

高阶轨道角动量模场传输光纤的设计研究

柯熙政, 陈云*, 张颖

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 针对纤芯折射率分布为倒抛物线型的光纤结构,在光纤的纤芯与包层之间增加低折射率层,构成了改进的新型光纤。该光纤可容纳高阶轨道角动量(OAM)模场,通过归一化截止频率的计算得到光纤可支持 9 种模式,最高可容纳拓扑荷数为 3 的 OAM 模式。计算得到简并模式 LP_{11} 与 LP_{21} 的有效折射率差均可达到 2.1×10^{-4} ,简并模式 LP_{31} 之间有效折射率差可达到 10^{-3} ,能够有效地使矢量模式简并分离,对越高阶的模式简并分离效果越好。最后分析了此光纤结构低折射率层的分布对于光纤可容纳涡旋光束模式数目的影响。

关键词 光纤光学; 涡旋光束; 矢量模式; 有效折射率

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.020601

Design and Analysis of a Transmission Fiber with High-Order Orbital Angular Momentum Mode

Ke Xizheng, Chen Yun*, Zhang Ying

Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract For a fiber having an inverted parabolic distribution as its refractive index distribution, adding a low refractive index layer between the core and the fiber cladding can create an improved novel fiber. This novel fiber can accommodate a high-order orbital angular momentum (OAM) mode field. Calculation of the normalized cutoff frequency showed that the novel fiber can support 9 fiber modes and accommodate the OAM modes with a topological charge of 3. According to the calculations, the effective refractive index differences for the degenerate modes of LP_{11} and LP_{21} both reach 2.1×10^{-4} , and the effective refractive index difference between the degenerate modes of LP_{31} reaches 10^{-3} . The vector modes were effectively decoupled and the degenerative separation effect of the higher order modes was improved. Finally, the influence of the low refractive index layer's distribution on the optical fiber transmittable vortex light mode was analyzed.

Key words fiber optics; vortex beam; vector mode; effective refractive index

OCIS codes 060.4510; 060.2280; 080.4865; 220.2740

1 引言

涡旋光束的生成与传输的方法主要有 3 种:第 1 种是利用激光器直接输出,同时具有矢量偏振和螺旋相位的激光束^[1],但这种涡旋光束的生成成本较高;第 2 种是利用空间结构器件产生^[2];第 3 种就是在光纤中生成与传输。相比空间产生方法,光纤产生方法^[3-4]能够极大地简化光学结构,产生的涡旋光束相位纯度更高。涡旋光束在不同的正交模式下可以

承载独立的数据流^[5],因此研究涡旋光束在光纤中生成与传输高密度信息具有有广阔的应用前景^[6-8]。

人们最初认为光纤中不能传输涡旋光束,直到 2011 年,Bozinovic 等^[9-10]提出了涡旋光纤的结构并在 2013 年进行了 0.9 km 和 1.1 km 的传输实验,证明了轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 模式在光纤中传输的可能性。2011 年至 2012 年间, Yan 等^[11-13]设计了多种光纤结构,并通过仿真分析证明其可以传输高阶涡旋光束。2013 年, Li 等^[14]通过仿真

收稿日期: 2018-07-19; 修回日期: 2018-07-24; 录用日期: 2018-08-02

基金项目: 国家自然科学基金(61377080, 60977054)、陕西省重点产业链项目(2017ZDCXL-GY-06-01)

* E-mail: 839140582@qq.com

及实验表明环状光纤同样适合传输具有 OAM 的光束。2014 年 Brunet 等^[15]对环形光纤进行改进,证明了其能传输 36 种模式,最高可传输 7 阶涡旋光束;2014 年, Li 等^[16]提出一种具有 19 个环纤芯的光纤结构,仿真证明该光纤可以传输高阶模式。2015 年,黄桂勇等^[17]提出了一种改进结构,在原环光纤中引入高折射率层,进一步增大了 OAM 模式之间的有效折射率差,通过数值仿真对引入的高折射率层参数进行优化设计。2016 年, Zhang 等^[18]提出一种使用布拉格光纤光栅产生涡旋光的方法。同年,柯熙政实验室利用少模光纤产生一阶涡旋光,并进行实验研究^[19]。2017 年,张羚翔等^[20]研究了环形光子晶体光纤中涡旋光的激发和传输。

人们一般利用阶跃光纤或者环形光纤生成或传输具有 OAM 特性的光束,本文通过在纤芯与包层中间添加一层低折射率层的结构,将一种纤芯折射率为倒抛物线渐变分布的光纤结构^[21-22]改进成一种新型光纤。仿真模拟了新型光纤中可容纳高阶贝塞尔模式的 OAM 光束、光纤可容纳的传输模式,最终分析了新型的光纤结构对高阶 OAM 模式数目以及简并分离效果的影响。

2 理论基础

涡旋光束在三维空间中的波前会绕其传播方向旋转,形成螺旋状波阵面,在等相位波阵面中心处相位是不确定的,存在奇点,导致该点处的光强为零。涡旋光束的数学描述是在柱坐标系下亥姆霍兹方程的特征解。光纤是圆柱状的介质光波导,在柱坐标系下电场强度与磁场强度满足齐次亥姆霍兹方程,求解方程可得:涡旋光束本身就是光纤的一组本征解,不同阶数的涡旋光分别对应光纤中的不同模式组合,因此其相位纯度高。光纤中传输的涡旋光束是高斯贝塞尔涡旋光束,是一种无衍射的涡旋光束^[23],其强度分布在传输过程中保持不变。

OAM 模式可由光纤中不同模式叠加,不同模式间的有效折射率(n_{eff})不同,会构成本征模之间的模式走离,从而导致模式分散。选用光纤中相同矢量模式的奇模(even)与偶模(odd)叠加,相同模式间的纤芯模的传播系数 β 相同,即有效折射率 n_{eff} 相同,模式不会发生走离情况。

OAM 模式可以表示为^[24]

$$\text{OAM}_{\pm l, m}^{\pm} = \text{HE}_{l+1, m}^{\text{even}} \pm j\text{HE}_{l+1, m}^{\text{odd}}, \quad (1)$$

$$\text{OAM}_{\pm l, m}^{\mp} = \text{EH}_{l-1, m}^{\text{even}} \pm j\text{EH}_{l-1, m}^{\text{odd}}, \quad (2)$$

式中: $\text{OAM}_{\pm l, m}^{\pm}$ 的上标 \pm 表示 OAM 光束的自旋角

动量的方向,下标 \pm 表示轨道角动量的方向; l 为拓扑荷数; m 为径向指数。根据(1)式、(2)式可知,采用的光纤结构能够传输高阶涡旋光,证明设计的光纤结构可以容纳相应的模式。

3 结构设计

为了能够有效地令矢量模式简并与分离,光纤结构需要满足高折射率梯度与高模场梯度。研究表明,这可在具有高折射率差和尖锐折射率分布的光纤结构中实现。综合考虑,将纤芯为倒抛物线折射率渐变分布的光纤结构进行改进,在纤芯与包层中间添加一层低折射率层,这样增大了折射率差,光纤容纳的模式数量更多,其折射率分布可描述为^[21]

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \sqrt{1 - 2N(r^2/r_{\text{core}}^2)}, & 0 \leq r \leq r_{\text{core}} \\ n_2, & r_{\text{core}} < r \leq r_1 \\ n_3, & r > r_2 \end{cases}, \quad (3)$$

式中: n_1 和 n_2 分别为纤芯中心($r=0$)和低折射率层($r \leq r_2 = 5 \mu\text{m}$)时的折射率; $r_{\text{core}} = 3 \mu\text{m}$; n_3 为 $r > 5 \mu\text{m}$ 时的折射率; N 为倒抛物线的曲率参数; r_1 为光纤纤芯的内径; r_2 为光纤纤芯的外径。图 1 中黑色曲线为改进的倒抛物线渐变折射率分布光纤的折射率分布(红色部分为原光纤结构^[21-22])。

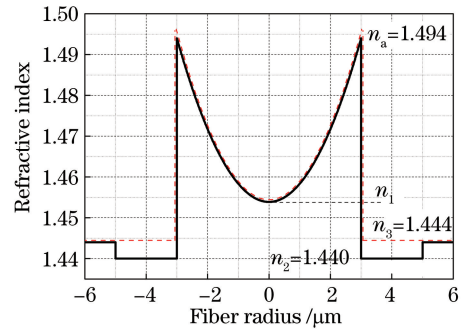


图 1 改进的光纤结构折射率分布图

Fig. 1 Refractive index profile of improved fiber structure

由图 1 可知, $n_1 = 1.4539$, $n_2 = 1.440$, $n_3 = 1.444$ 。令 $N = -4$, 相对折射率差为 $\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / (2n_1^2)$; 低折射率层与包层之间的折射率差为: $\Delta n_2 = n_2 - n_3$ 。最大折射率差出现在纤芯和低折射率层的分界处: $n_a = n_1 - (n_1 - n_2)N$, $\Delta n_{\text{max}} = n_a - n_2$ 。特殊情况: $N = 0$ 时是常规的阶跃折射率分布光纤结构。

3.1 数值计算

光纤的纤芯的折射率呈渐变型,其倒抛物线纤芯的归一化截止频率 V 也是随纤芯的折射率变化

的。归一化截止频率可表示为^[25]

$$V(r) = 2\pi r \sqrt{n(r)^2 - n_2^2} / \lambda, \quad (4)$$

式中: λ 为波长。

设定波长 $\lambda = 1550$ nm, 光纤中的模式数量随着归一化截止频率 V 值的增加逐渐增多。光纤在纤芯半径为 r_2 的范围内传输涡旋光, 由计算可知此光纤结构 $V = 5.421$, 根据归一化频率值对应的贝塞尔函数曲线的根^[26], 设计的光纤中可以容纳的模式数量为 9 种, 最高可传输 3 阶 OAM 模式。

由光纤的特征方程可直观地看出, 设计的光纤可容纳的模式满足^[25]

$$\left(\frac{1}{U^2} + \frac{1}{W^2}\right)^2 \left[\frac{J'_l(U)}{U J_l(U)} + \frac{K'_l(W)}{W K_l(W)}\right]^{-1} = \left(\frac{k_0}{\beta_{co} l}\right)^2 \left[n_1^2 \frac{J'_l(U)}{U J_l(U)} + n_2^2 \frac{K'_l(W)}{W K_l(W)}\right], \quad (5)$$

式中: 归一化的横向参数 $U = ur_1$, $u^2 = k_0^2 (n_1^2 - n_{eff}^2)$, $k_0 = 2\pi/\lambda$; 归一化的横向衰减参数 $W = wr_1$, $w^2 = k_0^2 (n_{eff}^2 - n_1^2)$; J_l 与 K_l 分别为第一类贝塞尔函数和第二类虚宗量贝塞尔函数; $J'_l(U)$ 和 $K'_l(W)$ 分别是对 U 和 W 的一阶微分; $\beta_{co} = k_0 n_{eff}$ 为纤芯模式的纵向传播系数。由(5)式可得光纤中可容纳模式的有效折射率与波长的关系, 进而可计算得到光纤中模式间的有效折射率差与波长的关系, 分别如图 2 和图 3 所示。

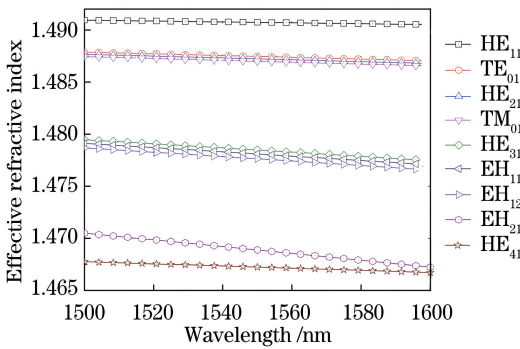


图 2 有效折射率与波长的关系图

Fig. 2 Effective refractive index versus wavelength

在 1545~1575 nm 之间随着波长的增加, 原始光纤^[21-22]结构可容纳 6 种模式, 最高可传输 2 阶 OAM 模式。从图 2 可以看出在 1500~1600 nm 波长范围内, 随着波长的增加, 改进后的光纤中可容纳模式的有效折射率减少, 可容纳 9 种模式, 最高可传输 3 阶 OAM 模式。改进的新型光纤容纳 OAM 模式的数目比原始光纤多。

从图 3 中可知, 在所示波长范围内 LP_{11} 模式组 $\{TE_{01}, HE_{21}, TM_{01}\}$ 有效折射率差均为 $2.1 \times$

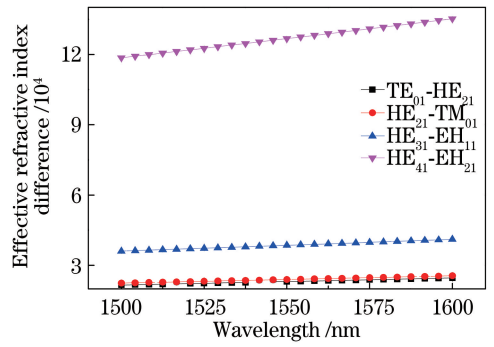


图 3 有效折射率差与波长的关系图

Fig. 3 Relationship between effective refractive index difference and wavelength

10^{-4} ; LP_{21} 模式组 $\{HE_{31}, EH_{11}\}$ 有效折射率差可大于 3.6×10^{-4} ; LP_{31} 模式组 $\{EH_{21}, HE_{41}\}$ 有效折射率差最大可大于 1.1×10^{-3} 。加了低折射率层的光纤结构的 LP_{21} 模式组比原始光纤结构^[21-22]的 LP_{21} 模式组的有效折射率差提高了至少 1×10^{-4} , 有效折射率差的提高可避免 HE 模和 EH 模耦合为 LP 模, 减少了模间耦合, 保证了每组简并模式可以独立稳定地传输。证明其结构有很好的模式分离效果。

3.2 仿真结果分析

由于 $EH_{l-1,m}$ 和 $HE_{l+1,m}$ 的模都由特征方程决定, 其强度与相位分布都一样。在 $\lambda = 1550$ nm, 归一化截止频率分别为 $V_1 = 3.3, V_2 = 5, V_3 = 5.4$ 的条件下, 光纤可容纳的模式与模式叠加可生成拓扑荷为 l 的 OAM 模式, 该模式的光强 I 、相位与 LP 简并模场的对应关系如图 4 所示。

图 4(a)、(b)、(c) 分别对应于拓扑荷数为 $l = 1, 2, 3$ 的 OAM 模式光强, 由(1)式可知 OAM 模式是模场 E 奇模与偶模的叠加, OAM 模式的光强 I 可通过 $I = E^2$ 画出; 图 4(e)、(f)、(g) 分别对应于 OAM 模式的相位分布, 相位在一个周期内跳变 l 次, 可传输 l 阶涡旋光束; 图 4(h)、(i)、(j) 分别为 $LP_{11}, LP_{21}, LP_{31}$ 的模场分布。LP 模式为同一阶数中几种模式简并到一起的模式统称, 通常称其为简并模式。仿真结果可知, 本文光纤结构可容纳生成 3 阶涡旋光束的模式, 而在实际的光纤中要激发得到涡旋光束首先得到的是 LP 模式, 需通过模式选择的方法才能得到所需的叠加模式。

4 低折射率层对 OAM 模式的影响

光纤中的导模数目并不是单纯依赖于某一个结构参数, 而是取决于光纤的归一化工作频率。在纤

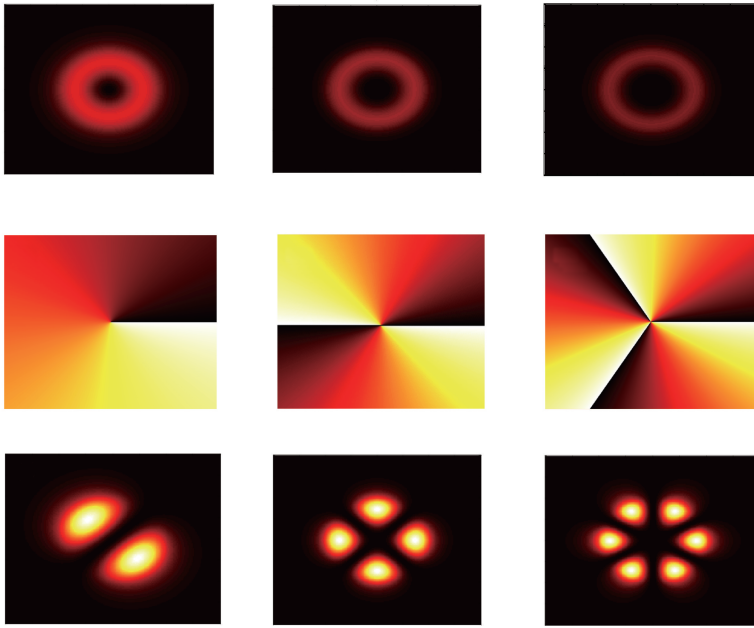


图 4 涡旋光束的光强与相位图。(a) OAM_{11} 模式光强图;(b) OAM_{21} 模式光强图;(c) OAM_{31} 模式光强图;(e) OAM_{11} 模式相位图;(f) OAM_{21} 模式相位图;(g) OAM_{31} 模式相位图;(h) LP_{11} 模场分布;(i) LP_{21} 模场分布;(j) LP_{31} 模场分布
Fig. 4 Light intensity and phase diagram of the vortex beam. (a) OAM_{11} mode intensity map; (b) OAM_{21} mode intensity map; (c) OAM_{31} mode intensity map; (e) OAM_{11} mode phase diagram; (f) OAM_{21} Mode phase diagram; (g) OAM_{31} mode phase diagram; (h) LP_{11} mode field distribution; (i) LP_{21} mode field distribution; (j) LP_{31} mode field distribution

芯折射率分布不变的情况下,纤芯为倒抛物线折射率分布型的光纤结构通过改变纤芯半径可控制光纤可容纳 OAM 模式的阶数,如图 5 所示。由图 5(a) 可以看出,当光纤的折射率 n_1 、 n_2 与 r_2 的值不变时,光纤可传输 OAM 模式的阶数随 r_1 的增大而逐渐减小。这是因为根据(3)式随着 r_1 的增大且接近

r_2 时,折射率 n_1 增大的趋势减缓,光纤倒抛物线折射率分布越缓和,内径 r_1 和外径 r_2 的折射率差趋于缓和,从而使可容纳 OAM 模式的阶数减小的趋势随 r_1 的增大趋于缓和。图 5(b)中低折射率层的环半径 $\Delta r = r_2 - r_1$,由图 5(b)和(3)式可知,增大低折射率层的半径,也可增加光纤容纳 OAM 模式的阶数。

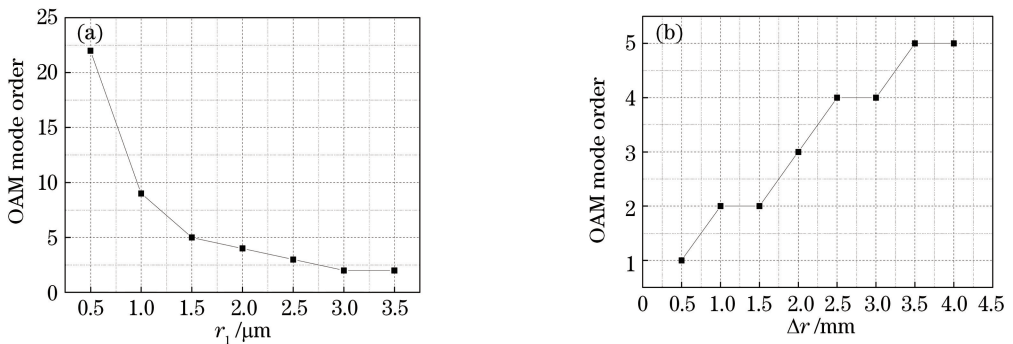


图 5 可容纳 OAM 阶数与半径的关系。(a)阶数与半径 r_1 的关系;(b)阶数与低折射率层环半径 Δr 的关系
Fig. 5 Accommodate the relationship between OAM order and radius. (a) OAM order and r_1 ; (b) OAM order and ring radius of low refractive index layer Δr

在内径 r_1 和外径 r_2 不变的情况下,改变低折射率层的折射率 n_2 得到图 6,即光纤可传输涡旋光的拓扑荷数与 n_2 的对应关系。随着 n_2 的减小,可

传输 OAM 模式的阶数增大,可通过改变光纤折射率的内外折射率差使光纤容纳更高阶的 OAM 模式。

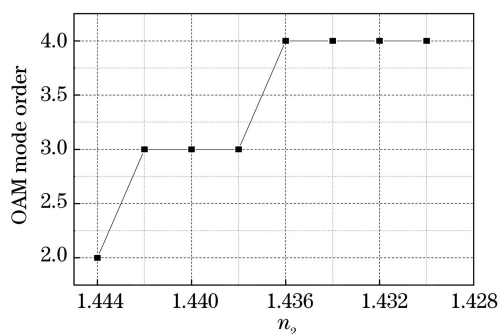


图6 可容纳 OAM 阶数与低折射率层 n_2 的关系

Fig. 6 Relationship between accommodate OAM order and refractive index n_2 of low refractive index layer

5 结 论

在原有纤芯为倒抛物线渐变折射率分布的光纤结构的基础上改进,构成一种新型结构的光纤,计算仿真得出了此光纤存在的 OAM 模式的强度分布图、相位分布图与简并的模式图,理论证明了这种改进的新型结构能够容纳更高阶 OAM 模式。相比原光纤结构,此光纤结构有 3 个优点:

1)增加 $2 \mu\text{m}$ 低折射率层,使光纤中内外折射率差增大,模式分离的有效折射率差增大,便于模式分离。其光纤结构与市面上的渐变折射率多模光纤的折射率分布相反,改进结构对于越高阶的 EH 与 HE 模式分离效果越好。

2)当改进光纤的折射率不变时, r_1 减小或者 r_2 增大,即 Δr 增大,都会导致归一化工作频率 V 增大,进而使光纤容纳的 OAM 的模式数目增多。

3)当改进光纤的纤芯的内外半径 r_1 与 r_2 的取值不变时,降低低折射率层的折射率 n_2 ,同样导致归一化工作频率 V 增大,贝塞尔函数根的数目增多,光纤能容纳 OAM 的模式数目也相应增多,可容纳更高阶模式的涡旋光。

参 考 文 献

- [1] Wu Y X, Wang Z Y, Chen S B, *et al.* Cascade conical refraction for annular pumping of a vortex Nd:YAG laser and selective excitation of low- and high-order Laguerre-Gaussian modes [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(5): 055804.
- [2] Li X Z, Meng Y, Li H H, *et al.* Generation of perfect vortex beams and space free-control technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1026018.
- 李新忠, 孟莹, 李贺贺, 等. 完美涡旋光束的产生及

其空间自由调控技术[J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1026018.

- [3] Mohammed W S, Pitchumani M, Mehta A A, *et al.* Selective excitation of the LP_{11} mode in step index fiber using a phase mask [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(7): 074602.
- [4] Li S H, Mo Q, Hu X, *et al.* Controllable all-fiber orbital angular momentum mode converter [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(18): 4376-4379.
- [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] Lü H, Ke X Z. Research on the beam with orbital angular momentum used in encoding and decoding of optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2): 331-335.
- 吕宏, 柯熙政. 具轨道角动量光束用于光通信编码及解码研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(2): 331-335.
- [7] Ke X Z, Guo X L. Realization of optical phase information encode by using orbital angular momentum of light beam [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2015, 32(1): 69-76.
- 柯熙政, 郭新龙. 用光束轨道角动量实现相位信息编码[J]. *量子电子学报*, 2015, 32(1): 69-76.
- [8] Ke X Z, Xu J N. Interference and detection of vortex beams with orbital angular momentum [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0905003.
- 柯熙政, 胥俊宇. 涡旋光束轨道角动量干涉及检测的研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0905003.
- [9] Bozinovic N, Kristensen P, Ramachandran S. Are orbital angular momentum (OAM/Vortex) states of light long-lived in fibers? [C] // *Laser Science*, October 16-20, 2011, San Jose, California United States. Washington: Optical Society of America, 2011: LWL3.
- [10] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y, *et al.* Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers[J]. *Science*, 2013, 340(6140): 1545-1548.
- [11] Yan Y, Wang J, Zhang L, *et al.* Fiber coupler for generating orbital angular momentum mode [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(21): 4269-4271.
- [12] Yan Y, Zhang L, Wang J, *et al.* Fiber structure to convert a Gaussian beam to higher-order optical orbital angular momentum modes [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(16): 3294-3296.
- [13] Yan Y, Yue Y, Huang H, *et al.* Efficient generation

- and multiplexing of optical orbital angular momentum modes in a ring fiber by using multiple coherent inputs[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(17): 3645-3647.
- [14] Li S H, Wang J. Multi-orbital-angular-momentum multi-ring fiber for high-density space-division multiplexing[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(5): 7101007.
- [15] 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.
- [16] Li S, 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.
- [17] Huang G Y, Zhou S L, Qin Y L, *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.
- [18] Zhang X, Wang A, Chen R, *et al.* Generation and conversion of higher order optical vortices in optical fiber with helical fiber Bragg gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(10): 2413-2418.
- [19] Ke X Z, Ge T. Experiment on generation of vortex light with few-mode fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1106004.
柯熙政, 葛甜. 利用少模光纤产生涡旋光的实验[J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1106004.
- [20] Zhang L X, Wei W, Zhang Z M, *et al.* Propagation properties of vortex beams in a ring photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(1): 014205.
张羚翔, 魏薇, 张志明, 等. 环形光子晶体光纤中涡旋光的传输特性研究[J]. *物理学报*, 2017, 66(1): 014205.
- [21] 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.
- [22] Wang L, Vaity P, Ung B, *et al.* Characterization of OAM fibers using fiber Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2014, 22(13): 15653-15661.
- [23] Duocastella M, Arnold C B. Bessel and annular beams for materials processing [J]. *Laser and Photonics Reviews*, 2012, 6(5): 607-621.
- [24] 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.
- [25] Sun P J. Generation of vector vortex beams in optical fibers[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2016: 18-22.
孙培敬. 光纤中矢量涡旋光束的产生[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016: 18-22.
- [26] Zhang X, Su X F, Zhang L, *et al.* Analysis of orbital angular momentum modes based on high-order Bessel functions in optical fiber of ring refractive index distribution[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(12): 1205002.
张霞, 宿晓飞, 张磊, 等. 折射率环状分布光纤中基于高阶贝塞尔函数的轨道角动量模式分析[J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1205002.