

## 说明书

发明名称: 一种高单模性低损耗空芯反谐振光纤

### 技术领域

[0001] 本发明涉及空芯光纤技术领域，具体涉及一种高单模性低损耗空芯反谐振光纤，属于光通信和传输技术领域。

### 背景技术

[0002] 空芯反谐振光纤具有独特的微结构设计，能将传输光波约束在空气纤芯中，在光与填充物质相互作用、非线性光学、气体检测、气体激光产生、光流体技术等领域都具有重要的应用；因其独特的结构和导光机理，能够获得超低的瑞利散射、低非线性系数、色散可调特性，可以提供更高的激光损伤阈值，使其在高功率激光传输、紫外/中红外光传输、脉冲压缩和光孤子传输等方面有潜在的应用；空气芯的超低损耗、低色散、低非线性、接近光速的传播速度，可实现空芯光纤通信传输及通信器件的开发，为下一代超大容量、低延迟、高速光通信系统的建设发展奠定基础。

[0003] 即使空芯光纤在设计和应用方面具有独特和巨大的优势，而由于其天然的不具备高阶模截止条件，空芯光纤的高阶模无法像实芯单模光纤那样被有效地滤除。这将极大地限制其在短距离传输的应用场景。近年来的研究工作表明，通过合理的结构设计可以一定程度上提升高阶模模式的泄漏损耗，从而在经过一定距离后产生近似单模的效果。

[0004] 当前常用的高阶模式滤除方法是选择一个高衰减的包层模式，通过结构设计使其与纤芯中的LP11模式高度相位匹配，从而有效提升LP11模式的泄漏损耗。此设计方法中的关键因素在于：包层模式的原生衰减和其与LP11模式的相位匹配程度。一般情况下，包层模式的衰减越高、与LP11模式的相位匹配程度越高，对LP11模式的泄漏提升越大，单模性越好。

[0005] 美国专利US11733451B2公布了一种单圈式（Single-Ring）空芯反谐振光纤。该专利提出利用高损耗的反谐振单元（ARE）模式与纤芯LP11模式高度相位匹配。该结构十分简单，拉制难度较低，并且可以实现超高的高阶模抑制比。将

包层管与纤芯尺寸比例在0.68左右时，可以实现宽带的高度单模效果，LP11模式衰减可达 $10^{-2}$  dB/m量级。然而，此结构难以实现超低衰减的传输，目前在近红外波段的最低衰减为4.3 dB/km (1080 nm)，在通信波段衰减则更高，且抗弯曲性能差，因此在近红外波段的许多应用中并无太大优势。

- [0006] 中国专利CN110515152B公开了一种单嵌套管无节点构的空芯反谐振光纤（Nested Anti-Resonant Nodeless Fiber, NANF）和一种双嵌套管无节点结构空芯反谐振光纤（Double Nested Anti-Resonant Nodeless Fiber, DNANF）。这两种结构通过增加反谐振层数的方式，有效降低了基模的传输损耗。对于NANF光纤，其最低衰减已经达到0.22 dB/km，而DNANF更是突破了传统实芯光纤的最低衰减记录，达到了0.11 dB/km。然而以上两种光纤在实现超低衰减的同时，也使LP11模式的损耗处于相当低的水平。NANF结构实现LP11模式最佳谐振泄漏设计时，理论LP11衰减约为 $10^{-2}$ ~ $10^{-3}$  dB/km量级，在实际制作和放置条件下，当前最高可达2.6 dB/m。其包层模式的原生衰减已经随着结构层数的增加而大大降低，因而LP11模式衰减无法达到足够高的水平。这种情况在DNANF结构中则更为严峻一些：一是DNANF结构中包层模式的衰减又被进一步降低；二是DNANF结构包层区域已经没有足够的空间来使LP11模式与包层模式达到足够的相位匹配，LP11模式理论衰减已经低于 $10^{-2}$  dB/km，这意味着DNANF光纤无法有效地滤除高阶模式，严重影响信号传输质量。

## 发明内容

- [0007] 本发明所要解决的问题在于针对上述现有技术存在的不足提供一种高单模性低损耗空芯反谐振光纤，通过包层结构变化，提高高阶模式损耗，实现高纯度单模传输。
- [0008] 本发明为解决上述提出的问题所采用的技术方案为：包括有外包层和内包层，所述的内包层由嵌套结构单元构成，所述的嵌套结构单元沿外包层内壁的周向布置，并与外包层内壁相接，所述内包层包覆的中心空腔形成纤芯，其特征在于所述嵌套结构单元包括有2层不同半径的嵌套玻璃管，包括外嵌套玻璃管 and 内嵌套玻璃管，至少存在有一个内嵌套玻璃管相对其所在的外嵌套玻璃管向一侧偏转，偏转夹角为 $5^{\circ}$ ~ $55^{\circ}$ 。

- [0009] 按上述方案，所述内嵌套玻璃管相对外嵌套玻璃管向一侧偏转，即所述的内嵌套玻璃管曲率中心和外嵌套玻璃管的曲率中心的连线L2，与外嵌套玻璃管的曲率中心和纤芯几何中心连线的延长线L1形成有一个偏转夹角。
- [0010] 按上述方案，所述的内包层包括有4~6个嵌套结构单元。
- [0011] 按上述方案，所述的嵌套结构单元沿外包层内壁的周向间隔均布。
- [0012] 按上述方案，所述的外包层及内壁均为圆形。
- [0013] 按上述方案，所述的嵌套玻璃管包括有不同半径的圆形嵌套玻璃管，各圆形嵌套玻璃管相切，外嵌套玻璃管与外包层内腔壁相切。
- [0014] 按上述方案，所述的嵌套玻璃管包括有不同半径的圆弧嵌套玻璃管和圆形嵌套玻璃管，其中各圆弧嵌套玻璃管与外包层内壁相交，或各圆形嵌套玻璃管与外包层内壁相切。
- [0015] 按上述方案，所述的嵌套玻璃管包括有不同半径的圆弧嵌套玻璃管，各圆弧嵌套玻璃管与外包层内壁相交。
- [0016] 按上述方案，所述的多个或所有内嵌套玻璃管相对外嵌套玻璃管向同一侧偏转，且偏转夹角相同或基本相同。
- [0017] 按上述方案，所述的内嵌套玻璃管相对外嵌套玻璃管部分向一侧偏转，部分向另一侧偏转。
- [0018] 按上述方案，所述的外嵌套玻璃管为圆弧嵌套玻璃管，所述的内嵌套管为圆形嵌套玻璃管或圆弧嵌套玻璃管。
- [0019] 按上述方案，所述的偏转夹角为15~45°；进一步的，所述的偏转夹角为25~40°；进一步的，所述的偏转夹角为30~40°。
- [0020] 按上述方案，所述的外包层和嵌套结构单元的基底材料均为纯石英玻璃。
- [0021] 按上述方案，所述的内、外嵌套玻璃管的壁厚为0.3至1.5  $\mu\text{m}$ 。
- [0022] 按上述方案，所述的外嵌套玻璃管与内嵌套玻璃管外径之比为1:0.35~0.6。
- [0023] 按上述方案，所述纤芯区域及其它外包层内空腔区域由气体填充。
- [0024] 按上述方案，所述气体为氩气、氮气、氦气、空气或多种气体的混合。
- [0025] 按上述方案，所述光纤的基模损耗为0.4~2dB/km；进一步的，所述衰减数值低于0.5 dB/km。

[0026] 按上述方案，所述光纤的高阶模损耗为4~10dB/km；进一步的，所述衰减数值高于6 dB/m。

[0027] 本发明的有益效果在于：1、本发明结构中，内包层包含有多层反谐振石英壁和空气层，所传输的基模被有效限制在纤芯中，限制损耗降低；本发明通过包层结构变化，兼具合理的、可制备的嵌套结构单元形状、优化的嵌套尺寸组合和内嵌套玻璃管的偏转，显著提高了LP11模式的泄漏损耗，且对基模性能影响较小，最终有效提升了光纤的单模性能。本发明的关键在于，在优化外嵌套玻璃管与内嵌套玻璃管外径之比至最佳时，让内嵌套玻璃管在外嵌套玻璃管中向一侧偏转，该结构可以提高LP11模式的泄漏效率，从而获得更高的单模性能。2、本发明设计纤芯高阶模式与内空气区域的模式的相位匹配，并设计增大包层模式损耗，使高阶模更高效地泄露、进一步提升高阶模式衰减，具有优异的单模传输性能；3、本发明的单模性能不具有波长选择性，在工作波长内均可实现高度单模传输。本发明提供了一种兼顾衰减和单模特性的空芯光纤，为高速通信、高功率传输、气体激光器、气体检测等领域提供性能优良的传输介质。

## 附图说明

[0028] 图1是本发明第一个实施例的径向截面结构图。

[0029] 图2是图1中的一个嵌套管的局部放大图。

[0030] 图3是本发明第二个实施例的径向截面结构图。

[0031] 图4是本发明第一个实施例中LP11模式损耗随旋转角度变化的曲线图。

[0032] 图5是本发明第一个实施例中LP11模式损耗随几何尺寸变化的曲线图。

[0033] 图6是本发明第一个实施例中基模损耗随波长变化曲线图。

[0034] 图7是本发明第三个实施例的径向截面结构图。

[0035] 图8是本发明第四个实施例的径向截面结构图。

## 本发明的实施方式

[0036] 下面将结合本发明实施例及附图对本发明作进一步的详细说明。

[0037] 空芯光纤中常用的高阶模式滤除方法是选择一个高衰减的包层模式，通过结构设计使其与纤芯中的LP11模式高度相位匹配，从而有效提升LP11模式的泄漏损耗。通过此设计方法实现的LP11模式衰减可以以下公式估算：

$$[0038] \quad \alpha'_{11}(\text{dB/m}) = \frac{20}{\log(10)} \cdot \Im(\beta'_{11}) = \frac{20}{\log(10)} \cdot \frac{\Im(\beta_{ARE} - \beta_{11}) \cdot |K|^2}{\Re(\beta_{11} - \beta_{ARE})^2}$$

[0039] 其中， $\Im(\beta'_{11})$ 为经谐振滤除后的LP11模式的传播常数虚部，其数值与最终损耗 $\alpha'_{11}$ 成正比。 $\Im(\beta_{ARE} - \beta_{11})$ 为包层模与LP11模式的原生传播常数虚部的差值，代表了初始状态下两模式的损耗差异。K为两模式的耦合系数，这里可视为常数。 $\Re(\beta_{11} - \beta_{ARE})$ 为两个模式传播常数实部的差值，代表了两模式的相位匹配程度，该数值越小，相位匹配程度越高。

[0040] 上述公式表明，设计后的LP11模式衰减取决于包层模式的原生衰减和其与LP11模式的相位匹配程度。一般情况下，包层模式的衰减越高、与LP11模式的相位匹配程度越高，对LP11模式的泄漏提升越大，单模性越好。仅通过调整相位匹配的方式（如图4中的点划线所示），LP11模式的衰减最高只能达到完美匹配点的水平，即图4中的圆形标记点。在达到完美匹配条件后，通过旋转包层玻璃管可以突破这一限制，进一步提高LP11模式的损耗（如图4中的实线所示）。在图4中的星星标记点，LP11模式的衰减可达11dB/m。

[0041] 本发明第一个实施例如图1、2所示，包括有外包层1和内包层，所述的内包层由5个嵌套结构单元构成，所述的嵌套结构单元沿外包层内壁的周向布设，所述的嵌套结构单元包括有2层不同半径的嵌套玻璃管，包括有外嵌套玻璃管2和内嵌套玻璃管3，构成反谐振单元，所述的嵌套玻璃管包括2个不同半径的圆形嵌套玻璃管，其中外嵌套玻璃管的直径为d1，内嵌套玻璃管的直径d2，外嵌套玻璃管与外包层内壁相切，所述的内嵌套玻璃管与外嵌套玻璃管相切并相对外嵌套玻璃管与外包层内腔壁相切点向一侧偏转，即所述的内嵌套玻璃管曲率中心（圆心）和外嵌套玻璃管的曲率中心（圆心）的连线L2，与外嵌套玻璃管的曲率中心和纤芯几何中心连线的延长线L1形成有一个偏转夹角，偏转夹角为35°，所有内嵌套玻璃管的偏转方向一致。所述内包层包覆的中心空腔形成纤芯

6, 所述纤芯区域及其他内部空间包括内嵌套玻璃管空腔5和外嵌套玻璃管空腔4由气体填充。所述气体为氩气、氮气、氦气、空气或多种气体的混合。具体地: 本实施例的相关参数为: 纤芯直径D为32  $\mu\text{m}$ , 外嵌套玻璃管的外径d1为31.6  $\mu\text{m}$ , 内嵌套玻璃管的外径d2为14.5  $\mu\text{m}$ , 与外嵌套玻璃管的外径之比为0.46; 外包层内径(外包层空腔直径)为95  $\mu\text{m}$ 。在本实施例中, 各嵌套玻璃管的壁厚为1.1  $\mu\text{m}$ 。当各嵌套玻璃管的壁厚为0.95  $\mu\text{m}$ 左右时, 使第二谐振工作波段扩展至1310 nm。使用第一反谐振窗口作为通信工作波段时, 各嵌套玻璃管的壁厚为0.5  $\mu\text{m}$ 左右。需要说明的是, 空芯反谐振光纤的基模泄漏损耗随着外嵌套玻璃管与内嵌套玻璃管外径之比的降低而提高, 然而LP11模式的泄漏损耗并不会随着该比值的降低而一直提高, 而是达到某一峰值后再下降, 该峰值对应于LP11模式与包层模式谐振作用最强点。因此, 通过调节该比值实现的LP11模式损耗提升是受限的。本发明兼具合理的、可制备的嵌套结构单元形状、优化的嵌套尺寸组合和内嵌套玻璃管的偏转, 综合产生了如下技术效果: 显著提高了LP11模式的泄漏损耗, 且对基模性能影响较小, 最终有效提升了光纤的单模性能。如图4所示, 在外嵌套玻璃管与内嵌套玻璃管外径之比为0.46、旋转角度为35°时, LP11模式损耗高于11 dB/m。

[0042] 本发明第二个实施例如图3所示, 它与第一个实施例的不同之处在于所述的内嵌套玻璃管相对外嵌套玻璃管2个向一侧偏转, 另外3个向另一侧偏转。其它结构与第一个实施例相同。

[0043] 本发明第三个实施例如图7所示, 它与第一个实施例的不同之处在于外嵌套玻璃管为圆弧嵌套玻璃管, 圆弧的圆周角为280°, 其中外圆弧嵌套玻璃管与外包层内壁相交, 内嵌套玻璃管为圆形嵌套玻璃管, 圆形内嵌套玻璃管与外包层内壁相切, 所述的内嵌套玻璃管曲率中心(圆心)和外嵌套玻璃管的曲率中心(圆心)的连线L2, 与外嵌套玻璃管的曲率中心和纤芯几何中心连线的延长线L1形成有一个偏转夹角, 偏转夹角为35°, 所有内嵌套玻璃管的偏转方向一致。其它结构与第一个实施例相同。

[0044] 本发明第四个实施例如图8所示, 它与第一个实施例的不同之处在于内、外嵌套玻璃管均为圆弧嵌套玻璃管, 圆弧内、外嵌套玻璃管的圆周角均为280°

左右，内、外各圆弧嵌套玻璃管均与外包层内壁相交。所述的内嵌套玻璃管曲率中心（圆心）和外嵌套玻璃管的曲率中心（圆心）的连线L2，与外嵌套玻璃管的曲率中心和纤芯几何中心连线的延长线L1形成有一个偏转夹角，偏转夹角为 $35^{\circ}$ ，所有内嵌套玻璃管的偏转方向一致。其它结构与第一个实施例相同。

## 权利要求书

- [权利要求 1] 一种高单模性低损耗空芯反谐振光纤，包括有外包层和内包层，所述的内包层由嵌套结构单元构成，所述的嵌套结构单元沿外包层内壁的周向布设，并与外包层内壁相接，所述内包层包覆的中心空腔形成纤芯，其特征在于所述嵌套结构单元包括有2层不同半径的嵌套玻璃管，包括外嵌套玻璃管和内嵌套玻璃管，至少存在有一个内嵌套玻璃管相对其所在的外嵌套玻璃管向一侧偏转，偏转夹角为 $5^{\circ}$ ~ $55^{\circ}$ 。
- [权利要求 2] 按权利要求1所述的高单模性低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述内嵌套玻璃管相对外嵌套玻璃管向一侧偏转，即所述的内嵌套玻璃管曲率中心和外嵌套玻璃管的曲率中心的连线L2，与外嵌套玻璃管的曲率中心和纤芯几何中心连线的延长线L1形成有一个偏转夹角。
- [权利要求 3] 按权利要求1或2所述的高单模性低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的内包层包括有4~6个嵌套结构单元。
- [权利要求 4] 按权利要求3所述的高单模性低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的嵌套结构单元沿外包层内壁的周向间隔均布。
- [权利要求 5] 按权利要求3所述的高单模性低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的外包层及内壁均为圆形。
- [权利要求 6] 按权利要求1或2所述的高单模性低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的嵌套玻璃管包括有不同半径的圆形嵌套玻璃管，各圆形嵌套玻璃管相切，外嵌套玻璃管与外包层内腔壁相切。
- [权利要求 7] 按权利要求1或2所述的高单模性低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的嵌套玻璃管包括有不同半径的圆弧嵌套玻璃管和圆形嵌套玻璃管，其中各圆弧嵌套玻璃管与外包层内壁相交，或各圆形嵌套玻璃管与外包层内壁相切。

- [权利要求 8] 按权利要求1或2所述的高单模性低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的嵌套玻璃管包括有不同半径的圆弧嵌套玻璃管，各圆弧嵌套玻璃管与外包层内壁相交。
- [权利要求 9] 按权利要求1或2所述的高单模性低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的多个或所有内嵌套玻璃管相对外嵌套玻璃管向同一侧偏转，且偏转夹角相同或基本相同。
- [权利要求 10] 按权利要求1或2所述的高单模性低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的内嵌套玻璃管相对外嵌套玻璃管部分向一侧偏转，部分向另一侧偏转。
- [权利要求 11] 按权利要求1或2所述的高单模性低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的外嵌套玻璃管为圆弧嵌套玻璃管，所述的内嵌套管为圆形嵌套玻璃管或圆弧嵌套玻璃管。
- [权利要求 12] 按权利要求1或2所述的高单模性低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的偏转夹角为 $15\sim 45^{\circ}$ 。
- [权利要求 13] 按权利要求1或2所述的高单模性低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的偏转夹角为 $25\sim 40^{\circ}$ 。
- [权利要求 14] 按权利要求1或2或3所述的高单模性低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的偏转夹角为 $30\sim 40^{\circ}$ 。
- [权利要求 15] 按权利要求1或2所述的高单模性低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的外包层和嵌套结构单元的基底材料均为纯石英玻璃。
- [权利要求 16] 按权利要求1或2所述的高单模性低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的内、外嵌套玻璃管的壁厚为 $0.3$ 至 $1.5\mu\text{m}$ 。
- [权利要求 17] 按权利要求1或2所述的高单模性低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的外嵌套玻璃管与内嵌套玻璃管外径之比为 $1:0.35\sim 0.6$ 。
- [权利要求 18] 按权利要求1或2所述的高单模性低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述纤芯区域及其它外包层内空腔区域由气体填充。
- [权利要求 19] 按权利要求18所述的高单模性低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述气体为氩气、氮气、氦气、空气或多种气体的混合。

- [权利要求 20] 按权利要求1或2所述的高单模性低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述光纤的基模损耗低于0.5 dB/km。
- [权利要求 21] 按权利要求1或2所述的高单模性低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述光纤的高阶模损耗高于6 dB/m。