发明名称: 一种单模超低损耗空芯反谐振光纤

技术领域

[0001] 本发明涉及一种单模超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单模超低损耗空芯反谐振光纤，通过包层结构变化，降低基模损耗的同时提高高阶模式损耗，从而实现高纯度单模下的低损耗传输。

[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间隔布设，并与外包层内壁相接，所述内包层包覆的中心空腔形成等效圆形纤芯空腔，所述嵌套结构单元包括有2层或2层以上不同半径的嵌套玻璃管，其特征在于沿所述外包层内壁周向设有辅助内包层，所述的辅助内包层包括有辅助嵌套结构单元，所述的辅助嵌套结构单元沿外包层内壁的周向与嵌套结构单元

交错间隔布设，并与外包层内壁相接，所述的辅助嵌套结构单元与相邻两侧的嵌套结构单元之间形成有一个与三者共同相切的等效圆形泄模空腔。

[0009] 按上述方案，所述的辅助嵌套结构单元包括有1层或1层以上不同半径的嵌套玻璃管。

[0010] 按上述方案，所述的嵌套玻璃管从外至内包括有外嵌套玻璃管和内嵌套玻璃管。

[0011] 按上述方案，所述的位于相邻两嵌套结构单元之间的辅助嵌套结构单元为1个或1个以上。

[0012] 按上述方案，所述的辅助嵌套结构单元对称布设于相邻两嵌套结构单元之间，即辅助嵌套结构单元的几何中线与相邻两嵌套结构单元的几何中线重合。

[0013] 按上述方案，所述的内包层包括有3~5个嵌套结构单元，所述的辅助内包层对应包括有3~5个辅助嵌套结构单元。

[0014] 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。

[0015] 按上述方案，所述的嵌套结构单元包括有3层不同半径的嵌套玻璃管，从外至内包括有外嵌套玻璃管和第一内嵌套玻璃管及第二内嵌套玻璃管。

[0016] 按上述方案，所述的外包层及内壁均为圆形。

[0017] 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。

[0018] 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或与相邻在外嵌套玻璃管相交，各圆形嵌套玻璃管与各圆形嵌套玻璃管相切，或各圆形嵌套玻璃管与外包层内壁相切。

[0019] 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。

[0020] 按上述方案，所述的外包层、内包层和辅助内包层的基底材料均为纯石英玻璃。

[0021] 按上述方案，所述的组成嵌套结构单元和辅助嵌套结构单元的内、外嵌套玻璃管的单边壁厚一致或差异小于20%。

[0022] 按上述方案，所述的组成嵌套结构单元和辅助嵌套结构单元的内、外嵌套玻璃管和外包层的单边壁厚为0.3至1.5μm。

[0023] 按上述方案，所述的嵌套结构单元包括有3层不同半径的嵌套玻璃管，所述的外嵌套玻璃管和第一内嵌套玻璃管为不同半径的圆形嵌套玻璃管，在外嵌套玻璃管和第一内嵌套玻璃管之间的相接处安设有支撑垫块。

[0024] 按上述方案，所述的支撑垫块为1个或多个，沿周向分布。

[0025] 按上述方案，所述支撑垫块截面近似为圆形、椭圆形、菱形或矩形。

[0026] 按上述方案，所述的等效圆形纤芯空腔与等效圆形泄模空腔的直径之比为1:0.4~0.7。

[0027] 按上述方案，所述的圆形纤芯与嵌套结构单元的外嵌套玻璃管的直径之比为1:1.2~1.5。

[0028] 按上述方案，所述的嵌套结构单元的外嵌套玻璃管与第一内嵌套玻璃管的直径之比为1: 0.55~0.75。

[0029] 按上述方案，所述的嵌套结构单元的第一内嵌套玻璃管与第二内嵌套玻璃管的直径之比为1: 0.4~0.7。

[0030] 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。

[0031] 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。

[0032] 按上述方案，所述光纤基模损耗低于0.5dB/km，优选地，所述光纤基模损耗低于0.15 dB/km。

[0033] 按上述方案，所述光纤高阶模损耗高于6dB/m，优选地，所述光纤高阶模衰减高于10 dB/m。

[0034] 本发明的有益效果在于：1、通过设置辅助内包层与嵌套结构单元之间形成圆形泄模空腔，作为高阶模谐振滤除单元，该空腔区域靠近微结构最外侧，区域内基模具有超高衰减，通过进一步设计空气区域的模式与纤芯高阶模式的相位匹配，使纤芯高阶模更高效地泄露、极大提升高阶模式衰减，具有优异的单模传输性能；可以实现超低损耗传输的同时，极大提升空芯光纤的单模性。2、对于基模，本发明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，实现超低损耗传输，优化后的支撑垫块可以进

一步降低光纤衰减。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。在降低基模损耗的同时提高高阶模式损耗，从而实现高纯度单模下的低损耗传输，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

[0035] 图1为本发明实施例1的径向截面结构图。

[0036] 图2是本发明实施例1中LP01模式损耗谱线。

[0037] 图3是本发明实施例1中LP11模式损耗谱线。

[0038] 图4是本发明实施例2的径向截面结构图。

[0039] 图5是本发明实施例3的径向截面结构图。

[0040] 图6是本发明实施例3中LP01模式损耗谱线。

[0041] 图7是本发明实施例4的径向截面结构图。

[0042] 图8是本发明实施例5的径向截面结构图。

[0043] 图9是本发明实施例6的径向截面结构图。

[0044] 图10是本发明实施例7的径向截面结构图。

[0045] 图11是本发明实施例8的径向截面结构图。

本发明的实施方式

[0046] 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。

[0047] 实施例1：如图1所示，为一种单模、低损耗空芯反谐振光纤，包括有外包层1和内包层，所述的内包层由4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均匀间隔布设，并与外包层内壁相接，所述嵌套结构单元包括有3层不同半径的圆形嵌套玻璃管，从外至内包括有圆形外嵌套玻璃管201和圆形第一内嵌套玻璃管202及圆形第二内嵌套玻璃管203，外嵌套玻璃管与外包层内腔壁相切，各圆形嵌套玻璃管相切于同一点，4个嵌套结构单元包覆的中心形成有一个与各嵌套结构单元共同相切的（等效）圆形纤芯空腔4。沿所述外包层内壁周向设有辅助内包层，所述的辅助内包层包括有4个辅助嵌套结构单元，所述的辅助嵌套结构单元沿外包层内壁的周向与嵌套结构单元交错间隔布设，所述的辅

助嵌套结构单元对称布设于相邻两嵌套结构单元之间，即辅助嵌套结构单元的几何中线与相邻两嵌套结构单元的几何中线重合，所述的辅助嵌套结构单元包括有1层圆形嵌套玻璃管301，即由1个圆形外嵌套玻璃管组成，并与外包层内壁相切，所述的辅助嵌套结构单元与相邻两侧的嵌套结构单元之间形成有一个与三者共同相切的（等效）圆形泄模空腔5，整个外包层内腔形成有4个对称分布的圆形泄模空腔。所述的等效圆形纤芯空腔与等效圆形泄模空腔的直径之比为1:0.4~0.7，所述的等效圆形纤芯空腔与嵌套结构单元的外嵌套玻璃管的直径之比为1:1.2~1.5，所述的嵌套结构单元的外嵌套玻璃管与第一内嵌套玻璃管的直径之比为1: 0.55~0.75，所述的嵌套结构单元的第一内嵌套玻璃管与第二内嵌套玻璃管的直径之比为1:0.4~0.7。所述的外包层、内包层和辅助内包层的基底材料均为纯石英玻璃。所述的所有组成嵌套结构单元和辅助嵌套结构单元的内、外嵌套玻璃管单边壁厚一致或近似一致。所述纤芯区域及其它外包层内空腔区域由气体填充。

[0048] 实施例1具体的结构参数为：等效圆形纤芯空腔的直径为28 μm；外嵌套玻璃管的外径为40 μm，第一内嵌套玻璃管外径为30 μm，与外嵌套玻璃管的外径之比为0.75；第二内嵌套玻璃管的外径为16 μm，外包层内径为105μm。所述的辅助嵌套结构单元包括有1层圆形嵌套玻璃管301，外径为7.6μm，任意两相邻的嵌套结构单元的外嵌套玻璃管的间距在8 μm以上，使得光纤在拉制过程中结构更加稳定易拉制。在本实施例中，所述的内、外嵌套玻璃管的单边壁厚为1.1μm，当第二谐振工作波段扩展至1310nm时，各壁厚应为0.95μm；使用第一反谐振窗口作为通信工作波段时，各壁厚应为0.5μm。本发明兼具合理的、可制备的包层壁形状、优化的最佳尺寸组合以及创新的泄模空腔设计，综合产生了如下技术效果：显著提高了LP11模式的泄漏损耗，降低了基模的传输损耗，最终有效提升了光纤的单模性能。如图2所示，本实施例在约400nm的带宽内可实现低于0.1dB/km的超低衰减传输。如图3所示，本实施例中LP11模式衰减在导光带内泄漏损耗高于10dB/m，并且在一个宽带范围内接近100 dB/m，可以实现高性能单模传输。

[0049] 实施例2：如图4所示，本实施例与实施例1主要差别在于所述嵌套结构单元包括有3层不同半径的圆弧嵌套玻璃管和圆形嵌套玻璃管，从外至内包括有圆弧外嵌套玻璃管201和圆形第一内嵌套玻璃管202及圆形第二内嵌套玻璃管203，其中圆弧外嵌套玻璃管与外包层内壁相交，各圆形内嵌套玻璃管相切，并与外包层内壁相切于同一点。本实施例具有与实施例1相同直径的圆形纤芯空腔4，但外包层1的内径更小。所述的等效圆形纤芯空腔与等效圆形泄模空腔的直径之比为1:0.5~0.7，所述的嵌套结构单元的圆形纤芯与外嵌套玻璃管的直径之比为1:1.2~1.5。其它结构与实施例1基本相同。

[0050] 实施例3：如图5、6所示，其与实施例1的不同之处在于所述嵌套结构单元包括有3层不同半径的圆形嵌套玻璃管，从外至内包括有圆形外嵌套玻璃管201和圆形第一内嵌套玻璃管202及圆形第二内嵌套玻璃管203，外嵌套玻璃管与外包层内腔壁相切，各圆形嵌套玻璃管相切于同一点，在外嵌套玻璃管和第一内嵌套玻璃管之间的相接处安设有支撑垫块204，支撑垫块为1个，所述支撑垫块截面近似为椭圆形。其中，第一内嵌套玻璃管与第二内嵌套玻璃管同外切于支撑垫块的内侧切点，外嵌套玻璃管与外包层内腔壁同内切于支撑垫块的外侧切点，并且所述的内侧切点和外侧切点位于同一径线上，该结构使得外嵌套玻璃管与第一内嵌套玻璃管似为等间隔分布。具体的结构参数为：等效圆形纤芯空腔的直径为28 μm；外嵌套玻璃管的外径为42 μm，第一内嵌套玻璃管外径为27.3 μm，与外嵌套玻璃管的外径之比为0.65；第二内嵌套玻璃管的外径为12μm，外包层内径为110μm。在本实施例中，支撑垫块为长轴9μm，短轴4μm的实芯椭圆，材料为纯石英玻璃。所述的辅助嵌套结构单元包括有1层圆形嵌套玻璃管301，外径为8.2 μm，任意两相邻的嵌套结构单元的外嵌套玻璃管的间距在8 μm以上，使得光纤在拉制过程中结构更加稳定易拉制。在本实施例中，所述的内、外嵌套玻璃管的单边壁厚为1.1μm，当第二谐振工作波段扩展至1310 nm时，各壁厚应为0.95μm；使用第一反谐振窗口作为通信工作波段时，各壁厚应为0.5 μm。

[0051] 本发明兼具合理的、可制备的包层壁形状、优化的最佳尺寸组合以及最佳的石英垫尺寸，综合产生了如下技术效果：显著提高了LP11模式的泄漏损耗，降低了基模的传输损耗，最终有效提升了光纤的单模性能；任意两相邻的嵌套结构

单元的间距在8μm以上，大大降低了拉制难度，利于大规模、长距离生产。引入石英支撑垫块可以进一步降低光纤的衰减，同时提升泄模空腔对纤芯高阶模的泄漏效率。与如图6所示，本实施例在约400nm的带宽内可实现低于0.1 dB/km的超低衰减传输。

[0052] 实施例4：如图7所示，实施例4与实施例3的区别在于支撑垫块的形状。本实施例中，支撑垫块的截面为直径5 μm的实芯圆。

[0053] 实施例5：如图8所示，实施例5与实施例3的区别在于支撑垫块的形状。本实施例中，支撑垫块的截面为实芯矩形。

[0054] 实施例6：如图9所示，为增加结构稳定性，实施例6在实施例4的基础上，将实芯圆支撑垫块的个数增加到2个，2个支撑垫块对称设置在内嵌套玻璃管的两侧。

[0055] 实施例7：如图10所示，为增加结构稳定性，实施例7在实施例5的基础上，将矩形支撑垫块的个数增加到2个，2个支撑垫块对称设置在内嵌套玻璃管的两侧。

[0056] 实施例8：如图11所示，为增加结构稳定性，实施例8在实施例5的基础上，将矩形支撑垫块的个数增加到3个。

权利要求书

[权利要求 1] 一种单模超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间隔布设，并与外包层内壁相接，所述内包层包覆的中心空腔形成等效圆形纤芯空腔，所述嵌套结构单元包括有2层或2层以上不同半径的嵌套玻璃管，其特征在于沿所述外包层内壁周向设有辅助内包层，所述的辅助内包层包括有辅助嵌套结构单元，所述的辅助嵌套结构单元沿外包层内壁的周向与嵌套结构单元交错间隔布设，并与外包层内壁相接，所述的辅助嵌套结构单元与相邻两侧的嵌套结构单元之间形成有一个与三者共同相切的等效圆形泄模空腔。

[权利要求 2] 按权利要求1所述的单模超低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的辅助嵌套结构单元包括有1层或1层以上不同半径的嵌套玻璃管。

[权利要求 3] 按权利要求1或2所述的单模超低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的嵌套玻璃管从外至内包括有外嵌套玻璃管和内嵌套玻璃管。

[权利要求 4] 按权利要求1或2所述的单模超低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的位于相邻两嵌套结构单元之间的辅助嵌套结构单元为1个或1个以上。

[权利要求 5] 按权利要求1或2所述的单模超低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的辅助嵌套结构单元对称布设于相邻两嵌套结构单元之间，即辅助嵌套结构单元的几何中线与相邻两嵌套结构单元的几何中线重合。

[权利要求 6] 按权利要求1或2所述的单模超低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的内包层包括有3~5个嵌套结构单元，所述的辅助内包层对应包括有3~5个辅助嵌套结构单元。

[权利要求 7] 按权利要求6所述的单模超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 8] 按权利要求1或2所述的单模超低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的嵌套结构单元包括有3层不同半径的嵌套玻璃管，从外至内包括有外嵌套玻璃管和第一内嵌套玻璃管及第二内嵌套玻璃管。

[权利要求 9] 按权利要求1或2所述的单模超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 10] 按权利要求1或2所述的单模超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 11] 按权利要求1或2所述的单模超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或与相邻在外嵌套玻璃管相交，各圆形嵌套玻璃管与各圆形嵌套玻璃管相切，或各圆形嵌套玻璃管与外包层内壁相切。

[权利要求 12] 按权利要求1或2所述的单模超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 13] 按权利要求1或2所述的单模超低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的外包层、内包层和辅助内包层的基底材料均为纯石英玻璃。

[权利要求 14] 按权利要求3所述的单模超低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的组成嵌套结构单元和辅助嵌套结构单元的内、外嵌套玻璃管的单边壁厚一致或差异小于20%。

[权利要求 15] 按权利要求3所述的单模超低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的组成嵌套结构单元和辅助嵌套结构单元的内、外嵌套玻璃管的单边壁厚为0.3至1.5μm。

[权利要求 16] 按权利要求8所述的单模超低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的嵌套结构单元包括有3层不同半径的嵌套玻璃管，所述的外嵌套玻璃管和第一内嵌套玻璃管为不同半径的圆形嵌套玻璃管，在外嵌套玻璃管和第一内嵌套玻璃管之间的相接处安设有支撑垫块。

[权利要求 17] 按权利要求16所述的单模超低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的支撑垫块为1个或多个，沿周向分布；所述支撑垫块截面近似为圆形、椭圆形、菱形或矩形。

[权利要求 18] 按权利要求1或2所述的单模超低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的等效圆形纤芯空腔与等效圆形泄模空腔的直径之比为1:0.4~0.7。

[权利要求 19] 按权利要求3所述的单模超低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的圆形纤芯与嵌套结构单元的外嵌套玻璃管的直径之比为1:1.2~1.5。

[权利要求 20] 按权利要求3所述的单模超低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的嵌套结构单元的外嵌套玻璃管与第一内嵌套玻璃管的直径之比为1: 0.55~0.75。

[权利要求 21] 按权利要求3所述的单模超低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述的嵌套结构单元的第一内嵌套玻璃管与第二内嵌套玻璃管的直径之比为1: 0.4~0.7。

[权利要求 22] 按权利要求1或2所述的单模超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；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 23] 按权利要求1或2所述的单模超低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述光纤基模损耗低于0.5 dB/km。

[权利要求 24] 按权利要求18所述的单模超低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述光纤基模损耗低于0.1 dB/km。

[权利要求 25] 按权利要求1或2所述的单模超低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述光纤高阶模损耗高于6 dB/m。

[权利要求 26] 按权利要求18所述的单模超低损耗空芯反谐振光纤，其特征在于所述光纤高阶模衰减高于10 dB/m。