

光学学报

基于游标效应和基底增敏的复合光纤结构温度传感器

刘福祿^{1,2}, 张钰民^{1,2}, 庄炜^{1,2}, 骆飞^{1,2}, 祝连庆^{1,2*}

¹北京信息科技大学光电测试技术及仪器教育部重点实验室, 北京 100016;

²北京信息科技大学光纤传感与系统北京实验室, 北京 100192

摘要 为实现高精度温度传感,设计了一种基于游标效应和铝合金基底增敏的复合结构的光纤温度传感器。该传感器由空芯光纤和单模光纤形成的级联法布里-珀罗干涉仪(FPI)、与级联 FPI 串联的光纤布拉格光栅(FBG)和铝合金基底构成。利用三光束干涉理论、光束传播法、有限元分析,阐述了其反射光谱、传输光场、热力学等特性。通过控制空芯光纤和单模光纤的几何长度,可灵活地调整游标效应增敏倍数和温度测量分辨率。该复合结构的设计不仅可以测量温度的微小变化量,还可以测量温度的绝对值。实验结果表明,基于游标效应的级联 FPI 和 FBG 的温度灵敏度分别为 138.4 pm/°C 和 37.4 pm/°C,传感器的温度重复性和快速响应性良好,可以广泛应用于高精度测量领域。

关键词 光纤光学; 游标效应; 级联法布里-珀罗; 光纤布拉格光栅; 温度传感器

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1506002

Fiber Temperature Sensor with Composite Structure Based on Vernier Effect and Substrate Sensitization

Liu Fulu^{1,2}, Zhang Yumin^{1,2}, Zhuang Wei^{1,2}, Luo Fei^{1,2}, Zhu Lianqing^{1,2*}

¹Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China;

²Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China

Abstract To achieve high-accuracy temperature sensing, this paper designed a fiber temperature sensor with a composite structure based on the vernier effect and aluminum alloy substrate sensitization. The sensor is composed of a cascaded Fabry-Perot interferometer (FPI) formed by splicing a hollow-core fiber and two single-mode fibers, a fiber Bragg grating (FBG) in series connection with the cascaded FPI, and an aluminum alloy substrate. Its characteristics such as reflection spectra, transmission field, and thermodynamics are expounded by the three-beam interference theory, the beam propagation method, and finite element analysis. By controlling the geometric lengths of the hollow-core fiber and the single-mode fiber, we can flexibly adjust the vernier effect sensitization multiplier and temperature measurement resolution. The composite structure was designed to measure not only small temperature changes but also the absolute values of temperatures. The experimental results show that the temperature sensitivity of the cascaded FPI and FBG based on the vernier effect is 138.4 pm/°C and 37.4 pm/°C, respectively, and the temperature repeatability and fast response of the sensor are good. The designed sensor can be widely applied to high-precision measurements.

Key words fiber optics; vernier effect; cascaded Fabry-Perot; fiber Bragg grating; temperature sensor

OCIS codes 060.2370; 060.2300; 060.3738; 120.6710

收稿日期: 2020-12-23; 修回日期: 2021-02-04; 录用日期: 2021-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(61735002)、高等学校学科创新引智计划项目(D17021)、北京市自然科学基金项目(4212048)

通信作者: *lqzhu_bistu@sina.com

1 引言

温度作为基本国际单位之一,已经应用于地球科学、医学、物理学、化学、生物学等自然科学的各个领域以及日常生活^[1]。越来越多的技术被应用在高精度温度测量方面,其中光纤传感技术扮演着重要的角色。在光纤温度传感领域,光纤的结构有布拉格光纤光栅(FBG)^[2]、长周期光纤光栅(LPG)^[3]、Sagnac干涉仪(SI)^[4]、Mach-Zehnder干涉仪(MZI)^[5]和法布里-珀罗干涉仪(FPI)^[6]等。其中FBG结构简单,用于温度测量时稳定性好但分辨率相对较低。光纤干涉结构的特点可以满足人们对于温度高灵敏度测量的需求。FPI光纤温度传感器因其结构紧凑、空间分辨率高等特点已成为研究的重点。FPI的制作方法包括电弧放电^[7]、化学腐蚀^[8]、微细加工、不同类型光纤拼接^[9]、光纤内部反射涂层、光栅对等。

为了在光纤干涉结构的基础上进一步增加测量灵敏度,基于游标效应的干涉传感结构可以实现更大的光谱偏移,以达到更高分辨率的要求。游标效应最初被用来提高长度测量的分辨率(如游标卡尺)。到目前为止,游标效应由于能够提高测量灵敏度,越来越多地应用于光纤高精度温度传感领域。2015年,Shao等^[10]提出了一种基于游标效应与Sagnac干涉仪串联的光纤温度传感器,其灵敏度是单一Sagnac干涉仪的9倍左右,但传感器整体尺寸较大(单个Sagnac干涉环的长度为2m)。2017年,杨易等^[11]将一小段毛细管熔接于单模光纤和一段大模场光纤之间,构成了基于游标效应串联的两个FPI,温度灵敏度达到179.3 pm/°C。2019年,Yang等^[12]展示了一种光纤温度传感器,其结构为将几百微米的硅胶管和单模光纤(SMF)依次拼接在一段SMF上。该传感器利用游标效应制备,温度灵敏度达到了183.99 pm/°C。

本文基于游标效应由级联FPI(CFPI)和FBG构成一种高灵敏度温度传感器。该传感器结构简单,其制备过程为通过将一段空芯光纤(HCF)和两段SMF熔接,构成基于游标效应的级联FPI,并与FBG串联,最后将上述复合结构光纤传感器封装在热膨胀系数较大的铝合金基底上。本研究基于游标效应和基底增敏原理实现了对温度的高分辨测量。级联FPI和FBG的复合使得传感器不仅可以测量温度的变化量,还可以测量温度的绝对值,且具有灵敏度可灵活设计的特点。结果表明,增敏后的基于

游标效应的级联FPI变化温度灵敏度和FBG的绝对温度灵敏度分别为138.4 pm/°C和37.4 pm/°C,其重复性和温度快速响应性良好。

2 实验原理分析

2.1 传感器结构

图1为基于游标效应的级联FPI和FBG结合的温度传感器示意图,当SMF纤芯中的光通过FBG并依次到达镜面 M_1 、 M_2 、 M_3 时,由于光纤熔接端面两侧的反射率(RI)不同,部分光被反射。其中SMF为康宁公司的SMF-28e,芯径为8.2 μm。HCF为Polymicro的空芯光纤,芯径为20 μm。SMF和HCF的包层直径均为125 μm。HCF为两段SMF的端面提供了空气通道,形成了法布里-珀罗(F-P)的空气腔。由于两种光纤的纤芯材料不同,根据菲涅耳公式,两段光纤的接触面具有反射镜的作用。因此, M_1 和 M_2 形成一个几何长度为 L_1 的空气反射腔,称为FPI1,而 M_2 和 M_3 形成一个几何长度为 L_2 的玻璃腔,称为FPI2。为了提高传感器的温度测量灵敏度,将级联FPI和FBG传感部分封装在铝合金(Al-7075T6)基底上,并将传感器放置在不锈钢304的管内形成嵌套管式封装结构,以增强其抵抗外界物理伤害的能力。

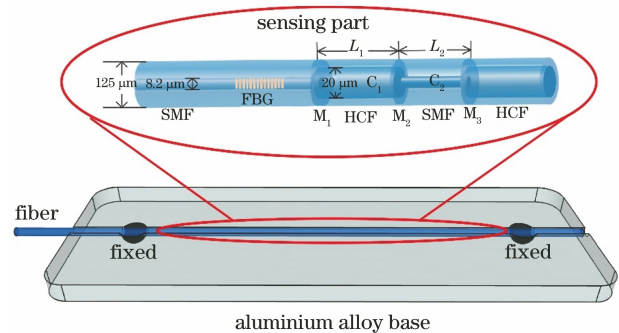


图1 级联FPI+FBG温度传感器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cascaded FPI+FBG temperature sensor

2.2 FBG部分传感原理分析

FBG反射光谱的中心波长为

$$\lambda_{\text{Bragg}} = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中, n_{eff} 为光纤的纤芯折射率, Λ 为光栅的周期。由于热光效应和热膨胀效应,当温度变化时,光纤的折射率和光栅周期的变化会引起反射光谱中心波长的变化。环境温度的影响会给FBG带来许多内应力,包括热光效应、弹性光效应、热膨胀效应和光路变化引起的波导效应,上述4种效应对应的系数可表示为

$$\alpha_n = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T}, \alpha_t = (\Delta n_{\text{eff}})_{\text{ep}},$$

$$\alpha_\Lambda = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}, \alpha_w = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \alpha}, \quad (2)$$

式中 T 为温度, α 为光栅的热膨胀系数。

光栅所受的应力和温度可以改变 n_{eff} 和 Λ , 其中: 应力通过弹光效应影响 n_{eff} , 通过改变光纤长度影响 Λ ; 温度通过热光效应影响 n_{eff} , 通过热膨胀效应影响 Λ 。由(1)式和(2)式可得

$$d_\lambda = \lambda_{\text{Bragg}} [(1 - P_e)\epsilon + (\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T] = \lambda_{\text{Bragg}} (K_\epsilon \epsilon + K_T \Delta T), \quad (3)$$

式中, $K_\epsilon = 1 - P_e$ 为应力敏感系数, $K_T = \alpha_\Lambda + \alpha_n$ 为温度敏感系数, α_Λ 为光纤的热膨胀系数, ϵ 为轴向应变, ΔT 为温度变化差值, α_n 为热光系数。 $P_e = -\frac{1}{2}n_{\text{eff}}[(1-\nu)p_{12} - \nu p_{11}]\epsilon$ 为有效弹光系数, 其中 ν 为纤芯材料的泊松比, p_{11} 和 p_{12} 为弹光系数。本文选用的光纤参数为 $n_{\text{eff}} = 1.4682, \nu = 0.16, p_{11} = 0.12, p_{12} = 0.27^{[13]}$ 。

将光纤光栅粘贴于热膨胀系数较大的铝合金基底上, 封装材料的热膨胀系数为 α_s , 粘贴后光纤光栅的轴向应变系数为 $\epsilon = (\alpha_s - \alpha_\Lambda)\Delta T$, 则(3)式可写为

$$d_\lambda = \lambda_{\text{Bragg}} [\alpha_n - P_e(\alpha_s - \alpha_n) + \alpha_s]\Delta T = \lambda_{\text{Bragg}} [\alpha_n + (1 - P_e)\alpha_s + P_e\alpha_\Lambda]\Delta T. \quad (4)$$

由(4)式可知, 增敏封装后 FBG 温度灵敏度由封装材料的热膨胀系数决定^[14]。

2.3 游标效应原理分析

基于游标效应的级联 FPI 传感部分对应的反射镜面 M_{1-3} 的反射率相同, 即 $R_1 = R_2 = R_3$, 可以表示为

$$R_1 = R_2 = R_3 = \frac{n_{\text{SMF}} - n_{\text{air}}}{n_{\text{SMF}} + n_{\text{air}}}, \quad (5)$$

式中, n_{SMF} 为 SMF 的纤芯折射率, n_{air} 为空气芯光纤纤芯折射率即空气折射率。

对由 M_1 和 M_2 组成的空气 FPI 腔, 其反射光谱为典型的双光束干涉。设 M_1 和 M_2 的反射率分别为 R_1, R_2 , 则从左侧 SMF 入射的光经两个反射面后再次返回到 SMF 中的光强, 可表示为

$$I_r = R_1 + A^2 + 2R_1 A \cos(2\Phi_1), \quad (6)$$

式中: $A = (1 - k_1)(1 - R_1)R_2^{1/2}$, 其中 k_1 为谐振腔 C_1 的传输损耗; $\Phi_1 = 2\pi n_1 L_1 / \lambda$ 为光在谐振腔 C_1 内传输导致的相移, n_1 为谐振腔 C_1 内介质(即空气)的有效折射率, λ 为输入光在真空中的波长。因谐

振腔内介质的热膨胀和热光效应, 相移随温度发生变化, 进而引起干涉谱中谐振波谷中心波长 λ_N 发生漂移。空气 FPI 腔的温度灵敏度 $S_{T-\text{air}}$ 可表示为

$$S_{T-\text{air}} = \frac{\partial L_1}{\partial T} = \lambda_N \left(\frac{\partial L_1}{\partial T} \frac{1}{L_1} + \frac{\partial n_1}{\partial T} \frac{1}{n_1} \right), \quad (7)$$

式中: N 表示谐振级次, 为整数; $\frac{\partial L_1}{\partial T} \frac{1}{L_1}$ 表示谐振腔的热膨胀系数, 此处谐振腔壁毛细管材料为纯石英, 腔长为 L_1 , 受到温度和应力的作用, 热膨胀系数为 $(\alpha_s - \alpha_\Lambda)\Delta T$; $\frac{\partial n_1}{\partial T} \frac{1}{n_1}$ 表示腔内介质的热光系数, 此处腔内介质为空气, 其热光系数同时受到应力和温度的影响, 热光系数为 $P_e + \alpha_n \Delta T$ 。同理, 对于由 M_2 和 M_3 构成的光纤 FPI 腔, 其温度灵敏度 $S_{T-\text{fiber}}$ 可表示为

$$S_{T-\text{fiber}} = \frac{\partial L_N}{\partial T} = \lambda_N \left(\frac{\partial L_2}{\partial T} \frac{1}{L_2} + \frac{\partial n_2}{\partial T} \frac{1}{n_2} \right). \quad (8)$$

由 M_1, M_2 和 M_3 构成三光束干涉器件, 设 M_3 的反射率为 R_3 , 则左侧入射光经三个反射面后总的反射光强可表示为

$$I_{rr} = R_1 + A^2 + B^2 + 2\sqrt{R_1} B \cos[2(\Phi_1 + \Phi_2)] + 2\sqrt{R_1} A \cos(2\Phi_1) + 2AB \cos(2\Phi_2), \quad (9)$$

式中: $B = (1 - k_1)(1 - k_2)(1 - R_1)(1 - R_2)R_3^{1/2}$, 其中 k_2 为谐振腔 C_2 的传输损耗; $\Phi_2 = 2\pi n_2 L_2 / \lambda$ 为光在谐振腔 C_2 内传输导致的相移, 其中 n_2 为谐振腔 C_2 内介质(即单模光纤)的有效折射率。两个谐振腔的反射光同时满足最强波长叠加处对应光谱中的最大值, 反之为最小值, 即对应叠加光谱包络的最大值和最小值。包络曲线的自由光谱范围(FSR, R_{FS})比单个 FPI 的 FSR 大得多, 即形成游标效应。由叠加谱中极小值的点组成的周期性包络函数可以通过 $\frac{\partial I_{rr}}{\partial \lambda} = 0$ 求得, 即

$$F_c = D + 2m \cos[4\pi(s_1 - s_2)/\lambda], \quad (10)$$

式中: D 为包络函数的直流部分; m 为交流部分的振幅; s_1, s_2 分别为谐振腔 C_1 和 C_2 的光程^[15]。

基于游标效应的三光束干涉包络曲线的谷底中心波长的温度灵敏度为 $S_{T-\text{vernier}}$, 即

$$S_{T-\text{vernier}} = \lambda_N \left(\frac{\partial L_2}{\partial T} \frac{1}{L_2} + \frac{\partial n_2}{\partial T} \frac{1}{n_2} \right) \times \frac{R_{\text{FS}_1}}{|R_{\text{FS}_1} - R_{\text{FS}_2}|}, \quad (11)$$

与单玻璃腔干涉仪相比, $S_{T-\text{vernier}}$ 的温度灵敏度的放大倍数为

$$P = \left| \frac{S_{T-\text{vernier}}}{S_{T-\text{fiber}}} \right| = \frac{R_{\text{FS}_1}}{|R_{\text{FS}_1} - R_{\text{FS}_2}|}. \quad (12)$$

3 传感器原理仿真分析

3.1 级联 FPI 仿真分析

根据 (12) 式将基于游标效应的级联 FPI 传感器进行仿真,其三光束干涉反射光谱如图 2 所示。仿真实验中各参数分别设置为: $n_1=1, n_2=1.4682$,空芯光纤的几何长度为 $L_1=745 \mu\text{m}$,谐振腔 C_2 的

几何长度为 $L_2=505 \mu\text{m}$ 。谐振腔 C_1 和 C_2 的自由光谱范围分别为 1.628 nm 和 1.643 nm ,它们的数值接近但不相等。图 2 所示为单空气腔和单玻璃腔温度升高 10°C 时以及三束干涉谱温度升高 60°C 时的干涉谱变化。从三光束干涉的叠加谱中可以看出,自由谱区约为 58.15 nm ,温度的灵敏度为 $130 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。

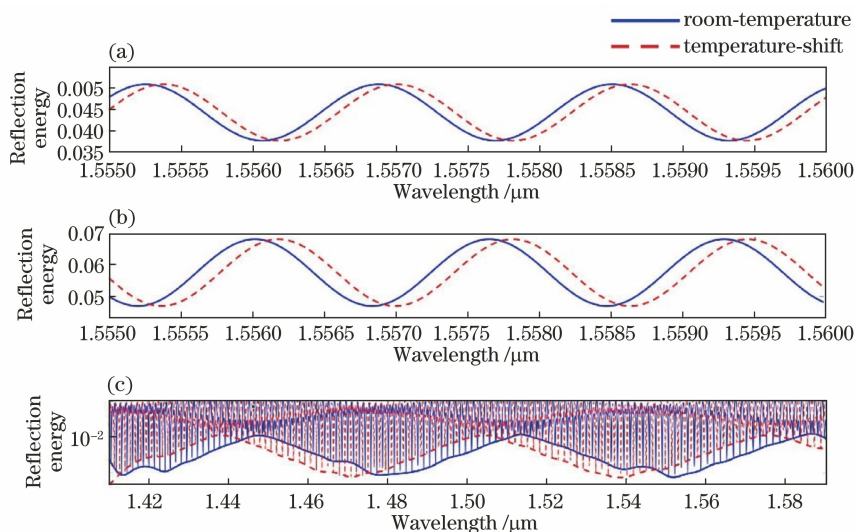


图 2 基于单空气腔、玻璃腔和级联腔的 CFPIs 的模拟温度响应。(a)单空气腔;(b)玻璃腔;(c)级联腔
Fig. 2 Simulated temperature responses of CFPIs based on single air cavity, glass-cavity, and cascaded cavities.
(a) Single air cavity; (b) glass-cavity; (c) cascaded cavities

3.2 传感结构的 BPM 仿真分析

在 SMF-HCF-SMF 结构中,由于干涉效应,HCF 中沿轴线方向的光场随传播长度的变化而发生循环变化。当 HCF 的长度和入射波长满足一定条件时,一些特定位置的光纤端面的光场分布将与入射光相同,这种现象称为自聚焦现象。用光束传播法(BPM)对 FPI 传感结构进行分析,所得结果如图 3 所示,从图中可以看出自聚焦现象。可以将末端 SMF 选择自聚焦位置与 HCF 连接,以获得更大的光能,同时提高反射光谱的对比度。传感器的制作过程中 HCF 的长度按照 BPM 仿真中的自聚焦位置选取(由于制作工艺问题,HCF 的长度会有一些误差)以使得后端 SMF 谐振腔获得最大光能。

3.3 传感器灵敏度参数 M 的仿真

仿真过程中,末端 SMF 长度的变化不仅会影响游标效应的增敏效果,而且会使反射光谱包络在温度变化时向不同方向漂移。参数 M 定义为谐振腔 C_1 的自由光谱范围与谐振腔 C_2 的自由光谱范围之差(即 $M=R_{FS_1}-R_{FS_2}$)。由(12)式可知,传感器的灵敏度受参数 M 的绝对值影响,传感器反射光谱随温度变化的方向受参数 M 的符号影响。当 $M>$

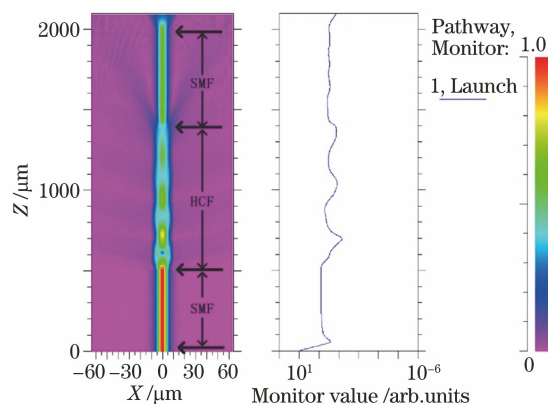


图 3 SMF-HCF-SMF 结构的 BPM 仿真
Fig. 3 BPM simulation diagram of the SMF-HCF-SMF structure

0 ,传感器的反射光谱将向长波方向偏移;而 $M<0$,传感器的反射光谱将向短波方向偏移。传感器的温度灵敏度与参数 M 的关系如图 4 所示。在仿真中,参数 M 随 L_2 的长度变化而变化(L_1 为常数)。无论参数 M 的符号为正还是负,温度灵敏度都会随着 M 绝对值的降低而增加。

3.4 铝合金基底热传递与热膨胀仿真分析

在传感器结构中,铝合金基底负责被测物体温

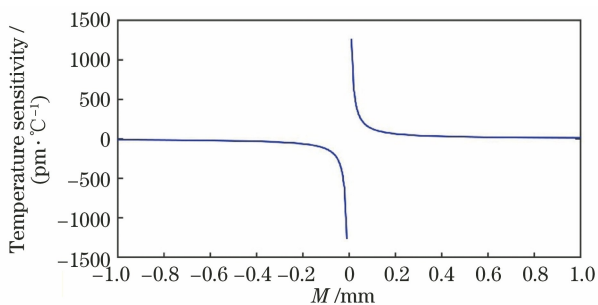


图 4 温度灵敏度与参数 M 的关系

Fig. 4 Relationship between temperature sensitivity and parameter M

度的传递和光纤传感部分的增敏。铝合金基底材料为 Al7075-T6, 具有良好的导热系数和较大的热膨胀系数。基底可以在短时间内对温度进行传递, 并且铝合金的热膨胀系数远大于光纤的热膨胀系数, 可以提供较好的增敏效果。图 5 和图 6 分别为所用铝合金基底热传递和热膨胀的稳态仿真结果。

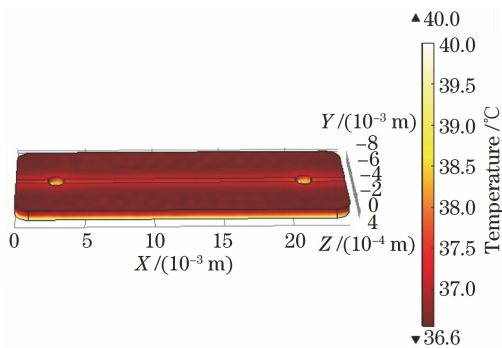


图 5 铝合金基底的热传递仿真

Fig. 5 Simulation of heat transfer on aluminum alloy substrates

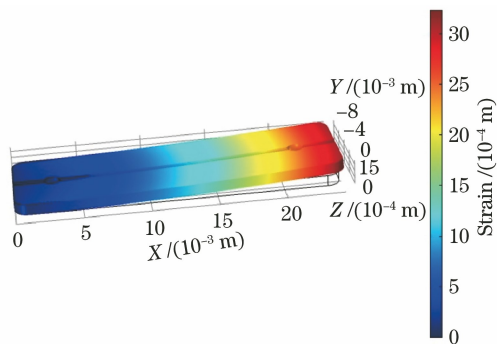


图 6 铝合金基底的热膨胀仿真

Fig. 6 Simulation of thermal expansion of aluminum alloy substrates

4 传感器制作与标定

4.1 传感器的制作过程

该传感器的制作过程如图 7 所示。首先, 使用

单模光纤写入 FBG, 并在 FBG 的后端拼接一段 HCF (Polymicro)。在显微镜和三位移平台的帮助下, 将 HCF 切割成设计长度。其次, 将一段端面平整的 SMF 拼接在 HCF 的另一端, 并切割成设计长度。最后, 在末段 SMF 的端面熔接一段相同的 HCF, 并将整体的传感部分利用环氧树脂 DP420 封装在铝合金基底上。单模光纤中的 FBG 是通过氩离子激光器的紫外激光照射相位掩模来刻写的。在拼接过程中, 光纤端面的完整性和平整度是光谱质量的关键, 谐振腔 C_1 和 C_2 的长度控制是传感灵敏的决定性因素。所有光纤的熔接均采用商用熔接机 (Fujikura 80S+) 自动熔接。

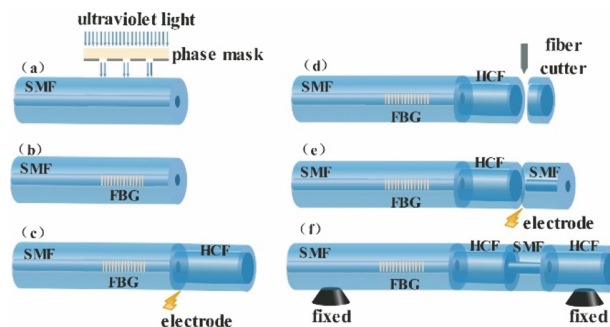


图 7 传感器制作示意图

Fig. 7 Diagram of sensor fabrication process

传感器制作过程中利用显微镜观察光纤在切割刀中的长度, 并根据图像计算出不同种类光纤的长度。采用三位移平台固定光纤, 通过螺旋旋杆调整三位移平台, 改变光纤在切割刀中的长度。制作好的光纤传感部分的显微镜照片如图 8 所示。 L_1 和 L_2 的几何长度分别约为 $745 \mu\text{m}$ 和 $505 \mu\text{m}$ 。

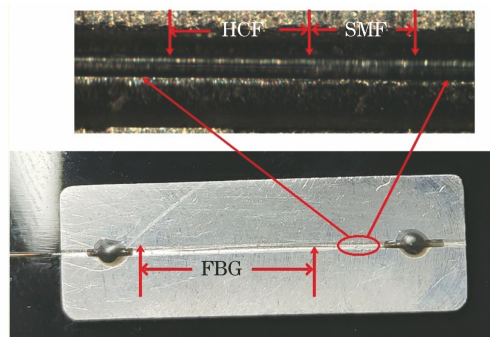


图 8 光纤传感部分的显微镜图片

Fig. 8 Microscope pictures of the fiber optic sensing section

4.2 传感器标定试验

传感器的标定实验装置如图 9 所示。测试系统由一个宽带光源 (BBS)、一个分辨率为 5 pm 的光谱分析仪和一个电热恒温箱组成。恒温箱以 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 为起始温度, $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 为步进, 以 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 为最终温度, 进行

三个周期的增温和降温过程。在每个温度的稳定阶段,光谱分析仪采集光谱并储存。

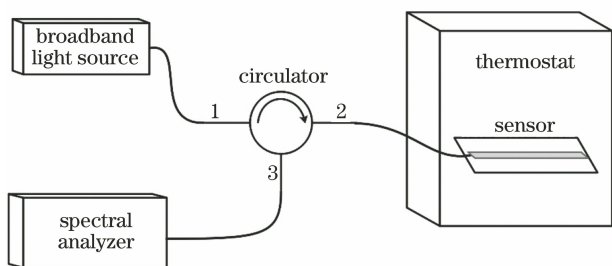


图 9 传感器标定示意图

Fig. 9 Sensor calibration diagram

5 实验结果及分析

5.1 实验结果

基于游标效应的传感器反射干涉光谱如图 10 所示,从中可以看到,反射光谱由级联 FPI 的干涉光谱和 FBG 的反射峰组成,经过传感器的标定,随着温度的升高(从 30 °C 到 80 °C),反射光谱的包络线向短波方向偏移而 FBG 中心波长向长波方向偏移(分别为 6.903 nm 和 1.872 nm)。通过对三组升降温标定实验数据的平均化处理和拟合,得到级联 FPI 和 FBG 的温度灵敏度分别为 138.4 pm/°C 和 37.4 pm/°C。图 11 为包络曲线的跟踪拟合峰值和 FBG 反射谱中心波长随温度变化的曲线。经过数据的拟合,可知干涉光谱和 FBG 峰值的漂移与温度具有良好的线性关系。

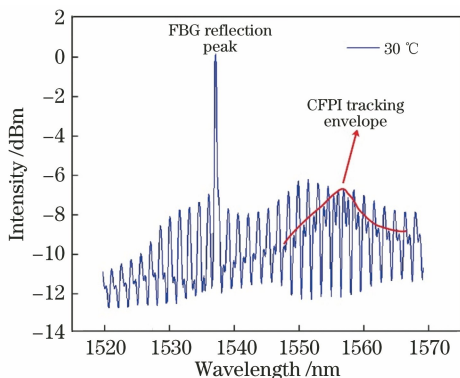


图 10 传感器的反射光谱图

Fig. 10 Reflectance spectrogram of the sensor

5.2 传感器的重复性

传感器的重复性表示传感器按同一方向进行全量程多次测试时,所得测试曲线的不一致程度,反映了传感器的稳定性。重复性较好的传感器在多次相同输入测试条件下,输出的重复性较好,误差较小。对制作的传感器进行三次升降温,采集每个升降温

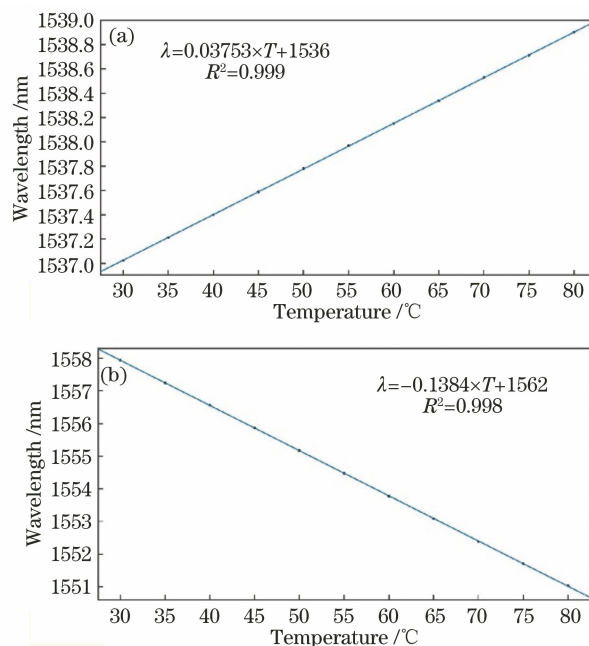


图 11 FBG 和级联 FPI 的温度拟合曲线。(a) FBG; (b) 级联 FPI

Fig. 11 Temperature fit curves for FBG and cascaded FPI. (a) FBG; (b) cascaded FPI

过程中温度点稳定时的数据,对数据进行分析得到温度点的重复性误差箱线图,如图 12 所示。由图可以得到,传感器在升降温过程中每个温度点的重复性误差较小,波动范围较窄,满足实际应用的需求。

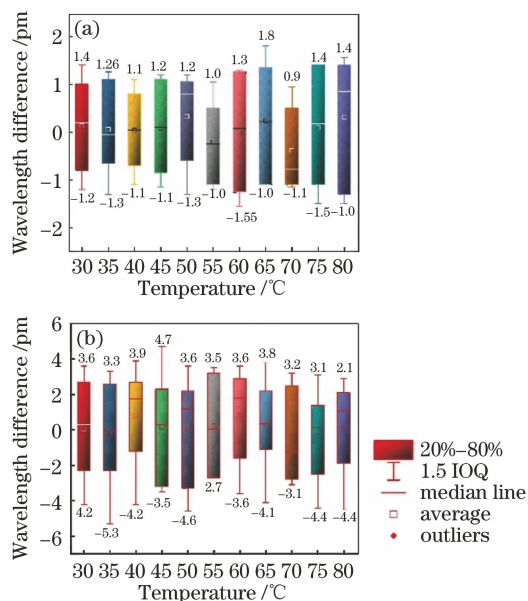


图 12 FBG 和级联 FPI 的温度重复性误差箱线图。(a) FBG; (b) 级联 FPI

Fig. 12 Temperature repeatability error box line diagrams for FBG and cascaded FPI. (a) FBG; (b) cascaded FPI

5.3 传感器温度响应时间

传感器温度响应时间是传感器温度读数达到测量总步进变化的 99.3% 所用的时间,传感器的温度响应时间为传感器时间常数(τ)的 5 倍。传感器时间常数为传感器输出达到测量总步长变化的 63.2% 所需要的时间。如图 13 所示,传感器的输出值与传感器时间常数具有特定的关系,任何两个读数之间经过时间常数时,第二个读数将始终接近实际温度与第一个读数差值的 63.2%。线性时间定量系统可表示为

$$T = (T_1 - T_2)[1 - \exp(-t/\tau)] + T_1, \quad (13)$$

式中, T 为传感器的输出值, T_1 为传感器的初始温度, T_2 为传感器正在测量的新介质的温度, $(T_1 - T_2)$ 为温度的变化量, t 为传感器温度为 T_1 时的开始时间^[16]。

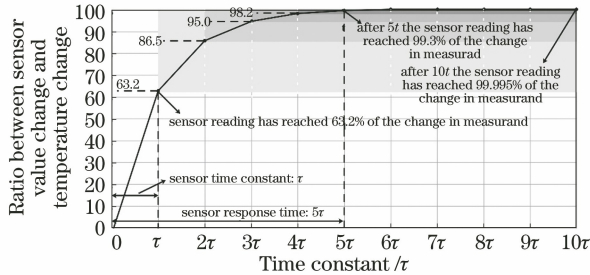


图 13 传感器响应时间与传感器时间常数的关系

Fig. 13 Relationship between sensor response time and sensor time constant

利用水浴槽营造两个恒定的温度场分别为 40 °C 和 50 °C,将传感器放置在 40 °C 的环境中,并保持传感器有足够的时间响应到 40 °C,然后迅速地将传感器从 40 °C 温度场移至 50 °C 的温度场。以进入 50 °C 温度场的时间为起始时间,观察传感器的波长变化,以波长漂移到 46.3 °C 对应波长时为截止时间。经过 5 次实验得到传感器平均时间常数为 4.06 s,即传感器的温度响应时间为 20.3 s。

5.4 FBG 与级联 FPI 的干扰

FBG 光谱反射带为反射率小于 100% 的高斯分布,而级联 FPI 与 FBG 的反射光谱在发生重叠时可能会干扰 FBG 中心波长的解调。图 14 所示为 FBG 的反射光谱和 FBG 与级联 FPI 串联后 FBG 部分的光谱,可以看出 FBG 光谱会受到级联 FPI 的影响。传感器在光谱仪上的总光谱分布为

$$I_{\text{total}} = R(\lambda) + R_f T(\lambda) + R_f S(\lambda) T(\lambda) \cos(2ka^*), \quad (14)$$

式中, $R(\lambda)$ 为 FBG 的反射系数, R_f 为级联 FPI 的反射率, $T(\lambda)$ 为 FBG 的透射系数, $S(\lambda)$ 为级联 FPI

的干涉条纹对比度, $k=2\pi/\lambda$ 为波数, a^* 为其他项。对于 FBG 反射光谱中心波长的测量,由 (13) 式可知,除了 FBG 本身的光谱外,该区域还有两个因素影响着 FBG 的光谱。一个因素是 FBG 光谱直流项(DC)的一系列周期性变化和级联 FPI 反射光的干涉谱。级联 FPI 反射光与 FBG 光谱的 DC 项是对称的,不会引起 FBG 反射光谱的不对称失真。另外一个因素是级联 FPI 干涉光谱会引起 FBG 反射光谱的随机不对称失真。FBG 反射峰的偏移取决于 FBG 和级联 FPI 反射光谱的相对幅值和周期。在这种传感器中,如果采用传统的确定反射峰极点的方法,测量误差将非常大。在 3 dB 带宽下,FBG 反射光谱的光谱失真小,测量结果是线性的,故将 3 dB 带宽的反射光谱的平均波长看作是 FBG 的中心波长。

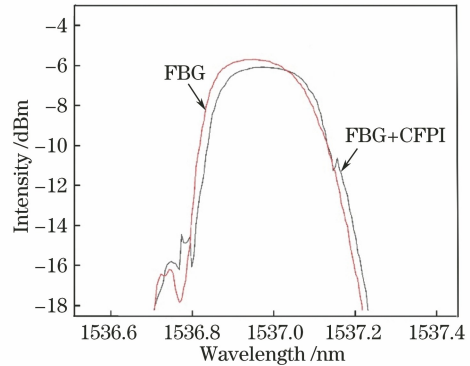


图 14 普通 FBG 与干扰后的 FBG 反射光谱的对比

Fig. 14 Comparison of ordinary FBG and post-interference FBG reflection spectra

6 结 论

制作了一种基于游标效应的复合结构的高灵敏度光纤温度传感器。该传感器结构简单,通过将一段空芯光纤和两段 SMF 熔接构成基于游标效应的级联 FPI,并与 FBG 串联后封装在铝合金基底上实现了对温度的高分辨测量。其中 FBG 与级联 FPI 的复合使得传感器可以同时测量温度的绝对值和微小变化量。通过理论分析、模拟仿真和实验,验证了游标效应和铝合金基底的增敏效果,并对传感器的重复性和响应时间进行了讨论。实验结果表明,该传感器具有高灵敏度、温度绝对值和温度变化量皆可测量的特点,且具有根据需求灵活设计灵敏度的特点。传感器的 FBG 绝对温度灵敏度和基于游标效应的级联 FPI 变化温度灵敏度分别为 37.4 pm/°C 和 138.4 pm/°C,其重复性和温度快速响应性良好,可以在高精度测量方面广泛使用。

参 考 文 献

- [1] Al-Hayali S K, Al-Janabi A H. All fiber-optic temperature sensor based on cladding etched no-core fiber coated with nanostructured copper oxide-polyvinyl alcohol thin film [J]. *Optik*, 2020, 220: 165154.
- [2] Lin H T, Zhang L, Liu X, et al. Research on dynamic characteristics of temperature sensing based on loop ring-down cavity with FBG [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(10): 1006003.
林洪太, 张丽, 刘欣, 等. FBG 环形衰荡腔的温度传感动态特性研究 [J]. *光学学报*, 2020, 40(10): 1006003.
- [3] Gu Z X, Ling Q. Theoretical analysis for long-period fiber grating strain sensor based on dual-peak resonance near PMTP [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0106005.
顾铮先, 凌强. 基于近 PMTP 区域双峰谐振效应的长周期光纤光栅应变传感理论分析 [J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0106005.
- [4] Starodumov A N, Zenteno L A, Monzon D, et al. Fiber Sagnac interferometer temperature sensor [J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 70(1): 19-21.
- [5] Zong S Y, Wen X Y, Zhang D S. Mach-Zehnder interferometer based on fiber core mismatch and core-offset splicing for the simultaneous sensing of temperature and refractive index [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(17): 170607.
宗书尧, 文晓艳, 张东生. 基于纤芯失配与错位熔接的光纤 Mach-Zehnder 温度折射率双参量传感器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(17): 170607.
- [6] Huang B S, Gao S C, Huang X C, et al. High-sensitivity fiber Fabry-Pérot interferometer strain sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(6): 0606002.
黄炳森, 高社成, 黄新成, 等. 高敏光纤法布里-珀罗干涉应变传感器 [J]. *光学学报*, 2020, 40(6): 0606002.
- [7] Liu S, Wang Y P, Liao C R, et al. High-sensitivity strain sensor based on in-fiber improved Fabry-Perot interferometer [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 2121-2124.
- [8] Wang K, Yu B L. Dual-parameter fiber sensors based on Fabry-Perot interference and fiber Bragg grating [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2016, 33(5): 604-609.
王坤, 俞本立. 基于法布里-珀罗干涉仪和光纤布拉格光栅的双参量光纤传感器 [J]. *量子电子学报*, 2016, 33(5): 604-609.
- [9] Wang Z R, Huang L, Liu C, et al. Sensitivity-enhanced fiber temperature sensor based on vernier effect and dual in-line Mach-Zehnder interferometers [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(18): 7983-7987.
- [10] Shao L Y, Luo Y, Zhang Z Y, et al. Sensitivity-enhanced temperature sensor with cascaded fiber optic Sagnac interferometers based on vernier-effect [J]. *Optics Communications*, 2015, 336: 73-76.
- [11] Yang Y, Xu B, Liu Y M, et al. Sensitivity-enhanced temperature sensor with fiber optic Fabry-Perot interferometer based on vernier effect [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(9): 094205.
杨易, 徐贲, 刘亚铭, 等. 基于游标效应的增敏型光纤法布里-珀罗干涉仪温度传感器 [J]. *物理学报*, 2017, 66(9): 094205.
- [12] Yang Y Q, Wang Y G, Zhao Y X, et al. Ultrasensitive temperature sensor based on fiber-optic Fabry-Pérot interferometer with vernier effect [J]. *Journal of Russian Laser Research*, 2019, 40(3): 243-248.
- [13] Han X X, Yuan L, Fan L L, et al. The influence of thermal expansion coefficient of FBG packaging material on temperature sensing accuracy [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2019, 40(3): 375-379.
韩笑笑, 员琳, 樊琳琳, 等. FBG 封装材料热膨胀系数对温度传感精度的影响 [J]. *半导体光电*, 2019, 40(3): 375-379.
- [14] Rong D D, Zhang Y M, Song Y M, et al. Study on the sensing characteristics of cylindrical metallic-packaged FBG sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(1): 117-124.
戎丹丹, 张钰民, 宋言明, 等. 柱体金属化封装 FBG 传感器的传感特性研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(1): 117-124.
- [15] Hou L Y, Mao B N, Wang J F, et al. Temperature characteristics of cascaded Fabry-Pérot interferometer sensors based on vernier effect [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(9): 0906002.
侯乐义, 毛邦宁, 王剑锋, 等. 基于游标效应的级联法布里-珀罗传感器温度特性 [J]. *光子学报*, 2019, 48(9): 0906002.
- [16] The difference between sensor response time and sensor time constant τ is 63.2% [EB/OL]. [2019-05-06]. <https://www.baranidesign.com/faq-articles/2019/5/6/difference-between-sensor-response-time-and-sensor-time-constant-tau>.
传感器响应时间与传感器时间常数 τ 之间的差异为 63.2% [EB/OL]. [2019-05-06]. <https://www.baranidesign.com/faq-articles/2019/5/6/difference-between-sensor-response-time-and-sensor-time-constant-tau>.