

# 负曲率空芯光纤限制损耗的影响因素

陈翔, 胡雄伟, 李进延\*

华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074

**摘要** 基于反谐振反射光波导模型和模式耦合模型分析了负曲率空芯光纤的导光机理, 利用有限元法模拟计算了圆形管环负曲率空芯光纤的结构参数对基模限制损耗的影响。通过分析嵌套环优化基模限制损耗机理, 发现嵌套环之间的空气层对反谐振反射也有贡献, 且嵌套环在不同管环数量下对限制损耗优化的影响不同。设计了一种纤芯直径不超过  $20\ \mu\text{m}$  的低限制损耗负曲率空芯光纤, 其在  $1550\ \text{nm}$  处的限制损耗小于  $1\ \text{dB/km}$ , 可保证单模传输。

**关键词** 光纤光学; 空芯光纤; 限制损耗; 有限元法; 负曲率; 嵌套环

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.050602

## Influence Factors of Confinement Loss of Negative Curvature Hollow Core Fiber

Chen Xiang, Hu Xiongwei, Li Jinyan\*

Wuhan National Research Center for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

**Abstract** The light guiding mechanism of negative curvature hollow core fiber is analyzed based on anti-resonant reflected optical waveguide model and mode coupling model. Influence of structural parameters of circular tube negative curvature hollow core fiber on confinement loss of fundamental mode is simulated based on finite element method. Reduction reason of confinement loss of fundamental mode with nested tubes is considered, which is found that air layer between nested tubes has contribution to anti-resonant reflection, and nested tube has different potentials for confinement loss optimization under negative curvature fiber structure with different number of tubes. A negative curvature hollow core fiber with core diameter less than  $20\ \mu\text{m}$  is proposed with confinement loss less than  $1\ \text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$  at  $1550\ \text{nm}$ , and single mode transmission can be maintained.

**Key words** fiber optics; hollow core fiber; confinement loss; finite element method; negative curvature; nested tube

**OCIS codes** 060.2310; 060.2400; 060.4005; 230.7370

## 1 引言

空芯光纤一般由特殊的包层结构将光限制在空气纤芯中, 如光子带隙光纤、Kagome 光纤和 Bragg 包层光纤等, 其具备极小的非线性系数、较低的模式色散、较高的损伤阈值、较宽的传输波段及近乎光速的传输速度, 有望突破传统通信光纤的传输瓶颈。负曲率空芯光纤是近年发现的一种新型空芯光纤<sup>[1-5]</sup>, 其包层结构简单, 光波导性能特殊, 已引起广

泛研究。

在光子带隙空芯光纤研究中, 不同的纤芯边界形状对限制损耗影响非常大, 内凹圆纤芯结构空芯光纤限制损耗较圆形纤芯结构或十二边形纤芯结构的光子带隙光纤更低<sup>[6]</sup>, 原因为当纤芯边界为内凹圆时, 光能量与玻璃部分的空间重叠部分减少, 且内凹圆弯曲度增加, 基模在玻璃部分的功率降低。研究发现, 包层外围结构对内凹圆纤芯结构纤芯导光的贡献量并不大, 将包层外围结构简化<sup>[7-8]</sup>至只剩余

收稿日期: 2018-08-04; 修回日期: 2018-09-04; 录用日期: 2018-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(61735007)

\* E-mail: ljy@mail.hust.edu.cn

一层包层结构时,纤芯仍能导光,导光机理为反谐振原理。进一步对剩余的一层包层结构进行优化,将包层中各石英环单元分开,发现限制损耗进一步降低<sup>[9-14]</sup>,这是因为去掉纤芯附近石英连接的共振点,可减少纤芯模式耦合到石英包层模。

2012年,Yu等<sup>[8]</sup>制备了包层简化的接触式负曲率空芯光纤,在3.05 μm波长处损耗最低达到34 dB/km;2013年,Kolyadin等<sup>[13]</sup>制备了接触式负曲率空芯光纤,可传输波长范围为2.5~7.9 μm,在3.39 μm波长处最低损耗达到50 dB/km;2017年,Debord等<sup>[15]</sup>报道了750 nm波长处最低损耗为7.7 dB/km的非接触石英环结构负曲率空芯光纤;2018年,Nawazuddin等<sup>[16]</sup>报道了在1550 nm波长处最低损耗为10.5 dB/km的负曲率空芯光纤。目前,已报道的负曲率空芯光纤损耗仍处于10 dB/km量级,离其理论损耗极限及商业应用还有一定差距,因此有必要继续进行负曲率空芯光纤损耗影响因素研究。

本文分析了负曲率空芯光纤的导光机理,利用商业有限元工具对负曲率空芯光纤的限制损耗进行模拟计算,研究了负曲率空芯光纤各结构参数对基模限制损耗的影响,为下一步低损耗负曲率空芯光纤的制备与应用提供理论指导。

## 2 负曲率空芯光纤的导光机理

虽然负曲率空芯光纤的几何结构不复杂,但其导光机理却并不简单<sup>[17-19]</sup>,目前并没有统一的负曲率空芯光纤定量分析模型,常用于解释负曲率空芯光纤导光机理的有反谐振反射光波导模型及模式耦合模型。

### 2.1 反谐振反射光波导模型

2002年,Litchinitser等<sup>[20]</sup>提出将平板波导的反谐振反射波导(ARROW)原理应用于空芯光纤中,谐振与反谐振如图1所示, $n_1$ 为玻璃折射率, $n_0$ 为空气折射率,玻璃壁厚为 $t$ 。

当满足谐振条件时,即

$$\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_0 = 2m\pi, \quad (1)$$

式中 $m$ 为共振阶数(整数), $\Phi_0$ 为光经过玻璃壁后的相位, $\Phi_1$ 为光在玻璃中界面反射并额外往返一次后的相位,谐振壁厚为

$$t_R = m\lambda [2(n_1^2 - n_0^2)^{1/2}]^{-1}, \quad (2)$$

式中 $\lambda$ 为波长。

光在石英中发生谐振,透过石英泄漏到外包层中。当满足反谐振条件时,即

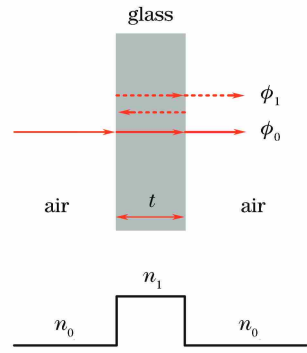


图1 谐振与反谐振示意图

Fig. 1 Schematic of resonance and anti-resonance

$$\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_0 = (2m - 1)\pi, \quad (3)$$

反谐振壁厚为

$$t_{AR} = (m - 0.5)\lambda [2(n_1^2 - n_0^2)^{1/2}]^{-1}, \quad (4)$$

而当光在石英中达到最大反谐振时,光会从石英中反射回纤芯进行传输。

### 2.2 模式耦合模型

在模式耦合模型中,某一包层模式并非单一存在,而是一组模式的合成,包括高折射率区域的介电模式和低折射率空气区域中的泄漏模式,纤芯模式的性质可以用纤芯模式与包层模式之间的耦合解释<sup>[21]</sup>。模式耦合发生在两个相似的模式(模式有效折射率相等或相近)之间,在空芯光纤中,介电模式折射率一般较高,不参与模式耦合,而包层中空气区域折射率与纤芯空气折射率相等,包层中空气区域的泄漏模式与纤芯模式有效折射率在一定条件下可能相近或相等,当两者相近或相等时,才可能发生模式耦合。

负曲率空芯光纤中,纤芯基模与包层管模的电场模 $E$ 如图2所示,单独观察每一个包层管,其具备反谐振条件,能够将模式束在管中心,其管模的有效折射率与单一包层管形成的空芯光纤基模有效折射率一致。

在模式耦合点,基模与管模发生耦合,限制损耗最大,通过抑制基模与管模的模式耦合,可实现基模限制损耗最小,抑制模式耦合需要两个条件:1)两个模式之间具有一定程度的空间不重叠;2)两个模式之间的有效折射率不匹配<sup>[6,22]</sup>。在负曲率空芯光纤中,可以通过结构设计避开这两个条件,从而抑制模式耦合。

两种模型中,反谐振反射光波导模型更接近光传播原理性质,模式耦合模型则更接近于对现象的描述,因此,结合两种模型可以理解负曲率空芯光纤的导光机理。

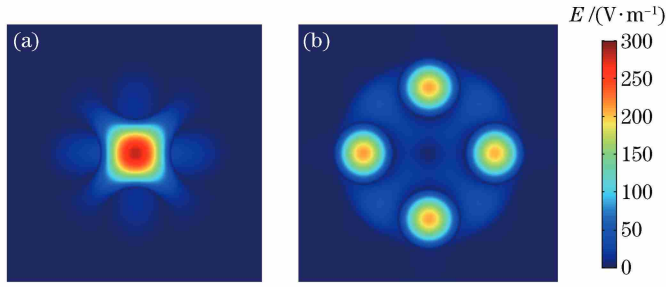


图 2 负曲率空芯光纤中模式的电场模。(a)基模；(b)管模

Fig. 2 Electric field mode in negative curvature hollow core fiber. (a) Fundamental mode; (b) tube mode

### 3 单层管环负曲率空芯光纤的基模限制损耗研究

本文仅讨论圆形管环结构,以最基本的单层 4 管环负曲率空芯光纤为例,纤芯直径为  $d_{core}$ ,管环内径为  $d_{tube}$ ,管环壁厚为  $t$ ,其结构如图 3 所示。

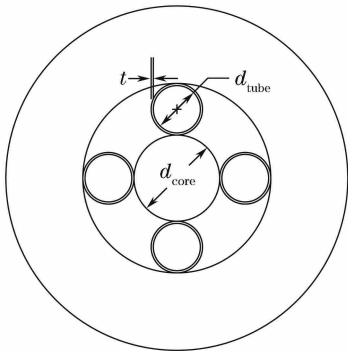


图 3 单层 4 管环负曲率空芯光纤的结构  
Fig. 3 Structure of single layer four tubes negative curvature hollow core fiber

根据反谐振反射模型和抑制模式耦合原理可以推断,影响负曲率空芯光纤限制损耗的主要因素有管环壁厚  $t$  (控制反谐振的主要影响因素) 和管环直径  $d_{tube}$  与纤芯直径  $d_{core}$  (控制模式耦合的主要影响因素),使用商业有限元工具 COMSOL Multiphysics 模拟计算各结构参数对单层管环空芯负曲率光纤基模限制损耗的影响,工作波长选择为  $1.55 \mu\text{m}$ 。

#### 3.1 管环壁厚对基模限制损耗的影响

在单层 4 管环负曲率空芯光纤中,设置纤芯直径为  $20 \mu\text{m}$ ,管环内径为  $12 \mu\text{m}$ ,计算管环壁厚为  $0.2 \sim 2 \mu\text{m}$  时纤芯基模的有效折射率,结果如图 4 所示,当管环壁厚分别为  $0.2 \sim 0.7 \mu\text{m}$ ,  $0.95 \sim 1.45 \mu\text{m}$ ,  $1.7 \sim 2 \mu\text{m}$  时,纤芯基模有效折射率连续;而当管环壁厚在  $0.8 \mu\text{m}$ ,  $1.5 \mu\text{m}$  附近时,接近理想谐振条件,无法形成反谐振,基模模式有效折射率出

现不连续现象,基模无法完全束缚在纤芯中。

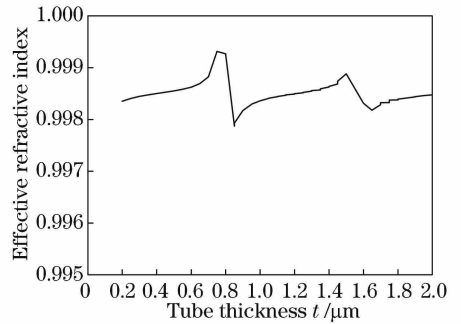


图 4 不同管环壁厚下基模的有效折射率  
Fig. 4 Effective refractive index of fundamental mode at different tube thicknesses

分析光纤基模在不同的管环壁厚时纤芯功率占比,结果如图 5 所示。当管环壁厚在  $0.8 \mu\text{m}$ 、 $1.5 \mu\text{m}$  附近时,基模在纤芯中的功率明显降低,同时,该模式在包层管环中的功率升高,这证明反谐振条件破坏,基模无法完全束缚在纤芯中;当管环壁厚继续增大,过渡到了下一阶反谐振区时,基模功率重新回到纤芯中。

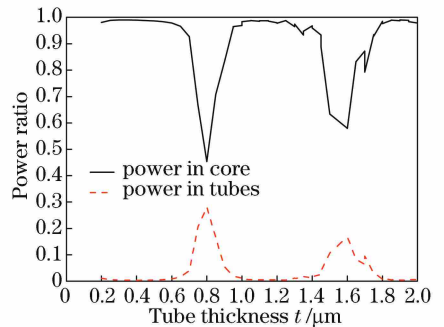


图 5 不同管环壁厚下基模的功率占比  
Fig. 5 Power ratio of fundamental mode at different tube thicknesses

模式有效折射率一般为虚数,其虚部  $n_{im}$  用于表征该模式的限制损耗  $L_c$  [23], 则有

$$L_c = 40\pi n_{im} / [\ln 10 \cdot \lambda], \quad (5)$$

式中  $L_c$  的单位为 dB/m,  $\lambda$  的单位为 m, 计算不同管环壁厚下基模的限制损耗, 结果如图 6 所示。

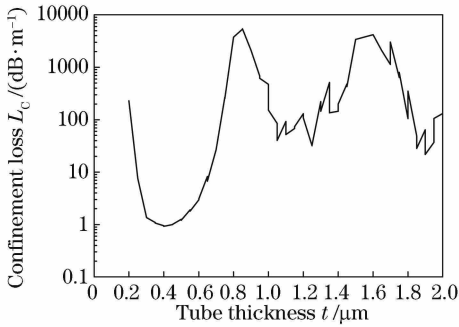


图 6 不同管环壁厚下基模的限制损耗

Fig. 6 Confinement loss of fundamental mode at different tube thicknesses

从图 6 可以看出, 在纤芯功率占比比较高时, 基模限制损耗较低, 限制损耗最低处一般为反谐振区中心, 第一反谐振区中心在管环壁厚为  $0.4 \mu\text{m}$  处, 第二反谐振区中心在管环壁厚为  $1.25 \mu\text{m}$  处。对应管环壁厚的不同取值, 其限制损耗的差别超过 3 个数量级, 因此, 在负曲率空芯光纤的设计与制备过程中必须严格控制管环壁厚。值得一提的是, 随着共振阶数  $m$  的增大, 即由第一反谐振区到高阶反谐振区, 纤芯功率占比越来越低, 基模损耗越来越大, 在设计负曲率空芯光纤时, 合理设计管环壁厚, 可以使传输波长位于第一反谐振区中心。

### 3.2 管环直径与纤芯直径对基模限制损耗的影响

进一步研究管环直径与纤芯直径对基模和管模耦合抑制的影响, 首先, 单独研究管环直径对限制损耗的影响, 计算单层 4 管环负曲率空芯光纤中不同管环直径下基模和管模的模式有效折射率, 结果如图 7 所示, 纤芯直径为  $20 \mu\text{m}$ , 管环壁厚为  $0.5 \mu\text{m}$ 。

当管环直径在  $23 \mu\text{m}$  附近时, 管模与基模模式有效折射率相等, 两个模式之间发生强烈耦合。从图 8 中观察基模在纤芯区域和管环区域的功率占比分布, 管环直径在  $23 \mu\text{m}$  附近时, 基模功率从纤芯区域大幅泄漏到管环区域, 基模与管模发生强烈的模式耦合。

当管环直径在  $18 \mu\text{m}$  和  $29.2 \mu\text{m}$  处时, 限制损耗达到最低, 抑制模式耦合达到最优, 如图 9 所示。

保持纤芯直径  $20 \mu\text{m}$  不变, 管环壁厚  $0.5 \mu\text{m}$ , 分别计算在单层 6 管环和单层 8 管环情况下, 不同管环直径下负曲率空芯光纤的基模限制损耗, 结果如图 10 所示。

从图 10 可以看出, 在单层 6 管环和单层 8 管环

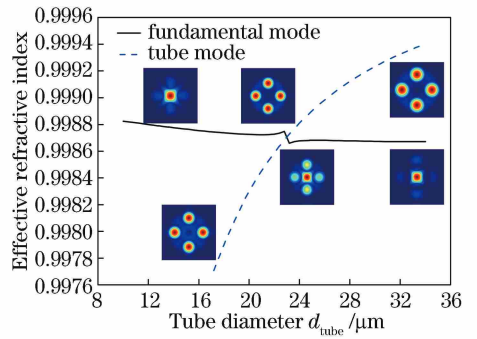


图 7 单层 4 管环负曲率空芯光纤中基模和管模的有效折射率

Fig. 7 Effective refractive index of fundamental mode and tube mode in single layer four tubes negative curvature hollow core fiber

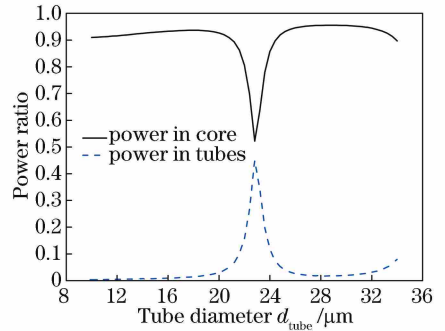


图 8 单层 4 管环负曲率空芯光纤中基模的功率占比

Fig. 8 Power ratio of fundamental mode in single layer four tubes negative curvature hollow core fiber

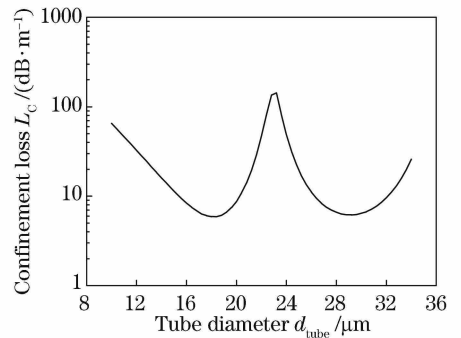


图 9 单层 4 管环负曲率空芯光纤中基模的限制损耗  
Fig. 9 Confinement loss of fundamental mode in single layer four tubes negative curvature hollow core fiber

负曲率空芯光纤中并未发现如单层 4 管环中的强烈耦合点, 这是在管环数量  $\geq 6$  的单层环结构中, 管环直径一直小于纤芯直径, 因此, 管模有效折射率始终小于纤芯基模有效折射率, 两者无法发生强烈耦合。

另外, 不同管环数量下, 抑制模式耦合的最优点也不同, 由图 9 可知, 在单层 4 管环负曲率空芯光纤中, 管环直径在  $18 \mu\text{m}$  附近时, 基模限制损耗达到

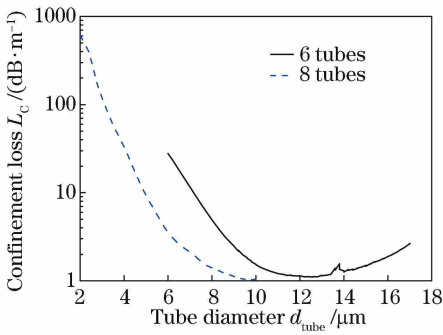


图 10 纤芯直径为 20 μm 时不同管环直径下基模的限制损耗  
Fig. 10 Confinement loss of fundamental mode at different tube diameters with 20 μm core diameter

最小,此时抑制模式耦合达到最优;而在单层 6 管环负曲率空芯光纤中,管环直径在 12.4 μm 附近时,基模限制损耗达到最小,抑制模式耦合达到最优;在单层 8 管环负曲率空芯光纤中,由于结构限制,改变管环直径无法使得抑制模式耦合达到最优,在可达到的管环直径范围(2~10 μm)内,基模限制损耗随管环直径的增大而减小。

纤芯直径变化时,可以研究不同管环直径对限制损耗的影响。分别计算纤芯直径为 10, 20, 40 μm 时,单层 4 管环、单层 6 管环和单层 8 管环结构下,不同管环直径下的基模限制损耗,结果如图 11 所示,为了方便观察,定义横坐标  $R_{T/C} = d_{tube}/d_{core}$ , 对于单层 4 管环、6 管环和 8 管环结构,  $R_{T/C}$  分别为 0.5~1.7, 0.3~0.85 和 0.1~0.5。

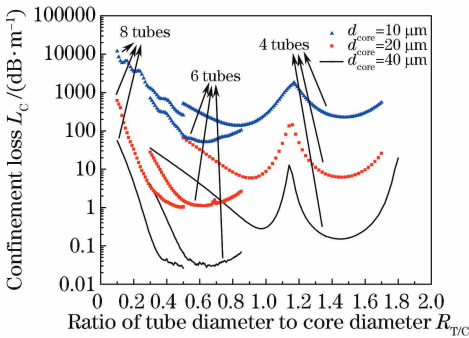


图 11 不同  $R_{T/C}$  下基模的限制损耗  
Fig. 11 Confinement loss of fundamental mode at different  $R_{T/C}$

从图 11 可以看出,对于相同管环数量的同类型光纤结构,随着纤芯直径的变化,基模限制损耗趋势基本一致,其特征点(如模式耦合最强点与模式耦合抑制最优点)的位置也基本重合,这说明,决定模式耦合的不是单纯的管环直径绝对值,而是管环直径与纤芯直径之比  $R_{T/C}$ 。因此,在负曲率空芯光纤的设计中,可以通过保持管环直径与纤芯直径之比不

变,灵活调节光纤整体结构以获得不同的性能。

在不同管环数量的结构中模式耦合的情况不同,在单层 4 管环结构中,  $R_{T/C}$  在 1.15 附近时,基模与管模发生强烈耦合,  $R_{T/C}$  在 0.9 附近时,抑制基模与管模的模式耦合达到最优;在单层 6 管环结构中,由于结构限制,无法发生强烈耦合,  $R_{T/C}$  在 0.62 附近时,抑制基模与管模的模式耦合达到最优;而在单层 8 管环结构中,不仅无法发生强烈耦合,同时,抑制基模与管模的模式耦合也无法达到最优,因此,在结构可达到的  $R_{T/C}$  范围内,抑制基模与管模的模式耦合逐渐靠近最优值,限制损耗逐渐降低。

随着纤芯直径增大,基模限制损耗急剧下降,纤芯直径为 10~40 μm,每增大一倍,限制损耗降低 1.5 个数量级。在实际情况中,某些特定应用(例如光纤激光器等)需要光纤保持单模传输,而增大纤芯直径会导致高阶模更难以滤除,影响光纤模式纯粹度,因此,在负曲率空芯光纤设计中,一般不选择通过无限增大纤芯直径获得较低的限制损耗,在后续的研究中,假定对纤芯直径要求不超过 20 μm。

#### 4 嵌套环对基模限制损耗的优化

上节的讨论均基于单层管环结构,能否使用多层管环进一步降低负曲率光纤的限制损耗值得研究,就像光子带隙光纤中增加包层层数以减少限制损耗一样。简单增加管环层数,势必增加不必要的节点,增加基模耦合到节点形成的块状模,进而增加基模限制损耗。既要产生不产生多余节点,又要增加管环层数,其中一个办法就是:在相同方位角的现有石英环内添加另一个嵌套环<sup>[24]</sup>,这种多层反谐振光纤能保持无节点结构,但包括更多与外层相同厚度的嵌套环。

增加嵌套环后,限制损耗的降低也可用模式耦合模型解释,模式耦合发生于相似的模式之间,增加嵌套环后,两层管环之间形成形状与纤芯结构差异较大的月牙区域,该区域传输模式的有效折射率与基模也相差较大,一般不会发生模式耦合,所以增加嵌套环后,模式耦合发生在纤芯区域的模式与嵌套环内层圆形区域的传输模式之间。对于单层管环结构,模式耦合发生只需穿越 1 层玻璃壁;而对于  $n$  层嵌套环结构,模式耦合发生需穿越  $2n - 1$  层玻璃壁和  $n - 1$  层空气层,每个介质层均能实现反谐振反射。另外,增加了嵌套层后,纤芯区域离嵌套环内层圆形区域的距离变大,两个区域传输模式的空间不重叠度提高,因此,模式耦合时,从纤芯区域泄漏到

嵌套环内层圆形区域的功率大幅减少,功率更集中到纤芯中,因此限制损耗降低。

为了观察增加嵌套环前、后负曲率空芯光纤中模式耦合的变化情况,选择单层4管环负曲率空芯光纤为初始结构,增加一层管环后变为两层嵌套4管环负曲率空芯光纤,增加两层管环后变为三层嵌套4管环负曲率空芯光纤,如图12所示。以这两种结构为例,对比分析嵌套环对限制损耗的优化,纤芯直径均为 $20\ \mu\text{m}$ ,管环壁厚均为 $0.5\ \mu\text{m}$ 。

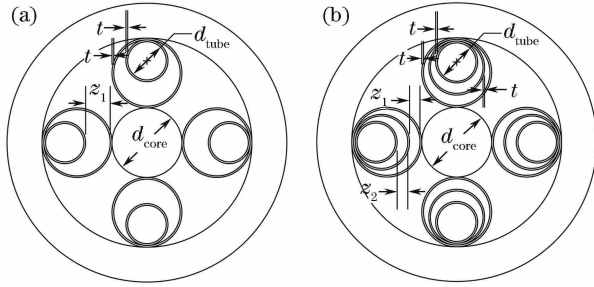


图12 负曲率空芯光纤。(a)两层嵌套4管环;  
(b)三层嵌套4管环

Fig. 12 Negative curvature hollow core fibers. (a) Two layers four tubes with nested tubes; (b) three layers four tubes with nested tubes

#### 4.1 两层嵌套环结构

在不同管环直径下,单层4管环负曲率空芯光纤与两层嵌套4管环负曲率空芯光纤的基模限制损耗如图13所示。管环直径在 $23\ \mu\text{m}$ 附近时,单层4管环结构中,基模与管模发生模式耦合,增加嵌套环后,基模与嵌套环内基模与管模管环直径为 $23\ \mu\text{m}$ 附近时同样发生模式耦合。

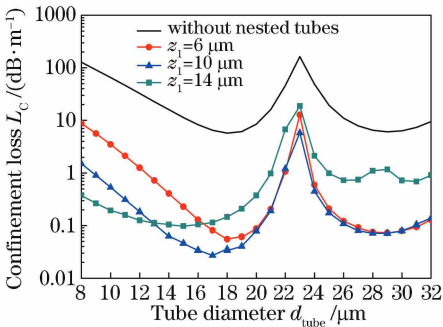


图13 两层嵌套4管环负曲率空芯光纤基模的限制损耗  
Fig. 13 Confinement loss of fundamental mode in two layers four tubes negative curvature hollow core fiber with nested tubes

有无嵌套环并不影响模式耦合的位置点,嵌套环影响模式耦合的强度,在不同管环直径下,对比单层4管环和两层嵌套4管环结构的基模在光纤截面

上不同区域的功率占比,结果如图14所示, $P_C$ 为基模在纤芯区域的功率分数, $P_T$ 为圆形套管区域中的功率分数, $P_Z$ 为嵌套环之间空气区域的功率分数。可以看出,两层嵌套4管环结构中从纤芯区域耦合到嵌套环内层圆形区域功率( $<5\%$ )比单层4管环结构中从纤芯区域耦合到套管区域的功率( $>50\%$ )低约1个数量级。通过多重反谐振反射与空间不重叠度增加,嵌套环结构限制损耗可进一步降低约1~2个数量级,结果如图13所示。

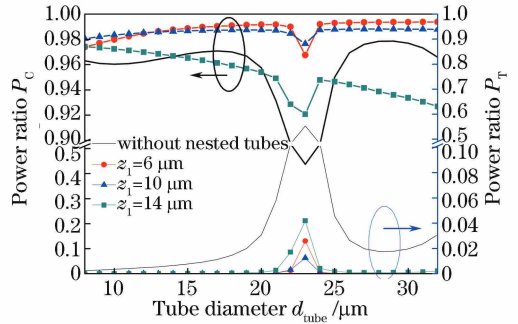


图14 两层嵌套4管环负曲率空芯光纤基模的功率占比  
Fig. 14 Power ratio of fundamental mode in two layers four tubes negative curvature hollow core fiber with nested tubes

嵌套环之间空气层厚度不同,耦合强度也不同,空气层厚度为 $6\sim 10\ \mu\text{m}$ 时,在模式耦合点,从纤芯耦合到嵌套环内层圆形区域的功率减小;而空气层厚度为 $10\sim 14\ \mu\text{m}$ 时,在模式耦合点,从纤芯耦合到嵌套环内层圆形区域的功率增大。为了清晰显示模式耦合点处功率随嵌套环之间空气层厚度的变化情况,计算两层嵌套4管环结构下,纤芯直径为 $20\ \mu\text{m}$ ,嵌套环内层管环直径为 $23\ \mu\text{m}$ ,不同空气层厚度 $z_1$ 下,基模在光纤截面上的功率分布,结果如图15所示。

当嵌套环之间空气层厚度 $<10\ \mu\text{m}$ 时,模式耦合程度逐渐降低;当嵌套环之间空气层厚度 $>10\ \mu\text{m}$ 时,模式耦合程度逐渐升高;空气层厚度在 $10\ \mu\text{m}$ 附近时,两层嵌套环结构中基模与嵌套环内层圆形区域的传输模式之间模式耦合程度最低,抑制模式耦合达到最优。这是由于在Litchinitser等<sup>[20]</sup>的ARROW模型中反谐振与空气层无关,其分析基于平板光波导时,假设包层中空气层厚度远小于芯区宽度,因此忽略了空气层的反谐振贡献,但在实际负曲率空芯光纤中,并不满足包层中空气层厚度远小于芯区宽度(纤芯直径)的设定,因此空气层的反谐振贡献并不能完全忽略。

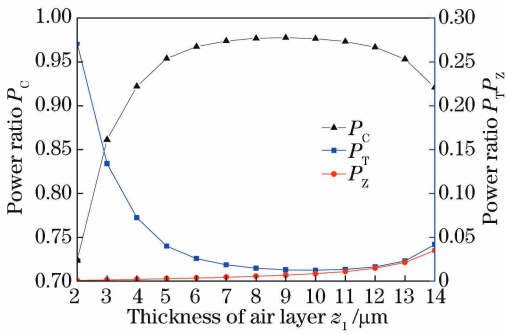


图 15 两层嵌套 4 管环负曲率空芯光纤中基模功率占比随嵌套环之间空气层厚度的变化

Fig. 15 Variation of power ratio of fundamental mode with thickness of air layer in two layers four tubes negative curvature hollow core fiber with nested tubes

可通过三层平板光波导中空气层的反谐振作用理解两层嵌套环负曲率空芯光纤中空气层厚度存在最优值的原因。如图 16 所示,在平板光波导中,假设芯区宽度为  $W_{core}$ ,包层中空气层厚度为  $W_{cladding}$ ,芯区中传输的模式满足共振条件

$$2k_T \times W_{core} = 2\pi, \quad (6)$$

式中  $k_T$  为横波矢量大小,即芯区模式在芯区空气层中横向往返一次行程的相位变化为  $2\pi$ ,当包层空气模式在包层空气中横向往返一次行程的相位变化为  $(2m-1)\pi$  时,  $m$  为表示共振的阶数(整数),即

$$2k_T \times W_{cladding} = (2m-1)\pi, \quad (7)$$

光在包层的空气层中发生反谐振,光反射回芯区传输,空气层反谐振条件为

$$W_{cladding} = (2m-1)/2 \times W_{core}, \quad (8)$$

而当包层空气模式在包层空气中横向往返一次的行程的相位变化是  $2m\pi$  时,即

$$2k_T \times W_{cladding} = 2m\pi, \quad (9)$$

光在包层的空气层中发生共振,在芯区与包层的空气层中能量耦合达到最大,光可透过包层的空气层传输。共振条件为

$$W_{cladding} = m \times W_{core}. \quad (10)$$

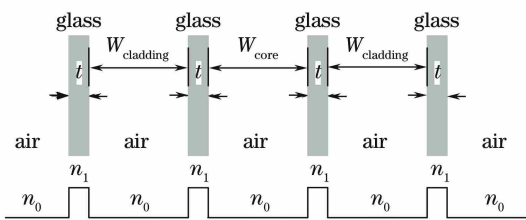


图 16 三层平板光波导

Fig. 16 Three layers slab optical waveguide

当空气层厚度不满足远小于纤芯直径条件时,空气层也能对反谐振反射起到贡献作用,且空气层厚度为纤芯半径的奇数倍时,反谐振反射作用最大。在图 15 的计算过程中,纤芯直径为  $20 \mu\text{m}$ ,因此空气层厚度在  $10 \mu\text{m}$  附近时,空气层的反谐振反射最强,基模与嵌套环内层圆形区域的传输模式之间模式耦合最弱。

#### 4.2 三层嵌套环结构

三层嵌套 4 管环负曲率空芯光纤中,第一层嵌套环空气层厚度为  $z_1$ ,第二层嵌套环空气层厚度为  $z_2$ ,在一定的纤芯直径( $20 \mu\text{m}$ )和嵌套环空气层厚度( $z_1 = z_2 = 5 \mu\text{m}$ )下,对比单层 4 管环、两层嵌套 4 管环和三层嵌套 4 管环结构的基模限制损耗,结果如图 17 所示,在三层嵌套 4 管环结构中,最内侧嵌套环直径在  $23 \mu\text{m}$  附近时仍发生了模式耦合。

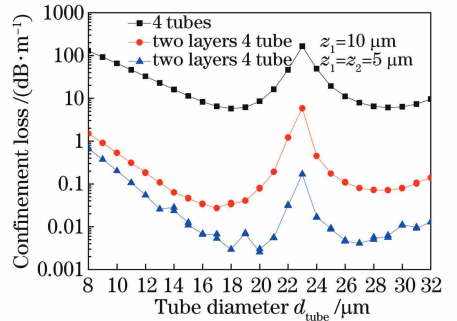


图 17 单层环、两层嵌套和三层嵌套 4 管环负曲率空芯光纤中基模的限制损耗

Fig. 17 Confinement loss of fundamental mode in single layer, two layers and three layers four tubes negative curvature hollow core fibers

如图 18 所示,从模式耦合的强度上看,在单层 4 管环结构中模式耦合点处,从纤芯耦合到套管环中的功率约为 55%;在两层嵌套 4 管环结构中模式耦合点处,从纤芯耦合到嵌套内层圆形区域中的功率小于 5%;而在三层嵌套 4 管环结构中模式耦合点处,从纤芯耦合到嵌套内层圆形区域中的功率小于 0.1%。因此,三层嵌套 4 管环结构可在两层嵌套 4 管环结构的基础上进一步降低限制损耗约 1 个数量级。

在三层嵌套 4 管环结构模式耦合点处,计算不同嵌套环间空气层厚度情况下的基模限制损耗,结果如图 19 所示。

保持某一空气层厚度不变,改变另一空气层厚度,可以看出,每层空气层均在  $9 \mu\text{m}$  附近时,限制损耗达到最低,这与在两层嵌套 4 管环结构中的结论基本相同,嵌套环之间空气层厚度为纤芯半径的奇数倍时,空气层反谐振反射作用最强,限制损耗最

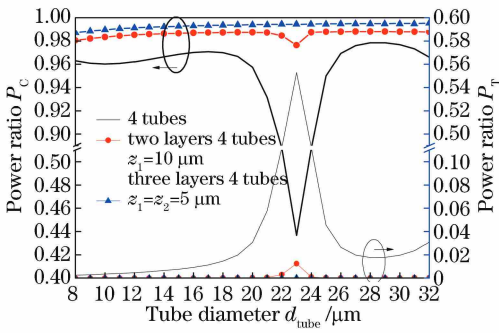


图 18 负曲率空芯光纤中基模的功率占比

Fig. 18 Power ratio of fundamental mode in negative curvature hollow core fibers

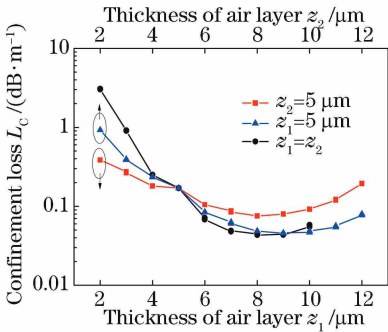


图 19 三层嵌套 4 管环负曲率空芯光纤中基模限制损耗随嵌套环之间空气层厚度的变化

Fig. 19 Variation of confinement loss of fundamental mode with thickness of air layer in three layers four tubes negative curvature hollow core fiber with nested tubes

低。每层空气层厚度之间并无相互影响,当  $z_1 = z_2 = 9 \mu\text{m}$  时,即两层空气层厚度均取最优值时,整体限制损耗达到最低。

4 管环结构中可以明显看到模式耦合,而在 6 管环、8 管环结构中无法发生强烈耦合,但可达到的抑制耦合最优情况不同,分别计算 6 管环、8 管环中两层和三层嵌套结构下的限制损耗,并与无嵌套结构相比较,结果如图 20 所示。

可以看出,不论是 6 管环结构还是 8 管环结构,在同样嵌套内层环直径条件下,增加嵌套环后限制损耗都进一步降低,这与 4 管环中情况基本一致,但限制损耗降低的幅度远小于在 4 管环中增加嵌套环情况,这是由于在 6 管环和 8 管环结构中,光纤截面空间受到限制,基模与管模很难达到抑制模式耦合最优,且空气层厚度远未达到最优,增加空气层厚度势必减小嵌套内层环直径,嵌套内层环直径减小会增加限制损耗,抵消了增加空气层厚度带来的限制损耗降低。特别是在 8 管环结构中,根据图 20 的模

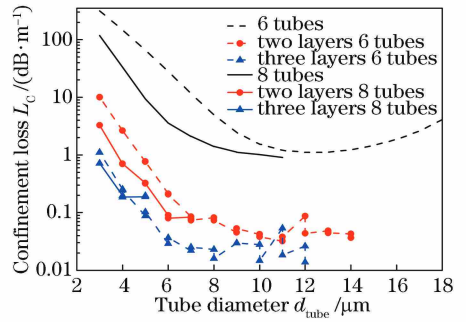


图 20 单层环、两层嵌套和三层嵌套 6 管环和 8 管环负曲率空芯光纤中基模的限制损耗

Fig. 20 Confinement loss of fundamental mode in single layer, two layers and, three layers 6 and 8 tubes negative curvature hollow core fibers

拟计算结果可知,在单层 8 管环中,管环直径可达到  $11 \mu\text{m}$ ,此时基模限制损耗最低约为  $1 \text{ dB/m}$ ;在两层嵌套 8 管环中,嵌套内层环直径只能达到  $7 \mu\text{m}$ ,基模限制损耗最低可达到约  $0.1 \text{ dB/m}$ ;但在三层嵌套 8 管环中,嵌套内层环直径只能达到  $5 \mu\text{m}$ ,虽然基模限制损耗有所降低,但针对整个光纤结构而言,基模限制损耗最低仅能达到约  $0.2 \text{ dB/m}$ 。因此,在 6 管环和 8 管环结构中,增加嵌套环降低限制损耗的效果并不如 4 管环结构。

## 5 一种低限制损耗单模负曲率空芯光纤

根据以上研究,研制了一种在纤芯直径不超过  $20 \mu\text{m}$  的低限制损耗单模负曲率空芯光纤,其相关结构参数如下:1) 纤芯直径为  $20 \mu\text{m}$ ;2) 采用三层嵌套 4 管环结构,将嵌套环对限制损耗的优化潜力发挥最大;3) 管环壁厚控制在第一反谐振区中心,工作波长为  $1550 \text{ nm}$ ,管环壁厚为  $0.4 \mu\text{m}$ ;4) 嵌套环之间空气层厚度均为  $9 \mu\text{m}$ ,接近纤芯直径  $1/2$ ,使空气层反谐振作用达到最大;5) 嵌套内层环直径为  $18 \mu\text{m}$ ,保持与纤芯直径的相对比值约为  $0.9$ ,达到 4 管环结构的抑制耦合最优点。

经计算, $1550 \text{ nm}$  工作波长处,该负曲率空芯光纤的限制损耗如表 1 所示。

由表 1 结果可知,该负曲率空芯光纤基模限制损耗  $< 1 \text{ dB/km}$ ,高阶模中,限制损耗最小的 LP11 模与基模的限制损耗相差 3 个数量级,在  $1550 \text{ nm}$  处,LP11 模限制损耗约为  $1000 \text{ dB/km}$ ,即初始注入激发同等功率的 LP11 模与基模,经过  $30 \text{ m}$  的传输距离后,LP11 模与基模的功率相差  $30 \text{ dB}$ ,可以认为该负曲率空芯光纤仅支持单模传输。



表 1 负曲率空芯光纤的模式有效折射率与限制损耗

Table 1 Mode effective index and confinement loss of negative curvature hollow core fiber

Mode	Effective index	Average confinement loss / (dB·km <sup>-1</sup> )
LP01	0.998602966000370-1.69859841840119×10 <sup>-11</sup>	6.47×10 <sup>-1</sup>
	0.998602958935283-1.97651259342529×10 <sup>-11</sup>	
LP11	0.996709063613520-5.75814156104491×10 <sup>-8</sup>	9.89×10 <sup>2</sup>
	0.996679673022994-4.67351275404594×10 <sup>-8</sup>	
	0.996621156318788-5.96804687485307×10 <sup>-9</sup>	
	0.996592958466542-2.16581295879327×10 <sup>-9</sup>	
	0.994798584019113-8.33081319495409×10 <sup>-6</sup>	
LP21	0.994798584019113-8.33081319494673×10 <sup>-6</sup>	2.93×10 <sup>5</sup>
	0.994798445347296-8.33114153520580×10 <sup>-6</sup>	
	0.994798445347296-8.33114153520367×10 <sup>-6</sup>	
LP02	0.993481085871916-4.60717915161041×10 <sup>-7</sup>	1.62×10 <sup>4</sup>
	0.993480894105488-4.59180599078204×10 <sup>-7</sup>	

对结构的容错性进行模拟计算,分析纤芯直径、管环壁厚、空气层厚度和嵌套内层环直径等参数(各浮动±1%)对基模限制损耗的影响。

从表 2 结果可知,当各结构参数浮动±1%时,

基模限制损耗增大,其中,管环壁厚与空气层厚度浮动时,反谐振效果减弱;而纤芯直径与嵌套内层环直径单独改变其中一项时,抑制模式耦合最优比偏离,因此限制损耗增大。

表 2 负曲率空芯光纤的结构容错性

Table 2 Structural fault tolerance of negative curvature hollow core fiber

Structural parameter	Initial confinement	Confinement loss when parameter positive	Confinement loss when parameter negative	Influence / %
	loss/ (dB·km <sup>-1</sup> )	floating 1% / (dB·km <sup>-1</sup> )	floating 1% / (dB·km <sup>-1</sup> )	
Core diameter (20 μm)	0.647	1.334	1.608	148.53
Glass wall thickness (0.4 μm)		2.364	0.986	265.38
Air layer thickness (9 μm)		2.620	0.793	304.95
Inner tube diameter (18 μm)		2.952	0.964	356.26

## 6 结 论

基于反谐振反射光波导模型和模式耦合模型分析了负曲率空芯光纤的导光机理,利用有限元工具分析圆形管环负曲率空芯光纤的管环壁厚、管环直径与纤芯直径之比、管环数量、纤芯直径等结构参数对基模限制损耗的影响,从模式耦合的角度分析了增加嵌套环后限制损耗的降低的原因,发现嵌套环结构中空气层对反谐振反射起到贡献作用,采用 4 管环结构增加嵌套降低限制损耗的潜力最大。最后,研制了一种纤芯直径不超过 20 μm 的低限制损耗负曲率空芯光纤,其在 1550 nm 处限制损耗可达 1 dB/km 以下,可保证单模传输。

## 参 考 文 献

[1] Wang Z F, Yu F, Wadsworth W J, *et al.* Efficient 1.9 μm emission in H<sub>2</sub>-filled hollow core fiber by pure stimulated vibrational Raman scattering [J].

Laser Physics Letters, 2014, 11(10): 105807.

- [2] Chen Y B, Wang Z F, Gu B, *et al.* Achieving a 15 μm fiber gas Raman laser source with about 400 kW of peak power and a 6.3 GHz linewidth[J]. Optics Letters, 2016, 41(21): 5118-5121.
- [3] Cassataro M, Novoa D, Günendi M C, *et al.* Generation of broadband mid-IR and UV light in gas-filled single-ring hollow-core PCF [J]. Optics Express, 2017, 25(7): 7637-7644.
- [4] Cao L, Gao S F, Peng Z G, *et al.* High peak power 2.8 μm Raman laser in a methane-filled negative-curvature fiber [J]. Optics Express, 2018, 26(5): 5609-5615.
- [5] Zhang Y, Zhu X S, Shi Y W. Hollow optical fiber surface plasmon resonance sensor based on light intensity detection[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6): 0606001.
- 张巧, 朱晓松, 石艺尉. 光强检测型空芯光纤表面等离子体共振传感器 [J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0606001.

- [6] Debord B, Alharbi M, Bradley T, *et al.* Hypocycloid-shaped hollow-core photonic crystal fiber. Part I: arc curvature effect on confinement loss [J]. *Optics Express*, 2013, 21(23): 28597-28608.
- [7] Pryamikov A D, Biriukov A S, Kosolapov A F, *et al.* Demonstration of a waveguide regime for a silica hollow - core microstructured optical fiber with a negative curvature of the core boundary in the spectral region  $>3.5 \mu\text{m}$  [J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 1441-1448.
- [8] Yu F, Wadsworth W J, Knight J C. Low loss silica hollow core fibers for 3-4  $\mu\text{m}$  spectral region [J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 11153-11158.
- [9] Uebel P, Günendi M C, Frosz M H, *et al.* Broadband robustly single-mode hollow-core PCF by resonant filtering of higher-order modes [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(9): 1961-1964.
- [10] Liu X L, Ding W, Wang Y Y, *et al.* Characterization of a liquid-filled nodeless anti-resonant fiber for biochemical sensing [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(4): 863-866.
- [11] Michieletto M, Lyngsø J K, Jakobsen C, *et al.* Hollow-core fibers for high power pulse delivery [J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7103-7119.
- [12] Hayes J R, Sandoghchi S R, Bradley T D, *et al.* Antiresonant hollow core fiber with an octave spanning bandwidth for short haul data communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(3): 437-442.
- [13] Kolyadin A N, Kosolapov A F, Pryamikov A D, *et al.* Light transmission in negative curvature hollow core fiber in extremely high material loss region [J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 9514-9519.
- [14] Chen Y, Saleh M F, Joly N Y, *et al.* Low-loss single-mode negatively curved square-core hollow fibers [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(7): 1285-1288.
- [15] Debord B, Amsanpally A, Chafer M, *et al.* 7.7 dB/km transmission loss at 750 nm inhibited-coupling guiding hollow-core photonic crystal fibers [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference, 2017: 1.
- [16] Nawazuddin M B S, Wheeler N V, Hayes J R, *et al.* Lotus-shaped negative curvature hollow core fiber with 10.5 dB/km at 1550 nm wavelength [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(5): 1213-1219.
- [17] Ding W, Wang Y Y, Gao S F, *et al.* Theoretical and experimental investigation of light guidance in hollow-core anti-resonant fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(12): 124201.  
丁伟, 汪滢莹, 高寿飞, 等. 高性能反谐振空芯光纤导光机理与实验制作研究进展 [J]. *物理学报*, 2018, 67(12): 124201.
- [18] Yu F, Knight J C. Negative curvature hollow-core optical fiber [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, 22(2): 146-155.
- [19] Wei C, Weiblen R J, Menyuk C R, *et al.* Negative curvature fibers [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2017, 9(3): 504.
- [20] Litchinitser N M, Abeeluck A K, Headley C, *et al.* Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguides [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(18): 1592-1594.
- [21] Vincetti L, Setti V. Waveguiding mechanism in tube lattice fibers [J]. *Optics Express*, 2010, 18(22): 23133-23146.
- [22] Debord B, Amsanpally A, Chafer M, *et al.* Ultralow transmission loss in inhibited-coupling guiding hollow fibers [J]. *Optics*, 2017, 4(2): 209-217.
- [23] White T P, Kuhlmeier B T, McPhedran R C, *et al.* Multipole method for microstructured optical fibers I formulation [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2002, 19(10): 2322-2330.
- [24] Poletti F. Nested antiresonant nodeless hollow core fiber [J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 23807-23828.