

文章编号:1001-9014(2007)01-0026-05

微型光扫描器研究

黄鹰^{1,2}, 向思桦¹, 陈四海^{1,2}, 赖建军^{1,2}, 易新建^{1,3}

(1. 华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074;
3. 图像识别和人工智能教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 设计了由正负微透镜阵列和压电陶瓷驱动器组成的微型光扫描器, 它工作于中、短波红外光及可见光等波段, 微透镜阵列规模为 256×256 元、单元直径为 $50 \mu\text{m}$, 扫描视场角约为 6.6° , 扫描频率可达 200Hz , 体积小到几个立方厘米。实验测试表明微扫描器的设计参数与实验测量结果基本相符。

关键词: 微透镜阵列; 压电驱动器; 微光机电系统; 微型光扫描器

中图分类号: TN256, TN305 **文献标识码:** A

STUDY ON MICROOPTICAL SCANNER

HUANG Ying^{1,2}, XIANG Si-Hua¹, CHEN Si-Hai^{1,2}, LAI Jian-Jun^{1,2}, YI Xin-Jian^{1,3}

(1. Institute of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology (HUST), Wuhan 430074, China;

2. National Optoelectronic Laboratory, Wuhan 430074, China;

3. Education Ministry Key Laboratory for Imaging Recognition and Intellectual Control, Wuhan 430074, China)

Abstract: The microoptical scanner consisted of a positive microlens array and a negative microlens array and a PZT actuator was designed, which works in middle and short-wavelength infrared light and visible light. These microlens arrays are with 256×256 elements and each element has a diameter of $50 \mu\text{m}$, the scanning angle is about 6.6 degree. The scanning frequency is 200Hz , and the volume is a few cubic centimeters. The experiment measurement shows that the designed parameters of the microoptical scanner are consistent with the results of experimental measurement.

Key words: microlens arrays; PZT actuator; MOEMS; microoptical scanner

引言

微透镜阵列有许多应用, 例如光束整形、光互连和光成像等。由正负微透镜阵列和微驱动器组成的微型光扫描器在光成像探测、激光雷达、卫星遥感和军事领域有着巨大的应用潜力。

传统的光扫描器多采用旋转棱镜或旋转反射镜来实现光斑扫描, 这种扫描方式随着科学应用要求的提高, 暴露出了一些缺点, 如体积大、扫描速率低、功耗大等, 这制约了通信和雷达等系统性能的提高。为了克服上述缺点, 美国在上世纪 90 年代开始致力于微型光扫描器的研究^[1], 报导的工作波长为 $0.632 \mu\text{m}$, 扫描频率不小于 200Hz 。最近又有新的发展^[2], 国内尚处于起步阶段。

本文扼要地阐述了正负微透镜阵列的制造工艺, 报导了由正负微透镜阵列对和压电微驱动器组成的微型光扫描器结构, 讨论了设计原理和参数, 最后给出了测量方法和测量结果。其设计参数的理论值和实验测量值基本相符。

1 微型光扫描器系统原理

如图 1 所示, 微扫描器光学系统由 3 组透镜 L_1 、 L_2 和 L_3 组成, F_2 为 L_2 的焦平面, L_1 和 L_2 为正负微透镜阵列对, L_3 为一会聚透镜。当一束准直平行光经 L_1 入射时, 让 L_2 相对于 L_1 作垂直位移 ΔX , 就可使聚焦光斑在 L_3 的后焦面 (F_3) 上实现线性扫描。设 L_1 、 L_2 和 L_3 的焦距分别为 f_1 、 f_2 和 f_3 , L_1 和 L_2 中每一子微透镜单元的直径为 D , 在只考虑 L_2 相对于 L_1 做一维

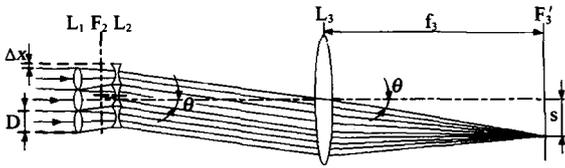


图1 微扫描器的光学系统
Fig.1 An optical system for microscanner

垂直位移 ΔX 的情况下,扫描角为:

$$\theta = \arctan \frac{\Delta X}{f_2} \quad (1)$$

可见扫描角 θ 与 L_3 的焦距 f_3 无关(图中表示的两个 θ 角是相等的). 偏转光束经 L_3 聚焦后,光斑在 L_3 的焦平面上的位移量为:

$$S = f_3 * \tan\theta = \frac{f_3}{f_2} \Delta X \quad (2)$$

由式(2)看出,扫描光斑的位移量 S 与微透镜对的相对位移 ΔX 之间呈线性关系,其放大倍率(扫描灵敏度) β 为:

$$\beta = \frac{f_3}{f_2} \quad (3)$$

如果 L_2 相对于 L_1 做二维(垂直或水平)位移时,扫描光斑就在 L_3 的后焦面上进行二维线性扫描. 为了使 L_1 中各子微透镜出射的光束能够落在 L_2 对应的子微透镜口径范围内,则 L_2 的位移量最大值为:

$$\Delta X_m = \frac{D}{2} \left(1 - \frac{f_2}{f_1}\right) \quad (4)$$

将式(4)代入式(2),可得扫描光斑的最大扫描范围:

$$S_m = \pm \frac{f_3}{2} \left(\frac{D}{f_2} - \frac{D}{f_1}\right) \quad (5)$$

最大偏转角:

$$\theta_m = \arctan \frac{\Delta X_m}{f_2} = \arctan \frac{D}{2f_2} \left(1 - \frac{f_2}{f_1}\right) \quad (6)$$

由式(5)和(6)看出,要增大扫描角,在设计上要选用大的微透镜子口径、大的正微透镜焦距(f_1)和小的负微透镜焦距(f_2).

2 正负微透镜阵列研制

2.1 正微透镜阵列的制作

图2表示正微透镜阵列的工艺过程,基底材料是石英,正微透镜阵列的制备我们曾有详细的报导^[3],这里不再赘述.

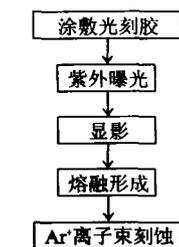


图2 正微透镜阵列制作工艺
Fig.2 Fabrication process for positive microlens array

刻蚀后的凸微透镜阵列总表

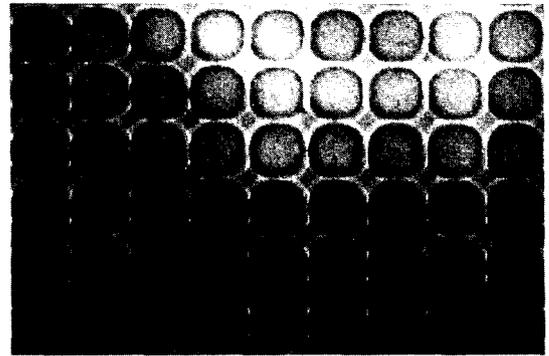


图3 正微透镜阵列显微照片
Fig.3 Micrography for positive microlens array

面尺寸为 13.5×13.5 mm, 单个微透镜尺寸为 $50\mu\text{m}$, 相邻微透镜的间隔是 $2\mu\text{m}$; 冠高为 $0.65\mu\text{m}$. 查得石英折射率 $n = 1.4586$, 根据冠高求得凸微透镜焦距 $f_1 = 1049.04\mu\text{m}$, 图3表示了 256×256 石英正微透镜阵列的局部显微照片.

2.2 负微透镜阵列的制作

采用曲率倒易法制作负微透镜阵列. 关于这种制作工艺我们已在别处详细论述^[4], 图4给出了负微透镜阵列制作的工艺步骤, 基底材料是 PDMS (Polydimethylsiloxane).

我们制作出来的负微透镜阵列总表面尺寸为 13.5×13.5 mm, 单个微透镜直径为 $50\mu\text{m}$, 相邻透镜间隔是 $2\mu\text{m}$; 冠高为 $3.94\mu\text{m}$. 查得 PDMS 折射率 $n = 1.4476$, 根据冠高求得负微透镜焦距 $f_2 = 177.25\mu\text{m}$.

2.3 微扫描器结构

将规格为 256×256 、单元微透镜直径为 $50\mu\text{m}$ 的正负微透镜阵列置于扫描器的安装盒内, 并配以压电驱动器(德国 jena 产品, 工作电压 150v 、位移 $50\mu\text{m}$ 、使用频率 200HZ), 构成透射式微型光扫描器, 图5表示研制的实物样品.

由于选择的压电陶瓷驱动器其使用频率为

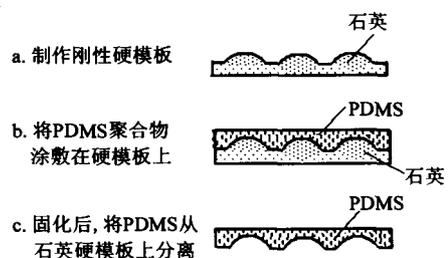


图4 负微透镜阵列工艺
Fig.4 Fabrication process for negative microlens array

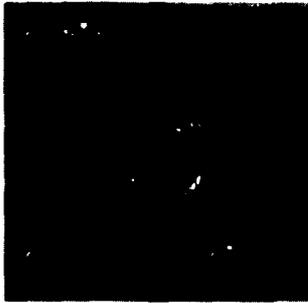


图5 微扫描器实物图
Fig. 5 A Sample of microscanner

200Hz, 应为此扫描器的运行频率. 由于石英(正微透镜阵列材料)和 PDMS(负微透镜阵列材料)对可见光(0.4 ~ 0.75 μm)、短波红外(0.76 ~ 2 μm)和中波红外(3 ~ 5 μm)透明, 故此微型光扫描器可适用于可见光和红外波段(不含长波红外).

3 参数测量与计算

3.1 微透镜阵列的几何占空比

由正负微透镜阵列的制作可知 $D = 50 \mu\text{m}$, $f_1 = 1049.04 \mu\text{m}$, $f_2 = 177.25 \mu\text{m}$, 相邻透镜间隔 $W = 2 \mu\text{m}$. 占空比为:

$$K = \left(\frac{D}{D + W} \right) = \left(\frac{50}{50 + 2} \right)^2 = 92.45\% \quad (7)$$

3.2 光束质量和传输效率

光束质量和传输效率用微透镜的点扩散函数表示. 通过微针孔探测器在微透镜阵列的后焦面进行扫描获得测量数据, 测试系统如图 6 所示. 测试时, 采用带尾纤的光通信用探测器兼作扫描器, 紧贴在微透镜的后焦面上. 通过光纤传输能量损失很小. 光源采用波长 $\lambda = 650\text{nm}$ 的激光.

实验中我们随机选取阵列中的局部单元进行测量, 图 7 表示了测量结果. 由图 7 看出, 单个微透镜的点扩散函数属爱里(Airy)分布, 无明显畸变, 且不同微透镜单元的点扩散函数分布大体相似, 表明光束均匀、微透镜阵列制作质量好. 也由下列测试过程看出光束透过单个微透镜的传输效率接近 90%.

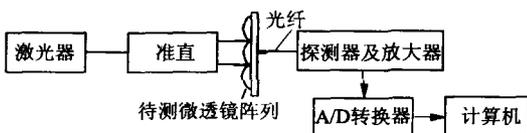


图6 微透镜阵列点扩散函数测试系统方块图
Fig. 6 A test system of point spread function for microlens array

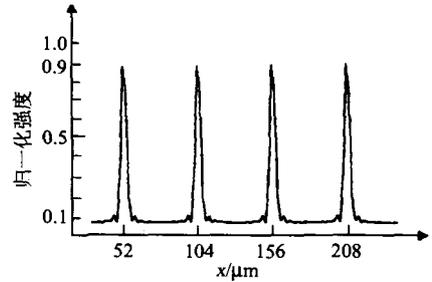


图7 微透镜阵列(局部)的点扩散函数曲线
Fig. 7 The point spread function curve for microlens array (in part)

传输效率的定义是: 光通过单个微透镜前后的光强比^[6], 如果用 I_1 表示入射到微透镜前的光强, I_2 表示经微透镜后的光强, 则传输效率:

$$\eta = \frac{I_2}{I_1} \quad (8)$$

实验测试方法是采用图 6 的装置. 首先将待测微透镜阵列卸下, 代之以直径为 $\phi = 50 \mu\text{m}$ (与单个微透镜的直径相等) 的光阑, 让入射光直接射到探测器上(不必加图 6 中的光纤接收), 测得 I_1 ; 然后将待测微透镜阵列按图 6 所示安装, 测量经微透镜后的光强 I_2 . 图 7 表示了 4 个相邻的单个微透镜的 η 值, 最好的结果接近 90%. 图 7 中测得的点扩散分布, 与文献报导结果大体相似^[7].

4.3 扫描角测量

图 8 是正负微透镜阵列和压电驱动器组成的扫描角测量装置图.

此装置由下列部件组成: (1) 激光源(LD), 波长为 $0.65 \mu\text{m}$; (2) 扩束准直镜; (3) 精密三维微调架, 用于调整正负微透镜阵列(L_1 、 L_2)的初始光路; (4) 压电陶瓷驱动器, 用于驱动负微透镜阵列扫描; (5) 聚焦透镜 L_3 , 焦距 $f_3 = 108\text{mm}$; (6) 成像屏, 置于

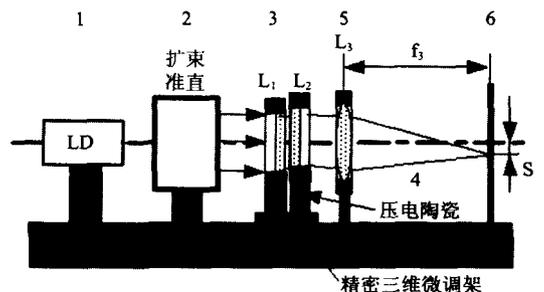


图8 扫描角测试实验装置
Fig. 8 An experiment equipment of scanning angle measurement

透镜 L_3 的焦平面上,成像面附有刻度标记.

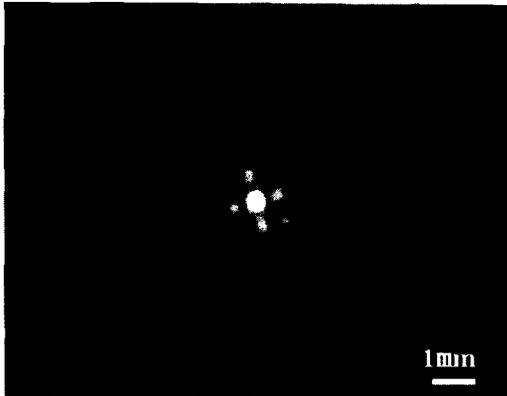


图 9 成像面上扫描光斑图

Fig. 9 The scanning optical spot diagram on imaging plane

在成像面上出现的扫描光斑受微透镜阵列衍射及聚焦透镜 L_3 的影响,形状如图 9 所示.

用压电驱动器分别于 X、Y 方向驱动负微透镜阵列,图 10 表示了 x 方向扫描光斑轨迹. 记录扫描光斑移动的最大位移 S_x 、 S_y . 测得 $2S_x \approx 25\text{mm}$, $2S_y \approx 25\text{mm}$. 由图 8 可知,实验的最大扫描角为:

$$\theta_{x_m} = \arctan\left(\frac{S_x}{f_3}\right) \text{ 或 } \theta_{y_m} = \arctan\left(\frac{S_y}{f_3}\right), \quad (9)$$

得到: $\theta_{x_m} \approx 6.6^\circ$; $\theta_{y_m} \approx 6.6^\circ$

根据式(6),理论最大扫描偏转角为:

$$\theta_{x_m} \approx 6.6^\circ; \theta_{y_m} \approx 6.6^\circ$$

$$\begin{aligned} \theta_m &= \arctan \frac{\Delta X_m}{f_2} \\ &= \arctan \frac{D}{2f_2} \left(1 - \frac{f_2}{f_1}\right) \\ &= \arctan \frac{50}{2 \times 177.25} \left(1 - \frac{177.25}{1049.04}\right) \\ &= 6.68^\circ, \end{aligned} \quad (10)$$

理论计算和实验测量二者基本相符合.

4 小结

本文报导了小体积正负微透镜阵列和压电微驱动器组成的光学扫描器,正微透镜阵列采用热熔及氩离子束刻蚀法制造,负微透镜阵列用正微透镜阵列复制反转法获得. 制作出的微透镜阵列规格为 256×256 , 单个微透镜直径为 $50\mu\text{m}$, 负微透镜阵列

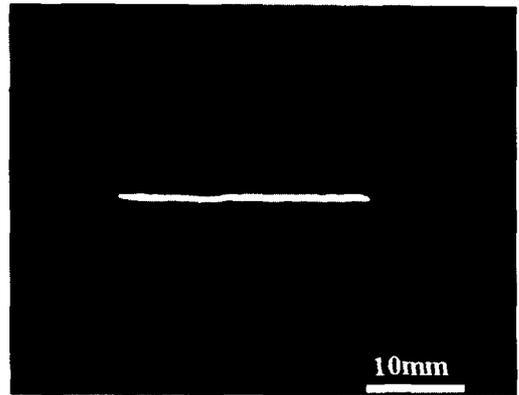


图 10 x 方向扫描光斑轨迹

Fig. 10 The scanning optical spot track in x orientation

由压电陶瓷驱动器驱动,扫描频率 200Hz. 扫描视场角实验测试为 6.6° , 理论设计为 6.68° , 两者基本一致. 虽然实验测量采用 650nm 红光,但由于构成正负微透镜阵列的材料对可见光、短波红外和中波红外均透明,故研制的微型扫描器适用于可见光到红外(不含长波红外)的光谱范围.

REFERENCES

- [1] Motamedi M E, Andrews A P, Gunning WJ, et al. Micro-optic laser beam scanner[C]. *SPIE*, 1993, 1992:2—13.
- [2] Hiroshi Miyajima, Kenzi Murakami, Masahiro Katashiro. MEMS optical scanners for microscopes[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, 10(3): 514—527.
- [3] Zhang Xinyu, Yi Xinjian, Zhao Xingrong, et al. Study of fabricating linear quartz microlens array[J]. *ACTA PHOTONICA SINICA*(张新宇, 易新建, 赵兴荣, 等. 石英微透镜阵列的制作研究. *光子学报*), 1997, 26(8): 710—714.
- [4] HE Miao, YI Xin - Jian, CHENG Zu-Hai. Fabrication of si concave microlenses array[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (何苗, 易新建, 程祖海. 凹型 Si 微透镜阵列的制作. *红外与毫米波学报*), 2002, 21(1): 33—36.
- [5] Tong Zi-Lei. Repetitive control system of scan of oscillating mirror[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (童子磊. 摆镜扫描的重复控制系统. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(3): 229—232.
- [6] Pawlowski E, Engel H, Ferstl M, et al. Diffractive microlenses with antireflection coatings fabricated by thin film deposition[J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(2): 647—652.
- [7] BorreLLi N F. *Microoptics Technology*[M], Marcel Dekker Inc. Press: New York, 1999, 45—48.