

## 提高 CCD 图像传感器填充因子的微透镜阵列的研究 \*

柯才军<sup>1</sup>, 易新建<sup>2</sup>, 赖建军<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学 光电系, 湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学 图像处理与智能控制国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**为了提高可见光 CCD 图像传感器的探测灵敏度, 提出了 516 × 516 元石英微透镜阵列的设计方法, 并简要介绍了其制作工艺。测量结果表明, 所制作的微透镜阵列有优良的表面轮廓、较好的几何尺寸均匀性和光学性能, 大幅度地提高了 CCD 图像传感器的填充因子。

**关键词:**微透镜阵列; 填充因子; CCD; 反应离子刻蚀

**中图分类号:** TN2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)02-0209-04

## Research on microlens array for improving the fill factor of CCD image sensors \*

KE Cai-jun<sup>1</sup>, YI Xin-jian<sup>2</sup>, LAI Jian-jun<sup>1</sup>

(1. Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. State Key Laboratory for Image Processing and Intelligent Control, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** To improve the detecting sensitivity of CCD image sensors, the design method and the fabrication technology of 516 × 516 element microlens array on fused silica substrate are introduced briefly. The test data indicate that the microlens array has perfect surface profile, good uniformity and optical performance. Consequently the fill factors of microlens array increase greatly.

**Key words:** Microlens array; Fill factor; CCD; Reactive ion etching

### 0 引言

随着半导体工艺的发展, CCD 像元尺寸不断减小, 综合性能尤其是成像分辨率不断提高<sup>[1]</sup>。但像元尺寸的减小导致探测灵敏度下降, 因此提高 CCD 的填充因子成为优化其性能参数的一个必要条件。对

于微透镜与 CCD 集成技术国外已经进行了很多的探索与研究<sup>[2~4]</sup>, 而国内才刚刚起步<sup>[5]</sup>, 还有大量的技术问题有待解决。如何制作出成型质量高、均匀性好, 并有良好的光学性能的石英微透镜阵列是国内外近年来一个研究热点<sup>[6]</sup>。已经报道的微透镜的制作方法有以下几种: 平面工艺离子交换法、光敏玻璃法、全息法、菲涅耳波带透镜法、光刻胶熔融法、

收稿日期: 2003-06-02; 修订日期: 2003-08-08

基金项目: 国家 863 高技术发展计划资助项目 (41321030204)

作者简介: 柯才军 (1976-), 男, 湖北鄂州人, 博士, 主要从事微光机电器件的研究。

PMMA X 光照射及熔融法。其中,光刻胶熔融法工艺简单、制作周期短、成本低廉,因而被广泛采用。由于光刻胶在化学稳定性和透光率方面与石英相比还不够理想,在研究中,采用了光刻熔融与反应离子刻蚀相结合的方法来制作石英微透镜阵列。在大多数情况下,微透镜阵列采用圆形基底形式<sup>[7]</sup>,但对于具体的应用来说,为了最大限度地提高 CCD 的填充因子,要求微透镜阵列能把入射的信号光几乎 100% 地会聚在 CCD 的光敏感元上,从而提高 CCD 的量子效率和探测灵敏度。

### 1 微透镜阵列的设计方法

微透镜与 CCD 集成的原理简图如图 1 所示,微透镜阵列的几何参数设计必须与 CCD 结构尺寸相匹配,采用的 CCD 为 516(V) × 516(H),像元大小 22 μm × 22 μm,光敏元 7 μm × 16 μm。

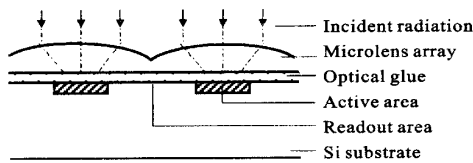


图 1 CCD/微透镜混合集成组件

Fig. 1 The schematic diagram of integration device

根据几何光学理论,微透镜的结构参数:接触角  $\theta$ 、焦距  $f$ 、外径  $D$ 、曲率半径  $R$  和冠高  $H$  之间满足下列关系式:

$$\sin \theta = \frac{D}{2R} \quad R^2 = \frac{D^2}{4} + (R - H)^2 \quad f = \frac{n_1 R}{n_1 - n_0} \quad (1)$$

式中  $n_0$  为空气的折射率;  $n_1$  为透镜材料的折射率。如果已知参数  $D$  和  $R$ , 整个微透镜的结构就可以确定。热融前后的基底尺寸  $d$  和  $D$  之间有如下关系:

$$D \approx \Gamma \times d \quad (2)$$

式中  $\Gamma$  为扩展因子,受胶层的高宽比和熔融温度的影响。通过实验可以发现,当基底尺寸  $d$  在 20~50 μm 范围内,熔融温度为 190 °C,高宽比适中时,  $\Gamma$  值约为 1.11。由于  $d$  已预先确定,从而可以确定  $D$  的大小。

在熔融前后,可以认为光刻胶胶体的体积近似不

变,因此有:

$$hd^2 = d \left[ R^2 \theta - \frac{R^2}{2} \sin 2\theta \right] \quad (3)$$

式中  $h$  为光刻胶体熔融前的高度;  $d$  为熔融前光刻胶体的底边尺寸。

联合公式(1)和(3)可得:

$$R^2 \times \left[ \arcsin \frac{D}{2R} - \frac{D(R-H)}{2R^2} \right] = d \times h \quad (4)$$

由于掩模图形的边长尺寸为  $d$ ,由公式(4)可知,只要确定了胶层厚度  $h$ ,就可以确定微透镜的结构。图 3 示出光刻胶胶层厚度 ( $h$ ) 与匀胶转速 ( $v$ ) 之间的关系曲线。通过此曲线,可以根据匀胶速率和匀胶次数确定所要得到的胶层厚度。

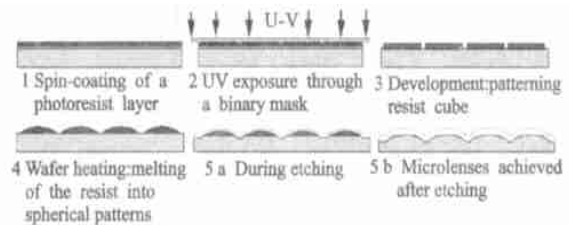


图 2 石英微透镜阵列的制作工艺流程

Fig. 2 Fabrication procedure of silica microlens array

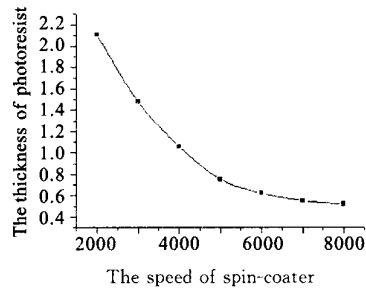


图 3 匀胶转速与光刻胶膜厚之间的关系

Fig. 3 Variation of the spin speed of spin-coater with the thickness of resist

为了使微透镜阵列达到接近 100% 的有效孔径比,在光刻掩模设计时,应该充分考虑到掩模图形间隔和单元图形尺寸  $d$  的关系。当  $d$  一定时,间隔太大,则微透镜之间的间隙随着增大,达不到理想的高有效孔径比;反之,过小的掩模图形间隔将使相邻的光刻胶浮雕结构在熔融时发生互连,阵列消失。合适的  $w_1$  值应该是使光刻胶图形熔融后保留小于 1 μm 的间隔,从而其有效孔径比在理论上可以达到 95% 左右。

## 2 微透镜阵列的制作工艺

选用双面抛光、厚度为  $200\ \mu\text{m}$  的高纯熔融石英光学玻璃片作为基片。经预处理后,采用旋涂法在基片上涂胶,试验中使用 BP212 型正性光刻胶;甩胶转速为  $4000\ \text{rpm}$ ,甩胶时间为  $35\ \text{s}$ 。为了达到约  $2\ \mu\text{m}$  的胶层厚度,第一次甩胶完后,将样片放入温度为  $85\ ^\circ\text{C}$  的烘箱中保持  $5\ \text{min}$ ,然后再进行第二次涂胶,工艺参数与第一次相同。将涂完胶的基片放在  $85\ ^\circ\text{C}$  烘箱中  $20\sim 30\ \text{min}$ ,使胶膜干燥并能同基片更紧密接触。

曝光质量的好坏直接影响后面的显影效果和微透镜成型。掩模图形的单元尺寸为  $19\ \mu\text{m}\times 19\ \mu\text{m}$ ,阵列数为  $516\times 516$ ,图形之间的间隔为  $3\ \mu\text{m}$ 。所用的光刻机为 KARL SUSS 公司生产的 MJB3 UV300/IR 型光刻机,最小分辨率达  $0.4\ \mu\text{m}$ 。经过两次涂 BP212 胶的基片,典型的曝光时间为  $90\ \text{s}$  左右。最后,光刻胶层形成了基底尺寸为  $19\ \mu\text{m}\times 19\ \mu\text{m}$ 、高度约为  $2\ \mu\text{m}$  的立方体状浮雕结构。

熔融工艺过程在扩散炉中进行,其退火腔内充入气流量为  $6\ \text{ml/s}$  的 Ar 保护气体,以防止光刻胶氧化。试验中熔融温度为  $190\ ^\circ\text{C}$ ,退火温度变化曲线如图 4 所示,其中的自然冷却过程也必须在富 Ar 的气氛中进行,以免光刻胶变性。

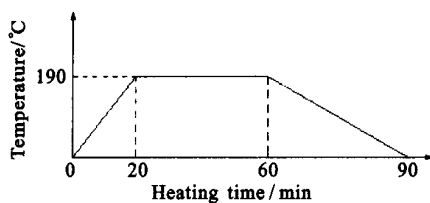


图 4 热熔工艺的温度变化曲线

Fig. 4 The temperature curve during thermal reflow

光刻胶图形转移采用反应离子刻蚀 (RIE) 来将熔融后的光刻胶图形转移到石英衬底上。采用 ME-3A 型反应离子刻蚀机,同时也可以选择在磁增强 (MERIE) 模式下工作,其工作原理与一般的反应离子刻蚀的区别在于,磁增强反应离子刻蚀只有沿垂直方向上的刻蚀速率,其他方向上的刻蚀过程很少或几乎没有。在以 BP212 光刻胶为掩蔽层刻蚀石英的情况下,通过适当控制刻蚀功率和反应气体配比,对石

英和光刻胶可以获得满意的刻蚀速度和刻蚀比(即石英的刻蚀速率与光刻胶的刻蚀速率的比值)。刻蚀工艺所采用的条件参数如表 1 所示。

表 1 磁增强反应离子刻蚀参数

Tab. 1 Operational parameters of MERIE

	Gas	Flow rate	Etching rate	Etching selectivity	Time	Operation power
Fused silica	$\text{CHF}_3$	22 sccm	$47\ \text{nm}/\text{min}$	1:0.98	60 min	70 W
Photoresist	$\text{O}_2$	1 sccm	$46\ \text{nm}/\text{min}$			

## 3 微透镜阵列测试

用扫描电子显微镜得到的微透镜表面轮廓 SEM 照片如图 5 所示,照片显示出轮廓清晰,表面粗糙度较好的石英透镜阵列。图 6 为用 Dektak- IIA 型台阶



图 5 微透镜阵列 SEM 照片

Fig. 5 Microphotograph of microlens

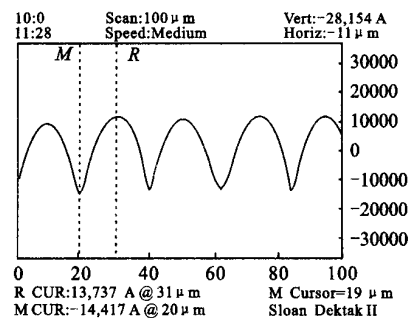


图 6 石英微透镜阵列的表面轮廓测试曲线

Fig. 6 Surface profile curve of silica microlens array

仪对其表面轮廓扫描得到的轮廓曲线图。由图 6 可以看出,折射微透镜的孔径尺寸在  $20.2\ \mu\text{m}$  附近上下波动,但变化幅度不大。同样地,冠高值也在  $2.8\ \mu\text{m}$  附近轻微波动。在实验过程中发现,由于在反应离子刻蚀条件下,相同时间里衬底的刻蚀厚度较 BP212 光刻胶的要大,即刻蚀比大于 1,石英微透镜之间的间距和冠高值较反应离子刻蚀前拱形光刻胶

的相应值要略大一些。对于这一问题,可以通过改变  $O_2$  和  $CHF_3$  的气流量的配比来调节两者的刻蚀速率,或者改用  $CHF_3$  和 Ar 作为刻蚀气体,从而保持刻蚀前后的几何参数不变。最后对石英微透镜阵列参数进行多次测量,计算平均值如表 2 所示。由此,可计算得到石英微透镜阵列的实际有效孔径比为 92.8%,已达到了较为理想的值,这说明所采用的制作工艺是行之有效的。

表 2 石英微透镜阵列测试参数( $\mu\text{m}$ )

Tab. 2 Test results of microlens array ( $\mu\text{m}$ )

Aperture size		Space		Radius of Sag	
X direction	Y direction	X direction	Y direction	curvature	
20.1	20.2	0.77	0.76	19.41	2.82

图 7 为阵列点扩散函数测量结果,可以看出各主峰强度值较高,展宽窄,旁瓣在数量和强度上都较小,且主峰之间的均匀性很好,其光学性能较为理想。

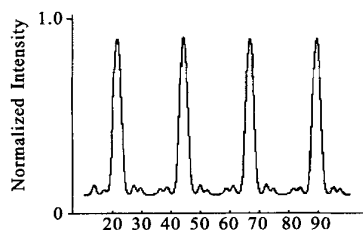


图 7 微透镜阵列点扩散函数

Fig. 7 PSF of microlens array

## 4 结束语

在理论设计的基础上,采用经过连续的光刻、熔

融和磁增强反应离子刻蚀相结合的工艺方法,制作了具有高有效孔径比的  $516 \times 516$  元折射微透镜阵列,其有效孔径比高达 92.8%。这对于提高可见光 CCD 的填充因子,提高其光学性能和探测效率有实用意义。另外,该方法也可用于显示器增亮技术、阵列发生器、激光扫描器等方面。

## 参考文献:

- [1] 张坤. 高帧速 CCD 摄像器件的设计[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(2):58-61.
- [2] Ichiro Murakami, Takashi Nakano, Keisuke Hatano, et al. Technologies to improve photo-sensitivity and reduce VOD shutter voltage for CCD image sensors[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2000, 47(8):1566-1572.
- [3] M Edward Motamedi, William E Tennant, Haluk O Sankur, et al. Microoptic integration with focal plane arrays[J]. Optical Engineering, 1997, 36(5):1374-1381.
- [4] Tsukamoto A, Kamisaka W, Senda H, et al. High sensitivity pixel technology for a 1/4-inch PAL 430K pixel IT-CCD[A]. Custom Integrated Circuits Conference, Proceedings of the IEEE 1996[C]. 1996. 39-42.
- [5] Chen Sihai, Yi Xinjian, Li Yi, et al. Hybrid integration between long focus microlens array and IR detector array[J]. International J Infrared and Millimeter Waves, 2001, 22(3):393-398.
- [6] Yongqi Fu, Ngoi Kok Ann Bryan. Investigation of integrated diffractive/refractive microlens microfabricated by focused ion beam[J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(6):2263-2266.
- [7] 税必继, 郭永康, 周崇喜. 用衍射微透镜阵列提高探测器性能的原理分析[J]. 红外与激光工程, 1997, 26(6):19-24.

## 书 讯

### 《光学系统设计》简介

《红外与激光工程》编辑部组织翻译的《光学系统设计》一书(内部资料)内容丰富、通俗易懂,主要内容包括:基础光学与光学系统技术要求;光阑、光瞳和基本原理;衍射、像差和像质;光程差的概念;几何像差概述及其消除方法;玻璃的选择(包括塑料);球面和非球面;光学设计过程;计算机性能评价;高斯光束成像;  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  和  $8 \sim 12 \mu\text{m}$  热红外成像基础和紫外光学系统;衍射光学照明系统的设计;性能评价与光学测试;公差与生产工艺性;光学加工;光学设计中的偏振问题;光学薄膜;硬件设计问题;镜头设计优化实例;光学系统设计常见的错误和失误;经验法则和提示。该书适用于光学领域的技术人员使用,也可作为大学教科书及研究生的参考书,中译本约 300 页,定价 160 元,有需求者请与《红外与激光工程》编辑部联系。编辑部还备有英文简装本,定价 150 元,数量有限,欢迎订阅。联系电话:(022) 23666400;(022) 23363000 转 3087;联系地址:天津市 225 信箱 32 分箱(300192)。