

光谱分析方法测试 GMLM 微间距的实验和方法推广

张洁, 黄尚廉, 张智海, 孙吉勇, 史玲娜, 朱永

重庆大学光电工程学院, 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030

摘要 基于 MEMS 的光栅平动式光调制器(GMLM)依靠结构中可动光栅和下反射镜之间的微间距的变化来实现光的调制作用, 被应用于显示领域。可动光栅和下反射镜之间的微间距是一个关键的参数, 传统的测试方法如台阶仪等要破坏结构, WYKO 白光干涉仪测量成本高, 所以要寻求一种测试成本较低、测量精度较高的测试方法。文章采用非接触的波长扫描式光谱分析方法进行了 GMLM 可动光栅和下反射镜之间的微间距测试实验研究。实验表明: 实验结果和理论分析吻合, 验证了理论模型的正确性; 对比 WYKO 白光干涉仪测试, 该方法的相对测试误差小于 1%; 具有很好的重复性。对该光谱分析方法进行了推广, 从理论上推导了该方法可以实现准动态测量 GMLM 器件吸合电压、共振频率以及其他基于衍射/干涉的 MEMS 器件的微小间距测试等。

关键词 光谱; 光调制器; 微间距; 微机电系统

中图分类号: TN761 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0593(2008)07-1684-05

引言

近年来, 随着 MEMS(微机电系统, Micro-electro-mechanical systems)技术的成熟, 基于 MEMS 的光调制器已成为当前研究的热点, 应用于投影显示等领域^[1-4]。重庆大学提出的基于 MEMS 的光栅平动式光调制器(Grating Moving Light Modulator, 简称 GMLM)^[5, 6], 是基于相位光栅的原理, 依靠可动光栅和下反射镜的距离的改变来实现对光能量的调制, 加工工艺较 DMD 简单, 同时解决了 GLV 难于形成面阵的缺点。可动光栅和下反射镜的距离是一个关键参数, 目前测试方法和测试仪器较少, 一般须采用专门测试设备和专门测试人员进行测试。据了解, 目前做的比较好的美国 Veeco 公司的 WYKO 白光干涉仪的价格在人民币 100~150 万元, 测量一次的费用对于非盈利单位为 4 000 元/片, 盈利单位 6 000 元/片^[7]。测试设备昂贵, 不利于工艺研究和检查器件加工误差以及相关实验。本文的主要目的是研究一种测试费用便宜、精度比较高的测试方法对 GMLM 中的微间距进行测量。下面将提出非接触的波长扫描式光谱分析方法对可动光栅和下反射镜的距离进行测量; 同时对该光谱分析方法进行推广研究。

1 光栅平动式光调制器

1.1 结构

GMLM 如图 1 所示^[5, 6], 主要包括一个可动光栅, 下面的反射镜和支撑可动光栅做上下位移的蟹型悬臂梁。

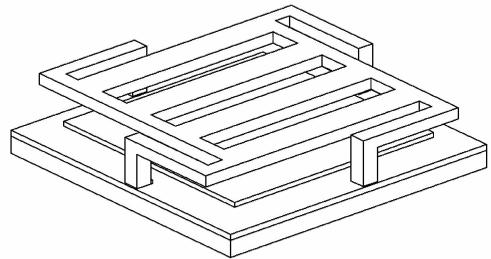


Fig. 1 One pixel of GMLM

基本光学原理如图 2 所示, 当不加激励的时候, 可动光栅上表面和下反射镜的距离为 $(2n)\lambda/4$, 根据衍射原理, 衍射能量集中在 0 级(暗态); 当加上激励以后, 可动光栅向下反射镜的方向平行移动, 此时可动光栅上表面和下反射镜的距离为 $(2n-1)\lambda/4$, 入射光以一个特定的角度衍射出去(亮态), 当滤出 ±1 级或者 0 级衍射光, 可以实现对光能量的调制。

收稿日期: 2007-03-08, 修订日期: 2007-06-12

基金项目: 重庆市院士基金项目(8883)和国家自然科学基金项目(60578023)资助

作者简介: 张洁, 女, 1980 年生, 重庆大学光电工程学院讲师 e-mail: zhangjie@cqu.edu.cn

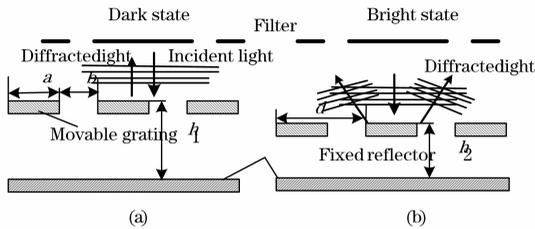


Fig. 2 GMLM operation (dark and bright states)

1.2 光学原理

GMLM 器件是基于矩形相位光栅衍射原理，可动光栅和下反射镜一起构成相位差可变的相位光栅对入射光进行调制，建立器件光学模型即如图 3 所示，器件对光的调制作用由理想矩形相位光栅、关于 x_1 方向对称的长 L ，宽 ω_0 的两个矩形上反射面和蟹型悬臂梁共同作用的结果，可动光栅和下反射镜的相位差为，

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \left(h(\cos\theta_0 + \cos\theta_i) + \frac{d}{2} \cdot (\sin\theta_i - \sin\theta_0) \right)$$

其中 h 为可动光栅与反射镜的间距，理想矩形相位光栅的光栅常数 $d = a + b$ ，器件单像素在 x_1 方向长度、宽度分别为 $L(L = md + a, m$ 为可动光栅的光栅周期数)， $\omega + 2\omega_0$ ，其中 ω 和 ω_0 分别为光栅线条在 y_1 方向的长度和边距， l_a, l_b, ω_a ，

$$t'_{s-even}(x_1, y_1) = t_{s-even}(x_1, y_1) + t_c(x_1, y_1) \tag{1}$$

$$t_{s-even}(x_1, y_1) = \frac{1}{d} \text{comb}\left(\frac{x_1}{d}\right) \exp(j\phi) \otimes \text{rect}\left(\frac{x_1}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{x_1}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{x_1}{\omega}\right) + \frac{1}{d} \text{comb}\left(\frac{x_1 + d/2}{d}\right) \otimes \text{rect}\left(\frac{x_1}{b}\right) \text{rect}\left(\frac{x_1}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{x_1}{\omega}\right) + \exp(j\phi) \otimes \text{rect}\left(\frac{x_1}{L}\right) \left[\text{rect}\left(\frac{y_1 + (\omega + \omega_0)/2}{\omega_0}\right) + \text{rect}\left(\frac{y_1 - (\omega + \omega_0)/2}{\omega_0}\right) \right] \tag{2}$$

$$t_c(x_1, y_1) = \left\{ \text{rect}\left(\frac{x_1 + (L - \omega_a)/2}{\omega_a}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1 - (L + l_a)/2}{l_a}\right) + \text{rect}\left(\frac{x_1 - (L + \omega_a)/2}{\omega_a}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1 - (L - l_a)/2}{l_a}\right) + \text{rect}\left(\frac{x_1 - (L - \omega_a)/2}{\omega_a}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1 + (L + l_a)/2}{l_a}\right) + \text{rect}\left(\frac{x_1 + (L + \omega_a)/2}{\omega_a}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1 + (L - l_a)/2}{l_a}\right) + \text{rect}\left(\frac{x_1 + (L - l_b)/2}{l_b}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1 - [(L + l_b)/2 + l_a]}{\omega_b}\right) + \text{rect}\left(\frac{x_1 - [(L + l_b)/2 + l_b]}{\omega_b}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1 - (L - l_b)/2}{l_b}\right) + \text{rect}\left(\frac{x_1 - (L - l_b)/2}{l_b}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1 + [(L + l_b)/2 + l_a]}{\omega_b}\right) + \text{rect}\left(\frac{x_1 + [(L + l_b)/2 + l_a]}{\omega_b}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1 + (L - l_b)/2}{l_b}\right) \right\} \exp(j\phi) \tag{3}$$

为了计算的方便，考虑主要衍射方向 x_1 轴上的光能量分布为^[8]，

$$I'_{s-even}(f_x, 0) = (A + C + D)^2 + B^2 + 2(A + B + D)B\cos(\phi) \tag{4}$$

其中 A, B, C, D 分别简化为

$$A = \frac{L\omega a}{d} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{sinc}\left(\frac{an}{d}\right) \text{sinc}\left[L\left(f_x \frac{n}{d}\right)\right], B = \frac{L\omega b}{d} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \exp(jn\pi) \text{sinc}\left(\frac{bn}{d}\right) \text{sinc}\left(\frac{an}{d}\right) \text{sinc}\left[L\left(f_x \frac{n}{d}\right)\right] \text{sinc}\left[L\left(f_x \frac{n}{d}\right)\right] \\ C = 2\omega_0 L \text{sinc}(L f_x), D = +2l_a \omega_a \text{sinc}(\omega_a f_x) (\cos[(L - \omega_a) f_x \pi / 2]) + 2l_a \omega_a \text{sinc}(l_a f_x) (\cos[(L + l_a) f_x \pi / 2]) + \\ + 2l_b \omega_b \text{sinc}(l_b f_x) (\cos[(L - l_b) f_x \pi / 2]) + 2l_b \omega_b \text{sinc}(\omega_b f_x) (\cos[(L + l_b + 2l_a) f_x \pi / 2])$$

高度为

$$h = \frac{k}{2} \cdot \frac{\lambda_{i-k} \cdot \lambda_i}{\lambda_{i-k} - \lambda_i} \tag{6}$$

2 非接触的波长扫描式光谱分析方法

GMLM 是基于衍射原理实现光的调制作用，根据(4)式，可以得到峰值波长与可动光栅和下反射镜之间的高度 h 的关系为

$$\lambda_i = \frac{2h}{m}, \lambda_{i-k} = \frac{2h}{m-k} \tag{5}$$

ω_0 分别为蟹型悬臂梁与光栅连接长度，宽度等。

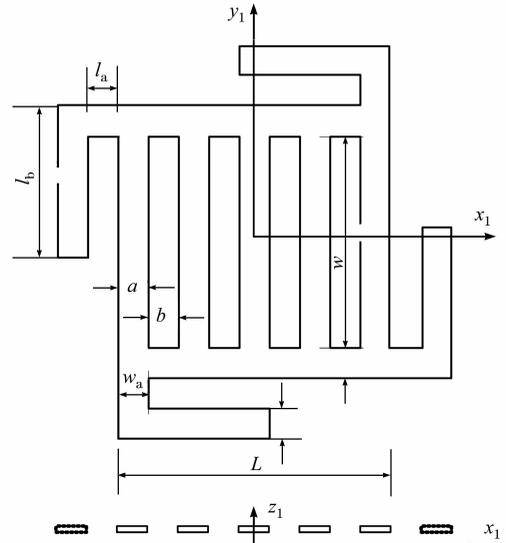


Fig. 3 Optical model of GMLM

不考虑蟹型悬臂梁部分的透过率函数 $t_{s-even}(x_1, y_1)$ ，悬臂梁部分的透过率函数 $t_c(x_1, y_1)$ ，则光栅平动式光调制器的透过率函数 $t'_{s-even}(x_1, y_1)$ 为，

其中 λ_i 和 λ_{i-k} 为波峰波长，对应干涉序列 m 和 $m-k$ ，它们相距 k 个波峰。加工出来的 GMLM 的测试样品如图 4 所示。要获得可动光栅和下发射面之间的间距 h ，需要得到峰值波长。为此，采用日本日立公司 U-4100 Spectrophotometer (价格为人民币 40 万元左右，测试一次为 50 元) 进行衍射光谱特性实验，U-4100 光谱仪如图 5 所示。

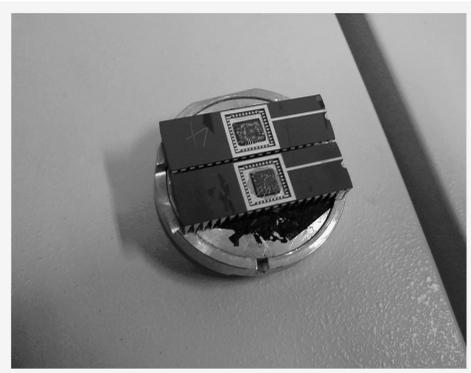


Fig. 4 Encapsulation sample of developed GMLM array module



Fig. 5 U-4100 spectrophotometer

根据(6)式,得到调制高度 h 为 $1.1313 \mu\text{m}$,测试曲线如图 6(a)所示,理论曲线如图 6(b)所示。测量的光谱曲线幅值在各个峰值波长是不等的,由于 GMLM 器件是基于衍射原理,在固定的接收面,有些波长的衍射能量不能被测试仪器的探测器所探测到;测试仪器本身光源的非均匀性。但是峰值波长的位置才是关注的重点。理论峰值波长与测量峰值波长相当吻合。利用 Veeco 公司 WYKO 白光干涉仪的测量结果 $h=1.2400 \mu\text{m}$,如图 7 所示。利用非接触的波长扫描式光谱分析方法的相对测试误差(以 WYKO 白光干涉仪测试为准)小于 1%。

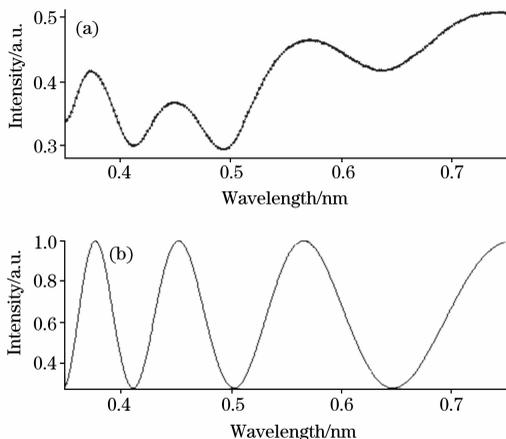


Fig. 6 Reflective intensity

(a): Experimental result; (b): Theoretical result

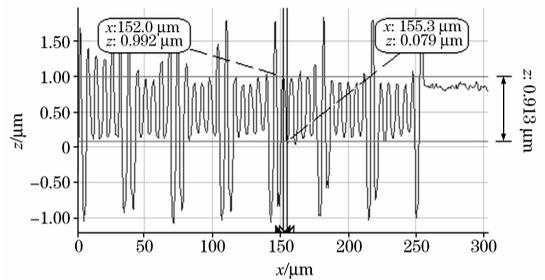


Fig. 7 Gap measurement for curve of GMLM using WYKO white interferometer

为了验证非接触的波长扫描式光谱分析方法的重复性,作者将制作的 GMLM 样品利用 U-4100 光谱仪进行了多次测试实验。如图 8 所示,由于放置 GMLM 在光谱仪测试端面位置时引起的随机误差或者分光光度计本身的误差造成每次测试的幅值有一定的波动^[9-11],但是峰值波长是一致的。图 9 为另一 GMLM 测试样品的重复性实验结果。

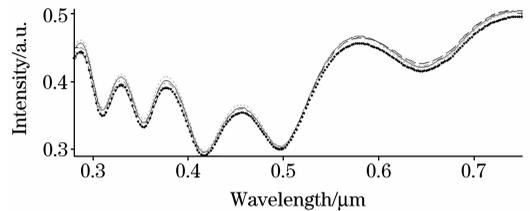


Fig. 8 Experimental reflective intensity as a function of wavelength for one GMLM module

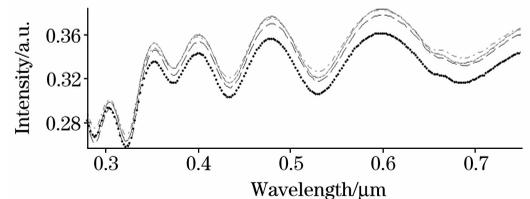


Fig. 9 Reflective intensity as a function of wavelength for another GMLM module

3 非接触的波长扫描式光谱分析方法推广

3.1 电压与高度的关系

非接触的波长扫描实验曲线由可动光栅与下反射镜之间间距 h 和扫描的波长决定, GMLM 器件是通过施加电压后间距变化引起相位变化实现光信号调制。因此,可以通过该方法实现可动光栅位移准动态测量。未加电压时对应波长扫描曲线 C_1 , 由此可计算出初始间距 h_1 , 施加电压 V_1 使得光栅平面下拉一定距离;待器件稳定后再次进行光学扫描,对应扫描曲线 C_2 , 计算此时间距 h_2 ; 依次类推可获得一系列点: $(V_3, h_3), (V_4, h_4), \dots, (V_n, h_n)$, 从而绘制出施加电压与器件下拉距离之间的关系: $h \sim V$ 。

3.2 吸合电压的测量

可动光栅与下电极之间静电吸引力为悬臂梁变形量的非线性函数,而悬臂梁的机械回复力是线性的,设静电吸引力

为 F_e , 机械回复力为 F_s , 随着施加的电压增加悬臂梁弯曲变形也越大, F_s 随之增大, 同时由于可动光栅与下反射镜之间间距变小, F_e 随之增大, 且 F_e 变化幅度大于 F_s 变化幅度, 电压在一定范围时, 两者可达到平衡, 若电压增加到某个特定值时, 若继续增加电压, 悬臂梁将不会达到平衡, 处于不稳定状态, 并在静电力的作用下吸附到下极板, 使悬臂梁失去稳定的最小施加电压称为吸合电压 V_{PI} , 而这种现象称为吸合现象。理论上当电压施加到吸合电压时 h 会突然发生突变, 从而光谱曲线会发生突变, 对于光栅平动式光调制器, 由于可动光栅在电压的作用下, 向下运动, 当电压达到吸合电压时, 可动光栅与反射面之间的距离急剧减小, 此时表现为相同波长范围内, 振荡次数 k 急剧减少; 同样的振荡次数下, 峰值波长之间的间距变大。所以可以通过这种现象用实验的方法测出器件的吸合电压。

3.3 共振频率

在不计重力情况下, 当可动光栅垂直向下运动位移为 y 时, 系统的机械恢复力和静电力相等, 系统的静电力 F_e 为

$$F_e = Ky = \frac{A\epsilon_r}{2} \times \frac{V^2}{(h_0 - y)^2} \quad (7)$$

其中, A 为有效面积, ϵ_r 为的相对介电常数, h_0 为可动光栅和下反射镜的初始高度, V 为施加的电压, K 为系统的等效弹性系数, M 为系统的等效质量, 即中心衍射光栅的质量。根据施加电压 V 与器件距离 h 之间的关系其中高度 $h = h_0 - y$, 可以求出等效弹性系数。多次施加电压可获得 $K_1, K_2, K_3, \dots, K_n$, 则悬臂梁等效弹簧系数为

$$K = \frac{1}{n} \sum_1^n K_n \quad (8)$$

GMLM 的中心衍射光栅视为刚性刻槽平板, 其固有频率为

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (9)$$

GMLM 质量和等效弹簧系数, 可以得到固有频率。

3.4 干涉型/衍射型器件的微小位移测量

干涉型/衍射型器件相位的改变通常是通过光程差的变化来实现, 而这个直接和微小高度有关, 干涉型/衍射型器件干涉/衍射光强是波长的函数, 根据前面的分析, 完全可以利用该非接触的波长扫描式光谱分析方法实现干涉型/衍射型器件的微小高度位移的测量。

4 结论

通过对非接触的波长扫描式光谱分析方法测试 GMLM 中可动光栅和下反射镜的微间距实验研究, 得到了以下结论。

(1) 采用 U-4100 光谱仪进行了实验研究, 实验结果和理论分析吻合; 对比利用 Veeco 公司 WYKO 白光干涉仪测量结果 ($h=1.2400 \mu\text{m}$), 利用非接触的波长扫描式光谱分析方法的相对测试误差 (以 WYKO 白光干涉仪测试为准) 小于 1%; 并对多个样品进行了多次实验, 说明了该方法具有很好的重复性; 减少了采用专本仪器的测试成本。

(2) 该测试方法可以忽略 GMLM 其他结构参数的影响, 测试结果中只存在波长微间距和峰值波长共同作用的影响; 该测试方法由于采用波长进行测试分析, 使得测试结果精度达到纳米量级。

对于该方法可以实现准动态测量器件吸合电压、共振频率以及其他基于衍射/干涉的 MEMS 器件的微小间距测试还需要大量的实验研究, 将是下一步工作的重点。

致谢: 感谢重庆大学光电工程学院温志渝教授对器件加工的指导和帮助; 感谢潘英俊、陈伟民教授在理论分析部分给予的指导; 感谢光学实验室提供的实验装置。

参 考 文 献

- [1] LIU Zhe-wen, WANG Xiao-hong, HUANG Qing-an (刘泽文, 王晓红, 黄庆安). Micro Systems Design (微系统设计). Beijing: Electron Industry Publishing Company (北京: 电子工业出版社), 2004. 11: 252.
- [2] Men W, Mohr J, Paul O. Translated by WANG Chun-hai, YU Jie, et al (王春海, 于杰, 等译). Micro Systems Technology (微系统技术). Beijing: Chemistry Industry Publishing Company (北京: 化学工业出版社), 2003. 263.
- [3] Larry J Hornbeck. J. MEMS, 2004, 13(2): 272.
- [4] ZHANG Jie, HUANG Shang-lian, FU Hong-qiao, et al (张洁, 黄尚廉, 付红桥, 等). Acta Optica Sinica (光学学报), 2005, 25(11): 1452.
- [5] ZHANG Jie, HUANG Shang-lian, YAN Xu, et al (张洁, 黄尚廉, 闫许, 等). Acta Photonica Sinica (光子学报), 2006, 35(6): 824.
- [6] ZHANG Jie, HUANG Shang-lian, YAN Xu, et al (张洁, 黄尚廉, 闫许, 等). Acta Optica Sinica (光学学报), 2006, 26(8): 1121.
- [7] <http://140.120.1.20/home/acende/WWW/semiconductor/WYKONT1100.pdf>.
- [8] LÜ Nai-guang (吕乃光). Fourier Optics (傅里叶光学). Beijing: Mechanical Industry Publishing Company (北京: 机械工业出版社), 1998. 82.
- [9] YANG Huai-dong, XU Li, CHEN Ke-xin, et al (杨怀栋, 徐立, 陈科新, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2005, 25(9): 1520.
- [10] HUANG Chong, OUYANG Yan-dong, WU Yong-jun, et al (黄翀, 欧阳艳东, 吴永俊, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2004, 24(5): 637.
- [11] HUANG Chong, ZHOU Xue-ping, LIN Xu-sheng, et al (黄翀, 周学平, 林旭升, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2006, 26(1): 175.

Experiments of Micro-Distance Measurement for GMLM with Spectrum Analysis Method

ZHANG Jie, HUANG Shang-lian, ZHANG Zhi-hai, SUN Ji-yong, SHI Ling-na, ZHU Yong

Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China

Abstract Projection display devices are undergoing a period of multi-development, and with the maturation of MEMS technology, which leads to MEMS-based light modulators for display applications, have become one of the research focuses. The structure of MEMS-based grating moving light modulator (GMLM) is composed of the reflection plate, address electrode and four cantilevers, and movable grating plate, which is supported by four crab-cantilevers placed around, and is actuated like a piston by electrostatic force. The piston-type motion of grating can be used to modulate the phase of incident light. The micro-distance between the upper surface of movable grating and underlying reflector is a key parameter and is important to GMLM performance. Traditional measurement method such as step-machine would destroy the device; while a high accuracy and non-contact measurement machine called KYKO White Light Interferometer is expensive. In the present paper, the GMLM optical principle using scalar diffraction theory was in details analyzed. A novel non-contact wavelength scanning spectrum analysis method was put forward to measure the distance between the upper surface of movable grating and underlying reflector. The U-4100 spectrophotometer was adopted to gain spectrum information; while the spectrum analysis method using peak wavelength position was introduced to calculate the micro distance. The measurement result is consistent to theoretical result. The micro-distance is $1.1313\ \mu\text{m}$ using such non-contact wavelength scanning spectrum analysis method, while it is $1.2400\ \mu\text{m}$ with WYKO White Light Interferometer. The relative error was lower than 1%, compared with the results measured by WYKO White Light Interferometer, and the method has good repetition ability and is cheap with RMB50 Yuan each time. Furthermore, measuring pull-in voltage, resonance frequency and micro distance in MEMS-based diffraction and interference devices was proposed completely based on such non-contact wavelength scanning spectrum analysis method.

Keywords Spectrum; Light modulator; Micro distance; MEMS

(Received Mar. 8, 2007; accepted Jun. 12, 2007)