

具有特征波长的少模光纤特性及传感应用

陆晨旭¹, 董小鹏^{1*}, 苏娟², 雷雪琴¹

¹厦门大学电子科学与技术学院光波技术研究所, 福建 厦门 361005;

²山东大学海洋研究院, 山东 青岛 266237

摘要 介绍了一种特殊设计的少模光纤及由少模光纤构成的单模光纤-少模光纤-单模光纤(SFS)传感结构。在对轴激发条件下,少模光纤芯子中仅有基模 LP₀₁和第一圆对称高阶模 LP₀₂传输,且SFS结构的传输光谱在工作波长范围内有一个特征波长。在特征波长附近相邻两个干涉峰间的波长间距达到最大,且在特征波长处干涉仪的输出光强不随波长变化,这使得特征波长在光谱中唯一且容易识别。理论和实验研究了SFS结构传输光谱的特征波长及其两边干涉条纹随轴向应变、温度、弯曲、液体折射率的传感特性,并将SFS结构用于轴向应变、温度、弯曲、位移、外界折射率和相对湿度的大范围、高灵敏度、多参量同时检测,为解决常规干涉仪存在的测量范围小、输出多值性等问题提供解决方案。

关键词 光纤光学; 光纤特性; 少模光纤; 特征波长

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.170620

Characteristics and Sensing Applications of Few-Mode Fiber with Critical Wavelength

Lu Chenxu¹, Dong Xiaopeng^{1*}, Su Juan², Lei Xueqin¹

¹*Institute of the Lightwave Technology, School of Electronic Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China;*

²*Institute of Marine Science and Technology, Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China*

Abstract This paper reviews a specially designed few-mode fiber and a single mode fiber-few mode fiber-single mode fiber (SFS) sensing structure. Only the fundamental core mode LP₀₁ and the first symmetric high order core mode LP₀₂ are excited in the few-mode fiber under the axial to axial splicing condition, and there is a critical wavelength existing in the transmission spectrum of the SFS structure at the operational wavelength. Near the critical wavelength, the wavelength spacing between adjacent interference peaks reaches maximum, and the output intensity of the interferometer is fixed while the wavelength changes. Therefore, the critical wavelength is exclusive and easy to identify from the transmission spectrum. The sensing characteristics of the critical wavelength and the interference fringes in the transmission spectrum under strain, temperature, bending, and liquid refractive index are studied theoretically and experimentally, and the SFS sensor structure is applied to measure a wide range of sensing parameters including strain, temperature, curvature, displacement, surrounding refractive index, and relative humidity, with the advantages of large measurement ranges, high sensitivity, and multi-parameter measurement. Thus, the current problems of limited measurement range and multi-value outputs existing in the traditional interferometers can be solved.

Key words fiber optics; fiber properties; few-mode fiber; critical wavelength

OCIS codes 060.2310; 060.2400; 060.2370

收稿日期: 2019-05-05; 修回日期: 2019-05-30; 录用日期: 2019-06-06

基金项目: 国家自然科学基金(61775186)、福建省高校产学研合作科技重大项目(2014H6027)、厦门海洋渔业局科技项目(16CZB025SF03)、泉州科学技术局项目(2015G32)

* E-mail: xpd@xmu.edu.cn

1 引言

随着光纤技术的发展,光纤传感技术因其抗电磁干扰、电绝缘、耐腐蚀、灵敏度高、体积小等优点,得到迅速的发展和应用^[1]。光纤马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构灵活、灵敏度高,是光纤传感领域应用广泛的一类光学器件。传统的两臂式光纤 MZI 将相干的两束光波在两根光纤(传感臂和参考臂)中传输,应用时存在参考臂屏蔽及小型化困难等问题,这限制了传统光纤 MZI 的实际应用^[2]。针对以上问题,采用一段少模光纤(FMF)并与单模光纤(SMF)熔接构成单模-少模-单模(SFS)结构,利用 FMF 低阶芯子模式与基模的干涉效应,将传统光纤 MZI 的两臂集成于一根光纤中,构成结构小而紧凑的“共线”(In-line)式光纤 MZI 传感器^[3-11],也可以采用多模光纤^[12-14]取代 SFS 传感单元中的少模光纤,或采用无芯光纤^[15]、细芯光纤^[16]、微纳光纤^[17],以及错位熔接^[18]、光子晶体光纤塌陷熔接^[19]等构成基于光纤高阶芯子模式或包层模式和纤芯基模干涉的共线式光纤 MZI。然而相比 SFS 结构,基于高阶纤芯模式和纤芯基模之间的干涉,以及基于包层模式与纤芯基模之间的干涉存在模式特性难以精确定量描述、激发条件不易控制、器件一致性和可靠性不高等问题,在应用中理论分析复杂,重复性及稳定性差。由于少模光纤仅支持 2 个或少数几个低阶模式的传输,因而 SFS 传感结构重复性及稳定性好,在实际传感测量中具有较高的应用价值。

基于纤芯基模 LP_{01} 、 LP_{11} ^[20]、 LP_{02} ^[4-10,12-14]干涉的 In-line MZI 中,当发生干涉的两个模式的群速度相等或群光程差为零时对应的波长为等效波长,也称为特征波长(CWL)。不同于常规干涉仪的梳状传输光谱,在 CWL 点,干涉光谱输出的条纹不随波长发生周期性变化^[21]。由于 CWL 在传输光谱中唯一且易识别,当被测参数^[4,7-10]影响传感光纤的几何参数和折射率参数时,通过检测 CWL 的漂移可实现对被测参量的检测,并且解决常规光纤 MZI 梳状光谱中峰值波长检测存在的测量范围小和多值性等问题。CWL 的现象在多模光纤^[12-14]、少模光纤^[4-10]、多模微纳光纤^[17]、液芯光纤^[20]中均有报道,但是对多模光纤中基于 LP_{01} 和 LP_{02} 模式干涉的研究仅停留于对干涉峰的温度和应变特性的研究,没有认识和发现 CWL 会随被测参量变化的内在规律^[12-14];而多模微纳光纤中基于 HE_{11} 和 HE_{12} 模式干涉产生的 CWL 容易受到环境折射率变化的影

响,其重复性及稳定性较差,可测参量有限^[17]; LP_{11} 模式的偏振敏感性使得液芯光纤传输光谱中的 CWL 易受环境影响^[21]。经特殊设计的 FMF 芯子仅有 LP_{01} 与 LP_{02} 模式传输,且在工作波段光谱中具有特征波长。基于 LP_{01} 和 LP_{02} 模式干涉的 SFS 结构重复性及稳定性好,偏振独立^[3],通过理论和实验研究 CWL 及干涉峰随被测参量的变化。SFS 结构可用于大范围、高灵敏度、多参量的传感测量,在现有的干涉仪中脱颖而出,具有很高的应用价值。

基于特殊设计的 FMF 及其构成的 SFS 共线式 MZI 传感结构,从理论及实验两个角度综合叙述 FMF 中纤芯基模 LP_{01} 和第一圆对称高阶模 LP_{02} 干涉传输光谱中形成的 CWL 及其两边干涉峰值、温度、弯曲、液体折射率、相对湿度等传感特性,并对 SFS 传感结构的应变、温度、弯曲、位移、液体折射率、相对湿度等传感性能进行总结。

2 具有特征波长的少模光纤结构及传感原理

SFS 结构中采用的少模光纤由武汉长飞光纤光缆股份有限公司制作。该少模光纤横截面示意图如图 1 所示,图 1(a)中 x 为测量点到光纤中心的距离。定义光纤的归一化折射率差为

$$\Delta n_{\text{co/cl}, i} = (n_{\text{co/cl}, i} - n_0) / n_0, \quad (1)$$

式中, $\Delta n_{\text{co/cl}, i}$ ($i=1, 2, 3$) 为纤芯/第 i 层内包层相对于外包层纯石英归一化折射率差, $n_{\text{co/cl}, i}$ 为纤芯/第 i 层内包层折射率, n_0 为外包层纯石英折射率。

如图 1 所示,实验中采用的少模光纤设计为五层折射率分布结构,共包括一个高掺杂圆形纤芯、三个环形掺杂内包层和一个玻璃外包层。令纤芯、第 i ($i=1, 2, 3$) 层内包层的直径分别为 $d_{\text{co}}, d_{\text{cl}, i}$, 其中纤芯为高 GeO_2 掺杂 ($d_{\text{co}} = 8 \mu\text{m}$, $\Delta n_{\text{co}} = 1.99\%$), 第一层内包层为 F 掺杂的凹陷环 ($d_{\text{cl}, 1} = 14.3 \mu\text{m}$, $\Delta n_{\text{cl}, 1} = -0.40\%$), 第二层和第三层内包层为 GeO_2 掺杂的凸出环 ($d_{\text{cl}, 2} = 18 \mu\text{m}$, $\Delta n_{\text{cl}, 2} = 0.48\%$; $d_{\text{cl}, 3} = 30 \mu\text{m}$, $\Delta n_{\text{cl}, 3} = 0.14\%$), 外包层为纯 SiO_2 。在工作波长下,这种多层光纤结构和 W 型相对折射率差分布设计在单模光纤的激发下,少模光纤芯子中仅激发基模 LP_{01} 和第一圆对称高阶模 LP_{02} 在光纤芯子中传输,并且少模光纤第二层为内包层凸出环的设计,使得 LP_{02} 模式先于 LP_{11} 模式传输^[22]。

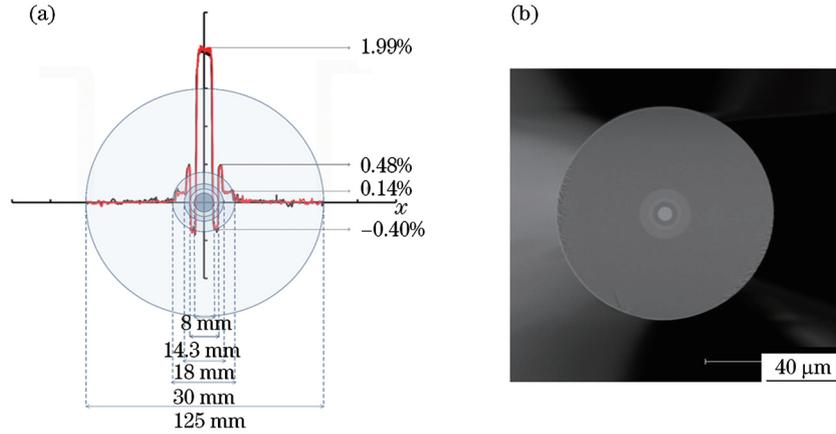


图 1 少模光纤横截面结构图。(a)几何示意图和归一化折射率差分布图;(b)扫描电镜图

Fig. 1 Diagram of the FMF cross-section structure. (a) Geometrical structure and relative refractive index difference profile; (b) scanning electron microscope micrograph

在两段单模光纤中间熔接一段少模光纤,可以构成基于少模光纤的共线式 MZI,也称 SFS 干涉结构,其结构如图 2 所示。

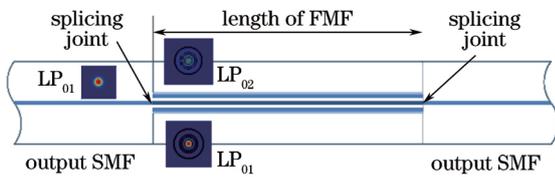


图 2 SFS 结构图

Fig. 2 Structure of the SFS

光波在输入单模光纤对轴激发少模光纤时,单模光纤中的 LP_{01} 模式只能激发少模光纤中的 LP_{01} 模式和 LP_{02} 模式。令 LP_{01} 模式和 LP_{02} 模式的传播常数为 β_1 和 β_2 ,当光信号在少模光纤中以 LP_{01} 模式和 LP_{02} 模式传播一段距离后,由于两个模式的传播常数不同,因此以两种模式传输的光产生一定的相位差。少模光纤中传输的 LP_{01} 模式和 LP_{02} 模式的光进入输出单模光纤并发生叠加。令少模光纤芯子中传输的 LP_{01} 模式和 LP_{02} 模式的激发效率分别为 t_{01} 和 t_{02} ,采用图 1 中少模光纤参数建立有限元模型,计算得 $t_{01} = 81.0\%$ 和 $t_{02} = 11.5\%$,则基于 SFS 结构的传输光谱 T' 可表示为^[14]

$$T' = P_{out}/P_{in} = t_{01}^2 + t_{02}^2 + 2t_{01}t_{02} \cos \varphi(\lambda), \quad (2)$$

式中, $\varphi(\lambda)$ 为 LP_{01} 模式和 LP_{02} 模式的光在长度为 L_{FMF} 的少模光纤中传输后所产生的相位差, λ 为波长, P_{out} 为输出光功率, P_{in} 为输入光功率。 $\varphi(\lambda)$ 可表示为

$$\varphi(\lambda) = \Delta\beta \cdot L_{FMF}, \quad (3)$$

式中, $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$ 为 FMF 中传输的 LP_{01} 模式和 LP_{02} 模式的传播常数差。结合(2)式和(3)式仿真计算 25 °C 下少模光纤自由状态时 LP_{01} 模式和 LP_{02} 模

式的传播常数差 $\Delta\beta$, 其和 SFS 结构 ($L_{FMF} = 50$ cm) 的传输光谱如图 3 所示。其中特征波长的仿真值为 1556.196 nm, 接近于实验值 1556.220 nm。从图 3 可知, 在 LP_{01} 模式和 LP_{02} 模式的群速度相等处, 即 $\Delta\beta$ 的最大值处, 传输光谱中出现非色散条纹, 其对应的波长称为特征波长。

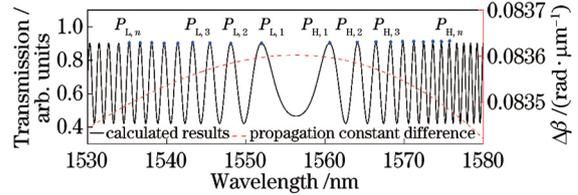


图 3 少模光纤中传输的 LP_{01} 模式和 LP_{02} 模式的传播常数差 $\Delta\beta$ 和 SFS 结构 ($L_{FMF} = 50$ cm) 传输光谱在 25 °C 自由状态下随波长变化的仿真曲线

Fig. 3 Simulation curves of the propagation constant difference $\Delta\beta$ of LP_{01} and the LP_{02} modes propagating in the FMF, and the transmission spectrum of the SFS structure ($L_{FMF} = 50$ cm) under the temperature of 25 °C versus wavelength

由图 3 可得,在非色散条纹处,传输光谱的输出光强不随波长变化发生改变,SFS 的传输光谱中相邻两个峰值的波长间距在距离特征波长最近的位置达到最大,而随着传输谱中的干涉峰远离特征波长,其相邻两个峰值的波长间距逐渐变小,因此光谱中特征波长及其最靠近特征波长的两边峰值易于从传输谱中识别和跟踪,从而可用于传感测量。将光谱图中的干涉峰从最靠近特征波长的峰值开始标记:将位于特征波长长波长段(从 CWL 到 1580 nm)的干涉峰标记为 $P_{H,1}, P_{H,2}, P_{H,3}, \dots, P_{H,n}$,其中 n 为第 n 个干涉峰;将位于特征波长短波长段(从

1530 nm 到 CWL) 的干涉峰标记为 $P_{L,1}, P_{L,2}, P_{L,3}, \dots, P_{L,n}$ 。理论分析和实验研究了 SFS 传输光谱中的特征波长及其两边最靠近特征波长的峰值 $P_{H,1}$ 和 $P_{L,1}$ 在应变、温度、液体折射率和弯曲下的传感特性, 并将 SFS 传感结构用于应变、湿度、温度、液体折射率、弯曲、位移等参量的大动态范围、高灵敏度测量, 及多个参量的同时测量。

3 基于特征波长及其干涉条纹的 SFS 结构传感特性及应用

3.1 SFS 结构中特征波长及干涉峰的温度特性

少模光纤由多个不同材料掺杂的内包层及高 GeO_2 掺杂的纤芯构成, 因此不同于普通的单模及多模光纤^[23], 在外界温度的影响下, 少模光纤的纤芯、各层内包层及外包层的热膨胀系数不同, 从而在纤芯和各内包层、外包层之间产生热应力^[24]。在温度

变化时, 少模光纤中的光弹效应和热光效应同时对纤芯和包层的折射率产生影响, 从而改变少模光纤的温度特性。不同温度下少模光纤 LP_{01} 模式和 LP_{02} 模式的传播常数差仿真及 SFS 结构 ($L_{\text{FMF}} = 16 \text{ cm}$) 的传输光谱如图 4 和图 5 所示。由仿真和实验数据可得, SFS 结构特征波长在温度升高时向长波长移动, 仿真和实验结果吻合, 实验温度灵敏度为 $0.0401 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。

由(3)式可知, 少模光纤中传输的 LP_{01} 模式和 LP_{02} 模式间的相位差 φ , 既是波长 λ 的函数, 也是温度 T 的函数, 可写为 $\varphi(\lambda, T)$ 。在外界温度对少模光纤的影响下(其他环境干扰因素保持不变), 入射光在少模光纤中传输一段距离 L 后, 相位差的变化量 $\Delta\varphi$ 可表示为^[12]

$$\Delta\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial\lambda}\Delta\lambda + \frac{\partial\varphi}{\partial T}\Delta T, \quad (4)$$

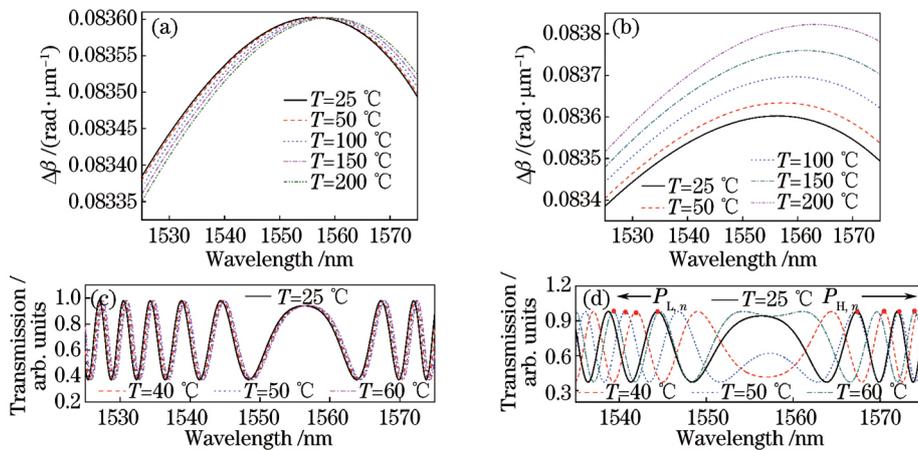


图 4 温度变化时, 少模光纤中传输的 LP_{01} 模式和 LP_{02} 模式的传播常数差 $\Delta\beta$ 及 SFS 结构 ($L_{\text{FMF}} = 16 \text{ cm}$) 的传输光谱随波长变化的仿真曲线。(a) 不考虑热应力下的 $\Delta\beta$; (b) 考虑热应力下的 $\Delta\beta$; (c) 不考虑热应力下的传输光谱; (d) 考虑热应力下的传输光谱

Fig. 4 Simulation curves of the propagation constant difference $\Delta\beta$ of the LP_{01} and LP_{02} modes propagating in the FMF, and the transmission spectra of the SFS structure ($L_{\text{FMF}} = 16 \text{ cm}$) versus wavelength when temperature changes. (a) $\Delta\beta$ without thermal stress; (b) $\Delta\beta$ with thermal stress; (c) transmission spectra without thermal stress; (d) transmission spectra with thermal stress

式中, $\Delta\lambda$ 为波长的变化量, ΔT 为温度的变化量。

在单位温度的变化下, FMF 传输谱中干涉峰/干涉谷的温度灵敏度为^[7]

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = - \left[\frac{\partial(\Delta\beta)}{\partial T} + \Delta\beta \cdot \alpha \right] \left[\frac{\partial(\Delta\beta)}{\partial\lambda} \right]^{-1}, \quad (5)$$

式中, $\alpha = (1/L) (\partial L / \partial T) = 5.1 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 为纯 SiO_2 的热膨胀系数。从(5)式可知, 少模光纤传输光谱中固定相位点的温度灵敏度和少模光纤长度无关, 仅与少模光纤几何结构参数和折射率分布有关。

随着温度的升高, 在 SFS 传感结构的干涉光谱中, 其特征波长和干涉条纹均随温度移动, 研究干涉峰/干涉谷的峰值/谷值波长位置到特征波长位置 λ_{CWL} 的距离对峰值/谷值温度灵敏度的影响, 将横坐标用归一化波长 $\lambda/\lambda_{\text{CWL}}$ 表示, 仿真得到少模光纤的峰值温度灵敏度和归一化波长之间的关系, 并实验研究长度为 30, 40, 50 cm 的少模光纤与单模光纤构成的 SFS 结构传输光谱中的干涉峰在不同温度下的移动情况。当温度 T 小范围 ($20 \sim 60^\circ\text{C}$) 变化时,

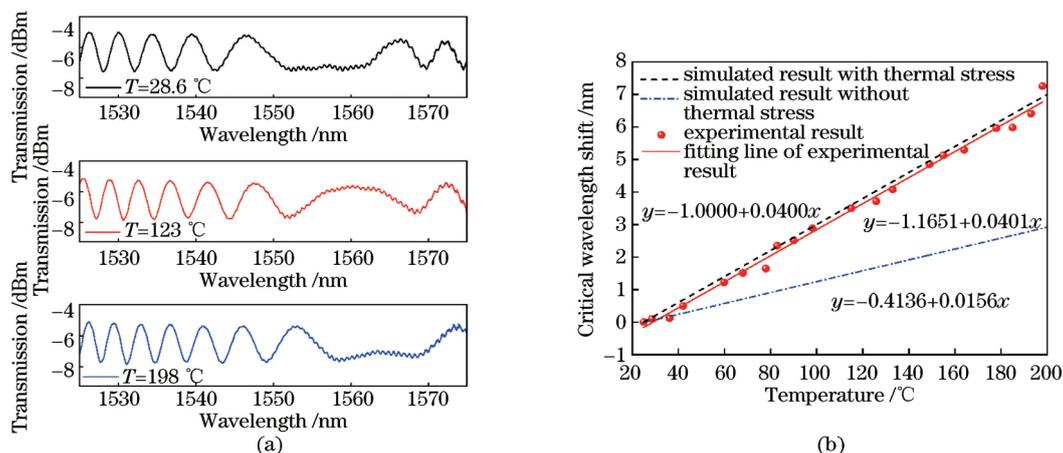


图 5 温度变化时 SFS 结构($L_{\text{FMF}} = 16 \text{ cm}$)的实验传输光谱及特征波长的移动。

(a) SFS 结构的实验传输光谱; (b) 特征波长随温度的移动

Fig. 5 Experimental transmission spectra of the SFS structure ($L_{\text{FMF}} = 16 \text{ cm}$) and critical wavelength shifts when temperature changes. (a) Experimental transmission spectra of the SFS structure; (b) critical wavelength shift versus temperature

SFS 传感结构的传输光谱($L_{\text{FMF}} = 50 \text{ cm}$)的变化情况如图 6 所示。仿真 SFS 结构的峰值温度灵敏度随归一化波长的变化,并采用长度不同的少模光纤组成的 SFS 结构进行实验验证,其仿真与实验结果如图 7 所示。

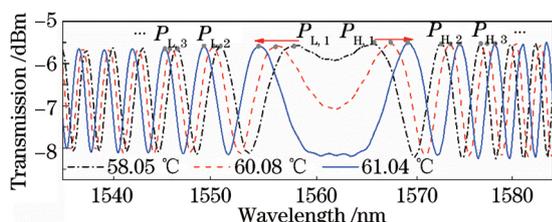


图 6 SFS 结构($L_{\text{FMF}} = 50 \text{ cm}$)的传输光谱随温度的变化

Fig. 6 Transmission spectra of the SFS structure ($L_{\text{FMF}} = 50 \text{ cm}$) versus temperature

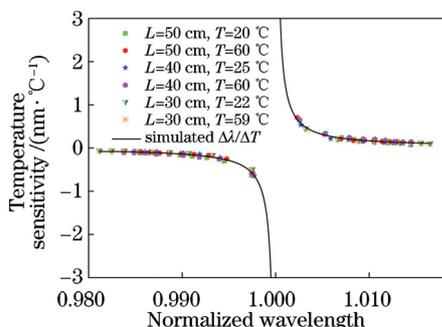


图 7 SFS 结构传输光谱中干涉条纹的温度灵敏度的仿真和实验曲线

Fig. 7 Simulated and experimental results of temperature sensitivity of the interference fringes in the transmission spectrum of the SFS structure

对于给定的少模光纤参数,依据图 6 和图 7 可得干涉峰/干涉谷在温度变化时, SFS 传感结构有以下特征:

- 1) 随着温度的增加,特征波长两边的干涉峰/干涉谷向相反方向移动,特征波长长波长段的干涉峰/干涉谷发生红移,特征波长短波长段的干涉峰/干涉谷发生蓝移;
- 2) 基于 SFS 结构的干涉光谱,其干涉峰/干涉谷的温度灵敏度仅和该干涉峰/干涉谷的波长到特征波长的间距有关,和 FMF 的长度无关;
- 3) 干涉峰/干涉谷的波长位置靠近特征波长时,其温度灵敏度大幅度增加。最靠近特征波长且分别位于其两边的干涉峰 $P_{L,1}$ 和 $P_{H,1}$ 的温度灵敏度在各自的波长处达到最大,随着干涉峰/干涉谷的波长远离特征波长,温度灵敏度减小并逐渐趋于常数。

通过研究 SFS 传感结构的传输光谱中特征波长和干涉条纹的温度特性,可针对不同的应用需求将 SFS 传感单元用于大范围温度测量(室温到 $800 \text{ }^\circ\text{C}$),高灵敏度、高精度测量,以及多个测量参数的同时解调。

3.2 SFS 结构中特征波长的轴向应变特性

当 SFS 结构中整段少模光纤作为传感单元并受到轴向应力时(温度为室温且恒定),令少模光纤的轴向总长度 L_{FMF} 改变量为 ΔL ,那么轴向应力对 FMF 中的 LP_{01} 模式和 LP_{02} 模式间的相位差 φ 的改变量 $\Delta\varphi$ 为

$$\Delta\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial\lambda}\Delta\lambda + \frac{\partial\varphi}{\partial L}\Delta L. \quad (6)$$

令轴向应变为 ϵ_0 ,当轴向应变发生 $\Delta\epsilon_0$ 的改变

时,可获得少模光纤干涉条纹的轴向应变波长灵敏度^[25]为

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta\varepsilon_0} = - \left\{ \Delta\beta + \frac{k_0^2}{2\beta_1\beta_2} \cdot \left\{ \gamma \left[n_0^4 \Delta\beta + (n_{co}^4 - n_0^4) \cdot (\beta_1 b_1 - \beta_2 b_2) \right] + V \delta \left(\beta_1 \frac{\partial b_1}{\partial V} - \beta_2 \frac{\partial b_2}{\partial V} \right) \right\} \left[\frac{\partial(\Delta\beta)}{\partial\lambda} \right]^{-1} \right\}, \quad (7)$$

式中: $\gamma = \rho_{12} - \nu(\rho_{11} + \rho_{12})$, $\rho_{11} = 0.12$, $\rho_{12} = 0.27$ 分别为纯 SiO₂ 的弹光系数,泊松比 $\nu = 0.17$;用归一化传播常数 b_1 和 b_2 表示 β_1 和 β_2 , 即 $\beta_j = k_0^2 [n_0^2 + b_j(n_{co}^2 - n_0^2)]$, $j = 1, 2$, 自由空间波数 $k_0 = 2\pi/\lambda$; V 为归一化频率; $\delta = \sigma(n_{co}^2 - n_0^2) + \frac{\gamma}{2}(n_{co}^4 - n_0^4)$.

SFS 结构传输光谱中 $\Delta\beta$ 随轴向应变变化仿真曲线如图 8 所示。实验测量轴向应变变化下 SFS 结构的传输光谱和特征波长随轴向应变的移动情况,并对其进行线性拟合,可得特征波长的实验灵敏度为 $-0.001 \text{ nm}/\mu\varepsilon$,与仿真结果吻合,如图 9 所示。根据(7)式仿真计算传输光谱中干涉条纹的轴向应变灵敏度与归一化波长间的关系,并对仿真结果进

行验证,如图 10 所示。

由仿真及实验结果可知,当少模光纤参数确定后,在轴向应变的作用下,少模光纤传输光谱中特征波长及干涉峰的轴向灵敏度均与 SFS 结构中少模光纤的长度无关。少模光纤干涉峰的轴向应变灵敏度由其峰值波长到特征波长的间距决定,其变化特征与其温度灵敏度相同。

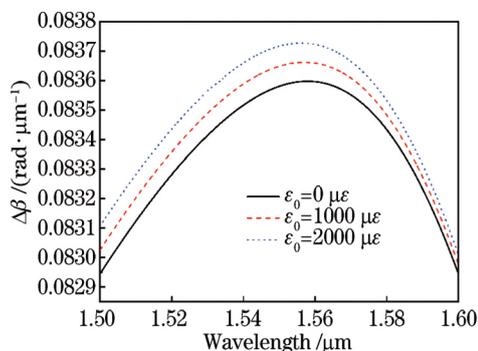


图 8 少模光纤中 LP₀₁ 模式和 LP₀₂ 模式之间传播常数差 $\Delta\beta$ 随轴向应变变化的仿真曲线

Fig. 8 Simulation curves of propagation constant difference $\Delta\beta$ of the LP₀₁ and LP₀₂ modes propagating in the FMF under axial strain variation

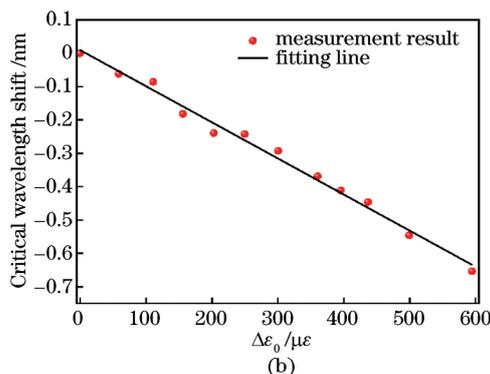
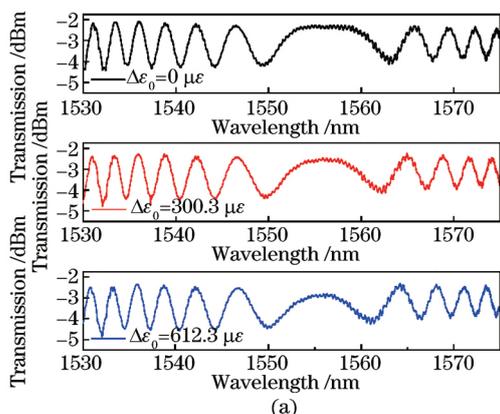


图 9 实验测量。(a) SFS 结构($L_{\text{FMF}} = 30 \text{ cm}$)传输光谱随轴向应变变化;(b)特征波长随轴向应变的变化

Fig. 9 Results of experimental measurements. (a) Transmission spectra of the SFS structure ($L_{\text{FMF}} = 30 \text{ cm}$) under axial strain variation; (b) critical wavelength shift of CWL versus axial strain

3.3 基于 SFS 传感结构的温度和轴向应变同时测量

通过对 SFS 结构传输光谱中干涉峰/干涉谷的温度和轴向应变灵敏度分析可知,调节 SFS 结构中的少模光纤长度,可使干涉峰 $P_{H,1}$ 和 $P_{L,1}$ 随温度和轴向应变产生线性移动。由于干涉峰 $P_{H,1}$ 和 $P_{L,1}$ 对温度和轴向应变灵敏度均不同,可采用传感方程进行温度和轴向应变的同时解调,实现双参量的同时检测。当温度和轴向应变分别变化 ΔT 和 $\Delta\varepsilon$ 时,干涉峰 $P_{H,1}$ 峰值波长漂移量为

$\Delta\lambda_{H,1}$, 干涉峰 $P_{L,1}$ 峰值波长漂移量为 $\Delta\lambda_{L,1}$ 。令干涉峰 $P_{H,1}$ 的温度灵敏度为 $K_{H,T}$, 轴向应变灵敏度为 $K_{H,\varepsilon}$; 干涉峰 $P_{L,1}$ 的温度灵敏度为 $K_{L,T}$, 轴向应变灵敏度为 $K_{L,\varepsilon}$ 。双参量传感器的特征方程表示为^[26]

$$\begin{pmatrix} \Delta\varepsilon_0 \\ \Delta T \end{pmatrix} = \frac{1}{D} \begin{pmatrix} K_{H,T} & -K_{L,T} \\ -K_{H,\varepsilon} & K_{L,\varepsilon} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\lambda_{L,1} \\ \Delta\lambda_{H,1} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

式中, $D = |K_{L,\varepsilon}K_{H,T} - K_{L,T}K_{H,\varepsilon}|$ 。实验中选取少模光纤长度为 20 cm, 通过实验测得, 在 $0 \sim 600 \mu\varepsilon$ 轴向应变变化和 $25 \sim 58 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度变化范围内, SFS 结

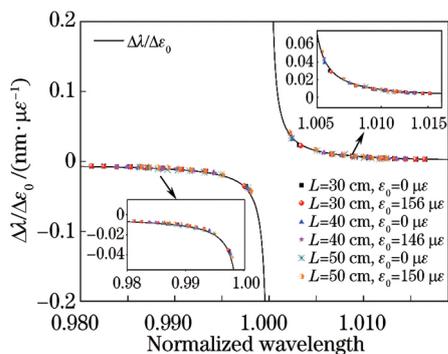


图 10 SFS 传感结构的传输光谱的干涉峰的轴向应变灵敏度随归一化波长的变化

Fig. 10 Relationship between axial strain sensitivity of the interference fringes in the transmission spectrum of the SFS structure and normalized wavelength

构的温度和轴向应变灵敏度系数分别为： $K_{H,T} = 0.262 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ， $K_{L,T} = -0.212 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ， $K_{H,\epsilon} = 0.009 \text{ nm}/\mu\epsilon$ ， $K_{L,\epsilon} = -0.013 \text{ nm}/\mu\epsilon$ 。代入传感方程可测量干涉峰 $P_{H,1}$ 和 $P_{L,1}$ 随温度和轴向应变的波长移动量，同时对温度和轴向应变进行解调，实时解调结果如图 11 所示^[7]。

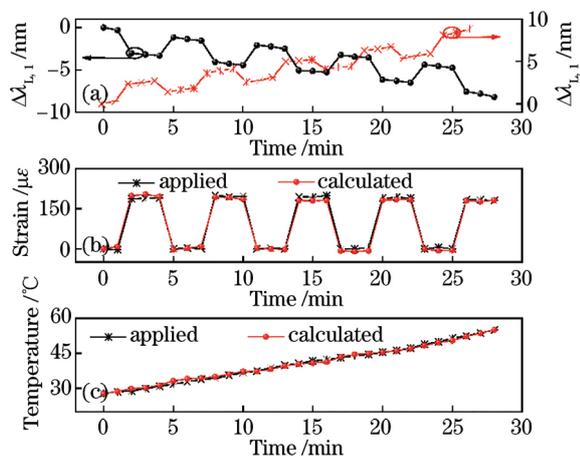


图 11 SFS 结构 ($L_{\text{FMF}} = 20 \text{ cm}$) 传感器随温度和轴向应变变化时的实时输出图。(a) 30 min 实验测试传输光谱中干涉峰 $P_{H,1}$ 和 $P_{L,1}$ 的峰值波长移动；(b) 实际施加轴向应力和 SFS 结构传感器实测输出轴向应力曲线；(c) 实际环境温度和 SFS 结构传感器实测输出温度曲线

Fig. 11 Output of sensor containing the SFS structure ($L_{\text{FMF}} = 20 \text{ cm}$) varies with temperature and axial strain. (a) Wavelength shifts for $P_{H,1}$ and $P_{L,1}$ over a 30-min period of the experiment; (b) curves of the applied and calculated axial strains over that time; (c) curves of the applied and calculated temperatures

3.4 基于涂覆聚酰亚胺的 SFS 结构传输光谱中干涉峰检测的湿度传感

环境中空气的湿度作为一个重要的参量，在工业监测、建筑结构健康检测中发挥着重要的作用。由于 SFS 结构中少模光纤在受到轴向应变的作用下，其传输光谱中特征波长两边的干涉谷会随轴向应变的增加而单调移动，且应变灵敏度随干涉谷到特征波长间距的增大而降低。聚酰亚胺作为一种湿敏材料，在外界空气的湿度增加时会发生膨胀，通过将其均匀涂覆在少模光纤表面，在外界湿度发生变化时，聚酰亚胺材料膨胀可对光纤产生轴向应力，从而检测 SFS 结构中传输光谱干涉谷的波长移动，并对环境中相对湿度的变化进行检测。实验中采用 SFS 结构 ($L_{\text{FMF}} = 15 \text{ cm}$) 作为传感单元，当相对湿度从 30% 增加到 98% 时，测量 SFS 结构的传输光谱及特征波长短波长一侧最靠近特征波长的四个干涉谷随相对湿度的移动情况，如图 12 所示。随着环境相对湿度的增加，SFS 结构的传输光谱中 $D_{L,1}, D_{L,2}, D_{L,3}, D_{L,4}$ 均向短波长移动，令 S 表示单位相对湿度引起的干涉谷的波长漂移量，如图 12 所示，最靠近特征波长的干涉谷 $D_{L,1}$ 的湿度灵敏度最大， $S = -0.360 \text{ nm}$ ^[10]。

3.5 SFS 结构中特征波长的弯曲特性

无论在科学研究还是工业使用中，光纤弯曲是不可避免的现象。根据图 1 中少模光纤剖面的几何参数及折射率分布建立有限元模型，仿真分析 SFS 结构中少模光纤在不同弯曲曲率下，少模光纤芯子中传输的 LP_{01} 模式和 LP_{02} 模式的 $\Delta\beta$ 、SFS 结构传输光谱及特征波长的变化情况，并对仿真结果进行实验验证，如图 13 和图 14 所示^[4]。随着少模光纤弯曲曲率的增加，仿真和实验结果显示 $\Delta\beta$ 最大值对应的波长及 SFS 结构的传输光谱中的特征波长向短波长移动。为比较特征波长随曲率变化的仿真结果和实验结果，将图 14 中的曲率 ρ 转换为等效曲率 ρ_{eff} ，其中 $\rho_{\text{eff}} = \rho/1.28$ ^[27]，如图 15 所示。当 FMF 的等效曲率大于 50.0 m^{-1} 时，特征波长变化量随等效曲率的增加呈线性关系，并且灵敏度较大，如图 15 中的插图所示，其中 y_s 为仿真值的线性拟合曲线， y_e 为实验值的线性拟合曲线。当 FMF 等效曲率在 $50.0 \sim 100.0 \text{ m}^{-1}$ 范围变化时，实验测得特征波长随等效曲率变化的灵敏度为 $0.39828 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$ ，与理论分析结果 $0.40081 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$ 吻合。

3.6 基于 SFS 结构传输光谱中特征波长检测的大位移传感

大量位移的测量在隧道管片、大型桥梁的

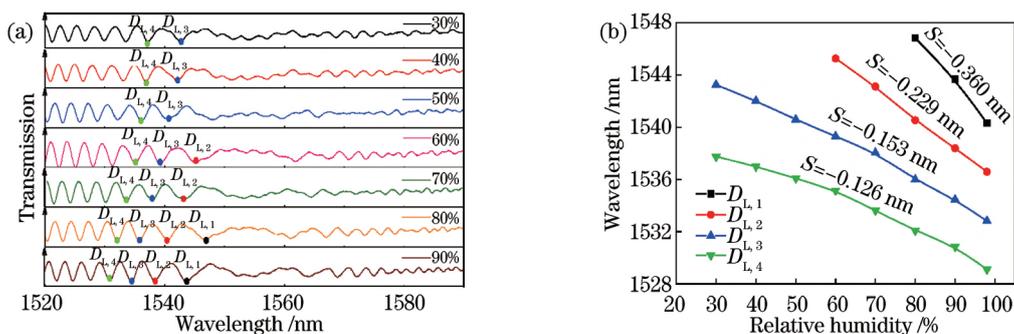


图 12 涂覆聚酰亚胺的 SFS 结构 ($L_{\text{FMF}} = 15 \text{ cm}$) 在相对湿度变化下的传感特性。(a) 传输光谱; (b) 干涉谷 $D_{L,1}, D_{L,2}, D_{L,3}, D_{L,4}$ 的波长移动

Fig. 12 Sensor outputs of the polyimide-coated SFS structure ($L_{\text{FMF}} = 15 \text{ cm}$) under relative humidity variation.

(a) Transmission spectra; (b) wavelength shifts of interference dips $D_{L,1}, D_{L,2}, D_{L,3}$, and $D_{L,4}$

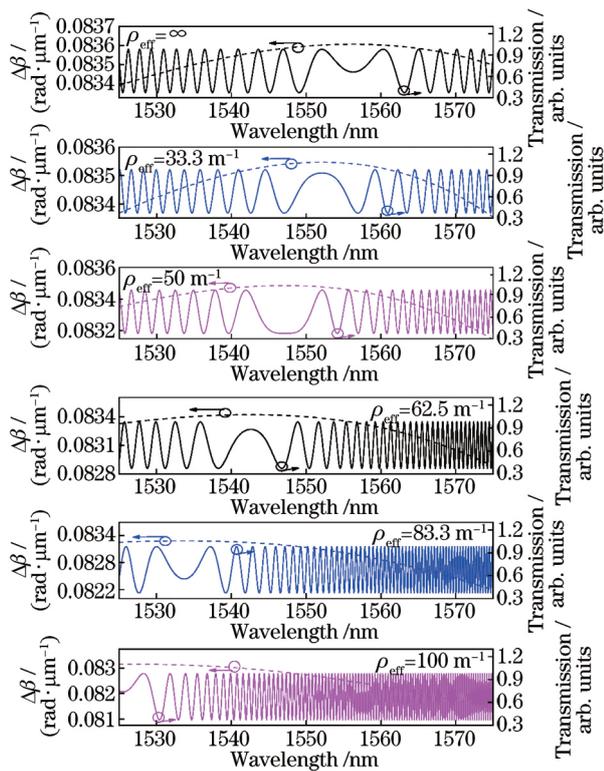


图 13 少模光纤在不同等效曲率下, 仿真 LP_{01} 模式和 LP_{02} 模式的 $\Delta\beta$ 及 SFS 结构 ($L_{\text{FMF}} = 35 \text{ cm}$) 的传输光谱随波长的变化

Fig. 13 Simulation of the propagation constant difference $\Delta\beta$ of LP_{01} and LP_{02} modes, and the transmission spectra of the SFS structure ($L_{\text{FMF}} = 35 \text{ cm}$) versus wavelength with different equivalent curvatures of the FMF

梁柱连接点、悬索桥的悬索拉伸和液位变化等检测有重要地位。由于在 SFS 结构中, 少模光纤的弯曲引起其传输光谱中特征波长随曲率单调变化, 采用

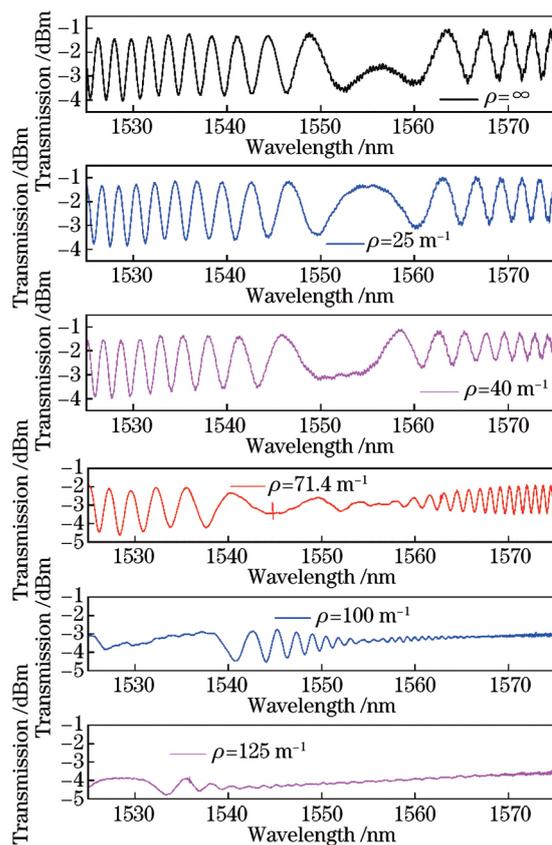


图 14 少模光纤在不同曲率下, 实验测得 SFS 结构 ($L_{\text{FMF}} = 35 \text{ cm}$) 的传输光谱随波长的变化

Fig. 14 Experimental results of the transmission spectra of the SFS structure ($L_{\text{FMF}} = 35 \text{ cm}$) versus wavelength with different curvatures of the FMF

一种结构简单的螺线管结构, 通过建立位移-等效曲率转换关系, 将 SFS 结构应用于大量程位移的传感测量, 其传感器的结构如图 16 所示^[28], 其中 ASE

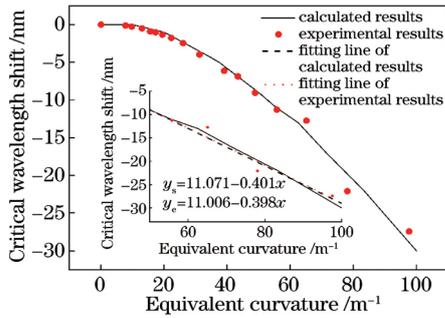


图 15 少模光纤的特征波长随等效曲率变化的仿真和实验结果

Fig. 15 Simulation and experimental results of the critical wavelength shift versus equivalent curvature of the FMF

为自激发辐射宽带光源, OSA 为光谱分析仪, a 为螺旋管在 x - y 平面投影的圆的半径, h 为螺距, a_0 和 h_0 分别为其初始值, L_h 为一圈弹簧管的管长。

位移传感器采用的螺旋管参数如图 16 (c) 所示, 建立该螺旋管中少模光纤的等效弯曲曲率与位移平台距离变化量的关系曲线, 通过检测传输光谱中特征波长的移动, 可对位移进行解调, 其测量值可达 120 mm。在不同的位移量下, SFS 结构的传输

光谱、特征波长的移动及少模光纤的等效曲率与位移之间的转换关系如图 17 所示。通过增加位移传感器中螺旋管的圈数, 重新建立等效曲率与位移之间的转换关系, 可增大位移传感器量程, 使传感器适用于不同场合的测量^[5]。

3.7 基于腐蚀 SFS 结构中特征波长的液体折射率传感

在食品检测、生化医疗等领域, 液体的折射率是液体本质的重要参量之一, 通过外界折射率 (SRI) 分析溶液的浓度、纯度等一些物理性能, 可获得其光学参量和生化反应参量, 这在多个研究领域和生产实践中具有举足轻重的地位。采用氢氟酸缓冲液腐蚀 SFS 结构中的少模光纤, 使得 LP_{02} 模式的模场在光纤表面形成倏逝场。当少模光纤周围的 SRI 变化时, LP_{02} 模式的有效折射率会随 SRI 发生变化, 腐蚀 SFS 结构的传输光谱中特征波长及其干涉条纹随 SRI 的增加单调移动。由于特征波长在 SFS 结构的传输光谱中唯一且容易识别, 采用腐蚀 SFS 结构的方法, 通过跟踪光谱中特征波长的移动, 可实现对 SRI 的大范围测量^[8]。

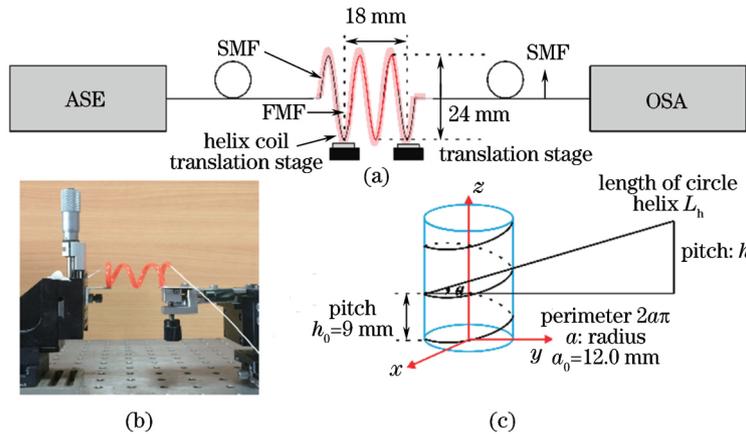


图 16 基于 SFS 结构 ($L_{FMF} = 10$ cm) 的大量程位移传感器。(a) 实验示意图; (b) 实验实物图; (c) 螺旋管数学模型

Fig. 16 Displacement sensor with large measurement range based on the SFS structure ($L_{FMF} = 10$ cm).

(a) Experimental diagram; (b) experimental setup; (c) geometrical mathematical model of circular helix

采用有限元模型理论仿真少模光纤直径 d_{FMF} 减小时, 少模光纤中传输的 LP_{01} 模式和 LP_{02} 模式的 $\Delta\beta$ 随波长的变化曲线, 及腐蚀 SFS 结构的传输光谱中特征波长的移动情况, 如图 18 所示。 LP_{02} 模式的有效折射率显著减小, 而 LP_{01} 模式的有效折射率基本不变, 使得 $\Delta\beta$ 增大, 特征波长向长波长方向移动。当 $d_{FMF} > 30 \mu\text{m}$ 时, 特征波长的位置基本保持不变; 当 $d_{FMF} < 30 \mu\text{m}$, 特征波长开始显著向长波长漂移, 并且移动速率逐渐增加。

实验中腐蚀 SFS 结构 ($L_{FMF} = 20$ cm) 中的少模光纤 $d_{FMF} = 21.3 \mu\text{m}$, 采用质量分数从 0 到 86% 的丙三醇水溶液作为折射率测试溶液, 其传输光谱如图 19 所示。腐蚀 SFS 结构的传输光谱中的特征波长随 SRI 的增加向短波长移动, 且折射率灵敏度随 SRI 的增大而增大。理论和实验研究腐蚀 SFS 结构的传输光谱中特征波长随 SRI 变化的灵敏度, 如图 20 所示。当 SRI 从 1.316 到 1.383 变化时, 特征波长随 SRI 增加而线性移动, 所得 SFS 结构的实验

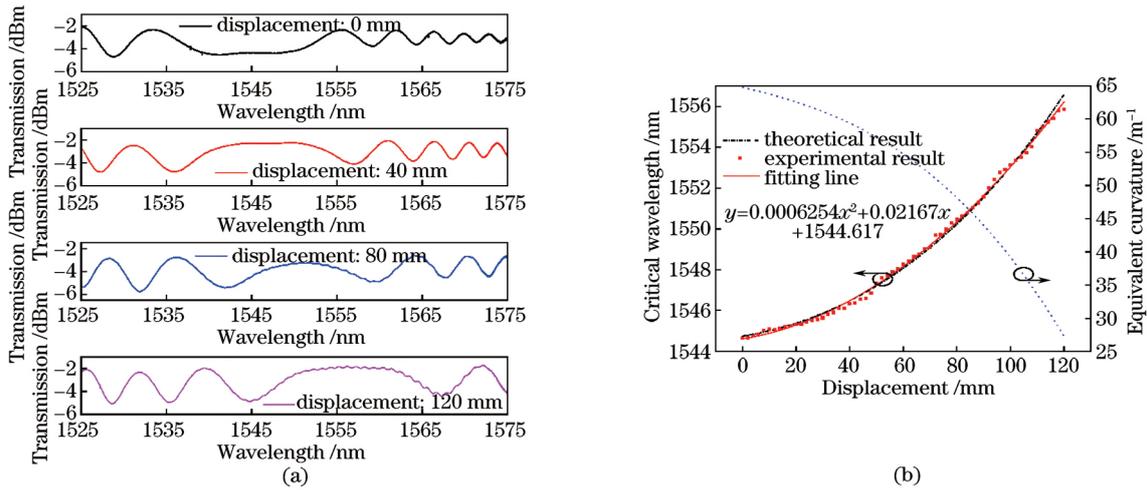


图 17 基于 SFS 结构 ($L_{\text{FMF}} = 10 \text{ cm}$) 的大位移传感器。(a) 传输光谱随位移量的变化；
(b) 少模光纤等效曲率和特征波长随位移量的变化曲线

Fig. 17 Large displacement sensor based on the SFS structure ($L_{\text{FMF}} = 10 \text{ cm}$). (a) Transmission spectra under different displacements; (b) change of the FMF equivalent curvature and shifts of the critical wavelengths under displacement variation

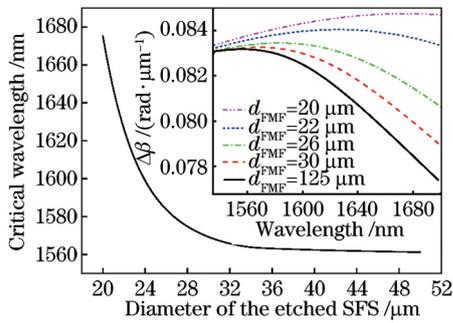


图 18 腐蚀 SFS 传输光谱中特征波长随光纤外径 d_{FMF} 变化的仿真曲线。其中插图为 LP_{01} 模式和 LP_{02} 模式的传播常数差在不同 d_{FMF} 下随波长变化的仿真曲线

Fig. 18 Simulation of the critical wavelength shifts in the transmission spectra of the etched SFS structure with different d_{FMF} . The inset is the simulation of the propagation constant difference of the LP_{01} and LP_{02} modes versus wavelength with different d_{FMF}

灵敏度为 $(140.626 \pm 12.560) \text{ nm/RIU}$ (RIU 为折射率单元); 当 SRI 变化大于 1.383 时, 特征波长随 SRI 开始非线性移动, 实验灵敏度增加; 在 SRI 从 1.433 到 1.439 变化时, 特征波长的最大折射率灵敏度可达 $(2489.796 \pm 190.179) \text{ nm/RIU}$ 。

3.8 SFS 结构的传输光谱中特征波长的解调方法

以采用腐蚀后的 SFS 结构传输光谱中的特征波长对 SRI 的检测为例, 对特征波长的解调方法进行解释。当 SFS 结构中少模光纤 $L_{\text{FMF}} = 20 \text{ cm}$, $d_{\text{FMF}} = 21.3 \mu\text{m}$ 时, 对 SRI 分别为 1.350, 1.355, 1.360 时的 SFS 结构的传输光谱进行仿真, 如图 21

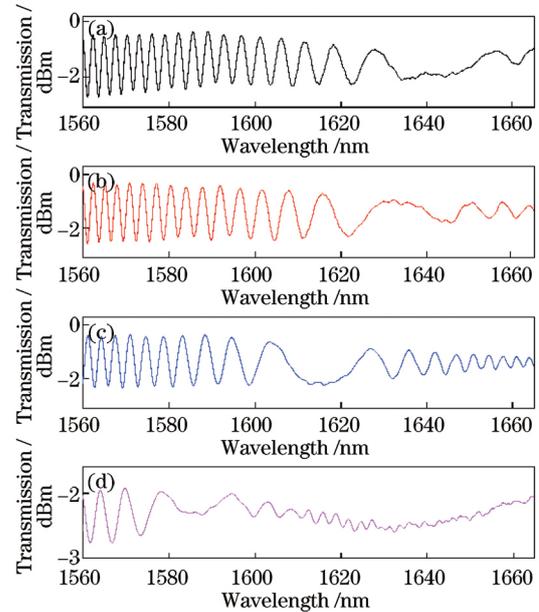


图 19 腐蚀 SFS 结构 ($L_{\text{FMF}} = 20 \text{ cm}$, $d_{\text{FMF}} = 21.3 \mu\text{m}$) 在不同 SRI 下的传输光谱。(a) SRI 为 1.316; (b) SRI 为 1.383; (c) SRI 为 1.423; (d) SRI 为 1.439

Fig. 19 Transmission spectra of the etched SFS structure ($L_{\text{FMF}} = 20 \text{ cm}$, $d_{\text{FMF}} = 21.3 \mu\text{m}$) under different SRI. (a) SRI is 1.316; (b) SRI is 1.383; (c) SRI is 1.423; (d) SRI is 1.439

所示。具有非色散条纹的传输光谱随波长成周期性变化, 其光谱中干涉峰/谷的波形非常相似。然而, 由于非色散条纹的出现, 干涉光谱中相邻两个干涉峰/谷之间的波长间距在特征波长附近最大, 这使得特征波长及两边干涉峰/谷极易从传输光谱中识别。

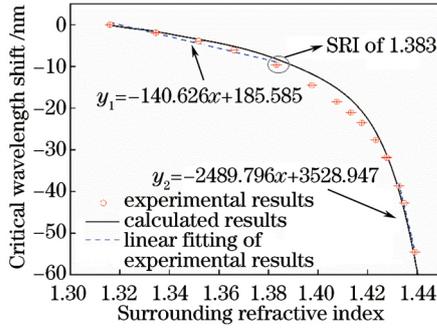


图 20 外界折射率变化下腐蚀 SFS 传输光谱中特征波长移动情况(实验结果标注误差线)

Fig. 20 Experimental results (marked with error bars) of the critical wavelength shift in the transmission spectrum of the etched SFS structure under surrounding refractive index variation

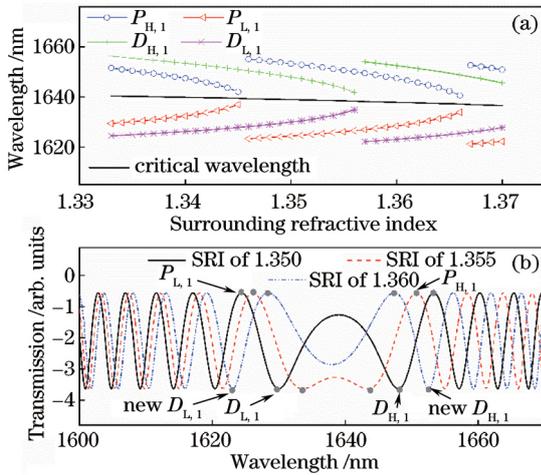


图 21 在外界折射率变化下, 腐蚀 SFS 结构 ($d_{\text{FMF}} = 21.3 \mu\text{m}$, $L_{\text{FMF}} = 20 \text{ cm}$) 的传输光谱及特征波长和部分干涉峰/干涉谷波长的仿真变化。(a) 特征波长及左右两边干涉峰/谷 ($D_{\text{L},1}$, $P_{\text{L},1}$, $P_{\text{H},1}$, $D_{\text{H},1}$) 的波长移动情况; (b) SRI 为 1.350, 1.355, 1.360 时的传输光谱

Fig. 21 Simulation of the transmission spectra of the etched SFS structure ($d_{\text{FMF}} = 21.3 \mu\text{m}$, $L_{\text{FMF}} = 20 \text{ cm}$) and shifts of the critical wavelength and the interference peaks/dips under surrounding refractive index variation, (a) Shifts of the critical wavelength and the interference peaks/dips ($D_{\text{L},1}$, $P_{\text{L},1}$, $P_{\text{H},1}$, $D_{\text{H},1}$) on each side of the critical wavelength; (b) transmission spectra under the SRIs of 1.350, 1.355, and 1.360

随着 SRI 的增大, 特征波长两边的干涉峰/谷移动方向不同, 位于特征波长短波长段的干涉峰/谷, 记作 $P_{\text{L},n}$ 或 $D_{\text{L},n}$, 发生红移; 位于特征波长长波

长段的干涉峰/谷, 记作 $P_{\text{H},n}$ 或 $D_{\text{H},n}$, 发生蓝移 ($n=1, 2, 3 \dots$)。并且干涉峰/谷的波长位置越靠近特征波长, 其折射率灵敏度越大, 如图 20(a) 所示。然而, 如果检测 $P_{\text{H},1}$ 、 $P_{\text{L},1}$ 、 $D_{\text{H},1}$ 、 $D_{\text{L},1}$ 其中一个干涉峰/谷的移动来解调 SRI, 其 SRI 的测量范围会受到干涉条纹的周期性影响, 从而造成传感器多值输出等问题。如图 21(a) 所示, 锁定 $P_{\text{H},1}$ 、 $P_{\text{L},1}$ 、 $D_{\text{H},1}$ 、 $D_{\text{L},1}$ 其中一个干涉峰/谷的波长移动情况, 在一定范围内, $P_{\text{H},1}$ 、 $P_{\text{L},1}$ 、 $D_{\text{H},1}$ 、 $D_{\text{L},1}$ 均随 SRI 的增加而单调移动, 当 SRI 的变化范围增大后, 以 $D_{\text{H},1}$ 和 $D_{\text{L},1}$ 为例, 两个干涉谷向特征波长的方向移动并在特征波长处合并消失, 此时, 新的 $D_{\text{H},1}$ 和 $D_{\text{L},1}$ 将在光谱中重新出现, 如图 21(b) 中虚点线光谱所示。新的 $D_{\text{H},1}$ 和 $D_{\text{L},1}$ 在光谱中更易识别, 从而会引起检测误判, 导致传感器输出结果突变, 引起测量误差。

从图 21(b) 可得, 由于 $P_{\text{H},1}$ 、 $P_{\text{L},1}$ 、 $D_{\text{H},1}$ 、 $D_{\text{L},1}$ 在传输光谱中关于特征波长呈对称分布, 令 $P_{\text{H},1}$ 、 $P_{\text{L},1}$ 、 $D_{\text{H},1}$ 、 $D_{\text{L},1}$ 对应的波长分别为 λ_{HP} 、 λ_{LP} 、 λ_{HD} 、 λ_{LD} , 则特征波长 λ_{CWL} 可写为

$$\lambda_{\text{CWL}} = \frac{\lambda_{\text{HP}} + \lambda_{\text{LP}} + \lambda_{\text{HD}} + \lambda_{\text{LD}}}{4} \quad (9)$$

由(9)式计算得到的特征波长随 SRI 的移动如图 21(b) 中实线所示, 相比于传输光谱中的干涉峰/谷, 特征波长在光谱中唯一存在且随 SRI 单调移动, 从而良好地解决干涉峰/谷的测量范围小、输出多值性问题, 为基于波长检测的干涉型传感器提出新的测量方案。

基于具有特征波长的 SFS 结构的干涉型传感器可应用于轴向应变、温度、弯曲、位移、外部折射率、相对湿度等参量的大范围、高灵敏度、多参量同时检测, 具有较高的应用价值。对 SFS 传感结构在不同参量下的测量应用进行总结, 如表 1 所示。

4 结 论

研究了一种特殊设计的少模光纤, 并将其与单模光纤构成单模光纤-少模光纤-单模光纤(SFS)共线式马赫-曾德尔干涉结构。这种 SFS 结构的传输光谱中存在唯一一个特征波长, 该特征波长随多个被测参量单调移动。位于特征波长两边的干涉峰灵敏度仅与其峰值波长到特征波长的间距相关, 并且最靠近特征波长的干涉峰灵敏度最大。通过理论研究和实验验证 SFS 结构传输光谱中的

表 1 具有特征波长的 SFS 传感结构在多种参量测量中的应用总结

Table 1 Summary of the SFS sensing structure with critical wavelength and its applications in different sensing parameters

Measurement parameter	Measurement index	Experimental sensitivity	Sensing applications
Temperature	Critical wavelength	$0.0401 \text{ nm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	Temperature measurement in a large measurement range (up to a maximum of $800 \text{ }^\circ\text{C}$)
Temperature	Interference peak / dip	Sensitivity of the interference peak is governed by the wavelength spacing between the peak wavelength and the critical wavelength; the sensitivities of the interference peaks increase significantly with the decreasing of wavelength spacing; the maximum temperature sensitivity of the interference peaks for an SFS structure employing a 30-cm FMF is $0.482 \text{ nm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	Temperature measurement with a high sensitivity, simultaneous measurement of temperature and other environmental variables such as strain
Strain	Critical wavelength	$-0.001 \text{ nm} \cdot \mu\epsilon^{-1}$	Strain measurement in a large measurement range
Strain	Interference peak/dip	Similar as the temperature sensitivity, the strain sensitivity of the interference peak is governed by the wavelength spacing between the peak wavelength and the critical wavelength, and increases significantly with the decreasing of wavelength spacing; the maximum strain sensitivity of the interference peaks for an SFS structure employing a 30-cm FMF is $-0.027 \text{ nm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	Strain measurement with high sensitivity; simultaneous measurement of strain and temperature
Relative humidity	Interference dip	-0.360 nm for per relative humidity change	Relative humidity measurement with a high sensitivity
Curvature	Critical wavelength	0.398 nm/m^{-1}	Curvature measurement in a large measurement range; large displacement measurement with different measurement ranges
Surrounding refractive index	Critical wavelength	Maximum reflective index sensitivity is $2489.796 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$	Liquid reflective index measurement with a large measurement range up to $1,454$ under 532 nm

特征波长和干涉条纹的传感特性, 可将 SFS 结构用于对轴向应变、温度、弯曲、位移、外部折射率、相对湿度等参量的大范围、高灵敏度、多参量同时解调的传感检测。

参 考 文 献

- [1] Liao Y B, Li M, Zhang M. Optical fiber sensing techniques and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
 廖延彪, 黎敏, 张敏. 光纤传感技术与应用 [M]. 北

- 京: 清华大学出版社, 2009.
- [2] Lee B H, Kim Y H, Park K S, *et al.* Interferometric fiber optic sensors[J]. *Sensors*, 2012, 12(3): 2467-2486.
- [3] Wei C F, Lin G B, Dong X P, *et al.* A tunable polarization-independent comb filter based on high-order mode fiber[J]. *Journal of Optics*, 2013, 15(5): 055403.
- [4] Su J, Dong X P, Lu C X. Characteristics of few mode fiber under bending [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, 22(2): 139-145.
- [5] Su J, Dong X P, Lu C X. Property of bent few-mode fiber and its application in displacement sensor[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(13): 1387-1390.
- [6] Su J, Dong X P, Lu C X. Intensity detection scheme of sensors based on the modal interference effect of few mode fiber[J]. *Measurement*, 2016, 79: 182-187.
- [7] Lu C X, Su J, Dong X P, *et al.* Studies on temperature and strain sensitivities of a few-mode critical wavelength fiber optic sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(5): 1794-1801.
- [8] Lu C X, Dong X P, Su J. Detection of refractive index change from the critical wavelength of an etched few mode fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(13): 2593-2597.
- [9] Lu C X, Su J, Dong X P, *et al.* Simultaneous measurement of strain and temperature with a few-mode fiber-based sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(13): 2796-2802.
- [10] Lei X Q, Dong X P, Lu C X. Sensitive humidity sensor based on a special dual-mode fiber[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(7): 2587-2591.
- [11] Liu Q, Bi W H, Wang S W, *et al.* Few-mode fiber temperature sensor based on interference between LP₀₁ and LP₁₁ modes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0206001.
刘强, 毕卫红, 王思文, 等. 基于 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式干涉的少模光纤温度传感器[J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0206001.
- [12] Tripathi S M, Kumar A, Varshney R K, *et al.* Strain and temperature sensing characteristics of single-mode-multimode-single-mode structures [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(13): 2348-2356.
- [13] Tripathi S M, Kumar A, Marin E, *et al.* Critical wavelength in the transmission spectrum of SMS fiber structure employing GeO₂-doped multimode fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(11): 799-801.
- [14] Salik E, Medrano M, Cohoon G, *et al.* SMS fiber sensor utilizing a few-mode fiber exhibits critical wavelength behavior[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(7): 593-595.
- [15] Ma L, Qi Y H, Kang Z X, *et al.* All-fiber strain and curvature sensor based on no-core fiber[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(5): 1514-1517.
- [16] Shao M, Han L, Zhao X, *et al.* Liquid level sensor based on in-fiber Michelson interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328021.
邵敏, 韩亮, 兆雪, 等. 基于在线型光纤迈克耳孙干涉仪的液位传感器[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328021.
- [17] Zhang N M Y, Li K W, Zhang N, *et al.* Highly sensitive gas refractometers based on optical microfiber modal interferometers operating at dispersion turning point[J]. *Optics Express*, 2018, 26(22): 29148-29158.
- [18] Fu G W, Li Q F, Li Y P, *et al.* Temperature insensitive curvature sensor of photonic crystal fiber based on core-offset splicing and waist-enlarged fiber taper[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1106007.
付广伟, 李颀峰, 李昀璞, 等. 温度不敏感的错位熔接粗锥型光子晶体光纤曲率传感器[J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 1106007.
- [19] 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.
- [20] Martincek I, Pudis D, Kacik D, *et al.* Investigation of intermodal interference of LP₀₁ and LP₁₁ modes in the liquid-core optical fiber for temperature measurements[J]. *Optik*, 2011, 122(8): 707-710.
- [21] Lacroix S, Gonthier F, Black R J, *et al.* Tapered-fiber interferometric wavelength response: the achromatic fringe[J]. *Optics Letters*, 1988, 13(5): 395-397.
- [22] Vengsarkar A M, Walker K L. Article comprising a dispersion-compensating optical waveguide: US5448674[P]. 1995-09-05 [2019-04-15]. <https://patents.google.com/patent/US5448674A/en>.
- [23] Kumar A, Jindal R, Varshney R K, *et al.* A fiber-optic temperature sensor based on LP₀₁-LP₀₂ mode interference[J]. *Optical Fiber Technology*, 2000, 6

- (1): 83-90.
- [24] Brugger K. Effect of thermal stress on refractive index in clad fibers[J]. Applied Optics, 1971, 10(2): 437-438.
- [25] Kumar A, Goel N K, Varshney R K. Studies on a few-mode fiber-optic strain sensor based on LP₀₁-LP₀₂ mode interference [J]. Journal of Lightwave Technology, 2001, 19(3): 358-362.
- [26] Xu M G, Reekie L, Dakin J P, *et al.* Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensors [J]. Electronics Letters, 1994, 30(13): 1085-1087.
- [27] Schermer R T, Cole J H. Improved bend loss formula verified for optical fiber by simulation and experiment [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2007, 43(10): 899-909.
- [28] Zhang Y H, Liu H H, Wang D C. Spring manual [M]. Beijing: China Machine Press, 1997: 176-177. 张英会, 刘辉航, 王德成. 弹簧手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 176-177.