

# 一种双段多层长周期光纤光栅光谱特性研究

鲍吉龙 赵洪霞 程培红 李 磊 沈鸿康

(宁波工程学院电子与信息工程学院, 浙江 宁波 315016)

**摘要** 长周期光纤光栅(LPFG)传感器具有非常广泛的应用价值,而有效解决物理量交叉敏感问题是其实用化的关键。基于 LPFG 对包层外介质折射率和厚度的敏感性,提出一种双段多层折射率横向分布结构的新型 LPFG 传感器的设计,并利用耦合模理论和传输矩阵方法分析了镀膜材料折射率、膜层厚度和镀层长度对新型 LPFG 传感器光谱特性的影响。软件仿真结果证明,这种 LPFG 由于结构设计上的特殊性,将使 LPFG 的谐振峰发生分裂,即一个透射峰分裂为两个。由于两个分裂峰对应力和温度的灵敏度不同,利用该结构的 LPFG 作为传感器,可以实现温度、应力等物理量的同步测量,从而解决 LPFG 传感器的交叉敏感问题。

**关键词** 传感器;新型长周期光纤光栅;镀层材料折射率;镀层厚度;镀膜长度

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0106001

## Research on Optical-Spectral Characteristics of Two-Section and Multi-Layer Long-Period Fiber Grating

Bao Jilong Zhao Hongxia Cheng Peihong Li Lei Shen Hongkang

(*Electronic and Information Engineering College, Ningbo University of Technology, Ningbo, Zhejiang 315016, China*)

**Abstract** Long-period fiber grating (LPFG) has a wide range of potential applications. But it is necessary to solve the cross sensitive problems of different physical quantities effectively before its practical application. Based on the sensibility of LPFG to the thickness and refractive index of cladding material, a new-type LPFG sensor composed of two-section multilayer transversely distributed refractive index is proposed. The influences of refractive index, thickness and length of the coating layer on the spectral characteristics of the new-type LPFG are analyzed by using coupling mode theory and transfer matrix method. The simulation results show that the resonant band splits due to the particularity of the LPFG structure. It can be concluded that this LPFG design can solve the cross sensitive problem and then can realize synchronous measurement of temperature, strain and other physical quantities.

**Key words** sensors; new-type long-period fiber grating; refractive index of coating materials; coating thickness; coating length

**OCIS codes** 060.2370; 060.3735; 310.1515

## 1 引 言

长周期光纤光栅(LPFG)具有不受电磁场干扰、本质上安全防爆、耐腐蚀、灵敏度高、传感合一、体积小和重量轻等优点,既可用于传统传感领域<sup>[1~4]</sup>,又可用于许多传统传感器难以涉足的极端恶劣场合,如被安装在有限空间中,或者用在极限温度、腐蚀、真空和危险的环境中,成为一些特殊环境

的非接触有效测量手段,因此在军事、航空航天、能源、环保、生物医学、自动控制以及建筑施工等领域备受青睐。但 LPFG 存在对温度、应力、折射率、弯曲等物理量的交叉敏感性,即当用 LPFG 测量某一待测参量时,由于环境变化引起的其他非待测参量的变化同样会引起谐振波长的漂移或透射峰的损耗,而 LPFG 本身不可能分辨出谐振波长的漂移或

收稿日期: 2012-07-03; 收到修改稿日期: 2012-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(61154003)资助课题。

作者简介: 鲍吉龙(1965—),男,博士,教授,主要从事光纤光栅与光纤传感技术等方面的研究。E-mail: baojl@nbut.cn

透射峰的损耗是来自于待测参量还是非待测参量,从而使单参量测量精度大大下降。针对 LPFG 在传感测量中的交叉敏感问题,已有许多研究人员进行了不懈的探索,目前已提出的解决方案主要有两类:1)两种或两种以上传感器的组合<sup>[5~9]</sup>,这不但增加了系统的复杂性而且成本高;2)单个传感器法<sup>[10~14]</sup>,这些方法中有些系统复杂成本高<sup>[11]</sup>,有些制作复杂<sup>[10,12~14]</sup>,仅适用于一些特殊的应用场合,不具普适性。

本文基于 LPFG 对包层外介质的敏感性,提出一种使 LPFG 谐振波长分裂的双段多层折射率横向分布的新型 LPFG 传感器,通过耦合模理论和传输矩阵方法,分析了镀层材料折射率、膜层厚度和镀层长度对新型 LPFG 传感器光谱特性的影响。该种 LPFG 不但具有双长周期光纤光栅的功能,而且结构紧凑,既可以减小光栅之间的熔接,又可以大大减小传感头的体积,对解决 LPFG 实际传感测量中的交叉敏感性具有积极的促进作用。

## 2 双段多层折射率横向分布 LPFG 结构模型

本文提出的可导致 LPFG 谐振波长分裂的双段多层式折射率横向分布结构的新型 LPFG 传感器,如图 1 所示。长为  $L$  的通用 LPFG 被分成  $L_1$  和  $L_2$  两段,在  $L_2$  段,折射率为  $n_1$  的包层介质表面镀上一层薄膜(折射率为  $n_2$ ),这样就在  $L_2$  区形成了  $n_0$ 、 $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$  四层折射率横向分布,而在  $L_1$  段依然是  $n_0$ 、 $n_1$ 、 $n_3$  三层折射率分布,其中  $n_0$  为纤芯折射率, $n_3$  为外界环境的折射率。经过这样的结构变化,传统的 LPFG 被设计成双段式三/四层折射率横向分布结构。

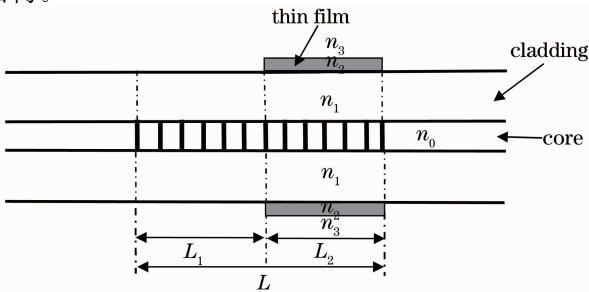


图 1 双段多层折射率横向分布 LPFG 传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of LPFG sensor composed of two-section multilayer transversely distributed refractive index

## 3 理论分析

### 3.1 双段多层式折射率横向分布结构 LPFG 的传输透射率

根据模式耦合理论,长为  $L$  的  $m$  阶均匀 LPFG 可用传输矩阵  $T_K$  表示为<sup>[15]</sup>

$$T_K = \begin{bmatrix} \cos sL + \frac{i\Delta\beta\sin sL}{2s} & \frac{iK}{s}\sin sL \\ \frac{iK^*}{s}\sin sL & \cos sL - \frac{i\Delta\beta\sin sL}{2s} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $s = \sqrt{K^2 + \frac{\Delta\beta^2}{4}}$ ,  $\Delta\beta = \beta_0 - \beta_1 - \frac{2\pi}{\Lambda}$ ,  $K = \frac{\pi\delta n}{\lambda}$ ,  $\beta_0 = \frac{2\pi}{\lambda}n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ ,  $\beta_1 = \frac{2\pi}{\lambda}n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ ,  $\Lambda$  为光栅周期。 $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$  和  $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$  分别为纤芯基模和  $m$  阶包层模的有效折射率, $\delta n$  为平均有效折射率调制系数, $K$  为耦合系数。

新型双段多层折射率横向分布 LPFG 传感器可等效看作长度为  $L_2$  的四层 LPFG 和长度为  $L_1$  的三层 LPFG 的串联。根据传输矩阵方法,同向传输的纤芯基模和第  $m$  阶包层模经历新型双段多层折射率横向分布 LPFG 后,纤芯基模和包层模的幅值为

$$\begin{bmatrix} a_{\text{co}}(L) \\ a_{\text{cl}}(L) \end{bmatrix} = T_K(L_1, n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}) \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \times T_K(L_2, n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}$  为两段光栅之间的界面矩阵, $b_{11} = \frac{n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}}{2n_{\text{eff}}^{\text{co}}}$ ,  $b_{12} = b_{21} = \frac{n_{\text{eff}}^{\text{co}} + n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}}{2n_{\text{eff}}^{\text{co}}}$ 。

经公式处理得双段多层折射率横向分布 LPFG 传感器纤芯基模的透射率为

$$T(\lambda) = |(t_{11}b_{11} + t_{12}b_{21})t_{13} + (t_{11}b_{12} + t_{12}b_{22})t_{23}|^2, \quad (3)$$

式中  $t_{11} = \cos s_1L_1 + \frac{i\Delta\beta_1\sin s_1L_1}{2s_1}$ ,  $t_{12} = \frac{iK_1}{s_1}\sin s_1L_1$ ,  $t_{13} = \cos s_2L_2 + \frac{i\Delta\beta_2\sin s_2L_2}{2s_2}$ ,  $t_{23} = \frac{iK_2}{s_2}\sin s_2L_2$ ;  $s_1$ ,  $\Delta\beta_1$ ,  $K_1$  为 LPFG 的  $L_1$  段在(1)式中对应的各量; $s_2$ ,  $\Delta\beta_2$ ,  $K_2$  为 LPFG 的  $L_2$  段在(1)式中对应的各量。

### 3.2 双段多层式折射率横向分布结构 LPFG 纤芯导模的色散方程

提出的新型双段多层折射率横向分布结构的 LPFG 传感器,尽管具有三/四层的折射率横向分布多层结构,但对于普通单模弱导光纤而言,由于包层

半径较大, 镀层对导模影响很小, 因此, 在分析和计算这种结构的 LPFG 的纤芯基模有效折射率时, 可以忽略镀层对导模的影响, 等效于普通的两层介质光纤模型。表征单模弱导光纤纤芯基模有效折射率的色散方程为<sup>[16]</sup>

$$V \sqrt{1-b} \frac{J_1(V \sqrt{1-b})}{J_0(V \sqrt{1-b})} = V \sqrt{b} \frac{N_1(V \sqrt{b})}{N_0(V \sqrt{b})}, \quad (4)$$

式中  $J_0$  和  $J_1$  是 0 阶和 1 阶第一类贝塞尔函数;  $N_0$  和  $N_1$  是 0 阶和 1 阶修正的第二类贝塞尔函数;

$V = \left( \frac{2\pi a_1}{\lambda} \sqrt{n_0^2 - n_1^2} \right)$  为归一化频率,  $a$  为光纤芯半径;  $b = (n_{\text{eff}}^2 - n_1^2) / (n_0^2 - n_1^2)$  为模式的归一化有效折射率。

### 3.3 双段多层式折射率横向分布结构 LPFG 包层模的特征方程

同样的道理, 对普通的单模弱导光纤, 由于包层半径较大, 镀层对导模影响很小, 在计算包层有效折射率时, 可等效采用三包层模型 LPFG 的特征方程<sup>[17]</sup>

$$\begin{aligned} & [Ju_2(\Gamma_1 + Nu_3\Gamma_2) - (\Gamma_3 + Nu_3\Gamma_4)] [(Ju_2/n_2^2)(\Gamma_5/n_4^2 + Nu_3\Gamma_6/n_3^2) - (1/n_1^2)(\Gamma_7/n_4^2 + Nu_3\Gamma_8/n_3^2)] + \\ & \xi_{12}^2 \xi_{34}^2 \Gamma_2 \Gamma_6 + \xi_{12}^2 \xi_{23}^2 \Gamma_9 p_{v2}^2 + \xi_{23}^2 \xi_{34}^2 \Gamma_{10} p_{v3}^2 + 2\xi_{23} \xi_{34} u_2 \Gamma_{10} 2^2 / (a_2 a_3 n_2 n_4 u_3^2 \pi^2) + \xi_{12} \xi_{23} \xi_{34}^2 u_3 2^2 p_{v3}^2 / (a_1 a_2 n_1 n_3 u_2^2 \pi^2) + \\ & 2\xi_{12} \xi_{34} 2^4 / (a_1 a_2 a_3 n_1 n_2 n_3 n_4 u_2 u_3 \pi^4) = \xi_{12}^2 \xi_{23}^2 \xi_{34}^2 p_{v2}^2 p_{v3}^2 + 2\xi_{23} \xi_{34} \xi_{12}^2 u_2 2^2 p_{v2}^2 / (a_2 a_3 n_2 n_4 u_3^2 \pi^2) + \\ & 2\xi_{12} \xi_{23} u_3 \Gamma_9 2^2 / (a_1 a_2 n_1 n_3 u_2^2 \pi^2) + \xi_{12}^2 (\Gamma_1 + Nu_3\Gamma_2) (\Gamma_5/n_4^2 + Nu_3\Gamma_6/n_3^2) + \xi_{23}^2 \Gamma_9 \Gamma_{10} + \\ & \xi_{34}^2 (Ju_2\Gamma_6/n_2^2 - \Gamma_8/n_1^2) (Ju_2\Gamma_2 - \Gamma_4), \end{aligned} \quad (5)$$

式中各参量表示为

$$u_j^2 = k^2 n_j^2 - \beta^2 = -w_j^2, \quad j = 1, 2, 3, 4; \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \beta = kn_{\text{eff}}^{\nu},$$

$$J = J'_l(u_1 a_1) / [u_1 J_l(u_1 a_1)], \quad N = N'_l(w_3 a_2) / [w_3 N_l(w_3 a_2)],$$

$$p_{v2} = \begin{vmatrix} J_l(u_2 a_2) & J_l(u_2 a_1) \\ Y_l(u_2 a_2) & Y_l(u_2 a_1) \end{vmatrix}, \quad q_{v2} = \begin{vmatrix} J'_l(u_2 a_2) & J'_l(u_2 a_1) \\ Y'_l(u_2 a_2) & Y'_l(u_2 a_1) \end{vmatrix}, \quad r_{v2} = \begin{vmatrix} J'_l(u_2 a_2) & J_l(u_2 a_1) \\ Y'_l(u_2 a_2) & Y_l(u_2 a_1) \end{vmatrix},$$

$$s_{v2} = \begin{vmatrix} J'_l(u_2 a_2) & J'_l(u_2 a_1) \\ Y'_l(u_2 a_2) & Y'_l(u_2 a_1) \end{vmatrix}, \quad p_{v3} = \begin{vmatrix} J_l(u_3 a_3) & J_l(u_3 a_2) \\ Y_l(u_3 a_3) & Y_l(u_3 a_2) \end{vmatrix}, \quad q_{v3} = \begin{vmatrix} J_l(u_3 a_3) & J'_l(u_3 a_2) \\ Y_l(u_3 a_3) & Y'_l(u_3 a_2) \end{vmatrix},$$

$$r_{v3} = \begin{vmatrix} J'_l(u_3 a_3) & J_l(u_3 a_2) \\ J'_l(u_2 a_2) & Y_l(u_3 a_2) \end{vmatrix}, \quad s_{v3} = \begin{vmatrix} J'_l(u_3 a_3) & J'_l(u_3 a_2) \\ Y'_l(u_3 a_3) & Y'_l(u_3 a_2) \end{vmatrix},$$

$$\Gamma_1 = u_2 p_{v2} s_{v3} - u_3 r_{v2} r_{v3}, \quad \Gamma_2 = u_2 p_{v2} q_{v3} - u_3 r_{v2} p_{v3}, \quad \Gamma_3 = u_2 q_{v2} s_{v3} - u_3 s_{v2} r_{v3},$$

$$\Gamma_4 = u_2 q_{v2} q_{v3} - u_3 s_{v2} p_{v3}, \quad \Gamma_5 = u_2 p_{v2} s_{v3} / n_2^2 - u_3 r_{v2} r_{v3} / n_3^2, \quad \Gamma_6 = u_2 p_{v2} q_{v3} / n_2^2 - u_3 r_{v2} p_{v3} / n_3^2,$$

$$\Gamma_7 = u_2 q_{v2} s_{v3} / n_2^2 - u_3 s_{v2} r_{v3} / n_3^2, \quad \Gamma_8 = u_2 q_{v2} q_{v3} / n_2^2 - u_3 s_{v2} p_{v3} / n_3^2,$$

$$\Gamma_9 = (r_{v3} + Nu_3 p_{v3})(r_{v3} / n_4^2 + Nu_3 p_{v3} / n_4^2), \quad \Gamma_{10} = (Ju_2 p_{v2} - q_{v2})(Ju_2 p_{v2} / n_2^2 - q_{v2} / n_1^2),$$

$$\xi_{12}^2 = \sigma_0^2 v_{12}^4 / (a_1^2 n_1^2 n_2^4 u_1^2 u_2^2), \quad \xi_{23}^2 = \sigma_0^2 v_{23}^4 / (a_2^2 n_2^2 n_3^2 u_2^2 u_3^2), \quad \xi_{34}^2 = \sigma_0^2 v_{34}^4 / (a_3^2 n_3^2 n_4^2 u_3^2 u_4^2),$$

式中  $\sigma_0^2 = \beta^2 l^2 / k^2$ ;  $v_{12}^4 = k^2 (n_1^2 - n_2^2)$ ,  $v_{23}^4 = k^2 (n_2^2 - n_3^2)$ ,  $v_{34}^4 = k^2 (n_3^2 - n_4^2)$ ,  $J_l, N_l, Y_l$  分别为第一类贝塞尔函数, 第二类修正的贝塞尔函数和第二类贝塞尔函数,  $l$  为贝塞尔函数的阶数,  $J'_l, N'_l, Y'_l$  分别为对括号中的量的一阶导数;  $n_{\text{eff}}^{\nu}$  为包层模有效折射率,  $\nu$  为包层模次数,  $\nu = 1, 2, 3, \dots$ 。

## 4 理论仿真及讨论

根据对双段多层折射率横向分布结构的 LPFG 传感器的理论分析, 利用 Mathcad2001 计算软件对这种结构 LPFG 传感器的光谱特性进行了仿真计算和分析。

图 2 为利用(3)式计算得到的新型 LPFG 透射谱曲线, 其中有关参数为:  $n_0 = 1.44661$ ,  $n_1 = 1.44403$ , 纤芯和包层半径分别为  $a_1 = 4.15 \mu\text{m}$ ,

$a_2 = 62.5 \mu\text{m}$ , 光栅周期  $\Lambda = 300 \mu\text{m}$ , 光栅长度  $L = 5 \text{ cm}$ ,  $\delta n = 2.1 \times 10^{-5}$ , 镀层厚度  $a_3 - a_2 = 400 \text{ nm}$ , 镀层材料折射率  $n_2 = 1.5$ ,  $L_1 = L_2 = 0.025 \text{ m}$ 。

由图 2 可看出, 新型双段多层折射率横向分布 LPFG 传感器的透射谱由双峰构成, 确实实现了 LPFG 透射峰的分裂。根据(3)式可知, 在纤芯和包层材料折射率及纤芯直径确定的情况下, 新型双段多层折射率横向分布 LPFG 的透射谱, 与镀层材料折射

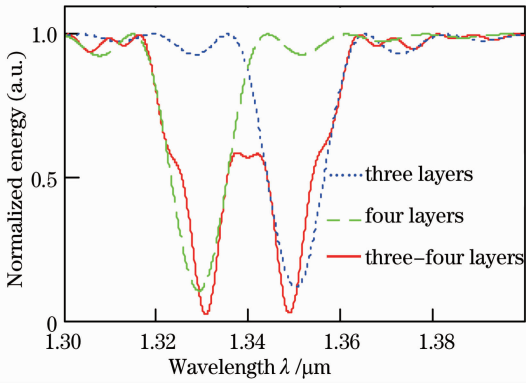


图2 新型双段多层折射率横向分布 LPFG 透射谱

Fig.2 Transmission spectra of new LPFG with two-section multi-layer transversely distributed refractive index rate, coating thickness and coating length etc structural parameters have a close relationship.

根据(4)式和(5)式,在膜层厚度为 400 nm、镀层长度  $L_2$  为 0.025 m、光栅周期为  $500 \mu\text{m}$  的情况下,计算得到了新型双段多层折射率横向分布 LPFG 的  $\text{HE}_{154}$ 、 $\text{EH}_{154}$ 、 $\text{HE}_{155}$  和  $\text{EH}_{155}$  一阶 4 个包层模两个谐振波长间距与  $L_2$  段的镀层材料折射率的关系,如图 3 所示。

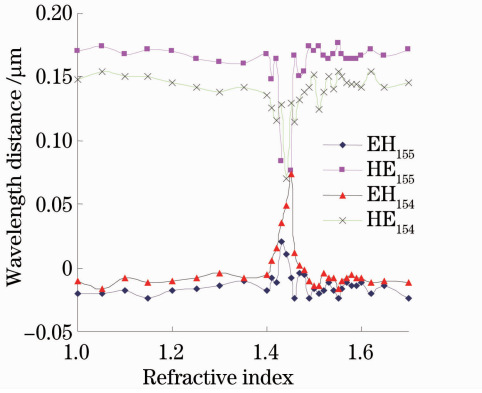


图3 两个谐振峰波长间距与镀层材料折射率之间关系曲线

Fig.3 Distance between two split peaks as a function of the refractive index of coating layer

由图 3 可知,镀层材料折射率在 1.41 之前,双段多层折射率横向分布 LPFG 的 4 个模式谐振波长间距几乎不变,即包层有效折射率几乎相同;当  $L_2$  段的镀层材料折射率大于 1.41 时,随着镀层材料折射率的增加,两个 EH 模谐振峰间距迅速增大,而两个 HE 模谐振峰间距迅速减小,且都在镀层材料折射率为 1.44 附近达到最值, EH 模谐振峰间距  $\Delta\lambda$  达到最大值  $0.074 \mu\text{m}$ , HE 模谐振峰间距  $\Delta\lambda$  达到最小值  $0.174 \mu\text{m}$ 。当镀层材料折射率大于 1.44 时,随着折射率的继续增加,模式谐振波长间距的变

化又呈现出与之前等等的规律。由此可知,  $L_2$  段的镀层材料的折射率对双段多层折射率横向分布结构的 LPFG 传感器的光谱特性有着重要的影响,选择合适折射率的镀层材料有利于提高双段多层折射率横向分布的 LPFG 传感器的传感精度。

图 4 是膜层材料折射率为 1.5、镀层长度为 0.025 m 和光栅周期为  $500 \mu\text{m}$  的情况下,两个谐振波长间距与膜层厚度之间的关系曲线。

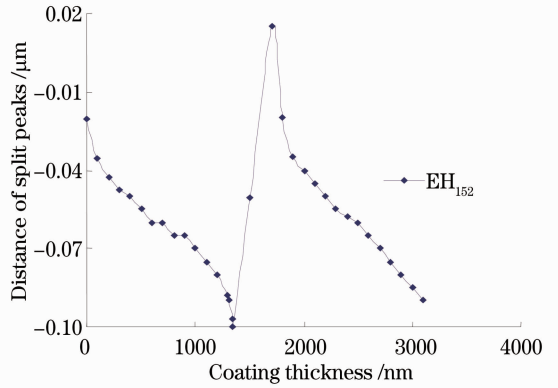


图4 谐振峰间距与镀膜厚度之间的关系曲线

Fig.4 Distance between two split peaks as a function of thickness of coating layer

由图 4 可知,  $L_2$  段镀层厚度从 0 逐渐增大到 1350 nm 的过程中,两谐振峰的间距逐渐减小,在 1350 nm 时突变,在 1700 nm 时随着膜厚度的增大,谐振波长间距又减小。由此可见,  $L_2$  段镀层厚度在材料折射率、镀层长度、光栅周期确定的情况下,存在设计最佳值。其他模式具有与  $\text{EH}_{152}$  近似的变化趋势。

在膜层材料折射率为 1.5、包层厚度为  $62.5 \mu\text{m}$ 、镀层厚度 400 nm 的情况下,利用(5)式求得  $L_1$  段和  $L_2$  段包层有效折射率代入(3)式得两谐振波长与  $L_2$  段镀层长度之间的关系如图 5(a)所示,两谐振波长间距与  $L_2$  段镀层长度之间的关系如图 5(b)所示。

由图 5(b)可明显看出,随着  $L_2/L$  比值的增加,谐振峰间距随之增大;当  $L_2/L = 50\%$ ,谐振峰间距达到最大值,随着  $L_2/L$  的继续增大,谐振峰间距随之减小。图 5(b) 是以  $x = L_2/L = 50\%$  为对称轴,具有很好的轴对称性。因此,在膜层材料折射率、包层厚度、镀层厚度确定的情况下,对于双段多层折射率横向分布结构的 LPFG 传感器而言,其分裂的两个谐振峰之间的间距随  $L_2/L$  的变化存在最大值。

图 6 为不同镀层长度情况下的光栅透射谱。从图中可以看出,当  $L_2/L = 40\%$  时,谐振峰间距为  $0.017 \mu\text{m}$ ;当  $L_2/L = 50\%$  时,谐振峰间距为  $0.018 \mu\text{m}$ 。

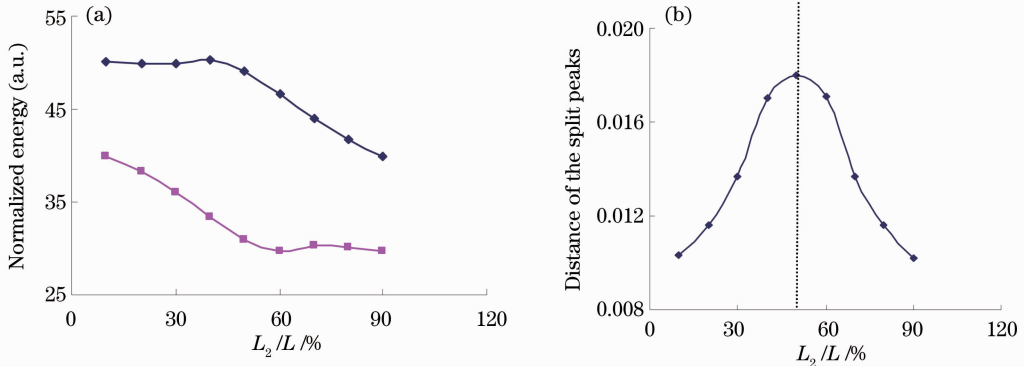


图 5 (a) 谐振波长和(b)谐振波长间距随镀层长度比  $L_2/L$  的变化曲线

Fig. 5 (a) Resonance wavelength and (b) distance between two split peaks as function of coating layer length ratio  $L_2/L$

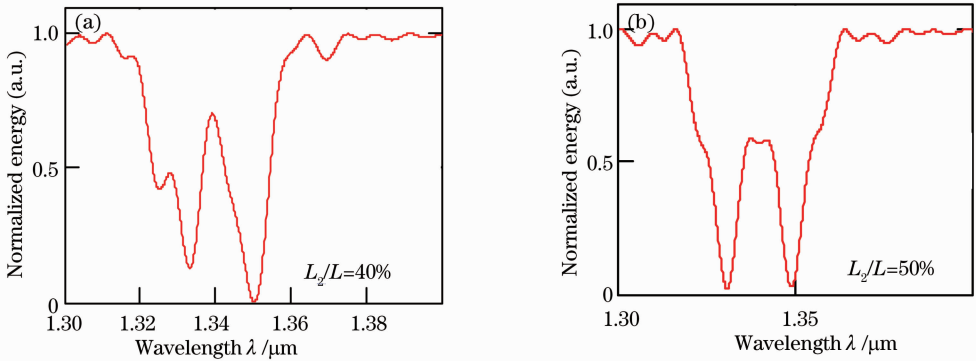


图 6 在不同镀层长度情况下的光栅透射谱。(a)  $L_2/L=40\%$ ；(b)  $L_2/L=50\%$

Fig. 6 Transmission spectra of LPFG with different coating lengths. (a)  $L_2/L=40\%$ ；(b)  $L_2/L=50\%$

## 5 结 论

提出一种新型双段多层折射率横向分布结构的 LPFG, 利用耦合模理论和传输矩阵方法理论分析了这种结构 LPFG 的光谱特性, 并讨论了  $L_2$  段镀层材料折射率、镀层厚度和镀膜长度对新型 LPFG 传感器光谱特性的影响。软件仿真结果证明, 这种 LPFG 由于结构设计上的特殊性, 将使 LPFG 的谐振峰发生分裂, 同时, 正是由于这种 LPFG 结构设计上的特殊性, 使 LPFG 的两段光栅具有不同的物理结构和不同物理参数的镀层材料, 从而实现 LPFG 的两个分裂峰具有不同的应变、温度等参量的传感灵敏度, 为实现温度、应力等物理量的同步测量创造了条件。因此, 利用该结构的 LPFG 作为传感器, 可以实现温度、应力等物理量的同步测量, 从而为解决 LPFG 传感器的交叉敏感问题提供有效方法。

## 参 考 文 献

1 Jiang Mingshun, Feng Dejun, Sui Qingmei. High-precision

transverse-pressure sensing system utilizing mechanically-induced long-period fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2855~2858

姜明顺, 冯德军, 隋青美. 高精度机械感生长周期光纤光栅横向压力传感系统[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2855~2858

2 Zeng Xiangkai, Rao Yunjiang, Liang Kuai. Characteristic analysis of LPFG resonance wavelength shift owing to transverse load[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0106002

曾祥楷, 饶云江, 梁 快. 长周期光纤光栅谐振波长的横向负载特性分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0106002

3 Song Xiaoli, Bai Yukun, Ren Guangjun *et al.*. Analysis of temperature sensing characteristics of a long-period grating formed in a liquid-filled photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1205007

宋晓利, 白育堃, 任广军等. 液体填充光子晶体光纤中长周期光栅的温度传感特性分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(12): 1205007

4 Guan Shouhua, Yu Qingxu, Zheng Jianzhou. Study on torsion characteristics of a new-type long-period fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 1996~2000

关寿华, 于清旭, 郑建洲. 一种新型长周期光纤光栅扭曲特性的研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 1996~2000

5 A. Sun, Z. S. Wu. Hybrid long-period-grating and fiber Bragg grating for cladding-mode-recoupling-based discrimination of temperature and strain[J]. *Opt. Eng.*, 2012, **51**(4): 044402

6 M. Kondiparthi, B. N. Shivananju. Simultaneous measurement of strain and temperature with a pair of matched fiber Bragg gratings [C]. *SPIE*, 2010, **7813**: 78130Q

- 7 C. C. Chan, K. M. Tan, C. M. Tay *et al.*. Simultaneous measurement of curvature and temperature for LPFG bending sensor [C]. *SPIE*, 2004, **5590**: 105~110
- 8 K. Samer, A. K. Bey, T. Sum *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and strain with long period grating pairs using low resolution detection[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, **144**(1): 83~89
- 9 H. M. Kim, H. Nam, D. S. Moon *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature with high sensing accuracy [C]. Optoelectronics and Communication Conference, 2009. 1~2
- 10 V. Bhatia, D. Campbell, R. O. Claus *et al.*. Simultaneous strain and temperature measurement with long-period grating[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(9): 648~650
- 11 K. J. Han, Y. W. Lee, J. Kwon *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature incorporating a long-period fiber grating inscribed on a polarization-maintaining fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **16**(9): 2114~2116
- 12 O. Frazao, G. Rego, F. M. Araujo *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature based on polarization loss properties of arc-induced long period gratings [C]. *SPIE*, 2004, **5502**: 168~171
- 13 G. Rego, R. Falate, O. Ivanov *et al.*. Simultaneous temperature and strain measurements performed by a step-changed arc-induced long-period fiber grating [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(9): 1392~1396
- 14 Y. G. Han, B. H. Lee, W. T. Han *et al.*. Controllable transmission characteristics of multi-channel long period fiber gratings [J]. *IEICE Trans. Electron.*, 2001, **E84-C**(5): 610~614
- 15 Rao Yunjiang, Wang Yiping, Zhu Tao. Theory and Applications of Fiber Gratings [M]. Beijing: Science Press, 2006. 255  
饶云江, 王义平, 朱涛. 光纤光栅原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 255
- 16 T. Erdogan. Cladding-mode resonances in short and long period fiber grating filters [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(8): 1760~1773
- 17 C. Tsao. Optical Fiber Waveguide Analysis [M]. New York: Oxford University Press, 1992

栏目编辑: 王晓球