

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局

(43) 国際公開日  
2014年9月4日(04.09.2014)



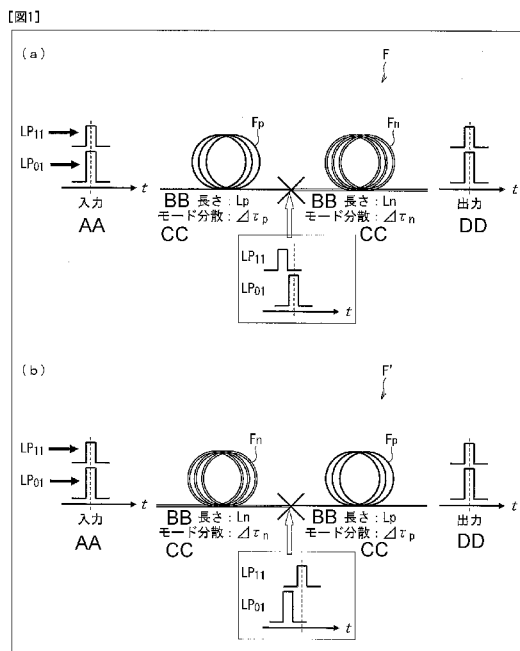
(10) 国際公開番号  
WO 2014/132763 A1

- (51) 国際特許分類:  
G02B 6/036 (2006.01) G02B 6/028 (2006.01)  
G02B 6/02 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2014/052693
- (22) 国際出願日: 2014年2月5日(05.02.2014)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:  
特願 2013-041253 2013年3月1日(01.03.2013) JP
- (71) 出願人: 株式会社フジクラ (FUJIKURA LTD.)  
[JP/JP]; 〒1358512 東京都江東区木場 1丁目5番  
1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 丸山 遼 (MARUYAMA, Ryo); 〒2858550  
千葉県佐倉市六崎 1 4 4 0 番地 株式会社フジ  
クラ佐倉事業所内 Chiba (JP). 桑木 伸夫  
(KUWAKI, Nobuo); 〒2858550 千葉県佐倉市六崎 1  
4 4 0 番地 株式会社フジクラ佐倉事業所内  
Chiba (JP). 松尾 昌一郎 (MATSUO, Shoichiro); 〒  
2858550 千葉県佐倉市六崎 1 4 4 0 番地 株式  
会社フジクラ佐倉事業所内 Chiba (JP).
- (74) 代理人: 特許業務法人 H A R A K E N Z O W  
O R L D P A T E N T & T R A D E M A  
R K (H A R A K E N Z O W O R L D P A T E N T & T R A D E M A -  
M A R K); 〒5300041 大阪府大阪市北区天神橋 2 丁  
目北 2 番 6 号 大和南森町ビル Osaka (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保  
護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA,  
BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN,  
CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES,  
FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN,  
IR, IS, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS,  
LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,  
MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH,  
PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK,  
SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,  
UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

[続葉有]

(54) Title: OPTICAL FIBER AND OPTICAL TRANSMISSION LINE

(54) 発明の名称: 光ファイバおよび光伝送路



AA Input  
 BB Length  
 CC Mode dispersion  
 DD Output

(57) Abstract: In the present invention, optical fibers (Fp, Fn) provided on an optical transmission line (F) are dual-mode optical fibers that propagate LP01 and LP11 mode components included in an optical signal, wherein the slope (dΔτ/dλ) of the mode dispersion (Δτ) to the wavelength (λ) is less than or equal to |0.5|ps/km/nm for the 1530 nm to 1625 nm wavelength band. The signs of the mode dispersion (Δτ) for the optical fibers (Fp, Fn) are inverse of each other. The optical transmission line is able to sufficiently compensate for mode dispersion across a wide wavelength band.

(57) 要約: 光伝送路 F が備える光ファイバ Fp、Fn は、信号光に含まれる LP01 及び LP11 のモード成分を伝搬する 2 モード光ファイバであり、1530 ~ 1625 nm の波長帯域において、波長 λ に対するモード分散 Δτ の傾き dΔτ/dλ が、|0.5|ps/km/nm 以下である。前記光ファイバ Fp、Fn は、前記モード分散 Δτ の符号が、互いに、反対である。前記光伝送路によれば、広い波長帯域にわたって、モード分散を十分に補償することができる。

WO 2014/132763 A1



(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR),

OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

## 明 細 書

発明の名称：光ファイバおよび光伝送路

### 技術分野

[0001] 本発明は、光ファイバおよび光伝送路に関する。

### 背景技術

[0002] 光情報通信においては、通信量の増加に伴い、伝送媒体となる光ファイバに求められる伝送容量も増加してきている。特に、WDM（波長多重分割）方式による長距離伝送用の光ファイバにおいて、このような要求は顕著である。通信量は今後も増加の一途を辿ることが予想されており、伝送容量の増加は光ファイバにおける喫緊の課題となっている。

[0003] そこで、近年、伝送容量の増加に対応すべく、複数のモードを伝搬させることが可能なFMF（Few-Mode Fiber）を伝送路に用い、各モードに対して対応する信号を重畳することにより複数の信号を多重化送信する、MDM（モード分割多重）伝送が注目を集めている。

[0004] しかしながら、FMFにおいては、モード分散の発生が避けられない。モード分散は、伝送距離に比例した伝送容量の低下を生じさせる。したがって、長距離伝送に耐える大容量のマルチモードファイバを実現するためには、モード分散を抑えることが重要になる。

[0005] 例えば、MDM伝送において採用され得るMIMO（Multiple-Input-Multiple-Output）の処理演算量は、FMFのモード分散が大きいほど増加することが知られている。このため、FMFのモード分散が大きいと、MIMOの処理に遅延が生じる虞がある。このため、MDM伝送では、モード分散が小さいFMFが必要となってくる。さらに、MDM伝送は、WDM伝送との併用が想定されるため、広い波長帯域に亘ってモード分散を小さくする必要がある。

[0006] そこで、モード分散特性が異なる複数の光ファイバを組み合わせることにより、光伝送路におけるモード分散を補償する技術が考案されている。例え

ば、下記特許文献1には、2つのMMF (Multimode Fiber) を好適に組み合わせることにより、最適化された波長(例えば、 $0.85\mu\text{m}$ )以外の他の波長(例えば、 $1.3\mu\text{m}$ )においても、モード分散を補償することにより、伝送帯域幅を拡大する技術が開示されている。

[0007] また、下記非特許文献1, 2には、モード分散の符号と、モード分散の波長に対する傾きの符号との各々が互いに異なる、2以上の2モードファイバを接続することにより、より広い波長帯域に亘ってモード分散を小さくする技術が開示されている。

[0008] 特に、下記非特許文献1では、グレーデッドインデックスコアにトレンチ構造を付与した構造の2モードファイバと、グレーデッドインデックスコアのみを有する構造の2モードファイバとを接続した光伝送路が提案されており、当該光伝送路を用いて、光通信の波長帯域であるC+L-bandにおいて数ps/km以下のモード分散を達成できることが示されている。

[0009] また、下記非特許文献2では、階段状の屈折率分布を有する2モード光ファイバが提案されており、各パラメータが調整された4本の光ファイバが接続された光伝送路を用いて、C+L-bandにおいて数ps/km以下のモード分散を達成できるとされている。

## 先行技術文献

### 特許文献

[0010] 特許文献1: 日本国公開特許公報「特開2006-221052号公報(2006年8月24日公開)」

### 非特許文献

[0011] 非特許文献1: Ryo Maruyama, et al, "DMD Free Transmission Line Composed of TMFs with Large Effective Area for MIMO Processing", ECOC2012, Tu.1.F.2 (2012/6/16)

非特許文献2: Taiji Sakamoto, et al, "Differential Mode Delay Managed Transmission Line for Wide-band WDM-MIMO System", OFC 2012, OM2D.1 (2012/3/4)

## 発明の概要

### 発明が解決しようとする課題

[0012] しかしながら、上記非特許文献 1, 2 の技術を用いたとしても、広い波長帯域に亘ってモード分散を十分に補償することは容易ではない。これは、従来の 2 モード光ファイバは、そのモード分散  $\Delta \tau$  が波長  $\lambda$  に対して傾きを有している、すなわち、モード分散  $\Delta \tau$  が波長  $\lambda$  に依存するという特性を有しているためである。この点に関し、図 18 を参照してより具体的に説明する。図 18 は、従来の光ファイバのモード分散特性を示すグラフである（ $x$  軸は波長、 $y$  軸はモード分散を示す）。この図 18 に示すように、正のモード分散  $\Delta \tau_p$  は、1 次関数  $y = a_p x + b_p$  ( $a_p > 0$ ) によって近似可能な特性を有しており、負のモード分散  $\Delta \tau_n$  は、1 次関数  $y = a_n x + b_n$  ( $a_n < 0$ ) によって近似可能な特性を有している。

[0013] このため、従来の光伝送路（例えば、非特許文献 1, 2 に開示されている光伝送路）においては、ある波長  $\lambda$  を基準として、モード分散を補償するように 2 つの 2 モード光ファイバ（正のモード分散  $\Delta \tau_p$  をもつ 2 モード光ファイバ、および、負のモード分散  $\Delta \tau_n$  をもつ 2 モード光ファイバ）を組み合わせたとしても、他の波長  $\lambda$  の信号光に対してモード分散を十分に補償することは容易ではない。よって、従来の光伝送路においては、広い波長帯域に亘ってモード分散を十分に補償することができなかった。

[0014] 上記の課題に関する発明者の知見によれば、従来の光伝送路であっても、下記数式 (1) を満たすことにより、広い波長帯域に亘ってモード分散  $\Delta \tau$  を補償することが可能である。しかしながら、上記モード分散  $\Delta \tau$  は、その波長  $\lambda$  に対する傾きがコア半径の変動に対して鈍感であるのに対し、その値がコア半径の変動に対して敏感であるため、コア半径が変動してしまうと、下記数式 (1) の関係が大きく崩れてしまう。このため、広い波長帯域に亘ってモード分散を十分に補償することのできる光伝送路を実現するという課題は、依然として未解決のままであった。

[0015]

[数1]

$$\frac{|a_p|}{|a_n|} = \frac{|b_p|}{|b_n|} \quad \dots(1)$$

[0016] 本発明は、上記の課題に鑑みて、発明者の更なる知見に基づきなされたものであり、その目的は、広い波長帯域に亘ってモード分散を十分に補償することが可能な光ファイバおよび光伝送路を実現することにある。

### 課題を解決するための手段

[0017] 上記課題を解決するために、本発明の一態様に係る光ファイバは、信号光に含まれるLP<sub>01</sub>モード成分およびLP<sub>11</sub>モード成分を伝搬する2モード光ファイバであって、予め定められた波長帯域において、下記数式(2)により定義されるモード分散 $\Delta\tau$ が一定であることを特徴とする。下記数式(2)において、 $v_{g11}$ は、前記LP<sub>11</sub>モード成分の群速度を示し、 $v_{g01}$ は、前記LP<sub>01</sub>モード成分の群速度を示す。

[0018] [数2]

$$\Delta\tau = \frac{1}{v_{g11}} - \frac{1}{v_{g01}} \quad \dots(2)$$

### 発明の効果

[0019] 本発明によれば、広い波長帯域に亘ってモード分散を十分に補償することが可能な光ファイバおよび光伝送路を実現することができる。

### 図面の簡単な説明

[0020] [図1]本発明の一実施形態に係る光伝送路の構成を示す。

[図2]本実施形態に係る光ファイバのモード分散特性を示すグラフである。

[図3]本実施形態に係る光ファイバの構成を示す断面図および側面図である。

[図4]本実施形態に係る光ファイバの屈折率分布を示すグラフである。

[図5]本実施形態に係る光ファイバに関して、パラメータR<sub>d</sub>とモード分散特性との関係を示すグラフである。

[図6]本実施形態に係る光ファイバに関して、パラメータR<sub>a</sub>とモード分散特

性との関係を示すグラフである。

[図7]本実施形態に係る光ファイバに関して、パラメータ $\alpha$ とモード分散特性との関係を示すグラフである。

[図8]本実施形態に係る光ファイバに関して、パラメータ $\Delta+$ とモード分散特性との関係を示すグラフである。

[図9] (a) は、実施例1の光ファイバにおける、屈折率分布を規定する各パラメータの設定値を示す。(b) は、実施例1に係る光ファイバの、モード分散特性を示すグラフである。(c) は、実施例1に係る光ファイバに関して、コア半径の変動量とモード分散特性との関係を示すグラフである。

[図10] (a) は、実施例2の光ファイバにおける、屈折率分布を規定する各パラメータの設定値を示す。(b) は、実施例2に係る光ファイバの、モード分散特性を示すグラフである。(c) は、実施例2に係る光ファイバに関して、コア半径の変動量とモード分散特性との関係を示すグラフである。

[図11] (a) は、実施例3の光ファイバにおける、屈折率分布を規定する各パラメータの設定値を示す。(b) は、実施例3に係る光ファイバの、モード分散特性を示すグラフである。(c) は、実施例3に係る光ファイバに関して、コア半径の変動量とモード分散特性との関係を示すグラフである。

[図12] (a) は、実施例4の光ファイバにおける、屈折率分布を規定する各パラメータの設定値を示す。(b) は、実施例4に係る光ファイバの、モード分散特性を示すグラフである。(c) は、実施例4に係る光ファイバに関して、コア半径の変動量とモード分散特性との関係を示すグラフである。

[図13] (a) は、実施例5の光ファイバにおける、屈折率分布を規定する各パラメータの設定値を示す。(b) は、実施例5に係る光ファイバの、モード分散特性を示すグラフである。(c) は、実施例5に係る光ファイバに関して、コア半径の変動量とモード分散特性との関係を示すグラフである。

[図14] (a) は、実施例6の光伝送路における、各光ファイバのモード分散 $\Delta\tau$ を示す。(b) は、実施例6における光伝送路の、モード分散特性を示すグラフである。

[図15]本比較例の光ファイバにおける、屈折率分布を規定する各パラメータの設定値を示す。

[図16]本比較例に係る光ファイバの、モード分散特性を示すグラフである。

[図17]本比較例に係る光ファイバに関して、コア半径の変動量とモード分散特性との関係を示すグラフである。

[図18]従来の光ファイバのモード分散特性を示すグラフである。

### 発明を実施するための形態

[0021] 以下、図1～図8を参照して、本発明の一実施形態に係る光伝送路および光ファイバについて説明する。なお、本書および添付の図面においては、モード分散 $\Delta\tau$ を、DMD (Differential Modal Group Delay) と示す場合もある。

[0022] [光伝送路の構成]

図1は、本実施形態に係る光伝送路F、F'の構成を示す。光伝送路F、F'は、いずれも、図1に示すように、少なくとも2本の光ファイバF<sub>p</sub>、F<sub>n</sub>を含んで構成されている。光ファイバF<sub>p</sub>は、正のモード分散 $\Delta\tau_p$ を有する2モード光ファイバであり、光ファイバF<sub>n</sub>は、負のモード分散 $\Delta\tau_n$ を有する2モード光ファイバである。モード分散 $\Delta\tau_p$ 、 $\Delta\tau_n$ は、いずれも、上記数式(2)によって定義されるものである。

[0023] 図1(a)は、正のモード分散 $\Delta\tau_p$ を有する光ファイバF<sub>p</sub>を入力側に配置し、負のモード分散 $\Delta\tau_n$ を有する光ファイバF<sub>n</sub>を出力側に配置した、光伝送路Fの構成例を示している。この光伝送路Fにおいて、LP11モード成分が光ファイバF<sub>p</sub>を伝搬するために要する時間は、LP01モード成分が光ファイバF<sub>p</sub>を伝搬するために要する時間よりも $\Delta\tau_p \times L_p$  ( $L_p$  = 光ファイバF<sub>p</sub>の長さ)だけ長い。したがって、LP11モード成分は、光ファイバF<sub>p</sub>を伝搬する過程で、 $\Delta\tau_p \times L_p$ だけ遅れることとなる。

[0024] 一方、この光伝送路Fにおいて、LP11モード成分が光ファイバF<sub>n</sub>を伝搬するために要する時間は、LP01モード成分が光ファイバF<sub>n</sub>を伝搬するために要する時間よりも $\Delta\tau_n \times L_n$  ( $L_n$  = 光ファイバF<sub>n</sub>の長さ)だけ

短い。したがって、LP11モード成分は、光ファイバF<sub>n</sub>を伝搬する過程で、 $\Delta\tau_n \times L_n$ だけ遅れを取り戻すこととなる。

[0025] したがって、光伝送路Fにおいて、 $\Delta\tau_p \times L_p + \Delta\tau_n \times L_n$ が十分小さくなるように、より好ましくは、 $\Delta\tau_p \times L_p + \Delta\tau_n \times L_n = 0$ となるように、光ファイバF<sub>p</sub>の長さL<sub>p</sub>及び光ファイバF<sub>n</sub>の長さL<sub>n</sub>を設定することにより、当該光伝送路Fにおけるモード分散を十分に補償し、モード分散が殆ど生じない光伝送路Fを実現することができる。

[0026] 特に、本実施形態の光伝送路Fにおいては、光ファイバF<sub>p</sub>、F<sub>n</sub>として、モード分散特性が波長λに依存しないもの（図2参照）を用いているため、波長λを考慮することなく、モード分散を補償するように光ファイバF<sub>p</sub>、F<sub>n</sub>の各々の長さを設定することにより、結果的に、所望の波長帯域の全域に亘って、モード分散を十分に補償することができる。

[0027] 図1(b)は、負のモード分散 $\Delta\tau_n$ を有する光ファイバF<sub>n</sub>を入力側に配置し、正のモード分散 $\Delta\tau_p$ を有する光ファイバF<sub>p</sub>を出力側に配置した、光伝送路F'の構成例を示している。この光伝送路F'において、LP01モード成分が光ファイバF<sub>n</sub>を伝搬するのに要する時間は、LP11モード成分が光ファイバF<sub>n</sub>を伝搬するのに要する時間よりも $\Delta\tau_p \times L_p$ だけ長い。したがって、LP01モード成分は、光ファイバF<sub>n</sub>を伝搬する過程で、 $\Delta\tau_n \times L_n$ だけ遅れることとなる。

[0028] 一方、この光伝送路F'において、LP01モード成分が光ファイバF<sub>p</sub>を伝搬するのに要する時間は、LP11モード成分が光ファイバF<sub>p</sub>を伝搬するのに要する時間よりも $\Delta\tau_p \times L_p$ だけ短い。したがって、LP01モード成分は、光ファイバF<sub>p</sub>を伝搬する過程で、 $\Delta\tau_p \times L_p$ だけ遅れを取り戻すこととなる。

[0029] したがって、光伝送路F'において、 $\Delta\tau_p \times L_p + \Delta\tau_n \times L_n$ が十分小さくなるように、より好ましくは、 $\Delta\tau_p \times L_p + \Delta\tau_n \times L_n = 0$ となるように、光ファイバF<sub>p</sub>の長さL<sub>p</sub>及び光ファイバF<sub>n</sub>の長さL<sub>n</sub>を設定することにより、当該光伝送路F'におけるモード分散を十分に補償し、モ

ード分散が殆ど生じない光伝送路 $F'$ を実現することができる。

[0030] 特に、本実施形態の光伝送路 $F'$ においては、光ファイバ $F_p$ 、 $F_n$ として、モード分散特性が波長 $\lambda$ に依存しないもの（図2参照）を用いているため、波長 $\lambda$ を考慮することなく、モード分散を補償するように光ファイバ $F_p$ 、 $F_n$ の各々の長さを設定することにより、結果的に、所望の波長帯域の全域に亘って、モード分散を十分に補償することができる。

[0031] [光ファイバのモード分散特性]

図2は、本実施形態に係る光ファイバ $F_p$ 、 $F_n$ のモード分散特性を示すグラフである。特に、図2は、予め定められた通信用の波長帯域である、1530～1625nm帯における、光ファイバ $F_p$ 、 $F_n$ のモード分散の特性を示している。図2において、x軸は波長、y軸はモード分散を示す。

[0032] 図2において注目すべき点は、光ファイバ $F_p$ は、 $y = b_p$ によって表される正のモード分散特性を有しており、光ファイバ $F_n$ は、 $y = b_n$ によって表される負のモード分散特性を有していることである。すなわち、光ファイバ $F_p$ のモード分散 $\Delta\tau_p$ の波長 $\lambda$ に対する傾き $d\Delta\tau_p/d\lambda$ はゼロであり、光ファイバ $F_n$ のモード分散 $\Delta\tau_n$ の波長 $\lambda$ に対する傾き $d\Delta\tau_n/d\lambda$ もゼロである。要するに、少なくとも1530～1625nm帯において、光ファイバ $F_p$ のモード分散 $\Delta\tau_p$ および光ファイバ $F_n$ のモード分散 $\Delta\tau_n$ は、いずれも波長 $\lambda$ に依存することなく、一定となっている。

[0033] これにより、光ファイバ $F_p$ 、 $F_n$ を用いた光伝送路 $F$ 、 $F'$ （図1参照）は、特に波長 $\lambda$ を考慮することなく、モード分散を補償するように光ファイバ $F_p$ 、 $F_n$ の各々の長さ $L_p$ 、 $L_n$ を設定することにより、結果的に、1530～1625nm帯全域に亘って、モード分散を十分に補償することができる。

[0034] なお、本書における「モード分散が一定」とは、モード分散の波長 $\lambda$ に対する傾き=0に限らず、モード分散の波長 $\lambda$ に対する傾き $\neq 0$ であってもよい。要するに、1530～1625nm帯全域に亘ってモード分散を十分に補償することができる程度に、モード分散の波長 $\lambda$ に対する傾きが十分に小

さければ、そのモード分散特性は、「モード分散が一定」の範疇に含まれる。例えば、波長 $\lambda$ に対するモード分散 $\Delta\tau$ の傾き $d\Delta\tau/d\lambda$ が、 $|0.5\text{ps}|/km/nm$ 以下であれば、「モード分散が一定」の範疇に含まれる。

[0035] なお、本実施形態に係る光ファイバは、屈折率分布を適宜変更することによって、正のモード分散 $\Delta\tau_p$ を有する光ファイバ $F_p$ とすることも、負のモード分散 $\Delta\tau_n$ を有する光ファイバ $F_n$ とすることも可能である。

[0036] [光ファイバの構成]

図3は、本実施形態に係る光ファイバ1の構成を示す断面図および側面図である。本実施形態(図1, 2)の光ファイバ $F_p$ ,  $F_n$ は、この光ファイバ1と同様の構成を有している。

[0037] 光ファイバ1は、シリカガラスを主成分とする円柱状の構造体である。光ファイバ1は、コア11と、クラッド12とを備えて構成されている。コア11は、円形状の断面を有する。クラッド12は、コア11を取り囲む円環状の断面を有する。

[0038] コア11は、内側コア111と、外側コア112とを備えて構成されている。内側コア111は、円形状の断面を有する。外側コア112は、内側コア111を取り囲む円環状の断面を有する。内側コア111の断面がなす円は、半径 $r_1$ を有している。外側コア112の断面がなす円環は、その内周部が半径 $r_1$ を有しており、その外周部が半径 $r_1 + r_2$ (半径 $a$ )を有している。光ファイバ1において、図3に示す断面構造は、中心軸Lに直交する各断面において共通である。

[0039] (光ファイバの屈折率分布)

図4は、本実施形態に係る光ファイバ1の屈折率分布を示すグラフである。なお、図4に示す屈折率分布は、例えば、Ge(ゲルマニウム)の添加によって屈折率を局所的に上げたり、F(フッ素)の添加によって屈折率を局所的に下げたりする公知の手法により実現することができる。

[0040] 内側コア111の屈折率分布は、図4に示すように、 $\alpha$ 乗型の屈折率分布

であり、中心軸L上で最大値 $n_1$ をとる。ここで、 $\alpha$ 乗型の屈折率分布とは、内側コア111の中心部と外側コア112との比屈折率差を $\delta$ として、中心軸Lからの距離が $r$ である点の屈折率 $n(r)$ が $n(r) = n_1 [1 - 2\delta (r/a)^\alpha]^{1/2}$ と表される屈折率分布のことを指す。なお、 $\alpha$ を大きくしていくと、 $\alpha$ 乗型の屈折率分布は、ステップ型の屈折率分布に漸近する。

[0041] 外側コア112の屈折率 $n_1'$ 、および、クラッド12の屈折率 $n_2$ は、図4に示すように一定である。内側コア111の最大屈折率 $n_1$ 、外側コア112の屈折率 $n_1'$ 、およびクラッド12の屈折率 $n_2$ は、 $n_1' < n_2 < n_1$ という関係を有している。図4に示す光ファイバ1の屈折率分布には、外側コア112の屈折率 $n_2$ と、外側コア112の屈折率 $n_1'$ との差( $n_1' < n_2$ )により、「トレンチ」と呼ばれる凹部が生じている。

[0042] なお、図4において、 $\Delta+$ は、内側コア111の中心部とクラッド12との比屈折率差 $[(n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2] \times 100$  [%]を表し、 $\Delta-$ は、外側コア112とクラッド12との比屈折率差 $[(n_1'^2 - n_2^2) / 2n_1'^2] \times 100$  [%]を表す。比屈折率差 $\Delta+$ は、「コア $\Delta$ 」と呼ばれることもある。

[0043] 以下の説明においては、光ファイバ1の屈折率分布を規定するパラメータとして、上述した $\alpha$ および $\Delta+$ の他に、 $R_a$ および $R_d$ を用いる。 $R_a$ は、外側コア112の外周部の半径 $a$ に対する内側コア111の半径 $r_1$ の比 $r_1/a$ を表す。また、 $R_d$ は、比屈折率差 $\Delta+$ の絶対値に対する比屈折率差 $\Delta-$ の絶対値の比 $|\Delta-| / |\Delta+|$ を表す。すなわち、 $R_d$ が小さくなるほど、トレンチの深さ( $n_2 - n_1'$ )は浅くなり、 $R_d = 0$ のとき、トレンチの深さは0になる。

[0044] また、以下の説明においては、光ファイバ1の伝搬特性を表す指標として、等価V値 $T$ を用いる。等価V値 $T$ は、 $T = \int [n^2(r) - n^2(\infty)k]^{1/2} dr$  (積分範囲は0から $\infty$ )により定義され、規格化周波数 $V$ との間に下記数式(3)の関係を有する。等価V値 $T$ の定義式において、 $n(r)$ は、中心軸Lからの距離が $r$ である点における屈折率を表し、 $k$ は、光ファイバ

1に入射させる光（以下「入射光」と記載）の波数を表す。下記数式（3）におけるAは、屈折率分布によって決定される定数である。

[0045] [数3]

$$T = \frac{V}{A} = \frac{\frac{2\pi}{\lambda} a n_1 \sqrt{2 \left( \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1} \right)}}{A} \quad \dots (3)$$

[0046] 図4に示す屈折率分布を有する光ファイバ1においては、等価V値Tが2.5未満の場合、2次モード（LP11）が遮断され、等価V値Tが4.5以下の場合、3次モード（LP21）が遮断される。すなわち、この等価V値Tが2.5以上4.5以下であるときに、光ファイバ1は2モード光ファイバとして機能する。以下、 $2.5 \leq T \leq 4.5$ であるT軸上の区間のことを、「2モード領域」と記載する。

[0047] （屈折率分布とモード分散特性との関係）

次に、光ファイバ1の屈折率分布とモード分散特性との関係について、図5～図8を参照して説明する。なお、以下の説明においては、モード分散 $\Delta\tau$ を波長 $\lambda$ の関数として扱う代わりに等価V値Tの関数として扱う。上記数式（3）から明らかなように、等価V値Tの変動は、コア半径の変動および波長 $\lambda$ の変動と等価である。したがって、等価V値Tに対するモード分散 $\Delta\tau$ の傾き（ $d\Delta\tau/dT$ ）が $\neq 0$ であれば、コア半径に対するモード分散 $\Delta\tau$ の傾き、および波長 $\lambda$ に対するモード分散 $\Delta\tau$ の傾きは、いずれも $\neq 0$ となる。

[0048] まず、パラメータRdがモード分散特性に及ぼす影響について、図5を参照して説明する。図5は、本実施形態に係る光ファイバ1に関して、パラメータRdとモード分散特性との関係を示すグラフである。特に、図5は、Rdを0, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0としたときに得られる $\Delta\tau(T)$ のグラフである。ここでは、 $\alpha$ を2.0とし、 $\Delta+$ を0.35%とし、Raを0.8としている。また、入射光の波長 $\lambda$ は、1.55 $\mu\text{m}$ としている。

- [0049] 図5に示すグラフから、パラメータ $R_d$ を変化させることで、等価 $V$ 値 $T$ に対するモード分散 $\Delta\tau$ の傾き ( $d\Delta\tau/dT$ ) が変化することがわかる。特に、 $R_d$ を徐々に増加させていくと、 $R_d=0.4$ 付近において、 $d\Delta\tau/dT \approx 0$ となることがわかる。したがって、 $R_d=0.4$ 付近に設定することで $d\Delta\tau/dT \approx 0$ に制御できることがわかる。
- [0050] 次に、パラメータ $R_a$ がモード分散特性に及ぼす影響について、図6を参照して説明する。図6は、本実施形態に係る光ファイバ1に関して、パラメータ $R_a$ とモード分散特性との関係を示すグラフである。特に、図6は、 $R_a$ を0.4, 0.6, 0.7, 0.75, 0.8としたときに得られる $\Delta\tau(T)$ のグラフである。ここでは、 $\alpha$ を2.0とし、 $\Delta+$ を0.35%とし、 $R_d$ を0.4としている。また、入射光の波長 $\lambda$ は、 $1.55\mu\text{m}$ としている。
- [0051] 図6に示すグラフから、 $R_a$ を変化させることにより、モード分散特性が横軸方向にシフト（すなわち、等価 $V$ 値 $T$ が変化）することがわかる。特に、等価 $V$ 値 $T$ が大きくなるにつれ、 $d\Delta\tau/dT$ は0に近づいていくことがわかる。そして、2モード領域に $d\Delta\tau/dT \approx 0$ の解が得られる $R_a$ の条件は $R_a \leq 0.7$ のときであることがわかる。したがって、 $R_a \leq 0.7$ に設定することで $d\Delta\tau/dT \approx 0$ に制御できることがわかる。
- [0052] 次に、パラメータ $\alpha$ がモード分散特性に及ぼす影響について、図7を参照して説明する。図7は、本実施形態に係る光ファイバ1に関して、パラメータ $\alpha$ とモード分散特性との関係を示すグラフである。特に、図7は、 $\alpha$ を1, 2, 5, 10, 10000としたときに得られる $\Delta\tau(T)$ のグラフである。ここでは、 $\Delta+$ を0.35%とし、 $R_a$ を0.6とし、 $R_d$ を0.4としている。また、入射光の波長 $\lambda$ は、 $1.55\mu\text{m}$ としている。
- [0053] 図7に示すグラフから、 $\alpha$ を変化させることにより、モード分散特性が縦軸方向にシフト（すなわち、モード分散 $\Delta\tau$ が変化）することがわかる。一方、図7に示すグラフから、 $\alpha$ を1.0~10.0の範囲内で変化させた場合であっても、 $d\Delta\tau/dT \approx 0$ のまま、 $d\Delta\tau/dT$ が殆ど変化しないこ

とがわかる。したがって、 $\alpha$ に任意の値（より確実に、 $1.0 \leq \alpha \leq 10.0$ ）を設定することで $d\Delta\tau/dT \approx 0$ に制御できることがわかる。

[0054] 次に、パラメータ $\Delta+$ がモード分散特性に及ぼす影響について、図8を参照して説明する。図8は、本実施形態に係る光ファイバ1に関して、パラメータ $\Delta+$ とモード分散特性との関係を示すグラフである。特に、図8は、 $\Delta+$ を0.3%、0.35%、0.4%、0.5%、0.6%としたときに得られる $\Delta\tau(T)$ のグラフである。ここでは、 $\alpha$ を2.0とし、 $R_a$ を0.6とし、 $R_d$ を0.4としている。また、入射光の波長 $\lambda$ は、 $1.55 \mu\text{m}$ としている。

[0055] 図8に示すグラフから、 $\Delta+$ を変化させることにより、モード分散特性が縦軸方向にシフト（すなわち、モード分散 $\Delta\tau$ が変化）することがわかる。一方、図8に示すグラフから、 $\Delta+$ を0.3~0.6の範囲内で変化させた場合であっても、 $d\Delta\tau/dT$ が殆ど変化しないことがわかる。したがって、 $\Delta+$ に任意の値（より確実に、 $0.3 \leq \Delta+ \leq 0.6$ ）を設定することで $d\Delta\tau/dT \approx 0$ に制御できることがわかる。

[0056] 以上のように、 $R_a \leq 0.7$ という条件の下、 $R_d = 0.4$ 付近に設定し、 $\alpha$ に任意の値（より確実に、 $1.0 \leq \alpha \leq 10.0$ ）を設定し、 $\Delta+$ に任意の値（より確実に、 $0.3 \leq \Delta+ \leq 0.6$ ）を設定することで、 $d\Delta\tau/dT \approx 0$ という条件を満たす2モード光ファイバを実現することができる。そして、このような光ファイバを光ファイバ $F_p$ 、 $F_n$ として用いることにより、所望の波長帯域の全域に亘って、モード分散を十分に補償することができる光伝送路 $F$ 、 $F'$ を実現することができる。

## 実施例

[0057] [実施例1]

本実施形態に係る光ファイバ1の実施例1について、図9(a)~図9(c)を参照して説明する。図9(a)は、実施例1の光ファイバ1における、屈折率分布を規定する各パラメータの設定値を示す。図9(b)は、実施例1に係る光ファイバ1の、モード分散特性を示すグラフである。

[0058] 図9(a)に示すように、本実施例1では、 $R_a = 0.7$ 、 $R_d = 0.4$ 、 $\alpha = 2.0$ 、 $\Delta + = 0.35$ を設定した。この結果、図9(b)に示すように、実施例1の光ファイバ1は、1530~1625nm帯において、モード分散 $\Delta\tau$ は、290~296ps/kmとなり、モード分散 $\Delta\tau$ の波長 $\lambda$ に対する傾き $d\Delta\tau/d\lambda$ は、 $|0.15|$ ps/km/nm以下となり、上記傾きが極めて小さいものとなった。したがって、実施例1の光ファイバ1は、1530~1625nm帯全域に亘って、モード分散を十分に補償することができるものであることが確認された。

[0059] ここで、実施例1の光ファイバ1において、コア半径の変動がモード分散特性に及ぼす影響について、図9(c)を参照して説明する。図9(c)は、実施例1に係る光ファイバ1に関して、コア半径の変動量とモード分散特性との関係を示すグラフである。図9(c)に示すように、実施例1の光ファイバ1は、コア半径に対するモード分散 $\Delta\tau$ の傾きが、 $|25|$ ps/km/ $\mu\text{m}$ 以下であり、コア径の変動によるモード分散の影響が非常に小さいものであることが確認された。

[0060] 以上のように、本実施例1によれば、本実施形態の光ファイバ1は、図9(a)に示すように各パラメータを適切に設定することにより、波長 $\lambda$ およびコア径の変動によるモード分散の影響が小さいものとなることが確認された。したがって、このように各パラメータが設定された光ファイバを光ファイバFpとして用いることにより、所望の波長帯域の全域に亘って、モード分散を十分に補償することができる光伝送路F、F'を実現することができる。

[0061] [実施例2]

本実施形態に係る光ファイバ1の実施例2について、図10(a)~図10(c)を参照して説明する。図10(a)は、実施例2の光ファイバ1における、屈折率分布を規定する各パラメータの設定値を示す。図10(b)は、実施例2に係る光ファイバ1の、モード分散特性を示すグラフである。

[0062] 図10(a)に示すように、本実施例2では、 $R_a = 0.6$ 、 $R_d = 0.$

4、 $\alpha = 1.4$ 、 $\Delta + = 0.35$ を設定した。この結果、図10(b)に示すように、実施例2の光ファイバ1は、1530~1625 nm帯において、モード分散 $\Delta\tau$ は、 $-540 \sim -530$  ps/kmとなり、モード分散 $\Delta\tau$ の波長 $\lambda$ に対する傾き $d\Delta\tau/d\lambda$ は、 $|0.10|$  ps/km/nm以下となり、上記傾きが極めて小さいものとなった。したがって、実施例2の光ファイバ1は、1530~1625 nm帯全域に亘って、モード分散を十分に補償することができるものであることが確認された。

[0063] ここで、実施例2の光ファイバ1において、コア半径の変動がモード分散特性に及ぼす影響について、図10(c)を参照して説明する。図10(c)は、実施例2に係る光ファイバ1に関して、コア半径の変動量とモード分散特性との関係を示すグラフである。図10(c)に示すように、実施例2の光ファイバ1は、コア半径に対するモード分散 $\Delta\tau$ の傾きが、 $|6|$  ps/km/ $\mu\text{m}$ 以下であり、コア径の変動によるモード分散の影響が非常に小さいものであることが確認された。

[0064] 以上のように、本実施例2によれば、本実施形態の光ファイバ1は、図10(a)に示すように各パラメータを適切に設定することにより、波長 $\lambda$ およびコア径の変動によるモード分散の影響が小さいものとなることが確認された。したがって、このように各パラメータが設定された光ファイバを光ファイバF<sub>n</sub>として用いることにより、所望の波長帯域の全域に亘って、モード分散を十分に補償することができる光伝送路F、F'を実現することができる。

[0065] [実施例3]

本実施形態に係る光ファイバ1の実施例3について、図11(a)~図11(c)を参照して説明する。図11(a)は、実施例3の光ファイバ1における、屈折率分布を規定する各パラメータの設定値を示す。図11(b)は、実施例3に係る光ファイバ1の、モード分散特性を示すグラフである。

[0066] 図11(a)に示すように、本実施例3では、 $R_a = 0.3$ 、 $R_d = 0.4$ 、 $\alpha = 2.0$ 、 $\Delta + = 0.35$ を設定した。この結果、図11(b)に示

すように、実施例3の光ファイバ1は、1530～1625 nm帯において、モード分散 $\Delta\tau$ は、315～325 ps/kmとなり、モード分散 $\Delta\tau$ の波長 $\lambda$ に対する傾き $d\Delta\tau/d\lambda$ は、 $|0.20|$  ps/km/nm以下となり、上記傾きが極めて小さいものとなった。したがって、実施例3の光ファイバ1は、1530～1625 nm帯全域に亘って、モード分散を十分に補償することができるものであることが確認された。

[0067] ここで、実施例3の光ファイバ1において、コア半径の変動がモード分散特性に及ぼす影響について、図11(c)を参照して説明する。図11(c)は、実施例3に係る光ファイバ1に関して、コア半径の変動量とモード分散特性との関係を示すグラフである。図11(c)に示すように、実施例3の光ファイバ1は、コア半径に対するモード分散 $\Delta\tau$ の傾きが、 $|5|$  ps/km/ $\mu$ m以下であり、コア径の変動によるモード分散の影響が非常に小さいものであることが確認された。

[0068] 以上のように、本実施例3によれば、本実施形態の光ファイバ1は、図11(a)に示すように各パラメータを適切に設定することにより、波長 $\lambda$ およびコア径の変動によるモード分散の影響が小さいものとなることが確認された。したがって、このように各パラメータが設定された光ファイバを光ファイバFpとして用いることにより、所望の波長帯域の全域に亘って、モード分散を十分に補償することができる光伝送路F、F'を実現することができる。

[0069] [実施例4]

本実施形態に係る光ファイバ1の実施例4について、図12(a)～図12(c)を参照して説明する。図12(a)は、実施例4の光ファイバ1における、屈折率分布を規定する各パラメータの設定値を示す。図12(b)は、実施例4に係る光ファイバ1の、モード分散特性を示すグラフである。

[0070] 図12(a)に示すように、本実施例4では、 $R_a=0.6$ 、 $R_d=0.1$ 、 $\alpha=10.0$ 、 $\Delta+=0.425$ を設定した。この結果、図12(b)に示すように、実施例4の光ファイバ1は、1530～1625 nm帯にお

いて、モード分散 $\Delta\tau$ は、 $2820\sim 2835\text{ ps/km}$ となり、モード分散 $\Delta\tau$ の波長 $\lambda$ に対する傾き $d\Delta\tau/d\lambda$ は、 $|0.50|\text{ ps/km/nm}$ 以下となり、上記傾きが極めて小さいものとなった。したがって、実施例4の光ファイバ1は、 $1530\sim 1625\text{ nm}$ 帯全域に亘って、モード分散を十分に補償することができるものであることが確認された。

[0071] ここで、実施例4の光ファイバ1において、コア半径の変動がモード分散特性に及ぼす影響について、図12(c)を参照して説明する。図12(c)は、実施例4に係る光ファイバ1に関して、コア半径の変動量とモード分散特性との関係を示すグラフである。図12(c)に示すように、実施例4の光ファイバ1は、コア半径に対するモード分散 $\Delta\tau$ の傾きが、 $|60|\text{ ps/km}/\mu\text{m}$ 以下であり、コア径の変動によるモード分散の影響が非常に小さいものであることが確認された。

[0072] 以上のように、本実施例4によれば、本実施形態の光ファイバ1は、図12(a)に示すように各パラメータを適切に設定することにより、波長 $\lambda$ およびコア径の変動によるモード分散の影響が小さいものとなることが確認された。したがって、このように各パラメータが設定された光ファイバを光ファイバFpとして用いることにより、所望の波長帯域の全域に亘って、モード分散を十分に補償することができる光伝送路F、F'を実現することができる。

[0073] [実施例5]

本実施形態に係る光ファイバ1の実施例5について、図13(a)～図13(c)を参照して説明する。図13(a)は、実施例5の光ファイバ1における、屈折率分布を規定する各パラメータの設定値を示す。図13(b)は、実施例5に係る光ファイバ1の、モード分散特性を示すグラフである。

[0074] 図13(a)に示すように、本実施例5では、 $R_a=0.6$ 、 $R_d=0.3$ 、 $\alpha=2.0$ 、 $\Delta+=0.6$ を設定した。この結果、図13(b)に示すように、実施例5の光ファイバ1は、 $1530\sim 1625\text{ nm}$ 帯において、モード分散 $\Delta\tau$ は、 $370\sim 387\text{ ps/km}$ となり、モード分散 $\Delta\tau$ の波

長 $\lambda$ に対する傾き  $d\Delta\tau/d\lambda$  は、 $|0.20| \text{ ps/km/nm}$  以下となり、上記傾きが極めて小さいものとなった。したがって、実施例5の光ファイバ1は、1530~1625 nm帯全域に亘って、モード分散を十分に補償することができるものであることが確認された。

[0075] ここで、実施例5の光ファイバ1において、コア半径の変動がモード分散特性に及ぼす影響について、図13(c)を参照して説明する。図13(c)は、実施例5に係る光ファイバ1に関して、コア半径の変動量とモード分散特性との関係を示すグラフである。図13(c)に示すように、実施例5の光ファイバ1は、コア半径に対するモード分散 $\Delta\tau$ の傾きが、 $|20| \text{ ps/km/}\mu\text{m}$  以下であり、コア径の変動によるモード分散の影響が非常に小さいものであることが確認された。

[0076] 以上のように、本実施例5によれば、本実施形態の光ファイバ1は、図13(a)に示すように各パラメータを適切に設定することにより、波長 $\lambda$ およびコア径の変動によるモード分散の影響が小さいものとなることが確認された。したがって、このように各パラメータが設定された光ファイバを光ファイバF<sub>p</sub>として用いることにより、所望の波長帯域の全域に亘って、モード分散を十分に補償することができる光伝送路F、F'を実現することができる。

[0077] [実施例6]

本実施形態に係る光伝送路Fの実施例(実施例6)について、図14(a)および図14(b)を参照して説明する。図14(a)は、実施例6の光伝送路Fにおける、光ファイバF<sub>p</sub>、F<sub>n</sub>のモード分散 $\Delta\tau$ を示す。図14(b)は、実施例6における光伝送路Fの、モード分散特性を示すグラフである。

[0078] 本実施例6では、実施例1の光ファイバ1を光ファイバF<sub>p</sub>として用い、実施例2の光ファイバ1を光ファイバF<sub>n</sub>として用い、光伝送路Fを構成した。すなわち、本実施例6では、1530~1625 nm帯においてモード分散 $\Delta\tau$ が略一定である光ファイバF<sub>p</sub>、F<sub>p</sub>を用い、光伝送路Fを構成し

た。各光ファイバのモード分散 $\Delta\tau$ は、図14(a)に示すとおりである。

[0079] そして、本実施例6では、 $\lambda=1580\text{nm}$ （光ファイバF<sub>p</sub>のモード分散 $\Delta\tau=295.0\text{ps/km}$ 、光ファイバF<sub>n</sub>のモード分散 $\Delta\tau=-532.2\text{ps/km}$ ）において、光伝送路Fのモード分散 $\Delta\tau$ が0となるように、L<sub>p</sub>（光ファイバF<sub>p</sub>のファイバ長）と、L<sub>n</sub>（光ファイバF<sub>n</sub>のファイバ長）との比をL<sub>p</sub>:L<sub>n</sub>=0.645:0.355に設定し、光伝送路Fのモード分散特性を求めた。

[0080] 図14(b)に示すように、実施例6の光伝送路Fは、1530~1625nm帯において、モード分散 $\Delta\tau$ は、 $-2\sim 2\text{ps/km}$ となり、モード分散 $\Delta\tau$ が極めて小さく、且つ、モード分散 $\Delta\tau$ の波長 $\lambda$ による影響が極めて小さいものであることが確認された。したがって、実施例5の光ファイバ1は、1530~1625nm帯全域に亘って、モード分散を十分に補償することができるものであることが確認された。

[0081] [比較例1]

本実施形態に係る光ファイバ1の比較例について、図15~図17を参照して説明する。図15は、本比較例の光ファイバにおける、屈折率分布を規定する各パラメータの設定値を示す。図16は、本比較例に係る光ファイバの、モード分散特性を示すグラフである。

[0082] 本比較例では、トレンチ無の光ファイバと、トレンチ有の光ファイバとを用いた。そして、図15に示すように、トレンチ無の光ファイバには、 $\alpha=1.8$ 、 $\Delta+=0.35$ を設定した。また、トレンチ有の光ファイバには、 $R_a=0.8$ 、 $R_d=1.0$ 、 $\alpha=1.8$ 、 $\Delta+=0.35$ を設定した。

[0083] この結果、図16(a)に示すように、上記トレンチ無の光ファイバは、1530~1625nm帯において、モード分散 $\Delta\tau$ は、 $-600\sim -460\text{ps/km}$ となり、モード分散 $\Delta\tau$ の波長 $\lambda$ に対する傾き $d\Delta\tau/d\lambda$ は、 $|1.7|\text{ps/km/nm}$ 以下となり、各実施例の光ファイバ1と比べて、上記傾きが大きいものとなった。

[0084] また、図16(b)に示すように、上記トレンチ有の光ファイバは、15

30～1625 nm帯において、モード分散 $\Delta\tau$ は、305～385 ps/kmとなり、モード分散 $\Delta\tau$ の波長 $\lambda$ に対する傾き $d\Delta\tau/d\lambda$ は、 $|0.8|$  ps/km/nm以下となり、各実施例の光ファイバ1と比べて、上記傾きが大きいものとなった。

[0085] ここで、本比較例の光ファイバにおいて、コア半径の変動がモード分散特性に及ぼす影響について、図17を参照して説明する。図17は、本比較例に係る光ファイバに関して、コア半径の変動量とモード分散特性との関係を示すグラフである。

[0086] 図17(a)に示すように、上記トレンチ無の光ファイバは、コア半径に対するモード分散 $\Delta\tau$ の傾きが、 $|190|$  ps/km/ $\mu\text{m}$ 以下であり、コア径の変動によるモード分散の影響が、各実施例の光ファイバ1と比べて大きいものであることが確認された。

[0087] また、図17(b)に示すように、上記トレンチ有の光ファイバは、コア半径に対するモード分散 $\Delta\tau$ の傾きが、 $|80|$  ps/km/ $\mu\text{m}$ 以下であり、コア径の変動によるモード分散の影響が、各実施例の光ファイバ1と比べて大きいものであることが確認された。

[0088] [付記事項]

本発明は上述した各実施形態に限定されるものではなく、請求項に示した範囲で種々の変更が可能であり、異なる実施形態にそれぞれ開示された技術的手段を適宜組み合わせて得られる実施形態についても本発明の技術的範囲に含まれる。

[0089] なお、上記各実施形態では、モード分散の補償対象とする波長帯域を、1530～1625 nm帯としたが、これに限らない。本発明が他の波長帯域をモード分散の補償対象とすることが可能なことは、当業者からしてみれば本書の内容から明らかである。

[0090] [まとめ]

以上のように、本発明の一態様に係る光ファイバは、信号光に含まれるLP01モード成分およびLP11モード成分を伝搬する2モード光ファイバ

であって、予め定められた波長帯域において、上記数式(2)により定義されるモード分散 $\Delta\tau$ が一定であることを特徴とする。上記数式(2)において、 $v_{g11}$ は、前記LP11モード成分の群速度を示し、 $v_{g01}$ は、前記LP01モード成分の群速度を示す。

[0091] 特に、上記光ファイバにおいて、前記波長帯域において、波長 $\lambda$ に対する前記モード分散 $\Delta\tau$ の傾き $d\Delta\tau/d\lambda$ が、 $|0.5| \text{ ps/km/nm}$ 以下であることが好ましい。特に、1530~1625nm帯である前記波長帯域において、波長 $\lambda$ に対する前記モード分散 $\Delta\tau$ の傾き $d\Delta\tau/d\lambda$ が、 $|0.5| \text{ ps/km/nm}$ 以下であることが好ましい。

[0092] 上記各光ファイバによれば、波長 $\lambda$ によるモード分散特性の変動が殆ど生じないため、符号が正であるモード分散特性を持つ第1の光ファイバと、符号が負であるモード分散特性を持つ第2の光ファイバとの各々を、当該光ファイバのように構成し、さらに、上記第1の光ファイバと上記第2の光ファイバとを適切な長さで組み合わせることにより、広い波長帯域に亘ってモード分散補償がなされた光伝送路を実現することができる。特に、上記光ファイバにより、本書に記載した実験結果からも明らかなように、通信波長帯である1530~1625nm帯(但し、これに限定するものではない。)の全域に亘ってモード分散補償がなされた、光伝送路を実現することができ、よって、上記光ファイバがより有用なものであることがわかる。

[0093] 上記光ファイバにおいて、屈折率分布が $\alpha$ 乗型であり、最大屈折率が $n_1$ である内側コアと、上記内側コアを取り囲み、且つ、屈折率が $n_1'$ である外側コアと、上記外側コアを取り囲み、且つ、屈折率が $n_2$ ( $n_1' < n_2 < n_1$ )であるクラッドとを備えることが好ましい。特に、上記光ファイバにおいて、前記内側コアの半径を $r_1$ とし、前記外側コアの外周部の半径を $a$ とし、前記外側コアと前記クラッドとの比屈折率差を $\Delta_-$ とし、前記内側コアと前記クラッドとの比屈折率差を $\Delta_+$ とし、 $R_a = r_1/a$ とし、 $R_d = |\Delta_-|/|\Delta_+|$ とした場合において、以下の条件1~3を満たすことが好ましい。

- [0094] (条件1) :  $R a \leq 0.7$   
 (条件2) :  $0.1 < R d < 0.5$   
 (条件3) :  $1.0 \leq \alpha \leq 10.0$

この光ファイバによれば、上記各パラメータを適切に調整することにより、モード分散 $\Delta\tau$ の波長 $\lambda$ およびコア半径 $a$ に対する傾き $d\Delta\tau/d\lambda$ および $d\Delta\tau/da$ が極めて小さい、つまり、波長 $\lambda$ およびコア径の影響が極めて小さいモード分散特性を、より確実に得ることができる。

- [0095] また、本発明の一態様に係る光伝送路は、上記光ファイバを用いており、且つ、前記モード分散 $\Delta\tau$ の符号が正である第1の光ファイバと、上記光ファイバを用いており、且つ、前記モード分散 $\Delta\tau$ の符号が負である第2の光ファイバとを備えていることを特徴とする。

- [0096] この光伝送路によれば、所望の波長帯域の全域に亘って、モード分散を十分に補償することができる光伝送路を実現することができる。

### 産業上の利用可能性

- [0097] 本発明は、通信用の光伝送路に利用可能であり、特に、波長多重分割又はモード多重分割による通信用の光伝送路に好適に利用することができる。

### 符号の説明

- [0098] F 光伝送路  
 F<sub>p</sub> 光ファイバ (第1の光ファイバ)  
 F<sub>n</sub> 光ファイバ (第2の光ファイバ)  
 1 光ファイバ  
 1 1 コア  
 1 1 1 内側コア  
 1 1 2 外側コア  
 1 2 クラッド

## 請求の範囲

[請求項1] 信号光に含まれるLP01モード成分およびLP11モード成分を伝搬する2モード光ファイバであって、

予め定められた波長帯域において、下記数式(2)により定義されるモード分散 $\Delta\tau$ が一定である

ことを特徴とする光ファイバ。

[数1]

$$\Delta\tau = \frac{1}{v_{g11}} - \frac{1}{v_{g01}} \quad \dots(2)$$

但し、上記数式(2)において、 $v_{g11}$ は、前記LP11モード成分の群速度を示し、 $v_{g01}$ は、前記LP01モード成分の群速度を示す。

[請求項2] 前記波長帯域において、  
波長 $\lambda$ に対する前記モード分散 $\Delta\tau$ の傾き $d\Delta\tau/d\lambda$ が、 $|0.5|$  ps/km/nm以下  
であることを特徴とする請求項1に記載の光ファイバ。

[請求項3] 1530~1625nm帯である前記波長帯域において、  
波長 $\lambda$ に対する前記モード分散 $\Delta\tau$ の傾き $d\Delta\tau/d\lambda$ が、 $|0.5|$  ps/km/nm以下  
であることを特徴とする請求項2に記載の光ファイバ。

[請求項4] 屈折率分布が $\alpha$ 乗型であり、最大屈折率が $n_1$ である内側コアと、  
上記内側コアを取り囲み、且つ、屈折率が $n_1'$ である外側コアと、  
、  
上記外側コアを取り囲み、且つ、屈折率が $n_2$  ( $n_1' < n_2 < n_1$ ) であるクラッドと  
を備えることを特徴とする請求項1から3のいずれか1項に記載の光ファイバ。

[請求項5] 前記内側コアの半径を $r_1$ とし、

前記外側コアの外周部の半径を  $a$  とし、  
前記外側コアと前記クラッドとの比屈折率差を  $\Delta -$  とし、  
前記内側コアと前記クラッドとの比屈折率差を  $\Delta +$  とし、  
 $R a = r 1 / a$  とし、  
 $R d = | \Delta - | / | \Delta + |$  とした場合において、  
以下の条件 1 ~ 3 を満たすことを特徴とする請求項 4 に記載の光ファイバ。

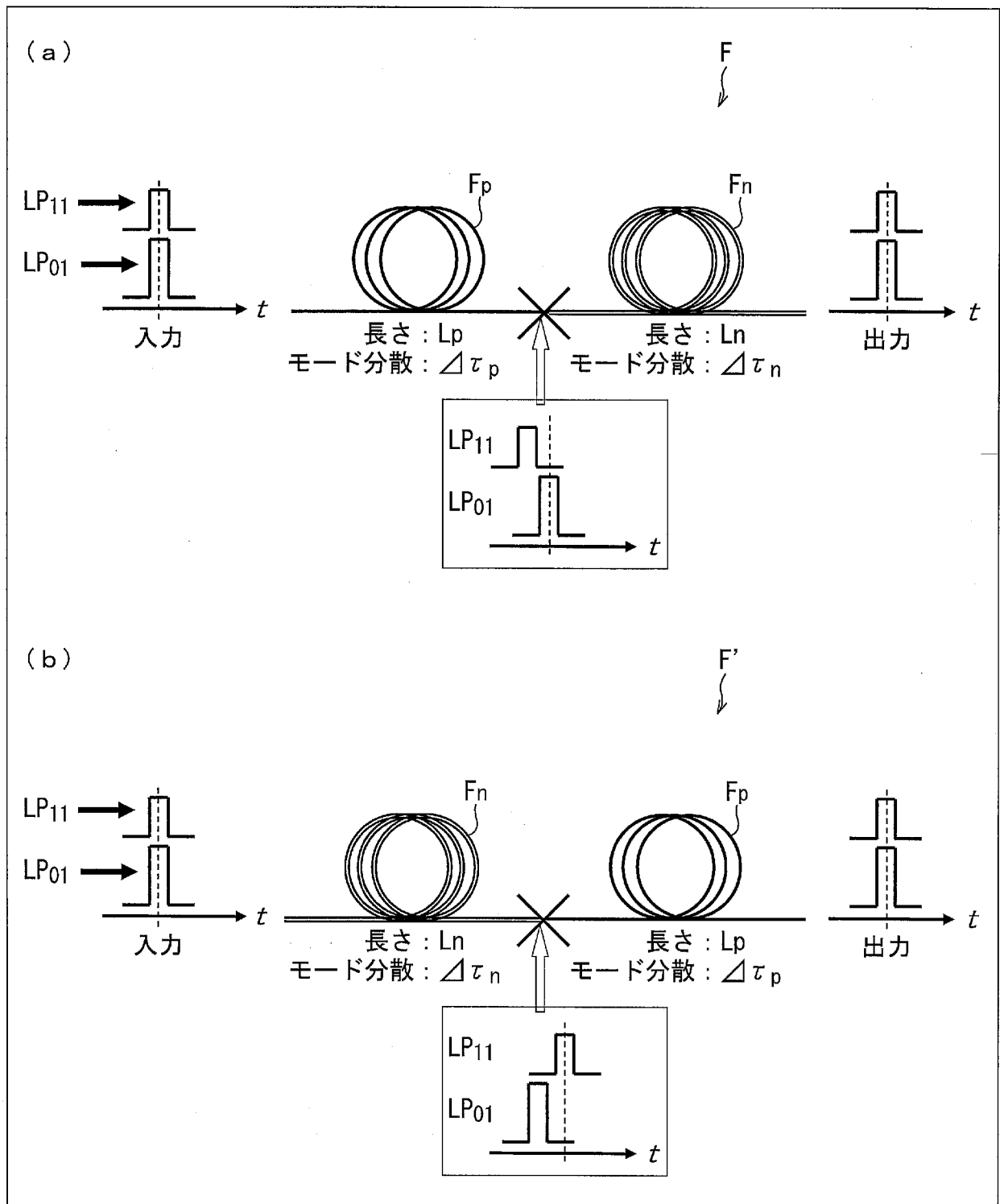
(条件 1) :  $R a \leq 0.7$

(条件 2) :  $0.1 < R d < 0.5$

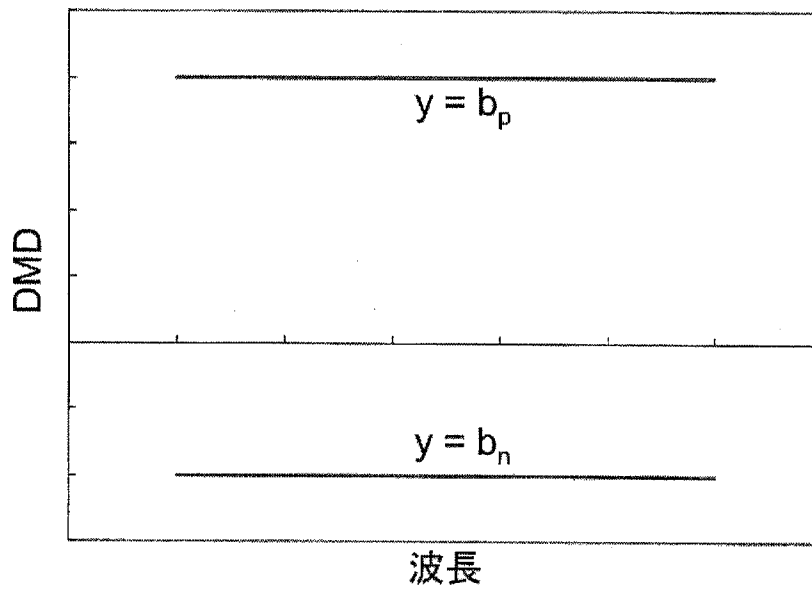
(条件 3) :  $1.0 \leq \alpha \leq 10.0$

[請求項6] 請求項 1 から 5 のいずれか 1 項に記載の光ファイバを用いており、  
且つ、前記モード分散  $\Delta \tau$  の符号が正である第 1 の光ファイバと、  
請求項 1 から 5 のいずれか 1 項に記載の光ファイバを用いており、  
且つ、前記モード分散  $\Delta \tau$  の符号が負である第 2 の光ファイバと  
を備えていることを特徴とする光伝送路。

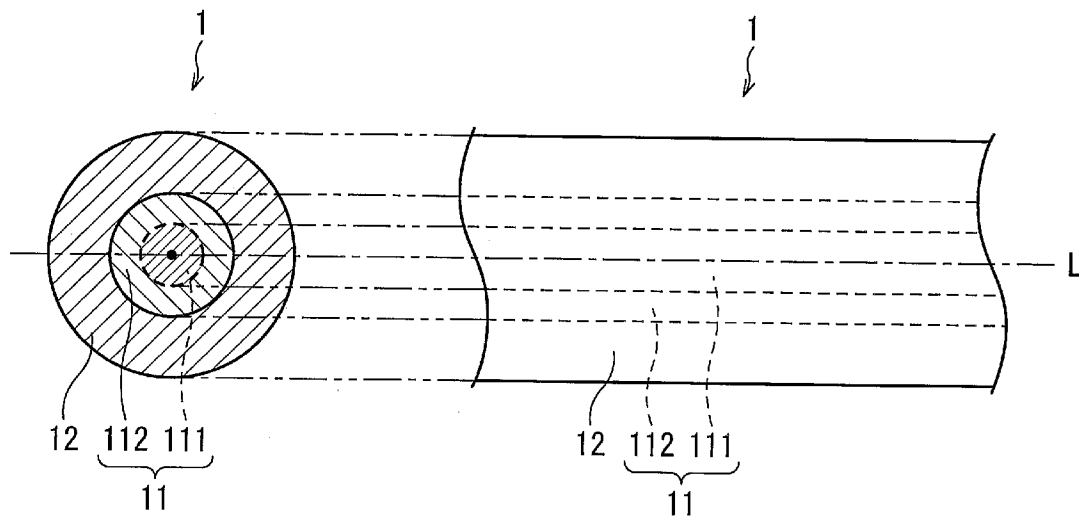
[図1]



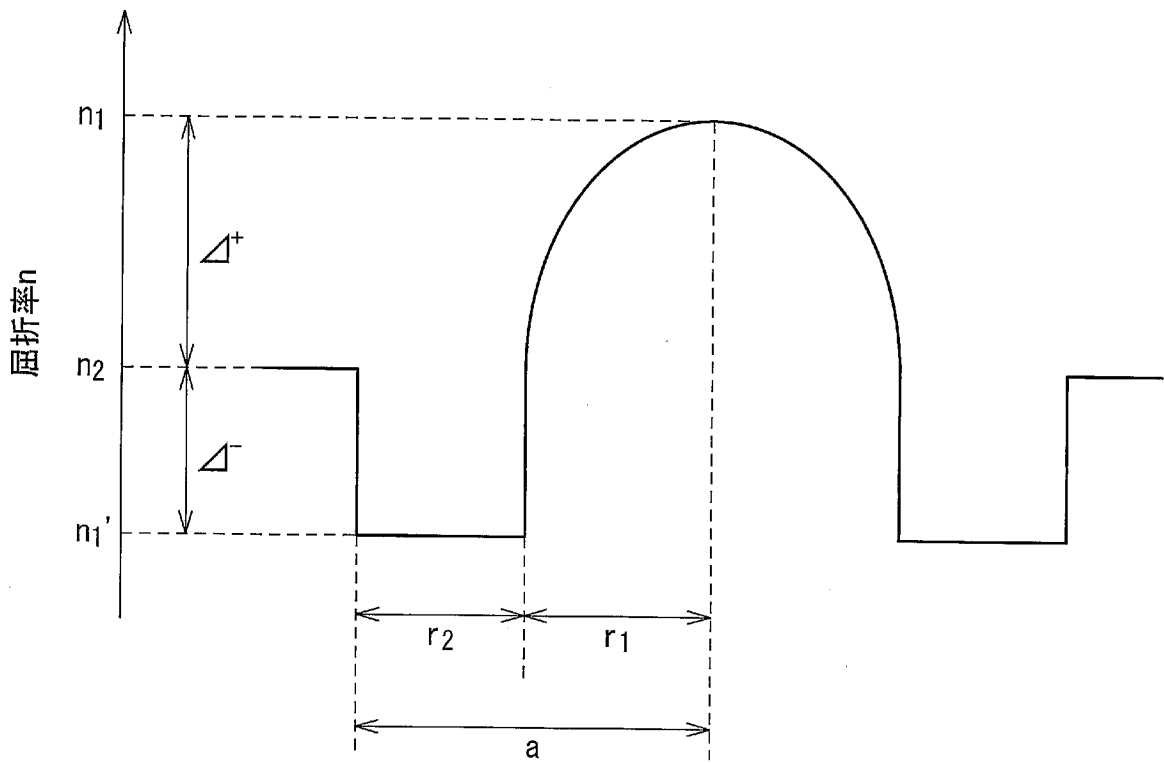
[図2]



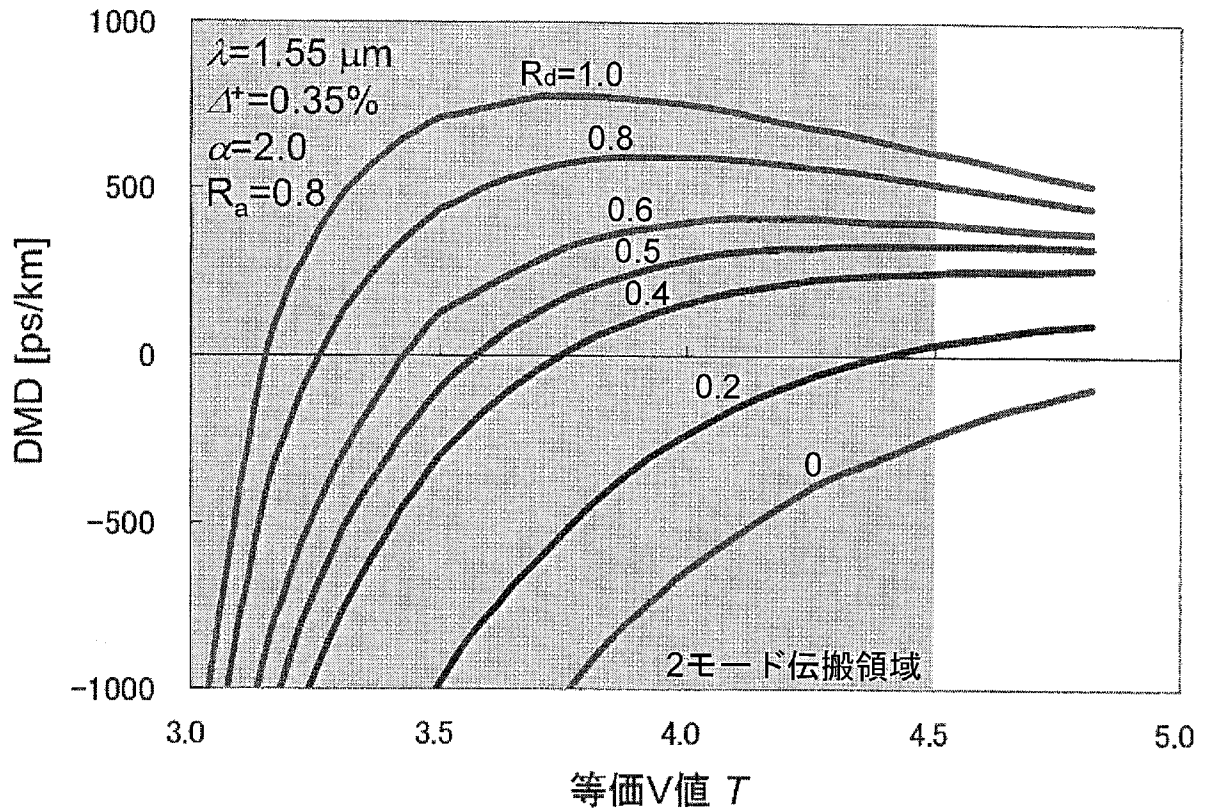
[図3]



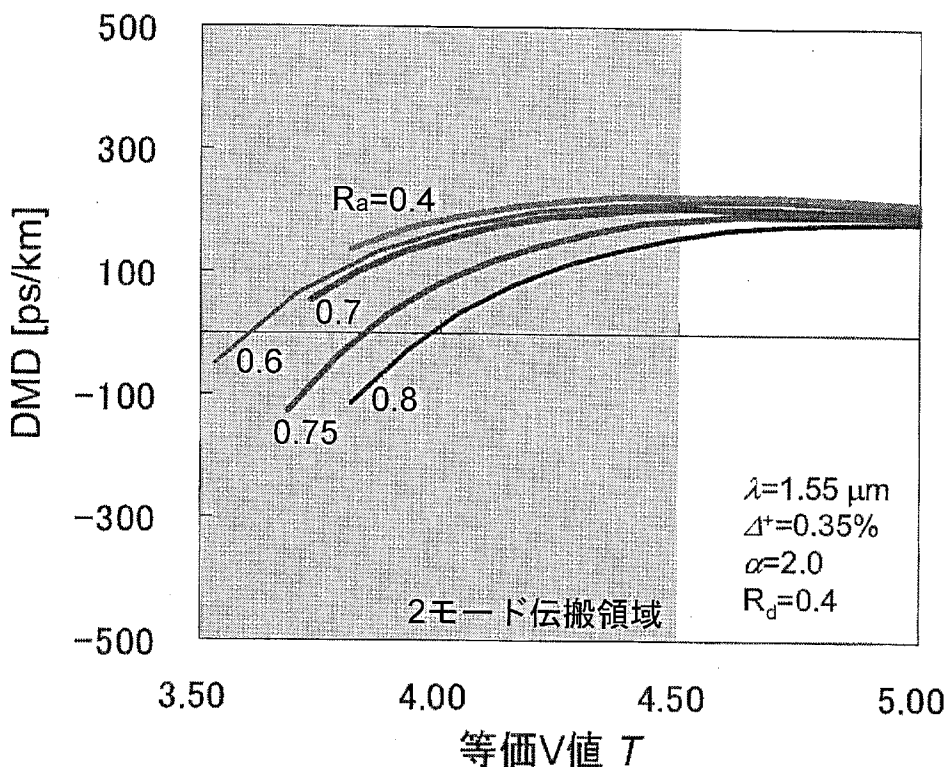
[図4]



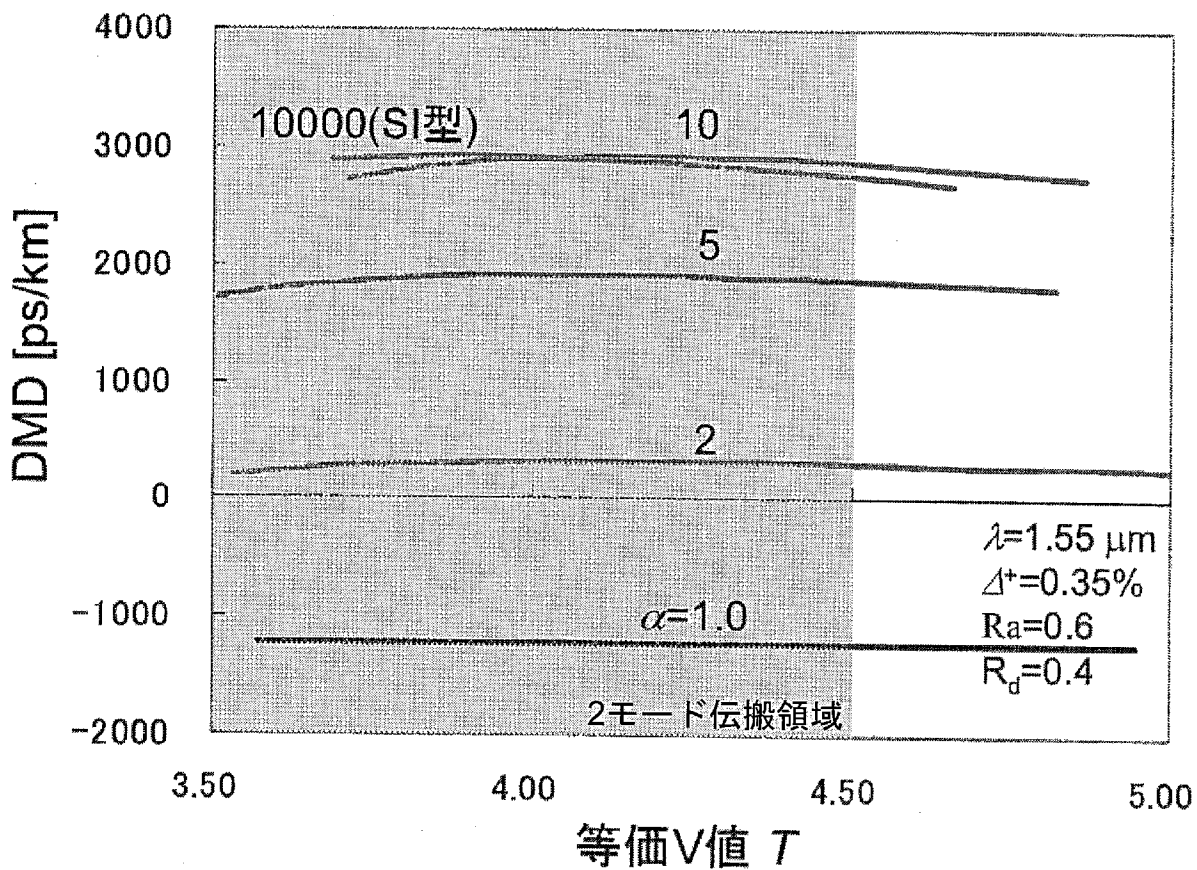
[図5]



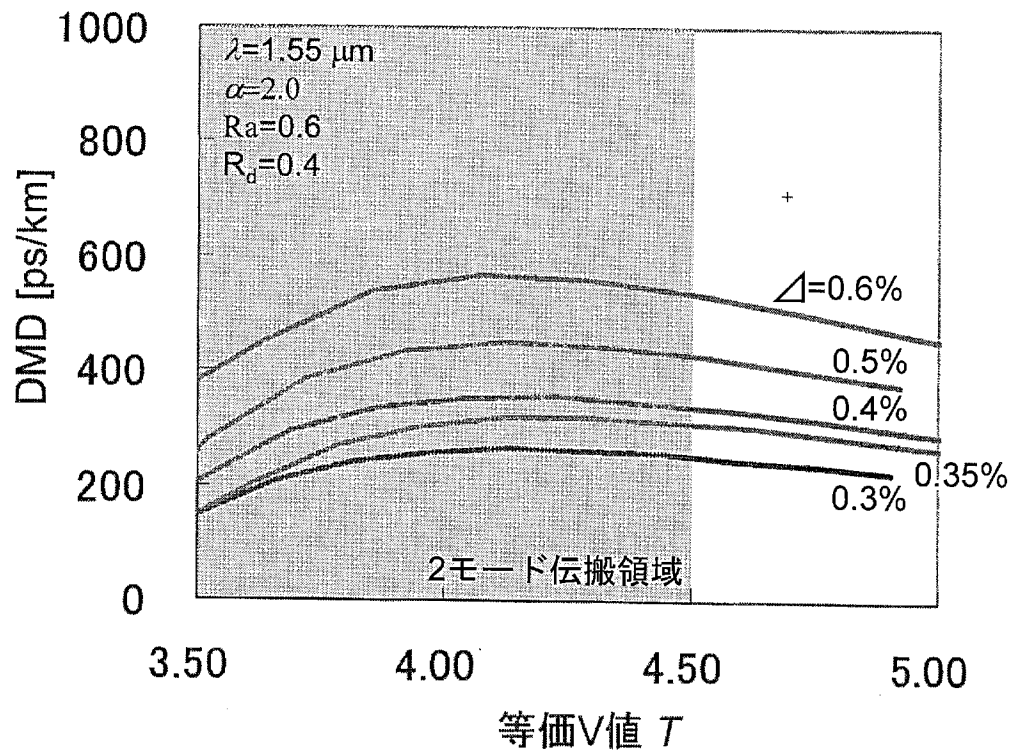
[図6]



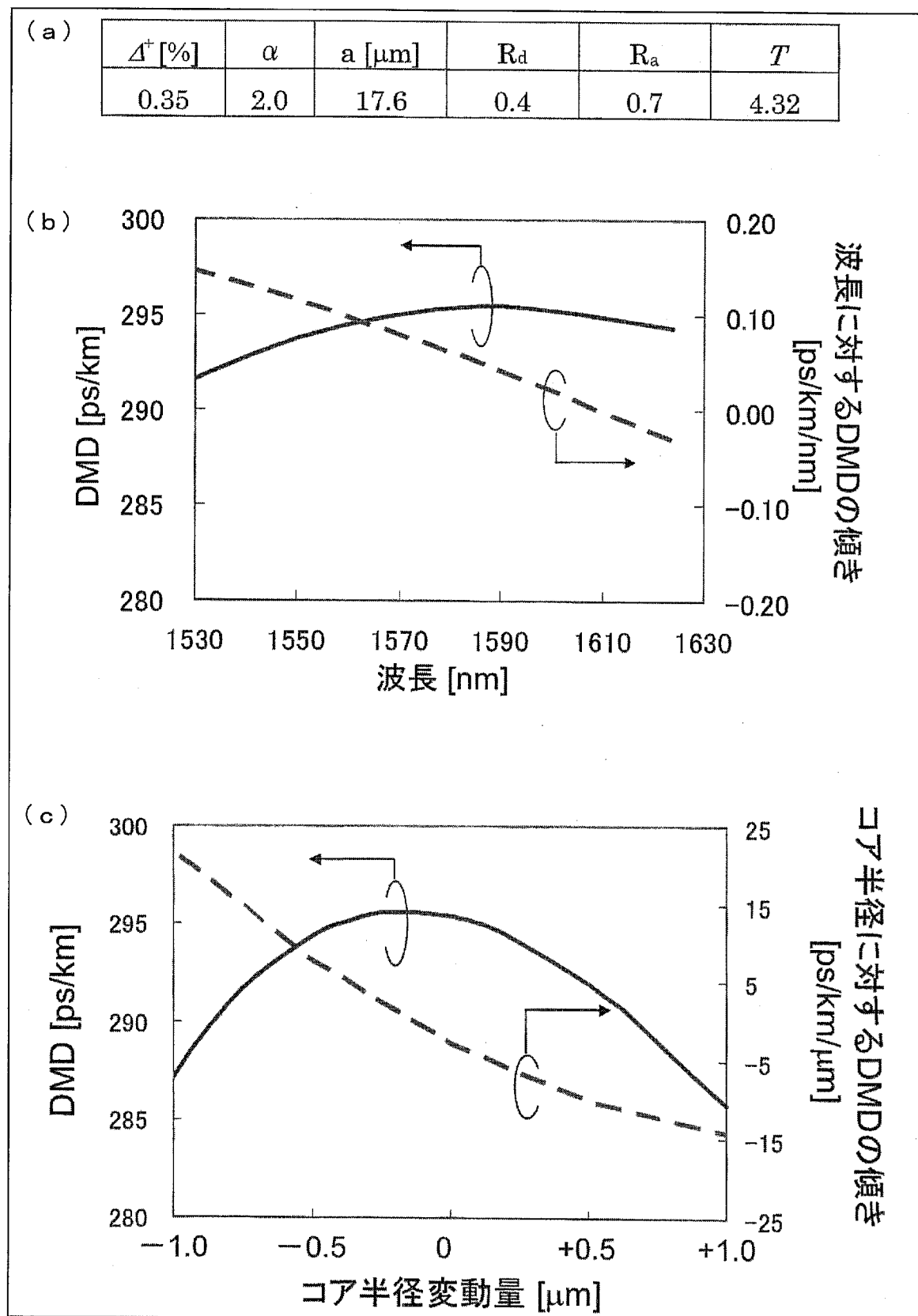
[図7]



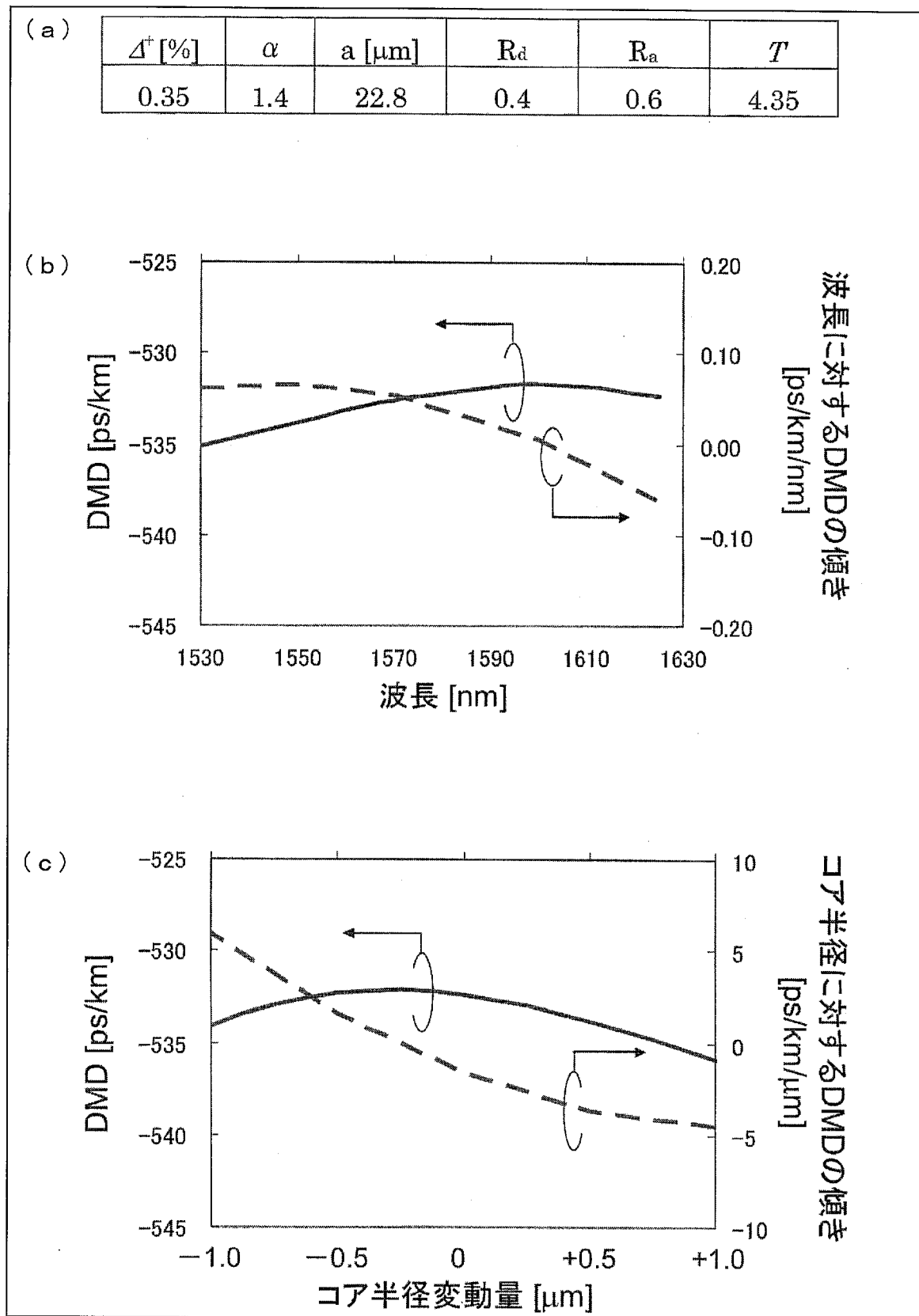
[図8]



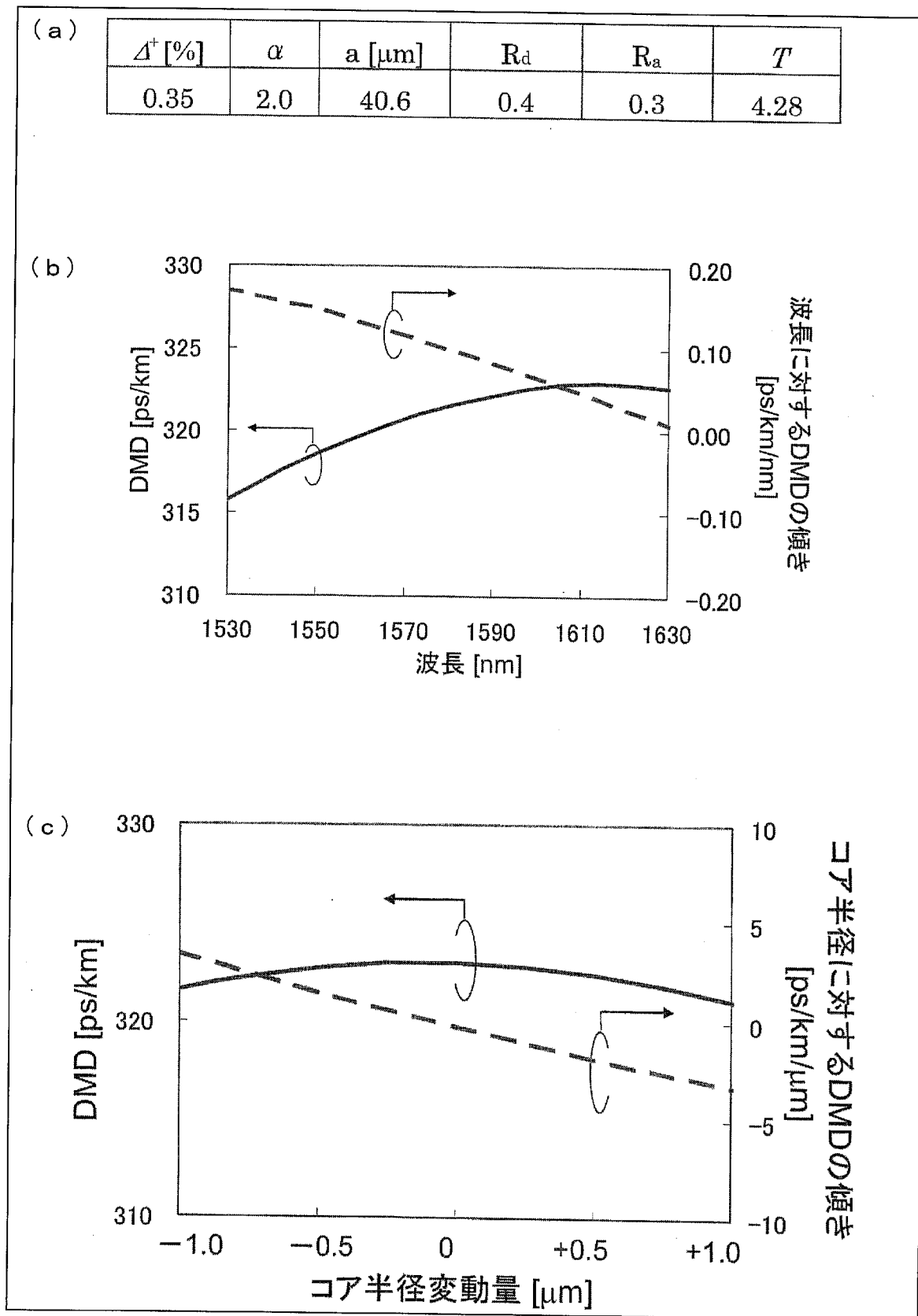
[図9]



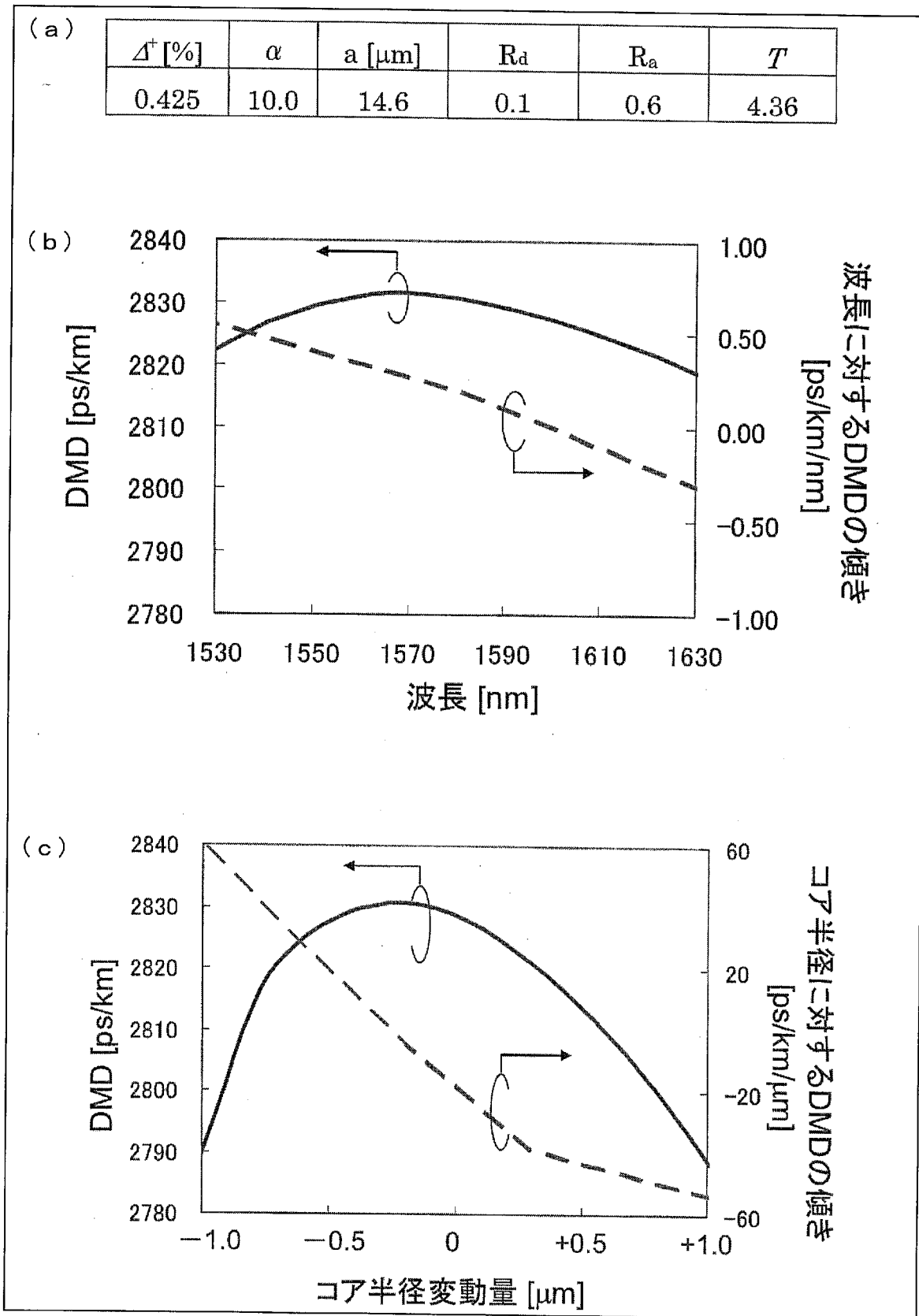
[図10]



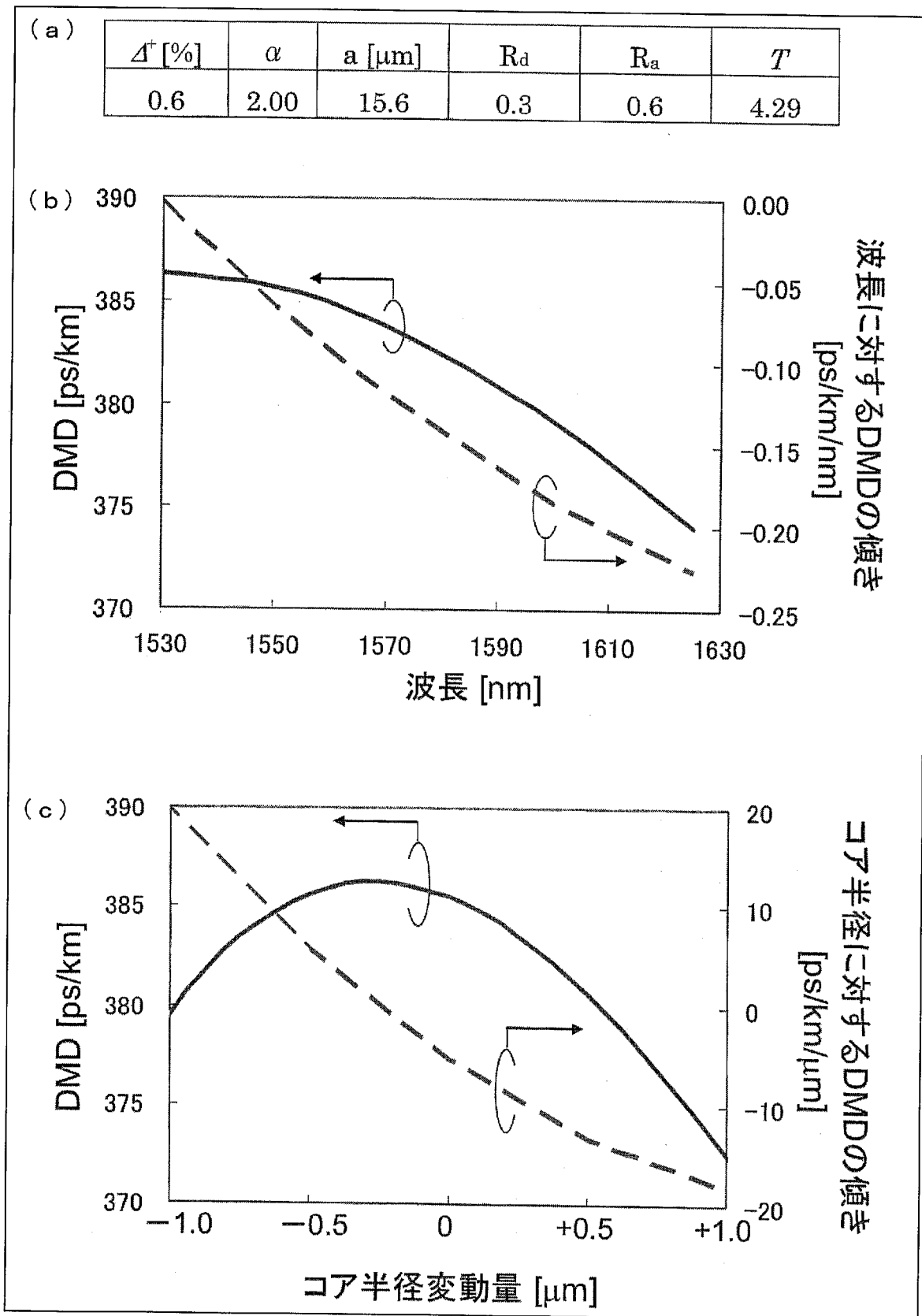
[図11]



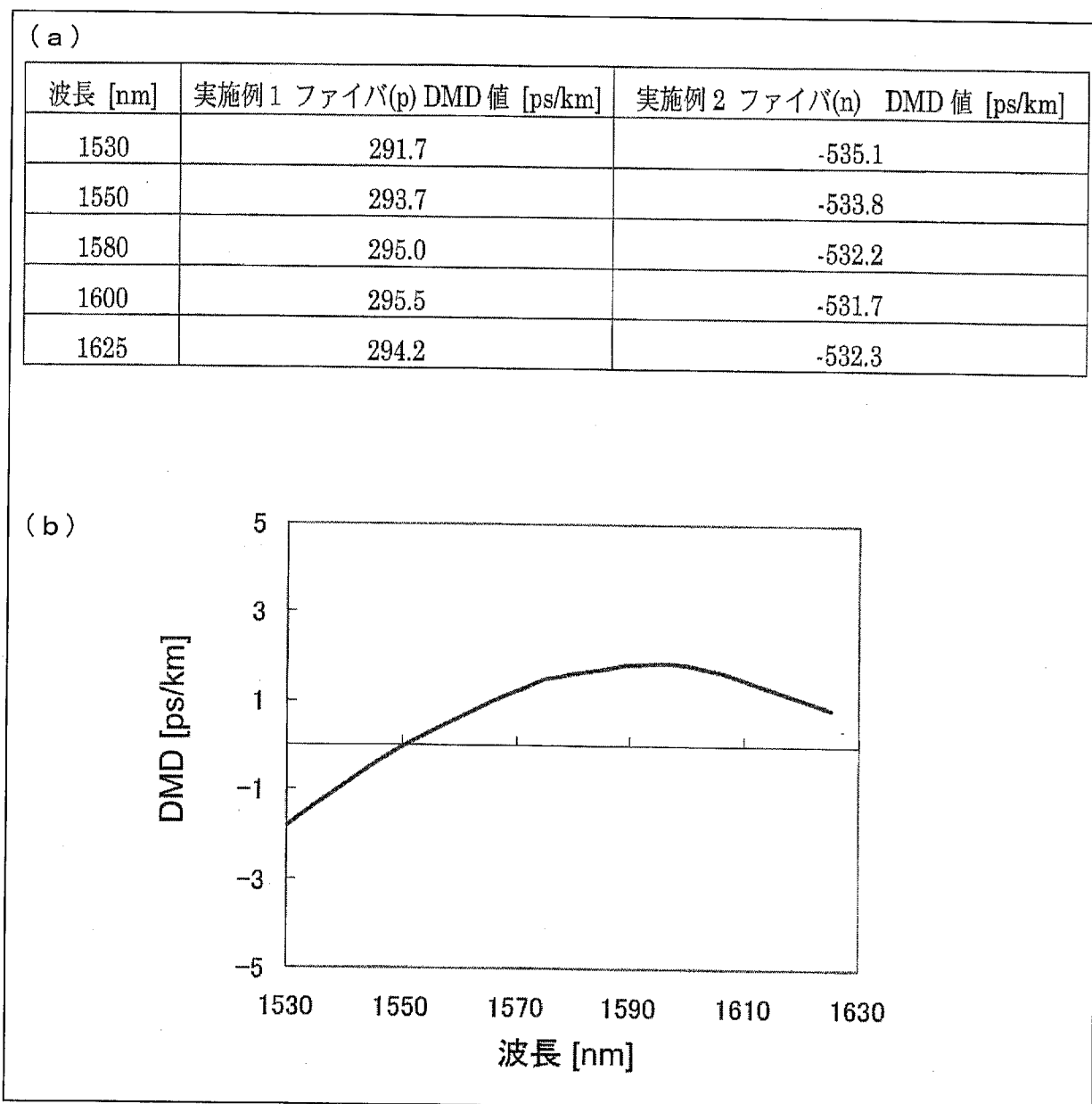
[図12]



[図13]



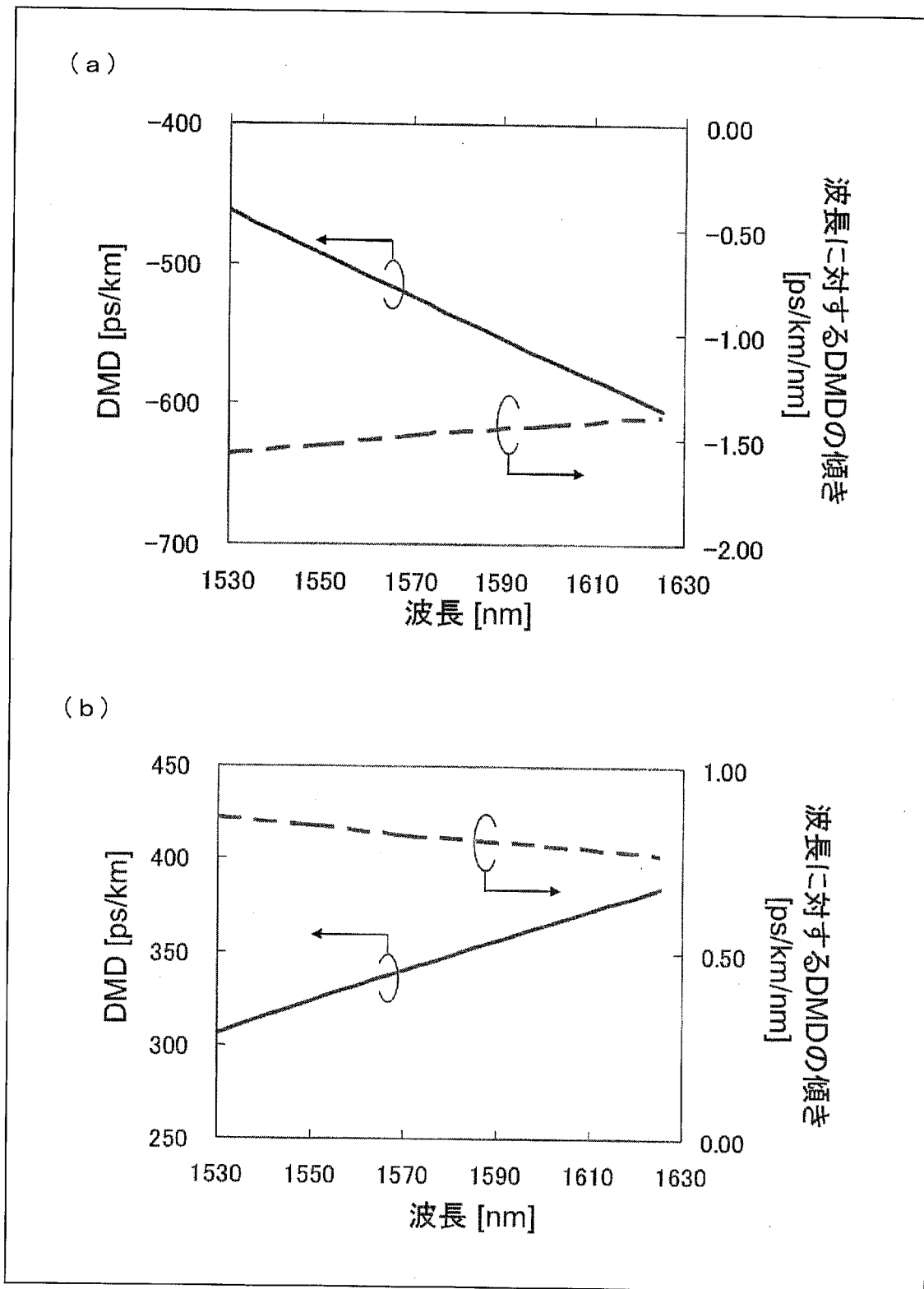
[図14]



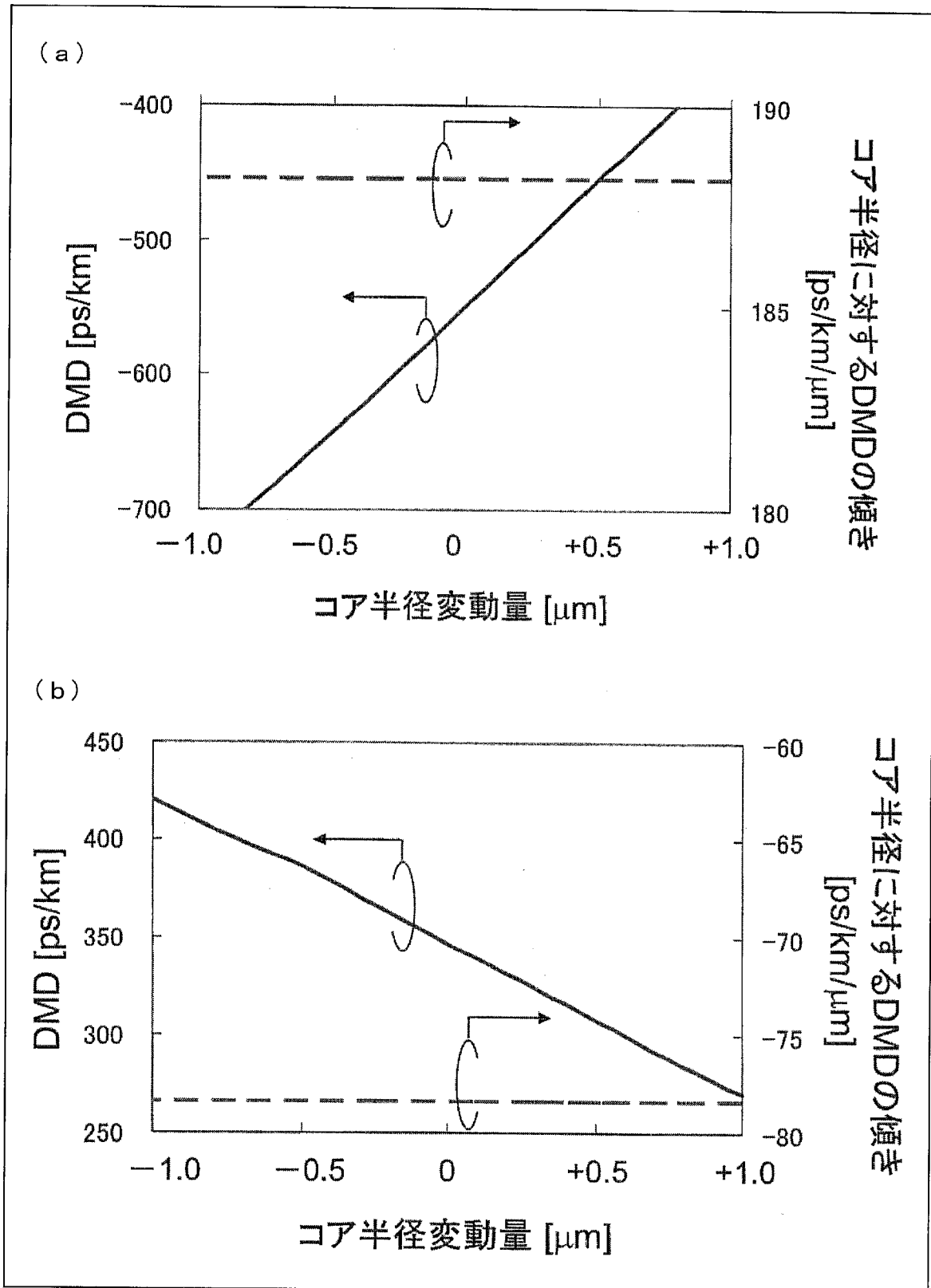
[図15]

ファイバ種	$\Delta^+$ [%]	$\alpha$	$a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_a$	$R_a$	$T$
トレンチ無	0.35	1.8	12.8	—	—	4.27
トレンチ有	0.35	1.8	16.8	1.0	0.8	4.35

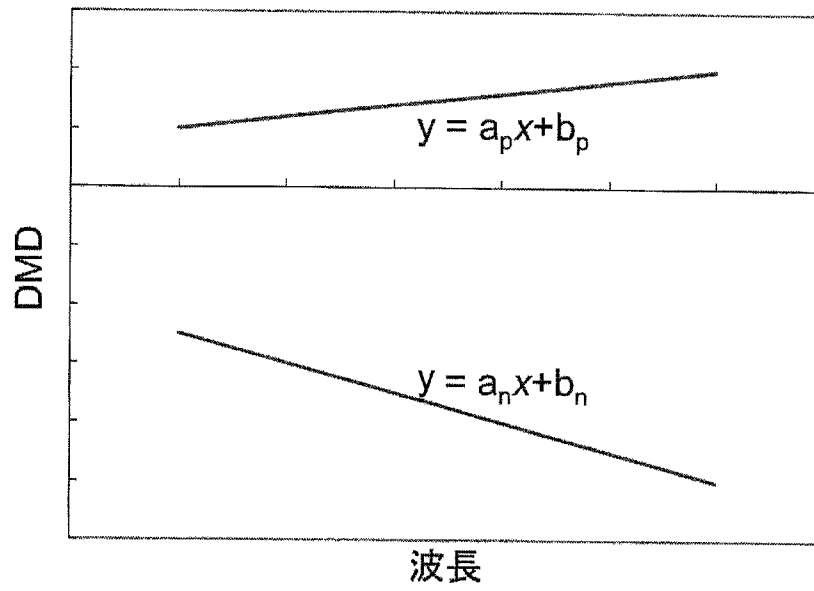
[図16]



[図17]



[図18]



**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.  
PCT/JP2014/052693

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**  
G02B6/036(2006.01)i, G02B6/02(2006.01)i, G02B6/028(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

**B. FIELDS SEARCHED**

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)  
G02B6/036, G02B6/02, G02B6/028

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2014
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2014	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2014

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)  
JSTPlus (JDreamIII), JST7580 (JDreamIII)

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	Taiji Sakamoto, Takayoshi Mori, Takashi	1-3, 6
Y	Yamamoto, Shigeru Tomita, Differential Mode	4
A	Delay Managed Transmission Line for Wide-band WDM-MIMO System, OFC/NFOEC 2012, 2012.03.04, OM2D.1, pp. 1 - 3	5
Y	Ryo Maruyama, Nobuo Kuwaki, Shoichiro Matsuo,	4
A	Kiminori Sato, and Masaharu Ohashi, DMD Free Transmission Line Composed of TMFs with Large Effective Area for MIMO Processing, ECOC 2012, 2012.09.16, Tu.1.F.2, pp. 1 - 3	5

Further documents are listed in the continuation of Box C.       See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 19 February, 2014 (19.02.14)	Date of mailing of the international search report 04 March, 2014 (04.03.14)
---	---

Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office	Authorized officer
Facsimile No.	Telephone No.

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.

PCT/JP2014/052693

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	Ryo MARUYAMA, Nobuo KUWAKI, Shoichiro MATSUO, Kiminori SATO, Masaharu OHASHI, "A Study on Design of Two-Mode Optical Fiber for Bundle Transmission", 2011 Nen IEICE Communications Society Conference Koen Ronbunshu 2, 30 August 2011 (30.08.2011), page 235	4 5

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))  
 Int.Cl. G02B6/036(2006.01)i, G02B6/02(2006.01)i, G02B6/028(2006.01)i

B. 調査を行った分野  
 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))  
 Int.Cl. G02B6/036, G02B6/02, G02B6/028

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの  
 日本国実用新案公報 1922-1996年  
 日本国公開実用新案公報 1971-2014年  
 日本国実用新案登録公報 1996-2014年  
 日本国登録実用新案公報 1994-2014年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)  
 JSTPlus(JDreamIII), JST7580(JDreamIII)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X	Taiji Sakamoto, Takayoshi Mori, Takashi Yamamoto, Shigeru	1-3, 6
Y	Tomita, Differential Mode Delay Managed Transmission Line for	4
A	Wide-band WDM-MIMO System, OFC/NFOEC 2012, 2012.03.04, OM2D.1, pp. 1 - 3	5
Y	Ryo Maruyama, Nobuo Kuwaki, Shoichiro Matsuo, Kiminori Sato, and	4
A	Masaharu Ohashi, DMD Free Transmission Line Composed of TMFs with Large Effective Area for MIMO Processing, ECOC 2012, 2012.09.16, Tu.1.F.2, pp. 1 - 3	5

C欄の続きにも文献が列挙されている。  パテントファミリーに関する別紙を参照。

\* 引用文献のカテゴリー  
 「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの  
 「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの  
 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)  
 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献  
 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願日の後に公表された文献  
 「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの  
 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの  
 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの  
 「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日 19.02.2014	国際調査報告の発送日 04.03.2014
--------------------------	--------------------------

国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	特許庁審査官 (権限のある職員) 吉田 英一 電話番号 03-3581-1101 内線 3294	2 X	9 1 2 4
---	--	-----	---------

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y A	丸山遼、桑木伸夫、松尾昌一郎、佐藤公紀、大橋正治， 2モード一括伝送用光ファイバ設計に関する一検討， 2011年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会講演論文集2， 2011.08.30， pp. 235	4 5