



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104067152 A

(43) 申请公布日 2014. 09. 24

(21) 申请号 201280043850. 9

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2012. 08. 02

G02B 6/02 (2006. 01)

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2014. 03. 10

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/US2012/049289 2012. 08. 02

(87) PCT国际申请的公布数据
W02014/021894 EN 2014. 02. 06

(71) 申请人 康宁股份有限公司
地址 美国纽约州

(72) 发明人 S·R·别克汉姆 M-J·李
D·A·诺兰 J·王

(74) 专利代理机构 上海专利商标事务所有限公
司 31100

代理人 李玲

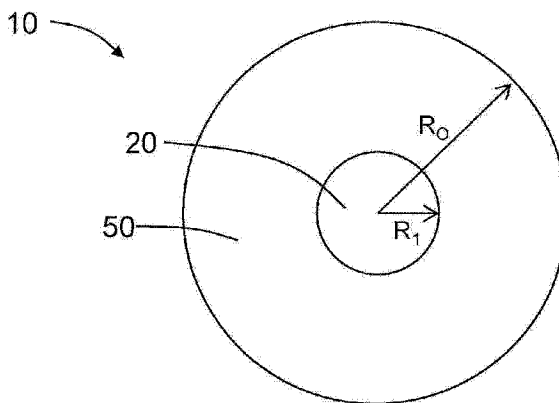
权利要求书3页 说明书29页 附图7页

(54) 发明名称

用于模分多路复用的少模光纤

(57) 摘要

披露一种适用于模分多路复用 (MDM) 光传输系统的少模光纤。该光纤具有渐变折射率纤芯, 该渐变折射率纤芯具有在 $8\mu\text{m}$ 至 $14\mu\text{m}$ 范围内的半径 R_1 、在 1550nm 的波长处大于或等于约 2.3 并小于约 2.7 的 α 值以及相对于包层从大约 0.3% 至大约 0.6% 的最大相对折射率 $\Delta_{1\text{MAX}}$ 。光纤也具有大于约 $90\mu\text{m}^2$ 并小于约 $160\mu\text{m}^2$ 的有效面积。纤芯和包层在大于 1500nm 的波长处仅支持 LP01 和 LP11 模。包层具有最大相对折射率 $\Delta_{4\text{MAX}}$, 其中 $\Delta_{1\text{MAX}} > \Delta_{4\text{MAX}}$, 并且 LP01 和 LP11 模之间的差分群延迟在 1550nm 的波长处小于约 0.5ns/km 。



1. 一种少模光纤,包括:

玻璃纤芯,所述玻璃纤芯具有大约 $8\ \mu\text{m}$ 至大约 $14\ \mu\text{m}$ 的范围内的半径 R_1 、在 1550nm 波长处其 α 值大于或等于约 2.3 且小于约 2.7 的渐变折射率分布、相对于玻璃包层在大约 0.3% 至大约 0.6% 的范围中的最大相对折射率 $\Delta_{1\text{MAX}}$ 以及在 1550nm 处大于约 $90\ \mu\text{m}^2$ 且小于约 $160\ \mu\text{m}^2$ 的有效面积;

直接围绕在所述玻璃纤芯周围并具有最大相对折射率 $\Delta_{4\text{MAX}}$ 的玻璃包层,其中 $\Delta_{1\text{MAX}} > \Delta_{4\text{MAX}}$; 以及

其中所述玻璃纤芯和玻璃包层在大于 1500nm 的一个或多个波长处仅支持 LP01 模和 LP11 模的传播和传输,其中所述 LP01 模和所述 LP11 模之间的群延迟大小在 1550nm 的波长处小于约 $0.5\text{ns}/\text{km}$ 。

2. 如权利要求 1 所述的少模光纤,其特征在于,所述玻璃包层包括直接围绕所述玻璃纤芯并具有最小相对折射率 $\Delta_{2\text{MIN}} < \Delta_{1\text{MAX}}$ 的低折射率环。

3. 如权利要求 1 所述的少模光纤,其特征在于,所述玻璃包层包括围绕所述纤芯并具有相对折射率 $\Delta_{2\text{MIN}} < \Delta_{1\text{MAX}}$ 的低折射率环,其中环形内包层被设置在所述纤芯和所述低折射率环之间。

4. 如权利要求 1 所述的少模光纤,其特征在于,还包括在所述 LP01 模和所述 LP11 模之间的群延迟大小,所述群延迟大小在 1550nm 波长处小于约 $0.3\text{ns}/\text{km}$ 。

5. 如权利要求 1 所述的少模光纤,其特征在于,还包括在 1550nm 处小于或等于 20dB 的 LP11 模的引脚阵列弯曲损耗。

6. 如权利要求 1 所述的少模光纤,其特征在于,还包括:

小于 1800nm 的 LP02 模的截止波长; 以及

大于 2400nm 的 LP11 模的截止波长。

7. 如权利要求 2 所述的少模光纤,其特征在于,所述低折射率环具有从大约 $2\ \mu\text{m}$ 至大约 $15\ \mu\text{m}$ 的范围内的径向厚度。

8. 如权利要求 3 所述的少模光纤,其特征在于,所述内包层具有小于或等于大约 $5\ \mu\text{m}$ 的径向厚度。

9. 一种模分多路复用 (MDM) 光传输系统,包括:

发射机,所述发射机被配置成分别在 LP11 模和 LP01 模中分别发送具有第一和第二波长的第一和第二导波光信号;

接收器,所述接收器被配置成接收所述第一和第二光信号并对所述第一和第二光信号进行波长多路分解; 以及

如权利要求 1 所述的少模光纤,被配置成光连接所述发射机和所述接收器并支持所述第一和第二导波光信号从所述发射机至所述接收器的传输。

10. 一种少模光纤,包括:

玻璃纤芯,所述玻璃纤芯包括从大约 $8\ \mu\text{m}$ 至大约 $14\ \mu\text{m}$ 的半径 R_1 、在 1550nm 波长处其 α 值大于或等于约 1.9 且小于约 2.7 的渐变折射率分布、相对于玻璃包层从大约 0.3% 至大约 0.6% 的最大相对折射率 $\Delta_{1\text{MAX}}$ 以及在 1550nm 处大于约 $90\ \mu\text{m}^2$ 并小于约 $160\ \mu\text{m}^2$ 的有效面积;

所述玻璃包层包括围住所述玻璃纤芯并具有最小相对折射率 $\Delta_{2\text{MIN}} < 0$ 的低折射率环以

及围住所述低折射率环并具有最大相对折射率 Δ_{4MAX} 的外包层,以使 $\Delta_{1MAX} > \Delta_{4MAX} > \Delta_{2MIN}$;以及

所述玻璃纤芯和玻璃包层在大于 1500nm 的一个或多个波长处仅支持 LP01 模和 LP11 模的传播和传输。

11. 如权利要求 10 所述的少模光纤,其特征在于,还包括直接毗邻并围绕所述纤芯而设置的内包层,所述内包层具有相对折射率 Δ_3 ,其中 $\Delta_{2MIN} < \Delta_3 \leq \Delta_{4MAX}$ 。

12. 如权利要求 10 所述的少模光纤,其特征在于,还包括在所述 LP01 模和所述 LP11 模之间的群延迟大小,所述群延迟大小在 1550nm 波长处小于约 0.5ns/km。

13. 如权利要求 10 所述的少模光纤,其特征在于,还包括:

小于 1600nm 的 LP02 模的截止波长;以及

大于 2000nm 的 LP11 模的截止波长。

14. 一种模分复用 (MDM) 光传输系统,包括:

发射机,所述发射机被配置成分别在 LP11 模和 LP01 模中分别发送具有第一和第二波长的第一和第二导波光信号;

接收器,所述接收器被配置成接收所述第一和第二光信号并对所述第一和第二光信号进行波长多路分解;以及

至少一个如权利要求 10 所述的少模光纤,被配置成光连接所述发射机和所述接收器并支持所述第一和第二导波光信号从所述发射机至所述接收器的传输。

15. 一种少模光纤,包括:

玻璃纤芯,所述玻璃纤芯包括从大约 $8\mu\text{m}$ 至大约 $14\mu\text{m}$ 的范围内的半径 R_1 、在 1550nm 波长处其 α 值大于或等于约 1.9 并小于约 2.7 的渐变折射率分布、相对于玻璃包层从大约 0.3% 至大约 0.6% 的最大相对折射率 Δ_{1MAX} 以及在 1550nm 处大于约 $90\mu\text{m}^2$ 并小于约 $160\mu\text{m}^2$ 的有效面积;

所述玻璃包层包括:低折射率环,所述低折射率环围住所述纤芯但通过内包层与所述纤芯隔开并具有最小相对折射率 $\Delta_{2MIN} < 0$;以及具有最大相对折射率 Δ_{4MAX} 的外包层,其中 $\Delta_{1MAX} > \Delta_4 \% > \Delta_{2MIN} \%$;以及

其中,所述玻璃纤芯和玻璃包层在大于 1500nm 的一个或多个波长处仅支持 LP01 模和 LP11 模的传播和传输。

16. 如权利要求 15 所述的少模光纤,其特征在于,还包括在所述 LP01 模和所述 LP11 模之间的群延迟大小,所述群延迟大小在 1550nm 波长处小于约 0.5ns/km。

17. 如权利要求 15 所述的少模光纤,其特征在于,还包括:

小于 1600nm 的 LP02 模的截止波长;以及

大于 2000nm 的 LP11 模的截止波长。

18. 如权利要求 15 所述的少模光纤,其特征在于,所述内包层具有小于或等于大约 $5\mu\text{m}$ 的径向厚度。

19. 如权利要求 15 所述的少模光纤,其特征在于,所述内包层具有相对折射率 $\Delta_3 \leq \Delta_{4MAX}$ 。

20. 一种模分多路复用 (MDM) 光传输系统,包括:

发射机,所述发射机被配置成分别在 LP11 模和 LP01 模中分别发送具有第一和第二波

长的第一和第二导波光信号；

接收器,所述接收器被配置成接收所述第一和第二光信号并对所述第一和第二光信号进行波长多路分解;以及

如权利要求 15 所述的少模光纤,被配置成光连接所述发射机和所述接收器并支持所述第一和第二导波光信号从所述发射机至所述接收器的传输。

用于模分多路复用的少模光纤

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求 2011 年 8 月 15 日提交的美国临时申请 61/523552 的优先权益,本申请依赖该美国临时申请的内容并且其内容通过引用而整体结合于此。

[0003] 领域

[0004] 本说明书总地涉及光纤,更具体地涉及用于模分多路复用 (MDM) 的少模光纤。

背景技术

[0005] 多媒体电信应用的量和多样性的爆炸性增长不断促动互联网话务的速度需求并引发主干光纤光通信链路的研究。基于相干通信和电子数字信号处理 (DSP) 的接收机由于其灵活性、可伸缩性和补偿各种传输损伤 (包括光纤非线性) 的能力近些年来已被接受作为长程系统的下一代标准。随着光纤非线性对可取得的光谱效率具有限制,因此大有效面积 (A_{eff}) 单模光纤 (SMF) 已被设计成减少非线性惩罚。

[0006] 然而,光纤的光谱效率随着增加的有效面积缓慢增加,因此需要另一解决方案来增加系统容量。最近的试验已表明能使用多输入多输出 (MIMO) 技术以少模光纤 (FMF) 一种以上的空间传播模来发送信号。少模光纤对于这种应用尤为吸引人,因为计算复杂性直接与随模数成比例,并且利用仅少模降低了可能导致来自多径干扰 (MPI) 的误码率惩罚的模混叠的风险。

[0007] 之前提出的光纤通信系统的少模光纤或者具有阶跃折射率或者具有抛物线型纤芯,在抛物线型纤芯中纤芯直径相对于单模光纤增加以除了基 LP01 模外支持至少 LP11 模。对于这两种纤芯设计,基 LP01 模和 LP11 模之间在 1550nm 窗内在一个或多个波长下存在大的延迟差。这些大的延迟差使得使用 MIMO 在时域下多路分解光信号变得困难。

[0008] 因此,需要具有低损耗和小的差分群延迟 (DGD) 的少模光纤的替代设计。

发明内容

[0009] 本公开的一个方面是包括玻璃纤芯和直接围绕纤芯的玻璃包层的少模光纤。玻璃纤芯具有范围从大约 $8 \mu\text{m}$ 至大约 $14 \mu\text{m}$ 的半径 R_1 、在 1550nm 的波长处 α 值大于或等于约 2.3 且小于约 2.7 的渐变折射率分布、相对于玻璃包层在大约 0.3% 至大约 0.6% 的范围内的最大相对折射率 $\Delta_{1\text{MAX}}$ 以及在 1550nm 处大于约 $90 \mu\text{m}^2$ 并小于约 $160 \mu\text{m}^2$ 的有效面积。玻璃包层包括最大相对折射率 $\Delta_{4\text{MAX}}$ 以使 $\Delta_{1\text{MAX}} > \Delta_{4\text{MAX}}$; 该光纤在大于 1500nm 的波长处仅支持 LP01 和 LP11 的传播和传输,其中两个模之间的群延迟在 1550nm 的波长处小于约 0.5ns/km。

[0010] 本公开的另一方面是包括玻璃纤芯和围绕玻璃纤芯的玻璃包层的少模光纤。该玻璃纤芯具有从大约 $8 \mu\text{m}$ 至大约 $14 \mu\text{m}$ 的半径 R_1 、在 1550nm 的波长处 α 值大于或等于约 1.9 和小于约 2.7 的渐变折射率分布、相对于玻璃包层在大约 0.3% 至大约 0.6% 的最大相对折射率 $\Delta_{1\text{MAX}}$ 以及在 1550nm 处大于约 $90 \mu\text{m}^2$ 并小于约 $160 \mu\text{m}^2$ 的有效面积。玻璃包层具有围住纤芯的低折射率环。低折射率环具有最小相对折射率 $\Delta_{2\text{MIN}} < 0$ 。玻璃包层也具有外包层,

该外包层围住低折射率环并具有最大相对折射率 Δ_{4MAX} ，以使 $\Delta_{1MAX} > \Delta_{4MAX} > \Delta_{2MIN}$ 。玻璃纤芯和玻璃包层在大于 1500nm 的波长处仅支持 LP01 和 LP11 的传播和传输。

[0011] 本公开的另一方面是包括由玻璃包层围绕的玻璃纤芯的少模光纤。该玻璃纤芯具有从大约 $8\mu\text{m}$ 至大约 $14\mu\text{m}$ 的范围内的半径 R_1 、在 1550nm 的波长处 α 值大于或等于约 1.9 和小于约 2.7 的渐变折射率分布、相对于玻璃包层在大约 0.3% 至大约 0.6% 的最大相对折射率 Δ_{1MAX} 以及在大约 1550nm 处大于约 $90\mu\text{m}^2$ 并小于约 $160\mu\text{m}^2$ 的有效面积。玻璃包层具有围绕玻璃纤芯但通过具有相对折射率 Δ_3 的内包层与之间隔开的低折射率环。低折射率环具有最小相对折射率 $\Delta_{2MIN} < 0$ 。玻璃包层也具有外包层，该外包层围住低折射率环并具有最大相对折射率 Δ_{4MAX} ，以使 $\Delta_{1MAX} > \Delta_{4MAX} > \Delta_{2MIN}$ 且 $\Delta_3 > \Delta_{2MIN}$ 。玻璃纤芯和玻璃包层在大于 1500nm 的波长处仅支持 LP01 和 LP11 的传播和传输。

[0012] 将在下面详细描述中阐述本公开的附加特征和优势，这些特征和优点在某种程度上对于本领域的技术人员来说根据该描述将是显而易见的，或者通过实施包括以下详细描述、权利要求书以及附图的本文所述的实施例来认识到。权利要求书被纳入于此并构成如下面描述的详细说明。

[0013] 应当理解的是，以上发明内容和以下具体实施方式两者描述各个实施例，且旨在提供用于理解所要求保护的题目的本质和特性的概观或框架。所包括的附图用于提供对各实施例的进一步理解，且被结合到本说明书中并构成其一部分。附图示出本发明所描述的各个实施例，并与本描述一起用于说明所要求保护的题目的原理和操作。

[0014] 附图简述

[0015] 图 1 是根据本文描述的实施例的少模光纤的一段的侧视图；

[0016] 图 2A 是沿剖切线 A-A 得到的图 1 的少模光纤的横截面图并示出本文披露的少模光纤的第一主示例实施例的配置；

[0017] 图 2B 绘出图 2A 的少模光纤的相对折射率分布；

[0018] 图 3A 是沿剖切线 A-A 得到的图 1 的少模光纤的横截面图并示出本文披露的少模光纤的第二主示例实施例的配置；

[0019] 图 3B 绘出图 3A 的光纤的相对折射率分布；

[0020] 图 4A 是沿剖切线 A-A 得到的图 1 的少模光纤的横截面图并示出本文披露的少模光纤的第二主示例实施例的配置；

[0021] 图 4B 绘出图 4A 的少模光纤的相对折射率分布；

[0022] 图 4C 类似于图 4B，除了相对折射率分布包括具有比内包层更高的相对折射率之外；

[0023] 图 4D 绘出对具有最佳值 α 的最大纤芯相对折射率 Δ_{1MAX} （在图例中表示为 Δ ）的不同值的脉冲展宽 (ns/km) 相对于波长 (μm) 的关系；

[0024] 图 5 是使用本文披露的少模光纤的示例性 MDM 光传输系统的示意图；

[0025] 图 6 是光学地连接图 5 的 MDM 光传输系统中的发射机和接收器的示例性光纤链路的示意图，其中光纤链路具有由光学放大器连接的少模光纤的多个跨距；以及

[0026] 图 7 示出替代的少模光纤实施例的折射率分布。

具体实施方式

[0027] 现在将详细参照用作长距离传输光纤的光纤的各个实施例,在附图中示出了各个实施例的示例。在可能时,将在所有附图中使用相同的附图标记来指示相同或类似的部分。

[0028] 术语

[0029] 本文将使用下面的术语来描述光纤,其中一些参数结合各示例性实施例被介绍和定义如下:

[0030] 在本文中,术语“折射率分布”是指折射率或相对折射率与光纤的半径之间的关系。

[0031] 术语“相对折射率”,如本文中使用的,被定义为:

$$[0032] \quad \Delta(r)\% = 100 \times [n(r)^2 - n_{\text{REF}}^2] / 2n(r)^2,$$

[0033] 除非另有所指,否则 $n(r)$ 是在半径 r 处的折射率。除非另外指明,相对折射率被定义在 1550nm 处。在一个方面,参考折射率 n_{REF} 是二氧化硅玻璃。在另一个方面, n_{REF} 是包层的最大折射率。如本文中使用的,相对折射率以 Δ 表示,而且它的值以“%”为单位给出,除非另外指明。在一区域的折射率小于参考折射率 n_{REF} 的情况下,相对折射率为负且被称为具有下陷区域或下陷折射率,而且最小相对折射率是在相对折射率负得最大的点处计算得出的,除非另外指明。在区域的折射率大于基准折射率 n_{REF} 的情形下,相对折射率为正,而且该区域可被认为是凸起的或具有正折射率。

[0034] 如本文中使用的,术语“上掺杂剂”是指相对于纯的、未掺杂的 SiO_2 提升玻璃的折射率的掺杂剂。如本文中使用的,术语“下掺杂剂”是相对于纯的、未掺杂的 SiO_2 倾向于使玻璃的折射率下降的掺杂剂。上掺杂剂在伴随有不是上掺杂剂的一种或多种其它掺杂剂时,可存在于具有负相对折射率的光纤区域中。类似地,不是上掺杂剂的一种或多种其它掺杂剂可存在于具有正相对折射率的光纤区域中。下掺杂剂在伴随有不是下掺杂剂的一种或多种其它掺杂剂时,可存在于具有正相对折射率的光纤区域中。类似地,不是下掺杂剂的一种或多种其它掺杂剂可存在于具有负相对折射率的光纤区域中。

[0035] 如本文中使用的,光纤的“有效面积” A_{eff} 是光纤中传播光的面积且被定义为

$$[0036] \quad A_{\text{eff}} = 2\pi \frac{\left(\int_0^\infty E^2 r dr\right)^2}{\int_0^\infty E^4 r dr},$$

[0037] 其中 E 是与在光纤中传播的光关联的电场,且 r 是光纤的半径。除非另有所指,在 1550nm 波长处确定该有效面积 A_{eff} 。

[0038] 模场直径(MFD)是对于单模光纤中传播的光的光点大小或光束宽度的量度。MFD 因变于光源波长、光纤芯半径、和光纤折射率分布。使用 PetermanII 方法测量 MFD,其中

[0039] $\text{MFD} = 2w$ 以及

$$[0040] \quad w^2 = 2 \frac{\int_0^\infty E^2 r dr}{\int_0^\infty (dE/dr)^2} r dr$$

[0041] 其中 E 是光纤中的电场分布,且 r 是光纤的半径。

[0042] 归一化波数或光纤的 V 数被定义为 $V = k * R_1 * \text{NA}$, 其中 k 是自由空间波数 $2\pi/\lambda$, λ 是波长, R_1 是纤芯的半径,而 NA 是光纤的数值孔径。 NA 是由 $(n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2)^{1/2} = n_{\text{clad}} [2\Delta_{\text{MAX}} / (1 - 2\Delta_{\text{MAX}})]^{1/2}$ 给出的,其中 n_{core} 是纤芯的最大折射率, n_{clad} 是包层的折射率而 Δ_{MAX} 是纤芯

相对于包层的最大相对折射率。

[0043] 光纤的波长色散或色散是材料色散、波导色散和模间色散之和。

[0044] 模的截止波长是一最小波长,超出该波长模就停止在光纤中传播。单模光纤的截止波长是一最小波长,在该波长处光纤将仅支持一个传播模式。单模光纤的截止波长对应于较高阶模中最高的截止波长。一般,最高的截止波长对应于 LP₁₁ 模的截止波长。可在 1990 年纽约 Marcel Dekker 公司出版的作者为 Jeunhomme 的“Single Mode Fiber Optics (单模光纤光学)”一书第 39-44 页中找到一种数学定义,其中理论纤维截止被描述为模式传播常数变得等于外包层中的平面波传播常数时的波长。此理论波长适合于无直径变化的无限长的完美直光纤。

[0045] 可通过发射功率的单模光纤的 EIA-455-170 光缆截止波长或“FOTP-170”中描述的 22m 缆线截止测试来近似求得该缆线截止波长、或“缆线截止”。如本文中使用的,缆线截止意味着使用近似测试获得的值。缆线截止波长一般比理论截止波长低 100-300nm。

[0046] 如本文中使用的,术语“少模光纤”指支持比单模光纤更多模但比常见多模光纤更少模的传播的光纤。传播模的数量和它们在具有任意折射率分布的圆柱对称光纤中的特性是通过求解标量波方程获得的(例如参见 T. A. Lenahan, “Calculation of modes in an optical fiber using a finite element method and EISPACK,” Bell Syst. Tech. J., vol. 62, no. 1, p. 2663, 1983 年 2 月)。在光纤或其它介质波导内行进的光形成混合型模,该混合型模一般被称为 LP(线性偏振)模。LP_{0p} 模具有两个偏振自由度并且是双倍衰落的,LP_{1p} 模是四倍衰落的并且 $m > 1$ 的 LP_{mp} 模是四倍衰落的。当我们指定在光纤内传播的 LP 模的数量时,我们不考虑这些衰落。例如,其中仅 LP₀₁ 模传播的光纤是单模光纤,即便 LP₀₁ 模具有两种可能的偏振也好。其中 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模传播的少模光纤支持三个空间模,因为 LP₁₁ 模是双倍衰落的,并且每种模也具有两种可能的偏振,给出总共 6 个模。因此,当称光纤具有两个 LP 模时,这意味着它支持所有 LP₀₁ 模和 LP₁₁ 模的传播。

[0047] 通过在预定测试条件下所引起的通过光纤传播的光的衰减,可测量光纤的抗弯性即弯曲性能。基于引脚阵列弯曲测试对本文描述的光纤的弯曲性能建模,以比较该光纤对弯曲的相对耐受力。为了执行该测试,对基本上不具有所引起的弯曲损耗的光纤测量衰减。随后绕引脚阵列编织光纤,并且再次测量衰减。弯曲所引起的损耗(一般用 dB 单位表达)是两次衰减测量之间的差。引脚阵列是在平面上以单行排列并保持在固定垂直位置的一组十个圆柱引脚。引脚间距为 5mm(中心至中心)。引脚直径为 0.67mm。使光纤在相邻引脚的相对侧面上通过。在测试期间,光纤被置于充分的张力之下,以使光纤顺应由该光纤所接触到的引脚的周边部分。该测试涉及光纤的宏观抗弯性。

[0048] 如本文中使用的,术语“ α 分布”或“阿尔法分布”指的是相对折射率分布,以单位为“%”的项 Δ 表示,其中 r 是半径,其遵循以下方程:

$$[0049] \quad \Delta = \Delta_0 \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^\alpha \right]$$

[0050] 其中 Δ_0 是最大相对折射率, r_0 是纤芯的半径, r 在 $r_i < r < r_f$ 范围内, Δ 如上定义, r_i 是 α 分布的起点, r_f 是 α 分布的终点,而 α 是作为实数幂。对于阶跃式折射率分布, α 值大于或等于 10。对于渐变式折射率分布, α 值小于 10。本文中使用的术语“抛物线”包

括 $\alpha = 2$ 的基本抛物线形折射率分布以及其中纤芯的曲率在纤芯的一个或多个点略为偏离于 $\alpha = 2$ 的曲率,例如具有中心线下沉的分布。要注意这里不同形式的纤芯半径和最大相对折射率被用于下面例子而不影响德尔塔 (Δ) 的基本定义。

[0051] 除非本文另有所指,在 1550nm 处对本文披露和下面描述的光纤的上述性质进行测量或建模。

[0052] 在下面的讨论中,光纤除纤芯外的任何部分被认为是包层的一部分。另外,光纤 10 的给定区 Y 的相对折射率一般被表述为半径的函数 $\Delta_Y(r)$,并且在某些情形下能具有最大 Δ_{YMAX} 和 / 或最小 Δ_{YMIN} 。在 $\Delta_Y(r)$ 为常数的例子中, $\Delta_Y(r) = \Delta_{YMAX} = \Delta_{YMIN}$ 并被表示为 Δ_Y 。

[0053] 图 1 是根据本公开的少模光纤 (光纤) 10 的截面的侧视图。下文中描述针对光纤 10 的示例性横截面图和相应示例性相对折射率分布的曲线图来描述光纤 10 的各种示例性实施例。

[0054] 第一主示例实施例

[0055] 图 2A 是沿图 1 的剖切线 A-A 得到的光纤 10 的横截面图并示出光纤 10 的第一主实施例。图 2B 是与图 2A 的横截面对应的相对折射率分布。该第一示例性实施例的光纤 10 包括半径 R_1 的玻璃渐变折射率纤芯 20 以及围绕纤芯并开始于半径 R_1 并延伸直至外径 R_0 的纤芯。包层 50 具有基本均一的折射率以及相对折射率 $\Delta_4 = 0$ 。

[0056] 在图示和本文描述的各实施例中,纤芯 20 包括纯二氧化硅玻璃 (SiO_2) 或具有相对于纯的、未掺杂的二氧化硅玻璃而言增加玻璃纤芯的折射率的一种或多种掺杂剂的二氧化硅玻璃。用于增加纤芯的折射率的合适的掺杂剂包括但不限于 GeO_2 、 Al_2O_3 、 P_2O_5 、 TiO_2 、 ZrO_2 、 Nb_2O_5 、 Ta_2O_5 和 / 或其组合。

[0057] 下面的表 1 给出该第一主例实施例中的七个例子 (EX1-EX7),其中这七个例子具有在 2.3 和 2.7 之间的 α 值。光学性质全部在 1550nm 的波长处建模,除非另有说明。在一个例子中,LP11 模的相对延迟的大小小于 0.25ns/km,在另一例子中 LP11 模的相对延迟的大小小于 0.1ns/km,而在另一例子中,LP11 模的相对延迟的大小小于 0.05ns/km。在一个例子中,LP11 模的相对延迟的大小小于 0.5ns/km。在一个例子中,LP11 模的相对延迟的大小在 1500 和 1600nm 之间的全部波长下小于 0.5ns/km。在另一例子中,LP11 模的相对延迟的大小在 1500 和 1600nm 之间的全部波长下小于 0.3ns/km。在另一例子中,LP11 模的相对延迟的大小在 1500 和 1600nm 之间的全部波长下小于 0.2ns/km。在一个例子中,有效面积 A_{eff} 在 100 和 150 μm^2 之间,而在另一例子中为 110 和 140 μm^2 之间。

[0058] 在一个例子中,LP11 模的引脚阵列弯曲损耗小于 30dB,在另一个例子中小于 20dB。在一个例子中,LP02 模的截止波长小于 1800nm,在另一例子中小于 1750nm 并在另一例子中小于 1750nm 并大于 1600nm。在这些例子中,LP02 模的成缆截止波长比 LP02 模的理论截止波长低大约 300nm。在一个例子中,LP11 模的截止波长大于 2400nm,在另一例子中大于 2500nm 并在另一例子中大于 2600nm。

[0059] 在一个例子中,LP01 模的衰减小于 0.21dB/km,在另一例子中小于 0.20dB/km 并且在另一例子中小于 0.19dB/km。在一个例子中,LP11 模的衰减小于 0.25dB/km,在另一例子中小于 0.23dB/km 而在另一例子中小于 0.21dB/km。比较例 (CE) 具有 $\alpha = 2.0$ 的抛物线折射率纤芯,由此在 1550nm 处得到 0.76ns/km 的相对延迟,这个对于 MDM 光传输系统中的实际使用而言太大。这些光学性质全部在 1550nm 的波长下建模,除非另有说明。

[0060]

表1 - 例1至例7的例子								
	例 1	例 2	例 3	例 4	例 5	例 6	例 7	比 较例
$\Delta_{\text{IMAX}}\%$	0.418							

[0061]

		0.418	0.418	0.418	0.418	0.418	0.418	0.418
R_1 (μm)	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54
α	2.317	2.367	2.417	2.467	2.517	2.567	2.617	2.0
V-数	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67
LP01 衰减, 1550 nm (dB/km)	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184
LP11 衰减, 1550 nm (dB/km)	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
LP01 A_{eff} , 1550 nm (μm^2)	129.9	130.6	131.4	132.1	132.8	133.6	134.3	125.3
LP11 A_{eff} , 1550 nm (μm^2)	263.2	262.7	262.3	261.9	261.5	261.1	260.9	268.4
LP01 MFD, 1550 nm (μm)	12.84	12.87	12.90	12.92	12.95	12.98	13.00	12.68
LP11 MFD, 1550 nm (μm)	13.11	13.08	13.05	13.03	13.01	12.99	12.97	13.33
LP11 截止 (μm)	2.562	2.576	2.589	2.602	2.615	2.628	2.640	2.464
LP02 截止 (μm)	1.742	1.748	1.755	1.761	1.767	1.772	1.778	1.696
LP21 截止								

[0062]

(μm)	1.577	1.586	1.595	1.603	1.611	1.620	1.628	1.514
LP01 引脚 阵列, 1550nm (dB)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LP11 引脚 阵列, 1550nm (dB)	18.00	16.29	14.77	13.42	12.22	11.15	10.20	15.73
LP01 色 散, 1550 nm (ps/nm/km)	21.08	21.12	21.16	21.19	21.22	21.26	21.30	20.79
LP11 色 散, 1550 nm (ps/nm/km)	19.38	19.44	19.49	19.55	19.60	19.6 6	19.7 1	18.95
LP01 有效 折射率	1.468 73	1.468 75	1.468 77	1.468 78	1.468 80	1.468 81	1.468 83	1.468 59
LP11 有效 折射率	1.468 65	1.4687 0	1.4687 4	1.468 77	1.4688 1	1.468 84	1.4688 8	1.4683 4
LP11 延 迟, 1500 nm (ns/km)	-0.10	-0.02	0.05	0.11	0.18	0.24	0.30	-0.63
LP11 延 迟, 1550 nm (ns/km)	-0.20	-0.12	-0.05	-0.02	0.09	0.16	0.22	-0.76
LP11 延 迟, 1600 nm (ns/km)	-0.32	-0.24	-0.16	-0.08	-0.01	0.06	0.13	-0.91

[0063] 下面的表 2 给出该第一主例实施例的七个更多的例子 (例 8- 例 14), 其中 α 的值在 2.3 和 2.7 之间。在一个例子中, 相对延迟的大小小于 0.25ns/km, 在另一例子中小于

0.1ns/km,而在另一例子中小于0.05ns/km。在一个例子中,LP11模的相对延迟的大小在1500nm和1600nm之间的所有波长下小于0.3ns/km。在另一例子中,LP11模的相对延迟的大小在1500和1600nm之间的全部波长下小于0.2ns/km。在另一例子中,LP11模的相对延迟的大小在1500和1600nm之间的全部波长下小于0.15ns/km。在一个例子中,有效面积 A_{eff} 在90和160 μm^2 之间,而在另一例子中为100和150 μm^2 之间。在一个例子中,LP11模的引脚阵列弯曲损耗小于60dB,在另一个例子中小于30dB,而在另一例子中小于20dB。

[0064] 在一个例子中,LP02模的截止波长小于1800nm,在另一例子中小于1750nm并在另一例子中小于1750nm并大于1600nm。在这些例子中,LP02模的成缆截止波长比LP02模的理论截止波长低大约300nm。在一个例子中,LP11模的截止波长大于2400nm,在另一例子中大于2500nm并在另一例子中大于2600nm。在一个例子中,LP01模的衰减小于0.21dB/km,在另一例子中小于0.20dB/km并在另一例子中小于0.19dB/km。在一个例子中,LP11模的衰减小于0.25dB/km,在另一例子中小于0.23dB/km并在另一例子中小于0.21dB/km。这些光学性质全部在1550nm的波长下被建模,除非另有说明。

表2 - 例子 例8至例14

	例8	例9	例10	例11	例12	例13	例14
[0065] $\Delta_{\text{IMAX}} \%$	0.452	0.389	0.454	0.446	0.472	0.547	0.337
$R_1 (\mu\text{m})$	10.29	10.86	9.85	9.77	9.33	8.66	11.37
α				2.567			

[0066]

	2.417	2.467	2.517		2.617	2.617	2.517
V-数				5.42			
	5.75	5.63	5.52		5.33	5.33	5.49
LP01 衰 减, 1550 nm (dB/km)	0.184	0.183	0.185	0.185	0.185	0.186	0.183
LP11 衰 减, 1550 nm (dB/km)	0.201	0.198	0.202	0.202	0.204	0.209	0.196
LP01 A_{eff} 1550 nm (μm^2)	123.3	141.1	118.9	119.5	111.4	95.9	159.5
LP11 A_{eff} 1550 nm (μm^2)	245.1	280.2	236.1	237.2	221.0	190.5	317.3
LP01 MFD, 1550 nm (μm)	12.49	13.36	12.26	12.29	11.86	11.00	14.20
LP11 MFD, 1550 nm (μm)	12.61	13.49	12.39	12.42	12.00	11.14	14.37
LP11截止 (μm)	2.629	2.586	2.548	2.517	2.485	2.484	2.532
LP02截止 (μm)	1.781	1.750	1.721	1.698	1.674	1.673	1.710

[0067]

LP21截止 (μm)	1.619	1.593	1.570	1.552	1.532	1.532	1.561
LP01引脚 阵列,1550nm (dB)	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24
LP11引脚 阵列, 1550nm (dB)	7.11	22.57	9.38	11.92	9.18	2.87	56.57
LP01 色 散, 1550 nm (ps/nm/km)	21.12	21.24	21.12	21.14	21.09	20.96	21.32
LP11 色 散, 1550 nm (ps/nm/km)	19.46	19.66	19.10	18.99	18.64	18.11	19.77
LP01 有 效折射率	1.46927	1.4683 5	1.4693 4	1.469 23	1.469 64	1.4707 7	1.4675 9
LP11 有 效折射率	1.46925	1.4683 4	1.4693 2	1.469 21	1.469 61	1.4707 4	1.4675 7
LP11延迟, 1500 nm (ns/km)	0.092	0.089	0.112	0.120	0.137	0.154	0.069

	LP11延迟, 1550 nm (ns/km)	-0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	-0.006	-0.017
[0068]	LP11 延 迟, 1600 nm (ns/km)	-0.108	-0.103	-0.134	-0.14 2	-0.163	-0.196	-0.120

[0069] 下面的表3给出该第一主例实施例的四个更多的例子(例15-例18),其中 α 的值在2.3和10.0之间。在一个例子中, α 的值为2.3和5.0之间。在另一例子中, α 的值为2.3和3之间。在一个例子中,相对延迟的大小小于0.25ns/km,在另一例子中小于0.1ns/km,而在另一例子中小于0.05ns/km。在一个例子中,LP11模的相对延迟的大小在1500nm和1600nm之间的所有波长下小于0.5ns/km。在另一例子中,LP11模的相对延迟的大小在1500和1600nm之间的全部波长下小于0.3ns/km。在另一例子中,LP11模的相对延迟的大小在1500和1600nm之间的全部波长下小于0.2ns/km。

[0070] 在一个例子中,有效面积 A_{eff} 在90和160 μm^2 之间,而在另一例子中为100和150 μm^2 之间。在一个例子中,LP11模的引脚阵列弯曲损耗小于100dB,在另一个例子中小于30dB,而在另一例子中小于20dB。在一个例子中,LP02模的截止波长小于1800nm,在另一例子中小于1750nm并在另一例子中小于1750nm并大于1600nm。在这些例子中,LP02模的成缆截止波长比LP02模的理论截止波长低大约300nm。在一个例子中,LP11模的截止波长大于2000nm,在另一例子中大于2200nm并在另一例子中大于2400nm。在一个例子中,LP01模的衰减小于0.21dB/km,在另一例子中小于0.20dB/km并在另一例子中小于0.19dB/km。在一个例子中,LP11模的衰减小于0.25dB/km,在另一例子中小于0.23dB/km并在另一例子中小于0.21dB/km。这些光学性质全部在1550nm的波长下被建模,除非另有说明。

[0071]

表3 - 示例 EX15 到 EX18

[0072]

	例15	例16	例17	例18
$\Delta_{1\text{MAX}} \%$	0.400	0.400	0.500	0.500
$R_1 (\mu\text{m})$	7.50	10.70	8.30	9.50
A	5	2.5	3	2.5
V-数	3.94	5.62	4.88	5.59
LP01 衰 减, 1550 nm (dB/km)	0.187	0.184	0.186	0.185
LP11 衰 减, 1550 nm (dB/km)	0.209	0.199	0.209	0.205
LP01 A_{eff} , 1550 nm (μm^2)	108.7	137.6	99.0	109.1
LP11 A_{eff} , 1550 nm (μm^2)	213.1	272.1	195.2	216.3
LP01 MFD, 1550 nm (μm)	11.60	13.18	11.15	11.74
LP11 MFD, 1550 nm (μm)	11.83	13.28	11.29	11.85
LP11 截 止(μm)	2.092	2.592	2.349	2.575

[0073]

LP02 截止(μm)	1.354	1.752	1.567	1.741
LP21 截止(μm)	1.303	1.597	1.452	1.586
LP01 引脚阵列, 1550nm (dB)	0.001	0.000	0.000	0.000
LP11 引脚阵列, 1550nm (dB)	99.8	18.2	11.0	3.9
LP01 色散, 1550 nm (ps/nm/km)	21.27	21.24	21.09	21.05
LP11 色散, 1550 nm (ps/nm/km)	15.25	19.61	17.39	18.94
LP01 有效折射率	1.4689 3	1.468 52	1.470 18	1.4700 2
LP11 有效折射率	1.4689 0	1.468 52	1.470 16	1.4700 0
LP11 延迟, 1500 nm	0.44	0.13	0.27	0.14

[0074]

(ns/km)				
LP11 延迟, 1550 nm	0.09	0.04	0.06	0.03
(ns/km)				
LP11 延迟, 1600 nm	-0.31	-0.06	-0.18	-0.11
(ns/km)				

[0075] 第二主例实施例

[0076] 图 3A 是沿图 1 的剖切线 A-A 得到的光纤 10 的横截面图并示出光纤 10 的第二主例实施例。图 3B 是与图 3A 的横截面对应的相对折射率分布。第二例实施例的光纤 10 包括直接毗邻于渐变折射率玻璃纤芯 20 或在其周围设置的低折射率环 40。包层 50 直接围住环 40。环 40 具有内径 R_1 、外径 R_2 、相对折射率 Δ_2 以及最小相对折射率 Δ_{2MIN} 。在一个例子中, 示出 $\Delta_2 = \Delta_{2MIN}$ 。

[0077] 下面的表 4 示出该第二主例实施例的三个例子, 例 19- 例 21。这些例子具有 1.9 和 2.1 之间的 α 值。低折射率环 40 的最小相对折射率 Δ_{2MIN} 小于 0, 而在这些例子中, $\Delta_{2MIN} < -0.05\%$ 。在一个例子中, 低折射率环 40 的外径 R_2 大于 $12 \mu m$, 在另一例子中大于 $14 \mu m$, 并在另一例子中大于 $16 \mu m$ 。在一个例子中, 相对延迟的大小小于 $0.25 ns/km$, 在另一例子中小于 $0.1 ns/km$, 而在另一例子中小于 $0.05 ns/km$ 。在一个例子中, LP11 模的相对延迟的大小在 1500 和 1600nm 之间的全部波长下小于 $0.3 ns/km$ 。在另一例子中, LP11 模的相对延迟的大小在 1500 和 1600nm 之间的全部波长下小于 $0.2 ns/km$ 。在另一例子中, LP11 模的相对延迟的大小在 1500 和 1600nm 之间的全部波长下小于 $0.1 ns/km$ 。

[0078] 在一个例子中, 有效面积 A_{eff} 在 90 和 $160 \mu m^2$ 之间, 而在另一例子中为 100 和 $150 \mu m^2$ 之间。在一个例子中, LP11 模的引脚阵列弯曲损耗小于 $60 dB$, 在另一个例子中小于 $30 dB$, 而在另一例子中小于 $20 dB$ 。在一个例子中, LP02 模的截止波长优选地小于 $1600 nm$, 在另一例子中小于 $1550 nm$ 并在另一例子中小于 $1550 nm$ 并大于 $1400 nm$ 。在这些例子中, LP02 模的成缆截止波长比 LP02 模的理论截止波长低大约 $100 nm$ 。在一个例子中, LP11 模的截止波长大于 $2000 nm$ 而在另一例子中大于 $2200 nm$ 。这些光学性质全部在 $1550 nm$ 的波长下建模, 除非另有说明。

[0079]

表4 – 例子 例19–例21			
	例19	例20	例21
$\Delta_{1\text{MAX}} \%$	0.391	0.433	0.458
$R_1 (\mu\text{m})$	10.75	10.65	10.36
A	2.05	2.05	2.05
$\Delta_{2\text{MIN}} \%$	-0.1	-0.1	-0.1
$R_2 (\mu\text{m})$	10.75	10.65	10.36
$R_3 (\mu\text{m})$	18.75	18.65	18.36
V-数	5.58	5.82	5.83
LP01 衰减, 1550 nm (dB/km)	0.184	0.184	0.184
LP11 衰减, 1550 nm (dB/km)	0.199	0.200	0.202
LP01 A_{eff} , 1550 nm (μm^2)	131.3	123.7	117.0
LP11 A_{eff} , 1550 nm (μm^2)	262.9	247.7	234.8
LP01 MFD, 1550 nm (μm)	12.92	12.54	12.20

[0080]

LP11 MFD, 1550 nm (μm)	12.98	12.59	12.27
LP11截止 (μm)	2.198	2.304	2.311
LP02截止 (μm)	1.443	1.510	1.514
LP21截止 (μm)	1.441	1.505	1.508
LP01引脚阵 列, 1550nm (dB)	0.00	0.00	0.00
LP11引脚阵 列, 1550nm (dB)	42.00	15.95	11.18
LP01 色散, 1550 nm (ps/nm/km)	21.24	21.16	21.10
LP11 色散, 1550 nm (ps/nm/km)	20.65	20.64	20.50
LP01有效折 射率	1.46826	1.46887	1.46923
LP11有效折 射率	1.46825	1.46886	1.46921
LP11延迟, 1500 nm (ns/km)	0.02	0.023	0.005
LP11延迟,	-0.008	-0.002	-0.025

	1550 nm (ns/km)			
[0081]	LP11延迟, 1600 nm (ns/km)	-0.047	-0.036	-0.064

[0082] 第三主例实施例

[0083] 图 4A 是沿图 1 的剖切线 A-A 得到的光纤 10 的横截面图并示出光纤 10 的第三主例实施例。图 4B 绘出与图 4 的横截面对应的示例性折射率分布,而图 4C 绘出另一示例性相对折射率分布。该第三示例性实施例的光纤 10 类似于第二示例性实施例的光纤,除了它进一步包括在纤芯 20 和环 40 之间的内包层 30。内包层 30 由此围住纤芯 20 以使环 40 不再与纤芯 20 接触(即,不再直接毗邻)。内包层 30 具有内径 R_1 和外径 R_2 ,而低折射率环 40 如今具有内径 R_2 、外径 R_3 以及径向宽度 $R_3 - R_2$ 。内包层 30 具有径向宽度 $R_2 - R_1$ 。在一个例子中,内包层具有相对折射率 $\Delta_3 = \Delta_4 = 0$ 。

[0084] 在一个例子中,内包层 30 可类似于包层 50 形成,也就是包括纯二氧化硅玻璃(SiO_2)、具有增加折射率的一种或多种掺杂剂(如, GeO_2 、 Al_2O_3 、 P_2O_5 、 TiO_2 、 ZrO_2 、 Nb_2O_5 、和 / 或 Ta_2O_5)的二氧化硅玻璃(诸如当包层被“上掺杂”时)、或具有诸如氟之类降低折射率的掺杂剂的二氧化硅玻璃(诸如当内包层“下掺杂”时)。

[0085] 下面的表 5 示出光纤 10 的该第三主例实施例的六个例子 EX22-EX27。例子(例 22-例 26)包括 α 值在 2.3 和 2.7 之间的值的渐变折射率纤芯 20。例 27 包括 α 值在 1.9 和 2.1 之间的值的渐变折射率纤芯 20。在一个例子中,低折射率环 40 的最小相对折射率 $\Delta_{2\text{MIN}}$ 小于 -0.1%,在另一例子中 $\Delta_{2\text{MIN}} < -0.2\%$,在另一例子中 $\Delta_{2\text{MIN}} \leq -0.3\%$,而在另一例子中 $-0.7\% \leq \Delta_{2\text{MIN}} \leq -0.3\%$ 。在一个例子中,低折射率环 40 的外径 R_3 大于 $14 \mu\text{m}$,在另一例子中,外径 R_3 大于 $16 \mu\text{m}$,而在另一例子中,外径 R_3 大于 $18 \mu\text{m}$ 。在一个例子中,低折射率环 40 的内径 R_2 大于 $12 \mu\text{m}$,在另一例子中, R_2 大于 $14 \mu\text{m}$ 而在另一例子中 R_2 大于或等于 $16 \mu\text{m}$ 。在一个例子中,低折射率环 40 的径向宽度由 $R_3 - R_2$ 定义,大于 $2 \mu\text{m}$,在另一例子中大于 $3 \mu\text{m}$ 而在另一例子中大于 $4 \mu\text{m}$ 。

[0086] 在一例实施例中,相对延迟的大小小于 0.25ns/km ,在另一例子中小于 0.1ns/km ,而在另一例子中小于 0.05ns/km 。在一个例子中,LP11 模的相对延迟的大小在 1500nm 和 1600nm 之间的所有波长下小于 0.5ns/km 。在另一例子中,LP11 模的相对延迟的大小在 1500 和 1600nm 之间的全部波长下小于

[0087] 0.3ns/km 。在另一例子中,LP11 模的相对延迟的大小在 1500 和 1600nm 之间的全部波长下小于 0.2ns/km 。

[0088] 在一个例子中,有效面积 A_{eff} 在 90 和 $160 \mu\text{m}^2$ 之间,而在另一例子中在 100 和 $150 \mu\text{m}^2$ 之间。在一个例子中,LP11 模的引脚阵列弯曲损耗小于 60dB ,在另一个例子中小于 30dB ,而在另一例子中小于 20dB 。在一个例子中,LP02 模的截止波长小于 1600nm ,在另一例子中小于 1550nm 并在另一例子中小于 1550nm 并大于 1400nm 。在这些例子中,LP02 模的成缆截止波长比 LP02 模的理论截止波长低大约 100nm 。在一个例子中,LP11 模的截止波长

大于 2000nm, 在另一例子中大于 2200nm 并在另一例子中大于 2400nm。这些光学性质全部在 1550nm 的波长下建模, 除非另有说明。

[0089]

	例22	例23	例24	例25	例26	例27
$\Delta_{1MAX} \%$	0.405	0.364	0.364	0.395	0.437	0.4
$R_1 (\mu\text{m})$	10.13	10.58	10.58	9.91	9.70	10.9
A	2.517	2.517	2.517	2.617	2.517	2
$D_{2MIN} \%$	-0.4	-0.4	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4
$R_2 (\mu\text{m})$	16	16	16	16	15	12.5
$R_3 (\mu\text{m})$	20	20	20	20	20	18
V-数	5.36	5.30	5.30	5.18	5.33	5.73
LP01 衰 减, 1550 nm	0.184	0.183	0.183	0.184	0.185	0.184

[0090]

(dB/km)						
LP11 衰 减, 1550 nm (dB/km)	0.200	0.198	0.198	0.200	0.202	0.199
LP01 A_{eff} , 1550 nm (μm^2)	129.4	142.5	142.5	129.2	119.2	132.4
LP11 A_{eff} , 1550 nm (μm^2)	257.0	282.5	283.0	256.5	236.8	282.4
LP01 MFD, 1550 nm (μm)	12.79	13.42	13.42	12.78	12.28	13.03
LP11 MFD, 1550 nm (μm)	12.91	13.52	13.55	12.91	12.39	13.66
LP11 截 止(μm)	2.304	2.263	2.276	2.252	2.284	2.49
LP02 截 止(μm)	1.510	1.486	1.490	1.473	1.499	1.72
LP21 截 止(μm)	1.503	1.484	1.486	1.469	1.494	1.531
LP01引 脚阵列, 1550nm (dB)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03

[0091]

LP11引 脚阵列, 1550nm (dB)	16.04	30.24	33.79	22.27	9.79	40.09
LP01 色 散, 1550 nm (ps/nm/k m)	21.20	21.28	21.27	21.22	21.14	20.86
LP11色 散, 1550 nm (ps/nm/k m)	19.76	20.16	20.04	19.59	19.64	19.20
LP01有 效折射 率	1.46861	1.46800	1.468 00	1.468 49	1.469 09	1.46833
LP11 有 效折射 率	1.46859	1.46799	1.467 98	1.468 47	1.469 07	1.46811
LP11 延 迟, 1500 nm (ns/km)	0.086	0.091	0.074	0.098	0.089	0.053
LP11 延 迟, 1550 nm (ns/km)	0	-0.022	-0.001	0	0.001	0.076
LP11 延	-0.095	-0.053	-0.083	-0.108		0.101

[0092]	迟, 1600 nm (ns/km)				0.101	
--------	--------------------------	--	--	--	-------	--

[0093] 图 4C 示出与图 4B 相似的相对折射率分布,除了它代表第三主例实施例的更广义版本,其中内包层 30 的有效折射率 Δ_3 小于(外)包层 50 的有效折射率,即 $\Delta_3 < \Delta_4$ 。在一个例子中,内包层 30 具有在 -0.1% 和 0.05% 之间的相对折射率 Δ_3 。低折射率环 40 直接毗邻内包层 30 设置并具有始(内)径 R_2 和终(外)径 R_3 。环 40 由此具有径向宽度 $R_3 - R_2$ 并具有相对于包层 50 的最小相对折射率 Δ_{2MIN} 。在一个例子中,最小相对折射率 Δ_{2MIN} 在 -0.1% 和 -0.7% 之间,并在另一例子中在 -0.3% 和 -0.5% 之间。

[0094] 在一个例子中,低折射率环 40 的径向宽度 $R_3 - R_2$ 在 $0 \mu\text{m}$ 和 $15 \mu\text{m}$ 之间,在另一例子中在 $2 \mu\text{m}$ 至 $8 \mu\text{m}$ 之间,而在另一例子中在 $4 \mu\text{m}$ 至 $6 \mu\text{m}$ 之间。在一个例子中,低折射率环 40 具有与阶跃式分布不同的折射率分布,例如提供额外的模-场控制的三角形或抛物线形分布。

[0095] 图 4D 示出对具有最佳 α 值的最大纤芯相对折射率 Δ_{1MAX} (在图例中表示为 Δ) 的 RMS 脉冲展宽 (ns/km) 相对于波长 (μm) 的关系。可以看到,在 $1.5 - 1.6 \mu\text{m}$ 的波长窗内, RMS 展宽(其等于在双模光纤中的 LP11 模延迟)的变化小于 0.1ns/km ,它适于 MDM 传输系统。

[0096] 第四主例实施例

[0097] 表 6 示出第五折射率分布的属性,其中纤芯的半径和 α 参数的变化使差模群延迟的符号和差模群延迟斜率改变。在例 28 中,凹槽在渐变折射率纤芯附近,但在例 29-32 中与纤芯相隔一偏移量 $R_2 - R_1$ 。例 31 的折射率分布在图 7 中被绘出。当根据规定的尺寸制造时,实施例 28-32 中的每一个得到非常低的差模延迟。光纤 6-10 的 LP01 有效面积 A_{eff} 大于 $120 \mu\text{m}^2$,更优选地在 120 和 $200 \mu\text{m}^2$ 之间。在一个例子中,LP02 模的理论截止波长小于 2400nm ,在另一例子中小于 2000nm 并在另一例子中小于 1800nm 。在这些例子中,LP02 模的成缆截止波长比 LP02 模的理论截止波长低大约 300nm 。在一个例子中,LP11 模的理论截止波长大于 2000nm ,在另一例子中大于 2200nm 并在另一例子中大于 2400nm 。在一个例子中,LP01 模的衰减小于 0.21dB/km ,在另一例子中小于 0.20dB/km 并在另一例子中小于 0.19dB/km 。在一个例子中,LP11 模的衰减小于 0.25dB/km ,在另一例子中小于 0.23dB/km 并在另一例子中小于 0.21dB/km 。这些光属性全部在 1550nm 的波长下被建模,除非另有说明。

[0098] 表 6

[0099]

例子	28	28	30	31	32
$\Delta 1$ (%)	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
R1(μm)	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1
α	1.96	2.005	2.02	2.04	2.06
R2(μm)	11.18	11.98	12.41	12.98	13.39
$\Delta 2$ (%)	-0.15	-0.2	-0.25	-0.35	-0.45
R3(μm)	17	17	17	17	18
R1/R2	0.99	0.93	0.89	0.86	0.83
理论LP02 截止(μm)	1.591	1.609	1.613	1.620	1.626
理论LP11 截止(μm)	2.420	2.440	2.441	2.443	2.447
LP01 色散 (ps/nm/km)	21.12	21.10	21.10	21.09	21.09
LP01有效面积 (μm^2)	123.4	124.5	124.9	125.3	125.8
LP01 MFD (μm)	12.53	12.59	12.61	12.63	12.65
LP11色散 (ps/nm/km)	21.06	21.08	21.11	21.12	21.11
LP11有效面积 (μm^2)	123.8	125.0	125.4	125.9	126.2
1530 (ns/km)	0.0106	0.0032	-0.0022	-0.0055	0.0011

[0100]	下的 LP01-LP02 延迟					
	1550 (nm/km) 下的 LP01-LP02 延迟	0.0107	0.0032	-0.002	-0.0053	0.0011
	1565 (nm/km) 下的 LP01-LP02 延迟	0.0103	0.0029	-0.002	-0.0053	0.0012
	(ps/nm/km)下 的LP01-LP02 延迟斜率	-0.009	-0.009	0.006	0.006	0.003

[0101] 表 7 示出例 31 的四种变型的折射率分布,其中纤芯的半径和 α 参数的变化改变差模群延迟的符号和差模群延迟斜率。图 7 示出例 31c 的折射率分布。当根据规定的尺寸制造时,实施例 28-32 中的每一个得到非常低的差模延迟。例 31a、31d 具有相似的 α 值,其中 $|\alpha_i - \alpha_j| < 0.2$,并具有略有不同的纤芯半径 $|R_{1i} - R_{1j}| > 0.2 \mu m$ 。例 31a 在 1530、1550 和 1565nm 下得到负的差模延迟,具有负的差模延迟斜率,而例 31a 在 1530、1550 和 1565nm 下得到正的差模延迟,其具有正的差模延迟斜率。将这两种建模的光纤例以大约 1:1 长度比组合得到具有将近零的差模延迟和差模延迟斜率的跨距。例子 31b 在 1530, 1550 和 1565nm 下得到正的差模延迟,其具有负的差模延迟斜率,而例子 31c 在 1530, 1550 和 1565nm 下得到负的差模延迟,其具有正的差模延迟斜率。将这两种建模的光纤例以大约 1:1 长度比组合得到具有将近零的差模延迟和差模延迟斜率的跨距。

[0102] 表 7

[0103]	例	31a	31b	31c	31d
--------	---	-----	-----	-----	-----

[0104]

$\Delta 1(\%)$	0.456	0.465	0.465	0.466
R1(μm)	11.01	11.16	10.89	11.23
α	2.026	2.095	1.991	2.038
R2(μm)	13.51	13.25	12.45	12.48
$\Delta 2(\%)$	-0.35	-0.35	-0.35	-0.35
R3(μm)	17	17	17	17
R1/R2	0.815	0.842	0.875	0.900
LP02截止 (μm)	1.614	1.653	1.689	1.628
LP11截止 (μm)	2.436	2.499	2.544	2.453
LP01 色散 (ps/nm/km)	21.01	21.11	21.22	21.17
LP01有效面 积 (μm^2)	124.9	126.3	131.8	125.8
LP01 MFD (μm)	12.62	12.67	12.94	12.64
LP11 色散 (ps/nm/km)	20.81	21.05	21.73	21.44
LP11有效面 积 (μm^2)	126.8	126.2	130.4	125.1
1530 (ns/km) 下的 LP01-LP02 延迟	-0.137	0.050	-0.029	0.121
1550 (nm/km) 下的 LP01-LP02	-0.144	0.048	-0.026	0.129

[0105]	延迟				
	1565 (nm/km) 下的 LP01-LP02 延迟	-0.137	0.050	-0.029	0.121
	(ps/nm/km)下 的LP01-LP02 延迟斜率	-0.0004	-0.0001	0.0002	0.0004

[0106] 表 8 示出附加的第六折射率分布的属性,其中纤芯的半径和 α 参数的变化使差模群延迟的符号和差模群延迟斜率改变。在实施例 33-38 中,沟槽与纤芯相隔偏移量 $R2 - R1$ 。当根据规定的尺寸制造时,实施例 33-38 中的每一个得到非常低的差模延迟。光纤 28-32 的 LP01 有效面积 A_{eff} 大于 $120 \mu\text{m}^2$,更优选地在 120 和 $200 \mu\text{m}^2$ 之间。在一个例子中,LP02 模的理论截止波长小于 2400nm ,在另一例子中小于 2000nm 并在另一例子中小于 1800nm 。在这些例子中,LP02 模的成缆截止波长比 LP02 模的理论截止波长低大约 300nm 。在一个例子中,LP11 模的理论截止波长大于 2000nm ,在另一例子中大于 2200nm 并在另一例子中大于 2400nm 。在一个例子中,LP01 模的衰减小于 0.21dB/km ,在另一例子中小于 0.20dB/km 并在另一例子中小于 0.19dB/km 。在一个例子中,LP11 模的衰减小于 0.25dB/km ,在另一例子中小于 0.23dB/km 并在另一例子中小于 0.21dB/km 。这些光属性全部在 1550nm 的波长下被建模,除非另有说明。

[0107] 表 8

[0108]

例	33	34	35	36	37	38
$\Delta 1(\%)$	0.477	0.436	0.455	0.466	0.463	0.454
R1(μm)	10.94	11.04	11.39	10.79	11.10	11.02
α	2.021	2.036	2.020	2.028	2.045	2.030
R2(μm)	12.34	12.73	12.92	12.46	12.77	12.78
$\Delta 2(\%)$	-0.30	-0.30	-0.28	-0.33	-0.32	-0.32
R3(μm)	17	17	17	17	17	17
R1/R2	0.887	0.867	0.882	0.866	0.869	0.862
LP02截止 (μm)	1.618	1.568	1.648	1.582	1.625	1.597
LP11截止 (μm)	2.441	2.364	2.494	2.383	2.454	2.408
LP01色散 (ps/nm/km)	21.08	21.14	21.10	21.08	21.10	21.10
LP01有效面 积(μm^2)	120.8	128.0	128.9	120.8	124.6	125.1
LP01 MFD (μm)	12.40	12.77	12.81	12.40	12.59	12.62
LP11色散 (ps/nm/km)	21.17	21.15	21.14	21.14	21.15	21.12
LP11有效面 积 (μm^2)	121.2	128.6	129.5	121.5	124.8	125.8
1530(ns/km) 下的 LP01-LP02 延迟	0.0135	-0.004	-0.0087	-0.0126	0.0186	-0.0197
	0.0155	-0.0038	-0.0083	-0.012	0.0193	-0.0198

[0109]

1550(nm/km) 下的 LP01-LP02 延迟						
1565 (nm/km)下的 LP01-LP02 延迟	0.017	-0.0037	-0.0081	-0.0115	0.0197	-0.02
(ps/nm/km) 下的 LP01-LP02 延迟	0.01	0.0086	0.017	0.031	0.031	-0.009

[0110] MDM 光传输系统

[0111] 根据本公开的少模光纤 10 具有低损耗和小的差分群延迟,并适用于光传输系统,尤其是那些利用 MDM 和配置成长程传输的那些系统。

[0112] 图 5 是示例性 MDM 光传输 (MDM 系统) 100 的示意图。MDM 系统 100 包括通过光纤链路 300 光连接的发射机 110 和接收机 210,该光纤链路 300 包括光纤 10 的至少一段跨距。

[0113] 发射机 110 包括两个或更多个光源 112,该光源 112 发射相同或不同的波长的光。两个光源 112-1、112-2 通过例示示出。每个光源 112 包括至少一个激光器 120,该激光器 120 射出具有 1500nm 和 1600nm 之间的波长的光 122。在一个例子中,发射机 110 包括至少 16 个激光器,这些激光器在 1500nm 和 1600nm 之间的一个或多个波长下发射。在另一例子中,发射机 110 包括至少 32 个激光器,这些激光器在 1500nm 和 1600nm 之间的一个或多个波长下发射。在另一例子中,发射机 110 包括至少 64 个激光器,这些激光器在 1500nm 和 1600nm 之间的一个或多个波长下发射。

[0114] 发射机 110 也包括 LP01-LP11 模转换器 116,该 LP01-LP11 模转换器 116 通过光纤区段 F1 (例如单模光纤区段) 光连接至光源 112-1。LP01-LP11 模转换器 116 被配置成将在 LP01 下行进的引导光转换成在 LP11 模下行进。一般来说,发射机 110 中的至少一个光源 112 光耦合至 LP01-LP11 模转换器 116,该 LP01-LP11 模转换器 116 在一个例子中将 LP01 模下的至少 50% 的强度转换成 LP11 模。

[0115] 每个光源单元 112 中的激光器 120 光连接至相应的调制器 130,调制器 130 是通过相应脉冲图案发生器 134 经由相应的脉冲信号 SP 驱动的。在一个例子中,每个调制器 130 工作在 40Gb/s 或更高的速度下。在另一例子中,每个调制器 130 工作在 100Gb/s 或更高的速度下。

[0116] 在一个例子中,每个调制器 130 可光连接至例如铒掺杂的光纤放大器 (EDFA) 的相应光学放大器 140。光学放大器 140-1 光连接至 LP01-LP11 模转换器 116,该 LP01-LP11 模

转换器 116 经由光纤 10 的区段光连接至多路复用器 15。光放大器 140-2 也经由光纤区段 F2 光连接至波长多路复用器 150。

[0117] 波长多路复用器 150 经由光纤链路 300 的光纤 10 光连接至发射机 210。发射机 210 包括光连接至光纤 10 的发射机端的波长多路分解器 220。波长多路分解器 220 进而光连接至分束器 230, 该分束器 230 经由相应的光纤区段 F3、F4 连接至检测器 240-1、240-2。模滤波器 250 被设置在光纤区段 F3 中, 以滤出要么 LP01 要么 LP11 模。

[0118] 在 MDM 系统 10 的操作中, 每个光源 120 射出光 122, 该光 122 随后根据来自相应脉冲图形发生器 134 的相应脉冲信号 SP 由相应的调制器 130 调制。调制器 130-1、130-2 的输出是相应的导波光信号 OS1、OS2, 该导波光信号 OS1、OS2 具有相应的波长 λ_1 、 λ_2 并在相应的光纤区段 F1、F2 中在 LP01 模下传播。光信号 OS1 经过 LP01-LP11 模转换器 116, 该 LP01-LP11 模转换器 116 将在 LP01 模下行进的光转换至 LP11 模, 以使光信号 OS1 在 LP11 模下传播。

[0119] 分别关联于光信号 OS1、OS2 的 LP11、LP01 模由波长多路复用器 150 多路复用, 并随后在它们各自的模态下在光纤链路 300 的光纤 10 中行进。图 5 的示例性 MDM 系统 10 示出一个例子, 其中 LP01、LP11 模由后模转换器 116 多路复用。然而, 在其它例子中可以有额外的波长多路复用器, 该多路复用器在通过 LP01-LP11 模转换器发送不同波长下的多个光信号之前组合这些光信号。

[0120] 图 6 是示例性光纤链路 300 的示意图, 该光纤链路 300 包括经由一个或多个光放大器 140 彼此光耦合的多个光纤跨距 10。光纤链路 300 具有 L 公里的长度。在一个例子中, L 大于 100 公里, 在另一例子中, L 大于 500 公里, 在另一例子中, L 大于 1000 公里并在另一例子中, L 大于 2000 公里。在一个例子中, 存在至少两个光纤跨距 10, 在另一例子中, 存在至少五个光纤跨距 10, 在另一例子中, 存在至少十个光纤跨距 10 并在另一例子中, 存在至少十个光纤跨距 10。在光纤链路 300 包括单个光纤跨距 10 的例子中, 一个例子中的长度 L 大于 20 公里, 在另一例子中大于 40 公里, 而在另一例子中大于 60 公里。

[0121] 光信号 OS1、OS2 进入接收机 210 并由波长多路分解器 220 多路分解。经多路分解的信号 OS1、OS2 随后通过分束器 230 发送, 该分束器将信号强度的大约一半转移至第一检测器 240-1。信号中的剩余强度通过光纤区段 F3 中的模滤波器 250 发送, 并且本例中模滤波器滤出 LP01 模。在另一例子中, 模滤波器 250 滤出 LP11 模。检测器 240-1、240-2 由此检测光信号 OS1、OS2 并将这些信号转换成相应的电信号 ES1、ES2, 这些电信号可由处理电子器件 (未示出) 在下游被处理。

[0122] 对本领域的技术人员显而易见的是, 可在不背离本发明的精神和范围的情况下对本文中所描述的实施例作出各种修改和变化。因此, 本说明书旨在覆盖本文中所描述的各实施例的修改和变化, 只要这些修改和变化落在所附权利要求及其等价方案的范围内即可。

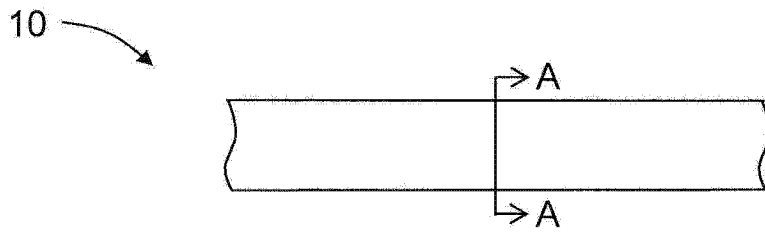


图 1

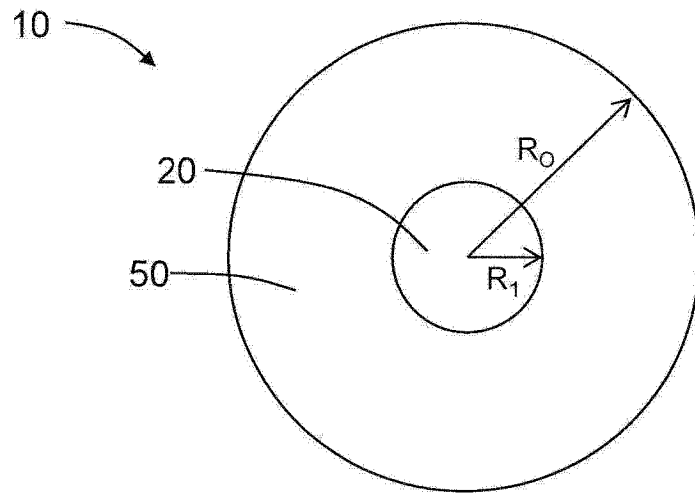


图 2A

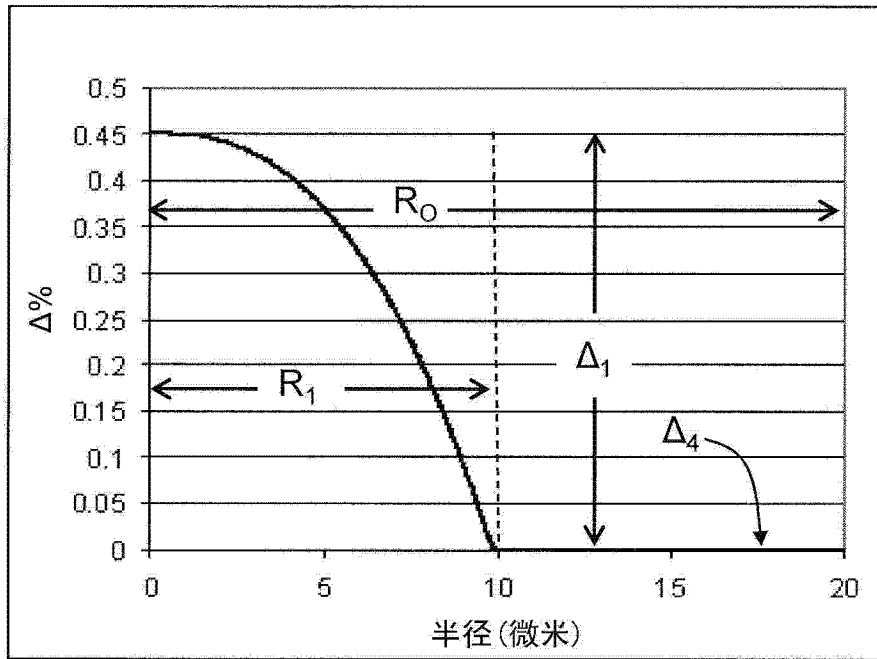


图 2B

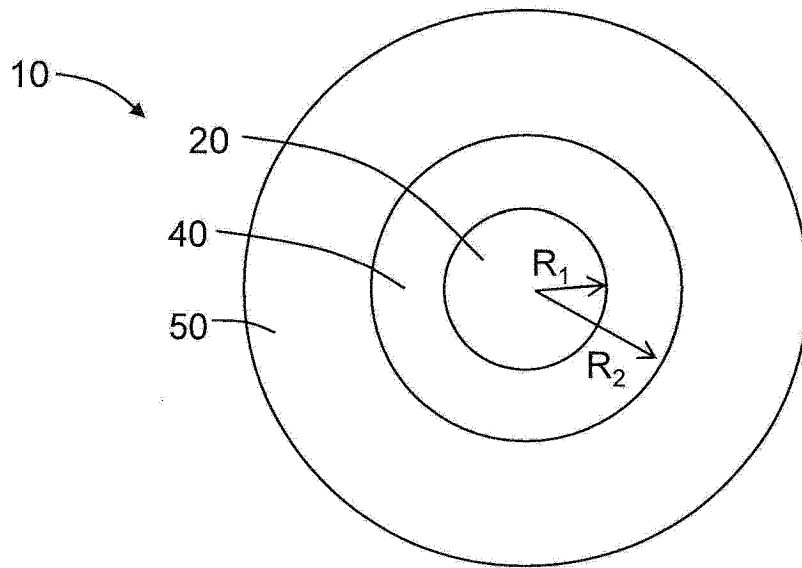


图 3A

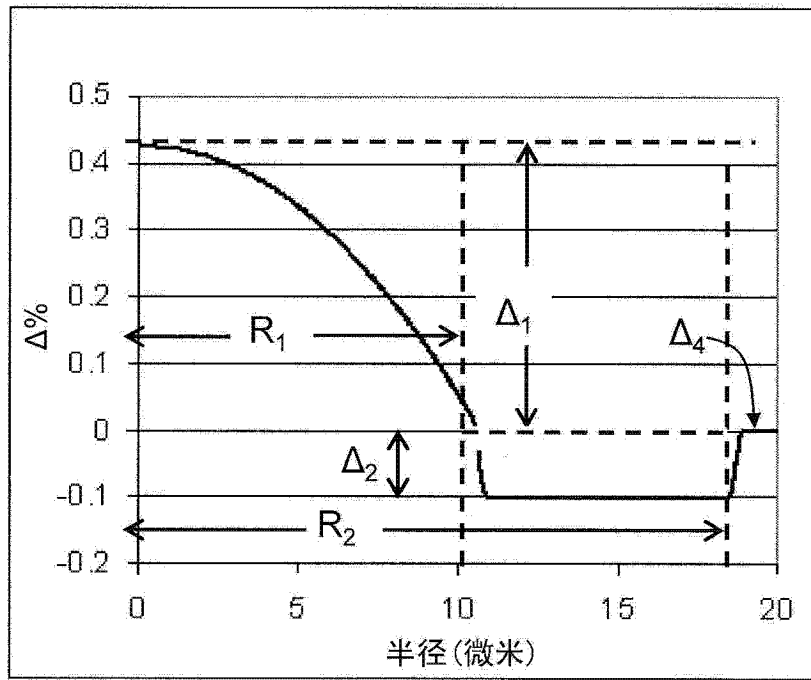


图 3B

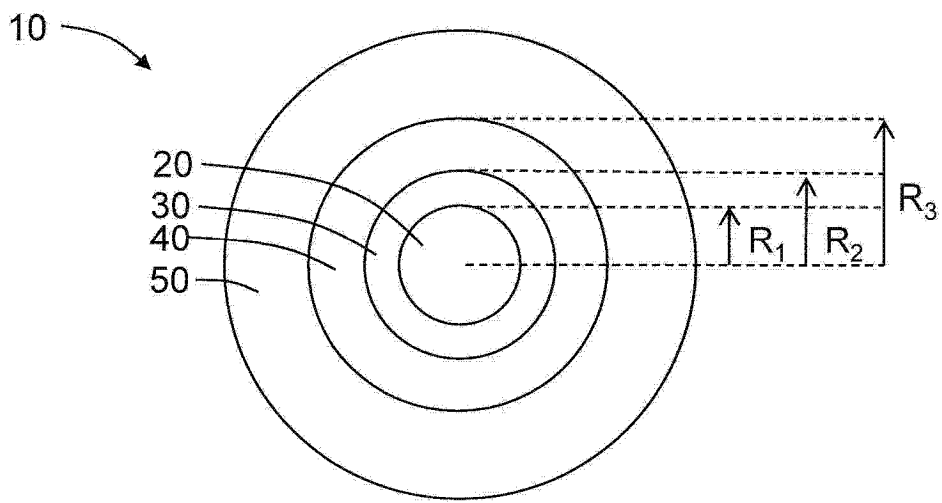


图 4A

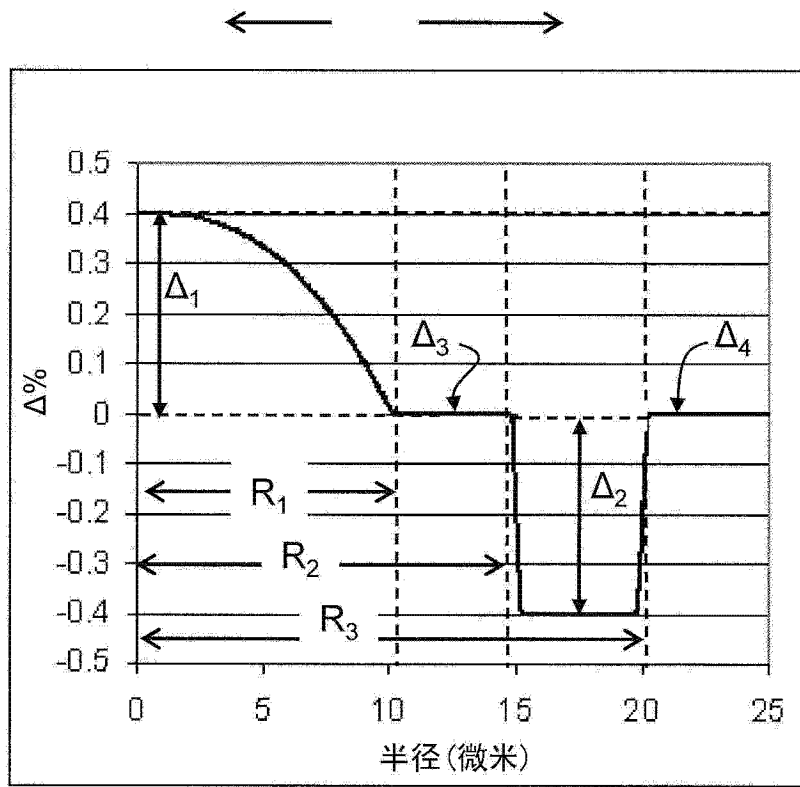


图 4B

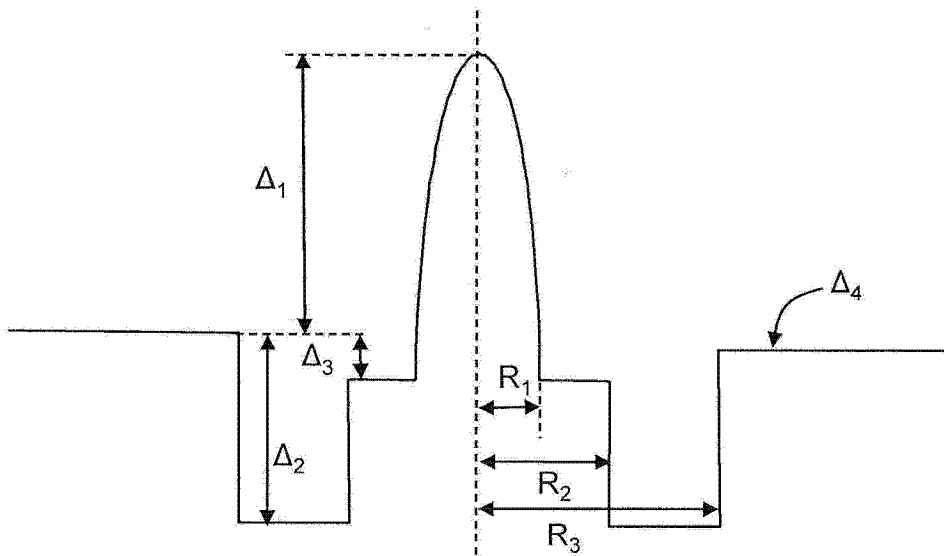


图 4C

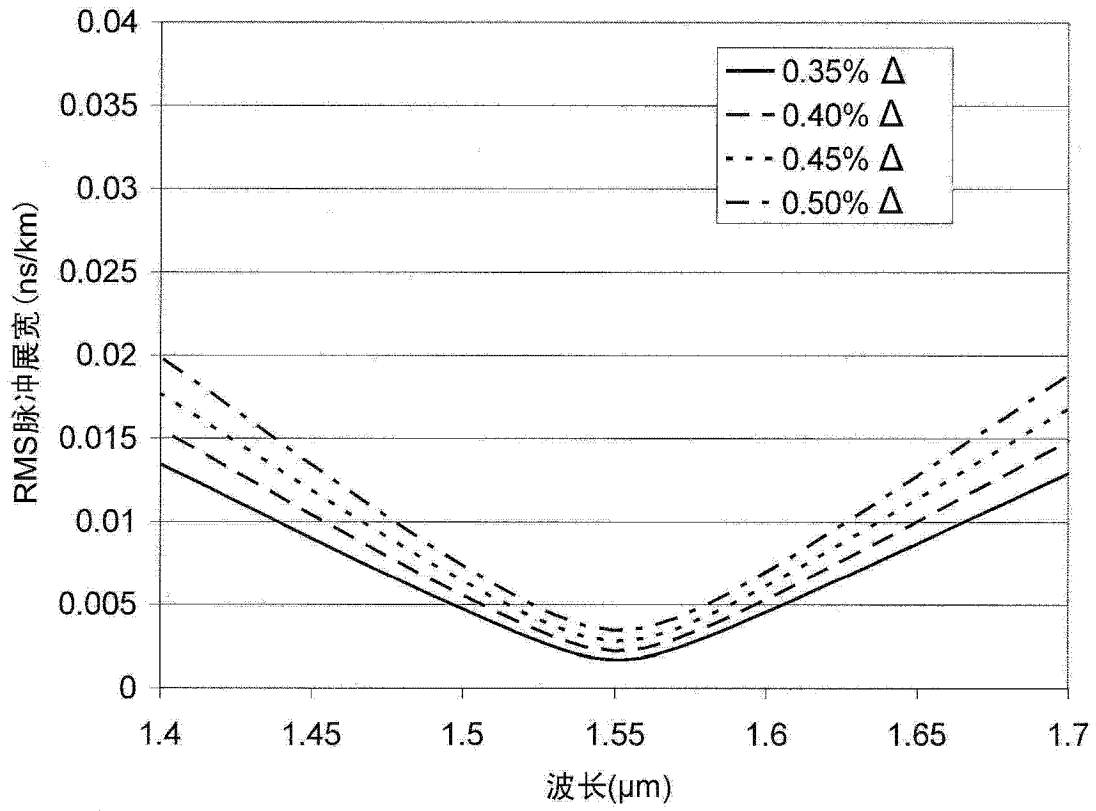


图 4D

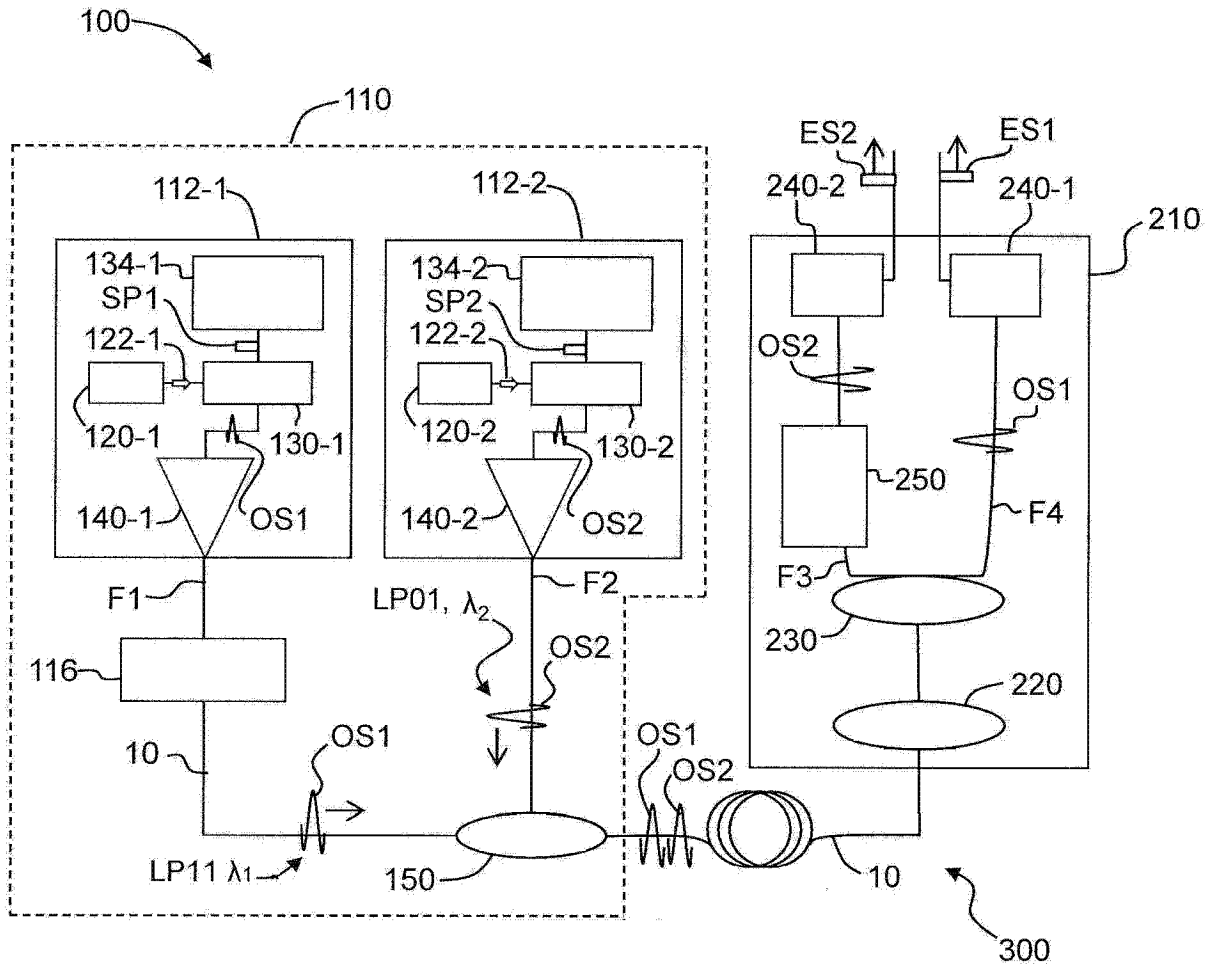


图 5

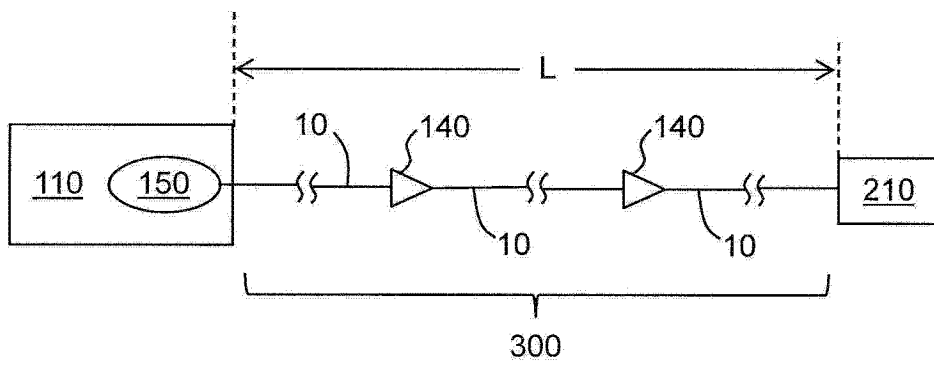


图 6

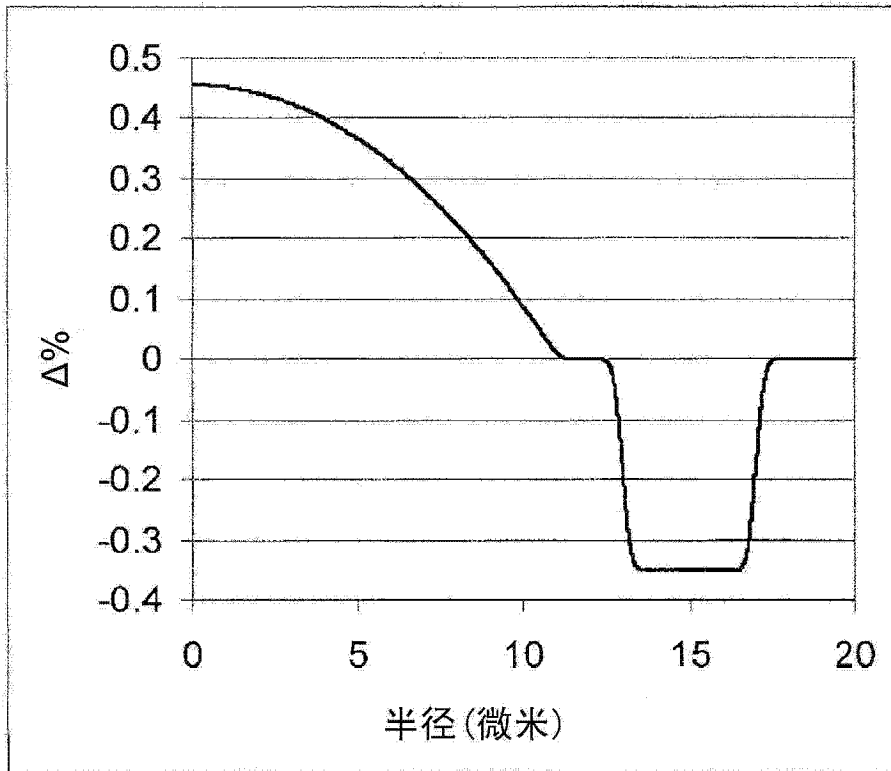


图 7