

光纤光栅在液氮温区温度传感性能的研究

蔡国利, 简 伟

(北京交通大学 光波技术研究所, 北京 100044)

摘要:文章从光纤光栅的温度传感模型出发,理论分析了光纤光栅的温度传感特性,完成了在液氮温区($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$)的温度测量。将理论与实验结果进行对比分析后得知,在液氮温区或者大范围测温中,反射波长相对漂移量 $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ 与温度改变量 ΔT 的关系是非线性的,呈二次关系式。

关键词:光纤布拉格光栅;光纤传感;温度传感;液氮温区

中图分类号:TN253 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-8788(2006)06-0056-02

Experiment on FBG temperature sensor in cryogenic environment

Cai Guoli, Jian Wei

(Lightwave Technology Institute, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A theoretical method for Fiber Bragg Grating (FBG) temperature sensing has been proposed. Based on a temperature sensing model of FBG, a temperature sensing experiment is conducted at liquid nitrogen temperature ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$). The theoretical and experimental results are compared and analyzed, which shows that at liquid nitrogen temperature or in large-scope temperature sensing, the relationship between the temperature variation ΔT and the relative shift of the reflected center wavelength $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ of FBG is nonlinear and conic multinomial.

Key words: FBG; optical fiber sensing; temperature sensing; liquid nitrogen temperature

光纤布拉格光栅(FBG)是近年来发展最为迅速、应用最为广泛的光纤无源器件之一,测量温度的变化是光纤光栅传感器最主要和最直接的应用。近年来对此作了大量的研究工作,但大部分的研究集中在常温附近,很少有关于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下FBG温度特性的报道,并且有关文献大都将波长与温度的关系作为常数线性方程来处理,但这种处理并不适用于低温或大范围测温时的波长变化。

本文从光纤光栅温度传感模型出发,理论研究了反射波长相对漂移量与温度改变量的关系,进而在实验的基础上,得出了液氮温区($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$)下两者之间的关系。将理论和实验结果对比分析可知,在液氮温区或者大范围测温时,波长相对漂移与温度改变不再满足简单的线性关系,而是呈二次关系式,此结果对光纤光栅温度传感机理的理论分析和应用研究具有一定意义。

1 光纤光栅温度传感理论

光纤光栅是一种折射率沿光纤纵向周期分布的元件,其 Bragg 方程为

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

当环境温度 T 发生变化时,如不考虑应力作用,材料的热光效应和热膨胀效应会导致有效折射率 n_{eff} 和光栅空间周期 Λ 发生变化,最终导致布拉格反射

波长 λ_B 漂移。若初始时光栅所处的环境温度为 T_0 ,则将 $\lambda_B(T)$ 作泰勒展开,并保留到二次项,有

$$\lambda_B(T) = \lambda_B(T_0) + \frac{d\lambda_B(T)}{dT} \cdot \Delta T + \frac{1}{2} \cdot \frac{d^2\lambda_B(T)}{dT^2} \cdot \Delta T^2, \quad (2)$$

式中, $\Delta T = T - T_0$ 。由式(1)和式(2)得

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\lambda_B(T) - \lambda_B(T_0)}{\lambda_B(T_0)} = \frac{1}{\lambda_B} \cdot \frac{d\lambda_B}{dT} \cdot \Delta T + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\lambda_B} \cdot \frac{d^2\lambda_B}{dT^2} \cdot \Delta T^2 = \eta \cdot \Delta T, \quad (3)$$

式中, η 表示温度灵敏度系数,且有

$$\eta = \frac{1}{\lambda_B} \cdot \frac{d\lambda_B}{dT} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\lambda_B} \cdot \frac{d^2\lambda_B}{dT^2} \cdot \Delta T. \quad (4)$$

对式(1)取自然对数并对 T 求导,得

$$\frac{1}{\lambda_B} \cdot \frac{d\lambda_B}{dT} = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \cdot \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{d\Lambda}{dT}, \quad (5)$$

式中, $1/n_{\text{eff}} \cdot dn_{\text{eff}}/dT$ 代表光纤光栅的热光系数,用 ϵ 表示; $1/\Lambda \cdot d\Lambda/dT$ 代表光纤光栅的热膨胀系数,用 α 表示。因此,式(5)可以写成

$$\frac{1}{\lambda_B} \cdot \frac{d\lambda_B}{dT} = \epsilon + \alpha. \quad (6)$$

由式(6)得

$$\frac{1}{\lambda_B} \cdot \frac{d^2\lambda_B}{dT^2} = \left[\frac{d\epsilon}{dT} + \frac{d\alpha}{dT} + (\epsilon + \alpha)^2 \right], \quad (7)$$

由式(5)、(6)、(7)得

$$\eta = (\epsilon + \alpha) + \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{d\epsilon}{dT} + \frac{d\alpha}{dT} + (\epsilon + \alpha)^2 \right] \cdot \Delta T.$$

(8)

对掺锗石英光纤,其热膨胀系数和热光系数分别为 $\alpha \approx 0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ^[1], $\epsilon \approx 8.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ^[2~3]。由于光纤光栅的力学参数会随温度而发生变化,因此,热膨胀系数 α 和热光系数 ϵ 与温度有一定的依赖关系,并不是常数,因此,在大范围测温时,光栅温度灵敏度系数 η 并不是常数。

2 实验结果及分析

近年来大量的研究表明,用光纤光栅传感器精确测温时不能简单地用光纤材料力学参数计算其温度灵敏度系数。因为石英通过成纤、写入光栅等操作后,原来的力学参数值发生了变化,精确的温度测量应建立在实验的基础上。文献[1~2]的实验室二次拟合曲线方程为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (6.045 \times 10^{-6} + 10^{-8} \cdot \Delta T) \cdot \Delta T, \quad (9)$$

该拟合曲线的测温区间为 20~260 ℃,并没有测量低温区光纤光栅反射波中心波长的温度响应。本文测量了光纤光栅反射波长在液氮温区的温度响应。实验装置如图 1 所示,从掺铒光纤放大器(EDFA)(泰克公司生产)发出的光通过环行器入射到置于液氮里的光纤光栅,经光纤光栅反射的光通过环行器进入光谱分析仪(ANDO 公司生产的 AQ6319,其分辨率为 0.001 nm)。使用的光纤光栅是本研究所生产的,它是利用紫外光在掺锗单模光纤上采用相位掩模技术紫外侧写入的。

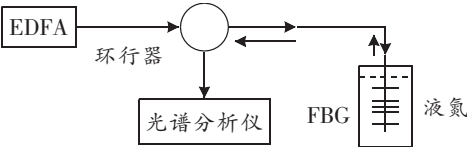


图 1 温度传感实验装置

实验中首先通过光谱仪得到室温下 FBG 的反射波长 λ_B 为 1 559.650 nm,室温(23 ℃)下光纤光栅的反射光谱线如图 2 所示,然后再将裸光纤光栅放到液氮中,液氮温区(-196 ℃)下光纤光栅的反射光谱线如图 3 所示。从室温到液氮温区,反射波中心波长 λ_B 的总漂移量为 $\Delta\lambda_{B0} = 1.398$ nm。重复了 4 次液氮温度—室温—液氮温度循环实验,实验数据见表 1。 λ_B 的漂移量在 1.4 nm 左右,说明温度的变化对光纤光栅来说完全是一个可逆的过程。

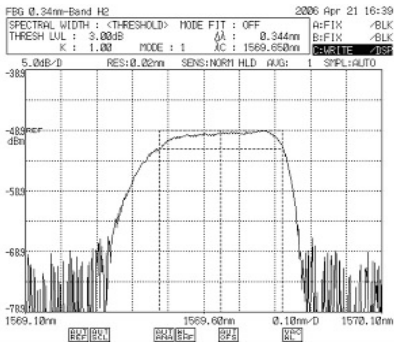


图 2 室温下光纤光栅的反射光谱线

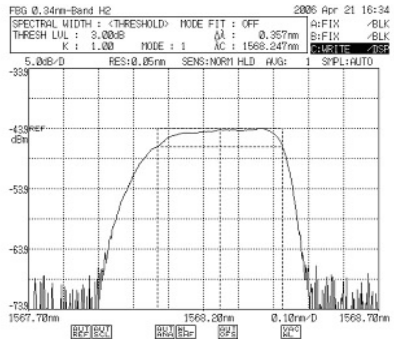


图 3 液氮温区下光纤光栅的反射光谱线

表 1 FBG 温度传感测量数据

序号	λ_B (23 ℃)/nm	λ_B (-196 ℃)/nm	$\Delta\lambda_{B0}$ /nm
1	1 569.650	1 568.251	1.399
2	1 569.650	1 568.249	1.401
3	1 569.650	1 568.247	1.403
4	1 569.650	1 568.252	1.398

由式(9)计算得到光纤光栅在液氮温区的漂移量为 $\Delta\lambda_B = 1.325$ nm,对比本文实验所得波长漂移量,两者较为吻合,出现偏差的原因可能与光纤光栅、反射中心波长不同等因素有关。实验结果说明:在液氮温区,光纤光栅仍能实现温度传感,反射光谱线无畸变,并且波长漂移量与温度呈二次关系式。

3 结论

实验研究了光纤光栅的低温特性,通过测量光纤光栅在液氮温区反射波中心波长的相对漂移量,得到以下结论:(1) 光纤光栅在液氮温区仍能实现温度传感,且反射光谱线无变形;(2) 反射波长相对漂移量与温度改变量呈二次关系式。

参考文献:

[1] 贾振安, 乔学光, 李明, 等. 光纤光栅温度传感的非线性现象 [J]. 光子学报, 2003, 32(7): 844-847.
[2] 乔学光, 贾振安, 傅海威, 等. 光纤光栅温度传感理论与实验 [J]. 物理学报, 2004, 53(7): 494-497.