

极紫外光辐照下表面碳沉积污染的计算模型

王 珣^{1,2} 金春水¹ 匡尚奇¹ 喻 波¹ 金方圆^{1,2}

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 极紫外光刻(EUVL)是最有可能实现 22 nm 技术节点的下一代光刻技术。极紫外(EUV)光刻系统使用波长为 13.5 nm, 在此波段下曝光设备只能采用全反射式系统。然而, 在极紫外光辐照下的光学元件, 薄膜表层的碳化和氧化是导致 EUV 反射膜反射率下降的两种主要机制。结合 EUV 光学器件的表面分子动力学理论, 研究碳沉积层的作用机理, 以便找到抑制污染沉积的有效方法。通过针对碳污染层模型的计算研究, 验证了模型和假设的有效性, 从侧面证明了 Boller 等的“二次电子诱导分解是主要沉积过程”理论。通过迭代法模拟了控制污染的几个关键参数对沉积层的影响, 得到 50~80 nm 的非工作波段产生的碳沉积最为严重的计算结果。

关键词 薄膜; 极紫外光刻; 碳沉积模型; 迭代法

中图分类号 O484.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0531001

Simulation Model of Surface Carbon Deposition Contamination Under Extreme Ultraviolet Radiation

Wang Xun^{1,2} Jin Chunshui¹ Kuang Shangqi¹ Yu Bo¹ Jin Fangyuan^{1,2}

(¹ 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 Extreme ultraviolet lithography (EUVL) is one of the most promising candidates for next generation lithography to achieve 22 nm technology node. It takes of extreme ultraviolet (EUV) at 13.5 nm. With this wavelength, all the exposure equipments must be reflective. Whereas, for the extreme ultraviolet irradiated optical elements, the two main mechanisms that reduce reflectivity of EUV reflective film are carbonization and oxidation of the film surface. Researching the mechanism of carbon deposited layer with surface molecule kinetic theory of EUV optical devices to find an effective way for inhibiting the deposition of pollution. We investigate the validity of models and assumptions by researching on carbon pollution layer model, indirectly proving the Boller's theory "secondary electron induced decomposition is the main deposition process". Present preliminary numerical results on the dependence of contamination rates on key parameters with the iterative method, and suggest a band of 50~80 nm where will produce a higher contamination rate.

Key words thin film; extreme ultraviolet lithography; carbon deposition model; iterative method

OCIS codes 310.3915; 310.1860; 340.7480

1 引 言

极紫外光刻(EUVL)是最有希望实现 22 nm 技术节点的下一代光刻技术之一。极紫外(EUV)光学器件表面的辐照污染问题一直以来都被视为

EUV 光刻设备商业化进程的关键挑战。曝光环境中, 残余的碳氢化合物和水蒸气被光学元件表面吸附和反应, 从而降低了界面的反射性能^[1-3]。具体是由于水分子中的氧原子能够氧化反射镜表面碳氢

收稿日期: 2013-12-02; 收到修改稿日期: 2014-01-10

基金项目: 国家重大科技专项

作者简介: 王 珣(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事极紫外光学薄膜的设计与制备等方面的研究。

E-mail: gocga@126.com

导师简介: 金春水(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要从事短波光学方面的研究。E-mail: jincs@sklao.ac.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

分子中的碳原子,在表面形成石墨型的碳覆盖层^[4-7]。工业上,光学器件的寿命要求 30000 h 以上,却仅仅由于几纳米厚的碳污染层而达不到使用要求^[8]。近几年,研究人员提出了一种将抗氧化材料覆盖于反射膜表面的方法^[6,9]。实验上已经成功的减少反射膜的表面氧化,然而 EUV 辐照下的碳层沉积一直存在,所以有必要在理论上研究碳层的生长特性,从而在污染影响严重的方面有针对性的处理^[10-13]。

两种不同的机制会导致光学器件的碳污染。一种是 EUV 辐射,致使表面吸附的碳氢分子被光子裂解;另一种机制是指表面二次电子和吸附碳氢分子的作用。这两种机制,无论哪一种都会形成具有较强化学键的碳层。Hollenshead 等^[2] 早期报道了一种预测碳污染的模型,包含了光子分解和二次电

子诱导分解过程,在不同曝光条件下,这个模型的理论计算结果与实验观察结果吻合的很好。就两种不同的反应方式,Hollenshead 等认为是光子诱导分解占主导作用,相反,Boller 等^[14] 则认为二次电子诱导分解是主要沉积过程。本文展示了碳污染模型中,对污染层沉积起决定性影响的参数的理论计算结果,讨论了一些新提出的假设的合理性。最后,得到了模型中其他方面的计算结果,并对极紫外光刻机设计中的污染防止方面提出了建议。

2 污染层模型

Hollenshead 等^[2] 提出一种在 EUV 辐射下产生碳沉积污染的模型,该模型假设碳污染是光学器件表面碳氢分子辐照分解以及耦合吸附共同作用的结果,该模型结构如图 1 所示。

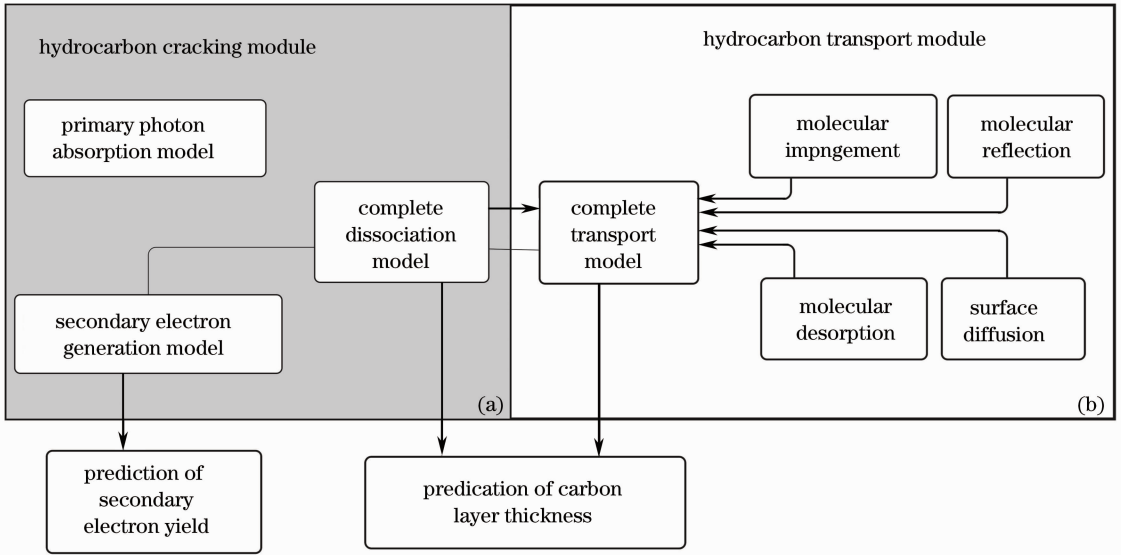


图 1 污染模型的结构图。(a)碳氢分子裂解模块;(b)碳氢分子转移模块

Fig. 1 Structure of contamination model. (a) Hydrocarbon cracking module; (b) hydrocarbon transport module

根据图 1 所述理论框架,预测碳污染层的生长,首先要得到在给定时间范围内,吸附在反射镜表面的碳氢分子的吸附密度 N_{ad} 。表面吸附密度的变化

率由变化的沉积密度和分子裂解过程共同决定,结合图 1 可以描述为^[2]

$$\frac{dN_{ad}}{dt} = s\Gamma_{mol} - N_{ad} \left[\frac{s\Gamma_{mol}}{N_{max}} + \frac{1}{\tau} + \sigma_{ph} I_0 (1 + R) + \sigma_{SE} I_{SE}(D) \right], \quad (1)$$

式中 s 为附着系数, Γ_{mol} 为碰撞率,由气体的分子运动论决定, N_{ad} 为单位表面区域内吸附的分子数, N_{max} 为单位面积内最大分子吸附数, τ 为吸附在表面分子的平均停留时间, σ_{ph} 光子裂解分子的反应横截面积, I_0 为辐照强度, R 为多层膜镜面反射率, σ_{SE} 为二次电子诱导裂解的反应横截面积, I_{SE} 为表面二次电流强度,它的表达式为^[2]

$$I_{SE}(D) = \frac{I_0(1-R)h\nu L_C M_C \mu_C}{2} \times \left\{ \frac{L_{Ru} M_{Ru} \mu_{Ru}}{L_C M_C \mu_C} \exp\left(-\frac{D}{L_{Ru}}\right) + \left[1 - \exp\left(-\frac{D}{L_C}\right) \right] \right\}. \quad (2)$$

(2)式描述镀有 Ru 抗氧化保护层的 EUV 反射膜上,经辐照沉积了厚度为 D 的碳层, I_{SE} 是此情况下碳层表面的二次电子流强度。 $h\nu$ 是辐照光子能量, L 、 M 、 μ 分别是电子逃逸深度、二次电子倍增系数和材料的光子吸收系数。

表 1 计算中所使用的参数值列表

Table 1 List of parameters with the values used for the calculation

Parameter	Value
Density ρ / (g/cm ³)	1
Sticking coefficient s	1
Pre-exponential factor τ_0 / (")	1×10^{-13}
Binding energy E_a / (kJ/mol)	74
Reflectivity of the mirror R	0.67
Energy of photon $h\nu$ / eV	92.5
Absorption coefficient for carbon and ruthenium μ_C, μ_{Ru} / cm ⁻¹	2.8776×10^4 1.5499×10^5
Multiplication factor of secondary electron in carbon and ruthenium M_C, M_{Ru} / eV ⁻¹	0.2802 0.0812
Escape depth of electron in carbon and ruthenium L_C, L_{Ru} / (10 ⁻¹⁰ m)	3.5, 3.5
Dissociation cross section of C ₉ H ₂₀ by photon and secondary electron σ_{ph}, σ_{SE} / (10 ⁻²⁰ m ²)	0.03787, 0.045

随着镜面反应碳氢分子数量的积累,得到的碳层厚度增长率为^[2]

$$\frac{dD}{dt} = \nu[G + F(D)] = N_{ad}(t)[\sigma_{ph}I_0(1 + R) + \sigma_{SE}I_{SE}(D)] \frac{M}{\rho N_{AV}}, \quad (3)$$

式中 $\frac{M}{\rho N_{AV}}$ 为分子体积, M 为分子量, ρ 为碳层密度, N_{AV} 为阿伏加德罗常数。模型假设每种碳氢分子的分解都积累到碳层中,本文中的计算采用迭代法,所讨论的为对碳层沉积具有决定性的条件假设,而不是全部初始假设。在 Hollenshead 的文中,有更详尽的模型描述。当前模型忽略了电子和光子诱导的解吸作用,以及表面吸附分子的表面扩散效应。本文中的结果使用上述模型和参数计算得到。还得到了 C₉H₂₀ 在不同条件(包括光强、气压、温度)下,曝光 8 h 后的结果。所得到的结论也证实了 Hollenshead 等的工作。

3 结果和讨论

3.1 不同的光子分解反应横截面积对结果的影响

目前,模型假设光子诱导分解横截面积等同于一个全部被照射分子总的吸收横截面积。但实际上

发生的反应概率没有像假设的高。计算时,分子的光吸收横截面积是不同气态原子在给定波长下总和[例如: $\sigma_{ph}(C_9H_{20}) = 9\sigma_{ph}(C) + 20\sigma_{ph}(H)$]。另外,气态分子的吸收横截面积与凝聚态分子是不同的^[15]。再者,解离分子再合并效率也是不同的,因此引入有效的光致分解横截面积是很有必要的。所以了解反应截面积对碳沉积厚度的影响规律,是非常重要的。图 2 为光解反应截面积从 $3.787 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ 到 $0.3787 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ 变化时碳层厚度变化规律(参考表 1 中的数据)。图 2 中碳的变化较大,明显可以看出光解截面积的精度将严重影响整个模型的准确性。当吸附在表面的碳氢分子光解截面积发生变化时,截面积的精度也对鉴别光子和电子诱导相对分解效率比起到重要作用。吸附分子反应截面积变化直接影响计算碳层厚度的变化。

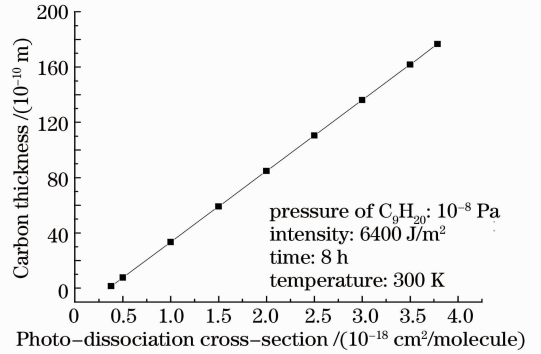


图 2 碳氢分子光解反应横截面积 σ_{ph} 的变化对碳沉积层厚的影响情况

Fig. 2 Variation of carbon deposited layer thickness with hydrocarbon molecule photo-dissociation cross-section value σ_{ph}

3.2 分子结合能的影响

碳氢分子的吸附是一种可逆过程^[16-18]。自由分布的气相碳氢分子,由于范德华力吸附在固体表面,也会由于分子运动而从固体表面解吸,保持动态平衡。而分子吸附在表面的平均持续时间 τ ,则由碳氢分子的结合能 E_a 决定^[17],即

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right), \quad (4)$$

式中 τ_0 为指数因子, k 为玻尔兹曼常量, T 是温度。由于指数存在,所以结合能一个微小的变化都会引起吸附时间的重大改变。这会导致热解吸效率的变化,影响表面吸附分子的数量,进而使碳层厚度变化明显。所以,需要考虑分子结合能对碳层厚度的影响。碳氢分子结合能 E_a 对碳沉积层厚度的影响情况如图 3 所示。

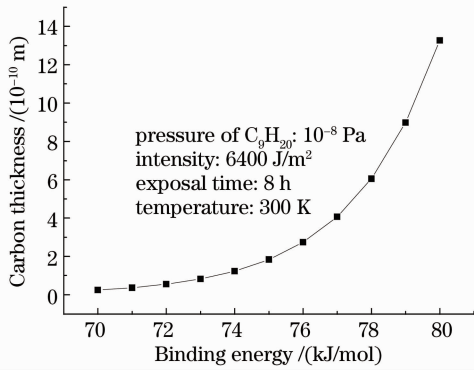


图3 碳氢分子结合能对碳沉积层厚的影响情况

Fig. 3 Variation of carbon deposited layer thickness with binding energy of hydrocarbon molecule

考虑到结合能随着表面解吸分子的种类和数量的变化而变化,也应注意结合能也会随着表面碳污染层增长而变化。实际上,最上层表面化学结构的变化(从清洗过的帽层材料到后来的石墨型碳层)将造成的结合能的改变,但当前的模型无法包括这种改变,形成一个误差源。

3.3 有机分子中碳原子数量的影响

结合碳污染模型,在保持其他参数不变的情况下,改变碳氢分子种类,可以得到分子量对碳层的影响,计算结果如图4所示,单个分子中更高碳含量将导致更高的污染速率。分子量和碳氢分子结合能的相互作用是不能被忽略的,因此,同种分子在不同的条件下具有不同的结合能。总的趋势是,分子中碳含量越高,分子结合能越大,分子污染速率越

大。但根据图4所示,分子中的碳原子数在3~6的区间内,碳层沉积速率变化很大,其他区域,沉积效率几乎是不变的。因此可以推测出:含有1~3个碳原子的有机物分子,吸附在反射镜表面的概率极低,减少了碳氢分子分解的机会,使污染层积累处于比较低的状态;6个碳原子以上的有机分子,非常容易吸附在反射镜表面,分子裂解的几率都很高,碳沉积速率较高且保持平稳。结合 Hollenshead 等的碳污染模型,可以从侧面证实 Boller 等的“表面二次电子诱导碳氢分子分解是主要沉积过程”结论^[14]。

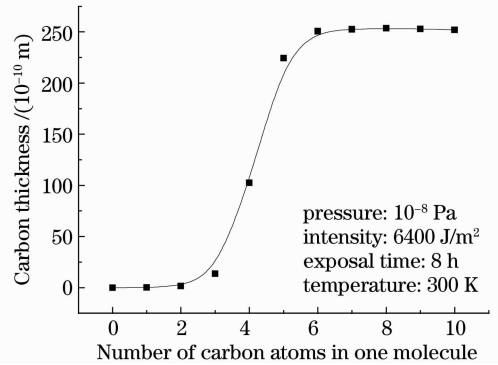


图4 碳氢分子中碳原子个数对碳沉积层厚的影响

Fig. 4 Variation of carbon deposited layer thickness with number of carbon atoms in one hydrocarbon molecule

3.4 带外辐射的影响

当前模型所能预测的碳污染是假设入射光是单色的,然而,最近的研究发现带外波段辐射也能产生碳污染^[19],这就使得模型包含更多能够产生碳污染的波段。表面吸附分子密度表达式为

$$\frac{dN_{ad}}{dt} = s\Gamma \left(1 - \frac{N_{ad}}{N_{max}} \right) - N_{ad} \left\{ \frac{1}{\tau} + \sum_{\lambda_i} \sigma_{ph}(\lambda) I_{\lambda} [1 + R(\lambda)] + \sum_{\lambda_i} \sigma_{SE}(\lambda) I_{SE}(\lambda) \right\}, \quad (5)$$

式中光子诱导和二次电子诱导裂解反应使用离散化的波长 λ_i 和光强 I_{λ_i} 的数值迭加。不同波长下 C_9H_{20} 的光解反应截面 $\sigma_{ph}(\lambda)$ 如图5(a)所示。不同波长的镜面反射率 R 的数据,可由 IMD 模拟得到。二次电子致裂解反应缺乏相关的实验数据,这里假设不变。对于某一特定波长下任意深度 z 的二次电子强度变化,可由下面式子得到:

$$dI_{SE}(\lambda) = \{ I_{\lambda} [1 - R(\lambda)] \mu(\lambda) \exp[-\mu(\lambda)z] \} \left[\exp(-z/L) \left(\frac{1}{2} \frac{hc}{\lambda} M \right) \right] dz, \quad (6)$$

式中使用的反射率和不同波长不同材料的吸收系数来自 CRXO 公布的数据^[20-21]。倍增系数 $M(eV^{-1})$ 是材料常数,电子逃逸深度 L 和二次电子分解反应截面 σ_{SE} 由二次电子能量决定。其他参数参考表1。

利用(6)式,能够计算出不同波长下,一个光子所产生的二次电子产生效率(SEY),结果如图5(a)所示。从图5(a)中可以发现,碳污染率预计在50~

80 nm 波段比13.5 nm 更高。具体计算中,假设光源入射不同波长的光是离散的,且有相同的强度。温度为300 K,残余气体 C_9H_{20} ,分压为 10^{-8} Pa。经过8 h 曝光后的变化碳污染厚度如图5(b)所示。结果表明碳污染率在50~80 nm 比13.5 nm 波段大一到两个数量级,但这个结果是模拟不同波长的单色光。实际情况是光源在中心波长13.5 nm 周围

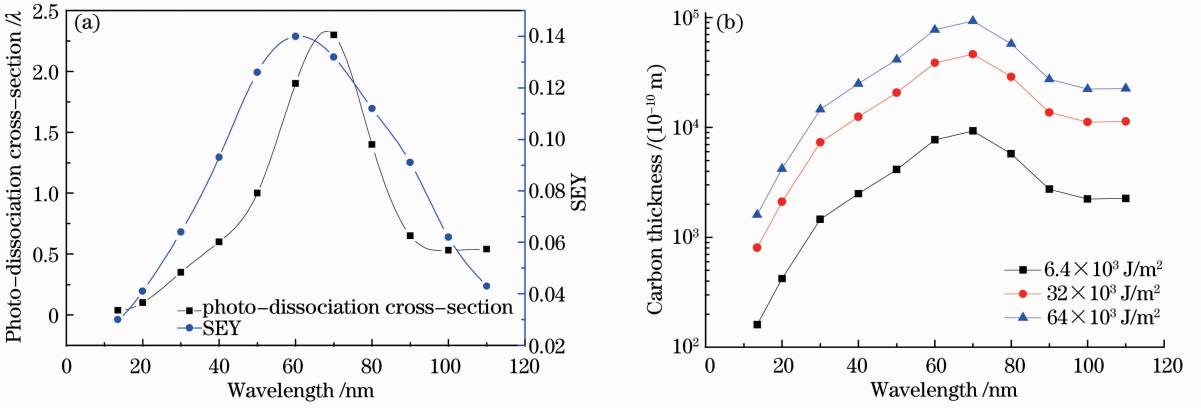


图 5 (a) C₉H₂₀ 光解反应横截面积和归一化的 SEY 在不同波长下的变化情况；
(b) 不同波长及光强下碳沉积层厚度变化情况

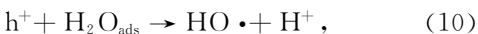
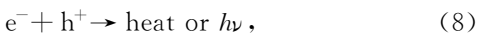
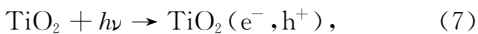
Fig. 5 (a) Variations of the photo-dissociation cross-section of C₉H₂₀ and normalized SEY with wavelength;
(b) carbon deposited layer thicknesses with different wavelengths and intensities

都有一部分带外波段。最初的模型包含多种波长 [(6)式], I_λ 表示波长 λ 的光强, $\sum I_\lambda$ 表示镜面全部入射光强。结果显示光源带外波段污染比 13.5 nm 的工作波长高很多。无论光强如何变化, 这个趋势不变的, 并且 50~80 nm 这个波段的污染率是最高的。对光源的光谱纯度提出了更高要求, 因此, 可以考虑应用到 EUV 光刻设备中的光源, 在 50~80 nm 这个波段的光谱进行重点过滤。

4 模型改进

4.1 保护层材料

以上讨论的保护层材料为 Ru, 在这个模型中, Ru 是吸附碳氢分子和 EUV 直接照射的表面, 其物理化学特性对模拟结果影响很大。随着 EUV 多层膜的发展和进步, 出现金属氧化物的保护层材料^[21], 如 RuO₂ 和 TiO₂ 等。此类金属氧化物与 Ru 相比, 除了具有抗氧化特性以外, 还具有催化氧化功能, 例如 TiO₂ 是性能优良的光催化剂^[22], 在有机物的降解方面应用广泛。实验表明, 使用 TiO₂ 保护层的 EUV 反射镜碳沉积速率明显变缓, 在 TiO₂ 的催化作用下, 发生以下反应过程:



形成的 HO· 具有极强的氧化性, 促成更多碳氢有机物分子氧化分解。目前, 模型中没有考虑碳沉积层由于 TiO₂ 催化作用下的消耗的过程, 此过程有待

进一步研究。

4.2 碳氢分子扩散过程

针对较轻的碳氢化合物 (C_x, x ≤ 3) 碳氢分子是均匀分布在真空腔内, 曝光过程的时间延长, 光路中的碳氢分子在逐渐消耗, 周围非辐照区域内的有机分子由于扩散作用, 补充到有辐照的消耗区域, 圆柱区域内表面扩散过程如图 6(a) 所示。然而在极高真空环境下, 扩散过程是非常缓慢的。上述模型中, 假设了碳氢分子的密度是固定不变, 这就导致了误差的产生。所以可以在 (5) 式中引入扩散因子 D_{sd} , 结合 Fick 扩散定律, 碳氢分子的扩散表达式为

$$\frac{dN_{\text{ad}}}{dt} = J(\tau) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[D_{\text{sd}} r \frac{\partial N_{\text{ad}}}{\partial r} \right]. \quad (12)$$

(12) 式可视为碳氢分子源, 代入 (5) 式, 最终表面吸附密度的变化率可以表达为

$$\frac{dN_{\text{ad}}}{dt} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[D_{\text{sd}} r \frac{\partial N_{\text{ad}}}{\partial r} \right] - N_{\text{ad}} \left[\frac{s\Gamma_{\text{mol}}}{N_{\text{max}}} + \frac{1}{\tau} + \sigma_{\text{ph}} I_0 (1 + R) + \sigma_{\text{SE}} I_{\text{SE}}(D) \right] + s\Gamma_{\text{mol}}. \quad (13)$$

碳层厚度仍然由 (3) 式决定, 但其中的每个沿着辐射方向的点的计算都包含 (12) 式, 即, 如 (13) 式中允许 N_{ad} 在辐射方向上是一个变化的函数。这样, 可以预测污染层厚度的空间变化和辐照区域内污染层的形貌情况。

初始条件 $t = 0, N_{\text{ad}} = 0, D = 0$, 假设镜面面积很大 $r \rightarrow \infty$, 表面密度 N_{ad} 接近最大面密度 N_{max} , 在光束中心点附近的表面分子密度旋转对称, $r = 0, \partial N_{\text{ad}} / \partial r = 0$ 。图 6(b) 为扩散区域内中心距和分子浓度随时间变化的情况。针对沉积层形貌有待进一步计算。

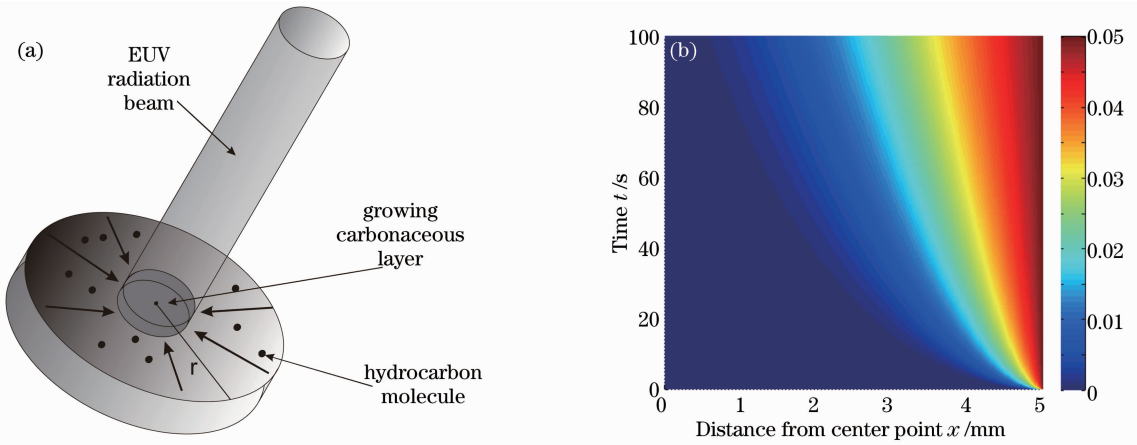


图 6 (a)在圆柱区域内进行表面扩散过程的计算；(b)扩散区域内中心距和分子浓度随时间变化的情况

Fig. 6 (a) Cylindrical domain used for the surface diffusion progress calculation; (b) change of space from center and surface molecule concentration with time in the diffusion domain

但在 Hollenshead 的模型中指出了扩散模型在较轻碳氢分子状态下的作用明显,而对于较重分子量下效果则不明显,可以通过图 4 中的现象给予解释:较重碳氢分子($C_x, x > 7$)的吸附能力极强,与镜面之间的吸附存在较强的作用力,甚至可以形成化学键,导致其在镜面上的吸附时间足够其完成在 EUV 辐照下的裂解。Fick 扩散定律是在没有外力的环境中进行的,而较大分子与镜面之间的作用力,不适用于 Fick 定律,本文利用 C_9H_{20} 作为参考污染源,可以不考虑 Fick 定律的影响。

5 结 论

理论研究可以充分地鉴别 EUV 碳污染过程中各个参数的重要性,结果表明:

- 1) 光解反应截面积 σ_{ph} 对碳沉积的影响是线性的;
- 2) 分子结合能 E_a 对沉积层的影响呈指数增加;
- 3) 含有 1~3 个碳原子的碳氢有机物分子,几乎不会吸附在反射镜表面,使污染层增长处于比较低的状态,6 个碳原子以上的有机分子,非常容易吸附在反射镜表面,分子裂解的几率都很高,碳沉积速率较高且保持平稳,从侧面印证了 Boller 等的“表面二次电子诱导碳氢分子分解是主要沉积过程”结论;
- 4) 工作波段外,碳污染率在 50~80 nm 比 13.5 nm 波段大一到两个数量级,无论光强如何变化,这个趋势不变的。

对于一些关键的初始参数,需要精确的实验数据和理论分析过程,如果能精确的获取光解反应截

面积 σ , 碳氢分子结合能 E_a 等,可以有效减少总体误差,这些对日后的实验工作意义重大。同时提出了碳污染模型的两个改进方案:1) EUV 反射膜的保护层可以选择使用 TiO_2 替换原有 Ru; 2) 将碳氢分子扩散过程加入沉积模型。这些都使得沉积模型可以预测表面碳沉积层的形貌,进而更接近实际,预测更加精确,为 EUV 光刻系统的工业应用提供了很好的指导作用。

参 考 文 献

- 1 Jin Chunshui. The Key Investigation on Extreme Ultraviolet Lithography [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003, 18-27.
- 金春水. 极紫外投影光刻中若干关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003, 18-27.
- 2 J Hollenshead, L Klebanoff. Modeling radiation-induced carbon contamination of extreme ultraviolet optics [J]. J Vac Sci Technol B, 2006, 24(1): 64-82.
- 3 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.
- 4 Lei Min, Li Xiaoping, Miao Huaikun. Development of contamination control techniques for EUV optics surfaces [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 030005.
- 雷敏, 李小平, 苗怀坤. 极紫外光学表面污染控制技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 030005.
- 5 Zhou Hongjun, Zhong Pengfei, Huo Tonglin, *et al.*. Cleaning of carbon contamination on Si wafer with activated oxygen by synchrotron radiation [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 907-910.
- 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.
- 6 Wang Hongchang, Wang Zhanshan, Li Fosheng, *et al.*. Analysis of the reflective performance of EUV multilayer under the influence of capping layer [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(7): 2368-2372.
- 王洪昌, 王占山, 李佛生, 等. 帽层对极紫外多层膜反射特性影

- 响分析[J]. 物理学报, 2004, 53(7): 2368—2372.
- 7 Xu Da, Zhu Jingtao, Zhang Zhong, *et al.*. Design of capping layers on Mo/Si multilayer [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(1): 160—163.
- 徐 达, 朱京涛, 张 众, 等. Mo/Si 多层膜表面保护层设计 [J]. 光子学报, 2009, 38(1): 160—163.
- 8 H Meiling, V Banine, P Kuerz, *et al.*. The EUV program at ASML: an update [C]. SPIE, 2003, 5037: 24—35.
- 9 S Bajt, N V Edwards, T E Madey. Properties of ultrathin films appropriate for optics capping layers exposed to high energy photon irradiation [J]. Surf Sci Rep, 2008, 63(2): 73—99.
- 10 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.
- 11 L E Klebanoff, M E Malinowski, W M Clift, *et al.*. Radiation-induced protective carbon coating for extreme ultraviolet optics [J]. J Vac Sci Technol B, 2002, 20(2): 696—703.
- 12 K Motai, H Oizumi, S Miyagaki, *et al.*. Atomic hydrogen cleaning of Ru-capped EUV multilayer mirror [J]. SPIE, 2007, 6517: 65170F.
- 13 H Oizumi, A Izumi, K Motai, *et al.*. Atomic hydrogen cleaning of surface Ru oxide formed by extreme ultraviolet irradiation of Ru-capped multilayer mirrors in H₂O ambience [J]. J Appl Phys, 2007, 46(7L): 633—635.
- 14 K Boller, R P Haelbich, H Hogrefe, *et al.*. Investigation of carbon contamination of mirror surfaces exposed to synchrotron radiation [J]. Nucl Instrum Methods Phys Res, 1983, 208(1-3): 273—279.
- 15 Y Hatano. Interaction of photons with molecules-cross-sections for photo-absorption, photo-ionization, and photo-dissociation [J]. Radiat Environ Biophys, 1999, 38(4): 239—247.
- 16 Zhang Shumin. The Research and Characterization of Cleaning Methods and Smoothing Layer for the Substrate of Extreme Ultraviolet Multilayer [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. 20—23.
- 张淑敏. 清洗技术和平滑层对极紫外多层膜基底粗糙度的影响及表面表征技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. 20—23.
- 17 S Peljhan, A Kokalj. Adsorption of chlorine on Cu(111): a density-functional theory study [J]. J Phys Chem, 2009, 113(32): 14363—14376.
- 18 Liu Wenjun, Wu Bingliang, Cha Chuansin, *et al.*. Determination of the surface diffusion coefficient of hydrogen atom on a platinum plane[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 1998, 14(6): 481—484.
- 19 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.
- 20 D T Attwood. Soft X-Rays and Extreme Ultraviolet Radiation [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- 21 S Matsunari, Y Kakutani, T Aoki, *et al.*. Durability of capped multi-layer mirrors for high volume manufacturing extreme ultraviolet lithography tool [C]. SPIE, 2009, 7271: 72713R.
- 22 S Yulin, N Benoit, T Feigl, *et al.*. Mo/Si multilayers with enhanced TiO₂ and RuO₂ capping layers [C]. SPIE, 2008, 6921: 692118.

栏目编辑: 史 敏