

doi:10.3788/gzxb20144309.0906005

# 基于焦耳热的光纤布喇格光栅电压传感器研究

米林, 杨德兴, 姜亚军, 王美蓉, 郭钰宁, 屈俊荣

(西北工业大学 理学院, 陕西省光信息技术重点实验室, 教育部空间应用物理与化学重点实验室, 西安 710072)

**摘 要:** 设计了一种基于焦耳热的新型光纤布喇格光栅电压传感器以用于小电压的精确监测. 实验中通过真空蒸镀法在光栅周围镀上一层金属镍, 并将光栅密闭封装在充满气凝胶的铜管中. 电压传感通过所镀金属镍层在通电过程中产生的焦耳热引起栅区温度升高, 导致光纤光栅反射谱中心波长漂移, 从而实现电压与光纤光栅中心波长漂移量的变换. 实验表明, 封装后的直流电压灵敏度达到  $520 \text{ pm}/\text{V}^2$ , 并可用于较低频率的交流传感, 且系统结构简单、精度高、易于实现.

**关键词:** 电压传感; 布喇格光纤光栅; 焦耳热; 金属封装; 波长漂移

中图分类号: TB133

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)09-0906005-5

## Investigation of FBG Voltage Sensor Based on Joule Heat

MI Lin, YANG De-xing, JIANG Ya-jun, WANG Mei-rong, GUO Yu-ning, QU Jun-rong

(Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, the Key Laboratory of Space Applied Physics and Chemistry, Ministry of Education, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** A new type of fiber Bragg grating voltage sensor which is based on joule heat was designed and used to precisely monitor small voltage. In the experiment, a layer of nickel was plated around the grating by vacuum evaporation method and the grating was hermetically packaged in copper tube which is full of aerogel. The center of reflection spectrum of fiber Bragg grating drifts as the fiber grating heated due to the heat generated in nickel layer when the current goes through. Thus the transformation from voltage change to centre wavelength drift could be obtained. The experiment results show that the direct current voltage sensitivity after packaged is up to  $520 \text{ pm}/\text{V}^2$ , and it can be used in the low frequency alternating current sensing. This system owns the advantages of simple structure, high accuracy and easy to be implemented.

**Key words:** Voltage sensor; Fiber Bragg grating; Joule heat; Metallic packaging; Wavelength drift

**OCIS Codes:** 060.3735; 280.0280; 280.4788; 310.0310

## 0 引言

光纤电压传感器是随着光纤技术发展起来的一种新型电压测量装置<sup>[1-4]</sup>, 与传统电压测量设备相比, 其优点是: 耐高压、耐腐蚀、抗电磁干扰; 测量精度高、安全、可靠、稳定; 易于小型化和智能化, 可进行多功能测量, 尤其是可以形成传感网络, 实现远距离监控和遥测. 但是其系统复杂、受环境影响大、制作成本高等缺陷阻碍了其实用化进程.

光纤电压传感器主要分为传光型(光纤只作为光信号的传输介质, 以其他光学材料作为电压的敏感元件)和传感型(光纤不仅负责光的传输, 而且要作为光调制的敏感元件). 传光型光纤电压传感器主要利用具有线性电光效应的电光晶体实现电压测量, 普遍存在着系统制作工艺复杂、成本高、受环境因素(如温度)的影响较大等问题. 传感型光纤电压传感器主要有相位型和光谱型两种. 相位型光纤电压传感器利用线性压电元件或电致伸缩元件作为相位调制器, 采用干涉原

**基金项目:** 国家科技重大专项课题(No. 2011ZX05026)和西北工业大学科技创新基金(No. 2012KJ01005)资助

**第一作者:** 米林(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤光栅传感技术. Email: milin\_123123@163.com

**导师(通讯作者):** 杨德兴(1966-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为极端环境下的光纤传感技术与系统、激光超声波物理与应用等. Email: dxyang@nwpu.edu.cn

**收稿日期:** 2013-12-19; **录用日期:** 2014-03-12

<http://www.photon.ac.cn>

理检测光相位的变化,易受环境影响发生消偏及相位差扰动.光谱型的光纤电压传感器将电压信号转换为光纤光栅敏感的应变或温度信号,通过检测布喇格反射中心波长漂移量实现电压的测量.

20世纪80年代以来,国外就开始涉足光纤电压传感器的研究,逐渐向小型化、智能化、多用途、新材料应用等高技术含量方向发展<sup>[5-6]</sup>.文献[5]和文献[6]分别利用圆石英晶体的逆压电效应和单光纤布喇格光栅用于监测高电压和交流电.国内光纤电压传感器的研究虽然起步较晚但是发展迅速,也取得了丰硕的成果<sup>[7-10]</sup>.文献[7]利用双光纤光栅和磁致伸缩材料,有效解决了电流和温度的交叉敏感问题.文献[8]给出了一种电光调制的法布里-珀罗干涉型电压传感器,具有较宽的频率响应范围、较高的灵敏度和较好的多额线性度.文献[9]提出了一种利用铌酸钽晶体的作传感头的光纤电压传感器,能够较好地消除光源波长波动,环境变化等不良因素带来的误差.文献[10]的方法易受外界环境的影响,并且套管产生的热量传导至栅区较慢,导致传感器对电流变化反应缓慢,热量的大量散失也降低了传感器的灵敏度.

本文采用光纤镀膜技术和金属封装技术对光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)进行封装,利用其温度灵敏性<sup>[11-12]</sup>提出一种基于焦耳热的FBG电压传感器.该系统结构简单、性能稳定、响应迅速、制作成本低廉、受环境影响较小,更易于广泛应用.

## 1 FBG的温度传感特性

FBG具有较好的温度敏感特性,由模式耦合理论可知,布喇格中心波长为

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

式中 $n_{\text{eff}}$ 为光纤线芯的有效折射率, $\Lambda$ 为光栅周期.热膨胀效应和热光效应是外界温度对布喇格波长形成影响的主要原因.前者改变光栅的周期,而后者改变光纤的折射率,即引起 $n_{\text{eff}}$ 和 $\Lambda$ 的变化.式(1)对温度求导,得

$$d\lambda_c/dT = 2(n_{\text{eff}}d\Lambda/dT + \Lambda dn_{\text{eff}}/dT) \quad (2)$$

由热膨胀效应引起的光栅周期变化为

$$d\Lambda/dT = \alpha \cdot \Lambda \quad (3)$$

由热光效应引起的有效折射率变化为

$$dn_{\text{eff}}/dT = n_{\text{eff}} \cdot \zeta \quad (4)$$

因此温度灵敏度为

$$K_T = \frac{d\lambda_c}{dT} / \lambda_c = \alpha + \zeta \quad (5)$$

式中, $K_T$ 为温度灵敏度, $\alpha = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}$ 为热膨胀系数, $\zeta =$

$\frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T}$ 为热光系数,表示折射率随温度的变化率.对于石英光纤, $\alpha \sim 0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ , $\zeta \sim 6.7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ .本

文所用FBG在室温下的中心波长为1548 nm,单位温度变化引起的光栅波长漂移 $1548 \times 7.2 \times 10^{-6} = 11.1 \text{ pm}$ ,即 $11.1 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ .

## 2 传感器的设计及工作原理

利用真空蒸镀法<sup>[13-14]</sup>在去除涂覆层的栅区部分镀上一层金属镍,并在金属层的两端引出两根铜丝作为电极,铜丝与栅区两端用导电胶连接.光纤光栅的封装按照如图1所示进行,即在对光纤光栅施加一定预应力的条件下将光纤光栅封装在内径7 mm,壁厚1 mm的铜管中,并将两根电极引出铜管.钢管两端由中心开孔的薄片封堵.封装时,使光纤光栅处于铜管的中央.图中钢管内灰色部分为硅气凝胶,其热传导率仅为 $0.013 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ <sup>[15]</sup>,起到阻隔热量损失、减小外部温度变化影响和固定光纤光栅的作用.

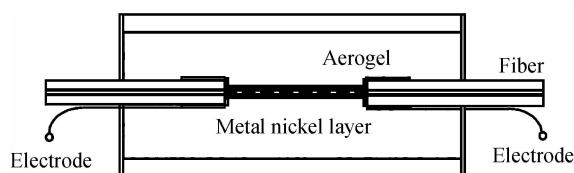


图1 镀膜FBG电压传感装置

Fig. 1 The schematic diagram of coated FBG voltage sensing device

气凝胶是近年来兴起的一种高孔隙率多孔材料.其固态热传导率仅为非多孔玻璃态材料热导率的1/500左右,并且由于没有空气对流,对流热传导率很低.同时多孔网络结构使气凝胶对热辐射具有“无穷隔热板效应”,使其对热辐射的遮挡效率很高.

在两根电极两端加电压,电流通过栅区表面的镍层产生热量.由于去除涂覆层的FBG半径只有 $62.5 \mu\text{m}$ ,所以镍层薄膜通电产生的热量可以迅速传导使栅区温度达到稳定.

## 3 实验研究

实验装置如图2,SM130为光纤光栅传感解调仪.从SM130发出的光直接进入图1所示的传感装置,与光栅中心波长一致的光被FBG反射回到解调仪,由SM130监视和测量,电源使用AFG3101任意波形信号源,为传感系统提供稳定的直流和交流源.

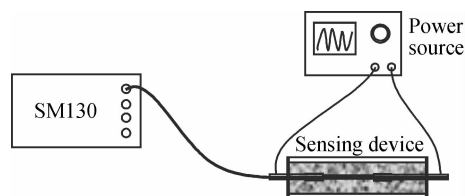


图2 实验装置

Fig. 2 The schematic diagram of experimental setup

### 3.1 金属封装前的直流电传感实验

为了更好地体现金属封装条件下电压传感装置的

优异性能,首先检验封装之前的电压传感特性.实验中通过稳压源为栅区镍层提供从 0 V 起以 0.1 V 的间隔增加至 2 V 的电压,得到电压的平方与反射中心波长的关系.

由于电流经过镍层产生热功率遵循  $P=U^2/R$ ,所以数据处理时采用电压的平方作为变量与 FBG 的反射中心波长相对应.图 3 中空心三角为电压升高时对应的数据点,圆点对应的是电压由 2 V 减小到 0 V 对应的数据点.电压升高时数据点的线性拟合度为 0.998 8;当电压逐渐减小时,线性拟合度也高达 0.998 6,两条拟合直线几乎重合,测量灵敏度为  $407 \text{ pm}/\text{V}^2$ .

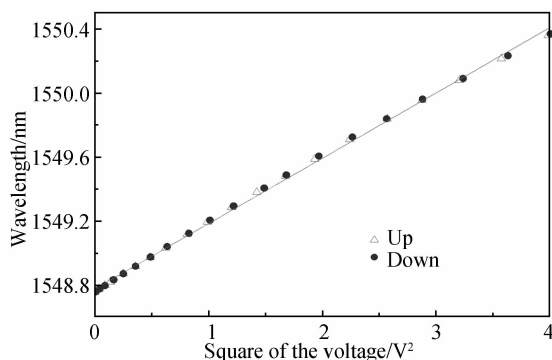


图 3 封装前 FBG 中心波长与电压平方的关系

Fig. 3 The relationship of the FBG center wavelength with the square of applied voltage before packaging

封装前的镀镍 FBG 裸露在空气中,镍层会逐渐受潮氧化脱落,电阻增大,影响测量精度,降低传感器的使用寿命. FBG 的栅区已经去除了涂覆层,在无保护的条件下极易断裂,并且外界温度变化、空气流动等因素极易对中心波长漂移产生影响.

### 3.2 金属封装后的直流电传感实验

图 4 为金属封装后测得的中心波长与电压平方的关系.电压逐渐升高时的线性拟合度为 0.998 1,电压减小时的拟合度也高达 0.998 4,并且两曲线几乎重合.金属封装保持了封装前传感装置优良的稳定性和

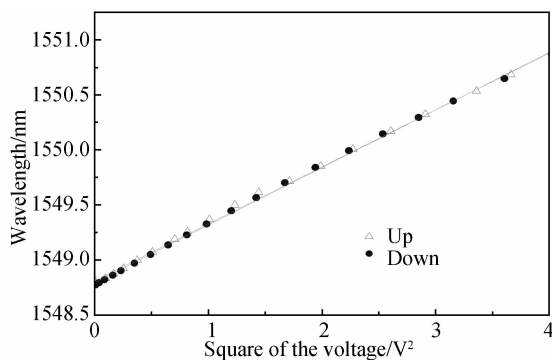


图 4 封装后 FBG 中心波长与电压平方的关系

Fig. 4 The relationship of the FBG center wavelength with the square of applied voltage after packaging

重复性,并且封装后的电压测量灵敏度达到了  $520 \text{ pm}/\text{V}^2$ ,较封装前有了显著提高.

实验中加载电压不能过高,否则将导致栅区严重退化、金属层脱落,甚至烧毁传感器等问题,这是由传感器的结构特点决定的.在传感器的产品化过程中可以采用添加中间层、光纤表面刻蚀等方法增大金属层的附着力以提高电压敏感范围,增强传感器的长期稳定性.

### 3.3 封装前的交流响应特性

为传感装置输入电压为 1.5 V,频率由 1 Hz 至 11 Hz 的交流电,经 SM130 采集 FBG 中心反射波长,得到图 5.

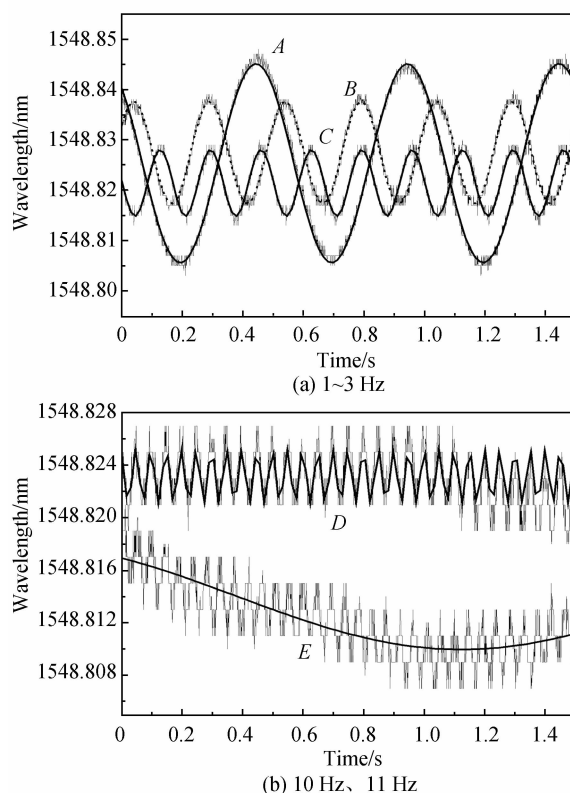


图 5 封装前交流频率对应的响应曲线

Fig. 5 Different AC frequencies corresponding to the response curve before packaging

图 5 中, A、B、C、D、E 分别为电压频率 1 Hz、2 Hz、3 Hz、10 Hz、11 Hz 对应的响应曲线.交流电频率为 1 Hz~3 Hz 时,FBG 反射中心波长的变化符合正弦规律,且随着交流电频率的升高,FBG 反射中心波长波动范围逐渐减小,这是由于栅区的镍层薄膜产生的热量传导至纤芯需要一定的时间,而过高的频率使得传导时间减小,栅区周期  $\Lambda$  和折射率  $n_{\text{eff}}$  不能及时响应热量的变化造成的.将上图数据经 OriginPro 软件正弦拟合得到表 1 中的数据.

由表 1 可知,频率在 1 Hz~10 Hz 逐渐增大的过程中,正弦拟合度由 0.96 减小至 0.536,FBG 反射中

心波长的振幅范围由 39.52 pm 减小至 4.08 pm. 随着交流频率的逐渐升高, 响应曲线的正弦特征退化, 且 2pm 的系统噪声对监测装置的干扰较大, 无法真实反映出交流信号的特征.

表 1 封装前的拟合结果

Table 1 The fitted results before packaging

| Frequency/Hz | Fitting | Amplitude |
|--------------|---------|-----------|
| 1            | 0.994   | 39.52     |
| 2            | 0.983   | 20.34     |
| 3            | 0.963   | 13.32     |
| 4            | 0.916   | 9.78      |
| 5            | 0.775   | 8.24      |
| 6            | 0.821   | 6.74      |
| 7            | 0.825   | 5.84      |
| 8            | 0.773   | 4.92      |
| 9            | 0.653   | 4.44      |
| 10           | 0.539   | 4.08      |

当交流频率达到 11 Hz 以上时, 数据曲线整体上下起伏, 无法形成正弦曲线拟合, 这是由于频率过高, 镍层周围的温度趋于稳定, 使得 FBG 反射中心波长在中心位置作微小幅度振荡, 而传感器裸露在空气中, 空气对流对栅区温度的影响较大. 因此在未封装条件下, 外界环境对传感器的影响较大, 频率过高会导致测量质量下降, 从而达不到监测交流电变化的目的.

### 3.4 金属封装后的交流响应特性

将传感装置按照图 1 进行封装, 通以 1.5 V, 频率 1~11 Hz 的电压, 经 SM130 采集 FBG 反射中心波长, 得到图 6.

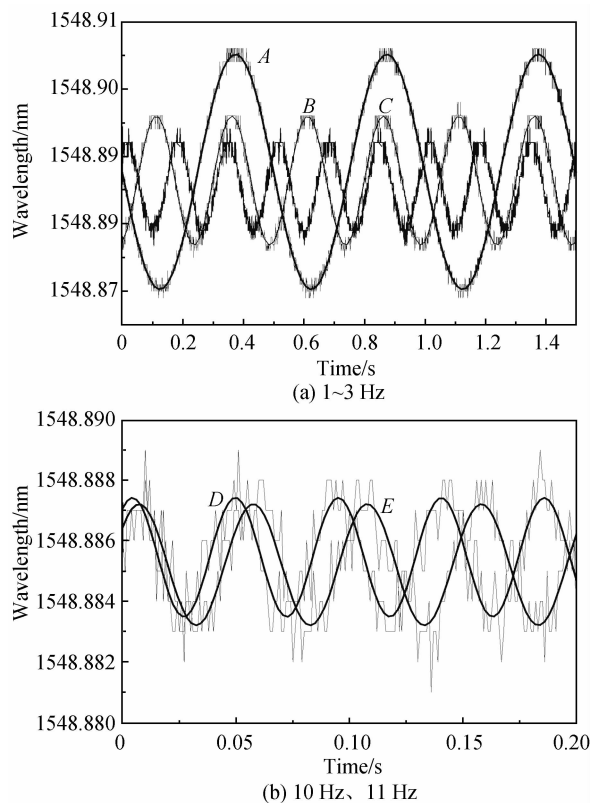


图 6 封装后交流频率对应的响应曲线

Fig. 6 Different AC frequencies corresponding to the response curve after packaging

图 6 中, A、B、C、D、E 分别为电压频率 1 Hz、2 Hz、3 Hz、10 Hz、11 Hz 对应的响应曲线. 交流频率在 1~3 Hz 时, FBG 反射中心波长的变化符合正弦规律, 金属封装没有破坏传感装置的交流敏感特性. 随着交流电频率的逐渐升高, FBG 反射中心波长波动范围逐渐减小. 镍层向栅区传导热量的时间减小, 且金属封装阻隔了部分热量的散失, 使得栅区周围热量的变化幅度变小, 进而使得中心波长的变化范围减小. 将上图数据经 OriginPro 软件正弦拟合得到表 2 中的数据.

由表 2 可知交流电频率在 1~11 Hz 逐渐增大的过程中, 正弦拟合度由 0.995 减小至 0.749, FBG 反射中心波长的波动范围由 34.86 pm 减小至 3.92 pm. 与表 1 中的数据对比可知, 传感器金属封装后的正弦拟合度显著提高, 且频率过大时拟合曲线不会出现整体起伏的情况, 说明封装结构很好地屏蔽了外界环境温度对传感装置的影响; 封装后正弦曲线的振幅较前者有小幅度的下降, 这是由于金属封装后, 阻隔了部分热量的散失, 使得栅区附近热量的变化范围减小.

表 2 封装后的拟合结果

Table 2 The fitted results after packaging

| Frequency/Hz | Fitting | Amplitude |
|--------------|---------|-----------|
| 1            | 0.995   | 34.86     |
| 2            | 0.984   | 19.36     |
| 3            | 0.965   | 13.14     |
| 4            | 0.946   | 9.78      |
| 5            | 0.911   | 7.84      |
| 6            | 0.891   | 6.68      |
| 7            | 0.847   | 5.56      |
| 8            | 0.808   | 4.86      |
| 9            | 0.791   | 4.56      |
| 10           | 0.768   | 4         |
| 11           | 0.749   | 3.92      |

虽然传感器在实时监测中可以有效屏蔽环境温度的影响, 但是环境温度大范围变化还是会对其造成较大影响. 通过补偿传感器即可以消除影响, 具体方案与其他类型的光栅传感器补偿相似.

## 4 结论

本文根据 FBG 的温度传感特性设计的新型电压传感器, 有效避开了长久以来光纤光栅传感难以解决的温度影响的因素. 实验中通过未封装状态和封装状态的直流电响应特性对比实验, 验证了金属封装不仅可以有效屏蔽外界环境对传感器的影响而且封装后的测量灵敏度较未封装时有了较大的提高. 此外封装后的传感器重复性和稳定性良好, 并且有效解决了后者在实用中存在的易氧化、易损坏的缺点.

在交流电传感实验中, 传感装置在低频率时可以保持良好的正弦响应特性, 而随着频率的升高, 传感装

置逐渐无法实时响应正弦电压信号,因此在交流频率较低时传感器可以满足测量要求,而交流频率过高使传感器由于响应曲线过度失真而失效.通过对比封装前后的拟合数据,可以看到金属封装虽然使FBG中心反射波长变化范围略有减小但是使正弦拟合度有了较大的提高,因此封装后的传感器有可能应用于更高频率的交流电测量中.

随着研究工作的深入,传感器将采用更有效的封装手段,进一步提高传感器的灵敏度和实用性能,并且使其能够应用于更高频率的交流测量.

#### 参考文献

- [1] RAHMATIAN F, ORTEGA A. Applications of optical current and voltage sensors in high-voltage systems. fiber [C]. Transmission & Distribution Conference and Exposition, Latin America, 2006, 1-4.
- [2] WANG Hong-xing, ZHANG Guo-qing, GUO Zhi-zhong, et al. Application of electronic transformers in digital substation [C]. Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008, 1-5.
- [3] HONG Lei-yang, SHI Bin-liang. Research and application of optical fiber sensing technology on high voltage transmission line monitoring [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, **462**: 59-63.
- [4] ZHENG Hong-qin, ZENG Hua, JIN Zheng, et al. Development and analysis of optical voltage sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2000, **4**(412): 1-5.  
郑勤红, 曾华, 金争, 等. 光学电压传感器的进展与分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2000, **4**(412): 1-5.
- [5] BOHNERT K. Optical fiber sensors for the electric power industry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, **43**(3-5): 511-526.
- [6] REILLY D. A fiber-bragg-grating-based sensor for simultaneous AC current and temperature measurement [J]. *Sensors Journal*, 2006, **6**(6): 1539-1542.
- [7] LÜ Quan-chao, ZHAO Jian-lin. Fibre Bragg grating sensor for simultaneous measurement of current and temperature [J]. *Acta Photanica Sinica*, 2009, **38**(11): 2810-2815.  
吕全超, 赵建林. 一种同时测量电流和温度的光纤光栅传感器 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(11): 2810-2815.
- [8] HONG Pei-zhi. Electric field and voltage sensor using optical-waveguide Fabry-Perot interferometer [J]. *Acta Photanica Sinica*, 1996, **25**(3): 230-234.  
洪佩智. 光波导 F-P 干涉型电场和电压传感器 [J]. *光子学报*, 1996, **25**(3): 230-234.
- [9] WANG Zhi-bin, LI Zhi-quan, WANG Li. Study on an optical voltage sensor [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2004, **17**(2): 317-321.  
王志斌, 李志全, 王莉. 一种光纤电压传感器的研究 [J]. *传感器学报*, 2004, **17**(2): 317-321.
- [10] DONG Xin-yong, WEN Wu-qi, WEI Yu-hua, et al. Electrically tuning Fiber Bragg grating by metal coating [J]. *Acta Photanica Sinica*, 2001, **30**(4): 422-424.  
董新永, 温午麒, 魏玉花, 等. 光纤布喇格光栅的金属管封装与电调谐 [J]. *光子学报*, 2001, **30**(4): 422-424.
- [11] 赵勇. 光纤光栅及其传感技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [12] MOREY W W, Meltz G, GLENN W H. Fiber optic Bragg grating sensors [C]. SPIE, 1989, **2507**: 98-107.
- [13] 杨烈宇, 关文铎, 顾卓明. 材料表面薄膜技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1991.
- [14] 杨邦朝, 王文生. 薄膜物理与技术 [M]. 电子科技大学出版社, 1994.
- [15] SHEN Jun, WANG Guo-qing, WANG Yu, et al. Preparation of silica aerogels and study of surface modification and thermal conductivity [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2004, **32**(8): 1106-1110.  
沈军, 汪国庆, 王钰, 等. SiO<sub>2</sub> 气凝胶的常压制备及其热传输特性 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2004, **32**(8): 1106-1110.