

# 镀吸收型膜长周期光纤光栅模式转换与 折射率响应特性

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,研究了镀吸收型薄膜长周期光纤光栅(LPFG)的模式转换及其折射率响应特性。讨论了镀膜 LPFG 包层模有效折射率随薄膜厚度的响应特性,从模场分布和波导传输本质上统一了模式转换与模式跳变两种表述。在此基础上分析了镀吸收型薄膜情形下 LPFG 包层模有效折射率实部与虚部随膜厚及薄膜折射率的变化,给出并解释了高阶和低阶包层模发生的一步、二步模式转换情况,进一步考察了薄膜消光系数对模式转换区域的影响。结果表明,薄膜消光系数对模式转换区域变化的影响很小。最后研究了转换区及其附近区域的镀吸收型膜 LPFG 透射谱的折射率响应特性,发现靠近模式转换区相较于模式转换区,LPFG 对薄膜折射率分辨率高出近一个数量级,而模式转换区域采用简易的透射率相对变化进行检测,对薄膜折射率的分辨率也高达  $10^{-5}$  以上。

**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/AOS201333.0706003

## Mode Transition in Absorption Film Coated Long-Period Fiber Grating and Response Characteristics of Refractive Index

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 absorption film coated long-period fiber grating (LPFG) and response characteristics of refractive index are studied. The response characteristics of effective index of cladding mode for coated LPFG with overlay thickness are discussed, and the mode jump and mode transition are unified in mode field distribution and the essence of waveguide transmission. Based on this result, the change in absorption film coated of real and imaginary of effective index of cladding mode for LPFG coating absorption film with different overlay thicknesses and overlay refractive indexes is analyzed. The one step and two step of mode transition of the high order and low order cladding mode are given and explained. The effect of film extinction coefficient to mode transition zone is further investigated. The results show that the film extinction coefficient has little influence on the mode transition zone. Finally, the response characteristics of refractive index in LPFG coated absorption film are investigated in the mode transition zone and near the mode transition zone. The results indicate that resolution of film refractive index in mode transition is one order larger than that in vicinity of mode transition, and the resolution can be also available to  $10^{-5}$  in mode transition detected by transmittance change.

**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

自 Rees 等<sup>[1]</sup>首次设计研究镀膜长周期光纤光

栅(LPFG)结构以来,由于镀膜 LPFG 不仅改善了透射谱特性,而且拓展了 LPFG 的传感领域,因而

**收稿日期**: 2013-03-29; **收到修改稿日期**: 2013-05-02

**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

其研究受到了越来越多的关注<sup>[2-3]</sup>。近年来,为了提高镀膜 LPFG 传感器灵敏度,提出了利用薄包层结构<sup>[4]</sup>、两层膜系结构<sup>[5]</sup>、模式转换<sup>[6]</sup>等多种方法。其中,模式转换由于结构简单、灵敏度高、适用范围广等优点,被国内外研究人员广泛研究。

Rees 等<sup>[1]</sup>在 LPFG 外镀一层比光纤包层折射率高的薄膜,实验上测定了谐振波长随薄膜厚度变化的曲线,发现谐振波长随薄膜厚度变化呈现跳变的情况,理论上首次指出镀膜 LPFG 包层模随薄膜厚度变化将发生模式跳变。随后由模式跳变现象出发,Gu 等<sup>[7-8]</sup>对其附近的镀膜 LPFG 传输特性与灵敏度进行了研究。与此同时,Villar 等<sup>[9]</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。由此又引发了关于模式转换及其相关特性的研究<sup>[10]</sup>。对于模式跳变与模式转换两种表述观点是否一致,有必要澄清并统一说法,这对深入探讨镀膜 LPFG 尤为必要。另一方面,近年来模式转换的研究集中于镀非吸收型膜 LPFG 环境折射率传感器,于秀娟等<sup>[11-12]</sup>研究了在模式转换情况下镀膜 LPFG 对环境折射率的响应特性,表明在模式转换区镀膜 LPFG 对环境折射率具有较高的灵敏度。然而,对于应用更为广泛的镀敏感薄膜 LPFG 的折射率型传感器,研究其模式转换及其薄膜折射率的响应特性尤其重要,但有关这方面的研究尚未见报道。由于敏感薄膜通常具有一定的吸收性,因此研究该类型镀膜 LPFG 时,必须考虑薄膜消光系数对 LPFG 传输特性的影响,包括模式转换区域的变化

以及透射谱随薄膜折射率变化的响应。

本文基于耦合模理论,从镀膜 LPFG 包层模有效折射率随薄膜厚度的响应特性出发,解释模式转换与模式跳变两种表述的内在联系与一致性;在此基础上分析镀吸收型膜 LPFG 的模式转换区包层模式有效折射率实部与虚部随膜厚及薄膜折射率的变化,观察高阶和低阶包层模发生的一步、二步模式转换情况;进一步考察薄膜消光系数对模式转换的影响;最后分析转换区及其附近区域的镀吸收型膜 LPFG 透射谱的折射率响应特性。针对薄膜折射率变化引起透射谱衰减峰峰值及峰值位置的变化,给出不同的灵敏度定义形式,分析两个区域对薄膜折射率的分辨率,为制作和优化设计高灵敏度镀吸收型膜 LPFG 传感器提供理论指导。

## 2 理论分析

### 2.1 镀吸收型膜 LPFG 结构

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、薄膜和环境的折射率,且满足  $\text{Re}(n_3) > n_1 > n_2 > n_4$ ,  $\text{Re}(\cdot)$  表示取实部。如无特殊说明,模拟计算时采用的光纤结构参数如下: $n_1 = 1.4681$ ,  $n_2 = 1.4628$ ,  $n_3 = 1.57 + 0.0004i$ ,  $n_4 = 1$ ,  $a_1 = 4.15 \mu\text{m}$ ,  $a_2 = 62.5 \mu\text{m}$ ; 光栅的结构参数如下: $\sigma = 4 \times 10^{-4}$ ,  $L = 2 \text{ cm}$ ,  $\Lambda = 450 \text{ nm}$ , 其中  $\sigma$  表示光纤纤芯的平均折变量,  $L$  表示光栅长度,  $\Lambda$  表示纤芯折射率调制周期。

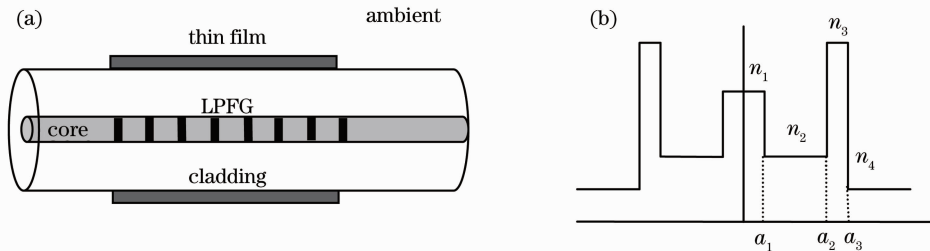


图 1 镀膜 LPFG 结构示意图。(a) 结构模型; (b) 折射率分布

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

### 2.2 镀膜 LPFG 模式跳变与模式转换

Rees 等<sup>[1]</sup>从实验上测定了谐振波长随薄膜厚度变化的曲线图,其中谐振波长随薄膜厚度变化曲线在一定的区域呈现出跳变的情况,并在理论上进行了深入的研究,发现镀膜 LPFG 包层模有效折射率随薄膜厚度变化也会在一定的区域发生跳变,称这种现象为模式跳变。

图 2 给出了模式跳变情况下镀膜 LPFG 的有效折射率  $n_{\text{eff}}$  随薄膜厚度的变化图,计算中使用 1550 nm 的波长,薄膜折射率  $n_3 = 1.57$ 。从图 2 中可以看出,随着薄膜厚度的增加,包层模式的有效折射率在某些薄膜厚度下会出现跳变。根据跳变的情况将薄膜厚度划分为:远离跳变区(A)、靠近跳变区(B)和跳变区(C)三个区域。随着薄膜厚度的进一步增加,将依

次出现第二、三个模式跳变区,即这三个区域将以 [ABCB] [ABCB]... 的形式周期性重复出现。

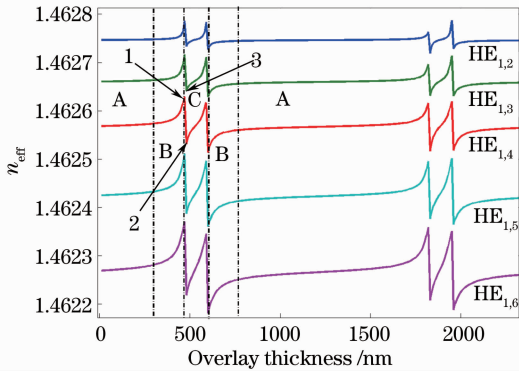


图 2 模式跳变情况下镀膜 LPFG 包层模有效折射率随薄膜厚度变化

Fig. 2 Change of effective refractive index with the overlay thickness under the mode jump

观察图 2 中包层模  $HE_{1,4}$ , 发现其首先在膜厚 470 nm 附近发生了跳变。其有效折射率从点 1 下跳变至点 2, 在点 1 之上有邻近的点 3, 为包层模  $EH_{1,3}$  有效折射率曲线上的点, 仔细考察点 1、2、3 对应的包层模式功率密度, 分别如图 3 所示。可以看出, 图 3(a) 中的功率密度值主要集中在包层中, 纤芯中分布较包层中低一些; 图 3(c) 中的功率密度分布与图 3(a) 类似, 主要集中在包层中, 纤芯中同样有较少的分布; 而图 3(b) 中的功率密度值分布与图 3(a) 相反, 主要集中在纤芯中, 包层中分布较纤芯中低一些。由以上功率密度分布的分析可以看出, 对于同一个模式  $HE_{1,4}$  从 1 点跳变至 2 点显然是不合理的。相反, 如果模式  $HE_{1,4}$  从 1 点跳变至 3 点则是合理的。由此, 先前关于模式跳变表述并不合理, 需要对其进行修正。

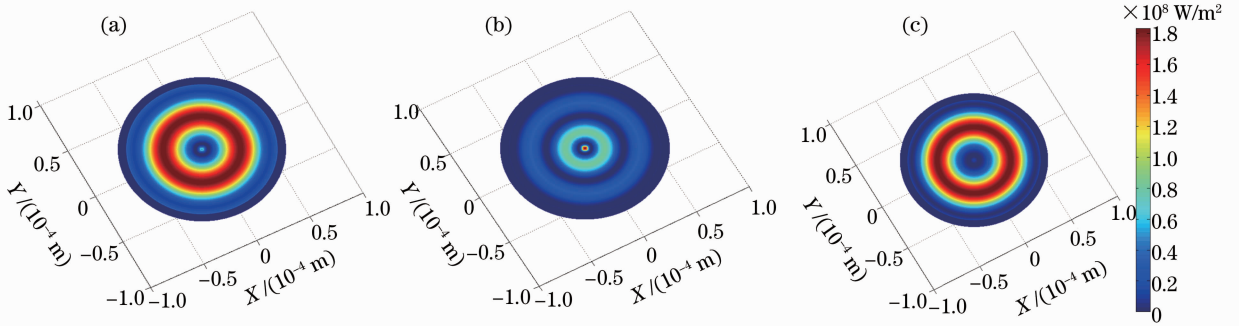


图 3 图 2 中 1、2、3 点对应的模式的功率密度图。(a) 点 1; (b) 点 2; (c) 点 3

Fig. 3 Power intensity of the mode corresponding to point 1, 2, 3 in Fig. 2. (a) Point 1; (b) point 2; (c) point 3

在上述镀膜 LPFG 柱形光波导结构中, 考虑到薄膜层中也可以传输模式, 则当包层模式进入薄膜层中传输时, 可以得到图 4 所示的包层模式有效折

射率随薄膜厚度的变化图。从图 4(a) 和 (b) 中可以看出, 随着薄膜厚度的增加, 包层模  $HE_{1,2}$  在薄膜厚度约为 470 nm 时, 率先进入薄膜层中传导; 与此同

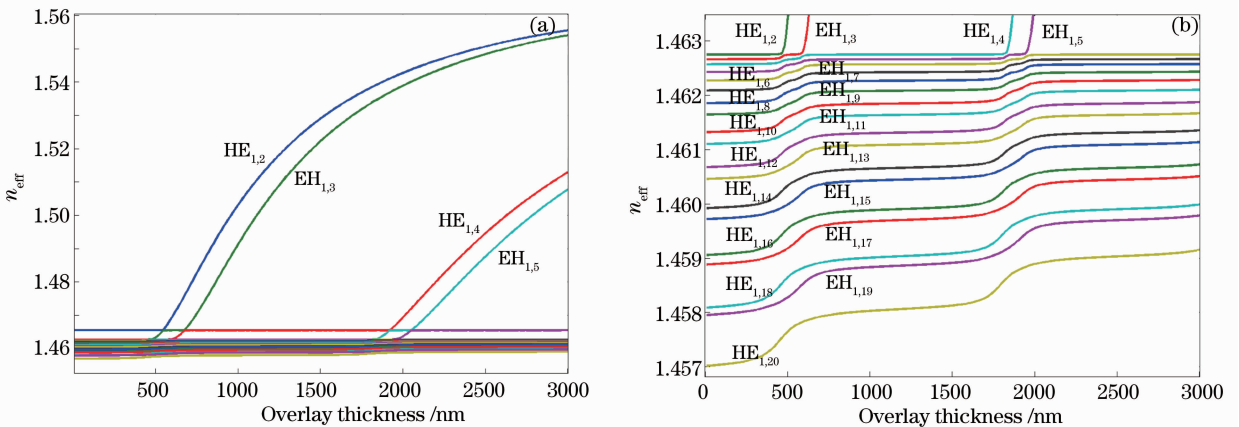


图 4 镀膜 LPFG 包层模有效折射率随薄膜厚度变化。(a) 前 4 个包层模式; (b) 前 19 个包层模式

Fig. 4 Change of effective refractive index in coated LPFG with the overlay thickness. (a) The first 4 cladding modes; (b) the first 19 cladding modes

时,高于  $HE_{1,2}$  的包层模式依次转换至比它低一阶的包层模式,包层模  $EH_{1,3}$  变为最低阶包层模式,这正与图 2 中分析的点 1 应跳至点 3 的情形相一致。随着薄膜厚度的进一步增加,最低阶包层模  $EH_{1,3}$  在薄厚约为 590 nm 时进入薄膜层中传导,高于  $EH_{1,3}$  的包层模式转换至比它低一阶的包层模式。由于在薄膜厚度 470~590 nm 间模式发生了两次转换,又称两步转换;随着薄膜厚度的增加,包层模  $HE_{1,4}$  和  $EH_{1,5}$  在膜厚约 1800 nm 和 1960 nm 处也进入薄膜层中传导。

综上分析可知,在模式跳变的基础上考虑包层模式在跳变区进入薄膜层中传输,即可得到模式转换的结果。可以认为,模式转换是对模式跳变的修正,两者在本质上是一致的。

### 3 镀吸收型膜 LPFG 的模式转换

#### 3.1 镀吸收型膜 LPFG 随薄膜厚度变化的模式转换

对于镀吸收型膜 LPFG 特征方程的求解,采用多元变量函数极小值的 Nelder-Mead 方法进行求根<sup>[13]</sup>。图 5 为在薄膜折射率实部大于包层折射率情况下,包层模式有效折射率实部随薄膜厚度变化图。包层模  $HE_{1,2}$  和  $EH_{1,3}$  在薄膜厚度约为 470 nm 和 590 nm 处时,开始进入到薄膜层中传导;包层模  $HE_{1,4}$  和  $EH_{1,5}$  也在薄膜厚度约为 1800 nm 和 1960 nm 处开始在薄膜层中传导。图 5 给出的包层模式有效折射率实部随薄膜厚度变化趋势和镀非吸收型薄膜 LPFG 情形是一致的<sup>[14]</sup>,但其有效折射率数值是有一定差别的。即当薄膜折射率虚部较小时,对模式转换并不会产生较大的影响。

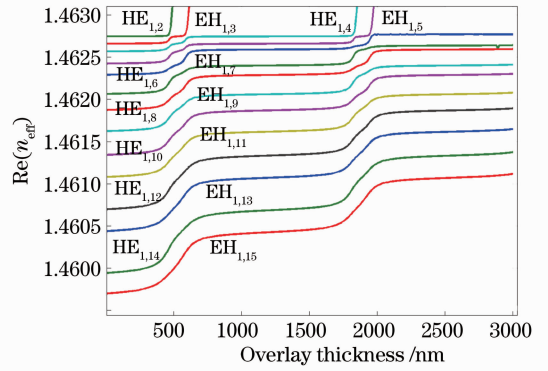


图 5 模式转换情况下镀吸收型膜 LPFG 前 14 个包层模式有效折射率实部随薄膜厚度变化

Fig. 5 Change of the first 14 cladding modes real effective refractive index in the LPFG coating absorption film with the overlay thickness under the mode transition

图 6 (a) 和 (b) 分别给出了包层模式  $HE_{1,6}$ 、 $EH_{1,7}$  和  $HE_{1,8}$  及较高阶包层模式  $EH_{1,13}$ 、 $EH_{1,14}$  和  $EH_{1,15}$  有效折射率虚部随薄膜厚度的变化图,  $Im(\bullet)$  表示取虚部。从图中可以看出,当膜厚模式发生转换时,有效折射率虚部将达到一个极大值。在包层模式  $HE_{1,2}$  和  $EH_{1,3}$  进入薄膜层中传输时,低阶包层模式  $HE_{1,6}$ 、 $EH_{1,7}$  和  $HE_{1,8}$  的有效折射率虚部随薄膜厚度变化曲线中出现两个相邻的峰;而较高阶包层模式  $EH_{1,13}$ 、 $EH_{1,14}$  和  $EH_{1,15}$  的有效折射率虚部也形成两个相邻峰,但两者重叠较多,边界不明显。以上两个有效折射率虚部峰体现的特征正对应于图 5 中的两步转换及一步转换情况。以上分析表明根据有效折射率虚部变化特征可以判断包层模式为一步转换或两步转换。

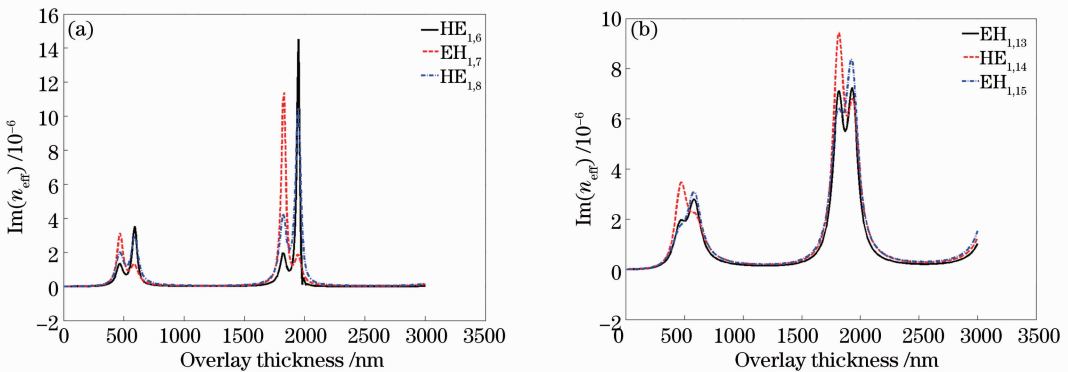


图 6 有效折射率虚部随薄膜厚度变化。(a)包层模  $HE_{1,6}$ 、 $EH_{1,7}$  和  $HE_{1,8}$ ; (b)包层模  $EH_{1,13}$ 、 $EH_{1,14}$  和  $EH_{1,15}$   
Fig. 6 Change of imaginary effective refractive index with overlay thickness. (a) Cladding modes  $HE_{1,6}$ ,  $EH_{1,7}$  and  $HE_{1,8}$ ; (b) cladding modes  $EH_{1,13}$ ,  $EH_{1,14}$  and  $EH_{1,15}$

### 3.2 镀吸收型膜 LPFG 随薄膜折射率变化的模式转换

图 7 给出了在薄膜厚度为 700 nm 时,包层模有效折射率实部随薄膜折射率的变化图。从图中可以看出,当薄膜厚度为 700 nm 时,包层模  $HE_{1,2}$  和  $EH_{1,3}$  分别在薄膜折射率实部约为 1.525 和 1.545 时开始进入薄膜层传输;包层模有效折射率实部随薄膜折射率变化与随薄膜厚度变化有相同的效果,即当薄膜折射率实部或薄膜厚度增加时,包层模都将在一定的条件下发生模式转换。

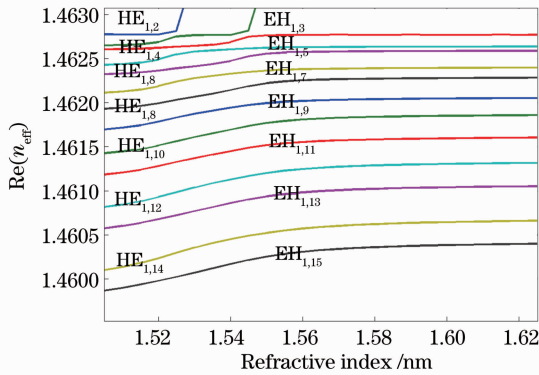


图 7 有效折射率实部随薄膜折射率变化 ( $h_3 = 700$  nm)  
Fig. 7 Change of real effective refractive index with the overlay refractive index ( $h_3 = 700$  nm)

### 3.3 镀吸收型膜 LPFG 随薄膜厚度及折射率变化的模式转换

图 8 给出了镀吸收型膜 LPFG 第一个模式转换区随薄膜折射率及薄膜厚度变化图。从图中可以看出,薄膜消光系数一定时,随着薄膜厚度的增加,发生模式转换区域对应的薄膜折射率将减少;而随着薄膜折射率的增加,发生模式转换区域对应的薄膜

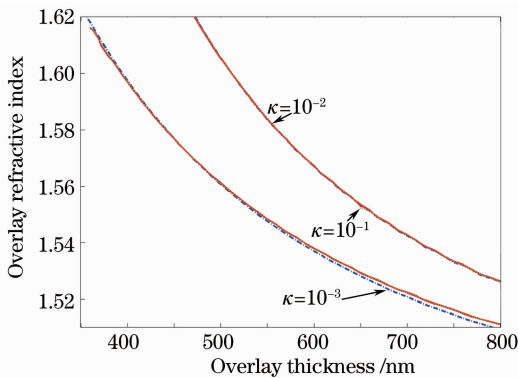


图 8 镀吸收型膜 LPFG 第一个模式转换区随薄膜折射率及薄膜厚度变化图

Fig. 8 Change of the first mode transition zone in the LPFG coating absorption film with the overlay refractive index and overlay thickness

厚度将减少,在图 8 中模式转换区域表现为一条弯曲的变化带(两弯曲曲线之间区域)。另外,薄膜厚度越厚对应的模式转换区域越小,而薄膜折射率越大对应的模式转换区域越大。进一步地,比较图 8 中薄膜消光系数  $\kappa=0.001$ 、 $\kappa=0.01$  及  $\kappa=0.1$  的模式转换区域变化带,可以看出,随着薄膜消光系数从  $\kappa=0.001$  变化到  $\kappa=0.01$ ,模式转换区的下(左)边界在薄膜厚度较大的区域会向上略微偏移,而在折射率较大区域则向下微移,上(右)边界基本一致;当薄膜消光系数从  $\kappa=0.01$  变化到  $\kappa=0.1$ ,模式转换区域基本不变。可见,薄膜消光系数的变化对模式转换区影响很小。

## 4 镀吸收型膜 LPFG 模式转换附近的透射谱

镀吸收型膜 LPFG 的透射谱可以通过数值求解耦合模方程<sup>[15]</sup>得到。设初值条件为  $A_{co}(0)=1$ ,  $A_{cl}(0)=0$ ,  $A_{co}$  为芯模振幅,  $A_{cl}$  为包层模振幅,光栅长度为  $L$ ,则光栅透射率可以表示为

$$T = \frac{A_{co}(L)}{A_{co}(0)}. \quad (1)$$

当外界环境发生微小变化时,敏感薄膜折射率将受其影响而发生相应的变化。图 9 给出了薄膜折射率为  $1.57+0.01i$  及其附近时 LPFG 的透射谱的折射率响应曲线,图 9(a)和图 9(b)中的薄膜厚度分别为 450 nm 和 530 nm,考察的包层模  $HE_{1,4}$  对应于靠近模式转换区和处于模式转换区域。

从图 9(a)可以看出,当薄厚及薄膜折射率靠近模式转换区时,薄膜折射率的微小变化,引起包层模  $HE_{1,4}$  衰减峰波长的较大偏移;图 9(b)表明当膜厚及薄膜折射率处于模式转换区时,薄膜折射率的微小变化,将引起包层模  $HE_{1,4}$  衰减峰峰值较大的变化,而峰值位置则偏移不大。根据镀吸收型膜 LPFG 在上述两个区域中所表现出的不同薄膜折射率响应特性,采用波长的相对偏移及透射率的相对变化<sup>[16]</sup>两种形式来定义传感器的灵敏度。

波长偏移型:

$$S_\lambda = \left| \frac{\partial \lambda}{\partial n_3} \frac{n_3}{\lambda} \right|. \quad (2)$$

透射率变化型:

$$S_T = \left| \frac{\partial T}{\partial n_3} \frac{n_3}{T} \right|, \quad (3)$$

式中  $\lambda$  为光波长,  $T$  为透射率。

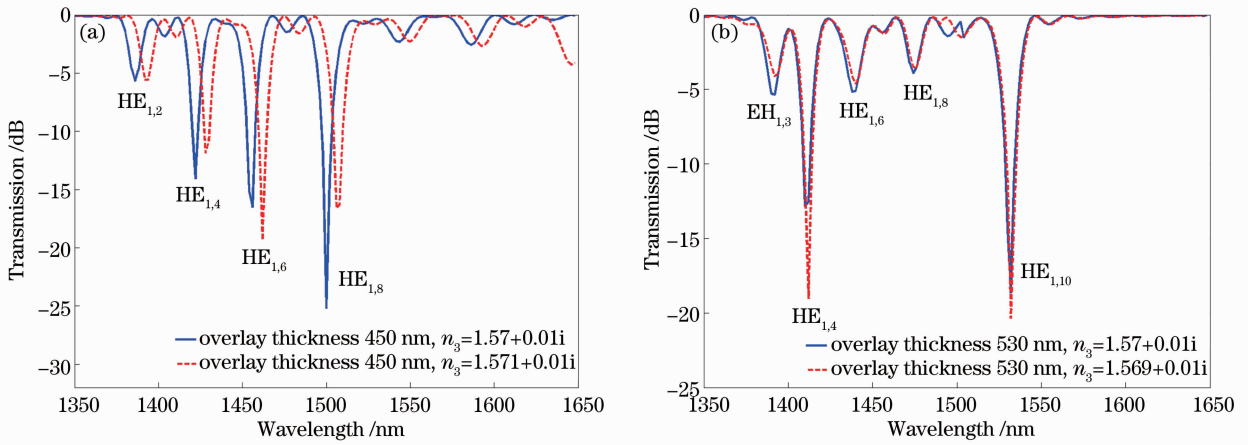


图 9 不同折射率对应的镀膜吸收型薄膜 LPFG 透射谱图。(a)薄膜厚度为 450 nm; (b)薄膜厚度为 530 nm

Fig. 9 Transmission spectra in the LPFG coating absorption film with different overlay refractive indexes. (a) Overlay thickness of 450 nm; (b) overlay thickness of 530 nm

根据上述定义的灵敏度两种形式,表 1 给出了图 9 中描绘的镀吸收型膜 LPFG 包层模  $HE_{1,4}$  靠近转换区及转换区内的灵敏度及相应的薄膜折射率分辨率,采用两种灵敏度形式对应的折射率分辨率由  $\delta_n(T) = S_T^{-1} n_3 \Delta T / T$  及  $\delta_n(\lambda) = S_\lambda^{-1} n_3 \Delta \lambda / \lambda$  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  $10^{-3}$ , 谐振波长测量精度  $\Delta \lambda$  取

0.01 nm。从表中可以看出,采用两种定义所获得的薄膜折射率分辨率,靠近模式转换区均比模式转换区高出近一个数量级;在转换区内衰减峰波长偏移小,可采用透射率相对变化进行检测,不但实现简易且对薄膜折射率的分辨率也高达  $10^{-5}$  以上,相较于复杂的波长偏移检测,具有广泛的实用性。

表 1 镀吸收型膜 LPFG 在靠近转换区和转换区的灵敏度

Table 1 Sensitivity of the LPFG coating absorption film in mode transition zone and near mode transition zone

| Cladding mode | Overlay thickness /nm | $S_T$              | $\delta_n(T)$         | $S_\lambda$ | $\delta_n(\lambda)$   | $\lambda$ /nm |
|---------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|-------------|-----------------------|---------------|
| $HE_{1,4}$    | 450                   | $1.41 \times 10^3$ | $1.11 \times 10^{-6}$ | 6.62        | $7.03 \times 10^{-7}$ | 1422          |
|               | 530                   | $1.73 \times 10^2$ | $9.06 \times 10^{-6}$ | 2.23        | $5.05 \times 10^{-6}$ | 1410          |

## 4 结 论

本文研究了镀制吸收型薄膜 LPFG 的模式转换及其折射率响应特性。讨论了镀膜 LPFG 包层模有效折射率随薄膜厚度的响应特性,从模场分布和波导传输本质上统一了模式转换与模式跳变两种表述,随薄膜厚度及薄膜折射率的变化,模式转换区将不断重复出现。进一步考察了薄膜消光系数对模式转换区域的影响,结果表明,薄膜消光系数的增加对模式转换区域影响很小。镀吸收型膜 LPFG 透射谱的薄膜折射率响应特性表明,靠近模式转换区相较于模式转换区,LPFG 对薄膜折射率分辨率高出近一个数量级;而模式转换区域采用简易的透射率相对变化进行检测,对薄膜折射率的分辨率也可高达  $10^{-5}$  以上。

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-assemble in long-period fiber gratings [J]. Opt Lett, 2005, 30(7): 720-722.

3 H Y Chen, Z T Gu. Design of a gas sensor based on a cladding-reduced long period fiber grating coated with a sensitive film [J]. Optik, 2013, 124(3): 219-224.

4 Deng Hongyou. The Sensor Based on Thin-Cladding Long Period Fiber Grating [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008. 54-62.

邓洪有. 薄包层长周期光纤光栅传感器 [D]. 成都: 电子科技大学, 2008. 54-62.

5 Deng Chuanlu, Gu Zhengtian, Zhang Jiangtao. Resonant characteristics and optimization of long period fiber grating coated with weak absorption double-layer films [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(11): 2873-2879.

邓传鲁, 顾铮先, 张江涛. 镀含弱吸收膜两层膜系长周期光纤光栅谐振特性及其优化 [J]. 光学学报, 2009, 38(11): 2873-2879.

6 A Cusano, A Iadicco, P Pilla, et al.. Coated long-period fiber gratings as high-sensitivity optochemical sensors [J]. J Lightwave Technol, 2006, 24(4): 1776-1786.

7 Z T Gu, Y P Xu, K Gao. Optical fiber long-period grating with solgel coating for gas sensor [J]. Opt Lett, 2006, 31(16):

## 参 考 文 献

1 N D Rees, S W James, R P Tatam, et al.. Optical fiber long-

2405—2407.

- 8 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.
- 9 I Del Villar, I R Matias, F J Arregui, *et al.*. Optimization of sensitivity in long period fiber gratings with overlay deposition [J]. *Opt Express*, 2005, 13(1): 56—69.
- 10 A Cusano, A Iadicicco, P Pilla, *et al.*. Mode transition in high refractive index coated long period gratings[J]. *Opt Express*, 2006, 14(1): 19—34.
- 11 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.
- 12 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.
- 13 Xu Yanping, Gu Zhengtian, Chen Jiabi. Effect of surface film optical parameters on the characteristic of long-period fiber grating [J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(11): 1519—1524.  
徐艳平, 顾铮先, 陈家璧. 表面膜层参数对长周期光纤光栅特性的影响 [J]. *中国激光*, 2005, 32(11): 1519—1524.
- 14 I Del Villar, I R Matias, F J Arregui. Influence on cladding mode distribution of overlay deposition on long-period fiber gratings [J]. *J Opt Soc Am A*, 2006, 23(3): 651—658.
- 15 T Erdogan. Cladding-mode resonance in short-and-long-period fiber grating filters [J]. *J Opt Soc Am A*, 1997, 14(8): 1760—1773.
- 16 Z T Gu, Y P Xu. Design optimization of a long-period fiber grating with sol-gel coating for a gas sensor [J]. *Meas Sci & Technol*, 2007, 18(11): 3530—3536.

栏目编辑: 王晓琰