

## 离轴螺旋长周期光纤光栅特性研究\*

王剑<sup>1)</sup> 马超<sup>2)</sup> 王东辉<sup>2)</sup> 孟令知<sup>2)</sup> 王洪业<sup>2)</sup> 苑立波<sup>1)†</sup>

1) (桂林电子科技大学光电工程学院, 桂林 541004)

2) (哈尔滨工程大学, 纤维集成光学教育部重点实验室, 哈尔滨 150001)

(2023年3月19日收到; 2023年5月6日收到修改稿)

本文研究一种具有大恒温区的新型四电极电弧放电装置, 用于制备高质量离轴螺旋长周期光纤光栅. 较大的恒温加热区更利于释放光纤应力, 使得光纤器件的离轴量小. 为了确定高质量离轴螺旋长周期光纤光栅的关键参数, 借助于光束传播法研究单模光纤在不同耦合长度、螺距、纤芯折射率、包层折射率、纤芯直径、包层直径、离轴量条件下对螺旋长周期光纤光栅透射光谱的影响. 由于传统方法难以对微小离轴量的螺旋长周期光纤光栅进行离轴量测量, 采用光谱对比反推离轴量的方法对螺旋器件的离轴量做出估计. 根据理论计算获得的透射光谱与实际光谱的对比, 得到螺旋光纤离轴量的估值分别为 0.12, 0.13 和 0.16  $\mu\text{m}$ . 最后, 对所研装置制备的离轴螺旋长周期光纤光栅的抗扭转性能及光栅制备的重复性进行实验, 实验表明, 制备的光栅有一定的抗扭转性及较好的光谱重复性.

**关键词:** 四电极电弧法, 大恒温场, 螺旋长周期光纤光栅, 离轴量

**PACS:** 07.60.Vg, 42.81.Qb, 42.81.-i

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230415

## 1 引言

离轴螺旋长周期光纤光栅 (off-axis helical long period fiber grating, OAH-LPFG) 作为一种无源器件, 能够实现特定波长的前向传输的导模与包层模之间的耦合<sup>[1,2]</sup>. 该光栅有着抗电磁干扰、尺寸小、重量轻、耐腐蚀和对偏振不敏感等特点, 这些特点使其在诸多领域得到广泛应用, 如滤波器<sup>[3,4]</sup>、耦合器<sup>[5,6]</sup>、偏振器<sup>[7,8]</sup>和传感器<sup>[9,10]</sup>.

与传统由紫外光照射制备的长周期光纤光栅不同, OAH-LPFG 仅需使光纤纤芯折射率沿轴向形成周期性螺旋调制, 而无需对光纤进行增敏操作, 使 OAH-LPFG 在单模光纤<sup>[11]</sup>、多模光纤<sup>[12]</sup>、多芯光纤<sup>[13]</sup>、保偏光纤<sup>[14]</sup>等多种类型光纤中得以制备. 此外, 由于 OAH-LPFG 具有特殊的折射率

变化形式, 还可以实现真正意义上的扭转测量, 即同时测量扭转方向和扭转角度. 随着 OAH-LPFG 结构的发展, 具有不同功能的 OAH-LPFG 日益受到重视<sup>[15]</sup>. 对于单模光纤, 2003年, Rao等<sup>[16]</sup>制备了常规长周期光纤光栅, 得到的扭转灵敏度为 0.0645  $\text{nm}/(\text{rad}\cdot\text{m}^{-1})$  (若无特殊强调, 灵敏度单位均为  $\text{nm}/(\text{rad}\cdot\text{m}^{-1})$ ); 2005年, Wang等<sup>[17]</sup>制备的常规长周期光纤光栅在 3 个共振峰得到的扭转灵敏度分别为 0.016, 0.032 和 0.03. 2016 年和 2017 年, Zhang等<sup>[18]</sup>和 Kong等<sup>[19]</sup>分别使用单模光纤制备了离轴螺旋长周期光纤光栅, 其扭转灵敏度分别为 0.21 与 0.307. 同样使用单模光纤作为制备材料的情况下, 离轴螺旋长周期光纤光栅获得了比常规长周期光栅更高的扭转灵敏度<sup>[20]</sup>.

近年来, 随着 OAH-LPFG 实际需求的增加, 其制备方法已经取得了长足发展, 例如氢氧火焰加热<sup>[21]</sup>、

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61827819, 62265004) 和广西八桂学者专项 (批准号: 2019A38) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lbyuan@vip.sina.com

CO<sub>2</sub> 激光<sup>[22]</sup>、微型陶瓷加热器<sup>[23]</sup>、电阻灯丝加热<sup>[24]</sup>等. 与其他制备方法相比, 电弧放电技术灵活简单且成本更低<sup>[25-27]</sup>. 然而, 传统的二电极电弧放电所产生温度场的恒温区面积较窄, 导致制备出的 OAH-LPFG 离轴量相对较大<sup>[27]</sup>. 较大的离轴量会引起 OAH-LPFG 的插入损耗以及透射光谱波动过大, 导致 OAH-LPFG 质量变差, 影响相关器件的性能. 因此如何降低 OAH-LPFG 光纤的离轴量, 是制备优质 OAH-LPFG 器件制备的关键.

本文制备了具有大恒温区的新型四电极电弧 OAH-LPFG 加工装置, 并对恒温区的长度进行测量, 得到了 2.19 mm 的光纤恒温加热区, 以此为基础研究如何提高 OAH-LPFG 的制备质量. 研究 OAH-LPFG 参数对透射光谱的影响, 进而得出微小离轴量情况下获得的 OAH-LPFG 具有较高质量的结论. 为了评估 OAH-LPFG 的离轴量, 采用理论计算透射光谱与实际光谱进行微小离轴量估计. 最后还对所研装置制备的 OAH-LPFG 的抗扭转性能及其制备 OAH-LPFG 的重复性进行实验. 采用本文研制实验装置制备的 OAH-LPFG 具有的低离轴量特性, 可制备多种高质量的 OAH-LPFG

器件, 可用于传感器、滤波器等多种应用场合.

## 2 四电极电弧法制备 OAH-LPFG

图 1(a) 为包括电动位移台、四电极加热区、固定夹具、电动旋转台、手动位移台和相机的 OAH-LPFG 加工装置. 手动位移台用于调节固定夹具与电动旋转台的位置. 四电极上方的相机用于观察光纤加工过程及用来调整四电极的位置. 待加工的光纤分别固定于固定夹具与旋转夹具, 旋转夹具位于电动旋转台上, 并同电动旋转台上的旋转电机一同旋转, 制备 OAH-LPFG 时, 通过计算机编写的程序设置好制备的 OAH-LPFG 的周期、OAH-LPFG 的长度、电动旋转台的旋转速度及电动位移台的位移速度, 并调整好四电极电弧放电的温度场温度, 可以实现 OAH-LPFG 的螺旋加工. 图 1(b), (c) 中,  $\Lambda$  为 OAH-LPFG 螺距,  $d$  为 OAH-LPFG 离轴量. 由图 1(d), (e) 可知, 相比于二电极加工装置, 四电极可以形成更大面积的加工区域<sup>[28]</sup>. 当 OAH-LPFG 加工时, 二电极形成的温度场较窄, 可以认为此时加工得到的 OAH-LPFG 离轴量  $d$  为加热区两边

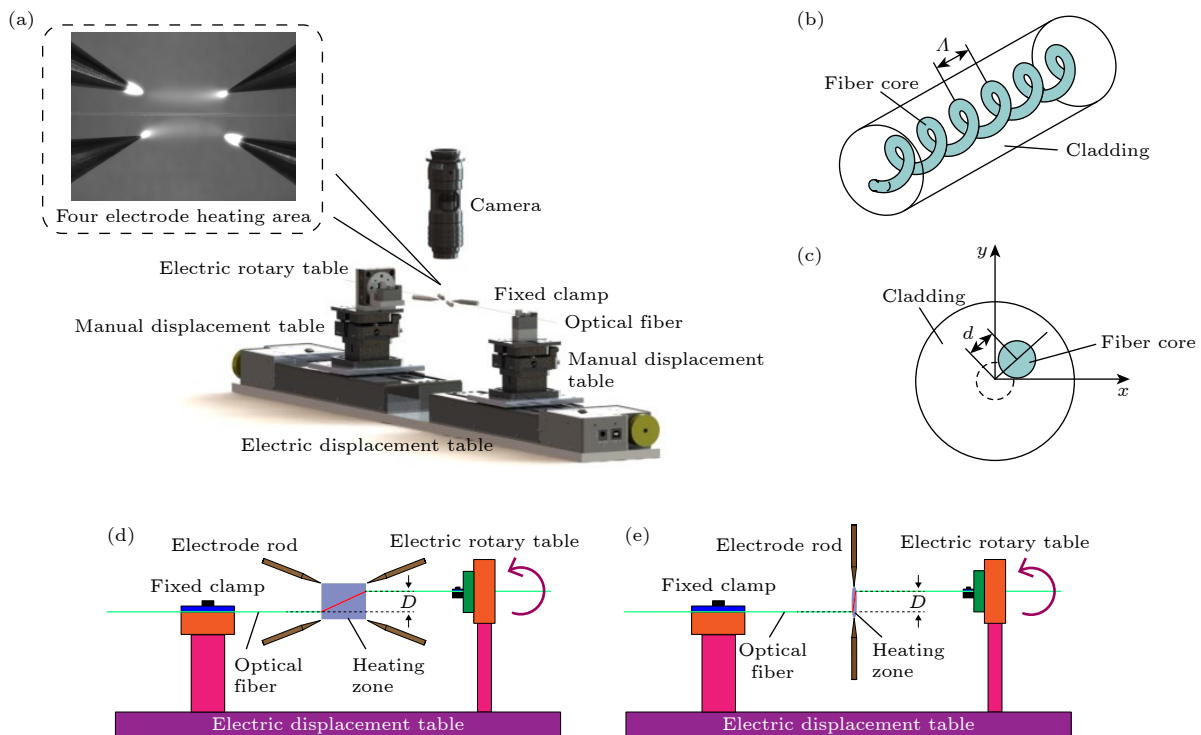


图 1 (a) 大恒温区的四电极电弧放电 OAH-LPFG 加工装置; (b) OAH-LPFG 结构; (c) OAH-LPFG 的某一横截面; (d) 四电极加工装置结构; (e) 二电极加工装置结构

Fig. 1. (a) Four electrodes arc discharge OAH-LPFG processing device in large constant temperature region; (b) OAH-LPFG structure; (c) a cross section of OAH-LPFG; (d) structure of the four-electrode machining device; (e) structure of the two-electrode machining device.

光纤的高度差  $D$ <sup>[27]</sup>. 而对于四电极电弧形成的宽温度场, 在高度差  $D$  相同时, 宽的温度场利于光纤应力释放与光纤软化, 使加工得到的 OAH-LPFG 离轴量  $d$  小于相同加工条件下二电极电弧加工得到的 OAH-LPFG 离轴量  $d$ .

在搭建的大恒温区的新型四电极电弧 OAH-LPFG 加工装置中, 4 个电极轴线及光纤轴线位于同一平面. 电极 A、电极 A'、电极 B' 和电极 B 的排布方式如图 2(b) 所示. 电极 A 与电极 A' 组成一组电弧放电路径, 电极 B 与电极 B' 组成另一组电弧放电路径. 电极 A 与电极 A' 的距离为 3 mm, 电极 A 与电极 B' 的距离为 1.6 mm, 电极轴线与光纤轴线夹角的锐角约为  $20^\circ$ . 通过 50 Hz 高压交流电源给两组电极供电, 两组电极分别在交流电源的正半周期与负半周期分别交替导通, 放电电流交替经电极 A 流至电极 A', 经电极 B 流至电极 B', 如图 2(b) 所示. 从图 2(d) 中可知, 在测试电压下, 最高温度基本稳定在  $1050^\circ\text{C}$ , 在  $1050^\circ\text{C}$  上下  $50^\circ\text{C}$  内波动. 以被加工光纤上的温度最高点为基准点, 在被加热光纤上找到相对于基准点变化  $100^\circ\text{C}$  的两个温度点, 定义这两个温度点的距离为被加热光纤的恒温区长度. 通过图 2(c) 可知, 当光纤上最高温度为  $1050^\circ\text{C}$  时, 恒温区长度约为 2.19 mm.

### 3 离轴螺旋长周期光纤光栅特性

#### 3.1 OAH-LPFG 模态耦合理论

在四电极加工装置的非圆对称加工因素作用下, 纤芯会轻微偏离加工系统的中心轴线, 当高温扭转光纤时使得光纤形成螺旋型结构 (图 1(b)). 图 1(b) 中呈螺旋形式的结构为扭转后的纤芯,  $\Lambda$  为扭转周期. 当光纤离轴量相比于包层直径较小时, 可以近似认为包层形状不变, 包层模式不受扭转影响. 图 1(c) 为 OAH-LPFG 的截面图, 图中  $d$  为光纤的离轴量. 离轴量较小时, 纤芯仍能有效传导光波, 离轴螺旋作用仅仅对纤芯产生调制, 使特定波长的纤芯基模与包层中的其他模式进行耦合. 为了便于讨论, 定义纤芯中的涡旋模式为

$$\begin{cases} \text{OAM}_{0,1}^{\pm} = (\text{HE}_{11}^{\circ} \pm j\text{HE}_{11}^{\circ}) \\ \approx F_{0,n}(r) (\hat{x} \pm j\hat{y}), \\ \text{OAM}_{\pm 1,n}^{\pm} = (\text{HE}_{2n}^{\circ} \pm j\text{HE}_{2n}^{\circ}) \\ \approx F_{1,n}(r) (\hat{x} \pm j\hat{y}) e^{\pm j\theta}, \\ \text{OAM}_{\pm 1,n}^{\mp} = (\text{TM}_{0n} \pm j\text{TE}_{0n}) / \sqrt{2} \\ \approx F_{1,n}(r) (\hat{x} \mp j\hat{y}) e^{\pm j\theta}, \end{cases} \quad (1)$$

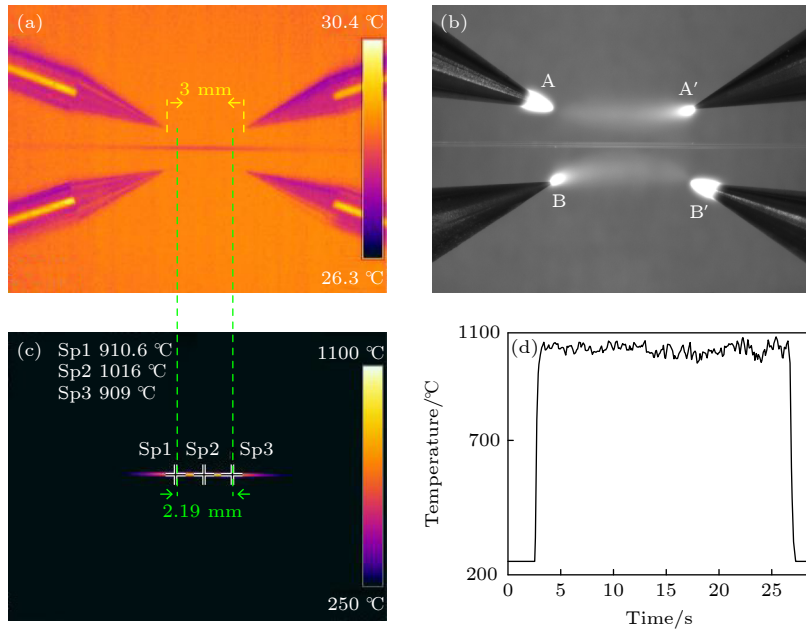


图 2 (a) 四电极未进行电弧放电时红外热像仪拍摄的温度图; (b) 四电极电弧放电加热光纤图; (c) 四电极电弧放电加热光纤时, 红外热像仪拍摄的温度图; (d) 四电极电弧放电时, 光纤加热区域最高温度的波动情况

Fig. 2. (a) Temperature map taken by infrared thermal imager when arc discharge is not carried out on four electrodes; (b) four-electrode arc discharge heating fiber diagram; (c) temperature map taken by infrared thermal imager when the optical fiber is heated by four-electrode arc discharge; (d) fluctuation of the maximum temperature in the optical fiber heating region during the four-electrode arc discharge.

式中, OAM 代表 OAH-LPFG 中的组合涡旋模式, 其由光纤矢量模式 TE, TM 和 HE 经  $\pi/2$  相移组合而成, OAM 模式的上标为模式的圆偏振态, 下标为模式载有的轨道角动量  $\pm 1$  和光场在光纤径向的谐振阶数  $n$ .  $j$  为虚数符号, 代表对应模式进行了  $\pi/2$  的相位移动. 上标  $o$  和  $e$  代表模式的奇偶性,  $F$  为不同模式的模场径向分布. 等式右方的  $(\hat{x} \pm j\hat{y})$  表示模式的圆偏振态,  $e^{\pm j\phi}$  为模式的螺旋相位. 由于 OAH-LPFG 本身不具有偏振效应, 出射光场与入射光场偏振保持一致, 因此在下文的讨论过程中, 不再标识模式的偏振态.

接下来, 考虑 OAH-LPFG 中的 OAM 模式耦合过程<sup>[29]</sup>. 纤芯基模也就是 OAM<sub>0,1</sub> 与包层模式 OAM<sub>1,n</sub> 的耦合过程如下:

$$\frac{\partial a_p(z)}{\partial z} = j\beta_p a_p + j \sum_p a_q(z) \kappa_{pq}, \quad (2)$$

其中,  $a$  代表模式振幅, 其下标为模式序号,  $z$  为光波沿着光纤传播的距离,  $\beta$  为模式的传播常数.  $\kappa_{pq}$  为模式  $p$  和模式  $q$  之间的耦合系数, 该系数描述不同模式之间的能量交换速率. 可以从波长-模式有效折射率分布图 3 中观察它们的规律. 非光栅区的芯模和包层模式独立传输无相互耦合 (模式的正交性),  $\kappa_{pq} = 0$ ; 光栅区的芯模和特定包层模则会产生周期性的能量耦合 (微扰引起模式能量交换),  $\kappa_{pq} \neq 0$ . 其表达式为

$$\begin{aligned} \kappa_{pq} &= \frac{\omega \varepsilon_0}{4\sqrt{N_p N_q}} \int_A \mathbf{E}_p^* \mathbf{E}_q \Delta n dA, \\ N &= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty (\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) r dr d\theta, \\ \Delta n &= (n_{co}^2 - n_{cl}^2) \delta(r - r_0) d \cos(\theta - k_u z), \quad (3) \end{aligned}$$

其中,  $\omega$  为光波频率,  $\varepsilon_0$  为真空介电常数,  $N$  代表模式能量归一化系数,  $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{H}$  为模式电场和磁场分布.  $N$  模式能量归一化系数,  $A$  代表光纤横截面. 圆柱坐标系  $(r, \theta, z)$  下, 扭转引起的折射率调制量为  $\Delta n$ ,  $n_{co}$  和  $n_{cl}$  分别为纤芯与包层折射率,  $\delta$  为冲激函数,  $r_0$  为纤芯半径,  $d$  为纤芯离轴量,  $k_u = 2\pi/\Lambda$  为光纤扭转强度.

将参与耦合的 OAM 模式与折射率调制量代入耦合系数表达式中, 经过化简可以得到耦合系数的表达式为

$$\begin{aligned} \kappa_{pq} &= \frac{\pi \omega \varepsilon_0 (n_{co}^2 - n_{cl}^2) r_0 d}{4\sqrt{N_p N_q}} \mathbf{E}_j^*(r_0) \mathbf{E}_k(r_0) \\ &\times \int_A \exp[j(-\beta_p + \beta_q + k_u)z] dA \\ &\times \delta_{pq}(-m_p + m_q \pm 1), \quad (4) \end{aligned}$$

其中,  $\delta_{pq}$  为克罗内克脉冲函数, 该函数仅在自变量为 0 时输出为 1, 正负号代表扭转方向,  $m$  为各耦合模式的轨道角动量. 根据该耦合系数的表达式, 可以总结出单螺旋长周期光纤光栅实现模式能量耦合的两个选择定则:

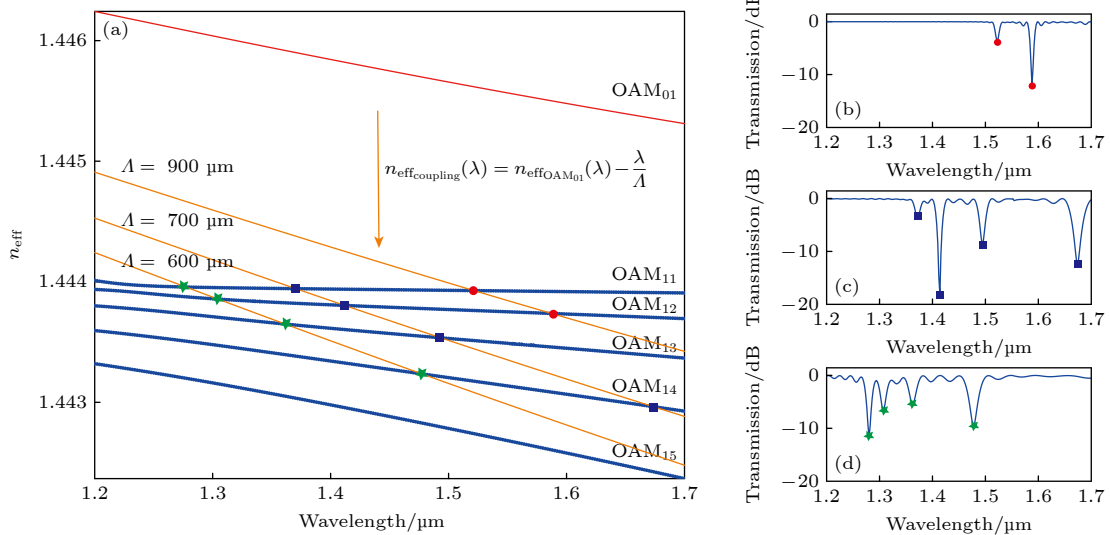


图 3 (a) 光纤中模式有效折射率随波长的变化. 不同光栅周期  $\Lambda$  及耦合长度  $L_c$  的透射光谱 (b)  $\Lambda = 900 \mu\text{m}$ ,  $L_c = 50 \text{ mm}$ ; (c)  $\Lambda = 700 \mu\text{m}$ ,  $L_c = 29 \text{ mm}$ ; (d)  $\Lambda = 600 \mu\text{m}$ ,  $L_c = 17.1 \text{ mm}$

Fig. 3. (a) Pattern effective refractive index changes with wavelength in fiber. Transmission spectrum with different grating period and coupling length: (b)  $\Lambda = 900 \mu\text{m}$ ,  $L_c = 50 \text{ mm}$ ; (c)  $\Lambda = 700 \mu\text{m}$ ,  $L_c = 29 \text{ mm}$ ; (d)  $\Lambda = 600 \mu\text{m}$ ,  $L_c = 17.1 \text{ mm}$ .

$$\begin{cases} -\beta_p + \beta_q + k_u = 0, & (5a) \\ -m_p + m_q \pm 1 = 0. & (5b) \end{cases}$$

(5a) 式表明耦合过程中的相位匹配条件, 即特定的耦合螺距; (5b) 式表明参与耦合的模式需要有特定数值的轨道角动量. 当模式  $p$  为光纤基模  $\text{OAM}_{0,1}$  时, 对应的不同的光纤扭转方向, 耦合模式  $q$  为  $\text{OAM}_{\pm 1,n}$ . 将 (5a) 式继续代入模式传播常数和有效折射率的表达式, 即

$$\begin{aligned} \beta(\lambda) &= n_{\text{eff}}(\lambda) \cdot 2\pi/\lambda, \\ k_u &= 2\pi/\Lambda, \end{aligned}$$

可以得到

$$n_{\text{eff coupling}}(\lambda) = n_{\text{eff OAM}_{0,1}}(\lambda) - \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad (6)$$

其中  $n_{\text{eff OAM}_{0,1}}$  代表基模有效折射率,  $n_{\text{eff coupling}}$  代表经过扭转调制后的光栅耦合曲线.

$$L_c = \frac{\pi}{2\kappa} = \frac{2}{\omega\varepsilon_0(n_{\text{co}}^2 - n_{\text{cl}}^2)r_0\mathbf{E}_p^*(r_0)\mathbf{E}_q(r_0)d} \frac{1}{d}. \quad (7)$$

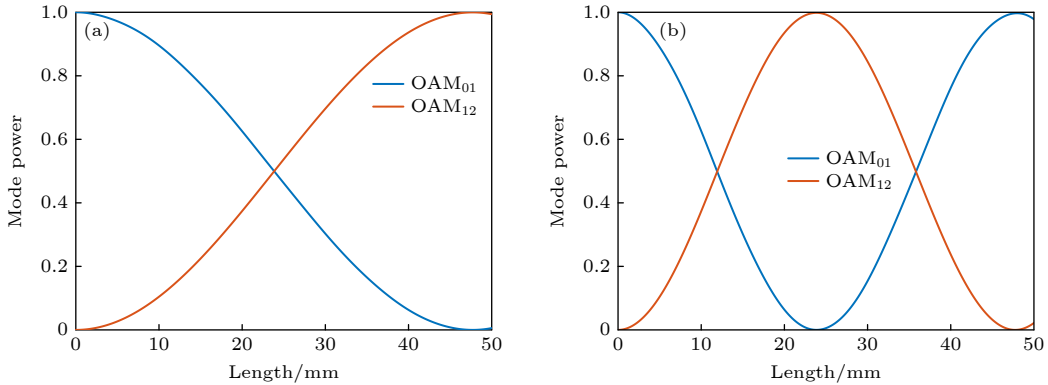


图 4 不同离轴量的模式耦合过程对比图 (a) 0.12  $\mu\text{m}$  离轴量; (b) 0.24  $\mu\text{m}$  离轴量

Fig. 4. Comparison diagram of mode coupling processes for different off-axis quantities: (a) 0.12  $\mu\text{m}$  off-axis quantity; (b) 0.24  $\mu\text{m}$  off-axis quantity.

100% 耦合长度与离轴量成反比, 可以通过实验光谱来计算耦合系数和离轴量. 图 4 为波长 1554 nm, 周期 870  $\mu\text{m}$  下不同离轴量的模式耦合过程对比图. 由图 4 可知, 0.12  $\mu\text{m}$  离轴量的 100% 耦合长度为 48 mm, 0.24  $\mu\text{m}$  离轴量的 100% 耦合长度为 24 mm. 这表明 100% 耦合长度与离轴量呈反比.

### 3.2 OAH-LPFG 参数与透射光谱的关系

为研究 OAH-LPFG 的耦合长度  $L_c$ , 螺距  $\Lambda$ , 纤芯折射率  $n_{\text{co}}$ , 包层折射率  $n_{\text{cl}}$ , 纤芯直径  $d_{\text{co}}$ , 包层直径  $d_{\text{cl}}$ , 离轴量  $d$  对 OAH-LPFG 透射光谱的影响, 基于光束传播法进行了相关仿真研究, 其仿真参数设置见表 1. 根据表 1 仿真参数设置, 得到的仿真结果如图 5 与图 6.

由图 5(a)–(f) 可知, OAH-LPFG 的耦合长度  $L_c$ , 螺距  $\Lambda$ , 纤芯折射率  $n_{\text{co}}$ , 包层折射率  $n_{\text{cl}}$ , 纤芯直径  $d_{\text{co}}$  对 OAH-LPFG 的透射光谱的插入损耗及波动影响较小, 主要对耦合区的耦合峰深度及

表 1 计算参数

Table 1. Calculation parameter.

耦合长度 $L_c/\mu\text{m}$	螺距 $\Lambda/\mu\text{m}$	纤芯折射率 $n_{\text{co}}$	包层折射率 $n_{\text{cl}}$	纤芯直径 $d_{\text{co}}/\mu\text{m}$	包层直径 $d_{\text{cl}}/\mu\text{m}$	离轴量 $d/\mu\text{m}$
18995–17245	870	1.461	1.457	8.7	125	0.3
15495	820–890	1.461	1.457	8.7	125	0.3
18495	870	1.4606–1.4613	1.457	8.7	125	0.3
18195	870	1.461	1.4566–1.4573	8.7	125	0.3
17745	870	1.461	1.457	8.6–9.3	125	0.3
18995	870	1.461	1.457	8.7	124.6–125.3	0.3
19495, 13245, 10245, 8045, 7095, 6345, 5795, 5495	870	1.461	1.457	8.7	125	0.30–1.35
9095, 7798, 6745, 5545, 5545, 5145, 4845, 4595	680	1.461	1.457	8.7	125	0.30–0.65

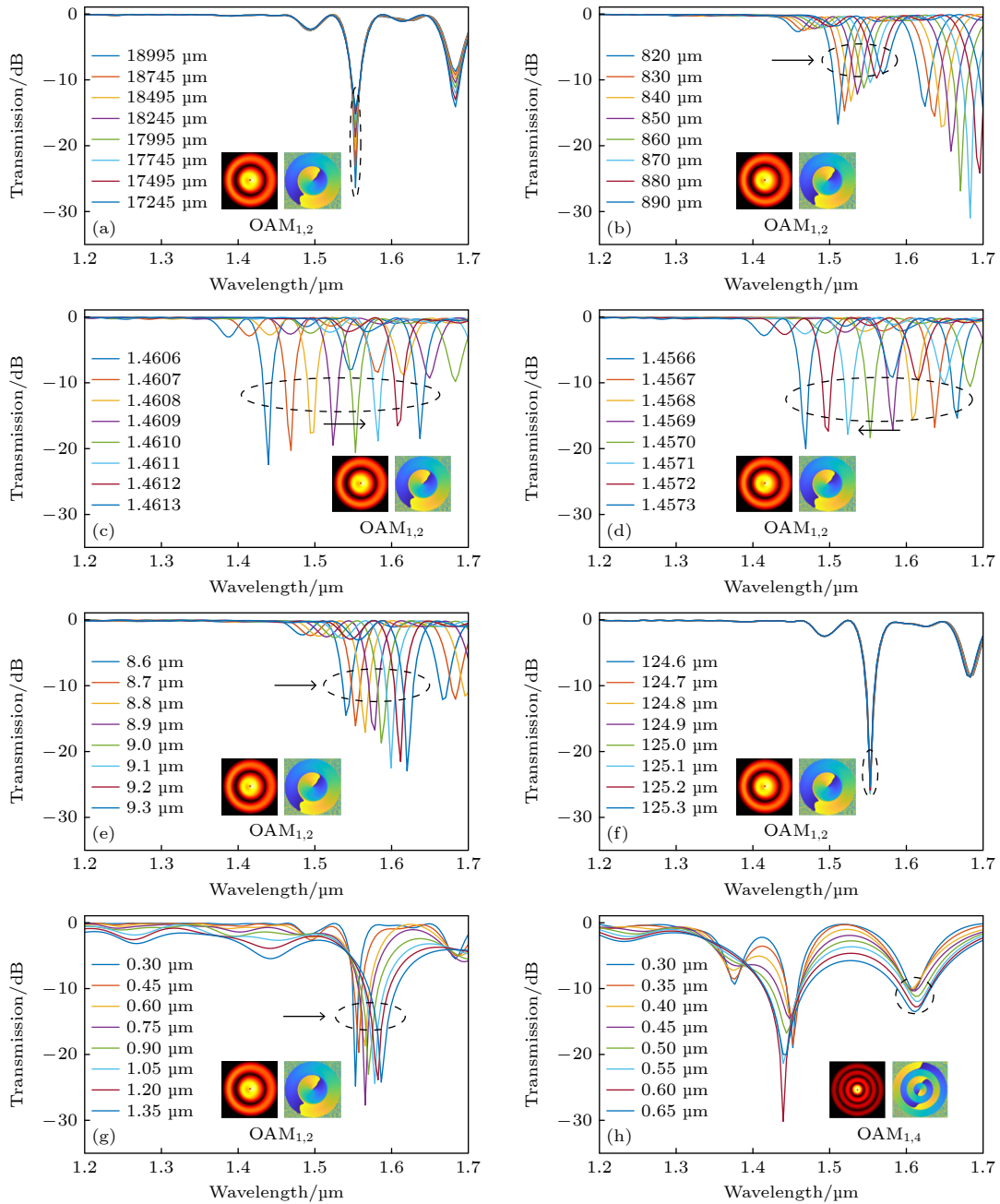


图 5 OAH-LPFG 参数与透射光谱的关系 (a) 耦合长度  $L_c$ ; (b) 螺距  $\Lambda$ ; (c) 纤芯折射率  $n_{co}$ ; (d) 包层折射率  $n_{cl}$ ; (e) 纤芯直径  $d_{co}$ ; (f) 包层直径  $d_{cl}$ . 透射光谱与离轴量  $d$  的关系 (g) OAH-LPFG 的  $OAM_{1,2}$  模式; (h) OAH-LPFG 的  $OAM_{1,4}$  模式

Fig. 5. Relation between OAH-LPFG parameters and transmission spectrum: (a) Coupling length  $L_c$ ; (b) pitch  $\Lambda$ ; (c) core refractive index  $n_{co}$ ; (d) cladding refractive index  $n_{cl}$ ; (e) core diameter  $d_{co}$ ; (f) cladding diameter  $d_{cl}$ . Relationship between transmission spectrum and off-axis quantity  $d$ : (g) OAH-LPFG  $OAM_{1,2}$  mode; (h) OAH-LPFG  $OAM_{1,4}$  mode.

损耗峰的波长位置产生影响, 其中包层直径  $d_{cl}$  对透射光谱几乎不产生影响. 图 5(g), (h) 分别为  $OAM_{1,2}$  和模式  $OAM_{1,4}$  模式下的透射光谱图. 由图 5(g), (h) 和表 1 可看出, 随着离轴量  $d$  增大, 同一模式的耦合长度变短. 同时可知, 离轴量  $d$  对 OAH-LPFG 透射光谱整体插入损耗、光谱整体波动、耦合峰宽度产生较大影响, 且其对其高阶模式影响更大. 定义波长 1.2—1.3  $\mu\text{m}$  为非耦合区, 图 6 中, average

为波长 1.2—1.3  $\mu\text{m}$  范围透射光谱光强的平均, difference 为波长 1.2—1.3  $\mu\text{m}$  范围透射光谱光强的最大差值, 即为光强在该范围内的最大波动. 由图 6(a)—(f) 可知, OAH-LPFG 的耦合长度  $L_c$ , 螺距  $\Lambda$ , 纤芯折射率  $n_{co}$ , 包层折射率  $n_{cl}$ , 纤芯直径  $d_{co}$ , 包层直径  $d_{cl}$  对透射光谱非耦合区插入损耗及最大波动影响微弱. 仿真中, 非耦合区插入损耗低于 0.2 dB, 最大波动在 0.35 dB 内. 结合图 5(c), (d)

以及图 6(c), (d) 可知, 透射光谱非耦合区接近耦合区时, 受到更大的影响. 图 6(g), (h) 表明, OAH-

LPFG 非耦合区透射光谱的插入损耗及最大波动对离轴量  $d$  变化敏感.

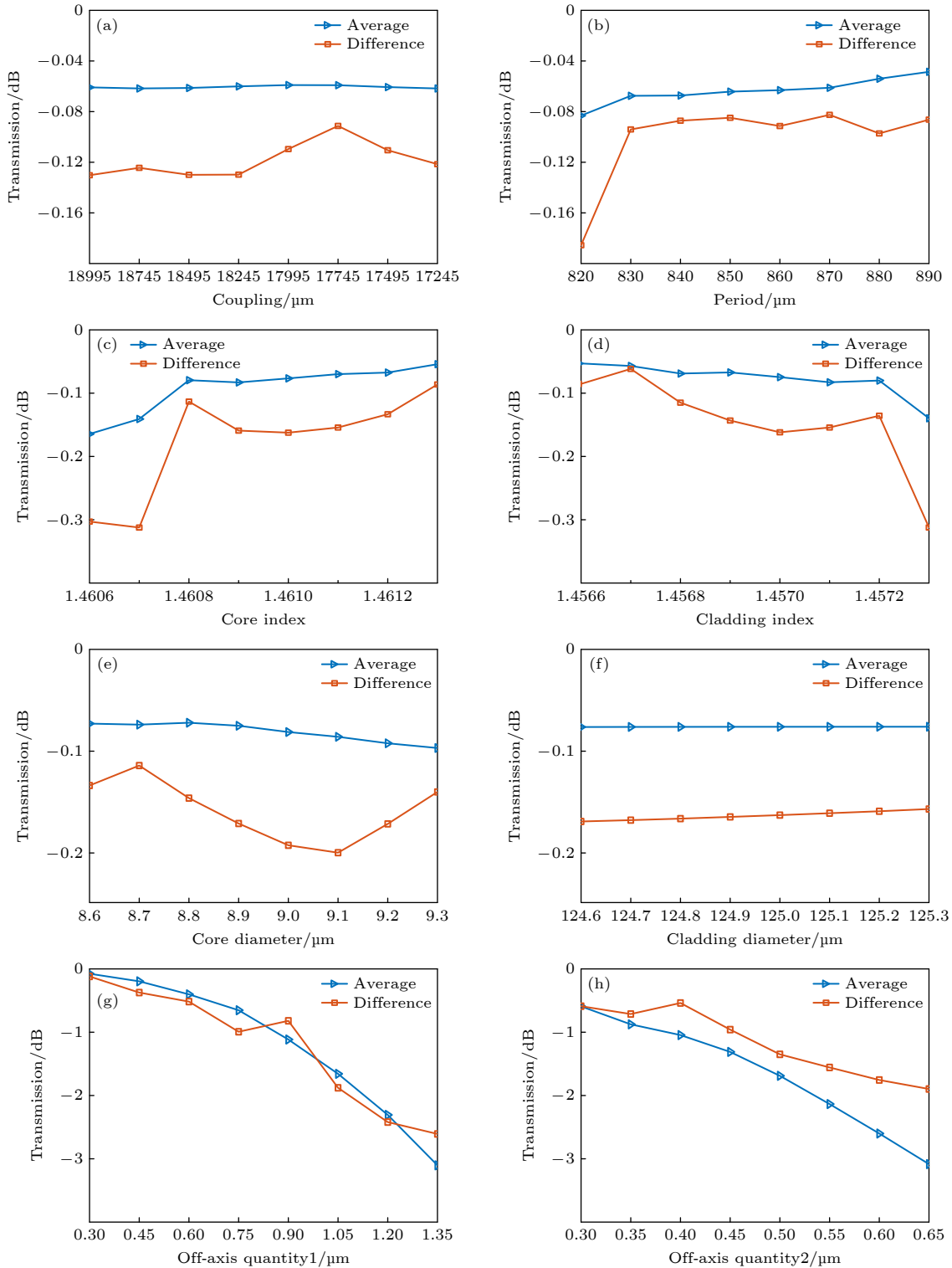


图 6 OAH-LPFG 参数对透射光谱非耦合区的影响 (a) 耦合长度  $L_c$ ; (b) 螺距  $\Lambda$ ; (c) 纤芯折射率  $n_{co}$ ; (d) 包层折射率  $n_{cl}$ ; (e) 纤芯直径  $d_{co}$ ; (f) 包层直径  $d_{cl}$ . 透射光谱非耦合区与离轴量  $d$  的关系 (g) OAH-LPFG 的  $OAM_{1,2}$  模式; (h) OAH-LPFG 的  $OAM_{1,4}$  模式  
 Fig. 6. Influence of OAH-LPFG parameters on the uncoupled region of transmission spectrum: (a) Coupling length  $L_c$ ; (b) pitch  $\Lambda$ ; (c) core refractive index  $n_{co}$ ; (d) cladding refractive index  $n_{cl}$ ; (e) core diameter  $d_{co}$ ; (f) cladding diameter  $d_{cl}$ . Relationship between the uncoupled region of transmission spectrum and the off-axis quantity  $d$ : (g) OAH-LPFG  $OAM_{1,2}$  mode; (h) OAH-LPFG  $OAM_{1,4}$  mode.

综上所述,虽然在 OAH-LPFG 的制备过程中不可避免产生一些不利情形,如加工时温度的波动、被加工光纤的微振动、光纤加工过程中不必要的微拉锥,将使得耦合长度、螺距、纤芯折射率、包层折射率、纤芯直径和包层直径产生细微的变化.但图 5 和图 6 表明,这些因素的细微改变对高质量离轴螺旋长周期光纤光栅的制备影响不大.离轴量  $d$  才是制备 OAH-LPFG 中重要的参数,大离轴量  $d$  会导致插入损耗增大,光谱整体波动变大,耦合峰展宽. OAH-LPFG 有着广泛的应用,但通过图 5 和图 6 的仿真可知,过大的离轴量  $d$  将对其应用带来困扰.

1) 滤波器,插入损耗是光栅滤波器的重要指标,当离轴量  $d$  较大时,使非滤除的波长产生非必要的损耗.

2) 高灵敏度传感器,色散转折点附近的耦合峰光谱可用于高灵敏度传感器<sup>[12,30]</sup>,如离轴螺旋长周期光纤光栅色散转折点附近的双耦合峰实现的高灵敏度传感器.在制备色散转折点双耦合峰光栅的过程中,如果离轴量  $d$  过大,透射光谱整体插入损耗、光谱整体波动较大,导致很难判断制备的透射光谱是否为色散转折点的透射光谱,即使能判断出透射光谱处于色散转折点,整体光谱质量也不高,所以当制备出的 OAH-LPFG 的离轴量  $d$  较小时,色散转折点的耦合峰光谱更容易制备且质量相对较高.

3) 涡旋光发生器<sup>[31,32]</sup>,涡旋光束由于其独特的结构,在光束中心具有相位或偏振奇异性而受到广泛关注,较大的离轴量  $d$  使得光谱整体波动变大,表明纤芯模式与其他模式耦合更强烈,从而导

致较大离轴量  $d$  的 OAH-LPFG 涡旋光不纯净.因此为制备高质量的 OAH-LPFG,以提高 OAH-LPFG 的应用,在制备过程中减小 OAH-LPFG 离轴量  $d$  至关重要.

## 4 结果分析与讨论

### 4.1 OAH-LPFG 离轴量特性表征

为了对大恒温区的新型四电极电弧 OAH-LPFG 加工装置加工的 OAH-LPFG 离轴量  $d$  特性进行表征,使用长飞低水峰单模光纤制备 OAH-LPFG 样品. OAH-LPFG 周期分别为 870, 750 和 645  $\mu\text{m}$ , 耦合长度分别为 49590, 29250 和 17080  $\mu\text{m}$ .

图 7(a)–(c) 的透射光谱在波长 1.55  $\mu\text{m}$  附近对应的包层模式分别为  $\text{OAM}_{1,2}$ ,  $\text{OAM}_{1,3}$ ,  $\text{OAM}_{1,4}$ . 从图 7(a)–(c) 可知,不同周期下制备的 OAH-LPFG 的插入损耗及透射光谱波动较低;图 7(d) 中,在波长 1.21–1.3  $\mu\text{m}$ , 等间隔取 10 个数据点, OAH-LPFG 为 870  $\mu\text{m}$  时的透射光谱的波动最大为 0.32 dB, 通过计算其平均值为 -0.46 dB. OAH-LPFG 为 750  $\mu\text{m}$  时的透射光谱的波动最大为 0.09 dB, 通过计算其平均值为 -0.21 dB. OAH-LPFG 为 610  $\mu\text{m}$  时的透射光谱的波动最大为 1.01 dB, 通过计算其平均值为 -0.6 dB, 通过数据可知,制备的 OAH-LPFG 插入损耗与透射光谱的波动较小,质量较高.

为评估所制备 OAH-LPFG 的离轴量  $d$  情况,用显微镜分别对未被加工的光纤及周期为 870, 750 和 645  $\mu\text{m}$  时的 OAH-LPFG 离轴量  $d$  进行观察.由图 8 可知,由于制备的 OAH-LPFG 离轴量  $d$  过小,从图 8 无法观察出 OAH-LPFG 产生的离轴量  $d$ ,

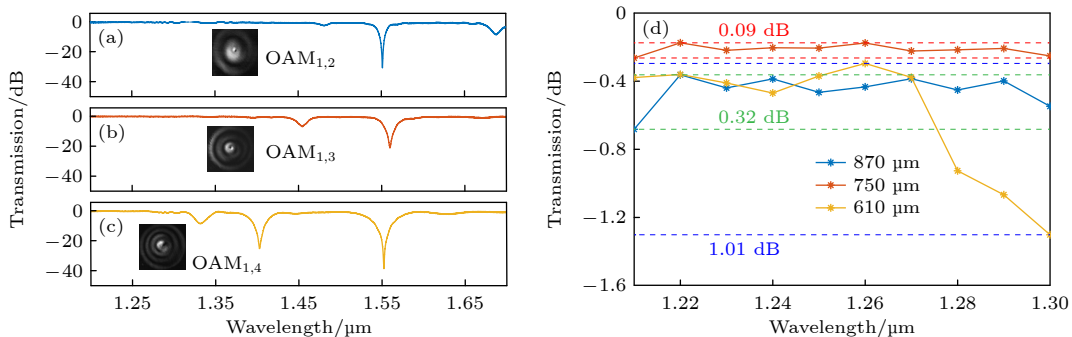


图 7 基于四电极电弧得到的不同周期下制备的 OAH-LPFG 透射光谱 (a) 870  $\mu\text{m}$ ; (b) 750  $\mu\text{m}$ ; (c) 645  $\mu\text{m}$ . (d) 透射光谱在 1.21–1.30  $\mu\text{m}$  波长范围的插入损耗及波动情况

Fig. 7. OAH-LPFG transmission spectrum obtained based on four-electrode arc: (a) 870  $\mu\text{m}$ ; (b) 750  $\mu\text{m}$ ; (c) 645  $\mu\text{m}$ . (d) Insertion loss and fluctuation of transmission spectrum in the range of wavelength 1.21–1.30  $\mu\text{m}$ .

与未被加工光纤的观察图一样. 为给出 OAH-LPFG 离轴量  $d$  的大致范围, 采用透射光谱对比的方法对 OAH-LPFG 的离轴量  $d$  进行估计.

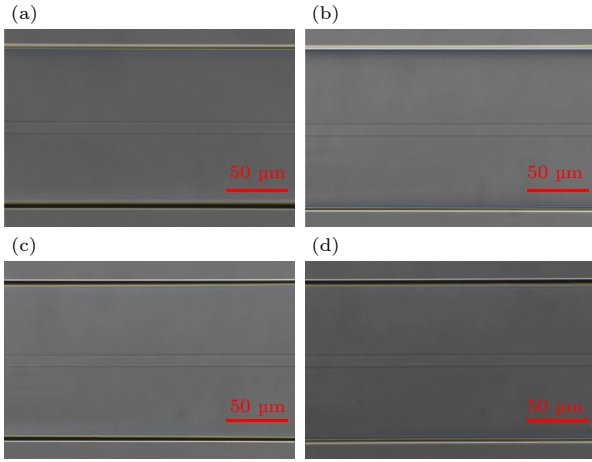


图 8 未被加工光纤与 OAH-LPFG 离轴量  $d$  的显微镜照片 (a) 未被加工光纤; (b) 周期 870  $\mu\text{m}$  OAH-LPFG; (c) 周期 750  $\mu\text{m}$  OAH-LPFG; (d) 周期 645  $\mu\text{m}$  OAH-LPFG  
 Fig. 8. Microscope observation of the unprocessed fiber and OAH-LPFG off-axis quantity  $d$ : (a) Unprocessed fiber; (b) periodic 870  $\mu\text{m}$  OAH-LPFG; (c) periodic 750  $\mu\text{m}$  OAH-LPFG; (d) periodic 645  $\mu\text{m}$  OAH-LPFG.

根据耦合模理论, 纤芯折射率  $n_{\text{co}}$  为 1.461, 包层折射率  $n_{\text{cl}}$  为 1.457, 纤芯直径  $d_{\text{co}}$  为 8.7  $\mu\text{m}$ . 图 9(a)–(c) 的周期分别为 870, 750 和 645  $\mu\text{m}$ , 耦合长度分别为 50000, 29048 和 17143  $\mu\text{m}$ . 经计算, 图 9(a)–(c) 对应的  $\kappa$  分别为 32.93, 54.09, 89.75. 于是根据 (7) 式和光纤模式分析的相关结果, 可得到图 9(a)–(c) 的离轴量  $d$  分别为 0.12, 0.13 和 0.16  $\mu\text{m}$ . 因图 9 是通过匹配图 7 得的透射光谱图, 所以可认为图 7 中透射光谱对应的离轴量  $d$  与图 9 中透射光谱对应的离轴量  $d$  基本一致. 根据以上所述, 本文搭建的大恒温区新型四电极电弧 OAH-LPFG 加工装置制备得到的 OAH-LPFG 离轴量  $d$  较小. 因此所加工的样品插入损耗低, 光谱波动小, 高阶模式激发效果好, 样品整体质量高.

#### 4.2 所研装置制备 OAH-LPFG 的重复性

为测试所研装置制备 OAH-LPFG 的光谱重复性, 用康宁单模光纤制备了 10 个离轴螺旋长周期光栅样品, 周期都为 550  $\mu\text{m}$ , 并测量其光谱. 图 10(a) 为康宁单模光纤的横截面的显微图像. 图 10(b) 为康宁单模光纤在光波长 532 nm 下测得的三维折射率轮廓图. 图 10(c) 为 10 个离轴螺旋长周期光栅样品

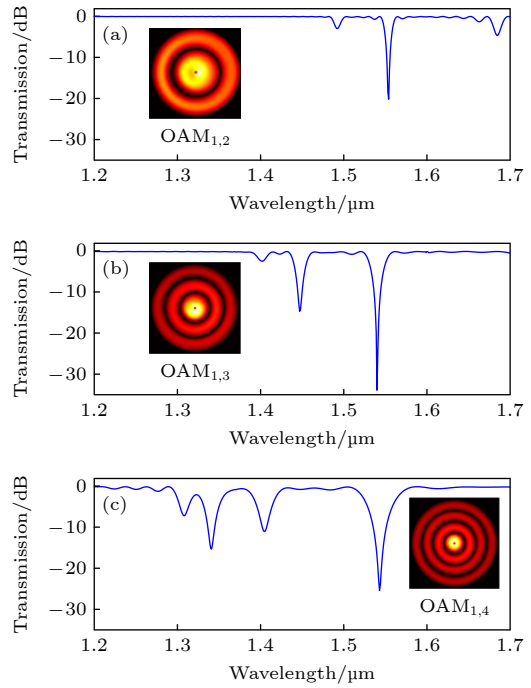


图 9 匹配的透射光谱 (a) 周期 870  $\mu\text{m}$ ; (b) 周期 750  $\mu\text{m}$ ; (c) 周期 645  $\mu\text{m}$   
 Fig. 9. Matched transmission spectra: (a) Period of 870  $\mu\text{m}$ ; (b) period of 750  $\mu\text{m}$ ; (c) period of 645  $\mu\text{m}$ .

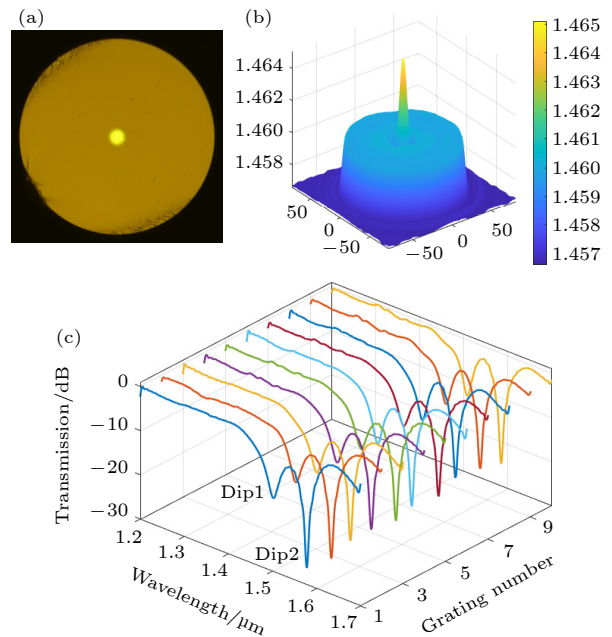


图 10 (a) 康宁单模光纤的横截面的显微图像; (b) 康宁单模光纤在光波长 532 nm 下测得的三维折射率轮廓图; (c) 10 个离轴螺旋长周期光栅样品的透射光谱图  
 Fig. 10. (a) A microscopic image of a cross section of Corning single mode fiber; (b) 3D refractive index profile of corning single-mode fiber measured at optical wavelength 532 nm; (c) transmission spectra of 10 samples of off-axis helical long-period grating.

栅样品的透射光谱图, 图中分别以不同的颜色显示. 结果表明, 这些光谱吻合较好, 意味着论文所提装置制备的离轴螺旋长周期光栅的透射光谱达到了较好的一致性. 以图 10(c) 透射光谱中 Dip2 的变化对 OAH-LPFG 制备的重复性进行评价. 光栅样品的透射光谱中, 耦合峰波长的变化情况如图 11(a) 所示, 耦合峰波长的最大变化量为 13 nm. 图 11(b) 显示了光栅样品的透射光谱中, 耦合峰损耗的变化情况, 耦合峰损耗的最大变化为 2.89 dB. 因此, 实验结果表明, 论文所研装置为制备高质量的离轴螺旋长周期光栅提供可能.

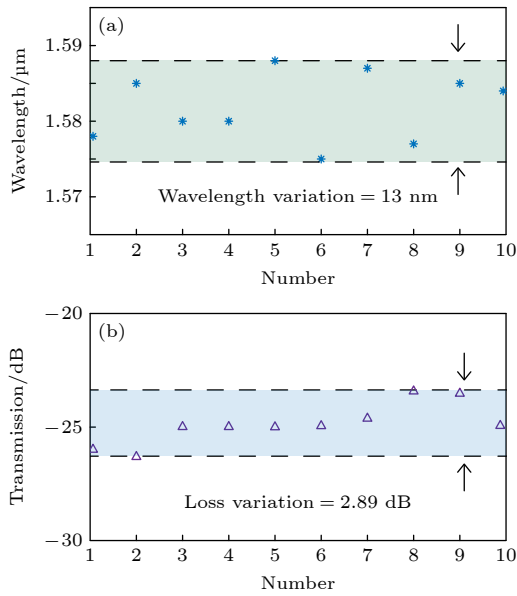


图 11 (a) 重复实验中光栅样品耦合峰波长的变化; (b) 重复实验中光栅样品耦合峰损耗的变化  
Fig. 11. (a) Change of coupling peak wavelength of grating samples in repeated experiment; (b) change of coupling peak loss of grating samples in repeated experiments.

### 4.3 OAH-LPFG 抗扭转测试

为评价本文提出的新型四电极电弧放电装置加工制备 OAH-LPFG 的性能, 增加相关光栅抗扭转的测试, 关于光栅抗扭转的测试分别用光栅扭转时断的圈数与光栅扭转传感的灵敏度予以说明.

#### 4.3.1 光栅扭转时断的圈数

为测试提出的新型四电极电弧放电装置制备的光栅扭转时断的圈数情况, 分别用单模光纤与偏芯光纤进行实验, 进而了解光纤纤芯离轴量  $d$  对光栅扭转时断的圈数的影响, 所用光纤的横截面与光纤扭转后的纵向截面见图 12.

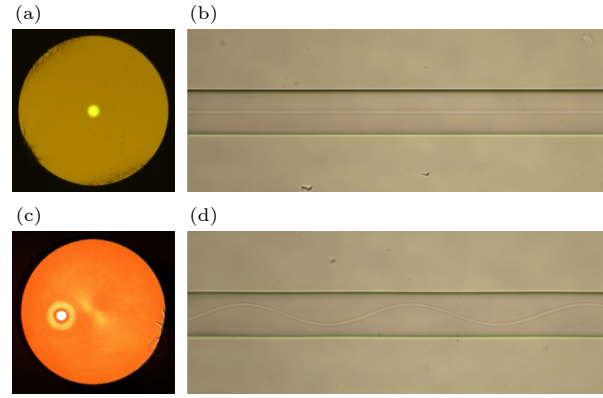


图 12 (a) 单模光纤横截面图; (b) 单模光纤扭转后的纵向截面图; (c) 偏芯光纤横截面图; (d) 偏芯光纤扭转后的纵向截面图

Fig. 12. (a) Cross section of single-mode fiber; (b) longitudinal cross-section of single-mode fiber after torsion; (c) cross-sectional diagram of eccentric fiber; (d) longitudinal cross-section of the eccentric fiber after torsion.

实验利用一对同心旋转夹具, 研究相关光栅扭转时断的圈数情况. 其中一个旋转夹具保持光纤固定, 而另一个则可以旋转任意角度, 旋转夹具间光纤的距离为 14.8 cm, 螺旋光纤器件的初始拉力为 0.45 N. 实验所用的螺旋光纤器件周期都为 1000 μm, 器件长度为 1 cm. 图 13 中, 单模螺旋光纤器件扭转时断的范围在 110 rad/m 附近, 最大波动为 4.54 rad/m; 偏芯螺旋光纤器件扭转时断的范围同样在 110 rad/m 附近, 最大波动为 4.01 rad/m. 通过对比可知, 纤芯离轴量  $d$  的大小对光栅扭转时断的圈数影响不大.

#### 4.3.2 光栅扭转传感的灵敏度

为测试提出的新型四电极电弧放电装置制备的 OAH-LPFG 扭转传感的灵敏度情况, 用单模光纤制备了 OAH-LPFG, 其中光栅的周期为 550 μm, 光栅长度为 9350 μm. 实验中利用一对同心旋转夹具, 研究了所制光栅的扭转传感的灵敏度. 其中一个旋转夹具保持光纤固定, 而另一个则可以在顺时针或逆时针从 0°变化 180°, 旋转夹具间光纤的距离为 14.8 cm. 不同旋转角度的耦合峰透射光谱如图 14(a), (c) 所示, 分别代表光栅顺时针或逆时的透射光谱. 实验中选取耦合峰为 Dip2. 图 14(a) 中, 当光栅顺时针方向扭转时, 耦合峰产生红移. 图 14(c) 中, 当光栅逆时针方向扭转时, 耦合峰产生蓝移. 此外, 还对耦合峰的扭转响应进行定量表征. 顺时针或逆时针对应的波长与扭曲速率的依赖

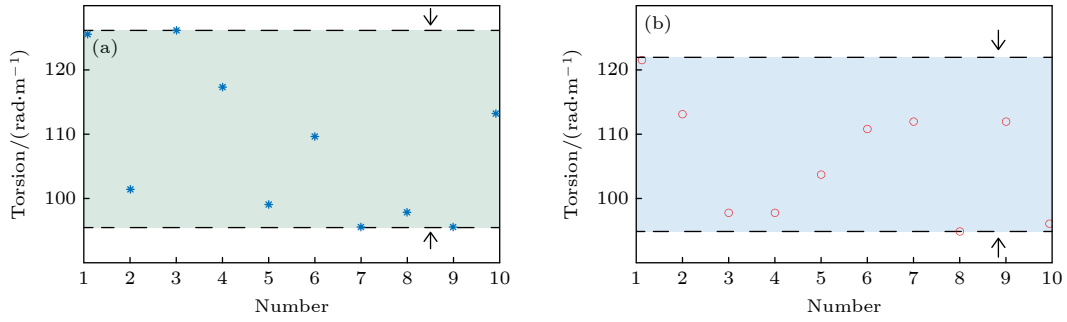


图 13 (a) 单模光纤扭转时断的情况, 最大波动为 4.54 rad/m; (b) 偏芯光纤扭转时断的情况, 最大波动为 4.01 rad/m

Fig. 13. (a) Breakage of single-mode fiber during torsion, and the maximum fluctuation is 4.54 rad/m; (b) breakage of eccentric fiber during torsion, and the maximum fluctuation is 4.01 rad/m.

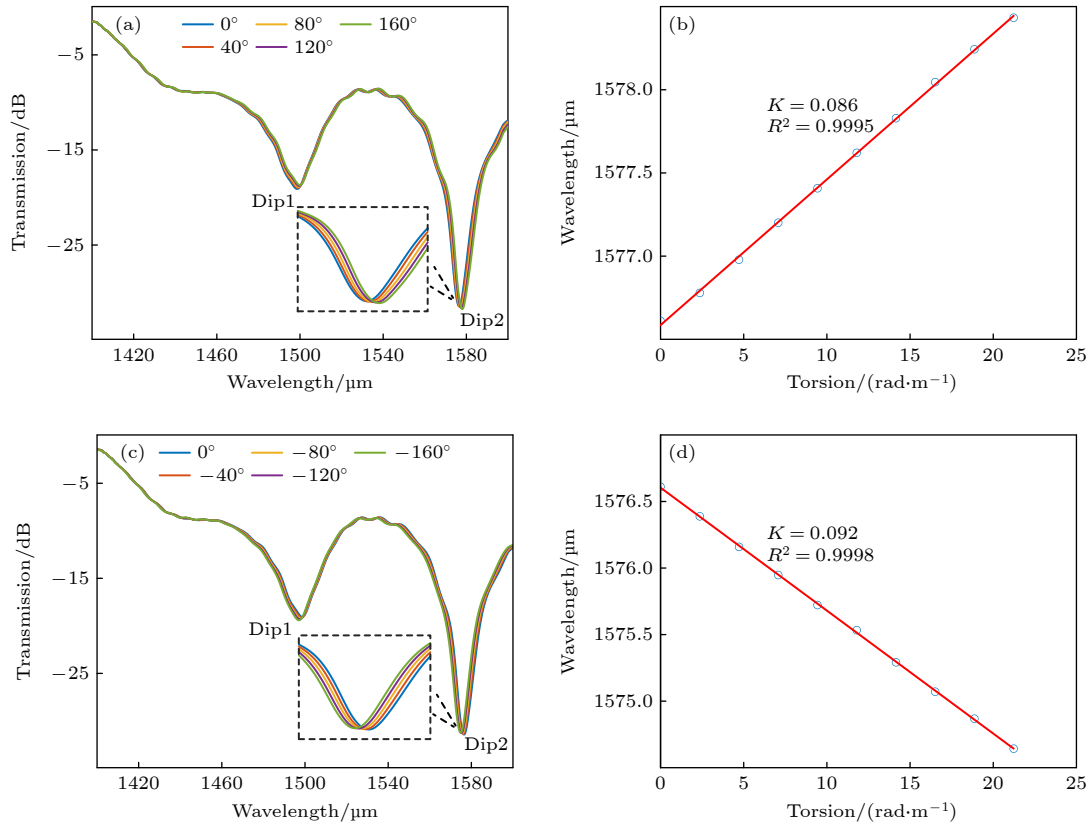


图 14 (a) 顺时针时不同扭转角度的耦合峰的透射光谱; (b) 顺时针时波长与扭曲率的依赖关系; (c) 逆时针时不同扭转角度耦合峰的透射光谱; (d) 逆时针时波长与扭曲率的依赖关系

Fig. 14. (a) Transmission spectra of coupling peaks with different torsion angles in clockwise direction; (b) dependence of clockwise wavelength on the distortion rate; (c) transmission spectra of coupling peaks with different torsion angles in counterclockwise direction; (d) dependence of counterclockwise wavelength on the distortion rate.

关系如图 14(b), (d)所示, 其对应的线性相关系数分别为 0.9995 与 0.9998. 计算出的扭转灵敏度分别为 0.086 与 0.092. 与文献 [16, 17] 制备的常规长周期光纤光栅相比, 灵敏度稍高. 但与文献 [27] 采用传统二电极制备的 OAH-LPFG 相比, 灵敏度稍低.

#### 4.4 不同制备方法制备 OAH-LPFG 比较

为进一步评价提出的大恒温区新型四电极

电弧放电 OAH-LPFG 加工装置制备 OAH-LPFG 的性能, 表 2 与其他制备方法得到的 OAH-LPFG 进行比较 [18,19,25,27,33,34]. 显然, 与其他方法相比, 本文提出的四电极电弧放电制备 OAH-LPFG 的方法不仅得到的光谱最小损耗小于 1 dB, 而且简单灵活、恒温区大、制备便捷. 其为实现高质量的螺旋长周期光栅提供了一种有效的制备方法.

表 2 不同制备方法制备 OAH-LPFG 比较<sup>[18,19,25,27,33,34]</sup>  
Table 2. Comparison of OAH-LPFG prepared by different preparation methods<sup>[18,19,25,27,33,34]</sup>.

结构	制备方法	透射光谱的最小损耗	说明
单模光纤螺旋长 周期光纤光栅	CO <sub>2</sub> 激光	>1 dB <sup>[18]</sup> <1 dB <sup>[19]</sup>	优点: 灵活、高品质; 缺点: 光路调试麻烦、昂贵
	氢氧火焰	<1 dB <sup>[33]</sup> ≈ 1 dB <sup>[34]</sup>	优点: 加热面积较宽, 加热温度均匀; 缺点: 氢气有一定危险性
	二电极电弧放电	>1 dB <sup>[25]</sup> >1 dB <sup>[27]</sup>	优点: 简单灵活; 缺点: 恒温区较窄
	四电极电弧放电	<1 dB	优点: 简单灵活、大恒温区、价格便宜; 缺点: 电弧需进一步优化

## 5 结 论

采用大恒温区新型四电极电弧放电 OAH-LPFG 装置, 得到较大的恒温光纤加热区, 不仅利于光纤应力的释放, 同时也减小光纤扭转过程中振动带来的影响. OAH-LPFG 参数的仿真表明: 影响 OAH-LPFG 插入损耗、透射光谱波动及耦合峰宽度大小的主要参数为其离轴量, OAH-LPFG 离轴量越大, OAH-LPFG 的插入损耗、光谱波动整体及耦合峰宽度变大. 为 OAH-LPFG 的设计与制备提供了参考. 通过实验样品与仿真结果比较, 本文所采用的装置制备的 OAH-LPFG 离轴量较小, 从而使得 OAH-LPFG 具有插入损耗、透射光谱波动及耦合峰宽度小的特性. 同时, 实验表明本文所研装置制备的 OAH-LPFG 有一定的抗扭转性能及较好的透射光谱重复性. 这些特点使得四电极电弧加热光纤的方法具有广泛的应用前景, 例如基于 OAH-LPFG 的滤波器和 OAH-LPFG 涡旋光发生器等, 能够满足制备高质量的 OAH-LPFG 器件的需求.

## 参考文献

- [1] Yang L, Xue L L, Su J, Qian J R 2011 *Chin. Opt. Lett.* **9** 070603
- [2] Xu H X, Yang L 2013 *Opt. Lett.* **38** 1978
- [3] Zhu C L, Wang L, Zhao H, Bing Z H, Zhao Y, Li H P 2022 *Opt. Commun.* **503** 127452
- [4] Rao X F, Yang L, Su J, Ban Q M, Deng X, Wang W 2022 *Opt. Lett.* **47** 5758
- [5] Ma C, Wang D, Deng H, Yuan L B 2022 *Opt. Fiber. Technol.* **73** 103019
- [6] Liu Y Q, Liu Q, Chiang K S 2009 *Opt. Lett.* **34** 1726
- [7] Ryu H S, Park Y, Oh S T, Chung Y, Kim D Y 2003 *Opt. Lett.* **28** 155
- [8] Wang Y P, Xiao L M, Wang D N, Jin W 2007 *Opt. Lett.* **32** 1035
- [9] Fu C, Ni Y Q, Sun T, Wang Y, Ding S, Vidakovic M 2021 *Adv. Struct. Eng.* **24** 1248
- [10] Zhao Y Y, Liu S, Luo J X, Chen Y P, Fu C L, Xiong C, Wang Y, Jing S Y, Bai Z Y, Liao C R, Wang Y P 2020 *J. Lightwave Technol.* **38** 2504
- [11] Liu Y, Yuan L B 2020 *Optik* **223** 165557
- [12] Gao K Y, Zhang Z, Huang B, Hao H, Zhao H, Wang P, Li H P 2022 *J. Opt. Soc. Am. B* **39** 1075
- [13] Shen X, Hu X W, Yang L Y, Dai N L, Wu J J, Zhang F F, Peng J G, Li H Q, Li J Y 2017 *Opt. Express* **25** 10405
- [14] Jiang C, Liu Y Q, Zhao Y H, Mou C B, Wang T Y 2019 *J. Lightwave Technol.* **37** 889
- [15] Ma C, Wang J, Yuan L B 2021 *Photonics* **8** 193
- [16] Rao Y J, Wang Y P, Ran Z L, Zhu T 2003 *J. Lightwave Technol.* **21** 1320
- [17] Wang Y P, Chen J P, Rao Y J 2005 *J. Opt. Soc. Am. B* **22** 1167
- [18] Zhang L, Liu Y, Cao X, Wang T 2016 *IEEE Sens. J.* **16** 4253
- [19] Kong X D, Ren K L, Ren L Y, Liang J, Ju H J 2017 *Appl. Opt.* **56** 4702
- [20] Zhao H, Li H P 2021 *Photonics* **8** 106
- [21] Shao L P, Liu S, Zhou M, Huang Z, Bao W J, Bai Z Y, Liu Z, Zhu G X, Sun Z Y, Zhong J L, Wang Y P 2021 *Opt. Express* **29** 43371
- [22] Mizushima R, Detani T, Zhu C L, Wang P, Zhao H, Li H P 2021 *J. Lightwave Technol.* **39** 3269
- [23] Ren K L, Ren L Y, Liang J, Kong X D, Ju H J, Xu Y P, Wu Z X 2016 *Appl. Opt.* **55** 9675
- [24] Liu W, Duan S, Du H, Jiang H, Sun C, Jin X, Zhao L, Geng T, Tong C, Yuan L B 2019 *J. Mod. Optic.* **66** 1215
- [25] Sun B, Wei W, Liao C, Zhang L, Zhang Z, Chen M Y, Wang Y 2017 *IEEE Photonic. Tech. L.* **29** 873
- [26] Bai Y, He Z, Bai J, Dang S 2021 *Appl. Phys. B* **127** 1
- [27] Liu Y, Deng H, Yuan L B 2019 *Opt. Fiber. Technol.* **52** 101950
- [28] Tachikura M 1984 *Appl. Opt.* **23** 492
- [29] Xu H X, Yang L, Han Z F, Qian J R 2013 *Opt. Commun.* **291** 207
- [30] Liu S, Zhou M, Zhang Z, Sun Z Y, Bai Z Y, Wang Y P 2022 *Opt. Lett.* **47** 2602
- [31] Fu C, Wang Y P, Liu S, Bai Z Y, Liao C, He J, Wang Y P 2019 *Sensors* **19** 4473
- [32] Ma M, Lian Y, Wang Y P, Lu Z 2021 *Front. Phys.* **9** 773505
- [33] Li Z L, Liu S, Bai Z Y, Fu C L, Zhang Y, Sun Z Y, Liu X Y, Wang Y P 2018 *Opt. Express* **26** 24114
- [34] Liu S, Zhou M, Shao L P, Zhang Z, Bai Z Y, Wang Y P 2022 *Opt. Express* **30** 21085

# Properties of off-axis helical long-period fiber gratings\*

Wang Jian<sup>1)</sup> Ma Chao<sup>2)</sup> Wang Dong-Hui<sup>2)</sup> Meng Ling-Zhi<sup>2)</sup>

Wang Hong-Ye<sup>2)</sup> Yuan Li-Bo<sup>1)†</sup>

1) (*School of Optoelectronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China*)

2) (*Key Laboratory of In-Fiber Integrated Optics, Ministry of Education, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

( Received 19 March 2023; revised manuscript received 6 May 2023 )

## Abstract

In this paper, a new four-electrode arc discharge device with large constant temperature region is designed, which is used to prepared high-quality off-axis helical long-period fiber grating. The larger constant temperature heating area is more conducive to releasing the stress of optical fiber, so that the prepared device is less off-axis. In order to show that low off-axis is a key parameter of high-quality off-axis helical long-period fiber grating, the effects of single mode fiber on transmission spectrum of off-axis helical long-period fiber grating under different coupling lengths, pitches, core refractive indexes, cladding refractive indexes, core diameters, cladding diameters and off-axis quantity are simulated by using beam propagation method. Since traditional methods are difficult to measure the off-axis helical long-period fiber grating with small off-axis quantity, the off-axis quantity of the prepared device is estimated by using the method of spectral comparison and back-thrust off-axis quantity in this work. The off-axis helical long-period fiber grating is prepared by using the established processing device. The off-axis quantities of the prepared devices are about 0.12, 0.13 and 0.16  $\mu\text{m}$ , respectively, according to the comparison between the simulated transmission spectrum and the actual spectrum. Finally, experiments on the torsional resistance and repeatability of the off-axis helical long-period fiber grating prepared by the device are carried out. The experimental results show that the prepared grating has certain torsional resistance and good spectral repeatability.

**Keywords:** off-axis helical long period fiber grating, four-electrode arc method, large constant temperature field, off-axis value

**PACS:** 07.60.Vg, 42.81.Qb, 42.81.-i

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230415

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61827819, 62265004) and the Bagui Scholars Program of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China (Grant No. 2019A38).

† Corresponding author. E-mail: [lbyuan@vip.sina.com](mailto:lbyuan@vip.sina.com)



## 离轴螺旋长周期光纤光栅特性研究

王剑 马超 王东辉 孟令知 王洪业 苑立波

### Properties of off-axis helical long-period fiber gratings

Wang Jian Ma Chao Wang Dong-Hui Meng Ling-Zhi Wang Hong-Ye Yuan Li-Bo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 130701 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230415

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230415>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 大焦深离轴超透镜的设计与制作

Design and fabrication of off-axis meta-lens with large focal depth

物理学报. 2021, 70(19): 197802 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202235>

#### 一种非对称双面离轴非球面反射镜检测补偿变焦光路设计方法

A method of designing asymmetric double-sided off-axis aspheric mirror detection compensation zoom light path

物理学报. 2019, 68(11): 114201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182253>

#### 基于矢量像差理论的离轴反射光学系统初始结构设计

Initial configuration design of off-axis reflective optical system based on vector aberration theory

物理学报. 2019, 68(13): 134201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190299>

#### Gauss声束对离轴圆柱的声辐射力矩

Acoustic radiation torque on an off-axis elliptical cylinder in Gauss beams

物理学报. 2021, 70(8): 084301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201635>

#### 结合线性回归的离轴数字全息去载波相位恢复算法

Off-axis digital holographic decarrier phase recovery algorithm combined with linear regression

物理学报. 2022, 71(4): 044202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211509>

#### 离轴抽运厄米-高斯模固体激光器

Off-axis pumped Hermite-Gaussian mode solid-state laser

物理学报. 2020, 69(11): 114202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200086>