

薄膜厚度对镀膜长周期光纤光栅模式重组的影响

欧启标¹ 彭宇林² 曾庆科¹ 秦子雄³ 李传起¹

¹广西师范大学电子工程学院, 广西 桂林 541004
²广西师范大学漓江学院, 广西 桂林 541006
³广西师范大学物理科学与技术学院, 广西 桂林 541004

摘要 基于严格的四层模型,对镀膜长周期光纤光栅在薄膜厚度增加时出现的模式重组现象进行了详细的研究。研究发现,随着薄膜厚度的增加镀膜长周期光纤光栅出现周期性的模式重组,每次的模式重组都伴随着一对相邻的包层模式进入薄膜层由薄膜导引。但这对包层模式并不是同时进入薄膜层的,每次都是 HE 模式进入薄膜层后再经过一定的厚度间隔,EH 模式才进入薄膜层。在模式重组过程中,交流耦合系数随薄膜厚度的变化出现急剧变化,在 HE 模式进入薄膜层过程中,交流耦合系数急剧减小,而在 EH 模式进入薄膜层过程中,交流耦合系数则急剧增加。与两个相邻模式依次进入薄膜层相对应,镀膜长周期光纤光栅的谐振波长在重组过程中出现两次跳变。研究还发现,在模式重组过程中,镀膜长周期光纤光栅的折射率灵敏度与没有重组时相比有明显增加。

关键词 光纤光学;长周期光纤光栅;谐振波长;薄膜厚度;折射率

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s205001

Impact of Film Thickness on Modes Reorganization of Coated Long Period Fiber Grating

Ou Qibiao¹ Peng Yulin² Zeng Qingke¹ Qin Zixiong³ Li Chuanqi¹

¹ College of Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China
² Lijiang College, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541006, China
³ College of Physical Science and Technology, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract Based on the strict four-layer model, the modes reorganization of the coated long period fiber gratings (LPG) appearing in the increase of film thickness is studied in details. The result shows that the periodic reorganization of coated LPG occurs when the film thickness increases, and in each reorganization, a pair of adjacent cladding modes go into the film layer, guided by the thin film layer. But the cladding modes do not enter the thin layer synchronically. Every time HE modes go into the thin layer first, and pass some degree of thickness, and then it's time for EH modes to enter the thin layer. In the process of reorganization, alternating current (AC) coupling coefficient varies greatly with the change of layer thickness. When HE modes go into the thin layer, AC coupling coefficient declines sharply; while EH modes go into the thin layer, AC coupling coefficient rises rapidly. Corresponding with the two adjacent modes in turn into the film layer, two jumps of the resonant wavelength of the coated LPG occur in the process of reorganization. The research also indicates that, in reorganization, the refractive index sensitivity of the coated LPG increases obviously, compared with the time before it is reorganized.

Key words fiber optics; long period fiber grating; resonant wavelength; film thickness; refractive index

OCIS codes 060.3735; 280.4788; 060.4510; 060.2370

1 引言

作为一种新型的光纤无源器件,长周期光纤光

栅(LPG)在光纤传感领域扮演着重要的角色^[1,2]。但由于其固有的交叉敏感问题的存在,普通长周期

收稿日期: 2012-05-25; **收到修改稿日期**: 2012-07-10

基金项目: 2012 年度广西教育厅科研项目(重点项目)(201202ED010)和广西师范大学教育发展基金会“教师成长基金”(JS2012010)资助课题。

作者简介: 欧启标(1978—),男,硕士,讲师,主要从事光纤通信器件和嵌入式方面的研究。E-mail: ouqibiao@126.com

光纤光栅的应用受到很大的限制。目前,对长周期光纤光栅的研究主要集中在利用镀膜长周期光纤光栅做传感器这一方面^[3,4]。目前,将镀膜长周期光纤光栅传感器应用于湿度检测的方案^[5,6]以及采用镀膜长周期光纤光栅解决长周期光纤光栅固有的交叉敏感以实现温度和应力同时测量的方案^[7]都有报道出现。理论研究方面,国内外也已有很多文献进行了报道^[8~10]。本文在归于严格的镀膜光栅四层模型的基础上,详细研究了薄膜厚度对包层模式有效折射率、芯层模式和包层模式耦合的交流耦合系数、谐振波长的漂移和光栅的折射率灵敏度的变化的影响,进一步给出了镀膜情形下交流耦合系数的详细表达式,并增加了光栅的折射率灵敏度和镀膜厚度的变化关系。

2 薄膜厚度对镀膜长周期光纤光栅特性的影响

2.1 薄膜厚度对包层模式有效折射率的影响

图1为在薄膜折射率大于包层折射率情况下,包层模式有效折射率随薄膜厚度的变化图,(b)图为(a)图中有效折射率在包层中分布的放大图。由图1可见,随着薄膜厚度的逐渐增加,包层模式的有效折射率逐渐增加,当薄膜厚度超过一定值后,包层模式中模式次数最低的模式(即 HE_{1,2} 模式,其对应的有效折射率最大)的有效折射率将大于包层折射率

并进入薄膜层,由薄膜层进行导引。其后,随着薄膜厚度的继续增加,余下来的包层模式中,模式次数最低的模式将依次进入薄膜层中。例如,在薄膜厚度为 365 nm 附近时,包层模式中折射率最大的模式 HE_{1,2} 进入薄膜层中,由薄膜层进行导引。在 HE_{1,2} 模式进入薄膜层后,EH_{1,3} 模式变为包层中的最低模式,随着薄膜厚度的继续增加,在薄膜厚度为 500 nm 附近时,EH_{1,3} 模式进入薄膜层中。随着薄膜厚度的持续增加,进入薄膜层由薄膜层进行导引的模式也越来越多。从整体来看,每次都有一对相邻的 HE 模和 EH 模进入薄膜层,但二者之间有一定的厚度间隔,并且模式次数越高这个厚度间隔越小。每对包层模式进入薄膜层由薄膜层导引的直接结果就是包层模式出现模式重组。例如,当 HE_{1,2} 和 EH_{1,3} 模式进入薄膜层中后,模式 HE_{1,4} 向前移动变为 HE_{1,2} 模式,HE_{1,6} 模式向前移动变为 HE_{1,4} 模式,其余类推。包层模式的重组具有一定的规律性,对于同一光纤参数来说,每次模式重组出现的厚度间隔几乎相同,在本文研究中,每次模式重组的厚度间隔约为 1000 nm。最后,需要说明的是,由于每次模式重组都有一对包层模式进入薄膜层,所以每一次模式重组都要经过两次跳变,并且模式次数越低,这种两级跳变越明显,而对于较高的包层模式,由于 HE 模和 EH 模跳变的厚度间隔很小,所以两级跳变观察不到。

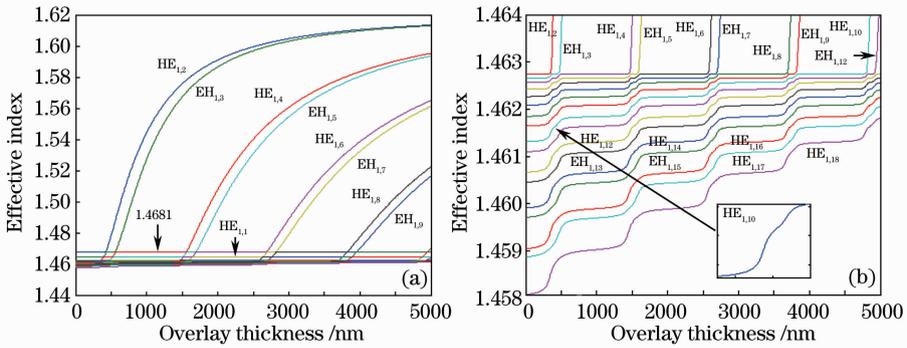


图1 有效折射率随薄膜厚度的变化

Fig. 1 Change of effective refractive index with film thickness

2.2 薄膜厚度对交流耦合系数的影响

Erdogan^[11]中给出了长周期光纤光栅芯层导模和包层模式耦合的交流耦合系数的计算公式

$$\kappa_{lv}^{cl-co}(z) = \sigma(z) \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\pi b}{Z_0 n_2 \sqrt{1+2b\Delta}} \right)^{1/2} \times \frac{n_1^2 u_1}{u_1^2 - V^2(1-b)/a_1^2} \times \left(1 + \frac{\sigma_2 \zeta_0}{n_1^2} \right) E_{lv}^{cl} \left[u_1 J_1(u_1 a_1) \times \frac{J_0(V \sqrt{1-b})}{J_1(V \sqrt{1-b})} - \frac{V \sqrt{1-b}}{a_1} J_0(u_1 a_1) \right]. \quad (1)$$

在镀膜长周期光纤光栅中(1)式依然有效,所不同的是 ζ_0 和功率归一化常数 E_{lv}^{cl} 有改变。其中 ζ_0 为

$$\zeta_0 = \frac{\alpha_{11} + K_4 u_3 \alpha_{41} + \frac{\sigma_2 u_3}{\omega_4^2 n_3^2 r_3} \alpha_{21}}{-\left(\alpha_{12} + K_4 u_3 \alpha_{42} + \frac{\sigma_2 u_3}{\omega_4^2 n_3^2 r_3} \alpha_{22}\right)}, \quad (2)$$

其中的 $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{41}, \alpha_{42}, \alpha_{21}, \alpha_{22}$ 分别为 α 矩阵元。 α 矩阵各元素分别为

$$\begin{aligned} \alpha_{11} &= (\sigma_1 \sigma_2 u_2^2 / u_3^2 n_2^2 r_2 r_1) u_{21} u_{32} p_{v2} r_{v3} - (u_2 / u_3) r_{v3} (J r_{v2} - s_{v2} / u_2) + (\sigma_2 / r_3) \xi_{21} + (u_2^2 / u_3^2) s_{v3} \tau_0, \\ \alpha_{12} &= (\sigma_2 / u_3 n_3^2 r_3) \xi_{22} + (\sigma_2 u_2^2 / n_2^2 u_3 r_2) u_{32} r_{v3} \tau_1 + (\sigma_2 u_2 / n_1^2 u_3 r_1) u_{21} r_{v2} r_{v3} - (\sigma_2 u_2^2 / n_1^2 r_1 u_3^2) u_{21} p_{v2} s_{v3}, \\ \alpha_{21} &= u_3 \cdot n_3^2 \xi_{21}, \\ \alpha_{22} &= \xi_{22}, \\ \alpha_{31} &= (\sigma_1 u_2^2 / u_3^2 r_3) \xi_{41} + (\sigma_1 u_2^2 / u_3 r_2) u_{32} r_{v3} \tau_0 + (\sigma_1 u_2 / u_3 r_1) u_{21} r_{v3} r_{v2} - (\sigma_1 n_3^2 u_2^2 / r_1 n_2^2 u_3^2) u_{21} s_{v3} p_{v2}, \\ \alpha_{32} &= (\sigma_1 \sigma_2 u_2^2 / u_3^2 r_3) \xi_{12} + (u_2 / u_3) r_{v3} [J r_{v2} - (n_2^2 / u_2 n_1^2) s_{v2}] - \\ &\quad (n_3^2 u_2^2 / n_2^2 u_3^2) s_{v3} \tau_1 - (\sigma_1 \sigma_2 u_{21} u_{32} u_2^2 / u_3 n_1^2 r_2 r_1) r_{v3} p_{v2}, \\ \alpha_{41} &= \sigma_2 u_2^2 / u_3^2 \xi_{41}, \\ \alpha_{42} &= \sigma_2 u_2^2 / u_3 \cdot \xi_{42}, \\ \alpha_{13} &= \alpha_{14} = \alpha_{23} = \alpha_{24} = \alpha_{33} = \alpha_{34} = \alpha_{43} = \alpha_{44} = 0, \end{aligned}$$

式中的其他参数为

$$\begin{aligned} u_j^2 &= k^2 n_j^2 - \beta^2 = -\omega_j^2, \quad j = 1, 2, 3, 4; \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}; \\ J &= \frac{J'_l(u_1 a_1)}{u_1} J_l(u_1 a_1); \quad K_4 = \frac{K'_l(\omega_3 a_2)}{\omega_3} K_l(\omega_3 a_2); \\ p_{v2} &= J_l(u_2 a_2) \times Y_l(u_2 a_1) - Y_l(u_2 a_2) \times J_l(u_2 a_1); \\ q_{v2} &= J_l(u_2 a_2) \times Y'_l(u_2 a_1) - Y_l(u_2 a_2) \times J'_l(u_2 a_1); \\ r_{v2} &= J'_l(u_2 a_2) \times Y_l(u_2 a_1) - Y'_l(u_2 a_2) \times J_l(u_2 a_1); \\ s_{v2} &= J'_l(u_2 a_2) \times Y'_l(u_2 a_1) - Y'_l(u_2 a_2) \times J'_l(u_2 a_1); \\ p_{v3} &= J_l(u_3 a_3) \times Y_l(u_3 a_2) - Y_l(u_3 a_3) \times J_l(u_3 a_2); \\ q_{v3} &= J_l(u_3 a_3) \times Y'_l(u_3 a_2) - Y_l(u_3 a_3) \times J'_l(u_3 a_2); \\ r_{v3} &= J'_l(u_3 a_3) \times Y_l(u_3 a_2) - Y'_l(u_3 a_3) \times J_l(u_3 a_2); \\ s_{v3} &= J'_l(u_3 a_3) \times Y'_l(u_3 a_2) - Y'_l(u_3 a_3) \times J'_l(u_3 a_2); \end{aligned}$$

l 为模式阶数, v 为包层模式次数;

$$\begin{aligned} \tau_0 &= p_{v2} J - \frac{q_{v2}}{u_2}; \quad \tau_1 = p_{v2} J - \frac{n_2^2}{u_2 n_1^2} q_{v2}; \\ \xi_{21} &= \left[\frac{u_{21}}{r_1} \left(\frac{q_{v3} p_{v2}}{n_2^2 u_3} - \frac{p_{v3} r_{v2}}{n_2^2 u_2} \right) - \frac{u_{32}}{n_3^2 r_2} p_{v3} \tau_0 \right] \cdot \frac{\sigma_1 u_2^2}{u_3^2}; \\ \xi_{22} &= \frac{\sigma_1 \sigma_2 u_2^2}{u_3 n_1^2 r_2 r_1} u_{21} u_{32} p_{v3} p_v + \frac{n_3^2 u_2^2}{n_2^2 u_3^2} q_{v3} \tau_1 - \\ &\quad \frac{u_2}{u_3} p_{v3} \left(J r_v - \frac{n_2^2}{u_2 n_1^2} s_v \right); \\ \xi_{41} &= \frac{\sigma_1 \sigma_2}{n_2^2 r_2 r_1} u_{21} u_{32} p_{v3} p_{v2} + \frac{1}{u_3} q_{v3} \tau_0 - \\ &\quad \frac{p_{v3}}{u_2} \left(J r_{v2} - \frac{s_{v2}}{u_2} \right); \\ \xi_{42} &= \frac{u_{32}}{n_2^2 r_2} p_{v3} \tau_1 + \frac{u_{21}}{n_1^2 r_1} (p_{v3} r_{v2} / u_2 - q_{v3} p_{v2} / u_3). \end{aligned}$$

其余参数可以参见相关文献[10]。功率归一化常数 E_{1v}^{cl} 由下式决定

$$P = P_{\text{co}} + P_{\text{cl}} + P_{\text{overlay}} + P_{\text{ex}} = \frac{1}{2} \text{Re} \left[\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\infty r dr (E_r^{\text{cl}} H_\phi^{\text{cl}*} - H_r^{\text{cl}*} E_\phi^{\text{cl}}) \right] = 1 \text{W}, \quad (3)$$

其中 $P_{\text{co}}, P_{\text{cl}}, P_{\text{overlay}}, P_{\text{ex}}$ 分别为某一包层模式在纤芯、包层、薄膜层和环境层中的功率。将包含有 E_{1v}^{cl} 项的各层电磁场的表达式代入(3)式即可计算出 E_{1v}^{cl} 。

图2为芯层导模和 $\text{HE}_{1,10}$ 包层模式耦合的交流耦合系数 $K_{\text{co-cl}}^{1-10}$ 随薄膜厚度的变化图。由图可见, 随着薄膜厚度的增加, $K_{\text{co-cl}}^{1-10}$ 将会减小。但这种减小并不是单调减小, 而是减小过程中出现周期性的跳变减小。在图2中, 当厚度为 315 nm 时 $K_{\text{co-cl}}^{1-10}$ 开始急剧减小, 到 415 nm 时达到最小值, 而后急剧增加, 在 485 nm 附近达到最高值, 然后继续缓慢减小, 在 1410 nm 附近又开始急剧减小, 在 1525 nm 附近达到最小值, 而后又急剧增加, 在 1605 nm 附近达到回来的最大值, 其后再缓慢减小。为了便于对比说明, 在图2中亦给出了没有镀膜时各次包层模式与芯层导模耦合的耦合系数分布图, 如图2中的虚线所示。通过对比图2中的实线和虚线可知, 每次耦合系数急剧变化并返回到比较稳定的状态时, 其耦合系数都与没有镀膜时小两次的耦合系数接近。例如图2中, 在第一次跳变后, 返回到比较稳定的值时, $\text{HE}_{1,10}$ 模式的耦合系数与没有镀膜时 $\text{HE}_{1,8}$ 模式的耦合系数基本相等, 再次发生跳变并回到比较稳定的状态时, $\text{HE}_{1,10}$ 模式的耦合系数与没有镀膜时 $\text{HE}_{1,6}$ 模式与芯层导模耦合的耦合系数接近。图3给出了耦合系数、包层模式有效折射率和

薄膜厚度的关系图。由图可以明显看到,耦合系数的急剧下降对应于 HE 模式进入薄膜层,而急剧上升则对应于 EH 模式进入薄膜层。

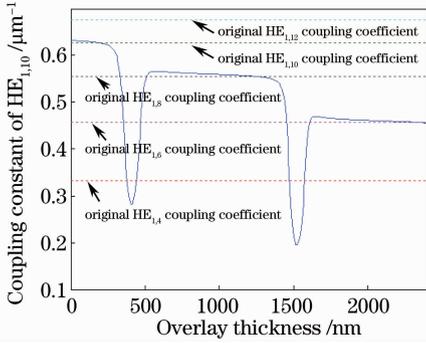


图 2 HE_{1,10} 模式的耦合系数随薄膜厚度的变化关系

Fig. 2 Change of coupling coefficient with film thickness

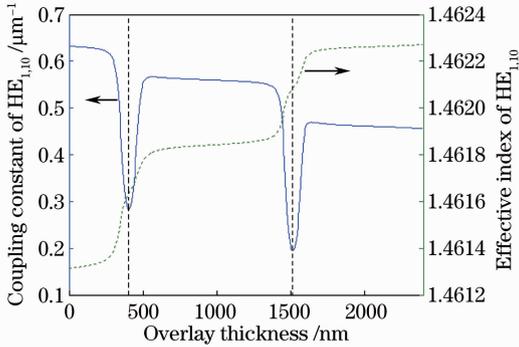


图 3 HE_{1,10} 模式的耦合系数和有效折射率随薄膜厚度的变化关系

Fig. 3 Change of coupling coefficient and effective refractive index with film thickness

2.3 薄膜厚度对谐振波长的影响

图 4 给出了镀膜 LPFG 的谐振波长随薄膜厚度的变化关系。由图 4 可见,对于研究的低次包层模式的耦合,随着薄膜厚度的增加,耦合的谐振波长向短波方向漂移,在薄膜厚度小于 300 nm 时,谐振薄膜随厚度的增加漂移很小,而在 300~500 nm 之间

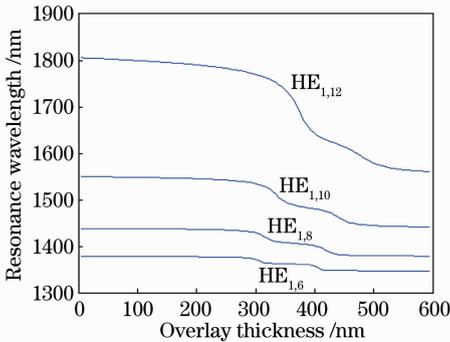


图 4 谐振波长和薄膜厚度的关系

Fig. 4 Relationship between resonance wavelength and film thickness

则急剧减少,薄膜厚度大于 500 nm 后,此次模式跳变完成,而后随薄膜厚度增加继续缓慢向短波方向漂移,直至下一次跳变的到来。需要注意的是,与有效折射率的两级跳变相对应,当薄膜厚度由 300 nm 逐渐向 500 nm 增加时,谐振波长向短波方向的漂移也呈现两级跳变(见图 4)。

2.4 薄膜厚度对镀膜长周期光纤光栅折射率灵敏度的影响

图 5 给出了 HE_{1,10} 模式的折射率灵敏度随薄膜厚度变化的关系图。由图可见,薄膜长周期光纤光栅的折射率灵敏度随薄膜厚度的变化而变化,存在着两个峰值,其中一个与 HE 模式的跳变相对应,另一个与 EH 模式的跳变相对应。为了方便对比,图 5 还给出了镀膜长周期光纤光栅的谐振波长随厚度的变化关系。由图可见,折射率灵敏度最大的地方刚好是谐振波长曲线斜率最大的地方。所以,如果应用镀膜长周期光纤光栅做折射率传感器件,合理设计 LPFG 的膜层厚度非常重要,膜层厚度选择适当可以极大提高光栅的折射率灵敏度,从而获得更好的测量效果。

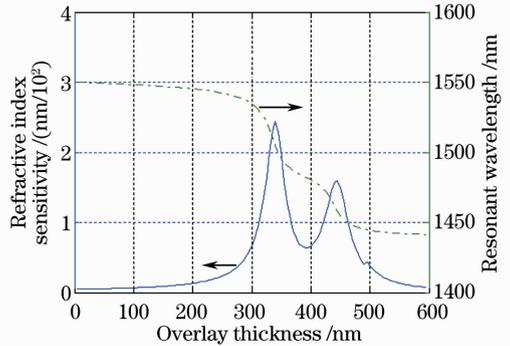


图 5 HE_{1,10} 模式的折射率灵敏度和薄膜厚度的关系

Fig. 5 Relationship between refractive index sensitivity and film thickness

2.5 薄膜厚度对镀膜长周期光纤光栅光谱的影响

图 6 为薄膜厚度 h 分别为 100、200、300、350、400、450 nm 时镀膜长周期光纤光栅的透射谱图。由图可见,薄膜厚度从 100 nm 向 300 nm 变化时,谐振波长的漂移很小,而从 350 nm 增加到 450 nm (模式重组区域)时则漂移很大,出射光谱的变化也很大。这说明镀膜长周期光纤光栅在模式重组过程中对厚度非常敏感,厚度的微小变化即能引起出射光谱的较大变化。这意味着如果在长周期光纤光栅的外表面镀上一层对待测量敏感的薄膜,待测量的某一物理特征的改变能引起此薄膜厚度的改变,则应用此光栅可以实现对此特定物质对应的物理特征

的变化进行测量。

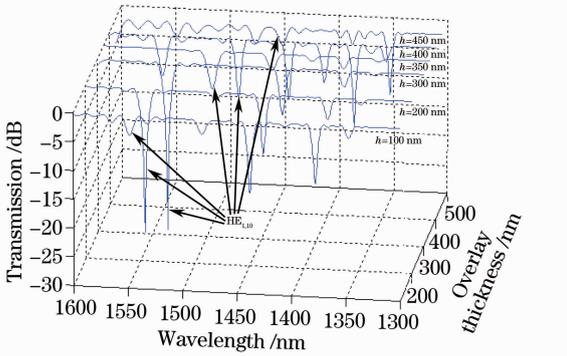


图6 镀膜 LPFG 的透射谱和薄膜厚度的关系

Fig. 6 Relationship between transmission spectra of coated LPFG and film thickness

3 结 论

通过对薄膜厚度改变对镀膜长周期光纤光栅的影响进行详细的数值研究,研究发现,随着薄膜厚度的改变,镀膜长周期光纤光栅出现周期性的模式重组。每次的重组都伴随着一对包层模式进入薄膜层由薄膜层导引。在出现模式重组时,总是 HE 模式先进入薄膜层后再经过一定的厚度间隔, EH 模式才进入薄膜层。在模式重组过程中,交流耦合系数随薄膜厚度的变化出现急剧变化,在 HE 模式进入薄膜层过程中,交流耦合系数急剧减少,而在 EH 模式进入薄膜层过程中,交流耦合系数则急剧增加。与成对的模式进入薄膜层相对应,镀膜长周期光纤光栅的谐振波长在重组过程中出现两次跳变。研究还发现,在模式重组过程中,镀膜长周期光纤光栅的折射率灵敏度与没有重组时相比有明显增加。这些研究结果对于应用镀膜光栅的模式重组特性以提高长周期光纤光栅的传感灵敏度具有一定的意义。

参 考 文 献

- 1 Lihui Liu, Qida Zhao, Luming Zhao *et al.*. A LPG sensing system for leak detection of oil storage tanks[C]. *SPIE*, 2010, **7157**: 715712
- 2 S. Tanka, H. Somatomo, A. Wada *et al.*. Sensitivity enhancement of LPG vibration sensor using higher-order cladding mode[C]. *SPIE*, 2009, **7503**: 75033C
- 3 Xu Yanping, Gu Zhengtian, Chen Jiabi. Study of long period fiber grating thin film sensors[J]. *J. University of Shanghai for Science and Technology*, 2005, **27**(3): 215~218
徐艳平, 顾铮先, 陈家璧. 长周期光纤光栅薄膜传感器的研究[J]. *上海理工大学学报*, 2005, **27**(3): 215~218
- 4 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
- 5 D. Viegas, J. Goicoechea, J. M. Corres *et al.*. Humidity sensor based on a long-period fiber grating coated with a SiO₂-nanospheres film[C]. *SPIE*, 2008, **7004**: 70044
- 6 A. Urrutia, P. J. Rivero, J. Goicoechea *et al.*. Humidity sensor based on a long-period fiber grating coated with a hydrophobic thin film[C]. *SPIE*, 2010, **7653**: 765320
- 7 C. C. Chan, K. M. Tan. Simultaneous measurement of curvature and temperature for LPG bending sensor[C]. *SPIE*, 2004, **5590**: 105~110
- 8 I. D. 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
- 9 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
- 10 Ou Qibiao, Mo Jialing, Huang Shangrong *et al.*. Characteristics of the long period grating with thin film overlay with a rectangle index modulation [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2012, **18**(1): 102~108
欧启标, 莫家玲, 黄尚荣等. 矩形折射率调制型薄膜长周期光纤光栅特性研究[J]. *量子光学学报*, 2012, **18**(1): 102~108
- 11 T. Erdogan. Cladding-mode resonance in short- and long-period fiber grating filters[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(8): 1760~1773

栏目编辑: 王晓琰