

文章编号 1004-924X(2017)11-2835-10

极紫外光刻机多层膜反射镜表面碳污染的清洗

宋 源, 卢启鹏*, 龚学鹏, 王 依, 彭忠琦

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:针对极紫外(EUV)光刻机工作过程中,多层膜反射镜表面沉积碳污染造成的反射率下降问题展开研究,讨论了多层膜反射镜表面碳污染清洗方法。首先描述了在 EUV 曝光过程中多层膜表面的碳污染形成过程,简单阐述了碳污染对多层膜反射镜的危害。然后从清洗机理、速率以及效果等方面详细描述了多种 EUV 多层膜表面碳污染清洗方法,分析对比了各清洗技术在清洗速率和效果等方面的优缺点。分析表明:离子体氧和活化氧清洗速率相差不多,可达到 2 nm/min,但清洗过程中容易造成表面氧化;等离子体氢和原子氢的清洗速率相对较慢,一般在 0.37 nm/min 左右,但清洗过程中不易产生氧化。最后针对不同方法应用于在线清洗 EUV 多层膜反射镜过程中将遇到的问题和难点进行了讨论。

关 键 词:极紫外光刻机;碳污染;清洗 技术;多层膜反射镜

中图分类号:TN305.7;O484.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172511.2835

Cleaning of carbon contamination on multilayer optics of EUVL

SONG Yuan, LU Qi-peng*, GONG Xue-peng, WANG Yi, PENG Zhong-qi

(State Key Laboratory of Applied Optics,
Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: luqipeng@126.com

Abstract: This paper focuses on the reflectivity decrease of reflective elements caused by the carbon contamination deposited on multilayers during EUV(Extreme Ultraviolet) lithography working and emphasizes the clear method of carbon contamination deposited on multilayers. The process of carbon contamination deposited on multilayers was elucidated and the damage of carbon contamination on the multilayers was introduced briefly. Several kinds of cleaning methods for carbon contamination deposited on multilayers were described in detail from cleaning mechanism, removing rate and cleaning effect, and their advantages and disadvantages were analyzed. The result indicates that the cleaning rates of plasma oxygen and activated oxygen reach 2 nm/min, but the multilayer surface is easy to be oxidized in cleaning process; and the plasma hydrogen and atomic hydrogen have relatively slow cleaning rates, they are only about 0.37 nm/min, but the multilayer surface is hardly to be oxidized. Moreover, the difficulties of different cleaning methods for X-ray multilayer mirrors in-situ are discussed.

收稿日期:2017-03-27;修订日期:2017-04-10.

基金项目:国家科技重大专项资助项目(No. 2012ZX02702001);国家自然科学基金资助项目(No. 61404139);应用光学国家重点实验室自主基金资助项目(No. Y5743FQ158);吉林省重点科技成果转化项目(No. 20150307039GX)

Key words: extreme ultraviolet lithography; carbon contamination; cleaning technologies; multilayers

1 引言

极紫外(Extreme Ultra-Violet, EUV)光刻技术使用 13.5 nm 波段的光,通过投影物镜系统将掩模上的图形复制到硅片上,相对于传统光刻技术具有更高的分辨率^[1-3]。然而,极紫外波段的光波易被物质吸收,为提高反射率,通常使用 Mo/Si 多层膜作为反射元件。多层膜反射镜在 EUV 光源下曝光一段时间后,表面沉积碳污染,造成反射率下降,导致光刻机不能正常工作^[4-7]。直接更换受污染的多层膜反射镜给精确复位带来技术难题,而且更换后表面还会再次出现碳污染^[8-11]。受到其他领域碳污染光学元件再生利用的启发,利用清洗技术处理多层膜表面碳污染已成为减少碳污染危害研究的重点。

目前,依据工作原理以及工作气体的不同,常用的极紫外多层膜表面碳污染清洗技术可以分为射频(RF)-O₂ 和 -H₂、表面声波法(SWD)-H₂、EUV/VUV 活性 O₂、EUV-H₂ 和原子氢清洗等^[12-16]。本文主要从清洗机理、速率和效果等方面对上述清洗方法进行综述,分析它们的优缺点,为后续碳污染的清除提供参考。

2 多层膜表面碳污染

碳污染的形成是一种光致沉积现象^[17-19]。Boller 等首次系统地研究了碳污染的形成机制^[20],随后 Rosenberg 等^[21]进一步完善该理论。Boller 等人认为碳污染的形成速率与光照时间、背景碳氢化合物含量及温度等因素有关。碳氢化合物首先吸附在光学元件表面,然后被 EUV 光辐照产生的二次电子分解,最后在表面形成碳污染。近年来,随着理论研究和探测手段的不断进步,Kurt、Shiraishi 等^[22-23]发现碳污染的增长速率还与碳氢化合物种类和背景压强有关。当 EUV 光刻机曝光腔中 C_xH_y 气体的压强高于 1.33×10^{-8} Pa 时,碳沉积就会出现。G. Kyriakou 等^[24]发现大分子的碳氢化合物所导致的碳沉积

速率更快,主要因为大分子化合物通常停留在表面的时间更长,吸附焓更大,更容易吸附在光学元件表面,进而增加分解机率,加快沉积速率。Hollenshead 等人^[25]认为分解光学元件表面吸附碳氢化合物的主要原因不是二次电子碰撞引起的,而是 EUV。按照上述理论建立模型,其拟合结果与实验数据相符。碳污染的生长模型如图 1 所示,首先碳氢化合物通过较弱的表面结合力吸附在光学元件表面,当 EUV 光源辐照时,碳氢化合物中的化学键发生断裂,形成活性非常强的基团。这些基团与光学元件表面物质发生反应,最后聚合生成难以去除的碳污染^[26-27]。

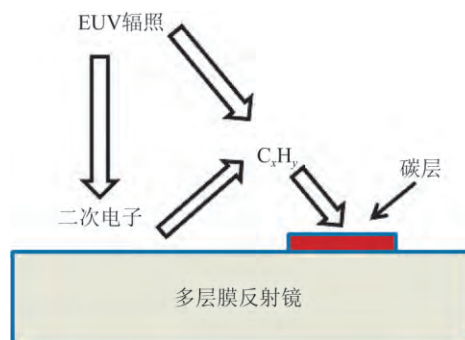


图 1 多层膜反射镜表面碳污染形成示意图

Fig. 1 Carbon contamination deposited on multilayer optics

对生成的碳污染用 X 射线光电子能谱进行分析,发现其形态随着曝光条件的变化会发生改变。Oestreich 等^[28]研究发现 1.5 nm 厚度的石墨态碳污染会导致 2% 的反射率损失。Koster 等^[29]发现不同形态的碳污染导致不同程度的反射率下降,一般 1~3 nm 的碳层就会导致至少 1% 的反射率损失。所以,研究多层膜反射镜碳污染的在线清洗技术对保障光刻机的大规模生产十分必要。

3 多层膜反射镜碳污染清洗方法

3.1 等离子体清洗方法

等离子体清洗技术是利用等离子体激发源,将工作气体激发生成具有活性的等离子体,与光

学元件表面的碳污染通过化学作用生成易挥发物质,从而达到清洗目的。目前,常用的工作气体有氧气和氢气等。按照工作气体的不同,清洗过程描述如图 2 和图 3 所示。

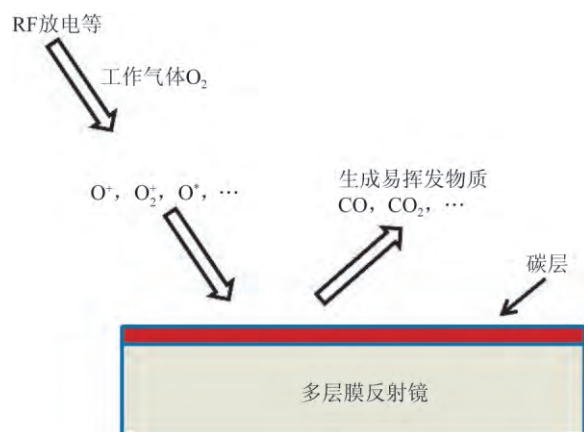


图 2 氧等离子体清洗基本原理示意图

Fig. 2 Mechanism of plasma O_2 cleaning carbon contamination

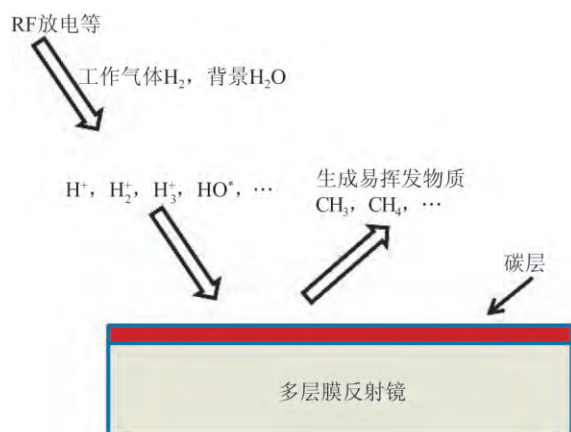


图 3 氢等离子体清洗基本原理示意图

Fig. 3 Mechanism of plasma H_2 cleaning carbon contamination

激发源不同导致等离子体的种类以及能量均不同,清洗速率和效果也存在很大差异。

3.1.1 表面声波激励法等离子体清洗方法

莫斯科国立大学核物理研究实验室的 E. M. Malykhin^[30]等人利用表面声波激励(SWD)法激发等离子体,采用 H_2 和 He 进行实验,比较了工作气体的清洗速率和效果。清洗装置如图 4 所示,待清洗样品为标准 Mo/Si 多层膜反射镜,利用磁控镀膜方式在表面镀 10 nm 厚的 a-C,密度为 1.9 g/cm^3 。

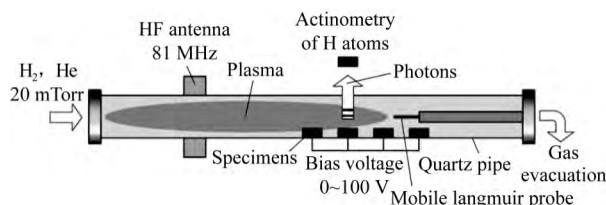


图 4 SWD 等离子体清洗装置示意图

Fig. 4 Cleaning equipment of carbon contamination with SWD-plasma

在清洗过程中分别通入压强为 2.66 Pa 的 H_2 和 He ,激发源频率为 81 MHz 。通过 Langmuir 探针检测 H_2 产生的主要等离子体为 H_3^+ ,能量为 22 eV ; He 产生的主要等离子体为 He^+ ,能量为 12 eV 。用 X 射线荧光(X-ray Fluorescence, XRF)对表面碳层厚度变化进行测量,发现当等离子体浓度为 $2 \times 10^{-4} \text{ ion}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 时, H_3^+ 的清洗速率为 0.15 nm/min ,而 He^+ 的清洗速率则低很多。Malykhin 等将实验结果与动力学理论计算结果进行对比,得到 H_3^+ 的清洗速率高于 He^+ 的主要原因是清洗机理不同。通过实验得到 He^+ 通过物理溅射的方式清除表面碳污染,而 H_3^+ 则是通过复杂的物理化学作用。

在实验中还发现较高的离子能量会破坏多层膜反射镜表面。如图 5 所示,用原子力显微镜观测清洗前后样品表面的变化,清洗后表面明显被破坏,形成很多“小液滴”,造成了表面的二次损伤。Malykhin 等按照离子在不同能量下对不同物质的溅射率曲线,绘制出清洗时离子能量的工作范围,在工作范围内选择较为合适的清洗条件,以减小清洗过程中离子对样品的损伤。

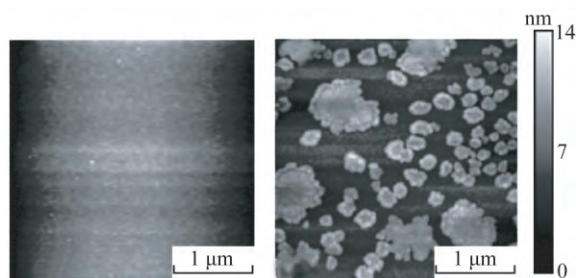


图 5 样品清洗前后的表面 AFM 检测对比图

Fig. 5 Comparison of AFM images before and after cleaning

3.1.2 EUV 等离子体清洗方法

荷兰基础能源研究所的 A Dolgov^[31] 等人利用 EUV 光源辐照工作气体产生等离子体进行碳污染清洗,清洗装置示意图如图 6 所示。该方法可直接利用光刻机的光源作为辐照源,易于实现极紫外光刻机多层膜反射镜的在线清洗。

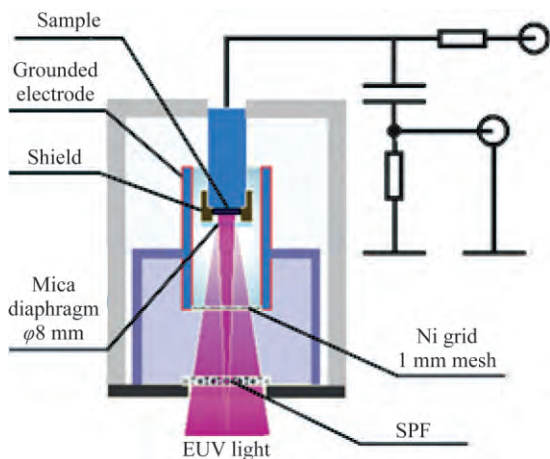


图 6 EUV 等离子体清洗装置示意图

Fig. 6 Cleaning equipment of carbon contamination with EUV-plasma H_2

在实验中,采用的样品为周期 40 的标准 Mo/Si 多层膜,厚度为 6.9 nm,表面沉积 15 nm 的 a-C。在清洗过程中同样通入了 H_2 和 He 两种气体作为对比气体,EUV 每个脉冲能量为 85 μJ ,平均功率为 0.13 W/cm^2 。背景初始压为 $4 \times 10^{-6} \sim 6.65 \times 10^{-6}$ Pa,通入工作气体后压强在 1~30 Pa,清洗样品得到清洗速率随工作气体通量密度以及偏压的变化关系。同样得到氢等离子体的清洗速率大于氦等离子体的实验结果。然后,用 SWD 激发相同能量的等离子体做清洗对比实验,发现 EUV 等离子体的清洗速率是 SWD 的 5 倍。利用 Bohdansky 和 Yamamura and Tawara 等提出的溅射模型进行理论计算,得到由 EUV 光辐照产生的氢等离子体对碳原子的溅射阈值能为 1.52 eV;SWD 生成的氢等离子体的溅射阈值能为 2.27 eV。这是因为在 EUV 辐照下,表面的碳氢化合物和氢气裂解时会生成一定量的 H 自由基和活性分子,加快反应进程,降低了溅射阈值。

3.1.3 射频放电等离子体清洗方法

射频放电等离子体清洗技术因为产生的等离

子体能量相对较低,对光学元件产生的二次损害也小,常用于光学元件的清洗,如同步辐射光学元件的碳污染清洗,但却很少应用到 EUV 光刻机的多层膜反射镜清洗中。

XEI Scientific 公司的 Christopher G. Morga^[32] 等人采用商用射频源产生等离子体氧对 EUV 光学元件进行清洗。利用石英天平测量清洗速率,将碳氢比为 1:1 的聚合物态碳污染镀于石英天平表面,工作距离为 15 cm,射频功率为 17 W,背景压为 0.2 Torr,分别用纯 O_2 和 O_2/N_2 的混合气进行清洗,清洗 30 min 后,工作气体为纯 O_2 时清洗了 10 nm 的碳污染层, O_2/N_2 混合气体则清洗了 12 nm。实验发现清洗速率在清洗过程中随着碳层厚度的减少逐渐降低;功率越大,清洗速率越大;清洗环境真空度变低时,有效碰撞变少使清洗速率降低。用该清洗方法对同步辐射光束线 MET 中受污染的 KB 镜和 M7 镜进行清洗,经过 2 h 清洗,表面碳污染明显得到去除。

西班牙 CELLS-ALBA 实验室的 Eric Pellegrin 等人^[33-34] 采用商业 ICP GV10 \times 射频源激发不同工作气体对碳污染进行清洗,实验装置如图 7 所示。实验中,在石英天平以及 Ru 帽层多层膜样品表面镀 50~200 nm 厚的 a-C 模拟实际碳污染,利用石英天平测量清洗速率,并用 X 电子能谱仪(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)分析清洗前后碳污染样品表面的化学组成成分。

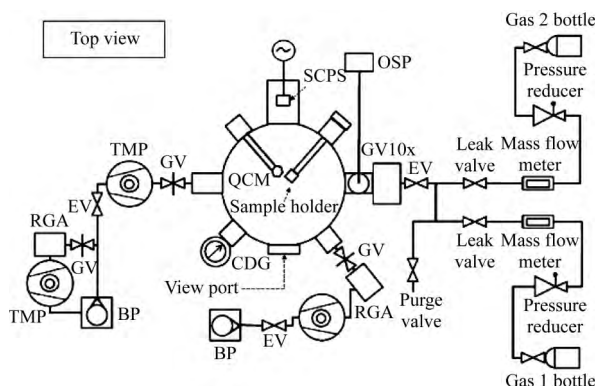


图 7 射频等离子体清洗碳污染装置示意图

Fig. 7 Cleaning equipment of carbon contamination with Radio Frequency(RF)-plasma

实验结果表明,在工作气体 O_2 中加入 4% 的 Ar 气后,清洗速率明显加快,最快清洗速率可以

达到 11.6 A/min。通过 XPS 谱对 Ru 帽层多层膜样品进行分析,结果表明 Ru 帽层明显发生氧化,生成 Ru_2O_3 和 RuO_2 等氧化物。为避免氧化,将工作气体换为不具有氧化性的 H_2/Ar 混合气,实验表明纯 H_2 的清洗速率最小,只有 0.07 A/min,而随着混合气体中 Ar 比例的增加以及射频源功率的增大,清洗速率随之变大,最大可达到 1.7 A/min。与之前 Graham 使用射频氢等离子体清洗碳污染相比,速率提高了一个量级,其原因在于氩气的衰弱电压较低,在等离子体激发过程中不仅充当催化剂,还担当着内部传输活性物质的介质。XPS 分析表明,利用 H_2 作为工作气体对样品造成的氧化损害较小。

综上所述,等离子体激发源和工作气体不同,清洗速率和效果差异较大。当工作气体为 O_2 时,其清洗速率快,是 H_2 的十倍左右,但在清洗过程中 O_2 容易造成表面氧化和损坏,所以需要严格控制清洗条件以及监测清洗截止点;当气体为 H_2 时,虽然速率相对较小,但清洗后对样品造成的氧化损坏较低。因此,需要根据实际情况选择相应的清洗方法。

上述清洗技术大多采用离线清洗方式,未来为了适应商业生产的要求,需要对多层膜反射镜表面碳污染进行在线清洗。对于射频放电和表面声波激励等离子体清洗技术,需针对极紫外光刻机的结构和空间限等问题,研究相应的等离子体激发和传输装置;同时为了降低清洗技术带来的氧化等损害,需要深入研究碳污染在线清洗条件控制和截止点检测技术。EUV 等离子体清洗技术,可直接使用光刻机的光源来激发等离子体实现在线清洗,但对于光路系统末端反射镜,由于多次反射造成 EUV 光强减弱,激发生成的等离子体数量降低,严重影响清洗效率。因此,如何提高末端等离子体的激发数量,对 EUV 等离子体清洗技术的在线应用十分重要。

3.2 活性氧清洗方法

活性氧清洗是利用紫外波段的光辐照 O_2 , 激发生成具有很强活性的自由基和臭氧等粒子,并与表面碳污染发生作用生成易挥发物质,达到碳污染清洗的目的。活性氧清洗碳污染的过程如图 8 所示。

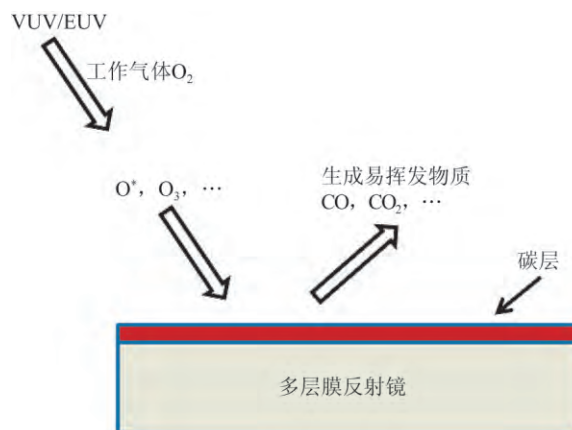


图 8 活性氧清洗碳污染原理示意图

Fig. 8 Mechanism of active O cleaning carbon contamination

日本先进科学与技术实验室的 K. Hamamoto 等人^[35-36]利用 NewSUBARU 的同步辐射 BL-3 光束线所产生的 VUV(172 nm)波段紫外光辐照氧气,对碳污染进行清洗。样品为 10.16 cm(4 英寸)大小的 Mo/Si 多层膜,碳污染厚度为 170 nm,用 GaAsP 光电二极管探测多层膜的反射率。为了探究背景环境对清洗的影响,他们设计了不同背景环境样品清洗实验,一种是在背景压力为 500 Pa 的低真空中通入 2×10^3 Pa 的 O_2 ;另一种是在普通大气下通入相同流量的 O_2 。通过检测得到低真空下的清洗速率为 2 nm/min,普通大气下的是 0.53 nm/min,低真空环境可提高清洗速率。用原子力显微镜测量清洗前后的表面粗糙度,在普通大气中样品的表面粗糙度增加了 0.51 nm,而在低真空中增加了 0.35 nm。最后,在低真空条件下对污染样品进行清洗,清洗前后反射率从 10% 恢复至 50%,并没有恢复到最大的 58%,由此表明在清洗过程中表面受到了一定程度的损坏。

该方法最大的优点是可直接用于在线清洗,清洗速率快,缺点则是会造成多层膜反射镜表面的粗糙度增加以及氧化,所以在清洗过程中同样需要严格控制清洗条件以及判断清洗截止点。该方法适用于表面镀有抗氧化帽层(如 TiO_2 , RuO 等)的多层膜反射镜清洗。

3.3 原子氢清洗方法

原子氢清洗技术是利用高温钨丝等特殊装置将氢气裂解为原子氢,与表面碳原子通过化学作用生成易挥发的小分子碳氢化合物,从而达到清洗目的。清洗过程如图 9 所示。

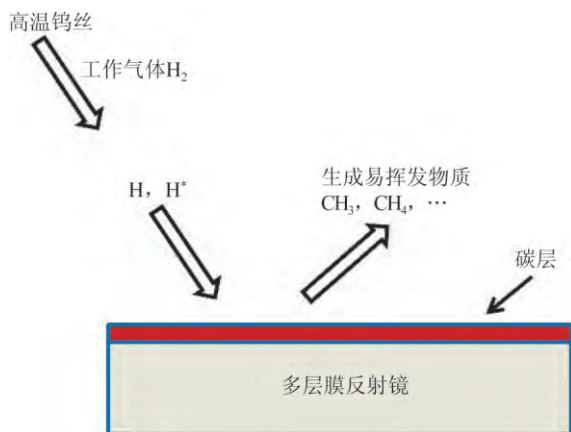


图 9 原子氢清洗碳污染原理示意图

Fig. 9 Mechanism of atomic hydrogen cleaning carbon contamination

美国桑迪亚实验室的 Samuel Graham^[37] 等人采用高温钨丝裂解法得到原子氢,并对碳污染样品进行清洗。氢源到样品的距离在 200 ~ 500 mm 内可调,角度在 0°~90°内变化。碳污染清洗速率用俄歇电子谱进行测量,反射率通过 EUV 波段反射率计进行检测。由实验结果可知:清洗速率随着清洗距离的增大而减小,与距离的平方成反比;角度越大,清洗速率越小。为提高清洗速率,加入石英弯管对原子氢进行收集和传输。当工作距离为 200 mm,角度为 0°时,对石墨态碳污染样品的清洗速率为 0.033 nm/min;对聚合物态碳污染样品的清洗速率为 0.067 nm/min,明显慢于其他方法。对标准多层膜样品进行原子氢清洗,经过 20 h 的清洗,Si 帽层的样品反射率降低 1.2%,Ru 帽层的样品反射率降低 0.5%,损害远低于其他清洗方法。用低能量离子束散射谱对表面进行分析,发现 Si 帽层多层膜表面有少部分 H 原子发生扩散,而 Ru 帽层多层膜样品则没有。Graham 采用上述清洗条件对一块已使用 20 个月、接受超过 5 亿个 EUV 辐照脉冲的多层膜反射镜进行清洗,初始反射率为 66.1%,使用后反射率下降至 48%,经过清洗反射率恢复至 61%。使用 AES 对反射镜进行检测,表面碳污染已经全部去除,但氧化物没有被清除。因此,原子氢清洗可以有效去除反射镜表面的碳污染并提高反射率,但对于已经被氧化的反射镜则不能完全恢复反射率。

荷兰等离子体物理研究所的 Chen^[38] 等人利用椭圆法实现了原子氢清洗碳污染的在线检测。

实验中,采用 3 种方式制备了聚合物态、石墨态和金刚石态 3 种形态的碳污染样品。清洗实验装置如图 10 所示,将 Woollam M-2000 型椭圆偏光光源的发射端和接受端精确地安装在清洗腔两侧,用于在线实时测量样品表面的碳层厚度。

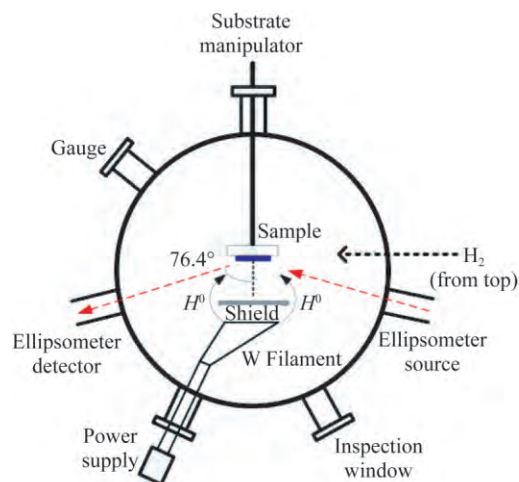


图 10 原子氢清洗碳污染装置示意图(荷兰等离子体物理研究所)

Fig. 10 Cleaning equipment of carbon contamination with atomic hydrogen (FOM-Institute for Plasma Physics)

清洗过程中,钨丝温度为 2 000 °C,氢气的通入压强为 20 kPa。实验结果表明,3 种类型的碳污染清洗速率均对温度有着很强的依赖性,并随着温度的升高呈现 e 指数增长。其中,由 EUV 辐照产生的碳污染清洗速率在 60 °C 时可达 0.2 nm/min, HOT filament 产生的碳污染清洗速率却只有 0.02 nm/min, PVD 的碳污染清洗速率为 0.06 nm/min。聚合物态碳污染的清除速率比石墨态的快 5~10 倍,主要原因是聚合物态碳污染在清洗过程中不需要加氢基因而清洗速率较快。

日本未来半导体先进技术公司的 Nishiyama 等人^[39] 在实验中利用 1 700 °C 的钨丝产生氢原子,对表面碳污染厚度为 11.2 nm 的多层膜反射镜进行清洗,实验装置如图 11 所示。氢气流量为 50 mL/min,为避免多层膜反射镜承受过多热量导致多层膜结构破坏,在样品与原子氢之间加入一个挡板,用来降低样品的表面温度。用原子力显微镜测量表面碳污染的厚度变化,得到碳污染的清洗速率为 0.37 nm/min。

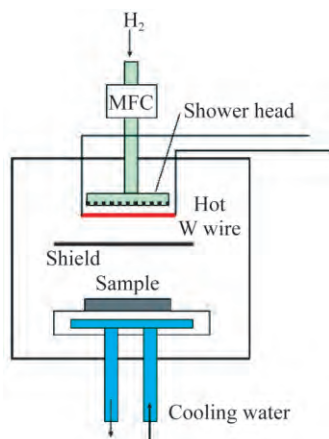


图 11 日本未来半导体先进技术公司的原子氢清洗碳污染装置示意图

Fig. 11 Cleaning equipment of carbon contamination with atomic hydrogen(MIRAI-Semiconductor Leading Edge Technologies)

日本 EUV 工艺技术研发部的 Oizumi^[40] 基于图 11 中的装置对原子氢清洗技术进行了系统研究。钨丝温度为 $1\ 800\ ^\circ\text{C}$, 氢气流量为 $100\ \text{mL/min}$, 清洗腔压强为 $7 \times 10^{-4}\ \text{Pa}$, 氢源到样品表面的距离为 $50\ \text{mm}$ 。待清洗的 Mo/Si 多层膜样品的初始反射率为 60% , 采用电子束沉积方法将碳层镀于样品的表面模拟碳污染。清洗前碳污染样品的反射率为 56.5% , 清洗之后反射率基本恢复。通过 XPS 分析表面清洗前后元素组分的变化, 可知碳元素基本清除, O 元素增多但量很少。出现 O 元素的主要原因是背景环境中的水蒸汽在高温钨丝的激发下, 生成具有较强活性

的 OH^- , OH^- 与表面发生相互作用。由此表明, 原子氢清洗技术本身不会对表面造成二次损害, 不过有较小的几率对表面产生氧化损害。

分析上述几个实例可知, 相对于其他清洗技术, 该方法的主要缺点是清洗速率较慢, 需要深入研究提高清洗速率的方法, 如利用特殊材料传输原子氢提高传输效率, 以及加入催化气体降低反应活化能; 主要优点是在清洗过程中对表面造成二次伤害的几率很小, 所以对清洗条件的控制更加灵活, 清洗截止点的测量要求不高。日本 EUV Process Technology Research Department 的 Motai^[41-42] 等人还发现原子氢可以清除 Ru 表面氧化物, 因此原子氢清洗方法也被认为是最有潜力的清洗方法。

4 结 论

随着 EUV 光刻技术的日趋成熟, 半导体工艺逐步向 $22\ \text{nm}$ 节点及以下的延伸。随着 EUV 光源功率的不断提高, 多层膜反射镜表面的污染也越来越严重, 造成多层膜反射镜的反射率下降, 影响曝光成像质量, 使光刻机无法正常工作。为降低碳污染对多层膜反射镜的危害, 清洗碳污染技术成为研究重点。本文详细介绍了有效清除 EUV 多层膜反射镜表面碳污染的方法, 分析对比了各清洗技术在清洗速率和效果等方面的优缺点, 为未来开展 EUV 多层膜表面碳污染在线清洗技术工作提供理论指导。

参考文献:

- [1] WOOD O, KOAY C S, PETRILLO K, *et al.*. EUV lithography at the $22\ \text{nm}$ technology node [J]. *SPIE*, 2010, 7636: 76361M.
- [2] 占平平, 刘卫国. EUV 光刻技术进展[J]. 科技信息, 2011(21): 44, 418.
ZHAN P P, LIU W G. Progress of EUVL technology[J]. *Science & Technology Information*, 2011 (21): 44, 418. (in Chinese)
- [3] WU B Q. Next-generation lithography for 22 and $16\ \text{nm}$ technology nodes and beyond[J]. *Science China Information Sciences*, 2011, 54(5): 959-979.
- [4] WANG L H, WANG X K, CHEN B. Study for dual-function EUV multilayer mirror [J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, 40(3): 571-574.
- [5] 杜宇禅, 李海亮, 史丽娜, 等. $32\ \text{nm}$ 节点极紫外光刻掩模的集成研制[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1034002.
DU Y CH, LI H L, SHI L N, *et al.*. Integrated development of extreme ultraviolet lithography mask at $32\ \text{nm}$ node [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1034002. (in Chinese)
- [6] 王珣, 金春水, 李春, 等. 极紫外反射镜氧化物保护层的制备与表征[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0331001.
WANG X, JIN CH SH, LI CH, *et al.*. Preparation and characteristic of oxide capping-layer on ex-

- treme ultraviolet reflective mirrors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0331001. (in Chinese)
- [7] 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.
- ZHUW X, JIN CH SH, KUANG SH Q, *et al.*. Design and fabrication of the multilayer film of enhancing spectral-purity in extreme ultraviolet [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1031002. (in Chinese)
- [8] GONG X P, LU Q P, LU G Q. Establishment of theoretical model and experimental equipment for researching on carbon contamination of EUV multilayer mirror [J]. *SPIE*, 2015, 9446: 94460W.
- [9] STREIN E, ALLRED D. Eliminating carbon contamination on oxidized Si surfaces using a VUV excimer lamp [J]. *Thin Solid Films*, 2008, 517(3): 1011-1015.
- [10] LIN B J. Making lithography work for the 7-nm node and beyond in overlay accuracy, resolution, defect, and cost [J]. *Microelectronic Engineering*, 2015, 143: 91-101.
- [11] 朱京涛, 黄秋实, 白亮, 等. 不同本底真空度下 SiC/Mg 极紫外多层膜的制备和测试[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(12): 2946-2951.
- ZHU J T, HUANG Q SH, BAI L, *et al.*. Manufacture and measurement of SiC/Mg EUV multilayer mirrors in different base pressures [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12): 2946-2951. (in Chinese)
- [12] 尉伟, 张波, 洪远志, 等. 同步辐射光源光束线光学元件碳污染原位清洗研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2013, 33(6): 552-555.
- WEI W, ZHANG B, HONG Y ZH, *et al.*. In-Situ cleaning of carbon-contaminated optical components in beam-line of synchrotron radiation light source [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2013, 33(6): 552-555. (in Chinese)
- [13] 周洪军, 钟鹏飞, 霍同林, 等. 同步辐射活化氧清洗碳污染的研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(3): 907-910.
- ZHOU H J, ZHONG P F, HUO T L, *et al.*. Cleaning of carbon contamination on Si wafer with activated oxygen by synchrotron radiation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 907-910. (in Chinese)
- [14] 尉伟, 王秋平, 王勇, 等. 等离子体清洗同步辐射光学元件[J]. *真空科学与技术学报*, 2009, 29(6): 704-706.
- WEI W, WANG Q P, WANG Y, *et al.*. Plasma cleaning of contaminated optical components of synchrotron radiation beam-line [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2009, 29(6): 704-706. (in Chinese)
- [15] 徐向东, 周洪军, 洪义麟, 等. 同步辐射光学元件辐照污染及其清洁处理[J]. *真空科学与技术学报*, 2000, 20(2): 114-119.
- XU X D, ZHOU H J, HONG Y L, *et al.*. Cleaning of contaminated optics devices by synchrotron radiation [J]. *Vacuum Science and Technology (China)*, 2000, 20(2): 114-119. (in Chinese)
- [16] 钟鹏飞, 周洪军, 霍同林, 等. 光学元件清洗过程中同步辐射活化氧的研究[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(12): 1921-1925.
- ZHONG P F, ZHOU H J, HUO T L, *et al.*. Research of oxygen activation by synchrotron radiation in optical component cleaning process [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(12): 1921-1925. (in Chinese)
- [17] 鹿国庆. 极紫外多层膜光学元件表面污染研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2014.
- LU G Q. *Study on Surface Contamination of EUV Multilayer Optics* [D]. Changchun: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2014. (in Chinese)
- [18] CHEN J Q, LOUIS E, WORMEESTER H, *et al.*. Carbon-induced extreme ultraviolet reflectance loss characterized using visible-light ellipsometry [J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(10): 105705.
- [19] CHEN J Q, LEE C J, LOUIS E, *et al.*. Characterization of EUV induced carbon films using laser-generated surface acoustic waves [J]. *Diamond and Related Materials*, 2009, 18(5-8): 768-771.
- [20] BOLLER K, HAELBICHR P, HOGREFE H, *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.
- [21] ROSENBERG A, MANCINI D C. Deposition of carbon on gold using synchrotron radiation [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1990, 291(1-2): 101-106.
- [22] KURTR, VAN BEEK M, CROMBEEN C, *et al.*. Radiation-induced carbon contamination of optics [J]. *SPIE*, 2002, 4688: 702-709.
- [23] SHIRAISHIM, YAMAGUCHI T, YAMAZAKI A, *et al.*. A simple modeling of carbon contamination on EUV exposure tools based on contamination experiments with synchrotron source [J]. *SPIE*, 2011, 7969: 79690N.
- [24] KYRIAKOU G, DAVIS D J, GRANT R B, *et al.*. Electron impact-assisted carbon film growth on Ru(0001): implications for next-generation EUV lithography [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2007, 111(12): 4491-4494.
- [25] HOLLENSHEADJ, KLEBANOFF L. Modeling radiation-induced carbon contamination of extreme ultraviolet optics [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2006, 24(1): 64-82.
- [26] 王珣, 金春水, 匡尚奇, 等. 极紫外光辐照下表面碳沉积污染的计算模型[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 531001.
- WANG X, JIN CH SH, KUANG SH Q, *et al.*. Simulation model of surface carbon deposition contamination under extreme ultraviolet radiation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 531001. (in Chinese)
- [27] 鹿国庆, 卢启鹏, 彭忠琦, 等. 极紫外光学元件表面碳污染模型的建立[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1234001.
- LU G Q, LU Q P, PENG ZH Q, *et al.*. Carbon contamination modeling on extreme ultraviolet optic surfaces [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1234001. (in Chinese)
- [28] OESTREICH, KLEIN R, SCHOLZE F, *et al.*. Multilayer reflectance during exposure to EUV radiation [J]. *SPIE*, 2000, 4146: 64-71.
- [29] KOSTERN, MERTENS B, JANSEN R, *et al.*. Molecular contamination mitigation in EUVL by environmental control [J]. *Microelectronic Engineering*, 2002, 61-62: 65-76.
- [30] MALYKHIN E M, LOPAEV D V, RAKHIMOV A T, *et al.*. Plasma cleaning of multilayer mirrors in EUV lithography from amorphous carbon contaminations [J]. *Moscow University Physics Bulletin*, 2011, 66(2): 184-189.
- [31] DOLGOV A, LOPAEV D, RACHIMOVA T, *et al.*. Comparison of H₂ and He carbon cleaning mechanisms in extreme ultraviolet induced and surface wave discharge plasmas [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, 47(6): 065205.
- [32] MORGAN C G, NAULLEAU P P, REKAWA S B, *et al.*. Removal of surface contamination from EUV mirrors using low-power downstream plasma cleaning [J]. *SPIE*, 2010, 7636: 76361Q.
- [33] PELLEGRIN E, ŠICS I, REYES-HERRERA J, *et al.*. Characterization, optimization and surface physics aspects of in situ plasma mirror cleaning [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2014, 21(2): 300-314.
- [34] GONZÁLEZCUXART M, REYES-HERRERA J, ŠICS I, *et al.*. RF plasma cleaning of optical surfaces: a study of cleaning rates on different carbon allotropes as a function of RF powers and distances [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 81(7): 533-536.
- [35] HAMAMOTO K, TANAKA Y, WATANABE T, *et al.*. Cleaning of extreme ultraviolet lithography optics and masks using 13.5 nm and 172 nm radiation [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 2005, 23(1): 247-251.
- [36] TAKAGI N, ANAZAWA T, NISHIYAMA I, *et al.*. Evaluation of the contamination removal capability and multilayer degradation in various cleaning methods [J]. *SPIE*, 2010, 7823: 782327.
- [37] GRAHAM S JR, STEINHAUS C A, CLIFT W M, *et al.*. Atomic hydrogen cleaning of EUV multilayer optics [J]. *SPIE*, 2003, 5037: 460-469.
- [38] CHEN J Q, LOUIS E, HARMSSEN R, *et al.*. In situ ellipsometry study of atomic hydrogen etching of extreme ultraviolet induced carbon layers [J].

- Applied Surface Science*, 2011, 258(1): 7-12.
- [39] NISHIYAMA Y, ANAZAWA T, OIZUMI H, *et al.*. Carbon contamination of EUV mask: film characterization, impact on lithographic performance, and cleaning [J]. *SPIE*, 2008, 6921: 692116.
- [40] OIZUMI H, YAMANASHI H, NISHIYAMA I, *et al.*. Contamination removal from EUV multilayer using atomic hydrogen generated by heated catalyzer [J]. *SPIE*, 2005, 5751: 1147-1154.
- [41] MOTAI K, OIZUMI H, MIYAGAKI S, *et al.*. Atomic hydrogen cleaning of Ru-capped EUV multilayer mirror [J]. *SPIE*, 2007, 6517: 65170F.
- [42] MOTAI K, OIZUMI H, MIYAGAKI S, *et al.*. Cleaning technology for EUV multilayer mirror using atomic hydrogen generated with hot wire [J]. *Thin Solid Films*, 2008, 516(5): 839-843.

作者简介:



宋 源(1988—),男,吉林白山人,博士,2011 年于贵州大学获得学士学位,2014 年、2016 年于中科院大学分别获得硕士、博士学位,主要从事极紫外多层膜表面碳污染清洗技术的研究。E-mail:songyuan_SHOW@126.com

通讯作者:



卢启鹏(1964—),男,黑龙江齐齐哈尔人,研究员,博士生导师,1987 年于浙江大学获得学士学位,1990 年于中科院长春光机所获得硕士学位,主要从事同步辐射光束线关键技术、近红外光谱技术的研究。E-mail:luqipeng@126.com