

光纤 Bragg 光栅液氦环境下温度传感特性的研究^{*}

张红洁^{1,2,4**}, 邓凡平^{1,2,4}, 肖 剑^{3,4}, 黄国君³, 王秋良^{1,2}

(1. 中国科学院应用超导重点实验室, 北京 100080; 2. 中国科学院电工研究所, 北京, 100080; 3. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 4. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:进行了液氦温度(4.2 K)到室温(298 K)温区内光纤 Bragg 光栅(FBG)温度传感性能的实验研究。重点分析了液氦温度(4.2 K)到液氮温度(77 K) FBG 的温度传感特性。实验表明:FBG 传感特性与温度相关。在 50 K 以下, 温度响应基本没有变化; 50 K-77 K, 波长偏移量随温度上升变化不规律; 150 K-298 K 传感特性近似成线性。对比裸光栅与涂敷光栅, 涂敷光栅的温度灵敏度远大于裸光栅的温度灵敏度。选用外加热膨胀系数大的聚合物封装, 可以显著提高 FBG 的温敏系数和线性度。

关键词:光纤布拉格光栅; 液氦温度; 温度传感

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2008)05-0581-03

Study on temperature response of fiber Bragg grating at liquid helium temperature

ZHANG Hong-jie^{1,2,4**}, DENG Fan-ping^{1,2,4}, XIAO Jian^{3,4}, HUANG Guo-jun³, WANG Qiu-liang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Applied Superconductivity, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 4. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The temperature response of fiber Bragg grating sensors has been monitored over a temperature range from 4.2 K to 298 K, especially the temperature sensing in liquid helium environment. It is found that the temperature sensitivity of FBG is dependent on temperature. A thermal response is measured to above 50 K. However, the changes are more complicated from 50 K to 77 K. The linear temperature response is found from 150 K to 298 K. Coating material with larger coefficient of thermal expansion can greatly improve the temperature sensing behavior of FBGs.

Key words: fiber Bragg grating; liquid helium temperature; temperature response

1 引言

光纤布拉格传感器是利用光纤布拉格光栅(FBG)作敏感元件的功能型光纤传感器,可以直接检测温度和应变等物理量。具有体积小、抗电磁干扰、准确度高等特点。FBG 传感器的独特优点使得它们很容易粘贴于结构表面或是嵌入结构内部,实现对结构状态的实时监测。同时它们还可以组成传感器阵列,实现多点、多种物理量的同时测量。

对于超导体,只有当它的温度低于临界温度时才处于超导态,反之将出现失超现象。所以能准确检测超导体的温度,对于超导体的安全运行具有举足轻重的作用。超导体多运行在通电状态,有磁场存在。传统的电阻温度计测量时因受磁场干扰,精度很难保证。且体积大,安装不方便。这些因素制约了电阻温度计在超导温度检测方面的应用。

将 FBG 传感器用于温度检测,国内已有报道,最低测量温度为-60^[1]。我们课题组的前期工作已经完成了液氦温度(77 K)下 FBG 传感特性的研究^[2]。本文对 FBG 在液氦温度(4.2 K)到室温(298 K)的温度范围内温度传感性能进行了研究和分析,为其在极低温和强磁场下的应用提供了理论基础。

2 FBG 温度传感原理

光纤布拉格光栅是折射率沿光纤轴周期性分布的新型光器件,具有良好的波长选择特性,即只有满足布拉格条件的波长的光被耦合到反向传输模中。温度通过改变光栅周期和光栅反向耦合模的有效折射率,从而导致光纤光栅响应波长的移动,通过检测波长偏移量就可以得到被测温度。光纤布拉格光栅的中心波长 λ_B 满足以下方程

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

收稿日期:2007-05-21 修订日期:2007-08-09

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(50577063)

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

式中, n_{eff} 为光纤光栅的有效折射率; λ_B 为光纤光栅的折射率调制周期。将式(1) 两边对温度求导可以得到

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

式(2)除以式(1),可以得到

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

式中, $\frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{dT}$ 代表光纤光栅热光系数,用 α 表示; $\frac{1}{\lambda_B} \frac{d\lambda_B}{dT}$ 代表光纤光栅热膨胀系数,用 β 表示。因此式(3) 可以写成

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \beta) dT = \gamma dT \quad (4)$$

其中

$$\gamma = \alpha + \beta \quad (5)$$

是裸光纤光栅的温度灵敏系数。当材料确定后,基本上是一与材料参数相关的常数。将式(4) 变形得

$$\lambda_B = \lambda_{B0} \cdot T = \lambda_{B0} \cdot T \quad (6)$$

$$\lambda_B = \lambda_{B0} \cdot T \quad (7)$$

式中 γ 是光栅的温度灵敏度。

3 实验

3.1 实验装置

实验装置如图 1 所示:

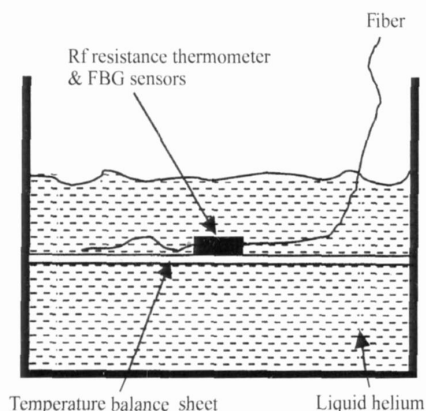


图 1 低温容器及实验装置
Fig. 1 Liquid helium bath used for temperature variation

本实验在杜瓦中通入液氦提供低温环境。装置主要包括一个温度平衡铜片,两个 FBG 传感器,一个铱铁电阻温度计。其中铱铁电阻温度计的作用是测量低温容器中的环境温度,并作为本实验的温度标准值,该铱铁电阻温度计事先已经过精确标定。

为了保证铱铁电阻温度计与光栅传感器感应的是同一个温度值,本实验将 FBG 传感器、电阻温度计粘贴在导热性能良好的铜片上。其中铱铁电阻温度计底部通过导热硅脂与铜片相连,这样可以保证电阻温度计均匀受热。由于铜良好的导热性,在整个温度范围内,可以认为传感器监测的是同一个温度。

本实验测量与温度读取装置如图 2 所示:

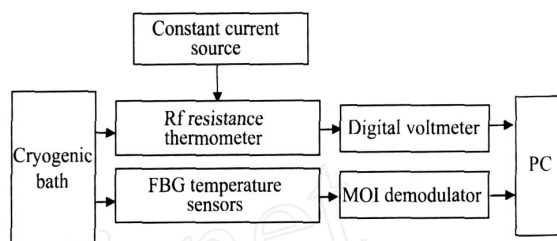


图 2 温度测量装置
Fig. 2 Experiment setup for cryogenic temperature measurement

铱铁电阻温度计 rf2297 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。通过自编的 Labview 程序,能实时监测温度变化过程并自动记录温度数据,绘制温度-时间关系曲线。

一根裸光栅和一根丙烯酸脂涂敷 FBG 作为实验的 FBG 温度传感器。其中裸光栅的中心波长是 1560 nm,涂敷层光栅 FBG 的中心波长是 1530 nm。MOI 公司生产的 4 通道解调仪 FBSQLI 提供光纤所需光源以及解调装置,其分辨率为 1 pm。

3.2 实验过程

实验开始时,向低温杜瓦容器中输入液氦直到整个杜瓦温度完全稳定到液氦温度 4.2 K 为止。在此过程中,由于环境温度急剧变化,光纤的中心波长由于热光效应和热膨胀效应而变小。让液氦自然挥发,温度自动上升来传感变化的温度。其中温度上升速度可以通过控制杜瓦盖上的液氦出气孔的大小来把握。整体温升比较缓慢,满足温度测量的要求。实验开始后,MOI 解调仪以 1 Hz 的频率读取 FBG 中心波长值。计算机每 6 s 保存一次温度值。液氦挥发完毕后,测量得到温度为 298 K。

4 实验结果与分析

为了便于比较,以下各图处理数据时,均以 4.2 K 时光纤中心波长为基准,将各个温度中心波长与该基准值的差值取为中心波长的偏移量。

图 3 为 4.2 K 到 298 K 光栅传感器温度响应曲线。由图可以看出,FBG 传感特性与温度相关。裸光栅的温度灵敏度远低于涂敷光栅的温度灵敏度。从 150-298 K,两个 FBG 传感器的中心波长偏移与温度变化近似成线性关系,随着温度降低,线性度变差。该实验测得的 77 K- 298 K 关系曲线与前期完成的液氮温度实验得到曲线相一致^[2]。下面重点研究液氦到液氮温区光栅传感特性。

图 4、图 5 分别给出了涂敷光栅与裸光栅在 4.2 K 到 77 K 的波长偏移量与温度的关系曲线。由于 FBG 传感器的热膨胀系数和热光系数极低,在 50 K 以下,温度传感基本没有变化;大概到 50 K 时,光栅波长随着温度上升而增加。为了提高光栅温度灵敏度,可以选用热膨胀系数大的聚合物材料,采用特殊工艺对裸光栅进行封装^[3]。从图上还发现,50 K 到 77 K 波长偏移量随温度升高变化不规律,这很可能是由光栅材料结构的改变引起,需要进一步研究。

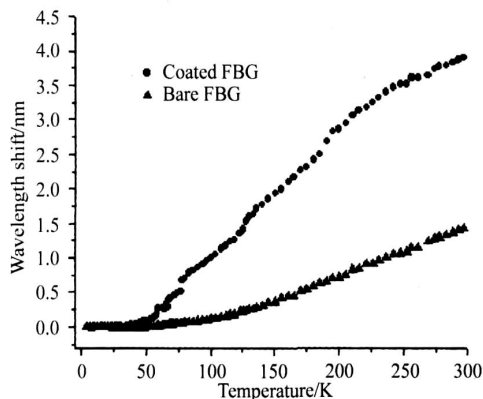


图3 FBG波长漂移量随温度变化曲线

Fig.3 Temperature response of FBG

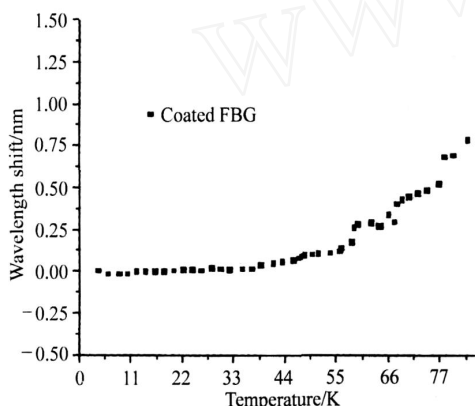


图4 4.2 K- 77 K带涂敷 FBG波长漂移量随温度变化曲线

Fig.4 Wavelength shift with temperature

from 4.2 K to 77 K of coated FBG

5 结论

实验研究了光纤 Bragg 光栅在 4.2 K 到 298 K 的温度传感特性。从 150 到 298 K,两个光栅传感器的中心波长偏移量与温度变化近似成线性关系,随着温度降低,线性度变差。由于光栅热膨胀系数和热光系数极低,当温度低于 50 K 时,光栅传感器波长偏移量不随温度的降低而改变,这限制了其在极低温

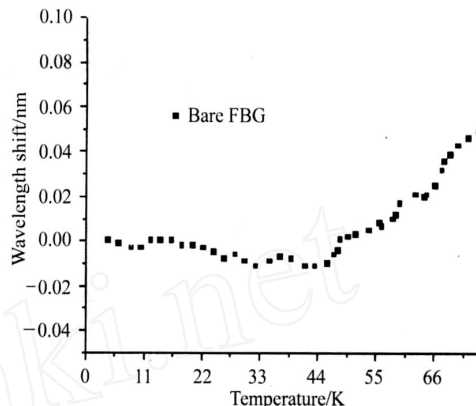


图5 4.2 K- 77 K裸光栅波长漂移量随温度变化曲线

Fig.5 Wavelength shift with temperature

from 4.2 K to 77 K of bare FBG

下的应用。可以选用热膨胀系数大的聚合物材料,采用腐蚀、封装等增敏技术,以提高光栅传感器的温度敏感度,推广其在极低温下的应用。从 50 K 到 77 K 光栅波长偏移量随温度变化比较复杂,很可能因为光栅材料的结构在极低温下发生了改变,其机理有待进一步实验和研究。

参考文献:

- [1] 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)
- [2] DENG Fan-ping, SHAO Jin-yi, HUANG Guo-jun, et al. Study on temperature characteristics of optical fiber Bragg grating under the 77 K environment[J]. Journal of Optoelectronics · Laser (光电子 · 激光), 2007, 18(4): 404-406. (in Chinese)
- [3] Mizunami T, Tatehata H, Kawashima H. High sensitivity cryogenic fibre-Bragg grating temperature sensor using Teflon substrates [J]. Meas Sci Technol, 2001, 12: 914-917.

作者简介:

张红洁 (1978 -) 女, 博士研究生, 现从事超导磁体数值计算方面的工作。