

# 镀高折射率纳米膜的长周期光纤光栅特性研究

于秀娟<sup>1,2</sup> 张 敏<sup>1</sup> 王利威<sup>1</sup> 雷 鸣<sup>1</sup> 廖延彪<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 清华大学电子工程系光纤传感研究中心, 北京 100084; <sup>2</sup> 黑龙江大学光纤技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要** 针对镀高折射率纳米膜的长周期光栅,建立了传感理论模型,研究了长周期光栅的谐振波长与纳米膜厚度及外界折射率的关系,给出不同纳米膜厚度下长周期光栅不同包层模式重组特性。研究发现,当长周期光栅外面镀上一层沿角向均匀分布的纳米膜时,随着膜厚变化会出现包层模分布的明显调制;适当选择镀膜参数和外界介质折射率,最低次包层模式  $HE_{1,2}$  会成为镀膜层中的导模,其他的包层模式将会发生模式转换现象;对于较低次包层模式(如  $HE_{1,6}$ ),在模式转换的时候存在两步转换,而高次的包层模只有一步转换(如  $HE_{1,14}$ )。同时给出了包层模式转换对外界折射率响应的关系:当膜层厚度增加时,长周期光栅模式转换现象移至低折射率区域。

**关键词** 光纤光学;长周期光纤光栅;谐振波长;特征方程;纳米膜;模式转换

中图分类号 TN253; TP212.14 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092910.2665

## Characteristics of Long-Period Optical Fiber Grating with High Refractive Index nm-Thick Film Overlay

Yu Xiujuan<sup>1,2</sup> Zhang Min<sup>1</sup> Wang Liwei<sup>1</sup> Lei Ming<sup>1</sup> Liao Yanbiao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

<sup>2</sup>Optical Fiber Research Institute of Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China

**Abstract** The sensing theoretical model of long-period gratings (LPGs) with high-refractive-index nanometer film coating is built. The influence of overlay thickness and external refractive index on the resonant wavelength of LPG is investigated theoretically. The phenomenon of reorganization of cladding modes at different coating film thicknesses is shown and explained in detail. The theoretical analysis shows that a significant modification of the distribution of cladding modes is seen as an azimuthally symmetric nanoscale high-refractive-index coating deposited on the cladding of LPG. If the parameters of layers (the refractive index and thickness) and the external refractive index are chosen accurately, the lowest cladding mode  $HE_{1,2}$  will become the overlay mode and other cladding modes will experience mode transition. For the lower cladding modes (such as  $HE_{1,6}$ ), there is two-step modes transition. For higher cladding modes (such as  $HE_{1,14}$ ), there is only the one-step modes transition. The mode transition on the sensitivity of the external refractive index is also analyzed; Modes transition shifts to lower refractive index region with the increase of the overlay thickness.

**Key words** fiber optics; long-period fiber grating(LPG); resonant wavelength; characteristic equation; nanometer film; mode transition

## 1 引 言

长周期光纤光栅是周期为几十至几百微米的一类光栅,其原理是将前向传输的纤芯模耦合至前向传输的包层模式,从而导致相应波长的传输损耗,在

透射谱出现一个或多个损耗峰。外界环境如温度、应力、折射率、环境湿度等变化均会引起长周期光栅包层模式有效折射率发生变化,进而引起长周期损耗峰特性(波长和幅度)的改变。人们利用这一原理

收稿日期: 2008-11-20; 收到修改稿日期: 2009-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(60629401,10776016)资助项目。

作者简介: 于秀娟(1980—),女,博士研究生,主要从事光纤传感及长周期光栅传感等方面的研究。

E-mail: yuxj06@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 廖延彪(1935—),男,教授,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: lyb-dee@mail.tsinghua.edu.cn

已经制作了很多长周期光栅传感器来测量各种物理量,如温度<sup>[1,2]</sup>、应变<sup>[3]</sup>、折射率<sup>[4,5]</sup>、横向负载<sup>[6]</sup>、液位<sup>[7]</sup>、pH 值<sup>[8]</sup>、湿度<sup>[9]</sup>、弯曲曲率<sup>[10,11]</sup>等。由于长周期光纤光栅具有很高的折射率敏感性,特别适合化学传感,尤其在易燃、易爆或电磁干扰严重的环境,因此长周期光纤光栅在传感领域已经引起人们的广泛关注。

但是长周期光纤光栅谐振波长对环境折射率的敏感区是 1.4~1.45,而对低于 1.4 的折射率变化几乎不响应<sup>[12]</sup>,同时不具有化学敏感特定性,这在很大程度上限制了其在化学检测方面的应用。近年来,人们的研究热点是在长周期光纤光栅的外面镀一层对外界环境敏感的纳米膜,构成长周期光栅纳米膜传感器。尤其是在长周期光栅外面一层比包层折射率高的纳米膜<sup>[13~15]</sup>,当纳米膜在某一厚度值时,会引起长周期光栅中包层模式的重新分布。选择适当的镀膜参数会明显改善长周期光栅对环境响应的灵敏度,使长周期光栅在低于 1.4 的折射率变化也有很大的波长漂移。

本文针对镀高折射率纳米膜的长周期光栅,建

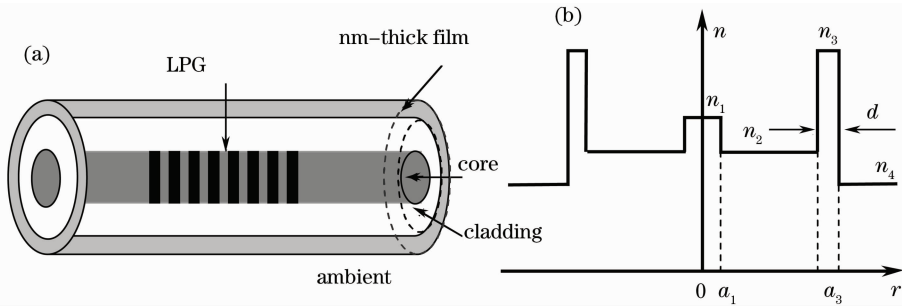


图 1 长周期光纤光栅四层介质模型

Fig. 1 Four-layer model of long-period grating

根据光的模场理论,单模光纤纤芯中传播的模式只有纤芯基模(HE<sub>11</sub>或 LP<sub>01</sub>),而包层中存在许多模式。在理想光纤中传输的光的不同模式相互正交,传输过程中不同模式之间没有能量交换,即不同模式的能量保持恒定。长周期光纤光栅纤芯中周期性的折射率调制使纤芯基模和同向包层模发生耦合,能量在模式之间发生相互转移。对于单模光纤长周期光栅来说,主要考虑纤芯基模和 1 阶  $\nu$  次包层模之间的耦合。根据模式耦合理论,长周期光纤光栅的谐振波长为

$$\lambda = [n_{\text{co,eff}}(\lambda) - n_{\text{cl,eff}}^{\nu}(\lambda)]\Delta, \quad (1)$$

其中  $n_{\text{co,eff}}(\lambda)$  为前向传输的纤芯基模在波长  $\lambda$  处的有效折射率,其值可以通过求解纤芯模式的特征方程求得; $n_{\text{cl,eff}}^{\nu}(\lambda)$  为 1 阶  $\nu$  次包层模在在波长  $\lambda$  处的

有效折射率,可通过求解包层模式的特征方程得到包层模式的有效折射率; $\Delta$  为栅格周期。其中纤芯基模和包层模的有效折射率均为波长的函数,不同包层模对应的谐振波长不同。

## 2 理论分析

### 2.1 镀膜长周期光栅理论模型

在长周期光栅的包层外面镀一层高折射率的敏感纳米膜,可以构成生物传感器或化学传感器。将镀膜的长周期光栅视为 4 层介质模型,其原理示意图和折射率分布如图 1 所示。其中纤芯半径为  $a_1$ ,折射率为  $n_1$ ;包层半径为  $a_2$ ,折射率为  $n_2$ ;薄膜层半径为  $a_3$ ,折射率为  $n_3$ ,薄膜厚度  $D = a_3 - a_2$ ;长周期光栅周围物质的折射率为  $n_4$ 。由于所镀膜层的折射率高于包层的折射率,因此有  $n_3 > n_1 > n_2$ 。

有效折射率,可通过求解包层模式的特征方程得到包层模式的有效折射率; $\Delta$  为栅格周期。其中纤芯基模和包层模的有效折射率均为波长的函数,不同包层模对应的谐振波长不同。

### 2.2 纤芯模式特征方程

对于 LPG 的纤芯基模而言,认为包层已经足够厚,外界环境折射率的变化对基模没有影响,因此可以用两层模型来求解基模的传播常数及场分量,其特征方程为

$$V \sqrt{1-b} \frac{J_1(V \sqrt{1-b})}{J_0(V \sqrt{1-b})} = V \sqrt{b} \frac{K_1(V \sqrt{b})}{K_0(V \sqrt{b})}, \quad (2)$$

其中  $V$  为光纤的归一化频率,其定义为

$$V = 2\pi/\lambda a_1 \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, b = (n_{\text{co,eff}}^2 - n_2^2)/(n_1^2 - n_2^2), \quad (3)$$

### 2.3 包层模式特征方程

对于镀高折射率纳米膜的 LPG, 采用 4 层模型理论计算包层模式的有效折射率。首先利用 Debye

势能法推导出长周期光纤光栅的包层模式在光纤中不同区域的场分量表达式, Debye 势函数  $\Psi(r)$ ,  $\Phi(r)$  可以表示为<sup>[16]</sup>

$$\Psi(r) = \begin{cases} C_1 Z_{\nu,1}(u_1 r) & r \leq a_1 \\ C_2 Z_{\nu,2}(u_2 r) + D_2 T_{\nu,2}(u_2 r) & a_1 < r \leq a_2 \\ C_3 Z_{\nu,3}(u_3 r) + D_3 T_{\nu,3}(u_3 r) & a_2 < r \leq a_3 \\ D_4 K_{\nu}(\omega_4 r) & r > a_3 \end{cases}, \quad (4)$$

$$\Phi(r) = \begin{cases} A_1 Z_{\nu,1}(u_1 r) & r \leq a_1 \\ A_2 Z_{\nu,2}(u_2 r) + B_2 T_{\nu,2}(u_2 r) & a_1 < r \leq a_2 \\ A_3 Z_{\nu,3}(u_3 r) + B_3 T_{\nu,3}(u_3 r) & a_2 < r \leq a_3 \\ B_4 K_{\nu}(\omega_4 r) & r > a_3 \end{cases}, \quad (5)$$

$$Z_{\nu,i}(x) = \begin{cases} J_{\nu}(x) & n_{\text{eff}} < n_i \\ I_{\nu}(x) & n_{\text{eff}} > n_i \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3), \quad (6)$$

$$T_{\nu,i}(x) = \begin{cases} Y_{\nu}(x) & n_{\text{eff}} < n_i \\ K_{\nu}(x) & n_{\text{eff}} > n_i \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3), \quad (7)$$

$$u_i = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{|n_i^2 - n_{\text{eff}}^2|} \quad i = 1, 2, 3, \quad \omega_4 = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_4^2}, \quad (8)$$

其中  $J_{\nu}(x)$  和  $Y_{\nu}(x)$  分别为第 1 类 Bessel 函数和第 1 类修正 Bessel 函数,  $I_{\nu}(x)$  和  $K_{\nu}(x)$  分别为第 2 类 Bessel 函数和第 2 类修正 Bessel 函数。

电磁场各分量与势函数  $\Psi(r)$ ,  $\Phi(r)$  的关系为

$$\begin{aligned} E_r &= \frac{\partial \Psi}{r \partial \phi} - \frac{\beta}{\omega \epsilon_i} \frac{\partial \Phi}{\partial r}, E_{\phi} = -\frac{\partial \Psi}{\partial r} - \frac{\beta}{\omega \epsilon_i} \frac{\partial \Phi}{r \partial \phi}, E_z = -(k^2 - \beta^2) \Phi / (j \omega \epsilon_i), \\ H_r &= \frac{\partial \Phi}{r \partial \phi} + \frac{\beta}{\omega \mu} \frac{\partial \Psi}{\partial \phi}, H_{\phi} = -\frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{\beta}{\omega \mu} \frac{\partial \Psi}{\partial r}, H_z = (k^2 - \beta^2) \Psi / (j \omega \mu). \end{aligned} \quad (9)$$

根据在  $r = a_1, a_2, a_3$  的边界上场分量  $E_{\phi}, E_z, H_{\phi}, H_z$  的连续性, 有

$$\mathbf{M}_1(a_1) [C_1 \ A_1 \ 0 \ 0]^T = \mathbf{M}_2(a_1) [C_2 \ D_2 \ A_2 \ B_2]^T, \quad (10)$$

$$\mathbf{M}_2(a_2) [C_2 \ D_2 \ A_2 \ B_2]^T = \mathbf{M}_3(a_2) [C_3 \ D_3 \ A_3 \ B_3]^T, \quad (11)$$

$$\mathbf{M}_3(a_3) [C_3 \ D_3 \ A_3 \ B_3]^T = \mathbf{M}_4(a_3) [D_4 \ B_4 \ 0 \ 0]^T, \quad (12)$$

其中  $\mathbf{M}_i(a_i)$  为第  $i$  层的传输矩阵, 其表达式可通过 (4)~(9) 式得到。结合 (10)~(12) 式可以得出

$$\mathbf{M}_1(a_1) [C_1 \ A_1 \ 0 \ 0]^T = \mathbf{M}_2(a_1) \mathbf{M}_2^{-1}(a_2) \mathbf{M}_3(a_2) \mathbf{M}_3^{-1}(a_3) \times \mathbf{M}_4(a_3) [D_4 \ B_4 \ 0 \ 0]^T.$$

令系数行列式为零, 即可得出包层模式的特征方程:

$$|\mathbf{M}_1(a_1) - \mathbf{M}_2(a_1) \mathbf{M}_2^{-1}(a_2) \mathbf{M}_3(a_2) \mathbf{M}_3^{-1}(a_3) \times \mathbf{M}_4(a_3)| = 0. \quad (13)$$

由 (13) 式可以求出 HE 和 EH 包层模的有效折射率。由于长周期光栅只考虑基模与 1 阶  $\nu$  次包层模的耦合, 所以在求解特征方程的时候, 只需求解 1 阶各次包层模式。设  $\text{HE}_{1,1}$  表示纤芯的导模,  $\text{HE}_{1,2}$  表示第一个  $\text{HE}_{1,j}$  模,  $\text{HE}_{1,4}$  表示第二个  $\text{HE}_{1,j}$  模;  $\text{EH}_{1,3}$  表示第一个  $\text{EH}_{1,j}$  模,  $\text{EH}_{1,5}$  表示第二个  $\text{EH}_{1,j}$  模, 其他依此类推。一阶各次包层模式的折射率由大到小依次排序为  $\text{HE}_{1,2}, \text{EH}_{1,3}, \text{HE}_{1,4}, \text{EH}_{1,5}, \dots$ 。

从包层模式的特征方程可以看出, 包层模式的

有效折射率与所镀纳米膜折射率  $n_3$ 、薄膜厚度  $D$  和外部环境的折射率  $n_4$  有关。因此可以通过改变上述 3 个参数的值, 来改变包层模式的有效折射率, 从而引起长周期光纤光栅谐振波长的漂移。

### 3 计算结果与讨论

本节中主要研究当镀膜材料确定以后, 膜层厚度以及外界环境的折射率改变时, 镀高折射率纳米膜的 LPG 的特性。计算中采用的参数为:  $a_1 = 4.15 \mu\text{m}$ ,  $a_2 = 62.5 \mu\text{m}$ ,  $n_1 = 1.458$ ,  $n_2 = 1.45$ , 长周

期光栅的周期  $\Lambda = 254 \mu\text{m}$ , 光栅长度  $L = 5 \text{ mm}$ , 光栅区域的平均折射率改变量为  $10^{-4}$  量级。由于用于镀膜的实际材料一般为有机材料, 其折射率一般为  $1.5 \sim 1.8$ , 所以本文计算中采用的参数为文献[17]报道中的值  $n_3 = 1.62$ 。

### 3.1 纳米膜层厚度改变对 LPG 特性的影响

设纳米膜的折射率和外界环境的折射率固定, 通过改变膜层厚度来研究 LPG 的特性。计算中取  $n_3 = 1.62, n_4 = 1$ 。假定纳米膜厚度沿光纤长度和圆周方向是均匀的。图 2 给出的是当纳米膜层的厚度从  $0 \sim 3000 \text{ nm}$  变化时, LPG 前 14 个一阶包层模的有效折射率, 其中计算中所用的波长为  $1550 \text{ nm}$ 。从图 2 中可以看出, 随着所镀膜厚度增加, LPG 包层模的有效折射率在某一厚度值处发生跳变, 同时最低次包层模开始在镀膜中传导。随着膜层厚度的持续增大, 将会出现更多的模式在镀膜层传导。模式跳变总是首先发生在未镀膜时传导的包层模中有效折射率最高的一个模式, 在模式跳变处包层模式的有效折射率发生了迅速的跃迁跳变。当模式转换完成后, 每个模式的有效折射率的值是模式跳变前的相应前一阶包层模的有效折射率值(例如, 当发生一次模式跳变后,  $\text{EH}_{1,3}$  的折射率值是未发生模式跳变前的  $\text{HE}_{1,2}$  的有效折射率的值)。在图 2 中, 包

层模  $\text{HE}_{1,2}, \text{HE}_{1,4}$  和  $\text{HE}_{1,6}$  在薄膜厚度依次约为  $340 \text{ nm}, 1400 \text{ nm}$  和  $2470 \text{ nm}$  处时, 开始在薄膜层中传导; 同时, 包层模  $\text{EH}_{1,3}, \text{EH}_{1,5}$  和  $\text{EH}_{1,7}$  在薄膜厚度依次约为  $460 \text{ nm}, 1520 \text{ nm}$  和  $2600 \text{ nm}$  处时, 开始在薄膜层中传导, 该现象可以由 3 个模式有效折射率的跳变证实。随着薄膜厚度的进一步增加, 这 3 个模式的有效折射率趋近于所镀纳米膜的折射率  $1.62$ , 这表明 3 个模式被很好的限制在纳米膜层内传导。在模式发生跳变时(即在每个包层模式转换为纳米膜层内的传导模式), 高阶模覆盖了它的前一个模式的能态。例如, 在膜层厚度为  $340 \text{ nm}$  时,  $\text{EH}_{1,3}$  的折射率值是未发生模式跳变前的  $\text{HE}_{1,2}$  的有效折射率的值,  $\text{HE}_{1,4}$  的有效折射率的值是未发生模式跳变前的  $\text{EH}_{1,5}$  的有效折射率的值,  $\text{EH}_{1,5}$  的折射率值是未发生模式跳变前的  $\text{HE}_{1,4}$  的有效折射率的值, 其他的依此类推。从图中还可以看出, 对于低阶包层模, 当有效折射率发生转换时, 折射率有两步(two-step)转换, 如图 2(a) 所示的  $\text{EH}_{1,9}$ 。其原因是包层模式在很小的薄膜厚度间隔内发生跃变, 例如  $\text{HE}_{1,2}$  和  $\text{EH}_{1,3}$  在所镀膜层厚度为  $340 \text{ nm}$  和  $460 \text{ nm}$  处发生跳变, 成为薄膜层中传导的模式。对于较高阶的包层模式, 有效折射率只有一步跳变, 如图 2(a) 所示的  $\text{EH}_{1,15}$ 。

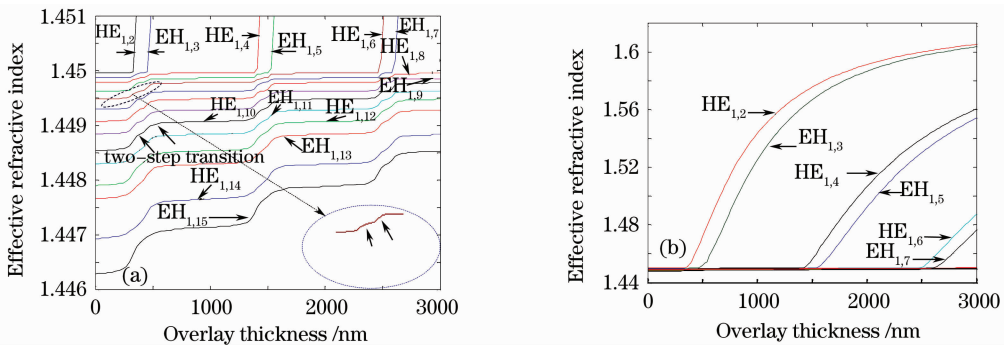


图 2 不同镀膜厚度对应的包层模的有效折射率。(a)前 14 个包层模式;(b)前 6 个包层模式

Fig. 2 Effective refractive index as a function of the overlay thickness. (a) the first 14 cladding modes; (b) the first six cladding modes

图 2 中的现象可以理解为模式的重新组合。当 LPG 外面没有镀纳米膜层时, 存在一些包层模式有效折射率的允许态。当 LPG 外面镀上纳米膜时, 会对长周期的结构产生调制。当纳米膜层的厚度增加到某一值时, 会对长周期光栅的结构产生很大的扰动, 包层模中出现不允许态(包层模中能量最高的状态), 此时会发生模式转换现象, 对应能量最高态的包层模转换为薄膜层的导模。随着薄膜厚度持续增加, 当纳米膜层厚度达到某些固定值时, 会周期性的

出现模式转换现象, 对应着更多的模式在薄膜层中进行传导。这种模式转换现象与文献[12]中报道的比较相似, 与之不同的是文献[14]采用的是标量近似的方法只分析了镀膜长周期光栅中模式的转换现象, 本文采用矢量分析的方法, 分析了镀膜长周期光栅在不同膜厚度时 HE 和 EH 模式的有效折射率的转换情况。

为了进一步验证所镀纳米膜的厚度对包层模式特性的影响, 我们分析包层模式的模场分布, 如图 3

所示, 所选择的模式为  $HE_{1,6}$ 。在薄膜厚度为 380 nm 附近,  $HE_{1,6}$  存在两步转换 (two-step transition)。首先,  $HE_{1,6}$  的模场转换为  $EH_{1,5}$ , 完成第 1 次模式过渡; 随着膜层厚度的增加,  $HE_{1,6}$  的模场转换为包层模  $HE_{1,4}$  的模场, 完成 2 次模式转换。图 3(a)~(c) 给出了未镀膜时的长周期光栅的 3 个包层模  $HE_{1,4}$ ,  $EH_{1,5}$  和  $HE_{1,6}$  的径向电场分布。图 3(d)~(h) 给出了当长周期光栅外面镀厚度分别为 220 nm, 320 nm, 380 nm, 400 nm 和 500 nm 纳米膜对应的  $HE_{1,6}$  径向电场的分布情况。从图中可以看

出, 当纳米膜厚度为 220 nm 时,  $HE_{1,6}$  的径向电场分布比较稳定, 与未镀膜时  $HE_{1,6}$  的模场相比变化很小; 膜层厚度为 320 nm 时,  $HE_{1,6}$  的径向电场分布开始向  $EH_{1,5}$  转变; 在纳米膜厚度为 380 nm 时,  $HE_{1,6}$  的径向电场与未镀膜时  $EH_{1,5}$  的径向电场分布基本相同, 至此完成了第 1 次模式转化。在膜层厚度为 400 nm 时,  $HE_{1,6}$  开始向  $HE_{1,4}$  过渡的第 2 次模式转换; 膜厚增至 500 nm 时,  $HE_{1,6}$  的径向电场与未镀膜时  $HE_{1,4}$  的径向电场分布相同, 至此完成了第 2 次模式转换。

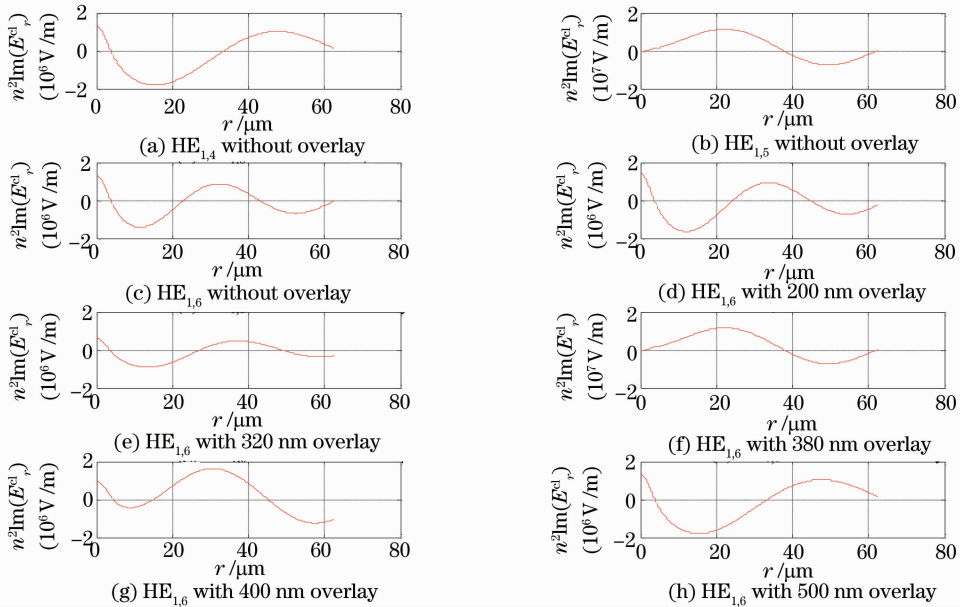


图 3 长周期光栅未镀膜时  $HE_{1,4}$ ,  $EH_{1,5}$  和  $HE_{1,6}$  的径向电场分布以及  $HE_{1,6}$  在不同膜厚的径向电场分布  
Fig. 3 The radial electric field distributions of the  $HE_{1,4}$ ,  $EH_{1,5}$  and  $HE_{1,6}$  modes for a structure without overlay and that of the  $HE_{1,6}$  for five overlay thickness values

以上分析了镀膜长周期光栅随着纳米膜厚度的增加, 不同包层模式有效折射率的转换情况。由长周期光栅的相位匹配(1)式可知, 某个包层模有效折射率的变化会直接引起对应的长周期光栅谐振波长的漂移。从图 2(a)中前 14 个一阶包层模随着镀膜厚度的转换情况可以推出对应的长周期光栅的谐振波长的漂移情况。由长周期光栅的相位匹配条件, 可以计算出纤芯模式和前 11 个一阶包层模耦合的谐振波长。图 4 给出了纤芯模式和前 11 个一阶包层模耦合得到的谐振波长随着纳米膜厚度变化的漂移情况。从图 4 中可以看出, 在膜层厚度为 320 nm 附近, 存在高次谐振向低次谐振的两次转换。首先,  $HE_{1,2}$  模式在薄膜层中传导, 随之  $EH_{1,3}$  的谐振波长向未镀膜时的  $HE_{1,2}$  的谐振波长漂移; 同理,  $HE_{1,4}$  模式的谐振波长移向未镀膜时  $EH_{1,3}$  的谐振波长。对于其他的一阶高次包层模式也会发生类似的现象。对于较低次

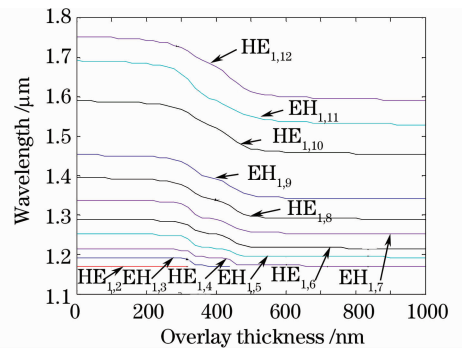


图 4 长周期光栅纤芯模和 14 个一阶包层模耦合所得谐振波长随薄膜厚度的漂移  
Fig. 4 Resonance wavelength shift caused by coupling between the core mode and the 14 first order cladding modes as a function of the thickness of overlay

的包层模谐振, 具有比较明显的两步跳跃现象, 即较低次的  $HE_{1,j}$  包层模谐振向与它相邻的  $HE_{1,j-1}$  包层



模谐振转换;同理,对于低次的  $\text{EH}_{1,j}$  包层模也存在这种两步转换。在图 2(a)中也可以清楚的看到较低次的包层模(如  $\text{HE}_{1,4}$ ,  $\text{HE}_{1,6}$ )具有两步跳变现象,而高次的包层模则没有这种现象(如  $\text{HE}_{1,12}$ )。图 3 中  $\text{HE}_{1,6}$  包层模的径向电场随着膜厚的增加向未镀膜时  $\text{HE}_{1,4}$ ,  $\text{EH}_{1,5}$  的径向电场依次转化的过程,更进一步说明对于较低次的包层模在膜厚增加到某一值时,将伴随着模式的两步跳变。

### 3.2 外界环境折射率变化对 LPG 特性的影响

从包层模式的特征方程可以看出,外界折射率变化时会引起包层模式的传播常数发生改变,进而会引起长周期光栅的谐振波长发生变化。图 5 给了的镀膜长周期光栅前 12 个一阶包层模式的有效折射率随外界环境折射率变化的曲线,图 5(a)~(d)对应的纳米膜厚度分别为 150 nm, 200 nm, 250 nm 和 300 nm,其中  $n_3 = 1.62$ 。从图 5 中可以看出,随着外界环境折射率  $n_4$  增加,长周期光栅一阶  $\nu$  次包层模的有效折射率不断增大。当  $n_4$  增加到某一值时,有效折射率发生了很明显的漂移。对于某一固定膜厚度,存在一个  $n_4$  值,使包层模  $\text{HE}_{1,2}$  的有效折射率发生跳变,跳变后的值大于包层的折射率  $n_2$ ,此时它从包层模转换为薄膜层中的传导模。与此同时,其他包层模式的有效折射率也发生明显的

跳变,它们的值转换为与之相邻的低次包层模式的有效折射率,即 1 阶  $\nu$  次包层模的有效折射率向  $\nu-1$  次包层模式的有效折射率转换,这种现象与图 2 中的模式转换比较相似。

从图 5(a)~(d)可以看出,当长周期光栅外面纳米膜厚度增加的时候,包层模式转换的区域移向低折射率区域。当膜层厚度为 150 nm 时,包层模式转化发生在折射率为 1.4 附近,此时对应的谐振波长对外界折射率的响应灵敏度很高,因为包层模式的有效折射率出现了转换(跳变);膜层厚度增加为 200 nm, 250 nm 时,模式转换区域分别移至 1.37, 1.33 附近。而普通未镀膜的长周期光栅在外界折射率为 1.33 附近,对外界折射率响应的灵敏度比较低。当薄膜厚度增加至 300 nm 时,包层模式转换区域移至折射率为 1.2 附近。如果继续增加薄膜厚度能够使包层模式转换区域移动至折射率 1 附近,就可以使镀膜长周期光栅在空气中具有很高的灵敏度,这对设计长周期光栅气体传感器提供了很好的可能性。

由包层模有效折射率与长周期光栅谐振波长之间的关系可知,外界环境改变时,不同包层模与会出现谐振波长转换的现象,图 6 给出了薄膜厚度分别为 150 nm, 200 nm, 250 nm 何 300 nm 时,  $\text{HE}_{1,8}$  模

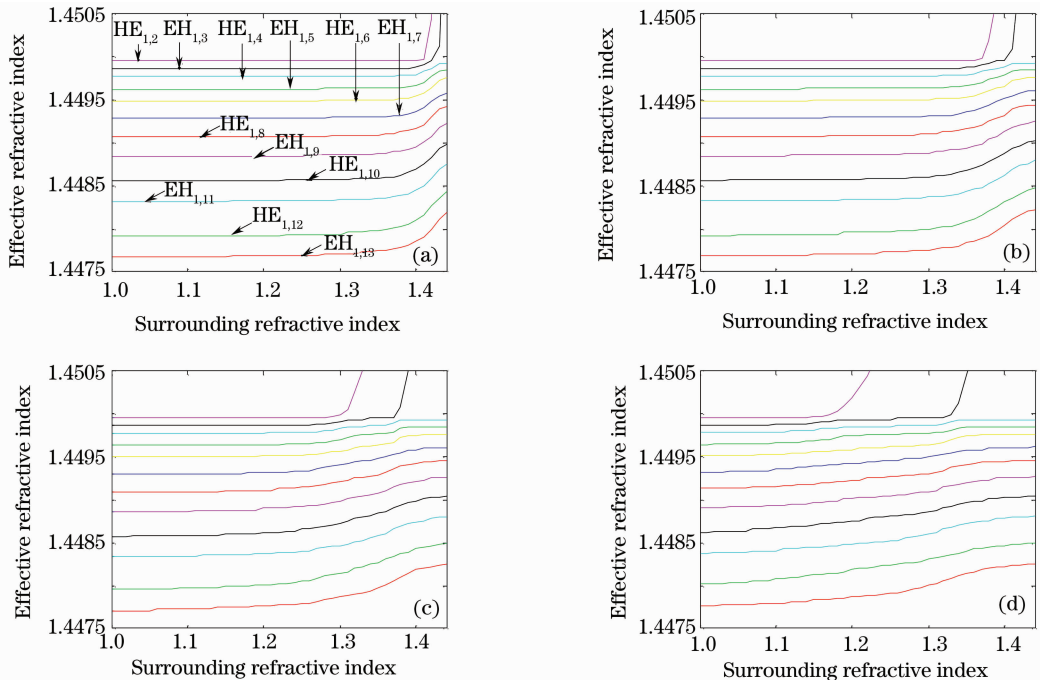


图 5 不同膜厚度的镀膜长周期光栅包层模有效折射率随外界环境折射率的变化。(a)150 nm;(b)200 nm;(c)250 nm;(d)300 nm

Fig. 5 Effective refractive index of the cladding modes of LPG versus the surrounding refractive index. (a) 150 nm; (b) 200 nm; (c) 250 nm; (d) 300 nm

式对应的谐振波长随外界环境折射率变化的曲线。从图中可以看出,随着膜厚度的增加,HE<sub>1,8</sub>模式对应的谐振波长随外界环境折射率变化的敏感区移至低折射率区域。膜层厚度为 150 nm 时,波长漂移灵敏度最大的位置在折射率 1.4 附近;当膜层增至 200 nm 时,谐振波长在  $n_4 = 1.37$  附近开始有很大的漂移;而当波长增至 300 nm 时,HE<sub>1,8</sub>模式对应的谐振波长随外界环境变化漂移的灵敏区域移至低折射率 1.2 附近。如果继续增加薄膜厚度,可以进一步使 HE<sub>1,8</sub>谐振波长在折射率 1 附近有很大的漂移,这种波长漂移的现象也可以从图 7 中得到。图 7 给出外界环境折射率分别为 1, 1.3, 1.37 和 1.4 时,HE<sub>1,8</sub>谐振波长随着膜层厚度变化的曲线。从图 7 中可以看出,随着外界环境折射率增大,波长漂移灵敏度高的区域移至低膜厚处。外界折射率为 1 时,HE<sub>1,8</sub>谐振波长在膜层厚度为 300~450 nm 的区域有很高的波长漂移灵敏度;而当外界折射率为 1.4 时,HE<sub>1,8</sub>谐振波长漂移的高灵敏度区域移至 100~250 nm 的膜厚区域。

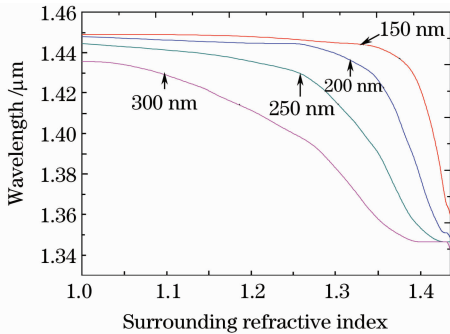


图 6 HE<sub>1,8</sub>模式对应的谐振波长随外界环境折射率变化的曲线

Fig. 6 Resonant wavelength of HE<sub>1,8</sub> cladding mode versus surrounding refractive index at different overlay thickness

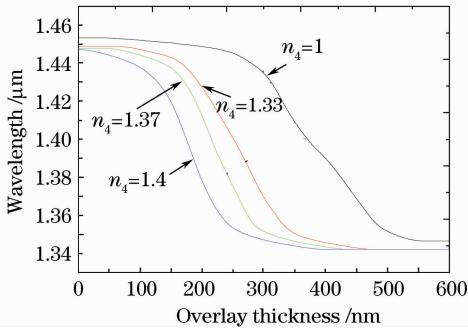


图 7 HE<sub>1,8</sub>谐振波长随镀膜厚度变化的曲线  
Fig. 7 Resonant wavelength of HE<sub>1,8</sub> versus the overlay thickness

通过上面的分析可以看出,镀高折射率纳米膜长周期光纤光栅的性能主要与膜材料的折射率、厚度以及外界环境的折射率等因素有关。当镀膜材料选定后,则应根据实际应用环境的折射率范围来设计传感器膜层的厚度。如果给出外界环境的折射率变化范围,通过选择适当的镀膜厚度,可以使长周期光栅最低次包层模式 HE<sub>1,2</sub>成为镀膜层中的导膜,引起其他包层模式发生重组(即有效折射率发生跳变)。包层模式转换时会出现谐振波长快速漂移的现象,这对提高对折射率响应的灵敏度有很大改善。

## 4 结 论

本文建立了镀高折射率纳米膜长周期光栅传感的理论模型,给出了纤芯模式和包层模式的特征方程。从理论上研究了镀高折射率纳米膜长周期光栅的特性,分析了在镀膜材料折射率确定的情况下,膜层厚度以及外界环境折射率改变时长周期光栅的模式特性。

由长周期光栅谐振波长与镀膜厚度和外界折射率的关系可知,在实际中设计长周期光栅薄膜传感器时,可以根据实际测量环境的折射率变化区域适当选择镀膜的厚度,使得长周期光栅对外界折射率响应灵敏度得到很大提高,因此可以很好改善传感器的灵敏度。如果使薄膜厚度足够大以至当外界折射率为 1 时,镀高折射率纳米膜长周期光栅传感器在此膜厚度区域具有很大的波长漂移,由此可以设计长高灵敏度的长周期光栅气体传感器。以上工作可对设计高灵敏度长周期光纤光栅镀纳米膜传感器提供理论指导和支持,对改善长周期光纤光栅薄膜传感器的性能具有一定的意义。

## 参 考 文 献

- 1 D. D. Davis, T. K. Gaylord, E. N. Glytsis *et al.*. Very-high-temperature stable CO<sub>2</sub>-laser-induced long-period fibre gratings [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(9): 40~742
- 2 G. Humbert, A. Malki. Temperature characterization of long-period fiber gratings fabricated with electric arc discharge [C]. *SPIE*, 2001, **4579**: 176~181
- 3 M. Yokota, H. Oka, T. Yoshino. Mechanically induced long period fiber grating and its application for distributed sensing [C]. *SPIE*, 2002, **1**: 35~138
- 4 J. H. Chong, P. Shum, H. Haryono *et al.*. Measurements of refractive index sensitivity using long-period grating refractometer [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **229**(1-6): 65~69
- 5 J. F. Ding, A. P. Zhang. Fiber-taper seeded long-period grating pair as a highly sensitive refractive-index sensor [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2005, **17**(6): 1247~1249
- 6 X. K. Zeng, Y. J. Rao, Y. P. Wang *et al.*. Transverse load, static strain, temperature and vibration measurement using a

- cascaded FBG/EFPI/LPFG sensor system[C]. *Proc. OFS*, 2002, **1**: 199~202
- 7 S. W. James, S. Khaliq, R. P. Tatam. Fiber-optic liquid-level sensor using long period grating [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(16): 127~130
- 8 J. L. Elster. *Long Period Grating-Based pH Sensors for Corrosion Monitoring* [D]. Blacksburg: Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999
- 9 Y. Liu, L. W. Wang, M. Zhang *et al.*. Long-period grating relative humidity sensor with hydrogel coating[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(12): 880~882
- 10 Zhao Hongxia, Bao Jilong, Chen Ying. Bending sensing rules for long-period fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1681~1685  
赵洪霞, 鲍吉龙, 陈莹. 长周期光纤光栅弯曲传感特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1681~1685
- 11 Zhao Hongxia, Bao Jilong, Chen Ying. Effect of bending curvature on transmission spectra of long period fiber gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 722~755  
赵洪霞, 鲍吉龙, 陈莹. 弯曲曲率对长周期光纤光栅透射谱特性的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 722~755
- 12 H. J. Patrick, A. D. Kersey, F. Bucholtz. Analysis of the response of long period fiber gratings to external index of refraction [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(9): 1606~1611
- 13 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
- 14 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
- 15 A. Cusano, A. Iadicicco, P. Pilla *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): 2356~2358
- 16 C. Tsao. *Optical Fiber Waveguide Analysis* [M]. New York: Oxford University Press, 1992
- 17 I. Del Villar, M. Achaerandio, I. R. Matias *et al.*. Deposition of an overlay with electrostatic selfassembly method in long period fiber gratings [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(7): 720~722