

超短 FBG 的高灵敏度温度传感器

吴昊^{1,2}, 张洋³, 王帅⁴, 刘瀚霖^{1,2}, 辛璟焘^{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 100192; 2. 北京信息科技大学 光纤传感与系统北京实验室, 北京 100016; 3. 中国建筑材料科学研究总院有限公司 绿色建筑材料国家重点实验室, 北京 100024; 4. 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 为了研究一种适用于人造卫星环境温度监测的高灵敏度温度传感器, 利用超短光纤光栅的小尺寸优点并结合双金属增敏结构研究设计小尺寸高灵敏度温度传感器。采用 1 mm 超短光纤光栅作为测量敏感元件, 以热膨胀系数大的铝材作为基底、热膨胀系数小的殷钢为热应变传递梁, 将 30 mm 的铝材基底热应变转化为 1 mm 超短光纤光栅上的弹性应变, 达到高效的温度增敏效果, 实现了高灵敏度的温度测量。经测试, 高灵敏度温度传感器的温度灵敏度系数为 292.59 pm/°C, 分辨率优于 0.004 °C, 线性度为 99.93%。该传感器可用于温度的精确测量, 具有尺寸小和分辨率高等优点。

关键词: 超短光纤光栅; 温度传感; 增敏结构

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2021.08.014

High sensitivity temperature sensor of ultra-short FBG

WU Hao^{1,2}, ZHANG Yang³, WANG Shuai⁴, LIU Han-lin^{1,2}, XIN Jing-tao^{1,2}

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; 2. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China; 3. State Key Laboratory of Green Building Materials, China Building Materials Academy, Beijing 100024, China; 4. Instrument, Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: To study a high-sensitivity temperature sensor suitable for artificial satellite fiber grating, the ultra-short fiber grating is used in the small size and high sensitivity temperature sensor with the bimetal sensitizing structure. The 1mm ultra-short fiber grating is used as the measurement sensitive element, the aluminum with a large thermal expansion coefficient is used as the substrate, and the invar with a small thermal expansion coefficient is used as the thermal strain transmission beam. The thermal strain of the 30 mm aluminum substrate is converted into the 1mm ultra-short fiber grating. Elastic strain achieves a high-efficiency temperature sensitization effect and realizes high-sensitivity temperature measurement. After testing, the temperature sensitivity coefficient of the high-sensitivity temperature sensor is 292.59 pm/°C, the resolution is better than 0.004 °C, the linearity is 99.93%. The sensor can be used for accurate temperature measurement and has the advantages of small size and high resolution.

Keywords: ultra-short fiber grating; temperature sensing; sensitizing structure

基金项目: 高等学校学科创新引智计划(先进光电子器件与系统学科创新引智基地)项目(No. D17021); 国家自然科学基金重点项目(No. 51535002)资助。

作者简介: 吴昊(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤光栅传感方面的研究。E-mail: 18435207113@163.com

通讯作者: 辛璟焘(1980-), 男, 博士, 副教授, 主要从事光纤传感, 光纤激光器方面的研究。E-mail: xinjingtao@bistu.edu.cn

收稿日期: 2020-10-13

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器具有体积小、抗电磁干扰能力强、重量轻、信号传输距离远等诸多优点^[1-2],可用于应变、温度、位移、和加速度等物理量的测量^[3-6]。光纤光栅传感器在航空航天、道路桥梁、石油电力、安全监测等^[7-8]诸多领域具有重要的应用。

在国防、民用、军事等领域,人造地球卫星发挥着重要的作用。由于地球轨道空间环境的复杂性,卫星表面的温度影响着其运行和正常工作,对其表面温度的测量和控制是一项重要的工作。对高性能卫星表面温度的测量来说,其测量精度需达到 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,分辨率达到 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

传统的热敏型测温元件可以实现对卫星温度的实时监测,但其抗电磁干扰能力差、耐辐射特性差,因此限制了其在卫星上的长期稳定使用。基于光纤光栅的新型高精度温度传感器是近些年来的研究热点。光纤光栅因其具有抗电磁干扰能力强、体积小、耐辐照等特点^[9],正在成为空间飞行器结构健康监测^[10]的一个重要研究方向。提高传感器的解调精度和传感器的灵敏度是提高温度测量精度和分辨率的有效技术手段。因此,研究微型高精度、高灵敏度系数的 FBG 温度传感器具有重要的研究价值。

目前,主要的光纤光栅温度传感器增敏方法主要有表面镀覆法、粘合法和双金属增敏结构。镀覆法是在光纤表面镀上一层热膨胀系数较大的镀覆层来提高传感器的温度灵敏度系数。华东理工大学的齐一华^[11]等人研究了 Ag-Ni 双金属镀层和 Ti-Ag-Ni 三层金属镀层对光纤布拉格光栅传感器高温传感特性,实验得到 Ag-Ni 双金属镀层光纤布拉格光栅的温度灵敏度系数为 $29.54\text{ }\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$,Ti-Ag-Ni 三层金属镀层光纤光栅的温度灵敏度系数为 $30.32\text{ }\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ 。南京邮电大学的魏昊文^[12]等人使用硅橡胶、环氧树脂和 PDMS 胶分别对 FBG 进行有机涂覆,对三种涂覆光纤光栅在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度下进行实验研究,得到的温度灵敏度系数分别为 $17\text{ }\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$, $27\text{ }\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ 和 $86\text{ }\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ 。

粘合法是通过把光纤光栅粘贴或者封装在热膨胀系数大的材料中实现温度增敏。西安石油大学的禹大宽^[13]等人将 FBG 封装在铍青铜基底材料上,制作的温度传感器在 $20\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内温度灵敏度系数为 $31.5\text{ }\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ 。詹亚歌^[14]等人设计了一种用铝槽封装光纤光栅的结构,其温度灵敏度系数达到

了 $39.8\text{ }\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ 。姜明月^[15]等人设计了一种以不锈钢管为基底封装材料的小尺寸光纤光栅温度传感器,对传感器在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间的温度进行测试结果表明金属基底封装的光纤光栅温度传感器的灵敏度达到 $28.6\text{ }\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ 。

为了进一步提高温度测量灵敏度,设计了双金属增敏结构,其由两种热膨胀系数不同的金属构成,热膨胀效应引起的基底的长度变化通过热膨胀系数小的传递梁传递给 FBG,实现温度测量的增敏效果。李阔^[16-17]等人设计了一种双金属光纤光栅温度传感器,得到传感器的精度为 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度灵敏度系数为 $520\text{ }\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$;为了实现高的增敏系数,他们将基底的长度提高到 360 mm 。马晓川^[18]等人制作了一种双金属温度传感器,温度的灵敏度系数达到了 $352.9\text{ }\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$,其传感器的尺寸较大,为 245 mm 。

本文通过理论分析了应变传递梁的长度变化、应变传递梁的材料变化、基底的长度变化和基底的材料变化对增敏结构光纤光栅温度传感器温度灵敏度系数的影响,在此基础上设计了一种高灵敏度、小尺寸的光纤光栅温度传感器。首先通过准分子激光器制备了 1 mm 超短光纤光栅,并将其作为敏感元件,然后采用导热快、热膨胀系数大的铝材料作为基底和热膨胀系数小的殷钢材料作为应变传递梁组成双金属结构,完成了传感器的小型化封装;传感器整体长度为 30 mm ,宽度为 6 mm ,高度为 3 mm 。实验结果表明,传感器灵敏度系数高达 $292.59\text{ }\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ 、分辨率优于 $0.004\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、具有高精度、高重复性、高分辨率的特点。

2 传感器的设计

结构增敏光纤光栅温度传感器增敏的原理是利用光纤光栅(FBG)对温度和应变同时灵敏的特性,把 FBG 和高热膨胀系数的材料封装到一起,当温度变化时,将高热膨胀系数材料的热形变转换为 FBG 的弹性应变,使得 FBG 波长变化量增加。本文使用双金属结构,对 FBG 进行温度灵敏度增敏,增敏结构如图 1 所示。

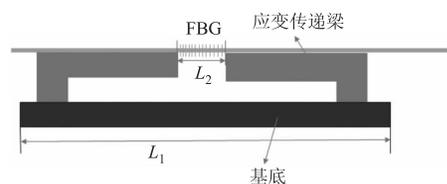


图 1 高灵敏度温度传感器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of high sensitivity temperature sensor

当温度发生变化时,基底与应变传递梁的长度均发生变化。由于它们的热膨胀系数不同,它们的长度变化量不同,它们的差值传递给了 FBG。当 FBG 的长度发生改变时,其布拉格波长会随之发生变化。FBG 的应变越大,布拉格波长漂移量也就越大。因此,可以通过调整基底和应变传递梁的长度以及选用不同材料组合的控制 FBG 的应变。

令 α_1 为基底的热膨胀系数, α_2 为应变传递梁的热膨胀系数, L_1 为基底材料金属上的两个固定点之间的长度, L_2 为传感光纤的长度。当温度变化 ΔT 时,基底部分长度变化量为 $\alpha_1 L_1 \Delta T$,应变传递梁长度变化量为 $\alpha_2 (L_1 - L_2) \Delta T$,增敏结构中,光纤长度的变化量为 $\Delta L = \alpha_1 L_1 \Delta T - \alpha_2 (L_1 - L_2) \Delta T$ 。采用两点式将 FBG 封装于应变传递梁上。当温度变化时,FBG 的波长变化由两部分组成,热效应导致的波长变化和由结构热膨胀导致的弹性应变引起的波长变化,可表示为:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e) \varepsilon + \xi_f \Delta T \quad (1)$$

其中, P_e 为光纤弹光系数; ξ_f 为光纤热光系数,光纤热膨胀引起的波长漂移综合入光纤光栅的应变。若由于结构热膨胀引起的应变全部传递到光纤上,则温度变化引起 FBG 的应变可以表示为:

$$\varepsilon = \frac{\alpha_1 L_1 \Delta T - \alpha_2 (L_1 - L_2) \Delta T}{L_2} \quad (2)$$

相应的光纤光栅温度灵敏度系数为:

$$k_T = \frac{\Delta \lambda_B}{\Delta T} \quad (3)$$

将式(1)、(2)代入式(3)中,可以得到,结构增敏的温度灵敏度系数可表示为:

$$k_T = \left(\left(\alpha_1 - \alpha_2 \right) \frac{L_1}{L_2} + \alpha_2 \right) (1 - P_e) + \xi_f \lambda_B \quad (4)$$

由公式(4)可以看出,温度灵敏系数的大小与基底长度、应变传递梁长度、基底的热膨胀系数和应变传递梁的热膨胀系数的有关。为了更加直观的分析温度增敏系数与基底长度、应变传递梁长度和热膨胀系数的相互关系。设定如下几种材料进行数值计算和绘制关系曲线。20 °C 时,铝的热膨胀系数为 $23.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,铜的热膨胀系数为 $17.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,铁的热膨胀系数为 $12.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,殷钢的热膨胀系数为 $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,石英的热膨胀系数为 $0.55 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,玻璃的热膨胀系数为 $4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

当基底选用热膨胀系数较大的材料,应变传递梁选用热膨胀系数较低的材料时,温度灵敏度系数与 L_1/L_2 的关系曲线如图 2 所示。

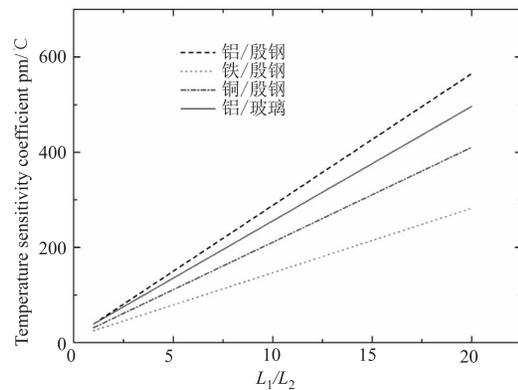
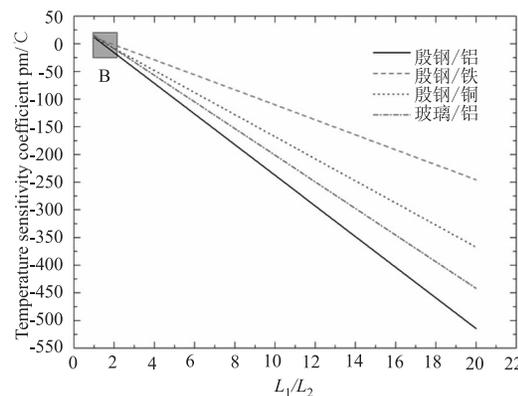


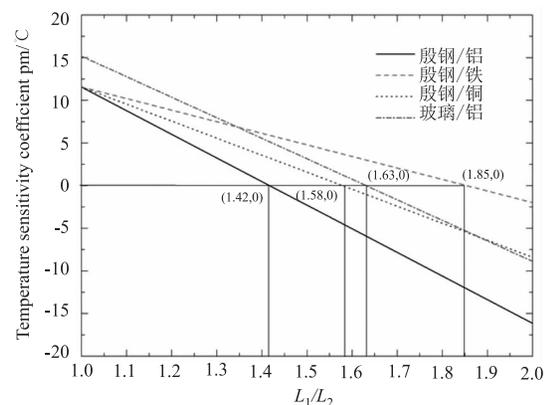
图 2 温度灵敏度系数与 L_1/L_2 的曲线关系

Fig. 2 Relationship between temperature sensitivity coefficient and L_1/L_2

当基底选用热膨胀系数较高的材料,应变传递梁选用热膨胀系数较低的材料时,温度灵敏度与 L_1/L_2 的曲线关系如图 3(a) 所示,图 3(a) 中 B 部分扩大图如图 3(b) 所示。



(a) 温度灵敏度系数与 L_1/L_2 的曲线关系



(b) B部分的放大图

图 3 温度灵敏度系数与 L_1/L_2 的曲线关系

及图中 B 部分的放大图

Fig. 3 Relationship between temperature sensitivity coefficient and L_1/L_2 and Enlarged view of Part B of the figure

根据式(4)及图 2 和图 3 进行,可以分析得到:

(1)如图 2 和图 3 所示,温度灵敏度的大小与 L_1/L_2 为线性关系。

(2)如图 3 所示,当基底选用低热膨胀系数材料、应变传递梁选用高热膨胀系数材料时,当温度升高时,双金属结构对光纤光栅处于压缩状态,光纤光栅本身处于膨胀拉伸状态。当 L_1/L_2 的值较小时,光纤光栅的膨胀处于主导地位,因此温度灵敏度系数为正;当 L_1/L_2 的值较大时,双金属结构对光纤光栅处于压缩处于主导地位,因此温度灵敏度系数为负;当两者相等时,此时设计的温度灵敏度系数为 0;对于双金属结构分别为殷钢/铝、殷钢/铁、殷钢/铜、玻璃/铝结构时,当 $L_1/L_2 = 1.42$ 、 1.63 、 1.58 、 1.85 时,双金属结构的温度灵敏度系数为 0;温度灵敏度系数为零无法进行温度的测量,但是这种结构可用于温度不敏感器件的封装,如基于光纤光栅的波分复用元器件和光纤激光器反射镜。

(3)如图 2 所示,当基底选用高热膨胀系数材料、应变传递梁选用低热膨胀系数材料时,当温度升高时,双金属结构对光纤光栅处于拉伸状态,在加上光纤光栅本身处于拉伸状态,可以加大温度传感器的灵敏度系数。本文将选择高热膨胀系数材料作为基底,低热膨胀系数材料作为应变传递梁进行实验。

由图 2 可以看出所用基底与应变传递梁热膨胀系数差值越大、 L_1/L_2 越大,温度灵敏度系数越大,因此采用铝和殷钢组合。为平衡微型化、增敏系数,选取 L_1/L_2 为 15。

3 传感器的制作

超短光纤光栅(Ultra-short Fiber Bragg grating, US-FBG)作为光纤光栅的一种,其制备方法与普通均匀光纤光栅类似,通过在相位掩模板之前放置可调光阑并且通过调整光阑大小实现光纤光栅的长度控制。

超短 FBG 的光栅栅区长度短,反射率会比较低。为了获得高反射率的超短光纤光栅,本实验将高掺锗的 OFS 光纤进行低温高压载氢增敏处理后,采用准分子激光和相位掩模板刻写超短光纤光栅。本实验中使用的超短光纤光栅光谱如图 4 所示。可以看出,光纤光栅的峰值反射率约为 40%,3 dB 带

宽约为 1.3 nm,采用高斯函数切趾,实现了边模抑制比约为 25 dB。

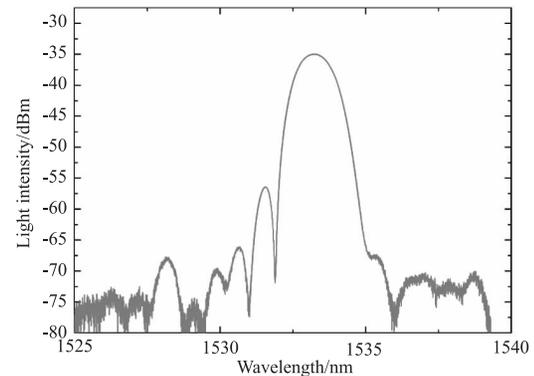


图 4 超短光纤光栅光谱图

Fig. 4 Ultra-short FBG spectrum

本实验制作的微型高灵敏度 FBG 温度传感器的结构及实物如图 5 所示。双金属结构的光纤光栅温度传感器是通过增大光纤光栅随温度的应变变化量来提高其温度灵敏度系数。实验采用 E-120 HP 环氧树脂粘合剂进行基底和应变传递梁的固定,以及使用两点式封装将光纤光栅固定在应变传递梁上。基底的长度为 30 mm,传感光纤的长度为 2 mm,光栅位于传感光纤的中心。理论计算的增敏结构的温度灵敏度系数为 426.839 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ 。

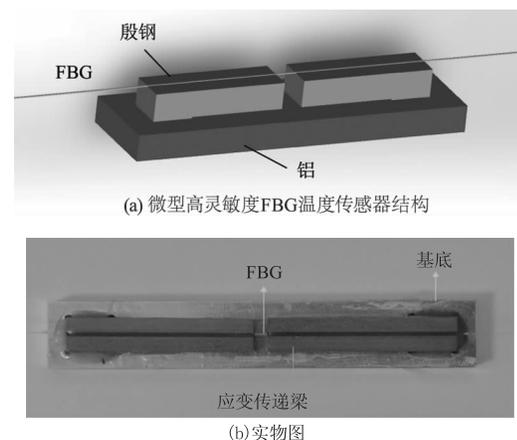


图 5 微型高灵敏度 FBG 温度传感器结构及实物图

Fig. 5 Structure and structure of FBG temperature sensor with high sensitivity and Physical picture

4 传感器的标定与测试

为了对比分析,在测试双金属结构时,实验中添加了 3 个光纤光栅传感器的温度测试。分别为两个表贴在殷钢、铝材料上的光纤光栅温度传感器(其中心波长分别为 1542 nm、1537 nm)和一根中心波长为 1533 nm 的裸光纤光栅。双金属增敏结构温度

传感器中光栅的中心波长为 1555 nm。将该四种光纤光栅温度传感器放于 FLUKE 7381 深井台式恒温槽中。将传感器与解调仪相连接,通过上位机将解调仪获取的数据传输至电脑终端。实验装置如图 6 所示。

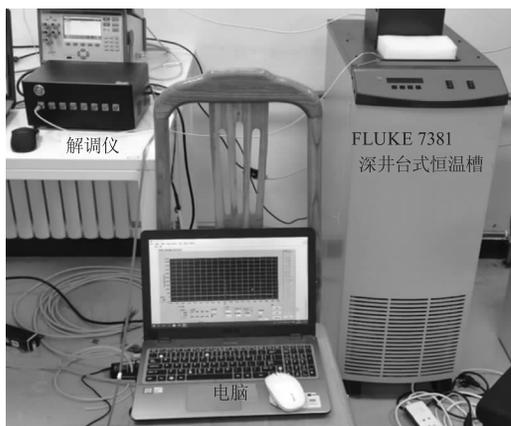


图 6 温度测试实验装置

Fig. 6 Experimental device for temperature measurement

实验中,在 20 ~ 40 °C 内,从 20 °C 开始,每隔 2 °C 设置一个间隔点,共计 11 个点。对四个温度传感器进行温度灵敏度实验,实验采用恒温水浴法,进行持续试验,每个间隔点,设置时长 20 min。每个温度间隔点的波长值是对应的波长数据短时间内的平均值,以此作为每个温度间隔点的稳定值。

为了研究微型高灵敏度 FBG 温度传感器的温度传感长期稳定性和可靠性,在 20 ~ 40 °C 内设置了 20 °C、30 °C 和 40 °C 三个间隔点,对微型高灵敏度 FBG 温度传感器进行了温度循环实验,实验采用了恒温水浴法,进行持续试验,每个温度间隔点设置稳定时长 20 min,共完成 6 次重复度温度测试。

5 实验结果与分析

通过水浴池调节温度在 20 ~ 40 °C 进行标定,通过数据分析,裸光纤光栅温度 - 波长测试数据的线性拟合结果为: $y = 0.011145x + 1533.3$, 获得的裸光纤光栅的灵敏度系数为 11.15 pm/°C, 如图 7 所示; 贴于殷钢材料上的光纤光栅温度 - 波长测试数据线性拟合结果为: $y = 0.01665x + 1537.13341$, 如图 8 所示; 贴于铝材料上的光纤光栅温度 - 波长测试数据线性拟合结果为: $y = 0.04193x + 1542.6$, 图 9 所示; 金属结构增敏微型 FBG 温度传感器温度 - 波长数据的线性拟合结果为: $y = 0.29259x + 1546.40595$, 其温度传感器的灵敏度系数为 292.59 pm/°C, 其实验数据的

线性拟合如图 10 所示。与传感器理论灵敏度 426.839 pm/°C, 存在较大误差。经过分析其产生误差的主要原因是传感光纤的有效长度是大于 2 mm 的理论值。造成这一点的原因有两点: (1) 两个点胶端点的距离大于传递梁豁口的长度; (2) 环氧胶的杨氏模量较小, 应变传递效率小于 100%, 因此传感光纤的有效长度大于 2 mm, 接近 3 mm。

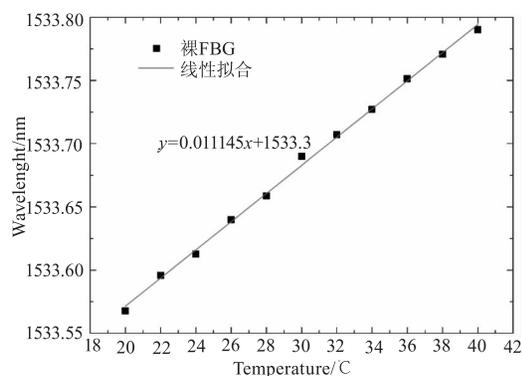


图 7 裸 FBG 温度传感器温度响应特性

Fig. 7 Temperature response characteristics of bare FBG temperature sensor

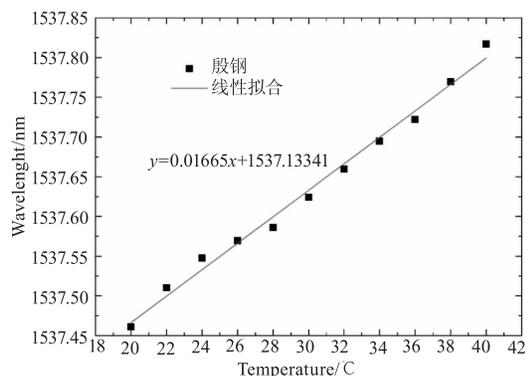


图 8 殷钢结构 FBG 温度传感器温度响应特性

Fig. 8 Temperature response characteristics of FBG temperature sensor with invar structure

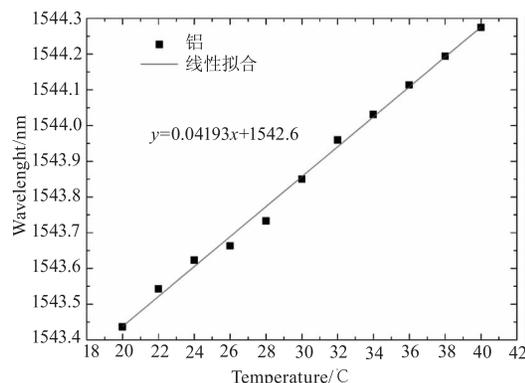


图 9 铝结构 FBG 温度传感器温度响应特性

Fig. 9 Temperature response characteristics of FBG temperature sensor with aluminum structure

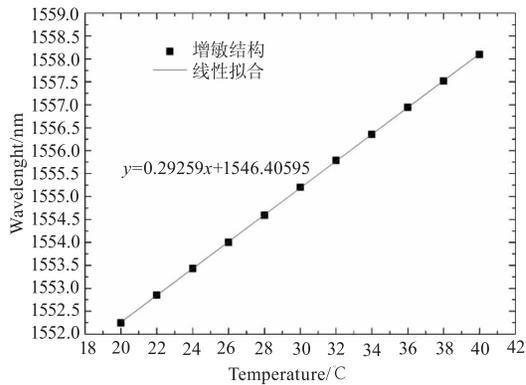


图 10 金属结构增敏微型高灵敏度
FBG 温度传感器温度响应特性

Fig. 10 Temperature response characteristics of
metal structure sensitized FBG temperature sensor

由图 7 至图 10 可以看出:1. 四个传感器线性拟合均为线性关系;2. 贴于铝材料表面、殷钢表面材料以及裸 FBG 三个传感器的测量点在拟合曲线的两侧分布,设计的微型高灵敏度 FBG 温度传感器的测量点均在拟合曲线上。由于测试使用的解调仪的精度为 10 pm,因此当传感器温度灵敏度系数较低的时,其测量值在拟合曲线附近的涨落明显。当传感器温度灵敏度系数很高时,10 pm 的涨落无法在拟合曲线附近观察到。一方面说明微型高灵敏度 FBG 温度传感器的传感精度高于其余三个温度传感器;另一方面说明高增敏可以克服解调仪的解调误差。

对增敏微型温度传感器进行的长期稳定性和可靠性分析,实验获取的实验数据如图 11 所示,循环试验进行了 8.7 h。

实验中微型高灵敏度 FBG 温度传感器在每个温度固定间隔定点的波长值是对应的波长数据短时间内的平均值,以此作为每个温度间隔点的稳定值。以温度间隔点循环次数为横坐标,每次达到间隔点对应的波长稳定值为纵坐标,测试数据结果如图 11(a)所示。以相同温度下,求取每次循环温度稳定后,对应温度间隔点的各波长稳定值的平均值。再求各个稳定值与平均值对应的波长差,以温度循环次数为横坐标,每次达到稳定点对应的稳定值与平均值的差值为纵坐标作图,如图 11(b)所示。由图 11(b)可以看出,微型高灵敏度 FBG 温度传感器的重复偏差不超过 ± 8 pm,该偏差对温度测量的结果影响不超过 0.06 $^{\circ}\text{C}$,测量分辨率优于 0.004 $^{\circ}\text{C}$,满足高精度测温要求,稳定性

和重复性良好。

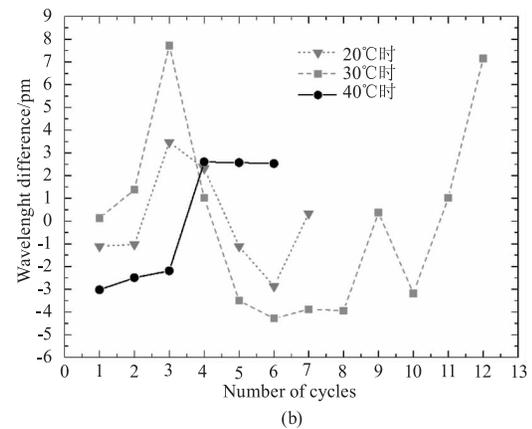
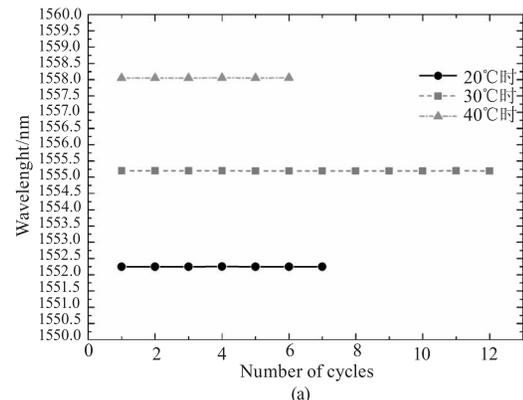


图 11 微型高灵敏度 FBG 温度传感器的
长期稳定性和可靠性实验数据

Fig. 11 Experimental data of long-term stability and
reliability of miniature high sensitivity FBG temperature sensor

由于受光纤光栅承受的应变量的限制,测温传感器的量程为 $20 \sim 40$ $^{\circ}\text{C}$ 。实验的线性效果良好,为提高温度传感器的灵敏度提供了一种良好的方法。

6 结论

本文经过理论分析双金属增敏结构的应变传递梁和基底材料、长度的变化对温度灵敏度系数的影响,获取了增敏结构所采用的材料及长度对温度灵敏度关系,采用准分子激光器写制的 1 mm 超短光纤光栅作为传感元件,制作了以热膨胀系数高的铝材料为基底、热膨胀系数低的殷钢为应变传递梁的微型高灵敏度温度传感器。通过理论分析、数值计算,表明金属增敏结构能够有效提高光纤光栅温度灵敏度。并对其进行了实验的标定、重复度实验验证,实验结果表明:微型增敏温度传感器的灵敏度系数为 292.59 $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$,实现了在 $20 \sim 40$ $^{\circ}\text{C}$ 的测温。经过循环试验,可知微型增敏温度传感器测量结果影响不超过 0.06 $^{\circ}\text{C}$,满足

高灵敏度、长期稳定性测温要求。微型高灵敏度温度传感器具有体积小、抗电磁干扰能力强、耐辐照、测量灵敏度系数高的特点,在高精度测温传感领域具有重要的应用价值。

参考文献:

- [1] Han Xiaoxiao, Yuan Lin, Fan Linlin, et al. The influence of thermal expansion coefficient of FBG packaging material on temperature sensing accuracy [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2019, 40(3): 375-379. (in Chinese)
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.
- [2] Wang Fu, Jiang Huai, Yi Xiaolong, et al. Sensitivity enhancement and encapsulation of fiber bragg grating temperature sensors [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2020, 41(1): 73-76. (in Chinese)
王甫, 江淮, 易小龙, 等. 光纤光栅温度传感器增敏封装特性研究 [J]. *半导体光电*, 2020, 41(1): 73-76.
- [3] He Tao, Zhu Yao, Yang Tianhao, et al. Accuracy design of grating displacement sensor calibration device for high and low temperature environment [J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2018, 359, 1-5. (in Chinese)
何涛, 朱跃, 杨天豪, 等. 高低温环境光栅线位移传感器校准装置精度设计 [J]. *导弹与航天运载技术*, 2018, 359, 1-5.
- [4] Jin Qiao, Wu Xiangyu, Wang Chuanke, et al. Fiber bragg grating acceleration sensor for detecting floor vibration caused by human walking [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2020, 450(7): 11-16. (in Chinese)
金峤, 吴翔宇, 王传克, 等. 一种用于人致楼盖振动测试的光纤加速度传感器 [J]. *仪表技术与传感器*, 2020, 450(7): 11-16.
- [5] Li Tao, Dai Yutang, Zhao Qiancheng. A new type of high sensitivity optical fiber temperature sensor with microstructure [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2014, (4): 625-630. (in Chinese)
李涛, 戴玉堂, 赵前程. 一种新型微结构高灵敏度光纤温度传感器 [J]. *光电子·激光*, 2014, (4): 625-630.
- [6] Zhang Liang. Design and packaging technology of high temperature strain FBG sensor [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2017. (in Chinese)
张亮. 高温应变 FBG 传感器的设计及封装技术 [D]. 杭州: 中国计量大学, 2017.
- [7] Shui Biao. Research on sensing technology of metallized package fiber grating [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012 (in Chinese)
水彪. 金属化封装光纤光栅传感技术研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [8] Xu Guoquan, Xiong Daiyu. Applications of fiber bragg grating sensing technology in engineering [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 306-317. (in Chinese)
徐国权, 熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用 [J]. *中国光学*, 2013, 6(3): 306-317.
- [9] Li Kai. Research on airborne sensors and key technologies based on FBG [D]. Beijing: Beijing Information Science and Technology University, 2018. (in Chinese)
李凯. 基于 FBG 的机载传感器及关键技术研究 [D]. 北京: 北京信息科技大学, 2018.
- [10] Xue Jingfeng, Song Hao, Wang Wenjuan. Application of optical fiber grating in health monitoring for aircraft structure [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2012, 418(22): 45-49. (in Chinese)
薛景锋, 宋昊, 王文娟. 光纤光栅在航空结构健康监测中的应用前景 [J]. *航空制造技术*, 2012, 418(22): 45-49.
- [11] Qi Yihua. Research on surface metallization of fiber bragg grating and high temperature sensing performance [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
齐一华. 光纤布拉格光栅表面金属化及高温传感性能研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2013.
- [12] Cao Shuaishuai. Fiber bragg grating temperature sensor signal demodulation and design of automatic calibration system [D]. Ji'nan: Shan Dong University, 2012. (in Chinese)
曹帅帅. 光纤光栅温度传感器信号解调及其自动标定系统设计 [D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [13] Yu Dakuan, Qiao Xueguang, Jia Zhenan, et al. Bonded fiber bragg grating temperature sensor [J]. *Instrument*

- Technique and Sensor, 2006, (9): 4 - 5. (in Chinese)
- 禹大宽, 乔学光, 贾振安, 等. 贴片封装的光纤 Bragg 光栅温度传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2006, (9): 4 - 5.
- [14] Zhan Yage, Cai Haiwen, Xiang Shiqing, et al. Study on high resolution fiber bragg grating temperature sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, (1): 83 - 86. (in Chinese)
- 詹亚歌, 蔡海文, 向世清, 等. 高分辨率光纤光栅温度传感器的研究[J]. 中国激光, 2005, (1): 83 - 86.
- [15] Jiang Mingyue. FBG temperature-enhancing sensor and its monitoring system software design[D]. Ji'nan; Shan Dong University, 2017. (in Chinese)
- 姜明月. FBG 温度增敏传感器及其监测系统软件设计[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [16] Li Kuo, Zhou Zhenan, Liu Aichun. The application of fiber bragg grating sensor to high precision temperature measure measurement[J]. Progress in Geophysics, 2008, 90(4): 1322 - 1325. (in Chinese)
- 李阔, 周振安, 刘爱春. 基于光纤光栅的高精度测温传感器研究[J]. 地球物理学进展, 2008, 90(4): 1322 - 1325.
- [17] Li Kuo, Zhou Zhenan, Liu Aichun, et al. High-Sensitivity fiber bragg grating temperature sensor at high temperature [J]. ACTA OPTICA SINICA, 2009, 29(1): 249 - 251. (in Chinese)
- 李阔, 周振安, 刘爱春, 等. 一种高温下高灵敏光纤光栅温度传感器的制作方法[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 249 - 251.
- [18] Ma Xiaochuan, Zhou Zhenan, Liu Aichun, et al. A high-sensitivity and stable fiber bragg grating temperature sensor[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2013, 24(4): 1245 - 1250. (in Chinese)
- 马晓川, 周振安, 刘爱春, 等. 高灵敏度稳定光纤光栅温度传感器的研究[J]. 光电子·激光, 2013, 24(7): 1245 - 1250.