

光纤 Bragg 光栅在 77 K 环境下的温度传感性能研究*

邓凡平^{1**}, 邵进益², 黄国君², 许国兴¹, 王厚生¹, 王秋良¹

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要:进行了从液氮温度(77 K)到室温(286 K)的光纤 Bragg 光栅(FBG)温度传感性能的实验研究。结果表明,FBG 的温敏系数与温度相关。低于 210 K,FBG 的温敏系数变小,这将限制低温环境下 FBG 作为温度传感器的使用。通过在裸 FBG 外部涂敷热膨胀系数为 61×10^{-6} 的丙烯酸酯材料,可以显著提高 FBG 的温敏系数和线性度。80 K 时,有丙烯酸酯包层材料的 FBG 温敏系数为 0.01526 nm/K ,而同温度条件下裸 FBG 的温敏系数仅为 0.00449 nm/K 。

关键词:光纤 Bragg 光栅(FBG); 液氮温度; 温敏系数

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2007)04-0404-03

Study on Temperature Characteristics of Optical Fiber Bragg Grating Under the 77 K Environment

DENG Fairping^{1**}, SHAO Jin-yi², HUANG Guo-jun², XU Guo-xing¹, WANG Hou-sheng¹, WANG Qiu-liang¹

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

Abstract: The temperature sensing capacity of fiber Bragg grating(FBG) sensors from 77 K to 286 K is studied. It is found that the temperature sensitivity of FBG is dependent on the temperature. Below 210 K, the temperature sensitivity became smaller which seriously limits the application of FBG as temperature sensor in cryogenic environment. However, coating material Acrylate with larger coefficient of thermal expansion about 61×10^{-6} , can greatly improve the temperature sensing capacity of FBGs. At 80 K, the temperature sensitivity of Acrylate coated FBG is 0.01526 nm/K that is better than 0.00449 nm/K of the bare FBG at the same temperature.

Key words: fiber Bragg grating(FBG); liquid nitrogen temperature; temperature sensitivity

1 引言

温度监测对超导实验尤其重要。传统方法采用电阻温度计,但其尺寸较大,无法深入磁体内部测量,而且易受电磁干扰,测量的精确性和可靠性难于保证。近年来,光纤 Bragg 光栅(FBG)传感器的出现引起了超导工程人员的兴趣。FBG 用于传感,具有耐久性好、抗电磁干扰、单端输入和体积小等特点。

FBG 传感器是利用波长进行调制的,当外界温度发生变化时,将引起 FBG 的中心波长发生漂移,通过检测波长漂移量就可以计算出被测点的温度,FBG 波长漂移量与温度的对应换算关系称之为温敏系数^[1]。

国内目前研究的最低温度为 $-60 \text{ (} 213 \text{ K)}^{[2]}$,不能满足超导环境的需要。本文对 FBG 在液氮温度(77 K)到室温(286 K)的温度传感性能进行了研究和分析,根据实验数据计算了

裸 FBG 和以丙烯酸酯为包层材料的 FBG 的温敏系数,为其在低温和强磁场条件下的使用提供了一定基础。

2 FBG 温度传感原理

根据 FBG 传感理论,Bragg 中心波长 λ_B 与光栅周期 Λ 、纤芯有效折射率 n_{eff} 的关系满足

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

当仅考虑外界环境温度 T 变化时,由于热光效应, n_{eff} 发生变化;同时因为热膨胀效应, Λ 也发生变化。二者共同作用,使得 λ_B 发生偏移。式(1)两边对 T 进行求导,有

$$d\lambda_B = \left(2 \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + 2n_{\text{eff}} \frac{d\Lambda}{dT} \right) dT \quad (2)$$

式(2)两边同除以 λ_B ,并将式(1)代入,整理得到

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + \frac{d\Lambda}{\Lambda} \right) dT \quad (3)$$

* 收稿日期:2006-05-30 修订日期:2006-08-14

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(10355001)

** E-mail: fpdeng@mail.iee.ac.cn

令: $\alpha = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{dT}$, 为热光系数; $\beta = \frac{d\lambda}{dT}$, 为热膨胀系数。带入式

(3) 并整理得到

$$\lambda_B = \lambda_0 (1 + \alpha + \beta) T \quad (4)$$

其中, $\tau = \alpha + \beta$, 为 FBG 传感器的温敏系数。

常温下, 对于掺 Ge 裸石英光纤, 约为 $0.55 \times 10^{-6} / \text{K}$, 约为 $7.1 \times 10^{-6} / \text{K}^{3.41}$ 。为提高 FBG 的温敏系数, 在裸 FBG 外部涂敷热膨胀系数较大的丙烯酸脂材料。表 1 给出了实验所用 FBG 的热膨胀系数。

表 1 FBG 热膨胀系数
Tab. 1 Coefficients of thermal expansion of FBG and coating material

Coating material	Acrylate coated FBG / K ⁻¹	Bare FBG / K ⁻¹
Thermal expansion	61.00×10^{-6}	0.55×10^{-6}

3 实验

3.1 实验装置

实验装置如图 1 所示, 其中 Pt 电阻温度计已经过精确标定。传感器的 FBG 与 Pt 电阻温度计都为 15 mm, 为了保证 Pt 电阻与 FBG 感应的是同一温度值, 利用导热性能良好的 Cu 材料特别设计了温度平衡腔。将 Pt 电阻温度计与 FBG 置于腔内, 保持充分接近但又不接触, 以避免互相干扰。MOI 公司生产的 4 通道解调仪 FBCL1 提供光纤所需光源及解调装置, 其分辨率为 1 pm。实验所用裸 FBG 的 λ_B 为 1530 nm, 带丙烯酸脂包层 FBG 的 λ_B 为 1550 nm。

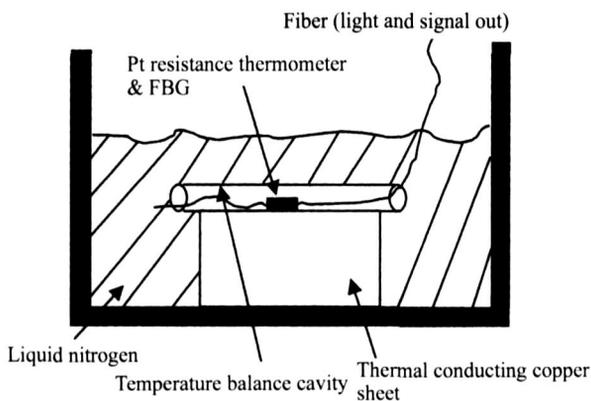


图 1 低温容器及其实验装置

Fig. 1 Liquid nitrogen bath used for temperature variation

实验开始时, 将温度平衡腔和导热 Cu 片浸泡于杜瓦瓶的液氮中, 此时温度为 77 K。实验过程中, 由于液氮的自然挥发, 液氮液面下降导致温度平衡腔和导热 Cu 片逐步暴露在空气中, 周围的环境温度会随着上升。由于液氮的热容大, 挥发速度较慢, 温度上升的速率约为 2 K/min, 可以保证 FBG 测量的是稳态温度。温度腔下部通过 Cu 片连接至液氮内, Cu 片除了提供温度平衡腔的结构支撑外, 还由于其底部一直浸泡在液氮中, 可在温度与液氮间形成均匀的温度梯度场, 进一步减

缓温度腔内的温度上升速率。

实验的测量与数据读取装置如图 2 所示。Pt 电阻温度计 Pt100 外接 1 mA 恒流源, 其电压值通过数字电压表 K2000 进行读取, 并通过 NI 数据采集卡读入计算机。通过自编 Lab-view 程序, 实时绘制出温度-时间关系曲线。

3.2 实验过程

实验开始时, 将液氮灌入低温容器直到整个温度腔浸泡在液氮中。在此过程中, 由于环境温度急剧变化, 光纤的 λ_B 由于热光效应和热膨胀效应而变小。实验开始后, MOI 解调仪以 1 Hz 的频率读取 λ_B 值。随着液氮液面逐渐下降, 温度腔内的温度从 77 K 缓慢上升, 液氮挥发完毕后, 测量得到的温度为 286 K。测量数据共 66 个, 平均每 3 K 得 1 个数据值。

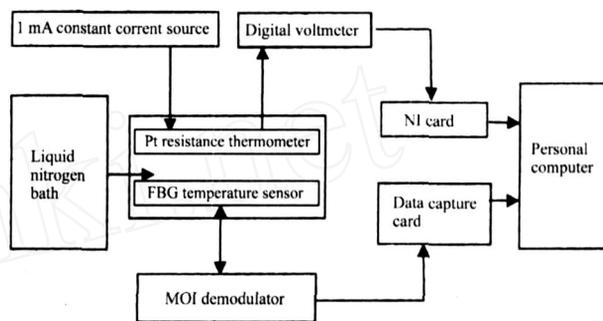


图 2 温度测量装置

Fig. 2 Experiment setup for cryogenic temperature measurement

4 实验结果与分析

测量结果如图 3 所示。数据处理时, 2 根光纤均以 77 K 时的中心波长为基准, 由其它温度对应的中心波长减去该基准值, 得到中心波长变化量。

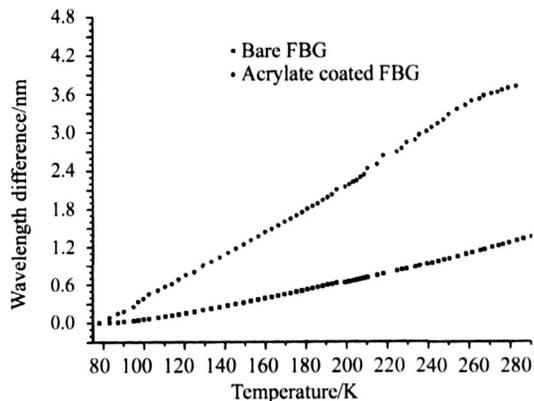


图 3 两 FBG 传感器测量数据对比

Fig. 3 Bragg wavelength difference versus temperature for acrylate coated FBG and bare FBG

由图 3 可见, 裸光栅 FBG 的测量数据分布比较均匀 (原因可能是由于光栅部位直接感受温度变化, 响应速度较快), 未出现有多峰现象, 带包层 FBG 的测量数据分布不如裸 FBG 那样

均匀,并出现数次多峰现象(原因是 FBG 包层和纤芯材料性质的差异)。

从图 3 可以看出,裸 FBG 的低温温度与波长关系是具有一定的非线性;带涂敷层 FBG 的温敏系数高于裸 FBG,且低温下的线性度较好。这反映了 FBG 温敏系数与温度的关系,并可通过外覆热膨胀系数较大的材料来提高 FBG 的温敏系数。

根据图 3 的实验数据,计算了不同温度范围内裸 FBG 和带包层 FBG 的温敏系数,结果见表 2。

表 2 不同温度范围内 FBG 温敏系数
Tab. 2 Calculated temperature sensitivities of FBGs at different temperatures

Temperatur/ K	Temperature sensitivities of acrylate coated FBG / (nm · K ⁻¹)	Temperature sensitivities of bare FBG / (nm · K ⁻¹)
286 ~ 210	0.02157	0.00825
200	0.01991	0.00684
100	0.01593	0.00482
80	0.01526	0.00449

在 286 ~ 210 K 时,测得裸光栅的温敏系数为 0.00825 nm/K,考虑到测量误差以及不同公司生产的 FBG 的差异,对比从其他文献查到的裸 FBG 温敏系数 0.00889 nm/K^[5],可以认为此次实验结论是准确的。

5 结 论

实验研究了 FBG 传感器从液氮温度到室温的温度传感性能。在一定温度范围内,FBG 的温度-波长线性关系良好;低于一定温度时,FBG 的温敏系数显著减小。

低于 210 K 时,FBG 温敏系数变小的原因可能是由于光纤的光学性能的变化,这需要进一步的理论和实验来验证。但从应用角度来看,为了在低温环境下也能充分发挥 FBG 的温度传感特性,则需要涂敷热膨胀系数更大的外包层材料。

参考文献:

- [1] Sanjay Gupta, Toru Mizunami, Takashi Yamao, et al. Fiber Bragg grating cryogenic temperature sensors[J]. Applied Optics, 1996, 35 (25) :5202-5205.
- [2] JIANG De-sheng, GUO Ming-jin, YUAN Hong-cai, et al. Studies on properties of low temperature of fiber Bragg gratings[J]. Journal of Optoelectronics · Laser (光电子 · 激光), 2004, 15 (6) :660-662. (in Chinese)
- [3] HU Jia-yan, JIANG Shan. Study of encapsulating technique and strain sensing characteristic of FBG temperature sensor[J]. Journal of Optoelectronics · Laser (光电子 · 激光), 2006, 17 (3) :311-313. (in Chinese)
- [4] WANG Yr-tian, ZHENG Long-jiang, HOU Pei-guo, et al. Optoelectronics and Fiber Sensor Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. 136-142. (in Chinese)
- [5] Max B Reld, Meric Ozcan. Temperature dependence of fiber optic Bragg gratings at low temperatures[J]. Opt Eng, 1998, 37 (1) :237-240.

作者简介:

邓凡平 (1982 -),男,硕士研究生,目前从事 FBG 传感器在高场超导磁体方面的研究。