

256×256 Si 微透镜阵列与红外 焦平面阵列单片集成研究*

陈四海 易新建 王宏臣 孔令彬 马宏

(华中科技大学激光技术国家重点实验室,湖北,武汉,430074)

摘要 基于标量衍射理论设计了8位相菲涅尔衍射微透镜阵列,利用多次曝光和离子束刻蚀技术在大规模面阵(256×256)PtSi红外焦平面阵列的背面制作了单片集成微透镜阵列样品(单元面积为 $30\mu\text{m}\times 40\mu\text{m}$)。测试结果表明,单片集成微透镜的红外焦平面阵列样品的信噪比提高了2.0倍。

关键词 PtSi 红外焦平面阵列,微透镜阵列,单片集成技术。

MONOLITHIC INTEGRATION OF 256×256 Si MICROLENS ARRAYS WITH INFRARED FOCAL PLANE ARRAYS*

CHEN Si-Hai YI Xin-Jian WANG Hong-Chen KONG Ling-Bin MA Hong

(The State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University
of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract 8-phase-level 256×256 elements diffractive microlens arrays with element dimension of $30\mu\text{m}\times 40\mu\text{m}$ were fabricated on the backside of the PtSi infrared focal plane arrays (IRFPA) based on the scalar diffraction theory and computer aided design. The measurement results indicate that the ratio of the signal-to-noise of the PtSi IRFPA sample with microlenses is increased by a factor of 2.0.

Key words PtSi infrared focal plane arrays (PtSi IRFPA), microlens arrays, monolithic integration technology.

引言

传统的高密度 IRFPA 中,光敏面积不到象元面积的一半,因此入射到传感器阵列上的目标辐射只有约不到一半的信号光被探测器光敏面所吸收,而超过一半的其余信号光入射到象元的非感光区(“死区”)被浪费掉,使传感器阵列的感光灵敏度低和信噪比特性恶化。如果在 IRFPA 的前视方向或背面添加微透镜阵列,可以大大提高阵列的占空比(填充因子),微透镜阵列将落入“死区”的信号辐射大部分甚至全部聚集到传感器的光敏区,使占空比提高到接近 100%,从而大大改善 IRFPA 的响应特性。本文基于标量衍射理论设计了 8 位相的衍射微透镜阵列,并成功地制作了和 PtSi IRFPA 单片集成的 256×256 元硅微透镜阵列,从而有效地提高了

PtSi IRFPA 的占空比和响应特性。

1 微透镜阵列的设计

二元微透镜的设计基于成熟的标量衍射理论和二元光学理论^{5~6}。已知 256×256 元 PtSi IRFPA 的像元尺寸为 $30\mu\text{m}\times 40\mu\text{m}$,光敏元尺寸为 $21\times 21\mu\text{m}^2$,占空比为 36.75%,工作波段为 $3\sim 5\mu\text{m}$,背面入射式,衬底材料为 Si,厚度 $400\pm 10\mu\text{m}$ 。根据上述参数要求,由标量衍射理论,采用流程图设计了 8 相位的与 PtSi IRFPA 相匹配的衍射微透镜阵列。阵列中透镜的中心距水平和垂直方向分别为 $30\mu\text{m}$ 和 $40\mu\text{m}$,工作波长为 $4\mu\text{m}$, F 数为 2.35,临界尺寸为 $1.3\mu\text{m}$ 。图 1 和图 2 分别给出了 256×256 元衍射微透镜相位和相应的掩模版分布图。

* 国家自然科学基金(编号 60086003)资助项目
稿件收到日期 2000-12-14,修改稿收到日期 2001-01-18

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60086003)

Received 2000-12-14, revised 2001-01-18

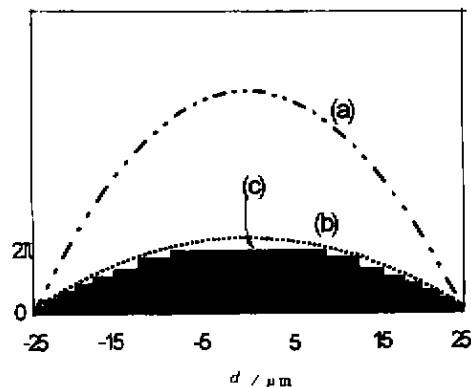


图 1 衍射微透镜的相位分布图
(a) 原始位相分布, (b) 模 2π 的位相分布,
(c) 8 台阶位相分布

Fig. 1 The phase profile of diffractive microlens
(a) the original phase, (b) modular 2π phase,
(c) 8-phase-level

2 微透镜阵列的制作与集成

本文采用多次掩模光刻和离子束刻蚀工艺制作衍射微透镜^[5],其流程一般包括光刻和基片刻蚀两个主要步骤.对于多位相等级的二元光学元件,则需要多次重复上述工艺过程,进行套刻加工.在与红外焦平面阵列单片集成的衍射微透镜阵列的制作中,光刻是非常重要的工艺.在多位相台阶衍射微透镜的制作过程中,第二次以后的多次光刻需要将掩模版与基片上已有的图形精确对准(称为单面对准).在单片集成中,大阵列 PtSi IRFPA 微电子图形与衍射微透镜图形的对准问题(称为双面对准)是一个工艺难题,也是制造关键技术之一,将另文讨论.此外,在光刻胶上制造的微透镜浮雕图形,如何通过离子研磨技术高保真地转移到衬底上去,也是一个关键技术.由实验可知,离子束的刻蚀速率与离子束的束能、束流密度、束流方向和可用作刻蚀的靶材料的种类密切相关^[7].通过选择离子的人射角度和能量,

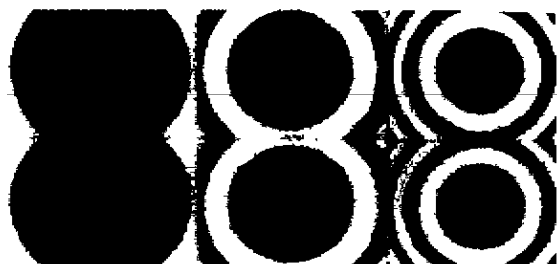


图 2 8 位相的掩模版分布图
Fig. 2 8-phase-level masks

可使 Si 衬底的刻蚀速率和光刻胶的刻蚀速率非常接近,如离子的人射角度 θ 为 30° 、束能为 $400 \sim 600\text{eV}$ 时,两者的速率约为 1:1.1.因此,我们选择 30° 作为最佳的刻蚀角度.束能为 500eV 时,刻蚀速率为 $10 \sim 20\text{nm}/\text{min}$.具体工艺过程如下:首先,将清洗处理过的 PtSi IRFPA Si 衬底背面涂上 BP212 光刻胶,前烘胶后,利用德国 KARL SUSS MJB3 MASK ALIGNER 的红外对准功能将 1[#]掩模版上的图形与 PtSi IRFPA 图形双面对准后,进行接触式曝光,显影和坚膜后,通过氩离子束刻蚀将图形转移到 Si 衬底上,然后利用 2[#]和 3[#]掩模版分别进行第 2 次和第 3 次套刻和刻蚀,并调整相应的光刻和刻蚀参数,便得到了 8 位相分布的衍射微透镜阵列.

3 结果与讨论

我们通过上述工艺过程和制备方法,制作了与 PtSi IRFPA 单片集成的 256×256 元衍射微透镜阵列.利用 JSM 扫描电子显微镜和 DEKTAK I 型表面轮廓仪对衍射微透镜的表面浮雕结构进行了测量和分析.图 3 为所制作样品的显微照片,图 4 给出了衍射微透镜阵列其中一个单元的台阶分布.从图 3 和图 4 的测试结果可以看出,衍射微透镜图形表面光滑平整,面阵图形的均匀性良好,台阶轮廓分明,表面浮雕位相分布与理论设计较为一致,说明利用

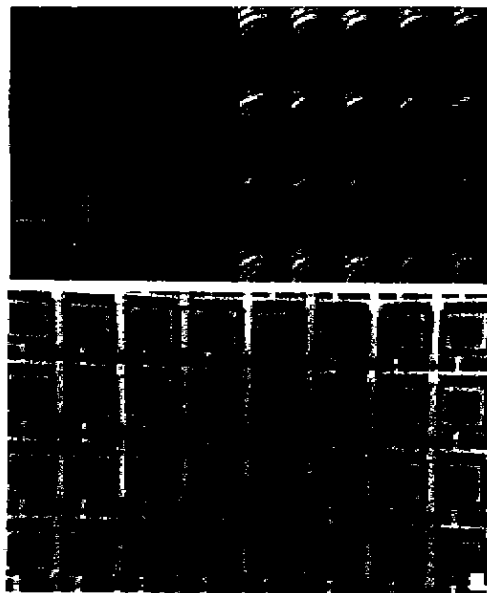


图 3 集成样品的 SEM 照片(上图为 8 位相的微透镜阵列,下图为 PtSi 红外焦平面阵列,图中标尺为 $10\mu\text{m}$)

Fig. 3 The SEM microphotography of integrated sample
(upper part; 8-phase-level microlens arrays;
lower part; PtSi IR FPA, scale is $10\mu\text{m}$)

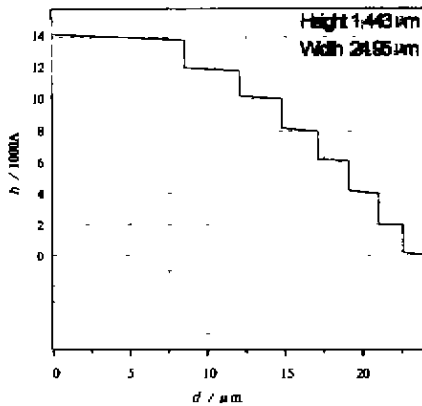


图4 衍射微透镜的微浮雕结构

Fig. 4 Micro-relief profile of the diffractive microlens

上述光刻机制造的图形清晰,误差较低。由图3中对准标记T可得知双面对准精度优于 $2\mu\text{m}$,单面对准精度优于 $0.3\mu\text{m}$,电子显微照片和台阶测试只是给出了衍射微透镜的形貌特征,而在应用中,更关心的是微透镜的光学性能参数,为此,对集成样品进行了成像测试,对制作的微透镜阵列集成芯片测试结果表明80%样品的信噪比增益达到2.0倍,有微透镜的红外焦平面实时成像质量有明显提高。在理想情况下,与微透镜阵列集成的焦平面阵列占空比应提高2.7倍,测试结果表明只提高到74%,说明在微透镜的制作工艺中,还是存在一定的工艺误差。研究表明,对准误差是影响衍射效率最重要因素,其次才是刻蚀深度误差^[8-9]。如果能克服制作工艺中存在的误差,可使微透镜的衍射效率提高。此外,制作16台阶或连续浮雕结构的衍射微透镜,能使衍射效率理论值接近100%,本实验室将对这方面展开研究工作,红外焦平面的性能可望得到进一步得到改善。

4 结语

本文利用多次曝光和离子束刻蚀技术在大规模

面阵(256×256 元)PtSi红外焦平面的背面进行了单片集成微透镜阵列的制作,并对样品进行了测试,结果表明,单片集成微透镜阵列的红外焦平面阵列样品,其信噪比为无微透镜阵列时的2.0倍,实时观察表明,图像清晰度有了明显的提高。

REFERENCES

- [1]Gordon N T, Jones C L, Purdy D J. Application of microlenses to infrared detector arrays. *Infrared Phys.*, 1991, **31**(3): 599—604
- [2]Motamedi M, Edward T, Ennant William E, et al. Micro-optic integration with focal plane arrays. *Optical Engineering*, 1997, **36**(5): 1374—1381
- [3]D'Amato Dante, Centamore Robert. Two applications for microlens arrays; detector fill factor improvement and laser diode collimation. In: *Proc. SPIE*, 1991, **1544**: 166—177
- [4]CHEN Si-Hai, YI Xin-Jian, HE Miao, et al. Research on hybrid device of Si microlens arrays with long focus and IR detector arrays. *Digest, 25th International Conference on Infrared and Millimeter Waves*, 2000; 147—148
- [5]CHEN Si-Hai, YI Xin-Jian, LI Yi, et al. Design of diffractive microlens arrays integration with focal plane arrays. In: *Proc. SPIE*, 2000, **4224**: 170—173
- [6]Swanson G J. Binary optics technology; the theory and design of multi-level diffractive optical elements. *Technical Report 854*, Lincoln Laboratory, MIT, 14 Aug. 1989
- [7]Yi X J, Zhang X Y, Li Y, et al. Microlens arrays formed by melting photoresist and ion beam milling. In: *Proc. SPIE*, 1997, **3267**: 249—253
- [8]Parn M W, Goodman J W. Effect of VLSI fabrication errors on Kino-form efficiency. In: *Proc. SPIE*, 1990, **1211**: 125—136
- [9]Perstl M, Kuhlow B, Pawlowski E. Blazed Fresnel zones approximated by discrete step profiles; effects of fabrication errors. In: *Proc. SPIE*, 1993, **1732**: 89—99