

极紫外光刻动态气体锁抑制率的理论研究

陈进新 王宇 谢婉露

中国科学院光电研究院, 北京 100094

摘要 从理论上系统性地研究了动态气体锁抑制率,提出了动态气体锁理论分析模型。通过理论分析推导出单组分和多组分清洁气体在等截面或者变截面条件下的动态气体锁抑制率解析表达式,并对单组分清洁气体在等截面和变截面条件下的动态气体锁抑制率进行了比较。研究表明,当抑制率为85%以上时,可以近似地使用等截面假设来计算动态气体锁抑制率,且应以清洁气体出口处截面面积作为动态气体锁平均截面面积;动态气体锁抑制率与动态气体锁结构以及清洁气体相关量值有关,当给定动态气体锁结构和扩散系数时,动态气体锁抑制率随着向硅片台腔室扩散的气体体积流量的增大而增大。该动态气体锁抑制率理论研究体系,能够为极紫外(EUV)光刻机动态气体锁的研制提供理论依据。

关键词 X射线光学; 极紫外光刻机; 动态气体锁; 抑制率; 清洁气体

中图分类号 TN23;O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.053401

Theoretical Investigation on Suppression Ratio of Dynamic Gas Lock for Extreme Ultraviolet Lithography

Chen Jinxin Wang Yu Xie Wanlu

Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract The theory of dynamic gas lock (DGL) suppression ratio is systematically studied and the DGL theoretical model is provided. Then the suppression ratio formulas of DGL with uniform or variable sections are derived through theoretical calculation under the conditions of single- or multi-component purge gases. Moreover, the suppression ratios of uniform-section DGL and variable-section DGL are compared for single-component purge gas. The theoretical results show that the uniform-section supposition, taking the section area where purge gas flows out DGL as the average section area, can be used when the suppression ratio is more than 85%; the suppression ratio is related to the DGL structure and the parameters of purge gas, and the suppression ratio increases with the increase of the gas volume flux into the wafer chamber when the DGL structure and diffusion coefficient are constant. The theory system proposed on DGL suppression ratio can provide a theoretical basis for the development of DGL in the extreme ultraviolet (EUV) lithography.

Key words X-ray optics; extreme ultraviolet lithography; dynamic gas lock; suppression ratio; purge gas

OCIS codes 340.7480; 350.4600; 120.4640; 000.2170

1 引言

随着集成电路的进一步发展,波长为13.5 nm的极紫外(EUV)光刻技术成为研究热点,国际半导体行业已经将EUV光刻作为22 nm或16 nm分辨率节点大规模集成电路生产的候选光刻技术^[1-2]。

EUV光刻机由EUV光源、收集镜、照明系统、掩模台、投影物镜系统和硅片台等部分组成^[3]。因为空气对EUV辐照具有强烈的吸收作用,所以EUV光刻机内部为真空环境,且在不同部分具有不同的真空要求。其中,硅片台中不包含光学元件,只需满足一般的清洁真空要求;投影物镜系统需要满足超清洁真空环

收稿日期: 2016-01-06; **收到修改稿日期:** 2016-01-07; **网络出版日期:** 2016-04-11

基金项目: 国家科技重大专项(2012ZX02702007)

作者简介: 陈进新(1982-),男,博士,工程师,主要从事极紫外系统和激光器结构设计方面的研究。

E-mail: ashion@aoe.ac.cn

境要求,即保持极低的、能够污染光学元件的特定气体分压(水分压为 1×10^{-5} Pa;分子量 45~100 的大分子压力为 9.8×10^{-9} Pa;分子量 100~200 的大分子压力为 4.8×10^{-9} Pa)^[4]。

硅片表面的光致抗蚀剂在 EUV 辐照的作用下会发生光化学反应,产生对光学元件有害的污染气体,因而需要通过动态气体锁(DGL)来抑制污染气体由硅片台向投影物镜的系统扩散。

国际上开展动态气体锁研究的时间较早,取得了较多的研究成果^[5-10],但缺乏对动态气体锁的相关理论性研究。国内,本课题组对 EUV 光刻机动态气体锁开展了开创性的研究,提出了两种新型动态气体锁结构^[11-12],并提出动态气体锁抑制率的概念,用来有效地量化评价动态气体锁的隔离效能^[13]。文献[13]对动态气体锁抑制率的理论研究是建立在等截面、单一清洁气体等假设的基础上,在具体应用上存在一定的局限。本文将系统地分析动态气体锁抑制率,进一步完善动态气体锁抑制率的理论研究体系,为 EUV 光刻机动态气体锁的研制提供理论依据。

2 动态气体锁原理及理论模型

动态气体锁在整个 EUV 光刻机中的位置如图 1 所示。动态气体锁的原理是选择对 EUV 吸收率较小的清洁气体,将它注入通光孔中,再分别流向投影物镜腔室和硅片台腔室,通过对应腔室的真空泵抽走。而流向硅片台腔室的清洁气体与硅片上释放的将要流向投影物镜腔室的污染物相碰撞,使得部分污染物折返而随清洁气体流入硅片台腔室,从而达到隔离效果。

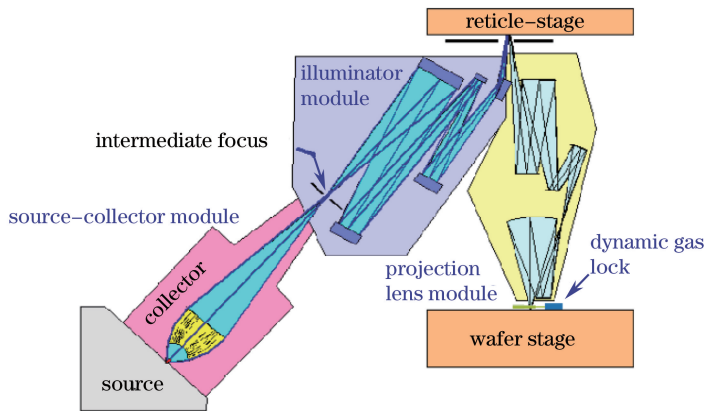


图 1 EUV 光刻机的组成部分

Fig. 1 Schematic layout of the EUV lithography

辐照到硅片上的 EUV 光束近似为矩形,如图 2 所示,其尺寸约为 $2 \text{ mm} \times 26 \text{ mm}$,由于光斑边缘曲线变形弯曲,其面积近似为 54 mm^2 。因在硅片上所成的像为一个缩小的像,所以沿硅片指向投影物镜腔室的 EUV 光束截面尺寸近似为一个逐级放大的矩形,其放大倍率与系统的数值孔径(NA)值有关,且在图中 z 轴(长边)和 y 轴(短边)方向的 EUV 光束截面尺寸近似为一个梯形。

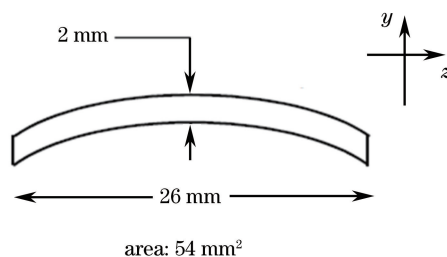


图 2 硅片上 EUV 光斑尺寸

Fig. 2 EUV radiation size on wafer

为了确保 EUV 辐射的顺利通过,动态气体锁的中心通光孔尺寸需要略大于当地的 EUV 光束截面尺寸。清洁气体仅由沿短边方向剖面的动态气体锁两侧边的狭缝流入通光孔。设硅片光斑上各像点成像光线

的空间半锥角均为 θ , 取动态气体锁中心通光孔内径与 EUV 光束截面间距恒为 0.5 mm, 硅片与动态气体锁窄口端间距为 10 mm, 系统 $NA = \sin \theta = 0.2$, 并取近似 $\sin \theta = \tan \theta$, 则动态气体锁沿着短边方向和长边方向的截面如图 3 和 4 所示。

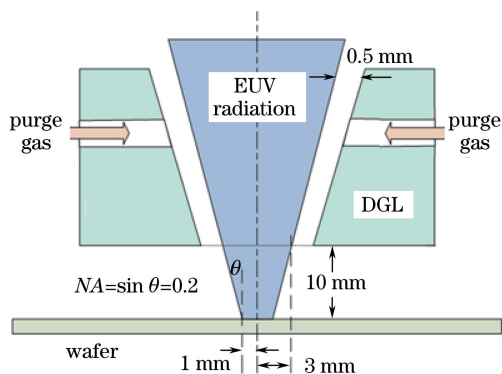


图 3 动态气体锁短边方向剖面图

Fig. 3 Short-side direction of DGL cross-section

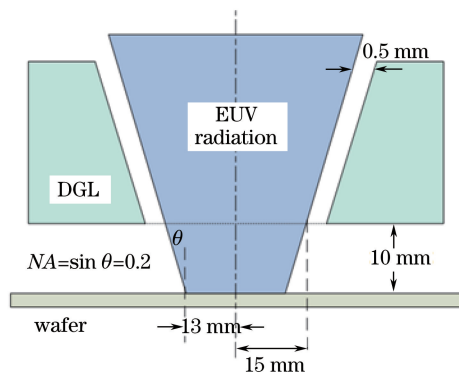


图 4 动态气体锁长边方向剖面图

Fig. 4 Long-side direction of DGL cross-section

本文提出的动态气体锁抑制率作为量化指标, 用来有效量化评价动态气体锁的隔离效能。动态气体锁抑制率 R_s 可表示为

$$R_s = 1 - \frac{Q_1}{Q_{II}}, \quad (1)$$

式中 Q_1 为动态气体锁工作时流入投影物镜腔室的污染气体总量, Q_{II} 为动态气体锁不工作时流入投影物镜腔室的污染气体总量。

EUV 真空环境的本底压强为 1.4×10^{-5} Pa^[4], 为了清洁光学元件和避免碳沉积, 需要适时地在其表面吹扫对 EUV 吸收率较小的清洁气体, 致使投影物镜腔室局部工作真空总压为帕量级。此外, 因动态气体锁不停地往硅片台腔室注入气体, 致使硅片台腔室局部工作真空总压也为帕量级。实际投影物镜腔室和硅片台腔室的特征长度约为米量级, 在如此大的腔室中存在较大差别的真空度梯度分布。

假设清洁气体和污染气体都为单组分气体, 则真空腔室中存在两种气体组分。考虑到污染气体远比清洁气体稀疏(污染气体分压小于 1.4×10^{-5} Pa, 清洁气体分压为帕量级), 则气体分子平均自由程为^[14-15]

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi \delta_1^2 P_1}, \quad \bar{\lambda}_2 = \frac{kT}{\sqrt{1 + \frac{m_2}{m_1} \pi \left(\frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \right)^2} P_1}, \quad (2)$$

式中 $\bar{\lambda}_1$ 是清洁气体分子平均自由程, $\bar{\lambda}_2$ 是污染气体分子平均自由程, k 是玻尔兹曼常数, T 是气体的绝对温度, P_1 是清洁气体分压, δ_1 是清洁气体分子有效直径, δ_2 是污染气体分子有效直径, m_1 是清洁气体分子质量数, m_2 是污染气体分子质量数。

设 L 为动态气体锁处的特征长度, 则表征气体稀薄程度或流动状态的 Knudsen 数为^[14]

$$f_{kn} = \frac{\bar{\lambda}}{L}. \quad (3)$$

若清洁气体为氢气^[13], 污染气体为水分子, 则 $\delta_1 = 3 \times 10^{-10}$ m, $\delta_2 = 3.4 \times 10^{-10}$ m, $m_1 = 2$, $m_2 = 18$; 取 $T = 293$ K, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K, $P_1 = 1$ Pa, 由(2)式可求得 $\bar{\lambda}_1 = 10$ mm, $\bar{\lambda}_2 = 4$ mm。若取 $L = 10$ mm, 则由(3)式可知, 对清洁气体而言 $f_{kn} = 1$, 对污染气体而言 $f_{kn} = 0.4$ 。

所以, 该动态气体锁的流场属于在 EUV 辐射下的过渡流 ($10 > f_{kn} > 0.1$) 流场, 流场分布具有特别复杂的特性, 不能用常规连续流体理论, 而要采用分子气体动力学方法进行分析。

3 单组分清洁气体等截面动态气体锁抑制率理论计算

动态气体锁结构模型如图 5 所示。设 P_p 是在管道出口处的动态气体锁清洁气体分压, P_{dl} 是在硅片台

腔室出口处的污染气体分压, P_{d2} 是在动态气体锁清洁气体出口处的污染气体分压, S_1 是向硅片台腔室扩散的气体的体积流量, S_2 是向投影物镜腔室扩散的气体的体积流量。

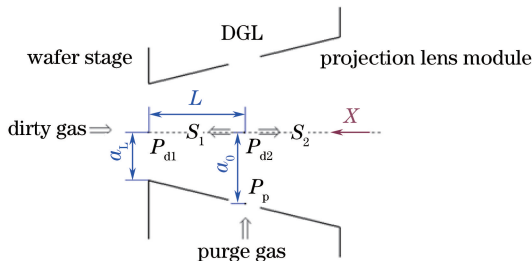


图5 动态气体锁理论模型

Fig. 5 Theoretical diagram of DGL

污染气体的浓度梯度和质量输运量的关系遵循菲克定律^[17], 且假设污染气体仅由硅片台腔室向投影物镜腔室平行传质, 令动态气体锁中线上由投影物镜腔室指向硅片台腔室的方向为 x 轴正方向, 即在垂直于 x 轴的平面内污染气体的密度近似相等, 有

$$\frac{dm_d}{dt} = -D_d A \frac{d\rho_d}{dx}, \quad (4)$$

式中 $\frac{dm_d}{dt}$ 为单位时间内在 x 轴负方向污染气体的质量输运量, ρ_d 为污染气体的密度, D_d 为污染气体在清洁气体内的扩散系数, A 为垂直于 x 轴的动态气体锁横截面积, 在计算时取其平均值 \bar{A} , 即假设动态气体锁横截面积处处相等。

对(4)式进行变换(因 S_1 与 $\frac{dm_d}{dt}$ 方向相反, 故消去负号), 有

$$\rho_d S_1 = D_d \bar{A} \frac{d\rho_d}{dx}, \quad (5)$$

$$\frac{S_1}{D_d \bar{A}} dx = \frac{1}{\rho_d} d\rho_d. \quad (6)$$

对(6)式进行积分, 并设 L 为从清洁气体入口到硅片台腔室出口的沿 x 方向长度, ρ_{d1} 为硅片台腔室出口处的污染气体密度, ρ_{d2} 为清洁气体出口处的污染气体密度, 有

$$\frac{\rho_{d1}}{\rho_{d2}} = \exp\left(\frac{S_1 L}{D_d \bar{A}}\right). \quad (7)$$

假设动态气体锁为等截面积, 污染气体密度之比与当地污染气体粒子数之比相等; 仅考虑稳态结果, 粒子数之比与粒子数流量之比相等; 由理想气体状态方程可知粒子数流量之比与气体流量之比相等。设从硅片台腔室进入动态气体锁的污染气体流量为 Q_{d1} , 根据质量守恒定律, 它包括流向投影物镜腔室的污染气体流量为 $P_{d2} \cdot S_2$ 和带回硅片台腔室的污染气体流量为 $P_{d1} \cdot S_1$ 。设清洁气体出口处的污染气体流量为 Q_{d2} , 清洁气体出口处的污染气体体积流量为 S_0 , 可以得到

$$\frac{\rho_{d1}}{\rho_{d2}} = \frac{Q_{d1}}{Q_{d2}} = \frac{P_{d1} S_1 + P_{d2} S_2}{P_{d2} S_0} = \frac{P_{d1} S_1 + P_{d2} S_2}{P_{d2} (S_1 + S_2)}, \quad (8)$$

由(7)和(8)式经过变换后, 可得增压比为

$$R_p = \frac{P_{d1}}{P_{d2}} = \left(1 + \frac{S_2}{S_1}\right) \exp\left(\frac{S_1 L}{D_d \bar{A}}\right) - \frac{S_2}{S_1}. \quad (9)$$

当通往投影物镜腔室的气体体积流量为 0 ($S_2 = 0$) 时的增压比设为 R_{p0} , 则

$$R_{p0} = \exp\left(\frac{S_1 L}{D_d \bar{A}}\right). \quad (10)$$

令 f 为全部清洁气体中流向硅片台腔室的气体比例, 则有

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{f}{1-f} \quad (11)$$

结合(9)~(11)式,由(1)式可得到动态气体锁对污染气体的抑制率为

$$R_s = \frac{P_{d1}S_1}{P_{d1}S_1 + P_{d2}S_2} = 1 - \frac{1-f}{R_{p0}} \quad (12)$$

设 Q_{p1} 为流向硅片台腔室的清洁气体的流量,则 $S_1 = \frac{Q_{p1}}{P_p}$,代入(12)式可得

$$R_s = 1 - \frac{1-f}{\exp\left(\frac{Q_{p1}L}{D_d \bar{A} P_p}\right)} \quad (13)$$

由(13)式可知,当给定动态气体锁结构时,其抑制率主要取决于与清洁气体相关的比值 $\frac{Q_{p1}}{D_d P_p}$ 。需要优化不同的设计变量,如清洁气体流量和清洁气体种类(对应不同的扩散系数),来使得污染气体的透射率最小,即动态气体锁抑制率最大,进而使 $\frac{Q_{p1}}{D_d P_p}$ 取最大值。

4 单组分清洁气体变截面动态气体锁抑制率理论计算

(13)式的推导过程中使用了等截面假设,但如图3和4所示,实际动态气体锁的截面是变化的,且与系统的 NA 值相关。下面推导单组分清洁气体变截面的动态气体锁抑制率,为方便计算取系统 NA 值为0.2(当系统 NA 取其他值时计算过程与此类似)。

如图5所示,以清洁气体出口处作为 x 轴原点,由动态气体锁宽口端指向其窄口端的方向为 x 轴正向,设清洁气体出口处至窄口端的距离为 L , $x=0$ 处动态气体锁沿短边方向尺寸为 $2a_0$,沿长边方向尺寸为 $2b_0$, $x=L$ 处其短边方向尺寸为 $2a_L$,长边方向尺寸为 $2b_L$ 。则对于 $NA=0.2$ 的系统动态气体锁,其截面面积为

$$A_x = 4(a_0 - 0.2x)(b_0 - 0.2x) \quad (14)$$

根据菲克定律及平行传质假设,由(4)式可知:

$$\rho_d S_1 = D_d A_x \frac{d\rho_d}{dx} \quad (15)$$

将(14)式代入(15)式,积分化简后可得

$$\frac{\rho_{d1}}{\rho_{d2}} = \left(\frac{a_L b_0}{a_0 b_L}\right)^{\frac{S_1}{0.8(a_0 - b_0)D_d}} \quad (16)$$

由理想气体的状态方程可知污染气体流量 Q_d 和粒子数流量 N_d 的关系为

$$N_d = \frac{Q_d}{kT} \quad (17)$$

式中,玻尔兹曼常数 $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K,输入气体温度 $T = 293$ K,气体流量 Q_d 单位为 $(\text{Pa} \cdot \text{m}^3)/\text{s}$,粒子数流量 N_d 单位为 s^{-1} 。

仅考虑稳态结果,粒子数之比与粒子数流量之比相等。在清洁气体出口处(下标用 $d2$ 表示)及动态气体锁窄口端(下标用 $d1$ 表示),有

$$\frac{Q_{d1}}{Q_{d2}} = \frac{N_{d1}}{N_{d2}} = \frac{\rho_{d1} A_L}{\rho_{d2} A_0} = \frac{\rho_{d1} a_L b_L}{\rho_{d2} a_0 b_0} \quad (18)$$

根据质量守恒定律可知:

$$\frac{Q_{d1}}{Q_{d2}} = \frac{P_{d1}S_1 + P_{d2}S_2}{P_{d2}S_0} = \frac{P_{d1}S_1 + P_{d2}S_2}{P_{d2}(S_1 + S_2)} \quad (19)$$

结合(16)、(18)和(19)式,可得

$$\frac{P_{d1}S_1 + P_{d2}S_2}{P_{d2}(S_1 + S_2)} = \frac{a_L b_L}{a_0 b_0} \cdot \left(\frac{a_L b_0}{a_0 b_L} \right)^{\frac{S_1}{0.8(a_0 - b_0)D_d}}, \quad (20)$$

由(11)和(20)式可知:

$$\frac{P_{d2}S_2}{P_{d1}S_1 + P_{d2}S_2} = \frac{a_0 b_0 (1-f)}{a_L b_L} \cdot \left(\frac{a_0 b_L}{a_L b_0} \right)^{\frac{S_1}{0.8(a_0 - b_0)D_d}}, \quad (21)$$

则动态气体锁的抑制率为

$$R_s = \frac{P_{d1}S_1}{P_{d1}S_1 + P_{d2}S_2} = 1 - \frac{a_0 b_0 (1-f)}{a_L b_L} \cdot \left(\frac{a_0 b_L}{a_L b_0} \right)^{\frac{S_1}{0.8(a_0 - b_0)D_d}}. \quad (22)$$

设 Q_{p1} 为流向硅片台腔室的清洁气体的流量,则 $S_1 = \frac{Q_{p1}}{P_p}$,代入(22)式得

$$R_s = 1 - \frac{a_0 b_0 (1-f)}{a_L b_L} \cdot \left(\frac{a_0 b_L}{a_L b_0} \right)^{\frac{Q_{p1}}{0.8(a_0 - b_0)D_d P_p}}. \quad (23)$$

因为 $b_0 > a_0$,故 $\frac{a_0 b_L}{a_L b_0} = \frac{a_0 b_0 - 0.2a_0 L}{a_0 b_0 - 0.2b_0 L} > 1$ 。由(23)式可知,当给定动态气体锁结构时,其抑制率主要取决于与清洁气体相关的比值 $\frac{Q_{p1}}{D_d P_p}$ 。当 $\frac{Q_{p1}}{D_d P_p}$ 取最大值时,动态气体锁抑制率最大。

5 单组分清洁气体等截面和变截面抑制率比较

针对单组分清洁气体,等截面动态气体锁抑制率如(13)式所示,变截面动态气体锁抑制率如(23)式所示。设 Q_p 为流向动态气体锁的清洁气体总流量,由(11)式可得单组分清洁气体等截面的动态气体锁抑制率的另一种形式为

$$R_s = 1 - \frac{1-f}{\exp\left(\frac{fQ_p L}{D_d \bar{A} P_p}\right)}, \quad (24)$$

单组分清洁气体变截面的动态气体锁抑制率的另一种形式为

$$R_s = 1 - \frac{a_0 b_0 (1-f)}{a_L b_L} \cdot \left(\frac{a_0 b_L}{a_L b_0} \right)^{\frac{fQ_p}{0.8(a_0 - b_0)D_d P_p}}. \quad (25)$$

由图3可知,在动态气体锁短边方向,其窄口端长度为7 mm;由图4可知,在动态气体锁长边方向,其窄口端长度为31 mm;并设窄口端到宽口端的距离为20 mm,动态气体锁清洁气体入口处在窄口端到宽口端的中心位置。则有: $L=10$ mm, $a_0=5.5$ mm, $b_0=17.5$ mm, $a_L=3.5$ mm, $b_L=15.5$ mm。

分别用动态气体锁窄口端截面面积 $A_L=217$ mm²,清洁气体出口处截面面积 $A_0=385$ mm²,窄口端到清洁气体出口处中心位置截面面积 $A_{L/2}=297$ mm² 替代平均截面面积 \bar{A} 代入(24)式,将各特征尺寸代入(25)式,以 $\frac{fQ_p}{D_d P_p}$ 为横坐标(单位为 mm)、 $\frac{1-R_s}{1-f}$ 为纵坐标画图,得到三组等截面和一组变截面的曲线,如图6所示。

特别地,若 $f=50\%$,以 $\frac{Q_p}{D_d P_p}$ 为横坐标(单位为 mm)、 R_s 为纵坐标画图,得到三组等截面和一组变截面的曲线,如图7所示。

由图7可知,对单组分清洁气体,当抑制率 R_s 为85%以上时,可以近似地认为变截面动态气体锁抑制率与以清洁气体出口处截面面积为平均截面面积的等截面动态气体锁抑制率一致,其误差在10%以内。所以在使用等截面假设计算动态气体锁抑制率时,以清洁气体出口处截面面积作为动态气体锁平均截面面积。

6 多组分清洁气体抑制率理论计算

动态气体锁清洁气体由单组分气体(氩气)变为多组分混合气体(氢气+氩气)是一种发展趋势^[8]。所以需特别针对多组分混合清洁气体对动态气体锁抑制率进行理论分析。

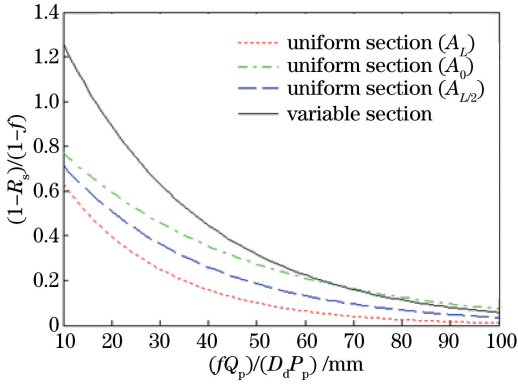


图6 等截面和变截面抑制率比较图 I

Fig. 6 Suppression ratio comparison (I) of DGL with uniform or variable sections

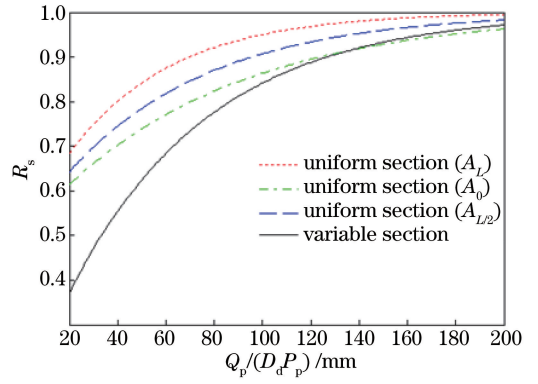


图7 等截面和变截面抑制率比较图 II

Fig. 7 Suppression ratio comparison (II) of DGL with uniform or variable sections

设多组分清洁气体由 n 种单纯气体组成,且第 i 种单纯气体的体积百分含量为 $c_{(i)}$,第 i 种单纯气体的气体分压为 $P_{p(i)}$,第 i 种单纯气体的总流量为 $Q_{p(i)}$,第 i 种单纯气体流向硅片台腔室的流量为 $Q_{p1(i)}$,第 i 种单纯气体流向投影物镜腔室的流量为 $Q_{p2(i)}$,则

$$\sum_1^n c_{(i)} = 1, \quad (26)$$

$$\sum_1^n P_{p(i)} = P_p, \quad (27)$$

$$\sum_1^n Q_{p(i)} = Q_p, \quad (28)$$

$$Q_{p(i)} = c_{(i)} Q_p. \quad (29)$$

对第 i 种单纯气体,令 $f_{(i)}$ 为该种清洁气体流向硅片台腔室的气体比例,则有

$$Q_{p1(i)} = f_{(i)} Q_{p(i)} = f_{(i)} c_{(i)} Q_p, \quad (30)$$

$$Q_{p1} = \sum_1^n Q_{p1(i)} = \sum_1^n f_{(i)} c_{(i)} Q_p, \quad (31)$$

$$Q_{p2(i)} = [1 - f_{(i)}] Q_{p(i)} = [1 - f_{(i)}] c_{(i)} Q_p, \quad (32)$$

$$Q_{p2} = \sum_1^n Q_{p2(i)} = \sum_1^n [1 - f_{(i)}] c_{(i)} Q_p. \quad (33)$$

又由流量与分压关系,结合(27)式可以得到

$$Q_{p1} = \sum_1^n P_{p(i)} S_1 = P_p S_1, \quad (34)$$

$$Q_{p2} = \sum_1^n P_{p(i)} S_2 = P_p S_2. \quad (35)$$

由(26)、(31)、(33)、(34)和(35)式可知:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{Q_{p1}}{Q_{p2}} = \frac{\sum_1^n f_{(i)} c_{(i)}}{\sum_1^n [1 - f_{(i)}] c_{(i)}} = \frac{\sum_1^n f_{(i)} c_{(i)}}{1 - \sum_1^n f_{(i)} c_{(i)}}. \quad (36)$$

特别地,对于单组分清洁气体,或者各种清洁气体流向硅片台腔室的气体比例都相等,则(36)式退化为(11)式。

对多组分清洁气体,定义清洁气体流向硅片台腔室的加权气体比例为

$$\bar{f} = \sum_1^n f_{(i)} c_{(i)}, \quad (37)$$

将(37)式代入(36)式,可得

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{\bar{f}}{1 - \bar{f}}. \quad (38)$$

6.1 等截面动态气体锁

将(36)式代入(9)式,可得等截面动态气体锁(多组分清洁气体)的增压比为

$$R_p = \frac{P_{d1}}{P_{d2}} = \left[1 + \frac{1 - \sum_1^n f_{(i)} c_{(i)}}{\sum_1^n f_{(i)} c_{(i)}} \right] \exp\left(\frac{S_1 L}{D_d \bar{A}}\right) - \frac{1 - \sum_1^n f_{(i)} c_{(i)}}{\sum_1^n f_{(i)} c_{(i)}}, \quad (39)$$

式中 D_d 为污染气体在多组分清洁气体内的扩散系数。

由(34)和(39)式可得等截面动态气体锁(多组分清洁气体)的抑制率为

$$R_s = 1 - \frac{1 - \sum_1^n f_{(i)} c_{(i)}}{\exp\left(\frac{Q_{p1} L}{D_d \bar{A} P_p}\right)}, \quad (40)$$

特别地,对于单组分清洁气体,或者各种清洁气体流向硅片台腔室的气体比例都相等,那么(40)式退化为(13)式。

将(31)式代入(40)式,结合(37)式,可得等截面动态气体锁(多组分清洁气体)的抑制率的另一种形式为

$$R_s = 1 - \frac{1 - \bar{f}}{\exp\left(\frac{\bar{f} Q_p L}{D_d \bar{A} P_p}\right)}. \quad (41)$$

6.2 变截面动态气体锁

由(20)、(34)和(36)式可得变截面动态气体锁(多组分清洁气体)的抑制率为

$$R_s = 1 - \frac{a_0 b_0 \left[1 - \sum_1^n f_{(i)} c_{(i)} \right]}{a_L b_L} \cdot \left(\frac{a_0 b_L}{a_L b_0} \right)^{\frac{Q_{p1}}{0.8(a_0 - b_0) D_d P_p}}, \quad (42)$$

特别地,对于单组分清洁气体或者各种清洁气体流向硅片台腔室的气体比例都相等,那么(42)式退化为(23)式。

将(31)式代入(42)式,结合(37)式,可得变截面动态气体锁(多组分清洁气体)的抑制率的另一种形式为

$$R_s = 1 - \frac{a_0 b_0 (1 - \bar{f})}{a_L b_L} \cdot \left(\frac{a_0 b_L}{a_L b_0} \right)^{\frac{\bar{f} Q_p}{0.8(a_0 - b_0) D_d P_p}}. \quad (43)$$

7 结 论

动态气体锁的作用是隔离投影物镜腔室和硅片台腔室,抑制污染物从硅片台腔室扩散到投影物镜腔室,有效保护投影物镜腔室内的光学系统。以动态气体锁抑制率作为量化指标可以有效地量化评价动态气体锁的隔离效能。本文系统地研究了动态气体锁抑制率的理论部分;根据 EUV 光刻机硅片上 EUV 光斑尺寸和系统 NA 值,提出了动态气体锁理论分析模型;通过理论分析,推导出单组分和多组分清洁气体在等截面或者变截面条件下的动态气体锁抑制率解析表达式,并对单组分清洁气体在等截面和变截面条件下的动态气体锁抑制率进行了比较。

本文得出结论如下:

- 1) 使用抑制率来有效量化评价动态气体锁的隔离效能,动态气体锁抑制率通用表达式如(1)式所示;
- 2) 单组分清洁气体等截面动态气体锁抑制率解析表达式如(13)或(24)式所示;
- 3) 当系统 NA 值为 0.2 时,单组分清洁气体变截面动态气体锁抑制率解析表达式如(23)式或(25)式所示;
- 4) 多组分清洁气体等截面动态气体锁抑制率解析表达式如(41)式所示;
- 5) 当系统 NA 值为 0.2 时,多组分清洁气体变截面动态气体锁抑制率解析表达式如(43)式所示;
- 6) 当抑制率为 85% 以上时,可以近似使用等截面假设计算动态气体锁抑制率,且应以清洁气体出口处截面面积作为动态气体锁平均截面面积;
- 7) 动态气体锁抑制率与动态气体锁结构和清洁气体相关量值有关;当给定动态气体锁结构时,其抑制

率主要取决于与清洁气体相关的比值 $\frac{Q_{p1}}{D_d P_p}$, 当 $\frac{Q_{p1}}{D_d P_p}$ 取最大值时, 动态气体锁抑制率最大; 当给定动态气体锁结构和扩散系数时, 动态气体锁抑制率随着向硅片台腔室扩散的气体体积流量的增大而增大。

参 考 文 献

- 1 Quirk M, Serda J. Semiconductor manufacturing technology[M]. Han Zhengsheng, transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 4-12.
迈克尔·夸克, 朱利安·瑟达. 半导体制造技术[M]. 韩郑生, 译. 北京: 电子工业出版社, 2009: 4-12.
- 2 Bakshi V. EUV lithography[C]. Bellingham: SPIE and John Wiley & Sons Inc, 2008: 1-54.
- 3 Van der Velden M H L. Radiation generated plasmas: A challenge in modern lithography[M]. Eindhoven: Printservice Technische Universiteit Eindhoven, 2008: 5-6, 165.
- 4 Harned N, Moors R, van Kampen M, *et al.*. Strategy for minimizing EUV optics contamination during exposure[R]. EUV Symposium, 2008: 29.
- 5 Mertens B M, van der Zwan B, de Jager P W H, *et al.*. Mitigation of surface contamination from resist outgassing in EUV lithography[J]. Microelectronic Engineering, 2000, 53(1): 659-662.
- 6 Jonkers J. EUV-transparent Interface structure: US6683936B2[P]. 2004-01-27.
- 7 S Roux. Method for recycling gases used in a lithography tool: US7087911B2[P]. 2006-08-08.
- 8 J H W Jacobs, B D Brewster, R G Livesey. Lithographic apparatus, device manufacturing method, and device manufactured thereby: US7502095B2[P]. 2009-03-10.
- 9 Srivastava A, Pereira S, Gaffney T. Sub-atmospheric gas purification for EUVL vacuum environment control[C]. SPIE, 2012, 83222: 83222U.
- 10 Banine V Y, Moors J H J. Lithographic apparatus and device manufacturing method: US8094288B2[P]. 2012-01-10.
- 11 陈进新, 王魁波, 王宇, 等. 一种动态气体锁: ZL201310320652.9[P]. 2015-04-08.
- 12 陈进新, 王宇, 吴晓斌, 等. 一种螺旋气流动态气体锁: ZL201310343253.4[P]. 2015-04-01.
- 13 Chen Jinxin, Wang Kuibo, Wang Yu. Simulation of flow-field in dynamic gas lock for extreme ultraviolet lithography[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2015, 35(8): 940-946.
陈进新, 王魁波, 王宇. 极紫外真空动态气体锁流场分析与研究[J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(8): 940-946.
- 14 Shen Qing. Rarefied gas dynamics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003: 1-20.
沈青. 稀薄气体动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 1-20.
- 15 Xu Chenghai. Vacuum engineering technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 1-12, 345-364.
徐成海. 真空工程技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 1-12, 345-364.
- 16 Chen Maozhang. Fundamentals of viscous fluid dynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 14-15.
陈懋章. 粘性流体动力学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 14-15.