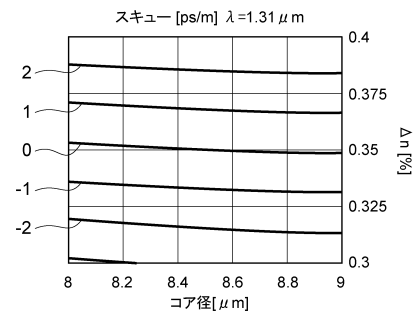
【 図 4 】



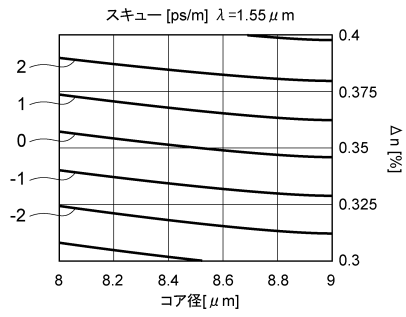
【 図 5 】



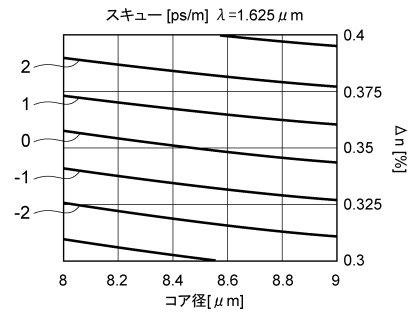
【 図 6 】



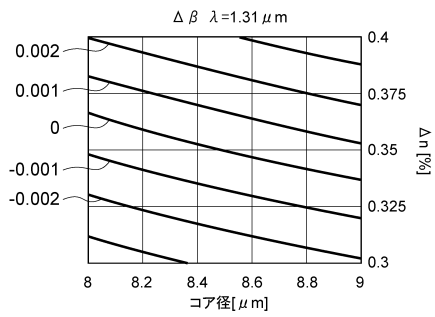
【 図 7 】



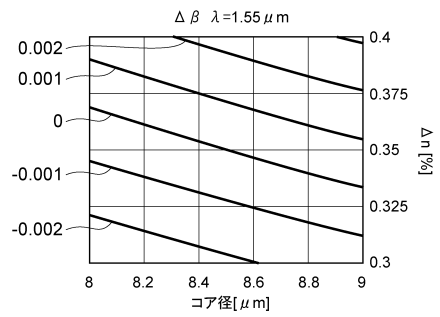
【 図 8 】



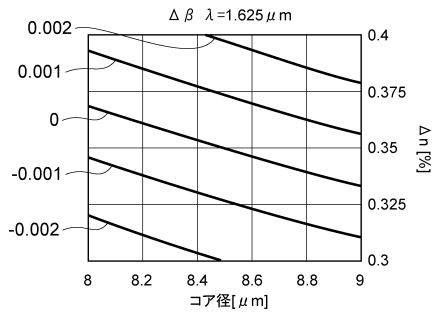
【 図 9 】



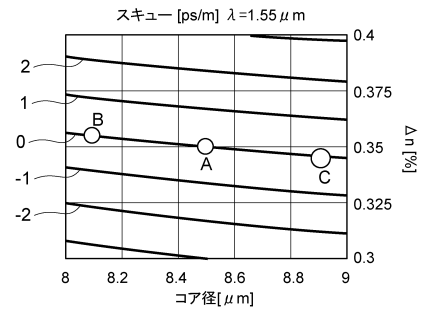
【 図 10 】



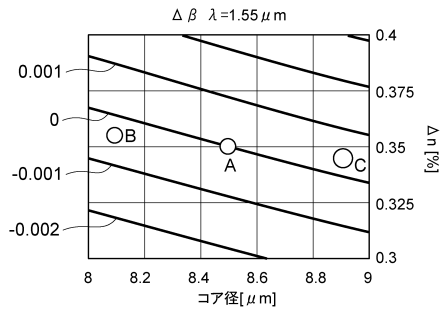
【図 1 1】



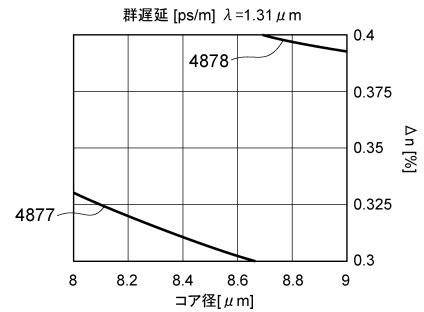
【図 1 2】



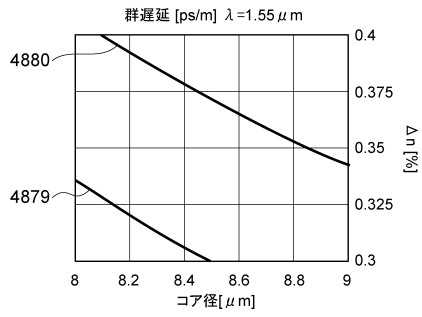
【図 1 3】



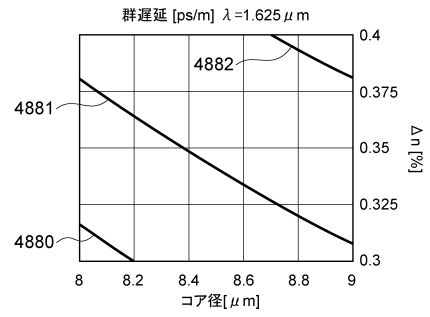
【図 1 4】



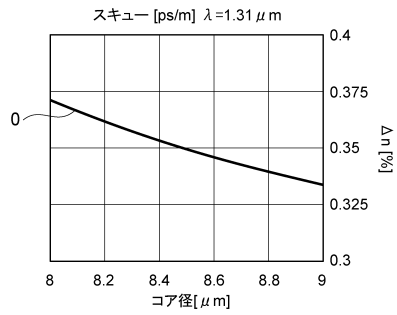
【図 15】



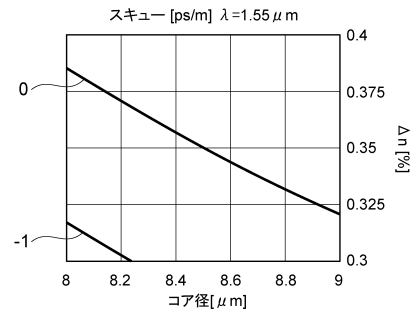
【図 16】



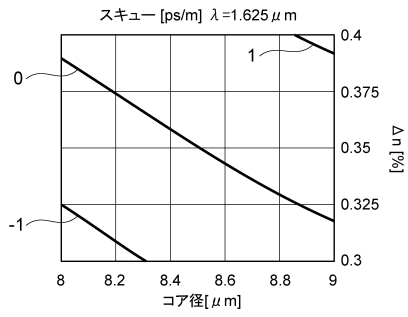
【図 17】



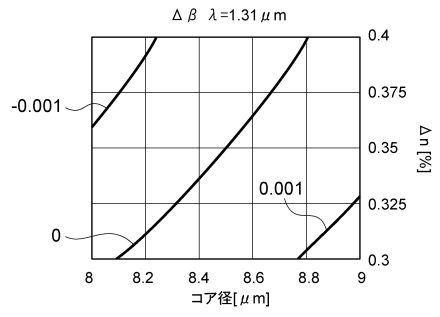
【図 18】



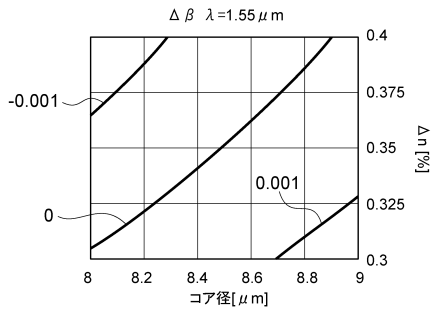
【図19】



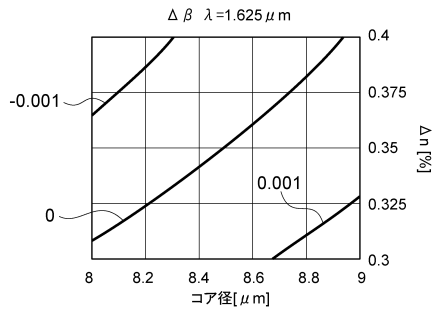
【図20】



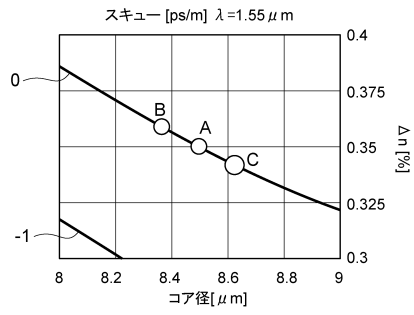
【図21】



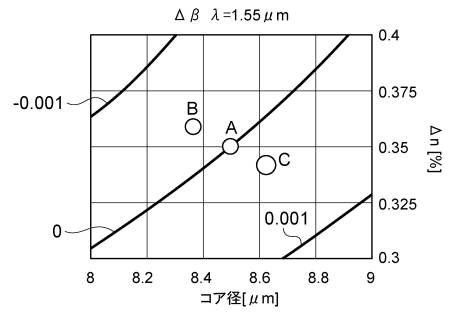
【図22】



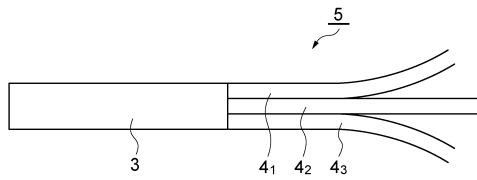
【図 2 3】



【図 2 4】



【図 2 5】



フロントページの続き

- (72)発明者 永島 拓志
神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電気工業株式会社横浜製作所内
- (72)発明者 笹岡 英資
神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電気工業株式会社横浜製作所内

審査官 奥村 政人

- (56)参考文献 国際公開第2010/038863(WO, A1)
特開2011-170336(JP, A)
特開2011-170099(JP, A)
特開2010-286661(JP, A)
特開平11-295569(JP, A)
国際公開第2013/021697(WO, A1)
特開平03-130724(JP, A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G02B 6/00 - 6/54