

(19) 日本国特許庁(JP)

## (12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5887997号  
(P5887997)

(45) 発行日 平成28年3月16日(2016.3.16)

(24) 登録日 平成28年2月26日(2016.2.26)

(51) Int.Cl.

G01M 11/02 (2006.01)

F 1

G01M 11/02

F

請求項の数 7 (全 17 頁)

(21) 出願番号	特願2012-40544 (P2012-40544)
(22) 出願日	平成24年2月27日(2012.2.27)
(65) 公開番号	特開2013-130558 (P2013-130558A)
(43) 公開日	平成25年7月4日(2013.7.4)
審査請求日	平成27年1月16日(2015.1.16)
(31) 優先権主張番号	特願2011-40523 (P2011-40523)
(32) 優先日	平成23年2月25日(2011.2.25)
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)
(31) 優先権主張番号	特願2011-255359 (P2011-255359)
(32) 優先日	平成23年11月22日(2011.11.22)
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)

(出願人による申告) 平成23年度、独立行政法人情報通信研究機構「高度通信・放送研究開発委託研究／革新的光ファイバ技術の研究開発」、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願

(73) 特許権者	000002130 住友電気工業株式会社 大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号
(74) 代理人	100088155 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
(72) 発明者	林 哲也 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 森口 正治

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】マルチコア光ファイバのコア間クロストークの測定方法

## (57) 【特許請求の範囲】

## 【請求項1】

特定の波長の光を入射した場合のマルチコア光ファイバのコア間クロストークを測定する方法であって、

前記マルチコア光ファイバに対して前記特定の波長を含む一定の範囲で入射光の波長を変化させながら、当該マルチコア光ファイバのコア間クロストークを測定することで、各波長に対応するクロストーク値の集合を取得し、

前記クロストーク値の集合を母集団として、コア間クロストークの統計学的分布を得ることにより、前記特定の波長におけるコア間クロストークの統計学的分布における平均値、中央値、最頻値、分位数及び分散からなる群から選ばれる値を求める

ことを特徴とする、マルチコア光ファイバのコア間クロストークの測定方法。

## 【請求項2】

前記特定の波長を $\lambda_0$ とし、前記 $\lambda_0$ を含む前記一定の範囲を示す波長掃引幅 $\Delta\lambda_{range}$ において、

前記クロストークの統計学的分布の平均値の波長依存性を $S$ とし、前記 $\lambda_0$ におけるコア間クロストークの統計学的分布の平均値の波長に依存した変化である $S_{range}$ の絶対値が4.6dB以下になる範囲のクロストーク値を用いて、前記 $\lambda_0$ におけるコア間クロストークの統計学的分布における平均値、中央値、最頻値、分位数及び分散からなる群から選ばれる値を求める

ことを特徴とする、請求項1記載のマルチコア光ファイバのコア間クロストークの測定

10

20

方法。

**【請求項 3】**

前記特定の波長を  $\lambda_0$  とし、前記一定の範囲は  $\lambda_0 - \Delta_{dev}$  から  $\lambda_0 + \Delta_{dev}$  とし、前記クロストークの統計学的分布の平均値の波長依存性を  $S$  とし、前記測定によって得られた、前記コア間クロストークの統計学的分布を、 $x$  を確率密度関数で慣用的に用いられる確率変数とする次の式で表される確率密度関数  $f(x)$  :

**【数 1】**

$$f(x) = \begin{cases} \frac{10}{\ln 10} \frac{1}{2S\lambda_{dev}} \left[ \left( \frac{1}{x} + \frac{1}{2\sigma^2 10^{-\frac{S\lambda_{dev}}{10}}} \right) \exp\left(-\frac{x}{2\sigma^2 10^{-\frac{S\lambda_{dev}}{10}}}\right) - \left( \frac{1}{x} + \frac{1}{2\sigma^2 10^{-\frac{S\lambda_{dev}}{10}}} \right) \exp\left(-\frac{x}{2\sigma^2 10^{-\frac{S\lambda_{dev}}{10}}}\right) \right] & (x > 0) \\ 0 & (x = 0) \end{cases} \quad 10$$

で  $\lambda^2$  を変数としてフィッティングすることにより、前記特定の波長におけるコア間クロストークの統計学的分布における平均値すなわち  $4\lambda^2$ 、中央値、最頻値、分位数及び分散からなる群から選ばれる値を求める

ことを特徴とする、請求項 1 記載のマルチコア光ファイバのコア間クロストークの測定方法。

**【請求項 4】**

前記母集団に含まれる前記クロストーク値の個数は、少なくとも 130 個以上である

ことを特徴とする、請求項 1 ~ 3 のいずれか一項に記載のマルチコア光ファイバのコア間クロストークの測定方法。 20

**【請求項 5】**

前記一定の範囲を示す波長掃引幅を  $\lambda_{range}$  とした際に、前記波長掃引幅  $\lambda_{range}$  は、少なくとも 5.2 nm 以上である

ことを特徴とする、請求項 1 ~ 4 のいずれか一項に記載のマルチコア光ファイバのコア間クロストークの測定方法。

**【請求項 6】**

特定の波長の光を入射した場合のマルチコア光ファイバのコア間クロストークを測定する方法であって、

前記マルチコア光ファイバへの入射光の偏波状態を変化させながら、当該マルチコア光ファイバのコア間クロストークを測定することで、入射光の各偏波状態に対応するクロストーク値の集合を取得し、 30

前記クロストーク値の集合を母集団として、コア間クロストークの統計学的分布を得ることにより、前記特定の波長におけるコア間クロストークの統計学的分布における平均値、中央値、最頻値、分位数及び分散からなる群から選ばれる値を求める

ことを特徴とする、マルチコア光ファイバのコア間クロストークの測定方法。

**【請求項 7】**

前記クロストーク値の集合は、前記入射光の偏波状態をポアンカレ球上で一様に分布する様に変化させながら取得される

ことを特徴とする、請求項 6 記載のマルチコア光ファイバのコア間クロストークの測定方法。 40

**【発明の詳細な説明】**

**【技術分野】**

**【0001】**

本発明は、マルチコア光ファイバのコア間クロストークの測定方法に関する。

**【背景技術】**

**【0002】**

近年、複数のコアを有するマルチコア光ファイバが盛んに研究されている。マルチコア光ファイバは、例えば、長手方向に垂直な断面において複数のコアが二次元状に分散配置された構成を有し、この複数のコアの間でのクロストークが発生することが知られている

。例えば、以下の非特許文献 1 には、マルチコア光ファイバのコア間クロストークは、統計的なバラツキを有する値であることが示されている。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0003】

【非特許文献 1】T. Hayashi et al., "Crosstalk Variation of Multi-Core Fibre due to Fibre Bend," in Proc. ECOC '10, We.8.F.6(2010)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

発明者は上述の従来技術を検討した結果、以下のような課題を発見した。すなわち、マルチコア光ファイバのコア間クロストークの変化は、コア間の等価的な実効屈折率（光ファイバの曲げを考慮して直線導波路に換算した実効屈折率）が等しくなる等価実効屈折率差の零点で起きていて、零点でのクロストークの変化は零点周辺でのコア間の位相差に依存することが分かった。したがって、コア間クロストークの統計学的分布を得るために、零点周辺でのコア間の位相差を変化させてクロストークを測定する必要がある。コア間クロストークの統計学的分布を調べることを目的として、従来、コア間の位相差を変更するために光ファイバの巻き替えを行い、その上でコア間クロストークを測定することを繰り返す必要があったため、コア間クロストークの統計学的分布を得るための作業量は膨大であった。

10

【0005】

本発明は上記を鑑みてなされたものであり、より簡易な方法でコア間クロストークの特性を分析することができるマルチコア光ファイバのコア間クロストークの測定方法の提供を目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0006】

本発明に係るマルチコア光ファイバのコア間クロストークの測定方法は、特定の波長の光を入射した場合のマルチコア光ファイバのコア間クロストークを測定する。上記目的を達成するため、本発明に係るマルチコア光ファイバのコア間クロストークの測定方法は、コア間クロストーク値の取得工程と、コア間クロストークの統計学的分布に関する特定数値を求める数値特定工程を備える。取得工程では、マルチコア光ファイバに対して特定の波長を含む一定の範囲で入射光の波長を変化させながら、当該マルチコア光ファイバのコア間クロストークを測定することで、各波長に対応するクロストーク値の集合が取得されるか、又は、マルチコア光ファイバへの入射光の偏波状態を変化させながら、当該マルチコア光ファイバのコア間クロストークを測定することで、入射光の各偏波状態に対応するクロストーク値の集合が取得される。数値特定工程では、取得工程で取得されたクロストーク値の集合を母集団として、コア間クロストークの統計学的分布を得ることにより、特定の波長におけるコア間クロストークの統計学的分布における平均値、中央値、最頻値、分位数及び分散からなる群から選ばれる値が求められる

30

【0007】

上記目的を達成するため、本発明に係るマルチコア光ファイバのコア間クロストークの測定方法は、第1態様として、特定の波長の光を入射した場合のマルチコア光ファイバのコア間クロストークを測定する方法であって、マルチコア光ファイバに対して特定の波長を含む一定の範囲で入射光の波長を変化させながら、当該マルチコア光ファイバのコア間クロストークを測定することで、各波長に対応するクロストーク値の集合を取得し、クロストーク値の集合を母集団として、コア間クロストークの統計学的分布を得ることにより、特定の波長におけるコア間クロストークの統計学的分布における平均値、中央値、最頻値、分位数及び分散からなる群から選ばれる値を求める特徴とする。

40

【0008】

上記第1態様によれば、マルチコア光ファイバに対して特定の波長を含む一定の範囲で

50

入射光の波長を変化させながら当該マルチコア光ファイバのコア間クロストークを測定することで、コア間クロストークの統計学的分布を得ることができ、マルチコア光ファイバを巻き直して零点周辺でのコア間の位相差を変更させてクロストークを測定する必要がない。よって、より簡易な方法でコア間クロストークの特性を分析することができる。

## 【0009】

上記作用を効果的に奏する構成として（第1態様に適用可能な第2態様として）、具体的には、特定の波長を $\lambda_0$ とし、一定の範囲を示す波長掃引幅を $\text{range}$ とし、クロストークの統計学的分布の平均値の波長依存性を $S$ とし、測定によって得られた、波長 $\lambda$ とクロストーク値との関係を、次の式：

## 【数1】

$$f_{lin}(\lambda) = XT_{lin} \cdot 10^{\frac{S(\lambda-\lambda_0)}{10}}$$

10

で近似し、または、

測定により得られた、波長 $\lambda$ とクロストークのデシベル値との関係を、次の式：

## 【数2】

$$f_{dB}(\lambda) = XT_{dB} + S(\lambda - \lambda_0)$$

20

で近似した際に、 $S$ の絶対値が4.6 dB以下になる範囲のクロストーク値を用いて、特定の波長におけるコア間クロストークの統計学的分布における平均値、中央値、最頻値、分位数及び分散からなる群から選ばれる値を求める態様とすることができる。

## 【0010】

また、上記作用を効果的に奏する他の構成として（第1及び第2態様のうち少なくともいずれかに適用可能な第3態様として）、具体的に、特定の波長を $\lambda_0$ とし、一定の範囲は $\lambda_0 - \text{dev}$ から $\lambda_0 + \text{dev}$ とし、クロストークの統計学的分布の平均値の波長依存性を $S$ とし、上記測定によって得られた、コア間クロストークの統計学的分布を、次の式：

## 【数3】

$$f(x) = \begin{cases} \frac{10}{\ln 10} \frac{1}{2S\lambda_{dev}} \left[ \left( \frac{1}{x} + \frac{1}{2\sigma^2 10^{\frac{S\lambda_{dev}}{10}}} \right) \exp\left(-\frac{x}{2\sigma^2 10^{\frac{S\lambda_{dev}}{10}}}\right) - \left( \frac{1}{x} + \frac{1}{2\sigma^2 10^{\frac{-S\lambda_{dev}}{10}}} \right) \exp\left(-\frac{x}{2\sigma^2 10^{\frac{-S\lambda_{dev}}{10}}}\right) \right] & (x > 0) \\ 0 & (x = 0) \end{cases}$$

30

で $x^2$ を変数としてフィッティングすることにより、特定の波長におけるコア間クロストークの統計学的分布における平均値すなわち $x^2$ 、中央値、最頻値、分位数及び分散からなる群から選ばれる値を求める態様が挙げられる。

## 【0011】

また、第1～第3態様のうち少なくともいずれかに適用可能な第4態様として、前記母集団に含まれる前記クロストーク値の個数が少なくとも130個以上である態様とすることができる。

40

## 【0012】

また、第1～第4態様のうち少なくともいずれかに適用可能な第5態様として、前記一定の範囲を示す波長掃引幅を $\text{range}$ とした際に、前記波長掃引幅 $\text{range}$ が少なくとも5.2 nm以上である態様とすることもできる。

## 【0013】

また、本発明に係るマルチコア光ファイバのコア間クロストークの測定方法は、第6態様として、特定の波長の光を入射した場合のマルチコア光ファイバのコア間クロストーク

50

を測定する方法であって、マルチコア光ファイバへの入射光の偏波状態を変化させながら、当該マルチコア光ファイバのコア間クロストークを測定することで、入射光の各偏波状態に対応するクロストーク値の集合を取得し、クロストーク値の集合を母集団として、コア間クロストークの統計学的分布を得ることにより、特定の波長におけるコア間クロストークの統計学的分布における平均値、中央値、最頻値、分位数及び分散からなる群から選ばれる値を求める特徴とする。

#### 【0014】

上記第6態様によれば、マルチコア光ファイバへの入射光の偏波状態を変化させながら当該マルチコア光ファイバのコア間クロストークを測定することで、コア間クロストークの統計学的分布を得ることができ、マルチコア光ファイバを巻き直して零点周辺でのコア間の位相差を変更させてクロストークを測定する必要がない。よって、より簡易な方法でコア間クロストークの特性を分析することができる。10

#### 【0015】

ここで、上記作用を効果的に奏する構成として（第6態様に適用可能な第7態様として）、具体的には、入射光の偏波状態を、ポアンカレ球上で一様に分布する様に変化させながら、クロストーク値の集合を取得する態様が挙げられる。

#### 【発明の効果】

#### 【0016】

本発明によれば、より簡易な方法でコア間クロストークの特性を分析することができるマルチコア光ファイバのコア間クロストークの測定方法が提供され得る。20

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【0017】

【図1】本発明に係るマルチコア光ファイバのコア間クロストークの測定方法を実施するため装置構成の一例を示す図である。

【図2】本発明に係るマルチコア光ファイバのコア間クロストークの測定方法を実施するため装置構成の他の例を示す図である。

#### 【図3】零点におけるコア間位相差を説明する図である。

#### 【図4】波長を変化させた際のクロストーク分布の平均を示した図である。

【図5】図5は、波長を変化させた際のクロストーク分布の平均値の変化と測定したクロストーク分布の平均値の誤差との対応を示した図である。30

【図6】波長掃引範囲でのクロストーク分布の平均値の変化量を変化させた場合の確率分布形状の違いを説明する図である。

#### 【図7】マルチコア光ファイバを用いて測定した際の結果を示す図である。

#### 【図8】図7に示した測定結果を確率分布としてプロットした結果を示す図である。

#### 【図9】サンプル値数Nを変えた場合のXT平均値の変化を示した図である。

#### 【図10】rangeを変えた場合のXT平均値の変化を示した図である。

#### 【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。本実施形態では、まず従来のクロストークに関して問題点を示すと共に、その後、本発明の実施形態について説明を行う。なお、図面の説明においては同一要素には同一符号を付し、重複する説明を省略する。40

#### 【0019】

まず、マルチコア光ファイバのクロストークについて説明する。マルチコア光ファイバとは、長手方向に垂直な断面において複数のコアが二次元状に分散配置された構成を有しているものである。ここで、ファイバの曲げや捻れを考慮に入れた場合に、コアmからコアnへのクロストークは、単一偏波の場合を考えると、モード結合方程式で、次の式(1)で示すことができる。

## 【数4】

$$\frac{\partial A_n(z)}{\partial z} = -j\kappa_{nm} A_m(z) \exp(-j\{\phi_m(z) - \phi_n(z)\}) \quad (1)$$

ただし、 $A_n$ はコアnの複素電界振幅で、 $\kappa_{nm}$ はコアmからコアnへの結合係数、 $\phi$ は次の数式(2)に示すものであり、 $\beta$ は各コアの伝搬定数であり、 $D_{nm}$ はコアnとコアmの中心間距離、Rはファイバの曲げ半径、 $\theta_n$ はコアmを原点としてコアnがファイバの曲げ径方向と為す角度である。

## 【数5】

$$\begin{cases} \phi_m(z) = \beta_m z \\ \phi_n(z) = \int_0^z \beta_n \left\{ 1 + \frac{D_{nm}}{R} \cos \theta_n(z') \right\} dz' \end{cases} \quad (2)$$

## 【0020】

ここで上記数式(2)に含まれる数式(3)は、コアmを基準として曲がり導波路を直線導波路に換算した、コアnの等価的な伝搬定数(等価伝搬定数)である。ここでは、コアmが基準となっているのでコアmの等価伝搬定数は $\beta_m$ である。

## 【数6】

$$\beta_n \left\{ 1 + \frac{D_{nm}}{R} \cos \theta_n(z') \right\} \quad (3)$$

## 【0021】

マルチコア光ファイバに含まれる2つのコアの間では、等価伝搬定数が等しくなる点(等価伝搬定数差の零点)で、支配的なクロストークの変化が生じるので、ファイバ長手のクロストーク変化は、次の数式(4)に示すようにモデル化することができる。

## 【数7】

$$A_n(n_{zero} + 1) = A_n(n_{zero}) + K \exp(j\phi_{random}) A_m(n_{zero}) \quad (4)$$

## 【0022】

なお、 $A_n(n_{zero})$ は $n_{zero}$ 番目の等価伝搬定数差の零点後のコアnの複素電界振幅で、 $K$ は支配的なクロストーク変化の係数で、 $\phi_{random}$ は各零点でのコア間の位相差に相当するパラメータである。なお、 $\phi_{random}$ は、実際の光ファイバでは曲げ径や捩れ方がわずかに変化するだけで、大きく変化してしまうので、ランダムな値として扱っている。

## 【0023】

ここで、次の数式(5)は、それぞれ、 $\sigma^2 = \langle n^2 \rangle / 2$ の分散を持つ確率分布にしたがう。

## 【数8】

$$\Re\{K \exp(j\phi_{random}) A_m(n_{zero})\}, \quad \Im\{K \exp(j\phi_{random}) A_m(n_{zero})\} \quad (5)$$

## 【0024】

したがって、中心極限定理により、 $n_{zero}$ が十分大きければ、次の数式(6)に示す値は、それぞれ、数式(7)をもつ正規分布を確率分布として分布する。

## 【数9】

$$\begin{aligned} &\Re\{A_n(n_{zero})\} \\ &\Im\{A_n(n_{zero})\} \end{aligned} \quad (6)$$

10

20

30

40

## 【数10】

$$\sigma^2 = \frac{K^2}{2} \sum_{k=0}^{n_{zero}} |A_m(k)|^2 \quad (7)$$

## 【0025】

ここで、コア間クロストークが数式(8)で示すように十分に小さく、マルチコア光ファイバが長手方向において一定の捩れレートで捻られている場合は、数式(9)の関係が導かれる。

## 【数11】

$$A_m(n_{zero}) \approx 1 \quad (8)$$

10

## 【数12】

$$\sigma^2 = \frac{\kappa_{nm}^2}{\beta_n} \frac{R}{D_{nm}} L_F \quad (9)$$

## 【0026】

このとき、数式(6)の分布の分散は、マルチコア光ファイバの捩れレートに依存せず、結合係数、伝搬定数、ファイバの曲げ半径、コアの中心間距離、ファイバ長に依存することが分かる。ただし、実際には、マルチコア光ファイバには、2つの偏波モードがあるので、数式(7)、(9)は、それぞれ次の数式(10)、(11)に変換することができる。

20

## 【数13】

$$\sigma^2 = \frac{K^2}{4} \sum_{k=0}^{n_{zero}} |A_m(k)|^2 \quad (10)$$

## 【数14】

$$\sigma^2 = \frac{1}{2} \frac{\kappa_{nm}^2}{\beta_n} \frac{R}{D_{nm}} L_F \quad (11)$$

30

このとき、 $|A_n(n_{zero})|^2 / \sigma^2$  は、自由度4のカイ二乗分布で分布する。

## 【0027】

また、 $|A_n(n_{zero})|^2$  は、 $1 / \sigma^2$  でスケーリングされた自由度4のカイ二乗分布である数式(12)

## 【数15】

$$f(x) = \frac{x}{4\sigma^4} \exp\left(-\frac{x}{2\sigma^2}\right) \quad (12)$$

40

で分布し、分布の平均値 $X_T \mu$  は、 $4 / \sigma^2$  となる。

## 【0028】

ここで、実際にクロストークを測定して、上記の分散を持つ統計学的分布を得るために、実ファイバに於いて、各零点でのコア間の位相差 $\tau_{random}$ を測定毎にランダムにばらつかせる必要があることが分かる。 $\tau_{random}$ は既に述べた通り、マルチコア光ファイバの僅かな曲げ径や捩れ方の変化により大きく変わるので、従来は測定毎にマルチコア光ファイバを巻き替えることで、マルチコア光ファイバの各位置の曲げ径や捩れ方をばらつかせて、 $\tau_{random}$ をばらつかせていて、クロストークのヒストグラムを得ることで、クロストークの統計学的分布を取得していた。

## 【0029】

50

しかし、このマルチコア光ファイバの巻き替えには時間と人手が必要で、ヒストグラムのサンプル数を大きくすることは容易ではなく、作業量の増大が問題となっていた。

#### 【0030】

そこで、本実施形態では、マルチコア光ファイバの巻き替えを繰り返してクロストークを測定することを必要とせず、クロストークの統計学的分布のヒストグラムを取得する方法として、クロストークの波長特性を測定する手法を考案した。

#### 【0031】

図1は、本発明に係るマルチコア光ファイバのコア間クロストークの測定方法を実施するための具体的な装置構成の一例を示す図である。また、図2は、本発明に係るマルチコア光ファイバのコア間クロストークの測定方法を実施するための具体的な装置構成の他の例を示す図である。なお、図2には、送光部200Aのみ開示されているが、当該送光部200Aが適用される測定装置の他の構成については、図1の装置構成と同じである。10

#### 【0032】

図1に示された測定装置は、測定対象であるマルチコア光ファイバ100への光入射状態及び光出射状態を機械的に調節するための調節機構と、測定光を出射する送光部200、クロストーク光を受光する受光部300、及び判定部400を備える。

#### 【0033】

調節機構は、測定対象であるマルチコア光ファイバ100の入射端100aが固定される送光側ステージ500A、マルチコア光ファイバ100の出射端100bが固定される受光側ステージ500B、これらステージ500A、500Bの姿勢制御を個別に行うためのステージ駆動部600を備える。送光部200は、光源210と、光源210から出射される測定光の波長を所定範囲内で掃引させるための光源駆動部220を備える。光源210から出力された測定光は送光用光ファイバ701に導かれ、この送光用光ファイバ701の出射端701aは送光側ステージ500Aに固定されている。受光部300は、入射端702aが受光側ステージ500Bに固定された受光用光ファイバ702を介して、マルチコア光ファイバ100の出射端100bから出射されたクロストーク光を受光するための受光素子310(PD)を備える。判定部400は、ステージ駆動部600及び光源駆動部220の駆動制御、及び、PD310からの測定値の取得を行い、本実施形態に係る測定方法を実施する制御部410と、各種測定データ等を格納するためのメモリ420を備える。20

#### 【0034】

送光側ステージ500Aは、送光用光ファイバ701の出射端701aを保持した状態で矢印S1で示された水平方向に沿って移動可能な台座501Aと、マルチコア光ファイバ100の入射端100aを保持した状態で矢印S1に直交する矢印S2(S1)で示された垂直方向に移動可能な台座502Aを備える。ステージ駆動部600は、台座501Aを所定量だけ水平方向に移動させ、また、台座502Aを所定量だけ垂直方向に移動させることにより、例えば、送光用光ファイバ701の出射端701aと、マルチコア光ファイバ100の入射端100a上に配置されたコアmとを光学的に接続させる。

#### 【0035】

一方、受光側ステージ500Bは、受光用光ファイバ702の入射端702aを保持した状態で矢印S1(S2)で示された水平方向に沿って移動可能な台座501Bと、マルチコア光ファイバ100の出射端100bを保持した状態で矢印S1に直交する矢印S2(S1)で示された垂直方向に移動可能な台座502Bを備える。ステージ駆動部600は、制御部410からの指示信号に従って、台座501Bを所定量だけ水平方向に移動させ、また、台座502Bを所定量だけ垂直方向に移動させることにより、例えば、受光用光ファイバ702の入射端702aと、マルチコア光ファイバ100の出射端100b上に配置されたコアnとを光学的に接続させる。なお、調節機構としては、図1に示されたステージ駆動部600等を含む構成には限定されず、例えば、各コアに個別に光を入出力可能なカップリングデバイス(空間光学系、光ファイバカプラなど)が適用されてもよく、その場合、送光側ステージ500Aや受光側ステージ500Bによらず、手動で力40

10

20

30

40

50

ツプリングデバイスとファイバ701、702を接続しても良い。このような調節機構により、測定対象であるマルチコア光ファイバ100の入射端100a上に配置された複数コアのうち、送光用光ファイバ701の出射端701aを介して測定光を入射させるコアの選択と、マルチコア光ファイバ100の出射端100b上に配置された複数コアのうち、受光用光ファイバ702の入射端702aを介してクロストーク光を受光するコアの選択が可能になる。制御部410は、測定光の波長又は偏光状態を変化させながら入射側コアmと出射側コアnが任意に選択されていくことにより、コア間クロストーク値の集合の取得が可能になる。

#### 【0036】

上述の送光部200は、波長を変化させながら測定光を出射する光源手段として機能しているが、この送光部200に換えて、測定光の偏光状態を変化させながら測定光を出射する送光部200Aが図1に示された測定装置に適用されても良い。なお、図2の送光部200Aは、光源210の他、該光源210から出射された光の偏光状態を所望の状態に変更するための偏光素子230と、制御部430からの指示に従って偏光素子230の姿勢制御を行う駆動部240を備える。光源210から出射された光のうち偏光素子230を通過した光が測定光として送光用光ファイバ701に導かれる。

#### 【0037】

式(2)は、 $\phi_m(z) = 2\pi/\lambda \cdot n_{eff,m} z$  の関係を利用して、次の式(13)に書き換えることができる。

#### 【数16】

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_m(z) = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff,m} z \\ \phi_n(z) = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff,n} \int_0^z \left\{ 1 + \frac{D_{nm}}{R} \cos \theta_n(z') \right\} dz' \end{array} \right. \quad (13)$$

#### 【0038】

ここで、 $n_n(z) = z$ 、 $n_{eff,f}$ 、 $n_m = n_{eff,f}$ 、 $n_n$  と仮定すると、マルチコア光ファイバのコア間の位相差は、次の式(14)のように表すことができる。

#### 【数17】

$$\begin{aligned} \delta\phi_{nm}(z, \lambda) &= \phi_m(z) - \phi_n(z) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff,m} z - \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff,n} \left( z + \frac{D_{nm}}{\gamma R} \sin \gamma z \right) \\ &= -\frac{2\pi}{\lambda} n_{eff,n} \frac{D_{nm}}{\gamma R} \sin \gamma z \end{aligned} \quad (14)$$

#### 【0039】

このとき、上記の仮定を用いる場合、等価伝搬定数差の零点は  $z = (n_{zero} - 1/2)$  となるので、上記の式(14)は次の式(15)に書き換えることができる。

#### 【数18】

$$\delta\phi_{nm}(\lambda) = \pm \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff,n} \frac{D_{nm}}{\gamma R} \quad (15)$$

と表すことができる。

#### 【0040】

ここで、 $n_{eff,f}$  を  $1.444$ 、 $n_n$  を  $2.01$  [rad/m]、 $D_{nm}$  を  $45 \mu m$ 、 $R$  を  $140 mm$  とした場合の波長と  $\delta\phi_{nm}(\lambda)$  の関係の例を示したもののが図3である。図3に示すように、 $10 nm$  の波長範囲において、零点におけるコア間位相差は3回転ほど変化している。このように、測定に用いる波長を変えることで十分な位相差の変化を生じさせることができると分かる。

10

20

30

40

50

## 【0041】

なお、上記の説明では、説明を簡単にするため、Rを一定とし、 $n(z) = z$ とする条件を用いたことから、等価伝搬定数差の零点での位相差は式(15)の2パターンに収束している。しかしながら、実際のマルチコア光ファイバでは、Rは長手方向に沿って理想的な一定ではなく、捩れレートも一定ではない。このため、波長の変化により、ファイバ長手方向のそれぞれの等価伝搬定数差の零点で、コア間の位相差が変化する。したがって、クロストークの値についても、統計学的分布にしたがってばらついた値をとる。

## 【0042】

ここで、マルチコア光ファイバに対して前記特定の波長を含む一定の範囲で入射光の波長を変化させながら(波長掃引)、当該マルチコア光ファイバのコア間クロストークを測定し、この結果を用いてクロストークの統計学的分布を得る上で、問題になり得るのが、結合係数の波長依存性である。

10

## 【0043】

一例としてマルチコア光ファイバの結合係数の波長依存性に関して、クロストーク分布の平均値 $X T_\mu$ と波長との関係を図4に示す。

## 【0044】

$X T_\mu$ の対数表示は波長に対してほぼ線形であることが分かる。本ファイバは、結合係数の波長依存性の大きなファイバであるが、それでも、波長に対する $10 \cdot \log_{10} X T_\mu$ の傾きは、約 $0.14 \text{ dB/nm}$ 以下におさまっていることが図4から分かる。

20

## 【0045】

ここで、基準波長 $\lambda_0$ における $X T_\mu$ を $X T_{\mu, \lambda_0}$ とし、クロストーク分布の平均値の対数表示は波長に対して線形だとすると、次の式(16)と表すことができる。なお、ここでSは $X T_\mu$ の波長に対する係数である。

## 【数19】

$$X T_{\mu, \lambda_0} \cdot 10^{\frac{S(\lambda - \lambda_0)}{10}} \quad (16)$$

## 【0046】

このとき、基準波長 $\lambda_0$ から $\pm S_{\text{dev}}$ の波長範囲の入射光を照射する場合、波長掃引幅 $\text{range}$ は $2 S_{\text{dev}}$ であり、 $X T_\mu$ は次の式(17)の範囲で変化する。

30

## 【数20】

$$X T_{\mu, \lambda_0} \cdot 10^{\frac{S\lambda_{\text{dev}}}{10}} \leq X T_\mu \leq X T_{\mu, \lambda_0} \cdot 10^{\frac{-S\lambda_{\text{dev}}}{10}} \quad (17)$$

すなわち、 $X T_\mu$ は $\pm S_{\text{dev}}$ dBの範囲で変化する。

## 【0047】

このとき、波長掃引により測定したクロストーク分布の平均値 $X T_{\mu, \text{meas}}$ は、式(18)のように表すことができる。

## 【数21】

$$X T_{\mu, \text{meas}} = 4 \sigma_0^2 \frac{5 \left( 10^{\frac{S\lambda_{\text{dev}}}{10}} - 10^{-\frac{S\lambda_{\text{dev}}}{10}} \right)}{S \lambda_{\text{dev}} \ln 10} = X T_{\mu, \lambda_0} \frac{5 \left( 10^{\frac{S\lambda_{\text{dev}}}{10}} - 10^{-\frac{S\lambda_{\text{dev}}}{10}} \right)}{S \lambda_{\text{dev}} \ln 10} \quad (18)$$

40

## 【0048】

よって、波長掃引により測定したクロストーク分布の平均値 $X T_{\mu, \text{meas}}$ と、波長掃引の中心波長に於けるクロストーク分布の平均値 $X T_{\mu, \lambda_0}$ の差異は、 $S_{\text{dev}}$ に依存する。つまり、波長掃引を行った波長範囲の広さではなく、波長掃引範囲におけるクロストーク分布の平均値、あるいは結合係数の変化量に依存する。

## 【0049】

ここで、波長掃引範囲でのクロストーク分布の平均値の変化量 $S_{\text{range}} = S_{\text{dev}}$

50

$\epsilon_v$  と、 $X T_{\mu, \text{meas}}$  と  $X T_{\mu, 0}$  の差異のデシベル値との関係を図 5 に示す。クロストークの分布形状を考えると、この波長範囲でのクロストークの値は 20 dB 以上に渡りばらついているので、その平均値を求めた場合に、誤差 0.2 dB 以下とすることができるということは測定精度が高いことを示しており、波長掃引範囲における  $X T_{\mu}$  の変化が約 4.6 dB 以下であれば、十分な精度で、特定の波長  $0$  におけるクロストークの統計学的分布の平均値  $X T_{\mu, 0}$  の測定を行うことができる。また、同様に、統計学的分布における平均値、中央値、最頻値、分位数及び分散からなる群から選ばれる値を求めることが可能となる。

#### 【0050】

また、測定した波長とクロストークの関係を次の式 (19a) で近似するか、あるいは、測定した波長とクロストークのデシベル値の関係を式 (19b) で近似した場合に、 $2 S_{\text{dev}}$  が約 4.6 dB 以下であれば、十分な精度で、特定の波長  $0$  におけるクロストークの統計学的分布の平均値  $X T_{\mu, 0}$  の測定を行うことができる。  
10

#### 【数22】

$$f_{lin}(\lambda) = X T_{lin} \cdot 10^{\frac{S(\lambda - \lambda_0)}{10}} \quad (19a)$$

$$f_{dB}(\lambda) = X T_{dB} + S(\lambda - \lambda_0) \quad (19b)$$

#### 【0051】

また、クロストークの確率分布形状自体も、同様に  $2 S_{\text{dev}}$  が約 4.6 dB 以下であれば、 $2 S_{\text{dev}}$  が 0 dB の場合、つまり波長  $0$  での確率分布形状と十分一致する。図 6 では、 $2 S_{\text{dev}}$  の違いによる確率分布形状の違いを示す。 $2 S_{\text{dev}}$  の変化に応じて、確率分布形状が変化することがわかる。  
20

#### 【0052】

さらに、 $2 S_{\text{dev}}$  が約 4.6 dB より大きい場合でも、測定したクロストーク値を母集団として、確率密度分布を求め、次の式 (20) で表される確率密度関数でフィッティングすることで、 $X T_{\mu, 0}$ 、すなわち、基準波長  $0$  での  $X T_{\mu} = 4^{-2}$  を求めることもできる。

#### 【数23】

$$f(x) = \begin{cases} \frac{10}{\ln 10} \frac{1}{2S\lambda_{\text{dev}}} \left[ \left( \frac{1}{x} + \frac{1}{2\sigma^2 10^{\frac{S\lambda_{\text{dev}}}{10}}} \right) \exp \left( -\frac{x}{2\sigma^2 10^{\frac{S\lambda_{\text{dev}}}{10}}} \right) - \left( \frac{1}{x} + \frac{1}{2\sigma^2 10^{-\frac{S\lambda_{\text{dev}}}{10}}} \right) \exp \left( -\frac{x}{2\sigma^2 10^{-\frac{S\lambda_{\text{dev}}}{10}}} \right) \right] & (x > 0) \\ 0 & (x = 0) \end{cases}$$

(20)

30

#### 【0053】

ここで、実際に、特定の波長を含む一定の範囲で入射光の波長を変化させながら、当該マルチコア光ファイバのコア間クロストークを測定した結果を図 7 に示す。測定した波長範囲は 1620 ~ 1630 nm であり、この 10 nm の波長範囲で 2001 点の測定をしている。クロストークの値を確率分布としてプロットした結果を図 8 に示す。図 8 に示すように、その確率分布は確かに前述の通り、式 (12) に従うことが分かる。  
40

#### 【0054】

ここで、実測された XT スペクトルから、XT 平均値の測定バラツキが十分に小さくなる条件を検討する。

#### 【0055】

まず、 $\text{range}$  を 10 nm で固定し、サンプル値数 N を変えた場合の XT 平均値の  
50

変化の絶対値を図9に示す。図9に示す各系列は、中心コア#1と外周コア#2~7とのXTに関するデータで、各系列でそれぞれサンプル値数N=2001で測定したときのXT平均値を基準としている。図9中の実線は、中心コア#1と外周コア#2~7との各実測値に基づいたXT平均値であり、図9中の破線は、各実測値とXT平均値とのバラツキの上限を示す線である。ここで、XT平均値の変化の絶対値が1dB以下となるためには、およそN=130である必要があることが図9から分かる。同様に、XT平均値の変化の絶対値が0.5dB以下となるためにはおよそN=200、0.2dB以下となるためにはおよそN=300である必要があり、0.1dB以下となるためにはおよそN=380である必要があることが分かる。

## 【0056】

10

次に、rangeを変えた場合のXT平均値の変化を図10に示す。図10では、波長ステップを5pmとして測定したデータを用いている。rangeの変化に応じてNも変化するが、range=2nmにおけるNは401個であり、図9の結果に基づくと、Nの変化に起因するXT平均値の変化は0.1dB以下である。このとき、range=10nmでのXT平均値を基準とすると、XT平均値の変化の絶対値が0.5dB以下であるためには、およそrange=5.2nmである必要があり、0.2dB以下であるためにはおよそrange=8.8nmである必要があることが分かる。

## 【0057】

ここで、式(4)は、2つの偏波モードを考えた場合に次の式(21)として表すことができる。

20

## 【数24】

$$\begin{bmatrix} A_{n,x}(n_{zero}+1) \\ A_{n,y}(n_{zero}+1) \end{bmatrix} = T_n(n_{zero}) \begin{bmatrix} A_{n,x}(n_{zero}) \\ A_{n,y}(n_{zero}) \end{bmatrix} + K \exp(j\phi_{random}) T_m(n_{zero}) \begin{bmatrix} A_{m,x}(n_{zero}) \\ A_{m,y}(n_{zero}) \end{bmatrix} \quad (21)$$

と表すことができる。ここで、 $A_{n,x}(n_{zero})$ は、 $n_{zero}$ 番目の等価伝搬定数差の零点後のコアnの複素電界振幅のx軸偏波成分、 $A_{n,y}(n_{zero})$ はy軸偏波成分である。すなわち、次の式(22)でジョーンズベクトルとなっている。

## 【数25】

$$\begin{bmatrix} A_{n,x}(n_{zero}) \\ A_{n,y}(n_{zero}) \end{bmatrix} \quad (22)$$

30

でジョーンズベクトルとなっている。 $T_n(n_{zero})$ は $n_{zero}$ 番目の等価伝搬定数差の零点直後から $n_{zero}+1$ 番目の等価伝搬定数差の零点直前までのコアnのジョーンズ行列である。

## 【0058】

ここで、式(23)は、等しい分散の確率分布で分布する。

## 【数26】

$$\Re\{A_{n,x}(n_{zero})\}, \Im\{A_{n,x}(n_{zero})\}, \Re\{A_{n,y}(n_{zero})\}, \Im\{A_{n,y}(n_{zero})\} \quad (23)$$

40

## 【0059】

また、ジョーンズベクトルにジョーンズ行列を掛けても、偏波状態、すなわち、偏波の向きやx軸及びy軸の各偏波成分の位相が変わるだけで、式(23)の確率分布の分散は変わらない。各コアにおいてジョーンズ行列が異なるのは当然であり、また、各零点間のジョーンズ行列も実際のマルチコア光ファイアでは異なることが一般的である。ここで、ジョーンズ行列に掛けるジョーンズベクトルの偏波状態が変化すると、ジョーンズ行列とジョーンズベクトルの積として求められるジョーンズベクトルの偏波状態は勿論変化し、入力と出力のジョーンズベクトルの偏波状態の相対的な変化量も変わる。つまり、入力の偏波状態が変化すれば、入力と出力の間での偏波の向きやx軸及びy軸の各偏波成分の

50

位相の変化のし方も変わる。

【0060】

このことから、各零点におけるx軸及びy軸の各偏波成分のコアnとコアmとの間での位相差を、入力光の偏波状態を変えることができる。

【0061】

そこで、巻き替えを必要とせずにマルチコア光ファイバのコア間クロストークの統計学的分布のヒストグラムの取得法として、クロストークの偏波状態依存性を測定する手法を採用することが可能となる。

【0062】

ここでは、入力光の偏波状態が、ポアンカレ球上で十分一様に分布する様に、変化させながらクロストークの値の変化を測定すると、測定した値の統計学的分布が、先に説明したクロストーク分布となる。 10

【0063】

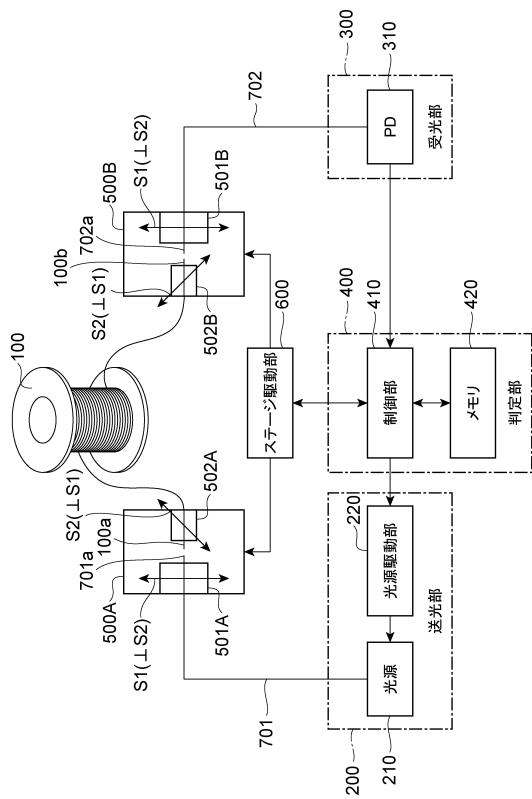
以上のように、本実施形態に係るマルチコア光ファイバのコア間クロストークの測定方法によれば、マルチコア光ファイバに対して特定の波長を含む一定の範囲で入射光の波長を変化させながら当該マルチコア光ファイバのコア間クロストークを測定することで、コア間クロストークの統計学的分布を得ることができる。また、マルチコア光ファイバへの入射光の偏波状態を変化させながら当該マルチコア光ファイバのコア間クロストークを測定することでも、コア間クロストークの統計学的分布を得ることができる。いずれの方法であっても、マルチコア光ファイバを巻き直して零点周辺でのコア間の位相差を変更させてクロストークを測定する必要がない。よって、より簡易な方法でコア間クロストークの特性を分析することができる。 20

【符号の説明】

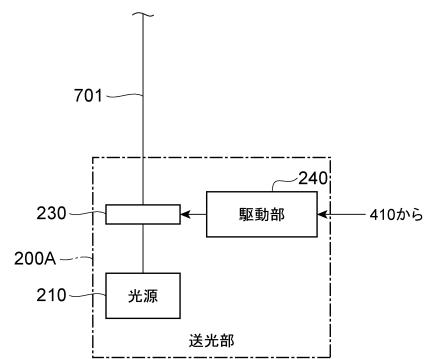
【0064】

100...マルチコア光ファイバ、200...送光部、300...受光部、400...判定部、  
701...送光用光ファイバ、702受光用光ファイバ。

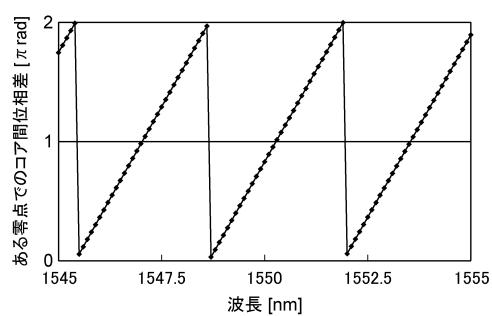
【図1】



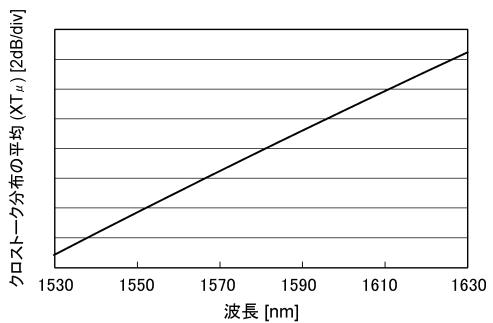
【図2】



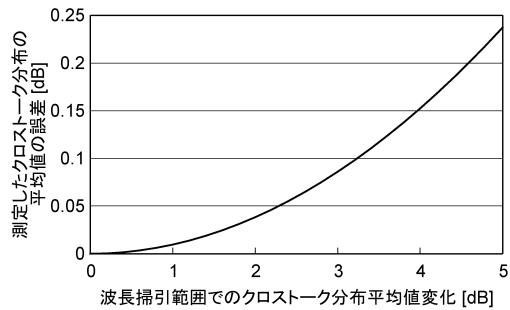
【図3】



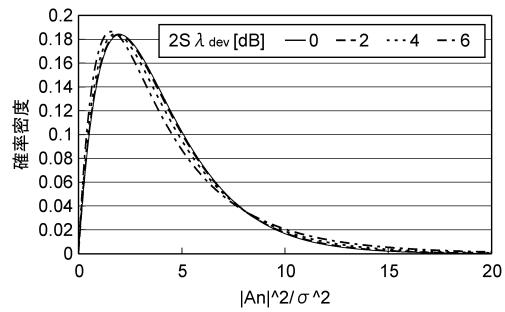
【図4】



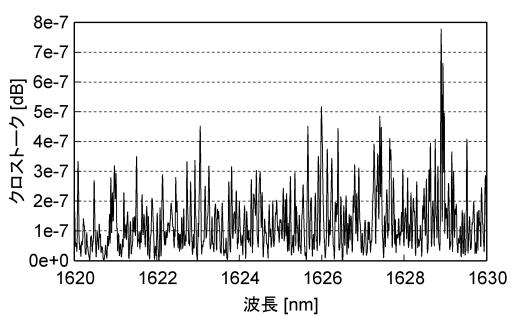
【図5】



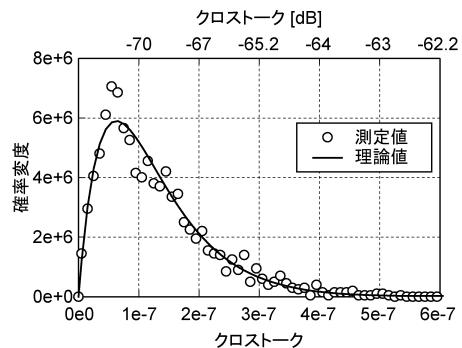
【図6】



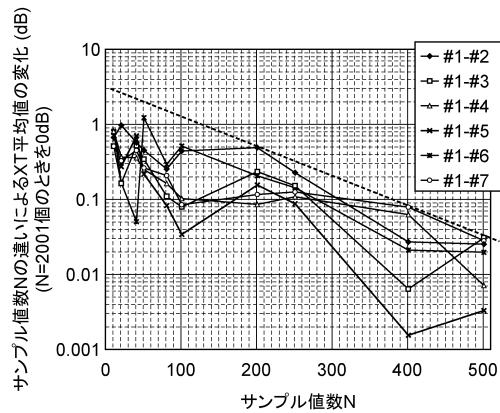
【図7】



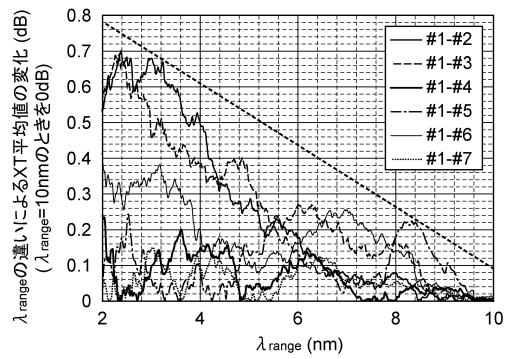
【図8】



【図9】



【図10】



---

フロントページの続き

(56)参考文献 特開2008-310042(JP,A)  
特開2009-118090(JP,A)  
特開2006-162464(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G 01 M 11/00 - 11/02