

# 硅微机械 FP 腔器件机电特性模拟\*

欧毅<sup>1</sup> 孙雨南<sup>2</sup> 陈大鹏<sup>1</sup> 崔芳<sup>2</sup>

(1 中科院微电子研究所微细加工与纳米技术实验室,北京 100029)

(2 北京理工大学信息科学与技术学院,北京 100081)

**摘要** 介绍了一种硅微机械 FP 腔器件,该器件作为光学滤波器、光学衰减器等在光纤通信技术中具有广泛应用.采用化学气相沉积、刻蚀、金属蒸发等工艺对该器件进行加工,并利用湿法腐蚀释放使其形成悬空结构,悬空膜采用静电激励驱动.分析了器件的基本原理、工作范围、静电激励的阈值电压等特性,并指出了影响阈值电压大小的因素.

**关键词** 微机械 FP 腔;光纤通信;阈值电压

**中图分类号** TN256;TP212 **文献标识码** A

## 0 引言

在光纤通信技术中,光学滤波器、光学衰减器都是重要的组成部分.而通常的这些光学器件都是体器件,其调谐速度慢,体积大.而基于表面微机械技术的 FP 干涉型滤波器和衰减器具有体积小、易于集成、调谐速度快、调谐准确度高、插入损耗小、可以连续调谐等优点,可以广泛应用于光通讯波分复用(WDM)系统中<sup>[1~3]</sup>.本文介绍一种基于表面薄膜工艺的硅微机械 FP(MEMS-FP)腔器件,它是采用化学气相沉积、刻蚀、金属蒸发等工艺进行加工的多用途微型光学器件.目前,这种结构可以用做滤波器、衰减器或调制器<sup>[4,5]</sup>.本文对它的一些基本性能进行模拟和分析.

## 1 MEMS FP 器件的基本结构及原理

MEMS-FP 腔器件的三维基本结构如图 1,其加工过程是首先在低电阻率的掺杂硅片上低压化学气相沉积(LPCVD)生长 $1.16\ \mu\text{m}$ 左右的氧化硅作

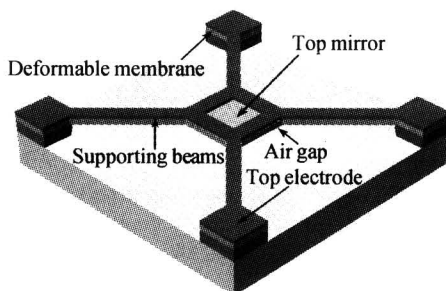


图 1 硅微机械 FP 腔器件的三维基本结构  
Fig. 1 The three-dimensional structure of MEMS-FP device

为牺牲层,然后再在氧化硅上 LPCVD 生长  $0.2\ \mu\text{m}$  左右的氮化硅;在光刻出上电极图形后,蒸镀上电极金属( $\text{Cr}=10\ \text{nm}$ ,  $\text{Au}=50\ \text{nm}$ ),剥离后,采用反应离子刻蚀(RIE)刻透四条梁之间梯形部分的氮化硅,最后用氢氟酸(HF)湿法腐蚀去除牺牲层,并释放结构.

器件的基本工作原理是在上下电极之间施加外电压,这时上反射镜会在电场力的作用下向下移动,从而使 FP 腔的腔长发生改变,这样使入射进 FP 腔的某一固定波长的光线的光程发生改变.根据多光束干涉的原理此时的反射光的反射率会发生变化,据此可以作为可变的光学衰减器;而此时的透射光会因为 FP 腔的滤波作用而输出与腔长相关的某一波长的光波,据此可以作为光学可变滤波器;上反射镜在外加快速变化电压的作用下,会快速振动,这时可以作为光学调制器使用.

器件在工作的过程中实际是一个耦合场的问题,根据外接恒定电源的平板电容的性质可以得到电场力为

$$F_1 = \frac{1}{2} \frac{U^2 C^2}{\epsilon_0 A} \quad (1)$$

式中  $U$  为外加电压,  $C$  为腔体电容,  $\epsilon_0$  为真空介电常量,  $A$  为电极面积.

由于腔体实际具有 2 层结构,所以腔体的电容为

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d + d_n / \epsilon_n} \quad (2)$$

式中  $d$  为空气隙长度,  $d_n$ ,  $\epsilon_n$  分别为氮化硅的厚度和相对介电常量.

将式(2)代入式(1)得到

$$F_1 = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 A U^2}{(d + d_n / \epsilon_n)^2} \quad (3)$$

另外根据虎克定律有

$$F_2 = \tilde{K}(d_0 - d) \quad (4)$$

\*国家自然科学基金(60177009,60236010,90207004)、高等学校博士点专项科研基金(20010007010)和“973”计划(2003CB314703,2003CB314704)资助项目  
Tel:010-62007355 Email:ouyi@ime.ac.cn  
收稿日期:2004-12-20

式中  $F_2$  为上反射镜的弹性回复力,  $\tilde{K}$  为上反射镜的弹性常量,  $d_0$  为初始 FP 腔长度.

在器件的工作过程中, 显然有  $F_1 = F_2$ , 即

$$\tilde{K}(d_0 - d) = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 A U^2}{(d + d_n/\epsilon_n)^2} \quad (5)$$

式(5)表示了器件在工作过程中外加电压和腔长之间的关系, 另外当上反射镜被电场力压迫到某个位置后, 反射镜所提供的回复力将不能平衡此时的电场力, 这样导致的结果是使上反射镜由于过大电场力而被吸附在硅衬底上, 不能再恢复到悬空状态. 所以, 上反射镜在工作过程中是有一定的行程要求的, 为得到这个行程, 在式(5)两侧对  $d$  求导数.

$$\tilde{K}(d + d_n/\epsilon_n)(2d_0 - 3d - d_n/\epsilon_n) = \epsilon_0 A \frac{\partial U}{\partial d} \quad (6)$$

由式(6)可以得到上反射镜的行程为

$$d \leq \frac{1}{3}(2d_0 - d_n/\epsilon_n) \quad (7)$$

这是在器件结构上要求的上反射镜的行程, 称之为结构行程范围; 另一方面, 在工作过程中器件的调谐范围还对上反射镜有一定的行程范围要求, 称之为调谐行程范围. 显然, 为了使器件能够正常工作, 调谐行程范围不能大于结构行程范围.

## 2 MEMS FP 器件的性能分析

硅微机械 FP 腔器件是集光学、机械、静电学于一体的综合性器件. 本文采用有限元降阶方法分析了器件的一些机械、耦合和瞬态响应特性.

有限元降阶方法采用主自由度和缩减矩阵来压缩问题的规模. 主自由度处的位移被计算出来后, 解可以被扩展到初始的完整自由度集. 降阶方法比常规的耦合场模拟方法更快而且系统开销较少. 降阶方法的缺点是初始解只能计算出主自由度上的位移. 要得到完整的位移、应力则必须进行扩展处理<sup>[6]</sup>.

当外加电压缓慢线性增加时, 上反射镜会在电场力的作用下逐渐向基底方向移动, 并发生变形, 变形后的形状如图 2.

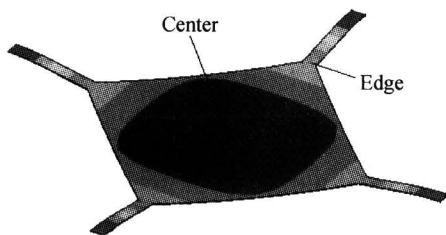


图 2 静电力作用下的上反射镜变形  
Fig. 2 Deformation of reflector driven by electrostatic force

取反射镜中间和角边上四点作为主自由度参考点, 来计算其在外电压作用下的位移. 计算后得到的电压和位移之间关系如图 3.

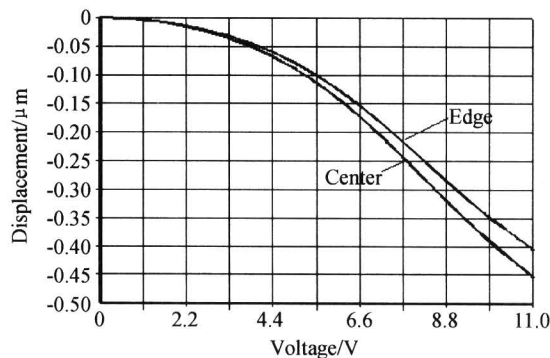


图 3 驱动电压和上反射镜位移之间关系  
Fig. 3 Relationship between voltage and deformation of reflector

设定牺牲层的厚度是  $1.16 \mu\text{m}$ , 也就是将器件的中心工作波长定为  $1554 \text{ nm}$ , 同时考虑器件的工作带宽为  $40 \text{ nm}$  时 ( $1534 \sim 1574 \text{ nm}$ ), 上反射镜应该至少可以向基底方向移动  $399 \text{ nm}$ , 使此时的腔长变为  $767 \text{ nm}$ .

这样上反射镜的调谐行程就是  $400 \text{ nm}$  左右, 即使当氮化硅膜的厚度为  $1 \mu\text{m}$  时 ( $5/4$  光学厚度), 这个行程也满足式(7)的要求.

最终由于计算的反射镜尺寸为: 四个支臂长  $120 \mu\text{m}$ , 宽  $10 \mu\text{m}$ , 整个反射板部分  $400 \times 400 \mu\text{m}$ , 中间的反射窗口为  $300 \times 300 \mu\text{m}$ , 氮化硅的厚度为  $0.2 \mu\text{m}$ .

经计算后得到当腔长从  $1554 \text{ nm}$  变化到  $767 \text{ nm}$  时, 所需的外电压为  $10.2 \text{ V}$ , 也就是器件的阈值电压为  $10.2 \text{ V}$ . 阈值电压的大小主要受以下几方面的因素影响:

1) 上下电极之间的电介质, 即如果氮化硅薄膜的厚度增加, 引起腔体电容值变小, 进而就会导致阈值电压的升高;

2) 器件的结构形状, 不同的器件形状的刚度是不同的, 如果设计的上反射镜的刚度较大, 那阈值电压也会升高.

从电压和位移之间的曲线还可以看出, 它们之间是个非线性的关系, 这与式(5)是吻合的. 而且在外电压较小时上反射镜的位移随电压的变化比较缓慢, 在电压较大时变化就比较快了, 这也就是说器件的工作在小电压范围内会比较容易调谐, 图 4 显示了在  $0 \sim 10.2 \text{ V}$  范围内电压每升高  $0.2 \text{ V}$  时上反射镜的移动量. 曲线表明在驱动电压较高时如果要得到好的调谐性能, 就需要精确地控制调谐时的电压增量.

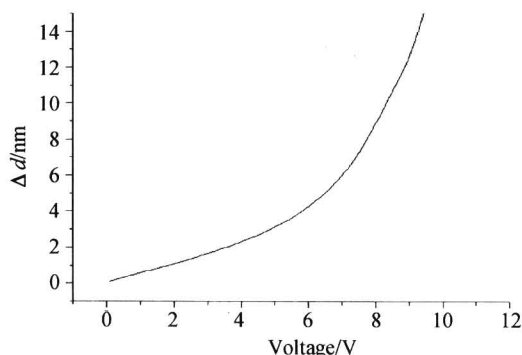


图4 每0.2 V电压增量时上反射镜的位移增量  
Fig. 4 Relationship between 0.2 V increment of voltage and increment of deformation of reflector

### 3 结论

从模拟计算的结果可知阈值电压为10.2 V,已经可以满足器件的实际应用. 如果希望进一步降低阈值电压可以从影响电压的两个主要方面来采取措施:首先可以减薄上反射镜即氮化硅的厚度,但是本文计算所采用的氮化硅厚度已经是只有1/4光学厚度了,无法再减小厚度了. 而且当氮化硅厚度较薄时必须考虑到器件在湿法腐蚀和结构释放过程中的粘连问题,从而导致器件加工难度增大,这方面问题的实验研究将另文报道.

因此只能在结构尺寸方面进行改进,这里考虑到最后器件耦合封装时经过透镜聚焦后的入射光束光斑面积必须小于等于上反射镜的面积,所以镜面尺寸不能做大的改动<sup>[7]</sup>,但是可以考虑改变四个支

臂的形状,比如将支臂设计成迂回的回折梁,这样就可以明显地减小整个上反射镜的刚度,从而大幅度减小驱动电压.

#### 参考文献

- 1 刘洪举. 光纤通信中的光学复用技术. 光子学报, 1995, **24**(6):544~550  
Liu H J. *Acta Photonica Sinica*, 1995, **24**(6):544~550
- 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 陈益新. 光纤通信中光电器件的新进展. 光子学报, 2000, **29**(Z01):1~7  
Chen Y X. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(Z01):1~7
- 4 Ford E, Walker A, Greywall S, et al. Micromechanical fiber-optic attenuator with 3  $\mu$ s response. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, **18**(9):1663~1670
- 5 左玉华, 毛容伟, 王良臣, 等. 1.55  $\mu$ m MOEMS 可调谐光滤波器调谐性能模拟. 光子学报, 2005, **34**(4):525~528  
Zuo Y H, Mao R W, Wang L C, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4):525~528
- 6 王国强. 使用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践. 西安:西北工业大学出版社, 1999. 142~143  
Wang G Q. *Numerical Simulation Technical & Its Application in ANSYS*. Xi'an: Northwest Polytechnical University Press, 1999. 142~143
- 7 Walker J A, Ford J E, Basavanthally N. Performance and packaging implications of a MEMS based optical modulator for WDM Fiber-to-the-home systems. *Proceedings of the 1997 47th IEEE Electronic Components & Technology Conference*. San Jose, CA, USA: Bell Lab, 1997. 601~606

## Simulation of Electric-mechanical Characteristics of Micromechanical Device Fabry-Perot Cavity on Silicon

Ou Yi<sup>1</sup>, Sun Yunan<sup>2</sup>, Chen Dapeng<sup>1</sup>, Cui Fang<sup>2</sup>

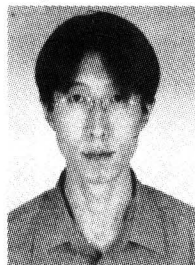
<sup>1</sup> Dept. of Micro-processing & Nano-technology, Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

<sup>2</sup> Dept. of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081

Received date: 2004-12-20

**Abstract** A device of silicon micromachined Fabry-Perot cavity is introduced. It can be extensive used in the optical fiber communication, such as optical filter and optics attenuator. The device is fabricated by general surface processes, such as LPCVD, RIE, chemical etching and evaporating metal-coating. The silicon nitride film which is suspended above the silicon substrate, is driven by an electrostatic force. The basic principle, operating range and threshold voltage of the device are analyzed, and the factors of influence threshold voltage are discussed. By means of the finite element method, the mechanical, the coupling and the response characteristics of the device are analyzed.

**Keywords** Fabry-Perot Cavity; Optical fiber communication; Threshold voltage



**Ou Yi** was born in 1975. He received the B. S. degree from the Department of Opto-electronic Engineering of Beijing Institute of Technology in 1997. He is currently pursuing his M. S. and Ph. D. degree in the Department of Opto-electronic Engineering of Beijing Institute of Technology. His research interests focus on MOEMS devices for optical communication system.