

## 光纤布拉格光栅温度传感增敏特性的实验研究

张学强<sup>1,2</sup>, 孙博<sup>1,2\*</sup>, 贾静<sup>1,2</sup>

- (1. 西北大学 光子学与光子技术研究所, 陕西 西安 710069;
2. 西北大学 陕西省光电子技术重点实验室, 陕西 西安 710069)

**摘要:** 分别以铜、铝、有机玻璃、聚四氟乙烯为实验衬底材料, 对采用片式粘敷封装技术的光纤布拉格光栅温度传感增敏特性进行了实验研究。研究表明, 当对两侧尾纤有涂覆层的光纤布拉格光栅进行封装时, 其温度灵敏系数分别是裸纤情况下的 2.3 倍、2.9 倍、5.2 倍、11.7 倍。然而, 粘敷材料在较高温度时显著的热膨胀会引起光纤包层与涂覆层发生一定的脱离, 导致此时其实验结果重复性不甚理想。为了克服这种不利情况, 对尾纤无涂覆层的光纤布拉格光栅进行了封装测试。在测试温度范围内, 其反射波长随温度的变化始终呈现良好的线性关系, 其温度灵敏系数分别提高到了 3 倍、3.4 倍、9.2 倍、12.6 倍, 测量结果重复性良好。研究结果为将来片式封装光纤布拉格光栅传感器的温度增敏特性的研究, 提供了必要有益的数据支持和参考。

**关键词:** 光纤布拉格光栅; 温度传感增敏; 布拉格波长; 衬底材料; 片式封装  
**中图分类号:** TP212 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1118003

## Experimental investigation on temperature sensitivity enhancement of fiber Bragg grating sensor

Zhang Xueqiang<sup>1,2</sup>, Sun Bo<sup>1,2\*</sup>, Jia Jing<sup>1,2</sup>

- (1. Institute of Photonics and Photo-technology, Northwest University, Xi'an 710069, China;
2. Key Laboratory of Opto-electronic Technology of Shaanxi Province, Northwest University, Xi'an 710069, China)

**Abstract:** The enhanced temperature sensitivities of Fiber Bragg Gratings (FBGs) slice-packaged with copper, aluminum, perspex and PTFE were studied experimentally. The results show that when the coated fiber tails on both sides of FBG are bonded on substrate materials, the temperature sensitivity coefficients are about 2.3 times, 2.9 times, 5.2 times, and 11.7 times that of a bare FBG, respectively. However, the measurement reproducibility of the results is unsatisfactory due to the fact that the thermal expansion of substrate materials at higher temperature will inevitably lead to a separation of fiber cladding from coating layer. For experimental optimization, the experiments under the uncoated tail of FBG are carried out based on the aforementioned four substrate materials. The reflection wavelengths have a good linear relationship with the temperature change within the measurement temperature range. The temperature sensitivity coefficients of FBGs are enhanced to 3 times, 3.4 times, 9.2 times, 12.6 times, respectively,

收稿日期: 2019-07-05; 修订日期: 2019-08-15

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室项目(12JS095)

作者简介: 张学强(1991-), 男, 硕士生, 主要从事光纤光学及单频光纤激光器方面的研究。Email: zxqiang\_nwu@163.com

通讯作者: 孙博(1979-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事光纤激光器技术、太赫兹波技术方面的研究。Email: sunbo\_xt@163.com

and the results show a good measurement reproducibility. The research results provide necessary and useful data support and reference for the future research on the temperature sensitivity enhancement of slice-packaged fiber Bragg grating sensors.

**Key words:** fiber Bragg grating; temperature sensitivity enhancement; Bragg wavelength; substrate materials; slice package

## 0 引言

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)凭借其具有体积小、熔接损耗小、耐高温、抗腐蚀、全兼容于光纤等优点,以及其谐振波长对应变、温度、浓度、折射率等外界环境的变化比较敏感等特点,因此近年来被广泛应用于传感技术等领域中<sup>[1-3]</sup>。由于无涂覆层的裸光纤布拉格光栅非常脆弱,在传感技术应用中较为不便,因此通常需要对光纤布拉格光栅进行适当的封装才可用于实际应用中<sup>[4-6]</sup>。此外,常见的裸光纤的应变、温度以及压力灵敏系数相对较低<sup>[7]</sup>,如果要利用光纤布拉格光栅进行温度传感,则需要适当的敏化封装增加其灵敏系数,从而有利于将基于光纤布拉格光栅的传感器应用于各种实际情况中。目前,常见的光纤布拉格光栅敏化技术有嵌入式敏化技术和粘敷式敏化技术。敏化材料有单一材料与混合材料之分,一般为各种金属、聚合物、合金等材料,结构亦有针式、管式、片式等之分<sup>[8-11]</sup>。其中片式封装方法,因其结构具有简单紧凑、体积小、导热快、易制作等优点而备受关注。

将光纤布拉格光栅粘敷封装于热膨胀系数较大的衬底材料中,可以有效增加其温度灵敏系数。目前,国内许多课题组利用各种材料制成的片式基底,应用于增加光纤布拉格光栅温度灵敏系数的实验研究工作中。2004年,中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室的詹亚歌等人报道了将光纤布拉格光栅用环氧树脂胶封装在一个刻有细槽的铝板内,得到了封装后的光纤布拉格光栅温度灵敏系数为 39.4 pm/°C,是裸光纤布拉格光栅的 3.5 倍<sup>[8]</sup>。2006年,黑龙江大学光纤技术研究所的于秀娟等人选用铜片对光纤布拉格光栅进行封装,得到封装后的光纤光栅温度灵敏系数为 31.22 pm/°C,是裸光纤光栅的 2.78 倍<sup>[9]</sup>。2016年,武汉理工大学刘士华等人选用热膨胀系数较大的铝片作为衬底材料对裸光纤

布拉格光栅进行封装,光纤布拉格光栅温度灵敏系数达到 36.6 pm/°C,约是裸光纤光栅的 3.21 倍<sup>[10]</sup>。文中基于光纤布拉格光栅温度传感理论,分别以热膨胀系数较大、温变稳定性好的铜(Copper)、铝(Aluminium)、有机玻璃(Perspex)、聚四氟乙烯(PTFE)等作为粘敷衬底材料,对采用片式粘敷封装方式的光纤布拉格光栅温度增敏特性进行了实验研究。通过精确地温控,分别测试了光纤布拉格光栅两侧尾纤在有、无涂覆层两种粘敷封装情况下的温度灵敏系数,其实验结果为光纤布拉格光栅在采用该封装技术提高其传感灵敏度方面的研究提供了必要的数据支持和参考。

## 1 基本理论

由耦合模理论可知,均匀光纤布拉格光栅(FBG)的布拉格(Bragg)波长可以表示为<sup>[11]</sup>:

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

式中: $\lambda_B$ 为光纤布拉格光栅波长; $n_{\text{eff}}$ 为光纤纤芯的有效折射率; $\Lambda$ 为光纤布拉格光栅周期。对于裸光纤布拉格光栅而言,温度既能引起光纤布拉格光栅折射率的变化,同时也会由于热膨胀而引起栅距的改变。当只考虑温度作用而不考虑应力作用时,光纤光栅布拉格波长具有以下温度响应特征:

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi)dT \quad (2)$$

式中: $\alpha$ 为光纤布拉格光栅的材料膨胀系数; $\xi$ 为光纤布拉格光栅的热光系数。为简便起见,令温度灵敏系数  $K_T = \alpha + \xi$ ,则公式(2)可以化简为:

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = K_T dT \quad (3)$$

公式(3)即为在不考虑应变作用下的光纤光栅布拉格波长与温度增量之间的关系。从式中可以看出,光纤光栅布拉格波长的漂移量与温度的变化量之间呈线性变化关系。对于纯石英光纤,膨胀系数  $\alpha$  约为  $0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,热光系数  $\xi$  约为  $6.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ <sup>[11]</sup>,由此可

得到裸光纤布拉格光栅的温度灵敏系数理论计算值为 11.39 pm/°C。

从公式(2)可以看出,为了提高光纤布拉格光栅的温度灵敏系数,可以适当增大光纤材料的热膨胀系数和热光系数。由于光纤布拉格光栅的温度灵敏系数受材料的弹性模量、热膨胀系数的影响较大,可以将其粘敷封装于某种膨胀系数较大的衬底材料上。在这种情况下,当温度发生变化时,不仅光纤本身的热膨胀和热光效应会使得布拉格波长发生变化,同时衬底材料的热膨胀也会使光纤布拉格光栅发生轴向应变而伸长,使得光纤布拉格光栅周期  $\Lambda$  的总伸长量大于裸光纤布拉格光栅在同一温度下的伸长量,从而引起布拉格波长漂移量或者温度灵敏系数值的增加。因此,借助于粘敷封装技术可以显著提高光纤布拉格光栅的温度灵敏系数。当衬底材料的热膨胀系数  $\alpha_s$  大于光纤布拉格光栅材料的热膨胀系数  $\alpha$  时,衬底材料的热膨胀将对光纤布拉格光栅有轴向拉伸作用。由于应力不影响光纤布拉格光栅的热光系数,此时  $K_T$  可以修正为:

$$K_T = \alpha + \xi + (1 - P_e)(\alpha_s - \alpha) \quad (4)$$

式中:  $P_e$  为光纤布拉格光栅的有效弹光系数,值约为 0.22<sup>[12]</sup>。从公式(4)中可以看出,当衬底材料的热膨胀系数大于石英材料的热膨胀系数时,将会提高光纤布拉格光栅的温度灵敏系数。将修正后的温度灵敏系数公式(4)代入公式(3)中,可得到考虑衬底材料热膨胀作用的光纤布拉格光栅温度响应关系为:

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = [\alpha + \xi + (1 - P_e)(\alpha_s - \alpha)]dT \quad (5)$$

将实验中拟采用的铜、铝、有机玻璃、聚四氟乙烯等衬底材料的热膨胀系数分别代入公式(5)中,可得到在这些材料衬底封装下的光纤布拉格光栅温度灵敏系数理论值,其结果如表 1 所示。

表 1 不同衬底材料封装下的光纤布拉格光栅温度灵敏系数理论值

Tab.1 Temperature sensitivity theoretical value of FBG with packaged on different materials

Substrate materials	Copper	Aluminium	Perspex	PTFE
$\alpha_s/^\circ\text{C}$	17 <sup>[13]</sup>	23.2 <sup>[14]</sup>	70 <sup>[15]</sup>	109 <sup>[13]</sup>
$K_T\lambda_B/\text{pm}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	31.28	38.78	95.36	142.51

在实验中,利用环氧树脂胶将光纤布拉格光栅

两侧的尾纤以一定间距的粘敷于不同片式衬底材料上进行封装。根据热膨胀知识可知,材料由于温度改变而有胀缩现象。温度的变化所导致材料体积的变化量可以表示为<sup>[16]</sup>:

$$\Delta V = \alpha V \Delta T \quad (6)$$

式中: $\Delta V$  为所给温度变化  $\Delta T$  下材料体积的改变量; $\alpha$  为材料的体膨胀系数; $V$  为材料的初始体积; $\Delta T$  为温度差。对于文中实验来说,由于尾纤处有两个粘点,所以理论模型可以简化为一维角度来分析。此时,材料的一维热伸长量可以表示为<sup>[16]</sup>:

$$\Delta L = \alpha L \Delta T \quad (7)$$

式中: $\Delta L$  为材料的一维热伸长量; $\alpha$  为材料的热膨胀系数; $L$  为材料的初始长度(在实验中即为光纤布拉格光栅两侧尾纤粘点间的距离); $\Delta T$  为温度差。从公式(7)可以看出,材料的热伸长量的大小与材料的种类、材料的初始长度及温差数值有关。在温度变化不大时,材料在单一方向上的热伸长量与温度的变化量成正比,与材料的初始长度也成正比。初始长度不同的材料,在相同温度变化时,在同一方向上的热伸长量是不同的。为了便于不同衬底材料粘敷封装下的光纤布拉格光栅温度灵敏性的对比,在实验中将光纤布拉格光栅两侧尾纤上的两粘点间距均设置为 55 mm。

## 2 实验装置

图 1 为实验所采用的光纤布拉格光栅温度传感增敏实验装置示意图。实验中采用带尾纤输出的 976 nm 单模输出半导体激光二极管作为泵浦源,经由一单模 976/1 550 nm 的波分复用器(Wavelength Division Multiplexer, WDM),激发泵浦一段低浓度掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤,用其产生的放大自发辐射谱(Amplified Spontaneous Emission, ASE)作为宽带辐射源,以此来研究光纤布拉格光栅的温度增敏特性。由于实验中所采用的光纤布拉格光栅带宽较窄,因此在实验研究波段范围内的宽带光源光谱较为平滑。在掺杂光纤后与一中心波长为 1 550 nm 的环形器 port1 端熔接,环形器 port2 端熔接用于研究温度传感特性测试的光纤布拉格光栅。实验中所采用的光纤光栅是刻写在普通单模光纤上,栅区长度为 15 mm,中心波长为 1 550 nm,反射率约为 70%,反射带宽(Full width at half maximum, FWHM)约为 0.08 nm。光纤布拉格光栅的栅区部分

没有任何涂覆层保护,而栅区两侧的尾纤部分则有涂覆层保护。实验中,将光纤布拉格光栅拉直,且尽量无任何应力地置于不同片式衬底材料上,并利用环氧树脂胶在光纤布拉格光栅两侧的尾纤上进行粘敷封装。尾纤上的两粘贴点间距均为 55 mm,且相对于光纤布拉格光栅中心呈对称分布。在粘贴操作中,使光纤布拉格光栅位于衬底材料中心轴线处且平行于衬底材料,这样不但能够保证光纤布拉格光栅反射波长与温度有良好线性关系,而且还确保了片式封装装置的稳定性。将粘敷有光纤布拉格光栅的片式衬底材料置于由黄铜制成的高精度温控炉中(温控精度为 0.01 °C),保持温控炉与片式封装装置水平接触,并在衬底材料和温控炉表面之间涂抹一层导热硅脂,以提高温控炉与衬底材料之间的热传导效率,从而避免了受热不均匀对实验结果的影响。外界环境的干扰,尤其是外界温度的变化,会对光纤布拉格光栅光谱的反射波长输出有较大的影响。因此,在片式装置上加一隔热保护盖,以防止外界环境变化对测量结果的影响。光纤布拉格光栅的反射光谱经环形器的 port3 端输出,利用光谱分析仪(Yokogawa, AQ6370C)对其进行采集、测量,光谱分析仪分辨率为 0.02 nm。另外,在使用环氧树脂胶对光纤布拉格光栅的粘敷封装过程中,光纤布拉格光栅与片式衬底材料在测试温度范围内始终没有出现脱落现象。

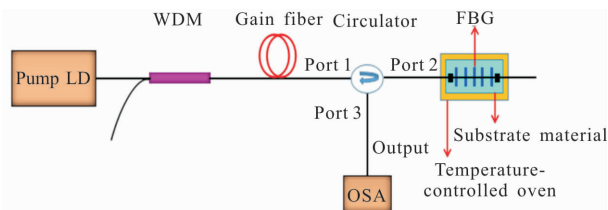


图 1 光纤布拉格光栅温度传感增敏实验装置示意图

Fig.1 Experimental setup for FBG temperature sensitivity enhancement

### 3 实验结果及讨论

以铜、铝、有机玻璃、聚四氟乙烯等材料作为光纤布拉格光栅的衬底材料,分别对光纤布拉格光栅的两侧尾纤有、无涂覆层粘敷封装情况,进行了光纤布拉格光栅温度增敏的实验研究。在实验测量中,为了减小由于温度不稳定带来的测量误差,所有实验数据均在恒温后采集、记录。

首先对实验中所使用的光纤布拉格光栅在裸纤

情况下(即未粘敷于衬底材料上时)的反射波长漂移量和温度灵敏系数进行了测量。图 2 为光纤布拉格光栅在温度为 30~60 °C 之间(测量温度间隔为 5 °C)时,反射谱随温度变化的漂移情况。从图中可以看出,在裸纤情况下,光纤布拉格光栅的反射光谱随温度的升高而向长波长方向以相同的波长间隔漂移,即其反射波长随温度的增长而呈线性变化,如图 2 中的插图所示。当温度变化 30 °C 时,光纤布拉格光栅反射波长漂移量约为 0.31 nm。由图 2 中插图拟合计算出该光纤布拉格光栅在裸纤情况下的平均温度灵敏系数为 10.23 pm/°C,在测量误差允许范围内与理论计算值基本一致。

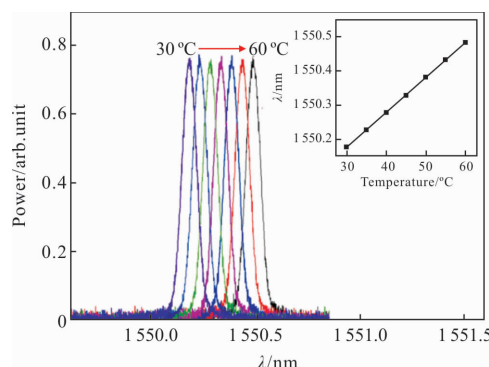


图 2 裸光纤布拉格光栅反射谱随温度变化漂移图

Fig.2 Bare FBG reflection spectrum shifts with temperature

按照前文所描述的那样,将尾纤带有涂覆层的光纤布拉格光栅分别粘敷封装于铜、铝、有机玻璃、聚四氟乙烯等衬底材料上,对封装后的光纤布拉格光栅进行了温度敏感性测试实验。实验中,每隔 5 °C 记录一个光谱。图 3 为衬底材料为聚四氟乙烯时,光纤布拉格光栅的反射谱随温度变化的漂移情况。从

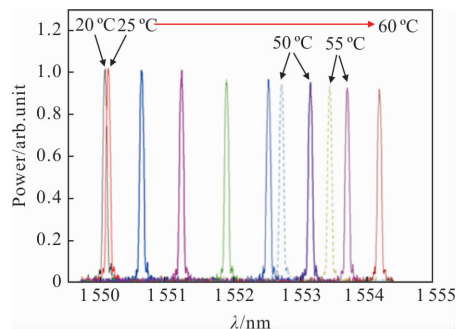


图 3 聚四氟乙烯为衬底材料的尾纤有涂覆层粘敷封装时光纤布拉格光栅反射谱随温度变化图

Fig.3 Reflection spectra of FBG with coated tails slice-packed on PTFE

图中可以看出, 光纤光栅的反射光谱在 20~25 °C 的中心波长间隔明显小于高于 25 °C 时的光谱间隔。这主要是由于在粘敷光纤光栅的操作中, 无法完全保证在将光纤布拉格光栅粘敷于衬底材料上时完全被拉直。当温度在低于 25 °C 时, 光纤布拉格光栅仍基本处于自由伸展状态, 此时整个装置的温度敏感性仍主要由光纤布拉格光栅自身的温度敏感性所决定 (即由光纤布拉格光栅自身的热膨胀系数和热光系数决定)。经多次测试发现, 当温度超过 25 °C 之后, 衬底材料的热膨胀效应将会变得显著起来, 会将光纤布拉格光栅完全拉直, 这时衬底材料的热膨胀效应将会显著提高光纤布拉格光栅的温度敏感特性。此时, 在 25~50 °C 之间测量的反射谱, 其相邻反射谱的中心波长间隔基本相等, 而高于 50 °C 时, 相邻反射谱中心波长的间隔稍小, 其原因下面会有解释。课题组还分别研究测试了将光纤布拉格光栅片式封装于铜、铝、有机玻璃等衬底材料时的温度敏感特性。图 4 为使用这四种衬底材料对光纤布拉格光栅片式封装时, 其反射波长随温度的变化关系。从图中可以看出, 在高于 25 °C 时, 基于上述四种衬底材料片式封装后的有涂覆层光纤布拉格光栅的反射波长随温度的变化

了多次升温 and 降温的重复实验后发现, 在温度较低时实验结果重复性较好, 而在温度较高时重复性不甚理想。尤其是对用热膨胀效应较大的聚四氟乙烯封装后的光纤布拉格光栅进行多次测试时发现, 其在温度为 50 °C 和 55 °C 时的反射谱中心波长甚至会明显偏离初次测试值, 即其反射谱中心波长发生反向漂移现象, 如图 3 中虚线光谱所示。究其原因, 主要是因为, 只是在实验中固定光纤布拉格光栅时, 只是将其涂覆层与衬底材料紧密粘接, 随着温度的不断升高, 光纤布拉格光栅的尾纤包层与涂覆层之间的应力逐渐增大。在温度较高时, 较大的应力会造成尾纤包层与涂覆层之间发生脱离而产生相对运动, 导致衬底材料的热膨胀并没有通过涂覆层完全作用于光纤布拉格光栅上, 进而导致其反射谱中心波长发生反向漂移现象。包层与涂覆层之间的这种不可恢复的脱离现象, 会造成有涂覆层粘敷封装的光纤光栅温度敏感性测试重复性不甚理想。

为了改进和优化实验, 笔者将光纤布拉格光栅两侧的尾纤浸泡在丙酮中, 将其涂覆层进行了剥离, 重复上述实验工作。图 5 为剥离尾纤的光纤布拉格光栅片式封装于上述四种衬底材料上时, 光纤不拉

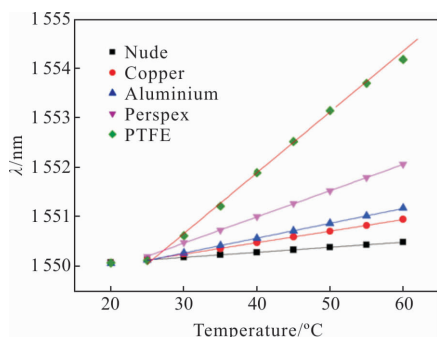


图 4 利用不同材料片式封装尾纤有涂覆层时光纤布拉格光栅的反射波长-温度曲线

Fig.4 Reflection wavelengths of FBG with coated tails slice-packaged on different substrate materials versus temperature

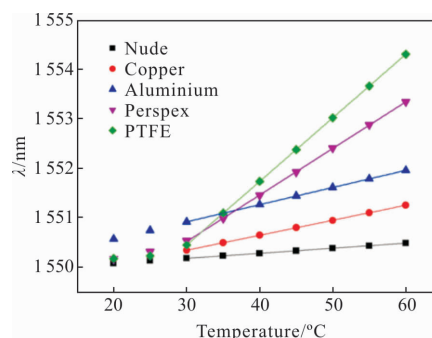


图 5 利用不同材料片式封装尾纤无涂覆层时光纤光栅的反射波长-温度曲线

Fig.5 Reflection wavelengths of FBG with uncoated tails slice-packaged on different substrate materials versus temperature

基本上呈线性关系。通过对实验数据数值拟合, 可以得到利用铜、铝、有机玻璃和聚四氟乙烯做衬底材料时, 光纤布拉格光栅的温度灵敏系数分别为 23.29、30.04、53.04、119.77 pm/°C, 与裸光纤布拉格光栅相比, 其温度灵敏系数分别是裸光纤布拉格光栅的 2.3 倍、2.9 倍、5.2 倍、11.7 倍。然而, 当对上述实验进行

格光栅的反射波长随温度的变化关系。从图中可以看出, 在温度高于 30 °C 时, 衬底材料的热膨胀效应将会显著提高光纤布拉格光栅的温度敏感特性, 此时光纤布拉格光栅的反射波长随温度成良好线性比例关系。通过对实验数据线性拟合计算, 当以铜、铝、有机玻璃、聚四氟乙烯为衬底材料时, 其温度灵

敏系数分别为 30.42、34.76、94.29、128.76 pm/°C, 约为裸光纤布拉格光栅的 3 倍、3.4 倍、9.2 倍、12.6 倍。可以看出, 对尾纤涂覆层剥离后的光纤布拉格光栅温度灵敏系数实验测量值, 在测量误差允许范围内与表 1 中的理论计算值基本吻合。经多次升温、降温反复实验测试, 测量结果具有很好的重复性。由此可以看出, 将尾纤涂覆层剥离后的光纤布拉格光栅粘贴于衬底材料, 相比于未对其尾纤涂覆层进行剥离操作的片式粘敷封装, 可进一步提高其温度灵敏系数。需要指出的是, 由于操作不当的原因, 在将光纤布拉格光栅拉直粘敷于铝片衬底材料的过程中, 光纤布拉格光栅处于一定的拉力伸张状态, 存在一定的预应力。因此在图 5 中, 铝片式封装下测量的光纤布拉格光栅反射谱中心波长都偏大, 但这并不影响其线性拟合得出的温度灵敏系数的准确性。

#### 4 结 论

文中基于光纤布拉格光栅温度传感理论, 以铜、铝、有机玻璃、聚四氟乙烯为衬底材料, 对光纤布拉格光栅两侧尾纤有、无涂覆层片式封装情况的增敏特性进行了实验研究。实验中所使用的光纤布拉格光栅, 其在裸光纤情况下的温度灵敏系数平均值为 10.23 pm/°C。当光纤布拉格光栅尾纤涂覆层未剥离粘贴于上述衬底材料上时, 通过实验数据数值拟合, 得到粘敷封装的光纤布拉格光栅温度灵敏系数分别是裸光纤的 2.3 倍、2.9 倍、5.2 倍、11.7 倍。然而, 由于在较高温度下光纤包层与涂覆层之间的应力会使得光纤包层与涂覆层发生错位、脱离, 引起反射谱中心波长反向漂移现象, 导致实验测量结果重复性不甚理想。为了进一步优化实验, 将光纤布拉格光栅尾纤的涂覆层进行剥离, 重复了上述测试实验, 进一步将光纤布拉格光栅的温度灵敏系数提高到了 3 倍、3.4 倍、9.2 倍、12.6 倍, 其反射波长随温度的变化曲线具有良好的线性关系。经多次升温、降温测试, 实验结果重复性良好。由此可见, 对光纤布拉格光栅两侧尾纤涂覆层进行剥离操作有利于其温度灵敏性的提高, 同时选取热膨胀系数较大的衬底材料能够更进一步地提高其温度灵敏性。

#### 参 考 文 献 :

- [1] Warren-Smith S C, Schartner E P, Nguyen L V, et al. Stability of grating-based optical fiber sensors at high temperature[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(8): 2978–2983.
- [2] Kan Baoxi, Yang Chao, Bian Heming, et al. Humidity influence on embedded fiber Bragg grating strain sensors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47 (S1): S122007. (in Chinese)
- [3] Zhang Kaiyu, Yan Guang, Meng Fanyong, et al. Temperature decoupling and high strain sensitivity fiber Bragg grating sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(6): 1330–1337. (in Chinese)
- [4] Wu X, Lu J, Wang G, et al. Temperature measurement of electromagnetic launcher rails based on FBG [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(5): 2382–2386.
- [5] An Jia, Wang Yongjie, Li Fang, et al. Highly sensitive LPG temperature sensor employing polyamic acid-coating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 0822002. (in Chinese)
- [6] Zhang W, Webb D J, Lao L, et al. Water content detection in aviation fuel by using PMMA based optical fiber grating[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 282: 774–779.
- [7] Kersey A D, Davis M A, Patrick H J, et al. Fiber grating sensors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1442–1463.
- [8] Zhan Yage, Cai Haiwen, Geng Jianxin, et al. Study on aluminum groove encapsulating technique and sensing characteristics of FBG sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(8): 952–955. (in Chinese)
- [9] Yu Xiujuan, Yu Youlong, Zhang Min, et al. Strain and temperature sensing characteristics of copper chip encapsulated fiber Bragg grating sensors [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(9): 1325–1328. (in Chinese)
- [10] Liu Shihua, Chen Tao, Li Ruiya, et al. Study on the effect of adhesive effect of substrate FBG temperature sensor on its performance[J]. *Optoelectronics · Laser*, 2016, 27(7): 692–698. (in Chinese)
- [11] Jia Zhenan, Qiao Xueguang, Fu Haiwei, et al. Temperature sensitizing technology of fiber Bragg grating [J]. *Journal of Northwestern University: Natural Science*, 2003, 33 (4): 413–415. (in Chinese)
- [12] Zhao Q, Liu X, Wang Y, et al. High sensitive fiber Bragg

- grating vibration sensor based on quartz diaphragm[C]//2018 IEEE 3rd Optoelectronics Global Conference (OGC). IEEE, 2018: 118–121.
- [13] Yuan Y, Wang J, Yao M, et al. Influence of SiO<sub>2</sub> addition on properties of PTFE/TiO<sub>2</sub> microwave composites [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2018, 47(1): 633–640.
- [14] Jiang W, Li G, Wu Y, et al. Effect of heat treatment on bonding strength of aluminum/steel bimetal produced by a compound casting [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 258: 239–250.
- [15] Silva-López M, Fender A, MacPherson W N, et al. Strain and temperature sensitivity of a single-mode polymer optical fiber[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(23): 3129–3131.
- [16] Liu Z, Gao Q, Chen J, et al. Negative thermal expansion in molecular materials[J]. *Chemical Communications*, 2018, 54(41): 5164–5176.