

倾斜锥形微透镜单模光纤激发高阶涡旋光模式

宋巍, 刘奂奂, 庞拂飞, 杨俊锋, 张春香, 文建湘, 商娅娜, 黄素娟, 陈娜, 曾祥龙, 王廷云*

上海大学通信与信息工程学院特种光纤与光接入网重点实验室, 特种光纤与先进通信国际合作联合实验室,
上海先进通信与数据科学研究院, 上海 200444

摘要 提出了一种在环形芯光纤中激发高阶涡旋光模式的方法, 通过控制锥形微透镜单模光纤与环形芯光纤之间的倾斜角度和错位距离, 实现了高阶涡旋光模式的激发。由数值模拟与实验测试结果可知, 倾斜角度和错位距离分别约为 8° 和 $2\ \mu\text{m}$ 时, 高质量的二阶涡旋光模式被激发。此外, 由于锥形微透镜光纤具有聚焦光束的特性, 其倾斜错位激发可以提高光的耦合效率, 该方法与使用普通单模光纤的错位激发法相比, 光的耦合效率提高 13% 左右。激发出的高阶涡旋光模式在高分辨率显微镜、光学微观操纵和光学传感等应用领域中具有巨大的应用潜力。

关键词 光纤光学; 涡旋光; 锥形微透镜单模光纤; 环形芯光纤; 轨道角动量

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0906001

Excitation of High-Order Optical Vortex Modes by Tilting Tapered and Lensed Single Mode Fiber

Song Wei, Liu Huanhuan, Pang Fufei, Yang Junfeng, Zhang Chunxiang, Wen Jianxiang,
Shang Yana, Huang Sujuan, Chen Na, Zeng Xianglong, Wang Tingyun*

Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication, Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract A method for exciting high-order optical vortex modes in an annular-core fiber is proposed. The method involves controlling the tilt angle and the offset distance between the tapered and lensed single mode fiber (SMF) and the annular-core fiber. Numerical simulation and experimental verification results show that the excitation of the high quality second-order optical vortex mode can be realized by optimizing the tilt angle and the offset distance to approximately 8° and $2\ \mu\text{m}$, respectively. This tilted offset excitation method based on a tapered and lensed SMF can improve the coupling efficiency because of the focusing effect of the tapered and lensed SMF. Compared with excitation by a standard SMF, an enhancement in the coupling efficiency of approximately 13% is found by using the tapered and lensed SMF. The excited high-order optical vortex modes show considerable potential for high-resolution microscopy, optical micromanipulation, optical sensing, etc.

Key words fiber optics; vortex beams; tapered and lensed single mode fiber; annular-core fiber; orbital angular momentum

OCIS codes 060.2310; 050.4865; 220.3630; 230.1150

1 引 言

涡旋光模式具有特殊的螺旋相位波前结构, 其在高分辨率显微镜^[1]、光学显微操纵^[2-3]、量子信息科学^[4]、光学传感^[5-6]、信息编码和解码^[7]和光通

信^[8-9]等领域中具有广阔的应用前景。涡旋光模式中的每个光子均携带 $L \cdot \hbar$ 的轨道角动量(OAM), 其中 \hbar 为普朗克常数, L 为光学拓扑荷^[10], 所以可将涡旋光模式称为 L 阶 OAM 模式, 其取值理论上具有无穷性, 且不同阶数的 OAM 模式之间相互正

收稿日期: 2019-04-15; 修回日期: 2019-05-05; 录用日期: 2019-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(61635006, 61605108, 61735009, 61675125)、上海教育发展基金会和上海市教育委员会主办的“曙光计划”(16SG35)

* E-mail: tywang@shu.edu.cn

交,因此,将 L 取值较大的高阶 OAM 模式应用于模分复用系统中,可以提高数据传输容量^[11]。同时,高阶涡旋光模式间的耦合可以忽略不计^[12],所以在存在外部扰动的情况下,高阶涡旋光模式可以稳定传输。因此,高阶涡旋光模式的激发具有十分重要的意义。

目前,激发涡旋光模式的方法有很多^[13],包括利用 q-板^[14]、螺旋相位板^[15]、柱面透镜模式转换器^[16]、空间光调制器^[17]等体光学器件的空间激发法,但激发出的空间光会受到大气湍流的影响^[18],需要将其耦合进光纤中实现长距离稳定传输,而耦合过程必然会引起光纤系统损耗,损耗达 2 dB 以上^[19-20]。因此,可直接在光纤中激发涡旋光模式,基于微弯光栅^[21]、长周期光纤光栅^[22]和光纤耦合器^[23]可实现全光纤的激发,但刻写光栅和拉制耦合器都需要复杂度较高的制作工艺,而且光栅和耦合器制作成型后结构无法改变,从而导致光栅法和耦合器法的灵活性大大降低。此外,光栅激发法还受工作波长的限制^[22]。为了解决上述问题,考虑采用全光纤错位的方法激发涡旋光模式^[24-26],这种方法只需要改变输入光的入射条件和偏振态即可激发出涡旋光模式,但目前该方法仅限于一阶涡旋光模式的激发。

本文提出一种基于锥形微透镜单模光纤(SMF)的倾斜错位激发高阶涡旋光模式的方法,其核心思想为通过控制锥形微透镜 SMF 与环形芯光纤之间的倾斜角度和错位距离^[27],实现高阶涡旋光模式的激发。环形芯光纤的环形折射率分布与涡旋光模式的强度分布相匹配,所以环形芯光纤可以很好地支持并传输涡旋光模式^[28-29],另外,锥形微透镜 SMF 由于具有聚焦光束的特性,可以提高光耦合进环形芯光纤时的耦合效率^[30-31],这在错位激发一阶涡旋光模式的研究中得到了验证^[32]。通过数值分析与实验验证,激发二阶涡旋光模式的最佳倾斜角度和错位距离分别约为 8° 和 $2 \mu\text{m}$,本文提出方法的光耦合效率比基于普通 SMF 错位激发方法提高了近 13%。因此,基于锥形微透镜 SMF 的倾斜错位激发高阶涡旋光模式的方法,在高级涡旋光相关的很多领域都具有广泛的应用前景。

2 理论与仿真分析

2.1 环形芯光纤中的 OAM 模式理论

由于 OAM 模式具有特殊的螺旋相位波前结构,所以其相应的场分布具有螺旋相位项 $\exp(iL\theta)$,其中 L 为 OAM 模式的阶数, θ 为方位角。一般将

光纤中的 OAM 模式定义为 $\text{OAM}_{L,m}$,并可将其表示为两个正交线偏振(LP)模式进行 $\pi/2$ 相移后的线性组合,其中 m 为模式的径向阶数,由此,一阶和二阶 OAM 模式表达式为

$$\begin{aligned} O_{\text{AM}\pm 1,m} &= L_{P_{1,m}^c} \pm i \times L_{P_{1,m}^s} = \\ F_{1,m}(r) \exp(\pm i\theta) &= F_{1,m}(r) [\cos\theta \pm i\sin\theta], \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} O_{\text{AM}\pm 2,m} &= L_{P_{2,m}^c} \pm i \times L_{P_{2,m}^s} = \\ F_{2,m}(r) \exp(\pm i2\theta) &= F_{2,m}(r) [\cos(2\theta) \pm i\sin(2\theta)], \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $F_{L,m}(r)$ 为相应标量模的径向场分布, $L=1, 2$; $L_{P_{L,m}^c}$ 和 $L_{P_{L,m}^s}$ ($|L|=1, 2$)表示两个相互正交的标量模式,其中 c 和 s 分别表示余弦和正弦。

图 1(a)为本文采用的支持 LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} 和 LP_{02} 模 4 种模式的环形芯光纤的结构和折射率分布示意图,其芯径(a_1)为 $2 \mu\text{m}$,高折射率环的外径(a_2)为 $6.85 \mu\text{m}$,包层的半径(a_3)为 $62.5 \mu\text{m}$,相应的折射率分别为 $n_1=1.462$ 、 $n_2=1.472$ 和 $n_3=1.458$ 。对该环形芯光纤进行仿真分析,可以得到该光纤支持的上述四种模式的归一化场强分布图,仿真结果如图 1(b)所示。根据以上分析,这些模式可以分别转换为 $|L|=0, 1, 2$ 的 OAM 模式,即可以利用该环形芯光纤激发并传输一阶和二阶 OAM 模式。

2.2 仿真分析二阶涡旋光模式的激发条件

针对错位距离和倾斜角度对光耦合效率和 OAM 模式纯度的影响进行研究。倾斜角度指两光纤在水平方向上的夹角,在图 2(a)中用 φ 表示;错位距离指锥形微透镜 SMF 尖端处的中心与环形芯光纤纤芯的中心之间的间距,在图 2(b)中用 m 表示。当只将光纤进行错位时,可以很容易地激发出纯度较高的一阶 OAM 模式,但此时激发出的 LP_{21} 模的纯度比 LP_{01} 模和 LP_{11} 模低很多,所以很难激发出高阶 OAM 模式。考虑到模式阶数越高,其传播常数越小,数值孔径(NA)越大,孔径角越大,在两光纤错位的基础上,保持两光纤之间具有一定的倾斜角度,可以激发出光纤中的高阶模式^[27]。亦可从射线光学的角度进行理解,即光的入射角越大,光纤中传输的模式阶数越高,所以通过倾斜光纤增大入射光角度,有助于激发出光纤中的高阶模式。另外,由于使用的环形芯光纤最多支持二阶模式,故本文主要对二阶涡旋光的激发进行研究,若将本文的环形芯光纤换为其他可以支持更多模式的光纤,通过控制两光纤之间的相对倾斜角度,可以实现更高阶涡旋光的激发。

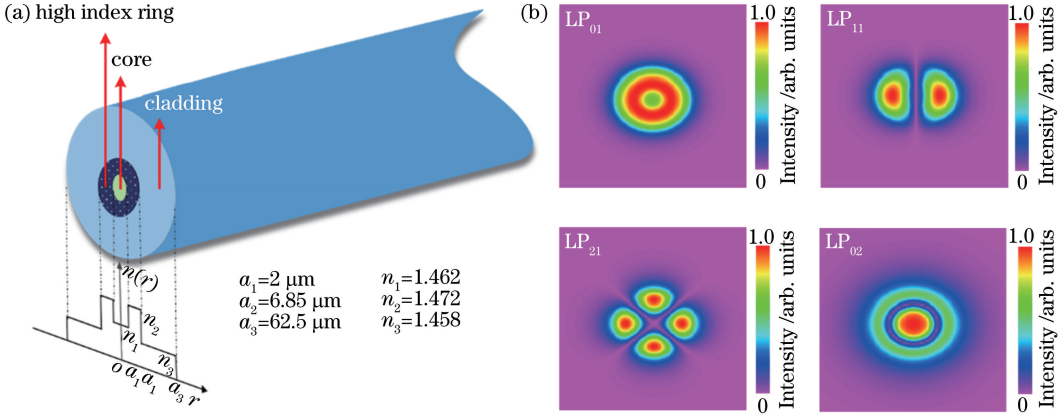


图 1 支持二阶模式的环形芯光纤。(a) 环形芯光纤的结构和折射率分布图；
(b) 环形芯光纤中 LP₀₁, LP₁₁, LP₂₁ 和 LP₀₂ 模的归一化场强分布图

Fig. 1 Annular-core fiber supporting second-order mode. (a) Structure and refractive index profile of annular-core fiber;
(b) normalized field intensity profiles of LP₀₁, LP₁₁, LP₂₁, and LP₀₂ modes in annular-core fiber

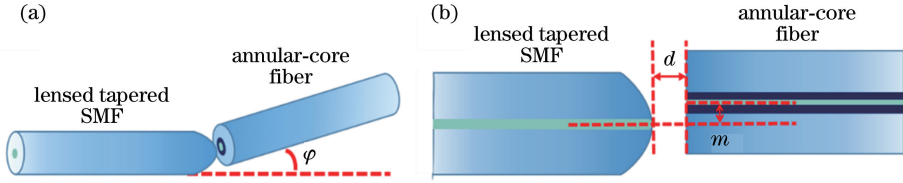


图 2 错位倾斜激发参数说明。(a) 倾斜角度 φ ; (b) 错位距离 m 及光纤之间的水平距离 d

Fig. 2 Description of offset and tilt parameters. (a) φ represents tilt angle; (b) m represents offset distance and d represents horizontal distance between fibers

使用锥形微透镜 SMF 代替普通的 SMF 将光耦合进环形芯光纤中,这是因为当普通 SMF 与环形芯光纤之间有一定的倾斜角度时,其端面的平面结构必然会引起光纤间相对水平距离的增加,即增大图 2(b)中的 d 值。图 3(a)计算出了光耦合效率随水平距离的变化曲线,随着水平距离的增加,光耦合效率降低。相比之下,锥形微透镜 SMF 具有锥

形端头,两光纤相对倾斜不会增大光纤间的水平距离。此外,锥形微透镜 SMF 的顶端微透镜具有类似物镜的如图 3(b)所示的聚焦特性,光由锥形微透镜 SMF 输出后会进行会聚,光的模场直径在一定传播距离内减小,在焦点附近达到最小值,约为 $2.35 \mu\text{m}$,相比之下,普通 SMF 的最小模场直径约为 $9 \mu\text{m}$,而本文环形芯光纤的环厚约为 $4.85 \mu\text{m}$,所以

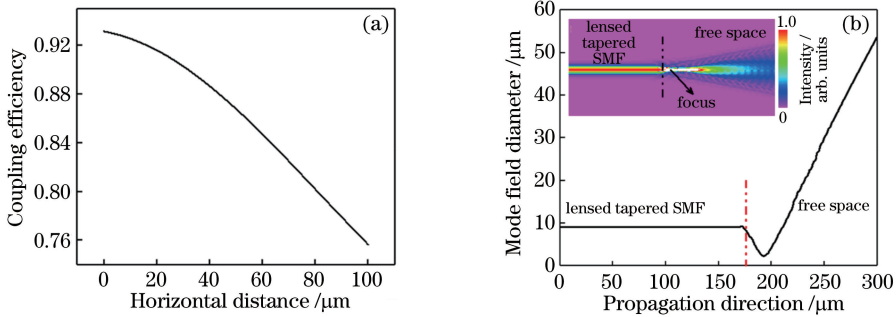


图 3 锥形微透镜 SMF 的仿真结果。(a) 耦合效率随光纤之间的水平距离的变化趋势；
(b) 光在锥形微透镜 SMF 和自由空间中传播期间的模场直径变化(插图为归一化模场强度的变化)

Fig. 3 Simulation results of tapered and lensed SMF. (a) Trend of coupling efficiency varies with horizontal distance between fibers; (b) variation of mode field diameter during propagation of beam in tapered and lensed SMF and free space (illustration shows variation of normalized mode field intensity)

当用锥形微透镜 SMF 代替普通 SMF 与环形芯光纤进行错位时,控制光纤之间的相对水平距离为某一合适值,可使耦合进环形芯光纤高折射率环中的光增加。虽然物镜也有聚焦特性,但在光纤链路中引入物镜时,需引入其他支撑和准直等器件,这不但增加了整个聚焦模块的体积,更重要的是不能实现涡旋光的全光纤激发,且空间光耦合进光纤中的损耗可达 2 dB 以上^[19-20],另外,该模块的光输入输出侧均与平面结构接近,倾斜物镜会增大光纤间的相对距离,进而降低耦合效率。后续将借助锥形微透镜 SMF 激发二阶 OAM 模式,以此提高光的耦合效率。

在错位激发一阶 OAM 模式的基础上,两光纤之间有一定的倾斜角度,可以实现高阶 OAM 模式的有效激发。图 4 为对激发二阶 OAM 模式时所需要的倾斜角度进行仿真分析的结果图,其中,不同倾斜角度下激发出的环形芯光纤中的 4 种导模纯度分布如图 4(a) 所示,需要注意两点,其一是本文中的模式纯度是在忽略了辐射模后计算得到的,其二是在不同的错位距离条件下,激发出的各模式的纯度

随倾斜角度的变化趋势相同。为方便以下讨论,在研究倾斜角度的影响时,选择错位距离为 $2\ \mu\text{m}$ 进行分析。根据图 4(a) 的仿真结果图,当倾斜角度小于 5° 时,基模和相对高阶模的纯度分别与倾斜角度成反比和成正比;当倾斜角度为 5° 和 9° 时, LP_{11} 模和 LP_{21} 模的占比随倾斜角度的增加而减小;当倾斜角度足够大时,更高阶模式在所有输出模式中占有最大比重。因此,为了激发出纯度较高的二阶 OAM 模式,应选取一个最佳倾斜角度。结合仿真分析发现,当倾斜角度为 $8^\circ\sim 9^\circ$ 时,激发出的 LP_{21} 模的纯度最大,即此时可以激发出高纯度的二阶 OAM 模式,在该范围的左侧和右侧分别有低阶模和更高阶模占有较大比重。为了得到最佳倾斜角度值,仿真分析了倾斜角度对总耦合效率的影响,总耦合效率指错位后的输出光功率与输入光功率的比值,结果如图 4(b) 所示,总耦合效率随倾斜角度的增加持续降低。综合考虑倾斜角度对 LP_{21} 模的纯度和总耦合效率的影响,选择 8° 的倾斜角度用于后续的仿真和实验。

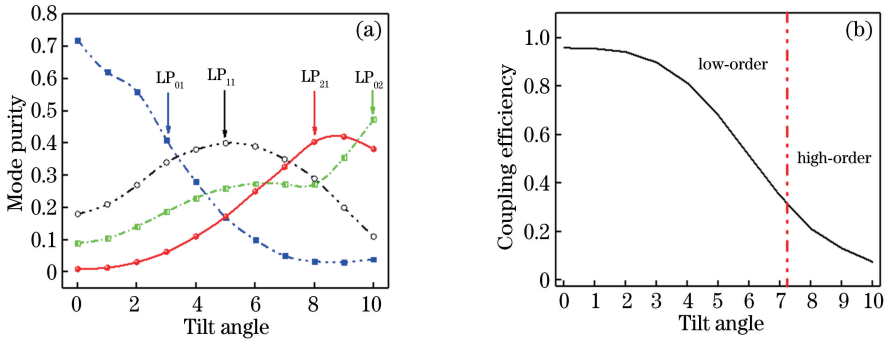


图 4 不同倾斜角度的仿真结果。(a) LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} 和 LP_{02} 模的纯度随倾斜角度的变化; (b) 总模式耦合效率随倾斜角度变化

Fig. 4 Simulation results under different tilt angles. (a) Purities of LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} , and LP_{02} modes vary with tilt angle; (b) total mode coupling efficiency varies with tilt angle

为了实现二阶 OAM 模式的高效激发,不仅要最佳倾斜角度进行分析,还需要在最佳倾斜角度 (8°) 下,研究不同错位距离对激发二阶 OAM 模式的影响,仿真结果如图 5 所示。图 5(a) 为各传输导模的纯度随错位距离变化的曲线图,可以看出,错位距离小于 $5\ \mu\text{m}$ 时,能实现较高纯度的二阶 OAM 模式的激发。光的总耦合效率随错位距离变化的曲线如图 5(b) 所示,随着错位距离的增加,总耦合效率呈先缓慢增加后急剧下降的趋势;错位距离为 $3\ \mu\text{m}$ 时,总耦合效率达到最大,但与错位距离为 $2\ \mu\text{m}$ 时相比,总耦合效率的增量很小,仅为 0.2% 左右,而且当错位距离由 $2\ \mu\text{m}$ 增加到 $3\ \mu\text{m}$ 时,错位

激发出的二阶 OAM 模式的纯度降低 4% 左右。因此,综合考虑光的总耦合效率和各阶模式纯度分布,选取最佳错位距离 $2\ \mu\text{m}$ 进行后续实验。

3 环形芯光纤中激发二阶 OAM 模式的实验

基于锥形微透镜单模光纤 (SMF) 的错位激发二阶 OAM 模式的实验装置图如图 6 所示,其中可调谐激光器的工作波长设为 $1550\ \text{nm}$,锥形微透镜 SMF 的曲率半径约为 $12.74\ \mu\text{m}$ 。图中左下角的插图表示显微镜下环形芯光纤的端面结构图,上端的插图表示错位部分的具体实现及错位前后的模式转

换图。可调谐激光器的输出光经过 1×2 耦合器 (OC) 后等分为两路高斯光, 一路输入到上述的错位部分用于激发涡旋光模式, 该部分借助两个六维 (6D) 调整架对错位距离和倾斜角度进行精确控制。错位前的偏振控制器 (PC_1) 控制 SMF 中的基模偏振态, 基模经过错位部分, 激发了环形芯光纤中的基模和高阶模。错位后的偏振控制器 (PC_2) 有两个

作用, 一是控制环形芯光纤中模式的偏振态, 二是对环形芯光纤施加压力, 使激发出的 LP 模式转换为对应阶数的 OAM 模式。最后, 利用由准直器 (Col)、透镜 (L)、起偏器 (Pol)、反射镜 (M) 和非偏振分束器 (NPBS) 组成的干涉系统, 将激发出的 OAM 模式与耦合器输出的另一路高斯光中的基模进行干涉, 借助干涉条纹对激发出的 OAM 模式进行分析。

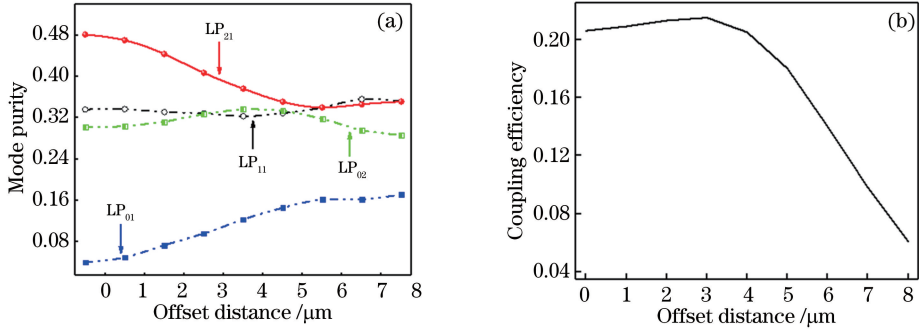


图 5 不同错位距离的仿真结果。(a) 倾斜角度为 8° 时, LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} 和 LP_{02} 模的纯度随错位距离变化的曲线; (b) 倾斜角度为 8° 时, 总的模式耦合效率随错位距离的变化曲线

Fig. 5 Simulation results under different offset distances. (a) Purities of LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} , and LP_{02} modes vary with offset distance when tilt angle is 8° ; (b) total mode coupling efficiency varies with offset distance when tilt angle is 8°

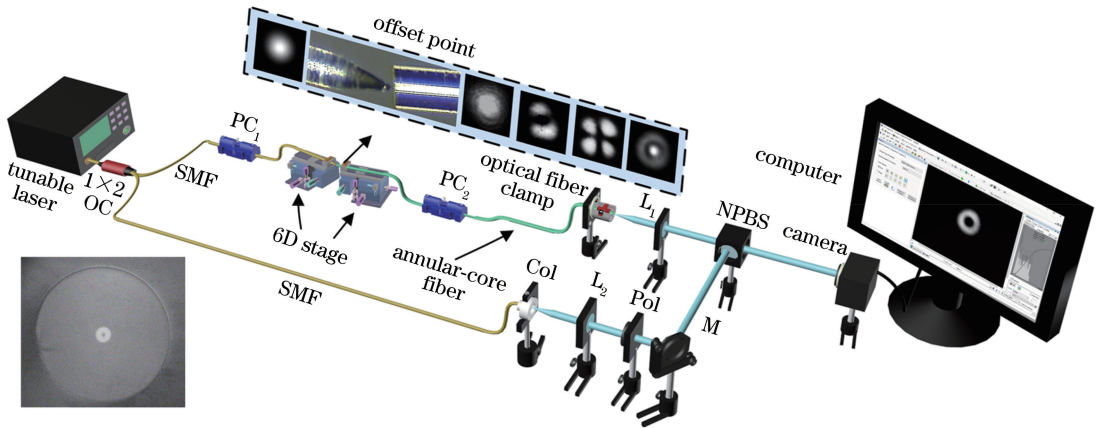


图 6 在环形芯光纤中倾斜错位激发二阶 OAM 模式的实验装置图 (左下角插图为环形芯光纤端面)

Fig. 6 Experimental setup to generate second-order OAM mode in annular-core fiber by adding tilt angle (illustration in bottom left corner is end face of annular-core fiber)

实验结果如图 7 所示。结果表明: 当两光纤之间的错位距离和倾斜角度均为零时, 激发出如图 7 (a) 中所示的基模; 当倾斜角度为 0° 或 $4^\circ \sim 6^\circ$ 时, 选择合适的错位距离可以很容易地激发出如图 7 (b) 所示的 LP_{11} 模, 此时的倾斜角为 5° , 错位距离为 $2 \mu\text{m}$; 当倾斜角度继续增加时, 激发出的 LP_{11} 模的比重将减小, 而高阶模的比重会增加, 此时在激发出的 LP_{11} 模中, 会有小部分的高阶模存在, 如图 7 (c) 所示; 当倾斜角度为 8° 且错位距离为 $2 \mu\text{m}$ 时, 会激发出如图 7 (d) 所示的高纯度的 LP_{21} 模; 倾斜角度继

续增加, 直至接近或大于 10° 时, 更高阶模式将占最大比重, 倾斜角度为 10° 时激发出的 LP_{02} 模如图 7 (e) 所示。

以上实验结果表明, 当错位距离和倾斜角度分别为 $2 \mu\text{m}$ 和 8° 时, 可以激发出纯度较高的 LP_{21} 模, 此时利用 PC_2 对环形芯光纤施加压力, 最终可以调出如图 8 (a) 所示的二阶 OAM 模式。利用光功率计测得此时错位后的输出光功率, 将该值与锥形微透镜 SMF 的输出光功率作比值, 可得到错位后总的光耦合效率。本文提出的方法和同装置下的基于

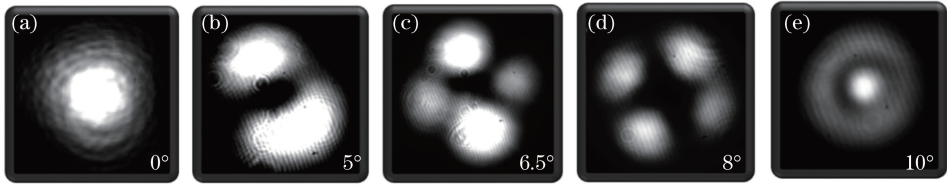


图 7 模式的强度分布图。(a) LP_{01} 模, 倾斜角度为 0° ; (b) LP_{11} 模, 倾斜角度为 5° ;

(c) 低纯度 LP_{21} 模, 倾斜角度为 6.5° ; (d) 高纯度 LP_{21} 模, 倾斜角度为 8° ; (e) LP_{02} 模式, 倾斜角度为 10°

Fig. 7 Intensity patterns of modes. (a) LP_{01} mode when tilt angle is 0° ; (b) LP_{11} mode when tilt angle is 5° ; (c) LP_{21} mode with low purity when tilt angle is 6.5° ; (d) LP_{21} mode with high purity when tilt angle is 8° ; (e) LP_{02} mode when tilt angle is 10°

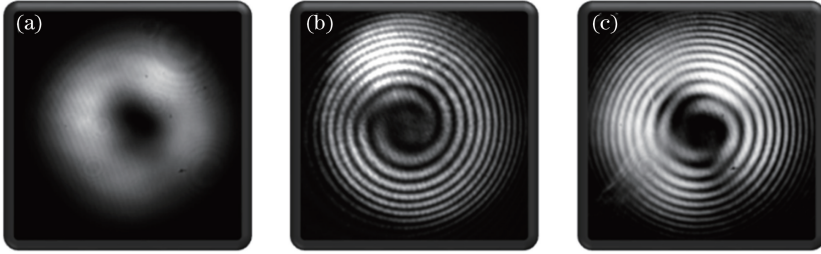


图 8 二阶 OAM 模式的强度分布图及其干涉图。(a) 当倾斜角度为 8° 且错位距离为 $2 \mu\text{m}$ 时, 激发出的二阶 OAM 模式的强度分布图; (b) $L = +2$ 时的干涉图案; (c) $L = -2$ 时的干涉图案

Fig. 8 Intensity pattern and interference patterns of second order OAM mode. (a) Intensity pattern of excited second-order OAM mode when tilt angle is 8° and offset distance is $2 \mu\text{m}$; (b) interference pattern with $L = +2$; (c) interference pattern with $L = -2$

普通 SMF 的倾斜错位激发二阶 OAM 模式的方法相比, 光耦合效率可以提高 13% 左右。将激发出的二阶 OAM 模式与基模干涉后, 可以得到如图 8(b) 和图 8(c) 所示的双螺旋干涉, 图中相反的螺旋方向代表具有相反符号的拓扑荷值, 图 8(b) 中的逆时针代表 $L = +2$, 图 8(c) 中的顺时针代表 $L = -2$ 。以上实验结果说明, 基于锥形微透镜 SMF 的全光纤倾斜错位激发 OAM 模式的方法可以有效地激发出高阶 OAM 模式。与其他空间激发法相比, 倾斜错位激发法的成本低、灵活性强, 且该方法比传统基于普通 SMF 的仅限于一阶 OAM 模式激发的错位方法更具优势。随着特种光纤制造工艺的不断完善, 以及实验条件的不断优化, 倾斜错位法将具有广泛的应用前景。此外, 参照表面倾斜的光电子集成电路的封装方法^[33], 可以在不改变倾斜角度的情况下, 完成对错位激发高阶涡旋光模式的光纤的封装, 达到高阶涡旋光模式的全光纤激发效果。

4 结 论

通过数值模拟与实验测试, 得到了基于锥形微透镜 SMF 的倾斜错位激发高质量二阶涡旋光模式的最佳倾斜角度和错位距离, 二者分别约为 8° 和 $2 \mu\text{m}$, 即 $L = \pm 2$ 的涡旋光模式。与基于普通 SMF

的错位激发法相比, 基于锥形微透镜 SMF 的错位激发法可使光耦合效率提高 13% 左右, 而且可以激发出除一阶涡旋光模式以外的高阶涡旋光模式。实验还发现, 激发涡旋光模式下, 曲率半径不同的锥形微透镜 SMF 对光耦合效率的影响不同。因此, 后续通过优化锥形微透镜 SMF 的参数, 可进一步提高光耦合效率。激发出的高阶涡旋光模式在高分辨率显微镜、微观粒子操作和光学传感等领域都具有很大的发展潜力。

参 考 文 献

- [1] Shi P, Du L P, Yuan X C. Structured spin angular momentum in highly focused cylindrical vector vortex beams for optical manipulation[J]. Optics Express, 2018, 26(18): 23449-23459.
- [2] Padgett M, Bowman R. Tweezers with a twist[J]. Nature Photonics, 2011, 5(6): 343-348.
- [3] Simpson N B, Allen L, Padgett M J. Optical tweezers and optical spanners with Laguerre-Gaussian modes[J]. Journal of Modern Optics, 1996, 43(12): 2485-2491.
- [4] Ding D S, Zhang W, Zhou Z Y, et al. Quantum storage of orbital angular momentum entanglement in an atomic ensemble[J]. Physical Review Letters.

- 2015, 114(5): 050502.
- [5] Yu S F, Pang F F, Liu H H, *et al.* Compositing orbital angular momentum beams in $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ crystal for magnetic field sensing[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(9): 091107.
- [6] Milione G, Wang T, Han J, *et al.* Remotely sensing an object's rotational orientation using the orbital angular momentum of light [Invited] [J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(3): 030012.
- [7] Bouchal Z, Celechovský R. Mixed vortex states of light as information carriers [J]. *New Journal of Physics*, 2004, 6: 131.
- [8] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y X, *et al.* Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers[J]. *Science*, 2013, 340(6140): 1545-1548.
- [9] 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.
- [10] 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]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [11] Zhu G X, Hu Z Y, Wu X, *et al.* Scalable mode division multiplexed transmission over a 10-km ring-core fiber using high-order orbital angular momentum modes[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 594-604.
- [12] Gregg P, Kristensen P, Ramachandran S. Conservation of orbital angular momentum in air-core optical fibers[J]. *Optica*, 2015, 2(3): 267-270.
- [13] Liu J F, Xing D K, Zeng X Y, *et al.* Orbital angular momentum multiplexing technology based on optical fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 050005.
刘剑飞, 邢登科, 曾祥焯, 等. 基于光纤的轨道角动量复用技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 050005.
- [14] Gregg P, Mirhosseini M, Rubano A, *et al.* Q-plates as higher order polarization controllers for orbital angular momentum modes of fiber [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1729-1732.
- [15] Schemmel P, Pisano G, Maffei B. Modular spiral phase plate design for orbital angular momentum generation at millimetre wavelengths [J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 14712-14726.
- [16] Beijersbergen M W, Allen L, van der Veen H E L O, *et al.* Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum [J]. *Optics Communications*, 1993, 96(1/2/3): 123-132.
- [17] Wang J, Liu J, Li S H, *et al.* Experimental demonstration of free-space optical communications using OFDM-QPSK/16QAM-carrying fractional orbital angular momentum (OAM) multiplexing[C] // *Optical Fiber Communication Conference*, March 22-26, 2015, Los Angeles, California, United States. Washington, DC: OSA, 2015: M2F.5.
- [18] Rodenburg B, Lavery M P J, Malik M, *et al.* Influence of atmospheric turbulence on states of light carrying orbital angular momentum [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(17): 3735-3737.
- [19] Gao J Q, Sun J F, Li J W, *et al.* Coupling method for making space light into single-mode fiber based on laser nutation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(8): 0801001.
高建秋, 孙建锋, 李佳蔚, 等. 基于激光章动的空间光到单模光纤的耦合方法[J]. *中国激光*, 2016, 43(8): 0801001.
- [20] Li L, Zhang B, Xia Y W, *et al.* Pulse temporal profile measurement technology of frequency modulation based on self-focusing lens coupling optical fiber sampling for high power laser facility [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0504002.
李磊, 张波, 夏彦文, 等. 基于自聚焦透镜耦合光纤取样的高功率激光装置调频脉冲时间波形测量技术[J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 0504002.
- [21] 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.
- [22] Zhao Y H, Liu Y Q, Zhang C Y, *et al.* All-fiber mode converter based on long-period fiber gratings written in few-mode fiber[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(22): 4708-4711.
- [23] Wen J X, He X Y, Xing J F, *et al.* All-fiber OAM amplifier with high purity and broadband spectrum gain based on fused taper vortex-beam coupler[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(6): 7105308.
- [24] Jin X Q, Pang F F, Zhang Y, *et al.* Generation of the first-order OAM modes in single-ring fibers by offset splicing technology [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(14): 1581-1584.
- [25] Xia F, Zhao Y, Hu H F, *et al.* Broadband generation of the first-order OAM modes in two-mode fiber by offset splicing and fiber rotating technology[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 112: 436-441.
- [26] Viswanathan N K, Krishna Inavalli V V G. Generation of optical vector beams using a two-mode fiber[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(8): 1189-1191.

- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Alder T, Stohr A, Heinzlmann R, *et al.* High-efficiency fiber-to-chip coupling using low-loss tapered single-mode fiber [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(8): 1016-1018.
- [31] Thual M, Rochard P, Chanclou P, *et al.* Contribution to research on micro-lensed fibers for modes coupling [J]. Fiber and Integrated Optics, 2008, 27(6): 532-541.
- [32] Song W, Yang J F, Liu H H, *et al.* Generation of OAM modes by using tapered lensed single mode fiber[C]//2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), October 26-29, 2018, Hangzhou, China. New York: IEEE, 2018: 18355846.
- [33] Boudreau R A, Lacourse J S. Multi-fiber alignment package for tilted facet optoelectronic components: US5062138 [P/OL]. 1991-06-25 [2019-02-15]. <https://patents.google.com/patent/US5026138A/en>.