

文章编号: 0258-7025(2009)06-1317-10

镀膜光纤光栅应用与发展

顾铮先 邓传鲁

(上海理工大学理学院光电功能薄膜实验室, 上海 200093)

摘要 镀膜光纤光栅(CFG)是近年来光通信、光传感应用领域的研究热点,以其优异的光学特性和调节灵活的设计而使其具有诱人的应用前景。对镀膜光纤光栅的结构和理论特性作一简要的介绍,给出镀膜介质膜和金属膜的光纤光栅计算模型,重点阐述镀膜光纤光栅在传感和通信领域中的应用,对镀膜光纤光栅的发展方向作进一步展望。

关键词 光栅; 镀膜光纤光栅; 布拉格光纤光栅; 长周期光纤光栅; 传感器; 滤波器; 调谐

中图分类号 TP212.14; TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093606.1317

Application and Development of Coated Fiber Grating

Gu Zhengtian Deng Chuanlu

(Laboratory of Photo-Electric Functional Films, College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract Coated fiber grating has aroused more and more interest in optical communication and optical sensing recent years. Due to its good optical characteristics and flexible and adjustable design, coated fiber grating has an attractive application prospect. The structure and theory of coated fiber grating is introduced simply briefly, and the calculation model of fiber grating coated dielectric film and metal film is given. The application of coated fiber grating in the sensing and communication area is emphasized. And the further outlook of its development direction is prospected.

Key words gratings; coated fiber grating; fiber Bragg grating; long period fiber grating; sensor; filter; tuning

1 引 言

1978年, K. O. Hill等^[1]首先发现掺锗光纤的紫外光敏特性, 这成为光纤光栅(FBG)研究的起点。1989年, G. Meltz等^[2]首次采用全息干涉法, 在掺锗石英光纤上研制出第一支布拉格谐振波长位于通信波段的光纤光栅, 从此推动了光纤光栅的大发展, 1996年, A. M. Vengsarker等^[3]采用振幅掩模法制作了第一支长周期光纤光栅(LPFG)。自此, 各国对光纤光栅的研究飞速发展起来。现今, 人们可以改变光纤光栅的周期、折射率调制深度等, 制作成种类繁多、用途广泛的光纤器件, 如啁啾光栅、闪耀光栅、相移光栅、切趾光栅、摩尔光栅等。

短周期光纤光栅的周期一般为零点几微米, 为

反射型光纤光栅; 长周期光纤光栅的周期一般在几十微米到几百微米, 为透射型光纤光栅。LPFG相较于FBG, 虽然具有更为优秀的弯曲、温度、应变和折射率灵敏度等特点, 使其可以制成多种光纤传感器, 但是FBG也具有自身显著的优点, 且在传感和通信领域中应用广泛, LPFG所制成的光纤器件还不能完全代替FBG, 有关FBG的研究仍然在不断深入。尤其是近年来, 在FBG和LPFG的包层上镀一层均匀对称或周期性变化非对称的薄膜^[4~7]来改变光纤光栅的传输特性成为研究热点, 相关研究成果屡见报道, 镀膜FBG和LPFG在传感和通信领域大放异彩。

本文介绍了镀膜光纤光栅的耦合原理, 就介质

收稿日期: 2008-04-28; **收到修改稿日期**: 2008-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(60777035)、教育部科学技术研究重点项目(208040)、上海市教育委员会科研项目(07ZZ87)及上海市重点学科建设项目(T0501)资助课题。

作者简介: 顾铮先(1965—), 男, 教授, 博士生导师。主要从事光电工程与测量、光电功能薄膜、光纤传感器等方面的研究。

E-mail: zhengtiangu@163.com

膜和金属膜的数学计算方法作一介绍;重点论述镀膜光纤光栅在传感和通信中的广泛应用,并介绍本实验室在镀膜长周期光纤光栅研究方面所做的工作;展望了镀膜光纤光栅的发展和应用前景。

2 镀膜光纤光栅耦合原理及相关知识介绍

2.1 镀膜光纤光栅耦合原理

现今,许多学者致力于镀膜光纤光栅的理论和实验研究^[8~10],这种镀膜光纤光栅主要应用于传感和通信领域中。其基本思想是:基于FBG和LPFG对包层外界环境变化非常敏感的特性,可以根据实际需要,在光纤光栅外包层镀一层敏感薄膜。当外界环境(温度、应力、化学浓度等)变化时,引起薄膜参数(薄膜折射率、薄膜厚度)相应变化,进而影响光纤光栅谐振波长变化,可以通过测量谐振波长的变化来探测外界环境的变化,或者基于透射谱中的波段损耗用于滤波等。图1是镀膜FBG或LPFG的一般结构示意图。

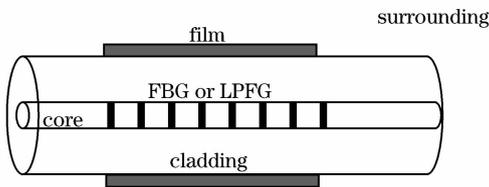


图1 镀膜FBG或LPFG结构模型

Fig.1 Coated FBG or LPFG model

FBG为反射型光纤光栅的原因在于其前向传输导模和后向导模发生耦合,在始端得到反射谱。其光学特性是以谐振波长为中心的窄带光学滤波,谐振波长满足公式

$$n_{\text{eff,co}} + n_{\text{eff}} = \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad (1)$$

式中, $n_{\text{eff,co}}$ 为芯层有效折射率,可由芯层模特征方程求得, n_{eff} 为芯层或包层有效折射率, λ 为谐振波长, Λ 为光栅周期。

LPFG为透射型光纤光栅的原因在于芯模与同向各阶次包层模之间耦合,在终端得到透射谱。对于芯模和包层模耦合,主要是纤芯导模与一阶包层模产生的耦合,其相位匹配条件满足公式

$$n_{\text{eff,co}}(\lambda) - n_{\text{eff,cl}}^v = \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad v = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

式中 $n_{\text{eff,cl}}^v$ 为1阶 v 次包层模式在波长 λ 处的有效折射率,可由包层模特征方程求得。

镀膜FBG的反射谱和镀膜LPFG的透射谱都

是光栅参数、镀膜折射率和谐振波长的函数,当光栅参数或膜层光学参数发生变化时,相应的有效折射率发生变化,进而引起谐振波长的变化。要求出谐振波长,必须求解芯层模和包层模特征方程。包层模特征方程是膜层折射率的函数,由于膜层材料不同,其膜层折射率为实数或复数,这就对包层模特征方程求解需要不同的处理方法。

2.1.1 介质膜的处理方法

对于介质膜,只有不考虑或者忽略膜吸收时,膜层折射率才为实数,因此,求解FBG和LPFG的特征方程,得到有效折射率也为实数。文献[11]报道了在LPFG包层镀一层介质膜,组成三包层结构,膜层折射率为实数,求解包层模特征方程得到有效折射率,进而求得谐振波长。文献[12]也报道了用传输矩阵法求解包层模特征方程,得到了包层模有效折射率。

当考虑介质膜的吸收特性时,膜层折射率为复数,复折射率表示为 $N_3 = n_f + ik_f$ (n_f 为折射率, k_f 为消光系数)。一般介质膜消光系数很小(10^{-3} 数量级),因此亦称为弱吸收薄膜。求解包层模有效折射率,需求解复超越包层模特征方程,其处理思想和金属膜相同,但在具体数学计算时稍有差别。

2.1.2 金属膜的处理方法

LPFG在许多应用中采用包层外镀金属方法来制作传感器以及损耗峰波长的滤波器或者光调制器。O. Duhem等^[13,14]利用附加金属包层进行温度和应变调节来改变谐振波长,但没有对此做相应的理论研究。近年来,由于镀金属膜光纤光栅的广泛应用,其理论研究也逐渐完备。北方交通大学的魏准等^[15]与上海交通大学的张自嘉等^[16]分别对二包层(金属膜较厚,电磁场无法穿过,因此不计空气包层)和三包层的LPFG进行了理论研究,初步建立了此类光纤光栅的处理方法和理论体系。徐艳平等^[17]则对镀金属四包层结构的LPFG做了理论计算的探讨工作,给出了数学处理的一般解决方案。

图2(a)为镀金属三包层结构;图2(b)为镀金属四包层结构。(b)与(a)不同之处是在金属膜层外又镀一层敏感膜。该结构中金属膜必须非常薄,小于穿透深度,允许电磁场穿过,以感应敏感薄膜的变化。

在光通信波段范围内,金属的复折射率实部为负,消光系数非常大。如在1550 nm附近一些典型金属折射率为,金 $n_3 = 0.559 + i9.81$,铜 $n_3 = 0.606 + i8.26$,铝 $n_3 = 1.38 + i15.4$,镍 $n_3 = 3.83 + i6.82$ 。因此,求解特征方程而得出的有效折射率也为复数。其复有效折射率的求解方法为:

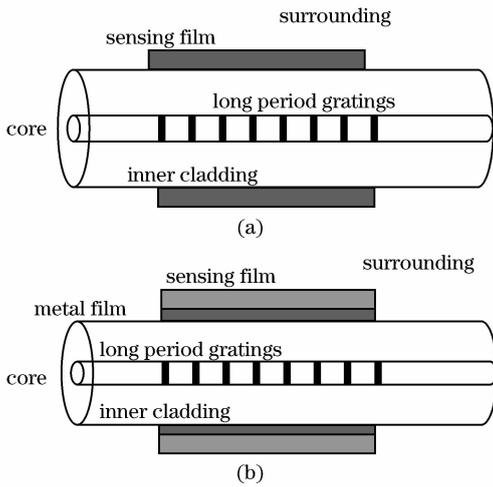


图 2 (a) 镀金属膜三包层 LPFG 结构模型;

(b) 镀金属膜四包层 LPFG 结构模型

Fig. 2 (a) triple-clad LPFG coated metal film;

(b) four-clad LPFG coated metal film

首先忽略复折射率的虚部,求解包层模有效折射率(金属膜 LPFG 特征方程,汉克尔函数为避免计算溢出,需近似处理),其解为实数。

考虑虚部影响,将虚部作为微扰,得到精度更高的近似值。据平面波导理论,虚部对有效折射率影响不大^[18],因此只需在上述实数解的很小范围内求解,得出复数解。

镀金属三包层 LPFG 的理论研究表明,用不同金属作外包层时,传播常数有一定的差别;金属折射率虚部相当大,不同金属其虚部不同,虚部大小变化对传播常数的实部影响很小;对 EH 模的影响大于对 HE 模的影响,对高阶模的影响大于对低阶模的影响^[15,16]。

我们实验室目前已建立镀金属膜四包层长周期光纤光栅包层模特征方程,并对其求解方法进行了深入的理论探讨,求得的复有效折射率较好地符合已有的文献报道结果。同时,还对复折射率膜四包层 LPFG 包层模的场分布、功率密度分布、谐振波长、透射谱等

特性进行了分析,有望获得高灵敏度的传感器。

2.2 一般镀膜方法

LB 膜技术^[8]:朗缪尔-布罗基特膜(Langmuir-Blodgett 膜,简称 LB 膜)技术是一种精确控制薄膜厚度和分子排列的单分子膜沉积技术,即在水气界面上将不溶解的成膜材料分子加以紧密有序的排列,形成单分子膜,然后再转移到固体衬底上的制膜技术。制成的膜既具有纳米颗粒特有的量子尺寸效应,又具有分子层次性、膜厚可控、易于组装等优点,缺点是膜的稳定性相对较差。

离子自组装技术^[19]:离子自组装技术(ISA)又称静电自组装技术(ESA),主要是通过静电吸引将聚电解质和/或电荷纳米粒子逐层组装到基片上,从而形成纳米结构功能薄膜。1992 年,Decher 等首次采用此种技术制备出纳米复合薄膜,因其具有纳米级结构、热稳定性、机械性能好、成膜速度快、生产成本低、对环境污染小等优点,而受到广泛关注。

溶胶-凝胶法^[20]:溶胶-凝胶法(sol-gel)是用含高化学活性组分的化合物作先驱体,在液相下将这些原料均匀混合,并进行水解、缩合化学反应,在溶液中形成稳定的透明溶胶体系,溶胶经陈化胶粒间缓慢聚合形成三维空间网络结构的凝胶,凝胶网络间充满了失去流动性的溶剂,形成凝胶。凝胶经过干燥、烧结固化制备出分子乃至纳米亚结构的材料。溶胶-凝胶法作为一种化学镀膜技术,具有纯度高、均匀度高、装置简单、工艺易于控制、成本低,容易清理等优点。

2.3 镀膜种类

基于 FBG 和 LPFG 镀膜研究的报道,根据镀膜材料的不同,大致分为有机膜^[4,21,22]、金属膜^[15,16]等;根据镀膜光纤光栅在传感器领域中的具体应用而实现的功能,又可分为气敏膜^[4,20,23~27]、湿敏膜^[5,21,28~30]、温敏膜^[31,32]、化学膜^[33~39]、生物膜^[22,40,41]等,具体情况参见表 1。

表 1 镀膜光纤光栅在传感器和光通信领域中的应用

Table 1 Application of coated LPFG in sensing and optical communication area

The area	The sort of films	The application	The documents
Sensing	Gas-sensing film	Gas sensor	[4,20,23~27]
	Humidity-sensing film	Humidity sensor	[5,21,28~30]
	Temperature-sensing film	Temperature sensor	[31,32]
	Chemistry-sensing film	Chemical sensor	[33~39]
	Biology-sensing film	Biological sensor	[22,40,41]
Communication	Metal film	Filter	[6,13]
	Metal film	Tuning device	[7,14,54~58]

3 镀膜光纤光栅的应用

表 1 给出了镀膜光纤光栅在传感器和光通信领域中的应用。

3.1 传感器领域中的应用

3.1.1 气敏传感器

随着现代化的发展,气体在工业、生活中的应用越来越普遍,但往往这些气体都存在泄漏的隐患而导致重大灾难,比如煤矿瓦斯爆炸、居民生活煤气中毒等。目前,通常用的检测方法有十几种,如电化学方法、光化学方法等。由于许多气体极易爆炸,且检测环境电磁干扰大,用电学原理设计的气敏传感器在实际使用中十分危险。因此,光气敏传感器是其发展的方向。光纤光栅具有耐高温、耐腐蚀、信号传输距离远和抗干扰性强等特点,适合在危险工作环境下完成气体的单点和多点的传感检测^[42]。氢气、二氧化碳和氨气是工业中常用气体,用于检测这些气体的光纤光栅气体传感器也应运而生。

在 FBG 上溅射 Pd 膜,氢遇 Pd 膜后很快被吸收并生成 PdH_x,其体积随氢气浓度的变化产生收缩或膨胀,引起光栅周期变化,导致布拉格波长改变^[23],将信号传送给光谱仪,通过计算机进行数字信号处理从而得到氢气浓度的变化。Y. T. Peng 等^[24]研究了在 FBG 上镀 Pd 膜并在外套 Pd 管的方法所制作的传感器性能,讨论了热处理和吹扫气体对传感器响应性能的影响。Pd 膜吸氢以后会表现出光弹效应,光弹效应是指各向同性的透明材料(如玻璃、塑料等)如果内部存在应力,就会呈现出各向异性,当光射入时,会产生双折射现象。S. Boonsong 等^[23]基于这种光弹效应,研究了一种可应用于分布式的光纤光栅氢敏传感器,此传感器在氢气体积分数为 0.3%~1.8% 范围内检测线性度非常好。对于气体检测,镀膜 LPFG 的灵敏度明显优于镀膜 FBG,Alain Trouillet 等^[26]的研究证明了 LPFG 氢敏传感器的灵敏度是 FBG 的 500 倍。FBG 传感器在钯氢发生化学反应时,钯膜因应力发生形变而产生的谐振波长改变;而 LPFG 传感器则主要是包层模和消逝波在钯膜和外界环境的接触面上的耦合导致谐振波长的变化。

Beatrys M. Lacquet 等^[20]在 LPFG 上用溶胶-凝胶法镀一层膜,膜层材料是荧光黄、水等结合而生成的物质,其成分比不同,则其膜层折射率不同。当 CO₂ 气体被膜层吸收时,遇水形成碳酸,和未质子化的荧光黄发生反应,引起膜层折射率改变,进而引起 LPFG 谐振波长改变,这种改变程度直接源于 CO₂ 浓

度的不同,此类传感器可用于检测 CO₂ 浓度。

P. Suresh Kumar 等^[4]采用溶胶-凝胶法在 LPFG 包层外镀一层溴甲酚紫膜,此膜对氨气敏感,当氨气遇膜层发生反应时,溴甲酚紫膜的颜色随着浓度的增加由黄变蓝,相应的膜层折射率发生变化,谐振波长也发生变化,其检测动态范围为 0.027~2.04 mmol/L。

我们实验室数值模拟了不同包层模式在 LPFG 各区域的场分布,理论研究了膜层的厚度和折射率等对 LPFG 透射特性的影响。基于膜层对外界变化敏感性能,设计了一种光纤光栅气体传感器^[43]。理论模拟了光纤参数和膜层参数对传感器灵敏度的影响^[44],利用最优化数值方法,寻得最佳膜层光学参数。理论计算表明该类型传感器对膜层折射率的测量分辨率高达 10⁻⁸。图 3 给出了灵敏度 S_n 为 10³ 及 10⁴ 的等高线对应的膜厚 h₃ 和折射率 n₃ 的取值范围。实验上制作了溶胶-凝胶 SnO₂ 薄膜 LPFG 乙醇传感器^[27,45],实验得到了传感器与乙醇蒸气作用前后的透射谱图如图 4 所示。

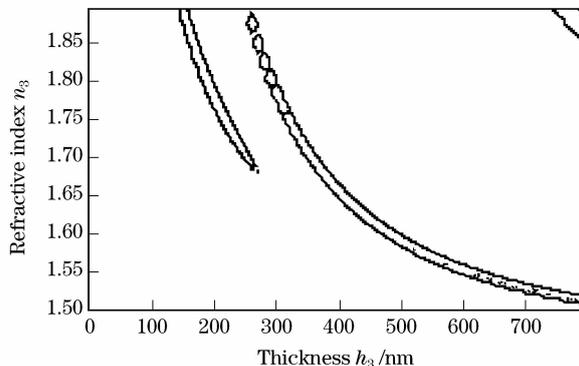


图 3 灵敏度 $S_n = 10^3, 10^4$ 的等高线

Fig. 3 Contour line with $S_n = 10^3, 10^4$

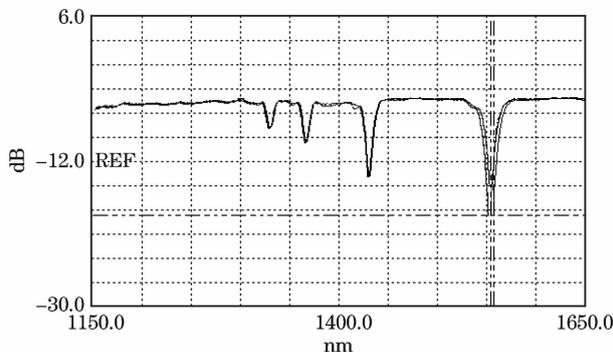


图 4 LPFG 传感器与乙醇作用前后的光谱

Fig. 4 Optical spectrum of LPFG sensor before and after acting with C₂H₅OH

目前实验室正探讨和研究镀膜 LPFG 的双峰

谐振效应及其应用,研究表明,当镀膜长周期光纤光栅满足合适条件时,高阶包层模式同样会出现双峰谐振效应^[46]。与 X. W. Shu 等^[47]报道的无包层光纤光栅的双峰效应结果基本一致。在此基础上,分析了薄膜参数对双峰间距的影响以及材料色散对光栅透射特性的影响,设计了一种高灵敏度双峰传感器,它对膜层折射率变化的最小分辨率可达 10^{-7} ^[48]。

3.1.2 湿度传感器

湿度是影响人类生活的一个重要因素,大气中适宜的湿度对人们的健康非常有益;湿度对工业生产的安全高效运作也产生重要影响。湿蒸气中湿度的测量方法主要分为热力学法和光学法两大类。热力学法采用绝对法测量湿度,不受小水滴直径大小限制,但测量精度和实时性较差。光学法主要有全息法、相关法、散射法(包括消光法)等,研究较多的是散射法,但受多重散射、光学窗口洁净度的影响。随着光纤光栅技术的发展,光纤光栅被用于湿度传感的理论和逐渐发展起来。

FBG 在探测大型汽轮机的湿度时,必须考虑温度影响,因此,同时测量温度和湿度的变化便非常必要。盛德仁等^[5]基于 FBG 原理,提出了一种测量湿蒸气两相流湿度场的新方法。其原理是:把感湿材料涂覆在 FBG 上,感湿材料选择的是环氧-酚醛树脂(对水异常敏感,吸湿特性显著)和碳纤维复合材料(良好感湿性,湿膨胀线性度好)。当感湿材料遇水蒸气发生变化(折射率和轴向应变变化)时,将引起谐振波长的变化。实验发现:增大涂层厚度和减小光纤包层半径能使传感器湿度灵敏度大大提高。在此基础上,黄学峰等^[28]又进一步发展了用 FBG 测量湿蒸气两相流温/湿度的理论数学模型,并初步解决了怎样同时测量湿蒸气两相流温/湿度的问题,图 5 是其感温/湿光纤光栅结构示意图。

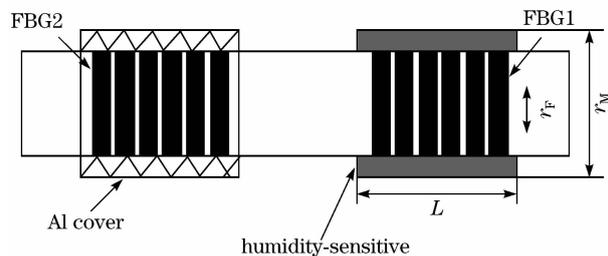


图 5 感温/湿光纤光栅结构示意图

Fig. 5 Temperature/humidity sensing FBG model

在同一段光纤写入两段光栅,一端 FBG1 光栅涂覆湿敏材料,同时感受温度湿度响应;另一光栅 FBG2 封装在温敏材料金属铝内,只感受温度的影

响。研究表明 FBG 在涂覆湿敏材料和用温敏材料进行封装之后,其响应范围更宽,灵敏度更高。

Khay Ming Tan 等^[29]报道了在 LPFG 镀一层聚乙烯亚胺制作的一种高灵敏度的湿敏传感器,其透射谱的谐振峰随湿度变化,其灵敏度为 0.833% RH/dB,精确度为 $\pm 0.25\%$ RH,且高阶模对湿度的灵敏度高于低阶模。Maria Konstantaki 等^[21]报道了用聚氧化乙烯/氯化钴(PEO/CoCl₂)的混合物作为湿敏膜,研究表明湿度变化引起 LPFG 透射谱损耗峰位置和幅度的变化,在湿度范围 $50\% \sim 95\%$ 内,其检测分辨率低于 0.2% 。Liwei Wang 等^[30]制作了镀水凝胶膜的 LPFG 传感器,用来探测湿度,实验结果表明,此传感器在湿度 $38.9\% \sim 100\%$ 范围内具有高灵敏度,随湿度呈现线性变化,精确度可达 $\pm 2.3\%$ RH,此类传感器有望在健康体检、医疗设施和货物储存方面得到广泛应用。

3.1.3 温度传感器

近年来,许多学者对光纤光栅的温度特性做了大量的研究工作。大多关于 FBG 温度特性的研究,其所处的温度环境最低也没低于 $-30\text{ }^\circ\text{C}$ ^[49~52],这就大大限制了 FBG 在极低环境温度下的应用性。况且,在低温环境中工作,FBG 难以克服较低的热膨胀系数 α ($\alpha = \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{d\Lambda}{dT}$) 和结构脆弱的弱点,直接应用于温度传感器并不适用。郭明金等^[32]通过采用化学镀与电镀相结合的方法在 FBG 外包层上镀一层 $10\text{ }\mu\text{m}$ 厚的金,理论和实验研究了裸 FBG 和镀金 FBG 的中心波长随低温环境的变化。图 6 为镀金 FBG 温度传感器的结构示意图。实验数据表明,裸 FBG 和镀金 FBG 温度传感器的中心波长在 $-70 \sim 0\text{ }^\circ\text{C}$ 的范围内随温度线性变化,重复性较好,几乎没有迟滞现象,其温度灵敏系数分别为 $0.0101\text{ nm}/^\circ\text{C}$ 和 $0.0283\text{ nm}/^\circ\text{C}$,由此看出,镀金 FBG 在低温环境中工作远优于裸 FBG。

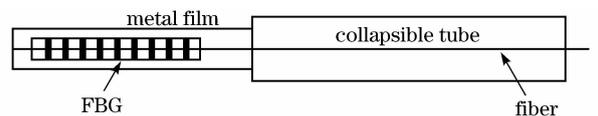


图 6 镀金光纤布拉格光栅传感器示意图

Fig. 6 Golden film FBG sensor model

何万迅等^[31]分别在 LPFG 上涂覆丙烯酸类聚合物和硅树脂材料,实现了 LPFG 大范围波长调谐与温度补偿,当温度在 $0 \sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ 范围变化时,表面涂覆丙烯酸类聚合物的 LPFG 波长调谐范围增大至 60 nm ,而涂覆硅树脂材料的 LPFG 波长移动被

抑制在 0.6 nm 以内,前者可为设计高灵敏度温度传感器提供思路。

3.1.4 化学传感器

光纤传感器技术在化学传感领域有巨大的应用潜力,因为它抗电磁干扰、尺寸小、质量轻,可用于恶劣环境。一般来说,FBG 传感器要受到温度和应力的严格限制,因此需要更先进的技术来探测谐振波长的变化。相比而言,LPG 很好地克服了此不利因素,谐振波长对周期长度和外界环境(温度、应力、曲率半径、介质折射率)敏感,被广泛用于折射率传感器、化学浓度传感器、液位传感器。

现今,研究主要集中在镀膜 LPG 应用于化学传感器所表现出的高灵敏度。S. W. James 等^[33]报道了用 LB 技术在 LPG 包层上镀一层几百纳米的薄膜,膜层折射率大于包层折射率,发现谐振波长和谐振峰幅度变化随膜厚和折射率的变化明显,表现了非常高的灵敏度。P. Pilla 等^[34]用镀间规聚苯乙烯的 LPG 用于化学传感器,这种物质的敏感性源于它对氯代芳香族化合物的选择性和高吸附特征,增强了对低分子量物质的选择。实验研究发现其灵敏度分别为 $0.130 \text{ nm}/10^{-6}$ 和 $0.163 \text{ dB}/10^{-6}$,响应时间为分钟数量级。Andrea Cusano 等^[35]也在 LPG 上镀一层间规聚苯乙烯,在室温下探测水中的氯仿,探测能力可达 10^{-6} 量级。Jesus M. Corres 等^[36]在 LPG 包层上镀聚丙烯胺盐酸盐和聚丙烯酸膜,用作 PH 传感器。实验研究表明,在 PH 值 4~7 范围内,衰减带波长偏移量高于 85 nm,平均灵敏度达 $28.3 \text{ nm}/\text{PH}$ 。

工业生产中常常对溶液中铜离子进行检测,刘云峰等^[37]在 LPG 上镀一层对 Cu^{2+} 敏感的交联高分子敏感膜,该膜利用乙基碳二亚胺(EDAC)做羧基活化剂,硅烷化的氨基表面与羧甲基纤维素(CMC)反应而制得。该传感器可初步检测溶液中的二价铜离子。J. Keith 等^[38]用 LBL(layer-by-layer)离子自组装技术镀一层纳米级厚的聚酰胺一胺(PAMAM)和三嗪染料薄膜,在检测铜离子方面显示出巨大的潜力,并且通过试剂的运用拓宽了 LBL-LPG 装置的检测范围,当镀有 6 层膜时,可检测到 1.3 mg 的 $\text{Cu}^{2+} \text{ L}^{-1}$ 。Justyna Widera 等^[39]在 LPG 上镀一层羧甲基纤维素, Cu^{2+} 遇膜层被吸附, Cu^{2+} 浓度减小。基于此,实验采用动态方法分析谐振波长对 Cu^{2+} 浓度随时间变化的响应特性,检测了谐振波长随时间变化的偏移量。发现这个动态方法能够对浓度低于百万分之几的 Cu^{2+} 进行检测,

其探测能力可达亚 10^{-6} 数量级,这个动态分析方法的理论模型可扩展用于其他镀膜 LPG。

3.1.5 生物传感器

传统的生物传感器,体积大,需要大量的测试样本和有机的(荧光)指示剂,一次只能做一种测试,不能做体内检测,费时费力。近几年来,基于光纤光栅原理,光纤光栅可以被设计成生物传感器,在医学中的应用迅速得到了发展。由于光纤光栅尺寸小,对生物体的侵害能达到最小限度,因此非常适用于生物医学检测。

华侨大学的庄启仁等^[40]设计了一种生物膜传感器,此类传感器采用 LPG 作为生物探针,膜层材料包括硅化层、抗体和抗原物质,通过测控谐振波长的变化来测量生物膜层厚度的变化,可用于血液抗体现场分析。D. W. Kim 等^[22]在 LPG 端面溅射银膜作为反射镜,又在包层上镀一层免疫球蛋白膜,光在 LPG 内传输,遇金属膜被反射,在 LPG 内产生干涉条纹。当此传感器检测抗体-抗原时,抗体-抗原遇膜层发生作用,膜层折射率发生变化,引起干涉条纹位置的移动,图 7 是用于生化传感器而设计的新颖结构模型。光子晶体光纤(PCF)光栅微孔内侧镀两层有机敏感膜,紧靠侧壁为聚赖氨酸单分子层,聚赖氨酸层上面又镀一层单分子 DNA,镀膜微孔里面注入软化水。实验发现膜层厚度变化引起谐振波长漂移,谐振波长对应生物膜层厚度的灵敏度约为 $1.4 \text{ nm}/1 \text{ nm}$ 。PCF-LPG 能够检测的平均膜厚达纳米数量级,这种技术可用于 DNA 和蛋白质检测,为光子晶体光纤检测毒品和制作传感器提供了理论可能性,也突破了以往不能检测单个分子的技术瓶颈。

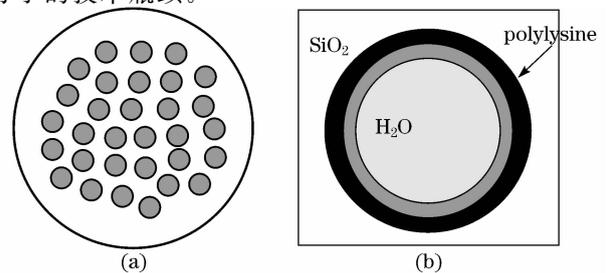


图 7 基于光子晶体光纤光栅而设计的生化传感器

(a) 光子晶体光纤横截面图,黑圆代表微孔

(b) 微孔内侧镀两层有机敏感膜,聚赖氨酸和 DNA

Fig. 7 Photonic crystal fiber long period gratings biochemical sensor (a) The cross-section of photonic crystal fiber, the circle in place of micro pore (b) The micro pore coated two kinds of the sensitive films, polylysine and DNA

3.2 通信中的应用

随着信息业务量快速增长,语音、数据和图像等业务综合在一起传输,从而对通信带宽容量提出了更高要求。以时分复用(TDM)为基础的电传送网难以适应需要,要突破电信号处理速率“瓶颈”,就必须引入光信号的处理方法,因此以光波分复用

表 2 光纤光栅在有源和无源光纤器件中的应用

Table 2 Application of the fiber grating in active device and the passive device

Sorts	Application	Function
Active device	Fiber laser	DFB structure, wavelength tuning
	Semiconductor laser	Feedback external cavity, wavelength stabilization
	EDFA fiber amplifier	Gain flattening
	Raman fiber amplifier	Bragg grating resonators
Passive device	Filter	Narrow band/ broad band/bandstop filter
	WDM wavelength division multiplexer	Waveguide grating array; grating/filter combination
	OADM all optical add/drop multiplexing	Grating routing
	Dispersion compensator	Single/multichannel channel compensation
	Wavelength converter	Wavelength conversion
	OTDM delayer	Time delay
	OCDMA coder	Wavelength encoding

3.2.1 滤波器

在波分复用网络中,必须将光纤中以不同波长传输的信号进行复用或解复用,这就需要滤波器。窄带滤波器是波分复用/解复用器和光插/分复用器(OADM)滤波器必不可少的器件。对带通滤波器的要求是波长必须精确地与国际电信联盟(ITU)标准频率匹配,并且有低损耗、低串扰和宽通带。由于期望增加光纤放大器有效区域内(典型地为1530~1570 nm)的容量,对更窄通带滤波器的需求不断增长。目前,用于实际系统的滤波器主要有三种类型:体光学型薄膜干涉滤波器、平面光波回路(PLC)型滤波器和光纤光栅型滤波器。

目前,已经开发了两种光纤光栅滤波器,一种为FBG滤波器,一种为LPFG滤波器。

FBG可外镀一层金属膜,通过金属膜的焦耳电阻加热来达到调谐目的,这种装置稳固,具有低损耗、可控制性强等优良特性,可用作调谐滤波器。沿FBG长度周期变化的金属膜厚来控制光栅不同处的发热特性,引起局部折射率的变化,从而诱导出可调谐的相移。A. K. Ahwja等^[6]基于此调谐原理制作了单个和多个(超结构)温度精确控制的相移元件,实验分析了这两种结构的调谐滤波器都具有良好的调谐特性。

早在1999年,O. Duhem等^[13]在长周期光纤光栅包层上镀一层金属铜膜,研究了这种滤波器的电调谐特性。这种结构的滤波器的耦合特性,变化甚

(WDM)为基础的全光通信网(AON)成为研究的热点。光纤光栅的出现使许多复杂的全光网通信成为可能,在光纤通信中,光纤光栅可实现许多特殊功能,构成有源和无源光纤器件,应用广泛。表2列出了光纤光栅在有源和无源光纤器件中的具体应用。目前,镀膜光纤光栅主要应用于滤波器和调谐器。

微,但当铜膜通一直流电时,在0.5 W的电流功率下,高阶包层模的谐振波长移动了4 nm,并且表明,基于电调谐机制,镀金属膜LPFG比镀金属膜FBG在用作滤波器方面,具有更大的优越性。Ignacio DelVillar等^[19]用离子自组装技术,在LPFG外包层镀一层高折射率膜,膜层材料为聚烯丙基胺盐酸(PAH)和普鲁士蓝(PB)作为聚阳离子,聚丙烯酸(PAA)作为聚阴离子。理论和实验结果表明,包层模有效折射率随膜层厚度呈周期性变化,然而膜层厚度不同,谐振波长变化程度也不同,这为宽带滤波器的设计提供了一定的依据。

3.2.2 调谐器

随着光纤光栅的温度和应力的改变,其透射谱特性将发生相应的改变,光纤光栅的调谐技术正是基于此原理,使光纤光栅的光谱特性(波长、带宽、时延等)发生改变。光纤光栅的调谐技术在光通信中有重要应用,许多光学器件都源自于光纤光栅的调谐机制,比如:可调谐滤波器、可调谐外腔激光器、可调谐光纤激光器、动态色散补偿^[53]、掺铒光纤放大器(EDFA)功率均衡等。光纤光栅的调谐技术就其原理可分为两种,一是温度调谐,二是应力调谐。目前报道的镀金属光纤光栅主要应用于温度调谐,其原理在于通过改变金属膜的温度实现调谐。

耿健新等^[54]在FBG上镀一层2 μm厚的金属薄膜,利用金属层的电热效应对光纤光栅进行温度调谐,当调谐电流从0 mA增加到180 mA时,谐振波长

移动了2.34 nm。杨石泉等^[55]利用简单的双点源真空蒸发法在静止的FBG上镀一层均匀铝膜,利用铝膜中流过电流的热效应,使中心波长向长波方向移动达到电流调谐的目的,实验中用较小的电流(约43 mA)获得了较大的波长调谐范围(约4 nm),其调谐精度达到 $2.15 \times 10^{-3} \text{ nm}/\text{mA}^2$ 。张文等^[56]提出了采用半导体致冷器、热敏电阻配合控制电路对FBG的工作温度进行双向精确控制实现了温度/波长调谐的方法,并且在封装过程中对FBG表面镀膜来提高其温度灵敏度。实验结果表明,调谐装置准确度优于0.05 nm,且受环境温度变化的影响较小。K Kalli等^[57]在聚合物光纤内写入布拉格光栅,且在包层上镀金属薄膜,膜层材料为金属Pd/Cu,采用电热效应来进行波长调谐,当金属膜通以160 mW功率的电流时,实验获得了2 nm的波长漂移。

LPFG是一种透射损耗光纤光栅,对温度的敏感性比FBG高很多,调谐范围很大。早期研究结果表明其调谐范围可达60 nm,调谐效率为 $320 \text{ nm}/\text{W}$ ^[58]。D. M. Costantini等^[14]在LPFG上外镀Ti-Pt合金膜进行温度调谐,在0.67 W的电流功率下将包层膜 HE_{17} 的谐振波长移动了11 nm,调谐效率为 $16.4 \text{ nm}/\text{W}$ 。L. R. Chen^[7]采用沿LPFG长度变化的金属膜厚来控制光栅不同处的发热特性引起局部折射率的变化,从而诱导出可调谐的相移,通过控制相移点的个数达到调谐目的。Nan-Kuang Chen等^[59]在LPFG上镀光聚合物,此聚合物具有高热光系数,包层被激光脉冲周期性蚀刻。这种LPFG具有明显色散、高效率、宽带调谐、防激光蚀刻等特点,实验研究表明其调谐效率高达 $15.8 \text{ nm}/\text{C}$,调谐范围高达105 nm(1545~1650 nm)。

4 展 望

近年来,国内外关于镀膜光纤光栅理论技术得到了飞速发展,许多科技工作者根据需要制作了种类繁多、不同用途的镀膜光纤光栅,并在理论和实验上验证了其潜在的应用价值,这些光纤光栅已被广泛应用于传感和通信领域。在传感器领域中,根据不同的应用场合,镀膜光纤光栅广泛地应用在气体传感器、湿度传感器、温度传感器、化学传感器和生物传感器;在通信领域中,镀膜光纤光栅在过滤器和调谐技术中也有着广泛的应用,显示了其巨大的优越性。随着光纤光栅技术的发展,应用在各行各业中的光纤光栅必定将成为一支主力军,伴随着这一趋势,镀膜光纤光栅也展示了一个更为广阔的应用

与发展前景。

现今,镀膜光纤光栅虽然较成功地运用到各类传感领域中,但大多只限于实验研究的理论可行性,离实际应用尚有较大距离。对于生物传感,虽然光纤光栅具有体积小、成本低、对人体最小限度侵害等优点,但国内外研究只处于理论和实验阶段,真正实施于生物体还不成熟,还有许多问题有待解决,镀膜光纤光栅生物传感应用实用化是其发展方向之一。另外,国内外有关镀金属膜光纤光栅的研究成果的报道,大多局限于光纤光栅的温敏调谐特性,对其理论实质和数学处理模型尚未见完整报道。国内张自嘉等^[16,17]虽然对其做了一定的研究,但数学处理模型过于简单化、理想化,尚有许多不足之处。因此,建立一套完备的镀金属光纤光栅的数学处理模型和理论体系很有必要,也是今后工作的一个主要方向^[60]。

均匀LPFG因其良好的滤波特性已被广泛应用于通信、滤波等领域。因此,探讨镀膜非均匀光纤光栅的传输新特性及其应用,将是非常有前景的工作。镀膜啁啾LPFG的啁啾系数的不同将导致传输谱特性呈现出两种截然不同的状态,可用于宽带阻滤波器和多通道窄带滤波。同样,镀膜级联光纤光栅和相移光纤光栅的光栅结构与镀膜参数的改变,将会引起传输谱的变化,引起损耗峰位置及幅值的变化。通过膜层与光栅结构的优化设计,可以满足不同应用场合下通信器件的要求。

光子晶体光纤是近年来发展迅速的具有优良特性的光子器件。利用纤芯或包层中的气孔微结构的灵活可调性,在微孔中充满或涂敷各种生化敏感材料,并在纤芯上刻制光纤光栅,则可以充分利用光子晶体和光纤光栅在性能和结构上的优势,制备出高灵敏的传感器件和高性能的通信器件。随着光集成技术以及融微光学元件、微电子器件和微机械结构的优点的集成微光机电(MOEM)工艺的日趋成熟,开发与研制高集成、多功能、智能化的传感与通信等微型化器件必将成为未来发展的重要目标。

参 考 文 献

- 1 K. O. Hill, Y. Fujii *et al.*. Photosensitivity in optical fiber waveguide: application to reflection filter fabrication [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**(10): 647~649
- 2 G. Meltz, W. W. Morey *et al.*. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method [J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(15): 823~825
- 3 A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire *et al.*. Long-period fiber gratings as band-rejection filters [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1): 58~65

- 4 P. Suresh Kumar *et al.*. Long period grating in multimode fiber for ammonia gas detection, optical fibers and passive components [C]. *SPIE*, 2004, **5279**: 331~335
- 5 Sheng Deren, Huang Xuefeng *et al.*. A novel method based on fiber Bragg grating sensor measurement in two-phase wet steam flow moisture field [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, **25**(5):136~140
 盛德仁, 黄学峰等. 一种基于布拉格光纤光栅测量湿蒸气两相流湿度场的新方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2005, **25**(5):136~140
- 6 A. K. Ahuja P. E. Steinvurzel *et al.*. Tunable single phase-shifted and superstructure gratings using microfabricated on-fiber thin film heaters [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **184**:119~125
- 7 L. R. Chen. Phase-shifted long-period gratings by refractive index-shifting [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **200**:187~191
- 8 Stephen W. James *et al.*. Cascaded long-period gratings with nanostructured coatings [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(17):2197~2199
- 9 Andrea Cusano, Agostino Iadicicco Pierluigi Pilla *et al.*. Cladding mode reorganization in high-refractive-index-coated long-period gratings: effects on the refractive-index sensitivity [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(19): 2536~2538
- 10 Nicholas D. Rees *et al.*. Optical fiber long-period gratings with Langmuir-Blodgett thin-film overlays [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(9): 686~688
- 11 Ignacio Del Villar *et al.*. Optimization of sensitivity in long period fiber gratings with overlay deposition [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(1): 56~69
- 12 Xu Yan-Ping *et al.*. Long-period fiber grating thin film sensors based on cladding mode coupling [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**(7):1702~1705
- 13 O. Duhem *et al.*. Long period copper-coated grating as an electrically tunable wavelength-selective filter [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(12):1014~1016
- 14 D. M. Costantini, C. A. P. Muller, S. A. Vasiliev *et al.*. Tunable loss filter based on metal-coated long period fiber grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(11):1458~1460
- 15 Wei Huai *et al.*. Long period fiber grating with metal coating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(8): 931~936
 魏淮等. 镀金属长周期光纤光栅的研究 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(8):931~936
- 16 Zhang Zijia *et al.*. Theoretical and experimental investigation of metal coated long period fiber gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 897~901
 张自嘉等. 金属包层长周期光纤光栅的理论和实验研究 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 897~901
- 17 Xu Yangping *et al.*. Establishment and solution of the characteristic equation of metal-coated quadruple clad long-period fiber grating [J]. *J. University of Shanghai for Science and Technology*, 2006, **28**(1):9~13
 徐艳平等. 镀金属四包层长周期光纤光栅特征方程的建立与求解 [J]. *上海理工大学学报*, 2006, **28**(1):9~13
- 18 I. P. Kaminow, W. L. Mammel, H. P. Weber. Metal-coated waveguides: analytical and experimental study [J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(2): 396~405
- 19 Ignacio Del Villar *et al.*. Spectral evolution with incremental nanocoating of long period fiber gratings [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(25): 11972~11981
- 20 Beatrys M. Lacquet *et al.*. Long-period grating with sol-gel coating for CO₂ detection, Second European Workshop on Optical Fiber Sensors [C]. *SPIE*, 2004, **5502**: 287~290
- 21 Maria Konstantaki *et al.*. Optical fiber long-period grating humidity sensor with poly(ethylene oxide)/cobalt chloride coating [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(19): 4567~4571
- 22 D. W. Kim *et al.*. Fiber-optic interferometric immuno-sensor using long period grating [J]. *Electronics Letters*, 2006, **42**(6): 324~325
- 23 S. Boonsong, T. A. Massood, K. Alex. Pd-coated elastooptic fiber optical Bragg sensors for multiplexed hydrogen sensing [J]. *Sensors and Actuators B*, 1999, **60**: 27234
- 24 Y. T. Peng, Y. Tang, J. S. Sirkis. The characterization of hydrogen sensors based on palladium electroplated fiber Bragg grating (FBG) [C]. *SPIE*, 1999, **3670**:42~53
- 25 Gary W. Hunter. Microfabricated hydrogen sensor technology for aerospace and commercial applications [C]. *SPIE*, 1997, **2270**:77~88
- 26 Alain Trouillet, Marin, Colette Veillas. Fiber gratings for hydrogen sensing [J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, **17**:1124~1128
- 27 Zhengtian Gu, Yanping Xu. Optical fiber long-period grating with solgel coating for gas sensor [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(36): 2405~2407
- 28 Huang Xuefeng, Sheng Deren *et al.*. Theoretic mathematics model based on fiber Bragg grating sensor measurement in two-phase wet steam flow temperature/moisture [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, **26**(7):40~46
 黄学峰, 盛德仁等. 布拉格光纤光栅测量湿蒸气两相流温/湿度的理论数学模型 [J]. *中国电机工程学报*, 2006, **26**(7):40~46
- 29 Khay Ming Tan *et al.*. High relative humidity measurements using gelatin coated long-period grating sensors [J]. *Sensors and Actuators B*, 2005, **110**:335~341
- 30 Liwei Wang *et al.*. A relative humidity sensor using a hydrogel-coated long period grating [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2007, **18**: 3131~3134
- 31 He Wanxun, Wu Jiahui *et al.*. Broadband wavelength tuning and temperature compensation of long-period fiber grating [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2002, **36**(7): 1029~1031
 何万迅, 吴嘉慧等. 长周期光纤光栅的大范围波长调谐与温度补偿 [J]. *上海交通大学学报*, 2002, **36**(7): 1029~1031
- 32 Guo Mingjin, Jiang Desheng. Low temperature properties of fiber Bragg grating temperature sensor with plating gold [J]. *Chinese Journal of Low Temperature Physics*, 2006, **28**(2):138~141
 郭明金, 姜德生. 镀金光纤光栅温度传感器的低温特性 [J]. *低温物理学报*, 2006, **28**(2):138~141
- 33 S. W. James, N. D. Rees, G. J. Ashwell *et al.*. Optical fiber long period gratings with Langmuir Blodgett thin film overlays [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(9): 686~688
- 34 P. Pilla, A. Iadicicco *et al.*. Long period gratings coated with syndiotactic polystyrene as highly sensitive chemical sensors [C]. *SPIE*, 2005, **5855**:483~486
- 35 Andrea Cusano *et al.*. Coated long-period fiber gratings as high-sensitivity optochemical sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(4): 1776~1786
- 36 Jesus M. Corres *et al.*. Fiber-optic pH-sensors in long-period fiber gratings using electrostatic self-assembly [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(1): 29~31
- 37 Liu Yunfeng, Dong Saying, Jiang Jiang. The monitoring of Cu²⁺ by long period grating sensor [J]. *Journal of Analytical Science*, 2006, **22**(3): 258~261
 刘云峰, 董飒英, 姜江. 长周期光纤光栅对铜离子的检测研究 [J]. *分析科学学报*, 2006, **22**(3): 258~261
- 38 J. Keith, L. C. Hess *et al.*. The investigation of the behavior of a long period grating sensor with a copper sensitive coating fabricated by layer-by-layer electrostatic adsorption [J]. *Talanta*, 2006, **70**(4): 818~822
- 39 Justyna Wiedera *et al.*. Kinetic behavior of polymer-coated long-period-grating fiber-optic sensors [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(6):1011~1017
- 40 Zhuang Qiren, Gong Dongmei, Zhang Weibin *et al.*. Long

- period fiber grating biosensor for detecting bio-layer thickness [J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2006, **15**(1):106~110
庄启仁, 龚冬梅, 张渭滨等. 长周期光纤光栅生物膜传感器 [J]. *激光生物学报*, 2006, **15**(1):106~110
- 41 Lars Rindorf, Jesper B. Tensen. Photonic crystal fiber long-period gratings for biochemical sensing [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(18): 8224~8231
- 42 A. Chtanov, M. Gal. Differential optical detection of hydrogen gas in the atmosphere [J]. *Sensors and Actuators B*, 2001, **79**: 196~199
- 43 Xu Yanping, Gu Zhengtian, Chen Jiabi. Long-period fiber grating thin film sensors based on cladding mode coupling [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**(7):1702~1705
- 44 Xu Yangping, Gu Zhengtian, Chen Jiabi *et al.* Structure optimization of long-period fiber grating gas-sensing film sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 326~330
徐艳平, 顾铮先等, 陈家璧. 长周期光纤光栅气敏薄膜传感器结构优化 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 326~330
- 45 Zhengtian Gu, Yanping Xu. Design optimization of a long-period fiber grating with sol-gel coating for a gas sensor [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2007, **18**: 3530~3536
- 46 Gu Zhengtian, Xu Yangping, Deng Chuanlu. Dual-peak resonance and transmission spectrum in coated long-period fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2):219~225
顾铮先, 徐艳平, 邓传鲁. 表面镀层长周期光纤光栅双峰谐振及其透射谱研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(2):219~225
- 47 X. W. Shu, D. X. Huang., Highly sensitive chemical sensor based on the measurement of the separation of dual resonant peaks in a 100- μm -period fiber grating [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **171**: 65~69
- 48 Gu Zhengtian, Xu Yangping. Optimization of fiber grating film sensor based on dual peak resonance [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(2):164~167
顾铮先, 徐艳平. 双峰谐振光纤光栅薄膜传感器的优化设计 [J]. *光子学报*, 2008, **19**(2):164~167
- 49 Noritomo Hirayama, Yasukazu Sano. Fiber Bragg grating temperature sensor for practical use [J]. *ISA Transaction*, 2000, **39**: 169~173
- 50 V. M. Murukeshan, P. Y. Chan, L. S. Ong *et al.*. Cure monito—ring of smart composites using fiber Bragg grating based embedded sensors [J]. *Sensors and Actuators*, 2000, **79**(2):153~161
- 51 Zhang Xiaojing, Wu Zhanjun *et al.*. Experimental investigation on temperature sensitivity of fiber Bragg gratings [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(4):497~499
张晓晶, 武湛君等. 光纤布拉格光栅温度灵敏性的实验研究 [J]. *光学技术*, 2005, **31**(4):497~499
- 52 Bi Weihong, Li Wei, Fu Guangwei *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature with a fiber Bragg grating sensor array [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2003, **14**(8): 827~830
毕卫红, 李 卫, 傅广为等. 分布式光纤光栅实现应变和温度的同时测量 [J]. *光子学报*, 2003, **14**(8):827~830
- 53 B. J. Eggleton, A. Ahuja. Integrated tunable fiber gratings for dispersion management in high-bitrate systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(10): 1418~1432
- 54 Geng Jianxin *et al.*. Temperature tunability of metallized fiber Bragg gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8):735~738
耿健新等. 金属化光纤光栅的温度调谐 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(8):735~738
- 55 Yang Shiquan *et al.*. A simple method for FBG wavelength tuning by current [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(7): 907~910
杨石泉等. 一种简单的光纤光栅电调谐方法 [J]. *光子学报*, 2002, **31**(7): 907~910
- 56 Zhang Wen, Chen Weimin *et al.*. Wavelength tuned fiber Bragg grating based on double direction temperature control [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(6): 844~847
张 文, 陈伟民等. 光纤光栅的双向温度/波长调谐技术研究 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(6): 844~847
- 57 K Kalli *et al.*. Development of an electrically tunable Bragg grating filter in polymer optical fibre operating at 1.55 μm [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2007, **18**: 3155~3164
- 58 A. Anatoli, Abramov, Benjamin *et al.*. Electrically tunable efficient broad-band fiber filter [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(4): 445~447
- 59 Nan-Kuang Chen *et al.*. Widely tunable asymmetric long-period fiber grating with high sensitivity using optical polymer on laser-ablated cladding [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(15): 2082~2084
- 60 Gu Zhengtian, Xu Yanping, Chen Jiabi, Ag-coated long-period fiber grating [J]. *Semiconductor Photonics and Technology*, 2005, **11**(3):203~207