

文章编号: 1001-3806(2002)02-0084-02

## 光纤光栅反射波长移动研究\*

谢 芳 张书练 李 岩 梁晋文

(清华大学精密仪器与机械学系, 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京, 100084)

**摘要:** 提出并实验了一种探测光纤光栅波长移动的新方法。该方法用一组与各个传感光纤光栅的参数对应相同的光纤光栅作为滤波元件, 用抖动倍频的方法跟踪传感光纤光栅的反射光谱的峰值点, 同时采用高分辨率的光栅尺作为系统的读出设备, 彻底消除了压电陶瓷的非线性性及滞后性带来的误差, 从而得到高精度的测量结果。

**关键词:** 测量; 光纤光栅; 传感器

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A

## Study on the reflected wavelength shift based on sensing elements of in-fiber Bragg gratings

Xie Fang, Zhang Shulian, Li Yan, Liang Jinwen

(Department of Precision Instruments, State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing, 100084)

**Abstract:** A new method is presented to detect the wavelength shift on in-fiber Bragg gratings. The system employs a series of in-fiber Bragg gratings, having the same parameters as the sensing in-fiber Bragg gratings, as filter elements. Furthermore, the system tracks the maximum wavelength of the reflected spectrum of in-fiber Bragg gratings through dithering and doubling the frequency. A grating with high sensitivity is used to read the output of the system. The non-linearity and hysteresis of PZT have been erased thoroughly, so the accuracy of the system is improved a lot.

**Key words:** measurement; in-fiber Bragg gratings(FBG); sensor

### 引 言

与一般的光纤传感器相比, 以光纤光栅(FBG)作为敏感元件的传感器除了具有光纤传感器的一切优点以外, 还有它的独特优势——它是波长编码的传感器。光纤光栅传感器的探测量是FBG的反射波长的移动量。与光源的强度及其波动无关, 与光的偏振态无关, 所以它抗干扰性很强。而且可以很方便地用波分复用技术、时分复用技术和空间复用技术构成光纤光栅传感网络, 实现多点传感。光纤光栅传感器可以广泛应用于应力、温度、压力、超声波、加速度、强磁场和力的测量<sup>[1,2]</sup>。当被测量(如应力等)变化时, 光纤光栅的反射波长将会移动, 而且反射波长的移动量与被测量的变化量成线性关系<sup>[3]</sup>。由于这些优点, 光纤光栅作为敏感元件的传

感器的研究正引起国内外广泛的兴趣。研究光纤光栅传感器的关键问题就是要研究如何高精度地测量光纤光栅的反射波长的移动量的问题。当一宽光源(如LED, 波长1550nm, 谱宽约为60nm)经过一个光纤光栅时, 满足Bragg条件的波长 $\lambda_B$ 被反射回来。

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

式中,  $\lambda_B$ 为光纤光栅的反射波长,  $n_{\text{eff}}$ 为光纤的有效折射率,  $\Lambda$ 为光纤光栅的Bragg周期。

图1是一个光纤光栅的反射光谱, 由图可知, 其反射光谱的3dB带宽约为0.3nm。要提高光纤光栅传感器的测量精度, 首先必须提高系统跟

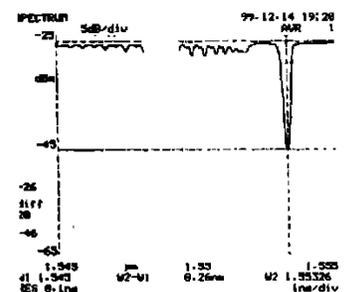


Fig. 1 The transmissive spectrum of a fiber Bragg grating

踪光纤光栅反射光谱峰值点波长的精度。因为由报道<sup>[1]</sup>可知, 对于波长为1550nm的光纤光栅, 当用于

\* 清华大学博士点基金资助项目。

作者简介: 谢 芳, 女, 1966年4月出生。讲师, 博士研究生。主要从事光纤传感及精密测量研究。

收稿日期: 2001-03-06; 收到修改稿日期: 2001-06-11

应力传感时,其灵敏度为  $1.2\text{pm}/\mu\text{E}$ ; 当用于温度传感时,其灵敏度为  $13\text{pm}/^\circ\text{C}$ 。如果系统跟踪光纤光栅反射光谱峰值点波长的精度低,  $0.3\text{nm}$  的谱宽对应的测量误差为: 当测量应力时,  $\Delta_s = 300\text{pm}/(1.2\text{pm}/\mu\text{E}) = 250\mu\text{E}$ ; 当测量温度时,  $\Delta_t = 300\text{pm}/(13\text{pm}/^\circ\text{C}) \approx 23^\circ\text{C}$ 。可见,提高系统跟踪 FBG 反射光谱峰值点波长的精度是非常必要的。其次,跟踪到反射光谱峰值波长时,还需高精度地读出此时系统的输出。有报道用压电陶瓷的驱动电压作为系统的输出<sup>[1, 4, 5]</sup>, 这样,压电陶瓷的非线性性和滞后性必定直接影响系统的测量精度。针对以上两个问题,我们采用抖动调制,通过倍频的方法跟踪光纤光栅反射光谱的峰值波长。在确定了峰值波长的同时,采用一个高分辨率的光栅尺(德国 Heidenhain, 型号 MT12B, 栅距  $d = 10\mu\text{m}$ ,  $1/1000$  细分,分辨率  $= 10\mu\text{m}/1000 = 0.01\mu\text{m}$ ) 来读出系统的输出值,彻底消除了压电陶瓷的非线性性和滞后性的影响,从而提高系统的测量精度。

### 1 测量系统的基本原理及实验

测量系统原理如图 2 所示。光源 LED 发出  $3\text{dB}$  带宽为  $1498\sim 1559\text{nm}$  ( $3\text{dB}$  带宽约为  $6\text{nm}$ ) 的光照射到 8 个串联的光纤光栅  $G_1\sim G_8$  上。光纤光栅  $G_1\sim G_8$  作为传感元件置于被测场中。在标准状态下(不受力,室温),光纤光栅  $G_1\sim G_8$  的反射波长均布在  $1498\text{nm}\sim 1559\text{nm}$  之内,相邻两反射波长的间距约为  $7\text{nm}$ 。满足 Bragg 条件的波长被  $G_1\sim G_8$  反射回来,如图 2 所示。当光纤光栅  $G_1\sim G_8$  所受的应力或温度变化时,反射回来的 8 个波长将会移动。这 8 个窄光谱被一个  $1\times 8$  的光纤分支器传输到 8 个跟踪光纤光栅  $G'_1\sim G'_8$ , 跟踪光纤光栅  $G'_1\sim G'_8$  的各种参数分别与传感光纤光栅  $G_1\sim G_8$  对应相同(在相同的条件下,反射波长相同)。光纤光栅  $G'_1\sim G'_8$  作为滤波跟踪元件夹持在一个微动工作台上,微动工作台由压电陶瓷 PZT1 和 PZT2 驱动,拉伸光纤光栅  $G'_1\sim G'_8$ 。微动工作台的作用一方面是夹持跟踪光纤光栅  $G'_1\sim G'_8$ , 另一方面是放大压电陶瓷的伸长量以扩大系统的量程。PZT1 是尺寸为  $\text{O}25\text{mm}\times 58\text{mm}$  的叠片压电陶瓷,可以产生较大的静态位移,驱动电压为  $0\sim 300\text{V}$  时,其位移为  $0\sim 50\mu\text{m}$ ,但 PZT1 不能在交流电压下使用(其静电电容太大,  $C = 6.7\mu\text{F}$ )。PZT2 是尺寸为  $4\text{mm}\times 4\text{mm}\times 15\text{mm}$  的叠片压电陶瓷,其交流特性很好。经实验证明,对于叠片式压电陶瓷,当静电电容

$C > 1.5\mu\text{F}$ , 该压电陶瓷很难在交流电压下工作。为了得到大的直流变形( $50\mu\text{m}$ ) 叠加小的交流变形(幅值  $= 2\mu\text{m}$ , 频率  $f = 94\text{Hz}$ ), 我们把 PZT1 和 PZT2 串联,一起来推动微动工作台。由 PZT1 产生静态位移拉伸光纤光栅  $G'_1\sim G'_8$ ; 由 PZT2 产生交流位移(幅值  $0\sim 25\text{V}$ , 频率为  $94\text{Hz}$  正弦电压驱动),使光纤光栅  $G'_1\sim G'_8$  产生抖动,当跟踪光纤光栅与对应的传感光纤光栅的反射波长匹配时,探测器 PD 探测到的信号为交流信号。微动工作台在拉伸光纤光栅的同时,还推动光栅尺的测头(如图 2 所示),光栅

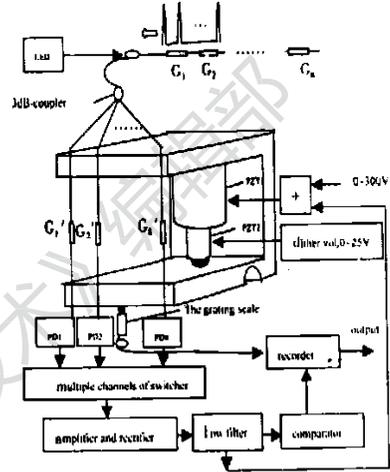


Fig. 2 The principle of the experimental system

尺的输出与微动工作台的位移成线性关系。为了提高被测信号的信噪比,我们用探测器 PD1~ PD8 探测光纤光栅  $G'_1\sim G'_8$  的透射光。实验过程如下:先通过多路开关选定一个当前测量的光纤光栅(例如  $G_1$ ) 对应的探测器(例如 PD1)。把传感光纤光栅 ( $G_1$ ) 夹持在一维工作台上(其最小分辨率为  $10\mu\text{m}$ ),等间距地拉伸光纤光栅,每拉伸光纤光栅  $10\mu\text{m}$ ,系统记录一次光栅尺的输出。当光纤光栅  $G'_1$  的反射波长与  $G_1$  不相匹配时,探测器 PD1 接受到一个不变的直流信号。调节 PZT1 的驱动电压,当光纤光栅  $G'_1$  的反射波长与  $G_1$  相匹配时,探测器 PD1 接受到一个交流信号(如图 3 所示): 光纤光栅  $G'_1$  的反射光谱的峰值点与光纤光栅  $G_1$  的反射光谱的峰值点相匹配时,如图 3 的位置 2,探

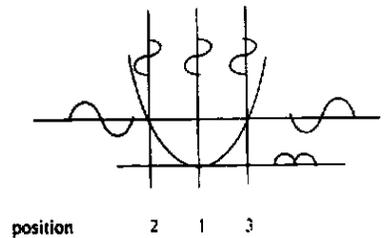


Fig. 3 The frequencies of the outputs when the Bragg wavelengths matching and not matching

测到一个交流信号(如图 3 所示): 光纤光栅  $G'_1$  的反射光谱的峰值点与光纤光栅  $G_1$  的反射光谱的峰值点相匹配时,如图 3 的位置 2,探  
(下转第 96 页)

表面。如图 3a, 刻蚀边缘较锐利, 有较好的垂直度。

对接近式刻蚀, 主要受刻蚀光源发散的影响, 在间距为 50 $\mu\text{m}$  时刻蚀极限分辨率约 5 $\mu\text{m}$ , 如图 3b, “脊条”上可以观察到一些刻蚀的痕迹, 刻蚀边缘有较好的垂直度。

接触式和接近式刻蚀结构和步骤简单, 有较高的精度, 并且对定位和防震基本没有要求。这两种方法最主要缺陷是所需的激光能量密度比投影法高, 很容易造成掩模板的破坏, 此外刻蚀产物会对掩模板产生污染。

193nm 准分子激光可精细刻蚀的材料种类比 308nm 激光多, 我们利用 MPB 公司的 ASX-750 ArF (193nm, 脉宽 17ns) 激光对 PI, PC 和 PMMA 等聚合物进行刻蚀实验。结果表明, 193nm 激光对上述 3 种聚合物都具有很好的刻蚀性能, 刻蚀表光洁度以及边缘锐利程度与 308nm 激光刻蚀 PI 相近, 图 4 为 193nm 准分子激光刻蚀 PC 微图案显微图。

实验中测得: 当能量密度为 200mJ/cm<sup>2</sup> 时, 308nm 激光对 PI 材料刻蚀速率为 0.11 $\mu\text{m}/\text{pulse}$ ,

而 193nm 激光对 PMMA 刻蚀速率为 0.4 $\mu\text{m}/\text{pulse}$ , 对 PI 和 PC 约 0.07 $\mu\text{m}/\text{pulse}$ 。这些结果与 他人实验吻合。

相比较离子束刻蚀, 准分子激光刻蚀在横向分辨率上要低于前者, 并且刻蚀边缘垂直度也不如前者, 在深度精度上两者相近, 而后者和前者相比有着极高的刻蚀速率。准分子激光刻蚀一般采用投影法进行, 其优势是实验装置和刻蚀步骤都更简单, 并且刻蚀速率高。

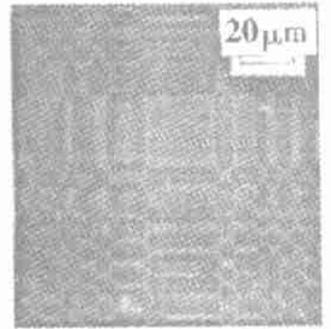


Fig. 4 Micrographs of patterns on PC etched by ArF laser

参 考 文 献

[1] Wang X M, Leger J R. Appl Opt, 1997, 36(20): 4660~ 4665.
[2] Behrmann G P, Dugnan M T. Appl Opt, 1997, 36(20): 4666~ 4674.

(上接第 85 页)

测器 PD1 将接受到一个频率为 2x94Hz= 188Hz 的信号, 此时系统记录下光栅尺的输出作为系统的输出信号; 当 G1' 的反射光谱的峰值点不与 G1 的反射光谱的峰值点匹配时, 如图 3 的位置 1 和位置 3, PD1 将接受到一个频率为 94Hz 的信号, 此时电路将反馈给 PZT1 一个微小的直流量, 使 PZT1 伸长一点或缩短一点, 使 G1' 的反射光谱的峰值点与 G1 的反射光谱的峰值点匹配, 系统记录下光栅尺的输出作为系统的输出。图 4 为测量结果示意图, 光纤光栅的最大应变为 2400 $\mu\text{strain}$ , 对测得点作最小二乘直线拟合, 得此测量系统的灵敏度约为

0.07 $\mu\text{m}/\mu\text{strain}$ , 测得数据的线性相关性为 R= 0.9998。由此可见, 此测量系统线性度非常高。

2 结 论

提出并实验了一种探测光纤光栅传感网络的方法。该方法用抖动倍频的方法跟踪传感光纤光栅的反射波长, 使对反射光谱的峰值点的对准精度提高 4~ 5 倍。同时, 系统采用一个高分辨率的光栅尺作为系统读出设备, 避免了用压电陶瓷的驱动电压作为系统的输出, 使测量结果的直线相关性达 R= 0.9998。只要通过多路选择开关就可方便地进行多点传感的检测。

参 考 文 献

[1] Rao Y J. Meas Sci Technol, 1997, 8: 355~ 375.
[2] 鲍吉龙, 章献民, 陈抗生 et al. 激光技术, 2000, 24(3): 174~ 179.
[3] Zhang W G, Dong X Y, Feng D J et al. Electron Lett, 2000, 36(20): 28.
[4] Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. Opt Lett, 1993, 18(16): 15.
[5] Jackson D A, Ribeiro A B L, Reekie L et al. Opt Lett, 1993, 18(14): 15.

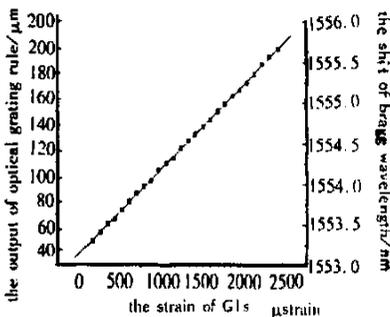


Fig. 4 The experimental results

◆ the experiment result — the fitting line Y = 38.1937+ 0.0666x R = 0.9998