

极紫外光学器件辐照污染检测技术

王 珣^{1,2}, 金春水^{2*}, 匡尚奇², 喻 波²

(1. 中国科学院大学, 北京 100049;

2. 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: 总结并讨论了极紫外光刻技术中, 有关极紫外光学器件受辐照污染的“在线”检测方法。简要介绍了极紫外光刻系统的原理、反射镜膜层结构以及表面污染产生的机理; 指出光刻系统中“在线”检测的技术要求; 分析了目前几种主要表面检测技术的特点; 给出了每种方法在极紫外光学系统中的应用潜力; 最后, 指出光纤椭偏仪在极紫外光学系统的“在线”表面污染检测中具有良好的应用前景。

关键词: 极紫外光刻; 碳污染检测; 光纤椭偏仪

中图分类号: O484.5; O434.19 文献标识码: A doi:10.3788/CO.20140701.0079

Techniques of radiation contamination monitoring for extreme ultraviolet devices

WANG Xun^{1,2}, JIN Chun-shui^{2*}, KUANG Shang-qi², YU Bo²

(1. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

2. *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: jincs@sklao.ac.cn*

Abstract: This paper reviews the “in situ” surface analysis and monitoring techniques for contamination induced in Extreme Ultraviolet Lithography (EUVL). It introduces the EUV lithography, reflective multilayer mirror and the mechanism of carbon contamination induced by EUV. It points out the requirement of the “in situ” surface analysis techniques in EUV lithography. The mainly surface analysis techniques are discussed. Analyzed results show the applied potentiality of each measurement used in the EUV optical system. Finally, it points out that the Fiber-based ellipsometry has further application prospect in “in situ” surface contamination monitoring of EUV lithography.

Key words: Extreme Ultraviolet Lithography (EUVL); carbon contamination monitoring; fiber-based ellipsometry

1 引言

计算机、手机等电子产品与我们的生活关系越发密切。电子产品的核心部件微处理器和集成电路的发展几乎完全取决于光刻技术的进步。光刻技术是将高复杂度的空间图形刻蚀在涂有光刻胶的硅片上^[1],最后形成一组互相联系和交叉的多层结构。而光刻机的作用就是实现这个完整的刻蚀过程。光刻最小线宽的表达式为^[2]:

$$L_w = k_1 \frac{\lambda}{NA}, \quad (1)$$

式中: λ 为光刻波长, NA 为投影系统数值孔径, k_1 为工艺因子,由光学系统参数、分辨率增强技术和光刻胶性能等因素决定。从等式可以看出,减小曝光波长可以有效提高分辨率。

当前芯片制造业所使用的光刻系统主要是基于 248 和 193 nm 的深紫外光 (DUV) 系统^[2-6]。低于 193 nm 的候选光刻技术是基于 13.5 nm 的极紫外光刻 (EUVL)。由于绝大多数材料在 EUV 波段都有很强吸收,与 DUV 的透射光学系统不同,EUVL 使用反射式光学系统,而且必须在高真空环境下。

在反射光学系统中,另一个关系到光刻效率的重要因素是 EUV 镜面的反射率。为了获得高反射率,反射镜片需要结合布拉格 (Bragg) 反射定律镀制多层高反膜^[6]。在 13.5 nm 波段,每个镜片最大的反射率理论值可以达到 75% 以上。

随着曝光波长的缩短,光子能量进一步提高,镜面碳污染问题越来越严重。在短波光学领域,人们早已注意到短波光学器件表面的辐照污染是造成能量损失的主要原因。提高曝光效率主要是去除光学器件表面污染。因此需要先确定污染来源、形成机制以及检测方法。

离线 EUV 污染检测技术较多,但大多数缺乏亚纳米程度的探测能力,设备庞大,所需的真空环境甚至比光刻机还要苛刻,很难加载到光刻设备中。为此,本文主要介绍了几种满足光刻设备基本需求的表面检测技术,并侧重于不拆卸光学元件的“在线”检测手段。分析了当前几种主流表

面检测技术,给出每种方法在极紫外光学系统中的应用潜力。最后,根据光纤偏偏仪的特点,指出其在“在线”表面污染检测技术的独特优势以及良好的应用前景。

2 多层膜反射镜

光刻机主要包括辐照光源、照明光学系统、刻有投影图案的掩模板、微缩光学系统和用于记录掩模图形的基底。针对不同波长,光刻机的结构和调制光束的机理都有明显的差别。图 1 是 EUV 光刻机的反射式镜面结构。

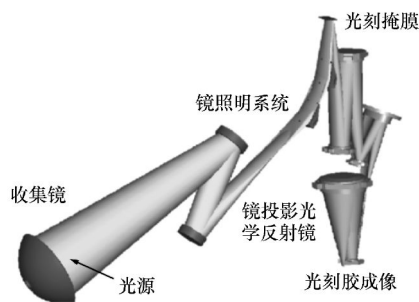


图 1 EUVL 光学系统结构图

Fig. 1 Schematic diagram of EUVL optical system

EUV 光从真空正入射到普通材料表面,其反射率均小于 1%,透射深度为几百纳米左右。根据多层膜反射理论,在反射过程中增加更多的界面可以增加总体反射率。因此,多层膜 (Multilayer) 结构被用于提高 EUV 镜面的反射率^[6]。通过在镜面交替镀制折射率不同的两种材料来实现。在不同材料分界面的电子密度差异越大越有利于提高反射率,因而一般选用原子序数相差较大的两种材料制作反射膜^[7]。

增多界面是利用每个膜层反射光的干涉叠加来提高反射率,当波长为 λ ,入射角为 θ ,周期厚度为 d 时,由 Bragg 定律^[5-6]:

$$m\lambda = 2d\sin\theta \sqrt{1 - \frac{2\delta}{\sin^2\theta}}, \quad (2)$$

式中: m 是最大的 Bragg 级数, δ 是折射率实部的加权平均偏移量。

在 EUV 波段,国外有报道使用 Mo/Si 多层膜

结构已经获得接近 70% 的反射率^[2]。图 2 为用于 EUV 辐射的 Mo/Si 多层膜结构。图 3 显示一个周期为 50 的 Mo/Si 多层膜反射率^[8]测量曲线。因为多层膜反射率对整个 EUV 光学系统有重要的影响,提高 EUV 镜片的反射率也是 EUV 光刻机商业化使用的重要手段。

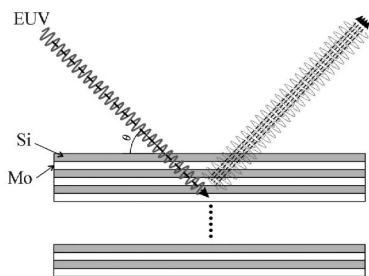


图 2 钼硅多层膜结构

Fig. 2 Alternating layers of silicon and molybdenum in a multilayer structure

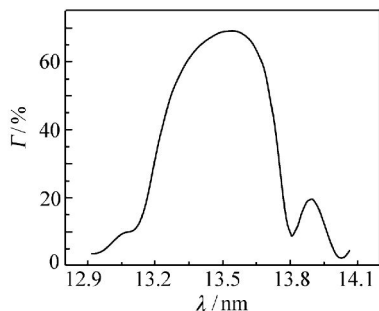


图 3 周期为 50 的钼硅多层膜的波长—反射率测量图

Fig. 3 Measured curve of reflectance versus wavelength for a Mo/Si multilayer mirror consisting of 50 periods^[8]

3 EUV 光学元件的污染

EUV 元件使用在高真空中才能使残余气体对 EUV 的吸收达到最小。真空腔中包括微缩光学元件、各种传感器、EUV 光刻胶、电线和许多其他部件^[11]。这些器件可能会在真空下放气,影响曝光过程。因此,有必要知道腔内残余气体的成分以及放气规律。

一般真空腔内部的残余气体主要包括氢气、

氧气、水和碳氢化合物。其中水和氧气的危害最大,它们可以腐蚀反射镜表面,造成反射率下降和反射镜面型的改变,例如腐蚀 Mo/Si 多层膜外表面的硅。通过在反射镜表面镀制抗氧化层,可以很好地抑制这种氧化作用^[13-14]。

碳氢化合物在 EUV 曝光过程中对光学器件的污染损伤最为严重。在光刻机的理论设计中必须要加以考虑并解决。进一步的实验表明,被 EUV 照射的光学元件表面产生小于 10 eV 的二次光电子,不断破坏吸附在光学元件表面的碳氢化合物的化学键,最终形成碳沉积层。析出的碳污染量取决于真空腔内残余的有机气体成分,以及 EUV 辐射光子密度,这就是光学元件表面污染主要形成机理。

碳氢化合物会使碳在光学表面沉积(如图 4)。碳污染沉积的主要过程可以概括为 3 步:(1)碳氢分子的吸附;(2)分子扩散转移;(3)光子或二次电子的诱导分裂^[13]。镀制抗氧化层无法阻止碳污染的积累,甚至真空条件更好的同步辐射内部器件也有碳污染被观察到^[12]。

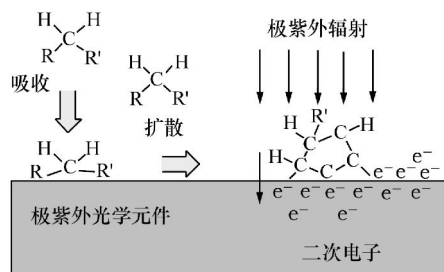


图 4 EUV 辐照下光学器件的污染机制

Fig. 4 Physical mechanism of carbon contamination on EUV optics

碳沉积层对反射率影响很大,IMD 软件模拟显示,2 nm 的纯石墨层能导致 5% 的反射率损失。如果这发生在每一个 EUV 反射镜上,对光刻系统来说是致命的。无法达到“30 000 h 内每个镜片反射率不能低于 1%^[15]”的基本要求。所以,光刻机内部应该有针对污染的检测和清洗装置。

在实际的光刻商业生产中,不可能经常关闭庞大复杂的光刻设备进行维护。所以,当光刻机的光学系统因为碳污染出现光能损失之前,污染

物就应该在不打开真空腔的条件下被及时发现和处理并且监控污染设备需要在较广的探测范围中快速响应,兼以高敏感度、高精度的监控污染程度,探测出污染物的多种物理和化学性质,并与真空环境很好的兼容,操作简单,较小的占用光刻机内部空间等。

4 污染检测装置的表面分析技术

目前有许多基于“离线”EUV 污染检测技术。例如, X 射线光子能谱仪(X-ray Photon Spectrometer)和俄歇电子能谱仪(AES),俄歇深度轮廓分析仪和极紫外光谱仪(EUV spectrometer)等^[17-22]。这些技术大多缺乏对亚纳米尺度下的检测能力,而且有些技术所需的真空环境要比光刻机本身还要苛刻。另外,所有这些技术都需要占用大量内部真空区域,所以将其改装成“在线”的检测设备是不切实际的。

下面列举了目前几种主流的“在线”污染探测技术,有些已经成功应用于其他类似的检测设备,有些理论上具有可行性,属于相对成熟的检测手段。它们具有不同的特点,也被很多研究机构提出可以作为“在线”监测技术手段搭载在光刻机中:

- (1) 探测 EUV 诱导光电流(EUV Induced Photocurrent);
- (2) 消隐电势能谱仪(Disappearance Potential Spectroscopy, DAPS);
- (3) X 射线荧光仪(X-ray Fluorescence, XRF);
- (4) 激光激发表面声波(Laser-generated Surface Acoustic Waves, LG-SAWs);
- (5) 探测二次电子增益(Secondary Electron Yield, SEY);
- (6) 保偏光纤椭偏仪(Polarization Preserving Fiber Based Spectroscopic Ellipsometry)。

4.1 探测 EUV 诱导光电流

EUV 光束照射任何材料都可以产生光电子,材料特性和电场强度决定着光电转换效率。EUV 诱导光电流以下公式描述:

$$I_{\text{photocurrent}} = \int_0^{\infty} k(Z, E(\lambda, x)) f(x) dx, \quad (3)$$

式中: Z 为原子序数, E 为电场强度, λ 为波长, x 为光电子产生深度。函数 $f(x)$ 随着深度 x 变化, $k(Z, E)$ 是光电子到达表面或逃逸的几率。

当 EUV 光入射多层膜表面,入射和反射光场耦合叠加,在膜层间产生驻波场^[16]。多层膜的结构决定着 X 射线驻波在膜间的传播。图 5 显示 Mo/Si 多层膜中随深度变化的电场强度。驻波的周期波长是 EUV 波段的一半,电磁场中波节和波腹的电场振幅不同,能量也不同,激发出的光电子也不同。波腹经过被辐射材料会产生大量二次电子,在波节通过的区域几乎没有。经测算, EUV 入射光子能量为 92 eV,产生的光电子能量小于 10 eV,平均电子自由程只有 3~5 nm^[24]。只有接近表面的光电子才能逃逸并转换成光电流。正因如此,表面稍有起伏将引起光电流很大变化^[23]。

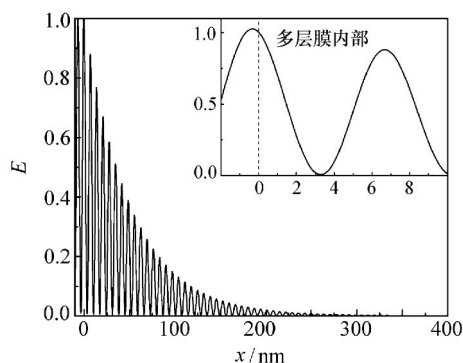


图5 多层膜内部电场强度图

Fig. 5 Electric field intensity as a function of depth in a multilayer structure

表面光电流(EUV Induced Photocurrent)技术作为一种污染检测手段,其主要优点是对污染层水平高度有极高的敏感度,结构简单,不需要额外的光源,易于实现。然而正是因为光电流对入射光波长的过度依赖,也使这种技术有了很大的缺陷。首先,就目前的 EUV 光源技术,13.5 nm 波长的单色性远远达不到要求,实际中无法确定光电流的起伏是由波长带宽还是表面污染物堆积造成的;其次,无法确定表面附近的驻波模型和光电转换效率;再者,光电流的测量结果缺乏直接的化学信息,能提供的数据只有表面污染层的厚度变

化信号。因此,这些缺陷使得这项技术在 EUV 光刻机中的使用受到极大的限制。

4.2 消隐电势能谱

电子轰击材料表面时,当电子能量高于材料吸收边时,表面会有铸孔(core holes)出现。这将导致反弹电子减少,就好像电子消失了一样。基于这种现象的分析仪器称为消隐电势能谱(Disappearance Potential Spectroscopy, DAPS)^[27-28]。

一个完整的 DAPS(见图 6)系统包括电子枪、样品支撑台、减速场分析器(Retarding field analyzer, RFA)。入射电子能量是可调的,减速场可以探测比入射电子能量更低的电子,所以只有弹性碰撞的电子可以自由通过。RFA 搜集器中的电子流和入射电子能量是可以测量和分析的^[28]。

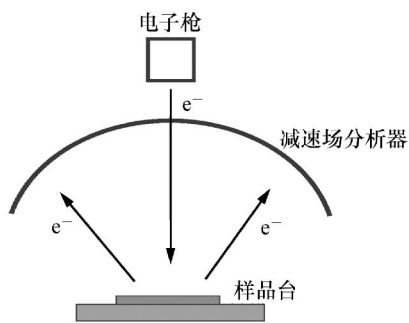


图 6 消隐电势能谱仪

Fig. 6 Schematic configuration of DAPS

X 射线光子能谱仪(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)在表征物质表面特性、厚度、化学组成方面有很高的精度,也能够满足亚纳米级的检测。但其对于真空度的极高要求,使其污染“在线”检测应用受到很大限制^[17]。就这方面而言, DAPS 具有很大优势。

XPS 中的电子来自原子内层电子激发,所以逃逸电子没有能量损失。然而弹性碰撞的电子不仅可以无能量损失地入射一定深度,而且弹性碰撞反射回的电子也没有能量损失。因此, DAPS 的电子运动距离是 XPS 中电子的两倍,能量损失也更大。这说明 DAPS 比其他类型的电子光谱仪在同样条件下具有更高的表面精度。预计 DAPS 信号精度可达三分之一原子层厚度。不仅分辨率高,它的另一个优点是可以区分不同元素。虽然 DAPS 具有探测样品表面变化方面的应用潜力,

但其自身存在一些无法克服的缺陷:无法探测污染层厚度信息, RFA 体积庞大,而且从一些实验数据中发现大量难以消除的信号噪声。因此,将其应用到光学表面污染监测有很大问题需要克服。

4.3 X 射线荧光光谱仪

X 射线荧光光谱仪(X-ray Fluorescence, XRF)是利用高能 X 射线照射材料,使材料本身产生 X 射线荧光。这种荧光隐含物质信息,广泛应用于许多化学分析中。但对于 C、O 等主要构成污染层的低原子序数的元素,荧光探测器很难区别。而且,激发出的 X 射线能量非常低,以致于任何吸收都要考虑,并且整个系统也要放在真空环境中。

为了减少散射造成的背景干扰,全反射 X 射线荧光光谱仪(Total Reflection X-ray Fluorescence, TXRF)可以用于探测低原子序数元素^[29-32], TXRF 的全反射光路可减少透过光造成的能量损失,可将全部入射光用于激发样品,使同样功率 X 射线能够得到更强的信号。图 7 为 TXRF 示意图。全反射的光路还可以使荧光探测器靠近样品,最大限度地收集荧光辐射。另外,加入一个滤光片可以减少高能光子,有利于降低背景噪声。滤光片可以用高能截止滤光片或单色多层膜滤光片。

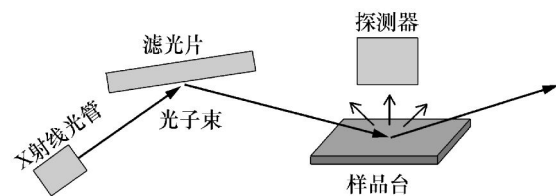


图 7 全反射式 X 射线荧光光谱仪

Fig. 7 Schematic diagram of TXRF

荧光辐射强度由探测光束强度和发散角、样品原子 K 电子层对光子的吸收系数、荧光效率、探测器效能、样品元素的浓度和本身对材料的吸收几个因素决定。由于是针对碳元素的荧光探测,所以荧光效率是固定的。我们要提高激发光束的强度以提高探测范围。另外,如果受激辐射和原子吸收边的能量差异很小,原子 K 电子层对

光电子吸收系数会很大。BN-anode X 光管发出 392 eV 的辐射激发 227 eV 的荧光。为了增加探测器效能,选用固态探测器,例如,在低原子序数的探测中使用硅探测器或硅漂移探测器^[23]。

TXRF 主要优点是可以探测元素特征和数量。但是,探测器很难响应较薄的碳层产生的荧光辐射,无法获得亚波长的精度。另一个关键缺陷是如果污染层的厚度小于光电子的逃逸深度,就无法得到污染层的厚度信息。并且 TXRF 系统非常复杂,需要占用一部分真空区域,探测器必须和样品贴的非常近,这在 EUV 光刻系统中是不允许的。基于以上原因,这项技术的实际应用也存在较大的困难。

4.4 激光激励表面声波

人们发现在绝大多数材料表面镀膜以后,表面声波的波速会发生改变,这样就可以用来确定材料表面是否沉积薄膜。对于各向同性材料的表面波速 C ,通过杨氏模量 E ,泊松比 ν 和材料密度 ρ 决定^[34]:

$$C = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}}. \quad (4)$$

在较大块材料中,声速不依赖于激发频率。

声波振幅在表面时最大,随着深度增加呈指数减少。声波入射深度与波长成比例,并且频率越高入射深度越小。这就意味着高频声波受薄膜影响更显著。因此,薄膜表面的波速取决于频率,这种现象类似色散。所以测量速度和频率能够获得薄膜和基底信息。

表面波可以通过脉冲激光获得,声波可以用压电式转换器测量。依据不同的膜层和基底组合以及厚度,拟合测量曲线的色散关系,可以得到诸如杨氏模量、泊松比、密度和厚度等薄膜特性。此外,晶体基底对高频表面声波有一个很低的吸收率。探测器的精度也超过了 1 nm。另外需要注意, LG-SAWs 探测器的工作温度不能超过 100 °C。

LG-SAWs(见图 8)的主要优点是能够精确区分碳的诸多同素异形体。然而目前 LG-SAWs 还只是一种接触探测技术,不能够应用到投影光学中,因为接触能够导致光学器件面型变化,因此仅

用在照明光学系统中。

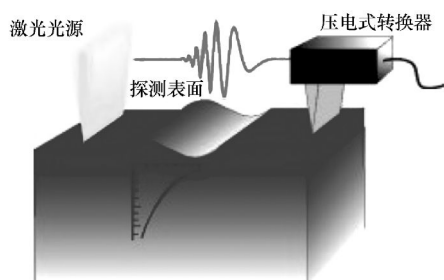


图 8 激光激励表面声波探测

Fig. 8 Schematic diagram of LG-SAW measurement

4.5 二次电子增益探测

在高能量初始电子束、离子束、光子束的轰击下,固体表面会有低于初始能量的电子逃逸,这种现象就是二次电子溅射 (Secondary Electron Yield, SEY)。当电子撞击固体材料表面时,电子既有弹性反射也有非弹性反射。根据电子能量损失过程,初始电子和材料的主要作用方式:材料电离;声子和等离子体的激发;带间跃迁和自由电子散射。而非弹性碰撞散射出的电子,可以说是“真正”的二次电子。这种“真正”的二次电子可以定义为非弹性碰撞散射电子的数量与初始入射电子的比值。

大多数二次电子的动能低于 50 eV,能量频谱峰值范围在 2 ~ 5 eV 之间,逃逸深度约为 3 ~ 5 nm。对于碳污染层,二次电子的逃逸深度约为 3 nm^[35]。这使得 SEY 成为一个很好的候选检测手段。

SEY 检测主要优点是具有小于 0.1 nm 的探测分辨率,对光致污染检测已经足够了。缺点是如果膜层比二次电子的逃逸深度更大,探测器将无法测量,而且 SEY 技术缺乏污染层的厚度信息,电子束容易使材料气化,产生测量误差。因此对于 SEY 的使用应该慎重。

4.6 保偏光纤椭偏仪

椭偏仪 (Spectroscopic Ellipsometry, SE) 是一种非接触、无损、高敏感度的检测手段,利用偏振光的特性探测膜质、表面及材料微结构的特性。它的测量参数是线偏振光经过表面反射以后的偏

振变化情况。用 Ψ 和 Δ 表示,这两个值与菲涅耳反射系数的比率有关:

$$\rho = \frac{R_p}{R_s} = \frac{\frac{E_{rp}}{E_{ip}}}{\frac{E_{rs}}{E_{is}}} = \frac{|E_{rp}| \exp(i\Delta_p) |E_{is}| \exp(i\Delta)}{|E_{rs}| \exp(i\Delta_s) |E_{ip}| \exp(i\Delta)} = \frac{|E_{rp}| |E_{is}| \exp(i\Delta_p)}{|E_{rs}| |E_{ip}| \exp(i\Delta_s)} = \tan\Psi \exp(i\Delta), \quad (5)$$

式中, $\tan\Psi = \frac{|E_{rp}| |E_{is}|}{|E_{rs}| |E_{ip}|}$ 与 p、s 分量电场振幅的比率有关, $\Delta = \Delta_s - \Delta_p$ 为 p、s 分量经样品反射后的相位差, Δ_i 为 p、s 入射时的相位。

目前椭偏仪有很多不同构造方案,以应用于不同的使用领域。应用最广泛的是“旋转分析椭

偏仪”,如图 9 所示,包括光源、起偏器、样品、连续旋转分析器和探测器。起偏器让入射样品的光变成线偏振光,连续旋转分析器和探测器提供反射光偏振态的信息。

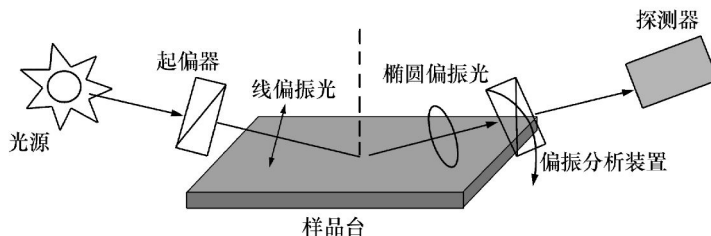


图 9 典型的旋转椭偏仪结构

Fig. 9 Typical configuration of rotating analyzer ellipsometer

偏振角可直接测量,光学常数和厚度可以通过光学模型拟合得到,对于光学模型的建立要依赖 Ψ 和 Δ 。拟合过程也非常复杂,需要大量的经验和技巧^[25]。由于测量反射光的偏振态,相比直接探测反射率可以避免 EUV 光源中的杂光干扰。而且已有其他构造的椭偏仪,成功应用于其他检测和动态控制等领域,这对椭偏仪在光刻机中的使用提供重要的参考价值。不仅如此,椭偏仪的光源、偏振分析器和另外一些元件可以放在真空腔外部,方便其光路瞄准。椭偏仪的分辨率也可精确到单分子层的沉积^[26]。相比普通的椭偏仪需要平行度很高入射和反射光束,光刻物镜的镜面基底大多是非球面的,以致于无法提供平行光束,虽然可以添加补偿镜改善,但增加了校正的复杂程度,使得椭偏仪的测量进一步复杂化。

如图 9 所示,“在线”椭偏仪需要视线将光束瞄准样品表面,这也限制了其应用到 EUVL 中所有镜片。对此,国外研究人员开始使用保偏光纤(polarization preserving fibers)传递光到样品上。图 10 为光纤椭偏仪的结构。检测光纤中的偏振态是非常重要的,光在光纤中传输时的偏振态会

随着光纤的温度和压力而变化,可以探测光纤末端平面反射回来的偏振态来确定保偏光纤对偏振态的影响。结合光波导,让光纤椭偏仪兼顾了灵

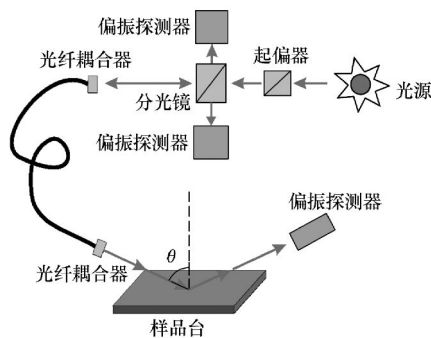


图 10 基于光纤的椭偏仪结构图

Fig. 10 Structural diagram of fiber-based ellipsometry

活性和精确性。相比于其他几种“在线”检测手段的优缺点,保偏光纤椭偏仪有独特的优势,也是目前能够满足 EUVL 设计要求的最佳“在线”检测手段。

用椭偏仪的测量数据建立的函数模型不但可以确定厚度信息,最主要的是能得到膜层的光学

常数,有利于辨别多种形态的碳污染层,保偏光纤的引入又兼顾了椭偏仪“在线”检测的灵活性和精确性。椭偏仪所建立的模型是基于布鲁格曼(Bruggerman)的有效中值近似,能够得到污染层在可见光条件下的光学特性,预测 EUV 波段的反射率损失,实验报道中已经得到了验证。在日后设计用清除碳污染层的结构单元时,可以实时监测膜层厚度并分析碳层的性能特点,从而指导清除工作,提高碳污染层的清除效率。

5 结束语

考虑到 EUV 光刻机的商业因素,必须尽可能的延长它的工作寿命与降低后期维护成本,这就要求“在线”的情况下,对 EUV 反射镜表面污染层的探测和清理。以上 6 种方法,理论上虽然都能够检测出碳污染层,但并不是所有方法都能达到 EUV 光刻机的“在线”检测要求, LG-SAWs、SEY、Spectrometer Ellipsometry 可以实现污染层的“在线”检测。

参考文献:

- [1] BAKSHI V. *EUV Lithography*[M]. Bellingham; SPIE Press, 2008, 2(1):19-20.
- [2] ATTWOOD D. *Soft X-Rays and Extreme Ultraviolet Radiation: Principles and Applications*[M]. Cambridge: Cambridge Press, 1999.
- [3] RONSE K. Optical lithography—a historical perspective[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2006, 7:844-857.
- [4] 窦银萍, 孙长凯, 林景全. 激光等离子体极紫外光刻光源[J]. *中国光学*, 2013, 6(1):20-33.
DOU Y P, SUN CH K, LIN J Q. Laser-produced plasma light source for extreme ultraviolet lithography[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1):20-33. (in Chinese)
- [5] FAY B. Advanced optical lithography development, from UV to EUV[J]. *Microelectronic Eng.*, 2002, 61-62:11-24.
- [6] 张立超. 极紫外多层膜技术研究进展[J]. *中国光学*, 2010, 3(6):554-565.
ZHANG L CH. Progress in EUV multilayer coating technologies[J]. *Chinese Optics*, 2010, 3(6):554-565. (in Chinese)
- [7] SPILLER E. *Soft X-Ray Optics*[M]. Bellingham; SPIE Press, 1994.
- [8] ZOETHOUT E, SIPOS G, VAN DE KRUIJS R W, *et al.*. Stress mitigation in Mo/Si multilayers for EUV lithography[J]. *SPIE*, 2003, 5037:872-878.
- [9] 朱京涛, 宋竹青, 丁涛, 等. 极紫外 Mg/SiC、Mg/Co 多层膜的稳定性[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6):1380-1386.
ZHU J T, SONG ZH Q, DING T, *et al.*. Stability of Mg/SiC, Mg/Co EUV multilayers[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6):1380-1386. (in Chinese)
- [10] 陈波, 何飞. 月基地球等离子体层极紫外成像仪的光学设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9):2057-2062.
CHEN B, HE F. Optical design of moon-based earth's plasmaspheric extreme ultraviolet imager[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9):2057-2062. (in Chinese)
- [11] MEILING H, MEIJER H, BANINE V, *et al.*. First performance results of the ASML alpha demo tool[J]. *SPIE*, 2006, 6151:615-108.

(1) 使用 LG-SAW 探测 EUV 光照下的碳层, 既可以得到膜层厚度也可以得到污染层的机械特性。通过分析杨氏模量(< 100 GPa), 得到污染层中的氢原子含量, 从而分析出碳层的机械强度和不同原子的聚合程度。这对日后碳污染层的清理有很高的参考价值。

(2) 应用“在线”SEY 碳沉积层, 可以得到小于 0.1 nm 的测量精度, 当碳层被清理时, SEY 也能得到一个相反的 SEY 信号。

(3) 以上两种检测手段相比, 光纤椭偏仪是最具有优势的检测手段。在日后设计用清除碳污染层的结构单元时, 可以实时监测膜层厚度并分析碳层的性能特点, 从而指导清除工作, 提高碳污染层的清除效率。

综上所述, 保偏光纤偏振光谱仪是目前最适合应用于 EUV 光刻系统中使用的“在线”污染检测技术, 希望通过广大科技工作者的努力, 椭圆偏振光谱仪可在其他光学器件的监测领域发挥更重要的作用。

- [12] BOLLER K J, HAELBICH R P, HOGREFE H, *et al.*. Investigation of carbon contamination of mirror surfaces exposed to synchrotron radiation[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Phys. Res.*, 1983, 208:273-279.
- [13] HOLLENSHEAD J, KLEBANOFF L. Modeling radiation-induced carbon contamination of extreme ultraviolet optics[J]. *J. Vacuum Science Technology*, 2006, B 24:64-82.
- [14] NAITO T, TADANO M, TERUNUMA N, *et al.*. Investigation of carbon contamination on SR-irradiated devices[J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section a-Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, 2004, 527:624-631.
- [15] MERTENS B, WEISS M, MEILING H, *et al.*. Progress in EUV optics lifetime expectations[J]. *Microelectronic Eng.*, 2004, 73-74:16-22.
- [16] OESTREICH S, KLEIN R, SCHOLZE F, *et al.*. Multilayer reflectance during exposure to EUV radiation[J]. *SPIE*, 2000, 4146:64-71.
- [17] OKOROANYANWU U, JIANG A, DITTMAR K, *et al.*. Monitoring reticle molecular contamination in ASML EUV Alpha Demo Tool[J]. *SPIE*, 2010, 7636:76360H.
- [18] OKOROANYANWU U, DITTMAR K, FAHR T, *et al.*. Analysis and characterization of contamination in EUV reticles [J]. *SPIE*, 2010, 7636:76361Y.
- [19] 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]. *J. Phys. Chem.*, 2007, C111:4491-4494.
- [20] MATSUNARI S, AOKI T, MURAKAMI K, *et al.*. Carbon deposition on multi-layer mirrors by extreme ultra violet ray irradiation[J]. *SPIE*, 2007, 6517:65172X-8.
- [21] KOSTER N, MERTENS B, JANSEN R, *et al.*. Molecular contamination mitigation in EUVL by environmental control[J]. *Microelectronic Eng.*, 2002, 61-2:65-76.
- [22] LEE D H, TOMIE T, JESSIE D, *et al.*. Detection of atomic-level surface contamination by extreme ultraviolet photoelectron spectroscopy technology[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2009, 37:1490-1494.
- [23] HILLERET N, SCHEUERLEIN C, TABORELLI M. The secondary-electron yield of airexposed metal surfaces[J]. *Appl. Physics a-Materials Science Processing*, 2003, 76:1085-1091.
- [24] MALINOWSKI M E, STEINHAUS C, CLIFT W M, *et al.*. Controlling contamination in Mo/Si multilayer mirrors by Si surface capping modifications[J]. *SPIE*, 2002, 4688:442-453.
- [25] CHEN J Q, LOUIS E, LEE C J, *et al.*. Detection and characterization of carbon contamination on EUV multilayer mirrors [J]. *Optics Express*, 2009, 17:16969-16979.
- [26] COLLINS R W. In-situ ellipsometry as a diagnostic of thin-film growth-studies of amorphous-carbon[J]. *J. Vacuum Science Technology a-Vacuum Surfaces*, 1989, Films 7:1378-1385.
- [27] VERHOEVEN J, LOS J. The influence of an electron beam on oxidation of polycrystalline nickel surfaces, monitored by disappearance potential spectroscopy(DAPS)[J]. *Surface Science*, 1976, 58:566-574.
- [28] KIRSCHNER J, STAIB P. Disappearance potential spectroscopy[J]. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. amp; Processing*, 1975, 6:99-109.
- [29] STRELI C, WOBRAUSCHEK P, BAUER V, *et al.*. Total reflection X-ray fluorescence analysis of light elements with synchrotron radiation and special X-ray tubes[J]. *Spectrochimica Acta Part B-Atomic Spectroscopy*, 1997, 52:861-872.
- [30] STRELI C, AIGINGER H, WOBRAUSCHEK P. Light-element analysis with a new spectrometer for total-reflection X-ray-fluorescence[J]. *Spectrochimica Acta Part B-Atomic Spectroscopy*, 1993, 48:163-170.
- [31] STRELI C, WOBRAUSCHEK P, LADISICH W. Total-reflection X-ray-fluorescence analysis of light-elements under various excitation conditions[J]. *X-Ray Spectrometry*, 1995, 24:137-142.
- [32] STRELI C, WOBRAUSCHEK P, AIGINGER H. A new X-ray tube for efficient excitation of low-z-elements with total reflection X-ray-fluorescence analysis[J]. *Spectrochimica Acta Part B-Atomic Spectroscopy*, 1991, 46:1351-1359.
- [33] STRELI C, WOBRAUSCHEK P, SCHRAIK I. Comparison of SiLi detector and silicon drift detector for the determination of low Z elements in total reflection X-ray fluorescence [J]. *Spectrochimica Acta Part B-Atomic Spectroscopy*, 2004, 59:

1211-1213.

[34] SCHNEIDER D, SCHWARZ T. A photo acoustic method for characterizing thin films[J]. *Surface Coatings Technology*, 1997, 91:136-146.

[35] VOREADES D. Secondary electron emission from thin carbon films[J]. *Surface Science*, 1976, 60:325-348.

作者简介:



王 珣(1987—),男,辽宁大连人,博士研究生,2010年于沈阳理工大学获得学士学位,主要从事极紫外多层膜技术等方面的研究。E-mail:gocga@126.com



匡尚奇(1981—),男,吉林长春人,博士,副研究员,2009年于吉林大学获得博士学位,主要从事短波长光学光刻、极紫外多层膜技术等方面的研究。E-mail:physicskuang@163.com



金春水(1964—),男,博士,研究员,博士生导师,1987年于浙江大学获得学士学位,1990年、2003年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事紫外、极紫外-软X射线光学技术等方面的研究。E-mail:jincs@sklao.ac.cn



喻 波(1986—),男,硕士,助理研究员,主要从事极紫外多层膜方面的研究。E-mail:yubodisan@126.com

《光学 精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学 精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

* 美国工程索引 EI 核心期刊

* 中国精品科技期刊

* 中文核心期刊

* 百种中国杰出学术期刊

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国仪器仪表学会

地址:长春市东南湖大路3888号

邮编:130033

电话:0431-86176855

传真:0431-84613409

电邮:gxjmgc@sina.com

网址:http://www.eope.net

定价:50.00元/册