

镀膜相移长周期光纤光栅大间隔双峰滤波特性

陈海云^{1,2,3} 顾铮甦² 杨 颖²

¹ 上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093

² 上海理工大学理学院光电功能薄膜实验室, 上海 200093; ³ 浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004

摘要 研究了镀膜相移长周期光纤光栅(PS-LPFG)工作于相位匹配转折点(PMTP)时的大间隔双峰滤波特性。LPFG 工作于 PMTP 时, 纤芯模与高次包层模耦合产生的损耗峰 3 dB 带宽可达 288 nm 以上, 在此 LPFG 中点引入单个 π 相移时在中心波长两侧出现的两个阻带峰间隔达 388 nm, 远大于低次包层模耦合 π 相移 LPFG 的双峰间隔。在 LPFG 中均匀地引入 $M(M>1)$ 个 π 相移时, 双峰间隔随 M 的增大而增大, M 为奇数时, 中心波长损耗为 0; M 为偶数时, 中心波长损耗随 M 的增大而减小。薄膜折射率与厚度的增加都将使两个阻带峰向短波长方向移动并增大双峰间隔。光栅长度的增大在改变双峰峰值损耗的同时使双峰间隔逐渐减小。

关键词 光纤光学; 相移长周期光纤光栅; 传输矩阵法; 相位匹配转折点; 薄膜参数; 阻带峰

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201232.0506002

Large-Separation Dual-Peak Filtering Characteristics of Phase-Shifted Long-Period Fiber Gratings with Film Coatings

Chen Haiyun^{1,2,3} Gu Zhengtian² Yang Ying²

¹ School of Optical-Electric and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

² Laboratory of Opto-Electric Functional Films, College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

³ Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China

Abstract The large-separation dual-peak filtering characteristics of phase-shifted long-period fiber gratings (PS-LPFG) with film coatings are studied. When an LPFG is designed to work at the phase-matching turning point (PMTP), the coupling between core mode and a higher-order cladding mode produces a single resonant peak whose bandwidth reaches 288 nm and above. The introduction of a phase-shift into the center of this LPFG gives rise to two band-rejection peaks locating at the two sides of the central wavelength. The separation between these two peaks reaches 388 nm which is much larger than that of the PS-LPFG based on the coupling between core mode and a lower-order cladding mode. When the LPFG is devised uniformly by introducing $M (M>1)$ π phase shifts, the separation increases with the increase of M . The loss at central wavelength is constant at zero when M is odd, whereas the loss at central wavelength decreases with the increase of M when M is even. The increase of film thickness and refractive index causes the two peaks to shift towards short wavelength and increases the separations. Furthermore, the increment of grating length changes the peak loss of dual peaks and decreases the separation.

Key words fiber optics; phase-shifted long-period fiber grating; transfer-matrix method; phase-matching turning point; film parameters; band-rejection peak

OCIS codes 060.2310; 060.2340; 120.2440

收稿日期: 2011-11-01; 收到修改稿日期: 2012-01-04

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)和上海市重点学科建设项目(S30502)资助课题。

作者简介: 陈海云(1977—), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事光纤光栅传感理论与技术、光电检测等方面的研究。

E-mail: chy@zjnu.cn

导师简介: 顾铮甦(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电工程与测量、光电功能薄膜和光纤传感器等方面的研究。E-mail: zhengtiangu@163.com(通信联系人)

1 引 言

长周期光纤光栅(LPFG)能够将纤芯模耦合到同向传输的包层模,从而在透射谱中产生一系列离散的损耗峰。与布拉格光纤光栅相比,LPFG制作容易、插入损耗低、后向反射小、结构紧凑,已经广泛应用于通信^[1,2]和传感^[3~5]领域。相移长周期光纤光栅(PS-LPFG)是在均匀LPFG中一定位置引入相移,均匀LPFG中点引入单个 π 相移时,LPFG的损耗峰在中心波长处分裂为两个阻带峰;引入多个 π 相移时,阻带峰间隔随相移个数的增多而增大^[6,7],但已有的PS-LPFG双峰间隔较小,通常在十几个纳米,引入多个 π 相移增大后间隔一般也只在100 nm以内,因而用于双通道带阻滤波时双峰间隔的调节范围有限。

近年来,镀膜LPFG的研究越来越受到关注^[8~10]。在LPFG表面镀制一层折射率大于包层材料的薄膜可以改变包层模模场分布,进而影响LPFG的滤波特性。目前主要的镀膜技术有LB技术^[8]、离子自组装多层技术(ISAM)^[9]和溶胶-凝胶技术^[10]。Gu Zhengtian等^[11]研究了镀膜PS-LPFG的滤波特性,改变薄膜参数可以调节阻带峰的位置和峰值损耗的大小,但双峰间隔的调节范围与传统无镀膜的PS-LPFG相差不大。

当光栅周期较短时,纤芯模与高次包层模耦合的相位匹配曲线(PMC)在900~2000 nm的波长范围内将呈现出二次曲线特性^[12],相位匹配曲线包含一转折点,在转折点处相位匹配曲线的斜率由正转

向负。当设计合适的光栅周期使LPFG工作于相位匹配转折点(PMTP)时,纤芯模与高次包层模耦合只有一个损耗峰,其3 dB带宽可达数百纳米^[13,14]。本文基于耦合模理论,利用传输矩阵法研究了工作于PMTP的镀膜相移LPFG的滤波特性。研究了镀膜LPFG的PMC及PMTP特性,模拟计算了在工作于PMTP的镀膜均匀LPFG中引入单个和多个 π 相移时的传输谱特性,讨论了薄膜参数与光栅参数对PS-LPFG双峰带阻滤波特性的影响,得到了不同于低次包层模耦合PS-LPFG的滤波特性。研究结果可以为镀膜相移LPFG大间隔双峰带阻滤波器的设计提供参考,这种大间隔双峰宽带光纤滤波器有望在光纤系统的波分复用和光谱滤波等方面得到很好的应用。

2 理论分析

2.1 传输矩阵法

镀膜LPFG结构如图1(a)所示,图1(b)为相应的折射率分布示意图, a_1 和 a_2 分别为纤芯与包层半径, $h_3 = a_3 - a_2$ 为薄膜厚度, n_1, n_2, n_3 和 n_4 分别表示纤芯、包层、薄膜和环境折射率,且满足 $n_3 > n_1 > n_2 > n_4$ 。PS-LPFG的纤芯折射率调制如图2所示,在两段长度为 L_i 和 L_{i+1} 的均匀光栅之间由于折射率调制突变而引入相移 φ_i ,相移的引入也可以通过在两段均匀光栅之间插入一定长度无光栅的普通光纤来实现。

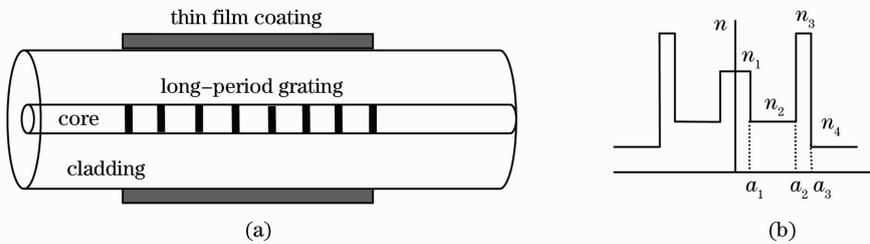


图1 镀膜LPFG结构示意图。(a)结构模型;(b)折射率分布

Fig. 1 Schematic of coated LPFG sensor. (a) Structural diagram; (b) refractive index profile

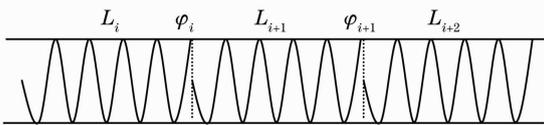


图2 PS-LPFG纤芯折射率调制示意图

Fig. 2 Schematic of refractive-index modulation of a PS-LPFG core

通常采用传输矩阵法研究PS-LPFG的传输谱特性。设初始条件为:光栅输入端纤芯模振幅为1,包层模振幅为0,则光经过图2所示的光栅结构后,纤芯模与 m 次包层模的振幅 R 和 S 可以用如下的矩阵形式表示^[15]:

$$\begin{bmatrix} R \\ S \end{bmatrix} = [F_{M+1} F_{\rho M} \cdots F_{i+1} F_{\rho i} F_i \cdots F_{\rho 1} F_1] \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 M 为相移的个数;

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

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

(2)式为相移对应的传输矩阵,其中 φ_i 为第 i 个相移;(3)式为一段均匀光栅对应的传输矩阵,式中 L_i 为光栅长度, δ 为失谐量:

$$\delta = \frac{1}{2} \left(\beta_{co} - \beta_{cl}^m - \frac{2\pi}{\Lambda} \right), \quad (4)$$

式中 β_{co} 和 β_{cl}^m 分别是纤芯模和 m 次包层模的传播常数,且有关系式 $\beta_{co} = (2\pi/\lambda)n_{co}^o$, $\beta_{cl}^m = (2\pi/\lambda)n_{cl}^{cl,m}$, n_{co}^o 和 $n_{cl}^{cl,m}$ 分别为纤芯模和 m 次包层模的有效折射率,可以通过数值求解圆柱光波导的特征方程得到^[16]; λ 为光波长, Λ 为光栅周期, κ 为纤芯模与 m 次包层模的互耦合常数, $\gamma = \sqrt{\delta^2 + \kappa^2}$ 。光经过PS-LPFG后的透射率为 $T = RR^*$ 。

2.2 相位匹配转折点

对于纤芯模与 m 次包层模的耦合,(4)式中令 $\delta=0$ 即为相位匹配条件:

$$\lambda_{res,m} = [n_{co}^o(\lambda_{res,m}) - n_{cl}^{cl,m}(\lambda_{res,m})]\Lambda, \quad (5)$$

$\lambda_{res,m}$ 为纤芯模与 m 次包层模耦合的谐振波长。根据(5)式作出的纤芯模与各次包层模耦合的相位匹配曲线如图3所示。计算中采用的光纤结构参数如下: $a_1=4.15 \mu\text{m}$, $a_2=62.5 \mu\text{m}$, $h_3=200 \text{ nm}$, $n_1=1.4681$, $n_2=1.4628$, $n_3=1.57$, $n_4=1$ 。由图3(a)可知,低次包层模耦合的PMC中,谐振波长随光栅周期单调增大,一条代表光栅周期的竖直线与一条PMC只有一个交点,即只有一个谐振波长;图3(b)

则显示,高次包层模耦合的PMC具有二次曲线特性,一条代表光栅周期的竖直线与PMC可能有两个交点,即出现“双峰谐振”现象^[17]。PMC包含有一个转折点,PMC的斜率在转折点由正转向负,图中实心圆点即为 $\text{HE}_{1,10}$ ($m=19$)包层模PMC的转折点,竖直线A对应双峰谐振,竖直线B与PMC相切只有一个交点,当光栅周期取相应值时,纤芯模与 $\text{HE}_{1,10}$ 包层模耦合只有一个损耗峰,其3 dB带宽可以表示为^[13,14]

$$\Delta\lambda_{3 \text{ dB}} = \frac{1.26\lambda_{res}}{\sqrt{cL\Delta D}}, \quad (6)$$

式中 c 为真空中光速, L 为光栅长度, ΔD (ps/nm/km)为纤芯模与包层模之间的色散差。此时的损耗峰带宽可达数百纳米,远大于低次包层模耦合产生的损耗峰带宽。由图3(b)可知每一个PMTP对应有一个谐振波长 λ_T 和一个光栅周期 Λ_T 。对于镀膜LPFG,一定厚度的高折射率薄膜将影响包层模有效折射率,进而影响转折点的 λ_T 和 Λ_T 。 λ_T 和 Λ_T 随薄膜折射率和厚度的变化如图4所示,由图可知,在一定范围内, λ_T 随薄膜折射率和厚度的增加而减小,而 Λ_T 随薄膜折射率和厚度的增加而增大。值得注意的是,图4(a)和(b)中均存在一个跳变区域, λ_T 和 Λ_T 随薄膜折射率和厚度的增加而出现跳变,这是由于薄膜折射率和厚度的增加引起了包层模模式过渡和重组^[18],当薄膜折

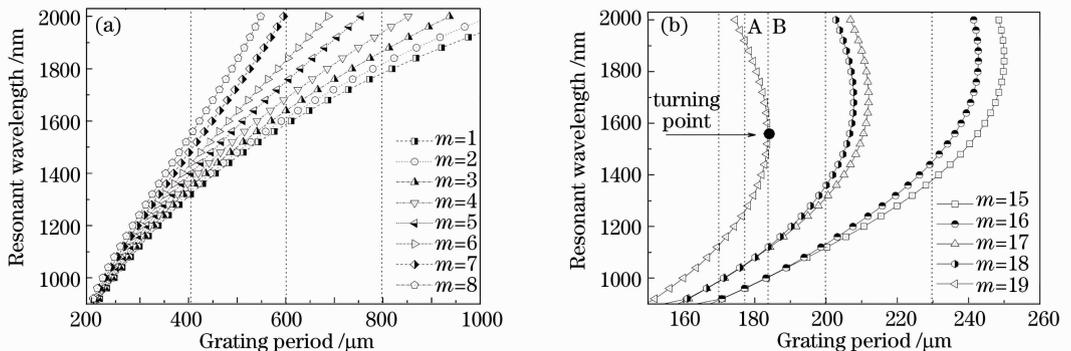


图3 相位匹配曲线。(a)低次包层模耦合;(b)高次包层模耦合

Fig. 3 Phase-matching curves. (a) Lower-order cladding mode coupling; (b) higher-order cladding mode coupling

射率和厚度取值处于这个跳变区域时,损耗峰波形的完整性将受到破坏,因此对于 LPFG 在滤波方面

的应用,薄膜参数取值应避免跳变区域。

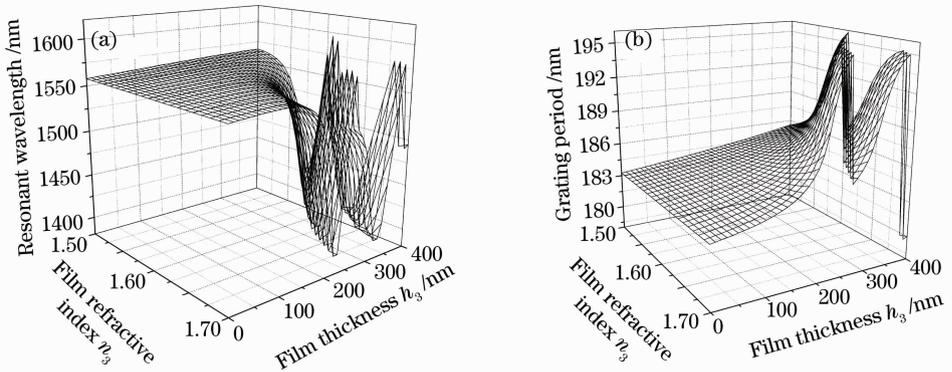


图 4 薄膜折射率与厚度对 λ_T 和 Δ_T 的影响。(a) λ_T ; (b) Δ_T

Fig. 4 Effect of film refractive index and thickness on λ_T and Δ_T . (a) λ_T ; (b) Δ_T

3 镀膜 PS-LPFG 的传输谱特性

利用传输矩阵法模拟计算 PS-LPFG 的传输谱特性,分析在不同位置引入不同相移量以及引入多个 π 相移时的传输谱特性。计算中采用的光纤结构参数与 2.2 节中所取参数一致;光栅周期取相应的转折点对应光栅周期 $\Lambda = \Delta_T = 184.7 \mu\text{m}$,则 $\lambda_T = 1562.2 \text{ nm}$,光栅总长度取 $L = 10.6 \text{ mm}$,此时 $\kappa L = \pi/2$,未引入相移时的中心波长 λ_T 处透射率 $T_T = 0$ 。

3.1 引入单个 π 相移时的传输谱

讨论在不同位置引入单个不同的相移量对 PS-LPFG 传输谱特性的影响。为表征引入相移的位置,引入参数 α :

$$\alpha = \frac{L_1}{L_1 + L_2}, \quad (7)$$

式中 L_1, L_2 表示两段均匀光栅的长度, $L = L_1 + L_2$,显然有 $0 < \alpha < 1$, $\alpha = 0.5$ 时在光栅中点引入相移。由传输矩阵理论的对称性可知,在位置 α 和 $1 - \alpha$ 处引入相移效果相同,因此只需讨论 $0 < \alpha \leq 0.5$ 的情况。

未引入相移及在光栅中点 ($\alpha = 0.5$) 引入 π 相移时的传输谱如图 5 所示。由图可知,当工作于 PMTP 的镀膜均匀 LPFG 未引入相移时出现单个损耗峰,中心波长透射率 $T_T = 0$,该损耗峰的 3 dB 带宽为 288 nm,远大于低次包层模耦合的损耗峰带宽,适用于单峰宽带滤波。而当在光栅中点处引入 π 相移时,中心波长透射率 T_T 变为 1,即损耗为 0,在两侧同时出现两个新的阻带峰,双峰间隔达 388 nm,单个阻带峰的带宽分别为 80 nm 和 97 nm。双峰间隔和单峰带宽均远大于基于低次包层模耦合

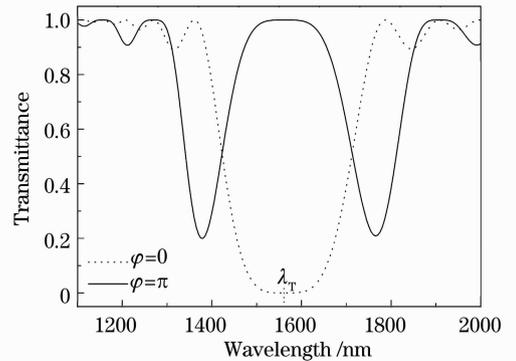


图 5 光栅中点引入 π 相移时的传输谱

Fig. 5 Transmission spectra with π phase shift at the center of grating

的 PS-LPFG。

图 6 给出了在均匀镀膜 LPFG 中点引入不同相移量时的传输谱。如图 6(a) 所示,当相移量 φ 从 0 增大到 π 时,传输谱由单个宽带损耗峰逐渐向两个对称的阻带峰演变, T_T 由 0 逐渐增大到 1, 两侧新出现的阻带峰同时向中心波长移动,同时两阻带峰峰值透射率不断减小, $\varphi = \pi$ 时达到最小。而图 6(b) 则显示,当相移量 φ 从 π 增大到 2π 时, T_T 由 1 逐渐减小为 0, 两侧阻带峰继续向中心波长移动,两阻带峰峰值透射率继续减小, $\varphi = 2\pi$ 时两个阻带峰重新合并成单个宽带损耗峰。由图 6 分析可知,上述的变化过程是周期性的,周期为 2π 。工作于 PMTP 的 LPFG 中点引入不同相移量时显现出了不同于低次包层模耦合 PS-LPFG 的传输谱变化特性。低次包层模耦合 PS-LPFG 中当相移量为 $0 < \varphi < \pi$ 和 $\pi < \varphi < 2\pi$ 时,传输谱特性表现为两个不对称的阻带峰^[11]。

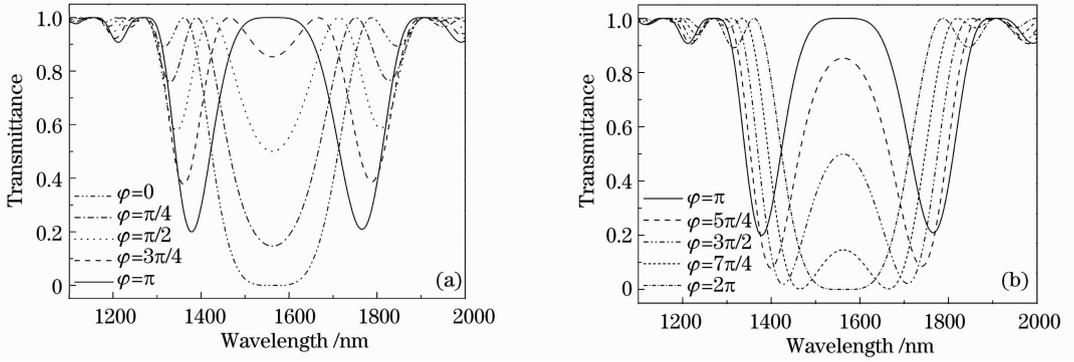


图 6 光栅中点引入不同相移量时的传输谱。(a) $\varphi=0\sim\pi$; (b) $\varphi=\pi\sim2\pi$

Fig. 6 Transmission spectra with different phase shifts at the center of grating. (a) $\varphi=0\sim\pi$; (b) $\varphi=\pi\sim2\pi$

在光栅不同位置引入相移时的传输谱如图 7 所示。由图 7(a)可知,对 $\varphi=\pi$,当相移点由光栅一侧端点向中心移动时,传输谱由单个宽带损耗峰逐渐分化演变为两侧对称的阻带峰。 $\alpha < 0.2$ 时, T_T 逐渐增大,单个损耗峰的带宽随之增大; $\alpha \geq 0.2$ 时, T_T 继续增大,两侧开始出现新的阻带峰,阻带峰随 α

的增大而向两侧移动,阻带峰峰值透射率减小; $\alpha = 0.5$ 时,传输谱与图 5 所示一致。图 7(b) 是在不同位置引入 $\pi/2$ 相移时的传输谱。由图可知, T_T 随 α 增大而增大,中心损耗峰带宽亦随之减小,两侧同时出现新的阻带峰,但当 $\alpha = 0.5$ 时, T_T 不能增大到 1,两侧新阻带峰的峰值透射率与 λ_T 处的透射率相差不大。

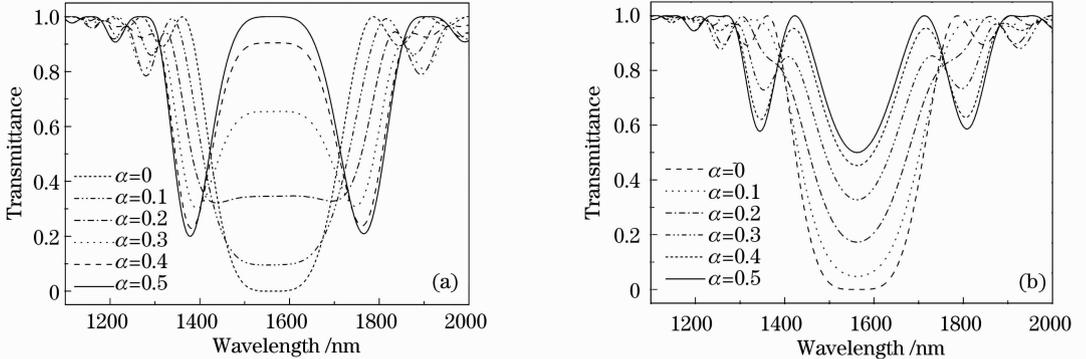


图 7 光栅中不同位置引入相移时的传输谱。(a) $\varphi=\pi$; (b) $\varphi=\pi/2$

Fig. 7 Transmission spectra at different positions in grating. (a) $\varphi=\pi$; (b) $\varphi=\pi/2$

3.2 引入多个 π 相移时的传输谱

引入不同数目 π 相移的传输谱如图 8 所示,引入的 M 个 π 相移,将长度为 L 的 LPFG 均匀地分成

$M+1$ 段。由图可知,当工作于 PMTP 的 LPFG 中引入多个 π 相移时, λ_T 两侧出现两个阻带峰,且当 π 相移个数增加时,两阻带峰同时向两侧移动,双峰间

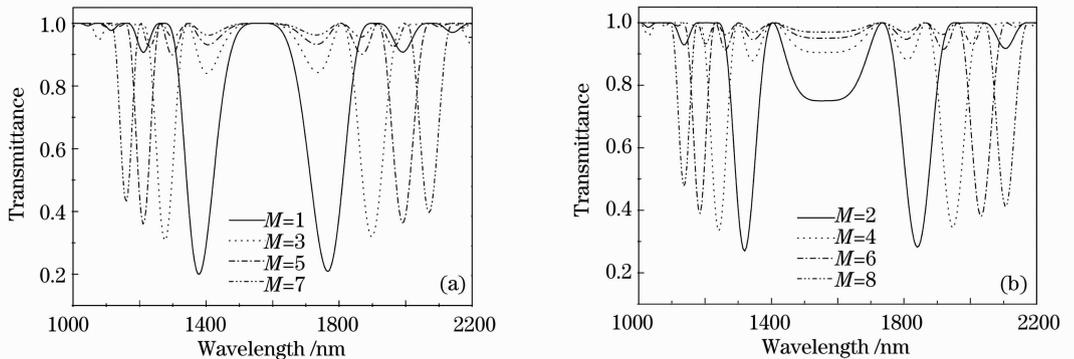


图 8 光栅中引入多个 π 相移时的传输谱。(a) M 为奇数; (b) M 为偶数

Fig. 8 Transmission spectra with multiple π phase shifts in the grating. (a) M is odd; (b) M is even

隔随之增大。尤其值得注意的是,引入 π 相移个数为奇数和偶数时,传输谱表现出了不同的变化特性。如图 8(a)所示,光栅中点引入奇数个 π 相移时,中心波长透射率 T_T 保持为 1,即中心波长损耗为 0,起到带通作用;而当引入偶数个 π 相移时有不同的特性,如图 8(b)所示, T_T 不为 1,并随 M 的增大而增大。此外,与低次包层模耦合的 PS-LPFG 相比,两个阻带峰间隔及其随 M 增大的幅度大大增加。表 1 给出了镀膜 LPFG 中引入多个 π 相移时的双峰

表 1 镀膜 LPFG 引入多个 π 相移时的双峰特性

Table 1 Dual-peak characteristics of coated LPFG with multiple π phase shifts

M	Wavelength /nm		Separation /nm	Peak transmittance		Bandwidth /nm		Transmittance at λ_T
	Peak1	Peak2		Peak1	Peak2	Peak1	Peak2	
1	1378	1766	388	0.1996	0.2088	80	97	1
2	1319	1841	522	0.2698	0.2819	54	68	0.7500
3	1277	1898	621	0.3068	0.3194	42	56	1
4	1241	1947	706	0.3336	0.3447	34	48	0.9045
5	1211	1991	780	0.3592	0.3635	29	41	1
6	1184	2032	848	0.3898	0.3818	24	37	0.9505
7	1160	2070	910	0.4290	0.3958	18	32	1
8	1137	2106	969	0.4774	0.4115	10	29	0.9699

4 薄膜参数和光栅参数对双峰滤波特性的影响

4.1 薄膜参数对传输谱的影响

对于镀膜 PS-LPFG,薄膜厚度和折射率的变化都将影响其传输谱。光栅中点引入单个 π 相移时薄膜参数对传输谱的影响如图 9 所示,薄膜厚度和折射率的增加都将引起两个阻带峰向短波长方向移动,左侧阻带峰的移动量大于右侧阻带峰,因而双峰

特性参数,可见,两阻带峰的带宽均达到了几十个纳米,两阻带峰的带宽随 π 相移个数的增多而减小,两阻带峰的峰值透射率随之增大。因此,引入多个 π 相移的 LPFG 可以根据实际滤波要求,通过改变引入 π 相移的个数来调整双峰间隔及带宽,尤其是引入奇数个 π 相移的 LPFG,由于其中心波长损耗始终保持为 0,因而具有良好的双峰带阻和中心波长带通的滤波性能。

间隔也随之增加。因此,可以通过改变薄膜参数对 PS-LPFG 的传输谱进行调整。图 9 同时显示,中心波长也随薄膜参数的增大而向短波长方向移动,这是由于薄膜折射率和厚度的增加使 PMTP 向短波长方向偏移,因而薄膜参数改变时,光栅周期取值也需要作相应的调整,PMTP 对应波长随薄膜参数变化以及光栅周期的相应调整规律如图 4 所示。

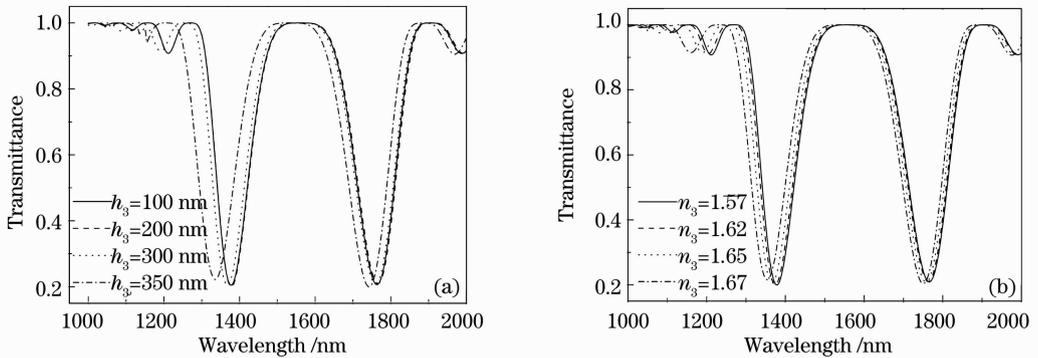


图 9 薄膜参数对 PS-LPFG 传输谱的影响。(a) 薄膜厚度 ($n_3 = 1.57$); (b) 薄膜折射率 ($h_3 = 200$ nm)

Fig. 9 Influence of film parameters on the transmission spectra of PS-LPFG. (a) Film thickness ($n_3 = 1.57$); (b) film refractive index ($h_3 = 200$ nm)

4.2 光栅参数对传输谱的影响

光栅长度 L 、光栅周期 Λ 以及纤芯折射率调制

σ 都将对 PS-LPFG 的传输谱产生影响。对工作于 PMTP 的 LPFG 而言,光栅周期取转折点对应的光

栅周期,即 $\Lambda = \Lambda_T$, 由光纤结构及薄膜参数决定。因此,这里只考虑光栅长度 L 和纤芯折射率调制 σ 对传输谱特性的影响。

不同长度 PS-LPFG 中点引入单个 π 相移时的传输谱如图 10(a)所示。两阻带峰的峰值透射率随光栅长度的增加而减小, L 约为 14 mm 时达到最小值,之后又随光栅长度的增大而增大,中心波长透射率 T_T 始终保持为 1,同时,双峰间隔随光栅长度的

增加而不断减小。由(6)式可知,在其他参数确定的情况下,光栅长度的增加将使未引入相移时的单个损耗峰带宽减小,从而影响在中心处引入单个 π 相移后的双峰间隔。由图 10(b)可知,纤芯折射率调制大小只影响两阻带峰的峰值透射率,对双峰位置的影响很小。因而在光纤结构和薄膜参数确定的情况下,可以通过改变光栅长度和纤芯折射率调制量来进一步优化 PS-LPFG 的滤波特性。

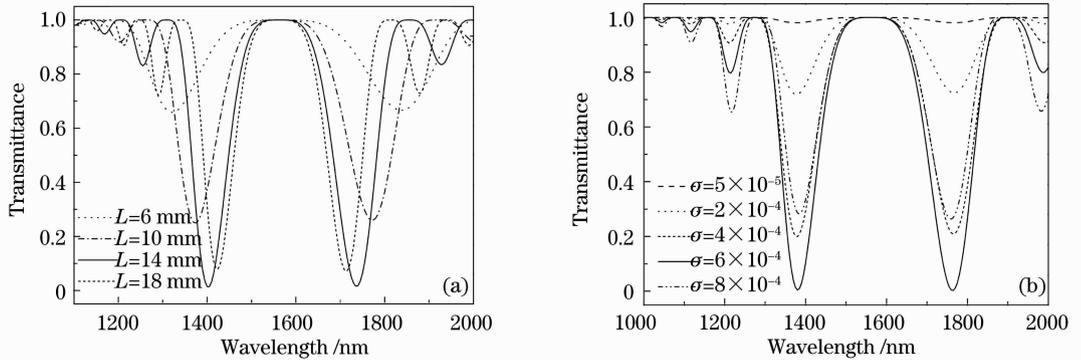


图 10 光栅参数对 PS-LPFG 传输谱的影响。(a) 光栅长度 L ; (b) 纤芯折射率调制 σ

Fig. 10 Influence of grating parameters on the transmission spectra of PS-LPFG. (a) Grating length L ; (b) modulation of core refractive index σ

5 结 论

利用传输矩阵法研究了镀膜相移 LPFG 工作于 PMTP 时的双峰带阻滤波特性。研究表明,选取合适的光栅周期使 LPFG 工作于 PMTP 时,传输谱特性表现为单个带宽达几百纳米的损耗峰,在此 LPFG 中点引入单个 π 相移时,中心波长两侧同时出现新的阻带峰,双峰间隔可达 388 nm 以上,且单个阻带峰带宽可达 97 nm。引入多个 π 相移时,双峰间隔随 π 相移个数的增加而增大,引入的 π 相移个数为奇数时,中心波长损耗保持为 0;引入的 π 相移个数为偶数时,中心波长损耗不为 0,并随相移个数的增加而减小。PMTP 随薄膜参数的变化而变化,薄膜厚度和折射率的增加都将使两阻带峰向短波长方向移动,同时双峰间隔也随之增大。光栅长度的增大在改变两阻带峰峰值透射率的同时使双峰间隔逐渐减小,而纤芯折射率调制量的变化只影响两阻带峰的峰值透射率。与一般的基于低次包层模耦合的 PS-LPFG 相比,该 PS-LPFG 具有双峰间隔大、单峰带宽宽等明显优点,且可以通过引入多个 π 相移、改变薄膜参数和光栅参数等对滤波特性进行调节和优化,这种大间隔双峰宽带光纤滤波器有望应用于光纤通信中的波分复用和光谱滤波等领域。

参 考 文 献

- 1 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): 58~64
- 2 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
- 3 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
- 4 Gu Zhengtian, Zhang Jiangtao. Metal-coated long-period fiber grating liquid sensor based on dual-peak resonance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0305003
顾铮先, 张江涛. 基于双峰谐振效应的镀金属长周期光纤光栅液体浓度传感器[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0305003
- 5 Liu Hongyue, Liang Dakai, Zeng Jie *et al.*. Long period fiber grating refractive index sensitivity-based reinforcing rebar corrosion sensor in concrete [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0806009
刘宏月, 梁大开, 曾 捷 等. 基于长周期光纤光栅折射率敏感特性的混凝土结构钢筋锈蚀监测[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0806009
- 6 J. R. Qian, H. F. Chen. Gain flattening fiber filters using phase-shifted long period gratings [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(11): 1132~1133
- 7 H. Ke, K. S. Chiang, J. H. Peng. Analysis of phase-shifted long-period fiber gratings [J]. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1998, **10**(11): 1596~1598
- 8 N. D. Rees, S. W. James, R. P. Tatam. Optical fiber long-period gratings with Langmuir-Blodgett thin-film overlays [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(9): 686~688

- 9 I. D. Villar, M. Achaerandio, I. R. Matias *et al.*. Deposition of overlays by electrostatic self-assembly in long-period fiber gratings[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(7): 720~722
- 10 Z. T. Gu, Y. P. Xu, K. Gao. Optical fiber long-period grating with sol-gel coating for gas sensor[J]. *Opt. Lett.*, **31**(16): 2405~2407
- 11 Gu Zhengtian, Jiang Xiuli, Zhao Xiaoyun. Filter characteristics of phase-shifted long period fiber grating with film coatings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 633~637
顾铮先, 蒋秀丽, 赵晓云. 镀膜相移长周期光纤光栅滤波特性[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 633~637
- 12 X. W. Shu, L. Zhang, I. Bennion. Sensitivity characteristics near the dispersion turning points of long-period fiber gratings in B/Ge codoped fiber[J]. *Opt. Lett.*, **26**(22): 1755~1757
- 13 S. Ramachandran, M. Yan, L. Crowsar *et al.*. Large bandwidth, highly efficient mode coupling using long-period gratings in dispersion tailored fibers[C]. OFC'01, 2001, MC2: 1~2
- 14 X. W. Shu, L. Zhang, I. Bennion. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(2): 255~266
- 15 T. Erdogan. Fiber grating spectra[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 16 C. Tsao. *Optical Fiber Waveguide Analysis*[M]. New York: Oxford University Press, 1992
- 17 X. W. Shu, X. M. Zhu, S. Jiang *et al.*. High sensitivity of dual resonant peaks of long-period fibre grating to surrounding refractive index changes [J]. *Electron. Lett.*, **35**(18): 1580~1581
- 18 A. Cusano, A. Iadicicco, P. Pilla *et al.*. Cladding mode reorganization in high-refractive-index-coated long-period grating: effects on the refractive-index sensitivity[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(19): 2536~2538

栏目编辑: 谢 婧