

## 激光与光电子学进展

## 基于拉锥多模光纤长周期光栅的模式转换器

吴萌, 马跃辉, 陈思宇, 苏杭, 凡晓龙, 牟成博, 刘云启\*

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, 上海 200444

**摘要** 长周期光纤光栅作为模式转换器可以实现不同传输模式之间的相互转换, 具有兼容性强、结构紧凑和低损耗等优点。通过二氧化碳激光器在不同锥腰直径的拉锥多模光纤上制备长周期光纤光栅, 实现了全光纤模式转换, 成功激发了-1阶轨道角动量模式。此外, 通过实验研究了制备长周期光纤光栅的模式耦合、偏振相关损耗和温度特性。结果表明, 当多模光纤的锥腰直径减小至 30  $\mu\text{m}$  或更细时, 拉锥多模光纤长周期光栅的模场分布发生变化, 从原有的模式混叠状态转变为清晰的模式分离。这一发现表明, 通过优化拉锥多模光纤的锥腰直径和光栅周期参数, 可以设计出实现多种高阶模式转换的功能器件。该类器件在模分复用光通信系统中有潜在的应用前景。

**关键词** 长周期光纤光栅; 多模光纤; 模式转换器; 轨道角动量

**中图分类号** TN253

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/LOP251066

## 1 引言

长周期光纤光栅(LPFG)作为一种沿光纤轴向进行周期性折射率调制的全光纤器件, 具有制备灵活、结构紧凑和经济高效等优点。该器件能实现全光纤架构下的模式转换功能, 且能对轨道角动量(OAM)光束进行有效调控<sup>[1-5]</sup>。模式转换器作为模分复用技术的关键器件, 为突破传统单模光纤(SMF)通信容量极限提供了解决方案。在模分复用系统中, 利用少模光纤或多模光纤中的不同模式作为独立信道来传输不同信息, 在扩展通信系统的传输容量方面具有巨大潜力。

在基于模分复用的通信系统中, 模式转换器是将基模转换为高阶纤芯模的关键设备<sup>[6-8]</sup>。Zhao等<sup>[2]</sup>通过二氧化碳激光器在两模光纤中写入LPFG, 制造了均匀型和倾斜型2种LPFG, 以提供LP<sub>01</sub>模式和LP<sub>11</sub>纤芯模式之间的光耦合, 耦合效率超过99%。通过改变倾斜两模光纤LPFG的倾斜角度, 可以调整LPFG模式转换器的写入效率和带宽。Feng等<sup>[9]</sup>提出一种基于级联啁啾两模光纤LPFG的超宽带模式转换器, 该模式转换器可以将基模转换为1阶柱矢量模, 实现10 dB带宽为170 nm, 20 dB带宽为145 nm。Chang等<sup>[10]</sup>提出一种预扭转制备LPFG的方法, 先对光纤进行预扭转再用二氧化碳激光器刻写LPFG, 实现了具有99.55%的耦合效率和0.81 dB的低插入损耗的3阶OAM转换。Liu等<sup>[11]</sup>提出基于级联LPFG的LP<sub>01</sub>-LP<sub>11</sub>超宽带模式转换器, 其

最大带宽接近400 nm, 实现的10 dB带宽为395.8 nm, 通过调整扭转率, 光栅的10 dB带宽表现出可调性, 当扭转率为36 rad/m时, 其进一步提高了13.7 nm。

多模光纤是一种具有较大纤芯直径的光波导结构, 能够支持数百个空间模式同时传输。与SMF相比, 多模光纤由于多个模式间的传播常数与群速度差异, 适用于短距离、高速数据传输场景。除光通信领域外, 近年基于多模光纤的研究多集中于传感领域。Monzón-Hernández等<sup>[12]</sup>在SMF中周期性地插入直径为150  $\mu\text{m}$ 的多模光纤, 芯径的周期性变化会产生一个单强谐振峰, 研究发现, 谐振峰的波长会随温度和环境折射率的变化而变化。Ding等<sup>[13]</sup>提出一种高灵敏度温度传感器, 该结构由内部刻有光纤布拉格光栅的多模光纤两端拼接SMF制成, 在-40~40  $^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内, 该传感器获得的温度平均灵敏度为266.25 pm/ $^{\circ}\text{C}$ 。Zhang等<sup>[14]</sup>通过周期性拼接多模光纤和SMF, 设计了一种微型弯曲传感器。多模光纤可以在很短的长度内提供强烈的折射率调制, 因此仅需5个周期就能形成显著的谐振峰, 实验表明, 该传感器在0~2.44  $\text{m}^{-1}$ 的曲率范围内实现了31.47 nm/ $\text{m}^{-1}$ 的弯曲灵敏度<sup>[14]</sup>。Wang等<sup>[15]</sup>通过周期性地多模光纤嵌入到SMF中, 制造周期性嵌入多模光纤诱导的LPFG, 并通过腐蚀减小光纤包层直径, 大幅提高了折射率灵敏度。实验结果表明, 该传感器在1.333~1.437的折射率范围内实现的最大折射率灵敏度为1322.26 nm/RIU, 温度响

收稿日期: 2025-04-22; 修回日期: 2025-05-22; 录用日期: 2025-06-10; 网络首发日期: 2025-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(62075124)

通信作者: \*yqliu@shu.edu.cn

应测量值为  $13 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。Zhao 等<sup>[16]</sup>提出一种基于形状调制多模光纤的灵敏度增强应变传感器。与传统的仅包含一段均匀多模光纤的常规单模-多模-单模(SMS)光纤结构不同,该应变传感器将多个多模光纤段进行横向偏移拼接,实验结果表明,由形状调制多模光纤形成的 SMS 光纤结构实现的应变灵敏度高达  $-55.63 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ,是多模光纤形成的常规 SMS 光纤结构灵敏度的 33 倍。

综上所述,目前对多模光纤的研究大多集中在基于传统 SMS 结构及其与光纤光栅结合的复合型结构传感器,以及基于 SMS 结构的调制器、功率分配器、光开关、方向耦合器、带通滤波器和光纤透镜<sup>[17-22]</sup>等,这类装置可以实现折射率、温度、应变、磁场和曲率等多种参量的精确测量,但缺少对多模光纤 LPFG 模式转换的探索。因此,本文提出基于熔融拉锥和二氧化碳激光制备技术的拉锥多模光纤 LPFG,以实现多模光纤 LPFG 模式的分离,并研究不同锥腰直径下拉锥多模光纤 LPFG 的温度特性和偏振相关损耗(PDL)特性。

## 2 基本原理

LPFG 在光纤纤芯沿轴向产生周期性折射率变化,使光纤中满足相位匹配条件的模式在特定的波长处发生耦合,从而实现光纤中的模式调控。相位匹配条件<sup>[23]</sup>为

$$\lambda = \left( n_{\text{eff,co}}^{(01)} - n_{\text{eff,cl}}^{(nm)} \right) \frac{\Lambda}{N} \quad (1)$$

式中: $\lambda$ 为 LPFG 的谐振波长; $n_{\text{eff,co}}^{(01)}$ 为纤芯基模的有效折射率; $n_{\text{eff,cl}}^{(nm)}$ 为高阶纤芯模或包层模的有效折射率; $\Lambda$ 为光栅的周期; $N$ 为模式的衍射级次。通过式(1)可以推导出 LPFG 的温度灵敏度<sup>[24]</sup>为

$$\frac{d\lambda}{dT} = \lambda \gamma (\alpha + \Gamma_{\text{temp}}) \quad (2)$$

$$\Gamma_{\text{temp}} = \frac{\xi_{01} n_{\text{eff,co}}^{(01)} - \xi_{\text{cl}} n_{\text{eff,cl}}^{(nm)}}{n_{\text{eff,co}}^{(01)} - n_{\text{eff,cl}}^{(nm)}} \quad (3)$$

式中: $\gamma = \frac{d\lambda/d\Lambda}{n_{\text{eff,co}}^{(01)} - n_{\text{eff,cl}}^{(nm)}}$ 为波导色散因子,与相位匹配曲线的斜率相关; $\alpha$ 为光纤材料的热膨胀系数; $\Gamma_{\text{temp}}$ 为温度灵敏度因子; $\xi_{01}$ 、 $\xi_{\text{cl}}$ 分别为纤芯基模、高阶纤芯模或包层模的热光系数。

在光通信和光纤传感系统中,PDL 是一项关键的性能参数。PDL 会导致光信号在传输过程中出现随机信噪比波动,从而影响系统的稳定性和测量精度,其定义为不同偏振光通过光纤器件后的最大输出功率  $P_{\text{max}}$  与最小输出功率  $P_{\text{min}}$  的比值,用于表征光器件对不同偏振态光的功率响应差异:

$$L_{\text{PDL}} = 10 \lg \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{min}}} \quad (4)$$

实验所用光纤为渐变折射率多模光纤(长飞光纤光缆股份有限公司,OM2),该光纤的包层直径为  $125 \mu\text{m}$ ,纤芯直径为  $50 \mu\text{m}$ ,纤芯与包层之间存在低折

射率沟槽,光纤的包层折射率比沟槽折射率高  $0.006$ 。根据测得的光纤参数,用 COMSOL 仿真软件分析多模光纤在  $1200 \sim 2400 \text{ nm}$  波长范围内的模式有效折射率,并根据式(1)计算得到不同锥腰直径下多模光纤 LPFG 的相位匹配曲线。

图 1(a)~(c)分别为在  $1200 \sim 2400 \text{ nm}$  波段范围内锥腰直径为  $50, 30, 25 \mu\text{m}$  的拉锥多模光纤 LPFG 的相位匹配曲线。由图 1 可知,当锥腰直径为  $50 \mu\text{m}$  时,多模光纤支持的模式数较多,在同一周期下,纤芯基模在同一波长处能同时耦合到多个模式,但多个模式叠加在一起会出现模式混叠现象。随着周期的减小,模式混叠现象变得明显。当锥腰直径分别为  $30 \mu\text{m}$  和  $25 \mu\text{m}$  时,多模光纤支持的模式数减少,相位匹配曲线相较于大直径多模光纤的相位匹配曲线有所区分。因此,随着锥腰直径的减小,多模光纤支持的模式数逐渐减少,并且模式的相位匹配曲线逐渐分开。这是因为拉锥改变了光纤的波导结构,而波导色散的改变影响了多模光纤的模式有效折射率,所以锥腰直径为  $50 \mu\text{m}$  的模式相位匹配曲线和锥腰直径为  $30 \mu\text{m}$  和  $25 \mu\text{m}$  的模式相位匹配曲线表现出不同的倾斜趋势。

使用 RSoft 软件中的 BeamPROP 模块对拉锥多模光纤 LPFG 的模式演变进行仿真分析。首先,建立如图 2(a)所示的 LPFG 三维模型,其中,紫色部分为光纤纤芯,灰色部分为光纤包层。随后,设置 LPFG 的基本参数,光纤的纤芯和包层直径分别为  $50 \mu\text{m}$  和  $125 \mu\text{m}$ ,光纤包层和沟槽的折射率分别为  $1.444$  和  $1.438$ ,光栅的周期数均为  $20$ ,环境折射率为  $1.000$ 。图 2(b)~(d)分别是锥腰直径为  $30 \mu\text{m}$  且周期为  $200 \mu\text{m}$ 、锥腰直径为  $25 \mu\text{m}$  且周期为  $150 \mu\text{m}$ 、锥腰直径为  $25 \mu\text{m}$  且周期为  $225 \mu\text{m}$  的拉锥多模光纤 LPFG 的模式演变过程,入射端的光为  $\text{LP}_{01}$  模式,经过锥腰区的光栅时,光栅将纤芯基模耦合至其他高阶纤芯模。由图 2 可知,锥腰直径为  $30 \mu\text{m}$ 、周期为  $200 \mu\text{m}$  与锥腰直径为  $25 \mu\text{m}$ 、周期为  $150 \mu\text{m}$  的拉锥多模光纤 LPFG 实现了  $\text{LP}_{01}$  模- $\text{LP}_{12}$  纤芯模的耦合,而锥腰直径为  $25 \mu\text{m}$ 、周期为  $225 \mu\text{m}$  的 LPFG 实现了  $\text{LP}_{01}$  模- $\text{LP}_{02}$  纤芯模的耦合。

## 3 实验与讨论

使用三电极合路器制造系统(CMS, 3SAE TECHNOLOGIES)对多模光纤进行熔融拉锥,将多模光纤分别拉锥至锥腰直径为  $50, 30, 25 \mu\text{m}$ ,锥腰长度为  $4 \text{ cm}$ ,两边过渡区长度为  $1 \text{ cm}$ 。通过显微镜观察到拉锥后的多模光纤锥腰直径误差不超过  $1.5 \mu\text{m}$ 。图 3 是不同锥腰直径的多模光纤拉锥前后的透射光谱,由图 3 可知,拉锥前的光谱损耗范围为  $2 \text{ dB} \sim 3 \text{ dB}$ ,这是为了消除模间干涉引起的弯曲损耗。拉锥没有引起明显的损耗增加,拉锥后的损耗光谱平坦,不会影响后续的光栅制备过程。

由于多模光纤的纤芯直径较大,与 SMF 模场不匹

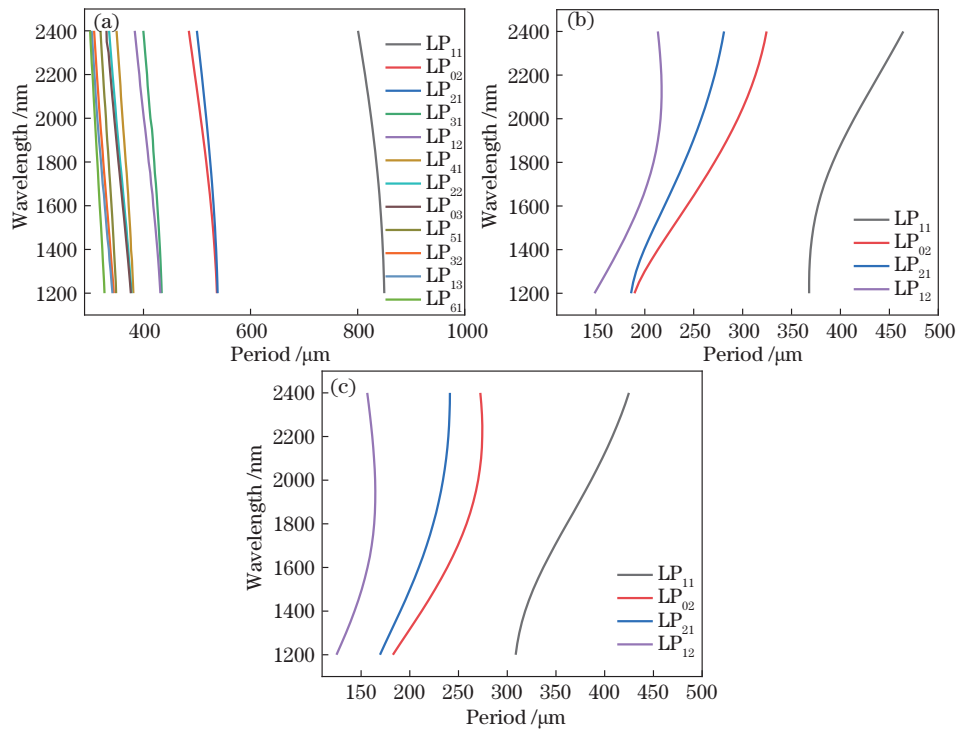


图 1 不同锥腰直径的拉锥多模光纤 LPFG 的仿真相位匹配曲线。(a) 50  $\mu\text{m}$ ; (b) 30  $\mu\text{m}$ ; (c) 25  $\mu\text{m}$

Fig. 1 Phase matching curves of the LPFGs inscribed in the tapered multimode fibers with different waist diameters. (a) 50  $\mu\text{m}$ ; (b) 30  $\mu\text{m}$ ; (c) 25  $\mu\text{m}$

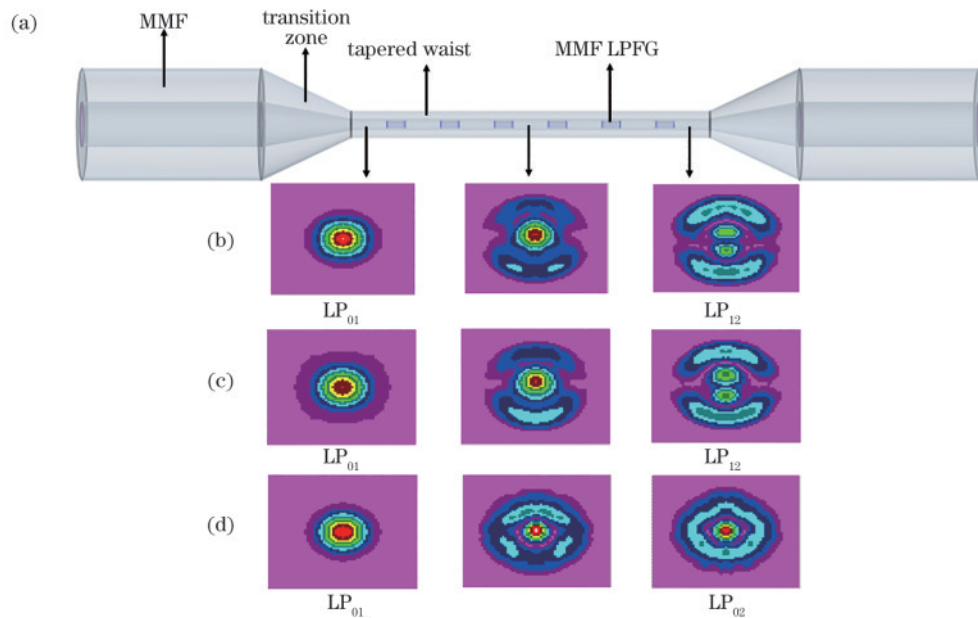


图 2 不同锥腰直径的拉锥多模光纤 LPFG 的模式演变示意图。(a)拉锥多模光纤 LPFG 模型;(b)锥腰直径为 30  $\mu\text{m}$  且周期为 200  $\mu\text{m}$ 、(c)锥腰直径为 25  $\mu\text{m}$  且周期为 150  $\mu\text{m}$ 、(d)锥腰直径为 25  $\mu\text{m}$  且周期为 225  $\mu\text{m}$  的仿真模场分布

Fig. 2 Schematic diagrams of mode evolution for the LPFGs inscribed in the tapered multimode fibers with different waist diameters.

(a) Model of the tapered multimode fiber LPFG; simulated mode field distributions of (b) waist diameter of 30  $\mu\text{m}$  and period of 200  $\mu\text{m}$ , (c) waist diameter of 25  $\mu\text{m}$  and period of 150  $\mu\text{m}$ , and (d) waist diameter of 25  $\mu\text{m}$  and period of 225  $\mu\text{m}$

配,实验中将长度为 5 cm 的多模光纤样品两端与 SMF 连接时会产生模式干涉。将入射端的多模光纤缠绕在直径为 1.4 cm 的圆柱体上,可对产生的模间干涉进行消除,起到类似滤模器的作用,使进入光栅的光变为高纯度的 LP<sub>01</sub> 模式。

首先通过二氧化碳激光器(大族激光科技产业集

团股份有限公司,CO<sub>2</sub>-H10)在锥腰直径为 50  $\mu\text{m}$  的拉锥多模光纤上分别制备周期为 320  $\mu\text{m}$  和 340  $\mu\text{m}$  的 LPFG,实验发现,两者的光谱都具有一个带宽很大的谐振峰,其对应的透射光谱如图 4(a) 所示,并且插入损耗达到约 7 dB。结果表明,锥腰直径为 50  $\mu\text{m}$  时,在同一周期下,LPFG 纤芯基模在不同的波长处同时耦

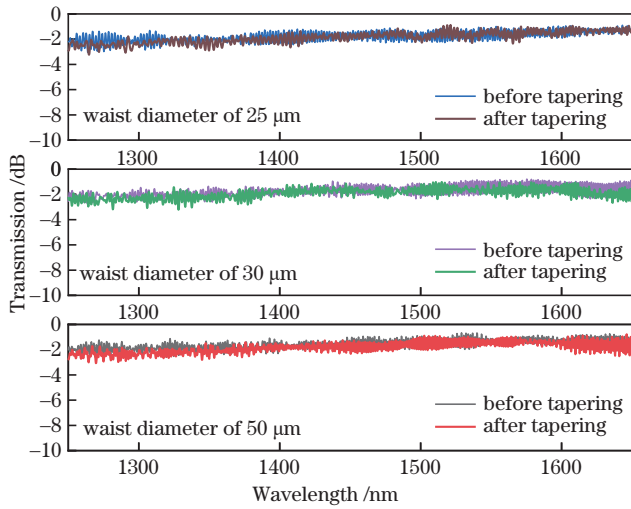


图 3 多模光纤拉锥前后的透射光谱

Fig. 3 Transmission spectra of multimode fiber before and after tapering

合到多个不同模式,引起谐振峰带宽的增加,以及光栅插入损耗的增大。

随后在锥腰直径为 30  $\mu\text{m}$  的拉锥多模光纤上分别制备周期为 2028、2008、1993、1990、1980  $\mu\text{m}$  的 LPFG, 其对应的透射光谱如图 4(b) 所示。上述周期对应的拉锥多模光纤 LPFG 光谱均呈现单峰状态, 对应的谐振波长分别为 1840.6、1790.4、1767.2、1757.2、1633.4 nm。

接着在锥腰直径为 25  $\mu\text{m}$  的拉锥多模光纤上分别制备周期范围为 1820~2000  $\mu\text{m}$  的多个 LPFG, 其对应的透射光谱如图 4(c) 所示。上述周期对应的拉锥多模光纤 LPFG 光谱随着周期的减小, 谐振波长均发生蓝移, 由双峰状态变成单峰状态。周期为 2000、1990、1980、1960、1940、1920  $\mu\text{m}$  的 LPFG 光谱双峰状态对应的谐振波长分别为 1599.4 nm 和 2020.6 nm、1519.4 nm 和 1967.0 nm、1515.0 nm 和 1964.4 nm、1477.6 nm 和 1944.6 nm、1474.1 nm 和 1907.8 nm。周期为 1910、1890、1860、1830、1820  $\mu\text{m}$  的 LPFG 光谱单峰对应的波长分别为 1823.8、1815.6、1790.0、1736.0、1669.4、1556.8 nm。锥腰直径为 30  $\mu\text{m}$  和 25  $\mu\text{m}$  的拉锥多模光纤 LPFG 相较于锥腰直径为 50  $\mu\text{m}$  的拉锥多模光纤 LPFG 的谐振峰带宽均变窄, 在不同波段均具

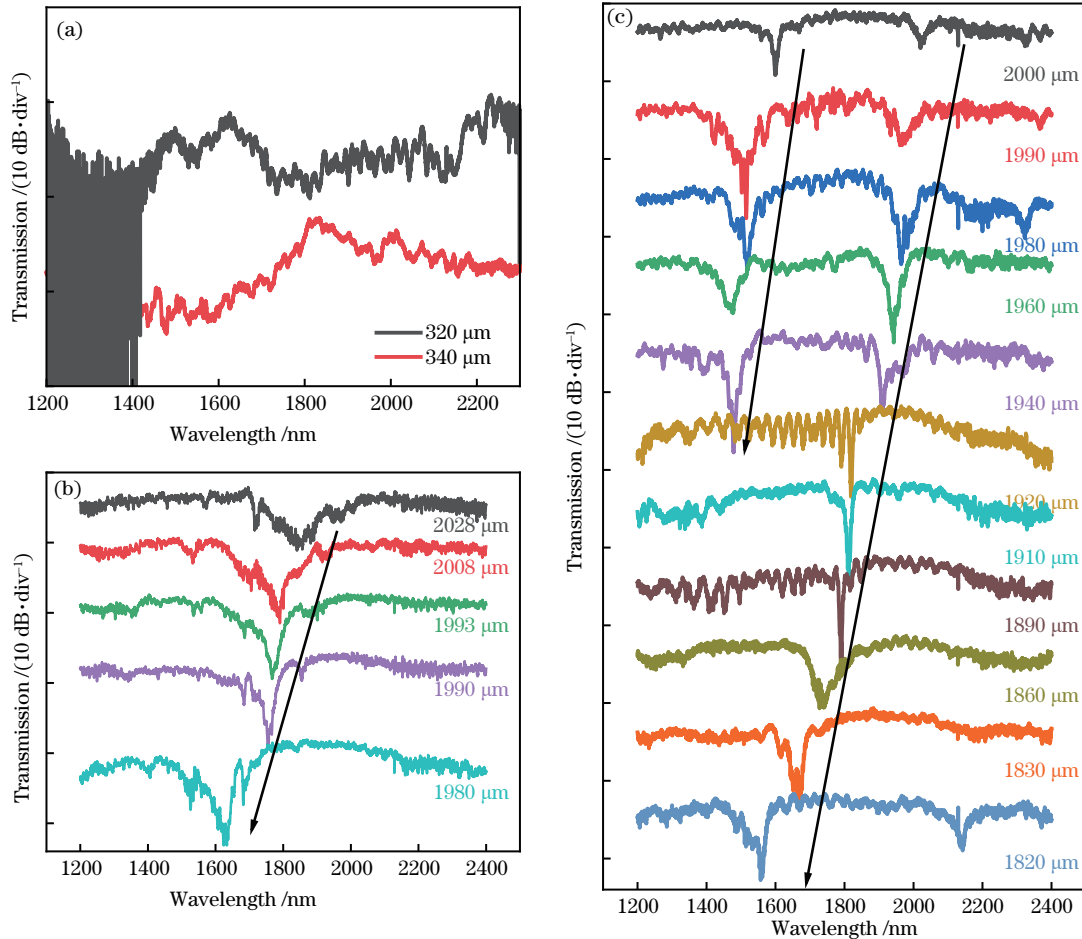


图 4 不同锥腰直径的拉锥多模光纤 LPFG 透射光谱。(a) 锥腰直径为 50  $\mu\text{m}$  时不同周期的透射光谱; (b) 锥腰直径为 30  $\mu\text{m}$  时不同周期的透射光谱; LP<sub>01</sub>-LP<sub>12</sub> 模; (c) 锥腰直径为 25  $\mu\text{m}$  时不同周期的透射光谱; LP<sub>01</sub>-LP<sub>12</sub> 模和 LP<sub>01</sub>-LP<sub>02</sub> 模

Fig. 4 Transmission spectra of the LPFGs inscribed in the tapered multimode fibers with different waist diameters. (a) Transmission spectra under different periods with waist diameter of 50  $\mu\text{m}$ ; (b) transmission spectra under different periods with waist diameter of 30  $\mu\text{m}$  with LP<sub>01</sub>-LP<sub>12</sub> mode; (c) transmission spectra under different periods with waist diameter of 25  $\mu\text{m}$  with LP<sub>01</sub>-LP<sub>12</sub> mode and LP<sub>01</sub>-LP<sub>02</sub> mode

有较低的插入损耗,实现了不同单个纤芯模式的转换,并且平均模式转换效率高于 90%。由图 4 可知,在同一锥腰直径下,随着光栅周期的减小,拉锥多模光纤 LPFG 的谐振波长均发生蓝移,符合图 1(b)和(c)仿真相位匹配曲线的规律。

为验证锥腰直径为 30  $\mu\text{m}$  和 25  $\mu\text{m}$  的 LPFG 实现的是纤芯基模与高阶纤芯模的耦合,将光栅区域浸没在甘油中。结果表明,锥腰直径为 30  $\mu\text{m}$ 、周期为 1993  $\mu\text{m}$  和锥腰直径为 25  $\mu\text{m}$ 、周期为 1949  $\mu\text{m}$  的拉锥多模光纤 LPFG 对应的谐振峰没有消失,并且谐振峰对应的波长位置没有明显移动,符合纤芯模的规律。

图 5(a)是实验与仿真所得的锥腰直径为 30  $\mu\text{m}$  时,LPFG 的  $\text{LP}_{12}$  纤芯模的谐振波长与光栅周期的关

系曲线,图 5(b)是实验与仿真所得的锥腰直径为 25  $\mu\text{m}$  时,LPFG 的  $\text{LP}_{12}$  纤芯模和  $\text{LP}_{02}$  纤芯模的谐振波长与光栅周期的关系曲线。其中,实线为仿真所得的相位匹配曲线,离散点表示实验制备的拉锥多模 LPFG 对应的谐振波长与光栅周期。由图 5 可知,锥腰直径为 30  $\mu\text{m}$  时,制备的 LPFG 的  $\text{LP}_{12}$  纤芯模与仿真所得的 10 阶高阶衍射相对应,锥腰直径为 25  $\mu\text{m}$  时,制备的 LPFG 的  $\text{LP}_{12}$  纤芯模和  $\text{LP}_{02}$  纤芯模分别与仿真所得的 13 阶和 7 阶高阶衍射相对应。实验数据与仿真分析结果呈现出比较一致的分布趋势。仿真和实验结果之间存在的细微偏差主要归因于以下 2 个因素:一个是光纤拉锥工艺中锥腰直径的微小波动;另一个是二氧化碳激光单侧曝光导致的非对称折射率调制。

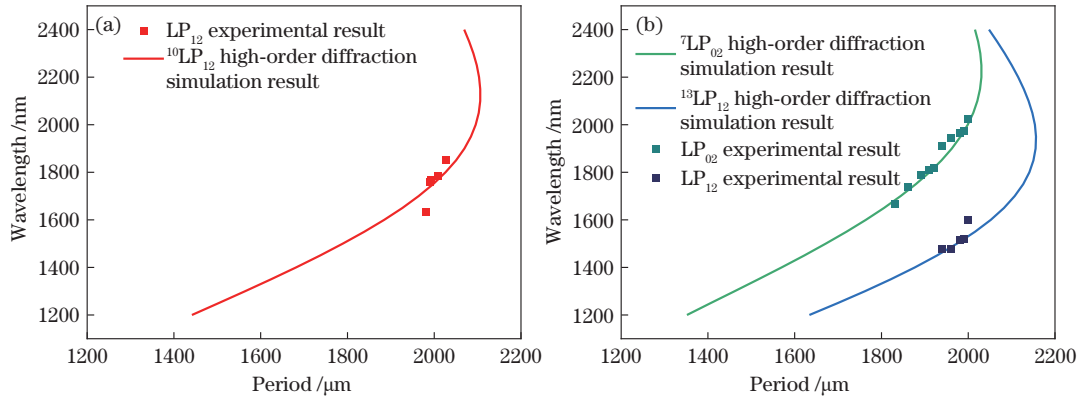


图 5 不同锥腰直径下实验与仿真所得的拉锥多模光纤 LPFG 谐振波长与光栅周期关系。(a) 30  $\mu\text{m}$ :  $\text{LP}_{01}$ - $\text{LP}_{12}$  纤芯模; (b) 25  $\mu\text{m}$ :  $\text{LP}_{01}$ - $\text{LP}_{02}$  纤芯模和  $\text{LP}_{01}$ - $\text{LP}_{12}$  纤芯模

Fig. 5 Relationship between resonance wavelength and grating period of the LPFGs inscribed in the tapered multimode fiber with different waist diameters by simulate and experiment. (a) 30  $\mu\text{m}$  with  $\text{LP}_{01}$ - $\text{LP}_{12}$  core mode; (b) 25  $\mu\text{m}$  with  $\text{LP}_{01}$ - $\text{LP}_{12}$  core mode and  $\text{LP}_{01}$ - $\text{LP}_{02}$  core mode

分别选取锥腰直径为 50  $\mu\text{m}$  且周期为 320  $\mu\text{m}$ 、锥腰直径为 30  $\mu\text{m}$  且周期为 1980  $\mu\text{m}$ 、锥腰直径为 25  $\mu\text{m}$  且周期为 1940  $\mu\text{m}$ 、锥腰直径为 25  $\mu\text{m}$  且周期为 1820  $\mu\text{m}$  的拉锥多模光纤 LPFG,使用可调谐激光器(Agilent, 81600)和红外相机 CCD(InGaAs, Model C10633-23, Hamamtsu Photonics)对其模场分布进行观测。图 6(a)~(d)分别为上述拉锥多模光纤 LPFG 的透射光谱和对应光纤分别在 1550.0、1624.0、1478.6、1556.8 nm 波长处测量的模场分布。由图 6 可知,当锥腰直径为 50  $\mu\text{m}$  时,拉锥多模光纤 LPFG 模场分布呈现混叠状态,表明 LPFG 将纤芯基模耦合至多个不同阶次的高阶纤芯模,由于各高阶纤芯模对应不同的波长范围,光栅光谱表现为宽带的高纤损耗。当锥腰直径为 30  $\mu\text{m}$  和 25  $\mu\text{m}$  时,拉锥多模光纤 LPFG 的纤芯模式不再呈现混叠状态的散斑模场,而是变成单个模式的耦合,图 6(b)~(d)对应的模式均为纤芯模式,分别为  $\text{LP}_{12}$  纤芯模、 $\text{LP}_{12}$  纤芯模和  $\text{LP}_{02}$  纤芯模。实验证明了在拉锥多模光纤上制备的 LPFG 可以实现纤芯基模与高阶纤芯模式的耦合,当锥腰直径为 50  $\mu\text{m}$

及以上时,LPFG 将  $\text{LP}_{01}$  模同时耦合至多阶纤芯模,当锥腰直径为 30  $\mu\text{m}$  及以下时,多模光纤 LPFG 的模式不再呈现混叠状态,此时的拉锥多模光纤可视为少模光纤。因此,通过调整拉锥多模光纤的锥腰直径和光栅周期,可以制备更多不同类型的高阶纤芯模式转换器。

图 7 为实验观测的拉锥多模光纤 LPFG 输出模式分布与干涉图样,用于激发 OAM 模式的样品为图 6 中锥腰直径为 30  $\mu\text{m}$  和 25  $\mu\text{m}$  的拉锥多模光纤 LPFG 的  $\text{LP}_{12}$  纤芯模。通过调节偏振控制器在标量模式之间产生  $\pi/2$  相位差,可以由  $\text{LP}_{12}$  激发 1 阶 OAM 模式,将 OAM 光束与高斯光束进行干涉,可以生成如图 7 所示的 -1 阶 OAM 模式干涉图。

通过光矢量分析仪(OVA 5000, Luna)测量实验制备的拉锥多模光纤 LPFG 的 PDL 特性,结果如图 8 所示。测量的样品分别为锥腰直径为 30  $\mu\text{m}$  的基于  $\text{LP}_{01}$ - $\text{LP}_{12}$  纤芯模耦合的 LPFG、锥腰直径为 25  $\mu\text{m}$  的基于  $\text{LP}_{01}$ - $\text{LP}_{12}$  纤芯模耦合的 LPFG 和锥腰直径为 25  $\mu\text{m}$  的基于  $\text{LP}_{01}$ - $\text{LP}_{02}$  纤芯模耦合的 LPFG。上述 LPFG 的

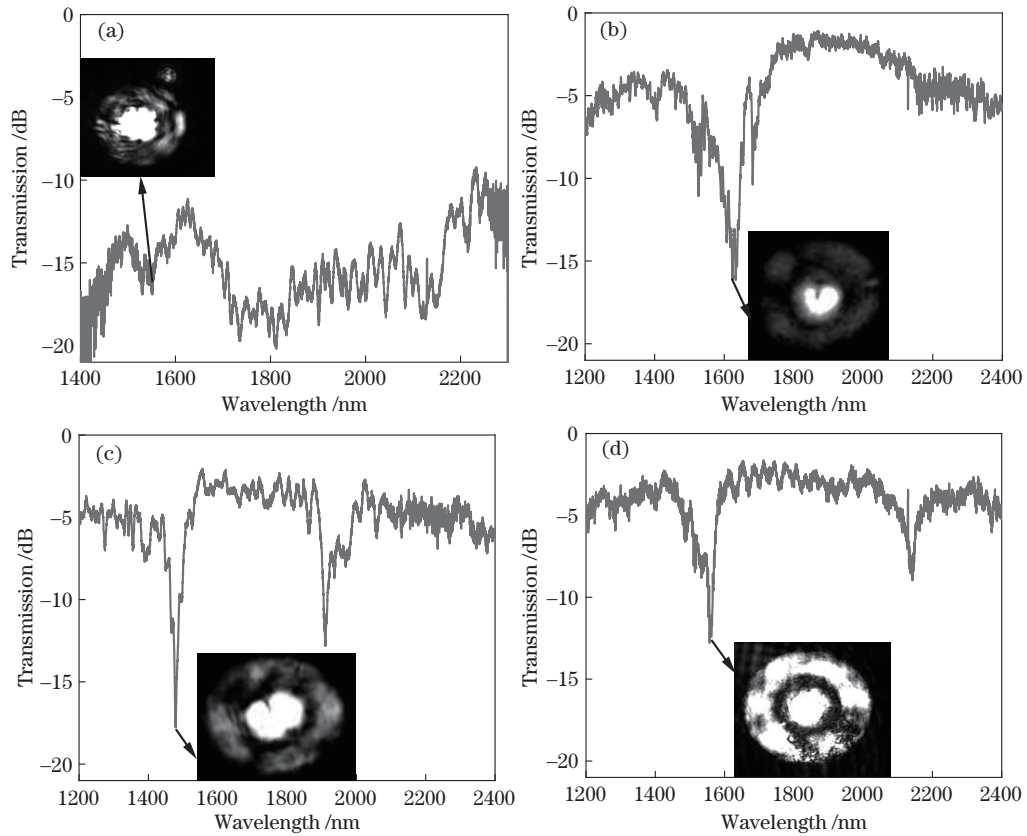


图 6 不同锥腰直径和周期的拉锥多模光纤 LPPG 的透射光谱和模场分布。(a) 锥腰直径为  $50\ \mu\text{m}$ 、周期为  $320\ \mu\text{m}$  的 LPPG 的透射光谱和其在  $1550.0\ \text{nm}$  波长处测量的模场分布；(b) 锥腰直径为  $30\ \mu\text{m}$ 、周期为  $1980\ \mu\text{m}$  的 LPPG 的透射光谱和其在  $1624.0\ \text{nm}$  波长处测量的模场分布；(c) 锥腰直径为  $25\ \mu\text{m}$ 、周期为  $1940\ \mu\text{m}$  的 LPPG 的透射光谱和其在  $1478.6\ \text{nm}$  波长处测量的模场分布；(d) 锥腰直径为  $25\ \mu\text{m}$ 、周期为  $1820\ \mu\text{m}$  的 LPPG 的透射光谱和其在  $1556.8\ \text{nm}$  波长处测量的模场分布

Fig. 6 Transmission spectra and mode field distributions of the LPPGs inscribed in the tapered multimode fiber with different waist diameters and periods. (a) Transmission spectrum of the LPPG with a waist diameter of  $50\ \mu\text{m}$  and a period of  $320\ \mu\text{m}$ , and the mode field distribution at the wavelength of  $1550.0\ \text{nm}$ ; (b) transmission spectrum of the LPPG with a waist diameter of  $30\ \mu\text{m}$  and a period of  $1980\ \mu\text{m}$ , and the mode field distribution at the wavelength of  $1624.0\ \text{nm}$ ; (c) transmission spectrum of the LPPG with a waist diameter of  $25\ \mu\text{m}$  and a period of  $1940\ \mu\text{m}$ , and the mode field distribution at the wavelength of  $1478.6\ \text{nm}$ ; (d) transmission spectrum of the LPPG with a waist diameter of  $25\ \mu\text{m}$  and a period of  $1820\ \mu\text{m}$ , and the mode field distribution at the wavelength of  $1556.8\ \text{nm}$

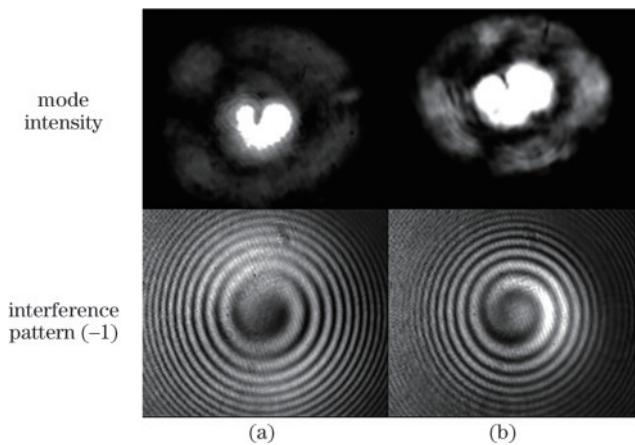


图 7 不同锥腰直径拉锥多模光纤 LPPG 模场分布和  $-1$  阶 OAM 模式分布。(a)  $30\ \mu\text{m}$ ; (b)  $25\ \mu\text{m}$

Fig. 7 Output mode distributions and  $-1$  order OAM patterns of LPPGs inscribed in tapered multimode fibers with different waist diameters. (a)  $30\ \mu\text{m}$ ; (b)  $25\ \mu\text{m}$

最大 PDL 分别为  $22.00\ \text{dB}$ 、 $11.76\ \text{dB}$  和  $16.14\ \text{dB}$ ，这说明制备的拉锥多模光纤 LPPG 具有较高的偏振依赖性。产生该现象的原因是拉锥引起的光纤波导结构的变化和二氧化碳激光的非对称折射率调制。

表 1 总结了基于二氧化碳激光器制备的不同类型的 LPPG 的 PDL 特性<sup>[25-27]</sup>，文献[25]、[26]、[27]中的 PDL 分别为  $19.85\ \text{dB}$ 、 $10.50\ \text{dB}$ 、 $26.54\ \text{dB}$ ，与本实验制备的拉锥多模光纤 LPPG 的 PDL 接近。这些 LPPG 均采用二氧化碳激光制备方式，光栅具有非对称折射率调制特性，会引起 PDL 的增大，并且 PDL 受激光功率和激光扫描次数的影响。实验制备锥腰直径为  $30\ \mu\text{m}$  的拉锥多模光纤 LPPG 时，所用功率比制备锥腰直径为  $25\ \mu\text{m}$  的拉锥多模光纤 LPPG 时大，并且制备  $25\ \mu\text{m}\ \text{LP}_{02}$  纤芯模时的激光扫描次数比制备  $25\ \mu\text{m}\ \text{LP}_{12}$  纤芯模时多，所以  $25\ \mu\text{m}\ \text{LP}_{02}$  纤芯模比  $25\ \mu\text{m}\ \text{LP}_{12}$  纤芯模的 PDL 高。

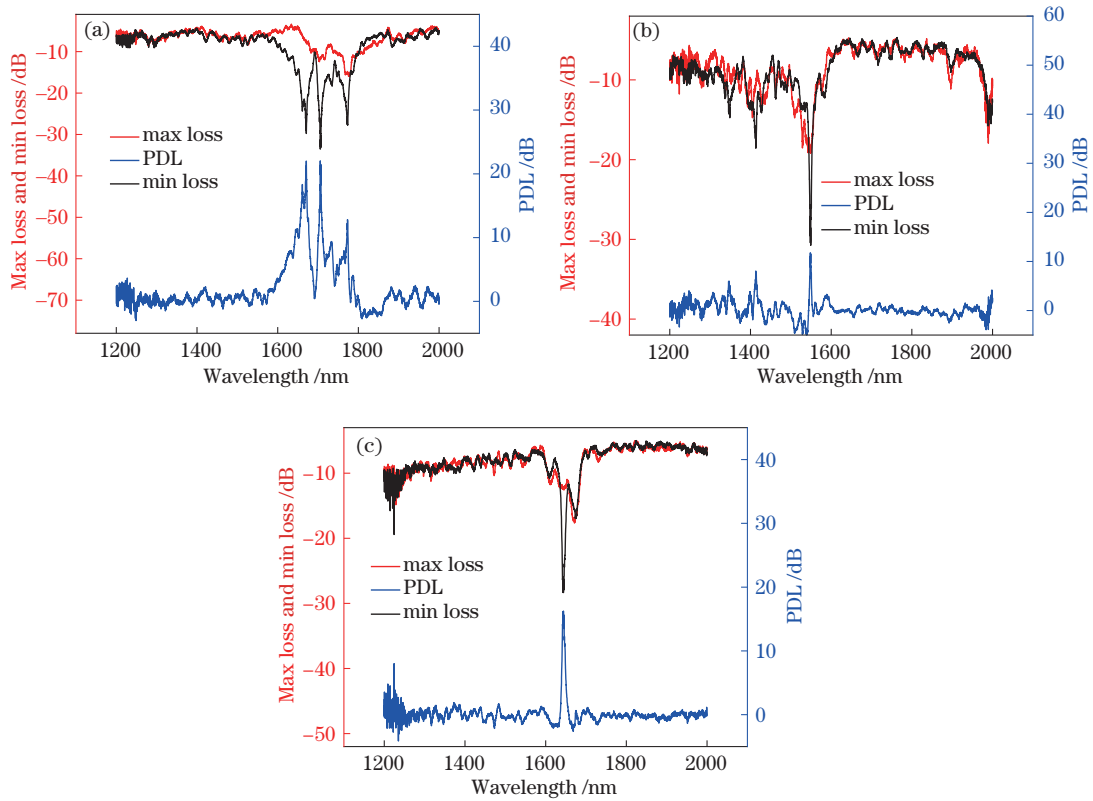


图 8 不同锥腰直径的拉锥多模光纤 LPFG 的 PDL 特性。(a) 30 μm: LP<sub>01</sub>-LP<sub>12</sub> 纤芯模; (b) 25 μm: LP<sub>01</sub>-LP<sub>12</sub> 纤芯模; (c) 25 μm: LP<sub>01</sub>-LP<sub>02</sub> 纤芯模

Fig. 8 PDL characteristics of the LPFGs inscribed in the tapered multimode fiber with different waist diameters. (a) 30 μm with LP<sub>01</sub>-LP<sub>12</sub> core mode; (b) 25 μm with LP<sub>01</sub>-LP<sub>12</sub> core mode; (c) 25 μm with LP<sub>01</sub>-LP<sub>02</sub> core mode

表 1 不同类型 LPFG 的 PDL 特性对比

Table 1 Comparison of the PDL characteristics for different types of LPFGs

Grating type	Fabrication method	Maximum PDL /dB	Ref.
Tapered LPFG	CO <sub>2</sub> laser modulation	19.85	[25]
Few-mode fiber LPFG	CO <sub>2</sub> laser modulation	10.50	[26]
SMF LPFG	CO <sub>2</sub> laser modulation	26.54	[27]

实验研究了锥腰直径为 25~30 μm 的拉锥多模光纤 LPFG 的温度特性,如图 9 所示,其中, S 为光栅的温度灵敏度,温度测量范围为 25~100 °C。LPFG 的谐振波长随

着温度的升高向长波方向偏移, 30 μm LP<sub>12</sub> 纤芯模、25 μm LP<sub>12</sub> 纤芯模、25 μm LP<sub>02</sub> 纤芯模 LPFG 的波长偏移量分别为 5.3、10.4、11.5 nm, 对应光栅的温度灵敏度分别为 0.073、0.128、0.144 nm/°C。由图 9 可知,在同一模式下,随着直径的减小,光栅的温度灵敏度略有提升,在同一直径下, LP<sub>02</sub> 纤芯模式的温度灵敏度略高于 LP<sub>12</sub> 纤芯模式的温度灵敏度。图 9 表明,各 LPFG 的温度灵敏度均不高,具有较小的温度串扰,略高于常规少模光纤 LPFG<sup>[26,28]</sup>,但符合 SMF LPFG 温度灵敏度的数量级<sup>[29-30]</sup>。

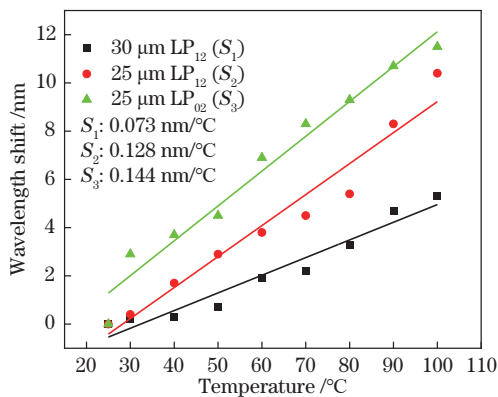


图 9 不同锥腰直径的拉锥多模光纤 LPFG 的温度特性

Fig. 9 Temperature characteristics of the LPFGs inscribed in the tapered multimode fiber with different waist diameters

## 4 结 论

通过二氧化碳激光器在锥腰直径为 50、30、25 μm 的多模光纤上制备了 LPFG。当多模光纤的锥腰直径减小至 30 μm 或更细时,拉锥多模光纤长周期光栅的模场分布发生变化,从原有的模式混叠状态转变为清晰的模式分离,不再呈现散斑状,此时的拉锥多模光纤可以看作 SMF,并且成功实现了一阶 OAM 模式的激

发。因此可以通过调节拉锥多模光纤的锥腰直径和光栅周期,来制备更多不同类型的更高阶纤芯模式转换器,从而可以结合模分复用技术,有效扩展通信系统的信道容量,满足未来高速、大容量光通信网络的需求。

## 参 考 文 献

- [1] 刘云启, 姜晨, 刘祖耀, 等. 长周期光纤光栅[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(9): 0900001.  
Liu Y Q, Jiang C, Liu Z Y, et al. Long-period fiber gratings[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(9): 0900001.
- [2] Zhao Y H, Liu Y Q, Zhang L, et al. Mode converter based on the long-period fiber gratings written in the two-mode fiber[J]. Optics Express, 2016, 24(6): 6186-6195.
- [3] Han Y, Liu Y G, Wang Z, et al. Controllable all-fiber generation/conversion of circularly polarized orbital angular momentum beams using long period fiber gratings [J]. Nanophotonics, 2018, 7(1): 287-293.
- [4] He X D, Tu J J, Wu X W, et al. All-fiber third-order orbital angular momentum mode generation employing an asymmetric long-period fiber grating[J]. Optics Letters, 2020, 45(13): 3621-3624.
- [5] Zhao X Y, Zhao Y H, Liu Y Q, et al. High-order mode conversion in a few-mode fiber via laser-inscribed long-period gratings at 1.55  $\mu\text{m}$  and 2  $\mu\text{m}$  wavebands[J]. Applied Optics, 2020, 59(34): 10688-10694.
- [6] 昌文喆, 刘艳格, 冯茂, 等. 少模长周期光纤光栅模式转换器及其应用研究[J]. 中国激光, 2024, 51(18): 1801008.  
Chang W Z, Liu Y G, Feng M, et al. Few-mode long-period fiber grating mode converter and its applications [J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(18): 1801008.
- [7] 张伟栋, 马跃辉, 姜晨, 等. 基于螺旋长周期光纤光栅的宽带模式转换器[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(15): 1506003.  
Zhang W D, Ma Y H, Jiang C, et al. Broadband mode converter based on helical long-period fiber gratings[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(15): 1506003.
- [8] 张豪, 邓佳瑶, 王梦柯, 等. 基于级联非对称 Y 分支的紧凑宽带高效的 LP<sub>01</sub>-LP<sub>11a</sub> 模式转换器[J]. 中国激光, 2024, 51(6): 0606003.  
Zhang H, Deng J Y, Wang M K, et al. Compact, broadband, and efficient LP<sub>01</sub>-LP<sub>11a</sub> mode converter based on cascaded asymmetric Y-junction[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(6): 0606003.
- [9] Feng M, Liu Y G, Wang Z, et al. Ultra-broadband mode converter using cascading chirped long-period fiber grating[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(6): 7105610.
- [10] Chang W Z, Feng M, Wang P, et al. High-efficiency broadband third-order OAM mode converter based on a multi-period preset-twist long-period fiber grating[J]. Optics Express, 2022, 30(26): 47048-47058.
- [11] Liu Z Y, Zhao X Y, Mou C B, et al. Near 400 nm broadband mode converter based on cascaded long period fiber gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(23): 8449-8455.
- [12] Monzón-Hernández D, Martínez-Ríos A, Salceda-Delgado G, et al. Compact sensors based on cascaded single-mode-multimode-single-mode fiber structures[J]. Applied Physics Express, 2013, 6(3): 032502.
- [13] Ding M, Yang B Y, Jiang P, et al. High-sensitivity thermometer based on single mode-multimode FBG-single mode fiber[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 96: 313-317.
- [14] Zhang S, Deng S F, Wang Z M, et al. A miniature SMS-LPG bending sensor with high sensitivity based on multimode fiber embedded-LPG[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 295: 31-36.
- [15] Wang J B, Wang A Z, Hao J Y, et al. Mode dependence of refractive index sensitivity of long-period fiber gratings induced by periodically embedded multimode fiber[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(10): 10452-10459.
- [16] Zhao Z Y, Li X R, Yan S H, et al. Sensitivity-enhanced strain sensor based on a shape-modulated multimode fiber [J]. Optics Letters, 2024, 49(5): 1329-1332.
- [17] Donagic D, Culshaw B. Microbend sensor structure for use in distributed and quasi-distributed sensor systems based on selective launching and filtering of the modes in graded index multimode fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(10): 1856-1868.
- [18] Kumar A, Varshney R K, Antony C S, et al. Transmission characteristics of SMS fiber optic sensor structures[J]. Optics Communications, 2003, 219(1/2/3/4/5/6): 215-219.
- [19] Kumar A, Varshney R K, Kumar R. SMS fiber optic microbend sensor structures: effect of the modal interference[J]. Optics Communications, 2004, 232(1/2/3/4/5/6): 239-244.
- [20] Kumar A, Goel N K, Varshney R K. Studies on a few-mode fiber-optic strain sensor based on LP<sub>01</sub>-LP<sub>02</sub> mode interference[J]. Journal of Lightwave Technology, 2001, 19(3): 358-362.
- [21] Mackie D M, Lee A W. Slotted multimode-interference devices[J]. Applied Optics, 2004, 43(36): 6609-6619.
- [22] Mohammed W S, Mehta A, Johnson E G. Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference[J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(2): 469-477.
- [23] Erdogan T. Fiber grating spectra[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1277-1294.
- [24] Shu X W, Zhang L, Bennion I. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(2): 255-266.
- [25] Chen L, Ma Y H, Jiang C, et al. High-sensitive refractive index sensor based on the long-period gratings inscribed in the tapered fiber at dispersion turning point [J]. Optics Communications, 2024, 569: 130798.
- [26] Li M X, Huang Z N, Liu Z Y, et al. Tunable broadband mode converter based on long-period fiber gratings at 2- $\mu\text{m}$  waveband[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(15): 5134-5141.
- [27] Wang Y P, Jin W, Wang D N. Strain characteristics of CO<sub>2</sub>-laser-carved long period fiber gratings[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2007, 43(2): 101-108.
- [28] 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.

- [29] Zhao X Y, Liu Y Q, Liu Z Y, et al. All-fiber bandwidth tunable ultra-broadband mode converters based on long-period fiber gratings and helical long-period gratings[J]. Optics Express, 2020, 28(8): 11990-12000.
- [30] Wei P, Ma Y H, Zhu Y, et al. Broadband wavelength-tunable mode converter based on long-period fiber gratings[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2024, 36(10): 649-652.

## Mode Converter Based on the Long-Period Gratings Inscribed in the Tapered Multimode Fiber

Wu Meng, Ma Yuehui, Chen Siyu, Su Hang, Fan Xiaolong, Mou Chengbo, Liu Yunqi\*

*Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China*

### Abstract

**Objective** Long-period fiber gratings (LPFGs) serve as mode converters for interconversion among different transmission modes, offering strong compatibility, compact structure, and low insertion loss. In this paper, the LPFGs are fabricated in tapered multimode fibers (MMFs) with different waist diameters using a CO<sub>2</sub> laser. The all-fiber mode conversion and  $-1$  order orbital angular momentum (OAM) mode can be successfully excited. The experimental investigations are conducted on the mode coupling characteristics, polarization-dependent loss, and temperature responses of the tapered MMF LPFGs. Results show that the mode field distribution of the LPFG changes from the original mode aliasing to distinct mode separation when the waist diameter of the tapered MMF is reduced to be less than 30  $\mu\text{m}$ . These findings indicate that the functional devices with high-order mode conversions can be designed by optimizing the waist diameter and grating parameters of the tapered MMFs. Such devices have potential applications in the mode-division multiplexing optical communication system.

**Methods** In this study, we change the diameters of the MMFs by fiber tapering. The MMFs are tapered to be with a waist diameter of 50  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$  and 25  $\mu\text{m}$  using a three-electrode combined manufacturing system. The LPFGs are fabricated by CO<sub>2</sub> laser in the tapered MMFs with different waist diameters. We use COMSOL multiphysics simulation software to calculate the propagation modes and effective refractive index supported by MMFs with different waist diameters in different bands. The phase matching curves for different modes of the tapered MMF LPFGs are calculated. When the waist diameter is 50  $\mu\text{m}$ , the MMF supports a relatively large number of core modes. Under the same period, the fundamental core mode is simultaneously coupled to multiple high order core modes at the same wavelength, and the superposition of these multiple modes results in mode aliasing phenomena. As the period decreases, mode overlap becomes more pronounced. When the waist diameter reduces to 30  $\mu\text{m}$  and 25  $\mu\text{m}$ , the number of core modes supported by the MMF decreases, and the phase-matching curves become separated compared to those for the MMFs with larger waist diameter. Consequently, as the waist diameter decreases, the number of core modes supported by the MMF gradually reduces, and the phase matching curves of the modes progressively separated with each other.

**Results and Discussions** We fabricate the tapered MMFs with different waist diameters using a three-electrode fusion splicing system. Subsequently, the LPFGs with different periods are inscribed in these tapered MMFs using a CO<sub>2</sub> laser. We observe the mode field distributions of the tapered MMF-LPFGs. The resonance wavelength and mode field distribution agree well with the simulation results (Figs. 2, 5 and 6). The output mode field distributions and interference patterns of the tapered MMF-LPFGs are tested (Fig. 7). The gratings realize core mode conversions, including LP<sub>01</sub>-LP<sub>12</sub> core modes of the gratings inscribed in the MMFs with waist diameters of both 30  $\mu\text{m}$  and 25  $\mu\text{m}$ , as well as LP<sub>01</sub>-LP<sub>02</sub> core mode of the gratings inscribed in the MMFs with waist diameters of 25  $\mu\text{m}$ . The excitation of the  $-1$  order OAM mode can be achieved by the fabricated gratings. The tapered MMF-LPFGs exhibits high polarization-dependent loss and low temperature sensitivity. The polarization-dependent loss characteristics and temperature characteristics are presented (Figs. 8 and 9). As the waist diameter decreases, the temperature sensitivity of the tapered MMF-LPFGs gradually increases.

**Conclusions** In this study, we fabricate the LPFGs in the tapered MMFs with waist diameters of 50  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$ , and 25  $\mu\text{m}$  by a CO<sub>2</sub> laser. When the waist diameters are reduced to 30  $\mu\text{m}$  or even below, the mode field distribution of the tapered MMF-LPFGs transition from mode aliasing to distinct mode separation. The high order core mode conversions are achieved successful, including LP<sub>01</sub>-LP<sub>12</sub> core mode as well as LP<sub>01</sub>-LP<sub>02</sub> core mode. These results demonstrate that higher-order core mode converters can be fabricate by precisely controlling the waist diameter of the tapered MMFs and grating period. When combined with mode division multiplexing technology, this approach can effectively expand channel capacity in communication systems, thereby meeting the demands of future high-speed, large-capacity optical networks.

**Key words** long-period fiber grating; multimode fiber; mode converter; orbital angular momentum