



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112969941 B

(45) 授权公告日 2023. 08. 25

(21) 申请号 201980073966.9

(22) 申请日 2019.11.08

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 112969941 A

(43) 申请公布日 2021.06.15

(30) 优先权数据  
2018-218153 2018.11.21 JP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日  
2021.05.10

(86) PCT国际申请的申请数据  
PCT/JP2019/043826 2019.11.08

(87) PCT国际申请的公布数据  
W02020/105470 JA 2020.05.28

(73) 专利权人 日本电信电话株式会社  
地址 日本东京

(72) 发明人 松井隆 中岛和秀

(74) 专利代理机构 北京信慧永光知识产权代理  
有限责任公司 11290  
专利代理师 李成必 李雪春

(51) Int.Cl.  
G02B 6/02 (2006.01)

(56) 对比文件  
JP 2018021999 A, 2018.02.08  
CN 1359013 A, 2002.07.17  
CN 1334928 A, 2002.02.06  
CN 104678484 A, 2015.06.03  
CN 108508530 A, 2018.09.07  
JP 2013097172 A, 2013.05.20  
JP 2013088458 A, 2013.05.13  
WO 2018168170 A1, 2018.09.20  
US 2014153883 A1, 2014.06.05

审查员 曾毅

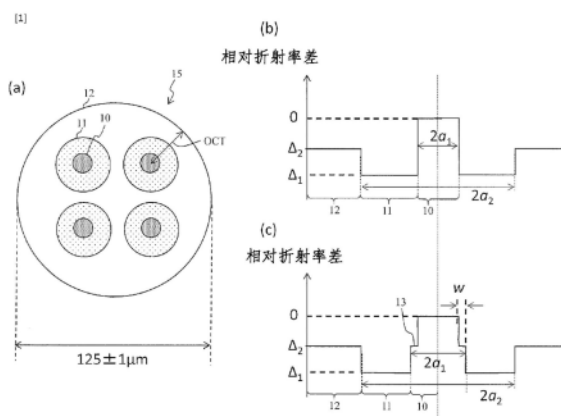
权利要求书2页 说明书15页 附图16页

## (54) 发明名称

多芯光纤和光传输方法

## (57) 摘要

本发明的目的在于提供以现有的单模光纤的包层直径的标准 $125 \pm 1 \mu\text{m}$ 具有四个芯且能够应对数千km级的传输的多芯光纤、该多芯光纤的设计方法和利用该多芯光纤的光传输方法。本发明的多芯光纤在各芯的周围配置折射率不同的两阶段的包层,使芯半径 $a_1$ 、包围各芯的周围的第一包层区域的半径 $a_2$ 、第一包层区域相对于芯的相对折射率 $\Delta_1$ 、以及包含四个芯和第一包层区域的第二包层区域相对于芯的相对折射率 $\Delta_2$ 为规定的范围。



1. 一种多芯光纤,其特征在于具有:

半径 $a_1$ 的四个芯,沿长边方向配置成正方格子状;

折射率比芯低的半径 $a_2$ 的第一包层区域,在所述芯的周围,折射率与所述芯的相对折射率差为 $\Delta_1$ ;

折射率比芯低的第二包层区域,在所述第一包层区域的外周部,折射率比所述第一包层区域大且与所述芯的相对折射率差为 $\Delta_2$ ,

所述第二包层区域的外径是 $125 \pm 1 \mu\text{m}$ ,

波长1550nm处的有效截面积为 $80 \mu\text{m}^2$ 以上,

波长1625nm、弯曲半径30mm处的弯曲损耗为0.1dB/100turn以下,

截止波长为1530nm以下,

在所述芯和所述第一包层区域之间具有宽度 $w$ 的与所述第二包层区域相同折射率的区域,

所述宽度 $w$ 为 $0 \mu\text{m} < w \leq 1.3 \mu\text{m}$ 。

2. 根据权利要求1所述的多芯光纤,其特征不在于,所述 $\Delta_1$ 与每1km的芯间串扰的合计值XT (dB/km)的关系满足数C1,

[数C1]

$$\Delta_1 \leq 4.93 \times 10^{-5} \text{XT} - 0.00127 \quad (\text{C1})。$$

3. 根据权利要求1所述的多芯光纤,其特征不在于,所述 $a_1$ 与所述 $\Delta_1$ 的关系满足数C2,

[数C2]

$$a_1 \geq -28041\Delta_1^2 - 560.65\Delta_1 + 3.1369 \quad (\text{C2})。$$

4. 根据权利要求1所述的多芯光纤,其特征不在于,

所述 $\Delta_2$ 与每1km的芯间串扰的合计值XT (dB/km)的关系满足数C3,

[数C3]

$$\Delta_2 \geq -1.14 \times 10^{-5} \text{XT} - 0.00509 \quad (\text{C3})。$$

5. 根据权利要求1所述的多芯光纤,其特征不在于,

所述 $a_1$ 与所述 $a_2$ 的比 $a_2/a_1$ 为1.0以上且3.0以下,

所述 $\Delta_1$ 、所述 $a_2/a_1$ 和波长1550nm处的有效截面积 $A_{\text{eff}}$ 的关系满足数C4,

所述 $\Delta_2$ 、所述 $a_2/a_1$ 和所述 $A_{\text{eff}}$ 的关系满足数C5,

[数C4]

$$\Delta_2 \geq (1.9 \times 10^{-6} A_{\text{eff}}^2 + 0.00033 A_{\text{eff}} + 0.0163) a_2/a_1 + (-8.0 \times 10^{-6} A_{\text{eff}}^2 + 0.00139 A_{\text{eff}} - 0.0705) \quad (\text{C4})$$

[数C5]

$$\Delta_2 \geq (5.0 \times 10^{-8} A_{\text{eff}}^2 + 6.5 \times 10^{-6} A_{\text{eff}} - 0.00108) a_2/a_1 + (-29 \times 10^{-7} A_{\text{eff}}^2 + 5.58 \times 10^{-5} A_{\text{eff}} - 0.00594)$$

且

$$\Delta_2 \leq (5.0 \times 10^{-7} A_{\text{eff}}^2 - 9.5 \times 10^{-5} A_{\text{eff}} + 0.0056) a_2/a_1 + (-1.6 \times 10^{-6} A_{\text{eff}}^2 + 0.00031 A_{\text{eff}} - 0.0208) \quad (\text{C5})。$$

6. 根据权利要求3所述的多芯光纤,其特征不在于,所述 $\Delta_1$ 、所述 $\Delta_2$ 满足数C6,

[数C6]

$$-0.7\% \leq \Delta_1 \leq -0.49\%$$

$$-0.4\% \leq \Delta_2 \leq -0.27\% \quad (C6)。$$

7. 根据权利要求4所述的多芯光纤,其特征在於,所述 $\Delta_1$ 、所述 $\Delta_2$ 满足数C6,

[数C6]

$$-0.7\% \leq \Delta_1 \leq -0.49\%$$

$$-0.4\% \leq \Delta_2 \leq -0.27\% \quad (C6)。$$

8. 根据权利要求5所述的多芯光纤,其特征在於,所述 $\Delta_1$ 、所述 $\Delta_2$ 满足数C6,

[数C6]

$$-0.7\% \leq \Delta_1 \leq -0.49\%$$

$$-0.4\% \leq \Delta_2 \leq -0.27\% \quad (C6)。$$

9. 一种光传输方法,其特征在於,

将1000km以上的权利要求1至8中任意一项所述的多芯光纤作为光传输通道,从四个发送机向所述多芯光纤的每个所述芯发送波长1530nm以上的信号光,由四个接收机对所述多芯光纤的每个所述芯接收所述信号光。

10. 一种光传输方法,其特征在於,

将通信距离为1000km以上的海底通信系统的单模光纤替换为权利要求1至8中任意一项所述的多芯光纤,

从四个发送机向所述多芯光纤的每个所述芯发送波长1530nm以上的信号光,由四个接收机对所述多芯光纤的每个所述芯接收所述信号光。

## 多芯光纤和光传输方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及具有多个芯的多芯光纤、该多芯光纤的设计方法和利用该多芯光纤的光传输方法。

### 背景技术

[0002] 正在积极地研究具有多个芯区域的多芯光纤 (MCF) 以通过使用空分复用技术来显著地扩大传输容量。特别是已知在使用空分复用的光传输通道中能够降低消耗电力, 期待 MCF 在以海底通信系统为代表的长距离光通信系统中的有效利用, 在非专利文献1中使用 MCF 在10000km级的传输实验中成功。在此, 在MCF中需要防止由芯间的串扰 (XT) 引起的传输特性的劣化。为了降低XT, 除了需要进行MCF中的芯参数的设计以外, 还需要适当地设定芯间的距离, 在非专利文献2中报道了使芯间的XT在10000km为-30dB以下的XT非常低的MCF。

[0003] 在此, 包括非专利文献1、2的多个报告中所示的MCF为了降低XT而设定足够宽的芯间隔, 因此包层直径为150~230 $\mu\text{m}$ , 与以往的光纤相比变大。但是, 从一个光纤母材制造的光纤的长度与包层直径的平方成反比地变短, 因此包层直径的扩大使光纤的生产性显著劣化。此外, 由于现有的光纤部件等是根据以往125 $\mu\text{m}$ 的包层直径设计的, 所以为了有效利用扩大了包层直径的MCF, 需要重新设计周边部件, 在实用化上需要进行大量的研究开发。

[0004] 因此, 近年来, 开发了具有与以往同等的125 $\mu\text{m}$ 的包层直径的MCF。包层直径为标准的125 $\mu\text{m}$ , 由此能够将光纤的批量生产性维持在与以往同等以上, 并且能够有效利用标准的连接部件、光缆等现有的周边物品。此外, MCF的各芯具有与现有的光纤同等的光学特性, 由此能够确保与现有的光接口的互换性, 因此能够从现有的设备容易升级为MCF。

[0005] 在非专利文献3、4中报道了在100km具有-30dB以下的XT, 并且光学特性与现有的单模光纤 (SMF) 同等的具有四个芯的MCF。按照非专利文献3, 在使用同种的芯结构的情况下能够配置四个芯, 此外, 按照非专利文献5, 示出了通过使用多个芯结构能够配置五个芯。另外, 在非专利文献6中研究了具有与面向海底的低损耗光纤同等特性的MCF, 示出了能够以125 $\mu\text{m}$ 的包层直径配置2芯。

[0006] 现有技术文献

[0007] 非专利文献1:H.Takahashi et al., “First Demonstration of MC-EDFA-Repeatered SDM Transmission of 40x 128-Gbit/s PDM-QPSK Signals per Core over 6,160-km 7-core MCF,” ECOC2012, Th3C3, Sep.2012.

[0008] 非专利文献2:T.Hayashi et al., “Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber,” Opt.Express, vol.19, pp.16576-16592, Aug.2011.

[0009] 非专利文献3:T.Matsui et al., “Design of multi-core fiber in 125 $\mu\text{m}$  cladding diameter with full compliance to conventional SMF,” ECOC2015, We.1.4.5, Sep.2015.

[0010] 非专利文献4:T.Matsui et al., “118.5Tbit/s Transmission over 316km-Long

Multi-Core Fiber with Standard Cladding Diameter”OECC2017,PDP2,Aug.2017.

[0011] 非专利文献5:T.Gonda et al.,“125 $\mu\text{m}$  5-core fibre with heterogeneous design suitable for migration from single-core system to multi-core system” ECOC2016,W2B1,Sep.2016.

[0012] 非专利文献6:田村等,“具有125 $\mu\text{m}$ 包层直径的Aeff放大非耦合型2芯光纤”电子信息通信学会交流大会,B-10-2、2016年9月

[0013] 非专利文献7:P.J.Winzer et al.,“Penalties from In-Band Crosstalk for Advanced Optical Modulation Formats,”ECOC2011,Tu5B7,Sep.2011.

[0014] 但是,在考虑维持现有的125 $\mu\text{m}$ 的包层直径且具有四个芯的MCF的情况下,如非专利文献3~5所示,由于XT的限制,存在数百km左右成为极限的课题。此外,如非专利文献6所示,为了实现能够应对数千km级的传输的XT,对于包层直径125 $\mu\text{m}$ ,芯数的极限为两个,存在难以进行三个以上的芯配置的课题。

### 发明内容

[0015] 因此,为了解决所述课题,本发明的目的在于提供以现有的单模光纤的包层直径的标准125 $\pm$ 1 $\mu\text{m}$ 具有四个芯且能够应对数千km级的传输的多芯光纤、该多芯光纤的设计方法和利用该多芯光纤的光传输方法。

[0016] 为了达成上述目的,本发明的多芯光纤在各芯的周围配置折射率不同的两阶段的包层,使芯半径a1、包围各芯的周围的第一包层区域的半径a2、第一包层区域相对于芯的相对折射率 $\Delta 1$ 、以及包含四个芯和第一包层区域的第二包层区域相对于芯的相对折射率 $\Delta 2$ 为规定的范围。

[0017] 具体地说,本发明的多芯光纤的特征在于具有:

[0018] 半径a1的四个芯,沿长边方向配置成正方格子状;

[0019] 折射率比芯低的半径a2的第一包层区域,在所述芯的周围,折射率与所述芯的相对折射率差为 $\Delta 1$ ;以及

[0020] 折射率比芯低的第二包层区域,在所述第一包层区域的外周部,折射率比所述第一包层区域大且与所述芯的相对折射率差为 $\Delta 2$ ,

[0021] 所述第二包层区域的外径是125 $\pm$ 1 $\mu\text{m}$ ,

[0022] 波长1550nm处的有效截面积为80 $\mu\text{m}^2$ 以上,

[0023] 波长1625nm、弯曲半径30mm处的弯曲损耗为0.1dB/100turn以下,

[0024] 截止波长为1530nm以下,

[0025] 在所述芯和所述第一包层区域之间具有宽度w的与所述第二包层区域相同折射率的区域,

[0026] 所述宽度w为0 $\mu\text{m}$ <w $\leq$ 1.3 $\mu\text{m}$ 。

[0027] 通过第一包层区域的存在,容易将电场分布封闭于芯,因此能够在降低XT的状态下使芯间隔变窄,即使是125 $\mu\text{m}$ 的包层直径,也能够作为配置四个芯且能够进行长距离传输的多芯光纤。

[0028] 本发明的多芯光纤,可以在所述芯和所述第一包层区域之间具有宽度w的与所述第二包层区域相同折射率的区域。在这种情况下,所述宽度w优选为0 $\mu\text{m}$ <w $\leq$ 1.3 $\mu\text{m}$ 。

[0029] 本发明的多芯光纤的各参数如下所述。

[0030] 特征在于,所述  $\Delta_1$  与每1km的芯间串扰的合计值XT (dB/km) 的关系满足数C1。

[0031] [数C1]

$$[0032] \quad \Delta_1 \leq 4.93 \times 10^{-5} XT - 0.00127 \quad (C1)$$

[0033] 特征在于,所述  $a_1$  与所述  $\Delta_1$  的关系满足数C2。

[0034] [数C2]

$$[0035] \quad a_1 \geq -28041\Delta_1^2 - 560.65\Delta_1 + 3.1369 \quad (C2)$$

[0036] 特征在于,所述  $\Delta_2$  与每1km的芯间串扰的合计值XT (dB/km) 的关系满足数C3。

[0037] [数C3]

$$[0038] \quad \Delta_2 \geq -1.14 \times 10^{-5} XT - 0.00509 \quad (C3)$$

[0039] 特征在于,所述  $a_1$  与所述  $a_2$  的比  $a_2/a_1$  为1.0以上且3.0以下,

[0040] 所述  $\Delta_1$ 、所述  $a_2/a_1$  和波长1550nm处的有效截面积  $A_{\text{eff}}$  的关系满足数C4,

[0041] 所述  $\Delta_2$ 、所述  $a_2/a_1$  和所述  $A_{\text{eff}}$  的关系满足数C5。

[0042] [数C4]

$$[0043] \quad \Delta_1 \leq (1.9 \times 10^{-6} A_{\text{eff}}^2 - 0.00033 A_{\text{eff}} + 0.0163) a_2/a_1 + (-8.0 \times 10^{-6} A_{\text{eff}}^2 + 0.00139 A_{\text{eff}} - 0.0705) \quad (C4)$$

[0044] [数C5]

$$[0045] \quad \Delta_2 \geq (5.0 \times 10^{-8} A_{\text{eff}}^2 + 6.5 \times 10^{-6} A_{\text{eff}} - 0.00108) a_2/a_1 + (-2.9 \times 10^{-7} A_{\text{eff}}^2 + 5.58 \times 10^{-5} A_{\text{eff}} - 0.00594)$$

[0046] 且

$$[0047] \quad \Delta_2 \leq (5.0 \times 10^{-7} A_{\text{eff}}^2 - 9.5 \times 10^{-5} A_{\text{eff}} + 0.0056) a_2/a_1 + (-1.6 \times 10^{-6} A_{\text{eff}}^2 + 0.00031 A_{\text{eff}} - 0.0208) \quad (C5)$$

[0048] 特征在于,所述  $\Delta_1$ 、所述  $\Delta_2$  满足数C6。

[0049] [数C6]

$$[0050] \quad -0.7\% \leq \Delta_1 \leq -0.49\%$$

$$[0051] \quad -0.4\% \leq \Delta_2 \leq -0.27\% \quad (C6)$$

[0052] 此外,本发明的多芯光纤的各参数能够以如下方式表现。

[0053] 本多芯光纤的特征在于具有:

[0054] 半径  $a_1$  的四个芯,沿长边方向配置成正方格子状;

[0055] 折射率比芯低的半径  $a_2$  的第一包层区域,在所述芯的周围,折射率与所述芯的相对折射率差为  $\Delta_1$ ; 以及

[0056] 折射率比芯低的第二包层区域,在所述第一包层区域的外周部,折射率比所述第一包层区域大且与所述芯的相对折射率差为  $\Delta_2$ ,

[0057]  $a_2/a_1 = 2.0$  且波长1550nm处的有效截面积为  $80 \mu\text{m}^2$ ,

[0058] 将第一包层区域的相对折射率差作为横轴、将第二包层区域的相对折射率差作为纵轴时,所述  $\Delta_1$  和所述  $\Delta_2$  位于由

[0059] A0 (-0.800, -0.396)

[0060] A1a (-0.800, -0.340)

[0061] A1b (-0.750, -0.351)

- [0062] A1 (-0.682, -0.378)
- [0063] 包围的范围。
- [0064] 本多芯光纤的特征在于具有：
- [0065] 半径 $a_1$ 的四个芯,沿长边方向配置成正方格子状；
- [0066] 折射率比芯低的半径 $a_2$ 的第一包层区域,在所述芯的周围,折射率与所述芯的相对折射率差为 $\Delta_1$ ;以及
- [0067] 折射率比芯低的第二包层区域,在所述第一包层区域的外周部,折射率比所述第一包层区域大且与所述芯的相对折射率差为 $\Delta_2$ ,
- [0068]  $a_2/a_1=3.0$ 且波长1550nm处的有效截面积为 $80\mu\text{m}^2$ ,
- [0069] 将第一包层区域的相对折射率差作为横轴、将第二包层区域的相对折射率差作为纵轴时,所述 $\Delta_1$ 和所述 $\Delta_2$ 位于由
- [0070] B0a (-0.700, -0.376)
- [0071] B1a (-0.700, -0.266)
- [0072] B1b (-0.671, -0.286)
- [0073] B1c (-0.618, -0.313)
- [0074] B1d (-0.586, -0.338)
- [0075] B1 (-0.490, -0.396)
- [0076] B0d (-0.586, -0.400)
- [0077] B0c (-0.618, -0.391)
- [0078] B0b (-0.671, -0.371)
- [0079] 包围的范围。
- [0080] 本多芯光纤的特征在于具有：
- [0081] 半径 $a_1$ 的四个芯,沿长边方向配置成正方格子状；
- [0082] 折射率比芯低的半径 $a_2$ 的第一包层区域,在所述芯的周围,折射率与所述芯的相对折射率差为 $\Delta_1$ ;以及
- [0083] 折射率比芯低的第二包层区域,在所述第一包层区域的外周部,折射率比所述第一包层区域大且与所述芯的相对折射率差为 $\Delta_2$ ,
- [0084]  $a_2/a_1=3.0$ 且波长1550nm处的有效截面积为 $100\mu\text{m}^2$ ,
- [0085] 将第一包层区域的相对折射率差作为横轴、将第二包层区域的相对折射率差作为纵轴时,所述 $\Delta_1$ 和所述 $\Delta_2$ 位于由
- [0086] C0a (-0.600, -0.274)
- [0087] C1a (-0.600, -0.255)
- [0088] C1b (-0.590, -0.262)
- [0089] C1c (-0.570, -0.277)
- [0090] C1 (-0.528, -0.305)
- [0091] C0c (-0.570, -0.297)
- [0092] C0b (-0.590, -0.289)
- [0093] 包围的范围。
- [0094] 上述多芯光纤的各参数以如下方式设计。

[0095] 所述多芯光纤具有：

[0096] 半径 $a_1$ 的四个芯，沿长边方向配置成正方格子状；

[0097] 折射率比芯低的半径 $a_2$ 的第一包层区域，在所述芯的周围，折射率与所述芯的相对折射率差为 $\Delta_1$ ；以及

[0098] 折射率比芯低的第二包层区域，在所述第一包层区域的外周部，折射率比所述第一包层区域大且与所述芯的相对折射率差为 $\Delta_2$ ，

[0099] 所述多芯光纤的设计方法进行：

[0100] 第一步骤，根据有效截面积 $A_{\text{eff}}$  ( $\mu\text{m}^2$ ) 和每1km的芯间串扰的合计值XT (dB/km) 的要求条件，选定所述 $a_1$ 和所述 $\Delta_1$ 的组合；

[0101] 第二步骤，选定在所述第一步骤中选定的所述组合中满足截止波长和弯曲损耗的要求条件的所述 $a_2$ 和所述 $\Delta_2$ ，取得相对于所述XT的所述 $\Delta_1$ 和芯间隔 $\Lambda$ 的芯间隔关系、以及相对于附加损耗 $\alpha_c$ 的要求条件的所述 $\Delta_1$ 与从所述第二包层区域的外周部到所述芯的中心的最近距离OCT的OCT关系；以及

[0102] 第三步骤，使用在所述第二步骤中取得的所述芯间隔关系和所述OCT关系，通过 $\phi=2 \times (\Lambda/\sqrt{2}+\text{OCT})$ 计算在所述第一步骤中取得的所述 $\Delta_1$ 处的所述第二包层区域的外径 $\phi$ ，并判断所述外径 $\phi$ 是否为125 $\mu\text{m}$ 以下。

[0103] 在此，特征在于，在 $A_{\text{eff}}$ 为80 $\mu\text{m}^2$ 以上的情况下，在所述第一步骤中，选定满足数C1和数C2的所述组合。此外，特征在于，在 $a_2/a_1$ 为3.0以下的情况下，在所述第二步骤中，选定满足数C3的所述 $\Delta_2$ 。

[0104] 此外，本发明的光传输方法的特征在于，

[0105] 将1000km以上的所述多芯光纤作为光传输通道，

[0106] 从四个发送机向所述多芯光纤的每个所述芯发送波长1530nm以上的信号光，

[0107] 由四个接收机对所述多芯光纤的每个所述芯接收所述信号光。

[0108] 此外，本发明的光传输方法的特征在于，

[0109] 将通信距离为1000km以上的海底通信系统的单模光纤替换为所述多芯光纤，

[0110] 从四个发送机向所述多芯光纤的每个所述芯发送波长1530nm以上的信号光，

[0111] 由四个接收机对所述多芯光纤的每个所述芯接收所述信号光。

[0112] 本发明的多芯光纤是4芯，实现了第二包层的直径为125 $\mu\text{m}$ 且XT为-54dB/km以下。该特性是非专利文献3~6中的任意一种多芯光纤都无法实现的特性。因此，本多芯光纤能够置换在海底通信系统那样的长距离光通信系统中当前运用的单模光纤，此外，由于是4芯，所以能够实现飞跃性的传输容量的扩大和消耗电力的降低。

[0113] 本发明能够提供以现有的单模光纤的包层直径的标准125 $\pm$ 1 $\mu\text{m}$ 具有四个芯且能够应对数千km级的传输的多芯光纤、该多芯光纤的设计方法和利用该多芯光纤的光传输方法。

[0114] 在本多芯光纤中，以标准的包层直径配置四个芯，能够实现与现有的光纤具有互换性的光学特性和能够进行数千km级的传输的XT，起到能够提供适合于海底系统等超长距离通信的高密度、大容量的MCF的效果。

## 附图说明

- [0115] 图1是说明本发明的多芯光纤的结构的一例的图。
- [0116] 图2是说明本发明的多芯光纤的宽度w的影响的图。
- [0117] 图3是表示本发明的多芯光纤的有效截面积与结构参数的关系的特性图。
- [0118] 图4是表示本发明的多芯光纤的有效截面积与结构参数的关系的特性图。
- [0119] 图5是表示本发明的多芯光纤的有效截面积与结构参数的关系的特性图。
- [0120] 图6是表示本发明的多芯光纤的芯配置与XT及附加损耗的关系的一例的特性图。
- [0121] 图7是表示在本发明的多芯光纤中在规定的截止波长、弯曲损耗和有效截面积下使包层直径为 $125 \pm 1 \mu\text{m}$ 以下的结构参数的关系的特性图。
- [0122] 图8是表示在本发明的多芯光纤中在规定的截止波长、弯曲损耗和有效截面积下使包层直径为 $125 \pm 1 \mu\text{m}$ 以下的结构参数的关系的特性图。
- [0123] 图9是表示在本发明的多芯光纤中在规定的截止波长、弯曲损耗和有效截面积下使包层直径为 $125 \pm 1 \mu\text{m}$ 以下的结构参数的关系的特性图。
- [0124] 图10是表示本发明的多芯光纤中的XT与必要的结构参数的范围的关系的特性图。
- [0125] 图11是表示本发明的多芯光纤中的XT与必要的结构参数的范围的关系的特性图。
- [0126] 图12是表示在本发明的多芯光纤中的规定的截止波长、弯曲损耗和有效截面积下使包层直径为 $125 \mu\text{m}$ 以下的结构参数的关系的特性图。
- [0127] 图13是表示在本发明的多芯光纤中的规定的截止波长、弯曲损耗和有效截面积下使包层直径为 $125 \mu\text{m}$ 以下的结构参数的关系的特性图。
- [0128] 图14是表示在本发明的多芯光纤中的规定的截止波长、弯曲损耗和有效截面积下使包层直径为 $125 \mu\text{m}$ 以下的结构参数的关系的特性图。
- [0129] 图15是说明本发明的多芯光纤的设计例的表。
- [0130] 图16是说明本发明的多芯光纤的设计例中的芯间隔与XT的关系的特性图。
- [0131] 图17是说明本发明的多芯光纤的设计例中的OCT及附加损耗的关系的特性图。
- [0132] 图18是本发明的多芯光纤的剖视图。
- [0133] 图19是说明本发明的多芯光纤的评价结果的表。
- [0134] 图20是说明本发明的设计方法的流程图。
- [0135] 图21是说明本发明的光传输方法的图。

## 具体实施方式

- [0136] 参照附图对本发明的实施方式进行说明。以下说明的实施方式是本发明的实施例，本发明并不限于以下的实施方式。另外，在本说明书和附图中附图标记相同的结构要素表示相互相同的结构要素。
- [0137] 图1是说明本实施方式的光纤15的结构的一例的图。图1的(a)是截面结构，图1的(b)和图1的(c)是各芯的折射率分布。光纤15是多芯光纤，其具有：
- [0138] 半径 $a_1$ 的四个芯10，沿长边方向配置成正方格子状；
- [0139] 折射率比芯低的半径 $a_2$ 的第一包层区域11，在芯10的周围，折射率与芯的相对折射率差为 $\Delta 1$ ；以及
- [0140] 折射率比芯低的第二包层区域12，在第一包层区域11的外周部，折射率比第一包

层区域大且与芯的相对折射率差为  $\Delta_2$ ,

[0141] 其中,光纤15的特征在于,

[0142] 第二包层区域12的外径是  $125 \pm 1 \mu\text{m}$ ,

[0143] 波长1550nm处的有效截面积为  $80 \mu\text{m}^2$  以上,

[0144] 波长1625nm、弯曲半径30mm处的弯曲损耗为0.1dB/100turn以下,

[0145] 截止波长为1530nm以下。

[0146] 光纤15在1心的光纤中具有四个芯,包层直径(第二包层区域12的外径)是标准的  $125 \pm 1 \mu\text{m}$ 。

[0147] 各芯的折射率分布如图1的(b)所示,具有在芯10的周围具有比芯低的折射率的第一包层区域11,并且具有在其周围折射率比芯低且比第一包层区域高的第二包层区域12。此外,如图1的(c)所示,在芯10和第一包层区域11之间可以具有区域13,该区域13具有与第二包层区域12同等的折射率。

[0148] 图2表示对于图1的(c)的折射率分布,相对于区域13的宽度w的截止波长的变化量。如图2所示,在芯10和第一包层区域11中即使具有与第二包层区域12同等折射率的区域13,截止波长的变化量也小。根据图能够确认,在宽度w为  $1.3 \mu\text{m}$  以下的情况下,截止波长的变化量为  $\pm 10 \text{nm}$  而成为与测量误差同等,因此可以视为图1的(b)和图1的(c)的折射率分布是同等的。通过图1的(c)的结构,能够减小制造时的芯结构的变动,例如第二包层区域的折射率在纯石英的情况下结构容易稳定等能够改善制造上的偏差和成品率,因此是优选的。

[0149] 另外,在此以芯的折射率为基准,定义了相对折射率差,但是芯和包层的材料能够分别以纯石英和添加氟的玻璃、或分别添加GeO<sub>2</sub>的玻璃、纯石英玻璃和添加氟的玻璃的组合等能够构成图1所示的折射率分布的玻璃材料的组合来选定材料。

[0150] 此外,光纤的“截止波长”是指能够单模传播的条件,如果是比截止波长长的波长,则光以单模传播,如果是比截止波长短的波长,则光以多模传播。

[0151] 图3~图5是说明用于在光纤15的波长1550nm处得到规定的有效截面积  $A_{\text{eff}}$  的芯参数的设计范围的图。横轴是第一包层区域11相对于芯的相对折射率差  $\Delta_1$ ,纵轴是芯10的半径  $a_1$ 。图3~图5分别表示使第一包层区域11区域的半径  $a_2$  与芯半径  $a_1$  的比  $a_2/a_1$  变化为2.0、2.5、3.0的情况。此外,包层相对于芯的相对折射率差  $\Delta$  设定为使截止波长成为1530nm。

[0152] 对图3~图5进行比较,用于得到固定的  $A_{\text{eff}}$  的  $a_1$  与  $\Delta_1$  的关系大体相同。可以认为这是因为电场分布被封闭于由第一包层区域11包围的区域,因此对与第二包层区域12相关的参数  $a_2$ 、 $\Delta_2$  (第二包层区域12相对于芯的相对折射率差) 的依赖性小。

[0153] 在此,以往的SMF在波长1550nm处  $A_{\text{eff}}$  约为  $80 \mu\text{m}^2$ ,为了确保与以往同等以上的连接性和低非线性,  $A_{\text{eff}}$  优选为  $80 \mu\text{m}^2$  以上。根据图3~图5,为了使  $A_{\text{eff}}$  为  $80 \mu\text{m}^2$ ,根据实线的近似曲线,需要满足数1。

[0154] [数1]

$$[0155] \quad a_1 \geq -28041\Delta_1^2 - 560.65\Delta_1 + 3.1369 \quad (1)$$

[0156] 已知在MCF中为了降低XT,需要将芯间隔增大一定量。XT引起的传输特性劣化依赖于传输方式,在非专利文献7中示出了对于QPSK、16QAM、64QAM,分别需要为-18dB、-24dB、-32dB以下的串扰。在多芯光纤的情况下,芯间的串扰成为相对于任意芯的来自其他芯的串扰成分的总和,对于每单位距离的串扰(XT、单位dB/km)和距离L(km),任意的距离的串扰由

[0157]  $XT + \log(L)$

[0158] 给出。

[0159] 因此,例如为了使用16QAM的信号格式进行1000~10000km的传输,多芯光纤的串扰需要为-54~-64dB/km以下。为了降低串扰,需要使芯间隔增大一定量,但是已知在包层直径为固定的情况下伴随芯间隔的扩大,芯与包层端的厚度(OCT)变小,产生由光波的泄漏引起的附加损耗 $\alpha_c$ 。

[0160] 图6是说明用于降低芯间串扰(XT)和附加损耗 $\alpha_c$ 的光纤15的设计例的图。横轴是第一包层区域11的相对折射率差 $\Delta_1$ ,第一纵轴是芯间隔 $\Lambda$ 或OCT,第二纵轴是第二包层区域12的外径。XT和附加损耗随着波长变长而变大,因此考虑C+L波段整个区域的有效利用,波长为1625nm。实线是XT为-64dB/km的芯间隔 $\Lambda$ ( $\mu\text{m}$ ),虚线是附加损耗 $\alpha_c$ 为0.01dB/km的OCT。即,在比实线靠上的区域中XT小于-64dB/km,在比虚线靠上的区域中 $\alpha_c$ 小于0.01dB/km。

[0161] 点线是用于满足XT为-64dB/km且 $\alpha_c$ 为0.01dB/km的“必要的包层直径”,在4芯配置的情况下,

[0162] 必要的包层直径 $= 2 \times (\Lambda / \sqrt{2 + \text{OCT}})$ 。

[0163] 在此,设定了 $a_1$ 和 $\Delta_2$ ,以使 $a_2/a_1 = 3.0$ 、 $A_{\text{eff}}$ 为 $110\mu\text{m}^2$ 、截止波长 $\lambda_c$ 为1530nm。

[0164] 从图6可知, $\Delta_1$ 变大,则光波的封闭变弱,为了得到所希望的XT和 $\alpha_c$ ,必要的芯间隔 $\Lambda$ 和OCT变大。在图6的情况下,为了使包层直径为 $125 \pm 1\mu\text{m}$ ,需要使 $\Delta_1$ 为-0.52%(参照点划线)。此时必要的芯间隔 $\Lambda$ 、OCT分别是 $42.5\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$ 。另外,图6所示的芯间隔、OCT是满足规定的XT、附加损耗的最小限的值,如果设定其以上的值,则XT、附加损耗成为更小的值。即,如果为了使包层直径为 $125 \pm 1\mu\text{m}$ 而使 $\Delta_1$ 小于-0.52%,则必要的包层直径为 $125\mu\text{m}$ 以下, $\Lambda$ 、OCT的设计具有余量。

[0165] 图7~图9是说明

[0166] 截止波长为1530nm以下,

[0167] 弯曲损耗在波长1625nm、弯曲半径30mm处为0.1dB/100turn以下,必要的包层直径为 $125 \pm 1\mu\text{m}$ 的光纤15的结构参数的一例的图。在任意附图中在阴影的区域中,能够同时满足所述条件(XT为-64dB/km以下且 $\alpha_c$ 为0.01dB/km以下)。

[0168] 图7是 $A_{\text{eff}}$ 在波长1550nm处为 $80\mu\text{m}^2$ 、 $a_2/a_1 = 2.0$ 的情况,

[0169] 图8是 $A_{\text{eff}}$ 在波长1550nm处为 $80\mu\text{m}^2$ 、 $a_2/a_1 = 3.0$ 的情况,

[0170] 图9是 $A_{\text{eff}}$ 在波长1550nm处为 $110\mu\text{m}^2$ 、 $a_2/a_1 = 3.0$ 的情况。

[0171] 在图7~图9中,虚线是截止波长为1530nm的条件(在比虚线靠上的区域中截止波长为1530nm以下),点线是弯曲损耗 $\alpha_b$ 为0.1dB/100turn的条件(在比点线靠下的区域中弯曲损耗 $\alpha_b$ 为0.1dB/100turn以下)。

[0172] 在图7~图9中,实线是波长1625nm的XT的条件,在比实线靠下的区域中分别为-54dB/km以下、-58dB/km以下、-61dB/km以下、-64dB/km以下。

[0173] 满足所有条件的区域是由实线、虚线和点线包围的区域,例如在作为-64dB/km以下的XT的情况下为图中的阴影的区域。根据图7~图9, $\Delta_1$ 的上限和 $\Delta_2$ 的下限由XT和截止波长的要求条件确定, $\Delta_2$ 的下限相对于 $\Delta_1$ 变化较小。因此 $\Delta_1$ 的上限和 $\Delta_2$ 的下限能够由实线和虚线的交点给出。此外,从图7~图9可知, $a_2/a_1$ 越大且必要的 $A_{\text{eff}}$ 越小,能够设计的区域

越缓和。

[0174] 因此在 $A_{\text{eff}}$ 为 $80\mu\text{m}^2$ 以上、截止波长为1530nm以下、XT为-64dB/km以下的情况下,图8成为最大的区域,此时为数2。

[0175] [数2]

[0176]  $-0.7\% \leq \Delta_1 \leq -0.49\%$

[0177]  $-0.4\% \leq \Delta_2 \leq -0.27\%$  (2)

[0178] 在图7中,如果将X坐标作为 $\Delta_1$ 、将Y坐标作为 $\Delta_2$ ,则阴影区域、即满足

[0179]  $a_2/a_1=2.0$ 、

[0180] 波长1550nm处的 $A_{\text{eff}}=80\mu\text{m}^2$ 、

[0181] 包层直径 $D \leq 125\mu\text{m}$ 、

[0182] 附加损耗 $\alpha_c \leq 0.01\text{dB/km}$ 、

[0183] 截止波长 $\lambda_c \leq 1530\text{nm}$ 、

[0184] 弯曲损耗 $\alpha_b \leq 0.1\text{dB}/100\text{turn}$ 、以及

[0185]  $XT \leq -64\text{dB/km}$

[0186] 的区域是由

[0187] A0(-0.800, -0.396)

[0188] A1a(-0.800, -0.340)

[0189] A1b(-0.750, -0.351)

[0190] A1(-0.682, -0.378)

[0191] 包围的范围。

[0192] 另外,如果是满足 $XT \leq -61\text{dB/km}$ 的区域,则是由

[0193] A0(-0.800, -0.396)

[0194] A2a(-0.800, -0.335)

[0195] A2b(-0.750, -0.346)

[0196] A2c(-0.700, -0.363)

[0197] A2(-0.668, -0.380)

[0198] 包围的范围,

[0199] 如果是满足 $XT \leq -58\text{dB/km}$ 的区域,则是由

[0200] A0(-0.800, -0.396)

[0201] A3a(-0.800, -0.331)

[0202] A3b(-0.750, -0.339)

[0203] A3c(-0.700, -0.355)

[0204] A3d(-0.650, -0.380)

[0205] A3(-0.639, -0.387)

[0206] 包围的范围,

[0207] 如果是满足 $XT \leq -54\text{dB/km}$ 的区域,则是由

[0208] A0(-0.800, -0.396)

[0209] A4a(-0.800, -0.328)

[0210] A4b(-0.750, -0.323)

- [0211] A4c (-0.700, -0.349)
- [0212] A4d (-0.650, -0.370)
- [0213] A4 (-0.600, -0.400)
- [0214] 包围的范围。
- [0215] 在图8中,如果将X坐标作为  $\Delta 1$ 、将Y坐标为作为  $\Delta 2$ ,则阴影区域、即满足
- [0216]  $a_2/a_1=3.0$ 、
- [0217] 波长1550nm处的  $A_{\text{eff}}=80\mu\text{m}^2$ 、
- [0218] 包层直径  $D\leq 125\mu\text{m}$ 、
- [0219] 附加损耗  $\alpha_c\leq 0.01\text{dB/km}$ 、
- [0220] 截止波长  $\lambda_c\leq 1530\text{nm}$ 、
- [0221] 弯曲损耗  $\alpha_b\leq 0.1\text{dB}/100\text{turn}$ 、以及
- [0222]  $XT\leq -64\text{dB/km}$ 的区域是由
- [0223] B0a (-0.700, -0.376)
- [0224] B1a (-0.700, -0.266)
- [0225] B1b (-0.671, -0.286)
- [0226] B1c (-0.618, -0.313)
- [0227] B1d (-0.586, -0.338)
- [0228] B1 (-0.490, -0.396)
- [0229] B0d (-0.586, -0.400)
- [0230] B0c (-0.618, -0.391)
- [0231] B0b (-0.671, -0.371)
- [0232] 包围的范围。
- [0233] 另外,如果是满足  $XT\leq -61\text{dB/km}$ 的区域,则是由B0a (-0.700, -0.376)
- [0234] B2a (-0.700, -0.256)
- [0235] B2b (-0.671, -0.278)
- [0236] B2c (-0.618, -0.306)
- [0237] B2d (-0.586, -0.329)
- [0238] B2 (-0.484, -0.396)
- [0239] B0d (-0.586, -0.400)
- [0240] B0c (-0.618, -0.391)
- [0241] B0b (-0.671, -0.371)
- [0242] 包围的范围,
- [0243] 如果是满足  $XT\leq -58\text{dB/km}$ 的区域,则是由
- [0244] B0a (-0.700, -0.376)
- [0245] B3a (-0.700, -0.242)
- [0246] B3b (-0.671, -0.267)
- [0247] B3c (-0.618, -0.299)
- [0248] B3d (-0.586, -0.319)
- [0249] B3 (-0.470, -0.396)

- [0250] B0d (-0.586, -0.400)
- [0251] B0c (-0.618, -0.391)
- [0252] B0b (-0.671, -0.371)
- [0253] 包围的范围,
- [0254] 如果是满足 $XT \leq -54\text{dB/km}$ 的区域,则是由
- [0255] B0a (-0.700, -0.376)
- [0256] B4a (-0.700, -0.234)
- [0257] B4b (-0.671, -0.256)
- [0258] B4c (-0.618, -0.278)
- [0259] B4d (-0.586, -0.312)
- [0260] B4 (-0.458, -0.396)
- [0261] B0d (-0.586, -0.400)
- [0262] B0c (-0.618, -0.391)
- [0263] B0b (-0.671, -0.371)
- [0264] 包围的范围。
- [0265] 在图9中,如果将X坐标作为 $\Delta 1$ 、将Y坐标作为 $\Delta 2$ ,则阴影区域、即满足
- [0266]  $a_2/a_1 = 3.0$ 、
- [0267] 波长1550nm处的 $A_{\text{eff}} = 110\mu\text{m}^2$ 、
- [0268] 包层直径 $D \leq 125\mu\text{m}$ 、
- [0269] 附加损耗 $\alpha_c \leq 0.01\text{dB/km}$ 、
- [0270] 截止波长 $\lambda_c \leq 1530\text{nm}$ 、
- [0271] 弯曲损耗 $\alpha_b \leq 0.1\text{dB}/100\text{turn}$ 、以及
- [0272]  $XT \leq -64\text{dB/km}$ 的区域是由
- [0273] C0a (-0.600, -0.274)
- [0274] C1a (-0.600, -0.255)
- [0275] C1b (-0.590, -0.262)
- [0276] C1c (-0.570, -0.277)
- [0277] C1 (-0.528, -0.305)
- [0278] C0c (-0.570, -0.297)
- [0279] C0b (-0.590, -0.289)
- [0280] 包围的范围。
- [0281] 另外,如果是满足 $XT \leq -61\text{dB/km}$ 的区域,则是由C0a (-0.600, -0.274)
- [0282] C2a (-0.600, -0.247)
- [0283] C2b (-0.590, -0.254)
- [0284] C2c (-0.570, -0.269)
- [0285] C2 (-0.513, -0.308)
- [0286] C0c (-0.570, -0.297)
- [0287] C0b (-0.590, -0.289)
- [0288] 包围的范围,

[0289] 如果是满足 $XT \leq -58\text{dB/km}$ 的区域,则是由

[0290] C0a(-0.600, -0.274)

[0291] C3a(-0.600, -0.234)

[0292] C3b(-0.590, -0.242)

[0293] C3c(-0.570, -0.257)

[0294] C3(-0.495, -0.311)

[0295] C0c(-0.570, -0.297)

[0296] C0b(-0.590, -0.289)

[0297] 包围的范围,

[0298] 如果是满足 $XT \leq -54\text{dB/km}$ 的区域,则是由

[0299] C0a(-0.600, -0.274)

[0300] C4a(-0.600, -0.220)

[0301] C4b(-0.590, -0.233)

[0302] C4c(-0.570, -0.249)

[0303] C4(-0.479, -0.313)

[0304] C0c(-0.570, -0.297)

[0305] C0b(-0.590, -0.289)

[0306] 包围的范围。

[0307] 图10和图11是说明由与如图7~图9所示制作的曲线图的截止波长 $\lambda_c$ (虚线)XT的条件(实线)的交点给出的 $\Delta_1$ 的上限(图10)和 $\Delta_2$ 的下限(图11)相对于XT的依赖性的图。在此 $a_2/a_1$ 为3.0。从图10和图11可知, $\Delta_1$ 的上限和 $\Delta_2$ 的下限相对于XT的要求条件线性地变化。如果 $A_{\text{eff}}$ 为 $80\mu\text{m}^2$ 以上,则根据图10和图11为数3。

[0308] [数3]

$$[0309] \Delta_1 \leq 4.93 \times 10^{-5} XT - 0.00127$$

$$[0310] \Delta_2 \geq -1.14 \times 10^{-5} XT - 0.00509 \quad (3)$$

[0311] 在此,对图7和图8进行比较,如果 $a_2/a_1$ 变小,则 $\Delta_1$ 的上限变得更小, $\Delta_2$ 的下限变得更大,因此在 $a_2/a_1$ 比3.0小的情况下,包含在由数3表示的 $\Delta_1$ 的上限和 $\Delta_2$ 的下限的范围内。

[0312] 图12~图14是说明由与如图7~图9所示制作的曲线图的截止波长 $\lambda_c$ (虚线)XT的条件(实线)的交点给出的 $\Delta_1$ 的上限(图12)、 $\Delta_2$ 的下限(图13)和 $\Delta_2$ 的上限(图14)相对于 $a_2/a_1$ 的依赖性的图。在各图中直线是进行了线性近似的结果。

[0313] 在此,将XT的要求条件作为 $-64\text{dB/km}$ 。从图12~图14可知, $\Delta_1$ 的上限、 $\Delta_2$ 的下限( $\Delta_{2\_min}$ )和 $\Delta_2$ 的上限( $\Delta_{2\_max}$ )相对于 $a_2/a_1$ 通过线性近似,能够比较良好地进行近似。根据图12~图14,

[0314] 相对于 $A_{\text{eff}} = 80\mu\text{m}^2$ ,为数4,

[0315] [数4]

$$\Delta_1 = 0.0020 a_2/a_1 - 0.01069$$

$$[0316] \quad \Delta_{2 \min} = -0.00024 a_2/a_1 - 0.00335 \quad (4)$$

$$\Delta_{2 \max} = 0.0012 a_2/a_1 - 0.005833$$

[0317] 相对于  $A_{\text{eff}} = 90 \mu\text{m}^2$ , 为数5,  
[0318] [数5]

$$\Delta_1 = 0.0019 a_2/a_1 - 0.01045$$

$$[0319] \quad \Delta_{2 \min} = -9 \times 10^{-5} a_2/a_1 - 0.00329 \quad (5)$$

$$\Delta_{2 \max} = 0.0011 a_2/a_1 - 0.005417$$

[0320] 相对于  $A_{\text{eff}} = 100 \mu\text{m}^2$ , 为数6。  
[0321] [数6]

$$\Delta_1 = 0.0022 a_2/a_1 - 0.01182$$

$$[0322] \quad \Delta_{2 \min} = -7 \times 10^{-5} a_2/a_1 - 0.00328 \quad (6)$$

$$\Delta_{2 \max} = 0.0011 a_2/a_1 - 0.00525$$

[0323] 如果取数4~数6的系数的近似曲线, 则为数7。  
[0324] [数7]

$$[0325] \quad \Delta_1 \leq (1.9 \times 10^{-6} A_{\text{eff}}^2 - 0.00033 A_{\text{eff}} + 0.0163) a_2/a_1 + (-8.0 \times 10^{-6} A_{\text{eff}}^2 + 0.00139 A_{\text{eff}} - 0.0705)$$

$$[0326] \quad \Delta_2 \geq (5.0 \times 10^{-8} A_{\text{eff}}^2 + 6.5 \times 10^{-6} A_{\text{eff}} - 0.00108) a_2/a_1 + (-2.9 \times 10^{-7} A_{\text{eff}}^2 + 5.58 \times 10^{-5} A_{\text{eff}} - 0.00594) \quad (7)$$

$$[0327] \quad \Delta_2 \leq (5.0 \times 10^{-7} A_{\text{eff}}^2 - 9.5 \times 10^{-5} A_{\text{eff}} + 0.0056) a_2/a_1 + (-1.6 \times 10^{-6} A_{\text{eff}}^2 + 0.00031 A_{\text{eff}} - 0.0208)$$

[0328] 在满足数7的参数范围内, 能够实现标准的125 $\mu\text{m}$ 包层直径、4芯且与现有的光纤同等的特性的光纤。

[0329] 图15是在数7的设计范围内设计的结构参数和光学特性。设计例(1)和(2)的4芯光纤分别是  $A_{\text{eff}}$  为85 $\mu\text{m}^2$ 和102 $\mu\text{m}^2$ , 在C波段和L波段中得到单模动作, 弯曲损耗也在与以往的SMF同等以下。

[0330] 图16和图17是相对于由图15表示的设计例的XT特性和附加损耗。波长是1625nm。

[0331] 图16表示芯间隔与XT的关系。为了得到-64dB/km以下的XT, 对

[0332] 于设计例(1)和设计例(2), 需要分别为41.6 $\mu\text{m}$ 以下和44 $\mu\text{m}$ 以下的芯间隔。

[0333] 图17表示OCT与附加损耗 $\alpha_c$ 的关系。为了作为0.01dB/km以下的附加损耗, 对于设计例(1)和设计例(2), 需要分别为28.7 $\mu\text{m}$ 以下和30.9 $\mu\text{m}$ 以下的OCT。

[0334] 从这些结果可知, 在设计例(1)和设计例(2)的4芯光纤中, 最低限度必要的包层直径分别为116.2 $\mu\text{m}$ 和124.0 $\mu\text{m}$ 。在任意设计例中都能够以标准的125 $\mu\text{m}$ 的包层直径配置四个芯。

[0335] (实施例)

[0336] 图18是本实施例的多芯光纤的截面照片。图19表示测量结果。

- [0337] 从图18的截面照片可知,包层直径是125 $\mu\text{m}$ ,配置有四个芯。
- [0338] 此外,根据图19,各芯的折射率分布是
- [0339] 芯半径为6 $\mu\text{m}$ ,
- [0340]  $a_2/a_1$ 为3,
- [0341]  $\Delta 1$ 和 $\Delta 2$ 分别为-0.6%和-0.4%,
- [0342] 可确认满足表示所述结构条件的数学式。
- [0343] 作为光学特性是 $A_{\text{eff}}$ 为80 $\mu\text{m}^2$ 以上,截止波长为1480nm以下。
- [0344] 传输损耗在波长1550nm和1625nm处分别是0.18dB/km以下和0.25dB/km以下,未确认到长波长侧的显著的损耗增加,因此可以认为确保了足够的OCT。
- [0345] XT在波长1625nm处为-66dB/km以下,在整个通信波长带中得到应对10000km以上的传输距离的XT特性。
- [0346] (设计方法)
- [0347] 图20是表示多芯光纤的设计方法的流程图。
- [0348] 所述多芯光纤具有:
- [0349] 半径 $a_1$ 的四个芯,沿长边方向配置成正方格子状;
- [0350] 折射率比芯低的半径 $a_2$ 的第一包层区域,在所述芯的周围,折射率与所述芯的相对折射率差为 $\Delta_1$ ;以及
- [0351] 折射率比芯低的第二包层区域,在所述第一包层区域的外周部,折射率比所述第一包层区域大且与所述芯的相对折射率差为 $\Delta_2$ ,
- [0352] 所述设计方法进行:
- [0353] 第一步骤S01,根据有效截面积 $A_{\text{eff}}$  ( $\mu\text{m}^2$ ) 和每1km的芯间串扰的合计值XT (dB/km) 的要求条件,选定所述 $a_1$ 和所述 $\Delta_1$ 的组合;
- [0354] 第二步骤S02,选定在第一步骤S01中选定的所述组合中满足截止波长和弯曲损耗的要求条件的所述 $a_2$ 和所述 $\Delta_2$ ,取得相对于所述XT的所述 $\Delta_1$ 和芯间隔 $\Lambda$ 的芯间隔关系、以及相对于附加损耗 $\alpha_c$ 的要求条件的所述 $\Delta_1$ 和从所述第二包层区域的外周部到所述芯的最短距离OCT的OCT关系;以及
- [0355] 第三步骤S03,使用在第二步骤S02中取得的所述芯间隔关系和所述OCT关系,通过 $\Phi=2\times(\Lambda/\sqrt{2}+\text{OCT})$ 计算在所述第一步骤中取得的所述 $\Delta_1$ 处的所述第二包层区域的外径 $\Phi$ ,并判断所述外径 $\Phi$ 是否为125 $\mu\text{m}$ 以下。
- [0356] 在设计具有标准的125 $\mu\text{m}$ 的包层直径的4芯光纤时,首先设定对 $A_{\text{eff}}$ 、XT、弯曲损耗、截止波长的要求条件(步骤S00)。
- [0357] 接着,在步骤S01中,如图3~图5所示,选定满足 $A_{\text{eff}}$ 的要求条件的 $a_1$ 和 $\Delta_1$ 的组合。并且,如图10和图11所示,设定与所希望的XT对应的 $\Delta_1$ 的条件。例如,在 $A_{\text{eff}}$ 为80 $\mu\text{m}^2$ 以上的情况下,在第一步骤S01中,选定满足数1和数3的 $a_1$ 和 $\Delta_1$ 的组合。
- [0358] 接着,在步骤S02中,例如,如图6、图7~图9所示,对之前选定的 $a_1$ 和 $\Delta_1$ ,选定满足弯曲损耗和XT的要求条件的 $a_2$ 和 $\Delta_2$ 。具体地说,根据由图7~图9得到的图12的曲线图选定 $a_2$ ,根据图13和图14的曲线图选定 $\Delta_2$ 。在该时点得到芯10和第一包层区域11的参数。例如,在 $a_2/a_1$ 为3.0以下的情况下,在第二步骤S02中,选定满足数3的 $\Delta_2$ 。由于在该时点 $a_1$ 、 $a_2$ 、

$\Delta_1$ 和 $\Delta_2$ 齐备,所以使用图6求出XT的要求条件、能够充分降低附加损耗的芯间隔和OCT,求出必要的包层直径。

[0359] 最后,在步骤S03中,如果必要的包层直径为 $125\pm 1\mu\text{m}$ 或其以下,则设计完成。在包层直径比这大的情况下,重新进行芯和第一包层区域的参数选定,以达到 $125\pm 1\mu\text{m}$ 以下(从步骤S01开始反复进行)。

[0360] (光传输方法)

[0361] 图21是说明使用了上述多芯光纤的光传输方法的图。本光传输方法的特征在于,将1000km以上的多芯光纤15作为光传输通道,从四个发送机21向多芯光纤15的每个芯10发送波长1530nm以上的信号光,由四个接收机22对多芯光纤15的每个芯10接收所述信号光。

[0362] 光纤电缆100具备4芯光纤15,对每个该芯10在发送侧和接收侧分别连接发送机21和接收机22。如上所述,光纤电缆100即使串扰大也在-54dB/km以下,适合于数千km级的长距离传输。在此,设想在电缆的铺设中存在光纤间的连接点或光放大器,但是可以认为在数千km级的传输通道中光纤中的串扰是支配性的,其他连接点或光组件的串扰的影响十分小。

[0363] 本光传输方法能够将通信距离为1000km以上的海底通信系统的单模光纤置换为多芯光纤15,从四个发送机21向多芯光纤15的每个芯10发送波长1530nm以上的信号光,由四个接收机22对多芯光纤15的每个芯10接收所述信号光。

[0364] 光纤电缆使用采用了标准包层直径的多芯光纤15,因此能够沿用现有的光缆结构,是优选的。

[0365] 工业实用性

[0366] 本发明能够应用于光通信系统中的光纤。

[0367] 附图标记说明

[0368] 10: 芯

[0369] 11: 第一包层区域

[0370] 12: 第二包层区域

[0371] 21: 发送机

[0372] 22: 接收机

[0373] 100: 光缆

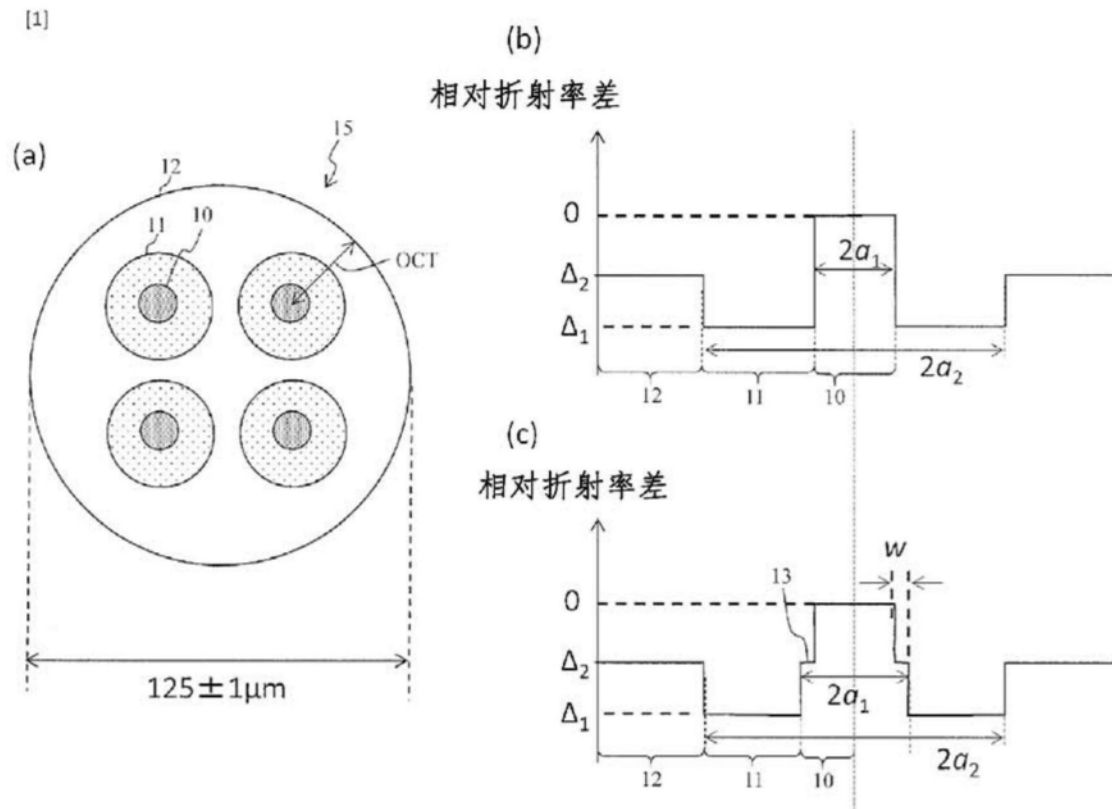


图1

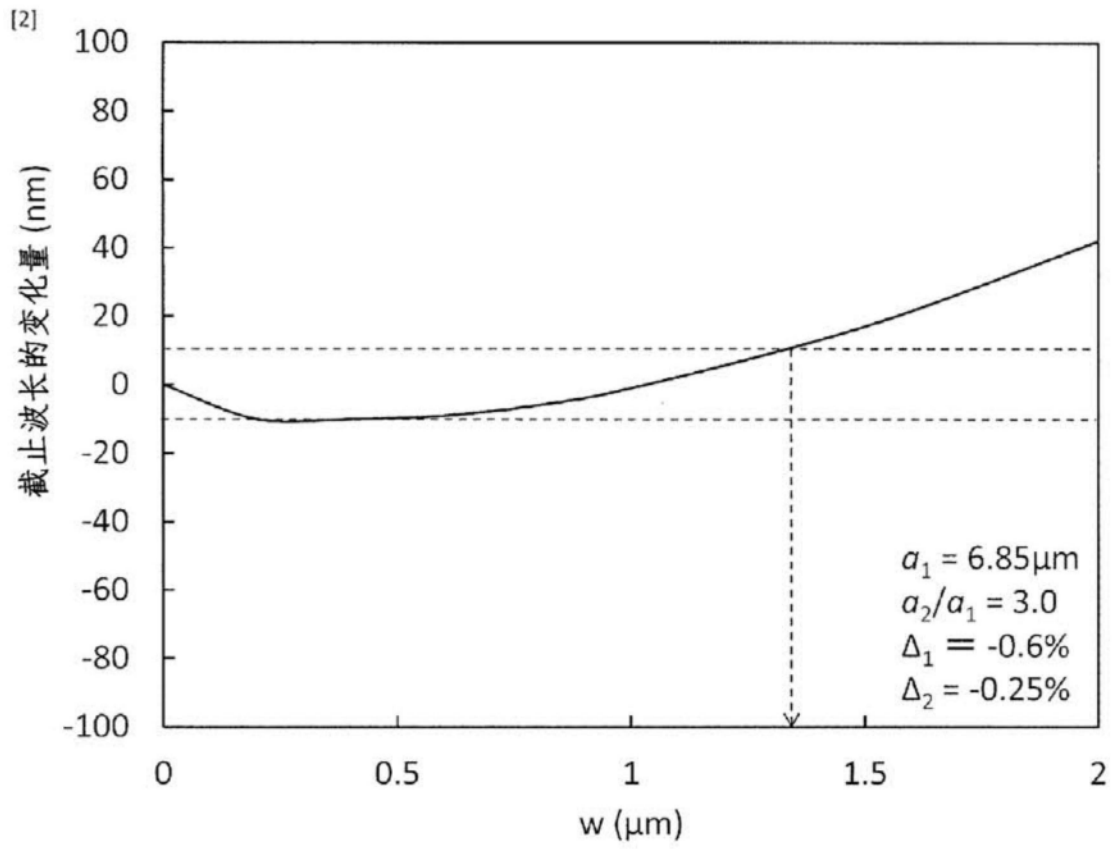


图2

[3]

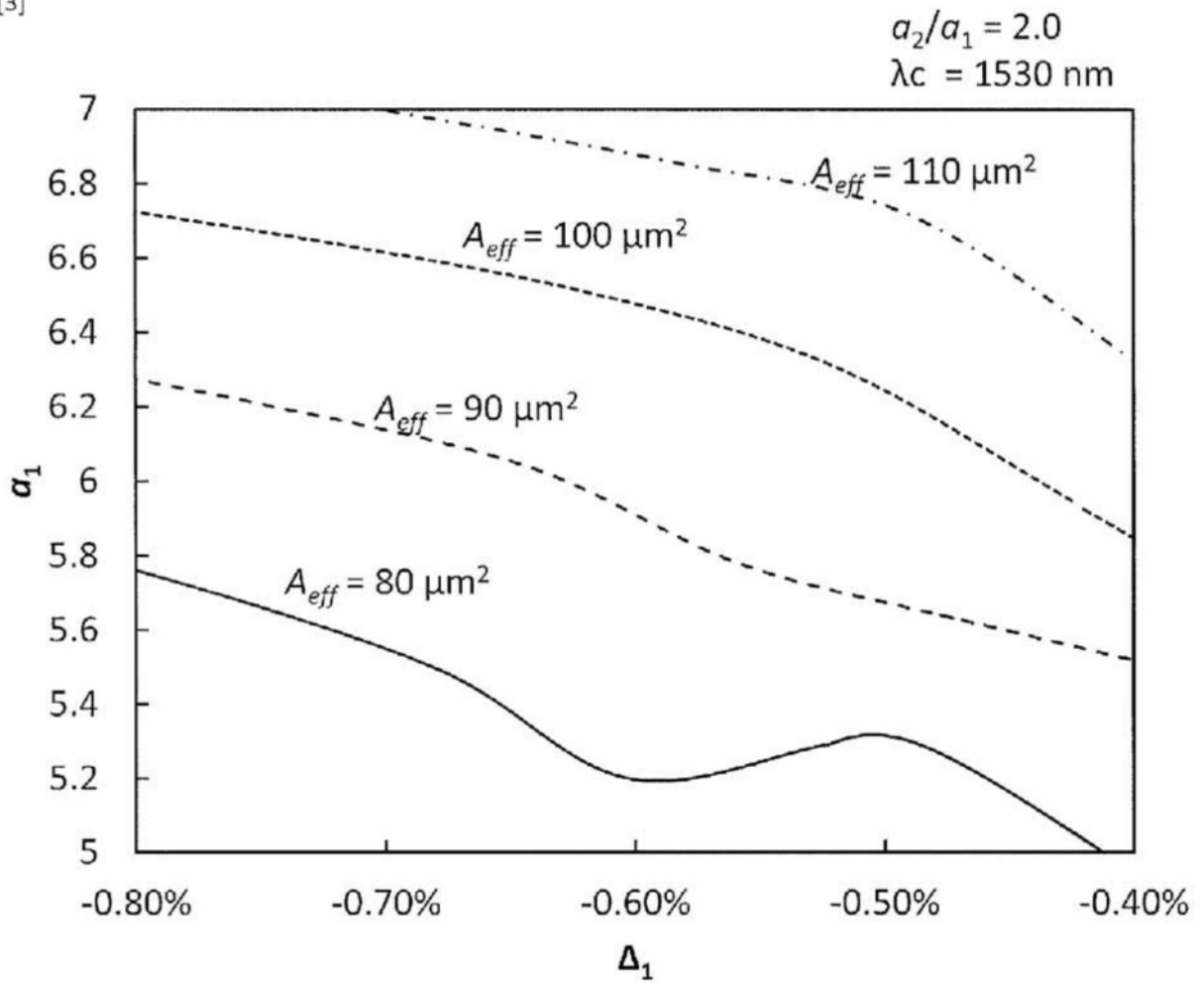


图3

[4]

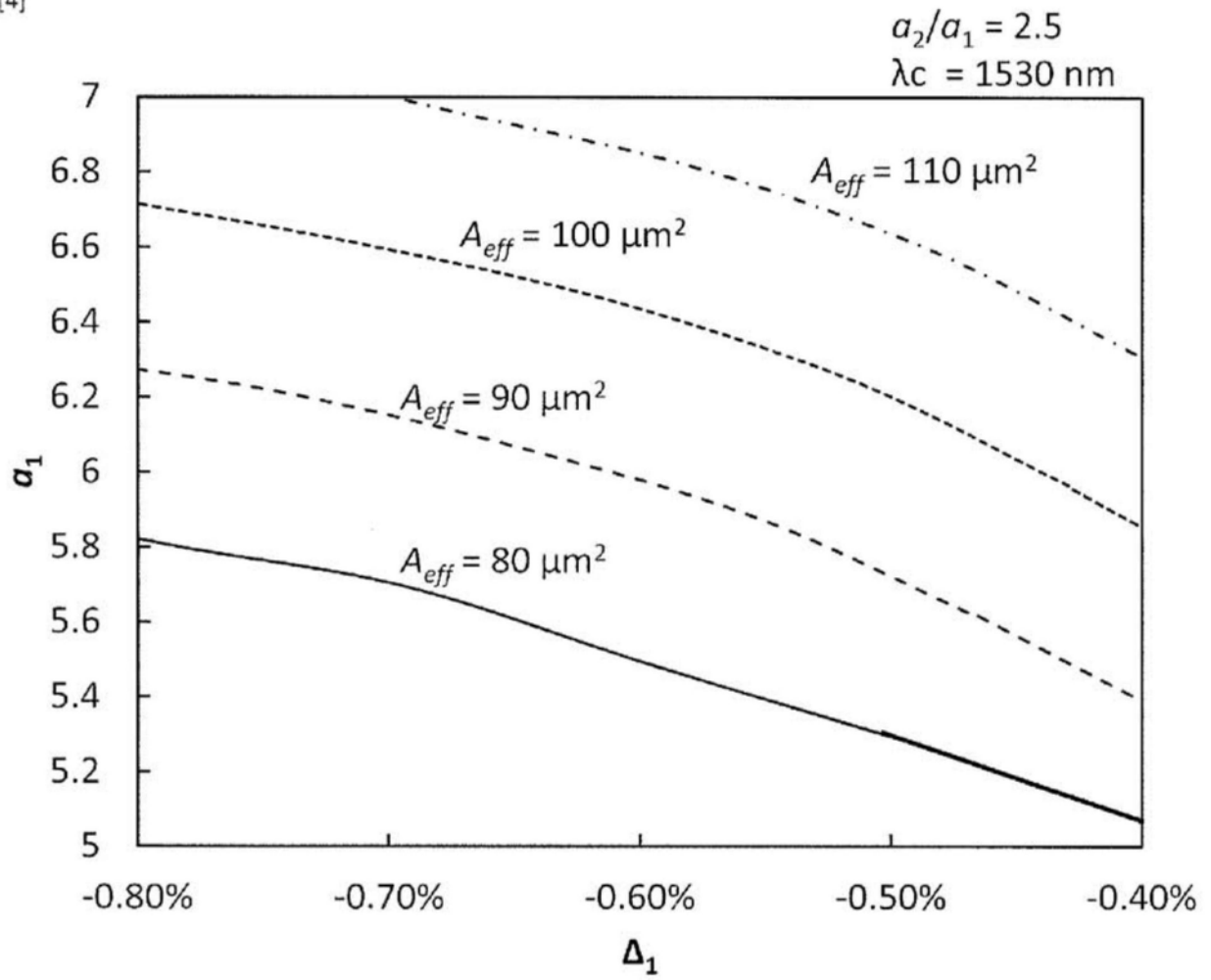


图4

[5]

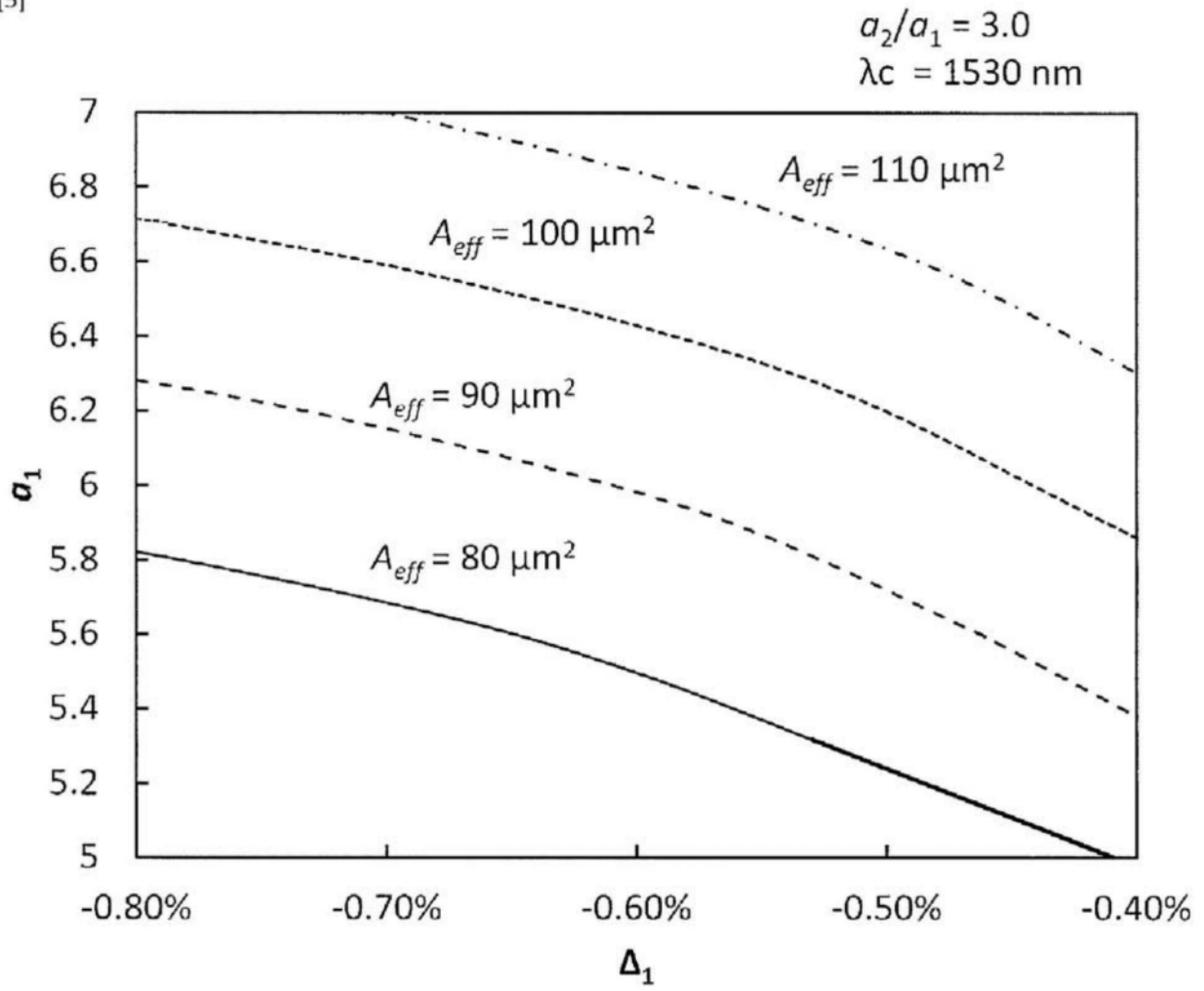


图5

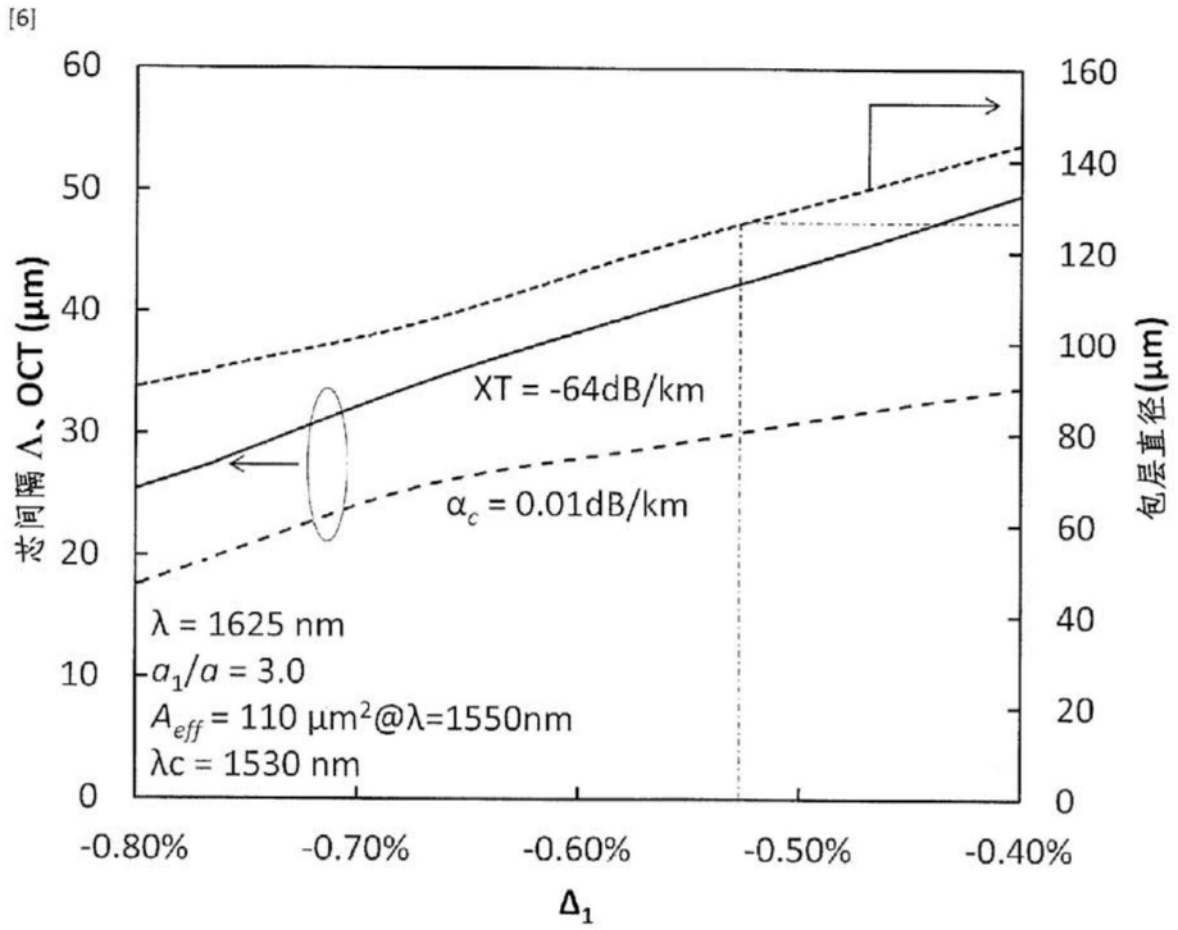


图6

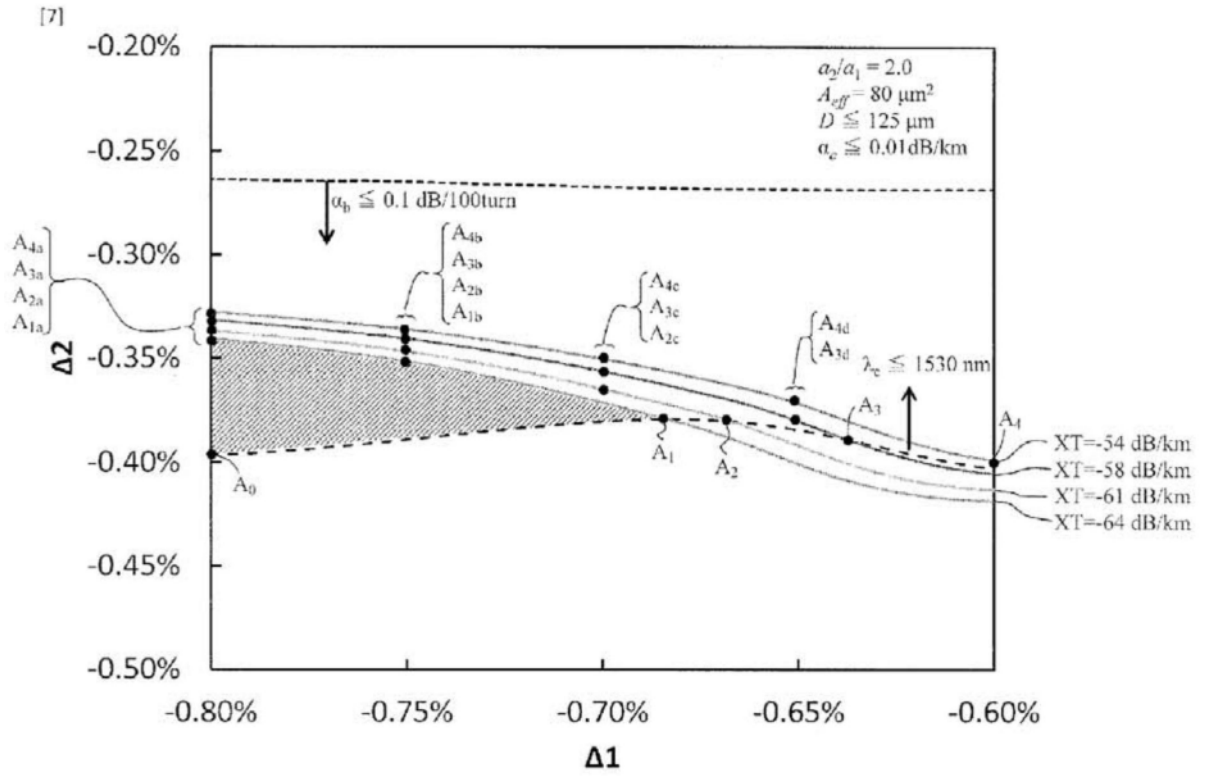


图7

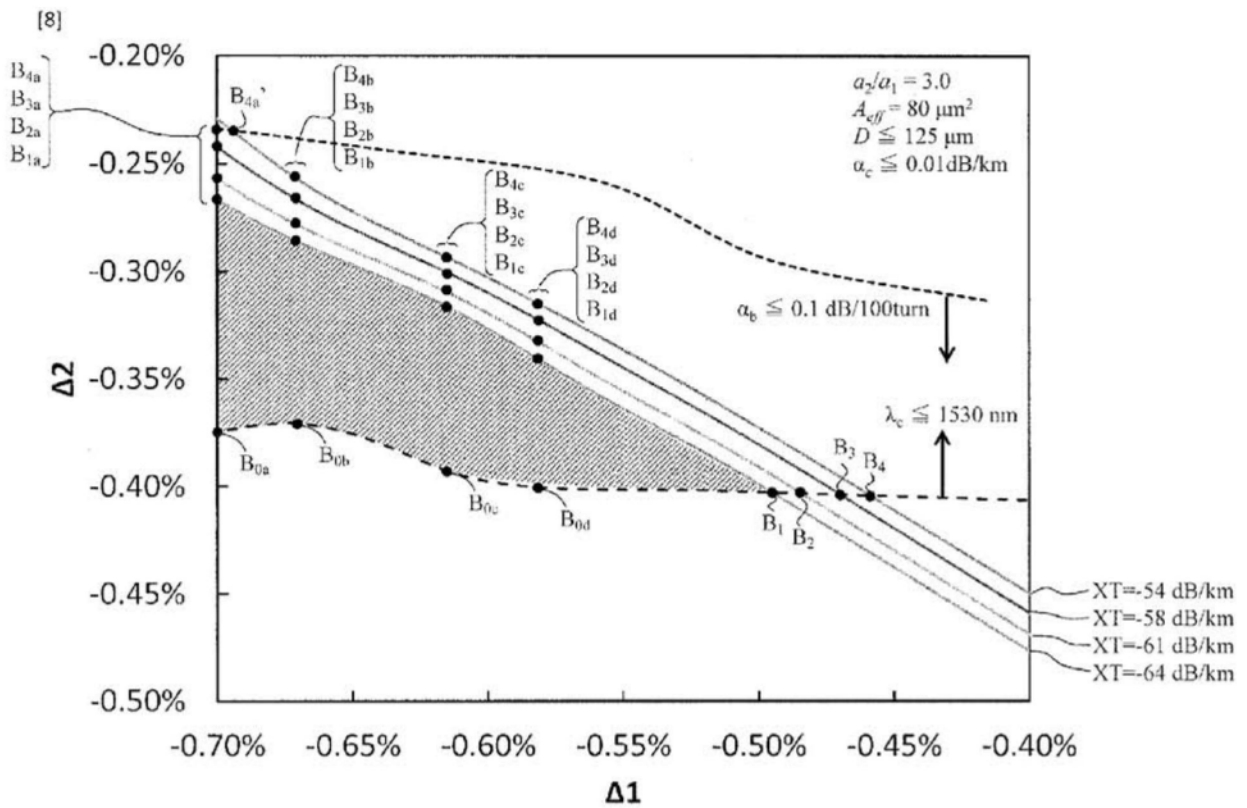


图8

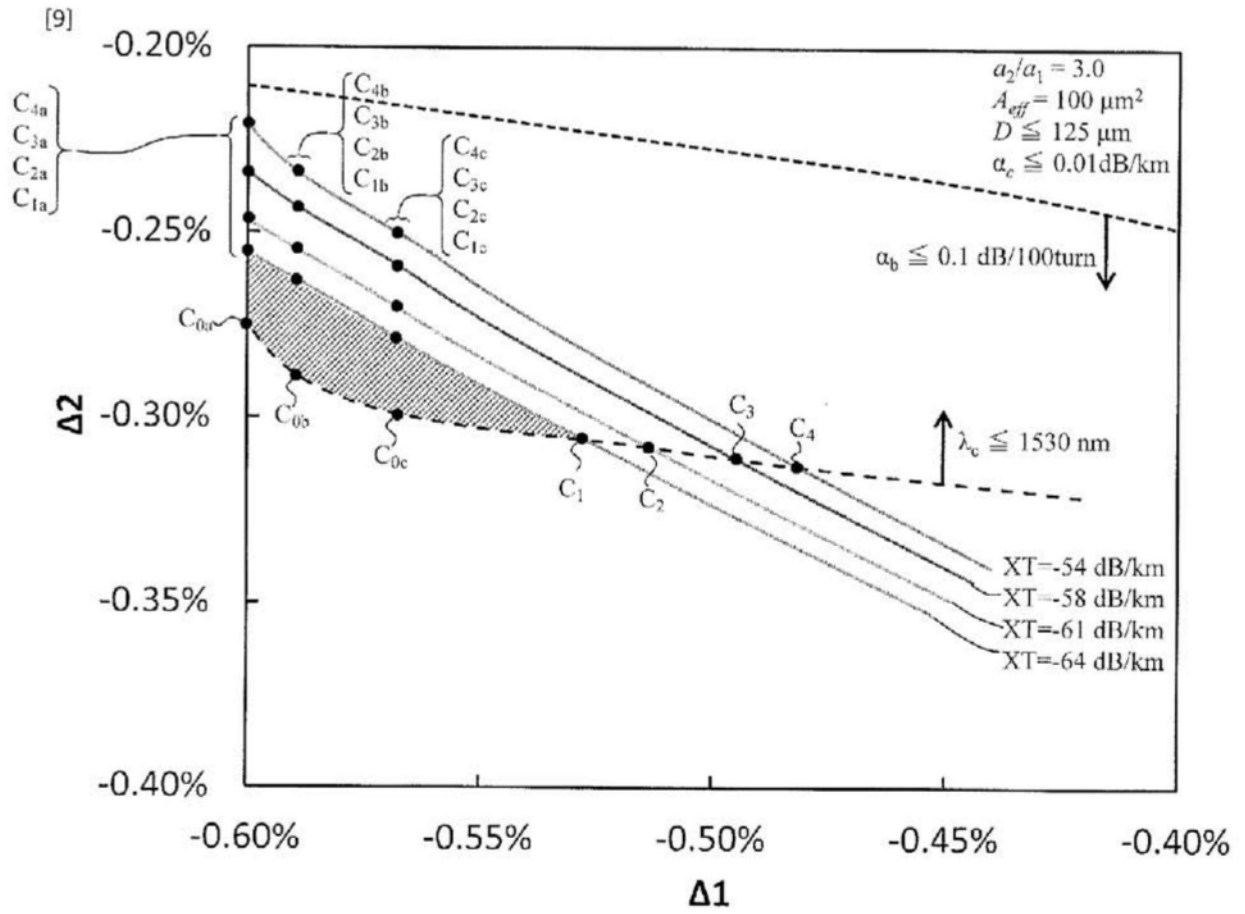


图9

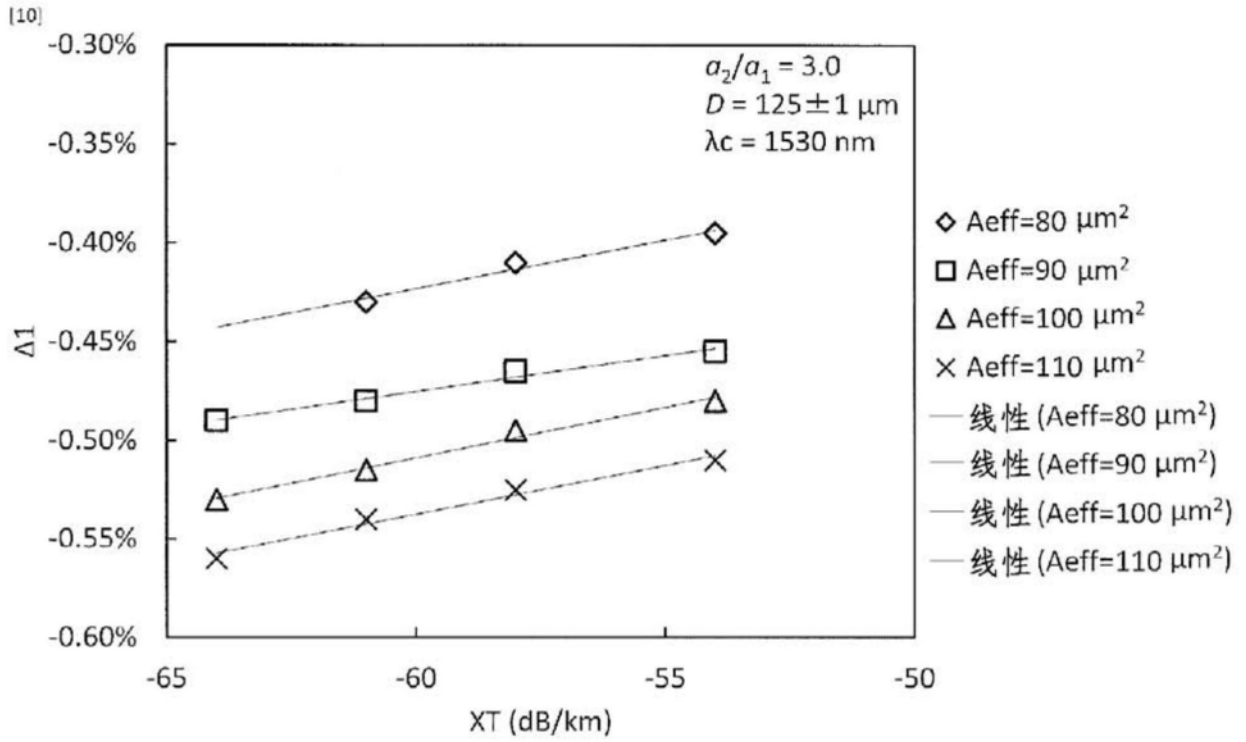


图10

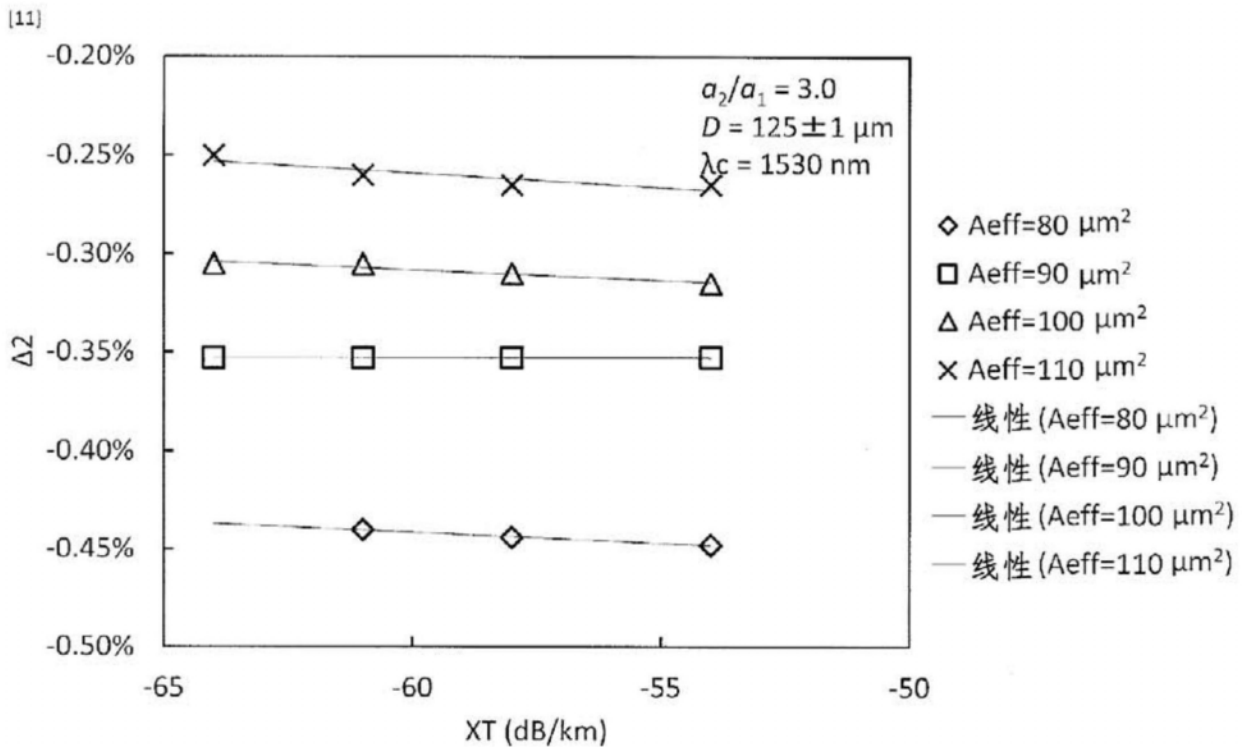


图11

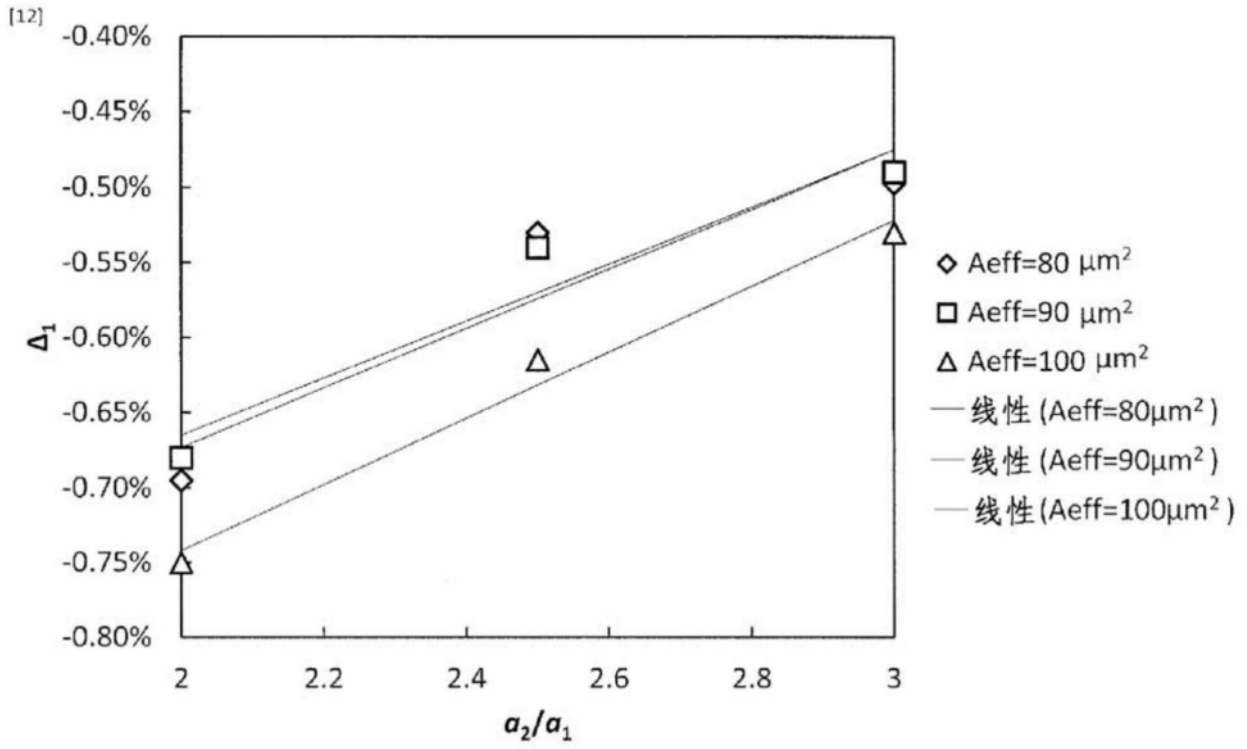


图12

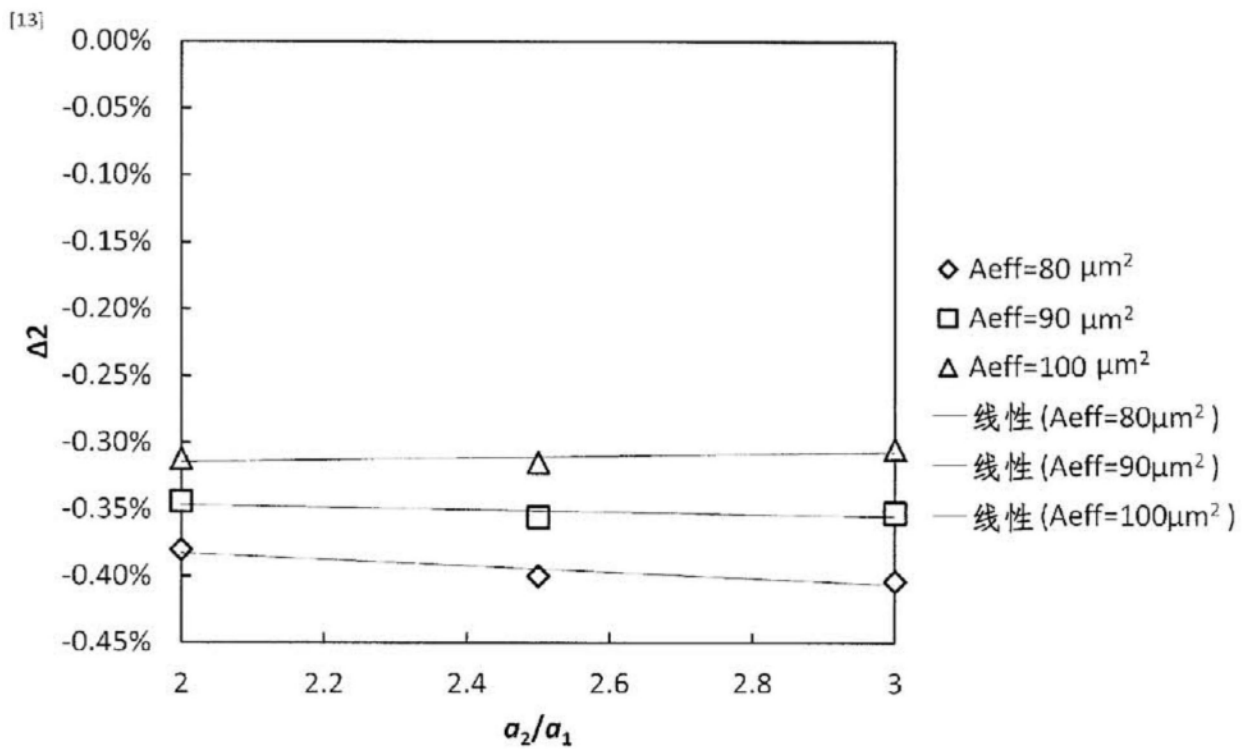


图13

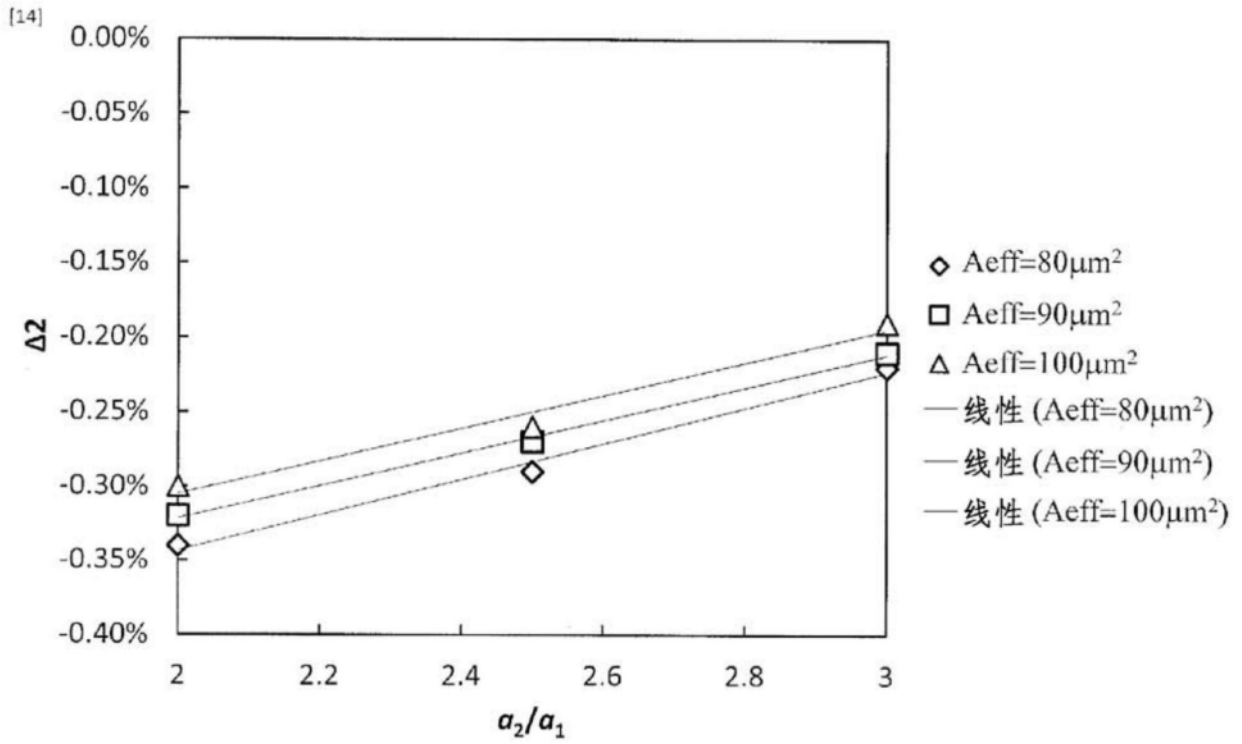


图14

[15]

		设计例(1)	设计例(2)
$a_1$		5.83 $\mu m$	6.57 $\mu m$
$a_2/a_1$		2.5	2.5
$\Delta_1$		-0.68%	-0.61%
$\Delta_2$		-0.38%	-0.31%
$A_{eff}$	$\lambda = 1550nm$	85 $\mu m^2$	102 $\mu m^2$
$\alpha_b$	$\lambda = 1625nm, R=30mm$	<0.1dB/100turn	<0.1dB/100turn
$\lambda_c$		1530nm	1530nm

图15

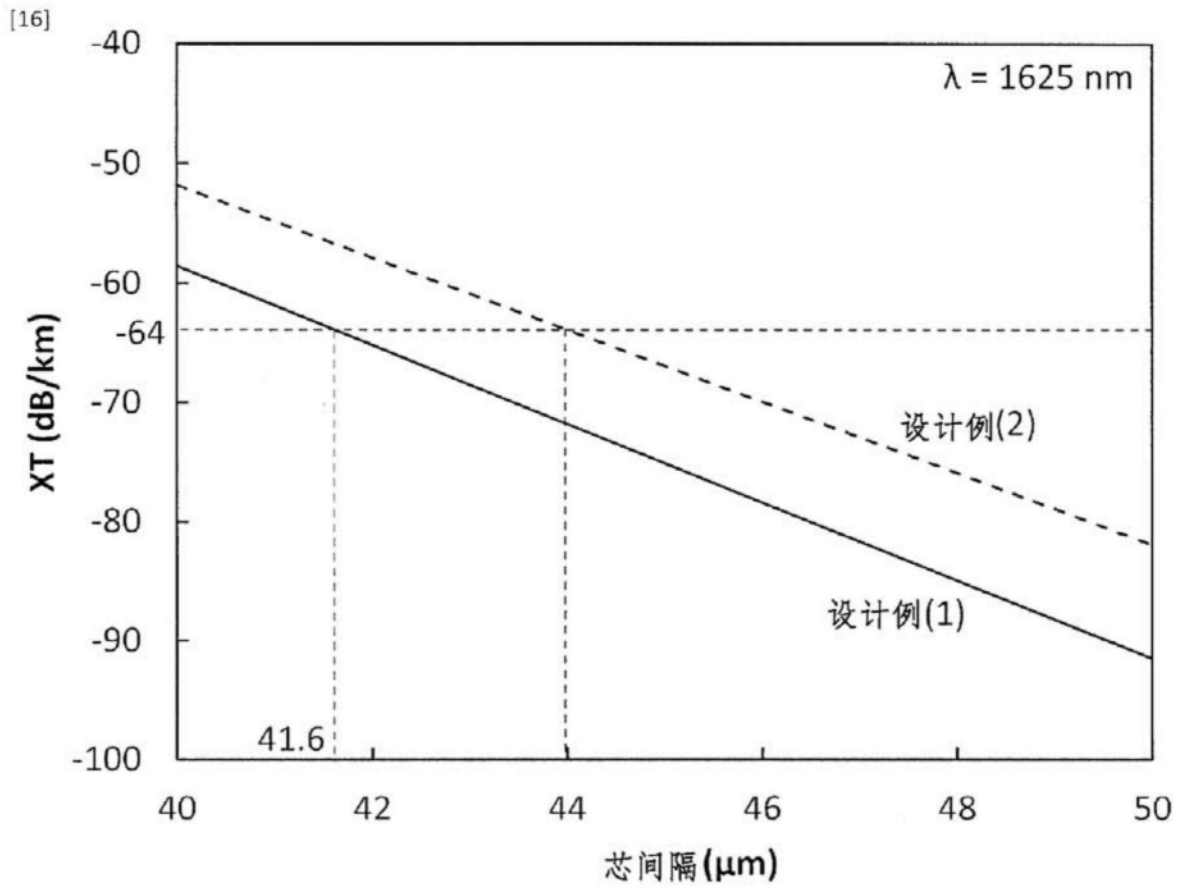


图16

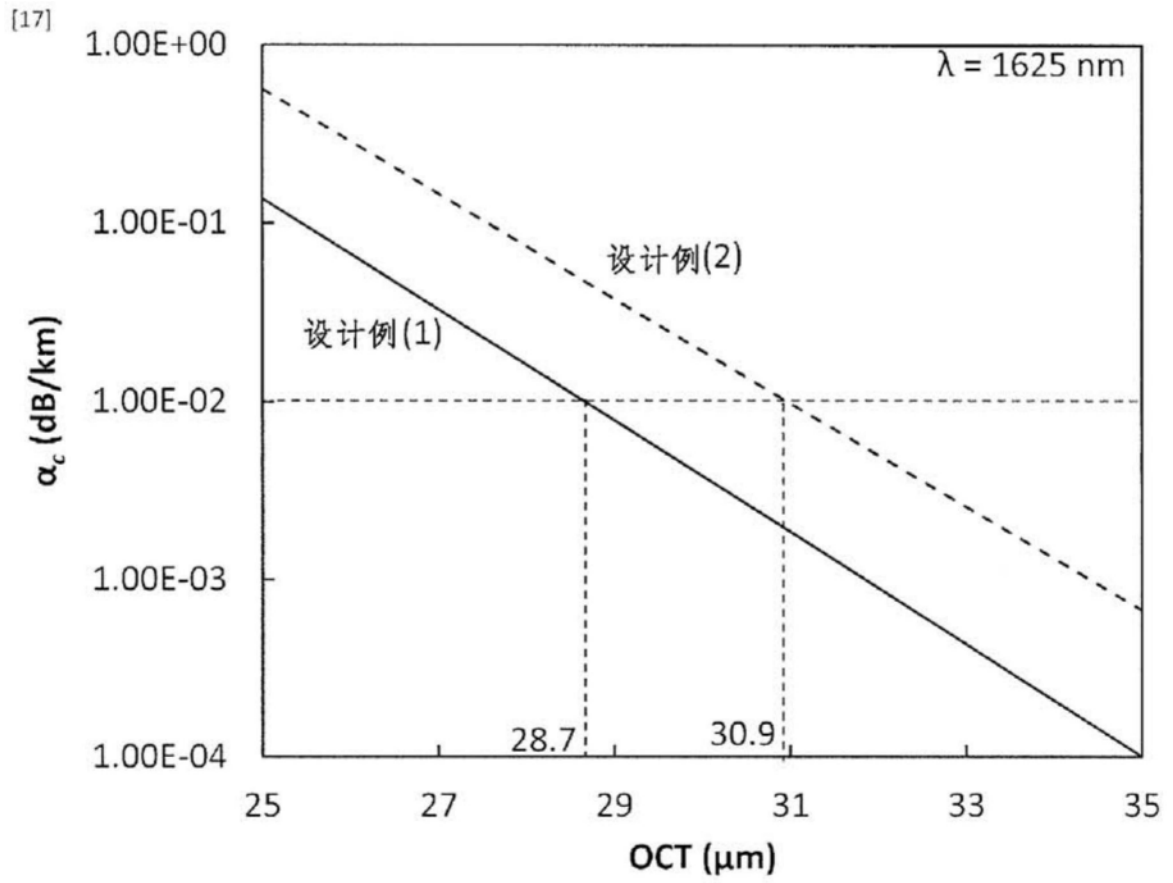


图17

[18]

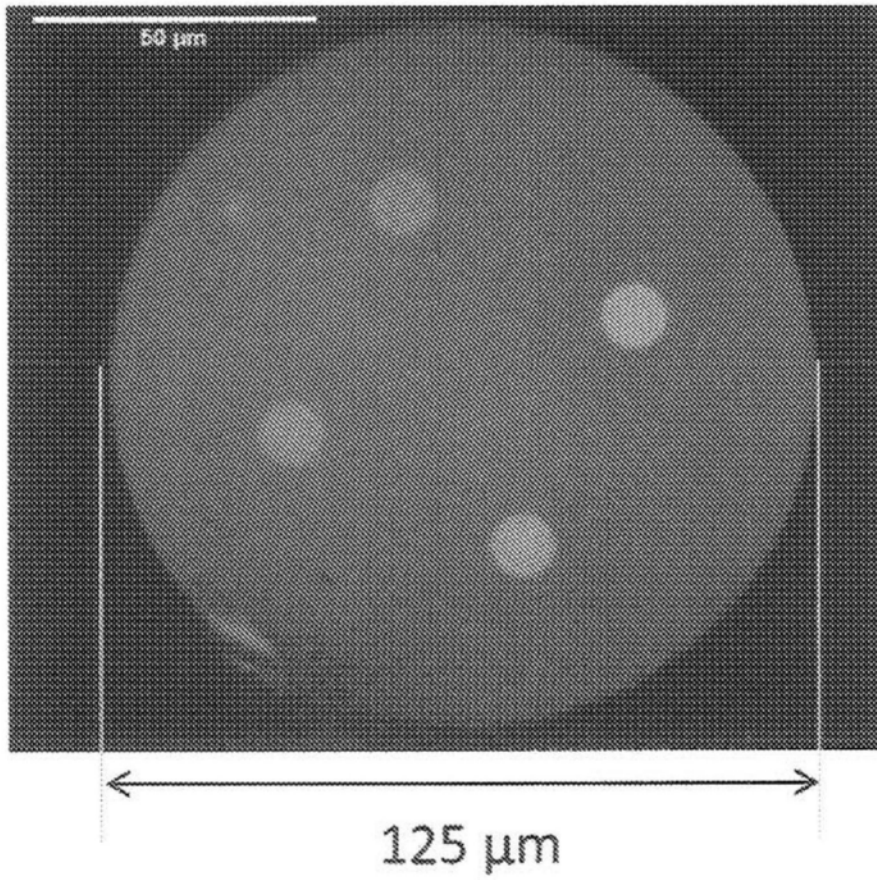


图18

[19]

	测量条件	设计例①
$a_1$		$6\mu\text{m}$
$a_2/a_1$		3
$\Delta_1$		-0.6%
$\Delta_2$		-0.4%
有效截面积 $A_{\text{eff}}$	$\lambda = 1550\text{nm}$	$83\sim 89\mu\text{m}^2$
弯曲损耗 $\alpha_b$	$\lambda = 1625\text{nm}$ 、 $R=30\text{mm}$	$<0.01\text{ dB}/100\text{turn}$
截止波长 $\lambda_c$		$<1490\text{ nm}$
传输损耗	$\lambda = 1550\text{nm}$	$<0.18\text{ dB}/\text{km}$
	$\lambda = 1625\text{nm}$	$<0.25\text{ dB}/\text{km}$
XT	$\lambda = 1625\text{nm}$	$<-66\text{ dB}/\text{km}$

图19

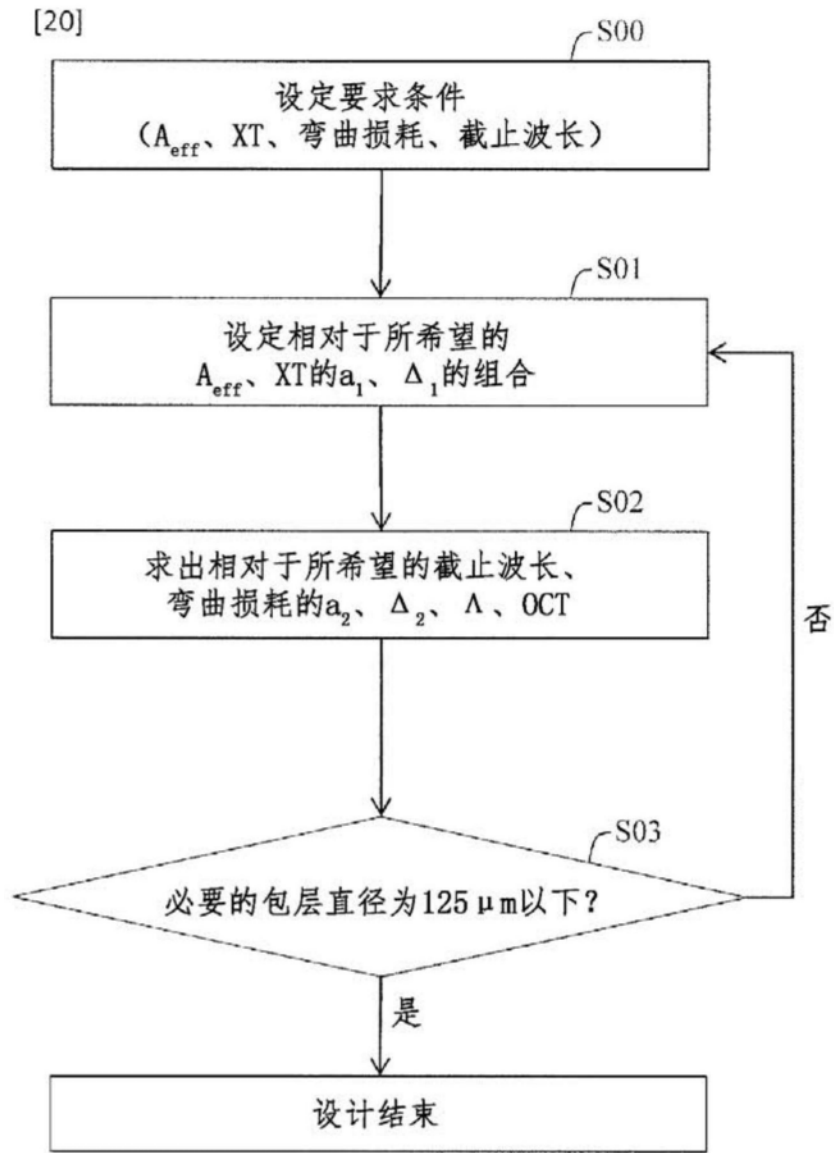


图20

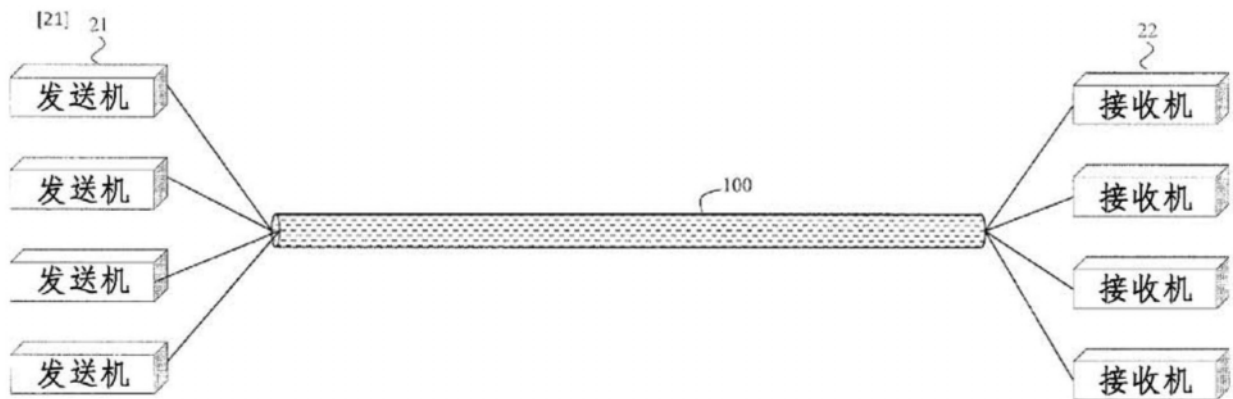


图21