

浅谈空芯反谐振光纤的发展与应用展望

戈西伟, 冯翔, 贾慧, 霍爱国, 颜硕

中国人民解放军63726部队, 宁夏 银川

收稿日期: 2025年2月19日; 录用日期: 2025年4月20日; 发布日期: 2025年4月28日

摘要

随着信息技术的飞速发展, 人民都在生活中享受(依赖)着高速的网络, 信息传递的速度、数据的定位和准确性对我们都有着深远的意义。从日常使用的互联网发微信、刷抖音到信息数据传输、大数据的应用等, 这一切都离不开一种神奇的技术——光纤通信。传统的实心光纤虽然已广泛应用, 但其性能受限于材料特性, 难以满足未来高速、大容量通信的需求。空心光缆作为一种新型光纤技术, 以其独特的结构和优异的光传输性能, 在通信领域展现出巨大的应用潜力。

关键词

空芯光纤, 结构特点, 应用趋势

A Brief Discussion on the Development and Application Prospects of Hollow Anti-Resonant Fibers

Xiwei Ge, Xiang Feng, Hui Jia, Aiguo Huo, Shuo Yan

Chinese People's Liberation Army 63726 Unit, Yinchuan Ningxia

Received: Feb. 19th, 2025; accepted: Apr. 20th, 2025; published: Apr. 28th, 2025

Abstract

With the rapid development of information technology, people are relying on high-speed networks in their daily lives. The speed of information transmission, the positioning and accuracy of data all have profound significance for us. From the daily use of the Internet to send WeChat, brush TikTok to information data transmission, big data application, etc., all this is inseparable from a magical technology—fiber optic communications. Although traditional solid fiber has been widely used, its

performance is limited by material characteristics, and it is difficult to meet the needs of high-speed and large-capacity communication in the future. As a new optical fiber technology, hollow fiber cable has shown great application potential in the field of communication due to its unique structure and excellent optical transmission performance.

Keywords

Hollow-Core Fiber, Structural Features, Application Trend

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

光纤通信技术作为现代通信领域的基石，以其高带宽、低损耗和长距离传输能力，为信息社会的快速发展提供了有力支撑。然而，随着信息技术的不断进步和业务需求的日益增长，大数据、云计算和物联网等新兴技术的快速发展，传统普通光纤在某些方面已难以满足未来通信系统的要求[1]。空心光纤作为一种新型的光传输介质，以其独特的结构和卓越的性能，正逐渐成为光通信领域下一代高速通信网络的理想选择。

2. 空芯反谐振光纤的演进历程

普通光纤通常由纤芯和包层组成，纤芯的折射率高于包层，使得光信号在纤芯与包层之间的全反射作用下沿纤芯传输。这一原理确保了光信号在光纤中的稳定传输，但同时也带来了一些局限性。1) 时延问题：传统光纤的群折射率通常大于 1，导致光信号在传输过程中存在一定的时延。这对于高速通信系统和实时性要求较高的应用来说是一个不利因素。2) 非线性效应：由于光信号在纤芯中传输时与固体材料相互作用，会产生克尔光学非线性等效应，限制了传输容量的进一步提升。3) 材料限制：传统光纤主要依赖于石英玻璃等固体材料，其性能受到材料特性的束缚，如损伤阈值、衰减等[2]。

2.1. 普通光纤的原理

光纤是一种细如头发丝的透明纤维，通常由高纯度的二氧化硅(SiO_2)制成。它的内部结构包括核心(Core)和包层(Cladding)，其中核心用于传导光线，而包层则负责将光线反射回核心内以实现全反射效应。图 1 光纤信号传输。通过这种方式，即使是在弯曲的情况下，光也可以几乎无损失地沿着光纤传播。

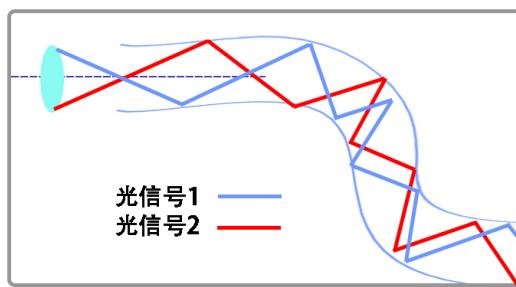


Figure 1. Optical signal transmission

图 1. 光纤信号传输

2.2. 空芯反谐振光纤的导光机理

空芯反谐振光纤是一种微结构光纤，其独特之处在于拥有一个充满空气或真空的中空纤芯，使得光信号能够在空气介质中传输，从而极大降低了模场与石英材料的重叠度，围绕在中空纤芯周围的包层结构实现了对光信号的有效限制和传输。以最简单的空芯光纤结构为例，即单个空芯薄壁管，来说明其导光原理，如图 2 所示[3]。其中，玻璃层的折射率为 n_1 ，厚度为 t ，空气芯的折射率为 n_0 ，纵向和横向传播常数分别为 K_L 和 K_T 。在空气芯区域，其纵向传输常数 K_L 接近 $n_0 k_0$ ，横向传播常数 K_T 为 0，在玻璃壁区域的横向传播常数 K_T 为 $\sqrt{k_0^2 n_1^2 - k_0^2 n_0^2}$ 。设空芯光纤中的光直接透传玻璃壁的相位变化为 ϕ_0 ，而经过在玻璃壁表面发生两次反射到达玻璃壁另一侧的光相位变化为 ϕ_1 ，则二者之间的相位差 $\Delta\phi$ 为 $2t\sqrt{k_0^2 n_1^2 - k_0^2 n_0^2}$ 。当 $\Delta\phi$ 为 π 的偶数倍时，光在玻璃层的外侧相干增强，不能被限制在光纤内，这种状态就为谐振状态，此时相位差满足谐振条件[4]。

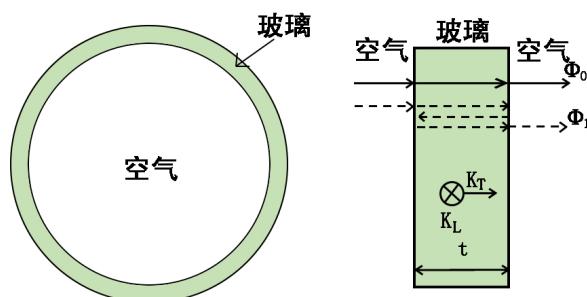


Figure 2. Theoretical model of light guiding in hollow-core optical fibers
图 2. 空芯光纤导光理论模型

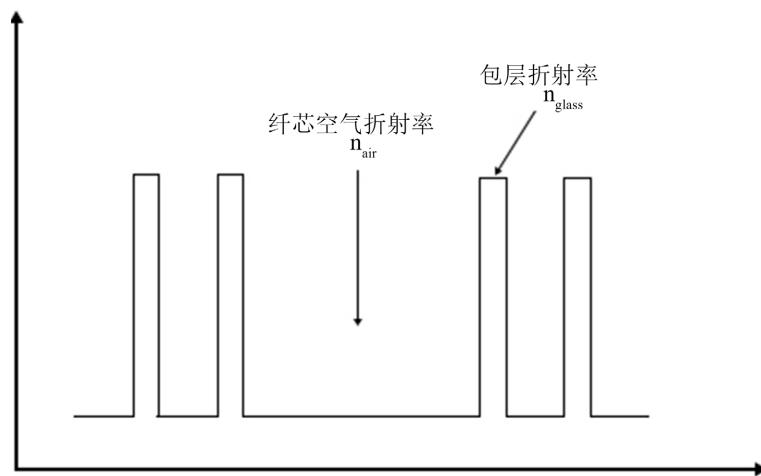


Figure 3. Refractive index diagram of hollow anti-resonant fiber
图 3. 空芯反谐振光纤的折射率示意图

反谐振光纤的包层通常由多层不同的材料或者尺寸的微结构组成，这些结构形成了反谐振条件，当光信号在光纤中传播时，如果光纤不能满足包层的谐振条件，光将被反射回纤中，并沿着轴向继续传播，这种反射机制是基于光纤中高折射率层与低折射率层之间的界面反射图 3 空芯反谐振光纤的折射率示意图[5]。由于空芯纤芯的折射率远低于包层石英的折射率，光信号在纤芯与包层界面处发生全内反射，从

而被限制在纤芯中传输，同时通过调控包层石英壁的厚度和微结构，可以实现对传输窗口的选择，使得特定波长的光信号能够在纤芯中高效传输。此外，空芯反谐振光纤的这种导光机理使得其具有一系列优良性能，如高损伤阈值、低色散、低非线性等，这些性能使得空芯反谐振光纤在高功率激光传输、中红外波段激光传输以及可见及紫外波段光传输等领域展现出独特优势[6]。

2.3. 空芯反谐振光纤的演进

光纤是光通信的基础，光通信经历了从光纤的发明到光纤通信的实现、商业化、技术进一步发展、全球化和新发展等多个阶段，成为了现代通信的重要组成部分，为人们的生活和工作带来了巨大的便利和支持。空芯光纤(Hollow-Core Fiber, HCF)的纤芯采用空气作为导光介质，很大程度地降低了光纤材料特性对光纤性能的影响，具有全波段低损耗、超低非线性、超低色散和超低时延等优良特性[7]。

2019年，南安普顿大学光电研究中心发明了著名的嵌套式抗共振无节点光纤(Nested Antiresonant Nodeless Fiber, NANF)，将空芯光纤的损耗降到1.3 dB/km。南安普顿大学的研究人员，在NANF的结构基础上，持续优化光纤参数与拉制工艺，于2021年成功实0.22 dB/km的超低传输损耗，2024年，微软联合南安普顿大学采用双嵌套反谐振无节点光纤(Double Nested Anti-resonant Nodeless Fiber, DNANF)结构，优化光纤制作工艺，实现0.11 dB/km的传输损耗，刷新了HCF传输损耗记录。图4空芯光纤发展过程[8]

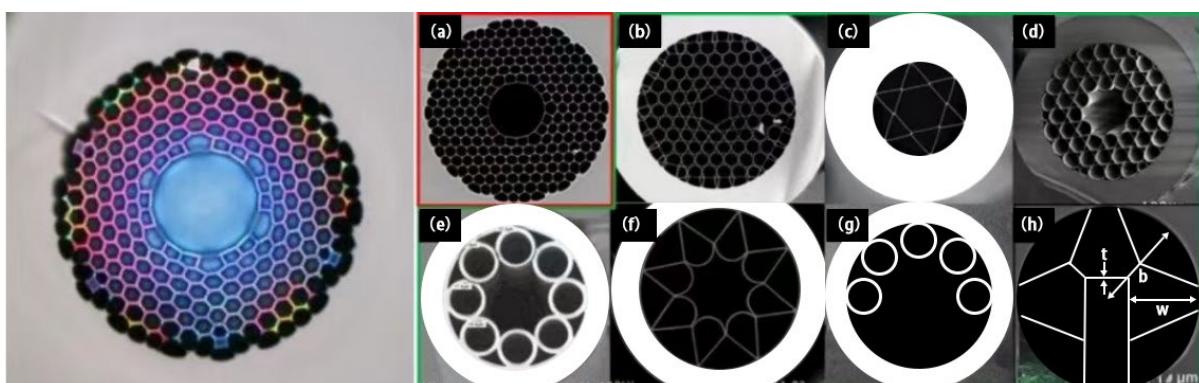


Figure 4. Development process of hollow fiber
图4. 空芯光纤发展过程

3. 空芯光纤的设计与性能技术

空心反谐振光纤(HC-ARF)是一种依靠反谐振反射光波导进行导光的微结构光纤，其剖面结构设计对于光纤的性能至关重要。

3.1. 空芯光纤结构设计

空心反谐振光纤的结构主要包括纤芯、内包层和外包层。纤芯由低折射率的空气填充，这是光信号传输的主要通道[9]。内包层通常由多层不同材料或尺寸的微结构组成，如毛细管结构，这些微结构形成反谐振条件，使得特定波长的光在纤芯中发生反复反射，而不泄漏到包层中[10]。外包层则采用高折射率的材料，如二氧化硅，以进一步抑制光泄漏。南安普顿大学提出一种横向无损检测空芯光纤内部结构的技术，并成功对NANF和DNANF的结构进行测量。NANF和DNANF的横截面测量结果如图5所示[11]。图5(a)是NANF的横截面，其中，外嵌套管平均直径 d_1 为26.6 μm ，内嵌套管平均直径 d_2 为12.1 μm 。图5(b)是非破坏测量法和显微法得到的5个内外嵌套管的直径，两种技术拥有优秀的测量一致性，内

外管的测量差异分别为 0.7% 和 1.2%。DNANF 的横截面如图 5(c) 所示, 其中, 三个嵌套管中外嵌套管平均直径 d_1 为 $29.9 \mu\text{m}$, 中嵌套管平均直径 d_2 为 $25.4 \mu\text{m}$, 内嵌套管平均直径 d_3 为 $8.0 \mu\text{m}$ 。同样, 图 5(d) 展示了两种技术的测量差异, 外、中和内嵌套管平均差异分别为 0.3%、0.6% 和 3%。非破坏测量法相较显微法, 具有识别亚微米级直径波动的能力[12]。

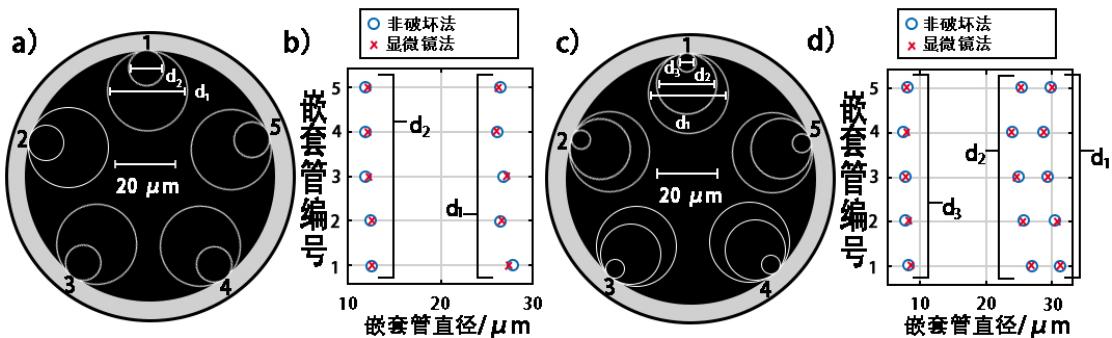


Figure 5. (a) Non destructive measurement of NANF cross-section; (b) Comparison of non-destructive and microscopic methods for measuring NANF; (c) Non destructive measurement of DNANF cross-section; (d) Comparison of non-destructive and microscopic methods for measuring DNANF

图 5. (a) 非破坏法测量的 NANF 横截面; (b) 非破坏法和显微法关于 NANF 的测量对比; (c) 非破坏法测量的 DNANF 横截面; (d) 非破坏法和显微法关于 DNANF 的测量对比

3.2. 空芯光纤非线性系数

空芯光纤的非线性效应比常规玻芯光纤的非线性效应低 3 到 4 个数量级, 这就说明在同等条件下, 空芯光纤产生的非线性效应要远小于玻芯光纤。中国移动联合暨南大学实现了一种测量 HCF 克尔非线性系数的新方法[13]。该方法采用高阶正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)调制星座图中的星座点非线性相移推算得到克尔非线性系数, 避免了非理想波束发射、频谱采集和光纤长度不足引起的测量不准确。测量原理如图 6 所示[14]。高功率调制信号在经过光纤后受非线性影响, 会引起星座图中的星座点旋转, 每个星座点的相移可以通过测量旋转角度得到, 如图 6(a) 所示。非线性相移 φ_{NL} 与信号强度的关系为 $\varphi_{\text{NL}} = \gamma \text{Leff} |A(0, t)|^2$, 其中, A 为信号复振幅, γ 为非线性系数, Leff 为光纤有效长度。通过线性拟合非线性相移与信号强度, 得到拟合曲线斜率 k ($k = \gamma \text{Leff}$), 即可得到非线性系数 γ , 如图 6(b) 所示[11]。

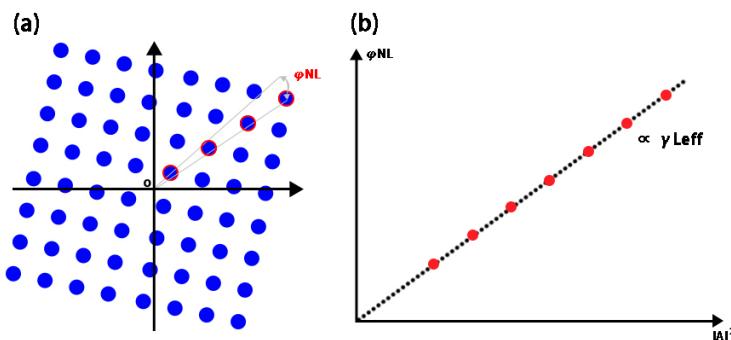


Figure 6. (a) Through nonlinear phase shift; (b) Linear fitting of nonlinear phase shift to input power

图 6. (a) 经过非线性相移; (b) 非线性相移与输入功率的线性拟合

实验结构如图 7 所示, 测量得到的 NANF 克尔非线性系数为 $2.2 \times 10 - 23 \text{ m}^2/\text{W}$ @1550 nm, 与已发

表文献测量的 $2.3 \pm 0.3 \times 10 - 23 \text{ m}^2/\text{W}$ 大约一致[15]。

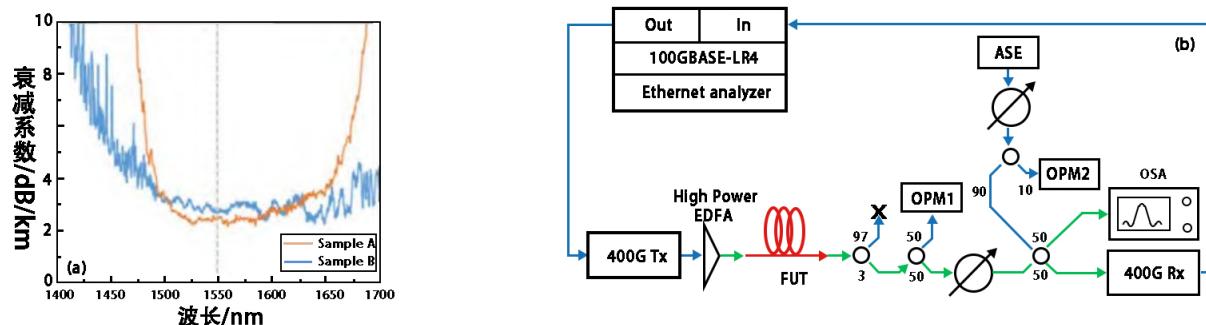


Figure 7. (a) Loss spectra of NANF; (b) measurement structure
图 7. (a) NANF 的损耗谱; (b) 测量结构

4. 空芯光纤的发展趋势及应用

随着新型材料和制造技术的不断进步, 空芯光纤的应用领域将进一步扩大。在通信领域, 空芯光纤在量子通信和空间光通信中发挥重要作用, 为未来高速通信网络提供新的技术支持。在传感领域, 空芯光缆的高灵敏度和低非线性效应将使其在高精度传感器和生物传感器中得到更广泛的应用, 在工业加工领域, 空芯光缆的高效、精确材料加工能力将使其在制造业中发挥更大的作用[16]。

4.1. 在通信领域应用

空芯光纤在通信领域的应用主要体现在长距离光通信传输和高容量数据传输上, 其自身的低损耗和高带宽特性, 空芯光纤能够显著降低信号衰减和色散, 提高传输效率和可靠性, 特别是在量子通信和空间光通信中, 空芯光纤展现出了独特的优势图 8 反谐振光纤。试验显示, 空芯光纤的光传输速度比单模光纤提升近 50%, 延迟率降低近 30%, 可见空芯光纤损耗低到与普通光纤非常接近甚至低于普通石英光纤, 非常适合低时延及无中继超长距离光纤通信传输[17], 有望在 AI 超算通信网络领域获得应用。

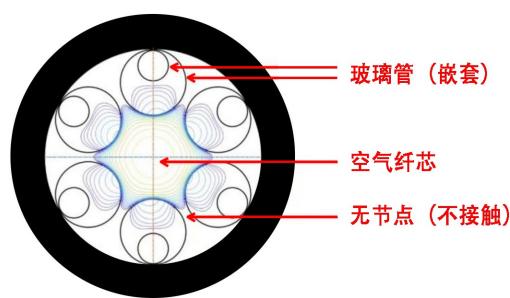


Figure 8. Anti-resonant fiber
图 8. 反谐振光纤

4.2. 在传感领域应用

空芯光纤具有更高的灵敏度和分辨率, 与传统干涉术相比, 空芯光纤可以实现高度集成化和远程控制, 还可以抵抗腐蚀和电磁干扰, 同时具有更强的灵活性和大孔径特性, 可以用于光学传感领域, 测量温度、压力、流量和化学等参数, 如图 9 所示[18]。结合基于空芯光纤的通信应用, 基于空芯光纤的通信感知一体化技术也在前沿研究。

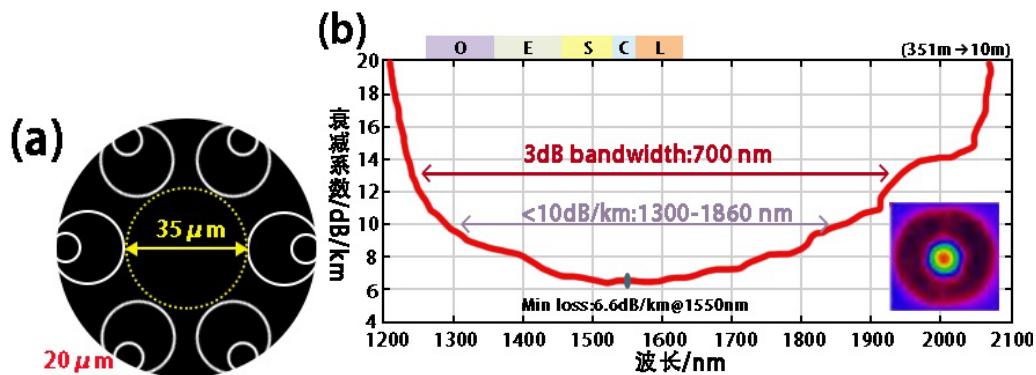


Figure 9. (a) The aperture of the hollow core fiber; (b) Loss spectra

图 9. (a) 空芯光纤的孔径; (b) 损耗谱

5. 结束语

空心光缆以其独特的空心结构和优异的光学性能，在通信、传感、工业加工等领域展现出巨大的应用潜力。随着材料科学和制造技术的进步，空芯光缆的技术性能将不断提升，应用领域将进一步拓展。未来，空心光缆有望成为光通信领域的重要支柱，为信息技术的发展做出更大贡献。同时，我们也应看到空心光缆在发展过程中仍面临一些挑战，如制造工艺复杂、成本较高等问题，需要业界共同努力加以解决。

通过对比分析可以看出，空心光纤作为一种新型的光传输介质，在性能上具有显著优势，在多个领域展现出了广阔的应用前景。未来随着技术的不断进步和应用领域的不断拓展，空心光纤将在光通信行业中发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1] 戎华北. 光纤传感器的现状和应用[J]. 厦门科技, 2005(4): 34-36.
- [2] 姜德生. 中国光纤传感器的发展与产业化[J]. 自动化信息, 2012(1): 16-19.
- [3] 王梦玲, 高寿飞, 汪滢莹, 等. 紫外空芯反谐振光纤的研制[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 213-219.
- [4] 邓黎, 陈佟, 李伯中. 新型低损耗空芯反谐振光纤的设计制造与行业应用展望[J]. 电力信息与通信技术, 2024, 22(12): 1-6.
- [5] 丁伟, 汪滢莹, 高寿飞. 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): 49-67.
- [6] 李萍, 陈伟. 空芯反谐振光纤长距离通信的机遇与挑战[J]. 光通信研究, 2023(2): 1-8+44.
- [7] 黎敏, 廖延彪. 光纤传感器及其应用技术[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008.
- [8] 曾璇, 刘炳宏, 石艺尉. 红外低损耗空芯光纤的制作[J]. 光学时报, 2013, 33(3): 79-83.
- [9] 严世博. 新型空芯反谐振光纤的设计及其应用研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [10] 韩颖, 董婷婷. 一种红外波段低损耗空芯反谐振光纤的设计与研究[J]. 红外与毫米波学报, 2020, 39(1): 32-38.
- [11] 郑伟钦. 新型空芯反谐振光纤的理论研究与性能仿真[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- [12] 谭伟, 何宇婧, 杨从辉. 采用红外空芯光纤探头的特征谱遥测系统[J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31(2): 148-152.
- [13] 石艺尉, 周志云, 汤晓黎. 吸收式敏感传感空芯光纤的设计与制备[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(2): 111-114.
- [14] 周佳琦, 陆维嘉, 孙帮山. 空芯光纤气体传感室的优化设计[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 281-286.
- [15] 华花, 魏中晗, 石艺尉. 紫外空芯光纤光谱式气体传感系统特性[J]. 复旦学报, 2013, 52(3): 386-393.
- [16] 程华奇, 彭伟. 基于单模光纤偏心结构的光纤折射率传感器研究[J]. 光电子激光, 2012, 23(4): 649-653.
- [17] 郭娜, 朱维震, 张慧嘉, 等. 长距离空芯反谐振微结构光纤的制备研究[J]. 激光与红外, 2023, 53(4): 585-588.
- [18] 张博, 顾帅, 廉正刚, 等. 微结构空芯光纤特性及光纤测试和工程应用[J]. 光通信研究, 2023(2): 9-18.