

# 镀膜双峰谐振长周期光纤光栅折射率传感的 优化设计与实验

蒋秀丽<sup>1,2</sup> 顾铮先<sup>1</sup> 凌 强<sup>1</sup> 蓝锦龙<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学光电功能薄膜实验室, 上海 200093; <sup>2</sup>上海电力学院数理学院, 上海 200090

**摘要** 利用镀自组装薄膜的双峰谐振长周期光纤光栅(LPFG)实现了高灵敏的折射率传感,给出了提高镀膜双峰谐振光纤光栅对环境折射率(SRI)灵敏度的途径。确定最佳镀膜厚度,使光纤包层模位于模式转换区附近;调整光纤半径,使镀膜后光栅的双峰位于相位匹配转折点(PMTP)附近,给出了确定最优膜厚和光纤半径的方法。将不同半径的双峰光栅镀自组装聚丙烯胺盐酸盐(PAH)/聚丙烯酸(PAA)薄膜后,放入不同浓度的葡萄糖溶液中进行折射率传感实验。结果表明:通过优化光纤半径和薄膜厚度,镀膜后工作于模式转换区附近和 PMTP 附近的双峰光栅对 1.333~1.372 范围内折射率的灵敏度高达 3985 nm/RIU(RIU 为单位折射率),明显高于不在模式转换区或 PMTP 附近的光栅,亦高于已报道的非双峰镀膜长周期光纤光栅。

**关键词** 光纤光学;光纤折射率传感;长周期光纤光栅;双峰谐振;模式转换

**中图分类号** TN253

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.0505003

## Optimal Design and Experiments of Coated Dual-Peak Resonance Long-Period Fiber Grating Refractive Index Sensing

Jiang Xiuli<sup>1,2</sup> Gu Zhengtian<sup>1</sup> Ling Qiang<sup>1</sup> Lan Jinlong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Photo-Electric Functional Films, University of Shanghai for Science and Technology,  
Shanghai 200093, China;

<sup>2</sup>School of Mathematics and Physics, Shanghai Institute of Electric Power, Shanghai 200090, China

**Abstract** Highly sensitive refractive index sensing is realized by using dual-peak resonance long-period fiber grating (LPFG) with self-assembled coating. The way for improving the sensitivity of coated dual-peak resonance fiber gratings to the surrounding refractive index is given. The fiber cladding mode is located near the mode transition zone by choosing optimal film thickness. The dual-peak structure of fiber coated is located near phase-matching turning point (PMTP) by adjusting the fiber radius. The method for determining optimal film thickness and fiber radius is given. Dual-peak gratings with different fiber radii coated with poly allylaminehydrochloride (PAH)/ poly acrylic acid (PAA) films are immersed in different concentrations of glucose solution to carry out refractive index sensing experiments. Results show that the sensitivity of coated dual-peak gratings operating near mode-transition regions and PMTP is 3985 nm/RIU in 1.333~1.372 index range, which is obviously higher than those of gratings not operating near mode-transition or PMTP, and also higher than that of non-dual-peak coated LPFGs reported.

**Key words** fiber optics; fiber refractive index sensing; long-period fiber grating; dual-peak resonance; mode transition

**OCIS codes** 060.2310; 060.2370; 310.1860

**收稿日期:** 2015-11-30; **收到修改稿日期:** 2016-01-08

**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)、上海市重点学科建设项目(T0501)、沪江基金(B14004)

**作者简介:** 蒋秀丽(1978—),女,博士研究生,讲师,主要从事光电功能薄膜、光纤传感方面的研究。

E-mail: jiangxiuli@shiep.edu.cn

**导师简介:** 顾铮先(1965—),男,博士,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: zhengtian@163.com(通信联系人)

## 1 引 言

长周期光纤光栅(LPFG)可使波长满足相位匹配条件的光从芯模向包层模耦合<sup>[1]</sup>,在 LPFG 的传输谱中对应的谐振波长出现损耗峰。包层模易受到包层外介质折射率的影响,导致谐振波长发生变化。基于 LPFG 的折射率传感受到了广泛关注<sup>[2-3]</sup>,但仅当环境折射率略低于包层折射率时,LPFG 的谐振波长才对环境折射率(SRI)有较高的灵敏度<sup>[2]</sup>。

在 LPFG 外镀折射率高于包层折射率的薄膜,可以扩展 LPFG 折射率传感范围,突破裸 LPFG 仅对环境折射率略低于包层折射率时才敏感的限制。Del Villar<sup>[4-7]</sup>等的数值分析与实验表明,LPFG 外镀高折射率膜厚度增加到一定程度后,包层模式的有效折射率会迅速增大,最低阶包层模转变为薄膜中的导模,其余的每个包层模均向前一阶模式转化,称为模式转换或重组。环境折射率越大,达到模式转换所需要的薄膜厚度越小。根据所探测环境的折射率,选择镀膜 LPFG 的最佳薄膜厚度,使包层模式处于转换区,谐振波长对环境折射率变化有很高的灵敏度<sup>[8-12]</sup>。我们课题组在这方面进行了大量的工作<sup>[11-13]</sup>。Li 等<sup>[8]</sup>在 LPFG 外镀多层自组装薄膜用于蔗糖溶液的浓度探测,实验发现,镀 100 层聚丙烯胺盐酸盐(PAH)/聚苯乙烯磺酸钠(PSS)的 LPFG 对质量分数为 20%~25%的溶液有最佳灵敏度,而镀 115 层 PAH/PSS 的 LPFG 对质量分数小于 5%的溶液有最佳灵敏度。

Shu 等<sup>[14]</sup>最早研究了 LPFG 中芯模与高阶包层模耦合的双峰谐振现象,并实验研究了双峰对外界折射率的响应,将光栅置于不同浓度的蔗糖溶液中,发现溶液浓度增大即外界折射率增大时,两个谐振峰向相反的方向移动,双峰间隔对 1.33~1.44 范围内折射率的灵敏度达 2081 nm/RIU(RIU 为单位折射率),相对于芯模与低阶包层模耦合的谐振波长对环境折射率的响应,灵敏度提高了一个数量级。在双峰谐振 LPFG 外镀高折射率薄膜使得包层模式位于模式转换区,可以进一步提高其对外界折射率的灵敏度。且位于模式转换区的双峰谐振镀膜 LPFG 对薄膜参数变化亦有很高的灵敏度。Smietana 等<sup>[15]</sup>在双峰谐振的 LPFG 外固定噬菌素,与溶液中细菌结合后,生物膜层的厚度发生微小变化,使谐振峰发生约 1.3 nm 的移动。由于镀膜双峰谐振 LPFG 的高灵敏度,其已成为光纤光栅生物、化学传感研究的热点<sup>[16-17]</sup>。

双峰间距越小,即双峰位于相位匹配转折点(PMTP)附近,对外界环境的灵敏度越高<sup>[18]</sup>。在光纤外镀高折射率薄膜,双峰间距会随薄膜厚度的增加而增大,当薄膜厚度达到使包层模处于模式转化区时,双峰间距很大,甚至双峰中的某个峰或 2 个峰超出一般光谱仪的探测范围。为了解决这个问题,本文提出通过腐蚀光纤半径使镀膜后的光栅包层模处于模式转换区,同时双峰间距较小,即处于 PMTP 附近。理论上给出了获得最佳光纤半径的方法。对不同光纤半径的光栅镀膜后进行了折射率传感实验。结果表明处于模式转换区和 PMTP 附近的光栅有最优的灵敏度。

## 2 长周期光纤光栅芯模与高阶包层模的耦合特征

据长周期光纤光栅耦合模理论,经过周期为  $\Lambda$ 、长度为  $L$  的光栅后,光的透射率为<sup>[1]</sup>

$$I = \left| \frac{A_{co}(L)}{A_{co}(0)} \right|^2 = 1 - \frac{K^2}{K^2 + \delta^2} \sin^2 \sqrt{K^2 + \delta^2} L, \quad (1)$$

式中  $K$  为耦合常数, $\delta$  为失谐量,定义为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_{co} - n_{cl}^m) - \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad (2)$$

其中  $n_{co}$ 、 $n_{cl}^m$  分别是芯模和  $m$  阶包层模的有效折射率。若失谐量  $\delta=0$ ,则  $\lambda = (n_{co} - n_{cl}^m) \Lambda$ ,称为相位匹配条件,满足该条件的波长称为谐振波长,对应于传输谱中的损耗峰。

Shu 等<sup>[14]</sup>指出,在光纤传输常用的波长范围内,LPFG 中芯模与高阶包层模的耦合会出现双峰谐振现象。由相位匹配条件  $\lambda = (n_{co} - n_{cl}^m) \Lambda$  和光栅传输率(1)式,分析了芯模与 19 阶包层模式的耦合情况。数值模拟所采用的光纤与光栅参数:纤芯半径  $r_{co}$  为 4.15  $\mu\text{m}$ ,包层半径  $r_{cl}$  为 62.5  $\mu\text{m}$ ,纤芯折射率  $n_{co}$  为 1.4681,包层折射率  $n_{cl}$  为 1.4628,环境折射率  $n_{SRI}$  为 1。纤芯折射率调制幅度为  $2 \times 10^{-4}$ ,光栅长度为 2 cm。芯模与 19 阶包层模耦合的相位匹配曲线如图 1(a)所示。相位匹配曲线的顶点对应的波长记为  $\lambda_T$ ,波长小于  $\lambda_T$  时, $d\Lambda/d\lambda > 0$ ,而波长大于  $\lambda_T$  时, $d\Lambda/d\lambda < 0$ ,该顶点亦称为 PMTP,转折点波长  $\lambda_T$  对应的光栅周期

记为  $\Delta_T$ 。由图 1(a)可以看出,光栅周期为  $\Delta_T$  时,只在波长  $\lambda_T$  处失谐量  $\delta=0$ ,对应的传输谱如图 1(b)、(c)中的黑色曲线所示,传输谱为单个宽且深的损耗峰。光栅周期  $\Delta > \Delta_T$  时,对应的传输谱如图 1(b)中的红、绿、蓝线所示,所有波长的失谐量  $\delta > 0$ ,在波长  $\lambda_T$  处失谐量  $\delta$  最小,该处对应损耗峰的中心。光栅周期越大,失谐量  $\delta$  越大,耦合越弱,损耗峰越浅。光栅周期  $\Delta < \Delta_T$  时,有 2 个波长满足相位匹配条件,失谐量  $\delta = 0$ ,光栅传输谱如图 1(c)中的红、绿、蓝线所示,传输谱中有 2 个损耗峰。光栅周期越小,两峰の間隔越大,转折点波长  $\lambda_T$  的失谐量  $\delta$  绝对值越大,其透射率越大。

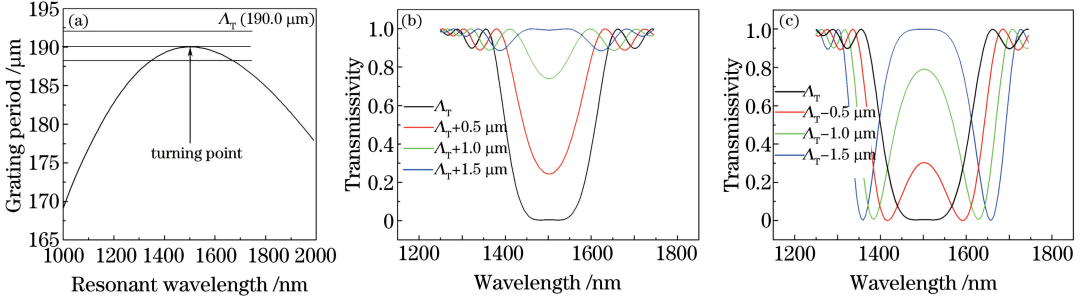


图 1 (a) 芯模与 19 阶包层模的相位匹配曲线; (b)  $\Delta \geq \Delta_T$  对应的传输谱; (c)  $\Delta \leq \Delta_T$  对应的传输谱

Fig. 1 (a) Phase-matching curves of core mode and the 19<sup>th</sup> cladding mode; (b) transmission spectra with  $\Delta \geq \Delta_T$ ; (c) transmission spectra with  $\Delta \leq \Delta_T$

对于不同的光栅周期  $\Delta$ ,转折点处波长  $\lambda_T$  的失谐量为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_T}(n_{co} - n_{cl}^m) - \frac{2\pi}{\Delta}, \quad (3)$$

由(3)式可计算  $\lambda_T$  在不同  $\Delta$  时的透射率,结果如图 2 所示。当  $\Delta = \Delta_T$ ,转折点波长  $\lambda_T$  的失谐量  $\delta = 0$ ,即满足相位匹配,透射率为 0。当  $\Delta > \Delta_T$ ,即光栅周期在相位匹配曲线顶点的上方,光栅周期越大,失谐量  $\delta$  越大,芯模与包层模的耦合越弱,透射率增大,透射谱为越来越浅的单峰。当光栅周期达到  $\Delta_+$  时,透射率为 1,此时称为芯模与包层模完全失耦合。当  $\Delta < \Delta_T$ ,即光栅周期在相位匹配曲线顶点的下方, $\lambda_T$  失谐量  $\delta < 0$ ,随着光栅周期减小, $\lambda_T$  失谐量  $\delta$  的绝对值增大,其透射率亦增大,损耗峰开始分裂为双峰。当光栅周期为  $\Delta_-$ ,其透射率为 1 时,称为两个峰完全分裂。

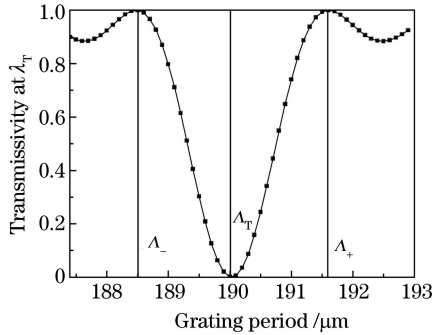


图 2 转折点处波长的透射率与光栅周期的关系

Fig. 2 Transmissivity at  $\lambda_T$  as a function of grating period

### 3 镀膜双峰谐振 LPFG 液体传感的优化

#### 3.1 使包层模式位于模式转换区的膜层厚度

在光纤光栅外镀膜,芯模不受薄膜的影响,薄膜的参数主要影响包层模式的有效折射率,从而影响光栅的谐振波长。图 3 显示了 1~19 阶包层模式有效折射率随薄膜厚度  $d$  的变化,计算中薄膜折射率为 1.55,环境折射率为 1.33,光波长为 1450 nm。

由图 3 可以看出,随着薄膜厚度的增加,包层模式的有效折射率增大,当薄膜厚度  $d$  超过 300 nm,包层模的有效折射率增大加快,薄膜厚度  $d$  超过 385 nm 时,最低阶包层模的有效折射率超过了光纤包层折射

率,而成为薄膜中的导模,包层模中其余的每一个模式向前一阶的模式转化,称为模式转换。所有的奇次模(HE模)转换为偶次模(EH模),由于EH模式在纤芯区的模场较弱,与芯模的耦合非常弱,故损耗峰幅值减小,所以在模式转换过程中,谐振波长快速移动的同时会伴随损耗峰幅值减小<sup>[5]</sup>。薄膜厚度  $d$  继续增大到 450 nm 时,又一个包层模转成薄膜中的导模,EH模又过渡到 HE模,完成一次完整的模式转换。然后包层模式有效折射率又随薄膜厚度缓慢增长,开始下一次的模式转换。

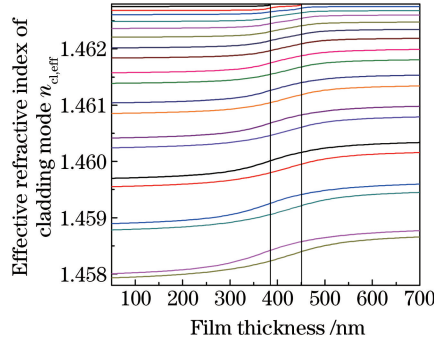


图 3 包层模式有效折射率与薄膜厚度的关系

Fig. 3 Effective refractive index of the cladding mode as a function of film thickness

根据环境的折射率,在光纤光栅外镀膜厚度应当使得包层模处于模式转换区附近,这样环境折射率或薄膜参数的微小变化会导致包层模式发生较大变化,从而引起谐振波长的显著改变。

### 3.2 膜层厚度与双峰间距对光栅环境折射率灵敏度的影响

选择恰当的镀膜厚度使包层模处于模式转换区附近,可提高镀膜双峰 LPFG 对环境折射率的灵敏度。图 4 (a)、(b)分别给出了薄膜厚度  $d$  为 100 nm 和 300 nm 时,芯模与 19 阶包层模相位匹配曲线随环境折射率的变化。随着环境折射率的增大,周期确定的光栅双峰间距会增大。当环境折射率变化范围为 1.34~1.37,薄膜厚度  $d$  为 300 nm 时(由图 3 知包层模位于模式转换附近),双峰间距的增大明显高于薄膜厚度  $d$  为 100 nm 时双峰间距的变化。图 4 (b) 还可看出,薄膜厚度  $d$  均为 300 nm,周期为  $\Lambda_1$  的光栅双峰初始间距较小,周期为  $\Lambda_2$  的光栅双峰初始间距较大。对于同样的折射率变化,双峰初始间距越小,双峰间距的变化量就越大。双峰间距随环境折射率的变化情况,及对环境折射率的灵敏度如表 1 所示。表 1 的数据显示,薄膜厚度  $d$  为 300 nm、双

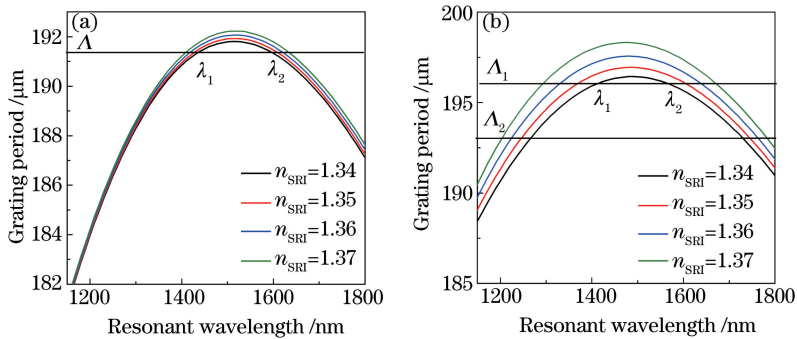


图 4 相位匹配曲线随环境折射率的变化。(a) 薄膜厚度  $d$  为 100 nm; (b) 薄膜厚度  $d$  为 300 nm

Fig. 4 Variation of phase-matching curves with surrounding refractive indices. (a) Film thickness is 100 nm; (b) film thickness is 300 nm

表 1 双峰间距随环境折射率的变化

Table 1 Variation of dual-peak intervals with surrounding refractive indices

Film thickness	$(\lambda_2 \sim \lambda_1) / \text{nm}$	$(\lambda_2 \sim \lambda_1) / \text{nm}$	$(\lambda_2 \sim \lambda_1) / \text{nm}$	$(\lambda_2 \sim \lambda_1) / \text{nm}$	$\Delta(\lambda_2 \sim \lambda_1)$	$\Delta(\lambda_2 \sim \lambda_1) / \Delta n_{\text{SRI}} / (\text{nm} / \text{RIU})$
$d / \text{nm}$	$(n_{\text{SRI}} = 1.34)$	$(n_{\text{SRI}} = 1.35)$	$(n_{\text{SRI}} = 1.36)$	$(n_{\text{SRI}} = 1.37)$	$/ \text{nm}$	$/ \text{nm} / \text{RIU}$
100	155	180	203	224	69	2300
300	153	234	307	377	224	7460
300	462	499	537	579	117	3900

峰初始间距为 153 nm 的光栅,对环境折射率有最高的灵敏度,达到 7460 nm/RIU(RIU 为单位折射率)。数值分析显示,优化薄膜厚度使包层模式位于模式转换区附近,且双峰初始间距小的光栅具有较高的灵敏度。

### 3.3 优化光纤半径使镀膜后光栅处于相位转折点附近

双峰间距越小,即双峰在 PMTP 附近,两谐振峰对外界环境变化越敏感<sup>[17]</sup>。镀膜后双峰谐振光栅的包层模处于模式转换区附近,且双峰位于 PMTP 附近,光栅的灵敏度最高。在光纤外镀高折射率薄膜,薄膜会改变相位匹配曲线,图 5(a)显示了薄膜厚度对相位匹配曲线的影响,随着薄膜厚度的增加,相位匹配曲线会上移。若要使镀膜后的谐振峰位于 PMTP 附近,镀膜前的相位匹配曲线顶点需与光栅周期有一定的间隔。但在光栅刻制时光栅周期与相位匹配曲线顶点有一定间隔,所有波长失谐量  $\delta > 0$ ,光栅透射谱中损耗峰很浅,不利于判断光栅刻制是否成功。另外光栅刻制完成后,如果不能满足条件,光栅周期就很难再改变。光栅刻制时为双峰谐振状态,通过减小光纤半径,亦可引起相位匹配曲线的变化,即改变相位匹配曲线与光栅周期的相对位置。图 5(b)显示了光纤半径  $R$  对相位匹配曲线的影响,随着光纤半径的减小,相位匹配曲线下降。

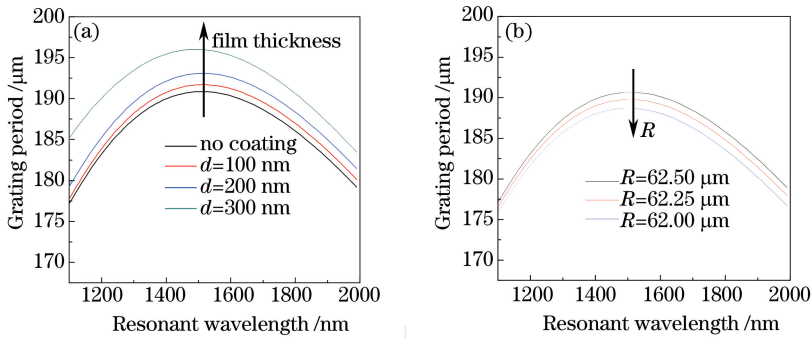


图 5 (a) 薄膜厚度对相位匹配曲线的影响; (b) 光纤半径对相位匹配曲线的影响

Fig. 5 (a) Effect of film thickness on phase-matching curves; (b) effect of fiber radius on phase-matching curves

减小光纤半径,镀膜后的双峰是否位于 PMTP 附近,理论上可以通过转折点波长  $\lambda_T$  的透射率判断。图 6 给出了对特定的光栅周期,对不同的光纤半径镀膜后(薄膜参数已确定,使包层模式位于模式转换区)转折点波长  $\lambda_T$  对应的透射率。光纤半径增大,相位匹配曲线上移,图 6 中,光纤半径从  $R_-$  增大至  $R_+$  过程中,相位匹配曲线顶点在光栅周期的下方,向光栅周期靠近。由第 2 节的分析可知,传输谱为单峰。光纤半径为  $R_T$ ,转折点波长  $\lambda_T$  与光栅周期满足相位匹配条件, $\lambda_T$  对应的透射率达到 0,传输谱为最深的单峰。光纤半径大于  $R_T$  时,相位匹配曲线的顶点达到光栅周期的上方,光栅开始分裂为双峰。在  $R_T$  右侧且靠近  $R_T$  的光纤半径为最优光纤半径。镀膜后可以使光栅包层模处在模式转换区附近,同时双峰位于 PMTP 附近。

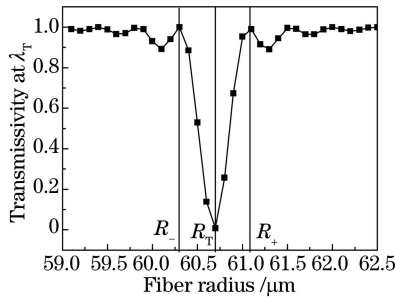


图 6 不同半径的光栅最佳厚度镀膜后转折点处波长的透射率

Fig. 6 Transmissivity at  $\lambda_T$  for gratings of different radii coated with optimal film thickness

## 4 镀膜双峰谐振长周期光纤光栅折射率传感实验

### 4.1 光栅腐蚀与镀膜

对不同半径的光纤光栅镀膜后进行折射率传感实验。实验所用光纤光栅采用紫外光逐点曝光法写入,光栅周期为 190 nm。所用光纤为 Corning 公司的 SM-28,写入光栅前光纤在 12159 kPa 载氢一周,写入光栅后在

120 °C下退火 12 h。用质量分数为 2%的氢氟酸溶液腐蚀光纤,光谱随腐蚀时间的变化如图 7 所示,每分钟腐蚀厚度约 0.05 μm。在腐蚀后的光栅外用自组装方法镀 PAH/PAA 薄膜,将 PAH 和 PAA 用去离子水配制成 2 g/L的溶液,成膜后薄膜的折射率约为 1.55<sup>[19]</sup>,经 p 偏振双面反射法测得每层膜的厚度约为 8 nm。

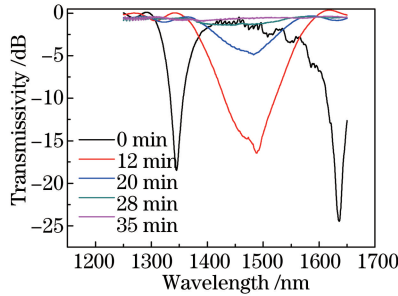


图 7 光栅透射谱随腐蚀时间的变化

Fig. 7 Variation of transmission spectra with corrosion time

#### 4.2 折射率传感实验

对不同腐蚀程度的光纤光栅镀膜,腐蚀 20 min 的光栅镀 12 层 PAH/PAA 膜,腐蚀 28 min 的光栅镀 22 层 PAH/PAA 膜,腐蚀 35 min 的光栅镀 31 层薄膜后,光谱均呈现为小间距的双峰,即位于 PMTP 附近,分别称作 1 号、2 号和 3 号光栅。将 3 个镀膜后的光栅放入不同浓度的葡萄糖溶液中,观察传输谱的变化,分别如图 8 (a)、(b)、(c)所示。腐蚀 20 min 的光栅镀 31 层薄膜后,称为 1'号光栅,在葡萄糖溶液中的传输谱如图 8(d)所示,该光栅的双峰间距很大,一个峰已经超出光谱仪的探测范围。3 号光栅与 1'号光栅均是镀 31 层薄膜,随溶液浓度的增加,左侧损耗峰的幅值减小,可以判断镀 31 层膜后包层模式位于模式转换区附近。

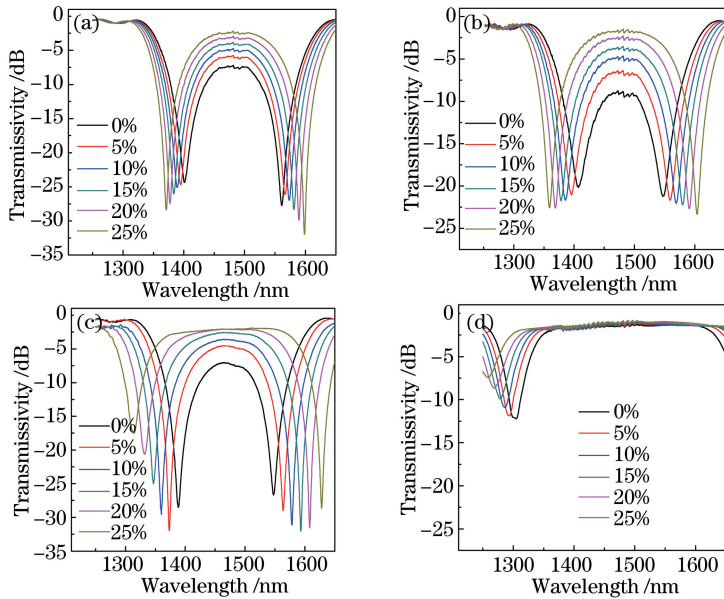


图 8 光纤光栅在不同浓度葡萄糖溶液中的传输谱。

(a) 1 号光栅,腐蚀 20 min 镀 12 层 PAH/PAA 薄膜;(b) 2 号光栅,腐蚀 28 min 镀 22 层 PAH/PAA 薄膜;  
(c) 3 号光栅,腐蚀 35 min 镀 31 层 PAH/PAA 薄膜;(d) 1'号光栅,腐蚀 20 min 镀 31 层 PAH/PAA 薄膜

Fig. 8 Transmission spectra of fiber grating immersed in different concentrations of glucose solution. (a) Grating 1 coated with 12 layers of PAH/PAA after 20 min etched; (b) grating 2 coated with 22 layers of PAH/PAA after 28 min etched; (c) grating 3 coated with 31 layers of PAH/PAA after 35 min etched; (d) grating 1' coated with 31 layers of PAH/PAA after 20 min etched

20 °C时,查手册<sup>[20]</sup>可知质量分数为 0%、5%、10%、15%、20%、25%的葡萄糖溶液的折射率分别为 1.3333、1.3402、1.3477、1.3555、1.3635、1.3719。各光栅谐振波长的移动与环境折射率的关系如图 9 所示,其中曲线 fiber-S 代表短波侧谐振峰随折射率的移动,曲线 fiber-L 代表长波侧谐振峰随折射率的移动,曲线

fiber-interval 代表双峰间距随折射率的变化。光栅 1' 和光栅 3 包层模式都位于模式转换区,但光栅 3 双峰间距小,双峰位于 PMTP 附近,由图 9 可看出,其短波长的谐振峰对环境折射率灵敏度高于光栅 1'。光栅 1、2、3 的双峰位于 PMTP 附近,但只有光栅 3 的包层模式位于模式转换区,由图 9 可看出,光栅 3 对环境折射率灵敏度明显高于光栅 1、2。谐振波长在质量分数为 25% 的葡萄糖溶液中比在纯水中增大 155 nm,而质量分数为 25% 的葡萄糖溶液折射率比纯水大 0.0389,光栅 1 的双峰间距对环境折射率的灵敏度为 2081 nm/RIU,而光栅 3 双峰间距对环境折射率的灵敏度达到了 3985 nm/RIU。光栅 1 镀 12 层薄膜,厚度约 100 nm,其灵敏度与之前的仿真结果非常接近。光栅 3 镀 31 层薄膜,厚度约为 250 nm。实验中镀膜厚度没有至 300 nm,自组装镀膜过程薄膜的非均匀性导致薄膜层损耗,降低了芯模与包层模的耦合,又因接近模式转换导致耦合减弱,双重因素使膜厚为 250 nm 时,损耗峰的深度已经变浅。采用更均匀的镀膜方式如提拉法,减少膜层损耗,使膜厚尽量接近模式转换厚度,有望进一步提高双峰光栅的灵敏度。

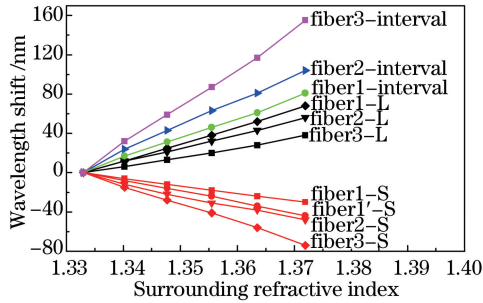


图 9 谐振波长移动与葡萄糖溶液折射率的关系

Fig. 9 Shift of resonant wavelength versus refractive index of glucose solution

实验表明:通过优化光纤半径使镀膜后的双峰光栅工作于模式转换区和 PMTP 附近,光栅可达到最优灵敏度。优化后光栅 3 的双峰间距对环境折射率的灵敏度达到了 3985 nm/RIU,该值超过已报道的普通镀膜长周期光纤光栅<sup>[9-10]</sup>及双峰光栅<sup>[14]</sup>,表 2 列举了几种典型 LPFG 折射率传感实验的灵敏度,对比可看出优化后的镀膜双峰光栅的灵敏度处于较高水平。LPFG 折射率传感过程会对温度产生交叉敏感,每改变 1 °C,双峰间距改变约 0.2 nm。为降低温度的影响,测量在 20 °C 的室温下进行,温度波动范围在 0.1 °C 以内,温度所引起的波长移动小于 0.02 nm。所用光谱仪的波长分辨率为 0.02 nm,则对环境折射率的分辨率可达  $5 \times 10^{-6}$ 。位于模式转换和 PMTP 附近的镀膜光栅除了对环境折射率有高灵敏度外,亦对其他参数如薄膜参数变化有很高的灵敏度,在双峰光栅外镀生化敏感薄膜使其工作于模式转换和 PMTP 附近,可实现高灵敏的化学或生物传感。

表 2 长周期光纤光栅折射率计的性能参数

Table 2 Performance parameters of long-period fiber grating refractometers

Sensor	Detecting range	Sensitivity /(nm/RIU)	Reference
Bared LPFG	1.330~1.426	47	[3]
LPFG coated by 100 nm Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> film	1.333~1.461	3000	[9]
Bared dual-peak LPFG	1.33~1.44	2081	[14]
Metal film coated dual-peak LPFG	1.3352~1.3792	1100	[21]
Dual-peak LPFG coated by PAA/PAH film	1.3333~1.3719	3985	our work

## 5 结 论

使镀膜后的双峰光栅工作于模式转换区与 PMTP 附近,可使镀双峰光栅获得最优灵敏度。理论上给出了使光栅工作于模式转换区的最佳薄膜厚度,及使镀膜后光栅位于 PMTP 附近的最佳光纤半径。折射率传感实验表明:经优化的镀膜双峰光栅折射率灵敏度可达 3985 nm/RIU。此方法亦可用来优化镀敏感生化薄膜的双峰谐振光栅,其高灵敏度可实现化学或生物的高灵敏传感。

## 参 考 文 献

- 1 Erdogan T. Fiber grating spectra[J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(8): 1277-1294.
- 2 Patrick H J, Kersey A D, Bucholtz F. Analysis of the response of long period fiber gratings to external index of refraction [J]. J Lightwave Technol, 1998, 16(9): 1606-1612.
- 3 Chong J H, Shum P, Haryono H, *et al.*. Measurements of refractive index sensitivity using long-period grating refractometer[J]. Opt Commun, 2004, 229(1): 65-69.
- 4 Del Villar I, Matias I R, Arregui F J, *et al.*. Optimization of sensitivity in long period gratings with overlay deposition[J]. Opt Express, 2005, 13(1): 56-69.
- 5 Del Villar I, Corres J M, Achaerandio M, *et al.*. Spectral evolution with incremental nanocoating of long period fiber gratings[J]. Opt Express, 2007, 14(25): 11972-11981.
- 6 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]. Opt Lett, 2005, 30(19): 2536-2538.
- 7 Cusano A, Iadicicco A, Pilla P, *et al.*. Mode transition in high refractive index coated long period gratings [J]. Opt Express, 2006, 14(1): 19-34.
- 8 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]. Reactive & Functional Polymers, 2011, 71(3): 335-339.
- 9 Zou F, Liu Y Q, Deng C L, *et al.*. Refractive index sensitivity of nano-film coated long-period fiber gratings[J]. Opt Express, 2015, 23(2): 1114-1124.
- 10 Coelho L, Viegas D, Santos J L, *et al.*. Enhanced refractive index sensing characteristics of optical fibre long period grating coated with titanium dioxide thin films[J]. Sensors & Actuators B: Chemical, 2014, 202(4): 929-934.
- 11 Gu Zhengtian, Lan Jinlong. Design optimization of coated long-period fiber grating based on mode transition[J]. Chinese J 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 Zhengtian, Lan Jinlong. Mode transition and refractive index response in long-period fiber grating coated with double-layer overlays including metal film[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0406005.  
顾铮先, 蓝锦龙. 镀金属两层膜系长周期光纤光栅模式转换与折射率响应[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0406005.
- 13 Jiang Xiuli, Gu Zhengtian. Impact of thin film extinction coefficient on coated long-period fiber grating transmission spectrum[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2189-2195.  
蒋秀丽, 顾铮先. 薄膜消光系数对镀膜长周期光纤光栅传输谱的影响[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2189-2195.
- 14 Shu X W, Huang D. Highly sensitive chemical sensor based on the measurement of the separation of dual resonant peaks in a 100-mm-period fiber grating[J]. Opt Commun, 1999, 171(s1-s3): 65-69.
- 15 Smietana M, Bock W J, Mikulic P, *et al.*. Detection of bacteria using bacteriophages as recognition elements immobilized on long-period fiber gratings[J]. Opt Express, 2011, 19(9): 7971-7978.
- 16 Wang Z Y, Hefflin J R, Cott K V, *et al.*. Biosensors employing ionic self-assembled multilayers adsorbed on long-period fiber gratings[J]. Sensors & Actuators B: Chemical, 2009, 139(2): 618-623.
- 17 Topliss S M, James S W, Davis F, *et al.*. Optical fibre long period grating based selective vapour sensing of volatile organic compounds[J]. Sensors & Actuators B: Chemical, 2010, 143(2): 629-634.
- 18 Chen X F, Zhou K M, Zhang L, *et al.*. Dual-peak long-period fiber gratings with enhanced refractive index sensitivity by finely tailored mode dispersion that uses the light cladding etching technique[J]. Appl Opt, 2007, 46(4): 451-455.
- 19 Corres J M, Matias I R, Del Villar I, *et al.*. Design of pH sensors in long-period fiber gratings using polymeric nanocoatings[J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(3): 455-463.
- 20 Haynes W M. CRC handbook of chemistry and physics[M]. Boca Raton: CRC Press, 2012.
- 21 Gu Zhengtian, Zhang Jiangtao. Metal-coated long-period fiber grating liquid sensor based on dual-peak resonance[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0305003.  
顾铮先, 张江涛. 基于双峰谐振效应的镀金属长周期光纤光栅液体浓度传感器[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0305003.