

一种方位角标记的空芯光纤及空芯光纤端面检测方法

技术领域

本发明属于光通信领域，更具体地，涉及一种方位角标记的空芯光纤及空芯光纤端面检测方法。

背景技术

空芯微结构光纤具有结构简单、空芯单模导光、传输谱宽的特点，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；大空气孔纤芯导光具有超低的瑞利散射、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。

虽然空芯光纤在设计和应用方面有很大优势，然而其传输损耗一直高于传统的石英光纤，近年发现基于反谐振原理的空芯光纤在合理的结构设计之下，能有效减小传输损耗，具有作为超长距离通信光纤的潜力。进一步降低衰减，是空芯微结构光纤制造领域的一个重要课题。

虽然已知的空芯反谐振光纤，特别是具有嵌套结构元件的光纤，能够显著降低光纤的衰减，但是空芯反谐振光纤制造过程与常规的实芯光纤具有本质上的区别。空芯光纤的微观立体结构是其导光的基础，为了形成或者维持特定的微观结构需要在拉丝过程中持续通入气体，由于原材料的不均匀性、嵌套结构元件堆栈过程中的偏差、拉丝过程中的热场分布不均等因素，会造成拉制出来的空芯反谐振光纤的反谐振结构元件出现尺寸不一的情况，如图 1 所示。这种几何结构上的不均匀将会极大地影响空芯反谐

振光纤的传输损耗。而正是由于这种制造方法相对于现有的实心光纤是颠覆性的，因此无法采用通常实芯光纤增大光纤预制棒尺寸的方法来改善几何不均匀性。

发明内容

针对现有技术的以上缺陷或改进需求，本发明提供了一种方位角标记的空芯光纤及空芯光纤端面检测方法，其目的在于通过对具有多层负曲率层的反谐振微结构单元，调整其方位角，在保证光纤传输性能的前提下对光纤端面进行标记，对各个反谐振微结构单元进行标识，可用于检测光纤的几何均匀性，由此解决现有的空芯光纤的反谐振单元难以相互区分，无法检测几何均匀性的技术问题。

为实现上述目的，按照本发明的一个方面，提供了一种方位角标记的空芯光纤，包括包层空芯套管以及排列并附着在所述包层空芯套管内壁的多个周向均匀布置的反谐振微结构单元，反谐振微结构单元包围的中空区域为纤芯；

所述反谐振微结构单元具有多层负曲率层，以远离纤芯为内侧，以靠近纤芯为外侧，最外侧负曲率层的曲率中心到光纤几何中心再到最内侧负曲率层的曲率中心三点连成的夹角为方位角；

存在至少一个反谐振微结构单元的方位角与其他至少一个反谐振微结构单元的方位角具有差异。

优选地，所述方位角标记的空芯光纤，其方位角之间的差异 $\geq 1.5^\circ$ 。

优选地，所述方位角标记的空芯光纤，其中标记反谐振微结构单元与其他所有反谐振微结构单元的方位角具有差异。

优选地，所述方位角标记的空芯光纤，其所述其他所有反谐振微结构单元的方位角相同。

优选地，所述方位角标记的空芯光纤，其所述其他所有反谐振微结构单元的方位角为 0° 。

优选地，所述方位角标记的空芯光纤，其所述标记反谐振微结构单元的方位角为 θ ，有 $1.5^{\circ} \leq \theta \leq 45^{\circ}$ 。

优选地，所述方位角标记的空芯光纤，其所述反谐振微结构单元，包括双层相切嵌套的毛细管，内层毛细管的圆心到光纤几何中心再到外层毛细管的圆心三点连成的夹角为所述反谐振微结构单元的方位角。

优选地，所述方位角标记的空芯光纤，其所述其他反谐振微结构单元的毛细管相切处附着于所述包层空芯套管的内壁。

优选地，所述方位角标记的空芯光纤，其所述包层空芯套管为圆形，多个所述反谐振微结构单元外轮廓相同。

按照本发明的另一个方面，提供了所述的空芯光纤端面检测方法，包括以下步骤：

- (1) 将方位角标记的空芯光纤在预设位置截断；
- (2) 对步骤(1)获得的截断后的端面采用透射光或反射光进行成像，获空芯光纤该位置的端面图像；
- (3) 对于步骤(2)获得的端面图像，根据其方位角进行反谐振微结构单元识别，获得各反谐振微结构单元的图像；
- (4) 对步骤(3)识别获得的反结构微结构单元的图像进行几何参数提取，判断所述空芯光纤的几何均匀性。

总体而言，通过本发明所构思的以上技术方案与现有技术相比，能够取得下列有益效果：

本发明提供了一种方位角标记的空芯光纤及空芯光纤端面检测方法，采用方位角标记，在不提高光纤制备的复杂性、几乎不影响光纤传输性能的前提下，能快速辨别空芯光纤中的反谐振微结构单元，便于在线控制反谐振微结构单元的几何均匀性，有利于降低空芯光纤的传输损耗；同时，在空芯光纤耦合过程中，便于识别不同反谐振微结构单元，从而降低空芯光纤的耦合损耗。

附图说明

图 1 是本发明实施例 1 提供方位角标记的空芯光纤预制棒的结构示意图；

图 2 是无标记的空芯光纤示意图，用来与实施例 1 进行对比；

图 3 是本发明实施例 1 提供方位角标记的空芯光纤预制棒在拉丝过程中的压力控制示意图；

图 4 是本发明实施例 2 提供带两个方位角标记的空芯光纤预制棒在拉丝过程中的压力控制示意图；

图 5 是本发明实施例 3 提供带方位角标记的空芯光纤预制棒在拉丝过程中的压力控制示意图。

在所有附图中，相同的附图标记用来表示相同的元件或结构，其中：1 为反谐振微结构单元，2 为包层空芯套管，3 为实施例 1 采用的唯一标记反谐振微结构单元，4 和 5 为实施例 2 采用的相邻两个标记反谐振微结构单元，6、7、8 为实施例 3 采用的相邻三个标记反谐振微结构单元。

具体实施方式

为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合实施例，对本发明进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。此外，下面所描述的本发明各个实施方式中所涉及到的技术特征只要彼此之间未构成冲突就可以相互组合。

本发明提供的方位角标记的空芯光纤，包括包层空芯套管以及排列并附着在所述包层空芯套管内壁的多个周向均匀布置的反谐振微结构单元，反谐振微结构单元包围的中空区域为纤芯；所述包层空芯套管为圆形，多个所述反谐振微结构单元外轮廓相同。

反谐振微结构单元的数量 $n \geq 3$ 。

所述反谐振微结构单元具有多层负曲率层，以远离纤芯为内侧，以靠

近纤芯为外侧，最外侧负曲率层的曲率中心到光纤几何中心再到最内侧负曲率层的曲率中心为方位角。

存在至少一个反谐振微结构单元的方位角与其他至少一个反谐振微结构单元的方位角具有差异。可以通过识别这种方位角的差异，对所有反谐振微结构单元进行识别：首先识别出具有差异的反谐振微结构单元，再通过与上述具有差异的反谐振微结构单元的相对位置，识别出其他反谐振微结构单元。为了能方便的识别出反谐振微结构单元，方位角的差异需要在 1.5° 以上，以明显的与反谐振微结构单元装配误差进行区分。即将反谐振微结构单元的方位角的偏移作为空芯光纤方位的标识，方位角发生偏移的反谐振微结构单元个数为 m ，其中 $m \geq 1$ 。

与其他所有反谐振微结构单元的方位角具有差异的反谐振微结构单元，易于识别，称之为标记反谐振微结构单元。

反谐振微结构单元的方位角，一定程度上影响了空芯光纤的传输性能，优选 $\leq 45^\circ$ 。当反谐振微结构单元的方位角为 0° 时，多层负曲率层最大可能的正对着纤芯方向，典型如双层负曲率层皆正对纤芯方向，具备理论上较佳的传输性能。因此优选的方案，除标记反谐振微结构单元外，其他所有反谐振微结构单元的方位角为 0° 。

较容易实现地，采用唯一的标记反谐振微结构单元，使其与其他所有反谐振微结构单元的方位角具有差异，而其他所有反谐振微结构单元的方位角相同，则标记反谐振微结构单元更容易被识别出，而其他反谐振微结构单元则通过其与标记反谐振微结构单元的相对位置进行识别。

然而标记反谐振微结构单元的方位角差异，同样影响着光纤的传输性能，过大的方位角差异，一方面导致光纤的传输损耗增加，另一方面由于光纤横截面的不对称性明显，光传播模式可能变形。因此标记反谐振微结构单元的方位角为 θ 且 $1.5^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ ，优选 $1.5^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$ ，保持所述空芯光纤良好的传输性能。

优选地，所述反谐振微结构单元，包括双层相切嵌套的毛细管，内层毛细管的圆心到光纤几何中心再到外层毛细管的圆心为所述反谐振微结构单元的方位角。除了标记反谐振微结构单元以外，其他反谐振微结构单元的毛细管相切处附着于所述包层空芯套管的内壁，方位角为 0° 。

本发明提供的方位角标记的空芯光纤制备方法，包括以下步骤：

步骤1、制备嵌套结构的反谐振微结构单元：通过母管在高温拉丝炉中拉制成所需的毛细管；毛细管可根据设计需求进行二次加工，如切削、打磨、焊接等，形成嵌套结构的反谐振微结构单元。

步骤2、预制棒堆积：将步骤1得到的嵌套结构反谐振微结构单元在套管中进行堆叠组装，其中选取 m 个嵌套结构反谐振微结构单元在堆积时产生方位角的偏移，以此作为空芯光纤方位的标识，从而形成方位角标记的空芯光纤预制棒。

步骤3、将步骤2中的方位角标记的空芯光纤预制棒直接拉制成空芯光纤，或先拉制成中间预制棒，再套入套管中拉成空芯光纤。在拉制过程中通过方位角标记，快速分辨光纤中反谐振微结构单元与预制棒中反谐振微结构单元的对应关系，从而通过控制预制棒中反谐振微结构单元内的气压大小，来调节光纤中反谐振微结构单元的大小。

进一步地，所述反谐振微结构单元、套管以及方位角标记可以是高纯二氧化硅材质、掺杂石英材质（掺有锗、氟、氯、硼、铝等一种或多种元素）、多组分玻璃材质、塑料材质等。

进一步地，所述空芯光纤具有大于等于 $100\mu\text{m}$ 的包层直径。

本发明提供的空芯光纤端面检测方法，包括以下步骤：

- （1）将方位角标记的空芯光纤在预设位置截断；
- （2）对步骤（1）获得的截断后的端面采用透射光或反射光进行成像，获空芯光纤该位置的端面图像；
- （3）对于步骤（2）获得的端面图像，根据其方位角进行反谐振微结

构单元识别，获得各反谐振微结构单元的图像；

(4) 对步骤(3)识别获得的反结构微结构单元的图像进行几何参数提取，判断所述空芯光纤的几何均匀性。

根据其几何均匀性，可调整所述空芯光纤拉丝时各反谐振微结构单元各区域以及套管内通入气体的压强，从而控制光纤拉丝工艺，提高光纤的几何均匀性，使得所述空芯光纤具备更低的传输损耗和熔接损耗。

本发明提供的空芯光纤具备较低的传输损耗，其最低的传输损耗 $\leq 30\text{dB/km}$ ，更优的 $\leq 1\text{dB/km}$ ；并且具备较低的熔接损耗，其空芯光纤自熔接损耗为 $\leq 0.5\text{dB}$ 。

以下为实施例：

为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合实施例，对本发明进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。此外，下面所描述的本发明各个实施方式中所涉及到的技术特征只要彼此之间未构成冲突就可以相互组合。

实施例 1

本实施例提供的空芯光纤结构如图 1 所示，包括包层空芯套管以及排列并附着在所述包层空芯套管内壁的 5 个周向均匀布置的反谐振微结构单元，反谐振微结构单元包围的中空区域为纤芯；所述包层空芯套管为圆形，多个所述反谐振微结构单元外轮廓相同。

所述反谐振微结构单元，包括双层相切嵌套的毛细管，内层毛细管的圆心到光纤几何中心再到外层毛细管的圆心三点连成的夹角为所述反谐振微结构单元的方位角。采用唯一的标记反谐振微结构单元，其方位角为 $\Theta=7.8^\circ$ ，而其他所有反谐振微结构单元的方位角皆为 0° 且毛细管相切处附着于所述包层空芯套管的内壁。其制备方法如下：

先通过母管制备两种尺寸的毛细管，大毛细管外径 10.4mm，壁厚

0.32mm，小毛细管外径 6.2mm，壁厚 0.34mm。将小毛细管套入大毛细管中，然后通过激光加热的方式使其固定，从而形成反谐振微结构单元 1。再准备一根纯二氧化硅的套管，套管尺寸为外径 65mm，内径 55mm。将五个反谐振微结构单元 1 在套管 2 中堆叠成如图 1 所示的空芯光纤预制棒，其中一个反谐振微结构单元 3 的方位角在堆积过程中使其发生偏移， θ 为 7.8° ，其余方位角保持装配误差 $\leq 1.5^\circ$ ，从而得到了一根方位角标记的空芯光纤预制棒。方位角标记的空芯光纤预制棒可在拉丝炉中直接拉制成空芯光纤。但是在拉丝时，由于温度的波动，会造成反谐振微结构单元的尺寸不一样，成像检测如图 2 所示，其反谐振微结构单元的外径最大偏差为 25%。为此需要通过在反谐振微结构单元里通入不同压力的气体，来使得反谐振微结构单元的尺寸均一。如图 3 所示，通过方位角标记，来识别反谐振微结构单元中所需气压的大小，P1、P2、P3、P4、P5 分别为反谐振微结构单元中大毛细管中的气压大小，其值分别为 15.3mbar、15.5mbar、15.5mbar、15.8mbar、15.2mbar。P6、P7、P8、P9、P10 分别为反谐振微结构单元中小毛细管中的气压大小，其值分别为 64.3mbar、64.4mbar、64.9mbar、64.7mbar、64.5mbar。拉制成光纤后，其反谐振微结构单元中大毛细管外径最大偏差为 2.9%，其反谐振微结构单元中小毛细管外径最大偏差为 3.3%，其在 1550nm 处的衰减为 0.58dB/km。此空芯光纤熔接时，可通过方位角标记单元来辨别毛细管方位，从而实现更精准的对接，其最低熔接损耗为 0.36dB。

实施例 2

本实施例提供的空芯光纤结构如图 4 所示，包括包层空芯套管以及排列并附着在所述包层空芯套管内壁的 5 个周向均匀布置的反谐振微结构单元，反谐振微结构单元包围的中空区域为纤芯；所述包层空芯套管为圆形，多个所述反谐振微结构单元外轮廓相同。

所述反谐振微结构单元，包括双层相切嵌套的毛细管，内层毛细管的圆心到光纤几何中心再到外层毛细管的圆心为所述反谐振微结构单元的方

位角。采用相邻的两个标记反谐振微结构单元 4, 5, 其方位角 θ 分别为 11.2° 和 9.4° , 而其他所有反谐振微结构单元的方位角皆为 0° 且毛细管相切处附着于所述包层空芯套管的内壁。其制备方法如下:

先通过母管制备两种尺寸的毛细管, 大毛细管外径 8.2mm, 壁厚 0.62mm, 小毛细管外径 4.15mm, 壁厚 0.44mm。将小毛细管套入大毛细管中, 然后通过激光加热的方式使其固定, 从而形成反谐振微结构单元 1。再准备一根纯二氧化硅的套管, 套管尺寸为外径 55mm, 内径 45mm。将五个反谐振微结构单元 1 在套管 2 中堆叠成如图 4 所示的空芯光纤预制棒, 其中两个反谐振微结构单元 (4 和 5) 的方位角在堆积过程中使其发生偏移, 反谐振微结构单元 4 的方位角 θ 为 11.2° , 反谐振微结构单元 5 的方位角 θ 为 9.4° , 其余方位角保持 $\leq 1.5^\circ$, 从而得到了一根方位角标记的空芯光纤预制棒。方位角标记的空芯光纤预制棒可在拉丝炉中可先拉制成中间预制棒, 中间预制棒的外径 7.5mm, 再套入外径 14.2mm 内径 8.1mm 的套管中拉丝。与上一实施例一样, 通过在反谐振微结构单元里通入不同压力的气体, 来使得反谐振微结构单元的尺寸均一。如图 4 所示, 通过方位角标记单元, 来识别反谐振微结构单元中所需气压的大小, P1、P2、P3、P4、P5 分别为反谐振微结构单元中大毛细管中的气压大小, 其值分别为 29.9mbar、29.8mbar、30.2mbar、30.3mbar、30.4mbar。P6、P7、P8、P9、P10 分别为反谐振微结构单元中小毛细管中的气压大小, 其值分别为 112.5mbar、112.1mbar、113.2mbar、112.7mbar、113.2mbar。拉制成光纤后, 其反谐振微结构单元中大毛细管外径最大偏差为 2.7%, 其反谐振微结构单元中小毛细管外径最大偏差为 2.8%, 其在 1550nm 处的衰减为 0.46dB/km。此空芯光纤熔接时, 可通过方位角标记单元来辨别毛细管方位, 从而实现更精准的对接, 其最低熔接损耗为 0.25dB。

实施例 3

本实施例提供的空芯光纤结构如图 5 所示, 包括包层空芯套管以及排

列并附着在所述包层空芯套管内壁的 5 个周向均匀布置的反谐振微结构单元，反谐振微结构单元包围的中空区域为纤芯；所述包层空芯套管为圆形，多个所述反谐振微结构单元外轮廓相同。

所述反谐振微结构单元，包括双层相切嵌套的毛细管，内层毛细管的圆心到光纤几何中心再到外层毛细管的圆心三点连成的夹角为所述反谐振微结构单元的方位角。采用相邻的三个标记反谐振微结构单元 6, 7, 8, 其方位角 θ 分别为 6.4°、7.2°和 7.8°，而其他所有反谐振微结构单元的方位角皆为 0°且毛细管相切处附着于所述包层空芯套管的内壁。其制备方法如下：

如图 5 所示，先通过母管制备两种尺寸的毛细管，大毛细管外径 6.6mm，壁厚 0.37mm，小毛细管外径 2.8mm，壁厚 0.24mm。将小毛细管套入大毛细管中，然后通过激光加热的方式使其固定，从而形成反谐振微结构单元 1。再准备一根纯二氧化硅的套管，套管尺寸为外径 27mm，内径 21mm。将五个反谐振微结构单元 1 在套管 2 中堆叠成如图 5 所示的空芯光纤预制棒，其中三各反谐振微结构单元（6、7 和 8）的方位角在堆积过程中使其发生偏移，反谐振微结构单元 6 的方位角 θ 为 6.4°，反谐振微结构单元 7 的方位角 θ 为 7.2°，反谐振微结构单元 8 的方位角 θ 为 7.8°，其余方位角保持 $\leq 1.5^\circ$ ，从而得到了一根方位角标记的空芯光纤预制棒。方位角标记的空芯光纤预制棒可在拉丝炉中可先拉制成中间预制棒，中间预制棒的外径 10.5mm，再套入外径 18.2mm 内径 11.0mm 的套管中拉丝。与上一实施例一样，通过在反谐振微结构单元里通入不同压力的气体，来使得反谐振微结构单元的尺寸均一。如图 5 所示，通过方位角标记单元，来识别反谐振微结构单元中所需气压的大小，P1、P2、P3、P4、P5 分别为反谐振微结构单元中大毛细管中的气压大小，其值分别为 46.2mbar、46.9mbar、47.6mbar、46.3mbar、46.5mbar。P6、P7、P8、P9、P10 分别为反谐振微结构单元中小毛细管中的气压大小，其值分别为 156.3mbar、157.4mbar、159.4mbar、158.5mbar、157.9mbar。拉制成光纤后，其反谐振微结构单元中大毛细管外径最大偏差

为 3.1%，其反谐振微结构单元中小毛细管外径最大偏差为 3.4%，其在 1550nm 处的衰减为 0.43dB/km。此空芯光纤熔接时，可通过方位角标记单元来辨别毛细管方位，从而实现更精准的对接，其最低熔接损耗为 0.27dB。

本领域的技术人员容易理解，以上所述仅为本发明的较佳实施例而已，并不用以限制本发明，凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

权 利 要 求 书

1.一种方位角标记的空芯光纤，其特征在于，包括包层空芯套管以及排列并附着在所述包层空芯套管内壁的多个周向均匀布置的反谐振微结构单元，反谐振微结构单元包围的中空区域为纤芯；

所述反谐振微结构单元具有多层负曲率层，以远离纤芯为内侧，以靠近纤芯为外侧，最外侧负曲率层的曲率中心到光纤几何中心再到最内侧负曲率层的曲率中心三点连成的夹角为方位角；

存在至少一个反谐振微结构单元的方位角与其他至少一个反谐振微结构单元的方位角具有差异。

2.如权利要求 1 所述的方位角标记的空芯光纤，其特征在于，方位角之间的差异 $\geq 1.5^{\circ}$ 。

3.如权利要求 1 或 2 所述的方位角标记的空芯光纤，其特征在于，其中标记反谐振微结构单元与其他所有反谐振微结构单元的方位角具有差异。

4.如权利要求 3 所述的方位角标记的空芯光纤，其特征在于，所述其他所有反谐振微结构单元的方位角相同。

5.如权利要求 4 所述的方位角标记的空芯光纤，其特征在于，所述其他所有反谐振微结构单元的方位角为 0° 。

6.如权利要求 3 所述的方位角标记的空芯光纤，其特征在于，所述标记反谐振微结构单元的方位角为 θ ，有 $1.5^{\circ} \leq \theta \leq 45^{\circ}$ 。

7.如权利要求 3 所述的方位角标记的空芯光纤，其特征在于，所述反谐振微结构单元，包括双层相切嵌套的毛细管，内层毛细管的圆心到光纤几何中心再到外层毛细管的圆心三点连成的夹角为所述反谐振微结构单元的方位角。

8.如权利要求 7 所述的方位角标记的空芯光纤，其特征在于，所述其他反谐振微结构单元的毛细管相切处附着于所述包层空芯套管的内壁。

9.如权利要求 1 所述的方位角标记的空芯光纤，其特征在于，所述包层空芯套管为圆形，多个所述反谐振微结构单元外轮廓相同。

10.如权利要求 1 至 9 任意一项所述的空芯光纤端面检测方法，其特征在于，包括以下步骤：

- (1) 将方位角标记的空芯光纤在预设位置截断；
- (2) 对步骤 (1) 获得的截断后的端面采用透射光或反射光进行成像，获空芯光纤该位置的端面图像；
- (3) 对于步骤 (2) 获得的端面图像，根据其方位角进行反谐振微结构单元识别，获得各反谐振微结构单元的图像；
- (4) 对步骤 (3) 识别获得的反结构微结构单元的图像进行几何参数提取，判断所述空芯光纤的几何均匀性。