

文章编号: 1000-7032(2017)08-4090-07

单端面长周期光栅透射模式测量技术

李秋顺¹, 向 栋², 陈 超³, 史建国¹, 纪晓彤¹, 李新天¹, 董文飞^{4*}

(1. 山东省科学院生物研究所 山东省生物传感器重点实验室, 山东 济南 250014;

2. 中国科学技术大学工程科学学院 精密机械与仪器系, 安徽 合肥 230027;

3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

4. 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所 中科院生物医学检验技术重点实验室, 江苏 苏州 215163)

摘要: 为了实现长周期光栅透射谱测量模式的远距离监测, 设计了单端面镀反射膜的测量装置系统, 对单端面镀银膜长周期光栅的传感原理做了分析, 并从实验的角度分别对单端面镀银膜模式系统和直接透射模式系统的长周期光栅在不同折射率的环境介质中的响应进行了研究, 比较了它们的异同。首先, 采用 2×2 单模光纤耦合器分别连接光谱分析仪、光源、长周期光栅。然后, 在包含长周期光栅的光纤的另一个端面制备反射银膜。最后, 通过测量一系列不同折射率的环境介质, 比较了直接透射模式与单端面镀银膜模式下的长周期光栅的响应光谱。实验结果表明: 采用波长解调表达时, 对于同一种环境介质, 两种模式下长周期光栅的响应光谱的谐振波长基本相同; 采用功率/峰值解调表达时, 随着甘油浓度从水变为80%的甘油溶液, 直接透射模式下的光损耗从 -6.05 dB变为 -9.22 dB, 单端面镀银膜模式下的光损耗从 -8.03 dB变为 -11.33 dB。与直接透射模式相比, 单端面镀银膜的长周期光栅光谱中的相对光损耗明显增加, 谐振峰更尖锐, 更有利于谐振波长和谐振峰光损耗值的识别。本研究设计的单端面镀银膜的长周期光栅测量系统不仅保留了长周期光栅透射谱的感应模式, 而且使长周期光栅在对环境介质的测量中操作更加灵活方便, 尤其是在远距离、恶劣环境或深层液体的折射率测量中具有独特的优势。

关 键 词: 光纤; 长周期光栅; 折射率; 银膜; 单端面

中图分类号: O439; O433.1; O657.38

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20173808.1090

**Transmission Mode Measurement Technique of
Long Period Grating Based on A Single End Face**LI Qiu-shun¹, XIANG Dong², CHEN Chao³, SHI Jian-guo¹, JI Xiao-tong¹, LI Xin-tian¹, DONG Wen-fei^{4*}

(1. Key Biosensor Laboratory of Shandong Province, Biology Institute of Shandong Academy of Sciences, Jinan 250014, China;

2. Department of Precision Machinery and Instrumentation, School of Engineering Science,
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;3. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;4. CAS Key Laboratory of Bio-Medical Diagnostics, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology,
Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, China)

* Corresponding Author, E-mail: wenfeidong@sibet.ac.cn

收稿日期: 2016-12-19; 修订日期: 2017-02-13

基金项目: 国家自然科学基金(61340032, 61535010); 江苏省自然科学基金(BE2015601); 山东省自然科学基金(ZR2012CM029); 山东省重点研发计划(2015GSF117024, 2015GSF121047); 山东省自主创新及成果转化专项(2014ZZCX02602); 中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-204); 苏州市科技计划(SS201539, ZXY201434); 863 国家高技术研究发展计划(2015AA021005)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China (61340032, 61535010); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BE2015601); Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2012CM029); Key Research and Development Plan of Shandong Province (2015GSF117024, 2015GSF121047); Independent Innovation and Achievements Transformation Project of Shandong Province (2014ZZCX02602); Key Deployment Project of Chinese Academy of Sciences (KFZD-SW-204); Science and Technology Program of Suzhou City (SS201539, ZXY201434); 863 National High Technology Research and Development Program (2015AA021005)

Abstract: In order to realize remote monitoring or measuring in the way of transmission mode for long period fiber grating (LPFG), the measurement device system based on a single end face coated with reflective film was designed. The sensing principle of LPFG with a single end face coated with reflective film was explained and analysed. The responses of the single end face system and the direct transmission mode system to environmental media with different refractive index were investigated by experiments. Firstly, 2×2 single-mode fiber coupler was used to connect spectrometer, light source and LPFG, respectively. Then, the reflective silver film was fabricated in the other end face of the optical fiber including LPFG. Finally, by measuring a series of environmental media with different refractive indices, the response spectra of LPFG were compared in the two cases of the direct transmission mode and the silver film coated single end face mode. When the wavelength demodulation is adopted, the resonance wavelength corresponding to the same medium is nearly same in the above two cases. When the power/peak demodulation is adopted, the optical loss gradually changed from -6.05 dB to -9.22 dB for the direct transmission mode, but from -8.03 dB to -11.33 dB for the silver film coated single end face mode with the increase of glycerin concentration in solutions. Compared with the direct transmission mode, the relative optical loss of LPFG based on the single end face mode increases significantly. The LPFG in the single end face mode has more sharp resonance peaks than that in the direct transmission mode, which makes the resonance wavelengths and the optical loss value being recognized more easily. The measurement device system based on the single end face coated with silver film not only retains the transmission sensing mode of LPFG, but also makes the operation of measuring environment medium more flexible and convenient. In particular, it has a unique advantage for the measurement of refractive index in long distance, deep liquid, and severe environment.

Key words: optical fiber; long period fiber grating; refractive index; silver film; single end face

1 引言

折射率是反映物质本质的重要光学参数之一。通过对折射率的测量,可以了解物质的纯度、溶液中物质的浓度、生化反应参数等多种性质^[1-2],因此折射率的测量在工业生产、环境监测、食品检测、临床检验、药物筛选、冶金及科研等诸多领域有着重要的研究意义与广泛的应用价值^[3-6]。

长周期光纤光栅(Long period fiber grating)折射率传感器是利用 CO_2 、UV或飞秒激光等光源对光纤纤芯折射率进行周期性调制制作而成的一种无源光学传感器件,具有质量轻、抗电磁干扰、耐腐蚀、易联网、背向反射损耗低、灵敏度高等优点^[7-8],而且经过纳米薄膜修饰可以调节其对不同折射率的介质的响应灵敏度或实现对特定生化物质的检测^[9-11],因而已被广泛应用于折射率传感领域,例如,用于直接测量溶液中酒精、乙醇、甲基环己烷、正十六烷^[12]、蔗糖^[13]、硫酸铜^[14]、二

甲基亚砷、氯化钠、氯化钙、乙二醇^[15]、甘油^[16]等化学成分的浓度和监测石油冶炼过程中苯和二甲苯等芳香族化合物的含量^[17],以及经过纳米材料修饰后,用于检测抗原抗体^[18]、DNA^[19]、大肠杆菌^[20]等生物分子和二氧化碳气体^[21]、氢气^[22-23]、三氯甲烷^[24]等有毒有害物质或易燃易爆气体。

长周期光栅通常是以直接透射模式光谱的方式实现对折射率的测定,包含长周期光栅的光纤的一端直接连接光源,光纤的另一端直接连接光谱分析仪。由于长周期光栅直接处于光源和光谱分析仪的中间,对于远距离或深水环境(深井开采作业、石油天然气探测、深海探测等)中的折射率探测是非常不利的,存在操作繁琐、长周期光栅不便放置等弊端。

为改进长周期光栅直接测量系统的这个缺点,我们利用光纤耦合器及在长周期光栅的一个光纤端面制备反射膜的方式,设计了一种基于单端面长周期光栅测量环境折射率的装置和方法。并通过实验证实,这种装置和方法不仅实现了长

周期光栅对折射率的单端面检测,同时仍然保持了长周期光栅的透射谱显示模式。这种单端面透射谱长周期光栅传感器装置通过增加光纤长度可以使单端面长周期光栅探头无限延伸,因而在远距离和深水环境中的折射率测量中操作方便,有望在海洋深水、易燃易爆环境、极端恶劣环境、危险溶液(如氢氧化钠、硫酸等)、冷冻液、工业过程中的质量在线监控等人们不易接触或无法接触的环境检测中发挥作用。

2 单端面长周期光栅折射率检测系统的构成及其工作原理

2.1 单端面长周期光栅折射率检测系统的硬件构成

图 1 为单端面长周期光栅折射率检测系统示意图。它主要由光谱分析仪(OA)、宽带光源、 2×2 单模光纤耦合器、单端面镀有反射膜的长周期光栅传感器和计算机等组成。上述器件的连接顺序为: 2×2 光纤耦合器输入端的光纤接头 P_0 和宽带光源相连接,光纤耦合器输出端的一个光纤接头 P_2 与光谱分析仪连接,光纤耦合器输出端的另一个光纤接头 P_1 与刻有长周期光栅的光纤的一个端面相连接。长周期光栅的栅区部分被拉直固定于可盛放待测液体物质的凹型槽的支架上,刻有长周期光栅的光纤另一端的平整端面镀有反射膜银膜。我们利用 Plassys MP600s 多靶磁控溅射镀膜仪,采用真空镀膜的方法在光纤单端面制备反射银膜^[25-26]。这样通过 2×2 光纤耦合器连接后,长周期光栅不再直接处于光源与光谱分析仪之间,而是处于 2×2 光纤耦合器的一个输出端,可以以探头的形式对环境介质进行检测。本实验中所使用的光源为丹麦 NKT Photonics 公司的 Superk COMPACT 超连续谱白光光源,所使用的光谱分析仪为日本 YOKOGAWA 公司的 AQ6370B 光谱仪。实验中所使用的长周期光栅采用紫外写入法制作而成,即首先将掺 Ge 的单模光纤(Corning SMF-28)放入一个钢制的高压密封罐中,然后通入 1×10^7 Pa 的高压氢气,将光纤浸泡两个月以上对光纤进行低温高压载氢处理,最后使用 248 nm 的 KrF 准分子激光器(Lumonics PM886)发出的紫外激光照射振幅掩模版,将载氢光纤制作成实验中所用的长周期光栅。进行测量时,将待测液体放入液体槽中,并用光谱分析仪实

时记录相应的光谱数据。为了避免温度带来的交叉影响,测试环境室温为 $(25 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ 。

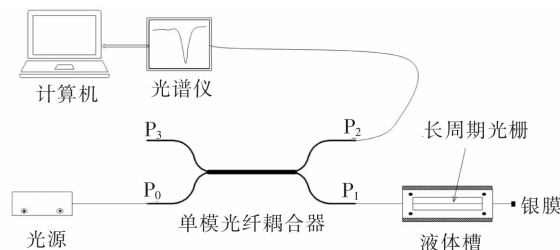


图 1 单端面长周期光栅折射率检测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the measurement system of long period fiber grating based on a single end face to refractive index

2.2 单端面长周期光栅折射率检测系统的工作原理

2×2 单模光纤耦合器是一种用于传送和分配光信号的光纤无源器件,其基本功能是实现光功率分配和光波长分配,分路传送母线系统发出的信息或者把信息传入母线系统^[27]。光源产生的光通过 2×2 光纤耦合器传输到长周期光栅,经过长周期光栅作用之后的光到达单端面末端时,被单端面的银膜反射,反射回的光再次经过长周期光栅,然后回传到 2×2 光纤耦合器,再通过 2×2 光纤耦合器把信号传输到光谱分析仪,在光谱分析仪上显示出相应的光谱信号,最后通过有线或无线的方式将光谱分析仪的光谱信号数据传送到手提电脑或台式电脑上。

3 结果与讨论

3.1 直接透射模式的测量

为了研究单端面镀银膜长周期光栅传感器与传统直接透射式长周期光栅传感器对折射率响应的差异,我们首先测量了直接透射模式的长周期光栅对折射率的响应光谱。

3.1.1 直接透射模式的测量实验装置

直接透射模式的长周期光栅测量装置系统如图 2 所示。它主要由 OSA、宽带光源、长周期光栅传感器及计算机等组成。包含长周期光栅的光纤的一端通过适配器与光源相连接,长周期光栅的栅区部分被拉直固定于可盛放待测液体物质的凹型液体槽的支架上,包含长周期光栅的光纤的另一端直接和 OSA 相连接。由光源发出的白光从光纤的一端打入光纤的纤芯,然后白光通过长周期光栅,最后从光纤的另一端直接进入光谱分析

仪,并通过计算机采集光谱分析仪产生的信号数据。

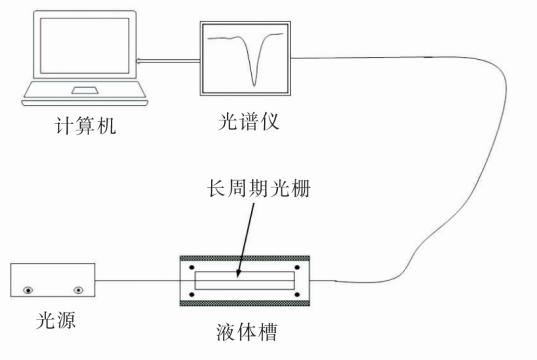


图2 直接透射模式的长周期光栅折射率检测系统示意图

Fig. 2 Schematic of measurement system of long period fiber grating with direct transmission mode to refractive index

3.1.2 直接透射模式下长周期光栅对折射率的响应

我们选用不同浓度的甘油溶液作为具有不同折射率的环境介质。图3给出了直接透射模式下长周期光栅对甘油溶液的响应光谱。

从图3可以看出,直接透射模式下,长周期光栅的光谱以透射谱的形式出现。随着甘油浓度的增大,谐振峰逐渐向短波方向移动,光谱的透射强度逐渐增大。当甘油的体积分数从纯水变到80%时,长周期光栅光谱的谐振波长从1340.6 nm移动到1293.2 nm。

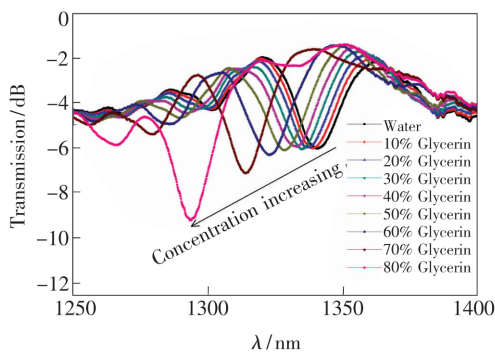


图3 直接透射模式下长周期光栅对不同折射率的响应光谱

Fig. 3 Response spectra of long period fiber grating to different refractive indices under the conditions of the direct transmission mode

3.2 单端面镀银膜模式下长周期光栅对折射率的响应

为了考察单端面镀银膜模式下长周期光栅对

折射率的传感性能,我们进一步测试了单端面镀银膜的长周期光栅对不同浓度的甘油溶液的响应,相应的响应光谱如图4所示。

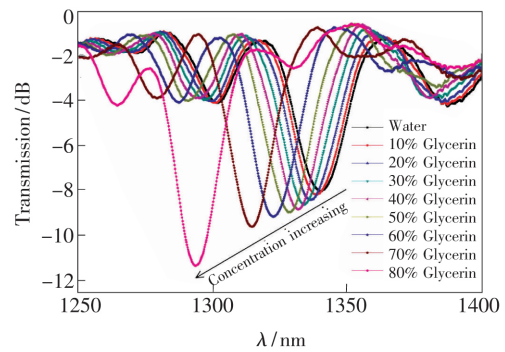


图4 单端面镀银膜模式下LPFG对折射率的响应光谱

Fig. 4 Response spectra of long period fiber grating to the refractive index under the conditions of single end face coated the silver film

从图4可以看出,单端面镀银膜的长周期光栅的光谱,并没有出现反射谱,而是仍然以透射谱的形式出现。而且随着甘油浓度的增大,谐振峰也呈现逐渐向短波方向移动的现象,光谱的透射强度也逐渐增大。当甘油的浓度从纯水变到80%的甘油溶液时,长周期光栅光谱的谐振波长从1340.8 nm移动到1293.8 nm。虽然谐振波长略有差别,但总体的变化趋势基本一致。

3.3 直接透射模式与单端面镀银膜模式对折射率响应光谱的比较

从图3和图4可以看出,在相同波长范围(1250~1400 nm)内,直接透射模式的长周期光栅和单端面镀银膜的长周期光栅的透射谱的谐振峰的个数完全相同,它们的区别主要在于透射强度的大小。在单端面镀银膜的长周期光栅的透射谱中并没有形成新的共振峰,因而,这证明在单端面镀银膜模式下,不仅没有产生反射谱,而且也没有产生光束的干涉,没有形成Fabry-Perot效应。单端面镀银膜的长周期光栅仍然保持了宽波长范围的透射谱只有一个主谐振峰的测量优势。

为了更清晰地观察直接透射与单端面镀银膜两种模式下长周期光栅透射谱的异同,我们进一步在图5和图6中给出了谐振波长、光损耗与甘油浓度的关系。

从图5可以看出,两种模式下,在同一甘油浓度下谐振波长值完全一样或仅仅有非常微小的差别。随着甘油浓度的增加,谐振波长的变化趋势

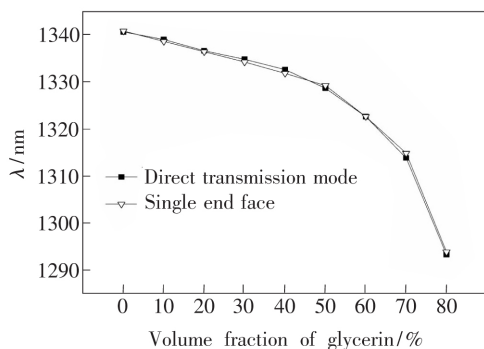


图 5 两种模式下浓度与谐振波长的关系

Fig. 5 Relationship between concentration and resonance wavelength in the case of two modes

几乎完全吻合。这说明传统的长周期光栅传感系统通过单端面镀银膜改造后,长周期光栅的响应光谱不仅仍然以透射谱的形式出现,而且在同一甘油浓度下谐振波长的位置也几乎完全重合。可见,两种模式下基于测量波长调制方式的折射率传感性能是相同的。

从图 6 可以看出,对于这根长周期光栅,在设定系统的光损耗初始值相同的情况下(一般设为 0),当待测液体从纯水变为 80% 的甘油溶液时,直接透射模式下的光损耗从 -6.05 dB 变为 -9.22 dB,单端面镀银膜模式下的光损耗从 -8.03 dB 变为 -11.33 dB。与直接透射模式相比,单端面镀银膜的长周期光栅的相对光损耗明显增加。还可以看出,随着甘油浓度的增加,两种模式下的相对光损耗均呈现逐渐增大的趋势,在 80% 的甘油溶液中均呈现了最大的相对光损耗,因而两种模式下的相对光损耗变化趋势是类似的,但基于功率的单端面镀膜长周期光栅的传感性能较好。

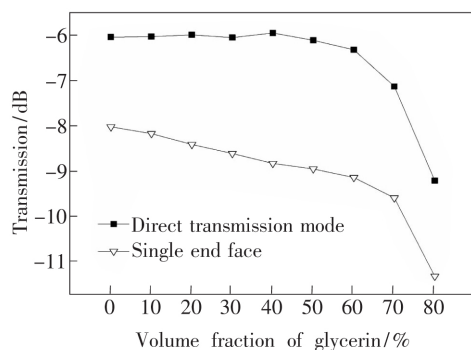


图 6 两种模式下光损耗与甘油体积分数的关系

Fig. 6 Relationship between optical loss and volume fraction of glycerin in the case of two modes

从上面的分析与图 3、图 4 中可以看出,与直接透射模式相比,单端面镀银膜的长周期光栅的谐振峰更尖锐,谐振波长和谐振峰值更容易识别,因而在对环境介质的测量中更为有利。而且,单端面镀银膜的长周期光栅以探头的方式对环境介质进行检测,操作更加便利。

单端面镀银膜长周期光栅与直接透射式长周期光栅相比,前者先后发生两次前向传输导模与前向传输包层模的耦合,即发生两次损耗,而后者仅发生一次耦合/损耗,故前者谐振峰/损耗峰深度低于后者。由此可知,基于波长解调的折射率传感,单端面镀银膜长周期光栅与直接透射式长周期光栅的传感性能相同;基于功率或者谐振峰峰值解调的折射率传感器,单端面镀银膜长周期光栅的传感性能优于直接透射式长周期光栅。

需要指出的是,由于光纤单端面银膜的表面形貌、均匀性、致密性等影响光反射的效率,进而影响长周期光栅透射谱的形状、谐振峰的光滑度、谐振峰的中心波长的清晰度等输出信号的质量,因此在镀银膜时,要尽量保持所镀的银膜均匀致密。

4 结 论

本文对传统直接透射模式的长周期光栅检测系统进行了改进,提出了单端面镀银膜的长周期光栅检测系统和方法,然后从谐振波长和光损耗两个角度研究了两种模式下的长周期光栅对环境介质的响应光谱。实验结果表明:在单端面模式下,在 0~80% 的甘油溶液中,长周期光栅的响应光谱不仅仍以透射谱的形式出现,而且透射谱的谐振波长基本与直接透射模式的保持一致,但光损耗从 -8.03 dB 变为 -11.33 dB,大于直接透射模式。在两种模式下,基于测量波长的折射率传感性能相同,基于测量功率的单端面镀膜长周期光栅的折射率传感性能优于直接透射式长周期光栅。本文设计的单端面透射谱长周期光栅探头传感器,操作更加灵活方便,其传感性能也明显优于直接透射式长周期光栅,在对环境介质的检测中,尤其是在海洋深水、易燃易爆的化学物质、操作员难以接触的物质(如冷冻系统中的防冻剂)、危险溶液(如氢氧化钠、硫酸等)或其他极端恶劣环境中的测量中将发挥更好的作用,具有广阔的应用前景。

参 考 文 献:

- [1] 张宗权,徐铭,任俊鹏,等. 封闭玻璃管道内液体折射率的非接触测量 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(10):2408-2416.
ZHANG Z Q, XU M, REN J P, *et al.*. Non-contact measurement for liquid refractive index in a closed pipe [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10):2408-2416. (in Chinese)
- [2] 刘伟波,董丽芳. 光谱法研究一种具有渐变折射率的新型等离子体光子晶体 [J]. 发光学报, 2017, 38(2):232-237.
LIU W B, DONG L F. Investigation on novel graded-index plasma photonic crystal by spectroscopy method [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(2):232-237. (in Chinese)
- [3] LI Q S, XIANG D, CHANG Z M, *et al.*. Highly sensitive refractive index sensor based on a TiO₂ nanowire array [J]. *Appl. Opt.*, 2017, 56(7):1930-1934.
- [4] 王二伟,鱼卫星,王成,等. 用表面等离子体共振传感器检测纳米间距 [J]. 中国光学, 2013, 6(2):259-266.
WANG E Y, YU W X, WANG C, *et al.*. Nanogap measurement by using surface plasmon resonance sensor [J]. *Chin. Opt.*, 2013, 6(2):259-266. (in Chinese)
- [5] 李秋顺,成荣,张旭霖,等. 聚合物薄膜对表面等离子体共振光谱的调制 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(9):1796-1804.
LI Q S, CHENG R, ZHANG X L, *et al.*. Modulation of polymer thin films on surface plasmon resonance spectroscopy [J]. *J. Zhejiang Univ. (Eng. Sci.)*, 2015, 49(9):1796-1804. (in Chinese)
- [6] 毕卫红,邢云海,周昆鹏,等. 长周期光纤光栅检测混合油的折射率 [J]. 光子学报, 2017, 46(2):0206001.
BI W H, XING Y H, ZHOU K P, *et al.*. Measurement of the refractive index of the mixed oil kerosene based on long period fiber grating [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2017, 46(2):0206001. (in Chinese)
- [7] HUANG Q D, YU Y Q, OU Z L, *et al.*. Refractive index and strain sensitivities of a long period fiber grating [J]. *Photon. Sens.*, 2014, 4(1):92-96.
- [8] 梁居发,敬世美,孟爱华,等. 基于光纤布拉格光栅与长周期光栅并联的集成光学传感器 [J]. 中国光学, 2016, 9(3):329-334.
LIANG J F, JING S M, MENG A H, *et al.*. Integrated optical sensor based on a FBG in parallel with a LPG [J]. *Chin. Opt.*, 2016, 9(3):329-334. (in Chinese)
- [9] LI Q S, ZHANG X L, HE H, *et al.*. Improved detecting sensitivity of long period fiber gratings by polyelectrolyte multilayers: the effect of film structures [J]. *Opt. Commun.*, 2014, 331:39-44.
- [10] REES N D, JAMES S W, TATAM R P, *et al.*. Optical fiber long-period gratings with Langmuir-Blodgett thin-film overlays [J]. *Opt. Lett.*, 2002, 27(9):686-688.
- [11] LI Q S, ZHANG X L, YU Y S, *et al.*. Enhanced sucrose sensing sensitivity of long period fiber grating by self-assembled polyelectrolyte multilayers [J]. *React. Funct. Polym.*, 2011, 71(3):335-339.
- [12] ZHANG Z, SIRKIS J S. Temperature-compensated long period grating chemical sensor [C]. *12th International Conference on Optical Fiber Sensors, Williamsburg, Virginia United States*, 1997:OWC38.
- [13] 王久玲,饶云江,朱涛,等. CO₂ 激光脉冲边缘写入的长周期光栅折射率特性研究 [J]. 光学学报, 2007, 27(10):1730-1734.
WANG J L, RAO Y J, ZHU T, *et al.*. Refractive index characteristic for edge-written long-period fiber gratings induced by CO₂ laser pulses [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2007, 27(10):1730-1734. (in Chinese)
- [14] KEITH J, PUCKETT S, PACEY G E. Investigation of the fundamental behavior of long-period grating sensors [J]. *Talanta*, 2003, 61(4):417-421.
- [15] FALCIAI R, MIGNANI A G, VANNINI A. Long period gratings as solution concentration sensors [J]. *Sens. Actuators B: Chem.*, 2001, 74(1-3):74-77.
- [16] LI Q S, ZHANG X L, SHI J G, *et al.*. An ultrasensitive long-period fiber grating-based refractive index sensor with long wavelengths [J]. *Sensors*, 2016, 16(12):2205-4-9.
- [17] ALLSOP T, ZHANG L, BENNION I. Detection of organic aromatic compounds in paraffin by a long-period fiber grating

- optical sensor with optimized sensitivity [J]. *Opt. Commun.*, 2001, 191(3-6):181-190.
- [18] DELISA M P, ZHANG Z, SHILOACH M, *et al.*. Evanescent wave long-period fiber Bragg grating as an immobilized antibody biosensor [J]. *Anal. Chem.*, 2000, 72(13):2895-2900.
- [19] JANG H S, PARK K N, KIM J P, *et al.*. Sensitive DNA biosensor based on a long-period grating formed on the side-polished fiber surface [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(5):3855-3860.
- [20] TRIPATHI S M, BOCK W J, MIKULIC P, *et al.*. Long period grating based biosensor for the detection of Escherichia coli bacteria [J]. *Biosens. Bioelectron.*, 2012, 35(1):308-312.
- [21] MELO L, BURTON G, DAVIES B, *et al.*. Highly sensitive coated long period grating sensor for CO₂ detection at atmospheric pressure [J]. *Sens. Actuators B: Chem.*, 2014, 202:294-300.
- [22] WEI X T, WEI T, XIAO H, *et al.*. Nano-structured Pd-long period fiber gratings integrated optical sensor for hydrogen detection [J]. *Sens. Actuators B: Chem.*, 2008, 134(2):687-693.
- [23] TANG X L, REMMEL K, LAN X W, *et al.*. Perovskite-type oxide thin film integrated fiber optic sensor for high-temperature hydrogen measurement [J]. *Anal. Chem.*, 2009, 81(18):7844-7848.
- [24] PILLA P, IADICICCO A, CONTESSA L, *et al.*. Optical chemo-sensor based on long period gratings coated with δ form syndiotactic polystyrene [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, 17(8):1713-1715.
- [25] 赵洪霞, 丁志群, 程培红, 等. 单层结构光纤布拉格光栅光谱特性研究 [J]. 光子学报, 2016, 45(3):0306004.
ZHAO H X, DING Z Q, CHENG P H, *et al.*. Spectral characteristics of single layer fiber Bragg grating [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2016, 45(3):0306004. (in Chinese)
- [26] 刘华松, 杨霄, 王利栓, 等. 离子束溅射氧化钽薄膜的光学带隙特性 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(1):21-27.
LIU H S, YANG X, WANG L S, *et al.*. Characteristics of optical band gap of tantalum oxide thin film deposited by ion beam sputtering [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(1):21-27. (in Chinese)
- [27] ABEBE M, VILLARRUEL C A, BURNS W K. Reproducible fabrication method for polarization preserving single-mode fiber couplers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, 6(7):1191-1198.



李秋顺(1969 -),男,山东济南人,博士,副研究员,2009年于吉林大学获得博士学位,主要从事纳米材料合成、光电生化分析等方面的研究。

E-mail: lishun1688@126.com



董文飞(1975 -),男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,2004年于德国马普研究所获得博士学位,主要从事生物纳米材料光子学等方面的研究。

E-mail: wenfeidong@sibet.ac.cn