

# 128×128 PtSi 红外焦平面用硅衍射微透镜 阵列的设计与制备\*

李毅 易新建 陈思乡

(华中理工大学光电子工程系, 武汉, 430074)

TN215

**摘要** 通过考虑互相关联的光学和工艺参数, 设计了 3~5 $\mu\text{m}$  红外 128×128 硅衍射微透镜阵列. 阵列中微透镜的孔径为 50 $\mu\text{m}$ , 透镜 F 数为  $f/2.5$ , 微透镜阵列的中心距为 50 $\mu\text{m}$ . 采用多次光刻和离子束刻蚀技术在硅衬底表面制备衍射微透镜阵列. 对实际的工艺过程和制备方法进行了讨论, 对制备出的 128×128 硅衍射微透镜阵列的光学性能和表面浮雕结构进行了测量.

**关键词** 红外焦平面, 衍射, 微透镜阵列.

硅 红外阵列

## DESIGN AND FABRICATION OF DIFFRACTIVE MICROLENS ARRAYS ON SI SUBSTRATES FOR 128×128 PtSi INFRARED FOCAL PLANE ARRAYS\*

LI Yi YI Xing-Jian CHEN Si-Xiang

(Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology,  
Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** 128×128 diffractive microlens array was designed by considering the correlative optical and processing parameters for 3—5 $\mu\text{m}$  wavelength range with a microlens diameter of 50 $\mu\text{m}$ . The lens  $f$  number and array pitch are  $f/2.5$  and 50 $\mu\text{m}$ , respectively. The diffractive microlens arrays were fabricated on the surface of Si substrates by successive photolithography and Ar<sup>+</sup> ion-beam-etching technique. The practical processes and fabrication method were discussed. The optical characteristics and the surface relief structure of the 128×128 Si diffractive microlens array were measured.

**Key words** infrared focal plane, diffraction, microlens array.

### 引言

近年来衍射光学和微光学的应用日趋广泛<sup>[1]</sup>. 表面浮雕结构衍射光学元件(DOE)出现了新的应用领域, 如光学透镜设计、显示、光互连、传感器等<sup>[2]</sup>. 在传感器领域最具有应用前景的方面就是利用微透镜阵列与红外焦平面(IRFPA)相集成, 以改善红外焦平面阵列的性能<sup>[3~7]</sup>. 红外探测器阵列与微透镜阵列集成可使小面积的探测器具有大光敏面探测器的灵敏度. 由于探测器的噪声与光敏面的平方根成正比, 在信号不变的情况下, 光敏面积的减小可改善探测器的信噪比. 此外, 光伏型探测器的阻抗与探测器的光敏面成反比, 光敏面的减小可增大光伏型探测器的阻抗, 这有利于

探测器阵列与读出电路的混成, 提高探测器到读出电路的注入效率.

与 HgCdTe 和 InSb 等内带吸收的红外探测器相比, 硅化物肖特基势垒探测器具有较低的量子效率. 在大规模红外焦平面阵列中, 硅化物肖特基势垒探测器的优势在于它可采用标准的集成电路工艺在硅衬底上进行制备, 因此, 可以制造出具有低噪声、低成本、大面阵、高均匀性的探测器阵列. 本文通过考虑互相关联的光学和工艺参数, 设计和制备了用于 PtSi 肖特基势垒红外成像传感器的 128×128 硅衍射微透镜阵列, 以改善 PtSi 红外焦平面阵列的填充因子、灵敏度等性能参数.

\* 国家高科技 863-409 直属主题资助项目  
稿件收到日期 1999-07-01, 修改稿收到日期 1999-09-20

\* The project supported by the National High Technology Program.  
Received 1999-07-01, revised 1999-09-20

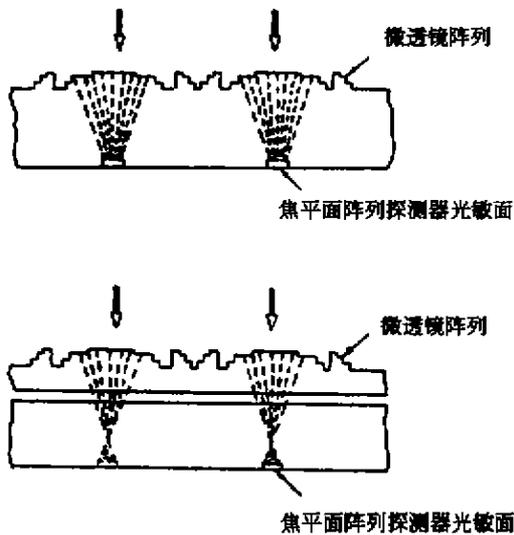


图1 衍射微透镜阵列与红外焦平面阵列的集成, (a)衍射微透镜阵列直接制作在红外焦平面阵列芯片的背面, (b)衍射微透镜阵列混成在红外焦平面阵列芯片的背面

Fig. 1 Integration of diffractive microlens array with IRFPA, (a) diffractive microlens array directly formed on back of IRFPA chip, (b) diffractive microlens array hybridized to back surface of IRFPA chip

## 1 衍射微透镜阵列的设计

衍射微透镜阵列的主要特性之一就是其结构的准平面性,从而可实现衍射微透镜阵列与红外焦平面阵列的混合集成和单片集成。

图1给出了衍射微透镜阵列与红外焦平面阵列相集成的结构示意图。根据 $128 \times 128$  PtSi肖特基势垒红外成像传感器的实际尺寸,我们选用标量衍射理论进行衍射微透镜阵列的设计,并采用改进的模拟退火算法对衍射微透镜的位相进行优化设计。对于 $128 \times 128$  PtSi肖特基势垒红外成像传感器,其工作波长范围为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ ,为了使衍射微透镜阵列满足 $128 \times 128$  PtSi红外焦平面成像传感器的要求,设计中还考虑了探测器光敏面大小、像元尺寸、工作波长、透镜 $F$ 数、最小工艺特征尺寸或临界尺寸等重要的光学和工艺参数。最终设计出与红外焦平面成像传感器相匹配的 $128 \times 128$  衍射微透镜阵列,阵列中透镜的中心距为 $50 \mu\text{m}$ ,中心工作波长为 $4 \mu\text{m}$ ,透镜 $F$ 数和最小工艺特征尺寸分别为 $f/2.5$ 和 $1.5 \mu\text{m}$ 。衍射微透镜阵列的表面浮雕结构如图2所示。

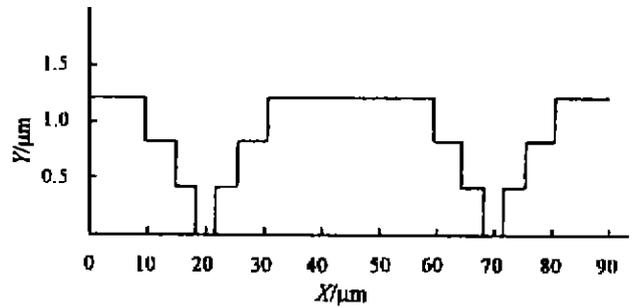


图2 衍射微透镜表面浮雕分布  
Fig. 2 Surface-relief structure of diffractive microlens array

## 2 衍射微透镜阵列的制备

衍射微透镜阵列是采用类似于集成电路的光刻和刻蚀工艺进行制备。从原理上说,利用这种方法可以制备出任意尺寸和形状的高质量衍射微透镜阵列。它主要包括三个步骤:(1)掩模版设计;(2)借助光刻胶将图形转移到衬底表面;(3)利用离子束刻蚀将图形高保真地复制到衬底。正如前文所述,最小波带宽度取决于最小工艺特征尺寸,为了保证衍射微透镜阵列制备工艺的可行性, $128 \times 128$  硅衍射微透镜阵列最小波带宽度为 $1.5 \mu\text{m}$ 。

实验中所用的硅衬底均两面抛光,经严格的表面清洗和处理后,先利用光刻工艺将掩模版上的图形转移到光刻胶上,再利用氩离子束将设计图形转移到硅衬底上。由于刻蚀速率和侧向刻蚀随离子束电流、离子束加速电压、离子束相对衬底表面的人射角等而变化,因此刻蚀时样品装在旋转的载片平台上,通过选择合适的刻蚀工艺参数,使刻蚀出的表面、刻蚀速率和选择性达到最佳。典型的刻蚀速率为 $10 \sim 20 \text{nm}/\text{min}$ ,此外,离子束刻蚀参数的起伏会产生位相台阶的高度误差,光刻时各次套刻的对准误差将导致表面浮雕位相分布的错位,这些都会影响衍射微透镜阵列的光学性能,因此必须加以严格控制。一般地,刻蚀深度误差应控制在优于5%。为了确保光刻工艺的套刻精度,同时保证光刻胶对离子束的抗蚀作用,根据各次套刻蚀深度的不同,涂覆光刻胶的厚度应随着套刻的次数逐渐降低。此外,在离子束刻蚀后去除光刻胶的工艺中,必须严格清洗已具有表面浮雕结构的硅衬底表面,否则,不仅会影响光刻胶的附着力,还将影响到光刻工艺的套刻精度,以及表面浮雕结构的完整性。

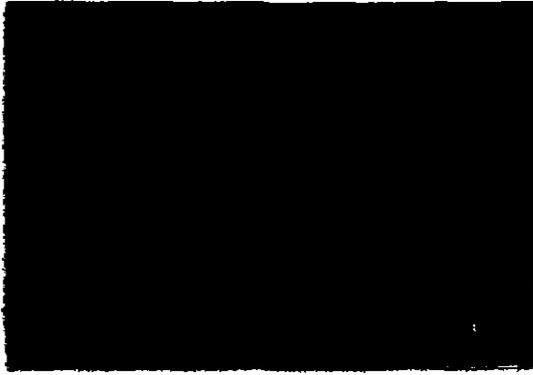


图 3 128 × 128 四位相硅衍射微透镜阵列  
Fig. 3 A portion of a 4-phase 128 × 128 Si diffractive microlens array.

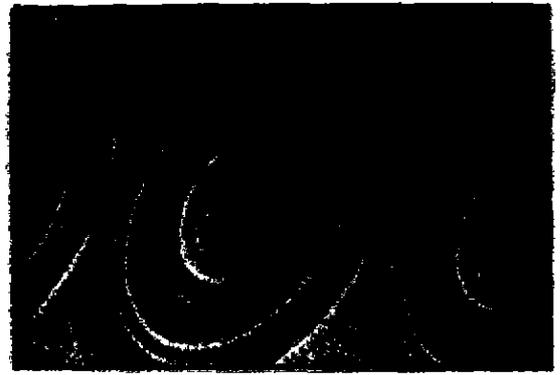


图 4 衍射微透镜表面浮雕结构的显微照片  
Fig. 4 SEM microphotography of the central region of surface-relief structure of diffractive microlens array

### 3 结果与讨论

我们利用上述工艺过程和制备方法,制备出了 128 × 128 四位相硅衍射微透镜阵列.利用扫描电子显微镜(SEM)和台阶测量仪(精度 5nm)对衍射微透镜阵列的表面浮雕结构进行了测量和分析.

图 3 为 128 × 128 四位相硅衍射微透镜阵列的显微照片.图 4 示出了衍射微透镜阵列其中一个微透镜浮雕结构的显微照片.通过与设计参数进行对比,结果表明衍射微透镜的表面浮雕位相分布与理论设计较为一致.

非涅耳微透镜阵列的衍射效率是表征元件质量较为重要的指标之一,它直接关系到设计和制备出的元件能否在实际光学系统中被选用的一个至关重要的问题.我们选用背景扣除法测量衍射微透镜阵列的衍射效率.测量时先用准直光学系统将来自标样黑体的红外光变成所需波长的准单色平行光,红外光在照射到衍射微透镜阵列之前,采用调制盘对其进行调制,并利用红外探测器对经过衍射微透镜阵列的红外光进行探测,用锁相放大器对红外探测器的输出信号进行采集,最终通过输出的信号来表征衍射微透镜阵列的焦面光强分布.由计算机对所采集的光强分布进行数据处理,得出衍射微透镜阵列后焦点间的背景平均强度  $I_b$ ,然后移去衍射微透镜阵列,插入相应的硅衬底基片,以补偿反射等损失,在原焦平面位置上测入射光强  $I_p$ .最后采用背景扣除的方法计算衍射效率,即

$$\eta = \frac{I_p - I_b}{I_p} \quad (1)$$

利用上述方法对制备出的 128 × 128 四位相硅衍射微透镜阵列进行测试,理论衍射效率为  $\eta_{理} = 81\%$ ,实测

的衍射效率为  $\eta_{实} = 68\%$ ,测试系统的重复精度为 3%.

为了测量衍射微透镜阵列中单一透镜的焦点光强分布,在红外探测器的人射面加入直径为  $10\mu\text{m}$  的微小光阑,将带有微小光阑的红外探测器装在精度达  $1\mu\text{m}$  的微调架上,通过使其在透镜焦平面上沿衍射微透镜的径向精密移动,从而采集单一透镜的焦点光强分布.图 5 给出了衍射微透镜阵列中单一透镜的焦点光强分布.

### 4 结论

通过考虑互相关联的光学和工艺参数,设计了 3 ~  $5\mu\text{m}$  红外 128 × 128 硅衍射微透镜阵列.采用多次光刻和离子束刻蚀技术在硅衬底表面制备 128 × 128 四位相硅衍射微透镜阵列.测量和分析的结果表明,理论设计参数与实际制备出的表面浮雕位相分布较为一致.可以预计,衍射微透镜阵列对改善大面阵列焦平面阵列的性能显得非常重要且具有较好的应用前景.

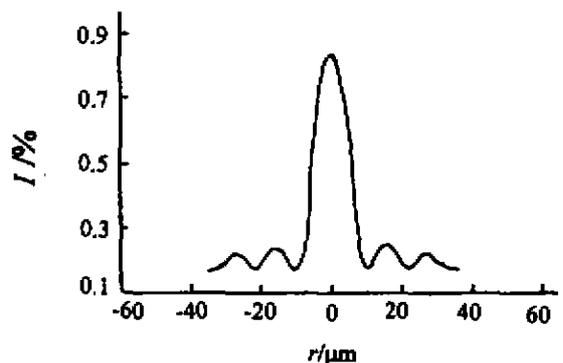


图 5 衍射微透镜焦点光强分布  
Fig. 5 Optical intensity distribution of the focal spot

## REFERENCES

- [1] Fleming Madeleine B, Hutley M C. Blazed diffractive optics, *Appl. Opt.*, 1997, **36**(20): 4635—4643
- [2] Yi X J, Zhang X Y, Li Y, *et al.* Microlens arrays formed by melting photoresist and ion beam milling, *Proceedings of the SPIE*, 1997, **3276**: 249—253
- [3] GUO Qing, WANG Ru-Li, GUO Zhong-Yuan, *et al.* Development and application experiments on binary phase-only Fresnel lens arrays, *J. Infrared Millim. Waves* (郭晴, 王汝笠, 郭中原, 等. 二元位相型菲涅尔透镜列阵器件的研制及其应用实验, *红外与毫米波学报*), 1995, **14**(1): 18—26
- [4] LI Yi, YI Xing-Jian, HAO Jian-Hua. Design and fabrication of  $128 \times 128$  diffractive microlens arrays, *Proceedings of the SPIE*, 1998, **3505**: 19—24
- [5] Motamedi M Edward, Ming C Wu, Kristofer S J Pister. Micro-opto-electro-mechanical devices and on-chip optical processing, *Opt. Eng.*, 1997, **36**(5): 1282—1297
- [6] Motamedi M Edward, Tenant E William, Holuk O Sankur, *et al.* Micro-optic integration with focal plane arrays, *Opt. Eng.*, 1997, **36**(5): 1374—1381
- [7] Du Chunlei, Guo Lurong, Wang Y R. *et al.* Method for improving performance of IR focal plane array using microlens array, *Proceedings of the SPIE*, 1997, **3099**: 107—114