

化学腐蚀法制造硅微透镜列阵的实验研究

朱维安 黄友恕 钟先信

(重庆大学光机系 重庆 400044)

秦 邻

(电子工业部24研究所 重庆 400060)

摘要 采用 KOH:H₂O 的湿法化学腐蚀 Si(100) 晶片获得了球面轮廓曲线十分好的微透镜, 透镜直径可从几个微米到几个毫米, 焦距和孔径之比 f/D 可以从2.5到10以上。文章给出了微透镜及列阵的实验测试结果和若干显微照片, 对其设计与制造建立了半经验理论模型。最后, 对球面的形成原理及异常焦斑形状作了讨论。

关键词 硅微透镜 微机械 微光学 短程透镜

1 前 言

近年来, 继微电子之后, 微机械、微光学的发展越来越引起人们的关注。以微电子、微机械和微光学为基础组成的微系统是把传感器、执行器和信号处理电路集成在一起的工程系统。微系统技术是多学科交叉前沿领域, 已受到许多国家政府部门、学术界和工程技术部门的高度重视。微光学包括微光学元件及系统, 而微光学元件又是系统的重要组成部分。它包括自聚焦微透镜、微折射镜、微反射镜、二元光学透镜、三维结构的微菲涅耳透镜和棱镜以及几何光学微透镜列阵等等。它们可以对微光路进行转换、传输和处理, 达到光学聚焦、偏振、干涉、衍射和散射的目的。微光学元件特别适合于混合集成用, 使得微系统在光学领域内发展许多应用而又不采用复杂的集成光学形式。

基于几何光学的反射、折射和透射原理制造的微透镜及其列阵是微系统光学元件的重要组成部分。现有制造微透镜列阵的方法有三种。第一种方法是利用硅材料各向异性化学法腐蚀的特点, 通过 KOH:H₂O 腐蚀液对 (100) Si 片的两步腐蚀法得到轮廓线近球面的凹面镜^[1], 第二种方法为光刻蚀熔法^[2], 首先在 Si 基片上形成一半球形的光刻胶液滴, 通过液滴的高度和逐渐加热温度控制球体的曲率半径, 采用离子束刻蚀技术进行图形转移, 在芯片上可做出微透镜阵; 第三种方法是精密机械加工法^[3], 采用先进的数控金刚石车床完成球面面形加工, 曲面精度可达0.5 μ m, 光洁度为10nm, 尽管金刚石钻加工精度很高, 还要进行外形表面的精细手

工抛光,用粒度为 $0.5\mu\text{m}$ 的刚玉粉,使工件表面达到没有划痕和麻点的目的。三种方法各有优缺点。

由于Si的化学腐蚀液具有设备装置要求不高、工艺流程较为简单、容易控制、重复性好、便于批量生产的特点。从九十年代初开始国外就有一些学者对之进行了研究。而国内对此方法尚无系统深入的研究报道。基于微光学元件在微系统中的重要地位和需求的紧迫性,本文在实验研究的基础上,对硅微光学透镜阵的设计、制造工艺、理论分析、形成机理及其有关基础理论作了较为深入的研究,得到了轮廓线十分光滑的近球面硅微透镜阵列,首次发现了微透镜的八边形聚焦斑点,后文对其产生机理将作研究。文章最后给出了这种硅微透镜阵列可能的应用领域。

2 设计原理及工艺制造

2.1 设计原理

如图1所示。微透镜是在(100)硅上腐蚀成倒金字塔结构后由快腐蚀面(411)削角推进与其它面的推进交合形成的(参见本节第二部分和第四节形成机理的讨论)。我们建立起图1所示的半径经验模型。 X_c 为临界扩展半宽度,它的物理意义是,当开口大于 X_c 时,腐蚀的凹面坑深度 S 不再随时间变化。由图1可直接得关系式(1),为简单起见,考虑腐蚀时间为单位时间

$$X_c = \frac{d_0}{2} + \frac{R}{\sin\theta} - \frac{r}{\tan\theta} \quad (1) \quad \text{Fig. 1 Formation geometry diagram of micromirror}$$

公式中 d_0 表示V形槽开口半宽度, R 为快腐蚀面{411}的速度, r 为{100}的腐蚀速度,显然

$$S = \frac{d_0}{2} - r$$

定义 $m = \frac{R}{r}$,考虑到 $S = x_c \tan\theta$,有

$$S = d_0 \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{m} \left(\frac{1}{2} \sin\theta - \frac{1}{2} \cos\theta \right) \right] = \alpha d_0 \quad (3)$$

式中 α 为与Si结构和工艺条件有关的常数。

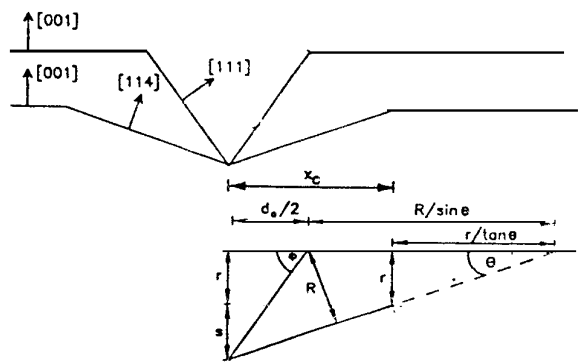
最后形成的浅凹面坑,由开口尺寸 D 和高度 S 两个几何参数描写,这是理想球面的球冠部分。设球面直径为 d ,显然有如下关系式

$$d = \frac{D^2}{8S} + S^2 \quad (4)$$

考虑到 $D \gg S$ 的近似,重新写(4)式:

$$d = \frac{D^2}{8S} \quad (5)$$

由于半径为 d 的理想球面,其反射焦距为 $\frac{d}{2}$,所以我们所获得的微透镜球面反射焦距为:



$$f = \frac{D^2}{16s} \quad (6)$$

数值孔径为:

$$f/D = \frac{D}{16S} \quad (7)$$

将(6)式代入(1)式,整理得

$$d_0 = \frac{D^2}{16f\alpha} = \frac{D}{16\alpha} \cdot \frac{D}{f} \quad (8)$$

上式就是设计微透镜最初开口尺寸 d_0 的理论依据,结合工艺条件可确定硅片厚度。按实际需要给定微透镜的焦距 f 和数值孔径 f/D ,列阵的间距应大于或等于孔径 D 。光刻掩模板既可设计边长为 d_0 的正方形列阵,也可设计直径为 d_0 的圆列阵,后者的优点在于无需对准晶向进行光刻。

2.2 制造工艺

材料选取:(100)_n型Si,双面抛光,厚度400 μm 以上。

腐蚀液配方:30%质量百分比浓度的KOH水溶液,全部腐蚀工艺在60℃条件下的振动恒温槽中进行。

详细的制造流程见图2。

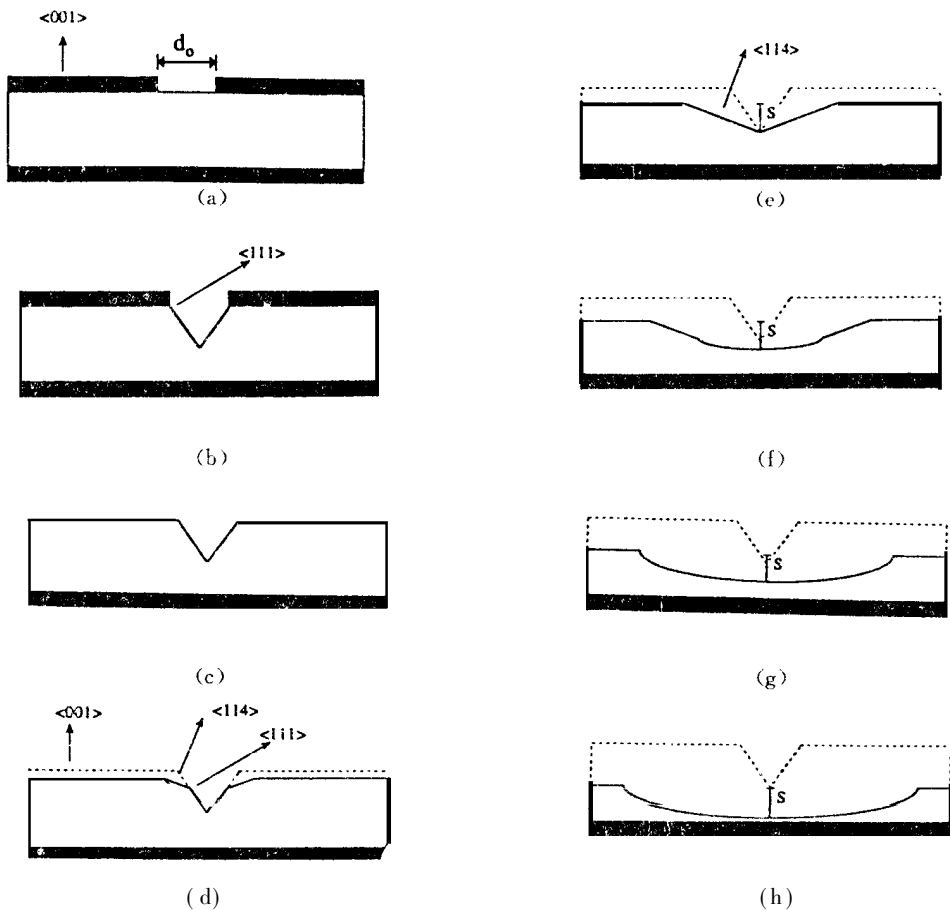


Fig. 2 Fabrication process of micromirrors

① 双面抛光的 Si 片正面和背面都生长 SiO_2 或 Si_3N_4 保护膜, 正面用光刻版光刻形成裸硅方形开口(见图2(a));

② 将①步的基片放入 $\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}$ 腐蚀液中进行预腐蚀, 时间足够长后, 腐蚀将自动终止而形成倒金字塔坑, 坑的四个侧面的 $\{111\}$ 面组成(图2(b))。

③ 漂去正面保护膜, 背面的保护膜继续保留(见图2(C))。

④ 重新放入碱性腐蚀液中, 各向异性腐蚀液将对裸 Si 倒金字塔坑进行腐蚀, 在保证腐蚀液温度和搅拌条件不变的情况下, 随着时间的增加将使坑体表面开口尺寸增大, 形状也将由方形向多边形最终向圆形过渡; 侧面也将由斜面向光滑曲面过渡, 凹面坑的深度由大变小, 最后至一常数值 S 以后不再变化(见图2(d)-(h)), 此时就形成了具有近理想球面的浅凹面的微透镜阵列。

在微透镜阵的制造中, 技术关键有两点:

① 必须防止在保护膜上引入针孔, 针孔将使理想的微透镜阵中生长出逐渐“长大”的缺陷。实际工艺中可在光刻时采用两次曝光法来最大限度地消除光刻版或空气净化室中引入缺陷的影响。

② $\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}$ 腐蚀液浓度、温度和搅拌速度等工艺条件的控制是制造微透镜阵的关键技术, 为此我们建立了微机械加工的专用自动腐蚀槽, 它具有恒温、搅拌、回流的功能, 使得硅微腐蚀工艺具有一致性和可重复性。

3 实验结果

(1) 图3是 $d_0 = 18\mu\text{m}$, 经过5小时30wt% $\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}$ 腐蚀后形成的微透镜剖面的轮廓曲线图。测试仪器为 $\alpha\text{step-200}$ 型台阶测试仪。测得微透镜 $D = 525\mu\text{m}$, 高度 $S = 10.5\mu\text{m}$, 曲线十分光滑并沿 OZ 轴对称。重复测试表明只要通过微透镜顶点(中心点), 沿平面内任意方向分布的剖面曲线都具有对称性, 所以微透镜凹面具有绕 OZ 轴的旋转对称性, 制造的微透镜凹面应是理想球面的球冠部分。

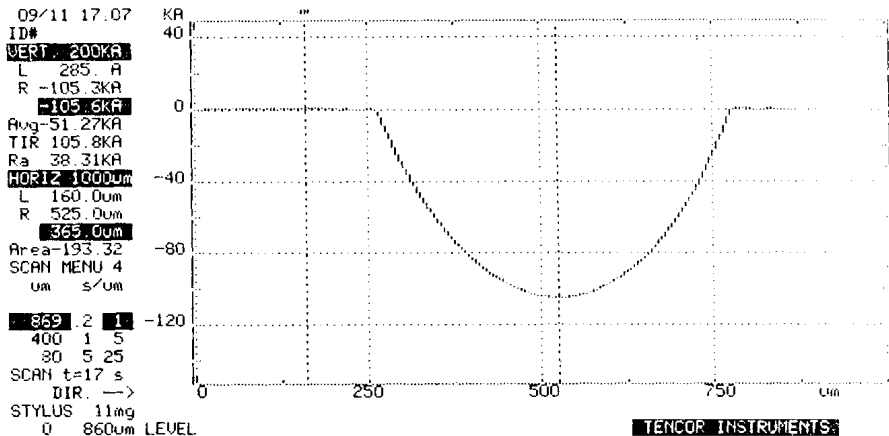


Fig. 3 Micromirrors good spherical profile

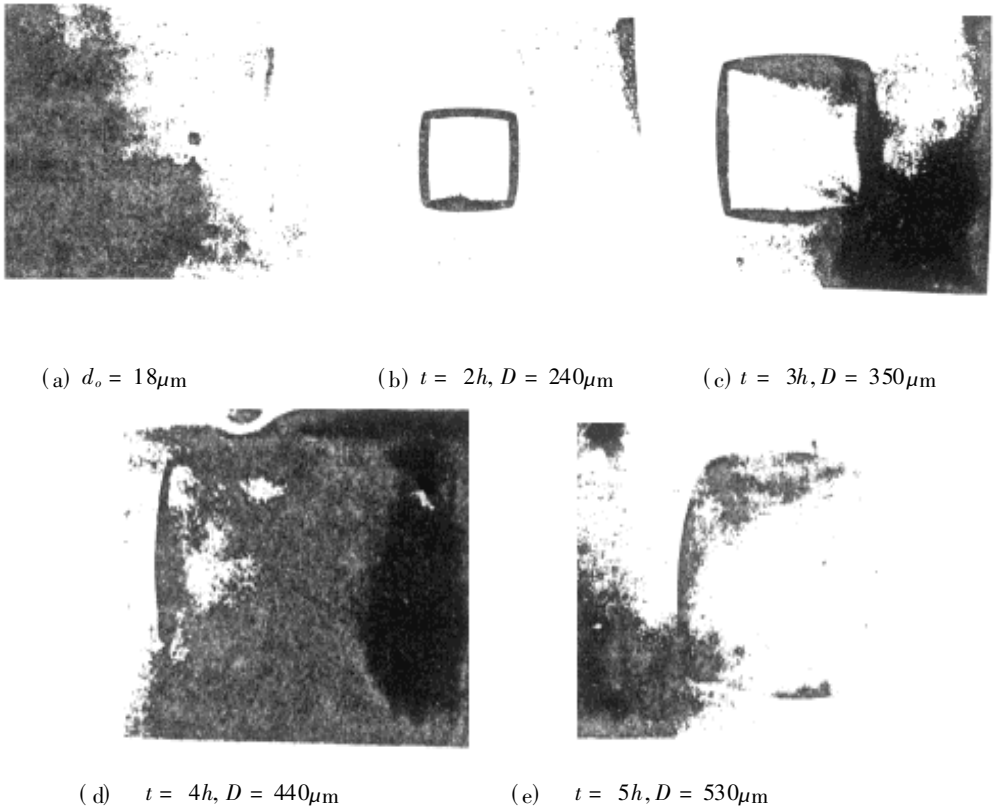


Fig. 4 Optical photographs of progression of a micromirror for different etching times

(2) 图4(a) - (e) 所显示的是微透镜制造过程中和终止的显微照片, 可看出平面开口由方变圆、由小变大的过程。

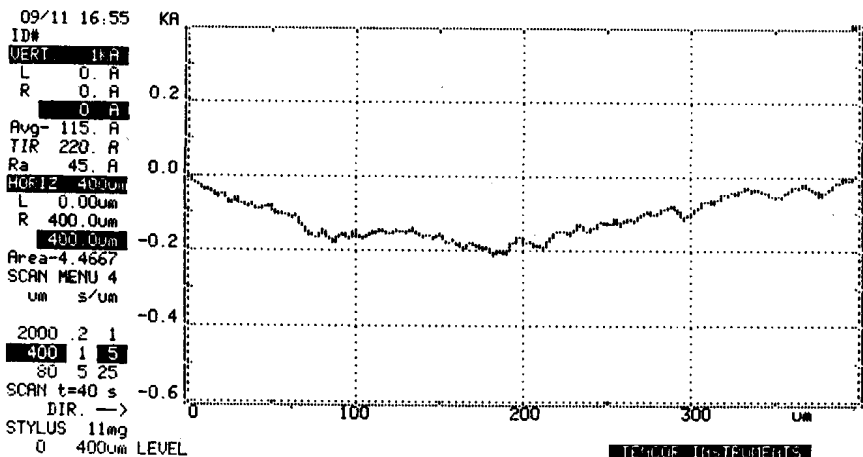


Fig. 5 A good smoothness curve

(3) Si 片表面粗糙度对球面反射镜的反射效率影响很大。通过摸索工艺找到了表面光洁

度很好的工艺条件: 即30wt% KOH:H₂O, 60 条件下带中档速度的搅拌, 图5给出了样品表面粗糙度测试曲线, 在超过300 μm 的大范围内, 表面不平整度小于20nm。

4 讨 论

(1) 由倒金字塔的 V 形槽腐蚀演变成表面光滑的球面镜的机理目前尚无一套系统成熟的解释。早期的模型包括两方面的解释, 即为为什么会形成向下的凹面坑和为什么会使开口由方变圆。Kendall 认为 KOH:H₂O 的腐蚀速度在(100)面上表现为“软极小值”(soft minimum), 即它的相邻晶面都具有相对大些的腐蚀速度, 这样形成凹面通常要优先于平面, 意味着 KOH:H₂O 是一个非平面型腐蚀系统。而表面是正方形的坑在凸角处沿<011>方向逐渐消失的速度大于<001>方向^[5], 原来的方形孔将逐步演变成近似圆孔。借助于轮廓仪的定量测试分析, 进一步发现了在倒金字塔的倒角处, 是{411}快腐蚀晶面系的出现, 使得凸角逐渐光滑, 而{111}面为最慢腐蚀面, {411}面的推进使{111}面逐渐消失。V形槽的顶点在这个过程中几乎不向下推移。一旦快腐蚀面以独立面的形式向水平四周和向下推进时, 顶角处也开始向下推进。直到顶角小平台向下推时的速度与硅衬底平面向下腐蚀的速度相等时, 就形成了理想球面的透镜反射面了。

微透镜反射面是理想球面的球冠部分, 球冠高度为 S , 是一个不随腐蚀时间变化的量, 尽管腐蚀过程还可以使凹面向平面四周扩展, 即使开口孔径 D 增大。我们认为方形倒金字塔坑腐蚀演化成光滑曲面需要借助于复杂的三维模型才能解释清楚。然而借助于二维模型也能较为清晰地描述微透镜的形成机理, 即把垂直方向和水平面分别考虑, 以时间相同作为它们的联系。这涉及微系统 CAD 的知识, 笔者所在的重庆大学光机系目前正开展这方面的研究。

(2) 开口尺寸小的容易形成理想球面凹镜, 而开口尺寸较大($d_0 > 15\mu\text{m}$)所形成的凹面镜易成椭圆状, 估计是硅材料的细微偏轴切割导致微透镜的偏轴。 d_0 较大, 腐蚀时间长, 偏轴误差累积越大。

(3) 在用显微镜对微透镜进行观察时, 很容易地观察到它的聚焦焦斑, 出乎意料的是焦斑形状是八边形而不是圆。我们认为这是微透镜面的精细结构影响所致, 后续论文报道其成因。图6是一个微透镜的焦斑形状。

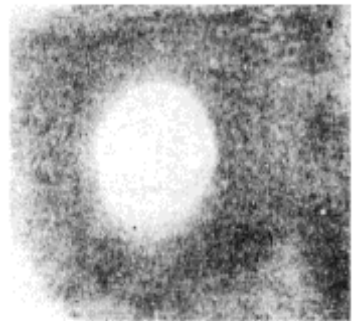


Fig. 6 Focal point of micromirror

5 结 论

我们的实验研究和分析讨论表明, 因 KOH:H₂O 化学腐蚀(100)Si 单晶片, 很容易获得具有精确尺寸和理想轮廓曲面的微透镜列阵。同其它微透镜制造方法相比, 该方法具有简便易行、重复性好、可批量生产的优点。所制造的硅微透镜列阵可进一步地发展成为短焦距透镜的模具。我们的实验研究发现选择恰当的工艺条件可以获得光洁度极佳(表面不平整度<25nm)的表面。文章给出了微透镜的表面轮廓曲线的微透镜制造过程的显微照片系列, 测试数据和理论分析相吻合。对微透镜的形成机理进行了较深入的分析, 对其光学特性作了初步测试, 发现

了八边形的聚焦斑点,其理论解释尚在探讨之中。预测这种硅微透镜列阵可制成反射式及透射式的短程焦距透镜线阵及面阵,并可发展成柱面镜阵列,满足微光学用途的光路转换及调制的要求,与图像传感器结合,实现光学信息处理,有广阔市场应用前景。

致射:研究工作中得到重庆大学光机所何清义副教授,肖沙里副教授的帮助,并进行了许多有益的讨论,在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 Kendall D L, de Guel G R, Guel S. Sandoval Chemically etched micromirrors in silicon. *Appl phys Lett*, 1988, 52(10): 836~837
- 2 M AI Zhihong, YI Lingjian, ZHAO Linrong. Fabrication of silicon microlens arrays using ion beam milling. *Semiconductor photonics and technology*, 1996, 2(1): 61~65
- 3 石邦任,刘 骥,孔 梅,武连文. 理想短程透镜的研究. *光学学报*, 1997, 17(3): 357~361
- 4 Kendall Don L, Eaton William P, Manginel Ran, Digges Thomas G, Jr. Micromirror arrays using KOH:H₂O micromachining of silicon for lens templates, geodesic lenses, and other applications. *Optical Engineering*, 1994, 33(11): 3578~3588

A Experimental Research on Silicon Micromirror Arrays Made by Chemical Etching

ZHU Wei-An, HU ANG You-Shu, ZHONG Xian-Xin

(The Department of Optoelectronic Instruments, Chongqing University, Chongqing 400044)

QING Ling

(The 24th Institute of the Department of Electronic Industry, Chongqing 400060)

Abstract

Micromirrors with good spherical profiles can be made on the Si{100} surface by wet-chemical etching in KOH:H₂O solutions. The mirror diameters span the range from a few micrometers to several millimeters and the range of f/D 's obtainable starts at about 2.5 and goes up to at least 10. Some experiment and microphotos on micromirrors array have given in the paper. A semiempirical model is developed to design the arrays. Finally some discussions on the spherical formation theory and the focal point images are given.

Key words: Silicon micromirror, Micromachining, Microoptics, Geodesic lenses

朱维安 男, 1965年8月出生。分别于1987年和1990年在四川联合大学获学士和硕士学位。1990年到重庆大学从事光电传感器方面的专职研究,现为在职博士研究生,研究方向微机械和微光学元件,发表有关论文十余篇。