

# 128×128 硅衍射微透镜阵列的 设计与制备\*

李 毅 易新建 蔡丽萍 陈思乡 曾晓雁

(华中理工大学光电子工程系 武汉 430074)

**提要** 通过考虑互相关联的光学和工艺参数,设计了 3~5 μm 红外 128×128 硅衍射微透镜阵列。阵列中微透镜的孔径为 100 μm,透镜  $F$  数为  $f/1.5$ ,微透镜阵列的中心距为 100 μm。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** 衍射光学,微透镜阵列,红外焦平面

## 1 引 言

近几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>[3-6]</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。一般情况下,注入效率满足

$$\eta = \frac{g_m R_d}{1 + g_m R_d} \quad (1)$$

式中  $g_m$  为读出电路的输入跨导,  $R_d$  为探测器的阻抗。

与诸如 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,以提高 PtSi 红外焦平面阵列的填充因子、灵敏度、工作温度等性能参数。

\* 国家高科技 863-409 直属主题项目。

收稿日期: 1998-11-23; 收到修改稿日期: 1999-05-14

## 2 衍射微透镜阵列的设计

衍射微透镜阵列的设计方法可分为光束追迹法、标量衍射理论、矢量衍射理论。一般地, 当光学元件的特征尺寸远大于工作波长时, 可采用光束追迹法进行设计; 当特征尺寸与波长同数量级或稍小时, 则矢量理论较为适宜; 当特征尺寸处于上述两种情形之间时, 最适宜的设计方法是标量衍射理论。

根据 128×128 PtSi 焦平面阵列的实际尺寸, 我们选用标量理论进行衍射微透镜阵列的设计。在标量衍射理论中, 不考虑元件的厚度效应, 即认为它是无限薄的, 入射光场在通过二元光学元件(衍射微透镜)时, 其振幅因子不发生变化, 位相因子则要乘上二元光学元件的位相分布函数, 这就是二元光学元件的位相调制作用。设衍射微透镜的位相函数为  $\phi(x_0, y_0)$ , 考虑到其有限的孔径大小, 则其透过率函数为

$$t(x_0, y_0) = p(x_0, y_0) \exp\{j\phi(x_0, y_0)\} \quad (2)$$

$$\text{其中, } p(x_0, y_0) = \begin{cases} 1 & (x_0, y_0) \text{ 在孔径内} \\ 0 & (x_0, y_0) \text{ 在孔径外} \end{cases} \quad (3)$$

则入射光场  $U_0(x_0, y_0)$  透过透镜的光场分布为

$$U_0(x_0, y_0) = U_0(x_0, y_0) \cdot t(x_0, y_0) \quad (4)$$

传播距离  $Z$  后到达输出面, 由菲涅耳衍射积分公式可得

$$U(x, y) = C \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_0(x_0, y_0) p(x_0, y_0) \exp\left\{j \frac{k}{2z} [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2] + j\phi(x_0, y_0)\right\} dx_0 dy_0 \quad (5)$$

其中  $C$  为常位相和振幅因子,  $C = \frac{1}{j\lambda z} \exp(jkz)$ , 通常关心的是光场的相对振幅和位相, 因此  $C$  常可忽略不计, 将(5) 写成傅里叶变换的形式

$$U(x, y) = C \exp\left\{j \frac{k}{2z} (x^2 + y^2)\right\} F \left[ U_0(x_0, y_0) p(x_0, y_0) \exp\left\{j \frac{k}{2z} (x_0^2 + y_0^2) + j\phi(x_0, y_0)\right\} \right] \quad (6)$$

在实际应用中, 通常只需求出输出面的光强分布满足某种相对分布  $I(x, y)$ , 由于  $I(x, y) = |U(x, y)|^2$ , 则由上述关系式可得

$$I(x, y) = \left| \iint U_0(x_0, y_0) p(x_0, y_0) \exp\left\{j \frac{k}{2z} [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2] + j\phi(x_0, y_0)\right\} dx_0 dy_0 \right|^2 = \left| F \left[ U_0(x_0, y_0) p(x_0, y_0) \exp\left\{j \frac{k}{2z} (x_0^2 + y_0^2) + j\phi(x_0, y_0)\right\} \right] \right|^2 \quad (7)$$

对(5) ~ (7) 式的解析求解通常只对于某些特殊的  $U_0(x_0, y_0)$ ,  $U(x, y)$  (或者  $I(x, y)$ ) 和  $p(x, y)$  才行得通, 在一般情况下只能进行数值求解。数值求解的关键是需要某种算法, 该算法能够对位相函数  $\phi(x_0, y_0)$  进行优化搜索, 从而得到它的一个最佳值, 由这个最佳位相分布而得到的输出光场相对于实际所需光场分布的误差为最小(或者小于某一容限值)。我们选用改进的模拟退火设计算法对衍射微透镜的位相进行优化设计。

对于 128×128 PtSi 肖特基势垒红外成像传感器, 其工作波长范围为 3~ 5  $\mu\text{m}$ 。为了使衍射微透镜阵列满足 128×128 PtSi 肖特基势垒红外成像传感器的要求, 设计中考虑了三个重要的光学和工艺参数, 即工作波长、透镜  $F$  数、最小工艺特征尺寸或临界尺寸。根据上述关系式和讨论, 我们折中设计出 128×128 硅衍射微透镜阵列, 其中心工作波长为 4  $\mu\text{m}$ , 透镜  $F$  数和最小工艺特征尺寸分别为  $f/1.5$  和 1.5  $\mu\text{m}$ 。

### 3 衍射微透镜阵列的制备

衍射微透镜阵列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:掩模板设计、借助光刻胶将图形转移到衬底表面、利用离子束刻蚀将图形高保真地复制到衬底。如前所述,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,128×128 硅衍射微透镜阵列最小波带宽度为 1.5 μm。

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板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入射角等而变化,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 10~20 nm/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,根据各次套刻后刻蚀深度的不同,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。

### 4 结果与讨论

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 5 nm)对衍射微透镜阵列的表面浮雕结构进行了测量和分析。图 1 为 128×128 四位相硅衍射微透镜阵列的显微照片。图 2 示出了衍射微透镜阵列中一个微透镜浮雕结构的显微照片。图 3 给出了利用台阶测量仪获得的微透镜中心区表面浮雕结构分布。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。

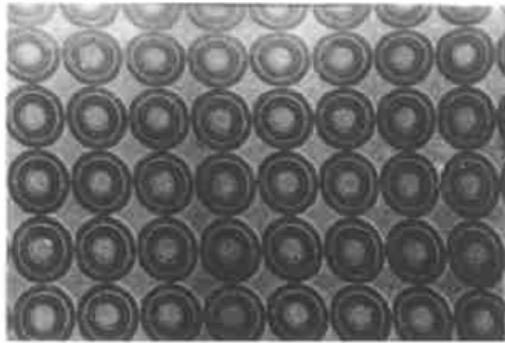


图 1 128×128 四位相硅衍射微透镜阵列

Fig. 1 A portion of a 4-phase 128×128 central region of diffractive microlens array

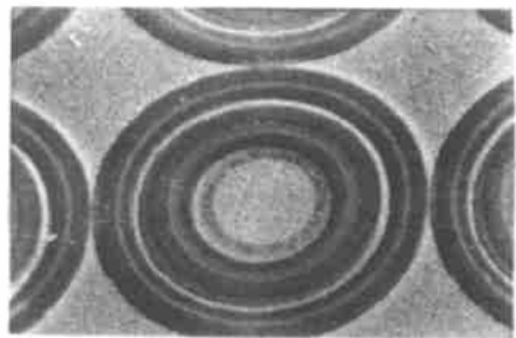


图 2 衍射微透镜表面浮雕结构的显微照片

Fig. 2 SEM microphotography of the diffractive microlens array

菲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

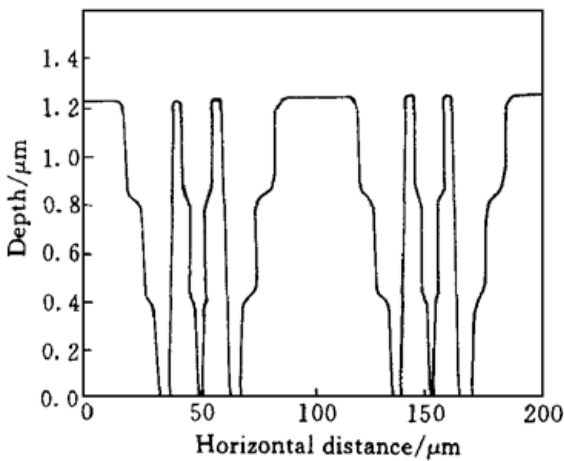


图3 衍射微透镜阵列表面浮雕分布

Fig. 3 Surface profilometer trace of diffractive microlens

衍射效率, 即

$$\eta = \frac{I_p - I_b}{I_p} \quad (8)$$

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  $\eta_{\text{theory}} = 81\%$ , 实测的衍射效率为  $\eta_{\text{exp.}} = 68\%$ , 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, 在红外探测器的入射面加入直径为 10 μm 的微小光阑, 将带有微小光阑的红外探测器装在精度达 1 μm 的微调架上, 通过使其在微透镜的焦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 4 给出了衍射微透镜阵列中单一透镜的焦点光强分布。

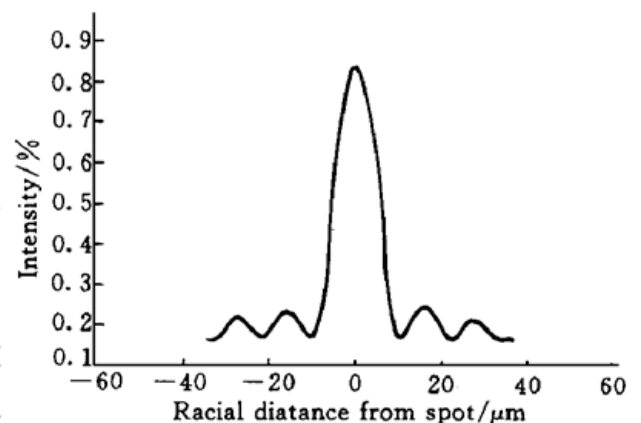


图4 衍射微透镜焦点光强分布

Fig. 4 Optical intensity distribution of the focal spot

## 5 结 论

通过考虑互相关联的光学和工艺参数, 设计了 3~5 μm 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红外焦平面阵列的性能显得非常重要且具较好的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Madeleine B. Fleming, M. C. Hutley. Blazed diffractive optics. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(20): 4635~ 4643
- 2 X. -J. Yi, X. -Y. Zhang, Y. Li *et al.*. Microlens arrays formed by melting photoresist and ion beam milling. *SPIE*, 1997, **3276**: 249~ 253

- 3 Guo Qing, Wang Ruli, Guo Zhongyuan *et al.*. Development and application experiments on binary phase-only Fresnel lens arrays. *J. Infrared Millim. Waves* (红外与毫米波学报), 1995, **14**(1): 18~ 26 (in Chinese)
- 4 Li Yi, Yi Xinjian, Hao Jianhua. Design and fabrication of  $128 \times 128$  diffractive microlens arrays. *SPIE*, 1998, **3505**: 19~ 24
- 5 M. Edward Motamedi, 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 M. Edward Motamedi, William E. Tenannt, Haluk O. Sankur *et al.*. Micro-optic integration with focal plane arrays. *Opt. Eng.*, 1997, **36**(5): 1374~ 1381

## Design and Fabrication of $128 \times 128$ Diffractive Microlens Arrays on Si Substrates

Li Yi Yi Xinjian Cai Liping Chen Sixiang Zeng Xiaoyan

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

**Abstract**  $128 \times 128$  diffractive microlens arrays have been designed by considering the relative optical and processing parameters for 3~ 5  $\mu\text{m}$  wavelength with a microlens diameter of 100  $\mu\text{m}$ . The lens  $F$  number and array pitch are  $f/1.5$  and 100  $\mu\text{m}$ , respectively. The diffractive microlens arrays have been fabricated on the surface of Si substrates by successive photolithography and  $\text{Ar}^+$  ion-beam-etching technique. The practical processes and fabrication method are discussed. The optical characteristics and measurement of the surface relief structure are presented.

**Key words** diffractive optics, microlens array, infrared focal plane array