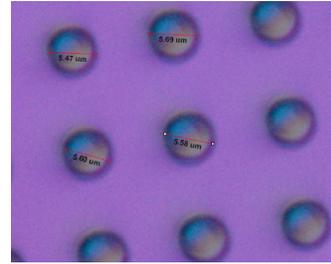




用于短波红外探测器的微透镜阵列制作

冯献飞*, 邓 军, 刘 明, 李超慧, 邹德恕

北京工业大学信息学部, 光电子技术省部共建教育部重点实验室,
北京 100124



摘要: 采用光刻胶热熔法制作具有特定尺寸的微透镜, 制作的微透镜能将微透镜阵列技术应用于短波 $1\ \mu\text{m} \sim 3\ \mu\text{m}$ 红外探测器中, 有效地提高探测器件的光电性能。采用 AZ P4620 厚光刻胶, 利用紫外光刻技术, 对透镜制作中的前烘、曝光和显影、坚膜、热熔等工艺进行了深入细致的实验研究, 确定了最优的工艺参数, 实现了球冠直径在 $(5.5 \pm 0.5)\ \mu\text{m}$ 、曲率半径 $3\ \mu\text{m}$ 的微透镜, 且透镜有很好的均匀性和一致性, 满足近红外探测器件的要求。

关键词: 微透镜阵列; 光刻胶热熔法; 前烘; 热熔

中图分类号: TH741.8

文献标志码: A

Microlens array for shortwave infrared detectors

Xianfei Feng*, Jun Deng, Ming Liu, Chaohui Li and Deshu Zou

Key Laboratory of Optoelectronics Technology, Ministry of Education, Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract: A microlens with a specific size is fabricated by using melting photoresist, and the microlens can be applied to a shortwave $1\ \mu\text{m} \sim 3\ \mu\text{m}$ infrared detector, which can effectively improve the photoelectric performance of the detector. Using AZP4620 thick photoresist and UV lithography technology, the lens production in the soft bake, exposure and development, hardening, hot melt and other processes were carried out in-depth and detailed experimental study was done to determine the optimal process parameters. The micro-lens with a crown diameter of $(5.5 \pm 0.5)\ \mu\text{m}$ and a radius of curvature of $3\ \mu\text{m}$ was realized. The lens has good uniformity and consistency to meet the requirements of near infrared detection device.

Keywords: microlens array; melting photoresist; pre-baking; hot melt

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.06.010

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(6): 633–637

1 引言

随着科技的进步, 当今社会的仪器和设备都向光、电集成的目标发展。由于传统方法制造出来的光学元件工艺复杂、重量大且元件尺寸大, 因此很难满足当今社会的需求。直径超小的透镜与透镜阵列成为了新的研究方向, 这种透镜与透镜阵列具有体积小、

重量轻、便于集成化、阵列化等优点, 被广泛应用于光束整形、光学器件互连、三维成像增强等领域^[1]。若将微透镜阵列应用于红外探测器件可以实现在不增加器件噪声的前提下, 增加器件的等效光敏面积, 从而实现探测器件性能的提升。针对近红外波段的探测器件, 根据探测波长范围和微透镜材料特性, 需要制作特定尺寸的微透镜阵列, 来满足工作在 $1\ \mu\text{m} \sim 3\ \mu\text{m}$ 波段的探测器件的需求。

目前, 制作微透镜阵列的方法有离子交换法^[2]、

收稿日期: 2017-03-04; 收到修改稿日期: 2017-04-24

*E-mail: 326776790@qq.com

光刻胶热熔法^[3]、光电反应刻蚀法^[4]、聚焦离子束刻蚀与沉积法^[5]、化学气相沉积法^[6]等。此外,文献[7]采用二维胶体球阵列在气-液界面形成一种薄膜结构,将这种结构转移到固体表面,由于胶体球之间的强吸引力使胶体球颗粒聚集,自发形成二维阵列结构。文献[8]提出胶体颗粒自组合法,实现了微透镜阵列,但制作的微透镜阵列形貌均匀性差,且成本高。文献[9]提出一种新的光敏玻璃热成型法,该方法用紫外辐射曝光来调制光敏玻璃材料,将材料加热到软化点,使材料发生膨胀,然后对光敏玻璃两侧施加压力,实现透镜阵列;但该方法采用曲面基底,需超精密加工方法制作,虽然具有很强优势,但是制作的透镜尺寸较大且成本较高。文献[10]采用电铸制模技术,将制作好微透镜阵列图案的光刻胶板表面真空蒸镀一薄层银,作为电铸时的初始导电层,然后将镀有银层的光刻胶板作为阴极,将镍块作为阳极,浸入一定配比的电铸液(镍盐溶液)中,加载一定大小的电流,在阴极表面就会不断有金属镍析出,最后形成一定厚度的镍层。将阴极拉出电铸槽,冲洗后剥离,就得到了带有微透镜阵列图案的镍板,作为塑压或注塑的原始模板,这种方法周期太长且成本太高。文献[11]提出了一种新颖的方法,利用硅的各向异性腐蚀特性,采用两步湿法腐蚀制作出了非球面凹透镜阵列。该方法操作简单、成本低,但是由于单晶硅的晶体结构导致底部的硅湿法腐蚀不够完全,会影响非球面凹透镜阵列的制作。

采用光刻胶热熔法制作微透镜阵列,周期短,可重复性强,且工艺步骤简单,工艺参数容易控制,制作出的微透镜阵列均匀性好,对材料和设备要求不高(成本低)。本文对光刻胶热熔法中前烘、曝光、热熔等关键步骤进行深入研究,给出满足工作在 $1\ \mu\text{m}\sim 3\ \mu\text{m}$ 波段探测器件需求的具有特定球冠尺寸的微透镜阵列制备工艺和优化条件。

2 实验工艺

光刻胶热熔法是用光刻胶制作出光滑图形,主要利用光刻胶受热后会融化,受到表面张力作用下形成球形的特性。工艺步骤包括基片清洗、涂胶和匀胶、

前烘、曝光和显影、后烘、热熔、离子束刻蚀等。首先选择合适厚度的光刻胶(能满足整个工艺过程中光刻胶的厚度);对基片预处理,采用丙酮、乙醇、去离子水清理基片表面油垢和其他杂质,以确保基片和光刻胶具有良好的黏附力;基片上涂覆均匀的光刻胶,并把光刻胶放在提前设置好的掩膜版下进行紫外曝光,经过显影就形成了相对应的圆柱状胶体;把基片放到快速退火炉进行热熔,光刻胶在快速退火炉中被加热,并在表面张力作用下,形成与掩膜版类似光滑的图形;最终利用离子束刻蚀机得到均匀的微透镜阵列。整个工艺过程可分为五个关键步骤:

1) 采用旋转涂胶方法在基底上均匀涂覆一定厚度的光刻胶(如图1)。

为得到满足透镜曲率要求的光刻胶图形,我们选择AZP4620型正性厚光刻胶,光刻胶折射率为1.64。操作步骤:① 打开甩胶机,设置甩胶机参数(如表1);② 把InP衬底基片放到甩胶机上并且涂上除湿剂,然后启动甩胶机,以2000 rad/s的速度旋转15 s;③ 在InP衬底基片上涂上AZ P4620光刻胶,之后甩胶机以6000 rad/s的速度旋转30 s;④ 最终得到的胶膜厚为 $4.6\ \mu\text{m}$ 。旋转涂覆方法操作简单,受到高转速之后会得到均匀的光刻胶。为保证涂胶的均匀性,涂胶时的环境温度必须保持 $25\ ^\circ\text{C}$,因为此时光刻胶的流动性好,黏附性强。

2) 光刻胶在提前设计好的掩膜版的遮蔽下进行紫外曝光(如图2)。

采用接触式紫外曝光将掩膜版上图形转移到光刻胶上,曝光强度为 $2.6\ \text{mW}/\text{cm}^2$,具有如下优点:① 掩膜版与基片厚光刻胶直接接触,光刻图形与掩膜版图形呈现比例1:1,适合厚胶光刻;② 分辨率可达亚微米级,满足微透镜尺寸要求;③ 设备简单。

3) 对经过接触式紫外曝光的光刻胶进行显影(如图3)。

采用专用的显影液AZ400K,常温下与去离子水1:1稀释待用。显影前先把基片放到水里浸泡,提高表面的湿润度;然后把基片放到显影液中,同时掐表计时,到达时间后拿出;再用去离子水清洗,用氮气枪

表1 甩胶机设置参数。

Table 1 The parameter set by glue machine.

除湿剂旋转参数 P17/Hz	旋转除湿剂所需 时间的参数 P81/s	涂光刻胶所需 时间的参数 P82/s	旋转光刻胶的参数 P19/Hz	旋转光刻胶所需 时间的参数 P83/s
34	15	15	102	30



图 1 InP 衬底上旋转式涂光刻胶.

Fig. 1 Rotary-type photoresist on InP substrate.



图 3 显影.

Fig. 3 Development.

吹干。适当的显影时间很重要，显影时间过长，会导致图形边界粗糙，影响光刻胶与基片的结合力；显影时间过短，会使变性的光刻胶溶解不彻底，会严重影响微透镜的均匀性。

4) 把片子放到快速退火炉中进行热熔(如图 4)。

采用快速退火炉进行热熔。快速退火炉一般都是以碘钨灯管为发热元件，升温速度极快，采用 S 型热电偶测温并利用 PID 实现温度控制，具有很高的控温精度，上下波动在 5 °C 范围内。部分快速退火炉还具有真空装置，可在真空或多种气体环境下工作。使用快速退火炉进行热熔可以精确调控温度，操作简单；可以在氮气环境下热熔，避免光刻胶氧化。

5) 把片子放到离子束刻蚀机中刻蚀，得到微透镜阵列。

RIE(离子束刻蚀)分为物理离子束刻蚀和反应离子束刻蚀。物理离子束刻蚀是当高能束轰击样品时，动量会传递给样品中的原子或者分子，产生溅射效应。反应离子束刻蚀是将一些卤化物气体直接导向样品表面，在离子束轰击下，可以实现增强刻蚀。经过大量实验最终采用工作气压 10 Pa，RF(射频功率)500 W，气体 SF₆ 为 100 sccm/min，CHF₃ 为 10 sccm/min 时，刻蚀石英的速率为 286 nm/min。

3 结果分析

3.1 前烘工艺对厚胶光刻的影响

前烘可以使光刻胶中的有机溶剂(包括有机溶剂产生的气体)挥发，目的使光刻胶硬化，增强光刻胶与基底表面的黏附力。实验表明，过高的前烘温度会造成光刻胶硬化，不利于胶层内部的溶剂挥发，易引起聚合物的热交联，使胶膜的感光度下降，显影容易产生底膜。过低的前烘温度会造成光刻胶溶剂难以彻底

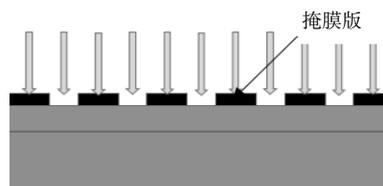


图 2 曝光.

Fig. 2 Exposure.



图 4 热熔.

Fig. 4 Hot melt.

挥发，接触式曝光时胶层易发生图形变形，显影速度过快，难以控制^[12]。

通过多次工艺，分析前烘时间和前烘温度对厚胶光刻的影响。实验表明，前烘温度在 60 °C 以下时，即使前烘时间超过 40 min，光刻胶中的气泡也不能被排干净，光刻胶中的溶剂也不能被蒸干，基片在接触式曝光中很容易粘在掩模版上。为了彻底排出厚层光刻胶中的气泡，去除胶膜中的溶剂，前烘温度为 60 °C 时需要至少 45 min 时间，前烘温度 85 °C 需要 20 min，前烘温度 100 °C 需要 8 min。实验结果表明，在不同前烘温度下光刻胶的显影速率有所不同，光刻胶前烘温度越低，显影速率越快。这三种不同光刻胶前烘温度和时间都能使光刻胶完全显影。用 alphastep-500 台阶仪测量显影后的轮廓面，结果如图 5 所示。

对比图 5(a)、图 5(b)和图 5(c)，3 种不同的前烘条件下，光刻显影的图形面形相差很小。由于前烘时间严重影响光刻胶内部硬化程度，尤其对于厚光刻胶。前烘时间越长光刻胶内部就越硬，在一定的曝光强度下，光刻胶表层吸收了大部分能量而底层曝光强度相对不足，显影后会有残胶，会对微透镜阵列的制作有影响。曝光强度过大或过长的显影时间都会引起光刻胶图形变形。因此采用 100 °C 的前烘温度，以缩短前烘工艺时间。

前烘工艺中一般采用热板加热或烘箱加热。热板加热是从基底层向上逐层传热，导致厚光刻胶从底层到表层的加热温度不同，固化程度不统一，影响光刻质量。烘箱加热使光刻胶的底层和表层同时加热，容易让光刻胶中的溶剂挥发，曝光显影不易形成底膜。

表 2、表 3 给出了相同的前烘温度、不同的前烘时间和曝光时间条件下，光刻胶图形的剩余厚度。

对于一定的曝光时间，随着前烘时间的加长，光

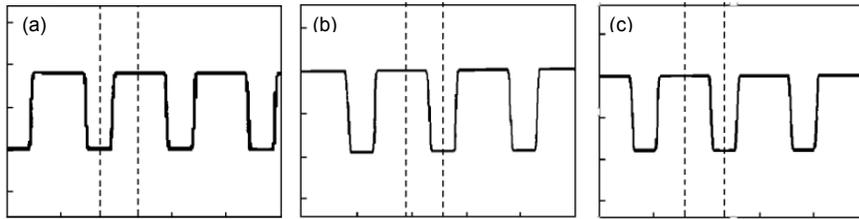


图5 前烘温度和时间. (a) 前烘温度 60 °C, 时间 45 min. (b) 前烘温度 85 °C, 时间 20 min. (c) 前烘 100 °C, 时间 8 min.

Fig. 5 Pre-baking temperature and time. (a) Pre-baking temperature 60 °C, time 45 min. (b) Pre-baking temperature 85 °C, time 20 min. (c) Pre-baking temperature 100 °C, time 8 min.

表2 前烘温度 100 °C, 曝光 25 s, 显影 8~9 s

Table 2 Pre-baking temperature 100 °C, exposure 25 s and development 8~9 s

前烘时间/min	6	7	8	9	10	11	15	20	25
胶的厚度/ μm	3.34	3.56	3.13	3.07	2.98	2.97	2.89	2.85	2.86

表3 前烘温度 100 °C, 曝光 20 s, 显影 8~9 s

Table 3 Pre-baking temperature 100 °C, exposure 20 s and development 8~9 s

前烘时间/min	6	7	8	9	10	11	15	20	25
胶的厚度/ μm	3.12	3.14	3.25	3.47	3.21	2.77	2.63	2.59	2.53

刻胶的厚度先增加后降低, 会有一个峰值; 对于不同曝光时间, 光刻胶的厚度都在前烘时间超过 10 min 后基本稳定。因此确定优化的前烘条件为前烘温度 100 °C, 时间 10 min。

3.2 热熔工艺对微透镜面型的影响

光刻胶热熔工艺就是在一定温度下将光刻胶柱体加热至熔融状态, 在表面张力和基片附着力的共同作用下, 最终形成光刻胶球冠的过程。由于表面张力和基片附着力的共同作用, 熔融后的光刻胶表面积将收缩到最小值, 致使光刻胶表面能量最低。热熔后要得到稳定的球冠形微透镜, 必须要求光刻胶圆柱经过热熔后变成光刻胶球冠的表面能减少量与重力势能的增加量平衡^[13]。

在实验中, 并非任意大小、厚度的圆柱胶体热熔后都能形成良好的球面面形, 能否形成满足设计需求的球面形状由光刻胶圆柱体直径大小、高度, 以及胶与基底的浸润程度决定。由于光刻胶作为一种非晶态聚合物, 是由多种化学成分组成。因此光刻胶的熔点不是一个准确的温度, 而是一个温度范围, 在这个温度范围内的光刻胶呈现液态。由于光刻胶的种类不同, 其熔点范围也不同。

为了进一步确定热熔工艺参数对微透镜形状的影响,

在前面实验的基础上, 固定前烘温度为 100 °C, 前烘时间 10 min, 曝光时间 25 s, 显影时间为 8.5 s, 进行了不同的热熔时间和热熔温度的对比实验。在实验中, 利用台阶仪和测量显微镜对显影后的光刻胶圆柱进行上下台面直径和高度的测量。热熔工艺后, 再对形成的类球面微透镜的直径和高度进行测量。所有测量的实验数据如表 4。

根据表 4 可知, 当前烘时间一定时, 随着温度升高, 球冠的高度降低且球冠的直径增大; 当前烘温度一定时, 随着前烘的时间增加, 球冠的高度降低且球冠的直径增大; 热熔后球冠的体积变化为融化前的 66% 左右。由于光刻胶是一种对光敏感的混合液体, 由溶剂、感光树脂和增感剂组成, 在经过热熔后液体中成分得到一定量的挥发, 所以体积会变小; 在热熔温度 140 °C 且热熔时间 4 min 时, 光刻胶利用率最大且热熔后曲率半径接近 3 μm , 满足近红外探测器对微透镜尺寸的要求。

图 6 是采用光刻胶热熔法制备的用于近红外波段的微透镜。实验结果表明, 通过合理的设计和适当的条件以及精密的微细加工实验最终制备出满足工作在 1 μm ~ 3 μm 波段探测器件需求的具有特定球冠尺寸的微透镜阵列, 光刻胶热熔技术可以取得较好的结果。

表4 微透镜阵列热熔条件实验.

Table 4 Experimental study on melting conditions of microlens array.

热熔温度/℃	热熔时间/s	热熔前上台面/ μm	热熔前下台面/ μm	热熔前高度/ μm	球冠高度 $h/\mu\text{m}$	球冠直径 $D/\mu\text{m}$	热熔前体积 $V_1/\mu\text{m}^3$	球冠体积 $V_2/\mu\text{m}^3$	V_2/V_1 /%	球冠曲率半径 $R = (4h^2 + D^2) / 8h$
140	180	3.05	5.98	1.89	1.7	5.3	31.37	21.36	68.08	2.92
140	240	3.05	5.98	1.89	1.68	5.4	31.37	21.71	69.21	3.01
140	300	3.05	5.98	1.89	1.65	5.45	31.37	21.54	68.67	3.07
150	180	3.05	5.98	1.89	1.58	5.32	31.37	19.62	62.55	3.03
150	240	3.05	5.98	1.89	1.56	5.42	31.37	19.94	63.56	3.13
150	300	3.05	5.98	1.89	1.53	5.48	31.37	19.92	63.50	3.21
160	180	3.05	5.98	1.89	1.5	5.57	31.37	20.06	63.96	3.34
160	240	3.05	5.98	1.89	1.48	5.68	31.37	20.4	65.04	3.46
160	300	3.05	5.98	1.89	1.46	5.87	31.37	21.37	68.13	3.68

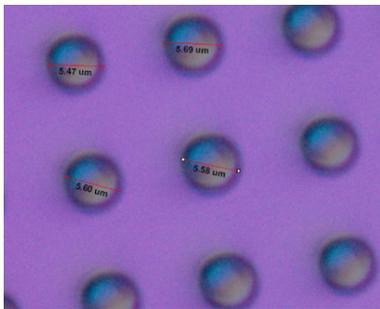


图6 微透镜阵列.

Fig. 6 Microlens array.

4 结论

采用光刻胶热熔法制作应用于近红外波段探测器的微透镜阵列,当掩膜版形状大小、光刻胶性能、涂胶厚度确定的情况下,微透镜的光学形状主要取决于热熔工艺。采用 AZP4620 型光刻胶,通过优化各步工艺的温度和时间参数,最终制备出满足工作在 $1\ \mu\text{m} \sim 3\ \mu\text{m}$ 波段探测器件需求的具有特定球冠尺寸的微透镜阵列。

基金项目

本课题得到 2017 年光电子技术教育部重点实验室基金(PXM2017_014204_500034)的经费支持。

参考文献

- 王峰一, 武伟璐, 牛邦玉. 微透镜及其阵列研究概况[J]. 科技与创新, 2016(11): 102-103.
- Oikawa M, Iga K, Sanada T, et al. Array of distributed-index planar micro-lenses prepared from ion exchange technique[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1981, 20(4): L296-L298.
- Totsu K, Fujishiro K, Tanaka S, et al. Fabrication of

three-dimensional microstructure using maskless gray-scale lithography[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 130-131: 387-392.

- Shiang J J, Faircloth T J, Duggal A R. Experimental demonstration of increased organic light emitting device output via volumetric light scattering[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 95(5): 2889-2895.
- Kim C S, Ahn S H, Jang D Y. Review: developments in micro/nanoscale fabrication by focused ion beams[J]. *Vacuum*, 2012, 86(8): 1014-1035.
- 杨西, 杨玉华. 化学气相沉积技术的研究与应用进展[J]. 甘肃水利水电技术, 2008, 44(3): 211-213.
- Sun Fengqiang, Cai Weiping, Li Yue, et al. Nanoparticle array synthesized by two-dimensional colloid crystal lithography[J]. *Physics*, 2003, 32(4): 223-227.
- 孙丰强, 蔡伟平, 李越, 等. 基于二维胶体晶体刻蚀法的纳米颗粒阵列[J]. 物理, 2003, 32(4): 223-227.
- Hanarp P. Optical properties of nanometer disks, holes and rings prepared by colloidal lithography[D]. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2003: 1-56.
- Gan Daiwei. Fabrication technology research of microlens array[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2011(9): 44-45, 49.
- 甘代伟. 微透镜阵列制作技术研究[J]. 装备制造技术, 2011(9): 44-45, 49.
- Ni Z H, Wang H M, Kasim J, et al. Graphene thickness determination using reflection and contrast spectroscopy[J]. *Nano Letters*, 2007, 7(9): 2758-2763.
- Lim C S, Hong M H, Lin Y, et al. Microlens array fabrication by laser interference lithography for super-resolution surface nanopatterning[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(19): 191125.
- Tang Xionggu, Yao Xin, Guo Yongkang, et al. Effect of baking process conditions on surface profile of lithography for thick film resists[J]. *Microfabrication Technology*, 2005(3): 31-35.
- 唐雄贵, 姚欣, 郭永康, 等. 烘焙工艺条件对厚胶光刻面形的影响[J]. 微细加工技术, 2005(3): 31-35.
- 刘德森. 微小光学与微透镜阵列[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 210-214.