

· 光电器件与材料 ·

基于啾啾相移光纤光栅的多波长滤波器的研究

熊海, 裴丽, 刘超, 吴良英, 孟晓婷

(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘要: 使用V-I传输矩阵法分析了相移量、相移点位置以及啾啾系数对啾啾相移光纤光栅透射谱特性的影响,并分析了在啾啾光纤光栅中同时引入多相移时生成的多陷波滤波器的波长间隔,发现其与以同样的位置引入单相移时陷波滤波器的波长偏离间隔基本一致。依据仿真分析结果,可以优化啾啾相移光栅相移数量、位置间隔、啾啾系数和相移量的参数选择,设计出实际需要的多波长滤波器。

关键词: 啾啾相移光纤光栅; V-I传输矩阵法; 多波长滤波器

中图分类号: TN913.7

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-06-0032-04

Research on Multi-wavelength Filter Based on Chirped Phase-shifted Fiber Bragg Grating

XIONG Hai, PEI Li, LIU Chao, WU Liang-ying, MENG Xiao-ting

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: V-I transfer matrix method is used to analyze phase-shifting, phase-shifted point position and the influence on phase-shifted fiber Bragg grating (FBG) transmission spectrum characteristic from chirped coefficient. The wavelength spacing of the multi-notch filter generated by inserting multiple phase shifts into the chirped FBG is analyzed. It is similar to the wavelength shifting spacing of the notch filter, which inserts single phase shifting at the same position. According to simulation results, chirped phase-shifted grating shifting number, position interval, chirped coefficient and phase-shifting can be chosen optimally to design the applicable multi-wavelength filter.

Key words: chirped phase-shifted fiber Bragg grating (FBG); V-I transfer matrix method; multi-wavelength filter

在过去的几十年中,相移光纤光栅已经被全面的研究并广泛应用于全光通信和传感领域^[1]。相比使用普通布拉格光纤光栅(FBG)作反射型带阻滤波器,需要借助于光耦合器、环形器,成本较高,相移光纤光栅能在反射谱的阻带中打开一个或多个透射窗口,实现透射型滤波^[2]。而且,透射窗口的位置可以通过改变相移量的大小调整;窗口的通透率以及线宽也可以根据相移位置的不同而不同,因而可以根据不同的需要设计得到不同滚降特性、不同线宽的透射峰^[3]。相移光纤光栅同时具有波长选择性能

好、插入损耗低和偏振态无关等优点,这些优点使得它在窄带滤波、波分复用/解复用以及光纤传感领域得到深入研究和广泛应用^[4]。基于这些优点,国内外已经有很多关于均匀相移光纤光栅的研究和应用,但是对啾啾相移光栅的特性分析和实验却非常少。啾啾相移光纤光栅的透射峰波长和数量由相移点的位置和数量来确定,且啾啾光栅具有较宽的带宽,反射谱中可容纳更多的透射峰^[5],更加适用于多波长滤波^[6]。一般而言对啾啾相移光纤光栅的研究方法主要是传输矩阵法^[7]和多层膜法^[8],而V-I传输

收稿日期:2014-11-26

基金项目:国家自然科学基金(61275076)资助课题

作者简介:熊海(1989-),男,河南信阳人,硕士研究生,主要从事光通信元器件的研究;导师裴丽(1970-),女,山西运城人,教授,主要从事光纤传感、光器件、ROF、光网络技术方面研究。

矩阵法^[9-10]已被证实可以用来分析光纤布拉格光栅(FBG)的特性,该方法简化了传输矩阵,提高了计算效率,但是至今还没有基于该方法对啁啾相移光纤光栅传输特性的研究分析。

利用V-I传输矩阵模型对啁啾相移光纤光栅的传输特性进行了分析。结果表明,在啁啾光纤光栅中同时引入多相移时生成的多陷波滤波器的波长间隔与以同样的位置引入单相移时陷波滤波器的波长偏离间隔基本一致。依据仿真分析结果,可合理选择啁啾相移光栅的啁啾系数、相移数量、相移位置和相移量,实现多波长滤波。

1 啁啾相移光纤光栅V-I理论模型

啁啾相移光纤光栅是指在啁啾光纤光栅的某些点,通过采用一些方法破坏其周期的连续性而得到的,这些不连续的连接就会产生相移。相移点把啁啾光栅分为多段,相当于多个啁啾光纤光栅的无缝级联而成^[11]。

当在布拉格光纤光栅的 z_i 处引入相移量为 θ_i ($i=1,2,\dots,M$)的相移时,折射率调制可以表示为^[8]

$$n(z) = n + \delta_n \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda(z)}z\right)\right) \quad (1)$$

其中, $\Lambda(z) = \Lambda_0 \left(1 - \frac{F}{L}Z\right)$; L 为光栅长度; F 为线性啁啾系数; z 为光栅位置; $\Lambda_0 = \lambda_B / 2n_{\text{eff}}$ 为栅格周期; λ_B 为布拉格波长; n_{eff} 为有效折射率; n 为调制前的纤芯折射率; δ_n 为折射率调制深度。

V-I传输矩阵法的理论分析在文献[8]、文献[9]已详细介绍,这里直接引用。相移调制矩阵可由V-I变换表示为

$$F_{\theta_i} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i/2) & jZ \sin(\theta_i/2) \\ j \frac{\sin(\theta_i/2)}{Z} & \cos(\theta_i/2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, θ_i 表示相移量的大小; $Z = (120\pi)/n_{\text{eff}}$, n_{eff} 为有效折射率。整个啁啾相移光纤光栅的传输矩阵可表示为

$$\mathbf{VI} = \mathbf{VI}_1 \cdot F_{\theta_1} \cdot \mathbf{VI}_2 \cdot F_{\theta_2} \cdots F_{\theta_M} \cdot \mathbf{VI}_{M+1} \quad (3)$$

其中, \mathbf{VI}_i 为每小段光栅的传输矩阵。啁啾相移光纤光栅的反射系数表示为^[10]

$$R = \frac{VI_{11} + VI_{12}/Z_2 - VI_{21}Z_1 - VI_{22}Z_1/Z_2}{VI_{11} + VI_{12}/Z_2 + VI_{21}Z_1 + VI_{22}Z_1/Z_2} \quad (4)$$

2 仿真分析

2.1 相移大小不同时的传输特性

根据以上V-I理论模型,在光栅的中间位置引入单点相移,分析不同相移量对啁啾相移光纤光栅透射谱特性的影响。选取的光栅参数是:光栅长度为1 cm,纤芯有效折射率为 $n_{\text{eff}}=1.4513$,折射率调制量为 $\Delta n=1.46 \times 10^{-4}$,啁啾系数为0.0005,中心波长为1550 nm,条纹可见度为1。图1为不同相移量下仿真模拟得到的啁啾相移光纤光栅的透射谱,相移角 θ 分别为 $\pi/3$ 、 $2\pi/3$ 、 π 、 $4\pi/3$ 、 $5\pi/3$ 。

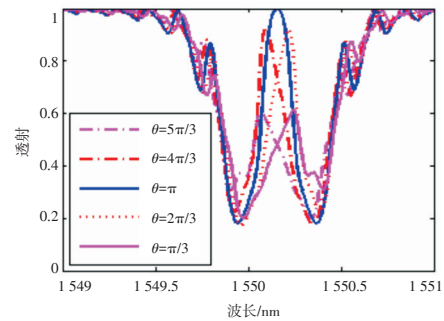


图1 啁啾布拉格光栅中间位置引入不同相移量时的透射谱

从图1中可知,如果引入的相移量以 π 对称,则透射峰的位置是关于相移为 π 时对称的。若相移量逐渐偏离 π ,则透射峰也将逐渐偏离中心位置。相移量越接近 π ,透射峰的线宽越窄,透射峰的通率越高。若相移 $\theta < \pi$,透射峰的波长将大于相移为 π 时的透射峰波长;若 $\theta > \pi$,则透射峰的波长将小于相移为 π 时的透射峰波长,并且随着相移量的增大,透射峰波长将会朝着短波长的方向移动。

2.2 啁啾系数不同时的传输特性

图2所示的是在不同啁啾系数下仿真模拟得到的啁啾相移光栅透射谱。光栅的相移量为 π ,相移位置取光栅中间位置,其他参数同图1选取的参数一致。

由图2可知,当啁啾系数 f 逐渐增大时,啁啾相移光纤光栅的反射带宽随之逐渐增大,透射峰的线宽也随之增大,但反射峰峰值会稍微下降。啁啾系

数 f 的变化不会对透射峰的位置以及通透率产生影响,不同的啾啾系数对旁瓣的抑制效果也不同。因此,啾啾系数的选择并非是越大越好,应该选择合适的啾啾系数使得能够增大带宽的同时又能够对旁瓣有一定抑制,从而能够尽量去避免由于旁瓣产生信道串扰。

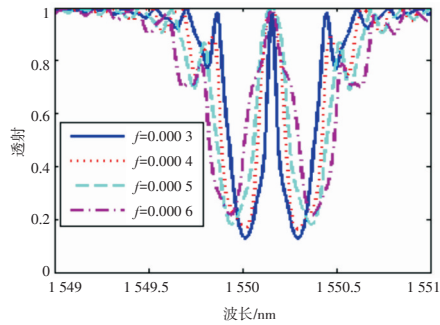


图2 不同啾啾系数的啾啾相移光纤光栅透射谱

2.3 相移位置不同时的传输特性

图3为在不同相移位置下仿真模拟得到的啾啾相移光栅透射谱。光栅的相移量为 π ,相移位置为 $a \times L$, a 取值分别为0.3、0.7、0.4、0.6,其他参数同图1选取的参数一致。

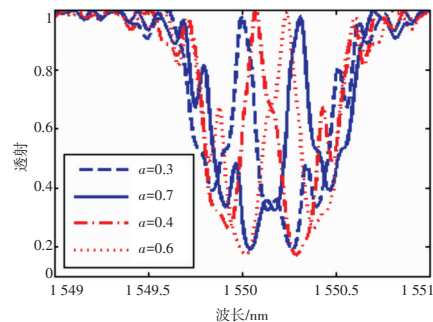
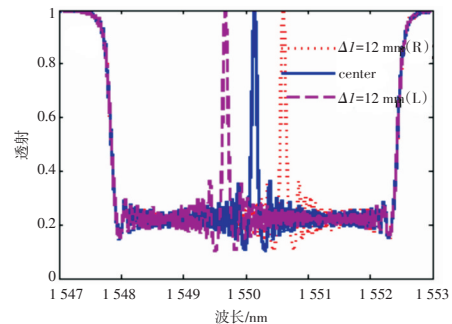


图3 在啾啾布拉格光栅不同位置引入 π 相移时的透射谱

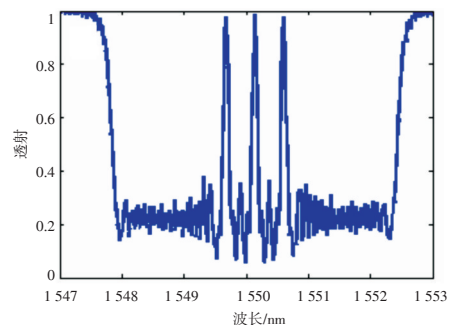
由图3可知,对均匀相移光纤光栅而言,当相移点位置变化时,透射峰始终位于布拉格波长处,相移位置的变化只会对透射峰的通透率有影响,而不会使透射峰的位置发生变化。而对于啾啾相移光纤光栅而言,相移位置变化时,透射峰的通透率始终保持不变,透射峰的位置会发生变化。当相移位置以光栅中心为对称时,透射峰的位置也是关于中心波长对称的。若相移位置逐渐远离光栅中心点,则透射峰的位置也将逐渐远离中心波长。

2.4 多相移及位置不同时的传输特性

基于V-I传输矩阵模型,对啾啾FBG在不同的位置引入相移进行模拟仿真,观察陷波滤波器波长的变化。选取的光栅参数是:线性啾啾光栅长度为12 cm,纤芯有效折射率为 $n_{\text{eff}}=1.4774$,折射率调制量为 $\Delta n=2.65 \times 10^{-4}$,啾啾系数为0.003,中心波长为1550 nm,条纹可见度为1。图4a为分别在光栅的3个不同位置引入 π 相移时的透射谱,其中蓝实线为在光栅中间位置引入 π 相移时的透射谱线图,紫色虚线为在光栅中间位置向左偏离12 mm处引入 π 相移时的透射谱线图,红色虚线则是在光栅中间位置向右偏离12 mm处引入 π 相移的透射谱线图。



(a)在光栅3个不同位置引入 π 相移,陷波滤波器波长偏离间隔的变化



(b)以12 mm间隔同时引入3个 π 相移时,3个陷波滤波器的波长间隔的仿真结果

图4 波长偏离0.47 nm的啾啾相移FBG的透射谱

由图4a可以看出,当在光栅中间位置向左偏离12 mm处引入 π 相移时,产生的陷波波长相对于在中间位置引入 π 相移时的陷波波长向左偏离0.47 nm;当相移点距离啾啾光栅中间位置向右偏离12 mm时,陷波波长向右偏离0.47 nm。使用同样的模型,在啾啾光栅中引入多个相移,可以形成多陷波滤波

器。图4b为同时在光栅的中间位置、中间位置向左偏离12 mm、中间位置向右偏离12 mm处引入3个 π 相移时的透射谱线图,发现当同时加3个相移时,会产生3个陷波滤波器,对比图4a可以发现,将同时引入的3个相移的相移位置间隔设定为12 mm时,这3个陷波滤波器仍然有一个0.47 nm的波长间隔,符合预期设想。

使用与图4同样的模型,在啁啾光栅的0.2、0.4、0.6处同时引入3个 π 相移,即这3个相移点的位置间隔为24 mm,产生的透射谱线图如图5所示。发现图5中的3个陷波滤波器之间的波长间隔为0.93 nm。对比图4b,当啁啾光栅上引入的相移点之间的间隔增大时,对应生成的多个陷波滤波器之间的波长间隔会相应的增大。

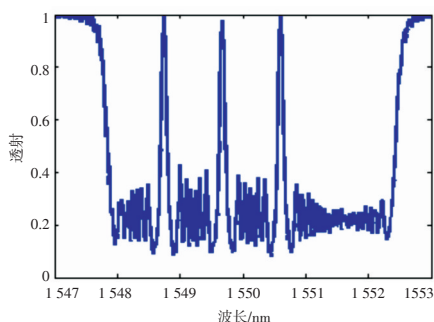


图5 以12 mm间隔同时引入3个 π 相移时,3个陷波滤波器的波长间隔的仿真结果

综上所述,在啁啾光栅中同时引入3个 π 相移时,生成的3个陷波滤波器的波长间隔与在光栅同样的位置引入单个相移时的陷波滤波器波长的偏离间隔基本一致,并且改变各个相移点之间的间距,陷波滤波器之间的波长间隔也会发生相应的变化。根据仿真结果,通过在啁啾光栅上引入多个相移点,并合理设计相移量、啁啾系数、相移位置以及位置间隔,可获得所需的滤波器通道数、通道间隔以及中心波长。

3 结论

利用V-I传输矩阵法仿真分析了相移量、相移位置以及啁啾系数的变化对啁啾相移光纤光栅的透

射谱特性的影响。通过数值模拟,发现在啁啾光纤光栅中同时引入多相移时生成的多陷波滤波器的波长间隔与以同样的位置引入单相移时陷波滤波器的波长偏离间隔基本一致;相移点之间的间隔增大,对应生成的多个陷波滤波器之间的波长间隔也会相应的增大。根据仿真分析结果,合理的设计相移数量、相移位置,选定合适的啁啾系数,可以获得实际所需的波长,设计出滤波器,实现多波长滤波。

参考文献

- [1] Melloni A, Chinello M, Martinelli M. All-optical switching in phase-shifted fiber Bragg grating[J]. *Photonics Technology Letters*, 2000, 12(1): 42-44.
- [2] Wang X, Yu C, Yu Z, et al. Sampled phase-shift fiber Bragg gratings[J]. *Chinese Optics Letters*, 2004, 2(4): 190-191.
- [3] Wang J, Jiang S, Jia L. Research on the phase-shifted fiber grating spectrum characteristics in the inhomogeneous strain fields[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(7): 2003-2008.
- [4] Wei D, Li T, Zhao Y, et al. Multiwavelength erbium-doped fiber ring lasers with overlap-written fiber Bragg gratings [J]. *Optics letters*, 2000, 25(16): 1150-1152.
- [5] 鲁韶华, 许鸥, 董小伟, 等. 啁啾相移光纤光栅的反射谱特性[J]. *中国激光*, 2008, 35(4): 577-581.
- [6] Kang Y, Ye C, Luo Z, et al. Investigation on reflection spectra of chirped and phase-shifted fiber Bragg gratings[J]. *Optoelectronics Letters*, 2007, 3(2): 112-114.
- [7] Zengerle R, Leminger O. Phase-shifted Bragg-grating filters with improved transmission characteristics[J]. *Lightwave Technology*, 1995, 13(12): 2354-2358.
- [8] 余华清. 啁啾相移光纤光栅的多层薄膜分析新方法[J]. *传感技术学报*, 2006, 19(3): 814-817.
- [9] Capmany J, Muriel M A, Sales S, et al. Microwave VI transmission matrix formalism for the analysis of photonic circuits: application to fiber Bragg gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(12): 3125.
- [10] 阮义, 裴丽, 祁春慧, 等. 光纤光栅的VI传输矩阵法研究[J]. *光学学报*, 2009(12): 3267-3271.
- [11] 光纤光栅理论基础与传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.