

激光与光电子学进展

长周期光纤光栅

刘云启^{1*}, 姜晨¹, 刘祖耀^{1,2}, 赵馨艺^{1,3}¹上海大学通信与信息工程学院上海市特种光纤与光接入网教育部重点实验室, 上海 200444;²江西师范大学物理与通信电子学院江西省光电子与通信重点实验室, 江西 南昌 330022;³河南师范大学电子与电气工程学院河南省光电传感集成应用重点实验室, 河南 新乡 453007

摘要 长周期光纤光栅作为一种重要的光无源器件, 与所有光纤传感器一样具有抗电磁干扰、耐腐蚀、灵敏度高、体积小、与光纤系统兼容等优点, 在光纤传感与光纤通信领域都有广泛的应用。本文对长周期光纤光栅的模式耦合原理、理论分析方法、光栅制备技术及其在光纤传感与光纤通信领域的主要应用进行了总结分析, 其中制备技术主要总结了激光制备技术(包括紫外激光、二氧化碳激光、飞秒激光制备技术)与非激光制备技术(包括电弧放电、机械微弯、包层腐蚀、熔融拉锥、离子注入、超声调制技术), 分别介绍了长周期光纤光栅在温度、应变、弯曲、扭转和环境折射率、生化传感等方面的应用, 对于光纤通信领域的应用则侧重于全光纤滤波器、模式转换器、起偏器、模式耦合器等方面。本文是按照教程论文的形式撰写的, 旨在为相关领域的学生、科研工作者提供一个系统的介绍。

关键词 光纤光学; 长周期光纤光栅; 模式耦合; 模式转换; 光纤传感器; 光纤通信

中图分类号 TN913.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220735

Long-Period Fiber Gratings

Liu Yunqi^{1*}, Jiang Chen¹, Liu Zuyao^{1,2}, Zhao Xinyi^{1,3}¹Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Ministry of Education, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;²Key Laboratory of Optoelectronic and Telecommunication of Jiangxi Province, School of Physics and Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, Jiangxi, China;³Henan Key Laboratory of Optoelectronic Sensing Integrated Application, College of Electronic and Electrical Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453007, Henan, China

Abstract As an important passive optical component, long-period fiber gratings (LPFGs) have all the advantages of optical fiber sensors, such as anti-electromagnetic interference, corrosion resistance, high sensitivity, small volume, and compatible with fiber system, which have wide applications in the field of optical fiber sensors and optical communications. The paper summarizes the principle of mode coupling, the methods of theoretical analysis, fabrication techniques, and applications of the LPFGs in the field of optical fiber sensors and optical communications. The fabrication techniques include the laser inscribing techniques (UV laser, carbon dioxide laser, and femtosecond laser writing techniques) and non-laser techniques (arc discharge, mechanical micro-bending, cladding etching, fusion tapering, ion implantation, and acoustic wave modulation techniques). For the sensing application of the LPFGs, the characteristics of gratings on the temperature, strain, bending, torsion, and surrounding refractive index have been summarized. And their applications as all fiber filter, mode convertor, polarizer, and mode coupler have also been discussed for the applications in optical communication system. The paper is written in a tutorial style. We aim to provide a general reference for students, academics who are going to join in this field.

Key words fiber optics; long-period fiber grating; mode coupling; mode conversion; optical fiber sensors; optical communications

1 引言

广义上讲, 光波导中任何周期性的折射率调制都

可以称之为“光栅”, 光纤光栅是特指在光纤中形成的含有周期性折射率调制的一类光无源器件。根据折射率调制的周期大小, 把周期为几百纳米的光栅称为布

收稿日期: 2022-02-14; 修回日期: 2022-04-18; 录用日期: 2022-06-30; 网络首发日期: 2022-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(61875117, 62075124)

通信作者: *yqliu@shu.edu.cn

拉格光纤光栅(FBG),周期为百微米量级的光栅称为长周期光纤光栅(LPFG)。布拉格光纤光栅于1978年由Hill等^[1]提出,通过488 nm 氩离子激光在掺锗光纤中产生驻波干涉条纹,在光纤纤芯中产生周期性折射率调制。布拉格光栅可以实现纤芯基模与反向传播的纤芯模式发生耦合,透射光谱呈现出带阻滤波特性,并

且存在反射光谱。1996年,AT&T贝尔实验室的Vengsarkar等^[2]用紫外光通过振幅掩模版照射载氢的硅锗光纤,制备出了第一根长周期光纤光栅。长周期光纤光栅的结构示意图如图1所示,光纤的纤芯存在均匀的折射率调制。

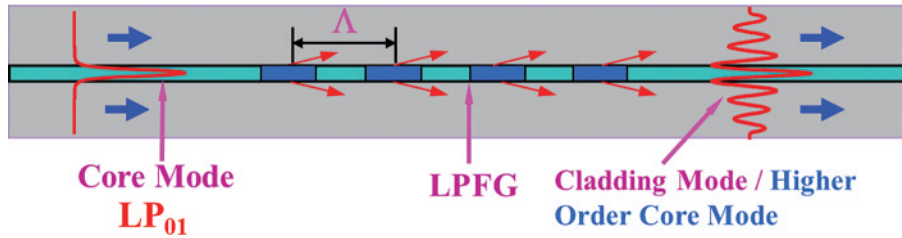


图1 长周期光纤光栅的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of LPFG

长周期光纤光栅可以实现纤芯基模与同向传输的高阶模式耦合,通常不存在反射谱,透射谱中存在一系列离散的衰减峰,衰减峰的波长称为长周期光纤光栅的谐振波长。长周期光纤光栅的模式耦合满足如下相位匹配条件^[3-4],表示为

$$\lambda = (n_{\text{eff}}^{01} - n_{\text{eff}}^{nm}) \Delta / N, \quad (1)$$

式中: λ 为光栅的谐振峰波长; n_{eff}^{01} 和 n_{eff}^{nm} 分别为基模和高阶模式的有效折射率,根据耦合的模式不同, n 和 m 分别取不同的整数值($n \geq 0, m \geq 1$); Δ 为光栅周期; N 为高阶衍射模式的级次,当 $N > 1$ 时光栅周期成倍数增大,光栅可以实现高阶衍射级的模式耦合^[5-6]。长周期光纤光栅实现模式耦合可以大致分为两类:第一类是基于纤芯基模与高阶包层模式的耦合,通常是在单模光纤中实现。紫外激光、二氧化碳激光等制备方式在光纤中引入对称的折射率调制^[7],可以实现圆对称包层模式($LP_{0m}, m \geq 2$)的耦合。相对地,电弧放电、机械压制等制备方式可以在光纤中产生非对称的折射率调制^[8],从而将纤芯基模耦合至非对称的包层模($LP_{1m}, m \geq 1$)。第二类是基于光纤纤芯模式之间的耦合,少模光纤长周期光纤光栅能够将光从纤芯基模耦合至特定的高阶纤芯模式($LP_{11}, LP_{21}, LP_{02}, \dots$),实现全光纤结构的模式转换^[9],随着光纤复用光通信技术的发展,这方面的研究近年来受到广泛关注。

2 长周期光纤光栅的理论分析方法

分析长周期光纤光栅的最常用的理论模型有耦合模理论^[10]和传输矩阵理论^[11]。耦合模理论通常用于分析均匀光纤光栅的光学特性,它最初是由Yariv^[12]于1973年引入波导光学。对于非均匀周期的长周期光纤光栅,光栅耦合系数和传播常数等沿光纤轴向变化,继续使用耦合模理论分析的计算过程较为繁琐。另外,对于折射率调制较大时(例如 10^{-2}),耦合模理论的

精度会降低。在耦合模理论的基础上,传输矩阵法多用来研究非均匀周期的长周期光纤光栅,例如相移长周期光纤光栅^[13]。

光是一种电磁波,在真空中传播时,可以用电场强度和磁感应强度来准确地描述。但是当光进入非真空时,光的传播状态会受到介质的影响。光纤在理想状态下是一种正规波导,其折射率沿着光纤的轴向分布均匀。光纤中的传导模式可以从麦克斯韦方程组推导,当光进入光纤中传播时,描述光场分布的麦克斯韦方程组可以表示为

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: \mathbf{E} 为电场强度; \mathbf{B} 为磁感应强度, $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$; \mathbf{D} 为电感应强度, $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$; \mathbf{H} 为磁场强度; ϵ 是光纤的介电常数; μ 是光纤的磁导率。

在均匀光纤中,对上述方程组进行推导可以得到亥姆赫兹方程,表示为

$$\begin{cases} \nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \\ \nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中: k 为光纤中的波数,方向是光的传输方向。 $k = \omega \sqrt{\mu \epsilon} = k_0 n, k_0 = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda_0}$, ω 为圆频率, n 为光纤材料折射率, k_0 为真空中的波数, c 为真空中的光速, f 为频率, λ_0 为真空中的波长。

光在均匀光纤中传输时 ω 保持不变,光纤内部的电磁场可以表示为

$$\begin{cases} \mathbf{E}(x, y, z) = \mathbf{e}(x, y) \exp(-i\beta z) \\ \mathbf{H}(x, y, z) = \mathbf{h}(x, y) \exp(-i\beta z) \end{cases}. \quad (4)$$

将上述电磁场方程代入到亥姆霍兹方程[式(3)]中,化简得到

$$\begin{cases} [\nabla_t^2 + (k^2 - \beta^2)] \mathbf{e} = 0 \\ [\nabla_t^2 + (k^2 - \beta^2)] \mathbf{h} = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

式中:下标 t 表示横向,即垂直于 z 方向; l_z 表示沿 z 向的单位矢量。光纤的模式就是式(5)的解。对于给定的边界条件,方程组可以解出无穷多个离散的解 $\{\mathbf{e}_i(x, y), \mathbf{h}_i(x, y), i = 1, 2, 3, \dots\}$ 。光纤中的光场分布就是这些解的线性组合。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{bmatrix}(x, y, z) = \sum_i \begin{bmatrix} a_i \mathbf{e}_i \\ b_i \mathbf{h}_i \end{bmatrix}(x, y) \exp(-i\beta_i z), \quad (6)$$

式中: a_i 和 b_i 为加权系数。

长周期光纤光栅的模式耦合属于同向传输的基模和高阶模之间的耦合,能量在模式之间发生相互转移。在单模光纤中,纤芯中只能传输基模,而包层中存在许多模式。在少模光纤中,纤芯可以支持两个或者更多

的模式。在理想光纤中,光纤在轴向是完全一致的,不同模式相互正交。互不干扰,在传输过程中模式能量保持恒定。

完整的长周期光纤光栅的理论模型包含纤芯、包层和外界环境三层模型,如图 2 所示。其中 n_1 和 n_2 分别是纤芯和包层的折射率, a_1 和 a_2 分别是纤芯和包层的半径,外界环境的折射率为 n_3 。一般把满足 $(n_1 - n_2)/n_2 \ll 1$ 的光纤称为弱导光纤。为了简化计算,在计算纤芯模式时,将第三层外部环境忽略,只考虑纤芯和包层。当计算包层模式时,将纤芯和包层看成一体,研究包层和外界环境两层模型。在简化计算时,我们可以采用线偏模式(LP 模)来研究长周期光纤光栅的电磁场,LP 模式和矢量模式的对应关系为

$$\begin{cases} HE_{1n} \leftrightarrow LP_{0n} \\ HE_{2n} + TE_{0n} \leftrightarrow LP_{1n} \\ HE_{2n} + TM_{0n} \leftrightarrow LP_{1n} \\ HE_{m+1,n} + EH_{m-1,n} \leftrightarrow LP_{mn} \quad (m \geq 2, n \geq 1) \end{cases}. \quad (7)$$

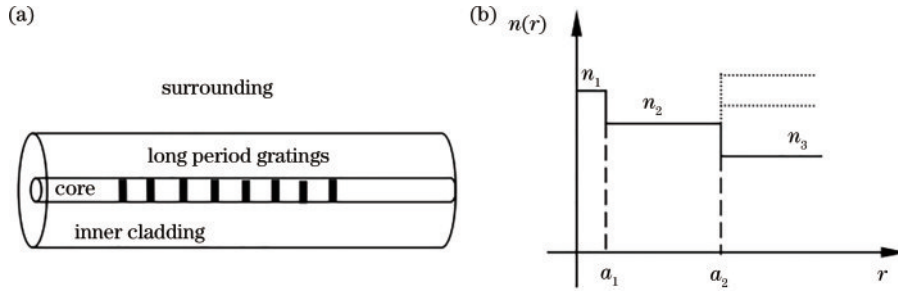


图 2 长周期光纤光栅。(a)三层结构模型;(b)截面折射率分布

Fig. 2 LPPG. (a) Three-layer structure model; (b) transverse refractive index

对于光纤来说,要在纤芯中形成导模,必须要满足纤芯模式的有效折射率在纤芯和包层的折射率之间,也即 $k_0 n_2 < \beta_{co} < k_0 n_1$,此时光主要集中在纤芯中振荡径向传播,在包层中按指数迅速衰减。基模在纤芯和包层的场分布可以表示为

$$h_x(r, \phi) = -\frac{\omega \epsilon}{\beta} \begin{cases} a_0 J_m \left(\frac{U}{a_1} r \right) \exp(jm\phi), & (0 \leq r \leq a_1) \\ b_0 K_m \left(\frac{W}{a_1} r \right) \exp(jm\phi), & (r > a_1) \end{cases}, \quad (8)$$

$$e_z(r, \phi) = \begin{cases} a_0 \frac{j}{\beta} \exp(jm\phi) \left[\frac{U \sin \phi}{a_1} J'_m \left(\frac{Ur}{a_1} \right) + j \frac{m \cos \phi}{r} J_m \left(\frac{Ur}{a_1} \right) \right], & (0 \leq r \leq a_1) \\ b_0 \frac{j}{\beta} \exp(jm\phi) \left[\frac{W \sin \phi}{a_1} K'_m \left(\frac{Wr}{a_1} \right) + j \frac{m \cos \phi}{r} K_m \left(\frac{Wr}{a_1} \right) \right], & (r > a_1) \end{cases}, \quad (9)$$

$$h_z(r, \phi) = \begin{cases} a_0 \frac{-j}{\omega \mu_0} \exp(jm\phi) \left[\frac{U \cos \phi}{a_1} J'_m \left(\frac{Ur}{a_1} \right) - j \frac{m \sin \phi}{r} J_m \left(\frac{Ur}{a_1} \right) \right], & (0 \leq r \leq a_1) \\ b_0 \frac{-j}{\omega \mu_0} \exp(jm\phi) \left[\frac{W \cos \phi}{a_1} K'_m \left(\frac{Wr}{a_1} \right) - j \frac{m \sin \phi}{r} K_m \left(\frac{Wr}{a_1} \right) \right], & (r > a_1) \end{cases}, \quad (10)$$

式中: $U = (k_0^2 n_1^2 - \beta^2) a^2$; $W^2 = (\beta^2 - k_0^2 n_2^2) a^2$; $U^2 + W^2 = V^2$; a_1 为光纤纤芯半径, a_0 和 b_0 为待定系数; J_m 是第一类贝塞尔函数; K_m 是修正的第二类贝塞尔函数; m 是函数的阶次; β 为传播常数。

对于纤芯模式,电场在 r 方向和 z 方向的分量在纤

芯和包层的界面连续,通过这个边界条件可以求解特征方程得出纤芯模式的有效折射率。对于包层模式,使用矢量模式进行求解可以得到更为精确的模场分布。首先求出单模光纤中包层模的场分布表达式,利用边界连续性条件得出包层模的特征方程,从而得到

包层模的有效折射率。再利用功率归一化条件确定模场的归一化系数,进一步可得到包层模场的功率分布图。当纤芯折射率为 1.4671,包层折射率为 1.4614,纤芯半径为 $3.8 \mu\text{m}$,包层半径为 $62.5 \mu\text{m}$ 时,按照式(2)~(10)进行计算,得到纤芯基模有效折射率随波长的增加而近似单调地减小,如图 3 所示。单模光纤只支持单个的纤芯模式,也就是 LP_{01} 模,对于少模光纤,纤芯可以支持两个或者更多的模式。前 8 个低阶纤芯模式的截面能量分布如图 4 所示。

按照式(2)~(10)的纤芯包层数据进行计算,第一阶衍射级的前 19 阶次包层模的有效折射率随波长的变化情况如图 5 所示。随着波长的增加,包层模有效折射率呈现单调减小的变化规律,且模式阶次越高,有效折射率就越小。图 6 是仿真的单模光纤长周期光纤

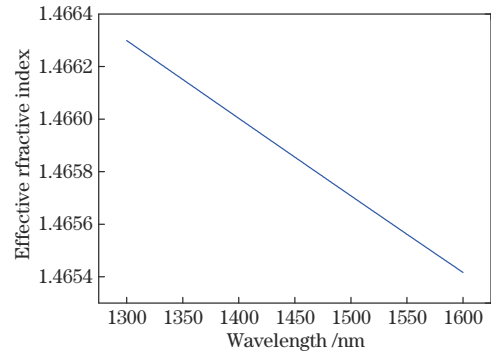


图 3 纤芯基模有效折射率随波长的变化
Fig. 3 Change of effective refractive index of core fundamental mode with wavelength

光栅圆对称折射率调制激发的 4 个低阶包层模式在光纤截面的能量分布。

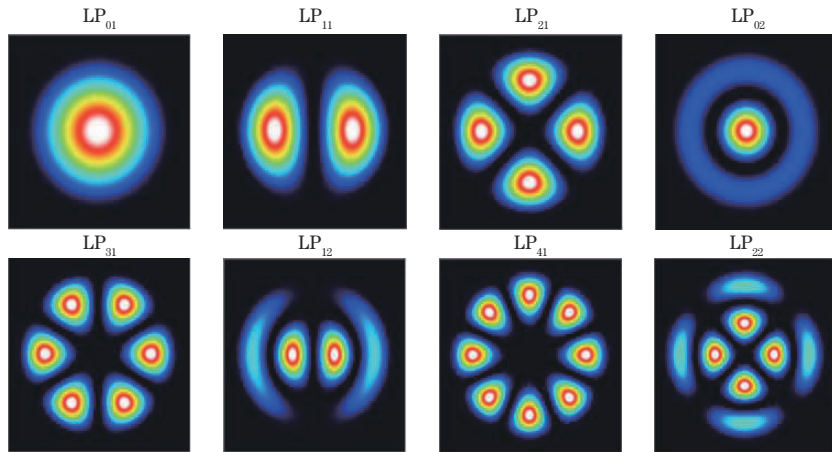


图 4 8 个低阶纤芯模式的能量分布

Fig. 4 Intensity distributions of the 8 lower order core modes

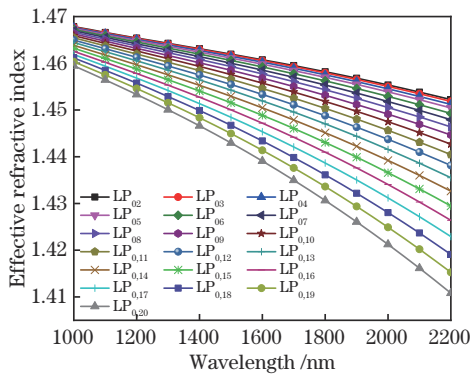


图 5 第一阶衍射级前 19 次包层模的有效折射率随波长的变化
Fig. 5 Change of effective refractive index of cladding modes with wavelength for the first 19 times before the first diffraction order

在理想的光纤中,各个模式相互正交,在传播过程中不会相互干扰,模式传播的能量也很稳定。当光纤中存在微扰,比如结构轻微变化或者折射率不均匀时,模式之间不正交将引起能量的交换,也就是模式耦合。一般长周期光纤光栅的折射率调制在 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 的范

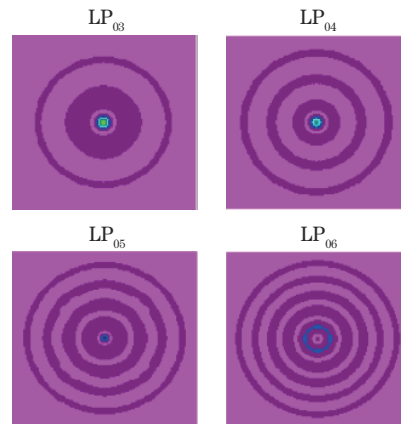


图 6 长周期光纤光栅圆对称折射率调制激发的 4 个低阶包层模式在光纤截面的能量分布

Fig. 6 Intensity distributions of four low order cladding modes excited by circularly symmetric refractive index modulation of LPFG across the fiber cross-section

围,因此可将光栅的作用简化为纤芯微扰。完整的光栅透射谱需要计算对每一个包层模式对应的透射谱再进行叠加,但实际上高阶包层模同纤芯模的耦合效率

远比低阶包层模式低,所以可以根据精确程度对透射谱的计算进行简化。

假定长周期光纤光栅的周期性折射率调制是矩形调制,且在光纤纤芯圆对称分布,折射率调制在纤芯的截面是均匀分布,只沿光纤轴向变化,且假定光纤的折射率调制只在纤芯中,包层折射率不变。纤芯折射率的分布可以表示为

$$n_{\text{co}}(z) = n_1 + \delta n(z). \quad (11)$$

沿 z 轴的纤芯折射率改变量 $\delta n(z)$ 可以表示为

$$\delta n(z) = \Delta n \text{rect}(z/\Lambda). \quad (12)$$

且有

$$\text{rect}(z/\Lambda) = \begin{cases} 1, & n\Lambda \leq z \leq n\Lambda + p\Lambda \\ 0, & n\Lambda + p\Lambda < z \leq (n+1)\Lambda \end{cases}, \quad (13)$$

$$(n = 0, 1, 2, \dots, N; 0 < p < 1),$$

式中: p 称为光栅的占空比,在采用逐点扫描法制备的长周期光纤光栅中, p 取决于激光器的光斑尺寸和长周期光纤光栅的周期; n 是光栅长度 L 内包含的周期数。

长周期光纤光栅中模式的耦合可以分成两类,一类是纤芯模式同包层模式的耦合,另一类是包层模式的自耦合,对于理想的长周期光纤光栅来说,前者的耦合效率远大于后者,因此包层模式之间的耦合可以忽略不计,简化后的长周期光纤光栅耦合方程可以表示为

$$\frac{dA^{\text{co}}}{dz} = i\kappa_{11}^{\text{co-co}} A^{\text{co}} + \frac{i}{2} \sum_{\nu} \kappa_{1\nu}^{\text{cl-co}} A_{\nu}^{\text{cl}} \times \sum_{m=1}^{+\infty} [A_m \exp(-i2\delta_{1\nu-11}^{\text{cl-co}} z)]$$

$$\sum_{\nu} \left\{ \frac{dA_{\nu}^{\text{cl}}}{dz} + i\kappa_{1\nu}^{\text{cl-co}} A^{\text{co}} \times \sum_{m=1}^{+\infty} [A_m \exp(-i2\delta_{1\nu-11}^{\text{cl-co}} z)] \right\}, \quad (14)$$

式中: A^{co} 和 A_{ν}^{cl} 分别是纤芯基模和第一阶 ν 次包层模的 z 正向振幅; $k_{11}^{\text{co-co}}(z)$ 和 $k_{1\nu}^{\text{cl-co}}(z)$ 分别为纤芯基模的自耦合常数和纤芯基模与第一阶 ν 次包层模之间的互耦合常数。

$$k_{11}^{\text{co-co}}(z) = \frac{\omega \epsilon_0 n_1^2 \sigma(z)}{2} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{a_1} r dr (|E_r^{\text{co}}|^2 + |E_{\phi}^{\text{co}}|^2), \quad (15)$$

$$k_{1\nu}^{\text{cl-co}}(z) = \frac{\omega \epsilon_0 n_1^2 \sigma(z)}{2} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{a_1} r dr (E_r^{\text{cl}} E_r^{\text{co}*} + E_{\phi}^{\text{cl}} E_{\phi}^{\text{co}*}), \quad (16)$$

式中: $\delta_{1\nu-11}^{\text{cl-co}}$ 是纤芯基模与一阶 ν 次包层模式间的解调参量。定义为

$$\delta_{1\nu-11}^{\text{cl-co}} = \frac{1}{2} \left(\beta_{11}^{\text{co}} - \beta_{1\nu}^{\text{cl}} - \frac{2\pi}{\Lambda} \right). \quad (17)$$

当 $\delta_{1\nu-11}^{\text{cl-co}} = 0$ 时,长周期光纤光栅纤芯基模与包层模相位匹配。因此,相位匹配条件为 $\beta_{11}^{\text{co}} - \beta_{1\nu}^{\text{cl}} - 2\pi/\Lambda = 0$, $\nu = 2, 3, 4, \dots$ 或 $n_{\text{eff}}^{\text{co},11}(\lambda) - n_{\text{eff}}^{\text{cl},1\nu}(\lambda) = \lambda/\Lambda$, $\nu = 2, 3, 4, \dots$, 式中: $n_{\text{eff}}^{\text{co},11}(\lambda) = \beta_{11}^{\text{co}}/k$, 为纤芯基模的有效折射率; $n_{\text{eff}}^{\text{cl},1\nu}(\lambda) = \beta_{1\nu}^{\text{cl}}/k$, 为一阶 ν 次包层模式的有效

折射率。各阶包层模式与纤芯基模的互耦合常数随模式阶次增加的变化情况如图 7 所示。

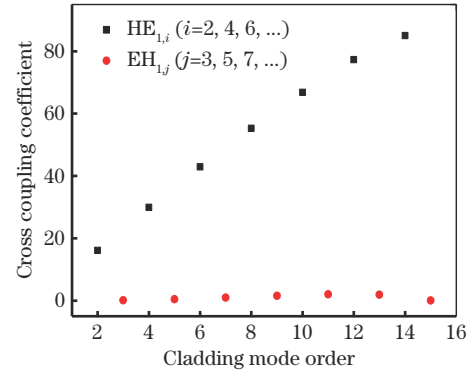


图 7 纤芯基模与包层模式的互耦合常数随模式阶次的变化
Fig. 7 Variation of coupling constants between fundamental core mode and cladding mode on the cladding mode order

假定长周期光纤光栅栅区前光纤中的能量为 1, 以栅区的起始点为原点, 则 $|A^2(0)| = 1$ 。经过长度为 L 的栅区, 基模同包层模将进行能量交换, 在栅区结束处纤芯基模能量为 $|A^2(L)|$, 定义长周期光纤光栅的透射率为

$$T(\lambda) = |A(L)|^2 = \cos^2(\sqrt{\hat{\sigma}^2 + \kappa^2} L) + \frac{1}{1 + \kappa^2/\hat{\sigma}^2} \sin^2(\sqrt{\hat{\sigma}^2 + \kappa^2} L), \quad (18)$$

式中: $\hat{\sigma}$ 为直流耦合系数, 定义为 $\hat{\sigma} = \delta + \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2}$

$\frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz}$; δ 即为上述纤芯导模与一阶 ν 次包层模式间的解调参量 $\delta_{1\nu-11}^{\text{cl-co}}$; σ_{11} 为纤芯模式的自耦合系数, σ_{22} 为包层模的互耦合系数。对于均匀的长周期光纤光栅, $\frac{d\phi}{dz} = 0$; κ 为纤芯基模和包层模式之间的变形耦合系数, 对于矩形折射率调制长周期光纤光栅, $\kappa = \frac{2}{\pi} k_{1\nu-11}^{\text{cl-co}}$ 。

图 8 为实验测量的硼锆共掺单模光纤中写入的长

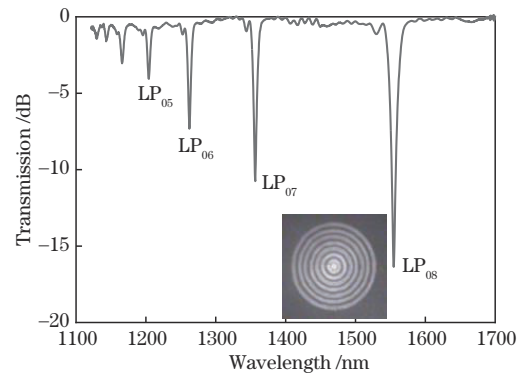


图 8 硼锆共掺单模光纤长周期光纤光栅的透射谱及谐振峰
模场分布
Fig. 8 Transmission spectra and mode pattern of LPFG fabricated in B-Ge-codoped single-mode fiber

周期光纤光栅的典型透射光谱,图中不同透射峰对应不同阶次的高阶包层模,从长波方向随波长减少包层模阶次依次减小,其中,波长接近 1550 nm 的谐振峰对应的包层模式为 LP_{08} 模,模式强度分布如插图所示。由图 8 可知,长周期光纤光栅耦合的高阶包层模具有圆对称的模场分布。图 9(a) 为长周期光纤光栅的前

19 个包层模式, $LP_{0,2}$ 模~ $LP_{0,20}$ 模的相位匹配曲线,图 9(b) 为放大的 $LP_{0,11}$ 模~ $LP_{0,20}$ 模的相位匹配曲线。由图可知,在色散拐点两侧光栅谐振波长随光栅周期的变化趋势相反,一般可以根据计算的相位匹配曲线确定合适的光栅周期,从而制备包含相应阶次包层模的长周期光纤光栅。

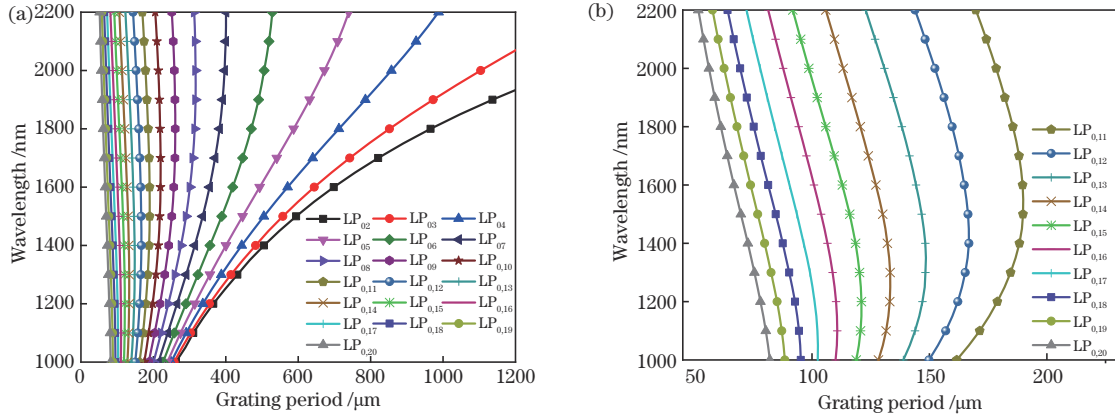


图 9 长周期光纤光栅包层模式的相位匹配曲线。(a) $LP_{0,2}$ 模~ $LP_{0,20}$ 模; (b) $LP_{0,11}$ 模~ $LP_{0,20}$ 模

Fig. 9 Phase matching curves of the cladding modes of LPFG. (a) $LP_{0,2}$ mode to $LP_{0,20}$ mode; (b) $LP_{0,11}$ mode to $LP_{0,20}$ mode

3 长周期光纤光栅的制备方法

制备长周期光纤光栅有很多方法,按照在制备过程中是否使用激光,可以将长周期光纤光栅的制备方法分为两类:基于激光刻写的技术和非激光的技术。其中基于激光的刻写方法包括紫外激光曝光法、二氧化碳激光刻写法、飞秒激光刻写法。我们把其他不使用激光技术制备长周期光纤光栅的方法归为非激光法,主要包含了电弧放电法、机械微弯法、包层刻蚀法、熔融拉锥法、离子注入法、超声调制法等。两种类型的写入方法各有优缺点,基于非激光的成栅方法一般成本较低、工艺简单,精度一般较激光写入方法低。基于激光刻写的方法精度更好,重复性好,但是成本相对较高。各种制备技术的主要特点如下所述。

3.1 紫外激光写入法

1996年,Vengsarkar等^[2]利用紫外激光通过振幅掩模版曝光载氢光纤成功制备了第一根长周期光纤光栅。振幅掩模版曝光法是目前最常用的紫外激光写入长周期光纤光栅方法^[14-17]。紫外激光曝光或者

直写的方法是利用掺锗光纤或者载氢光纤的光敏性成栅,由于掺锗光纤或者载氢光纤对紫外光有较强的吸收,激光曝光之后纤芯折射率会产生周期性调制进而形成光栅。该方法制作的光栅一致性较好,而且对紫外光的相干性没有要求。除了振幅掩模版之外,研究人员还提出了其他基于紫外曝光的方法,比如说微透镜阵列法等,这些方法主要的不同之处使用了不同的振幅模板提高光栅的写入效率。除了利用紫外激光曝光幅值模板以外,另一种基于紫外激光的写入方法是逐点写入法^[18]。这种方法利用聚焦透镜将紫外激光的光斑压缩到几十微米的直径,然后截取一束紫外脉冲光对光纤进行逐点曝光。将光束或者光纤进行移动就可以在光纤上周期性曝光形成长周期光纤光栅。紫外激光辐射法常用的光源为:193 nm ArF 准分子激光器、248 nm KrF 准分子激光器、244 nm 倍频氩离子激光器等。该方法的优点是光栅透射谱质量高、重复性好,缺点是局限于光敏性光纤或者需要光纤载氢处理、光栅高温易擦除。图 10^[19]为紫外激光通过振幅掩模版曝光和点对点直写制备长周期光

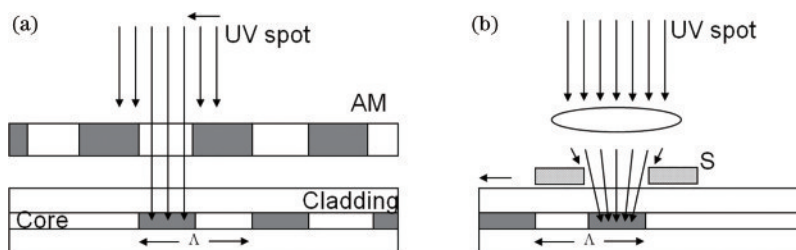


图 10 紫外激光制备长周期光纤光栅的原理示意图。(a) 振幅掩模版曝光法, (b) 点对点直接写入法^[19]

Fig. 10 Schematic diagram of the LPFG inscription by the UV laser techniques. (a) Amplitude mask exposure technique; (b) point by point inscribing method^[19]

纤光栅的原理图。

紫外激光写入长周期光纤光栅的典型光谱如图 8 所示,通常紫外激光只在光敏光纤的纤芯中形成周期性的折射率调制,因此光栅会将纤芯基模耦合至圆对称的高阶包层模 LP_{0m} 模。

3.2 二氧化碳激光辐照法

二氧化碳激光辐照法是利用光纤对 $10.6 \mu\text{m}$ 的激光吸收来实现光纤内的折射率调制^[20-28]。在实验过程中移动光纤或者激光光束,可以在光纤中形成周期性折射率调制来制备长周期光纤光栅。使用二氧化碳激光刻写长周期光纤光栅不要求光纤的光敏性,不需要掩模版。光栅的周期和周期数都可以灵活变化。早期使用的二氧化碳激光长脉冲具有较强的热扩散效应,纤芯模与包层模的耦合不彻底,容易形成较大的插入损耗^[20]。2003年,Wang等^[22-23]对二氧化碳激光辐照法进行了改进,提出了一种用计算机控制的二氧化碳激光扫描法,利用聚焦的二氧化碳激光点点写入,提高了光栅的写入效率和光栅质量。Liu等^[7, 26]研究了光纤退火、二氧化碳激光的能量密度和写入过程施加轴向应力对光栅耦合效率的影响,研究了不同刻写条件下光纤玻璃结构变化对光致折射率调制的影响。

二氧化碳激光制备长周期光纤光栅的机理大致可以归结为四类:残余应力释放^[21],玻璃结构变化^[7],光纤物理形变^[25],冻结黏弹力^[26]。使用二氧化碳激光器在掺硼光纤上制备长周期光纤光栅的典型透射谱如图 11 所示,其中,波长为 1531 nm 的峰对应的模式是 LP_{07} 模。由图可知,利用二氧化碳激光器制备的长周期光纤光栅具有与紫外激光写入长周期光纤光栅相似的透射光谱和模场分布。

由于光纤对 $10.6 \mu\text{m}$ 波长的二氧化碳激光的强吸收作用,二氧化碳激光沿入射方向在光纤截面逐渐减弱,即入射光强在光纤的入射侧较强,这导致光纤横截面内的折射率变化不对称,光纤受到曝光的一面的折

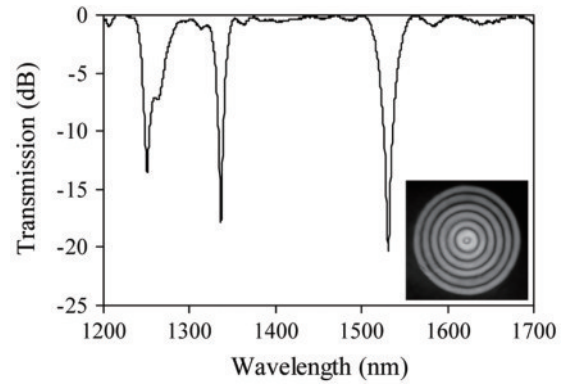


图 11 二氧化碳激光器在掺硼光纤上刻写长周期光纤光栅的典型光谱(波长为 1531 nm 谐振峰的近场模式图)^[7]

Fig. 11 Typical transmission spectrum of a carbon dioxide laser written LPFG in a commercial B-Ge-codoped fiber (together with an image of the near-field pattern of the coupled LP cladding mode at the resonance wavelength of 1531 nm)^[7]

射率调制大于另一面,形成非对称的折射率梯度分布,因此耦合的包层模式也可能为 LP_{1m} 模。对于重掺杂的光纤,其纤芯的玻璃软化温度降低,因此仅采用较弱的二氧化碳激光曝光即可制备具有较高对比度的长周期光纤光栅,激光引起的折射率调制基本上是圆对称的,此时耦合的包层模式为 LP_{0m} 模。

2004年,Oh等^[29]提出了一种利用二氧化碳激光器制作螺旋长周期光纤光栅的方法。传统的光纤光栅沿光纤轴具有周期性的垂直折射率变化,而利用单面激光照射并同时旋转和移动光纤引起的不对称折射率变化,可以得到螺旋式的折射率调制。2016年,Zhang等^[30]使用二氧化碳激光器对光纤进行旋转加工,在两模光纤上制备了螺旋长周期光纤光栅,实现了高灵敏度的光纤扭转传感器和高阶纤芯模式转换器。使用二氧化碳激光器制备螺旋长周期光纤光栅的实验装置图如图 12 所示。

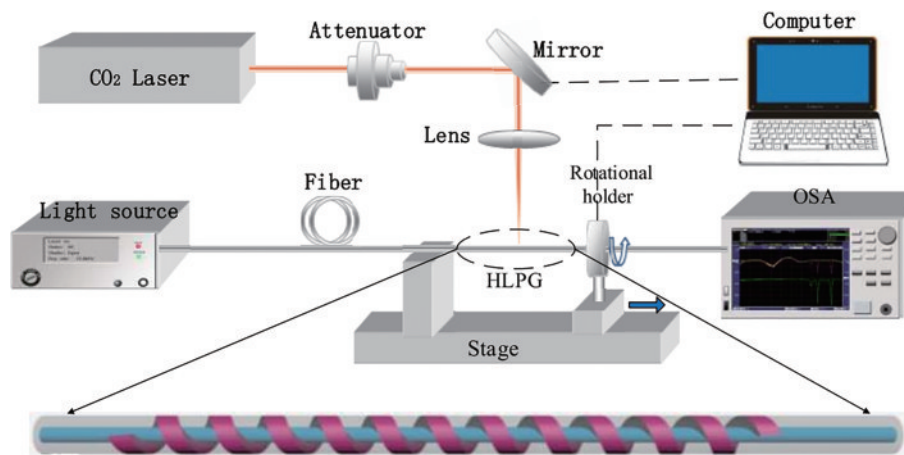


图 12 二氧化碳激光器制备螺旋长周期光纤光栅的装置示意图^[30]

Fig. 12 Schematic diagram of the experimental setup for the fabrication of helical LPFG with carbon dioxide laser^[30]

光纤由一个旋转位移平台控制,可以根据需求改变光纤的转速和轴向移动速度以改变螺旋长周期光纤光栅的螺距,从而制备不同谐振波长和谐振峰对比度的螺旋长周期光纤光栅。不同螺旋长周期光纤光栅制备技术的提出,得益于手征长周期光纤光栅的提出,Kopp等^[31]于2004年提出通过高温炉加热熔融并同时扭转光纤,从而制备手征长周期光纤光栅的方法。由于近年来光纤模分复用技术与全光纤涡旋光产生等方面的研究进展,螺旋长周期光纤光栅的研究受到了更多的关注,发展出了基于不同热处理方法的制备技术,例如热源采用高温炉^[31]、二氧化碳激光^[30, 32-35]、氢氧焰^[36-38],以及基于二氧化碳激光加热或者电弧放电的专业光纤熔接机^[39-40]等。

3.3 飞秒激光辐照法

飞秒激光辐照法的出现是激光加工领域的一个重大突破。飞秒脉冲具有超短、超快、高能等优点,可以进行点对点的精确加工,为长周期光纤光栅的制备提供

了新的手段。但这种制作技术需要昂贵的飞秒激光器与高精度的位移控制设备,加工成本较高。1999年Kondo等^[41]首次报道了使用800 nm波段脉冲宽度为120 fs重复频率120 kHz的飞秒激光脉冲制备了长周期光纤光栅。2001年,Fertein等^[42]研究了使用810 nm的飞秒激光刻写的长周期光纤光栅的折射率变化可达 6×10^{-3} 。Hindle等^[43]利用飞秒激光辐射将长周期光纤光栅写入到掺锗光纤和纯硅芯光纤中,掺锗光纤写入的长周期光纤光栅具有16 dB的谐振峰对比度和0.3 dB的额外插入损耗,光栅的折射率调制深度达到了 3×10^{-4} 。此后还有在光子晶体光纤^[44]和保偏光纤^[45]中使用飞秒激光制备长周期光纤光栅的报道。图13^[41]为飞秒激光器刻写长周期光纤光栅的实验装置图。光纤固定在计算机控制的三轴位移台上,使用飞秒激光脉冲对光纤逐点刻写,通过安装在显微镜上的CCD摄像机观察飞秒脉冲聚焦辐照过程中产生的结构变化等特征。

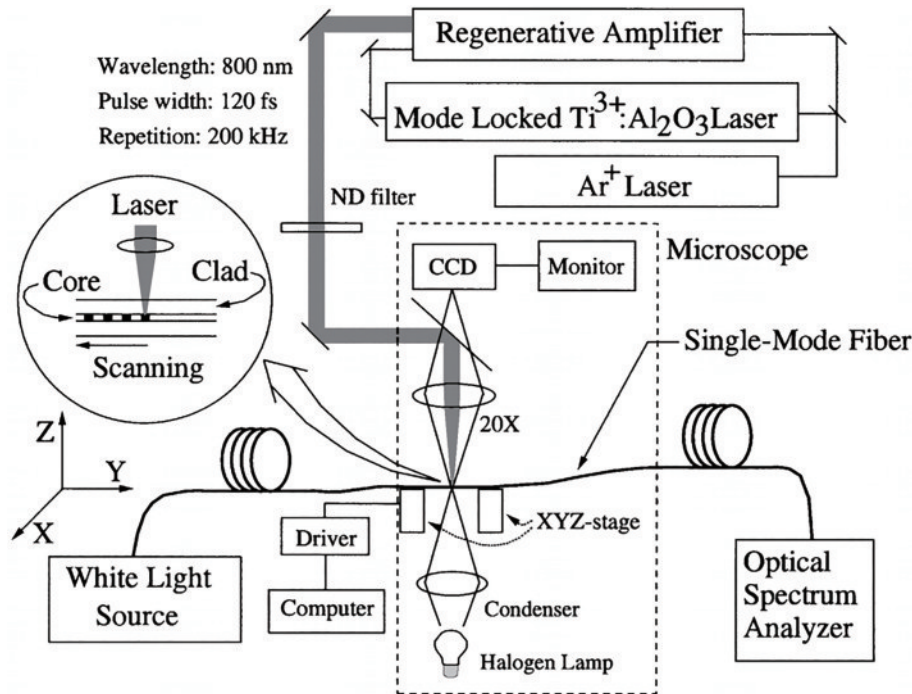


图13 飞秒激光器刻写长周期光纤光栅的实验示意图^[41]

Fig. 13 Schematic diagram of experimental setup for LPFG fabrication technique with femtosecond laser^[41]

3.4 电弧放电法

1999年,Hwang等^[46]首次报道了使用电弧放电的方法在光纤上成功地写入了长周期光纤光栅,并研究了光栅形成的基本机理。实验证明由电弧放电制备的长周期光纤光栅在高温下具有良好的热稳定性。电弧放电法是通过放电使光纤发生微弯而形成长周期光纤光栅的,如图14所示。光纤轴向移动过程中,两个电极对光纤进行周期性放电形成长周期光纤光栅^[47]。该方法简便、容易控制、不需要掺杂光纤和光纤载氢,可以通过调整电弧电流的大小和光纤被加热区域的大小

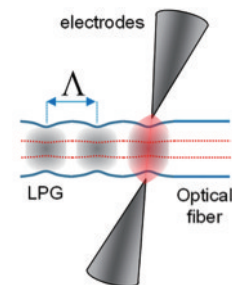


图14 电弧放电法制备长周期光纤光栅的示意图^[47]

Fig. 14 Schematic diagram of arc-induced LPFG^[47]

来控制长周期光纤光栅的光谱特性,但是光栅制备的重复性一般^[48]。各种因素变化都会对光栅制备重复性有影响,包括光纤与电极之间相对位置的变化、电极退化及其在替换时的重新定位、光纤或电极上的灰尘以及环境条件(如湿度)的变化。由于电弧放电的尺寸随电极间隙的增大而增大,所制备长周期光纤光栅的周期不能做到很小^[49]。电弧放电法制备的长周期光纤光栅已经在很多不同种类的光纤上实现^[47,50-51]。由于显而易见的电弧放电引起的非对称折射率调制,一般该类光栅是将纤芯基模的光耦合至 LP_{1m} 模式。

3.5 机械微弯法

机械微弯法使用周期性刻槽板等挤压光纤形成长周期光纤光栅^[52-56]。机械微弯法成栅的主要机理是光纤的弹光效应引起的折射率调制,周期排布的锯齿结构挤压光纤侧面会在光纤中形成具有同样周期性的微弯曲结构,进而引起光纤轴向的周期性折射率变化形成长周期光纤光栅。使用机械微弯法在少模光纤上可以实现纤芯模式之间的转换。Blake 等^[57]于 1986 年使用周期性机械微弯的方法挤压两模光纤实现了 LP_{01} 模至 LP_{11} 模的转换,并且 LP_{11} 模的转换效率达到 99.68%,这是早期的机械光栅实现光纤模式转换的实验演示,从这种角度看“长周期光纤光栅”的制备远早于 1996 年。由于机械微弯产生的折射率调制为非对称,所以模式转换具有偏振特性。

图 15 所示的机械光栅是使用周期性刻槽板和一个平板对光纤进行压制得到的。其中受压光纤长度为 3.5 cm,当调整光纤与刻槽的夹角时,光栅的周期会相应地变化。当改变施加在光纤上的压力时,光栅的透射谱也会发生相应的变化,如图 16 所示,当压力从 P_1 增大到 P_4 时,两个谐振峰由浅变深,但是当压力继续增大到 P_5 时,短波方向的峰开始变浅,而长波方向的峰继续加深。说明施加压力越大,在光纤中形成的微弯曲更明显从而模式的耦合效率也更高,但是当超过某个值时,光栅的对比度反而减小是由于光栅谐振峰过耦合引起的。这种制备方法对光纤光敏性无要求,可以用于任何光纤,通过改变施加压力的大小以及刻槽的周期可以改变长周期光纤光栅的光谱特性,当刻槽板压力减弱直至消失时,光栅会退化最终恢复成原本光纤的状态。所以,机械压制长周期光纤光栅的形

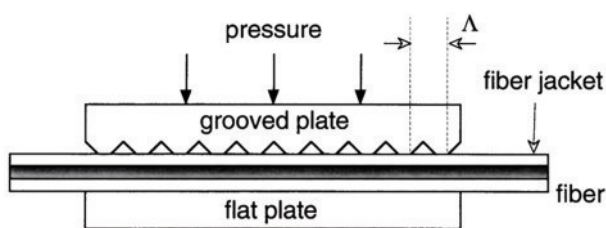


图 15 机械微弯长周期光纤光栅的侧面示意图^[52]
Fig. 15 Side view of a mechanically induced LPFG^[52]

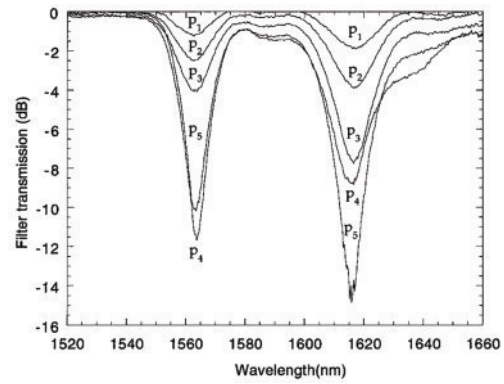


图 16 机械微弯长周期光纤光栅透射谱随受压力的变化^[52]
Fig. 16 Transmission spectra of mechanically induced LPFG with increasing applied pressure^[52]

成具有可逆性,模式耦合强度和谐振波长可调谐并具有重复性。机械微弯制备的长周期光纤光栅一般是将光从纤芯基模耦合至 LP_{1m} 模,对于单模光纤对应的是 LP_{1m} 包层模,对应少模光纤而言则是 LP_{1m} 纤芯模。目前采用机械方法还可以在光子晶体光纤^[53]、硫化物光纤^[54]等特殊的光纤上制备长周期光纤光栅。

机械微弯制备长周期光纤光栅的优点是光栅周期可以灵活控制,因此在很多原理研究实验中被广泛采用,但机械装置通常对器件防震条件有较高要求,而且机械微弯制备的长周期光纤光栅存在退化明显的缺点,光栅特性易随时间有不同变化,这一缺点会对实际应用有一定限制。

3.6 包层刻蚀法

包层刻蚀法使用氢氟酸等将石英光纤的包层进行腐蚀形成周期性结构^[58-62]。由于光纤的结构遭到了一定程度的改变或者破坏,导致光纤内部部分残余应力释放,形成折射率调制,刻蚀区域的纤芯和包层模式的有效折射率也会发生变化。该类光栅在受到不同程度的应力时,谐振峰会产生很明显的改变,可以作为谐振深度可调谐的滤波器等应用。图 17^[58]所示是使用氢氟酸刻蚀光纤包层后形成的光栅的结构示意图。制备过程中光纤包层的部分区域周期性附着了很薄的金属层,这些金属层不同氢氟酸发生反应,同时也保护了相应位置的包层,没有附着金属的包层被氢氟酸腐蚀,最

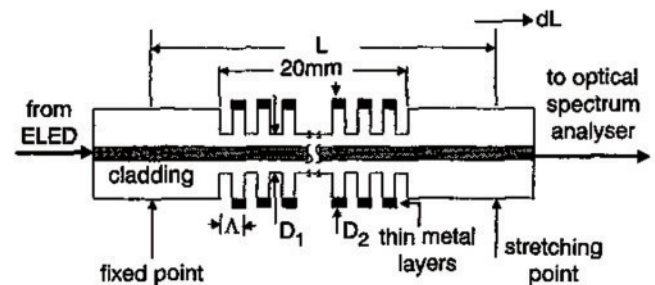


图 17 氢氟酸刻蚀长周期光纤光栅示意图^[58]
Fig. 17 Schematic diagram of HF etched LPFG^[58]

后会形成图中的结构。图 18 为刻蚀包层的长周期光纤光栅受到一定的轴向应力时透射光谱的变化。不施加应力时,谐振波长处的光栅对比度约为 1.2 dB,随着应力的增加,谐振峰深度加深。最深的深度约为 25 dB。

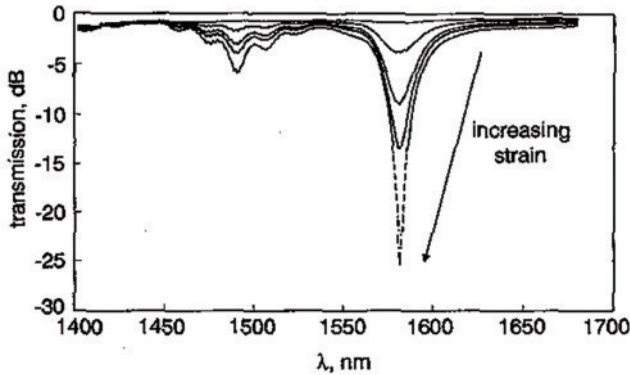


图 18 刻蚀长周期光纤光栅受到应力时光谱的变化^[58]

Fig. 18 Evolution of transmission spectra when strain is applied to the etched LPFG^[58]

该方法在波导光栅器件的制备中有较多类似的应用,利用强激光在光纤表面刻蚀也可以形成类似包层刻蚀类型的长周期光纤光栅^[25]。这种技术的优点是制备的光栅具有较高的应变、弯曲灵敏度。缺点是刻蚀后光栅的机械性能下降,并且制备过程中容易引起光纤额外的插入损耗。

3.7 熔融拉锥法

熔融拉锥法制作长周期光纤光栅也是利用外部热源对光纤进行加工进而产生周期性的结构变化。通常使用的热源有氢氧焰^[63]、电弧放电^[64-66]、电极加热^[67]、二氧化碳激光^[68-70]等。但是同之前的方法不同之处在于,这种方法在加热光纤的过程中需要同时对光纤施加轴向拉力,从而形成周期性的拉锥区域。熔融拉锥法制备长周期光纤光栅的机理更为复杂,除了加热区域的残余应力释放,光纤纤芯还会出现轻微的膨胀现象,并且由于光纤的直径和折射率都发生了改变,光纤有效折射率也会发生变化,这些机理相互作用使光纤内部产生了折射率调制进而形成光栅。图 19^[66]是使用电弧放电作为热源对单模光纤进行熔融拉锥制备长周期光纤光栅的实验示意图。实验中对光纤做周期性

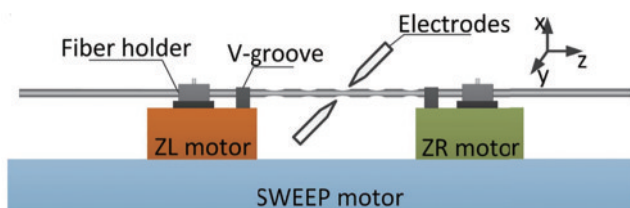


图 19 熔融拉锥法制备长周期光纤光栅的实验示意图^[66]

Fig. 19 Schematic diagram of the experimental setup for fabrication of the micro-tapered LPFG^[66]

的轻微拉锥,形成的光栅可以明显降低额外插入损耗,同时保证光纤结构的完整性,结构强度较高。

3.8 离子注入法

离子注入法利用串联加速器,将 He 离子在真空中通过金属振幅掩模注入光纤包层和纤芯中^[71-73]。离子注入法制备长周期光纤光栅的主要原理是由于光纤在注入大量离子之后,离子与光纤内部原子核发生相互作用,使光纤的密度增加,进而增大了注入区域的折射率,周期性注入离子后在光纤中形成光栅。实验示意图如图 20^[71]所示,其中 He 离子的加速能最大可达 5.1 MeV。由 Ni: Co 制成的金属掩模,周期为 170 μm,光栅间距为 60 μm。离子注入法可以给光纤带来高达 0.01 量级的折射率改变,并且形成的光栅在 500 °C 范围内都是稳定的^[71]。任何商业上可用的二氧化硅光纤的折射率都可以通过离子注入来改变,所以不需要掺杂光纤或者载氢过程^[72]。由于离子束在注入过程中能量逐渐减弱,用该方法写入的长周期光纤光栅会在横截面上发生不均匀的折射率分布,如图 20 所示,注入了离子后的光纤在通白光之后能明显在包层形成一圈月牙形的亮斑,说明离子的注入不是均匀分布在光纤截面。由于该方法成本较高,因此相关工作报道较少。

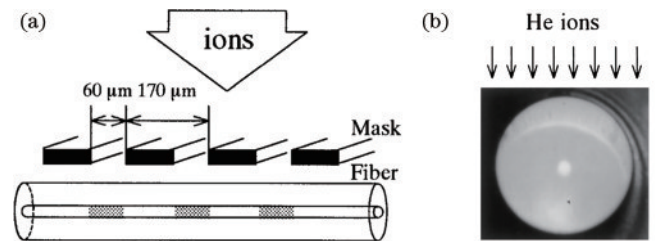
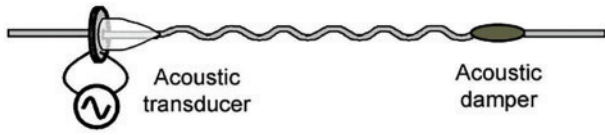


图 20 实验示意图。(a)金属掩模与光纤对准的示意图;(b)He 离子注入光纤后光纤通光的截面图^[71]

Fig. 20 Schematic diagram of experiment. (a) Schematic of alignment of metal mask and fiber; (b) cross section of optical fiber after He ion implantation^[71]

3.9 超声调制法

超声调制法利用超声波沿着光纤轴向振动,产生周期性微弯从而在光纤中引入周期性的折射率调制^[74-79]。通过改变声波的频率及振动的幅度,可以调节长周期光纤光栅的周期及模式耦合强度。超声波引入的周期性折射率调制是一种动态结构,当关闭超声信号时,光栅退化成未调制的光纤,光仍按照未调制时的传播方式传播。当超声波频率在几十 MHz 时,形成的折射率调制的周期是几百微米的量级,所以其光谱呈现带阻滤波特性。超声调制长周期光纤光栅的原理示意图如图 21 所示。超声波由信号发生器的射频信号驱动压电陶瓷谐振产生。由于底部材料声阻抗较大,大部分超声波都会耦合到超声聚能器中进行放大,再耦合到裸光纤中进行传输。在这个过程中,裸纤产生振动,形成周期性的折射率调制。近年来超声调制

图 21 超声波调制长周期光纤光栅的原理示意图^[77]Fig. 21 Schematic diagram of the acoustic induced LPFG^[77]

长周期光纤光栅被用于在少模光纤中引发纤芯模式的转换^[78-79]。Zhang 等^[78]使用超声调制的两模光纤长周期光纤光栅实现了一阶光纤轨道角动量(OAM)模式

转换,其波长调谐范围为 1540~1560 nm。该类长周期光纤光栅一般将光从纤芯基模耦合至 LP_{1m} 模。动态光栅的优点是较为灵活,便于在不同研究中灵活调节长周期光纤光栅特性,因此在很多基础研究中被广泛采用,但由于超声装置体积、光栅稳定性等原因的限制,该方法在实用化器件中较少采用。

表 1 总结了几种常见的长周期光纤光栅制备技术的主要特点,基于各自不同的特点,这些制备方法有不同的应用。

表 1 长周期光纤光栅制备方法总结对比

Table 1 Comparison of the methods for LPFG fabrication

Fabrication method	Mechanism	Advantage and disadvantage	Reference
UV laser technique	Photosensitivity	High writing efficiency, good repeatability, need amplitude mask and photosensitive fiber, and low temperature stability	[2],[14-19]
Carbon dioxide laser technique	Residual stress relaxation, glass structure changes, physical deformation	High writing efficiency, good flexibility and repeatability, no need of photosensitive fiber, high temperature stability, and low cost	[20-28]
Femtosecond laser technique	Multiple photon absorption, glass structure changes	Good flexibility and repeatability, no need of photosensitive fiber, high temperature stability, and high cost	[41-45]
Arc-induced LPFG	Residual stress relaxation, glass structure changes, physical deformation	Good flexibility, no need of photosensitive fiber, high temperature stability, and low cost	[46-51]
Mechanically induced LPFG	Photoelastic effect	Good flexibility, grating degeneration, and low cost	[52-57]
Cladding etched LPFG	Physical deformation, residual stress relaxation	High coupling efficiency, high sensitivity, and fragile fiber	[58-62]
Micro-tapered LPFG	Physical deformation, residual stress relaxation	High sensitivity, fragile fiber, and low cost	[63-70]
Ion implanted LPFG	Ion implantation	High index modulation, and asymmetric index distribution	[71-73]
Acoustic induced LPFG	Photoelastic effect	Good flexibility, and low index modulation	[74-79]

长周期光纤光栅的形成机理与制备技术有关,这里仅以二氧化碳激光制备长周期光纤光栅的形成机理为例,对各种物理效应,包括残余应力释放、玻璃结构变化、冻结黏弹力、光纤刻蚀等在光栅形成中的作用做简单分析。各种效应的发生规律主要是由激光曝光的温度、强度和时间不同所引起的不同加热和冷却条件决定的。残余应力释放效应是最早被用于解释二氧化碳激光制备长周期光纤光栅的物理机理之一^[7],由于光纤对 10.6 μm 波长的二氧化碳激光有强烈的吸收,在聚焦激光的加热作用下,光纤拉制过程中在光纤纤芯与包层间形成的残余应力将被周期性地释放,从而引起周期性的光纤折射率调制,形成长周期光纤光栅,利用这一特性可以采用具有较大残余应力的光纤例如多包层光纤等制备长周期光纤光栅,对于残余应力较小的光纤,基于残余应力释放引致的折射率调制相对偏小,不足以制备具有较高透射峰对比度的长周期光

纤光栅,这时激光加热引致的光纤玻璃结构变化(玻璃致密化或者玻璃体积膨胀)效应对光栅的形成同时起重要的作用。实验发现,通过二氧化碳激光在外加应力的光纤中制备长周期光纤光栅的写入效率可以大幅度提高,说明不仅光纤中的残余应力可以通过激光照射被周期性地释放,而且外加应力也可以通过激光照射的方法被周期性地“冻结”在光纤结构中,这一效应通常归类为冻结黏弹力的作用^[26]。图 22^[26]为实验测量的在不同外加应力的单模光纤中制备长周期光纤光栅时、单次二氧化碳激光扫描制备的光栅对比度与写入激光能量密度的关系曲线,可以看出,对于施加了较大外加应力的光纤,采用较小的激光能量密度即可写入具有较高谐振峰对比度的长周期光纤光栅。从这一研究结果可以看出,对于残余应力较小的特种光纤,可以通过适当施加外加应力提高写入长周期光纤光栅的效率,制备具有高谐振峰对比度的长周期光纤光栅。

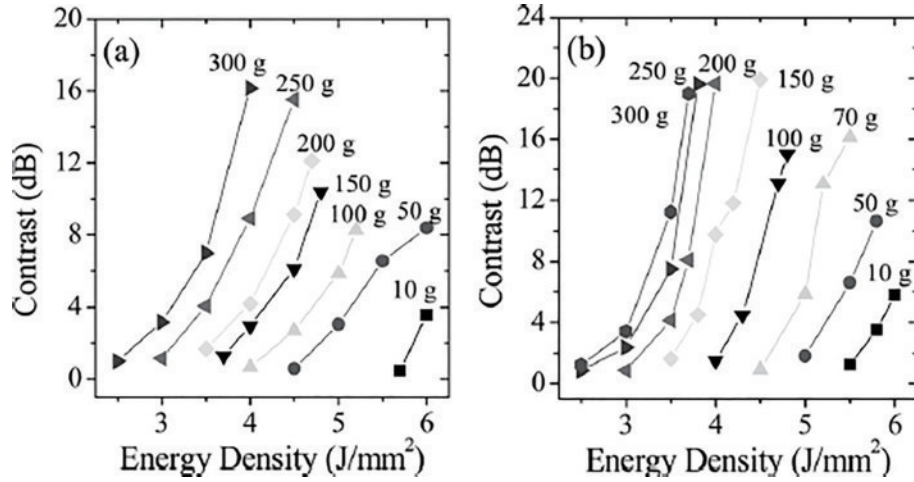


图 22 不同外加应力下长周期光纤光栅制备光栅对比度随二氧化碳激光扫描次数的关系曲线^[26]

Fig. 22 Dependence of the grating contrast on the laser scanning cycle of carbon dioxide laser when the fiber is applied with external strain during the fabrication of the LPFG^[26]

二氧化碳激光加热引致的光纤玻璃结构变化(包括玻璃致密化与玻璃体积膨胀)对长周期光纤光栅的形成起重要的作用,通过不同条件下的光栅制备与退火实验,光纤玻璃结构变化与残余应力释放两种效应对长周期光纤光栅形成的贡献有了系统的研究。图 23^[7]为不同加热和冷却条件下光纤玻璃的体积与温度的关系示意图。

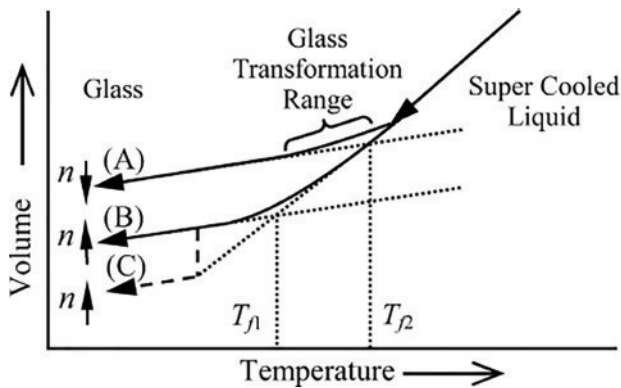


图 23 不同加热和冷却条件下光纤玻璃体积和加热温度的关系示意图^[7]

Fig. 23 Schematic diagram of the relation between glass volume and heating temperature for the fiber being heated and cooled at different conditions^[7]

图中的 T_{f_i} ($i=1,2$) 为光纤的“假想”温度(定义为光纤玻璃从高温冷却至一个平衡的玻璃状态所对应的温度)。图中:过程 A 中,光纤玻璃的温度从高温被快速降低,导致玻璃折射率(n)较低而“假想”温度较高,对应于光纤的拉丝过程,光纤发生玻璃体积膨胀效应;过程 B 中,光纤玻璃的温度从高温被慢速降低,导致玻璃折射率较高而“假想”温度较低,对应于光纤的高温退火处理过程,光纤发生玻璃致密化;过程 C 中,光纤玻璃的温度从较低的温度(小于“假想”温度)被快速降低,导致玻璃折射率较高而“假想”温度较低,对应于光纤的激光热

处理过程,光纤也发生玻璃致密化。高浓度的光纤掺杂对光纤的“假想”温度有一定的影响,因此对激光引起的光纤折射率调制有不同影响。对于二氧化碳激光聚焦于光纤掺杂(掺硼或者掺氟)区域的情况,残余应力释放的效应对光纤折射率调制也有较大的影响。

光纤玻璃结构变化在其他长周期光纤光栅制备技术,特别是基于加热效应的长周期光纤光栅制备技术(例如电弧放电法等)中也起到重要的作用,通常该效应引致的光纤折射率调制可以高至 10^{-4} 量级,这对大多数长周期光纤光栅的制备都起到重要的作用。

4 长周期光纤光栅传感特性

长周期光纤光栅能够实现特定波长纤芯基模与同向传输高阶包层模式或者高阶纤芯模式之间的转换,作为具有良好带阻滤波特性的环境敏感器件,能够实现高灵敏度的传感应用。与传统电信号传感器相比,长周期光纤光栅传感器具有体积小、抗腐蚀、抗电磁干扰、能够应用于恶劣环境、远距离传输等优点。长周期光纤光栅通过不同效应对物理参量温度、应变、弯曲、扭转、折射率响应进行传感。能够将外界变化物理量转化为强度、波长、相位、偏振态等光信号的变化加以测量。

4.1 长周期光纤光栅传感原理

长周期光纤光栅通常是通过在光纤纤芯或者包层诱导周期性的折射率调制而形成的。由式(1)可知,只考虑一阶衍射阶次时,基模与同向传输包层模式耦合的谐振波长可改写为

$$\lambda = (n_{\text{eff}}^{\text{cl}} - n_{\text{eff}}^{\text{cm}}) \Lambda, \quad (19)$$

式中: $n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$ 为包层模式有效折射率。通过式(19),可以推导出长周期光纤光栅温度响应 $d\lambda/dT$ 、应变响应 $d\lambda/d\epsilon$ 、环境折射率灵敏度 $d\lambda/dn_{\text{sur}}$ ^[4] 分别表示为

$$d\lambda/dT = \lambda \cdot \gamma \cdot (\alpha + \Gamma_{\text{temp}}), \quad (20)$$

$$d\lambda/d\varepsilon = \lambda \cdot \gamma \cdot (1 + \Gamma_{\text{strain}}), \quad (21)$$

$$d\lambda/dn_{\text{sur}} = \lambda \cdot \gamma \cdot \Gamma_{\text{sur}}, \quad (22)$$

式中： α 是光纤材料热膨胀系数； γ 是波导色散因子； Γ_{temp} 、 Γ_{strain} 和 Γ_{sur} 分别表示温度、应变、环境折射率灵敏度因子^[4]。

$$\gamma = (d\lambda/d\Delta) / (n_{\text{eff}}^{01} - n_{\text{eff,cl}}^{nm}), \quad (23)$$

$$\Gamma_{\text{temp}} = \frac{\xi_{\text{co}} n_{\text{eff}}^{01} - \xi_{\text{cl}} n_{\text{eff,cl}}^{nm}}{n_{\text{co}}^{\text{eff}} - n_{\text{eff,cl}}^{nm}}, \quad (24)$$

$$\Gamma_{\text{strain}} = \frac{\eta_{\text{co}} n_{\text{eff}}^{01} - \eta_{\text{cl}} n_{\text{eff,cl}}^{nm}}{n_{\text{co}}^{01} - n_{\text{eff,cl}}^{nm}}, \quad (25)$$

$$\Gamma_{\text{sur}} = -\frac{u_m^2 \lambda_{\text{res}}^3 n_{\text{sur}}}{8\pi r_{\text{cl}}^3 n_{\text{cl}} (n_{\text{eff}}^{01} - n_{\text{eff,cl}}^{nm}) (n_{\text{cl}}^2 - n_{\text{sur}}^3)^{3/2}}, \quad (26)$$

式中： ξ_{co} 、 ξ_{cl} 和 η_{co} 、 η_{cl} 分别表示纤芯与包层材料的热光系数与弹光系数； u_m 为第一类零阶贝塞尔方程的第 m 个根； r 与 n_{cl} 分别是光纤包层的半径和折射率。由式(20)~(22)可知，长周期光纤光栅对外界环境的响应与光纤色散因子 γ 密切相关。为了简化分析过程，我们仅考虑部分低阶包层模式，如图 9 所示，在波长 1000~2200 nm 范围内，LP₀₂~LP₀₇ 模式的相位匹配曲线的切线斜率为正值，LP₀₈~LP_{0,10} 模式的相位匹配曲线的切线斜率随着波长的增加由正转变为负值。因此，对于相位匹配曲线上出现拐点的模式，在色散拐点处同一周期光纤光栅对应两个谐振波长，在光谱上表现为双谐振峰。随着模式阶数的增加，色散拐点对应的谐振波长也减小，低阶模式的色散转点位于更长波。图 24 为硼锆共掺光纤上制备周期为 227.5 μm 的长周期光纤光栅的透射光谱，LP_{0,10} 阶包层模式的色散拐点在 1600 nm 波长附近出现双峰谐振。在色散拐点处， $|d\lambda/d\Delta|$ 趋于无穷大，由式(23)可知，色散因子 $|\gamma|$ 无穷大，色散拐点处长周期光纤光栅包层模式可取得最大环境灵敏度。一般情况下，可以通过选择耦合的包层模式和光栅周期在色散拐点或接近色散拐点来设计出具有极高灵敏度的长周期光纤光栅器件。

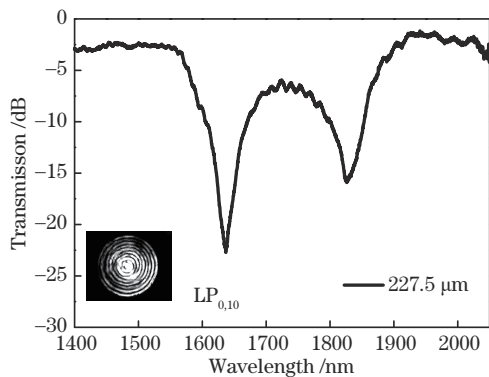


图 24 色散拐点处长周期光纤光栅的双谐振峰

Fig. 24 Dual-dip resonance of LPFG at dispersion turning point

长周期光纤光栅的扭转传感灵敏度除了符合环境对灵敏度影响的一般规律外，主要还与长周期光纤光

栅结构有较大的关系，因此对于不同种类的长周期光纤光栅，由扭转引起的谐振波长变化的机理和特性有较大的区别，如腐蚀法^[80]和紫外曝光法^[81]写入的长周期光纤光栅的波长漂移主要是由非线性弹性效应和光弹效应引起，随着扭矩方向和大小的变化，其波长漂移和扭转率的关系成双曲线函数。对于二氧化碳激光写入的长周期光纤光栅，由于在写入过程中单侧曝光引起的非对称折射率调制，该类光栅的波长漂移与扭转率呈线性关系。对于二氧化碳激光制备的长周期光纤光栅，为了简化分析其扭转响应，在这里忽略色散对灵敏度的影响。由式(19)可知，由光纤扭转引起的长周期光纤光栅波长变化^[30]可以表示为

$$\Delta\lambda^{(m)} = (n_{\text{eff}}^{01} - n_{\text{eff,cl}}^{nm}) \Delta\Delta + \Delta n_{\Delta} \Delta, \quad (27)$$

式中： $\lambda^{(m)}$ 表示第 m 阶包层模式谐振波长； $\Delta n_{\Delta} = \delta n_{\text{eff}}^{01} - \delta n_{\text{eff,cl}}^{nm}$ ，而 $\delta n_{\text{eff}}^{01}$ 、 $\delta n_{\text{eff,cl}}^{nm}$ 分别为光栅纤芯、包层模的有效折射率在扭矩作用下的变化量， $\Delta\Delta$ 为光栅周期的变化量。根据光弹效应，由扭转剪应力引起的折射率变化^[82]可以表示为

$$\Delta n = c\sigma, \quad (28)$$

式中： Δn 为折射率变化； c 为常数； σ 是剪应力，与半径、扭转率和方向有关。由于光纤包层的直径远大于纤芯，因此相对于包层，纤芯受的剪应力很小，受其影响的折射率变化极小，可以忽略不计。另外，长周期光纤光栅的每个折射率调制面之间都是彼此平行，因此外加的扭矩导致的光栅周期变化量也可以忽略。此时，(27)式可以简化为

$$\Delta\lambda^{(m)} \approx -\delta n_{\text{eff,cl}}^{nm} \cdot \Delta. \quad (29)$$

因此，长周期光纤光栅谐振波长漂移的大小与 $\delta n_{\text{eff,cl}}^{nm}$ 有线性关系。另外，施加在光纤上的扭力将使得光栅产生椭圆双折射现象，其扭力和椭圆双折射的关系可表示为

$$\dot{\mathbf{E}} = G\dot{\mathbf{R}}_T, \quad (30)$$

式中： G 是光弹系数； $\dot{\mathbf{E}}$ 为扭力引入的椭圆双折射矢量； $\dot{\mathbf{R}}_T$ 为扭转率矢量； $\delta n_{\text{eff,cl}}^{nm}$ 随着矢量 $\dot{\mathbf{E}}$ 的变化而变化，因此二氧化碳激光写入的长周期光纤光栅既能测量扭转力的大小，同样也能测量扭转力的方向。长周期光纤光栅的扭转响应与光纤、光栅结构密切相关。对于螺旋长周期光纤光栅来说，由于其螺旋式的折射率调制结构，光栅周期很容易受外加扭力的影响。当外加扭力方向与螺旋结构方向一致时，螺旋光栅的周期会减小，反之，光栅的周期增大。此时，螺旋长周期光纤光栅由扭力引起的谐振波长变化表示为

$$\Delta\lambda^{(m)} = (n_{\text{eff}}^{01} - n_{\text{eff,cl}}^{nm}) \Delta\Delta - \delta n_{\text{eff,cl}}^{nm} \cdot \Delta, \quad (31)$$

式中：当施加扭转力时， $\Delta\Delta$ 与 $\delta n_{\text{eff,cl}}^{nm}$ 的符号相反，即当螺旋长周期光纤光栅周期变大时，折射率由于“螺距”的疏松而变小。因此，在相同的扭力下，螺旋长周期光纤光栅具有比常规长周期光纤光栅更高的扭转灵敏度。

单个长周期光纤光栅往往具有较大的光谱带宽，

对于光纤传感而言,较大的带宽会降低波长检测测量精度^[83]。通过将一对长周期光纤光栅进行级联能够形成全光纤马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪。其原理是光波经过第一个长周期光纤光栅后,纤芯中的部分能量被耦合到包层中传输,剩余的能量仍然在纤芯中传输。经过一定距离后,包层中的能量被第二个长周期光纤光栅重新耦合回纤芯。纤芯和包层中的光由于经历了不同的光程,将在纤芯中发生干涉,其透射谱出现一系列窄线宽、高分辨率谐振峰。基于一对长周期光纤光栅的 M-Z 干涉仪输出光强 T_o ^[84] 可以表示为

$$T_o = T_{cl}^2 - 2T_{co}T_{cl}\cos(\varphi + \delta), \quad (32)$$

$$T_{cl} = 1 - T_{co}, \quad (33)$$

$$\varphi = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff,cl}}^m L}{\lambda^{(m)}}, \quad (34)$$

式中: φ 是纤芯模式与包层模式相位差^[85]; δ 是初始相位差; $\Delta n_{\text{eff,cl}}^m$ 是纤芯与包层模式折射率差; L 是两个长周期光纤光栅级联长度。由式(32)与(33)联立可知,当 T_{co} 为 3 dB 时,干涉条纹对比度最大。长周期光纤光栅 M-Z 干涉仪的自由光谱范围可以表示为

$$R_{\text{FSR}} = \frac{\lambda^2}{\Delta n_{\text{eff,cl}}^m L}. \quad (35)$$

图 25^[86] 是单个长周期光纤光栅与级联光栅透射光谱仿真结果。

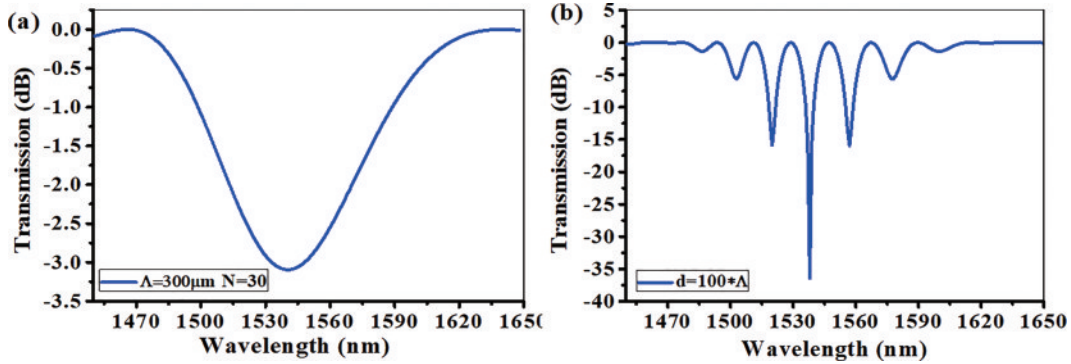


图 25 长周期光纤光栅透射光谱。(a) 单个长周期光纤光栅, (b) 级联长周期光纤光栅^[86]

Fig. 25 Transmission spectra of LPFG. (a) Single LPFG; (b) cascaded LPFGs^[86]

4.2 长周期光纤光栅温度传感特性

长周期光纤光栅具有高灵敏度温度传感特性,温度传感机理主要包括两个方面:第一、温度变化引起的光纤材料的热光效应和热膨胀效应;第二、长周期光纤光栅进行镀膜和涂覆后,温度改变引起涂覆材料的有效折射率改变。长周期光纤光栅的温度灵敏度主要由 γ^m 和 Γ_{temp}^m 决定。其中, γ^m 的大小和符号与光栅的周期 Λ 和包层模式的阶次 m 密切相关,而 Γ_{temp}^m 则主要与纤芯和包层的热光系数 ξ_{co} 和 ξ_{cl} 有关。因此,不同种类的光纤,不同的包层模式具有不同的长周期光纤光栅温度灵敏度。温度变化时,由于热光效应的作用,光纤纤芯和包层材料的折射率发生变化,纤芯基模和包层模式的有效折射率随之变化,共振波长发生漂移。而光纤热膨胀效应的作用引起长周期光纤光栅的波导结构发生变化,例如光栅周期的变化使得谐振波长漂移。对于常规长周期光纤光栅,温度灵敏度相对比较小,如图 26^[86] 所示,硼锆共掺光纤中写入的是周期为 400 μm 的长周期光纤光栅 LP_{06} 模式的温度响应,其谐振波长随着温度的上升线性地红移,温度灵敏度为 0.082 $\text{nm}/^\circ\text{C}$ 。

目前提高长周期光纤光栅温度灵敏度的方法主要有三种:提高包层模阶数^[87]、减小包层直径增强消逝场^[88]、对光栅表面进行高热光系数材料涂覆^[89]。Zou 等^[90] 分别利用硅橡胶与紫外固化胶封装长周期光纤光栅,如图 27^[86] 所示,硅橡胶封装长周期光纤光栅

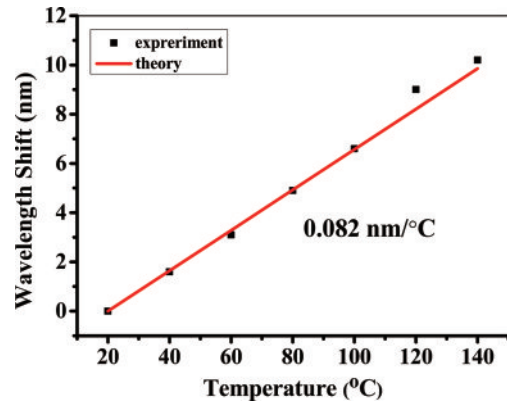
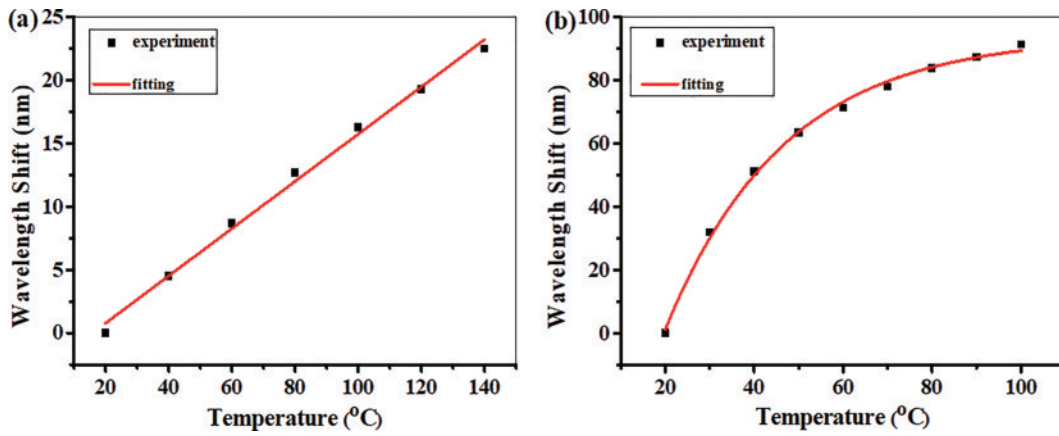


图 26 常规长周期光纤光栅 LP_{06} 模的温度特性^[86]

Fig. 26 Temperature characteristics of conventional LPFG with LP_{06} cladding mode^[86]

的 LP_{06} 模式温度灵敏度为 0.186 $\text{nm}/^\circ\text{C}$ 。对比裸长周期光纤光栅有显著提高。硫化硅橡胶在室温下固化后的折射率在 1.43 附近,由于其具有负的热光系数,随着温度的升高,硅橡胶的折射率下降,因此在温度变化时,引起的长周期光纤光栅外界环境折射率变化始终远离长周期光纤光栅的包层材料折射率,在长周期光纤光栅的环境折射率最灵敏的范围之外。这限制了硅橡胶对长周期光纤光栅温度传感的增敏效果。紫外固化胶封装后的光栅温度灵敏度高达 1.08 $\text{nm}/^\circ\text{C}$,比同阶模式裸长周期光纤光栅的温度灵敏度提高了一个数量

图 27 材料涂覆长周期光纤光栅温度传感特性。(a)硅橡胶;(b)紫外固化胶^[86]Fig. 27 Temperature characteristics of coated LPFG with LP₀₆ cladding mode. (a) Silicone rubber; (b) UV curing adhesive^[86]

级,同时也远远高于用硅橡胶封装的长周期光纤光栅。在 20~30 °C 的局部范围内,温度灵敏度高达 5.43 nm/°C。以上方法是通过温度变化过程中封装材

料的热光效应引起长周期光纤光栅的环境折射率变化来实现温度增敏的^[86]。不同材料涂覆长周期光纤光栅的温度特性如表 2 所示。

表 2 不同材料涂覆长周期光纤光栅的温度特性

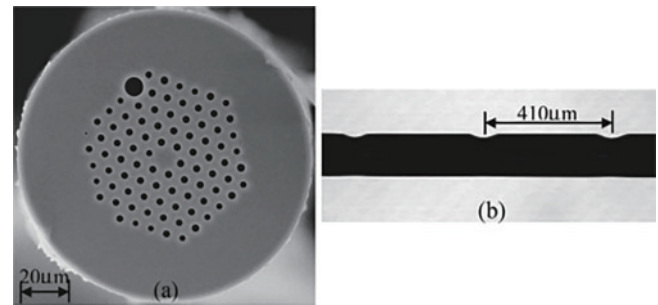
Table 2 Temperature characteristics of the LPFGs coated by different materials

Package material	Mode	Sensitivity / (pm·°C ⁻¹)	Temperature / °C	Reference
Bare LPFG	LP ₀₆ mode	82	20-140	[86]
PDMS	LP ₀₅ mode	255.4	20-80	[91]
Silicone rubber	LP ₀₆ mode	186	20-140	[90]
UV Curable adhesive	LP ₀₆ mode	5430	20-30	[86]

4.3 长周期光纤光栅应变传感特性

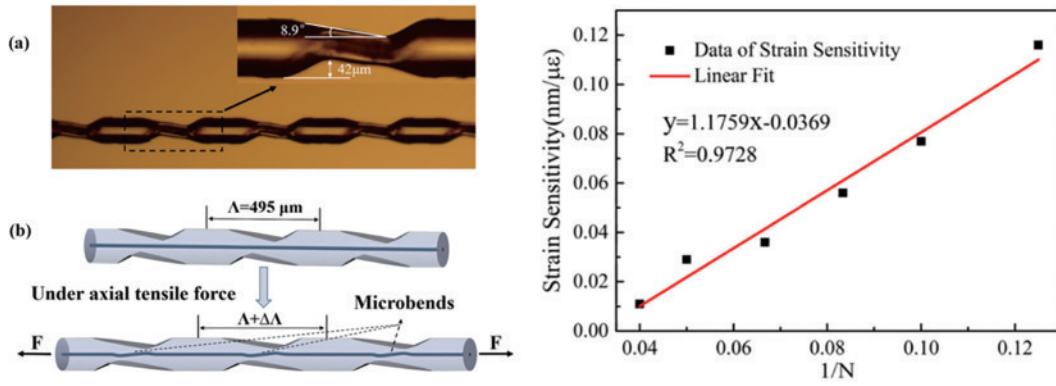
由前面的分析可知,长周期光纤光栅谐振波长的应变灵敏度与 γ^m 、 Γ_{strain}^m 密切相关。其中, γ^m 的大小和符号与长周期光纤光栅的周期 Λ 和包层模式的阶次 m 有关, Γ_{strain}^m 与纤芯和包层的弹光系数 η_{co} 、 η_{cl} 有关。对不同种类的光纤,不同的包层模式的轴向应变灵敏度也不同。对于二氧化碳激光写入普通长周期光纤光栅,包层模式轴向应变灵敏度较小。而对于一些基于特殊结构特种光纤制备的长周期光纤光栅,则可具有较高的应变灵敏度。Wang 等^[24]通过使用聚焦的二氧化碳激光束在大模场光子晶体光纤上刻写周期性的凹槽,其结构如图 28 所示,制成的长周期光纤光栅传感器具有高应变敏感性 -7.6 pm/ $\mu\epsilon$ 和低温度敏感性 3.91 pm/°C。这种长周期光纤光栅虽然采用二氧化碳激光制备,但制备过程在光栅包层形成明显的周期性刻槽,因此光栅具有类似包层腐蚀制备的长周期光纤光栅一样的高应变灵敏度。由于基于光子晶体光纤的长周期光纤光栅的温度灵敏度比常规长周期光纤光栅低一个数量级,这种应变传感器可以有效地降低应变和温度之间的交叉敏感性,并且在不使用温度补偿的情况下,由温度引起的应变误差仅为 0.5 pm/°C。

Wang 等^[92]采用二氧化碳激光刻写技术制备了一种具有平行斜面结构的长周期光纤光栅,其光栅结构

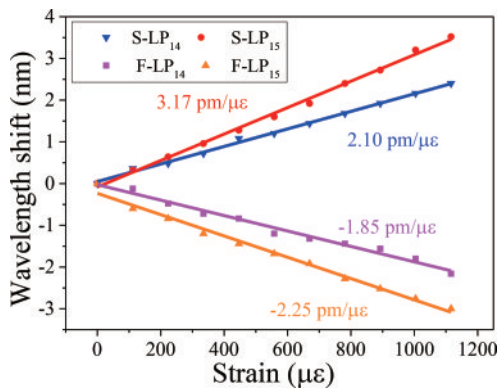
图 28 基于二氧化碳激光刻写技术的光子晶体光纤长周期光纤光栅^[24]Fig. 28 LPFG inscribed in photonic crystal fiber by carbon dioxide laser^[24]

如图 29 所示。这种结构是用二氧化碳激光抛光单模光纤形成周期性的平行斜面制成。平行斜面结构有效地提高了光栅的应变灵敏度。长度为 3.9 mm 的长周期光纤光栅具有良好的重复性,应变灵敏度可达到 116 pm/ $\mu\epsilon$ 。

另外,一些特种光纤由于掺杂导致包层或纤芯部分材料具有不同弹光系数,在此类光纤中制备的长周期光纤光栅也具有与常规长周期光纤光栅不同的应变响应。熊猫型保偏光纤由于一对高掺杂 B₂O₃ 应力区的存在,在外界应变的作用下,随着应变增加,保偏光纤双折射减小,这将导致保偏光纤快轴与慢轴的包层

图 29 基于二氧化碳激光刻写技术的平行斜面结构长周期光纤光栅及其应变特性^[92]Fig. 29 Strain characteristics of the carbon dioxide laser written LPFG with parallel inclined planes^[92]

模式具有相反的应变响应^[93]。图 30^[33]为熊猫型保偏光纤中制备的螺旋长周期光纤光栅的快轴与慢轴 LP₁₄、LP₁₅包层模式的应变响应特性。对于保偏光纤长周期光纤光栅温度传感特性也有类似规律。因此,保偏光纤长周期光纤光栅可作为应变、温度双参量同时测量传感器^[33, 93]。

图 30 保偏光纤螺旋长周期光纤光栅快轴与慢轴包层模式应变特性^[33]Fig. 30 Strain characteristics of the fast and slow axis modes of the helical LPFG written in polarization-maintaining fiber^[33]

4.4 长周期光纤光栅弯曲传感特性

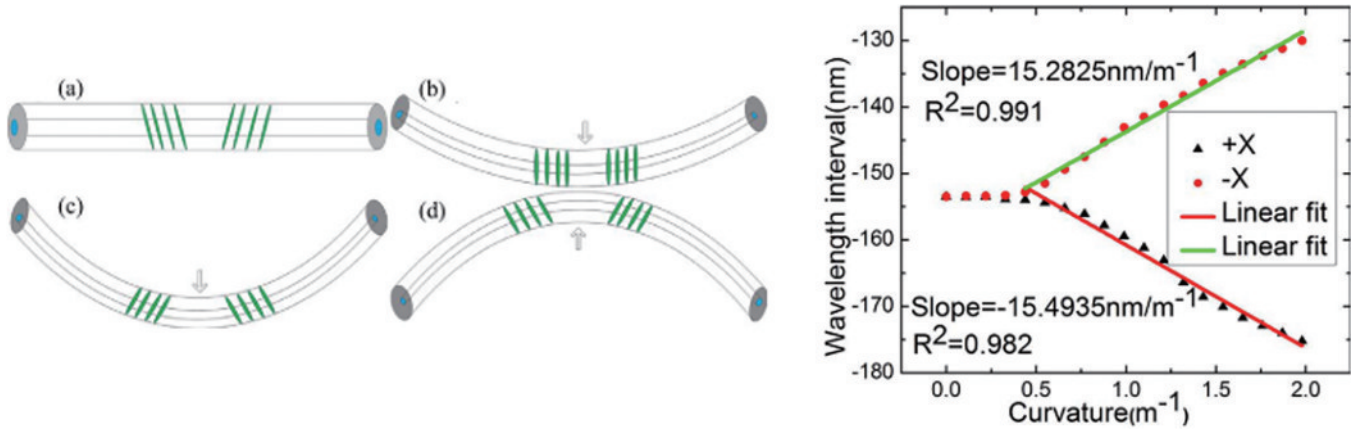
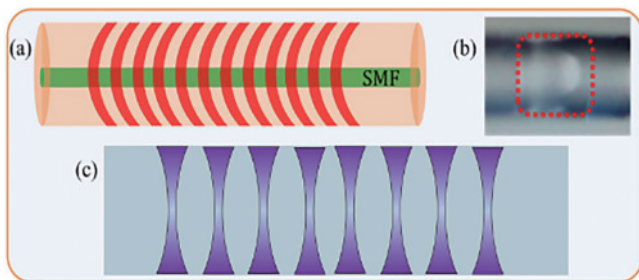
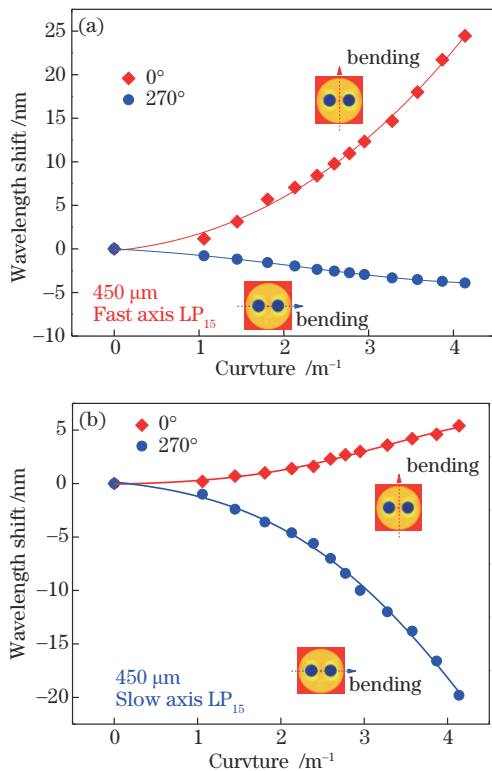
长周期光纤光栅的弯曲特性很复杂,谐振波长的变化容易受到长周期光纤光栅模式阶数、光栅折射率调制方式,以及光纤波导结构等因素的影响。目前来说,长周期光纤光栅弯曲传感侧重两个方面研究,高灵敏度与弯曲传感的矢量性。Rao等^[23]通过二氧化碳激光在单模光纤中写入长周期光纤光栅,对于 LP₀₅模,随着弯曲曲率的增加,光栅谐振波长蓝移,最大弯曲灵敏度为 -6.99 nm/m^{-1} ,二氧化碳激光在光栅写入过程中引入了非对称折射率调制。

为了实现弯曲方向与曲率大小同时测量,一系列长周期光纤光栅矢量传感器得到了研究。Allsop等^[94]利用飞秒激光非对称地改变光纤包层折射率分布制备长周期光纤光栅,随着弯曲方向不同,谐振峰的波长发

生红移与蓝移,可以实现一个平面中的弯曲曲率大小和方向同时感测,两个不同方向的弯曲灵敏度分别为 -1.62 nm/m^{-1} 和 3.82 nm/m^{-1} 。Jin等^[95]提出了一种基于长周期光纤光栅的矢量弯曲传感器,利用聚焦二氧化碳激光沿着光子晶体光纤的一侧刻写周期性凹槽,来实现弯曲方向测量。同样,在光纤中引入非对称的折射率调制,既可以实现高灵敏度曲率测量,又可同时测量弯曲方向。Zhou等^[96]采用扇形长周期光纤光栅实现矢量曲率测量。如图 31 所示, Li等^[97]通过级联两个 6° 倾斜角的倾斜长周期光纤光栅提出一种高灵敏度的矢量弯曲传感,同时该传感器可以降低环境温度的影响。当传感器弯曲时,两个选定的凹陷朝向彼此移动,两个凹陷之间的间隔用于改善曲率测量的灵敏度并进一步降低温度串扰。对于 $0.5 \sim 2 \text{ m}^{-1}$ 的曲率范围,对于相反的弯曲方向,弯曲灵敏度达到 $-15.4935 \text{ nm/m}^{-1}$ 和 $15.2852 \text{ nm/m}^{-1}$,传感器的温度灵敏度是常规长周期光纤光栅的三分之一。Huang等^[98]同样通过在周期性折射率中引入角度,设计了一种温度不敏感矢量曲率传感器。

为了进一步提高传感器灵敏度。Zhang等^[99]设计了一种凹透镜式折射率调制的长周期光纤光栅,这种光栅可以实现双向高灵敏度弯曲传感。其结构如图 32 所示,这种光栅由弧形光栅平面阵列组成。实验结果表明这种光栅的本征包层模场比传统光栅更接近光纤表面。因此,光栅可以对环境扰动更灵敏。在 $0 \sim 2.08 \text{ m}^{-1}$ 的弯曲范围内达到 $-32.782 \text{ nm/m}^{-1}$ 的高灵敏度。

以上矢量曲率传感器是基于光栅制备过程中引入非对称折射率调制来实现曲率大小与方向的同时测量。另一种是长周期光纤光栅与非对称结构特种光纤结合,同样可以实现矢量曲率传感,以保偏光纤为例,如图 33 所示,当保偏光纤沿着快轴或者慢轴弯曲时,保偏光纤快轴与慢轴包层模式波长响应具有不同灵敏度。这是由于保偏光纤沿快轴弯曲时,对快轴模式的影响远大于沿慢轴弯曲对快轴模式的影响,同理,对慢轴模式也有相同的规律。

图 31 级联倾斜长周期光纤光栅的弯曲特性^[97]Fig. 31 Bending characteristics of cascaded tilted long-period fiber gratings^[97]图 32 凹透镜式长周期光纤光栅结构示意图^[99]Fig. 32 Structure of concave-lens-like long-period fiber grating^[99]图 33 保偏光纤长周期光纤光栅弯曲特性。(a)快轴模式；
(b)慢轴模式Fig. 33 Bending characteristics of the LPFG written in the polarization-maintaining fiber. (a) Fast axis mode;
(b) slow axis mode

4.5 长周期光纤光栅扭转传感特性

由前面的分析可以知道,当对光纤施加轴向扭转时,光纤中径向应力呈线性增加,这一过程将导致光纤中局部折射率变化,引起光纤圆双折射,圆双折射的存在同时又会影响光纤的线性双折射。根据相位匹配条件,对于长周期光纤光栅来说,会引起共振波长的漂移。长周期光纤光栅的制备方式决定了光栅的折射率调制,不同的制备方式对光栅线性双折射有很大的影响。对于长周期光纤光栅扭转传感器,原则上可以使用多种光栅制备技术,包括紫外曝光、电弧放电、机械微弯和二氧化碳激光写入等。利用不同模式有效折射率的变化,不同结构的光栅的折射率调制分布,不同的特种光纤的固有双折射,组合效应在扭转力的作用下会导致复杂的光谱变化,可以实现各种高灵敏度的长周期光纤光栅扭转传感。对于二氧化碳激光写入的长周期光纤光栅,由于在写入过程中单侧曝光引起的光纤非对称折射率调制,该类光栅的波长漂移与扭转率呈线性关系。二氧化碳诱导传统长周期光纤光栅具有较小的扭转灵敏度 $0.06 \text{ nm}/(\text{rad}/\text{m})$ ^[100]。目前来说提高二氧化碳写入的长周期光纤光栅扭转灵敏度的方法有:1)超长周期光纤光栅被证明可以提高扭曲灵敏度^[5]。通过制备周期为 2 mm 的长周期光纤光栅,可以使得包层折射率的变化升高,从而将灵敏度提高到 $0.22 \text{ nm}/(\text{rad}/\text{m})$ (约为常规 LPFG 的 4 倍)^[5]。2)在特种光纤上制备长周期光纤光栅,形成较大的折射率调制以提高扭转灵敏度,图 34^[101]所示是二氧化碳激光在双包层光纤上制备长周期光纤光栅的扭转特性,该光栅能实现基模 LP_{01} 模到 LP_{15} 包层模式耦合,光栅谐振波长漂移随扭转率变化有很好的线性度,在 $1.55 \mu\text{m}$ 与 $2.0 \mu\text{m}$ 波段灵敏度分别达到 $-0.058 \text{ nm}/(\text{rad}/\text{m})$ 和 $-0.243 \text{ nm}/(\text{rad}/\text{m})$ 。

利用高阶纤芯模式对应的谐振峰与包层模式相比具有更高的扭转灵敏度。如图 35 所示,Zhao 等^[9]利用二氧化碳激光在两模光纤中写入常规与倾斜长周期光纤

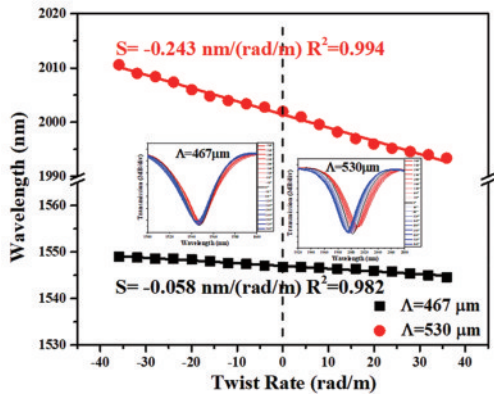


图 34 二氧化碳激光制备双包层光纤长周期光纤光栅扭转特性^[101]

Fig. 34 Twist characteristics of the LPFG inscribed in the double-cladding fiber by carbon dioxide laser^[101]

光栅,分别取得了 0.37 nm/(rad/m)和 0.5 nm/(rad/m)

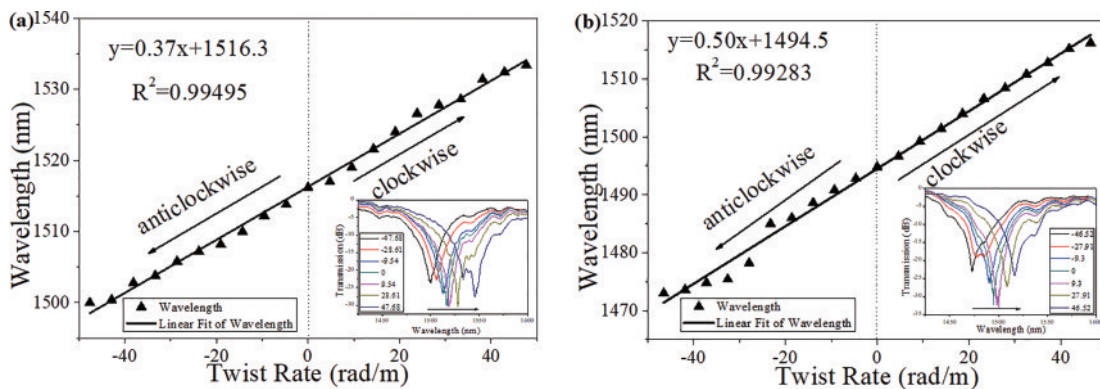


图 35 两模光纤长周期光纤光栅的扭转传感特性。(a)常规长周期光纤光栅,(b)倾斜长周期光纤光栅^[9]

Fig. 35 Twist characteristics of two-mode fiber LPFG. (a) Conventional LPFG; (b) tilted LPFGs^[9]

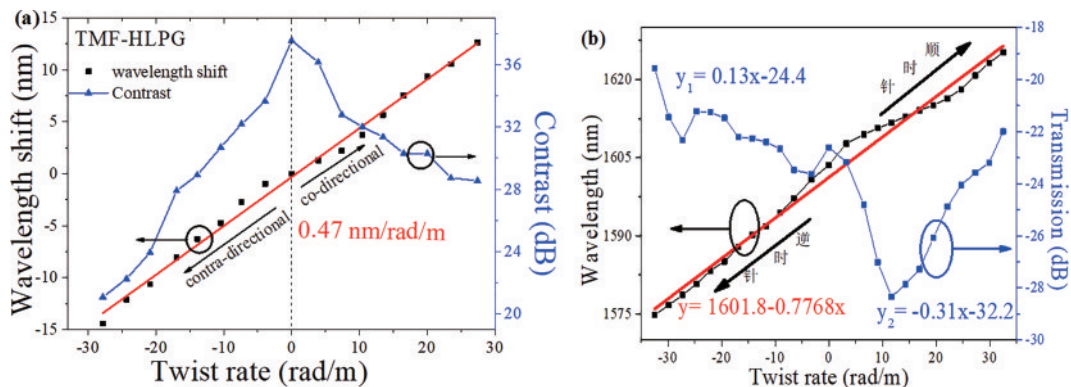


图 36 两模光纤螺旋结构长周期光纤光栅的扭转传感特性。(a)螺旋长周期光纤光栅^[30];(b)手征长周期光纤光栅^[32]

Fig. 36 Twist characteristics of two-mode fiber LPFG. (a) Helical LPFG^[30]; (b) chiral LPFG^[32]

具有螺旋结构的两模光纤长周期光纤光栅不但能测量扭转的大小,同时也能测量扭转的方向。当施加不同方向的扭力时,光栅的谐振波长向不同的方向漂移,且该波长漂移趋势与单模光纤常规长周期光纤光栅相反。这主要是模式耦合和波长有关的传播常数差密切相关,而传播常数差又与光栅的归一化频率 V 有关^[103]。在实验中,两模光纤的归一化

的扭转灵敏度,两模光纤具有较大的纤芯直径,光栅扭转过程中引入更强的折射率调制从而在 LP_{01} 和 LP_{11} 之间引起更高的线性双折射导致这类光栅具有更高的扭转灵敏度。

另外一大类扭转传感器就是基于特殊光纤或者特殊光纤光栅结构的,最常见的就是采用螺旋结构来提高光栅的扭转灵敏度。对于螺旋长周期光纤光栅来说,由于其特殊螺旋折射率调制结构,光栅周期很容易受外加扭力的影响。Zhang 等^[30,102]在单模光纤上制备螺旋长周期光纤光栅与手征长周期光纤光栅这两类类型的螺旋光栅,分别取得了 $-0.05 \text{ nm}/(\text{rad}/\text{m})$ 和 $0.21 \text{ nm}/(\text{rad}/\text{m})$ 的扭转灵敏度。同时,在两模光纤上分别制备了这两种光栅,如图 36^[30,32]所示,两种光栅的扭转灵敏度分别为 $0.47 \text{ nm}/(\text{rad}/\text{m})$ 和 $0.78 \text{ nm}/(\text{rad}/\text{m})$,灵敏度均高于常规两模光纤长周期光纤光栅的扭转灵敏度。

频率 $V=3.7$, 而处于该值的光纤,光栅波长与拍长成反比关系,随着两模光纤长周期光纤光栅的周期变长,谐振峰向短波方向漂移。所以,在两模光纤长周期光纤光栅上施加扭力时,谐振波长呈现与常规长周期光纤光栅相反的变化趋势。对于二氧化碳激光在不同的特种光纤上制备的不同类型的长周期光纤光栅,其波长扭转灵敏度总结如表 3 所示。

表 3 二氧化碳激光制备不同类型长周期光纤光栅的扭转特性
Table 3 Torsion characteristics of different kinds of LPFGs written by carbon dioxide laser

Fiber type	Grating type	Mode	Sensitivity / (nm·rad ⁻¹ ·m ⁻¹)	Reference
Single mode fiber	Conventional LPFG	LP ₁₇ cladding mode	0.0008	[104]
Single mode fiber	Helical LPFG	LP ₁₄ cladding mode	-0.099	[105]
Dispersion shift fiber	Helical LPFG	LP ₁₄ cladding mode	-0.038	[105]
Single mode fiber	Chiral LPFG	LP ₁₄ cladding mode	-0.207	[102]
Double cladding fiber	Conventional LPFG	LP ₁₅ cladding mode	0.088	[101]
Double cladding fiber	Helical LPFG	LP ₁₅ cladding mode	-0.384	[106]
Two mode fiber	Conventional LPFG	LP ₁₁ core mode	0.37	[9]
Two mode fiber	Helical LPFG	LP ₁₁ core mode	0.47	[30]
Two mode fiber	Chiral LPFG	LP ₁₁ core mode	0.7768	[32]

对于一些特殊的长周期光纤光栅,基于强度检测同样可以实现高灵敏度扭转传感器。这一类光栅往往具有较强的偏振相关特性。对于保偏光纤长周期光纤光栅,当外加扭转力时,长周期光纤光栅中光的偏振态会随着扭转呈现周期性变化,表现为快慢轴包层模式谐振峰的对比如周期性变化。如图 37^[33]所示,通过在

保偏光纤中写入螺旋长周期光纤光栅,光栅的对比度与输入光的偏振态有很大的相关性。通过对光纤施加扭转率可以对光纤中光的偏振态与偏振度进行调控实现光栅谐振峰对比度的变化。保偏光纤螺旋长周期光纤光栅基于强度变化的顺时针与逆时针扭转率的灵敏度分别为 5.98 dB/(rad/m)和 -5.97 dB/(rad/m)。

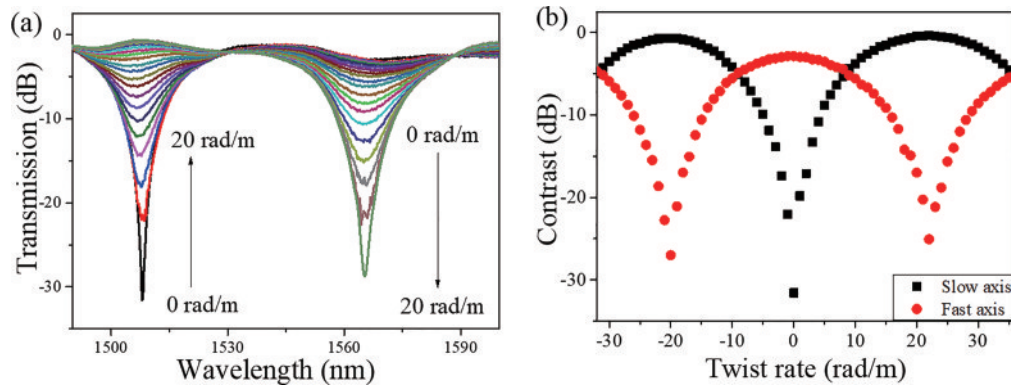


图 37 保偏光纤长周期光纤光栅的扭转传感特性^[33]
Fig. 37 Twist characteristics of polarization-maintaining fiber LPFG^[33]

4.6 长周期光纤光栅折射率传感特性

长周期光纤光栅的环境折射率(SRI)灵敏度与包层模式,波导结构,外界折射率变化区间三大因素有关。当环境折射率由空气逐渐增大时,长周期光纤光栅的包层模式的传播常数与模场分布发生变化,根据长周期光纤光栅的相位匹配条件与耦合效率公式可知,长周期光纤光栅表现为谐振波长与光栅对比度的变化。当环境折射率小于光纤包层折射率时,随着环境折射率增加,光纤包层对模场的约束减小表现为谐振波长的蓝移。包层模式与纤芯模式的耦合效率降低表现为谐振峰对比度的降低。当环境折射率接近或等于包层折射率时,等同于等效包层半径增大,包层模式依次消失转换为辐射模式。随着环境折射率继续增加大于包层折射率,包层与环境界面全反射消失,辐射模式在纤芯与环境折射率界面反射形成泄漏模,谐振峰再次出现。为了提高长周期光纤光栅对外界环境折射率

变化的灵敏度,通常有三种主要方法:利用包层模式色散拐点特性、减小光纤包层直径、长周期光纤光栅镀纳米高折射率薄膜。

Pilla等^[107]基于色散曲线设计并制备了在色散拐点附近的长周期光纤光栅,这类光栅表现出了超高折射率灵敏度。在折射率 1.3469 附近的折射率灵敏度为 9100 nm/RIU,这一结果表明在常规单模光纤中制备色散拐点处的长周期光纤光栅可以实现高性能化学和生物传感器。Colaço等^[50]利用电弧放电系统,制备了近色散拐点处的长周期光纤光栅,光栅周期为 197 μm。当外部折射率从 1.33 到 1.42 变化时,光栅的平均折射率灵敏度为 -720 nm/RIU。Liu等^[6]通过理论和实验上对硼锆共掺单模光纤中写入的色散拐点长周期光纤光栅进行了一系列研究,实验结果与仿真结果具有很好的一致性。并且研究了外界环境折射率传感特性,与常规长周期光纤光栅相比,高衍射级阶次

长周期光纤光栅包层模在色散拐点处具有更高的折射率灵敏度。如图 38^[6]所示,对于 447 μm 周期的长周期

光纤光栅,在折射率变化范围 1.447~1.453 内,光栅的折射率灵敏度为 13497.7 nm/RIU。

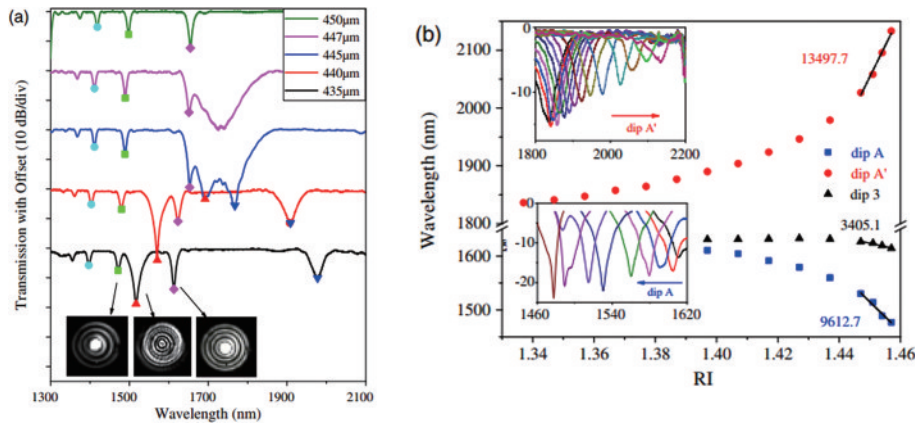


图 38 色散拐点长周期光纤光栅的环境折射率特性^[6]

Fig. 38 SRI characteristics of LPFG near dispersion turning point^[6]

通过减小光纤包层直径可以有效提高长周期光纤光栅对外界环境的响应。细径光纤长周期光纤光栅增敏原理在于通过减小光纤直径,进一步增强消逝场^[108-110]。常规减小包层直径的方式有腐蚀、拉锥、离子刻蚀等。通过在这类光纤上制备长周期光纤光栅来增强包层模式倏逝场与外界环境的作用,从而提高长周期光纤光栅的环境折射率灵敏度。目前商用细径光纤已成熟,主要以 80 μm 包层直径的细径光纤与较小芯径的细芯光纤为主。Yan 等^[111]理论结合实验研究了在细径光纤上写入大角度(81°)倾斜光栅的相关特性,相较于在单模光纤中写入的大角度倾斜光栅而言,该光栅的环境折射率灵敏度提高近 6 倍。Luo 等^[112]将此光栅应用于低浓度葡萄糖溶液的检测。Fu 等^[113]在纤芯直径只有 1.8 μm 的细芯光纤上制备非对称的长周期光纤光栅,在 1.400~1.440 的折射率范围内实现了 1047.3 nm/RIU 的高灵敏度的 SRI 传感。Zhao 等^[114]通过仿真与实验研究了细径光纤长周期光纤光栅的折射率传感特性。对于常规光纤而言,一定模式阶数范围内,随着包层模式阶数增加,包层模的环境折射率灵

敏度增加。如图 39 所示,对于光纤直径而言,长周期光纤光栅耦合到同阶模式所需的周期随光纤直径的减小而减小,同样环境折射率灵敏度随光纤直径的减小而增加。如图 40 所示,对于 80 μm 细径光纤长周期光纤光栅,在环境折射率范围 1.447~1.457 变化范围内,LP₀₆包层模式的折射率灵敏度为 6812.9 nm/RIU。

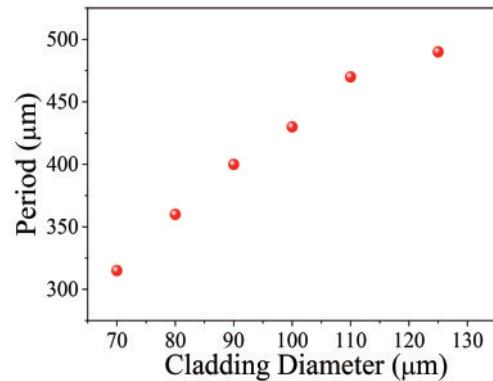


图 39 细径光纤包层直径与长周期光纤光栅周期的关系^[114]
Fig. 39 Relationship between fiber cladding diameter and the period of LPFG^[114]

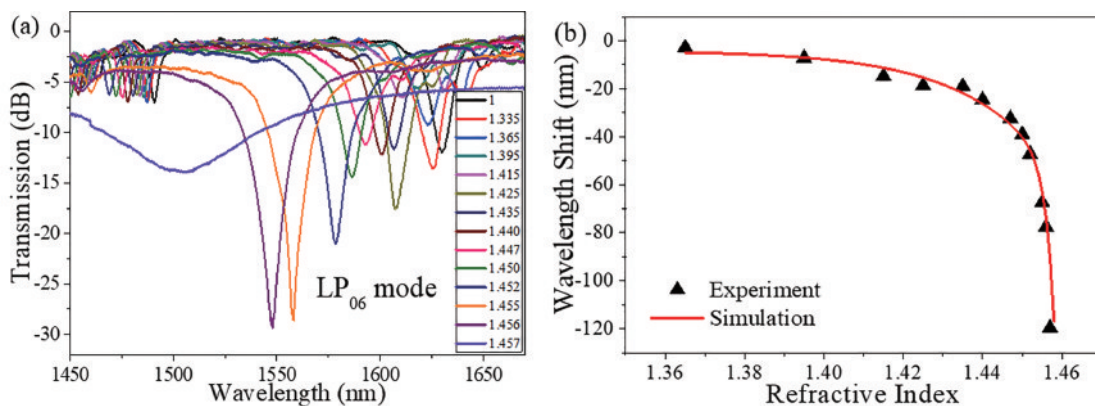


图 40 细径光纤长周期光纤光栅的折射率特性^[114]

Fig. 40 SRI characteristics of the LPFG written in the thin-cladding fiber^[114]

利用氢氟酸腐蚀长周期光纤光栅直径,随着包层直径减小,包层模式的折射率灵敏度将得到大幅提高。del Villar等^[115]通过腐蚀谐振波长在色散转折点处的长周期光纤光栅来提高其折射率灵敏度,比较了腐蚀前后左右双峰波长的变化。如图 41^[115]所示,腐蚀前双峰的左边谐振峰折射率灵敏度为 319 nm/RIU,右边谐振峰折射率灵敏度为 508.9 nm/RIU。腐蚀后光纤的直径为 25 μm ,双峰的折射率灵敏度分别为 1058.7 nm/RIU 和 1552.7 nm/RIU,腐蚀后长周期光纤光栅的折射率

灵敏度提高了 3 倍以上。基于这种高折射率灵敏度的长周期光纤光栅,通过聚丙烯胺盐酸盐(PAH)和聚丙烯酸(PAA)聚电解质涂层交替沉积后,长周期光纤光栅能够实现高灵敏度的 pH 传感。如图 42^[115]所示,腐蚀后光栅的 pH 传感灵敏度比常规单模光纤长周期光纤光栅的 pH 传感灵敏度增加了近 3 倍,证明了这种腐蚀光纤直径的方法可以提高长周期光纤光栅化学传感灵敏度。

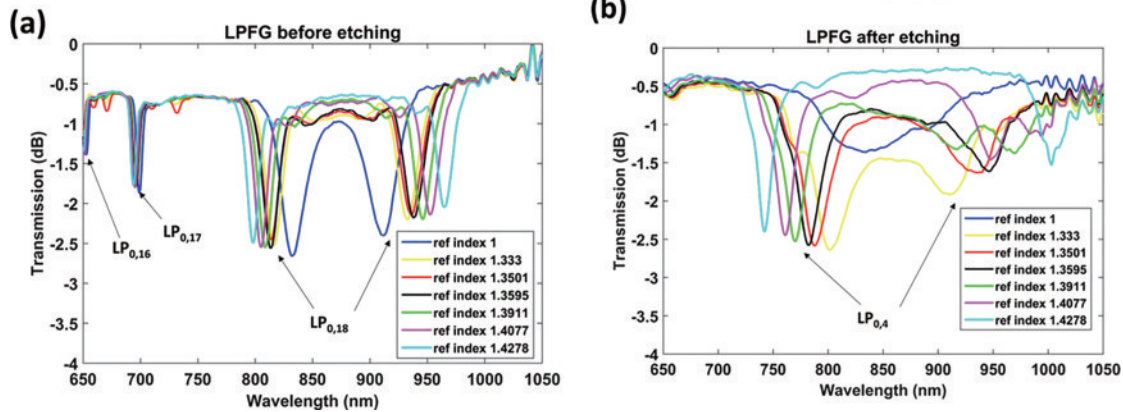


图 41 长周期光纤光栅腐蚀前后的折射率特性^[115]

Fig. 41 SRI characteristics of LPFG before and after the etching^[115]

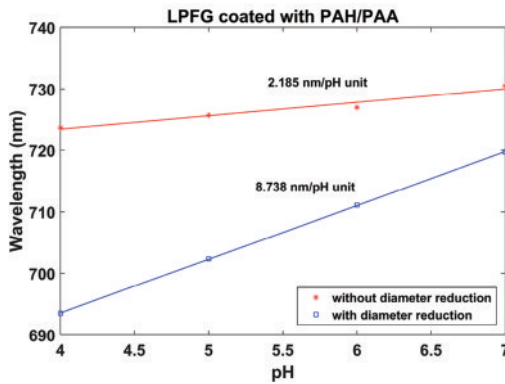


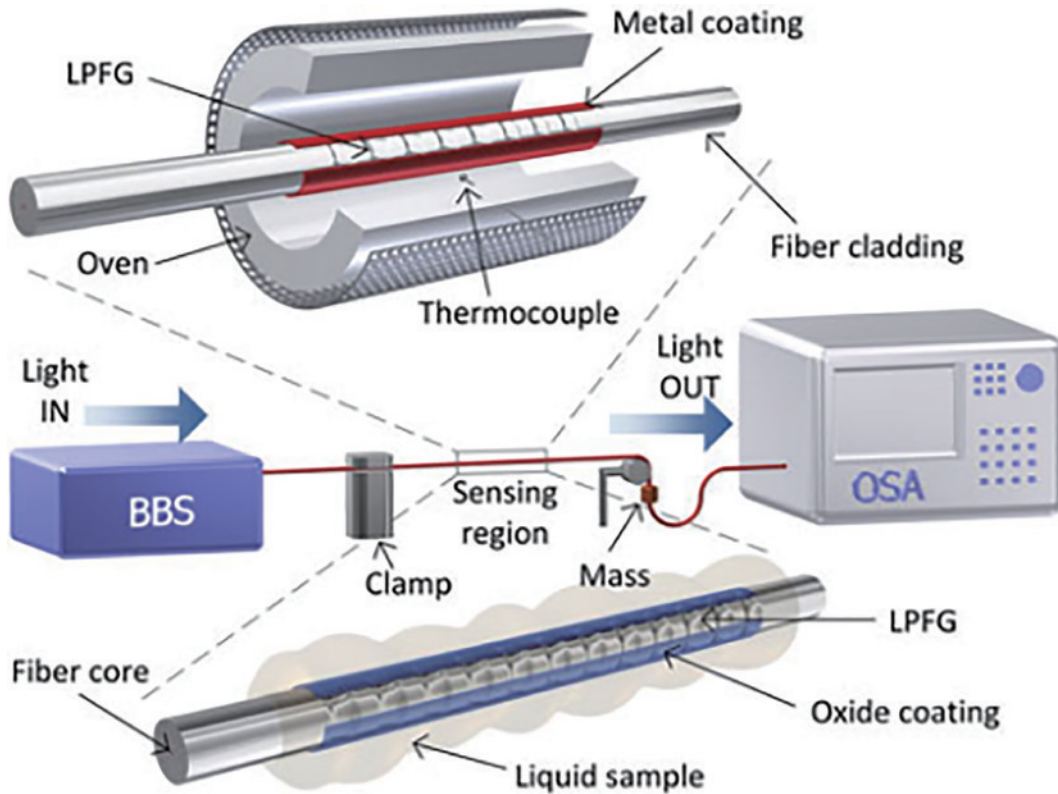
图 42 腐蚀前后 PAH/PAA 涂覆长周期光纤光栅 pH 传感特性^[115]

Fig. 42 The pH sensing characteristics of the PAH/PAA-coated LPFGs with and without clad etching^[115]

镀膜技术的发展促进了长周期光纤光栅技术与生物化学技术的结合。通过镀膜技术来增强长周期光纤光栅的折射率灵敏度使得长周期光纤光栅在很多领域更具有明显的优势。将高折射率的纳米薄膜镀在长周期光纤光栅表面,能够显著地提高长周期光纤光栅的折射率灵敏度。长周期光纤光栅作为折射率传感器时,其高灵敏度传感折射率感区间限制在包层折射率附近,而对于生物化学传感,水折射率附近或者更高的高折区间的灵敏度极其重要。为了解决长周期光纤光栅这一缺陷,Rees等^[116]提出将一层折射率高于光纤包层材料、厚度在百纳米量级的薄膜镀在长周期光纤光栅表面。当薄膜

厚度达到某一特定值时,长周期光纤光栅对环境折射率的灵敏度有明显增加。当环境折射率超过包层材料折射率时,长周期光纤光栅仍然能够工作。Davies等^[117]采用溶胶凝胶法在长周期光纤光栅表面制备二氧化钛(TiO_2)/二氧化硅(SiO_2)纳米薄膜。此种方法明显地提高了长周期光纤光栅在 1.42~1.44 折射率范围内的折射率灵敏度。对于 1.33 左右的水环境下的折射率灵敏度比未涂覆之前也有显著提高。如图 43 所示,Coelho等^[118]对长周期光纤光栅进行金属氧化物镀膜,并用于环境折射率传感器。对于 Ni、Ti、Al 和 Cr 不同金属氧化物,分别取得了 10437 nm/RIU (1.432)、1150 nm/RIU (1.400)、20125 nm/RIU (1.448) 和 875 nm/RIU (1.420) 的环境折射率灵敏度,与裸长周期光纤光栅相比,金属氧化物涂覆的长周期光纤光栅的折射率灵敏度明显增强,可以用于环境折射率高于光纤包层的系统。

在随后的研究中,更多的镀膜工艺被采用,薄膜的光学性能越来越优良;同时,对镀膜长周期光纤光栅的折射率传感机制的理论研究不断完善,Cusano等^[116,119-121]用模式转换理论对镀膜长周期光纤光栅的传感特性进行了详尽、深入的解释。长周期光纤光栅表面镀上几百纳米厚的折射率远高于包层材料的薄膜以后,包层模式的有效折射率受到薄膜特性(折射率和厚度)以及外界环境折射率的影响。在上述三个参数当中,保持两个参数不变(例如薄膜厚度、薄膜折射率

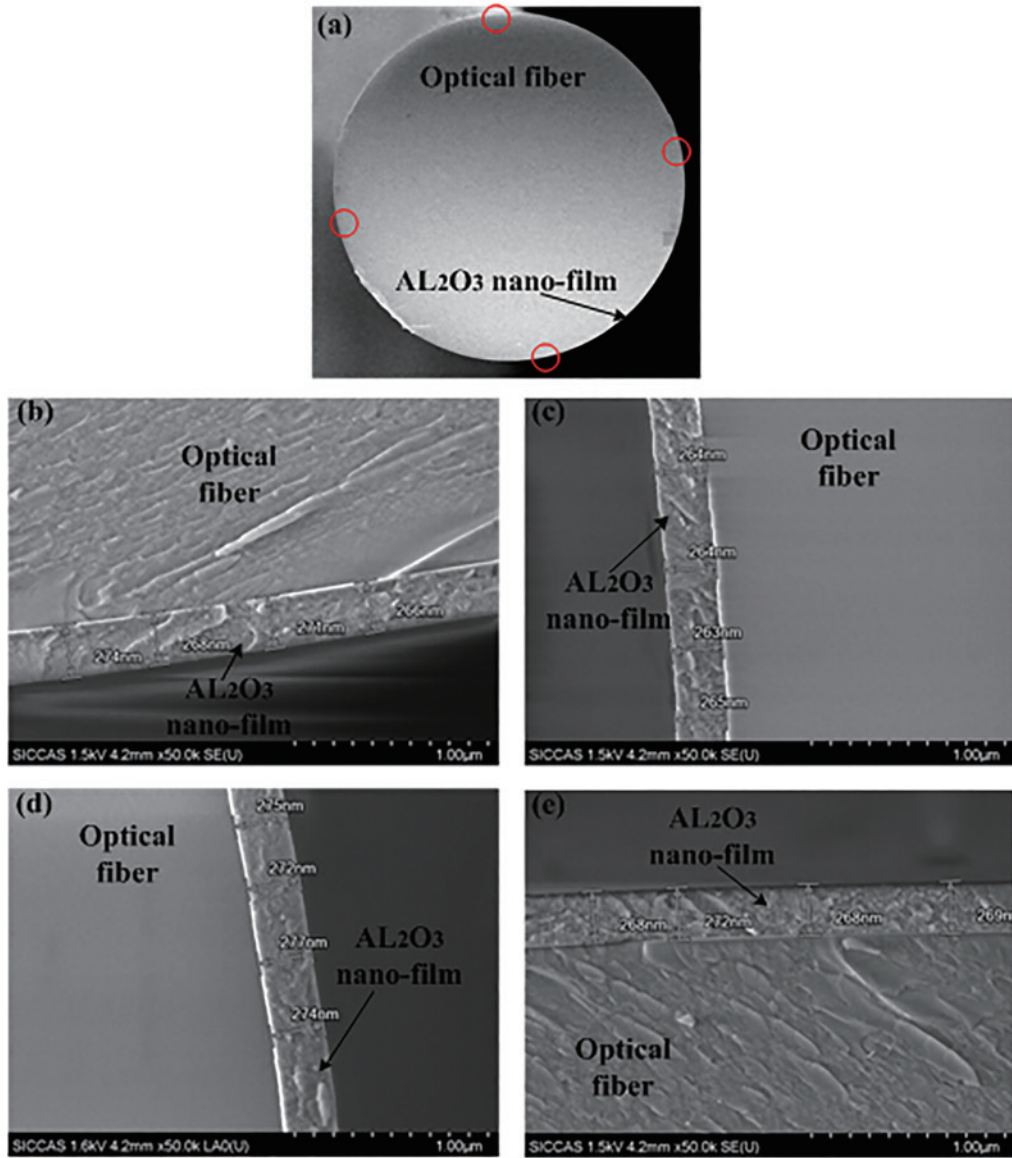
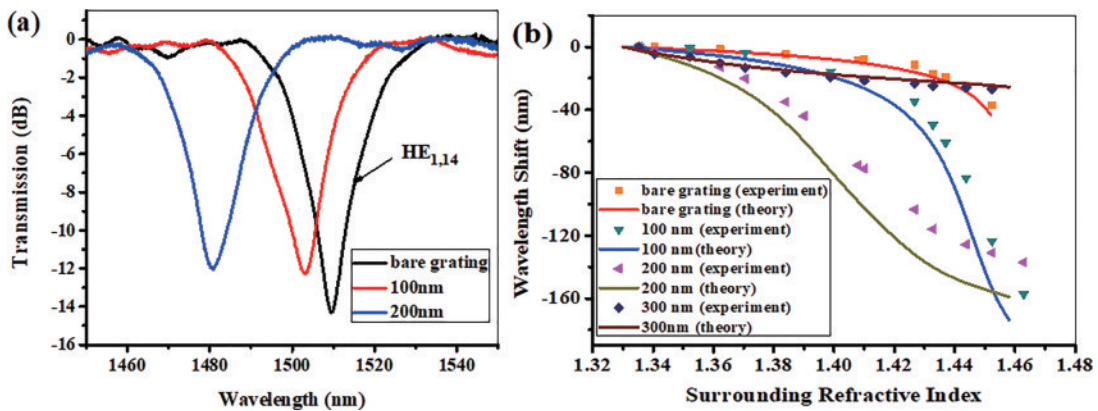
图 43 镀氧化物膜长周期光纤光栅用于环境折射率传感示意图^[118]Fig. 43 Schematic diagram of oxide film coated LPFG for environmental refractive index sensing^[118]

不变),另一个参数环境折射率增加,包层模式的有效折射率会随之上升。当环境折射率增加到某个特定数值时,最低阶次包层模式 $HE_{1,2}$ 的有效折射率将超过包层材料的折射率, $HE_{1,2}$ 模式在包层中的电磁场由振荡衰减的形式变化为按指数衰减的形式,即 $HE_{1,2}$ 模式的能量不再集中在包层当中,而是转移到薄膜当中。与此同时,高一阶次的包层模 $EH_{1,3}$ 的有效折射率增加到 $HE_{1,2}$ 模式在环境折射率变化前的初始值,可认为 $EH_{1,3}$ 模式转换为 $HE_{1,2}$ 模式。对于其他包层模式也发生类似的高阶次模式向相邻低一阶次包层模式的转换这一现象称为模式转换^[121]。引起模式转换的环境折射率变化区间称为转换区。在转换区域当中,包层模的有效折射率发生很大变化,根据相位匹配条件可知,长周期光纤光栅的共振波长会产生剧烈漂移,使得长周期光纤光栅共振波长对环境折射率的灵敏度大大提高。

Zou 等^[27]通过用原子层沉积(ALD)技术在长周期光纤光栅表面镀高折射率 Al_2O_3 纳米薄膜,如图 44 所示,镀膜后长周期光纤光栅的 SEM 图片。通过实验研究了不同薄膜参数条件下,硼锆共掺的光纤上写入的长周期光纤光栅对环境折射率的敏感特性。如图 45 所示,镀 100 nm 厚 Al_2O_3 薄膜的长周期光纤光栅 $HE_{1,14}$ 模式在转换区内,环境折射率灵敏度达到 -3000 nm/RIU,是裸长周期光纤光栅的 3 倍。另外,结合色散转折点效应和模式转换,可以优化特定折射率范围内的灵敏度。

如图 46 所示,Zou 等^[122]分别讨论了色散拐点和模式转换对折射率灵敏度的增强作用,揭示了这些机制在不同折射率传感范围内的相对重要性。利用单个长周期光纤光栅研究了 $HE_{1,18}$ 和 $HE_{1,20}$ 的模式转换,得到了两个高灵敏度范围,并采用 ALD 技术在长周期光纤光栅表面沉积二氧化钛(TiO_2)纳米膜。在环境折射率范围 $1.336 \sim 1.3397$ 和 $1.4526 \sim 1.4561$ 内分别实现了 1104 nm/RIU 和 42000 nm/RIU 的高折射率灵敏度传感。

基于长周期光纤光栅的折射率特性,将长周期光纤光栅与一些新型材料结合,可以拓展长周期光纤光栅在生物、化学、物理上的传感应用。Wang 等^[123]将聚乙二醇(PEG)和聚乙烯醇(PVA)涂覆长周期光纤光栅表面实现湿度传感,涂覆后的长周期光纤光栅如图 47 所示。PEG/PVA 均是亲水性的湿度敏感型高分子材料,当 PEG/PVA 材料涂覆在长周期光纤光栅表面时,环境湿度的变化会转变为材料折射率的变化。如图 48 所示,实验结果表明,分子量为 600 的 PEG 和黏度为 (54~66) 的 PVA 构成混合膜制备的湿度传感器具有最佳的湿度传感特性。其中,质量分数为 15% 的 PEG 溶液与质量分数为 3% 的 PVA 溶液以 2:1 的体积比配成混合溶液后,涂覆在长周期光纤光栅表面制作的湿度传感器,在湿度范围为 50%~75% RH,可实现最大的湿度灵敏度为 2.485 nm/%RH,其湿度测量范围在 50%RH~95%RH 之间,并且传感器表现出

图 44 镀 Al_2O_3 薄膜长周期光纤光栅 SEM 图片^[27]Fig. 44 SEM picture of the cross section of the LPFG coated with Al_2O_3 nano-film^[27]图 45 镀 Al_2O_3 薄膜长周期光纤光栅折射率特性^[27]Fig. 45 SRI characteristics of LPFG coating with Al_2O_3 nano film^[27]

良好的可逆性、重复性、稳定性。

如图 49 所示, Zhang 等^[124] 将长周期光纤光栅封装在磁流体中, 由于磁流体具有可调折射率特性, 在

外界磁场的作用下, 长周期光纤光栅环境折射率发生变化, 进而实现磁场测量。由于与常规单模光纤相比, 细径光纤 LPFG 具有更高的折射率灵敏度, Jiang

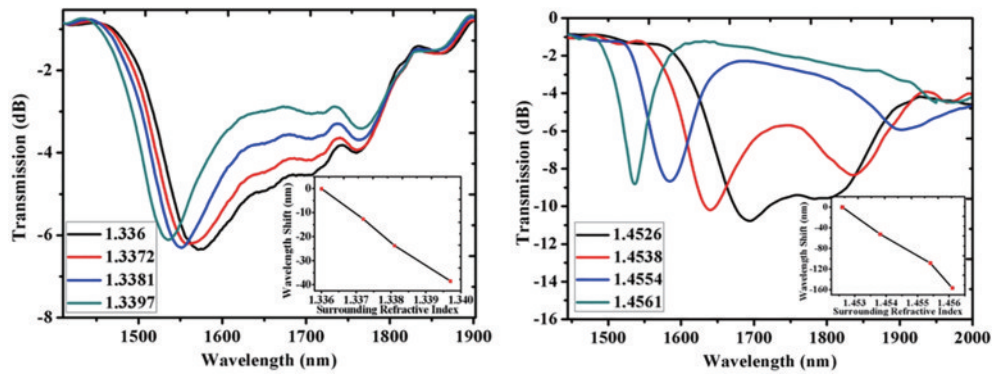
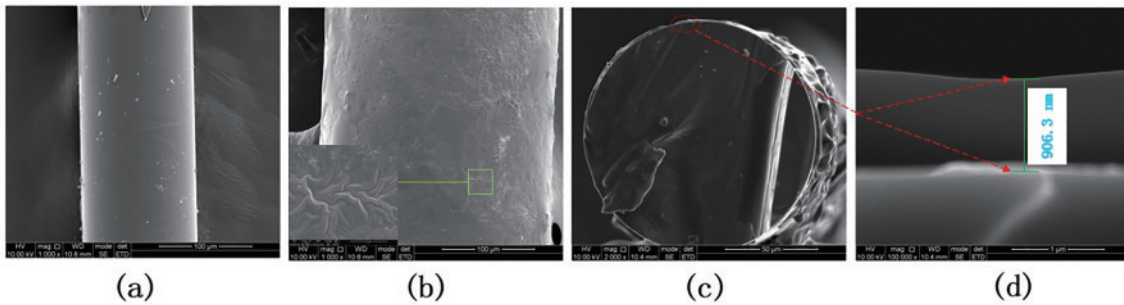
图 46 镀 TiO₂ 薄膜长周期光纤光栅折射率特性^[122]Fig. 46 SRI characteristics of LPFG coating with TiO₂ nano film^[122]

图 47 涂覆长周期光纤光栅 SEM 图。(a)PVA 涂覆,(b)PEG/PVA 涂覆,(c)涂覆长周期光纤光栅横截面,(d)涂覆厚度^[123]
 Fig. 47 SEM images of the coated LPFG. (a) Fiber coated with pure PVA film; (b) fiber coated with PEG/PVA composite film;
 (c) cross-section of the coated LPFG; (d) film thickness of the coated film^[123]

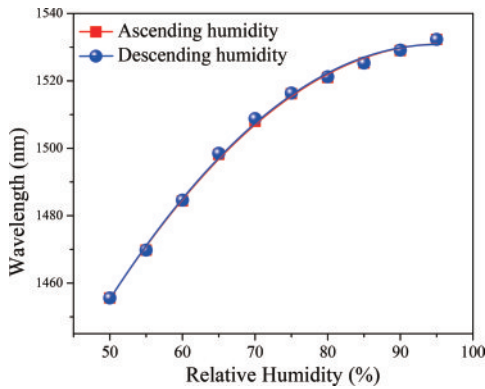
图 48 PVA/PEG 涂覆长周期光纤光栅湿度传感特性^[123]

Fig. 48 Dependence of the resonance wavelength under the ascending and descending humidity process of PEG/
 PVA coated LPFG^[123]

等^[125]将细径保偏光纤 LPFG 与磁流体结合,提出了一种高灵敏度的矢量磁场传感器。在外界磁场作用下,细径保偏光纤周围形成非均匀折射率分布,如图 50^[125]所示,这种非均匀折射率分布使得该磁场传感器具有一定的方向性。如图 51^[125]所示,在 0~10.5 mT 磁场强度的变化范围内,长周期光纤光栅最大波长漂移的灵敏度达到 -618 pm/mT。最大的方向传感的灵敏度是 72 pm/(°)。基于光谱分析仪 0.02 nm 的波长分辨率,该传感器能检测到的最小磁场强度约为 32.3 μT。

4.7 级联长周期光纤光栅传感特性

与常规长周期光纤光栅相比,级联长周期光纤光栅具有更高的测量精度,尤其是对温度、应变等低灵敏度的物理量的测量有较大的优势。Sáez-Rodríguez

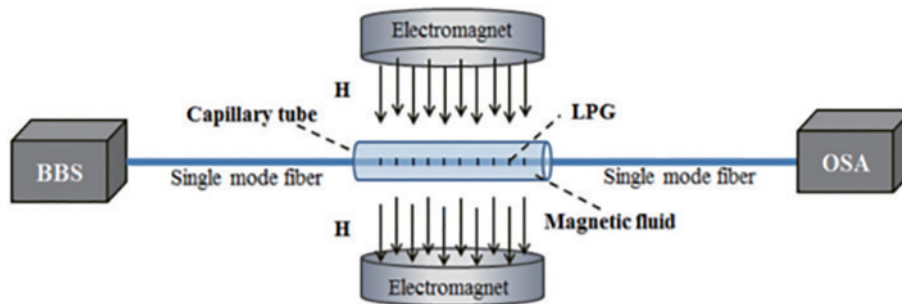
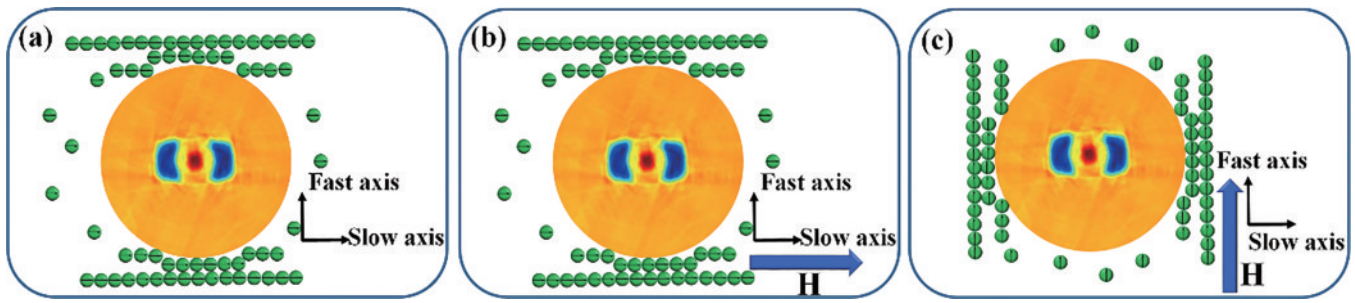
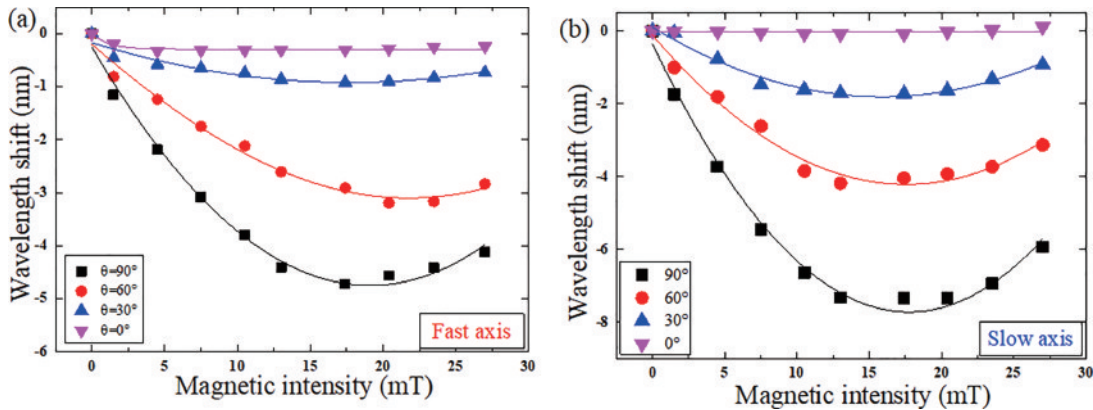
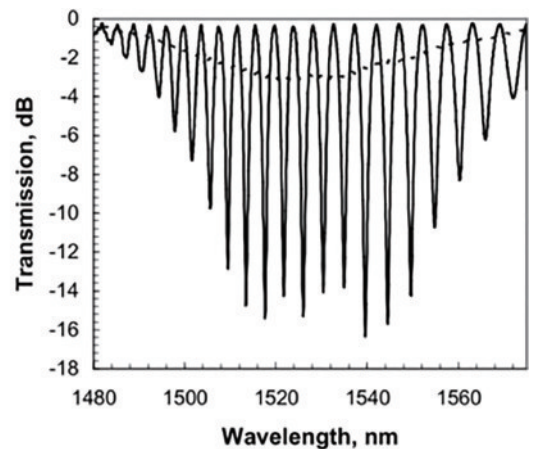
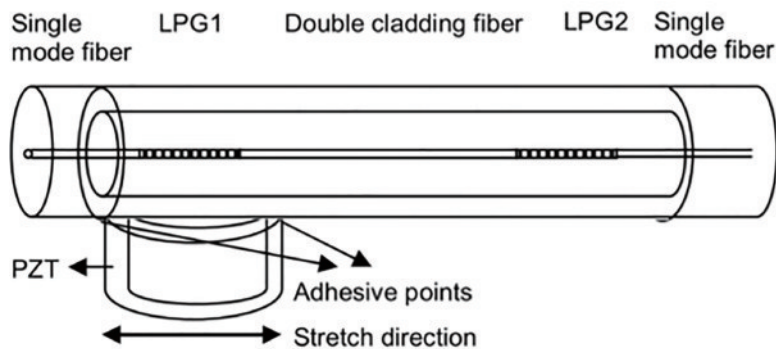
图 49 长周期光纤光栅与磁流体结合实现磁场传感装置图^[124]

Fig. 49 Experimental setup of magnetic field sensor based on LPFG and magnetic fluid^[124]

图 50 磁流体包裹细径保偏光纤横截面示意图^[125]Fig. 50 Transverse profile schematic diagram of thin cladding polarization maintaining fiber immersion into magnetic fluid^[125]图 51 磁流体包裹细径保偏光纤长周期光纤光栅磁场传感特性。(a)快轴模式;(b)慢轴模式^[125]Fig. 51 Magnetic field characteristics of thin cladding polarization maintaining fiber immersion into magnetic fluid. (a) Fast axis mode; (b) slow axis mode^[125]

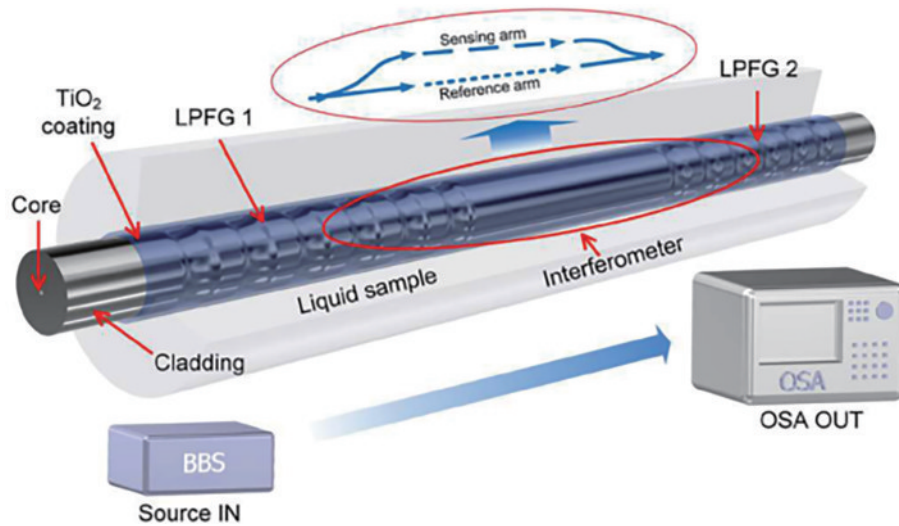
等^[126]在双包层光纤中,级联声光长周期光纤光栅制作 M-Z 干涉仪,可以在数十 kHz 的频率下实现有效的光调制。如图 52 所示,长 10.45 cm、峰间距 4.2 nm 的干涉仪,可在 50 nm 左右的波长范围内实现传感测量,并

且该干涉仪的插入损耗小,对输入偏振态的灵敏度低,对周围介质的折射率的依赖性可以忽略不计,用于温度传感时,其温度灵敏度为 0.11 nm/°C。

图 52 级联长周期光纤光栅干涉仪示意图与其透射光谱图^[126]Fig. 52 Diagram of the cascaded LPFG interferometer and spectrum of the interferometer^[126]

将级联长周期光纤光栅与折射率传感增敏技术结合,可以提高其传感灵敏度。Araujo 等^[83]分析了基于级联长周期光纤光栅干涉仪的波长灵敏度和光谱分辨率,该干涉仪通过两个相同的无涂层和 TiO₂ 涂层长周期光纤光栅的组合实现折射传感,所制备的

M-Z 干涉仪示意图如图 53 所示。涂层厚度为 30 nm,涂层长度为 3 cm,波长位移灵敏度为 216 nm/RIU,其光谱分辨率为 1.1×10^{-4} RIU。尽管 2 cm 长、30 nm 厚的 TiO₂ 涂层的 M-Z 干涉仪波长位移灵敏度只有 142 nm/RIU,但测量得到的光谱分辨率为

图 53 级联镀膜长周期光纤光栅干涉仪示意图^[83]Fig. 53 Schematic diagram of cascaded coated long period fiber grating interferometer^[83]

1.8×10^{-5} RIU, 比单个长周期光纤光栅高一个量级, 显著提高了测量精度。

另外, 特种光纤长周期光纤光栅也可以采用级联 M-Z 干涉仪的方式, 提高传感精度, 拓展光纤光栅传感的应用。基于保偏光纤长周期光纤光栅的 M-Z 干涉仪能够分别在快轴与慢轴两个偏振状态形成干涉仪, 其典型光谱如图 54 所示, 由于熊猫型保偏光纤长周期光纤光栅快轴与慢轴包层模式谐振波长的温度与应变响应相反, 利用保偏光纤长周期光纤光栅 M-Z 干涉仪可以实现温度与应变的同时测量, 其快轴与慢轴模式的温度与应变响应如图 55 所示, 与单个保偏光纤长周期光纤光栅相比, 有更高的测量精度。

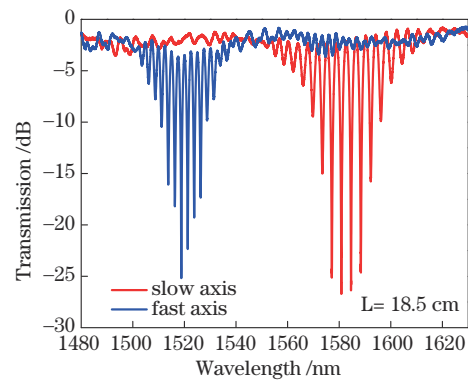


图 54 保偏光纤长周期光纤光栅干涉仪光谱图

Fig. 54 Transmission spectra of cascaded polarization-maintaining fiber LPFG

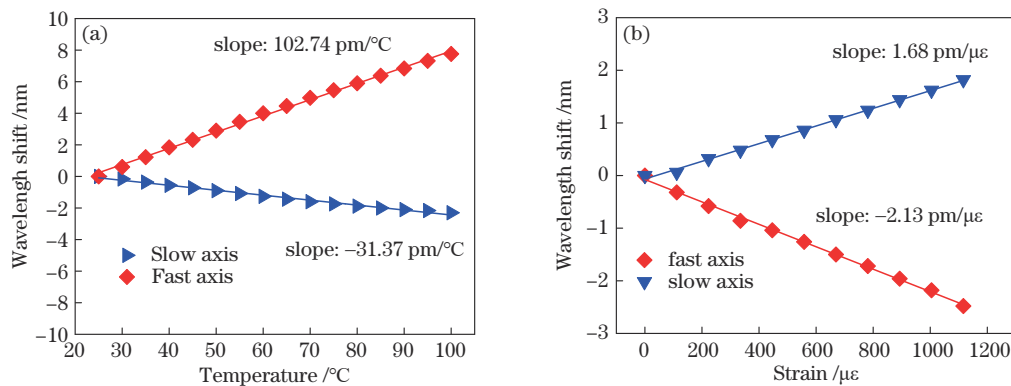


图 55 保偏光纤长周期光纤光栅干涉仪的传感特性。(a) 温度; (b) 应变

Fig. 55 Sensing characteristics of cascaded polarization-maintaining fiber LPFGs. (a) Temperature; (b) strain

5 长周期光纤光栅的光纤通信应用探索

作为全光纤器件, 长周期光纤光栅在光纤通信中被广泛应用, 比如: 滤波器、增益均衡器、模式转换器、模式耦合器、光分插复用器、偏振控制器等无论是基于

包层模耦合还是纤芯模之间耦合的长周期光纤光栅, 都有潜在的应用前景。

5.1 全光纤滤波器

掺铒光纤放大器 (EDFA) 因为其带宽可以覆盖 1550 nm 光通信窗口, 在波分复用光通信系统中有着重要的应用, 但是, 放大器的增益在整个波段的不均衡,

会造成波分复用系统中各个通道的光的信号强弱有差别,从而影响实际应用中的传输效果。尤其是放大器在通信系统中利用级联的方法使用的时候,多处的不平坦积累导致增益比较低的信道的信号传输的误码增加,从而影响信息的传输。长周期光纤光栅在 EDFA 增益平坦方面的应用是最早期的应用探索,利用长周期光纤光栅实现掺铒光纤放大器增益平坦的动态调整具有潜在的商业价值。利用长周期光纤光栅的透射损耗特性,信号在放大之后,在增益相对比较高的波段引入一定的损耗,使增益降低到合适的水平,实现增益的平坦,进而达到增益均衡的功效。1996年,Vengsarkar等^[2]提出并制备了长周期光纤光栅,其插入损耗、模色散、偏振相关损耗(PDL)等参数均为其作为全光纤、低损耗的带阻滤波器奠定基础。同年,他们利用长周期光纤光栅对掺铒光纤放大器的增益谱进行了展宽,提出了一种宽带放大器,其增益变化为 $0.2\text{ dB}/30\text{ nm}$ ^[3]。同时还证明了级联放大器可以被均衡,从而使放大器的带宽提高3倍。他们还利用两个长周期光纤光栅,设计了一个增益平坦的宽带 EDFA,其平坦增益带宽超过 40 nm ,噪声低于 4.0 dB ,输出功率接近 $+15\text{ dBm}$ ^[127]。2003年,Wang等^[22]提出了一种基于长周期光纤光栅的可调谐增益均衡器,具有波长调谐范围宽、调谐速度快、操作方便、全光纤等优点,在 33 nm 的带宽下,可以获得 0.5 dB 的平坦度。2004年,Rao等^[128]利用二氧化碳激光制备的长周期光纤光栅作为增益均衡器,分别得到了带宽为 32 nm 、 33 nm 、 34 nm 时平坦度波动为 $\pm 0.7\text{ dB}$ 、 $\pm 0.5\text{ dB}$ 、 $< 0.5\text{ dB}$ 。2005年,Rao等^[129]提出了基于长周期光纤光栅的全光纤动态增益均衡器,通过直接控制长周期光纤光栅的弯曲曲率来平坦 EDFA 的增益,如图 56 所示。他们在弯曲不敏感光纤上制备长周期光纤光栅,利用光栅独特的弯曲特性可以更好地控制增益大小和具有更快的响应

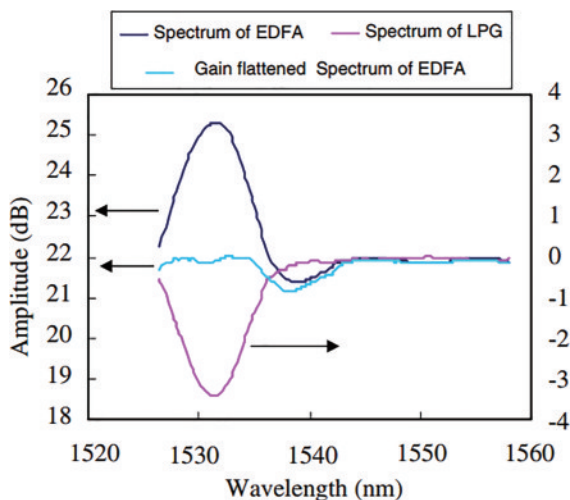


图 56 基于长周期光纤光栅增益均衡器的增益谱示意图^[129]
Fig. 56 Schematic diagram of EDFA gain spectrum based on LPFG gain equalizer^[129]

时间。

2007年,Zhu等^[130]提出采用二氧化碳激光制备的扭转长周期光纤光栅的方法实现 EDFA 的动态增益平坦化,相比较常规长周期光纤光栅,这种扭转光纤中写入的长周期光纤光栅的横向载荷敏感性提高了7倍,提供了更大的可调范围,同时对方向依赖性大大减弱,使增益均衡器的封装更容易。利用这种技术,制备了带宽为 32 nm 时增益波动小于 0.5 dB 平坦度的增益均衡器。

长周期光纤光栅具有优秀的滤波特性,通过改变写入参数,制备具有不同透射谱的光栅,可以得到不同滤波功能的滤波器,这在光纤通信中有广泛应用前景。1998年,Gu^[131]利用两个长周期光纤光栅级联组成 M-Z 干涉仪,形成多波长带通滤波结构的光谱特性,由于两个长周期光纤光栅之间的光纤会引起包层模与纤芯模之间的相位延迟,所以可以通过增加两个长周期光纤光栅之间的光纤长度来减小波长间距和损耗峰的带宽,这样可以方便地调整滤波器的波长间距和带宽。如图 57(a)和(b)所示,1998年,Qian等^[132]根据耦合模理论和传输矩阵对相移长周期光纤光栅的传输特性进行理论分析,提出了一种基于相移长周期光纤光栅的高效增益滤波器,通过选择不同的相移来适应不同的增益谱形状。该滤波器是由一个光栅实现的,具有制备简单的优点,因此,在波分复用系统中具有潜在的应用价值。2002年,Chen^[133]提出了一种基于对称多相移的长周期光纤光栅的频谱平坦化的带通滤波器,利用两相移和三相移光栅,然后适当调整两个光栅之间

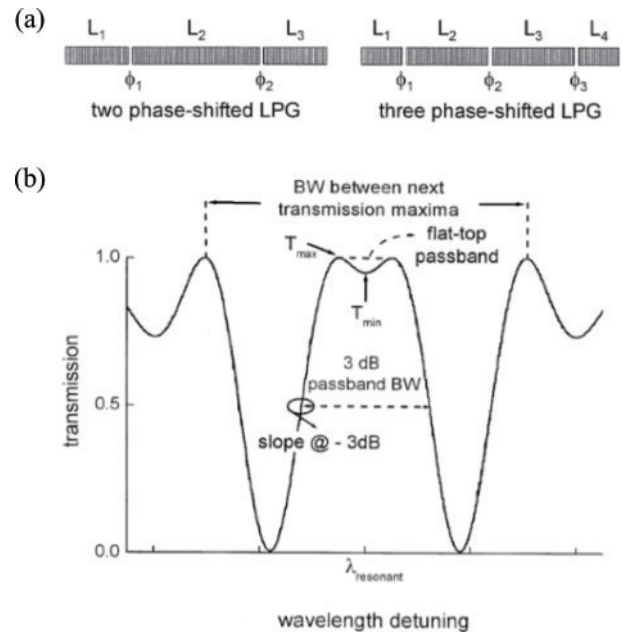


图 57 长周期光纤光栅。(a)两个和三个相移长周期光纤光栅;
(b)基于长周期光纤光栅的滤波器的通带特性^[133]
Fig. 57 LPFG. (a) Schematic of two and three phase-shifted LPFGs; (b) illustration of passband characteristics of filters based on LPFGs^[133]

的长度在相移之间的比例和耦合系数,从而更好地调节滤波器的响应。文中定义相邻两个光栅长度之比为参数 C :当滤波器是基于两相移长周期光纤光栅时,调节光栅的参数,使 C 等于 2,可以实现频谱最平坦的带通滤波器;当滤波器是基于三相移长周期光纤光栅时,调节光栅的参数,使 C 处于 2.3~2.5 之间,都可以实现频谱最平坦的带通滤波器。2003 年,Zhu 等^[134]提出相移长周期光纤光栅与一个常规长周期光纤光栅级联的增益平坦型光纤滤波器,实验上实现了在不均衡的频谱下,3 dB 的带宽从 18 nm 增加到 46 nm,并且在该带宽上的增益纹波减少到大约 0.9 dB,该器件的性能提高了 2~3 倍。另外,可以通过选择不同的相移调控增益谱。2008 年,Navruz 等^[135]提出一种基于周期性的相移长周期光纤光栅优化设计的多频带滤波器。文中通过改变光栅长度和相移周期,可以控制反射波段的光谱位置和带宽。此外,优化相移长周期光纤光栅可以在传输频谱内产生所需的抑制频带数,优化相移序列,可以很容易地从透射谱中去除一些多余的抑制带。

通过调整光栅的总长度和耦合系数,可以根据具体需要调整滤波器的响应。如图 58(a)所示,2007 年,Shin 等^[136]研制了一种由二氧化碳激光诱导的具有相反螺旋方向的两个螺旋长周期光纤光栅组成的可调谐全光纤带阻滤波器。利用螺旋长周期光纤光栅扭转特性的原理,由于在扭转时,随着扭转角度的变化,螺旋

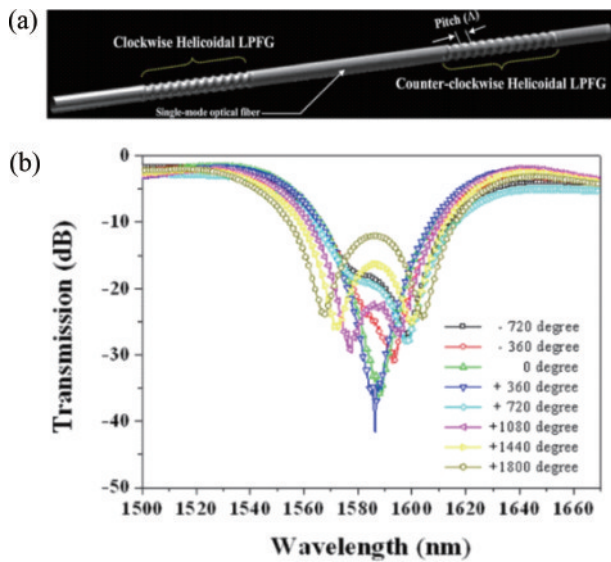


图 58 可调谐全光纤带阻滤波器。(a)基于二氧化碳激光诱导的螺旋长周期光纤光栅对螺旋度相反的带宽可调全光纤带阻滤波器原理图;(b)根据旋转角度制备的可调谐全光纤滤波器的光谱特性^[136]

Fig. 58 Tunable all-fiber band rejection filters. (a) Schematic of the bandwidth-tunable all-fiber band rejection filters based on a carbon dioxide laser-induced helicoidal LPFG pair of opposite helicities; (b) spectral characteristic of the fabricated bandwidth-tunable all-fiber band rejection filters according to the rotation angle^[136]

长周期光纤光栅的周期会相应地减小或者增大,然后谐振峰会随着周期的减小或者增大会发生“蓝移”或者“红移”。当扭转 to 一定角度时,两个光栅的谐振峰会发生重叠,这就形成了一个比较宽的谐振峰,如图 58(b)所示,通过调节扭转的角度,实现了一个额外插入损耗小于 1.3 dB、偏振相关损耗小于 1.5 dB、15 dB 带宽超过 27 nm 的可调带宽的滤波器。该滤波器带宽调谐的灵活性高、额外插入损耗低,而且对偏振不敏感。

2007 年,Kim 等^[137]提出了一种基于遗传算法的合成方法,利用双阻滤波器串联而成的长周期光纤光栅结构,设计了一种平顶带通滤波器。该方法以级联长周期光纤光栅为结构,通过适当地诱导折射率的变化,从而制备出符合要求的长周期光纤光栅,进而在一定波长范围内设计出性能优良的平顶带通滤波器。2009 年,Zhu 等^[138]提出了一种具有可调谐带宽的全光纤带阻滤波器,该滤波器是通过将一个常规长周期光纤光栅与扭转长周期光纤光栅(R-LPFG)级联实现的,如图 59 所示。扭转长周期光纤光栅和螺旋长周期光纤光栅不同,它是二氧化碳激光照射在扭转的单模光纤上制备光栅,然后撤掉扭转力,此时光栅的谐振峰就会分裂成两个谐振峰^[139, 26]。当使用的二氧化碳激光功率足够大,可以沿光纤产生旋转沟槽时,波长分裂效应对施加在光栅上的轴向应变特别敏感。另外还可以通过控制旋转速度调节光栅的带宽大小。为了补偿由于波长分裂导致的谐振峰对比度下降,将具有匹配特性的普通长周期光纤光栅与扭转长周期光纤光栅串联,实现一种 15 dB 带宽大于 16.3 nm 的偏振不敏感的

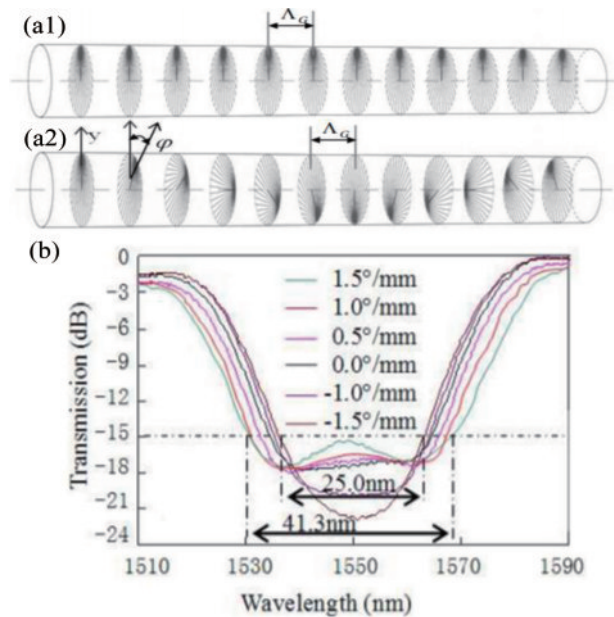


图 59 可调谐带宽的全光纤带阻滤波器。(a1)长周期光纤光栅;(a2)扭转长周期光纤光栅;(b)光谱特性^[138]

Fig. 59 Tunable bandwidth all-fiber rejection filters. Schematic diagrams of (a1) LPFG; (a2) R-LPFG; (b) spectral characteristics^[138]

可调谐滤波器,该滤波器可以作为噪声滤波器或动态增益均衡器在光通信系统中得到广泛应用。另外,他们利用切趾法制备的长周期光纤光栅,实现了顶部带宽高达 10 nm、平坦度小于 0.5 dB 的滤波器^[140]。

2016 年,Inoue 等^[34]提出了一种长度比较短的基于两个具有相同周期和周期数,螺旋方向相反的螺旋长周期光纤光栅连续级联而成的平顶带阻滤波器。如图 60 所示,该方法中的两个级联光栅是在光栅振幅上没有运用复杂的切趾法。而且级联后的光栅小于 4.6 cm,他们成功地设计出 0.5 dB 和 1 dB 带宽分别为 13 nm 和 15 nm 的平坦滤波器。但是,如果保持如此短的光栅的长度,又要提高带宽,这种滤波器就必须通过牺牲滤波器的抑制比来实现。针对这个问题,2017 年,Zhu 等^[35]提出了两种基于两个具有相反方向的螺旋长周期光纤光栅级联而成的平顶带阻滤波器。一个是基于直接级联两个不同周期的相反螺旋方向的光栅的平顶带阻滤波器,其抑制深度约为 18.5 dB、1 dB 带宽为 13 nm,另一个是在第二个螺旋光栅的后面加一个光纤反光镜和一个环形器制备的平顶的滤波器,其抑制深度大于 34 dB、2 dB 带宽为 15 nm。这两个滤波器的特殊在于两个螺旋长周期光纤光栅的周期

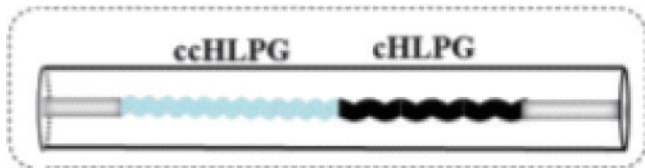


图 60 基于二氧化碳激光器制备级联螺旋长周期光纤光栅^[34]
Fig. 60 Cascaded helical LPFGs written by carbon dioxide laser^[34]

分别是 630 μm 和 625 μm ,周期相差 5 μm ,导致对应的两个谐振波长有 10 nm 的分离。

然而,以上基于级联光栅实现的滤波器都有一个共同的关键性的问题,即光栅对偏振比较敏感,这在光纤通信中有一定的限制。因此,偏振不敏感的带阻滤波器的研究对光纤通信和光纤传感系统至关重要。2018 年,Zhu 等^[141]提出一种级联单个螺旋长周期,利用螺旋长周期光纤光栅与包层剥离器相结合的方法,实现了一种简单、高效的偏振不敏感平顶带阻滤波器,如图 61 所示,并进行了仿真和实验的验证。与以往基于单个螺旋光栅的方法不同的是该光栅既对输入光偏振不敏感,也不会减小谐振峰深度。这个包层模剥离器是利用油的折射率较高,第一段螺旋长周期光纤光栅产生的包层模从油区域的包层中溢出,而且不能耦合到第二段螺旋长周期光纤光栅的原理实现的,实现了一个抑制深度为 17 dB、1 dB 带宽为 14 nm、最大偏振相关损耗为 1.5 dB 的平顶滤波器。

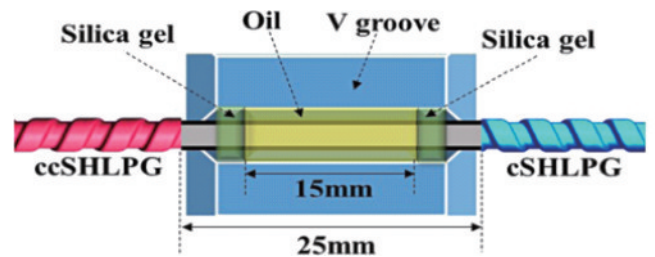


图 61 保持部分螺旋长周期光纤光栅浸油的 V 型槽支架的俯视图的原理图^[141]

Fig. 61 Top view of the V groove holder that was used to keep part of the helical LPFG simmered in oil^[141]

表 4 级联长周期光纤光栅的比较

Table 4 Comparison of cascaded long period fiber gratings

Cascaded LPFGs	Specification	Reference
Helical LPFG pair with opposite helicities and same grating period	Bandwidth tunable, 15 dB bandwidth > 27 nm, grating length > 10 cm, and polarization insensitive	[136]
Cascaded LPFGs with different grating periods	Theoretical calculation	[137]
Cascaded gratings consists of conventional and helical LPFGs	Grating length < 5.13 cm, bandwidth tunable, 15 dB bandwidth > 16.3 nm, and PDL < 0.9 dB	[138]
Helical LPFG pair with opposite helicities and same grating period	Grating length < 4.6 cm, and 1 dB bandwidth > 15 nm	[34]
Helical LPFG pair with opposite helicities and different grating periods	Grating length is 5.02 cm, 1 dB bandwidth > 13 nm, and dependent on the incident polarization	[35]
Helical LPFG pair with opposite helicities, combined with a cladding-mode stripper	1 dB bandwidth is 14 nm, and polarization insensitive	[141]

5.2 模式转换器

随着通信技术的快速发展,网络带宽需求逐渐增加,增加通信容量是一个亟待解决的问题。在 2010 年初,作为低成本、长距离传输的空分复用技术被提出,空分复用技术可以利用空间的维度和自然空间作为传输通道,这为通信带宽的增加提供了很好的解决方法。空

分复用技术可以利用并行光纤光束,比如,少模光纤、多模光纤和多芯光纤等。少模光纤的模式相对比较少,在传输的过程中,不容易发生信号的串扰和模式的相互耦合,基于少模光纤的模式复用技术是空分复用技术的重要形式。模式转换器是模式复用系统的关键组件之一,其作用就是将少模光纤中纤芯的基模转换成光纤所支

持的高阶纤芯模式。另外,少模光纤模式转换器也可以作为一种全光纤轨道角动量(OAM)光束产生器,基于OAM的模分复用技术同样可以增加通信容量。模式转换器可分为三大类:体光型、波导型和全光纤型模式转换器。近年来,由于全光纤器件体积小,易操作,抗干扰能力强等的优点,基于不同类型的少模光纤长周期光纤光栅的全光纤模式转换器相继被提出。

早在 1990 年, Hill 等^[142]提出一种利用紫外激光逐点刻写的光纤光栅,实现了由基模(LP₀₁)到高阶模

式(LP₁₁)的转换。2002 年, Ramachandran 等^[14]用仿真的方法实现了一种基于耦合效率高于 99% 的带宽可调的少模光纤长周期光纤光栅的模式转换器。这种模式转换器的带宽达到 63 nm, 这里的少模光纤是经过适当的参数调整得到的, 使得光栅相位匹配条件在很大的光谱范围内得到满足。2006 年, Dashti 等^[143]通过在压电陶瓷上加载两束正交的声波制备声光光栅, 将 LP₀₁ 模转换成一阶 OAM 模式, 如图 62 所示。

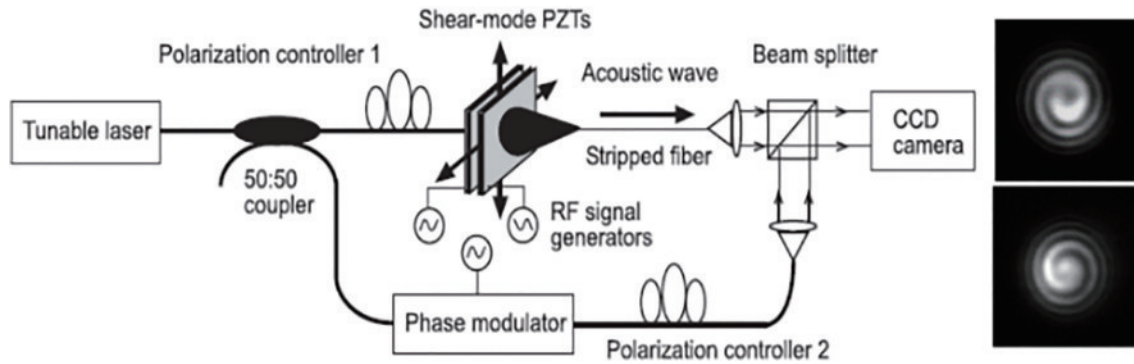


图 62 制备声光光栅和产生一阶 OAM 的实验装置图^[143]

Fig. 62 Experimental diagram of fabrication of acousto-optic grating and generation of first order OAM^[143]

2010 年, Andermahr 等^[144]通过光克尔效应改变少模光纤折射率调制制备长周期光纤光栅, 转换的效率约为 50%, 用实验的方法制备了 LP₁₁ 模的模式转换器, 因为写入光束质量的限制, 这种模式转换器的转换效率比较低。2012 年, Giles 等^[145]通过机械应力压制少模光纤的方法制备了微弯长周期光纤光栅, 并成功

分别用两模光纤实现了 LP₀₁ 模到 LP₁₁ 模的高效率的转换和用四模光纤分别实现了 LP₀₁ 模到 LP₁₁、LP₂₁ 和 LP₀₂ 模的转换, 如图 63 所示。同年, Bozinovic 等^[146]提出利用机械应力挤压涡旋光纤制备机械微弯长周期光纤光栅, 并实现了高效率的一阶 OAM 模式的激发, 如图 64 所示。2014 年, Song 等^[147]在四模光纤上制备了

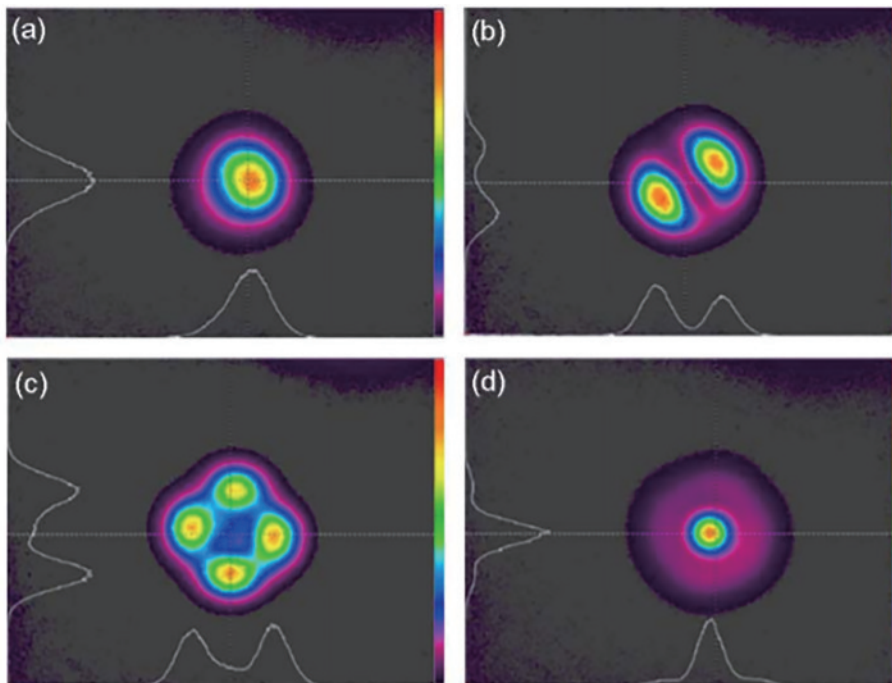


图 63 模式转换器输出端的远场模式监测。(a)LP₀₁模;(b)LP₁₁模;(c)LP₂₁模;(d)LP₀₂模^[145]

Fig. 63 Far field patterns measured at the output of the acousto-optic mode converter. (a) LP₀₁ mode; (b) LP₁₁ mode; (c) LP₂₁ mode; (d) LP₀₂ mode^[145]

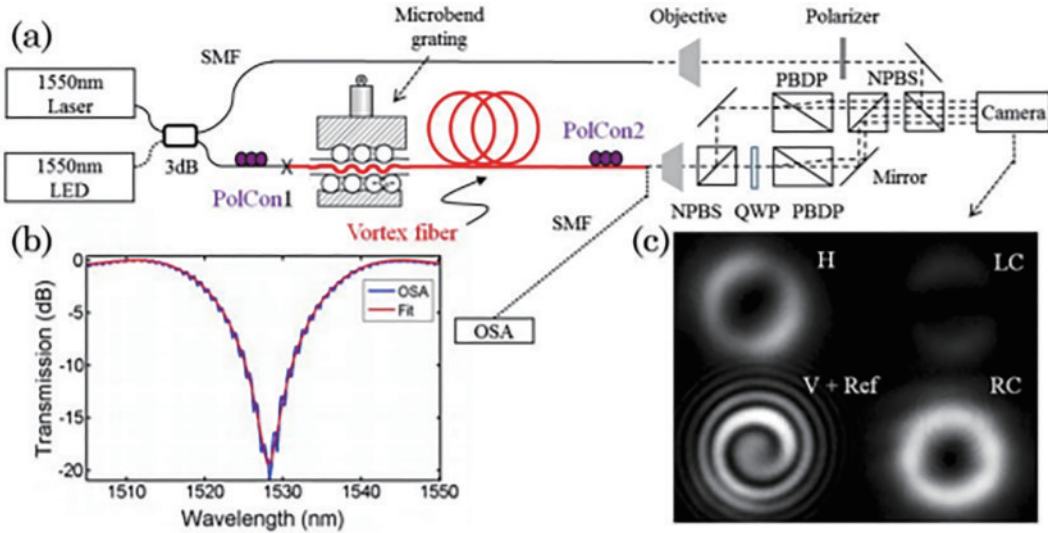


图 64 实验装置图。(a)制备微弯光栅和产生 OAM 的实验装置图;(b) LP_{01} - LP_{11} 模式转换器的透射谱;(c)一阶 OAM^[146]

Fig. 64 Experimental setup. (a) Experimental equipment diagram of fabrication of micro-bending grating and generation of OAM; (b) transmission spectrum of LP_{01} - LP_{11} mode converter by the grating; (c) pattern and interference pattern of 1st order OAM^[146]

一种声光模式转换器,它能在通信波长范围内产生光纤所支持的所有模式,提供了模分复用传输系统中空间模式之间的动态切换功能。

2014年,南开大学 Wang 等^[148]通过二氧化碳激光刻写法在少模光纤上制备了长周期光纤光栅,实现了 LP_{01} 模到 LP_{11} 模的高效率模式转换,同时还测量了这种模式转换器的温度,拉力和偏振特性。这种模式转换器对温度的变化不灵敏,对拉力的变化比较敏感,同时对偏振比较敏感。2015年,Dong 等^[149]同样用二氧化碳激光刻写法在两模光纤中制备了不同长度的长周期光纤光栅,实现了带宽可调的模式转换,如图 65 所示。这个长周期光纤光栅的周期是 1.205 mm,光栅的长度是 18.075 mm,可以实现在 C 波段 34.0 nm 的带宽下 99% 的转换效率,可以将 LP_{01} 模转换为四种高阶圆柱矢量模式或 LP_{11} 模式中的任何一种。这种模式转换器对温度变化不敏感,而且模式转换效率对输入光的偏振状态不敏感,因此可以作为稳定的模式转换器用于光纤通信系统。

2016年,Zhao 等^[9]用二氧化碳激光器在两模光纤上制备了长周期光纤光栅和倾斜长周期光纤光栅,均实现了转换效率高达 90% 的 LP_{01} 模到 LP_{11} 模的模式转换和同时产生了 ± 1 阶 OAM,如图 66 所示。改变倾斜长周期光纤光栅的倾斜角度,可以调节基于长周期光纤光栅的模式转换器的写入效率和带宽。实验测量了这两种模式转换器的特性,比如实验测得的扭转灵敏度分别为 0.37 nm/(rad/m) 和 0.50 nm/(rad/m),所以这种模式转换器不仅可以作为模分复用系统中高效的波长可调的模式转换器,还可以作为高灵敏度的光纤扭转传感器。2017年,Zhao 等^[150]用二氧化碳激光制备了一种基于长周期光纤光栅的全光纤模式转换器,如图 67 所示。

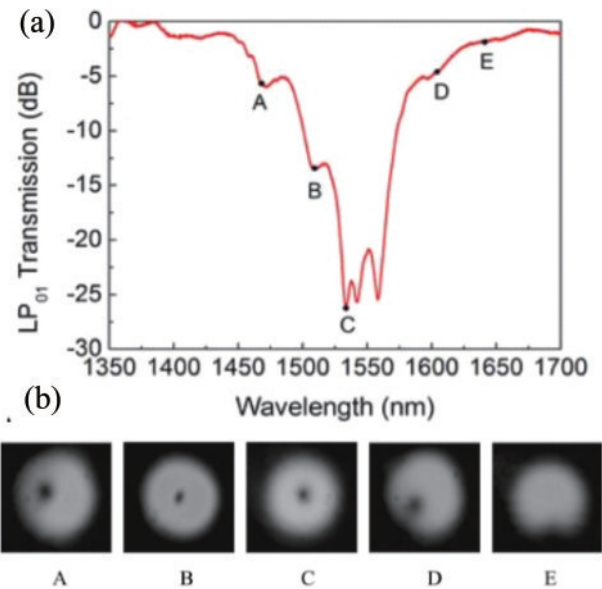


图 65 长周期光纤光栅。(a)15 个周期数的长周期光纤光栅的光谱图;(b)不同波长处的模场分布^[149]

Fig. 65 LPFG. (a) Spectrum of the LPFG with 15-period gratings; (b) mode field distribution at different wavelengths^[149]

通过具有不同周期的长周期光纤光栅实现 LP_{01} 模到不同的高阶纤芯模(LP_{11} 、 LP_{21} 和 LP_{02} 模)之间的转换,转换效率高达 99%。并实现了拓扑电荷(± 1 , ± 2)的 OAM 模式耦合。论文提出利用级联长周期光纤光栅,实现了 LP_{01} 模和 LP_{21} 模之间的模式转换,其中第一个光栅实现 LP_{01} 模到 LP_{11} 模的耦合,第二个光栅将同一波长范围的 LP_{11} 模耦合到 LP_{21} 模,利用这种级联少模光纤长周期光纤光栅实验中在 1552 nm 波长处实现了转换效率为 99.5% 的模式转换。全光纤模式转换器在模分复用光通信中具有广阔的应用前景。

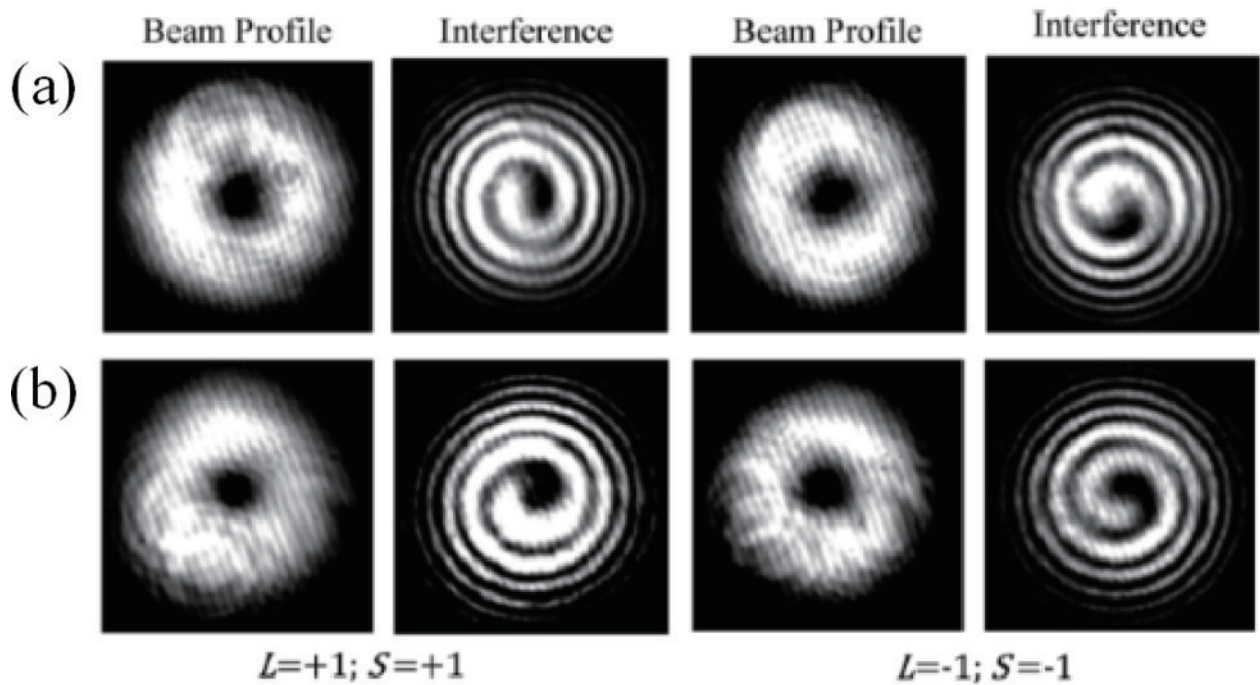


图 66 (a)长周期光纤光栅和(b)倾斜长周期光纤光栅的输出端的光斑图和干涉图^[9]

Fig. 66 Spot pattern and interference pattern at the output of (a) LPFG and (b) tilted LPFG^[9]

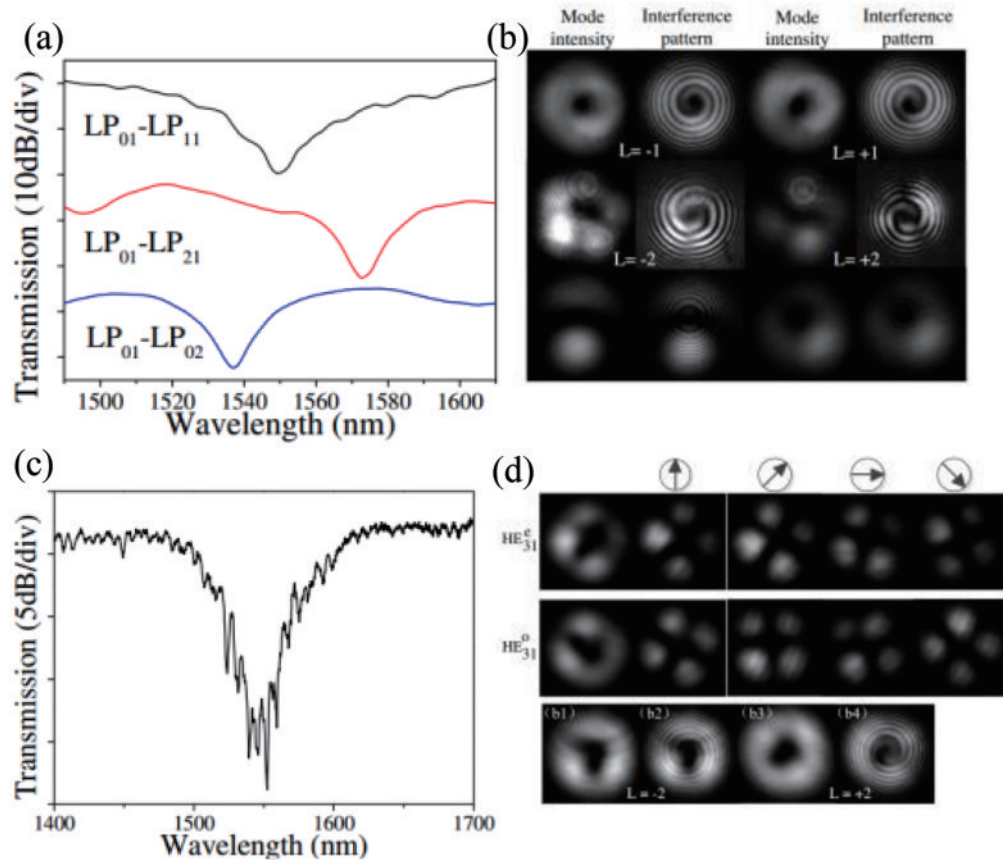


图 67 基于长周期光纤光栅的模式转换器。(a)单个基于长周期光纤光栅的模式转换器的光谱图；(b)单个模式转换器的模场分布和干涉分布图；(c)级联模式转换器的光谱图；(d)级联模式转换器的光强分布及干涉模式图^[150]

Fig. 67 Mode converter based on LPFG. (a) Spectrum of a single mode converter based on a LPFG; (b) mode field distribution and interference pattern of a single mode converter; (c) spectrum of the cascaded mode converter; (d) intensity distribution and interference patterns of the cascaded mode converter^[150]

2018年,深圳大学课题组Fu等^[37]提出了一种基于螺旋长周期光纤光栅产生的OAM光束的模式转换器,他们制备的螺旋长周期光纤光栅是在氢氧火焰加热过程中,将单模光纤扭成一段,然后将螺旋光栅切成若干段,螺旋光栅的每一段都是理想的长周期光纤光栅,都可以用来生成+1阶OAM模式,模式的转换效

率和纯度分别高达87%和91%。同年,同样采用氢氧焰加热扭转的方法制备了基于实芯六角光子晶体光纤(PCF)的OAM模式转换器,如图68^[36]所示。这种转换器可以作为+5和+6阶OAM的发生器,这两种模式转换器的偏振相关损耗都比较高,因此可作为偏振相关器件。

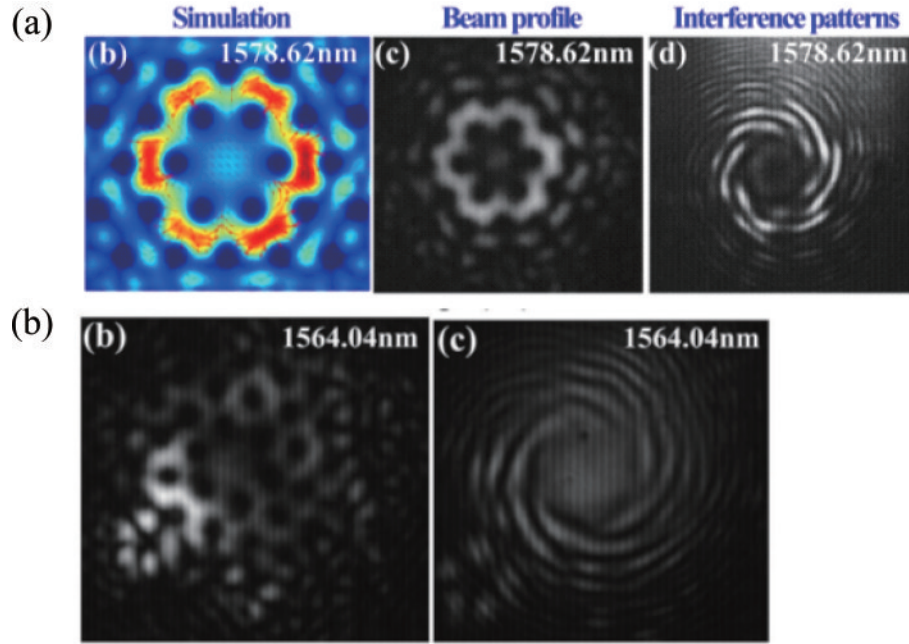


图 68 基于 PCF 的 OAM 模式转换器。(a)由螺旋光子晶体光纤产生的 OAM_{+6} 模式干涉光斑分布图;(b)由螺旋光子晶体光纤产生的 OAM_{+5} 模式干涉光斑分布图^[36]

Fig. 68 OAM mode converter based on PCF. (a) Interference patterns of the OAM_{+6} mode generated by the helical PCF; (b) interference patterns of the OAM_{+5} mode generated by the helical PCF^[36]

2018年,Zhang等^[151]提出了一种基于两模保偏光子晶体光纤(PM-PCF)的长周期光纤光栅模式转换器。该模式转换器实现了 LP_{01} 模与 LP_{11a} 模的平行偏振方向转换。与典型的传统模式转换器不同,该模式转换器最显著的特点是可以将不同波长的线性偏振 LP_{11a} 模进行分离,在长周期光纤光栅的透射光谱中出现了两个不同波长的两个谐振峰分离,如图69所示,

而且转换效率最高可达99%以上,此外,通过改变长周期光纤光栅的周期数可以相应地调节模式转换器的带宽。这种紧凑、对温度不敏感和模式可分离的保偏光子晶体光纤模式转换器在全光纤复用系统和全光纤锁模光纤激光器中都具有潜在的应用前景。

2019年,Zhang等^[38]提出了一种基于手征长周期光纤光栅的偏振无关OAM发生器。该装置成功地激发了输入光的任意偏振态下的螺旋相位,得到了理想偏振态下的OAM模式。这种光栅是在氢氧火焰加热过程中,通过扭转熔融少模光纤制备的。结果表明,光栅耦合的高阶模式具有与输入基模相同的偏振特性,基于光栅产生的OAM模式的螺旋方向性与偏振无关,完全由手征长周期光纤光栅的螺旋手性决定,这种模式转换器可以在任意偏振状态下产生OAM模式,而且这些模式的纯度高于93%。

2019年,Zhao等^[152]提出了基于三段 π 相移长周期光纤光栅级联的超宽带模式转换器,实现了10 dB和15 dB带宽分别为182 nm和116 nm的 LP_{01} 模到 LP_{11} 模的转换。该模式转换器对温度不灵敏,同时 ± 1 阶OAM模式经过模式转换器被激发。2020年,Zhao等^[153]利用二氧化碳激光器分别在光纤色散拐点波段

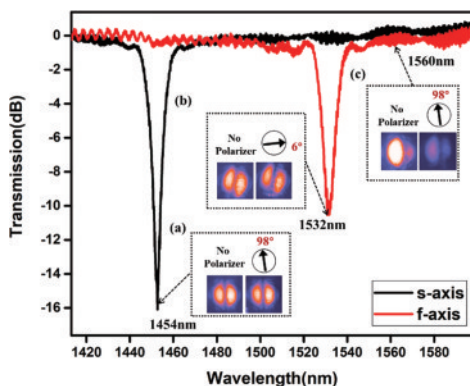


图 69 基于 PM-PCF 的模式转换器的光谱图和强度分布图^[151]
Fig. 69 Transmission spectra and intensity distributions of the PM-PCF^[151]

制备了常规长周期光纤光栅和螺旋长周期光纤光栅,实现了 10 dB 带宽分别为 300 nm 和 297 nm,波长范围覆盖了 O+E+S+C 波段。-1 阶 OAM 模式经过螺旋长周期光纤光栅在超宽波长范围被直接激发。这两种模式转换器随着扭转率从 $-36\sim 36$ rad/m 变化时,10 dB 带宽的变化分别为 52 nm 和 91 nm。因此,这两种模式转换器不仅可以作为带宽可调的超宽带模式转换器应用于超宽带的模分复用系统,还可以应用于基

于少模光纤的光纤传感系统。同年,Liu 等^[154]利用理论和实验的方法研究了基于级联长周期光纤光栅的超宽带模式转换器,实现 10 dB 带宽在 1.55 μm 波段和 2.0 μm 波段分别为 193.6 nm 和 447.5 nm 的 LP_{01} 模到 LP_{11} 模的转换,文中详细地研究了级联长周期光纤光栅的透射谱与两个光栅之间间距以及两个光栅的周期的关系。图 70^[154]为级联少模光纤长周期光纤光栅的示意图与不同波段的光谱。

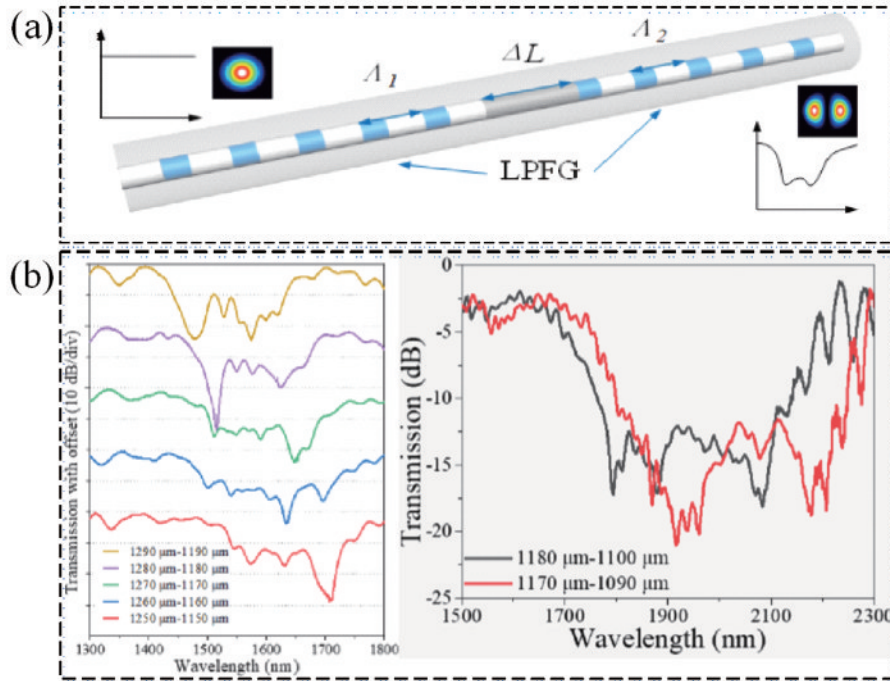


图 70 (a)级联少模光纤长周期光纤光栅的示意图;(b)不同周期的级联少模光纤长周期光纤光栅在 1.55 μm 和 2 μm 波段的透射谱^[154]
Fig. 70 (a) Schematic diagram of the cascaded few-mode fiber LPFGs; (b) transmission spectra of the cascaded few-mode fiber LPFGs with different grating periods in 1.55 μm and 2 μm waveband^[154]

5.3 全光纤起偏器

光纤起偏器是构成以偏振或者相位为主要检测量的光纤系统的重要光无源器件之一,由于全光纤起偏器具有插入损耗小,重量轻,体积小,与光纤系统的兼容性强的优点,现在已成为光纤系统产生线偏振光的关键性的无源器件。起偏器实际上可以看作是一个偏振模式的模式选择器,即被激发的两个互为正交的光偏振模式中其中一个偏振模式通过的时候另一个被截止。

20 世纪 80 年代中期之前,大部分光纤起偏器采用单模光纤制作。比如,1980 年,Bergh 等^[155]提出一种制备高质量单模光纤起偏器的方法。使用该技术制成的起偏器消光比超过 60 dB,是一种高消光比,低损耗,高偏振比的起偏器。还有,在 1983 年,Hosaka^[156]也用单模光纤研制了一种简单新颖的光纤偏振器,并对偏振器的偏振特性进行了研究。该偏振器是在一个由同心纤芯和具有 B_2O_3 掺杂包层组成的短的光纤截面上制作的。这种起偏器是由同心圆单模光纤缓冲层部件构成,因此与普通单模光纤相比具有一定的优越性。

1995 年,Wang^[157]提出了一种基于高双折射单模光纤中偏振模与包层模的耦合原理的全光纤起偏器。单模光纤在经历轴向周期扰动后,由于偏振与包层模之间会发生耦合,其衰减在一定波长处达到峰值。起偏器的工作波长可以通过扰动的空间周期的变化来调整。这种起偏器可用于相干光纤通信、光纤陀螺仪、光纤干涉仪以及一些无源和有源光纤器件中,对光纤通信的发展有很大的作用。

1997 年,Ortega 等^[158]证明了一种利用在硼锗共掺的光纤上制备的长周期光纤光栅基于偏振模色散实现高性能光纤起偏器(插入损耗小于 0.5 dB,消光比大于 30 dB)的可行性,另外,还实现了 100 nm 带宽的啁啾操作,可以提高起偏器的带宽。但是这种长周期光纤光栅的长度比较长,有 10 cm。2002 年,Ramachandran 等^[159]在少模光纤上基于长周期光纤光栅制备了一种带宽比较宽、光谱平坦值为 10 nm 的光纤起偏器。这种方法为制造具有任意偏振性、波长和带宽的起偏器提供了不同程度的设计灵活性,从而使

这种滤波器成为一种可替代体光学起偏器的可行选择。2007年, Wang^[160]提出了一种基于在光子晶体光纤上制备的长周期光纤光栅的新型光纤起偏器。如图 71 所示, 这种起偏器在 1550 nm 附近约 11 nm 的带

宽范围内有 22.83 dB 的消光比, 而且它的温度灵敏性比较低, 为 3.9 pm/°C, 克服了传统单模光纤上其他光纤起偏器对温度交叉敏感的缺点。

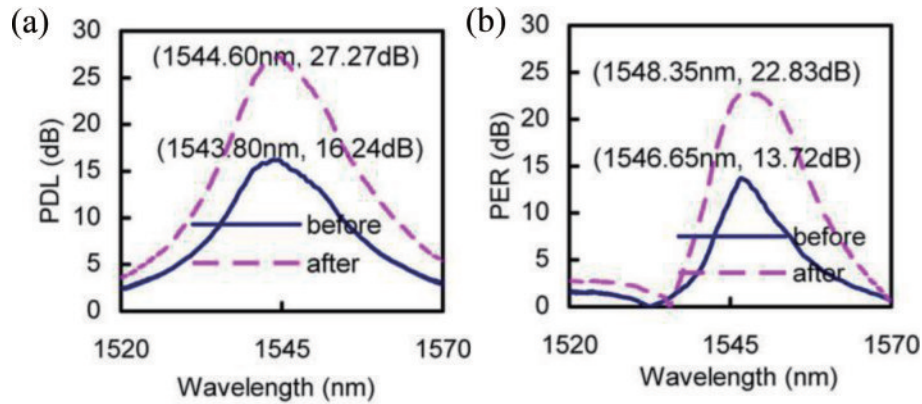


图 71 基于长周期光纤光栅的起偏器。(a)偏振相关损耗;(b)偏振消光比^[160]
Fig. 71 LPFG-based polarizer. (a) PDL; (b) polarization extinction ratio^[160]

2010年, Xue等^[161]提出了一种基于手征长周期光纤光栅的全光纤宽带圆偏起偏器。通过仿真设计了一种消光比超过 25 dB、带宽超过 60 nm、光纤长度为 9 cm 的圆偏起偏器, 起偏器的带宽等性能指标都可以通过调整设计参数来实现。2011年, Yang等^[162]分析了偏振器的带宽、消光比等性能指标与扭转率变化、光纤双折射、光栅长度等结构参数之间的关系, 为偏振器的优化设计提供了依据, 提出并仿真验证了一种利用高双折射光纤的宽带圆偏起偏器。这两种圆偏起偏器的提出都是基于理论仿真。

2012年, Yan等^[163]提出了一种基于在保偏光纤上用紫外曝光法制备的 45° 倾斜光纤光栅的偏振起偏器。在中心波长 1550 nm 时, 该起偏器在 50 nm 波长范围内的偏振消光比达到 46 dB, 如图 72 所示, 不仅是单波

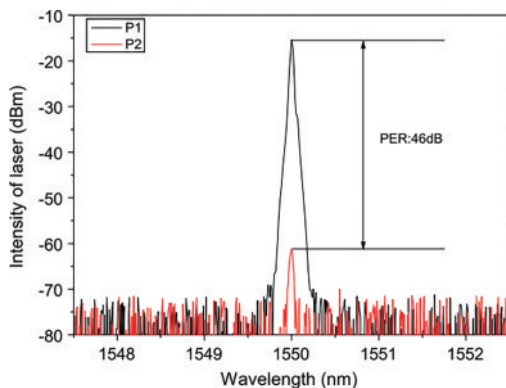


图 72 在两个正交偏振态(P1 和 P2)下, 用 1550 nm 单波长测量 48 mm 长的 45° 倾斜光栅的透射光谱^[163]
Fig. 72 Transmission spectra of a 48 mm 45° TFG measured using a single wavelength at 1550 nm at two orthogonal polarization states (P1 and P2)^[163]

长, 带宽还比较宽, 在 1525~1608 nm 的波长范围内, 有 50 nm 波段总的偏振消光比值大于 40 dB。由于光谱的分布是高斯形状, 且中心共振对称, 因此该光栅的实际响应可以扩展到较短的波长一侧。

2019年, Jiang等^[33]在保偏光纤上利用二氧化碳激光器制备螺旋长周期光纤光栅, 其在谐振波长处偏振相关损耗高达 30.4 dB 和 29.6 dB, 如图 73 所示。当自然光入射时, 快轴 LP₁₅ 模式和慢轴 LP₁₄ 模式在对应的谐振波长处的对比度分别为 6.4 dB 和 3.4 dB。当线偏振光入射时, 快轴 LP₁₅ 模式和慢轴 LP₁₄ 模式在对应的谐振波长处的对比度分别为 -32.6 dB 和 -31.6 dB。因此, 该螺旋长周期光纤光栅可作为起偏器。

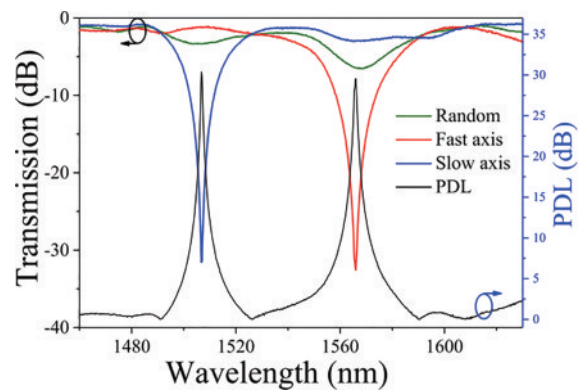


图 73 基于保偏光纤周期为 480 μm 的螺旋长周期光纤光栅的偏振相关损耗和透射谱^[33]
Fig. 73 PDL and transmission spectra of helical LPFG with a polarization-preserving fiber LPFG with a period of 480 μm^[33]

5.4 模式耦合器

1999年, Chen等^[164]利用长周期光纤光栅和集成透镜光纤提高光纤耦合效率。这种耦合器在较长的工

作距离范围内,可以获得大于 50% 的耦合效率和有较大的波长差,这有助于器件的封装。2000 年,Grubsky 等^[165]提出了一种基于长周期光纤光栅的波长选择性耦合器,这种耦合器是用两个平行的长周期光纤光栅紧密贴合到一起,如图 74 所示,经过第一根光纤的光经过第一个长周期光纤光栅时,将一定波长的纤芯模耦合到包层模,包层模在包层中通过两根光纤之间的渐逝波耦合,在第二根光纤中激发同阶次的包层模,然后第二根光纤中的包层模经过相同参数的第二个长周期光纤光栅耦合回光纤纤芯成为第二根光纤中的纤芯模,所以第一根光纤的纤芯模在一定的波长范围内被耦合到第二根光纤纤芯内,从输出端口 2 出来,非耦合的光将留在第一光纤中,并从输出端口 1 输出。因为长周期光纤光栅是将光耦合为正向传播的包层模式,因此不存在反射光,而且长周期光纤光栅在非共振波长不产生损耗,耦合器的插入损耗仅受其切割和熔接损耗的限制,所以该耦合器具有低插入损耗、无反反射、高通道隔离等优点。

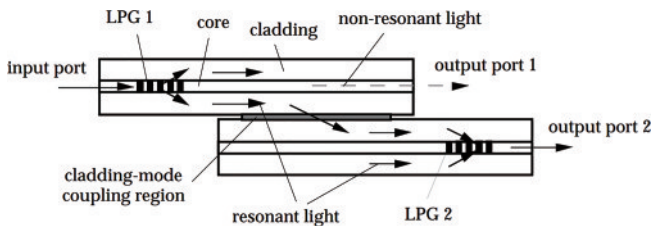


图 74 基于长周期光纤光栅的波长选择耦合器的工作原理^[165]
Fig. 74 Principle of operation of the wavelength-selective coupler based on LPFG^[165]

Chiang 等^[166]演示了相似的长周期光纤光栅波长选择耦合器,并进行了详细的理论分析^[167]。该类耦合器的关键是基于平行光纤包层模之间的渐逝波耦合,两个长周期光纤光栅需要相同的模式阶数和谐振波长,这一原理同样适用于长周期光纤光栅包层模与倾斜布拉格光栅同阶包层模之间的耦合^[168]。这一长周期光纤光栅耦合器的原理可从图 75 得到更多的理解。如图 75 所示,单个长周期光纤光栅的模场分布为圆对称形的,当一根尺寸相同的单模光纤靠近长周期光纤光栅时,光纤中由于渐逝波耦合出现光场分布,原来长周期光纤光栅的模场分布也相应发生变化。

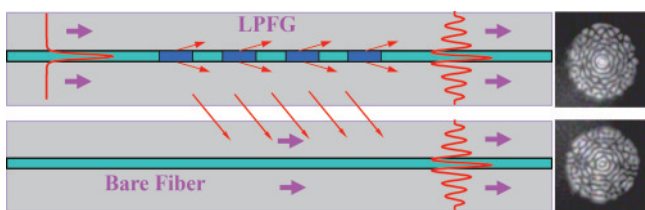


图 75 长周期光纤光栅与裸光纤的渐逝波耦合及模场分布
Fig. 75 Evanescent-field coupling between a LPFG and an identical bare fiber and mode distributions

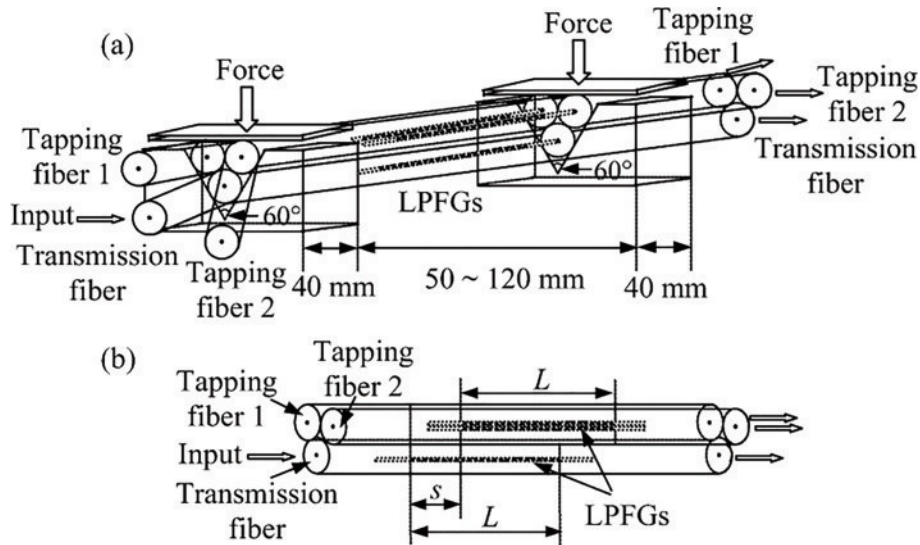
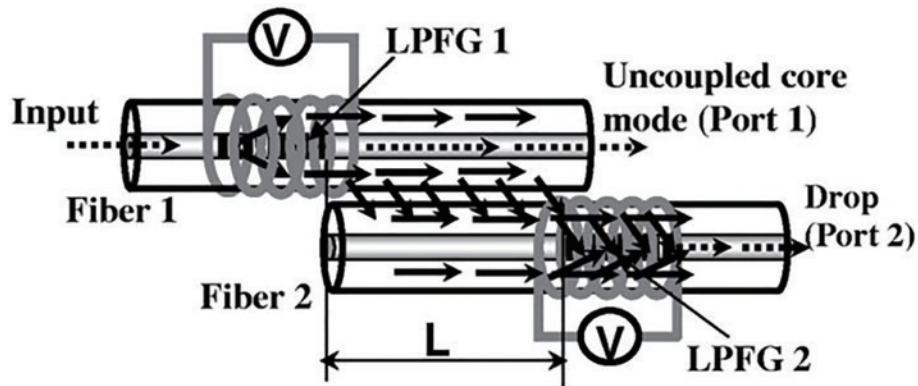
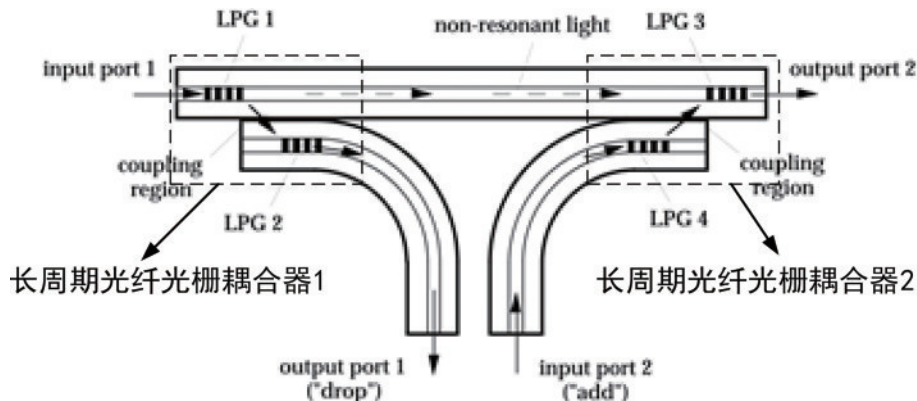
基于相似的设计原理,2006 年,Liu 等^[169]提出了一种基于三根平行长周期光纤光栅的六端口的宽带 3×3 耦合器,如图 76 所示。通过研究改变光栅周围折射率和引入光栅间偏移距离对耦合器传输特性的影响,从而优化耦合器,最高耦合效率达到 85%。这种耦合器可用于多路复用、信号的分接、宽带滤波等六端口器件的构建。2007 年,Liu 等^[170]又提出了一种对称 3×3 耦合器,基于三根平行的长周期光纤光栅,当入射光输入任意一根光纤时,在光栅的共振波长处实现了三根光纤相同的功率输出,实现的三端口功率比为 32.8%、33.8%、33.4%,在谐振波长处的总的耦合效率为 72%。可以通过提高光栅的质量,进一步提高耦合器的性能,它的波长选择性和分裂比可调谐性可能会开辟新的应用,所以该耦合器在光学传感器和通信领域具有广泛的应用前景。

2006 年,Han 等^[171]提出了一种基于长周期光纤光栅的电压可控的光分插复用器,并进行了实验验证。如图 77 所示,两个长周期光纤光栅的谐振波长位置由线圈加热器温度控制,对两个光栅的谐振波长进行控制,因此可以得到波长可调谐耦合器。该耦合器在温度为 20~120 °C 的范围内,温度的灵敏度为 $-0.45 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,它在波长为 1502.32~1552.86 nm 范围内,信号隔离度达到 ~40 dB,它具有 S 波段和 C 波段波长调谐范围宽、信号隔离度高、无背反射等优点。

在波分复用的光通信系统中,基于光纤光栅的光分插复用器解决了信号在节点进行光电光信号转换时受电子器件影响通信速率的问题。利用波长选择耦合器的原理,如图 78 所示,Grubsky 等^[165]提出了一种基于两个长周期光纤光栅模式耦合器的光分插复用器。它的工作原理是入射到输入端口 1 的光通过第一个波长选择耦合器通过输出端口 1 输出,可以输出谐振波长范围内的光信号,未被耦合的光信号继续在光纤中传输至输出端口 2,对于需要添加信号,光被入射到输入端口 2,经过长周期光纤光栅 4 (LPG4) 将其转换成包层模式,经过长周期光纤光栅 3 (LPG3) 将光转换为光纤的纤芯模式,通过输出端口 2 输出。通过调整长周期光纤光栅的光谱形状,可以选择性地添加或删除不同的通道。

2002 年,Zhu 设计了一种利用长周期光纤光栅和压电陶瓷 (PZT) 光纤拉伸器制备的波长可调分插复用器,如图 79^[172] 所示。该器件可选波长范围为 1526.25~1563.75 nm,信道间距为 0.75 nm,覆盖了掺铒光纤放大器的整个 C 波段增益谱,每个信道间的串扰小于 39 dB,总插入损耗约为 0.24 dB,通过改变压电陶瓷光纤拉伸器的电压,可以在一定范围内实现复用通道的调谐。

2012 年,Chen 等^[173]证明了一种支持少模光纤的两个正交 LP_{11} 模的光分插复用器 (MADM)。通过光分插复用器对 $3 \times 318 \text{ Gb/s}$ 复用信号执行添加、删除

图 76 基于三个平行相同长周期光纤光栅的宽带耦合器的设计^[169]Fig. 76 Design of broadband coupler based on three parallel identical LPFGs^[169]图 77 基于线圈加热器的长周期光纤光栅的电压可控的波长可调耦合器的原理图^[171]Fig. 77 Schematics of a voltage-controllable coupler based on two LPFGs with divided coil heaters^[171]图 78 基于两个长周期光纤光栅模式耦合器的光分插复用器^[165]Fig. 78 Add-drop multiplexer using two mode couplers based on LPFGs^[165]

和传输的功能,发现添加、删除和传输端口的功耗损失分别为 2.6 dB、2.4 dB、0.7 dB。2014 年, Fang 等^[174]利用两个平行长周期光纤光栅实现一个光分插复用器,首先利用一个单模光纤长周期光纤光栅把基模 LP_{01} 模转换成包层模,该光栅与少模光纤连接,包层模经过少模光纤传播,然后经过第二个少模光纤长周期光纤光

栅转换成理想的高阶纤芯模。通过控制少模光纤长周期光纤光栅的周期,满足相位匹配条件,从而可以得到不同的 LP_{0m} 模。文中主要研究 LP_{02} 模和 LP_{03} 模分插复用器的设计,该复用器,易操作、可扩展性好,能很好地消除通过后向复用器和耦合器引起的耦合干扰,理论计算的模式功率的转化率可达 98%, 3 dB 带

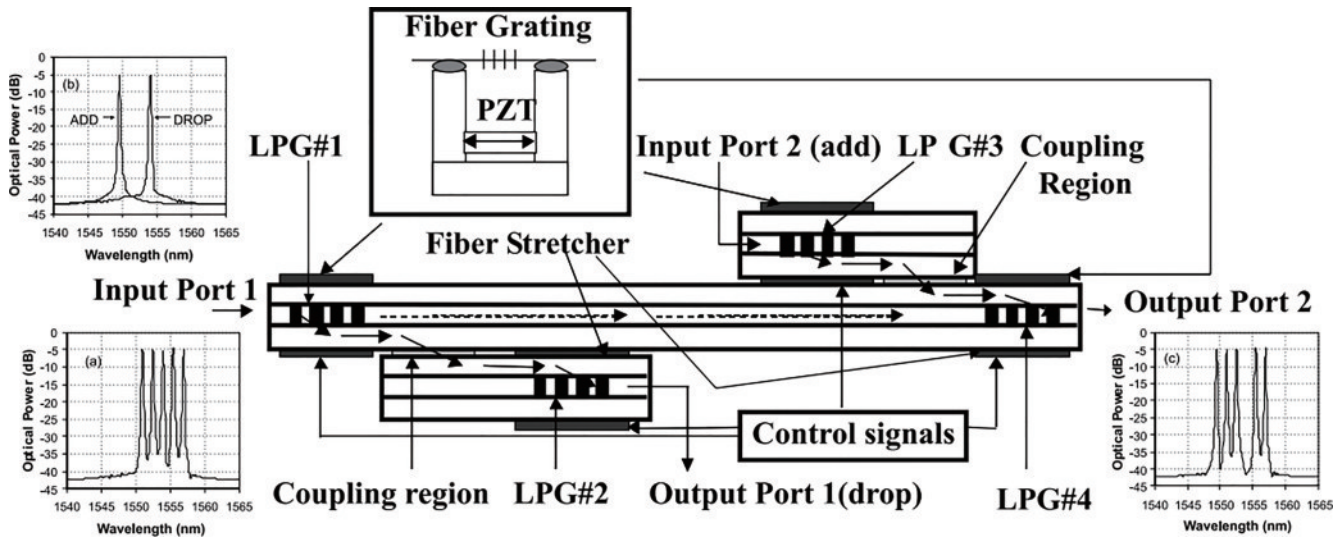


图 79 基于四个相同的长周期光纤光栅和压电陶瓷光纤拉伸器的波长可调的光分插复用器^[172]

Fig. 79 Wavelength-tunable add/drop multiplexer by using four identical LPGs and PZT fiber stretchers^[172]

宽可达 10 nm 以上。LP₀₂ 模和 LP₀₃ 模分插复用器的总转换比如图 80^[174] 所示。

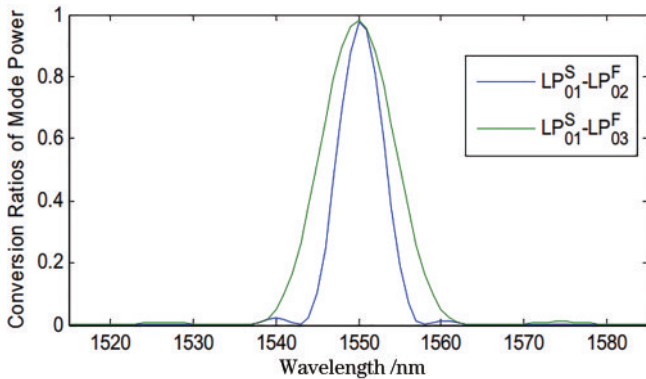


图 80 LP₀₂ 和 LP₀₃ 模分插复用器的总转换比^[174]

Fig. 80 Total conversion ratio of MADMs for LP₀₂ mode and LP₀₃ mode^[174]

6 结束语

本文以教程论文的形式对长周期光纤光栅的模式耦合原理、理论分析方法、光栅制备技术及其在光纤传感与光纤通信领域的主要应用做了抛砖引玉的介绍,作为全光纤的滤波器长周期光纤光栅已经在 EDFA 的增益平坦等方面有商业化的应用,近年来基于传统光栅制备技术改进的螺旋长周期光纤光栅的研究引起了多个研究组的关注^[175-176],螺旋长周期光纤光栅在光纤偏振器件、全光纤 OAM 模式转换、光纤偏振滤波器、高灵敏度光纤传感器等方面都有大量的应用,其制备方式多采用二氧化碳激光、电弧放电、氢氧焰加热等方法,基于商用化光纤熔接机的螺旋长周期光纤光栅的制备技术也日趋成熟,相关方向目前仍然是研究的热点,尤其是螺旋长周期光纤光栅可以直接实现全光纤 OAM 模式转换,不需要额外的光纤器件来改变不同光

纤矢量模式之间的相位差,因此在全光纤 OAM 模式转换方面相对常规长周期光纤光栅有一定的优势^[177]。采用二氧化碳激光^[178]与电弧放电技术^[179-180]制备的长周期光纤光栅由于其独特的写入方法可以制备具有不同传感特性的长周期光纤光栅,因此各有其特殊的传感和通信应用。近年来基于少模光纤的模式复用光纤通信技术^[181-182]的研究快速发展,基于少模光纤的长周期光纤光栅在少模光纤的模式耦合与转换方面有重要的应用前景。光纤空分复用技术被认为是新一代光纤通信技术的核心技术^[183],全光纤通信器件的研究是空分复用光通信系统实用化应用的重要部分。少模光纤长周期光纤光栅模式耦合器等新型器件的研究在新一代光纤通信与光纤传感技术中都有重要的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication[J]. Applied Physics Letters, 1978, 32(10): 647-649.
- [2] Vengsarkar A M, Lemaire P J, Judkins J B, et al. Long-period fiber gratings as band-rejection filters[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(1): 58-65.
- [3] Vengsarkar A M, Pedrazzani J R, Judkins J B, et al. Long-period fiber-grating-based gain equalizers[J]. Optics Letters, 1996, 21(5): 336-338.
- [4] Shu X W, Zhang L, Bennion I. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(2): 255-266.
- [5] Rao Y J, Zhu T, Mo Q J. Highly sensitive fiber-optic torsion sensor based on an ultra-long-period fiber grating [J]. Optics Communications, 2006, 266(1): 187-190.
- [6] Liu Z Y, Liu Y Q, Mou C B, et al. CO₂ laser-written long-period fiber grating with a high diffractive order cladding mode near the turning point[J]. Applied Optics, 2018, 57(17): 4756-4760.

- [7] Liu Y Q, Lee H W, Chiang K S, et al. Glass structure changes in CO₂-laser writing of long-period fiber gratings in boron-doped single-mode fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(7): 857-863.
- [8] Rego G, Ivanov O V, Marques P V S. Demonstration of coupling to symmetric and antisymmetric cladding modes in arc-induced long-period fiber gratings[J]. *Optics Express*, 2006, 14(21): 9594-9599.
- [9] 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.
- [10] Erdogan T. Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, 14(8): 1760-1773.
- [11] Chern G W, Wang L A. Transfer-matrix method based on perturbation expansion for periodic and quasi-periodic binary long-period gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1999, 16(11): 2675-2689.
- [12] Yariv A. Coupled-mode theory for guided-wave optics[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1973, 9(9): 919-933.
- [13] Ke H, Chiang K S, Peng J H. Analysis of phase-shifted long-period fiber gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, 10(11): 1596-1598.
- [14] Ramachandran S, Wang Z Y, Yan M. Bandwidth control of long-period grating-based mode converters in few-mode fibers[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(9): 698-700.
- [15] del Villar I, Achaerandio M, Arregui F J, et al. Generation of selective fringes with cascaded long-period gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(13): 1412-1414.
- [16] Urrutia A, Goicoechea J, Ricchiuti A L, et al. Simultaneous measurement of humidity and temperature based on a partially coated optical fiber long period grating [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 227: 135-141.
- [17] Dandapat K, Tripathi S M, Chinifooroshan Y, et al. Compact and cost-effective temperature-insensitive bio-sensor based on long-period fiber gratings for accurate detection of *E. coli* bacteria in water[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(18): 4198-4201.
- [18] Costa R Z V, Kamikawachi R C, Muller M, et al. Thermal characteristics of long-period gratings 266 nm UV-point-by-point induced[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(5): 816-823.
- [19] Martinez-Rios A, Monzon-Hernandez D, Torres-Gomez I, et al. Long Period fibre gratings[M]//Yasin M, Harun S M, Arof H. *Fiber optic sensors*. London: IntechOpen, 2012: 275-294.
- [20] Davis D D, Gaylord T K, Glytsis E N, et al. Long-period fibre grating fabrication with focused CO₂ laser pulses[J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(3): 302-303.
- [21] Kim B H, Park Y, Ahn T J, et al. Residual stress relaxation in the core of optical fiber by CO₂ laser irradiation[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(21): 1657-1659.
- [22] Wang Y P, Rao Y J, Ran Z L, et al. A novel tunable gain equalizer based on a long-period fiber grating written by high-frequency CO₂ laser pulses[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(2): 251-253.
- [23] Rao Y J, Wang Y P, Ran Z L, et al. Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(5): 1320.
- [24] Wang Y P, Xiao L M, Wang D N, et al. Highly sensitive long-period fiber-grating strain sensor with low temperature sensitivity[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(23): 3414-3416.
- [25] Wang Y P, Wang D N, Jin W, et al. Asymmetric long period fiber gratings fabricated by use of CO₂ laser to carve periodic grooves on the optical fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(15): 151105.
- [26] Liu Y, Chiang K S. CO₂ laser writing of long-period fiber gratings in optical fibers under tension[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(17): 1933-1935.
- [27] Zou F, Liu Y Q, Deng C L, et al. Refractive index sensitivity of nano-film coated long-period fiber gratings [J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1114-1124.
- [28] Zhao Y H, Wang W, Liu Y Q, et al. Spectral and sensing performance of long-period fiber gratings at 2 μm waveband [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(3): 855-862.
- [29] Oh S, Lee K R, Paek U C, et al. Fabrication of helical long-period fiber gratings by use of a CO₂ laser[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(13): 1464-1466.
- [30] Zhang L, Liu Y Q, Zhao Y H, et al. High sensitivity twist sensor based on helical long-period grating written in two-mode fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(15): 1629-1632.
- [31] Kopp V I, Churikov V M, Singer J, et al. Chiral fiber gratings[J]. *Science*, 2004, 305(5680): 74-75.
- [32] Cao X B, Liu Y Q, Zhang L, et al. Characteristics of chiral long-period fiber gratings written in the twisted two-mode fiber by CO₂ laser[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(18): 5167-5171.
- [33] Jiang C, Liu Y Q, Zhao Y H, et al. Helical long-period gratings inscribed in polarization-maintaining fibers by CO₂ laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(3): 889-896.
- [34] Inoue G, Wang P, Li H P. Flat-top band-rejection filter based on two successively-cascaded helical fiber gratings [J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 5442-5447.
- [35] Zhu C L, Zhao H, Wang P, et al. Enhanced flat-top band-rejection filter based on reflective helical long-period fiber gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(12): 964-966.
- [36] Fu C L, Liu S, Wang Y, et al. High-order orbital angular momentum mode generator based on twisted photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1786-1789.
- [37] Fu C L, Liu S, Bai Z Y, et al. Orbital angular momentum mode converter based on helical long period fiber grating inscribed by hydrogen-oxygen flame[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(9): 1683-1688.
- [38] Zhang Y, Bai Z Y, Fu C L, et al. Polarization-

- independent orbital angular momentum generator based on a chiral fiber grating[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(1): 61-64.
- [39] Ren K L, Ren L Y, Liang J, et al. Online fabrication scheme of helical long-period fiber grating for liquid-level sensing[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(34): 9675-9679.
- [40] Ren K L, Ren L Y, Liang J, et al. Online and efficient fabrication of helical long-period fiber gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(14): 1175-1178.
- [41] Kondo Y, Nouchi K, Mitsuyu T, et al. Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(10): 646-648.
- [42] Fertein E, Przygodzki C, Delbarre H, et al. Refractive-index changes of standard telecommunication fiber through exposure to femtosecond laser pulses at 810 nm [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(21): 3506-3508.
- [43] Hindle F, Fertein E, Przygodzki C, et al. Inscription of long-period gratings in pure silica and Germano-silicate fiber cores by femtosecond laser irradiation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(8): 1861-1863.
- [44] Liao C R, Wang Y, Wang D N, et al. Femtosecond laser inscribed long-period gratings in all-solid photonic bandgap fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(6): 425-427.
- [45] Wolf A A, Dostovalov A V, Lobach I A, et al. Femtosecond laser inscription of long-period fiber gratings in a polarization-maintaining fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(24): 5178-5183.
- [46] Hwang I K, Yun S H, Kim B Y. Long-period fiber gratings based on periodic microbends[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(18): 1263-1265.
- [47] Esposito F, Ranjan R, Campopiano S, et al. Arc-induced long period gratings from standard to polarization-maintaining and photonic crystal fibers[J]. *Sensors*, 2018, 18(3): 918.
- [48] Rego G, Okhotnikov O, Dianov E, et al. High-temperature stability of long-period fiber gratings produced using an electric arc[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(10): 1574.
- [49] Kato Y, Seikai S, Tateda M. Arc-fusion splicing of single-mode fibers. I: optimum splice conditions[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(7): 1332-1336.
- [50] Colaço C, Caldas P, del Villar I, et al. Arc-induced long-period fiber gratings in the dispersion turning points[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(19): 4584-4590.
- [51] Iadicicco A, Ranjan R, Esposito F, et al. Arc-induced long period gratings in polarization-maintaining panda fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(18): 1533-1536.
- [52] Savin S, Digonnet M J, Kino G S, et al. Tunable mechanically induced long-period fiber gratings[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(10): 710-712.
- [53] Lim J H, Lee K S, Kim J C, et al. Tunable fiber gratings fabricated in photonic crystal fiber by use of mechanical pressure[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(4): 331-333.
- [54] Pudo D, Mägi E C, Eggleton B J. Long-period gratings in chalcogenide fibers[J]. *Optics Express*, 2006, 14(9): 3763-3766.
- [55] Jin Y X, Chan C C, Zhang Y F, et al. Mechanically induced long-period fiber grating in side-hole single-mode fiber for temperature and refractive sensing[J]. *Optics Communications*, 2010, 283(7): 1303-1306.
- [56] 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.
- [57] Blake J N, Kim B Y, Shaw H J. Fiber-optic modal coupler using periodic microbending[J]. *Optics Letters*, 1986, 11(3): 177-179.
- [58] Lin C Y, Wang L A. Loss-tunable long period fibre grating made from etched corrugation structure[J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(21): 1872-1873.
- [59] Chiang K S, Liu Y Q, Ng M N, et al. Analysis of etched long-period fibre grating and its response to external refractive index[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(11): 966-967.
- [60] Chiang C C, Tsai L. Perfectly notched long-period fiber grating filter based on ICP dry etching technique[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(2): 193-195.
- [61] Cui Z Q, Zhang W G, Liu F, et al. Asymmetrically corrugated long-period gratings by burning fiber coating and etching cladding[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(20): 1961-1964.
- [62] Del Villar I, Cruz J L, Socorro A B, et al. Sensitivity optimization with cladding-etched long period fiber gratings at the dispersion turning point[J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 17680-17685.
- [63] Yoon M S, Park S, Han Y G. Simultaneous measurement of strain and temperature by using a micro-tapered fiber grating[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(8): 1156-1160.
- [64] Bock W J, Chen J, Mikulic P, et al. Pressure sensing using periodically tapered long-period gratings written in photonic crystal fibres[J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, 18(10): 3098-3102.
- [65] Pilla P, Manzillo P F, Giordano M, et al. Spectral behavior of thin film coated cascaded tapered long period gratings in multiple configurations[J]. *Optics Express*, 2008, 16(13): 9765-9780.
- [66] Yin G L, Wang Y P, Liao C R, et al. Long period fiber gratings inscribed by periodically tapering a fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(7): 698-701.
- [67] Shao L Y, Zhao J, Dong X Y, et al. Long-period grating fabricated by periodically tapering standard single-mode fiber[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(10): 1549-1552.
- [68] Ren K L, Ren L Y, Liang J, et al. Highly strain and bending sensitive microtapered long-period fiber gratings [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(13): 1085-1088.
- [69] Kong X D, Ren K L, Ren L Y, et al. Tunable wavelength-selective coupler based on microtapered long-period fiber gratings[J]. *IEEE Photonics Technology*

- Letters, 2018, 30(9): 821-824.
- [70] Porraz-Culebro T E, Martinez-Rios A, Toral-Acosta D, et al. Characteristics of LPFGs written by a CO₂-laser glass processing system[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(4): 1301-1309.
- [71] Fujimaki M, Ohki Y, Brebner J L, et al. Fabrication of long-period optical fiber gratings by use of ion implantation[J]. Optics Letters, 2000, 25(2): 88-89.
- [72] von Bibra M L, Roberts A, Canning J. Fabrication of long-period fiber gratings by use of focused ion-beam irradiation[J]. Optics Letters, 2001, 26(11): 765-767.
- [73] Hodzic V, Orloff J, Davis C C. Periodic structures on biconically tapered optical fibers using ion beam milling and boron implantation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(6): 1610.
- [74] Kim B Y, Blake J N, Engan H E, et al. All-fiber acousto-optic frequency shifter[J]. Optics Letters, 1986, 11(6): 389-391.
- [75] Birks T A, Russell P S J, Culverhouse D O. The acousto-optic effect in single-mode fiber tapers and couplers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(11): 2519-2529.
- [76] Kim H S, Yun S H, Kwang I K, et al. All-fiber acousto-optic tunable Notch filter with electronically controllable spectral profile[J]. Optics Letters, 1997, 22(19): 1476-1478.
- [77] Yeom D I, Steinvurzel P, Eggleton B J, et al. Tunable acoustic gratings in solid-core photonic bandgap fiber[J]. Optics Express, 2007, 15(6): 3513-3518.
- [78] Zhang W D, Huang L G, Wei K Y, et al. High-order optical vortex generation in a few-mode fiber via cascaded acoustically driven vector mode conversion[J]. Optics Letters, 2016, 41(21): 5082-5085.
- [79] Zhang W D, Huang L G, Wei K Y, et al. Cylindrical vector beam generation in fiber with mode selectivity and wavelength tunability over broadband by acoustic flexural wave[J]. Optics Express, 2016, 24(10): 10376-10384.
- [80] Ivanov O V, Wang L A. Wavelength shifts of cladding-mode resonance in corrugated long-period fiber gratings under torsion[J]. Applied Optics, 2003, 42(13): 2264-2272.
- [81] Gonzalez D A, Jauregui C, Quintela A. Torsion-induced effects on UV long-period fiber gratings[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5502: 192-195.
- [82] Shi L L, Zhu T, Fan Y N, et al. Torsion sensing with a fiber ring laser incorporating a pair of rotary long-period fiber gratings[J]. Optics Communications, 2011, 284(22): 5299-5302.
- [83] Araujo S G V H C, de Almeida J M M M, Saraiva C M T, et al. Mach-Zehnder interferometers based on long period fiber grating coated with titanium dioxide for refractive index sensing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(18): 4584-4589.
- [84] Choi H Y, Kim M J, Lee B H. All-fiber Mach-Zehnder type interferometers formed in photonic crystal fiber[J]. Optics Express, 2007, 15(9): 5711-5720.
- [85] Dong X Y, Yang X F, Shum P, et al. Tunable WDM filter with 0.8-nm channel spacing using a pair of long-period fiber gratings[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(4): 795-797.
- [86] 邹芳. 镀高折射率纳米薄膜长周期光纤光栅传感特性研究[D]. 上海: 上海大学, 2016.
- Zou F. Research on sensing characteristics of long-period fiber grating coated with high index nano-film[D]. Shanghai: Shanghai University, 2016.
- [87] Smietana M, Bock W J, Mikulic P, et al. Increasing sensitivity of arc-induced long-period gratings: pushing the fabrication technique toward its limits[J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(1): 015201.
- [88] James S W, Khaliq S, Tatam R P. Enhanced sensitivity fibre optic long period grating temperature sensor[C]// 2002 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest. OFS 2002(Cat. No.02EX533), May 10, 2002, Portland, OR, USA. New York: IEEE Press, 2002: 139-142.
- [89] Yin S Z, Chung K W, Zhu X. A highly sensitive long period grating based tunable filter using a unique double-cladding layer structure[J]. Optics Communications, 2001, 188(5/6): 301-305.
- [90] Zou F, Liu Y Q, Zhu S, et al. Temperature sensitivity enhancement of the nano-film coated long-period fiber gratings[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(8): 2460-2465.
- [91] Wang Q, Du C, Zhang J M, et al. Sensitivity-enhanced temperature sensor based on PDMS-coated long period fiber grating[J]. Optics Communications, 2016, 377: 89-93.
- [92] Wang S Y, Ma Y W, Geng T, et al. Compact fiber strain sensor fabricated by a CO₂ laser[J]. Optics Letters, 2020, 45(15): 4156-4159.
- [93] Zhou Y W, Gao K, Huang R, et al. Temperature and stress tuning characteristics of long-period gratings imprinted in Panda fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(12): 1728-1730.
- [94] Allsop T, Dubov M, Martinez A, et al. Bending characteristics of fiber long-period gratings with cladding index modified by femtosecond laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(8): 3147-3154.
- [95] Jin L, Jin W, Ju J. Directional bend sensing with a CO₂-laser-inscribed long period grating in a photonic crystal fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(21): 4884-4891.
- [96] Zhou Q, Zhang W G, Chen L, et al. Bending vector sensor based on a sector-shaped long-period grating[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(7): 713-716.
- [97] Li Y P, Zhang W G, Wang S, et al. Bending vector sensor based on a pair of opposite tilted long-period fiber gratings[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(2): 224-227.
- [98] Huang L, Meng X Y, Zhao Y H, et al. Temperature-insensitive directional bending sensors based on the interlaced tilted long-period gratings[J]. Optics Communications, 2019, 447: 18-23.

- [99] Zhang Y S, Zhang W G, Chen L, et al. Concave-lens-like long-period fiber grating bidirectional high-sensitivity bending sensor[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(19): 3892-3895.
- [100] Wang Y P, Rao Y J. Long period fibre grating torsion sensor measuring twist rate and determining twist direction simultaneously[J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(3): 164-166.
- [101] Huang L, Jiang C, Zhao X Y, et al. Fabrication and sensing characteristics of 2 μm long period fiber grating written in double cladding fiber by CO₂ laser[C]//2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), August 5-8, 2019, Huangshan, China. New York: IEEE Press, 2019.
- [102] Zhang L, Liu Y Q, Cao X B, et al. High sensitivity chiral long-period grating sensors written in the twisted fiber[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(11): 4253-4257.
- [103] Poole C D, Townsend C D, Nelson K T. Helical-grating two-mode fiber spatial-mode coupler[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1991, 9(5): 598-604.
- [104] Jiang C, Liu Y Q, Huang L, et al. Double cladding fiber chiral long-period grating-based directional torsion sensor [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(18): 1522-1525.
- [105] Xu C C, Liu Y Q, Jiang C, et al. Characteristics of helical long-period gratings written in different SMFs by CO₂-laser[C]//2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), October 26-29, 2018, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2018.
- [106] Cao X B, Tian D D, Liu Y Q, et al. Sensing characteristics of helical long-period gratings written in the double-clad fiber by CO₂ laser[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(18): 7481-7485.
- [107] Pilla P, Trono C, Baldini F, et al. Giant sensitivity of long period gratings in transition mode near the dispersion turning point: an integrated design approach[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(19): 4152-4154.
- [108] Kakarantzas G, Dimmick T E, Birks T A, et al. Miniature all-fiber devices based on CO₂ laser microstructuring of tapered fibers[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(15): 1137-1139.
- [109] Iadicicco A, Campopiano S, Giordano M, et al. Spectral behavior in thinned long period gratings: effects of fiber diameter on refractive index sensitivity[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(28): 6945-6952.
- [110] Martinez-Rios A, Monzon-Hernandez D, Torres-Gomez I. Highly sensitive cladding-etched arc-induced long-period fiber gratings for refractive index sensing[J]. *Optics Communications*, 2010, 283(6): 958-962.
- [111] Yan Z J, Sun Z Y, Zhou K M, et al. Numerical and experimental analysis of sensitivity-enhanced RI sensor based on ex-TFG in thin cladding fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(14): 3023-3027.
- [112] Luo B B, Yan Z J, Sun Z Y, et al. Biosensor based on excessively tilted fiber grating in thin-cladding optical fiber for sensitive and selective detection of low glucose concentration[J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32429-32440.
- [113] Fu C L, Zhong X Y, Liao C R, et al. Thin-core-fiber-based long-period fiber grating for high-sensitivity refractive index measurement[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 7103208.
- [114] Zhao Y H, Liu Y Q, Zhou C, et al. Sensing characteristics of long-period fiber gratings written in thinned cladding fiber[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(5): 1217-1223.
- [115] del Villar I, Partridge M, Rodriguez W E, et al. Sensitivity enhancement in low cutoff wavelength long-period fiber gratings by cladding diameter reduction[J]. *Sensors*, 2017, 17(9): 2094.
- [116] Rees N D, James S W, Tatam R P, et al. Optical fiber long-period gratings with Langmuir-Blodgett thin-film overlays[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(9): 686-688.
- [117] Davies E, Viitala R, Salomäki M, et al. Sol-gel derived coating applied to long-period gratings for enhanced refractive index sensing properties[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2009, 11(1): 015501.
- [118] Coelho L, Santos J L, Viegas D, et al. Fabrication and characterization of metal oxide-coated long-period fiber gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(10): 2533-2539.
- [119] Cusano A, Iadicicco A, Pilla P, et al. Mode transition in high refractive index coated long period gratings[J]. *Optics Express*, 2006, 14(1): 19-34.
- [120] del Villar I, Achaerandio M, Matias I R, et al. Deposition of overlays by electrostatic self-assembly in long-period fiber gratings[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(7): 720-722.
- [121] del Villar I, Matias I R, Arregui F J. Influence on cladding mode distribution of overlay deposition on long-period fiber gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2006, 23(3): 651-658.
- [122] Zou F, Liu Y Q, Mou C B, et al. Optimization of refractive index sensitivity in nanofilm-coated long-period fiber gratings near the dispersion turning point[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(4): 889-897.
- [123] Wang Y L, Liu Y Q, Zou F, et al. Humidity sensor based on a long-period fiber grating coated with polymer composite film[J]. *Sensors*, 2019, 19(10): 2263.
- [124] Zhang N M Y, Dong X Y, Shum P P, et al. Magnetic field sensor based on magnetic-fluid-coated long-period fiber grating[J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(6): 065402.
- [125] Jiang C, Liu Y Q, Mou C B, et al. Fiber vector magnetometer based on polarization-maintaining fiber long-period grating with ferrofluid nanoparticles[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(8): 2494-2502.
- [126] Sáez-Rodríguez D, Cruz J L, Diez A, et al. Modulation of coaxial modal interferometers based on long period gratings in double cladding fibers[J]. *Optics Express*, 2007, 15(17): 10929-10934.
- [127] Wysocki P F, Judkins J B, Espindola R P, et al. Broadband erbium-doped fiber amplifier flattened beyond 40 nm using long-period grating filter[J]. *IEEE Photonics*

- Technology Letters, 1997, 9(10): 1343-1345.
- [128] Rao Y J, Zhu T, Ran Z L, et al. Novel long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses and applications in optical fiber communication[J]. Optics Communications, 2004, 229: 209-221.
- [129] Rao Y J, Hu A Z, Niu Y C. A novel dynamic LPFG gain equalizer written in a bend-insensitive fiber[J]. Optics Communications, 2005, 244: 137-140.
- [130] Zhu T, Rao Y J, Wang J L. All-fiber dynamic gain equalizer based on a twisted long-period grating written by high-frequency CO₂ laser pulses[J]. Applied Optics, 2007, 46(3): 375-378.
- [131] Gu X J. Wavelength-division multiplexing isolation fiber filter and light source using cascaded long-period fiber gratings[J]. Optics Letters, 1998, 23(7): 509-510.
- [132] Qian J R, Chen H F. Gain flattening fibre filters using phase-shifted long period fibre gratings[J]. Electronics Letters, 1998, 34(11): 1132-1133.
- [133] Chen L R. Design of flat-top bandpass filters based on symmetric multiple phase-shifted long-period fiber gratings [J]. Optics Communications, 2002, 205(4/5/6): 271-276.
- [134] Zhu Y N, Shum P, Lu C, et al. EDFA gain flattening using phase-shifted long-period grating[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2003, 37(2): 153-157.
- [135] Navruz I, Altuncu A. Optimization of phase shifted long-period fiber gratings for multiband rejection filters[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(14): 2155-2161.
- [136] Shin W, Yu B A, Noh Y C, et al. Bandwidth tunable band rejection filter based on helicoidal fiber grating pair of opposite helicities[J]. Optics Letters, 2007, 32(10): 1214-1216.
- [137] Kim H, Bae J, Chun J. Synthesis of flat-top bandpass filters using two-band rejection long-period fiber gratings [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(19): 1466-1468.
- [138] Zhu T, Shi C H, Rao Y J, et al. All-fiber bandwidth-tunable band-rejection filter based on a composite grating induced by CO₂ laser pulses[J]. Optics Express, 2009, 17(19): 16750-16755.
- [139] Zhu T, Rao Y J, Song Y, et al. Highly-sensitive temperature-independent strain sensor based on a long-period fiber grating with a CO₂-laser engraved rotary structure[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(8): 543-545.
- [140] Rao Y J, Zhu T. A novel flat-band long period grating with special index apodization induced by high frequency CO₂ laser pulses[C]//Optical Fiber Communication Conference 2006, March 5-10, 2006, Anaheim, California, USA. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2006: OWI51.
- [141] Zhu C L, Zhao H, Li H P. Mode-couplings in two cascaded helical long-period fibre gratings and their application to polarization-insensitive band-rejection filter [J]. Optics Communications, 2018, 423: 81-85.
- [142] Hill K O, Malo B, Vineberg K A, et al. Efficient mode conversion in telecommunication fibre using externally written gratings[J]. Electronics Letters, 1990, 26(16): 1270-1272.
- [143] Dashti P Z, Alhassen F, Lee H P. Observation of orbital angular momentum transfer between acoustic and optical vortices in optical fiber[J]. Physical Review Letters, 2006, 96(4): 043604.
- [144] Andermahr N, Fallnich C. Optically induced long-period fiber gratings for guided mode conversion in few-mode fibers[J]. Optics Express, 2010, 18(5): 4411-4416.
- [145] Giles I, Obeysekara A, Chen R S, et al. Fiber LPG mode converters and mode selection technique for multimode SDM[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(21): 1922-1925.
- [146] 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.
- [147] Song D R, Park H S, Kim B Y, et al. Acousto-optic excitation of all the higher-order modes in a four-mode fiber for mode-division multiplexed transmission[C]//2014 OptoElectronics and Communication Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology, July 6-10, 2014, Melbourne, VIC, Australia. New York: IEEE Press, 2014: 98-99.
- [148] Wang B, Zhang W G, Bai Z Y, et al. CO₂-laser-induced long period fiber gratings in few mode fibers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(2): 145-148.
- [149] Dong J L, Chiang K S. Temperature-insensitive mode converters with CO₂-laser written long-period fiber gratings[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(9): 1006-1009.
- [150] 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.
- [151] Zhang X H, Liu Y G, Wang Z, et al. LP₀₁-LP_{11a} mode converters based on long-period fiber gratings in a two-mode polarization-maintaining photonic crystal fiber[J]. Optics Express, 2018, 26(6): 7013-7021.
- [152] Zhao Y H, Liu Z Y, Liu Y Q, et al. Ultra-broadband fiber mode converter based on apodized phase-shifted long-period gratings[J]. Optics Letters, 2019, 44(24): 5905-5908.
- [153] 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.
- [154] Liu Z Y, Liu Y Q, Zhao X Y, et al. Bandwidth optimization of cascaded long-period gratings for broadband mode conversion over 1.0-2.2 μm waveband [J]. Optics Express, 2020, 28(21): 31882-31892.
- [155] Bergh R A, Lefevre H C, Shaw H J. Single-mode fiber-optic polarizer[J]. Optics Letters, 1980, 5(11): 479-481.
- [156] Hosaka T, Okamoto K, Edahiro T. Fabrication of single-mode fiber-type polarizer[J]. Optics Letters, 1983, 8(2): 124-126.
- [157] Wang A, Arya V, Nasta M H, et al. Optical fiber polarizer based on highly birefringent single-mode fiber [J]. Optics Letters, 1995, 20(3): 279-281.
- [158] Ortega B, Dong L, Liu W F, et al. High-performance

- optical fiber polarizers based on long-period gratings in birefringent optical fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 9(10): 1370-1372.
- [159] Ramachandran S, Das M, Wang Z, et al. High extinction, broadband polarisers using long-period fibre gratings in few-mode fibres[J]. *Electronics Letters*, 2002, 38(22): 1327-1328.
- [160] Wang Y P, Xiao L M, Wang D N, et al. In-fiber polarizer based on a long-period fiber grating written on photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(9): 1035-1037.
- [161] Xue L L, Yang L, Xu H X, et al. A novel all-fiber broadband circular polarizer[C]//2010 Photonics Global Conference, December 14-16, 2010, Orchard, Singapore. New York: IEEE Press, 2010.
- [162] Yang L, Xue L L, Li C, et al. Adiabatic circular polarizer based on chiral fiber grating[J]. *Optics Express*, 2011, 19(3): 2251-2256.
- [163] Yan Z J, Zhou K M, Zhang L. In-fiber linear polarizer based on UV-inscribed 45° tilted grating in polarization maintaining fiber[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3819-3821.
- [164] Chen W T, Wang L A. Optical coupling between single-mode fibres by utilising long-period fibre gratings[J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(5): 421-423.
- [165] Grubsky V, Starodubov D S, Feinberg J. Wavelength-selective coupler and add-drop multiplexer using long-period fiber gratings[C]//Optical Fiber Communication Conference. Technical Digest Postconference Edition. Trends in Optics and Photonics Vol. 37 (IIEECat. No. 00CH37079), March 7-10, 2000, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE Press, 2000: 28-30.
- [166] Chiang K S, Liu Y Q, Ng M N, et al. Coupling between two parallel long-period fibre gratings[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(16): 1408-1409.
- [167] Chiang K S, Chan F Y M, Ng M N. Analysis of two parallel long-period fiber gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(5): 1358-1366.
- [168] Liu Y Q, Liu Q, Chiang K S. Optical coupling between a long-period fiber grating and a parallel tilted fiber Bragg grating[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(11): 1726-1728.
- [169] Liu Y Q, Chiang K S. Broad-band optical coupler based on evanescent-field coupling between three parallel long-period fiber gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(1): 229-231.
- [170] Liu Y Q, Chiang K S, Liu Q. Symmetric 3×3 optical coupler using three parallel long-period fiber gratings[J]. *Optics Express*, 2007, 15(10): 6494-6499.
- [171] Han Y G, Lee S B, Kim C S, et al. Tunable optical add-drop multiplexer based on long-period fiber gratings for coarse wavelength division multiplexing systems[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(6): 703-705.
- [172] Zhu Y N, Lu C, Lacquet B M, et al. Wavelength-tunable add/drop multiplexer for dense wavelength division multiplexing using long-period gratings and fiber stretchers [J]. *Optics Communications*, 2002, 208(4/5/6): 337-344.
- [173] Chen X, Li A, Ye J, et al. Reception of mode-division multiplexed superchannel via few-mode compatible optical add/drop multiplexer[J]. *Optics Express*, 2012, 20(13): 14302-14307.
- [174] Fang L, Jia H Z. Mode add/drop multiplexers of LP₀₂ and LP₀₃ modes with two parallel combinative long-period fiber gratings[J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 11488-11497.
- [175] Zhao H, Li H P. Advances on mode-coupling theories, fabrication techniques, and applications of the helical long-period fiber gratings: a review[J]. *Photonics*, 2021, 8(4): 106.
- [176] Ma C, Wang J, Yuan L B. Review of helical long-period fiber gratings[J]. *Photonics*, 2021, 8(6): 193.
- [177] Wang Z, Tu J J, Gao S C, et al. Transmission and generation of orbital ANGULAR momentum modes in optical fibers[J]. *Photonics*, 2021, 8(7): 246.
- [178] Fu C L, Wang Y P, Liu S, et al. Recent progress in fabrications and applications of heating-induced long period fiber gratings[J]. *Sensors*, 2019, 19(20): 4473.
- [179] Rego G, Caldas P, Ivanov O V. Arc-induced long-period fiber gratings at INESC TEC. part I: fabrication, characterization and mechanisms of formation[J]. *Sensors*, 2021, 21(14): 4914.
- [180] Rego G, Caldas P, Ivanov O V. Arc-induced long-period fiber gratings at INESC TEC. part II: properties and applications in optical communications and sensing [J]. *Sensors*, 2021, 21(17): 5914.
- [181] Puttnam B J, Rademacher G, Luís R S. Space-division multiplexing for optical fiber communications[J]. *Optica*, 2021, 8(9): 1186-1203.
- [182] 赵云鹤, 刘云启. 少模光纤长周期光栅: 从模式转换到高灵敏度光纤传感[J]. *应用科学学报*, 2020, 38(2): 310-338. Zhao Y H, Liu Y Q. Few-mode fiber long-period gratings: from mode conversion to high sensitivity fiber-optic sensing[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2020, 38(2): 310-338.
- [183] Agrawal G P. *Fiber-optic communication systems*[M]. 5th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2021.