

# 啾啾长周期光纤光栅的超宽带滤波特性及其切趾优化

杨 颖<sup>1,2,3</sup> 顾铮先<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093  
<sup>2</sup> 上海理工大学理学院光电功能薄膜传感器实验室, 上海 200093  
<sup>3</sup> 临沂大学汽车学院, 山东 临沂 276005

**摘要** 基于光纤光栅的模式耦合理论,采用传输矩阵法对啾啾长周期光纤光栅(LPFG)的超宽带滤波特性进行了分析。研究表明当啾啾 LPFG 的纤芯模同时与同向传输的多个阶次的包层模发生耦合,且与多个不同阶次包层模对应的谐振峰交叠时,其传输谱带宽可扩展到 500 nm 以上,可用做超宽带带阻滤波器。传输谱带宽随模式序数、啾啾系数、光栅长度、周期和折射率调制量的增加单调递增,但随光纤包层半径的增大单调递减。采用高斯折射率切趾技术抑制了传输谱旁瓣,为设计超宽带滤波器提供了新的方法。

**关键词** 光纤光学;啾啾长周期光纤光栅;模式耦合理论;传输矩阵法;超宽带滤波器

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1006006

## Ultra-Wideband Filtering Characteristics of Chirped Long-Period Fiber Gratings with Apodization Optimization

Yang Ying<sup>1,2,3</sup> Gu Zhengtian<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Optical-Electrical and Computer Engineering,  
University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China  
<sup>2</sup> Laboratory of Photoelectric Functional Film Sensors, College of Science,  
University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China  
<sup>3</sup> School of Automobile Engineering, Linyi University, Linyi, Shandong 276005, China

**Abstract** Based on the coupled-mode theory and transfer matrix method, the ultra-wideband filtering characteristics of chirped long-period fiber gratings (LPFG) are analyzed. When the resonant peaks corresponding to different order cladding modes overlap with each other, the transmission spectral bandwidth of chirped LPFG can expand to 500 nm, so this chirped LPFG can be used as ultra-wideband band-stop filters. With the increasing of mode order, chirp coefficient, grating length, grating period and refractive index modulation, the transmission spectral bandwidth increases monotonically, but the transmission spectral bandwidth decreases with the increasing of the fiber cladding radius. The refractive index apodization is proposed to inhibit the side-lobes of the transmission spectra. It provides a new method for the design of wideband filters.

**Key words** fiber optics; chirped long-period fiber gratings; the coupled-mode theory; the transfer matrix method; ultra-wideband filters

**OCIS codes** 060.2310; 190.4360; 120.2240; 350.2450

收稿日期: 2012-03-01; 收到修改稿日期: 2012-05-21

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项目(11ZZ131)和上海市重点学科建设项目(S30502)资助课题。

作者简介: 杨 颖(1970—),女,博士研究生,副教授,主要从事光纤光栅传感和光电子技术等方面的研究。

E-mail: lysyyy168@126.com

导师简介: 顾铮先(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

1987年, Ouellette<sup>[1]</sup>提出啁啾光纤光栅能对长距离光通信系统进行色散补偿, 大幅提高光信号在光纤中的传输效率。随后, 啁啾光纤光栅因其体积小、结构简单、成本低廉、插入损耗低和兼容性好等优点, 在色散补偿<sup>[2]</sup>、脉冲压缩<sup>[3]</sup>、波分复用<sup>[4]</sup>、传感<sup>[5~7]</sup>, 特别是滤波<sup>[8]</sup>等领域逐渐得到广泛应用。近年来, 由于光通信网络的发展对高性能宽带(带宽大于100 nm)滤波器提出迫切需求, 啁啾长周期光纤光栅(LPFG)引起了人们的普遍关注<sup>[9~11]</sup>。

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芯区传输的导模能量耦合到包层中, 从而造成与波长相关的传输损耗, 表现出良好的带阻滤波特性。1997年, Erdogan<sup>[12]</sup>建立了啁啾LPFG的理论基础; 2002年, 武志刚等<sup>[13]</sup>对交叉耦合常数和非线性啁啾对LPFG透射谱的影响进行了分析; 之后, 刘玉敏等<sup>[14]</sup>提出将啁啾LPFG级联用作波分复用隔离滤波器。最近, Zhang等<sup>[15]</sup>采用线性锥形包层结构的啁啾LPFG并结合加大折射率调制深度来扩展滤波器的带宽, 所设计的滤波器的带宽可由0.9 nm扩大到12.8 nm。Liu等<sup>[16]</sup>又进一步提出通过控制包层膜折射率和厚度来调整均匀和非均匀LPFG宽带滤波器的带宽, 带宽也只能达到几十纳米。上述文献报道的啁啾LPFG滤波器的带宽较小, 一个重要原因就是分析啁啾LPFG的传输特性时, 只分析了纤芯模与某一个特定模式序数的包层模的耦合, 这样所得到的透射谱只能体现一个很小的波长范围内光纤光栅的滤波特性, 而且对不同模式序数的包层模对应的透射谱可能发生的交叠现象上述文献中都未提及。因纤芯模同时会和多个不同模式序数的包层模发生耦合, 所以在实际设计、制作光纤光栅滤波器时, 必须分析纤芯模同时与多个包层模耦合时所呈现的滤波特性。目前报道的光纤光栅滤波器的最大带宽接近200 nm, 是由Kim等<sup>[17]</sup>将两个完全相同的均匀LPFG交叉扭曲后利用高阶模的耦合得到的。

本文基于模式耦合理论, 用传输矩阵法对啁啾LPFG的超宽带(带宽大于200 nm)带阻滤波特性进行了分析。发现在适当的光栅参数下, 啁啾LPFG的透射谱带宽可达500 nm以上; 并对包层模式序数、啁啾系数等光栅参量对啁啾LPFG超宽带滤波特性的影响进行了数值模拟。调整这些结构参量可对滤波器的整体特征、滤波器工作带宽和中心滤波波长等特性进行控制, 为设计透射带宽大、损耗低的高性能超宽带带阻滤波器提供了较大的灵活性, 使啁啾LPFG超宽带滤波器在超宽带无线通信系统、电光滤波器、宽带光纤放大器、模式转化器和偏光器等领域具有重要的应用价值和广阔的市场前景。

## 2 啁啾 LPFG 传输谱的分析方法

啁啾光纤光栅制作时将光敏光纤置于光强空间变化的紫外光中曝光, 引起了纤芯折射率的改变, 其折射率沿轴向的分布可表示为<sup>[18]</sup>

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

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,  $\Lambda(z)$  为折射率变化的周期分布函数,  $\Lambda(z) = \Lambda_0 + \Delta\Lambda(z)$ ,  $\Lambda_0$  为光栅中点处的周期,  $\Delta\Lambda(z)$  为周期的变化, 它满足

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

式中  $K_0 = \frac{2\pi}{\Lambda_0}$ ,  $\Delta K(z) = \frac{d\phi(z)}{dz}$ ,  $\phi(z)$  为啁啾LPFG相对于坐标原点的相移, 可表示为

$$\phi(z) = C \left( \frac{z}{L} \right)^2, \quad (3)$$

式中  $C$  为啁啾系数,  $L$  为光栅长度,  $0 \leq z \leq L$ 。啁啾LPFG的传输谱可用传输矩阵法进行分析<sup>[19]</sup>, 将光栅均匀地分成  $M$  段, 每一段看作是均匀的, 如图1所示, 满足的分段条件是  $\Delta z \gg \Lambda_0$ ,  $\Delta z$  为每小段的光栅长度, 所分的区域数  $M \ll L/\Lambda_0$ 。

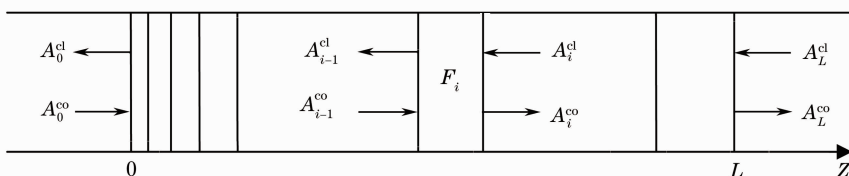


图1 传输矩阵法分析啁啾LPFG传输谱示意图

Fig. 1 Schematic diagram of transfer matrix method for analyzing chirped LPFG transmission spectra

用传输矩阵来表征每一段的传输特性,即

$$\begin{bmatrix} A_i^{\text{co}} \\ A_i^{\text{cl}} \end{bmatrix} = \mathbf{F}_i \begin{bmatrix} A_{i-1}^{\text{co}} \\ A_{i-1}^{\text{cl}} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中  $A_i^{\text{co}}$  和  $A_i^{\text{cl}}$  分别为第  $i$  段出射端纤芯模式和一阶

$\nu$  次包层模式的振幅,  $A_{i-1}^{\text{co}}$  和  $A_{i-1}^{\text{cl}}$  分别为第  $i$  段入射端纤芯模式和一阶  $\nu$  次包层模式的振幅,  $\mathbf{F}_i$  为第  $i$  段的传输矩阵, 可表示为

$$\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} \cos(\gamma\Delta z) + i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma} \sin(\gamma\Delta z) & i \frac{\kappa}{\gamma} \sin(\gamma\Delta z) \\ i \frac{\kappa}{\gamma} \sin(\gamma\Delta z) & \cos(\gamma\Delta z) - i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma} \sin(\gamma\Delta z) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中  $\Delta z$  为每一小段光栅的长度,  $\kappa$  为纤芯模与一阶  $\nu$  次包层模的互耦合常数<sup>[20]</sup>,  $\hat{\sigma}$  为总自耦合系数, 定义为

$$\hat{\sigma} = \delta + \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz}, \quad (6)$$

式中  $\delta = \frac{1}{2}(\beta^{\text{co}} - \beta_{\nu}^{\text{cl}}) - \frac{\pi}{\Lambda}$ .  $\sigma_{11}$  和  $\sigma_{22}$  分别为纤芯模和包层模的直流自耦合系数<sup>[20]</sup>.

将每一段光栅传输矩阵的乘积与入射光矩阵

$\begin{bmatrix} A_0^{\text{co}} \\ A_0^{\text{cl}} \end{bmatrix}$  相乘, 即可得整个光栅区的传输特性:

$$\begin{bmatrix} A_M^{\text{co}} \\ A_M^{\text{cl}} \end{bmatrix} = \mathbf{F} \begin{bmatrix} A_0^{\text{co}} \\ A_0^{\text{cl}} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中  $\mathbf{F} = \mathbf{F}_M \mathbf{F}_{M-1} \cdots \mathbf{F}_i \cdots \mathbf{F}_1$ ,  $A_M^{\text{co}}$  和  $A_M^{\text{cl}}$  分别为入射端纤芯模式和一阶  $\nu$  次包层模式的振幅,  $A_M^{\text{co}} = A_L^{\text{co}}$ ,  $A_M^{\text{cl}} = A_L^{\text{cl}}$  分别为出射端纤芯模式和一阶  $\nu$  次包层模式的振幅。

利用 LPFG 的边界条件:  $A_0^{\text{co}} = 1$  和  $A_0^{\text{cl}} = 0$ , 可得啁啾 LPFG 的透射率为

$$T = \left| \frac{A_L^{\text{co}}}{A_0^{\text{co}}} \right|^2 = A_L^{\text{co}} \times A_L^{\text{co}*}. \quad (8)$$

### 3 仿真与结果分析

如无特别说明, 仿真模拟所采用的光纤参数: 纤芯半径  $a_1 = 2.625 \mu\text{m}$ , 包层半径  $a_2 = 62.4 \mu\text{m}$ , 纤芯折射率  $n_1 = 1.458$ , 包层折射率  $n_2 = 1.45$ .

#### 3.1 不同序数包层模谐振峰交叠情况对啁啾 LPFG 滤波特性的影响

##### 3.1.1 谐振峰未发生交叠

在啁啾系数  $c = -0.0125 \text{ nm/cm}$ , 光栅周期  $\Lambda = 500 \mu\text{m}$ , 光栅长度  $L = 5 \text{ cm}$ , 纤芯平均折射率的改变量  $\sigma = 0.0004$  的情况下, 图 2 给出了纤芯模与模式序数  $\nu$  分别为 1、3、5、7 的四个低阶包层模耦合的光纤光栅谐振峰的分布图。可以看出, 四个包层模式对应的谐振峰是分立的, 随包层模序数的增大,

谐振峰对应的谐振波长变大, 谐振峰带宽也变大, 分别为 35、37、46、51 nm。此时四个谐振峰未出现交叠, 彼此间几乎互不干扰。该情形下如果选定多个包层模式, 啁啾光栅可同时实现多个波段范围内的滤波。

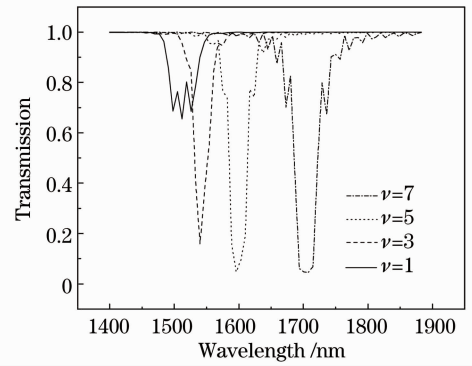


图 2 不同模序包层模谐振峰的分离

Fig. 2 Separation of resonant peaks for different cladding modes

##### 3.1.2 谐振峰发生交叠

增大光纤光栅长度, 各谐振峰带宽将变大。图 3 为光栅长度为 15 cm 时, 纤芯模分别与模式序数  $\nu$  为 1、3、5、7 的四个包层模耦合形成的谐振峰,

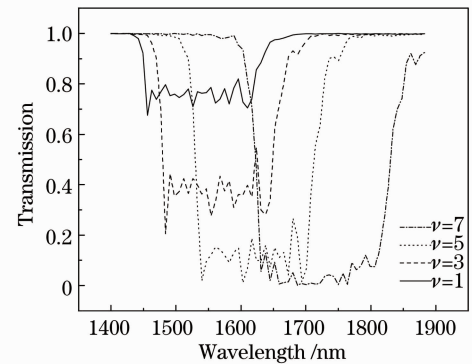


图 3 不同模序包层模谐振峰的交叠

Fig. 3 Overlap of resonant peaks for different cladding modes

谐振峰带宽分别为 133、151、162、175 nm。显然,四个不同序数包层模对应的谐振峰在 1610~1650 nm 范围内出现了交叠,所以文献[13~17]在分析啁啾 LPFG 的滤波特性时,只考虑纤芯模与某一阶次包层模的耦合是不妥的,必须要充分考虑可能发生的多个包层模式对应的谐振峰的交叠,才能正确分析啁啾 LPFG 的滤波特性。

图 4 为光栅长度为 15cm 时纤芯模与多个不同低阶(文中  $\nu \leq 9$ )包层模耦合的传输谱。随着与纤芯模耦合的包层模数目的增加,传输谱带宽明显变大。

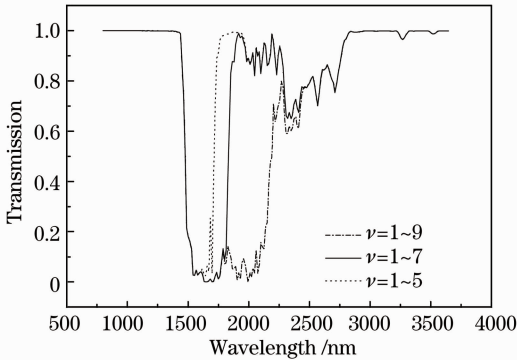


图 4 纤芯模与多个包层模耦合时的传输谱

Fig. 4 Transmission spectra for core mode coupling with multiple cladding modes

由图 3 可以看出,在所选光栅参数下,模式序数  $\nu=1$  时谐振波长最小值为 1463 nm,当有多个包层模式对应的透射谱叠加时,该结构光栅的截止波长在 1.50  $\mu\text{m}$  附近,如图 4 所示。此时,光纤的数值孔径为  $\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} = 0.1526$ ,该值符合常规单模光纤的数值孔径取值小于 0.18 的要求,故数值模拟所选用的光栅参数同时兼顾了光纤接收光的能力和模式色散的影响。

### 3.2 光栅参量对啁啾 LPFG 超宽带滤波特性的影响

在包层模式序数一定的情况下,啁啾 LPFG 传输谱的分布与啁啾系数、光栅长度、光栅周期等结构参量密切相关,这些参量的变化将对其超宽带滤波特性产生影响。

#### 3.2.1 光栅长度

光栅长度对不同序数包层模的谐振峰宽度影响较大,在用传输矩阵法求解啁啾 LPFG 的传输谱时,将光栅均匀地分成了若干段,在光栅周期和折射率调制不变的情况下,光栅长度越长,相邻啁啾单元的谐振波长差会相应加大,多个啁啾单元叠加的结果会导致透射谱带宽增大。图 5 给出了光栅长度分别为 15、18、20 cm 时啁啾 LPFG 的传输谱,显然随

着光栅长度的增大,传输谱带宽变大。图 6 反映了传输谱带宽随光栅长度变化的规律,光栅长度从 12 cm 增加到 22 cm 时,滤波器带宽由 660 nm 单调递增至 873 nm。该带宽范围的滤波器可用于宽带光纤放大器、超宽带无线通信系统和偏光器等领域。

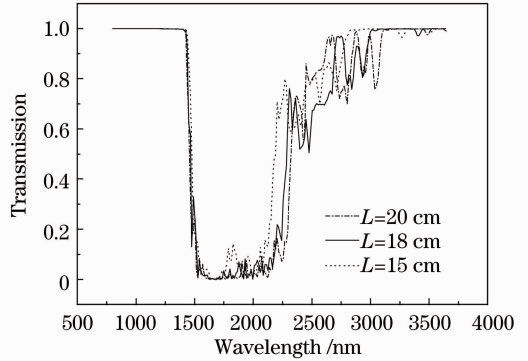


图 5 光栅长度不同时光纤光栅传输谱

Fig. 5 Transmission spectra of chirped LPFG for different grating lengths

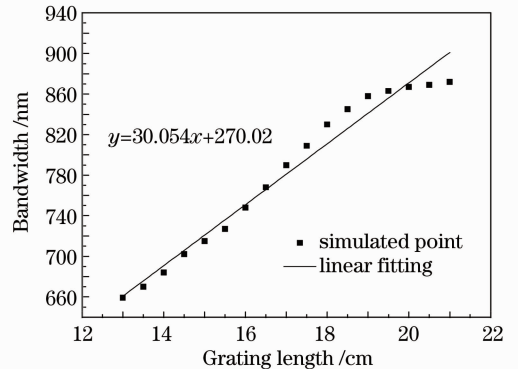


图 6 传输谱带宽与光栅长度的关系图

Fig. 6 Plot of transmission spectral bandwidth versus grating length

#### 3.2.2 啁啾系数

由于光纤光栅中引入了啁啾,  $\Lambda(z)$  随  $z$  线性变化,使不同波长的光谱分量在光栅的不同位置处满足相位匹配条件( $\delta = 0$ )而发生耦合,纤芯模的能量耦合到包层模中。对于给定的波长,当所引入的啁啾量增大时,光栅的有效耦合长度将变小,使满足匹配条件产生耦合的波长区域得到拓展,所以随着啁啾系数的增大,光栅的传输谱线将被展宽。图 7 为啁啾系数分别为  $-0.0125, -0.0145, -0.0165$  nm/cm 时光纤光栅的传输谱(取  $\nu=1 \sim 9$ )。可以看出,随着啁啾系数的增大,传输谱带宽逐渐变宽。图 8 给出了传输谱带宽随啁啾系数变化的关系曲线,当啁啾系数在  $-0.01 \sim -0.02$  nm/cm 范围内增大时,传输谱带宽由 310 nm 逐渐增加到 930 nm。

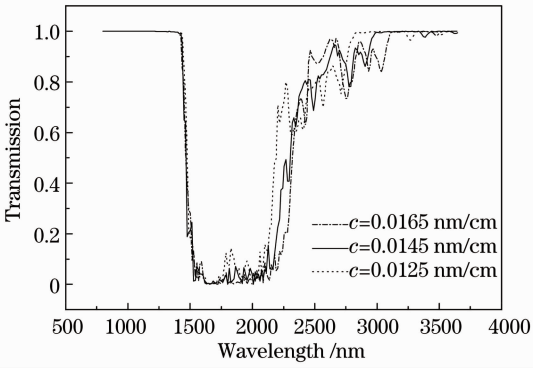


图7 啁啾系数不同时光纤光栅传输谱

Fig. 7 Transmission spectra of chirped LPFG for different chirp coefficients

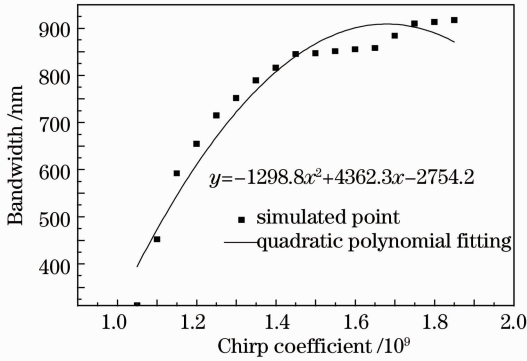


图8 传输谱带宽与啁啾系数的关系图

Fig. 8 Plot of transmission spectral bandwidth versus chirp coefficients

### 3.2.3 光栅周期

图9给出了传输谱带宽随周期变化的关系曲线,随着光栅周期的增大,传输谱带宽变大,光栅周期由420 nm均匀增加到510 nm,传输谱带宽由476 nm单调递增至733 nm。该现象可由

$$\lambda = \frac{\lambda_D}{1 - \frac{\Delta}{2\pi}\sigma_{11}} \quad (9)$$

解释<sup>[20]</sup>,式中 $\lambda$ 为传输谱中心谐振波长, $\lambda_D$ 为LPFG的设计波长,是无折射率调制即 $\phi(z) = 0$ 时的谐振波长, $\lambda_D = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}})\Lambda$ , $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$ 分别为纤芯模和包层模的有效折射率。 $\sigma_{11}$ 为纤芯模的自耦合系数, $\sigma_{11} \approx \frac{2\pi}{\lambda}\Delta n$ <sup>[19]</sup>, $\Delta n$ 为曝光后纤芯折射率的平均变化量。将 $\lambda_D$ 和 $\sigma_{11}$ 代入(9)式可得

$$\lambda = (\Delta n + n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}})\Lambda, \quad (10)$$

在其他参量不变的情况下,谐振波长 $\lambda$ 只与周期 $\Lambda$ 有关,周期变大时,谐振波长变大,即谐振波长将向长波长方向偏移。又因LPFG的传输谱带宽 $\Delta\lambda$ 可表示为<sup>[20]</sup>

$$\Delta\lambda = \frac{2\Delta\lambda_D}{L} \sqrt{1 - \left(\frac{\kappa L}{\pi}\right)^2}, \quad (11)$$

式中 $\kappa$ 、 $L$ 均与 $\Lambda$ 无关,将 $\lambda_D = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}})\Lambda$ 代入后,可以看出, $\Lambda$ 越大,传输谱带宽也越大。可知调整光栅周期可对滤波器的工作波长范围和带宽进行调整。

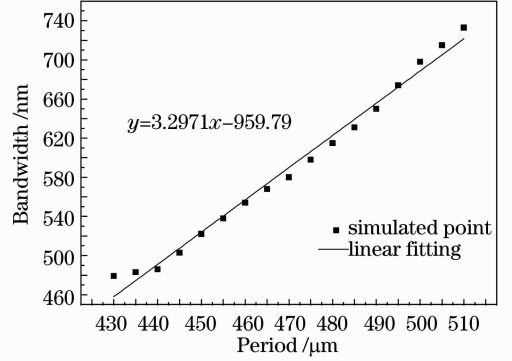


图9 传输谱带宽与光栅周期的关系图

Fig. 9 Plot of transmission spectral bandwidth versus grating period

### 3.2.4 光栅折变量

制作光纤光栅时,通过紫外光曝光将入射光的相干场图样写入纤芯,在纤芯内产生了沿纤芯轴向的折射率的周期性变化,这种变化反映了光栅周期、折射率调制深度等参量的变化,而这些参量又决定了光纤光栅的谐振波长、传输谱带宽等特性。图10给出了传输谱带宽随光栅折变量变化的规律,光栅折变量由0.00015递增至0.00055时,传输谱带宽由464 nm近似线性递增至786 nm。将 $\sigma_{11} \approx \frac{2\pi}{\lambda}\Delta n$ ,代入(9)式并作变换后可得

$$\lambda = \left(1 + \frac{\Delta n}{\Delta n_{\text{eff}}}\right)\lambda_D, \quad (12)$$

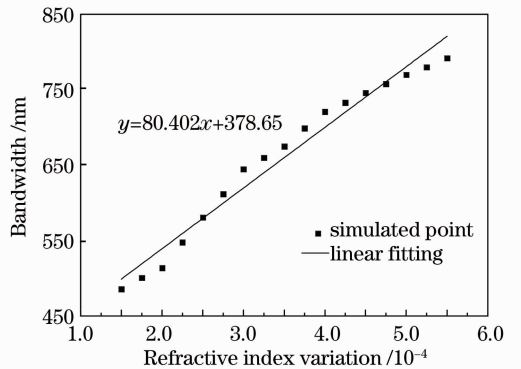


图10 传输谱带宽与光栅折变量的关系图

Fig. 10 Plot of transmission spectral bandwidth versus refractive index modulation

式中  $\frac{\Delta n}{\Delta n_{\text{eff}}}\lambda_D$  即为波长偏移量,所以光栅平均折变量

$\Delta n$  越大,波长偏移量越大,传输谱将向长波长方向平移,且带宽略有增加。另外,随着调制深度的增加,光栅纤芯折变量增大,纤芯模和包层模的耦合深度加大,峰值损耗减小。

### 3.2.5 包层半径

文献[21]指出,包层模的能量主要分布在纤芯和包层中,包层的厚度直接影响包层模在光纤中的稳定传输和能量分布。图 11 显示了光纤包层半径由  $62 \mu\text{m}$  增大到  $71 \mu\text{m}$  时,传输谱带宽从  $714 \text{ nm}$  单调递减至  $426 \text{ nm}$ 。这是因为随包层半径的增加,光纤波导结构的导波作用减弱,导致包层模式发散,减小了纤芯模与包层模横向的交叠积分,耦合作用降低,耦合系数变小,传输谱带宽随之减小。可见调节包层半径也是一种控制滤波器带宽的有效途径。

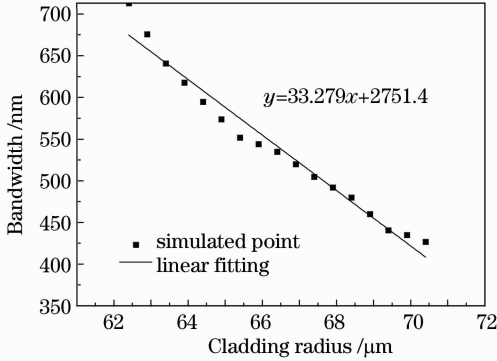


图 11 传输谱带宽与包层半径的关系图

Fig. 11 Plot of transmission spectral bandwidth versus cladding radius

### 3.3 色散对啁啾 LPFG 超宽带滤波器性能的影响

波长不同的光通过啁啾 LPFG 时会产生色散现象。对 LPFG,当满足相位匹配条件  $\lambda = \Lambda(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{iv,eff}}^{\text{cl}})$  时,包层模将与纤芯模耦合,式中  $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$  为纤芯模的有效折射率,  $n_{\text{iv,eff}}^{\text{cl}}$  为一阶  $\nu$  次包层模的有效折射率。对于周期不均匀的啁啾 LPFG,不同波长的光将在不同的位置被耦合到包层模。所以把具有一定波谱宽度的光源发出的光射入光纤后,不同波长的光传输路径不完全相同,到达终点的时间也不相同,从而会出现脉冲展宽现象,即产生波导色散。假设波长为  $\lambda$  的光在光纤中的 A 处被耦合到包层,经过  $dz$  的距离传播到 B 处,而波长为  $\lambda + d\lambda$  的光则传播到 B 处时才被耦合到包层,在  $dz$  的距离中,波长为  $\lambda$  的光在包层中传播,而波长为  $\lambda + d\lambda$  的光在芯层传播,由于纤芯与包层的折射率不同,导致波长为  $\lambda$  的光与波长为  $\lambda + d\lambda$  的光有不同的时间延迟,其时

延差

$$dt = dz \times (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{iv,eff}}^{\text{cl}}) / c, \quad (13)$$

式中  $c$  为光速,由此所引起的色散可表示为

$$D_g = \frac{dt}{d\lambda} = \frac{dz \times (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{iv,eff}}^{\text{cl}}) / c}{d\lambda} = \frac{(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{iv,eff}}^{\text{cl}})}{c \times \frac{d\lambda}{dz}} = \frac{(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{iv,eff}}^{\text{cl}})}{c \times c_0}, \quad (14)$$

式中  $c_0 = d\lambda/dz$  为啁啾系数,表示啁啾光纤光栅单位长度中耦合波长的变化量。

图 12 为  $\sigma = 0.0004, c_0 = -2 \times 10^{-9} \text{ nm/cm}, L = 16 \text{ cm}, \Lambda = 520 \mu\text{m}$ ,包层模式序数  $\nu = 5$  时,啁啾 LPFG 的时间延迟曲线。可以看出,啁啾 LPFG 的时延量很小,仅几皮秒。图 13 为啁啾 LPFG 的色散曲线,可以看出啁啾光栅的色散量也很小,因色散引起的波长偏移量只有  $10^{-6} \text{ nm}$ 。因此,在讨论啁啾 LPFG 用于带宽为几百纳米的超宽带滤波器时,其波导色散可以忽略。

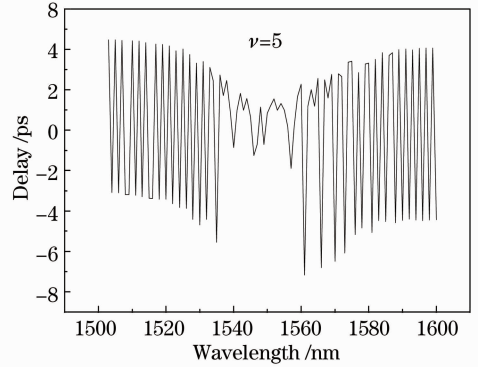


图 12 啁啾 LPFG 的时延曲线

Fig. 12 Delay curve of chirped LPFG

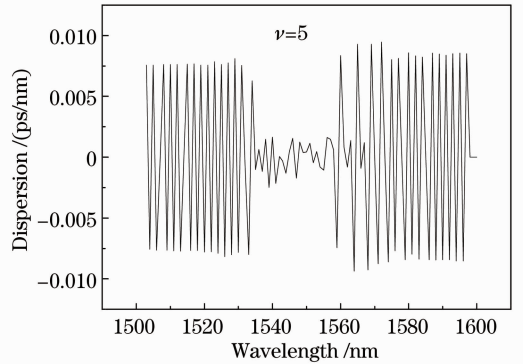


图 13 啁啾 LPFG 的色散曲线

Fig. 13 Dispersion curve of chirped LPFG

### 3.4 啁啾 LPFG 超宽带滤波器的性能优化

当啁啾 LPFG 用作超宽带滤波器时,虽然纤芯模与多个不同阶次包层模耦合形成的谐振峰的交叠

使其传输谱带宽大幅度展宽,但其传输谱线抖动明显,滤波器的输出稳定性受到影响。为了减小抖动,优化其滤波性能,可采用折射率切趾技术<sup>[22,23]</sup>。图 14 为未切趾和高斯切趾、升余弦切趾时啾啾 LPFG 的传输谱。可以看出,高斯函数抑制抖动的能力较强,切趾效果比较明显,调制后的传输谱只有很小的旁瓣,但切趾后带宽会明显变小;而升余弦函数切趾则对啾啾 LPFG 的光谱抖动抑制不够明显。

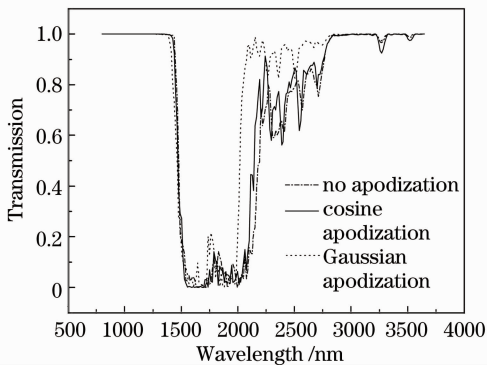


图 14 不同切趾函数时啾啾 LPFG 的传输谱  
Fig. 14 Transmission spectra of chirp LPFG for different apodization functions

啾啾 LPFG 的传输谱带宽与光栅各参数在理论上有着复杂的关系,在实际设计、制作超宽带滤波器时,可先选定光纤光栅的结构参数,如图 15 所示的传输谱所选择的光栅参数为  $\sigma = 0.0004$ ,  $c = -1.25 \times 10^{-9}$  nm/cm,  $L = 15$  cm,  $\Lambda = 500$   $\mu$ m。图中 A 为采用高斯切趾之后模拟计算出的啾啾 LPFG 的传输谱,传输谱带宽为 557 nm,再根据传输谱带宽随光栅结构参量近乎线性的变化规律,灵活地调整光栅长度、周期、啾啾系数、折变量等结构参量,对传输谱带宽进行微调。B 为光栅周期减小 25  $\mu$ m 时的传输谱,带宽减少了 61 nm。C 为将光栅长度由 15 cm 增

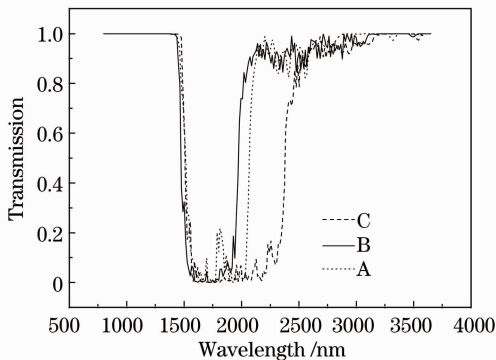


图 15 光栅周期和长度对传输谱带宽的影响  
Fig. 15 Effects of grating period and grating length on transmission spectral bandwidth

大到 20 cm 时传输谱,传输谱带宽增加了 262 nm。设计好单个光栅的光谱特性后,将多个光纤光栅级联还可以实现多阻带滤波,同时可滤出多个波长范围的信号,光栅个数可以根据需要随时增减<sup>[24]</sup>。在啾啾 LPFG 的传输谱带宽与多个光栅参数相关的情形下,如何实现各参数的最优化选型以及如何确定各光栅参数相互之间的制约关系还需进一步研究。另外,啾啾 LPFG 的传输谱还存在波长漂移、温度和压力等因素的微扰,这些问题也有待进一步研究解决。

## 4 结 论

啾啾 LPFG 的纤芯模同时与同向传输的多个阶次的包层模发生耦合,且多个不同阶次包层模对应的谐振峰发生交叠时,其传输谱带宽可扩展到 500 nm 以上,所以啾啾 LPFG 可用于超宽带带阻滤波器。随着与纤芯模耦合的包层模数目的增多,啾啾 LPFG 的传输谱带宽变大;啾啾系数、光栅长度、光栅周期和折射率调制量增加时,传输谱带宽均会沿长波长方向展宽;只有当包层半径增加时,传输谱带宽才会减小。波导色散对啾啾 LPFG 的传输谱带宽的影响很小,可以忽略不计。啾啾 LPFG 的传输谱带宽与光栅各参量在很多情况下表现出近似线性的关系,因而可根据其近似斜率在设计、制作中对超宽带滤波器谐振波长和带宽做出估计,增强了设计灵活性。采用高斯切趾技术能较好地抑制传输谱的抖动,调制后旁瓣的影响几乎可以忽略,但带宽会变窄。

## 参 考 文 献

- 1 F. Ouellette. Dispersion cancellation using linearly chirped Bragg grating filters in optical waveguides [J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(10): 847~849
- 2 K. O. Hillk, F. Bilodeau, B. Malo *et al.*. Chirped in fiber Bragg grating for compensation of optical fiber dispersion [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(17): 1314~1316
- 3 J. A. R. Williams, I. Bennion, L. ZHANG. The compression of optical pulse using self-phase-modulation and linearly chirped Bragg gratings in fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(5): 491~493
- 4 Tan Zhongwei, Zheng Kai, Liu Yan *et al.*. Application of dispersion compensator based on chirped fiber gratings in ultra long-hual DWDM system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(11): 5218~5223  
谭中伟, 郑凯, 刘艳等. 基于啾啾光纤光栅的色散补偿器在超长距离密集波分复用系统中的应用 [J]. *物理学报*, 2005, **54**(11): 5218~5223
- 5 Y. Okabe, R. Tsuji, N. Takeda. Application of chirped fiber Bragg grating sensors for identification of crack locations in composites [J]. *Composites: Part A*, 2004, **35**(1): 59~65

- 6 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
- 7 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
- 8 S. Choi, T. J. Eom, Y. Jung *et al.*. Broad-band tunable all-fiber bandpass filter based on hollow optical fiber and long-period grating pair[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(1): 115~117
- 9 Xu Xinhua, Wang Qing. Pure apodized linearly chirped long period fiber grating[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **10**(15): 844~848  
徐新华, 王青. 纯切趾线性啁啾长周期光纤光栅的研究[J]. *红外与激光工程*, 2009, **10**(15): 844~848
- 10 Zhou Jun, Fan Hongwei, Xu Tiefeng *et al.*. Design of optical comb filters based on cascaded phase-shifted linearly chirped fiber gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(6): 961~966  
周骏, 苑红伟, 徐铁峰等. 基于级联相移线性啁啾光纤光栅的梳状滤波器设计[J]. *光子学报*, 2010, **39**(6): 961~966
- 11 Li Xianhua, Zeng Shuguang, Zhang Bin *et al.*. Theoretical analysis on chirp matched optical parametric chirped pulse amplification [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(7): 071901  
李现华, 曾曙光, 张彬等. 啁啾匹配光参量啁啾脉冲放大理论分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(7): 071901
- 12 T. Erdogan. Cladding mode resonances in short and long period fiber grating filters[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(8): 1760~1773
- 13 Wu Zhigang, Dong Xiaoyi, Zhang Weigang *et al.*. The transmission of chirped long-period fiber gratings [J]. *Acta Scientiarum Naturallum (Universitatis Nankaiensis)*, 2002, **135**(2): 10~14  
武志刚, 董孝义, 张伟刚等. 啁啾的长周期光纤光栅的透射谱特性[J]. *南开大学学报(自然科学)*, 2002, **135**(2): 10~14
- 14 Liu Yumin, Yu Chongyuan, Yang Hongbo *et al.*. Numerical simulation to wavelength-division multiplexing isolation filter using concatenated long period chirped fiber grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 516~519  
刘玉敏, 俞重远, 杨红波等. 长周期啁啾光纤光栅级联作为波分复用隔离滤波器的数值研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(4): 516~519
- 15 Y. Zhang, Y. Li, Z. He *et al.*. Broadband filter using cladding profile linearly tapered long-period waveguide grating [J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(7): 1828~1832
- 16 Q. Liu, K. Chiang. Design of long-period waveguide grating filter by control of waveguide cladding profile [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(9): 3540~3546
- 17 M. Kim, Y. Jung, B. Kim *et al.*. Ultra-broadband optical filter based on long-period fiber gratings using higher-order cladding modes [C]. Seoul: Laser and Electro-Optics-Pacific Rim. (CLEOPR), 2007. TuD4
- 18 Fan Hongjian, Zhang Weigang, Yan Aidong *et al.*. Spectrum analysis for non-uniform ultra-long-period fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1547~1552  
范弘建, 张伟刚, 颜爱东等. 非均匀超长周期光纤光栅的频谱分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1547~1552
- 19 F. Y. M. Chan, K. S. Chiang. Transfer-matrix method for the analysis of two parallel dissimilar nonuniform long-period fiber gratings [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(2): 1008~1018
- 20 T. Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 21 Zhang Zijia. Fiber Grating Theoretical Basis and Sensing Technology [M]. Beijing: Science and Technology Press, 2009. 10~14  
张自嘉. 光纤光栅理论基础与传感技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2009. 10~14
- 22 F. Y. M. Chan, K. S. Chiang. Analysis of apodized phase-shifted long-period fiber gratings [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **244**(1-6): 233~243
- 23 Shen Benjian, Zheng Guangwei, Tan Jichun *et al.*. Diffraction characteristic analysis of Sinc-apodized reflective volume Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 12~18  
沈本剑, 郑光威, 谭吉春等. Sinc切趾反射体布拉格光栅衍射特性分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 12~18
- 24 Ma Weitao, Zhou Jun, Xu Tiefeng *et al.*. Design of optical comb filter with multi-concatenated linearly chirped fiber gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1284~1289  
马伟涛, 周骏, 徐铁峰等. 多级联线性啁啾光纤光栅梳状滤波器的优化设计[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1284~1289

栏目编辑: 何卓铭