

激光与光电子学进展

偏振保持反谐振空芯光纤

薛宇勃, 李海粟*, 刘亚静, 王伟, 姜有超, 任国斌, 裴丽

北京交通大学光波技术研究所全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044

摘要 现代光网络需要满足高速、大带宽、大容量传输技术。基于反谐振反射光波导机制, 提出一种偏振保持 (PM) 空芯光纤。光被正交方向上厚度不同的 4 个套管限制在空气芯子中来实现有效的 PM 传输。为了实现提高 PM 性能的同时降低传输损耗, 研究了套管中反谐振层的数量、套管厚度、空气芯子尺寸以及正交方向上相邻两个套管之间距离的影响。数值仿真结果表明, 所提出的反谐振空芯光纤在 1550 nm 处支持两种正交偏振模式, HE_{11x} 和 HE_{11y} 模式的双折射为 1.2×10^{-4} , 传输损耗分别为 0.002 dB/m 和 0.013 dB/m。此外, 在 1425~1725 nm (带宽为 300 nm) 内, 光纤的双折射不低于 1.0×10^{-4} , 传输损耗在 0.002 dB/m~0.185 dB/m 范围内, 色散值低于 $45.51 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。同时, 由于采用空芯结构的设计, 光纤具有较低的弯曲损耗。所提出的光纤在需要短距离, 大容量和低时延传输的数据中心和金融网络系统等领域具有较好的应用前景。

关键词 双折射; 反谐振反射光波导; 偏振保持; 空芯光纤

中图分类号 TN252

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2326001

Polarization-Maintaining Anti-Resonant Hollow-Core Optical Fibers

Xue Yubo, Li Haisu*, Liu Yajing, Wang Wei, Jiang Youchao, Ren Guobin, Pei Li

Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of EMC,
Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract Modern optical networks require broadband, high-speed, large-capacity transmission techniques. Based on the anti-resonant reflecting optical waveguiding mechanism, we propose a polarization-maintaining (PM) hollow-core optical fiber. The light is confined by four tubes, which have different thicknesses along two orthogonal directions to achieve efficient PM guidance. To enhance the PM performance while achieving low propagation loss, we investigate the effects of additional anti-resonant layers in the tubes, tube thickness, air-core size and the distance between two adjacent tubes. Numerical simulations indicate that, at 1550 nm, the proposed fiber supports two orthogonally polarized modes with the birefringence of 1.2×10^{-4} and the propagation losses of HE_{11x} and HE_{11y} modes are 0.002 dB/m and 0.013 dB/m respectively. Moreover, within 1425~1725 nm (bandwidth of 300 nm), the birefringence of the proposed fiber is no less than 1.0×10^{-4} , the propagation losses are within 0.002 dB/m and 0.185 dB/m, and the dispersions are less than $45.51 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$. We also show that the proposed fiber has low bend losses thanks to the air-core guidance. The proposed fiber may have applications for data centers and financial network systems that need short-range, large-capacity and low-latency transmission.

Key words birefringence; anti-resonant reflecting optical waveguide; polarization-maintaining; hollow-core fibers

OCIS codes 260.1440; 260.2030; 260.5430; 260.5740

收稿日期: 2021-03-02; 修回日期: 2021-03-12; 录用日期: 2021-03-17

基金项目: 北京市自然科学基金(4192048)、国家重点研发计划(2018YFB1801003)、国家自然科学基金(62075007, 61620106014, 61827818, 62005013)。

通信作者: lihaisu@bjtu.edu.cn

1 引言

随着移动互联网,人工智能和云计算的飞速发展,近年来数据流量呈指数增长。数据中心和金融交易机构对于低时延和大容量的数据传输有巨大的需求。当前采用波分复用技术的传统实芯单模光纤^[1],其传输容量正逐渐接近非线性香农极限(即容量瓶颈^[2])。与实芯光纤不同,空芯光纤由于其独特的空芯结构而具有低时延的优势^[3],而且在单根光纤中可以引导两种偏振保持(PM)模式复用使传输容量增加一倍^[4-5]。因此,支持两种正交 PM 模式的空芯光纤将会在短距离、大容量和低时延的光传输网络领域具有很好的应用前景。

目前空芯光纤的研究主要集中在两种方案^[6]。一种是空芯光子带隙光纤(HC-PBGF)^[7],可以通过光子晶体的带隙效应来引导光传输^[8-10]。然而,HC-PBGF 复杂的制造技术和表面散射损耗限制了其应用^[11]。另一种是空芯反谐振反射光纤(HC-ARF)。与 HC-PBGF 相比,HC-ARF 具有更低的模场石英重叠度、更低的表面散射损耗、更宽的导光通带和更好的模式纯度,因此具有更大的优化潜力和应用前景。目前 HC-ARF 在很多场景都有应用,例如弯曲光纤传感器、大功率超快激光传输和高精度微加工^[12-14]。2018 年, Wang 等^[15]提出一种负曲率芯子的新型 HC-ARF,在 1512 nm 处实现的最小传输损耗为 2 dB/km。2018 年, Wei 等^[16]提出一种单偏振保持的 HC-ARF,双折射可以达到 10^{-5} 。2020 年, Yan 等^[17]提出在 1512-1587 nm 范围内实现单偏振保持的混合型 HC-ARF。2020 年, Taranta 等^[18]提出一种具有良好偏振性能的 HC-ARF,模式交叉耦合的比例为 10^{-10} ,传输损耗为 3 dB/km。2020 年, Yerolatsitis 等^[19]设计在 1550 nm 实现双偏振的 HC-ARF,双折射为 4.4×10^{-5} 。一般而言,双折射需要高于 10^{-4} 才能实现有效的 PM 传输^[20-23],而且较低的传输损耗^[24]也会保持较高的传输效率。因此,如何实现两种正交模式偏振保持传输的同时保持较低的损耗是目前研究的重点。

本文提出了一种在正交方向上具有不同厚度的 4 个套管结构的 HC-ARF 来实现有效的 PM。为了实现提高 PM 性能的同时降低传输损耗,研究了套管中反谐振层的数量、套管厚度、空气芯子尺寸以及正交方向上相邻两个套管之间距离的影响。另外,还研究了所提出光纤的弯曲性能,与波长有

关的传输性能(损耗和色散),以确定传输带宽。

2 基本原理

2.1 光纤设计

图 1 展示了所提出的 HC-ARF 的示意性横截面以及相应的结构参数。为了实现高双折射,光纤包层中引入 4 个套管结构来实现纤芯场的正交偏振^[25]。光纤包层直径 $D=81.2 \mu\text{m}$ 。沿 y 轴和 x 轴套管的半径分别表示为 R_a 和 R_b ($R_a=R_b=16.8 \mu\text{m}$)。空气芯子的半径用 r 表示。沿 y 轴和 x 轴套管的厚度分别表示为 t_1 和 t_2 。将正交方向两个相邻套管之间的距离定义为 d 。空气的折射率为 1,石英在 1550 nm 处的折射率为 1.444。光纤特性采用基于有限元算法的 COMSOL Multiphysics 软件^[26]计算,其中网格尺寸小于波长的五分之一,而且在所设计的光波导外部加入了完美匹配层,通过以上两种方法以满足仿真计算精度的需求。目前为了实现这种结构,有两种可能的制造方法可用。一种是在光纤拉丝同时进行真空抽气^[27-28];另一种基于比较先进的 3D 打印技术。例如,已经使用单步 3D 打印方法成功制造了高分辨率的光子晶体光纤^[29]。

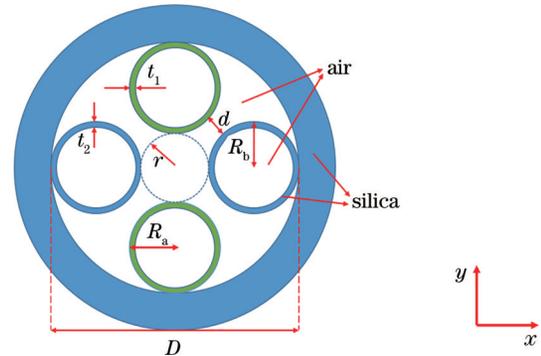


图 1 空芯光纤的横截面示意图

Fig. 1 Schematic cross-section of HC-ARF

2.2 理论分析

根据反谐振反射光波导的机制,谐振频率由高折射率层的几何和光学特性决定。提出的 HC-ARF 的第 m 个传输频率范围可以表示为^[30]:

$$\frac{c(m-1)}{2t_{1,2}\sqrt{n_2^2-n_1^2}} < f < \frac{cm}{2t_{1,2}\sqrt{n_2^2-n_1^2}} \quad (m=1, 2, \dots), \quad (1)$$

式中 c 是真空中光速, m 是整数, n_1 和 n_2 分别是空气和反谐振层的折射率 ($n_1=1, n_2=1.444$)。通过沿两个正交方向(即分别沿 y 轴和 x 轴的 t_1 和 t_2)的厚度差引入两组谐振频率。 m 值沿 y 轴选择第一个谐

振区间,沿 x 轴选择第二个谐振区间。 t_1 值为 $0.6 \mu\text{m}$ 。

首先,研究在波长 1550 nm 的 HC-ARF 套管中增加不同数量的反谐振层,以提高双折射同时减少传输损耗。图 2(a)、(d)、(g) 展示了向 HC-ARF 的 4 个套管中分别添加一层,两层和三层反谐振层(添加的反谐振层的厚度与套管相同)。在这部分中, r , d , t_2 分别为 $7 \mu\text{m}$, $1 \mu\text{m}$, $0.48 \mu\text{m} \sim 1.2 \mu\text{m}$ 。使用 t_2/t_1 (t_2/t_1 比值从 0.8 到 2.0) 来表示沿两个正交方向的反谐振层的厚度差。图 2(b)、(c)、(e)、(f)、(h)、(i) 展示了双折射 (Δn_{eff} , 模式 HE_{11x} 和 HE_{11y} 的有效折射率差) 和传输损耗 (HE_{11x} 和 HE_{11y}) 随着图 2(a)、(d)、(g) 中光纤的正交方向厚度差的变化。其中蓝色区域是(1)式计算的谐振波长。如图 2(b)

和(c)所示,添加一层反谐振层的 HC-ARF 的双折射值比较低(大约 10^{-5}),并且传输损耗高于 10^3 dB/m 。损耗曲线的波动可归因于有限约束的引导模式与套管共振之间的耦合。图 2(e)和(f)展示添加两层反谐振层的 HC-ARF 的双折射值可以达到 10^{-4} ,传输损耗为 $10^0 \sim 10^3 \text{ dB/m}$ 。这种情况下的双折射可以实现有效的 PM,但传输损耗仍高于 1 dB/m 。为了进一步降低损耗,在图 2(g)的 HC-ARF 套管中添加三层反谐振层。从图 2(h)和(i)可以看出,双折射高于 1.0×10^{-4} ,对于特定的 t_2/t_1 比值,传输损耗低于 1 dB/m ,表明这种结构下的光纤可以实现有效 PM 的同时保持较低的传输损耗。仿真结果表明,提出的空芯光纤可以同时实现高双折射和低损耗,

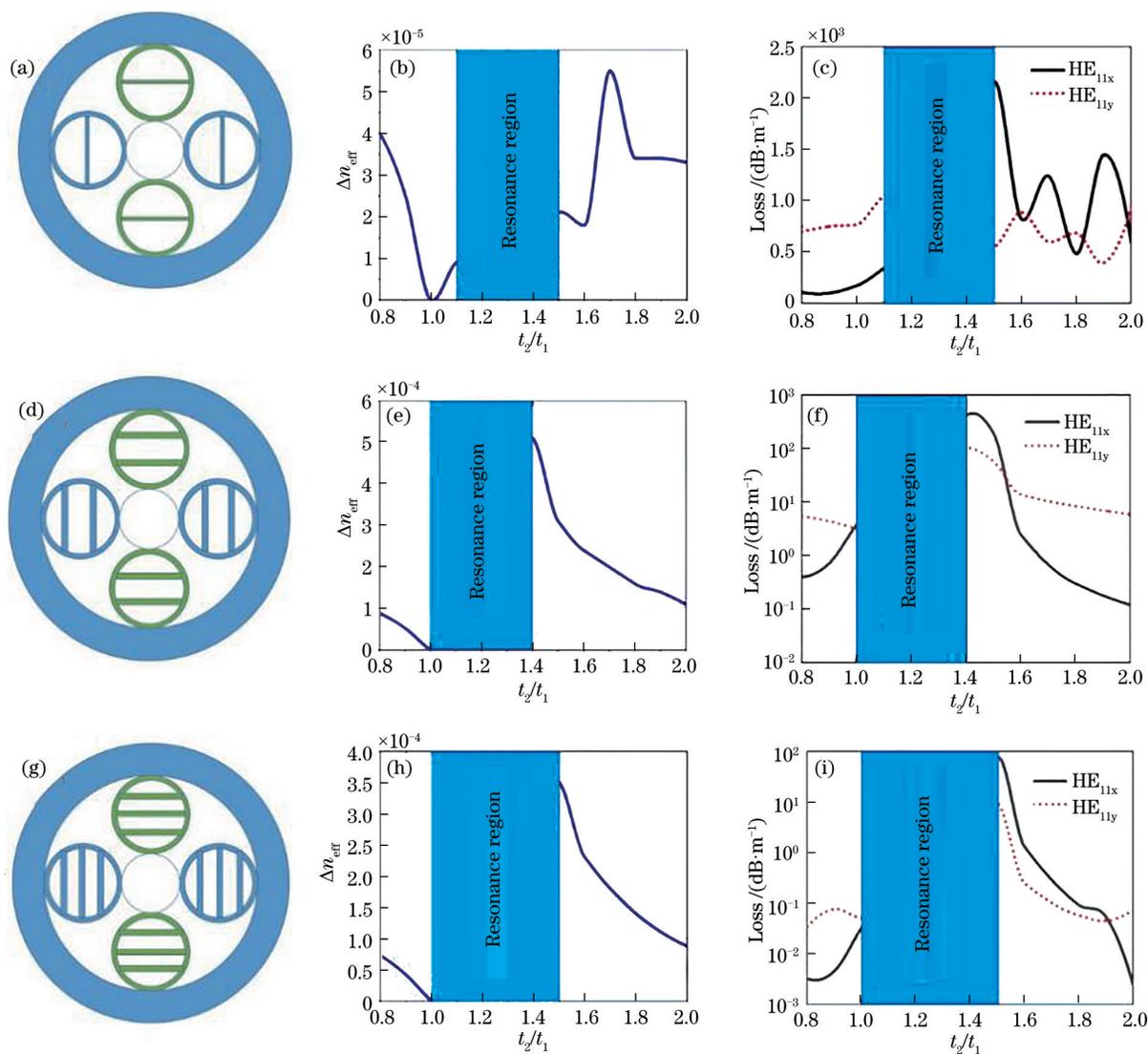


图 2 三种空芯光纤结构以及相应双折射和损耗仿真结果。(a)添加一层反谐振层;(d)添加两层反谐振层;(g)添加三层反谐振层;(b),(c),(e),(f),(h),(i)双折射和损耗

Fig. 2 Three kinds of HC-ARF and the birefringence and loss simulation results. (a) Adding an anti-resonant layer; (d) adding two anti-resonant layers; (g) adding three anti-resonant layers; (b), (c), (e), (f), (h), (i) birefringence and loss

这是因为更多的反谐振层增强了反谐振性能。在以下内容中,将基于图 2(g)所示的 HC-ARF 结构研究其他参数对传输性能的影响,以进一步改善光纤传输性能。

3 光纤结构优化

基于图 2(g)所示的空芯光纤结构进行数值仿真来优化光纤结构参数,包括正交方向相邻两个套管之间的距离 d 和空气芯子尺寸 r 。首先,课题组研究了正交方向上相邻两个套管之间的距离对双折射和传输损耗的影响。如图 3(a)和(b)所示,为了平衡高双折射和低传输损耗,课题组选择最佳值 $d=1.5 \mu\text{m}$,此时双折射为 1.4×10^{-4} ,传输损耗约为 $10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ dB/m}$ 。然后,研究了空气芯子尺寸的影响。如图 3(c)和(d)所示,相比于正交方向上相邻

两个套管之间的距离的影响,双折射和传输损耗受空气芯子尺寸的影响比较大。空气芯子尺寸较大时,光纤的能量泄漏较少。但是,还注意到空气芯子尺寸较大的光纤会降低双折射。课题组选择最佳值 $r=8 \mu\text{m}$ 来平衡高双折射和低传输损耗,此时双折射为 1.0×10^{-4} ,传输损耗约为 10^{-2} dB/m 。最后,在波长 1550 nm 处,再次基于图 2(g)所示的光纤结构 ($d=1.5 \mu\text{m}, r=8 \mu\text{m}$),研究模式的双折射和传输损耗随着 t_2/t_1 的变化。如图 3(e)和(f)所示,双折射高于 1.0×10^{-4} ,而且与图 2(i)所示的仿真结果相比,传输损耗进一步减小。最后,在工作波长 1550 nm 处,选择了最佳厚度差 t_2/t_1 比值为 1.7,此时的双折射为 1.2×10^{-4} , HE_{11x} 和 HE_{11y} 的传输损耗分别为 0.002 dB/m 和 0.013 dB/m 。相较于 Mousavi 等^[25]提出的光波导结构,本文提出的反谐

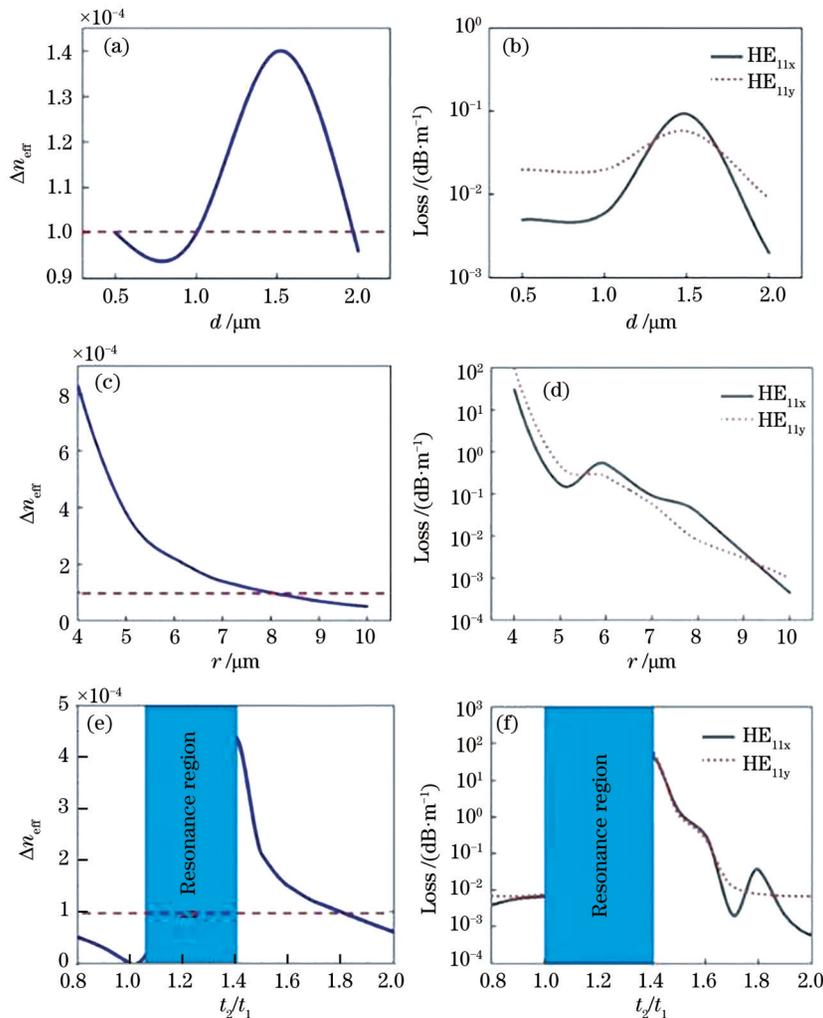


图 3 不同参数优化后的结果。(a),(b)正交方向相邻两个套管之间的距离;(c),(d)空气芯子半径;(e),(f)正交方向套管的厚度差

Fig. 3 Optimized results of different parameter. (a) ,(b) Distance between two adjacent tubes in the orthogonal direction; (c), (d) radius of air core; (e), (f) thickness difference of tubes in orthogonal direction

振光纤在 1550 nm 处最小损耗降低了 0.041 dB/m, 更有利于在实际大容量偏振复用系统中应用。

使用优化后的空芯光纤结构 ($t_2/t_1=1.7, d=1.5 \mu\text{m}, r=8 \mu\text{m}$), 图 4(a) 和 (b) 展示了 HE_{11x} 和 HE_{11y} 在 1550 nm 处的归一化电场, 其中绿色箭头表示电场矢量。然后, 研究在波长 1200 nm 至 2250 nm 之间模式的传输性能 (双折射, 传输损耗和色散)。如图 5(a) 和 (b) 所示, 在 1425~1725 nm (带宽 300 nm) 范围内, 双折射大于 1.0×10^{-4} , 传输损耗在 0.002 dB/m~0.185 dB/m 范围内。如图 5(c) 所示, 当波长接近谐振区域时, 色散值会变大, 但在 1425~1725 nm 范围内, 色散值低于 $45.51 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。还可以观察到双折射和传输损耗之间的平衡取决于波长的范围。此外, 在 1550 nm 处计算了沿 x 轴和 y 轴方向弯曲时 HE_{11x} 和 HE_{11y} 的弯曲损耗^[31-32]。如

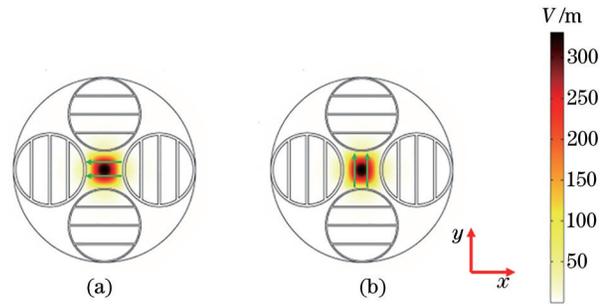


图 4 HE_{11x} 和 HE_{11y} 在 1550 nm 处的归一化电场, 其中绿色箭头表示电场矢量。(a) HE_{11x} , (b) HE_{11y}

Fig. 4 Normalized electric fields of HE_{11x} and HE_{11y} at 1550 nm. Green arrows indicate the electric vectors. (a) HE_{11x} , (b) HE_{11y}

图 5(d), 由于在空气芯子中传输, 当沿 x 轴和 y 轴方向弯曲半径超过 2 cm 时, 两个正交偏振模式的弯曲损耗均低于 0.2 dB/圈。

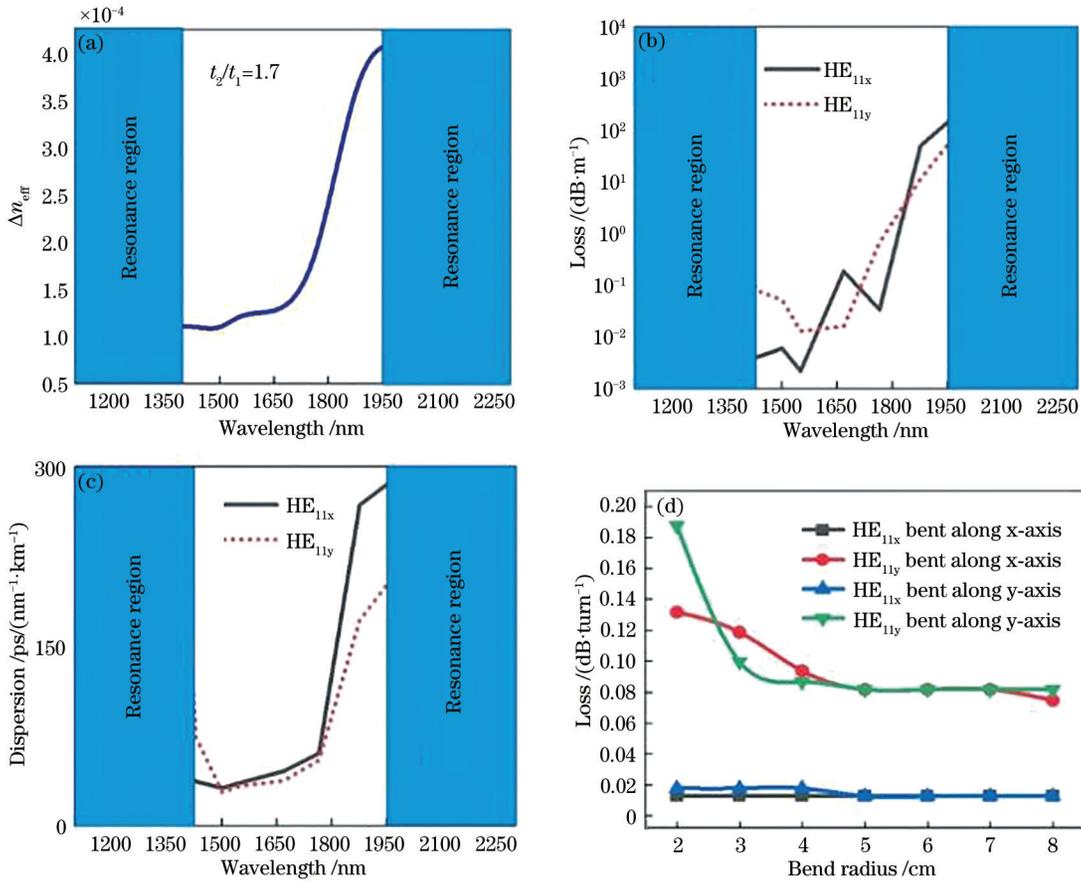


图 5 与波长相关的传输性能以及光纤的弯曲性能。(a) 双折射; (b) 损耗; (c) 色散; (d) 弯曲损耗

Fig. 5 Wavelength-dependent transmission performance and fiber bending performance. (a) Birefringence; (b) loss; (c) dispersion; (d) bending loss

4 结 论

提出一种新型的反谐振反射空芯光纤, 通过在正交方向上不同厚度的套管中加入反谐振层来实现

正交偏振保持模式的传输。为了在高双折射和低传输损耗之间取得平衡, 研究了套管中反谐振层的数量, 套管厚度, 空气芯子尺寸以及正交方向上相邻两个套管之间距离的影响。仿真结果表明, 所提出的

在 4 个套管上添加三个反谐振层的空芯光纤的优化结构参数满足 $t_2/t_1=1.7$, $d=1.5 \mu\text{m}$, $r=8 \mu\text{m}$ 时, 可以实现有效的偏振保持和低传输损耗。在 1425~1725 nm (带宽 300 nm) 范围内, 双折射大于 1.0×10^{-4} , 传输损耗在 0.002 dB/m~0.185 dB/m 范围内, 并且色散值小于 $45.51 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。在 1550 nm 处, 双折射为 1.2×10^{-4} , HE_{11x} 和 HE_{11y} 的传输损耗分别为 0.002 dB/m 和 0.013 dB/m。此外, 当光纤沿 x 轴或 y 轴方向弯曲时, 由于两种偏振态在空气芯子中传输, 当弯曲半径超过 2 cm 时, 弯曲损耗低于 0.2 dB 每圈。因此提出的反谐振反射空芯光纤将在数据中心, 金融网络系统等其他需要短距离, 大容量和低时延传输的领域中得到广泛的应用。本文侧重于偏振保持反谐振空芯光纤的设计和优化, 制作以及测试将根据本文的研究结果在未来进一步开展研究。

参 考 文 献

- [1] Tkach R W. Scaling optical communications for the next decade and beyond[J]. Bell Labs Technical Journal, 2010, 14(4): 3-9.
- [2] Essiambre R J, Kramer G, Winzer P J, et al. Capacity limits of optical fiber networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(4): 662-701.
- [3] Li H S, Ren G B, Gao Y X, et al. Hollow-core photonic bandgap fibers for orbital angular momentum applications[J]. Journal of Optics, 2017, 19(4): 045704.
- [4] Li W P, Kong M, Yu J J. Generation of PDM-16QAM radio frequency signal based on a polarization multiplexing optical modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 2306002.
李韦萍, 孔森, 余建军. 基于偏振复用光调制器产生 PDM-16QAM 射频信号[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2306002.
- [5] Xiao H, Li H S, Ren G B, et al. Polarization-maintaining supermode fiber supporting 20 modes[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(16): 1340-1343.
- [6] Hong Y F, Wang Y Y, Ding W, et al. Research progress on polarization maintaining hollow core fiber[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(11): 1148010.
洪奕峰, 汪滢莹, 丁伟, 等. 保偏空芯光纤的研究进展[J]. 光子学报, 2019, 48(11): 1148010.
- [7] Li H S, Ren G B, Lian Y D, et al. Broadband orbital angular momentum transmission using a hollow-core photonic bandgap fiber[J]. Optics Letters, 2016, 41(15): 3591-3594.
- [8] Noda J, Okamoto K, Sasaki Y. Polarization-maintaining fibers and their applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 1986, 4(8): 1071-1089.
- [9] Varnham M P, Payne D N, Birch R D, et al. Single-polarisation operation of highly birefringent bow-tie optical fibres[J]. Electronics Letters, 1983, 19(7): 246-247.
- [10] Terrel M A, Digonnet M J F, Fan S H. Resonant fiber optic gyroscope using an air-core fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(7): 931-937.
- [11] Yablonovitch E. Photonic band-gap structures[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1993, 10(2): 283-295.
- [12] Herrera-Piada L A, Hernández-Romano I, May-Arrijo D A, et al. Sensitivity enhancement of curvature fiber sensor based on polymer-coated capillary hollow-core fiber[J]. Sensors, 2020, 20(13): 3763.
- [13] Gao S F, Wang Y Y, Liu X L, et al. Nodeless hollow-core fiber for the visible spectral range[J]. Optics Letters, 2017, 42(1): 61-64.
- [14] Jaworski P, Yu F, Maier R R J, et al. Picosecond and nanosecond pulse delivery through a hollow-core Negative Curvature Fiber for micro-machining applications [J]. Optics Express, 2013, 21(19): 22742-22753.
- [15] Gao S F, Wang Y Y, Ding W, et al. Hollow-core conjoined-tube negative-curvature fibre with ultralow loss[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 2828.
- [16] Wei C L, Menyuk C R, Hu J. Polarization-filtering and polarization-maintaining low-loss negative curvature fibers[J]. Optics Express, 2018, 26(8): 9528-9540.
- [17] Yan S B, Lian Z G, Lou S Q, et al. A new method to achieve single-polarization guidance in hollow-core negative-curvature fibers[J]. IEEE Access, 2020, 8: 53419-53426.
- [18] Taranta A, Fokoua E N, Mousavi S A, et al. Exceptional polarization purity in antiresonant hollow-core optical fibres[J]. Nature Photonics, 2020, 14(8): 504-510.
- [19] Yerolatsitis S, Shurvinton R, Song P, et al. Birefringent anti-resonant hollow-core fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(18): 5157-5162.
- [20] Yaman F, Bai N, Zhu B Y, et al. Long distance transmission in few-mode fibers[J]. Optics Express, 2010, 18(12): 13250-13257.
- [21] Ramachandran S, Kristensen P. Optical vortices in fiber[J]. Nanophotonics, 2013, 2(5-6): 455-474.

- [22] van Putten L D, Fokoua E N, Mousavi S M A, et al. Exploring the effect of the core boundary curvature in hollow antiresonant fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(2): 263-266.
- [23] Chaudhuri S, van Putten L D, Poletti F, et al. Low loss transmission in negative curvature optical fibers with elliptical capillary tubes[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(18): 4228-4231.
- [24] Chen X, Hu X W, Li J Y. Influence factors of confinement loss of negative curvature hollow core fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(5): 050602.
陈翔, 胡雄伟, 李进延. 负曲率空芯光纤限制损耗的影响因素[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(5): 050602.
- [25] Mousavi S A, Sandoghchi S R, Richardson D J, et al. Broadband high birefringence and polarizing hollow core antiresonant fibers[J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 22943-22958.
- [26] COMSOL Multiphysics[EB/OL]. [2021-03-01]. <https://cn.comsol.com/>.
- [27] Tammela S, Ylä-Jarkko K. Optical fiber fabrication: US7813608B2[P/OL]. 2010-10-12[2021-03-03]. <http://www.google.com/patents/US7813608>.
- [28] Han S T, Chiang W H, Shieh C S, et al. Method of fabricating an optical fiber module: US20030123817 [P/OL]. 2003-07-03[2021-03-03]. <http://www.google.com/patents/US20030123817>.
- [29] Bertoncini A, Liberale C. 3D printed waveguides based on photonic crystal fiber designs for complex fiber-end photonic devices[J]. *Optica*, 2020, 7(11): 1487-1494.
- [30] Li H S, Ren G B, Zhu B F, et al. Guiding terahertz orbital angular momentum beams in multimode Kagome hollow-core fibers[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(2): 179-182.
- [31] Li H S, Ren G B, Gao Y X, et al. Particle swarm optimization of single-mode trench-assisted bend-insensitive fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(12): 1293-1296.
- [32] Schermer R T, Cole J H. Improved bend loss formula verified for optical fiber by simulation and experiment[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2007, 43(10): 899-909.