

# 反射相移对 MEMS 滤波器半峰全宽影响分析\*

殷学会<sup>1</sup> 李承芳<sup>1</sup> 吴晓平<sup>2</sup> 胡强高<sup>2</sup>

(1 武汉大学物理系, 武汉 430072)

(2 武汉邮电科学研究院, 武汉 430073)

**摘 要** 以典型的基于 MEMS 的 FP 腔结构为例, 用传输矩阵方法推导了考虑反射相移的半峰全宽的解析表达式. 利用此解析表达式分别模拟了考虑反射相移的半峰全宽与干涉级次和 FP 腔两反射镜间距的关系, 并将其与不考虑反射相移的半峰全宽进行了对比; 同时将反射相移和反射率对半峰全宽的影响进行了比较分析.

**关键词** MEMS; 可调滤波器; 法布里-珀罗腔; 半峰全宽; 反射相移

**中图分类号** TN205 **文献标识码** A

## 0 引言

光可调滤波器在光通信密集波分复用、分插复用、光谱仪、调谐激光器和光传感等领域中有着重要的应用<sup>[1~8]</sup>. FP (Fabry-Perot) 腔是目前光可调滤波器中使用最普遍的一种结构. 基于多光束干涉的影响, 光学介质将两个相互平行低耗高反的反射镜隔开构成 FP 腔. 常规的 FP 腔滤波器两反射镜间距非常大, 与间距带来的相变相比, 反射镜产生的反射相移非常小, 可以忽略掉. 但如果两反射镜间距很小, 要想获得精确的峰值波长、自由谱域和半峰全宽就必须考虑反射相移. 基于 MEMS (Micro Electro Mechanical systems) 的 FP 腔就属于这种情况. 此类 FP 腔因其有着易与其它光电器件兼容、造价低廉、体积微小、易于批量生产、易于控制等优点, 而成为一个研究热门. 其多使用悬臂、桥式的薄膜结构<sup>[5~8]</sup>, 反射镜间隙非常小, 因此必须考虑反射相移带来的影响.

文献[9]用实验验证了反射相移对基于 MEMS 的 FP 腔的自由谱域有着严重影响, 指出干涉级次不大于 10 时, 反射相移为自由谱域的主要影响因素; 干涉级次在 10~40 时, 反射相移色散为自由谱域的主要影响因素. 文献[10]推导了考虑反射相移情况下基于 MEMS 的 FP 腔共振波长和两反射镜间距的关系表达式, 并讨论了基于 MEMS 的 FP 腔的调节灵敏度和计算误差. 然而讨论反射相移对基于 MEMS 的 FP 腔半峰全宽影响的文献尚未见到报道. 本文以典型的基于 MEMS 的 FP 腔结构为

例, 用传输矩阵的方法推导了考虑反射相移时半峰全宽解析表达式; 利用此解析表达式分别模拟了考虑反射相移的半峰全宽与干涉级次和 FP 腔两反射镜间距的关系, 并将其与不考虑反射相移的半峰全宽进行了对比; 同时将反射相移和反射率对半峰全宽的影响进行了比较分析.

## 1 理论推导

基于 MEMS 的 FP 腔一般使用类似于图 1 的结构<sup>[10]</sup>. 两反射镜由高低折射率绝缘薄膜交替组成的 DBR (Distributed Bragg Reflector) 构成, 光学介质为空气, 上反射镜使用悬臂结构, 电极分别加在基底和上反射镜上. 静电驱动上反射镜向下移动,

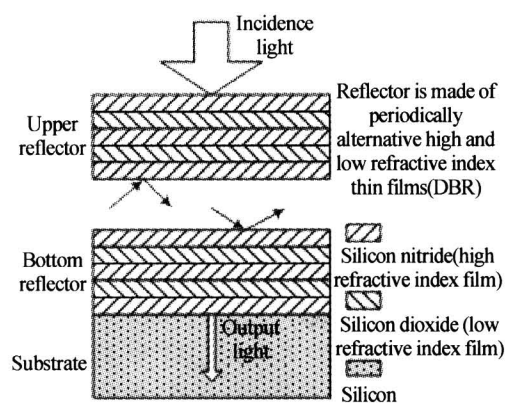


图 1 基于 MEMS 的 FP 腔示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of a MEMS-based Fabry-Perot Interferometer

则两反射镜间隙改变, 透过 FP 腔的波长也随之改变. FP 腔的透射率为<sup>[11]</sup>

$$\tau = [T_u T_b / (1 - \sqrt{R_u R_b})^2] \cdot \{1 + [4 \sqrt{R_u R_b} / (1 - \sqrt{R_u R_b})^2] \sin^2 [(2\pi n L \cos \theta) / \lambda - (\beta_u + \beta_b) / 2]\}^{-1} \quad (1)$$

式中  $T_u$ 、 $T_b$ 、 $R_u$ 、 $R_b$ 、 $\beta_u$ 、 $\beta_b$  分别为上层和下层 DBR

\* 国家“863”高技术计划(2002AA312200)资助项目  
Tel: 027-87693577 Email: xhyin@wri.com.cn  
收稿日期: 2005-05-10

的透射率、反射率和反射相移,  $n$ 、 $L$ 、 $\theta$  分别为 FP 腔的光学介质折射率、两反射镜间距和光入射角,  $\lambda$  为入射光波长. 用传输矩阵的方法, 得到由  $2S+1$  ( $S$  为 DBR 周期数) 层绝缘薄膜组成的 DBR 的传输函数为<sup>[11]</sup>

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} \cos \delta_h & \frac{i}{n_h} \sin \delta_h \\ in_h \sin \delta_h & \cos \delta_h \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \delta_l & \frac{i}{n_l} \sin \delta_l \\ in_l \sin \delta_l & \cos \delta_l \end{bmatrix} \right\}^S \times \begin{bmatrix} \cos \delta_h & \frac{i}{n_h} \sin \delta_h \\ in_h \sin \delta_h & \cos \delta_h \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ n_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

$\delta_j = 2\pi n_j d_j \cos \theta_j / \lambda$  ( $j = h, l$ ),  $n_j$ 、 $d_j$ 、 $\theta_j$ 、 $\delta_j$  分别为绝缘薄膜层的折射率、物理厚度、入射光折射角和位相厚度,  $n_m$  为基底的折射率,  $n_j d_j = \lambda_0 / 4$  ( $\lambda_0$  为 DBR 的中心反射波长).

可调滤波器在  $\lambda_0$  附近调节波长, 故  $\lambda_0 / \lambda$  非常接近于 1, 因此在正入射的情况下, 利用泰勒公式展开得到  $\cos \delta_h = \cos \delta_l \approx -\pi(\lambda_0 / \lambda - 1) / 2$  以及  $\sin \delta_h = \sin \delta_l \approx 1$ . 将式(2)做矩阵乘法运算, 结合切比雪夫第二类多项式以及反射相移  $\beta$ 、反射率  $R$  的计算公式<sup>[11]</sup>得到  $\beta$  和  $R$  的表达式

$$\beta \approx -N\pi(\lambda_0 / \lambda - 1) \quad (3)$$

$$R = \frac{[(\frac{n_m}{n_h} - n_h)U_S + (\frac{n_m}{n_l} - n_l)U_{S-1}]^2}{[(\frac{n_m}{n_h} + n_h)U_S + (\frac{n_m}{n_l} + n_l)U_{S-1}]^2} \quad (4)$$

式中  $U_S = \frac{\sin[(S+1)\arccos x]}{\sqrt{1-x^2}}$ ,  $x = -\frac{1}{2}(\frac{n_h}{n_l} + \frac{n_l}{n_h})$

$$N = \{(U_S - U_{S-1})[(\frac{n_m}{n_h} - n_h)U_S + (\frac{n_m}{n_l} - n_l) \cdot U_{S-1}]\} / \{[(\frac{n_m}{n_h} - n_h)U_S + (\frac{n_m}{n_l} - n_l)U_{S-1}][(\frac{n_m}{n_h} + n_h)U_S + (\frac{n_m}{n_l} + n_l)U_{S-1}]\} \quad (5)$$

$N$  为 DBR 反射相移的一个因子, 称为反射相移系数.

从式(3)、(4)可知, 在一阶近似下  $\beta$  是波长的函数,  $R$  与波长无关. 通过计算得到的透射率也与波长无关, 又由于 FP 腔的反射相移引起的变化量很小, 半峰全宽远远小于波长, 故利用小角度下的正弦近似可以得到考虑相移情况下基于 MEMS 的 FP 腔半峰全宽的解析表达式

$$\delta = \frac{1 - (R_u R_b)^{1/2}}{(R_u R_b)^{1/4}} \cdot \frac{\lambda'}{\pi(k + \frac{N_u + N_b}{2})} = \frac{1 - (R_u R_b)^{1/2}}{(R_u R_b)^{1/4}} \cdot \frac{2nL + \frac{N_u + N_b}{2} \cdot \lambda_0}{\pi(k + \frac{N_u + N_b}{2})^2} \quad (6)$$

式中  $\lambda'$  为 FP 腔的共振波长,  $k$  为干涉级次,  $N_u$ 、 $N_b$  分别是 FP 腔的上下两反射镜的反射相移系数.

## 2 模拟计算与分析

### 2.1 不同 $k$ 值下反射相移的影响

$k$  值越小, 反射相移对半峰全宽的影响就越显著; 相反,  $k$  值越大, 反射相移的影响则越小. 并且考虑反射相移的半峰全宽  $\delta$  始终要小于相同  $k$  值下不考虑反射相移的半峰全宽  $\delta'$ . 式(6)将  $(N_u + N_b) / 2$  去掉就变成不考虑反射相移的常用关系式:  $\delta' = [1 - (R_u R_b)^{1/2}] \lambda' / [\pi k (R_u R_b)^{1/4}]$ . 以反射镜由 21 层薄膜组成, 高低折射率薄膜分别为 SiN ( $n_h = 2.01$ ) 和 SiON ( $n_l = 1.49$ ), 基底为 Si ( $n_m = 3.6$ ), 反射镜反射中心波长和 FP 腔共振波长均为 1550 nm 的可调滤波器为例, 根据式(6)和常用关系式, 模拟了  $\delta$  和  $\delta'$  分别与  $k$  的变化关系图, 见图 2.

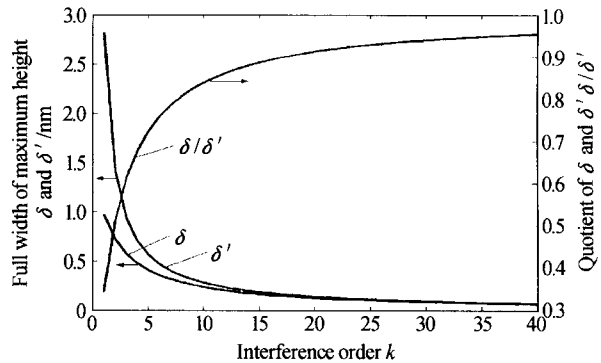


图 2  $\delta/\delta'$ 、 $\delta$  和  $\delta'$  分别随  $k$  的变化关系

Fig. 2  $\delta/\delta'$ 、 $\delta$  and  $\delta'$  change with  $k$  respectively

从图 2 可以看出:  $k = 20$  时,  $\delta$  约等于  $\delta'$  的 90%;  $k < 20$  时,  $\delta/\delta'$  随着  $k$  值的减小急剧下降, 甚至达到 0.5 以下,  $\delta$  和  $\delta'$  曲线偏离相当严重; 而  $k > 20$  时,  $\delta/\delta'$  曲线变化十分缓慢, 并随着  $k$  的增大而逐渐接近于 1,  $\delta$  和  $\delta'$  曲线也越来越接近. 这是因为低阶干涉级次时,  $k$  和  $(N_u + N_b) / 2$  大小相当, 对  $\delta$  的贡献也相当; 随着  $k$  的减小,  $(N_u + N_b) / 2$  值大于  $k$ ,  $(N_u + N_b) / 2$  对  $\delta$  的贡献明显要大于  $k$  的贡献, 故  $\delta$  和  $\delta'$  曲线偏离严重; 然而  $k$  远远大于  $(N_u + N_b) / 2$  时,  $(N_u + N_b) / 2$  对  $\delta$  的贡献则远远小于  $k$  的贡献, 可以忽略掉, 因此  $\delta$  和  $\delta'$  曲线随着  $k$  的增大而越来越接近.

### 2.2 不同 $L$ 值下反射相移的影响

MEMS 可调滤波器通过调节  $L$  的大小来调节透过波长, 调节范围一般很宽, 只在一个自由谱域内对波长进行调节, 因此调节范围内各共振波长的干涉级次相同且很小, 半峰全宽与  $L$  成线性关系, 但反射相移的存在使  $L$  的变化对  $\delta$  的影响要小于对  $\delta'$  的影响. 图 3 模拟了  $k = 2$  时, 可调滤波器的  $\delta$  和  $\delta'$

分别与  $L$  的变化关系. 图中  $\delta$  和  $\delta'$  均随着  $L$  的增大而增大, 但  $\delta$  的斜率明显要小于  $\delta'$  的斜率.  $L$  从 1525 nm 增加到 1565 nm 时,  $\delta$  从 2.798 nm 增加到 2.834 nm, 变化了 0.036 nm;  $\delta'$  从 2.775 nm 增加到 2.848 nm, 变化了 0.073 nm.  $\delta$  的变化幅度要小于  $\delta'$  的变化幅度一半, 故反射相移的存在大大改善了可调滤波器的腔长调节对半峰全宽的影响. 图 3 中  $\delta$  不是始终小于  $\delta'$ , 这和前述结论并不矛盾, 因为同一  $L$  所对应的考虑反射相移的共振波长和不考虑反射相移的共振波长不相等, 即  $\delta$  和  $\delta'$  不是同一共振波长的半峰全宽.

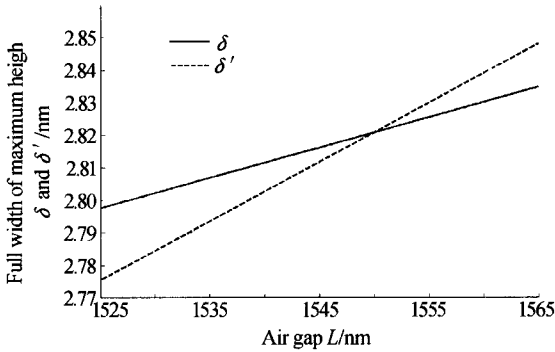


图 3  $\delta$  和  $\delta'$  随  $L$  变化关系  
Fig. 3  $\delta$  and  $\delta'$  as functions of  $L$  respectively

### 2.3 反射率和反射相移对半峰全宽影响的比较

反射相移的出现使基于 MEMS 的 FP 腔半峰全宽多了一个制约因素, 但反射相移和反射率一样取决于薄膜层的层数及高低折射率之比. 为了比较反射相移和反射率对半峰全宽的影响, 模拟了  $\lambda' = 1550 \text{ nm}$ ,  $k=2$ 、硅基折射率为 3.6 时,  $N_u, R_u$  (分别用  $N, R$  表示, 由于光通过两反射镜后的出射介质分别为空气和硅基,  $N_u, R_u$  值并不等于  $N_b, R_b$ , 但变化趋势相同) 和  $\delta, \delta'$  分别随  $S, n_h$  和  $n_l$  变化的曲线, 如图 4、5、6. 图 4 是  $N, R$  以及  $\delta, \delta'$  随  $S$  的变化关系图, 其中  $n_h=2, n_l=1.46$ . 随着  $S$  的增大,  $N$  和  $R$  均逐渐增大,  $\delta, \delta'$  逐渐减小. 值得一提的是, 式 (6) 是在半峰全宽相对共振波长很小的时候做出的近似. 虽然计算出的半峰全宽数值较大时, 存在着较大的误差, 但是其变化趋势仍可以用式 (6) 来表示. 图 5 是  $N, R$  以及  $\delta, \delta'$  随  $n_h$  的变化关系图, 其中  $S=10, n_l=1.46$ . 从图 5 中可以看到: 随着  $n_h$  的增大,  $N, \delta, \delta'$  减小,  $R$  增大. 图 6 是  $N, R$  以及  $\delta, \delta'$  随  $n_l$  的变化关系图, 其中  $S=10, n_h=2$ . 从图 6 中可以看到: 随着  $n_l$  的增大,  $N, \delta, \delta'$  增大,  $R$  减小.

图 4 中  $N$  和  $R$  对  $\delta$  有着相同的贡献, 均使  $\delta$  减小, 但  $N$  的贡献主要表现在  $\delta$  和  $\delta'$  的偏离. 图 5 中  $N$  减小应该使  $\delta$  增大趋势, 但是由于  $R$  增大,  $\delta$  实际上是逐渐减小的; 图 6 中  $N$  的增大应该使  $\delta$  减小,

但是由于  $R$  减小,  $\delta$  是逐渐增大的. 因此可以看出反射率是决定半峰全宽大小的主要因素, 而反射相移的存在使半峰全宽值有了一个相对的减小. 因此在设计半峰全宽值时, 应当主要参考  $R$  的大小. 从

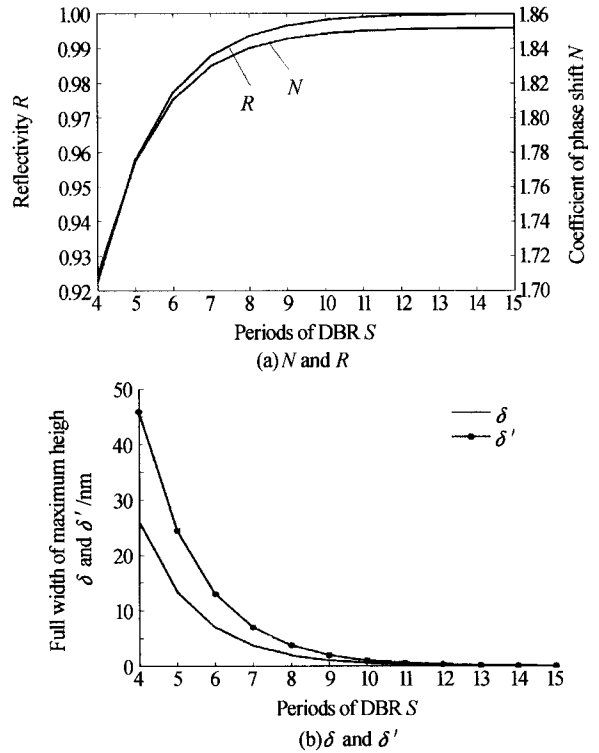


图 4  $n_h=2, n_l=1.46$  时,  $N, R$  以及  $\delta, \delta'$  随  $S$  的变化曲线  
Fig. 4 When  $n_h=2$  and  $n_l=1.46$ , the change curves of  $N, R, \delta$  and  $\delta'$  with the change of  $S$

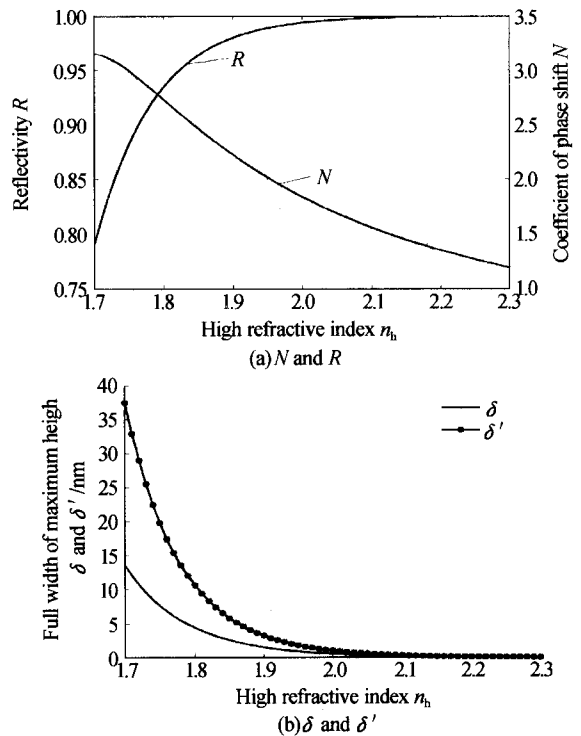


图 5  $S=10, n_l=1.46$  时,  $N, R$  以及  $\delta, \delta'$  随  $n_h$  的变化曲线  
Fig. 5 When  $S=10$  and  $n_l=1.46$ , the change curves of  $N, R, \delta$  and  $\delta'$  with the change of  $n_h$

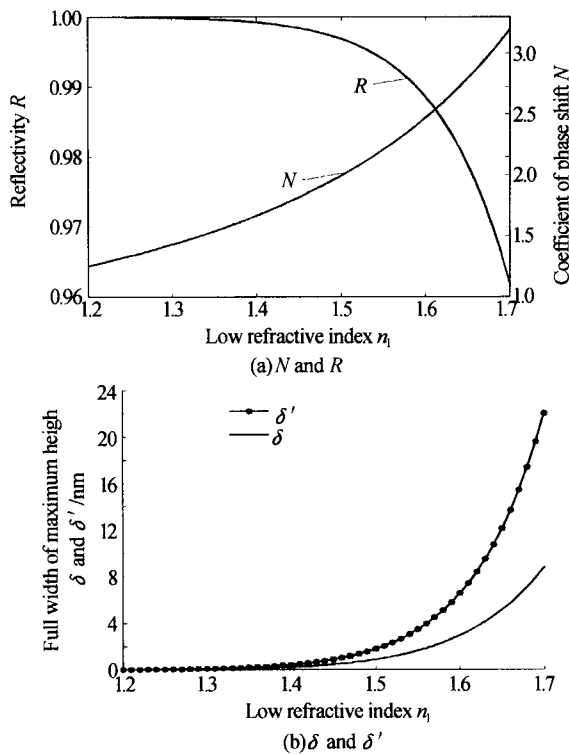


图 6  $S=10, n_h=2$  时,  $N, R$  以及  $\delta, \delta'$  随  $n_1$  的变化关系  
Fig. 6 When  $S=10$  and  $n_h=2$ , the change curves of  $N, R, \delta$  and  $\delta'$  with the change of  $n_1$

图 4、5、6 中可看出采用多周期 DBR 和高折射率比的滤波器将获得低半峰全宽值。

### 3 结论

由于基于 MEMS 的 FP 腔两反射镜间距很小, 必须考虑反射镜的反射相移对半峰全宽的影响. 要获得精确的半峰全宽值必须使用考虑反射相移的表达式. 在反射相移的影响下, 基于 MEMS 的 FP 腔可调滤波器半峰全宽受两反射镜间距变化的影响变小. 与反射相移带来的影响相比: 反射率仍是半峰全宽设计中的决定因素, 采用多周期 DBR 和高折射率比的滤波器将获得低半峰全宽值. 这对于基于 MEMS 的 FP 腔半峰全宽设计有着重要的指导意义.

#### 参考文献

1 Sadot D, Boimovich E. Tunable optical filters for dense WDM networks. *IEEE Communications Magazine*, 1998, **36**(12): 50~55

2 欧毅, 崔芳, 孙雨南. 微机械 FP 腔可调谐滤波器在 WDM 系统中的串扰分析. *光子学报*, 2003, **32**(9): 1110~1113  
Ou Y, Cui F, Sun Y N. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9): 1110~1113

3 Correia J H, Bartek M, Wolffenbuttel R F, et al. Bulk-micromachined tunable Fabry - Perot microinterferometer for the visible spectral range. *Sensors Actuators A: Physical*, 1999, **76**(2): 191~196

4 崔建民, 冯立辉, 孙雨南, 等. 用于 OADM 的集成声光可调滤波器的性能分析. *光子学报*, 2003, **32**(12): 1430~1433  
Cui J M, Feng L H, Sun Y N, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(12): 1430~1433

5 Garrigues M, Leclercq J L, Viktorovitch P. III-V Semiconductor based MOEMS devices for optical telecommunications. *Microelectronic Engineering*, 2002, **61-62**: 933~945

6 左玉华, 毛容伟, 黄俊昌, 等. 镜面起伏对 1.55  $\mu\text{m}$  Si 基 MEMS 光滤波器的影响. *光子学报*, 2003, **32**(6): 661~664  
Zuo Y H, Mao R W, Huang C J, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6): 661~664

7 Jaeheon H. Novel fabrication and characterization method of Fabry - Perot microcavity pressure sensors. *Sensors Actuators A: Physical*, 1999, **75**(2): 168~175

8 Li M Y, Yuen W, Li G S. Top-emitting micromechanical VCSEL with a 31.6 nm tuning range. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, **10**(1): 18~20

9 Xiang M, Cai Y M, Wu Y M, et al. Experimental study of the free spectral range (FSR) in FPI with a small palte gap. *Optics Express*, 2003, **11**(23): 3147~3152

10 Shen W D, Liu X D, Huang B Q, et al. Analysis on the tunable optical properties of MOEMS filters based on Fabry-Perot Cavity. *Optics Communications*, 2004, **239**(2): 153~160

11 唐晋发. 应用薄膜光学. 上海: 上海科学技术出版社, 1984. 82~86  
Tang Jinfa. Applied thin film optics. Shanghai: Shanghai science and technology press, 1984. 82~86

## Analysis of Reflection Phase Shift's Effect on MEMS-Based Filter's Full Width of Maximum Height

Yin Xuehui<sup>1</sup>, Li Chengfang<sup>1</sup>, Wu Xiaoping<sup>2</sup>, Hu Qianggao<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of physics, Wuhan University, Wuhan 430072

<sup>2</sup> Wuhan Research Institute of Posts & Telecommunications, Wuhan 430073

Received date: 2005-05-10

**Abstract** Analytic expression with the effect of phase shift on reflection for full width of maximum height of a typical MEMS-based FP cavity is deduced by transfer matrix method. The relationship between full width of maximum height and interference order is simulated with the analytic expression, so does the relationship between full width of maximum height and the gap of the two reflectors. And the result is compared with full width of maximum height without considering phase shift on reflection. The effects on full width of maximum height caused by phase shift on reflection and reflection index respectively are discussed too.

**Keywords** MEMS; Tunable optical filter; Fabry-Perot Cavity; Full width of maximum height; Reflection phase shift



**Yin Xuehui** was born in 1981, in Hubei Province. He received his B. S. degree from Wuhan University in 2003. Currently, he is pursuing his M. S. degree in Wuhan University. His research interests focus on photoelectric devices for optical communication.