

文章编号: 0253-2239(2007)02-0219-7

表面镀层长周期光纤光栅双峰谐振及其透射谱研究*

顾铮天¹ 徐艳平² 邓传鲁¹

(¹ 上海理工大学光电功能薄膜实验室, 上海 200093)
(² 南洋理工大学材料工程学院, 新加坡 639798)

摘要 采用严格的耦合模理论, 通过求解表面镀层长周期光纤光栅的特征方程, 给出了双峰谐振波长的确定方法, 以及它与光栅周期和模式序数之间的关系。结果表明, 对应于较高次的包层模式, 存在双峰谐振现象, 且包层模式序数越高, 与芯模产生谐振耦合所需的光栅周期越小。进一步讨论了双峰谐振波长的间距随薄膜参量与光栅参量变化的关系, 描绘了这些参量对透射谱衰减谐振峰的影响, 理论分析结果与 X. W. Shu 的无镀层长周期光纤光栅实验结果一致。这些研究为建立高灵敏的双峰谐振薄膜传感器提供了结构优化的理论支持。

关键词 光纤光学; 长周期光纤光栅; 双峰谐振; 透射谱; 耦合模理论

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A

Dual-Peak Resonance and Transmission Spectrum in Coated Long-Period Fiber Grating

Gu Zhengtian¹ Xu Yanping² Deng Chuanlu¹

(¹ Laboratory of Photo-electric Functional Films, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093)
(² School of Materials Science and Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798)

Abstract By resolving the characteristic equation of coated long-period fiber grating (LPGF), the dual peak resonant wavelengths is determined based on rigorous coupled-mode theory. The relationship between the dual-peak resonant wavelengths and grating period, the mode order is studied. The results show that the dual resonance appears in higher cladding mode. The higher the cladding mode order is, the smaller the related grating period required to couple with core mode is. Furthermore, the influence of film optical parameters and grating structure parameters on the intervals of dual-peak resonant wavelengths, as well as the attenuation peak of transmission spectra, are analyzed. The results are coincident with the non-coated long-period fiber grating experiment made by X. W. Shu. The research provides theoretical foundation for the structural optimization of dual-peak resonance film sensors with high sensitivity.

Key words fiber optics; long-period fiber grating (LPGF); dual-peak resonance; transmission spectra; coupled-mode theory

1 引 言

长周期光纤光栅(LPGF)由于具有很高的折射率敏感性^[1], 已被应用于化学传感方面, 目前主要应用于溶液浓度测量^[2~4]。采用 LP₀₁₅ 模双谐振峰的间距进行浓度传感的方案比采用 400 μm 的光栅传感方案灵敏度可提高 20 倍。

D. R. Nicholas^[8]等通过在光纤光栅包层上镀一层折射率随外界环境变化而变化的敏感薄膜, 研究了薄膜厚度对长周期光纤光栅透射谱的影响。Z. T. Gu 等^[9]实验上研究制作了溶胶-凝胶长周期光纤光栅气敏传感器。这些结构消除了以往要求待检测化学溶液折射率必须小于包层折射率的限制, 为发展

收稿日期: 2007-02-26; 收到修改稿日期: 2007-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(60777035)、上海市跨世纪人才培养基金“曙光项目”(02SG32)、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: 顾铮天(1965—), 男, 上海人, 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

专用化学长周期光纤光栅传感器提供了可能。

如果将双峰效应应用在这些镀膜长周期光纤光栅上,则不但可以利用长周期光纤光栅折射率灵敏度高、而且可以充分利用薄膜的敏感性,扩大长周期光纤光栅双峰效应的应用范围,除了可用于液体浓度测量,也可用于气体浓度测量。

本文主要研究这种表面镀层长周期光纤光栅的双峰效应。首先分析表面镀层长周期光纤光栅中谐振波长与光栅周期的关系,给出了双峰模式存在的条件及对应的谐振波长确定方法;然后研究敏感薄膜的光学参量与光栅结构参量对双峰谐振波长间距,以及透射谱谐振峰形状的影响,为进一步设计高灵敏镀膜长周期光纤光栅双峰谐振传感器的结构提

供一定的理论依据。

2 镀膜长周期光纤光栅理论分析

将这种光纤光栅包层区域外面镀一层敏感薄膜的传感器结构视为三包层模型。薄膜层和外部介质分别为第二和第三包层。图 1(a)、图 1(b)分别是表面镀层长周期光纤光栅传感器的结构和折射率分布图。芯层折射率为 n_1 ,光栅区域的平均折射率改变量为 σ ,包层折射率为 n_2 ,敏感薄膜折射率为 n_3 ,周围环境(待测气体)折射率为 n_4 。已知纤芯半径为 a_1 ,包层半径为 a_2 ,薄膜层半径为 a_3 ,薄膜厚度 $h = a_3 - a_2$ 。

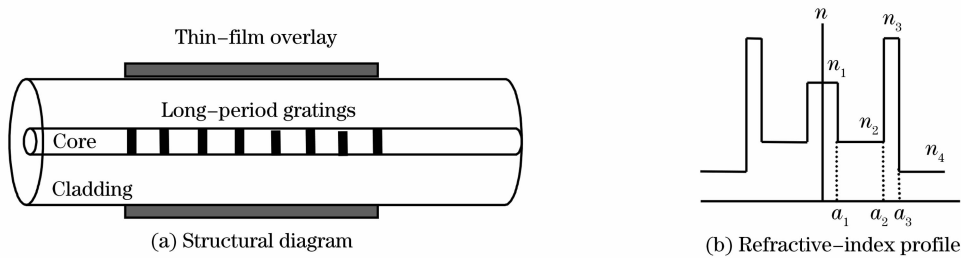


图 1 表面镀层长周期光纤光栅传感器三包层模型

Fig. 1 Triple-cladding model of coated long-period fiber grating sensor

对于单模长周期光纤光栅,根据模式耦合理论,前向传播的纤芯导模与同向传播的一阶包层模式之间的耦合模方程为

$$\frac{dA^{\text{co}}}{dz} = ik_{11}^{\text{co-co}} A^{\text{co}} + \frac{i}{2} \sum_{\nu} k_{1\nu}^{\text{cl-co}} A_{\nu}^{\text{cl}} \times \sum_{m=1}^{+\infty} [A_m \exp(-i2\delta_{1\nu-11}^{\text{cl-co}} z)], \quad (1)$$

$$\sum_{\nu} \left[\frac{dA_{\nu}^{\text{cl}}}{dz} = +ik_{1\nu}^{\text{cl-co}} A^{\text{co}} \times \sum_{m=1}^{+\infty} [A_m \exp(-i2\delta_{1\nu-11}^{\text{cl-co}} z)] \right], \quad (2)$$

其中 A^{co} 是纤芯导模的正 z 向振幅, A_{ν}^{cl} 是一阶 ν 次包层的正 z 向振幅。 $\delta_{1\nu-11}^{\text{cl-co}}$ 是纤芯导模与一阶 ν 次包层模式间的解调参量,定义如下:

$$\delta_{1\nu-11}^{\text{cl-co}} = \frac{1}{2} \left(\beta_{11}^{\text{co}} - \beta_{1\nu}^{\text{cl}} - \frac{2\pi}{\Lambda} \right), \quad (3)$$

其中 β_{11}^{co} , $\beta_{1\nu}^{\text{cl}}$ 分别为纤芯导模与一阶 ν 次包层模的传播常量,令 $\delta_{11-11}^{\text{cl-co}} = 0$,可得长周期光纤光栅包层模耦合的相位匹配条件:

$$\beta_{11}^{\text{co}} - \beta_{1\nu}^{\text{cl}} - \frac{2\pi}{\Lambda} = 0, \quad (4)$$

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

$$n_{\text{eff,co}}(\lambda) - n_{\text{eff,cl}}^{\nu}(\lambda) = \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad \nu = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

式中 $n_{\text{eff,co}}(\lambda)$ 为前向传输导模在波长 λ 处的有效折射率;可由纤芯模式的特征方程^[10]求得, $n_{\text{eff,cl}}^{\nu}(\lambda)$ 为 1 阶 ν 次包层模式在波长 λ 处的有效折射率。须由

包层模特征方程求出^[11], Λ 为光栅周期。芯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 λ 为 1 阶 ν 次谐波中心波长,简称谐振波长,在此波长处,基模一部分能量耦合到该高次包层模上,并在通常情况下由于弯曲或接触涂覆层等原因而被损耗。在一定的情况下,特别是当周期比较短的时候,由于高阶包层模的有效折射率随波长的变化比较快,可能会有两个波长满足(5)式的条件,导致出现两个谐振波长。不同的包层模,两个谐振波长不同。

$k_{11}^{\text{co-co}}$ 和 $k_{1\nu}^{\text{cl-co}}$ 分别为纤芯模的自耦合常量和纤芯模与一阶 ν 次包层模之间的互耦合常量^[12]。耦合常量 $k_{1\nu}^{\text{cl-co}}$ 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,影响长周

期光纤光栅的透射谱特性。

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:

$$\begin{aligned} A^{\text{co}}(z = -L/2) &= 1, \\ A^{\text{cl}}(z = -L/2) &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

长周期光纤光栅的透射率定义为

$$T = A^{\text{co}}(L/2)/A^{\text{co}}(-L/2). \quad (7)$$

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(1)式、(2)式,得到 $A^{\text{co}}(L/2)$,代入(7)式,即可得到透射率 T 。

3 双峰谐振波长的确定

采用的光纤参量为: $a_1 = 4.15 \mu\text{m}$, $a_2 = 62.4 \mu\text{m}$; $n_1 = 1.4681$, $n_2 = 1.4628$ 。计算中未计材料色散的影响。当光纤光栅给定时,由材料的色散特性 $n(\lambda)$,只需对不同波长处的折射率加以修正,即可按照下文所述方法进行分析。虽然考虑材料色散后所获得的双峰谐振波长位置与不计色散时结果会有一点偏差,但并不影响研究所得到的结论。

为了确定双峰谐振波长,利用相位匹配条件(5)式计算并描绘了 1—4 次低次模 15—25 次高次模下的镀膜长周期光纤光栅的周期与各次包层模式谐振波长的关系,如图 2、图 3 所示。图 2 考虑了常用光纤的传输波长实际应用范围 900~1700 nm,使谐振点位置尽量控制在这一范围内,所用到的参量为: $a_1 = 2.625 \mu\text{m}$, $a_2 = 15 \mu\text{m}$, $h = 100 \text{ nm}$, $n_3 = 1.47$, $\sigma = 2 \times 10^{-4}$, $n_1 - n_2 = 0.0082$ 。可见,低次模式同样出现了双峰谐振现象。若按照本文计算采用的光纤参量,则双峰谐振波长远超出了实际光纤光栅的工

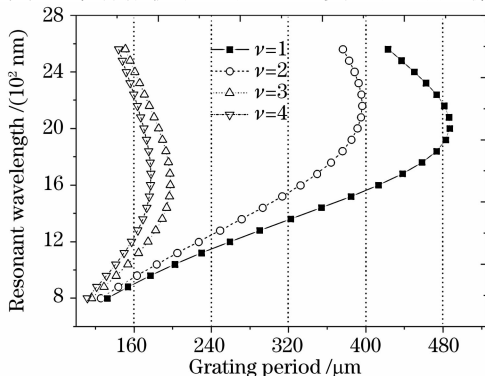


图 2 低次包层模谐振波长与光栅周期关系图

Fig. 2 Relation between resonance wavelength and grating period for lower cladding modes

作波长范围。这也正好解释了为什么大多数实验中观察不到低次模式双峰谐振的现象。图 3 显示了高次模式($h = 180 \text{ nm}$, $n_3 = 1.57$, $n_1 - n_2 = 0.0052$)的双谐振现象。包层模式序数越低,与芯模产生谐振耦合所需的光栅周期越大,双峰对应的谐振波长越大。当波长处在 900~1900 nm 范围时,包层模式序数 ν 为 15~25 的均出现了双谐振峰。

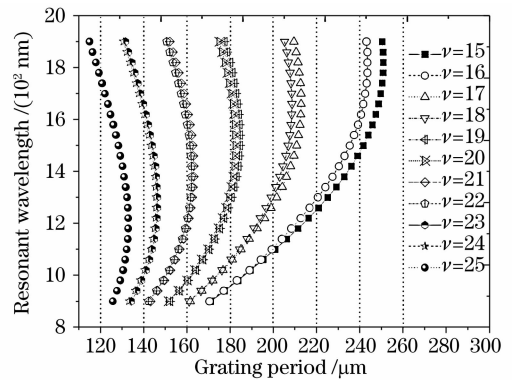


图 3 高次包层模谐振波长与光栅周期关系图

Fig. 3 Relation between resonance wavelength and grating period for higher cladding modes

为了确定在给定光栅周期的条件下的双峰谐振波长及对应的模式序数,根据(5)式,定义: $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff,co}}(\lambda) - n_{\text{eff,cl}}^{\nu}(\lambda) - \lambda/\Lambda$,只需给出不同包层模式序数下 Δn_{eff} 与波长的关系,则对应 $\Delta n_{\text{eff}} = 0$ 的波长即为谐振波长。图 4 是光栅周期 Λ 为 $142 \mu\text{m}$ 时计算得到的几个较高次包层模对应的 Δn_{eff} 曲线。可以看出, $\nu = 23, 24$ 时将产生双峰谐振现象,对应的谐振波长也可由图得知。

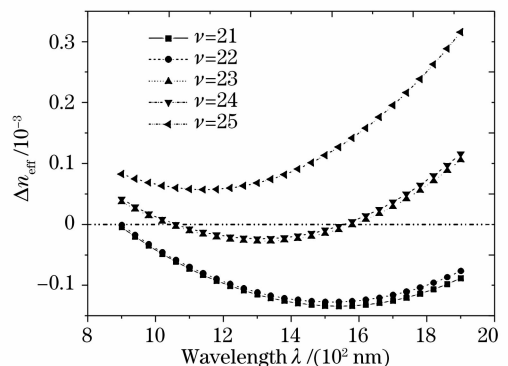


图 4 Δn_{eff} 与光波长之间的关系曲线

Fig. 4 Plot of Δn_{eff} versus light wavelength

根据包层模式与特征方程根的次序即模式序数之间的关系,奇数次模式代表 HE 模式,偶数次模式代表 EH 模式。由于 EH 模式耦合强度要比 HE 模式耦合强度小得多^[12],下面以 23 阶模式($\text{HE}_{1,12}$)为例研究双峰谐振长周期光纤光栅透射谱特性,讨论

不同参量对透射谐振峰的影响。

4 双峰谐振长周期光纤光栅透射谱特性

4.1 无镀层和表面镀层长周期光纤光栅透射谱特性比较

三包层结构长周期光纤光栅与两包层结构长周期光纤光栅的不同之处在于在光纤包层上镀了一层敏感薄膜,该薄膜对外界环境的改变敏感,导致其折射率相应改变,该特性可以大大提高传感器的灵敏度。图 5 为无镀层长周期光纤光栅和表面镀层长周期光纤光栅透射谱特性图,图中可以看出,其双峰的位置和幅度发生了一定的变化。图中计算所用的参量如表 1 所列。

表 1 计算用纤芯及各包层参量

Table 1 The parameters of fiber core and claddings for calculation

	Triple-clad structure	Double-clad structure
Core	$n_1, r_1 = 4.15 \text{ nm}$	$n_1, r_1 = 4.15 \text{ nm}$
1 st clad	$n_2, r_2 = 62.4 \text{ nm}$	$n_2, r_2 = 62.4 \text{ nm}$
2 nd clad	$n_3 = 1.57, r_3 = 62.58 \text{ nm}$	$n_3 = 1.0$
Surroundings	$n_4 = 1.0$	

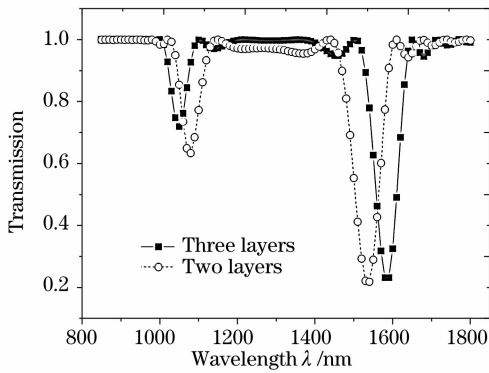


图 5 无镀层和表面镀层长周期光纤光栅透射谱图

Fig. 5 Transmission spectra of HE_{1,12} of non-coated and coated long-period fiber grating

图 6 和图 7 为膜厚 $h = 180 \text{ nm}$, 光栅平均折变量 $\sigma = 4 \times 10^{-4}$, 光栅长度 $L = 1 \text{ cm}$, 周期 $\Lambda = 142 \mu\text{m}$ 时, 无镀层和表面镀层长周期光纤光栅(未考虑薄膜折射率变化)的 HE_{1,12} 模式在不同环境折射率时的透射谱图。从图 6 和图 7 中可以看出, 无镀层和表面镀层长周期光纤光栅的双谐振峰位置, 都随着环境折射率的增大向相反方向远离, 并且双谐振峰的幅度都有一定程度的变化。但是, 表面镀层长周期光纤光栅的双谐振峰位置变化比无镀层长周期光纤光栅的变化大得多, 由此得出, 基于双谐振峰的间距进行传感的机理, 用表面镀层长周期光纤光栅设计

的传感器灵敏度高于两包层长周期光纤光栅传感器的灵敏度。

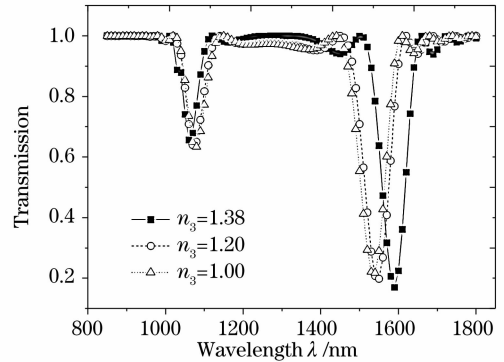


图 6 无镀层长周期光纤光栅的 HE_{1,12} 在不同环境折射率时的透射谱图

Fig. 6 Transmission spectra of HE_{1,12} of non-coated LPFG for different environment refractive indices

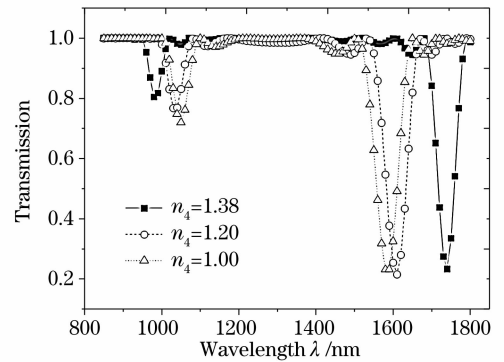


图 7 表面镀层长周期光纤光栅的 HE_{1,12} 在不同环境折射率时的透射谱图

Fig. 7 Transmission spectra of HE_{1,12} of coated LPFG for different environment refractive indices

4.2 低次模和高次模的双峰谐振透射谱特性比较

图 8 为表面镀层长周期光纤光栅, 在膜厚 $h =$

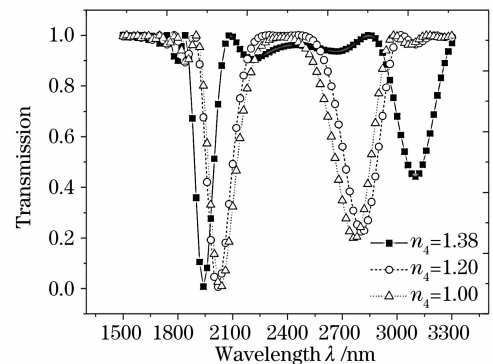


图 8 表面镀层长周期光纤光栅的 HE_{1,5} 在不同环境折射率时的透射谱图

Fig. 8 Transmission spectra of HE_{1,5} of coated LPFG for different environment refractive indices

180 nm, 光栅平均折变量 $\sigma = 4 \times 10^{-4}$, 光栅长度 $L = 1$ cm, 周期 $\Lambda = 142 \mu\text{m}$ 时, 长周期光纤光栅(未考虑薄膜折射率变化)的 HE_{15} 模式在不同环境折射率时的透射谱图。透射谱图表明 HE_{15} 模式的双谐振峰位置, 都随着环境折射率的增大向相反方向远离, 并且双谐振峰的幅度都有一定程度的变化, 这一点和 $\text{HE}_{1,12}$ 模式相一致。和图 7 比较可得, HE_{15} 模式随不同环境折射率谐振峰位置变化更为明显, 谐振峰带宽更为宽大, 但是, HE_{15} 模式双谐振峰产生需要的波段范围为 1500~3300 nm 左右, 这已经超出实际应用中的工作波长, 因此, 考虑实际需要, 高次包层模式 $\text{HE}_{1,12}$ 作为研究对象才成为最佳选择。

4.3 不同薄膜参量下的双峰谐振透射谱

由于气敏机理不同, 不同气体对气敏薄膜的折射率和厚度的影响是不同的。大多数情形下, 气体将引起薄膜折射率的变化; 但像聚四氟乙烯薄膜, 接触酒精、苯、戊烷等气体时, 薄膜会膨胀, 从而引起双峰谐振峰的偏移。再加上温度、应力等的变化, 将会引起光栅结构参量, 如光栅周期、光栅长度等的变化, 同样会造成双峰谐振峰的偏移。因此, 可以实现对气体、温度、应力等量的传感与测量。

首先考察薄膜参量对双峰谐振透射谱的影响。图 9 给出了薄膜折射率 $n_3 = 1.57$, 光栅平均折变量 $\sigma = 4 \times 10^{-4}$, 光栅长度 $L = 1$ cm, 周期 $\Lambda = 142 \mu\text{m}$ 时, $\text{HE}_{1,12}$ 模式在不同薄膜厚度 h 时的谐振波长与光栅周期关系图。可以看出, 光栅周期固定时, 随着薄膜厚度的增加, 两个谐振峰相互远离。图 10 描绘了不同薄膜厚度时的光栅透射谱图, 更清晰地反映了上述这种趋势, 并且从图中还可看出, 薄膜厚度对

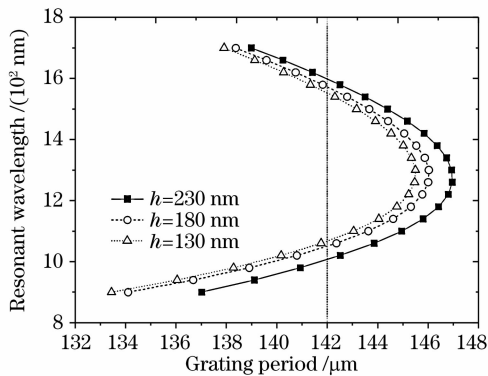


图 9 $\text{HE}_{1,12}$ 模式在不同薄膜厚度时的光栅周期与谐振波长关系图

Fig. 9 Resonance wavelength versus the grating period for different film thicknesses

谐振峰的高度和谐振峰位置都有影响。表 2 列出了三种膜厚下的双谐振波长及其间距。

表 2 $\text{HE}_{1,12}$ 模在不同膜厚时的双谐振波长及其间距

Table 2 Dual resonance wavelengths and intervals of $\text{HE}_{1,12}$ at different film thicknesses

Film thickness / nm	λ_1 / nm	λ_2 / nm	$\Delta\lambda$ / nm
130	1567.29	1056.61	510.68
180	1584.98	1043.68	541.30
230	1608.09	1016.24	591.85

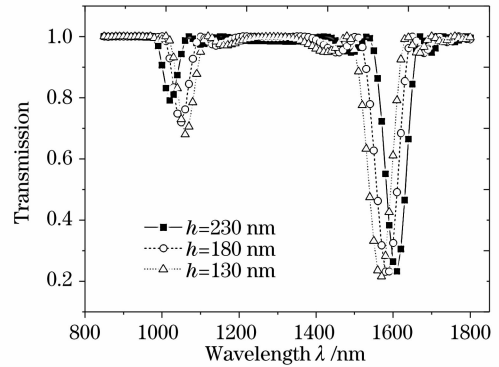


图 10 $\text{HE}_{1,12}$ 模式在不同薄膜厚度时的透射谱

Fig. 10 Transmission spectra of $\text{HE}_{1,12}$ for different film thicknesses

图 11 和图 12 为膜厚 $h = 180$ nm, 光栅平均折变量 $\sigma = 4 \times 10^{-4}$, 光栅长度 $L = 1$ cm, 周期 $\Lambda = 142 \mu\text{m}$ 时, $\text{HE}_{1,12}$ 模式在不同薄膜折射率时的谐振波长与光栅周期关系图以及透射谱。表 3 给出了三种不同薄膜折射率情况下的双谐振波长及其间距数值。可以看出, 随着薄膜折射率的增加, 双谐振峰相互远离。文献[5]给出了无镀层长周期光纤光栅双峰液体传感器的观测结果, 当光纤包层外的液体折射率由 1 增大到 1.74 时, 双谐振峰向相反方向远离, 波长偏移的大小分别由 0 变化为 -180 nm 和 300 nm。对比可见,

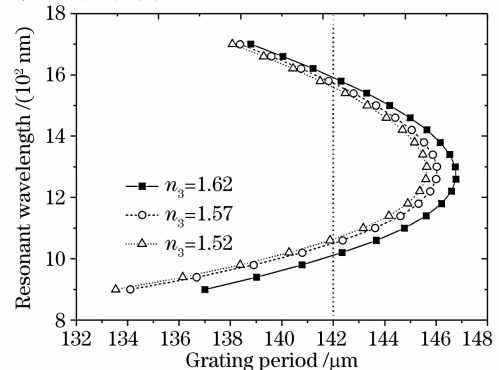


图 11 $\text{HE}_{1,12}$ 模式在不同薄膜折射率的周期与谐振波长关系图

Fig. 11 Resonance wavelength versus the period for different refractive indices

表面镀层长周期光纤光栅结果与文献[5]所观察到的现象基本一致。进一步观察透射谱可看出,薄膜折射率同时影响透射峰的高度和谐振峰位置。

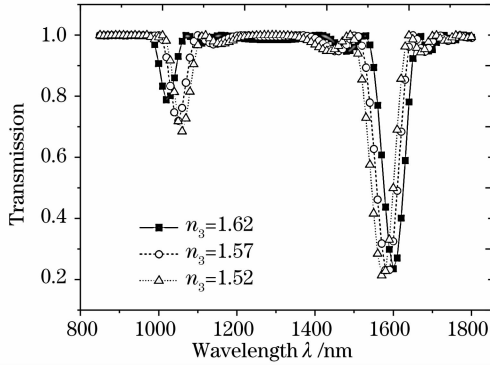


图 12 HE_{1,12} 模式在不同薄膜折射率的透射谱图

Fig. 12 Transmission spectra of HE_{1,12} for different film refractive indices

表 3 HE_{1,12} 模在不同薄膜折射率时的双谐振波长及其间距
Table 3 Dual resonance wavelengths and intervals of HE_{1,12} at different refractive indices

Film refractive index	λ_1 /nm	λ_2 /nm	$\Delta\lambda$ /nm
1.52	1573.36	1054.16	519.20
1.57	1584.98	1043.68	541.30
1.62	1601.60	1017.16	584.44

4.4 不同光栅参量下的双峰谐振透射谱

图 13 为 $n_3 = 1.57, h = 180 \text{ nm}$, 光栅长度 $L = 1 \text{ cm}$, $\Lambda = 142 \mu\text{m}$ 时 HE_{1,12} 模式在不同的光栅平均折变量时的透射谱。可看出随着光栅平均折变量的增加,双谐振峰相互靠拢,即在光栅写入过程中,随着曝光量的增加,纤芯折变量增加,两个损耗峰互相互靠近。这与文献[5]所描绘的实验结果完全相符。光栅平均折变量对透射谱谐振波长、谐振峰的宽度和高度都有显著的影响。表 4 给出了三种不同光栅平均折变量情况下的双谐振波长及其间距。

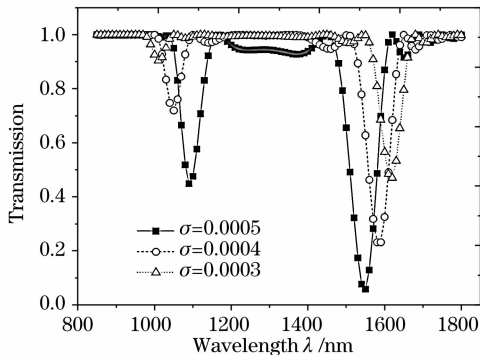


图 13 HE_{1,12} 模式在不同光栅折变量时的透射谱图

Fig. 13 Transmission spectra of HE_{1,12} for different grating refractive index modulations

表 4 HE_{1,12} 模在不同光栅平均折变量时的双谐振波长及其间距

Table 4 Dual resonance wavelengths and intervals of HE_{1,12} at different index modulations

Index modulation	λ_1 /nm	λ_2 /nm	$\Delta\lambda$ /nm
0.0003	1616.92	1004.20	612.72
0.0004	1584.98	1043.68	541.30
0.0005	1547.07	1088.67	458.40

图 14 为 $n_3 = 1.57, h = 180 \text{ nm}, \sigma = 4 \times 10^{-4}$, $\Lambda = 142 \mu\text{m}$ 时, HE_{1,12} 模式在不同的光栅长度时的透射谱。可以看出,光栅长度只影响透射峰的高度和宽度,对谐振波长的偏移没有影响。在设计传感器时,要合适的光栅长度,使透射峰的宽度尽可能窄,以提高传感器的灵敏度。

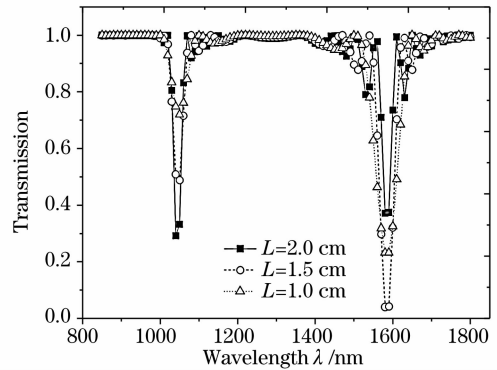


图 14 HE_{1,12} 模式在不同光栅长度时的透射谱图

Fig. 14 Transmission spectra of HE_{1,12} for different grating lengths

图 15 为 $n_3 = 1.57, h = 180 \text{ nm}, \sigma = 4 \times 10^{-4}$, $L = 1 \text{ cm}$ 时, HE_{1,12} 模式在不同的光栅周期时的透射谱图。可以看出,光栅周期对 HE_{1,12} 模式透射谱谐振峰的高度影响不大,但对谐振波长偏移有较大影响。随着光栅周期的增加,双谐振峰相互靠拢。

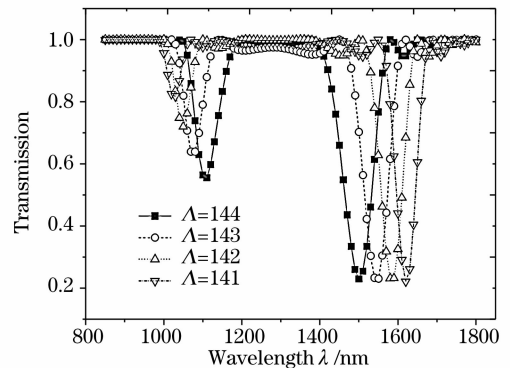


图 15 HE_{1,12} 模式在不同光栅周期的透射谱图

Fig. 15 Transmission spectra of HE_{1,12} for different grating periods

由上可知,薄膜的折射率和厚度对包层模式的双谐振峰的高度和谐振波长的位置都有影响。光纤光栅的结构参量(光栅长度 L , 光栅周期 Λ , 折变量 σ 等)对透射谱的形状、高度或者双谐振峰中心波长的位置影响也非常大。另外,参量选取的不同,造成的双峰谐振波长间距的偏移程度也是不同的。从图 12 明显看出,薄膜折射率介于 1.52~1.57 时,双峰谐振波长间距变化较薄膜折射率介于 1.57~1.62 的情形要大。而这也正是表面镀层长周期光纤光栅传感器结构优化设计时必须考虑的。

5 结 论

三包层结构的表面镀层长周期光纤光栅较之两包层结构的无镀层长周期光纤光栅,不仅传感范围更广泛,既可用于液体传感,也可用于气体传感;而且传感方案更灵活,可根据环境检测物选择合适的敏感材料,并通过调整薄膜参量或光栅结构参量获得高灵敏度,可望在光化学生物传感器中得到广泛应用。

参 考 文 献

- 1 J. H. Chong, P. Shum, H. Haryono *et al.*. Measurements of refractive index sensitivity using long-period grating refractometer [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **229**: 65~69
- 2 Xu Yanping, Gu Zhengtian, Chen Jiabi. Effect of surface film optical parameters on the characteristic of long-period fiber grating[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1519~1524
- 3 Tong Zhi, Wei Huai, Wang Muguang *et al.*. Effect of change of ambient refractive index on characteristics of long-period fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1088~1091
- 童 治,魏 淮,王目光 等. 环境折射率变化对长周期光栅特性影响的研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1088~1091
- 4 R. Falate, O. Frazão, G. Rego *et al.*. Refractometric sensor based on a phase-shifted long-period fiber grating[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(21): 5066~5072
- 5 X. W. Shu, X. M. Zhu, S. Jiang *et al.*. High sensitivity of dual resonant peaks of long-period fibre grating to surrounding refractive index changes[J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(18): 1580~1581
- 6 X. W. Shu, D. X. Huang. Highly sensitive chemical sensor based on the measurement of the separation of dual resonant peaks in a 100- μm -period fiber grating [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **171**: 65~69
- 7 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,顾铮天,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
- 8 D. R. Nicholas, W. J. Stephen, P. T. Ralph. Optical fiber long-period gratings with Langmuir-Blodgett thin-film overlays [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(9): 686~688
- 9 Z. T. Gu, Y. P. Xu, K. Gao. Optical fiber long-period grating with sol-gel coating for gas sensor [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(16): 2405~2407
- 10 D. Gloge. Weakly guiding fibers [J]. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(10): 2252~2258
- 11 C. Tsao. *Optical Fibre Waveguide Analysis* [M]. New York: Oxford Press, 1992. 298~369
- 12 T. Erdogan. Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(8): 1760~1773