

级联长周期光纤光栅和 Bragg 光纤光栅的 光学特性

曹莹 顾铮先

(上海理工大学理学院光电功能薄膜实验室, 上海 200093)

摘要 基于耦合模理论及传输矩阵法, 给出了级联长周期光纤光栅和 Bragg 光纤光栅系统 (CLBG) 的耦合模方程与总传输矩阵, 理论模拟了 CLBG 的反射谱, 得到的反射峰位置与已知文献中所给出的两个反射峰的位置关系相吻合。在此基础上, 模拟了镀膜 CLBG 之间的光纤长度、薄膜折射率、薄膜厚度等参数对反射谱的影响。由仿真结果可知, CLBG 反射峰中受长周期光纤光栅和 Bragg 光纤光栅共同影响产生的反射峰对外界环境的变化非常敏感, 其对薄膜折射率的分辨率较单个镀膜长周期光纤光栅高 2 个数量级, 表明 CLBG 在薄膜传感领域具有重要的应用价值。

关键词 光栅; 级联光纤光栅; 耦合模理论; 反射谱; 传感

中图分类号 TP212.14; TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201239.0405003

Optical Properties of Cascaded Long-Period and Fiber Bragg Gratings

Cao Ying Gu Zhengtian

(Laboratory of Photo-Electric Functional Films, College of Science, University of Shanghai for
Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract Based on coupled-mode theory and transfer matrix method, the general transfer matrix for evaluating cascaded long-period grating and fiber Bragg grating system (CLBG) is obtained. Through general transfer matrix, the reflection spectrum of CLBG is simulated, and the theoretical simulations agree well with the relationship of two reflected peaks given in the known paper. Effects of the length of fiber between long-period fiber grating (LPG) and fiber Bragg grating (FBG), film refractive index and thickness on coated CLPG are discussed. From simulation results, reflection peaks affected by LPG and FBG in CLBG are sensitive to changes of the film parameters, and resolution on the film refractive index is 2 orders of magnitude higher than that of single coated LPG, which shows that coated CLBG has important application value in sensing field.

Key words gratings; cascaded fiber grating; coupled-mode theory; reflective spectra; sensing

OCIS codes 060.2340; 050.2770; 060.3735; 060.2300

1 引言

光纤光栅问世以来, 研究与制作取得了飞速发展, 因其具有良好的滤波特性、较低的插入损耗、体积小、不受非线性效应影响、极化不敏感、易于与光

纤系统连接等诸多优点, 且制作工艺比较成熟, 现已成为光通信和传感领域重要的器件之一^[1~4]。根据光纤光栅周期的长短, 光纤光栅被分为长周期光纤光栅 (LPG) 和 Bragg 光纤光栅 (FBG)。近年来, 人

收稿日期: 2011-10-11; **收到修改稿日期:** 2011-12-30

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创新重点项目(11ZZ131)及上海市重点学科建设项目(S30502)资助课题。

作者简介: 曹莹(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤光栅传感器方面的研究。E-mail: fcccy0614@163.com

导师简介: 顾铮先(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、光纤传感器等方面的研究。E-mail: zhengtiangu@163.com(通信联系人)

们发现将不同的光纤光栅级联在一起,呈现了许多不同于单个光纤光栅的特点,因而备受关注^[5~8]。当两个 FBG 的谐振频率相同时,在级联的光栅中会产生法布里-珀罗(F-P)干涉,且耦合系数和光栅之间距离合适时,会形成梳状反射谱^[5],已广泛应用于光通信中的波分复用系统和传感领域^[6,9~11]。而在级联 LPG 中,将会形成马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉,其透射谱中出现一系列干涉峰,这些干涉峰带宽比单个 LPG 的损耗峰的带宽窄得多,其测量分辨率比单个 LPG 的高得多^[7],因此级联 LPG 在传感领域具有更广泛的应用^[8]。

虽然 FBG 和 LPG 以及它们的级联结构已广泛用于传感领域^[2,3,9~12],但是普通 FBG 上的大部分包层必须被移掉才能使纤芯模和周围环境发生接触,通常要蚀刻、边研磨或者使用 D-型光纤,这将使光纤强度和坚固性大大降低;而 LPG 测量温度和应力等参数时存在较大的交叉敏感问题,而且当光栅长度很长时容易降低空间测量分辨率。所以,人们通过利用 LPG 和 FBG 各自的特点相结合,使它们能在传感等领域发挥更好的作用^[13,14]。文献^[13]通过使用 LPG 和 FBG 级联,实现了温度和自补偿折射率测量。此外,FBG 可以被用来激发包层模,通过在光纤中级联 LPG 使 FBG 中存在包层模,LPG 和 FBG 的级联结构已经被用来实现控制能量在纤芯模和包层模式之间的转换^[14]。

级联 FBG 以及级联 LPG 的理论研究和实际应用都已取得了长足进展^[5~12],虽然人们已经通过实验对级联 FBG 和 LPG 系统(CLBG)的一些性质进行了研究^[13~15],但是理论上的详细研究还未见报道。近年来,基于两包层结构,在光纤光栅包层外镀一层敏感薄膜构成三包层结构的光纤光栅成为研究热点。R. Hou 等^[16]在两包层 LPG 外镀一层随环境折射率变化的薄膜,可以用来做溶液折射率传感,提高了灵敏度和精度。Z. T. Gu 等^[17,18]通过在两包层 LPG 外镀一层溶胶-凝胶气敏薄膜,使 LPG 包层模对薄膜折射率的变化更为敏感,已用于检测 C₂H₅OH 气体。镀膜光纤光栅由于薄膜参数可调,光谱设计具有很大的灵活性。

本文在耦合模方程的基础上,通过传输矩阵法对 CLBG 的反射谱特性进行详细的理论分析,并与现有文献的实验结果进行比较。对镀膜 CLBG 的传感特性进行进一步的研究,讨论了 LPG 和 FBG 之间的光纤长度、薄膜折射率、薄膜厚度等参数对镀膜 CLBG 反射谱的影响,为它们在传感领域的潜在

应用提供了理论支持。

2 理论分析

2.1 镀膜 CLBG 结构

图 1 为镀膜 CLBG 的结构示意图。芯层折射率为 n_1 ,半径为 a_1 ;内包层折射率为 n_2 ,半径为 a_2 ;第二包层,即薄膜层的折射率为 n_3 ,半径为 a_3 ,薄膜厚度 $h_3 = a_3 - a_2$;周围环境的折射率为 n_4 。

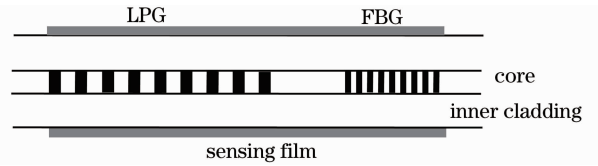


图 1 镀膜 CLBG 结构图

Fig. 1 Structure of the coated CLBG

2.2 耦合模方程

对于理想的均匀光纤,纤芯及包层中存在的各阶模式相互正交,不存在模式耦合。光纤中写入光栅时,将破坏光纤波导光学特性的一致性,产生介电常数的扰动。这种沿光纤纵向的周期性扰动,使得各个模式在纤芯和包层中相互耦合。任一个模式 μ 受其他 ν 个模式的影响可以表示为^[19]

$$\frac{dA_{\mu}(z)}{dz} = i \sum_{\nu} A_{\nu}(z) (K_{\nu\mu}^t + K_{\nu\mu}^z) \exp[i(\beta_{\nu} - \beta_{\mu})z] + i \sum_{\nu} B_{\nu}(z) (K_{\nu\mu}^t - K_{\nu\mu}^z) \exp[-i(\beta_{\nu} + \beta_{\mu})z], \quad (1)$$

$$\frac{dB_{\mu}(z)}{dz} = -i \sum_{\nu} A_{\nu}(z) (K_{\nu\mu}^t - K_{\nu\mu}^z) \exp[i(\beta_{\nu} + \beta_{\mu})z] - i \sum_{\nu} B_{\nu}(z) (K_{\nu\mu}^t + K_{\nu\mu}^z) \exp[-i(\beta_{\nu} - \beta_{\mu})z], \quad (2)$$

(1)、(2)式适合各种类型的光纤光栅,式中 $A_{\mu}(z)$ 、 $B_{\mu}(z)$ 、 $A_{\nu}(z)$ 、 $B_{\nu}(z)$ 分别是模式 μ 及模式 ν 的正 z 向和负 z 向振幅分量, $K_{\nu\mu}^t$ 、 $K_{\nu\mu}^z$ 是横向、纵向耦合系数,可由耦合常数 $\kappa_{\nu\mu}$ 表达, β_{ν} 、 β_{μ} 是模式 μ 和 ν 的传播常数。

对于 LPG 和 FBG,考虑到以下因素,对(1)式和(2)式可做出如下近似^[15]:

1) 由于 z 方向上的场分量比横向场分量小 1 ~ 2 个数量级,纵向耦合系数 $K_{\nu\mu}^z(z)$ 比横向耦合系数 $K_{\nu\mu}^t(z)$ 小 2 ~ 4 个数量级,因此忽略纵向耦合系数, $K_{\nu\mu}^z = 0$ 。

2) 由于折射率调制只存在于纤芯中,相对于芯模之间的耦合或芯模与包层模之间的耦合,包层模

之间的耦合可以忽略。

$K_{\nu\nu}^l$ 可由耦合常数 $\kappa_{\nu\nu}$ 表达^[19]

$$K_{\nu\nu}^l(z) = \kappa_{\nu\nu}(z) \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda}z\right) \right], \quad (3)$$

式中, 耦合常数 $\kappa_{\nu\nu}$ 包括纤芯模的自耦合常数 $\kappa_{01-01}^{\text{co-co}}$ 和纤芯模与一阶 ν 次包层模的互耦合常数 $\kappa_{\nu-01}^{\text{cl-co}}$, 可分别表示为

$$\kappa_{01-01}^{\text{co-co}}(z) = \frac{\omega \varepsilon_0 n_1^2 \sigma(z)}{2} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{a_1} r dr (|E_r^{\text{co}}|^2 + |E_\phi^{\text{co}}|^2), \quad (4)$$

$$\kappa_{\nu-01}^{\text{cl-co}}(z) = \frac{\omega \varepsilon_0 n_1^2 \sigma(z)}{2} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{a_1} r dr (E_r^{\text{cl}} E_r^{\text{co}*} + E_\phi^{\text{cl}} E_\phi^{\text{co}*}), \quad (5)$$

式中 ω 为光波角频率, ε_0 为真空中的介电常数, $\sigma(z)$ 为 z 处的纤芯折射率变化量, r 为径向分量, E_r^{co} 和

E_ϕ^{co} 分别为纤芯模式径向和角向电场分量, E_r^{cl} 和 E_ϕ^{cl} 分别为一阶 ν 次包层模式径向和角向电场分量^[19]。

2.3 CLBG 的耦合机制

LPG 中同时存在着两种模式, 前向传输的纤芯模和包层模; FBG 中同时存在着两种模式, 前向传输的纤芯模和后向传输的纤芯模。在 CLBG 结构中, 光经过 LPG 后, 进入 FBG 中的模式有纤芯模和包层模。当 LPG 的谐振波长和 FBG 的谐振波长一样, 且光经过 LPG 后没有满耦合, 即光在谐振波长处没有全部被耦合到包层中时, 进入 FBG 的纤芯模被 FBG 反射, 一部分会耦合到包层中, 在再次经过 LPG 时被耦合回纤芯, 另一部分直接沿着纤芯传播; 进入 FBG 的包层模, 被 FBG 耦合回纤芯并且反射回去, 穿过 LPG, 如图 2 所示。

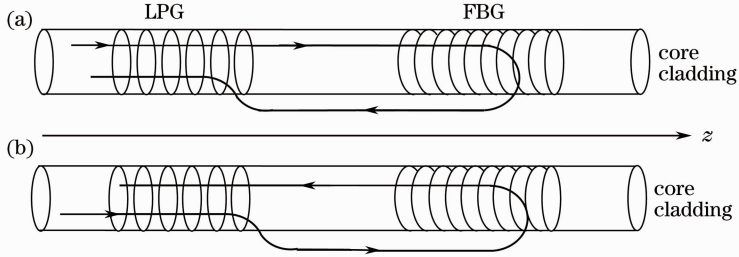


图 2 CLBG 的耦合机制示意图

Fig. 2 Recoupling mechanism of CLBG

2.4 传输矩阵

对于 CLBG 这种整体折射率非均匀分布的结构, 可利用传输矩阵处理。首先给出 LPG 段和 FBG 段的传输矩阵, 再得到系统总传输矩阵。由于光经 LPG 进入 FBG 后存在 4 种模式, 前向传输的纤芯模、前向传输的包层模、后向传输的纤芯模和后向传输的包层

模, 因此文中采用 4×4 的矩阵形式处理。

2.4.1 LPG 段传输矩阵

依据文献[20], 考虑到光进入 LPG 中时只有前行纤芯模和包层模, 没有后行模式, 对应的矩阵元素为零, 可将 LPG 段的传输矩阵 F_L 改写成 4×4 的矩阵形式

$$F_L = \begin{bmatrix} \cos \gamma_c L_L + i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_c} \sin \gamma_c L_L & 0 & i \frac{\kappa}{\gamma_c} \sin \gamma_c L_L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ i \frac{\kappa}{\gamma_c} \sin \gamma_c L_L & 0 & \cos \gamma_c L_L - i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_c} \sin \gamma_c L_L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中

$$\gamma_c \equiv \sqrt{\kappa^2 + \hat{\sigma}^2}, \quad \hat{\sigma} \equiv \delta + \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz}, \quad \delta \equiv \frac{1}{2} (\beta_{\text{co}} - \beta_{\text{cl}}) - \frac{\pi}{\Lambda_L} = \pi \Delta n_{\text{eff}} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_D} \right), \quad (7)$$

$\hat{\sigma}$ 为直流耦合系数, κ 为纤芯模式与包层模式的互耦合系数[即(5)式中的 $\kappa_{\nu-01}^{\text{cl-co}}(z)$], δ 为纤芯模与一阶 ν 次模之间的解调系数, σ_{11} 为纤芯模式的自耦合系

数, σ_{22} 为包层模式的互耦合系数, 由于折射率调制只存在于纤芯中, 相对于纤芯模式之间的耦合或纤芯模式与包层模式之间的耦合, 包层模式之间的耦

合可以忽略,所以此处 $\sigma_{22} = 0$, $\frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz}$ 是由于光栅周期啁啾化引入的耦合项,对于均匀光纤光栅 $\frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz} = 0$, $\lambda_D = \Lambda_L (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}})$ 为 LPG 的设计波长, Λ_L 为光栅

周期, L_L 为 LPG 的长度。

2.4.2 FBG 段传输矩阵

由耦合模方程(1),(2),可推出 FBG 段的耦合模方程,由此可求出 FBG 段的传输矩阵。

$$\frac{dA^{\text{co}}}{dz} = i\kappa_B^{\text{co-co}} A^{\text{co}} + \frac{1}{2} i\kappa_B^{\text{co-co}} B^{\text{co}} \exp(-i2\delta_{\text{co}} z) + \frac{1}{2} i\kappa_B^{\text{cl-co}} A^{\text{cl}} \exp(-i2\delta'_{\text{cl}} z) + \frac{1}{2} i\kappa_B^{\text{cl-co}} B^{\text{cl}} \exp(-i2\delta_{\text{cl}} z), \quad (8a)$$

$$\frac{dB^{\text{co}}}{dz} = -\frac{1}{2} i\kappa_B^{\text{co-co}} A^{\text{co}} \exp(i2\delta_{\text{co}} z) - i\kappa_B^{\text{co-co}} B^{\text{co}} - \frac{1}{2} i\kappa_B^{\text{cl-co}} A^{\text{cl}} \exp(i2\delta_{\text{cl}} z) - \frac{1}{2} i\kappa_B^{\text{cl-co}} B^{\text{cl}} \exp(i2\delta'_{\text{cl}} z), \quad (8b)$$

$$\frac{dA^{\text{cl}}}{dz} = \frac{1}{2} i\kappa_B^{\text{cl-co}} A^{\text{co}} \exp(i2\delta'_{\text{cl}} z) + \frac{1}{2} i\kappa_B^{\text{cl-co}} B^{\text{co}} \exp(-i2\delta_{\text{cl}} z), \quad (8c)$$

$$\frac{dB^{\text{cl}}}{dz} = -\frac{1}{2} i\kappa_B^{\text{cl-co}} A^{\text{co}} \exp(i2\delta_{\text{cl}} z) - \frac{1}{2} i\kappa_B^{\text{cl-co}} B^{\text{co}} \exp(-i2\delta'_{\text{cl}} z), \quad (8d)$$

式中 A^{co} 、 B^{co} 分别为纤芯导模的前向和后向传输振幅, A^{cl} 、 B^{cl} 分别为包层模的前向和后向传输振幅; $\kappa_B^{\text{co-co}}$ 、 $\kappa_B^{\text{cl-co}}$ 分别为 FBG 纤芯模的自耦合系数和纤芯模与包层模的互耦合系数;光栅的解调参量 δ_{co} 、 δ'_{cl} 、 δ_{cl} 定义为

$$\delta_{\text{co}} = \frac{1}{2} \left(2\beta_{\text{co}} - \frac{2\pi}{\Lambda_B} \right), \quad \delta_{\text{cl}} = \frac{1}{2} \left(\beta_{\text{co}} + \beta_{\text{cl}} - \frac{2\pi}{\Lambda_B} \right), \quad \delta'_{\text{cl}} = \frac{1}{2} \left(\beta_{\text{co}} - \beta_{\text{cl}} - \frac{2\pi}{\Lambda_B} \right)$$

β_{co} 和 β_{cl} 是纤芯模和包层模的传播常数, $\beta_i = (2\pi/\lambda) n_{\text{eff},i}$, $n_{\text{eff},i}$ 为相应模式的有有效折射率(i 为 co 模和 cl 模)。 Λ_B 为 Bragg 光栅的周期。

方程组(8a)~(8d)为变系数常微分方程组,可采用文献[21]中给出的矩阵方法进行求解。将方程组(8a)~(8d)写成一阶微分方程 $\frac{dy}{dz} + \mathbf{P}(z)y = \mathbf{Q}(z)$ 的形式,变量 y 代表 A^{co} 、 B^{co} 、 A^{cl} 、 B^{cl} , $\mathbf{P}(z)$ 为与 z 有关的系数项矩阵

$$\mathbf{P}(z) = \begin{bmatrix} i\kappa_B^{\text{co-co}} & i\kappa_B^{\text{co-co}} \exp(-i2\delta_{\text{co}} z) & \frac{1}{2} i\kappa_B^{\text{cl-co}} \exp(-i2\delta'_{\text{cl}} z) & \frac{1}{2} i\kappa_B^{\text{cl-co}} \exp(-i2\delta_{\text{cl}} z) \\ -\frac{1}{2} i\kappa_B^{\text{co-co}} \exp(i2\delta_{\text{co}} z) & -i\kappa_B^{\text{co-co}} & -\frac{1}{2} i\kappa_B^{\text{cl-co}} \exp(i2\delta_{\text{cl}} z) & -\frac{1}{2} i\kappa_B^{\text{cl-co}} \exp(i2\delta'_{\text{cl}} z) \\ \frac{1}{2} i\kappa_B^{\text{cl-co}} \exp(i2\delta'_{\text{cl}} z) & \frac{1}{2} i\kappa_B^{\text{cl-co}} \exp(-i2\delta_{\text{cl}} z) & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} i\kappa_B^{\text{cl-co}} \exp(i2\delta_{\text{cl}} z) & -\frac{1}{2} i\kappa_B^{\text{cl-co}} \exp(-i2\delta'_{\text{cl}} z) & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

方程组中 $\mathbf{Q}(z) = 0$,由 $\frac{dy}{dz} + \mathbf{P}(z)y = \mathbf{Q}(z)$ 的通解形式 $y = \exp\left[-\int \mathbf{P}(z) dz\right] \left\{ \int \mathbf{Q}(z) \exp\left[\int \mathbf{P}(z) dz\right] dz + C \right\}$, C 为光栅中各模式的初始条件即 $y(z=0)$,得到一阶微分方程组(8a)~(8d)的解为

$$\begin{bmatrix} A^{\text{co}}(z) \\ B^{\text{co}}(z) \\ A^{\text{cl}}(z) \\ B^{\text{cl}}(z) \end{bmatrix} = \exp\left[-\int_0^{L_B} \mathbf{P}(z) dz\right] \begin{bmatrix} A^{\text{co}}(0) \\ B^{\text{co}}(0) \\ A^{\text{cl}}(0) \\ B^{\text{cl}}(0) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中 $\exp\left[-\int_0^{L_B} \mathbf{P}(z) dz\right]$ 可写成矩阵形式:

$$\exp\left[-\int_0^{L_B} \mathbf{P}(z) dz\right] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

代入 $z=L_B$ (FBG 长度),和 FBG 的初始条件,(9)式可改写成:

$$\begin{bmatrix} A^{\text{co}}(L_B) \\ B^{\text{co}}(0) \\ A^{\text{cl}}(L_B) \\ B^{\text{cl}}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -r_{12} & 0 & -r_{14} \\ 0 & r_{22} & 0 & r_{24} \\ 0 & -r_{32} & 1 & -r_{34} \\ 0 & r_{42} & 0 & r_{44} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} r_{11} & 0 & r_{13} & 0 \\ -r_{21} & 1 & -r_{23} & 0 \\ r_{31} & 0 & r_{33} & 0 \\ -r_{41} & 0 & -r_{43} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A^{\text{co}}(0) \\ B^{\text{co}}(L_B) \\ A^{\text{cl}}(0) \\ B^{\text{cl}}(L_B) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中

$$\begin{bmatrix} 1 & -r_{12} & 0 & -r_{14} \\ 0 & r_{22} & 0 & r_{24} \\ 0 & -r_{32} & 1 & -r_{34} \\ 0 & r_{42} & 0 & r_{44} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} r_{11} & 0 & r_{13} & 0 \\ -r_{21} & 1 & -r_{23} & 0 \\ r_{31} & 0 & r_{33} & 0 \\ -r_{41} & 0 & -r_{43} & 1 \end{bmatrix} = \mathbf{F}_B, \quad (12)$$

即为最后求得的 FBG 段的传输矩阵。

2.4.3 CLBG 总传输矩阵

对于级联光栅，两个光栅之间的光纤产生相移，其相移矩阵为

$$\mathbf{F}_{pi}^L = \begin{bmatrix} \exp\left(\frac{i\varphi}{2}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \exp\left(-\frac{i\varphi}{2}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中 $\frac{\varphi}{2} = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}d}{\lambda}$, d 为 LPG 和 FBG 之间的光纤长度, $\Delta n_{\text{eff}} = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}})$, $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$ 分别为纤芯模和包层模的有效折射率。

最终, 得到 CLBG 总传输矩阵为

$$\mathbf{T} = \mathbf{F}_B \times \mathbf{F}_{pi}^L \times \mathbf{F}_L, \quad (14)$$

由此, 入射端和出射端模式之间的关系可通过关系式求得

$$\begin{bmatrix} A^{\text{co}}(L) \\ B^{\text{co}}(0) \\ A^{\text{cl}}(L) \\ B^{\text{cl}}(0) \end{bmatrix} = \mathbf{T} \times \begin{bmatrix} A^{\text{co}}(0) = 1 \\ B^{\text{co}}(L) = 0 \\ A^{\text{cl}}(0) = 0 \\ B^{\text{cl}}(L) = 0 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中 $L = L_L + d + L_B$, 最后, 得到整个 CLBG 的反射率为

$$R_B = |B^{\text{co}}(0)/A^{\text{co}}(0)|^2. \quad (16)$$

3 仿真与分析

如无特别说明, 仿真模拟所用的光栅参数如下:

FBG: 周期 $\Lambda_B = 0.528 \mu\text{m}$, 长度 $L_B = 10 \text{ mm}$, 纤芯平均折射率改变量为 0.00022 ; LPG: 周期 $\Lambda_L = 500 \mu\text{m}$, 纤芯平均折射率改变量为 0.00019 , $L_L = 18 \text{ mm}$; FBG 与 LPG 之间的光纤长度 $d = 10 \text{ mm}$. 计算所采用的光纤参数为: $a_1 = 2.625 \mu\text{m}$, $a_2 = 62.4 \mu\text{m}$; $n_1 = 1.458$, $n_2 = 1.45$, $n_3 = 1.57$, $n_4 = 1$. 下文模拟的为 $j = 5$ 阶包层模的情况。

文献[13, 14]通过实验得到了级联 LPG 和 FBG 的反射谱。该反射谱中有两个反射峰, 第一个是由 FBG 反射形成的, 另一个是由 LPG 和 FBG 共同作用形成的, 文献[14]给出了两个反射峰的位置之间的近似关系为

$$\lambda_{\text{LB}} = \lambda_B \left(1 - \frac{\Lambda_B}{\Lambda_L + \Lambda_B}\right), \quad (17)$$

与文献[13, 14]实验结果一致。 λ_B 为由 FBG 反射形成的反射峰的位置, λ_{LB} 为由 LPG 和 FBG 共同作用形成的反射峰的位置。由文中参数模拟计算得 FBG 纤芯的有效折射率为 1.4524 , 进而算得 FBG 的谐振波长为 $\lambda_B = 1533.8 \text{ nm}$, 代入(17)式可计算得到 $\lambda_{\text{LB}} = 1532.2 \text{ nm}$ 。

图 3 为基于传输矩阵法理论模拟得到的反射谱, 其中一个反射峰的位置位于 1532.2 nm 处, 而另一个反射峰的位置恰位于 1533.8 nm 处。与文献[14]给出的两反射峰位置关系吻合得很好。

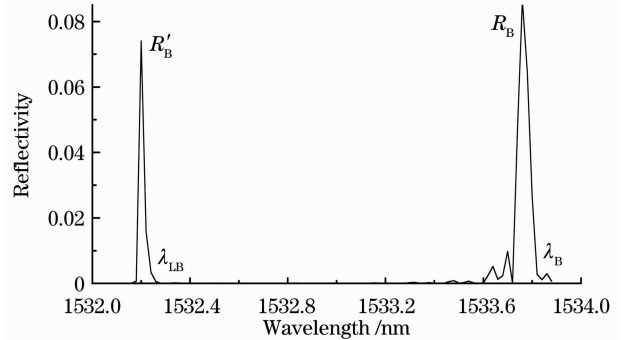


图 3 CLBG 的反射谱

Fig. 3 Reflection spectrum of the CLBG

3.1 LPG 长度的变化对镀膜 CLBG 反射谱的影响

当耦合深度 $\kappa L_L < \pi/2$, LPG 没有满耦合时, 纤芯模和包层模可以同时进入 FBG。耦合深度可通过调整 LPG 的长度加以控制。表 1 列出了不同 LPG 长度所对应的耦合深度。图 4 给出了 LPG 的长度从 12 mm 到 18 mm 时 LPG 的透射谱。由图可知, 当纤芯平均折射率改变量一定, 且耦合深度 $\kappa L_L < \pi/2$ 时, 随着 LPG 长度的增加, 透射率逐渐减小。

表 1 LPG 长度不同时所对应的耦合深度
Table 1 κL_L values at different LPG lengths

L_L/mm	12	13	14	15	16	17	18
κL_L	0.5203	0.5636	0.6070	0.6503	0.6937	0.7370	0.7804

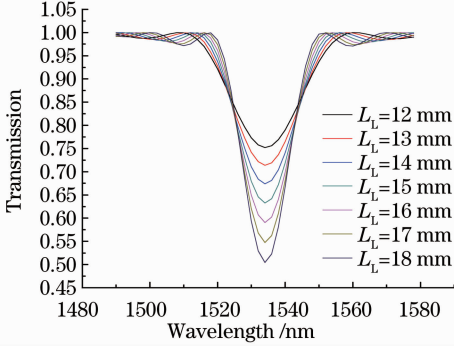


图 4 LPG 的长度从 12 mm 到 18 mm 变化时, LPG 的透射谱

Fig. 4 Transmission spectra of LPG with lengths from 12 mm to 18 mm

图 5 为 LPG 的长度从 12 mm 到 18 mm 变化时, CLBG 反射谱的仿真结果。由图可知,随着 L_L 的增加, R_B 越来越小, 而 R'_B 逐渐变大。由图 4 可知,随着 LPG 长度的增加,将会有更多的纤芯模耦合到包层中去,所以由 FBG 反射回的纤芯模产生的反射峰的峰值会逐渐变小,而由包层模耦合回纤芯产生的反射峰的峰值会逐渐增大。

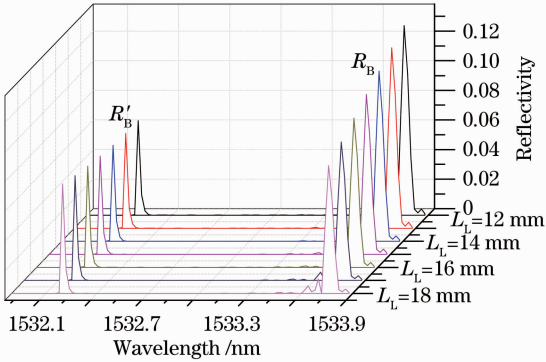


图 5 L_L 变化时 CLBG 的反射谱

Fig. 5 Reflection spectra of the CLBG with L_L changing

3.2 级联光纤长度对镀膜 CLBG 反射谱的影响

图 6 为仿真 LPG 和 FBG 之间级联的光纤长度对 CLBG 反射谱的影响。LPG 和 FBG 之间级联的光纤长度分别为 0, 5, 10, 15, 20 mm。

由图可知, R_B 随着 d 的增加或者减小并没有明显的变化, 而 R'_B 随着 d 的增加逐渐减小。 R_B 是 FBG 反射纤芯模产生的反射峰的反射率, 由于该反射峰是在纤芯内传播的, 所以受外界环境影响很小, 基本没有变化; 而 R'_B 是由纤芯模与包层模耦合产生

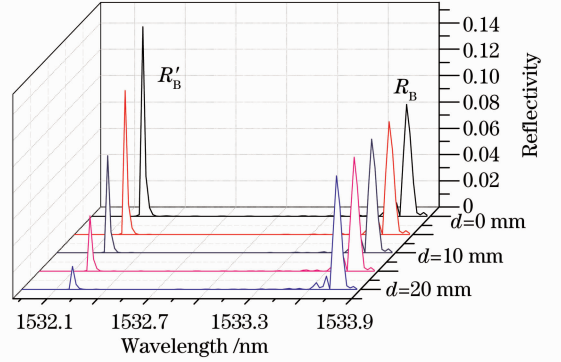


图 6 FBG 和 LPG 中间级联的光纤长度对 CLBG 反射谱的影响

Fig. 6 Reflection spectra of the CLBG with the separation changing between the two gratings

的, 受外界环境影响较大, 所以级联光纤越长, 衰减越大, R'_B 也就越小。

3.3 镀膜折射率对镀膜 CLBG 反射谱的影响

图 7 表示折射率为 1.51~1.57 时, CLBG 的反射谱的变化情况, 薄膜厚度取 300 nm。

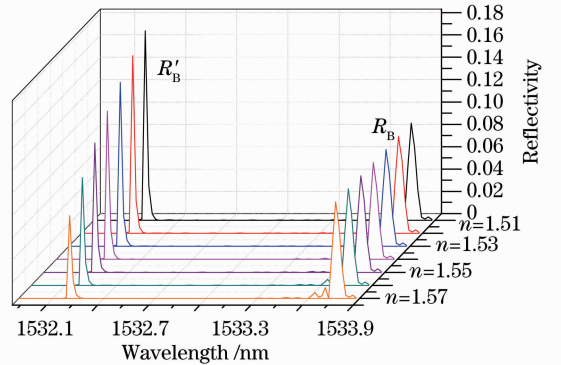


图 7 镀膜折射率对 CLBG 反射谱的影响

Fig. 7 Reflection spectra of the CLBG with the film refractive index changing

由图 7 可以发现, 薄膜折射率在 1.51~1.57 间变化时, R'_B 的变化是很明显的, 随着折射率的增加, R'_B 逐渐减小, 而 R_B 几乎没有变化, 说明 R'_B 对镀膜层的折射率变化是比较敏感的。为了表征 CLBG 传感器灵敏度的高低, 定义反射率 R 的梯度与传感膜层折射率 n_3 的梯度之比的绝对值为灵敏度 S_n , 即

$$S_n = \left| \frac{\partial R}{\partial n_3} \frac{n_3}{R} \right|, \quad (18)$$

显然, S_n 与薄膜折射率、薄膜厚度和入射光波波长 λ 以及光栅参数密切相关。根据灵敏度可以推算出传

传感器对折射率的分辨率 $\sigma_n = n_3 \frac{dR}{R} S_n^{-1}$, 对于一般的测量仪器, $\frac{dR}{R}$ 可取 10^{-3} 。表 2 比较了 CLBG 与单个 LPG 对薄膜折射率变化的灵敏度和分辨率。

表 2 级联 LPG 和 FBG 与单个 LPG 对薄膜折射率变化的灵敏度和分辨率的比较

Table 2 Compare of the sensitivity and the resolution between coated CLPG and single coated LPG

n_3	R'_B	$S_n(\text{CLBG})$	$\sigma_n(\text{CLBG}) / 10^{-4}$	T	$S_n(\text{LPG})$	$\sigma_n(\text{LPG}) / 10^{-2}$
1.51	0.169389	8.23377	1.830	0.4981631	0.0382246	3.950
1.52	0.158900	11.98710	1.270	0.4984080	0.0917140	1.660
1.53	0.146776	13.20690	1.160	0.4989380	0.2104094	0.727
1.54	0.132578	18.40620	0.837	0.4998875	0.3896301	0.395
1.55	0.115948	25.03300	0.619	0.5014685	0.6451571	0.240
1.56	0.096491	33.89090	0.460	0.5035063	0.0524911	0.297
1.57	0.073955	52.49140	0.299	0.5042551	0.4715271	0.333

3.4 镀膜厚度对镀膜 CLBG 反射谱的影响

D. R. Nicholas 等^[22]通过在长周期光纤光栅的包层上面镀一层 Langmuir-Blodgett (LB) 敏感薄膜 (折射率为 1.57), 研究了薄膜厚度对模式序数分别为 5(HE₁₃) 和 6(EH₁₃) 的包层模式的谐振波长偏移的影响。当薄膜厚度达到几百纳米时, 谐振波长漂移幅度对膜层的光学厚度有很高的敏感度。

图 8 为薄膜厚度对 CLBG 反射谱的影响。由

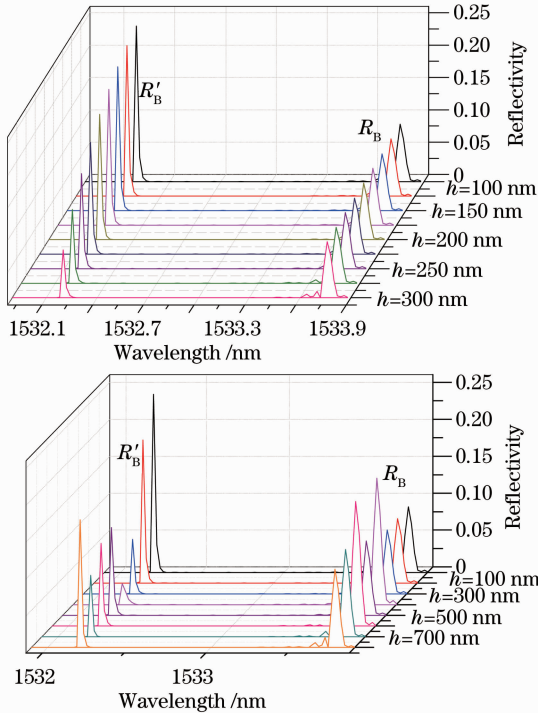


图 8 薄膜厚度对 CLBG 反射谱的影响。(a)膜厚: 100~300 nm; (b)膜厚: 100~800 nm

Fig. 8 Reflection spectra of the coated CLBG with the film thickness changing. (a) Film thickness: 100~300 nm; (b) film thickness: 100~800 nm

由表 2 可以看出,镀膜后的 CLBG 第二个反射峰的灵敏度远远高于单个镀膜 LPG 的灵敏度,其对薄膜折射率的分辨率较单个镀膜 LPG 高 2 个数量级。可见,CLBG 在传感领域有着巨大的潜在应用价值。

图 8(a)可知,在 100~300 nm 的范围内,随着膜厚的缓慢增加, R'_B 的变化很有规律,逐渐变小,而 R_B 变化不大。但是图 8(b)中,当膜厚在 100~800 nm 之间且变化较大时, R'_B 和 R_B 变化都相当明显,并且不是很有规律。由图 8 可知,当薄膜在一定折射率时,在某些膜厚范围内,CLBG 对膜厚变化比较敏感,而其他膜厚范围不是很敏感。

因此,可以通过计算 S_n 随着薄膜参数变化的函数关系,采用最优化数值方法,通过分析反射谱与薄膜厚度和折射率的关系,寻找出传感器膜层的最佳光学参数。进一步根据所采用的膜层参数,选取一定的波长,使其工作在 LPG 的某次包层模式耦合波长附近,考察传感器与被测物质作用前后反射谱的变化情况,从而达到检测物质的目的。

4 结 论

利用耦合模方程和传输矩阵法,对 CLBG 做了详尽的理论研究,所得结果与已知实验吻合得很好。CLBG 的反射谱中的两个反射峰一个是由 FBG 反射产生,另一个为 LPG 和 FBG 共同作用产生的。由 FBG 和 LPG 共同影响产生的第二个反射峰,因为是由纤芯模和包层模耦合产生的,所以对外界环境比较敏感。进一步地,分析了级联光纤长度、镀膜折射率和厚度对镀膜 CLBG 反射谱的影响。当 LPG 和 FBG 之间级联的光纤长度逐渐增大时,第二个反射峰会逐渐减小。折射率在 1.51~1.57 范围内,折射率越大,CLBG 的第二个反射峰越小。在 100~800 nm 的薄膜厚度范围内,CLBG 的反射峰变化也十分明显。另外,通过对镀膜 CLBG 和单个镀膜 LPG 灵敏度的比较,发现 CLBG 镀膜后比单

个镀膜 LPG 灵敏度要高很多,其对薄膜折射率的分辨率较单个镀膜 LPG 高 2 个数量级。因此,只要设计寻找出传感器膜层的最佳光学参数,就可利用镀膜 CLBG 进行高灵敏传感测量。

参 考 文 献

1 I. Riant. Fiber Bragg gratings for optical telecommunications[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2003, **4**(1): 41~49

2 Y. J. Rao. In-fibre Bragg grating sensors [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1997, **8**(4): 355~375

3 V. Bhatia, A. M. Vengsarkar. Optical fiber long-period grating sensors[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(9): 692~694

4 M. K. Pandit, K. S. Chiang, Z. H. Chen *et al.*. Tunable long-period fiber gratings for EDFA gain and ASE equalization[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2000, **25** (3): 181~184

5 Zhang Zijia. Fiber Grating Theoretical Basis and Sensing Technology[M]. Beijing: Science and Technology Press, 2009. 97~100
张自嘉. 光纤光栅理论基础与传感技术[M]. 北京: 科学技术出版社, 2009. 97~100

6 V. Mizrahi, T. Erdogan, D. J. DiGiovanni *et al.*. Four channel fiber grating demultiplexer[J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(10): 780~781

7 Y. G. Han, B. H. Lee, W. Han *et al.*. Controllable transmission characteristics of multi-channel long period fiber gratings [J]. *IEICE Trans. Electron.*, 2001, **E84-C** (5): 610~614

8 B. H. Lee, J. Nishii. Bending sensitivity of in-series long-period fiber gratings[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(2): 1624~1626

9 Yin Guolu, Lou Shuqin, Peng Wanjing *et al.*. Sensitivity of fiber Bragg grating-based Fabry-Pérot interferometric sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1490~1495
尹国路, 娄淑琴, 彭万敬等. 光纤布拉格光栅法布里-珀罗干涉式传感器灵敏度[J]. 中国激光, 2010, **37**(6): 1490~1495

10 Fan Fan, Zhao Jianlin, Wen Xixing *et al.*. Sensitivity analysis on strain sensor based on Fabry-Perot interferometer with intensity interrogation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1525~1531
樊帆, 赵建林, 文喜星等. 强度解调型光纤光栅法布里-珀罗干涉仪的应变传感灵敏度分析[J]. 中国激光, 2010, **37**(6):

1525~1531

11 Zhang Le, Wu Bo, Ye Wen *et al.*. Highly sensitive fiber-optic vibration sensor based on frequency-locking of a FBG Fabry-Perot cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0406006
张乐, 吴波, 叶雯等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔锁频原理的高灵敏度光纤振动传感器[J]. 光学学报, 2011, **31**(4): 0406006

12 Tian Li, Zhang Ailing. Dual wavelength filtering properties of phase-shifted fiber Bragg grating and sampled fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2896~2900
田力, 张爱玲. 相移光栅及取样光栅的双峰滤波特性[J]. 中国激光, 2010, **37**(11): 2896~2900

13 M. Han, F. W. Guo, Y. F. Lu. Optical fiber refractometer based on cladding-mode Bragg grating [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(3): 399~401

14 A. P. Zhang, X. M. Tao. Cladding-mode-assisted recouplings in concatenated long-period and fiber Bragg gratings [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(14): 1214~1216

15 D. Sáez-Rodríguez, J. L. Cruz, A. Díez *et al.*. Coupling between counterpropagating cladding modes in fiber Bragg gratings[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(8): 1518~1520

16 R. Hou, Z. Ghassemloo, A. Hassan *et al.*. Modelling of long-period fiber grating response to reflective index higher than that of cladding[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **12**(10): 1709~1713

17 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

18 Z. T. Gu, Y. P. Xu. Design optimization of a long-period fiber grating with sol-gel coating for a gas sensor [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2007, **18**(11): 3530~3536

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

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

21 F. Abrishamian, Y. Nakai, S. Sato *et al.*. An efficient approach for calculating the reflection and transmission spectra of fiber Bragg gratings with acoustically induced microbending [J]. *Optical Fiber Technology*, 2007, **13**(1): 32~38

22 D. R. Nicholas, W. J. Stephen, P. T. Ralph *et al.*. Optical fiber long-period gratings with Langmuir-Blodgett thin-film overlays[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(9): 686~688

栏目编辑: 谢 婧