

荧光光纤光栅传感特性的实验研究*

赵 磊 孙伟民 姜富强 刘志海 朱玉华 李金娟 苑立波

(哈尔滨工程大学理学院, 哈尔滨 150001)

摘 要 在载氢掺铒光纤上写入 Bragg 光纤光栅, 得到新型光子学器件-荧光光纤光栅. 分别对其 Bragg 波长(λ_B)及荧光寿命(τ)的温度(T)及应变(ϵ)响应特性进行了实验研究, 并且给出了 λ_B 和 τ 分别关于(T, ϵ)的拟合方程. 实验结果表明: 荧光光纤光栅的 λ_B 对 T 和 ϵ 的响应具备一般 Bragg 光纤光栅的优良特性, 测得温度灵敏度为 11.1 pm/°C, 应变灵敏度为 1.19 pm/ $\mu\epsilon$; 而且 τ 对 T 和 ϵ 的响应也具有良好的线性关系, 温度灵敏度为 0.59 $\mu\text{s}/^\circ\text{C}$, 应变灵敏度为 6.16 ns/ $\mu\epsilon$. 实验结论为解决温度应力交叉敏感、实现温度应力的同时监测提供一条新颖的途径.

关键词 荧光光纤光栅; 传感特性; 曲线拟合; 温度; 应力; 交叉敏感

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

0 引言

荧光光纤指掺杂稀土元素(铒(Er)、钕(Nd)、铥(Tm)、镱(Yb)等)的光纤, 这种光纤在受到合适波长的抽运光源激励后会发出荧光信号. 近年来荧光光纤被广泛应用于制作各种光纤放大器与光纤激光器^[1~3]等. 此外, 荧光光纤传感器在温度测量领域^[4]、医药化学检测^[5,6]等方面也有着广泛的应用.

荧光光纤光栅是一种将荧光光纤与光纤光栅结合在一起的新型光子学器件, 其实质是直接将光栅写入荧光光纤. 利用荧光信号与光纤光栅的特性, 可以将这种新型器件应用在更广的领域. 在通信领域有着潜在的应用前景, 如对某选择波长进行光放大, 进行信号分拣工作等. 在传感领域的应用前景更为明显, 由于荧光光纤的荧光寿命与光纤光栅的反射波长都对光强的变化不敏感, 测量系统抗干扰能力强, 将二者结合制成的荧光光纤光栅就可以作为一种抗干扰能力强, 实现温度、应变同时测量的新型传感手段. 因此, 对这种器件展开研究具有很高的理论价值和工程意义.

1 荧光光纤光栅的传感原理

1.1 Bragg 光纤光栅传感器的工作原理

当光纤光栅周围的温度、应变或其他待测物理量发生变化时, 将导致光栅周期 Λ 或纤芯折射率 n 发生变化, 进而使反射回的 Bragg 波长 λ_B 产生漂移, 通过检测 λ_B 的变化情况, 即可获得待测物理量的变化信息.

Bragg 波长满足方程

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

式中, n 为纤芯的有效折射率, Λ 为光栅周期.

由温度和应变引起的 Bragg 波长变化 $\Delta\lambda_B$ 可以用式(2)表示^[7]

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \{ [1 - (n^2/2) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]] \epsilon + (\alpha + \xi) \Delta T \} \quad (2)$$

式中, ϵ 为应变; ν 为泊松比; p_{11} , p_{12} 为光弹系数; α 和 ξ 分别为光纤材料的热膨胀系数和热光系数; ΔT 为温度变化.

由式(2)可以看出, 可以通过检测 Bragg 波长变化 $\Delta\lambda_B$ 来测出外界应变 ϵ 与温度变化 ΔT .

1.2 荧光光纤传感器的测温原理

荧光光纤温度传感器应用领域很广, 采用不同的敏感材料可以制成不同测温范围的传感器. 对荧光信号的处理方法一直是荧光传感器中的关键和研究热点, 可以利用荧光强度、双波长强度比及荧光寿命等作为传感参量. 但由于强度型荧光光纤传感器易受外界因素影响, 造成强度扰动, 很难达到高准确度. 荧光寿命型传感器可以避免上述缺点, 因此成为人们关注的发展方向.

当稀土掺杂光纤受到抽运光源激励时, 会发出荧光. 在激励光停止后, 荧光不会立即消失, 而是以指数规律衰减^[8]. 荧光消退的时间称为荧光寿命, 用 τ 表示. 荧光寿命 τ 是温度 T 的函数, 与光强无关. 这即是寿命型荧光测温的基本原理.

目前荧光寿命的测量手段主要有三种: 数据拟合法^[9]、模拟锁相法^[10]、数字锁相法^[11]. 在实验中采用了快速傅里叶变换数据拟合法^[8]来测量荧光寿命, 该方法具有速度快、误差小、不受本底干扰等一系列优点.

2 荧光光纤光栅的传感特性实验

实验所用的荧光光纤光栅是自行制作的, 选用

*黑龙江省自然科学基金资助(项目代码 A0308)
Tel: 0451-82519758 Email: wmsun@optics-teaching.org
收稿日期: 2005-05-22

Fibercore 生产的 DF1500L 掺铒光纤, 经载氢处理后采用相位掩模板法写入 Bragg 光纤光栅. 将长度为 10 mm 光栅写在长度为 30 mm 的载氢铒纤中部. 经退火处理后光栅中心波长为 1531.011 nm, 3 dB 带宽为 0.2 nm, 反射率为 93%, 其透射谱如图 1. 光谱仪型号 AV6361, 分辨率选择 0.2 nm.

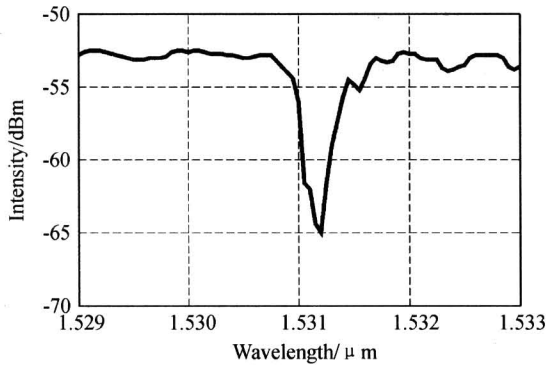


图 1 在载氢铒纤上制作的光纤光栅透射谱
Fig. 1 Transmission spectrum of FBG fabricated on hydrogen-loaded fluorescence fibers

图 2 为用 980 nm LD 作为抽运光源去激发荧光光纤光栅, 得到的荧光增益谱. 可以看到, 在荧光信号的最高峰, 波长位置 1531 nm 附近出现小凹陷, 这个小凹陷反映的正是写入 FBG 的信息.

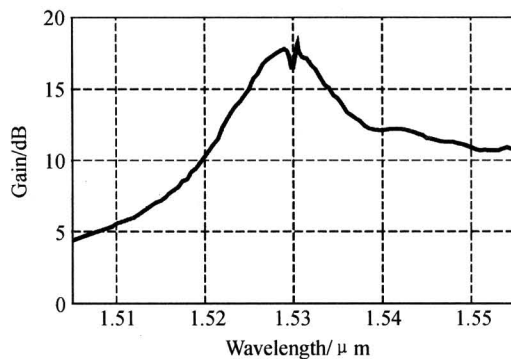


图 2 荧光光纤光栅的增益谱
Fig. 2 Spectrum of fluorescence fiber gratings

2.1 Bragg 反射波长的温度和应力特性实验

此部分实验仪器采用管式电阻炉(分辨率 1℃, 最高温度 1000℃)以及 Micron Optics 公司生产的波长解调仪 FBG-IS v4.6(自带光源, 分辨率为 1pm).

为达到同时测量光纤光栅随温度和应变响应之目的, 设计了图 3 的实验装置.

图 3 中, 制作好的荧光光纤光栅置于管式电阻炉的中部. 由 FBG 波长解调仪自带宽带光源发出的光经电阻炉的一端进入荧光光纤光栅, 满足 Bragg 波长的光反射回波长解调仪, 最终由计算机读出 Bragg 波长. 在电阻炉的另一端通过一个定滑轮来悬挂砝码盘, 对光纤光栅进行线性加载.

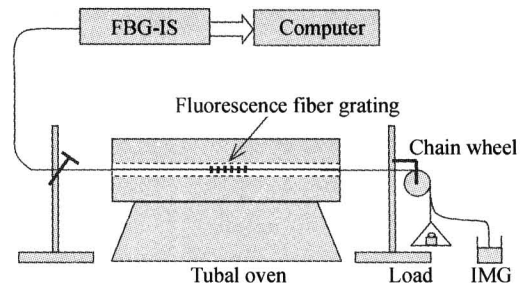


图 3 Bragg 波长 λ_B 的传感特性测试装置
Fig. 3 Experimental setup for testing the sensing properties of Bragg wavelength λ_B

实验选取了 50℃、75℃、100℃、125℃、150℃、175℃ 共 6 组温度值进行温度响应的测试. 在每个温度下, 进行恒温应力响应测试, 在砝码盘上从 20 g 到 200 g 逐次添加砝码, 加载步长为 20 g. 记录每组温度下, 10 个荷载点下的 λ_B 值.

2.2 荧光寿命的温度和应力特性实验

此部分实验装置如图 4. 被方波调制的 LD 发出 980 nm 的激光经 WDM 980 nm 端注入, 再经 WDM 980/1550 nm 公共端进入管式电阻炉去激励荧光光纤, 受激产生的荧光信号经 WDM 1550 nm 端返回后送入荧光信号探测电路, 被转化为电压信号后送入数据采集卡, 最后经计算机对采集到的荧光电压信号进行快速傅里叶变换数据拟合^[8], 从而获得荧光寿命. 实验中将采集到的数据做 100 次平均以降低噪音影响, 需用时 1~2 s 便可获得寿命, 测量准确度达到 1 μs. 采用这种测量荧光寿命的方法可以很好的实现实时监测.

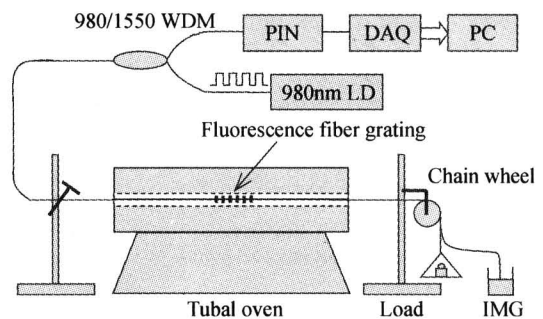


图 4 荧光寿命 τ 的传感特性测试装置
Fig. 4 Experimental setup for testing the sensing properties of fluorescent lifetime τ

测试同 2.1 部分的测试步骤相同, 温度同样分为 6 组, 分别对每个温度下的 10 个荷载点进行荧光寿命的测量, 记录得到的实验数据.

3 实验结果分析

为处理数据方便起见, 将实验中砝码质量 m 换算为光纤产生的应变 ϵ . 根据弹性体力学中的胡克定律, 当应变较小时, 应力 σ 与应变 ϵ 成正比

$$\sigma = F_n / S = Y \cdot \epsilon \quad (3)$$

实验中, $F_n = m \cdot g$, 因此得到

$$\epsilon = mg / SY \quad (4)$$

式中, 石英的杨氏模量取 $Y = 7.31 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, 光纤横截面积 $S = \pi(62.5 \times 10^{-6})^2 = 1.23 \times 10^{-8} \text{ m}^2$, 重力加速度取 $g = 9.80 \text{ m/s}^2$.

当加载 1 g 砝码时, 由式(4)可以计算得到在光纤轴向上产生的应变为

$$\epsilon = \frac{mg}{SY} = \frac{10^{-3} \times 9.8}{1.23 \times 10^{-8} \times 7.31 \times 10^{10}} = 10.9 \mu\epsilon \quad (5)$$

3.1 Bragg 反射波长的温度和应变响应分析

处理 2.1 部分的测量数据, 作出 10 组荷载下 λ_B 的温度响应关系图, 并对 $\lambda_B \sim T$ 进行线性拟合, 如图 5(a). 再作出 6 组温度下 λ_B 的应变响应图, 并对 $\lambda_B \sim \epsilon$ 进行线性拟合, 如图 5(b).

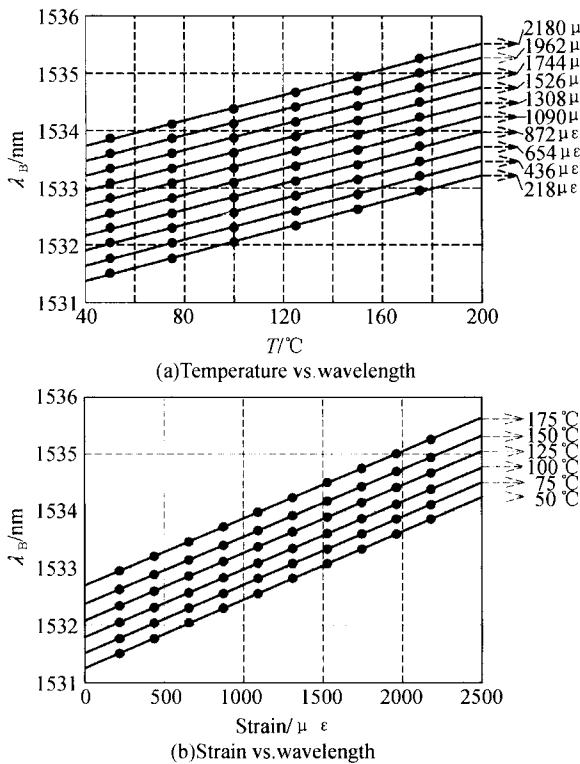


图 5 实测 λ_B 的温度应变响应及其拟合曲线
Fig. 5 Thermal and strain response of λ_B and fitting curves

从图 5(a) 中可以得到光纤光栅 Bragg 波长 λ_B 与温度 T 呈现出很好的线性关系, 线性度 r^2 为 0.999. 从图 5(b) 中可以得到 λ_B 与应变 ϵ 亦存在很好的线性关系, 线性度 r^2 高达 0.99998. 通过拟合结果可以求得 λ_B 的温度灵敏度 $\delta\lambda_B/\delta T$ 为 11.1 pm/ $^{\circ}\text{C}$, 应变灵敏度 $\delta\lambda_B/\delta\epsilon$ 为 1.19 pm/ $\mu\epsilon$. 进而可以求得归一化温度响应 $\delta\lambda_B/(\delta T \cdot \lambda_B) = 7.25 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 归一化应变响应 $\delta\lambda_B/(\delta\epsilon \cdot \lambda_B) = 0.78 \times 10^{-6}/\mu\epsilon$. 这与理论值非常符合^[7].

为了找出 λ_B 关于温度 T 和应变 ϵ 的定量关系, 利用如图 5 中实验测得的数据将 λ_B 分别对 (T, ϵ) 作

一次平面拟合以及二次曲面拟合, 得到一次拟合方程(6)和二次拟合方程(7).

$$\lambda_B = 1530.677 + 0.0113T + 1.188 \times 10^{-3}\epsilon \quad (6)$$

$$\lambda_B = 1530.778 + 9.117 \times 10^{-3}T + 1.2 \times 10^{-3}\epsilon + 9.86 \times 10^{-6}T^2 - 5.048 \times 10^{-9}\epsilon^2 \quad (7)$$

分别作出拟合方程(6)和拟合方程(7)在每组温度下与实测点的偏离度, 如图 6. 从该图中可以看到, 二次拟合明显优于一次拟合.

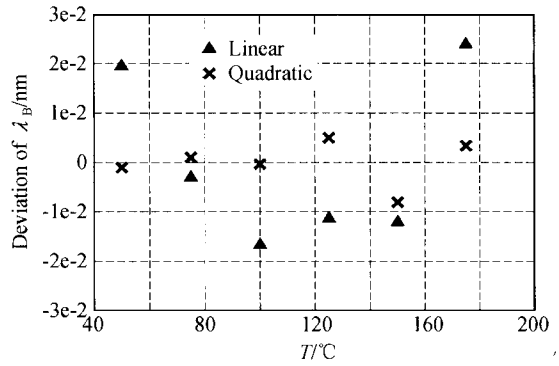


图 6 一次拟合与二次拟合下的 λ_B 偏离度
Fig. 6 Deviation of λ_B under linear and quadratic fitting equations respectively

3.2 荧光寿命的温度和应变响应分析

处理 2.2 部分的测量数据, 作出 10 组荷载下荧光寿命 τ 的温度响应关系图, 并对 $\tau \sim T$ 进行线性拟合, 如图 7(a), 图中的 10 条直线自下而上地对应于 218 $\mu\epsilon$, 436 $\mu\epsilon$, 654 $\mu\epsilon$... 2180 $\mu\epsilon$ 下 τ 的温度响应拟合曲线. 再作出 6 组温度下 τ 的应变响应图, 并对

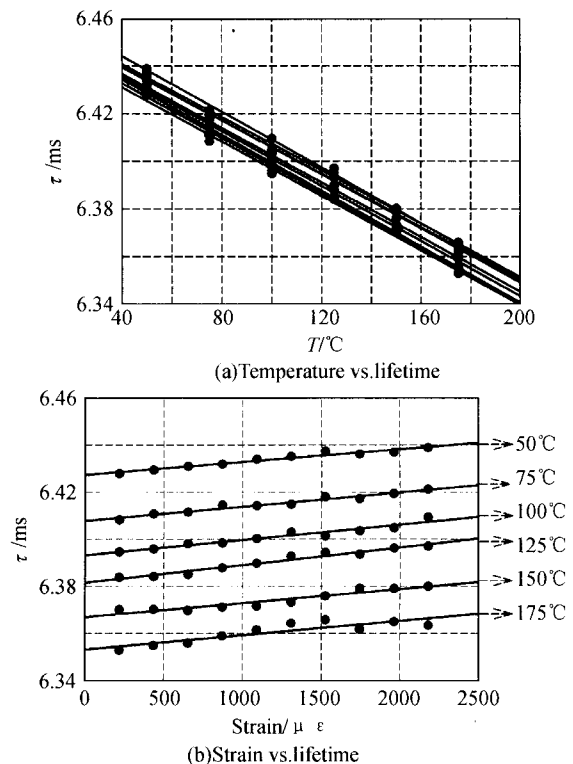


图 7 实测 τ 的温度应变响应及其拟合曲线
Fig. 7 Thermal and strain response of τ and fitting curves

$\tau \sim \epsilon$ 进行线性拟合,如图 7(b).

从图 7(a)和图 7(b)中可以得出,荧光寿命 τ 与温度 T 和应变 ϵ 都存在线性关系,并且图 7(b)中的拟合曲线斜率非常小,为 10^{-6} 量级,说明 τ 对于 ϵ 的响应关系不显著.另外由实验结果可以求得 τ 的温度灵敏度 $\delta\tau/\delta T$ 为 $0.59 \mu\text{s}/^\circ\text{C}$,应变灵敏度 $\delta\tau/\delta\epsilon$ 为 $6.16 \text{ ns}/\mu\epsilon$.由这两个灵敏度数值也可看出温度是影响寿命的主要因素,应变对寿命的影响很小.

同样,利用如图 7 中实验测得的数据将 τ 分别对 (T, ϵ) 作一次平面拟合以及二次曲面拟合,得到一次拟合方程(8)和二次拟合方程(9).

$$\tau = 6.453 - 5.715 \times 10^{-4} T + 6.251 \times 10^{-6} \epsilon \quad (8)$$

$$\tau = 6.457 - 6.783 \times 10^{-4} T + 7.816 \times 10^{-6} \epsilon + 4.746 \times 10^{-7} T^2 - 6.711 \times 10^{-10} \epsilon^2 \quad (9)$$

分别作出拟合方程(8)和拟合方程(9)在每组温度下与实测点的偏离度,如图 8.可以看出两种拟合方法下的偏离度相近.

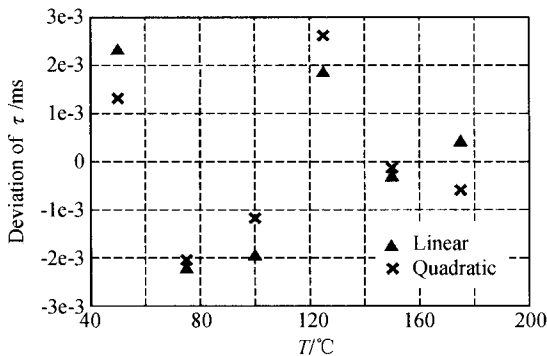


图 8 一次拟合与二次拟合下的 τ 偏离度
Fig. 8 Deviation of τ under linear and quadratic fitting equations respectively

4 实验结果

为了便于分析荧光光纤光栅的 λ_B 和 τ 的传感特性,对实验结果的分析是按照关系式(10)进行的,文中给出的拟合方程正是该关系式的函数表达式.

$$\begin{cases} \lambda_B = \phi(T, \epsilon) \\ \tau = \varphi(T, \epsilon) \end{cases} \quad (10)$$

若将式(10)的自变量与参变量反演,得到式(11)

$$\begin{cases} T = \Phi(\lambda_B, \tau) \\ \epsilon = \Psi(\lambda_B, \tau) \end{cases} \quad (11)$$

通过式(11)可以看到,只要测得荧光光纤光栅在外界条件下的 λ_B 和 τ ,便可通过计算同时获得温度和应变信息.

5 结论

通过在掺铒光纤上制作 FBG 得到荧光光纤光栅,这种新型光纤器件结合了 FBG 和荧光光纤的优

良传感特性.实验中对荧光光纤光栅的 Bragg 波长 λ_B 和荧光寿命 τ 分别做了温度、应力测试并进行了结果分析,并对 $\lambda_B(T, \epsilon)$ 和 $\tau(T, \epsilon)$ 分别进行了数据拟合,给出了拟合方程.由实验结果可以得到以下结论:

1) 荧光光纤光栅具有与一般 FBG 同样良好的温度和应力特性,线性度高、重复性好.测得 λ_B 的温度灵敏度为 $11.1 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,应变灵敏度为 $1.19 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 都与理论值符合.

2) 荧光寿命 τ 对温度和应变的响应也存在良好的线性关系.测得 τ 的温度灵敏度为 $0.59 \mu\text{s}/^\circ\text{C}$,应变灵敏度为 $6.16 \text{ ns}/\mu\epsilon$.温度是影响寿命的主要因素,应变对寿命的影响很小.

3) 实验结果为解决温度、应力交叉敏感,以及温度应力的同时监测等提供了一条新颖的途径.

参考文献

- 陈胜平,吕可诚,李乙钢,等.大功率高效率掺铒超荧光光纤光源及其应用.光子学报,2004,**33**(1):17~20
Chen S P, Lu K C, Li Y G, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004,**33**(1):17~20
- 郭小东,乔学光,贾振安,等.一种高功率掺铒光纤超荧光光源.光子学报,2004,**33**(11):1298~1300
Guo X D, Qiao X G, Jia Z A, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004,**33**(11):1298~1300
- 乔启全,陈柏,陈嘉琳,等.用于光纤光栅制作的监控光源掺 Yb^{3+} 超荧光光源的研究.光子学报,2003,**32**(1):1~4
Qiao Q Q, Chen B, Chen J L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003,**32**(1):1~4
- Wade S A, Muscat J C, Collins S F, et al. Nd^{3+} doped optical fiber temperature sensor using the fluorescence intensity ratio technique. *Review of Scientific Instruments*, 1999,**70**(11):4279~4282
- 唐江宏,刘万卉,扬欣,等.盐酸荧光光纤传感器的研制.化学传感器,1998,**18**(1):55~62
Tang J H, Liu W H, Yang X, et al. *Chemical Sensors*, 1998,**18**(1):55~62
- 何俊,张杰.荧光光纤传感器在医药学中的应用研究.华西药理学杂志,2000,**15**(6):448~451
He J, Zhang J. *WCJ · PS*, 2000,**15**(6):448~451
- Kersey A D, Davis M A, Patrick H J, et al. Fiber grating sensors. *Journal of Lightwave Technology*, 1997,**15**(8):1442~1463
- 孙伟民,张健中,于蕾,等.荧光寿命的快速傅里叶变换拟合方法.光学学报,2004,**24**(6):838~841
Sun W M, Zhang J Z, Yu L, et al. *Acta Optical Sinica*, 2004,**24**(6):838~841
- Zhang Z Y, Grattan K T V, Hu Y L, et al. Prony's method for exponential lifetime estimations in fluorescence based thermometers. *Rev Sci Instruments*,

- 1996, **67**(7):2590~2594
- 10 Zhang Z Y, Grattan K T V, Palmer A W. A novel signal processing scheme for a fluorescence based fiber optic temperature sensor. *Rev Sci Instrum*, 1991, **62**(5):735
- ~1742
- 11 Fericola V, Crovini L. Digital optical fiber point sensor for high-temperature measurement. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, **13**(7):1331~1334

Experimental Research on the Sensing Properties of Fluorescent Fiber Gratings

Zhao Lei, Sun Weimin, Jiang Fuqiang, Liu Zhihai, Zhu Yuhua, Li Jinjuan, Yuan Libo

School of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150001

Received date: 2005-05-22

Abstract The fluorescence fiber gratings are fabricated the structure of fiber Bragg gratings (shortly FBGs) on Hydrogen-loaded Erbium-doped fluorescence fibers. The properties of temperature and strain for λ_B and τ have been studied experimentally, the fitting equations for $\lambda_B(T, \epsilon)$ and $\tau(T, \epsilon)$ are given. The results show, like plain FBGs, the Bragg wavelength of fluorescence fiber gratings have well properties in response to temperature and strain, the thermal and stress sensitivity is 11.1 pm/°C and 1.19 pm/ $\mu\epsilon$. Moreover, the lifetime of fluorescence fiber gratings represent good linearity with temperature or strain changes, the thermal and stress sensitivity is 0.59 $\mu\text{s}/^\circ\text{C}$ and 6.16 ns/ $\mu\epsilon$, respectively. Finally, the results also provide novel ways of solving the cross-talking problem or simultaneously measuring of temperature and strain.

Keywords Fluorescence fiber gratings; Sensing properties; Curve fitting; Temperature; Strain; Cross-talking



Zhao Lei was born in 1981 in Heilongjiang Province. He received the B. S. degree from Physics Department of Harbin Engineering University (HEU) in 2003. He is presently pursuing the M. S. degree in HEU, majoring in optical engineering. His research work focuses on fiber grating sensor technology.