

基于空芯光纤和光纤布拉格光栅的温度应变同时测量传感器

谭展, 廖常锐, 刘申, 侯茂祥, 张哲, 郭奎奎, 王义平*

深圳大学光电工程学院光电子器件与系统教育部重点实验室, 广东 深圳 518060

摘要 提出一种新颖的温度和应变双参数同时测量的光纤传感器。该传感器由空芯光纤和光纤布拉格光栅级联而成。空芯光纤通过反谐振机理将光限制在空气纤芯内传输, 满足谐振条件的光泄露出空气芯, 在传输光谱上表现为周期性损耗峰。由于空芯光纤和光纤布拉格光栅的物理机理不同, 对外界温度、应变的响应存在差异, 利用耦合矩阵则可以精确地实现温度和应变双参数的同时测量。实验结果表明, 在 1550 nm 波长附近, 空芯光纤和光纤布拉格光栅对应的温度灵敏度分别为 24.55 pm/°C 和 12.76 pm/°C, 应变灵敏度分别为 -0.70 pm/μ ϵ 和 1.02 pm/μ ϵ , 该级联结构的传感器制作简单且具有较高的测量精度。

关键词 光纤光学; 光纤传感器; 空芯光纤; 光纤布拉格光栅; 温度传感器; 应变传感器

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1206007

Simultaneous Measurement Sensors of Temperature and Strain Based on Hollow Core Fiber and Fiber Bragg Grating

Tan Zhan, Liao Changrui, Liu Shen, Hou Maoxiang,
Zhang Zhe, Guo Kuikui, Wang Yiping*

Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education, College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract A novel temperature and strain dual-parameter fiber sensor is proposed, which is constructed via the cascading between a hollow core fiber and a fiber Bragg grating. The hollow core fiber confines the light to transmit inside the air core based on the anti-resonance mechanism and the light satisfying the resonance condition leaks out of the air core, which is indicated as a periodic loss peak in the transmission spectrum. Because the physical mechanisms for hollow core fiber and fiber Bragg grating as well as their spectral responses to external temperature and strain are different, the simultaneous measurement of temperature and strain can be realized based on the coupling matrix. The experimental results show that the temperature sensitivities of hollow core fiber and fiber Bragg grating are 24.55 pm/°C and 12.76 pm/°C near 1550 nm wavelength, respectively. In contrast, the strain sensitivities are -0.70 pm/μ ϵ and 1.02 pm/μ ϵ , respectively. The proposed dual-parameter sensor is simple in fabrication and has a high measurement accuracy.

Key words fiber optics; optical fiber sensor; hollow core fiber; fiber Bragg grating; temperature sensor; strain sensor

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.3735

1 引 言

光纤光栅是近几年发展最为迅速的光纤器件之一, 它具有许多独特的优点, 在光纤通信、光纤传感

等领域具有广阔的应用前景^[1-5]。光纤光栅对温度和应变都有良好的线性响应, 是理想的温度传感器及应变传感器。然而, 在机械、建筑和安全监测等实际工程应用环境中通常存在温度和应变等多个参量

收稿日期: 2018-06-06; 修回日期: 2018-07-21; 录用日期: 2018-08-17

基金项目: 国家自然科学基金(61425007, 61635007)、广东省重大科技专项(2015B010105007)、广东省自然科学基金(2014A030308007)、深圳市科技计划(JCYJ20160427104925452, JCYJ20170412105604705)

* E-mail: ypwang@szu.edu.cn

同时变化的情况。由于光纤光栅存在温度与应变的交叉响应,单个光纤光栅难以直接同时测量温度和应变。如何避免温度和应变等参量间的交叉敏感成为一个重要课题。目前,学者们已经提出了多种同时测量温度和应变的方法,例如,Shu等^[6]利用两个不同类型的光纤布拉格光栅(FBG)级联、王目光等^[7]利用长周期光纤光栅与FBG级联实现了温度和应变的同时测量。童峥嵘等通过在Lyot滤波器中熔接一段长周期光纤光栅^[8]及利用多模-单模-多模结构与FBG级联^[9]都实现了温度和应变的同时测量。Miao等^[10]利用一根倾斜FBG包层模和纤芯模的不同透射峰对温度和应变的灵敏度不同,实现了温度和应变的同时测量。Mokhtar等^[11]对一根光纤上的两个FBG进行宽度或高度不均匀封装,使其产生不同敏感系数的双峰,实现了温度和应变的同时测量。Shi等^[12]利用高双折射环形镜和掺铒光纤连接,实现温度和应变双参量的同时测量。卞继城等^[13]提出了一种基于马赫-曾德尔干涉的温度和应变双参数同时测量的光纤传感器,其结构是在单模光纤(SMF)上分别熔接两个球形结构并在单模光纤中间熔接一段细芯光纤。

近年来,基于空芯光纤(HCF)的光纤传感器件获得了广泛关注^[14-19]。2008年,莫斯科国立大学Zheltikov^[14]提出基于HCF环形波导泄漏损失的生化传感器和传感器阵列。2010年,重庆大学朱涛等^[15]在HCF法布里-珀罗(F-P)干涉腔内填充一种具有较强吸水性的新型纳米复合水凝胶从而构成一种温度低敏感的微型湿度计。2014年,北京理工大学Gao等^[16]提出了基于磁性凝胶涂覆的HCF紧凑型全光纤磁场传感器。2014年,复旦大学蒋永翔等^[17]提出了一种基于镀银HCF结构的表面等离子体共振传感器。2015年,香港理工大学汪超等^[18]通过错位熔接两段不同内径的HCF,制作了一个微腔光纤F-P干涉仪型气压传感器。2017年,复旦大学张屿等^[19]提出了基于光强检测方式的HCF表面等离子体共振传感器。2018年,复旦大学林华等^[20]提出了一种新型的基于金属-介质-金属的多层膜结构的HCF折射率传感器。但是,目前基于反谐振HCF实现温度和应变双参数同时测量的传感器件在国内还未见报道。

本文提出一种基于反谐振效应的HCF和FBG级联的全光纤传感器,实现了温度和应变同时传感。由于HCF和FBG对温度与应变的响应特性不同,因此可以通过光谱分析仪实时监测HCF透射谱谐

振波长及FBG透射谱谐振波长的漂移量,然后利用双参数耦合矩阵可以计算出温度和应力的变化。该新颖的全光纤级联传感器解决了温度和应变之间的交叉敏感问题,其温度灵敏度高达24.55 pm/°C,应变灵敏度达1.02 pm/ $\mu\epsilon$ 。实验测温范围为室温(20 °C)至500 °C,应变测量范围为0~3000 $\mu\epsilon$,测量范围较广且能用于高温传感。同时,该级联结构的传感器制作简单,具有光纤传感器的众多优点,在安全监测等工程领域有广阔的应用前景。

2 传感器原理

2.1 HCF传感原理

HCF又被称为毛细玻璃管,其结构为由低折射率的空气芯和高折射率石英包层介质环绕形成的管状结构,端面结构如图1(a)所示。空气芯直径为 $2r$,空气芯折射率为 n_1 ,包层厚度为 d ,包层折射率为 n_2 ,HCF外界环境折射率为 n_3 。由于空气折射率低于石英折射率($n_1 < n_2$),导致光不能像在普通光纤内一样发生全反射,因此不能完全将光限制在空气芯中传输。HCF导光机理如图1(b)所示,空气芯中传输的光一部分(r_1)被包层反射回空气芯,另一部分(t_1)会透射到包层中。包层中的光一部分(r_2)反射回空气芯,另一部分(t_2)透射到外界损耗掉。该HCF传导机理符合反谐振波导模型^[21-22],反谐振波导传输机理如图1(c)所示。高折射率的包层(n_2)可以被认为是一个F-P谐振腔,当入射光波长满足F-P腔的谐振条件时,这部分光就会泄露出空气芯,被束缚在高折射率包层(n_2)中振荡,从而在透射光谱上表现为损耗极大,对应图1(d)中的波谷;当光波长远离谐振波长时,光将被F-P腔反射回来,被限制在低折射率层(n_1)中,并沿着其轴向向前传播,在透射光谱上表现为极小的传输损耗,对应图1(d)中透射最强位置。

基于反谐振效应的HCF谐振波长^[22-23]为

$$\lambda_m = \frac{2d}{m} \sqrt{n_2^2 - n_1^2}, \quad (1)$$

式中: m 为谐振阶次。由于温度对空气芯折射率的影响可以忽略,谐振波长 λ_m 对温度 T 求导可得

$$\frac{\partial \lambda_m}{\partial T} = \frac{2dn_2}{m \sqrt{n_2^2 - n_1^2}} \times \frac{\partial n_2}{\partial T}, \quad (2)$$

式中: $\partial n_2 / \partial T$ 为包层热光系数。当温度升高时,HCF石英包层折射率 n_2 增大^[4],谐振波长 λ_m 往长波方向偏移(红移)。谐振波长 λ_m 对应应变 ϵ 求得

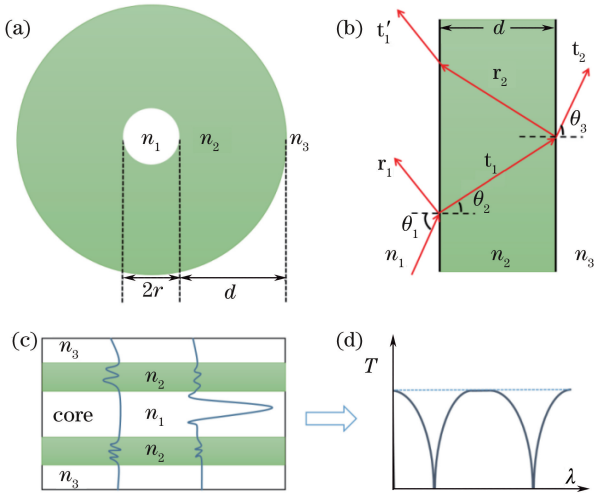


图 1 HCF 示意图。(a) 端面；(b) 导光机理；(c) 反谐振波导传输；(d) 反谐振波导透射谱

Fig. 1 Schematic of HCF. (a) End facet; (b) light guiding mechanism; (c) anti-resonant waveguide transmission; (d) transmission spectrum of anti-resonant waveguide

$$\frac{\partial \lambda_m}{\partial \epsilon} = \frac{2\sqrt{n_2^2 - n_1^2}}{m} \times \frac{\partial d}{\partial \epsilon} + \frac{2dn_2}{m\sqrt{n_2^2 - n_1^2}} \times \frac{\partial n_2}{\partial \epsilon}, \quad (3)$$

式中： $\partial n_2 / \partial \epsilon$ 表示折射率随应变的变化系数； $\partial d / \partial \epsilon$ 表示包层厚度随应变的变化系数。

2.2 FBG 传感原理

FBG 是利用光纤光敏性在光纤纤芯中制备的一维折射率周期性调制结构。当光纤纤芯的有效折射率发生改变时，光纤中会产生轴向的周期性扰动，正向与反向传输模式耦合，经过光纤光栅的窄带光中满足光栅布拉格条件的光被反射，不满足条件的光则透过光纤光栅继续传播。

FBG 的谐振波长 λ_B 可表示为^[4]

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (4)$$

式中： n_{eff} 为纤芯的有效折射率； Λ 为光栅周期； λ_B 随 n_{eff} 和 Λ 的改变而改变。温度变化会引起有效折射率的变化(热光效应)，同时由于热变形也会引起光栅周期的变化(热膨胀效应)^[4]。无论是对光栅进行拉伸还是挤压，都会改变光栅周期，同时光纤本身所具有的弹光效应也会使纤芯有效折射率随外界应力状态的变化而变化。当温度升高时，FBG 的有效折射率和栅距会增大，FBG 谐振波长红移。当轴向应力增加时，FBG 的有效折射率和栅距也会增大，FBG 谐振波长红移^[24]。

由于 FBG 谐振波长对应变和温度同时敏感，仅仅从波长的变化量很难实现应变和温度的区分测量。根据文献报道^[4, 24]，FBG 的谐振波长 λ_B 变化与

应变、温度的关系可表达为

$$\Delta \lambda_B = \alpha_\epsilon \Delta \epsilon + \alpha_T \Delta T. \quad (5)$$

中心波长取 1550 nm 时，FBG 的轴向应变灵敏度 $\alpha_\epsilon = 1.22 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ，温度灵敏度 $\alpha_T = 10.8 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ^[4]。

3 双参数传感器设计与制备

本研究设计的光纤传感器(HCF-FBG 传感器)的结构如图 2 所示，该传感器由一段基于反谐振效应的 HCF 和一个写在普通单模光纤上的 FBG 级联组成，两边各接一段单模光纤用于测量透射谱。将切平的 HCF 与单模光纤熔接，再利用紫外飞秒激光相位掩模法在 HCF 左端的单模光纤上写制 FBG，形成新型级联结构。

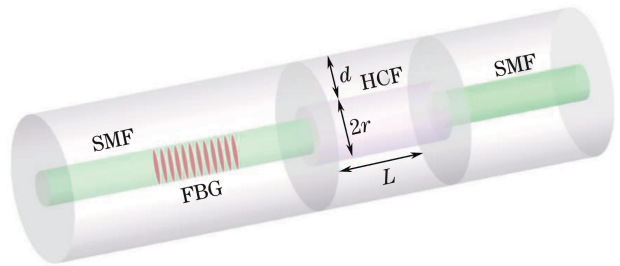


图 2 光纤传感器的结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of proposed fiber sensor

利用 Polymicro Technologies 公司的 TSP025150 纯石英 HCF(光纤内径为 25 μm 、外径为 125 μm)制备图 2 中的 HCF 谐振腔。光纤熔接机选用日本藤仓公司生产的 60S 商用熔接机，熔接参数均选用 -40 bit, 600 ms, 尽量减少熔接过程带来的影响。制作过程是先剥去单模光纤和 HCF 的涂覆层，再用光纤切割刀把端面切平，然后放到光纤熔接机中熔接。熔接后将样品放到光纤精密切割平台上对 HCF 进行精密切割，切取 HCF 长度为 5 mm，切割后放回光纤熔接机，熔接一段单模光纤后可观察到如图 3 所示的透射谱。在谐振波长位置出现损耗峰(图 3 中波谷位置)，不同阶次谐振波长不同，相邻阶次谐振波长约间隔 20 nm。在未谐振区域出现一系列的小杂峰，不是很光滑，类似干涉噪声。这主要是因为实际制备的 HCF 的包层厚度不是绝对均匀的，会导致部分其他非谐振频率的光也泄露出 HCF，从而产生如图 3 所示的小杂峰^[25]。

紫外飞秒激光相位掩模法写制 FBG 的实验系统如图 4 所示。利用掺钛蓝宝石飞秒激光再生放大系统(Solstice 100F, Spectra-Physics, 美国)产生波长为 800 nm、脉宽为 100 fs、重复频率为 1 kHz、最大脉冲能量为 4 mJ 的飞秒激光脉冲序列。该飞秒激光为线

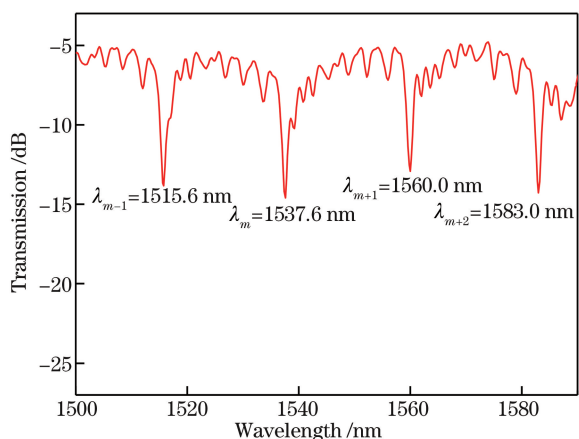


图 3 SMF-HCF-SMF 结构的透射光谱

Fig. 3 Transmission spectrum of SMF-HCF-SMF structure
偏振态输出,可以通过旋转格兰偏振棱镜前的半波片

来进行脉冲能量衰减。800 nm 的红外飞秒激光经过三倍频器后变成 267 nm 的紫外激光。飞秒激光高斯光斑的直径 ($1/e^2$) 为 6.2 mm, 利用光阑还可以进一步对光斑进行调制, 以改变光纤光栅的写作长度。利用焦距为 50.4 mm 的柱透镜将激光光束聚焦在光纤纤芯中, 期间通过了一块相位掩模板。将制作好的 SMF-HCF-SMF 谐振腔拉直固定在相位掩模板后的光纤夹持器上, 然后在 CCD 辅助观察下调节光纤和掩模板之间的间距。调整光路使激光经柱透镜和相位掩模板后, 精确聚焦在 HCF 左端的单模光纤上。在 FBG 的写作过程中, 利用宽带光源和光谱分析仪 (AQ6370C, 横河电机株式会社, 日本) 在线监测 FBG 的透射谱变化。在 HCF 左端单模光纤上制备 FBG 后 (即 HCF 和 FBG 级联) 的透射谱如图 5 所示。

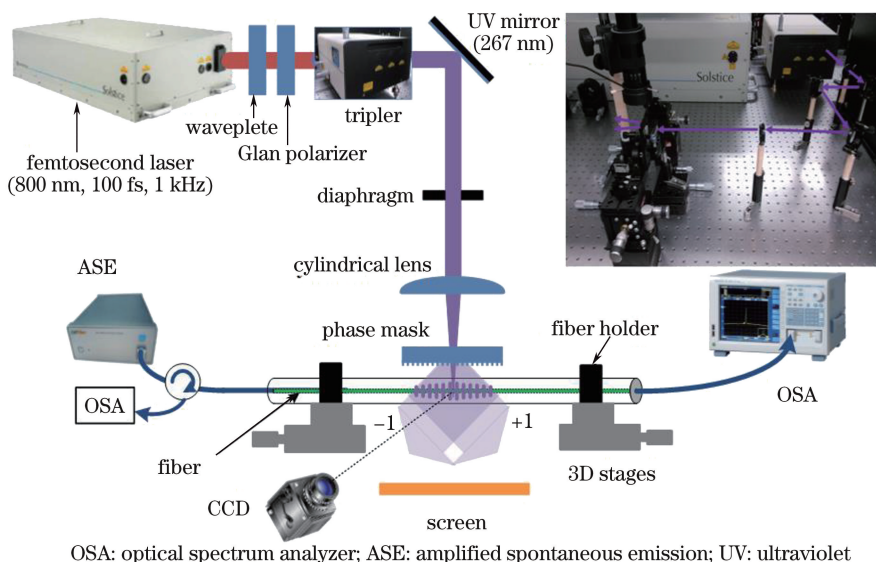


图 4 紫外飞秒激光相位掩模法制备 FBG 装置示意图

Fig. 4 Experimental device for UV femtosecond laser inscription of FBG by phase mask

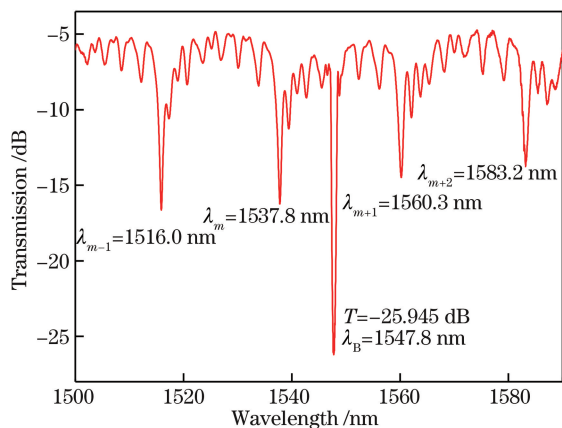


图 5 HCF 与 FBG 级联的透射光谱

Fig. 5 Transmission spectrum of cascaded HCF and FBG

4 双参数传感实验

4.1 温度响应特性

利用卡博莱特·盖罗 (Carbolite·Gero) 的开合式单段水平管式马沸炉 (ETS12/300) 测试传感器的温度响应特性, 温度调节范围为 20 °C 至 1200 °C, 温度精度为 $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。将待测 HCF-FBG 传感器样品放入马沸炉中, 在两端出口处放置光纤夹具夹持光纤, 稍微施加拉力使待测样品保持水平, 避免弯曲给测试带来影响。温度每次升高 10 °C, 从 20 °C 升到 100 °C。待温度升到 100 °C 后, 每次升高 100 °C, 从 100 °C 升到 500 °C, 进行高温实验。每次升温均需等温度稳定 10 min 后再记录数据, 避免温度不稳定造成误差。温度升高过程中 HCF-FBG 传感器透射谱

的演变过程如图 6(a)所示,HCF 和 FBG 的谐振峰随温度的升高都向长波长方向漂移,实验结果与理论相符。对峰值位置进行线性拟合,HCF 和 FBG 的谐振波长随温度的变化规律如图 6(b)所示。HCF 和 FBG 的温度灵敏度分别为 24.55 pm/°C和12.76 pm/°C。

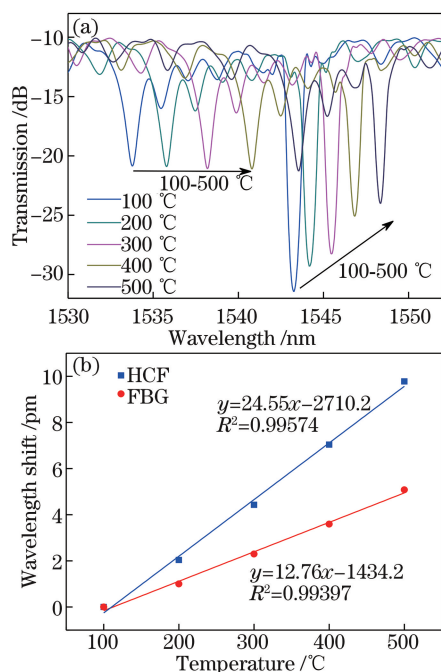


图 6 温度响应特性。(a)温度升高过程中 HCF-FBG 传感器透射谱;(b) HCF 和 FBG 的谐振波长随温度的变化

Fig. 6 Characteristics of temperature response. (a) Transmission spectrum of HCF-FBG sensor during temperature increases; (b) resonance wavelength of HCF or FBG versus temperature

4.2 应变响应特性

测量应变响应的实验装置如图 7 所示,该装置由两个高精度的一维手动位移平台组成(精度为 0.01 mm),被测 HCF-FBG 传感器的两端分别用紫外固化胶固定在一个一维平台上,两个固定点之间的距离为 200 mm,光纤末端分别连接光谱仪和光源。一个位移平台固定不动,另一个可以通过手动转动位移旋钮轴向移动,并且通过旋钮上的刻度可以读出轴向移动的位移值。在应变响应测试实验过程中,为了避免温度变化带来的测量误差,室温保持在 27 °C。每次使右边一维平台向右移动 0.03 mm,左边一维平台保持不动,从而使 HCF-FBG 传感器轴向应变增加 150 $\mu\epsilon$ (1 $\mu\epsilon$ 的定义为 1 m 长的光纤拉伸 1 μm 所需要施加的拉力,20 mm 长的光纤每拉升 0.01 mm 所施加的拉力为 50 $\mu\epsilon$)。记录光谱数据后重复该步骤,应变量从 0 $\mu\epsilon$ 逐渐增大至

3000 $\mu\epsilon$ 。HCF 的纤芯是空气,在同样拉力情况下,HCF 的应变理论上会比普通单模光纤大。实验所用 HCF 的空气芯内径为 25 μm ,石英包层外径为 125 μm ,空气芯截面积是石英包层截面积的 1/24,空气芯带来的影响比较小,因此用整段光纤的平均应变值来计算 HCF 和 FBG 的应变。

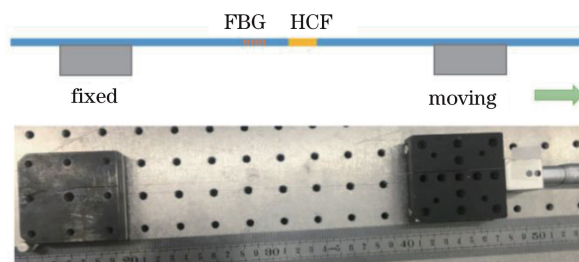


图 7 应变测量装置

Fig. 7 Device for strain measurement

应变增加过程中 HCF-FBG 传感器透射谱的演变过程如图 8(a)所示,随着应变的增加,HCF 的谐振峰发生蓝移,FBG 的谐振峰发生红移,经过线性拟合得到 HCF 和 FBG 的谐振波长随轴向拉伸应变的变化曲线如图 8(b)所示,HCF 和 FBG 的应变灵

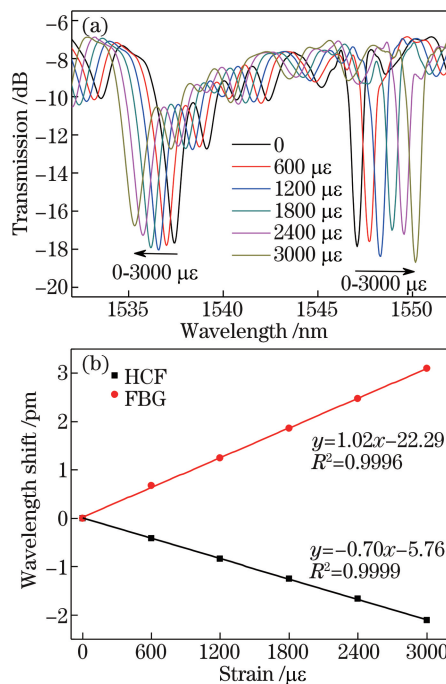


图 8 应变响应特性。(a)轴向应变增加过程中 HCF-FBG 传感器透射谱的演变;(b) HCF 和 FBG 的谐振波长随轴向应变的变化

Fig. 8 Characteristics of strain response. (a) Evolution of transmission spectrum of HCF-FBG sensor during axial strain increases; (b) resonance wavelength of HCF or FBG versus strain

灵敏度分别是 $-0.70 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 和 $1.02 \text{ pm}/\mu\epsilon$,样品对应变响应线性相关性高达99.9%。

4.3 温度应变双参数解调

光纤传感器在传感测量过程中通常容易受到温度、应变等多个参数变化交叉敏感的影响,导致测量误差增大。本研究研制的HCF-FBG传感器中的FBG和HCF对温度和应变同时敏感,但是它们对温度和应变响应灵敏度差异较大。因此,通过求解耦合矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\epsilon m} K_{Tm} \\ K_{\epsilon B} K_{TB} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_m \\ \Delta\lambda_B \end{bmatrix}, \quad (6)$$

可以实现温度 ΔT 和应变 $\Delta\epsilon$ 的同时测量,并且消除温度和应变交叉敏感的影响。

对于本研究报道的传感器,将HCF谐振波长 λ_m 和FBG谐振波长 λ_B 的温度和应变的响应灵敏度系数 $24.55 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, $12.76 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, $-0.70 \text{ pm}/\mu\epsilon$, $1.02 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 分别代入(6)式可以得到:

$$\begin{bmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.70 \text{ pm}/\mu\epsilon & 24.55 \text{ pm}/^\circ\text{C} \\ 1.02 \text{ pm}/\mu\epsilon & 12.76 \text{ pm}/^\circ\text{C} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_m \\ \Delta\lambda_B \end{bmatrix}, \quad (7)$$

从而实现温度 ΔT 和轴向应变 $\Delta\epsilon$ 的同时测量。

5 结 论

研究了HCF和FBG级联结构传感器对温度和应变的响应特性。实验结果表明该新型传感器中HCF和FBG的温度灵敏度分别为 $24.55 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 和 $12.76 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,轴向拉伸应变灵敏度分别为 $-0.70 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 和 $1.02 \text{ pm}/\mu\epsilon$,并且具有99%以上的线性度。建立温度与应变之间的耦合矩阵方程,可以有效实现外界温度与应变的同时测量,解决温度-应变之间的交叉敏感问题。本研究提出的新型光纤传感器,具有体积小、灵敏度高、易于制作和能埋入工程结构等优点,可以实现对工程结构的实时监测,具有较好的工程应用前景。

参 考 文 献

- [1] Liao Y B. Development of optical fiber sensors[J]. Optoelectronic Technology & Information, 2000, 13(3): 27-29.
廖延彪. 光纤传感发展近况[J]. 光电子技术与信息, 2000, 13(3): 27-29.
- [2] Jiang D S, He W. Review of applications for fiber Bragg grating sensors[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2002, 13(4): 420-430.
姜德生, 何伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. 光电子·激光, 2002, 13(4): 420-430.
- [3] Liao Y B, Li M. The development of optical fiber sensors[J]. Sensor World, 2004, 10(2): 6-12.
廖延彪, 黎敏. 光纤传感器的今日与发展[J]. 传感器世界, 2004, 10(2): 6-12.
- [4] Liao Y B. Fiber optics: principles and applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
廖延彪. 光纤光学: 原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [5] Rao Y J, Wang Y P, Zhu T. Fiber grating principles and applications[M]. Beijing: China Science Press, 2006.
饶云江, 王义平, 朱涛. 光纤光栅原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [6] Shu X, Zhao D, Liu Y, et al. Effectively simultaneous temperature and strain measurement utilising a dual-grating sensor formed by type IA and type IIA FBGs[J]. Proceedings of IEEE, 2002, 2: 1740-1745.
- [7] Wang M G, Wei H, Tong Z, et al. Simultaneous measurement of strain and temperature using a single dual-period fiber grating [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(7): 867-869.
王目光, 魏准, 童治, 等. 利用双周期光纤光栅实现应变和温度同时测量[J]. 光学学报, 2002, 22(7): 867-869.
- [8] Tong Z R, Guo Y, Yang X F, et al. Simultaneous measurement of temperature and strain based on a long-period fiber grating combined with a Lyot fiber filter in a linear configuration[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(3): 0305002.
童峥嵘, 郭阳, 杨秀峰, 等. 基于Lyot滤波器和长周期光纤光栅的温度与应变的同时测量[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0305002.
- [9] Tong Z R, Wang J Y, Yang X F, et al. Simultaneous measurement of temperature and strain based on core diameter mismatch and fiber Bragg grating [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1206001.
童峥嵘, 王洁玉, 杨秀峰, 等. 基于纤芯失配和光纤布拉格光栅实现温度和应变同时测量[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1206001.
- [10] Miao Y, Liu B, Zhao Q. Simultaneous measurement of strain and temperature using single tilted fibre Bragg grating [J]. Electronics Letters, 2008, 44(21): 1242-1243.
- [11] Mokhtar M R, Sun T, Grattan K T V. Bragg grating packages with nonuniform dimensions for strain and temperature sensing[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(1): 139-144.
- [12] Shi J, Xiao S, Chen H, et al. Simultaneous measurement of strain and temperature using a high-

- birefringence fiber loop mirror and an erbium-doped fiber[C]//Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition, December 8-12, 2010, Shanghai, China. New York: IEEE, 2011: 473-474.
- [13] Bian J C, Lang T T, Yu W J, *et al.* Study of fiber sensor for the simultaneous measurement of temperature and strain based on Mach-Zehnder interferometer[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2015, 26(11): 2169-2174.
卞继城, 郎婷婷, 俞文杰, 等. 基于马赫-曾德尔干涉的温度和应变同时测量的光纤传感器研究[J]. *光子·激光*, 2015, 26(11): 2169-2174.
- [14] Zheltikov A M. Ray-optic analysis of the (bio)sensing ability of ring-cladding hollow waveguides[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(3): 474-479.
- [15] Zhu T, Xu M, Rao Y J, *et al.* Miniature humidity sensor based on all-fiber Fabry-Perot interferometer formed by hollow core fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(6): 1592-1596.
朱涛, 徐敏, 饶云江, 等. 基于空芯光纤的集成式全光纤法-珀干涉式湿度传感器[J]. *光学学报*, 2010, 30(6): 1592-1596.
- [16] Gao R, Jiang Y, Zhao Y. Magnetic field sensor based on anti-resonant reflecting guidance in the magnetic gel-coated hollow core fiber [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(21): 6293-6296.
- [17] Jiang Y X, Liu B H, Zhu X S, *et al.* Study of silver coated hollow-core fiber surface plasmon resonance sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34 (2): 0223004.
蒋永翔, 刘炳红, 朱晓松, 等. 镀银空芯光纤表面等离子体共振传感器的研究[J]. *光学学报*, 2014, 34 (2): 0223004.
- [18] Xu B, Wang C, Wang D N, *et al.* Fiber-tip gas pressure sensor based on dual capillaries[J]. *Optics Express*, 2015, 23(18): 23484-23492.
- [19] Zhang Y, Zhu X S, Shi Y W. Hollow optical fiber surface plasmon resonance sensor based on light intensity detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37 (6): 0606001.
张巧, 朱晓松, 石艺尉. 光强检测型空芯光纤表面等离子体共振传感器[J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 0606001.
- [20] Lin H, Zhang X, Zhu X S, *et al.* Refractive index sensor based on hollow optical fiber with metal-dielectric-metal multilayered films structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 0606006.
林华, 张娴, 朱晓松, 等. 基于金属-介质-金属多层膜结构的空芯光纤折射率传感器[J]. *光学学报*, 2018, 38(6): 0606006.
- [21] Litchinitser N M, Abeeluck A K, Headley C, *et al.* Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguides[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(18): 1592-1594.
- [22] Zhang X B, Xiao H, Wang T Y. Recent advances in capillary based optical fiber sensors [J]. *Journal of Applied Sciences*, 2017, 35(4): 523-536.
张小贝, 肖海, 王廷云. 毛细管光纤传感器研究进展[J]. *应用科学学报*, 2017, 35(4): 523-536.
- [23] Litchinitser N M, Dunn S C, Usner B, *et al.* Resonances in microstructured optical waveguides[J]. *Optics Express*, 2003, 11(10): 1243-1251.
- [24] Zhou Z, Tian S Z, Zhao X F, *et al.* Theoretical and experimental studies on the strain and temperature sensing performance of optical FBG [J]. *Journal of Functional Materials*, 2002, 33(5): 551-554.
周智, 田石柱, 赵雪峰, 等. 光纤布拉格光栅应变与温度传感特性及其实验分析[J]. *功能材料*, 2002, 33(5): 551-554.
- [25] Gao R, Lu D F, Cheng J, *et al.* Optical displacement sensor in a capillary covered hollow core fiber based on anti-resonant reflecting guidance [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(2): 193-198.