

文章编号: 0253-2239(2010)03-0633-05

镀膜相移长周期光纤光栅滤波特性

顾铮甯¹ 蒋秀丽^{1,2} 赵晓云¹

(¹ 上海理工大学理学院, 上海 200093; ² 上海电力学院数理系, 上海 200090)

摘要 镀膜相移长周期光纤光栅(PS-LPFG)由于其结构及设计的灵活性可以改善光纤光栅的滤波特性。运用传输矩阵法,讨论了在镀膜 PS-LPFG 中不同位置引入单个相移、多个 π 相移时传输谱的滤波特性。研究发现,引入单个 π 相移时,会在谐振波长两侧出现两个新的阻带;引入多个 π 相移时,两个主阻带峰间隔随相移个数的增多而增大。进一步研究表明,薄膜厚度可以更灵活地调节镀膜 PS-LPFG 传输谱损耗峰的位置及损耗峰大小。随着薄膜厚度的增加,两损耗峰的位置向短波长方向移动,当薄膜厚度增大到一定值后,损耗峰位置向长波方向发生较大突变,同时损耗峰峰值急剧减小,随后损耗峰又将向短波方向移动且峰值逐渐增大。波长较大的损耗峰变化滞后于波长较小的损耗峰。

关键词 导波与光纤光学;镀膜相移长周期光纤光栅;传输矩阵;薄膜厚度;损耗峰

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103003.0633

Filter Characteristics of Phase-Shifted Long Period Fiber Grating with Film Coating

Gu Zhengtian¹ Jiang Xiuli^{1,2} Zhao Xiaoyun¹

(¹ College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)
(² Department of Math and Physics, Shanghai Institute of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract Phase-shifted long-period fiber grating (PS-LPFG) with film coating can improve the filtering characteristics of fiber grating due to its flexible structure and design. Based on transfer matrix method, the filter characteristics of PS-LPFG with film coating inserted by one phase-shift at different position or many π phase-shifts are analyzed. The results show that two new stop-bands appear at both sides of the resonant wavelength when a single π phase shift is inserted, and the interval of the two stop-bands increase with the number of phase-shifts inserted. Further studies indicate that the film thickness can adjust flexibly the location and amplitude of the loss peak. As the film thickness increases, the two loss peaks shift toward the shorter wavelength. When the film thickness increases to a certain value, the loss peaks jump to the longer wavelength, and meanwhile, the amplitudes of the loss peaks decrease rapidly. Subsequently, the loss peaks shift toward the short-wave direction again and the amplitudes increase with the film thickness. In addition, the changes of longer wavelength peaks lag behind the shorter wavelength peaks.

Key words guided-wave and fiber optics; phase-shifted long period fiber grating with film coating; transfer matrix; film thickness; loss peak

1 引言

长周期光纤光栅(LPFG)是一种前向传输型的光栅。与布拉格光纤光栅相比,它制作容易、结构简

单、后向反射小、插入损耗低、成本低廉,因而被广泛应用于掺铒光纤放大器(EDFA)的增益均衡器^[1,2]、滤波器^[3]以及光纤传感器^[4,5]等。

收稿日期:2009-08-02;收到修改稿日期:2009-10-21

基金项目:国家自然科学基金(60777035)、教育部重点科研项目(208040)、上海市教育委员会科研项目(07ZZ87)和上海市重点学科建设(T0501)资助课题。

作者简介:顾铮甯(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

均匀 LPFG 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^[6], 光谱设计缺乏灵活性。相移长周期光纤光栅 (PS-LPFG) 是在两段均匀的 LPFG 中引入相移, 由于其光谱设计具有较强的灵活性而备受关注^[7,8]。H. Ke 等^[9]研究了 PS-LPFG 的传输谱特性, 通过改变引入相移的位置和数量可以对透射谱进行调整和优化。

近年来, 在光纤光栅包层外镀一层薄膜的 LPFG 成为研究热点。D. R. Nicholas 等^[10]在 LPFG 外镀一层 LB 薄膜, LPFG 的谐振波长随薄膜厚度的变化而改变。Gu Zhengtian 等^[11~13]在 LPFG 外镀一层溶胶-凝胶气敏薄膜, 使得镀膜后的 LPFG 包层模对外界气体性质的变化更为敏感, 已制作了用于检测 C₂H₅OH 气体的传感器。可以设

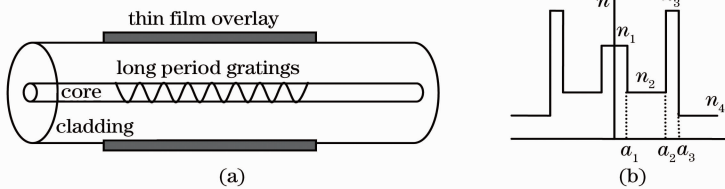


图 1 镀膜 LPFG 模型。(a) 结构模型; (b) 折射率分布模型

Fig. 1 Modal of long-period fiber gratings with film coating. (a) structural diagram; (b) refractive index profile

在均匀 LPFG 内插入正规光纤可构成 PS-LPFG, 插入不同长度的正规光纤可产生不同的相移量。M 段正规光纤, 将均匀 LPFG 分割为 M+1 段。图 2 中画出了相移长周期光纤光栅的结构示意图。图中 L_i 为第 i 段光栅的长度, φ_i 为第 i 段正规光纤所引入的相移。

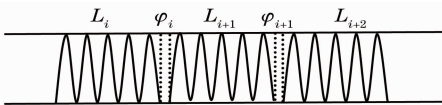


图 2 相移光栅纤芯部分示意图

Fig. 2 Schematic of the core layer of PS-LPFG

将光栅输入端的纤芯模能量归一化为 1, 而包层模的能量为 0。利用传输矩阵法^[14], 可得经过图 2 结构后, 芯模与 m 阶包层模的振幅分别为

$$\begin{bmatrix} R \\ S \end{bmatrix} = (\mathbf{F}_{M+1} \mathbf{F}_{pM} \cdots \mathbf{F}_{i+1} \mathbf{F}_{pi} \mathbf{F}_i \cdots \mathbf{F}_{p1} \mathbf{F}_1) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中

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

想, 在 PS-LPFG 外镀一层薄膜, 改变薄膜的厚度也将对其传输谱产生一定的影响, 从而调节 PS-LPFG 的滤波特性。

本文基于耦合模方程, 采用传输矩阵法研究 PS-LPFG 的传输谱。通过给定的具体光纤光栅参数, 模拟了镀膜 PS-LPFG 的传输谱, 分析了在均匀 LPFG 中引入单个、多个相移, 以及在不同位置处引入单个相移的光栅传输谱。讨论了薄膜厚度对相移光栅的影响。所得结论对镀膜相移长周期光纤光栅滤波器的设计有一定的参考作用。

2 理论分析

LPFG 外镀一层介质薄膜, 其结构如图 1 所示。图 1(b) 中, a_1 为纤芯半径, a_2 为包层半径, 则薄膜厚度 $h = a_3 - a_2$, n_1 为纤芯折射率, n_2 为包层折射率, n_3 为薄膜折射率, n_4 为周围环境的折射率。

(2) 式为第 i 段正规光纤对应的相移矩阵;

$$\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} \cos(\gamma L_i) + i \frac{\delta}{\gamma} \sin(\gamma L_i) & i \frac{\kappa}{\gamma} \sin(\gamma L_i) \\ i \frac{\kappa}{\gamma} \sin(\gamma L_i) & \cos(\gamma L_i) - i \frac{\delta}{\gamma} \sin(\gamma L_i) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

(3) 式为第 i 段光栅对应的传输矩阵。式中 $\delta = \frac{1}{2} (\beta_{co} - \beta_{cl}^m - \frac{2\pi}{\Lambda})$, β_{co} , β_{cl}^m 分别是芯模和 m 阶包层模的传输常数, 可由圆柱型光波导的特征方程求出^[15], Λ 为光栅周期, κ 为纤芯模和 m 阶包层模的耦合系数, $\gamma = \sqrt{\delta^2 + \kappa^2}$ 。

经过 PS-LPFG 后光强透过率

$$T = R \times R^*. \quad (4)$$

3 传输谱

数值模拟 PS-LPFG 的传输谱, 分析引入相移大小、位置以及薄膜参数等对镀膜 PS-LPFG 的传输谱的影响。计算所采用的光纤及光栅参数为: 纤芯半径 $a_1 = 2.625 \mu\text{m}$, 包层半径 $a_2 = 62.4 \mu\text{m}$, 薄膜厚度 $h = 300 \text{ nm}$, 纤芯折射率 $n_1 = 1.458$, 包层折

射率 $n_2 = 1.45$, 薄膜折射率 $n_3 = 1.57$, 环境折射率 $n_1 = 1$. 纤芯平均折射率的改变量为 4×10^{-4} , 光栅周期为 $520 \mu\text{m}$.

3.1 引入单个 φ 相移的 PS-LPFG 的传输谱

对于引入单个 φ 相移的 PS-LPFG, 相移 φ 的大小和引入位置都会对其传输谱产生影响. 引入参数 α

$$\alpha = \frac{L_1}{L_1 + L_2}, \quad (5)$$

式中 L_1 和 L_2 分别为两段均匀长周期光栅的长度. 容易得到, $0 < \alpha < 1$, 并且 $\alpha = 0.5$ 时, 相移位于光栅中心. 由传输矩阵理论和对称性可知, 在位置 α 和 $1 - \alpha$ 处引入相移效果相同, 故只需考虑 $0 < \alpha \leq 0.5$ 的情况.

1) $\varphi = \pi, \alpha = 0.5$ 时, 取光栅总长度为 18 mm . 在 $\alpha = 0.5$ 处引入单个 π 相移, 镀膜 PS-LPFG 的传输谱如图 3 所示. 由图 3 可知, 在均匀 LPFG 中未引入相移时, 谐振波长处的透射率最小; 在 LPFG 中心位置处引入一个 π 相移, 谐振波长处的透射率由最小变为最大, 而且在其两侧出现了两个新的阻带. 这样就可以构成一种同时滤掉两个波长的带阻滤波器.

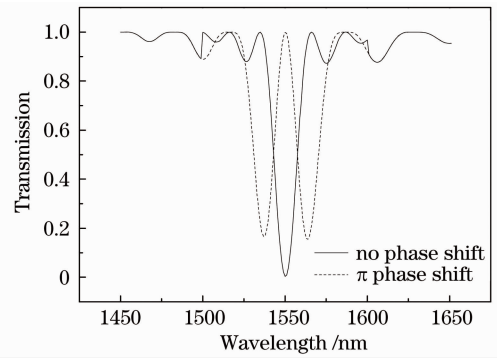


图 3 中心处引入 π 相移的 PS-LPFG 的传输谱
Fig. 3 Transmission spectrum of PS-LPFG with π phase shift at the center

2) $\varphi \neq \pi, \alpha = 0.5$ 时, 当光栅中心处所引入的相移不是 π 的整数倍时, PS-LPFG 的传输谱将变得不对称, 如图 4 所示, 所取的相移大小分别为 $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi, 3\pi/2$. 可以看出, 当 $\varphi = \pi/4$ 时传输谱的主阻带一侧出现了一个小的阻带, 随着相移的增大, 新出现的阻带幅值逐渐增大; $\varphi = \pi$ 时, 新阻带与原阻带幅度相当, 传输谱呈对称结构; 当 $\varphi = 3\pi/2$ 时, 小阻带转移到了谐振波长的另一侧. 由图中可以很容易得出这一变化是有周期性的, 周期为 2π .

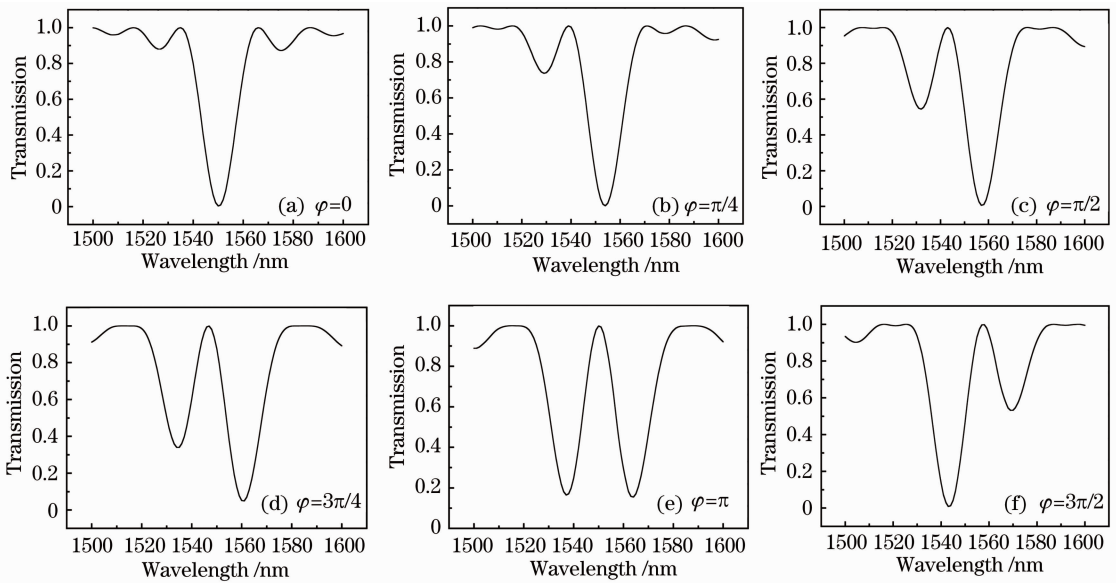


图 4 中心处引入 $\varphi \neq \pi$ 相移的 PS-LPFG 的传输谱

Fig. 4 Transmission spectrum of PS-LPFG with a phase shift which does not equal π at the center

3) $\varphi = \pi, 0 < \alpha < 0.5$ 时, $\alpha = 0.15, \alpha = 0.18, \alpha = 0.20, \alpha = 0.22$ 时 PS-LPFG 的传输谱如图 5 所示. 从图 5 可以看出, 在传输谱的中心区域, 分别得到了凹陷的、平坦的、凸起的 3 种情形. 当 $\alpha > 0.20$ 时, 传输谱的凹陷更加明显, 谐振波长处透射损耗进一步减小, 直到 $\alpha = 0.5$, 谐振波长处透射率增大

为 1.

4) $\varphi \neq \pi, 0 < \alpha < 0.5$ 时, 引入相移 $\varphi = 3\pi/4$ 时 PS-LPFG 的传输谱随 α 的变化情况如图 6 所示. 可以看出, 此时传输谱的对称性被打破, 传输谱损耗峰的左侧下方向长波长方向凸起, α 越大, 凸起的越多, 而损耗峰左侧上方比原来会有展宽.

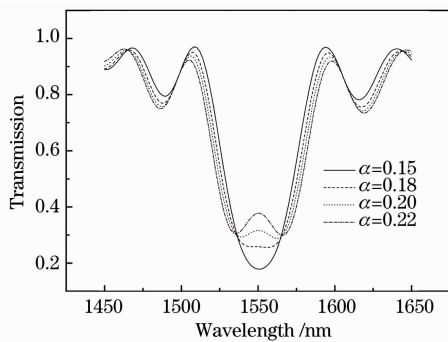


图 5 不同位置处引入 π 相移的相移 LPFG 的传输谱

Fig. 5 Transmission spectrum of PS-LPFG with π phase shift at different locations

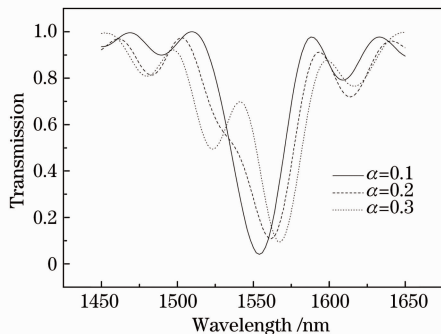


图 6 不同位置引入 $\varphi=3\pi/4$ 的 PS-LPFG 的传输谱

Fig. 6 Transmission spectra of PS-LPFG with $3\pi/4$ phase shift at different locations

3.2 引入多个 π 相移的 LPFG 的传输谱

将均匀 LPFG 均匀的分成 $M+1$ 段,在各段之间引入 1 个 π 相移,总共引入 M 个相移,计算其传输谱如图 7 所示。可以发现,引入多个 π 相移后,LPFG 的透射谱具有 2 个主阻带,阻带之间形成 1 个通带。此通带的宽度可以通过改变引入 π 相移的个数来调节。两个损耗峰间距与相移个数的关系如图 8 所示,可以看出损耗峰间距与相移个数成正比。

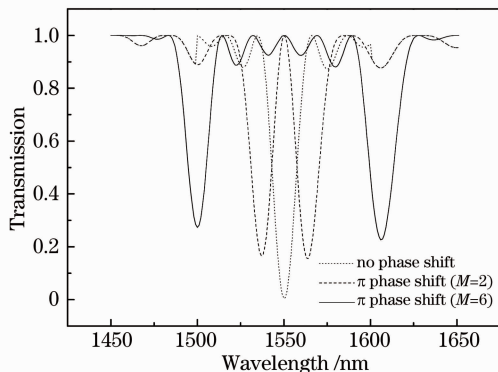


图 7 引入多个 π 相移的 PS-LPFG 的传输谱

Fig. 7 Transmission spectra of PS-LPFG with multiple π phase shifts

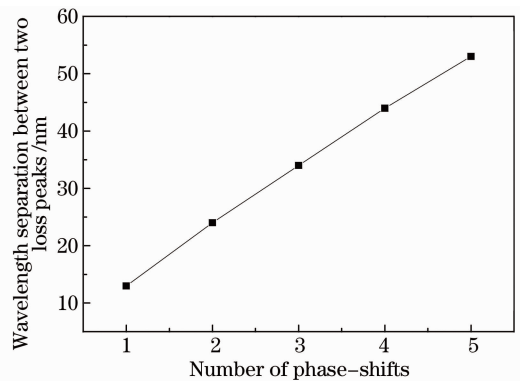


图 8 损耗峰间距与相移个数的关系

Fig. 8 Wavelength separation between two loss peaks as a function of phase-shift number

4 镀膜厚度对 PS-LPFG 的滤波特性的影响

相移数为 5 时,薄膜厚度分别为 100, 300 nm 的传输谱如图 9 所示。可以看出,随着薄膜厚度的增大,光栅传输谱发生了移动,两个主阻带损耗峰值也有略微改变。图 10 更精细地给出了不同薄膜厚度下,主阻带的位置与损耗峰值大小。图 10(a) 方形标注的线表示左侧损耗峰位置随薄膜厚度的变化,圆形标注的线表示右侧损耗峰位置随薄膜厚度的变化。薄膜厚度从 0 逐渐增大到 400 nm,两侧损耗峰的位置都在向短波长方向移动。薄膜厚度超过 400 nm 时左侧损耗峰位置向长波方向突变,而右侧损耗峰位置在薄膜厚度达到 440 nm 后,开始向长波方向突变,其变化滞后于左侧损耗峰。损耗峰位置突变后,随着薄膜厚度的增大,又会向短波长方向移动,之后又出现一次突变过程。随后损耗峰位置随薄膜厚度增大而向短波长方向移动。图 10(b) 方形标注的线表示左侧损耗峰透射率随薄膜厚度的变化,圆形标注的线表示右侧损耗峰透射率随薄膜厚

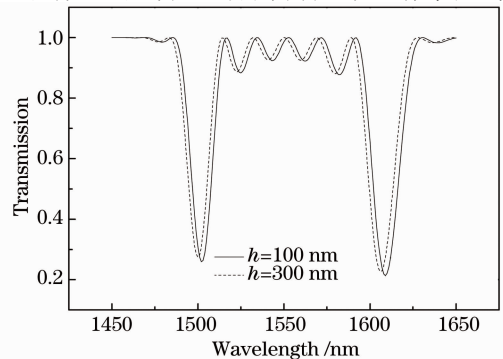


图 9 薄膜厚度对传输谱的影响

Fig. 9 Effect of film thickness on the transmission spectra

度的变化。随薄膜厚度的增大两个损耗峰的透射率略有增加。薄膜厚度增大到使得损耗峰位置发生跳变的时候, 损耗峰峰值急剧减小, 因此作为滤波用途

的镀膜的 PS-LPFG, 这样的薄膜厚度是应该避免的。对应其他不同的相移数目, 随薄膜厚度的变化, 两个损耗峰的变化具有类似的情形。

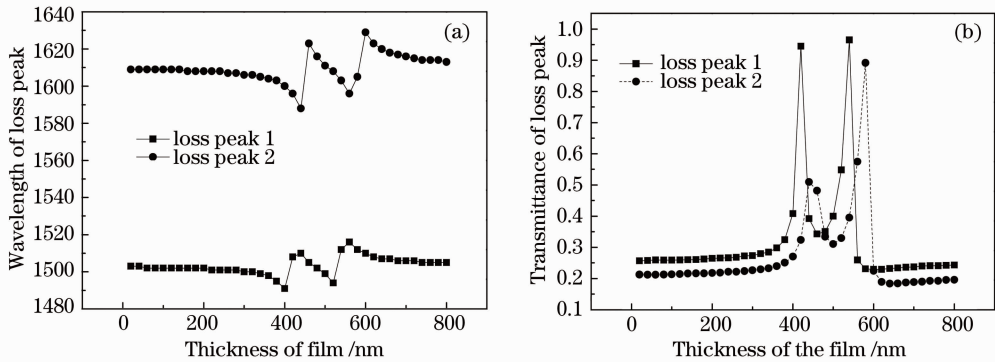


图 10 薄膜厚度对损耗峰的影响。(a) 损耗峰位置; (b) 损耗峰大小

Fig. 10 Effect of the film thickness on the loss peaks. (a) wavelength of loss peaks; (b) transmittance of loss peaks

5 结 论

利用传输矩阵法分析了在镀膜 PS-LPFG 中引入单个、多个 π 相移, 以及在不同位置处引入相移的传输谱。结论表明镀膜 PS-LPFG 的谱形与不镀膜的相似, 即在均匀 LPFG 中引入单个 π 相移时, 会在谐振波长两侧出现两个新的阻带; 当引入多个 π 相移时, 两个主阻带峰间隔随相移个数的增多而增大。薄膜厚度的变化会影响 PS-LPFG 的传输谱, 即随着薄膜厚度的增大, 损耗峰位置向短波长方向移动, 但薄膜厚度增大到一定值后, 损耗峰位置向长波方向有一个大的跳变, 同时损耗峰峰值急剧减小。

参 考 文 献

- 1 A. 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 Xie Zenghua, Chen Genxiang, Li Tangjun *et al.*. EDFA gain flattening equalizer based on long period fiber gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(6): 553~555
- 3 谢增华, 陈根祥, 李唐军等. 运用长周期光纤光栅实现 EDFA 的增益平坦化[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(6): 553~555
- 4 A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins *et al.*. Long-period fiber gratings as band-rejection filters[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1): 58~65
- 5 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1463
- 6 Xu Yanping, Gu Zhengtian, Chen Jiabi *et al.*. Structure optimization of long-period fiber grating gas-sensing film sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 326~330

- 徐艳平, 顾铮先, 陈家璧等. 长周期光纤光栅气敏薄膜传感器结构优化[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 326~330
- 6 Chen Genxiang, Liu Chunling, Li Tangjun *et al.*. Study on long-period fiber gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(5): 624~628
- 7 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
- 8 J. R. Qian, H. F. Chen. Gain flattening fiber filters using phase-shifted long period fiber gratings[J]. *Electron Lett.*, 1998, **34**(11): 1132~1133
- 9 L. R. Chen. Design of flat-top bandpass filters based on symmetric multiple phase-shifted long-period fiber gratings[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **205**(4~6): 271~276
- 10 H. Ke, K. S. Chiang, J. H. Peng. Analysis of phase-shifted long-period fiber gratings[J]. *IEEE Photo. Tech. Lett.*, 1998, **10**(11): 1596~1598
- 11 D. R. Nicholas, W. J. Stephen, P. T. Ralph. Optical fiber long-period gratings with Langmuir - Blodgett thin-film overlays [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(9): 686~688
- 12 Zhengtian Gu, Yanping Xu, Kan Gao. Optical fiber long-period grating with solgel coating for gas sensor[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(16): 2405~2407
- 13 Yanping Xu, Zhengtian Gu, Jiabi Chen. Long-period fiber grating thin film sensors based on cladding mode coupling[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**(7): 1702~1705
- 14 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
- 15 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
- 16 T. Erdogan. Fiber grating spectra[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1227~1294
- 17 C. Tsao. Optical Fiber Waveguide Analysis[M]. New York: Oxford University Press, 1992