

doi: 10.3788/gzxb20124104.0399

# 用于红外焦平面的正方形孔径球面微透镜阵列研究

孙艳军, 冷雁冰, 陈哲, 董连和

(长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

**摘 要:**针对目前红外焦平面光敏阵列中存在的占空比小、光能利用率低的实际问题,展开了正方形孔径球面微透镜阵列制作及其与红外焦平面阵列集成应用的研究. 本文从红外焦平面光敏阵列特点入手,对比分析了正方形孔径相比于传统圆形孔径微透镜阵列在光能利用上的优势. 提出正方形孔径微透镜阵列激光直写变剂量曝光制作技术,建立光刻胶曝光数学模型和正方形球面微透镜面型函数,以此为基础,编制直写设备变剂量曝光控制软件;利用长春理工大的学复合坐标激光直写系统和等离子刻蚀机进行相关工艺实验,制作了阵列  $256 \times 256$ 、单元尺寸  $40 \times 40 \mu\text{m}^2$ 、球面半径  $60 \mu\text{m}$ 、单元间距  $1 \mu\text{m}$  的红外石英微透镜阵列;并将其与相应阵列的碲-镉-汞红外光敏阵列进行集成. 结果表明:微透镜的占空比达到 95%,红外焦平面光能利用率从原来的 60% 提高到 90% 以上. 由此得出结论:变剂量曝光制作微透镜技术是可行的,正方形孔径球面微透镜阵列代替圆形孔径微透镜阵列,对于提高红外探测器的灵敏度、信噪比、分辨率等性能具备明显优势.

**关键词:**球面微透镜阵列;红外焦平面;正方形孔径;变剂量曝光

中图分类号:TH706

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2012)04-0399-5

## 0 引言

红外焦平面光敏阵列是红外探测器的关键部分. 在红外光敏阵列中,感光面分“光敏区”和“间隔区”. 光敏区接受光能量,产生光电效应,间隔区不能产生光电效应. 根据光敏区和间隔区所占比例(占空比)计算,光能有效利用率约为 60%,即占空比值较小<sup>[1]</sup>. 且随着探测技术小型化、微型化的发展,单元面积不断减小,这势必导致探测器感光灵敏度和信噪比特性的持续恶化. 基于这一问题,采用将微透镜阵列应用于红外焦平面中,把剩余 40% 不能利用的光聚集在光敏面上,提高焦平面阵列的占空比和探测灵敏度,这是大幅度地提高红外探测器应用性能的一种关键技术.

日本、美国和欧洲等发达国家从 20 世纪 80 年代就开展了圆形孔径微透镜阵列制作与集成技术的研究. 1995 年索尼公司将 1/3 英寸透镜阵列与光敏阵列集成,其信噪比和抗干扰性能比集成前提高一倍,并已具有成型产品;柯达公司 2004 年已经将微透镜阵列用于  $1024 \times 1024$  光敏阵列中;日本电气公司当前的视像产品中光敏单元 ( $4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ ) 与微透镜集成,感光灵敏度达 160 mV/lx. 国内,长春

光机所、华南科技大学等研究单位近些年也开展了圆形孔径微透镜阵列制作与集成技术研究,并有相应产品出现,但与国外差距很大. 圆形孔径微透镜阵列单元间隙大,其最大占空比为 78.5%,因此红外焦平面的光能利用率还有很大提升空间. 对此荷兰 Philips 公司研制了 2/3 英寸双层微透镜,使占空比值提高到 85%. 但双层微透镜制造工艺复杂、成品率低. 而方形和六边形孔径等异形孔径微透镜阵列通过减小单元间隙,其理论占空比可达 95% 以上. 美国 Honeywell 技术中心 90 年代采用离子交换法已制作出异形孔径平微透镜阵列,并应用于 CCD 相机中. 目前,国内西南大学和四川大学等单位也采用离子交换法研究平面异形孔径微透镜阵列制作技术,并取得一定的进展<sup>[2]</sup>.

本文提出采用逐点控制激光曝光能量的方法制作正方形孔径球面微透镜阵列,建立正方形孔径微透镜阵列面型函数和光刻胶曝光数学模型,并进行相关理论与实验研究.

## 1 正方形孔径球面微透镜阵列制作

采用激光直写变剂量曝光法制作球面微透镜原理如图 1 所示. 在基底材料表面涂覆厚层光刻胶,如

基金项目:吉林省自然科学基金(No. 20100111)资助

第一作者:孙艳军(1978—),男,讲师,博士研究生,主要研究方向为先进光学制造技术. Email:custsun@126.com

导师:董连和(1953—),男,教授,博导,主要研究方向为先进光学制造与光学特种加工技术. Email:custdong@126.com

收稿日期:2011-10-18;修回日期:2011-12-09

图 1(a);根据激光与胶膜的光化学作用原理,通过控制不同位置的激光束驻留时间,以及  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴的运动轨迹,实现对胶层不同位置的变剂量曝光,如图 1(b);将曝光后的胶膜浸入显影液将曝光后的胶膜溶解,如图 1(c);而后采用离子束刻蚀方法完成胶膜曲面结构向基底材料的转移,如图 1(d)<sup>[3]</sup>.在上述工艺过程中,研究曝光过程中能量在胶膜层的分布特性,掌握感光材料曝光后的光化学反应原理和规律,是实现曲面胶膜结构的关键所在.

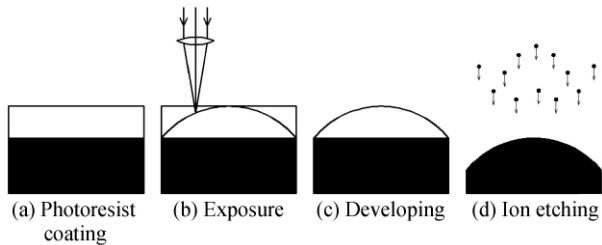


图 1 变剂量曝光制作微透镜阵列原理

Fig. 1 The theory of micro-lens array by varying dose exposure

## 2 感光胶曝光数学模型

### 2.1 光振幅分布

为提高光能均匀性,激光器发出的细光束需先扩束、后聚焦,扩束后的光振幅分布为

$$U_0(r) = \exp(-r^2)/\omega_0^2 \quad (1)$$

扩束光束经光刻物镜,其焦平面上的光点振幅分布为

$$G(\rho_r, 0) = \frac{\exp[i\pi\rho_r^2/\lambda f]}{i\lambda f} \int_0^a U_0(r) 2\pi r \cdot J_0(2\pi r\rho_r/\lambda f) dr \quad (2)$$

式中  $\omega_0$  为高斯光束半径,  $f$  为物镜焦距,  $a$  为通光孔径半径,  $\rho_r$  为焦平面径向坐标. 由式(2)分析可得,入射高斯光束孔径与通光孔径的比值对直写焦点的光强分布有直接影响,当通光孔径不变,入射光束直径越大对光束的截断越严重.

为使深层光刻胶感光,焦平面需深入到胶层内部,光刻胶层内的光场分布对曝光、显影以及显影后的轮廓都有影响,如忽略反射,则胶层内的光振幅分布为

$$U(\rho_r, z) = \frac{2\pi \exp[-i\pi\lambda(f+\delta)\rho_r^2]}{i\lambda(f+\delta)} \int_0^a U_0(r) \cdot \exp\left[-i\frac{\pi\delta r^2}{\lambda f(f+\delta)}\right] J_0(2\pi\rho_r r) r dr \quad (3)$$

### 2.2 曝光量随深度变化关系

在推出胶层内光振幅分布的情况下,假设曝光光束垂直基片表面,则可用朗伯比尔定律描述胶层深  $Z$  处的光化学反应,如式(4)<sup>[4-5]</sup>

$$\frac{\partial I(z, t)}{\partial z} = -I(z, t) [a_1 m_1(z, t) + a_2 m_2(z, t) + a_3 m_3(z, t)] \quad (4)$$

式中,  $I(z, t)$  是  $t$  时刻距离胶层表面深度为  $z$  处的光强,  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  为吸收常量,胶层深  $z$  处吸收光能后的分解速率为

$$\frac{\partial M_1(z, t)}{\partial t} = -M_1(z, t) I(z, t) C \quad (5)$$

由此推出深度与曝光量的关系为

$$M(z, t) = M(z, 0) \exp\left[-C \int_0^t I(z, \tau) d\tau\right] \quad (6)$$

式中  $\int_0^t I(z, \tau) d\tau$  是  $t$  时深为  $Z$  处曝光能量,可记为  $E(z, t)$ ,设初始浓度  $M(z, 0)$  为 1,则

$$M(z, t) = \exp[-CE(z, t)], I(z, t) = \frac{dE(z, t)}{dt} \quad (7)$$

将式(7)对时间  $t$  积分得到

$$\int_0^t \frac{\partial I(z, t)}{\partial z} d\tau = -\int_0^t I(z, \tau) [AM(z, \tau) + B] d\tau \quad (8)$$

将式(7)代入式(8)得

$$\frac{\partial E(z, t)}{\partial z} = \frac{A}{C} \{ \exp[-CE(z, t)] - 1 \} - BE(z, t) \quad (9)$$

式(9)表示  $t$  时刻的曝光量  $E$  沿深度方向  $z$  的传播规律.

## 3 正方形孔径球面微透镜阵列面型函数

正方形孔径球面微透镜单元结构如图 2. 在空间坐标系中,球心坐标为  $O(x_0, y_0, z_0)$ ,球面半径为  $r$ ,矢高  $h$ ,正方形透镜单元边长为  $b$ ,设球面上任意

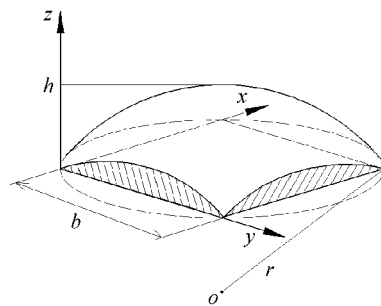


图 2 正方形球面微透镜

Fig. 2 Square aperture spherical micro-lens

一点坐标为  $M(x, y, z)$ ,根据球面任意一点与球心坐标和半径的关系可得<sup>[6-7]</sup>

$$\begin{cases} (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2 = r^2 \\ 0 < x < b, 0 < y < b, 0 < z < h \end{cases} \quad (10)$$

式(10)表示坐标原点处透镜单元的曲面公式,  $x$ 、 $y$  的取值范围限定透镜单元为正方形孔径. 微透镜阵列单元排列方式如图 3 所示. 设透镜阵列周期为  $T$ ,阵列数为  $N$ ,则任意透单元镜  $N(A, B)$  球面方

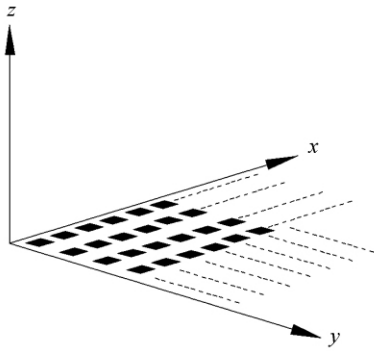


图3 微透镜阵列排列方式

Fig. 3 The rank mode of micro-lens array

程可表示为

$$\begin{cases} (x-Ax_0)^2 + (y-By_0)^2 + (z-z_0)^2 = r^2 \\ Ab-b < x < Ab, Bb-b < y < Bb, 0 < z < h \end{cases} \quad (11)$$

在建立微透镜阵列面型函数、曝光能量与曝光深度关系数学模型之后,即可编制激光直写工作台运动轨迹与任一点驻留时间的控制程序,通过控制工作台运动,实现光刻胶层曝光。

#### 4 实验研究

激光直写变剂量曝光制作微透镜阵列可分为以下几步:1)基片处理,处理表面污染物,增加感光胶与基片附着力<sup>[8]</sup>;2)涂布感光胶,实验中采用离心法在石英片表面涂布 PR1-12000A 正性光刻胶 20  $\mu\text{m}$ ;3)前烘,将涂好的基片处于 90  $^{\circ}\text{C}$  恒温情况下烘烤 20 min,然后自然冷却,去除感光胶中挥发物;4)变剂量曝光,将烘烤后的基片置于激光直写系统工作台上,激光直写系统采用长春理工大学与哈尔滨工业大学联合研制的 BOL500 型复合坐标激光直写系统,通过工作台运动与曝光系统控制程序对感光胶层进行曝光;5)显影,在室温 20 $^{\circ}\text{C}$  情况下,采用感光胶配套显影液对基片显影,得到感光胶微透镜阵列<sup>[9]</sup>;6)离子刻蚀,感光胶微透镜机械能力及光学性能较差,需采用离子刻蚀将微透镜图形转移至石英基片表面。离子刻蚀过程采用 801 型感应耦合等离子刻蚀机,刻蚀气体为 Ar 和 CF<sub>4</sub> 的混合气体,



图4 正方形孔径球面微透镜阵列显微图

Fig. 4 Micro-cope figure of square aperture spherical microlens array

刻速率 5.6 nm/min,离子束流密度控制在 100 mA/cm<sup>2</sup>,束子能量 500 eV. 为保证器件侧壁的效果,采用 0 $^{\circ}$ 入射角. 实验中制作的正方形孔径微透镜阵列在显微镜下效果如图 4.

对微透镜相关结构参量进行测试,并与设计参量进行对比如表 1. 其中,微透镜阵列单元半径的测试方法是采用本原纳米的 5 500 型原子力显微镜测出其结构轮廓,通过透镜单元的矢高与口径计算出其半径。

表 1 设计参量与测试参量表

Table 1 Design parameter and test parameter table

Parameter	Cell/ $\mu\text{m}$	Cell/ $\mu\text{m}$	Cell/ $\mu\text{m}$	Duty ratio/(%)
Design parameter	40 $\times$ 40	1	60	95%
Test parameter	I 39.8 $\times$ 40.1	1.1	59.5	95%
	II 40.2 $\times$ 40.0	1.1	60.2	
	III 39.1 $\times$ 40.2	0.9	59.6	

从表 1 中数据分析可知,微透镜阵列的测试数据与设计数据存在一定误差,这种误差的来源主要是由设备误差、工艺参量控制误差,以及操作误差综合作用的结果,这种误差是任何光学器件制作过程中都存在的,无法消除,只能尽量减小<sup>[10-11]</sup>. 实验中同时对正方形孔径微透镜阵列与红外焦平面阵列的集成应用进行研究,红外焦平面采用 256 $\times$ 256 碲镉汞(Hg-Cd-Te)外光敏阵列,阵列周期 41 $\times$ 41  $\mu\text{m}^2$ ,单元阵列尺寸 32 $\times$ 32  $\mu\text{m}^2$ ,占空比为 61%. 集成应用的原理如图 5,在给定像元尺寸,探测器光敏区尺寸、前置光学系统(虚线框)、微透镜折射率等参量的前提下,使入射光经微透镜会聚后落在探测器光敏区内的能量最多。

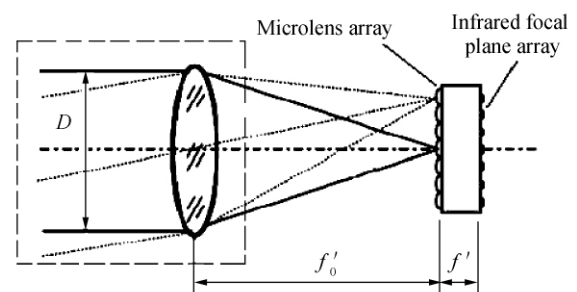


图5 微透镜阵列与红外焦平面集成应用原理

Fig. 5 Integration application theory of micro-lens array and infrared focal plane

光线经前置光学系统汇聚于微透镜,经微透镜其光线追迹如图 6. 对其中三条光线进追迹,包括最大视场、微透镜中心和边缘的光线分别为 0、1、2,光线 0、1、2 经微透镜折射后分别与焦平面交于一点,交点的纵坐标设为  $y$ ,则

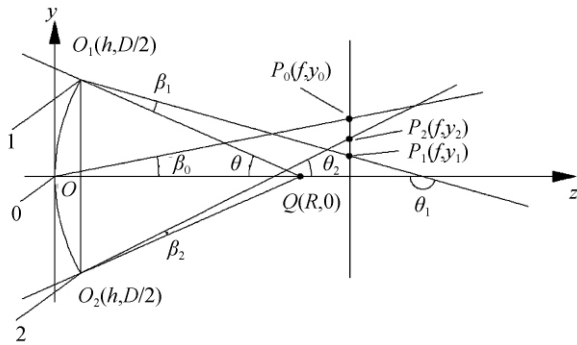


图 6 微透镜光线追迹

Fig. 6 The ray tracing of micro-lens

$$\begin{cases} y_0 = f \cdot \tan \beta_0 \\ y_1 = (f-h) \tan \theta_1 + D/2 \\ y_2 = (f-h) \tan \theta_2 - D/2 \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $f$  为微透镜焦距,  $h$  为微透镜矢高,  $\theta_1 = \beta_1 + \pi - \theta$ ,  $\theta_2 = \theta + \beta_2$ , 这三点都汇集在焦平面阵列光敏区内, 则所有的光线都会聚在光敏区内。

在应用正方形孔径微透镜阵列的红外焦平面阵列中, 由于透镜的汇聚作用, 使分散于间隔区的光能量也集中于光敏区, 使用计算机分别对红外光敏阵列集成微透镜阵列前、后的焦斑图像进行采集, 其效果如图 7。

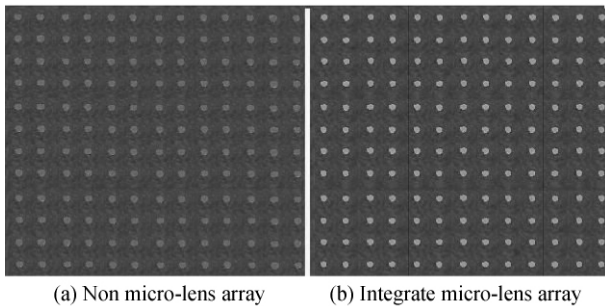


图 7 红外光敏阵列焦斑图像

Fig. 7 The light spot image of infrared photosensitive array

集成微透镜阵列的焦平面其焦斑图像更加清晰、对比度好、亮度高, 通过对光能量实测对比, 发现光能利用率从原来的大约 60% 提高到 90% 以上。同时, 探测器的光学性能、信噪比、分辨率等都得到明显改善。

## 5 结论

本文通过对激光直写光能量分布、光刻胶曝光深度与时间关系的分析, 以及正方形孔径阵列球面型函数的建立, 经实验证明激光直写逐点变剂量曝光的方法制作正方形孔径球面微透镜阵列是可行的。基片处理、涂胶、曝光、显影、刻蚀等一系列工艺中, 变剂量曝光过程是微透镜面型实现的关键, 工艺

实验结果表明: 提高激光直写设备运行及控制准确度、优化各工艺参量配置是提高微透镜阵列制作准确度的重要手段, 正方形孔径球面微透镜阵列代替圆形孔径微透镜阵列极大提高了红外焦平面对光能的利用率, 使红外探测器的灵敏度、信噪比、分辨率等性能都得到显著改善。值得一提的是变剂量曝光法也可推广用于自由曲面微透镜阵列的制作。

## 参考文献

- [1] HAN Yan-ling, LIU De-sen, JIANG Xiao-ping. Square selffocusing lens array and its image [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2): 221-223.  
韩艳玲, 刘德森, 蒋小平. 方形自聚焦透镜元阵列及其成像 [J]. *光子学报*, 2007, **36**(2): 221-223.
- [2] ZHANG Yu, LIU De-sen. Manufacture of hexagon aperture plane micro-lens array and its basic characteristics [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8): 1639-1641.  
张玉, 刘德森. 六角形孔径平面微透镜阵列的制作及基本特性研究 [J]. *光子学报*, 2008, **37**(8): 1639-1641.
- [3] KE Cai-jun, YI Jian-xin. Research on microlens array for improving the fill factor of CCD image sensors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(2): 209-212.  
柯才军, 易新建. 提高 CCD 图像传感器填充因子的微透镜阵列的研究 [J]. *红外与激光工程*, 2004, **33**(2): 209-212.
- [4] LENNER M, KAPLAN A, PALMER R E. Nanoscopic coulomb explosion in ultrafast graphite ablation [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **90**(15): 153119. 1-153119. 3.
- [5] FURUMIYA M. A 1/3-in 1.3 M-pixel single-layer electrode CCD with a high-frame-rate skip mode [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, **48**(9): 1915-1921.
- [6] SUN Yan-jun, LENG Yan-bing, DONG Lian-he. Study on antireflective relief periodic structure of sapphire infrared window [J]. *Infrared Technology*, 2010, **33**(2): 92-94.  
孙艳军, 冷艳冰, 董连和. 蓝宝石红外窗口抗反射浮雕结构研究 [J]. *红外技术*, 2010, **33**(2): 92-94.
- [7] DACHRAOUI H, HUSINSKY W, BETZ G. Ultra-short laser ablation of metals and semiconductors: evidence of ultrafast Coulomb explosion [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **83**(2): 333-336.
- [8] ZUO Chao, CHEN Qian, GU Guo-hua. Nonuniformity correction based on unified photoresponse characteristics of infrared focal plane arrays [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 926-932.  
左超, 陈钱, 顾国华. 基于焦平面归一化响应特性的红外非均匀性校正 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(6): 926-932.
- [9] JIAO Guo-hua, LI Yu-lin, HU Bao-wen. Mirau phase-shifting interferometer for profile measurement microlenses array [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10): 1924-1927.  
焦国华, 李育林, 胡宝文. Mirau 相移干涉法测量微透镜阵列面形 [J]. *光子学报*, 2007, **36**(10): 1924-1927.
- [10] LI Ming, CHENG Guang-hua, ZHAO Wei, et al. Concave microlens arrays produced by femto-second laser with HF acid etching [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 547-550.  
李明, 程光华, 赵卫, 等. 飞秒激光和酸刻蚀方法制作凹面微透镜阵列 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(3): 547-550.
- [11] HATEM D, WOLFGANG H. Fast electronic and thermal processes in femto-second laser ablation of Au [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(10): 104102(3).

## Square Aperture Spherical Microlens Array for Infrared Focal Plane

SUN Yan-jun, LENG Yan-bing, CHEN Zhe, DONG Lian-he

(The School of Photo-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 13002, China)

**Abstract:** In allusion to the current practical problem of small duty ratio, low light energy utilization in infrared focal plane array, the manufacture of square aperture spherical microlens array and integrated application with infrared focal plane array are studied. Starting with the character of microlens array infrared focal plane array, the advantages of square aperture spherical microlens array and round aperture spherical microlens array are compared. The laser direct writing varying dose exposure making technology of square aperture spherical microlens array is proposed, and the mathematical model of photoresist exposure and the square aperture spherical microlens array surface figure functions are established, based on which the direct writing varying dose exposure software is written. Related process experiments are carried out by the model number of laser direct system and plasma etching machine from Changchun University of Science and Technology. The infrared quartz spherical microlens array is made, of which micro-lens element size is  $40 \times 40 \mu\text{m}^2$ , spherical radius is  $60 \mu\text{m}$  and element spacing is  $1 \mu\text{m}$ , and then is integrated with the square aperture spherical microlens array with infrared photosensitive array. The results show that the duty ratio achieves 95%, and the utilization ratio of light energy increases from original 60% to 90%. It can be concluded that the way using square aperture spherical microlens array instead of the round aperture spherical microlens array can significantly improve sensitivity, signal-to-noise ratio and resolution ratio of the infrared detector.

**Key words:** Spherical micro-lens array; Infrared focal plane; Square aperture; Varying dose exposure