

文章编号 1004-924X(2007)03-0326-05

两种封装的光纤光栅温度传感器的低温特性

郭明金, 姜德生, 袁宏才

(武汉理工大学 光纤传感技术与信息处理教育部重点实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要:介绍了光纤光栅(FBG, Fiber Bragg Gratings)温度传感器的两种封装形式。推导了两种 FBG 温度传感器的温度敏感因素并进行了实验验证。实验研究了两种 FBG 温度传感器在 $-70\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的中心波长低温变化特性, 比较了相同条件下两种 FBG 温度传感器的实验结果。结果表明: 细不锈钢管封装的 FBG 温度传感器的中心波长在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时发生了突变, 急剧下降; 而镀金 FBG 温度传感器的中心波长在 $-70\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 随温度线性变化, 重复性较好并且几乎没有迟滞现象。两种传感器在线性变化区间的温度灵敏系数 KT 分别为 $28.2\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 和 $21.3\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$, 分别是裸光纤布拉格光栅的 3 倍和 2.3 倍, 它们的线性拟合度都超过 0.999。

关键词: 导波与光纤光学; 光纤布拉格光栅; 相位掩模; 封装工艺; 低温特性

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

Low temperature properties of fiber Bragg grating temperature sensors with two package methods

GUO Ming-jin, JIANG De-sheng, YUAN Hong-cai

(*Key Laboratory of Fiber Optic Sensing Technology and Information Processing, Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China*)

Abstract: Two package methods of Fiber Bragg Grating(FBG) temperature sensors were introduced. The temperature sensitive factors of the sensors were derived analytically and verified by experiments. The experiment results of two kinds of FBG temperature sensors in identical conditions were compared by analyzing the variety properties of center wavelength from $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. From the experimental results, it is shown that the center wavelength of FBG temperature sensor with thin stainless steel tube package falls sharply at $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$; while there is a very good linearity and preferable repeatability between the center wavelength of FBG with gold package in the temperature change from $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, and almost no hysteresis effect. The sensitivities KT of two temperature sensors are $28.2\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ and $21.3\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ respectively during linear change, and they are 2.89 and 2.28 times as large as that of a bare FBG. Their pertinence coefficients are more than 0.999.

Key words: guided and fiber optics; optical fiber Bragg grating; phase mask; package technique; property of low temperature

收稿日期: 2006-04-22; 修订日期: 2006-11-18.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 60537050)

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)是20世纪90年代以来国际上新兴的一种基础性光纤器件。由于光纤布拉格光栅具有抗电磁干扰、体积小、重量轻等诸多优点^[1-5],因此它非常适合于恶劣飞行环境中对飞机进行温度、压力等参数检测。近年来,很多专家学者对光纤光栅的温度传感特性进行了研究。日本的 Noritomo^[6]等人将光纤光栅布置于热电偶传感腔内,研究其没有应变下的温度传感能力;新加坡的 Murukeshan^[7]等人用光纤光栅研究了复合材料固化过程的温度特性;中国的 BI Weihong^[8]等人研究了分布式光纤布拉格光栅实现应变和温度的同时测量。但是,这些研究大多集中于光纤布拉格光栅温度传感器常温时谐振波长随温度变化的特性,虽然有研究者研究了光纤布拉格光栅温度传感器零度以下的温度特性,但最低温度也不低于 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下光纤布拉格光栅温度传感器的温度特性几乎没有报道。而飞机在日常训练和战斗飞行时,经常有达到 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下温度的过冷气流,这对光纤布拉格光栅温度传感器低温特性提出了需求。因此,研究光纤布拉格光栅温度传感器 $-30\sim-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时谐振波长随温度变化的特性显得非常重要。本文将对两种封装的光纤布拉格光栅温度传感器低温时中心波长随温度变化的特性进行理论和实验分析,为光纤布拉格光栅温度传感器在飞机低温飞行环境中的使用提供依据。

2 光纤布拉格光栅封装

光纤布拉格光栅是基于光纤的光敏特性制成的,利用紫外光就可以将一些特定的光波导结构写入光纤中,形成光纤型光波导器件。目前最有效的、应用最多的一种光纤光栅制作方法是相位掩模法。

纯石英组成的光纤在低温环境中具有较低的热膨胀系数同时又特别脆弱,因此用裸光纤布拉格光栅来测量低温非常困难,可以采用热膨胀系数大的金属材料封装光纤光栅以增加其强度,提高传感器的温度灵敏度。本文采用热膨胀系数大的不锈钢管和金封装光纤布拉格光栅制作了两种

小尺寸的光纤光栅温度传感器,它们的封装形式如图1和2所示。图1中细不锈钢管直径规格分别为1 mm和1.5 mm。光纤布拉格光栅与细不锈钢管之间以及不同规格的细不锈钢管之间的粘贴均采用美国生产的双组分环氧树脂。图2中镀金层的厚度约为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。

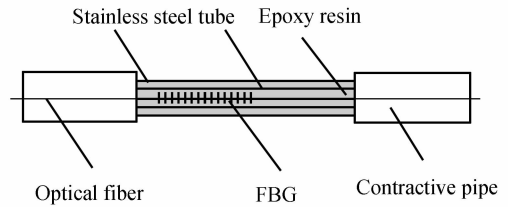


图1 不锈钢管封装的FBG温度传感器示意图
Fig.1 Sketch of FBG with thin stainless steel tube package

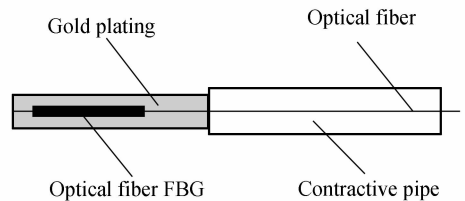


图2 镀金FBG温度传感器示意图
Fig.2 Sketch of FBG with plating gold package

两种封装好的光纤光栅温度传感器都需要进行老化处理,目的是除去残余应力和让温度传感器老化。这样处理后的光纤布拉格光栅温度传感器的中心波长与老化前相比较,应 $\leq 0.2\text{ nm}$ 。

3 实验

3.1 实验原理

根据光栅理论,当一束光进入光纤光栅时,会对满足布拉格条件的光波产生反射,该光波的波长称为光纤布拉格光栅的中心波长 λ_B ,光纤布拉格光栅的中心波长 λ_B 与折射率和光栅周期的关系为

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

式中, n_{eff} 为纤芯有效折射率; Λ 为光栅的调制周期。

由式(1)可以看出: n_{eff} 与 Λ 的改变均会引起反射光波长的改变。当光纤布拉格光栅的外界环

境发生变化的时候,就有可能导致光纤布拉格光栅的中心波长随着温度变化的特性。由于光纤材料的热光效应,光纤布拉格光栅的周期也发生变化,从而导致 n_{eff} 和 Λ 的变化,最终导致光纤布拉格光栅波长的漂移。不考虑波导效应,可得:

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = \left(\frac{1}{n} \frac{dn}{dT} + \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} \right) dT, \quad (2)$$

令 $\frac{1}{n} \frac{dn}{dT} = \xi$, 即为热光常数; $\frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} = \alpha$, 即为热

膨胀系数,从而可得式(3):

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = (\xi + \alpha) dT, \quad (3)$$

令 $K_T = \lambda(\xi + \alpha)$, K_T 为光纤布拉格光栅温度传感的灵敏度系数,由此可得式(4):

$$\Delta\lambda = K_T \Delta T, \quad (4)$$

式(4)即为假定没有外力作用时裸光纤布拉格光栅中心波长与温度的关系。对于光纤为纯石英的情况,通常有: $\alpha \approx 0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\xi \approx 6.67 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。对于中心波长在 1 300 nm 的光纤布拉格光栅,其温度灵敏系数 K_T 约为 9.4 pm/ $^\circ\text{C}$ 。但是,由于采用的光纤、光纤光栅写入工艺以及退火工艺的差别,裸光纤布拉格光栅的温度敏感特性会有所不同。

光纤布拉格光栅传感器封装后,封装材料会极大地改变光纤布拉格光栅的传感特性。若用 α_s 表示封装材料的热膨胀系数,则封装后的光纤布拉格光栅温度传感器的温度响应可表示为:

$$K_T = \lambda[\xi + \alpha + (1 - P_e)(\alpha_s - \alpha)], \quad (5)$$

式(5) $P_e = (n_{\text{eff}}^2/2)[P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})]$ 为光纤的有效弹光系数,其中 P_{11} 和 P_{12} 为光纤的弹光系数, ν 为泊松比,对于纯石英光纤, $P_e \approx 0.22$ 。选用两种封装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 $\alpha_s \gg \alpha$, 因此式(5)可简化为:

$$K_T = \lambda[\xi + \alpha + (1 - P_e)\alpha_s], \quad (6)$$

则温度灵敏系数 K_T 是与封装材料热膨胀特性有关的常数。这里选用的两种封装材料的热膨胀系数分别为 $19 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 左右和 $13 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 左右,理论计算值 K_T 分别为 28.7 pm/ $^\circ\text{C}$ 和 22.6 pm/ $^\circ\text{C}$, 大约分别是裸光纤布拉格光栅的 3.2 倍和 2.4 倍。

3.2 实验仪器与过程

本次实验采用型号为 MC-711 的温度升降程序控制器,温度升降程序控制器的测量精度为

$\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。采用的光纤布拉格光栅长度为 10 mm,两种光纤布拉格光栅温度传感器的中心波长分别为 1 299.168 nm 和 1 286.424 nm。光纤布拉格光栅中心波长识别系统采用理工光科公司生产的 BGD-L10C 光纤布拉格光栅调制解调器,该仪器波长分辨率为几个皮米左右,扫描范围为 1 280~1 305 nm,扫描频率为几赫兹,其工作环境温度为 $-10 \sim 40^\circ\text{C}$ 。

光纤光栅温度传感器低温特性实验装置如图 3 所示。实验时,将两种待测光纤布拉格光栅温度传感器放入温度升降程序控制器中。温度升降程序控制器的温度控制为 $0 \sim -70^\circ\text{C}$ 。做了 8 次 $0^\circ\text{C} \sim -70^\circ\text{C}$ 再回到 0°C 的循环实验。降温以 0°C 作为温度起始点,控制温度升降程序控制器的温度,使控制器内的温度逐渐降低,每降低 5°C ,让控制器保持恒定温度 10 min 左右,温度降到 -70°C 后停止降温接着升温,升温过程同样是每 5°C 升一次,在每个温度点让控制器保持恒定温度 10 min 左右,温度最后升高到 0°C ,并记录每个温度点对应的光纤布拉格光栅温度传感器的中心波长值。同时借助通用的光纤 FC/PC 跳线头接头与光纤布拉格光栅调制解调器相连,通过 RS232 与计算机通讯,光纤布拉格光栅温度传感器的中心波长随温度变化的信息可以在计算机中显示并打印。取两个温度传感器的 8 次读数平均值作为测量结果,得到了一组实验分析的数据,由于篇幅的原因,实验数据列表省略。

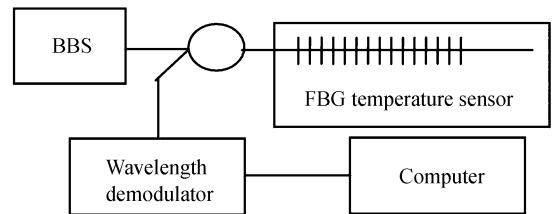


图 3 光纤布拉格光栅低温特性的实验装置

Fig. 3 Experimental setup for the low temperature properties of FBG

3.3 实验结果和分析

镀金的光纤光栅温度传感器在 $-70 \sim 0^\circ\text{C}$ 的中心波长随温度变化曲线如图 4 所示。从图中不难发现在升温与降温过程中镀金的光纤布拉格光栅温度传感器的中心波长与温度均呈现良好的线

性关系,相关系数均达 0.999 以上,其波长与温度的拟合方程式分别为

$$\lambda_B = 0.0283T + 1285.773$$

于是镀金 FBG 温度传感器相应的温度传感灵敏度系数 K_T 的平均值为 28.2 pm/°C,并且重复性较好。

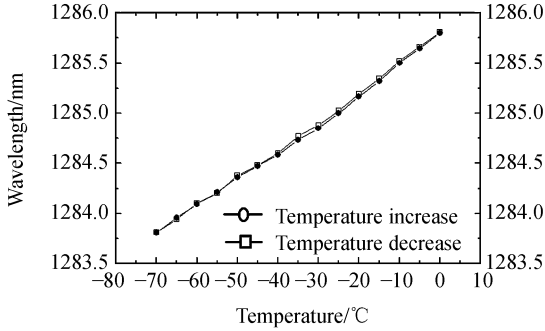


图4 镀金 FBG 温度传感器在 $-70 \sim 0$ °C 时中心波长随温度变化的曲线

Fig. 4 Change curve of center wavelength of FBG temperature sensor with metal package against the temperature from -70 °C to 0 °C

细不锈钢管封装的光纤光栅温度传感器在 $-70 \sim 0$ °C 之间的其中心波长随温度变化曲线如图 5 所示。实验过程中温度降到 -60 °C 时细不锈钢管封装的光纤光栅温度传感器中心波长发生突变,急剧下降,其值比正常值小得多,而在 $-60 \sim 0$ °C,升温与降温过程中光纤布拉格光栅的中心波长与温度均呈现良好的线性关系,相关系数均达 0.999 以上,其波长与温度的拟合方程式分别为

$$\lambda_B = 0.0213T + 1298.664$$

细不锈钢管封装的 FBG 温度传感器的温度传感灵敏度系数 K_T 的平均值为 21.3 pm/°C,同时重复性较好。

细不锈钢管封装的光纤布拉格光栅温度传感器当温度降到 -60 °C 时,其中心波长发生突变,急剧下降,其值比正常值小得多,定性分析其原因如下:

(1) 光纤布拉格光栅封装后,由于光纤布拉格光栅的热光系数没有变化,而外面的封装材料以及粘附树脂热胀冷缩的程度大,导致光纤布拉格光栅在 -60 °C 时的热胀冷缩性质发生改变;

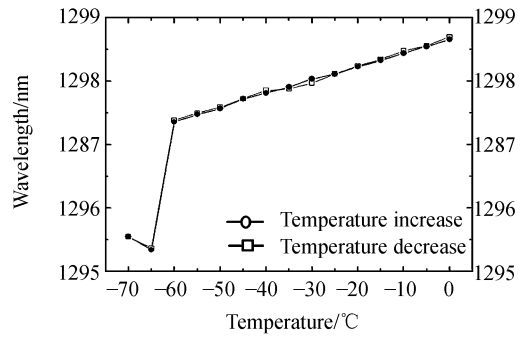


图5 细不锈钢管封装的 FBG 温度传感器在 $-70 \sim 0$ °C 时中心波长随温度变化的曲线

Fig. 5 Change curve of center wavelength of FBG temperature sensor with thin steel tube package against the temperature from -70 °C to 0 °C

(2) 受封装方法、技术和工艺的影响,光纤布拉格光栅与细不锈钢管之间出现空隙,导致光纤布拉格光栅传感器内部应力、应变不均匀, -60 °C 时光纤布拉格光栅中心波长发生突变;

(3) 双组分环氧树脂在 -60 °C 时其化学结构和物理特性发生了变化,导致光纤布拉格光栅脱离细不锈钢管或只有部分固定,于是光纤布拉格光栅产生了一定的微弯损失,从而改变了 FBG 温度传感器的传感特性。

(4) 低温时温度、应力对光纤光栅的耦合作用以及 FBG 的中心波长的影响加大导致了 FBG 温度传感器波长的突变。

尽管对 -60 °C 时光纤光栅的中心波长发生突变现象进行了上述几点的定性分析,但是上述每一点对该现象的影响有多大还有待进一步进行逐个的实验验证,以便确定对该现象影响最大的是何种因素,为光纤光栅温度传感器的封装与制作提供依据。

镀金和细不锈钢管封装的两种光纤布拉格光栅温度传感器温度传感灵敏度系数 K_T 分别为 28.2 pm/°C 和 21.3 pm/°C,是裸光纤布拉格光栅的 3 倍和 2.3 倍,都低于理论分析值 28.7 pm/°C 和 22.6 pm/°C。理论值和实验值之间的差异主要是由于光纤布拉格光栅较封装材料软,两者之间非刚性连接或者两者之间存在间隙;同时光纤布拉格光栅与两种封装材料热膨胀系数不同,从而导致热膨胀不同步。

4 结 论

采用镀金和细不锈钢管封装光纤布拉格光栅,研制了两种 FBG 温度传感器,它们的温度灵敏系数 K_T 在线性变化区间分别为 28.2 pm/℃ 和 21.3 pm/℃,是裸光纤布拉格光栅的 3 倍和 2.3 倍左右。通过实验研究了一 70~0℃ 之间两种封装形式的光纤布拉格光栅温度传感器的低温

特性。实验表明,镀金的光纤布拉格光栅温度传感器适合在低温环境中的应用;而细不锈钢管封装的 FBG 温度传感器由于受封装材料、技术和工艺的影响,其中心波长在某些温度发生突变,不适合低温区使用。因此,通过选取特定的封装材料、封装技术和工艺对 FBG 进行封装,能够消除 FBG 温度传感器在某些温度点的突变,从而使各种封装的 FBG 温度传感器能应用于整个低温环境,以满足航空航天恶劣飞行环境的需求。

参考文献:

- [1] 唐炜,史仪凯. Bragg 光纤传感技术应用研究[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(1): 79-83.
TANG W, SHI Y K. Study on applications of fiber Bragg grating sensing technique[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(1): 79-83. (in Chinese)
- [2] 姜德生, 何伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. 光电子·激光, 2002, 13(4): 420-430.
JIANG D SH, HE W. Review of applications for fiber Bragg grating sensors[J]. *J. Optoelectron · Laser*, 2002, 13(4): 420-430. (in Chinese)
- [3] RAO Y J. Recent progress in applications for in fiber Bragg grating sensors[J]. *Opt. Lasers Eng.*, 1999, 31: 297-324.
- [4] 郭玉彬, 葛璜. 光纤 Bragg 光栅的研究[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(1): 31-38.
GUO Y B, GE J. Fabrication of fiber Bragg grating[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(1): 31-38.
- [5] 桑新柱, 余重秀, 王葵如, 等. 高非线性光子晶体光纤中布拉格光栅的制作[J]. 光学精密工程, 2005, 13(6): 633-637.
SANG X ZH, YU CH X, WANG K R, *et al.*. Fabrication of Bragg grating in a highly nonlinear photonic crystal fiber [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 633-637.
- [6] NORITOMO H, YASUKAZU S. Fiber Bragg grating temperature sensor for practical use [J]. *ISA Trans.*, 2000, 39: 169-173.
- [7] MURUKESH AN V M, CHAN P Y, ONG L S, *et al.*. Cure monitoring of smart composites using fiber Bragg grating based[J]. *Sensor Actuator*, 2000, 79: 153-161.
- [8] 毕卫红, 李卫, 傅广为. 分布式光纤光栅实现应变和温度的同时测量[J]. 光电子·激光, 2003, 14(8): 781-785.
BI W H, LI W, FU G W. Simultaneous measurement of strain and temperature with a fiber Bragg grating sensor array[J]. *J. Optoelectron. Laser*, 2003, 14(8): 781-785. (in Chinese)

作者简介: 郭明金(1971—), 男, 湖北天门人, 2001 年于华中科技大学获工学硕士, 现为武汉理工大学光纤传感技术与信息处理教育部重点实验室在读博士, 师承姜德生教授, 主要从事光纤光栅传感技术的研究与应用。E-mail: hustguo2005@126.com