

文章编号: 0258-7025(2003)01-0022-03

## 亚稳态氖原子光刻的实验研究

霍芸生, 蔡惟泉, 曾庆林, 鄢和明, 王育竹

(中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学开放实验室, 上海 201800)

**摘要** 用亚稳态氖原子束进行了原子光刻实验。用栅网作掩膜,以扩散泵油的有机分子在亚稳态氖原子作用下所生成的碳膜作抗蚀剂,在硅片上刻蚀出分辨率为  $2\ \mu\text{m}$  的微结构,为进一步的纳米级原子光刻技术的研究打下了基础。

**关键词** 激光物理;原子光刻;亚稳态氖原子束;惰性气体

**中图分类号** TN 305.7 **文献标识码** A

### Experimental Study on Metastable-neon Atom Lithography

HUO Yun-sheng, CAI Wei-quan, ZENG Qing-lin,

YAN He-ming, WANG Yu-zhu

(Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,

The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** The atomic-lithography experiments were carried out by use of a metastable neon atomic beam. Metallic meshes were used as masks, and the carbon films produced from the organic molecules of diffusion-pump oil, which were adsorbed on the surface of wafers and exposed to the high energy metastable neon atomic beams. The microstructures on the silicon wafers with the resolution of microns were obtained.

**Key words** laser physics; atomic lithography; metastable neon atomic beam; inert gas

## 1 引言

由于受到衍射极限的限制,采用汞灯及准分子激光器等紫外光源的光刻技术所能达到的分辨率仅约在  $200\ \text{nm}$  左右。而热原子束中的原子质波波长在  $0.01\ \text{nm}$  量级,将原子束用于光刻,其分辨率可达  $10\ \text{nm}$  量级,因而原子光刻对于纳米技术的发展有着重要意义。

根据所使用原子束种类的不同,原子光刻可分为两类。其一,采用金属原子束的光刻,由高温铬、钠、铝等原子炉产生原子束。在正失谐激光驻波场偶极力的作用下,原子向该驻波光场的波节聚焦,并直接沉积在硅片等基板上,形成周期为所用激光波长的一半,分辨率约  $20\ \text{nm}$  的周期性金属线条或点阵<sup>[1,2]</sup>。其二,采用惰性气体亚稳态原子束的原子

光刻,利用亚稳态原子所具有的高内能。亚稳态氖原子的内能为  $16.6\ \text{eV}$ ,当此种原子打到硅片等基板材料上时,它们可释放出内能而使附着在基板上的扩散泵油蒸气的有机分子分解,并在基板上形成一层牢固的碳膜。此碳膜的厚度可达  $\sim 40\ \text{nm}$ 。它起着与常规光刻中所用的光刻胶相类似的作用,可以保护它所覆盖的那部分硅片在其后的化学刻蚀过程中不受腐蚀。若亚稳原子在打到基板以前先穿过掩膜,或由激光驻波场所形成的对于亚稳原子的“虚光栅”,就能以与常规光刻相类似的方法,在 Si,  $\text{SiO}_2$ , GaAs 等多种半导体材料的基板上形成微结构<sup>[3~5]</sup>。采用惰性气体亚稳原子的原子光刻技术,目前国外已在 Si 等半导体材料上得到分辨率为  $20\ \text{nm}$  的微结构<sup>[6]</sup>。国内已在原子光刻的理论分析和计算机模拟等方面做了不少研究工作。我们使用惰

收稿日期:2001-10-29;收到修改稿日期:2001-12-11

基金项目:国家自然科学基金(No. 19774060)资助项目。

作者简介:霍芸生(1943 ),男,1966年毕业于中国科技大学,主要从事激光物理与技术以及原子光学等方面的研究工作。

性气体亚稳态原子束进行了原子光刻的实验研究工作。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示, 氖气由口径为 0.16 mm 的玻璃喷嘴中喷出, 并在源室中形成超音速气流, 气流速度约为 1000 m/s。在钨针阴极与兼作阳极的锥形铬制漏勺(skimmer)之间的放电, 将气流中的部分氖原子激励到亚稳能级  $3s[3/2]j_{-2}$  以及  $3s'[3/2]j_{-0}$ 。亚稳态氖原子束穿过漏勺顶端直径 0.5 mm 的小孔后, 进入试验室。由置于试验室中的法拉第杯所测得的亚稳态氖原子束的强度为  $3.3 \times 10^{14}$  atom/s · sr。在法拉第杯前方, 靠近漏勺出口处的铜制偏转板上所加的电压约为 600 V, 其电场已足以使原子束中由放电所产生的电子、离子等带电粒子偏离原子束, 而不致于打到法拉第杯或样品上。对于亚稳态原子束强度的测量结果, 已在文献[7]中作了较详细的介绍。

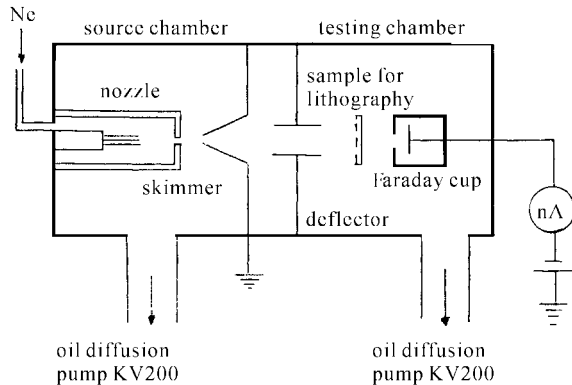


图 1 实验装置简图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

当进行原子光刻实验时, 作为样品基板的硅片与玻璃喷口之间的距离约为 32 cm, 因此在硅片表面, 亚稳态氖原子的通量约为  $3.2 \times 10^{11}$  atom/s · cm<sup>2</sup>。由于目前我们尚不具备适用于原子光刻的具有纳米量级微结构的掩膜, 作为第一步, 首先进行了微米级接触式原子光刻的实验研究。实验中分别使用了 80~2000 目/cm 的透射式电子显微镜(TEM)的载网, 以及 18 目/cm, 158 目/cm 和 276 目/cm 的不锈钢网作为掩膜, 掩膜紧贴着硅片。穿过掩膜孔的亚稳态氖原子打到硅片的表面, 并释放出其内能而回到原子的基态。此内能足以使吸附于硅片表面的扩散泵油蒸气的碳氢化合物分子解离, 其中可挥

发的解离产物为真空泵所抽走, 一部分剩下的碳原子沉积在硅片的表面而形成碳膜, 这样就把掩膜上的微结构转移到硅片上。扩散泵油的分子种类对于碳膜的沉积速率有较大影响<sup>[8]</sup>, 我们选用了上海树脂厂出品的 275 号超高真空扩散泵硅油。它与国外原子光刻实验中常用的 DC-705 扩散泵油大体相当。

## 3 实验结果

在实验中将基板与掩膜固定在一个可二维调节的支架上, 基板调节至氖原子束的中心区域。基板在原子束中的曝光时间通常在 10 h 左右。在其后的刻蚀过程中, 将镀上了碳膜的硅片先放在 1% 浓度的 HF 水溶液中浸泡 10~15 s, 以除去硅片表面在空气中所形成的氧化层, 然后在 40% 的 KOH 水溶液中腐蚀约 10~30 s。KOH 溶液的温度为 70℃, 温度控制的精度约为 0.1℃。用放大 100 倍的光学显微镜可清晰地看到经化学刻蚀后的硅片上的微结构。

用显微照相技术对所得到的原子光刻样品进行了照相。拍摄时, 调节光学显微镜的物距, 以使样品经显微镜的物镜和目镜放大 50~100 倍后, 清晰地成像于卸去了镜头的照相机的胶卷平面上。在两只 8 W 节能灯对样品近距离照明的情况下, 曝光时间通常控制在 1/8 s 左右。

在图 2(a) 所示的实验结果中使用了美国 Buckbee-Meas 公司的 18 目/cm 栅网作掩膜。图中的暗区对应于碳膜覆盖的区域。而白色的条纹则为硅片上未被碳膜保护的区域经化学刻蚀所形成的沟状线条。图 2(b) 所示是用透射式电子显微镜的 197 目/cm 的载网作掩膜在硅片上进行原子光刻的结果。在图 2(c) 中, 使用了 276 目/cm 的不锈钢网作掩膜, 这是我们目前所能得到的具有最小线度的掩膜。由于此种斜纹编织的不锈钢网的网孔的占空比较小, 图 2(c) 中楔形碳膜尖端的宽度与其周期之比为 1:16, 约 2.3 μm。

## 4 结 论

在惰性气体亚稳态原子束光刻实验中, 用各种栅网作掩膜, 以碳膜作抗蚀剂, 得到了分辨率约为 2 μm 的微结构。进一步的实验工作, 将需要以纳米掩膜进行, 以刻蚀出分辨率为 10 nm 量级的纳米结构。同时将可以从理论与实验两方面对于限制原子

光刻分辨率的因素、以及如何进一步提高其分辨率 进行深入的研究。

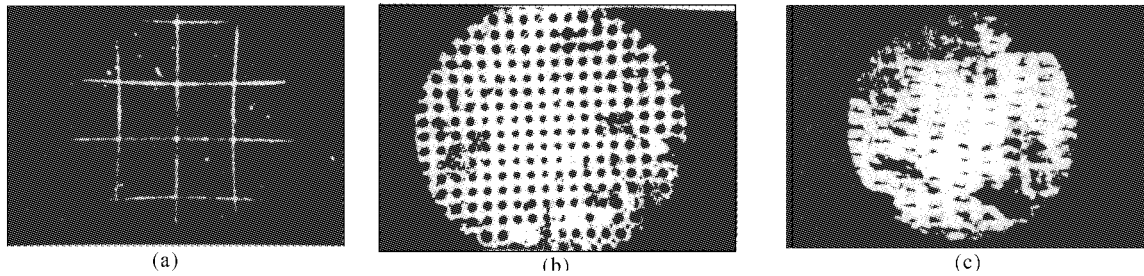


图 2 亚稳态氖原子光刻技术在硅片上所刻蚀的微结构显微照片

实验中所用的掩膜分别为(a) 18 目/cm 的镍网;(b) 197 目/cm 的 TEM 载网;(c) 276 目/cm 的不锈钢网

Fig. 2 Microscopic images of the microstructures in Si, fabricated by use of the metastable neon atom lithography technology

The masks used in the experiments were as follows: (a) nickel mesh with 18 wires/cm;

(b) TEM grid with 197 wires/cm; (c) stainless steel mesh of 276 wires/cm

### 参 考 文 献

- 1 J. J. McClelland, R. E. Scholten, E. C. Palm *et al.*. Laser-focused atomic deposition [J]. *Science*, 1993, **262** (5135):877~880
- 2 U. Drodofsky, J. Stuhler, B. Brezger *et al.*. Nanometerscale lithography with chromium atoms using light forces [J]. *Microelectr. Engineer.*, 1997, **35**(2): 285~288
- 3 K. S. Johnson, K. K. Berggren, A. Black *et al.*. Using neutral metastable argon atoms and contamination lithography to form nanostructures in silicon, silicon dioxide, and gold [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69** (18):2773~2775
- 4 S. J. Rehse, A. D. Glueck, S. A. Lee. Nanolithography with metastable neon atoms: Enhanced rate of contamination resist formation for nanostructure fabrication [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(10):1427~1429
- 5 K. S. Johnson, J. H. Thywissen, N. H. Dekker *et al.*. Localization of metastable atom beams with optical standing waves; nanolithography at the Heisenberg limit [J]. *Science*, 1998, **280**(5369):1583~1586
- 6 J. H. Thywissen, K. S. Johnson, N. H. Dekker *et al.*. Metastable-atom-activated growth of an ultrathin carbonaceous resist for reactive ion etching of SiO<sub>2</sub> and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> [J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1998, **16B**(3):1155~1161
- 7 Huo Yunsheng, Cai Weiquan, Zeng Qinglin *et al.*. Study on metastable neon beam source used for atom lithography [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2002, **A29**(1):40~42 (in Chinese)
- 8 W. W. Molzen, A. N. Broers, J. J. Cuomo *et al.*. Materials and techniques used in nanostructure fabrication [J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1979, **16**(2): 269~272