

文章编号:1001-5078(2025)03-0461-05

· 光纤传感及光通讯技术 ·

基于嵌套管的双管结构单偏振单模反谐振光纤

刘旭安¹, 郭婧¹, 陈超琦¹, 陈达如², 姜小刚³

(1. 黄山学院 信息工程学院, 安徽 黄山 245041; 2. 浙江师范大学 杭州高等研究院 浙江 杭州 311231;

3. 衢州学院 教师教育学院, 浙江 衢州 324000)

摘要:本文设计并研究了一种新型单偏振单模空芯反谐振光纤,并对其在近红外波段的单偏振单模特性进行了数值研究。与传统的多边形包层管反谐振结构不同,所提出的光纤由两个相同的薄壁管组成,它们对称地位于外包层内部,且各自内部再套嵌一个半径稍小的套管。套管的加入可以增加高阶模的限制损耗,使光纤实现单偏振单模特性。仿真结果表明,该光纤在1450 nm到1700 nm波长范围内,具有单偏振特性,在1639 nm到1672 nm波长范围内,单偏振单模特性,带宽为33 nm。该光纤可用于开发高性能单偏振单模光纤器件。

关键词:空心光纤;反谐振光纤;高双折射;单偏振单模

中图分类号:O436;TN217 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2025.03.021

Single-polarization single-mode anti-resonant fiber based on a dual-tube structure with nested tubes

LIU Xu-an¹, GUO Jing¹, CHEN Chao-qi¹, CHEN Da-ru², JIANG Xiao-gang³

(1. School of Information Engineering, Huangshan University, Huangshan 245041, China;

2. Hangzhou Institute of Advanced Studies, Zhejiang Normal University, Hangzhou 311231, China;

3. College of Teacher Education, Quzhou University, Quzhou 324000, China)

Abstract: A novel hollow-core anti-resonant fiber based on a dual-tube structure with nested tubes was proposed and numerically studied for near-infrared single-polarization single-mode operation. Unlike conventional anti-resonant structures with polygonal cladding tubes, the proposed fiber consists of two identical thin-walled tubes symmetrically positioned within the outer cladding, each internally nested with a slightly smaller radius tube. The introduction of the nested tubes enhances the confinement loss of higher-order modes, thereby enabling the fiber to achieve single-polarization single-mode operation. Simulation results demonstrate that the fiber exhibits single-polarization characteristics across the wavelength range of 1450 nm to 1700 nm, and single-polarization single-mode operation within the range of 1639 nm to 1672 nm, with a bandwidth of 33 nm. This fiber design holds significant potential for the development of high-performance single-polarization single-mode fiber devices.

Keywords: hollow-core fiber; anti-resonant fiber; high birefringence; single-polarization single-mode

1 引言

单偏振单模 (Single-Polarization Single-Mode, SPSM)

光纤在纤芯中只支持一个偏振基模,另外一种偏振基模和高阶模由于高损耗而截止。这种光纤由于具

基金项目:安徽省教育厅高校自然科学重点研究项目 (No. 2024JZZK034); 黄山学院校级人才启动项目 (No. 2024JZZK051); 安徽省教育厅教学研究项目 (No. 2023jyxm0708) 资助。

作者简介:刘旭安 (1984 -), 男, 博士, 主要从事光纤结构设计、光纤传感技术的研究。E-mail: liuxan@hsu.edu.cn/liuxan_5036@163.com

收稿日期:2025-01-13

有优异的偏振特性,完全消除了偏振模耦合和偏振模色散,被广泛应用于光纤通信^[1]、光纤传感^[2]、激光器与放大器^[3]、军事与国防以及医疗设备等领域^[4],为高速通信、高精度测量、稳定激光输出、精密实验、抗干扰传输和医疗诊断提供了可靠的技术支持。在通信领域,它减少了偏振模色散,提升了传输质量;在传感和实验中,它实现了高精度测量;在激光器和军事应用中,如光纤陀螺仪,它确保了稳定的偏振输出和抗干扰能力;在医疗设备中,它提供了高精度的光传输。

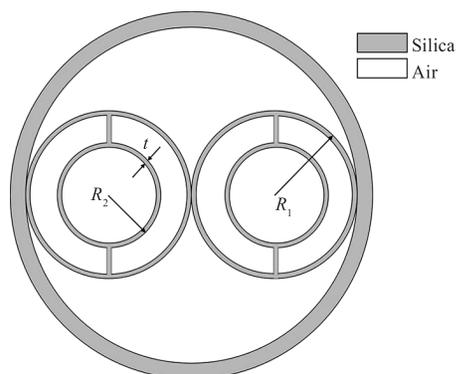
迄今为止,已广泛报道了两种类型的单偏振单模光纤,一种是实芯光纤,另一种是空芯光纤。与传统的实芯光纤相比,空芯(Hollow-core, HC)光纤将光限制在空芯区域进行传输,能够有效降低材料损耗和色散^[5-6]。根据不同的导光机制,空芯光纤可以进一步分为空芯光子带隙光纤和空芯反谐振光纤(Anti-resonant fiber, ARF)^[7]。与空芯光子带隙光纤相比,空芯反谐振光纤不依赖于光子带隙效应来导光,这意味着对包层折射率排列的要求并不严格^[8]。同时,空芯反谐振光纤结构简单,具有更宽、更理想的传输带宽,因此在近年来受到了许多关注,成为研究热点。

为了设计单偏振单模光纤,必须在光纤中禁止两个正交偏振基模中的一个和所有的高阶模式,或者承受比被选择为传输模的那个偏振基模高得多的传播损耗,以便在一定的传播距离后仍然可以实现单偏振单模特性。因此,通常有两种光纤设计方法来实现单偏振单模特性。第一种是利用在光纤的 x 和 y 方向上引入不对称的结构,使这两个正交方向的光纤有效折射率保持较大差异,当较低的有效折射率低于空间填充基模的有效折射率时,纤芯中只支持较高的有效折射率模式,这样就会形成偏振模传输^[9-12]。第二种方法是折射率匹配耦合。通过在包层中设计缺陷,使某一偏振基模有效折射率与包层缺陷有效折射率相匹配,导致该偏振模的光场能量被大量的耦合到包层缺陷处,形成高损耗。因此,两种正交偏振基模的限制损耗差异会非常大,形成偏振模传输^[13]。空芯反谐振光纤也可以采用第二种方法设计成单偏振单模光纤^[14-15]。文献[15]虽然采用第二种方法,但该光纤为硫族化物光纤,主要在中红外波段实现单偏振单模特性,存在与传统的二氧化硅光纤应用系统相互融合的问题。

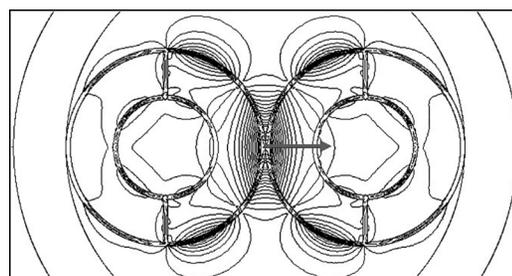
本文设计了一种简单的双管结构单偏振单模光纤,在通信波段实现了高双折射和单偏振单模性能。光纤由两个相同且相切的薄壁玻璃管组成,它们对称的分布在外包层内部,两管内部通过玻璃板各嵌套一个半径稍小的玻璃管。仿真结果表明,该光纤具有高双折射特性,达到 10^{-2} 量级。在 $1450 \text{ nm} \sim 1700 \text{ nm}$ 波长范围内可以保持单偏振特性。在 $1639 \text{ nm} \sim 1672 \text{ nm}$ 波长范围内可以保持单偏振单模特性。在 1625 nm 波长处, y 偏振基模的限制损耗达到最小值,为 $9.90 \times 10^{-5} \text{ dB/m}$ 。该单偏振单模光纤制作简单,成本低,在商用保偏光纤系统中具有潜在的应用前景。

2 光纤结构和模态特性

所提出的新型单偏振单模空芯反谐振光纤的横截面示意图如图 1(a) 显示。有一对半径和厚度都相同的反谐振管分布在外包层内部,这两根包层管都被固定在外包层内壁上,且彼此相切。两包层管内部通过玻璃板各再嵌套一个半径稍小的玻璃管,该玻璃管对高阶模损耗进行调节,引导高阶模能量泄露到包层管中,使得所选偏振基模与高阶模之间形成较大的损耗差,实现单模特性。这对内包层管外半径为 R_1 ,其内部两嵌套管外半径为 R_2 ,两种玻璃管和连接玻璃板的厚度都保持一致,记为 t ,外包层厚度为 $15 \mu\text{m}$,内半径等于 $2R_1$ 。选用二氧化硅玻璃作为光纤背景材料,二氧化硅的折射率特性用 Sellmeier 方程表征^[16]。



(a) 光纤的截面示意图



(b) x 偏振基模电场分布图

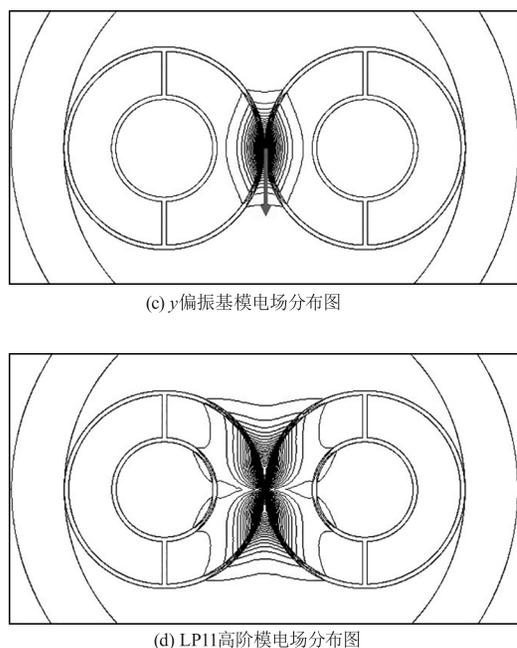


图1 空芯反谐振光纤结构及不同模式电场分布图

Fig.1 Cross-section of the proposed HC-ARF and electric field distribution of different modes

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{B_1 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - C_3} \quad (1)$$

这里, λ 是入射电磁波的波长; n 是 SiO_2 的折射率; $B_1 = 0.69616300$, $B_2 = 0.4079426$, $B_3 = 0.8974794$, $C_1 = 0.00467914826 \mu\text{m}^2$, $C_2 = 0.0135120631 \mu\text{m}^2$, $C_3 = 97.9340025 \mu\text{m}^2$ 。

本文采用在光纤研究领域广泛应用的有限元法对光纤进行了设计和仿真。为了保证仿真结果的准确性,在光纤区域外设置了厚度为 $10 \mu\text{m}$ 的完美匹配层(图1(a)中未显示)。在进行网格划分时,薄壁管和玻璃板区域的网格划分尺寸设置为小于 $0.1 \mu\text{m}$,在空气区域设置为小于 $2 \mu\text{m}$ 。当 $R_1 = 19 \mu\text{m}$, $R_2 = 10 \mu\text{m}$, $t = 0.84 \mu\text{m}$ 时,模型的总网格元数达到 471092,更密集的网格化对有效折射率的变化几乎为零。图1(b)~(d)分别为 $R_1 = 19 \mu\text{m}$, $R_2 = 10 \mu\text{m}$, $t = 0.84 \mu\text{m}$ 时,光纤 x 偏振基模、 y 偏振基模和最低损耗高阶模(LP11为最低损耗高阶模)在 1645 nm 波长处的电场分布。可以直接观察到, y 偏振基模具有较高的有效折射率(值为 1.01),可以很好地将光约束在靠近光纤中心的两管壁之间。相比之下, x 偏振基模的有效指数较低,其值只有 1.0033。 x 偏振基模与包层管模之间发生了严重耦合,导致大量的能量被泄露到包层管壁中,

因此必然会产生高限制损耗。对于高阶模来说,由于套管的调控,大大削弱了高阶模的约束能力,因此能量很容易泄漏到包层管区域。限制损耗值可由下式计算^[15]:

$$CL = \frac{20}{\ln 10} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \text{Im}(n_{\text{eff}}) \quad (2)$$

其中, λ 为工作波长, $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 为有效折射率的虚部。计算得到 y 偏振基模、 x 偏振基模和 LP11 的限制损耗值分别为 $7.12 \times 10^{-4} \text{ dB/m}$ 、 67.20 dB/m 、 1.95 dB/m 。光纤的单偏振特性由偏振消光比来描述,偏振消光比定义为 x 、 y 两偏振基模限制损耗的比值。当比值大于 100 时,则说明该光纤具有单偏振特性。光纤的单模特性由高阶模消光比来描述,高阶模消光比定义为较小的偏振基模限制损耗与最小的高阶模限制损耗的比值,当比值大于 100 时,则说明该光纤具有单模特性。根据上述定义,计算得到偏振消光比值为 94374,高阶模消光比值为 2737,结果表明,单偏振单模的运行是完全可以保证的,即光纤只有单 y 偏振基模传输。

3 损耗与单偏振单模特性分析

为了了解结构参数 R_1 , R_2 和 t 对光纤损耗特性的影响,研究了 x 偏振基模和 y 偏振基模在 1450 nm 和 1700 nm 波长下的限制损耗。首先,波长取值为 1550 nm ,在固定 $R_1 = 19 \mu\text{m}$, $R_2 = 10 \mu\text{m}$ 的条件下研究内包层管厚度 t 的影响,结果如图2所示。 x 偏振基模限制损耗随 t 的增加而缓慢增大。 y 偏振基模的限制损耗随 t 的增加先减小再增大。因为内包层管越厚, x 偏振基模越容易与包层管管模耦合,能量泄漏更容易发生,而在 y 偏振方向,当内包层管越厚时,由于全反射效应,纤芯对光场能量限制作用越大,当内包层管厚度达到一定量时,再增加厚度,会导致 y 偏振基模能量沿着管壁泄露到远离纤芯区域,因此损耗增大。

接下来,研究了固定 $R_2 = 10 \mu\text{m}$, $t = 0.84 \mu\text{m}$ 时内包层管外半径 R_1 的影响,如图3所示。结果表明 R_1 在 $18 \mu\text{m}$ 到 $21 \mu\text{m}$ 的取值范围内,对 x 偏振基模和 y 偏振基模限制损耗影响不大。最后,研究了固定 $R_1 = 19 \mu\text{m}$, $t = 0.84 \mu\text{m}$ 时内嵌套管外半径 R_2 的影响,如图4所示。结论与 R_1 保持一致,即 R_2 对 x 偏振基模和 y 偏振基模限制损耗影响也不大。合适的结构参数是 y 偏振基模的较低限制损耗取值和偏振消光比值的较高取值之间的折衷。因此,选择 $R_1 = 19 \mu\text{m}$, $R_2 = 10 \mu\text{m}$ 和 $t = 0.84 \mu\text{m}$ 作为典型的结构参数。

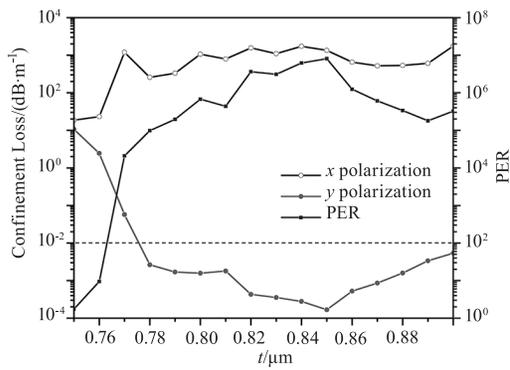


图 2 x, y 偏振基模的限制损耗和偏振模消光比随内包层管厚度 t 变化的曲线

Fig. 2 The confinement loss of the x -polarization fundamental mode, y -polarization fundamental mode, polarization extinction ratio versus tube thickness t with fixed $R_1 = 19 \mu\text{m}$ and $R_2 = 10 \mu\text{m}$ at wavelengths of 1550 nm

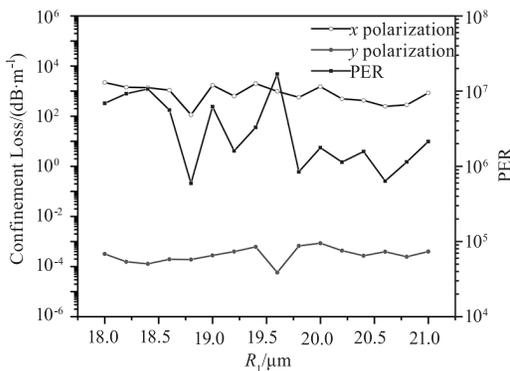


图 3 x, y 偏振基模的限制损耗和偏振模消光比随内包层管外半径 R_1 的变化曲线

Fig. 3 The confinement loss of the x -polarization fundamental mode, y -polarization fundamental mode, polarization extinction ratio versus cladding tube radius R_1 with fixed $R_2 = 10 \mu\text{m}$ and $t = 0.84 \mu\text{m}$ at wavelengths of 1550 nm

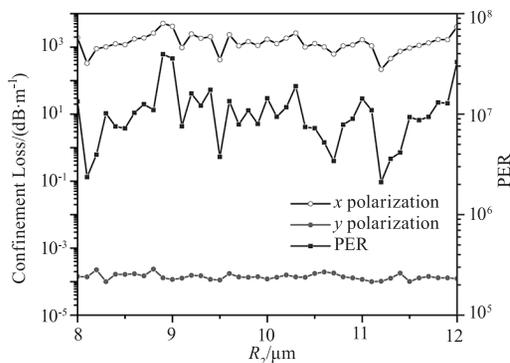


图 4 x, y 偏振基模的限制损耗和偏振模消光比随内嵌套管外半径 R_2 变化的曲线

Fig. 4 The confinement loss of the x -polarization fundamental mode, y -polarization fundamental mode, polarization extinction ratio versus nested tube radius R_2 with fixed $R_1 = 19 \mu\text{m}$ and $t = 0.84 \mu\text{m}$ at wavelengths of 1550 nm

为了测试 $R_1 = 19 \mu\text{m}, R_2 = 10 \mu\text{m}$ 和 $t = 0.84 \mu\text{m}$ 时光纤的单偏振单模特性,模拟了 x 偏振基模、 y 偏振基模和 LP11 高阶模在 1450 nm ~ 1700 nm 波长范围内的限制损耗。图 5 显示了所提出的光纤 x 和 y 偏振基模的有效折射率和双折射随波长的变化。结果表明, y 偏振基模的有效折射率大于 x 偏振基模的有效折射率,进一步证明相比 x 偏振基模, y 偏振基模的能量被更好的限制在纤芯。该种光纤在 1450 ~ 1700 nm 的近红外波段能获得高达 10^{-2} 量级的双折射。双折射可通过如下公式得到^[4]:

$$B = |n_y - n_x| \quad (3)$$

其中, n_x 和 n_y 分别是 x 和 y 偏振基模的有效折射率。图 6 显示了所提出的光纤 x, y 偏振基模和 LP11 高阶模的限制损耗随波长的变化。从图中可以看出,在 1450 nm 至 1700 nm 波长范围内, x 偏振基模一直保持很高的限制损耗。当波长小于 1635 nm 时, y 偏振基模和 LP11 高阶模的限制损耗都保持较低水平,两者损耗差较小。当波长大于 1635 nm 时, y 偏振基模和 LP11 高阶模的限制损耗不断增大,但

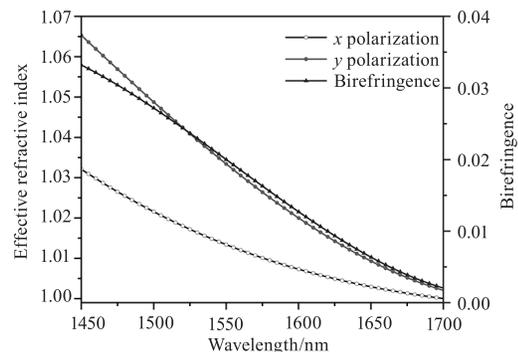


图 5 有效折射率与双折射随波长的变化曲线
Fig. 5 Variation curve of effective refractive index and birefringence with wavelength

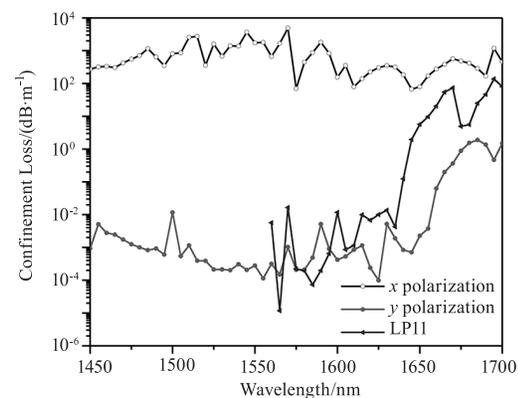


图 6 x, y 偏振基模和 LP11 高阶模的限制损耗随波长的变化曲线

Fig. 6 Variation curve of confinement loss for the x -polarization fundamental mode, y -polarization fundamental mode, LP11 with wavelength

LP11 高阶模的限制损耗增大幅度更大,导致两者损耗差增大,产生单模效应。如图 7 所示,该光纤在 1450 nm 至 1700 nm 波长范围内,偏振消光比都大于 100,说明在该范围内光纤都保持单偏振特性。在 1639 nm 至 1672 nm 波长范围内,高阶模消光比都大于 100,可以保持单模特性,单偏振单模带宽为 33 nm。在 1625 nm 波长处, y 偏振基模的限制损耗达到最小值,为 9.90×10^{-5} dB/m。

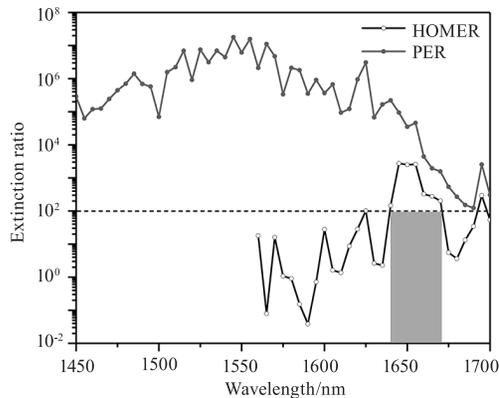


图7 偏振模消光比和高阶模消光比随波长的变化曲线
Fig.7 Variation curve of polarization extinction ratio and high-order mode extinction ratio with wavelength

4 结论

综上所述,本文提出了一种新型基于双管结构的单偏振单模空芯反谐振光纤,旨在实现高效的单偏振传输并抑制高阶模和偏振串扰。该光纤结构由两个对称且相切的包层反谐振管构成,每个包层管内部通过玻璃平板嵌套一个套管。仿真结果表明,通过优反谐振管的几何参数,使得光纤在 1450 nm 至 1700 nm 波长范围内具有单偏振特性,且在 1639 nm 至 1672 nm 波长范围内仅支持单一 y 偏振模式传输,同时抑制其他偏振模式和高阶模的传播,单偏振单模带宽为 33 nm。在 1625 nm 波长处, y 偏振基模的限制损耗达到最小值,为 9.90×10^{-5} dB/m。本文的研究为未来高性能单偏振单模光纤器件的开发提供了新的思路。

参考文献:

- [1] R Goto, R J Williams, N Jovanovic, et al. Linearly polarized fiber laser using a point-by-point Bragg grating in a single-polarization photonic bandgap fiber[J]. Optics Letters, 2011, 36(10):1872-1874.
- [2] J Noda, K Okamoto, Y Sasaki. Polarization-maintaining fibers and their applications [J]. Journal of Lightwave Technology, 1986, 4(8):1071-1089.
- [3] S Chen, L Han, A Schülzgen, et al. Local electric field enhancement and polarization effects in a surface-enhanced raman scattering fiber sensor with chessboard nanostructure[J]. Optics Express, 2008, 16(17):13016-13023.
- [4] Xu'an Liu, Weixuan Luo, Xiaogang Jiang, et al. Highly birefringent and low-loss hollow-core anti-resonant fiber based on a hybrid guidance mechanism [J]. Photonics, 2023, 10(5):525-536.
- [5] P Francesco. Nested antiresonant nodeless hollow core fiber[J]. Optics Express, 2014, 22(20):23807-23828.
- [6] M S Habib, J E Antonio-Lopez, C Markos, et al. Amezcua-Correa. single-mode, low-loss hollow-core antiresonant fiber designs[J]. Optics Express, 2019, 27(4):3824-3836.
- [7] C Markos, J C Travers, A Abdolvand, et al. Hybrid photonic-crystal fiber[J]. Reviews of Modern Physics, 2017, 89(4):045003-045057.
- [8] L Jiang, Y Zheng, L Hou, et al. A novel ultra-broadband single-polarization single-mode photonic crystal fiber[J]. Optics Communications, 2017, 396:8-14.
- [9] D Lu, X Fang, X Li, et al. Single-polarization single-mode photonic crystal fibers with uniformly sized air holes [J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(2):620-626.
- [10] F Zhang, M Zhang, X Liu, et al. Design of wideband single-polarization single-mode photonic crystal fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(5):1184-1189.
- [11] D Lu, J Liu. Broadband single-polarization single-mode operation in photonic crystal fibers with hexagonally latticed circular airholes[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(10):2452-2458.
- [12] D Lu, X Zhang, M Chang, et al. Endlessly single-polarization single-mode holey fibers with low confinement loss [J]. Optics Letters, 2013, 38(15):2915-2918.
- [13] S Yan, S Lou, W Zhang, et al. Single-polarization single-mode double-ring hollow-core anti-resonant fiber[J]. Optics Express, 2018, 26(24):31160-31171.
- [14] S Liu, L Zhang, M Tian, et al. Epsilon negative-based, broadband single-polarization single-mode hollow-core anti-resonant photonic crystal fiber [J]. Optics Express, 2021, 29(10):15664-15677.
- [15] X Jiang, H Yang, X Liu, et al. A mid-infrared ultrawide-bandwidth single-polarization single-mode fiber based on a twin-tube structure[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(9):2840-2845.
- [16] N Chen, M Chang, X Lu, et al. Numerical analysis of mid-infrared D-shaped photonic crystal fiber sensor based on surface-plasmon-resonance effect for environmental monitoring [J]. Applied Sciences, 2020, 10(11):3897-3908.