

文章编号:1001-5078(2018)09-1133-06

· 光纤及光通讯技术 ·

全金属化应变不敏感 FBG 温度传感器特性研究

戎丹丹¹, 张钰民¹, 杨润涛¹, 骆 飞¹, 祝连庆^{1,2,3}

(1. 北京信息科技大学光电信息与仪器北京市工程研究中心, 北京 100016;

2. 现代测控技术教育部重点实验室, 北京 100192; 3. 北京信息科技大学光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100192)

摘 要:为了解决传统胶封光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器存在严重胶蠕变和老化问题,提出基于一步超声波焊接的全金属化封装 FBG 传感器方法,采用有限元分析方法进行传感器的应变不敏感结构设计并制作了该温度传感器进行实验验证。测试结果表明,该方法制作的特定封装形式的 FBG 传感器对轴向应变不敏感,温度灵敏度达到 39.16 pm/℃,是封装前裸光栅的 4 倍,线性度超过 0.999,具有较好的重复性,并且温度从 20℃ 改变到 100℃ 的动态测量响应时间小于 30 s。该金属化封装 FBG 温度传感器的工艺简单,制作周期短,其优异的温度传感特性在高精度、高可靠性传感监测领域具有广泛的应用前景。

关键词:金属化封装;应变不敏感;光纤布拉格光栅;超声波焊接

中图分类号:TN929.11 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.09.013

Characteristics of strain-insensitive FBG temperature sensor via metallic packaging

RONG Dan-dan¹, ZHANG Yu-min¹, YANG Run-tao¹, LUO Fei¹, ZHU Lian-qing^{1,2,3}

(1. Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments,
Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China;

2. Key Laboratory of Modern Measurement Control Technology, Ministry of Education, Beijing 100192, China;

3. Beijing Key laboratory of Optoelectronic Test Technology, Beijing Information Science
and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: The phenomenon of creep and aging is ubiquitous in the traditional FBG sensors packaged by adhesive. To solve the problem, a kind of metallic-packaging FBG sensor based on one-step ultrasonic welding was proposed. Strain-insensitive structure of temperature sensor was designed by finite element analysis method, and the performance of temperature sensor was tested. The experimental results show that the metallic-packaging FBG sensor is insensitive to axial strain. And the temperature sensitivity reaches 39.16 pm/℃, which is as 4 times as that of bare FBG. The fitted linearity exceeds 0.999, and it has excellent repeatability. Furthermore, the dynamic response time is less than 30 s from 20℃ to 100℃. The metallic-packaging FBG temperature sensor had the advantages of simple process, short production cycle, and excellent temperature sensing characteristics. It has extensive prospect in the field of high-precision and high-reliability sensing.

Key words: metallic packaging; strain insensitive; fiber Bragg grating; ultrasonic welding

基金项目:教育部“长江学者与创新团队发展计划”项目(No. IRT-16R07);北京市优秀人才培养资助项目(No. 2015000020124G074)资助。

作者简介:戎丹丹(1996-),女,硕士研究生,主要从事光纤光栅传感及封装技术方面的研究。

通讯作者:祝连庆(1963-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为精密测量技术,光纤传感技术,光纤激光器技术及生物医学检测技术及仪器。E-mail:zhulianqing@sina.com

收稿日期:2018-01-15; **修订日期:**2018-03-07

1 引言

结构健康监测(SHM)在现代工程扮演着重要的角色,它能够实时把握工程结构的全寿命质量与安全状况,确保工程结构使用的安全性、完整性、适用性与耐久性^[1-2]。光纤布拉格光栅(FBG)由于具有体积小、抗电磁干扰、耐腐蚀、寿命长、复用性好等优点,被认为是用于长期结构健康监测的最理想传感元件之一^[3-4]。但裸FBG本身过于纤细、质脆、敏感度低,因此,在实际应用中需要对其进行封装保护或增敏。目前,通常使用高分子胶粘剂对FBG进行管式^[5-6]和基片式^[7-8]增敏封装,或直接采用胶粘剂将FBG通过开槽和粘贴的方式布设到待测结构上进行结构健康监测^[9]。而这些胶粘剂长期使用过程中容易老化和脱落,直接导致胶封传感器波长蠕变、测量失真甚至彻底报废^[10-11]。由于金属材料具有可焊接、耐久、性能相对稳定等特性,成为比较理想的FBG传感器全金属化封装方案^[12]。

全金属化封装FBG传感器采用特定方法在其表面结合一层金属,不但能提高灵敏度、增加响应速度,而且可以起到保护光栅的作用,发挥其耐久性优势^[13]。目前为止,国内外研究人员对FBG全金属化封装方法及封装后其传感特性做了许多研究。例如,X. C. Li等人^[14]采用磁控溅射法和电镀法结合对光纤光栅进行镀镍保护,并在此基础上研究了全金属化后的FBG的传感性能。Sekar等人^[15]采用真空蒸镀法在FBG表面镀上了一层铝和钯,研究结果表明,经全金属化的FBG的温度灵敏度有所提升,但镀层存在着内应力大等缺点。Xixi Zhang等^[16]提出使用激光辅助无掩模微相沉积纳米银和电镀镍相结合的方法制作出双材料微尺寸涂层FBG传感器,使得其温度灵敏度系数比裸光栅提高了一倍,但降低了力灵敏度。李玉龙等人^[17]采用化学镀镍结合电镀锌的方法对FBG进行金属化保护和温度增敏封装,得到镀层厚度不同的FBG传感器的温度灵敏系数是裸光栅的4~5倍,但是由于电镀造成的残余应力降低了全金属化封装FBG传感器的波长稳定性。目前非金属表面金属化的工艺方法无法一次性在光纤表面获得足够厚度金属涂层,因此主要思路是结合电镀方法对FBG进行二次镀膜以获得理想镀层厚度,往往制造过程复杂且成本过高。而一步超声焊接^[18]全金属化封装方法由于只需要对FBG进行一次封装,封装后的FBG传感器对比二次封装具有其特殊的优势^[19],为解决全金属化封装工程实际应用提供新思路。本文运用有限元分析

方法进行传感器的应变不敏感结构优化设计,采用一步超声焊接方法制作了全金属化封装FBG温度传感器,实验检验了其应变不敏感特性,以及温度灵敏度测试和温度响应特性可实现20~80℃内温度的测量,满足恶劣环境中的长时间温度测量需求。

2 基底设计原理和有限元分析

通常,为了提高光纤光栅的测量可靠性,以及满足使用环境和性能上的要求,需要对FBG进行增敏封装保护。对于基片式封装FBG温度传感器,封装基底材料会极大地改变FBG的传感特性,其温度响应 K_T 可表示为^[20]:

$$K_T = \frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = [\alpha + \xi + (1 - P_e)(\alpha_{\text{sub}} - \alpha)]\lambda_B \quad (1)$$

其中, α_{sub} 是封装材料的热膨胀系数。对纯石英光纤而言,通常有: $\alpha \approx 0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\xi \approx 6.67 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $P_e \approx 0.22$,因此只有改变基底材料的热膨胀系数 α_{sub} ,才能改变温度灵敏度系数 K_T 。当选用封装基底材料的热膨胀系数远大于光纤材料本身的热膨胀系数,即满足 $\alpha_{\text{sub}} \gg \alpha$,因此式(1)可以化简为:

$$K_T = [\xi + (1 - P_e)\alpha_{\text{sub}}]\lambda_B \quad (2)$$

由此可见,温度灵敏度系数 K_T 是一个与封装材料热膨胀特征有关的常数。对于选用封装基底材料为Al7075-T6铝合金的热膨胀系数为 $23 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,根据式(2),计算得到全金属化封装FBG传感器的温度灵敏度系数 K_T 理论值为39.55 pm/ $^\circ\text{C}$,是封装前裸FBG的4倍,能起到较好的温度增敏效果。

将Al7075-T6铝合金材料加工成一个“凸”字型结构的基底,如图1所示。凸起的上矩形部位用于粘贴在被测物表面,厚度为1.5 mm。在基底中央位置开了一个宽0.25 mm、深0.36 mm的细槽用于放置FBG。另外,在细槽对称两端的位置开了深度为0.56 mm的矩形凹槽用来放置超声焊锡进行FBG的金属化封装。

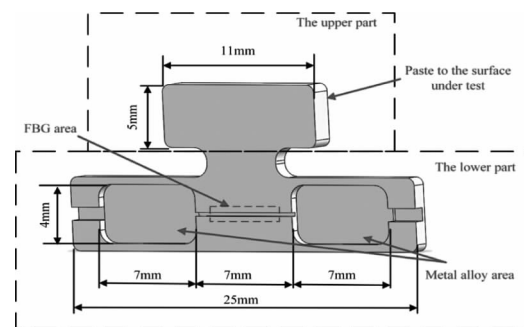


图1 FBG温度传感器的基底结构图

Fig. 1 Schematic of a FBG temperature sensor substrate

运用有限元分析软件对所设计的增敏型 FBG 温度传感器基底建立模型,选取 solid 实体单元模型,选择 Al7075-T6 铝合金作为基底材料,依照图 1 所示的设计尺寸建立模型。对基底进行扫略式网格划分,以确保网格划分相对均匀,提高计算精度,使得到的计算结果更接近实际,对试验件进行位移加载,固定试验件一端,另一端施加 $600\ \mu\text{e}$ 的应变。由底板通过基片两端胶层传递到基片上的应变如图 2 所示。结果显示,当等强度梁底板上的结构应力发生改变,用于粘贴到被测物表面的传感器基底上矩形部分明显受到压缩力,而用于放置 FBG 的下矩形部分未发生结构应力分布的改变。有限元仿真结果表明,当金属基底上矩形部分在受到轴向拉伸或压缩应变时,封装有 FBG 的位置的下矩形结构具有轴向应变不敏感性,从理论上证明了该封装基底结构的应变不敏感特性。

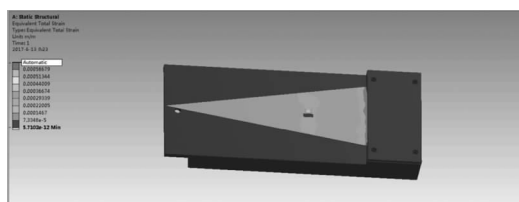


图2 有限元分析结果

Fig. 2 Finite element analysis results

3 传感器制作和实验

使用一步超声波焊接设备对 FBG 进行全金属化封装,同时用光谱分析仪监测焊接过程中光栅光谱的变化。一步超声波全金属化焊接封装 FBG 温度传感器制作的主要步骤:首先封装前对金属基体进行预处理,将 Al7075-T6 铝合金基体放置于纯酒精溶液中进行超声清洗,然后用蒸馏水反复清洗,将其放置在空气中自然风干。其次,将处理干净的铝合金基体放置在加热平台上,加热温度为 $300\ ^\circ\text{C}$,将光纤光栅放置于铝合金基体细凹槽正中心,光纤两端用夹具夹持,通过二维位移平台和光纤夹具对光纤光栅进行预拉伸。接着采用超声波焊接的方法用锡基金属合金把光纤栅区两端焊接在铝合金基体上,让焊锡均匀致密地分布在光栅两侧对称的矩形凹槽内。最后,关闭加热,让温度自然冷却到室温的状态,完成全金属化封装 FBG 温度传感器的制作,实物如图 3 所示。实验中使用的宽带光源为放大自发射(ASE)光源,输出功率为 $13.3\ \text{dBm}$,波段范围为 $1520\sim 1610\ \text{nm}$;光谱分析仪(OSA)为日本横河公司的 AQ6370D 型,其波长分辨率为 $0.02\ \text{nm}$,波长监测范围为 $600\sim 1700\ \text{nm}$;C+L 波段的 Ibsen 解

调仪,用于对 FBG 的反射光谱进行高精度解调,最小分辨率为 $2\ \text{pm}$;高低温测试箱型号为 GDW-100,其温度范围为 $-60\sim 150\ ^\circ\text{C}$,精度为 $\pm 0.5\ ^\circ\text{C}$;封装采用飞秒激光刻写的 II 型掺锗 FBG,反射率超过 60% , $3\ \text{dB}$ 带宽为 $0.47\ \text{nm}$,光栅长度为 $3.5\ \text{mm}$,中心波长为 $1565.84\ \text{nm}$ 。

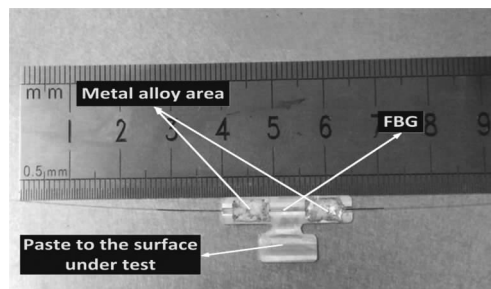
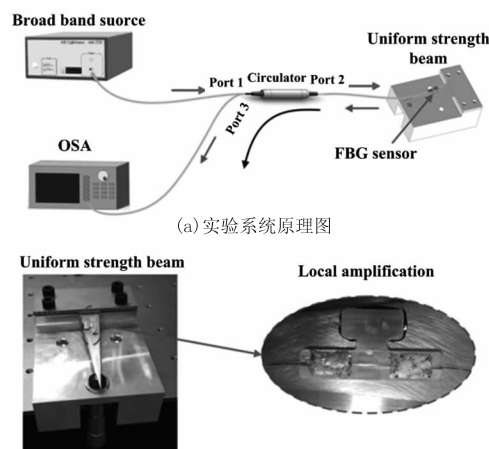


图3 一步超声焊接全金属化 FBG 温度传感器实物图

Fig. 3 Photograph of FBG temperature sensor

为研究该全金属化封装温度增敏 FBG 传感器的应变传感特性,用等强度梁测试平台对传感器进行了应变压缩及拉伸实验,搭建如图 4(a)所示的应变不敏感测试实验系统。系统中的 ASE 光源和 OSA 分别与光纤环形器的 1 端口和 2 端口相连接,OSA 测得传感器的反射光谱。等强度梁应变仪加载应变细节如图 4(b)所示,实验设计将传感器用 353D 环氧树脂胶粘贴到经过抛光处理的等强度梁上,先把传感器按如图所置于等强度梁的上表面,接着将等强度梁固定到应变仪上,通过调节高精度微分头加载应力实现对 FBG 的压缩,而当传感器置于等强度梁的下表面,调节微分头就可以实现对 FBG 的拉伸。



(a) 实验系统原理图

(b) 传感器粘贴到等强度梁细节图

图4 应变特性测试及 FBG 传感器粘贴方式

Fig. 4 Strain-sensing characteristic experiment systems and gluing method of FBG sensor

将全金属化封装温度增敏 FBG 传感器放置在高低温测试箱内,从室温为 20 ℃ 开始加热,设置高低温测试箱加热间隔为 10 ℃,一直加热到 80 ℃,对传感器的温度传感特性进行标定实验,并用 OSA 和高精度解调仪同时对传感器的反射光谱进行监测。

4 实验结果和分析

4.1 全金属化封装前后光谱分析

图 5 表示全金属化封装前后 FBG 反射光谱变化。经过高斯拟合得到的全金属化封装 FBG 传感器反射光谱的中心波长为 1568.54 nm,相较于封装前波长发生了 2.7 nm 的红移。对比封装前后 FBG 的反射光谱,光谱形状未发生双峰或畸变现象,信噪比高。

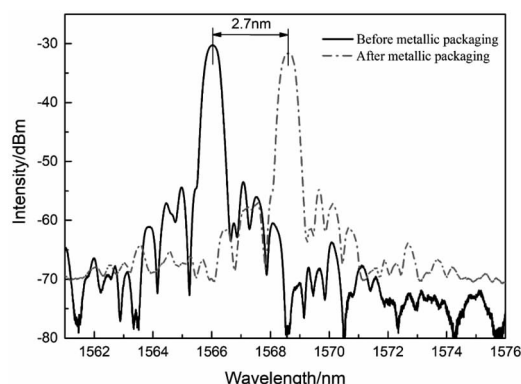


图 5 全金属化封装前后 FBG 传感器反射光谱的变化
Fig. 5 Reflection spectra of the FBG sensor before and after the metallic packaging

4.2 应变传感测试结果及分析

在室温 20 ℃ 温度环境下,进行压缩和拉伸的加载卸载实验,图 6 为反射波长和应变加载的关系。为了获得稳定的布拉格波光波长,每一次改变施加应力大小都持续 10 min 的时间。从图 6 (a)可以看出全金属化封装的 FBG 传感器在整个压缩实验过程中显示出很好的应变不敏感特性。在应变改变为 600 $\mu\epsilon$ 范围内,波长变化最大是压缩加载过程中的 4 pm。考虑到传感器的温度灵敏度是 39.55 pm/℃,4 pm 波长的改变量对应于温度变化误差约为 0.1 ℃。从图 6(b)可以看出在整个拉伸试验过程中,波长的最大变化量只有 2 pm。说明有限元理论仿真和应变传感测试结果一致,该封装结构的温度传感器具有轴向应变不敏感特性。

4.3 温度传感测试结果及分析

在测试温度范围为 20 ~ 80 ℃,传感器的反射光谱随温度变化的曲线如图 7 所示。从图中可以看到

随着温度的升高,封装后的传感器反射光谱峰值波长不断红移,相邻反射峰值波长之间的间隔近似相等,光谱形状完好未发生畸变且边模抑制高比,且大于 22 dB。

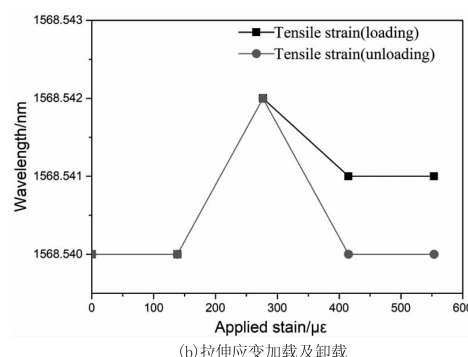
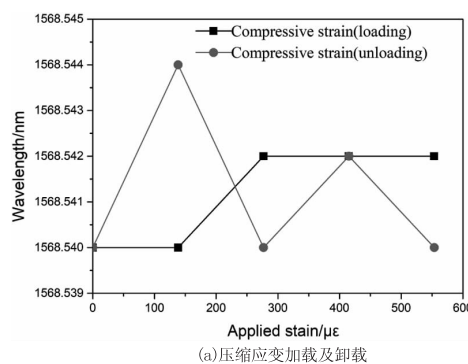


图 6 布拉格波长与施加外应变变化关系

Fig. 6 Bragg wavelength variation with the applied strain

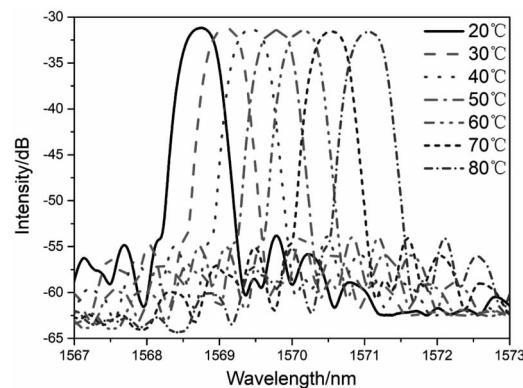


图 7 FBG 温度传感器的反射光谱随温度变化
Fig. 7 Reflection spectra of FBG temperature sensor under different temperatures

为了验证实验数据具有可重复性和可靠性,对传感器进行多次循环温度传感特性测试。图 8 表示其中两次升温 and 两次降温过程中反射波长随温度变化的关系。从图 8(a)中可以看到,两次升温过程波长随温度变化具有较好一致性,实验数据进行线性拟合得到的线性回归方程 λ_1 ,得到传感器升温过程温度灵敏度系数为 39.16 pm/℃。图 8(b)中的 λ_2 表示降温过程的线性回归方程,因此传感器降温过

程的温度灵敏度系数为 $39.13 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 。测定的系数 R^2 是一种常用于评价回归质量的统计参数,平均结果为 0.999,表明该封装后的传感器在测试温度范围内仍具有很好的线性度。温度灵敏度几乎相同,取升温 and 降温温度灵敏度的平均值 $39.145 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,是裸 FBG 的 4 倍左右,略低于理论分析值 $39.55 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,这说明实验结果和理论分析相符。若是实际采用的分辨率为 1 pm 的 FBG 解调仪,封装后的传感器温度分辨率为 0.03°C 。此外,传感器在温度传感过程中反射光谱形状一致完好且线性度良好,说明该预拉伸的全金属化封装传感器还具有测量低温的能力。

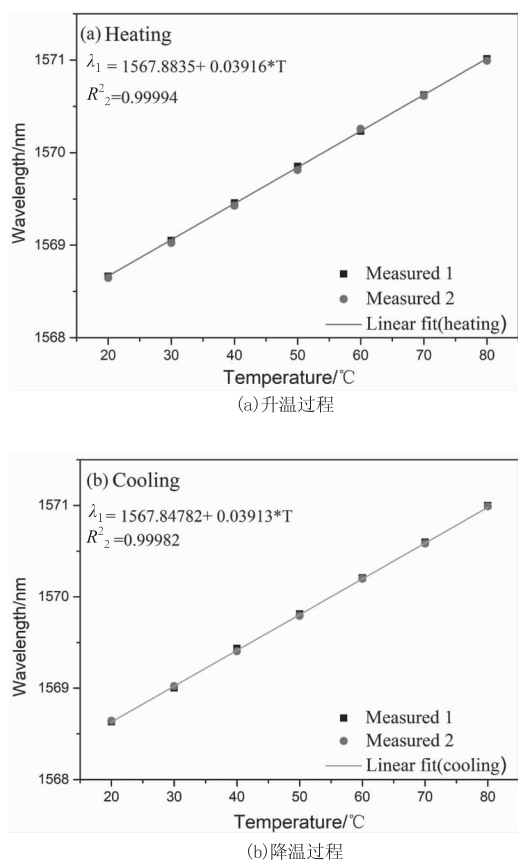


图8 两次温度循环实验结果

Fig. 8 Experiment results of the twice temperture cycles

对传感器的温度响应特性进行了测试,得到反射波长对温度响应和时间的关系如图9所示。当传感器测量外界温度突然从 20°C 改变到 100°C ,温度响应时间小于 30 s 。而稳定区间出现的传感器中心波长的波动是由于加热控制造成的微小温度变化引起的。与相同测量环境下的高温陶瓷胶固定铜管式封装的传感器的温度响应时间为 50 s 相比^[21],该全金属化封装的传感器具有更好的温度响应特性。

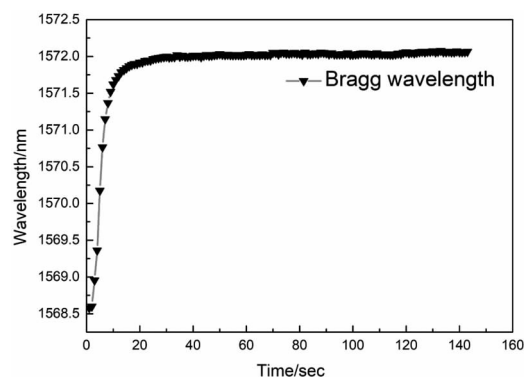


图9 温度突然变化从 $20 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 的封装后 FBG 时间响应
Fig. 9 Temporal response of encapsulated FBG with temperature sudden change from $20 \sim 100^{\circ}\text{C}$

5 结论

本文采用一步超声焊接法对 FBG 进行全金属封装,从理论和实验上验证了全金属化封装 FBG 温度传感器的应变不敏感特性。该全金属化封装温度传感器的温度灵敏度系数在线性变化区间为 $39.16 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,是裸光栅的 4 倍,线性度良好。在 $20 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 范围内表现出很好的温度响应特性,响应时间小于 30 s 。该全金属化封装 FBG 温度传感器制作性能可靠,可应用于常温范围的传感结构健康监测工程领域的高可靠性、耐久性测量。

参考文献:

- [1] Ferdinand P. The evolution of optical fiber sensors technologies during the 35 last years and their applications in structure health monitoring[J]. EWSHM - 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, 2014, (1): 914 - 929.
- [2] ZHANG Wenyu. Research on surface metalization of optical fiber gratical[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
张文禹. 光纤光栅表面金属化工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [3] Jin B, Zhang W, Zhang M, et al. Investigation on characteristic variation of the FBG spectrum with crack propagation in aluminum plate structures[J]. Materials, 2017, 10 (6): 588.
- [4] LI Hongnan, REN Liang. Structural health monitoring fiber grating sensor technology[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
李宏男, 任亮. 结构健康监测光纤光栅传感技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [5] WANG Peng, ZHAO Hong, LIU Jie, et al. Experimental study on temperature sensing characteristics of fiber Bragg grating packaged by copper capillary without strain[J].

- Journal of Optoelectronics Laser, 2012, (3): 434 - 438. (in Chinese)
- 王鹏, 赵洪, 刘杰, 等. 光纤光栅无应力毛细铜管封装及温度特性实验[J]. 光电子·激光, 2012, (3): 434 - 438.
- [6] ZHANG Yanjun, WANG Haibao, CHEN Zegui, et al. Study on FBG sensor's steel capillary packaging technique and sensing properties[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(1): 53 - 54. (in Chinese)
- 张燕君, 王海宝, 陈泽贵, 等. 光纤光栅毛细钢管封装工艺及其传感特性研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(1): 53 - 54.
- [7] LIU Shihua, CHEN Tao, LI Ruiya, et al. Research on the influence of adhesive stick effect on the performance of substrate FBG temperature sensor[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2016, (7): 692 - 698. (in Chinese)
- 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, (7): 692 - 698.
- [8] LIU Chuntong, LI Hongcai, ZHANG Zhili, et al. Study on the sensing characteristics of fiber Bragg grating packaged by aluminum alloy slice[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2008, 19(7): 905 - 908. (in Chinese)
- 刘春桐, 李洪才, 张志利, 等. 铝合金箔片封装光纤光栅传感特性研究[J]. 光电子·激光, 2008, 19(7): 905 - 908.
- [9] Hong C Y, Zhang Y F, Zhang M X, et al. Application of FBG sensors for geotechnical health monitoring, a review of sensor design, implementation methods and packaging techniques[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2016, 244: 184 - 197.
- [10] DING Xudong, ZHANG Yumin, XIA Jiabin, et al. Study on ultralow temperature characteristics of metallic packaging FBG sensor[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(6): 773 - 777. (in Chinese)
- 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.
- [11] LIU Hao, CHEN Weimin, ZHANG Peng, et al. Influence of metal layer on strain performance of FBG[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2013, (4): 642 - 648. (in Chinese)
- 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, (4): 642 - 648.
- [12] ZHU Yuehong. Fiber bragg grating, metallization and sensing technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016. (in Chinese)
- 朱月红. 光纤光栅、金属化及传感技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- [13] LI Yulong, HU Yongtao. Application of optical fiber Bragg grating in welding monitoring[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(11): 2803 - 2812. (in Chinese)
- 李玉龙, 胡勇涛. 光纤布拉格光栅在焊接监测中的应用[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2803 - 2812.
- [14] Li X, Prinz F. Metal embedded fiber bragg grating sensors in layered manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2003, 125(3): 577 - 585.
- [15] Sekar R, Shivananju B N, Lakshmi K P, et al. Dual functional performance of fiber Bragg gratings coated with metals using flash evaporation technique[J]. Optical Fiber Technology, 2012, 18(4): 183 - 185.
- [16] Zhang X, Alemohammad H, Toyserkani E. Sensitivity alteration of fiber Bragg grating sensors with additive micro-scale bi-material coatings[J]. Measurement Science & Technology, 2013, 24(2): 025106.
- [17] Li Y, Wang Y, Wen C. Temperature and strain sensing properties of the zinc coated FBG[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(16): 6463 - 6469.
- [18] Zhang Y, Zhu L, Luo F, et al. Fabrication and characterization of metal-packaged fiber Bragg grating sensor by one-step ultrasonic welding[J]. Optical Engineering, 2016, 55(6): 067103.
- [19] Mou C, Saffari P, Li D, et al. Smart structure sensors based on embedded fibre Bragg grating arrays in aluminium alloy matrix by ultrasonic consolidation[J]. Measurement Science & Technology, 2009, 20(3): 54 - 57.
- [20] Liu M, Zhang E, Zhou Z, et al. Measurement of temperature field for the spindle of machine tool based on optical fiber bragg grating sensors[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2013, (2): 435 - 447.
- [21] Reddy P S, Prasad R L N S, Sengupta D, et al. Method for enhancing and controlling temperature sensitivity of fiber bragg grating sensor based on two bimetallic strips[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(3): 1035 - 1041.