引用本文：钟宇豪，王良垒，蒋萍，等．多椭圆高双折射光子晶体光纤设计与性能研究[J]. 光通信技术，2026，50(5)：73-79.

多椭圆高双折射光子晶体光纤设计与性能研究

钟宇豪，王良垒，蒋 萍，蒲俊宇，靳清清，李虹润，赵 创，余先伦*

（重庆三峡科技大学 电子与信息工程学院，重庆 404020）

摘要：为了提高光纤的双折射和负色散，设计了一种多椭圆高双折射光子晶体光纤，该光纤纤芯区域被4个椭圆空气孔和2个小圆空气孔包裹，包层采用六边形的圆形空气孔结构排列。理论分析了椭圆空气孔短半轴和小圆空气孔直径对双折射、有效模场面积、非线性系数、限制损耗和色散的影响，并基于全矢量有限元法(FEM)进行了数值计算。结果表明，当选取的椭圆短半轴为0.55 μm，小圆孔直径为0.88 μm时。在1.55 μm处双折射高达4.35×10^{-2}，x偏振方向上的有效模场面积为1.917 6 μm^2，非线性系数为67.643 $W^{-1}\cdot km^{-1}$，限制损耗为5.95×10^{-5} dB/m，色散为-216.65 $ps\cdot nm^{-1}\cdot km^{-1}$，$y$偏振方向的色散能达到-525.29 $ps\cdot nm^{-1}\cdot km^{-1}$，为实现高双折射、大负色散的光子晶体光纤提供了新的参考。

关键词：光子晶体光纤；双折射；负色散；限制损耗

中图分类号：TN253　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-5561(2026)05-0073-07

DOI：10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.05.012

Design and performance study of multi-elliptical high-birefringence photonic crystal fibers

ZHONG Yuhao，WANG Lianglei，JIANG Ping，

PU Junyu，JIN Qingqing，LI Hongrun，ZHAO Chuang，YU Xianlun*

（School of Electronics and Information Engineering，Chongqing Sanxia University of Science and Technology，Chongqing 404020，China）

Abstract：In order to improve the birefringence and negative dispersion of optical fibers，a new type of multi-elliptical high-birefringence photonic crystal fiber is designed. The core region of the fiber is surrounded by four elliptical air holes and two small circular air holes，and the cladding consists of circular air holes arranged in a hexagonal lattice. The effects of the semi-minor axis of the elliptical air holes and the diameter of the small circular air holes on birefringence，effective mode area，nonlinear coefficient，confinement loss，and dispersion are investigated using the full-vector finite element method(FEM). The calculation results show that，when the semi-minor axis of the elliptical air holes is 0.55 μm and the diameter of the small circular air holes is 0.88 μm，the birefringence reaches 4.35×10^{-2} at 1.55 μm. The effective mode area in the x-polarization direction is 1.9176 μm^2，the nonlinear coefficient is 67.643 $W^{-1}\cdot km^{-1}$，and the confinement loss is 5.95×10^{-5} dB/m. The dispersion in the x-polarization direction is −216.65 $ps\cdot nm^{-1}\cdot km^{-1}$，while that in the y-polarization direction reaches −525.29 $ps\cdot nm^{-1}\cdot km^{-1}$，providing a new reference for the design of photonic crystal fibers with high birefringence and large negative dispersion.

Key words：photonic crystal fiber，birefringence，negative dispersion，confinement loss

0 引言

近年来，随着人工智能、大数据等前沿技术的飞速发展，光传输系统的性能面临前所未有的挑战，传统光纤难以在低损耗波长附近实现较大的负色散，因此需要较长的距离进行色散补偿，使得成本增加，且传统光纤在传输过程中偏振模容易耦合，导致信号传输质量下降。光子晶体光纤(PCF)的出现解决了这些问题。PCF是在光子晶体的基础上发展的一种新型光纤，其通过改变光纤横截面的几何特性，如气孔尺寸或者排列方式，就能获得具有截然不同光纤特性的光纤，这一设计的高度灵活性让其获得了较于传统光纤更加优异的传输特性，例如高双折射[1-3]、高非线性[4-5]、低限制损耗[6]和大负色散[7]等，使PCF在光纤通信[8]、光传感[9-11]和色散

收稿日期：2025-09-17。

基金项目：国家重点研发计划项目(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：钟宇豪(2001—)，男，江西宜春人，硕士研究生，获得研究生一等奖学金一次、研究生二等奖学金一次、主要研究方向为光纤通信、光子晶体光纤。

***通信作者：**余先伦(1967—)，男，硕士，教授，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。



补偿[12]等领域有着相当广泛的应用。

在众多性能指标中，高双折射可显著抑制偏振模之间的耦合，提高信号传输稳定性；大负色散可有效补偿色散引起的脉冲展宽，提升系统的传输容量和带宽；而低限制损耗则对实现远距离、低衰减传输至关重要。为了提高这些关键性能，多年来学者们提出了多种结构优化方案。2003年，Ju Jian等人[13]通过使用不同大小的空气孔获得了4×10^{-3}的双折射，但未对传输损耗进行讨论。2008年，何忠蛟[14]通过在纤芯中引入微小圆孔使PCF的双折射达到10^{-2}量级，但未考虑色散。2020年，Upadhyay A等人[15]设计了一种圆环的方形孔包裹纤芯的PCF，获得了−810 ps·nm^{-1}·km^{-1}的负色散，但其双折射较小。2024年，Yang Huailin等人[16]设计了一种六边形多孔芯PCF，双折射高达7.2×10^{-2}，但因其纤芯处有许多微小的矩形空气孔和分布在两侧的三角形气孔，导致现有的技术很难制备。同年，廖振鑫等人[17]提出了一种基于椭圆形孔阵列的PCF，双折射为1.92×10^{-2}，但其负色散较小。2025年，Mahmud R R等人[18]通过在纤芯区侧边引入一个缺陷孔在较宽波长范围内获得了较大的双折射，但限制损耗过高为10^{-2} dB/cm，无法保证长距离传输。在长距离光纤传输过程中，进行色散补偿的同时，保持偏振态并提高信号传输稳定性尤为重要，且需要较低的限制损耗实现高质量的通信传输。因此，设计具有高双折射、大负色散和低限制损耗的PCF，已成为光纤通信领域的一项挑战。

综上所述，目前已有结构往往难以在高双折射、大负色散和低限制损耗之间取得良好平衡，为了解决这一重要瓶颈，本文设计一种多椭圆高双折射PCF。

1 PCF结构设计及理论分析

1.1 PCF结构设计

为同时实现高双折射与大负色散，本文设计了一种具有非对称结构的PCF，其横截面图如图1所示。

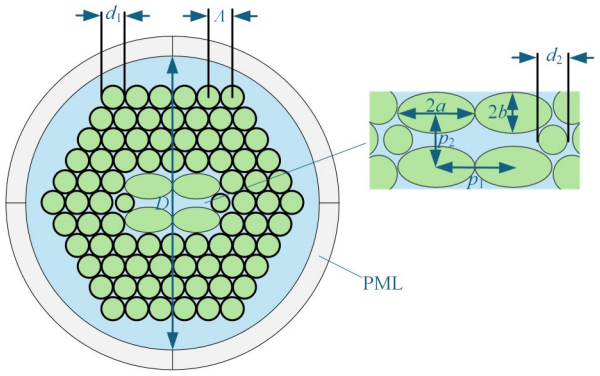


图1 PCF横截面图

光纤包层由六边形排列的圆形空气孔构成，在纤芯区域，引入了4个椭圆形空气孔与2个对称分布的圆形空气孔共同包围中心区域，大圆形空气孔直径为d_1，纤芯侧边小圆形空气孔直径为d_2，圆形空气孔之间的间距为Λ，围绕纤芯的椭圆空气孔长半轴为a，短半轴为b，椭圆空气孔横向间距为p_1，纵向间距为p_2，横截面直径为D。引入的多个横向排列的椭圆形空气孔可以打破结构对称性，增强偏振间的折射率差异，从而提升双折射性能。椭圆孔之间对称的2个圆形空气孔可以增强对模场的横向约束能力，将模场进一步限制在纤芯内，从而降低限制损耗。

1.2 PCF理论分析

本文利用有限元分析法计算，采用COMSOL建立模型，为了保证计算精度采用自适应三角形网格进行划分，并添加了一层厚度为p的完美匹配层（PML）。从麦克斯韦方程出发进行电磁分离，PCF纤芯的电场E满足波动方程（1）。

$$\nabla\times(\nabla\times E)-k_0^2\varepsilon_r(x,\ y)E=0 \tag{1}$$

式中：∇为向量微分算子；ε_r为相对介电常数；k_0表示真空中的波数，$k_0=2\pi/\lambda$，λ是工作波长。光在光纤中沿z轴传播有以下形式：

$$E(x,\ y,\ z)=E(x,\ y)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\beta z} \tag{2}$$

式中：β为传播常数，j为虚数单位。可通过式（2）计算有效模场面积A_{eff}[19]为

$$A_{\mathrm{eff}}=\frac{(\iint|E|^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y)^2}{\iint|E|^4\mathrm{d}x\mathrm{d}y} \tag{3}$$

根据式（3）可以求出非线性系数γ[20]为

$$\gamma=\frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\mathrm{eff}}} \tag{4}$$

式中：n_2为二氧化硅的非线性折射率系数，取$n_2=3.0\times10^{-20}$ m^2/W。

双折射为2个正交偏振基模折射率的差值，本文设计的PCF的双折射B[21]可表示为

$$B=|n_{\mathrm{eff},\ x}-n_{\mathrm{eff},\ y}| \tag{5}$$

式中：$n_{\mathrm{eff},\ x}$和$n_{\mathrm{eff},\ y}$分别是x偏振方向和y偏振方向上的有效折射率。

光在纤芯中传输时会通过空气孔的间距泄露到包层，导致光纤传输能量有所损耗，这种损耗被称为限制损耗，可由有效折射率的虚部求出。模拟仿真中计算所基于的理想纯二氧化硅材料不含任何掺杂成分，因此其散射损耗应可小到忽略不计[2]，则限制损耗

为影响PCF传输性能的主要因素。限制损耗$L(\lambda)$的计算公式[22]为

$$L(\lambda)=\frac{40\pi}{\lambda\ln 10}\mathrm{Im}(n_{\mathrm{eff}}) \tag{6}$$

式中：$\mathrm{Im}(n_{\mathrm{eff}})$为有效折射率的虚部。

PCF在传播时会因色散的存在导致光脉冲展宽或者信号畸变，色散$D(\lambda)$的计算公式[23]为

$$D(\lambda)=-\frac{\lambda}{c}\frac{\partial^2\mathrm{Re}(n_{\mathrm{eff}})}{\partial\lambda^2} \tag{7}$$

式中：c为光在真空中的传播速度，$\mathrm{Re}(n_{\mathrm{eff}})$为有效折射率的实部。

2 多椭圆PCF传输特性数值分析

为了探究PCF几何结构参数对传输特性的影响，本文通过改变椭圆空气孔的短半轴b，系统地分析其对双折射、色散以及限制损耗等关键性能的影响。同时，通过调节小圆孔直径d_2，分析其对有效模场面积与限制损耗的作用规律。PCF结构其他参数设置如表1所示。

表1 多椭圆PCF结构参数

参数	值/μm	参数	值/μm
d_1	1.089	p_2	1.52
Λ	1.1	D	13.2
a	1.1	p	1
p_1	2.24	—	—

2.1 椭圆空气孔短半轴变化

2.1.1 椭圆空气孔短半轴b与双折射的关系

改变椭圆空气孔的短半轴可以改变光纤结构的非对称性，并增强光纤的双折射。在保持光纤其他结构参数不变的条件下，固定小圆空气孔直径d_2为0.88 μm，得到不同短半轴b下的双折射与波长的变化，如图2所示。从图2可以看出，双折射随着短半轴b的增大而逐渐增大；在1.55 μm波长处，b=0.55 μm时双折射为4.35×10^{-2}，b=0.40 μm时，双折射仅为3.68×10^{-2}。这是因为保持长半轴a=1.1 μm不变时，增大短半轴b将增大椭圆空气孔的面积，导致2个偏振模式的有效折射率降低，在y偏振方向上有效折射率下降更快，从而使更大的短半轴b取得更大的双折射。此外，双折射随着波长的升高而显著上升，因为波长增大，光纤的归一化频率减小，导致基模模场变大，泄露至包层中的能量增加，又因椭圆孔的非对称结构，导致有效折射率差增加。

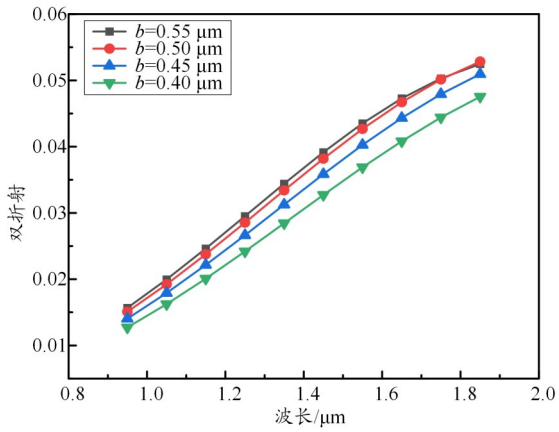
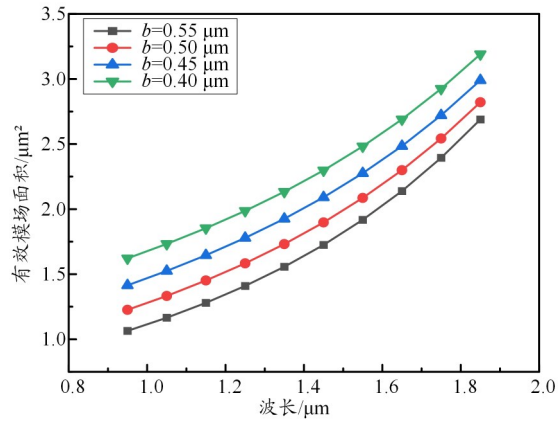


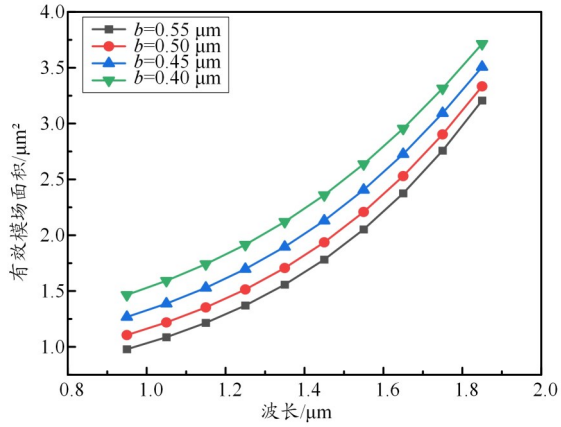
图2 双折射与短半轴和波长的变化曲线

2.1.2 椭圆空气孔短半轴b与有效模场面积的关系

短半轴b的长度会影响模场的约束能力，进而改变有效模场面积，图3为不同短半轴b下有效模场面积随波长的变化曲线，可以看出，随着波长的增大，有效模场面积逐渐增大，这是因为随着工作波长的增大，光纤的归一化频率降低，PCF对模场的限制能力减弱，从而使有效模场面积增加；随着短半轴b的增大，有效模场面积逐渐减小。这是因为在相同波长下，当b较小



(a) x偏振



(b) y偏振

图3 不同短半轴下有效模场面积与波长的关系

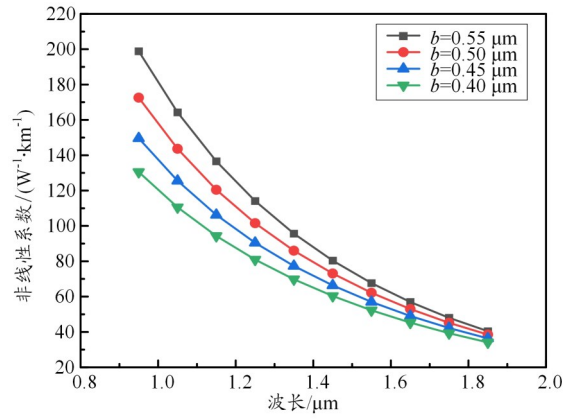
时，PCF的模场向外扩展，从而导致有效模场面积增大；当b较大时，纤芯与包层的折射率差异进一步加大，对模场的限制更加明显，从而减小有效模场面积。当波长为1.55 μm，b为0.55 μm时，与其他b取值相比，有效模场面积取得最小值，x偏振方向上的有效模场面积为1.917 6 μm^2，y偏振方向上有效模场面积为2.052 0 μm^2。

2.1.3 椭圆空气孔短半轴b与非线性系数的关系

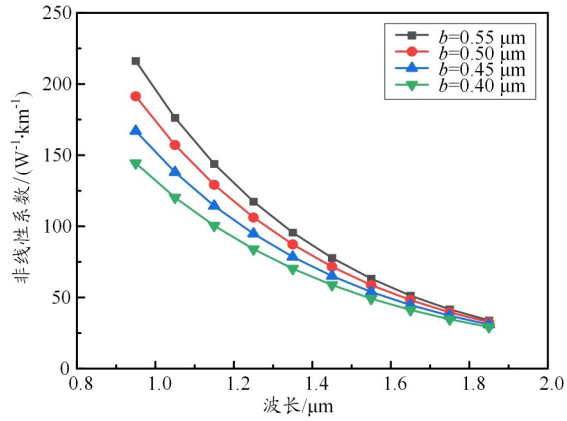
非线性系数与有效模场面积密切相关，改变短半轴b将会影响模场分布，从而影响非线性系数，图4为不同短半轴b下非线性系数随波长的变化曲线，可以看出，在0.95~1.85 μm波段内非线性系数随波长的增加呈明显下降趋势。根据式(4)，有效模场面积与非线性系数成反比。因此当波长增加时，有效模场面积随之扩大，从而使非线性系数减小。此外，不同椭圆短半轴尺寸对非线性系数的影响也十分显著。当短半轴增大时，椭圆空气孔的尺寸增大，限制模场更紧密，有效模场面积更小，非线性系数更大。因此，短半轴b越大，非线性系数越高。当波长为1.55 μm，b为0.55 μm时，x偏振方向的非线性系数为67.643 W^{-1}·km^{-1}，y偏振方向的非线性系数为63.212 W^{-1}·km^{-1}。和普通光纤的非线性系数相比，这种高非线性系数的光纤在超连续谱的产生中具有重要促进作用。

2.1.4 椭圆空气孔短半轴b与限制损耗的关系

改变PCF的结构参数能够得到不同折射率，根据式(6)可以计算得到限制损耗与波长的变化关系。图5为不同短半轴b下限制损耗随波长的变化曲线，可以看出，在波长为1.55 μm时，各结构的x偏振限制损耗都在10^{-5}量级左右，y偏振限制损耗都在10^{-4}量级左右，当波长小于1.45 μm时，各结构的限制损耗都小于10^{-4} dB/m，表明模场主要局限于纤芯内部，泄露损耗极小。其中，在波长为1.55 μm，b=0.55 μm时，x偏振方向上的限制损耗约为5.95×10^{-5} dB/m，y偏振方向上的限制损耗约为5.49×10^{-4} dB/m。此外，在波长大于1.65 μm时，限制损耗显著上升，这是由于随着波长的增大，PCF对于光的限制能力变弱，导致纤芯泄露到包层的能量增多。另外，因为y偏振沿椭圆空气孔的短轴方向，所以模场在短轴方向上的约束较弱，导致y偏振的限制损耗比x偏振更高。在光通信系统中低限制损耗对光纤性能具

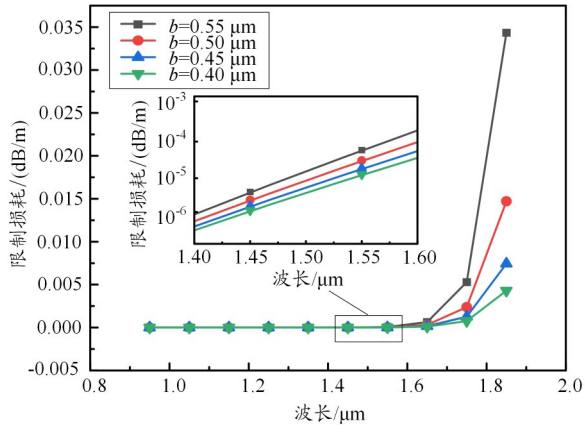


(a) x偏振

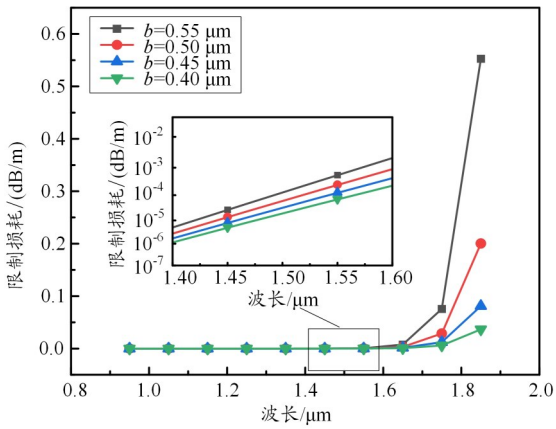


(b) y偏振

图4 不同短半轴下非线性系数随波长的变化曲线



(a) x偏振



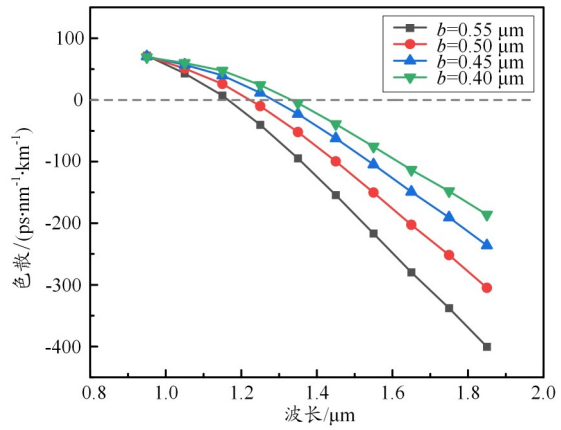
(b) y偏振

图5 不同短半轴下限制损耗随波长的变化曲线

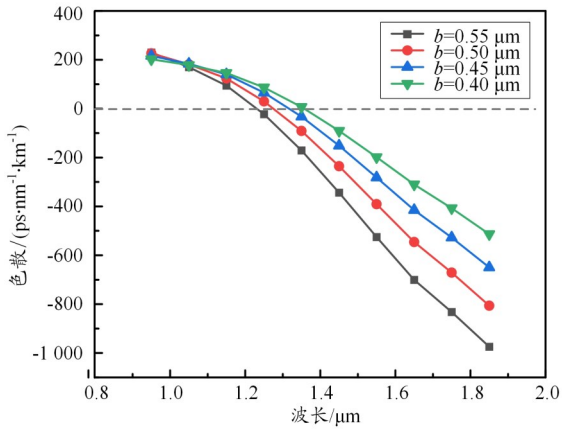
有重要意义，特别是在长距离传输场景中，能有效降低信号衰减，提升系统稳定性与传输效率。

2.1.5 椭圆空气孔短半轴 b 与色散的关系

PCF的负色散特性有助于补偿常规光纤中的正色散并抑制脉冲展宽，图6为不同短半轴 b 下色散随波长的变化曲线。可以看出，在大部分波长范围内，各结构都体现出明显的负色散特性。在短波长时，各结构的色散为正值，随波长增加迅速减小，在某一波长附近转为负值。当 b 增大时，整体曲线逐渐下移，负色散增强。另外，y 偏振方向的色散随波长变化更快，下降幅度大于 x 偏振方向，在1.55 μm处各结构色散均为负值。因此，该光纤可用于色散补偿，抵消光纤传输过程中产生的正色散，并能通过改变结构参数实现不同的色散补偿。当波长为1.55 μm，b 为0.55 μm时，与其他 b 取值相比，负色散达最大，此时 x 偏振方向的色散为−216.65 ps·nm^{-1}·km^{-1}，y 偏振方向的色散为−525.29 ps·nm^{-1}·km^{-1}，显示出优异的色散补偿性能。



(a) x 偏振



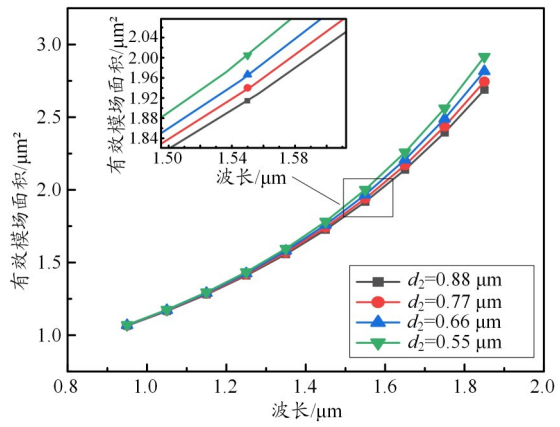
(b) y 偏振

图6 不同短半轴下色散随波长的变化曲线

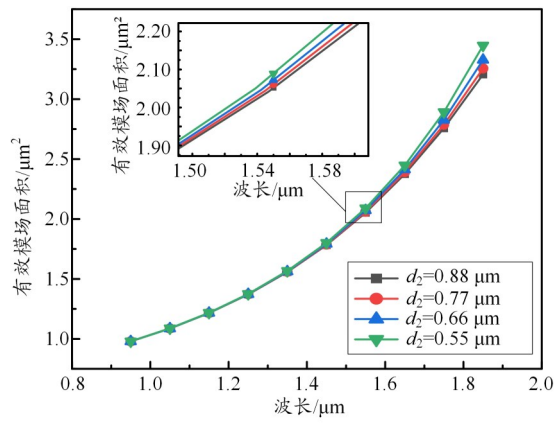
2.2 小圆空气孔直径变化

2.2.1 小圆空气孔直径 d_2 与有效模场面积的关系

保持PCF其他结构参数不变，短半轴 b 取0.55 μm时，改变小圆空气孔直径 d_2 会进一步影响模场限制能力，图7为不同小圆空气孔直径下有效模场面积随波长的变化曲线。可以看出，在同一波段下随着小圆直径 d_2 的增大，有效模场面积逐渐减小，这是因为当直径 d_2 增大时，小圆空气孔的尺寸增大，对模场的横向限制更强，所以在相同波长下，改变直径 d_2 对于 x 偏振的影响更大。由此可知，较小的小圆孔因为不能完全限制PCF的模场，从而导致模场面积增大；而较大的小圆孔能够增大纤芯与包层的折射率差，对模场的限制更加明显，从而减小有效模场面积。在波长为1.55 μm、d_2 为0.88 μm时，有效模场面积取得最小值，x 偏振方向上为1.917 6 μm^2，y 偏振方向上为2.052 0 μm^2，当 d_2 为0.55 μm时有效模场面积取得最大值，x 偏振方向上为2.013 μm^2，y 偏振方向上为2.089 1 μm^2。



(a) x 偏振



(b) y 偏振

图7 不同小圆孔直径下有效模场面积和波长的变化曲线

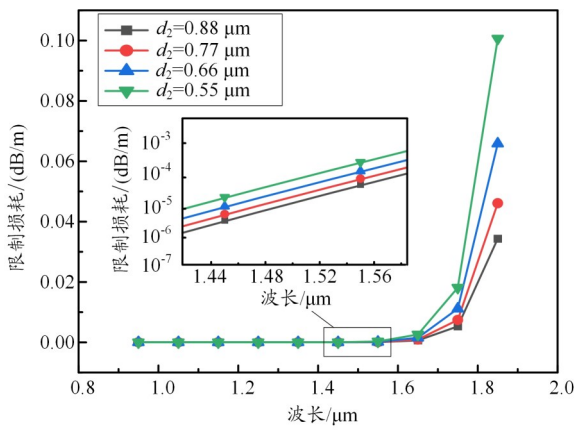
2.2.2 小圆空气孔直径 d_2 与限制损耗的关系

小圆空气孔直径 d_2 的改变同样会影响有效折射率，从而影响限制损耗，不同小圆孔直径下限制损耗随波长的变化曲线如图8所示。可以看出，随着小圆直径 d_2 的增大，限制损耗逐渐减小。这是因为两侧的小圆空气孔直径越大，限制模场的能力更强，能够更有效地阻止能量横向泄露，将能量聚集于纤芯中。当波长为1.55 μm，d_2 为0.55 μm时限制损耗达到最大，在 x 偏振方向上约为 2.89×10^{-4} dB/m，y 偏振方向上约为 2.21×10^{-3} dB/m。当 d_2=0.88 μm时限制损耗最小，在 x 偏振方向上约为 5.95×10^{-5} dB/m，y 偏振方向上约为 5.49×10^{-4} dB/m。因此，更大直径的小圆空气孔能够有效降低限制损耗，从而增强光纤的传输效率。

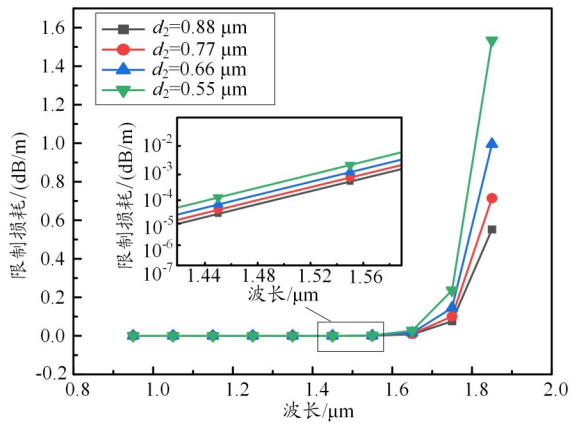
2.3 模场分布

根据计算结果可知，固定其他参数不变，当PCF短半轴 b 为0.55 μm时双折射、有效模场面积、非线性系数和色散的性能均达到最优。尽管在较长波长范围内该结构的限制损耗略有增加，但在目标波长为1.55 μm处，限制损耗仍与其他结构保持在同一量级内，具有良好的低损耗特性。固定其他参数不变，PCF小圆直径 d_2 为0.88 μm时，限制损耗与有效模场面积最小。由于光纤几何结构的制约，继续增大 b 与 d_2 将导致空气孔重叠，故选定 b=0.55 μm与 d_2=0.88 μm为研究的最优结构参数。基于全矢量有限元法（FEM）的仿真软件COMSOL Multiphysics对图1所设计的PCF进行数值计算，在波长为1.55 μm、短半轴 b 为0.55 μm、小圆直径 d_2 为0.88 μm时获得的 x 偏振态和 y 偏振态模场分布图如图9所示。

基模模场的分布是反映光纤性能的重要指标，由图9可以看出，x 偏振态的模场沿横向 x 方向延伸，呈椭圆形分布，y 偏振态的模场无明显延伸，近似圆形分布。在纤芯四周引入的4个椭圆空气孔，以及在纤芯两侧引入的小圆空气孔，导致在 x 方向上的占空比小于 y 方向上的占空比，使得 x 方向的有效折射率更大，x 偏振对模场束缚的能力更强。但无论是 x 偏振还是 y 偏振，模场能量始终被限制在纤芯内，这有利于光纤的长距离传输。

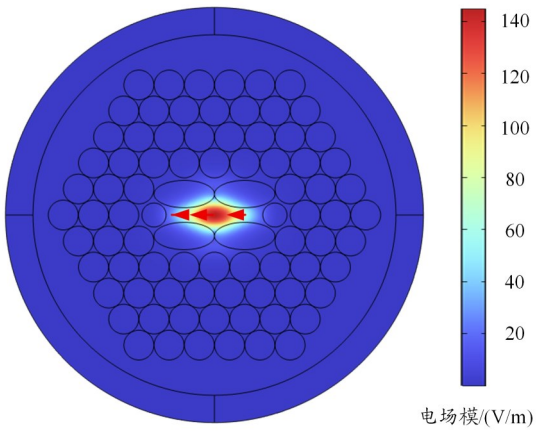


（a）x 偏振

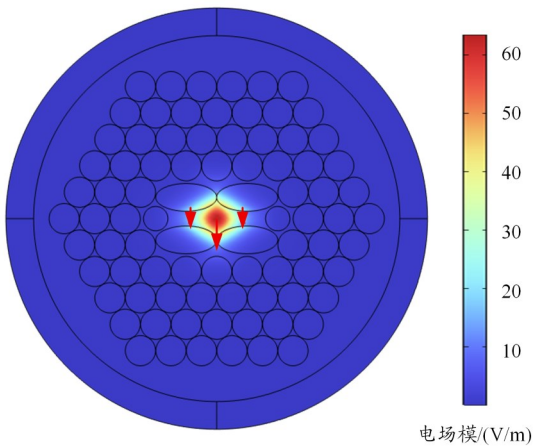


（b）y 偏振

图8 不同小圆空气孔直径下限制损耗随波长的变化曲线



（a）x 偏振态模场分布



（b）y 偏振态模场分布

图9 波长为1.55 μm处模场分布图

2.4 PCF制备可行性讨论

从结构设计角度来看，本文设计的PCF不仅具备良好的光学性能，还体现出较高的几何可调性和偏振选择性，适用于多种高性能光纤应用场景。然而，该结构在制造过程中也面临着一定挑战，尤其是在椭圆空气孔的形状控制与位置精度方面，对制备工艺提出了较高要求。为实现该结构，可采用溶胶凝胶法或3D打印技术结合拉制工艺来制作。这类工艺能够灵活定义空气孔形状和排布，适合复杂微结构光纤制备。目前，已有研究在微结构光纤的制备方面取得了一定进展。胡雄伟[24]通过二次拉制工艺，成功拉制出微孔直径为0.2 μm的PCF，为微结构光纤的制备提供了参考。基于已有技术基础，本文所设计的光纤结构具备一定的制备可行性。

3 结束语

本文基于有限元法设计了一种多椭圆高双折射PCF，其包层为六边形排列的空气孔，在纤芯周围引入4个椭圆空气孔来获得高双折射，并在纤芯两侧引入2个小圆空气孔，以此保证PCF在具有高双折射的同时具有较低的限制损耗。通过改变椭圆空气孔短半轴和小圆空气孔直径，对光纤传输特性进行数值分析和优化。仿真结果表明，当选取的椭圆短半轴为0.55 μm，小圆孔直径为0.88 μm时，该结构光纤在1.55 μm波长下双折射可达4.35×10^{-2}，x偏振方向上的有效模场面积为1.917 6 μm^2，非线性系数为67.643 $W^{-1}\cdot km^{-1}$，限制损耗为5.95×10^{-5} dB/m，色散为−216.65 $ps\cdot nm^{-1}\cdot km^{-1}$，$y$偏振方向的色散能达到−525.29 $ps\cdot nm^{-1}\cdot km^{-1}$，说明本文提出的PCF具有高双折射、大负色散和高非线性等特点，在非线性光学与光纤传感领域具备潜在应用价值。

参考文献

[1] Linsie A A, Mondal S, Prince S. Highly birefringent hexagonal porous core photonic crystal fiber for polarization maintaining integrated THz-photonics applications[J]. Optical and Quantum Electronics, 2024, 56(10):1672.

[2] Mondal K. Design of simple circular photonic crystal fiber having ultra-large negative dispersion and high birefringence for dispersion compensation[J]. Optical and Quantum Electronics, 2024, 56(10):1726.

[3] Liu Zihan, Wen Jialin, Zhou Zhengyong, et al. A highly birefringent photonic crystal fiber based on a central trielliptic structure: FEM analysis [J]. Physica Scripta, 2023, 98(11):115607.

[4] 赵丽娟，赵海英，徐志钮. 一种高双折射低损耗大负色散光子晶体光纤的设计[J]. 半导体光电，2020，41：368-373，378.

[5] Hanoon R A, Abdulhadi A H, Abass A K. Design of high nonlinear photonic crystal fiber for ultrashort pulse laser generation[J]. Journal of Optical Communications, 2025, 47(2):329-331.

[6] Jia Chunrong, Zhang Qingyu, Chen Zhipeng, et al. High birefringence low loss nearly zero flat dispersion similar to slotted core photonic crystal fibers[J]. Journal of Optical Communications, 2025, 46(3):515-525.

[7] Pandey S K, Maurya J B, Prajapati Y K. Photonic crystal fiber with high nonlinearity and extremely negative dispersion[J]. Optical and Quantum Electronics, 2021, 53(12):724.

[8] 贾春荣，张庆宇，邸志刚，等. 光子晶体光纤及其在太赫兹波段的应用[J]. 激光杂志，2024，45(4)：16-25.

[9] 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]. 光通信技术，2025，49(3)：47-52.

[10] 马依拉木·木斯得克，薛煜阳，哈里旦木·阿布都克里木，等. 新型高双折射率高灵敏度光子晶体光纤设计[J]. 光通信技术，2024，48(5)：67-72.

[11] Maidi A M, Yakasai I, Abas P E, et al. Design and simulation of photonic crystal fiber for liquid sensing[J]. Photonics, 2021, 8(1):16.

[12] 王亚捷，侯尚林，雷景丽. C+L波段低损耗色散补偿19芯光子晶体光纤设计[J]. 光学精密工程，2022，30(22)：2860-2868.

[13] Ju Jian, Jin Wei, Demokan M S. Properties of a highly birefringent photonic crystal fiber[J]. IEEE photonics technology letters, 2003, 15(10):1375-1377.

[14] 何忠蛟. 基于小圆孔结构纤芯的高双折射光子晶体光纤[J]. 光子学报，2008(11)：2217-2221.

[15] Upadhyay A, Singh S, Prajapati Y K, et al. Numerical analysis of large negative dispersion and highly birefringent photonic crystal fiber[J]. Optik, 2020, 218:164997.

[16] Yang Huailin, Yang Jian, Xu Qibo, et al. Highly birefringent photonic crystal fibers with near-zero flattened dispersion for polarization-maintaining terahertz transmission[J]. Physica Scripta, 2024, 99(4):045524.

[17] 廖振鑫，刘理，毛莉莉，等. 高双折射光子晶体光纤的设计与传感特性分析[J]. 光学技术，2024，50(4)：448-452.

[18] Mahmud R R, Khan M E, Nafiz A A M, et al. Numerical investigation of high birefringence dynamics in simple hexagonal photonic crystal fiber: RR Mahmud et al[J]. Indian Journal of Physics, 2025, 99:1-12.

[19] Du Zhenhua, Wei Feifei, He Jiaxin. High birefringence and nonlinearity photonic crystal fiber[J]. Journal of Optics, 2023, 52(2):665-671.

[20] Mondal K. A comparative study of birefringence in photonic crystal fiber employing various lattice geometries with all-circular air holes[J]. Optik, 2020, 215:164699.

[21] Lee Y S, Kim S, Oh K. Highly birefringent slotted-porous-core photonic crystal fiber with elliptical-hole cladding for terahertz applications [J]. Current Optics and Photonics, 2022, 6(2):129-136.

[22] Agbemabiese P A, Akowuah E K. Numerical analysis of photonic crystal fiber of ultra-high birefringence and high nonlinearity[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1):21182.

[23] Benlacheheb M, Cherbi L, Merabet A N. Highly birefringent fiber design based on polymer photonic crystal fiber with ultralow confinement loss for sensing application[C]//Micro-structured and Specialty Optical Fibres VII. Bellingham: SPIE, 2021:148-155.

[24] 胡雄伟. 新型光子晶体光纤的制备技术与传感特性研究[D]. 武汉：华中科技大学，2018.