

一种新型的基片式高灵敏度 FBG 温度传感器

徐学武,王红*,潘家栋,陶辉

(桂林电子科技大学 机电工程学院,广西 桂林 541004)

摘要: 光纤布喇格光栅(FBG)是一种新型的光学无源器件,广泛用于传感测量领域。由于裸 FBG 灵敏度很低,需对其进行增敏封装处理。对此进行深入研究,提出了一种新型的高灵敏度 FBG 温度传感器。该传感器采用铝-超殷钢基片进行封装,即将热膨胀系数不同的铝和超殷钢作为基底材料,并设计成过渡配合结构。当铝片受热形变时,两者之间形成挤压力,该挤压力带动铝向纵向两端延伸,FBG 所受应变增大,灵敏度得到提高。通过水浴加热实验对其进行验证,结果表明:该传感器的灵敏度系数得到较大提高,达到 $34.3 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,是裸 FBG 的 2.9 倍,比常规铝片封装的 FBG 温度传感器提高了 $9.7 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。

关键词: 光纤布喇格光栅;温度传感器;增敏封装;灵敏度

中图分类号: TN212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)07-0001-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.07.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Novel substrate high sensitivity FBG temperature sensor

XU Xuewu, WANG Hong*, PAN Jiadong, TAO Hui

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Fiber Bragg grating (FBG) is a new type of optical passive device widely used in sensor measurement. Since the sensitivity of bare FBG is very low, it needs to be sensitized and packaged. In this paper, an in-depth study is carried out to propose a new type of high sensitivity FBG temperature sensor. The sensor is packaged with an aluminum-super-invar steel substrate, that is, aluminum and super-invar steel having different thermal expansion coefficients are used as a base material, and are designed as a transition fit structure. When the aluminum sheet is deformed by heat, a pressing force is formed between the two, and the squeeze is formed. The pressure drives the aluminum to extend to both ends of the longitudinal direction, and the strain of the FBG is increased, and the sensitivity is improved. It is verified by water bath heating test. The results show that the sensitivity coefficient of the sensor is greatly improved to $34.3 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, which is 2.9 times that of bare FBG, and $9.7 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ higher than that of conventional aluminum foil packaged FBG temperature sensor.

Key words: FBG; temperature sensor; sensitization package; sensitivity

0 引言

光纤布喇格光栅(FBG)因具有电气绝缘、耐腐蚀和耐高温等独特优点,被广泛用于石油化工、桥梁隧道和航空航天等领域的测量^[1-3]。在实际应用中,裸

FBG 的温度灵敏度系数只有 $11 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 左右,因此需对其进行增敏封装,以增大传感器的灵敏度系数^[4,5]。

目前,FBG 传感器的增敏封装方式主要分为管式封装、基片式封装、聚合物封装和粘贴式封装^[6],其中研究基片式封装 FBG 传感器的人很多。于秀娟等人^[7]提出了一种铜片封装工艺,与裸 FBG 相比,该种封装工艺的传感器温度灵敏度系数提高了 2.7 倍,但其线性度较差。2016 年,刘士华等人^[8]设计了一种铝基片式 FBG 温度传感器,并研究了粘贴效果对传感器温敏特性的影响。理想情况下,该传感器灵敏度为 $36.6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,线性度为 0.997,但由于胶粘工艺极其严格,使其很难量产。

上述关于 FBG 温度传感器的灵敏度研究大都是

收稿日期:2019-03-26。

基金项目:桂林市科学研究与技术开发计划项目(20170102-1)资助;广西科技重大专项(2018AA28002)资助。

作者简介:徐学武(1993-),男,江西宜春人,硕士研究生,桂林电子科技大学在读学生。主要研究方向为光通信与光传感技术、传感器定位与故障检测。参加广西科技重大专项和桂林市科学研究与技术开发计划项目等,已发表中文核心论文 2 篇,申请软件著作权 2 项。

* 通信作者:王红(xustudywu@163.com)。



直接利用某一种热膨胀系数大的材料作为基底材料,通过材料的热胀冷缩效应提高灵敏度系数。本文在前人研究的基础上,提出一种新型的高灵敏度 FBG 温度传感器。

1 FBG 温度增敏原理

图 1 为光在 FBG 传感器中的传播示意图。当入射光进入光纤中的光栅后,满足特定波长的光会被反射回来,其余光则透射出去,该特定波长称为 FBG 的中心波长,用 λ_g 表示^[9]。FBG 传感器的传感信号为波长调制,当外界物理量发生变化时,FBG 传感器的中心波长将在一定范围内发生偏移,通过检测中心波长的偏移量,即可测量外界物理量的变化值。光纤纤芯折射率 n_{eff} 和光栅周期 Λ 的改变导致 FBG 的中心波长发生偏移^[10,11],其关系式为:

$$\lambda_g = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

当外界物理量变化时,将引起 n_{eff} 和 Λ 的变化,FBG 的中心反射波长 λ_g 随之改变,而单独由温度变化引起的中心波长偏移量可表示为:

$$\Delta\lambda_g = (\alpha_s + \zeta_s)\lambda_g\Delta T \quad (2)$$

其中, α_s 为光纤热膨胀系数, ζ_s 为热光系数。由式(2)可知,FBG 的中心反射波长的偏移量 $\Delta\lambda_g$ 主要由 α_s 、 ζ_s 和 ΔT 决定,当外界温度变化 ΔT 很小时,由温度引起的中心波长偏移量 $\Delta\lambda_g$ 也很小。由于裸 FBG 的温度灵敏度系数较低,为将其提高,需要对裸 FBG 进行封装增敏。

通常将裸 FBG 封装在热膨胀系数较大的基体材料上,当基体材料的热膨胀系数 α 远大于光纤热膨胀系数 α_s 时,式(2)可表示为:

$$\Delta\lambda_g = [\alpha(1+p_e) + \zeta_s]\lambda_g\Delta T \quad (3)$$

其中, p_e 为光纤的弹光系数。

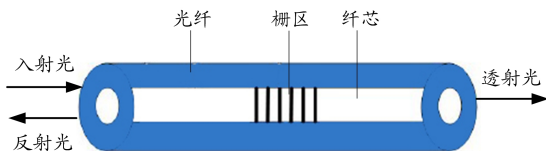


图 1 FBG 传感光路图

2 常规 FBG 温度传感器设计

对比式(2)和式(3)可知,当外界温度变化量 ΔT 相同时,选择热膨胀系数更大的材料作为基底材料,FBG 中心波长的偏移量更大,即传感器的温度灵敏度系数更大。常规的 FBG 温度传感器大多采用此类封装

工艺,以提高传感器的灵敏度。根据此原理,本文选用热膨胀系数较大的铝材料作为传感器的封装基底材料,设计的基底结构模型如图 2 所示。

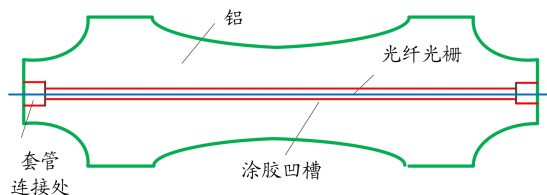


图 2 铝基片封装的 FBG 传感器模型

为了观察该结构模型在不同温度下的应变效果,本文对其进行有限元热静力分析,结果如图 3 所示。

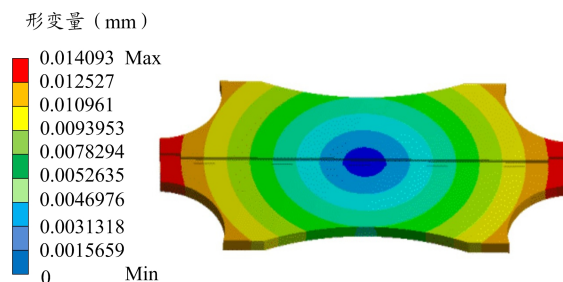


图 3 铝基片封装结构热静力分析

从图 3 可以看出,铝基片是整个结构模型的主要受热变形对象和分析对象,所以在该模型的热静力分析过程中,对铝基片进行网格划分,网格数为 53214 个,节点数为 93477 个。图 3 中,铝基片受热变形的形变量为 0.014093 mm。

3 FBG 温度传感器灵敏特性研究

本文通过实验研究铝基片封装的 FBG 传感器结构的温敏特性。

3.1 实验方法

本文采用水浴法对裸 FBG 温度传感器和常规封装的 FBG 温度传感器的灵敏特性进行研究,实验设备由合作企业提供,FBG 波段为 1553 nm,解调仪采样频率为 4 kHz,分辨率为 1 pm,解调波段为 1527~1568 nm,实验原理图如图 4 所示。

将裸 FBG 温度传感器和封装的 FBG 温度传感器置入恒温水箱中测量温度的变化,并通过解调仪解调出不同温度对应的中心反射波长,其中裸 FBG 温度传感器用于实验对比。实验中的可控热源为恒温箱中水温的变化,恒温箱精度为 0.01 °C,量程为 0 °C~100 °C。

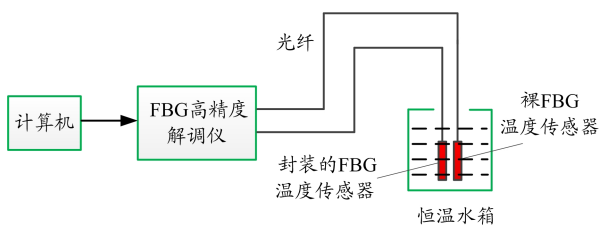


图4 实验原理图

3.2 实验结果与分析

实验过程中记录了在 10 组不同温度下 2 种 FBG 传感器中心波长的变化情况,表 1 为多次测量求平均的实验数据表。

将表 1 中所测的实验数据用软件进行直线拟合,图 5 为 2 种 FBG 温度传感器的温度-波长拟合曲线图,其中 R^2 为拟合曲线线性度。可以看出,裸 FBG 中心波长 λ_1 和温度 T 的关系式为: $\lambda_1 = 0.0118T + 1551.9$ 。即裸 FBG 温度传感器的灵

表 1 不同温度下 2 种
FBG 温度传感器测试结果

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	裸 FBG 传感器 中心波长 (nm)	常规 FBG 传感器波长 (nm)
30	1552.2253	1553.4413
35	1552.3015	1553.5445
40	1552.363	1553.6882
45	1552.4165	1553.8125
50	1552.4753	1553.9358
55	1552.5345	1554.0585
60	1552.5914	1554.1821
65	1552.6475	1554.3085
70	1552.7151	1554.4195
75	1552.7625	1554.5325

敏度系数为 $11.8 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$;常规封装的 FBG 中心波长 λ_2 和温度 T 的关系为: $\lambda_2 = 0.0246T + 1552.7$,即常规 FBG 温度传感器的灵敏度系数为 $24.6 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 。通过上述分析可知,常规封装 FBG 温度传感器的灵敏度系数更好,表明该传感器具有一定的实用价值。为进一步提

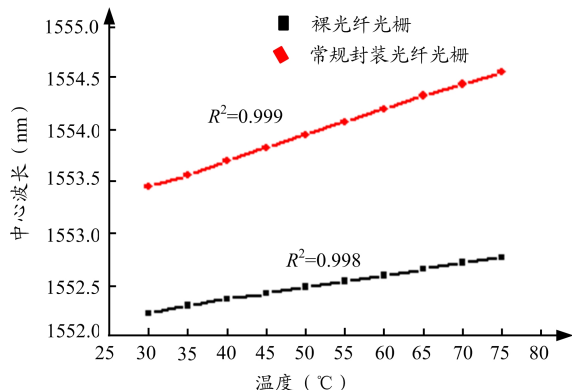


图5 FBG 温度传感器的温度-波长拟合曲线

高 FBG 温度传感器的灵敏度,使其应用于更多领域,本文设计了一种新型的高灵敏度 FBG 温度传感器。

4 新型的 FBG 温度传感器设计

4.1 结构设计

本文设计了一种采用铝-超殷钢基片封装的新型高灵敏度 FBG 温度传感器。即采用 2 种金属材料铝和超殷钢作为封装 FBG 传感器的基底材料,将其设计成特殊结构,并进行过渡配合,铝和超殷钢的热膨胀系数相差很大。图 6 为该传感器的封装结构模型图。

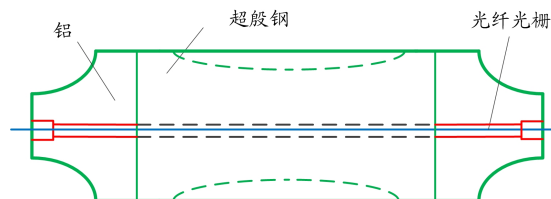


图6 铝-超殷钢基片封装的 FBG 温度传感器模型

由于铝的热膨胀系数较大,而超殷钢的热膨胀系数较小,当封装结构受热时,铝因受热发生形变,与过渡配合的超殷钢之间发生相互挤压,从而形成挤压应力,该应力中心对称分布且指向两端,铝受其影响向两端延伸。同时,铝基片本身受热发生形变,也会向两端延伸,所以封装结构的总变形量会增大。

为验证该封装结构的合理性,我们对其进行有限元热静力分析,参数设置和加载条件与前文一致,图 7 为新型的封装结构热静力分析云图。可以看出,在相同环境下,铝-超殷钢基片封装结构的形变量为 0.0183 mm ,比铝基片封装结构的形变量增加了 0.004207 mm ,所以铝-超殷钢基片封装的 FBG 温度传感器结构模型具有可行性。

4.2 实验验证

为了验证铝-超殷钢基片封装的 FBG 温度传感器

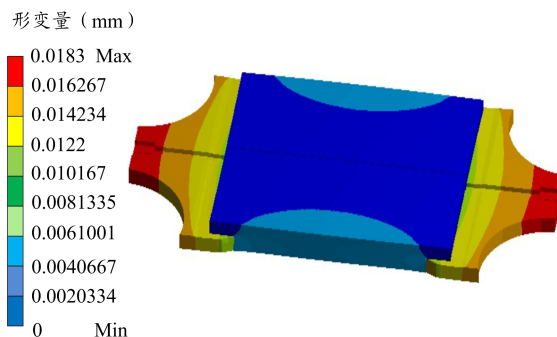


图7 新型 FBG 温度传感器封装模型热静力分析

的优越性。我们将前文实验中采用铝基片封装结构的 FBG 温度传感器替换成新型的铝-超殷钢基片封装结构的 FBG 温度传感器,其它实验条件不变。实验过程中记录了 10 组不同温度下,改进封装结构的 FBG 温度传感器中心波长的变化情况,为减少偶然误差,通过多次测量求平均的方法得到实验数据,如表 2 所示。

表 2 新型 FBG 温度传感器测试结果

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	新型 FBG 传感器的 中心波长 (nm)
30	1553.3292
35	1553.5005
40	1553.6724
45	1553.8435
50	1554.0325
55	1554.1565
60	1554.3582
65	1554.5295
70	1554.7031
75	1554.8525

将表 2 中的数据进行直线拟合,图 8 为新型 FBG 温度传感器的温度-波长拟合曲线图。该传感器的中心波长 λ_3 与温度 T 之间的关系为: $\lambda_3=0.0343T+1552.3$,即新型 FBG 温度传感器的灵敏度系数为 $34.3 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 。

与常规封装 FBG 温度传感器相比,新型 FBG 温度传感器的灵敏度系数提高了 $9.7 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,并且线性度达到 99%以上。

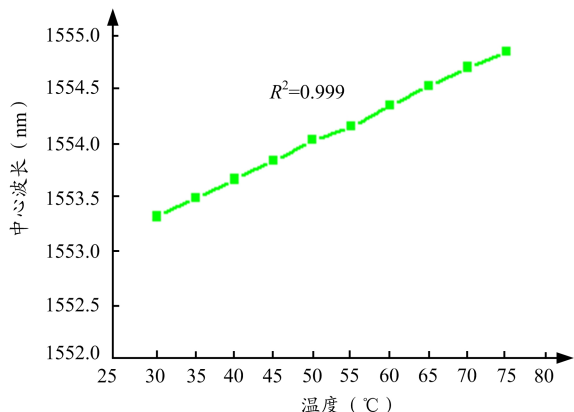


图 8 新型 FBG 温度传感器的温度-波长拟合曲线

5 结束语

本文详细分析了常规基片式封装的 FBG 温度传感器,并提出了一种新型的高灵敏度 FBG 温度传感器。首先,通过分析 FBG 传感器的温度传感原理,介绍了铝基片封装结构的常规 FBG 温度传感器,采用有限元对该结构模型进行热分析,并研究了 FBG 传感器的温敏特性。然后,设计了一种新型的高灵敏 FBG 温度传感器,该传感器采用铝-超殷钢基片进行封装,即采用超殷钢和铝作为基底材料,并将其设计成过渡配合的结构。最后,通过有限元热仿真和实验对新型的高灵敏 FBG 温度传感器进行验证。结果表明:本文的设计进一步提高了 FBG 传感器的温度灵敏度系数,且保证了传感器的线性度和重复性。

参考文献:

- [1] 徐国权,熊代余. 光纤光栅传感器技术在工程的应用[J]. 中国光学, 2013, 6(3): 307-313.
- [2] HUANG A B, WANG C C, LEE J T. Applications of FBG-based sensors to ground stability monitoring [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, 8(4): 513-520.
- [3] JIANG M S, SUI Q M. Application of fiber bragggrating sensor network in aluminum reduction tank shell temperature monitoring [J]. Journal of Central South University, 2013, 20(4): 924-930.
- [4] 张智禹. 光纤光栅传感器封装技术的研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2014.
- [5] 柳智慧, 石玉文, 张蕊. 光纤光栅传感器封装增敏技术的研究[J]. 光通信技术, 2015(1): 45-46.
- [6] 周锋, 李永倩, 王劲龙. 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.
- [7] 于秀娟, 余有龙, 张敏, 等. 铜片封装光纤光栅传感器的应变和温度传感特性研究[J]. 光子学报, 2006, 35(9): 758-762.
- [8] 刘士华, 陈涛, 李瑞亚, 等. 基片式 FBG 温度传感器胶粘剂效果对其性能影响的研究[J]. 光电子·激光, 2016, 27(7): 692-698.
- [9] 于海鹰, 秦旭辉, 刘耀东, 等. 一种用于人体测温的高精度 FBG 传感器[J]. 光通信技术, 2016, 40(4): 33-35.
- [10] 彭雄辉, 黄安怡, 左浩然. 基片式高灵敏度光纤光栅温度传感器[J]. 中国测试, 2017, 43(7): 134-138.
- [11] 周智, 王倩, 郝孝伟, 等. 考虑混凝土基体蠕变的 FBG 传感器应变传递研究[J]. 中国测试, 2016, 42(5): 1-4.

敬告作者

凡向本刊投稿的作者,除提供电子信箱地址外,还请提供联系电话。被录用的稿件在尚未刊登之前,如果作者离开原单位,请及时提供新的联系方式,以便编辑部赠送杂志。

本刊编辑部