

用于微型光谱仪的硅基多级微反射镜 设计与制作研究*

王 波¹⁾²⁾ 梁中翥¹⁾ 孔延梅¹⁾²⁾ 梁静秋^{1)†} 付建国¹⁾²⁾ 郑 莹¹⁾²⁾
朱万彬¹⁾ 吕金光¹⁾²⁾ 王维彪¹⁾ 裴 舒¹⁾ 张 军³⁾

1)(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

2)(中国科学院研究生院, 北京 100049)

3)(暨南大学光电工程系, 广州 510632)

(2009 年 5 月 6 日收到; 2009 年 6 月 23 日收到修改稿)

提出了一种基于微光机电系统技术实现的空间调制方式的微型傅里叶变换光谱仪, 介绍了其分光干涉系统结构及工作原理. 对其核心部件多级微反射镜的制作方法进行了研究, 采用硅在 KOH 溶液中的各向异性腐蚀方法制作多级微反射镜, 硅腐蚀后形成的(111)反射面的表面粗糙度均方根小于 10 nm.

关键词: 傅里叶变换光谱仪, 多级微反射镜, 微光机电系统, 空间调制

PACC: 0765E, 4278C, 4283

1. 引 言

傅里叶变换光谱仪 (Fourier transform spectrometer, 简称 FTS) 由于具备多通道和高通量的优点, 在光谱分析中有着广泛的应用. 傅里叶变换光谱技术从实现方式上可以分为时间调制和空间调制两大类. 近年来国外对微型 FTS 的研究^[1-6] 大部分是基于时间调制方式, 而这种基于时间调制的光谱仪都必须具备动镜驱动系统, 通过驱动器来控制反射镜运动从而改变其空间位置以获得不同时刻的干涉图, 然后对干涉图数据进行傅里叶变换复原光谱信息. 驱动系统成为时间调制微型 FTS 研究的难点与热点, 其驱动方式有热电驱动、电磁驱动及静电梳驱动^[5,6] 等. 时间调制方式需要高精度的驱动系统, 这使得系统加工和装调都比较困难, 重复性较差; 并且时间调制方式不能实现实时测量, 这些都成为制约其发展的瓶颈. 与时间调制方式相比, 空间调制方式的光谱仪结构中没有可动部件, 从而使得系统具备稳定性好、结构紧凑等优点, 并且能够实现光谱的实时测量. 因此空间调制的微型 FTS 引

起了人们的极大关注, 近年来有较快发展^[3,4].

本文提出了一种基于空间调制的原理的微型 FTS, 其空间分光干涉系统是基于 Michelson 干涉仪的原始结构, 而两臂的平面反射镜用多级微反射镜代替, 多级微反射镜是其核心结构. 本文设计了一种硅基多级微反射镜, 分析了其结构的可行性, 并研究通过微光机电系统 (MOEMS) 技术实现其加工制作.

2. 空间调制微型光谱仪工作原理

图 1 所示为本设计的分光干涉系统. 多级微反射镜 M_1, M_2 代替了传统 Michelson 干涉仪中的两个平面反射镜, 两个多级微反射镜均有 m 个多级微反射面, 台阶高度即反射面周期分别为 t 和 mt , 且沿 x, y 方向正交放置. 入射光束经透镜准直后到达分束器, 被分束器分为强度相等的两束相干光. 一束光经分束器反射后到达 M_1 , 被 M_1 反射后返回并透过分束器, 另一束光透过分束器到达反射镜 M_2 , 被 M_2 反射后返回并被分束器反射. 经 M_1 上每个反射面反射的光都与 M_2 上每个反射面反射的光在空间

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2009AA04Z315) 和国家自然科学基金 (批准号: 60977062) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn

不同位置干涉,形成 m^2 个干涉空间. 每个干涉空间的信息由 CCD 的不同像元接收,通过傅里叶变换即可恢复被测信号的光谱信息.

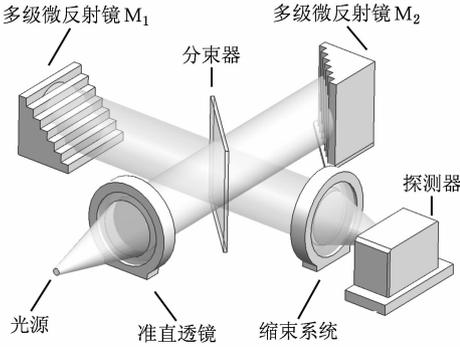


图 1 基于多级微反射镜的分光干涉系统示意图

以 x, y 代表 M_1, M_2 上反射面的序数,经 x 反射面反射的光与经 y 反射面反射的光干涉记为 (x, y) ,则 (x, y) 光的空间干涉级次即 $(my - x)$ 级,其光程差为 $\delta = 2td(my - x)$,空气中折射率为 1. 则 (x, y) 上的干涉光强表达式为

$$I(\nu, x, y) = \frac{1}{4m} B_0(\nu) (1 + e^{i2\pi\nu\Delta(my-x)}), \quad (1)$$

其中, ν 是波数(即波长的倒数), $B_0(\nu)$ 为入射光谱强度, $\Delta = 2t$; 舍去常数项并将各波数单色光干涉图函数积分,以间隔 $\Delta = 2t$ 离散采样,可得到整个光谱范围的干涉图函数 $I_D^{[7-12]}$.

对频域进行离散量化, $\nu_n = \frac{n}{N\Delta}$ ($n = 0, 1, \dots, N-1$),其中 N 为采样点数. 在这些频率上,变换值确定了傅里叶分量

$$B_{0n} = 4m \sum_{k=-n}^{N-n} I_D(k) e^{-i\frac{2\pi nk}{N}}. \quad (2)$$

采用过零单边采样方法来降低系统的原始数据量并减轻系统其他环节的压力,即 $k = -n, \dots, 0, \dots, N-n$,其中 n 为过零采样量,它决定了系统装配的精密位置.

3. 硅基多级微反射镜的制作方法

多级微反射镜是空间调制微型 FTS 的核心部件,其制作方法可采用硅腐蚀、分子键合等. 根据硅的晶格特征及其在碱性溶液中的各向异性腐蚀特性,我们设计采用硅的湿法腐蚀方法来制作多级微反射镜.

如图 2 所示, (110) 硅片中,两个 (111) 面的夹

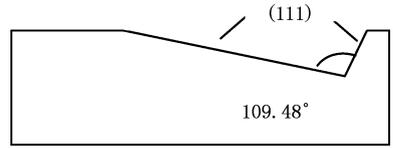


图 2 硅的晶体结构示意图

角为 109.48° ,我们选用 (111) 偏向 (110) 一定角度的硅片,偏角依据多级微反射镜参数而定. 经湿法腐蚀后形成的较大的 (111) 面(见图 2 中左边的 (111) 面)作为反射面.

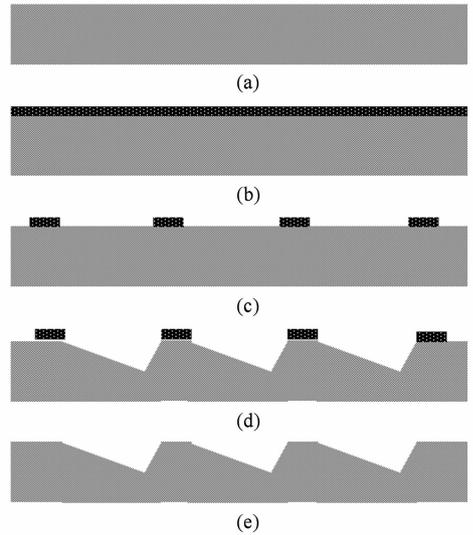


图 3 硅腐蚀制作多级微反射镜工艺流程图 (a) 硅片, (b) 制作掩膜层, (c) 制作掩膜图形, (d) 腐蚀硅, (e) 去除掩膜图形

工艺流程如图 3 所示. 首先在硅上制作 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 当作掩膜层(见图 3(b));通过光刻工艺制作出掩膜图形(见图 3(c));腐蚀硅至夹角为 109.48° 的两个 (111) 面停止(见图 3(d));去掉掩膜层(见图 3(e)). 装调时将图 3(e) 所示的结构偏转一定角度放置使入射光和反射面垂直,即可实现设计功能,如图 4 所示.

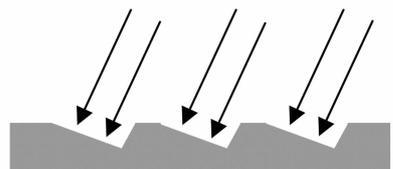


图 4 硅基多级微反射镜效果示意图

4. 硅基多级微反射镜结构衍射效应分析

湿法腐蚀后的沟槽侧面等效结构如图 5 所示. 其中 d 为有效反射面宽度, a 为有效反射面间隔, θ 是入射角, θ_m 是 m 级衍射角, α 是等效结构斜面与水平面夹角. 该结构可以近似认为 y 方向尺寸远远大于 x 方向, 所以 y 方向可以近似为无穷大, 则反射槽内的孔径函数为 $\text{rect}\left(\frac{x}{a}\right)$, 又由于槽内不同反射点的反射光的位相不同, 故每条反射光线要乘上一个相位因子.

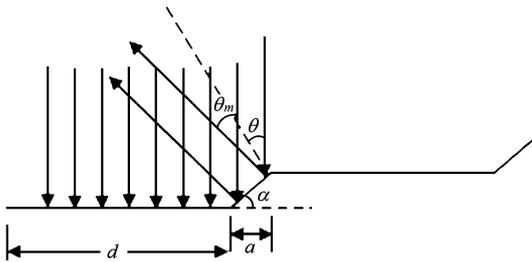


图 5 硅基微反射镜等效结构示意图

振幅为 1 的单色平面波在 X_1OZ 平面以角 θ 入射, 则

$$\phi(x_1) = k\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\text{tg}\alpha + \frac{\sin\theta_m}{\cos\alpha} \right) x_1. \quad (3)$$

令

$$\frac{1}{\lambda} \left(\text{tg}\alpha + \frac{\sin\theta_m}{\cos\alpha} \right) = \zeta, \quad (4)$$

于是第一个槽内的反射函数为

$$r_1 = \text{rect}\left(\frac{x_1}{a}\right) e^{i\phi(x_1)} = \text{rect}\left(\frac{x_1}{a}\right) e^{i2\pi\zeta x_1}. \quad (5)$$

后面的槽相当于第一个槽平移, 槽间距即有效反射面宽度为 d , 则后面的反射槽的函数依次为

$$r_2(x_1) = \text{rect}\left(\frac{x_1}{a}\right) e^{i\phi(x_1)} \otimes \delta(x_1 - d), \quad (6)$$

$$r_3(x_1) = \text{rect}\left(\frac{x_1}{a}\right) e^{i\phi(x_1)} \otimes \delta(x_1 - 2d), \quad (7)$$

$$r_N(x_1) = \text{rect}\left(\frac{x_1}{a}\right) e^{i\phi(x_1)} \otimes \delta[x_1 - (N-1)d], \quad (8)$$

则 N 个槽的总反射函数为

$$\begin{aligned} r(x_1) &= r_1(x_1) + r_2(x_1) + \cdots + r_N(x_1) \\ &= \text{rect}\left(\frac{x_1}{a}\right) e^{i2\pi\zeta x_1} \otimes \sum_{m=1}^N \delta[x_1 - (m-1)d]. \quad (9) \end{aligned}$$

单色照明光源的照明函数为 $e^{i2\pi u_0 x_1}$, 其中 $u_0 = \frac{\sin\alpha}{\lambda}$. 则反射槽入射平面上的光振动分布为

$$U_1(x_1) = \left\{ \text{rect}\left(\frac{x_1}{a}\right) e^{i2\pi\zeta x_1} \otimes \sum_{m=1}^N [x_1 - (m-1)d] \right\} \cdot e^{i2\pi u_0 x_1}, \quad (10)$$

于是在衍射屏即焦平面上的分布为其傅氏变换, 即

$$U(x_2) = a \text{sinc}[a(u - u_0 - \zeta)] \frac{\sin\pi N(u - u_0)d}{\sin\pi(u - u_0)d} \times e^{-i\pi(N+1)d(u - u_0)}. \quad (11)$$

相对光强分布为

$$I(x_2) = I_0 \text{sinc}^2[a(u - u_0 - \zeta)] \times \left[\frac{\sin\pi N(u - u_0)d}{\sin\pi(u - u_0)d} \right]^2. \quad (12)$$

综合两个多级微反射镜分别在 x, y 方向的衍射效应, 可以得到焦平面上的光强分布为

$$\begin{aligned} I(x_2, y_2) &= I_{01} \text{sinc}^2[a_1(u - u_0 - \zeta)] \\ &\times \left[\frac{\sin\pi N(u - u_0)d_1}{\sin\pi(u - u_0)d_1} \right]^2 \\ &+ I_{02} \text{sinc}^2[a_2(v - v_0 - \xi)] \\ &\times \left[\frac{\sin\pi N(v - v_0)d_2}{\sin\pi(v - v_0)d_2} \right]^2, \quad (13) \end{aligned}$$

其中 d_1 和 d_2 分别为两多级微反射镜的参数. 经过计算可以得到衍射和反射的光强分布如图 6 所示, 由图 6 可以看出, 衍射光的光强与反射光光强之比的数量级为 10^{-22} , 可见由湿法腐蚀所得到的多级微反射镜结构的衍射效应极小, 可以忽略.

5. 硅基多级微反射镜的制作研究

硅的湿法腐蚀在 MOEMS 技术中有广泛的应用. 我们采用硅的湿法腐蚀方法制作多级微反射镜, 一次掩膜腐蚀做出多级微反射镜, 制作方法简单易行.

目前已有商用软件用于模拟硅的腐蚀. 在腐蚀前我们分析了用 IMEE 和 ACES 软件模拟的不同偏角不同掩膜以及不同腐蚀条件下的腐蚀情况^[13,14]. 通过多次试验总结出, 浓度为 40% 的 KOH 溶液, 70 °C 恒温水浴为最佳腐蚀条件.

硅的湿法腐蚀过程中会产生大量气泡, 如果这些气泡没有及时脱离硅片表面, 就会在表面形成虚

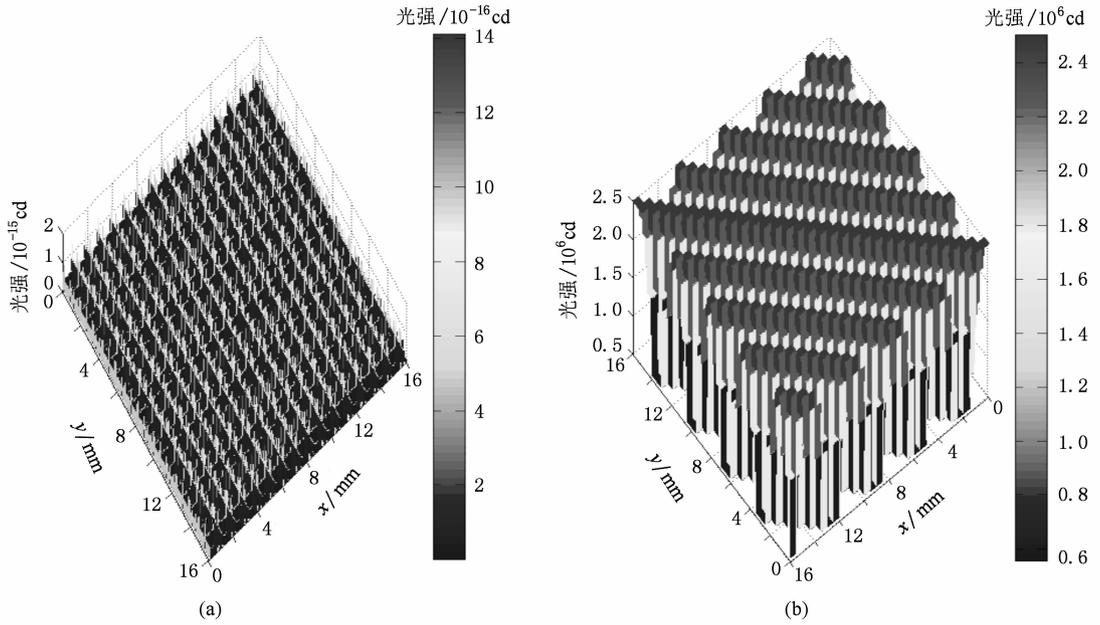


图 6 衍射效应分析图 (a)衍射光强分布,(b)反射光强分布

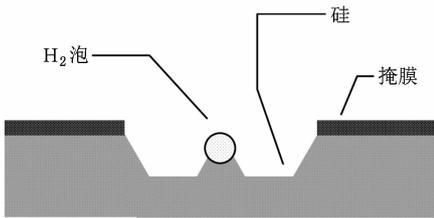


图 7 硅腐蚀过程中的虚掩膜现象

掩膜,不仅影响腐蚀速率,且在表面形成很多小的凸起,使表面粗糙度变差,如图 7 所示.使气泡及时脱离释放的方法主要有机械震动、混入添加剂等^[15-24].其中机械震动的方法主要有超声和磁力搅拌.实验研究发现,磁力搅拌操作控制较为困难;超声会影响掩膜层结构,甚至导致掩膜层脱落.

表 1 加速气泡释放的不同方案条件

方案	浓度/%	温度/℃	机械震动	添加剂
a	35	60	磁力搅拌	—
b	40	70	超声	—
c	40	70	—	IPA
d	40	70	—	SDS

添加剂不仅能使气泡及时脱离释放,提高腐蚀速率,改善表面粗糙度,且能改变不同晶面的腐蚀速率比,增强硅在碱性溶液中的各向异性腐蚀特性.常用的添加剂有异丙醇(IPA),二己基磺化琥珀

酸钠(SDSS),十二烷基硫酸钠(SDS)等.表 1 所示为分别采用机械震动和添加剂的方案条件,图 8 所示为对应的腐蚀情况.磁力搅拌使腐蚀后的硅表面呈现某特定方向的纹理,如图 8(a)所示;超声使气泡快速释放,腐蚀速率较快,但破坏掩膜,且使硅腐蚀后的表面质量变差,如图 8(b)所示;添加 IPA 可明显增强硅的各向异性腐蚀,但其气泡释放作用较差,如图 8(c)中的圆形凸起即形成的虚掩膜所致;添加 SDS 使气泡迅速释放,腐蚀速率加快,且腐蚀后硅表面形貌较好,如图 8(d)所示.实验发现在 KOH 腐蚀液中添加表面活性剂 SDS,迅速产生大量密集气泡,反应速率很快.经测定,在浓度为 40%,温度为 70 ℃的 KOH 溶液中,添加 SDS 的腐蚀速率约为添加 IPA 的两倍.图 9 所示为腐蚀形成的硅基多级微反射镜的原子力显微镜(AFM)测试图.图 10 所示为 AFM 测试硅腐蚀后形成的反射面微结构,表面粗糙度均方根(RMS)小于 10 nm,满足系统所需反射要求.

6. 结 论

提出了一种新型的基于空间调制的微型 FTS 的光路系统,对其核心部件多级微反射镜的制作方法进行了研究,采用(111)偏一定角度的单晶硅片,一次掩膜湿法腐蚀的方法制作多级微反射镜.通过对硅基多级微反射镜结构的衍射效应分析确定了

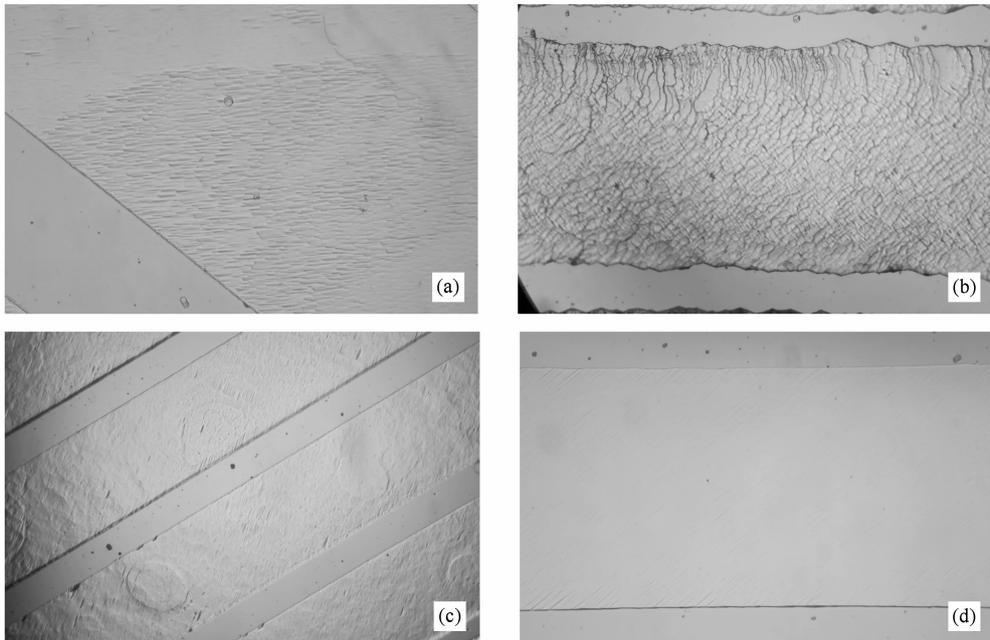


图 8 不同条件对硅腐蚀的影响 (a) KOH + 磁力搅拌, (b) KOH + 超声, (c) KOH + IPA, (d) KOH + SDS

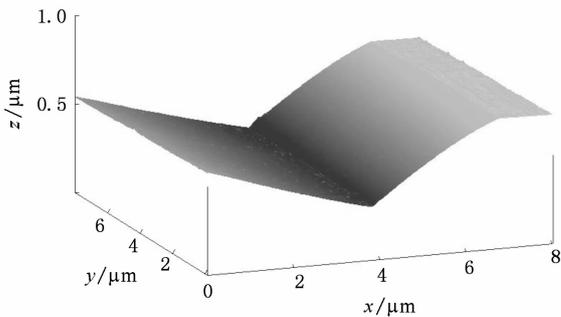


图 9 硅基多级微反射镜 AFM 测试图

该方案的可行性. 通过对模拟结果的分析 and 实验研究确定了硅腐蚀的最佳条件, 采用添加表面活性剂 SDS 的方法使气泡快速释放并增强各向异性腐蚀特性.

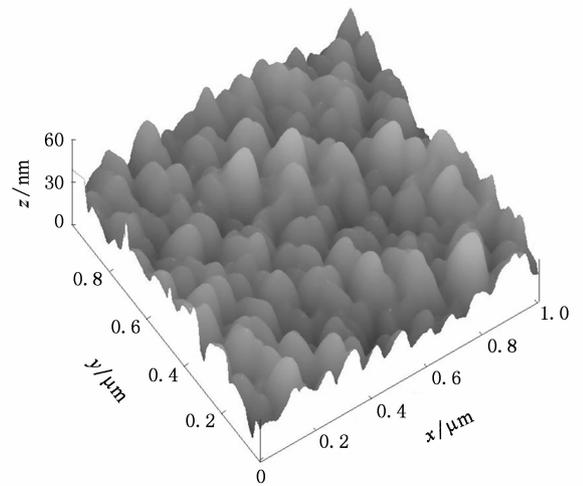


图 10 硅腐蚀形成的微反射面形貌 AFM 测试图

[1] Ulrike W, Christian S, Jurgen M, Jan G, Korvink J G 2005 *Sensor. Actuator. A* **123** 459
 [2] Muller K D, Basher W, Hecke M 1998 *Proceedings of the 11st Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, New York, January 1—5, 1998 p263
 [3] Jeongsik S, Woo H L, Dan P, Harry E 2006 *Pro. SPIE* **6109** 610904
 [4] Anatoliy M, Henrik A, Hans-Erik N 2006 *Pro. SPIE* **6395** 639504

[5] Gerben B, Patrick R, Toralf S, Peter S, Rene D 2004 *Appl. Opt.* **43** 2201
 [6] Ju H, Wu Y H 2001 *Optics and Precision Engineering* **9** 372 (in Chinese) [鞠 挥、吴一辉 2001 光学精密工程 **9** 372]
 [7] Li Z G, Wang S R, Li F T 2006 *Spectroscopy and Spectral Analysis* **20** 203 (in Chinese) [李志刚、王淑荣、李福田 2000 光谱学与光谱分析 **20** 203]
 [8] Jian X H, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 824 (in Chinese) [简小华、张淳民、赵葆常 2007 物理学报 **56** 824]

- [9] Luo Z Y, Yang L F, Chen Y C 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3051 (in Chinese) [罗志勇、杨丽峰、陈允昌 2005 物理学报 **54** 3051]
- [10] Chai L, He T Y, Yang S J, Wang Q Y, Zhang Z G 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 114 (in Chinese) [柴路、何铁英、杨胜杰、王清月、张志刚 2004 物理学报 **53** 114]
- [11] Yuan Z L, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6413 (in Chinese) [袁志林、张淳民、赵葆常 2007 物理学报 **56** 6413]
- [12] Chen B X, Li M, Zhang A J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4535 (in Chinese) [陈宝信、李明、张爱菊 2007 物理学报 **56** 4535]
- [13] Zhu Z J, Liu C 2000 *J. Microelectromech. Systems* **9** 252
- [14] Zhu Z J, Liu C 2000 *Journal of Computer Modeling Engineering Science* **1** 11
- [15] Irena Z, Irena B 1998 *Sensor. Actuator. A* **70** 250
- [16] Irena Z 1998 *Sensor. Actuator. A* **70** 260
- [17] Irena Z 2000 *Sensor. Actuator. A* **84** 116
- [18] Irena Z, Irena B, Kamilla K, Malgorzata K 2001 *Sensor. Actuator. A* **87** 163
- [19] Irena Z, Malgorzata K 2001 *Sensor. Actuator. A* **93** 138
- [20] Irena B, Irena Z 1995 *Sensor. Actuator. A* **48** 229
- [21] Kazuo S, Mitsuhiro S, Yoshihiro M, Takashi Y, Kazuo A, Yasuroh I, Masaharu Y 1998 *Sensor. Actuator. A* **64** 87
- [22] Chii R Y, Po Y C, Cheng H Y 2005 *Sensor. Actuator. A* **119** 271
- [23] Wen J C, Wei K C, Ching T K 2004 *Sensor. Actuator. A* **116** 357
- [24] Van V, Sato K, Shikida M 2001 *Sensor. Actuator. A* **93** 219

Design and fabrication of micro multi-mirrors based on silicon for micro-spectrometer*

Wang Bo^{1,2)} Liang Zhong-Zhu¹⁾ Kong Yan-Mei^{1,2)} Liang Jing-Qiu^{1)†} Fu Jian-Guo^{1,2)} Zheng Ying^{1,2)}
Zhu Wan-Bin¹⁾ Lü Jin-Guang^{1,2)} Wang Wei-Biao¹⁾ Pei Shu¹⁾ Zhang Jun³⁾

1) (State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

2) (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3) (Department of Optoelectric Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

(Received 6 May 2009; revised manuscript received 23 June 2009)

Abstract

A micro-spectrometer without moving parts that can be manufactured through micro-opto-electro-mechanical system techniques is developed, and the interference system is introduced. The fabrication of the micro multi-mirrors, which is the core part of the system, is investigated and wet etching of silicon in KOH solution is testified to be a good method. The root mean square surface roughness of the reflect surface made up of Si planes (111) through wet etching is less than 10 nm.

Keywords: Fourier transform spectrometer, micro multi-mirror, micro-opto-electro-mechanical system, space modulation

PACC: 0765E, 4278C, 4283

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2009AA04Z315) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60977062).

† Corresponding author. E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn