

极紫外光学表面污染控制技术的研究进展

雷敏 李小平 苗怀坤

(华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 极紫外(EUV)光刻机中光学元件的污染和采用的污染控制策略是影响光刻机性能的重要因素,其中污染主要包括光学表面碳沉积和光学表面氧化,污染控制技术包括智能气体混合技术、保护层技术和污染物清洁技术。着重论述了上述两种主要污染形式和三种污染控制技术的研究进展,对 EUV 光刻机中污染研究的前景进行了展望,并指出其发展面临的挑战及有待解决的关键技术。

关键词 光学制造;极紫外光刻;光学表面污染;污染控制;氧化;碳沉积

中图分类号 O432.1;O644.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.030005

Development of Contamination Control Techniques for EUV Optics Surfaces

Lei Min Li Xiaoping Miao Huaikun

(State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract The optics contamination and the contamination control strategies used in extreme ultra-violet lithography (EUVL) directly affect the performance of optics system. We summarize the main achievements in the research of optics contamination, such as carbon deposition and oxidation of optical surface, and contamination control strategies which include intellegent gas blending, protective capping layer and contamination cleaning. The challenges and key technologies are also presented.

Key words optical fabrication; extreme ultraviolet lithography (EUVL); optics contamination; contamination control; oxidation; carbon deposition

OCIS codes 220.4610; 340.7480; 350.6670

1 引言

极紫外光刻(EUVL)技术是投影光刻技术的自然延伸,二者都通过曝光光源和投影物镜将掩模上的图形复制到硅片之上,在结构上都包括曝光光源、掩模台及掩模传送机构、投影物镜及其他光学系统、工件台及硅片传送机构等主要部件。不同于深紫外投影光刻技术,EUVL 技术采用了波长为13.5 nm的极紫外光作为曝光光源,分辨率更高,被 International Technology Roadmap for Semiconductor (ITRS)2011 认为是 22 nm和 16 nm 技术节点最有前景的下一代光刻技术。

极紫外(EUV)光学表面的污染及其控制技术是制约 EUVL 技术在大规模生产领域应用的关键之一。在高能量的 EUV 光子以及工作环境中污染物的作用下,EUV 光学表面极易被污染,这不仅会降低光学元件的反射率,影响光学系统的波像差,还会造成对准误差及焦深的减小,导致光学系统的寿命和曝光性能下降^[1]。EUV 光学表面的污染控制技术作为光学表面污染的解决途径,主要从增加“清洁前平均时间”(MTBC)和减少每次清洁技术对光学表面造成的损伤这两个方面来增加光学元件的寿命,包括污染预防技术和污染清洁技术。

收稿日期: 2012-11-19; **收到修改稿日期**: 2012-12-13; **网络出版日期**: 2013-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(51235005)资助课题。

作者简介: 雷敏(1990—),男,博士研究生,主要从事极紫外光刻技术环境污染控制方面的研究。

E-mail: leimin2521@hotmail.com

导师简介: 李小平(1966—),男,博士,研究员,主要从事微环境控制技术方面的研究。E-mail: lixiaoping@hust.edu.cn (通信联系人)

EUVL 技术采用了全反射式的曝光系统,光学元件主要为多层膜反射镜,由交替的 Mo/Si 层堆叠而成,表面通常覆盖有由 Ru、TiO₂ 或 Si 等物质组成的保护层。本文将主要论述 EUV 光学表面污染中的表面碳沉积和表面氧化方面的研究进展,并分析智能气体混合技术、保护层技术和污染清洁技术这三种 EUV 污染控制技术。

2 EUV 光学表面污染

EUV 光学表面污染包括光学表面碳沉积、光学表面氧化、光学表面锡沉积^[2]、光学表面腐蚀^[2,3]和多层膜反射镜的膜层间扩散^[4]等形式。本文主要介绍投影物镜中常见的表面碳沉积和表面氧化这两种污染形式。

2.1 光学表面碳沉积

2.1.1 碳沉积的污染源

EUV 光学表面碳沉积的污染源为环境中的碳氢化合物及其他含碳的化合物,常见的有乙醇、苯、甲苯、异丁烯和甲基丙烯酸甲酯(MMA)等气体,这些污染物主要来自真空腔内壁吸附的气体、真空中剩余气体、零件和光刻胶释气等。Madey 等^[5]认为吸附在真空腔内壁上的污染物分子比真空中剩余的气体分子多,是污染物的主要来源;虽然真空腔内壁表面积比真空腔中线缆的表面积大,但 Hamamoto 等^[6]认为线缆的释气率更高,释放的气体更多。Watanabe 等^[7~9]则研究了不同光刻胶的释气特性及其对光学表面污染的影响程度。

2.1.2 无曝光条件下碳氢化合物在光学表面的反应

无曝光条件下碳氢化合物在光学表面的反应主要包括吸附、释放和高温下的分解。Yakshinskiy 等^[10]研究了 Ru(10 $\bar{1}$ 0)表面吸附的乙醇的程序升温脱附(TPD)过程,如图 1 所示,乙醇在约 140 K 就开始从 Ru 表面释放,当 Ru 表面的温度继续升高时,吸附在 Ru 表面的乙醇开始分解,释放出 H₂ 和 CO 等产物,并在 Ru 表面留下一层沉积的碳。Wasielwshi 等^[11]发现 MMA 在 Ru(10 $\bar{1}$ 0)表面的 TPD 过程与乙醇类似,MMA 在 170 K 开始从 Ru 表面释放,当温度升高到 300 K 以上时,直接吸附在 Ru 表面的一层 MMA 开始分解,生成 H₂、CO 和 CO₂ 等气体,并在 Ru 表面留下一层沉积的碳。

2.1.3 光学表面碳沉积过程

光学表面的碳沉积是在 EUV 光子和碳氢化合物的共同作用下形成的。如图 2 所示,碳沉积的原理为:环境中的碳氢化合物分子吸附在光学元件的表面,并扩散到 EUV 照射的区域,在极紫外光的作用下碳氢化合物发生分解,形成自由的碳基团,碳基团聚合在一起并化学吸附在光学表面形成碳的沉积。碳氢化合物分解的原因现在有两种观点:Boller 等^[12]认为碳氢化合物分解主要是 EUV 光子作用产生的低能量电子的作用,这种观点可以解释实验中碳沉积速度先快后慢的现象;Hollenshead 等^[13]则认为光子的直接作用才是分解的主要原因,因为平均每个光子产生光电子的数量约为 0.021 个,虽然光电子的反应截面积比光子大(光子为 $3.787 \times 10^{-4} \text{ nm}^2$,电子为 $4.5 \times 10^{-4} \text{ nm}^2$),但光子的数量与反应截面积的乘积却比电子更大。

2.1.4 环境参数对光学表面碳沉积的影响

碳沉积的速率与光学表面碳氢化合物的吸附和释放、碳氢化合物在光学表面的扩散、光子导致的碳氢化合

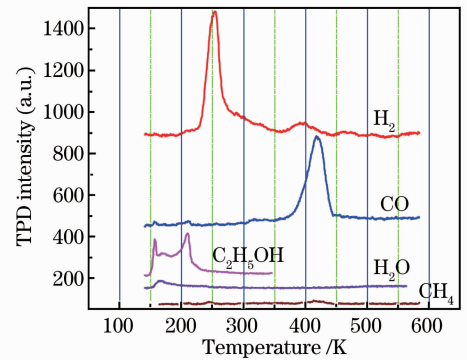


图 1 钌表面所吸附乙醇的 TPD 谱图
Fig. 1 TPD spectra of ethanol from Ru surface

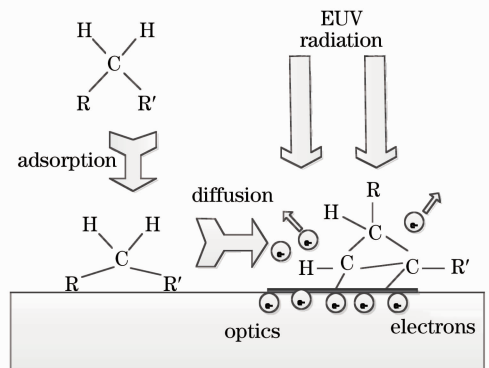


图 2 光致碳沉积过程示意图
Fig. 2 Schematic of photo-induced carbon deposition process

物的分解、光学表面光电子的生成以及电子导致的碳氢化合物的分解等过程密切相关。影响这些过程的环境因素则包括碳氢化合物的分压、碳氢化合物的种类、曝光光源特性、曝光功率密度和光学表面温度等因素。

环境中碳氢化合物分压升高时,吸附在光学表面的碳氢化合物分子增多,碳沉积的速率增大。Kurt等^[14]发现在电子束曝光作用下,曝光功率密度一定,增加碳氢化合物的分压,碳沉积的速率增大,继续增加碳氢化合物的分压时,碳沉积的速率会达到饱和状态;Matsunari等^[15]发现在 EUV 光照射下光学表面碳沉积与碳氢化合物分压呈正比例关系;Hill等^[16]则在实验过程中发现,在 13.5 nm 同步光源的照射下,碳氢化合物压强范围在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ Pa 之间时, TiO_2 表面碳沉积的速率与碳氢化合物的浓度呈对数关系。碳氢化合物的分压在 $10^{-8} \sim 10^{-5}$ Pa 的范围内,有些碳氢化合物的碳沉积速率与分压呈非线性关系,且速率受水蒸气浓度的影响大,而对于另外一些碳氢化合物,碳沉积速率则与分压呈线性关系,且速率受水蒸气浓度的影响小^[17]。不同的碳氢化合物对碳沉积也有较大的影响,Hollenshead等^[13]发现分子量小于 100 的碳氢化合物对碳沉积的贡献较小。

曝光功率密度增大,由光子或者光电子导致的碳氢化合物分解概率增大,碳沉积的速率增大。Hill等^[17]通过对比 EUV 照射的光强分布和光学表面碳沉积厚度的分布,发现光源密度在 $0.4 \sim 4$ mW/mm²、污染物(叔丁基苯或甲苯)压强在 $10^{-8} \sim 10^{-5}$ Pa 内,碳沉积速率与光源密度呈线性关系^[17];使用宽谱 8 nm EUV 光源进行实验时,对于甲苯、正十四烷和二乙苯等气体,其分压为 10^{-5} Pa 或 10^{-4} Pa,光源功率密度在 $5 \sim 50$ mW/mm² 范围内,碳沉积的速率与光源功率密度呈正比关系,但是压强为 10^{-6} Pa 时,碳沉积的速率则与功率密度呈非线性关系;对于气体苯,在分压为 10^{-6} Pa、 10^{-5} Pa 和 10^{-4} Pa 的条件下,碳沉积的速率则始终与功率密度呈非线性关系^[18]。

光学表面温度升高时,吸附在光学表面的碳氢化合物数量减少,碳沉积的速率减小。Yakshinskiy等^[19]研究了在不同温度下 TiO_2 表面的碳沉积,发现当温度升高时,光学表面碳沉积的速率减小。

不同的保护层材料具有不同的碳氢化合物吸附特性、催化效果和光电子产量,对碳沉积的影响不同;不同厚度的保护层,影响光学表面电场的强度,电场强度会影响光电子的生成,间接导致碳沉积的速率不同。Yakshinshiy等^[20]研究了 Ru 和 TiO_2 表面碳化物的沉积,发现 TiO_2 表面的碳沉积初始速率比 Ru 表面快,而当碳沉积厚度达到约 1 nm 时二者的碳沉积速率相当;Malinowski等^[21]研究了不同的 Si 保护层厚度对碳沉积的影响,发现 3 nm 厚的 Si 保护层具有较好的抗碳沉积特性。

此外,碳沉积的速率还随时间而变化,Boller等^[12]发现镀金硅表面的碳沉积的初始速率较大,当碳沉积达到一定的厚度时,碳沉积的速率减小到初始速率的 1/10;Kurt等^[14]发现在电子束的轰击之下,光学表面碳沉积的初始速率较大,随着时间的推移,碳沉积的速率逐渐减小;Hollenshead等^[13]则发现,在多层膜反射镜表面,碳沉积的初始速率较小,但随着时间的推移,碳沉积的速率加快。实验结果看似矛盾,但 Hollenshead等^[13]认为这是由于实验中使用的碳氢化合物的光学表面的吸附特性不同。

2.2 光学表面的氧化

2.2.1 光学表面氧化的污染源

光学表面氧化的主要污染源为水蒸气。由于 EUV 光刻机真空腔体中有精密的测量部件,不能进行烘烤,真空腔体中水蒸气的分压相对较高。在 EUV 工程样机中水分子的分压为 2.5×10^{-5} Pa,而碳氢化合物的分压只有 6.5×10^{-10} Pa^[22]。

真空腔中的水蒸气分压较高,但是更多的水分子却吸附在真空腔体的内壁上^[5]。水分子在温度低于 250 K 时就会以分子态的形式从腔壁上释放,温度约为 300 K 时吸附在腔壁上的主要为氢氧根($-\text{OH}$)^[23];温度高于 300 K 时,表面释放的水分子主要是通过氢氧根反应生成的,反应过程为



2.2.2 水分子在光学表面的升温脱附过程

水分子的吸附能较低,在绝大多数表面上,水分子在低于室温的条件下就会从表面上释放。Madey等^[5]研究了 Ru(0001)表面在不同的水分子覆盖程度下的 TPD 过程,在约 160 K 时吸附在 Ru 表面的多层水分子开始释放,在约 205 K 时 Ru 表面氢氧根开始反应生成水分子,并从表面释放。不同结构的 Ru 表面的 TPD 特性不同;表面上沉积的碳与氧化也会改变 Ru 表面的性质,降低水分子的吸附能和水分子分解的概率^[5]。

2.2.3 光学表面的氧化过程

光学表面氧化是水分子和 EUV 光子共同作用的结果。如图 3 所示,其形成可分为两个过程:1) 吸附在光学表面的含氧分子(主要为水分子)分解,生成活性态的氧;2) 活性态的氧在光学表面扩散,并与其他物质发生反应生成氧化物^[24]。Hollenshead 等^[22]认为过程 1 中水分子分解的途径有两种:1) 水分子直接吸收光子,导致水分子中的氢氧键断裂,形成活性态的氧;2) 光子作用在光学表面形成低能量的电子,低能量电子导致吸附在光学表面的水分子发生分解。形成的活性态的氧除了与光学表面反应生成氧化物外,还可能化学吸附在光学表面^[5]。

2.2.4 光学表面氧化与环境因素的关系

光学表面氧化与光学表面碳沉积类似,与水分子在表面的吸附和释放、光子和光电子导致的水分子分解等过程密切相关。影响这些过程的环境因素包括水分子的分压、光学表面的温度、曝光光源的特性和曝光功率密度等。

环境中的水分子分压影响平衡状态时吸附在光学表面的水分子数量,当水分子的分压升高时,光学表面吸附的水分子增多,氧化速率加快。Nishiyama^[24]建模得出在高水分子分压范围内,活性态氧的生成量与水分子的分压呈线性关系,但这并不表示与氧化速率呈线性关系。在实验条件下氧化速率与水分子的分压有些呈线性关系,而有些却呈非线性关系,造成这种结果的原因可能是实验过程中相应的参数控制不足。

温度升高时,吸附在光学表面的水分子减少,氧化速率减小。Hollenshead 等^[22]建立了 Ru 表面氧化模型,预测当温度高于 245 K 时,随着温度的升高,Ru 表面氧化速率将迅速下降。

曝光光源也会影响氧化速率,不同的曝光光源的时间特性不一致,导致水分子吸附状况不同,造成氧化速率不同。Nishiyama^[24]就发现使用脉冲放电光源的氧化速率比使用同步光源小。曝光功率密度增大时,参与反应的光子和电子的数量增多,氧化速率增大。Nishiyama^[24]使用模型得出光学表面生成的活性态的氧与光源的功率密度在较大范围内呈线性关系,但这与实验中光学表面氧化速率与光源密度成非线性关系的现象相矛盾,Gomei 等^[25]认为这是光源功率密度增大导致光致释气作用加强的结果,可以通过增加水蒸气的分压来进行补偿。

3 EUV 光学表面污染控制

EUV 光学表面污染控制主要包括污染预防技术和污染清洁技术。污染预防技术又分为智能气体混合技术和保护层技术;污染清除技术又分为射频(RF)清洁技术、氧气清洁技术、紫外(UV)清洁技术和氢原子清洁技术等。

3.1 智能气体混合技术

智能气体混合技术通过向工作环境中引入相应的气体与污染源气体发生反应实现污染控制。当光学元件处在易于生成氧化物的环境中时,向光学表面通入乙醇可以减少氧化^[26~28]。乙醇在 EUV 光的作用下在光学表面形成一层厌水型的无缺陷碳膜,这减少了吸附在光学表面的水分子,使得光学表面氧化速率变小。具有像 -OH、-SH、-COOH 等可以吸附在光学表面上的基团的一些碳氢化合物也可以发挥像乙醇一样的作用^[29],Koidal 等^[30]用实验证明了异丙醇(含有一 OH 基团)同样具有减小 Ru 表面氧化的作用。

当光学元件处在易于生成碳沉积的环境中时,也可以通过引入氧气来减少光学表面的碳沉积。Meiling 等^[31]发现在电子束曝光条件下引入氧气可以减少表面碳沉积,Nikon 公司则在其开发的 EUV 光刻设备中采用了通入氧气减缓碳沉积的措施^[32]。

3.2 保护层技术

保护层材料大致可分为三类:硅、以 Ru 为代表的金属和以 TiO₂ 为代表的金属氧化物。理想的保护层必须具有对极紫外光吸收率低,在水蒸气环境中能够抗氧化、在高温作用下结构稳定、化学性能稳定、可以形

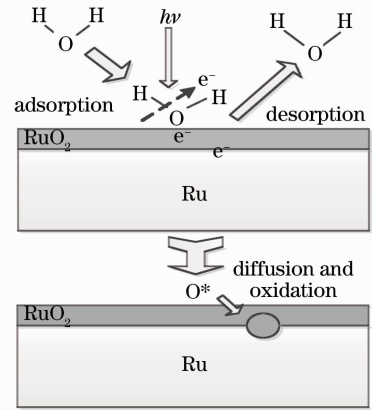


图 3 Ru 表面氧化过程示意图

Fig. 3 Schematic of Ru surface oxidation process

成厚度仅为几纳米的连续薄层等特性。Ru、Rh、TiO₂ 和 ZrO₂ 都是很有前景的表面保护层材料^[33]。

保护层的性能与保护层材料和保护层表面的微观结构有关。在相同的环境中,使用硅保护层抑制氧化的效果是没有使用保护层的 100 倍^[34];使用 Ru 保护层的元件的寿命约为使用 Si 保护层的 40 倍^[35];TiO₂ 以及 RuO₂ 保护层在极紫外光的照射下稳定性要比 Si 保护层好^[36];不同镀膜工艺生成的保护层的表面结构不同,导致相同材料的保护层的性能出现差异^[37]。当多层膜反射镜表面的硅保护层的厚度变化时,硅表面的碳沉积速率也会改变,这可能是硅保护层的厚度不同造成硅与真空接触面上的电场强度发生了改变,电场强度的改变进一步影响了自由电子产生的结果^[21]。

3.3 射频清洁技术

射频清洁技术包括 RF-O₂ 清洁技术和 RF-H₂ 清洁技术。RF-O₂ 清洁技术^[38] 使用氧气射频放电清洁光学表面碳沉积。这两种技术均通过射频放电生成活性态的氧或氢,活性态的氧或氢与光学表面的污染物反应生成挥发性的气体,进而去除污染物。射频清洁技术的缺点是在过清洁的状况下易造成光学表面的氧化。在使用射频清洁技术时应注意碳清除速率与表面氧化速率的比值,比值越大,清洁过程中由于碳沉积不均匀而造成氧化的概率就越小。Graham 等^[39] 在实验中发现,射频放电的功率越大,碳清除速率与氧化速率的比值越大。

3.4 氧气清洁技术

氧气清洁技术^[40,41] 通过氧气分子和 EUV 的共同作用去除表面沉积的碳。其清洁原理为:光学表面碳沉积在氧气、环境中的碳氢化合物和 EUV 光的共同作用下发生反应,生成挥发性的碳氧化物、水和挥发性 CH_x 等气体。氧气清洁技术的主要优点是清洁速度快,在线清洁设备简单,缺点是难以控制清洁的结束时间,易造成光学表面的氧化。Malinowski 等^[40] 研究了光学表面碳沉积、氧气清洁技术以及氧气清洁技术可能带来的氧化,并在氧气分压为 6.7×10^{-2} Pa,光源功率为 $1 \sim 3$ mW/mm² 的条件下取得了每小时 10% 的清洁速率。

3.5 UV 清洁技术

UV 清洁技术^[42-44] 使用氧气与 172 nm 准分子激光来清除光学表面的碳沉积。其清洁原理为:氧气在 172 nm 紫外光的作用之下生成活性态的氧基团,活性态的氧基团与光学表面的碳沉积以及碳氢化合物反应,生成气态的碳氧化物和水分子。UV 清洁技术的优点是 172 nm 的紫外光源技术相对成熟,各种物质对它的吸收率也较 13.5 nm 的极紫外光低,对真空度要求不高;缺点是容易造成光学表面的氧化。Hamamoto 等^[20] 研究了 UV 清洁技术,并在氧气分压为 2×10^3 Pa 和大气压环境下分别获得了 2 nm/min 和 0.53 nm/min 的清洁速率。Tanaka 等^[44] 研究了 UV 清洁技术的清洁速率与光源和试件间的距离以及氧气的浓度之间的关系,发现清洁速率与氧气的浓度密切相关,同时光源距试件越近,清洁速率越大。

3.6 氢原子清洁技术

如图 4 所示,氢原子清洁技术^[39,45-48] 通过向光学表面引入原子态的氢去除光学表面的碳沉积或者氧化。其清洁原理为:原子态的氢与光学表面沉积的碳反应生成挥发性的碳氢化合物,或与光学表面的氧化物发生还原反应生成水分子。氢原子清洁技术的优点是可同时清除碳沉积与表面氧化,同时对光学表面的损伤小,缺点是清洁速度相对较低。Oizumi 等^[46] 在研究氢原子清洁碳沉积的过程中发现光学表面在清洁后反射率以及峰值反射波长的变化都在仪器测量误差范围内;Graham 等^[45] 在研究氢原子清洁碳沉积的过程中得到了 6 nm/h(溅射得到的碳沉积)和 12 nm/h(EUV 导致的碳沉积)的清洁速率。Nishiyama 等^[47] 发现氢原子清洁技术还可以有效地去除光学表面的氧化物,并对光学表面的粗糙度的影响小;Motai 等^[48] 也用实验证明了氢原子可以有效地去除光学表面的氧化物,并使用石英管成功将氢原子导入到了光学表面。

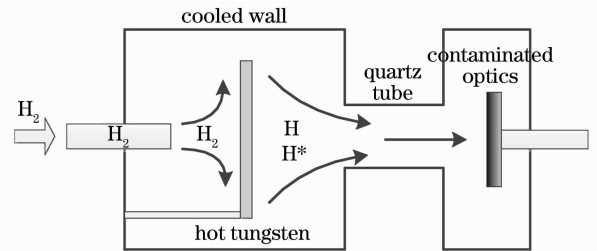


图 4 氢原子清洁光学表面装置示意图

Fig. 4 Schematic of atomic hydrogen cleaning optical surface of apparatus

4 结束语

EUVL 中的污染形成机理与污染控制技术研究已取得了长足的进步,光学元件的寿命显著提高,但仍

然存在许多问题与挑战:

- 1) 建立了光学表面碳沉积模型和氧化模型,并研究了污染形成与环境因素的关系。但光学表面污染形成的机理仍不清晰,环境中碳氢化合物与水蒸气会相互影响,需要建立包含碳沉积和氧化的统一模型。
- 2) 现有的智能气体混合技术和保护层技术可以有效地缓解光学表面污染,但都不能完全阻止污染物的生成,仍需进一步研究合适的智能气体控制参数,并开发新的保护层材料和保护层制作工艺。
- 3) 现有的污染清洁技术已经可以用于清除碳沉积和氧化,对光学元件造成的不可逆损伤也越来越小,但光学元件的寿命仍达不到大规模生产的要求,需研究合适的清洁方法和清洁参数,进一步减少清洁过程对光学元件的损伤。

参 考 文 献

- 1 A. Barty, K. A. Goldberg. The effects of radiation induced carbon contamination on the performance of an EUV lithographic optic[C]. *SPIE*, 2003, **5037**: 450~459
- 2 J. Pankert, R. Apetzl, K. Bergmann *et al.*. Integrating Philips' extreme UV source in the alpha-tools[C]. *SPIE*, 2005, **5751**: 260~271
- 3 P. A. Grunow, L. E. Klebanoff, S. Graham *et al.*. Rates and mechanisms of optic contamination in the EUV Engineering Test Stand[C]. *SPIE*, 2003, **5037**: 418~428
- 4 H. Takase, S. Terashima, Y. Gomei *et al.*. Study of ruthenium-capped multilayer mirror for EUV irradiation durability [C]. *SPIE*, 2006, **6151**: 855~858
- 5 T. E. Madey, N. S. Faradzhev, B. V. Yakshinskiy *et al.*. Surface phenomena related to mirror degradation in extreme ultraviolet (EUV) lithography[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2006, **253**(4): 1691~1708
- 6 K. Hamamoto, Y. Tanaka, T. Watanabe *et al.*. Outgassing characteristics of structural materials and the removal of contaminants from EUVL masks using 172-nm radiation[J]. *J. Photopolymer Sci. Technol.*, 2004, **17**(3): 367~372
- 7 T. Watanabe, H. Kinoshita, H. Nii *et al.*. Photoinduced outgassing from the resist for extreme ultraviolet lithography by the analysis of mass spectroscopy[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2001, **19**(3): 736~742
- 8 H. Hada, T. Watanabe, K. Hamamoto *et al.*. Evaluation of resists outgassing by EUV irradiation[C]. *SPIE*, 2004, **5374**: 686~694
- 9 I. Pollentier. Study of EUV resist outgassing/contamination for device integration using EUVL processes [J]. *J. Photopolymer Sci. Technol.*, 2010, **23**(5): 605~612
- 10 B. V. Yakshinskiy, I. Nishiyama, A. Wueest *et al.*. Surface phenomena related to degradation of EUV mirrors: interaction of ethyl alcohol with ruthenium surfaces[C]. *SPIE*, 2008, **6921**: 69213E
- 11 R. Wasielewski, B. V. Yakshinskiy, M. N. Hedhili *et al.*. Surface chemistry of Ru: relevance to optics lifetime in EUVL [C]. *SPIE*, 2007, **6533**: 653311
- 12 K. Boller, R. P. Haelbich, H. Hogrefe *et al.*. Investigation of carbon contamination of mirror surfaces exposed to synchrotron radiation[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1983, **208**(1-3): 273~279
- 13 J. Hollenshead, L. Klebanoff. Modeling radiation-induced carbon contamination of extreme ultraviolet optics[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2006, **24**(1): 64~82
- 14 R. Kurt, M. van Beek, C. Crombeen *et al.*. Radiation-induced carbon contamination of optics[C]. *SPIE*, 2002, **4688**: 702~709
- 15 S. Matsunari, T. Aoki, K. Murakami *et al.*. Carbon deposition on multi-layer mirrors by extreme ultra violet ray irradiation[C]. *SPIE*, 2007, **6517**: 65172X
- 16 S. B. Hill, N. S. Faradzhev, C. S. Tarrío *et al.*. Measuring the EUV-induced contamination rates of TiO₂-capped multilayer optics by anticipated production-environment hydrocarbons[C]. *SPIE*, 2009, **7211**: 727111
- 17 S. B. Hill, N. S. Faradzhev, L. J. Richter *et al.*. Complex species and pressure dependence of intensity scaling laws for contamination rates of EUV optics determined by XPS and ellipsometry[C]. *SPIE*, 2010, **7631**: 76310E
- 18 S. B. Hill, N. S. Faradzhev, L. J. Richter *et al.*. Optics contamination studies in support of high-throughput EUV lithography tools[C]. *SPIE*, 2011, **7961**: 79612M
- 19 B. V. Yakshinskiy, S. Zalkind, R. A. Bartynski *et al.*. Carbon film growth on model electron-irradiated MLM cap layer: interaction of benzene and MMA vapor with TiO₂ surface[C]. *SPIE*, 2009, **7271**: 727110
- 20 B. V. Yakshinskiy, M. N. Hedhili, S. Zalkind *et al.*. Radiation-induced defect formation and reactivity of model TiO₂ capping layers with MMA: a comparison with Ru[C]. *SPIE*, 2008, **6921**: 692111
- 21 M. E. Malinowski, C. Steinhaus, M. Clift *et al.*. Controlling contamination in Mo/Si multilayer mirrors by Si surface-capping modifications[C]. *SPIE*, 2002, **4668**: 442~453

- 22 J. Hollenshead, L. Klebanoff. Modeling extreme ultraviolet H₂O oxidation of ruthenium optic coatings[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2006, **24**(1): 118~130
- 23 P. A. Thiel, T. E. Madey. The interaction of water with solid surfaces: fundamental aspects[J]. *Surface Science Reports*, 1987, **7**(6-8): 211~385
- 24 I. Nishiyama. Model of Ru-surface oxidation for the lifetime scaling of EUVL projection optics mirror[C]. *SPIE*, 2006, **6151**: 129~138
- 25 Y. Gomei, H. Takase, T. Aoki *et al.*. Scaling law in acceleration test of extreme ultraviolet lithography projection optics mirror contamination[J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2005, **23**(6): 2848~2851
- 26 L. E. Klebanoff, M. E. Malinowski, P. Grunow *et al.*. First environmental data from the EUV engineering test stand [C]. *SPIE*, 2001, **4343**: 342~346
- 27 Y. Kakutani, M. Niibe, Y. Gomei *et al.*. Inhibition of contamination of Ru-capped multilayer mirrors for extreme ultraviolet lithography projection optics by ethanol[J]. *Jpn. J. Appl. Phys. Part 1*, 2007, **46**(9BSD): 6155~6160
- 28 N. Koster, B. Mertens, R. Jansen *et al.*. Molecular contamination mitigation in EUVL by environmental control[J]. *Microelectronic Engineering*, 2002, **61**(2): 65~76
- 29 L. E. Klebanoff, W. M. Cliff, M. E. Malinowski *et al.*. Radiation-induced protective carbon coating for extreme ultraviolet optics[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2002, **20**(2): 696~703
- 30 K. Koida, M. Niibe, Y. Kakutani *et al.*. Protection from surface oxidation of Ru capping layers for EUVL projection optics mirrors by introducing hydrocarbon gas[C]. *SPIE*, 2008, **6921**: 69211
- 31 H. Meiling, B. Mertens, F. Stietz *et al.*. Prevention of MoSi multilayer reflection loss in EUVL tools[C]. *SPIE*, 2001, **4506**: 93~104
- 32 K. Murakami, T. Oshino, H. Kondo *et al.*. Development of EUV lithography tool technologies at Nikon[C]. *SPIE*, 2012, **8322**: 832215
- 33 S. Bajt, N. V. Edwards, T. E. Madey. Properties of ultrathin films appropriate for optics capping layers exposed to high energy photon irradiation[J]. *Surface Science Reports*, 2008, **63**(2): 73~99
- 34 H. Meiling, V. Banine, P. Kuerz *et al.*. The EUV program at ASML: an update[C]. *SPIE*, 2003, **5037**: 24~35
- 35 S. A. Bajt, H. N. Chapman, N. Nguyen *et al.*. Design and performance of capping layers for extreme-ultraviolet multilayer mirrors[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(28): 5750~5758
- 36 S. Yulin, N. Benoit, T. Feigl *et al.*. Mo/Si multilayers with enhanced TiO₂- and RuO₂-capping layers[C]. *SPIE*, 2008, **6921**: 692118
- 37 S. Bajt, Z. R. Dai, E. J. Nelson *et al.*. Oxidation resistance of Ru-capped EUV multilayers[C]. *SPIE*, 2005, **5751**: 118~127
- 38 S. Graham, C. Steinhaus, M. Clift *et al.*. Radio-frequency discharge cleaning of silicon-capped Mo/Si multilayer extreme ultraviolet optics[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2002, **20**(6): 2393~2400
- 39 S. Graham, M. E. Malinowski, C. E. Steinhaus *et al.*. Studies of EUV contamination mitigation[C]. *SPIE*, 2002, **4688**: 431~441
- 40 M. Malinowski, P. Grunow, C. Steinhaus *et al.*. Use of molecular oxygen to reduce EUV-induced carbon contamination of optics[C]. *SPIE*, 2001, **4343**: 347~356
- 41 K. Hamamoto, S. Takada, T. Watanabe *et al.*. Investigation of contamination removal from finished EUVL mask[J]. *J. Photopolymer Sci. Technol.*, 2003, **16**(3): 395~399
- 42 K. Hamamoto, Y. Tanaka, T. Watanabe *et al.*. Cleaning of extreme ultraviolet lithography optics and masks using 13.5 nm and 172 nm radiation[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2005, **23**(1): 247~251
- 43 T. Aoki, H. Kondo, S. Matsunari *et al.*. Apparatus for contamination control development in EUVA[C]. *SPIE*, 2005, **5751**(1): 1137~1146
- 44 K. Tanaka, K. Hamamoto, N. Sakaya *et al.*. Cleaning characteristics of contaminated Imaging optics using 172 nm radiation[J]. *Jpn. J. Appl. Phys. Part 1*, 2007, **46**(9BSD): 6150~6154
- 45 S. Graham, C. Steinhaus, M. Clift *et al.*. Atomic hydrogen cleaning of EUV multilayer optics[C]. *SPIE*, 2003, **5037**: 520~529
- 46 H. Oizumi, H. Yamanashi, I. Nishiyama *et al.*. Contamination removal from EUV multilayer using atomic hydrogen generated by heated catalyzer[C]. *SPIE*, 2005, **5751**: 1147~1154
- 47 I. Nishiyama, H. Oizumi, K. Motai *et al.*. Reduction of oxide layer on Ru surface by atomic-hydrogen treatment[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2005, **23**(6): 3129~3131
- 48 K. Motai, H. Oizumi, S. Miyagaki *et al.*. Atomic hydrogen cleaning of Ru-capped EUV multilayer mirror[C]. *SPIE*, 2007, **6517**: 65170F