

DOI:10.16136/j.joel.2022.10.0845

大传输窗口低限制损耗空芯反谐振光纤的数值研究

娄 跃, 施伟华*, 张甜甜

(南京邮电大学 电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 江苏 南京 210023)

摘要:提出了一种大传输窗口低限制损耗单环嵌套结构的空芯反谐振光纤。采用全矢量有限元法结合完美匹配层边界条件数值模拟了光纤传输特性,并分析了空芯反谐振光纤的结构参数对光纤传输特性的影响。仿真结果表明,优化后的光纤具有大传输窗口低限制损耗的优势,且具有平坦色散特性。当纤芯直径为 $50\ \mu\text{m}$ 、反谐振管个数 N 为 6、反谐振管厚度 t 为 $0.30\ \mu\text{m}$ 、外层反谐振管直径 d 为 $32.50\ \mu\text{m}$ 、内层反谐振管直径 d_1 为 $21.13\ \mu\text{m}$ 时,在 $1260\text{--}1675\ \text{nm}$ 波长范围内,限制损耗均低于 $0.21\ \text{dB/km}$,色散值为 $(1.1 \pm 0.3)\ \text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,在波长为 $1550\ \text{nm}$ 时,限制损耗为 $0.078\ \text{dB/km}$ 。

关键词:反谐振光纤;低限制损耗;大传输窗口;有限元法

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)10-1087-07

Numerical study of hollow-core anti-resonant fiber with large transmission window and low confinement loss

LOU Yue, SHI Weihua*, ZHANG Tiantian

(College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

Abstract: A monocyclic nested hollow-core anti-resonant fiber (HC-ARF) with large transmission window and low confinement loss is proposed. The transmission characteristics of HC-ARF are simulated by full-vector finite element method combined with perfectly matched layer boundary conditions, and the influence of the structure parameters of HC-ARF on the transmission characteristics is analyzed. The simulation results show that the optimized fiber has the advantages of large transmission window, low confinement loss and flat dispersion. When the diameter of the fiber core is $50\ \mu\text{m}$, the number of the anti-resonant tube is 6, the thickness of the anti-resonant tube t is $0.30\ \mu\text{m}$, the diameter of the outer anti-resonant tube d is $32.50\ \mu\text{m}$, and the diameter of the inner anti-resonant tube d_1 is $21.13\ \mu\text{m}$, the confinement loss is lower than $0.21\ \text{dB/km}$ and the dispersion value is $(1.1 \pm 0.3)\ \text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ in the wavelength range of $1260\text{--}1675\ \text{nm}$, the confinement loss at $1550\ \text{nm}$ is $0.078\ \text{dB/km}$.

Key words: anti-resonant fiber; low confinement loss; large transmission window; finite element method

1 引 言

空芯反谐振光纤(hollow-core anti-resonant fiber, HC-ARF)是一种基于反谐振效应将光限制在空气纤芯传输的结构^[1]。由于其特殊的传导机制,HC-ARF具有大传输窗口、低损耗、低非线性

等特点^[2],广泛应用于低损耗传输^[3]、非线性光学^[4]、光纤传感^[5]等领域。近几年,HC-ARF被认为是最具潜力的下一代传输光纤^[6],由此探索兼顾低损耗和大传输窗口的 HC-ARF 成为研究热点。

研究人员首先对基于单环非嵌套结构 HC-

* E-mail: shiwh@njupt.edu.cn

收稿日期: 2021-12-10 修订日期: 2022-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(61571237)和江苏省研究生科研创新计划项目(SJCX21_0278)资助项目

ARF 进行研究, 光纤结构由若干个反谐振管组成。2013 年, KOLYADIN 等^[7]提出了由 8 个反谐振管组成的 HC-ARF, 数值模拟了在 2 500—7 900 nm 波段内光的传输, 在波长为 3 390 nm 时, 最低损耗为 50 dB/km。2017 年, 高寿飞等^[8]提出由 6 个反谐振管组成的 HC-ARF, 在可见光波段 410 nm(440—850 nm) 处, 限制损耗低于 350 dB/km, 在 532 nm 波长得到最低限制损耗为 80 dB/km。2017 年, HAYES 等^[9]提出一种由 7 个反谐振管组成的 HC-ARF, 在 400 nm(1 000—1 400 nm) 处, 损耗值低于 30 dB/km, 在 1 200 nm 时得到最低损耗为 25 dB/km。2018 年, PROVINO 等^[10]提出了由 6 个厚度为 0.49 μm 反谐振管组成单环 HC-ARF, 在 1 100 nm(1 100—2 200 nm) 处, 损耗低于 100 dB/km, 在 1 650 nm 时得到最低损耗为 25 dB/km。2018 年, 高寿飞等^[11]提出单环连体管结构 HC-ARF, 在 335 nm(1 302—1 637 nm) 处的 O、E、S、C 和 L 波段上损耗小于 16 dB/km, 在 1 512 nm 时得到最低损耗为 2 dB/km。

研究人员为了进一步降低光纤的损耗, 开始在单环 HC-ARF 结构中引入嵌套反谐振管, 嵌套 HC-ARF 理论上有望比标准石英光纤的损耗低^[12]。2018 年, BRADLEY 等^[3]提出了由 6 个嵌套反谐振管组成的 HC-ARF, 在 40 nm(1 420—1 460 nm) 传输窗口, 限制损耗低于 1.4 dB/km, 在 1 450 nm 时, 最小限制损耗为 1.3 dB/km, 并且由 0.5 km 长的光纤实现单模传输。2019 年, SAKR 等^[13]提出了由 6 个嵌套反谐振管组成的嵌套 HC-ARF, 实现在 700 nm(1 240—1 940 nm) 波段上损耗低于 10 dB/km, 在 1 550 nm 时得到最低损耗为 6.6 dB/km。2020 年, JASION 等^[14]提出了 6 个嵌套反谐振管组成具有超低损耗的 HC-ARF, 在 95 nm(1 530—1 625 nm) C 和 L 波段, 限制损耗低于 0.32 dB/km, 在 1 550 nm 时, 最低限制损耗达到 0.24 dB/km。

通过以上分析, HC-ARF 理论上具有大传输窗口超低损耗的优势, 通过引入嵌套结构或改变 HC-ARF 结构参数, 可以一定程度降低光纤损耗, 扩大低损耗传输窗口。目前极值损耗从 10^2 dB/km 降低到 10^{-1} dB/km, 当损耗为 10^{-1} dB/km 时, 传输窗口为 10^1 nm, 传输窗口为 10^2 nm 时, 对应损耗水平为 10^0 dB/km, 所以需要兼顾低损耗和大传输窗口, 进一步增加低损耗的带宽, 同时考虑制备工艺。本文采用单层嵌套结构 HC-ARF, 通过优化反谐振管个数、反谐振管厚度、外层反谐振管直径、内层反谐振管直径等参量, 进一步增大传输窗口, 降低损耗, 同时考虑制备容差, 为制备实用

化、高效能的 HC-ARF 提供设计方案。

2 光纤结构设计

如图 1(a) 所示, HC-ARF 由 6 组 12 个反谐振管嵌套而成。所有反谐振管的厚度设为 t , 外层反谐振管直径设为 d , 内层反谐振管的直径设为 d_1 。光纤的纤芯为最大内切圆, 纤芯直径设为 D 。HC-ARF 最外围是外包层, 起到保护和固定反谐振管的作用。在数值仿真中外包层外围为完美匹配层, 作为吸收边界。图 1(a) 中反谐振管和外包层均为二氧化硅, 其折射率与波长相关, 可以根据 Sellmeier^[15] 方程算出。其他部分为空气, 其折射率取值 1。图 1(b) 是波长为 1 550 nm 时光纤的模场分布图, 可以看到电磁场可以很好限制在纤芯内部。嵌套式 HC-ARF 可以采用堆叠拉伸法进行拉制^[16], 将一个石英管固定在具有相同壁厚和两倍外径的第二石英管内部, 拉制成毫米量级的初级石英管; 然后在一个直径为 10 mm 量级的石英管内堆叠形成所需的结构; 最后进行气压控制以保持结构, 再次拉伸形成最终光纤。

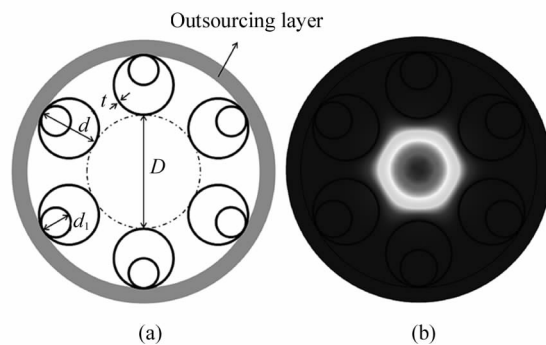


图 1 光纤的结构图与模场分布图:
(a) HC-ARF 的结构图; (b) 在波长为 1 550 nm 时, 光纤的模场分布图

Fig. 1 Fiber structure diagram and mode field distribution diagram: (a) Structure of HC-ARF; (b) Mode field distribution of optical fibers at the wavelength of 1 550 nm

在图 1(a) 中, 反谐振管的厚度 t 可以用 LITCHINITSER 等^[1]提出的反谐振反射波导(anti-resonant reflecting optical waveguide, ARROW)原理来求得。当反谐振管壁厚满足:

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

式中, n_1 为二氧化硅的折射率, n_0 为空气的折射率, λ 为波长, m 为谐振的阶数。

此时光在光纤中满足反谐振条件, 被限制在纤芯中传输。利用式(1)可以求得相应波长对应低损

耗区域的反谐振管厚度 t , 为了对应于 1 260—1 675 nm 波段, t 的值还需进一步优化。

3 光纤参数优化

本文主要研究在 1 200—1 800 nm 波段的光传输, 为了满足 ARROW 原理, 图 1(a) 中纤芯直径一般要远大于波长, 经过计算和优化后纤芯直径取 50 μm , 外包层厚度设为 10 μm 。光纤结构中还有 4 个自由参数: 反谐振管个数 N 、反谐振管厚度 t 、外层反谐振管直径 d 和内层反谐振管直径 d_1 。

下面综合考虑大传输窗口和低损耗来优化以上参数。光纤的损耗包括限制损耗、散射损耗、材料吸收损耗。限制损耗与光纤的结构相关, 可以通过改变光纤参数来优化限制损耗。散射损耗是指光纤拉制过程中导致光纤表面粗糙度的产生, 而造成一定程度的损耗^[17], 可以通过提高工艺水平来降低光纤的散射损耗。空芯光纤的材料吸收损耗主要归结于

拉制过程中残余的 OH 离子, 可以在光纤制备过程进行除水处理降低材料吸收损耗^[18]。本文主要考虑限制损耗。

不同反谐振管个数时光纤的限制损耗随波长的变化如图 2(a) 所示, 其中 $t=0.30 \mu\text{m}$, $N=4, 6, 8, 10, 12$ 。从图中可以看到长波段限制损耗较大, 因为由式(1)可以求得当 $t=0.30 \mu\text{m}$ 时, 低损耗传播窗口在 1 260 nm 附近。6 个管结构限制损耗相对最小, 因为光纤的纤芯直径不变, 为了保证反谐振管间隙不变, 反谐振管的个数减少时, 具有更大的包层管直径, 从而使包层管的中心到光纤纤芯的距离变大, 增加了纤芯基模与包层管模式之间的模式不匹配^[19], 从而有效地减少纤芯基模的光损失, 因此具有更低的限制损耗。然而当 $N=4$ 时, 反谐振管间相对间隙过大, 电磁场会通过间隙泄漏, 从而使限制损耗增大。因此本文 N 取值 6。

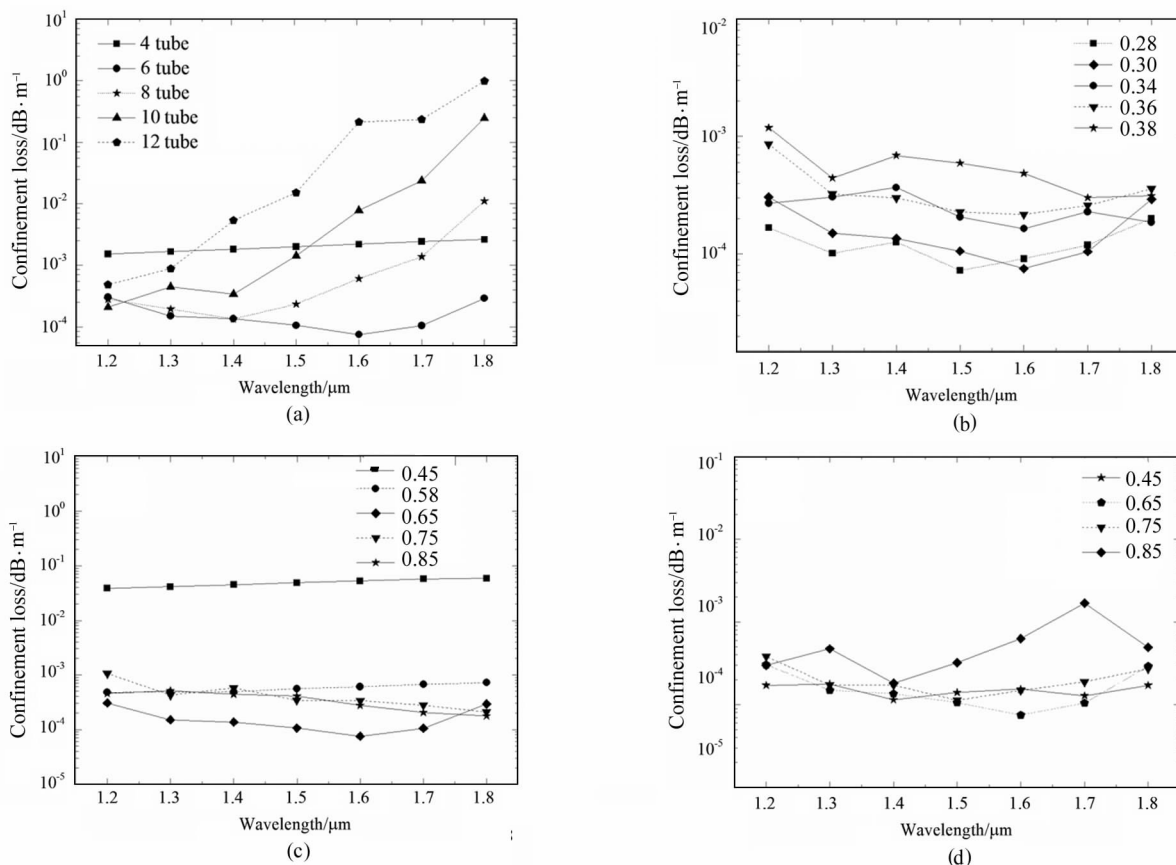


图2 优化不同光纤参数的限制损耗图: (a) 不同反谐振管个数 N ; (b) 不同反谐振管厚度 t ;

(c) 不同外层反谐振管直径与纤芯直径比 d/D ; (d) 不同内层反谐振管直径与外层反谐振管直径比 d_1/d

Fig. 2 Optimized the confinement loss diagram for different optical fiber parameters: (a) Different numbers of anti-resonant tubes N ; (b) Different thickness of anti-resonant tubes t ; (c) Different outer anti-resonant tubes diameter and core diameter ratio d/D ; (d) Different inner anti-resonant tubes diameter and outer anti-resonant tubes diameter ratio d_1/d

不同反谐振管厚度时光纤的限制损耗随波长的变化如图 2(b)所示,图中 $N=6, d/D=0.65, d_1/d=0.65$ 。优化波长区间选取 1 200—1 800 nm,通过式(1)计算反谐振管厚度 t 在 0.28—0.40 μm 之间。可以看出:随着反谐振管厚度的增大,光纤的限制损耗整体上呈变大的趋势;因为反谐振管厚度增大,低损耗窗口会向长波漂移。 $t=0.28 \mu\text{m}$ 时,在 1 200—1 800 nm 波段,限制损耗低于 0.20 dB/km。 $t=0.30 \mu\text{m}$ 时,在 1 200—1 800 nm 波段,限制损耗低于 0.30 dB/km。考虑到光纤的制备工艺,最终 t 取值 0.30 μm 。

不同外层反谐振管直径时光纤的限制损耗随波长的变化如图 2(c)所示,用 d/D 的值来表示。其中 $N=6, t=0.30 \mu\text{m}, d_1/d=0.65$ 。经过分析和计算发现, d/D 的值不能过大,过大会造成外层反谐振管彼此接触,有节点会增加光纤的额外谐振,从而增大光纤的限制损耗^[6]。同时 d/D 的值不能过小,过小反谐振管之间间隙过大,纤芯中的大部分电磁场会通过间隙泄漏到包层中去。从图 2(c)中可以看出:在 $d/D=0.65$ 时,限制损耗在 1 200—1 800 nm 波段上最低,因此 d/D 的取值 0.65。

不同内层反谐振管直径时光纤的限制损耗随波长的变化如图 2(d)所示,用 d_1/d 来表示。其中 $N=6, t=0.30 \mu\text{m}, d/D=0.65$ 。当 d_1/d 取值过小,内层反谐振管会相当于一个大的节点,不利于降低光纤的限制损耗。 d_1/d 取值也不宜过大,仿真发现:当 d_1/d 取值过大会使内层反谐振管和外层反谐振管的管壁过于接近,光纤的限制损耗也会随之增大。从图中可以看出:当 $d_1/d=0.65$ 时出现最低限制损耗,当波长为 1 600 nm 时,限制损耗为 0.075 dB/km,且在 1 200—1 800 nm 波段上限制损耗有很好的平坦度,低于 0.31 dB/km,因此 d_1/d 取值 0.65。

如图 3 所示为 $N=6, t=0.30 \mu\text{m}, d/D=0.65, d_1/d=0.65$ 时,在 600—2 400 nm 波段上的限制损耗图。可以看出:在 1 260—1 675 nm 波段上,光纤限制损耗低于 0.21 dB/km;当在波长为 1 600 nm 时,最低限制损耗达到 0.075 dB/km;当波长为 1 550 nm 时,限制损耗为 0.078 dB/km。实现了大带宽低限制损耗的传输设计。

作为传输光纤,色散也是重要的性能参量。如图 4 为光纤在 $D=50 \mu\text{m}, N=6, t=0.30 \mu\text{m}, d/D=0.65, d_1/d=0.65$ 时的色散曲线图。可以看出:在 1 260—1 675 nm 波段上,色散值为 $(1.1 \pm 0.3) \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。由计算结果可知 HC-ARF 有平坦色散

特性。

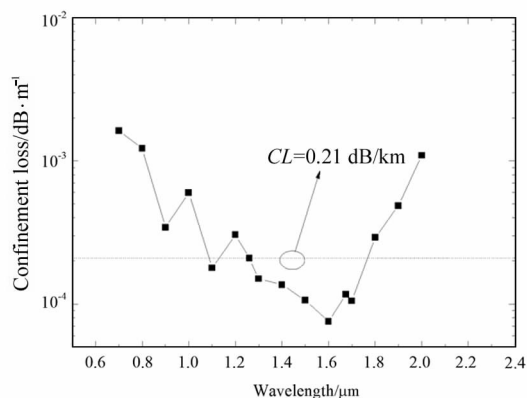


图 3 优化后光纤的限制损耗图:

$N=6, t=0.30 \mu\text{m}, d/D=0.65, d_1/d=0.65$

Fig. 3 The confinement loss diagram of the optimized fiber:

$N=6, t=0.30 \mu\text{m}, d/D=0.65, d_1/d=0.65$

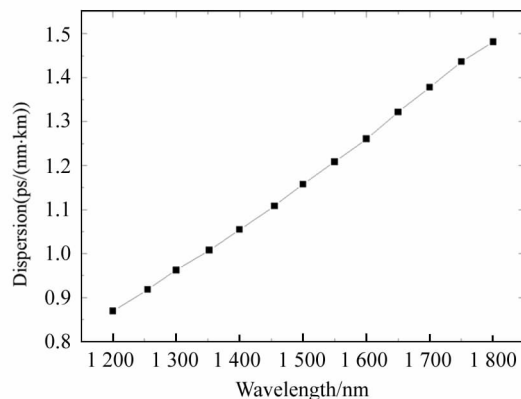


图 4 光纤色散特性图

Fig. 4 Optical fiber dispersion characteristic diagram

4 制备容差分析

从实用的角度看,光纤在制作的过程中可能出现制备容差,主要包括几何尺寸的误差和形状的偏差。由图 2 表示的反谐振管厚度、外层反谐振管直径与纤芯直径比、内层反谐振管直径与外层反谐振管直径比,可以得出:在 1 260—1 675 nm 波段上保持限制损耗低于 10^{-1} dB/km,反谐振管厚度可取 0.30 μm ($1-6.67\%$) 和 0.30 μm ($1+13.33\%$),内层反谐振管直径可取 21.13 μm ($1\pm 15\%$),外层反谐振管直径可取 32.50 μm ($1-10.77\%$) 和 32.50 μm ($1+15.38\%$)。提出的反谐振光纤对反谐振管厚度、外层反谐振管直径、内层反谐振管直径等结构参量具有一定的制备容差。反谐振管形状偏差可以在光纤拉制过程在纤芯和反谐振管中充入惰性气体,每个区域独立控制气压以抵消表面张力的影响并控制几

何形状,来保证光纤不出现形变^[20]。

此外,反谐振管嵌入包层长度也是光纤制备过程中影响光纤传输特性的因素之一。前面的仿真都是基于反谐振管与包层单点接触的理想状态。然而光纤在实际拉制过程中反谐振管和包层接触不会是理想的单点接触,而是有有限的长度,如图 5(a)中 H 。本文用长度 H 与内层反谐振管直径 d_1 的比值来衡量制备过程出现的误差。如图 5(b)显示了在 $D=50\mu\text{m}$, $N=6$, $t=0.30\mu\text{m}$, $d/D=0.65$, $d_1/d=0.65$ 时理想 HC-ARF 的限制损耗与反谐振管嵌入包层的长度分别为 $1.06\mu\text{m}$ 、 $1.69\mu\text{m}$ 和 $2.11\mu\text{m}$ 在 $1200\text{--}1800\text{ nm}$ 带宽范围内的限制损耗对比图。在设计结构中,由于 $d_1=21.13\mu\text{m}$,反谐振管嵌入包层长度 $1.06\mu\text{m}$ 、 $1.69\mu\text{m}$ 和 $2.11\mu\text{m}$ 可分别等价于 5% 、 8% 、 10% 制作误差。计算表明,反谐振管嵌

入包层的长度对限制损耗有负影响,但并没有量级上的改变。在有 5% 误差下,在 $1260\text{--}1675\text{ nm}$ 波段的限制损耗低于 0.80 dB/km 。在有 10% 误差下,在 $1260\text{--}1675\text{ nm}$ 波段的限制损耗低于 0.88 dB/km 。随着嵌入长度增大,限制损耗会进一步增大,因为 H 增大减少反谐振管有效作用区域,还会增大反谐振管间隙,从而增大限制损耗。因此设计的结构在 $1260\text{--}1675\text{ nm}$ 波段上限制损耗低于 10^{-1} dB/km ,反谐振管嵌入包层长度的制备容差可达 $2.11\mu\text{m}$ 。

表 1 给出了与其他 HC-ARF 结构的性能对比。从可对比角度,只对其中的数值结果进行比较。可以看出本文所提出的结构在较宽的传播窗口 ($1260\text{--}1675\text{ nm}$) 具有较低的限制损耗 (10^{-1} dB/km),在 1550 nm 处限制损耗达 10^{-2} dB/km 。

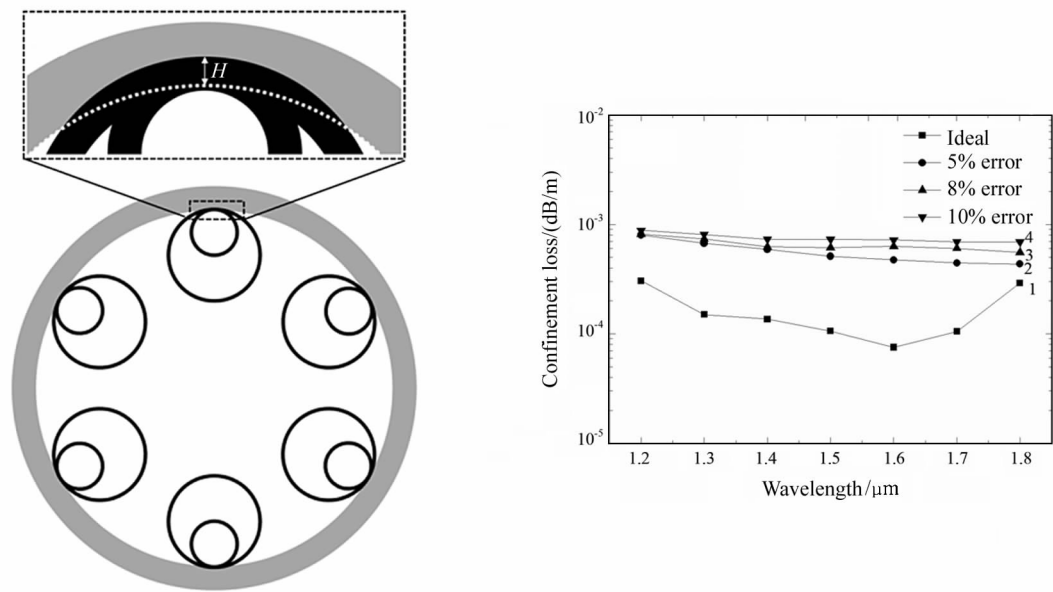


图 5 反谐振管嵌入包层长度分析图:(a) 反谐振管嵌入包层长度示意图;
(b) 比较理想 HC-ARF 结构(图中 1 号)和光纤制备过程反谐振管嵌入包层长度(图中 2、3 和 4 分别表示 5% 、 8% 和 10% 的误差)之间的限制损耗图
Fig. 5 Diagram of length analysis of anti-resonant tube embedding cladding:
(a) Schematic diagram of embedding cladding length of anti-resonant tube;
(b) Comparing the confinement loss diagram between the ideal HC-ARF structure (curve1 in the figure) and the length of the anti-resonant tube embedded cladding in the fiber fabrication process
(2,3 and 4 in the figure representing errors of 5% , 8% and 10% , respectively)

表 1 本文结构与其他结构性能的对比

Tab. 1 Comparison of performance between the structure in this paper and other structures

REF	Structure	Transmission window/nm	Confinement loss /dB · km ⁻¹	Minimum confinement loss/dB · km ⁻¹
[15]	Single ring six tubes	110(1 100—2 200)	≤100	25@1 650
[16]	Conjoined-tube	335(1 302—1 637)	≤16	2. 00@1 512
[18]	Single ring nested six tubes	700(1 240—1 940)	≤10	6. 60@1 550
[19]	Single ring nested six tubes	95(1 530—1 625)	≤0. 32	0. 24@1 550
This work	Single ring nested six tubes	415(1 260—1 675)	≤0. 21	0. 078@1 550

5 结 论

本文设计了一种可以覆盖 O、E、S、C、L、U 波段低限制损耗大纤芯 HC-ARF。在波长为 1 600 nm 处得到最低限制损耗为 0. 075 dB/km, 1 550 nm 传输窗口限制损耗达到 0. 078 dB/km, 在 1 260—1 675 nm 波段上, 限制损耗低于 0. 21 dB/km。文中还分析了光纤的色散特性, 在 1 260—1 675 nm 波段上, 色散值为 (1.1 ± 0.3) ps/(nm · km)。最后对光纤拉制过程中会出现的几何尺寸及形状偏差和反谐振管嵌入包层长度偏差进行分析。本文为大传输窗口低损耗平坦色散 HC-ARF 的实际应用提供有益的参考。

参考文献:

- [1] LITCHINITSER N M, ABEELUCK A K, HEADLEY C, et al. Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguides[J]. Optics Letters, 2002, 27(18): 1592-1594.
- [2] WEI C, WEIBLEN R J, MENYUK C R, et al. Negative curvature fibers[J]. Optics Photonics, 2017, 9(3): 504-561.
- [3] BRADLEY T D, HAYES J R, CHEN Y, et al. Record low-loss 1.3 dB/km data transmitting antiresonant hollow core fiber[C]//2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 23-27, 2018, Roma, Italy. New York: IEEE, 2018: 1-3.
- [4] RUSSELL P, HÖLZER P, CHANG W. Hollow-core photonic crystal fibres for gas-based nonlinear optics[J]. Nature Photonics, 2014, 8(4): 278-286.
- [5] LIU S, WANG Y, HOU M, et al. Anti-resonant reflecting guidance in alcohol-filled hollow core photonic crystal fiber for sensing applications[J]. Optics Express, 2013, 21(25): 31690-31697.
- [6] DING W, WANG Y Y, GAO S F. Recent progress in low loss hollow core antiresonant fibers and their applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019, 26(4): 78-82.
- [7] 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.
- [8] GAO S F, WANG Y Y, LIU X L. Node-less hollow-core fiber for the visible spectral range[J]. Optics Letters, 2017, 42(1): 61-64.
- [9] HAYES J R, SANDOGHCHI S R, BRADLEY T D. Anti-resonant hollow core fiber with an octave spanning bandwidth for short haul data communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(3): 437-442.
- [10] PROVINO L, HABOUCHE A, HAVRANEK M. Large core hollow-core antiresonant fiber with low loss and truly single-mode guidance for NIR wavelengths[C]//OSA Laser Congress, November 4-11, 2018, Boston, Massachusetts, United States. Washington DC: Optica Publishing Group, 2018: ATh1A. 6.
- [11] GAO S F, WANG Y Y, WEI D. Hollow core conjoined tube negative curvature fiber with ultralow loss[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 2828-2830.
- [12] POLETTI F. Nested antiresonant nodeless hollow core fiber[J]. Optics Express, 2014, 22(20): 23807-23828.
- [13] SAKR H, BRADLEY T D, HONG Y. Ultrawide bandwidth hollow core fiber for interband short reach data transmission[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 03-07, 2019, San Diego, CA,

- USA. New York:IEEE,2019:1-3.
- [14] JASION G T, BRDLEY T D, HARRINGTON K. Hollow core NANF with 0.28 dB/km attenuation in the C and L bands [C]//Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), March 08-12, 2020, San Diego, CA, USA. New York:IEEE,2020:1-3.
- [15] SANTOS D F, GUERREIRO A, BAPTISTA J M. SPR microstructured D-type optical fiber sensor configuration for refractive index measurement[J]. Sensors Journal, IEEE. 2015,15(10):5472-5477.
- [16] DEBORD B, AMSANPALLY A, CHAFER M. Ultralow transmission loss in inhibited coupling guiding hollow fibers[J]. Optica, 2017,4(2):209-217.
- [17] JACKLE J, KAWASAKI K. Intrinsic roughness of glass surfaces[J]. Journal of Physics Condensed Matter, 1999,7(23):4351-4358.
- [18] LITCHINITSER N M, ABEELUCK A K, HEADLEY C. Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguides [J]. Optics Letters, 2002,27(18):1592-1594.
- [19] WEI C, MENYUK C R, HU J. Impact of cladding tubes in chalcogenide negative curvature fibers[J]. IEEE Photonics Journal, 2017,8(3):1-9.
- [20] JASION G T, HAYES J R, WHEELER N V. Fabrication of tubular anti-resonant hollow core fibers: modelling, draw dynamics and process optimization[J]. Optics Express, 2019,27(15):20567-20582.

作者简介:

施伟华 (1969—),女,硕士,教授,硕士生导师,主要从事光通信及其器件方面的研究。