光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.06.011

# 用于卫星次镜座结构的光纤光栅温度传感器设计

王天奇[1,2]，孟凡勇[1,2]，王永千[1,2]，宋言明[1,2]，闫　光[1,2*]

（北京信息科技大学 1. 仪器科学与光电工程学院；2. 光纤传感与系统实验室，北京 100016）

**摘　要：** 针对太空环境下在轨卫星内部次镜座结构的特殊性，为监测其温度状态，设计了一种金属基底的光纤光栅温度传感器来贴合次镜座使用。通过变换固定点距离，结合光纤温度传感原理以及弯曲栅区的应变状态，设计了结构小、质量轻且可同时多位置测量温度的基底结构。实验测试结果表明，该结构温度传感器中三个波段的线性度均达到了 0.999，灵敏度分别为 10.78，10.81 和 10.36 pm/℃，同一温度下的中心波长波动在±3 pm 内，受外界应力影响较小，有良好的重复性。

**关键词：** 光纤光栅；温度传感器；次镜座；卫星监测

**中图分类号：** TN253　**文章编号：** 1001－5868(2020)06－0815－07

## Design of Fiber Bragg Grating Temperature Sensor for Satellite Secondary Mirror Base Structure

WANG Tianqi[1,2], MENG Fanyong[1,2], WANG Yongqian[1,2], SONG Yanming[1,2], YAN Guang[1,2]

(1. College of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beijing 100192, CHN; 2. Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, CHN)

**Abstract:** In view of the particularity of the structure of the secondary mirror base in the space environment, it is necessary to monitor its temperature state, thus a FBG temperature sensor with metal base is designed for the application of satellite secondary mirror seat. By changing the distance of fixed points, combining the principle of optical fiber temperature sensing with the strain state of bent gate region, a substrate with small structure and light weight is designed, and also it can realize multi-position temperature measurement simultaneously. Experimental results show that the linearity of the temperature sensor reaches 0.999 in three bands, and the sensitivity is 10.78, 10.81 and 10.36 pm/℃ respectively for the three bands. The center wavelength of the sensor fluctuates within ±3 pm at the same temperature, which is less affected by external stress and has good repeatability.

**Key words:** FBG; temperature sensor; secondary mirror base; satellite monitoring

## 0　引言

太空环境中存在着各种形态的粒子和场，包括高能带电粒子辐射环境、太阳辐射环境、高低温度交变环境等[1]。其中，温度场的变化是影响卫星内电子器件正常使用的因素之一，监测卫星的温度场分布对保障系统的安全运行有很重要的科学意义。和普通的电子类温度传感器相比，光纤光栅温度传感器具有体积小、质量轻及抗电磁干扰等特点[2]，所以被越来越广泛地应用在航天领域中。近几年来，国内外的专家学者对航天环境下卫星结构的温度场监测展开了相关研究。2009 年，欧洲太空局的研究人员将光纤栅区封装在陶瓷片上制成温度传感器，安装在 Proba-2 卫星上，在室温和 1 000 ℃之间可稳定

**收稿日期：**2020－10－15.

**基金项目：**国家自然科学基金面上项目(51675053).

* **通信作者：**闫　光　**E-mail：** 1084945257@qq.com

循环工作 50 h 以上[4]；2017 年，北京航空航天大学的魏鹏等使用光纤光栅温度传感器监测－196 ℃低温真空环境下的卫星翼架状态[4]；2019 年，北京卫星环境工程研究所的韩放等利用金属涂覆增敏技术制作了光纤布拉格光栅温度传感器，并将其应用在－110～－40 ℃低温航空环境中[5]。

虽然针对卫星环境下光纤温度传感器的研究有了一定的进展，但就卫星本身异形复杂结构如何测温没有较多的分析。温度是航空航天领域中的重要考量参数，直接影响卫星中各个电子设备的工作性能、工作寿命及测量精度[6]。本文针对小型卫星激光通信收发装置中次镜座结构内的温度场分布测量问题，依据光纤传感原理，设计了一种以铝合金材质作为基底的新型环状光纤光栅温度传感器。该传感器可配合卫星次镜座结构，同时解决了光纤光栅温度-应变耦合问题，保证了卫星测温的精度。

## 1 光纤光栅传感原理

光纤布拉格光栅（简称 FBG）是在单模光纤的纤芯内通过某种方式对其折射率进行周期性调制而形成的一种全光纤器件[7]。光纤光栅结构如图 1 所示。

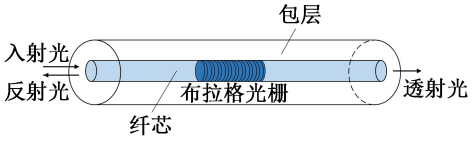



图 1 光纤光栅结构示意图

FBG 是一种空间相位光栅，可以在光纤纤芯内形成，通过光栅前向传输的纤芯模式与后向传输的纤芯模式之间发生耦合，前向传输的纤芯模式的能量可以传递给后向传输的纤芯模式，形成对入射波的反射[8]。根据以上耦合理论，光纤的中心波长 $\lambda_B$ 与光栅周期 $\Lambda$ 的关系为

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \tag{1}$$

式中，$n_{eff}$ 是光纤纤芯的有效折射率。一般情况下，当光纤所处外界环境的温度、应变发生变化时，由于弹光效应和热光效应的影响，光纤光栅的周期和纤芯折射率会发生变化，波长也会产生相应变化[9]。

若只考虑应力作用，光纤光栅波长变化 $\Delta\lambda_B$ 与它所受的纵向应变 $\Delta\varepsilon$ 之间的关系为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1-\rho_a)\Delta\varepsilon \tag{2}$$

$$\rho_a = \frac{n^2}{2}[\rho_{12}-\nu(\rho_{11}-\rho_{12})] \tag{3}$$

其中，$\rho_a$ 是光纤的弹光系数，$\rho_{11}$ 和 $\rho_{12}$ 是光纤的光学应力张量分量，$\nu$ 是泊松系数[10]。

若只考虑温度变化，光纤光栅波长变化 $\Delta\lambda_{BT}$ 与外界环境温度变化 $\Delta T$ 之间的关系为

$$\Delta\lambda_{BT} = \lambda_B(1+\xi)\Delta T \tag{4}$$

其中，$\xi$ 是光纤的热光系数，若忽略波导效应的影响，则在这种情况下光纤光栅的温度灵敏度为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B\Delta T} = \frac{1}{n_{eff}}\left[\xi - \frac{n_{eff}^3}{2}(P_{11}+2P_{12})\alpha\right] + \alpha \tag{5}$$

式中，$\alpha$ 为光纤的线性热膨胀系数[11]。

由式(2)，(4)可知，光纤光栅受到应力作用或外界温度改变时，其中心波长会发生偏移。由式(5)可知，光纤光栅的温度灵敏度系数与热膨胀系数有关[12]，若用光纤光栅测温，光纤在本身材料不变的情况下，传感器基底可选用热膨胀系数较低的金属材料。

## 2 次镜座结构特征与光纤光栅温度传感器设计

### 2.1 次镜座结构特征

卫星次镜座为特殊圆环结构，此结构凹槽内外圆半径分别为 $R_1$＝12 mm，$R_2$＝14.5 mm，凹槽深度 $d$ 为 4 mm。次镜座结构如图 2 所示。若要对此结构凹槽部位进行测温，未封装的光纤光栅放入其中会受应变的干扰而导致测温精度降低，所以需要对此结构进行精确分析，设计的传感器应安装在凹槽内部，进行多点测量并合理布局栅区位置，以达到精准测温的目的。

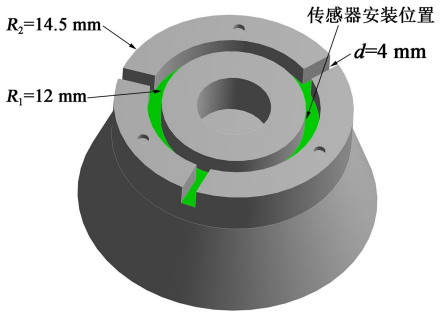



图 2 次镜座结构图

### 2.2 传感器基底结构设计

在选择传感器基底材料时，考虑到卫星监测对重量的敏感性，以及材料进行热传导的速率，所以选用质量轻、导热快的铝合金 7075-T651 作为基底材料。

为解决传感器与次镜座凹槽匹配度的问题，将传感器的外形设计成环状结构。传感器内的光纤光栅布置在环形中间圈层，光纤圈直径 $D$ 为 26.5 mm，一根光纤上设有 3 个栅区，两端分别点胶固定。当次镜座受到外界应力干扰后，传感器结构可能会产生形变，降低测温准确性，甚至导致获取数据缺失。为了保证传感器内的光栅不受应变影响，只需确定栅区两端固定点距离以及弧高。已知光纤的尺寸，光纤内 3 个栅区的弧高 $h$ 及点胶固定点距离 $L$ 未知，根据传感器内部结构的对称性，只需确定一个栅区即可推出整体固定点布局，所以本文通过变换单个光纤光栅固定点之间的距离与弧高，对不同尺寸光栅受应力影响情况进行仿真分析。

传感器内光纤呈圆环状，半径 $r=13.25$ mm，两端固定点分别为 $A$ 和 $B$，相距 $L$，光纤弧度结构如图 3 所示。设弧度为 $\alpha$，结合相关定理，弧度 $\alpha$ 与弧高 $h$ 关系为

$$\cos\alpha=\frac{r-h}{r}=1-\frac{h}{r} \tag{6}$$

$$\sin\alpha=\sqrt{1-\cos^2\alpha}=\sqrt{1-\left(1-\frac{h}{r}\right)^2} \tag{7}$$

由式(7)可得出两端固定点相距 $L$ 为

$$L=2r\sin\alpha=2r\sqrt{1-\left(1-\frac{h}{r}\right)^2} \tag{8}$$

固定点 $A$，$B$ 在直径处时，$L$ 最大为 26.5 mm，沿垂直中心线往上，距离 $L$ 与弧高 $h$ 逐渐缩小。

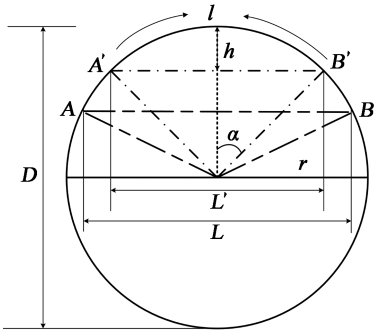



图 3　光纤弧度结构示意图

通过改变固定点距离 $L$ 和弧高 $h$，按照以上公式进行计算，得到表 1 数据。把栅区固定在基底上，将基底装配在钢材试验件(150 mm × 50 mm × 5 mm)中心位置。根据应力应变理论知识，已知应力 $\sigma$ 与拉力 $F$ 之间的关系[13]为

$$\sigma=\frac{F}{A} \tag{9}$$

式中，$A$ 为原始横截面积，并且应变 $\varepsilon$ 和应力 $\sigma$ 的关系式为

$$\varepsilon=\frac{\sigma}{E} \tag{10}$$

式中，$E$ 为材料的弹性模量，由式(9)和(10)可知应变与拉力之间[14]的关系为

$$\varepsilon=\frac{F}{EA} \tag{11}$$

由式(11)可知，应变与拉力成线性关系。设 $F$ 为 30 000 N，$A=2.5\times10^{-4}$，$E=200$ GPa，则计算可得试验件传递到基底的应变为 600 με；若拉力 $F$ 不变，则传感器底部传递到光纤处的应变不变，此时改变固定点距离以及弧高，则可发现光栅应变量的变化情况。将上述各结构建模仿真，使用 Ansys 有限元仿真软件对试验件施加 30 000 N 的力，将其一端固定，在另一侧施加拉力。以固定点距离为 26.5 mm 为例，由单栅设计整体应变仿真图 4 可以看出，在拉伸时钢材试验件受应变为 600 με 左右，与上述理论计算结果吻合。图 5 为单个基底结构应变仿真图，最大受力处为 520 με，对比图 6 所示单栅结构应变仿真结果可以发现，栅区应变几乎为零。

**表 1　固定点距离、弧高与应变关系**

| $L$/mm | $h$/mm | 应变/με |
|---|---|---|
| 26.50 | 13.25 | 0.67 |
| 25.69 | 10.00 | 0.42 |
| 20.74 | 5.00 | 0.43 |
| 16.79 | 3.00 | 0.41 |
| 14.00 | 2.00 | 0.84 |
| 12.25 | 1.50 | 5.76 |
| 10.10 | 1.00 | 19.00 |

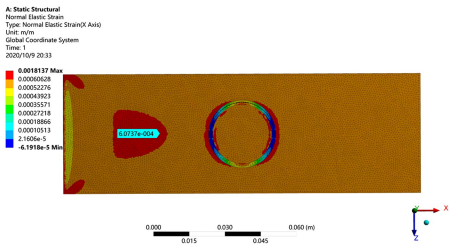


图 4　单栅整体应变仿真图

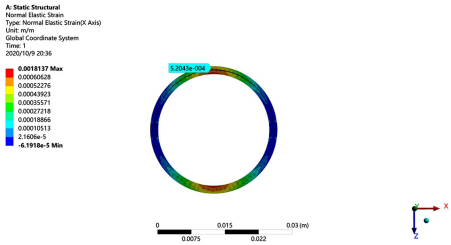


图 5　单个基底结构应变仿真图

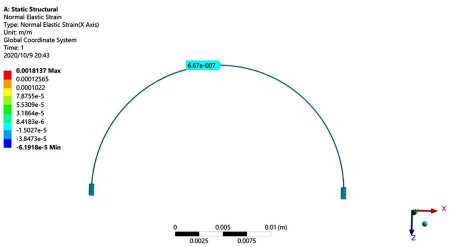



图 6 单栅结构应变仿真图

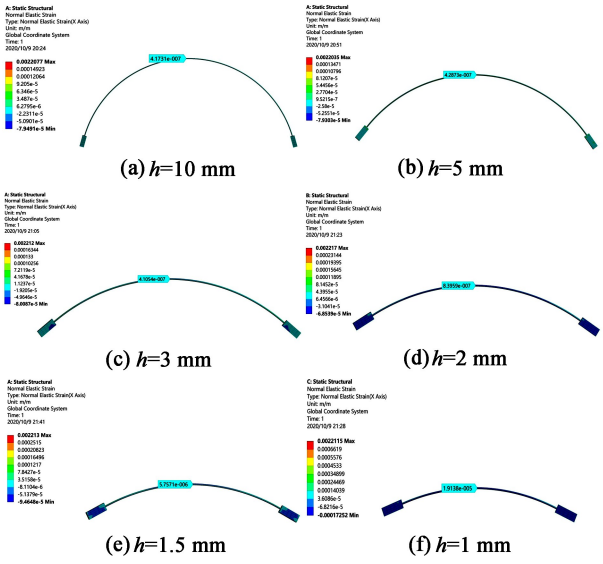



图 7 不同弧高仿真图

之后按表 1 数据改变固定点距离及弧高，依次进行建模仿真，对试验件施加相同的力，各个弧高下仿真结果如图 7 所示。

从仿真结果可以发现，在固定点相距 14～26.5 mm 时，栅区受应变影响较小，可忽略不计，在 $L=12.25$ 时栅区受到应变的影响开始变大，为 5.76 με。因设有 3 个栅区，每个栅区固定点距离需分布均匀，且两个相近固定点之间要保留一定距离，方便封装的同时避免数据交叉影响，所以在应变值较小的范围内选择固定点距离最短的 14 mm，弧高为 2 mm 作为传感器尺寸，依此尺寸进行 3 个栅区布局设计。

栅区固定点距离设为 14 mm 后，再对其他部位进行设计，为方便栅区封装，留出 3 个栅区豁口，每个点胶台的高度为 0.8 mm，并设有小凹槽可以卡入光纤点胶固化，基底整体高度为 2.5 mm，基底外环处留有一孔用于导入光纤。配合基底的上盖设计与基底完全吻合，厚度为 0.5 mm，整体结构高为 3 mm。环形传感器上下基底结构以及栅区位置如图 8 所示。

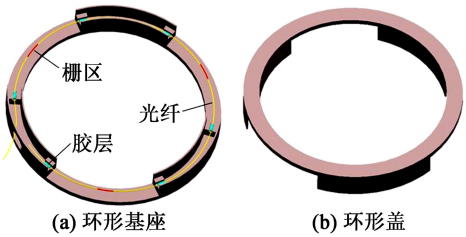



图 8 传感器上下部位结构图

### 2.3 封装设计

光纤光栅温度传感器中有 3 个栅区，为了防止在测温时栅区中心波长数据重叠，所以选用 3 个不同波段的光纤光栅，在常温状态下分别为 1 532，1 534 和 1 536 nm，定义 3 个栅区序号分别为 1 号、2 号和 3 号，栅区长度为 5 mm，3 个栅区刻在一条光纤上，然后将其封装在传感器中。

在封装时，光纤从圆孔进入，沿着基底中的凹槽顺时针放入，栅区位置分别对应底盘的 3 个豁口处，栅区在中间位置，然后使用 353ND 胶固定栅区两侧，完成后在外侧一端光纤加入黑色纤维套管防护，并在入口处使用硅橡胶进行结构封闭，固定套管与光纤。最后以硅橡胶为粘合剂完成上下结构的合并封装，封装过程中注意保持上下端面一致，避免产生相对位移，最后用重物压置 24 h。传感器封装完成后的实物照片如图 9 所示。



图 9 传感器封装实物图

## 3 实验结果分析

### 3.1 温度传感实验分析

为了验证封装好的传感器能否在卫星次镜座上稳定测温，需要对光纤光栅温度传感器的性能进行实验验证。传感器的重复性、灵敏度以及线性度是考量测温性能的重要标准。

首先，使用高低温试验箱对传感器进行温度循环实验，以检测其重复性。卫星在运行时期，次镜座结构位于热控制系统内，温度控制在 40 ℃左右。所以设置程序将温度控制在 10，20，30 和 40 ℃，每个温度点稳定 10 min，温度由低到高再变低持续进行

5 个循环，观察温度的变化以及温度传感器中各栅区的重复性，温度循环实验测量原理如图 10 所示。实验过程中使用 Labview 软件实时记录中心波长，待实验结束导出，并通过 Matlab 编写程序对数据进行细化处理，找出每个循环中每个温度点停留的中心波长的平均值，5 次循环结果如图 11 所示，横坐标为温度，纵坐标为每个栅区的中心波长值。以第一次循环的数据作为标准，对比之后的 4 次循环，获得三个波段的波长偏移量，分别如图 12(a)，(b)和(c)所示。由图 12 可知，这三个波段在不同温度下中心波长重复性偏差分别在 ±3 pm，±2 pm，±2 pm 内，证明此温度传感器具有良好的重复性。

接着，在试验箱中进行温度标定实验，对传感器的灵敏度和线性度进行标定。设定箱内温度为 10～50℃，递增步长为10℃，记录温度点的中心

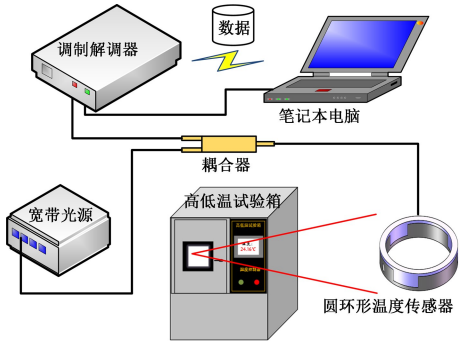



图 10　温度循环实验测量原理图

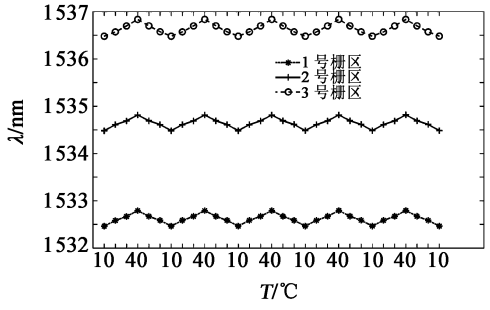
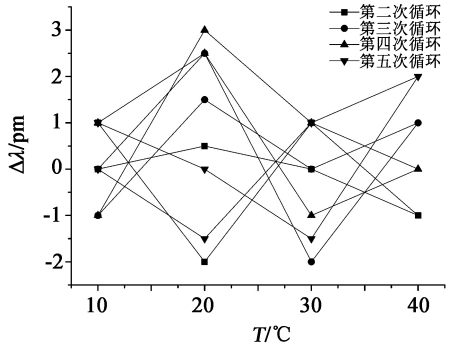
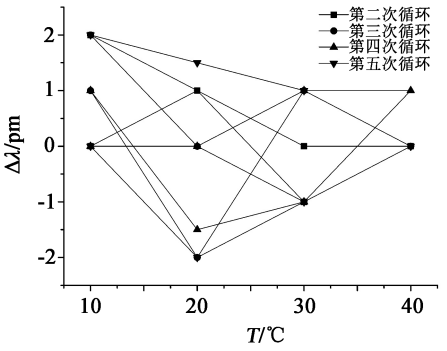


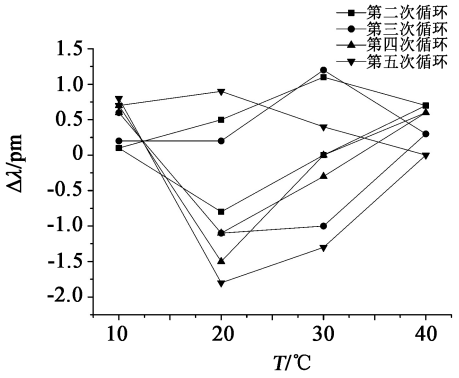

图 11　传感器三个栅区温度循环图




(a)　1 号栅区




(b)　2 号栅区




(c)　3 号栅区

图 12　传感器重复性偏差曲线图

波长值，利用数据处理软件 Origin 将 3 个波段的数据进行温度-中心波长的线性拟合，结果如图 13 所示。

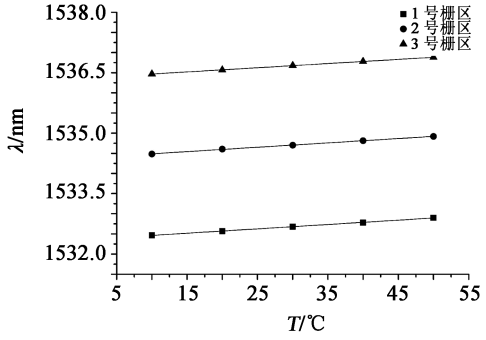



图 13　传感器温度-中心波长关系图

分析图 13，得到 1 号栅区的线性度为 0.999 46，灵敏度为 10.78 pm/℃，中心波长与温度之间的线性关系为

$$\lambda = 1\,532.356\,2 + 0.010\,78T \tag{12}$$

2 号栅区的线性度为 0.998 86，灵敏度为 10.81 pm/℃，中心波长与温度之间的线性关系为

$$\lambda = 1\,534.380\,7 + 0.010\,81T \tag{13}$$

3 号栅区的线性度为 0.999 61，灵敏度为 10.36 pm/℃，中心波长与温度之间线性关系为

$$\lambda = 1\,536.364\,6 + 0.010\,36T \quad (14)$$

根据以上结果，可以发现在 10～50 ℃温度范围内，传感器内的 3 个栅区具有良好的线性度及灵敏度。

### 3.2 应变拉伸实验分析

在 MTS 机上进行应变拉伸实验，检测基底发生形变对传感器内光纤光栅产生的影响。在温度恒定的室温环境下，将温度传感器粘贴固定在拉伸件钢板中心位置，然后使用 MTS 机上的夹具夹住拉伸件两端进行拉伸实验。卫星次镜座在工作时，外界环境导致的应变约为 600 με，因此机器设定程序对拉伸件施加 0～600 με 的应变，递增步长为 100 με，在排除温度对波长的影响后，对获取的三个栅区的中心数据进行对比处理。相较于平稳状态下的波长，拉伸时每个应变节点波长的漂移量变化关系如图 14 所示。

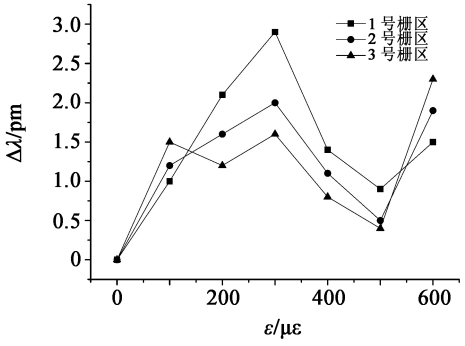



图 14 传感器应变拉伸实验波长漂移量

从图 14 可以看出，对拉伸件进行纵向拉伸，在不同应变下，传感器内三个波段的中心波长漂移量始终在 3 pm 范围内，可以证明这种光纤光栅温度传感器受到应变的影响微小，得到的温度数据可靠。

## 4 结论

本文通过改变环形栅区的固定点距离以及弧高，设计了一种可配合卫星次镜座使用的金属基底的光纤光栅温度传感器。该传感器内设有三个栅区，可以多方位对次镜座进行测温。对封装完成后传感器的灵敏度、线性度以及温度重复性进行了实验检测，发现传感器内三个栅区的灵敏度分别为 10.78，10.81 和 10.36 pm/℃，线性度均为 0.999，同一温度下中心波长的重复性在 3 pm 范围内。以上结果表明传感器内的栅区在环形状态下也可以稳定地监测温度，为环形光纤光栅温度传感器在航天环境中的应用提供了参考。

### 参考文献：

[1] 侯 睿，赵尚弘，李勇军，等. 空间环境对卫星光通信系统光学器件的影响[J]. 半导体光电，2010，31(5)：771-777.
Hou Rui，Zhao Shanghong，Li Yongjun，et al. The influence of space environment on optical devices of satellite optical communication system [J]. Semiconductor Optoelectronics，2010，31(5)：771-777.

[2] 任 越，张钰民，钟国舜，等. 管式光纤光栅高温传感器封装及温度特性[J]. 激光与红外，2020，50(5)：598-601.
Ren Yue，Zhang Yumin，Zhong Guoshun，et al. Package and temperature characteristics of tube-type fiber grating high temperature sensor[J]. Laser & Infrared，2020，50(5)：598-601.

[3] Haddad E，Kruzelecky R，Zou J，et al. Fiber optic high temperature sensors for re-entry vehicles[C]// Proc. of 6th European Symp. on Aerothermodynamics for Space Vehicles，2009：659.

[4] Wei Peng，Liu Jie，Dai Zejing，et al. Monitoring the shape of satellite wing frame using FBG sensors in high electronic noise，vacuum and −196 ℃ environment[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics，2017.

[5] 韩 放，廖 韬，苏新明，等. 用于航天环境的布拉格光栅温度传感器灵敏度与精度研究[J]. 计算机测量与控制，2019，27(10)：289-293.
Han Fang，Liao Tao，Su Xinming，et al. Research on sensitivity and accuracy of FBG temperature sensor for aerospace environment [J]. Computer Measurement and Control，2019，27(10)：289-293.

[6] 卢建中，孟凡勇，闫 光，等. 卫星镜头结构光纤光栅温度传感器研究[J]. 激光与红外，2019，49(10)：1252-1259.
Lu Jianzhong，Meng Fanyong，Yan Guang，et al. Research on the FBG temperature sensor with satellite lens structure[J]. Laser & Infrared，2019，49(10)：1252-1259.

[7] 杨 兴，胡建明，戴特力. 光纤光栅传感器的原理及应用研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版)，2009，26(4)：101-105.
Yang Xing，Hu Jianming，Dai Teli. Research on the principle and application of FBG sensor[J]. J. of Chongqing Normal University (Natural Science Edi.)，2009，26(4)：101-105.

[8] Wang C，Zhang Y，Sun J，et al. Research on a fiber Bragg grating temperature measurement method for inter-satellite laser link[J]. Rev. of Scientific Instruments，2020，91(1)：015007.

[9] Wang L，Wang Y，Wang J，et al. A high spatial resolution FBG sensor array for measuring ocean temperature and depth [J]. Photonic Sensors，2020，10(1)：57-66.

[10] Kingsbury R W，Riesing K M，Cahoy K L，et al. Free-space optical communication module for small satellites：US，20180076895[P]. 2017.

[11] Ibrahim S K, McCue R, O'Dowd J A, et al. Demonstration of strain independent temperature measurements using optical PM-FBG sensors for ground testing of satellite panels[C]// Proc. of Inter. Conf. on Space Optics—ICSO 2018. Inter. Society for Optics and Photonics, 2019, 11180: 111807B.

[12] Gao X, Ning T, Zhang C, et al. A dual-parameter fiber sensor based on few-mode fiber and fiber Bragg grating for strain and temperature sensing[J]. Opt. Commun., 2019, 454: 124441.

[13] 闫　光, 卢建中, 张开宇, 等. 温度解耦大量程光纤光栅应变传感器[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(5): 1682-1688.
Yan Guang, Lu Jianzhong, Zhang Kaiyu, et al. Temperature decoupled large range FBG strain sensor[J]. J. of Jilin University (Engin. Edition), 2019, 49(5): 1682-1688.

[14] Nandini Basumallick, Palas Biswas, Kamal Dasgupta, et al. Design optimization of fiber Bragg grating accelerometer for maximum sensitivity[J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2013: 194.

**作者简介：**

**王天奇**(1994—)，女，硕士生，主要研究方向为光纤传感与光电器件；

**闫　光**(1979—)，男，博士，讲师，硕士生导师，主要从事光纤激光器与传感器的研究。

(上接第 814 页)

[21] Akhavan A, Ghafoorifard H, Abdolhosseini S, et al. Metal-insulator-metal waveguide-coupled asymmetric resonators for sensing and slow light applications[J]. IET Optoelectron., 2018, 12(5): 220-227.

[22] Han Z, Forsberg E, He S. Surface plasmon Bragg gratings formed in metal-insulator-metal waveguides [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2007, 19(2): 91-93.

[23] Dionne J A, Sweatlock L A, Atwater H A, et al. Plasmon slot waveguides: Towards chip-scale propagation with subwavelength-scale localization[J]. Phys. Rev. B, 2006, 73(3): 035407.

[24] Wang T B, Wen X W, Yin C P, et al. The transmission characteristics of surface plasmon polaritons in ring resonator [J]. Opt. Express, 2009, 17(26): 24096-24101.

[25] Setayesh A, Mirnaziry S R, Abrishamian M S. Numerical investigation of a tunable band-pass plasmonic filter with a hollow-core ring resonator[J]. J. Opt., 2011, 13(3): 035004.

[26] Kurokawa Y, Miyazaki H T. Metal-insulator-metal plasmon nanocavities: Analysis of optical properties[J]. Phys. Rev. B, 2007, 75(3): 035411.

[27] Kekatpure R D, Barnard E S, Cai W S, et al. Phase-coupled plasmon-induced transparency[J]. Phys. Rev. Lett., 2010, 104(24): 243902.

[28] Lu Q, Wang Z Z, Huang Q Z, et al. Plasmon-induced transparency and high-performance slow light in a plasmonic single-mode and two-mode resonators coupled system[J]. J. Lightwave Technol., 2017, 35(9): 1710-1717.

[29] Mario L Y, Chin M K. Optical buffer with higher delay-bandwidth product in a two-ring system[J]. Opt. Express, 2008, 16(3): 1796-1807.

**作者简介：**

**张利伟**(1979—)，男，博士，副教授，主要从事表面等离激元、超材料等方面的研究；

**乔文涛**(1982—)，男，硕士，副教授，主要从事表面等离子激元波导及其应用技术方面的研究。