

doi: 10.3788/gzxb20164501.0106003

薄包层长周期光纤光栅薄膜传感器特性研究

陈海云^{a,b,c}, 彭保进^{a,b}, 斯剑霄^c, 黄秋萍^c

(浙江师范大学 a. 信息光学研究所; b. 浙江省光信息检测与显示技术研究重点实验室;
c. 数理与信息工程学院, 浙江 金华 321004)

摘 要: 基于薄膜参量变化引起的长周期光纤光栅模式重组机制, 系统研究了光纤包层半径变化对长周期光纤光栅薄膜传感器特性的影响. 结果表明, 在相同薄膜参量下包层半径的减小可有效提高传感器的灵敏度, 并增大传感器对薄膜参量变化响应的动态范围, 但减小包层半径对传感器的增敏效应随薄膜厚度的增大而减小. 通过氢氟酸腐蚀减小包层半径, 采用静电自组装法在包层表面镀制 PAH/PAA 薄膜, 镀膜过程中光纤光栅输出的光谱数据证实了理论分析结果. 实验结果表明: 半径为 39 μm 、膜厚为 424 nm 的长周期光纤光栅薄膜传感器在溶液 pH 值检测中的灵敏度达 3.93 nm/pHU, 比标准包层时的灵敏度提高了 1 倍.

关键词: 光纤光学; 长周期光纤光栅; 模式重组; 薄包层; 敏感薄膜

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)01-0106003-6

Film Sensor Based on Long-Period Fiber Grating with Reduced Cladding

CHEN Hai-yun^{a,b,c}, PENG Bao-jin^{a,b}, SI Jian-xiao^c, HUANG Qiu-ping^c

(a. Institute of Information Optics; b. Key Laboratory of Optical Information
Detection and Display Technique in Zhejiang Province; c. College of Mathematics,

Physics and Information Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

Abstract: Based on the mode-reorganization mechanism of long-period fiber grating induced by the increase of film thickness, the influence of cladding radius on the characteristics of long-period fiber grating-based film sensor was investigated. The results show that the reduction of fiber cladding can improve the sensitivity of film sensor in a great manner for given film parameters and enlarge the dynamic range of the response of film sensor to the variation of film thickness. Moreover, the sensitivity-increasing effect caused by cladding reduction is degraded by the increase of film thickness. In experiment, the cladding was reduced with hydrofluoric acid and the organic film of PAH/PAA was deposited by electrostatic self-assembly method. The theoretical results are confirmed by analyzing the spectral data during film deposition. The application of this film sensor in pH sensing shows the sensitivity reaches 3.93 nm/pHU when the cladding was 39 μm and film thickness was 424 nm, which was two times as high as that of common fiber cladding.

Key words: Fiber optics; Long-period fiber grating; Mode-reorganization; Reduced cladding; Sensitive film

OCIS Codes: 060.2310; 060.2370; 060.2340; 060.3738

0 引言

长周期光纤光栅 (Long-Period Fiber Grating,

LPFG) 能够将纤芯模耦合到同向传输的包层模, 从而在透射谱中产生一系列离散的损耗峰. 包层模的模场分布易受环境的影响, 适合应用于环境折射率^[1] 和溶

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51302248)、浙江省自然科学基金 (No. Y15F050012)、浙江省教育厅科研项目 (No. Y201534206)、浙江师范大学博士启动基金 (No. ZC304014028) 和浙江省光信息检测与显示技术研究重点实验室开放基金项目资助

第一作者: 陈海云 (1977-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为光纤光栅传感理论与技术、光电检测技术. Email: chy@zjnu.cn

收稿日期: 2015-08-10; **录用日期:** 2015-10-16

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

液浓度^[2]的传感. 薄包层长周期光纤光栅 (Cladding-Reduced Long-Period Fiber Grating, CRLPFG) 的包层半径小于标准单模光纤包层, 此时包层模场的消逝波更易受环境影响, 因而具有更高的折射率响应灵敏度^[3,4].

长周期光纤光栅薄膜传感器通常由 LPFG 包层表面镀制一层敏感薄膜构成, 薄膜与被测介质的相互作用引起薄膜参量 (折射率或厚度) 的变化而影响 LPFG 的输出光谱, 因而可用于光化学^[5] 和光生物^[6] 传感. 此外, 薄膜本身会影响包层模的模场分布, 因而选取合适的薄膜参量可以提高传感器对薄膜参量的响应灵敏度, 这种薄膜本身对传感器的增敏效应可用模式重组机制解释^[7-11]. 对一定折射率的薄膜, 厚度增大到一定值时低次包层模将依次过渡并进入膜层中传输, 高次包层模逐次取代低次包层模, 从而完成模式重组^[7-9]. 当薄膜参量处于模式过渡区附近时, 传感器具有高灵敏度^[10-11].

溶液 pH 值的检测与控制对环境监测、化学生物工业生产过程控制等都十分重要, 光纤式 pH 传感器将光纤结构与 pH 敏感薄膜相结合^[12-14], 具有灵敏度高、结构紧凑、可在线监测等优势, 近年来引起了广泛的研究兴趣, LPFG 与聚丙烯胺盐酸盐 (Poly Allylamine Hydrochloride, PAH)/聚丙烯酸 (Poly Acrylic Acid, PAA) 薄膜结合是其中一种重要的结构^[14], 实现了对 pH 值的高灵敏检测. 本文基于 LPFG 耦合模理论和模式重组机制系统研究薄包层长周期光纤光栅薄膜传感器特性, 分析包层模有效折射率 (Effective Refractive Index, ERI) 随薄膜参量的变化关系, 探讨包层半径减小对传感器灵敏度的影响. 实验上用氢氟酸腐蚀减小包层半径并用静电自组装 (Electrostatic Self-Assembly, ESA) 法镀制 PAH/PAA 薄膜, 记录不同包层半径 LPFG 镀膜过程中的光谱数据, 并将该传感器用于溶液 pH 值的高灵敏检测.

1 理论分析

镀膜 LPFG 结构如图 1(a), 图 1(b) 为相应的折射率分布示意图, a_1 和 a_2 分别为纤芯与包层半径, $h_3 = a_3 - a_2$ 为薄膜厚度, n_1 、 n_2 、 n_3 和 n_4 分别表示纤芯、包层、薄膜和环境折射率. LPFG 能够将纤芯模耦合到同向传播的不同次包层模, 根据模式耦合理论, 纤芯模与包层模耦合的谐振波长由相位匹配条件决定^[15], 即

$$\lambda_{\text{res}} = [n_{\text{eff}}^{\text{co}}(\lambda_{\text{res}}) - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}(\lambda_{\text{res}})]\Lambda, \quad m=1,2,3,\dots \quad (1)$$

式中 λ_{res} 为谐振波长, Λ 为光栅周期, $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 分别为纤芯模与 1 阶 m 次包层模的有效折射率. 敏感薄膜与被测介质的相互作用使薄膜参量发生改变, 包层模有效折射率随之改变, 而纤芯模有效折射率不受影响, 则由式(1)可知, 谐振波长将发生偏移, 因而根据谐振波

长的偏移量或根据固定波长处透过率的变化可确定被测介质的变化. 在光栅结构参量确定的情况下, 薄膜本身的参量取值就直接决定了传感器对薄膜参量变化的响应灵敏度. 由式(1)分析可知, 包层模有效折射率随薄膜参量的变化率本质上反映了传感器对薄膜参量变化的响应灵敏度. 因此, 通过考察不同包层半径条件下包层模有效折射率随薄膜厚度的变化关系可以直观而有效地分析薄包层长周期光纤光栅薄膜传感器特性.

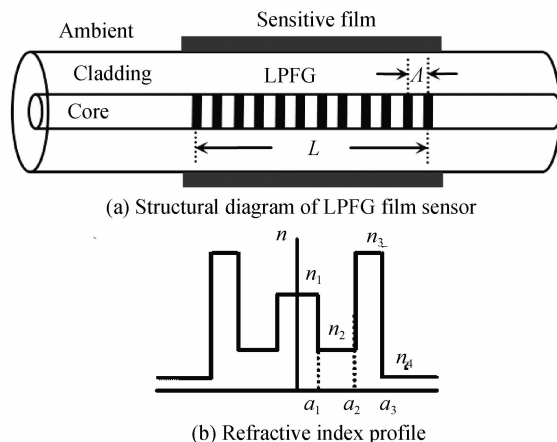


图 1 LPFG 薄膜传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic of LPFG film sensor

根据多层圆柱光波导理论^[16] 计算得到包层半径为 $62.5 \mu\text{m}$ 和 $39 \mu\text{m}$ 时包层模有效折射率随薄膜厚度变化如图 2. 图中 $\text{HE}_{1,1}$ 、 $\text{EH}_{1,3}$ 对应 $m=1,3,\dots$ 的 1 阶包层模, 而 $\text{EH}_{1,2}$ 、 $\text{EH}_{1,4}$ 、 \dots 则对应 $m=2,4,\dots$ 的 1 阶包层模, 采用的计算参量为: $a_1 = 4.15 \mu\text{m}$, $a_2 = 62.5 \mu\text{m}$, $n_1 = 1.4681$, $n_2 = 1.4628$, $n_3 = 1.55$, $n_4 = 1$. 由图 2 可见, 随着薄膜厚度的增大, 当膜厚达到 480 nm 时, 最低次包层模 $\text{HE}_{1,1}$ 率先过渡到镀层中, 同时, 其余包层模式过渡到相邻低一次的包层模, 即 $\text{EH}_{1,2}$ 过渡到原 $\text{HE}_{1,1}$, $\text{HE}_{1,3}$ 过渡到 $\text{EH}_{1,2}$, 依次类推. 当膜厚达到 600 nm 时, $\text{EH}_{1,2}$ 模式将转入镀层中传输, 其余包层模再次向相邻低次包层模转化, 至此, 完成一次模式重组^[8], 上述两个膜厚值之间的区域即为模式过渡区 (图中阴影区域). $\text{HE}_{1,3}$ 和 $\text{EH}_{1,4}$ 过渡到镀膜中传输的膜厚约为 1840 nm 和 1960 nm , 模式重组现象将周期性出现. 完成一次模式重组将有一对最低次 HE/EH 模式进入镀层传播, 且分两步完成, 第一步 HE 模过渡至 EH 模, 第二步 EH 模过渡至 HE 模, EH 模是中间过渡模式状态. LPFG 耦合模理论指出, 纤芯模与 1 阶偶次包层模之间的耦合系数为零^[17], 因此, 当薄膜参量位于模式过渡区中心位置时, 谐振峰将消失, 而在整个模式过渡区内, 谐振峰的损耗将减小, 这将给传感器设计带来不利. 在模式过渡区两侧的 ERI 曲线的斜率较大, 因此, 在模式过渡区两侧 LPFG 传感器对薄膜参量的变化具有较高的响应灵敏度^[11], 越靠近过渡区, 响

应灵敏度越高,即增大薄膜厚度对传感器具有增敏效应.对比图 2(a)和(b)可知,包层半径的减小几乎不影响模式过渡区的位置及区域范围的大小.

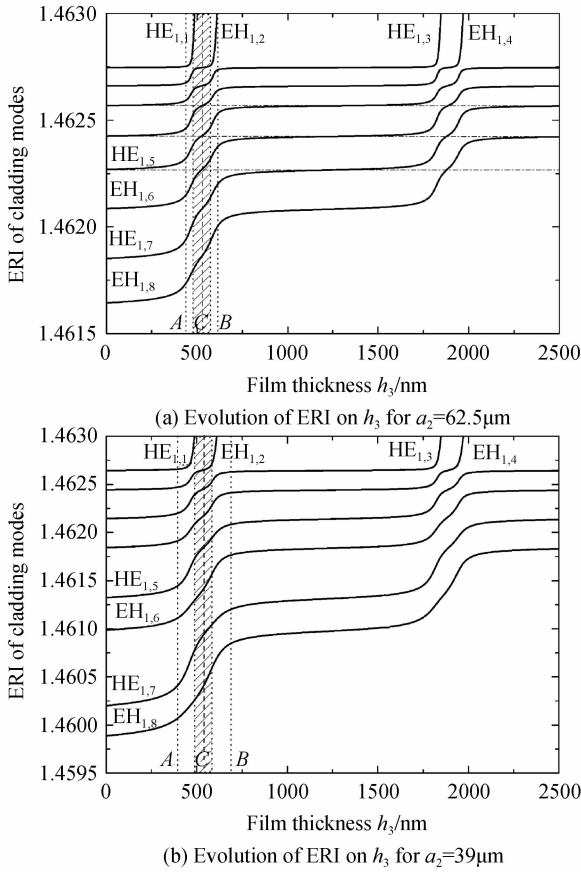


图 2 包层模 ERI 随薄膜厚度变化的关系 ($n_3=1.55$)
Fig. 2 Evolution of cladding mode ERI on the film thickness

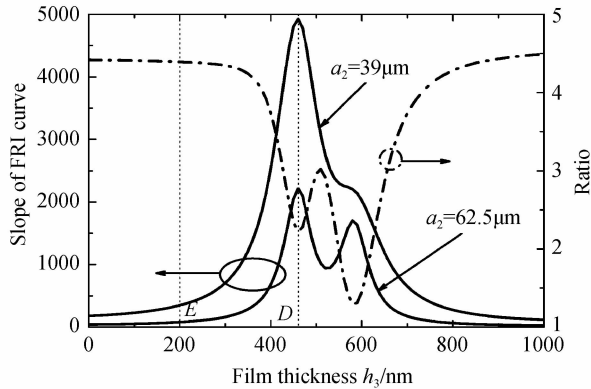


图 3 $HE_{1,7}$ 模式不同包层半径的 ERI 曲线斜率及其比值
Fig. 3 The slope of ERI curves of different cladding radii and their ratio for $HE_{1,7}$ mode

对薄膜传感器而言,包层模有效折射率随薄膜厚度变化曲线的斜率反映了传感器的灵敏度,不同包层半径时 $HE_{1,7}$ 模式 ERI 曲线的斜率如图 3. 由图 3 可知,传感器的灵敏度随薄膜厚度增大而增大,在模式过渡区的边缘(竖直线 D)达到最大值,且包层半径的减小在提高灵敏度的同时扩大了传感器对薄膜参量响应的动态范围.例如:直线 E 对应 200 nm 的膜厚,此处

$a_2=62.5\mu\text{m}$ 时斜率很小,而当 $a_2=39\mu\text{m}$ 时,曲线斜率已得到了很大的提高.图 3 同时给出了不同包层半径 ERI 曲线斜率的比值,这个比值反映了包层半径减小对提高薄膜传感器灵敏度的贡献,即增敏效应.可以发现,在到达模式过渡区之前,包层半径减小的增敏效应随薄膜厚度的增大而减小.因此,关于包层半径减小对 LPFG 薄膜传感器特性产生的影响可得:1)不影响模式过渡区的位置和范围;2)相同薄膜参量下,减小包层半径可有效提高传感器灵敏度;3)扩大 LPFG 薄膜传感器对薄膜参量响应的动态范围;4)包层半径减小产生的增敏效应随薄膜厚度增大而减小.

2 实验验证

2.1 包层腐蚀

实验中所用 LPFG 利用逐点写入法在 SM-28 单模光纤中刻写得到, KrF 准分子激光脉冲频率为 150 Hz, 单点曝光时间为 10 s, 光栅周期为 238 μm , 长度为 2.5 cm. 刻制的光栅在 120 $^{\circ}\text{C}$ 高温下经过 12 h 退火, 所得透射谱在 1 250~1 650 nm 的波长范围内仅出现一个谐振峰, 峰值波长为 1 362.4 nm, 峰值损耗为 26.67 dB.

包层腐蚀所用的 HF 溶液按质量比为 2 : 3 的分析纯氢氟酸与去离子水配制, 同规格普通光纤腐蚀试验得到在环境温度为 18 $^{\circ}\text{C}$ 时的腐蚀速率约为 1.0 $\mu\text{m}/\text{min}$. 光栅通过光纤与宽带光源和光谱仪 (OSA) 相连接以实时监测镀膜过程中的透射谱, 包层腐蚀过程中谐振峰的变化如图 4. 随着腐蚀过程的进行, 谐振峰逐渐向长波长方向移动, 同时峰值损耗随之增加. 这是由于光纤直径随腐蚀时间的增加而逐渐减小, 包层模的有效折射率随之减小, 而光纤直径在一定范围内减小时, 包层直径减小对纤芯模的影响可以近似忽略, 由 LPFG 的相位匹配条件(式(1))可知, 谐振波长随之增大. 同时, 随着包层半径的减小, 纤芯模与包层模的耦合强度随之增大, 从而引起谐振峰峰值损耗增大. 腐蚀

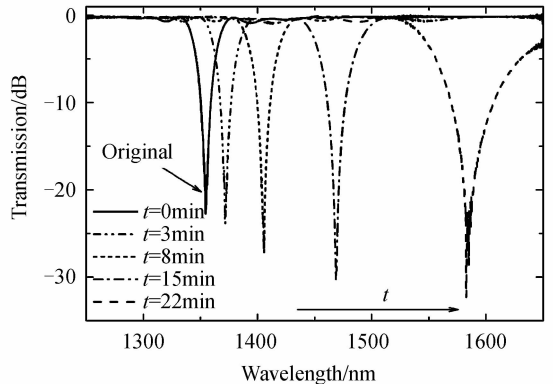


图 4 光纤包层腐蚀过程中的 LPFG 透射谱变化
Fig. 4 Evolution of transmission spectrum during cladding erosion

过程结束后,将光纤光栅用大量去离子水清洗,以消除光纤表面残余氢氟酸的影响,实际腐蚀时间为 23.5 min,腐蚀后的光纤包层半径约为 $39 \mu\text{m}$ 。

2.2 ESA 法镀 PAH/PAA 薄膜

静电自组装法利用不同极性材料之间的静电作用在基底表面沉积薄膜,操作方法简便,对环境要求低,且在光纤光栅包层表面镀膜过程中可以实时监测 LPFG 的透射谱,为考察薄膜参量对传感特性的影响提供了极大的便利.实验中所用的聚阳离子电解质为 PAH(分子量为 15000),聚阴离子电解质为 PAA(分子量为 450000),均购自国药集团上海化学试剂有限公司.PAH 和 PAA 均用 $18\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ 的去离子水配制成浓度为 2g/L 的溶液,并通过滴加 $0.1\text{M}(\text{mol/L})$ 的 HCl 或 NaOH 溶液,将溶液的 pH 值调节为 4.5.经去离子水清洗的薄包层光纤光栅在 1M 的 KOH 溶液中浸泡 10 min,光栅经大量去离子水清洗后在 60°C 条件下干燥 30 min,处理后的光栅表面带负电荷.镀膜时将表面预处理后的光栅交替浸入 PAH 和 PAA 溶液中 2 min,每次浸泡后需经去离子水清洗以去除多余的聚离子,镀膜完成后在 60°C 条件下热处理 60 min.实验所得的单层薄膜厚度约为 8nm ^[18],实验中薄膜为 53 层 PAH/PAA,实际厚度为 424nm .PAH/PAA 薄膜的折射率为 1.55 ^[14],与图 2 所示结果对比可知, 424nm 的薄膜厚度处于模式过渡区附近,LPFG 薄膜传感器具有较高的响应灵敏度.镀膜过程中 CRLPFG 的光谱响应如图 5.随着 PAH/PAA 薄膜层数 N 的增加,谐振峰向短波长方向偏移,同时峰值损耗随之减小.这是由于薄膜厚度的增加引起包层模有效折射率的增大,而对纤芯模的影响可以忽略,因而导致谐振波长以及包层模与纤芯模之间耦合系数的减小.此外,PAH/PAA 薄膜的折射率的虚部不为零^[19],存在薄膜的吸收损耗,且随着薄膜厚度的增大,吸收损耗愈加明显.因此,在 PAH/PAA 薄膜的镀制过程中,薄膜层数的选择除应满足 LPFG 薄膜传感器的高灵敏度要求外,需要注意薄膜厚度不宜过大,以避免薄膜吸收损耗

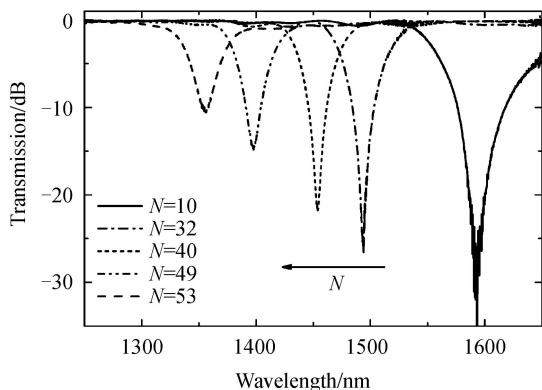


图 5 镀膜过程中 CRLPFG 透射谱变化

Fig. 5 Evolution of transmission spectrum during film coating

过大而导致谐振峰过弱而不利于传感应用。

为分析包层半径对 LPFG 薄膜传感器特性的影响,在相同参量的标准包层 LPFG 表面用相同工艺镀制 53 层 PAH/PAA 薄膜.镀膜完成后,标准包层 LPFG 的峰值波长总偏移量为 111.0nm ,而薄包层 LPFG 的总偏移量达到了 299.4nm ,显然,薄膜沉积对薄包层 LPFG 光谱的影响更加显著.镀膜过程中另一个值得关注的参量是单层薄膜对应的峰值波长偏移量,即每增加一层薄膜对应的谐振波长偏移量.由于每层薄膜的厚度近似相等,相同的薄膜厚度变化对应的波长偏移量直接体现了传感器对薄膜参量变化的响应灵敏度,偏移量越大,灵敏度越高.对于 ESA 法镀膜的 LPFG 薄膜传感器,在镀膜过程中可以通过观测光谱变化来粗略评估传感器的灵敏度.表 1 中给出了薄膜层数分别为 10、30、40 和 50 时相应的单层薄膜峰值波长偏移量,由表中数据对比可得:1)在给定光栅参量 (Δ, L) 和相同薄膜厚度条件下,薄包层 LPFG 薄膜传感器的灵敏度要明显高于标准包层传感器;2)在薄膜厚度较小时,标准包层 LPFG 的响应极小,但薄包层 LPFG 的响应有明显提高,因而包层半径的减小可以有效扩大薄膜传感器对薄膜参量变化响应的动态范围;3)由比值数据的对比可知,薄膜传感器的增敏效应随薄膜厚度增大而降低.实验结果与理论分析的结论相吻合。

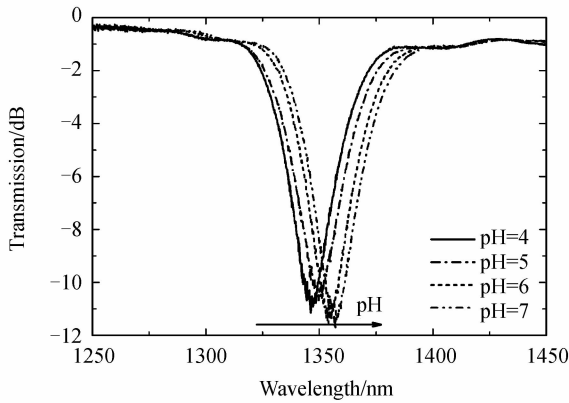
表 1 镀制单层薄膜对应峰值波长偏移量

Table 1 Wavelength shift caused by the deposition of a single layer

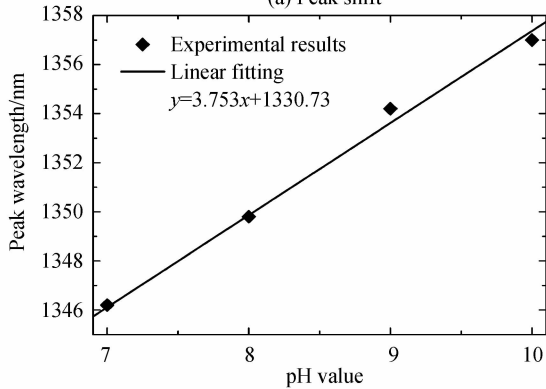
	$N=10$	$N=30$	$N=40$	$N=50$
$a_2 = 39 \mu\text{m}$	4.1	4.4	5.6	11.6
$a_2 = 62.5 \mu\text{m}$	0.9	2.0	2.8	7.0
Ratio	4.56	2.20	2.00	1.66

2.3 PH 传感试验

PAH/PAA 薄膜包覆 LPFG 对 pH 变化的响应机理为 pH 变化引起薄膜的溶胀和收缩^[14],薄膜厚度改变导致包层模有效折射率变化并引起 LPFG 谐振峰的偏移.实验中传感器被伸直固定于 U 形架上,以消除对弯曲和应力的响应,环境温度保持在 $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$,以避免温度引起的交叉敏感.实验所用的 pH 缓冲液按 pH 定义用 HCl、NaOH 和去离子水配制,CRLPFG 薄膜传感器对酸性溶液 pH 传感实验结果如图 6, pH 从 4 变化到 7,相应的谐振峰向长波长方向偏移,谐振波长随 pH 值单调变化,总偏移量达 10.8nm ,线性拟合结果显示灵敏度约为 3.75nm/pHU (pH unit).碱性溶液 pH 传感实验结果如图 7, pH 值从 7 变化到 10,谐振波长随 pH 值同样呈单调变化,谐振波长向短波长方向偏移,灵敏度约为 3.93nm/pHU ,传感器对碱性溶液的 pH 灵敏度略高于酸性溶液.作为对比,在标准包



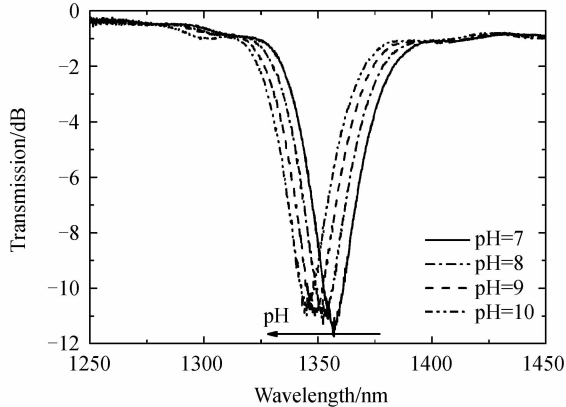
(a) Peak shift



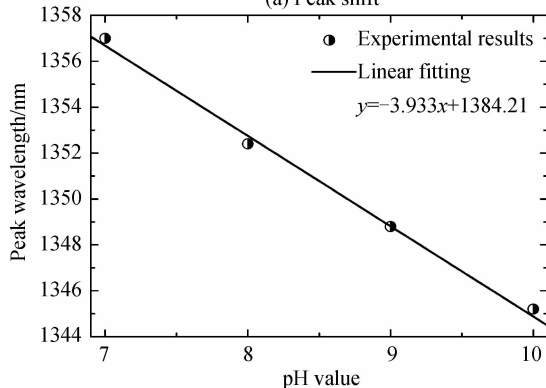
(b) Dependence of peak wavelength on pH value

图6 酸性溶液 pH 变化的光谱响应

Fig. 6 Response of spectrum to pH value in acidic buffer



(a) Peak shift

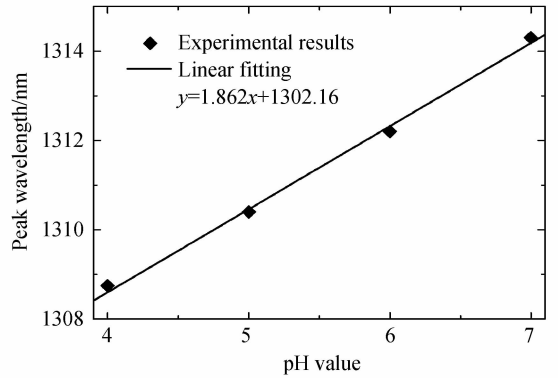


(b) Dependence of peak wavelength on pH value

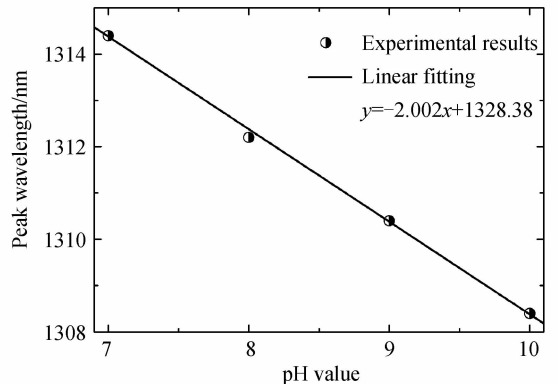
图7 碱性溶液 pH 变化的光谱响应

Fig. 7 Response of spectrum to pH value in alkaline buffer

层半径 $62.5 \mu\text{m}$ 、光栅结构参量相同的 LPFG 表面镀制相同层数的 PAH/PAA 薄膜,传感器对 pH 值变化响应的实验结果如图 8,对酸性溶液和碱性溶液中 pH 值的响应灵敏度分别为 1.86 nm/pHU 和 2.00 nm/pHU ,由此可见,包层半径减小到 $39 \mu\text{m}$ 时,传感器对 pH 的响应灵敏度提高了近 1 倍,与图 3 所示的理论分析结果基本吻合。



(a) In acidic buffer



(b) In alkaline buffer

图8 标准包层半径薄膜传感器的 pH 响应

Fig. 8 pH response of film sensor with standard cladding

3 结论

提出了薄包层长周期光纤光栅薄膜传感器结构,基于耦合模理论和模式重组机制系统探讨了传感器对薄膜参量变化的响应特性,从包层模有效折射率随薄膜参量变化关系的角度研究了 LPFG 包层半径减小对传感特性的影响.研究表明,包层半径减小不影响模式过渡区的位置和范围,但可扩大 LPFG 薄膜传感器对薄膜参量响应的动态范围,同时包层半径减小时 LPFG 薄膜传感器产生的增敏效应随薄膜厚度的增大而减小.实验上实现了基于薄包层长周期光纤光栅和 PAH/PAA 有机敏感薄膜的 pH 传感器,用氢氟酸腐蚀减小包层半径,采用静电自组法镀制薄膜,通过与标准包层 LPFG 镀膜过程中光谱数据的对比,证实了理论研究的结果.溶液 pH 传感实验结果显示,当包层半径减小到 $39 \mu\text{m}$ 时,传感器对溶液 pH 值的响应灵敏度可达 3.93 nm/pHU ,比相同光栅结构和薄膜参量

的标准包层 LPFG 传感器的灵敏度提高了 1 倍, 研究结果对高灵敏度 LPFG 薄膜传感器的设计与实现具有一定的参考意义.

参考文献

- [1] PATRICK H J, KERSEY A D, BUCHOLTZ F. Analysis of the response of long period fiber gratings to external index of refraction[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, **16**(9): 1606-1612.
- [2] ZHANG Bin, ZHU Hao-tian, HE Ru-shuang, *et al.* Measurement of saturation point of aqueous solution based on long period Michelson interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 0906006.
张斌, 朱昊天, 何如双, 等. 基于长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪的溶液饱和点测量[J]. 光子学报, 2014, **43**(9): 0906006.
- [3] IADICICCO A, CAMPOPIANO S, GIORDANO M, *et al.* Spectral behavior in thinned long period gratings: effects of fiber diameter on refractive index sensitivity [J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(28): 6945-6952.
- [4] CHEN H Y, GU Z T. Characteristics of a long-period fiber grating with reduced cladding for refractive index sensing[J]. *Journal of Modern Optics*, 2011, **58**(18): 1659-1665.
- [5] CHEN Hai-yun, GU Zheng-tian, GAO Kan. Multi-parameter photochemical sensing technique based on long-period fiber and wavelength-division multiplexing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(2): 0205003.
陈海云, 顾铮先, 高侃. 基于波分复用的长周期光纤光栅光化学多参量传感技术研究[J]. 中国激光, 2014, **41**(2): 0205003.
- [6] PILLA P, MALACHOVSK V, BORRIELLO A, *et al.* Transition mode long period grating biosensor with functional multilayer coatings[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(2): 512-522.
- [7] VILLAR I D, MATIUS I R, ARREGUI F J. Optimization of sensitivity in long period fiber gratings with overlay deposition [J]. *Optics Express*, 2004, **13**(1): 56-69.
- [8] CUSANO A, IADICICCO A, PILLA P, *et al.* Cladding mode reorganization in high-refractive-index-coated long-period gratings: effects on the refractive-index sensitivity[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(19): 2536-2538.
- [9] YU Xiu-juan, ZHANG Min, WANG Li-wei, *et al.* Characteristics of long-period optical fiber grating with high refractive index nm-thick film overlay[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2665-2672.
于秀娟, 张敏, 王利威, 等. 镀高折射率纳米膜的长周期光纤光栅特性研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(10): 2665-2672.
- [10] GU Zheng-tian, LAN Jin-long. Mode-transition in absorption film coated long-period fiber grating and response characteristics of refractive index[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(7): 0706003.
顾铮先, 蓝锦龙. 镀吸收型膜长周期光纤光栅模式转换与折射率响应特性[J]. 光学学报, 2013, **33**(7): 0706003.
- [11] GU Zheng-tian, LAN Jin-long. Design optimization of coated long period fiber grating based on mode transition [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(1): 0105007.
顾铮先, 蓝锦龙. 基于模式转换的镀膜长周期光纤光栅传感器的结构优化设计[J]. 中国激光, 2014, **41**(1): 0105007.
- [12] GU B B, YIN M J, ZHANG A P, *et al.* Low-cost high-performance fiber-optic pH sensor based on thin-core fiber modal interferometer[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(25): 22296-22302.
- [13] ZAMARRENO C R, HERNAEZ M, VILLAR I D, *et al.* Optical fiber pH sensor based on lossy-mode resonances by means of thin polymeric coatings[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, **155**: 290-297.
- [14] CORRES J M, VILLAR I D, MATIAS I R. Fiber optic pH-sensor in long-period fiber gratings using electrostatic self-assembly[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(1): 29-31.
- [15] TURAN E. Fiber grating spectra[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8): 1468-1488.
- [16] DONG X W, PEI L JIAN S S. Widely tunable long-period fiber grating with nm-thick higher refractive index film overlay[J]. *Optik*, 2006, **117**: 462-467.
- [17] TURAN E. Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, **14**(8): 1760-1773.
- [18] SHIRATORI S S, RUBNER M F. pH-dependent thickness behavior of sequentially adsorbed layers of weak polyelectrolytes[J]. *Macromolecules*, 2000, **33**: 4213-4219.
- [19] VILLAR I D, ACHAERANDIO M, MATIAS I R, *et al.* Deposition of overlays by electrostatic self-assembly in long-period fiber gratings[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(7): 720-722.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China(No. 51302248); The Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No. Y15F050012); Research Project of Education Department of Zhejiang Province (No. Y201534206); Zhejiang Normal University Foundation for Doctor (No. ZC304014028); Opening Foundation of Key Laboratory of Researching Optical Information Detecting and Display Technology in Zhejiang Province.