

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2109043

基于无芯光纤与光栅级联的反射式大量程高分辨力海水温度传感器*

赵 勇^{1,2}, 赵 健¹, 吕日清¹, 林子婷¹

(1. 东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110819; 2. 河北省微纳精密光学传感与检测技术重点实验室 秦皇岛 066004)

摘 要:针对海洋环境探测中海水温度的大量程高分辨力测量需求,本文提出并验证了一种基于无芯光纤(NCF)与光纤布拉格光栅(FBG)级联的反射式传感器。传感器的制作过程包括将刻有 FBG 的单模光纤与带有涂覆层的 NCF 熔接,之后在 NCF 的端面上镀金膜形成反射镜,最后将光纤结构封装于毛细管中。其中,无涂覆层的 NCF 是多模波导,而有涂覆层的 NCF 可以看作反谐振反射波导,理论分析可知多模干涉和反谐振效应叠加得到输出光谱。由于聚合物涂覆层的热光系数较高,干涉波长的位置随着温度变化发生明显偏移。根据 FBG 中心波长和干涉波长所在位置,通过对应的拟合曲线可以计算出准确的温度值。实验结果表明,在 -6°C ~ 54°C 温度范围内,最小可探测温度分辨力为 $0.000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该反射式光纤传感器具有加工方便、结构紧凑、灵敏度高优点,在大范围高分辨力海水温度测量中具有很大的应用潜力。

关键词: 无芯光纤; 布拉格光栅; 多模干涉; 反谐振; 反射式; 温度测量

中图分类号: TN253 TH741 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4035

Reflective large-range high-resolution seawater temperature sensor based on no-core fiber combined with fiber Bragg grating

Zhao Yong^{1,2}, Zhao Jian¹, Lyu Riqing¹, Lin Ziting¹

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Hebei Key Laboratory of Micro-Nano Precision Optical Sensing and Measurement Technology, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The measurement of seawater temperature in marine environment detection requires large-range and high-resolution. To achieve this objective, a reflective-type optical fiber sensor based on the cascaded no-core fiber (NCF) and fiber Bragg grating (FBG) is proposed, which is also evaluated. The manufacturing process of the sensor includes three steps. First, the coated-NCF is fused to the single-mode fiber (SMF) inscribed with FBG. Then, the gold film is plated on the other side of the NCF to form a reflector. Finally, the fiber structure is encapsulated in the capillary. It is worth noting that the NCF without coating is a multi-mode waveguide, while the NCF with coating can be regarded as an anti-resonant reflecting optical waveguide. Theoretical analysis shows that the output spectrum is achieved by the superposition of multi-mode interference and anti-resonance effect. Due to the high thermal optical coefficient of NCF polymer coating, the position of the interference wavelength in the spectrum shifts obviously with the temperature change. According to the position of the FBG center wavelength and the interference wavelength, the accurate temperature value can be calculated through the corresponding fitting curves. Experimental results show that the minimum detectable temperature resolution is $0.000\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the range of -6°C ~ 54°C . This reflective sensor has advantages of convenient processing, compact structure, and high sensitivity, which has great potential for large-range and high-resolution seawater temperature measurement applications.

Keywords: no-core fiber; fiber Bragg grating; multi-mode interference; anti-resonant; reflective-type; temperature sensing

收稿日期: 2021-12-17 Received Date: 2021-12-17

* 基金项目: 国家自然科学基金(61933004)、河北省自然科学基金(F2020501040)项目资助

0 引言

随着世界技术革命的不断深入发展,海洋在全球的战略地位日益突出,开发利用海洋资源已成为当今世界的一股新潮流。准确监测海水温度变化对于海洋研究、环境监测、资源开发、气候变化预测和军事安全保障等方面具有重要意义^[1]。电学传感器是测量海水温度的常用设备,技术成熟,具有精度高、实用性广的优点,目前市面上有多种电学海水温度传感器,其中商用温盐深分析仪 SeaBird Hydrocat 在 $-5^{\circ}\text{C} \sim 45^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的测量分辨力可以达到 0.0001°C 。然而,这些传感器通常价格昂贵,容易受到电磁干扰,且尺寸较大,在微区域测量中存在局限性^[2]。本文提出了一种具有抗电磁干扰、耐腐蚀、灵敏度高等优点的光纤传感器,其分辨力指标可与电学传感器相媲美,同时测量范围满足对海洋环境动态监测的要求。

在此之前,已经有许多基于光纤的传感元件被设计和制造^[3-4],典型的光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)和长周期光纤光栅的温度灵敏度分别可以达到 $29.87 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ ^[5]和 $90.77 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ ^[6]。基于光栅的传感器具有结构简单、稳定性高、线性度好等优点。除了光栅外,基于干涉和谐振原理的光纤温度传感器也被广泛的研究。Su等^[7]研制了一种用于高温测量的悬浮芯微结构光纤传感器,最大灵敏度约为 $51.6 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 。但由于石英光纤纤芯和包层的材料特性,这些结构的温度响应灵敏度较低,限制了其在高精度测量领域的应用。Xue等^[8]将光子晶体光纤拉锥后嵌入毛细管并填充异丙醇,利用异丙醇的热光学效应以及密封胶和密封液的热膨胀,将测量灵敏度提高到 $-3.88 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 。聚二甲基硅氧烷也是光纤温度传感器中经常用到的敏感材料,在空芯光纤填充^[9]以及侧抛光纤的封装^[10]方面有很多应用。由此可知,通过结合敏感材料,可以显著提高传感结构的温度特性,但很多传感器的测量范围很难满足海洋环境的检测需求,另外,光纤填充、拉锥和抛磨等步骤会增加制造工艺的复杂性,同时也在一定程度上也降低了传感结构的机械强度和稳定性。

无芯光纤(no-core fiber, NCF)是一种特殊类型的均匀材质石英光纤波导,与纤芯-包层光纤不同,NCF本身作为纤芯,外部低折射率介质作为包层而形成波导。由于其独特的结构特点,近年来受到了广泛关注。NCF具有圆对称的横截面,可以激发 $\text{LP}_{0,m}$ 模式并形成多模干涉和自成像现象。NCF直接与外界环境接触,因此可作为各种敏感材料的载体,制成透射式或者反射式传感元件。其中,基于NCF的透射式传感器已经广泛应用于湿度^[11]、液体折射率^[12]和温度测量^[13]等诸多方面。然而,由于透射式传感结构在实际应用中存在局限性,有学者

提出在NCF的端面上镀高反射率薄膜来制作反射式传感器^[14],这增加了传感探头使用的灵活性,并已经用于测量液位^[15]、甲烷^[16]和 Hg^{2+} 浓度^[17]。Baharin等^[18]提出了一种基于NCF错位熔接的Mach-Zehnder干涉仪,温度灵敏度达到 $3.2 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 。Hong等^[19]利用DNA-十六烷基三甲基氯化铵来涂覆NCF,实现一种高度紧凑的生物相容性微探针型温度传感器。虽然NCF与敏感材料的结合在许多方面得到了应用,但是材料的合成和传感器结构的制造仍面临着诸多困难。

本文利用带有涂覆层的NCF与FBG级联构造了一种反射式大量程高分辨力温度传感器。传感机理是多模干涉和反谐振现象的叠加。入射光在经过FBG时会有部分光反射,而透射光则会传输经过NCF,之后在镀有金膜的端面反射并再次经过NCF,最终耦合到SMF输出,在反射谱中可以看到带有FBG中心波长的干涉曲线。由于聚合物涂覆层的存在,其丙烯酸树脂材料具有较大的热光系数,使得该结构对温度变化敏感。在反射谱中可以看到带有FBG中心波长的特征曲线,通过FBG波长的位置可以确定温度范围和干涉谷的阶次,根据校准过的曲线拟合结果可以得到准确的温度值。在 $-6^{\circ}\text{C} \sim 54^{\circ}\text{C}$ 范围内,最小可探测分辨力为 0.0001°C 。该反射式传感器制作方便,结构紧凑,灵敏度高,在海水温度测量中具有很大的优势。

1 理论分析和传感器设计

带有涂覆层的NCF截面和传感结构示意图如图1所示,实验中所采用的NCF和SMF均由长飞公司生产,其中NCF的横截面存在3层结构,包括包层、内涂覆层和外涂覆层,直径分别为 $125 \mu\text{m}$ 、 $193 \mu\text{m}$ 和 $245 \mu\text{m}$ 。传感结构由FBG和带有涂覆层且端面镀有金膜的NCF构成,其中FBG的中心波长为 1555.001 nm 。部分入射光被FBG反射,而通过FBG的传输光(I_i)进入NCF,在NCF的包层内激发 $\text{LP}_{0,m}$ 模式并向前传输,在传输到带有涂覆层的NCF部分时,由于聚合物涂覆层折射率大于石英包层折射率,因此,部分光在包层-涂覆层界面反射,而另一部分则折射到涂覆层内并在涂覆层-空气界面反射。涂覆层可以看作法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)谐振器,满足谐振条件的光在涂覆层内往复反射形成多光束干涉,并继续向前传播并最终泄漏(I_{leak})^[20]。包层中的光传输到NCF端面,经金膜反射后再次回到NCF包层和涂覆层,最终耦合回到入射SMF并传输至解调仪。带有涂覆层NCF中的光场可以看作是多模干涉和多光束干涉的组合^[21]。由于多光束干涉的存在,在聚合物涂覆的NCF中形成了反谐振效应,其色散曲线与无涂覆层的NCF明显不同。

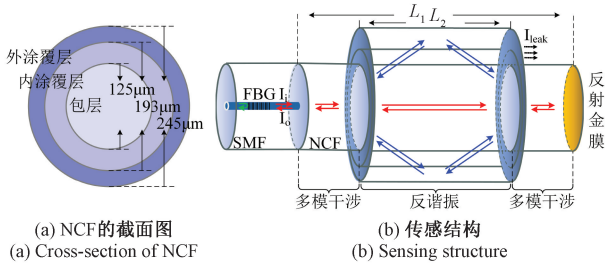


图1 NCF和级联结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of NCF and cascaded structure

对于FBG,其中心波长随着温度变化 ΔTem 而发生的移动可以表示为:

$$\Delta\lambda_{FBG} = (\xi + \alpha)\lambda_{FBG}\Delta Tem \quad (1)$$

式中: ξ 和 α 分别为光纤的热膨胀系数和热光系数。

对于无涂覆层的NCF,多模干涉起主导作用并导致自成像现象,对应的峰值波长为^[22]:

$$\lambda_0 = p \frac{n_{eff} D_{NCF}^2}{L} \quad p = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

式中: n_{eff} 对应NCF包层的有效折射率, D_{NCF} 和 L 分别是无涂覆层NCF的直径和长度, p 是自成像级数。

对于带有涂覆层的NCF,可以看作是低折射率石英被高折射率聚合物包裹而形成的波导。涂覆层充当双层F-P谐振器,其多光束干涉引起的非透射谐振波长可以写成^[23]:

$$\lambda_N = \frac{2(d_1 \sqrt{n_{coating1}^2 - n_{cladding}^2} + d_2 \sqrt{n_{coating2}^2 - n_{cladding}^2})}{N} \quad (3)$$

式中: d_1 和 d_2 是NCF内、外涂覆层的厚度,对应的折射率分别为 $n_{coating1}$ 和 $n_{coating2}$, $n_{cladding}$ 是包层的折射率, N 是谐振阶次。满足谐振条件的光在涂覆层中传输并泄露形成传输损耗谷,而处于反谐振区域的光在包层中传输,对应光谱中的高透射区域。

下面通过COMSOL仿真软件来模拟NCF中的电场矢量分布,其中NCF的包层、内涂覆层和外涂覆层的折射率分别设置为1.446、1.535和1.538。仿真结果如图2所示,其中图2(a)为色散曲线,图2(b)为色散曲线上特殊位置的电场矢量分布。对于无涂覆层的NCF,包层中基模($HE_{1,1}/LP_{0,1}$)的色散曲线为一条直线,对应的电场矢量分布为图2(b)中的A图所示。对于带有涂覆层的NCF,列举了模式 $HE_{1,41}$ 、 $HE_{1,40}$ 和 $HE_{1,39}$ 在波长1530~1580 nm范围内的色散曲线,以模式 $HE_{1,40}$ 为例,随着波长的增加,NCF的有效折射率明显减小,当达到包层中基模的有效折射率附近时,减小趋势逐渐平缓并与

基模重合,从C、D和E点处的电场矢量分布可以看出,涂覆层中的高阶模($HE_{1,40}$)逐渐转化为包层中的基模($HE_{1,1+(39)}$)并继续传输,该色散曲线与模式重组现象一致^[24],也就是形成了反谐振现象。

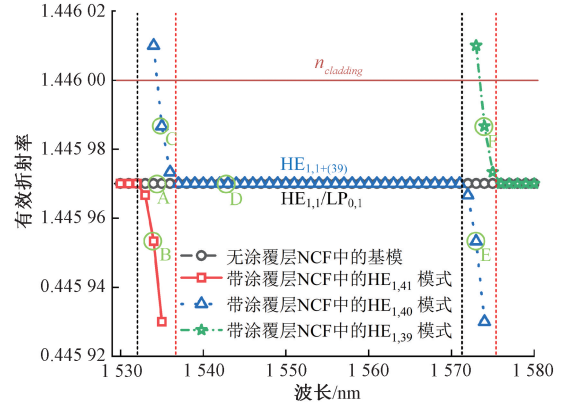
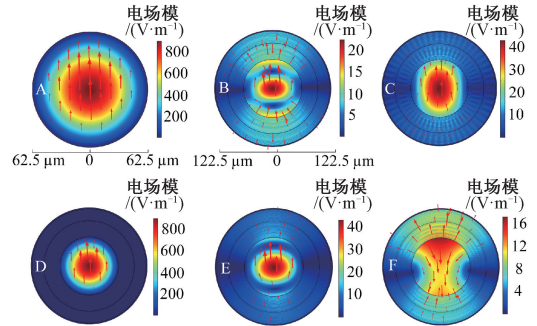
(a) 有无涂覆层的NCF的色散曲线
(a) Dispersion curves of the NCF with and without coating(b) 电场矢量分布
(b) Electric field vector distribution

图2 仿真结果

Fig. 2 Simulation results

忽略温度对NCF包层折射率和涂覆层厚度的影响,当温度变化时,涂覆层的折射率发生改变而引起干涉波长位置移动,根据式(3),对应的温度灵敏度可以表示为:

$$\frac{\Delta\lambda_N}{\Delta Tem} = \frac{2}{N} \left(\frac{n_{coating1} d_1}{\sqrt{n_{coating1}^2 - n_{cladding}^2}} \times \frac{\Delta n_{coating1}}{\Delta Tem} + \frac{n_{coating2} d_2}{\sqrt{n_{coating2}^2 - n_{cladding}^2}} \times \frac{\Delta n_{coating2}}{\Delta Tem} \right) \quad (4)$$

基于多模干涉的无涂覆层NCF的传输强度可以表示为^[25]:

$$I_{MMI} = 10 \lg \left(\left| \sum \eta_{0,m} \exp \left(i \frac{2\pi n_{eff}(LP_{0,m})L}{\lambda} \right) \right|^2 \right) \quad (5)$$

式中: L 是无涂覆层NCF的长度, $\eta_{0,m}$ 是SMF中基模与NCF中 $LP_{0,m}$ 模式之间的电场强度耦合系数,其可以表示为^[26]:

$$\eta_{0,m} = \frac{\left| \int_0^\infty \mathbf{E}_s(r) \mathbf{E}_{0,m}(r) r dr \right|^2}{\int_0^\infty |\mathbf{E}_s(r)|^2 r dr \int_0^\infty |\mathbf{E}_{0,m}(r)|^2 r dr} \quad (6)$$

式中: \mathbf{E}_s 和 $\mathbf{E}_{0,m}$ 分别是基模和 $LP_{0,m}$ 模式的电场矢量分布。

由反谐振效应主导的带涂覆层 NCF 的传输强度是包层中传输的 $HE_{1,m+(N-m)}$ 各模态的叠加,可表示为^[27]:

$$I_{AR} = 10 \lg \left(\sum \eta_{0,m}^2 \bar{R}_{0,m} \right) \quad (7)$$

式中: $\bar{R}_{0,m}$ 是 $LP_{0,m}$ 模式在包层-涂覆层界面的强度反射率。

根据式(5)和(7),基于多模干涉和反谐振效应传感结构的传输强度可以写成^[27]:

$$I_o = 10 \lg \left(A \sum \eta_{0,n}^2 \bar{R}_{0,n} + B \left| \sum \eta_{0,n} \exp \left(i \frac{2\pi n_{eff}(LP_{0,n})L}{\lambda} \right) \right|^2 \right) \quad (8)$$

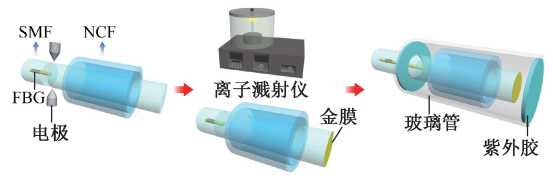
其中, A 、 B 分别为多模干涉和反谐振部分的强度系数,两者之和为 1。

该透射光经金膜反射后再次传输经过 NCF 并最终耦合回到 SMF。丙烯酸树脂涂覆层的热光系数和热膨胀系数分别为 $-2.9 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$ 和 $8 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$,比石英包层大很多。另外,涂覆层的热光系数比热膨胀系数大很多,因此如果忽略热膨胀的影响,干涉谷的位置受温度变化引起的移动可以近似为涂覆层折射率改变的结果。与此同时,从 NCF 涂覆层泄露的光(I_{leak})也受到温度变化的影响,因此干涉谷的幅值也存在变化。

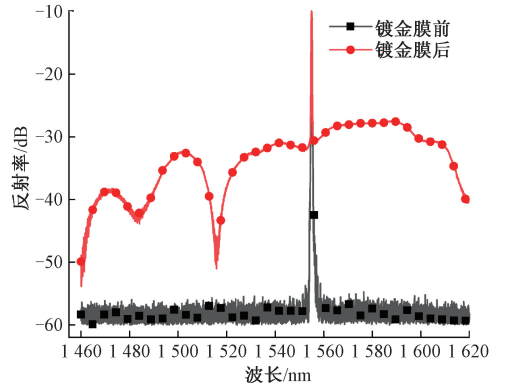
2 传感器制作与实验验证

传感结构的制作过程如图 3(a) 所示,该过程包括 3 个步骤:1)将 NCF 与刻有 FBG 的 SMF 熔接,为了方便光纤切割和熔接,需要剥去 NCF 两端的部分涂覆层。2)将传感结构放入离子溅射仪(JS-1600)中,在 NCF 端面沉积金膜提高反射率。经过反复实验和光谱对比,最终选择的 NCF 长度为 0.6 cm,保留的涂覆层长度为 0.38 cm,金膜厚度约为 50 nm。传感结构在镀金膜前后的反射光谱对比如图 3(b) 所示,可以看出,FBG 的中心波长位置基本不变,然而,在端面镀金膜之后可以看到明显的干涉曲线,且在 1 460~1 550 nm 波长范围内的干涉波长对比度较高。3)用紫外胶将镀膜后的结构封装在玻璃管中,避免测量过程中周围液体对 NCF 涂覆层和金膜的影响。

传感器的温度特性测试实验系统如图 4 所示。采用恒温油槽(AIKOM GL-1020SA)来调节传感器周围的温



(a) 传感结构的加工过程
(a) Fabrication processes of the sensing structure



(b) 镀金膜前后的反射光谱
(b) Reflection spectrum before and after gold plating

图 3 传感探头制备和光谱对比

Fig. 3 Sensor probe preparation and spectral comparison

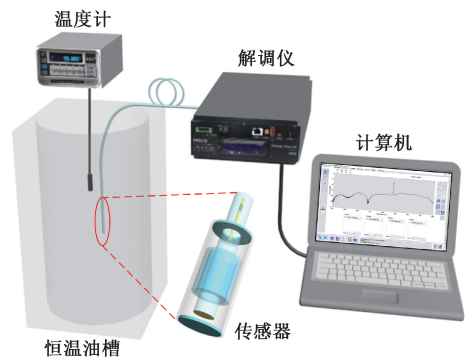


图 4 温度特性实验系统示意图

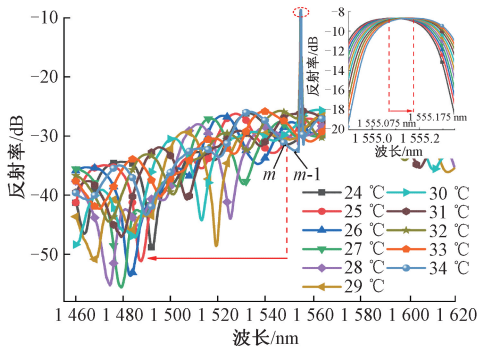
Fig. 4 The experimental system for temperature characteristic measurement

度,并且准确的温度值通过铂电阻温度计(ASL F200)来校准,光谱数据由解调仪(MOI Si155)所采集,同时该解调仪也作为光源。本实验测试了传感器在 $-6^\circ\text{C} \sim 54^\circ\text{C}$ 范围内的温度响应,涵盖了一般的海水温度范围。实验包括升温 and 降温两个过程,每次温度改变量为 1°C 。

3 实验结果与讨论

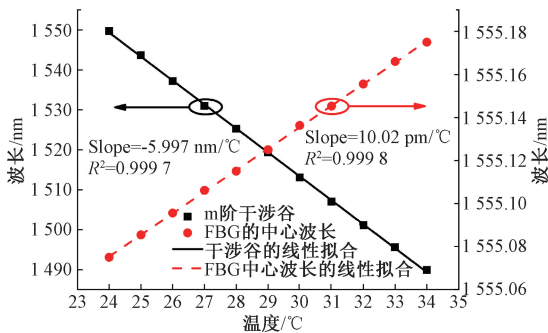
传感器在 $24^\circ\text{C} \sim 34^\circ\text{C}$ 温度范围内的光谱移动和特征波长的线性拟合如图 5 所示。在此温度区间内,我们定义传感结构干涉波长的阶次为 m 。随着温度的升高,该

干涉波长向短波长方向偏移,而FBG的中心波长向相反方向移动。同时干涉波长的幅值在升温过程中也发生变化,这可能是由于涂覆层中泄漏光强度变化引起的。而FBG中心波长的振幅基本不变,主要是因为FBG的反射光强受温度的影响较小。



(a) 24 °C ~ 34 °C 范围内的光谱移动

(a) Spectral shift in the temperature range of 24 °C ~ 34 °C



(b) 干涉谷和中心波长移动的线性拟合

(b) Linear fitting of interference dip and central wavelength

图5 24 °C ~ 34 °C 范围内的温度响应

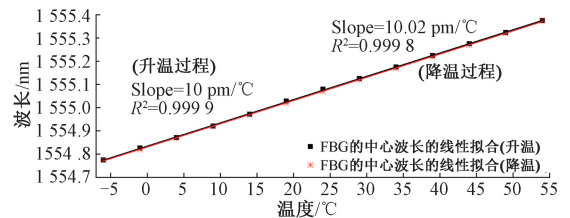
Fig. 5 Temperature response in the range of 24 °C ~ 34 °C

在图5(b)中,NCF干涉波长和FBG中心波长的响应灵敏度分别为 $-5.997 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 和 $10.02 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。需要注意的是,当温度上升到 34°C 时, m 阶干涉谷几乎移出了解调仪的波长扫描范围,而在 1550 nm 附近(24°C 条件下 m 阶干涉谷所在位置)出现了 $m-1$ 阶干涉谷。该干涉谷的位置随着温度的升高也会发生蓝移,因此可以作为新的特征波长在 $34^\circ\text{C} \sim 44^\circ\text{C}$ 温度区间内校准温度。

根据上述测温原理,在 $-6^\circ\text{C} \sim 54^\circ\text{C}$ 的温度范围内进行实验,以 10°C 为间隔分成6个测量区间。升温 and 降温过程的线性拟合曲线如图6所示,其中图6(a)为FBG中心波长的线性拟合,图6(b)为不同阶次NCF干涉谷的线性拟合。

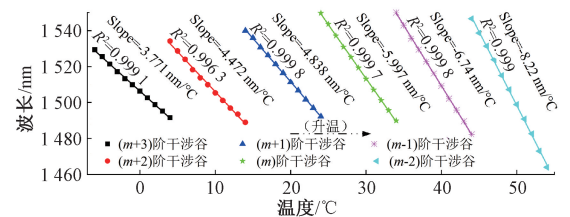
从图6(a)中可以看出,在升温 and 降温过程中FBG的中心波长在 $1554.775 \sim 1555.375 \text{ nm}$ 之间移动,对应的灵敏度分别为 $10.02 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 和 $10.04 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,表现出良好的测量稳定性和重复性。在 $-6^\circ\text{C} \sim 4^\circ\text{C}$ 、 $4^\circ\text{C} \sim 14^\circ\text{C}$ 、 $14^\circ\text{C} \sim 24^\circ\text{C}$ 、 $24^\circ\text{C} \sim 34^\circ\text{C}$ 、 $34^\circ\text{C} \sim 44^\circ\text{C}$ 、 $44^\circ\text{C} \sim 54^\circ\text{C}$ 这6个

温度区间内,随温度升高,不同阶次的干涉谷均向短波长方向移动,灵敏度分别为 -3.771 、 -4.472 、 -4.838 、 -5.997 、 -6.74 、 $-8.22 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,这说明阶次越低的干涉谷具有越高的温度灵敏度,该现象可以通过式(4)来解释。实验中采用的解调仪的波长分辨率为 1 pm ,因此该传感结构的最小可探测温度分辨力为 0.0001°C 。在降温过程中,随着温度的降低,不同阶次干涉谷向长波长方向移动,灵敏度分别为 -3.766 、 -4.663 、 -4.918 、 -5.93 、 -6.792 、 $-8.249 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。对比可知,在相同的温度区间内,NCF干涉谷在升温 and 降温过程中的灵敏度稍有偏差,这可能是由于NCF的响应灵敏度高,而升降温过程中油槽内温场不均匀造成的。在大范围温度测量中,需要确定干涉谷的阶次,这也是级联FBG的原因。根据FBG中心波长的位置可以大致判断出温度范围,确定干涉谷的阶次,进而通过干涉谷的位置和对应的拟合曲线计算出准确的温度值。



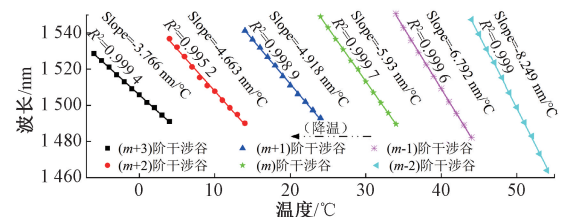
(a) FBG的中心波长移动和线性拟合

(a) Center wavelength of FBG and linear fitting



(b) 升温过程中NCF传感结构干涉波长的线性拟合

(b) Linear fitting of the interference dips of NCF structure in heating process



(c) 降温过程中NCF传感结构干涉波长的线性拟合

(c) Linear fitting of the interference dips of NCF structure in cooling process

图6 特征波长在温度范围为 $-6^\circ\text{C} \sim 54^\circ\text{C}$ 的线性拟合

Fig. 6 Linear fitting of characteristic wavelengths in the temperature range of $-6^\circ\text{C} \sim 54^\circ\text{C}$

此外,通过实验验证了涂覆层长度对传感结构温度特性的影响。首先制作一个SMF-NCF-金膜的传感结构,其中NCF的长度为 1 cm ,涂覆层的长度为 0.55 cm 。之

后在 NCF 的一端逐渐剥去涂覆层,分别测试了涂覆层长度为 0.55、0.45、0.3 和 0.2 cm 时的温度响应特性。其中 20℃ 条件下不同涂覆层长度传感结构的光谱如图 7(a) 所示,从中可以看出干涉波长的位置基本不变,这主要是因为反谐振结构中的非透射波长位置与结构长度无关,该现象与式(3)一致。对应的温度响应拟合曲线如图 7(b) 所示。从图中可以看出,传感结构的涂覆层越长,在光谱中的传输损耗越高,这是因为涂覆层是由损耗系数较大的丙烯酸树脂制成,部分光在其中传播时会被损耗掉。根据理论分析和仿真可知,涂覆层所在位置对干涉光谱和传感特性影响较小,另外,涂覆层越长的传感结构的温度响应灵敏度越高,这与文献[28]中所描述的结论是一致的。此外,由于自成像现象,NCF 包层中的高阶模能量沿传播方向周期性变化,因此不同 NCF 长度的传感结构的光谱有明显差异^[25]。

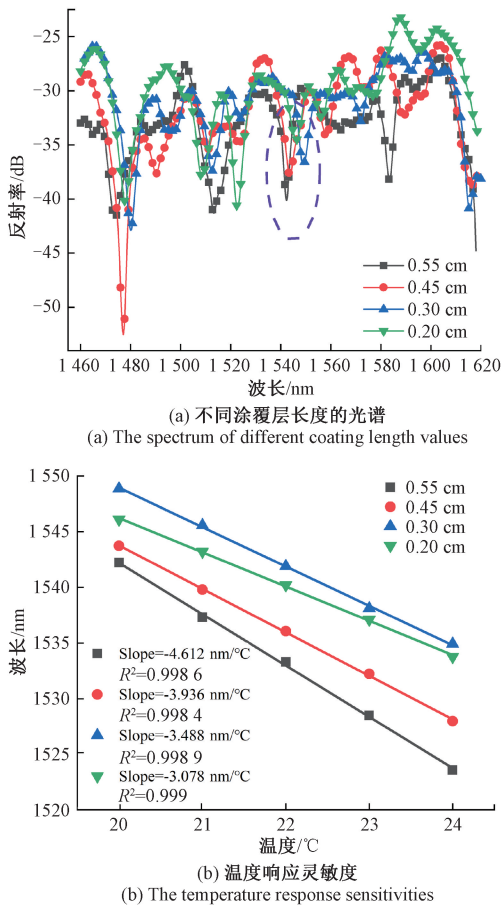


图7 不同涂覆层长度的传感结构的温度响应

Fig. 7 Temperature response of the sensing structures with different coating length values

表1 比较了方案所提出的传感器与其他光纤传感元件的结构尺寸和温度特性。该传感器通过熔接 NCF 和

FBG,并在 NCF 端面镀金膜实现,结构的整体长度小于 1 cm。实验结果表明,该小尺寸传感器具有较高的温度灵敏度,在 -6℃ ~ 54℃ 范围内,最小可探测分辨力为 0.000 1℃。此外,反射式传感器在实际应用中与透射式传感器相比有很大的优势。需要注意的是,在大范围测温中需要使用级联的 FBG 来确定干涉谷的阶次,这增加了实验步骤和数据处理的复杂性。

表1 本文传感器与其他光纤温度传感元件的比较

Table 1 Comparison of the proposed sensor with other fiber-optic temperature sensing structures

方案	传感结构	类型	尺寸/mm	灵敏度/ (nm·°C ⁻¹)
文献[8]	锥形光纤	透射式	2.8	-3.88
文献[9]	SMF-空芯-SMF	透射式	30	0.60
文献[10]	侧面抛光光纤	透射式	16	-0.40
文献[18]	错位熔接 NCF	透射式	1.5	3.20
文献[19]	生物膜涂覆 NCF	反射式	14.5	-0.22
本文	带涂覆层的 NCF	反射式	6	-8.22

4 结 论

本文提出了一种基于 NCF 和 FBG 级联的反射式光纤温度传感器,并对其进行了实验验证。由于带有涂覆层的 NCF 中存在多模干涉和反谐振现象,在反射光谱中得到明显的干涉曲线。涂覆层的材料为丙烯酸树脂,其热光系数较大,干涉谷的位置会受到温度的影响而发生偏移,传感器结构在 -6℃ ~ 54℃ 范围内的最大灵敏度达到 -8.22 nm/°C。需要注意的是,在大范围温度测量中,存在着不同阶次干涉谷的偏移,而且低阶干涉谷的响应灵敏度高于高阶干涉谷。因此,为了测量准确的温度值,需要通过级联 FBG 的方式来确定干涉谷的阶次。另外,实验对比表明,涂覆层越长的传感结构的温度灵敏度越高。该反射式传感器具有加工方便、结构紧凑、灵敏度高等优点,可用于大范围高分辨力的海水温度测量。

参考文献

[1] ALAPPATTU D P, WANG Q, YAMAGUCHI R, et al. Warm layer and cool skin corrections for bulk water temperature measurements for air-sea interaction studies[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2017, 122(8): 6470-6481.

[2] 张龙,叶松,周树道,等. 海水温盐深剖面测量技术综述[J]. 海洋通报, 2017, 36(5): 481-489.

- ZHANG L, YE S, ZHOU SH D, et al. Review of measurement techniques for temperature, salinity and depth profile of sea water[J]. *Marine Science Bulletin*, 2017, 36(5): 481-489.
- [3] 单一男, 马智锦, 曾旭, 等. 基于分布式光纤传感技术的结构变形估计方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(4): 1-9.
- SHAN Y N, MA ZH J, ZENG X, et al. Research on structural deformation estimation based on distributed optical fiber sensing technology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(4): 1-9.
- [4] 向洋, 孙世政, 党晓圆, 等. 基于光纤布拉格光栅的流量温度复合传感研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(4): 15-22.
- XIANG Y, SUN SH ZH, DANG X Y, et al. Research on flow and temperature composite sensing based on fiber Bragg grating[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(4): 15-22.
- [5] WANG L, WANG Y J, WANG J F, et al. A high spatial resolution FBG sensor array for measuring ocean temperature and depth[J]. *Photonic Sensors*, 2020, 10(1): 57-66.
- [6] NIU H W, CHEN W H, LIU Y, et al. Strain, bending, refractive index independent temperature sensor based on a graded index multimode fiber embedded long period fiber grating [J]. *Optics Express*, 2021, 29 (15): 22922-22930.
- [7] SU H Y, ZHANG Y D, MA K, et al. High-temperature sensor based on suspended-core microstructured optical fiber [J]. *Optics Express*, 2019, 27 (15): 20156-20164.
- [8] XUE Y, YU Y S, YANG R, et al. Ultrasensitive temperature sensor based on an isopropanol-sealed optical microfiber taper [J]. *Optics Letters*, 2013, 38 (8): 1209-1211.
- [9] CAI L, LIU Y, HU S, et al. Optical fiber temperature sensor based on modal interference in multimode fiber lengthened by a short segment of polydimethylsiloxane[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2019, 61(6): 1656-1660.
- [10] HE C Y, FANG J B, ZHANG Y N, et al. High performance all-fiber temperature sensor based on coreless side-polished fiber wrapped with polydimethylsiloxane [J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 9686-9699.
- [11] TONG R J, ZHAO Y, CHEN M Q, et al. Multimode interferometer based on no-core fiber with GQDs-PVA composite coating for relative humidity sensing [J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 48: 242-247.
- [12] ZHANG S, DENG S F, WANG Z M, et al. A compact refractometer with high sensitivity based on multimode fiber embedded single mode-no core-single mode fiber structure [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 38(7): 1929-1935.
- [13] JIA Z X, PU S L, RAO J, et al. Temperature self-compensative all-fiber magnetic field sensing structure based on no-core fiber cascaded with fiber Bragg gratings[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 119: 26-29.
- [14] ANTONIO-LOPEZ J E, SANCHEZ-MONDRAGON J, LIKAMWA P, et al. Fiber-optic sensor for liquid level measurement [J]. *Optics Letters*, 2011, 36 (17): 3425-3427.
- [15] FENG D J, LIU M, FENG W L, et al. Michelson liquid-level sensor based on cascaded no-core fiber and single-mode fiber structure[J]. *Optik*, 2020, 206: 163746.
- [16] LIA S Y, LI X M, YANG J C, et al. Novel reflection-type optical fiber methane sensor based on a nocore fiber structure[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2016, 3: 439-442.
- [17] ZHANG Y N, ZHANG L B, HAN B, et al. Reflective mercury ion and temperature sensor based on a functionalized no-core fiber combined with a fiber Bragg grating[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 272: 331-339.
- [18] BAHARIN N F, MUSA S M A, AZMI A I, et al. Compact and high sensitivity low-temperature sensor based on coreless silica fiber Mach-Zehnder interferometer [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2018, 60(8): 1929-1934.
- [19] HONG S, JUNG W, KIM T, et al. Compact biocompatible fiber optic temperature microprobe using DNA-based biopolymer [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(4): 974-978.
- [20] LIU S H, TIAN J, WANG S, et al. Anti-resonant reflecting guidance in silica tube for high temperature

- sensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(23): 2135-2138.
- [21] LIAN X K, WU Q, FARRELL G, et al. High-sensitivity temperature sensor based on anti-resonance in high-index polymer-coated optical fiber interferometers [J]. Optics Letters, 2020, 45(19): 5385-5388.
- [22] ANTONIO-LOPEZ J E, CASTILLO-GUZMAN A, MAY-ARRIOJA D A, et al. Tunable multimode-interference bandpass fiber filter[J]. Optics Letters, 2010, 35(3): 324-326.
- [23] YOU B, LU J Y, LIU J H, et al. Subwavelength film sensing based on terahertz anti-resonant reflecting hollow waveguides [J]. Optics Express, 2010, 18(18): 19353-19360.
- [24] 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.
- [25] SILVA S, FRAZÃO O, SANTOS J L, et al. A reflective optical fiber refractometer based on multimode interference[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2012, 161(1): 88-92.
- [26] WANG Q, FARRELL G, YAN W. Investigation on single-mode-multimode-single-mode fiber structure [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(5): 512-519.
- [27] LIAN X K, FARRELL G, WU Q, et al. Spectral dependence of transmission losses in high-index polymer coated no-core fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(22): 6352-6361.
- [28] CHEN Y F, HU Y C, YAN F, et al. Ultrahigh-sensitive and compact temperature sensor based on no-core fiber with PMMA coating[J]. Optics Express, 2021, 29(23): 37591-37601.

作者简介



赵勇(通信作者),1996年、2001年于哈尔滨工业大学获得学士、博士,2001~2009年在清华大学任博士后、副教授。现为东北大学教授。主要研究方向为新型光纤传感器技术、新型光电传感器材料及原理。

E-mail: zhaoyong@ise.neu.edu.cn

Zhao Yong (Corresponding author) received his B.Sc. and Ph.D. degrees both from Harbin Institute of Technology in 1996 and 2001, respectively. Then, he worked as a postdoctoral research fellow and an associate professor at Tsinghua University until 2009. Now, he is currently working at the Northeastern University as a full professor. His current research interests include the development of fiber-optic sensors and device, fiber Bragg grating sensors, novel sensor materials and principles, and optical measurement technologies.



赵健,2017年于重庆大学获得学士学位,现为东北大学信息科学与工程学院博士研究生,主要研究方向为飞秒激光微加工、光纤传感器和海水参数测量。

E-mail: 1148923046@qq.com

Zhao Jian received his B.Sc. degree from Chongqing University in 2017. He is currently a Ph.D. candidate at Northeastern University. His main research interests include femtosecond laser micromachining, optical fiber sensors and seawater parameters measurement.