

文章编号 1004-924X(2015)11-3107-07

## 高精度石英全息透镜的 MEMS 工艺制作

韩励想<sup>1</sup>, 滑 伟<sup>2</sup>, 马建设<sup>1\*</sup>, 苏 萍<sup>1</sup>

(1. 清华大学 深圳研究生院, 广东 深圳 518055;

2. 中山大学 中法核工程与技术学院, 广东 珠海 519000)

**摘要:**通过微电子机械技术(MEMS)在抛光的熔融石英基材表面制作了平面精度达到  $0.4\ \mu\text{m}$  的超大单片面积的全息透镜。采用了分辨率达到  $0.2\ \mu\text{m}$  的步进投影式拼接光刻, 适合石英基材的专用等离子耦合刻蚀(ICP)干法刻蚀技术, 特殊的物理清洗方法, 以及相关的多项辅助工艺。透镜理想面形横截面曲线为分段抛物线, 每一片由 23 个柱状结构单元周期横向排列构成, 采用等深度不等宽度的 4 台阶结构拟合, 单元宽度约为  $2.966\ \text{mm}$ 。在  $4\ \text{in}(10.16\ \text{cm})$  圆片上, 获得了单片尺寸为  $68\ \text{mm}\times 68\ \text{mm}$  的方形透镜。采用接触式台阶仪, 扫描电子显微镜(SEM), 高倍光学显微镜等方法进行不同阶段检测。结果显示: 台阶平面精度为  $0.4\ \mu\text{m}$ , 垂直精度为  $30\ \text{nm}$ , 有非常好的立墙陡直度和刻蚀均匀性。此工艺方案可实现小规模批量生产, 成本适中, 可以直接用于制作  $6\ \text{in}(15.24\ \text{cm})$  以上同等级要求的石英透镜, 经适当改进也可用于蓝宝石等基底材料的制作。

**关键词:**微电子工艺; 光刻; 全息透镜; 等离子耦合干法刻蚀; 微机电系统(MEMS)

**中图分类号:** O438.1; TN405.98 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152311.3107

## MEMS manufacture process of high precision quartz hologram lens

HAN Li-xiang<sup>1</sup>, HUA Wei<sup>2</sup>, MA Jian-she<sup>1\*</sup>, SU Ping<sup>1</sup>

(1. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China;

2. Institut Franco-Chinois de l'Energie Nucléaire, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519000, China)

\* Corresponding author, E-mail: ma.jianshe@mail.sz.tsinghua.edu.cn

**Abstract:** An over-sized monolithic holographic lens with a micron plane precision of  $0.4\ \mu\text{m}$  is fabricated on a quartz substrate well polished by Micro-electro-mechanical system(MEMs) process. Some improved methods are used in this series process, such as the stepper projection exposure with a resolution of  $0.2\ \mu\text{m}$  and the stitching method, the improved ICP (Inductively Coupled Plasma) dry etching technology for a quartz, the physical cleaning method designed especially and a lot of other supporting processes. The ideal surface shape curve of cross section for the hologram lens is a piecewise parabola. A single lens is horizontally arrayed by 23 column cell structures with a width about  $2.966\ \text{mm}$ . Because of the difficulty in practice, the 4-step structure with an equal depth and an unequal width is used to fit it. At last, single piece square hologram lenses with the area more than  $68\ \text{mm}\times 68\ \text{mm}$  are obtained at a  $4\ \text{in}(10.16\ \text{cm})$  circle piece. The step profiler, scanning electron microscope, high-powered and resolution optical microscope are used to measure lens accuracy at

收稿日期: 2015-06-01; 修订日期: 2015-08-07.

基金项目: 深圳市基础研究项目(No. JCYJ20140417115840236); 广东省产学研合作专项资金资助项目(No. 2012B091100102)

different stages. The results indicate that the lens has a plane precision of  $0.4\ \mu\text{m}$ , vertical precision of  $30\ \text{nm}$ , and shows a good vertical wall shape and etching uniformity. This process technology can be used for small batch production, and the cost is moderate. It is suitable for processing the same grade lenses with the size of  $6\ \text{in}(15.24\ \text{cm})$ , and also for processing the sapphire substrates.

**Key words:** micro electronic process; photo lithography; hologram lens; Inductively Coupled Plasma (ICP) dry etch; Micro-electro-mechanical System(MEMS)

## 1 引言

衍射光学元件是利用器件表面的微结构调制和变换光波面的光学元件,具有广泛的应用。衍射光栅,菲涅尔透镜,全息透镜,全息光栅,全息滤光片,全息扫描器,以及其它的多二元光学器件都属于此类元件。高精度的衍射光学系统,由于其结构具有较小的深宽比,工艺上可以等价作为一种有特定光学功能的微结构薄膜系统,或者一种特殊类型的微机电系统器件<sup>[1-2]</sup>。全息透镜是一种常用的衍射光学元件,为一种光波相干叠加而获得的全息图的记录介质。可以实现一些特殊功能,但目前尚不能完全取代常规光学元件。其外形轻薄,可以在空间上重叠记录多张全息图,成像特性随波长变化,因此色差较大,在趋向于单色的窄光谱应用中表现较好,但难以同时获得大的视场和大的出射光瞳。

近些年微电子工艺、超精细加工以及计算机辅助设计等技术的发展极大地推动了全息透镜的设计和制作技术<sup>[3]</sup>。高纯度石英作为一种性能优良的材料,物理、化学性能可靠而且稳定,对宽的光谱具有良好的透过性,但加工相对困难。对于石英基材的精细加工方法主要有:(1)湿法化学腐蚀,方便而且成本低廉,但属于各向同性作用,难以获得足够好的面形,不能保证立墙陡直度,不适合高精度结构;(2)快激光或 FIB(聚焦离子束刻蚀)等直写方法,但在加工面积和效率等方面都受很大限制,加工难度和成本较高;(3)金刚石刀头超精细加工,硬脆物质的超精细加工一直是该领域的世界难题,能够有效实现此功能的机台,在全球范围非常有限,成本高且成品率低,短时间内没有工业化量产和用于民用的可能<sup>[4]</sup>;(4)微纳米压印,在石英表面的压印技术还不成熟,难度较大,模具制作的成本也较高;(5)等离子体干法刻蚀是

目前比较适合加工此类器件的技术,工艺逐渐趋于成熟,成本逐渐下降,适合工业化量产。刻蚀气体有多种选择,常用的有  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ,  $\text{CHF}_3$ ,  $\text{CF}_4$ ,  $\text{SF}_6$ ,  $\text{CF}_4/\text{SF}_6$  混合气体,及以上气体与氩气的混合气体等,需要按照不同的工艺要求调整气氛、流速等参数,刻蚀速率通常在  $10\sim 20\ \text{nm}/\text{min}$ 。

在具体加工技术方面,有如下比较突出的问题,即为本文所述工作的主要困难和研究目标:

(1)结构精度越高,大面积单片透镜的实现就越困难;而对于超大面积透镜,则很难实现高的结构精度。通过常规技术加工的此类衍射光学元件只能达到大于  $2\ \mu\text{m}$  的精度,而结构尺寸一般却超过  $10\ \mu\text{m}$ 。同时由于作为基底的高硬度光学材料在抛光精度等方面的限制(如整片翘曲度),即使在  $2\ \mu\text{m}$  的精度要求下,通常也只能制作单片直径小于  $10\ \text{mm}$  的全息透镜。如果制作几乎与整片  $4\ \text{in}(10.16\ \text{cm})$ (甚至  $6\ \text{in}(15.24\ \text{cm})$ ) 晶圆等大的高精度透镜(平面精度达到  $0.4\ \mu\text{m}$ ),需要 2 次以上套刻的自由曲面拟合,常规曝光和刻蚀技术无法达到,必须探索新的方法。

(2)石英基底的性质与 Si 晶圆表面生成或沉积的  $\text{SiO}_2$  薄膜有较大差异,其加工特性与多数微电子设备的工艺条件和设计用途不一致,因此工艺细节也需要重新探索。

(3)此类高精度大面积全息透镜通常成本较高,产能较低,成品率较低,一致性也较差,难以实现批量生产。探索交易实现,成本较低,操作性较强的标准工艺,用于工业化量产具有重要应用价值。

## 2 抛物线面形的拟合及相关精度分析

### 2.1 台阶拟合方法

全息透镜的一个结构单元如图 1 所示,多个单元横向排成柱状阵列,构成约  $68\ \text{mm}$  宽度的一片透镜。

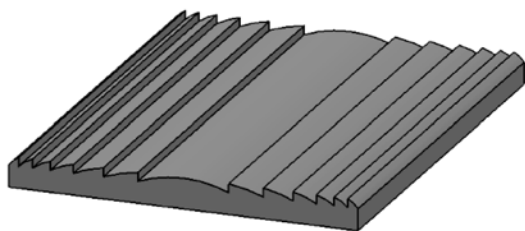


图 1 全息透镜 3D 示意

Fig. 1 Diagrammatic drawing of holographic lens

与柱状透镜相垂直的截面,其面形曲线表现为多条不同曲率的分段抛物线,图 2 所示为 2 个透镜单元衔接处的截面示意图,每条抛物线对应不同的二次曲线方程(根据设计要求,接合处的 2 条抛物线不是完整的)。受工艺限制,在实际制作中通常采用多级台阶结构来拟合透镜的抛物线面形,台阶级数越多,实际面形越接近理想抛物线,但其加工过程将需要更多的套刻次数,更多的工艺步骤和更高的工艺精度。通过  $n$  次套刻获得  $2^n$  个台阶级数的结构,而实际上 4 台阶结构的衍射效率可以达到原抛物线面形的 80% 以上,满足多数场合的需要。此次制作,用等深度且不等宽度的 4 台阶曲线分别拟合每一条抛物线,所制作透镜的最小台阶宽度小于  $4.65 \mu\text{m}$ ,每一级台阶深度  $353 \text{ nm}$ (与基材折射率相关),每一单片石英透镜包括 21 个重复周期结构,总面积超过  $68 \text{ mm} \times 68 \text{ mm}$ ,属于超大面积全息透镜。

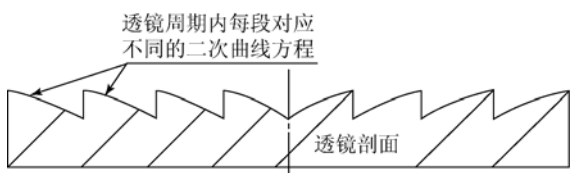


图 2 透镜单元接合处截面曲线示意

Fig. 2 Junction of 2 lens cross section

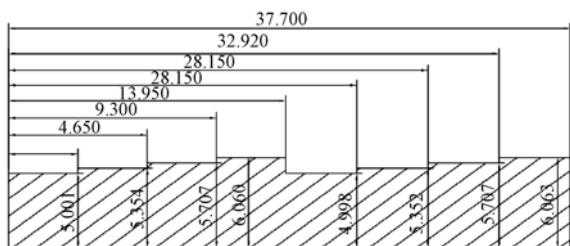


图 3 透镜结构局部设计图

Fig. 3 Design of local lens structure

## 2.2 相关工艺,设备及检测的精度分析

精度参量主要通过以下方式描述:(1)平面精度,即最小尺寸台阶的实际宽度与设计值的偏差,及其相对位置的准确程度(通过台阶上沿位置衡量),例如曝光过程中的套刻精度等;(2)垂直精度,即刻蚀获得的台阶深度与设计值的偏差,及其多点的一致性;(3)刻蚀面的表面粗糙度;(4)微结构中台阶的立墙角度和形态。(1)(2)通过在样片中取参考点测量估算,同时以工艺步骤的实际分辨率作为参考,属于半定量检测;(3)(4)为垂直精度在平均精度基础上的进一步和更精细要求,依据显微图像定性描述。当器件要求的结构平面精度达到亚微米等级时,所需的工艺水平与  $1 \mu\text{m}$  以上将会是 2 个不同层次,此后工艺水平的要求通常以每  $0.2 \mu\text{m}$  为一个等级;尺度达到  $0.3 \mu\text{m}$  以后,将会按照更精细的等级划分,而其提高的难度与所需的成本将会成倍增长,需要新的技术、设备甚至全新的工艺线。

本文所涉及的石英基全息透镜,一个周期内以中心线为轴左右对称,每个半周期内透镜面形由 28 条分段抛物线构成(包括 1 条不完整线),长度和曲率均不相同,通过共 109 个台阶拟合。作为衍射光学元件,可以认为其所需的平面和垂直精度均为最小工艺尺寸的  $1/10$  左右,以满足其所要求的光学性能。在此透镜中即可认为,平面精度需要高于  $0.5 \mu\text{m}$ ,垂直精度需要高于  $30 \text{ nm}$ 。在微电子工艺设备领域,通常用一台设备所能实现的最小图形线宽(关键尺度)来描述此设备的工艺精度,关键尺度通常大于所需精度的 2 倍以上,不同的器件或工艺步骤可以有不同的默认比例,而设备真正能实现的量化工艺精度则需要针对具体工艺,设备和条件来考量。

在此透镜的制作过程中,所涉及的主要工艺步骤为:清洗,涂胶,曝光显影,等离子体干法刻蚀等。环境条件需要与相应的精度要求、工艺设备匹配。光刻流程中实际采用了  $0.4 \mu\text{m}$  技术及相应条件,极限加工精度  $0.3 \mu\text{m}$ ,实际可分辨最小线宽约为  $0.2 \mu\text{m}$ 。等离子体干法刻蚀系统的加工精度高于此等级,平面维度上的精度主要由光刻工艺的质量决定。垂直方向上,采用的 ICP 刻蚀系统,经过反复调试及标定,垂直刻蚀精度高于  $20 \text{ nm}$ 。检测设备采用了极限分辨率  $0.2 \mu\text{m}$  的金像光学显微系统,垂直分辨率  $0.5 \text{ nm}$  的接触式台阶仪,以及扫描电子显微镜(SEM)系统。

### 3 工艺流程及关键问题

#### 3.1 基片及预刻蚀实验

基材选用 4 in(10.16 cm)高纯石英圆片,冷加工制作,双面机械抛光,加工标准上仅要求 TTV(整体厚度值偏差)值小于  $15\ \mu\text{m}$ 。基材制作使用进口石英砂,  $\text{SiO}_2$  纯度超过 99.993%,其它微量元素含量标称如表 1 所示,折射率为 1.53~1.54,密度为  $2.65\ \text{g}/\text{cm}^3$ 。

表 1 杂质元素含量

Tab. 1 Impurity element content

杂质元素	Al	Fe	K	Li	Cu	Na	B	Ca	Mg	P	Ti
单位/ $\times 10^{-6}$	15.00	0.20	0.60	0.40	0.02	0.80	0.10	0.40	0.05	0.06	1.20

提高基片的加工精度,可以提高工艺质量和成品率,但同时会大幅度提高成本。此透镜的制作工艺研究,目的是探索此类元件的工业化量产方法,综合考虑全部技术方案,所选择的抛光标准是合理的。不同厂商提供的石英圆片,因为熔铸工艺和表面处理方式不同,在刻蚀过程中会有不同的刻蚀速率,以及不同的平面均匀性和表面粗糙度。需要先通过预刻蚀实验,选出合适的厂商及型号,然后摸索出不同条件下的刻蚀速率及相应工艺条件。

#### 3.2 工艺流程

主要工艺流程如下:清洗(包括烘烤),(A1)一次涂胶,(A2)曝光显影,(A3)检测后一次刻蚀,(A4)去胶并清洗,(B1)检测后二次涂胶,(B2)二次光刻,(B3)二次刻蚀,(B4)检测后去胶,简易清洗。

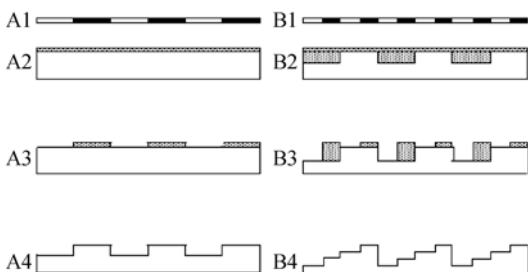


图 4 套刻步骤示意

Fig. 4 Procedure of alignment

因为器件深宽比较小,因此以平面工艺为基础设计工艺方案。第一次刻蚀在预定位置获得

706 nm(设计值)凹槽,第二次高精度套刻,在第一次刻蚀基础上继续刻蚀 353 nm,于是在 706 nm 凹槽内获得 1 059 nm 深度台阶,在基底表面上获得 353 nm 深度台阶,从而实现了设计的 4 台阶结构。台阶级数为  $k$ ,刻蚀次数为  $n$ ,则  $k=2^n$ 。

#### 3.3 工艺细节

微电子工艺中大部分设备及工艺流程以硅工艺为基础<sup>[5]</sup>,但使用石英基片制作光学元件的工艺有其特殊性,工艺细节的变动基于以下方面,任何微小欠缺都可能使实验失败<sup>[6-7]</sup>。

(1)不同的清洗工艺。常规硅工艺的清洗流程不适用于此类元件的制作,高酸(碱)度的清洗工艺会严重影响基片的表面光洁度,甚至在表面留下明显腐蚀痕迹,影响其光学性能。常规光刻胶使用在石英基片上,也具有相对较差的附着度。使显影后发生大面积脱胶或图形质量差等问题。本文采用一种较特殊的物理手段为主的清洗方法,配合严格的操作流程和条件,获得了可以接受的清洗质量,涂胶步骤中的返工率小于 5%。<sup>[8]</sup>

(2)光刻胶甄选。光学器件对胶的要求如下:①薄型胶系,具有较小的黏滞系数;②在氟基等离子体气氛下,对于石英材料具有较高的刻蚀比;③刻蚀过程中耐高温,不易碳化。满足以上基本条件后,再考虑与基片附着性,显影质量,条件适应性,设备宽容度等细节性能。光刻胶的合适选择,是实现设计结构的深度和精度,以及较少缺陷的前提。

(3)涂胶与烘烤。涂胶前,基片在  $400^\circ\text{C}$  洁净气氛中严格烘烤 12 h 以上。冷却后,采用手动旋涂光刻胶,但系统要有较高的精度,包括滴胶速率,转速程序,机台平稳度等。胶膜厚度约为  $1.8\ \mu\text{m}$ ,曝光焦平面设定为距基片表面  $0.9\ \mu\text{m}$ ,曝光前和显影前各进行一次热板烘烤。

(4)步进投影式拼接光刻。综合考虑结构精度要求,单片器件面积,基片表面平面度等因素,采用步进投影式曝光,掩模放大系数 5 倍,一次曝光面积为  $4\ \text{mm}\times 4\ \text{mm}$ ,单片透镜曝光 256 次;通过对曝光系统及步进参数的调整以及特殊的补偿措施,使显影后拼接效果不影响刻蚀质量。为降低成本,采用 NIKON 公司较早期的亚微米曝光系统,对系统装片单元进行了一系列改装以适应石英基片的直径,厚度和重量。实际条件下,显影最高分辨率超过  $0.2\ \mu\text{m}$ 。

(5)多区域的步进曝光拼接及其识别标记。作为光学元件,不需要在基片上制作高对比度的不透光层,因此工艺过程中也不能制作高衬度的位置识别标记。设计了特殊的识别标记和制作方法,以及相应的曝光系统识别参数,通过在透明的石英基底上制作浮雕式(透明)微结构位置识别标记,作为曝光系统在分区域步进曝光过程中的移动和对焦依据,实现了透明石英基底上的多曝光区域的步进式自动套刻和精确拼接。通过多次预备实验,验证并掌握了这一技术。全部制作过程中没有增加额外的不透光薄膜或相关工艺,有效节约了成本和提高了工艺可靠性,降低了工艺难度和复杂程度。全部套刻和拼接曝光过程,工艺质量符合要求,1 000 倍光学金像显微镜下,拼接痕迹不可见。<sup>[9]</sup>

(6)刻蚀工艺采用 ICP 刻蚀,使用  $\text{CHF}_3$ ,不添加辅助气体,通过在条件相对稳定后的刻蚀时间来控制深度。所用 ICP 机台在改造过程中加装了专用的陶瓷夹具和气体冷却系统,通过流动的高纯氮气从基片背面进行冷却,实验阶段基片放置在腔体中央,每次加工 4 in 基片 3 片,获得了较好的刻蚀均匀度。<sup>[10-11]</sup>

#### 4 工艺质量及光学性能检测

图 5 所示为获得的透镜样品,对其结构精度及光学特性通过多种方式进行检测。透镜根据设计要求仅在一个方向上具有放大效果,且同时有显著的分光效果,面积接近 4 in。圆片的最大内接正方形,有较好的透光和衍射效率,如图 6 所示。



图 5 完成的石英全息透镜

Fig. 5 Quartz holographic lenses produced



图 6 横向放大及光束分向折射效果

Fig. 6 Dimension magnify and light beam deflection effect

接触式探针台阶仪随机测试结果,如图 7 所示,表现出良好的表面光洁度及立墙形状。在微结构表面上,精确的表面光洁度值难以精确测量,结合微结构的设计特征和图 7 的台阶仪测试结果可知(1)刻蚀后的最大尺度约为  $50 \mu\text{m}$ ,在此范围内的表面 P-V 值小于  $0.015 \mu\text{m}$ ; (2)图 7 中刻蚀表面光洁度略优于未刻蚀表面(光刻胶保护),而基片表面 100 mm 内 TTV 值小于  $15 \mu\text{m}$ ,以此推算和目测均可认为基片表面光洁度超过  $R_a 0.01$  (取样范围 1 mm); (3)等离子体刻蚀系统具有一定的表面抛光能力,在之前的其它实验中,ICP 刻蚀硅片表面的氢氧合成氧化生成的  $\text{SiO}_2$  薄膜,获得过优于  $R_a 0.001$  (取样范围  $50 \mu\text{m}$ ) 的表面效果。因为以上理由,认为此次刻蚀表面的光洁度优于  $R_a 0.01$ 。

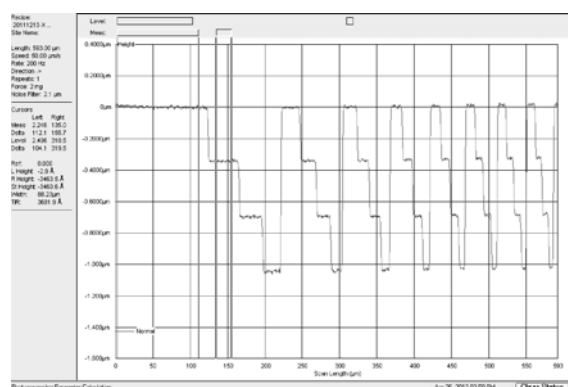


图 7 台阶仪测试

Fig. 7 Measurement with step profiler

中试过程中的 SEM 截面检测,样品制作需要横向折断,属于破坏性测试,仅用于试刻蚀阶段

的中试过程。以 SEM 测量结果对台阶仪等设备测量结果进行校正,并检验刻蚀速率标定的效果(其台阶高度不等同于设计刻蚀深度)。图像表现出好的光洁度和台阶形状。

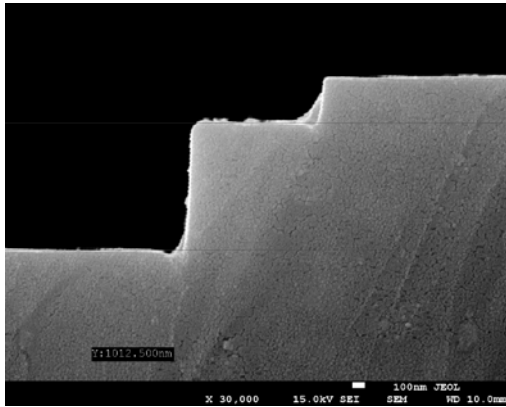


图 8 制作过程中的扫描电镜检测

Fig. 8 SEM measurement of etching effect

光刻过程中,显影后的高倍金像显微镜照片,用于套刻位置的调校,及修改 Stepper 系统的定位坐标和拼接参数等,图 9 为套刻偏差的修正过程中<sup>[12]</sup>。

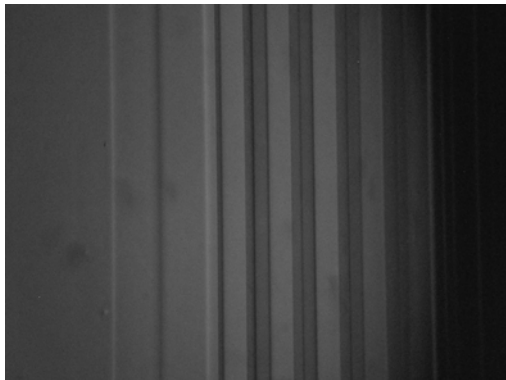


图 9 金像显微镜 1 200 倍照片

Fig. 9 1 200 × photo by metalloscope

配合专用的 LED 发光屏幕,产生较高锐度的明暗条纹,表现出理想的分光效果如图 10 所示。使用分布光度计测量不同角度的光强可以在一定程度上定量分析其分光效果,并推论其实际使用效果。通过此系统可以在设定的距离和角度看到

肉眼 3D 图像<sup>[13]</sup>。此次实验实现了小批量制作,预刻蚀实验完成后,正式投片 70 片,全程由研制相关的专业人员操作,共获得成品石英全息透镜 67 片,光学测试后认为加工精度最高的约为 15~20 片,缺陷略多的约为 10 片,其它效果中等。其中使用了 64 片,在显微镜下拼接成超大全息透镜单元,获得了图 10 中的分光条纹图像。



图 10 透镜分光条纹(分布于大的墙面)

Fig. 10 Light beam split projecting on wall

## 5 结 论

本文采用 Stepper 曝光系统及相关辅助技术,获得了优于  $0.4 \mu\text{m}$  的平面精度;改进的适用于石英刻蚀的 ICP 系统实现了垂直刻蚀深度的精确控制和好的立墙效果,并有较高的成品率和适中的成本,适用于小规模量产。工艺实验中,获得了实际平面精度达到  $0.2 \mu\text{m}$ ,垂直精度为  $30 \text{ nm}$ ,单片面积超过  $68 \text{ mm} \times 68 \text{ mm}$  的石英基全息透镜。同样工艺方案,可以制作单片直径 6 in 以上石英基底器件;对于结构较简单的如石英光栅类器件,可实现  $0.2 \mu\text{m}$  线宽。同等级精度、单片面积、材料的光学器件制作,目前在国内还没有相关报导,相关技术的发展具有重要意义。后期工作将着重于:(1)刻蚀深度的更高精度控制;(2)大面积刻蚀过程中的平面均匀性;(3)规模化量产技术及制作成本的降低,包括更经济和更适合各种不同要求的 ICP 刻蚀设备。

## 参考文献:

[1] BERNHARDT M, WYROWSKI F, BRYNGDAHL O. Iterative techniques to integrate different optical

functions in a diffractive phase element [J]. *Appl Opt.*, 1991, 30(32): 4629-4635.

[2] 李路明,王立鼎. MEMS 研究的新进展——微型系统及其发展应用的研究 [J]. *光学精密工程*, 1997,

- 5(1): 67-73.
- LI L M, WANG L D. Micro system and its Development and Applications [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(1): 67-73. (in Chinese)
- [3] 杨国桢, 顾本源. 衍射光学元件的设计方法 [J]. *物理*, 1994, 23(4): 200-205.
- YANG G ZH, GU B Y. Diffractive phase element design procedure [J]. *Physics*, 1994, 23(4): 200-205. (in Chinese)
- [4] 陈冰, 郭兵, 赵清亮, 等. 热压硫化锌的超精密磨削加工饶志敏 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2110-2116.
- CHEN B, GUO B, ZHAO Q L, *et al.*. Ultra precision grinding of hot-pressed zinc sulfide [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2110-2116. (in Chinese)
- [5] CHARLES A H. *Electronic Materials and Processes Handbook* [M]. America: McGraw-Hill Companies, 2004.
- [6] MICHAEL Q, JULIAN S. *Semiconductor Manufacturing Technology* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- [7] STEPHEN A C. *The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication* [M]. Britain: Oxford University Press, Inc., 2001.
- [8] 韩励想, 李占奎, 鲁皖, 等. 双面二维硅微条探测器的沾污失效分析及修复 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(12): 2616-2623.
- HAN L X, LI Z K, LU W, *et al.*. Contamination failure analysis and repairing for double side two dimensional silicon micro strip detectors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12): 2616-2623. (in Chinese)
- [9] KOJI I. Biomedical micro device fabricated by micro stereo lithography. sixth international symposium on micro machine and human science [C]. *IEEE*, 1995: 67-70.
- [10] 赵玉清. 电子束离子束技术 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 222-228.
- ZHAO Y Q. *Electron Beam and Ion Beam Technology* [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002: 222-228. (in Chinese)
- [11] 韩励想, 李占奎, 靳根明. 用于半导体探测器研制的数字摄影显微系统 [J]. *核电子学与探测技术*, 2009, 29(5): 945-949.
- HAN L X, LI ZH K, JIN G M, *et al.*. The system of digital-image optical microscope in semiconductor particle detector development [J]. *Nuclear Electronics and Detection Technology*, 2009, 29(5): 945-949 (in Chinese)
- [12] 达道安. 真空手册 [M]. 北京, 国防工业出版社, 2004: 834-915.
- DA A D A. *Vacuum Manual* [M]. Beijing: Defence industry Press, 2004: 834-915. (in Chinese)
- [13] 张雷, 杨勇, 赵星, 等. 基于小发散角的投影式集成成像三维显示再现深度的拓展 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 1159-1165.
- ZHANG L, YANG Y, ZHAO X, *et al.*. Enhancement of field depth for projection-type integral imaging 3D display based on small diverging angle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1159-1165. (in Chinese)

#### 作者简介:



韩励想(1978—),男,吉林省吉林市人,博士后,2001年于吉林大学获得学士学位,2010年于中科院近代物理研究所获得博士学位,主要从事微电子、微机电系统,及先进LED技术等方面的技术及工程研究。E-mail: lixiang-han@impcas.ac.cn



马建设,男,河南人,副研究员,2000年于哈尔滨工业大学获博士学位,主要从事信息存储及处理技术。E-mail: ma.jianshe@mail.sz.tsinghua.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)