光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024052102

玻璃焊料封装 FBG 温度传感特性研究

杨武坤[1]，张钰民[1,2*]，宋言明[1,2]，田　婧[1]，王　都[1,2]

（北京信息科技大学 1. 光电测试技术及仪器教育部重点实验室，北京 100192；
2. 光纤传感与系统北京实验室，北京 100016）

摘　要： 针对传统胶粘剂封装的光纤布拉格光栅(FBG)温度传感器长期使用出现的老化、蠕变等问题，提出了一种新的金属封装 FBG 传感器温度增敏结构和封装工艺。通过有限元分析方法对传感器进行应变不敏感设计，使用玻璃焊料代替传统环氧树脂胶粘剂将 FBG 与不锈钢基底进行两点式焊接固定，并使用金属外壳与硅橡胶进行密封保护。在－20～55 ℃温度变化范围内，所制作的 FBG 温度传感器温度灵敏度为 27.46 pm/℃，线性拟合度均达到 0.999，温度稳定性和可重复性良好，其在 0～150 ℃的大温度范围内测量标准差小于 0.003 ℃，也保持了良好的温度稳定性和重复性。该封装结构的传感器工艺简便、成本低、易于实现，其在结构健康监测领域具有广阔的应用前景。

关键词： 光纤光栅；温度传感器；玻璃焊料；稳定性；重复性

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2024)05－0726－06

Research on Temperature Sensing Characteristics of FBG Packaged with Glass Solder

YANG Wukun[1], ZHANG Yumin[1,2], SONG Yanming[1,2], TIAN Jing[1], WANG Du[1,2]

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

Abstract: A novel temperature sensing structure and packaging process for metal-encapsulated fiber Bragg grating (FBG) temperature sensors were proposed to overcome issues such as aging, creep, and other long-term effects typically seen in traditional adhesive-encapsulated FBG temperature sensors. Finite element analysis was used to design a strain-insensitive sensor. In this new design, glass solder replaced traditional epoxy resin adhesive to secure the FBG to a stainless steel substrate through two-point welding, while a metal shell and silicone rubber provided sealing protection. The FBG temperature sensor demonstrated a temperature sensitivity of 27.46 pm/℃ within the range of －20 to 55 ℃, with a linear fitting degree of 0.999. The sensor exhibited excellent temperature stability and repeatability, achieving a measurement standard deviation of less than 0.003 ℃ across a broader temperature range of 0 to 150 ℃. This packaging structure offers a simple, cost-effective, and easily implementable sensor technology, with promising application prospects in the field of structural health monitoring.

Key words: fiber Bragg grating; temperature sensing; glass solder; stability; repeatability

收稿日期：2024－05－21.

基金项目：北京学者计划项目(BJXZ2021-012-00046).

* **通信作者：**张钰民

0　引言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器，因其具有抗电磁干扰能力强、传输损耗低、体积小、高稳定性等优点，被广泛应用于各种复杂系统的健康检测中，例如桥梁[1]、土木建筑[2]、岩石[3]等。相较于传统的电学传感器，后者往往体积大、重量重且易受电磁干扰，光纤传感器则可以应用在电磁环境复杂，以及需要轻量化传感的场景中。

由于 FBG 裸栅的灵敏度、温度稳定性和重复性较差，需要使用不同材料或特殊工艺对 FBG 进行封装，以此得到更高性能、安全可靠的温度传感器。目前，常使用胶粘剂将 FBG 与热膨胀系数较大的金属或聚合物材料的基底相连接[4]，又或是通过特殊的增敏结构设计，来提高传感器的灵敏度和长期测量的可靠性。2022 年，刘明尧等[5]研究了使用环氧树脂胶作为粘接剂的黄铜管封装 FBG 传感器在低温下的温度传感特性，在 80～300 K 温度范围内，其灵敏度可达 26 pm/K，线性度为 0.996，相较于裸 FBG 温度传感器均有较大提升。但是普通的胶粘剂与传感器基底和光纤在材料特性方面存在较大差异，胶粘层作为力学传递的中间层，难以保证层与层之间应变的精确传递。并且经长时间的使用后，胶粘剂会出现蠕变及老化等问题[6-8]。

2013 年，马晓川等[9]设计了一种双金属增敏装置，通过低温玻璃焊料固定焊接 FBG，得到了温度灵敏度系数达到 345.9 pm/℃的 FBG 温度传感器。同年，刘浩等[10]发现金属化粘接层封装传感器的应变传递特性优于环氧胶粘接层封装传感器，且其稳定性更好。2018 年，谢仁伟等[11]分析了 FBG 的预拉伸幅度和玻璃焊料粘结层厚度对温度传感器稳定性的影响，该传感器在低温环境下稳定性良好。杨洋等[12]对比了全金属化封装工艺和胶装工艺制作的压力传感器的性能，研究结果表明金属化封装基本不存在蠕变现象，且其灵敏度是使用 353ND 胶粘剂制成的 FBG 传感器的 3.4 倍。但是全金属化封装对于设备和工艺的要求较高，且成本较高。相较于环氧树脂型胶粘剂和金属焊料，玻璃焊料与光纤本身的性质更为接近，封装更加牢固，稳定性更好，抗蠕变和抗老化性能好。

本文设计了一种新的 FBG 温度传感器封装结构与工艺，使用玻璃焊料将 FBG 封装在不锈钢金属基底上，提高传感器的温度灵敏度，将传感基底密封在金属保护外壳中，提升传感器的机械强度和应力不敏感性。通过实验验证了所制作的 FBG 温度传感器在－20～55 ℃范围内的温度传感特性，结果表明该种封装的传感器温度灵敏度为 27.46 pm/℃，线性度好、温度测量的稳定性和重复性高。长期保存后，在 0～150 ℃的大温度范围内，温度的测量误差小于 0.27 ℃，即温度测量的稳定性和重复性高。

1　FBG 温度传感原理

FBG 是通过激光刻写等特殊方法，在光纤纤芯轴向位置上形成周期性的折射率分布，实现滤波作用。当入射光进入光纤后，FBG 区域将会满足布拉格条件[13-14]的入射光反射，即：

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

式中，n_{eff} 表示纤芯的有效折射率，Λ 表示 FBG 的折射率调制周期。两个参量均会受到外界环境变化的影响，如温度、应变、振动、湿度等因素，这些物理量的变化会导致 FBG 中心波长漂移，因此，检测 FBG 的中心波长变化就可以逆向实现对环境因素的传感测量。

当温度变化时，光纤会发生热胀冷缩和热光效应，FBG 位置处会随之发生延展和收缩，从而导致有效折射率和光栅周期发生变化，经过数学推导可以得到 FBG 温度传感的数学模型[15-16]，即：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda} = \frac{1}{n_{eff}}\frac{dn_{eff}}{dT}\Delta T + \frac{1}{\Lambda}\frac{d\Lambda}{dT}\Delta T \tag{2}$$

$$\Delta\lambda_B = \lambda(\varepsilon + \alpha)\Delta T \tag{3}$$

式中，$\Delta\lambda_B$ 表示温度变化引起的中心波长漂移，ε 为热光系数，α 为热膨胀系数。

由于 SiO_2 材料的特殊性，若直接对裸 FBG 进行操作不仅容易使其发生损坏，且其温度灵敏度仅为 10 pm/℃左右，在很多环境下都不能满足测量需求。由公式(3)可知，提高 FBG 灵敏度的方法包括提高其热光系数或热膨胀系数[17]。因此，在 FBG 的材料属性已经确定的前提下，对 FBG 进行增敏结构设计是提高 FBG 温度传感器灵敏度的可行解决方案。具体而言，即采用具有较高热膨胀系数的材料作为 FBG 传感器的基底，此时 FBG 的温度响应可表示为：

$$\Delta\lambda_B = \lambda[(\varepsilon + \alpha) + (1 - P_e)(\alpha_{sub} - \alpha)]\Delta T \tag{4}$$

式中，α_{sub} 表示封装基底材料热膨胀系数，不锈钢的热膨胀系数为 1.5×10^{-5} ℃$^{-1}$；P_e 约为 0.22，可得理论上不锈钢基底 FBG 温度传感器的灵敏度应为

28.2 pm/℃。

2 传感器设计与封装

2.1 有限元分析

本文所设计的 FBG 温度传感器基本结构如图 1 所示。该传感器主要由 FBG、玻璃焊料、FBG 传感器不锈钢基底、硅橡胶层、FBG 传感器外壳构成。

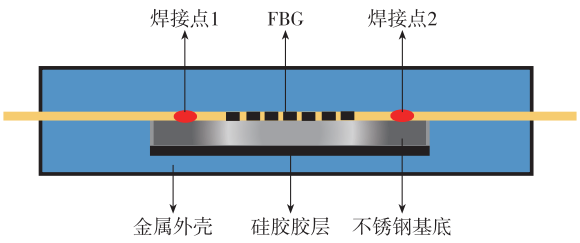

图 1 FBG 传感器结构示意图

运用有限元仿真分析软件对所设计的金属封装式 FBG 温度传感器结构进行建模仿真[18]，实体单元模型的选择为六面体单元，对模型进行扫掠式网格划分，使得网格划分更加均匀，提高计算精度，得到更加接近真实值的仿真结果。将模型一端固定，对传感器底部外壳施加 500 με 的应变量，所得传感器整体等效应变分布如图 2 所示。从图中可知当传感器外壳受到外部应力作用时，传感器底部外壳发生明显的应力变化，传感器基底和光纤部分并未发生明显的应力分布变化，外壳的应力并未通过硅橡胶层传递到其他部分，这表明所设计的传感器外壳能够有效排除外部应力干扰，减少光纤所受到的外力冲击，起到保护传感器的作用。所设计的 FBG 温度传感器对外部应力不敏感，可以提高温度测量的精度，使 FBG 传感器的温度稳定性和重复性更好。

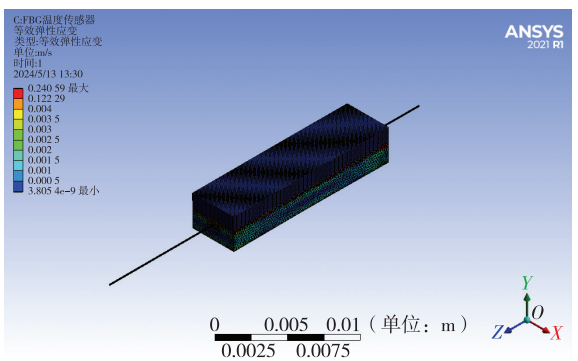

图 2 有限元仿真结果

2.2 传感器制作

传感器的封装制作分为两步：1）首先，将清洁过的光纤使用带有夹具的移动平台固定，并进行约 7 nm 的预拉伸，使用两点式焊接的方法，把玻璃焊料作为粘接层，将 FBG 焊接到传感器基底，冷却后使用光谱仪观测得到 FBG 中心波长相较于裸光纤时中心波长发生了约 2 nm 的红移；2）使用硅橡胶将基底与传感器外壳相粘接，并固化 24 h，FBG 温度传感器封装完毕。封装过程应排除操作失误对传感器的传感性能造成影响，本文所使用的 FBG 传感器的封装实物如图 3 所示。

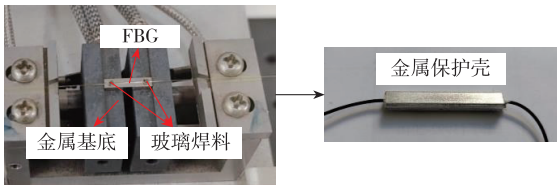

图 3 FBG 温度传感器封装实物照片

3 传感器标定和测试

传感器封装制作完成后，进行 FBG 温度传感器的标定实验，实验装置如图 4 所示，主要由深井台式恒温槽（FLUKE 7381，温度控制范围为 −80～110 ℃）、光纤光栅解调仪（波长范围为 1 528～1 568 nm，分辨率为 0.8 pm）、热电偶（精度为 0.1 ℃）、FBG 传感器和计算机组成。将 FBG 的反射光接入光纤光栅解调仪，对其温度变化过程中光纤光栅中心波长的变化进行实时监测与数据采集。将封装好的 FBG 温度传感器放置在深井台式恒温槽中，首先控制温度升至 55 ℃，待中心波长示数稳定后，温度步进设为 15 ℃，并逐渐降温至 −20 ℃，每个温度下持续时间为 3.5 h。

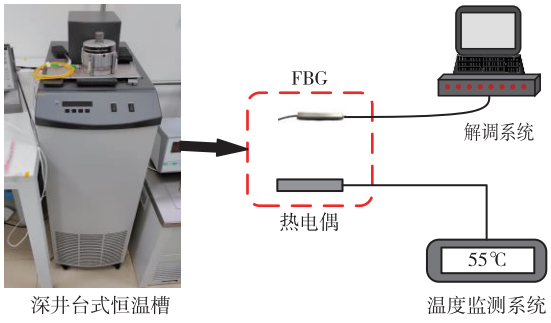

图 4 −20～55 ℃ FBG 传感器温度特性实验装置

在标定实验的基础上，检验所设计并制作的 FBG 温度传感器的测量可重复性和长期温度稳定性。在 −20～55 ℃ 内，每隔 15 ℃ 设置一个温度间隔点，共 6 个点，进行 3 个循环的升降温实验，使用

解调仪记录 FBG 中心波长的改变。为了保证实验的准确度，要使传感器结构充分受热，在每个温度点下持续测量 3.5 h。

在上述实验的基础上，进一步对 FBG 传感器在大温度范围内的温度稳定性和可重复性进行实验检验，实验所用到的温度控制装置改为高精度温度校准槽（JULABO FK30-SL，温度控制范围为－30～200 ℃）。实验中温度变化范围为 0～150 ℃，温度步长为 30 ℃，每个温度点的稳定测量时间大于 1 h，共进行三个温度循环的升降温测量。如图 5 所示为在 0～150 ℃大温度范围内 FBG 传感器温度特性的实验装置。

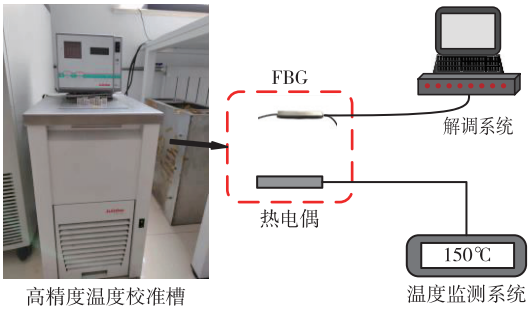

图 5　0～150 ℃ FBG 传感器温度特性实验装置

4　实验结果与分析

通过深井台式恒温槽调节温度在－20～55 ℃范围内，进行传感器标定，将每个温度稳定阶段测量得到的中心波长的平均值作为该温度下 FBG 的中心波长，使用最小二乘法对其进行拟合，可以得到 FBG 中心波长和温度的响应关系，拟合曲线如图 6 所示，拟合方程为：

$$\lambda_{FBG}=0.027\,46T+1\,560.435\,3 \tag{5}$$

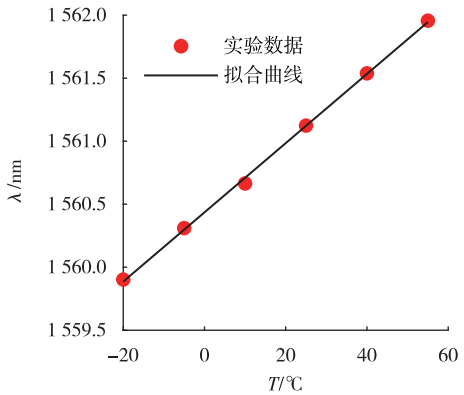

图 6　中心波长与温度拟合曲线

结果表明 FBG 的温度特性曲线具有良好的线性关系，拟合系数大于 0.999，拟合曲线的斜率表示 FBG 传感器的温度灵敏度，FBG 的温度灵敏度为 27.46 pm/℃，略低于理论值 28.2 pm/℃，相对误差为 2.6%。

通过光纤光栅解调仪采集温度循环实验中 FBG 的中心波长变化信息，可以作为评价 FBG 质量和温度传感特性的重要指标。如图 7 表示三次温度循环过程中 FBG 的中心波长随温度的变化关系，从图中可以看出在同一温度稳定点，FBG 传感器中心波长都具有较好的重复性，根据测量得到的数据可以计算出 FBG 在－20～55 ℃范围内的 6 个温度测量点下的最大温度偏差分别为 0.24，0.18，0.17，0.15，0.18，0.15 ℃。上述结果表明本文所使用的传感器结构和制作工艺可以使得 FBG 传感器具有较好的温度测量可重复性。

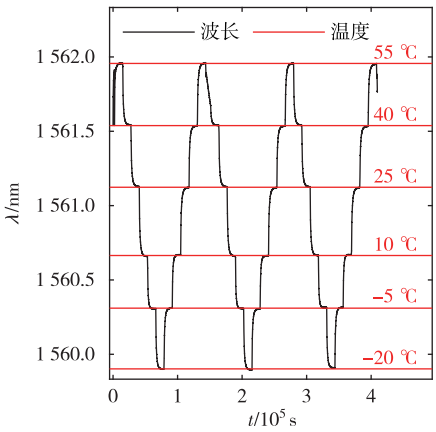

图 7　－20～55 ℃ FBG 中心波长随温度变化曲线

根据实验测量数据，可以得到在一个升降温循环内，同一温度点、同一时间段内的温度波动情况。图 8 反映了在 55，40，25，10，－5，－20 ℃下，当温箱

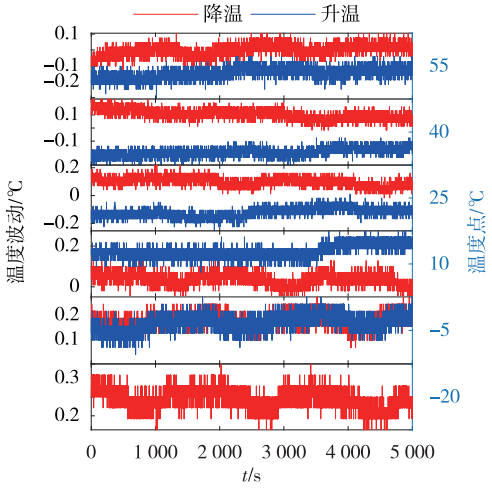

图 8　－20～55 ℃升降温过程中温度测量点的温度测量稳定性曲线

温度稳定后，FBG 所测量的温度稳定性情况，可以看出在升温和降温的情况下，所有温度点下的温度波动均小于 0.2 ℃，可计算出所有温度点下的测量标准差小于 0.001 ℃，说明该 FBG 温度传感器具有良好的温度测量稳定性。

设置目标温度为 0 ℃，对 FBG 温度传感器的测温精度进行检测，根据公式(5)得到的中心波长和温度的关系，可得到 FBG 的温度测量值为 0.24 ℃，测量结果表明 FBG 的温度测量误差在 ±0.24 ℃以内。根据上述结果可以认为，该传感器的材料选择、结构设计和封装工艺可以有效提高 FBG 的温度灵敏度，以及提高 FBG 的温度重复性和温度稳定性。

为进一步探究所设计 FBG 传感器的稳定性和可重复性等温度特性，将上述实验用到的传感器放置 50 天后再进行实验测量。如图 9 表示在 0～150 ℃大温度范围内，FBG 中心波长随温度的变化曲线。图 10 表示在 0～150 ℃温度变化范围内，即一个升降温周期内，当温箱温度稳定后，FBG测量的6个温

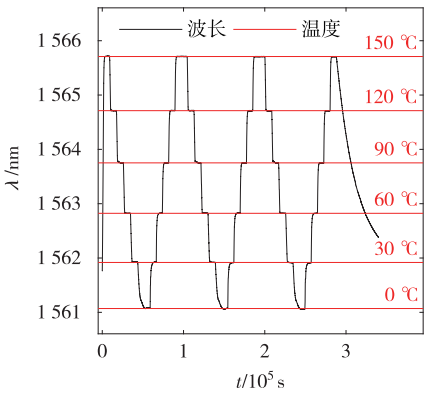

图 9 0～150 ℃ FBG 中心波长随温度变化曲线

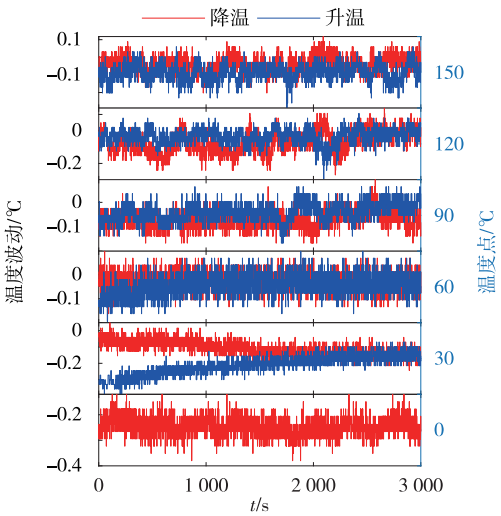

图 10 0～150 ℃升降温过程中温度测量点的温度测量稳定性曲线

度测量点的温度稳定性情况。6 个温度点的测量误差分别为 0.13，0.27，0.09，0.08，0.01，0.03 ℃，所有温度点下的测量标准差均小于 0.003 ℃，图中结果表明在大温度范围内该传感器仍然具有良好的温度测量可重复性和稳定性。

5 结论

FBG 本身温敏特性较差，无法满足实际工程监测要求。为提高其温度灵敏度、温度稳定性和重复性，本文使用有限元分析的方法进行 FBG 温度传感器结构设计，该结构具有应力不敏感性，使用玻璃焊料代替传统胶粘剂作为粘接层材料，对 FBG 进行金属表贴式封装固定，相较于传统的胶封传感器，其具有更好的抗蠕变、抗老化能力。在 −20～55 ℃的温度环境下，所制作的 FBG 温度传感器温度灵敏度系数达到了 27.46 pm/℃，线性拟合度达到 0.999，FBG 的温度波动小于 0.2 ℃，温度稳定性和重复性良好。且该温度传感器在 0～150 ℃的大温度范围内依然具有很好的温度稳定性和重复性。该 FBG 温度传感器制作方便，且具有良好的温度传感性能，可用于长期和恶劣环境下的工程测量。未来将进一步优化制作工艺，并使用新材料以获得更高性能的 FBG 温度传感器，使其在航空航天等领域中得到更加广泛的应用。

参考文献：

[1] Chan T H T, Yu L, Tam H Y, et al. Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation[J]. Eng. Struct., 2006, 28(5): 648-659.

[2] Li H N, Li D S, Song G B. Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering[J]. Eng. Struct., Elsevier, 2004, 26(11): 1647-1657.

[3] Zheng Y, Zhu Z W, Xiao W, et al. Review of fiber optic sensors in geotechnical health monitoring[J]. Opt. Fiber Technol., 2020, 54: 102127.

[4] Wnuk V P, Mendez A, Ferguson S, et al. Process for mounting and packaging of fiber Bragg grating strain sensors for use in harsh environment applications[J]. Proc. of SPIE, 2005, 5758: 46-53.

[5] 刘明尧，张伟伟，宋 涵. 低温环境下 FBG 温度传感特性研究[J]. 半导体光电，2022，43(2)：327-331.
Liu Mingyao, Zhang Weiwei, Song Han. Study on temperature sensing characteristics of FBG in low temperature environment [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(2): 327-331.

[6] Zhang Y, Zhu L, Luo F, et al. Comparison of metal-packaged

and adhesive-packaged fiber Bragg grating sensors[J]. IEEE Sensors J.，2016，16(15)：5958-5963.

[7] Fusiek G，Rubert T，Niewczas P，et al. Preliminary characterization of metal-packaged fiber Bragg gratings under fatigue loading[C]// 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technol. Conf.（I2MTC），2017：1-4.

[8] 丁旭东，张钰民，夏嘉斌，等. 金属化封装光纤光栅传感器超低温特性研究[J]. 激光与红外，2017，47(6)：773-777.
Ding Xudong，Zhang Yumin，Xia Jiabin，et al. Study on ultralow temperature characteristics of metallic packaging FBG sensor[J]. Laster & Infrared，2017，47(6)：773-777.

[9] 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.
Ma Xiaochuan，Zhou Zhen'an，Liu Aichun，et al. A high-sensitivity and stable fiber Bragg grating temperature sensor [J]. J. of Optoelectronics·Laser，2013，24(7)：1245-1250.

[10] 刘　浩，陈伟民，章　鹏，等. 金属化粘接层对 FBG 应变传感性能的影响[J]. 光电子·激光，2013，24(4)：642-648.
Liu Hao，Chen Weimin，Zhang Peng，et al. Influence of metal bonding layer on strain sensing performance of FBG[J]. J. of Optoelectronics·Laser，2013，24(4)：642-648.

[11] 谢仁伟，张学智，王　双，等. 光纤光栅温度传感器稳定影响因素研究[J]. 光电子·激光，2018，29(4)：363-369.
Xie Renwei，Zhang Xuezhi，Wang Shuang，et al. Research on influencing factors of FBG temperature sensors stability[J]. J. of Optoelectronics·Laser，2018，29(4)：363-369.

[12] 杨　洋，郑一博，杨　洋，等. 光栅与基片的连接对光纤光栅压力传感器的影响[J]. 光电技术应用，2018，33(1)：71-76.
Yang Yang，Zheng Yibo，Yang Yang，et al. Influence of connection of grating and substrate on fiber grating pressure sensor[J]. Elector-Optic Technol. Application，2018，33(1)：71-76.

[13] Erdogan T. Fiber grating spectra [J]. J. Lightwave Technol.，1997，15(8)：1277-1294.

[14] 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. Study on sensitivity and accuracy of Bragg grating temperature sensor for spacecraft environment[J]. Computer Measurement & Control，2019，27(10)：289-293.

[15] 詹亚歌，蔡海文，耿建新，等. 铝槽封装光纤光栅传感器的增敏特性研究[J]. 光子学报，2004，(8)：952-955.
Zhan Yage，Cai Haiwen，Geng Jianxin，et al. Study on aluminum groove encapsulating technique and sensing characteristeristics of FBG sensor[J]. Acta Photonica Sinica，2004，(8)：952-955.

[16] 何　伟，徐先东，姜德生. 聚合物封装的高灵敏度光纤光栅温度传感器及其低温特性[J]. 光学学报，2004，(10)：1316-1319.
He Wei，Xu Xiandong，Jiang Desheng. High-sensitivity fiber Bragg grating temperature sensor with polymer jacket and Its low-temperature characteristic[J]. Acta Optica Sinica，2004，(10)：1316-1319.

[17] 孙　安，乔学光，贾振安，等. 大范围光纤布拉格光栅温度传感器增敏实验研究[J]. 光学学报，2004，(11)：1491-1493.
Sun An，Qiao Xueguang，Jia Zhen'an，et al. The experimental study of large range enhanced temperature sensitivity concerning fiber Bragg grating temperature sensor[J]. Acta Optica Sinica，2004，(11)：1491-1493.

[18] 杜翠翠，孔德仁，徐春冬. 金属封装式 FBG 传感器设计及应变传递试验[J]. 湖南大学学报(自然科学版)，2023，50(4)：9-20.
Du Cuicui，Kong Deren，Xu Chundong. Design of metallic packaged fiber Bragg grating sensor and its strain transfer experiment[J]. J. of Hunan University：Natural Sciences，2023，50(4)：9-20.

作者简介：

杨武坤(1998—)，男，安徽省宿州市人，硕士研究生，主要研究方向为光纤传感技术与光电器件；

张钰民(1982—)，男，北京市人，博士，副教授，主要研究方向为光纤传感技术、光纤激光器。