

极紫外光学元件表面碳污染模型的建立

鹿国庆^{1,2} 卢启鹏¹ 彭忠琦¹ 龚学鹏¹

(¹ 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)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 为有效评估和预测在极紫外光辐照下,极紫外光刻机中残留的碳氢化合物气体在多层膜光学元件表面造成的碳污染状况,建立了光学元件表面碳沉积的复杂理论模型,描述了残留碳氢化合物在光学表面的传输,在极紫外光子和二次电子激发下引起的分子分解,并在光学表面形成碳沉积层的过程。模型预测结果和实验数据吻合得很好。理论分析表明引起碳氢化合物分解的主要原因是光子分解而不是二次电子分解。碳层的生长依赖于碳氢化合物气体偏压和极紫外光强,具有较轻分子量的碳氢化合物($< \sim 100$ amu)对污染的贡献很小。同时当基底温度适度增加时(~ 30 °C),能够加速表面碳氢化合物分子的解吸附,可有效减少碳污染。

关键词 光学器件;极紫外光刻;碳氢化合物污染模型;多层膜光学元件;二次电子

中图分类号 O434.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1234001

Carbon Contamination Modeling on Extreme Ultraviolet Optic Surfaces

Lu Guoqing^{1,2} Lu Qipeng¹ Peng Zhongqi¹ Gong Xuepeng¹

(¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to estimate and predict the carbonaceous contamination of extreme ultraviolet (EUV) multilayer optical element surfaces caused by EUV irradiation in the presence of residual hydrocarbon gases, a comprehensive model of radiation-induced carbon growth on EUV optic surfaces is presented. The model describes the transport of residual hydrocarbons to the irradiated area and the subsequent dissociation of the hydrocarbon by both EUV ionization and secondary electron excitation. The dissociated hydrocarbons are reactive and form a carbonaceous film. Model predictions fit experimental data quite well. Theoretical analysis indicates that the primary cause of hydrocarbon dissociation is bond breaking by direct photon absorption rather than by secondary electrons. Calculations also demonstrate that the growth of carbon film depends on various conditions of hydrocarbon partial pressure and EUV power. The model successfully predicts that light hydrocarbons ($< \sim 100$ amu) pose a negligible risk to EUV optics and modest increases in substrate temperature (~ 30 °C), which will substantially reduce optic contamination by increasing hydrocarbon desorption from the surface.

Key words optical devices; extreme ultraviolet lithography; hydrocarbon contamination modeling; multilayer optical element; secondary electrons

OCIS codes 340.7480; 340.7470; 260.5130; 310.1860

1 引 言

极紫外光刻(EUVL)作为 11~22 nm 节点的主流光刻技术,正逐步向商业化迈进^[1-2]。ASML 的

NXE:3300B 样机已经研制完成,而国内尚处于关键技术研究阶段。目前制约国外 EUVL 实现商业化的关键因素有三个^[2-6]:1)高功率光源的开发;2)低

收稿日期: 2013-05-03; **收到修改稿日期**: 2013-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(11079035)、国家科技重大专项(2012ZX02702001)、应用光学国家重点实验室开放基金(Y2Q03FQK02)

作者简介: 鹿国庆(1986—),男,博士研究生,主要从事极紫外光刻光学元件寿命方面的研究。E-mail: ods888@163.com

导师简介: 卢启鹏(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事同步辐射光束线和极紫外光刻光学元件寿命关键技术等方面的研究。E-mail: luqipeng@126.com(通信联系人)

缺陷或缺陷掩膜的实现;3)高分辨率、高灵敏度和低线宽粗糙度光刻胶的制备。此外,EUVL中多层膜光学元件表面的碳沉积污染也是一个非常重要的问题。

EUVL的工作波长为13.5 nm,该波段的光会被大部分物质所吸收,所以光刻机必须保持在真空中,光学系统全部采用反射系统,反射镜用交替叠加的Mo/Si多层镀膜技术制作,反射率在正入射条件下可达到67%~70%^[7-8]。在EUVL曝光过程中,光刻机中残留的碳氢化合物(C_xH_y)会在多层膜光学元件表面造成碳沉积污染。 C_xH_y 的主要来源是光刻机曝光腔中残留的 C_xH_y 气体、光刻机各组件释放出来的 C_xH_y 气体以及光刻胶因放气作用释放出来的 C_xH_y 气体^[9-10]。实验发现,当光刻机中 C_xH_y 压强达到 1.33×10^{-8} Pa或更高时,碳沉积就会出现^[11]。碳层对极紫外(EUV)辐照有着强烈地吸收,例如1.5 nm厚度的石墨层会使得一块反射镜的相对反射率($\Delta R/R$)降低2%^[12]。光刻机中大约有10块反射镜,其中照明系统约4~5块,反射投影系统一般是6镜系统^[13-14],工业上对反射投影系统的要求是在30000 h曝光时长内,每块镜片的反射率损失不能超过1.6%^[12]。

Boller等^[15]认为碳沉积与曝光时间、 C_xH_y 气体压强和基底温度有关, C_xH_y 首先吸附在光学表面,然后被由EUV辐照基底产生的二次电子分解产生碳沉积。Hollenshead等^[16]不同意二次电子分解起主要作用的结论,认为 C_xH_y 是被EUV光子分解。Kurt等^[17-18]的研究发现碳层增长与 C_xH_y 种类和压强有关。Shiraishi等^[19]认为碳沉积速率由EUV光强的大小和 C_xH_y 的多少决定。

EUVL中光学元件的碳污染控制是一个极为关键的问题,准确而有效地评估和预测光学元件表面的碳沉积状况,对光刻机使用寿命的评估和碳污染的监测及清洗具有重要的指导意义。本文从光学元件表面 C_xH_y 的分解和传输模型入手,建立了一个较为完整的理论模型,对模型的准确性进行了验证,比较了光子和二次电子对碳层厚度的贡献,分析了在不同 C_xH_y 压强和EUV光强下碳层的生长变化,不同碳原子数 C_xH_y 对碳层的贡献以及温度的影响。

2 模型的建立

实验证明,在没有EUV辐照下,光学元件表面的碳污染极其微弱^[11]。这是因为环境中的 C_xH_y

仅仅是物理吸附在光学元件表面,与表面的结合很弱,并且 C_xH_y 分子相互之间的作用非常微弱,要想形成比较大的污染,必须要在分子间形成更强的化学键,即C-C键。在EUV辐照下, C_xH_y 分子会发生裂化,即大的分子分解为具有更强活性的小基团,然后这些基团与光学表面或相互之间发生反应并进行聚合,形成类似于石墨的无定形碳沉积层(其中含有部分氢),密度 $[(1.2 \pm 0.2) \text{ g/cm}^3]$ ^[20]远小于纯石墨的密度 $[(2.2 \pm 0.2) \text{ g/cm}^3]$ 。C-C基团被化学束缚在基底表面,与初始时物理吸附态相比具有更强的解吸附能,从而形成比较稳定的碳层,不易被移除。随着曝光的持续, C_xH_y 分子不断进行交叉耦合,碳层厚度进一步增加。

为了建立具体的理论模型,把整个碳污染过程分为两部分:1) EUV辐照引起的 C_xH_y 分解模型,由模型建立碳层厚度的微分方程;2) 光学表面 C_xH_y 传输模型,由模型建立光学表面 C_xH_y 浓度微分方程。将两个过程联立起来,就可以得到完整的碳污染模型。

2.1 C_xH_y 分解模型和碳层厚度微分方程的建立

吸附在光学元件表面的 C_xH_y 主要在以下两种不同的物理机制下分解(图1):1)入射的部分EUV光子直接被 C_xH_y 吸收,EUV光子直接破坏分子的化学键;2) EUV光子与基底相互作用产生的二次电子引起的间接吸收分解。EUV光子首先被光学元件基底吸收,转化为初级光电子,这些光电子经过非弹性散射,产生大量低于20 eV能量的二次电子,穿过基底到达光学元件表面,然后二次电子离开表面与吸附的 C_xH_y 发生反应(低能量二次电子对 C_xH_y 具有很强的分解活性^[21])。

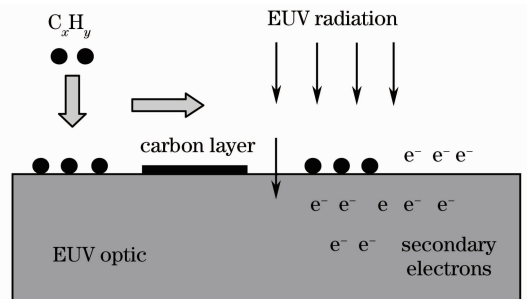


图1 EUV辐照引起的 C_xH_y 分解模型

Fig. 1 EUV radiation-induced hydrocarbon cracking module

简单起见,假设EUV辐照是均匀、单色($\lambda = 13.5 \text{ nm}$, $h\nu = 92.5 \text{ eV}$)的光束,垂直入射于光学元件表面(这里取Ru作为最上层)。大部分的光子

(约 67%) 从表面反射出去, 剩下的光子有一部分被吸附在表面的 C_xH_y 直接吸收, 引起分子分解; 还有一部分光子进入基底, 转化为二次电子, 返回基底表面引起分子分解。取碳层—真空界面为坐标原点, 正方向指向基底, 则基底表面的坐标为 $x=D$ (D 为碳层厚度), $x \rightarrow \infty$ 表示基底深处。

首先计算直接被表面 C_xH_y 吸收的 EUV 光子引起的分解速率 G , 光子被 C_xH_y 吸收的数量与通过 C_xH_y 的光子数量成正比; 对于非反射基底, 与表面入射光子通量成正比, 对于反射光学元件, 还要加上反射回来的部分, 于是得到 G 为

$$G = \sigma_{ph} N_{hv}^0 (1 + R) N_{ad}, \quad (1)$$

式中 N_{hv}^0 是表面入射光子通量 ($\text{mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), σ_{ph} 是光

子分解碰撞截面 (mm^2), R 是反射率 (约 67%), N_{ad} 是吸附在基底表面的 C_xH_y 分子浓度 (mm^{-2})。

其次计算表面 C_xH_y 分子被二次电子分解的部分, 在此之前, 需要知道从光学表面发射出的二次电子通量 I_{SE} ($\text{mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), I_{SE} 与被基底吸收的光子数量有关^[22]:

$$I_{SE} = \frac{1}{2} N_{hv}^0 (1 - R) h\nu \int_z M \mu \exp\left(-\frac{z}{L}\right) dz, \quad (2)$$

式中 M 为物质常量, μ 为线性衰减吸收系数, L 为电子逃离深度。

二次电子不单从基底 Ru 中产生, 还会从不断增加的碳层中产生, 所以这里的积分区域分为基底 Ru 和碳层 (厚度为 D) 两部分, 即

$$I_{SE} = \frac{1}{2} N_{hv}^0 (1 - R) h\nu \left\{ \left[-L_C M_C \mu_C \exp\left(-\frac{z}{L_C}\right) \right]_0^D + \left[-L_{Ru} M_{Ru} \mu_{Ru} \exp\left(-\frac{z}{L_{Ru}}\right) \right]_D^\infty \right\} = \frac{1}{2} N_{hv}^0 (1 - R) h\nu L_C M_C \mu_C \left\{ \frac{L_{Ru} M_{Ru} \mu_{Ru}}{L_C M_C \mu_C} \exp\left(-\frac{D}{L_{Ru}}\right) + \left[1 - \exp\left(-\frac{D}{L_C}\right) \right] \right\}. \quad (3)$$

与(1)式类似, 由二次电子引起的 C_xH_y 分解速率为

$$F(D) = \sigma_{SE} I_{SE}(D) N_{ad}, \quad (4)$$

式中 σ_{SE} 是相应的二次电子分解碰撞截面。

把直接光子吸收引起的分解和间接二次电子引起的分解结合起来就可以得到吸附在表面的 C_xH_y 分解速率

$$\frac{dC}{dt} = G + F(D) =$$

$$[\sigma_{ph} N_{hv}^0 (1 + R) + \sigma_{SE} I_{SE}(D)] N_{ad}. \quad (5)$$

知道了基底表面 C_xH_y 的分解速率, 就可以建立碳层厚度的微分方程:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{dC}{dt} n_c l_c \frac{1}{N_C}, \quad (6)$$

式中 n_c 是单个 C_xH_y 分子中包含的碳原子数, l_c 是碳原子的厚度, N_C 是单位面积内单层碳原子数量。这里假定只有一种 C_xH_y 气体, 碳原子为立方体, 紧挨着排列在一起, 则

$$l_c = V^{1/3} = \left(\frac{M}{\rho N_{Av}} \right)^{1/3}, \quad (7)$$

$$N_C = \frac{1}{l_c^2}, \quad (8)$$

式中 M 为分子摩尔质量, ρ 为密度, N_{Av} 为阿伏伽德罗常数 ($6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)。

则碳沉积层厚度的微分方程为

$$\frac{dD}{dt} = \frac{dC}{dt} n_c l_c \frac{1}{N_C} = n_c V \frac{dC}{dt} = n_c V [\sigma_{ph} N_{hv}^0 (1 + R) + \sigma_{SE} I_{SE}(D)] N_{ad}. \quad (9)$$

2.2 光学表面 C_xH_y 传输模型和 C_xH_y 浓度微分方程的建立

光学表面 C_xH_y 传输模型决定了可用于分解的吸附在表面的 C_xH_y 分子浓度, 它的主要来源是环境中 C_xH_y 分子与基底发生的碰撞, 分子以一定的速率 (与气体偏压成正比) 与基底表面碰撞, 在某一时刻只有有限的分子吸附在表面, 当某一区域被分子占据, 多余的分子就会从这片区域反射回环境中。吸附在表面的分子有一个特征停留时间, 之后会挥发重新返回环境中, 即分子解吸附, 挥发速度取决于环境温度以及 C_xH_y 分子和基底表面的结合能。此外, 基底表面的 C_xH_y 分子浓度还要考虑到 EUV 光子以及二次电子的分解, 如图 2 所示。

由此可以得到光学元件表面 C_xH_y 分子浓度的微分方程:

$$\frac{dN_{ad}}{dt} = s\Gamma_{mol} - N_{ad} \left[\frac{s\Gamma_{mol}}{N_{ad}^{max}} + \frac{1}{\tau} + \sigma_{ph} N_{hv}^0 (1 + R) + \sigma_{SE} I_{SE}(D) \right], \quad (10)$$

式中右边第一项 $s\Gamma_{mol}$ 是气体分子撞击光学表面引起的碰撞吸附速率, s 是粘附系数, 取值为 1, 表明每一个分子都会被吸附在表面, 但有一个平均停留时间, Γ_{mol} 是分子碰撞速率。光刻机中 C_xH_y 气体压强

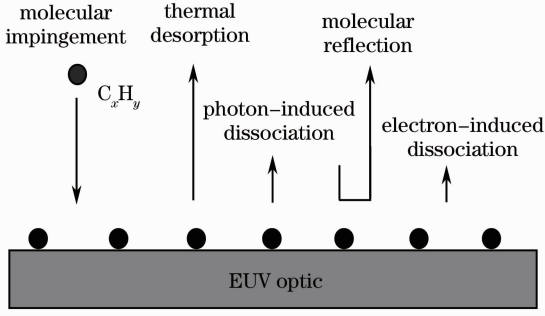


图2 表面 C_xH_y 传输模型

Fig. 2 Hydrocarbon transport module on surface

约 2.66×10^{-7} Pa, 可视为理想气体, 此时 Γ_{mol} 和气体压强成正比, 由气体动力学方程可得:

$$\Gamma_{mol} = \frac{1}{4}nv = \frac{1}{4} \frac{p}{k_B T} \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}}, \quad (11)$$

式中 T 为环境温度, k_B 为波尔兹曼常量 ($1.3806505 \times 10^{-23}$ J/K), m 为分子量。

(10) 式中右边第二项 $-s\Gamma_{mol} \frac{N_{ad}}{N_{ad}^{max}}$ 描述的是入射的多余分子从表面反射的部分, 因为环境中 C_xH_y 分子和表面分子之间的相互作用很弱, 在表面很难形成超过一层的 C_xH_y 分子层, N_{ad}^{max} 是表面 C_xH_y 分子的最大浓度。

(10) 式中右边第三项 $\frac{N_{ad}}{\tau}$ 描述的是由于分子自发热解吸附作用从表面挥发的部分, τ 是分子在表面的平均停留时间, 与分子的表面结合能 E_A 有关, 由 Arrhenius 方程给出

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_A}{RT}\right), \quad (12)$$

式中 $\tau_0 = 1 \times 10^{-13}$ s, R 为普适气体常量。

(10) 式中右边第四项和第五项是 C_xH_y 分子在光子和二次电子作用下发生的分解。将 (9) 式和 (10) 式联立起来, 就得到了碳层厚度和表面 C_xH_y 分子浓度的微分方程组, 通过解方程能够得到碳层厚度随时间和其他各项参数的变化。

曝光初始时刻, 碳层厚度为零, 有一定初始量的 C_xH_y 分子吸附在表面, 由此可得方程组的初始条件: $t = 0$ 时, $D = 0, N_{ad}(0) = N_{ad}^0$ 。令 (10) 式为 0, 同时忽略辐通量 ($N_{hv}^0 = 0, I_{SE} = 0$), 可得到 N_{ad}^0 为

$$N_{ad}^0 = \frac{s\Gamma_{mol}}{[s\Gamma_{mol}/N_{ad}^{max} + 1/\tau]}. \quad (13)$$

2.3 模型预测结果和实验数据的对比

为验证模型的准确性, 利用文献中实验数据和建立的理论模型获得的预测结果进行比较。所选用

2 组实验数据来自 ALS 同步辐射光源中心^[16], C_xH_y 气体总偏压为 1.33×10^{-6} Pa, EUV 平均强度约 0.843 mW/mm²。模拟中 C_xH_y 气体压强也取 1.33×10^{-6} Pa, 当选取的 C_xH_y 为正壬烷 C_9H_{20} 时, 预测结果和 ALS 实验数据吻合得很好, 如图 3 所示。图中采用对数坐标, 碳层厚度做为 EUV 剂量的函数。这说明模型具有很好的准确性, 因此可以利用建立起来的理论模型对污染深入地研究, 探讨一些关键因素的影响, 并在实际工作中对碳沉积的形成和清洗给予指导。

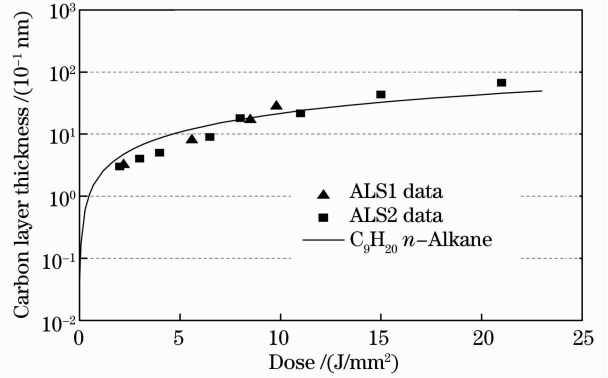


图3 预测和实验的最终碳层厚度

Fig. 3 Predicted and experimental final carbon thicknesses

3 碳沉积主要影响因素的分析

利用建立的理论模型, 对影响碳沉积过程的一些主要因素进行详细的分析, 这些因素包括光子和二次电子对碳层厚度贡献的比较、不同压强和光强下碳层的生长变化、不同碳原子数的 C_xH_y 对碳层的贡献以及温度的影响。

3.1 光子和二次电子对碳层厚度的贡献

在碳沉积污染过程中, 一个比较重要的问题是 C_xH_y 分解主要是由直接吸收的 EUV 光子引起, 还是由间接产生的二次电子引起。大量的实验发现^[23-27], 不管是用 EUV 光子或电子 e^{-1} 作为辐射源, 都能观察到类似的污染现象。两者对污染贡献的大小可以通过下面的比值得到

$$\frac{V_e}{V_p} = \frac{\sigma_{SE} I_{SE}(D)}{\sigma_{ph} N_{hv}^0}. \quad (14)$$

由 (3) 式可知, 二次电子数量随着碳层厚度地增加而减少, 因此该比值也随着污染过程变化。图 4 是二次电子数量随碳层厚度变化的曲线, 趋向于两个渐进线, 分别与纯的 Ru 基底和一个厚的碳层相对应。在曝光初始时刻 (即 $t = 0, D = 0$) 二次电子的量最多, 约 0.021, 表示每吸收 100 个光子, 约有 2.1

个电子逃离基底表面。将光子以及二次电子引起的分解碰撞截面： $\sigma_{ph} = 0.03787 \times 10^{-2} \text{ nm}^2$ 和 $\sigma_{SE} = 0.045 \times 10^{-2} \text{ nm}^2$ 代入(14)式，得 0.0242。此比值表明即使在二次电子贡献最大的情况下，其对碳层厚度的贡献也仅有 2.4%，因此可以得出：碳沉积主要是由直接吸收的 EUV 光子引起。

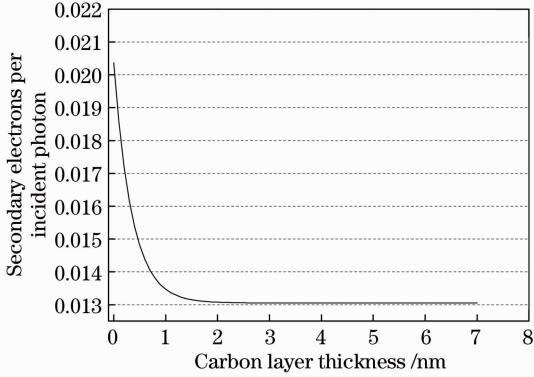


图 4 二次电子数量随碳层厚度的变化预测

Fig. 4 Predicted secondary electron number as a function of carbon layer thickness

3.2 压强和光强对污染的影响

EUV 光学元件表面出现碳沉积的直接原因是残留 C_xH_y 气体在 EUV 辐照下的分解， C_xH_y 的多少和光强的大小对碳增长的影响最为直接。图 5 是正壬烷 C_9H_{20} 在 10 h 的曝光时间内在不同光强下碳层厚度随压强的变化示意图，当压强在 $1 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 之间时，碳层厚度呈线性增长，在这个压强范围内，EUV 光子足量，表面 C_xH_y 数量有限，碳沉积由表面 C_xH_y 浓度决定；当压强增加至约 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ ， C_xH_y 表面覆盖度开始趋于饱和，碳层增长取决于 EUV 光强。

图 6 是 C_9H_{20} 在 10 h 的曝光时间内在不同压强下碳层厚度和 EUV 光强的关系。随着光强的增加，

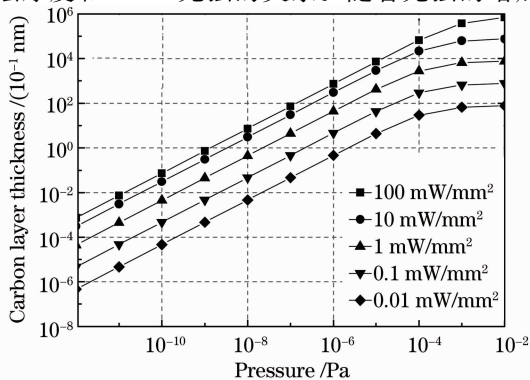


图 5 压强对碳层厚度(C_9H_{20})的影响

Fig. 5 Dependence of pressure on carbon thickness for C_9H_{20}

碳层厚度呈线性增长，此时表面 C_xH_y 数量足量，碳沉积取决于光子数；当光强达到约 100 mW/mm^2 时，增长开始下降，此时表面 C_xH_y 数量有限，光子没有得到充分利用。

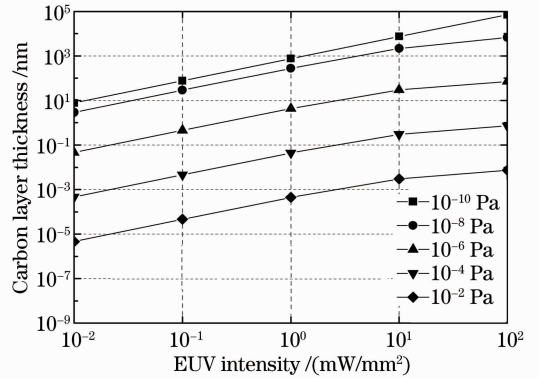


图 6 光强对碳层厚度(C_9H_{20})的影响

Fig. 6 Dependence of light intensity on carbon thickness for C_9H_{20}

3.3 碳原子数对污染的影响

光刻机中残留 C_xH_y 的种类是多种多样的，不同碳原子数的 C_xH_y 对碳层的贡献是不同的。图 7 是不同碳原子数的正烷烃对碳层的贡献，从预测结果可以看到，含碳原子数少的低分子量 C_xH_y 对污染的贡献很小，这是因为低分子量 C_xH_y 分子在光学表面的停留时间很短；只有当分子量大于 115 amu (C_9H_{20}) 时才能观察到明显的碳层增长。对于较重的 C_xH_y 分子(大于 C_{10})来说，分子的沉积速率(即碰撞频率 Γ_{mol})大致相同，唯一不同的是分子质量。Kurt 等^[17-18]的研究间接证实了这一点。

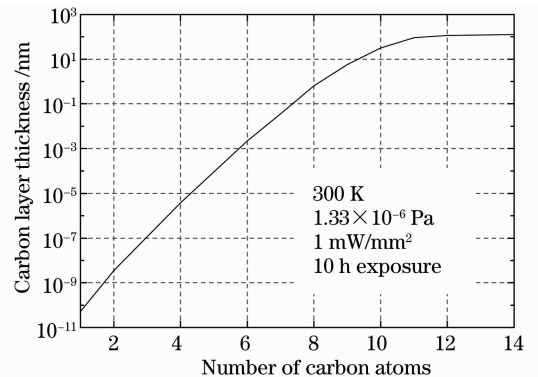


图 7 碳原子数对碳层厚度的影响

Fig. 7 Number of carbon atoms as a function of carbon thickness

3.4 温度的影响

光刻机正常工作时温度是室温(即 300 K)，随着曝光时间的增加，光学元件的温度会有一些的上升，碳层增长也会随之变化。图 8 是 C_8H_{18} 、 C_9H_{20} 、

$C_{10}H_{22}$ 三种正烷烃在 280 K~330 K 温度下模拟碳层厚度的变化曲线。从图中可以看到,对于给定的气体,随着光学表面温度的上升,碳沉积不断减少;当温度到达 330 K 时,碳沉积几乎可以忽略。这主要是因为当温度增加时, C_xH_y 分子的表面停留时间减少,导致光学表面碳氢化合物分子浓度减少,从而引起了碳沉积的降低。

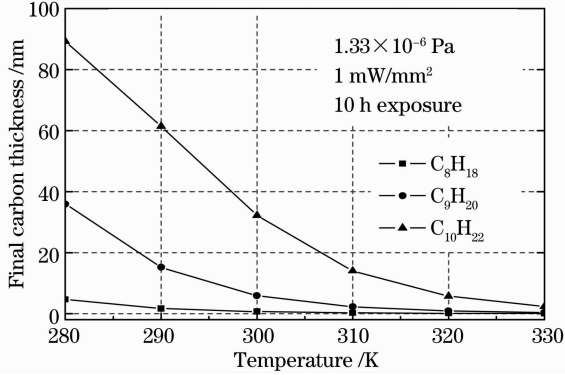


图 8 不同正烷烃的碳层厚度随温度的变化预测

Fig. 8 Predicted carbon thickness as a function of temperature for selected n -alkanes

4 结 论

通过理论分析,建立了在极紫外光辐照下,残留碳氢化合物气体在光学元件表面造成的碳沉积数学模型,描述了 C_xH_y 在光学表面的传输,在极紫外光子和二次电子激发下引起的分子分解,分解的分子具有一定的活性并在光学表面形成碳污染层。模型预测结果发现当 C_xH_y 为 C_9H_{20} 时,碳层增长和 ALS 的实验数据吻合得很好。计算表明 C_xH_y 分解的主要原因是由直接吸收的 EUV 光子引起的分子分解,而不是由间接产生的二次电子引起。模型分析了在不同 C_xH_y 气体偏压和 EUV 光强下碳层的生长变化趋势,计算了含有不同碳原子数的正烷烃对碳层厚度的贡献,发现具有较轻分子量的 C_xH_y ($< \sim 100$ amu) 对碳污染层的贡献很小,同时当基底温度适度增加时(约 $30^\circ C$),能够加速表面 C_xH_y 的解吸附速率,充分地减少碳污染。

参 考 文 献

- 1 D A Tichenor, A K Ray-Chaudhuri, Sang Hun Lee, *et al.*. Initial results from the EUV engineering test stand [C]. SPIE, 2001, 4506: 9-18.
- 2 R Peeters, S Lok, E V Alphen, *et al.*. ASML's platform performance and volume introduction [C]. SPIE, 2013, 8679: 86791F.
- 3 Hakaru Mizoguchi, Hiroaki Nakarai, Tamotsu Abe, *et al.*. LPP-EUV light source development for high volume manufacturing

- lithography [C]. SPIE, 2013, 8679: 86790A.
- 4 V Jindal, P Kearney, A Antohe, *et al.*. Challenges in EUV mask blank deposition for high volume manufacturing [C]. SPIE, 2013, 8679: 86791D.
- 5 Yasin Ekinci, Micharla Vockenhuber, Mohamad Hojeij, *et al.*. Evaluation of EUV resist performance with interference lithography towards 11 nm half-pitch and beyond [C]. SPIE, 2013, 8679: 867910.
- 6 Hideaki Tsubaki, Shinji Tarutani, Naoki Inoue, *et al.*. EUV resist materials design for 15 nm half pitch and below [C]. SPIE, 2013, 8679: 867905.
- 7 Marco Wedowski, James H Underwood, Eric M Gullikson, *et al.*. High-precision reflectometry of multilayer coatings for extreme ultraviolet lithography [C]. SPIE, 2000, 3997: 83-93.
- 8 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.
- 9 Hans Meiling, Henk Meijer, Vadim Banine, *et al.*. First performance results of the ASML alpha demo tool [C]. SPIE, 2006, 6151: 615108.
- 10 Gregory Denbeaux, Yudhishtir Kandel, Genevieve Kane, *et al.*. Resist outgassing contamination growth results using both photon and electron exposures [C]. SPIE, 2013, 8679: 86790L.
- 11 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.
- 12 S Oestreich, R Klein, F Scholze, *et al.*. Multilayer reflectance during exposure to EUV radiation [C]. SPIE, 2000, 4146: 64-71.
- 13 Liu Fei, Li Yanqiu. Design of high numerical aperture projection objective for industrial extreme ultraviolet lithography [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0222003.
- 刘 菲, 李艳秋. 大数值孔径产业化极紫外投影光刻物镜设计 [J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0222003.
- 14 Yang Guanghua, Li Yanqiu. Thermal and structural deformation of projection optics and its influence on optical imaging performance for 22 nm extreme ultraviolet lithography [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322005.
- 杨光华, 李艳秋. 22 nm 极紫外光刻物镜热和结构变形及其对成像性能影响[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322005.
- 15 K Boller, R P Haelbich, H Hogrefe, *et al.*. Investigation of carbon contamination of mirror surfaces exposed to synchrotron radiation [J]. Nucl Instrum Method, 1983, 208(1): 273-279.
- 16 J Hollenshead, L Klebanoff. Modeling carbon contamination of extreme ultraviolet (EUV) optics [C]. SPIE, 2004, 5674: 675-685.
- 17 R Kurt, M V Beek, C Crombeen, *et al.*. Radiation induced carbon contamination of optics [C]. SPIE, 2002, 4688: 702-709.
- 18 G Kyrialou, D J Davis, R B Grant, *et al.*. Electron impact-assisted carbon film growth on Ru(0001): implications for next-generation EUV lithography [J]. J Phys Chem C, 2007, 111(12): 4491-4494.
- 19 M Shiraishi, T Yamaguchi, A Yamazaki, *et al.*. A simple modeling of carbon contamination on EUV exposure tools based on contamination experiments with synchrotron source [C]. SPIE, 2011, 7969: 79690N.
- 20 Juequan Chen, Eric Louis, Rob Harmsen, *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.
- 21 A D Bass, L Sanche. Absolute and effective cross-sections for

- low-energy electron-scattering processes with condensed matter [J]. *Radiat Environ Biophys*, 1998, 37(4): 243–257.
- 22 B V Yakshinskiy, R Wasielewski, E Loginova, *et al.*. Carbon accumulation and mitigation processes, and secondary electron yields of ruthenium surfaces [C]. *SPIE*, 2007, 6517: 65172Z.
- 23 M E Malinowski, C A Steinhaus, D E Meeker, *et al.*. Relation between electron- and photon-caused oxidation in EUVL optics [C]. *SPIE*, 2003, 5037: 429–438.
- 24 T E Madey, N S Faradzhev, B V Yakshinskiy, *et al.*. Surface phenomena related to mirror degradation in extreme ultraviolet (EUV) lithography [J]. *Applied Surface Science*, 2006, 253(4): 1691–1708.
- 25 S Matsunari, T Aoki, K Murakami, *et al.*. Carbon deposition on multilayer mirrors by extreme ultra violet ray irradiation [J]. *SPIE*, 2007, 6517: 65172X.
- 26 M Schürmann, S Yulin, Viatcheslav Nesterenko, *et al.*. Multi-technique study of carbon contamination and cleaning of Mo/Si mirrors exposed to pulsed EUV radiation [C]. *SPIE*, 2010, 7636: 76361P.
- 27 M Catalfano, A Kanjilal, A Al-Ajlony, *et al.*. Mirror contamination and secondary electron effects during EUV reflectivity analysis [C]. *SPIE*, 2012, 8322: 832233.

栏目编辑：韩 峰