

真空腔室气锁结构对碳传输与碳沉积抑制作用的实验研究

郝明¹ 张雨豪¹ 滕帅¹ 刘佳兴¹ 巴要帅¹ 张虎忠² 谢元华^{1*} 刘坤^{1*}

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院 沈阳 110819; 2. 兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室 兰州 730000)

Experimental Study on the Inhibition of Carbon Transport and Deposition by Gas Lock Structure in Vacuum Chambers

HAO Ming¹, ZHANG Yuhao¹, TENG Shuai¹, LIU Jiaying¹, BA Yaoshuai¹,
ZHANG Huzhong², XIE Yuanhua^{1*}, LIU Kun^{1*}

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract Extreme ultraviolet lithography technology represents one of the most advanced semiconductor manufacturing processes. However, during this process, hydrocarbon compounds and water vapor are generated through material outgassing and photo-induced physical-chemical reactions, which can infiltrate the projection chamber and result in carbon deposition on multilayer mirrors' surfaces. This phenomenon significantly impacts product quality while also increasing costs associated with component replacement and maintenance. The introduction of clean gas via a gas lock structure effectively mitigates the diffusion process of pollutants, thereby offering a viable technical solution. In this study, simulation and orthogonal experiments were conducted to investigate the flow rate and temperature of clean gas as well as pollutants under different gas lock structures. The suppression rate parameters for pollutants by gas locks under varying process conditions were determined. These research findings provide a numerical basis for designing gas lock structures, selecting parameters for process experiments, and offer valuable insights into controlling pollution sources within similar vacuum environments.

Keywords Extreme ultraviolet lithography, Clean technology, Gas lock, Vacuum environment

摘要 极紫外光刻技术是目前最先进的半导体制造工艺之一,而在工艺过程中,由于材料放气、光致物理化学反应等,产生的碳氢化合物和水蒸气等会进入到投影腔室,进一步在多层反射镜表面形成碳沉积,大幅影响产品质量同时增加了零部件的更换维修成本。采用气锁结构引入清洁气体能够有效地缓解污染源的扩散过程,是目前可行的技术手段。文章通过仿真和正交模拟实验的方法,对不同气锁结构下,清洁气体和污染气体的流量、温度开展研究,得到了不同工艺条件下气锁对污染气体的抑制率参数。研究结论为气锁结构的设计和工艺试验的参数选取提供了数值基础,也预期能够为同类型真空环境下的污染源控制手段提供技术思路。

关键词 极紫外光刻 清洁技术 气锁 真空环境

中图分类号: TB79 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202410007

极紫外光刻(EUV)机为现代集成电路产业提供了飞跃式的高分辨率技术支持,促进半导体芯片尺寸进一步减小^[1-2]。图1展示了极紫外光刻曝光系统的示意图^[3],在极紫外光刻过程中,等离子体产

生13.5 nm的光子,这些光子被收集器收集并由照明光学系统进行整形,进一步通过反射的光刻掩模进入投影腔,该腔室内包含多层反射镜,在多次反射后,光线进入晶圆刻蚀腔室完成光刻过程。为了

收稿日期: 2024-10-25

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFF0717200); 国家自然科学基金联合基金项目(U22A20179)

* 联系人: E-mail: yhxie@mail.neu.edu.cn; kliu@mail.neu.edu.cn

确保工艺清洁度,从等离子源到最终晶圆阶段的每个子系统腔室必须保持高度真空环境。然而,在刻蚀过程中或光致反应过程中,有机材料等挥发或者反应产生的碳氢化合物会导致投影腔内镜面产生碳污染,从而降低镜片的反射率和使用寿命,也影响成像质量。碳沉积的生长速度可以达到 0.001–0.01 nm/h,一个 2 nm 的碳层会导致反射率下降约 1%^[4]。因此,有必要采取技术措施来防止或减少污染水平^[5]。气锁作为一种行之有效的技术手段,可以减缓污染的发生^[6-7]。在国外研究中, Kanouff M P 等^[8]在 1999 年提出了采用气幕的技术来防止碳氢化合物的污染,即通过引入惰性气体降低污染物的扩散过程。Hollenshead J T 等^[9-10]也在气锁设计和碳沉积数值模型中做了大量的理论模型,为后续的研究工作提供了丰富的理论基础。在国内研究中,中国科学院微电子所对于气锁技术做出了大量的研究工作,包括建立污染抑制的数值模型^[11-12],对气锁结构进行设计并开展数值理论研究^[13-14],同时搭建了模拟实验台对工艺过程进行验证^[15-16]。

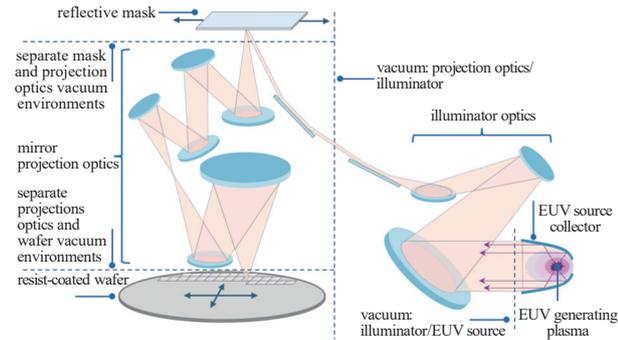


图1 极紫外光刻系统示意图^[3]

Fig. 1 Schematic diagram of the EUV system^[3]

本文基于两种气锁形式,以 N₂ 作为单组分清洁气体,以 CO₂ 作为污染气体,在模拟实验台上进行了气体温度和流量的正交实验,预期为相关研究工作提供数值借鉴和工艺参考。

1 实验系统设计

1.1 模拟实验平台

如图 2 所示,为本研究所应用的真空系统组成图,其中,上下腔真空室分别用于模拟 EUV 刻蚀腔室和投影腔室,气锁介于上下腔室之间。在刻蚀腔室中,通入 CO₂ 作为污染源的代

表。为了测试清洁气体的抑制效果,本文从气体的进气流量、进气温度两方面考虑,因此在进气入口前端设置有气体加热器和流量控制器,分别控制以上参数。

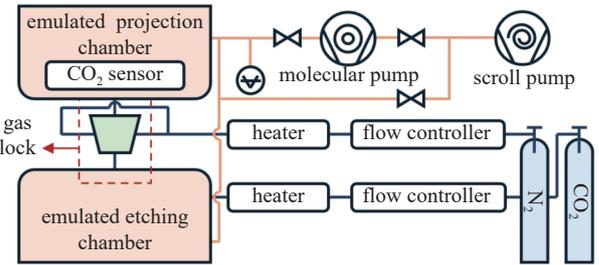


图2 实验台系统组成图

Fig. 2 Experimental system

1.2 气锁结构设计

为了达到较好的污染抑制效果,气锁横截面设置为倒梯形,根据横截面的尺寸特征,气锁的立体结构设计为旋转结构和平面拉伸结构共两种,结构示意图及相关参数如图 3 所示,通过对比两种结构的污染抑制效果,确定最佳的结构形式。

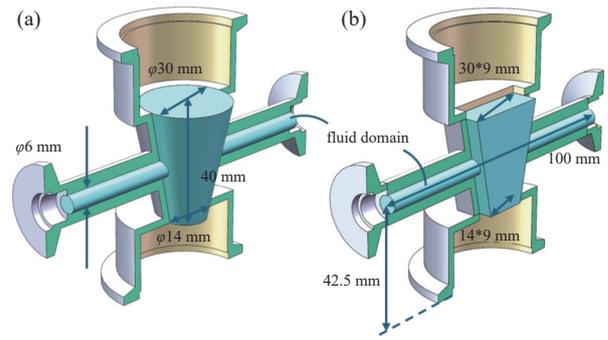


图3 两种气锁结构。(a)旋转式,(b)拉伸式

Fig. 3 Two types of airlock structures. (a) Rotating structure, (b) stretched structure

1.3 进气管道设计

根据理想气体状态方程,在稳定的真空腔室内通入大流量气体,会引起局部的压力和温度波动,为了探索不同进气管道对压力和温度波动的影响程度,采用仿真方法对进气管道内气体流动特征进行计算。在计算之前,对管道内流动进行流态判别,根据判别结果选用合适的数值模拟方法。根据最小特征尺寸进行连续流态和分子流态的判别,采用克努森数作为判断标准来判断进气阶段管内流体是否适合连续假设。克努森数的计算方法如式(1)所示。

$$K_n = \frac{\lambda}{L} \quad (1)$$

式中, λ 为气路引入气体的分子平均自由程(m), L 为流域结构的特征尺寸(m), 在计算模型中, 选用最小尺寸, 即 $\phi 4-\phi 2.5$ mm 管路的内径 2.5 mm 作为特征尺寸, 而气体分子平均自由程由式(2)计算。

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 p} \quad (2)$$

式中, k 为玻尔兹曼常数(J/K), T 为温度(K), σ 为气体分子有效直径(m), p 为气体分压力(Pa), 为了测定极端情况下进气对管道和气锁内流场的影响, 本章节气路评估计算采用 100 kPa 进气压力全压通入气路, 且无设置流量控制器进行流量控制。表 1 列出了结构参数及气体分子性质。

表 1 气路结构参数

Tab. 1 Parameters of air circuit structure

参数	数值
特征尺寸	2.5 mm/4 mm/5 mm
气体种类	N ₂
管道压力	0 kPa~100 kPa
管道温度	300 K
气体分子有效直径	0.364 nm

由式(1)可知, 克努森数与流体特征尺寸成反比, 因此在计算克努森数时选择最小管道内径进行核算, 当特征尺寸为 2.5 mm 时, 通过式(1)和式(2)计算可得 K_n 范围为 $2.8 \times 10^{-5} @ 100 \text{ kPa} \sim 5.6 \times 10^{-5} @ 50 \text{ kPa}$ 。克努森数对流体流域的限定范围如下式(3)所示。

$$\begin{aligned} K_n < 0.01 & \quad (\text{连续流域}) \\ 0.01 < K_n < 0.1 & \quad (\text{滑流流域}) \\ 0.1 < K_n < 10 & \quad (\text{过渡流域}) \\ 10 < K_n & \quad (\text{自由分子流}) \end{aligned} \quad (3)$$

因此由计算可知, 管道内流动问题满足连续介质假设, 可以用无滑移边界条件的纳维-斯托克斯方程描述流体。根据连续性假设, 对流动模型进行仿真设置, 选取气锁中心轴共 6 个数据采集点进行压力和温度数值表征, 具体监测位置如图 4 所示, 同时仿真过程中的相关参数列于表 2。

在以上仿真条件下, 对三种常规尺寸进气管道进行了仿真, 图 5 为三种管道条件下相同时间下气锁内的压力云图和温度云图。同时对气锁内的 6 个监测点压力和温度随时间变化的曲线绘制如图 6 所示。

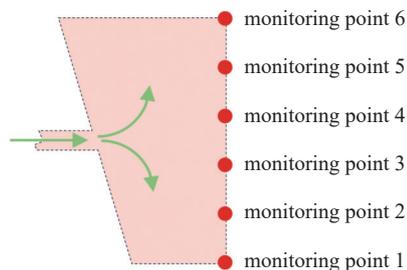


图 4 监测点位置示意图

Fig. 4 Monitoring points

表 2 仿真参数表

Tab. 2 Table of simulation parameters

参数	数值
仿真工具	Fluent 19.2
求解模型	Laminar
网格数量	120000
气体种类	N ₂
初始压力	0 kPa
壁面温度	300 K
边界条件	无滑移
入口边界	压力入口: 100 kPa
入口温度	300 K
出口边界	压力出口: 0 kPa
时间步长	自适应时间步长 (min 1 μ s)

从图 6 可以看出, 三种口径的进气管道在 100 kPa 的进气压力下, 气锁内的温度出现了短时间范围内的波动。设定 0.03% 波动量范围对应的时间为稳定时间点, 由图可知, 随着管径的增大, 稳定时间逐渐减小, 分别为 11.002 s, 11.000 s 以及 10.205 s。进一步地, 对不稳定区域内的多点数据进行方差处理, 可得到三种口径的方差值均值为 157.9403, 138.0245 和 227.918, 该结果反应出, 在进气前期, 各点温度波动不稳定性均有差别, 其中 $\phi 6-\phi 4$ mm 口径管道内, 各点的平均稳定性较好。综合评价选择 $\phi 6-\phi 4$ mm 口径管道作为实验进气管路。

2 实验研究

2.1 基本理论

在本研究中, 主要对象为清洁气体和污染气体在气锁结构中的扩散, 则其浓度梯度关系满足菲克定律^[1], 即如式(4)所示。

$$J = -D \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (4)$$

式中, J 为气体的扩散通量, D 为气体的扩散系数,

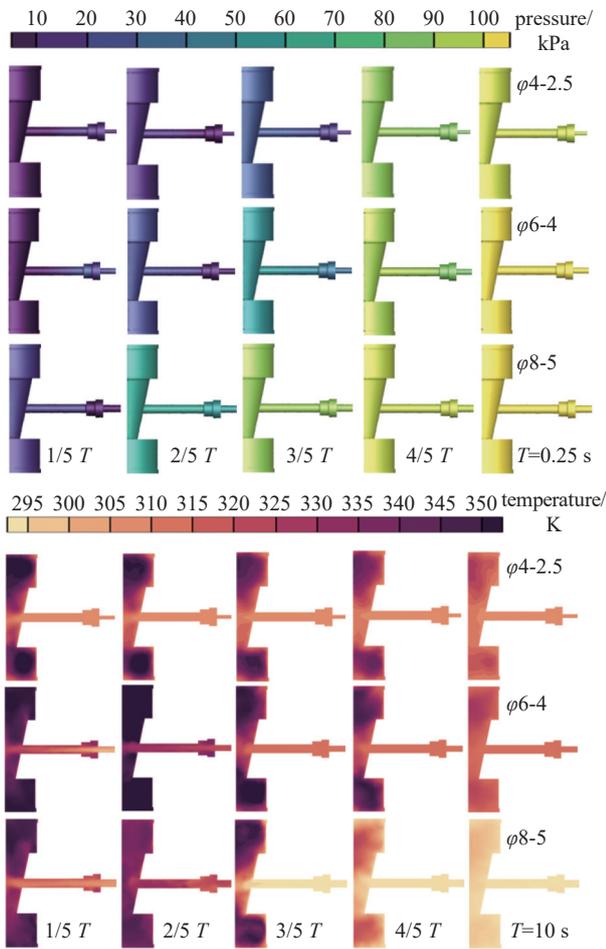


图5 不同尺寸管道气锁内压力云图及温度云图

Fig. 5 Pressure and temperature contour inside the gas lock with different pipe sizes

C 为扩散物质的体积浓度, $\partial C/\partial x$ 为浓度梯度。由该公式可知, 气体浓度梯度越大, 扩散通量越大, 而当气体浓度梯度一定时, 扩散通量与扩散物质的扩散系数相关, 物质之间的扩散系数可用下述公式评估^[17]。

$$D = \frac{T}{6\pi r\eta} \quad (5)$$

式中, D 为扩散系数, T 为热力学温度, r 为扩散质点的半径, η 为介质的黏度。由式(5)可以看出, 在气体种类一定时, 气体扩散程度与热力学温度以及压强相关。因此在本研究的实验设计中, 考虑通入气体的温度和流量。

2.2 正交设计

根据菲克定律, 为了评估气体间的扩散规律, 本研究中以 N_2 作为清洁气体、 CO_2 作为污染气体, 对于影响气体扩散程度的热力学温度和压强, 本研

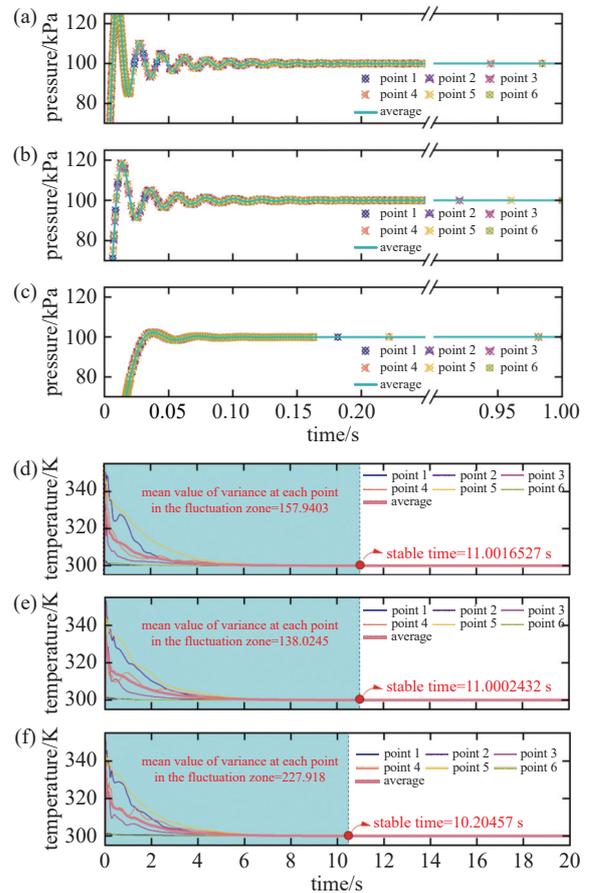


图6 不同尺寸进气管道压力及温度随时间变化曲线, 进气管道压力。(a) $\phi 4-\phi 2.5$ mm, (b) $\phi 6-\phi 4$ mm, (c) $\phi 8-\phi 5$ mm, 进气管道温度, (d) $\phi 4-\phi 2.5$ mm, (e) $\phi 6-\phi 4$ mm, (f) $\phi 8-\phi 5$ mm

Fig. 6 Time development of the pressure and temperature, pressure. (a) $\phi 4-\phi 2.5$ mm, (b) $\phi 6-\phi 4$ mm, (c) $\phi 8-\phi 5$ mm, temperature, (d) $\phi 4-\phi 2.5$ mm, (e) $\phi 6-\phi 4$ mm, (f) $\phi 8-\phi 5$ mm

究探索两种气体不同温度和进气流量条件下的污染抑制率。在正交实验中, 共设置 3 个实验因素, 每因素设置 5 个水平, 分别为: N_2 温度(70, 60, 50, 40, 30℃)、 N_2 流量(100, 80, 60, 40, 20 sccm)、以及 CO_2 温度(110, 90, 70, 50, 30℃), 同时, 每组实验中分别设置 5 个梯度的 CO_2 流量, 用于对比不同污染程度下气锁的抑制效果, CO_2 流量不作为正交实验中的因素之一。每个水平按照 1-5 排序, 正交表如表 3 所示。

3 结果分析

3.1 投影腔 CO_2 浓度变化曲线

根据正交实验表, 共进行 25 组实验。在刻蚀

表3 正交实验表

Tab. 3 Table of orthogonal experiments

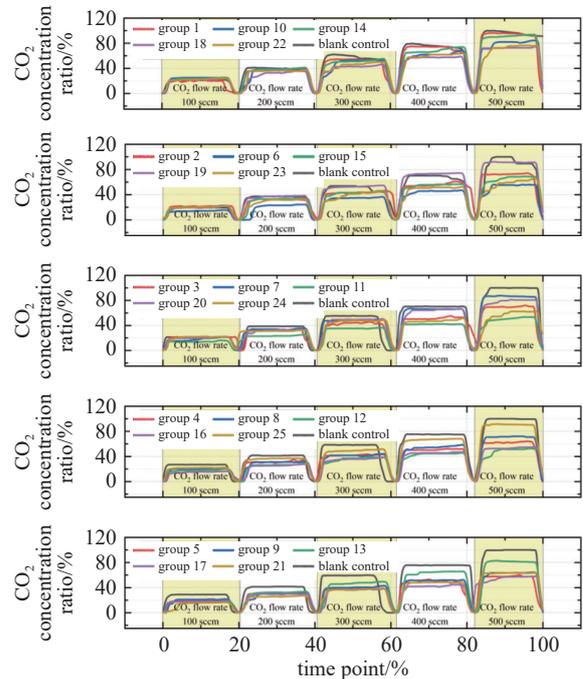
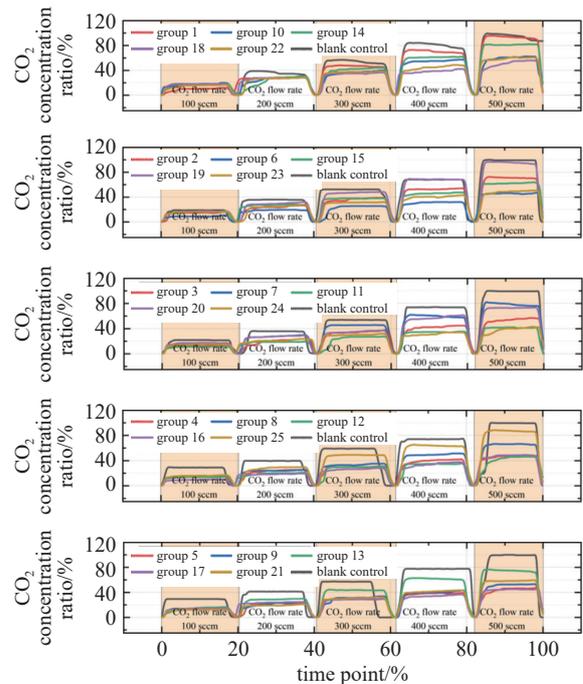
因素	N ₂ 温度/°C	N ₂ 流量/(mL/min)	CO ₂ 温度/°C
实验 1	1	1	1
实验 2	1	2	2
实验 3	1	3	3
实验 4	1	4	4
实验 5	1	5	5
实验 6	2	1	2
实验 7	2	2	3
实验 8	2	3	4
实验 9	2	4	5
实验 10	2	5	1
实验 11	3	1	3
实验 12	3	2	4
实验 13	3	3	5
实验 14	3	4	1
实验 15	3	5	2
实验 16	4	1	4
实验 17	4	2	5
实验 18	4	3	1
实验 19	4	4	2
实验 20	4	5	3
实验 21	5	1	5
实验 22	5	2	1
实验 23	5	3	2
实验 24	5	4	3
实验 25	5	5	4

腔室中通入不同流量及温度的 CO₂, 在气锁接口通入不同流量及温度的 N₂, 在投影腔室设置有 CO₂ 传感器进行 CO₂ 浓度的检测, 同时每种结构的气锁实验分别设置一组空白对照组, 对照组的实验条件为通入不同温度的 CO₂ 而无清洁气体引入。最终将两种结构气锁的检测数据随工艺时间的变化汇总于图 7 和图 8 中。

由图 7 和图 8 可以看出, 清洁气体的引入有效的抑制了 CO₂ 向投影腔室的扩散, 例如实验组 6, 11, 12, 17, 18 和 24, 其投影腔室的 CO₂ 浓度均得到了较好的控制, 由正交表中也可以看出, 这些实验组呈现清洁气体流量对比污染气体流量比较大的趋势。为了进一步分析几个实验因素对抑制率的影响, 本文对正交实验的结果进行了分析。

3.2 旋转型结构抑制率直观分析

对于旋转型结构气锁, 将 25 组实验结果进行

图7 旋转式气锁投影腔 CO₂ 浓度随时间变化曲线Fig. 7 Time development of the CO₂ concentration in projection chamber of rotating structure图8 拉伸式气锁投影腔 CO₂ 浓度随时间变化曲线Fig. 8 Time development of the CO₂ concentration in projection chamber of stretched structure

整理, 汇总于表 4 中, 设抑制率为 I_R , 则有^[11]:

$$I_R = 1 - \frac{Q_1}{Q_2} \quad (6)$$

式中, Q_1 为清洁气体通入工艺下, 投影腔室内的

CO₂ 浓度, Q_2 为无清洁气体通入工艺下, 即空白组条件下投影腔内的 CO₂ 浓度。抑制率的计算取值为各 CO₂ 通气流量对应的抑制率平均值。

表 4 旋转型结构抑制率汇总表

Tab. 4 Table of inhibition rates for rotating structure

组别	1	2	3	4	5
抑制率/%	54.66	61.36	64.64	64.59	67.17
组别	6	7	8	9	10
抑制率/%	72.39	58.07	64.29	65.94	58.74
组别	11	12	13	14	15
抑制率/%	71.53	69.73	59.89	55.45	63.52
组别	16	17	18	19	20
抑制率/%	69.84	69.37	63.64	54.08	59.88
组别	21	22	23	24	25
抑制率/%	69.42	60.14	66.47	63.90	57.10

由表 3 的数据可以看出, 该结构气锁下, 最高抑制率为 72.39%, 最低为 54.08%。结合表 4 中的实验数据, 计算 5 个因素条件下的均值和极差, 以对实验结果进行直观分析, 将计算结果统计于表 5 之中。

表 5 旋转型结构直观分析表

Tab. 5 Table of intuitive analysis for rotating structure

因素	N ₂ 温度/℃	N ₂ 流量/(mL/min)	CO ₂ 温度/℃
k_1	0.625	0.676	0.585
k_2	0.639	0.637	0.636
k_3	0.640	0.638	0.636
k_4	0.634	0.608	0.651
k_5	0.634	0.613	0.664
R	0.015	0.068	0.079

通过表 5 可以看出, $R_3 > R_2 > R_1$, 说明在工艺参数中, CO₂ 温度对实验结果的影响最大, 其次为 N₂ 流量和 N₂ 温度, 而在三个因素中, CO₂ 温度的水平 5, N₂ 流量的水平 1, N₂ 温度的水平 3 是最优参数组合。

3.3 拉伸型结构抑制率直观分析

对拉伸型结构气锁进行 25 组实验结果的整理, 统计于表 6 中。

由表 6 的数据可以看出, 该结构气锁下, 最高抑制率为 79.52%, 最低为 59.10%。计算拉伸型结构气锁 5 个因素条件下的均值和极差, 结果如表 7 所示。

通过表 7 可以看出, $R_3 > R_2 > R_1$, 说明在工艺参数中, CO₂ 温度对实验结果的影响最大, 其次为 N₂ 流

表 6 拉伸型结构抑制率汇总表

Tab. 6 Table of inhibition rates for stretched structure

组别	1	2	3	4	5
抑制率/%	59.10	68.41	72.54	74.31	75.23
组别	6	7	8	9	10
抑制率/%	79.52	62.91	69.58	74.26	66.59
组别	11	12	13	14	15
抑制率/%	77.95	76.63	62.70	64.58	68.33
组别	16	17	18	19	20
抑制率/%	77.51	75.45	71.07	59.73	66.59
组别	21	22	23	24	25
抑制率/%	74.14	69.55	73.11	75.97	61.14

表 7 拉伸型结构直观分析表

Tab. 7 Table of intuitive analysis for stretched structure

因素	N ₂ 温度/℃	N ₂ 流量/(mL/min)	CO ₂ 温度/℃
k_1	0.699	0.736	0.662
k_2	0.706	0.706	0.698
k_3	0.700	0.698	0.712
k_4	0.701	0.698	0.718
k_5	0.708	0.676	0.724
R	0.010	0.060	0.062

量和 N₂ 温度, 而在三个因素中, CO₂ 温度的水平 5, N₂ 流量的水平 1, N₂ 温度的水平 5 是最优参数组合。

综合表 5 和表 7 的统计结果, CO₂ 温度, 即污染气体的温度对抑制率影响较强, 在实际光刻工艺中, 对应不同的工艺条件, 有着不同的工艺温度, 可通过冷却处理等操作, 降低污染气体的扩散能力。N₂ 作为清洁气体, 其流量的大小对污染气体的抑制率也有较大的影响, N₂ 的温度影响次之。在实际工艺中, 可以通过调控这两个工艺参数对抑制效果进行优化处理。

4 结论与展望

本文通过模拟 EUV 光刻工艺流程, 搭建了一套实验真空系统用于研究气锁在光刻腔和投影腔之间阻碍污染气体扩散的规律, 实验结果得到以下结论。

(1) 对清洁气体和污染气体的温度和流量进行了正交实验设计, 采用 N₂ 作为清洁气体, CO₂ 作为污染气体, 设计了两种气锁结构下各 25 组实验。旋转型结构气锁最高抑制率为 72.39%, 拉伸型结构气锁最高抑制率为 79.52%。

(2) 污染气体的温度对其扩散新能影响权重最

高, 高温气体更容易扩散到投影腔进一步污染光学表面; 当采用 N_2 作为单组分清洁气体的工艺下, N_2 的流量影响污染气体扩散的权重次之, 最后为 N_2 的温度, 实际工艺中, 可通过调控清洁气体的流量和温度实现不同的抑制效果。

(3) 对三种因素下的各水平进行了评估, 综合来看, 清洁气体温度高、流量大, 污染气体温度低条件下更有利于气锁的抑制效果。

参 考 文 献

- [1] Seo Y, Go H, Lee J, et al. Analysis method to define photoresist resolution in EUV lithography[J]. International Conference on Extreme Ultraviolet Lithography 2023, 2023, 12750: 127500B
- [2] Sunahara A, Hassanein A, Tomita K, et al. Optimization of extreme ultra-violet light emitted from the CO_2 laser-irradiated tin plasmas using 2D radiation hydrodynamic simulations[J]. *Optics Express*, 2023, 31(20): 31780–31795
- [3] Rice B J. Extreme ultraviolet (EUV) lithography[M]. Woodhead Publishing, 2014, 42–79
- [4] Chai K, Lu Q, Song Y, et al. Detection of carbon contamination in EUV multilayer mirrors based on secondary electrons[J]. *Vacuum*, 2024, 221: 112869
- [5] Wang S, Ye Z, Guo P, et al. In-situ non-destructive removal of tin particles by low-energy plasma for imitation of EUV optical mirrors self-cleaning[J]. *Vacuum*, 2023, 212: 111963
- [6] Mertens B M, Zwan B, Jager P W H, et al. Mitigation of surface contamination from resist outgassing in EUV lithography[J]. *Microelectronic Engineering*, 2000, 53: 659–662
- [7] Yildirim O, Buitrago E, Hoefnagels R, et al. Improvements in resist performance towards EUV HVM[J]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 2017, 10143: 101430Q
- [8] Kanouff M P, Ray-Chaudhuri A K. A gas curtain for mitigating hydrocarbon contamination of EUV lithographic components[J]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 1999, 3676: 735–742
- [9] Hollenshead J T, Klebanoff L E. Modeling radiation-induced carbon contamination of extreme ultraviolet optics[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2006, 24(1): 64–82
- [10] Hollenshead J T, Klebanoff L E, Delgado G. Predicting radiation-induced carbon contamination of EUV optics[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2019, 37(2): 021602–1–021602–24
- [11] Chen J X, Wang Y, Xie W L. Theoretical investigation on suppression ratio of dynamic gas lock for extreme ultraviolet lithography[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53: 053401 (陈进新, 王宇, 谢婉露. 极紫外光刻动态气体锁抑制率的理论研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53: 053401 (in Chinese))
- [12] Sun J, Wang K, Wu X, et al. Theoretical research on suppression ratio of dynamic gas lock for extreme ultraviolet lithography contamination control[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2022, 40: 042603
- [13] Chen J X, Wang Y, Xie W L. Simulation investigation on suppression ratio of dynamic gas lock in extreme ultraviolet lithography[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54: 023401 (陈进新, 王宇, 谢婉露. 极紫外光刻动态气体锁抑制率的仿真研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54: 023401 (in Chinese))
- [14] Chen J X, Wang K B, Wang Y. 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 (in Chinese))
- [15] Chen J X, Wang Y, Xie W L. Experimental research on suppression ratio of dynamic gas lock for extreme ultraviolet lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0222002 (陈进新, 王宇, 谢婉露. 极紫外光刻动态气体锁抑制率的实验研究 [J]. *光学学报*, 2017, 37(2): 0222002 (in Chinese))
- [16] Wang K, Gao Z, Luo Y, et al. Experimental research on airflow efficiency of dynamic gas lock for extreme ultraviolet lithography[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2023, 41: 042602
- [17] Feng J, Zhang H W. Basics of steelmaking[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005 (冯捷, 张红文. 炼钢基础知识 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005 (in Chinese))