

文章编号: 0253-2239(2010)08-2189-07

# 薄膜消光系数对镀膜长周期光纤光栅传输谱的影响

蒋秀丽<sup>1,2</sup> 顾铮<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 上海理工大学光电功能薄膜实验室, 上海 200093; <sup>2</sup> 上海电力学院数理系, 上海 200090)

**摘要** 在长周期光纤光栅外镀折射率随环境变化而改变的敏感薄膜, 其谐振波长随薄膜折射率的变化而改变。对无吸收薄膜, 光栅耦合强度为  $\pi/2$  时, 其传输谱中谐振波长对应的损耗峰峰值为零。镀复折射率薄膜的长周期光纤光栅, 耦合强度为  $\pi/2$  时, 损耗峰不为零, 在谐振波长对薄膜折射率变化响应灵敏的区域, 包层模传输常数的虚部较大, 损耗峰幅值减小, 甚至消失, 不利于谐振波长的测量。通过求解镀膜复折射率薄膜长周期光纤光栅的耦合模方程, 得到了损耗峰峰值的解析解。找到了损耗峰为零的条件。在此条件下设计光栅, 可以有效地避免损耗峰减小带来的不利因素。

**关键词** 光纤光学; 长周期光纤光栅; 薄膜消光系数; 损耗峰; 光栅长度

中图分类号 TP212.14 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103008.2189

## Impact of Thin Film Extinction Coefficient on Coated Long-Period Fiber Grating Transmission Spectrum

Jiang Xiuli<sup>1,2</sup> Gu Zhengtian<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Photo-Electric Functional Films, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China  
<sup>2</sup>Department of Math and Physics, Shanghai Institute of Electric Power, Shanghai 200090, China

**Abstract** The resonant wavelength of long-period fiber grating (LPFG) coated with sensitive film, whose refractive index varies with the surrounding medium, changes with the film refractive index. When the coupling strength of LPFG with non-absorbing film coating is  $\pi/2$ , the loss peak corresponding to the resonance wavelength gets to zero. However, it is not the case for the LPFG coated with complex refractive index film. When the coupling strength of LPFG with complex refractive index film is  $\pi/2$ , the loss peak is not zero. While the resonant wavelength is sensitive to the film refractive index, imaginary part of propagation constant of clad mode becomes larger, which causes reduction or even disappearance of the loss peak. It is not conducive to the measurement of resonant wavelength. Analytical solution of the value of the loss peak is obtained by solving the coupled-mode equations for LPFG with complex refractive index film. The condition under which loss peak gets to zero is found. Designing LPFG according this principle, the unfavorable factor mentioned above can be effectively avoided.

**Key words** fiber optics; long-period fiber grating; extinction coefficient of thin-film; loss peak; grating length

## 1 引 言

长周期光纤光栅(LPFG)是光纤纤芯折射率沿轴向受到周期性地调制<sup>[1]</sup>而形成,周期一般在几十

至几百微米,现已广泛的应用于光纤通信<sup>[2,3]</sup>与传感领域<sup>[4~6]</sup>。LPFG可使波长满足相位匹配条件的光发生芯模与同向传输的包层模之间的耦合<sup>[7]</sup>,由

收稿日期: 2009-08-26; 收到修改稿日期: 2009-11-27

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)资助课题。

作者简介: 蒋秀丽(1978—),女,博士研究生,讲师,主要从事光电功能薄膜、光纤通信与传感等方面的研究。

E-mail: showleejiang@yahoo.com.cn

导师简介: 顾铮(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光电工程与测量、光电功能薄膜及光纤传感器等方面的研究。E-mail: zhengtiangu@163.com(通信联系人)

于包层模损耗大,故 LPFG 的传输谱对应此谐振波长出现相应的损耗峰。包层模易受到外界环境的影响,从而导致谐振波长的变化,LPFG 已应用于溶液浓度或折射率传感器<sup>[8]</sup>。但仅当环境折射率低于并接近于包层折射率时,LPFG 谐振波长对外界折射率变化比较敏感<sup>[9]</sup>。

在长周期光纤光栅外镀一层折射率高于包层的薄膜最先由 James 提出<sup>[10]</sup>。镀膜长周期光纤光栅传感器成为研究的热点。环境折射率与薄膜参数(厚度与折射率)的变化均可以引起镀膜 LPFG 的谐振波长的改变。溶液浓度变化可引起其折射率的改变,则镀膜的 LPFG 可作为溶液浓度传感器。若薄膜为参数随环境变化的敏感功能薄膜,即可实现对多种环境量的检测,如用作湿度传感器<sup>[11]</sup>、气体浓度传感器等<sup>[12]</sup>。Villar 详细研究了镀膜 LPFG 的谐振波长随薄膜层厚度的变化<sup>[13,14]</sup>,在特定厚度区域谐振波长变化较快。Villar 分析原因为在此区域,随着薄膜厚度的改变,最低阶的包层模转为薄膜层的导模,相应的每一个模式都向低一阶的模式转变,称为模式重组过程,此时包层模的有效折射率变化迅速,故相应的谐振波长变化较快。恰当设置薄膜厚度、薄膜折射率与环境折射率,其中任何一个参数的变化均可引起模式重组过程,谐振波长可对其有高的灵敏度<sup>[15~18]</sup>。

James 与 Villar 实验发现随着薄膜厚度的增加,在模式重组过程中,谐振波长发生较大移动的同时相应损耗峰深度减小,甚至消失。不利于谐振波

长的测量,这给传感器的实际应用造成困难。Villar 指出薄膜层的吸收是其中原因之一<sup>[13]</sup>。本文针对镀膜的 LPFG 气体传感器(薄膜折射率随气体参数的变化而改变),讨论了薄膜层吸收对其传输谱的影响。对无吸收薄膜,光栅的耦合强度为  $\pi/2$  时,谐振波长对应的损耗峰为零,镀复折射率薄膜的 LPFG,由于薄膜层的吸收,光栅的耦合强度为  $\pi/2$  时,谐振波长对应的损耗峰不为零,若损耗峰深度很小则不利于谐振波长的测量。通过求解镀膜复折射率薄膜的 LPFG 的耦合模方程,得到了损耗峰峰值的解析解,其大小与耦合系数、光栅长度及薄膜层吸收所致的包层模传输常数的虚部有关。找到了损耗峰值为零的条件。根据这一条件设计光栅,可以较好地改善上述不利因素。

## 2 镀膜长周期光纤光栅及其传感原理

图 1(a)和(b)给出了镀气敏薄膜的长周期光纤光栅气体传感器的结构和折射率分布示意图。图 1(b)中各符号代表的物理量分别:  $a_1$  为纤芯半径,  $a_2$  为包层半径,则  $h = a_3 - a_2$  为敏感薄膜厚度。  $n_1$  为纤芯折射率,  $n_2$  为包层折射率,  $N_3 = n_3 + ik$  为薄膜复折射率,其中  $n_3$  为薄膜折射率,随外界气体性质的变化而改变,  $k$  为薄膜的消光系数,  $n_4$  为周围气体环境的折射率。通常用  $\Delta_1$  表示纤芯折射率调制的周期,  $L$  表示光栅的长度,  $\sigma$  表示光纤纤芯的平均折变量。

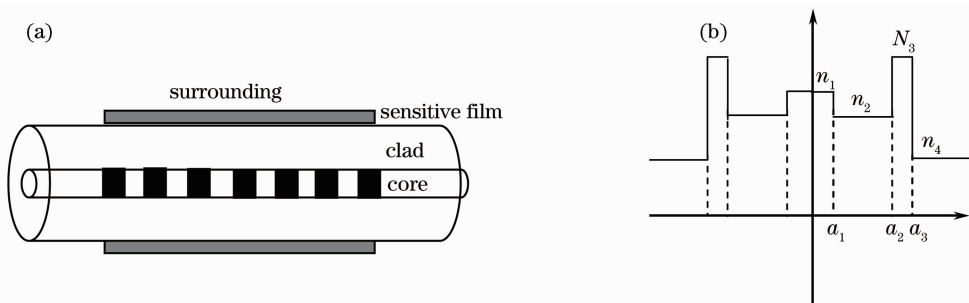


图 1 镀膜 LPFG 气体传感器模型。(a)结构图;(b)折射率分布图

Fig. 1 Gas sensor modal of long-period fiber gratings with film coating. (a) structural diagram; (b) refractive index profile

Tao 给出了三包层圆柱型光波导混合模(EH/HE 模)的特征方程<sup>[19]</sup>,可解得各个模式的传输常数,进而求得各包层模的有效折射率。图 2 给出了前五个包层模的有效折射率随薄膜折射率的变化,设薄膜消光系数为 0。其它参数分别为:纤芯半径  $a_1 = 4.15 \mu\text{m}$ ,包层半径  $a_2 = 62.5 \mu\text{m}$ ,薄膜厚度  $h = a_3 - a_2 = 200 \text{ nm}$ 。纤芯折射率  $n_1 = 1.4681$ ,包层折射率

$n_2 = 1.4628$ ,环境折射率  $n_4 = 1$ 。如无特别声明,本文计算均采用上述参数值。由图 2 可知随着薄膜折射率的增加,各个模式的有效折射率均增大,当薄膜折射率增大至 1.7 时,包层模有效折射率随薄膜折射率的变化加快。薄膜折射率达到 1.725 时,第一个包层模式截止,第二个包层模折射率增大至第一个模式的有效折射率,依次类推,称为模式重组。

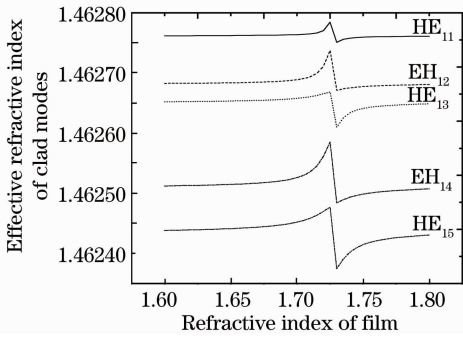


图 2 光纤包层模有效折射率随薄膜折射率的变化  
Fig. 2 Effective refractive index of clad modes versus film refractive index

光栅谐振波长满足方程

$$\lambda_{\text{res}}^m = \Lambda(n_{\text{co}} - n_{\text{cl}}^m), \quad (1)$$

式中  $\Lambda$  为光栅周期,  $n_{\text{co}}$  为芯模的有效折射率, 两者不随薄膜折射率的变化而改变,  $n_{\text{cl}}^m$  为  $m$  阶包层模的有效折射率, 在模式重组过程包层模有效折射率随薄膜折射率变化迅速, 相应的光纤光栅的谐振波长移动较快。在此区域光栅谐振波长对薄膜折射率变化的灵敏度高。图 3 给出第 5 阶谐振波长随薄膜折射率的变化, 光栅周期为  $400 \mu\text{m}$ 。薄膜折射率从  $1.60 \sim 1.72$ , 谐振波长改变约  $8 \text{ nm}$ , 而在  $1.70 \sim 1.72$  区域谐

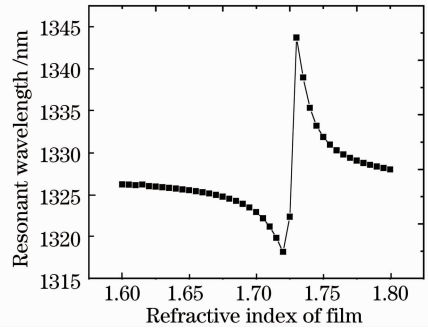


图 3 谐振波长随薄膜折射率的变化  
Fig. 3 Resonant wavelength versus film refractive index  
谐振波长移动将近  $5 \text{ nm}$ 。

对不同折射率的敏感薄膜, 选择恰当的薄膜厚度, 当敏感薄膜折射率发生变化时, 可发生模式重组现象<sup>[14]</sup>, 此时包层模有效折射率变化迅速。图 4(a) 给出了在不同薄膜参数(薄膜折射率与厚度)下, 第五阶包层模有效折射率相对薄膜折射率的变化率, 图 4(b) 给出了此变化率为  $10^{-3}$  的等高线。该等高线之间的区域对应变化率大于  $10^{-3}$  的薄膜参数。图中可以看出对特定的敏感薄膜, 其折射几乎确定, 此时需恰当的薄膜厚度, 当敏感薄膜折射率发生微小变化时, 包层模有效折射率及光栅谐振波长才可发生较大变化<sup>[16]</sup>。

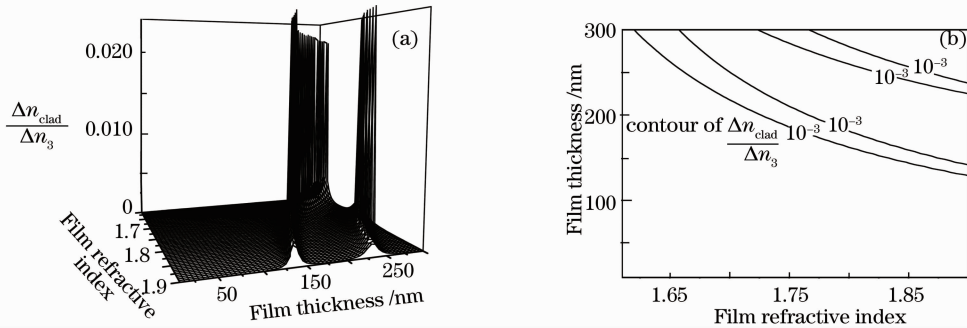


图 4 (a) 不同薄膜厚度与折射率下包层模有效折射率相对薄膜折射率的变化率; (b) 包层模有效折射率相对薄膜折射率变化率的等高线

Fig. 4 (a) Clad mode index change rate with respect to film refractive index under different film parameters; (b) contour of (a)

实验中, 损耗峰太宽或太小都将影响谐振波长测量的精度, 所以理论分析时不仅要考虑谐振波长的位置, 而且要研究传输谱的形状。下面将研究在模式重组区域, 薄膜吸收对损耗峰的影响。

### 3 薄膜消光系数对长周期光纤光栅透射谱的影响

#### 3.1 耦合模方程

光纤纤芯折射率轴向的周期性变化, 破坏了规

则光纤各模式之间的正交性, 在不同模式之间发生能量耦合。光纤芯模与  $m$  阶包层模的耦合模方程为<sup>[7]</sup>

$$\frac{dA_{\text{co}}}{dz} = iKA_{\text{cl}}^m \times \exp(-i2\delta z), \quad (2a)$$

$$\frac{dA_{\text{cl}}^m}{dz} = iKA_{\text{co}} \times \exp(i2\delta z), \quad (2b)$$

$$\delta = \frac{1}{2} \left( \beta_{\text{co}} - \beta_{\text{cl}}^m - \frac{2\pi}{\Lambda} \right), \quad (2c)$$

式中  $A_{co}$  是芯模振幅,  $A_{cl}^m$  是  $m$  阶包层模振幅.  $K$  是芯模与  $m$  阶包层模之间的耦合系数.  $\beta_{co}$ ,  $\beta_{cl}^m$  分别是芯模和  $m$  阶包层模的传输常数.

若初始条件为  $A_{co}(0) = 1, A_{cl}^m(0) = 0$ , 求解方程(2a)与(2b)式, 经过长度为  $L$  的 LPFG, 芯模的透射率可以表示为

$$I = |A_{co}(L)|^2 = \cos^2 \sqrt{K^2 + \delta^2} L + \frac{\delta^2}{K^2 + \delta^2} \sin^2 \sqrt{K^2 + \delta^2} L. \quad (3)$$

谐振波长处即  $\delta = 0$  时, 对应的透射率为  $\cos^2(KL)$ .  $KL$  称为耦合强度, 即耦合系数与光栅长度的乘积, 是 LPFG 的重要参数. 它决定了 LPFG 的谐振波长的透射率, 即传输谱中损耗峰峰值的大小. 耦合强度  $KL$  为  $\pi/2$  时, 谐振波长对应透射率为零.

若考虑薄膜的吸收, 则薄膜的折射率为复数, 由三层圆柱型光波导混合模(EH/HE 模)的特征方程, 所得包层模的传输常数亦为复数, 可写为  $\beta_{cl}^m = \beta' + i\beta''$ ,  $\beta'$  为实部,  $\beta''$  为虚部, 则耦合模方程可写为

$$\frac{dA_{co}}{dz} = iKA_{cl}^m \exp(-\beta''z) \exp\left[-i\left(\beta_{co} - \beta' - \frac{2\pi}{\Lambda}\right)z\right], \quad (4a)$$

$$\frac{dA_{cl}^m}{dz} = iKA_{co} \exp(\beta''z) \exp\left[i\left(\beta_{co} - \beta' - \frac{2\pi}{\Lambda}\right)z\right], \quad (4b)$$

设边界条件为  $A_{co}(0) = 1, A_{cl}^m(0) = 0$ , 经过长为  $L$  的光栅后, 芯模振幅为  $A_{co}(L)$ , 光经过长周期光纤光栅的透射率可以表示为

$$I = \frac{A_{co}^2(L)}{A_{co}^2(0)} = A_{co}^2(L). \quad (5)$$

对不同波长用数值方法解耦合模方程得到  $I$ , 即可得到透射谱. 光纤参数与光栅周期及长度一定时, 随着薄膜层参数的变化, 会引起包层模的传输常数及耦合系数  $K$  的变化, 传输谱随之改变.

### 3.2 薄膜消光系数对包层模传输常数的影响

#### 3.2.1 薄膜消光系数对包层模传输常数实部的影响

图 5 给出了薄膜折射率为 1.60 和 1.71 时第 5 阶包层模的传输常数实部随薄膜消光系数的变化. 薄膜折射率为 1.60 时, 远离模式重组区域, 随着薄膜消光系数的增大, 包层模传输常数实部变化很小. 薄膜折射率为 1.71 时, 处于模式重组区域内, 随着薄膜消光系数的增大, 包层模传输常数实部变化虽然较薄膜折射率为 1.60 时明显, 但变化量仍是非常小的.

包层模传输常数实部的改变导致谐振波长的变

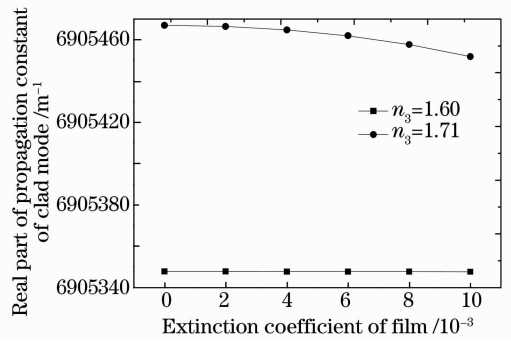


图 5 包层模传输常数实部随薄膜消光系数的变化

Fig. 5 Real part of propagation constant of clad mode under different film extinction coefficients

化, 表 1 给出薄膜折射率分别为 1.60 和 1.71 时不同薄膜消光系数对应的谐振波长. 从表 1 中可看出, 薄膜折射率为 1.60 时, 随着薄膜消光系数从 0~0.01, 谐振波长只改变了 0.005 nm, 薄膜折射率为 1.71 时, 随着薄膜消光系数从 0~0.01, 谐振波长共改变了 0.761 nm.

表 1 薄膜消光系数对谐振波长的影响

Table 1 Impact of film extinction coefficient on resonant wavelength

Extinction coefficient	0	0.004	0.008	0.010
Resonant wavelength / nm ( $n_3 = 1.60$ )	1326.206	1326.206	1326.209	1326.211
Resonant wavelength / nm ( $n_3 = 1.71$ )	1321.163	1321.267	1321.584	1321.824

#### 3.2.2 薄膜消光系数对包层模传输常数虚部的影响

图 6 给出了第 5 阶包层模传输常数虚部随薄膜折射率及消光系数的变化. 图中可看出, 消光系数

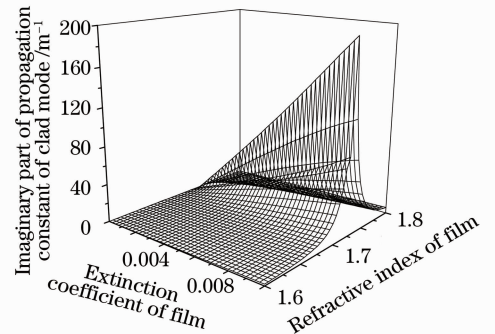


图 6 包层模传输常数虚部随薄膜折射率与消光系数的变化

Fig. 6 Imaginary part of propagation constant of clad mode under different film refractive indices and extinction coefficients



一定,随着薄膜折射率的增大,包层模传输常数虚部增大,在模式重组区域增大迅速。且在模式重组区域消光系数越大,包层模传输常数虚部越大。

### 3.3 薄膜消光系数对耦合系数的影响

图 7 给出了耦合系数随薄膜折射率的变化,设光纤纤芯的平均折变量  $\sigma=1 \times 10^{-4}$ 。图中可以看出在模式重组区域耦合系数迅速减小。

表 2 表示了薄膜折射率为 1.60 和 1.71 时耦合系数随薄膜消光系数的变化。可以看出薄膜折射率为 1.60 和 1.71 时耦合系数随薄膜消光系数的变化都非常小。

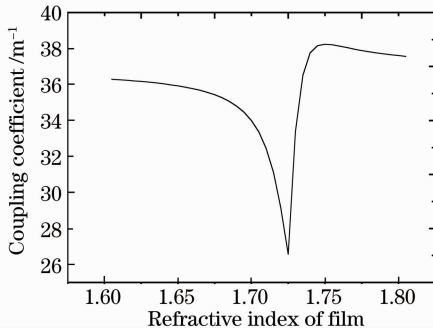


图 7 耦合系数随薄膜折射率的变化

Fig. 7 Coupling coefficient versus film refractive index

表 2 薄膜消光系数对耦合系数的影响

Table 2 Impact of film extinction coefficient on coupling coefficient

Extinction coefficient	0	0.004	0.008	0.01
Coupling coefficient / $m^{-1}$ ( $n_3 = 1.6$ )	36.317	36.317	36.319	36.320
Coupling coefficient / $m^{-1}$ ( $n_3 = 1.71$ )	29.140	29.171	29.309	29.477

### 3.4 薄膜消光系数对传输谱的影响

通过上述分析,在模式重组区域薄膜折射率的变化造成包层模有效折射率的实部及耦合系数较大的变化,而薄膜消光系数则带来了包层模传输常数的虚部,尤其在模式重组区域薄膜消光系数导致包层模传输常数较大的虚部。设所镀膜折射率为 1.70,若不考虑薄膜层吸收,包层模传输常数虚部为零,则光栅谐振波长透射率为  $\cos^2(KL)$ ,光栅设计时使  $KL=\pi/2$ ,则谐振波长透射率为零。根据这样的设计,图 8 给出了不同薄膜折射率与消光系数时,谐振波长的透射率。由图 8 可以看出,消光系数  $k$  为零,薄膜折射率为 1.70 时谐振波长的透射率为零,随着薄膜折射率的增大,由于耦合系数的降低,

谐振波长的透射率增大。对相同的薄膜折射率,消光系数越大谐振波长的透射率越大,原因是薄膜消光系数所导致的包层模传输常数的虚部。

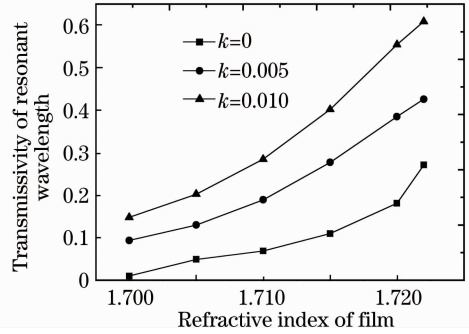


图 8 不同薄膜消光系数与折射率时谐振波长的透射率

Fig. 8 Transmissivity of resonant wavelength under different film extinction coefficients and refractive indices

若实际应用中气敏薄膜的折射率随气体性质的变化在 1.70~1.72 之间改变。设计光栅时,对应薄膜折射率 1.70,使其耦合强度  $KL=\pi/2$ 。若薄膜的消光系数为 0.01,则传感器应用过程中,其传输谱随气敏薄膜折射率的变化如图 9 所示,当气敏膜折射率达到 1.72 时,损耗峰明显减小,而且有较大的展宽,不利于谐振波长的测量。

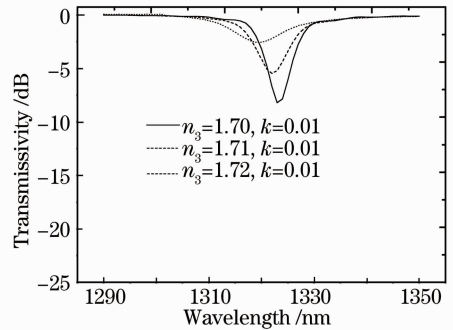


图 9 薄膜消光系数为 0.01 时,不同折射率对应的传输谱

Fig. 9 Transmission spectrum under different indices when the extinction coefficient is 0.01

## 4 避免谐振波长透射率增大的方法

镀膜的 LPFG 作为气体传感器,在实际应用时,希望损耗峰深且窄,这样有利于谐振波长的测量。故对于镀膜折射率薄膜的 LPFG,需要理论上确定影响损耗峰大小的因素,以指导镀膜折射率膜的 LPFG 气体传感器的设计。

耦合模方程(4)式中,若  $\beta_\infty - \beta' - 2\pi/\Lambda = 0$ ,则方程简化为

$$\frac{dA_{e\infty}}{dz} = iKA_{e\infty}^m \exp(-\beta'z), \quad (6a)$$

$$\frac{dA_{cl}''}{dz} = iKA_{co} \exp(\beta'z). \quad (6b)$$

由(6a),(6b)式可得

$$\frac{d^2 A_{co}}{dz^2} + \beta' \frac{dA_{co}}{dz} + K^2 A_{co} = 0. \quad (7)$$

由初始条件  $A_{co}(0)=1, A_{cl}''(0)=0$ , 经过长度为  $L$  的光栅, 可解得

$$A_{co}(L) = \exp\left(-\frac{\beta'}{2}L\right) \cos\left[\sqrt{K^2 - (\beta'/2)^2}L - \varphi\right], \quad (8a)$$

$$\varphi = \arctan\left[\frac{\beta'/2}{\sqrt{K^2 - (\beta'/2)^2}}\right], \quad (8b)$$

随着  $L$  的增大, 芯模振幅呈现阻尼振荡的形式。谐振波长对应的透射率即

$$I = A_{co}^2(L) = \exp(-\beta'L) \cos^2\left[\sqrt{K^2 - (\beta'/2)^2}L - \varphi\right]. \quad (9)$$

若长周期光纤光栅所镀膜折射率为 1.71, 消光系数为 0.01, 厚度为 200 nm, 光栅的平均折变量  $\sigma=1 \times 10^{-4}$ , 不同的光栅长度对应的谐振波长的透射率如图 10 所示, 子图为光栅长度为 0.06~0.20 m 时的放大图。

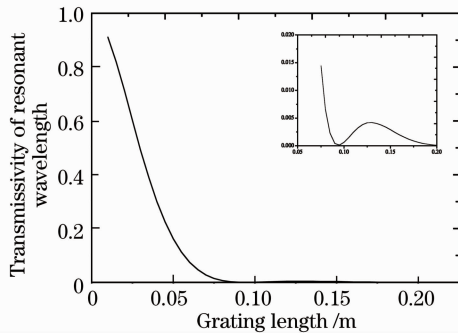


图 10 谐振波长的透射率随光栅长度的变化

Fig. 10 Transmissivity of resonant wavelength versus grating length

为了验证解析解的正确性, 可以通过数值求解方程(4)与(5)式, 得到不同光栅长度的透射谱, 找到不同光栅长度下谐振波长的透射率, 得到的结果与解析解具有很高的一致性。

根据(9)式可知, 其透射率为零的条件是

$$\sqrt{K^2 - (\beta'/2)^2}L = \frac{\pi}{2} + \varphi. \quad (10)$$

当薄膜折射率为 1.71, 消光系数为 0.01, 厚度为 200 nm 时, 在谐振波长处  $K=32.3 \text{ m}^{-1}$ ,  $\beta'=42.5 \text{ m}^{-1}$ , 根据(10)式, 可计算出, 在光栅长度  $L=0.095 \text{ m}$  时, 谐振波长的透射率为零, 谐振波长所对应的损耗峰深度最大。

取光栅长度  $L=0.095 \text{ m}$ , 薄膜折射率在 1.70~1.72 之间变化时对应的传输谱如图 11 所示。图 9 中薄膜折射率为 1.71 时的传输谱线, 谐振波长对应的透射率为 -5.45 dB, 谱线半宽为 8 nm, 图 11 中, 折射率为 1.71 时的传输谱线谐振波长的透射率为 -23.46 dB, 谱线半宽为 2 nm。图 9 中薄膜折射率为 1.72 时的传输谱线, 谐振波长对应的透射率为 -2.54 dB, 谱线半宽为 12 nm, 图 11 中, 折射率为 1.72 时的传输谱线谐振波长的透射率为 -6.3 dB, 谱线半宽为 8 nm。相对于图 9, 图 11 中的光栅参数所对应的传输谱, 更有利于谐振波长的测量。

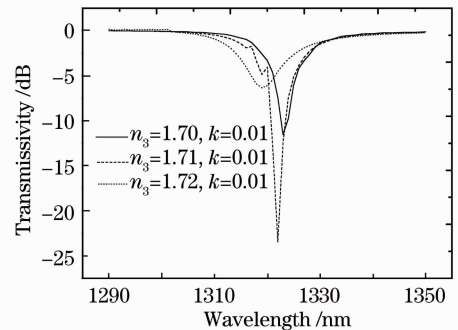


图 11 光栅长度为 0.095 m 时, 不同折射率对应的传输谱

Fig. 11 Transmission spectrum under different indices when the grating length is 0.095 m

对镀膜折射率薄膜的 LPFG, 谐振波长对应的损耗峰的大小, 不仅取决于耦合系数与光栅长度, 还与薄膜消光系数所引起的包层模传输常数的虚部有关。在镀膜折射率薄膜的 LPFG 气体传感器的实际应用中, 可以通过选择恰当的光栅长度, 使谐振波长的透射率尽量的小。

## 5 结 论

通过求解镀膜折射率薄膜 LPFG 的耦合模方程, 对应谐振波长, 得到了芯模的振幅及透射率的解析解。发现芯模振幅随光栅长度增长呈阻尼振荡的形式变化。找到了损耗峰峰值为零的条件。此条件可以有效地指导镀膜折射率薄膜 LPFG 气体传感器的设计, 避免损耗峰深度减小。

### 参 考 文 献

- 1 A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins. Long-period fiber gratings as band-rejection filters [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1): 58~65
- 2 Chen Genxiang, Li Tangjun, Liu Chunqing *et al.*. Study on fiber grating filters for gain flattening[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(10): 1315~1317

- 陈根祥, 李唐军, 刘春宁等. 光纤光栅增益平坦化器件的研究[J]. 光学学报, 1999, **19**(10): 1315~1317
- 3 Li Chunfei, Zang Zhigang. Optical switching in a nonlinear-fiber connected long-period fiber grating pair[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1919~1923
- 李淳飞, 臧志刚. 用非线性光纤连接的长周期光栅对的光开关特性[J]. 中国激光, 2008, **35**(12): 1919~1923
- 4 Gao Kan, Zhou Yingwu, Lin Feng *et al.*. A novel pressure sensor based on long period fiber grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8): 997~1000
- 高侃, 周赢武, 林峰等. 基于长周期光纤光栅的压力传感器[J]. 中国激光, 2004, **31**(8): 997~1000
- 5 Zhan Yage, Cai Haiwen, Xiang Shiqing *et al.*. Study on high resolution fiber bragg grating temperature sensor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 83~86
- 詹亚歌, 蔡海文, 向世清等. 高分辨率光纤光栅温度传感器的研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(1): 83~86
- 6 V. Bhatia, A. M. Vengsarkar. Optical fiber long-period grating sensors[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(9): 692~694
- 7 T. Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 8 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
- 9 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): 1606~1612
- 10 N. D. Rees, S. W. James, R. P. Tatam *et al.*. Optical fiber long-period gratings with langmuir-blodgett thin-film overlayers [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(9): 686~688
- 11 M. Konstantaki, S. Pissadakis, S. Pispas *et al.*. Optical fiber long-period grating humidity sensor with poly (ethylene oxide) / cobalt chloride coating [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(19): 4567~4571
- 12 J. Zhang, X. Tang, J. Dong *et al.*. Zeolite thin film-coated long period fiber grating sensor for measuring trace chemical[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(11): 8317~8323
- 13 I. Del Villar, J. M. Corres, M. Achaerandio *et al.*. Spectral evolution with incremental nano coating of long-period fiber gratings[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(25): 11972~11981
- 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 Zhengtian Gu, Yanping Xu, Kan Gao. Optical fiber long-period grating with solgel coating for gas sensor[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(16): 2405~2407
- 16 Xu Yanping, Gu Zhengtian, Chen Jiabi *et al.*. Structure optimization of long-period fiber grating gas-sensing film sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 326~330
- 徐艳平, 顾铮, 陈家璧等. 长周期光纤光栅气敏薄膜传感器结构优化[J]. 光学学报, 2006, **26**(3): 326~330
- 17 A. Cusano, A. Iadicco, P. Pilla *et al.*. Modetransition in high refractive index coated long period gratings[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(1): 19~34
- 18 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
- 19 C. Tsao. *Optical Fibre Waveguide Analysis*[M]. Oxford: Oxford University Press, 1992