

# 啁啾光纤光栅 F-P 腔的滤波特性

黄芳云

(温州大学图书馆, 浙江温州 325035)

**摘要:** 提出用啁啾光纤光栅构成 F-P 腔滤波器, 用传输矩阵法讨论了 F-P 腔的反射系数与啁啾光纤光栅参数的关系, 并用 matlab 编程进行了数值计算. 结果表明, 光纤光栅的啁啾系数和 F-P 腔的腔长对 F-P 腔滤波器性能有显著影响.

**关键词:** F-P 腔; 滤波器; 光纤光栅; 反射特性

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-0375(2007)02-0039-06

法布里-珀罗 (F-P) 腔谐振滤波器是利用光束在平板的两个表面多次反射产生的干涉, 满足相位条件的波长被输出, 是一种波长选择器件, 在光纤通信系统和光传感系统中具有广泛的应用<sup>[1,2]</sup>. 目前的 F-P 腔滤波器有多种<sup>[3,4]</sup>, 其中薄膜型 F-P 腔谐振滤波器因含有非光纤元件而光损耗大; 光纤 F-P 腔谐振滤波器虽然能与光纤直接耦合, 但其中的非本征型光纤 F-P 腔谐振滤波器的干涉腔是空气, 由于发散角的原因, 光信号变得非常弱; 本征型光纤 F-P 腔谐振滤波器, 其干涉腔内介质是光纤, 光在腔内来回反射的损耗非常小, 由于是强度型滤波器, 在实际应用中必须补偿光纤连接器和耦合器以及光源输出功率的起伏, 这导致其性能和稳定性不高. 光纤光栅传感器采用波长编码的方式, 克服了强度调制传感器的稳定性差的缺点. 基于啁啾光纤光栅的 F-P 腔谐振滤波器<sup>[5-7]</sup>主要用于光纤激光器的选频、光纤光栅解调、波长选择器、波长转换器、色散补偿器和传感系统中, 已经成为光网络中不可缺少的器件. 本文对由两个啁啾光纤光栅构造的 F-P 腔的滤波特性进行研究, 讨论两光纤光栅的长度、周期、啁啾系数、反射率和间距等对光纤光栅 F-P 腔滤波特性的影响.

## 1 啁啾光纤光栅的滤波特性

光纤光栅是在光纤上形成折射率周期变化的光栅, 可以看作是对光纤的微扰. 啁啾光纤光栅的周期沿光栅轴逐渐变大或变小 (可用啁啾系数  $c$  来描述, 定义为单位长度光栅其周期的变化), 周期只有几个微米, 光学性质是基于光纤反向模式之间的谐振耦合而实现的, 入射的光波中只有波长满足布拉格方程的光才被反射, 其余波长的光继续前进而透射出去, 从而呈现滤波功能. 光在啁啾光纤光栅中传输的耦合模方程为<sup>[8]</sup>:

收稿日期: 2006-09-05

作者简介: 黄芳云(1964-), 女, 安徽六安人, 工程师, 学士, 研究方向: 电子信息技术与应用

$$\begin{cases} \frac{da}{dz} = j\Delta\beta a(z) + jkb(z) \\ \frac{db}{dz} = -j\Delta\beta b(z) - jk^* a(z) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $a(z) = A(z)\exp(j\beta z)$  和  $b(z) = B(z)\exp(-j\beta z)$  为后向和前向传播的光波,  $k$  是耦合系数, 可看作常数, 失谐量  $\Delta\beta = 2\pi n_{\text{eff}}(1/\lambda - 1/\lambda_B) - 2\pi\Delta n/\lambda - 4\pi n_{\text{eff}} z/\lambda_B^2$ ,  $\lambda$  是光波波长,  $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$  是布拉格波长,  $\Lambda$  是光栅周期,  $n_{\text{eff}}$  是光栅的有效折射率,  $\Delta n$  是形成光栅时纤芯折射率的变化.

方程(1)不存在解析解, 只能通过数值求解, 常用传输矩阵法, 是将非均匀光纤光栅分成  $M$  小段, 位置  $z_i = iL/M$ , 假定每小段是均匀光栅, 每段确定一个  $2 \times 2$  矩阵, 令  $b(z_i)$ 、 $a(z_i)$  和  $b(z_{i-1})$ 、 $a(z_{i-1})$  是通过  $i$  段光栅前后的光场, 如图1所示, 则有:

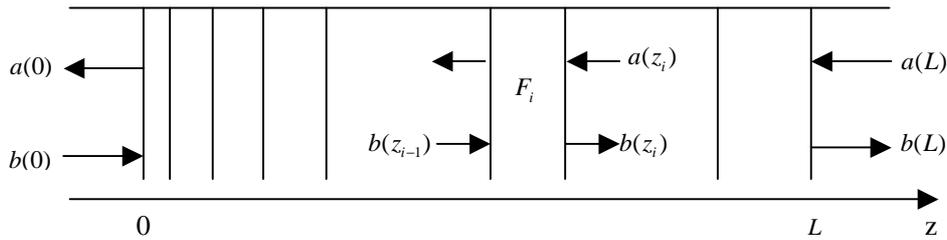


图1 非均匀光栅的传输矩阵法示意图

$$\begin{bmatrix} b(z_{i-1}) \\ a(z_{i-1}) \end{bmatrix} = F_i \begin{bmatrix} b(z_i) \\ a(z_i) \end{bmatrix} \quad (2)$$

每段光栅的矩阵由下式给出:

$$F_i = \begin{bmatrix} \cosh(S\Delta z) - i\frac{\Delta\beta}{S}\sinh(S\Delta z) & -i\frac{\Delta\beta}{S}\sinh(S\Delta z) \\ i\frac{\Delta\beta}{S}\sinh(S\Delta z) & \cosh(S\Delta z) + i\frac{\Delta\beta}{S}\sinh(S\Delta z) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$a(z_{i-1})$

式中  $S = \sqrt{k^2 - (\Delta\beta)^2}$ . 把整个光栅  $M$  段矩阵连乘起来:

$$\begin{bmatrix} b(0) \\ a(0) \end{bmatrix} = F_M \cdot F_{M-1} \cdots F_i \cdots F_2 \cdot F_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{啁啾光栅的反射系数为: } r_g = \frac{a(0)}{b(0)} = |r_g| e^{i\Phi_r} \quad (5)$$

$$\text{啁啾光栅的反射率为: } R_g = |r_g|^2 = \left| \frac{a(0)}{b(0)} \right|^2 \quad (6)$$

## 2 啁啾光纤光栅 F-P 腔的滤波特性与数值分析

啁啾光纤光栅构成的 F-P 腔如图 2 所示. 设光栅  $G_1$  和  $G_2$  的反射系数、透射系数、长度分别为  $r_{g1}$ 、 $t_{g1}$ 、 $L_1$ 、 $r_{g2}$ 、 $t_{g2}$ 、 $L_2$ , F-P 腔的腔长为  $h$ , 边界条件  $a(L_1 + L_2 + h) = 0, b(L_1 + L_2 + h) = 1$ , 则 F-P 腔外  $z = 0$  处的反射波为<sup>[9,10]</sup>:

$$a(0) = \frac{r_{g1} + r_{g2} e^{-i2\beta h}}{1 - r_{g1} r_{g2} e^{-2i\beta h}} b(0) \quad (7)$$

其中  $\beta = 2n\pi/\lambda$ ,  $n$  是 F-P 腔光纤的折射率. 在  $z = 0$  处 F-P 腔的反射系数为:

$$r_{\text{F-P}} = \frac{a(0)}{b(0)} = \frac{r_{g1} + r_{g2} e^{-i2\beta h}}{1 - r_{g1} r_{g2} e^{-2i\beta h}} \quad (8)$$

F-P 腔的反射率为:

$$R_{\text{F-P}} = |r_{\text{F-P}}|^2 = \frac{R_{g1} + R_{g2} - 2|r_{g1}||r_{g2}|\cos(2\beta h - \Phi_{r1} - \Phi_{r2})}{1 + R_{g1}R_{g2} - 2|r_{g1}||r_{g2}|\cos(2\beta h - \Phi_{r1} - \Phi_{r2})} \quad (9)$$

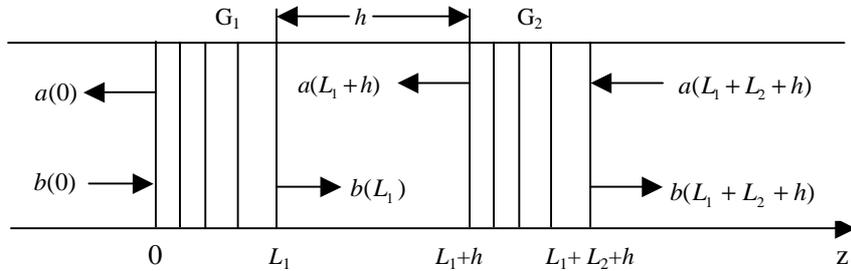


图 2 光纤光栅 F-P 腔结构示意图

由 (6) 式可计算出单个啁啾光纤光栅的滤波特性曲线, 图 3 为用 matlab 编程计算的反射谱, 计算中的参量取值为:  $n_{\text{eff}} = 1.45$ ,  $M=10000$ ,  $\Lambda = 5\mu\text{m}$ ,  $k = 10^{-3}\text{cm}^{-1}$ , 图 3(a)中  $c=0.10\text{nm}\cdot\text{cm}^{-1}$ , 图 3(b)中  $L=7\text{cm}$ . 曲线表明, 光栅的长度和啁啾系数对其滤波特性影响明显, 光栅长度越短, 反射谱的波长带宽越小, 滤波性能越好; 啁啾系数  $c$  越小, 反射谱的波长带宽越小, 反射率越大, 滤波性能越好; 图 4 为用 matlab 编程计算的啁啾光纤光栅 F-P 腔反射谱, 其中单个光栅的参量取值除图 4 标出外, 取与图 3 相同的值. 图 4 表明, F-P 腔的长度和光栅啁啾系数对滤波通道数 (或者滤波光谱的带宽) 影响最明显, 曲线表明, F-P 腔的长度增大, 啁啾光纤光栅 F-P 腔的滤波性能降低, 位于 1550nm 两边波长滤波通道数不对称, 光谱的波动性增大; 由于啁啾光纤光栅具有

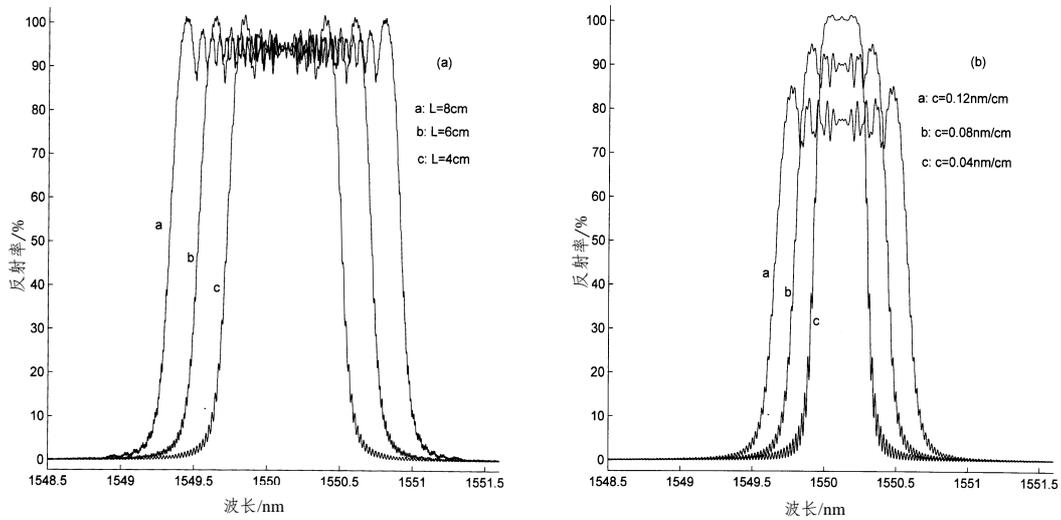


图 3 光栅的长度和啁啾系数对啁啾光栅滤波特性的影响

一定的反射带宽，它只能对其反射带以内的光波提供反馈，反射带以外的光波无法在啁啾光纤光栅 F-P 腔内产生谐振，因此在光纤光栅反射带以外没有谐振峰。可见，光纤光栅的反射带宽起着对输出谱线数目（滤波器通道数）的限制作用，光纤光栅的反射带宽越窄，F-P 腔所能容纳的滤波通道数越少，所以光栅啁啾越大，F-P 腔所能容纳的滤波通道数越多。

对于反射率不是很高的光纤光栅构成的 F-P 腔，由(9)式可得腔的反射率可以近似表示为：

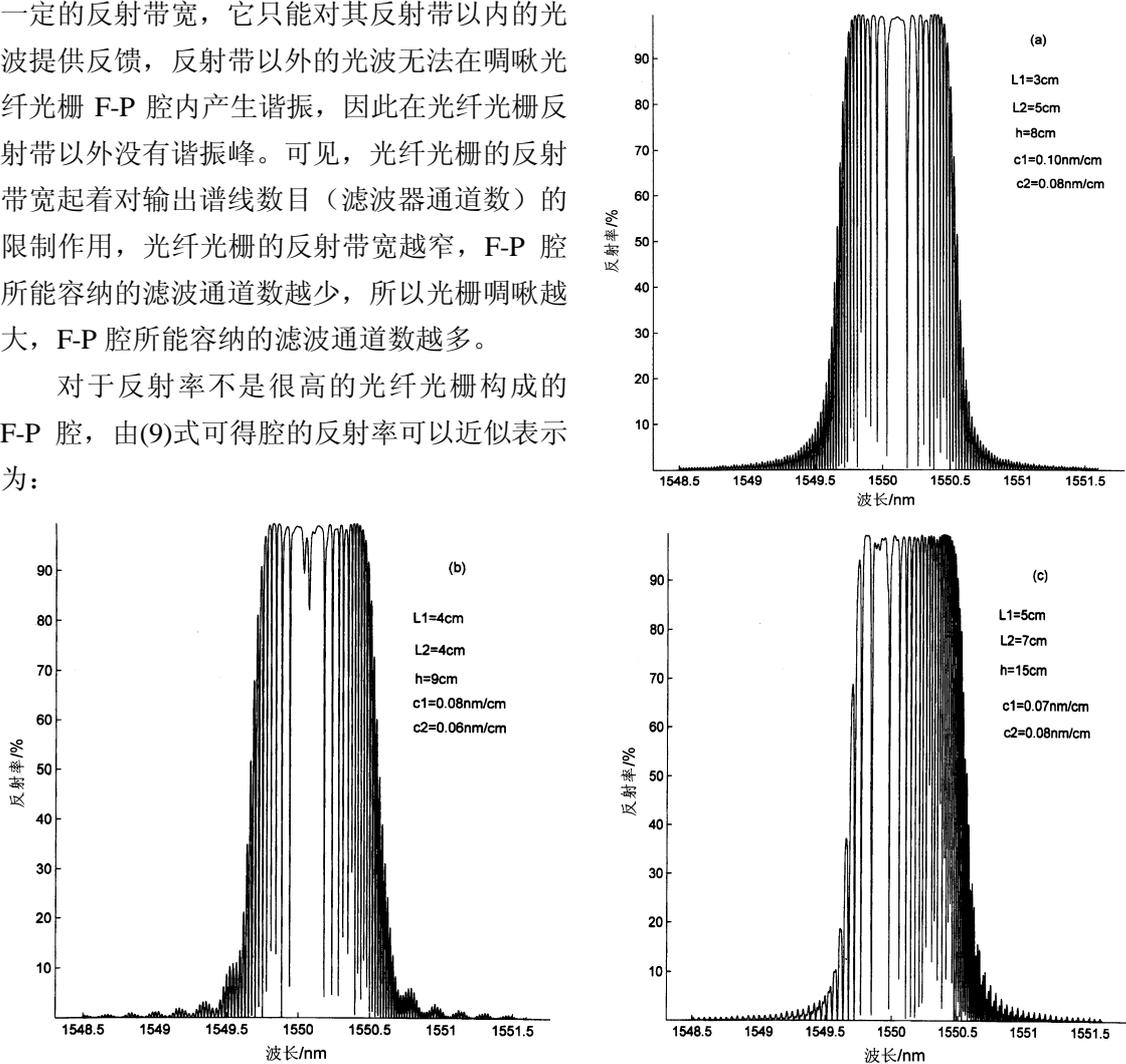


图 4 光栅的啁啾系数和腔长度对 F-P 腔滤波特性的影响

$$R_{F-P} = 2R_g(\lambda)(1 + \cos \Phi_{F-P}) \quad (10)$$

$$\text{其中 } \Phi_{F-P} = \frac{4\pi n L_{F-P}}{\lambda}, \quad L_{F-P} = h + \frac{L_1 + L_2}{2}$$

是 F-P 腔的腔长,  $n$  是 F-P 腔的折射率。由 (10) 式可以求得在光纤光栅反射带宽内 F-P 腔的反射谱线带宽为<sup>[6]</sup>:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2nL_{F-P}} \quad (11)$$

上式表明, 增大 F-P 腔的腔长可以减小反射谱线的带宽, 提高 F-P 腔的滤波性能。利用 (11) 式可求得光栅 F-P 腔的谱线带宽典型值小于 0.05nm, 远小于光栅带宽 (~0.5nm), 表明啁啾光纤光栅 F-P 腔的滤波性能比啁啾光纤光栅要好得多。理论上是由于光纤光栅反射率相位因子  $\Phi_r$  的作用, 使得光纤光栅 F-P 腔的谱线间距比普通 F-P 腔的谱线间距变小。因此, 外界环境发生变化时, 光纤光栅 F-P 腔反射谱的移动比相应单一的啁啾光纤光栅要明显得多, 即光纤光栅 F-P 腔对外界更为敏感。

### 3 结 论

利用双啁啾光纤光栅来制作本征型 F-P 腔滤波器, 在啁啾光纤光栅反射带宽内形成干涉条纹。F-P 腔的长度增大, F-P 腔的滤波性能降低; 光纤光栅的啁啾越小, 反射带宽越窄, F-P 腔所能容纳的滤波通道数越少; 外界环境发生变化时, F-P 腔反射谱的移动比相应单一的啁啾光纤光栅要明显得多, 表现对外界更为敏感。这种啁啾光纤光栅 F-P 腔滤波器可以很自然地实现波分复用。

#### 参考文献

- [1] 卞炬烽, 袁一方, 陶伟, 等. 用于光纤通信系统的 F-P 可调谐滤波器[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(2): 54-57.
- [2] 李莹, 张书练. 基于可调 F-P 腔滤波器的光纤光栅解调系统[J]. 激光技术, 2005, 29(3): 237-240.
- [3] 吴国锋. 几种新型可调谐窄带光滤波器[J]. 光子技术, 2006, 12(2): 64-68.
- [4] 汪宏章, 戴珩. 新型 F-P 腔滤波器的性能分析及控制[J]. 传感器技术, 2005, 24(9): 16-18.
- [5] 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.
- [6] 李家方, 吕可诚, 韩群, 等. 基于光纤光栅 F-P 腔的一种新颖传感系统的理论研究[J]. 光电子技术, 2004, 24(1): 21-26.
- [7] 吴朝霞, 吴飞, 蔡璐璐, 等. Bragg 光纤光栅法布里——珀罗腔传感器的应变测量[J]. 光学技术, 2005, 31(4): 559-602.
- [8] 汤树成. 光纤光栅谱特性的数值模拟[J]. 现代有限传输, 2002, 18(2): 23-28.
- [9] 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.
- [10] 饶云江, 周昌学, 冉曾令, 等. 啁啾光纤光栅法布里——珀罗传感器波分频分复用[J]. 中国激光, 2006, 33(5): 631-635.

## Filter Characteristics of Chirped Fiber Grating F-P Cavity

HUANG Fangyun

(The Library, Wenzhou University, Wenzhou, China 325035)

**Abstract:** The Fabry-Perot (F-P) cavity filter based on chirped fiber gratings is proposed. The relation of reflectivity of F-P cavity with parameters of chirped fiber gratings is obtained by the transferred matrix method, and is numerically calculated by matlab. The results show that the marked effect of chirped parameters and F-P cavity has an influence on filter characteristics of F-P cavity.

**Key words:** F-P cavity; Filter; Fiber grating; Reflectivity

(编辑: 王一芳)