

# 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

顾铮无 蓝锦龙

(上海理工大学理学院光电功能薄膜实验室, 上海 200093)

**摘要** 基于耦合模理论,根据镀膜长周期光纤光栅(LPFG)包层模有效折射率随膜层参数的变化,指出了模式转换区的划分及特点,考察了模式转换区及其附近 LPFG 透射谱折射率的响应特性。从传感器设计角度,进一步针对波长偏移和透射率两种检测类型,给出了两类灵敏度的定义,讨论了模式转换区及其附近灵敏度随薄膜参数与光栅参数变化的关系,通过优化设计,给出了高灵敏度对应的最佳设计参数带及区域。结果表明,选择合适的膜层参数与光栅参数,利用波长偏移和透射率两种检测方法,该传感器对薄膜折射率的分辨率均可达  $10^{-7}$  以上,且模式转换区适合于制作波长偏移型的传感器,模式转换区附近则适合于制作透射率型传感器。

**关键词** 光纤光学; 镀膜长周期光纤光栅; 模式转换; 灵敏度

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0105007

## Design Optimization of Coated Long-Period Fiber Grating Based on Mode Transition

Gu Zhengtian Lan Jinlong

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

**Abstract** Based on the coupled-mode theory, according to the variation of effective index of cladding modes in coated long-period fiber grating (LPFG) with the film parameters, the partition and characteristics of mode transition region are pointed out. The response characteristics of refractive index in coated LPFG transmission spectrum in mode transition region and its vicinity are investigated. Further, the two kinds of sensitivity definitions are given for the different detection types of wavelength shift and amplitude change from the aspect of sensor design. The changes of sensitivity with film parameters and grating parameters are discussed. By using optimization method, the optimum design parameters and regions with high sensitivity are obtained. The results show that the sensor resolution of film refractive index can be also available to  $10^{-7}$ , if detected by wavelength shift and transmittance change. When the suitable film parameters and grating parameters are selected, mode transition region is fit for the sensor detected by wavelength shift, while the vicinity of mode transition region is fit for the sensor detected by transmittance.

**Key words** fiber optics; coated long-period fiber grating; mode transition; sensitivity

**OCIS codes** 060.2310; 060.2340; 060.2370; 310.3915

## 1 引 言

Rees 等<sup>[1]</sup>在长周期光纤光栅(LPFG)外镀一层比光纤包层折射率高的薄膜,首次发现谐振波长随薄膜厚度变化呈现跳变的情况。据此 Villar 等<sup>[2]</sup>提

出了模式转换的观点,即薄膜增至一定厚度时低阶包层模式将依次进入薄膜层中传输,高阶模式逐阶取代低阶模式。其后,于秀娟等<sup>[3-4]</sup>研究了模式转换情况下镀膜 LPFG 对环境折射率的响应特性,表

**收稿日期**: 2013-06-21; **收到修改稿日期**: 2013-09-06

**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创新重点项目(11ZZ131)、上海市重点学科建设项目(S30502)

**作者简介**: 顾铮无(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

明在模式转换区镀膜 LPFG 对环境折射率具有较高的灵敏度。

Gu 等<sup>[5]</sup>采用溶胶-凝胶法在 LPFG 包层外涂覆 SnO<sub>2</sub> 薄膜,用于检测乙醇气体,获得了高灵敏度的化学传感器。自此,人们开始更加关注应用更为广泛的镀敏感薄膜 LPFG 的折射率型化学生物传感器的研究<sup>[6-8]</sup>。为了提高镀膜 LPFG 传感器的灵敏度,研究人员提出了不少提高灵敏度的方法,如薄包层结构<sup>[9]</sup>、级联结构<sup>[10]</sup>、双峰谐振<sup>[11]</sup>及表面等离子激元共振(SPR)<sup>[12]</sup>等。模式转换现象同样可用于增强敏感薄膜对折射率的响应度,顾铮先等<sup>[13]</sup>考察了镀吸收型敏感膜 LPFG 的模式转换特性,指出敏感膜折射率高响应度出现在模式转换区及其附近。为了研制实用的高灵敏化学生物传感器,需要进一步深入研究镀膜 LPFG 的结构与灵敏度的关系,采用结构优化方法,寻找并确定高灵敏传感器所需的结构设计参数。

本文基于耦合模理论,首先从镀膜 LPFG 包层模有效折射率随膜层参数的变化出发,指出模式转换区的划分及特点;在此基础上,对模式转换区及其附近 LPFG 透射谱折射率响应特性进行了考察。

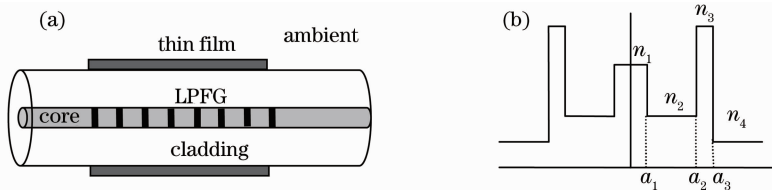


图 1 镀膜 LPFG 结构示意图。(a) 结构模型; (b) 折射率分布

Fig. 1 Structure of coated LPFG. (a) Structural model; (b) refractive index profile

根据耦合模理论<sup>[14]</sup>以及镀膜 LPFG 柱形光波导结构,当包层模式进入薄膜层中传输时,可以得到包层模式有效折射率随薄膜厚度的变化情况,如图 2 所示。计算中所用的波长为 1550 nm。从图中可以看出,随着薄膜厚度的增加,当到达 470 nm 时,最低阶次的包层模 HE<sub>1,2</sub> 将跳至薄膜层内传输,随着 HE<sub>1,2</sub> 模在薄膜层内传输,高阶次的包层模也将转换至模式跳变前的低一阶包层模,此时, EH<sub>1,3</sub> 模成为最低阶次包层模;随着薄膜厚度的继续增加, EH<sub>1,3</sub> 模在膜厚 590 nm 处进入到薄膜层中传输,而包层模 HE<sub>1,4</sub> 和 EH<sub>1,5</sub> 则在薄膜厚度约为 1800 nm 和 1960 nm 处开始在薄膜层中传导。随着薄膜厚度的进一步增加,将会有更多的模式在薄膜层中传输,而每个在薄膜层中传输的模式都是未转换前的最低阶包层模式,这种现象称为模式转换。

图 2 插图给出了模式转换区及靠近转换区的划

针对 LPFG 传感器波长偏移和透射率变化两种检测类型,考察了两类灵敏度在模式转换区及其附近随薄膜参数与光栅参数变化的关系。最后,通过优化设计,给出高灵敏度对应的最佳设计参数带及区域,得到两种检测方法对薄膜折射率的灵敏度及分辨率,从中选择合适的膜层参数与光栅参数,为建立实际的传感器提供了直观的依据。

## 2 镀膜 LPFG 模式转换及折射率响应

### 2.1 镀膜 LPFG 模式转换

镀膜 LPFG 结构如图 1(a)所示,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。 $\sigma, L, \Lambda$  分别表示光栅的折射率分辨率、光栅长度和光栅周期,如无特殊说明,本文模拟计算采用的光纤结构参数如下:  $n_1 = 1.4681, n_2 = 1.4628, n_3 = 1.57, n_4 = 1, a_1 = 4.15 \mu\text{m}, a_2 = 62.5 \mu\text{m}, a_3 = a_2 + h_3$ ; 光栅的结构参数如下:  $\sigma = 4 \times 10^{-4}, L = 2 \text{ cm}, \Lambda = 450 \text{ nm}$ 。

分,将薄膜厚度划分为远离转换区、靠近转换区及转换区 3 个区域,在图中分别用 A、B 和 C 表示。

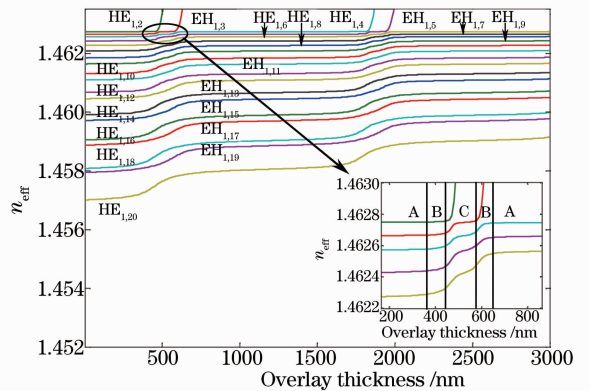


图 2 镀膜 LPFG 包层模式有效折射率随薄膜厚度变化图  
Fig. 2 Effective refractive index of cladding mode in coated LPFG versus overlay thickness

## 2.2 模式转换附近镀膜 LPFG 折射率响应

对于镀膜敏感薄膜 LPFG 化学生物传感器,被检测的化学或生物物质将改变敏感薄膜折射率,从而引起镀膜 LPFG 透射谱的变化。以下选择模式转换区及其附近两个区域,研究了镀膜敏感膜 LPFG 的透射谱的折射率响应特性。图 3(a)和(b)给出了薄膜厚度分别为 450 nm 和 530 nm 时镀膜 LPFG 透射谱包层模  $HE_{1,4}$  的折射率响应,其中 450 nm 和 530 nm 分别对应于图 2 中的靠近模式转换区 B 及模式转换区 C。

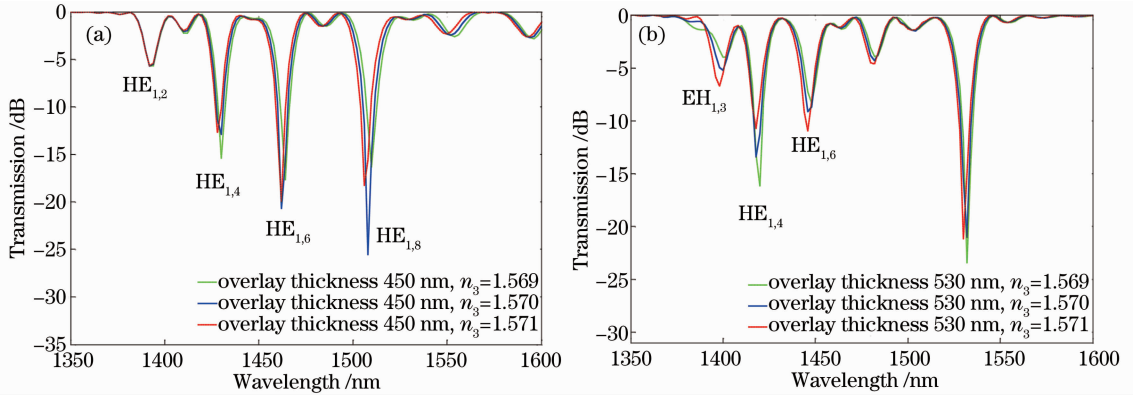


图 3 模式转换区及其附近镀膜吸收型薄膜 LPFG 透射谱的折射率响应。(a) 模式转换区附近; (b) 模式转换区

Fig. 3 Refractive index respond of transmission spectra in coated absorption film LPFG.

(a) Vicinity of mode transition region; (b) mode transition region

## 3 模式转换附近镀膜 LPFG 结构优化设计

### 3.1 透射率变化型

光纤中常用的通信波长范围为 800~1600 nm,使用光纤光栅时,设计的透射谱衰减峰也应在此波段内。考虑到实用经济的放大自发辐射(ASE)宽带光源,其带宽较窄且有多波段可供选择,仿真分析时可参照与宽带光源中心波长相近的特定模式的谐振波长,在其附近优化选择结构参数。图 4 给出了不同的  $n_3$ 、 $h_3$  在给定光栅结构参量及入射波长 1390~1420 nm 范围内对应灵敏度  $S_T$  的最大值  $S_T^{\max}$ 。其中薄膜厚度  $h_3$  在 380~780 nm 之间,薄膜折射率  $n_3$  在 1.5~1.7 之间。从图 4 中可以看出,对于不同的  $(n_3, h_3)$  组合,所能达到的最大灵敏度  $S_T^{\max}$  各不相同,其中  $S_T^{\max}$  最大值达到  $5 \times 10^3$  以上。而且,  $S_T^{\max}$  在某些特定的  $(n_3, h_3)$  组合区域内可以达到较大值。为方便可见,作出高灵敏度的等高线,从中找到高灵敏度区域对应的薄膜参数,通过选择和镀膜工艺条件,达到镀膜 LPFG 传感器结构优化从而提高灵敏度的目的。

从图 3 可以看出,当薄厚及薄膜折射率在模式转换区及其附近时,薄膜折射率的微小变化,都会引起各阶包层模对应的衰减峰较大的变化,带来衰减峰位置的偏移以及给定波长处透射率的变化。根据实际传感器的检测要求,采用波长的相对偏移及透射率的相对变化两种形式来衡量传感器的灵敏度,分别定义为衰减峰波长或透射率的相对变化率与敏感薄膜折射率相对变化率之比,用  $S_\lambda$ 、 $S_T$  表示。以下将分别针对这两种灵敏度进行镀膜 LPFG 的结构优化分析,为设计实用的高灵敏度传感器提供理论设计参数。

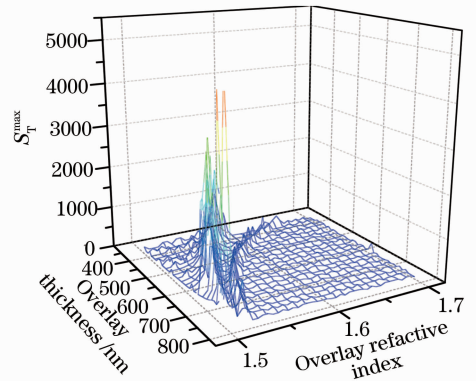


图 4 膜厚 380~780 nm 时,折射率  $n_3=1.5\sim 1.7$  范围内最大灵敏度( $\Lambda=450 \mu\text{m}$ )

Fig. 4 Maximum sensitivities in the region of thickness from 380 nm to 780 nm and refractive index from 1.5 to 1.7 ( $\Lambda=450 \mu\text{m}$ )

图 5 给出了薄膜厚度  $h_3$  在 380~780 nm,薄膜折射率  $n_3$  在 1.5~1.7 范围内  $S_T^{\max}$  的等高线图,图中两条虚线所夹区域为模式转换区。可以看出,灵敏度  $S_T^{\max}$  在一定范围内较其他区域有更高的数值,随着薄膜折射率和膜厚的变化,灵敏度  $S_T^{\max}$  的等高线形成了两条如图所示的高灵敏的参数带,即在这

两条参数带中的  $S_T^{\max}$  普遍较大,当 LPFG 敏感薄膜传感器的薄膜参数处于这两条参数带时,将具有高灵敏度。将两条高灵敏参数带与图中虚线划分的范围比较,可以发现,两条参数带处于不同的区域。其中,范围较宽的参数带处于靠近模式转换区域,而范围较窄的参数带则处于模式转换区内,并且靠近模式转换区参数带具有较高的灵敏度。

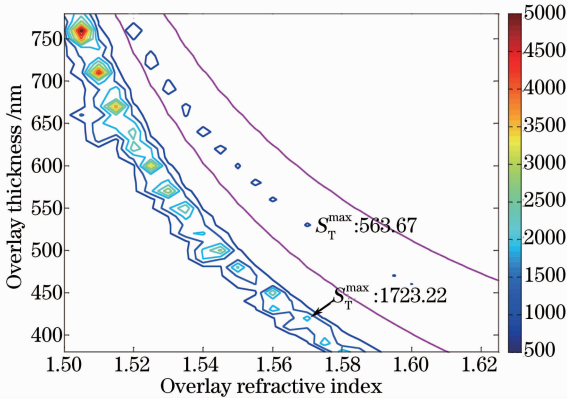


图 5 膜厚 380~780 nm, 折射率  $n_3=1.5\sim 1.7$  范围内最大灵敏度等高线图( $\Lambda=450\ \mu\text{m}$ )

Fig. 5 Contour lines in the region of thickness from 380 nm to 780nm and refractive index from 1. 5 to 1. 7 ( $\Lambda=450\ \mu\text{m}$ )

当薄膜参数一定时,光栅周期的变化也会对镀膜 LPFG 的透射谱产生影响,使衰减峰发生改变,从而改变传感器灵敏度。因此,下面将针对光栅周期及膜厚对灵敏度的影响进行讨论。图 5 中选择的光栅周期为  $450\ \mu\text{m}$ ,当薄膜折射率为 1.57 时,在膜厚为 420 nm(靠近模式转换区)和 530 nm(模式转换区)两处具有较高灵敏度,其值分别为 1723.22 和 563.67。选定薄膜折射率为 1.57,改变光栅周期以及薄膜厚度,进一步考察灵敏度的变化,以获得更理想的设计参数。

图 6 给出了不同的光栅周期  $\Lambda$ 、薄膜厚度  $h_3$  在其他给定光栅结构参量及入射波长 1390~1420 nm 范围内对应灵敏度  $S_T$  的最大值  $S_T^{\max}$ 。薄膜厚度  $h_3$  在 380~780 nm,光栅周期  $\Lambda$  在 300~900  $\mu\text{m}$  之间。图中可以看出,对于不同的  $(\Lambda, h_3)$  组合,所能达到的最大灵敏度  $S_T^{\max}$  各不相同,  $S_T^{\max}$  在某些特定  $(\Lambda, h_3)$  组合时可以达到很高值。

图 7 给出了薄膜折射率为 1.57,薄膜厚度  $h_3$  在 380~780 nm,光栅周期  $\Lambda$  在 300~900  $\mu\text{m}$  范围内灵敏度  $S_T$  的最大值  $S_T^{\max}$  的等高线图。图中可以看出,在膜厚约为 400~440 nm 范围内(靠近模式转

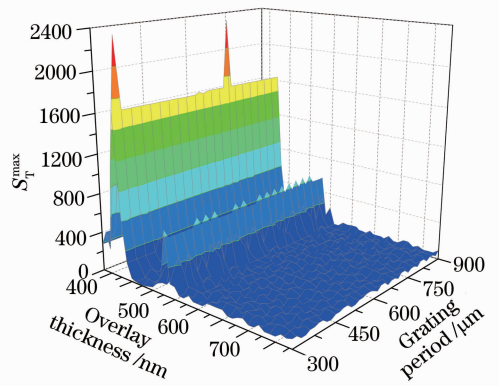


图 6 膜厚 380~780 nm,光栅周期  $\Lambda=300\sim 900\ \mu\text{m}$  范围内最大灵敏度 ( $n_3=1.57$ )

Fig. 6 Maximum sensitivities in the region of thickness from 380 nm to 780nm and grating period from 300  $\mu\text{m}$  to 900  $\mu\text{m}$  ( $n_3=1.57$ )

换区),无论光栅周期取何值,  $S_T^{\max}$  比膜厚在 520~550 nm 范围内(模式转换区)的高,且光栅周期为 310 和 690  $\mu\text{m}$  附近处  $S_T^{\max}$  具有最大值 2358.58。

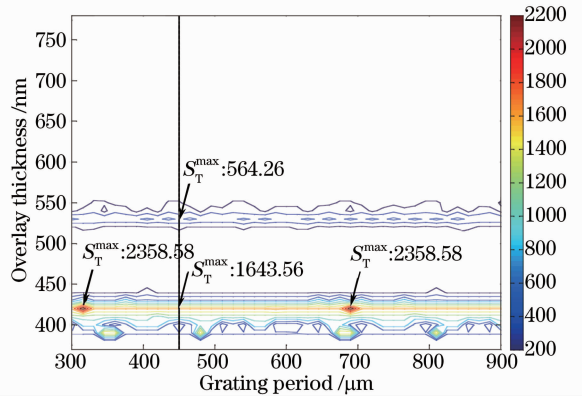


图 7 膜厚 380~780 nm,光栅周期  $\Lambda=300\sim 900\ \mu\text{m}$  范围内最大灵敏度等高线图 ( $n_3=1.57$ )

Fig. 7 Contour lines in the region of thickness from 380 nm to 780 nm and grating period from 300  $\mu\text{m}$  to 900  $\mu\text{m}$  ( $n_3=1.57$ )

根据图 5 和图 7 可以选择设计高灵敏度 LPFG 敏感薄膜传感器所需材料的折射率、膜厚及光栅周期。表 1 给出了图 5、图 7 中描绘的镀敏感膜 LPFG 靠近转换区及转换区内几个典型参数组合的灵敏度及相应的薄膜折射率分辨率,对应的折射率分辨率由  $\sigma_T = S_T^{-1} n_3 \Delta T / T$  计算得到。对于常用的光谱检测仪器,透射率  $T$  的变化率  $\Delta T / T$  的测量精度取  $10^{-3}$ 。根据表 1 的结果,选择合适的薄膜折射率、膜厚、入射波长和光栅周期,该传感器对折射率的最小分辨率可以达  $10^{-7}$ 。

表 1 镀膜敏感膜 LPFG 几个典型的光学参量值及其灵敏度和分辨率

Table 1 Typical optical parameters and relevant sensitivity and resolution of coated LPFG

Overlay thickness /nm	Overlay refractive index	Grating period / $\mu\text{m}$	Sensitivity $S_T$	Resolution $\sigma_T$	Wavelength $\lambda$ /nm
760	1.505	450	5280.76	$2.85 \times 10^{-7}$	1417
500	1.545	450	2626.48	$5.88 \times 10^{-7}$	1417
420	1.57	450	1823.22	$9.11 \times 10^{-7}$	1417
420	1.57	315	2358.58	$6.66 \times 10^{-7}$	1413

### 3.2 波长偏移型

以下讨论利用波长偏移型表征的灵敏度进行的优化设计。图 8 给出了不同的  $n_3$ 、 $h_3$  在给定光栅结构参量及入射波长 1390~1420 nm 范围内对应的由波长偏移表征的灵敏度  $S_\lambda$  的最大值  $S_\lambda^{\max}$ 。薄膜厚度  $h_3$  在 380~780 nm 之间，薄膜折射率  $n_3$  在 1.5~1.7 之间。从图 8 可以看出，对于不同的 ( $n_3$ 、 $h_3$ ) 组合，所能达到的最大灵敏度  $S_\lambda^{\max}$  各不相同， $S_\lambda^{\max}$  在某些特定的 ( $n_3$ 、 $h_3$ ) 组合区域时可以达到较大值。

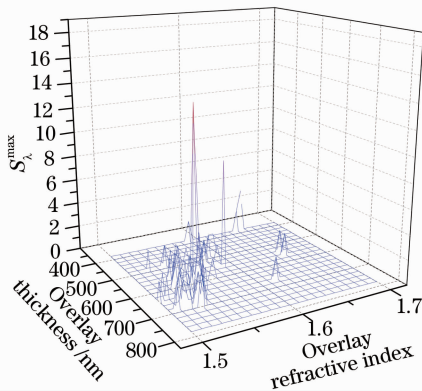


图 8 膜厚 380~780 nm, 折射率  $n_3 = 1.5 \sim 1.7$  范围内最大灵敏度 ( $\Lambda = 450 \mu\text{m}$ )

Fig. 8 Maximum sensitivities in the region of thickness from 380 nm to 780 nm and refractive index from 1.5 to 1.7 ( $\Lambda = 450 \mu\text{m}$ )

图 9 给出了薄膜厚度  $h_3$  在 380~780 nm, 薄膜折射率  $n_3$  在 1.5~1.7 范围内  $S_\lambda^{\max}$  的等高线图。图中两条虚线所夹区域为模式转换区。从图 9 可以看出，高灵敏度的参数组合多数都集中在模式转

换区内，在靠近转换区附近也有少数高灵敏度参数组合，但是其灵敏度都没有模式转换区内的高。

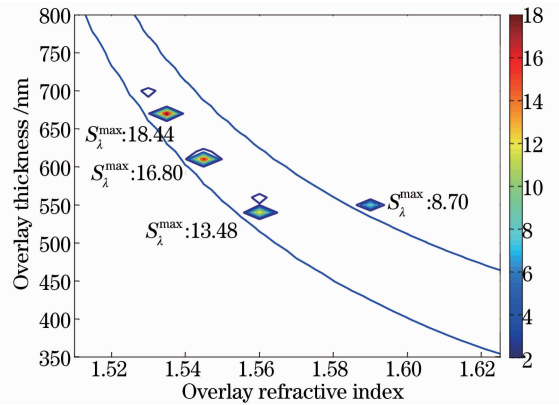


图 9 膜厚 380~780 nm, 折射率  $n_3 = 1.5 \sim 1.7$  范围内最大灵敏度等高线图 ( $\Lambda = 450 \mu\text{m}$ )

Fig. 9 Contour lines in the region of thickness from 380 nm to 780 nm and refractive index from 1.5 to 1.7 ( $\Lambda = 450 \mu\text{m}$ )

从图 9 中可以选择设计高灵敏度 LPFG 敏感薄膜传感器所需材料的折射率和膜厚。同样考虑到光栅周期会影响镀膜 LPFG 传感器的灵敏度，可以选取图 9 中高灵敏度的薄膜参数组合，通过改变光栅周期，以期获得更高灵敏度所对应的结构参数。表 2 给出了图 9 中描绘的镀膜敏感膜 LPFG 靠近转换区及转换区内几个典型参数组合的灵敏度及相应的薄膜折射率分辨率，对应的折射率分辨率由  $\sigma_\lambda = S_\lambda^{-1} n_3 \Delta\lambda / \lambda$  计算得到。对于常用的光谱检测仪器，谐振波长测量精度  $\Delta\lambda$  取 0.01 nm。从表中可以看出，选择合适的薄膜参数和入射波长，该传感器对折射率的最小分辨率可达  $10^{-7}$ 。

表 2 镀膜敏感膜 LPFG 几个典型的光学参量值及其灵敏度和分辨率

Table 2 Typical optical parameters and relevant sensitivity and resolution of coated LPFG

Overlay thickness /nm	Overlay refractive index	Grating period / $\mu\text{m}$	Sensitivity $S_\lambda$	Resolution $\sigma_\lambda$	Wavelength $\lambda$ /nm
670	1.535	450	18.44	$5.97 \times 10^{-7}$	1394
610	1.545	450	16.80	$6.48 \times 10^{-7}$	1419
540	1.56	450	13.4805	$8.19 \times 10^{-7}$	1412

## 4 结 论

根据模式转换的特点,通过考察模式转换区及其附近镀敏感膜 LPFG 透射谱的折射率响应特性,给出了针对波长偏移和透射率变化两种检测类型的传感器灵敏度随薄膜参数以及光栅参数的变化关系。通过优化设计,给出了高灵敏度对应的最佳薄膜参数设计参数带,以及最佳膜层厚度与光栅周期匹配区。从透射率变化型与波长偏移型镀膜 LPFG 传感器的结构优化分析可知,工作在模式转换区的 LPFG 更适合于制作波长偏移型的传感器,而工作在模式转换区附近则更适合于制作透射率变化型传感器。选择合适的膜层参数与光栅参数,无论通过检测波长偏移还是透射率变化,镀敏感膜 LPFG 传感器对薄膜折射率的分辨率均可达  $10^{-7}$  以上。

## 参 考 文 献

- 1 N D Rees, S W James, R P Tatam, *et al.*. Optical fiber long-period gratings with Langmuir-Blodgett thin-film overlays[J]. *Opt Lett*, 2002, 27(9): 686–688.
- 2 I Del Villar, I R Matias, F J Arregui. Optimization of sensitivity in long period fiber gratings with overlay deposition[J]. *Opt Express*, 2004, 13(1): 56–69.
- 3 Yu Xiujuan, Zhang Min, Wang Liwei, *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.
- 4 P Pilla, C Trono, F Baldini, *et al.*. Giant sensitivity of long period gratings in transition mode near the dispersion turning point: an integrated design approach[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(19): 4152–4154.
- 5 Z T Gu, Y P Xu, K Gao. Optical fiber long-period grating with sol-gel coating for gas sensor[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(16): 2405–2407.
- 6 Y Qian, Y S Yu, Q S Li, *et al.*. High sensitive long period fiber grating sensor for detection of nitrite[J]. *Chem Res Chinese Universities*, 2009, 25(5): 624–627.
- 7 J C Yang, C Y Tao, X M Li, *et al.*. Long-period fiber grating sensor with a styrene-acrylonitrile nano-film incorporating cryptophane A for methane detection[J]. *Opt Express*, 2011, 19(15): 14696–14706.
- 8 S M Tripathi, W J Bock, P Mikulic, *et al.*. Long period grating based biosensor for the detection of Escherichia coli bacteria[J]. *Biosens Bioelectron*, 2012, 35(1): 308–312.
- 9 Zhang Zijia, Xu Autao. Sensitivity of the thin-cladding long period fiber gratings to refractive index[J]. *Chinese J Sensors & Actuators*, 2009, 22(8): 1105–1108.  
张自嘉, 许安涛. 薄包层长周期光纤光栅的折射率传感特性[J]. *传感技术学报*, 2009, 22(8): 1105–1108.
- 10 Zhang Le, Wu Bo, Ye Wen, *et al.*. Highly sensitive fiber-optic vibration sensor based on frequency-locking of a FBG Fabry-Perot cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0406006.  
张乐, 吴波, 叶雯, 等. 基于光纤光栅法布里-珀罗锁频原理的高灵敏度光纤振动传感器[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0406006.
- 11 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.
- 12 Zhao Minfu, Zhang Guiju, Ma Difeng. Single-ended LPFG refractive index sensor based on metal-coated surface plasma resonance[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(7): 144–150.
- 13 Gu Zhengtian, Lan Jinlong. 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.
- 14 T Erdogan. Cladding-mode resonance in short- and long-period fiber grating filter[J]. *J Opt Soc Am A*, 1997, 14(8): 1760–1773.

栏目编辑: 王晓琰