

说明书

发明名称: 带折射率标记的空芯微结构光纤、其制备及检测方法

技术领域

[0001] 本发明属于光通信领域，更具体地，涉及一种带折射率标记的空芯微结构光纤、其制备及检测方法。

背景技术

[0002] 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，可实现空芯微结构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] 即使空芯微结构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微结构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。

[0004] 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，但是在空芯反谐振光纤制造过程中，其与现有的实心光纤具有本质上的区别。空芯微结构光纤的微观立体结构是其导光的基础，为了维持或者形成特定的微观结构需要在拉丝过程中维持通入气体，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大小不一的情况，如图2所示。这种几何结构上的不均匀将会极大的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心光纤增加光纤尺寸的方法来改善几何不均匀性。

发明内容

- [0005] 针对现有技术的以上缺陷或改进需求，本发明提供了一种带折射率标记的空芯微结构光纤、其制备及检测方法，其目的在于，通过在形成外包层的包层空心套管上用具有可区分的折射率标记单元，形成具有不对称性的端面结构，从而实现旋转对称的多个反谐振微结构单元进行标记，评价其几何均匀性，更好的控制空芯微结构光纤拉丝工艺，由此解决现有的空芯微结构光纤由于端面的几何均匀性不佳导致传输性能与理论设计差异较大的技术问题。
- [0006] 为实现上述目的，按照本发明的一个方面，提供了一种带折射率标记的空芯微结构光纤，包括包层空心套管、以及排列在所述包层空心套管内壁的多个反谐振微结构单元，所述多个反谐振微结构单元旋转对称；
- [0007] 所述包层空心套管设有一个或多个折射率标记单元，所述折射率标记单元与套管的折射率存在折射率差；所述空芯微结构光纤端面结构具有不对称性。
- [0008] 优选地，所述带折射率标记的空芯微结构光纤，其所述包层空心套管外壁轮廓及内壁轮廓为圆形。
- [0009] 优选地，所述带折射率标记的空芯微结构光纤，其所述折射率标记单元与所述包层空心套管的 $\geq 0.05\%$ 。
- [0010] 优选地，所述带折射率标记的空芯微结构光纤，其所述折射率标记单元为高纯二氧化硅材质、掺杂石英材质、多组分玻璃材质、或塑料材质。
- [0011] 优选地，所述带折射率标记的空芯微结构光纤，其单个所述折射率标记单元的面积占光纤包层面积的 $0.002\% \sim 2\%$ ；所述光纤包层包括所述包层空心套管形成的外包层以及所述反谐振微结构单元形成的反谐振包层。
- [0012] 优选地，所述带折射率标记的空芯微结构光纤，其至少一个所述折射率标记单元处于相邻反谐振微结构单元的几何中心与光纤几何中心的连线之间的区域内且靠近所述相邻反谐振微结构单元其中之一。
- [0013] 优选地，所述带折射率标记的空芯微结构光纤，其所述包层空心套管设有多个折射率标记单元，所述多个折射率标记单元具有可识别的差异，所述差异为轮廓形状和/或面积差异。

- [0014] 优选地，所述带折射率标记的空芯微结构光纤，其所述折射率标记单元的外轮廓为圆形、矩形、或正多边形。
- [0015] 按照本发明的另一个方面，提供了所述的带折射率标记的空芯微结构光纤的制作方法，包括以下步骤：在空芯微结构光纤预制棒用于形成包层空心套管的区域内钻孔，将与包层空心套管最大折射率差 $\geq 0.05\%$ 的芯棒嵌入其中，并装配用于形成所述带折射率标记的空芯微结构光纤的预制棒；将所述预制棒进行拉丝获得所述带折射率标记的空芯微结构光纤。
- [0016] 按照本发明的另一个方面，提供了一种空芯微结构的预制棒的拉丝检测方法，包括以下步骤：
- [0017] （1）将本发明提供的带折射率标记的空芯微结构光纤在预设位置截断；
- [0018] （2）对步骤（1）获得的截断后的端面采用透射光进行成像，获空芯微结构光纤该位置的端面图像；
- [0019] （3）对于步骤（2）获得的端面图像，根据其折射率标记单元进行反谐振微结构识别，获得各反谐振微结构单元的图像；
- [0020] （4）对步骤（3）识别获得的反谐振微结构单元的图像进行几何参数提取，判断所述空芯微结构光纤的几何均匀性。
- [0021] 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：
- [0022] 本发明提供的带折射率标记的空芯微结构光纤，其通过在形成外包层的包层空心套管上用具有可区分的折射率标记单元，形成具有不对称性的端面结构，从而实现对旋转对称的多个反谐振微结构单元进行标记，实现几何均匀性的评价和检测，而不破坏光纤端面几何轮廓的均匀，不应影响光纤在拉丝过程中的气流，使得反谐振微结构单元可识别并且尽可能的与理论设计形状相当。
- [0023] 本发明提供了一种带折射率标记的空芯微结构光纤及其制备方法，能快速辨别空芯微结构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大小均匀性，有利于降低空芯微结构光纤的传输损耗；同时，在空芯微结构光纤耦合过程中，便于识别不同反谐振微结构单元，从而降低空芯微结构光纤的耦合损耗。

附图说明

- [0024] 图1是本发明实施例1提供带折射率标记单元的空芯微结构光纤预制棒的结构示意图；
- [0025] 图2是无标记的空芯微结构光纤示意图，即实施例1对比的空芯微结构光纤示意图；
- [0026] 图3是本发明实施例1提供的带孔套管示意图；
- [0027] 图4是本发明实施例1提供的空芯微结构光纤端面结构示意图；
- [0028] 图5是本发明实施例2提供的空芯微结构光纤端面结构示意图；
- [0029] 图6是本发明实施例3提供的空芯微结构光纤端面结构示意图。
- [0030] 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为折射率标记单元，3为包层空心套管，4为套管上的孔。

具体实施方式

- [0031] 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。
- [0032] 本发明提供的带折射率标记的空芯微结构光纤，包括包层空心套管、以及排列在所述包层空心套管内壁的多个反谐振微结构单元，所述多个反谐振微结构单元旋转对称。
- [0033] 所述包层空心套管为玻璃材质；所述包层空心套管外壁轮廓及内壁轮廓为圆形。
- [0034] 所述包层空心套管设有一个或多个折射率标记单元，所述折射率标记单元与套管的折射率存在折射率差，所述折射率标记单元与所述包层空心套管的 $\text{最大折射率差} \geq 0.05\%$ ；所述折射率标记单元为高纯二氧化硅材质、掺杂石英材质、多组分玻璃材质、或塑料材质。所述折射率标记单元的外轮廓为圆形、矩形、或正多边形。

- [0035] 单个所述折射率标记单元的面积占光纤包层面积的0.002%~2%；所述光纤包层包括所述包层空心套管形成的外包层以及所述反谐振微结构单元形成的反谐振包层。
- [0036] 至少一个所述折射率标记单元处于相邻反谐振微结构单元的几何中心与光纤几何中心的连线之间的区域内且靠近所述相邻反谐振微结构单元其中之一。相邻反谐振微结构单元的几何中心与光纤几何中心的连线之间的区域一般呈扇形，包层空心套管在此区域内一般呈扇环形，对于具有旋转对称的反谐振微结构单元的空芯微结构光纤而言，折射率标记单元落在此区域内，使光纤端面呈现不对称性，可以实现具有不对称性的光纤端面图
- [0037] 像的获取。为了提高可识别度，可采用多个折射率标记单元，优选方案，所述多个折射率标记单元具有可识别的差异，所述差异为轮廓形状和/或面积差异。
- [0038] 关于反谐振微结构光纤的几何均匀性检测，目前没有成熟可行的技术方案，本专利构思采用图像法进行端面检测，提取几何特征，来解决几何均匀性检测的问题。图像法检测的难度在于反谐振微结构光纤的端面，理论上具有较为完美的对称性，难以相互区分。若采用形状标记，例如在套管内部增加结构或者对套管进行刻槽加工，都会破坏光纤规整的端面结构，可能会导致传输性能恶化或性能改变。
- [0039] 无论是基于反谐振波导理论还是基于抑制耦合理论来解释空芯反谐振光纤的导光原理，较为完美、与设计更加一致的光纤端面结构都意味着更优良更可控的传输性能。
- [0040] 为了尽可能减小对于空芯微结构光纤传输性能的影响，本发明采用折射率标记单元设置于套管形成的外包层中，在维持空芯微结构光纤端面几何结构不变的前提下，采用图像法进行端面检测时，形成破坏空芯微结构光纤的端面对称性的标记，从而使多个反谐振微结构单元可以被标识、提取几何参数，进行几何均匀性的判断。
- [0041] 本发明提供的带折射率标记的空芯微结构光纤的制作方法，主要步骤为：在空芯微结构光纤预制棒用于形成包层空心套管的区域内钻孔，将与包层空心套管最大折射率差 $\geq 0.05\%$ 的芯棒嵌入其中，并装配用于形成所述带折射率标记的

空芯微结构光纤的预制棒；将所述预制棒进行拉丝获得所述带折射率标记的空芯微结构光纤。芯棒可以是高纯二氧化硅材质、掺杂石英材质、多组分玻璃材质、或塑料材质，也可以具有不均匀的折射率剖面结构，例如光波导结构，这种芯棒可采用管内沉积法制备。

[0042] 本发明提供的空芯微结构的预制棒的拉丝检测方法，其特征在于，包括以下步骤：

[0043] (1) 将本发明提供的带折射率标记的空芯微结构光纤在预设位置截断；

[0044] (2) 对步骤(1)获得的截断后的端面采用透射光进行成像，获得空芯微结构光纤该位置的端面图像；由于折射率差异界面在透射光作用下出现明显的轮廓，因此折射率标记在在端面图像上具备可识别度。

[0045] (3) 对于步骤(2)获得的端面图像，根据其折射率标记单元进行反谐振微结构识别，获得各反谐振微结构单元的图像；

[0046] (4) 对步骤(3)识别获得的反谐振微结构单元的图像进行几何参数提取，判断所述空芯微结构光纤的几何均匀性。

[0047] 以下为实施例：

[0048] 典型的空芯反微结构光纤的端面结构如图1所示，包层空心套管形成外包层，其内壁排列有多个反谐振微结构单元，多个反谐振微结构单元旋转对称，形成反谐振包层。反谐振微结构单元的数量 n ，一般有 $n \geq 3$ ，实施例中 n 取5。反谐振微结构单元由单层或多层负曲率结构的组件构成，单层的曲率结构的组件，示例如图1，多层负曲率结构的组件示例如图4至6。

[0049] 所述包层空心套管设有一个或多个折射率标记单元，所述折射率标记单元与套管的折射率存在折射率差，所述折射率标记单元与所述包层空心套管的折射率差 $\geq 0.05\%$ ；所述折射率标记单元为高纯二氧化硅材质、掺杂石英材质、多组分玻璃材质、或塑料材质，本实施例采用掺杂石英玻璃材质。

[0050] 上述带折射率标记的空芯微结构光纤，制备步骤如下：

[0051] 步骤1、制备反谐振微结构单元：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。

- [0052] 步骤2、制备带孔套管：在套管上通过钻孔方式，制备出带有一个或多个孔的套管。
- [0053] 步骤3、制备标记芯棒：采用预制棒掺杂工艺，制备出掺杂芯棒，其折射率与套管的折射率存在折射率差，最大折射率差 $\geq 0.05\%$ 。而后将掺杂芯棒拉制成毛细棒，即为所需的标记芯棒。
- [0054] 步骤4、预制棒堆积：将步骤3得到的标记芯棒套入步骤3制备的带孔套管的孔中，并将步骤1得到的反谐振微结构单元在套管中进行堆叠组装，从而形成带折射率标记的空芯微结构光纤预制棒。
- [0055] 步骤5、将步骤4中的带折射率标记的空芯微结构光纤预制棒直接拉制成空芯微结构光纤，或先拉制成中间预制棒，再套入套管中拉成空芯微结构光纤。在拉制过程中通过标记芯棒，可以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。
- [0056] 进一步地，所述反谐振微结构单元、套管以及标记芯棒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，只需套管与标记芯棒之间存在折射率差即可。本专利实施例采用掺杂适应材质。
- [0057] 进一步地，所述空芯微结构光纤具有大于等于100 μm 的包层直径。
- [0058] 进一步地，采用本发明方法制备的空芯微结构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 $\leq 1\text{dB/km}$ 。
- [0059] 进一步地，采用本发明方法制备的空芯微结构光纤具备较低的熔接损耗，其空芯微结构光纤自熔接损耗为 $\leq 0.5\text{dB}$ 。

实施例1

- [0060] 本实施例采用具有单层负曲率结构的组件作为反谐振微结构单元，如图1所示，制作方法如下：先通过母管制备毛细管，用于形成反谐振微结构单元1，母管经过拉丝炉拉制成毛细管，其外径为5.4mm，壁厚为0.32mm。再在纯二氧化硅套管上，通过钻孔工艺，钻出一个与套管轴线方向平行的孔，如图3所示。用于形成包层空心套管3的玻璃管尺寸为外径30mm，内径26mm，钻出的孔直径为

3.0mm，用于设置折射率标记单元，孔的位置处于两反谐振微结构单元之间，靠近其中之一。通过等离子体气相沉积工艺制造出折射率差为0.20%的芯棒，芯棒在拉丝塔上拉成外径2.8mm的毛细棒，用于形成折射率标记单元。将一根毛细棒插入套管上钻出的孔内，然后将5根毛细管在套管中堆叠成如图1所示的带折射率标记的空芯微结构光纤预制棒。带折射率标记的空芯微结构光纤预制棒可在拉丝炉中直接拉制成空芯微结构光纤。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，如图2所示，其反谐振微结构单元的外径最大偏差为33%。对光纤端面进行透射成像可观察端面图像的差异变化，标记反谐振微结构单元，并据此调整拉丝工艺，从而保证光纤的几何均匀性。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4所示，通过折射率标记单元，来识别反谐振微结构单元中所需气压的大小，P0为常压，P1、P2、P3、P4、P5分别为反谐振微结构单元中的气压大小，其值分别为33.6mbar、33.7mbar、34.1mbar、34.0mbar、33.9mbar。拉制成光纤后，其反谐振微结构单元的外径最大偏差为3.9%，其在1550nm处的衰减为4.8dB/km。此空芯微结构光纤熔接时，可通过折射率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0.44dB。

实施例2

[0061] 本实施例采用多层的负曲率结构的组件作为反谐振微结构单元，嵌套相切的毛细玻璃管用于形成反谐振微结构单元，相切处与用于形成包层空心套管3的玻璃管内壁接触，如图5所示，制作方法如下：先通过母管制备两种尺寸的毛细管，大毛细管外径13.6mm，壁厚0.49mm，小毛细管外径6.8mm，壁厚0.54mm。再在纯二氧化硅套管上，通过钻孔工艺，钻出两个与套管轴线方向平行的孔，用于设置折射率标记单元，两孔的相对位置使其与结构中心连线的夹角小于 72° ，由于反谐振微结构单元周向均匀布设，这样设置的折射率标记无需考虑反谐振微结构单元的相对位置，必能破坏端面图像的旋转对称性。套管尺寸为外径55mm，内径43mm，钻出的孔直径为2.5mm。通过等离子体气相沉积工艺制造出折射率差为0.60%的芯棒，芯棒在拉丝塔上拉成外径2.3mm的毛细棒。将两根毛细棒插入套管上钻出的孔内，然后将5个反谐振微结构单元在套管中

堆叠成如图5所示的带折射率标记的空芯微结构光纤预制棒。带折射率标记的空芯微结构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6.9mm，再套入外径16mm内径7.5mm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。对光纤端面进行透射成像可观察端面图像的差异变化，标记反谐振微结构单元，并据此调整拉丝工艺，从而保证光纤的几何均匀性。P0为常压，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44.4mbar、44.7mbar、44.5mbar、44.6mbar、44.8mbar。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113.3mbar、113.2mbar、113.7mbar、113.7mbar、113.9mbar。拉制而成的空芯微结构光纤，其反谐振微结构单元中大毛细管外径最大偏差为3.9%，其反谐振微结构单元中小毛细管外径最大偏差为4.0%，其在1550nm处的衰减为0.32dB/km。此空芯微结构光纤熔接时，可通过折射率标记单元来辨别毛细管方位，通过熔接机旋转功能实现更精准的对接，其最低熔接损耗为0.32dB。

实施例3

[0062] 本实施例采用多层的负曲率结构的组件作为反谐振微结构单元，嵌套相切的毛细玻璃管用于形成反谐振微结构单元，相切处与用于形成包层空心套管3的玻璃管内壁接触，如图6所示，先通过母管制备两种尺寸的毛细管，大毛细管外径10.35mm，壁厚0.32mm，小毛细管外径6.8mm，壁厚0.44mm。再在纯二氧化硅套管上，通过钻孔工艺，钻出一个与套管轴线方向平行的方形孔。套管尺寸为外径80mm，内径40mm，钻出的孔的边长为3.0mm。通过等离子体气相沉积工艺制造出折射率差为0.73%的芯棒，先将芯棒的外形打磨成方形，然后将方形芯棒在拉丝塔上拉成边长为2.8mm的毛细棒。将一根方形毛细棒插入套管上钻出的孔内，然后将5个反谐振微结构单元在套管中堆叠成如图6所示的带折射率标记的空芯微结构光纤预制棒。带折射率标记的空芯微结构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5.5mm，再套入外径10mm内径6.0mm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。对光纤端面

进行透射成像可观察端面图像的差异变化，标记反谐振微结构单元，并据此调整拉丝工艺，从而保证光纤的几何均匀性。P0为常压，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57.2mbar、57.5mbar、57.7mbar、57.5mbar、57.2mbar。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148.5mbar、148.2mbar、148.9mbar、149.4mbar、149.6mbar。拉制而成的空芯微结构光纤，其反谐振微结构单元中大毛细管外径最大偏差为2.5%，其反谐振微结构单元中小毛细管外径最大偏差为2.6%，其在1550nm处的衰减为0.33dB/km。此空芯微结构光纤熔接时，可通过折射率标记单元来辨别毛细管方位，通过熔接机旋转功能实现更精准的对接，其最低熔接损耗为0.37dB。

[0063] 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

- [权利要求 1] 一种带折射率标记的空芯微结构光纤，其特征在于，包括包层空心套管、以及排列在所述包层空心套管内壁的多个反谐振微结构单元，所述多个反谐振微结构单元旋转对称；
- 所述包层空心套管设有一个或多个折射率标记单元，所述折射率标记单元与套管的折射率存在折射率差；所述空芯微结构光纤端面结构具有不对称性。
- [权利要求 2] 如权利要求1所述的带折射率标记的空芯微结构光纤，其特征在于，所述包层空心套管外壁轮廓及内壁轮廓为圆形。
- [权利要求 3] 如权利要求1所述的带折射率标记的空芯微结构光纤，其特征在于，所述折射率标记单元与所述包层空心套管的最大折射率差 $\geq 0.05\%$ 。
- [权利要求 4] 如权利要求3所述的带折射率标记的空芯微结构光纤，其特征在于，所述折射率标记单元为高纯二氧化硅材质、掺杂石英材质、多组分玻璃材质、或塑料材质。
- [权利要求 5] 如权利要求1所述的带折射率标记的空芯微结构光纤，其特征在于，单个所述折射率标记单元的面积占光纤包层面积的 $0.002\% \sim 2\%$ ；所述光纤包层包括所述包层空心套管形成的外包层以及所述反谐振微结构单元形成的反谐振包层。
- [权利要求 6] 如权利要求1所述的带折射率标记的空芯微结构光纤，其特征在于，至少一个所述折射率标记单元处于相邻反谐振微结构单元的几何中心与光纤几何中心的连线之间的区域内且靠近所述相邻反谐振微结构单元其中之一。
- [权利要求 7] 如权利要求1所述的带折射率标记的空芯微结构光纤，其特征在于，所述包层空心套管设有多个折射率标记单元，所述多个折射率标记单元具有可识别的差异，所述差异为轮廓形状和/或面积差异。

- [权利要求 8] 如权利要求1所述的带折射率标记的空芯微结构光纤，其特征在于，所述折射率标记单元的外轮廓为圆形、矩形、或正多边形。
- [权利要求 9] 如权利要求1至8任意一项所述的带折射率标记的空芯微结构光纤的制作方法，其特征在于，包括以下步骤：在空芯微结构光纤预制棒用于形成包层空心套管的区域内钻孔，将与包层空心套管最大折射率差 $\geq 0.05\%$ 的芯棒嵌入其中，并装配用于形成所述带折射率标记的空芯微结构光纤的预制棒；将所述预制棒进行拉丝获得所述带折射率标记的空芯微结构光纤。
- [权利要求 10] 空芯微结构的预制棒的拉丝检测方法，其特征在于，包括以下步骤：
- (1) 将权利要求1至8任意一项所述带折射率标记的空芯微结构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进行成像，获空芯微结构光纤该位置的端面图像；
 - (3) 对于步骤(2)获得的端面图像，根据其折射率标记单元进行反谐振微结构识别，获得各反谐振微结构单元的图像；
 - (4) 对步骤(3)识别获得的反谐振微结构单元的图像进行几何参数提取，判断所述空芯微结构光纤的几何均匀性。