

文章编号:1004-4213(2010)06-0961-6

基于级联相移线性啾啾光纤光栅的梳状滤波器设计*

周骏^{1a}, 苑红伟², 徐铁峰^{1b}, 张玲芬^{1a}, 马伟涛^{1a}

(1 宁波大学 a. 理学院 光学与光电子技术研究所; b. 信息科学与工程学院 电子与电气工程系, 浙江 宁波 315211)

(2 江苏大学 机械工程学院 光信息科学和技术系, 江苏 镇江 212013)

摘 要:为了获得反射带宽大、信道间隔均匀的高性能梳状滤波器,提出一种基于级联相移线性啾啾光纤光栅的新型梳状滤波器的结构设计.利用传输矩阵法和法布里-珀罗谐振腔理论,数值分析了该梳状滤波器中啾啾光栅的级联方式、啾啾量、折射率调制量和级联处的相移量对光栅反射谱特性的影响.结果表明:对应不同的级联方式,反射峰存在疏密变化,即两个级联光栅的啾啾量同号时,反射峰分布均匀对称,可设计均匀滤波器;而两个啾啾量异号时,反射峰呈现出疏密渐变的特性,可设计非均匀滤波器.此外,光栅啾啾量增加,反射谱带宽增大,但是反射率降低,而增大折射率调制量,可以提高反射率;级联处的相移量改变时,每个反射峰位置发生移动,从而可以通过改变相移量选择滤波窗口.

关键词:级联相移线性啾啾光纤光栅;传输矩阵法;F-P 谐振腔理论;梳状滤波器

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103906.0961

0 引言

1987 年, Ouellette 首次提出啾啾光纤光栅对长距离光通信系统进行色散补偿,大大提高了光信号在光纤中的传输效率^[1]. 随后, 啾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^[2-3]、脉冲压缩^[4]、滤波^[5]和传感^[6], 特别是波分复用技术^[7-8]等方面得到了广泛应用. 近年来, 由于光通信网络的发展对高性能的密集梳状滤波器有迫切的需求, 相移型啾啾光纤光栅引起了人们的普遍关注和研究. 相移型啾啾光纤光栅的基本结构是在一个啾啾光纤光栅内引入一个或多个相移^[9-10], 通过控制光栅的相移量及相移点调节啾啾相移光栅的特性, 实现单波长滤波或带通光谱滤波. 对于梳状滤波, 人们提出了重叠写入啾啾光纤光栅^[8,11]的制备方法, 即在光纤的相同部位写入多个光纤光栅, 其优点是滤波效果好, 反射带宽大, 然而要在光纤的同一位置重叠写入多个光栅并各自保持良好特性, 技术要求高.

为了得到反射带宽大、信道间隔好, 同时易于制备的高性能梳状滤波器, 本文提出了级联相移线性

啾啾光纤光栅的结构设计. 该结构可以通过相位掩膜法或二次曝光法在一根光纤上同时制作两个线性啾啾光栅来获得, 制作相对简便^[12-13]; 而且, 通过改变啾啾光栅的级联方式、啾啾量的大小、折射率调制量和级联处的相移量, 可以设计均匀梳状滤波器和非均匀梳状滤波器.

1 模型与理论

级联相移线性啾啾光纤光栅的结构如图 1, 每个线性啾啾光栅 (Linearly Chirped Grating, LCG) 的长度均为 L , 中间相移 φ 是由折射率调制的突变引起的, 可以通过精确控制光栅间的距离 Δz 来改变相移量的大小.

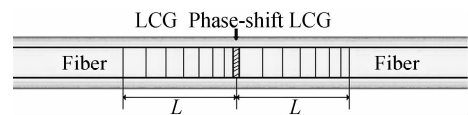


图 1 级联相移线性啾啾光纤光栅的结构
Fig. 1 Structure of cascaded phase-shifted linearly chirped fiber gratings

图 1 所示啾啾光纤光栅中心折射率采用正弦调制, 有效折射率变化为^[14]

$$\delta n_{\text{eff}}(z) = \overline{\delta n_{\text{eff}}}(z) \left\{ 1 + V \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \Phi(z) \right] \right\} \quad (1)$$

式中, $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 表示折射率的平均变化量, V 为折射率变化的条纹可见度, Λ 为平均光栅周期, $\Phi(z)$ 描述光栅的啾啾特性, 对于线性啾啾光栅 $\Phi(z) = 2\pi p z / \Lambda L$, 其中啾啾参量 $p = d\lambda_D / dz$, λ_D 是光纤光栅的设计波长.

* 国家自然科学基金(60677015, 60977048)、浙江省“钱江人才”项目(2007R10015)、宁波市重点实验室基金(2007A22006)、浙江省教育厅科研项目(20070971)和宁波市自然科学基金(2008A610001)资助

Tel: 0574-87609980

Email: ejzhou@yahoo.com.cn

收稿日期: 2009-10-09

修回日期: 2010-03-24

将图 1 中的每个线性啁啾光栅分成 M 小段, 每一段近似为具有不同周期的均匀光栅. 根据传输矩阵法^[15], 各小段可以用 2×2 的矩阵来表示其传输特性, 则级联啁啾光栅表示为 $2M$ 个 2×2 矩阵的乘积, 令 R_i 和 S_i 分别是通过第 i 段光栅时向前和

向后的光场振幅, R_{i-1} 和 S_{i-1} 分别是通过第 $i-1$ 段光栅时向前和向后的光场振幅, 则

$$\begin{bmatrix} R_i \\ S_i \end{bmatrix} = F_i \begin{bmatrix} R_{i-1} \\ S_{i-1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中传输矩阵 F_i 为

$$F_i = \begin{bmatrix} \cos h(s_i \Delta z) - j \frac{\zeta_i}{s_i} \sin h(s_i \Delta z) & -j \frac{k_i}{s_i} \sin h(s_i \Delta z) \\ j \frac{k_i}{s_i} \sin h(s_i \Delta z) & \cos h(s_i \Delta z) + j \frac{\zeta_i}{s_i} \sin h(s_i \Delta z) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, Δz 是第 i 均匀段的长度, $j = \sqrt{-1}$, ζ_i 和 k_i 是第 i 均匀段的自耦合系数和交叉耦合系数, $s_i = \sqrt{k_i^2 - \zeta_i^2}$.

则光场振幅在经过第一个啁啾光栅后,

$$\begin{bmatrix} R_M \\ S_M \end{bmatrix} = F_{\text{LCG}} \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 $F_{\text{LCG}} = F_M F_{M-1} \cdots F_2 F_1$. 所以光束通过整个级联啁啾后, 光场振幅为

$$F_{\text{PSLCG}} = F_{\text{LCG}} F_\varphi F_{\text{LCG}} \quad (5)$$

式中 $F_\varphi = \begin{bmatrix} \exp(-j\varphi/2) & 0 \\ 0 & \exp(j\varphi/2) \end{bmatrix}$, 相移量 $\varphi = 2\pi n_{\text{eff}} \Delta z / \lambda_D$, Δz 是光栅间的距离.

再由边界条件

$$\begin{bmatrix} R_{2M} \\ S_{2M} \end{bmatrix} = F_{\text{PSLCG}} \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix} = F_{\text{PSLCG}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

可求出反射系数 $\rho = F_{21} / F_{11}$ 及相位角 $\varphi_\rho = \text{Arg}(\rho)$, 同时可得到反射率 $R_{2M} = \left| \frac{F_{21}}{F_{11}} \right|^2$ 和透射率 $T = 1 - R$, 其中 F_{21}, F_{11} 是传输矩阵 F_{PSLCG} 中的元素.

因为级联光纤光栅中每个光栅的啁啾量 $C(\text{nm}) = p(\text{nm/cm}) \cdot L(\text{cm})$, 其值可正可负, 据此定义四种级联方式, 即正正级联 ($C_1 > 0, C_2 > 0$), 负正级联 ($C_1 < 0, C_2 > 0$), 正负级联 ($C_1 > 0, C_2 < 0$) 和负负级联 ($C_1 < 0, C_2 < 0$), 分别如图 2 中的 (a) ~ (d), 其中 $C < 0$ 表示线性啁啾光栅的周期沿光传播方向逐渐增加, 反之, $C > 0$ 表示线性啁啾光栅的周期沿光传播方向逐渐减小.

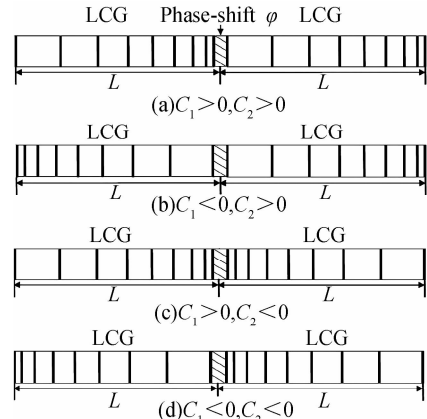


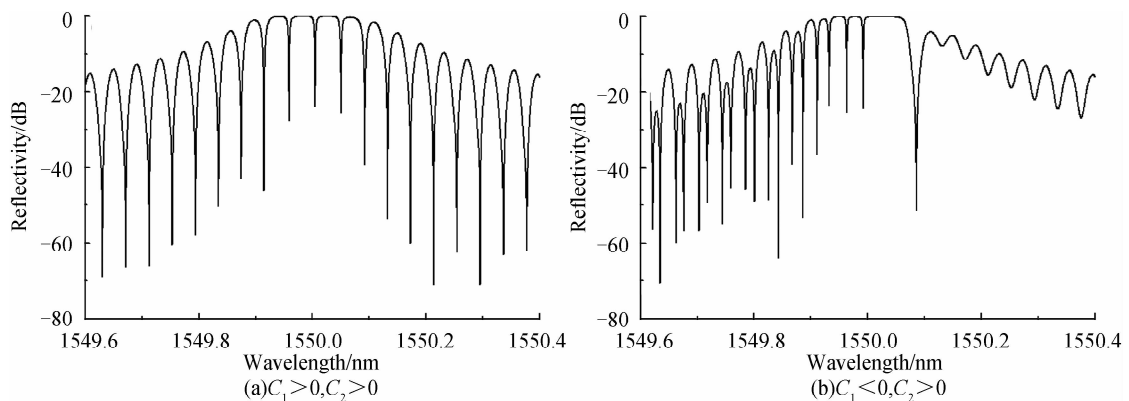
图 2 级联相移线性啁啾光纤光栅的四种级联方式
Fig. 2 The four chirped modes of cascaded phase-shifted linearly chirped fiber gratings

2 数值模拟和光谱分析

为考察相移量和级联方式对级联相移线性啁啾光纤光栅传输特性的影响, 设定的数值模拟参量为: 啁啾光栅长度 L 均为 2 cm, 有效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.45$, 折射率调制量 $\delta n_{\text{eff}} = 1.3 \times 10^{-4}$, 中心耦合波长 1 550 nm, 光栅啁啾量的绝对值为 $C = 0.07$ nm.

2.1 级联方式对级联光栅反射谱的影响

相移量一定时, 不同级联方式下的反射谱特性如图 3. 由图可见, 当光纤光栅 F-P 谐振腔的腔长满足谐振条件时, 光纤光栅 F-P 腔在中心耦合波长 1550 nm 处反射峰极大, 而在中心波长两侧由于 F-



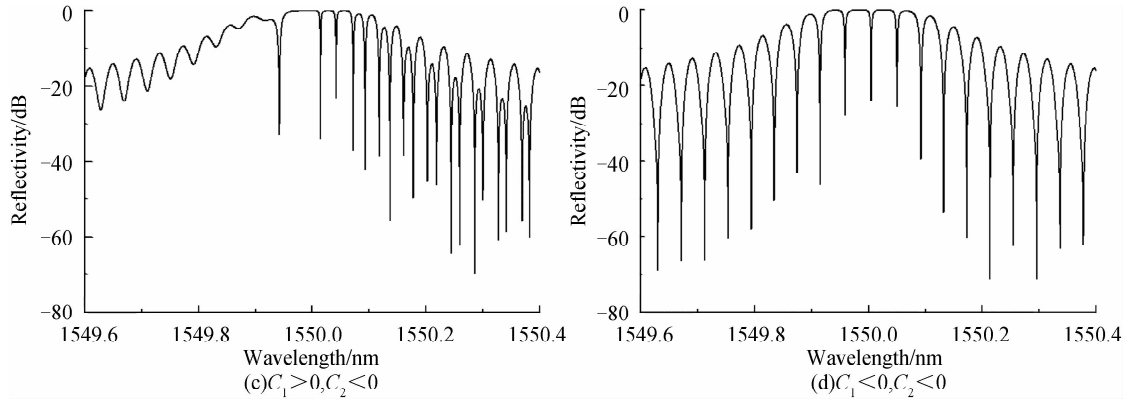
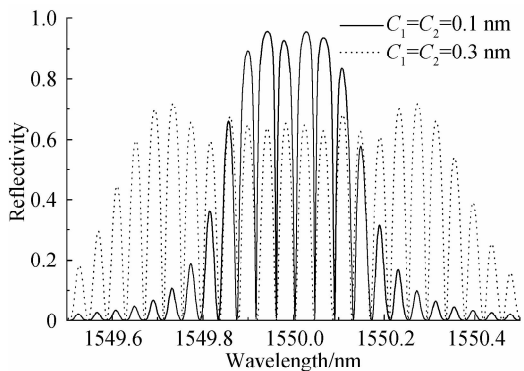


图3 相移量 φ 为 0.5π 时,四种级联方式的反射谱
 Fig. 3 Reflective spectra of the four chirped modes with a phase shift $\varphi=0.5$

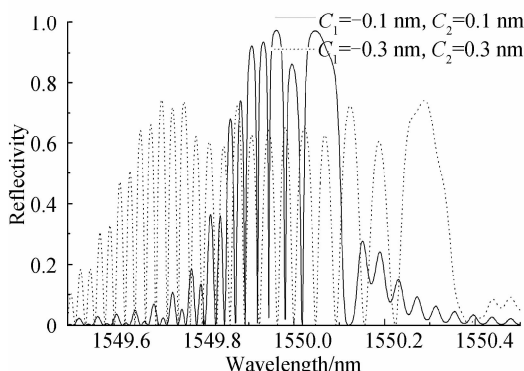
P 腔谐振失配,反射幅值减小.当两个啁啾光栅为正正级联和负负级联时,它们的反射谱在中心波长附近重合并且相对中心波长位置具有对称性,反射峰间隔均匀,如图 3(a)和(d);两个啁啾光栅为正负级联和负正级联时,反射峰间隔不等,呈现出左密右疏(图 3(b))或是左疏右密(图 3(c))的特性,而在紧靠中心波长的右侧(图 3(b))或者左侧(图 3(c)),反射峰宽大且平坦.

2.2 啁啾量对级联光栅反射谱的影响

不同级联方式下对应不同啁啾量的光栅反射谱特性如图 4.从图 4(a)可见,对应正正级联方式下的光栅,在 $1.5495 \sim 1.5505 \mu\text{m}$ 波长范围,取 $C_1=C_2=0.1 \text{ nm}$ (实线)和 $C_1=C_2=0.3 \text{ nm}$ (虚线)



(a)Positive-positive chirps concatenation



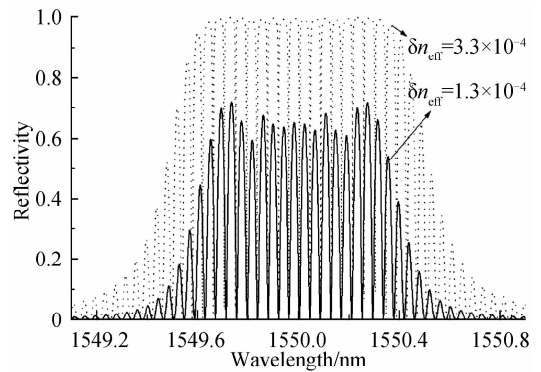
(b)Negative-positive chirps concatenation

图4 不同啁啾量下的光栅反射谱
 Fig. 4 Reflection spectrum of the grating with different chirps

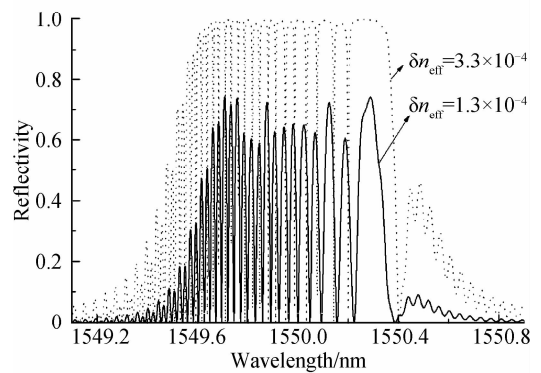
时,反射谱中心处的平均反射率分别为 0.93 和 0.67,但后者的反射谱通道带宽明显宽于前者;而在反射谱带宽范围内,反射谱的信道间隔相等,说明啁啾量的大小只影响反射谱通道带宽,对反射谱的信道间隔无影响.图 4(b)是负正级联方式下的光栅反射谱,可以看出,随着啁啾量的增加,反射谱带宽迅速变宽,啁啾光栅的反射率也随之降低,而反射谱信道间隔不等并且受啁啾量大小影响.因此,增加光栅啁啾量,可以增大反射谱带宽,但是反射率迅速降低.所以在实际应用中,通过增加啁啾量来提高通道带宽的同时,还要考虑光栅反射谱的反射率受到的影响.

2.3 折射率调制量对级联光栅反射谱的影响

图 5 给出了啁啾光栅在正正级联 ($C_1=C_2=$



(a)Positive-positive chirps concatenation



(b)Negative-positive chirps concatenation

图5 不同折射率调制量下的光栅反射谱
 Fig. 5 Reflection spectrum of the grating with different index modulation

0.07 nm) 和负正级联 ($C_1 = -0.07$ nm, $C_2 = 0.07$ nm) 时, 折射率调制量与反射谱之间的关系, 其中波长范围选取为 $1.5495 \sim 1.5505 \mu\text{m}$. 从图中看出, 对于这两种级联方式, 折射率调制量从 1.3×10^{-4} 变为 3.3×10^{-4} 时, 级联啁啾光栅在信道带宽内的反射率都会迅速增大, 并且很小的折射率变化就能达到很高的反射率, 甚至接近 1. 折射率调制量达到一定值后再继续提高, 对反射率影响不大, 反而会使反射谱的旁瓣增强, 滤波效果变差. 因此减少折射率调制量, 可以获得高的通道隔离度, 反之, 增大折射率调制量可以弥补因啁啾量增大导致的反射率降低的缺陷.

2.4 相移量对级联光栅反射谱的影响

在不同的级联方式下, 控制相移量的增大或减少对级联光栅反射谱特性的有重要影响. 对于正正级联方式, 当 $C_1 = C_2 = 0.07$ nm 且相移量从 0 增大到 2π 时, 光栅反射谱的变化如图 6. 由图 6(a) 可见, 相移量 $\varphi = 0$ 时, 级联光栅产生两组反射峰; 随着相移量的增加, 两组反射峰以不同的改变量由短波长区向长波长区移动, 到 $\varphi = 0.3\pi$ 时重合 (图 6(b)), 经历图 6(c)、6(d) 和图 6(a) ($\varphi = \pi$) 的分离过程后再次重合 (图 6(b)), 并且反射谱中心位置不变. 因为从 $\varphi = \pi$ 到 $\varphi = 2\pi$ 的反射谱变化与 $\varphi = 0$ 到 $\varphi = \pi$ 的情形相同, 并且 $\varphi = 0$ 和 $\varphi = \pi$ 时的反射谱完全相同, 因此反射谱的变化周期为 π .

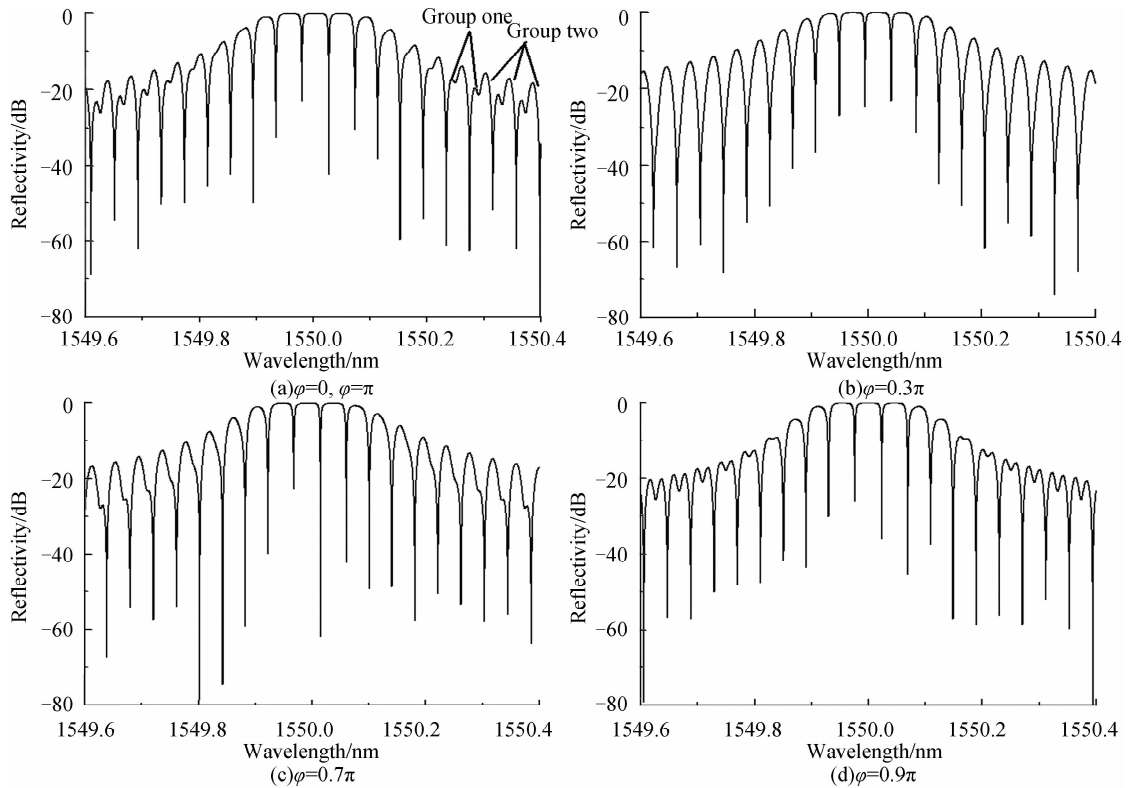
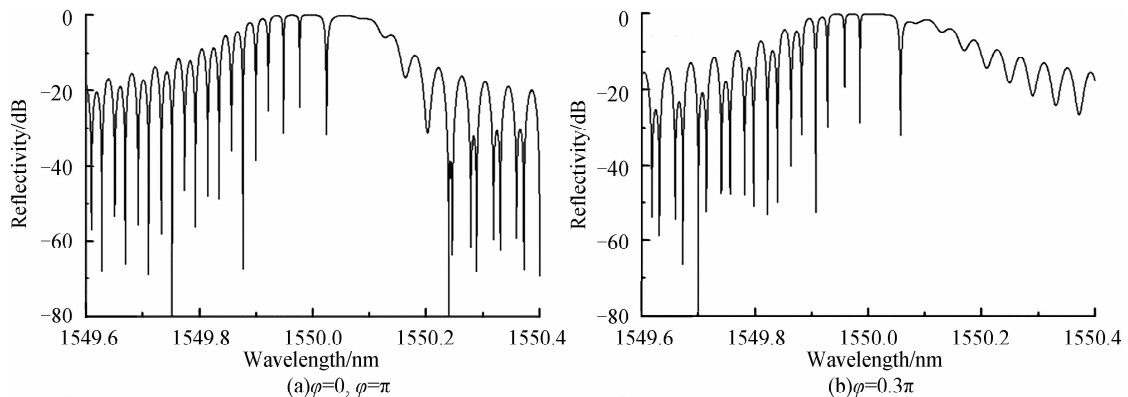


图 6 $C_1 = C_2 = 0.07$ nm, 相移量增大时的反射谱

Fig. 6 Reflection spectrum of the gratings with increased phase shifts when $C_1 = C_2 = 0.07$ nm

对于负正级联方式, 在 $C_1 = -0.07$ nm, $C_2 = 0.07$ nm 时, 反射谱如图 7. 由图可见, 反射谱出现左

密右疏的特征, 相移量的增大同样使两组反射峰向长波长方向移动, 而左密右疏的特性不随相移量的



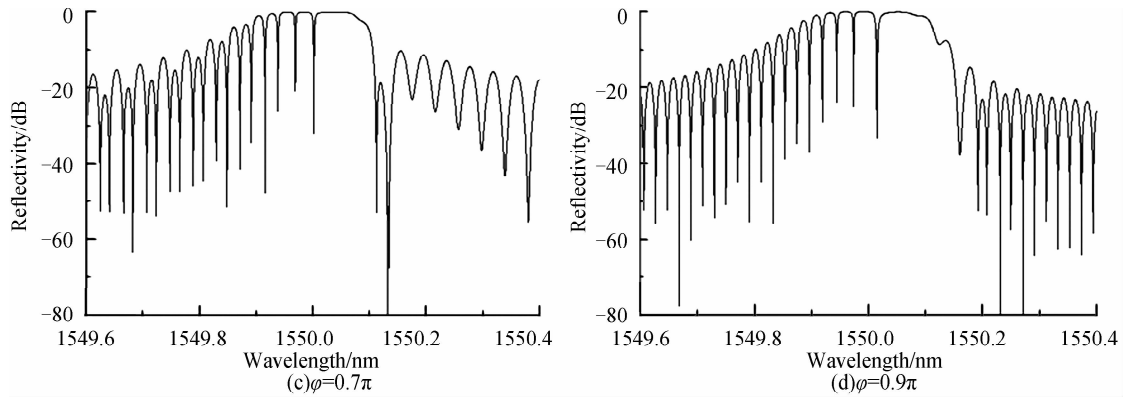


图 7 $C_1 = -0.07 \text{ nm}, C_2 = 0.07 \text{ nm}$, 相移量增大时的反射谱

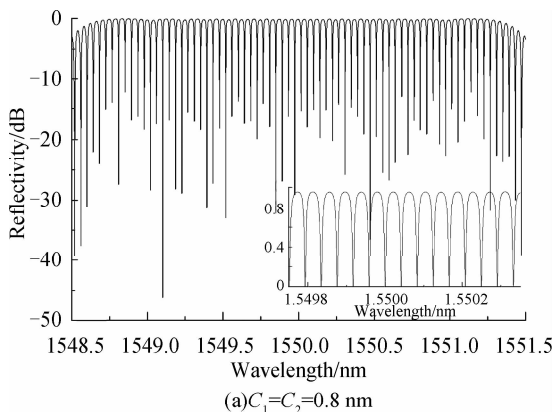
Fig. 7 Reflection spectrum of the gratings with increased phase shifts when $C_1 = -0.07 \text{ nm}, C_2 = 0.07 \text{ nm}$

增大而改变, 反射谱的周期同样为 π .

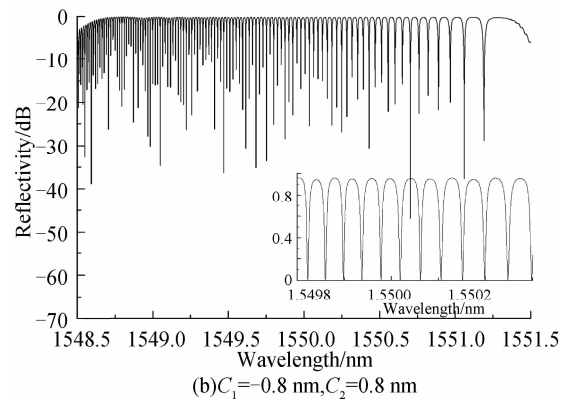
总之, 光栅级联处的相移量 φ 增加时, 反射峰位置向右偏移, 但是反射谱中心位置不变; 相反, 当 φ 减少时, 反射峰位置向左偏移, 反射谱中心位置仍保持不变. 因此, 利用相移量与反射峰位置偏移的关系, 可以选择光栅相移量来选择合适的滤波窗口.

3 在滤波器方面的应用

为充分利用不同级联方式下啁啾光栅的反射谱特性设计梳状滤波器, 由本文分析, 选择啁啾光栅的优化设计参量为: 长度 $L = 3 \text{ cm}$, 折射率调制 $\delta n_{\text{eff}} = 3.5 \times 10^{-4}$, 啁啾量 $C_1 = C_2 = 0.8 \text{ nm}$, 这里较大的折射率调制和啁啾量可以增大反射率和提高信道带宽. 正正级联方式下的光栅反射谱如图 8(a), 插图是 $1.5497 \sim 1.5503 \mu\text{m}$ 波长范围内的反射谱细节. 由图可见, 信道分布均匀, 3 dB 带宽为 28 nm , 间隔为 0.0417 nm , 反射率接近于 0.95 , 可作为均匀梳状滤波器. 而在负正级联方式 ($C_1 = -0.8 \text{ nm}, C_2 = 0.8 \text{ nm}$) 下的反射谱如图 8(b), 反射峰在中心波长附近非常平坦, 但信道间隔逐渐增大, 呈现出左密右疏的特征, 反射率接近于 0.95 . 因此, 可根据滤波波段选择相应的信道窗口, 将负正级联方式下的啁啾光栅设计为非均匀梳状滤波器. 此外, 负负级联的光栅反射谱与正正级联的情形相同, 正负级联的光栅反射谱和负正级联的相反, 这里不赘述了.



(a) $C_1 = C_2 = 0.8 \text{ nm}$



(b) $C_1 = -0.8 \text{ nm}, C_2 = 0.8 \text{ nm}$

图 8 $C_1 = C_2 = 0.8 \text{ nm}$ 和 $C_1 = -0.8 \text{ nm}, C_2 = 0.8 \text{ nm}$ 时光栅的反射谱

Fig. 8 Reflection spectrum of the gratings when $C_1 = C_2 = 0.8 \text{ nm}$ and $C_1 = -0.8 \text{ nm}, C_2 = 0.8 \text{ nm}$

4 结论

本文提出了级联相移线性啁啾光纤光栅的梳状滤波器的结构设计. 通过改变两个光栅的级联方式、啁啾量的大小、折射率调制量和光栅级联处的相移量, 数值模拟分析了各种级联方式下的相移啁啾光栅的反射谱特性. 结果表明, 级联光栅的啁啾量符号相同时, 反射峰的分布均匀, 可设计为均匀梳状滤波器; 而啁啾量符号相反时, 反射峰呈现出不对称的疏密变化, 可设计成非均匀梳状滤波器; 增加光栅的啁啾量, 可以增大反射谱带宽, 但导致反射率降低; 而增大折射率调制量, 可以提高反射率; 相移量增大时, 啁啾光栅的反射峰位置向长波长方向移动, 反之向短波长方向移动, 通过改变相移量可以改变滤波窗口. 因此, 级联相移线性啁啾光纤光栅滤波器的结构简单, 易于制备, 适合应用于光通信系统.

参考文献

- [1] OUELLETTE F. Dispersion cancellation using linearly chirped Bragg grating filters in optical waveguides[J]. *Opt Lett*, 1987, **12**(10): 847-849.
- [2] HILL K O, BILODEAU F, MALO B, et al. Chirped in-fiber Bragg gratings for compensation of optical-fiber dispersion[J]. *Opt Lett*, 1994, **19**(17): 1314-1316.

- [3] TAN Zhong-wei, ZHENG Kai, LIU Yan, *et al.* Application of dispersion compensator based on chirped fiber gratings in ultra long-haul DWDM system[J]. *Chin Phys Soc*, 2005, **54**(11):5218-5223.
谭中伟, 郑凯, 刘艳, 等. 基于啁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.
- [4] WILLIAMS J A R, BENNION I, ZHANG L. The compression of optical pulses using self-phase-modulation and linearly chirped Bragg gratings in fibers[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1995, **7**(5):491-493.
- [5] DONG X, SHUM P, YANG X, *et al.* Bandwidth-tunable filter and spacing-tunable comb filter with chirped-fiber Bragg gratings[J]. *Opt Commun*, 2006, **259**(2):645-648.
- [6] OKABE Y, TSUJI R, TAKEDA N. Application of chirped fiber Bragg grating sensors for identification of crack locations in composites[J]. *Composites: Part A*, 2004, **35**:59-65.
- [7] XUE Xin-hua, WANG Qing. Theoretical analysis of linearly chirped moiré fiber gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(9):1618-1623.
徐新华, 王青. 线性啁啾莫尔光纤光栅的理论研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(9):1618-1623.
- [8] SLAVIK R, LAROCHELLE S. Large-band periodic filters for DWDM using multiple-superimposed fiber bragg gratings[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2002, **14**(12):1704-1706.
- [9] LU Shao-hua, XU Ou, FENG Su-chun, *et al.* Design and application of optical filters based on chirped phase-shifted fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9):1675-1680.
鲁韶华, 许鸥, 冯素春, 等. 基于啁啾相移光纤光栅的滤波器设计及应用[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9):1675-1680.
- [10] ZENGERLE R, LEMINGER O. Phase-shifted Bragg-grating filters with improved transmission characteristics [J]. *J Lightwave Technol*, 1995, **13**(12):2354-2358.
- [11] PEREIRAS, LAROCHELLE S. Field profiles and spectral properties of chirped bragg grating fabry-perot interferometers[J]. *Opt Express*, 2005, **13**(6):1906-1915.
- [12] VOIGTLÄNDER C, THOMAS J, WIKSZAK E, *et al.* Chirped fiber Bragg gratings written with ultrashort pulses and a tunable phase mask[J]. *Opt Lett*, 2009, **34**(12):1888-1890.
- [13] LOH W H, COLE M J, ZERVAS M N, *et al.* Complex grating structures with uniform phase masks based on the moving fiber-scanning beam technique[J]. *Opt Lett*, 1995, **20**(20):2051-2053.
- [14] LIANG S, TJIN S C, NGO N Q, *et al.* Novel tunable Fiber-optic edge filter based on modulating the chirp rate of a pi-phase-shifted fiber bragg grating in transmission [J]. *Opt Commun*, 2009, **282**(7):1363-1369.
- [15] ERDOGAN T. Fiber grating spectra [J]. *J Lightwave Technol*, 1997, **15**(8):1277-1294.

Design of Optical Comb Filters Based on Cascaded Phase-Shifted Linearly Chirped Fiber Gratings

ZHOU Jun^{1a}, YUAN Hong-wei², XU Tie-feng^{1b}, ZHANG Ling-fen^{1a}, MA Wei-tao^{1a}

(1 a. *Institute of Optics & Optoelectronics, Faculty of Science*; b. *Department of Electronic and Electric Engineering, School of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China*)

(2 *Department of Optical Engineering, School of Mechanical Engineering,*

Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: A novel optical comb filter is designed with two cascaded phase-shifted linearly chirped fiber gratings. According to the transmission matrix method and Fabry-Perot resonant cavity theory, the characteristics of reflection spectrum of the optical comb filter are numerically analyzed for the different combinations of two chirp gratings, the value of chirp, the index modulation and the phase-shift. The results show that the distribute density of reflection peaks is different for the different combinations of two chirp gratings, that is, the spacing between reflection peaks is equal if the signs of two chirps same, it can be used to design a uniform filter; on the other hand, the distribute of reflection peaks shows the characteristic density gradient if the signs of two chirps opposite, which can be used to design a non-uniform filter. And the greater the chirp of gratings, the wider the bandwidth of reflection spectrum of the filter, and the lower the reflectivity; however, the reflectivity will be improved with the increase of index modulation; furthermore each of the reflection peaks moves with the change of phase-shift, which is useful to select a filter window by changing the phase-shift.

Key words: Cascaded phase-shifted linearly chirped fiber gratings; Transfer matrix method; Fabry-Perot resonant cavity theory; Comb filter

ZHOU Jun received the Ph. D. degree in optics from Shanghai Jiaotong University, in 1996. His research interests focus on the nonlinear optical properties of polymer material and polymeric waveguide devices.

