引用本文:赖俊斌,揭隽峰,陆东亮,等. 基于硅胶板封装的FBG温度传感器设计与性能研究[J]. 光通信技术,2026,50(5):34-38.

基于硅胶板封装的FBG温度传感器设计与性能研究

赖俊斌[1],揭隽峰[2],陆东亮[1],姜海明[2,3*],谢 康[2,3]

(1.广州质量监督检测研究院,广州 511447;2.广东工业大学 机电工程学院,广州 510006;
3.广东工业大学 精密电子制造技术与装备国家重点实验室,广州 510006)

摘要:针对传统光纤布拉格光栅(FBG)温度传感器灵敏度低和在特定应用场景(如表面贴合、抗机械干扰)中存在局限性的问题,设计一种基于硅胶板封装的FBG温度传感器。采用硅胶板封装结构设计,将裸FBG嵌入预制的硅胶基板凹槽中,利用硅胶良好的高热膨胀系数、导热性、柔韧性和粘附性实现封装。通过搭建温度标定实验系统,在设定温度范围内(20~100 ℃)对封装后的传感器进行温度响应特性测试。实验结果表明:硅胶板封装FBG温度传感器表现出良好的线性温度响应,灵敏度达到53 pm/℃,线性度优于0.998。与裸FBG相比,其灵敏度提升约5.3倍。

关键词:光纤布拉格光栅;温度传感;基片封装;硅胶增敏;温度灵敏度

中图分类号:TN253　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1002-5561(2026)05-0034-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.05.006

Design and performance research of FBG temperature sensor based on silicone plate packaging

LAI Junbin[1],JIE Junfeng[2],LU Dongliang[1],JIANG Haiming[2,3*],XIE Kang[2,3]

(1. Guangzhou Quality Supervision and Testing Institute,Guangzhou 511447,China;
2. School of Electromechanical Engineering,Guangdong University of Technology,Guangzhou 510006,China;3. State Key Laboratory of Precision Electronic Manufacturing Technology and Equipment,Guangdong University of Technology,Guangzhou 510006,China)

Abstract: Aiming at the low sensitivity and limitations of traditional fiber Bragg grating(FBG) temperature sensors in specific application scenarios such as surface bonding and resistance to mechanical interference,FBG temperature sensor based on silicone sheet packaging is designed. Adopting a silicone board packaging structure design, the bare FBG is embedded into a pre fabricated silicone substrate groove, utilizing the excellent high thermal expansion coefficient, thermal conductivity, flexibility, and adhesion of silicone to achieve packaging. By building a temperature calibration experimental system, the temperature response characteristics of the packaged sensor were tested within the set temperature range(20~100 ℃). The experimental results show that the FBG temperature sensor encapsulated in silicone plate exhibits good linear temperature response, with a sensitivity of 53 pm/℃ and a linearity better than 0.998. Compared with bare FBG, the sensitivity is increased by about 5.3 times.

Key words: fiber Bragg grating,temperature sensing,substrate packaging,silica gel sensitization,temperature sensitivity

0 引言

在众多温度传感器中,光纤布拉格光栅(FBG)传感器具备抗电磁干扰、体积小、结构简单、耐腐蚀等优点,被广泛应用于电力设备监测、煤矿安全监测、能源设施安全防护等领域[1-5]。然而,常规未封装FBG传感器的温度灵敏度仅约10 pm/℃,且质脆易断[6-8],难以满足复杂环境下的测温需求。因此,需通过封装提升其温度灵敏度并保护光栅[9]。

现有的FBG封装形式主要包括聚合物封装[10-11]、金属层镀膜封装[12]、金属管式封装[13-16]和基片式封装[17]

收稿日期:2025-09-26。

基金项目:国家自然科学基金项目(11874126)资助;广州市质量安全协同创新中心项目(2023B04J0407)资助。

作者简介:赖俊斌(1982—),男,高级工程师,硕士,现任广州质量检验研究院有源医疗器械及电子电气检验研究部副部长。主要研究方向为FBG传感技术及电子电气检测。主持参与广东省科技厅广东LED产业共性技术检测与研发创新服务平台项目建设;担任广东省质量工作专家库成员专家、广东省照明学会监事等。



***通信作者:**姜海明(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事光电子器件、光纤技术和测控技术等领域的研究。

等。聚合物封装方面,Nedoma J等人[18]采用聚二甲基硅氧烷(PDMS)封装,将温度灵敏度提升至39.44 pm/℃,但PDMS高黏度、长固化时间易导致固化不完全;孙庆华等人[21]使用改性丙烯酸酯和环氧树脂将预拉伸FBG封装于毛细锌管内,灵敏度分别达21.87 pm/℃和35.13 pm/℃,并展现出良好稳定性。基片式与金属封装方面,刘士华等人[19]选用高膨胀系数铝基底,灵敏度达36.3 pm/℃,但胶粘工艺严苛、难以量产;彭雄辉等人[20]利用铝与殷钢的热膨胀系数差异进行过渡配合,灵敏度达33.21 pm/℃;刘明尧等人[22]采用黄铜管金属管式封装,在80~230 K低温区间灵敏度达26 pm/K;杨武坤等人[23]针对胶粘老化与蠕变问题,提出玻璃焊料金属封装结构,在-20~55 ℃内灵敏度为27.46 pm/℃,线性拟合度0.999,长期稳定性优良。总体来看,现有方案虽在灵敏度提升上取得进展,但仍存在明显局限:PDMS、环氧等聚合物灌封灵敏度较高,却存在固化周期长、易固化不完全、长期老化蠕变及使用温域偏低等问题;金属基底粘贴、铜—殷钢过渡配合及金属管式封装虽提升了结构可靠性,但封装后体积大、刚度高,难以贴合曲面或狭小表面,柔性不足,抗机械振动与应变串扰能力有限,难以满足表面贴合、装备内嵌等工况需求。因此,兼顾高灵敏度、柔性贴合与长期稳定性的封装材料与结构仍亟待发展。

硅胶作为一种柔韧、高弹性的高分子封装基材,具备优异的柔韧性与弹性恢复能力(弹性模量通常为1~10 MPa),能有效缓冲机械冲击并适应曲面安装;同时具有出色的热稳定性与宽温适应性(工作温度范围可达-60~200 ℃甚至更高)、卓越的化学惰性(耐水汽、臭氧、紫外线及多种溶剂)、突出的耐老化性能以及良好的电绝缘性,是FBG温度传感器封装材料的理想选择。本文设计一种基于硅胶板封装的FBG温度传感器,通过基片式封装对FBG进行处理,以提升其机械防护性、环境稳定性并优化温度响应特性。

1 FBG温度增敏原理

当外界物理量发生变化时,FBG的反射中心波长将在一定范围内发生偏移,通过检测FBG的反射中心波长的偏移量,即可测量外界物理量的变化值。用λ_b表示反射回来的特定波长,其关系式为

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

式中:n_{eff}为光栅区折射率,Λ为光栅周期。

当温度T或者受到的压力ε发生变化时,会引起n_{eff}和Λ的变化,导致反射回来的波长λ_b发生偏移,FBG的反射中心波长变化$\Delta\lambda_b$可表示为

$$\Delta\lambda_b = \lambda_b[(\alpha+\xi)\Delta T + (1-P_e)\varepsilon] \tag{2}$$

式中:α为光纤的热膨胀系数,ξ为光纤热光系数,P_e为弹光系数,ΔT为温度变化值。

当使用FBG传感器测量温度时,要先消除外部压力的影响,确保FBG传感器仅受温度的作用。本文采用的硅胶板封装结构通过多种机制有效抑制了应变对FBG的影响:硅胶材料凭借其低弹性模量(1~10 MPa)和高柔韧性,能够吸收和分散外部机械应力,起到机械隔离与缓冲作用;在封装前对FBG施加恒定预应力,使其处于张紧状态,从而避免光栅随机弯曲并维持初始状态稳定;同时,FBG被嵌入硅胶板凹槽并通过环氧树脂胶固定。该封装结构约束了FBG的横向移动和弯曲,增强了整体机械稳定性,显著降低了环境应变的直接影响。因此,忽略式(2)中和外部压力相关的$(1-P_e)\varepsilon$项,则FBG的反射中心波长变化可以表示为

$$\Delta\lambda_b' = \lambda_b(\alpha+\xi)\Delta T \tag{3}$$

由式(3)可知,FBG传感器的温度灵敏度取决于$(\alpha+\xi)$的大小。将FBG进行封装后,FBG的中心波长漂移量可以表示为

$$\Delta\lambda_b'' = \lambda_b[(1-P_e)(\alpha_s-\alpha)+(\alpha+\xi)]\Delta T \tag{4}$$

式中:α_s表示封装材料的热膨胀系数。当温度发生变化时,由于热胀冷缩使封装材料产生应力并施加在FBG上,使栅区的长度发生变化。

由以上分析可知,封装后的FBG温度灵敏度只与封装材料的热膨胀系数有关,封装增敏后FBG的中心波长漂移量会因外界封装物体的热胀冷缩而增加,即温度灵敏度的增加。图1为温度增敏的原理图[25]。温度升高时,硅胶板受热膨胀,通过热膨胀力F挤压对栅区施加压应力导致栅区长度增加,即光纤光栅周期变化,从而导致反射中心波长进一步红移。

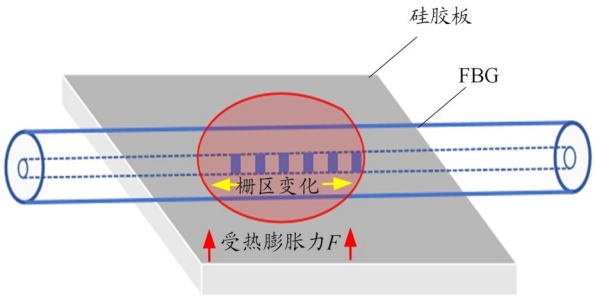
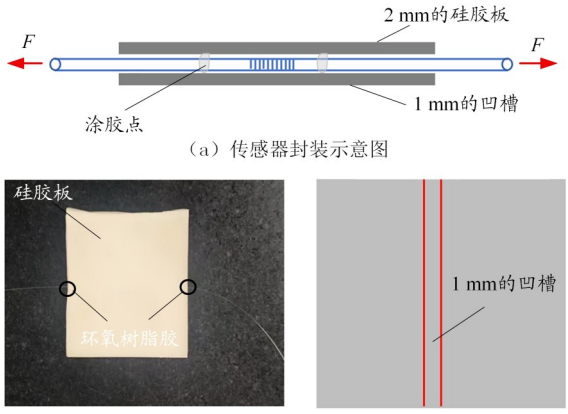


图1 温度增敏的原理图

2 传感器的设计与制作

本文设计的传感器采用“硅胶板—FBG—硅胶板”对称夹层结构,由上下硅胶板(厚为2 mm)、裸FBG和环氧树脂胶构成,传感器封装示意图及实物图如图2所示。下层硅胶板中央开设宽1 mm的凹槽,FBG沿槽轴线布置并使栅区位于硅胶板中心;在栅区两侧3~5 mm处采用环氧树脂胶点式锚固,上层硅胶板覆盖后形成整体封装。该设计既避免胶体直接覆盖栅区引起局部应力集中,又通过对称包覆限制光纤横向位移和弯曲,并保留硅胶板的柔性贴合能力。



(a) 传感器封装示意图

(b) 封装后的实物图　　(c) 底部硅胶板正视图

图2 传感器封装示意图及实物图

本文设计的传感器利用硅胶板与石英光纤之间的热膨胀系数差异实现温度增敏。温度变化时,硅胶板产生的轴向热变形通过两侧胶接锚固区传递至FBG栅区。除光纤自身的热膨胀效应和热光效应外,封装材料热膨胀引起的附加轴向应变与弹光效应都会使布拉格中心波长发生变化,从而提高温度灵敏度。实际增敏效果受硅胶板热膨胀系数、胶接位置与长度、界面粘结状态和应变传递效率共同影响。该结构预期在提高温度响应灵敏度的同时,增强FBG的机械防护、表面贴装适应性及测试重复性。硅胶板的具体热膨胀系数因其制作方式及所用填料的不同而存在显著差异[26-28],其热膨胀系数α_s在20×10^{-6}~300×10^{-6} ℃之间,FBG(主要成分为SiO_2)的热膨胀系数为0.55×10^{-6} ℃。

实验所用硅胶板长为20 mm、宽为20 mm、厚度为2 mm,底部的硅胶板中间开一个宽度为1 mm的凹槽并将FBG放置在中心凹槽中。首先,在封装前对FBG施加恒定预应力(使光栅保持张紧状态),这主要是为了克服自由状态下FBG固有的问题:未受约束的光栅容易发生随机弯曲,处于不稳定状态;若直接在此状态下封装,光栅将承受各向异性的应力(即不同方向受力不均)。这种初始状态的不确定性会直接导致后续温度实验中,每次测试的起始条件不一致,进而引起光栅反射波长漂移的非线性、失真及温度特性的整体不稳定。施加预应力能有效消除这种随机性,确保封装后FBG的波长-温度响应具有良好的一致性和可重复性。然后,用细玻璃棒蘸取环氧树脂胶滴入在距离FBG光栅区3~5 mm两侧,将另一块相同大小的硅胶板封装在FBG上方。最后,将上述结构整体加热10 min固化,完成传感器的制作。

3 实验分析

在封装制作完成后,本文对所设计的FBG传感器的温度传感特性进行测试。封装好的FBG温度传感器通过环形器连接超连续光源(型号:SC-5,厂家:YSL)和光谱分析仪(型号:AQ6370D,厂家:YOKOGAWA),并将其置于温控箱(型号:BPS-100CB,厂家:一恒)中。设置温控箱的温度从20 ℃开始,以10 ℃为间隔逐步升温至100 ℃,然后再以相同的温度间隔降温至20 ℃,在每个测量节点温度用光谱仪进行数据的读取,光谱仪的最小采样分辨率为0.001 nm。实验装置示意图如图3所示。

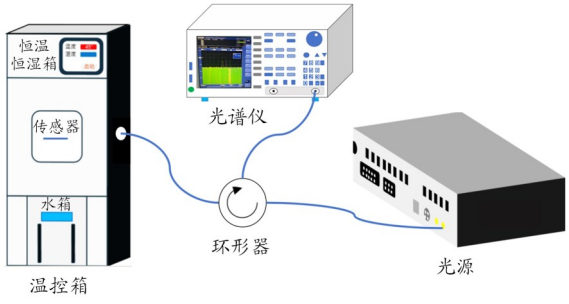


图3 实验装置(传感系统)示意图

3.1 灵敏度实验

为检验封装结构对温度传感性能的影响,将封装后FBG与裸FBG(封装前)的温度响应特性进行对比分析。实验过程中在每个温度下记录6个数值求其平均值,确保测量结果的可靠性。相关测试数据如表1所示。由表1可知,在20~100 ℃内,封装后FBG与裸FBG的中心波长平均值均随温度升高而单调增大。封装后FBG的中心波长由1 538.075 6 nm增至1 542.413 8 nm,累计红移4.338 2 nm;裸FBG则由1 537.866 9 nm增至1 538.669 9 nm,累计红移0.803 0 nm。前者的总波长漂移量约为后者的5.40倍,说明硅胶板

表1 封装前后FBG传感器温度试验结果

温度/℃	6次结果的中心波长平均值/nm	
	封装后FBG	裸FBG
20	1 538.075 6	1 537.866 9
30	1 538.727 5	1 537.958 3
40	1 539.262 8	1 538.055 6
50	1 539.743 3	1 538.152 7
60	1 540.342 8	1 538.263 7
70	1 540.758 5	1 538.365 1
80	1 541.337 1	1 538.462 3
90	1 541.836 8	1 538.569 7
100	1 542.413 8	1 538.669 9

的热膨胀变形能够有效传递至光栅区并显著增强FBG的温度响应。将表1数据经线性拟合后,得到封装前后的FBG温度传感器的温度-波长拟合曲线如图4所示。封装后FBG的温度响应保持高线性(线性度R^2=0.998),而裸FBG的基准灵敏度仅约10 pm/℃。在20~100 ℃温域内,封装后FBG传感器的波长漂移量约为裸FBG的5.3倍。因波长漂移量与灵敏度在相同温变条件下具有一致的倍数关系,故其温度灵敏度也约为裸FBG的5.3倍,说明该封装设计能大幅提升FBG的温度响应灵敏度。

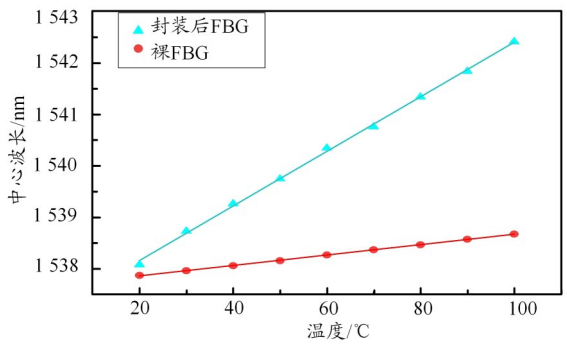


图4 封装前后FBG温度传感器的温度-波长拟合曲线

3.2 重复性实验

为评估封装后FBG传感器的可靠与重复性能,开展了5次温度升降循环实验,得到升温和降温阶段FBG传感器温度特性的拟合曲线如图5所示。可以看出,实验数据点在循环测试中均呈现吻合的趋势,表明FBG传感器表现出良好的可靠性及重复性。

3.3 稳定性试验

为评估封装后FBG在恒温环境下的波长稳定性,

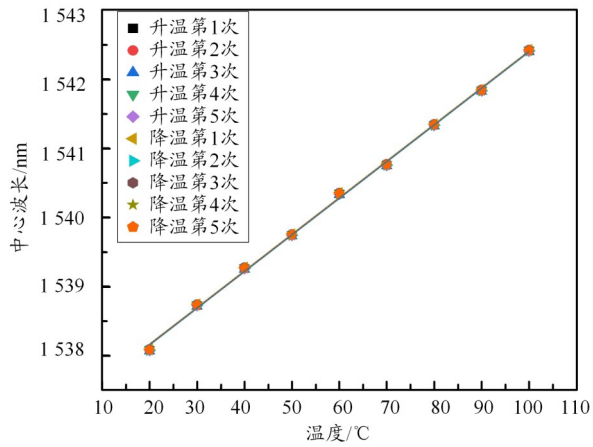


图5 FBG温度传感器的升降温度-波长拟合曲线

在恒温恒湿试验箱中设置了20、50、100 ℃这3个温度点进行测试。每个温度点均恒温保持120 min,待温度稳定后,每隔10 min记录一次FBG反射光谱中心波长数据,共记录12组,得到温度分别为20、50、100 ℃下的FBG反射光谱中心波长变化,如图6所示。可以看出,在恒定温度下,FBG反射光谱中心波长的波动幅

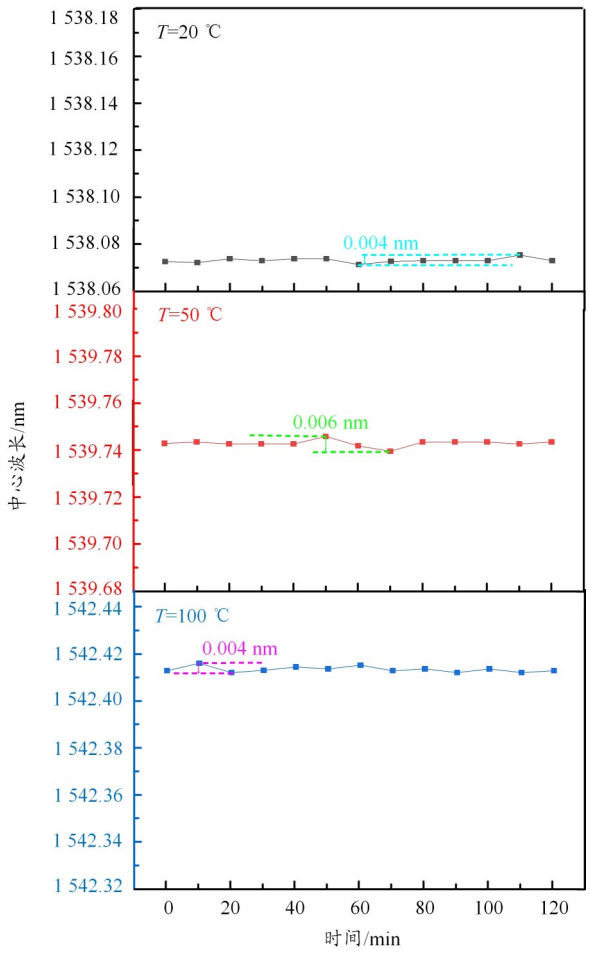


图6 FBG封装后不同温度下的稳定性测试

度极小。20 ℃时最大波动为0.004 nm,50 ℃时为0.006 nm,100 ℃时为0.004 nm,表明传感器具有良好的稳定性。

本文将所设计硅胶板封装结构的温度灵敏度提升情况与其他封装结构进行对比,结果如表2所示。可以看出,本文设计的硅胶板封装FBG传感器在温度灵敏度提升方面效果显著。

表2 不同封装结构的温度灵敏度对比

基底材料	温度灵敏度/(pm/℃)	线性度
铝—超殷钢[24]	34.3	0.999
铝—殷钢[20]	33.2	0.996
硅胶板	53	0.998

4 结束语

针对提升FBG温度传感器灵敏度的技术需求,提出了一种基于硅胶板封装的FBG温度传感器。通过封装材料的热膨胀系数与硅胶板材料特性,有效改善了裸FBG的温度响应特性。实验数据显示:在20~100 ℃温度区间,封装器件能保持优良的线性响应(拟合优度R^2>0.998),温度灵敏度提高至53 pm/℃,约为裸FBG温度灵敏度(10 pm/℃)的5.3倍。该温度传感器成本低、结构简单、制备便捷,兼具优良的温度传感性能、机械防护特性和重复性,可用于多种场合的物体表面温度测量。该封装技术为FBG温度传感器提供了一条结构简易、成本可控、易于大规模制造与部署的高性价比路径,在工业设备状态监测等领域具有广阔应用前景。

参考文献:

[1] 侯公羽,胡志宇,李子祥,等. 分布式光纤及FBG传感技术在煤矿安全监测中的应用现状及展望[J]. 煤炭学报,2023,48(S1):96-110.
[2] 王浩,曹珊珊,苏俊豪,等. 基于双包层光纤布拉格光栅传感器的锂电池组温度场监控[J]. 物理学报,2022,71(10):274-282.
[3] 张鼎博,李俊,张维,等. FBG传感技术在异形结构健康监测中的应用[J]. 激光与光电子学进展,2022,59(5):95-107.
[4] 刘春桐,张正义,李洪才,等. 基于FBG的液压系统中流量/压力/温度同时测量技术[J]. 光子学报,2016,45(11):16-22.
[5] 史雯慧,王浩,曹慧,等. 基于光纤布拉格光栅传感的锂电池内部状态原位监测[J]. 光子学报,2023,52(9):164-172.
[6] Somesh N, Chethana K, Srinivas T, et al. Investigation on FBG based optical sensor for pressure and temperature measurement in civil application[J]. Optoelectronics Letters, 2024, 20(9): 531-536.
[7] Zheng Yong, Zhu Zhengwei, Xiao Wang, et al. Review of fiber optic sensors in geotechnical health monitoring[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 54: 102127.
[8] 李玉龙,温昌金,赵诚. FBG增敏封装工艺及装置研究现状[J]. 激光与红外,2013,43(11):1203-1211.
[9] 周锋,李永倩,王劭龙. 光纤布喇格光栅传感器及其封装研究进展[J]. 光通信技术,2017,41(11): 8-11.
[10] 李群,陆云才,邵剑,等. 基于EpoCore胶裹覆的FBG传感器温度敏感性研究[J]. 光电工程,2024,51(12):76-86.
[11] 魏昊文,徐宁. 高灵敏度布喇格FBG温度传感器[J]. 光通信技术,2019,43(5):1-4.
[12] 刘明尧,张品,李聪. 基于FBG毛细钢管电镀封装结构的温度传感特性研究[J]. 仪表技术与传感器,2024(7):25-29.
[13] 廖开宇,孙庆华,欧阳华,等. FBG管式封装及其传感特性[J]. 光通信技术,2021, 45(12): 9-13.
[14] 任越,张钰民,钟国舜,等. 管式FBG高温传感器封装及温度特性[J]. 激光与红外,2020,50(5): 598-601.
[15] 张燕君,高海川,张龙图,等. 毛细铜管封装的内嵌式镀金光纤布拉格光栅温度和应力传感器[J]. 光电工程,2021,48(3):200195.
[16] 张锦龙,员琳,韩笑笑,等. 双层管式微型FBG传感器封装技术[J]. 光通信技术, 2019,43(6):5-8.
[17] 杜翠翠,孔德仁,徐春冬. 基片式FBG传感器加速度试验研究[J]. 应用光学,2022,43(1): 152-159.
[18] Nedoma J, Fajkus M, Bednarek L, et al. Encapsulation of FBG sensor into the PDMS and its effect on spectral and temperature characteristics[J]. Advances in Electrical and Electronic Engineering, 2016, 14(4): 460-466.
[19] 刘士华,陈涛,李瑞亚,等. 基片式FBG温度传感器胶粘贴效果对其性能影响的研究[J]. 光电子·激光,2016,27(7):692-698.
[20] 彭雄辉,黄安贻,左浩然. 基片式高灵敏度FBG温度传感器[J]. 中国测试,2017,43(7):134-138.
[21] 孙庆华,温昌金,李学文. FBG的毛细锌管封装及温度传感特性[J]. 应用激光,2018,38(4):678-681.
[22] 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.
[23] 杨武坤,张钰民,宋言明,等. 玻璃焊料封装FBG温度传感特性研究[J]. 半导体光电,2024,45(5):726-731.
[24] 徐学武,王红,潘家栋,等. 一种新型的基片式高灵敏度FBG温度传感器[J]. 光通信技术,2019,43(7):1-4.
[25] 贾振安,史小宇,禹大宽,等. FBG温度传感增敏方法研究[J]. 红外,2023,44(11):31-35.
[26] Zhou Wenying, Qi Shuhua, Tu Chunchao, et al. Novel heat-conductive composite silicone rubber[J]. Journal of applied polymer science, 2007, 104(4): 2478-2483.
[27] 周文英,齐暑华,涂春潮,等. 导热硅橡胶复合材料研究[J]. 航空材料学报,2007(1):33-36.
[28] 马腾飞,李桂洋,郭子民,等. 热膨胀硅橡胶性能对比及热物改性研究[J]. 材料工程,2023,51(12):151-158.