

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl⁷

G02B 6/13

G02B 6/16

G02B 6/00



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 200410011158.5

[43] 公开日 2005 年 9 月 14 日

[11] 公开号 CN 1667439A

[22] 申请日 2004.10.15

[21] 申请号 200410011158.5

[71] 申请人 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

地址 130031 吉林省长春市东南湖大路 16 号

[72] 发明人 张亮 秦莉 王立军

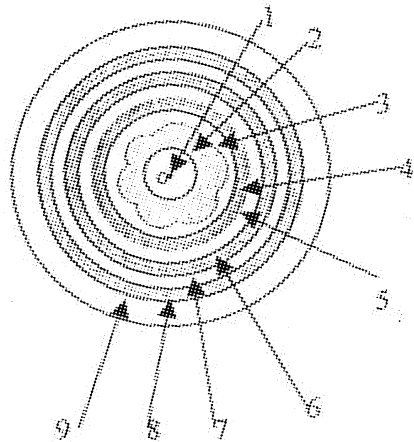
[74] 专利代理机构 长春科宇专利代理有限责任公司
代理人 梁爱荣

权利要求书 2 页 说明书 9 页 附图 1 页

[54] 发明名称 一种大模场光纤

[57] 摘要

本发明涉及光纤激光器所用的掺杂稀土离子的光纤结构的设计。包括内纤芯 1、环形纤芯 2、边界区 3、第一包层 4、第一包层外区 5、第二包层 6、第二包层外区 7、第三包层 8、第三包层外区 9、第一内圆 11、第二内圆 10、弧形 12 或多边直线 13。本发明采用非对称多包层环形纤芯的光纤结构，解决了背景技术中由于双包层光纤的内包层对称分布，造成在泵浦光的局部稳定态不能被纤芯所吸收的问题，减少了光纤激光器所使用增益光纤长度。同时解决了背景技术中由于采用多模光纤光栅谐振腔不能形成激光的单模输出，单模光纤光栅谐振腔与泵浦光耦合效率低的问题，利用本发明这种结构的光纤既能实现在一根光纤耦合入大功率泵浦光又能实现单模激光输出。



I S S N 1 0 0 8 - 4 2 7 4

1、一种大模场光纤，包括：内纤芯(1)、保护层(9)，其特征在于还包括：环形纤芯(2)、边界区(3)、第一包层(4)、第一包层外区(5)、第二包层(6)、第二包层外区(7)、第三包层(8)，在环形纤芯(2)本体的外边缘形成边界，边界由多个弧形(12)连接而成，环形纤芯(2)中掺杂稀土离子作为光纤的增益区，在弧形(12)的外面是边界区(3)，在边界区(3)的外面是第一包层(4)，在第一包层(4)的外面为第一包层外区(5)，在第一包层外区(5)的外面为第二包层(6)，在第二包层(6)的外面为第二包层外区(7)，在第二包层外区(7)的外面为第三包层(8)，第三包层(8)的外面为保护层(9)。

2、根据权利要求1所述的一种大模场光纤，其特征在于：环形纤芯(2)的第一内圆(11)的半径为 R_b ，第一包层(4)的第二内圆(10)的半径为 R_a ，弧形(12)的半径为 R_n ，由弧形(12)的两端点与中心点 o 构成夹角 θ_n ；每个弧形(12)的半径 R_n 各不相同呈非对称分布，每个弧形(12)所对应的夹角 θ_n 各不相同即为 θ_n 夹角中 $\theta_1 \neq \theta_2 \neq \dots \neq \theta_n$ ，或每个弧形(12)所对应的夹角 θ_n 部分相同，夹角 θ_n 按非对称分布，且 $\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n = 2\pi$ ，选择 $R_b > R_n > R_a$ 。

3、一种大模场光纤，包括：内纤芯(1)、保护层(9)，其特征在于还包括：环形纤芯(2)、边界区(3)、第一包层(4)、第一包层外区(5)、第二包层(6)、第二包层外区(7)、第三包层(8)，在环形纤芯(2)的外边界由多个非对称连续的直线形(13)组成，由多段直线形(13)连接组成，多段直线形(13)各不相同，多边形呈非对称分布，每段直线形(13)的长度为：

$$L = 2 \cdot R \cdot \sin(\frac{\theta_n}{2})$$
，为实现非对称性每段直线形(13)对应的夹角 θ_n 各不相同，且按非对称分布，每个弧形(12)所对应的夹角 θ_n 各不相同即为 θ_n 夹角中 $\theta_1 \neq \theta_2 \neq \dots \neq \theta_n$ ，或每个弧形(12)所对应的夹角 θ_n 部分相同，夹角 θ_n 按

非对称分布, $\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n = 2\pi$; 环形纤芯(2)中掺杂稀土离子作为光纤的增益区, 在弧形(12)的外面是边界区(3), 在边界区(3)的外面是第一包层(4), 在第一包层(4)的外面为第一包层外区(5), 在第一包层外区(5)的外面为第二包层(6), 在第二包层(6)的外面为第二包层外区(7), 在第二包层外区(7)的外面为第三包层(8), 第三包层(8)的外面为保护层(9)。

4、根据权利要求 1 或 3 所述的一种大模场光纤, 其特征在于: 在大模场光纤中其折射率的选择: 环形纤芯(2)选择第一大的折射率; 边界区(3)的折射率选择为最小, 第一包层(4)选择第二大的折射率; 第一包层外区(5)的折射率选择与边界区(3)的折射率相同; 第二包层(6)选择第三大的折射率, 第二包层外区(7)的折射率选择与边界区(3)的折射率相同; 第三包层(8)选择第四大的折射率。

5、根据权利要求 2 所述的一种大模场光纤, 其特征在于: 弧形(12)采用圆弧或采用凹弧,

$$\text{圆弧的半径为: } R_n = \frac{R_a^2 \sin^2(\theta_n/2) + [R_a - R_b \cos(\theta_n/2)]^2}{2[R_a - R_b \cos(\theta_n/2)]}$$

$$\text{凹弧的半径为: } R_n = \frac{R_b^2 + R_a^2 - 2R_b R_a \cos(\theta_n/2)}{2[R_b \cos(\theta_n/2) - R_a]}$$

一种大模场光纤

技术领域：本发明属于石英光纤制作和光子晶体光纤的制作领域。涉及光纤激光器所用的掺杂稀土离子的光纤结构的设计。

背景技术：光纤激光器是利用在光纤中的掺杂稀土离子能级间的能级转换实现能量释放，并以光的形式沿着光学纤维波导传播并释放。

以往传统的光纤激光器是利用单模光纤，在纤芯中掺杂稀土离子作为增益介质实现离子内能级之间的能量转换。由于单模光纤中纤芯只有几个微米。这样与泵浦光源的耦合效率低，产生的激光能量有限，极大的限制了光纤的应用。为了提高光纤激光器的输出功率，提高光纤的利用率。人们提出包层泵浦技术，既利用光纤双包层结构来实现包层泵浦。对于这种双包层结构的光纤是在包层与纤芯中引入一个内包层结构，形成纤芯、内包层、外包层的三层结构。这样在内包层中有大量的泵浦光耦合进入，并按折线传输，被纤芯所吸收。由于在圆柱形内包层结构中有螺旋传播的光不能被纤芯所吸收。对此提出各种内包层结构如：星型，矩型，D型，多边形以及非稳态型等来解决纤芯的吸收效率的问题。虽然如此上述的结构中仍然存在稳态分布的局域态的泵浦光不能被吸收的问题。如果提高光纤激光器的输出功率增加掺杂稀土离子的光纤长度，造成输出光易受环境影响，同时泵浦光在传输过程中被辐射或吸收，造成掺杂稀土离子作为增益光纤内热量沉积。正是由于在双包层光纤的内包层中泵浦光的局域态存在影响了光纤激光器的稳定，造成了输出光的波动，提高了光纤激光器的阈值。

而单模光纤激光器中要求输出激光满足单模状态。传统光纤激光器利用二色镜形成谐振腔，全光纤兴光纤激光器利用光纤光栅来形成谐振腔，

要求谐振腔光纤光栅既满足单模滤波又要满足泵浦光高效耦合，同时传输损耗低。多模粗光纤光栅虽然满足泵浦光高效耦合，但是输出光为多模状态。单模光纤满足单模滤波，但是与泵浦光耦合效率低。两种光纤的熔接耦合固有存在对传输光的高损耗，不利于泵浦光的利用。

本发明的详细内容：

为了解决背景技术中传统单模对称边界内包层结构的双包层光纤存在泵浦光的局域稳态不能被纤芯吸收。多模光纤光栅谐振腔不能对激光的单模输出，影响激光的光束质量问题，单模光纤光栅谐振腔与泵浦光耦合效率低的问题。本发明的目的在于提供一种非对称多包层环形纤芯的掺杂稀土离子光纤结构。

为了实现上述目的，本发明的非对称多包层环形纤芯的光纤结构包括：内纤芯、环形纤芯、边界区、第一包层、第一包层外区、第二包层、第二包层外区、第三包层、保护层。在环形纤芯中掺杂有稀土离子作为增益介质，环形纤芯位于内纤芯的周围。这里环形纤芯和包层形成的数值孔径较大保证泵浦光有较大的耦合效率。环形纤芯有较大的面积保证有大量的泵浦光在内传播通过，能够充分的吸收泵浦光。同时根据规范化的 V 制约常数的设定和 b 规范传播参数的限制实现了对于所有模式在传播起了单一模式光纤的作用。

本发明在环形纤芯本体的外边缘形成边界，边界由多个弧形组成，每个弧形的半径 R_n 各不相同，弧形呈现非对称分布。

在环形纤芯本体的外边缘形成边界，边界由多个弧形连接而成，环形纤芯中掺杂稀土离子作为光纤的增益区，在弧形的外面是边界区，在边界区的外面是第一包层，在第一包层的外面为第一包层外区，在第一包层外区的外面为第二包层，在第二包层的外面为第二包层外区，在第二包层外区的外面为第三包层，第三包层的外面为保护层。

环形纤芯的第一内圆的半径为 R_b ，第一包层的第二内圆的半径为 R_a ，弧形的半径为 R_n ，由弧形的两端点与中心点 o 构成夹角 θ_n ；每个弧形的半径 R_n 各不相同呈非对称分布，每个弧形所对应的夹角 θ_n 各不相同即为 θ_n 夹角中 $\theta_1 \neq \theta_2 \neq \dots \neq \theta_n$ ，或每个弧形所对应的夹角 θ_n 部分相同，夹角 θ_n 按非对称分布， $\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n = 2\pi$ ，选择 $R_b > R_n > R_a$ 。

在环形纤芯的外边界由多个非对称连续的直线形状组成，由多段直线连接组成，多段直线各不相同，多边形呈非对称分布，每段直线的长度为： $L = 2 \cdot R \cdot \sin(\frac{\theta_n}{2})$ ，为实现非对称性每段直线对应的夹角 θ_n 各不相同，且按非对称分布，每个弧形所对应的夹角 θ_n 各不相同即为 θ_n 夹角中 $\theta_1 \neq \theta_2 \neq \dots \neq \theta_n$ ，或每个弧形所对应的夹角 θ_n 部分相同，夹角 θ_n 按非对称分布， $\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n = 2\pi$ ；环形纤芯中掺杂稀土离子作为光纤的增益区，在弧形的外面是边界区，在边界区的外面是第一包层，在第一包层的外面为第一包层外区，在第一包层外区的外面为第二包层，在第二包层的外面为第二包层外区，在第二包层外区的外面为第三包层，第三包层的外面为保护层。

在大模场光纤中其折射率的选择：在大模场光纤中环形纤芯选择第一大的折射率；边界区的折射率选择为最小，第一包层选择第二大的折射率；第一包层外区的折射率选择与边界区的折射率相同；第二包层选择第三大的折射率，第二包层外区的折射率选择与边界区的折射率相同；第三包层选择第四大的折射率。弧形采用圆弧，圆弧的半径为：

$$R_n = \frac{R_a^2 \sin^2(\frac{\theta_n}{2}) + [R_a - R_b \cos(\frac{\theta_n}{2})]^2}{2[R_a - R_b \cos(\frac{\theta_n}{2})]}, \text{ 弧形采用凹弧, 凹弧的半径为:}$$

$$R_n = \frac{R_b^2 + R_a^2 - 2R_b R_a \cos(\frac{\theta_n}{2})}{2[R_b \cos(\frac{\theta_n}{2}) - R_a]}。$$

本发明当泵浦光在这种非对称边界区多包层环形纤芯的掺杂稀土离子光纤传输时，在环形纤芯中产生和传导激光；当泵浦光传达到第三包层外区，由于第三包层外区折射率低于第三包层，泵浦光通过透射作用传导到第三包层；同样泵浦光在由于第二包层外区折射率低于第二包层，泵浦光通过透射作用传导的第二包层；再通过第一包层外区的反射作用，泵浦光继续透过传输的第一包层区，由边界区的透过作用泵浦光被大模场的环形纤芯和内纤芯被吸收。

通过边界区、第一包层、第一包层外区、第二包层、第二包层外区、第三包层、第三包层外区有效的耦合和传输泵浦光；在内纤芯、环形纤芯中、边界区、第一包层、第一包层外区、第二包层、第二包层外区、第三包层形成的光纤光栅单模光纤滤波作用。

本发明采用非对称边界环形纤芯，解决了在背景技术中由于在双包层光纤的内包层对称分布，造成在泵浦光的局部稳定态不能被纤芯所吸收的问题，利用非对称边界环形纤芯的掺稀土离子的光纤，减少了光纤激光器所使用双包层光纤长度，增加了光纤激光器输出光的稳定性，降低了光纤激光器阈值。同时本发明采用非对称多包层环形纤芯的掺杂稀土离子光纤结构，解决了在背景技术中由于采用多模光纤光栅谐振腔不能形成激光的单模输出，影响激光光束质量的问题，单模光纤光栅谐振腔与泵浦光耦合效率低的问题，利用本发明保证了信号光在大模场纤芯中以单模输出，同时这种结构增加了光纤端面的耦合效率。本发明既能实现在一根光纤耦合入大功率泵浦光又能实现单模激光输出，降低了传输损耗。

附图说明

图 1 本发明多弧形结构横截面多包层光纤的示意图。

图 2 本发明多弧形结构横截面结构多包层光纤设计原理

图 3 本发明多弧形结构非稳态腔型结构横截面多包层光纤的示意图

图 4 本发明多弧形结构非稳态腔型结构多包层光纤设计原理图

图 5 本发明多边形非对称连续边界内包层结构多包层光纤横截面图

图 6 本发明多边形非对称连续边界内包层结构多包层光纤原理图

具体实施方式：下面结合附图和实施例对本发明进一步说明，但本发明不限于这些实施例。

实施例中包括：内纤芯 1、环形纤芯 2、边界区 3、第一包层 4、第一包层外区 5、第二包层 6、第二包层外区 7、第三包层 8、保护层 9、第一内圆 11 是以 o 点为中心的半径为 R_b 、第二内圆 10 是以 o 点为中心的半径为 R_a ，弧形 12 是以 o 点为中心的半径为 R_n ，选择 $R_b > R_n > R_a$ 。

本发明的大模场光纤受限于规范 V 参数。这里 V 相对于单包层定义为 $V \equiv \frac{2\pi \sqrt{n_{shell}^2 - n_{cladding}^2}}{\lambda} < \pi$ 。其中 n_{shell} 表示第一包层 4、第二包层 6、第三包层 8 石英层的折射率， $n_{cladding}$ 表示第一包层外区 5、第二包层外区 7 的石英层的折射率；t 为包层厚度， λ 为真空波长。对于规范传播参数为 b，

$$b = \frac{n_{eff}^2 - n_{cladding}^2}{n_{shell}^2 - n_{cladding}^2}, \text{ 这里 } n_{eff} \text{ 是独立模的有效折射率指数。}$$

实施例 1：图 1、图 2 所示为本发明的第一个实施例。

在本实施例中本发明的弧形 12 选择六个圆弧。

内纤芯 1 用多组分玻璃或石英作为基质材料，内纤芯 1 的半径可以采用 $32\mu\text{m}$ ，内纤芯 1 的数值孔径为 0.15。环形纤芯 2 可以根据不同需要选择掺杂有稀土离子如：钕离子或镱离子或掺杂其它多种稀土离子，利用石英、也可以用多组分玻璃作为基质；同时也掺入二氧化锆和氧化硼或其它离子实现高折射率和高光敏性；环形纤芯 2 的直径可采用 $4\mu\text{m}$ 或 $7\mu\text{m}$ 或 $9\mu\text{m}$ 或 $10\mu\text{m}$ ，环形纤芯 2 的数值孔径为 0.35。在边界与第一内圆 11 之间是边界区 3，边界区 3 的材料选取低折射率的石英材料构成，环形纤芯 2 的边界在边界区 3 内变化。第一包层 4、第二包层 6、第三包层 8 的每个

包层厚度可选择为 $4\mu\text{m}$ 或 $7\mu\text{m}$ 或 $9\mu\text{m}$ 或 $10\mu\text{m}$ 。在第一包层外区 5、第二包层外区 7 的厚度均为 $25\mu\text{m}$ 。环形纤芯 2 的要保证信号光在大模场纤芯中以单模输出，同时这种结构增加了光纤端面的耦合效率。保护层 9 由聚四氟乙烯材料构成。保护层 9 的厚度为 $125\mu\text{m}$ ，大模场光纤的直径为 $250\mu\text{m}$ 。

如图 2 所示：边界区 3 由第一内圆 11 的半径 R_b 和第二内圆 10 半径为 R_a 组成。第二内圆 10 的半径 R_a 选择为 $36\mu\text{m}$ 或 $39\mu\text{m}$ 或 $41\mu\text{m}$ 或 $42\mu\text{m}$ ，第一内圆 11 的半径 R_b 选择为 $61\mu\text{m}$ 或 $64\mu\text{m}$ 或 $66\mu\text{m}$ 或 $67\mu\text{m}$ 。直径为 R_n 的圆与第二内圆 10 相交形成的弧形 12，弧形 12 内切于第一内圆 11 或位于第一内圆 11 和第二内圆 10 之间。弧形 12 与第二内圆 10 相交于两点形成弦 L_n ，则有： $L_n = 2 \cdot R_a \cdot \sin(\theta_n/2)$ ， $n > 3$ ，每段弧形 12 与中心点 o 构成的夹角 θ_n 各不相同，弧形 12 所在的圆半径 R_n 与夹角之间有如下关系：

$$R_n = \frac{R_a^2 \sin^2(\theta_n/2) + [R_a - R_b \cos(\theta_n/2)]^2}{2[R_a - R_b \cos(\theta_n/2)]}。本实施例如图所示的环形纤芯边界由$$

6 段弧形组成，为实现非对称性，每段弧形对应的夹角 θ_n 各不相同，因此， R_n 也相应的不同，本实施例中非对称连续边界由六段组成，我们设定每段弧形对应的夹角 θ_n 分别为：

选择第一种夹角和半径的情况：

$$\text{对应六段夹角 } \theta_n \text{ 为：} \frac{7\pi}{36}, \frac{9\pi}{36}, \frac{11\pi}{36}, \frac{13\pi}{36}, \frac{15\pi}{36}, \frac{17\pi}{36},$$

$$\text{六个半径 } R_n \text{ 为：} R_{(1-6)} = 45.56\mu\text{m}, 53.6\mu\text{m}, 60.6\mu\text{m}, 64.32\mu\text{m}, 65.93\mu\text{m}, 67\mu\text{m}。$$

选择第二种夹角和半径的情况：

对应的夹角 θ_n 根据需要可以选取两个或三个相同的数值，实现弧形

12 的非对称分布，可分别选取 $\theta_{1-6} = \frac{7\pi}{36}, \frac{7\pi}{36}, \frac{13\pi}{36}, \frac{13\pi}{36}, \frac{15\pi}{36}, \frac{17\pi}{36}$ ，分别得到半

径 R_n 为: $R_{(1-6)} = 45.56\mu\text{m}, 45.56\mu\text{m}, 64.32\mu\text{m}, 64.32\mu\text{m}, 65.93\mu\text{m}, 67\mu\text{m}$ 。依此类推选择四个或五个夹角 θ_n ，以及更多的夹角数值组成非对称圆弧分布结构。

环形纤芯 2 其中数值孔径为 0.45，保护层 9 的厚度选取为 $125\mu\text{m}$ ，大模场光纤的直径为 $245\mu\text{m}$ 。

上述规范参数 V 选取 3.0807，传播参数 b 选取为 0.636、0.622、0.618、0.639。内纤芯 1 的折射率 $n_{\text{内芯}}$ 为 1.5100，第一包层区 4 的折射率为 $n_{\text{包层}}$ 为 1.505、第二包层区 6 的折射率为 $n_{\text{包层}}$ 为 1.502、第三包层区 8 的折射率为 $n_{\text{包层}}$ 为 1.500，同时第一包层外区 5、第二包层外区 7 的折射率 $n_{\text{包层外区}}$ 均为 1.490。其中内纤芯 1 的直径选择为 $10\mu\text{m}$ 或 $15\mu\text{m}$ 或 $18\mu\text{m}$ 或 $20\mu\text{m}$ 或 $25\mu\text{m}$ 或 $30\mu\text{m}$ 或 $32\mu\text{m}$ 或 $35\mu\text{m}$ 或 $38\mu\text{m}$ 或 $40\mu\text{m}$ 。边界区 3 的厚度可选择为 $4\mu\text{m}$ 。第一包层区 4 的厚度可选择为 $3\mu\text{m}$ 或 $5\mu\text{m}$ 或 $7\mu\text{m}$ 或 $9\mu\text{m}$ 或 $11\mu\text{m}$ 或 $13\mu\text{m}$ 或 $15\mu\text{m}$ 。

第一包层外区 5、第二包层外区 7 的厚度根据上述环形纤芯 2 的实际需要而确定。用光纤预制棒的研磨等工艺，制作出所需要的环形纤芯 2 形状，然后拉丝涂覆制成大模场光纤。

实施例 2: 图 3、图 4 所示为本发明的第二个实施例。

在本实施例中本发明的弧形 12 选择六个凹弧。

内纤芯 1 和环形纤芯 2、边界区 3、第一包层 4、第一包层外区 5、第二包层 6、第二包层外区 7、第三包层 8、保护层 9 的材料和实施例 1 的相同。环形纤芯 2、边界区 3、第一包层 4、第一包层外区 5、第二包层 6、第二包层外区 7、第三包层 8、保护层 9 的厚度、折射率与实施例 1 相同。

环形纤芯 2 的边界在第一内圆 11 的半径为 R_0 和第一包层的第二内圆的半径为 R_0 区域变化，半径为 R_n 的弧形 a_n 是边界 3 相应的第 n 个凹弧 12，如图 4 所示边界由六段凹弧组成，为实现非对称分布，每段凹弧 12

对应的夹角 θ_n 各不相同,因此, R_n 也相应的不同,我们设定每段弧形对应的夹角 θ_n 与实施例1相同。半径为 R_n 的圆与第一内圆11相交形成的弧形12为凹弧,凹弧外切于第二内圆10上或位于第一内圆11和第二内圆10之间。弧形12与第一内圆11相交于两点形成弦 L_n ,则有:
 $L_n = 2 \cdot R_b \cdot \sin(\theta_n/2)$, $n > 3$, 弦 L_n 所对应的与中心点 o 的夹角 θ_n , 凹弧所在

的圆半径 R_n 与夹角 θ_n 之间有如下关系: $R_n = \frac{R_b^2 + R_a^2 - 2R_b R_a \cos(\frac{\theta_n}{2})}{2[R_b \cos(\frac{\theta_n}{2}) - R_a]}$, 本实

施中的 R_a 和 R_b 与实施例1中相同,对应的圆弧半径 R_n 的大小从分别为:

$$R_{(1-6)} = 132\mu\text{m}, 134\mu\text{m}, 137\mu\text{m}, 142\mu\text{m}, 150\mu\text{m}, 166\mu\text{m}。$$

以此类推选择四个或五个,以及更多的夹角数值组成非对称弧形分布结构,同样的也可以设计更多的凹弧组成非对称环形纤芯结构的大模场光纤。

环形纤芯2其中数值孔径为0.35,保护层9的厚度选取为 $150\mu\text{m}$ 。

内纤芯1的直径与实施例1的相同。大模场光纤的直径为 $300\mu\text{m}$ 。

内纤芯2的实现需要在对光纤预制棒的研磨过程中采用更加复杂的工艺,制作出所需要的形状,然后拉丝涂覆制成大模场光纤。

参数 v 、 b 的选择与实施例1相同。

实施例3:图5、图6中又给了本发明的第三个实施例,

本实施例中的内纤芯1、边界区3、第一包层4、第一包层外区5、第二包层6、第二包层外区7、第三包层8、保护层9的材料、尺寸和结构关系与实施例1相同。环形纤芯2材料与实施例1相同,环形纤芯2由非对称连续边界组成多边形。选用大模场光纤直径为 $350\mu\text{m}$ 。

选择第一种夹角和线段的情况:

$n > 3$, 每段直线形13与中心点 o 构成的夹角 θ_n 各不相同,选取每段直线形13所对应的夹角 θ_n 分别为:

对应六段夹角 θ_n 为: $\frac{7\pi}{36}, \frac{9\pi}{36}, \frac{11\pi}{36}, \frac{13\pi}{36}, \frac{15\pi}{36}, \frac{17\pi}{36}$,

六个直线形 13 为: $L_{(1-6)} = 45\mu m, 76\mu m, 95\mu m, 114\mu m, 132\mu m, 159\mu m$

选择第二种夹角和线段的情况:

对应的夹角 θ_n 根据需要可以选取两个或三个相同的数值, 实现直线形 13 的非对称连续分布, 可分别选取 $\theta_{1-6} = \frac{7\pi}{36}, \frac{7\pi}{36}, \frac{13\pi}{36}, \frac{13\pi}{36}, \frac{15\pi}{36}, \frac{17\pi}{36}$, 分别得到直线形 13 为: $L_{(1-6)} = 45.56\mu m, 45.56\mu m, 64.32\mu m, 64.32\mu m, 65.93\mu m, 67\mu m$ 。依此类推选择四个或五个夹角 θ_n , 以及更多的夹角数值组成非对称直线形 13 连续分布结构。

本发明中半径 R 、夹角 θ_n 、内纤芯 1 和环形纤芯 2、边界区 3、第一包层 4、第一包层外区 5、第二包层 6、第二包层外区 7、第三包层 8 的厚度参数还可根据不同的设计要求来选择, 本发明中的材料还可选择除上述实施例材料之外的其他材料。

参数 v 、 b 的选择与实施例 1 相同。

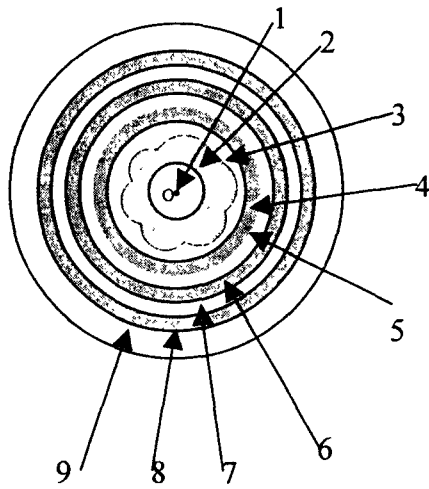


图 1

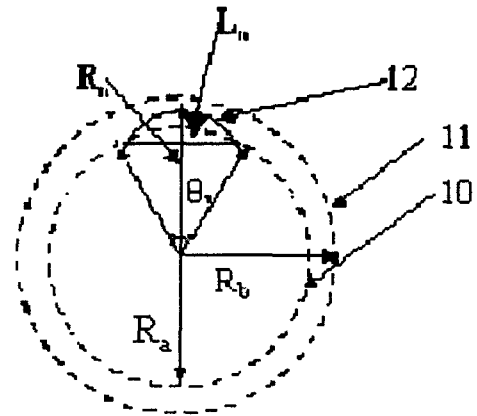


图 2

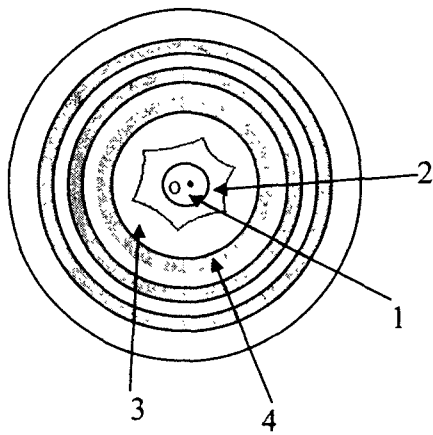


图 3

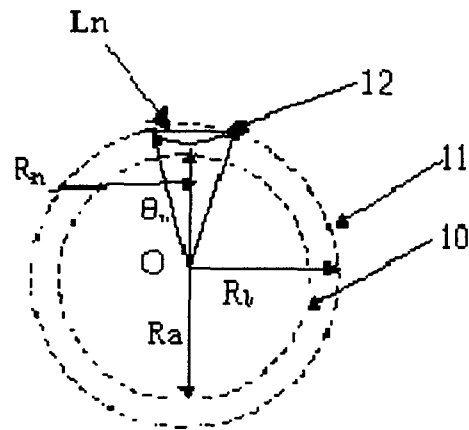


图 4

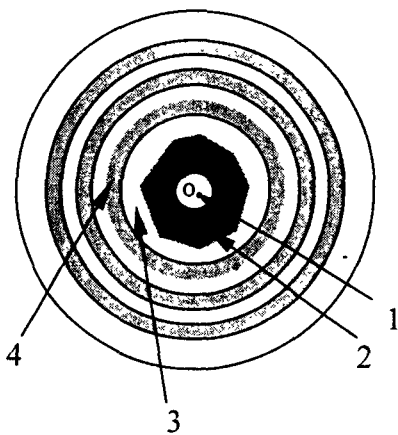


图 5

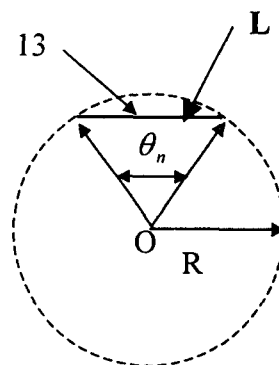


图 6