

文章编号 1004-924X(2009)09-2069-07

采用在线成型工艺的光纤光栅传感器

李剑芝^{1,2}, 杜彦良², 刘晨曦²

(1. 北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044;

2. 石家庄铁道学院 河北省大型结构健康诊断与控制重点实验室, 河北 石家庄 050043)

摘要: 为了实现对布拉格光纤光栅的温度补偿, 提出了一种新的热应力温度补偿机制。设计并制造了一种新型的、采用在线成型工艺的光纤光栅温度自补偿应变传感器, 该传感器不仅具有温度补偿功能, 而且可以实现应变增敏, 解决了管式封装胶粘不牢、胶层老化、以及温度补偿的传感器不能测量应变的问题。实验结果表明, 在 $-20 \sim 40$ °C, 该传感器实现了良好的温度补偿和应变增敏效果。在实验温度范围内, 光栅传感器的波长基本保持不变; 应变敏感性为 $1.69 \text{ pm}/\mu\text{E}$, 是原来的 1.4 倍, 与理论计算值吻合得很好。该传感器通过单光栅来实现温度补偿功能, 并且能够测量应变, 解决了光栅传感器现存的一些关键问题。

关键词: 光纤光栅; 光纤传感器; 温度补偿; 在线成型; 应变

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

FBG strain sensor based on online forming

LI Jian-zhi^{1,2}, DU Yan-liang², LIU Chen-xi²

(1. *School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing*

Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. *Major Laboratory of Structural*

Health Monitoring and Control, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: To eliminate the temperature effect of Fiber Bragg Gratings (FBGs), a new thermal stress compensation mechanism and an online-forming technology are presented to design and manufacture a novel FBG strain sensor. The sensor can not only compensate temperature drifts, but also can enhance the strain sensitivity, so the weak adhesion and glue aging in packaging processing is improved. Especially, the sensor can be used in the stress measurement that can not be realized by traditional temperature compensating sensors. The experimental results indicate that the sensor provides good abilities of temperature compensation and strain sensitivity in $20\text{-}40$ °C. In measurement ranges, it shows a near zero shift and a high strain sensitivity of 1.69 pm , which is 1.4 times that of bare FBGs in the proposed self-compensated package and is coincident with the theoretical calculation well. These results prove that the sensor resolves some difficulties existed in optical fiber sensing fields, for it has temperature compensated functions and strain-testing functions simultaneously.

Key words: Fiber Bragg Grating (FBG); fiber-optic sensor; temperature compensating; online forming; strain

收稿日期: 2008-09-01; 修订日期: 2008-10-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50778116); 河北省自然科学基金资助项目 (No. E2006000389)

1 引言

近年来,光纤光栅在光纤传感领域受到了极大的关注,已越来越多地被应用于对应变、温度、压力、加速度等物理量的准分布式测量中^[1-8]。然而光纤光栅的中心反射波长会随环境温度的起伏和应力的改变而发生漂移,光栅波长越长,其反射谱受温度的影响越大,由此引起的测量结果的不精确会导致系统性能的劣化。例如对于波长为 1 550 nm 的光纤光栅来说,在 -20~40 °C 时的温度漂移约为 0.7 nm,这对于传感来说是个致命的缺点。因此,有必要对光纤光栅的环境温度进行温度补偿。

为了解决这个问题,一些研究学者提出基于双材料的预应力机制。例如 G. W. Yoffe^[9] 提出用两种不同热膨胀系数的金属材料进行封装;L. Yuan 等人也进行了同样的尝试研究^[10];Tsai 等人则提出了一种基于双金属材料的更加精确的微调机制^[11]。上述文献涉及的方法都需要对光栅施加预应力,其封装温度补偿结果是令人满意的。但由于封装时采用的是点式粘结和螺纹连接,在粘接前必须施加一定的预应力,容易造成粘接不牢,或发生蠕变,使光纤光栅长期稳定性差。文献[12]报道的封装方式虽然不需要预加应力,但是需要镀金属层,工艺复杂且封装的长度较长,其温度系数仍有 0.1 pm/°C。Iwashima T 等人提出采用负膨胀材料进行封装^[13]的方法,解决了胶粘不牢的问题;美国康宁公司对此进行了理论研究,证明通过选用适宜的负温度系数材料,光纤光栅温敏性可降低至 1 pm/°C^[14]。文献[15]采用了在线成型的思想,通过设置一层空气层,对啁啾光栅进行了温度补偿。由于这些负膨胀封装方法无法测量应变,只能用于通讯领域,作者认为此种补偿方法对于传感来说仍需要进一步完善。

针对光纤传感器现存的上述问题,本文提出一种新型的、采用在线成型工艺的光纤光栅温度自补偿应变传感器,该传感器不仅实现了温度补偿,而且可以实现应变增敏,解决了管式封装胶粘不牢、胶层老化的问题,以及温度补偿的传感器不能测量应变的问题。

2 温度补偿原理及结构设计

2.1 温度补偿原理

由耦合模理论可知,光纤布拉格光栅的布拉

格波长为:

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

式中 n_{eff} 为纤芯的有效折射率; Λ 为栅格周期。由式(1)可以看出,布拉格波长 λ_B 随 n_{eff} 和 Λ 的改变而改变。当光栅受轴向应力作用或温度变化影响时, n_{eff} 和 Λ 均会发生变化。温度对 λ_B 的影响主要是热光效应引起的光纤折射率 n_{eff} 的变化及热膨胀效应引起的光栅周期的改变。当光纤光栅发生应变时,其 λ_B 也会发生漂移,这一方面是由于光栅材料受应力作用而引起 n_{eff} 的变化(这种现象称为光弹效应);另一方面是光栅材料受应力作用时,其微观质点会发生位移,从而使 Λ 发生改变。

光栅波长的漂移幅度与周围环境温度的变化可用如下线性关系式表示:

$$\Delta\lambda_t = (\alpha_t + \xi)\Delta t\lambda_B, \quad (2)$$

式中 $\Delta\lambda_t$ 为由于温度变化引起的 λ_B 漂移幅度, α_t 为光纤材料的热膨胀系数, ξ 为光纤材料的热光系数, Δt 为周围环境温度的变化量。对典型石英单模光纤来说,石英的热光系数 $\xi \approx 7.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,热膨胀系数 $\alpha_t \approx 0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。因此对于 λ_B 为 1 550 nm 的光栅,由式(2)计算的光栅温度敏感性为 11.7 pm/°C。

当光纤光栅发生应变时,其 λ_B 也会发生漂移,其漂移的幅度与应变可用如下线性关系式表示:

$$\Delta\lambda_\epsilon = (1 - P_\epsilon)\Delta\epsilon\lambda_B, \quad (3)$$

式中 $\Delta\lambda_\epsilon$ 表示应变引起的 λ_B 的漂移幅度, P_ϵ 为光弹性常数, $\Delta\epsilon$ 为应变幅度。对于典型的石英单模光纤, $P_\epsilon = 0.22$,对 λ_B 为 1 550 nm 的光栅,由式(3)计算的光栅应变敏感性为 1.2 pm/ $\mu\epsilon$ 。

2.2 结构设计

如图 1 所示,该结构由一段材料 1,以及内外两个钢管(材料 2 和材料 3)组成。其中,材料 1 作为温度补偿元件,材料 2 作为应变传递元件,材料 3 起承受结构件的应变及保护内部器件的作用。

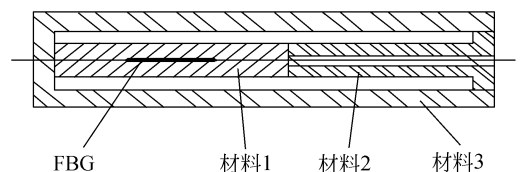


图 1 传感器结构示意图

Fig. 1 Scheme of a FBG sensor

温度与应变均可造成光纤光栅的中心波长漂移,若使应变引起的波长漂移量与温度造成的波长漂移量在幅度上严格地相等而方向相反,则二者可以相互抵消,从而消除波长随温度的变化,达到温度补偿效果。因此,要实现光纤光栅的温度补偿,就必须要求材料1的热收缩所导致的光栅波长改变刚好能抵消温度变化造成的波长漂移。也就是说,若要对光栅的完全温度补偿,必须满足由温度变化引起的波长漂移量刚好和应变造成的波长改变量 $\Delta\lambda_e$ 相互抵消,即:

$$\Delta\lambda_t = -\Delta\lambda_e, \quad (4)$$

引入式(2)、(3),有:

$$(\alpha_t + \xi)\Delta t = -(1 - P_e)\Delta\epsilon. \quad (5)$$

由于光栅与材料1牢牢地结合成一体,故可令光纤的热膨胀系数 α_t 为0。对于典型的单模石英光纤,有热光系数 $\xi \approx 7.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $P_e = 0.22$,则材料1的热膨胀系数应为 $\alpha_1 = -9.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

假设没有外界应力的作用,传感器仅受温度影响,材料3的长度 L_3 保持不变,则材料1缩短的长度等于材料2伸长的长度,即:

$$\Delta L_1 = -\Delta L_2. \quad (6)$$

这里特别需要注意的是:在温度改变的情况下,材料3会由于热膨胀的作用发生长度改变,而把传感器粘贴在大型结构体上时,由于被测结构一般由大型混凝土或是钢铁构成,故也会由于温度的升高(降低)发生热膨胀(收缩)。但是传感器监测的结构体发生的应变应该也包括由于温度影响而造成的结构体的热膨胀(或热收缩),所以在分析温度补偿的时候,不管是由于结构体温度改变造成的热膨胀(或热收缩),还是结构承受外界应力所发生的变形,都应该由光栅应变传感器如实地反映出来。

由式(5)可知,当材料1在与材料2的热应力相互作用下,温度每升高 1°C 所发生的应变为 $\epsilon_1 = -9.0 \times 10^{-6}$ 时,可实现对光纤光栅的完全补偿,即:

$$\epsilon_1 = -9.0 \times 10^{-6} \Delta t, \quad (7)$$

而材料2发生的应变为:

$$\epsilon_2 = \frac{\Delta L_2}{L_2} = \frac{-\epsilon_1 L_1}{L_2} = 9.0 \times 10^{-6} \Delta t \cdot \frac{L_1}{L_2}, \quad (8)$$

引入热应力方程:

$$\epsilon = \frac{\sigma_t}{E} + \alpha_t \Delta t, \quad (9)$$

式中, σ_t ——热应力;

α_t ——材料的热膨胀系数;

Δt ——温度的变化量。

上式可改写为:

$$\epsilon = \frac{F_t}{ES} + \alpha_t \Delta t, \quad (10)$$

式中, F_t 为热约束力, S 为材料的横截面积。

当温度升高时,由于材料2刚度比较大,材料1会受到材料2的挤压作用,导致材料1发生压缩应变。

材料1的热应力方程为:

$$\epsilon_1 = \frac{F_{t_1}}{E_1 S_1} + \alpha_{t_1} \Delta t. \quad (11)$$

材料2的热应力方程为:

$$\epsilon_2 = \frac{F_{t_2}}{E_2 S_2} + \alpha_{t_2} \Delta t. \quad (12)$$

在静力平衡状态下,根据牛顿第三定律,材料1和材料2的相互作用力大小相等,即:

$$F_{t_1} = F_{t_2}. \quad (13)$$

联立式(11)、式(12)、及式(13),可消去 F_{t_1} 和 F_{t_2} ,经整理后可得:

$$\frac{\epsilon_1 - \alpha_{t_1} \Delta t}{\epsilon_2 - \alpha_{t_2} \Delta t} = \frac{E_2}{E_1} \cdot \frac{S_2}{S_1}, \quad (14)$$

再代入式(7)及式(8),消去 Δt ,整理后得:

$$\frac{\alpha_{t_1} + 9.0 \times 10^{-6}}{\alpha_{t_2} - 9.0 \times 10^{-6} \cdot \frac{L_1}{L_2}} = \frac{E_2}{E_1} \cdot \frac{S_2}{S_1}, \quad (15)$$

上式即为传感器温度补偿的结构设计公式。

接下来分析传感器的应变传感特性。设传感器不受温度影响,传感器粘贴在被测结构物上,材料3随被测结构的应变而发生同步变形,产生的应变为 ϵ ,长度改变为 ΔL ,且满足:

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2. \quad (16)$$

则材料1与材料2的应变之比为:

$$\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} = \frac{\frac{F}{S_1 E_1}}{\frac{F}{S_2 E_2}} = \frac{S_2 E_2}{S_1 E_1}, \quad (17)$$

又知:

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{\Delta L_1}{L_1} = \frac{\Delta L_1 L_2}{\Delta L_2 L_1}, \\ \epsilon_2 &= \frac{\Delta L_2}{L_2} \end{aligned} \quad (18)$$

联立上述两式可得:

$$\epsilon_1 = \frac{1 + \frac{L_2}{L_1}}{1 + \frac{L_2 S_1 E_1}{L_1 S_2 E_2}} \epsilon, \quad (19)$$

式(19)即为传感器的应变传感公式。

若 $\frac{S_1 E_1}{S_2 E_2} < 1$, 则有 $\epsilon_2 > \epsilon_1$, 即可实现应变增敏, 提高测量灵敏度和精度。

本文所制作的传感器的材料参数如下: 材料 1 和材料 2 的横截面积相等, 长度相等。材料 1 的弹性模量 E_1 约为 75 GPa 左右, 材料 2 的弹性模量 E_2 为 210 GPa 左右。因此, 当传感器在外力作用下产生形变, 即 $\epsilon_1 = 1.47 \epsilon = 1.76 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 时, 可实现应变增敏, 增敏系数为 1.47。

3 实验

传感器的制作过程如下: 首先在材料 1 的成型制备过程中埋入光纤光栅, 得到材料 1, 材料 1 的固化成型在恒温干燥箱中进行, 固化温度为 170 °C。由于成型制备过程中将光纤光栅埋入其内部, 光栅和材料 1 紧密地结合在一起, 故可有效地解决胶粘不牢的缺点。材料 2 与材料 3 之间采用激光焊接方式结合; 材料 3 与材料 1 之间采用树脂胶粘接。

应变传感特性实验: 将传感器在材料万能实验机上进行拉伸试验, 以测试其应变增敏系数。

温度传感特性实验: 将传感器放置在高低温恒温槽中, 所选温度为 -20 ~ 40 °C, 每 10 °C 为一个梯度, 进行温度补偿试验。光源为日本 ANDO 公司生产的 AQ4315 宽带白光光源发射仪, 解调

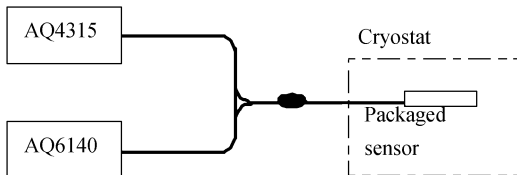


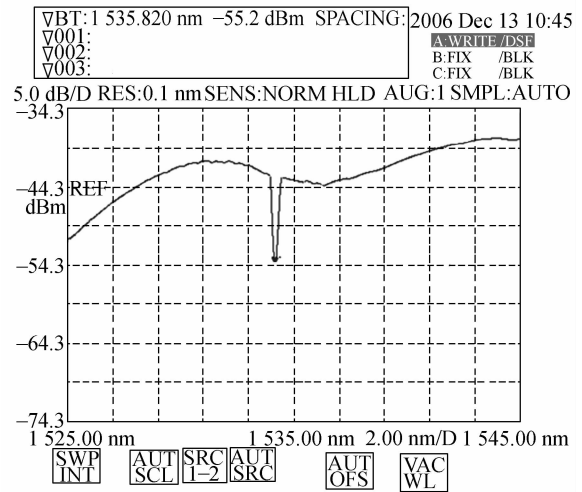
图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Scheme of experiment setup

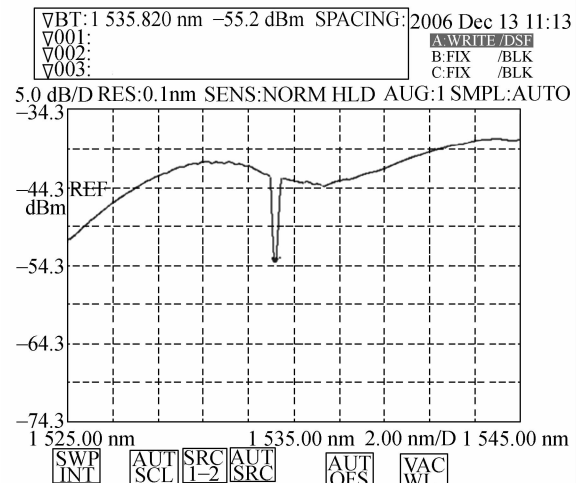
仪器为 ANDO 公司生产的 AQ6140 光纤光谱分析仪。解调实验系统如图 2 所示。由宽带光源发出的信号光经耦合器传输至布拉格光栅, 由于光纤光栅的波长选择性, 反射后的光波再经耦合器传至光纤光谱仪, 通过光谱仪分析出光纤光栅的反射波长。

4 实验结果及分析

图 3 为在不同的环境温度下光纤光栅传感器的透射图谱。由该图可以看出: 在环境温度为 40 °C 时, 光栅的波长为 1 535.820 nm; 环境温度



(a) 40 °C



(b) -20 °C

图 3 不同温度下的光纤光栅透射谱

Fig. 3 Transmitted spectra of FBG in different temperatures

为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,光栅的波长为 $1\ 534.250\ \text{nm}$,去除材料3因温度变化引起的变形因素,通过计算表明该传感器达到了良好的温度补偿效果。

图4为封装后的传感器在材料万能试验机上测试的应变传感特性曲线。从图中可以看到应变灵敏度为 $1.69\ \text{pm}/\mu\epsilon$,与理论计算值 $1.76\ \text{pm}/\mu\epsilon$ 吻合得很好,实验进行3个循环,传感器的重复性能良好,应变增敏系数为1.4。

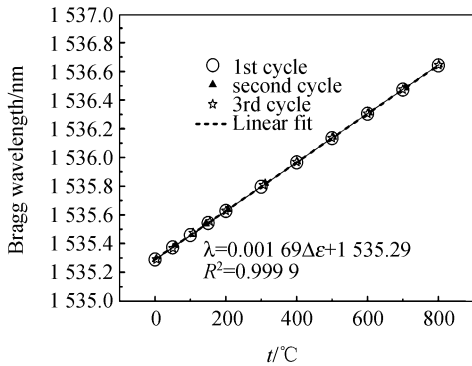


图4 传感器应变传感特性曲线

Fig. 4 Strain sensing characteristics of packaged sensor

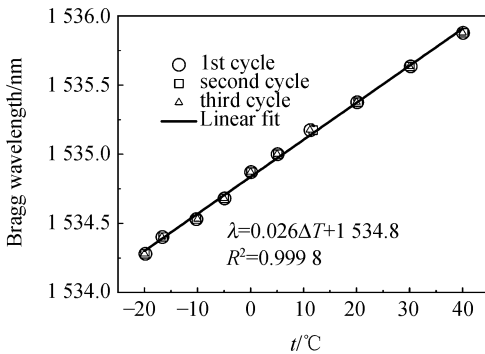


图5 传感器的温度实验曲线

Fig. 5 Temperature response of packaged sensor

图5为传感器的温度实验曲线。从中可以看

到光栅传感器的温度漂移量为 $26\ \text{pm}/^{\circ}\text{C}$,去除材料3因温度变化引起的变形因素后,得到传感器的温度补偿效果曲线,如图6所示。该图表明,在 $-20\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$,补偿后的光栅传感器的波长基本保持不变,与裸光栅的温度灵敏度 $10.4\ \text{pm}/^{\circ}\text{C}$ 相比,具有很好的温度补偿效果。

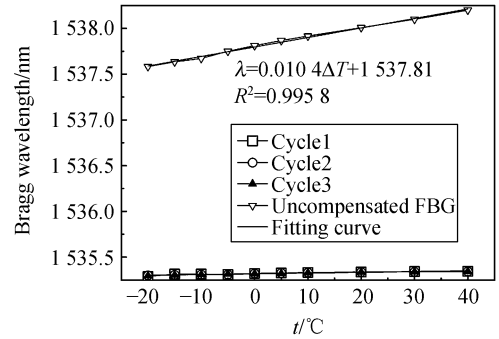


图6 传感器温度补偿特性曲线

Fig. 6 FBG wavelength of temperature after compensating package

5 结 论

本文提出了一种针对光纤传感器的新型热应力温度补偿机制,并采用在线成型技术,设计、制造了具有温度自补偿功能的光纤光栅应变传感器,解决了因光栅粘胶的老化而造成传感器测试不准确的问题。在 $-20\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$,封装的传感器实现了良好的温度补偿,在将近 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度跨越范围内,光栅传感器的波长基本保持不变。该传感器不仅能测量应变,而且具有应变增敏效果,应变灵敏度为 $1.69\ \text{pm}/\mu\epsilon$,增至裸光栅的1.4倍,与理论计算值吻合得很好。

参考文献:

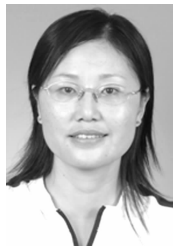
[1] KODINDOUMA M B, IDRIS R L, KERSEY A D, *et al.*. Damage assessment of a full-scale bridge using an optical fiber monitoring system [C]. *Smart Structures and Materials 1996; Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*,

Bellingham, WA, USA: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1996:265-275.

[2] MINHO S, BAE L S, SAM C S. Simultaneous strain and temperature sensing using two fiber Bragg gratings embedded in a glass tube[C]. *Proceedings of the 1997 Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO, Piscataway, NJ, USA;*

- IEEE*, 1997;392-397.
- [3] KIRKPATRICK T C, PETERSON D O, ROSSI P J, *et al.*. Preliminary study to facilitate smart structure systems in bridge girders[C]. *Proceedings of the 1999 Smart Structures and Materials - Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*, Bellingham, WA, USA: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1999; 152-160.
- [4] CHAN C C, JIN W, H HO L, *et al.*. Improvement of measurement accuracy of fiber Bragg grating sensor systems by use of gas absorption lines as multi-wavelength references [J]. *Electron. Lett.*, 2001, 37;742-743.
- [5] 郭明金,姜德生,袁宏才. 两种封装的光纤光栅温度传感器的低温特性[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(3):326-330.
- GUO M J, JIANG D SH, YUAN H C. Low temperature properties of fiber Bragg grating temperature sensors with two package methods[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3): 326-330. (in Chinese)
- [6] 节德刚,刘延杰,孙立宁,等. 基于双光栅尺的高速高精度位移测量方法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(7):1077-1083.
- JIE D G, LIU Y J, SUN L N, *et al.*. A high speed and high precision displacement measurement method using double grating scales [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7):1077-1083. (in Chinese)
- [7] 李丽,林玉池,付鲁华,等. 光纤光栅空分光复用传感系统的研究[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(4): 473-477.
- LI L, LIN Y CH, FU L H, *et al.*. Research on spatial division multiplexing of fiber bragg grating sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 473-477. (in Chinese)
- [8] 王为,林玉池,朱萍玉. 光纤光栅在低阻抗材料动态性能测试中的应用[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3):488-492.
- WANG W, LIN Y CH, ZHU P Y. Application of FBG sensor to measurement of dynamic performance of low impedance material [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3):488-492. (in Chinese)
- [9] YOFFE G W, KRUG P A, OUELLETTE F, *et al.*. Passive temperature compensating package for optical fiber gratings [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(30):6859-6861.
- [10] YUAN L. Temperature-compensating device with central-wavelength tuning for optical fiber gratings [J]. *Opt. Eng.*, 2001, 40(5):698-702.
- [11] TSAI H H, JANG W Y, YEH F F. Central wavelength tunable mechanism for temperature compensated package of fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2001, 24(1):86-90.
- [12] LO Y L, KUO C P. Packaging a fiber Bragg grating with metal coating for an athermal design[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(5): 1377-1383.
- [13] IWASHIMA T, INOUE A, SHIFGEMATSU M, *et al.*. Temperature compensation technique for fiber Bragg gratings using liquid crystalline polymer tubes[J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(5): 417-419.
- [14] DAVID WEIDMAN. Fiber Bragg gratings enhance real-world applications [J]. *Laser Focus World*, 1999(5):99-103.
- [15] 李彬,傅永军,魏淮,等. 高温封装实现光纤光栅的长期稳定[J]. *光电子·激光*, 2006, 17(7):798-802.
- LI B, FU Y J, WEI H, *et al.*. Long-term stabilization of fiber gratings by high-temperature packaging [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, 17(7):798-802. (in Chinese)

作者简介:



李剑芝(1978—),女,河北定州人,讲师,北京交通大学博士研究生,主要从事智能材料与结构的研究。E-mail: lijianzhigang@163.com



刘晨曦(1983—),男,湖南益阳人,硕士研究生,主要从事光纤传感测试技术的研究。E-mail: liuchenxilcx@126.com



杜彦良(1956—),男,河北深泽人,教授,博士生导师,主要从事智能材料与结构的研究。E-mail: duyil@sjzri.edu.cn

● 下期预告

电控可变焦 128×128 元自适应液晶微透镜阵列

李 晖,张新宇,张天序,沈绪榜

(华中科技大学 图像识别与人工智能研究所 多谱信息处理技术国防科技重点实验室,湖北 武汉 430074)

借鉴已有的单圆孔电极液晶透镜的结构与设计方法,发展得到了新型的电控可变焦 128×128 元的液晶微透镜阵列。该面阵液晶微透镜使用 ITO 玻璃作为上下基板,其中上电极是将 ITO 膜通过光刻技术和盐酸腐蚀方法得到了 128×128 元圆孔阵列图案;而下电极就是 ITO 膜。上电极的圆孔阵列整齐的排列,每个圆孔的直径为 $50 \mu\text{m}$,圆孔之间的间隔为 $100 \mu\text{m}$ 。夹在上下基板之间的液晶层的厚度为 $20 \mu\text{m}$ 。该面阵液晶微透镜的特性为:在 $0.2 \sim 5.0 \text{ V}_{\text{RMS}}$ 电压范围内,该面阵液晶微透镜的焦距范围为 $50 \sim 400 \mu\text{m}$ 。进一步的测试结果表明,该面阵液晶微透镜的点扩展函数值近似于理论数值,并且该面阵液晶微透镜的工作电压与焦距是成反比例关系,以及该面阵液晶微透镜可以成清晰的多重像。