

光纤光栅温度应变智能传感原理及增敏技术研究*

郭 团[†] 乔学光 贾振安 孙 安 陈长勇

(西安石油学院光纤传感重点实验室 西安 710065)

摘 要 文章分析了光纤光栅对温度和应变传感的响应机理,对光纤光栅的纤芯材料选择、光纤光栅的写入方法及封装方法等方面进行了综合评述,在此基础上讨论了实现光纤光栅对温度和应变传感增敏的基本原理和方法,介绍了长周期光纤光栅与光纤布拉格(Bragg)光栅融合测量和如何选用对温度和应变灵敏的纤芯材料,研究了超短脉冲激光直接写入法和如何选用热膨胀系数和弹性模量不同的特种聚合材料对光纤光栅进行封装处理。

关键词 光纤光栅 温度和应变传感 增敏技术

SMART SENSING AND IMPROVED SENSITIVITY OF FIBER GRATINGS TO TEMPERATURE AND STRAIN

GUO Tuan[†] QIAO Xue-Guang JIA Zhen-An SUN An CHEN Chang-Yong

(Fiber Sensing Laboratory, Xi'an Petroleum University, Xi'an 710065, China)

Abstract The response mechanism of fiber gratings to temperature and strain is analyzed. After reviewing various fiber core materials, fabrication techniques and coating methods, we discuss the basic methods of improving the sensitivity of fiber gratings to temperature and strain. These include hybrid FBG/LPFG sensing, the use of temperature-sensitive and strain-sensitive fiber core materials, direct fabrication by ultrashort pulsed lasers and polymer overlay coating.

Key words fiber grating, temperature and strain sensing, improving sensitivity technology

1 引言

光纤传感技术是伴随着光导纤维及光纤通信技术发展而另辟新径的一种崭新的传感技术^[1,2]。光纤传感器是利用待测量(温度、应力等)对光纤内传输的光波参量进行调制,通过对被调制的光波信号进行解调,获得待测量变化的一种装置。光纤光栅是近几年发展最为迅速的光纤无源器件。它是利用光纤材料的光敏性,在光纤纤芯内形成空间相位光栅,从而在纤芯内形成一个窄带(透射或反射)滤波器或反射镜。利用光纤光栅可制成用于检测应力、应变及温度等诸多参量的光纤传感器。自从1978年 Hill 等人首先在掺锗光纤中采用驻波写入法制成世界上第一只光纤光栅以来,由于它的独特优点,因而在光纤通信、光纤传感等领域均有广阔的应用前景。目前最引人注目的是对光纤布拉格光栅(FBG)、光纤长周期光栅(LPFG)和光纤啁啾光栅(CFG)的研究和

应用。

光纤光栅传感器由于其传感信号直接调制光波波长的突出特点而优于各种普通光纤传感器^[3]。其优点表现为:测量信号避免了“光强型”传感器(读取信息是测量光强大小)因光源起伏、连接损耗及光纤弯曲损耗等因素造成的测量精度下降的影响;测量信号避免了“干涉型”传感器(读取信息是观察干涉条纹的变化)中相位测量的不清晰和对固定参考点的需要;光纤光栅传感器能方便地使用波分复用技术在一根光纤中串联多个光纤光栅进行分布式测量,这是其他传感器无法比拟的,具有巨大的开发和应用潜力。

本文旨在通过分析光纤光栅对温度和应变传感

* 国家自然科学基金(批准号 69877025, 60177028)资助项目;教育部科学技术研究重点项目(批准号 02190)

2002-07-25 收到初稿 2002-09-09 修回

[†] 通讯联系人, E-mail: guotuan2001@163.com

的响应机理,从光纤光栅的材料选择、光纤光栅的写入方法及封装方法几个方面讨论实现光纤光栅增敏效果的基本原理和技术。

2 光纤光栅温度应变传感基本原理

光纤光栅温度应变传感基本原理(以 FBG 为例):首先用激光干涉条纹侧面辐照掺杂光纤技术在光纤内部制作光栅,当光栅周围的温度、应变或其他待测量发生变化时,将导致光栅周期或纤芯折射率的变化,从而产生布拉格反射峰值波长位移,通过检测布拉格反射峰值波长位移,即可获得待测量的变化情况。为实时区分测量温度和应变响应,可在光纤同一位置处写入两个不同栅距的光纤布拉格光栅,利用不同栅距光纤布拉格光栅对温度和应变的不同响应系数,可以分别求出产生这种位移的温度和应变变化,从而实现用光纤光栅对温度和应变的同点实时区分测量。

2.1 光纤布拉格光栅温度应变传感原理

光纤布拉格光栅是纤芯折射率沿轴向呈周期性变化,使前向传输的导模能量耦合到反向导模中,形成反射波长周期变化的尖锐的反射峰的光波导器件^[4,5]。其结构如图 1 所示。

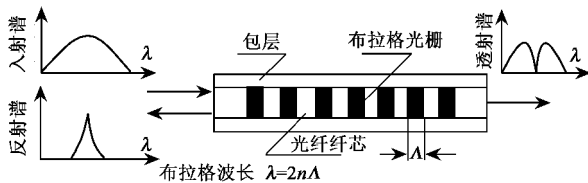


图 1 光纤布拉格光栅结构示意图

光纤布拉格光栅的响应峰值波长为

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

其中 n_{eff} 为光纤纤芯的有效折射率, Λ 为光栅周期(栅距)。

改变纤芯折射率和光栅周期时,布拉格波长变化量为

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

当温度和应变同时变化时,布拉格波长的相应改变为

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \left\{ \left[1 - \left(\frac{n^2}{2} \right) (P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})) \right] \cdot \Delta\varepsilon + [\alpha + \xi]\Delta T \right\}, \quad (3)$$

其中 $\Delta\varepsilon$ 为应变变化, ΔT 为温度变化, P_{ij} 为光纤材料的弹光张量分量, α 为光纤材料的热膨胀系数, ξ

为光纤材料的热光系数, ν 为光纤材料泊松(Poisson)比系数。温度恒定应变变化和应变恒定温度变化的波长响应(工作波长为 $\lambda_B = 1550\text{nm}$)分别为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta\varepsilon} = 1.20 \times 10^{-3} \text{ nm}/\mu\varepsilon,$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 10.3 \times 10^{-3} \text{ nm}/^\circ\text{C}.$$

光纤布拉格光栅特性分析:

(1) 光纤布拉格光栅对应变和温度的变化具有同时敏感效应,即 $10\mu\varepsilon$ 的应变变化等效于 1°C 的温度变化。因此,必须通过适当的方法将温度和应变对光纤布拉格光栅反射波长变化的单独作用区分开,以达到区分测量的目的。

(2) 对温度和应变的灵敏度响应偏低。1nm 的波长变化约需要 $1000\mu\varepsilon$ 的应变变化或 100°C 的温度变化。这样的响应灵敏度只有通过高分辨率光谱仪进行光谱分析与信号解调,所以很难满足实际测量的需要。因此,提高光纤布拉格光栅对温度和应变响应灵敏度成为其实用化的关键技术。

2.2 双波长光纤布拉格光栅温度应变区分测量传感原理

为了同时区分温度和应变对光纤布拉格光栅反射波长的影响,进而实现同点多参区分测量的目的,用两个不同周期的相位 mask 在光纤同一位置上写入两个不同中心波长($\lambda_{B1} = 1300\text{nm}$, $\lambda_{B2} = 850\text{nm}$)的光纤布拉格光栅^[6]。假定温度和应变变化与布拉格波长变化呈线性关系,则光纤布拉格光栅的反射波长偏移量与被测物理量间的变化关系为

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{e1} & M_{T1} \\ M_{e2} & M_{T2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{pmatrix}. \quad (4)$$

这里矩阵元 M_{ij} 可通过分别测量布拉格波长随温度和应变的变化而得到,由(4)式求出 $\Delta\varepsilon$ 和 ΔT ,得到待测点温度应变变化。测量原理如图 2 所示。

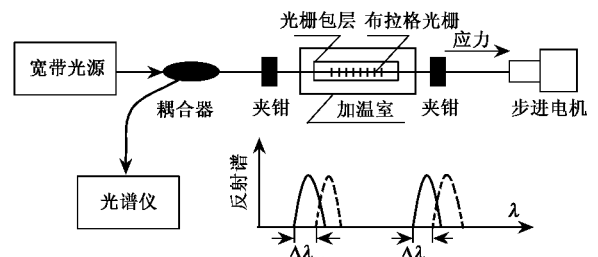


图 2 温度应变同时区分测量的双波长光纤布拉格光栅传感器

双波长光纤布拉格光栅特性分析:

(1) 同点写入双波长光纤布拉格光栅可实现光

光纤栅温度应变同点同时区分测量.

(2) 将上述方法推广,在不同待测点上分别写入栅距不同的双波长光纤布拉格光栅可实现同一光纤多点双参量分布式同时区分测量.在实际应用中,既降低了成本,又充分利用了光频带宽,增大了传递信息量.

(3) 温度和应变线性方程忽略了温度和应变的高阶灵敏度和温度-应变的交叉灵敏度的影响造成测量误差.通常情况下此误差可以忽略.例如对掺锗石英,在0—100℃和0—1%的应变测量范围内,应变的相对误差为 7.9×10^{-4} ,温度的相对误差为 7.7×10^{-3} .

2.3 长周期光纤光栅温度应变传感原理

长周期光纤光栅(LPFG)能够实现前向传输纤芯基模和前向传输包层模式之间的耦合,在透射谱中形成多个吸收峰,其周期一般大于100μm.

长周期光纤光栅的耦合机理如下:

纤芯基模与各包层模式之间耦合的相位匹配条件为

$$\beta_{co} - \beta_{cl}^{(n)} = 2\pi/\Lambda, \quad (5)$$

其中 β_{co} 为前向传输纤芯基模传播常数 $\beta_{cl}^{(n)}$ 为各包层模式传播常数, Λ 为长周期光栅的栅距.

相位常数 $\beta = 2\pi n_{eff}/\lambda$, 其中 n_{eff} 为模式有效折射率 λ 为入射光波长.由(5)式得

$$n_{co} - n_{cl}^{(n)} = \lambda^{(n)}/\Lambda, \quad (6)$$

其中 n_{co} 为纤芯基模有效折射率 $n_{cl}^{(n)}$ 为各包层模式有效折射率 $\lambda^{(n)}$ 为各阶谐波波长.

满足相位匹配条件的特定波长由纤芯耦合进包层,很快被衰减掉,在谱图上表现为一个个损耗峰.长周期光纤光栅传感透射谱如图3所示.

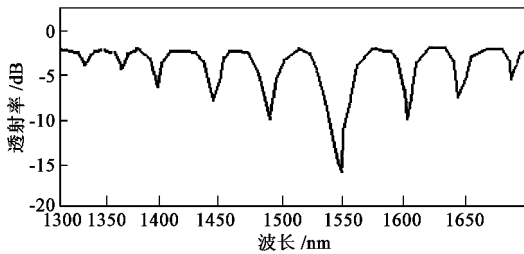


图3 长周期光纤光栅的透射谱

长周期光纤光栅特性分析:

- (1) 长周期光纤光栅没有反射谱,只有透射谱.
- (2) 长周期光纤光栅有较长的周期(栅距),较宽的响应带宽.

$$\Lambda_{LP} \approx 200-500\mu m, \quad \Delta\lambda_{LP} \approx 30nm;$$

$$\Lambda_B \approx 1\mu m, \quad \Delta\lambda_B \approx 1nm.$$

(3) 长周期光纤光栅有较大的温度敏感响应特性和较小的应变敏感响应特性.长周期光纤光栅的温度系数是光纤布拉格光栅的6倍,而应变系数是光纤布拉格光栅的1/2倍,两者融合写入易实现多点温度应变双参量的分布测量.

温度系数:

$$\alpha_{LP} = 0.061-0.13nm/^\circ C,$$

$$\alpha_B = 0.011-0.02nm/^\circ C;$$

应变系数:

$$\beta_{LP} = 0.0005-0.0010nm/\mu\epsilon,$$

$$\beta_B = 0.001-0.0020nm/\mu\epsilon.$$

2.4 长周期光纤光栅与光纤布拉格光栅融合实现增敏

温度对光纤材料的影响主要有两方面:一是热膨胀导致材料尺度变化,另一方面是热致折射率改变^[7].

设长周期光纤光栅 $\Lambda_L = 485\mu m$,纤芯和包层的折射率 n_{co} 和 n_{cl} 分别为 1.4581 和 1.45,纤芯和包层的直径 r_1 和 r_2 分别为 2.625μm 和 62.5μm.在基准温度下(室温),取纤芯热光系数为 $9.0 \times 10^{-6}/^\circ C$,包层的热光系数为 $8.7 \times 10^{-6}/^\circ C$,光纤布拉格光栅栅距 $\Lambda_B = 0.5\mu m$.在 1557nm 处,1℃ 的温度增加引起长周期光纤光栅和光纤布拉格光栅波长的变化为 $(\Delta\lambda_L)_T = 2.5892(n_{co}) - 2.4953(n_{cl}) + 0.0010(r_1) - 0.0004(r_2) + 0.0006(\Lambda_L) = 0.0951nm$, $(\Delta\lambda_B)_T = 0.0054(n_{co}) + 0.0035(n_{cl}) + 0.0002(r_1) + 0.0006(\Lambda_B) = 0.0095nm$.

由以上数据可知,温度变化引起光纤折射率变化对耦合波长影响较大,而热膨胀引起纤芯、包层半径和光栅周期对耦合波长影响很小.长周期光纤光栅相对于光纤布拉格光栅有较强的温度响应特性.

当对光纤施加轴向应力时,光纤将产生轴向应变,一方面使光栅周期加大、光纤纤芯和包层半径缩小;另一方面将通过光弹性改变光纤的折射率^[7].

同上述参数,在 1500nm 处,实验测得每 100μ ϵ 引起的光纤布拉格光栅和长周期光纤光栅耦合波长的变化量分别为

$$(\Delta\lambda_L)_S = -8.6158(n_{co}) + 8.4776(n_{cl}) - 0.0403(r_1) + 0.0156(r_2) + 0.1557(\Lambda) = -0.0072nm,$$

$$(\Delta\lambda_B)_S = 0.0181(n_{co}) - 0.0177(n_{cl}) - 0.0001(r_1) + 0.1557(\Lambda) = 0.1258nm.$$

可见,对长周期光纤光栅施加轴向应力,引起纤芯和包层折射率下降,使得耦合中心波长变小,同时纤芯半径减小也使得耦合波长减小,而包层半径减

小及光栅周期增大对耦合波长的作用恰恰相反,两方面综合结果使得长周期光纤光栅总体对应力表现不敏感.对于光纤布拉格光栅,纤芯折射率的变化可以忽略,起主要作用的是光栅周期的变化.光纤布拉格光栅相对于长周期光纤光栅有较强的温度响应特性.

综上所述,利用长周期光纤光栅有比光纤布拉格光栅对温度变化有较大的响应灵敏度,而对应变化有较小的响应灵敏度,可实现应变和温度的增敏和实时区分测量^[8].实验装置如图4所示.

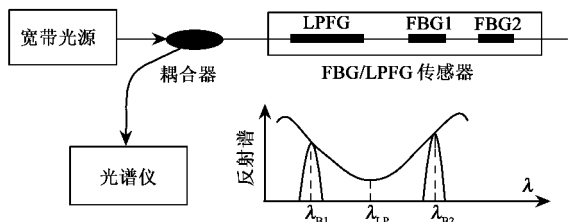


图4 融合 FBG/LPFG 传感器温度和应变同时区分测量

3 光纤光栅的材料选择

光纤对紫外光的吸收将诱导光纤的折射率随紫外光强的空间分布发生变化,即光致折射率变化.通过在光纤中适当的掺入各种杂质使其光敏性提高.高掺锗光纤、硼/锗共掺光纤和掺稀土光敏光纤及高压载氢等技术在国内外均有研究^[9].这种光纤具有较强的光敏性,但对温度和应变响应灵敏度低.例如,硅基质掺锗光纤裸光纤光栅温度响应为 0.011nm/℃,应变响应度为 0.0013nm/με.这种特性的光纤适合于在通信中使用,因为它有较好的稳定性,但这样低的温度和应变响应灵敏度很难适应于传感测量中.因此,必须研究对温度和应变响应敏感的特殊材料,其中包括正向敏感响应和反向敏感响应,即纤芯折射率随温度应变的升高而增加和纤芯折射率随温度应变的升高而减少的特殊光纤材料.通过适当的选择和不同组合,从源头上解决光纤光栅对温度应变响应灵敏度低的问题.

下面以掺稀土元素 Tm/Ho 特种光纤光栅为例,通过实验分析其温度应变响应特性^[10].

实验激励光源为发光二极管(LED),波长为 780nm,最大功率为 20mW.实验所测单模 Tm/Ho 光纤传感芯区和包层直径分别为 11.5μm 和 125.0μm,光纤光栅长度为 10μm.为了改变温度和应变,将光纤光栅传感器置于加温室中,并通过滑轮系统与悬挂砝码相连,如图5所示.传感器的输出端通过 2×1 耦合

器连接到 InGaAs 光电探头(响应波长大于激励光源的波长并覆盖荧光光谱范围),信号处理采用适时锁相探测技术.图6给出了 40—800℃ 之间探测器发射的荧光寿命与温度的特性曲线.

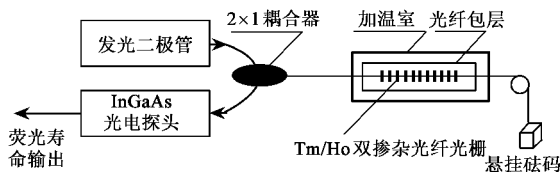


图5 Tm/Ho 特种光纤光栅温度应变特性实验装置

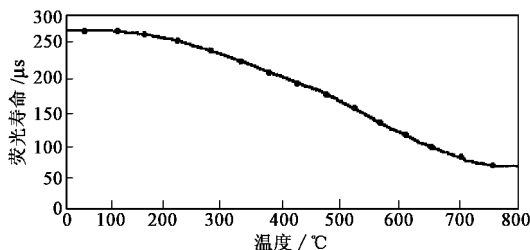


图6 Tm/Ho 特种光纤光栅温度特性

用实验的方法测量掺稀土元素 Tm/Ho 光纤光栅传感器的温度特性和应变效应,结果表明,在 200—700℃,Tm/Ho 光纤光栅传感器的温度敏感性较高,应变敏感性与其他掺杂光纤光栅传感器的应变敏感性相近.

在光纤光栅中掺入 B₂O₃ 可改变光纤折射率的温度响应系数,其折射率随温度的升高而减少.利用两种掺杂光纤对温度响应的相反特性,在折射率随温度的升高而减少 B₂O₃ 掺杂光纤和折射率随温度的升高而明显增加 Tm/Ho 光纤的交接处写入光栅,对相同的温度改变,光纤布拉格光栅反射波长变化为各自单独漂移量之和,这样就实现了对温度响应增敏的目的.

对温度和应变敏感的特殊光纤光栅材料及掺杂技术的研究是国内外光纤光栅传感领域的难点,现在仅处于探索阶段,有待于进一步研究和开发.

4 光纤光栅的写入方法

光纤光栅行之有效的写入方法大体可归纳为两大类:干涉写入法和逐点写入法.下面分别对两类写入方法进行简要分析,总结优缺点,并进一步讨论写入方法在增敏技术中的应用.

4.1 全息相干法

全息相干法是最早应用于横向写入制作 FBG 的一种方法,其工作装置示意图如图7所示.入射紫外光经分光镜分为两束,经全反射后相交于光纤,产

生干涉场,形成正弦分布明暗相间的干涉条纹. 光纤经过一段时间的照射,在纤芯内部引起和干涉条纹同样分布的折射率变化,从而在光纤上写入正弦分布的体光栅.

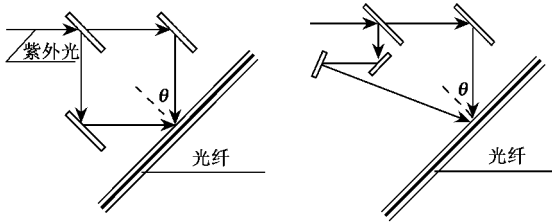


图7 全息相干法制作 FBG 示意图

优点:突破了纵向驻波法对光栅布拉格中心反射波长的限制,操作简单且行之有效. 如果将光纤以一定弧度放入相干场,容易得到光纤啁啾光栅(光栅栅距非均匀).

缺点:由于输出光束的多横模现象影响空间相干性,多纵模振荡或纵模漂移增加输出线宽,这些都大大缩小了相干区域. 同时欲得到准确的光栅布拉格中心反射波长,对光路的调整有着极高的精度要求.

4.2 光栅衍射相干法(mask 法)

相位光栅衍射相干写入法是现在最有前途和使用最广泛的一种方法. 目前,这种方法总体上可分为两类,如图8所示. 它们通过垂直入射和斜入射两种不同方法使相位光栅的衍射光相交,产生高质量的干涉场.

垂直入射时 ± 1 级衍射光相干得到光栅周期为位相光栅周期的一半,斜入射时 0 级和 +1 级衍射光相干得到光栅周期与位相光栅周期相同.

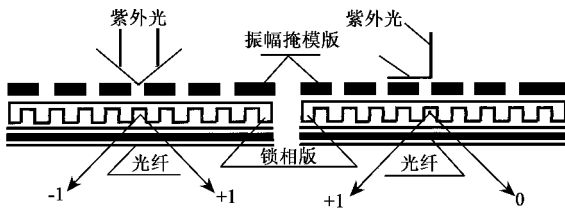


图8 位相光栅写入法原理示意图

优点:降低了对光源的要求,易于得到准确的光纤光栅周期,且易于实现大规模生产,成本低.

缺点:很难实现严格控制位相光栅的腐蚀深度和准确的占空比.

4.3 逐点写入法

逐点写入法是利用聚焦激光束在光纤上逐点曝光形成光栅的方法,它一般利用光纤固定光斑逐点

运动或光斑固定光纤逐点运动,从而在光纤上写入光栅. 此方法要求带动光纤的步进电机步进值等于所需光栅的栅距.

优点:光纤纤芯折射率调制度强.

缺点:对步进电机的精度和传动系统的精度要求十分苛刻.

为了缓解上述不足,可以采用一种新的方法——逐点谐波写入法,即电机步进值等于光栅栅距 Λ 的 n 倍,从而降低了对步进电机和传动设备的要求.

4.4 写入方法增敏分析

由于光纤折射率变化 Δn 的提高直接影响到光纤布拉格光栅峰值反射波长的漂移大小 $\Delta \lambda_B$,基于逐点写入法对光纤纤芯折射率调制度强的优点,可以推测这种方法在实现提高光纤光栅温度应变响应灵敏度方面有巨大的潜力,即实现增敏技术. 通过实验,我们用 $\lambda = 850 \text{ nm}$ 波长的超短脉冲激光(功率 $P = 20 \text{ mW}$)对硅光纤纤芯进行直接写入,实现了 $\Delta n = 10^{-3}$ 的高折变率调制,由理论计算其温度应力响应灵敏度可提高 100 倍,这样就从源头上解决光纤光栅对温度和应力响应灵敏度低的问题.

5 光纤光栅的封装技术

封装技术的主要作用是保护和增敏. 人们希望光纤光栅能够具有较强的机械强度和长的使用寿命,与此同时,在光纤传感中通过适当的封装技术提高光纤光栅对温度和应变的响应灵敏度^[11]. 通过选用对温度和应变具有不同响应的特种聚合材料对光纤光栅进行封装处理,区分温度和应变响应,减少交叉响应灵敏度引起的误差,是实现光纤光栅对温度应变响应灵敏度增敏的一个重要方面.

5.1 测温增敏

选用热膨胀系数较大的聚酰胺纤维(polyamide fiber)聚合物材料,当外界温度改变时,聚合物膨胀而带动光栅产生应变,相应的光纤布拉格光栅产生温度和应变的双重调制,提高温度测量响应灵敏度. 根据计算温度响应灵敏度可达 $0.25 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,是裸光纤光栅的 25 倍.

5.2 测压增敏

选择热膨胀系数较小的聚四氟乙烯(terflon)聚合物材料,避免温度变化时给光纤光栅较大的应变偏置,同时这种材料还具有适当的弹性模量. 在选择材料时,弹性模量适中是极为重要的. 模量太大,可能导致光纤光栅与封装材料之间的滑落,模量较小,

增敏效果不好,不能进行有效的应变传递.我们选用聚四氟乙烯聚合物材料,其静压灵敏度可提高到 $0.06\text{nm}/\text{MPa}$,是裸光纤光栅的20倍.

6 结束语

现代工业的飞速发展对传感领域提出了新的要求和更高的目标,研究新型的传感器,拓宽光纤光栅应用领域势在必行.由于光纤光栅传感器具有其他传感器无法比拟的优点,其抗电磁干扰能力强、尺寸小、重量轻、耐高温性好、复用能力强、传输距离远、耐腐蚀及易变形等,因而成为国内外研究的热点和学科前沿问题.

从国外相关报道看,自光纤光栅用于传感以来,受到世界范围内的广泛重视,并且在民用工程结构、航空航天业、船舶航运业、石油化工业、电力工业、核工业及医学等方面已经取得了持续和快速的发展.民用方面,应用光纤光栅传感器最多的领域当数桥梁的安全监测.加拿大是光纤光栅的起源地,在卡尔加里附近的Beddington Trail大桥是最早使用光纤光栅传感器进行测量的桥梁之一(1993年)^[12],16个光纤光栅传感器贴在预应力混凝土支撑的钢增强杆和炭纤复合材料筋上,对桥梁结构进行长期监测.在航天航空方面,使用先进的复合材料来制造航空航天器件(如机翼部件)是必然的趋势.Smart Fibres Ltd为飞机和航天器提供埋有光纤光栅传感器的复合材料灵巧结构,以利于器件使用的监测、结构的损伤探测、设计信息的搜集以及智能控制等^[13].在医学应用方面,光纤光栅传感器能通过最小限度的侵害方式对人体组织功能进行内部测量,提供有关温度、压力和声波场的精确局部信息.设计一种光纤光栅阵列温度传感器,用来测量超声波、温度和压力场,研究病变组织的超声和热性质.传感器的分辨率

为 0.1°C ,精度为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$,测量范围为 $30\text{--}60^\circ\text{C}$ ^[14].

增敏技术在任何传感领域中均是核心技术.就光纤光栅温度应变传感领域而言,在光敏材料基础上研制对温度和应变变化敏感的纤芯材料是核心技术,附以适当的封装、写入技术及采用不同光栅组合等方法使其灵敏度进一步提高,同时实现多参量多点同时区分测量.许多具有潜力和市场前景的可实用化技术研究都在进行中,这些技术的成熟将会推动国民经济建设,因而正受到广泛关注.

参 考 文 献

- [1] 廖延彪. 光纤光学. 北京:清华大学出版社,2000[Liao Y B. Fiber Optics. Beijing:Tsinghua University Press,2000(in Chinese)]
- [2] 安毓英,曾小东. 光学传感与测量. 北京:电子工业出版社,2001[An Y Y, Zeng X D. Fiber-Sensing and Measurement. Beijing:Publishing House of Electronic Industry,2001(in Chinese)]
- [3] 姜德生,何伟. 光电子·激光,2002,13(4):420[Jiang D S, He W. Journal of Optoelectronics·Laser,2002,13(4):420(in Chinese)]
- [4] Yu L L. Optical Engineering,1998,37(8):2272
- [5] 贾宏志,李育林. 激光杂志,1999,20(5):12[Jia H Z, Li Y L. Laser Journal,1999,20(5):12(in Chinese)]
- [6] 乔学光,李育林. 应用激光,1998,18(6):254[Qiao X G, Li Y L. Applied Laser,1998,18(6):254(in Chinese)]
- [7] 孔梅,石邦任. 光子学报,2001,30(2):188[Kong M, Shi B R. Acta Potomac Silica,2001,30(2):188(in Chinese)]
- [8] Qiao X G, Li Y L. Journal of Optoelectronics·Laser,1999,7(1):42
- [9] Shang H Y. Optoelectronic Technology,2002,20(1):40
- [10] 张思炯,吴柳. 光电子·激光,2001,12(2):134[Zhang S J, Wu L. Journal of Optoelectronics·Laser,2001,12(2):134(in Chinese)]
- [11] Hill D J, Acranch G. Electronic·Letters,1999,35(15):1268
- [12] Friebele P et al. Optics and Photonics News,1998,9:33
- [13] Internet Reference:nasatech.com/Brief/Jun98/0698PTB1.html
- [14] Rao Y J et al. Lightwave Technol.,1997,15:779

讣 告

著名物理学家、中国科学院院士、北京大学教授杨立铭先生因病医治无效,于2003年1月12日上午6时在北京逝世,享年84岁.

著名物理学家、教育家、中国核科技主要奠基人之一、北京大学教授虞福春先生因病医治无效,于2003年2月12日下午1时在北京逝世,享年90岁.

美籍华人、世界著名高能物理学家袁家骝先生,2003年2月11日下午在北京协和医院逝世,享年91岁.

著名半导体材料学家、物理学家、中国半导体材料科学与技术的奠基人和开拓者、中国科学院半导体研究所林兰英院士因病医治无效,于2003年3月4日13时在北京协和医院逝世,享年85岁.

本刊将陆续刊登纪念这四位物理学家的文章.