

文章编号: 0258-7025(2008)10-1532-06

# 三包层级联长周期光栅的传输谱特性

赵晓云<sup>1</sup> 顾铮先<sup>2</sup>

(上海理工大学<sup>1</sup> 光学与电子工程信息学院现代光学重点实验室,<sup>2</sup> 理学院光电功能薄膜实验室, 上海 200093)

**摘要** 运用传输矩阵法对三包层级联长周期光纤光栅(LPFG)的传输谱特性进行分析,讨论了级联处光纤的长度、位置以及薄膜参数等对级联光栅传输谱的影响,并对级联长周期光栅和相移长周期光栅的传输谱进行了比较。结果表明两者传输谱在级联光纤长度较小或级联位置靠近光栅两端时具有较强的一致性;而在级联处光纤较长并且级联位置在中间时,两者表现出截然不同的特性,这一点和两包层级联光栅一致。另外,薄膜参数可以更灵活地调节传输谱衰减峰位置和峰值损耗的大小。

**关键词** 导波光学;级联长周期光纤光栅;传输矩阵法;传输谱

**中图分类号** TN 253;TP 212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083510.1532

## Spectral Characteristics of Triple-Clad Cascaded Long-Period Fiber Gratings

Zhao Xiaoyun<sup>1</sup> Gu Zhengtian<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Modern Optics, College of Opto-Electric and Electric Information Engineering,  
<sup>2</sup>Laboratory of Photo-Electric Functional Films, College of Science,  
University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

**Abstract** Spectral characteristics of three-layered cascaded long-period fiber gratings (LPFGs) were analyzed by the coupled-mode theory together with the transfer matrix method. The effects of the length, position of the fiber that connects the LPFGs on the transmission spectrum of the cascaded LPFG were discussed, and the transmission spectra between the cascaded LPFG and the phase-shifted LPFG were compared. The results show that their spectra have great consistency when the length of the cascading fiber is small or the cascading position is near the end of the cascaded LPFG. But when the cascading fiber is large or the cascading position is in the middle of the cascaded LPFG, the spectra of the cascaded LPFG and the phase-shifted LPFG are different. These results agree well with the two-layered cascaded LPFG. The changes of the film parameters can adjust flexibly the attenuation peak shifts of the spectra and the peak values of the spectra.

**Key words** guided wave optics; cascaded long period fiber grating; transfer matrix; transmission spectra

## 1 引言

长周期光纤光栅(LPFG)是一类特殊的光纤光栅,满足相位匹配条件的是同向传输的导模和包层模,在光纤通信<sup>[1,2]</sup>及光纤传感<sup>[3,4]</sup>领域有着广泛的应用。

均匀长周期光栅的传输谱在一定波段内对应于一个包层模只有一个传输损耗峰,只能通过改变光

栅的耦合强度及光栅长度等参量来调整损耗峰的中心波长、强度和带宽<sup>[5]</sup>,光谱设计缺乏灵活性。近年来,级联光栅引起了人们极大的关注。级联 LPFG 是由若干个(两个以上)均匀 LPFG 级联而成的一种光纤光栅结构。崔丽萍等<sup>[6]</sup>研究了两包层级联 LPFG 的光谱特性,发现一些有用的结论,比如级联光栅在一定条件下会出现一系列间隔均匀、线宽窄、

收稿日期:2008-01-07;收到修改稿日期:2008-03-13

基金项目:国家自然科学基金(60777035),教育部重点科研项目,上海市教育委员会科研项目(07ZZ87)及上海市重点学科建设项目(T0501)资助课题。

作者简介:赵晓云(1982—),女,山西人,硕士研究生,主要从事光纤光栅传感和通信方面的研究。

E-mail: xcloud815@hotmail.com

导师简介:顾铮先(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 (通信作者)

高精细度的阻带,具有与均匀光栅完全不同的光谱特性。

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 LPFG 成为研究热点。R. Hou 等<sup>[7]</sup>在两包层 LPFG 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。顾铮先等<sup>[8,9]</sup>通过在两包层 LPFG 外镀一层溶胶-凝胶气敏薄膜,使得镀膜后的 LPFG 包层模对外界折射率的变化更为敏感,已制作了用于检测 C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 气体的传感器。镀膜后的 LPFG 由于薄膜参数可调,光谱设计有很大的灵活性。可以设想,如果在两包层级联光栅外镀一层薄膜,其传输谱必然会表现出新的特性。

本文基于耦合模方程,给出了三包层均匀光纤光栅的研究方法,在此基础上,采用传输矩阵法对级联 LPFG 进行处理。通过给定的具体光纤光栅参数,模拟了三包层级联长周期光栅的传输谱,讨论了级联光纤的长度、位置及薄膜参数对级联光栅传输谱的影响。

## 2 理论分析

### 2.1 三包层光纤光栅结构及耦合理论

三包层 LPFG 薄膜层和外部介质分别为第二和第三包层。图 1 分别是三包层光纤光栅结构和折射率分布示意图。 $n_1$  为芯层折射率,光栅区域的平均折射率改变量为  $\sigma$ ,  $n_2$  为包层折射率,  $n_3$  为敏感薄膜折射率,  $n_4$  为周围环境折射率。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  $h_3 = a_3 - a_2$ 。

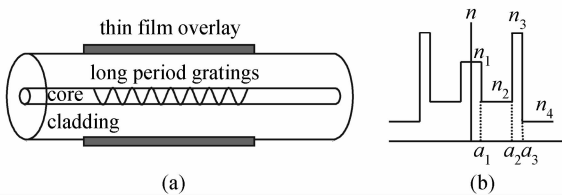


图 1 三包层 LPFG 模型。(a) 结构模型;  
(b) 折射率分布模型

Fig. 1 Three-layer LPFG model. (a) structural diagram; (b) refractive index profile

利用耦合模理论,均匀长周期光纤光栅的耦合模方程可以写成<sup>[10]</sup>

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

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

式中  $A^{\text{co}}$  为纤芯导模的正  $z$  向振幅,  $A_m$  为第  $m$  个模式的振幅,  $A_{\nu}^{\text{cl}}$  为一阶  $\nu$  次包层的正  $z$  向振幅。 $k_{11-\text{co}}^{\text{co-co}}$  和  $k_{1\nu-11}^{\text{cl-co}}$  分别为纤芯模的自耦合常数和纤芯模与一阶  $\nu$  次包层模之间的互耦合常数

$$k_{11-\text{co}}^{\text{co-co}}(z) = \frac{\omega \epsilon_0 n_1^2 \sigma(z)}{2} \int_0^{2\pi} d\phi \times \int_0^{a_1} R dR (|E_r^{\text{co}}|^2 + |E_{\phi}^{\text{co}}|^2), \quad (3)$$

$$k_{1\nu-11}^{\text{cl-co}}(z) = \frac{\omega \epsilon_0 n_1^2 \sigma(z)}{2} \int_0^{2\pi} d\phi \times \int_0^{a_1} R dR (E_r^{\text{cl}} E_r^{\text{co}*} + E_{\phi}^{\text{cl}} E_{\phi}^{\text{co}*}), \quad (4)$$

式中  $\omega$  为光波角频率,  $\sigma(z)$  为  $z$  处的纤芯折射率变化量,  $\epsilon_0$  为真空中介电常数,  $R$  为径向分量,  $E_r^{\text{co}}$  和  $E_{\phi}^{\text{co}}$  分别为纤芯模式径向和角向电场分量,  $E_r^{\text{cl}}$  和  $E_{\phi}^{\text{cl}}$  为一阶  $\nu$  次包层模式径向和角向电场分量。这些场分量与传输常数  $\beta_{11}^{\text{co}}$  和  $\beta_{1\nu}^{\text{cl}}$  密切相关<sup>[11]</sup>, 而传输常数需要通过求解三包层光纤光栅的特征方程得到<sup>[12]</sup>。三包层特征方程中涉及镀膜层折射率  $n_3$  及环境折射率  $n_4$ 。 $\delta_{1\nu-11}^{\text{cl-co}}$  为纤芯导模与一阶  $\nu$  次包层模式间的解调参量, 定义为

$$\delta_{1\nu-11}^{\text{cl-co}} = \frac{1}{2} \left( \beta_{11}^{\text{co}} - \beta_{1\nu}^{\text{cl}} - \frac{2\pi}{\Lambda} \right). \quad (5)$$

$\delta_{1\nu-11}^{\text{cl-co}} = 0$ , 即长周期光纤光栅包层模耦合的相位匹配条件

$$\beta_{11}^{\text{co}} - \beta_{1\nu}^{\text{cl}} - 2\pi/\Lambda = 0. \quad (6)$$

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

$$n_{\text{eff,co}}(\lambda) - n_{\text{eff,cl}}^{\nu}(\lambda) = \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad \nu = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

式中  $n_{\text{eff,co}}(\lambda)$  为前向传输导模在波长  $\lambda$  处的有效折射率, 简写为  $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ ;  $n_{\text{eff,cl}}^{\nu}(\lambda)$  为一阶  $\nu$  次包层模式在波长  $\lambda$  处的有效折射率, 简写为  $n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$ 。

### 2.2 三包层级联光栅分析处理方法

级联 LPFG 可以看作两段均匀长周期光栅 (LPFG1 和 LPFG2) 被长度为  $d$  的级联光纤和大小为  $\varphi$  的初始相移分开的一种长周期光栅组合。为清楚起见, 图 2 给出了级联光栅纤芯部分的示意图。

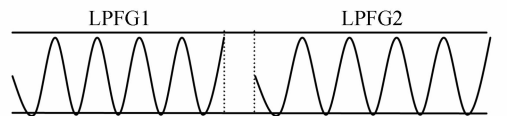


图 2 级联 LPFG 纤芯部分示意图

Fig. 2 Schematic of the core layer of the cascaded LPFG

LPFG1 和 LPFG2 的结构参量可以相同,也可以不同。如果 LPFG1 和 LPFG2 的结构参量相同,则当  $d=0, \varphi=0$  时可以看作为均匀长周期光栅;当  $d=0, \varphi \neq 0$  时,就成了相移长周期光栅。因此均匀长周期光栅和相移长周期光栅都可以看作级联长周

期光栅的特例。

当 LPFG1 和 LPFG2 为结构相同的长周期光栅时,级联长周期光栅的特定阶次包层模的传输振幅  $t$  和纤芯模的传输振幅  $r$  可以表示为<sup>[13]</sup>

$$\begin{bmatrix} t \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_2 & r_2 \\ r_2 & t_2^* \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \exp[i\pi(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}})d/\lambda] & 0 \\ 0 & \exp[-i\pi(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}})d/\lambda] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \exp(i\varphi/2) & 0 \\ 0 & \exp(-i\varphi/2) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} t_1 & r_1 \\ r_1 & t_1^* \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中  $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$  和  $n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$  可以由(7)式求出; $t_1$  和  $r_1, t_2$  和  $r_2$  分别表示 LPFG1 和 LPFG2 的特定阶次包层模和纤芯模的振幅,可根据传输矩阵法求出,均匀 LPFG 的传输矩阵可表示为<sup>[14]</sup>

$$\begin{bmatrix} t & r \\ r & t^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma L) + i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma} \sin(\gamma L) & i \frac{k}{\gamma} \sin(\gamma L) \\ i \frac{k}{\gamma} \sin(\gamma L) & \cos(\gamma \Delta z) - i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma} \sin(\gamma L) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中  $\gamma = \sqrt{\sigma^2 + k^2}$ ,  $k$  可由(3),(4)式求出。 $\hat{\sigma}$  为自耦合系数,定义为

$$\hat{\sigma} = \delta + \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz}, \quad (10)$$

$\sigma_{11}$  和  $\sigma_{22}$  为直流耦合系数, $\delta$  为解调参量,由(5)式定义。

由(8)式,再利用长周期光栅的平行传输率公式  $T = |t|^2$ ,可得级联长周期光栅的平行传输率  $T$  为

$$T = |\exp\{i[2\pi(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}})d/\lambda + \varphi]\} t_1 t_2 + r_1 r_2|^2. \quad (11)$$

### 3 仿真与分析

构成级联长周期光栅的两段均匀光栅的长度分别为  $L_1$  和  $L_2$ ,  $L$  为 LPFG1 和 LPFG2 的长度之和,取  $L = 18 \text{ mm}$ 。 $q$  为衡量级联光纤位置的参量,定义为  $q = L_1/L - 0.5$ ,当  $q = \pm 0.5$  时,级联光纤的位置在两侧,而当  $q = 0$  时,级联位置在中间。两段均匀长周期光栅 LPFG1 和 LPFG2 计算所采用的光纤参

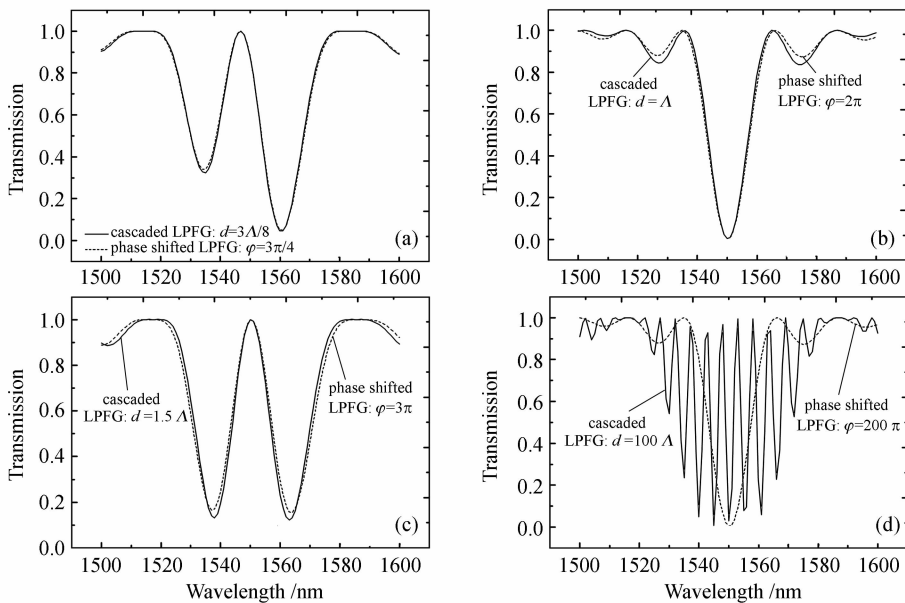


图3 级联光纤不同长度时级联 LPFG 与相应相移 LPFG 的传输谱

Fig. 3 Transmission spectra of cascaded LPFG with different fiber lengths between the two LPFGs and the corresponding phase shifted LPFG

数为:  $a_1 = 2.625 \mu\text{m}$ ,  $a_2 = 62.4 \mu\text{m}$ ,  $n_1 = 1.458$ ,  $n_2 = 1.45$ ,  $n_3 = 1.57$ ,  $n_4 = 1$ 。纤芯平均折射率的改变量为 0.0004, 光栅中心周期为  $520 \mu\text{m}$ 。

### 3.1 级联光纤长度对级联光栅光谱的影响

图 3 为级联光纤长度变化时级联 LPFG 的传输谱, 并与相移 LPFG 的传输谱进行了比较。由图可知, 对于级联 LPFG, 当 LPFG1 和 LPFG2 间的级联光纤长度  $d$  较小时 ( $d$  与光栅周期相当), 级联 LPFG 的传输谱与相移量为  $2\pi d/\Lambda$  的相移 LPFG 的传输谱相一致 (图 3(a) ~ (c))。而当  $d$  逐渐增大时, 级联 LPFG 的传输谱与对应的相移 LPFG 的传输谱的偏差逐渐增大, 呈现出完全不同的特性, 即级联 LPFG 的传输谱会出现间隔均匀、线宽窄的多个损耗峰 (图 3(d))。

### 3.2 级联光纤相对位置对级联光栅光谱的影响

相移长周期光栅中相移位置的改变会对光栅光

谱产生很大影响<sup>[15]</sup>。通过模拟计算, 发现级联长周期光栅中级联光纤位置的变化对其光谱的影响也非常大。以级联光纤长度为 9.5 个光栅周期的级联长周期光栅为例, 分析级联光栅传输谱特性。

图 4 分别给出了  $q = 0, q = 0.2, q = 0.3$  以及  $q = 0.4$  时级联光栅的传输谱, 也给出了相应相移大小为  $2\pi d/\Lambda$  的相移长周期光栅的传输谱。如图 3(a) 所示, 当级联光纤位置在中间时, 其光谱除了表现出相应的相移长周期光栅的特性, 即有两个对称的传输损耗峰外, 其两侧还出现较小的损耗峰。当级联光纤向两边移动一定的位置后, 如图 3(b) 和 (c) 所示, 级联长周期光栅传输谱线对称的两个传输损耗峰仍然存在, 但中间的传输率降低。级联光纤继续向两侧移动, 即  $q$  继续增大, 如图 3(d) 所示, 两个峰会过渡为一个峰。

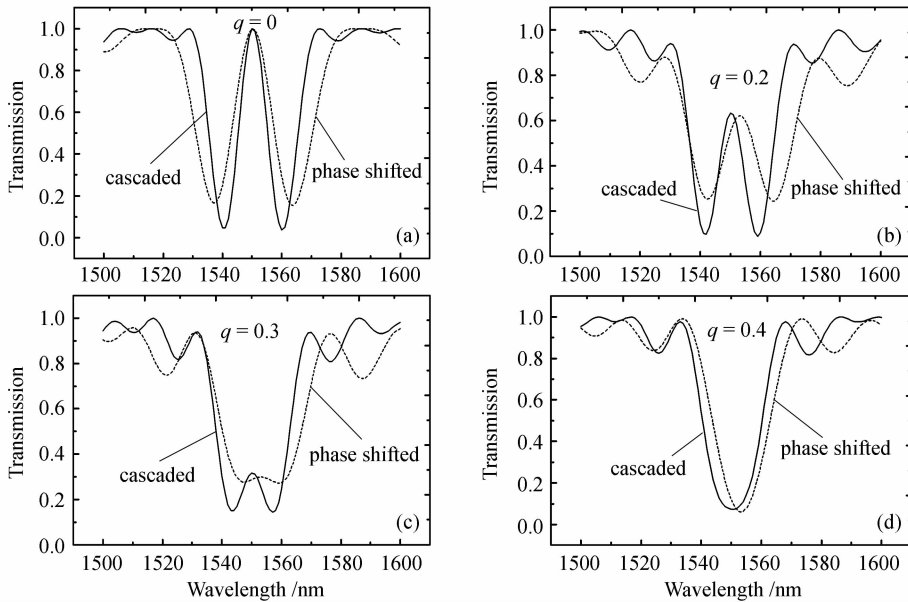


图 4 级联光纤不同位置时级联 LPFG 与相应相移 LPFG 的传输谱

Fig. 4 Transmission spectra of the cascaded LPFG with different cascading positions and the corresponding phase shifted LPFG

### 3.3 级联光栅兼有相移的情况

以上讨论都没有考虑级联光栅兼有相移的情况, 而目前也没有这方面的研究。级联 LPFG 有两个表征特性的量: 级联光纤长度和初始相移量大小。目前对级联 LPFG 的研究只考虑了两段光栅中间有一定长度和初始相移量为 0 的级联光纤的情况, 而对第二段光纤光栅初始相移不为 0 的情况没有考虑进去。在实际制作过程中, 第二段级联的光纤光栅相比第一段光纤光栅可能会有一定的初始相位, 很有必要考虑这样一种情况。

图 5 给出了级联光纤长度为 1.5 个光栅周期, 且具有不同相移量为  $3\pi/4, \pi, 3\pi/2$  以及  $2\pi$  的传输谱。从图中可以看出, 当相移量为  $3\pi/4$  时, 传输谱主阻带右侧出现了一个小的阻带 (图 5(a)); 当相移量继续增大到  $\pi$  时, 传输谱与均匀光栅一致 (图 5(b)); 继续增大到  $3\pi/2$  时, 小阻带又移到了主阻带左侧 (图 5(c)); 继续增大相移量为  $2\pi$  时, 小阻带幅值与原阻带相当, 传输谱呈现出对称结构 (图 5(d))。与相移光栅相比<sup>[16]</sup>, 在相移量为  $3\pi/4$  时, 级联光栅兼有相移时小阻带出现在波长较长一侧, 而

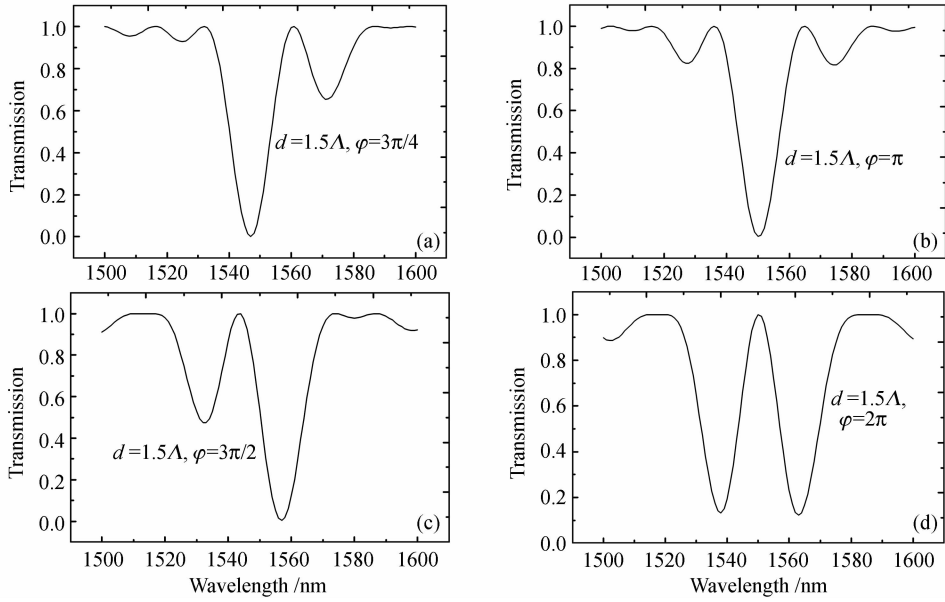


图 5 级联光栅兼有相移时的传输谱

Fig. 5 Transmission spectra of the cascaded LPFG with different phases

相移 LPFG 的小阻带出现在波长较短一侧;而当相移量为  $3\pi/2$  时,级联光栅兼有相移时小阻带出现在波长较短一侧而相移光栅的小阻带出现在波长较长一侧。

### 3.4 薄膜参数对级联光栅的影响

#### 3.4.1 薄膜厚度对级联 LPFG 传输谱的影响

讨论级联光纤长度为 1.5 个光栅周期时的情况。图 6 和图 7 分别给出了薄膜厚度在 100 ~ 2300 nm 内的级联光栅传输谱的衰减峰位置和峰值损耗随薄膜厚度的变化关系。从图 6 可以看出,薄膜厚度在 100 ~ 425 nm, 600 ~ 1500 nm, 1900 ~ 2300 nm 三个范围内时衰减峰都是随薄膜厚度增大而向短波长方向移动的,在区域 600 ~ 1500 nm 时薄膜厚度对传输谱的位置影响较小。而从图 7 也可以得出,薄膜厚度在这个范围时(600 ~ 1500 nm)传

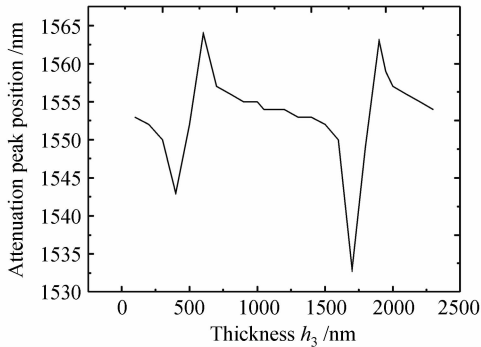


图 6 薄膜厚度对衰减峰位置的影响

Fig. 6 Effect of the thickness of the film on the transmission spectrum

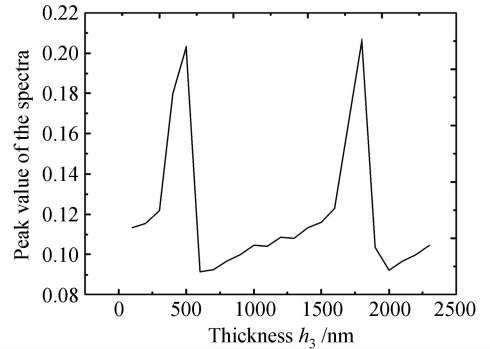


图 7 薄膜厚度对峰值损耗的影响

Fig. 7 Effect of thickness of the film on the peak value of the spectrum

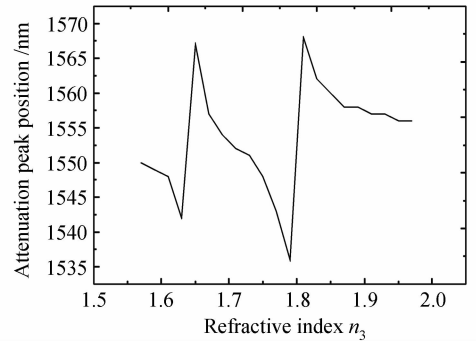


图 8 薄膜折射率对衰减峰位置的影响

Fig. 8 Effect of refractive index of the film on the transmission spectrum

输谱有较大的峰值损耗。

#### 3.4.2 薄膜折射率对级联 LPFG 传输谱的影响

图 8 和图 9 分别给出了薄膜折射率在 1.57 ~

1.97 内的级联光栅传输谱衰减峰位置和峰值损耗随薄膜折射率的变化关系。从图 8 可以看出, 薄膜折射率分别在 1.57~1.63, 1.65~1.79 和 1.81~1.97 三个范围内时, 衰减峰都是随折射率增大而向短波长方向移动的。而从图 9 可以看出, 当薄膜折射率在 1.67 和 1.77 范围内时, 传输谱有较大的峰值损耗。

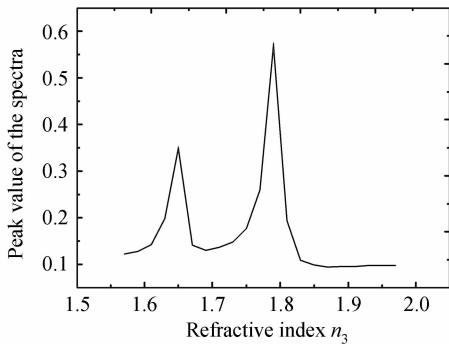


图 9 薄膜折射率对峰值损耗的影响

Fig. 9 Effect of refractive index of the film on the peak value of the spectrum

## 4 结 论

利用传输矩阵法分析了级联处的光纤长度、位置以及薄膜参数等对三包层级联长周期光栅传输谱的影响。当级联长周期光栅中的级联光纤长度与光栅周期相当时, 其透射光谱等效于相移大小为  $2\pi d/\Lambda$  的相移光栅的透射光谱; 级联光纤长度较长时, 传输谱中具有多个线宽窄、高精度的透射峰。这些结论和两包层级联 LPFG 相一致。还讨论了级联光栅兼有级联和相移的情况。通过讨论可以得知, 薄膜厚度和折射率处于三个不同区间时, 传输谱衰减峰位置都随薄膜厚度和折射率的增大而向短波长方向移动, 并且当薄膜厚度和折射率在其中一个特定区间时, 传输谱的峰值损耗较大。由于薄膜参数对级联 LPFG 传输谱的衰减峰位置和峰值损耗大小都影响巨大, 调节灵活, 在实际应用中可以选择恰当的薄膜参数达到设计特定性能滤波器的目的, 这为双阻带滤波器的设计提供了理论指导。

## 参 考 文 献

1 M. Vengsarkar, J. R. Pedrazzani, J. B. Judkins *et al.*. Long period fiber grating based gain equalizers [J]. *Opt. Lett.*,

1996, **21**(5):336~338  
 2 K. O. Hill, B. Malo, K. A. Vineberg *et al.*. Efficient mode conversion in telecommunication fibre using externally written grating [J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(16):1270~1272  
 3 D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1442~1463  
 4 F. Bilodeau, K. O. Hill, B. Malo *et al.*. Efficient narrowband LP<sub>01</sub>-LP<sub>02</sub> mode converters fabricated in photosensitive fibre: Spectral response [J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(8):682~684  
 5 Chen Genxiang, Liu Chunling, Li Tangjun *et al.*. Study on long-period fiber gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(5):624~628  
 陈根祥, 刘春宁, 李唐军 等. 长周期光纤光栅的研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(5):624~628  
 6 Cui Liping, Wu Yaming. Spectral characteristics of the cascaded long-period gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8):1019~1024  
 崔丽萍, 吴亚明. 级联长周期光栅光谱特性[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8):1019~1024  
 7 R. Hou, Z. Ghassemlooy, A. Hassan *et al.*. Modelling of long-period fiber grating response to refractive index higher than that of cladding [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **12**(10):1709~1713  
 8 Gu Zhengtian, Xu Yanping, Gao Kan. Optical fiber long-period grating with solgel coating for gas sensor [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(16):2405~2407  
 9 Xu Yanping, Gu Zhengtian, Chen Jiabi. Long-period fiber grating thin film sensors based on cladding mode coupling [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**(7):1702~1705  
 10 T. Erdogan. Cladding-mode resonance in short-and long-period fiber grating filter [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(8):1760~1773  
 11 C. Tsao. Optical Fiber Waveguide Analysis [M]. New York: Oxford University Press, 1992  
 12 Xu Yanping, Gu Zhengtian, Chen Jiabi. Effect of surface film optical parameters on the characteristic of long-period fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11):1519~1524  
 徐艳平, 顾铮先, 陈家璧. 表面膜层参数对长周期光纤光栅特性的影响[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11):1519~1524  
 13 H. Ke, K. S. Chiang, J. H. Peng. Analysis of phase-shifted long-period fiber gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(11):1596~1598  
 14 T. Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1227~1294  
 15 L. Tallone, L. Boschis, L. Gognolato *et al.*. Narrow-band rejection filters through fabrication of in-series long-period gratings [C]. *Opt. Fiber Commun. Conf.*, 1997. 175  
 16 Wang Defa. Study on spectral characteristics of phase-shifted long-period fiber gratings [D]. Shanghai: Master's Dissertation of Shanghai University, 2006. 34  
 王德法. 相移长周期光纤光栅透射谱特性研究[D]. 上海: 上海大学硕士学位论文, 2006. 34