

## 镀膜长周期光纤光栅的单峰宽带滤波特性\*

陈海云<sup>1)3)</sup> 顾铮无<sup>2)†</sup> 杨颖<sup>2)</sup>

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, 金华 321004)

(2012年2月24日收到; 2012年4月24日收到修改稿)

镀膜长周期光纤光栅 (LPFG) 工作于相位匹配转折点时纤芯模与高次包层模的耦合产生单个宽带损耗峰, 其 3 dB 带宽取决于纤芯模和包层模之间的色散差、光栅长度以及中心波长. 研究表明, 薄膜折射率和厚度的变化将影响纤芯模与包层模之间的色散差, 从而影响损耗峰的 3 dB 带宽, 同时损耗峰中心波长亦随之移动. 薄膜折射率为 1.57, 厚度为 350 nm 时, 损耗峰带宽可达 302 nm. 减小光栅长度在保证中心波长损耗大于 6 dB 的前提下可使损耗峰 3 dB 带宽增大至 334 nm. 进一步研究表明, 在均匀 LPFG 中偏离光栅中点的适当位置引入单个  $\pi$  相移可以使带宽增大至 372 nm 以上.

**关键词:** 长周期光纤光栅, 相位匹配转折点, 3 dB 带宽, 相移长周期光纤光栅

**PACS:** 07.60.-j, 07.60.Vg, 42.79.Ci, 42.81.-i

## 1 引言

长周期光纤光栅 (LPFG) 能够将纤芯基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. LPFG 制作容易、插入损耗低、后向反射小、结构紧凑, 已经被广泛应用于通信<sup>[1,2]</sup>和传感<sup>[3,4]</sup>领域. 与 Bragg 光纤光栅相比, LPFG 传输谱中的衰减峰带宽大, 适合应用于带阻滤波<sup>[1]</sup>. 然而, 纤芯模与低次包层模耦合产生的损耗峰带宽有限, 通常在十几到几十纳米范围内. 超连续光谱技术的发展使光源光谱宽度超过 1000 nm<sup>[5]</sup>, 短波长可小于 400 nm, 长波长可达 2000 nm 以上, 且可以很好地耦合到光纤中, 这使具有更大带宽的光纤带阻滤波器的研究具有很好的应用前景.

Shu 等<sup>[6]</sup>研究发现, 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, PMC 包含一个转折点, 在转折点处 PMC 的斜率由正转向负. 当实际光栅周期等于转折点对应光栅周期值时, 纤芯模与包层模耦合只有一个损耗峰, 损耗峰 3 dB 带宽可达数百纳米<sup>[7,8]</sup>, 具有良好的宽带带阻滤波性能. 近年来, 镀膜 LPFG 的研究越来越受到关注<sup>[9-11]</sup>. 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场分布, 因此可以通过改变薄膜折射率和厚度来调整和优化 LPFG 的滤波特性. 本文基于耦合模理论, 分析了镀膜 LPFG 的 PMC 及其转折点特性, 研究了工作于相位匹配转折点 (PMTP) 的镀膜均匀 LPFG 的损耗峰与 3 dB 带宽特性, 探讨了薄膜折射率和厚度对纤芯模与包层模之间色散差的影响, 讨论了损耗峰 3 dB 带宽及其中心波长随薄膜参数和光栅长度的变化规律. 并进一步讨论了在工作于 PMTP 的均匀 LPFG 中偏离光栅中点的适当位置引入单个  $\pi$

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60777035)、教育部科学技术研究重点项目 (批准号: 208040)、上海市教育委员会科研项目 (批准号: 11ZZ131) 和上海市重点学科建设项目 (批准号: S30502) 资助的课题.

† E-mail: zhengtianqu@163.com

相移时的损耗峰带宽变化特性. 本文将 LPFG 工作于 PMTP 时的单峰宽带特性与镀膜 LPFG 的可调谐性相结合, 得到了带宽可调的宽带滤波效果, 远远大于低次包层模耦合产生的损耗峰带宽, 可以为镀膜 LPFG 单峰宽带带阻滤波器的设计提供参考.

## 2 理论分析

### 2.1 耦合模理论

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, 并满足  $n_3 > n_1 > n_2 > n_4$ . 本文的模拟计算中所用参数为  $a_1 = 4.15 \mu\text{m}$ ,  $a_2 = 62.5 \mu\text{m}$ ,  $h_3 = 200 \text{nm}$ ,  $n_1 = 1.4681$ ,  $n_2 = 1.4628$ ,  $n_3 = 1.57$ ,  $n_4 = 1$ .

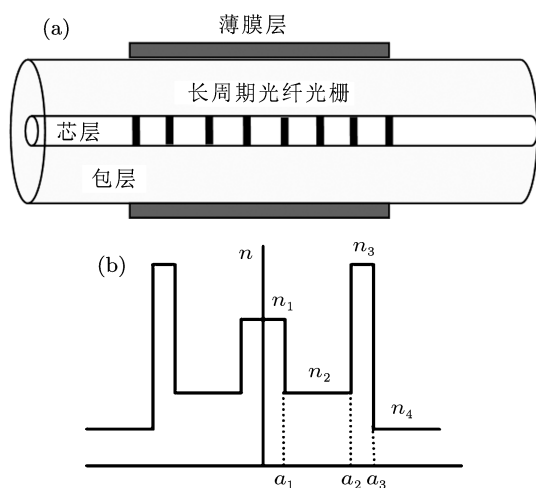


图 1 镀膜 LPFG 结构示意图 (a) 结构模型; (b) 折射率分布

根据耦合模理论, 设光栅输入端纤芯模振幅为 1, 包层模振幅为 0, 则光经过图 1 所示的光栅结构后, 纤芯模与  $m$  次包层模的振幅  $R$  和  $S$  可以通过如下的矩阵计算求得<sup>[12]</sup>:

$$\begin{bmatrix} R \\ S \end{bmatrix} = \mathbf{F} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \cos(sL) + i\frac{\delta}{s} \sin(sL) & i\frac{\kappa}{s} \sin(sL) \\ i\frac{\kappa}{s} \sin(sL) & \cos(sL) - i\frac{\delta}{s} \sin(sL) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

(2) 式为一段长度  $L$  的均匀光栅对应传输矩阵, 式中

$$\delta = \frac{1}{2} \left( \beta_{\text{co}} - \beta_{\text{cl}}^m - \frac{2\pi}{\Lambda} \right), \quad (3)$$

其中  $\beta_{\text{co}}$  和  $\beta_{\text{cl}}^m$  分别是纤芯模和  $m$  次包层模的传播常数, 且有关系式  $\beta_{\text{co}} = (2\pi/\lambda) n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ ,  $\beta_{\text{cl}}^m = (2\pi/\lambda) n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ ,  $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$  和  $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$  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<sup>[13]</sup>;  $\lambda$  为光波长,  $\Lambda$  为光栅周期,  $s = \sqrt{\delta^2 + \kappa^2}$ ,  $\kappa$  为纤芯模与  $m$  次包层模的互耦合常数:

$$\kappa = \frac{\omega \epsilon_0 n_1^2 \sigma(z)}{2} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{a_1} r dr \times (E_r^{\text{cl}} E_r^{\text{co}*} + E_\phi^{\text{cl}} E_\phi^{\text{co}*}), \quad (4)$$

式中  $\sigma(z)$  为纤芯折射率调制度,  $E_r, E_\phi$  分别为模式电场的径向和角向分量, 上标 cl, co 分别表示包层模和纤芯模, 多层圆柱光波导中的模式电场分量可由德拜势能法计算得到<sup>[13]</sup>. 光经过光栅后的透过率为  $T = R \times R^*$ .

### 2.2 相位匹配转折点

对于纤芯模与  $m$  次包层模的耦合, 相位匹配条件为

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

$\lambda_{\text{res},m}$  为纤芯模与  $m$  次包层模耦合的谐振波长. 图 2 所示为根据 (5) 式做出的纤芯模与各次包层模耦合 PMC. 由图 2(a) 可知, 低次包层模耦合的 PMC 中, 一条代表光栅周期的竖直线与一条 PMC 只有一个交点, 对应只有一个谐振波长. 图 2(b) 则显示, 高次包层模耦合 PMC 具有二次曲线特性, 竖直线 A 与  $\text{HE}_{1,10}$  模的 PMC 有两个交点, 出现“双峰谐振”现象<sup>[14]</sup>. 而竖直线 B 与 PMC 相切, 切点即为 PMTP, PMC 的斜率在该点由正转向负, 每一个 PMTP 对应有一个谐振波长 ( $\lambda_T$ ) 和一个光栅周期 ( $\Lambda_T$ ). 当光栅周期取转折点相应周期值时, 纤芯模与包层模耦合产生单个损耗峰, 其 3 dB 带宽可达数百 nm, 远远大于低次包层模耦合产生的损耗峰带宽.

对于镀膜 LPFG, 高折射率薄膜参数将影响包层模模场分布, 进而影响转折点的  $\lambda_T$  和  $\Lambda_T$ , 如图 3

所示. 由图 3 可知, 在一定范围内,  $\lambda_T$  随薄膜折射率和厚度的增加而减小, 而  $\Lambda_T$  随薄膜折射率和厚度的增加而增大. 值得注意的是,  $\lambda_T$  和  $\Lambda_T$  随薄膜折射率和厚度的进一步增加而出现了跳变, 这是由于薄膜折射和厚度的增加引起了包层模模式过渡和重组<sup>[15]</sup>, 这个跳变区域称为模式过渡区. 当薄膜参数取值处于模式过渡区时, 损耗峰波形的完整性将受到破坏, 因此 LPFG 用于滤波时应避免薄膜折射率和厚度取值处于模式过渡区.

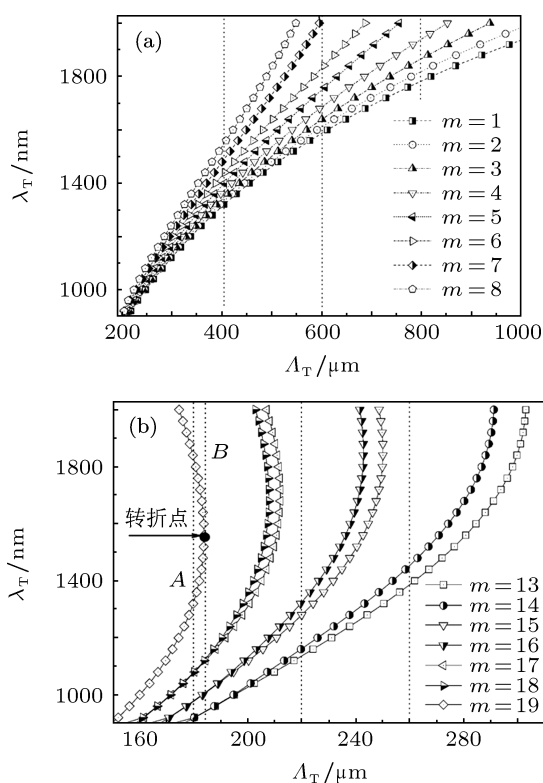


图 2 相位匹配曲线 (a) 低次包层模耦合; (b) 高次包层模耦合

### 2.3 损耗峰的 3 dB 带宽

LPFG 的纤芯模与包层模耦合产生损耗峰 3 dB 带宽可以表示为<sup>[8]</sup>

$$\Delta\lambda_{3\text{ dB}} = |\gamma| \frac{0.8\lambda_{\text{res}}^2}{L\Delta n_e}, \quad (6)$$

式中  $\Delta n_e$  为纤芯模与包层模有效折射率之差,  $L$  为光栅长度,  $\gamma$  定义为

$$\gamma = \frac{\frac{d\lambda_{\text{res}}}{d\Lambda}}{n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}}, \quad (7)$$

式中  $d\lambda_{\text{res}}/d\Lambda$  即为 PMC 的斜率. 由图 2(b) 可知, 离转折点越近  $|\gamma|$  越大, 损耗峰的 3 dB 带宽越大,

但当设计 LPFG 工作于 PMTP 时,  $|\gamma| \rightarrow \infty$ , 此时 (6) 式已不适用于计算损耗峰的带宽. LPFG 工作于 PMTP 时的损耗峰 3 dB 带宽<sup>[7,8]</sup>

$$\Delta\lambda_{3\text{ dB}} = \frac{1.26\lambda_{\text{res}}}{\sqrt{cL\Delta D}}, \quad (8)$$

式中  $c$  为真空中光速,  $L$  为光栅长度,  $\Delta D$  ( $\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ) 为纤芯模与包层模之间的色散差. 镀膜 LPFG 在光纤包层外镀上一层高折射率薄膜, 薄膜厚度与折射率的变化将影响光纤色散差  $\Delta D$ , 因此可以通过改变薄膜参数结合光栅长度来调整损耗峰的 3 dB 带宽.

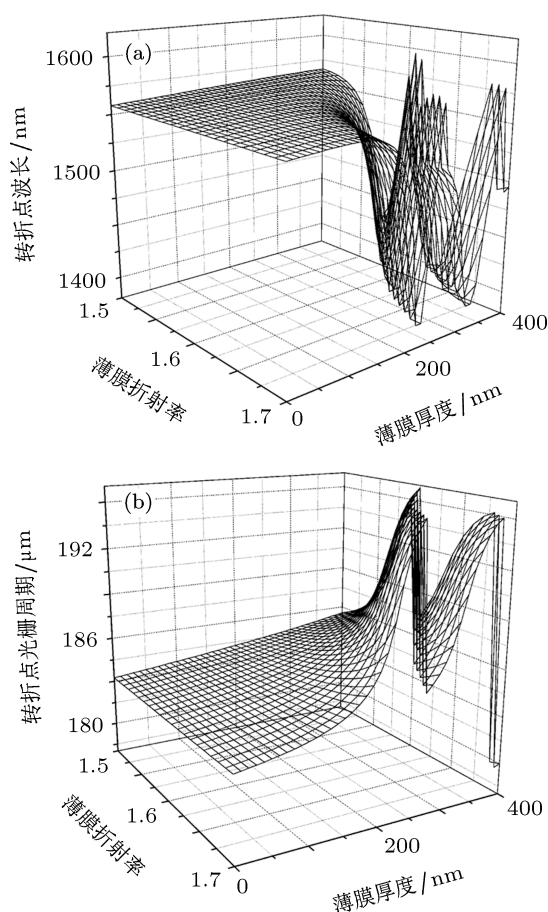


图 3 薄膜折射率与厚度对  $\lambda_T$  和  $\Lambda_T$  的影响 (a)  $\lambda_T$ ; (b)  $\Lambda_T$

## 3 薄膜参数与光栅长度对损耗峰 3 dB 带宽的影响

### 3.1 薄膜参数对带宽的影响

在光纤包层表面镀上高折射率薄膜时, 薄膜材料的折射率以及镀制厚度的变化都将影响包

层模模场的分布,进而影响包层模有效折射率;而纤芯的半径远远小于包层的半径,因此通常在处理时忽略薄膜层对纤芯模的影响.因此,纤芯模与包层模之间的色散差将随着薄膜参数而改变.图 4(a) 所示为薄膜厚度固定为 200 nm,薄膜折射率从 1.5 变化到 1.7 时的  $\Delta D$ . 由图 4 可知,  $\Delta D$  随薄膜折射率的增加而减小,  $\Delta D$  从  $n_3 = 1.57$  时的  $18.11 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$  减小到  $n_3 = 1.7$  时的  $17.81 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ . 与此相似,当薄膜折射率固定为 1.57 时,  $\Delta D$  随薄膜厚度的增加而减小,如图 4(b) 所示.

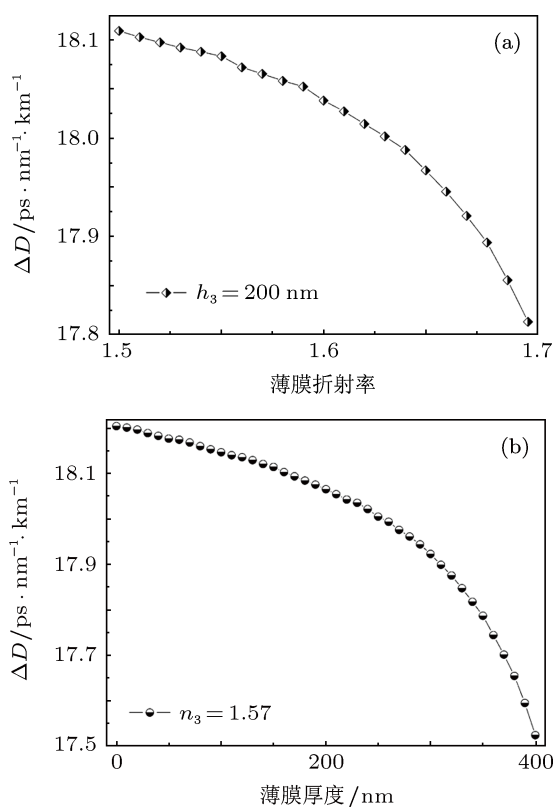


图 4 薄膜折射率与厚度对色散差  $\Delta D$  的影响 (a) 薄膜折射率; (b) 薄膜厚度

薄膜参数对 LPFG 传输谱的影响如图 5 所示. 可以发现, 损耗峰的中心波长随薄膜折射率和厚度的增加向短波长方向移动. 对  $n_3 = 1.57$ ,  $h_3$  由 0 增大到 350 nm 时, 由图 5(a) 可以发现, 损耗峰短波长一侧边沿的移动量大于长波长一侧, 因此损耗峰的带宽随之增加. 值得注意的是, 图 5(a) 中的薄膜参数取值在图 3 所示的模式过渡区之前, 损耗峰波形完整,  $h_3$  越接近模式过渡区, 损耗峰带宽增大越快. 图 5(b) 所示为  $h_3 = 200 \text{ nm}$  时不同薄膜折射率时的传输谱. 当  $n_3$  从 1.57 增大到 1.67 时, 带宽随  $n_3$

的增大而增大, 当  $n_3$  继续增大到 1.85 和 1.9 时, 薄膜参数取值超过了图 3 所示的模式过渡区, 包层模完成了一次模式过渡和重组<sup>[15]</sup>,  $n_3$  的增大不能使带宽持续增大, 但损耗峰中心波长继续向短波长方向移动. 表 1 给出了典型薄膜参数及相应转折点参数和损耗峰带宽. 数据表明, 改变薄膜参数可以同时调整损耗峰的中心波长及 3 dB 带宽.

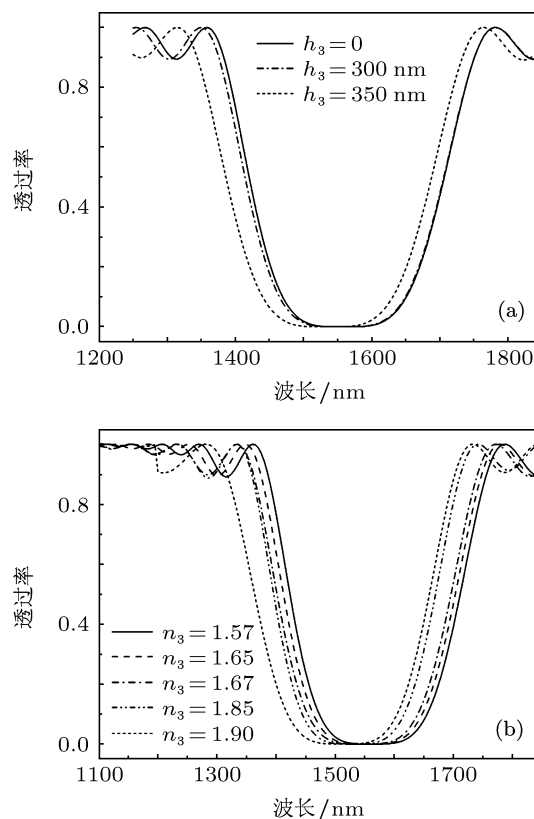


图 5 薄膜折射率与厚度对传输谱的影响 (a) 薄膜厚度 ( $n_3 = 1.57$ ); (b) 薄膜折射率 ( $h_3 = 200 \text{ nm}$ )

表 1 典型薄膜参数与相应转折点参数和带宽

序号	$h_3/\text{nm}$	$n_3$	$\lambda_T/\text{nm}$	$\Lambda_T/\text{nm}$	$\Delta\lambda_3/\text{dB}/\text{nm}$
1	0	1.57	1557.8	183.3	286
2	200	1.57	1562.2	184.7	288
3	350	1.57	1534.2	187.6	302
4	200	1.67	1545.1	186.1	298
5	200	1.90	1512.4	186.0	296

需要特别指出的是, 上述色散差与传输谱的分析所涉及的薄膜参数取值均避开了图 3 所示的模式过渡区. 当薄膜参数取值处于图 3 所示的模式过渡区时, 薄膜参数的变化将导致纤芯模与包层模之间的色散差发生跳变而影响损耗峰波形的完整性. 图 6 所示为  $n_3 = 1.67$ , 取不同薄膜

厚度时  $\Delta D$  的变化曲线及相应传输谱. 如图 6(a) 所示, 对于  $n_3 = 1.67$ , 薄膜厚度  $h_3 < 250$  nm 时,  $\Delta D$  随薄膜厚度的增大而减小; 而当  $250$  nm  $< h_3 < 400$  nm 时, 薄膜参数取值处于模式过渡区,  $\Delta D$  随薄膜厚度的增大出现跳变. 图 6(b) 相应显示, 薄膜厚度为  $100$  和  $200$  nm 时, 损耗峰波形完整, 带宽变化有规律; 而当薄膜厚度分别为  $300$  和  $350$  nm 时, 由于薄膜参数取值处于图 6(a) 所示的跳变区域, 损耗峰波形的完整性受到了破坏, 从而影响了损耗峰的带宽及其滤波特性.

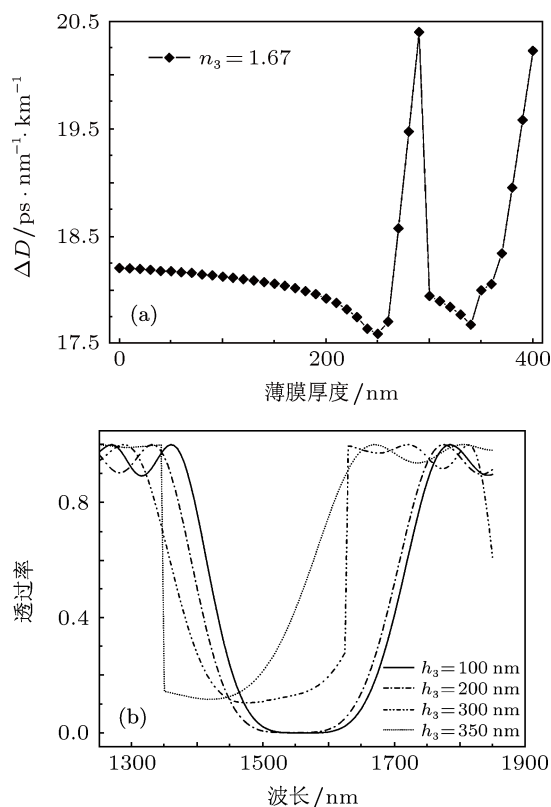


图 6 处于模式过渡区域的薄膜厚度对色散差  $\Delta D$  和传输谱的影响 (a) 色散差; (b) 传输谱

### 3.2 光栅长度对带宽的影响

根据 (8) 式可知, 在光纤结构参数与薄膜参数取定的情况下, 光栅长度的改变亦将影响损耗峰的带宽. 根据耦合模理论, 在中心波长处  $\delta = 0$ , 中心波长透过率  $T_T = \cos^2(\kappa L)$ , 当满足  $\kappa L = \pi/2$  时  $T_T = 0$ . 考察损耗峰的 3 dB 带宽时, 为保证滤波效果, 中心波长损耗要求达 6 dB 以上 [7], 即  $T_T < 0.25$ , 因此, 光栅长度  $L$  的考察范围可以取为  $\pi/3 < \kappa L \leq \pi/2$ . 若取薄膜参数  $n_3 = 1.57$ ,  $h_3 = 350$  nm, 计算可

得  $\kappa = 144.1 \text{ m}^{-1}$ , 则  $7.3 < L \leq 10.9$  mm,  $L$  取 8.2, 9.1, 10.0 和 10.9 mm 时的传输谱如图 7 所示. 由图 7 可知, 随着光栅长度  $L$  的增加, 中心波长损耗不断增大 ( $T_T$  减小), 损耗峰 3 dB 带宽随之减小, 图中所示四个损耗峰的 3 dB 带宽分别为 334, 327, 316 和 302 nm.

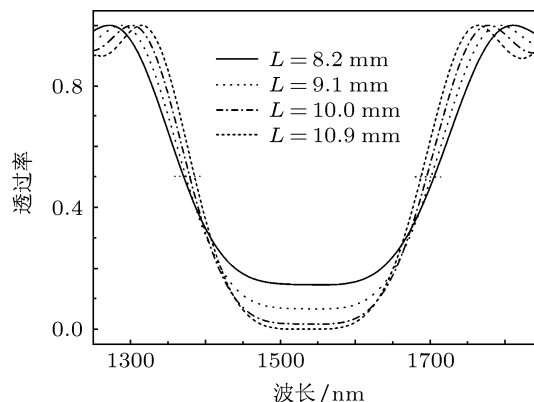


图 7 光栅长度  $L$  对传输谱的影响

### 4 非对称 PS-LPFG 的单峰宽带滤波特性

LPFG 中点引入  $\pi$  相移时, 在中心波长两侧将出现两个新的阻带峰 [16], 当引入相移位置偏离光栅中点时, 两阻带峰将逐渐向中心靠拢, 引入  $\pi$  相移的位置合适时, 传输谱表现为单个损耗峰. 引入因子  $\alpha$  表示  $\pi$  相移在光栅中的位置:

$$\alpha = \frac{L_1}{L_1 + L_2}, \quad (9)$$

式中  $L_1$  和  $L_2$  分别表示引入  $\pi$  相移后两侧两段光栅的长度,  $L_1 + L_2 = L$ . 相移 LPFG 的传输谱可以用传输矩阵法处理 [13]:

$$\begin{bmatrix} R \\ S \end{bmatrix} = F_1 \cdot F_p \cdot F_2 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中  $F_1$  和  $F_2$  可以通过将  $L_1$  和  $L_2$  代入 (2) 式得到,  $F_p$  为  $\pi$  相移对应传输矩阵:

$$F_p = \begin{bmatrix} \exp\left(\frac{i\pi}{2}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(\frac{-i\pi}{2}\right) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

不同位置引入  $\pi$  相移时 LPFG 的传输谱如图 8 所示, 其中  $n_3 = 1.57$ ,  $h_3 = 350$  nm,  $L = 10.9$  mm.

$\alpha = 0$  时即为均匀 LPFG, 损耗中心波长透过率  $T_T$  为 0. 随着  $\alpha$  的增大,  $T_T$  逐渐增大, 同时损耗峰的带宽增大; 当  $\alpha = 0.2$  时, 损耗峰的底部开始出现明显凹陷, 波形开始由单峰向双峰演化;  $\alpha$  增大至 0.5 时, 两侧出现两个新的阻带峰, 且中心波长透过率为 1, 即损耗为 0.  $\alpha$  取值应注意两点: 首先,  $\alpha$  取值应使损耗峰保持为单峰波形, 即损耗峰底部不出现凹陷; 其次, 为保证带阻滤波效果,  $\alpha$  取值应使中心波长透过率  $T_T < 0.25$ . 透射峰 3 dB 带宽  $\Delta\lambda_{3\text{dB}}$  和中心波长透过率  $T_T$  随位置因子  $\alpha$  的变化关系如图 9 所示. 由图 9 可知,  $\alpha = 0$  时中心波长透过率为 0 和 3 dB, 带宽为 302 nm,  $\Delta\lambda_{3\text{dB}}$  随  $\alpha$  的增大而近似线性的

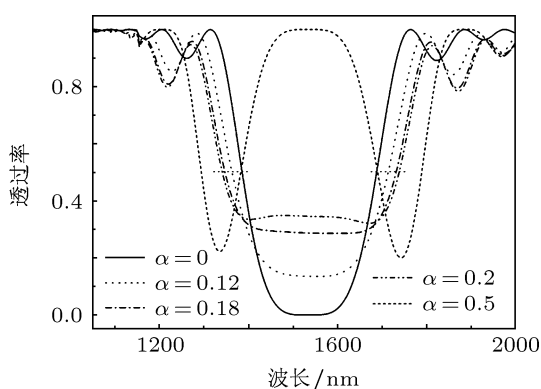


图 8 LPFG 中不同位置引入  $\pi$  相移时的传输谱

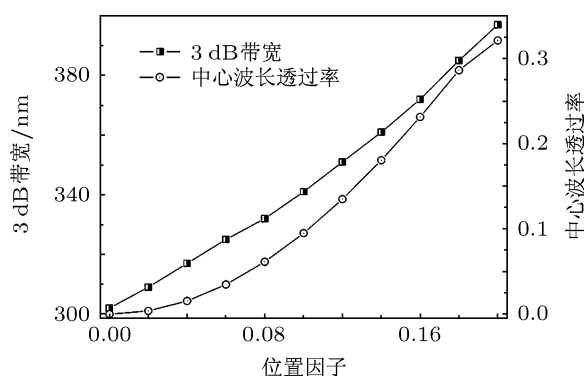


图 9 损耗峰 3 dB 带宽和中心波长透过率与位置因子的关系

增大; 中心波长透过率  $T_T$  也随之增大, 当  $\alpha$  增大至 0.16 时,  $\Delta\lambda_{3\text{dB}}$  增大至 372 nm,  $T_T$  为 0.2313, 相比于未引入  $\pi$  相移时的带宽 302 nm,  $\Delta\lambda_{3\text{dB}}$  增大了 70 nm. 而当  $\alpha = 0.18$  时, 虽然  $\Delta\lambda_{3\text{dB}}$  进一步增大至 385 nm, 但此时的  $T_T$  为 0.2861, 已大于 0.25, 滤波效果将受到影响. 因此, 在工作于 PMTP 长度为  $L$  的均匀 LPFG 适当位置引入单个  $\pi$  相移可以在保证中心波长损耗大于 6 dB 的前提下有效增大单峰 3 dB 带宽.

## 5 结论

基于耦合模理论研究了镀膜 LPFG 工作于 PMTP 时的单峰宽带滤波特性. 镀膜 LPFG 工作于 PMTP 时产生一 3 dB 带宽达数百 nm 的损耗峰, 其带宽取决于纤芯模和包层模之间的色散差、光栅长度以及谐振波长. 研究表明, 在一定薄膜参数下, 损耗峰的 3 dB 带宽可达 302 nm 以上, 远远大于基于低次包层模耦合的 LPFG 产生的损耗峰带宽. 薄膜折射率和厚度变化影响纤芯模与包层模之间色散差, 从而改变损耗峰 3 dB 带宽, 同时调整损耗峰中心波长. 薄膜参数确定时, 减小光栅长度可以在保证中心波长耗损大于 6 dB 的前提下增大损耗峰 3 dB 带宽至 334 nm 以上. 在此基础上, 在均匀 LPFG 偏离中点适当位置引入单个  $\pi$  相移可以使单峰 3 dB 带宽进一步增大至 372 nm 以上. 与一般的基于低次包层模耦合的 LPFG 相比, 工作于 PMTP 的镀膜 LPFG 具有更好的单峰宽带带阻滤波特性, 且可以通过改变薄膜参数、光栅长度以及在适当位置引入单个  $\pi$  相移等手段对损耗峰的 3 dB 带宽进行调整和优化, 可以为实际光纤光栅宽带滤波器的设计提供理论参考.

[1] Vengsarkar A M, Lemaire P J, Judkins J B, Bhatia V, Erdogan T, Sipe J E 1996 *J. Lightwave Technol.* **14** 58  
 [2] Zhu T, Rao Y J, Mo Q J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 249 (in Chinese)  
 [朱涛, 饶云江, 莫秋菊 2006 物理学报 **55** 249]  
 [3] Bhatia V, Vengsarkar A M 1996 *Opt. Lett.* **21** 692  
 [4] Patrick H J, Kersey A D, Bucholtz F 1998 *J. Lightwave Technol.* **16** 1606

[5] Ranka J K, Windeler R S, Stentz A J 2000 *Opt. Lett.* **25** 25  
 [6] Shu X W, Zhang L, Bennion I 2001 *Opt. Lett.* **26** 1755  
 [7] Ramachandran S, Yan M, Crowsar L, Carra A, Wisk P, Huff R 2001 *Proc. OFC'01 MC2*  
 [8] Shu X W, Zhang L, Bennion I 2002 *J. Lightwave Technol.* **20** 255  
 [9] Rees N D, James S W, Tatam R P 2002 *Opt. Lett.* **27** 686  
 [10] Villar I D, Achaerandio M, Matias I R, Arregui F J 2005 *Opt. Lett.*

30 720

- [11] Gu Z T, Xu Y P, Gao K 2006 *Opt. Lett.* **31** 2405  
 [12] Erdogan T 1997 *J. Lightwave Technol.* **15** 1277  
 [13] Tsao C 1992 *Optical Fiber Waveguide Analysis* (New York: Oxford University Press) p307  
 [14] Shu X W, Zhu X M, Jiang S, Shi W, Huang D X 1999 *Electron.*

*Lett.* **35** 1580

- [15] Cusano A, Iadicicco A, Pilla P, Contessa L, Campopiano S, Cutolo A 2005 *Opt. Lett.* **30** 2536  
 [16] Gu Z T, Jiang X L, Zhao X Y 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 633 (in Chinese) [顾铮先, 蒋秀丽, 赵晓云 2010 光学学报 **30** 633]

## Broadband single-peak filtering characteristics of coated long-period fiber gratings\*

Chen Hai-Yun<sup>1)3)</sup> Gu Zheng-Tian<sup>2)†</sup> Yang Ying<sup>2)</sup>

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 321004, China)

(Received 24 February 2012; revised manuscript received 24 April 2012)

### Abstract

A coated long-period fiber grating (LPPG) operating at the phase-matching turning point couples the fundamental core mode to a higher-order cladding mode, producing a single broad-band whose 3dB-bandwidth is dependent on the difference in dispersion between the core mode and a cladding mode, grating length and central wavelength. The variations of film refractive index and thickness influence the difference in dispersion between the core mode and cladding mode and thus, the bandwidth of loss peak. The central wavelength of loss peak also varies with the changes of film parameters. When the film refractive index is 1.57 and the film thickness is 350 nm, the bandwidth of loss peak reaches 302 nm. The bandwidth can be further improved to 334 nm by reducing the grating length based on the fact that the loss at the central wavelength is guaranteed to be more than 6 dB. A further investigation shows that introducing a  $\pi$  phase shift into a uniform LPPG at a proper position that is away from the grating center can increase the bandwidth to 372 nm and more.

**Keywords:** long-period fiber grating, phase-matching turning point, 3 dB bandwidth, phase-shifted long-period fiber grating

**PACS:** 07.60.-j, 07.60.Vg, 42.79.Ci, 42.81.-i

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60777035), the Foundation for Key Program of Ministry of Education, China (Grant No. 20840), the Research Project of Education Committee of Shanghai, China (Grant No. 11ZZ131), and the Shanghai Leading Academic Discipline Project, China (Grant No. S30502).

† E-mail: zhengtiangu@163.com