

微机械光调制器的制备及其在不同激励条件下的响应研究

茅惠兵, 忻佩胜, 柯菁华, 赖宗声

(华东师范大学电子科学技术系, 中山北路 3663 号, 上海 200062)

摘 要: 本文主要讨论了具有机械式抗反射开关(即 MARS)结构的新型微机械光调制器. MARS 结构光调制器由表面微机械工艺制备. 测量结果表明, 微机械光调制器有一系列的固有频率. 当器件被正弦信号激励时, 其响应信号也是正弦信号. 当器件被方波信号激励时, 响应信号和激励频率有关. 当激励方波频率远低于器件固有频率时, 器件响应实际上是对上下两个阶跃信号的响应: 出现明显的阻尼振荡效应. 当激励频率在固有频率附近时, 器件实际只对方波的基频效应: 响应为正弦信号.

关键词: 微电子机械系统; 光调制器; 固有频率

中图分类号: TN929 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2002)02-0262-04

Response Study of the Micromechanical Modulator under Different Drive Conditions

MAO Hui bing, XING Pei sheng, KE Jing-hua, LAI Zong sheng

(Dept. of Electronic Science and Technology, East China Normal University 3663 Zhong Shan Bei Road, Shanghai 200062, china)

Abstract: A new type of micromechanical optical modulator with a MARS structure is presented, which is fabricated by the surface micromechanical process. The measurement results show that the modulator has a series of resonant frequencies. When the modulator is driven by the sinusoidal signal, the response signal is also sinusoidal. However, when the modulator is driven by the square wave signal, the response signal depends on the driving frequency. If the frequency of the driving signal is far less than the resonant frequency, the modulator is driven by the up and down step signal: there is a damp vibration phenomenon. If the driving frequency is close to the resonant frequency, only the fundamental frequency part of the square wave has an effect: the modulator response is the sinusoidal signal.

Key words: micromechanical system; optical modulator; resonant frequencies

1 引言

微电子机械系统(简称微机械, 英文缩写为 MEMS)在外力作用下的响应是微机械研究领域的重要研究课题^[1,2]. 由于微机械的特征尺度(一般为毫米至亚微米)远小于宏观机械, 微机械器件的动态特性很容易被测量过程所干扰. 光学方法是测量微机械动态特性的重要方法. 光学方法的最大优点就在于它是一种非接触测量方法, 且没有附加质量, 不会对器件的工作造成干扰, 同时它分辨率好, 精度高, 因此已成为微机械动态特性检测的首选方案. 但传统的微机械光学测量系统比较复杂, 不利于实验的进行^[3]. 本文中讨论的微机械光调制器提供了一种微机械动态特性测量的理想方法, 它可用光纤直接耦合, 需要的光学元件远少于常见的光学系统.

微机械光调制器是九十年代中期出现的一种新型光调制

器^[4-7], 其基本结构是在硅衬底上制备的机械式抗反射开关(MARS). 它一般可有几兆赫兹的调制速率, 可望在即将出现的全光网中应用于如办公室或家庭等的终端用户. 和常规的光调制器相比, 微机械光调制器拥有很多优点, 如保持光学信号的相干性, 器件的可靠性高, 插入损耗低(≤ 0.5 dB), 对比度高(≥ 15 dB), 对环境温度的不敏感等, 而最大的优点是其作为微电子器件的低价格. 同时正如上文指出, 它又是测量微机械特性的理想方法.

微机械光调制器在不同激励条件下的响应研究还不多, 一般只对正弦激励进行研究, 而对具有不同频率的方波激励研究还未见报道. 通过对不同激励条件的器件响应的研究可以深入了解微机械器件的工作机制, 尤其是了解其动力学性能. 掌握微机械器件的最佳工作条件.

本文将在第二部分讨论微机械光调制器的工作原理, 在第三部分描述器件的制备工艺, 在第四部分详细讨论微机械光调制器在外加电压激励下的响应, 并在最后部分给出结论。

2 器件原理

MARS 结构微机械光调制器的基本结构是基于光学上常用的 Fabry Perot 结构: 即一层厚度为 h 的空气隙夹在硅衬底和可运动的光学厚度为 $\lambda/4$ 的悬浮膜之间。运用薄膜光学方法, 可以推得 MARS 结构的反射率 R 可以这样表示:

$$R = \frac{(n_0^2 - n_1^2 n_g)^2 \sin^2 2\pi h / \lambda + (n_g n_0^2 - n_1^2 n_0)^2 \cos^2 2\pi h / \lambda}{(n_0^2 + n_1^2 n_g)^2 \sin^2 2\pi h / \lambda + (n_g n_0^2 + n_1^2 n_0)^2 \cos^2 2\pi h / \lambda} \quad (1)$$

其中 n_0 为空气的折射率, 通常取为 1, n_g 为衬底的折射率, n_1 为悬浮膜的折射率。根据公式(1), 当空气隙厚度为四分之一波长的奇数倍时, 反射率为最大值, 当空气隙厚度为四分之一波长的偶数倍时, 反射率为最小值。

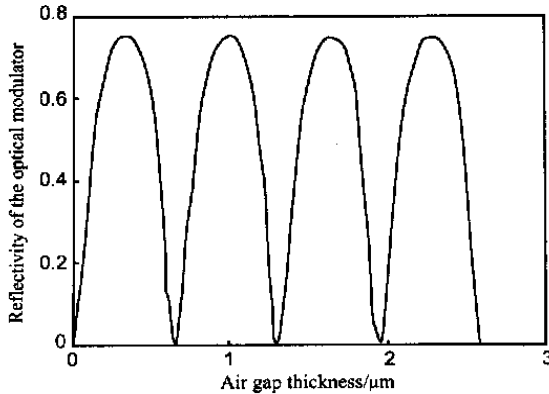


图1 微机械光调制器的反射率和空气隙厚度的关系, 其中硅衬底的折射率为 3.5, 氮化硅薄膜折射率取为 2, 氮化硅的光学厚度为四分之一波长, 波长为 1.3 微米

本文讨论的微机械光调制器以硅为衬底, 因此折射率 n_g 约为 3.5, 器件的悬浮膜选为氮化硅, 折射率约为 2 (通常为 1.98~2.05, 具体和制备工艺有关)。用这些数值计算得到的反射率和空气隙厚度 h 的关系如图 1 所示。用这些折射率数据计算得到最小值和最大值分别为: $R_{\min} = 0.044$, $R_{\max} = 0.75$ 。光调制器设计时希望反差比较大, 也就是 R_{\max} 和 R_{\min} 的比值比较大。同时根据式(1), 当 $n_g = n_1^2$ 时, $R_{\min} = 0$, 而硅与氮化硅的折射率和这个条件满足得较好, 同时硅和氮化硅薄膜的工艺比较成熟, 氮化硅的机械性能又比较好, 因此选用硅为衬底, 氮化硅为悬浮膜是比较理想的方案。

图 1 还显示, 当空气隙厚度 h 稍微偏离 $m\lambda/4$ (m 为奇数), 即离开反射率的极大值区域后, 在近 0.2 微米的范围内, 反射率 R 和空气隙厚度 h 具有良好的线性关系, 而 0.2 微米刚好在光调制器正常工作时氮化硅薄膜的振动幅度内, 因此可方便地运用光调制器研究氮化硅薄膜的振动规律。

微机械光调制器是靠静电作用驱动的, 即作用在光调制器悬浮膜上的力由器件上下电极之间的电压 V 决定, 该静电力可用方程(2)表示:

$$F = -\frac{\epsilon V^2}{2h^2} = -\frac{\epsilon V^2}{2(h_0 - x)^2} \quad (2)$$

其中 ϵ 是空气的介电常数, A 是电极面积, h_0 是空气隙在无外力作用时的厚度, x 是薄膜振动的位移。氮化硅薄膜在静电力的作用下运动, 若静电力是周期性的, 微机械悬浮膜的运动是一种受迫振动, 因此研究光调制器的反射率和外加电压的关系, 就能了解微机械薄膜的受迫振动规律, 得到各种动态参数。

3 器件制备工艺

微机械光调制器的制备工艺比较复杂, 因为在制定工艺方案时必须综合考虑器件的力学、光学和电学要求。器件是制备在掺磷硅衬底上的, 掺杂的目的是使器件工作时硅衬底同时作为导电底板。制作工艺的第一步是在衬底上用低压 CVD 方法淀积 0.9 μm 的二氧化硅薄膜作为牺牲层, 然后再在上面同样用低压 CVD 方法淀积 0.16 μm 的氮化硅薄膜。薄膜淀积完成后, 用等离子体刻蚀法在氮化硅薄膜上刻出所需的图形。器件的上电极是通过淀积钛铂金多层金属实现的, 其中钛的作用是为了提高电极和氮化硅薄膜之间的粘附性。器件的微机械悬浮结构是通过腐蚀液把牺牲层材料去掉实现的。在器件的整个制作工艺中, 牺牲层材料的腐蚀时间和腐蚀条件是得到具有较高性能器件的关键。图 2 是本文所讨论的微机械光调制器的扫描电镜照片, 其中中间的黑色区域是直径为 18 微米的光学窗口, 四条支撑臂的长宽分别为 12 μm 和 5 μm 。

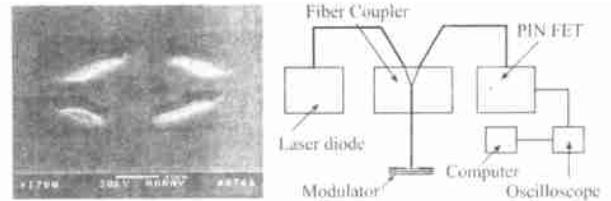


图 2 微机械光调制器的扫描电镜 (SEM) 照片, 其中中间黑色区域为直径 18 μm 的光学窗口

4 特性测量及结果讨论

微机械光调制器的测试系统如图 2 所示。其中的光源是半导体多量子阱激光器, 该激光器的发射波长为 1.3 微米, 发射功率为 1 毫瓦。系统中的光探测器是硅 PIN FET 组件, 测试系统中的光纤都是单模光纤。系统中光纤耦合器的作用是把激光器输出的直流光信号耦合至调制器, 又把调制器出来的经调制后的光信号耦合至光探测器。激励和响应信号都有 Tektronix 公司生产的 TDS220 双踪数字示波器显示并由计算机储存。

在测量系统完成后, 研究了器件在不同激励条件下的响应。图 3 是微机械光调制器在带偏压的正弦信号激励下的频率响应曲线。该正弦激励信号的峰峰值为 20.8V, 偏压为 30V。图 4 显示该微机械光调制器有一系列的共振频率 (即固有频率)。在这些共振频率时氮化硅薄膜具有较大的振幅, 因此调制器也就有了较大的响应幅度。测量结果显示, 调制器具有至少 5 个明显的共振峰, 同时不同共振峰的响应幅度也是不同的, 它表明这些共振峰的性质也是不一样的, 因此有待进

一步研究. 在频率响应曲线上, 主要的共振峰位于 880KHz, 它比其它共振峰大两倍以上, 因此可称为基本共振峰, 而低于该频率后, 调制器的响应基本没有起伏.

微机械光调制器在正弦信号激励下的相应比较简单. 图

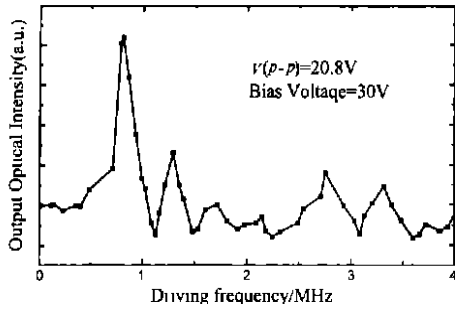


图 4 微机械光调制器在不同激励频率下的响应, 其中激励信号峰峰值为 20.8V 的带 30V 偏压的正弦信号

微机械光调制器对方波信号激励的响应则复杂得多. 图 6(a) 是 62KHz 的方波激励的响应. 图 6(a) 显示对方波激励的响应包括两部分. 在总体上, 方波激励的响应也是一种同频率的方波, 即激励信号的高电平对应响应信号的高电平, 激励信号的低电平对应于响应信号的低电平. 这个结果和正弦信号激励在低频的情形完全一致. 响应信号的另一部分是激励信号突变后在响应信号中出现的阻尼振荡现象. 该振荡的频率是 920KHz, 即近似于器件的基本谐振频率. 这种阻尼振荡效应在作者的另一篇文章中已有详细的讨论, 在此不再讨论.

图 6(b) 是 320KHz 方波信号激励的光调制器响应. 该结果比较复杂, 其中基本的频率成分是激励方波频率的三倍, 该

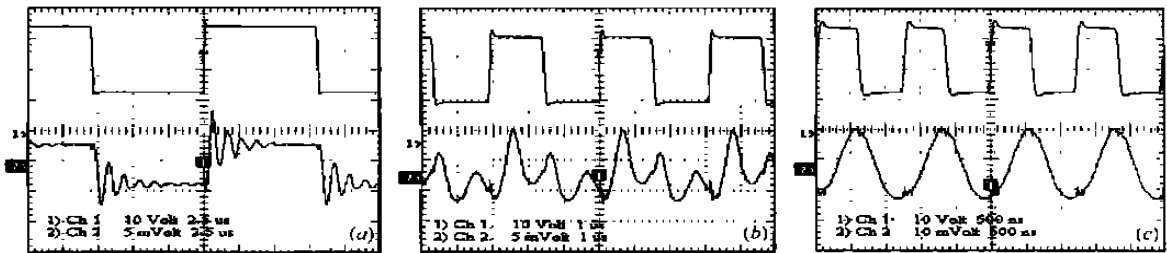


图 6 微机械光调制器在不同频率波信号激励下的响应波形. (a) 激励方波频率为 62kHz. (b) 激励方波频率为 320kHz. (c) 激励方波频率为 820kHz

形成以上结果的原因是由于器件存在若干谐振频率和方波存在多个频率成分. 实验结果已经显示, 正弦信号激励的器件响应也是正弦信号, 但由于器件存在若干固有频率, 不同频率的响应幅度是不同的(如图 4 所示). 当激励信号是方波时, 情况则完全不同了. 当激励频率很低时, 即远低于器件基本谐振频率时, 器件实际上是对两个上下阶跃信号的响应, 因此出现了阶跃信号激励时特有的阻尼振荡现象. 而阻尼信号的平衡位置也是一个方波, 该方波可以认为是由基波和若干高次谐波合成而成, 因为图 4 所示的频率响应曲线上, 在该波段上各次谐波几乎都有相同的响应幅度. 当激励方波频率接近于器件基本谐振频率时, 光调制器的响应发生了根本的变化. 根据数学原理, 频率为 ω 的方波可分解为频率分别为 $\omega, 3\omega, 5\omega$

5 分别是 28KHz 和 700KHz 的光调制器的响应. 图 5 显示在正弦信号的激励下, 光调制器的响应是同频率的正弦信号. 28KHz 时输出信号和激励信号同相位, 而 700 KHz 时输出信号的相位落后于激励信号.

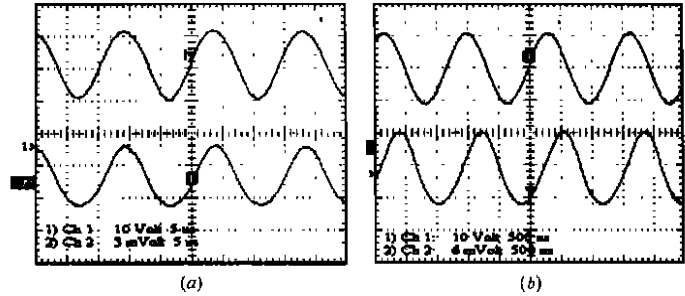


图 5 微机械光调制器在正弦信号激励下的响应波形. 图中上曲线为激励信号, 下曲线为响应信号. (a) 激励频率为 28KHz. (b) 激励频率为 700KHz.

响应信号中同时存在一个包络成分, 这个包络信号的频率即是激励方波的频率. 这个响应信号中的三次谐波成分和低频方波激励时出现的阻尼振荡信号容易混淆, 但实际是有显著差别的. 因为阻尼振荡是围绕平衡值的, 而该三次谐波是叠加在包络信号上的. 图 6(c) 是 820KHz 方波信号激励的器件响应. 结果显示在该频率下, 器件响应又比较简单, 基本类似于同频率的正弦信号, 只是在激励信号突变时产生小的扰动, 我们认为该扰动是激励信号的电学干扰形成的. 结果同时显示, 输出信号的相位已落后于激励信号的相位(即方波基频的相位, 下同).

等各种频率成份的正弦信号的叠加, 这时器件的响应信号也是对含上述所有频率成份的激励信号的响应. 但根据图 4 所示的频率响应曲线, 只有基本谐振频率 ω_0 附近的激励才有较大的响应. 在本文的实验结果中, 对 320KHz 的方波激励, 三次谐波的响应最大, 但由于基频的激励强度最大, 因此最后的响应是基频和三次谐波的叠加, 而更高次谐波的响应很小, 这正是图 6(b) 所示的结果. 对 820KHz 的方波激励, 只有基频的响应较大, 而 3ω 等高次谐波都不在共振频率附近, 这些高次谐波的响应很小. 实际上, 即使它们在高次共振频率附近, 由于高次共振频率的响应幅度远小于第一共振频率, 故它们也显示不出来. 因此当激励方波的频率在第一共振频率附近时, 光调制器的响应只是正弦响应, 这正是图 6(c) 的结果. 由于实

验条件限制, 更高频率的方波激励没有测量.

5 结论

本文主要讨论了具有 MARS 结构的新型微机械光调制器, 这种器件又为详细研究微机械的动态特性提供了良好的测量手段. MARS 结构光调制器由表面微机械工艺制备. 测量表明, 微机械光调制器有一系列的固有频率. 当器件被正弦信号激励时, 其响应信号也是正弦信号. 当器件被方波信号激励时, 器件响应和频率有关. 当激励方波频率远低于器件固有频率时, 器件响应实际上是对上下两个阶跃信号的响应: 出现明显的阻尼振荡效应. 当激励频率在固有频率附近时, 器件实际只对方波的基频效应: 响应为正弦信号.

参考文献:

- [1] Taechung Yi, Chang Jin Kim. Measurement of mechanical properties for MEMS materials [J]. Meas. Sci. Technol. , 1999, 10: 706- 716.
- [2] Peter M Osterberg, Stephen D Senturia. M-test: a chip for MEMS material property measurement using electrostatically actuated test structures [J]. J. of Microelectromechanical systems, 1997, 6(2): 107- 118.
- [3] Chuan Pu, Zuhua Zhu, Yir Wha Lo. Surface micromachined optical coherent detection system with ultra high sensitivity [J]. Sensors and Actuators, 1999, A 78: 36- 40.
- [4] James A Walker, Keith W Goossen, Susanne C Amey. Fabrication of a mechanical antireflection switch for fiber to the home systems [J]. J. Microelectromechanical systems, 1996, 5: 45- 50.
- [5] C Marxer, M A Gretillat, V P Jaecklin, R Baettig, O Anthamatten, P

- Vogel, N F De Rooij. MHz OptoMechanical modulator [A], TRANS DUCERS' 95 EUROSENSORS IX [C], 1995: 289- 292.
- [6] K Aratani, P J French, P M Sarro, R F Wolffenbuttel, S Middelhoeck. Surface micromachined tuneable interferometer array [A]. The 7th International Conference on Solid State Sensors and Actuators [C], 1995: 678- 681.
- [7] N J Frigo, P P Iannone, P D Magill, T E Darcie, M M Downs, B N Desai, U Koren, T L Koch, C Dragone, H M. Presby, G E Bodeep. A wavelength division multiplexed passive optical network with cost shared components [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1994, 6: 1365- 1367.
- [8] Huibing Mao, Jinghua Ke, Peisheng Xing, Zongsheng Lai. The Mechanical Property Investigation of the Micromechanical Optical Modulator [M]. to be published

作者简介:

茅惠兵 男. 1966 年生. 理学博士, 副教授. 1989 年毕业于复旦大学, 1995 年在中科院上海技术物理研究所获博士学位. 现在华东师范大学电子系工作. 主要研究方向是半导体材料器件和微机械技术.

忻佩胜 男. 1957 年生. 华东师范大学电子系工程师. 长期从事半导体工艺研究.

柯菁华 女. 1971 年生. 1994 年毕业于华北电力学院, 2000 年华东师范大学电子系研究生毕业, 现在美国 Virginia Communications University 攻读博士学位.

赖宗声 男. 1943 年生. 教授, 华东师范大学信息科学技术学院院长. 长期从事半导体传感器和 MEMS 技术研究.