

高灵敏度布喇格光纤光栅温度传感器

魏昊文, 徐宁

(南京邮电大学 电子与光学工程学院, 南京 210023)

摘要: 布喇格光纤光栅(FBG)传感器由于受到自身材料特性的限制, 其传感灵敏度较低, 如何提高 FBG 的灵敏度是研究的热点之一。首先理论仿真了具有高热膨胀系数的硅橡胶、环氧树脂和聚二甲基硅氧烷(PDMS)胶 3 种聚合物涂敷层的 FBG, 计算了反射谱中心波长偏移量随温度变化的光纤光栅传感温度灵敏度。根据理论分析结果, 实验研究了 3 种聚合物材料涂覆层的 FBG 的温度传感性能。实验结果表明: 具有 PDMS 材料涂覆层的 FBG 不仅保持了良好的线性特性, 且温度灵敏度可以达到 $0.0795\text{nm}/^\circ\text{C}$, 相对于光栅结构参数相同的裸栅温度灵敏度提升了 8 倍。

关键词: 布喇格光纤光栅传感器; 温度传感器; PDMS

中图分类号: S951; TN929.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)05-0001-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.05.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



High sensitivity fiber Bragg grating temperature sensor

WEI Haowen, XU Ning

(College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: Fiber Bragg grating (FBG) sensor has low sensitivity, because of the limitation of its material characteristic. Improving the sensitivity of FBG is in hotspot. Firstly, the FBG of three polymer coatings with high thermal expansion coefficient, silicone rubber, epoxy resin and polydimethylsiloxane (PDMS) were simulated theoretically. Then calculating the central wavelength offset of the reflection spectrum with temperature and the sensitivity of FBG. The temperature sensing properties of FBG coating of three kinds of polymer materials were examined base on the results of theoretical analysis. The experiment shows that FBG coated by PDMS not only keep a great linear characteristic, but also the temperature sensitivity can reach $0.0795\text{nm}/^\circ\text{C}$ which is 8 times bigger than bare grating with the same grating structure parameters.

Key words: FBG sensor; temperature sensor; PDMS

0 引言

自 20 世纪 70 年代光纤传感器出现以来, 光纤布喇格光栅(FBG)传感器以其波长偏移跟温度、压力等测量参数之间良好的线性关系, 成为众多类型传感器中的佼佼者^[1]。

FBG 由于受其温度敏感性的制约, 在高精度温度测量领域, 其使用并不是很广泛。为了提升 FBG 在温

度传感领域的应用, 很多学者提出了多种增敏方式。使用不同材料作为 FBG 涂敷材料的增敏方式, 由于其简单的实现方式和低廉的成本, 成为许多学者的研究对象。当被涂覆层所包裹的 FBG 所在环境温度变化时, 涂敷材料由于其自身的热膨胀性能够对 FBG 产生压迫, 受压迫的 FBG 所产生的波长偏移量要明显大于裸栅, 从而提升 FBG 的温度灵敏度。本文通过理论与实验对比 3 种聚合物封装的 FBG, 并对其性能进行分析。

1 FBG 传感原理

当光波通过 FBG 时, 满足 Bragg 条件的光波将被反射回来形成布喇格中心波长, 布喇格中心波长的偏移量即是实现传感的重要参数^[2]。FBG 的匹配条件为:

$$\frac{\Delta\lambda_D}{\lambda_D} = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} + \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} \quad (1)$$

收稿日期: 2018-12-17。

基金项目: 江苏省政策引导类计划项目(BY2016010-01)资助。

作者简介: 魏昊文(1993-), 男, 硕士生, 就读于南京邮电大学光电工程学院, 主要从事光学传感器件及传感网络的研究, 现阶段主要研究方向为布喇格 FBG 传感器的增敏和布喇格 FBG 切趾处理。



其中, λ_D 是 FBG 的布喇格波长 ($\lambda_D = 2n_{\text{eff}}\Lambda$), $\Delta\lambda_D$ 是 λ_D 的偏移量, n_{eff} 是该光栅纤芯的有效折射率, Λ 是其折射率的有效周期, Δn_{eff} 和 $\Delta\Lambda$ 是 FBG 受到环境变化影响而产生的有效折射率变化量和调制周期变化量。式(1)表明当外界环境变化时, FBG 的布喇格波长(反射光谱)也将随之发生偏移。

因为光纤材料存在弹光效应和热光效应, 所以当外界环境中的应力和温度发生变化时, 将导致光纤的 n_{eff} 发生变化。由于应力和热胀冷缩所造成的光纤的形变也会造成 Λ 发生一定程度的变化, 于是, λ_D 将随着温度和应力变化发生偏移。其表达式为:

$$\Delta\lambda_D = 2n_{\text{eff}}\Lambda \left\{ \left[1 + \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right] \varepsilon + \left[\alpha + \frac{\left(\frac{dn_{\text{eff}}}{dT} \right)}{n_{\text{eff}}} \right] \Delta T \right\} \quad (2)$$

其中, P_{11} 和 P_{12} 分别是光纤的普克尔系数, ε 为 FBG 的应力变量, ν 是材料的泊松比, α 是光纤的热膨胀系数, ΔT 是 FBG 的温度变化量。布喇格波长偏移和应力、温度变化量成良好的线性关系是 FBG 能够作为传感器的最主要原因。

从式(2)可以看出, FBG 的波长偏移主要受到温度和应力 2 个变量的影响。由于 $\Delta\lambda_D$ 和 ε 、 ΔT 成正比关系, 所以当 2 个变量同时变化时, $\Delta\lambda_D$ 偏移量最大。通过改变光纤纤芯材料和涂敷光纤都能够达到该目的, 而涂敷以其较低成本和较简单的实现方式获得了绝大多数人的青睐。应用高线性膨胀系数的材料涂敷 FBG, 使得 FBG 在环境温度发生变化时受到基质材料的压迫, 从而提升传感器灵敏度。但高线性膨胀系数不是对 FBG 增敏所需要考虑的唯一因素(由于光纤本身的材质易损, 使得涂敷材料线性膨胀系数不宜过高), 同时需要考虑涂敷材料与 FBG 的贴合程度等。本文采用了硅橡胶、环氧树脂以及聚二甲基硅氧烷(PDMS)胶等高膨胀系数和高切合 FBG 的材料对 FBG 进行涂敷, 达到对 FBG 增敏的效果。

2 理论分析

本文应用 OpticalGrating 仿真软件在 25℃~50℃ 分别对裸栅和 3 种聚合物涂敷的 FBG 进行理论仿真, 所用 FBG 的参数如表 1 所示。由于涂覆层厚度的大小对 FBG 的灵敏度没有任何影响, 所以该参数并未列在表内。

表 1 FBG 参数

参数名称	数值
有效折射率	1.47
栅格周期	527.21nm
中心波长	1550nm
折射率调制深度	0.0002

仿真表明: 所有 FBG 的反射中心波长都随着温度的升高逐渐向长波长的方向偏移, 且不同材料涂敷的 FBG 的反射波长的偏移量大小有所区别; 在相同条件下, 在温度变化时被聚合物涂敷过的 FBG 中心波长偏移量要大于裸栅。3 种聚合物在温度变化相同时, 以硅橡胶为基底的 FBG 相对于裸栅的波长偏移最小, 而以 PDMS 为基底的 FBG 波长偏移量最大。

仿真的 4 种 FBG 的中心反射波长随温度变化如图 1 所示。从 25℃ 变化到 50℃ 时, 裸栅以及以硅橡胶为基底、环氧树脂为基底、PDMS 为基底的 4 种 FBG 的中心波长偏移分别为 0.26nm、0.4291nm、0.6525nm 和 2nm。经计算可知, 这 4 种 FBG 所对应的温度灵敏度分别约为 0.0104nm/℃、0.0171nm/℃、0.0261nm/℃ 和 0.085nm/℃, 3 种涂敷材料相对于裸栅, 灵敏度分别提升约为 1.7 倍、2.6 倍和 8.5 倍, 其中 PDMS 胶的增敏效果最明显, 远远高于其余 2 种封装材料。3 种聚合涂敷的 FBG 相对于裸栅都有一定的灵敏度提升。从仿真数据可以看出, 3 种增敏 FBG 的波长随温度变化都具有良好的线性关系。因此, 硅橡胶、环氧树脂和 PDMS 这 3 种材料均能够用于对 FBG 的增敏。

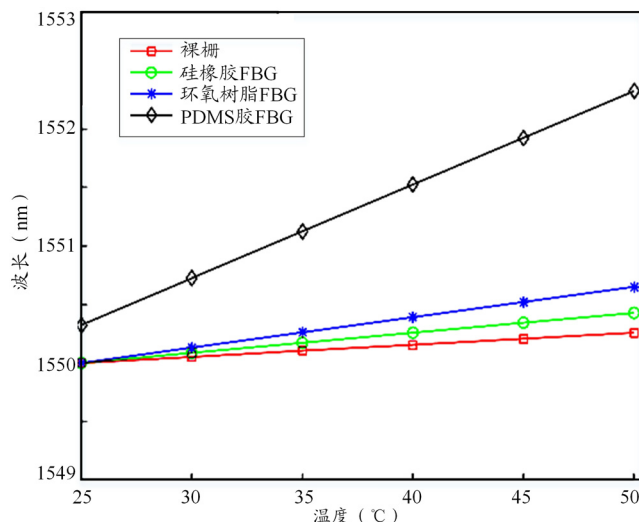


图 1 4 种 FBG 中心波长随温度变化关系

3 实验测试

为了保证测量结果的准确性,文中的4组实验均采用恒温箱进行加热,温度测量范围为 $25^{\circ}\text{C}\sim 90^{\circ}\text{C}$,每次温度测量间隔为 5°C 。实验器材包括:宽带光源、实验所用光谱仪(型号为Yokogawa AQ6370D)、恒温箱(型号为COLUMN OVEN LCO 102)和FBG(中心波长为 1550nm 、折射率调制深度为 2×10^{-4} 、栅区长度为 12mm 、 $n_{\text{eff}}=1.47$ 和栅格周期 $\Lambda=527.21\text{nm}$)。

本次实验先将未添加涂敷层的3组裸栅放入恒温箱中,并以 5°C 的温度间隔持续将恒温箱温度升至 90°C 后再将温度降低至室温,连续5次,每次升降温操作前间隔少许时间,以使恒温箱中的温度保持稳定;对每组光栅的10组数据进行统计,并取平均值。3组裸栅的数据统计完成后,将制备好的实验溶液均匀涂敷在裸栅上,然后再将涂敷后的裸栅重新放入恒温箱中,重复上述实验,并记录数据。实验仪器实物如图2所示。

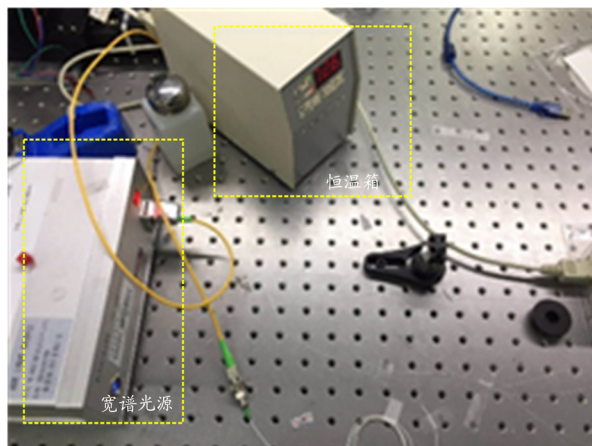


图2 实验仪器实物图

3种有机材料中硅橡胶常温下呈溶液状,耐热耐腐蚀,在 $-55^{\circ}\text{C}\sim 180^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内都能够正常工作,且当环境温度到达 200°C 以上时仍能保持一定的柔韧性和回弹性。本次实验所使用的环氧树脂是使用环氧树脂AB胶以1:1的比例进行混合所制备,低温条件下环氧树脂的粘黏度较强,且贴附能力很强,但流动性较差。实验中的PDMS胶是将主剂与固化剂以10:1的比例进行混合,常温下PDMS胶呈现为无色或淡黄色液体,溶液无明显气味,透明度很高,具有良好的导热性,且化学性质稳定热胀系数大,与硅材料具有很好的相容性。硅橡胶、环氧树脂和PDMS胶材料都具有较高的热膨胀系数,分别为 $5.9\times 10^{-4}\sim 7.9\times 10^{-4}\text{m}/^{\circ}\text{C}$ 、 $0.5\times 10^{-4}\sim 0.6\times 10^{-4}\text{m}/^{\circ}\text{C}$ 和 $1.2\times 10^{-4}\sim 1.8\times 10^{-4}\text{m}/^{\circ}\text{C}$ 。

4种FBG中心波长偏移与温度变化如图3所示。可以看出,3种被增敏材料涂敷后的FBG其斜率相对于裸栅都有一定程度上的增大,且其随温度变化的曲线具有一定的线性。计算可得,裸栅的温度灵敏度约为 $0.0107\text{nm}/^{\circ}\text{C}$,而以硅橡胶作为基质的FBG、以环氧树脂为基质的FBG和PDMS胶涂敷的FBG的灵敏度分别为 $0.0155\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ 、 $0.0248\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ 和 $0.0795\text{nm}/^{\circ}\text{C}$,相对于裸栅,3种FBG的灵敏度分别提升了1.5倍、2.4倍和8倍。

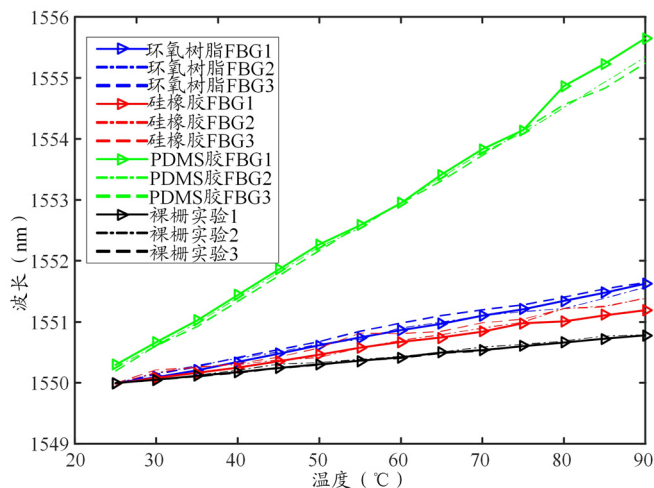


图3 4种FBG中心波长偏移与温度变化的实验值

图3中硅橡胶FBG3、环氧树脂FBG2以及PDMS胶FBG2由于实验操作并非完全相同导致了折线产生微小的差别。除以上情况外,每组3次测量的曲线斜率基本一致,这说明3种材料涂敷的FBG重复性良好。3种材料中除硅橡胶涂敷的FBG的灵敏度随温度变化的线性度较差以外,另外2种材料的灵敏度和温度变化具有良好的线性关系。通过图像的曲线斜率可以看出PDMS材料对于裸栅灵敏度的提升最大,且有着较高的线性度和重复性。

从图3可知,环氧树脂涂敷的FBG灵敏度高于硅橡胶涂敷的FBG,但小于PDMS胶涂敷的FBG;3种材料中硅橡胶的热膨胀系数最大,但其增敏效果不如热膨胀系数最小的环氧树脂,可能由于硅橡胶的热膨胀系数和光纤不匹配所导致;硅橡胶本身材质粘稠度比较大,涂敷在裸栅上后分布不均匀,当环境温度变化时,硅橡胶受热膨胀后对光纤施加的应力不均匀,所以硅橡胶虽然提升了FBG的温度灵敏度,但其线性较差,在3种涂敷材料中最不适合作为FBG的增敏材料;PDMS胶热膨胀系数介于二者之间,但其增敏效果要远远好于另外2种;由于环氧树脂和PDMS胶都具

有良好的线性和重复性,都能够作为 FBG 的增敏材料。FBG 灵敏度越高传感器的测量范围越小,因此可以根据所需要测量的范围选择适合的涂敷材料。

4 结束语

本文通过对硅橡胶、环氧树脂和 PDMS 胶 3 种高热膨胀系数的聚合物所涂敷的 FBG 进行 25℃~90℃升降温实验研究,得出通过聚合物涂敷 FBG 确实能提升温度灵敏度的结论。但温度灵敏度提升不仅取决于涂敷聚合物本身的热膨胀系数,且与聚合物同 FBG 的切合度高低有一定的关系。通过对 3 组数据进行比较研究发现:3 种聚合物中,涂敷硅橡胶的 FBG 灵敏度提升最低,且其涂敷后的 FBG 线性度也不如从前,硅橡胶作为 FBG 的涂敷材料并不是一项很好的选择;环氧树脂涂敷的 FBG 在保证了一定灵敏度提升的前提下,同时有优秀的线性度和可重复性,是一种优秀的 FBG 温度增敏材料;PDMS 胶涂敷的 FBG 增敏效果最为明显,在实验条件下,能达到 0.0795nm/℃的灵敏度,其效果相对于环氧树脂提升了约 3 倍,并且线性度和可重复性同样很好,对于高精度和小温度范围的测量情况,PDMS 胶是 3 种材料中最好的选择。因此,涂敷 PDMS 胶或环氧树脂聚合物的 FBG 能够提升 FBG 在精确温度测量领域的应用范围。

参考文献:

- [1] ESPOSITO M, BUONTEMPO S, PETRICCIONE A, et al. Fiber Bragg grating sensors to measure the coefficient of thermal expansion of polymers at cryogenic temperatures[J]. Sens. Actuators, 2013(189): 195–203.
- [2] CHENG X, QIU W, WENXUAN W, et al. High-sensitivity temperature sensor based on Bragg grating in BDK-doped photosensitive polymer optical fiber[J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(2): 1–3.
- [3] PARK C S, HAN Y, JOO K I, et al. Optical detection of volatile organic compounds using selective tensile effects of a polymer-coated fiber Bragg grating[J]. Opt. Express, 2010(18): 24753–24761.
- [4] UMESH S, DAEGIL K, HYUNJIN K, 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.
- [5] LANG Z, LIU Y, XIAOLIANG G, et al. High temperature strain sensor based on a fiber Bragg grating and rhombus metal structure[J]. Applied Optics, 2015, 54(28): 109–112.
- [6] GANZIY D, ROSE B, BANG O. Performance of low-cost few-mode fiber Bragg grating sensor systems: polarization sensitivity and linearity of temperature and strain response [J]. Applied Optics, 2016, 55 (23): 6156–6161.
- [7] HU X C, SAEZ-RODRIGUEZ D, MARQUES C, et al. Polarization effects in polymer FBG: study and use for transverse force sensing [J]. Optics Express, 2015, 23(5): 4581–4590.
- [8] SCHMID M J, MULLER M S. Measuring Bragg gratings in multimode optical fibers[J]. Optics Express 2015, 23(2): 8087–8094.
- [9] RAMAKRISHNAN M, RAJAN G, SEMENOVA Y, et al. Overview of Fiber Optic Sensor Technologies for Strain/Temperature Sensing Applications in Composite Materials[J]. MDPI, 2016, 15(4): 7–11.
- [10] NAM S H, ZHAN C, HAHN C, et al. Bend-insensitive ultra-short longperiod gratings by the electric arc method and their applications to harsh environment sensing and communication[J]. Optics Express, 2005, 13 (2): 731–737.
- [11] BHATTACHARYA S, DATTA A, BERG J M, et al. Studies on surface wettability of Poly(Dimethyl)Siloxane (PDMS) and glass under Oxygen-plasma treatment and correlation with bond strength [J]. Microelectromechanical Systems, 2005, 14(3): 590–597.
- [12] JUNG J, NAM H, LEE B, et al. Fiber Bragg grating temperature sensor with controllable sensitivity[J]. Applied Opt., 1999, 38(13): 2752–2754.
- [13] LIN G C, WANG L, YANG C C, et al. Thermal performance of metal-clad fiber Bragg grating sensor [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1998 (10): 406–408.

征稿简则

- 1、来稿文责自负,稿件刊用后如出现泄密、侵犯他人著作权等问题,本刊概不承担连带责任。
- 2、稿件内容必须与光通信密切相关(栏目有:光网络、光器件、光传感、光传输、可见光通信、无线光通信、量子通信、光纤光缆、光通信工程),稿件内容要真实、准确,且不得抄袭或重复发表。
- 3、本刊现已与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签署《CAJ-N 网络首发学术期刊合作出版协议》,通过《中国学术期刊(网络版)》(CAJ-N)正式出版我刊网络版。录用定稿网络首发之后,在后续的排版定稿、整期定稿网络版和印刷版中,不得修改论文题目、作者署名、作者单位以及其学术内容,只允许修改少量文字或少量不影响研究结果和结论的数据。由于网络首发周期短,因此凡被录用的稿件不允许撤稿。按国家有关网络连续型出版物管理规定,网络首发论文视为正式出版论文,我刊编辑部与电子杂志社共同为论文作者颁发论文网络首发证书(论文作者可以从“中国知网”下载或打印)。
- 4、来稿一经本刊录用,该文章全部版权即转归本刊所有;稿件印刷版出版后,当月赠寄当期杂志 2 册;2 个月内向作者一次性支付各版次(网络版、光盘版和印刷版)稿酬。

《光通信技术》编辑部