

# 支持 22 个轨道角动量模式的低平坦色散微结构光纤

游永, 黄薇\*, 陈胜勇, 宋彬彬

天津理工大学计算机科学与工程学院, 天津 300380

**摘要** 设计了一种可支持 22 个轨道角动量(OAM)模式传输的新型微结构光纤,该光纤具有低平坦色散、低损耗等优点,光纤中可支持的各个矢量模式之间有效折射率差值均大于  $10^{-4}$ ,对应的 22 个 OAM 模式都能够在纤芯中稳定传输。在 1500~1600 nm 波段范围内,通过优化包层最内圈两层空气孔的物理参数,该光纤中可支持传输的模式色散均能控制在  $0\sim 50\text{ ps}\cdot(\text{nm}\cdot\text{km})^{-1}$  范围内,HE<sub>71</sub> 和 EH<sub>51</sub> 模式的色散变化值低于  $12.8\text{ ps}\cdot(\text{nm}\cdot\text{km})^{-1}$ ,其余模式的色散变化范围低于  $5\text{ ps}\cdot(\text{nm}\cdot\text{km})^{-1}$ 。在 1550 nm 波段处,该光纤所支持的所有模式损耗均低于  $1.35\times 10^{-9}\text{ dB/m}$ 。

**关键词** 光纤光学; 微结构光纤; 轨道角动量

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0406006

## Flat and Low Dispersion Microstructured Optical Fiber for Supporting 22 Orbital Angular Momentum Modes

You Yong, Huang Wei, Chen Shengyong, Song Binbin

School of Computer Science and Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300380, China

**Abstract** A novel microstructured optical fiber is proposed and can support the transmission of 22 orbital angular momentum (OAM) modes, which has the advantages of flat and low dispersion and low loss. The OAM modes can be well-separated due to the large effective refractive index difference (above  $10^{-4}$ ) between the eigenmodes corresponding to each OAM mode. In the range of 1500-1600 nm, By adjusting the diameters of the first two inner rings of air-holes, we can controll the dispersion of each mode in the range from 0 to  $50\text{ ps}\cdot(\text{nm}\cdot\text{km})^{-1}$ . The dispersion variations of HE<sub>71</sub> and EH<sub>51</sub> modes are less than  $12.8\text{ ps}\cdot(\text{nm}\cdot\text{km})^{-1}$ , and the dispersion variations of other modes are less than  $5\text{ ps}\cdot(\text{nm}\cdot\text{km})^{-1}$ . Moreover, this fiber possesses a very low confinement loss below  $1.35\times 10^{-9}\text{ dB/m}$  for all the supported modes at 1550 nm.

**Key words** fiber optics; microstructured fibers; orbital angular momentum

**OCIS codes** 060.2310; 060.4005; 050.4865

## 1 引言

光纤轨道角动量(OAM)模式因其丰富而又奇异的特性引起了国内外科研工作者的广泛关注,并在光纤通信、激光技术、微纳操控等领域占领重要的一席之地<sup>[1-3]</sup>。光纤 OAM 复用通信技术作为光纤 OAM 模式最重要的应用之一,利用不同 OAM 模式相互正交的特性,将多个 OAM 模式作

为独立的通道分别携带不同的光信息进行复用传输,极大地提高了通信传输中的信息容量<sup>[4-7]</sup>。作为一个新兴研究领域,OAM 光纤通信尚存在很多问题需要解决,其中之一就是构成 OAM 模式的 HE 和 EH 本征模式在长距离光纤通信中由于传播常数接近,容易耦合成 LP 模式,影响 OAM 模式的稳定传输。其中 HE 模和 EH 模为构成 OAM 模式的非本征模式,两者的两个纵向分量均不为 0;LP 模为线

收稿日期: 2017-10-10; 收到修改稿日期: 2017-11-29

基金项目: 国家自然科学基金(11704283,U1509207)、天津市光电传感器与传感网络技术重点实验室开放课题

作者简介: 游永(1992-),男,硕士研究生,主要从事光纤光子学方面的研究。E-mail: youyongmail@163.com

导师简介: 陈胜勇(1973-),男,博士,教授,主要从事计算机视觉、图像处理和机器人等方面的研究。

E-mail: csy@tjut.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: weihuang@tjut.edu.cn

偏振模(极化模),其各分量具有固定的偏振(极化)方向。为解决该问题,必须对光纤结构进行特殊设计,使其各个矢量模式之间的折射率差值大于 $10^{-4}$ ,以避免模式之间的耦合<sup>[8]</sup>。

近年来,国内外科研工作者们设计出了多种可支持 OAM 模式传输的光纤,如简单结构的环芯阶跃光纤<sup>[8-11]</sup>和各类微结构光纤<sup>[12-17]</sup>。与简单结构的环芯光纤相比,微结构光纤横截面上复杂的折射率分布和精细结构使其具有更加灵活可控的光学特性,更有利于设计和开发出各式各样的新型功能型光纤。2016 年 Tian 等<sup>[14]</sup>设计了一种可支持 26 个 OAM 模式传输的微结构光纤,该光纤所支持的各个模式在 1550 nm 波长处色散值分布在  $70 \sim 260 \text{ ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$  之间;同年,Zhang 等<sup>[15]</sup>设计了一种支持 14 个 OAM 模式传输的微结构光纤,该光纤在通信波段色散值位于  $50 \sim 400 \text{ ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$  之间;与此同时,Hu 等<sup>[16]</sup>设计的可支持 26 个 OAM 模式传输的空气孔光子晶体光纤,所有可支持传输的模式色散在通信波段均位于  $-100 \sim -300 \text{ ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$  之间。总的来看,目前已报道的可支持 OAM 模式传输的微结构光纤文献较少,且色散特性都不太理想。

对于长距离 OAM 通信系统,支持 OAM 模式传输的光纤需要满足多种光学特性,如低损耗、低平坦色散,以及稳定的 OAM 模式等,这些都是光纤设计时需要考虑的特性。

本文在国内外研究基础上,设计了一种可以支持 22 个 OAM 模式(最高阶为  $\text{OAM}_{61}$  模式, $\text{OAM}_{61}$  由相位差为  $\pi/2$  的  $\text{HE}_{71}$  或者  $\text{EH}_{51}$  的奇偶模式相互叠加产生)的新型微结构光纤,该光纤包层由 4 层相同大小的空气孔围绕着纤芯按三角栅格呈周期排列,最内层环绕一圈小空气孔,纤芯由一圈高折射率环和中心大空气孔构成。该光纤支持传输的横电(TE)模、横磁(TM)模、HE 或 EH 模式之间的折射率差均大于  $1 \times 10^{-4}$ ,有效避免了各个矢量模式在传输过程中的相互耦合现象,保证了对应 22 个 OAM 模式的稳定传输。在  $1500 \sim 1600 \text{ nm}$  波段范围内,该光纤所支持传输的模式色散均小于  $50 \text{ ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$ ,其中,在 1550 nm 波长处,有 14 个 OAM 模式的色散小于  $30 \text{ ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$ 。此外,在  $1500 \sim 1600 \text{ nm}$  波段范围内,各个模式的色散变化除了  $\text{HE}_{71}$  和  $\text{EH}_{51}$  低于  $12.8 \text{ ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$ ,其余模式的色散变化均低于  $5 \text{ ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$ ,并且传输损耗非常小,所支持的所有模式损耗在 1550 nm 波段处均低于  $1.35 \times$

$10^{-9} \text{ dB/m}$ 。该光纤具有低平坦色散、低损耗等优点,在光纤通信系统中有潜在的应用价值。

## 2 光纤结构

### 2.1 OAM 模式

在光纤中,OAM 模式由相位差为  $\pi/2$  的 HE 或 EH 的奇偶模式相互叠加而成,其中, $\text{HE}_{l,m}$  奇偶模式叠加构成  $\text{OAM}_{\pm l-1,m}^{\pm}$  模式, $\text{EH}_{l,m}$  奇偶模式叠加构成  $\text{OAM}_{\pm l+1,m}^{\pm}$  模式,其中  $l$  代表拓扑荷, $m$  表示模式的强度分布在径向的同心圆数量, $\text{OAM}_{\pm l,m}^{\pm}$  的上标表示左旋或右旋圆偏振方向,下标中的“ $\pm$ ”代表 OAM 光束波前旋转的方向。

要支持 OAM 模式的长距离稳定传输,光纤必须通过特殊设计使各个矢量模式之间的折射率差大于  $10^{-4}$  以上,才能避免各个矢量模式在传输过程中发生相互耦合,最终转化为 LP 模式<sup>[2]</sup>。

### 2.2 光纤结构

该微结构光纤的截面如图 1 所示,为了实现矢量模式间的最大有效折射率差,光纤的纤芯部分由直径为  $d_0 = 10 \mu\text{m}$  的空气孔和围绕着空气孔的一圈高折射率环构成,高折射率环的折射率比包层基底材料的折射率高 0.05,环厚度  $h = 2 \mu\text{m}$ 。包层部分由最内层的 1 圈小型空气孔和外圈 4 层相同大小的大型空气孔构成,外圈 4 层大空气孔按三角栅格呈周期性排列,包层最内层空气孔中心距离纤芯中心点  $12 \mu\text{m}$ ,各个空气孔的孔间距  $\Delta = 11 \mu\text{m}$ 。光纤基底材料为纯二氧化硅,其在 1550 nm 波长处的折射率为 1.444,纤芯的高折射率环由掺杂二氧化硅构成。在理论模拟过程中,发现随着靠近纤芯最内两层空气孔直径的减小,光纤中的模式色散将会减小。考虑到光纤的模式特性及光纤制造技术,将第 1 层空气孔直径设为  $d_1 = 4 \mu\text{m}$ ,第 2~5 层空气孔直径

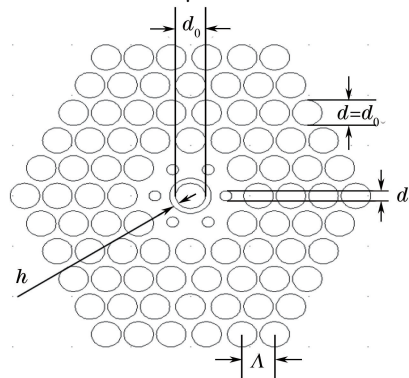


图 1 微结构光纤横截面图

Fig. 1 Cross section of the microstructured fiber

设为  $d = 10 \mu\text{m}$ , 通过有限元软件 COMSOL Multiphysics 对该模型进行理论分析。

### 3 微结构光纤特性

#### 3.1 模式特性

图 2 是该微结构光纤支持的所有本征矢量模式的电场分布图, 包括  $\text{TE}_{01}$ 、 $\text{HE}_{11}$ 、 $\text{HE}_{21}$ 、 $\text{HE}_{31}$ 、 $\text{TM}_{01}$ 、 $\text{EH}_{11}$ 、 $\text{HE}_{41}$ 、 $\text{EH}_{21}$ 、 $\text{HE}_{51}$ 、 $\text{EH}_{31}$ 、 $\text{HE}_{61}$ 、 $\text{EH}_{41}$ 、 $\text{HE}_{71}$ 、 $\text{EH}_{51}$  共 14 个模式, 模拟计算得到的光纤中各个矢量模式 (除  $\text{TE}_{01}$ 、 $\text{TE}_{11}$ 、 $\text{TM}_{01}$  之外) 所对应的 OAM 模式的相位图, 如图 3 所示。

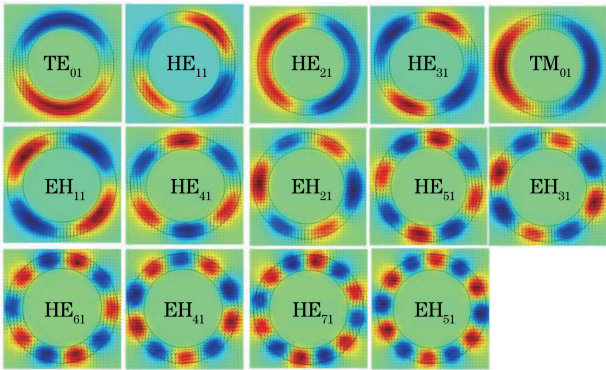


图 2 微结构光纤所支持的本征矢量模式电场分布图  
Fig. 2 Electric field distribution of the vector eigenmodes supported by the microstructured fiber

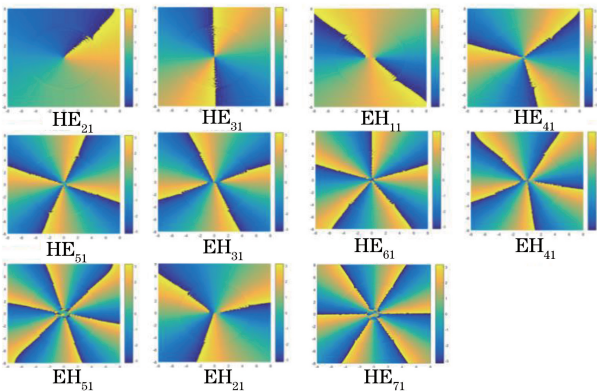


图 3 微结构光纤中各个矢量模式所对应的 OAM 模式的相位图

Fig. 3 Phase profiles of the OAM modes corresponding to each vector modes in the microstructured fiber

这 14 个矢量模式的有效折射率曲线如图 4 所示, 可见, 随着波长的增大, 各个模式的折射率逐渐减小。如图 5 所示, 计算不同矢量模式之间的有效折射率差值, 在图 5 中标注出了一条折射率差值为  $1 \times 10^{-4}$  的标准线, 从图中可以很明显地看出, 该微结构光纤所支持各阶矢量模式之差均大于  $1 \times 10^{-4}$ , 其中  $\text{HE}_{61}$  模式的有效折射率  $n_{\text{eff\_HE}_{61}}$  与  $\text{EH}_{41}$

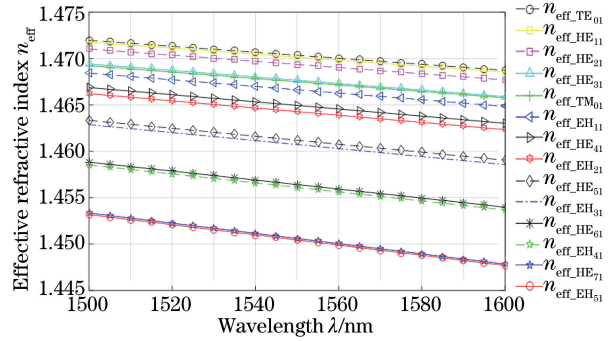


图 4 不同模式的有效折射率与波长的变化关系

Fig. 4 Effective refractive indices as a function of wavelength for different eigenmodes modes

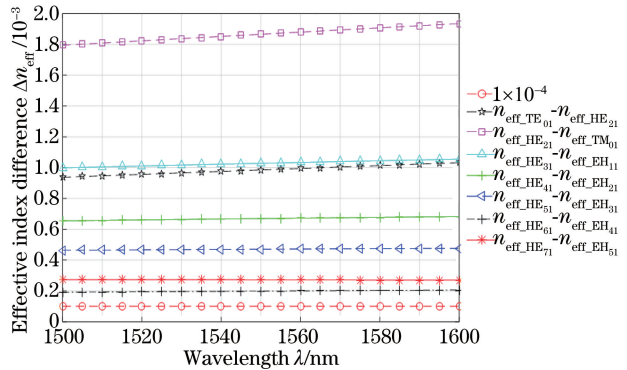


图 5 各个矢量模式之间有效折射率差值与波长的关系

Fig. 5 Absolute values of effective refractive index difference between vector modes as a function of wavelength

模式的有效折射率  $n_{\text{eff\_EH}_{41}}$  之差在 1550 nm 波长处最小, 其值为  $1.9 \times 10^{-4}$ 。因此, 该微结构光纤有效避免了各个矢量模式在传输过程中的相互耦合现象, 保证了所支持的 OAM 模式在光纤通信中的稳定传输。

从图 5 中可以看出, 该光纤可支持  $\text{OAM}_{\pm k 1}$  ( $k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ ) 和  $\text{OAM}_{\pm k+1, 1}$  ( $k = 1, 2, 3, 4, 5$ ) 共计 22 个 OAM 模式的稳定传输, 其中  $\text{OAM}_{\pm k 1}$  由  $\text{HE}_{k+1, 1}$  的奇偶模式叠加而成,  $\text{OAM}_{\pm k+1, 1}$  由  $\text{EH}_{k, 1}$  的奇偶模式叠加而成。

#### 3.2 色散特性

光纤的色散与光纤结构之间具有密切的关系, 该微结构光纤的色散  $D$  可以用 Sellmeier 色散公式<sup>[18]</sup>求得:

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}(n_{\text{eff}})}{d\lambda^2}, \quad (1)$$

式中,  $c$  为真空中的光速,  $\lambda$  为波长,  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  为模式的有效折射率的实部。

通过改变该光纤包层空气孔的物理参数, 逐步设计并优化了该光纤的结构及色散特性。如

图 6(a)所示,将包层第 1 层空气孔直径设为  $8 \mu\text{m}$ ,第 2~5 层空气孔直径均设为  $10 \mu\text{m}$ ;由图 6(b)可见,在波长  $1500 \sim 1600 \text{ nm}$  范围内,该光纤支持  $\text{TE}_{01}$ 、 $\text{HE}_{11}$ 、 $\text{HE}_{21}$ 、 $\text{HE}_{31}$ 、 $\text{TM}_{01}$ 、 $\text{EH}_{11}$ 、 $\text{HE}_{41}$ 、 $\text{EH}_{21}$ 、 $\text{HE}_{51}$ 、 $\text{EH}_{31}$ 、 $\text{HE}_{61}$ 、 $\text{EH}_{41}$ ,共 12 个本征模式,其色散值均位于  $25 \sim 80 \text{ ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$  之间。在图 7(a)中,包层空气孔直径第 1 层设为  $4 \mu\text{m}$ ,第 2 层设为  $8 \mu\text{m}$ ,第 3~5 层设为  $10 \mu\text{m}$ ,由图 7(b)可见,在波长  $1500 \sim 1600 \text{ nm}$  范围内,光纤支持  $\text{TE}_{01}$ 、 $\text{HE}_{11}$ 、 $\text{HE}_{21}$ 、 $\text{HE}_{31}$ 、 $\text{TM}_{01}$ 、 $\text{EH}_{11}$ 、 $\text{HE}_{41}$ 、 $\text{EH}_{21}$ 、 $\text{HE}_{51}$ 、 $\text{EH}_{31}$ 、 $\text{HE}_{61}$ 、 $\text{EH}_{41}$ 、 $\text{HE}_{71}$ 、 $\text{EH}_{51}$ ,共 14 个本征模式,其色散位于  $0 \sim 50 \text{ ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$  之间,分布均匀。在图 8(a)中,再将包层第 1 层空气孔直径设为  $4 \mu\text{m}$ ,第 2~5 层空气孔直径设为  $10 \mu\text{m}$ ,由图 8(b)

中可见,在  $1500 \sim 1600 \text{ nm}$  波长范围内,光纤所支持的模式也是 14 个,分别为  $\text{TE}_{01}$ 、 $\text{HE}_{11}$ 、 $\text{HE}_{21}$ 、 $\text{HE}_{31}$ 、 $\text{TM}_{01}$ 、 $\text{EH}_{11}$ 、 $\text{HE}_{41}$ 、 $\text{EH}_{21}$ 、 $\text{HE}_{51}$ 、 $\text{EH}_{31}$ 、 $\text{HE}_{61}$ 、 $\text{EH}_{41}$ 、 $\text{HE}_{71}$ 、 $\text{EH}_{51}$ ,各模式的色散值均小于  $50 \text{ ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$ 。在该波段范围内,  $\text{HE}_{21}$ 、 $\text{HE}_{31}$ 、 $\text{EH}_{11}$ 、 $\text{HE}_{41}$ 、 $\text{EH}_{21}$ 、 $\text{HE}_{51}$ 、 $\text{EH}_{31}$  对应共计 14 个 OAM 模式的色散小于  $30 \text{ ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$ ,色散值最大的为  $\text{HE}_{71}$  模式,该模式在波长为  $1550 \text{ nm}$  处的色散为  $43.83 \text{ ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$ ,且在  $100 \text{ nm}$  波长带宽范围内的色散变化幅度为  $12.8 \text{ ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$ 。由图 8(b)可见,在  $1500 \sim 1600 \text{ nm}$  波长范围内,除  $\text{HE}_{71}$  和  $\text{EH}_{51}$  两个模式的色散变化在  $10 \text{ ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$  以上,其余模式的色散变化幅度均不超过  $5 \text{ ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$ 。

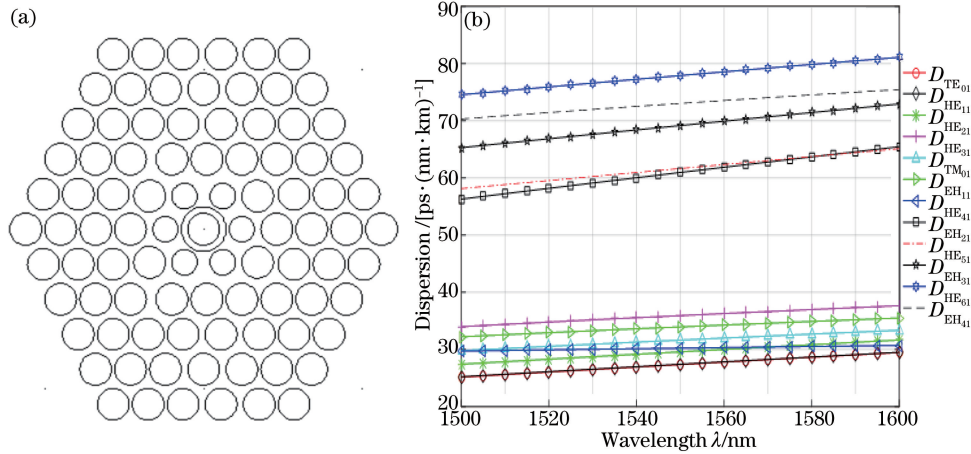


图 6 (a)空气孔直径第 1 层为  $8 \mu\text{m}$ 、第 2~5 层均为  $10 \mu\text{m}$  的光纤截面图; (b)对应(a)条件下的不同模式的色散与波长的变化关系  
Fig. 6 (a) Cross section of the microstructured fiber when the diameter of the air hole located at the first ring is  $8 \mu\text{m}$  and the diameters of the air hole located at the 2<sup>nd</sup>-5<sup>th</sup> rings are  $10 \mu\text{m}$ ; (b) dispersion as a function of wavelength for different modes

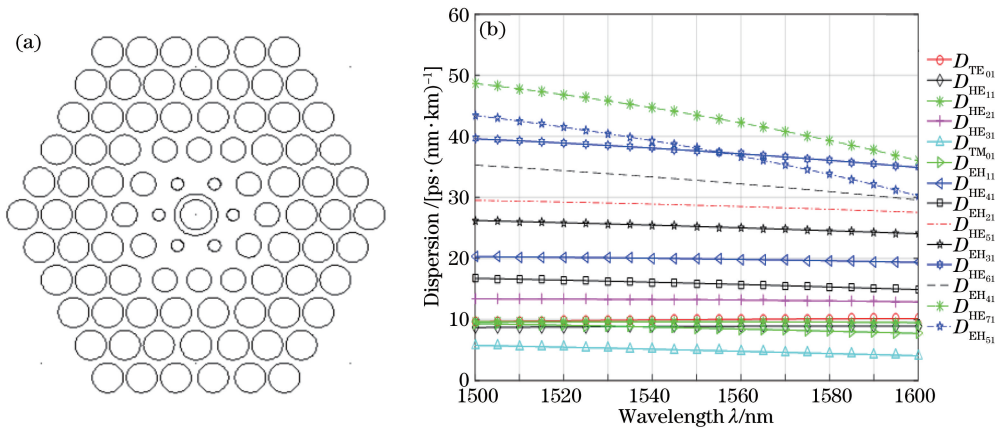


图 7 (a)空气孔直径第 1 层为  $4 \mu\text{m}$ 、第 2 层为  $8 \mu\text{m}$ 、第 3~5 层为  $10 \mu\text{m}$  的光纤截面图;  
(b)对应(a)条件下的不同模式的色散与波长的变化关系

Fig. 7 (a) Cross section of the microstructured fiber when the diameter of the air hole located at the first ring is  $4 \mu\text{m}$ , the diameter of the air hole located at the second ring is  $8 \mu\text{m}$ , and the diameter of the air hole located at the 3<sup>rd</sup>-5<sup>th</sup> rings is  $10 \mu\text{m}$ ; (b) dispersion as a function of wavelength for different modes

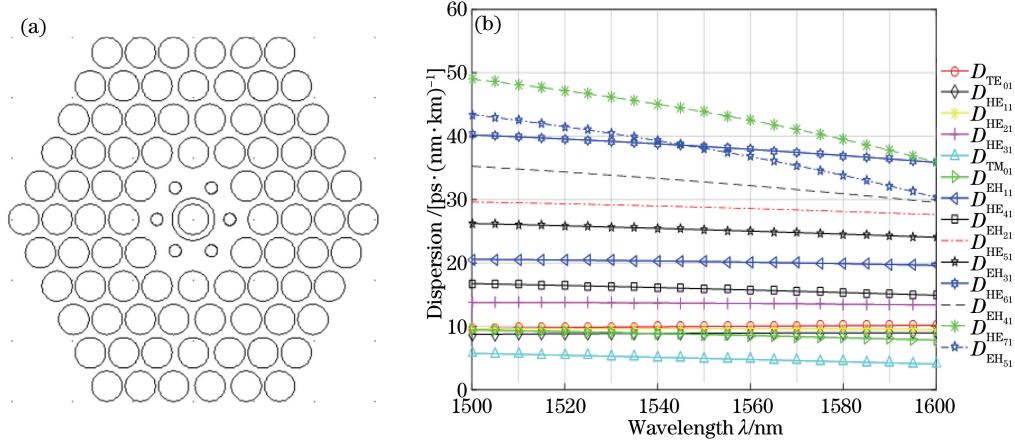


图 8 (a)第 1 层空气孔直径为 4 μm、第 2~5 层为 10 μm 的光纤截面图；(b)对应(a)条件下的不同模式的色散与波长的变化关系  
Fig. 8 (a) Cross section of the microstructured fiber when the diameter of the air hole located at the first ring is 4 μm and the diameters of the air hole located at the 2<sup>nd</sup>-5<sup>th</sup> rings are 10 μm; (b) dispersion as a function of wavelength for different modes

经过多次仿真计算发现,改变包层第 1 层和第 2 层空气孔的直径大小会对各个模式的色散产生明显影响,其中第 1 层的空气孔结构的变化对色散的影响较大,最终将第 1 层空气孔的直径设置为 4 μm;第 2 层空气孔的大小对色散的影响没有第 1 层明显,因此在权衡生产工艺和对色散影响程度后,决定将第 2 层空气孔直径与后几层空气孔直径保持一致,均设为 10 μm。

### 3.3 约束损耗

损耗特性是光纤重要特性之一,本文设计的微结构光纤的约束损耗  $L$  可表示为

$$L = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{20}{\ln 10} 10^9 \text{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (2)$$

式中  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  为模式的有效折射率的虚部,  $L$  的单

位为  $\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

利用损耗公式,计算得到该微结构光纤所支持传输的所有模式在 1550 nm 波长处的约束损耗,如表 1 所示。该光纤在 1500~1600 nm 波长范围内,各个模式的损耗保持在  $10^{-9} \text{dB} \cdot \text{m}^{-1} \sim 10^{-11} \text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$  之间,且均低于  $1.35 \times 10^{-9} \text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$ 。由表 1 中可见,该微结构光纤所支持传输的各个模式都有着非常好的约束损耗,这主要是由于高折射率环的束缚作用,使各阶模式都能很好地约束在纤芯中,因此总体约束损耗都比较理想。在对包层第 1 层和第 2 层空气孔优化过程中,损耗特性变化不大,均在  $10^{-9} \text{dB} \cdot \text{m}^{-1} \sim 10^{-11} \text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$  范围内,说明该光纤的损耗较低,包层空气孔的大小对光纤损耗特性影响较小。

表 1 微结构光纤支持的各个模式在 1550 nm 波长处的约束损耗

Table 1 Confinement loss for different modes at 1550 nm supported by the microstructured fiber

Mode	TE <sub>01</sub>	HE <sub>11</sub>	HE <sub>21</sub>	HE <sub>31</sub>	TM <sub>01</sub>	EH <sub>11</sub>	HE <sub>41</sub>
Confinement loss / (dB · m <sup>-1</sup> )	1.86 × 10 <sup>-10</sup>	1.16 × 10 <sup>-10</sup>	1.35 × 10 <sup>-9</sup>	1.19 × 10 <sup>-10</sup>	1.97 × 10 <sup>-11</sup>	3.42 × 10 <sup>-10</sup>	4.56 × 10 <sup>-10</sup>
Mode	EH <sub>21</sub>	HE <sub>51</sub>	EH <sub>31</sub>	HE <sub>61</sub>	EH <sub>41</sub>	HE <sub>71</sub>	EH <sub>51</sub>
Confinement loss / (dB · m <sup>-1</sup> )	4.30 × 10 <sup>-11</sup>	5.66 × 10 <sup>-10</sup>	2.53 × 10 <sup>-10</sup>	3.22 × 10 <sup>-10</sup>	1.61 × 10 <sup>-10</sup>	1.25 × 10 <sup>-11</sup>	5.01 × 10 <sup>-11</sup>

## 4 结 论

提出并设计了一种可支持 22 个 OAM 模式传输的新型微结构光纤,该光纤支持传输的各矢量模式之间的折射率差均大于  $10^{-4}$ ,有效避免了各矢量模式在传输过程中的相互耦合,保证了各 OAM 模式的稳定传输。通过理论计算,得出在 1500~1600 nm 波段范围内,该光纤所支持传输的模式色散在  $0 \sim 50 \text{ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$  之间,其中,在 1550 nm 波长处,有 14 个 OAM 模式的色散小于

$30 \text{ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$ ;并且各模式的色散变化值在此波段范围内均低于  $12.8 \text{ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$ 。此外,该光纤的模式约束损耗非常小,所支持的所有模式损耗在 1550 nm 波段处均低于  $1.35 \times 10^{-9} \text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$ 。该光纤具有低平坦色散、低损耗等优点,在光纤通信系统中具有潜在的应用价值。

### 参 考 文 献

[1] Padgett M J. Orbital angular momentum 25 years on [J]. Optics Express, 2017, 25(10): 11265-11274.

- [2] Ramachandran S, Kristensen P. Optical vortices in fiber[J]. *Nanophotonics*, 2013, 2(5/6): 455-474.
- [3] Shi S, Ding D S, Zhou Z Y, *et al.* Sorting of orbital angular momentum states of light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0607001.  
施帅, 丁冬生, 周志远, 等. 轨道角动量光的区分[J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0607001.
- [4] Wang J. Advances in communications using optical vortices[J]. *Photonics Research*, 2016, 4(5): B14-B28.
- [5] Willner A E, Huang H, Yan Y, *et al.* Optical communications using orbital angular momentum beams[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(1): 66-106.
- [6] Nejad R M, Allahverdyan K, Vaity P, *et al.* Mode division multiplexing using orbital angular momentum modes over 1.4-km ring core fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(18): 4252-4258.
- [7] Willner A J, Ren Y, Xie G, *et al.* Experimental demonstration of 20 Gbit/s data encoding and 2 ns channel hopping using orbital angular momentum modes[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(24): 5810-5813.
- [8] Brunet C, Vaity P, Messaddeq Y, *et al.* Design, fabrication and validation of an OAM fiber supporting 36 states[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 26117-26127.
- [9] Ramachandran S, Gregg P, Kristensen P, *et al.* On the scalability of ring fiber designs for OAM multiplexing[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 3721-3730.
- [10] Li S H, Wang J. A compact trench-assisted multi-orbital-angular-momentum multi-ring fiber for ultrahigh-density space-division multiplexing (19 rings  $\times$  22 modes)[J]. *Scientific Reports*, 2014(4): 3853.
- [11] Gregg P, Kristensen P, Ramachandran S. Conservation of orbital angular momentum in air-core optical fibers[J]. *Optica*, 2015, 2(3): 267-270.
- [12] 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): 3591-3594.
- [13] Zhou G, Zhou G, Chen C, *et al.* Design and analysis of a microstructure ring fiber for orbital angular momentum transmission[J]. *Photonics Journal*, 2016, 8(2): 7802512.
- [14] Tian W, Zhang H, Zhang X G, *et al.* A circular photonic crystal fiber supporting 26 OAM modes[J]. *Optical Fiber Technology*, 2016, 30:184-189.
- [15] Zhang H, Zhang W, Xi L, *et al.* A new type circular photonic crystal fiber for orbital angular momentum mode transmission[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(13): 1426-1429.
- [16] Hu Z A, Huang Y Q, Luo A P, *et al.* Photonic crystal fiber for supporting 26 orbital angular momentum modes[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 17285-17291.
- [17] Qiao W, Gao S C, Lei T, *et al.* Transmission of orbital angular momentum modes in grapefruit-type microstructure fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0406002.  
乔文, 高社成, 雷霆, 等. 轨道角动量模式在柚子型微结构光纤中的传输[J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0406002.
- [18] Maji P S, Chaudhuri P R. Circular photonic crystal fibers: numerical analysis of chromatic dispersion and losses[J]. *Isrn Optics*, 2013: 986924.