材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20240813002

一种新型轨道角动量光纤的设计与研究

赵丽娟[1,2]，静恩博[1]，徐志钮[1*]，华子明[1]，姬昆鹏[3]，李军辉[3]，许长清[4]，李文锋[4]

（1. 华北电力大学 电气与电子工程学院，河北 保定 071003；2. 华北电力大学 河北省电力物联网技术重点实验室，河北 保定 071003；3. 国网电力工程研究院有限公司，北京 100069；4. 国网河南省电力公司经济技术研究院，郑州 450052）

摘　要： 设计并研究了一种包层采用三层矩形空气孔结构的新型光子晶体光纤。通过有限元法建模并优化确定了该光纤的最优结构，进一步分析了其在1 300～1 700 nm波长范围内的关键光学参数。结果表明，该光纤在此波段内可支持46种轨道角动量模式的稳定传输，且相邻模式间的有效折射率差均大于1×10^{-4}。此外，模式纯度均达到98.8%，有效模场面积均大于6.4×10^{-11} m^2，非线性系数均低于2.24×10^{-3}，数值孔径最大值为0.1180。与现有光子晶体光纤相比，该设计具有传输模式数量多、传输损耗低、材料易获取等优点，表明其具备在未来大容量光纤通信系统中的潜在应用价值。

关键词： 轨道角动量；新型光子晶体光纤；有效模式折射率差；高拓扑荷数

中图分类号： TN252　**文章编号：** 1001－5868(2025)01－0075－08

Design of Orbital Angular Momentum Optical Fiber with High Performance

ZHAO Lijuan[1,2], JING Enbo[1], XU Zhiniu[1], HUA Ziming[1], JI Kunpeng[3], LI Junhui[3], XU Changqing[4], LI Wenfeng[4]

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, CHN; 2. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, CHN; 3. State Grid Electric Power Engineering Research Institute Co., LTD., Beijing 100069, CHN; 4. Economic and Technological Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, CHN)

Abstract: A new type of photonic crystal fiber with three layers of rectangular air holes in the cladding was designed and studied. The optimal structure of the fiber was obtained using finite element method modeling. On this basis, the key parameters of the optical fibers at varying wavelengths were modeled and studied. The results show that the optical fiber can support 46 modes of stable transmission in the wavelength range of 1 300～1 700 nm. In this band, the effective refractive index difference between the adjacent modes of photonic crystal fibers is greater than 10^{-4}. The purity is 98.8%, the effective mode field area exceeds 6.4×10^{-11} m^2, the nonlinear coefficient is less than 2.24×10^{-3}, and the maximum numerical aperture is 0.1180. Compared with the existing photonic crystal fibers, the new fiber has more transmission modes, less transmission loss, and is made from easily accessible materials, making it promising for future optical fiber communications.

Key words: orbital angular momentum; photonic crystal fibers; effective mode refractive index difference; high topological charge

收稿日期：2024－08－13.

基金项目：国家自然科学基金项目（62171185，62273146）；河北省省级科技计划资助项目（SZX2020034）.

* **通信作者：**徐志钮

1 引言

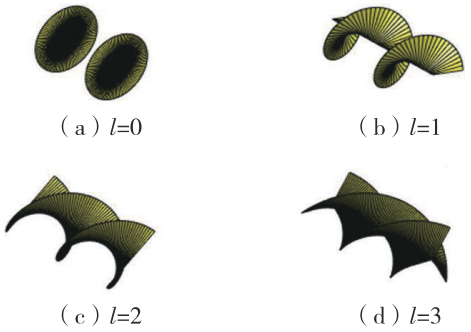
随着光通信技术的快速发展与迭代更新，传统光纤在容量与性能方面难满足实际通信需求，因此，提高光通信系统的容量和性能指标成为当前亟待解决的问题。轨道角动量（Orbital Angular Momentum，OAM）凭借其理论上的无限模式正交性，成为突破容量瓶颈的重要技术方向。同时，光子晶体光纤（Photonic Crystal Fiber，PCF）因其结构可灵活设计、材料选择范围广而受到广泛关注。

2012年，Yue等[1]提出一种阶跃折射率环形光纤结构，该结构通过在纤芯外围构造出一个环形的高折射率区域，成功实现支持10个OAM模式的稳定传输。2016年，Li等[2]提出一种可以支持16个OAM模式的空芯光纤，较之前研究略微增加了传输模式数。2018年，Wang等[3]通过在空芯光纤中掺杂高折射率材料Schott SF6，实现可同时传输56个OAM模式，但其限制性损耗较大。同年，Ashok等[4]设计一种螺旋光子晶体光纤，实现在无需掺杂特殊材料的条件下提升OAM模式性能，但其仅能传输14个OAM模式，无法满足通信系统中大容量信号传输的要求。继而，Bai等[5]提出一种包层中含有方形空气孔的PCF，可传输46个OAM模式，并且有较低的限制性损耗，但传输稳定性较差。OAM作为现阶段提高光纤通信容量的技术之一，在未来通信领域中有较大发展潜力，因此有必要研究出一种兼顾模式数量和参数性能的新型光子晶体光纤。

本文基于矩形空气孔与SiO_2间能产生更大折射率的原理，将光纤结构设计成三层矩形空气孔。采用光学变换建立了该结构的二维电磁场模型，并在此基础上研究纤芯与空气孔层之间的距离对传输模式数量的影响，确定了最佳光纤结构。分析该模型在1 300～1 700 nm范围内、步长为50 nm时的有效折射率差、非线性系数、有效模场面积、限制性损耗、数值孔径（Numerical Aperture，NA）和纯度。与现有光子晶体光纤在传输模式数、材料、有效模场面积、非线性系数和限制性损耗等方面进行比较，结果表明所设计光纤可稳定传输光信号并且具有较好的综合性能。

2 OAM原理及特点

OAM是描述电磁波运动性质的物理量[6]。由于OAM的正交性和高维性，其在理论上能够支持无限多的模式，非常适合大容量光信号的传输[7]。光不仅能携带能量，也能携带动量，其中动量包含线动量和角动量。本文所介绍的角动量主要是与空间相位分布相关的轨道角动量[8-9]。图1为OAM空间螺旋相位结构，也被称为涡旋电磁场[10]。



（a）l=0　（b）l=1　（c）l=2　（d）l=3

图1 空间螺旋相位结构图

由图1可知，光信号在向前传输的过程中螺旋相位的改变会产生不同的模式，每一个拓扑荷数包含了4种模式，可由公式（1）和（2）表示[11]：

$$\mathrm{OAM}^{\pm}_{\pm l,m}=\mathrm{HE}^{\mathrm{even}}_{l+1,m}\pm j\mathrm{HE}^{\mathrm{odd}}_{l+1,m} \tag{1}$$

$$\mathrm{OAM}^{\mp}_{\pm l,m}=\mathrm{EH}^{\mathrm{even}}_{l-1,m}\pm j\mathrm{EH}^{\mathrm{odd}}_{l-1,m} \tag{2}$$

式中，HE和EH为光纤的两种本征模式；even表示偶数，odd表示奇数[12]；l为拓扑荷数，理论上可以取到任意正整数[13]；m为模式阶数，为简化计算和复用方式，m的值取为1[14]。OAM的上标的正负号分别代表左旋和右旋圆偏振方向，下标的正负号则代表轨道角动量光束波旋转的方向，如图2所示。

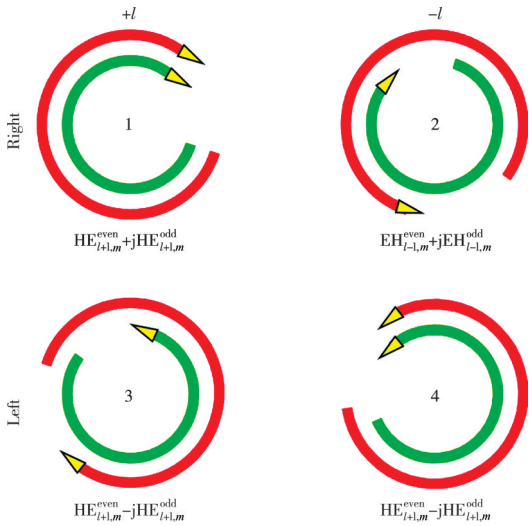


图2 轨道角动量原理示意图

由图2可知，当$l=1$时所对应的OAM模式为$\mathrm{OAM}_{\pm1}$，l有相同的圆偏振和旋转方向，只能作为两个信息状态。但当$l>1$时，OAM具有同向和反向

的偏振和旋转方向，即可产生 4 种相互独立的信息状态。

3　光纤设计

光纤的结构会影响传模的模式数量[15]。因此，需要系统地分析其结构，以确保获得更好的传输性能。

3.1　光子晶体光纤的几何设计

与传统圆孔空气孔相比，当包层中的空气孔设计为矩形时，光纤将具有更大的空气填空率，进而纤芯与包层之间的折射率差变大。因此，光纤不需要额外的掺杂就可以保证不同模式间具有较大的折射率差。同时，包层中矩形空气孔的排列可以阻止高阶模的能量泄露，从而使光信号在传输过程中模式能量集中于纤芯。基于此，设计了一种新型 PCF，其横截面如图 3 所示。

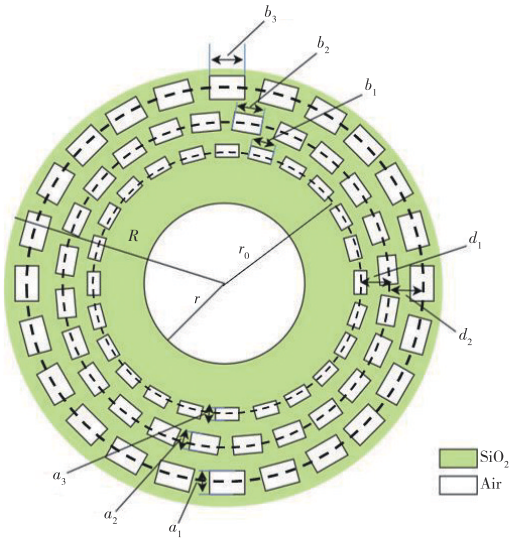


图 3　新型光子晶体光纤横截面示意图

由图 3 可知，该光纤具有三层矩形空气孔结构，能够有效提高其性能，减少光信号的丢失和能量损失，确保光信号能够实现远距离传输。纤芯外有三层不同大小的矩形，a_1，a_2，a_3，b_1，b_2 和 b_3 分别是三层矩形空气孔的宽度和长度。三条虚线表示不同空气孔层中心构成的圆周。d_1 和 d_2 是矩形空气孔层之间的距离。r 是纤芯半径，r_0 是圆心到第一层空气孔的距离，R 是光纤半径。该 PCF 所采用的材料为 SiO_2，其折射率可由 Sellmeier 方程计算得到[15]：

$$n(\lambda)=\sqrt{1+\frac{B_1\lambda^2}{\lambda^2-C_1}+\frac{B_2\lambda^2}{\lambda^2-C_2}+\frac{B_3\lambda^2}{\lambda^2-C_3}} \quad (3)$$

式中，n 为背景材料 SiO_2 的折射率，λ 为入射光的波长，B_i 和 C_i 为 Sellmeier 系数，i 的取值为 1，2，3，具体数值见表 1[15]。

表 1　Sellmeier 系数

系数	B_1	B_2	B_3	C_1	C_2	C_3
数值	1.473431	0.163681	1.369209	0.010902	0.058568	127.404933

使用 COMSOL Multiphysics 建立并求解所提光纤的电磁场模型，通过改变光纤结构参数，获得不同结构下的传输模式数量。不断优化光纤结构，以便传输更多模式，从而提高其通信容量。

3.2　纤芯半径对传输模式数的影响

在 d_1 取 2.1 μm，d_2 取 2.6 μm 不变的情况下，当纤芯半径在 0.5～5.5 μm 范围内变化，步长为 0.5 μm 时，建模获得了不同纤芯半径下的传输模式数量和有效折射率差，如图 4 所示。

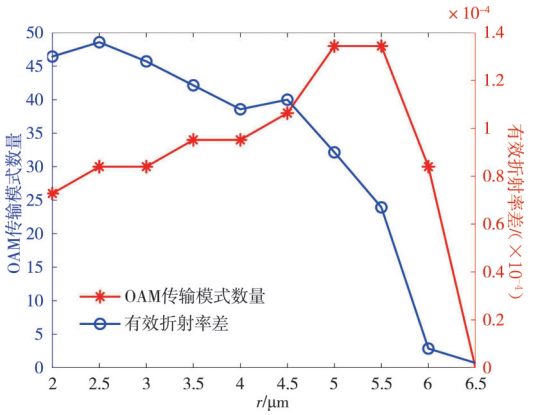


图 4　r 对传输模式数和有效折射率差的影响

由图 4 可知，该 PCF 所支持的 OAM 模式数量呈现显著的半径依赖性，当纤芯半径从 2 μm 增大至 5 μm 时，模式数逐渐增加；而当纤芯半径扩展至 5.5～6.5 μm 范围时，模式数随半径增加而锐减。这是因为随着纤芯半径持续增大，空气孔占比变大，更有利于光信号的传输，从而使传输模式数量变多；当空气孔的面积持续变大，可传输的区域面积变小，导致传输模式数变小。为了保证光信号能够稳定传输至光信号接收端，要避免相邻模式之间产生线偏振模，且相邻模式之间的有效折射率差要求大于 10^{-4}[16]。所设计的光纤有效折射率差在整体上随纤芯半径的增加而减小，当纤芯半径为 4.8 μm 时，有效折射率差小于 10^{-4}，已不能满足光纤的基本传输要求。为保证光信号的正常传输及尽量增大模式数，纤芯半径取 4.7 μm。

3.3 空气孔层之间的距离对传输模式数的影响

选取 $r=4.7\ \mu m$，$d_2=2.6\ \mu m$，d_1 在 1.7～2.4 μm 范围内变化，步长为 0.1 μm，建模研究了 d_1 对该光纤传输 OAM 模式数和有效折射率差的影响，结果如图 5 所示。

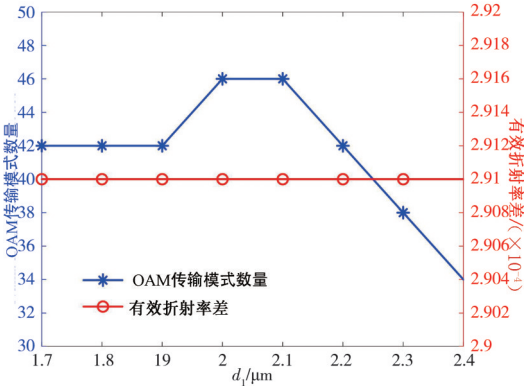


图 5 d_1 对传输模式数和有效折射率差的影响

由图 5 可知，该 PCF 所支持的 OAM 模式数在 d_1 为 1.9～2 μm 间随着 d_1 的增加而增大，当 d_1 在 2.1～2.4 μm 范围内时，模式数随 d_1 增加而减少。另外，有效折射率差均满足大于 10^{-4} 的要求。为传输更多数量模式及简化制作工艺，选取 $d_1=2.1$ μm。选取 $r=4.7\ \mu m$，$d_1=2.1\ \mu m$，建模研究 d_2 对传输 OAM 模式数和有效折射率差的影响，如图 6 所示。

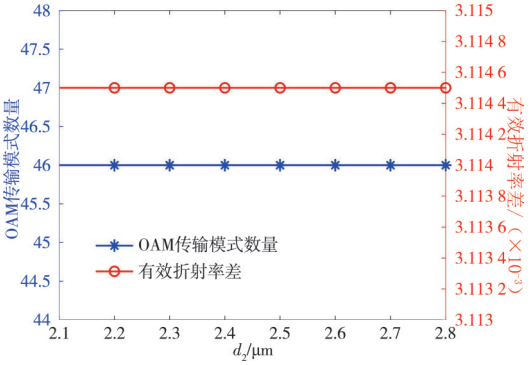


图 6 d_2 对传输模式数和有效折射率差的影响

由图 6 可知，d_2 并不会影响传输模式数量，且有效折射率差始终满足传输要求，于是根据比例将 d_2 取为 2.6 μm。综合以上研究结果，最优 PCF 结构：空气孔层之间的距离 d_1 和 d_2 分别为 2.1 和 2.6 μm，纤芯半径 r 为 4.7 μm。

4 性能分析

有效折射率差决定了 PCF 能否稳定地传输 OAM 模式；非线性系数和有效模场面积决定光纤能否长距离传输光信号[16]；限制性损耗表示该光纤在传输过程中的能量损失，是保证传输光信号稳定的重要指标之一[17]；数值孔径表示对光的收集能力，同时其与纯度共同表示该光纤是否满足进行通信的标准[18-19]。本节基于第 3 节确定的 PCF 结构，通过建模分析不同入射光波长下的相关参数值[20]，以验证所提光纤的通信性能。

4.1 有效折射率差对 PCF 性能的影响

研究该光纤是否适合传输光信号，需计算有效折射率差，其计算式为[16]：

$$\Delta n_{\mathrm{eff}}=\left|n_{\mathrm{eff}}\left(\mathrm{HE}_{l+1,m}\right)-n_{\mathrm{eff}}\left(\mathrm{HE}_{l-1,m}\right)\right| \tag{4}$$

式中，n_{eff} 为有效折射率。建模所获得不同本征模式的有效折射率差随波长变化情况如图 7 所示。

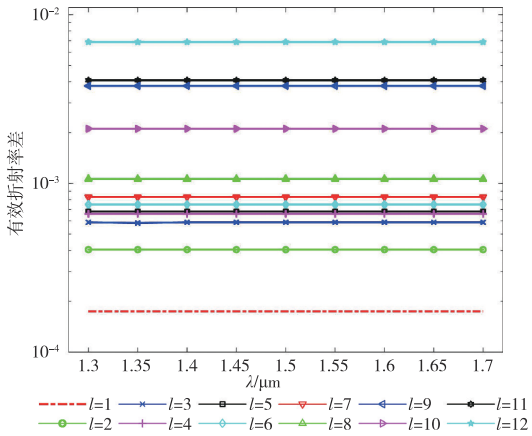


图 7 不同矢量模式在不同波长下的有效折射率差变化

由图 7 可知，有效折射率差随波长增加几乎不变，并且更高阶模式往往具有较高的有效折射率差。尽管低阶模式之间的有效折射率差较小，但满足了相邻模式之间折射率差大于 10^{-4} 的条件。因此，可以保证该光纤能够稳定传输光信号。

4.2 非线性系数对 PCF 性能的影响

非线性系数是光纤在非线性效应中一个非常重要的参数，它所反映的是光纤中非线性折射率随光强变化的强度。非线性系数越低，说明光纤的传输性能越好，其计算式为[16]：

$$\gamma=\frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\mathrm{eff}}} \tag{5}$$

式中，γ 为非线性系数；n_2 是所选材料 SiO_2 的非线性折射率，文中取值为 $3\times10^{-20}\ m^2/W$；A_{eff} 为光纤的有

效模场面积，计算式为[16]：

$$A_{\mathrm{eff}}=\frac{\left(\iint\limits_{\mathrm{cross-section}}|\boldsymbol{E}|^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y\right)^2}{\iint\limits_{\mathrm{cross-section}}|\boldsymbol{E}|^4\mathrm{d}x\mathrm{d}y} \tag{6}$$

式中，$\boldsymbol{E}$为电场矢量，cross-section表示整个光纤截面。有效模场面积是指光纤中光束的传播区域，也是光纤中光束能量分布的总面积。建模获得不同本征模式的A_{eff}随波长变化情况如图8所示。

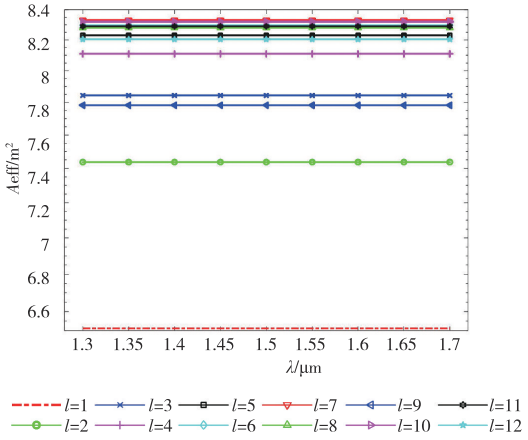


图8　不同矢量模式在不同波长下的有效模场面积变化

由图8可知，在相同的模式下，A_{eff}的变化较为平缓，这确保了该光纤在不同模式下的传输较为稳定。非线性系数决定了光纤中能够承载的最大功率和传输距离。A_{eff}越大，光束的能量分布就越均匀，能够承载的功率就越大，传输距离就越远。建模获得不同本征模式的非线性系数随波长变化情况如图9所示。

由图9可知，γ随波长增加而减小，这表明该光纤在传输更长波长光信号时性能更佳。低阶模式

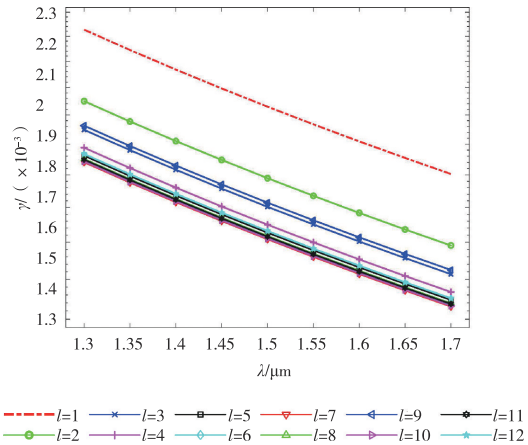


图9　不同矢量模式在不同波长下的非线性系数变化

的γ要比高阶模式的大，这是因为波长越大，光的能量就越容易发散，导致产生更大的A_{eff}，由公式(5)和(6)可得，所有模式的A_{eff}均大于6.4×10^{-11} m²，最大可达8.3×10^{-11} m²。由公式(5)可知，A_{eff}与γ成反比。因此，在相同模式情况下，较大的A_{eff}对应较小的γ，γ的数值均小于2.24×10^{-3}，最小可达1.3×10^{-3}。保证了光功率传输能力，为远距离传输光信号打下了基础。

4.3　限制性损耗对PCF性能的影响

由于纤芯不能将光全部聚集在内部，有一部分的光泄露到包层甚至包层外，以至于造成光通信的损耗，该损耗被称为限制性损耗[17]，其计算式为[17]：

$$L_{\mathrm{c}}=\frac{40\pi}{\ln(10)\lambda}\mathrm{Im}(n_{\mathrm{eff}}) \tag{7}$$

式中，$\mathrm{Im}(n_{\mathrm{eff}})$表示有效折射率虚部。限制性损耗是光信号在远距离传输过程中的决定性因素之一，限制性损耗越小，说明光信号在传输过程中能量损失越小，越适合进行远距离通信。建模获得不同本征模式的限制性损耗随波长变化情况如图10所示。

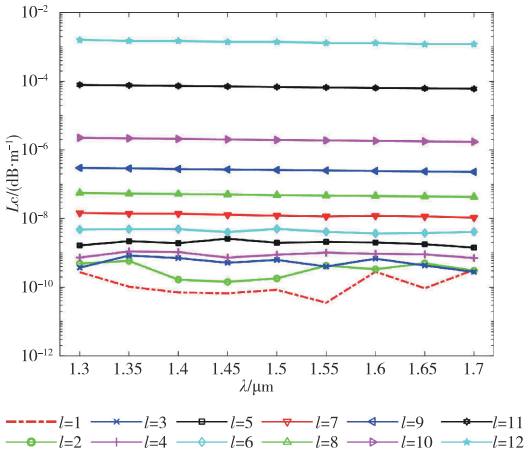


图10　不同矢量模式在不同波长下的限制性损耗变化

由图10可知，在不同波长下，该光纤限制性损耗的变化较为稳定。随着模式阶数的增加，会产生更多的限制性损耗，这是因为传输的光信号越多，泄露到包层外的就会更多。所设计的光纤限制性损耗最低可达1×10^{-10} dB/m量级，可证明该光纤在传输光信号时有较小的损耗，满足光通信长距离传输要求。

4.4　数值孔径对PCF性能的影响

*NA*表示光纤中光的总能量，描述该光纤约束光的能力。*NA*越大表示其能够约束更多的光，影响光纤的带宽，进一步影响光纤的传输性能[18]，其计算式为[18]：

$$NA=\left[1+\frac{\pi A_{\mathrm{eff}}}{\lambda^2}\right]^{-1/2} \tag{8}$$

NA 对光信号的正常传输有重要影响，*NA* 越大表示其对光的约束能力更强，更能将光信号集中在纤芯中。如图 11 所示，建模获得不同本征模式的 *NA* 随波长变化情况。

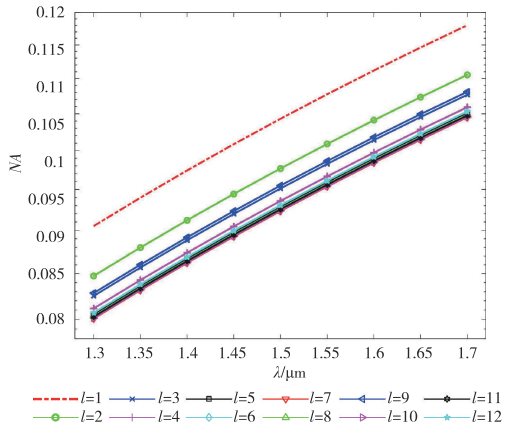


图 11 不同矢量模式在不同波长下的数值孔径变化

由图 11 可知，同一模式下，*NA* 随波长的增加而增加。在 1 300 nm 波长处数值孔径最小，为 0.0801，在 1 700 nm 波长处数值孔径最大，为 0.1180。同时，模式阶数越大，*NA* 越小，这是因为随着模式数量的增加，所传光信号容量增加，对光纤约束光的能力要求就会越大。

4.5 纯度对 PCF 性能的影响

纯度表明该光纤长距离传输光的能力，高纯度是光纤长距离传输 OAM 模式的保障，是使得光纤传输更稳定、准确的条件之一[19]，其计算式为[19]：

$$\eta=\frac{I_{\mathrm{r}}}{I_{\mathrm{c}}}=\frac{\iint\limits_{\mathrm{ring}}|\boldsymbol{E}|^2\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y}{\iint\limits_{\mathrm{cross-section}}|\boldsymbol{E}|^2\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y} \tag{9}$$

式中，I_{r} 表示光纤纤芯的平均光强，I_{c} 表示该光纤的平均光强，ring 表示纤芯截面。建模获得不同本征模式的纯度随波长变化情况如图 12 所示。

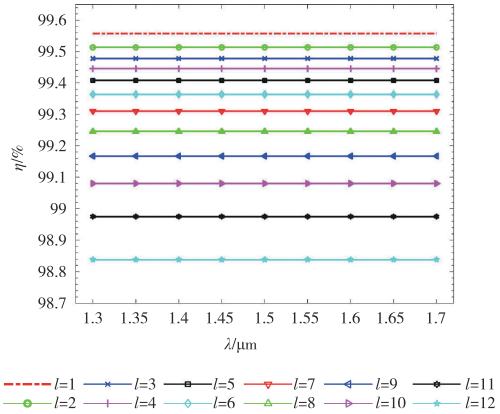


图 12 不同矢量模式在不同波长下的纯度变化

由图 12 可知，纯度随着波长的增加几乎不变。同时，模式阶数越大，纯度越低，这是因为随着模式数量的增加，聚集在纤芯的能量占比越低，导致纯度降低。但是所有的模式纯度大于 98.8%，其中 83.3% 的模式纯度大于 99%。说明该光纤有着较高的纯度，符合光通信的要求。

4.6 与现有光纤的性能比较

综合 4.1～4.5 节对该光纤的有效折射率差、非线性系数、有效模场面积、限制性损耗、纯度进行分析，可得最优情况下所提出的光纤部分参数。表 2 列出了本文光纤材料与现有光纤的性能参数比较结果。

现存研究往往针对某一个性能进行深入分析和优化，而忽略了其他参数。在通信领域，不仅要考虑通信的容量是否足够大，也要考虑到传输信号的质量问题和光纤材料的可获取性。由表 2 可知，所研究的 PCF 在传输模式数上满足大容量通信的要求，可传输 46 种 OAM 模式，各种参数在长距离传输中均有较好的表现，即有较大的有效模场面积和较低的非线性系数，限制性损耗最低可达 1×10^{-10} dB/m 量级，制作材料也容易获取，在未来光通信领域中有较好的应用潜力。

表 2 本文光纤材料与现有光纤的性能参数比较

文献	材料	模式数	有效模场面积/μm²	非线性系数/(m⁻¹W⁻¹)	限制性损耗/(dB•m⁻¹)
[21]	水/乙醇/苯	——	——	——	10^{-7}～10^{-3}
[22]	Bi_2O_3－GeO_2－Ga_2O_3	——	1.045～1.640	4.45～6.98×10^3	10^{-6}～10^{-3}
[23]	SiO_2	6	——	0.8～1.04×10^3	10^{-10}
[24]	SiO_2	22	9×10^4	——	10^{-7}
[25]	Topas	——	——	——	10^{-16}
[26]	SiO_2	——	10^8	——	10^{-9}
[7]	SiO_2	22	——	2.17	——
本文	SiO_2	46	83	1.3	10^{-10}

5　结论

本文提出了一种新型PCF，其在1 300～1 700 nm波段能够达到最高为12的拓扑荷数，即稳定传输46种OAM模式。通过仿真计算得出以下结论：1)各个模式之间的有效折射率差均大于10^{-4}，能够有效防止不同模式间的相互耦合，有利于光信号的正常传输；2)具有较高的纯度，在测试波段，所有的模式纯度均在98.8%以上，能够保证光信号在长距离传输中的质量；3)限制性损耗较低，有效模场面积较大，所有模式均在6.4×10^{-11} m^{2}以上，满足长距离传输的基本要求；4)数值孔径较大，最大可达0.1180，对光的收集能力强，能有效提高光纤的性能。该研究成果对PCF的进深入研发提供了理论基础，对未来OAM的进一步研究具有重要意义。

参考文献：

[1] Yang Y, Lin Z, Yan Y, et al. Octave-spanning supercontinuum generation of vortices in an As_2S_3 ring photonic crystal fiber[J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 1889-1891.

[2] Li H, Ren G, Lian Y, et al. Broadband orbital angular momentum transmission using a hollow-core photonic bandgap fiber[J]. Optics Letters, 2016, 41(15): 3591.

[3] Wang W, Wang N, Li K, et al. A novel dual guided modes regions photonic crystal fiber with low crosstalk supporting 56 OAM modes and 4 LP modes[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 57: 002213.

[4] Ashok N, Shin W. Spiral photonic crystal fiber structure for supporting orbital angular momentum modes[J]. Optik, 2018, 169: 361-367.

[5] Bai X, Chen H, Yang H. Design of a circular photonic crystal fiber with square air-holes for orbital angular momentum modes transmission[J]. Optik, 2018, 158: 1266-1274.

[6] Hong S, Lee Y, Choi H, et al. The PCF design for more number of OAM modes up to 101 by increasing the number of air-holes[J]. Proc. SPIE, 2019, 11141: 126-128.

[7] 刘兆伦，隋艳茹，郭晓洁，等. 一种可传输轨道角动量的螺旋光子晶体光纤[J]. 半导体光电，2022，43(2)：347-352，388.
Liu Zhaolun, Sui Yanru, Guo Xiaojie, et al. A spiral photonic crystal fiber capable of transmitting orbital angular momentum [J]. 2022, 43(2): 347-352, 388.

[8] Allen L, Beijersbergen M, Spreeuw R, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre Gaussian laser modes[J]. Physical Review A, 1992, 45(11): 8185-8189.

[9] Allen L, Padgett M, Babiker M. The orbital angular momentum of light [J]. Progress in Optics, 1999, 39: 291-372.

[10] Massari M, Ruffato G, Gintoli M, et al. Fabrication and characterization of high-quality spiral phase plates for optical applications[J]. Applied Optics, 2015, 54(13): 4077-4083.

[11] Wei S, Wang D, Lin J, et al. Demonstration of orbital angular momentum channel healing using a Fabry-Perot cavity [J]. Opto-Electronic Advances, 2018, 1(5): 180006.

[12] 郭忠义，龚超凡，刘洪郡，等. OAM光通信技术研究进展[J]. 光电工程，2020，47(3)：1-32.
Guo Zhongyi, Gong Chaofan, Liu Hongjun, et al. Research advances of orbital angular momentum based optical communication technology[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(3): 1-32.

[13] 赵丽娟，姜焕秋，徐志钮. 轨道角动量传输光纤的研究进展[J]. 半导体光电，2021，42(6)：776-783，798.
Zhao Lijuan, Jiang Huanqiu, Xu Zhiniu. Research progress of optical fiber with orbital angular momentum transmission[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(6): 776-783, 798.

[14] Kim M, Kim S. Epsilon-near-zero photonic crystal fibers for a large mode separation of orbital angular momentum modes [J]. Optik, 2020, 204: 164209.

[15] 赵丽娟，赵海英，徐志钮. 一种可用于轨道角动量的受激布里渊放大的光子晶体光纤放大器[J]. 物理学报，2022，71(7)：161-174.
Zhao Lijuan, Zhao Haiying, Xu Zhiniu. Design of photonic crystal fiber amplifier based on stimulated Brillouin amplification for orbital angular momentum[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(7): 161-174.

[16] 赵丽娟，梁　智，徐志钮. 一种可支持66种轨道角动量模式高质量传输的扭曲光子晶体光纤[J]. 光学学报，2024，44(16)：46-54.
Zhao Lijuan, Liang Zhi, Xu Zhiniu. A twisted photonic crystal fiber capable of supporting 66 orbital angular momentum modes for higt-quality transmission [J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(16): 46-54.

[17] 卜　洋，杨　志，赵丽娟，等. 大气湍流对基于轨道角动量的自由空间光通信影响及解决方案综述[J]. 半导体光电，2022，43(6)：1099-1108.
Bu Yang, Yang Zhi, Zhao Lijuan, et al. Influence of atmospheric turbulence on free space optical communication based on orbital angular momentum and solutions: a review [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(6): 1099-1108.

[18] 杜海龙，郑　义. 800 nm处近零色散高非线性光子晶体光纤的设计[J]. 半导体光电，2021，42(5)：686-691，703.
Du Hailong, Zheng Yi. Design of photonic crystal fiber with nearly zero dispersion and high nonlinearity at 800 nm [J]. 2021, 42(5): 686-691, 703.

[19] 刘　旭，马东堂. 基于轨道角动量的自由空间光通信研究与进展[J]. 半导体光电，2014，35(5)：759-763，854.
Liu Xu, Ma Dongtang. Research and progress on orbital angular momentum based free space optical communication

[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(5): 759-763, 854.

[20] 单义婷, 赵丽娟, 张智娟, 等. MIM波导结构耦合椭圆八字形谐振腔的折射率传感器[J]. 光通信技术, 2024, 48(1): 34-38.
Shan Yiting, Zhao Lijuan, Zhang Zhijuan, et al. Refractive index sensor with MIM waveguide structure coupled elliptical octagonal resonant cavity [J]. Optical Communication Technology, 2024, 48(1): 34-38.

[21] 马依拉木·木斯得克, 阿布都克力木·阿布力孜, 任 艳, 等. 1.55 μm波段处高灵敏度光子晶体光纤设计[J/OL]. 光通信技术, 1-8.
Mayilam Musdeke, Abdukelimu Abuliz, Ren Yan, et al. Design of high-sensitivity photonic crystal fiber at 1.55 μm band[J/OL]. Optical Communication Technology, 1-8.

[22] 郦逸舟, 谭 芳, 刘润泽, 等. 高双折射椭圆纤芯类矩形排布光子晶体光纤的性能研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2024, 47(2): 23-30.
Li Yizhou, Tan Fang, Liu Runze, et al. Performance study on rectangular arrangement photonic crystal fiber with high birefringence ellipsoidal fiber core[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2024, 47(2): 23-30.

[23] 解国兴, 谭 芳, 张云龙, 等. 抗弯曲大模场面积少模光子晶体光纤[J]. 强激光与粒子束, 2023, 35(12): 13-19.
Xie Guoxing, Tan Fang, Zhang Yunlong, et al. Bending resistant large mode field are a few-mode photonic crystal fiber [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2023, 35(12): 13-19.

[24] 杨婧翾, 李 巍, 成利敏. 新型太赫兹光子晶体OAM光纤设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023, 21(12): 1417-1422, 1446.
Yang Jingyi, Li Wei, Cheng Limin. Design of novel terahertz photonic crystal OAM fiber[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023, 21(12): 1417-1422, 1446.

[25] 师东方, 惠战强, 韩冬冬, 等. 类摩天轮型多孔纤芯超高双折射率太赫兹光子晶体光纤特性[J]. 光学学报, 2023, 43(10): 29-37.
Shi Dongfang, Hui Zhanqiang, Han Dongdong, et al. Characteristics of ferris wheel-like porous fiber core ultra-high birefringence terahertz photonic crystal fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(10): 29-37.

[26] 邸志刚, 孔令丰, 贾春荣, 等. 高双折射低损耗条形纤芯光子晶体光纤设计[J]. 激光杂志, 2023, 44(3): 28-32.
Di Zhigang, Kong Lingfeng, Jia Chunrong, et al. Design of photonic crystal fiber with high birefringence and low loss strip core[J]. Journal of Lasers, 2023, 44(3): 28-32.

作者简介:

赵丽娟(1981—),女,博士,教授,主要从事光纤传感与光纤通信方面的研究;

徐志钮(1979—),男,博士,教授,主要从事分布式光纤传感器及其在电气设备状态监测和故障诊断应用方面的研究。