

轨道角动量模式在柚子型微结构光纤中的传输

乔文^{1,2}, 高社成^{1,2}, 雷霆^{1,2}, 吉虹³, 阮银兰³, 谢振威^{1,2}, 杨传武^{1,2}, 袁小聪^{1,2}

¹深圳大学纳米光子学研究中心, 广东 深圳 518060;

²深圳大学光电工程学院光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 广东 深圳 518060;

³阿德莱德大学光子和先进传感器研究所, 阿德莱德 5005

摘要 研究了轨道角动量(OAM)模式在柚子型微结构光纤(MOF)中的传输。光纤纤芯周围存在一层直径为3 μm 的柚子型空气孔,由于空气孔与光纤纤芯之间存在较大的折射率差,传输的光被局限在纤芯中,从而形成稳定的传输模式。通过有限元法对光纤中的矢量本征模式进行模拟,得到了模式的有效折射率和模场分布。结果表明,MOF在630 nm波长附近可支持10个OAM模式传输,各模式间的有效折射率差达到0.01以上,较大的有效折射率差可抑制光纤中各模式间的相互耦合,从而提高OAM模式在光纤中的传输性能。实验中利用特殊设计的光学旋涡达曼光栅对在光纤中传输1 m的OAM_{1,1}和OAM_{-1,1}模式进行解调。

关键词 光纤光学; 轨道角动量; 有限元法; 柚子型微结构光纤; 有效折射率差; 模式传输

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0406002

Transmission of Orbital Angular Momentum Modes in Grapefruit-Type Microstructure Fiber

Qiao Wen^{1,2}, Gao Shecheng^{1,2}, Lei Ting^{1,2}, Ji Hong³, Ruan Yinlan³, Xie Zhenwei^{1,2},
Yang Chuanwu^{1,2}, Yuan Xiacong^{1,2}

¹Nanophotonics Research Centre, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

²Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems, Ministry of Education and Guangdong Province, College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

³Institute of Photonics and Advanced Sensing, The University of Adelaide, Adelaide 5005, Australia

Abstract The transmission of orbital angular momentum (OAM) modes in grapefruit-type microstructure fiber (MOF) is studied. The fiber core is surrounded by grapefruit-type air holes with diameter of 3 μm . The refractive index difference between fiber core and air hole is large, so that the transmission light can be concentrated into the core and stable modes can be formed. Based on the finite element method, vector eigenmodes in the fiber are analyzed. The effective refractive indexes and the mode field distributions of these modes are obtained. The results show that the transmission of ten OAM modes can be supported around the wavelength of 630 nm. The effective refractive index differences among OAM modes are larger than 0.01. The large effective refractive index difference can suppress mutual coupling among different modes, and improve the transmission performance of OAM modes in fiber. In addition, we use the special designed optical vortex Damman gratings in experiments to detect the OAM_{1,1} and OAM_{-1,1} modes after transmitting for 1 m in MOF.

Key words fiber optics; orbital angular momentum; finite element method; grapefruit-type microstructure fiber; effective refractive index difference; mode transmission

OCIS codes 060.2330; 050.1950; 050.4865; 060.4005

收稿日期: 2016-11-14; 收到修改稿日期: 2016-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(61138003, 61427819, 61405121)、深圳大学引进人才科研启动项目(000011, 000075)

作者简介: 乔文(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事轨道角动量光纤通信方面的研究。

E-mail: qiaowen@email.szu.edu.cn

导师简介: 袁小聪(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事微纳光学方面的研究。E-mail: xcyuan@szu.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

轨道角动量(OAM)作为一种新的数据信息载体,是除光的波长、强度和偏振外的另一种重要的光学特征。1992年,Allen等^[1]在近轴传播的条件下证明,由于OAM具有螺旋型的波前结构,其相位分布函数中含有与空间方位角 ϕ 成正比的项 $\exp(il\phi)$,其中 l 为拓扑荷,理论上 l 可以取彼此正交的无限个值。近年来,相位型光学旋涡OAM在光学显微成像、粒子捕获和光通信等方面的研究中得到广泛的关注^[2-3]。在光通信研究方面,OAM为光束的复用提供了一个全新的自由度,并已经在自由空间光通信中取得了一些重要进展^[4-6]。

在OAM光纤通信系统中,支持OAM模式传输的光纤是关键器件之一。为了使OAM模式在光纤中稳定传输,OAM光纤必须具有较大的有效折射率差,才能避免光纤中各矢量本征模式间的相互耦合和简并^[7]。1998年Alexeyev等^[8]提出一种可以传输OAM模式的环形结构光纤。此后,许多特殊结构的光纤被提出并用来支持OAM模式传输,例如空芯光纤^[9]、倒抛物线渐变折射率光纤^[10]、多芯光纤^[11]和多环光纤^[12]。这类光纤中模式间有效折射率差始终在 10^{-4} 量级,在OAM模式传输时,可能会发生奇偶本征模式走移,产生双折射和偏振模式色散,影响模式纯度,并引起模式间的耦合或串扰。因此,增大光纤中矢量本征模式的有效折射率差以确保OAM模式的稳定传输具有十分重要的意义。

本文提出了一种能够传输OAM模式的柚子型微结构光纤(MOF),也可以称作光子晶体光纤。这种光纤的纤芯由同类材料填充,柚子型空气孔所带来的较大折射率差能将传输光局限在纤芯中^[13]而不依赖光子禁带效应。MOF导光方式类似于传统光纤的全反射原理,也被称作全内反射光子晶体光纤(TIR-PCF)。MOF制作工艺成熟,不需要对其结构进行特殊的掺杂处理,便可使OAM模式在光纤中的稳定传输成为可能^[14-15]。对这种MOF进行理论模式分析,发现光纤中的各矢量本征模式间存在0.01以上的较大有效折射率差^[16],远大于引起光纤中模式间串扰的有效折射率差阈值(1.8×10^{-4}),因此理论上最多可以支持10个OAM模式传输。在实验中利用特殊设计的光学旋涡达曼光栅对在光纤中传输1 m后的 ± 1 阶的OAM模式(OAM_{1,1}和OAM_{-1,1})进行解调,证明了这种MOF可以传输 ± 1 阶的OAM模式,为今后OAM模式在光纤中的稳定传输和OAM模式在光纤中的复用提供了一种可行性的思路。

2 光纤中的OAM模式

对于圆对称结构的光波导,矢量波动方程的解可以被分解为横电模(TE)、横磁模(TM)、电磁混合模式(HE和EH)的光纤矢量本征模式,而这些光纤矢量本征模式在弱导条件下的传输可能会发生简并,形成标量线偏振(LP)模式^[17-18]。通常,光纤中的LP模式是由具有不同传播常数的矢量本征模式组成的,因此传播常数不固定^[19-20]。与光纤中的LP模式类似,OAM模式也是由光纤中的矢量本征模式组成的,但OAM模式是在均匀的偏振条件下由相同传播常数的矢量本征模式HE和EH的奇数模和偶数模简并形成的^[21]。

将OAM的模式定义为OAM _{l , m} ^{\pm} ,其中右上的角标 \pm 、 $-$ 分别表示圆偏振态OAM的右、左旋转方向;右下的角标 l 表征光纤中模式的阶数(即拓扑荷), m 表示模式的强度分布在径向的同心圆数量。当 l 不等于0时,OAM模式又可以分成拓扑荷为正负、偏振方向为左右旋的4种表示形式。对于光纤中的OAM模式,存在一组具有 $\pm\pi/2$ 相移的奇数和偶数矢量模式HE _{l , m} 和EH _{l , m} ,每个OAM模式可以表示为光纤中同阶数矢量模式的奇数模和偶数模的简并^[10,18]。因此,光纤中OAM的模式可表示为简并的HE _{$l+1$, m} 和EH _{$l-1$, m} 奇数模式(HE _{$l+1$, m} ^{odd})和偶数模式(HE _{$l+1$, m} ^{even})的和(差)。

对于1阶OAM模式,OAM _{± 1 , m} ^{\pm} 可表示为TM_{0, m} 与TE_{0, m} 的和(差),由于TE和TM模式具有不同的传播常数,不能简并形成稳定的OAM模式,因此OAM_{1, m} 只能由HE₂₁模式简并形成,+1阶的OAM为右旋偏振,-1阶的OAM为左旋偏振,1阶OAM模式只有两种表示形式^[22]。

在一般的光纤中,各矢量本征模式间的有效折射率差较小,不同的矢量本征模式在传输过程中会相互串扰,并发生模式简并,形成标量LP模式(例如HE₂₁、TE₀₁和TM₀₁模式会简并为LP₁₁模式^[18]),使得OAM模式纯度较低而发生模式走移,从而使光纤通信系统中的信号产生畸变,导致解调困难,因此OAM模式无法在一般单模光纤中稳定传输。

3 MOF 中的模式分析

MOF 的截面示意图如图 1 所示, MOF 的纤芯直径为 $2.06 \mu\text{m}$, 包层直径为 $125 \mu\text{m}$, 包层材料选用 F2 玻璃, 包层中的柚子型空气孔直径为 $3 \mu\text{m}$ 。理论分析 MOF 中的矢量本征模式, 通过 Sellmerier 方程计算该 F2 玻璃在不同波长(λ)下的折射率^[23]为

$$n_{\text{cladding}}^2(\lambda) = 1 + \frac{1.34533359\lambda^2}{\lambda^2 - 0.00997743871} + \frac{0.209073176\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0470450767} + \frac{0.937357162\lambda^2}{\lambda^2 - 111.886764} \quad (1)$$

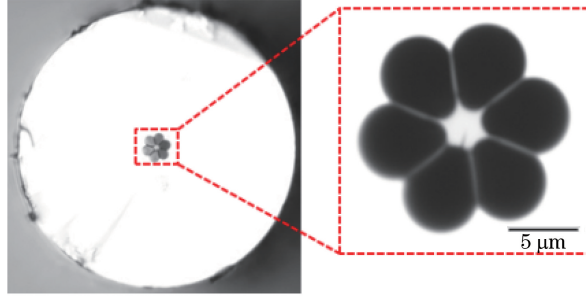


图 1 MOF 在显微镜下的横截面图

Fig. 1 Cross-section of MOF under microscope

利用有限元法进行求解, 分析 MOF 中的传输模式^[24], 再计算出 MOF 所能支持传输的 OAM 模式。在波长 630 nm 附近对 MOF 中的传输模式进行求解, 得到包括 TM、TE 和其他混杂模式在内的 12 个矢量本征模式, 图 2 为 MOF 中部分矢量本征模式的强度分布图。综合 OAM 的拓扑荷正负和 OAM 左右旋偏振态性质, 计算得到这种 MOF 可以支持 10 个 OAM 模式传输, 分别为 $\text{OAM}_{1,1}^+$, $\text{OAM}_{-1,1}^-$, $\text{OAM}_{2,1}^+$, $\text{OAM}_{-2,1}^-$, $\text{OAM}_{2,1}^-$, $\text{OAM}_{-2,1}^+$, $\text{OAM}_{3,1}^+$, $\text{OAM}_{-3,1}^-$, $\text{OAM}_{3,1}^-$, $\text{OAM}_{-3,1}^+$ 。

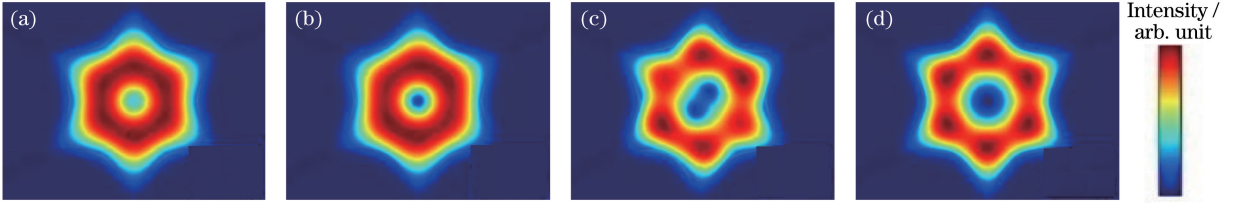


图 2 MOF 中部分矢量本征模式的强度分布。(a) TM_{01} ; (b) HE_{21} ; (c) EH_{11} ; (d) HE_{31}

Fig. 2 Intensity distributions of partial vector eigenmodes in MOF. (a) TM_{01} ; (b) HE_{21} ; (c) EH_{11} ; (d) HE_{31}

图 3 给出了 MOF 在 $550 \sim 710 \text{ nm}$ 的波长范围内, 各矢量本征模式的有效折射率及它们之间的有效折射率差值。MOF 纤芯周围的柚子型空气孔使得各模式间的有效折射率差值增大, 形成稳定的 OAM 模式传输, 不会发生严重的串扰和相互耦合。从图 3 中可以看出, 每个模式的有效折射率随着波长的增大而减小, 其中 HE_{11} 为光纤本征矢量模式的基模, 上标 x, y 表示偏振态的不同方向。光纤其他混杂模式的奇数模和

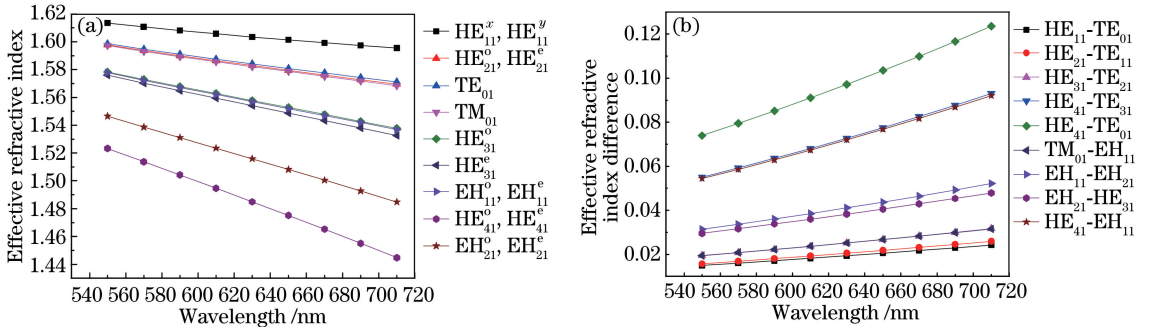


图 3 (a) MOF 中矢量本征模式的有效折射率; (b) MOF 中矢量本征模式之间的有效折射率差

Fig. 3 (a) Effective refractive index of vector eigenmodes in MOF; (b) effective refractive index difference among vector eigenmodes in MOF

偶数模表示同一模式的不同简并态,它们的有效折射率近似相等。在 630 nm 波长附近, HE_{11} 与 TE_{01} 的折射率差为 0.019,其他各模式的有效折射率差大于 0.02。模式间的有效折射率差随着波长的增大而增大,高阶模式与低阶模式间的有效折射率差最大可达到 0.09 以上,每组简并形成 OAM 模式的 本征矢量模式间 (HE 模式和 EH 模式)的有效折射率差大于 0.02。因此,认为 MOF 可以稳定传输 OAM 模式,MOF 中各模式间较大的有效率差能有效减小模式间的串扰,从而可以稳定传输 OAM 模式。

4 OAM 模式在 MOF 中传输

图 4 为搭建的 OAM 模式在 MOF 光纤中传输的实验系统,该系统可实现 OAM 模式的产生、OAM 模式在 MOF 中的传输和 OAM 模式的检测。光源采用波长为 632.8 nm 的氦氖激光器,由激光器产生的高斯光经过偏振片后变为线偏偏光,再用一个半波片来调整高斯光的偏振态,使入射高斯光的偏振与空间光调制器 SLM1 的偏振选择性相互匹配,之后在 SLM1 上分别产生单个线偏振的 +1 阶或 -1 阶 OAM 模式。空间光束耦合进入光纤采用的是圆偏振态的 OAM 模式^[25],再利用一个 1/4 波片将线偏振的 OAM 模式转换为圆偏振模式。由于光纤在大曲率弯折的情况下很容易出现光纤模式间串扰^[26],实验中将 MOF 自然伸直,避免光纤的过度弯曲给实验结果带来影响。MOF 的纤芯直径只有 2.06 μm ,在光纤耦合端用一个具有较大数值孔径(NA)的物镜(放大倍数为 60, $NA=0.70$)将产生的 OAM 模式聚焦后耦合至纤芯。OAM 模式经过 MOF 传输 1 m 后,在光纤出射端利用一个具有较大数值孔径的物镜(放大倍数为 100, $NA=1.49$)和一套扩束系统,将出射的光束进行准直和扩束,并用 CCD 在 L2 后观测,得到如图 4 所示的出射光强分布。透镜 L1 的焦距 $f=35$ mm,透镜 L2 的焦距 $f=175$ mm。

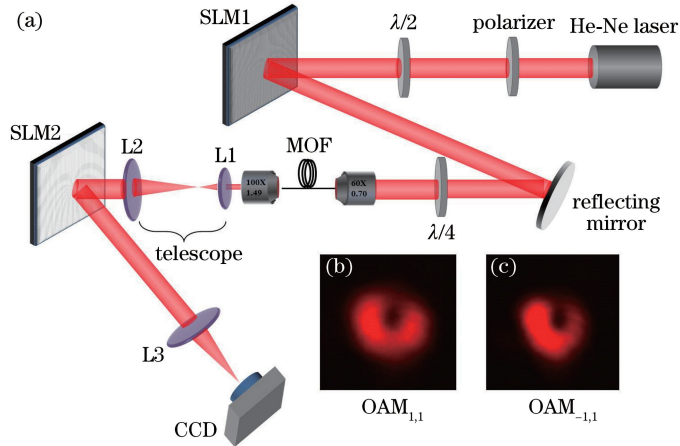


图 4 (a) 在 MOF 中传输 OAM 模式的实验系统示意图;(b) $OAM_{1,1}$ 模式和 (c) $OAM_{-1,1}$ 模式在 MOF 中传输 1 m 后的模式图样

Fig. 4 (a) Diagram of experimental system for OAM modes transmitting in MOF; mode patterns of (b) $OAM_{1,1}$ and (c) $OAM_{-1,1}$ after transmitting distance of 1 m in MOF

通过空间光调制器 SLM2 加载特殊设计的光学旋涡达曼光栅(DOVGs)^[27],对经过 MOF 传输后的模式进行解调。实验系统中产生单个 OAM 模式的 SLM1 和加载光学旋涡达曼光栅的 SLM2 的型号均为 Holoeye PLUTO-VIS,并且均为相位型反射式,像素数为 1920×1080 ,单个像素分辨率为 8 μm 。当一束带有特定拓扑荷($n_1 \times l$)的 OAM 光束入射在 DOVGs 上时,根据 DOVGs 的衍射方程可得

$$A = \sum_{n=-N/2}^{N/2} E_n \exp \left[in \left(\frac{2\pi x}{T} + l\theta \right) + in_1 l\theta \right], \quad (2)$$

式中 A 为 OAM 光束在光栅零级方向上的复振幅分布, N 为光栅总的衍射级次, T 为光栅周期(设定的光学旋涡达曼光栅周期为 13.68 μm), n 为 $-N/2$ 到 $N/2$ 的衍射级次, θ 为 OAM 在极坐标下的方位角。已知光栅可以将这束入射光衍射到 N 级, n_1 级入射旋涡光束通过光栅衍射后,对应的 $-n_1$ 级的出射光束将会表现为一个 $l=0$ 的实心亮点,即当 $l=1$ 的 OAM 模式入射在 DOVGs 的 +1 级时,通过光栅衍射后在它对应的 -1 级处会出现一个 OAM 模式还原点^[28-29]。利用 SLM2 加载一个 1×5 的光学旋涡达曼光栅,将 OAM 模

式入射在 SLM2 上,经过透镜 L3(焦距 $f = 50$ mm)的聚焦后,再通过 CCD 在 L3 后观察,得到解调后的 OAM 模式以及所对应的还原点,如图 5 所示。由此可见,这种 MOF 可以传输 ± 1 阶的 OAM 模式。

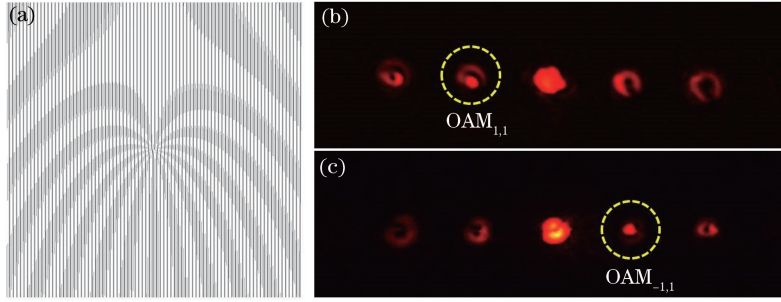


图 5 (a) 1×5 光学旋涡达曼光栅;(b) $OAM_{1,1}$ 对应的还原点;(c) $OAM_{-1,1}$ 对应的还原点

Fig. 5 (a) 1×5 optical vortex Damman grating; (b) restored point corresponding to $OAM_{1,1}$; (c) restored point corresponding to $OAM_{-1,1}$

5 结 论

提出并研究了一种 MOF 的 OAM 模式传输特性,为今后 OAM 模式在光纤中的稳定传输和复用提供了一种可行性思路。MOF 纤芯周围柚子型空气孔的存在,导致光纤中各矢量本征模式间有很大的有效折射率差,这种较大的有效折射率差可以有效抑制光纤中模式间的串扰。OAM 作为信息载体进行光纤通信,可以极大地提高通信系统的数据容量,在光束的复用、解复用和长距离的光纤传输等相关研究方面将会取得一系列突破性的进展。

致谢 感谢 Heike Ebendorff-Heidepriem 教授和 Tanya M Monro 教授提供光纤制造指导。

参 考 文 献

- [1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J, *et al.* Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [2] Padgett M, Bowman R. Tweezers with a twist[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(6): 343-348.
- [3] Fürhapter S, Jesacher A, Bernet S, *et al.* Spiral phase contrast imaging in microscopy[J]. *Optics Express*, 2005, 13(3): 689-694.
- [4] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, *et al.* Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 488-496.
- [5] Gibson G, Courtial J, Padgett M J, *et al.* Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2004, 12(22): 5448-5456.
- [6] Huang H, Xie G D, Yan Y, *et al.* 100 Tbit/s free-space data link enabled by three-dimensional multiplexing of orbital angular momentum, polarization, and wavelength[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(2): 197-200.
- [7] Ndagano B, Brüning R, McLaren M, *et al.* Fiber propagation of vector modes[J]. *Optics Express*, 2015, 23(13): 17330-17336.
- [8] Alexeyev A N, Fadeyeva T A, Volyar A V, *et al.* Optical vortices and the flow of their angular momentum in a multimode fiber[J]. *Semiconductor Physics*, 2000, 1(1): 82-89.
- [9] Gregg P, Kristensen P, Golowich S E, *et al.* Stable transmission of 12 OAM states in air-core fiber[C]. 2013 conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), IEEE, 2013: 14380845.
- [10] Ung B, Vaity P, Wang L, *et al.* Few-mode fiber with inverse-parabolic graded-index profile for transmission of OAM-carrying modes[J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 18044-18055.
- [11] 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: 3853-3853.
- [12] Ishaaya A A, Hensley C J, Shim B, *et al.* Highly-efficient coupling of linearly- and radially-polarized femtosecond pulses in hollow-core photonic band-gap fibers[J]. *Optics Express*, 2009, 17(21): 18630-18637.

- [13] Zhang Jing, Jiang Haiming, Xie Kang, *et al.* Low-loss coupling between photonic crystal fibers and standard single-mode fibers based on air holes filling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0406006.
张 静, 姜海明, 谢 康, 等. 基于空气孔填充的光子晶体光纤与普通单模光纤低损耗耦合研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0406006.
- [14] Ji H, Ruan Y L, Ebendoff-Heidepriem H, *et al.* Microstructured suspended core fiber for cylindrical vector beams propagation[C]. 2015 Conference on Lasers and Electro-Optics, 2015: 15398993.
- [15] Yue Y, Yan Y, Ahmed N, *et al.* Mode properties and propagation effects of optical orbital angular momentum (OAM) modes in a ring fiber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(2): 535-543.
- [16] Huang Guiyong, Zhou Shouli, Qin Yali, *et al.* Modal characteristics analysis of orbital angular momentum in a modified ring fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 080604.
黄桂勇, 周守利, 覃亚丽, 等. 改进环光纤结构中轨道角动量模式特性分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(8): 080604.
- [17] Ramachandran S, Kristensen P, Yan M F. Generation and propagation of radially polarized beams in optical fibers[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(16): 2525-2527.
- [18] Ramachandran S. Optical vortices in fiber[J]. *Nanophotonics*, 2013, 2(5-6): 455-474.
- [19] Boffi P, Martelli P, Gatto A, *et al.* Mode-division multiplexing in fibre-optic communications based on orbital angular momentum[J]. *Journal of Optics*, 2013, 15(7): 075403.
- [20] Snyder A W, Young W R. Modes of optical waveguides[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1978, 68(3): 297-309.
- [21] Wang L X, Vaity P, Chatigny S, *et al.* Orbital-angular-momentum polarization mode dispersion in optical fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(8): 1661-1671.
- [22] Zhou G, Zhou G Y, Chen C, *et al.* Design and analysis of a microstructure ring fiber for orbital angular momentum transmission[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(2): 1-12.
- [23] Rodney W S, Malitson I H, King T A. Refractive index of arsenic trisulfide[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1958, 48(9): 633-636.
- [24] Hu Minglie, Wang Qingyue, Li Yanfeng. Analysis of the microstructure fiber by the finite element method[J]. *Chinese J Lasers*, 2004, 31(11): 1337-1342.
胡明列, 王清月, 栗岩锋. 微结构光纤的有限元分析算法[J]. *中国激光*, 2004, 31(11): 1337-1342.
- [25] Bozinovic N, Golowich S, Kristensen P, *et al.* Control of orbital angular momentum of light with optical fibers[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2451-2453.
- [26] Schermer R T. Mode scalability in bent optical fibers[J]. *Optics Express*, 2007, 15(24): 15674-15701.
- [27] Zhang N, Yuan X C, Burge R E. Extending the detection range of optical vortices by Dammann vortex gratings[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(20): 3495-3497.
- [28] Lei T, Zhang M, Li Y R, *et al.* Massive individual orbital angular momentum channels for multiplexing enabled by Dammann gratings[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(3): e257.
- [29] Moreno I, Davis J A, Cottrell D M, *et al.* Encoding generalized phase functions on Dammann gratings[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(10): 1536-1538.