

# 镀金属两层膜系长周期光纤光栅模式转换与折射率响应

顾铮先 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,研究了镀金属两层膜系长周期光纤光栅(LPFG)的模式转换及其折射率响应特性。从表面等离子体共振(SPR)的激励条件和模式转换发生条件出发,指出镀金属两层膜系 LPFG 中的 SPR 和模式转换不会同时发生,在此基础上分析了镀金属两层膜系 LPFG 包层模有效折射率随敏感薄膜厚度的变化,发现镀金属两层膜系 LPFG 的模式转换区域比镀膜 LPFG 的转换区域要宽,且模式转换区域内第一次转换时的有效折射率变化斜率比镀膜 LPFG 的大,意味着在该区域其对敏感膜层的变化有更高的响应。考察了金属薄膜厚度对镀金属两层膜系 LPFG 包层模有效折射率的影响,结果表明,随着金属薄膜厚度的增加,第一次转换时有效折射率的变化斜率逐渐增加。分析了第一次转换时镀金属两层膜系 LPFG 透射谱对敏感薄膜折射率变化的响应特性,结果表明,镀金属两层膜系 LPFG 传感器对敏感薄膜折射率的灵敏度明显高于镀膜 LPFG,对敏感薄膜折射率的灵敏度的分辨率可达  $10^{-6}$ 。

**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/AOS201434.0406005

## Mode Transition and Refractive Index Response in Long-Period Fiber Grating Coated with Double-Layer Overlays Including Metal Film

Gu Zhengxian 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, the mode transition in long-period fiber grating (LPFG) coated with double-layer overlays including metal film and refractive response characteristics of overlay thickness have been studied. According to the excitation condition of surface plasmon resonance (SPR) and the occurrence condition of the mode transition, it is pointed out that its SPR and the mode transition do not occur at the same time, based on which, the changes of the efficient index of LPFG coated with double-layer overlays including metal film with sensing film thickness are analyzed, and it is obtained the mode transition zone of LPFG coated with double-layer overlays including metal film is wider than that of coated LPFG, and the slope of the efficient index of the first transition in the mode transition zone is bigger than that of coated LPFG, which means that there are higher responses for the variations of the sensing film thickness in this zone. The influences of metal film thickness on the refractive index of LPFG coated with double-layer overlays including metal film are further investigated. The result shows that the slope of efficient index increases gradually with the increase of the metal film thickness in the first transition of the first mode transition zone. The response characteristics of transmission spectrum of LPFG coated with double-layer overlays including metal film with sensing film refractive index in the first mode transition are investigated. The results indicate that sensitivity of sensing film refractive index of LPFG coated with double-layer overlays including metal film is higher than that

**收稿日期**: 2013-10-20; **收到修改稿日期**: 2013-11-21

**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

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 [www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)

of coated LPFG, and the resolution of the sensitivity of sensing film refractive index can be  $10^{-6}$ .

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

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

## 1 引 言

Rees 等<sup>[1]</sup>通过在长周期光纤光栅(LPFG)外镀一层比光纤包层折射率高的薄膜,首次观察到谐振波长随薄膜厚度变化呈现跳变的现象。随后 Villar 等<sup>[2]</sup>提出了模式转换的观点,圆满地解释了谐振波长的跳变现象,指出当薄膜增至一定厚度时,低阶包层模式将进入薄膜层中传输,同时原高阶模式逐阶取代低阶模式。

基于模式转换情况下镀膜 LPFG 对环境折射率有更高的响应<sup>[3-4]</sup>,本课题组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,即模式转换同样可用于增强镀膜 LPFG 对敏感薄膜折射率的响应度<sup>[5]</sup>。近年来,有关镀金属膜 LPFG 传感器的研究屡见报道,当镀金属膜 LPFG 满足等离子体波(SPW)激励条件时将发生表面等离子体激元共振(SPR),从而提高相应的折射率响应度<sup>[6-9]</sup>。但是,有关模式转换对镀金属膜 LPFG 折射率响应的影响未见报道。一方面,模式转换与 SPR 效应是否可能在镀金属膜 LPFG 中共存有必要给出正确的判断和解释,另一方面,模式转换是否可提高镀金属膜 LPFG 对薄膜折射率的响应也尤为值得关注。

本文基于耦合模理论,从 SPR 的激励条件和模式转换的发生条件出发,指出镀金属两层膜系 LPFG 中的 SPR 和模式转换的不可共存性。在此基础上分析镀金属两层膜系 LPFG 包层模有效折射率随敏感膜厚度的变化,观察模式转换区域及第一次转换的斜率,比较其与镀敏感膜 LPFG 的异同,从而明确处于模式转换区的镀金属两层膜系 LPFG 较镀敏感膜 LPFG 具有更好的折射率响应。并进一步考察金属膜厚对镀金属两层膜系 LPFG 包层模有效折射率的影响,模式转换区第一次转换时镀金属两层膜系 LPFG 透射谱随敏感膜折射率的响应特性,并采用透射率相对变化表征该 LPFG 传感器的灵敏度,给出其对敏感薄膜折射率的分辨率。

## 2 理论分析

### 2.1 镀金属膜两层膜系 LPFG 结构

在 LPFG 包层外镀一层金属薄膜后,继续在金属薄膜外镀一层敏感薄膜,即得到镀金属两层膜系

LPFG,也称为镀金属薄膜五层结构 LPFG,其结构示意图如图 1 所示。 $a_1$  和  $a_2$  分别为纤芯与包层半径, $a_3$  为金属薄膜半径, $a_4$  为敏感薄膜半径, $h_3 = a_3 - a_2$  为金属薄膜厚度, $h_4 = a_4 - a_3$  为敏感薄膜厚度, $n_1, n_2, n_3, n_4$  和  $n_5$  分别表示纤芯、包层、金属薄膜、敏感薄膜和环境的折射率。如无特殊说明,模拟计算采用的光纤结构参数如下: $n_1 = 1.4681, n_2 = 1.4628, n_3 = 0.559 + i9.81(\lambda = 1550 \text{ nm}), n_5 = 1.0, a_1 = 4.15 \mu\text{m}, a_2 = 62.5 \mu\text{m}$ 。光栅的结构参数如下:纤芯折射率改变量  $\sigma = 4 \times 10^{-4}$ 、光栅长度  $L = 2.7 \text{ cm}$ 、光栅周期  $\Lambda = 450 \text{ nm}$ 。

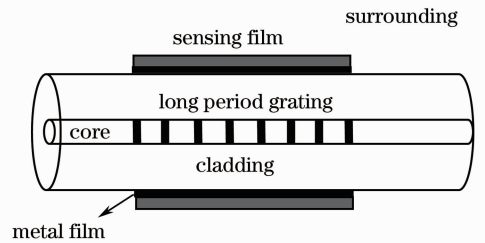


图 1 镀金属两层膜系 LPFG 结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of LPFG coated with double-layer overlays including metal film

### 2.2 镀金属两层膜系 LPFG 中 SPR 效应的激励条件

SPR 是沿着金属与介质界面的等离子体激元波激励的结果,其激励条件由金属与介质的介电常数、入射光波的波长和角度共同决定,该条件只有 TM 波才能满足<sup>[10]</sup>。表面等离子体波(SPW)与入射光波的相位发生匹配是 SPR 的激发条件。由此,考察相位匹配条件是研究 SPR 的关键。

SPW 的传播常数为<sup>[11]</sup>

$$k_{sp} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_{1r}\epsilon_2}{\epsilon_{1r} + \epsilon_2}}, \quad (1)$$

式中  $\omega$  为入射光波的频率, $c$  为光速, $\epsilon_{1r}$  为金属薄膜复介电常数的实部, $\epsilon_2$  为被测介质的介电常数。

对于 LPFG 中模式的传播常数为  $k_m = \frac{\omega}{c} n_{eff}$ , 其中  $n_{eff}$  为模式的有效折射率,其数值由镀金属两层膜系 LPFG 的本征方程求得。

由相位匹配可知,要在镀金属两层膜系 LPFG 中激发 SPW,发生 SPR,需要有 SPW 和 LPFG 的传播常数相等,即

$$k_{sp} = k_m, \quad (2)$$

$$\frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_{1r}\epsilon_2}{\epsilon_{1r} + \epsilon_2}} = \frac{\omega}{c} n_{\text{eff}}. \quad (3)$$

由图 1 中镀金属两层膜系 LPFG 的折射率分布及折射率与介电常数的关系可知,对于金属薄膜  $\epsilon_{1r} = \text{Re}(n_{3r}^2 - n_{3i}^2) = -95.9236$ ,下标 r 和 i 分别表示

$$\text{实部和虚部}, \sqrt{\frac{\epsilon_{1r}\epsilon_2}{\epsilon_{1r} + \epsilon_2}} = \sqrt{\frac{n_4^2 \times (-95.9236)}{n_4^2 - 95.9236}}.$$

在镀金属两层膜系 LPFG 中,包层模有效折射率一般满足  $n_5 < n_{\text{eff}}^{\text{cl}} < n_2$ ,且  $n_{\text{eff}}^{\text{cl}} = n_2 \sin \theta$ , $\theta$  为光线入射至包层与薄膜介面处的入射角。为使镀金属两层膜系 LPFG 与 SPW 发生相位匹配,则应使

$$\sqrt{\frac{\epsilon_{1r}\epsilon_2}{\epsilon_{1r} + \epsilon_2}} = \sqrt{\frac{\epsilon_{1r}n_4^2}{\epsilon_{1r} + n_4^2}} = n_4 \sqrt{\frac{\epsilon_{1r}}{\epsilon_{1r} + n_4^2}} < n_2. \quad (4)$$

一般地,  $|\epsilon_{1r}| \gg |\epsilon_2|$ ,故  $\sqrt{\frac{\epsilon_{1r}}{\epsilon_{1r} + n_4^2}} > 1$ ,由此可知  $n_4 < n_2$ 。即在镀金属两层膜系 LPFG 中要发生 SPR 效应要求敏感薄膜的折射率小于包层折射率。

### 2.3 镀金属两层膜系 LPFG 中模式转换的发生条件

当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,将这种情况称为模式转换。而在镀膜 LPFG 柱形光波导结构中,薄膜层中传输模式的前提条件是薄膜的折射率大于薄膜两边介质的折射率,此时,当薄膜厚度达到某一特定值时,低阶包层模式将进入薄膜层中传输<sup>[5]</sup>,所以在镀金属两层膜系 LPFG 中发生模式转换的条件是敏感膜层的折射率大于包层的折射率及敏感膜厚达到某些特定的数值。

综上,在镀金属两层膜系 LPFG 中发生 SPR 效应的条件是敏感膜层的折射率小于包层折射率,然而敏感膜层的折射率大于包层折射率是发生模式转换的条件之一,由此,SPR 效应和模式转换在镀金属两层膜系 LPFG 中是不会同时发生的。两种效应的折射率分布如图 2 所示。

## 3 镀金属两层膜系 LPFG 的模式转换

### 3.1 镀金属两层膜系 LPFG 随敏感薄膜厚度变化的模式转换

运用德拜势能法,建立五层结构 LPFG 的本征方程<sup>[12]</sup>。当敏感薄膜折射率大于包层折射率时,采用与镀膜 LPFG 模式转换相同的方法,可以得到镀金属两层膜系 LPFG 随敏感薄膜厚度变化的模式转换情况。图 3 给出了金属膜厚为 10 nm 时,镀金属两层膜系 LPFG 包层模有效折射率随敏感膜厚

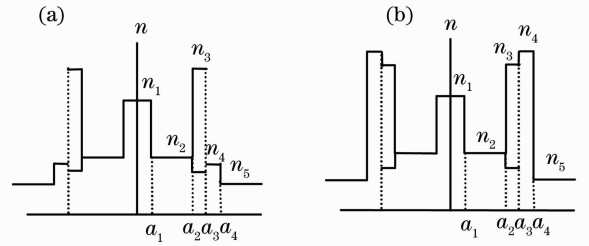


图 2 镀金属两层膜系结构 LPFG 折射率分布图。(a) SPR 效应对应的折射率分布; (b) 模式转换对应的折射率分布

Fig. 2 Refractive index profiles of LPFG coated with double-layer overlays including metal film. (a) Refractive index profile of SPR; (b) refractive index profile of mode transition

的变化图。从图中可以看出,随着敏感膜层厚度的增加,镀金属两层膜系在金属膜厚为 10 nm 时的两个模式转换区为 240~410 nm 和 1600~1780 nm,也就是说,第一个包层模式在敏感膜厚为 240 nm 时进入到敏感薄膜层中传输,第二、三、四个模式则依次在敏感膜厚为 410、1600、1780 nm 时进入到敏感薄膜层中传输。

图 4 给出了镀膜 LPFG 包层模有效折射率随敏感膜厚的变化图。对图 3 和图 4 进行分析可以得到镀金属两层膜系 LPFG 与镀膜 LPFG 模式转换的异同。比较图 3 和图 4,金属膜层厚度为 10 nm 的包层模有效折射率变化与镀膜 LPFG 包层模有效折射率变化比较接近,其第一个和第二个模式转换区域为 240~410 nm 和 1600~1780 nm,比镀膜 LPFG 包层模的转换区域 470~590 nm 和 1800~1960 nm 更宽,并且模式转换发生的敏感膜厚也变小了;镀金属两层膜系 LPFG 的第一个转换区内第一次转换的有效折射率变化要比镀膜 LPFG 的有效折射率变化斜率大,即当敏感膜层厚度处于第一个转换区第一次转换,且敏感膜层厚度发生变化时,镀金属两层膜系 LPFG 对敏感薄膜厚度的响应度要比镀膜 LPFG 的响应度高。

### 3.2 镀金属两层膜系 LPFG 随金属薄膜厚度变化的模式转换

图 4 中给出了镀膜 LPFG 的模式转换,镀膜 LPFG 是四层结构的 LPFG,此时金属膜厚为零,即  $h_3 = 0$ 。所以镀膜 LPFG 与镀金属两层膜系 LPFG 模式转换的某些不同点也体现了金属薄膜厚度对镀金属两层膜系 LPFG 模式转换的影响。为了进一步考察金属薄膜厚度变化对金属两层膜系 LPFG 模式转换的影响,图 5 给出了当金属薄膜厚度为

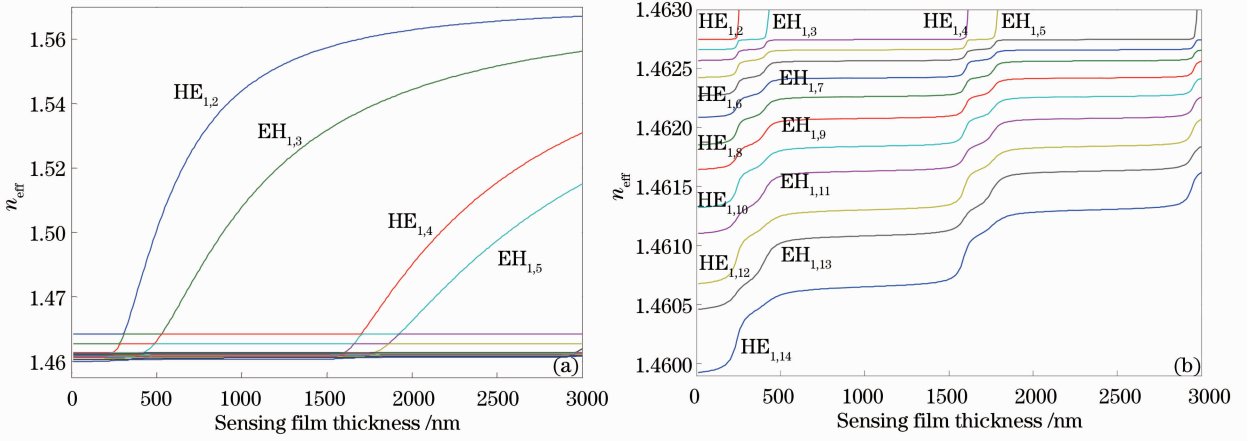


图 3 镀金属两层膜系 LPFG 包层模有效折射率随敏感膜厚度变化 ( $h_3 = 10 \text{ nm}$ )。 (a) 前 4 个包层模式; (b) 前 13 个包层模式  
 Fig. 3 Changes of effective refractive index in LPFG coated with double-layer overlays including metal film with the sensing film thickness ( $h_3 = 10 \text{ nm}$ ). (a) The first 4 cladding modes; (b) the first 13 cladding modes

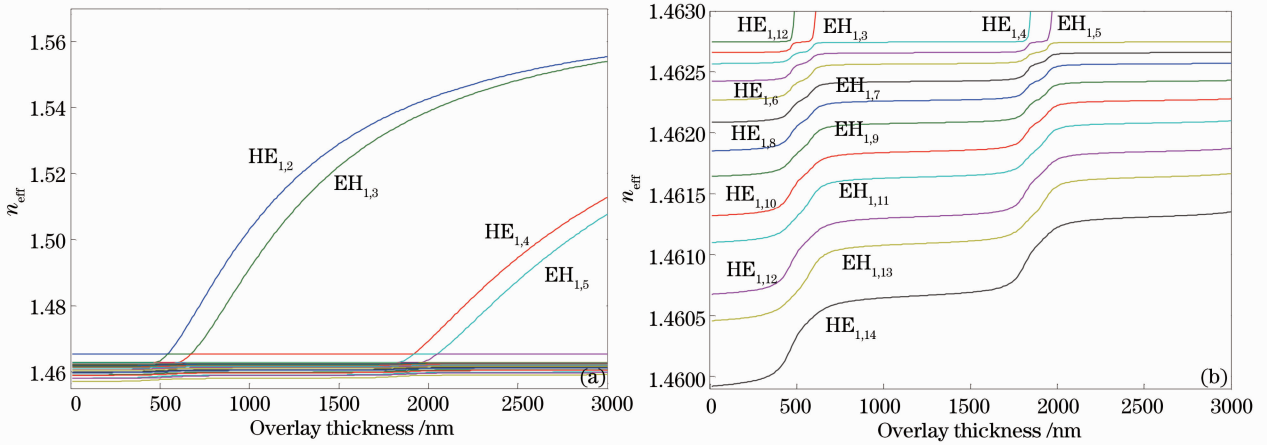


图 4 镀膜 LPFG 包层模有效折射率随薄膜厚度变化 ( $h_3 = 0$ )。 (a) 前 4 个包层模式; (b) 前 13 个包层模式  
 Fig. 4 Changes of effective refractive index in film coated LPFG with the overlay thickness ( $h_3 = 0$ ). (a) The first 4 cladding modes; (b) the first 13 cladding modes

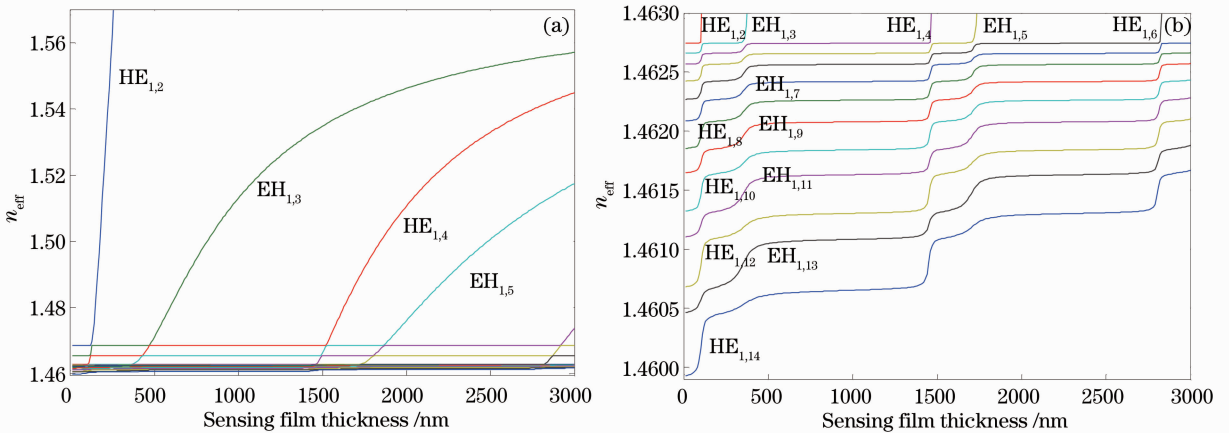


图 5 镀金属两层膜系 LPFG 包层模有效折射率随敏感膜厚度变化 ( $h_3 = 20 \text{ nm}$ )。 (a) 前 4 个包层模式; (b) 前 13 个包层模式  
 Fig. 5 Changes of effective refractive index in LPFG coated with double-layer overlays including metal film with the sensing film thickness ( $h_3 = 20 \text{ nm}$ ). (a) The first 4 cladding modes; (b) the first 13 cladding modes

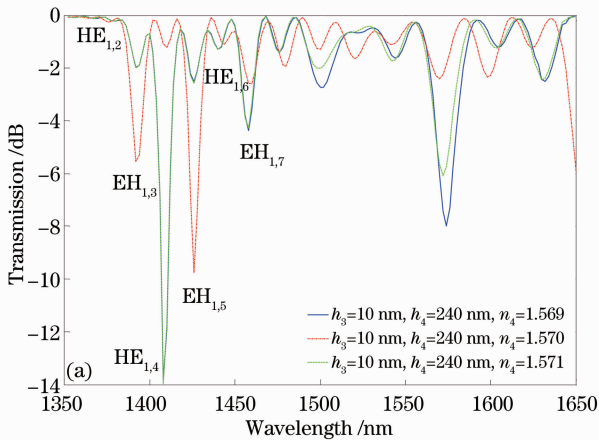


20 nm 时,镀金属两层膜系 LPFG 包层模有效折射率随敏感薄膜厚度的变化图。

图 4、图 3 和图 5 分别给出了金属薄膜厚度为 0、10、20 nm 时,镀金属两层膜系 LPFG 包层模有效折射率随敏感膜层厚度变化的模式转换。比较三幅图可以看出,随着金属薄膜厚度的增加,模式转换的区域由窄变宽,同时每个模式转换区域内第一次转换的有效折射率随敏感薄膜厚度的变化斜率也逐渐增大。

#### 4 镀金属两层膜系 LPFG 模式转换附近的透射谱

镀金属两层膜系 LPFG 的透射谱可以通过数值



求解耦合模方程<sup>[13]</sup>得到。设初值条件为  $A_{co}(0)=1$ ,  $A_{cl}(0)=0$ , 则光栅透射率可以表示为

$$T = A_{co}(L)/A_{co}(0). \quad (5)$$

当镀金属两层膜系 LPFG 处于模式转换区域时,由于敏感薄膜厚度的变化将使包层模的有效折射率发生改变,从而影响镀金属两层膜系 LPFG 的透射谱。图 6 给出了敏感薄膜折射率及敏感膜层厚度处于第一次模式转换时,不同金属膜层厚度的镀金属两层膜系 LPFG 的敏感膜层折射率响应曲线,图 6(a)、(b)中的金属薄膜厚度分别为 10 nm 和 20 nm,考察的敏感膜层厚度处于第一次模式转换附近。

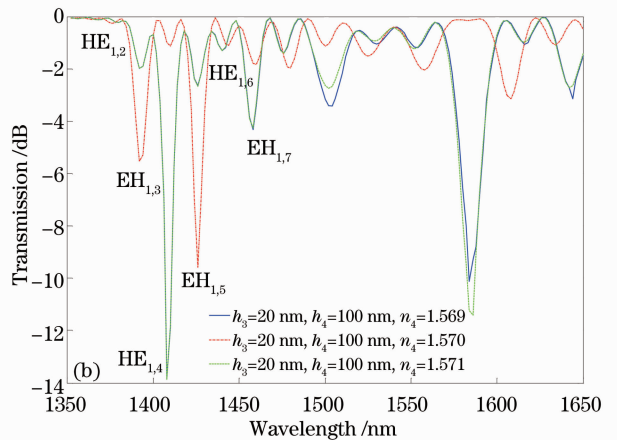


图 6 不同折射率对应的镀金属两层膜系 LPFG 透射谱图。(a)金属薄膜厚度 10 nm; (b)金属薄膜厚度 20 nm

Fig. 6 Transmission spectra in LPFG coated with double-layer overlays including metal film with different refractive indexes.

(a) Metal film thickness of 10 nm; (b) metal film thickness of 20 nm

图 6(a)给出了金属薄膜厚度为 10 nm,敏感膜层厚度为 240 nm,敏感膜折射率分别为 1.569、1.570 和 1.571 对应的镀金属两层膜系 LPFG 的透射谱图。从图 3 的分析中可以知道,敏感膜厚为 240 nm、敏感折射率为 1.570 时,镀金属两层膜系 LPFG 发生第一次模式转换,所以敏感膜厚为 240 nm 时已经发生了模式转换,其对应的透射谱线(图中绿色曲线)的模式标注要比其他两条谱线的高一个模式,例如在蓝色和红色曲线中标注  $HE_{1,2}$  的波长处,绿色曲线在此波长处应标注  $EH_{1,3}$ 。同理,图 6(b)也应如此。

从图 6(a)、(b)中可以看出,当敏感膜层厚度处于第一次模式转换附近时,随着敏感膜层折射率的变化,引起各模式的衰减峰发生不同程度的波长偏移和峰值变化。而金属薄膜厚度的变化,也会引起各模式衰减峰的变化,从而影响镀金属两层膜系 LPFG 的灵敏度。为了表征镀金属两层膜系 LPFG

传感器灵敏度的高低,定义透射率  $T$  的梯度与敏感膜层折射率  $n_4$  的梯度之比的绝对值为传感器对膜层厚度的灵敏度  $S_T$ ,即<sup>[14]</sup>

$$S_T = \left| \frac{\partial T}{\partial n_4} \right|. \quad (6)$$

为更加准确地得到金属薄膜折射率变化对镀金属两层膜系 LPFG 灵敏度的影响,运用(6)式计算各金属薄膜厚度对应的镀金属两层膜系 LPFG 传感器的灵敏度,结果如表 1 所示。

表 1 给出了图 6 中描绘的镀金属两层膜系 LPFG 包层模  $EH_{1,7}$  靠近转换区的灵敏度,采用灵敏度形式对应的敏感膜厚分辨率由  $\delta_T = S_T^{-1} n_4 \Delta T / T$  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  $10^{-3}$ 。从表中可以看出,随着金属薄膜厚度的增加,采用透射率相对变化进行检测,镀金属两层膜系 LPFG 传感器

对敏感薄膜折射率的灵敏度不断增大,可以达到 $10^3$ 以上,而敏感薄膜折射率分辨率数值则逐渐减

小,达到 $10^{-6}$ ,与镀膜 LPFG 的灵敏度相比,提高了一个数级,这也验证了第 3 节的分析结果。

表 1 镀金属两层膜系 LPFG 在靠近转换区的灵敏度

Table 1 Sensitivities of LPFG coated with double-layer overlays including metal film in the vicinity of mode transition zone

Cladding mode	Metal film thickness /nm	Sensing film thickness /nm	$S_T$	$\delta_T$	$\lambda$ /nm
EH <sub>1,7</sub>	0	470	$0.86 \times 10^2$	$1.81 \times 10^{-5}$	1458
	10	240	$6.45 \times 10^2$	$2.43 \times 10^{-6}$	1458
	20	100	$9.21 \times 10^2$	$1.70 \times 10^{-6}$	1458
	30	40	$1.01 \times 10^3$	$1.56 \times 10^{-6}$	1458

## 5 结 论

研究了镀金属两层膜系长周期光纤光栅的模式转换及其折射率响应特性。从 SPR 的激励条件和模式转换的发生条件出发,理论上指出了镀金属两层膜系 LPFG 中的 SPR 和模式转换的不可共存性。分析了镀金属两层膜系 LPFG 包层模有效折射率随敏感薄膜厚度的变化,比较其与镀敏感膜 LPFG 的异同,发现处于模式转换区的镀金属两层膜系 LPFG 较镀敏感膜 LPFG 具有更好的折射率响应。进一步考察了金属薄膜厚度对镀金属两层膜系 LPFG 包层模有效折射率的影响,结果表明,随着金属薄膜厚度的增加,第一次转换时有效折射率的变化斜率逐渐增加。第一次转换时镀金属两层膜系 LPFG 透射谱对敏感薄膜折射率变化的响应特性表明,镀金属两层膜系 LPFG 传感器对敏感薄膜折射率的灵敏度比镀膜 LPFG 高一个量级,对敏感薄膜折射率的灵敏度的分辨率达 $10^{-6}$ 。

## 参 考 文 献

- 1 N D Rees, S W James, R P Tatam. Optical fiber long-period gratings with Langmuir-Blodgett thin-film overlays [J]. Opt Lett, 2002, 27(9): 686–688.
- 2 I D Villar, M Achaerandio, I R Matias, *et al.*. Deposition of overlays by electrostatic self-assembly in long-period fiber gratings [J]. Opt Lett, 2005, 30(7): 720–722.
- 3 Yu Xiujian, 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 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.
- 6 Y J He, Y L Lo, J F Huang. Optical-fiber surface-plasmon-resonance sensor employing long-period fiber gratings in multiplexing [J]. J Opt Soc Am B, 2006, 23(5): 801–811.
- 7 G J Zhang, B Cao, C H Wang, *et al.*. Optical resonance analysis of reflected long period fiber gratings with metal film overlay [C]. SPIE, 2008, 7134: 713438.
- 8 D F Ma, C H Wang, G J Zhang, *et al.*. Modeling of measurement sensitivity of refractive index based on surface plasmon resonance of LPFGs [C]. SPIE, 2009, 7381: 73812P.
- 9 T Schuster, R Herschel, N Neumann, *et al.*. Miniaturized long-period fiber grating assisted surface plasmon resonance sensor [J]. J Lightwave Technol, 2012, 30(8): 1003–1008.
- 10 B Liedberg, C Nylander, I Lundstrom. Surface plasmon resonance for gas detection and biosensing [J]. Sens Actuators. 1983, 4: 299–303.
- 11 Zhang Jiangtao, Gu Zhengtian. Principle and study progress of fiber optic chemical sensor based on surface plasmon resonance [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(10): 24–31.
- 张江涛, 顾铮先. 光纤表面等离子体共振光化学传感器的原理及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(10): 24–31.
- 12 Deng Chuanlu, Gu Zhengtian, Zhang Jiangtao. Resonant characteristics of long-period fiber grating coated with double-layer films including metal film [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(10): 2656–2664.
- 邓传鲁, 顾铮先, 张江涛. 金属镀层两层膜系长周期光纤光栅谐振特性研究[J]. 光学学报, 2009, 29(10): 2656–2664.
- 13 T Erdogan. Cladding-mode resonance in short-and-long-period fiber grating filters [J]. J Opt Soc Am A, 1997, 14(8): 1760–1773.
- 14 Z T Gu, Y P Xu. Design optimization of a long-period fiber grating with sol-gel coating for a gas sensor [J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18(11): 3530–3536.

栏目编辑: 史敏