光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.03.007

LPFG 折射率模式响应及其在传感建模中的应用

杨 颖*

（临沂大学 自动化与电气工程学院，山东 临沂 276005）

摘 要： 基于光纤光栅的模式耦合理论，采用严格的数学模型，给出了三层介质长周期光纤光栅（LPFG）的纤芯模和包层模的本征方程，分析了长周期光纤光栅中的纤芯模式和包层模式的有效折射率随外界环境折射率变化的情形，以及外界环境折射率变化对长周期光纤光栅谐振波长的影响。通过在长周期光纤光栅外涂覆折射率对外界环境变化敏感响应的特定薄膜可以显著提高其传感测量的灵敏度。研究结果可为长周期光纤光栅传感器结构参数的优化设计和实际应用提供理论支持。

关键词： 长周期光纤光栅；模式耦合理论；折射率模式响应；光纤光栅薄膜传感器；传感器灵敏度

中图分类号： TP212.14 **文章编号：** 1001－5868(2021)03－0336－06

Mode Response of LPFG to the Refractive Index of External Medium

YANG Ying

（School of Automation and Electrical Engineering, Linyi University, Linyi 276005, CHN）

Abstract: Based on coupled-mode theory, the eigen equations of core and cladding modes of the three-layer dielectric long-period fiber grating (LPFG) are presented by using strict mathematical model. Changes of effective indexes of the core and cladding modes in LPFG with refractive index of external environment are described, and the influence of the changes of the refractive index of external medium on resonant wavelength of LPFG is analyzed. The sensitivity of sensing measurement of LPFG can be significantly improved by coating with a specific film whose refractive index is sensitive to the change of the external environment, which provides a theoretical support to the optimum design of LPFG sensor and its practical application.

Key words: long-period fiber grating; coupled-mode theory; refractive index mode response; fiber grating film sensor; sensor sensitivity

0 引言

光纤光栅是一种利用光纤材料的光敏性，通过一定方法使光纤纤芯的折射率发生轴向周期性调制而形成的衍射光栅，它是一种无源器件，能够对光纤中所传输的光的波长、偏振、传播方向、模式特性等传播行为方式加以控制[1]。根据光纤光栅周期的长短，通常把周期小于 1 μm 的光纤光栅称为短周期光纤光栅，又称为光纤布拉格光栅（Fiber Bragg Grating，FBG）；而把周期为几十至几百微米的光纤光栅称为长周期光纤光栅（Long-Period Fiber Grating，LPFG），又称为透射光栅。它们的共同特点是在满足相位匹配条件的谐振波长处，光波传播模式之间可以发生耦合。FBG 内发生的是正反向传播的纤芯模之间的耦合，满足相位匹配条件的特定波长（谐振波长）的光波会被反射，其他不满足相位匹配条件的光波会基本无损耗地在光纤纤芯中传播，属于反射型带通滤波器。LPFG 内发生的是纤

收稿日期：2021－04－05.

基金项目：国家自然科学基金项目（51471130）；山东省自然科学基金项目（ZR2015FL033）；临沂大学博士启动基金项目（LYDX2016BS079）.

* **通信作者：**杨 颖

芯模与同向传输的包层模之间的耦合，满足相位匹配条件的特定波长的光波，由纤芯被耦合进包层向前传播，由于散射损耗很快被衰减掉，在输出端观察到的光纤光栅透射谱中会出现一系列的损耗峰，属透射型带通滤波器。当光纤光栅所处环境的温度、浓度、应力、应变或其他物理量发生变化时，光栅周期或纤芯及包层的折射率将发生变化，会使其传输谱中的谐振波长发生变化，通过测量谐振波长的变化，即可获得待测物理量的变化情况。

光纤光栅传输光谱易受到温度、应力、弯曲等因素的影响，因而可以被用于多个不同参量的传感[2]。特别是 LPFG，其光纤中的包层模极易受外界因素的影响，因此，LPFG 的传输光谱中的谐振峰对环境折射率的变化较为敏感，具有很高的折射率敏感性[3]，非常适用于环境折射率、气体和液体浓度等物理量的传感[4]。尤其当在 LPFG 表面涂覆特定的敏感薄膜后[5]，利用特定敏感薄膜与不同环境参量的相互作用，还可以实现对环境温度和湿度，以及对溶液、农药、炸药、抗体、核酸的 pH 值和浓度等多种化学、生物参量的传感[6-7]，LPFG 已经成为光化学和光生物传感中最重要的器件之一[8]。

本文将采用三层阶跃折射率光纤结构，基于耦合模理论，详细讨论 LPFG 对周围环境折射率的响应，分析外界环境折射率变化时 LPFG 的谐振波长的变化情况，并对涂覆敏感膜薄的 LPFG 对薄膜材料折射率的高灵敏响应进行深入分析，提出结构优化的涂覆 LPFG 的设计方案，以为 LPFG 在光化学、生物传感、智能传感器及光纤通信等领域的实际应用提供理论支持。

1　LPFG 理论模型

LPFG 的三层结构模型如图 1 所示。图 2 为 LPFG 的三层阶跃折射率分布示意图，其中纤芯层折射率为 n_1，包层折射率为 n_2，周围环境（通常为液体、气体）折射率为 n_3。

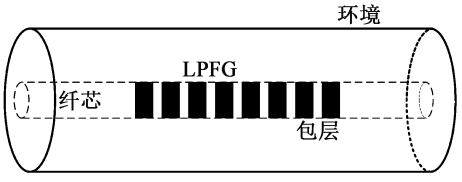


图 1　LPFG 的结构示意图

由耦合模理论可知，对于理想的均匀光纤，在未受到微扰时，纤芯及包层中存在的模式之间满足相互正交关系，模式之间不发生耦合，即不存在能量交换。在纤芯中写入或刻入光栅，会使纤芯的几何形状发生微小变化，进而产生介电扰动（折射率变化），破坏了光波导中光学特性的一致性，使原来纤芯与包层中相互正交的模式发生能量耦合。对于 LPFG，其模式耦合表现为前向传播的纤芯导模与同向传播的各阶次包层模式之间的耦合。相对纤芯导模与一阶各次包层模式的耦合，包层模式之间的耦合作用极其微弱，可以忽略，由此，LPFG 的耦合方程可以近似地表示为[9]

$$\frac{\mathrm{d}A^{\mathrm{co}}}{\mathrm{d}z}=\mathrm{i}\kappa^{\mathrm{co\text{-}co}}A^{\mathrm{co}}+\mathrm{i}\sum_m\frac{v}{2}\kappa_{1m}^{\mathrm{cl\text{-}co}}A_m^{\mathrm{cl}}\exp(-\mathrm{i}2\delta_{1m}^{\mathrm{cl\text{-}co}}z) \tag{1}$$

$$\sum_m\left[\frac{\mathrm{d}A_m^{\mathrm{cl}}}{\mathrm{d}z}=+\mathrm{i}\frac{v}{2}\kappa_{1m}^{\mathrm{cl\text{-}co}}A^{\mathrm{co}}\exp(+\mathrm{i}2\delta_{1m}^{\mathrm{cl\text{-}co}}z)\right] \tag{2}$$

式中，A^{co}，A_m^{cl} 分别为纤芯模与一阶 m 次包层模的振幅，$\kappa^{\mathrm{co\text{-}co}}$ 和 $\kappa_{1m}^{\mathrm{cl\text{-}co}}$ 分别为纤芯模自耦合系数与纤芯模和包层模之间的互耦合系数。$\delta_{1m}^{\mathrm{cl\text{-}co}}$ 为失谐参数：

$$\delta_{1m}^{\mathrm{cl\text{-}co}}=\frac{1}{2}\left(\beta^{\mathrm{co}}-\beta_{1m}^{\mathrm{cl}}-\frac{2\pi}{\Lambda}\right) \tag{3}$$

式中，β^{co} 和 β_{1m}^{cl} 分别为纤芯模与包层模的传播常数，Λ 为光栅周期。失谐参数表示对相位匹配条件的偏离程度，令 $\delta_{1m}^{\mathrm{cl\text{-}co}}=0$，即可得到 LPFG 的相位匹配条件：

$$\lambda_{\mathrm{res},m}=(n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{co}}-n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{cl},m})\Lambda \tag{4}$$

其中，$n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{co}}$ 和 $n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{cl},m}$ 分别表示纤芯模和 1 阶 m 次包层模的有效折射率，有效折射率与传播常数之间存在关系式 $\beta=kn_{\mathrm{eff}}$。

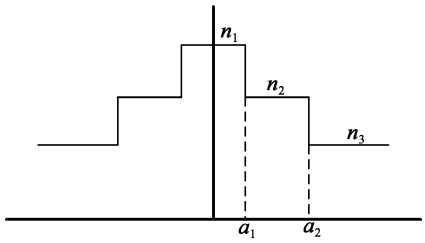


图 2　LPFG 的折射率分布图

设光栅长度为 L，中点为 z 轴原点，长周期光纤光栅的边界条件如下：$A^{\mathrm{co}}(z=-L/2)=1$，$A_m^{\mathrm{cl}}(z=-L/2)=0$。长周期光纤光栅的透射率定义为

$$T=A^{\mathrm{co}}(L/2)/A^{\mathrm{co}}(-L/2) \tag{5}$$

式中，A^{co} 是纤芯导模的正 z 向振幅，A_v^{cl} 是一阶 m 次包层模的正 z 向振幅。

求解耦合模方程可以得到模式的振幅 $A^{co}(L/2)$，代入式(5)，即可得到透过率 T。

光栅参数如下：芯层折射率 $n_1=1.458$，纤芯半径 $a_1=2.625\ \mu m$；内包层折射率 $n_2=1.45$，包层半径 $a_2=62.4\ \mu m$；$L=1.6\ cm$；$\Lambda=500\ \mu m$。求得 LPFG 的透射谱如图 3 所示，图中从左到右 5 个离散的谐振峰分别对应纤芯模到一阶 1,3,5,7,9 次包层模耦合。谐振峰是由于纤芯基模在与多个同向传输的一阶包层模耦合时，纤芯基模中的能量会被逐渐转换到包层模中，而进入包层模中的这些能量在沿包层传输一定距离后会损耗殆尽，所以在透射谱中会出现多个离散的损耗峰。

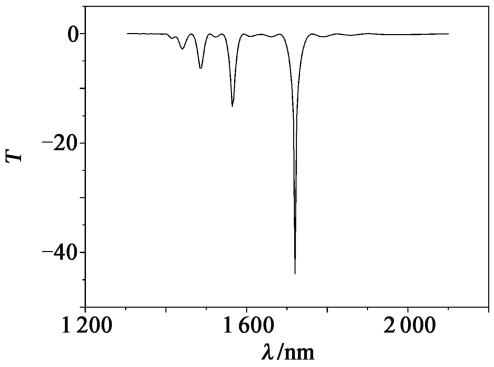


图 3 LPFG 的传输谱

对于图 2 所示的长周期光纤光栅，根据模式耦合理论，前向传播的纤芯基模与同向传播的一阶 m 次包层模式之间的耦合满足相位匹配条件：

$$n_{eff}^{co}(\lambda)-n_{eff}^{cl,m}(\lambda)=\frac{\lambda}{\Lambda},m=1,2,3,\cdots \quad (6)$$

式中，$n_{eff}^{co}(\lambda)$ 为前向传输导模在波长 λ 处的有效折射率，简写为 n_{eff}^{co}；$n_{eff}^{cl,m}(\lambda)$ 为一阶 m 次包层模式在波长 λ 处的有效折射率，简写为 n_{eff}^{cl}；Λ 为光纤光栅的周期。导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 为一阶 m 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。

2 LPFG 对环境折射率的响应

2.1 纤芯模式模型

光在光纤中传播时，如果纤芯中的传播常数 β 在 $k_0n_2<\beta<k_0n_1$（k_0 为真空中的波矢）的范围内，电磁场能量将被封闭在纤芯中，在纤芯中会存在径向振荡波，形成导波模。通常光纤包层半径远大于纤芯半径，导波场只会在纤芯内传播，在包层中会按指数迅速衰减，一般包层足够厚，导波场不会传播到包层外部，因此纤芯模式几乎不受外界环境折射率的影响。所以可以忽略外界环境，采用两层模型分析纤芯内的折射率分布：

对于单模光纤，纤芯模式为 $HE_{11}(LP_{01})$，给定入射波长 λ_i，HE_{11} 的特征方程（色散方程）为[10]

$$u_1\frac{J_m(u_1)}{J_{m-1}(u_1)}=w_1\frac{K_m(w_1)}{K_{m-1}(w_1)} \quad (7)$$

式中，$J(\cdot)$ 是第一类贝塞耳函数，$K(\cdot)$ 是第二类修饰贝塞耳函数，m 是模式序数。u_1 为表征纤芯内场分布规律的径向归一化相移常数，$u_1=a_1\sqrt{k_0^2n_1^2-\beta_{co}^2}$，$w_1$ 为表征包层内场分布规律的径向归一化衰减常数，$w_1=a_1^2\sqrt{\beta_{co}^2-k_0^2n_2^2}$；对 HE_{11} 纤芯模式 $J(\cdot)$，$m=1$，求解色散方程得到纤芯模式传播常数 β_{co} 后，设定光波波长 λ_i，便可求得纤芯模式的有效折射率 $n_{eff}^{co}(\lambda_i)=\frac{\beta_{co}}{k}(\lambda_i)$，其中，$k=\frac{2\pi}{\lambda_i}$。纤芯有效折射率随光波波长变化的情况如图 4 所示。

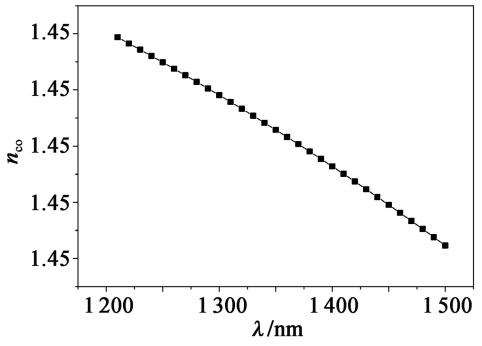


图 4 纤芯模式的有效折射率

2.2 包层模式模型

求解光纤中的麦克斯韦方程表明，光纤中除了存在有限个纤芯导模外，还有无限多连续的辐射模。由于包层半径是有限的，从纤芯中辐射出的光被包层俘获，形成所谓的包层模。当传播常数 $\beta<k_0n_2$ 时，由于不能满足全反射条件，光线会折射到包层中去，引起纤芯导模能量向包层辐射。由于包层模式的有效折射率与包层折射率和外部环境折射率 n_3 有关，所以包层模式的耦合波长会随其外部环境折射率的变化而变化，这使得 LPFG 可作为外部介质传感器。

2.3 外界环境折射率与包层折射率的关系

(1) $n_3<n_2$

当外界环境折射率小于包层折射率时，光线在

包层和外部介质界面处可以发生全内反射，在包层中会形成无损耗的导模。当 $n_3 < n_{\text{eff}}^{\text{cl}} < n_2$ 时，$k_0 n_3 < \beta < k_0 n_2$，光线在包层和外部介质界面处发生全内反射，在包层中也形成了导模。由于包层半径是有限的，从纤芯中辐射出的光被包层俘获，形成包层模。随着外部环境折射率的增加，包层对模式的束缚作用逐渐减弱，包层模有效折射率 $n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$ 会随之增加。相同波长下，包层模的数量会减少，对应模式的传播常数增大，导致导模与包层模之间的耦合波长会朝短波方向漂移，LPFG 透射谱发生蓝移[11]。

式中，a_1 为纤芯半径，a_2 为包层半径；n_1 为纤芯折射率，n_2 为包层折射率；$\sigma_1 = \mathrm{i}v n_{\text{eff}}^{\text{cl}} / z_0$，$\sigma_2 = \mathrm{i}v n_{\text{eff}}^{\text{cl}} z_0$ 其中，$z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$ 为真空阻抗，$n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$ 为包层有效折射率；u_2 为径向归一化相移常数，$u_2 = a_2 \sqrt{k^2 n_{\text{cl}}^2 - \beta_{\text{cl}}^2}$；其中 n_{cl} 为包层的折射率，β_{cl} 为包层模传播常数；

$$u_j^2 = (2p/l)^2 (n_j^2 - n_{\text{cl}}^2), j = 1, 2;$$

$$u_{21} = \frac{1}{u_2^2} - \frac{1}{u_1^2}; u_{32} = \frac{1}{w_3^2} + \frac{1}{u_2^2};$$

其中，$w_3^2 = (2p/l)^2 (n_{\text{cl}}^2 - n_3^2)$；$n_3$ 为外界折射率；

$$J = \frac{J'_v(u_1 a_1)}{u_1 J_v(u_1 a_1)}; K = \frac{K'_v(w_3 a_2)}{w_3 K_v(w_3 a_2)};$$

$$p_v(r) = J_v(u_2 r) N_v(u_2 a_1) - J_v(u_2 a_1) N_v(u_2 a_1);$$

$$q_v(r) = J_v(u_2 r) N'_v(u_2 a_1) - J'_v(u_2 a_1) N_v(u_2 r);$$

$$r_v(r) = J'_v(u_2 r) N_v(u_2 a_1) - J_v(u_2 a_1) N'_v(u_2 r);$$

$$s_v(r) = J'_v(u_2 r) N'_v(u_2 a_1) - J'_v(u_2 a_1) N'_v(u_2 r);$$

其中 N_v 为 v 阶第二类贝塞尔函数，又称诺依曼函数；J'_v, N'_v, K'_v 分别表示 J_v, N_v, K_v 宗量的一阶微商。

如果已知光纤结构参量及外部环境折射率，在设定光波波长后本征方程中仅有 $n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$ 未知，求解本征方程便可求得包层模有效折射率 $n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$。包层模式有效折射率随光波波长变化的情况如图 5 所示。

(2) $n_3 \cong n_2$

当外部环境折射率近似等于包层折射率时，可将光纤看成一个两层模型，纤芯相当于被一个无限大的包层所包围，这时包层模式不可能出现，纤芯模式也无法与其耦合，LPFG透射谱中不会有明显的损耗波带出现，明显的损耗波带只出现在包层模式转换成辐射模式时[14]。当包层模式转化成为辐射模式时，纤芯模将与连续的辐射模发生耦合，光栅的输出光谱中将呈现连续的吸收谱。

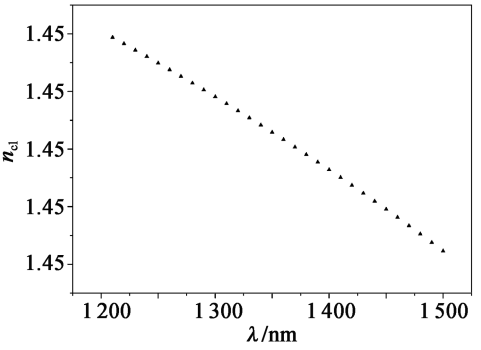


图 5　包层模式的有效折射率

当外部介质折射率 n_3 从 1 变化到包层折射率 n_2 时，菲涅耳反射系数会很小，包层中将没有模式传播，透射峰也几乎消失，对 LPFG 透射谱的影响主要是发生蓝移。如果 n_3 为包层上所涂覆的敏感薄膜的折射率，则此时在敏感薄膜中存在的是按指数规律衰减的波，薄膜厚度对耦合波长的偏移和透射谱的影响都很小[12]。

此时包层模本征方程(色散方程)为[13]

$$\zeta_0 = \zeta_1 \tag{8}$$

式中：

$$\zeta_0 = \frac{1}{\sigma_2} \frac{u_2[JK + \sigma_1\sigma_2 u_{21} u_{32}/n_2^2 a_1 a_2] p_v a_2 - K q_v(a_2) + J r_v(a_2) - s_v(a_2)/u_2}{-u_2[u_{32}/n_2^2 a_2 J - u_{21}/n_1^2 a_1 K] p_v a_2 + u_{32}/n_1^2 a_2 q_v a_2 + u_{21}/n_1^2 a_1 r_v a_2} \tag{9}$$

$$\zeta_1 = \sigma_1 \frac{u_2[u_{32}/a_2 J - n_3^2 u_{21}/n_2^2 a_1 K] p_v a_2 - u_{32}/a_2 q_v(a_2) - u_{21}/a_1 r_v(a_2)}{u_2[n_3^2/n_2^2 JK + \sigma_1\sigma_2 u_{21} u_{32}/n_1^2 a_1 a_2] p_v a_2 - n_3^2/n_1^2 K q_v a_2 + J r_v a_2 - n_2^2/n_1^2 u_2 s_v(a_2)} \tag{10}$$

(3) $n_3 \geqslant n_2$

当外界环境折射率大于包层折射率时，由于破坏了全反射的条件，使包层模式不存在全反射形式而转化成泄漏模式，光线将被折射到外部环境中去，从而引起包层模能量向外界环境的辐射。

Stegall 等[14]研究了 LPFG 的谐振波长偏移量与包层折射率变化之间的关系，并估算了泄漏传导模引起的能量损耗。当包层有效折射率 $n_3 < n_{\text{eff}}^{\text{cl}} < n_1$ 时，其透射谱上仍可形成分立的透射峰。这种情况分析光纤光栅采用的三层介质模型已不再适用，需改为简化的两层介质模型，即将纤芯和包层看作多模光纤纤芯，将光栅区域的外部介质则看作新的包层。

包层模式的特征方程是[13]

$$\frac{J_{m-1}(u_2)}{u_2 J_m(u_2)}=-\frac{(n_{cl}^2+n_{am}^2)K'_m(w_2)}{2n_{cl}^2 w_2 K_m(w_2)}+\left\{\frac{m}{u_2^2}-\left[\left(\frac{(n_{cl}^2-n_{am}^2)K'_m(w_2)}{2n_{cl}^2 w_2 K_m(w_2)}\right)^2+\left(\frac{mv^2\beta_{cl}}{u_2^2 w_2^2 n_{cl} k}\right)\right]^{\frac{1}{2}}\right\} \quad (11)$$

对于包层模，模式阶数 $m=1$，径向归一化相移常数 $u_2=a_2\sqrt{k^2n_{cl}^2-\beta_{cl}^2}$，$n_{cl}$ 为包层折射率，径向归一化衰减常数 $w_2=a_2\sqrt{\beta_{cl}^2-k^2n_{co}^2}$，$n_{co}$ 为纤芯折射率，k 为真空中的波矢。

包层模式的有效折射率是：$n_{eff}^{cl^2}(\lambda_i)=\frac{\beta_{cl}^n}{k}(\lambda_i)$。

这种情况下需要注意的是 β_{cl}，u_2，w_2，v 都是复数值，因此贝塞耳函数也具有复数值。当传播常数 β_{cl} 变成复数时，就有必要考虑损耗或泄漏模式了。对于复数 β_{cl}，其实部 β_r 等于特定模式的相速度，虚部 β_i 表示模式的损失率。

对于圆波导，β_{cl} 可近似表示成 $\beta_{cl}=\beta_r-\frac{i\alpha}{2}$，$\alpha$ 为功率衰减系数。

$$\beta_r=kn_{cl}\left[1-\frac{1}{2}\left(\frac{(l+0.25)\pi}{akn_{cl}}\right)^2\right] \quad (12)$$

$$\alpha\cong\frac{(n_{co}^2+n_{cl}^2)}{akn_{cl}^3\sqrt{n_{co}^2-n_{cl}^2}}\left(l+\frac{1}{4}\right)\pi \quad (13)$$

其中，$l=1,2,3,\cdots$。

3 涂覆 LPFG 对敏感薄膜折射率的响应

因具有很高的折射率敏感性，LPFG 可被用于测量气体、液体浓度。当测量液体浓度时，只有当溶液折射率小于或等于光纤包层的折射率时，LPFG 才具有较高的灵敏度，这在很大程度上限制了其广泛应用。如果能在 LPFG 外面涂覆一层折射率对周围环境有明显响应的敏感薄膜来感测液体的浓度，将使其应用更为方便。结合光纤光栅耐腐蚀、抗电磁干扰的特性，涂覆敏感薄膜的 LPFG 可方便地应用于易燃、易爆、强电磁干扰等恶劣环境下的测量。在 LPFG 包层外涂覆一层折射率随外界环境变化而变化的敏感薄膜层已成为目前光纤光栅传感领域的研究热点[5-6]。

对于涂覆敏感薄膜后的 LPFG，可采用三包层光纤光栅模型。图 6 为薄膜厚度为 600 nm 时，LPFG 中的 HE_{13} 模式在涂覆不同折射率的薄膜后的透射谱。当薄膜折射率发生微小变化时，LPFG 的透射率和谐振波长都将发生偏移。可以看出，随着薄膜折射率的增大，LPFG 的透射率将增大，谐振波长将变小。图 7 为谐振波长变化量随薄膜折射率变化的情况。

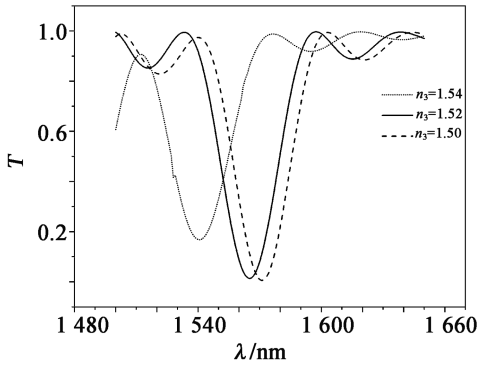


图 6 薄膜折射率不同时 LPFG 的透射谱

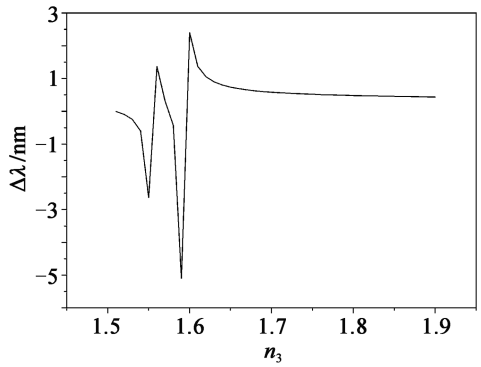


图 7 薄膜折射率不同时 LPFG 谐振波长的变化量

为了表征 LPFG 传感器灵敏度的高低，定义透射率 T 的梯度与传感膜层折射率 n_3 的梯度之比的绝对值 S_n 为 LPFG 传感器对敏感薄膜折射率的灵敏度，即：

$$S_n=\left|\frac{\partial T}{\partial n_3}\frac{n_3}{T}\right| \quad (14)$$

选择合适的敏感薄膜折射率和厚度，可以使涂覆 LPFG 传感器具有较高的光学灵敏度。表 1 给出了三组典型的敏感薄膜光学参数设计值及相应的灵敏度，较未涂覆敏感薄膜 LPFG 传感器的灵敏度可提高 1 个数量级。

表 1 三组敏感薄膜光学参数值及灵敏度

序号	薄膜折射率 n_3	薄膜厚度 h_3/nm	光波波长 λ_c/nm	灵敏度 S_n
1	1.63	503	1 587.2	8.45×10^4
2	1.65	467	1 484.7	8.57×10^4
3	1.67	491	1 479.4	8.34×10^4

4　结论

基于模式耦合理论，运用光纤光栅三层结构理论模型分析了在外界环境折射率小于、近似相等及大于包层折射率条件下，LPFG 对外界环境折射率的模式响应，并给出了详细的理论解释。在此基础上分析了涂覆 LPFG 对敏感薄膜折射率的光谱响应，得到了 LPFG 的谐振波长随敏感薄膜折射率变化的曲线及高灵敏度涂覆 LPFG 传感器所对应的典型值，为设计高灵敏度 LPFG 传感器提供了理论依据。

参考文献：

[1] Grattan K T V, Sun T. Fiber optic sensor technology: An overview[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2000, 82(1/3): 40-61.

[2] Yang Ying, Gu Zhengtian. Temperature and bending simultaneous sensing properties of cascaded grating[J]. Appl. Opt., 2013, 53(2): 165-173.

[3] Qi Liang, Zhao Chunliu, Yuan Jianyuan, et al. Highly reflective long period fiber grating sensor and its application in refractive index sensing [J]. Sensors & Actuators B: Chemical, 2014, 193: 185-189.

[4] Wang Jianneng, Luo Chingying. Long-period fiber grating sensors for the measurement of liquid level and fluid-flow velocity[J]. Sensors, 2012, 12(4): 4578-4593.

[5] Tang Fujian, Li Zhaochao, Chen Yizheng, et al. Monitoring passive film growth on steel using Fe-C coated long period grating fiber sensor[J]. IEEE Sensors J., 2019, 19(16): 6748-6755.

[6] Huang Ying, Tang Fujian, Liang Xiao, et al. Steel bar corrosion monitoring with long-period fiber grating sensors coated with nano iron/silica particles and polyurethane[J]. Structural Health Monitoring: An International J., 2014, 14(2): 178-189.

[7] Janczuk-Richter M, Dominik M, RozNiecka E, et al. Long-period fiber grating sensor for detection of viruses[J]. Sensors & Actuators B: Chemical, 2017, 250: 32-38.

[8] 秦海琨，张　敏，刘育梁，等. 光纤光栅生物传感器的研究进展综述[J]. 激光杂志，2008，29(5)：1-3.
Qin Haikun, Zhang Min, Liu Yuliang, et al. Research progress of fiber Bragg grating biosensors[J]. Laser J., 2008, 29(5): 1-3.

[9] Erdogan T. Cladding-mode resonances in short and long period fiber grating filters[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1997, 14(8): 1760-1773.

[10] Gloge D. Weakly guiding fibers[J]. Appl. Opt., 1971, 10(10): 2252-2258.

[11] Erdogan T. Fiber grating spectra [J]. J. Lightwave Technol., 1997, 15(8): 1277-1294.

[12] Vikram B, Vengsarkar A M. Optical fiber long-period grating sensors[J]. Opt. Lett., 1996, 21(9): 692-694.

[13] Sao C. Optical Fibre Waveguide Analysis[M]. New York: Oxford Press, 1992.

[14] Stegall D B, Erdogan T. Leaky cladding mode propagation in long-period fiber grating devices[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1999, 11(3): 343-345.

作者简介：

杨　颖(1970—)，女，山东临沂人，博士，教授，主要研究方向为光纤光栅传感、光电测量工程、光电子技术。

(上接第 335 页)

Zhu Shaohua, Zhang Zhenglin, Qiu Tangguo, et al. Optical fiber measurement of surface strain distribution on equal strength beam[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2019, 41(6): 809-813.

[7] 李得龙，程清明，张宝富，等. 光纤链路时延波动对频率传递稳定度的影响[J]. 激光与光电子学进展，2014，51(1)：010602.
Li Delong, Cheng Qingming, Zhang Baofu, et al. Research on the impact of optical fiber link delay fluctuation on frequency transfer stability[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 010602.

[8] 朱文武. 光载射频链路的非线性抑制和温度稳定性研究[D]. 大连：大连理工大学，2019：59.
Zhu Wenwu. Research on the nonlinearity suppression and temperature stability of radio over fiber links[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019: 59.

[9] 瞿鹏飞，廖　理，白瑶晨，等. 模拟微波光传输链路中的相位检测技术研究[J]. 半导体光电，2013，34(2)：282-286.
Qu Pengfei, Liao Li, Bai Yaochen, et al. Research on the phase detection technology in analog microwave photonic links [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013, 34(2): 282-286.

作者简介：

梁　旭(1986—)，男，四川南充人，2013 年毕业于电子科技大学光学工程专业，获工学硕士学位，工程师，主要从事微波光子学方面的研究。