

# 原子力显微镜加工红外微透镜阵列的研究\*

匡登峰, 方志良, 杨勇

(南开大学现代光学研究所, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

**摘 要:**提出了利用原子力显微镜灰阶阳极氧化方法加工 Si、Ge、GaAs 等晶体材料为基础的红外微透镜阵列. 加工了  $3 \times 3$  的红外硅微透镜阵列, 微透镜的高度和表面直径重复性误差分别为 0.2 nm 和 6.0 nm, 微透镜的平均曲率半径为 510.8 nm. 分析了原子力显微镜加工红外微透镜产生面型结构误差的原因, 并提出了减小面型结构误差的方法. 利用此种方法加工的折射、衍射和混合红外微透镜阵列可以进一步缩小红外成像系统的尺寸.

**关键词:**微透镜阵列; 红外焦平面阵列; 原子力显微镜阳极氧化; 灰阶

**中图分类号:** TN256

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2007)04-0659-4

## 0 引言

Si、Ge、GaAs 都是重要的红外透镜材料, 同时由于它们是成熟的半导体材料, 价格低廉. 随着 80 年代末兴起的微光学技术的发展, Si<sup>[1-2]</sup>、Ge<sup>[3-4]</sup>、GaAs<sup>[5]</sup> 等材料被广泛应用于红外微透镜阵列, 从而不仅提高了红外成像系统的质量, 而且大大降低了红外微透镜的成本. Si 微透镜阵列已经和红外探测器阵列集成用于红外光学系统中<sup>[1]</sup>, GaAs 加工的微透镜已经成功用于微光发射激光器<sup>[3]</sup>.

微透镜加工最常用的方法是掩膜套刻工艺<sup>[6-8]</sup>. 首先制作黑白图案的掩膜版, 利用光刻技术将图形转印到涂在基片表面的光刻胶上, 再经过刻蚀技术将光刻胶表面图形转移到基底上, 在基底表面形成台阶结构. 多次重复上述工艺, 就可以制作多阶微光学器件. 此方法不可能利用单个掩膜(需要利用多个掩膜和光刻步骤产生准灰阶光刻胶)加工衍射或混合微透镜所需要的任何形状表面. 目前, 利用聚焦的电子束或激光束的直写技术通过直接产生灰阶光刻胶掩膜能够克服套刻工艺的缺陷. 但上述方法都需要光刻胶作为掩膜, 微透镜的形状和焦距受到光刻胶特性(熔融态光刻胶的表面张力、厚度等)的限制, 从而难以精确地控制微透镜的形状和焦距等参量.

最近, 原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)局部氧化技术和干法或湿法各向异性刻蚀相结合已经发展成为很好的微米/纳米加工工具. 利用原子力显微镜可以在 Si<sup>[9-10]</sup>、Ge<sup>[11]</sup>、GaAs<sup>[12-13]</sup> 材料表面直接加工各种凸出的图形结构, 从而可以实现加工

折射、衍射和混合微透镜图形. 当针尖在样品表面扫描时, 通过编程改变 AFM 针尖(阴极)和样品(阳极)之间的氧化电压, 这样产生表面灰阶(氧化物高度具有无限的灰阶级数)氧化物结构用于下一步的结构转化. 通过各向异性干法刻蚀工艺, 如反应离子刻蚀(RIE)或电感耦合等离子体刻蚀(ICP)对于 AFM 氧化和未被氧化的表面区域刻蚀速度的较大差异, 能够加工任意设计的微透镜结构. 和光刻、电子束直写以及激光直写技术相比, AFM 氧化加工是直接书写、无需掩膜的加工技术, 此方法对图形形状的控制能力更好, 最小像元尺寸能达到 10 nm.

本文在研究了各种因素对加工结果的影响的基础上, 利用 AFM 加工了  $3 \times 3$  的红外硅微透镜阵列, 分析了透镜阵列图形结构、高度和表面半径的重复性.

## 1 AFM 阳极氧化加工的机理

在大气状态下, 当 AFM 针尖和半导体红外微透镜材料表面接触时, 针尖和样品表面之间将出现水膜. 水膜的尺寸将依赖于大气的相对湿度. 在针尖和样品之间施加合适的偏置电压, 在针尖/水膜和样品/水膜之间将会出现电化学反应, 如图 1. Si、Ge、

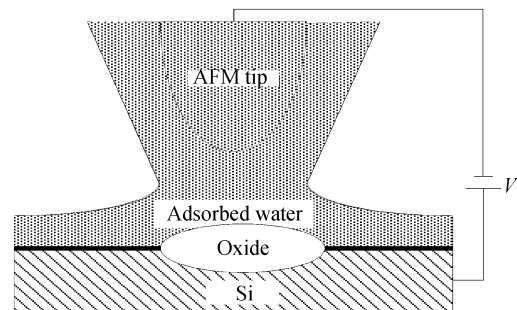


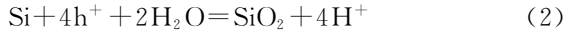
图 1 AFM 氧化加工 Si 微透镜原理  
Fig. 1 Principle illustration of AFM oxidation of Si infrared microlens

\*国家自然科学基金(60278005)和中国博士后科学基金(2005038459)资助  
Tel: 022-23504082 Email: dfkuang@nankai.edu.cn  
收稿日期: 2006-01-05

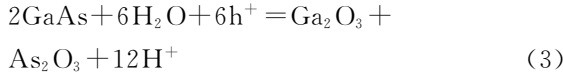
GaAs 等红外透镜材料作为阳极, 针尖作为阴极, 吸附的水膜作为电解液. 在两个界面发生的反应如下<sup>[9]</sup>: AFM 针尖/水界面



Si/水界面



对于 GaAs, 在 GaAs/水界面发生如下的反应<sup>[13]</sup>



AFM 加工的 Si、Ge、GaAs 氧化点的形状和尺寸大小与 AFM 导电探针尖端的曲率半径、环境湿度  $RH$ 、偏置电压  $V_{\text{bias}}$ 、以及氧化加工的时间  $t$  (针尖在样品表面停留的时间) 等因素有关<sup>[9-13]</sup>. 氧化物的高度  $h_{\text{ox}}$  主要由偏置电压和氧化时间决定; 氧化物的表面直径  $2r_{\text{ox}}$  主要由针尖曲率半径、氧化时间  $t$  和环境的相对湿度  $RH$  决定.

根据 Cabrera-Mott 阳极氧化生长模型<sup>[14]</sup>, 氧化物生长的速度和氧化过程中离子的输运速度成正比, 而离子的输运速度由传输电流决定. 在 AFM 阳极氧化加工中, 传输电流和偏置电压  $V_{\text{bias}}$  成正比. 因此, 氧化物生长速度和偏置电压  $V_{\text{bias}}$  成正比. Snow 等人<sup>[11]</sup> 在上述结论基础上对 Avouris 等人<sup>[9]</sup> 的模型进行了稍微修改, 得到

$$h_{\text{ox}}(t, V_{\text{bias}}) = V_{\text{bias}}/E_0 \log[RE_0 t/V_{\text{bias}} + 1] \quad (4)$$

式中  $R$  和  $E_0$  为拟合参量, 可以通过实验得到. 本模型基本上体现出氧化线高度  $h_{\text{ox}}$  随偏置电压  $V_{\text{bias}}$  线性增加, 随氧化时间  $t$  对数变化的规律. 因此, 可以通过改变偏置电压  $V_{\text{bias}}$  和氧化时间  $t$  控制 Si 微透镜氧化物高度的灰阶变化.

## 2 实验

为研究氧化时间  $t$  和相对湿度  $RH$  对加工的微透镜氧化物的表面宽度  $2r_{\text{ox}}$  的影响, 首先在偏置电压为 7 V, 氧化时间分别为  $t=1\text{ s}$ 、 $0.5\text{ s}$ 、 $0.1\text{ s}$ 、 $0.05\text{ s}$  和  $0.01\text{ s}$  的条件下, 不断增大相对湿度, 利用美国 DI(VEECO)公司的 Nanoscope IIIa 型多功能 SPM 在 Si 材料上加工了微透镜阵列, 加工过程均采用接触式 AFM. AFM 氧化加工采用的针尖是 NT-MDT<sub>TM</sub>公司的 CSCS12/W<sub>2</sub>C 型导电 AFM 探针, 针尖的曲率半径小于 30 nm, 针尖高  $15 \pm 3\ \mu\text{m}$ , 针尖锥角小于  $20^\circ$ , 针尖和悬臂梁面覆盖了 W<sub>2</sub>C(W<sub>2</sub>C 薄膜的特征电阻约为  $30\ \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ), W<sub>2</sub>C 薄膜的厚度为 25 nm, 悬臂梁的反射面也覆盖了 W<sub>2</sub>C. 实验的样品是 n 型 Si(100), 其电阻率为  $0.4 \sim 0.6\ \Omega \cdot \text{cm}$ .

在分析了上述氧化时间  $t$  和相对湿度对加工结果影响的基础上, 在偏置电压为 7 V, 氧化时间  $t=1\text{ s}$

的条件下, 利用 AFM 在 Si 材料上加工了  $3 \times 3$  的微凸透镜阵列.

## 3 结果和讨论

首先在偏置电压为 7 V, 氧化时间分别为  $t=1\text{ s}$ 、 $0.5\text{ s}$ 、 $0.1\text{ s}$ 、 $0.05\text{ s}$  和  $0.01\text{ s}$  的条件下, 不断增大相对湿度, 加工了多组 Si 氧化点, 从而分析了氧化物的表面直径  $2r_{\text{ox}}$  与时间  $t$  和相对湿度  $RH$  之间的关系, 结果如图 2. 实验过程中, 环境温度保持为  $24.8^\circ\text{C}$ , 氧气浓度为 18.3%. 从图 2 可以得到: 在其它条件基本相同的条件下, Si 氧化点的直径随相对湿度的提高不断增大. 这是由于相对湿度越大, 针尖和样品之间的水桥的横向尺寸越大, 氧化加工时, 氧化离子在 Si 样品表面所能达到的横向范围越大, 最终得到的 Si 氧化点的横向尺寸越大. 这样, 可以通过改变环境相对湿度控制加工的 Si 微透镜的表面半径.

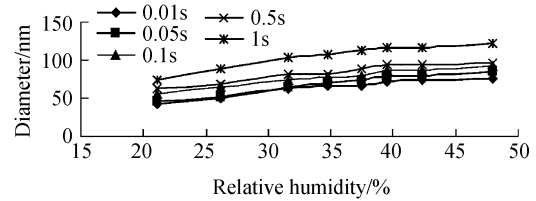


图 2 Si 微透镜表面直径和相对湿度的关系

Fig. 2 Relationship between surface diameter of Si microlens and relative humidity

在上述基础上, 在偏置电压为 7 V, 氧化时间  $t=1\text{ s}$  的条件下, 利用 AFM 在 Si 材料上加工的  $3 \times 3$  的微凸透镜阵列如图 3. 实验过程中, 环境温度保持为  $25.2^\circ\text{C}$ , 氧气浓度为 18.2%. AFM 测量的 9 个微透镜的高度分别为 4.35 nm、4.23 nm、4.12 nm、4.55 nm、4.98 nm、4.02 nm、4.64 nm、4.39 nm 和 4.36 nm, 它们的表面直径分别为 132.8 nm、140.6 nm、128.9 nm、144.5 nm、133.2 nm、136.7 nm、125.2 nm、132.8 nm 和 129.2 nm. 这样, Si 微透镜阵列的平均高度  $h_{\text{ox}}$  为 4.40 nm, 标准偏差为 0.2 nm; 其表面平均直径  $2r_{\text{ox}}$  为 133.8 nm, 标准偏差为 6.0 nm. 因此, 微透镜阵列的高度和直径具有很高的重复性, 从图 3 可以看出 9 个透镜的图形结构差别也很小, 也具有很高的重复性. 这说明利用 AFM 加工此类红外微透镜阵列具有很高的稳定性和重复性. 另一方面, 可以通过改变氧化加工的针尖曲率半径、氧化时间  $t$ 、偏置电压  $V_{\text{bias}}$  和环境的相对湿度  $RH$  等加工参量实现控制 AFM 氧化加工的透镜的表面直径和高度, 来满足实际应用中理想微透镜的表面直径和高度的要求.

微透镜的理想的面型结构为半球形, 可以用式

(5) 计算平凸微透镜的焦距

$$f=R/(n-1) \quad (5)$$

式中  $f$  是焦距,  $R$  和  $n$  分别是微透镜的曲率半径和折射率. 微透镜的曲率半径  $R$  可以从测量的 Si 表面凸出的氧化物的表面半径  $r$  和高度  $h$  利用式(6)推算得到

$$R=(r_{\text{ox}}^2+h_{\text{ox}}^2)/2h_{\text{ox}} \quad (6)$$

凸出的氧化物的平均高度  $h_{\text{ox}}$  为 4.40 nm, 表面半径  $r_{\text{ox}}$  为 66.9 nm. 这样得到微透镜的曲率半径  $R$  为 510.8 nm.

从图 3(a)的结果可以看出,加工的微透镜在样

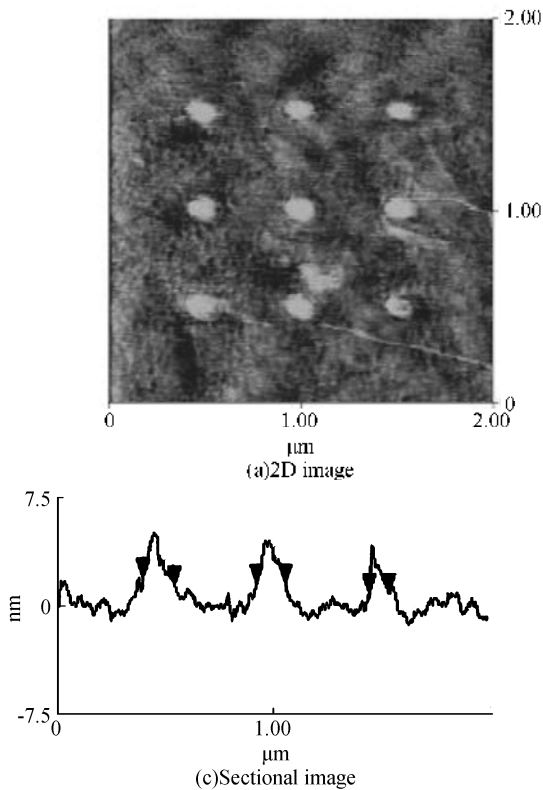


图 3 AFM 加工的  $3 \times 3$  Si 微透镜阵列图

Fig. 3 Images of  $3 \times 3$  Si microlens array

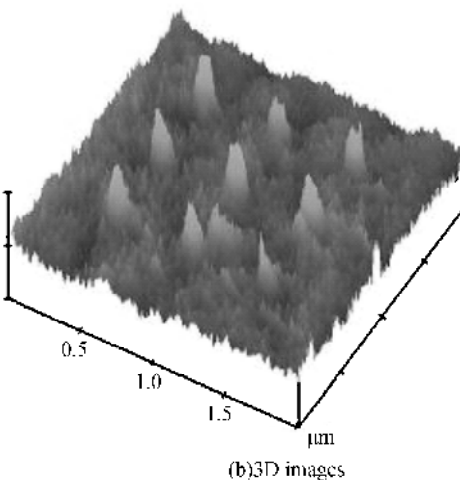
品表面轮廓形状基本为圆形. 而图 3(b)和图 3(c)表现出的微透镜的面型结构和理想透镜的球面结构有一定的差异,并且轮廓边缘出现毛刺. 这是由于在 AFM 氧化加工微透镜的过程中,AFM 导电探针的针尖形状决定了样品和针尖的水桥的形状,从而决定了加工过程中样品和针尖之间电场的分布和氧化离子的运动分布,因而影响最终加工的微透镜的面型结构. 这样,为得到接近理想球面的微透镜结构,在加工中可以采用针尖轮廓为球面的探针,并增大氧化时间使水桥覆盖的样品表面位置都能得到充分氧化.

此加工方法简单,易于控制,可以通过改变针尖和样品之间脉冲电压的波形来实现加工任意阶数的透镜阵列结构<sup>[15]</sup>,使其面型结构接近理想的球面. 同时此方法加工准确度高,突破了传统微透镜加工的技术瓶颈. 连续灰阶结构可以减小衍射发光度损失,因此对于光学器件应用非常重要.

## 4 结论

此方法加工的凸透镜阵列也可以作为掩膜,通过电感耦合反应等离子刻蚀技术(ICP)进一步转移到红外衬底材料上形成凹透镜阵列, Si(100)衬底利用  $\text{SF}_6/\text{O}_2$  等离子体进行刻蚀.

本文提出了利用 AFM 阳极氧化方法加工基于半导体晶体材料的红外微透镜阵列,在分析了偏置



电压  $V_{\text{bias}}$ 、以及氧化加工的时间  $t$  和环境湿度  $RH$  等因素对 AFM 氧化加工半导体红外材料的影响的基础上,利用 AFM 加工了  $3 \times 3$  的 Si 微凸透镜阵列,透镜的特征尺寸在亚微米量级,可以进一步缩小红外成像系统的尺寸. 此方法通过控制 AFM 导电针尖和样品之间电压的大小和波形以及各种环境因素能够加工连续灰阶结构的折射、衍射和混合红外微透镜阵列.

本文为研究亚微米级甚至纳米级的红外微透镜阵列提供了可行的加工和实现方法,为结合激光直写技术、AFM 氧化加工技术和电感耦合反应等离子刻蚀技术加工大幅面的红外微透镜阵列奠定了基础.

## 参考文献

- [1] KONG L B, YI X J, LIAN K, *et al.* Design and optical performance research of multi-phase diffractive microlens arrays[J]. *J Micromech Microeng*, 2004, **14**(8):1135-1139.
- [2] JU Hui, ZHANG Ping, WANG Shu-rong, *et al.* The design of blazed silicon grating by deflecting crystal orientation (111) silicon wafer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6):755-757. 鞠挥, 张平, 王淑荣, 等. 偏晶向(111)硅片闪耀光栅的制作[J]. *光子学报*, 2004, **33**(6):755-757.
- [3] CHEN Lei, GAO Zhi-shan, HE Yong. Focal length measurement of infrared lenses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8):986-988. 陈磊, 高志山, 何勇. 红外光学透镜焦距测量[J]. *光子学报*,

- 2004, **33**(8):986-988.
- [4] YANG Xin-jun, WANG Zhao-qi, SUN Qiang, *et al.* Design of off-axial optical system for binary optic infrared imaging spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4):573-576. 杨新军, 王肇圻, 孙强, 等. 基于二元光学的红外成像光谱仪离轴系统设计[J]. *光子学报*, 2005, **34**(4):573-576.
- [5] KARLSSON M, NIKOLAJEFF F, VUKUSIC J, *et al.* Monolithic integration of continuous-relief diffractive structures with vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE of Photonics Technology*, 2003, **15**(3):359-361.
- [6] SULESK T J, O'SHEA D C. Gray-scale masks for diffractive-optics fabrication: I. Commercial slide imagers [J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(32):7507-7517.
- [7] LI Feng-you, XIE Yong-jun, SUN Qiang, *et al.* Analyzing of line profile for laser direct writing lithography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2):136-139. 李凤有, 谢永军, 孙强, 等. 激光直写光刻中线条轮廓的分析[J]. *光子学报*, 2004, **33**(2):136-139.
- [8] LI Feng-you, XIE Yong-jun, LU Zhen-wu, *et al.* Experimental study on fixing the origin of polar coordinate laser writing systems[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10):1163-1165. 李凤有, 谢永军, 卢振武, 等. 极坐标激光直写系统原点定位的实验研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(10):1163-1165.
- [9] AVOURIS PH, HERTEL T, MARTEL R. Atomic force microscope tip-induced local oxidation of silicon: kinetics, mechanism, and nanofabrication[J]. *Appl Phys Lett*, 1997, **71**(2):285-287.
- [10] SNOW E S, JERNIGAH G G, CAMPBELL P M. The kinetics and mechanism of scanned probe oxidation of Si[J]. *Appl Phys Lett*, 2000, **76**(13):1782-1784.
- [11] LU Y F, MAI Z H, QIU G, *et al.* Laser-induced nano-oxidation on hydrogen-passivated Ge (100) surfaces under a scanning tunneling microscope tip[J]. *Appl Phys Lett*, 1999, **75**(16):2359-2361.
- [12] YOSHITAKA O, SHINJI A, MITSUO K, *et al.* Basic mechanisms of an atomic force microscope tip-induced nano-oxidation process of GaAs[J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, **83**(12):7998-8001.
- [13] YOSHITAKA O, YOSHIMASA I, MITSUO K, *et al.* Basic properties of GaAs oxide generated by scanning probe microscope tip-induced nano-oxidation process[J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, **88**(2):1136-1140.
- [14] CABRERA N, MOTT N F. Theory of the oxidation of the metals[J]. *Rep Prog Phys*, 1948, **12**(1):163-184.
- [15] CHEN C F, TZENG S D, CHEN H Y, *et al.* Silicon microlens structures fabricated by scanning-probe gray-scale oxidation [J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(6):652-654.

## Fabrication of Infrared Microlens Array Using Atomic Force Microscope

KUANG Deng-feng, FANG Zhi-liang, YANG Yong

(Key Lab of Opto-electric Information Science and Technology, Institute of Modern Optics, EMC, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Received date: 2006-01-05

**Abstract:** Infrared microlens array on the substrate of Si, Ge, and GaAs fabricated with atomic force microscope gray scale anodic oxidation was presented. A  $3 \times 3$  infrared silicon micro-lens array was fabricated using this method. The repeatability errors of the height and surface diameter of the nine microlens respectively were 0.2 nm and 6.0 nm. The average curvature radius of the microlens was 510.8 nm. The causes of surface figure errors of infrared microlens fabricated with atomic force microscope anodic oxidation were studied and the methods of reducing surface figure errors were put forward. Refractive, diffractive and hybrid infrared microlens arrays fabricated with this approach can be developed to further reduce the size of infrared imaging system.

**Key words:** Microlens array; Infrared focal plane array; Atomic force microscope anodic oxidation; Gray scale



**KUANG Deng-feng** was born on Nov. 10, 1979. He received his B. S., M. S., and Doctoral degrees from Tianjin University in 2000, 2003 and 2005 respectively. Now he is a Post Doctor in Institute of Modern Optics, Nankai University. He is working in the fields of micro optics and optical information processing.