

1.55 μm MOEMS 可调谐光滤波器调谐性能模拟*

左玉华 毛容伟 王良臣 余金中 王启明

(中国科学院半导体研究所 集成光电子国家重点实验室, 北京 100083)

摘 要 建立了等效单层梁模型和一维集总模型, 用经典力学理论和传输矩阵方法模拟了多层材料构成且具有四臂固支梁结构的 1.55 μm Si 基 MOEMS (Micro-Opto-Electro-Mechanical-Systems) 可调谐滤波器的调谐特性. 模拟调谐系数与实验结果吻合较好.

关键词 MOEMS; 可调谐滤波器; Fabry-Perot; 表面微机械

中图分类号 TN713 **文献标识码** A

0 引言

可调谐光滤波器是 DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) 系统中不可缺少的重要器件之一, 可用于信道光的区别检测和 OPM (Optical Performance Monitoring). MOEMS 可调谐光滤波器因其优异的大范围调谐能力, 近年来成为研究的热点^[1-5]. 此前的大部分文献重点报道了器件的制作, 或是针对某一力学或光学问题进行分析, 而针对具体器件的系统级建模方面的工作开展得较少. 本文针对我们制作的 Si 基 MOEMS 可调谐光滤波器结构, 分别从力学、电学及光学三方面进行了器件分析, 最终获得了器件调谐性能的模拟. 在模拟结果的基础上, 讨论了提高调谐系数的可能措施.

1 器件结构

透光窗口为边长 100 μm 的正方形, 中央质量块为边长 150 μm 的菱形. 四臂固支梁长 100 ~ 150 μm , 宽 30 ~ 50 μm . 固支梁由上 DBR、电极层 Cr/Au 及电镀 Au 组成, 厚约为 6 μm . 器件的截面示意图及 SEM 照片如图 1、图 2.

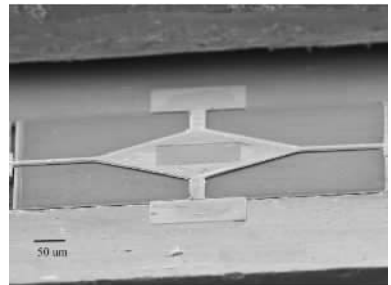


图 2 样品的 SEM 照片

Fig. 2 SEM photo of the device

2 模型的建立

2.1 光学模型

透射峰波长移动量与腔长变化量呈线性关系, 如式(1)

$$\Delta\lambda = \gamma_0 \left(\frac{\lambda_0}{d_0} \right) \Delta d = \gamma \Delta d \quad (1)$$

式中 λ_0 是与光学结构设计有关的常数. $\gamma = \gamma_0 \left(\frac{\lambda_0}{d_0} \right)$ 为光学常数.

本设计膜系为 (Air/Si/SiO₂.../Si/Air gap/Si.../SiO₂/Si Substrate). 利用传输矩阵方法, 可模拟出不同腔长时的 F-P 腔透射曲线, 计算出波长移动量随腔长变化的关系, 如图 3. 对于本设计, $d_0 = 0.5 \lambda_0$. 可以求出 γ 为 1.33.

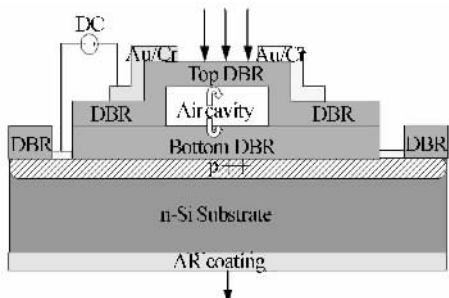


图 1 MEMS 可调谐光滤波器截面示意图

Fig. 1 Schematic of the cross-section of the device

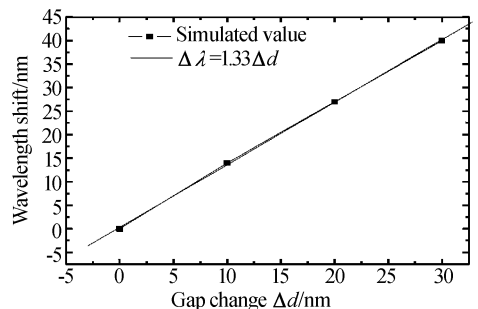


图 3 波长移动量与腔长变化量模拟曲线

Fig. 3 The wavelength shift vs. the gap change

2.2 电学模型

在垂直方向的电场分布与电极结构以及组成上下反射镜的 Si 与 SiO₂ 介质层有关. 设加在空气腔

*国家重点基础研究发展规划(973 项目 G2000036603)、863 高技术发展计划(2002AA312010)和国家自然科学基金(No. 90401001)

Tel: 010-82304505 Email: yhzuo@red.semi.ac.cn

收稿日期: 2004-03-09

两侧的实际电压 $U_{\text{air}} = k_2 \times U_{\text{total}}$, 总分压系数 k_2 由两部分组成: k_{21} 是由于上下反射镜引起的分压系数, 而 k_{22} 是电极的设计结构引起的电场分压. $k_2 = k_{21} \times k_{22}$.

将器件等效为由 Si、SiO₂ 和空气形成的多个电容的串联电路, 如图 4. 对于 n 层 SiO₂ 及 $(n + 1)$ 层 Si 构成的系统, 总电容为

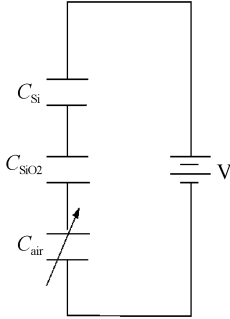


图 4 器件的等效电路
Fig. 4 Equivalent circuit of the device

$$\frac{1}{C_{\text{total}}} = (n + 1) \frac{1}{C_{\text{Si}}} + n \frac{1}{C_{\text{SiO}_2}} + \frac{1}{C_{\text{air}}} \quad (2)$$

即

$$C_{\text{total}} = k_{21} C_{\text{air}}$$

定义

$$k_{21} = \frac{1}{(n + 1) \frac{1}{\epsilon_{\text{Si}}} \times \frac{d_{\text{Si}}}{d_0} + n \frac{1}{\epsilon_{\text{SiO}_2}} \times \frac{d_{\text{SiO}_2}}{d_0} + 1} \quad (3)$$

式中: $\epsilon_{\text{Si}}, \epsilon_{\text{SiO}_2}, \epsilon_0$: 分别为 Si, SiO₂ 及空气的介电常数; $d_{\text{Si}}, d_{\text{SiO}_2}, d_0$: 分别为单层 Si, 单 SiO₂ 及空气腔的厚度.

$\epsilon_{\text{Si}} = 12, \epsilon_{\text{SiO}_2} = 2.2, d_{\text{Si}} = 110 \text{ nm}, d_{\text{SiO}_2} = 270 \text{ nm}, d_0 = 850 \text{ nm}, n = 8$ 代入式 (3), $k_{21} = 0.4$. 即对于 8.5 对 Si/SiO₂ 组成的系统, 上下反射镜引起的分压系数 $k_{21} = 0.4$. 而当下电极是无限大平板时, 相对于有限面积的下电极, 其分压系数 $k_{22} = 0.5$, 则总的分压系数 $k_2 = 0.2$.

2.3 力学模型

2.3.1 单层梁假设

固支梁是由四层 Si、三层 SiO₂、一层 Cr 以及一层 Au 组成的九层复合梁. 梁的剖面图如图 5(a). 上下层等宽等长. 为简化分析, 采用等效梁宽模型^[6], 以 Si 为标准, 将不同材料按其于 Si 的杨氏模量 (E_0) 之比来定义等效宽度, 则其它各层的等效梁宽如式 (4). 表 1 给出了不同材料的材料常数及等效惯性矩的计算.

$$W_i = \frac{E_i}{E_0} W_0 \quad (i=0, 1, 2, 3 \text{ 分别代表 Si、SiO}_2、\text{Cr 及 Au}) \quad (4)$$

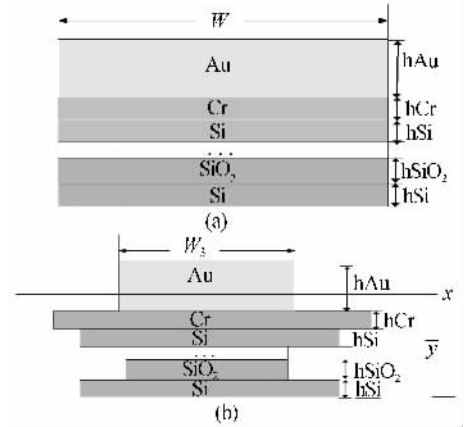


图 5 (a) 梁的剖面图; (b) 等效梁宽模型
Fig. 5 (a) Cross section of the beam; (b) Equivalent-beam-width model

表 1 不同材料的材料常数及等效厚度

材料	Cr	Au	Si (100)	SiO ₂
杨氏模量 (GPa)	278	78	175	72.4
泊松比 γ	0.215	0.425	0.222	0.14
有效杨氏模量 (GPa)	291.5	95.2	183	73.8
设计厚度 (μm)	0.1	6	0.44	0.81
梁的等效惯性矩 (μm^4)	$\sum_{j=1}^9 \left(\frac{W_j h_j^3}{12} + h_j W_j (y_j - \bar{y})^2 \right) = 596$			
梁的等效厚度 (μm)	$H_{\text{eff}} = 6.2$			

对于宽梁 ($W > 5h$), 有效杨氏模量 $E' = E / (1 - \gamma^2) = 171.3 \text{ GPa}$

质心坐标为 ($j = 1, 2, \dots, 9$, 指由下至上第 1, 2, \dots 9 层.)

$$y = \frac{\sum_{j=1}^9 (h_j W_j y_j)}{\sum_{j=1}^9 (h_j W_j)} \quad (5)$$

其中 $y_1 = \frac{1}{2} h_0, y_2 = h_0 + \frac{1}{2} h_1, y_3 = h_0 + h_1 + \frac{1}{2} h_2, \dots, y_8 = 4h_0 + 3h_1 + \frac{1}{2} h_2, y_9 = 4h_0 + 3h_1 + h_2 + \frac{1}{2} h_3$

复合梁的弹性模量与惯性矩乘积的等效值为

$$(EI)_{\text{eff}} = E_0 \times \sum_{j=1}^9 \left(\frac{W_j h_j^3}{12} + h_j W_j (y_j - \bar{y})^2 \right) \quad (6)$$

由复合梁的等效惯性矩 I_{eff} , 可定义出复合梁的等效厚度 H_{eff} 为

$$(W_0/12) H_{\text{eff}}^3 = I_{\text{eff}}$$

即

$$H_{\text{eff}} = (12 I_{\text{eff}} / W_0)^{1/3} \quad (7)$$

2.3.2 受力分析

将梁视为四臂固支梁, 其受力状态如图 6.

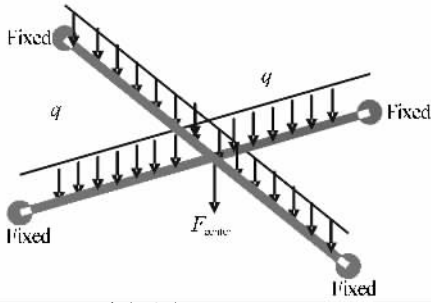


图 6 受力分析图

Fig. 6 Schematic of the force analysis

中央质量块受到的静电力为集中力(单位 N):

$$F_{\text{center}} = \frac{\varepsilon_0 A_{\text{center}} U^2}{2d_0^2}$$

四臂受到的静电力为分布载荷(单位 N/m):

$$q = \frac{\varepsilon_0 W U^2}{2d_0^2}$$

其中: W 为梁宽; d_0 为腔的原始长度; ε_0 为介电常数 $8.85 \times 10^{-12} \text{ m/V}$; U 为外加电压; A_{center} 为中央质量块电极的面积。

由梁的基本理论知,四臂固支梁中部的变形最大。假设四臂完全对称,由变形的叠加原理,可以计算出梁中部的最大挠度为^[5]

$$y_{\text{max}} = \frac{F L^3}{48 E' I} + \frac{q L^4}{24 E' I} = \frac{\varepsilon_0 U^2}{8 E' W h^3 d_0^2} (2 W L^4 + A_{\text{center}} L^3) \quad (8)$$

式中 L 为梁的长度, h 为梁的厚度。对于宽梁 ($W > 5h$), 有效杨氏模量 $E' = E / (1 - \gamma^2)$ 。其中 E 为构成

梁材料的弹性模量, 而 γ 为梁材料的泊松比。

假设中央共振腔发生均匀变形, 并且腔长变化量 Δd 等于梁的最大挠度, 则 Δd 随电压的变化关系如下

$$\Delta d = S_{\text{ideal}} U^2 \quad (9)$$

定义尺寸参数

$$S_{\text{ideal}} = \frac{\varepsilon_0 (2 W L^4 + A_{\text{center}} L^3)}{8 E' W h^3 d_0^2} \quad (10)$$

2.4 透射峰波长移动量与电压的关系

由式(2)及式(9)联立, 可求出透射峰波长移动量与电压的平方成正比

$$\Delta \lambda = \gamma \times S_{\text{ideal}} \times (k_2 \times U_{\text{total}})^2 = K \times U_{\text{total}}^2 \quad (11)$$

其中调谐系数

$$K = \gamma \times S_{\text{ideal}} \times k_2^2 \quad (12)$$

尺寸参数

$$S_{\text{ideal}} = \frac{\varepsilon_0 (2 W L^4 + A_{\text{center}} L^3)}{8 E' W h^3 d_0^2} \quad (13)$$

分压系数 $k_2 = k_{21} \times k_{22}$, $k_{22} = 0.5$, $k_{21} = \frac{1}{(n+1) \frac{1}{\varepsilon_{\text{Si}}} \times \frac{d_{\text{Si}}}{d_0} + n \frac{1}{\varepsilon_{\text{SiO}_2}} \times \frac{d_{\text{SiO}_2}}{d_0} + 1}$

3 结果与讨论

由于梁的厚度有一定范围, 故计算出的理论调谐系数也有一定范围。表 2 显示了理论调谐系数与实验调谐系数的对比。

表 2 不同器件的理论调谐系数与实验调谐系数的对比

参数	器件 A1	器件 A2	器件 B1	器件 C1
$W/\mu\text{m}$	30	30	20	30
$L/\mu\text{m}$	200	200	100	150
$A_p/\mu\text{m}^2$	21250	21250	21250	38750
$H_{\text{eff}}/\mu\text{m}(\text{cal.})$	6.08 ~ 7.72	6.08 ~ 7.72	4.44 ~ 6.08	5.26 ~ 6.91
$H_{\text{eff}}/\mu\text{m}(\text{test})$	7	7.5	5	5.5
$d_0/\mu\text{m}$	0.85	0.78	0.85	0.65
k_2^2	0.049	0.06	0.049	0.1
γ	1.33	1.30	1.33	1.02
$K_{\text{cal}}(\text{nm}/\text{V}^2)$	0.011 ~ 0.022	0.015 ~ 0.031	0.003 ~ 0.008	0.023 ~ 0.051
$K_{\text{test}}(\text{nm}/\text{V}^2)$	0.013	0.018	0.004	0.035

由表 2 可见, 实验调谐系数落在了理论模拟的调谐系数范围内, 二者有较好的吻合, 说明我们采用的模型能够较好地解释实验结果。

由比较可知, 提高调谐系数的途径有二。其一为提高分压系数, 调谐系数的减小 90% 来自于电场分压, 要求设计好电场分布, 减小上下反射镜的分压, 即两电极应尽量靠近, 尽量把反射镜做在两电极之外。其二进行器件结构参数优化, 目前调谐系数

的减小 10% 来自于结构参数以及制作误差。减小梁宽, 提高梁长, 减小中央通光孔的面积, 减小中央质量块的面积(以减小镜面的变形), 因而可减小梁厚。但另一方面为了降低 FWHM, 而增大腔长至 1550 nm, 会把调谐系数减小 4 倍。

4 结论

本文针对制作的 Si 基 MOEMS 可调谐光滤波器

结构,分别从力学、电学及光学三方面进行了器件分析,最终获得了器件调谐性能的模拟.建立了等效单层梁模型和一维集总模型,用经典力学理论和传输矩阵方法模拟了多层材料构成的具有四臂固支梁结构的 $1.55\ \mu\text{m}$ Si 基 MOEMS 可调谐滤波器的调谐特性.模拟调谐系数与实验结果取得了较好的吻合.

参考文献

- 1 Tran A T T D, Lo Y H, Zhu Z H, *et al.* Surface micromachined Fabry-Perot tunable filter. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, **8**(3): 393 ~ 395
- 2 左玉华, 毛容伟, 黄昌俊, 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
- 3 Zuo Y H, Mao R W, Huang C J, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6): 661 ~ 664
- 4 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
- 5 Greek S, Gupta R, Hjort K. Mechanical considerations in the design of a micromechanical tunable InP-based WDM filter. *Journal of Micro-Electro-Mechanical Systems*, 1999, **8**(3): 328 ~ 334
- 6 Raymond J Roark, Warren C Young. Formulas for stress and strain, Fifth edition. McGraw-Hill Book Company, 1975
- 7 King J A. Materials handbook for hybrid microelectronics. Boston: Artech House, 1988

Simulation of the Tuning Characteristics of $1.55\ \mu\text{m}$ MOEMS Tunable Optical Filters

Zuo Yuhua, Mao Rongwei, Wang Liangchen, Yu Jinzhong, Wang Qiming

State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083

Received date: 2004-03-09

Abstract An equivalent single layer model, as well as one-dimensional spring-mass-capacitor model, has been built up, to simplify the electrostatic analysis of multiple-layer fixed-fixed beam of $1.55\ \mu\text{m}$ Si-based MOEMS tunable optical filters. The effects of the structure parameters of the beams, the electrode geometry and initial air gap to the tuning coefficient, have been analyzed. The tuning characteristics have been simulated quantitatively with the classical mechanical theory and transfer matrix methods. The simulations fit in well with the experimental results.

Keywords MOEMS; Tunable optical filter; Fabry-Perot; Surface micromachining



Zuo Yuhua was born in 1975, in Guizhou Province. She received her B. S and M. S degrees from the Department of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, in 1997 and 2000, respectively. She obtained her Ph. D. degree in the Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, in 2003. And now she is working in the Institute of Semiconductors, CAS. Her research interests include MOMES, semiconductor optoelectronic devices and materials and their applications.