

# 光纤光栅传感器的原理及应用研究\*

杨兴,胡建明,戴特力

(重庆师范大学物理学与信息技术学院,重庆400047)

**摘要:**作为性能优良的敏感元件,均匀光纤布拉格光栅、啁啾光纤布拉格光栅等多种传感器已经有了更多的应用领域。通过光纤布拉格光栅内部写入、干涉法侧面写入、相位模版法写入等制作技术的原理说明和对比评介,通过光纤光栅传感器对所在环境的应变、应力、温度变化和动态磁场的感应原理分析,以及对光纤光栅传感器在复合材料、电力系统、石油天然气井和建筑结构中的应用工程的综述,阐明了这一类传感器在单参数传感测量,特别是多参数传感测量中还有很大的发展空间,值得进一步研究。

**关键词:**布拉格光纤光栅,相位模版法写入技术,单参数传感器,多参数传感器,建筑结构参数检测

中图分类号:TN241

文献标识码:A

文章编号:1672-6693(2009)04-0101-05

自上世纪70年代,Hill<sup>[1]</sup>等人首次制作出第一根短周期光纤光栅(即布拉格光纤光栅——FBG)以来,经过30多年的发展,光纤光栅的制作技术有了很大的提高,光纤光栅也得到了广泛的应用。尤其近20年<sup>[2]</sup>兴起的光纤光栅传感器,更是吸引了各国学者的广泛关注。相比传统的传感器,光纤光栅传感器具有其独特的优势,例如,径细、质软、重量轻,以及绝缘、抗电磁干扰且耐水、耐高温、耐腐蚀等特点。正是由于光纤光栅传感器所具有的诸多特点使其在工业、农业、生物、医疗、国防等领域有着广阔的应用。

## 1 光纤光栅的制作与发展

经过几十年的不断发展,写入激光光源的不断更新和光纤制作技术的不断完善,使光纤光栅的制作技术有了长足的发展。短周期光纤光栅的制作通常分为两种:一种是内部写入法,一种是外部写入法。内部写入法,制作简单,对实验装置的要求较低,但它只能写入布拉格波长与激励波长一致的光栅。1978年Hill等人使用488 nm氩离子激光器作光源,利用驻波干涉法成功制出第一根FBG。由于内部写入法的制约,1989年,美国的Meltz<sup>[3]</sup>等人首次提出了紫外侧写的外部写入技术,1993年,Hill<sup>[4]</sup>等人又提出了相位掩模法外部写入技术。Meltz等人的紫外侧写法,是以波长244 nm的紫外光作光源,利用全息干涉法从侧面对载氢光纤进行曝光刻写FBG。由于光栅的谐振波长与两束写入相干光的夹角有关,因此可以制作出谐振波长与写入波长不同的光纤光栅,但此种方法对光源的相干性和系统

的稳定性要求较高,不利于大批量生产。相位掩模法,用紫外光垂直照射相位掩模板后形成的+1级和-1级衍射光,+1和-1级衍射光在掩模板后干涉对载氢光敏光纤曝光从而刻写FBG。相位掩模法制作的FBG的谐振波长只与相位掩模板的周期有关。这种方法对光源的相干性要求不高,制作装置简单,是目前广泛采用的方法。随着光子晶体的制作工艺<sup>[5]</sup>及传输特性<sup>[6]</sup>的深入研究,光子晶体也逐渐被应用到光纤光栅的制作中,光子晶体光纤光栅也逐渐被应用到光纤光栅传感器的制作中。

相位掩模法制作FBG的装置主要由3部分组成:激光器、曝光装置及成栅监控系统。激光器可选用KrF或ArF等准分子激光器,激光主要指标有光斑大小、脉冲能量、相干长度、光斑质量、重复频率等,曝光装置由相位掩模板、光学精密平台(由步进电机控制的可移动平台)及各种反射镜和透射镜组成,成栅监控装置包括宽带光源、光谱分析仪、CCD和监视器。图1是相位掩模法制作FBG的示意图,图2是光敏光纤成栅的结构图。

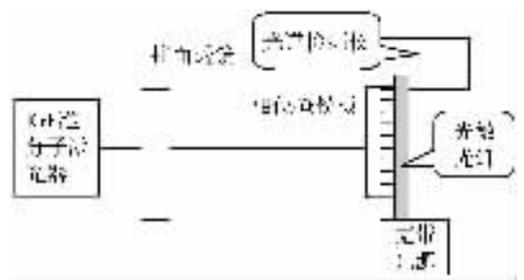


图1 相位掩模法制作光纤光栅的示意图

\* 收稿日期 2009-04-14 修回日期 2009-05-20

资助项目:重庆市高校光学工程重点实验室项目(No.0705),重庆师范大学校级课题(No.07XS01)

作者简介:杨兴,男,硕士研究生,研究方向为光纤光栅及传感器器件的制作,通讯作者:胡建明,E-mail:hujianming@cqnu.edu.cn

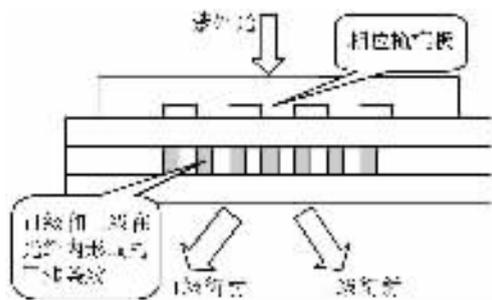


图2 光敏光纤成栅的结构图

## 2 光纤光栅传感器的原理<sup>[7]</sup>

短周期光纤光栅属于反射型带通滤波器,长周期光纤光栅属于透射型带阻滤波器。当光通过光纤光栅时,光纤光栅将反射或透射其中以布拉格波长 $\lambda_B$ 为中心波长的窄谱分量,图3为布拉格光纤光栅原理图。

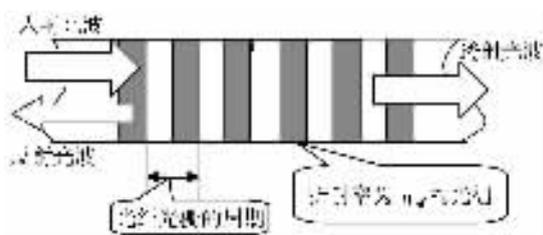


图3 布拉格光纤光栅原理图

对于光纤布拉格光栅,波长 $\lambda_B$ 是入射光通过光纤布拉格光栅时反射回来的中心波长。

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

式中, $\Lambda$ 是相位掩模光栅的周期; $n_{\text{eff}}$ 是光纤纤芯对自由空间中心波长的折射率。对于光纤光栅反射中心波长(对短周期光纤光栅)或透射中心波长(对长周期光纤光栅)与介质折射率有关,在温度、应变、压强、磁场等一些参数变化时,中心波长也会随之变化。通过光谱分析仪检测反射或透射中心波长的变化,就可以间接检测外界环境参数的变化。图4为光纤光栅传感器的原理图。

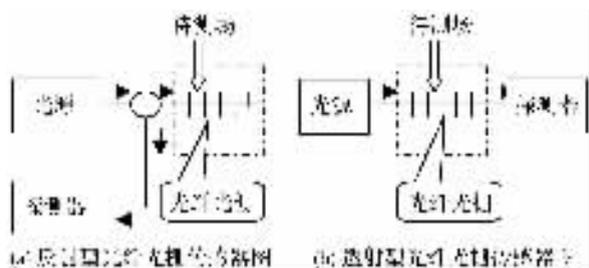


图4 光纤光栅传感器原理图

### 2.1 应变的测量

波长漂移 $\Delta\lambda_{BS}$ 和它所受的纵向应变 $\Delta\varepsilon$ 的关系式

$$\Delta\lambda_{BS} = \lambda_B(1 - \rho_a)\Delta\varepsilon \quad (2)$$

$$\rho_a = \frac{n^2}{2}[\rho_{12} - \nu(\rho_{11} - \rho_{12})] \quad (3)$$

其中 $\rho_a$ 是光纤的弹光系数, $\rho_{11}$ 和 $\rho_{12}$ 是光纤的光学应力张量分量; $\nu$ 是泊松系数。实验测得波长1.55  $\mu\text{m}$ 的FBG波长灵敏度系数约为1.15。在检测过程中对加速度、超声波、力等物理量的测量都可以转化为应变来测量。

### 2.2 温度的测量

设温度变化为 $\Delta T$ ,与之相对应的FBG中心波长的变化 $\Delta\lambda_{BT}$ 由下式给出

$$\Delta\lambda_{BT} = \lambda_B(1 + \xi)\Delta T \quad (4)$$

$\xi$ 是光纤的热光系数。

### 2.3 应力的测量

$$\Delta\lambda_{BP} = \lambda_B \left[ -\frac{1-2\nu}{E} + \frac{n^2}{2E}(1-2\nu)(2\rho_{12} - \rho_{11}) \right] \Delta P \quad (5)$$

其中 $E$ 是光纤的杨氏模量。

### 2.4 动态磁场的测量

法拉第效应表明在磁场作用下通过FBG的左旋和右旋偏振光的折射率大小会发生微弱的变化。假定沿FBG轴向施加磁场 $H$ ,左旋和右旋偏振光的折射率变化状况为

$$B_+ = 2n_+ \quad (6)$$

$$B_- = 2n_- \quad (7)$$

+和-代表FBG中右旋和左旋偏振光。决定法拉第效应灵敏度的是维尔德(偏振光旋度)常数,因此折射率的改变可以确定为

$$n_+ - n_- = \frac{V_d H \lambda}{2\pi} \quad (8)$$

其中 $V_d$ 是维尔德(偏振光旋度)常数, $\lambda$ 是工作波长。

## 3 光纤光栅传感器在当前各领域的典型应用

当前光栅光纤传感器的产品包括:应变传感器、温度传感器、压力传感器等。主要应用于材料成型、电力系统、健康监测、石油开采和采矿等行业。下面将介绍光纤光栅传感器在一些领域的典型应用。

### 3.1 复合材料上的应用( Composite cures applications )

复合材料产品具有重量轻、强度高、耐腐蚀等优点,在军用和民用领域逐步得到应用。但由于复合材料成型工艺的分散性,在实际生产中难以得到稳定的质量与性能<sup>[8]</sup>。复合材料的固化工艺<sup>[9]</sup>过程是决定其质量与力学性能的重要因素,传统的成型工艺多是采用基于经验的固化方法,无法得到成型过程中各状态参数变化的信息,不能充分发挥复合材料的可设计性。对材料的固化工艺过程进行在线监控,是解决这一问题的有效手段,它对于稳定产品质量,降低成本,提高材料加工与制造的重复性具有十分重要的意义。光纤光栅传感器为复合材料工艺过程的监测提供了崭新的方法和手段。光纤传感器监测复合材料固化工艺过程,是利用它体积小、敏感度高的特点,预先埋于预浸料铺层中来测量工艺过程中材料的参数。利用光纤光栅传感器进行复合材料工艺过程的监测示意图如图5所示。根据不同的光纤固化监测传感机理,能够从不同的角度观察、监测复合材料的固化过程。

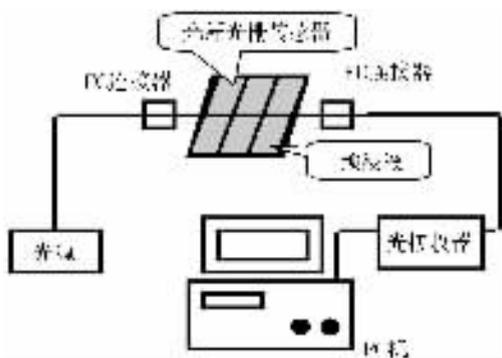


图5 光纤光栅用于监测复合材料制备的结构示意图

目前国内哈尔滨工业大学的万里冰<sup>[10]</sup>等人用正交复合材料板实现了热压罐固化过程中应变和温度同时监测,并分析了正交板的残余应变。武湛君<sup>[11]</sup>等人则利用单根 Bragg 光栅传感器实现了对复合材料工艺过程不同阶段、不同目标的监测(温度、压力、应力变化)。

### 3.2 电力系统方面的应用( Electrical system applications )

随着我国电力系统的不断发展,电力设备安全在线监测越来越受到人们的重视。现有的电力设备监测手段从工作原理上分主要有电信号传感器和光信号传感器两类。很多情况下需要测量的地方处在

高压环境中,如高压开关的在线监测,高压变压器绕组、发电机定子的电压、电流、温度等参数的实时测量。这些地方测量需要的传感器应具有很好的绝缘性能,一般电信号传感器无法使用。由于光纤光栅传感器所具有的绝缘、抗电磁干扰、体积小等特点,是进行这些环境下测量的最佳选择。

光纤光栅传感器在电力上的应用,主要包括两种方式:一是通过对温度的测量实现对电力设备的实时安全检测。电力设备的故障主要存在于电力系统要害部位(终端、中间接头等)和易发生故障的部位(弯曲敷设部位),因此对电力电缆系统的重点部位进行实时温度监测,就可以实现电力电缆的安全检测。光纤光栅传感器检测的电力设备包括高压开关柜隔离触头断路器、线夹、隔离刀闸、互感器、变压器、电抗器、阻波器等。光纤光栅传感器对这些电力设备进行温度的在线监测,诊断过热的原因,再经过处理分析故障,从而实现真正意义的在线安全监测。

二是间接测量电学参量如电压、电流等<sup>[12-13]</sup>。例如基于磁致伸缩材料(GMM)的大电流传感器。磁致伸缩材料在导线电流产生的磁场的作用下发生磁致伸缩,将FBG与超磁致伸缩材料通过某种方法结合,将磁致伸缩材料的应变转换为FBG的应变,进而导致FBG中心波长的漂移,通过检测FBG中心波长的漂移就可以测得导线电流强弱。图6为磁致伸缩材料的大电流传感器结构示意图。

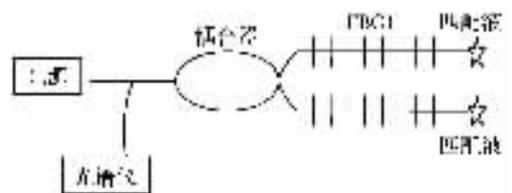


图6 磁致伸缩材料的大电流传感器结构示意图

### 3.3 石油、天然气井中的应用( Oil & Gas down-hole applications )

石油、天然气井的检测是石油和天然气开采过程中最基本和最关键的环节之一。压力、温度、流量等参量<sup>[14]</sup>是油气井下的重要物理量。通过先进的技术手段对这些量进行长期的实时监测,及时获取油气井下信息,对石油工业具有极为重要的意义。传统的电子传感器无法在井下恶劣的环境,诸如高温、高压、腐蚀、地磁的干扰下工作。光纤光栅传感器可以克服这些困难,其抗电磁干扰能力和耐高温、腐蚀能力能够精确地测量井下环境的参数。同时光

纤传感器具有分布式测量能力,可以测量井下参数的空间分布,给出剖面信息。而且光纤传感器横截面积小,在油气井中占据空间极小。因此,将光纤传感器应用于石油测井具有极广阔的前景。中国石油从2005年开始就已经在盘锦油田大规模安装由英国 Fiber Logix 公司研制的适应“恶劣环境”的光纤,目前仍可正常工作。图7为光纤光栅传感器应用于油井监测的结构示意图。

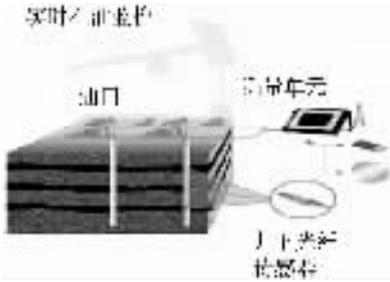


图7 光纤光栅传感器应用于油井的示意图

### 3.4 结构监测中的应用(Health structure examination)

公路、铁路、桥梁和一些重要的建筑设施是进行国民生产的基础,它们在国民经济及社会生活中起着十分重要的作用。如何确保它们经常处于健康状态愈来愈受到人们的重视。当前光纤光栅传感器已经广泛地应用于结构的健康监测中,例如上海卢浦大桥、济南黄河大桥、江阴长江公路大桥、中关村金融中心、上海国际网球中心<sup>[15]</sup>、天津奥体中心<sup>[16]</sup>,和一些铁路、隧道、飞机等结构健康检测。远程光纤光栅桥梁健康监测系统结构示意图如图8所示,光纤光栅传感器统一串连接到桥梁控制中心的光纤光栅传感网络分析仪中,分析仪可对采集到的数据进行分析、保存、打印等,监测人员可获取可靠信息,采取相应措施。获得数据和分析结果可通过 internet 传送到远处,从而达到远程监控的目的。

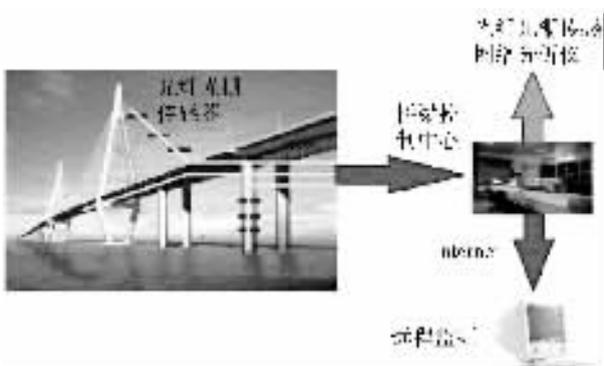


图8 光纤光栅传感器桥梁健康检测系统示意图

## 4 光纤光栅传感器的发展前景

光纤光栅传感器与传统的传感器比较具有的特点是:精度高、灵敏度好、可靠性高、抗电磁干扰、抗腐蚀、结构简单、尺寸小,适用于多种场合。国内外相关科研工作者对光纤光栅传感器做了大量的研究,并在很多工程上应用了光纤光栅传感器这种新技术。现阶段对光纤光栅传感器的研究主要集中在以下几个方面:

1)对传感器本身及进行横向应变检测和高灵敏度、高分辨率、且能同时检测应变和温度变化的传感器研究;

2)对光栅反射信号或透射信号分析和测试系统的研究,目标是开发低成本、小型化、可靠且灵敏的探测技术;

3)对光纤光栅传感器的实际应用研究,包括封装技术、温度补偿技术、传感器网络技术;

4)开展各应用领域的专业化成套传感技术的研发,如航空航天、航海、土木工程、医学和生物、电力<sup>[17]</sup>、地震监测<sup>[18]</sup>、核工业及化学和环境等行业。

相信在不久的将来光纤光栅传感器势必在很多领域取代传统的传感器。

### 参考文献:

- [1] Hill K O. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication[J]. Applied Physics Letter, 1978, 32: 647-649.
- [2] Morey W W, Meltz G, Glenn W H. Fiber optic bragg grating sensors[J]. Proc SPIE, 1989, 1169: 98-107.
- [3] Meltz G, Morey W W, Glenn W H. Formation of bragg grating in optical fibers by a transverse holographic method[J]. Optics Letters, 1989, 14: 823-825.
- [4] Hill K O. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask[J]. Applied Physics Letter, 1993, 62: 1035-1037.
- [5] 喻平, 欧红叶. 垂直沉积法自组装胶体光子晶体的研究进展[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2008, 25(4): 1-6.
- [6] 刘锐, 瞿荣辉, 蔡海文, 等. 光子晶体光纤布拉格光栅传输谱特性的分析[J]. 光学学报, 2009, 26(7): 1007-1012.
- [7] 饶云江, 王一平, 朱涛. 光纤光栅原理及应用[M]. 北京: 科学技术出版社, 2006: 160-165.
- [8] 赵海涛, 张博明, 武湛君, 等. 光纤光栅智能复合材料基

- 础问题研究[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(12): 27-30.
- [ 9 ] 杜彦良, 邵琳, 李剑芝, 等. 适用于斜拉索的智能混杂纤维复合材料的研究[J]. 功能材料, 2008, 32(2): 282-285.
- [ 10 ] 万里冰, 武湛君, 张博明. 光纤布拉格光栅监测复合材料固化[J]. 复合材料学报, 2004, 21(6): 1-5.
- [ 11 ] 武湛君, 张博明, 万里冰. 单根光纤光栅监测复合材料固化工艺过程多目标参量技术的研究[J]. 复合材料学报, 2004, 21(6): 82-86.
- [ 12 ] 刘德峰, 周王民, 魏光虎, 等. 一种改进的双光纤光栅大电流传感器[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(10): 21-27.
- [ 13 ] 钟小江, 仝卫国, 李宝树. 光纤光栅传感器技术及其在电力系统中的应用[J]. Technology&Application, 2007, 13(5): 25-29.
- [ 14 ] 刘敏敏, 周峰, 杜志顺. 光纤传感器在石油测井中的应用[J]. 光学与光电子技术, 2008, 6(3): 18-21.
- [ 15 ] 紫栅光电公司. 光纤光栅的应用案例[EB/OL]. [2008-06-03](2009-04-02). <http://www.synetoptics.com/main.successmenu.asp>.
- [ 16 ] 田德宝, 张大煦, 孙俊良, 等. 光纤布拉格光栅应变测量在天津奥体中心工程中的应用[J]. 施工技术, 2008, 37(11): 64-66.
- [ 17 ] 李星蓉. 光纤传感器在电力系统中的应用[J]. 电力系统通信, 2008, 29(7): 49-52.
- [ 18 ] 马超, 乔学光, 贾振安, 等. 光纤布拉格光栅地震检波器的研究与应用[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(2): 622-626.

## Principle and Typical Current Applications of Fiber Grating Sensors

*YANG Xing , HU Jian-ming , DAI Te-li*

( College of Physics and Information Technology , Chongqing Normal University , Chongqing 400047 , China )

**Abstract :** Fiber grating is diffraction grating which uses a certain method to change the core index permanently and periodically along the axial direction of photosensitive fiber. In the use of fiber as carrier , the fiber grating sensors measure the changes of parameters of the external environment indirectly by detecting the reflective or projective diversifications of the central wave. Characterized by high precision , small diameter , softness , light weight and resistance to the interference of electromagnetic and atomic radiation , the fiber Bragg grating sensor has been widely used in industry , agriculture , biology , medical care , defense and other fields. With the progress of optical fiber and fiber grating fabrication , the accuracy and reliability of fiber Bragg grating sensor is also improved gradually. The fiber Bragg grating sensor was previously used in temperature and stress measurement. But now it is applied to harsh environment detecting , structural health monitoring , as well as composite materials and medical care. So far the fiber sensors have developed from single parameter to multi-parameters measurement. This paper involves the development of fiber Bragg grating fabrication , the principle and current application of fiber grating sensors and their development prospects.

**Key words :** fiber grating sensor ; fiber Bragg grating ; structural monitoring

( 责任编辑 欧红叶 )