

文章编号: 0253-2239(2009)10-2656-09

# 金属镀层两层膜系长周期光纤光栅 谐振特性研究

邓传鲁 顾铮先 张江涛

(上海理工大学理学院光电功能薄膜实验室, 上海 200093)

**摘要** 采用严格的耦合模理论,建立了镀金属膜和敏感膜的两层膜系长周期光纤光栅复特征方程,用微扰法对复数超越特征方程进行求解,结果和文献[5]给出的数据相符。理论模拟数据表明,金属的消光系数对功率密度和透射谱影响很大,低阶偶次模式在纤芯内的功率密度所占比重远大于奇次模式,其衰减峰幅度也比奇次模高,因此,金属镀层长周期光纤光栅实际应用时,需要选择偶次模作为研究对象。进一步理论分析了金属和敏感膜层参数对长周期光纤光栅谐振特性的影响,研究发现,金属膜厚、敏感膜厚和折射率对谐振波长有较大的影响,谐振波长随金属膜厚、敏感膜厚和折射率的增大向短波方向漂移。在某些区域谐振波长存在跳变现象,长周期光纤光栅实际应用时应避开此区域。

**关键词** 长周期光纤光栅;耦合特性;复特征方程;金属膜;敏感膜;透射谱

**中图分类号** TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092910.2656

## Resonant Characteristics of Long-Period Fiber Grating Coated with Double-Layer Films Including Metal Film

Deng Chuanlu Gu Zhengtian Zhang Jiangtao

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

**Abstract** Based on the coupled-mode theory, the complex characteristic equation of long-period fiber gratings coated with metal film and sensing film is set up. By using the perturbation method, the complex roots are obtained. The results are coincident with the results of Reference[5]. The curves of intensity and the transmission spectrums are significantly influenced by the extinction coefficient. The proportion of the even mode's intensity in core is much larger than that of the odd mode's intensity. Also, the amplitude of the attenuation peak of the even mode is much larger than that of the odd mode. So the even mode is taken as the research object when the metal coated long-period fiber grating sensor is optimized. Furthermore, the influence of metal and sensitive film parameters on the resonant characteristics is analyzed in theory. The results show the metal film thickness, sensitive film thickness and refractive index influence the resonant wavelength, which shifts towards the short wavelength with the increase of the metal film thickness, sensitive film thickness and refractive index. And there is a jumping phenomenon for film parameters, so the film parameters corresponding to the jumping phenomena must be discarded in actual applications of long period fiber gratings (LPFG).

**Key words** long-period fiber gratings (LPFG); coupling characteristic; complex characteristic equation; metal film; sensing film; transmission spectrum

**收稿日期**: 2008-10-31; **收到修改稿日期**: 2009-03-09

**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)和上海市重点学科建设项目(T0501)资助项目。

**作者简介**: 邓传鲁(1979-),男,硕士研究生,主要从事光纤光栅传感器理论研究。E-mail: chuanludeng@163.com

**导师简介**: 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、光纤传感器等研究。

E-mail: zhengtiangu@163.com

## 1 引言

长周期光纤光栅(LPFG)已广泛应用于传感和通信领域<sup>[1,2]</sup>,尤其是近年来,在 LPFG 包层上镀一层敏感膜或金属膜来改变光纤光栅的传输特性,愈发引起学者的关注<sup>[3~5]</sup>。

Jesus M. Corres 等<sup>[3]</sup>在 LPFG 包层上镀聚丙烯胺盐酸盐和聚丙烯酸膜,用作 pH 传感器,实验研究表明,在 pH 值 4~7 范围内,平均灵敏度高达 28.3 nm/pH。Gu Zhengtian 等<sup>[4]</sup>理论研究和实验制作了镀凝胶溶胶 SnO<sub>2</sub> 薄膜 LPFG 乙醇传感器,并且,就光纤光栅表现出的双峰谐振<sup>[6]</sup>现象,理论研究了镀膜 LPFG 的双峰谐振规律和透射特性<sup>[7]</sup>,基于此提出了一种新型的 LPFG 双峰传感器设计方法<sup>[8]</sup>,理论模拟数据表明此类传感器具有较高的灵敏度。

镀金属膜 LPFG 现今处于起步阶段,早期,国外许多学者实验研究了对金属包层进行温度和应变调节<sup>[2,9]</sup>来改变谐振波长,但没有对此做相应的理论研究;张自嘉<sup>[5]</sup>和魏淮等<sup>[10]</sup>通过理论研究金属包层(环境层)LPFG 特征方程的求解方法,来探测谐振波长的偏移方向和大小,取得了一定的理论成果;Yue-Jing He<sup>[11]</sup>理论研究了镀金属薄膜(膜层)LPFG 传感器的耦合特点和透射特性,为此类薄膜

LPFG 传感器的应用奠定了理论基础。

基于镀膜 LPFG 表现出的优异特性,可以设计一种新的传感器结构模型—镀金属膜和敏感膜 LPFG。这种结构的 LPFG,既可以利用敏感膜对外界环境变化异常敏感特性,也可利用金属膜的温度和应变调节来改变谐振波长的特点,进一步优化 LPFG 透射性能。

以镀金膜为例,建立了此类五层结构 LPFG 的特征方程,模拟计算了特征方程的复根,结果和张自嘉研究结果相符。重点研究了此类 LPFG 的耦合特性,模拟计算数据表明,金属的消光系数对模式的耦合特性具有很大影响,低阶偶次模式在纤芯内的功率密度所占比重比奇次模式大,其衰减峰幅度也比奇次模式高。进一步理论分析了金属膜厚、敏感膜厚和折射率对长周期光纤光栅谐振特性的影响。

## 2 理论

图 1 为镀弱吸收薄膜五层结构的 LPFG 示意图。其中,芯层折射率为  $n_1$ ,半径为  $a_1$ ;内包层折射率为  $n_2$ ,半径为  $a_2$ ;弱吸收薄膜折射率为  $n_3$ ,半径为  $a_3$ ,厚度为  $h_3$ ;敏感薄膜折射率为  $n_4$ ,半径为  $a_4$ ,厚度为  $h_4$ ;周围环境折射率为  $n_5$ 。光栅区域的平均折射率改变量为  $\sigma$ ,数量级为  $10^{-4}$ 。

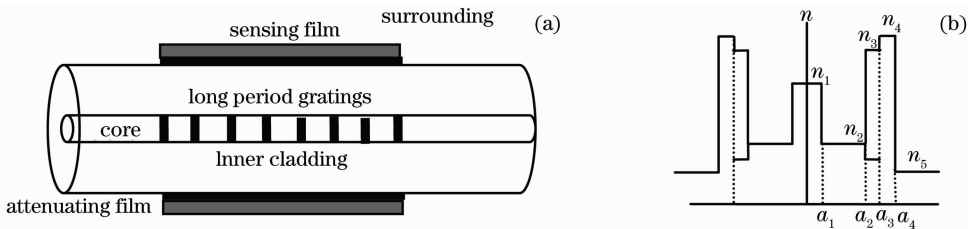


图 1 五层结构长周期光纤光栅结构示意图。(a)结构模型;(b)折射率分布模型

Fig. 1 Thin film sensor model of five-cladding long-period fiber grating (a) Structural diagram; (b) Refractive index profile

要研究五层结构 LPFG 的耦合特性和透射性能,必须严格建立芯层模和包层模场表达式,进而要求建立芯层模和包层模的特征方程,从而涉及到芯层模和包层模的求根问题。对于芯层模,由于场能量大多集中在芯层区域,一般采用两层结构模型特征方程<sup>[12]</sup>即可;而对于包层模,必须采用矢量场理论严格建立的包层模特征方程才能精确求解。

对于单模长周期光纤光栅,根据模式耦合理论,长周期光纤光栅包层模耦合的相位匹配条件为

$$\beta_{11}^{\text{co}} - \beta_{1\nu}^{\text{cl}} - 2\pi/\Lambda = 0. \quad (1)$$

根据  $\beta = k_0 \cdot n_{\text{eff}}$ ,相位匹配条件也可表示为

$$n_{\text{eff,co}}(\lambda) - n_{\text{eff,cl}}^{\nu}(\lambda) = \frac{\lambda}{\Lambda}, \nu = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

式中  $n_{\text{eff,co}}(\lambda)$  为前向传输导模在波长  $\lambda$  处的有效折射率,可由纤芯模式的特征方程<sup>[12]</sup>求得; $n_{\text{eff,cl}}^{\nu}(\lambda)$  为 1 阶  $\nu$  次包层模式在波长  $\lambda$  处的有效折射率,须由包层模特征方程求出<sup>[13]</sup>。芯层模和包层模的有效折射率都是波长的函数,满足上述等式的波长  $\lambda$  为 1 阶  $\nu$  次谐波中心波长,简称谐振波长。不同的包层模,谐振波长不同。

纤芯模的自耦合常数和纤芯模与一阶  $\nu$  次包层模之间的互耦合常数分别表示为  $k_{11-\nu}^{\text{co-co}}$  和  $k_{1\nu-11}^{\text{cl-co}}$ <sup>[12]</sup>。耦合常数  $k_{1\nu-11}^{\text{cl-co}}$  决定了长周期光纤光栅中纤芯导模

与包层模式之间耦合的强弱,随薄膜有效折射率的变化而变化,并且将直接引起透射谱的变化,影响 LPFG 的透射谱特性。

若以光栅中点为  $z$  轴原点,长周期光纤光栅的边界条件如下

$$A^{\text{co}}(z = -L/2) = 1, A_v^{\text{cl}}(z = -L/2) = 0. \quad (3)$$

长周期光纤光栅的透射率定义为

$$T = \frac{A^{\text{co}}(L/2)}{A^{\text{co}}(-L/2)}. \quad (4)$$

在求解模式耦合方程的过程中,由于其中存在数百个一阶包层模式,耦合方程求解工作量巨大,要对应每一波长求解。通过求解给定初值条件的偏微分方程组<sup>[7]</sup>,得到  $A^{\text{co}}(L/2)$ ,代入(4)式,即得到透

射率  $T$ 。

### 3 五层结构 LPFG 复特征方程建立与求解

镀金属薄膜 LPFG 复特征方程和普通 LPFG 的特征方程比较,其形式相同,差别仅在金属膜层的折射率取值为复数<sup>[5,10]</sup>。要研究五层结构的 LPFG 特性,则必须严格建立包层模复特征方程。

要建立包层模特征方程,首先要根据德拜势能法<sup>[13]</sup>推导出单模光纤中包层模的场分布表达式,然后利用界面上  $e_\varphi, e_z, h_\varphi, h_z$  场分布的连续性,可得到一个 16 元线性齐次方程组

$$\mathbf{M}_{16 \times 16} [C_1, A_1, C_2, D_2, A_2, B_2, C_3, D_3, A_3, B_3, C_4, D_4, A_4, B_4, D_5, B_5]^T = 0. \quad (5)$$

其中  $\mathbf{M}_{16 \times 16}$  为系数矩阵,  $A_i, B_i, C_i, D_i$  为场分量的加权系数。根据线性齐次方程组有解的条件,令其行列式等于零,便得出五层结构的 LPFG 复特征方程  $f(n_{\text{eff},r}, n_{\text{eff},i})$ 。

根据分块矩阵的运算法则,复特征方程可以写成

$$f(n_{\text{eff}}) = \mathbf{M}(u_4 a_4) \cdot \mathbf{M}(u_4 a_3)^{-1} \cdot \mathbf{M}(u_3 a_3) \cdot \mathbf{M}(u_3 a_2)^{-1} \cdot \mathbf{M}(u_2 a_2) \cdot \mathbf{M}(u_2 a_1)^{-1} \cdot \mathbf{M}(u_1 a_1) - \mathbf{M}(w_5 a_4) = 0. \quad (6)$$

其中

$$\mathbf{M}(u_i a_i) = \begin{bmatrix} -\frac{u_i^2}{n_i^2} \cdot J_l(u_i a_i) & -\frac{u_i^2}{n_i^2} \cdot Y_l(u_i a_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & u_i^2 \cdot J_l(u_i a_i) & u_i^2 \cdot Y_l(u_i a_i) \\ -\frac{\sigma_2}{n_i^2 \cdot a_i} \cdot J_l(u_i a_i) & -\frac{\sigma_2}{n_i^2 \cdot a_i} \cdot Y_l(u_i a_i) & -u_i \cdot J_l'(u_i a_i) & -u_i \cdot Y_l'(u_i a_i) \\ -u_i \cdot J_l'(u_i a_i) & -u_i \cdot Y_l'(u_i a_i) & \frac{\sigma_1}{a_i} \cdot J_l(u_i a_i) & \frac{\sigma_1}{a_i} \cdot Y_l(u_i a_i) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\mathbf{M}(u_i a_{i-1})^{-1} = \frac{n_i^2}{u_i^6} \cdot \frac{1}{JJYY} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} u_i^4 \cdot Y_l'(u_i a_{i-1}) & \frac{u_i^3 \cdot \sigma_1 \cdot Y_l(u_i a_{i-1})}{n_i^2 \cdot a_{i-1} \cdot \mu} & 0 & -\frac{u_i^5 \cdot Y_l(u_i a_{i-1})}{n_i^2} \\ -u_i^4 \cdot J_l'(u_i a_{i-1}) & -\frac{u_i^3 \cdot \sigma_1 \cdot J_l(u_i a_{i-1})}{n_i^2 \cdot a_{i-1} \cdot \mu} & 0 & \frac{u_i^5 \cdot J_l(u_i a_{i-1})}{n_i^2} \\ \frac{u_i^3 \cdot \sigma_2 \cdot Y_l(u_i a_{i-1})}{n_i^2 \cdot a_{i-1}} & -\frac{u_i^4 \cdot Y_l'(u_i a_{i-1})}{n_i^2} & -\frac{u_i^5 \cdot Y_l(u_i a_{i-1})}{n_i^2} & 0 \\ -\frac{u_i^3 \cdot \sigma_2 \cdot J_l(u_i a_{i-1})}{n_i^2 \cdot a_{i-1}} & \frac{u_i^4 \cdot J_l'(u_i a_{i-1})}{n_i^2} & \frac{u_i^5 \cdot J_l(u_i a_{i-1})}{n_i^2} & 0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\mathbf{M}(u_1 a_1) = \begin{bmatrix} -\frac{u_1^2}{n_1^2} \cdot J_l(u_1 a_1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & u_1^2 \cdot J_l(u_1 a_1) & 0 & 0 \\ -\frac{\sigma_2}{n_1^2 \cdot a_1} \cdot J_l(u_1 a_1) & -u_1 \cdot J_l'(u_1 a_1) & 0 & 0 \\ -u_1 \cdot J_l'(u_1 a_1) & \frac{\sigma_1}{a_1} \cdot J_l(u_1 a_1) & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$M(\omega_5 a_4) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{\omega_5^2}{n_5^2} \cdot K_l(\omega_5 a_4) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_5^2 \cdot K_l(\omega_5 a_4) \\ 0 & 0 & -\frac{\sigma_2}{n_5^2 \cdot a_4} \cdot K_l(\omega_5 a_4) & -\omega_5 \cdot K'_l(\omega_5 a_4) \\ 0 & 0 & -\omega_5 \cdot K'_l(\omega_5 a_4) & \frac{\sigma_1}{a_4} \cdot K_l(\omega_5 a_4) \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中  $u_1 = k \sqrt{n_1^2 - n_{\text{eff}}^2}, u_2 = k \sqrt{n_2^2 - n_{\text{eff}}^2}, u_3 = k \sqrt{n_3^2 - n_{\text{eff}}^2}, u_4 = k \sqrt{n_4^2 - n_{\text{eff}}^2}, \omega_5 = k \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_5^2}$ ；如果  $\text{Re}(n_3) < n_{\text{eff}}^2$ ，则  $u_3 = k \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_3^2}$ ； $J_l Y_l = J_l(u_i a_{i-1}) \cdot Y'_l(u_i a_{i-1}) - Y_l(u_i a_{i-1}) \cdot J'_l(u_i a_{i-1})$ ； $k = \frac{2\pi}{\lambda}, \sigma_1 = \frac{\beta l}{\omega \mu}, \sigma_2 = \frac{\beta l}{\omega \epsilon_0}$ 。 $J_l, Y_l, K_l$  分别代表第一类、第二类和第二类变态贝塞尔函数， $J'_l, Y'_l, K'_l$  为相应的贝塞尔函数求导表达式， $l = 1^{[8]}$ 。

复特征方程严格建立后，如何精确求其复根，便成为研究此类 LPFG 耦合性能和透射特性的关键一步。复特征方程涉及到求解复数根问题，其求解相对较为复杂，严格说来，应该在整个复平面上求解这一方程，需要大量计算。根据平面金属包层光波导理论<sup>[14]</sup>，在忽略介电常数  $\epsilon_3$  的虚部时，可以得到近似程度相当好的结果。在要求不很高的情况下，可以用这一结果作为零级近似值，然后将虚部作为微扰，对结果进行修正，采用求多元变量函数极小值的 Nelder-Mead 方法，得到精度更高的近似值。

为求解方便，令  $f(n_{\text{eff},r}, n_{\text{eff},i}) = 0$ ，引入

$$y(n_{\text{eff},r}, n_{\text{eff},i}) = f(n_{\text{eff},r}, n_{\text{eff},i}) f(n_{\text{eff},r}, n_{\text{eff},i})^* = 0, \quad (11)$$

其中 \* 表示复共轭，则  $y(n_{\text{eff},r}, n_{\text{eff},i})$  为实数，且有  $y(n_{\text{eff},r}, n_{\text{eff},i}) \geq 0$ ，可采用求多元变量函数极小值的 Nelder-Mead 方法求出其根<sup>[15]</sup>，对应  $y(n_{\text{eff},r}, n_{\text{eff},i}) = 0$  的变量  $(n_{\text{eff},r0}, n_{\text{eff},i0})$  就是其复根。

金属(例如金)膜层区域内表达式  $J(u_3 a_2) \cdot Y'(u_3 a_2) - Y(u_3 a_2) \cdot J'(u_3 a_2)$  由两类贝塞尔函数组成，由于其复宗量数值较大，在运用 Matlab 计算软件寻根求解运算时，会产生表达式的分母为 0 值问题。因此，合理解决贝塞尔函数运算，才能确保程序顺利进行。

当贝塞尔函数的宗量较大时，可以用贝塞尔函数的近似表达式代替，(12)式是两种贝塞尔函数的近似表达式<sup>[16]</sup>

$$Y_l(x) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot x}} \cos(x - \frac{\pi}{2} \cdot l - \frac{\pi}{4}) \quad J_l(x) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot x}} \sin(x - \frac{\pi}{2} \cdot l - \frac{\pi}{4}). \quad (12)$$

对于表达式  $J(u_3 a_2) \cdot Y'(u_3 a_2) - Y(u_3 a_2) \cdot J'(u_3 a_2)$ ，由贝塞尔函数公式推导如下

$$\left. \begin{matrix} J = J_1(x), J' = J_0(x) - \frac{J_1(x)}{x} \\ Y = Y_1(x), Y' = Y_0(x) - \frac{Y_1(x)}{x} \end{matrix} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{matrix} J \cdot Y' = Y_0(x) \cdot J_1(x) - \frac{Y_1(x) \cdot J_1(x)}{x} \\ Y \cdot J' = Y_1(x) \cdot J_0(x) - \frac{Y_1(x) \cdot J_1(x)}{x} \end{matrix} \right\} \Rightarrow J \cdot Y' - Y \cdot J' = \frac{2}{\pi \cdot x}, \quad (13)$$

因此

$$J_l(u_3 a_2) \cdot Y'_l(u_3 a_2) - Y_l(u_3 a_2) \cdot J'_l(u_3 a_2) = \frac{2}{\pi \cdot u_3 \cdot a_2}, \quad (14)$$

其中， $J_l, Y_l$  分别代表第一类、第二类贝塞尔函数， $J'_l, Y'_l$  为相应的贝塞尔函数求导表达式， $u_3 = k \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_3^2}, l$  为角向序数。

图 2 给出了镀金膜五层结构 LPFG 的  $\text{HE}_{12}$  模的  $y(n_{\text{eff},r}, n_{\text{eff},i})$  在复平面上第三包层模式  $\text{HE}_{12}$  复根附近的函数值图形。图中实部横坐标为  $n_{\text{eff},r} - n_{\text{eff},r0}$ ，表

示  $\text{HE}_{12}$  复根实部附近取值与  $n_{\text{eff},i0}$  的差值；虚部横坐标为  $n_{\text{eff},i}$ ，表示  $\text{HE}_{12}$  复根虚部在  $n_{\text{eff},i0}$  附近取值。计算得到  $\text{HE}_{12}$  的复根为  $1.462565855223 + i \times 4.5048347 \times 10^{-6}$ ，忽略  $n_3$  的虚部求出的零级解为  $1.462567423373$ ，和复根实部差别不大，复根虚部数量级和文献<sup>[17]</sup>相符。采用这种方法所求得的复根

较好符合预先设定的初始值即零级解附近,从而也充分验证了贝塞尔函数处理方法的合理性和可行性。

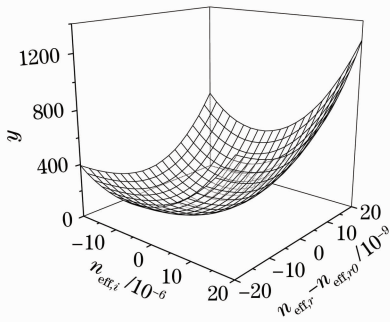


图2 特征方程  $y(n_{\text{eff},r}, n_{\text{eff},i})$  在第三个根  $\text{HE}_{12}$  附近的值  
Fig. 2 The value of characteristic equation  $y(n_{\text{eff},r}, n_{\text{eff},i})$  around  $\text{HE}_{12}$

以镀金膜为例,若无特别声明,所采用的光纤参数和光栅参数为:  $a_1 = 4.15 \mu\text{m}$ ,  $a_2 = 62.4 \mu\text{m}$ ,  $a_3 = a_2 + 20 \text{ nm}$ ,  $a_4 = a_3 + 200 \text{ nm}$ ;  $n_1 = 1.4681$ ,  $n_2 = 1.4628$ ,  $n_3 = 0.559 + i \times 9.81$ ,  $n_4 = 1.57$ ,  $n_5 = 1.0$ . 纤芯平均折射率的改变量为  $4 \times 10^{-4}$ , 光栅周期  $\Lambda$  选为  $450 \mu\text{m}$ . 值得注意的是,金属膜层厚度必须非常薄,远小于波长数量级,才能保证电磁场穿过金属膜层。

镀金属膜两层膜系 LPFG 复特征方程的精确求根,为研究此类结构的 LPFG 耦合特性奠定了理论基础。

## 4 五层结构 LPFG 耦合特性研究

### 4.1 功率密度

纤芯区域内功率密度所占比重,反映了包层模式和芯层模式的耦合强度大小。为了形象地描绘 LPFG 中光场横向的分布情况,图 3 给出了前六个一阶包层模式功率密度的径向分布曲线。图中曲线表明,各模式功率密度曲线在光纤内振荡减小分布,并且由于金属的损耗性质,在金属薄膜层内急剧而下;同时可看出,低阶偶次模式( $\nu=2, 4, 6$ )在纤芯内的功率密度所占比重远大于奇次模式( $\nu=1, 3, 5$ )。由此可以得出,镀金属薄膜的 LPFG 低阶偶次包层模式与纤芯模式的耦合强度,要比低阶奇次包层模式与纤芯模式的耦合强度强得多。Yue-Jing He<sup>[11]</sup> 理论研究了镀金属薄膜(膜层) LPFG 传感器的耦合特点和透射特性,在前几十个包层模式中,模拟计算得到的偶次模的耦合系数大于奇次模的耦合系数,这和上述结论一致。这些新的结论和非镀金属膜结构的 LPFG 的包层模式与纤芯模式的耦合

情况正好相反<sup>[18,19]</sup>。

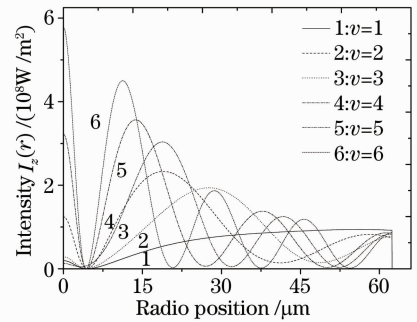


图3 前六个低阶包层模的功率密度沿径向的分布  
Fig. 3 The intensity of the cladding modes (1~6) in the radial direction

当膜层的消光系数非常小( $10^{-3}$ 数量级)时,对纤芯内功率密度的比重影响并不大<sup>[20]</sup>;但对于金属膜,其消光系数很大,纤芯内各包层模式功率密度分布的新特性正是由此所致。为了清晰表明金属膜层消光系数的具体作用,设计了膜层消光系数不同理论取值,模拟计算包层模式的功率密度在光纤内的变化特点。HE 模式代表奇数次模式,EH 模式代表偶数次模式。选择第 6( $\text{EH}_{13}$ )和第 7( $\text{HE}_{14}$ )包层模式作为研究对象,图 4 和图 5 给出当消光系数理论取值分别为 0.004 和 9.81 时,包层模式  $\text{EH}_{13}$  和  $\text{HE}_{14}$  的功率密度分布曲线。

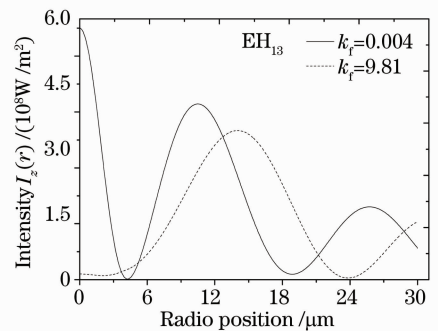


图4 不同消光系数的  $\text{EH}_{13}$  包层模式的功率密度沿径向的分布  
Fig. 4 The intensity of  $\text{EH}_{13}$  with different extinction coefficients in the radial direction

图中为了清楚地显示功率密度的变化特点,只画出了半径为  $30 \mu\text{m}$  内的功率密度分布情况。图 4 显示当消光系数取值为 9.81 时,纤芯内  $\text{EH}_{13}$  模式的功率密度所占比重较大;而图 5 显示当消光系数取值为 0.004 时,纤芯内  $\text{HE}_{14}$  模式的功率密度所占比重较大。消光系数为 0.004 的薄膜可视为弱吸收薄膜,徐艳平<sup>[20]</sup> 研究了镀弱吸收薄膜的 LPFG 理论特性,指出纤芯内低阶奇次模式的功率密度所占比重

大于偶次模式,此规律和上述消光系数理论取值为 0.004 时,模拟计算得到的纤芯内功率密度分布特点一致。同时,变化消光系数取值为 9.81 时,计算得到了镀金属膜的 LPFG 包层模式功率密度分布的不同特点,则有力地证实了此理论模型的正确性,从而也验证了此处理方法的合理性。

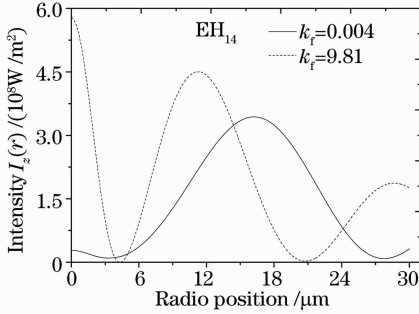


图 5 不同消光系数的 EH<sub>14</sub> 包层模式的功率密度沿径向的分布

Fig. 5 The intensity of EH<sub>14</sub> with different extinction coefficients in the radial direction

纤芯区域内功率密度所占比重,反映了包层模式和芯层模式的耦合强弱,从而对包层模式透射谱中的衰减峰的幅度产生重大影响。图。观察图 6 可得,消光系数取值 9.81 时,模式

### 4.2 透射谱

图 6 和图 7 分别描绘了消光系数分别为 0, 0.004 和 9.81 时,包层模式 EH<sub>13</sub> 和 HE<sub>14</sub> 的透射谱

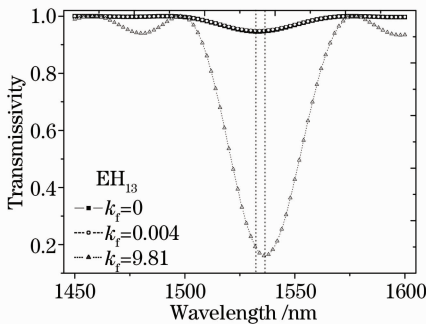


图 6 不同消光系数的 EH<sub>13</sub> 包层模式的透射谱图

Fig. 6 The intensity of EH<sub>13</sub> with different extinction coefficients

EH<sub>13</sub> 的透射谱中的衰减峰幅度,比消光系数取值 0.004 时要大;图 7 显示了,消光系数取值 0.004 时,模式 HE<sub>14</sub> 的衰减峰幅度,比消光系数取值 9.81 时要大。又可从两图中得知,消光系数理论取值分别为 0 和 0.004 时,两模式的透射谱图几乎拟为一体,说明消光系数取值很小时,对衰减峰影响很小,这和文献[20]相符。

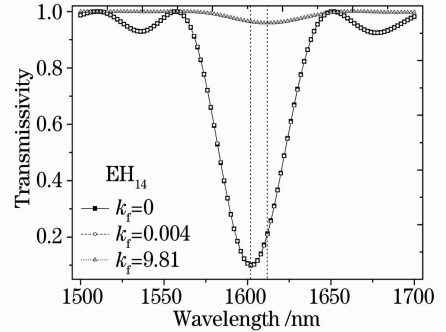


图 7 不同消光系数的 EH<sub>14</sub> 包层模式的透射谱图

Fig. 7 The intensity of EH<sub>14</sub> with different extinction coefficients

综合两图知,消光系数取值 9.81 时的透射谱变化特性,正好验证了 4.1 节中,纤芯中低阶偶次模式的功率密度所占比重比奇次模式要大的分布规律,从而得到偶次模式和芯层模的耦合强度要高于奇次模式和芯层模的耦合强度的结论,对应于透射谱中偶次模式的衰减峰幅度要比奇次模式大的透射特性;同时,消光系数取值 0.004 时的奇、偶次模式的透射谱变化特性,和文献[20]研究结果相符,这也从另一角度证明了此理论处理模型的可信性。

观察图 6 和图 7 得知,消光系数取值 9.81 时的谐振峰位置比消光系数取值 0.004 时的位置向长波方向漂移了几个纳米。表 1 给出了包层模式 EH<sub>13</sub> 和 HE<sub>14</sub> 的谐振波长随消光系数不同理论取值时的变化情况。表中可以看出,消光系数取值为 0 和 0.004 时,谐振波长偏移量极小;但消光系数取值 9.81 时,谐振波长都向长波方向漂移, EH<sub>13</sub> 的偏移量为 4.030 nm, HE<sub>14</sub> 的偏移量为 7.091 nm,这几个纳米的偏移量,和文献[5]、文献[10]的理论数据相符。

表 1 模式 EH<sub>13</sub> 和 HE<sub>14</sub> 随消光系数不同理论取值时的谐振波长

Tab 1 The resonant wavelength of EH<sub>13</sub> and HE<sub>14</sub> as different extinction coefficients

$k_f$ (EH <sub>13</sub> )	$\lambda$ /nm	$\Delta\lambda$ /nm	$k_f$ (HE <sub>14</sub> )	$\lambda$ /nm	$\Delta\lambda$ /nm
0	$\lambda_0 = 1532.243$		0	$\lambda_0 = 1602.230$	
0.004	$\lambda_1 = 1532.249$	$\lambda_1 - \lambda_0 = 0.006$	0.004	$\lambda_1 = 1602.238$	$\lambda_1 - \lambda_0 = 0.008$
9.81	$\lambda_2 = 1536.273$	$\lambda_2 - \lambda_0 = 4.030$	9.81	$\lambda_2 = 1609.321$	$\lambda_2 - \lambda_0 = 7.091$

文献[5]和文献[10]给出了 LPFG 镀金属薄膜实验前后的透射谱对比图,其研究选用的是奇次模式。给出的图中清晰表明,镀膜后的衰减峰幅度比镀膜前小了很多,且谐振峰位置向长波方向偏移了几个纳米,此变化规律和上述理论模拟的奇次模式  $EH_{14}$  的透射谱变化特性基本一致;但是,对镀金属膜后的衰减峰幅度变小现象,并没有作深入地研究,也没有给出合理的理论说明。这种新的透射特性是膜层的消光系数较大所致。从金属的理论特性上来看,对于表面等离子体共振 (SPR) 光纤光栅的金属表面,只有 TM 波存在,而 LPFG 中的偶次模式正是对应了 TM 波,金属等离子体表面波加强了偶次包层模式和芯层模式的耦合,使得偶次模式的衰减峰幅度变大,奇次模式衰减峰幅度相对变小。

综合上述,金属膜的消光系数对透射谱中的谐振峰幅度和位置影响很大,因此,在研究金属镀层 LPFG 的谐振特性和 SPR 光纤光栅传感器的优化设计时,要选择偶次模式作为研究对象,并且,金属膜的消光系数要充分考虑才能符合实际情况。

新型 LPFG 结构特点,在于包层外增添了金属膜层和敏感膜层,这种类型的 LPFG,既可以利用敏感膜层对外界环境变化异常敏感的特性,也可利用金属膜层的温度和应变调节来改变谐振波长的特点,进一步优化 LPFG 谐振特性,由此,膜层参数对 LPFG 的影响尤为值得关注。

## 5 膜层参数对 LPFG 谐振特性的影响

### 5.1 金属膜层厚度对 LPFG 的影响

首先考察敏感膜层参数一定时,不同金属膜层厚度对 LPFG 谐振特性的影响。图 8 给出了敏感薄膜折射率  $n_4 = 1.57$ ,敏感膜层厚度  $h_4 = 200$  nm 时,  $EH_{13}$  模式的谐振波长随不同金属膜层厚度的变化规律。图 8 中的曲线可分成 A、B、C 三个区域,在 A、C 区域,谐振波长随金属膜层厚度单调减小,而在 B 区域则表现出不规则的跳变特性。

图 9 给出了  $EH_{13}$  模式在不同金属膜层厚度 ( $h_3 = 10, 20, 30$  nm) 时的透射谱图。从图 9 中可以看出,随着金属膜层厚度的增加,谐振峰向短波方向漂移,漂移量在  $h_3 = 20 \sim 30$  nm 范围比  $h_3 = 10 \sim 20$  nm 范围要大,同时,随着金属膜层厚度的增加,谐振峰幅度也有所减小。

### 5.2 敏感膜层参数对 LPFG 的影响

然后考察金属膜层厚度一定时,不同敏感膜层参数对 LPFG 谐振特性的影响。图 10 和图 11 分别

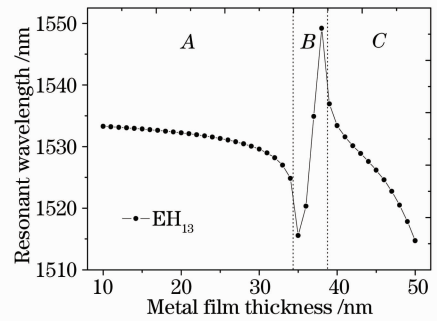


图 8 谐振波长随金属膜层厚度的变化

Fig. 8 Resonant wavelength for metal film thickness

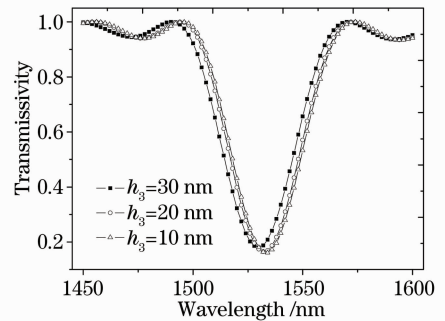


图 9 不同金属膜层厚度时的透射谱

Fig. 9 Transmission as different thickness of metal film

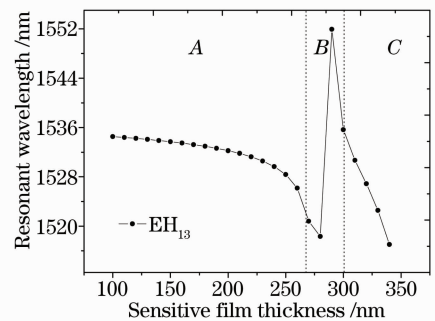


图 10 谐振波长随敏感膜层厚度的变化

Fig. 10 Resonant wavelength for sensitive film thickness

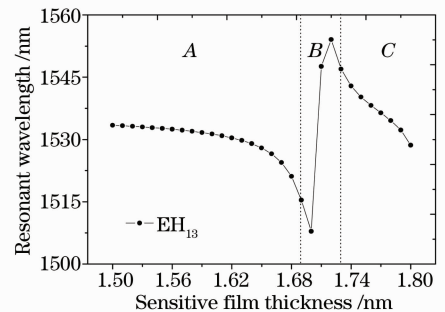


图 11 谐振波长随敏感膜层折射率的变化

Fig. 11 Resonant wavelength for sensitive film index

给出了金属薄膜厚度  $h_3 = 20$  nm 时,  $EH_{13}$  模式的谐振波长随敏感膜层厚度和敏感膜层折射率的变化规

律。图 10 和图 11 中的曲线同样可以分成 A, B, C 三个区域, 在 A, C 区域, 谐振波长随敏感膜层参数单调减小, 而在 B 区域表现出不规则的跳变特性。Nicholas D R<sup>[21]</sup> 等研究了镀膜 LPFG 的膜层厚度对模式  $HE_{13}$  和  $EH_{13}$  的谐振波长偏移的影响, 实验结果和上述理论模拟一致, 并且在跳变区域 B, 没有观察到谐振峰, 文献[21]对此解释为, 该区域的膜层与空气的等效折射率与包层折射率大致相等, 因而不存在包层模耦合现象。由此可见, 金属镀层两层膜系 LPFG 的谐振波长随膜层参数变化具有类似性, 因此, 传感器优化设计时, 膜层参数选择需要避开 B 区域。

图 12 和图 13 分别给出了  $EH_{13}$  模式在不同敏感膜层厚度 ( $h_4 = 100, 180, 260$  nm) 和不同敏感膜层折射率 ( $n_4 = 1.50, 1.58, 1.66$ ) 时的透射谱图。观察两图得知, 随着敏感膜层厚度和敏感膜层折射率的增加, 谐振峰都向短波方向漂移, 且漂移量逐渐增大, 谐振峰位置变化规律和图 10、图 11 符合较好, 同时, 谐振峰的幅度也有所减小。

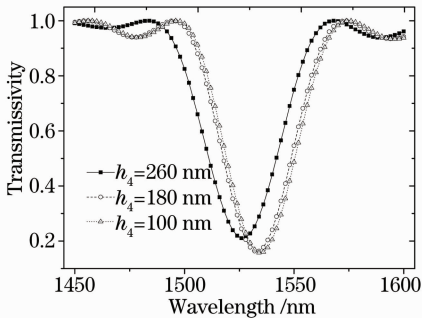


图 12 不同敏感膜层厚度时的透射谱

Fig. 12 Transmission as different thickness of sensitive film

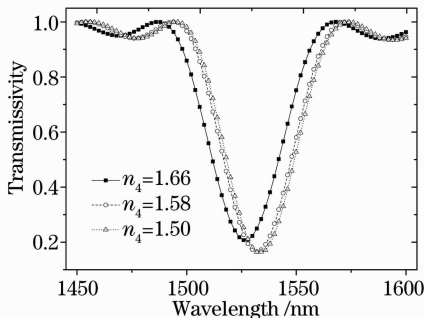


图 13 不同敏感膜层折射率时的透射谱

Fig. 13 Transmission as different refractive index of sensitive film

表 2 给出了几种典型的膜层参数下的  $EH_{13}$  模式的谐振波长值, 可便于清晰观察谐振波长随膜层参数的变化规律。

表 2 模式  $EH_{13}$  在不同膜层参数取值时的谐振波长

Table 2 The resonant wavelength of  $EH_{13}$  as different film parameters

$h_3$ / nm	$\lambda$ / nm	$h_4$ / nm	$\lambda$ / nm	$n_4$	$\lambda$ / nm
10	1533.30	100	1534.52	1.50	1533.43
20	1532.24	180	1532.94	1.58	1531.98
30	1529.58	260	1526.19	1.66	1526.53

## 6 结 论

基于严格的耦合模理论, 建立了金属镀层两层膜系五层结构 LPFG 的结构模型, 并给出了其包层模复特征方程及其求解方法, 所求复根和文献[5]的理论数据相符。

重点研究了镀金属膜和敏感膜 LPFG 的耦合特性, 研究表明, 金属膜层的消光系数对包层模式的耦合特性具有很大影响, 低阶偶次模式在纤芯内的功率密度所占比重远大于奇次模式, 低阶偶次模式的衰减峰幅度比奇次模式高。这一新特性, 其理论解释为, 金属等离子体表面波加强了偶次包层模式和芯层模式的耦合, 使得低阶偶次模式的透射峰幅度变大, 而低阶奇次模式透射谱幅度变小。同时, 考虑金属膜层的消光系数后, 谐振波长向长波方向偏移了几个纳米, 和文献[5], 文献[10]数据符合较好。

进一步理论模拟了金属膜层厚度、敏感膜层厚度和折射率对 LPFG 谐振特性的影响, 研究发现, 谐振波长随膜层参数变化存在跳变现象, LPFG 实际应用时应该避开跳变区域, 且在一定的膜层参数取值范围内, 谐振波长向短波方向漂移, 谐振峰深度也有所减小。

此研究工作, 可为金属镀层 LPFG 传感器的优化设计提供一定的理论支持, 同时, 在传感器结构优化设计时, 要充分考虑金属膜层消光系数的影响, 选择偶次模式作为研究对象。

## 参 考 文 献

- Zhao Hongxia, Bao Jilong, Chen Ying. Bending sensing rules for long-period fiber grating [J]. *Acta Optical 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
- Duhem O, Descota A, Henninot J F. Long period copper-coated grating as an electrically tunable wavelength-selective filter [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(12): 1014~1016
- Jesus M. Corres, Ignacio del Villar, Ignacio R. Matias *et al.*. Fiber-optic pH-sensors in long-period fiber gratings using electrostatic self-assembly [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**, (1): 29~31
- Gu Zhengtian, Xu Yanping. Optical fiber long-period grating with solgel coating for gas sensor [J]. *Opt. Lett.*, 2006,



- 31(16): 2405~2407
- 5 Zhang Zijia, Shi Wenkang, Gao Kai *et al.*. Theoretical and experimental investigation of metal coated long-period fiber gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 897~901  
张自嘉, 施文康, 高 侃 等. 金属包层长周期光纤光栅的理论和实验研究 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 897~901
- 6 Shu Xuewen, Huang Dexiu. Highly sensitive chemical sensor based on the measurement of the separation of dual resonant peaks in a 100- $\mu\text{m}$ -period fiber grating [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **171**: 65~69
- 7 Gu Zhengtian, Xu Yanping, Deng Chuanlu. Dual-peak resonance and transmission spectrum in coated long-period fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 219~225  
顾铮先, 徐艳平, 邓传鲁. 表面镀层长周期光纤光栅双峰谐振及其透射谱研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 219~225
- 8 Gu Zhengtian, Xu Yanping. Optimization design of fiber grating film sensor based on dual peak resonance [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(2): 164~167  
顾铮先, 徐艳平. 双峰效应光纤光栅薄膜传感器的优化设计 [J]. *光电子 • 激光*, 2008, **19**(2): 164~167
- 9 Costantini D M, Muller C A P, Vasiliev S A *et al.*. Tunable loss filter based on metal-coated Long period fiber grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(11): 1458~1460
- 10 Wei Huai, Tong Zhi, Wang Muguang *et al.*. Long-period fiber grating with metal coating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(8): 931~936  
魏 淮, 童 治, 王目光 等. 镀金属长周期光纤光栅的研究 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(8): 931~936
- 11 He YueJing, Lo YuLung, Huang JenFa. Optical-fiber surface-plasmon-resonance sensor employing long-period fiber gratings in multiplexing [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(5): 801~811
- 12 Gloge D. Weakly guiding fibers [J]. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(10): 2252~2258
- 13 Tsao C. *Optical fiber Waveguide Analysis* [M]. New York: Oxford University Press, 1992
- 14 Kaminow I P, Mammel W L, Weber H P. Metal coated waveguides: analytical and experimental study [J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(2): 396~405
- 15 Robert J S, Sandra L H. *Numerical Methods Using MATLAB (Third Edition)* [M]. New Jersey: Pearson Education, 1998
- 16 Liang Kunmiao. *Methods of Modern Mathematical Physics* [M]. Higher Education Press, 2004, 327~327  
梁昆淼编. *数学物理方法* [M]. 高等教育出版社, 2004, 327~327
- 17 Zhang Zijia, Shi Wenkang. Investigation of the cladding modes of metal coated fibers [J]. *J. Shanghai Jiao tong University*, 2004, **38**(11): 1847~1850  
张自嘉, 施文康. 金属包层光纤的包层模式 [J]. *上海交通大学学报*, 2004, **38**(11): 1847~1850
- 18 Turan Erdogan. Cladding mode resonances in short- and long-period fiber grating filters [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(8): 1760~1773
- 19 Xu Yanping, Gu Zhengtian, Chen Jiabi. The relation between resonant wavelengths and film optical parameters of triple-clad long-period fiber grating [J]. *Optical Technology*, 2006, **32**(2): 177~182  
徐艳平, 顾铮先, 陈家璧. 三包层长周期光纤光栅谐振波长与薄膜光学参数的关系 [J]. *光学技术*, 2006, **32**(2): 177~182
- 20 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
- 21 Nicholas I D R, Stephen W J, Ralph P T. Optical fiber long-period gratings with Langmuir-Blodgett thin-film overlays [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(9): 686~688