

空气孔-沟槽辅助六芯光纤传输特性的研究

宋锡策, 闫煜鹏, 蒲俊宇, 孙宏森, 刘凯, 李长江, 钟宇豪, 余先伦*

(重庆三峡学院 电子与信息工程学院, 重庆 404020)

摘要: 为了提升光纤的传输性能,设计了一种空气孔-沟槽辅助六芯光纤结构。六芯光纤中每根纤芯被一层低折射率沟槽包围,纤芯与沟槽之间存在一层包层,同时光纤周围环绕着空气孔辅助结构。基于光纤的耦合模式理论,对光纤的串扰、模场面积以及弯曲损耗3种传输特性进行了深入分析。研究结果表明:带有空气孔-沟槽辅助结构的光纤在芯间串扰方面表现最佳,串扰值达到最低约-55 dB;而单沟槽辅助结构则有效增大了光纤的模场面积,达到最大值约 $390\mu\text{m}^2$ 。然而,不同结构下光纤的弯曲损耗变化并未呈现明显规律,但其对数取值集中在4~9 dB/m。

关键词: 空气孔-沟槽辅助光纤; 弯曲损耗; 芯间串扰; 有效模场面积

中图分类号: TN929.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2025)02-0090-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.02.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on transmission characteristics of six core optical fibers assisted by air holes and grooves

SONG Xice, YAN Yupeng, PU Junyu, SUN Hongsen, LIU Kai, LI Changjiang, ZHONG Yuhao, YU Xianlun*

(School of Electronic and information Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404020, China)

Abstract: In order to improve the transmission performance of optical fibers, an air holes and grooves six core optical fiber structure was designed. In multi-core optical fibers, each core is surrounded by a layer of low refractive index grooves, with a cladding layer between the core and the grooves, and an air hole auxiliary structure surrounding the fiber. Based on the coupled-mode theory of optical fibers, an in-depth analysis was conducted on three transmission characteristics: crosstalk, mode field area, and bending loss. The research findings indicate that the fiber with the air holes and grooves structure exhibits the best performance in terms of inter-core crosstalk, achieving a minimum crosstalk value of approximately -55 dB. On the other hand, the single-trench-assisted structure effectively increases the mode field area of the fiber, reaching a maximum value of about $390\mu\text{m}^2$. However, the variation in bending loss across different structures does not show a clear pattern, with its logarithmic values concentrated in the range of 4~9 dB/m.

Key words: air holes and grooves optical fiber, bending loss, inter chip crosstalk, effective mode field area

0 引言

随着5G、大数据和物联网等业务的迅速发展,网

络带宽的需求日益增加。在光通信网中,单根单模光纤作为数据传输的主要手段,其通信系统容量已逼近极限。为提高光纤的传输容量并获得更佳的传输性能,基于空分复用原理的多芯光纤技术应运而生^[1-3]。空分复用被认为是一种非常有前景的技术,能够大大提升网络容量,克服传统光纤通信网络面临的容量限制。多芯光纤是为满足这种需求设计的一种传输介质,它通过增加纤芯的数量充分利用空间维度,有效地解决了传统单模光纤传输容量接近理论极限的问题,使得光纤的传输容量成倍增加^[4-6]。此外,研究人员基于空分复用多芯光纤技术,通常在纤芯外围设计多种辅助结构以提升传输性能。空气孔辅助和沟槽辅助

收稿日期:2024-06-16。

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3901405)资助;国家自然科学基金项目(U2030116)资助;重庆市重点实验室项目(YB2020C0301)资助。

作者简介: 宋锡策(1999—),男,江西宜春人,重庆三峡学院电子与信息工程学院硕士研究生,主要研究方向为光纤通信、多芯光纤。获得校内二等奖学金1次,校内三等奖学金1次。在重庆三峡学院第六届物理创新竞赛中获得三等奖。

***通信简介:** 余先伦(1967—),男,硕士,教授,硕士生导师,主要从事光纤通信、激光技术和光子晶体光纤方向的研究工作。



是2种常见的辅助结构,它们可以通过更精确地控制光束传播路径、限制光的传播模式、减小光纤的有效折射率差异以及增强非线性光学效应等方式,不同程度地提升光纤性能。文献[7-10]详细介绍了沟槽辅助和空气孔辅助光纤的结构构造及不同类型辅助结构对光纤性能的影响。然而,光纤的传输性能与其它特性之间存在平衡关系,即在提高某一性能时可能会导致其它性能下降,例如传输容量和机械强度等。

在此背景下,本文设计一种空气孔和沟槽辅助的六芯光纤,旨在最大化利用光纤内的空间资源。

1 空气孔-沟槽辅助六芯光纤设计

1.1 结构设计

光纤的传输性能与其结构之间存在着平衡关系。在本次设计中,光纤的结构和参数选择主要参考以下几个要素:

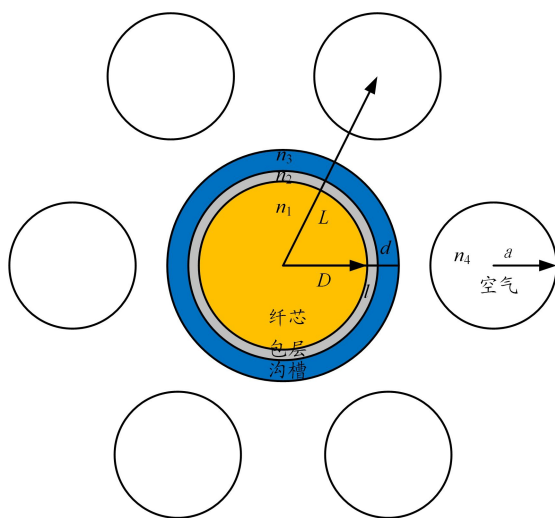
1)本次研究使用的光纤为单模光纤。根据归一化频率,光纤实现单模传输的条件是 $0 < v < 2.405$, v 是归一化频率。基于此条件,可以确定纤芯的折射率和半径的具体取值。

2)鉴于光纤内部空间有限,若纤芯间的距离过近,则可能导致相互干扰;若距离过远,则需增大光纤的半径,这不仅会提高制造成本,还会降低光纤内部空间的利用率。因此,在设计过程中,需要综合考虑光纤的性能与内部空间的有效利用。

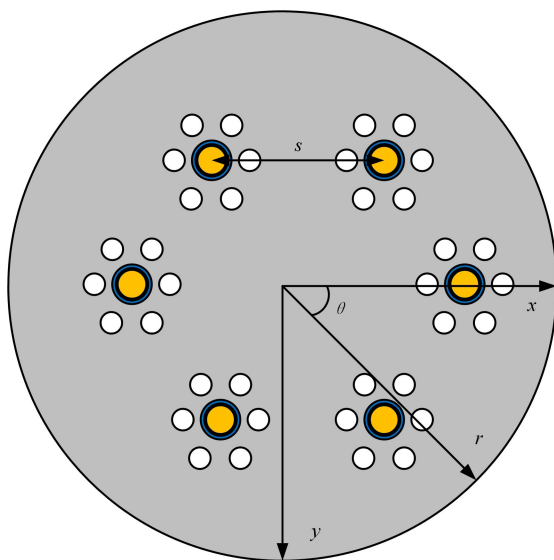
3)空气孔-沟槽辅助结构的变化及其参数的选择对光纤性能有显著影响。因此,需要根据不同辅助结构对光纤性能的影响进行仿真测试,并据此做出最佳选择。

本文设计的光纤采用结合了空气孔-沟槽这2种辅助结构的六芯光纤,其总体半径为 $62.5\ \mu\text{m}$,具体结构图如图1所示。图中, n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 分别为纤芯、包层、沟槽、空气孔的折射率, D 为纤芯的半径, d 为沟槽的宽度, a 为空气孔的半径, l 为包层的宽度, L 为纤芯中心到空气孔中心的距离, s 为相邻纤芯之间的距离, r 为光纤弯曲后发生的位移, θ 为弯曲方向的角度, R 为光纤的弯曲半径。

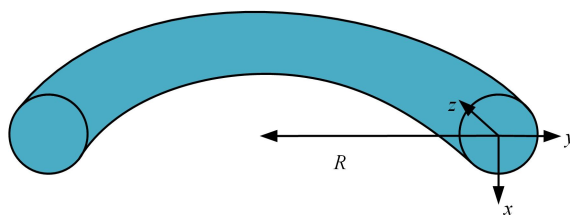
6根纤芯环绕分布在光纤内部,每根纤芯外层设有一层沟槽辅助结构,纤芯与沟槽之间由一层包层隔开。此外,每根纤芯周围还环绕排列有6个空气孔。这样的设计使得每根纤芯与其周围的辅助结构共同组成一个单元。



(a) 单元结构



(b) 光纤的总体结构



(c) 光纤的弯曲示意图

图1 空气孔-沟槽辅助结构的六芯光纤结构图

1.2 理论模型

图1(c)中的弯曲光纤可以依据式(1)描述为具有等效折射率分布的相应直光纤。

$$n_{\text{ERI}} = n^2 \left(1 + 2 \frac{r}{R} \cos \theta \right) \quad (1)$$

其中, n_{ERI} 为图1(c)中弯曲光纤等效折射率(ERI), n 为

宋锡策, 闫煜鹏, 蒲俊宇: 空气孔-沟槽辅助六芯光纤传输特性的研究

直光纤的折射率。

六芯光纤内部传播的光场可以使用耦合模式方程来描述,如式(2)所示。

$$\frac{dA_m(z)}{dz} = -j \sum_{m \neq n} k_{mn} A_n(z) \exp(j\Delta\beta_{mn} z) \varphi(z) \quad (2)$$

其中, A_m 和 A_n 分别为芯 m 和 n 中的模场分布, $\varphi(z)$ 为考虑光纤的弯曲和扭曲效应的随机相位函数, β_m 和 β_n 分别是芯 m 和 n 的传播常数, z 为光纤的传播方向。

六芯光纤中单个纤芯的耦合系数 k_{mn} 表达式如式(3)所示。

$$K_{mn} = \frac{k_0^2}{\beta_m} \frac{\iint \Delta\epsilon_m A_n A_m dS_z}{\iint A_m^2 dS_z} \quad (3)$$

其中, k_0 是自由空间的波数, S_z 是无限横截面积, $\Delta\epsilon_m$ 是纤芯与包层折射率的平方差, $\Delta\epsilon_m = n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2$, n_{core} 和 n_{clad} 分别表示纤芯和包层的折射率。 β_m 为图 1 单根纤芯的传播常数之和。

纤芯之间的串扰是影响光纤传输性能的一个重要特性。六芯光纤的平均串扰 X_{mn} 可通过式(4)计算。

$$X_{mn} = \frac{2k_{mn}^2 RW^2}{\beta_m s} \quad (4)$$

其中, W 是光纤的传播距离。

损耗是评估光纤性能的一个重要指标。为确保光波在弯曲的光纤中能够正常传播, 必须将光纤的损耗维持在足够低的水平。当光纤发生弯曲时, 会产生额外的弯曲损耗。六芯光纤的弯曲损耗 L_{loss} 可以通过以下表达式计算:

$$L_{\text{loss}} = 8.686 \frac{2\pi \text{Im}(n_{\text{eff}})}{\lambda} \quad (5)$$

其中, $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 为有效模式折射率的虚部, λ 为光纤波长。

模场面积也是光纤最重要的特性之一。六芯光纤的模场面积 A_{eff} 可以由式(6)计算。

$$A_{\text{eff}} = \frac{(\iint |E|^2 dx dy)^2}{\iint |E|^4 dx dy} \quad (6)$$

其中, E 表示光纤纤芯与包层区域内的电场强度。

2 空气孔-沟槽辅助六芯光纤的数值分析

根据图 1 中的光纤结构和理论模型, 本文在选定

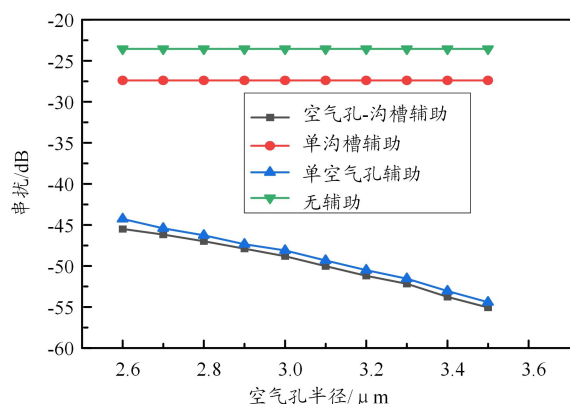
光波长 λ 为 1 550 nm 的情况下进行仿真计算。分析在 4 种不同纤芯辅助结构(空气孔-沟槽辅助、单空气孔辅助、单沟槽辅助以及无辅助)下, 光纤的芯间串扰、弯曲损耗及模场面积这 3 种传输特性的对比情况。通过控制单一变量的方法, 改变不同的参数(如光纤的沟槽宽度 d 、空气孔半径 a 和纤芯半径 D), 对这些传输特性与各参数之间的关系进行了详细的仿真分析。纤芯的各项基准参数如表 1 所示。

表 1 纤芯的各项基准参数

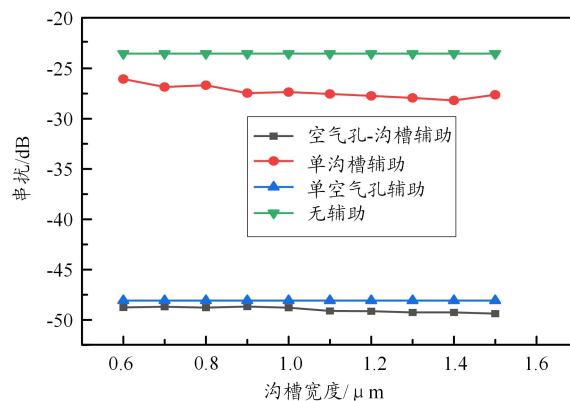
$D/\mu\text{m}$	$d/\mu\text{m}$	$l/\mu\text{m}$	$a/\mu\text{m}$	$s/\mu\text{m}$	$l/\mu\text{m}$	n_1	n_2	n_3	n_4
4	1	0.5	3	45	10	1.447 9	1.442	1.439	1

2.1 芯间串扰

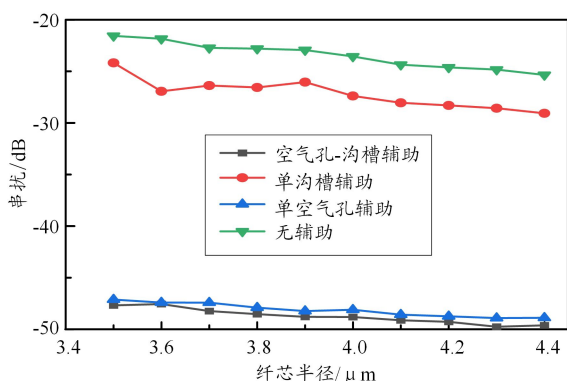
根据图 1 的光纤结构、表 1 中的基准参数以及式(1)~式(4)的计算, 得到 4 种不同辅助结构下, 光纤的纤芯间串扰与空气孔半径、沟槽宽度以及纤芯半径之间的关系, 如图 2 所示。从图 2(a)可以看出, 随着空气孔半径的增大, 4 种辅助结构光纤的串扰都显著降低。与其它结构相比, 空气孔-沟槽辅助结构光纤的串扰最低, 约为 -55 dB。从图 2(b)可以看出, 当沟槽宽度增加



(a) 串扰与空气孔半径关系图



(b) 串扰与沟槽宽度关系图



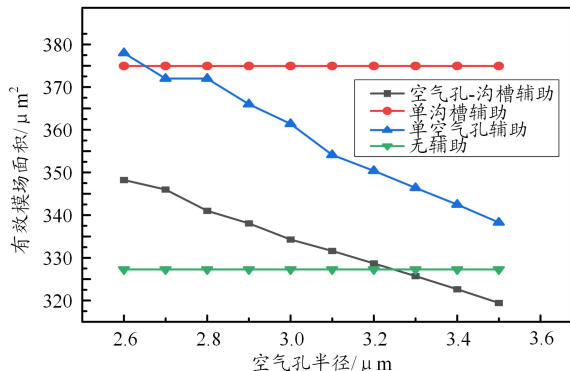
(c) 串扰与纤芯半径

图2 不同光纤结构下纤芯间串扰与空气孔半径、沟槽宽度以及纤芯半径的关系

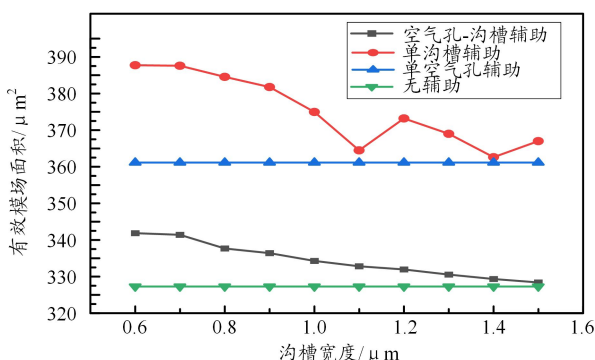
时,4种光纤的串扰均略有减少,其中空气孔-沟槽辅助结构光纤的串扰最低可达到约-49 dB。从图2(c)可以看出,随着纤芯半径的增加,4种辅助结构光纤的串扰均随之降低,其中空气孔-沟槽辅助结构的光纤串扰值下降到最低值-50 dB。根据以上结果可知,在沟槽宽度为1 μm 、空气孔半径为3.5 μm 以及纤芯半径为4 μm 的条件下,该空气孔-沟槽辅助结构的光纤串扰最低可达约-55 dB。

2.2 有效模场面积

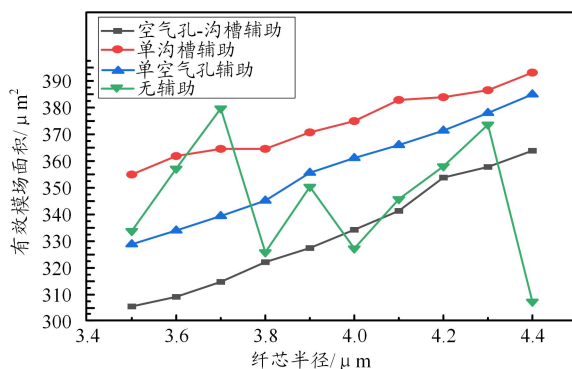
根据图1的光纤结构及表1中的基准参数,利用式(6)分别计算得到的4种不同辅助结构光纤的模场面积与空气孔半径、沟槽宽度以及纤芯半径的关系,如图3所示。从图3(a)可以看出,随着空气孔半径的增加,4种辅助结构光纤的有效模场面积都显著减小。与其它结构相比,单空气孔辅助结构光纤的有效模场面积最大,可达约378 μm^2 。从图3(b)可以看出,随着沟槽宽度的增加,4种辅助结构光纤的有效模场面积都逐渐减小,其中单沟槽辅助结构下的光纤有效模场面积最大,约为387 μm^2 。从图3(c)可以看出,当纤芯半径增加时,无辅助结构的光纤有效模场面积的变化没



(a) 有效模场面积与空气孔半径关系图



(b) 有效模场面积与沟槽宽度



(c) 有效模场面积与纤芯半径

图3 不同的光纤结构下光纤的模场面积与空气孔半径、沟槽宽度以及纤芯半径的关系

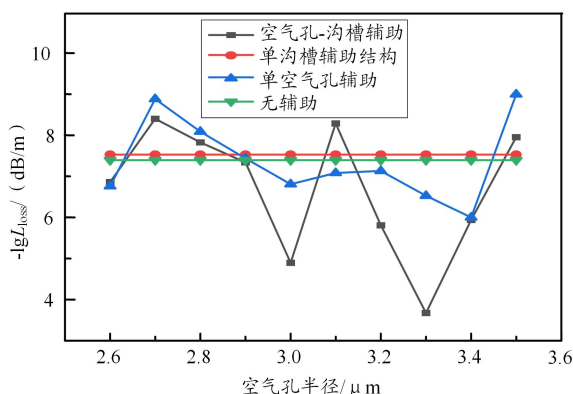
有明显规律;然而,带有辅助结构光纤的有效模场面积显著增大。由上述结果可知,在沟槽宽度为1.0 μm 、纤芯半径为4.4 μm 的情况下,单沟槽辅助结构的光纤有效模场面积达到最大值,约为390 μm^2 。

综上所述,在大多数情况下,引入辅助结构可有效增大光纤的有效模场面积,并且在调整纤芯半径时,带有辅助结构的光纤的有效模场面积波动幅度相对更小。

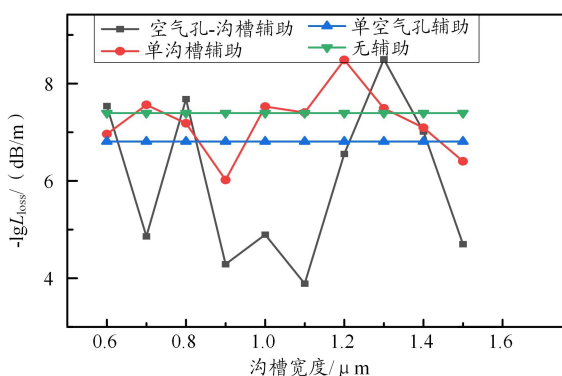
2.3 弯曲损耗

根据图1的光纤结构及表1中的基准参数,利用式(5)分别计算了4种不同辅助结构下光纤的弯曲损耗与空气孔半径、沟槽宽度以及纤芯半径的关系,如图4所示。为了进一步直观地表现光纤的损耗变化,对计算的结果值进行了对数处理。可以看出,不论是改变空气孔半径、沟槽宽度还是纤芯半径,弯曲损耗的变化都是不规律的。然而,4种不同辅助结构的光纤在取对数后的弯曲损耗集中在4~9 dB/m这个区间内。在沟槽宽度为1.2 μm 、纤芯半径为4.4 μm 的情况下,单沟槽辅助结构的光纤表现出最低的弯曲损耗。因此,制作特定结构的光纤时,通过调整这些关键参数可以获得更小的弯曲损耗。

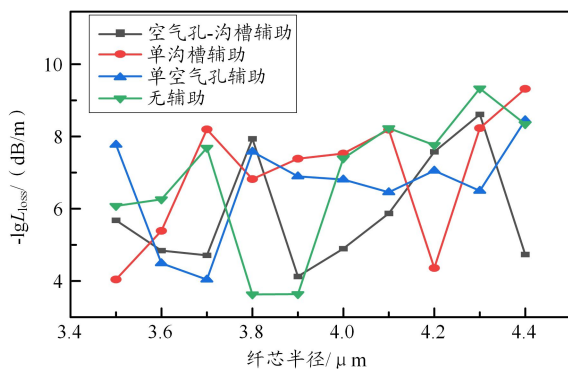
宋锡策, 闫煜鹏, 蒲俊宇: 空气孔-沟槽辅助六芯光纤传输特性的研究



(a) 弯曲损耗与空气孔半径的关系图



(b) 弯曲损耗与沟槽宽度的关系图



(c) 弯曲损耗与纤芯半径的关系图

图4 不同的光纤结构下光纤的弯曲损耗与空气孔半径、沟槽宽度以及纤芯半径的关系

3 结束语

本文设计了一种空气孔-沟槽辅助六芯光纤,通

过仿真计算和数据分析显示,空气孔和沟槽辅助结构显著提升了光纤的传输性能。研究结果表明,不同辅助结构对光纤传输特性有不同影响:空气孔-沟槽辅助结构能将芯间串扰显著降低至-55 dB;单沟槽辅助结构能有效将模场面积增大至约 $390 \mu\text{m}^2$ 。尽管弯曲损耗在不同结构下变化无明显规律,但对数化处理后取值集中在 4~9 dB/m,表明可通过参数优化进一步改善。综合对比可知,各光纤结构在传输特性上各有优势,未来研究可探索优化辅助结构设计,以实现光纤传输特性的全面提升。

参考文献:

- [1] HOSSEINI S, DE MIGUEL I, MERAYO N, et al. Energy efficient multipath routing in space division multiplexed elastic optical networks[J]. Computer Networks, 2024, 244: 110349–110349.
- [2] GELMECHA J D, GOSHU N G, AYANE H T, et al. Capacity enhancement in fiber optic communication systems using space division multiplexing[J]. Journal of Optical Communications, 2022, 45(s1): s831–s846.
- [3] TIWARI K, BATHAM D, THAKARE V V. Space division multiplexing elastic optical network-challenges and opportunities [C]//International Conference on Sustainable and Innovative Solutions for Current Challenges in Engineering & Technology. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 345–357.
- [4] NAKAJIMAK, MATSUIT. How can we consider multi-core fibre standard[J]. IET Optoelectronics, 2024, 18(6): 162–168.
- [5] HAYASHI T, SAKAMOTO T, YAMADA Y, et al. Randomly-coupled multi-core fiber technology[J]. Proceedings of the IEEE, 2022, 110(11): 1786–1803.
- [6] MASANORI K. Physical interpretation of intercore crosstalk in multi-core fiber: effects of macrobend, structure fluctuation, and microbend: comment[J]. Optics Express, 2023, 31(14): 23212–23213.
- [7] WANG N, LIU Y, LI W, et al. Design of a trench-assisted optical fiber for generating Bessel beams with different shapes[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(4): 1–5.
- [8] MU X, OTTINO A, FERREIRA F M, et al. Design and transmission analysis of trench-assisted multi-core fibre in standard cladding diameter[J]. Optics Express, 2022, 30(21): 38152–38166.
- [9] WANG G, ZHANG J, ZHANG H, et al. Low cross talk crescent-shaped pore-assisted few-mode multi-core optical fiber for optical communication [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2022, 39(7): 1839–1846.
- [10] ZHANG A, LIU Z, TU Q, et al. Trace detection of cadmium(II) ions based on an air-hole-assisted multicore microstructured optical fiber[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2022, 365: 131941–131941.