

32 nm 节点极紫外光刻掩模的集成研制

杜宇禅¹ 李海亮¹ 史丽娜¹ 李 春² 谢常青¹

(¹ 中国科学院微电子研究所纳米加工与新器件集成研究室, 北京 100029)
² 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 报道了国内首块用于极紫外投影光刻系统的 6 inch(1 inch=2.54 cm)标准极紫外光刻掩模。论述了 32 nm 节点 6 inch 标准极紫外光刻掩模的设计方案,及掩模衬底、反射层、吸收层材料的工艺特性研究,对缺陷控制及提高掩模效率的方法进行了分析。运用时域有限差分法对掩模的光学特性进行了仿真,根据仿真结果确定合适的 Cr 吸收层厚度。运用电子束光刻技术进行了掩模的图形生成,针对其中的电子束光刻临近效应进行了蒙特卡罗理论分析,用高密度等离子体刻蚀进行了图形转移,所制造的掩模图形特征尺寸小于 100 nm,特征尺寸控制精度优于 20 nm,满足技术设计要求。

关键词 X 射线光学;极紫外投影光刻;掩模;电子束光刻;32 nm 节点;时域有限差分法

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.1034002

Integrated Development of Extreme Ultraviolet Lithography Mask at 32 nm Node

Du Yuchan¹ Li Hailiang¹ Shi Lina¹ Li Chun² Xie Changqing¹

¹ Key Laboratory of Nano-Fabrication and Novel Devices Integrated Technology,
Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

² Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China

Abstract The first domestic 6 inch (1 inch=2.54 cm) extreme ultraviolet lithography (EUVL) mask for EUVL system is reported. The design of the 6 inch EUVL mask at 32 nm node is described, process characteristics of substrate materials, buffer and absorber layers are investigated in detail, and mask with low defective rate and high efficiency is designed. Suitable Cr absorber layer thickness is decided according to the optical property simulation by finite-difference time-domain (FDTD) method. Electron beam proximity effect is analyzed by using Monte Carlo simulation method. Electron beam lithography is used to generate patterns, and high density plasma etching is used to translate patterns to the Cr absorber layer and SiO₂ buffer layer. EUVL mask with critical dimension below 100 nm and critical dimension accuracy less than 20 nm is obtained, which meets the requirements of technical design specifications.

Key words X-ray optics; extreme ultraviolet lithography; mask; electron beam lithography; 32 nm node; finite-difference time-domain method

OCIS codes 220.3740; 220.4241; 340.7480

1 引 言

在纳米加工技术的发展中,光刻一直是核心推动力,决定着集成电路元件的特征尺寸。在技术上,

光刻技术的发展经历了等倍光刻到微缩投影光刻,使用的波长也在逐渐趋短。根据瑞利公式,光刻分辨率 R 可以表述为 $R = k_1\lambda/NA$,其中, λ 是所使用

收稿日期: 2013-04-16; 收到修改稿日期: 2013-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(61107032,61275170)

作者简介: 杜宇禅(1984—),女,博士研究生,主要从事极紫外光刻掩模技术方面的研究。E-mail: dyc0927@163.com

导师简介: 谢常青(1971—),男,研究员,博士生导师,主要从事 X 射线/极紫外衍射光学元件方面的研究。

E-mail: xiechangqing@ime.ac.cn

曝光光源的波长, NA 是光学透镜系统的数值孔径, k_1 是工艺因子, 其理论极限为 0.25。要进一步提高光刻分辨率, 满足 32 nm 及以下技术节点的加工要求, 需要采用更短波长的光源进行曝光, 推动了下一代光刻技术的迅速发展。其中, 极紫外投影光刻 (EUVL) 由于其具有高分辨率和高生产效率, 受到了广泛的关注^[1-5], 被公认为将会在 16 nm 节点应用于半导体工艺生产^[6-8]。

极紫外投影光刻是指采用 11~14 nm 工作波长的光刻技术, 最早被称作“软 X 射线投影光刻技术”。作为传统光学光刻的延伸, 极紫外光刻的掩模制造是极紫外光刻系统中一项关键技术。极紫外光刻采用微缩投影系统, 在极紫外波段任何材料的折射率均接近于 1, 而且存在着强烈的吸收, 必须采用反射光学系统, 并采用非轴向入射的方式。因此, 极紫外光刻的掩模制造与传统的透射式光学掩模相比, 有着特殊的技术和工艺要求, 面临着更大的挑战^[9-10]。此外, 掩模衬底及反射结构、掩模图形的均匀性及误差控制也都有着极其严格的要求。“零”缺陷的空白衬底加工, 高精度的图形生成技术, 都在挑战着微纳米加工技术的极限。

极紫外光刻掩模研究工作在早期以探索性的基础研究为主, 从 1996 年开始, 进入了大发展的阶段。在美国, 着重于极紫外光刻设备和工艺研发的 EUV LLC (EUV Limited Liability Company) 成立了包括 AMD、Infineon、Intel、IBM、Micron、Motorola、Lawrence Berkeley National Laboratory 和 Lawrence Livermore National Laboratory 等成员单位的攻关掩模技术的掩模组。在日本, 与 EUV LLC 类似的机构 ASET 也包括了主要生产掩模的 Hoya 公司。在欧洲开展极紫外光刻的研发工作的 MEDEA+ 则主要由 Schott 公司进行掩模研究和生产。

与极紫外光刻掩模相关的各项工艺水平也在不断进步。衬底材料的热膨胀系数、表面粗糙度及缺陷控制都已能够满足掩模制造的要求; 多层膜的制备技术取得了极大的进步, 峰值反射率最高已经达到 68%, 空白掩模的缺陷 (大于 50 nm) 可以控制在 0.04 cm^{-2} ^[11], 这也是掩模技术所面临的最大挑战。为了全面评价已有的掩模制备技术, Intel、IBM、Motorola 等公司和研究团体都完成了一些测试用掩模, 并进行了光刻实验。

我国的极紫外光学技术研究始于 20 世纪 70 年代末期, 研究领域包括极紫外光源、极紫外辐射计量术、超精密光学加工、检测技术和极紫外多层膜技术

等。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在 2003 年完成了线宽 150 nm 的条纹曝光实验, 实现了极紫外光刻的原理性贯通, 为进一步开展极紫外光刻技术研究打下了良好的基础。同济大学精密光学工程技术研究所在极紫外光学及多层反射膜方面也取得了重要进展。在 EUVL 掩模制造方面, 尽管国外已经有许多报道, 处于即将成熟阶段, 但是国内还没有见到相关报道, 尚需要进一步进行整体性和系统性的研究。

本文介绍了国内首块标准 6 inch (1 inch = 2.54 cm) 极紫外光刻掩模的集成研制过程, 共包括以下几项工作: 完成了国内首块标准 6 inch 极紫外光刻掩模的设计; 进行了标准空白衬底的制备; 分析了影响掩模图形加工的因素, 完成了加工和转移; 集成研制了完整的极紫外光刻标准掩模。

2 极紫外光刻掩模的设计

极紫外光刻掩模工作于 13.5 nm 波段的光学系统。由于几乎所有的材料对极紫外波段的辐射都有着强烈的吸收, 区别于传统光学光刻的透射式掩模, 极紫外光刻采用的是反射式掩模^[12-13]。图 1 给出了一个经典的极紫外光刻掩模的结构示意图, 通常包括一个低热膨胀系数 (LTEM) 的衬底及背面的防静电导电层、Mo/Si 多层膜反射结构、缓冲层及吸收层。在刻蚀吸收层的过程中, 缓冲层可以对下面的 Mo/Si 多层膜起到保护作用。

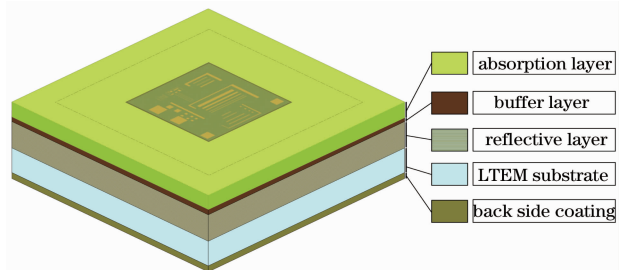


图 1 典型的极紫外光刻掩模结构图

Fig. 1 Typical EUVL mask structure

多层膜反射层又称反射镜, 是由介电常数差别较大的两种材料交替沉积形成的^[14-17]。通过递归方法进行计算, 可以选择合适的厚度, 使得反射膜具有最大的反射效率。对于应用在 13.5 nm 波段的极紫外光刻掩模, Mo/Si 多层膜具有比较理想的反射率。Mo/Si 多层膜由 40 层周期性排列的堆叠结构组成, Mo 和 Si 的厚度分别为 2.8 nm 和 4.0 nm。在多层膜的研制过程中, 精确控制每一层的厚度对于整个多层膜的性能来说至关重要。针对理想厚度

的偏差可以造成反射效率的大幅下降^[18-19]。

由于极紫外光刻掩模采用的是反射式投影,而非透射式投影,因此需要采用离轴入射的光学系统。由此就引入了掩模的阴影效应^[20]。在斜入射情况下,图形的投影位置和特征尺寸都会发生相应的变化,其简化的示意图如图 2 所示。在几何光学中,掩模阴影效应与入射光方向余弦、吸收层厚度成线性关系,由于还存在复杂的电磁相互作用,严格计算需

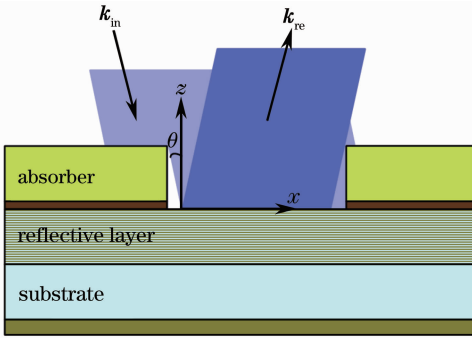


图 2 EUVL 掩模阴影效应简化示意图。 k_{in} 和 k_{re} 分别为入射波矢和反射波矢, θ 为入射角

Fig. 2 Simplified model for EUVL mask shadow effect. k_{in} and k_{re} are the incident and reflective wave vectors, respectively, and θ is the incident angle

要采用时域有限差分(FDTD)法等算法^[21]。要减小阴影效应的影响,一是要通过计算,在掩模设计时加入对图形设计的补偿,二是要尽量减小吸收层的厚度,采用吸收率较大的材料作吸收层。结合加工工艺的实际情况,选用了金属 Cr 作为吸收材料^[22]。

FDTD 算法是一种分析电磁场分布的纯数值方法,其基本原理是对麦克斯韦旋度方程在时域直接求解,并将计算结果转化为差分形式。将空间分为若干个网格,每个网格上的电场(或磁场)分量仅与它相邻的磁场(或电场)分量及上一时间步该点的场值有关。在每一时间步计算网格空间各点的电场和磁场分量,模拟电磁波传播及其与物体间相互作用的过程。通过 FDTD 方法,对极紫外光刻掩模的近场场强进行了仿真计算,其中衬底为 SiO_2 , 反射层为 40 层 Mo/Si 结构,周期为 6.938 nm, Mo/Si 厚度比为 4:6。掩模线宽为 80 nm, Cr 吸收层厚度分别为 50、70、90 nm。

为了更好地实现对多层反射膜结构的模拟,采用了傅里叶边界条件(FBC),利用传输矩阵方法计算多层膜在各个角度的反射系数,并通过 FBC 进行调用。在 x 、 y 方向设定为周期性边界条件, z 方向为吸收边界条件。计算的时间步长为 7.9817×10^{-19} s,空间步长为 0.5 nm,在距吸收层表面 20 nm 处观察极紫外波的场强分布,如图 3(a)所示。

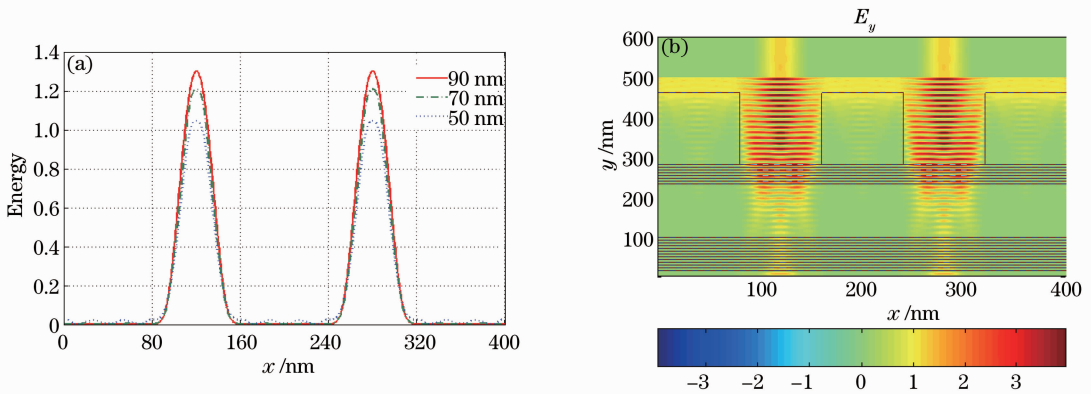


图 3 (a) 极紫外光刻掩模表面场强分布; (b) 70 nm 厚 Cr 吸收层掩模近场光场分布

Fig. 3 (a) Surface intensity distribution of the EUVL mask; (b) near field optical field distributions for Cr absorption layer thickness of 70 nm

从图 3(a)可以看出,在吸收层厚度为 50 nm 的情况下,吸收层区域对极紫外光的吸收效率不足,尚存在一定的反射强度。在吸收层厚度为 70 nm 和 90 nm 的情况下,吸收效果较好。由于掩模阴影效应的存在,在满足极紫外光吸收效率的前提下,选取小的吸收层厚度有利于降低极紫外光刻掩模图形加工转移难度,也有利于减小曝光线条的尺寸偏移。经综合考虑,确定 Cr 吸收层厚度为 70 nm。其近场

光场分布如图 3(b)所示。

针对标准的 6 inch 极紫外光刻掩模,共设计了三个分区,包括手持区、标记区和图形区。其中图形区大小为 $88 \text{ mm} \times 88 \text{ mm}$; 标记区大小为 $142 \text{ mm} \times 142 \text{ mm}$ (包含图形区),包括用于机器识别的条形码区、用于人眼识别的人类可读编码(HRC)区、用于掩模对准的对准标记区;手持区即为整个掩模,大小为 $152 \text{ mm} \times 152 \text{ mm}$,如图 4 所示。

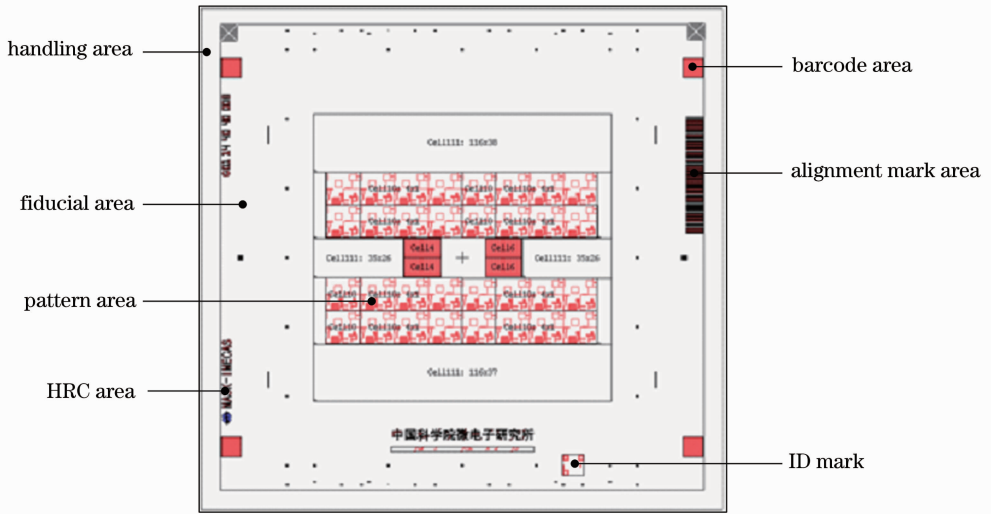


图 4 6 inch 极紫外光刻掩模版图布局
Fig. 4 Layout of a 6 inch EUVL mask

3 极紫外光刻掩模的制作工艺

3.1 总体工艺流程

极紫外光刻掩模的制作由空白掩模的制备和图形生成工艺组成^[3]。空白掩模由低热膨胀系数的石英衬底上沉积 Mo/Si 多层反射膜组成,为了满足掩模对表面平整度的要求,需要对石英衬底进行高精度抛光处理,并采用磁控溅射工艺进行吸收层的沉积。而图形生成工艺则由缓冲层和吸收层沉积、电

子束(E-beam)光刻、吸收层刻蚀及缓冲层刻蚀组成。具体流程如图 5 所示,主要步骤包括:1) 6 inch “零”缺陷的低热膨胀石英衬底制备;2) 40 周期 Mo/Si 多层结构的沉积;3) SiO₂ 缓冲层的沉积;4) Cr 吸收层的沉积;5) 电子束光刻生成掩模图形,包括旋涂电子束抗蚀剂及电子束曝光;6) Cr 层刻蚀工艺及抗蚀剂去除工艺;7) 缓冲层刻蚀。

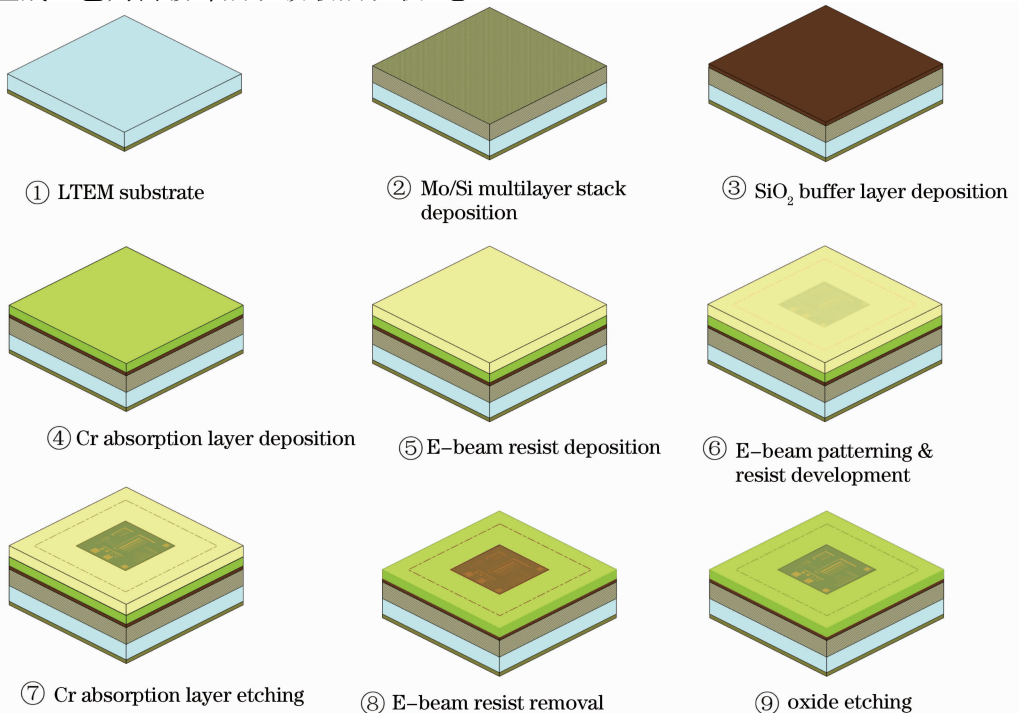


图 5 极紫外光刻掩模工艺流程
Fig. 5 EUVL mask fabrication process

3.2 空白掩模及吸收层的制备

制备空白掩模从准备衬底开始。极紫外光刻的投影光学系统要求最大限度地减小波前误差,保证图形分辨率,需要使用热膨胀系数极低的材料,以尽可能减小曝光中的热效应对光学图形的影响^[23-24]。Zerodur 玻璃微晶是专为低热膨胀性能设计的一种石英材料,其热膨胀系数几乎为零,是极紫外光学系统中理想的衬底材料。除了热膨胀性能,衬底对 Zerodur 玻璃微晶的表面粗糙度及平整度也有要求。经过高精度抛光工艺,其粗糙度可达到 0.9 nm,平坦度可以达到 110 nm。

Mo/Si 反射层采用磁控溅射系统进行沉积。Mo/Si 层共 40 个周期,其周期厚度约为 7 nm,为极紫外光源波长的一半左右。在反射层之上,覆盖了 20 nm 的 SiO₂ 保护层,以保护反射层免受刻蚀工艺的破坏,同时也便于掩模的修复。选用金属 Cr 作为吸收层的材料,Cr 具有较高的极紫外吸收效率和刻蚀选择比,而且与光学掩模制造工艺相容^[25]。采用磁控溅射系统,在缓冲层上溅射了 70 nm 厚的 Cr,通过原子力显微镜(AFM)检测表明,其吸收层的粗糙度可达到 0.1 nm,如图 6 所示。

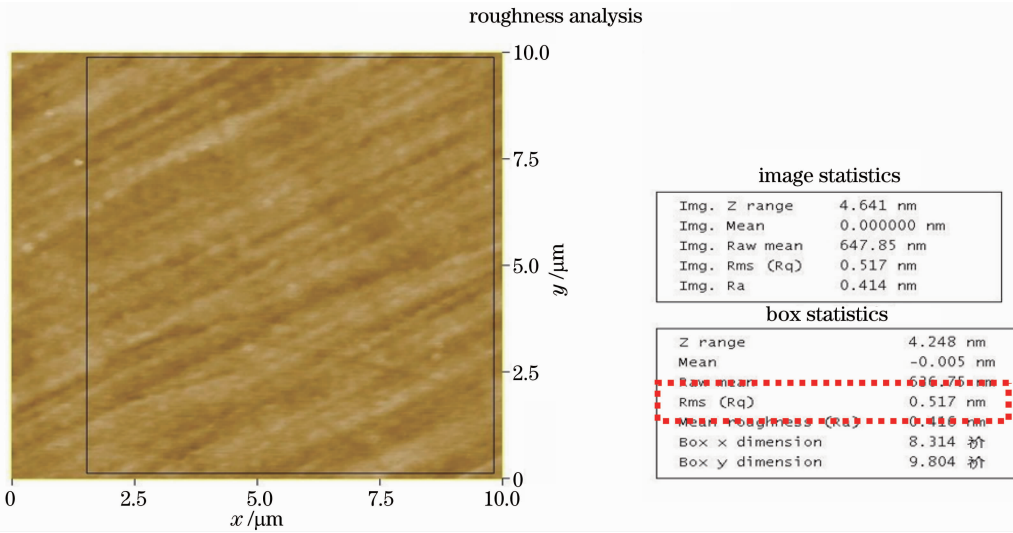


图 6 Cr 金属层表面原子力显微镜照片
Fig. 6 AFM image of Cr metal layer surface

3.3 图形生成工艺

为了满足 32 nm 节点的微纳加工要求,需要采用电子束光刻对掩模图形进行曝光。首先在溅射好吸收层的晶片上旋涂一层 300 nm 厚的 ZEP-520 电子束抗蚀剂,经过前烘后,采用 JEOL JBX-6300FS 电子束光刻系统进行曝光,加速电压为 100 kV。经过显影,便在抗蚀剂上形成了所需要的掩模图形。经过与多种电子束抗蚀剂比较,ZEP520 有高分辨

率、较高的灵敏度和对比度、良好的抗刻蚀性能,适用于极紫外光刻掩模的图形生成工艺。

在 100 kV 的加速电压下,4 nm 的电子束斑点大小理论上可以曝光产生 10 nm 以下的线条。然而,由于电子在抗蚀剂中存在的前散射效应,以及在电子入射到衬底上后产生的背散射效应,使曝光范围扩散,电子在抗蚀剂层中的沉积能量分布不均匀,从而影响了成像质量并制约了分辨率的提高,使

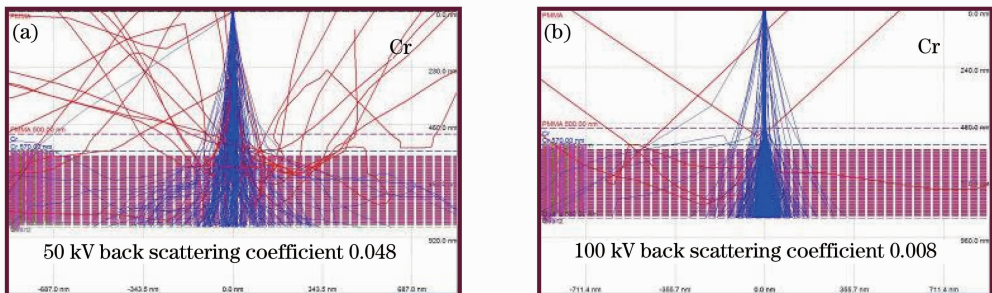


图 7 不同加速电压下电子在抗蚀剂中的轨迹图。(a) 50 kV; (b) 100 kV
Fig. 7 Track view in E-beam resist at different accelerating voltages. (a) 50 kV; (b) 100 kV

实际曝光出的图形尺寸会有一定程度的展宽,称为电子束曝光中的临近效应。对于以 70 nm 厚的 Cr 为衬底进行曝光的情况,采用蒙特卡罗方法对电子在抗蚀剂中的散射轨迹进行了模拟。图 7 显示了不同的加速电压下 20,000 个电子的轨迹分布情况。在 50 kV 的加速电压下,得到其散射系数为 0.048;而在 100 kV 的加速电压下,散射系数降低为 0.008。由此说明,采用较高的加速电压可以大大降

低临近效应。

从抗蚀剂到吸收层的图形转移由电感耦合等离子体 (ICP) 刻蚀工艺完成。Cr 吸收层相对于 ZEP520 抗蚀剂的刻蚀速率比为 6.2,而相对于 SiO₂ 缓冲层的刻蚀速率比则大于 200,且具有陡直的刻蚀截面和刻蚀精度,能够满足极紫外光刻掩模特征尺寸的要求(小于 100 nm)。最后,刻蚀 SiO₂ 缓冲层,完成后的版图照片如图 8 所示。

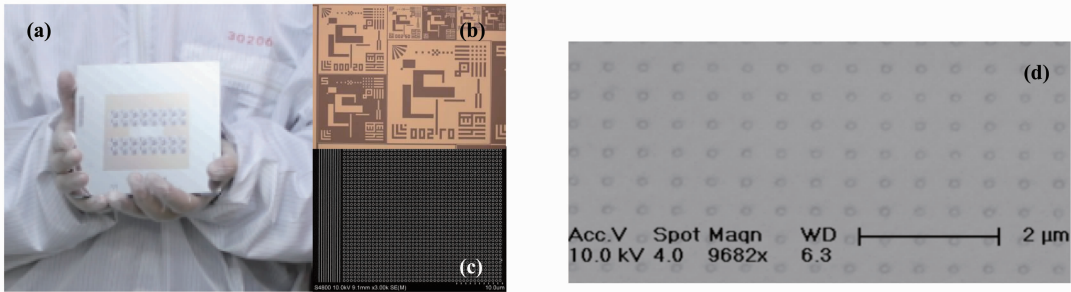


图 8 制备出的极紫外光刻掩模。(a) 掩模实物图照片; (b) 掩模图形显微镜照片; (c), (d) 掩模图形扫描电镜照片

Fig. 8 Fabricated EUVL mask. (a) Photograph of the mask; (b) microscopic picture of the mask patterns; (c), (d) scanning electron microscope pictures of the mask patterns

4 结 论

极紫外光刻掩模是极紫外光刻发展中的关键技术。然而,特征尺寸的减小和零缺陷的要求使掩模的研制成为极紫外光刻中最大的挑战。设计并制造了国内首块标准的 6 inch 极紫外光刻掩模,研发了整套可用于生产的极紫外光刻掩模制作的工艺流程,研制出了实用的 6 inch 极紫外光刻掩模,其特征尺寸达到了 100 nm 以下。通过对衬底、缓冲层、吸收层材料的选择,实现了掩模的低缺陷和高效率。图形生成工艺采用了电子束光刻技术,而吸收层和缓冲层的刻蚀则采用了 ICP 刻蚀技术。通过多种微细加工手段,克服了极紫外光刻掩模制造中的一些困难,使制备出的掩模能够应用于 32 nm 节点的极紫外光刻投影系统。

参 考 文 献

- 1 J Benschop, V Banine, S Lok, *et al.*. Extreme ultraviolet lithography: status and prospects [J]. *J Vac Sci Technol B*, 2008, 26(6): 2204–2207.
- 2 Tom Vandeweyer, Johan De Backer, Janko Versluijs, *et al.*. Patterning challenges in setting up a 16 nm node 6T-SRAM device using EUV lithography [C]. SPIE, 2011, 7969: 79691K.
- 3 C W Gwyn, R Stulen, D Sweeney, *et al.*. Extreme ultraviolet lithography [J]. *J Vac Sci Technol B*, 1998, 16(6): 3142–3149.
- 4 B La Fontaine, Y Deng, R H Kim, *et al.*. Extreme ultraviolet lithography: from research to manufacturing [J]. *J Vac Sci Technol B*, 2007, 25(6): 2089–2093.

- 5 C Wonil, P A Kearney, E M Gullikson, *et al.*. Inspection with the Lasertec M7360 at the SEMATECH mask blank development center [C]. SPIE, 2007, 6517: 65170D.
- 6 O Wood, J Arnold, T Brunner, *et al.*. Insertion strategy for EUV lithography [C]. SPIE, 2012, 8322: 832203.
- 7 H Shite, K Matsunaga, K Nafus, *et al.*. Latest cluster performance for EUV lithography [C]. SPIE, 2012, 8322: 83222Y.
- 8 J V Hermans, D Laidler, P Foubert, *et al.*. Progress in EUV lithography towards manufacturing from an exposure tool perspective [C]. SPIE, 2012, 8322: 832202.
- 9 J Chan-Uk, P Kearney, A Ma, *et al.*. Enabling defect-free masks for extreme ultraviolet lithography [C]. SPIE, 2007, 6533: 653310.
- 10 S Wurm. Transition to EUV lithography [C]. IEEE International Symposium on VLSI Technology, Systems and Application, 2012.
- 11 O Wood, C S Koay, K Petrillo, *et al.*. Integration of EUV lithography in the fabrication of 22-nm node devices [C]. SPIE, 2009, 7271: 727104.
- 12 Xie Changqing, Zhu Xiaoli, Niu Jiebin, *et al.*. Micro- and nano-metal structures fabrication technology and applications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900128.
- 谢常青, 朱效立, 牛洁斌, 等. 微纳金属光学结构制备技术及应用 [J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900128.
- 13 T Shimomura, T Liang. Chemical durability studies of Ru-capped EUV mask blanks [C]. SPIE, 2008, 7122: 712226.
- 14 Wang Zhanshan, Zhu Jingtao, Mu Baozhong, *et al.*. Applications of multilayer optics [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2010, 623(2): 786–790.
- 15 Wang Zhanshan, Wu Yonggang, Chen Lingyan. Multilayer optics in extreme ultraviolet and soft X-ray range [J]. *J Tongji University*, 2002, 30(4): 510–515.
- 王占山, 吴永刚, 陈玲燕. 极紫外和软 X 射线多层膜光学 [J]. *同济大学学报*, 2002, 30(4): 510–515.
- 16 T W Barbee, S Mrowka, M C Hettrick. Molybdenum-silicon

- multilayer mirrors for the extreme ultraviolet [J]. Appl Opt, 1985, 24(6): 883-886.
- 17 K M Skulina, C S Alford, R M Bionta, *et al.*. Molybdenum beryllium multilayer mirrors for normal incidence in the extreme-ultraviolet [J]. Appl Opt, 1995, 34(19): 3727-3730.
- 18 Zhu Wenxiu, Jin Chunshui, Kuang Shangqi, *et al.*. Design and fabrication of the multilayer film of enhancing spectral-purity in extreme ultraviolet [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1031002.
祝文秀, 金春水, 匡尚奇, 等. 提高极紫外光谱纯度的多层膜设计及制备[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1031002.
- 19 Yu Bo, Li Chun, Jin Chunshui. Diffusion coefficient measurement by grazing incidence X-ray reflection in a Mo/Si multilayer [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1107002.
喻波, 李春, 金春水. 基于掠入射 X 射线反射谱的 Mo/Si 多层膜扩散系数测量[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1107002.
- 20 Cao Yuting, Wang Xiangzhao, Bu Yang, *et al.*. Analysis of mask shadowing effects in extreme-ultraviolet lithography [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0805001.
曹宇婷, 王向朝, 步扬, 等. 极紫外投影光刻掩模阴影效应分析[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0805001.
- 21 Cao Yuting, Wang Xiangzhao, Bu Yang. Fast simulation method for contact hole mask in extreme-ultraviolet lithography [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0705001.
曹宇婷, 王向朝, 步扬. 极紫外投影光刻接触孔掩模的快速仿真计算[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0705001.
- 22 Wang Jun, Jin Chunshui, Wang Liping, *et al.*. Study on the off-axis illumination for extreme ultraviolet lithography [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1211003.
王君, 金春水, 王丽萍, 等. 极紫外光刻离轴照明技术研究[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1211003.
- 23 A Rastegar, S Eichenalub, K Goncher, *et al.*. A study of damage mechanism during EUV mask substrate cleaning [C]. SPIE, 2006, 6283: 62830I.
- 24 P B Mirkarimi, S Bajt, M A Wall. Mo/Si and Mo/Be multilayer thin films on Zerodur substrates for extreme-ultraviolet lithography [J]. Appl Opt, 2000, 39(10): 1617-1625.
- 25 K H Smith, J R Wasson, P J S Mangat, *et al.*. Cr absorber etch process for extreme ultraviolet lithography mask fabrication [J]. J Vac Sci Technol B, 2001, 19(6): 2906-2910.

栏目编辑: 韩峰