

文章编号: 1672-8785(2023)11-0031-05

光纤光栅温度传感增敏方法研究

贾振安^{1,2,3,4} 史小宇^{1,2,3,4*} 禹大宽^{1,2,3,4} 樊 伟^{1,2,3,4}

(1. 西安石油大学理学院, 陕西 西安 710065;

2. 陕西省油气资源光纤探测工程技术研究中心, 陕西 西安 710065;

3. 陕西省油气井测控技术重点实验室, 陕西 西安 710065;

4. CNPC 重点实验室——油藏光纤动态检测研究室, 陕西 西安 710065)

摘 要: 针对裸光栅温度灵敏度较低的问题, 设计了一种封装方式并进行结构制作。所设计的封装方式是将光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)置入毛细玻璃管中, 并填充 353ND 环氧树脂胶, 最后固定在铜片基底上。首先对 FBG 温度传感及增敏机理进行了理论分析, 然后进行结构的设计及制作, 最后进行温度传感测试。聚合物 353ND 和铜片的热膨胀系数显著高于裸光栅, 在外界温度发生变化时会对光纤光栅施加附加应力, 从而提高其温度灵敏度, 并保护 FBG 传感器的结构。实验结果表明: 在 40℃ 至 140℃ 的温度传感测试中, FBG 的反射波长保持着不错的线性; 温度灵敏度由增敏前的 10 pm/℃ 提升到了 21 pm/℃ 左右, 且温度传感特性拟合曲线线性度达到 0.996 以上。

关键词: 光纤传感; 光纤布拉格光栅; 温度传感; 封装增敏

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.11.005

Research on Sensitization Method for Fiber Bragg Grating Temperature Sensing

JIA Zhen-an^{1,2,3,4}, SHI Xiao-yu^{1,2,3,4*}, YU Da-kuan^{1,2,3,4}, FAN Wei^{1,2,3,4}

(1. School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Shaanxi Engineering Research Center of Oil and Gas Resource Optical Fiber Detection, Xi'an 710065, China;

3. Shaanxi Key Laboratory of Measurement and Control Technology for Oil and Gas Wells, Xi'an 710065, China;

4. Key Laboratory of CNPC-Research Laboratory for Optical Fiber Dynamic Detection of Oil Reservoirs, Xi'an 710065, China)

Abstract: Aiming at the problem of low-temperature sensitivity of bare grating, a packaging method is designed and its structure is made. The design packaging mode is as follows: fiber Bragg grating (FBG) is placed in a capillary glass tube, filled with 353ND epoxy resin adhesive, and finally fixed on the copper substrate. In

收稿日期: 2023-07-26

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(18JS093); CNPC 测井重点实验室基金项目(20216328)

作者简介: 贾振安(1959-), 男, 陕西咸阳人, 教授, 主要从事光纤光学、光纤传感、光纤通信等方面的研究。

***通讯作者:** E-mail: 599034182@qq.com

this paper, the mechanism of FBG temperature sensing and sensitization is analyzed theoretically, then the structure is designed and manufactured, and finally the temperature sensing test is carried out. The thermal expansion coefficient of polymer 353ND and copper sheet is significantly higher than that of bare grating, and additional stress is applied to the fiber grating when the external temperature changes, so as to improve its temperature sensitivity and protect the structure of FBG sensor. The experimental results show that the reflected wavelength of FBG maintains good linearity in the temperature sensing test from 40°C to 140°C. The temperature sensitivity increases from 10 pm/°C before sensitization to about 21 pm/°C, and the linearity of fitting curve of temperature sensing characteristics reaches more than 0.996.

Key words: fiber optic sensing; fiber Bragg grating; temperature sensing; encapsulation sensitization

0 引言

温度是生产生活中需要被准确测量的重要参数。FBG 具有对温度敏感的特性。当外界环境温度升高或降低时, 光纤布拉格波长会随之改变。测得反射波长即可得知外界温度, 因此 FBG 常被用于温度传感。相比于传统的测温传感器, FBG 传感器具有抗电磁干扰、成本低、尺寸小、质量轻等优点^[1]。在恶劣的工作环境中进行温度测量时, 该传感器具有更大的优势^[2]。此外, FBG 还被广泛用于压力^[3]、流量^[4]、振动^[5]等参数的测量。

FBG 的主要成分为 SiO₂。由于 SiO₂ 材料的特殊性, 若直接对裸光栅进行操作容易使其发生损坏, 且其温度灵敏度仅为 10 pm/°C 左右, 在很多环境下远远不能达到测量的标准。所以要对 FBG 进行一定的操作来提高其温度灵敏度。有两种比较直接的方法: 一是更换纤芯的材料来增大自身的热光系数和热膨胀系数; 二是使用精度更高的解调仪来进行解调。但是这两种方法的研究难度和成本较高, 并不便于实际应用。利用热膨胀系数较大的聚合物、金属^[6-7]对其进行封装或采用一定的制备方法对 FBG 表面进行金属镀层^[8-9]来提高光纤光栅的温度灵敏度是比较常用的增敏方式。通常根据实际应用选择不同的增敏方式。2016 年, 张翔等人^[10]将光纤光栅封装到铜管中, 在 -40°C~140°C 范围内实现了 FBG 温度灵敏度的提升。2018 年, 安佳等人^[11]将 LPG 包层腐蚀后置入金属外壳, 然后放进填充聚酰胺酸的试管中, 实现了灵敏度的大幅提升。

本文基于 FBG 温度传感及增敏原理, 设计了一种封装方式并进行结构制作, 即将 FBG 置入毛细玻璃管并填充 353ND 环氧树脂胶, 最后将其固定在铜片基底上。实验结果表明, 所提出的封装方式明显提升了温度灵敏度。

1 FBG 温度传感及增敏原理

FBG 是通过特殊制备方法刻写在光纤纤芯上的短周期光纤光栅。光通过 FBG 的反射中心波长 λ_b 可表示为^[12]

$$\lambda_b = 2n_{eff} \cdot \Lambda \quad (1)$$

式中, n_{eff} 和 Λ 分别为 FBG 的有效折射率和光栅周期, 且均受外界温度 T 和 ϵ 应力影响:

$$\Lambda = f(T, \epsilon) \quad (2)$$

$$n_{eff} = f(T, \epsilon, \lambda) \quad (3)$$

当温度和压力发生变化时, n_{eff} 和 Λ 会同时改变, FBG 的中心波长变化满足:

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_b &= \lambda_0[(\alpha + \xi)\Delta T + (1 - p_e)\epsilon] \\ &= \lambda_0[K_T\Delta T + K_\epsilon\epsilon] \end{aligned} \quad (4)$$

式中, α 为光纤的热膨胀系数, ξ 为热光系数, p_e 为弹光系数, K_T 为温度灵敏度系数, K_ϵ 为应变灵敏度系数。

由式(4)可知, 将 FBG 用于温度传感时应消除应力因素的影响, 使 FBG 只受温度作用。仅温度发生变化时, FBG 在热膨胀系数 α 和热光系数 ξ 的作用下, 中心波长变化可表示为

$$\Delta\lambda_b = \lambda_0(\alpha + \xi)\Delta T = \lambda_0 K_T \Delta T \quad (5)$$

由式(5)可知, FBG 温度传感增敏问题的核心是提升参数 K_T 。

如图 1(a)所示, 当温度升高时, FBG 的初始值会增大至 λ'_b ; 当温度降低时, λ'_b 会减小

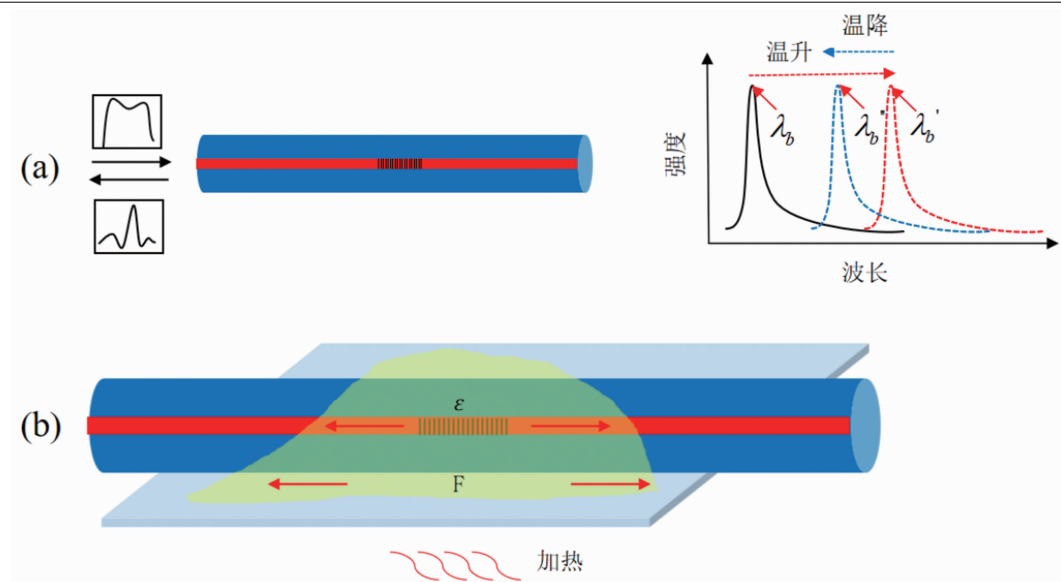


图 1 温度增敏原理图

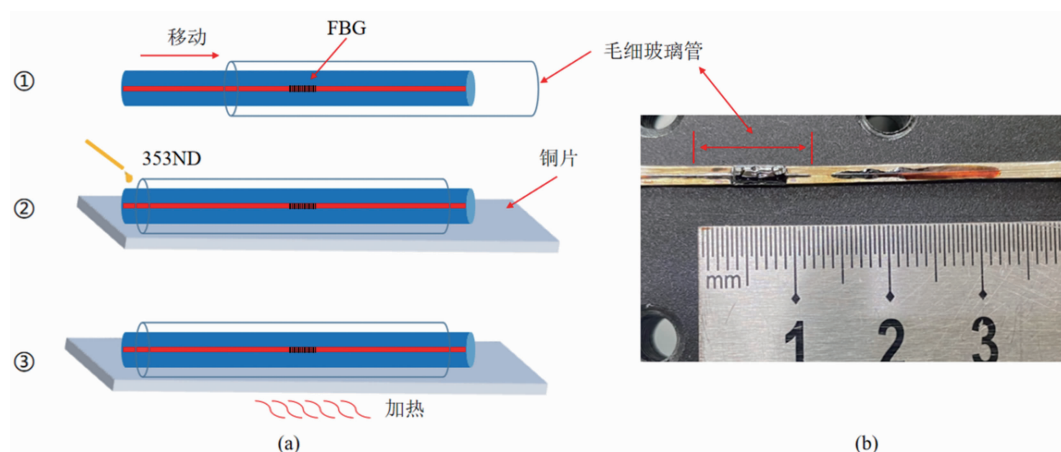


图 2 传感器制作过程及实物图

至 λ_0'' 。FBG 温度增敏的目的是在相同的温度变化情况下实现更大的中心波长偏移量, 以达到更高的测量精度。封装后光纤光栅的中心波长漂移量可表示为^[13]

$$\Delta\lambda_b = \lambda_0[(1 - P_e)(\alpha_s - \alpha) + (\alpha + \xi)]\Delta T \quad (6)$$

式中, α_s 代表的是聚合物和基底共同作用的热膨胀系数。当温度发生变化时, 热胀冷缩使封装材料产生应力并施加在 FBG 上, 导致栅区的长度发生变化。由以上分析可知, 封装增敏后 FBG 的中心波长漂移量会因外界物体的热胀冷缩而增加, 即温度灵敏度得到提高^[14]。图 1(b)为增敏的原理图。

2 传感器的制作

本文所提及的 FBG 温度增敏传感器的制

作过程及实物如图 2 所示。该传感器由 FBG、铜片、毛细玻璃管、环氧树脂胶构成。研究表明: 增敏所选的材料并不是决定传感器性能的唯一因素, 不同的封装工艺和技术对灵敏度有不同的影响。所以在操作过程中一定要排除操作不当对结果造成的影响^[15]。结构制作的具体流程分为三个步骤: (1)首先, 将实验所用的 FBG 穿过长度为 12 mm、内径为 200 μm 的毛细玻璃管, 并将毛细玻璃管固定在操作平台上。对 FBG 施加一定的预应力后(使光纤光栅保持张力), 通过操作移动平台以 20 μm 的步进精度移动 FBG, 使其处于毛细玻璃管的中心位置。(2)接着, 用细玻璃棒蘸取环氧树脂胶 353ND 滴入毛细玻璃管一侧。353ND 会在表

面张力和毛细管作用下填充光纤与毛细玻璃管的间隙。填充过程中应注意避免产生气泡而导致应力作用不均匀。完成填充后再利用 353ND 将上述结构封装在铜片基底上。(3)最后,将上述结构整体移至恒温加热台,在 100℃ 下加热 5 min 固化,完成传感器的制作。

3 实验与分析

3.1 实验装置

封装制作完成后,对其温度传感特性进行实验。实验设备由奈斯特真空干燥箱,分辨率为 1 pm、波长范围为 1510 ~ 1590 nm 的 SM125 光纤解调仪和 PC 组成。由 40℃ 至 140℃ 逐步加热,以 10℃ 为间隔进行测试实验。为了保证实验的准确度,要使传感器结构充分受热,所以在每个测量节点温度稳定 30 min。实验结构如图 3 所示。

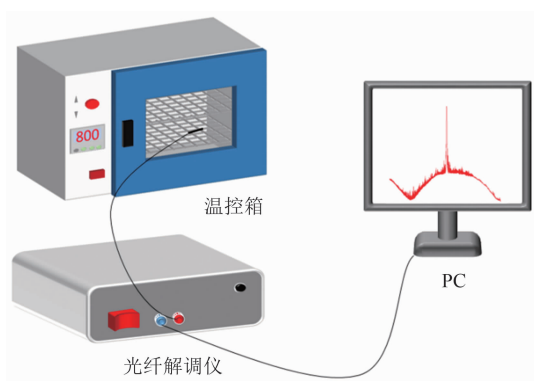


图 3 实验结构图

3.2 实验结果

为了验证所设计结构的温度增敏效果,首先对裸光栅进行温度传感测试,然后将增敏后的 FBG 温度响应与裸光栅进行比对,并重复进行温度传感测试来验证结构的稳定性。测试结果如图 4 和图 5 所示。通过对数据进行拟合可以得出两次测试中增敏后光纤光栅温度与 λ_b 的响应关系:

$$y_1 = 0.02134x + 1548.3815 \quad (7)$$

$$y_2 = 0.02147x + 1548.3724 \quad (8)$$

由数据分析可知,两次实验的温度响应特性曲线均保持不错的线性,拟合系数 R^2 为 0.99686 和 0.99773,温度灵敏度均达到 21

pm/℃ 以上,但裸光栅的温度灵敏度仅在 10 pm/℃ 左右;在 40℃ 至 140℃ 的温度测试中,封装后的 FBG 波长变化量达到了裸光栅的两倍。数据表明,该封装方式有效地提高了 FBG 的温度灵敏度,同时传感器具有良好的稳定性。

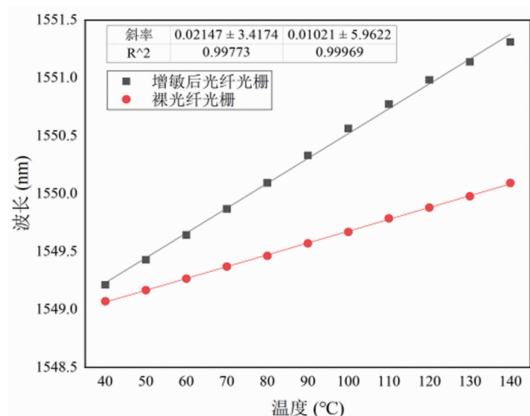


图 4 温度传感测试特性曲线 1

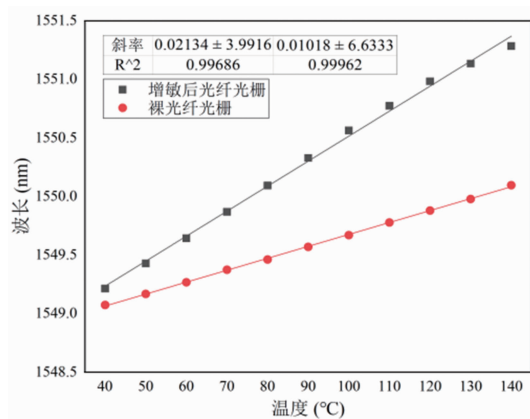


图 5 温度传感测试特性曲线 2

4 结束语

本文在理论分析 FBG 温度传感和增敏原理的基础上,围绕裸光栅温度灵敏度较低的问题对裸光栅进行封装设计及制作。将金属铜片作为基底,并用 353ND 聚合物进行封装,有效地提高了 FBG 的温度传感灵敏度。实验表明:所提出封装方式的增敏效果达到裸光栅的两倍。两次实验的拟合系数 R^2 均达到了 0.996 以上,且该传感器结构简单、成本低、易于实现,具有广阔的应用前景。未来的研究重点将放在引入新材料和新的封装方式上,以获得更

高的实用价值, 从而推动 FBG 传感器向微型化及产业化方向发展。

参考文献

- [1] Wang L T, Han H L. Design of an intelligent fiber Bragg grating temperature measurement system for electrical equipment [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, **1881** (2): 022003.
- [2] Wang H, Li C, Liang L, et al. Fast response characteristics of fiber Bragg grating temperature sensors and explosion temperature measurement tests [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, **354**: 114236.
- [3] 薛兆康, 国旗, 刘善仁, 等. 油气井下光纤光栅温度压力传感器[J]. *中国光学*, 2021, **14**(5): 1224.
- [4] Jiang Q, Gao F. Simulation and design of a fiber Bragg grating flow sensor [C]. *SPIE*, 2013, **8916**: 89162M.
- [5] Wei L, Jiang D Z, Yu L L, et al. A novel miniaturized fiber Bragg grating vibration sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, **19**(24): 11932–11940.
- [6] 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.
- [7] 魏昊文, 徐宁. 高灵敏度布拉格光纤光栅温度传感器 [J]. *光通信技术*, 2019, **43**(5): 1–4.
- [8] 赵劲凯, 汪洪, 贾金升, 等. 金属涂层光纤制备方法
- 方法与性能研究进展 [J]. *硅酸盐通报*, 2022, **41**(11): 3745–3755.
- [9] Wang X Y, Sun X Y, Hu Y W, et al. Highly-sensitive fiber Bragg grating temperature sensors with metallic coatings [J]. *Optik*, 2022, **262**: 169337.
- [10] 张翔, 谭跃刚, 陈宜炆, 等. 管式封装 FBG 大量程温度传感器及其特性研究 [J]. *现代机械*, 2016, **43**(6): 9–11.
- [11] 安佳, 王永杰, 李芳, 等. 采用聚酰胺酸层的高灵敏度长周期光纤光栅温度传感器 [J]. *红外与激光工程*, 2018, **47**(8): 346–352.
- [12] Gu Y F, Zhao Y, Lyu R Q, et al. A practical FBG sensor based on a thin-walled cylinder for hydraulic pressure measurement [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, **28**(22): 2569–2572.
- [13] Ren J, Liu Y, Gao H, et al. A hot-wire flowmeter based on polymer-filled extrinsic-phase-shift fiber Bragg grating [J]. *Optik*, 2023, **274**: 170571.
- [14] Sampath U, Kim D, Kim H, et al. Polymer-coated FBG sensor for simultaneous temperature and strain monitoring in composite materials under cryogenic conditions [J]. *Applied optics*, 2018, **57**(3): 492–497.
- [15] 李玉龙, 温昌金, 赵诚. 光纤光栅增敏封装工艺及装置研究现状 [J]. *激光与红外*, 2013, **43** (11): 1203–1211.