

光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔时延和色散特性的研究

屈 丽¹ 孟 瑜^{1,2} 卓仲畅^{1,2} 国秀珍² 苏雪梅¹

(¹ 吉林大学物理学院, 吉林 长春 130012)

(² 长春理工大学光电信息学院, 吉林 长春 130012)

摘要 针对组成光纤布拉格光栅法布里-珀罗(F-P)腔两端的光栅参数完全相同的情况,利用传输矩阵法,通过数值模拟分析了光纤布拉格光栅 F-P 腔的几个主要参数改变时对其透射谱特性的影响,详细讨论了光纤布拉格光栅 F-P 腔的时延和色散特性,分析了光纤布拉格光栅 F-P 腔腔长不同时对其慢光特性的影响。该结果对于设计布拉格光栅 F-P 腔以及布拉格光栅 F-P 腔在慢光和色散补偿方面的应用有一定的意义。

关键词 光纤光学;布拉格光栅法布里-珀罗腔;群时延;色散

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0806001

Study on Delay and Dispersion Characteristics of the Fiber Bragg Grating Fabry-Perot Cavity

Qu Li¹ Meng Yu^{1,2} Zhuo Zhongchang^{1,2} Guo Xiuzhen² Su Xuemei¹

¹ College of Physics, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China

² College of Optical and Electronic Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130012, China

Abstract Based on the fiber Bragg grating Fabry-Perot (F-P) cavity with identical grating parameters at two ends, using the transfer matrix method and numerical simulation method, the influence of various parameters of fiber Bragg grating F-P cavity on its transmission spectrum features is analyzed, and the delay and dispersion characteristics of the fiber Bragg grating F-P cavity are discussed in detail. Finally, when its cavity length of fiber Bragg grating F-P cavity is changed, the influence on its slow light characteristics is analyzed. The results of this study can be useful for designing Bragg grating F-P cavity, which are also meaningful to actual experiments and applications in using fiber Bragg grating F-P cavity on the slow light and dispersion compensation.

Key words fiber optics; Bragg grating Fabry-Perot cavity; group delay; dispersion

OCIS codes 050.2770; 050.1950; 050.2230; 060.2310; 060.3735

1 引 言

光纤光栅是一种通过一定的方法可以使得光纤纤芯折射率发生轴向周期性调制而成的衍射光栅,是一种无源滤波器件。光纤光栅具有体积小、成本低、插入损耗低、性能优异、与光学系统兼容性好等优点,已经在光纤通讯和光纤传感领域得到了越来越

广泛的应用^[1-4]。

利用光纤布拉格光栅的反射特性,可以构成布拉格光栅法布里-珀罗(F-P)腔,这种结构由于具有很好的滤波性质,可以用来构造激光器的谐振腔^[5]。目前,光纤布拉格光栅 F-P 腔已经广泛应用于滤波器^[6]、窄带激光器^[7]和传感器^[8-9]等方面。因此,对

收稿日期: 2013-01-29; 收到修改稿日期: 2013-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(11174109)

作者简介: 屈 丽(1985—),男,硕士研究生,主要从事量子光学、光纤光栅等方面的研究。E-mail: xj1301@126.com

导师简介: 苏雪梅(1964—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事量子光学、激光物理与光电子等方面的研究。

E-mail: suxm@jlu.edu.cn(通信联系人)

其特性的研究就显得尤为重要。目前,对光纤布拉格光栅 F-P 腔的透射谱特性的研究^[10-13]已经有很多,但是对 F-P 腔各个参量对其透射谱影响的分析较少,对其群时延和色散特性的研究也很少,而群时延和色散对于研究慢光现象和色散补偿方面是有益的。因此,对于光纤布拉格光栅的群时延和色散特性研究对实际应用有重要的意义。

2 光纤布拉格光栅 F-P 腔的传输矩阵理论

光纤布拉格光栅 F-P 腔是通过在同一根光纤上刻入 2 个均匀光纤布拉格光栅构成的,如图 1 所示,其中 L_1, L_2 分别为两个光栅的长度,中间的腔长为 L 。

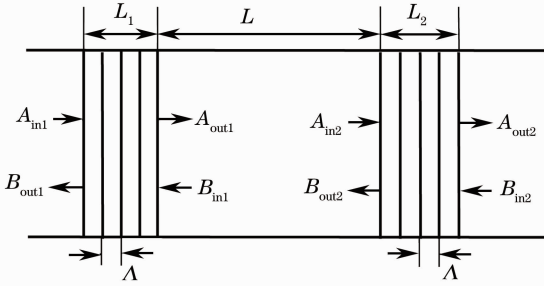


图 1 光纤布拉格光栅 F-P 腔的结构简图

Fig. 1 Structure graph of Bragg grating F-P cavity

采用传输矩阵法分析光纤光栅的 F-P 腔的特性。对于光纤光栅 F-P 腔,可以将其分成三部分。首先对第一部分光纤布拉格光栅 1 进行传输矩阵分析,对于光栅的前端,前向波和后向波的复振幅设为 A_{in1}, B_{out1} ,对于光栅的后端,前向波和后向波的复振幅为 A_{out1}, B_{in1} ,变换矩阵为 F_1 ,则有

$$\begin{bmatrix} A_{in1} \\ B_{out1} \end{bmatrix} = F_1 \begin{bmatrix} A_{out1} \\ B_{in1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{out1} \\ B_{in1} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中矩阵的各个元素值可以由耦合模式理论^[14]求出:

$$F_{11} = F_{22}^* = \cosh(\sqrt{k^2 - \sigma^2} L_1) - i \left(\frac{\sigma}{\sqrt{k^2 - \sigma^2}} \right) \sinh(\sqrt{k^2 - \sigma^2} L_1), \quad (2)$$

$$F_{12} = F_{21}^* = i \left(\frac{k}{\sqrt{k^2 - \sigma^2}} \right) \sinh(\sqrt{k^2 - \sigma^2} L_1), \quad (3)$$

式中直流耦合系数 $\sigma = 2\pi n_{eff} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right)$,其中 $n_{eff} = n + \delta n$, n 为纤芯曝光前的有效折射率, δn 为光栅的折射率调制深度, $\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$ 为布拉格反射峰值波长, Λ 为光栅周期。交流耦合系数 $k = \frac{\pi\nu}{\lambda_B} \delta n$,其中 ν 为光栅的条纹可见度。

由 $r = \frac{F_{21}}{F_{11}} = |r| \exp(i\varphi_r)$, $t = \frac{1}{F_{11}} = |t| \exp(i\varphi_t)$, 可得反射系数和透射系数^[14]为

$$r = \frac{-k \sinh(\sqrt{k^2 - \sigma^2} L_1)}{\sigma \sinh(\sqrt{k^2 - \sigma^2} L_1) + i \sqrt{k^2 - \sigma^2} \cosh(\sqrt{k^2 - \sigma^2} L_1)}, \quad (4)$$

$$t = \frac{\sqrt{k^2 - \sigma^2}}{\sqrt{k^2 - \sigma^2} \cosh(\sqrt{k^2 - \sigma^2} L_1) - i \sigma \sinh(\sqrt{k^2 - \sigma^2} L_1)}. \quad (5)$$

第二部分是一段非曝光区,光波在这一段非曝光区传播只是造成相位上的延迟^[15],变换矩阵 F_2 为

$$F_2 = \begin{bmatrix} \exp(-i\beta L) & 0 \\ 0 & \exp(i\beta L) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 $\beta = 2\pi n/\lambda$ 为传播常数。

第三部分是光纤布拉格光栅 2,这部分的光栅和第一部分所用光栅是同种的类型,但是,其参数与第一个光栅是不同的。因此,当光通过这段光栅后,其变换矩阵 F_3 为

$$F_3 = \begin{bmatrix} F'_{11} & F'_{12} \\ F'_{21} & F'_{22} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

光通过这段 F-P 腔结构后,其输入模式和输出模式之间的关系

$$\begin{bmatrix} A_{in} \\ B_{out} \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} A_{out} \\ B_{in} \end{bmatrix} = F_1 F_2 F_3 \begin{bmatrix} A_{out} \\ B_{in} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

则可得出光通过整个光纤布拉格光栅 F-P 腔的总变换矩阵为

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(-i\beta L) & 0 \\ 0 & \exp(-i\beta L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F'_{11} & F'_{12} \\ F'_{21} & F'_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} \cdot F'_{11} \exp(-i\beta L) + F_{12} \cdot F'_{21} \exp(i\beta L) & F_{11} \cdot F'_{12} \exp(-i\beta L) + F_{12} \cdot F'_{22} \exp(i\beta L) \\ F_{21} \cdot F'_{11} \exp(-i\beta L) + F_{22} \cdot F'_{21} \exp(i\beta L) & F_{21} \cdot F'_{12} \exp(-i\beta L) + F_{22} \cdot F'_{22} \exp(i\beta L) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

光纤布拉格光栅 F-P 腔的透射系数^[16]为

$$t_{\text{F-P}} = \frac{1}{t_{11}} = \frac{1}{F_{11} \cdot F'_{11} \exp(-i\beta L) + F_{12} \cdot F'_{21} \exp(i\beta L)} = \frac{t_1 t_2}{1 - r_1 r_2 \exp(i2\beta L)}, \quad (10)$$

式中 t_1, t_2, r_1 和 r_2 分别为光纤布拉格光栅 F-P 腔 1 和 2 的透射系数、反射系数。

光纤布拉格光栅 F-P 腔的透射率和反射率为

$$T_{\text{F-P}} = |t_{\text{F-P}}|^2, \quad (11)$$

$$R_{\text{F-P}} = 1 - T_{\text{F-P}}, \quad (12)$$

由于 $t_{\text{F-P}} = |t| \exp(i\varphi_i^{\text{F-P}})$, 故光纤布拉格光栅 F-P 腔的相位为

$$\varphi_i^{\text{F-P}} = \text{Im}(\ln t_{\text{F-P}}). \quad (13)$$

相应的群时延和色散公式为

$$\tau_i^{\text{F-P}} = \frac{d\varphi_i^{\text{F-P}}}{d\omega} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\varphi_i^{\text{F-P}}}{d\lambda}, \quad (14)$$

$$D_i^{\text{F-P}} = \frac{d\tau_i^{\text{F-P}}}{d\lambda} = \frac{2\tau_i^{\text{F-P}}}{\lambda} - \frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d^2\varphi_i^{\text{F-P}}}{d\lambda^2} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d^2\varphi_i^{\text{F-P}}}{d\omega^2}. \quad (15)$$

(11)~(15)式是在组成光纤布拉格光栅的两个光栅的参数不一致的情况下光纤布拉格光栅 F-P 腔透射率、反射率、相位、群时延和色散的计算公式。而当两端的光栅一致的情况时,变换矩阵 $\mathbf{F}_3 = \mathbf{F}_1$, 可以运用同样的方法,得到此时的光纤布拉格光栅 F-P 腔的透射系数为

$$t_{\text{F-P}} = \frac{1}{T_{11}} = \frac{1}{F_{11} \cdot F_{22} \exp(-i\beta L) + F_{12} \cdot F_{21} \exp(i\beta L)} = \frac{t^2}{1 - r^2 \exp(i2\beta L)}. \quad (16)$$

该光栅对应的反射率、透射率、相位、群时延和色散同样可以利用(11)~(16)式来进行计算。

3 数值模拟

3.1 光纤布拉格光栅 F-P 腔参数改变对其透射谱、群时延及色散的影响

针对组成光纤布拉格光栅 F-P 腔的两端光栅参数一致的情况时的色散特性进行讨论。取光栅长度 $L_1 = L_2 = 5 \text{ mm}$, 光栅的折射率调制深度 $\delta n = 1.0 \times 10^{-4}$, 光纤布拉格光栅 F-P 腔的腔长 $L = 5 \text{ mm}$, 光栅

的条纹可见度 $\nu = 1.0$, 光栅的周期 $\Lambda = 533.01 \text{ nm}$, 光纤的纤芯折射率 $n = 1.454$ 。当分别改变几个重要参数时,利用(11)~(16)式分别得到了光纤布拉格光栅 F-P 腔的透射率、群时延和色散随 $\Delta\omega$ 的变化曲线, $\Delta\omega = \omega - \omega_B$, 其中 $\Delta\omega = 0$ 时的中心频率 ω_B 与布拉格反射峰值波长 λ_B 相对应。

从图 2(a)中透射谱线可以明显看到,在其他参数保持不变的情况下,随着光栅长度的增加,谐振峰之间的距离变短,最小透射率变小且趋于平坦,透射带宽内的谐振峰线宽变窄, F-P 腔的中心波长位置不变。从图 2(b)和图 2(c)的群时延和色散曲线中看到,随着光栅长度的增加, F-P 腔群时延的最大值增大,色散的正负极值均有明显增加,在群时延剧烈变化的地方,对应的群时延色散曲线也出现了剧烈变化。而在群时延曲线平坦的位置,其色散值为零。透射谱、群时延和色散曲线没有随着光栅长度的增加而发生移动。

从图 3(a)中可以看出,保持其他参数不变,随着光纤布拉格光栅的折射率调制深度的增加,光纤布拉格光栅 F-P 腔最小透射率变小,谐振峰之间的距离变大,谐振峰的线宽会变窄,透射带宽内的谐振峰数目将增多,透射谱线向长波方向发生移动,但在带隙以外也有一些小的谐振谱线出现,这对实际应用是不利的。从图 3(b)和图 3(c)中可以看出,随着光栅折射率调制深度增加, F-P 腔群时延和色散的最大值增加,最小值减少。随着 δn 的增加,群时延和群时延色散曲线向长波方向移动。

从图 4(a)中可以看到,保持其他参数不变,随着腔长的增加,在透射带隙内,谐振谱线数目增加,谐振峰的线宽也变小,各个谐振谱线之间的距离变小。因此将光纤布拉格光栅 F-P 腔用做折射率传感器时,比光纤布拉格光栅传感器分辨率高。从图 4(b)和 4(c)中可以看出,随着腔长的增加,群时延的最大值增加,色散的正负极值也在增大。

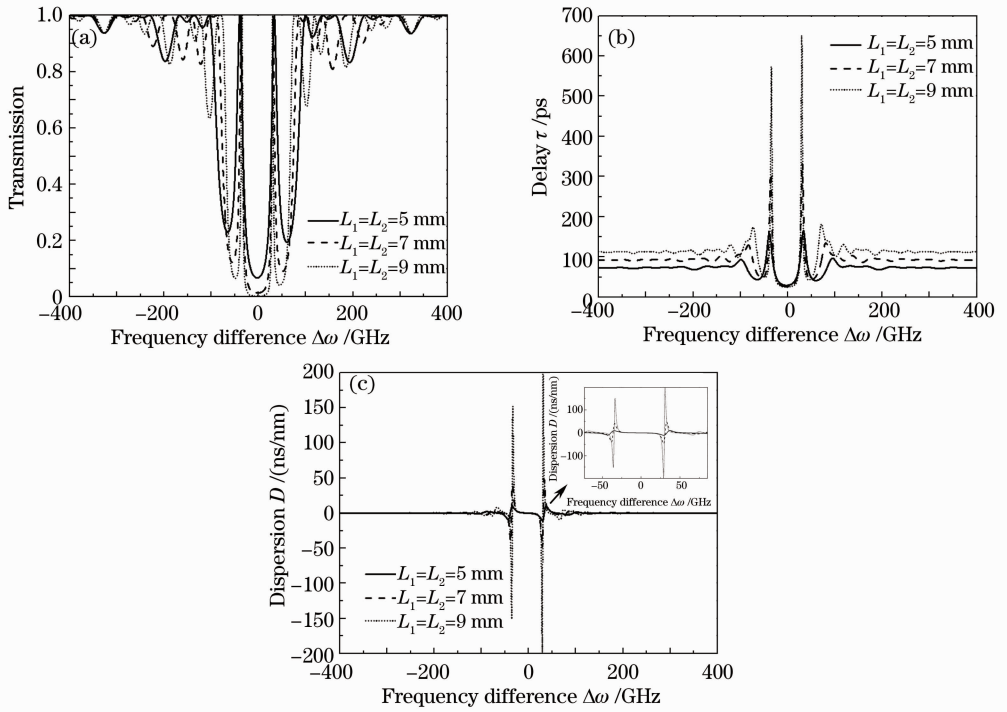


图 2 光栅长度改变时的透射谱、群时延和色散曲线

Fig. 2 Transmission spectra, delay and dispersion with different grating lengths

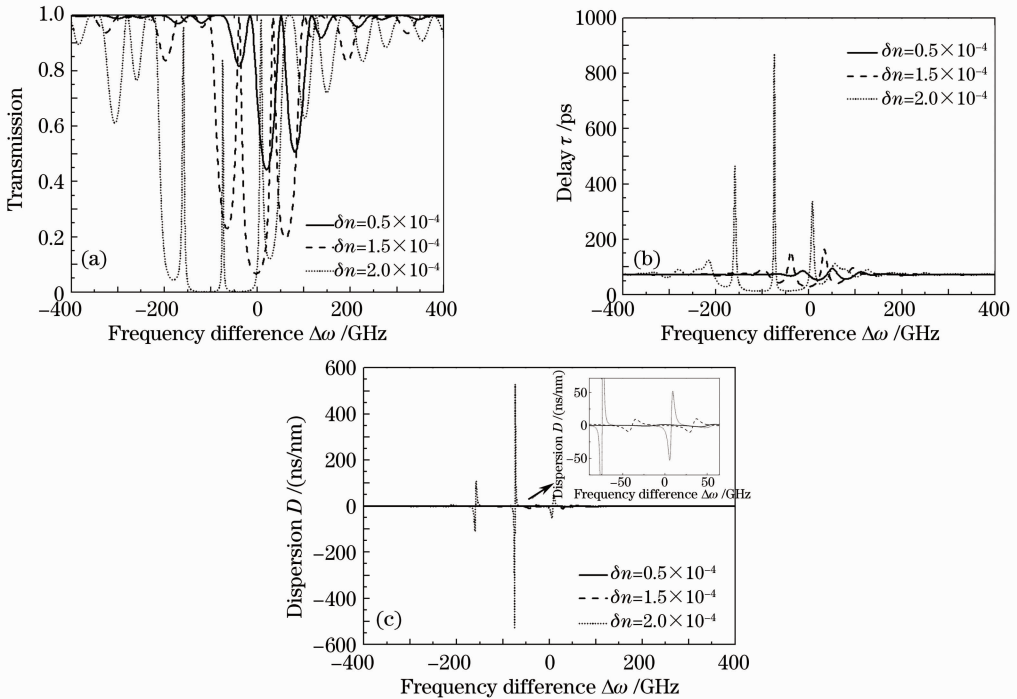


图 3 光栅折射率调制深度改变时的透射谱、群时延和色散曲线

Fig. 3 Transmission spectra, delay and dispersion with different grating refractive index modulation depths

从图 2~4 中可以看出,在优化选择各个参数的条件下,光纤布拉格光栅 F-P 腔可以用于光纤的色散补偿。首先根据入射光脉冲的中心波长,选择构成腔的布拉格光纤光栅的波长略小于光脉冲的中心

波长。由于色散曲线的峰值波长不随光栅长度的增加而发生移动,因此在实验条件允许的情况下,可以通过增加光栅长度来提高布拉格光栅 F-P 腔的色散补偿能力。同时选择大的光栅折射率调制深度,

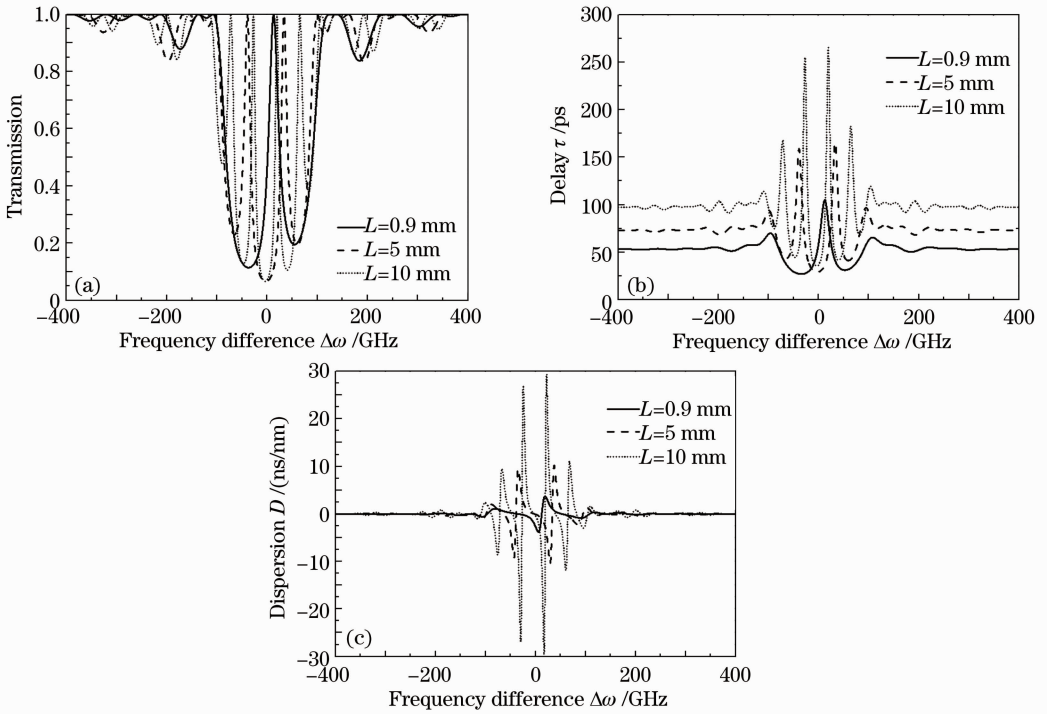


图 4 腔长改变时的透射谱、群时延和色散曲线

Fig. 4 Transmission spectra, delay and dispersion with different cavity lengths

以增加 F-P 腔色散的最大值,但由于会导致色散曲线的峰值波长向长波方向移动,所以要注意控制光栅折射率调制深度的大小,以防止色散曲线的峰值波长超过需要补偿的工作波长。另外,增大 F-P 腔的腔长有利于获得更大的色散值,但是腔长越大, F-P 腔内小的谐振峰越多,会干扰色散补偿效果,因此应选择与光栅长度相近的腔长。

接着,比较光纤布拉格光栅 F-P 腔、单个均匀布拉格光栅以及啁啾光纤光栅色散补偿的优缺点。以图 2 中的参数为例,取光栅长度 $L_1=L_2=9$ mm,从图 2(c) 可以看到,色散最大负极值为 198.5 ns/nm。以补偿普通单模光纤[G. 652 光纤,中心波长为 1550 nm,色散系数约为 18 ps/(nm·km)]为例,可以补偿约 11027.78 km 的单模光纤色散;而与图 2 中的光栅参数一致的单个光纤布拉格光栅,根据(5)、(13)~(15)式计算出色散最大负极值为 0.911 ns/nm,可以补偿约 50.61 km 的单模光纤色散。

周期不均匀的啁啾光纤光栅与基于均匀周期的光纤光栅器件相比,色散补偿的机理较为简单,但光栅的结构比较复杂,而且补偿中须引入一个耦合器或环形器,带来了 1 dB~3 dB 的插入损耗。均匀光纤光栅色散补偿较啁啾光纤光栅结构简单,而且光栅可直接与传输光纤熔接,插入损耗相当小。但光栅的色散机理复杂,且色散量不好控制,补偿的效

果没有啁啾光纤光栅的理想。

3.2 光纤布拉格光栅 F-P 腔的快慢光特性分析

众所周知,一个色散系统透射系数的相位与折射率的关系是 $\varphi = n\omega L_0/c$ (n 为系统折射率, L_0 为介质长度, ω 为入射光频率, c 为真空中光速),由此得到光脉冲在介质中传播的群速度为 $v_g = \frac{L_0}{\tau} =$

$\frac{c}{n(\omega) + \omega \frac{dn}{d\omega}}$, 其中 $\frac{dn}{d\omega}$ 为介质的折射率色散,若介质

的折射率色散为正,则光脉冲在介质中的传播速度小于真空中光速,反之则超光速传播。由 $v_g = \frac{L + 2L_1}{\tau_g}$, 可以得到其群速度与光速的比值随波长的

变化关系曲线,如图 5 所示。图中选取的参数为 F-P 腔腔长 L 分别取 5、15、25、35 mm,其他参数为 $n=1.454$, $L_1=L_2=5$ mm, $\nu=1.0$, $\delta n=1.0 \times 10^{-4}$, $\Lambda=533.01$ nm,从图中可以发现,随着 F-P 腔腔长的增加, F-P 腔透射谱中最小透射率波长位置对应的光的群速度与光速的比值逐渐大于 1,说明在此波长位置处,获得的透射光逐渐由慢光变为快光。随着腔长的增加,透射谱透射带宽内的谐振谱线对应的波长位置处的光的群速度与光速的比值逐渐减小,且这个比值始终小于 1,说明在这些波长位置处,获得的透射光始终为慢光。

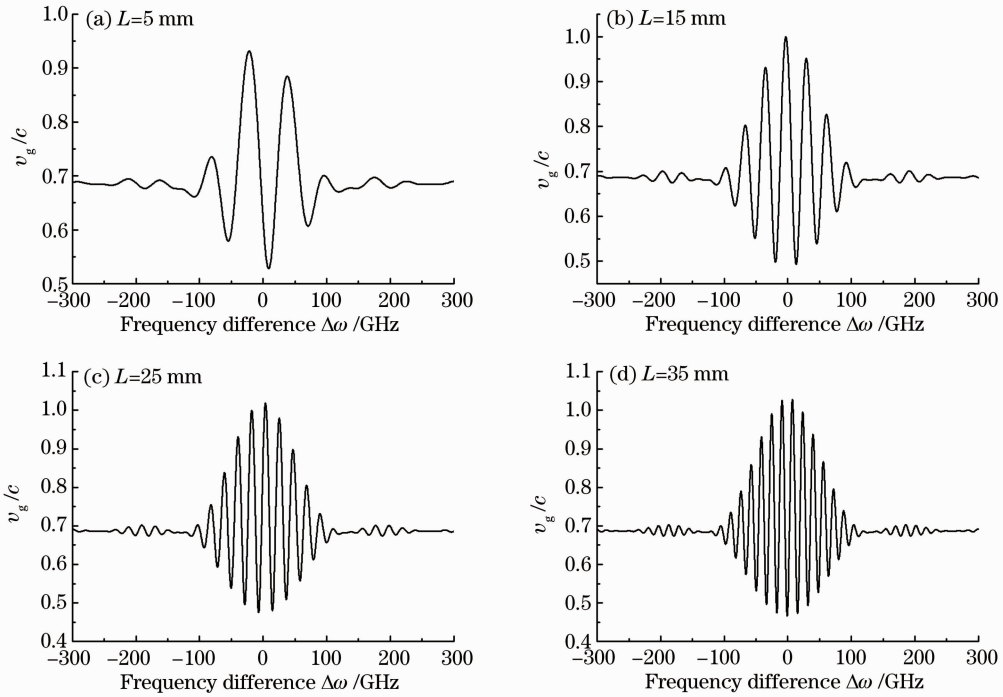


图 5 光纤布拉格光栅 F-P 腔腔长改变时 v_g/c 随波长的变化曲线

Fig. 5 Curves of v_g/c versus wavelength with different cavity lengths

用同样的方法分析了光栅的长度、光栅的折射率调制深度对光纤布拉格光栅 F-P 腔的光的群速度的影响,如图 6、7 所示。通过模拟发现,分别增加光栅的长度和光栅的折射率调制深度,而保证其他参数不变时,F-P 腔透射谱最小透射率对应的波长位置处获得的透射光逐渐由慢光变为快光,F-P 腔透射谱的谐振峰位置处获得的透射光始终为慢光。因此在实际应用中,可以通过适当改变这些参数来获得慢光或者快光,以达到需求。

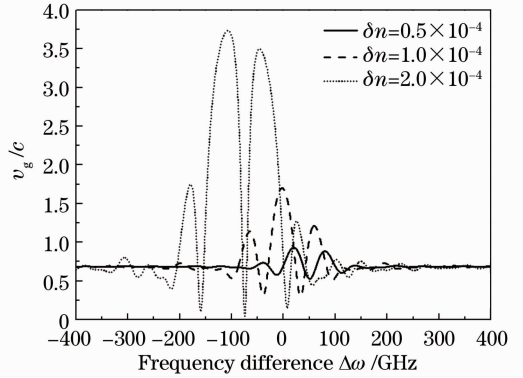


图 7 光栅折射率调制深度改变时 v_g/c 的变化曲线

Fig. 7 Graph of v_g/c with different grating refractive index modulation depths

F-P 腔的透射谱、群时延和色散随波长的变化关系。研究发现,随着光栅长度、折射率调制深度和 F-P 腔腔长的增加,其群时延最大值和色散的正负极值在增大,其中当光栅的折射率调制深度增加时,其群时延和色散曲线发生了红移。通过优化各个参数,光纤布拉格光栅 F-P 腔可以用于光纤色散补偿。并简要分析了系统参数对其快慢光特性的影响。该研究结果对实际利用光纤布拉格光栅 F-P 腔进行色散补偿和快慢光实验具有一定的参考价值。

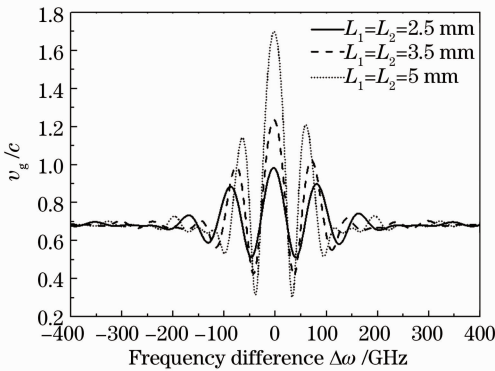


图 6 光栅长度改变时 v_g/c 的变化曲线

Fig. 6 Graph of v_g/c with different grating lengths

4 结 论

本文分析了用相同的光纤布拉格光栅构成的

参 考 文 献

1 Zhang Jinsong, Chen Genxiang, Huang Liqun, *et al.*. The

- applications of fiber gratings in optical communication [J]. Study on Optical Communication, 1998, (3): 50-53.
- 张劲松, 陈根祥, 黄力群, 等. 光纤光栅在光通信中的应用[J]. 光通信研究, 1998, (3): 50-53.
- 2 Wang Kuiru, Cheng Jieli, Chen Gong, *et al.*. Research on time-delay characteristics of solitons in fiber Bragg grating [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0219001.
- 王葵如, 程洁琳, 陈 功, 等. 光纤光栅中孤子时延特性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0219001.
- 3 Li Dongming, Chen Jun, Ge Huiliang, *et al.*. Water sound sensor using the optical fiber grating sensitivity enhanced through side pressure and end surface pulling [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0506001.
- 李东明, 陈 军, 葛辉良, 等. 侧面压迫式及端面拉伸式增敏光纤光栅水声传感器[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0506001.
- 4 Ye Zhenxing, Su Yang, Zhu Yong, *et al.*. Study on the pressure sensing measurement based on Stokes parameters of fiber gratings [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0605003.
- 叶振兴, 苏 洋, 朱 勇, 等. 基于光纤光栅斯托克斯参量的压力传感测量研究[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0605003.
- 5 A Othonos, X lee, D P Tsai. Spectrally broadband Bragg grating mirror for an erbium-doped fiber laser [J]. Opt Engng, 1996, 35(4): 1088-1092.
- 6 G E Town, K Sugden, J A R Williams, *et al.*. Wide-band Fabry-Perot-like filters in optical fiber [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1995, 7(1): 78-80.
- 7 Junqiang Sun, Xiuhua Yuan, Xinliang Zhang, *et al.*. Single-longitudinal-mode fiber ring laser using fiber grating-based Fabry-Perot filters and variable saturable absorbers [J]. Opt Commun, 2006, 267(1): 177-181.
- 8 Fan Liuqing, Ma Li, Han Daofu, *et al.*. Fiber Bragg grating temperature sensor based on dynamic Fabry-Perot cavity [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1005003.
- 范刘静, 马 力, 韩道福, 等. 基于动态法布里珀罗腔的光纤光栅温度传感[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1005003.
- 9 Zhang Le, Wu Bo, Ye Wen, *et al.*. Highly sensitive fiber-optic vibration sensor based on frequency-locking of a FBG Fabry-Perot cavity [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0406006.
- 张 乐, 吴 波, 叶 雯, 等. 基于光纤光栅法布里珀罗腔锁频原理的高灵敏度光纤振动传感器[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0406006.
- 10 Guan Baiou, Yu Youlong, Ge Chunfeng, *et al.*. Theoretical studies on transmission characteristics of fiber grating Fabry-Perot cavity [J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(1): 34-38.
- 关柏鸥, 余有龙, 葛春风, 等. 光纤光栅法布里-珀罗腔透射特性的理论研究 [J]. 光学学报, 2000, 20(1): 34-38.
- 11 Ren Wenhua, Zheng Jingjing, Wang Yanhua, *et al.*. Theoretical analysis of the resonant characteristics of the Fabry-Perot cavity composed of fiber Bragg grating [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(S2): 138-140.
- 任文华, 郑晶晶, 王燕花, 等. 光纤布喇格光栅法布里-珀罗腔谐振特性的理论分析[J]. 光子学报, 2008, 37(S2): 138-140.
- 12 Ren Wenhua, Wang Yanhua, Feng Suchun, *et al.*. A study on the interval between longitudinal modes of Fabry-Perot cavity composed of fiber Bragg gratings [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(12): 7758-7764.
- 任文华, 王燕花, 冯素春, 等. 对光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔纵模间隔问题的研究[J]. 物理学报, 2008, 57(12): 7758-7764.
- 13 Lü Changgui, Cui Yiping, Wang Zhuyuan, *et al.*. A study on the longitudinal mode behavior of Fabry-Perot cavity composed of fiber Bragg grating [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(1): 145-150.
- 吕昌贵, 崔一平, 王著元, 等. 光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔纵模特性研究 [J]. 物理学报, 2004, 53(1): 145-150.
- 14 Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(8): 1277-1294.
- 15 M A Muriel, A Carballar, J Azana. Field distributions inside fiber gratings [J]. IEEE J Quantum Electron, 1999, 35(4): 548-558.
- 16 Orazio Svelto. Principles of Lasers [M]. New York: Plenum Press, 1989.

栏目编辑: 王晓琰