

# 啾啾长周期光纤光栅的滤波特性研究

杨 颖<sup>1,2</sup>

(1. 临沂师范学院, 山东 临沂 276005; 2. 上海理工大学光电功能薄膜实验室, 上海 200093)

**摘要:**基于光纤光栅耦合模理论,采用传输矩阵法对啾啾长周期光纤光栅的啾啾系数和光栅参量(光栅长度、光栅周期和折变量)对其滤波特性的影响进行分析。当啾啾系数处于 $-0.000008 \sim -0.0004 \text{ nm/cm}$ 范围内时,可用于宽带带阻滤波器。当啾啾系数处于 $-0.05 \sim -1 \text{ nm/cm}$ 范围内时,可用于多通道窄带滤波器。为啾啾光纤光栅滤波器的优化设计提供理论依据。

**关键词:**光纤通信技术;滤波特性;传输矩阵;啾啾;长周期光纤光栅

**中图分类号:**TN253      **文献标识码:**A

## Study on filtering characteristics of chirped long-period fiber grating

YANG Ying<sup>1,2</sup>

(1. School of Electronic Information, Linyi Normal University, Linyi 276005, China;

2. Laboratory of Photo-electric Functional Films, College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** The spectral characteristics of chirped long-period fiber grating are analyzed with the transfer matrix method based on the coupling theory. The influences of various chirp coefficients and structural features on the filtering characteristics are studied numerically. When the chirp coefficient varies between  $-0.000008 \text{ nm/cm}$  and  $0.004 \text{ nm/cm}$ , it can be used for broadband rejection filters. While the chirp coefficient varies between  $-0.05 \text{ nm/cm}$  and  $-1 \text{ nm/cm}$ , it can be used for narrow-band rejection filters. The results provide theoretical basis for optimal design of Chirped fiber grating filters.

**Key words:** optical; fiber communication technology; filter characteristics; transfer matrix; chirped; long-period fiber grating

### 1 引言

啾啾长周期光纤光栅(LPFG)通过纤芯导模与同向传输的包层模的耦合,使满足相位匹配条件的导模耦合成为光纤中的辐射模而逃逸损失掉从而呈现出滤波功能<sup>[1]</sup>。啾啾长周期光纤光栅具有较宽的带宽,反射谱中可容纳较多的透射峰,适于多波长滤波,这些优点使其在滤波应用方面备受关注<sup>[2-3]</sup>。本文基于耦合模理论,采用传输矩阵法对非均匀的啾啾长周期光纤光栅的滤波特性进行分析,可为优化光纤光栅滤波器的设计提供理论依据。

### 2 啾啾长周期光纤光栅的传输特性

啾啾光纤光栅是一类重要的非均匀光纤光栅,

其纤芯折射率沿轴向的分布可表示为:

$$n(z) = n_1 + \Delta n \left\{ 1 + \nu \cos \left[ \frac{2\pi z}{\Lambda(z)} + \phi(z) \right] \right\} \quad (1)$$

式中, $n_1$ 为曝光前纤芯的折射率; $\Delta n$ 为曝光后纤芯折射率的平均变化量; $\nu$ 为折射率变化的条纹可见度,又称折射率调制的对比度; $L$ 为光栅长度; $\Lambda(z)$ 为折射率变化的周期分布函数,对于线性啾啾光纤光栅,光栅周期不再是常数,而是关于轴向坐标 $z$ 的函数,其表达式如下: $\Lambda(z) = \Lambda_0 + \Delta\Lambda(z)$ , $\Lambda_0$ 为

作者简介:杨 颖(1970-),女,副教授,主要从事光纤光栅传感,光电子技术等研究。E-mail:lysyyl68@126.com

收稿日期:2010-09-29;修订日期:2010-11-13

光栅中点处的周期,  $\Delta\Lambda(z)$  为周期的变化。  $\Delta\Lambda(z)$  满足如下关系:

$$\frac{\Delta\Lambda(z)}{\Lambda_0} = \frac{\Delta K(z)}{K_0} \quad (2)$$

式中,  $K_0 = \frac{2\pi}{\Lambda_0}$ ,  $\Delta K(z) = \frac{d\phi(z)}{dz}$ ,  $\phi(z)$  为啁啾光栅相

对于坐标原点的相移, 可表示为:  $\phi(z) = C\left(\frac{z}{L}\right)^2$ ,  $C$  为啁啾系数, 式中  $0 \leq z \leq L$ 。

基于耦合模理论的传输矩阵法是一种快速数值模拟非均匀光纤光栅光学特性的方法<sup>[4]</sup>。在用传输矩阵法分析非均匀啁啾光纤光栅时, 可将其均匀地分成  $M$  段, 每一段看作是均匀的, 满足的分段条件是  $\Delta z \gg \Lambda$ ,  $\Delta z$  为每小段的光栅长度, 即所分的区域数,  $M \ll L/\Lambda$ 。用传输矩阵来表征每一段的传输特性<sup>[5]</sup>, 即:

$$\begin{bmatrix} A_i^{co} \\ A_i^{cl} \end{bmatrix} = F_i \begin{bmatrix} A_{i-1}^{co} \\ A_{i-1}^{cl} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $A_i^{co}, A_i^{cl}$  分别为第  $i$  段的出射端纤芯模式和一阶  $\nu$  次包层模式的振幅;  $A_{i-1}^{co}, A_{i-1}^{cl}$  分别为第  $i$  段的入射端纤芯模式和一阶  $\nu$  次包层模式的振幅, 第  $i$  段的传输矩阵  $F_i$  可表示如下:

$$F_i = \begin{bmatrix} \cos(\gamma\Delta z) + i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma} \sin(\gamma\Delta z) & i \frac{\kappa}{\gamma} \sin(\gamma\Delta z) \\ i \frac{\kappa}{\gamma} \sin(\gamma\Delta z) & \cos(\gamma\Delta z) - i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma} \sin(\gamma\Delta z) \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,  $\Delta z$  为每小段的光栅长度;  $\kappa$  为纤芯模与一阶  $\nu$  次包层模之间的互耦合常数;  $\hat{\sigma}$  为总自耦合系数, 定义为:

$$\hat{\sigma} = \delta + \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz} \quad (5)$$

其中,  $\delta$  是一个与光栅  $z$  方向无关的量, 定义为  $\delta = \frac{1}{2}(\beta^{co} - \beta^{cl}) - \frac{\pi}{\Lambda}$ ,  $\beta^{co}$  和  $\beta^{cl}$  分别为纤芯模与一阶  $\nu$  次包层模的传输常数;  $\sigma_{11}$  和  $\sigma_{22}$  分别为纤芯基模与包层模的直流自耦合系数。由于啁啾光栅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, 在此处  $\sigma_{22} = 0$ ;  $\gamma = \sqrt{\hat{\sigma}^2 + \kappa^2}$ 。

对于啁啾光纤光栅,  $\kappa, \hat{\sigma}$  和  $\frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz}$  都不再是常

数, 所以利用传输矩阵法将啁啾光栅分段后, 需把每一段看作均匀光栅, 分段求解, 得到每一段随  $z$  变化的  $\kappa(z), \hat{\sigma}(z)$  和  $\frac{1}{2} \frac{d\phi(z)}{dz}$ 。将每一段的传输矩阵的乘积与入射光矩阵  $\begin{bmatrix} A_0^{co} \\ A_0^{cl} \end{bmatrix}$  相乘就可以得到整个光栅区的传输特性:

$$\begin{bmatrix} A_M^{co} \\ A_M^{cl} \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} A_0^{co} \\ A_0^{cl} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,  $F = F_M \cdot F_{M-1} \cdots F_i \cdots F_1$ ,  $A_0^{co}$  和  $A_0^{cl}$  分别为入射端纤芯模式和一阶  $\nu$  次包层模式的振幅;  $A_M^{co} = A_L^{co}$ ,  $A_M^{cl} = A_L^{cl}$  分别为出射端纤芯模式和一阶  $\nu$  次包层模式的振幅。

将光栅的输入端的纤芯模能量归一化为 1, 而包层模的能量为 0, 即长周期光纤光栅的边界条件为  $A_0^{co} = 1$  和  $A_0^{cl} = 0$ 。

光栅最终的光强透过率为:

$$T = A_L^{co} \times A_L^{co*} \quad (7)$$

### 3 模拟结果分析

计算所采用的光纤参数为: 纤芯半径  $a_1 = 2.625 \mu\text{m}$ , 包层半径  $a_2 = 62.4 \mu\text{m}$ , 外镀膜厚度  $h = 300 \mu\text{m}$ , 纤芯折射率  $n_1 = 1.458$ , 包层折射率  $n_2 = 1.45$ , 薄膜折射率  $n_3 = 1.57$ , 外界环境折射率  $n_4 = 1$ 。纤芯平均折射率的改变量为 0.0004, 光栅长度  $L = 40 \text{ cm}$ , 光栅中心周期  $500 \mu\text{m}$ 。

#### 3.1 啁啾 LPFG 构成宽带带阻滤波器

##### 3.1.1 啁啾系数对啁啾 LPFG 宽带滤波器的影响

啁啾系数分别为  $-0.0015 \text{ nm/cm}$ ,  $-0.0025 \text{ nm/cm}$  和  $-0.0035 \text{ nm/cm}$  时光纤光栅的传输谱如图 1 所示; 从模拟的传输谱的结果可以看出, 啁啾系数对其滤波特性有较明显的影响, 啁啾系数在  $-0.0008 \sim -0.004 \text{ nm/cm}$  范围内时, 啁啾系数越大传输谱的

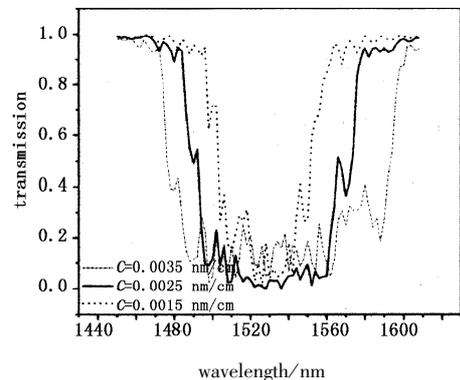


图1 啁啾系数不同时光纤光栅传输谱

带宽也越宽。从模拟的传输谱还可以看出由啁啾光纤光栅构成的宽带带阻滤波器其传输谱有较大的波动性,可以结合切趾技术,选择适当的切趾函数和切趾比例对其滤波效果进行优化<sup>[6]</sup>。

### 3.1.2 光栅参量对啁啾 LPFG 宽带滤波器的影响

#### (1) 光栅长度对啁啾 LPFG 宽带滤波器的影响

图2为光纤光栅长度分别为20 cm, 30 cm, 40 cm时的传输谱,可以看出光栅长度对其传输谱的带宽也有较大的影响,随着光栅长度的增大,传输谱带宽增宽,分别为88.5 nm, 172.6 nm和230.2 nm,可见滤波波长范围变大。在设计一定带宽要求的滤波器时,可以结合前面所讨论的啁啾系数对传输谱带宽的影响规律,选取合适的光栅长度。

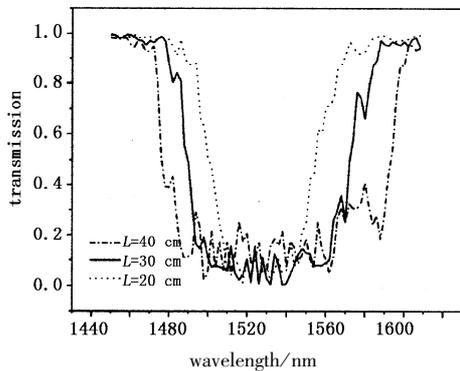


图2 光栅长度不同时光纤光栅传输谱

#### (2) 光栅周期对啁啾 LPFG 宽带滤波器的影响

图3为光纤光栅波长在1440~1620 nm范围内周期分别为480 μm, 500 μm, 520 μm时的传输谱。可以发现光栅周期对滤波器的带宽范围影响较大,随着光栅周期的增大,传输谱向长波长方向平移,滤波波长值逐渐变大,但带宽基本不变。在实际设计制作宽带滤波器时,要根据所要求的滤波波长范围结合光纤特性来选择合适的栅周期。

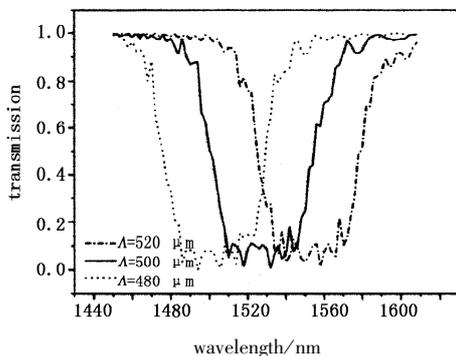


图3 光栅周期不同时光纤光栅传输谱

#### (3) 光栅折变量对啁啾 LPFG 宽带滤波器的影响

图4画出了光纤光栅折变量分别为0.0002,

0.0003, 0.0004时的传输谱。随着光栅折变量的增大,传输谱向长波长方向平移,带宽无明显变化。

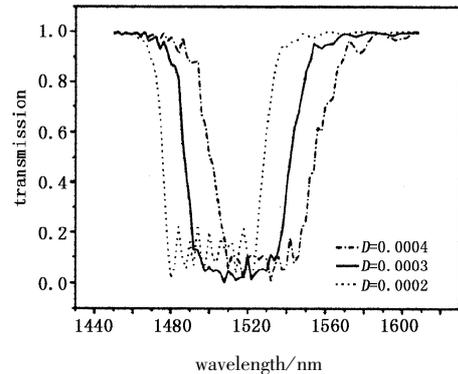


图4 光栅折变量不同时光纤光栅传输谱

### 3.2 啁啾 LPFG 构成多通道窄带滤波器

#### 3.2.1 啁啾系数对啁啾 LPFG 窄带滤波器的影响

图5为啁啾系数分别为-0.125 nm/cm, -0.2 nm/cm以及-0.5 nm/cm时的传输谱。可以看到传输谱线出现了多个分立的损耗峰,并且随着啁啾系数的增大,分立损耗峰的间隔在短波长方向逐渐减小,分立损耗峰数目也减少,且每个损耗峰带宽极窄,这使得啁啾光纤光栅在多通道滤波方面颇具优势,可用于波分复用系统中对多路光信号同时进行滤波,此时啁啾光纤光栅可用作多通道窄带滤波器。

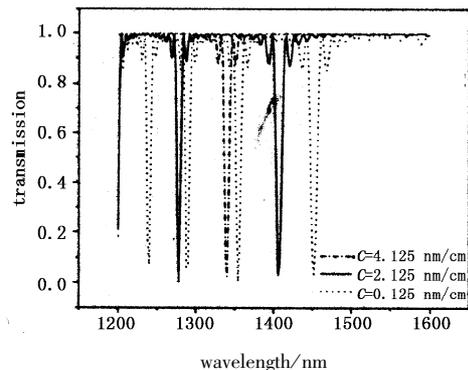


图5 啁啾系数不同时光纤光栅传输谱

#### 3.2.2 光栅参量对啁啾 LPFG 窄带滤波器的影响

##### (1) 光栅长度对啁啾 LPFG 窄带滤波器的影响

图6画出了光栅长度分别为30 cm, 40 cm和50 cm时的传输谱。随着光栅长度的增大,在同一带宽范围内的分立损耗峰减少,在图6所示1200~1600 nm波段内,分别有5个,4个,3个损耗峰。对每一光栅长度,分立损耗峰间距在短波长方向上变窄。可见,光纤光栅的长度起着对输出谱线数目(滤波器通道数)的限制作用,光纤光栅的长度越小,其所能容纳的滤波通道数越多。

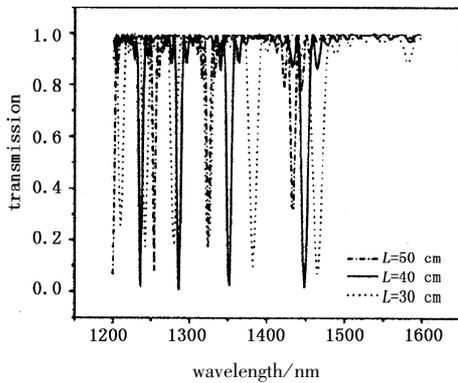


图6 光栅长度不同时光纤光栅传输谱

## (2) 光栅周期对啾啾 LPFG 窄带滤波器的影响

图7为光纤光栅周期分别为 $480\ \mu\text{m}$ ,  $500\ \mu\text{m}$ ,  $520\ \mu\text{m}$ 时的传输谱。随着光栅周期的增大,传输谱整体向右平移,分立损耗峰峰值没有明显变化。对每一光栅周期,分立损耗峰间距在短波长方向变窄。

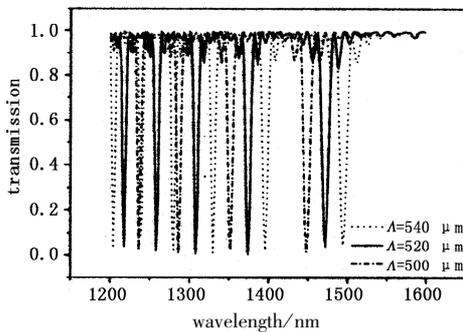


图7 光栅周期不同时光纤光栅传输谱

## (3) 光栅折变量对啾啾 LPFG 窄带滤波器的影响

图8为光纤光栅折变量分别为 $0.0003$ ,  $0.0004$ ,  $0.0005$ 时的传输谱。随着光栅折变量的增

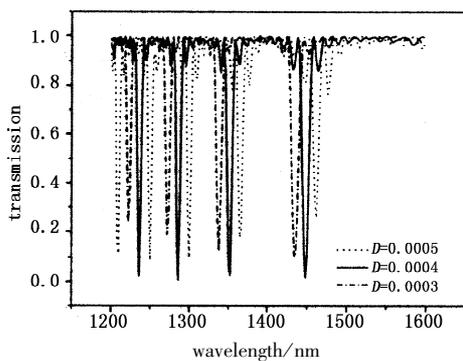


图8 光栅折变量不同时光纤光栅传输谱

大,传输谱整体向长波长方向平移,损耗峰个数不变,损耗峰峰值略有变化;对每一分立损耗峰,损耗峰深度也明显增大。对每一光栅折变量,分立损耗峰间距在短波长方向变窄。

## 4 结论

用传输矩阵法对啾啾长周期光纤光栅的传输特性进行了理论分析和数值模拟计算。研究表明:啾啾系数对其滤波特性的影响较大,当啾啾系数处于 $-0.000008 \sim -0.0004\ \text{nm/cm}$ 范围内时,传输谱带宽较宽,可以用来做宽带带阻滤波器。当啾啾系数处于 $-0.05 \sim -1\ \text{nm/cm}$ 范围内时,传输谱具有分立的谱线,可用作多通道窄带滤波器。调节光栅长度和啾啾系数可以控制滤波器的工作带宽;调整光栅周期,折变量可以调节滤波器的滤波范围。该结论对滤波器器件的优化设计具有指导意义。

## 参考文献:

- [1] Bennion I. UV-written in-fiber Bragg gratings[J]. Optical and Quantum Electronics, 1996, 28: 93 - 135.
- [2] Ashish M V, Paul J L, Justin B J. Long-period fiber gratings as band-rejection filters[J]. Lightwave Tech, 1996, 14(1): 58 - 65.
- [3] Mini Das K. Tarajan wavelength division multiplexing isolation filter using concatenated chirped long period gratings[J]. opt. comm, 2001, 190: 159 - 183.
- [4] Li Zhiqian, Cao Ping, Liu Zhengjun, et al. Dual demodulation multiplexing technique based on tilted grating[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(6): 635 - 638. (in Chinese) 李志全, 曹平, 刘正君, 等. 基于倾斜光栅双解调复用系统的研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(6): 635 - 638.
- [5] Florence Yuen Ming Chan, Kin Seng Chiang, Member, IEEE, Fellow, OSA. Transfer-matrix method for the analysis of two parallel dissimilar nonuniform long-period fiber gratings[J]. Lightwave Tech, 2006, 24(2): 1008 - 1018.
- [6] Somnath Bandyopadhyay, Palas Biswas, Atasi Pal, et al. Empirical relations for design of linear edge filters using apodized linearly chirped fiber Bragg grating[J]. Lightwave Tech, 2008, 26(24): 3853 - 3857.