

文章编号 : 0253-2239(2002)03-0344-03

微机构可调谐阵列滤光片的有限元分析*

陈 旻 刘 旭 李海峰

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)
(浙江大学微系统研究中心, 杭州 310027)

摘要: 提出一种新颖的采用薄膜技术在玻璃基底上构造微机构可调谐二维窄带滤光片阵列的方法。在有限元分析的基础上, 计算出器件在静电力作用下三维变形曲面结果, 并模拟了透过光谱特性。

关键词: 微机电系统; 有限元; 阵列滤光片

中图分类号: TN205 文献标识码: A

1 引 言

微机构可调谐阵列滤光片是一种采用微加工技术在玻璃或硅基底上制造出微腔结构的可调谐器件, 通过外加电压调谐光谱透过率。器件具有集成度高、易于控制和性能优异的特点, 主要应用在传感器、投影显示技术、波分复用通讯器件等领域^[1]。目前人们大量的研究工作主要集中在采用半导体材料或硅基底制造的用于红外波段的器件上。

本文介绍的是一种基于玻璃基底、采用镀膜方

法实现空腔结构的微器件。器件的原理与法布里-珀罗干涉仪类似, 通过调节间隔层的厚度改变滤光片的透过波长, 结构如图 1 所示。其中银膜为滤光片寻址时的 X 和 Y 电极, 同时又作为法布里-珀罗干涉仪空腔的上下两个反射镜。当 X、Y 加电压时, 由于静电作用力使上下电极相互吸引, 从而调节干涉腔的厚度, 起到调谐透射波长的目的。 Al_2O_3 薄膜被用来保护银电极, 同时增加 X 电极的刚性, 使形变均匀、稳定。

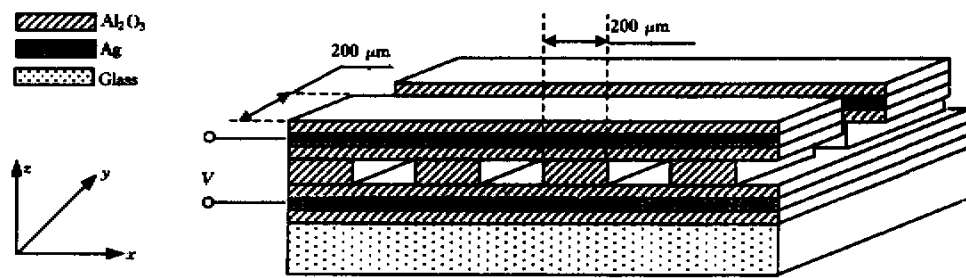


Fig. 1 Schematic graph of tunable filter array

滤光片的设计中心波长 λ_0 为 630 nm, 经过膜系设计得到法布里-珀罗滤光片的结构。初始分析可将上层悬空膜看作受均匀载荷下产生弯曲变形的理想梁。根据设计要求, 通过电学及力学的简单模型分析, 可以初步计算得器件的外形尺寸及调谐电压范围。

由于法布里-珀罗干涉仪的透过光谱对空腔的厚度十分敏感, 要精确计算器件变形后的光谱特性必须借助于有限元分析, 求出悬空膜在均匀载荷下

的实际三维变形面, 从而精确分析加电压后薄膜变形对器件性能的影响。

2 有限元方法

在本器件的分析中引入有限元方法主要是因为上层悬空膜受力时的边界条件为两边固定支撑, 另两边自由, 根据器件的结构参数, 已经不满足理想梁的一维变形条件。对于这样的问题在材料力学范围内是不存在解析解的^[2], 因而必须采用数值方法——有限元法。其基本前提是: 将连续的求解域离散为一组有限个单元的组合体。这样的组合体能解析地模拟或逼近求解区域。通过在每个单元内假设

* 国家自然科学基金(69976026)资助课题。

E-mail: cmzju@163.com

收稿日期: 2001-01-12; 收到修改稿日期: 2001-04-20

的近似函数来表示全求解区域上待求的未知场函数,使一个连续的无限自由度问题转化为离散的有限自由度问题^[3]。

可调谐阵列滤光片的器件结构与有限元分析中的平板弯曲问题模型类似。薄膜所荷载荷垂直于膜表面。膜的厚度(约 350 nm)比其他两个方向的尺寸(约 200 μm)小得多,薄膜受力弯曲的挠度(约 80 nm)比厚度又小得多。薄膜可以看作受力产生小挠度弯曲的弹性薄板,厚度方向上的正应力可忽略。假设薄膜中面内的各点没有平行于中面的位移,且薄板中面的法线在变形后仍保持为法线。满足以上假设时即可将平板弯曲问题简化为二维问题,且全部应力和应变可用板中面的挠度 ω 表示。

变形薄板 A'B'C'D' 的坐标如图 2 所示。满足的力学偏微分方程为^[4]：

$$\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = \frac{q}{D}$$

式中 q 为垂直薄板单位面积上的载荷大小, D 为板的抗弯刚度, $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ 。其中 E 为薄膜材料的杨氏模量, h 为膜厚, μ 为材料的泊松比。

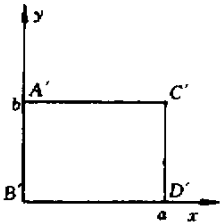


Fig. 2 Thin plate A'B'C'D'

边界条件沿 y 轴为固定支撑,沿 x 轴为自由边,满足的力学方程为：

$$\text{自由边: } \begin{cases} y = 0, \\ y = b, \end{cases}$$

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial^3 \omega}{\partial y^3} + (2 - \mu) \frac{\partial^3 \omega}{\partial x^2 \partial y} = 0,$$

$$\text{固定边: } \begin{cases} x = 0, \\ x = a, \end{cases}$$

$$\omega = 0, \quad \frac{\partial \omega}{\partial x} = 0.$$

利用有限元方法可以求得上述微分方程的数值解。

3 有限元计算

我们借助有限元分析软件 Algor 计算了 200 μm × 200 μm 大小的薄膜受外加电压时的变形结果,如

图 3 所示。图中计算所取的参数如下：

悬空平板尺寸为 200 μm × 200 μm; 平板厚度度为 327.09 nm(取值由最初的膜系设计结果确定); 平板材料的杨氏膜量 $E = 99.62 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$; 材料泊松比 $\mu = 0.37$; 平板上的均布压力面密度 $p = 15 \text{ N/m}^2$ (外加电压为 1 V 时)。

事实上,该变形为一个三维曲面。上层膜中心最大变形量约为 72.8 nm,即法布里-珀罗滤光片的间隔层缩小 72.8 nm。因为初始设计中取中心波长为 630 nm,若间隔层原始厚度为 1181.9 nm(简隔层厚度为上下两层金属反射镜间的光学厚度)根据法布里-珀罗干涉腔的理论($\Delta\lambda/\lambda = \Delta d/d$)^[5]可知以上形变量相当于中心波长向短波移动了大约 40 nm。加不同的电压即可实现对中心波长在一定范围内的调谐。

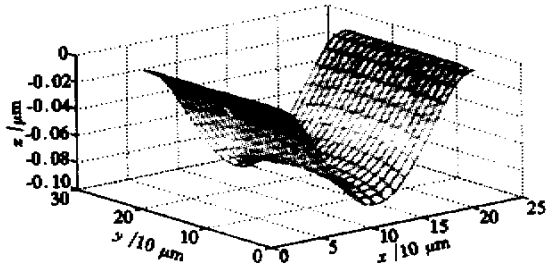


Fig. 3 The 3-D curved surface calculated by finite element

4 器件的光学特性

因为滤光片的上层悬空膜,也即法布里-珀罗干涉仪的反射镜产生了三维变形,而滤光片的光谱特性对于空腔厚度十分敏感,这一变形必定对器件的光学特性产生一定的影响。利用上述的有限元分析结果,我们对变形后的器件的光学特性进行了模拟。图 4 和图 5 显示了外加电压在 0~1 V 之间取值时不同波长沿器件的 x 轴和 y 轴的光谱特性。可见,

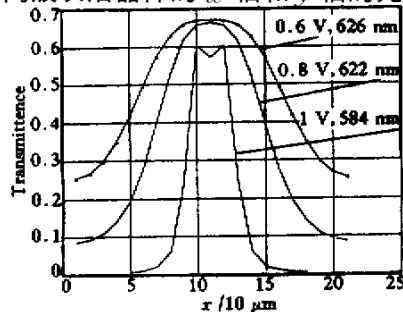


Fig. 4 The transmittance of center wavelength at different driving voltage along x axis

在加最大电压 1 V 时,对该波长满足高透过的部分已缩小为膜中心部分约 $20 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 的区域。

满足要求。

结论 微机构可调谐阵列滤光片在采用上层悬空膜导电的形式时,上层膜产生的三维弯曲变形对器件的光学特性造成了一定影响,主要体现在使器件的光学窗口面积缩小。目前单根光纤的直径一般在一百微米以上,内芯直径在十几到一百微米之间。如果采用光纤与阵列滤光片耦合读出信号,应设计使器件尺寸在 $100 \mu\text{m}$ 以上,变形后的可用光学窗口面积在 $100 \mu\text{m}^2$ 以上。根据弹性力学的板壳理论,器件的受力变形与上层悬空膜的材料、形状、尺寸及边界支撑条件有关,可以通过调整以上参数改变器件中部高透过区域的形状与大小,从而满足要求。类似结构不但可用于调谐波长的光学器件,还可应用于今后的波分复用光纤网络、显示技术、传感技术等广泛的领域,具有极大的潜力。因此,对于这类器件的理论研究和制造实验也是极有意义的。

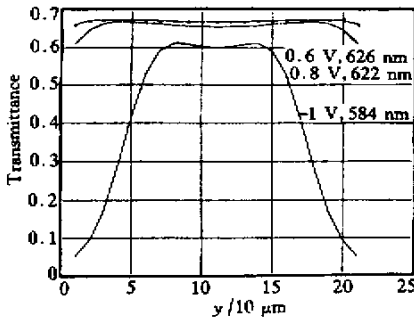


Fig. 5 The transmittance of center wavelength at different driving voltage along y axis

5 讨 论

当调谐器件的调谐范围确定之后,该范围内可容纳的透射波峰个数取决于滤光片的带宽,滤光片透过光谱的截止度越高,则相邻调谐波长间的串扰越低。器件调谐范围随外加电压的升高而增大,同时器件变形增大,可用光学窗口面积减小。要在有限的调谐范围内尽可能容纳多的透射波峰,必须缩小滤光片的带宽。在不改变器件原有的基本结构的基础上,增加间隔层的厚度是一种非常有效的方法。但是根据薄膜光学理论和器件的电学分析,由此达到同样的波长调谐范围将需要更大的变形和更高的驱动电压,因而影响器件整个的光学及电学性能。有限元分析可以帮助我们精确计算器件的变形,权衡二者的影响,从而对初始设计结果进行优化,直到

参 考 文 献

- [1] Moore D F, Syms R R. Recent developments in micromachined silicon. *Electron. and Commun. Engng. J.*, 1999, ?261~270
- [2] Sun Xunfang. *Material Mechanics*, first volume(材料力学,上册). Beijing: Higher Education Press, 1991. 243~254(in Chinese)
- [3] Jiang Xiaoyu. *Foundation for the Method of Finite Element* (有限元法基础). Beijing: Tsinghua University Press, 1992. 134~150(in Chinese)
- [4] Liu Hongwen. *Plate Theory*(板壳理论). Hangzhou: Zhejiang University Press, 1987. 27~33(in Chinese)
- [5] Tang Jinfa, Zheng Quan. *Applied Thin Film Optics* (应用薄膜光学). Beijing: Science Press, 1984. 244~254(in Chinese)

Finite Element Analysis of Tunable Optical Filter Array Based on Microstructure Technique

Chen Min Liu Xu Li Haifeng

(The State Key Lab of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)
(Research Center of Micro System, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 12 January 2001; revised 20 April 2001)

Abstract: A new method is proposed to build a micromachined tunable optical filter array on glass base in visible band. The analysis result based on finite element shows that the optical performance is strongly influenced by the curved 3-D surface of the suspended electrostatically driving layer.

Key words: micro electronical mechanical system; finite element; filter array