材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021112404

一种可传输轨道角动量的螺旋光子晶体光纤

刘兆伦[1,2*]，隋艳茹[1,2]，郭晓洁[1,2]，云　伟[1,2]，刘子岳[1]

（燕山大学 1. 信息科学与工程学院；2. 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室，河北 秦皇岛 066004）

摘　要： 设计了一种基于阿基米德螺线的新型螺旋光子晶体光纤，该光纤以二氧化硅为基底材料，包层由 24 个螺旋臂组成，每个螺旋臂包含 11 个小空气孔，纤芯设有大空气孔，包层与纤芯中间的环形区域用于传输轨道角动量模式。该结构在 1 300～1 800 nm 波段上可支持 22 种轨道角动量模式稳定传输，在 1 550 nm 波长下，有效折射率差最高可达 2.89×10^{-3}，色散系数最低可达 66.4 ps/(nm·km)，非线性系数最低可达 2.17 $W^{-1}\cdot km^{-1}$，且 1 500～1 600 nm 波段上的色散值变化均小于 15.15 ps/(nm·km)。此螺旋光子晶体光纤不仅结构简单，且具有低非线性、色散平坦的性能，为螺旋光子晶体光纤的设计提供了思路。

关键词： 光纤光学；轨道角动量；光子晶体光纤；螺旋排列；色散平坦

中图分类号： TN253；TP212　**文章编号：** 1001－5868(2022)02－0347－06

A Spiral Photonic Crystal Fiber Capable of Transmitting Orbital Angular Momentum

LIU Zhaolun[1,2], SUI Yanru[1,2], GUO Xiaojie[1,2], YUN Wei[1,2], LIU Ziyue[1]

(1. School of Information Science and Engineering; 2. Key Laboratory for Special Optical Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, CHN)

Abstract: A new type of spiral photonic crystal fiber based on Archimedes spiral is proposed, and silica is chosen as the background material. The cladding is composed of 24 spiral arms, each spiral arm contains 11 small air holes, and there is a big air hole in the center of the fiber core. The annular area between the cladding and the air-core can transmit the orbital angular momentum mode. It can support stable transmission of 22 kinds of orbital angular momentum modes over the wavelength range of 1 300～1 800 nm. The effective refractive index difference can be up to 2.89×10^{-3}, the lowest dispersion can reach 66.4 ps/(nm·km), and the nonlinear coefficient is minimally up to 2.17 $W^{-1}\cdot km^{-1}$ at 1 550 nm wavelength. The dispersion variation is less than 15.15 ps/(nm·km) in the wavelength range of 1 500～1 600 nm. The spiral photonic crystal fiber is not only simple in structure, but also has low nonlinearity and flat dispersion performance, which provides an idea for the design of spiral photonic crystal fiber.

Key words: fiber optics; orbital angular momentum; photonic crystal fiber; spiral arrangement; flat dispersion

0　引言

随着现代信息技术的快速发展，以及互联网、云计算等技术的大规模应用，设计出传输速度快、通信容量大的光纤通信系统成为亟需解决的问题。近年来提出的轨道角动量（Orbital Angular Momentum，OAM）复用技术作为一种新兴的技术，为提高数据传输速度、扩大信道容量提供了新的思路。1992 年，Allen 等[1]在波前结构为螺旋状分布的拉盖尔-高斯（Laguerre-Gaussian，LG）光束中发现了 OAM，第一次提出轨道角动量的概念，引起了

收稿日期：2021－11－24.

基金项目：中央引导地方科技发展资金项目(206Z0401G).

* **通信作者：**刘兆伦　**E-mail：**liuzhaolun@ysu.edu.cn

国内外研究人员的广泛关注。OAM 光束用 $\exp(il\theta)$表示，其中 θ 表示方位角，l 表示拓扑电荷数(一般为整数)[2-3]。不同拓扑电荷数的 OAM 模式间具有相互正交的特性，利用这种特性可同时传输多个 OAM 模式信息，从而达到扩大通信容量的目的。

利用光纤传输 OAM 光信号可以扩大传输容量，实现长距离的传输[4]。相比于传统光纤，光子晶体光纤(Photonic Crystal Fibre，PCF)的包层结构设计灵活，且能够降低光信号传输过程中产生的限制损耗和色散，从而具有传统光纤无法比拟的优势[5-6]，因此，设计包层结构新颖的 PCF 具有重要的研究价值。2012 年，Yue 等[7]设计了包层气孔呈正六边形排列的 PCF，利用基底材料 As_2S_3 与空气孔间存在较大的材料折射率差，产生了 2 个 OAM 模式，但限制损耗较大。2015 年，Zhang 等[8]在传统环形 PCF 的基础上去掉最内环的空气孔，得到了改进的环形 PCF，具有宽带宽、低损耗的优良特性。2016 年，Tian 等[9]在光纤纤芯处增加了一个空气孔，去掉了最内层的两层空气孔，设计出具有色散平坦的环形 PCF。2018 年，Nandam 等[10]将最内层空气孔进行旋转，提出了一种包层气孔为螺旋排列的 PCF，可以支持 14 种 OAM 模式的传输，并具有色散平坦的特性。2020 年，Israk 等[11]用高折射率材料环围绕光纤纤芯的空气孔，提出一种环形线圈结构的 PCF，同时具备低非线性、低色散的特性。

本文在传统 PCF 的基础上，包层空气孔基于阿基米德螺线排列，设计了一种新型螺旋 PCF 结构。该结构采用二氧化硅作为基底材料，通过全矢量有限元软件对该 PCF 结构进行仿真分析，结果表明该结构在 1 300～1 800 nm 波段上支持 22 种 OAM 模式稳定传输，且矢量模式间的有效折射率差维持在 7.29×10^{-4}～4.18×10^{-3} 之间，有效避免了矢量模式在光纤中产生的模式简并，保证了模式的稳定传输。该结构具有约束损耗低、有效折射率差大、色散平坦、非线性系数低等特点，对于提高光通信容量具有重要的价值。

1 光纤结构及模式分析

1.1 光纤结构设计

本文设计出一种基于阿基米德螺线的螺旋 PCF，光纤结构如图 1 所示。图中灰色部分为空气，紫色部分为二氧化硅。光纤的纤芯为一个大空气孔，包层围绕 24 组螺旋臂，其中每组螺旋臂包含 11 个直径相同的小空气孔。包层与纤芯之间的环形高折射率区域用于 OAM 模式的传输，基于阿基米德螺线的螺旋臂能有效阻止光的泄露，并增大矢量间的有效折射率差，有效避免了矢量模式间的简并。

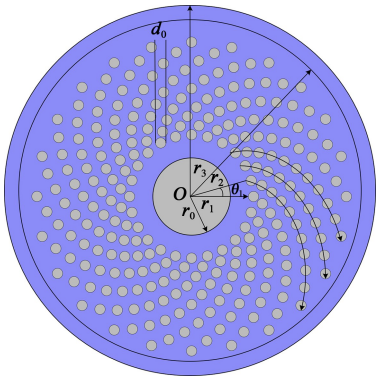


图 1 光纤结构横截面图

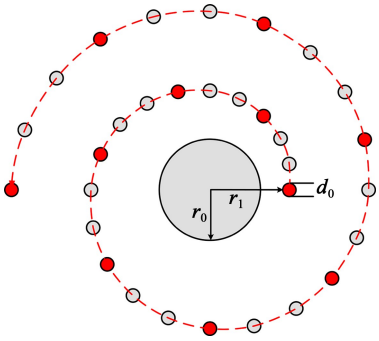
光纤纤芯部分的大空气孔半径为 $r_0=3.8\ \mu m$，纤芯中心到包层最内层空气孔的距离为 $r_1=5.5\ \mu m$，光纤包层部分的小空气孔直径为 $d_0=0.5\ \mu m$，纤芯到包层外环的半径 $r_2=16\ \mu m$，纤芯到最外层环的半径 $r_3=18\ \mu m$，包层最内层的空气孔数为 $N=24$，其相邻空气孔之间的角度为 $\theta_1=15°$。

该结构的基底材料为二氧化硅，其有效折射率 n_{silica} 的 Sellmeier 色散方程表示为

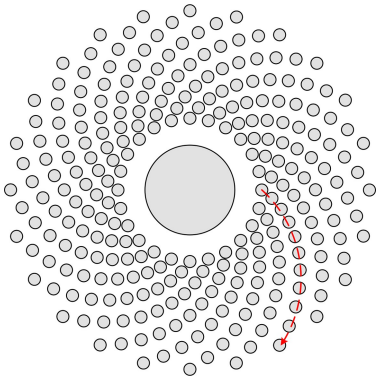
$$n_{silica}^2=\frac{0.696\,166\,3\lambda^2}{\lambda^2-0.068\,404\,3^2}+\frac{0.407\,942\,6\lambda^2}{\lambda^2-0.116\,241\,4^2}+\frac{0.897\,479\,4\lambda^2}{\lambda^2-9.896\,161^2}+1 \tag{1}$$

式中，λ 表示工作波长，单位为 μm。

通过软件 COMSOL Multiphysics 对本文设计的光纤进行仿真分析，设计过程如图 2 所示，其中图 2(a)是包层结构为阿基米德螺线的 PCF，将图中标红的空气孔围绕纤芯顺时针旋转 24 次，每次旋转角度 $\theta_1=15°$，得到本文设计的结构，如图 2(b)所示。



(a) 包层为阿基米德螺线的 PCF



(b)　本文设计的 PCF 结构

图 2　螺旋空气孔包层建模示意图

1.2　OAM 模式分析

OAM 模式可看做同阶矢量模奇偶模式的叠加[12]：

$$\begin{cases} \mathrm{OAM}^{\pm}_{\pm l,m} = \mathrm{HE}^{\mathrm{even}}_{l+1,m} \pm \mathrm{jHE}^{\mathrm{odd}}_{l+1,m} \\ \mathrm{OAM}^{\mp}_{\pm l,m} = \mathrm{EH}^{\mathrm{even}}_{l-1,m} \pm \mathrm{jEH}^{\mathrm{odd}}_{l-1,m} \end{cases} \tag{2}$$

式中，$\mathrm{HE}^{\mathrm{even}}$，$\mathrm{EH}^{\mathrm{even}}$ 分别表示 HE，EH 的偶模，$\mathrm{HE}^{\mathrm{odd}}$，$\mathrm{EH}^{\mathrm{odd}}$ 分别表示 HE，EH 的奇模，奇模和偶模之间存在一个大小为 $\pi/2$ 的相位差。l 表示拓扑电荷数，m 表示径向阶数，上标符号“±”表示圆偏振的左右方向，下标符号“±”表示螺旋相位的旋转方向。

OAM 模式的生成过程如图 3 所示[13]。OAM 模式由矢量模式叠加组成，类似于线偏振模式的形成过程，当矢量间的有效折射率差大于 1×10^{-4} 时，叠加的矢量模式就会形成 OAM 模式。由图 3 可知，$\mathrm{HE}_{l+1,m}$ 的奇偶模式叠加形成的 $\mathrm{OAM}_{l,m}$ 模式的场旋转方向与圆偏振方向相同，而由 $\mathrm{EH}_{l-1,m}$ 的奇偶模式叠加形成的 $\mathrm{OAM}_{l,m}$ 模式的场旋转方向与圆偏振方向相反，所以当 $l=1$ 时，$\mathrm{OAM}_{l,m}$ 具有相同的场旋转方向，包含 2 个 OAM 模式；当 $l>1$ ($l\geqslant2$)时，$\mathrm{OAM}_{l,m}$ 模式分成正负拓扑荷数、左右旋偏振方向的 4 种信息模式，即每个 $\mathrm{OAM}_{l,m}$ 模式组包含 4 个不同的 OAM 模式[14]。

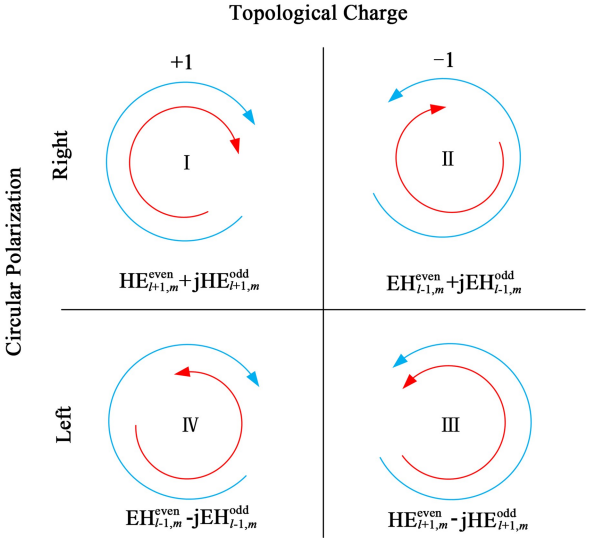


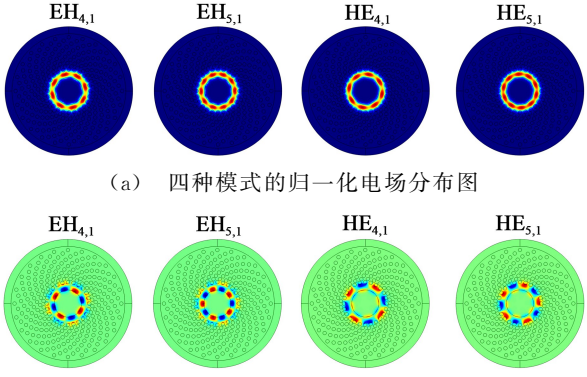
图 3　OAM 模式生成示意图

用图 1 所示结构仿真得出，该结构可传输的 HE 模式和 EH 模式分别为 $\mathrm{HE}_{2,1}$，$\mathrm{HE}_{3,1}$，$\mathrm{HE}_{4,1}$，$\mathrm{HE}_{5,1}$，$\mathrm{HE}_{6,1}$，$\mathrm{HE}_{7,1}$，$\mathrm{EH}_{1,1}$，$\mathrm{EH}_{2,1}$，$\mathrm{EH}_{3,1}$，$\mathrm{EH}_{4,1}$ 和 $\mathrm{EH}_{5,1}$，结合式(2)与图 3 可知，该结构可支持传输的拓扑荷数为 6 个，即 $l=1\sim6$。在光纤通信中，每一个 OAM 模式态都可以做为一个独立的信道传输光信息。该结构可合成 22 个 OAM 模式，表 1 为该结构支持的 OAM 模式及其相应的矢量模式。

表 1　该结构支持的 OAM 模式及相应的矢量模式

OAM 模式	拓扑荷数	矢量模式
$\mathrm{OAM}^{\pm}_{\pm1,1}$	1	$\mathrm{HE}_{2,1}$
$\mathrm{OAM}^{\pm}_{\pm2,1}$	2	$\mathrm{HE}_{3,1}$，$\mathrm{EH}_{1,1}$
$\mathrm{OAM}^{\pm}_{\pm3,1}$	3	$\mathrm{HE}_{4,1}$，$\mathrm{EH}_{2,1}$
$\mathrm{OAM}^{\pm}_{\pm4,1}$	4	$\mathrm{HE}_{5,1}$，$\mathrm{EH}_{3,1}$
$\mathrm{OAM}^{\pm}_{\pm5,1}$	5	$\mathrm{HE}_{6,1}$，$\mathrm{EH}_{4,1}$
$\mathrm{OAM}^{\pm}_{\pm6,1}$	6	$\mathrm{HE}_{7,1}$，$\mathrm{EH}_{5,1}$

图 4 展示了波长为 1 550 nm 时，$\mathrm{EH}_{4,1}$，$\mathrm{EH}_{5,1}$，$\mathrm{HE}_{4,1}$ 和 $\mathrm{HE}_{5,1}$ 模式的归一化电场分布图和 E_z 方向的电场分布。在归一化电场分布图中，各个矢量模式被限制在由空气和二氧化硅折射率差形成的高折射率区域内，同时模式的电场强度中心为零，符合传输 OAM 光束的要求。但在归一化电场的分布图中无法准确地分辨出 EH 和 HE 模式，而矢量模式在 E_z 方向的电场分布更容易分辨出 EH 和 HE 模式，EH 模式在 E_z 方向的电场分布更靠近光纤纤芯部分，而 HE 模式更靠近光纤包层部分。



(a)　四种模式的归一化电场分布图

(b)　四种模式 E_z 方向的电场分布

图 4　四种模式的仿真模式图

2 仿真优化及性能分析

2.1 有效折射率及有效折射率差

利用 Comsol 仿真计算，可得到每个模式的有效折射率(n_{eff})，进而得到各模式的有效折射率差(Δn_{eff})。根据 Δn_{eff} 可以判断生成 OAM 模式的阶数，随着 OAM 模式阶数的增加，$\mathrm{HE}_{l+1,1}$ 模式与 $\mathrm{EH}_{l-1,1}$ 模式的 n_{eff} 越来越接近，导致阶数越高的 Δn_{eff} 越小。当矢量模式间的有效折射率差小于 1×10^{-4} 时，会引起 EH 模式与 HE 模式简并成线偏振模式，对信号的稳定传输造成极大的影响，为了保证光纤中 OAM 模式的稳定存在，同一个 OAM 模式组的 EH 和 HE 模式的 Δn_{eff} 需大于 1×10^{-4}。

在 PCF 中，不同模式的传播常数 β 不同，传播常数越大，光纤束缚光的能力就越强。传播常数 β 和有效折射率 n_{eff} 之间的数学关系表示为[15]

$$n_{\mathrm{eff}}=\frac{\beta}{k_0} \tag{3}$$

式中，$k_0=2\pi/\lambda$ 表示真空中的波数，λ 表示波长，β 表示传播常数。

在多模光纤中，随着波长的增加，光束的场分布慢慢扩大到包层区域，高阶矢量模式的场分布比低阶矢量模式更容易扩展到包层区域，因此低阶模式的 n_{eff} 大于高阶模式的 n_{eff}。如图 5 所示，OAM 模式的 n_{eff} 处于 1.34～1.42 的区间中，随着波长的增加，n_{eff} 曲线呈逐渐下降的趋势，$\mathrm{HE}_{l+1,m}$ 和 $\mathrm{EH}_{l-1,m}$ 模式的 n_{eff} 相差越来越大，即 Δn_{eff} 越来越大，因此光纤中矢量模式的 Δn_{eff} 随波长的增加而增加。如图 6 所示，由图中 1×10^{-4} 标准线可知，所有模式的 Δn_{eff} 均大于 1×10^{-4}，模式的 Δn_{eff} 呈逐渐上升的趋势。在 1 550 nm 处 $\mathrm{HE}_{3,1}$ 与 $\mathrm{EH}_{1,1}$ 的 Δn_{eff} 为 2.89×10^{-3}，比 1×10^{-4} 高一个数量级。Δn_{eff} 的提高使得模间耦合减少，模间串扰的可能性也大大

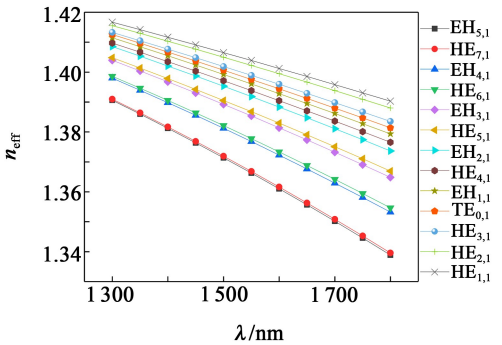


图 5 不同矢量模式在不同波长下的有效折射率变化

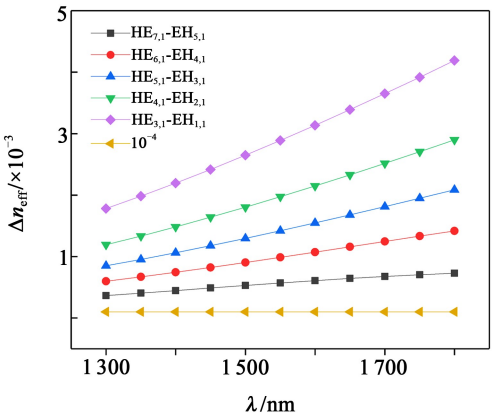


图 6 相邻矢量模式在不同波长下的有效折射率差变化

降低，在模分多路复用通信系统中，产生这些结果的结构在模式分复用通信系统中是很有价值的。

2.2 色散特性

光纤中传输的光信号在光纤中以不同的速度传播，到达一定距离后将会引起传输信号畸变，导致通信质量下降，这种效应称为光纤色散[16-17]。光纤中的色散主要包括材料色散和波导色散[18]。材料色散取决于光纤材料自身的特性，不同光纤材料的折射率在不同波长下的取值不一，但在有限元计算中已经将 Sellmeier 中的材料色散计算在内，所以光纤色散主要取决于波导色散。波导色散 D 主要受光子晶体光纤结构的影响，与矢量模的 n_{eff} 有关[19]：

$$D=-\frac{\lambda}{c}\frac{d^2\mathrm{Re}(n_{\mathrm{eff}})}{\mathrm{d}\lambda^2} \tag{4}$$

式中，c 表示真空中的光速，$\mathrm{Re}(n_{\mathrm{eff}})$表示各个 OAM 模式有效折射率的实部，$\lambda$ 表示波长，D 的单位为 ps/(nm·km)。

不同矢量模的色散系数随波长的变化如图 7 所示。由图中可以看出，在 1 300～1 800 nm 波长下，$\mathrm{EH}_{1,1}$ 和 $\mathrm{TE}_{0,1}$ 的色散度较平坦，$\mathrm{EH}_{5,1}$ 和 $\mathrm{HE}_{7,1}$ 模式的色散系数相对较高，随着波长的增大，色散系数呈缓慢增加的趋势，色散曲线较为平坦。在 1 500～1 600 nm 波段上，色散值的变化均小于 15.15 ps/(nm·km)，其中 $\mathrm{EH}_{1,1}$ 模式的色散值变化为 0.55 ps/(nm·km)，$\mathrm{TE}_{0,1}$ 模式的色散值变化为 0.24 ps/(nm·km)。在传输过程中，高阶 OAM 模式的稳定性低于低阶 OAM 模式，所以高阶 OAM 模式比低阶 OAM 模式的色散系数大。在 1 550 nm 波长下，$\mathrm{HE}_{1,1}$ 模式的色散系数最小，约为 66.42 ps/(nm·km)，$\mathrm{HE}_{7,1}$ 模式的色散系数最大，约为 253.2 ps/(nm·km)。大色散使高阶 OAM 模

式对波长的变化更加敏感，所以相比于高阶 OAM 模式，低阶矢量模式的色散曲线更加平坦。在长距离传输中，色散系数具有重要的作用，小而平坦的色散使得通信质量大大提高。

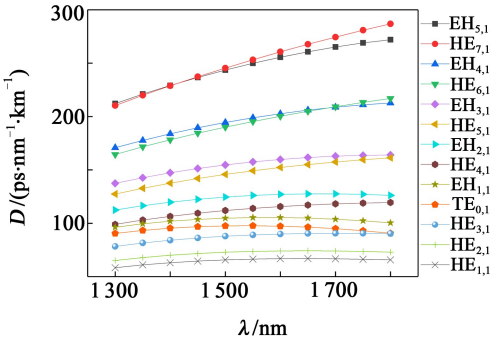


图 7　不同矢量模式在不同波长下的色散系数变化

2.3　限制损耗

在传播过程中，现实因素以及光纤结构中气孔存在且数量有限的原因[20]，导致光信息从纤芯渗透到包层中，造成光信息的泄露，缩短了传输距离，传输信息的质量降低，因此设计出低损耗的 PCF 是长距离信息传输的重中之重。限制损耗的计算与 OAM 模式的有效折射率虚部有关[21]：

$$L=\frac{2\pi}{\lambda}\frac{20}{\ln(10)}10^{9}\mathrm{Im}(n_{\mathrm{eff}}) \tag{5}$$

式中，$\mathrm{Im}(n_{\mathrm{eff}})$表示各个 OAM 模式的有效折射率的虚部，$\lambda$ 表示波长，L 的单位为 dB·m^{-1}。

表 2 记录了不同矢量模式在 1 550 nm 波长处的限制损耗。由表可知，在 1 550 nm 波长处，限制损耗在 10^{-9}～10^{-4} dB·m^{-1} 量级范围内，其中 $HE_{1,1}$ 模式的限制损耗最小，约为 1.39×10^{-9} dB·m^{-1}，而 $HE_{7,1}$ 模式的限制损耗最大，约为 4.38×10^{-4} dB·m^{-1}。随着波长和 OAM 模式阶数的增加，矢量模式的限制损耗越来越大，这是因为螺旋臂对光束的限制能力随着波长的增加而减小，且模式阶数越大，能量泄露到包层中的可能性越大。可通过对结构进行优化，减小 PCF 的限制损耗，限制损耗越小，PCF 的传输质量越好，更有利于长距离传输。

表 2　不同矢量模式在 1 550 nm 波长处的限制损耗

矢量模式	$HE_{1,1}$	$HE_{2,1}$	$HE_{3,1}$	$HE_{4,1}$	$HE_{5,1}$	$HE_{6,1}$
限制损耗/(dB·m^{-1})	1.39×10^{-9}	3.33×10^{-9}	7.28×10^{-9}	2.52×10^{-8}	1.96×10^{-7}	4.96×10^{-6}
矢量模式	$HE_{7,1}$	$EH_{1,1}$	$EH_{2,1}$	$EH_{3,1}$	$EH_{4,1}$	$EH_{5,1}$
限制损耗/(dB·m^{-1})	4.38×10^{-4}	2.34×10^{-8}	7.11×10^{-8}	5.62×10^{-7}	1.87×10^{-5}	9.14×10^{-4}

2.4　有效模场面积及非线性

非线性系数是衡量光纤非线性效应的重要指标，非线性效应是影响模式传输质量的重要因素之一，OAM 模式的非线性效应越小，光纤通信系统的传输质量越好。非线性系数计算表示为[22]

$$\gamma=\frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\mathrm{eff}}} \tag{6}$$

式中，n_2 表示材料的非线性折射率，其取值为 $n_2=2.6\times10^{-20}$ m^2·W^{-1}；A_{eff} 表示模式的有效模式面积，γ 的单位为 W^{-1}·km^{-1}。

OAM 模式的非线性系数与其有效模式面积 A_{eff} 有很大的关系。对于多模光纤来说，大模式面积是至关重要的属性，具有较大模式面积的 OAM 光纤不易受到非线性效应的影响。因此应尽可能地使光纤具有较大的有效模式面积，提高模式的传输质量。A_{eff} 表示为[22]

$$A_{\mathrm{eff}}=\frac{\left(\iint|E(x,y)|^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y\right)^2}{\iint|E(x,y)|^4\mathrm{d}x\mathrm{d}y} \tag{7}$$

式中，$E(x,y)$表示光纤的横向电场强度分布，A_{eff} 的单位为 μm^2。

根据式(6)和式(7)可以看出，OAM 模式的 A_{eff} 和非线性系数是呈倒数关系的，A_{eff} 越大，非线性系数就越小，光纤通信系统的传输质量越高。不同矢量模的有效模式面积随波长的变化如图 8 所示。由图中可以看出，在 1 300～1 800 nm 波段上，$TE_{0,1}$ 模式拥有最大的有效模式面积，约为 54.49 μm^2；其次为 $HE_{7,1}$ 模式，约为 51.81 μm^2；最小的是 $HE_{1,1}$ 模式，约为 33.32 μm^2。随着波长和矢量模式阶数的增加，各阶模式的 A_{eff} 也随之增加。

非线性系数与 A_{eff} 相反，不同矢量模的非线性系数随波长的变化如图 9 所示，在 1 300～1 800 nm 波段上，$HE_{1,1}$ 模式的非线性系数值最大，约为 3.77 W^{-1}·km^{-1}，$TE_{0,1}$ 模式的非线性系数最小，约为 1.67 W^{-1}·km^{-1}，各阶模式的非线性系数随波长和模式阶数的增加而逐渐减小。在 1 550 nm 波长处，$HE_{7,1}$ 模式的非线性系数为 2.17 W^{-1}·km^{-1}，该结构的模式非线性系数小，有利于减小光纤中的非线性效应，更有助于 OAM 模式在 PCF 中的稳定传输。

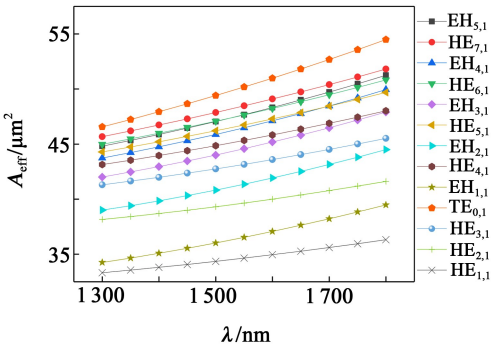


图 8 不同矢量模式在不同波长下的有效模式面积变化

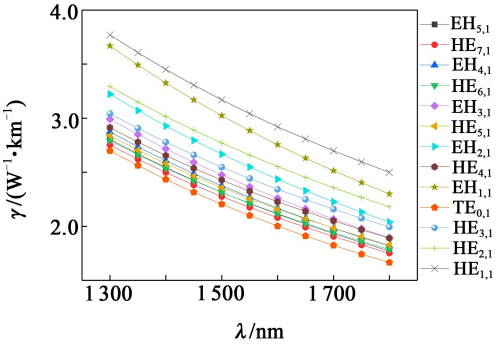


图 9 不同矢量模式在不同波长下的非线性系数变化

3 结论

本文设计了一种基于阿基米德螺线的螺旋光子晶体光纤，在 1 300～1 800 nm 波段内可稳定传输 22 种 OAM 模式。通过仿真计算得到该结构具有以下特性：(1)有效折射率差大。各个矢量模式的有效折射率差均大于 1×10^{-4}，在 1 550 nm 波长下的有效折射率差可达到 2.89×10^{-3}，有效避免了模式间的耦合，保证模式的稳定传输；(2)色散系数低且色散曲线平坦。在 1 300～1 800 nm 波段内，OAM 模式的色散系数维持在 58.36～286.91 ps/(nm·km)，$EH_{1,1}$ 模式的色散变化幅度可达到 0.55 ps/(nm·km)；(3)低限制损耗。在 1 550 nm 波长下，$HE_{1,1}$ 模式的限制损耗为 1.39×10^{-9} dB·m^{-1}，提高了光纤通信中信息传输的质量；(4)较低的非线性系数。$HE_{7,1}$ 模式在 1 550 nm 波长下的非线性系数为 2.17 W^{-1}·km^{-1}，有效地减小了非线性效应对 OAM 模式传输的影响。该研究成果为光子晶体光纤功能器件的研发提供了理论支持，且对高容量光纤通信中基于光纤的 OAM 多路复用有着重要的意义。

参考文献：

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

[2] Bozinovic N, Yue Yang, Ren Yongxiong, et al. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers [J]. Science, 2013, 340(6140): 1545-1548.

[3] Hu Ziang, Huang Yuqi, Luo Aiping, et al. Photonic crystal fiber for supporting 26 orbital angular momentum modes[J]. Opt. Express, 2016, 24(15): 17285-17291.

[4] 侯 金，王林枝，杨春勇，等. 轨道角动量光通信研究进展[J]. 中南民族大学学报：自然科学版，2014，33(1)：67-72.
Hou Jin, Wang Linzhi, Yang Chunyong, et al. Progress in optical orbital angular momentum communications[J]. J. of South-Central University for Nationalities (Natural Science Edition), 2014, 33(1): 67-72.

[5] Ellis D, Zhao Jian, Cotter D. Approaching the non-linear Shannon limit[J]. J. Lightwave Technol., 2009, 28(4): 423-433.

[6] 杨红红，陈鹤鸣，白秀丽. 一种可传输 42 个 OAM 模的光子晶体光纤[J]. 光通信研究，2018，206(2)：32-35.
Yang Honghong, Chen Heming, Bai Xiuli. A type of photonic crystal fibre with 42 OAM modes [J]. Study on Optical Communications, 2018, 206(2): 32-35.

[7] Yue Yang, Zhang Lin, Yan Yan, et al. Octave-spanning supercontinuum generation of vortices in an As_2S_3 ring photonic crystal fiber[J]. Opt. Lett., 2012, 37(11): 1889-1891.

[8] Zhang Hu, Zhang Wenbo, Xi Lixia, et al. Design of a circular photonic crystal fiber supporting OAM modes [C]// Asia Communications and Photonics Conf.: Optical Society of America, 2015: ASu2A-54.

[9] Tian Wei, Zhang Hu, Zhang Xiaoguang, et al. A circular photonic crystal fiber supporting 26 OAM modes[J]. Opt. Fiber Technol., 2016, 30: 184-189.

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

[11] Israk M F, Razzak M A, Ahmed K, et al. Ring-based coil structure photonic crystal fiber for transmission of orbital angular momentum with large bandwidth: Outline, investigation and analysis[J]. Opt. Commun., 2020, 473: 126003.

[12] 张文林. 具有多层结构的轨道角动量模式光纤的模式特性研究[D]. 深圳：深圳大学，2017.
Zhang Wenlin. Mode properties research of multi-layer structure orbital angular momentum fiber [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017.

[13] Dashti P Z, Alhassen F, Lee H P. Observation of orbital angular momentum transfer between acoustic and optical vortices in optical fiber[J]. Phys. Rev. Lett., 2006, 96(4): 043604.

(下转第 388 页)

Normal University, 2019.

[11] Shi Z, Feng Y, Zhao M, et al. Normalised gamma transformation-based contrast-limited adaptive histogram equalisation with colour correction for sand-dust image enhancement[J]. IET Image Processing, 2020, 14(4): 747-756.

[12] Buades A, Lisani J, Petro A B, et al. Backlit images enhancement using global tone mappings and image fusion [J]. IET Image Processing, 2020, 14(2): 211-219.

[13] 殷 莹, 吴向前, 王 萍, 等. 基于道路监控的图像增强算法研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2018, 35(2): 217-221, 234.

Yin Y, Wu X Q, Wang P, et al. Research on image enhancement algorithm based on road surveillance[J]. J. of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2018, 35(2): 217-221, 234.

[14] 鲍富成. 水下偏振成像及图像处理方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.

Bao F Ch. Research on underwater polarization imaging and image processing methods [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019.

[15] 张 全. 基于NSST的红外与可见光图像融合算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.

Zhang Q. Study on the fusion algorithm of infrared and visible light image based on NSST [D]. Xi'an: Xidian University, 2020.

[16] Wang S, Shen Y. Multi-modal image fusion based on saliency guided in Nsct domain[J]. IET Image Processing, 2020, 14(13): 3188-3201.

[17] Zhang G, Yan X, Xu Y, et al. Neural guided visual slam system with laplacian of gaussian operator[J]. IET Computer Vision, 2021, 15(3): 181-196.

[18] 游 江, 刘鹏祖, 容晓龙, 等. 基于暗通道先验原理的偏振图像去雾增强算法研究[J]. 激光与红外, 2020, 50(4): 493-500.

You J, Liu P Z, Rong X L, et al. Research on polarization image defogging enhancement algorithm based on dark channel a priori principle[J]. Laser and Infrared, 2020, 50(4): 493-500.

[19] 杨光义. 图像质量评价及其在图像去噪中的应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.

Yang G Y. Research on image quality evaluation and its application in image denoising[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.

[20] Maksimovic-Moicevic S, Lukac Ž, Temerinac M. Objective estimation of subjective image quality assessment using multi-parameter prediction[J]. IET Image Processing, 2019, 13 (13): 2428-2435.

[21] Schechner Y Y, Karpel N. Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis[J]. IEEE J. of Oceanic Engin., 2005, 30(3): 570-587.

作者简介:

王昊月(1997—),女,硕士研究生,主要从事水下偏振成像及去雾方面的研究;

陈向宁(1962—),男,博士,教授,主要从事光学遥感方面的研究。

(上接第 352 页)

[14] Pakarzadeh H, Sharif V. Control of orbital angular momentum of light in optofluidic infiltrated circular photonic crystal fibers[J]. Opt. Commun., 2019, 438: 18-24.

[15] 田 伟. 承载光子轨道角动量光波模式的光纤设计[D]. 北京: 北京邮电大学, 2017.

Tian Wei. Optical fiber design for the photonic orbital angular momentum wave modes [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017.

[16] 王沙沙. 生成多种轨道角动量模式光纤的设计研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.

Wang Shasha. Research and design of the fiber for generating multiple orbital angular momentum modes[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.

[17] Ashok N, Lee Y L, Shin W. Chalcogenide waveguide structure for dispersion in mid-infrared wavelength[J]. Jap. J. Appl. Phys., 2017, 56(3): 032501.

[18] Nandam A, Jung M, Lee Y L, et al. Reverse ridge silicon strip waveguide and silica slot waveguide structure for the dispersion at 1 550 nm[J]. IEEE Photonics J., 2016, 8(6): 7102609.

[19] Mann V, Askok N, Rastogi V. Coupled strip-slot waveguide design for dispersion compensation [J]. Opt. Quant. Electron., 2015, 47(9): 3161-3169.

[20] 王 霏, 肖平平. 具有混合形状空气孔的OAM传输光纤设计研究[J]. 光电子·激光, 2020, 31(3): 254-261.

Wang Fei, Xiao Pingping. Design and performance of fiber with hybrid shape air holes for OAM mode transmission[J]. J. of Optoelectronics·Laser, 2020, 31(3): 254-261.

[21] Islam M, Hossain M A, Haque F. A comparative analysis between low loss kagome structured THz hollow core and porous core PCF[J]. AIUB J. Sci. Eng., 2017, 16(2): 95-100.

[22] Xu Huizhen, Wu Jian, Xu Kun, et al. Ultra-flattened chromatic dispersion control for circular photonic crystal fibers[J]. J. Opt., 2011, 13(5): 994-1001.

作者简介:

刘兆伦(1978—),男,博士,副教授,主要研究方向为特种光纤及其功能器件。