

极紫外光刻动态气体锁抑制率的实验研究

陈进新^{1,2}, 王 宇¹, 谢婉露^{1,2}

¹中国科学院光电研究院 北京 100094;

²北京市准分子激光工程技术研究中心 北京 100094

摘要 开展了动态气体锁抑制率的实验研究,设计了一套极紫外真空动态气体锁实验验证系统;进行了真空抽气系统的详细设计,形成了具有实际可操作性的真空系统的最终布局;指出了该实验验证系统的验证方法;进行了动态气体锁实验,并对实验结果进行了分析,验证了动态气体锁理论模型和仿真结果的正确性。实验研究结果表明,当污染气体放气率恒定时,增加清洁气体总流量将使动态气体锁抑制率逐步增加;同等条件下动态气体锁抑制率不随污染气体放气率的改变而改变;当清洁气体总流量和污染气体放气率都恒定时,动态气体锁抑制率随清洁气体相对分子质量的增加而缓慢增加。该动态气体锁抑制率实验研究结果,能够为极紫外光刻机动态气体锁的研制提供实验依据。

关键词 光学制造; X 射线光学; 极紫外光刻; 动态气体锁; 抑制率

中图分类号 TN23; O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0222002

Experimental Research on Suppression Ratio of Dynamic Gas Lock for Extreme Ultraviolet Lithography

Chen Jinxin^{1,2}, Wang Yu¹, Xie Wanlu^{1,2}

¹Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

²Beijing Excimer Laser Technology and Engineering Center, Beijing 100094, China

Abstract Experimental research on dynamic gas lock (DGL) suppression ratio is presented. Firstly, an experimental system of the extreme ultraviolet (EUV) vacuum DGL is designed; then the vacuum pumping system is designed detailedly, and the practical layout of the vacuum system is developed; moreover, the experimental steps are pointed out; finally the DGL experiments are carried out and results are analyzed to verify the theoretical model and simulation results of the DGL. Experimental results show that suppression ratio of the DGL increases gradually as the purge-gas flux increases when the dirty-gas outgassing is constant; suppression ratio of the DGL has nothing to do with the dirty-gas outgassing under the same conditions; and suppression ratio of the DGL increases slowly as the purge-gas molecular weight increases and the purge-gas flux and dirty-gas outgassing remain stable. The experimental research on DGL suppression ratio is helpful for the development of DGL in EUV lithography machine.

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

OCIS codes 220.3740; 340.7480; 120.4640

1 引 言

利用浸没式投影光刻技术及多次曝光套刻技术可以使 193 nm 波长的 ArF 准分子激光器拓展应用到 22 nm 集成电路技术节点,但是曝光次数的增加会提高制造过程的复杂程度和技术难度,导致生产成本急剧上升,所以国际上一直在寻求波长更短的光刻光源。波长为 13.5 nm 的极紫外(EUV)光刻技术有望成为 16 nm 及以下分辨率节点的商用投影光刻技术^[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

收稿日期: 2016-09-08; 收到修改稿日期: 2016-10-09

基金项目: 国家科技重大专项(2012ZX02702007)

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

E-mail: ashion@aoe.ac.cn

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境要求,即维持极低的特定气体分压力(水分压 1×10^{-5} Pa;相对分子质量为 $45 \sim 100$ 的大分子 9.8×10^{-9} Pa;相对分子质量 $100 \sim 200$ 的大分子 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,因而需要动态气体锁(DGL)来抑制污染气体由硅片台向投影物镜系统扩散。

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]。本课题组对 EUV 光刻机动态气体锁开展了研究,提出了两种新型动态气体锁结构^[11-12],提出了动态气体锁抑制率的概念,用来有效量化评价动态气体锁的隔离效能^[13],并系统性地分析了动态气体锁抑制率,进一步完善其理论研究体系^[14]。本文将对动态气体锁抑制率进行实验研究,为 EUV 光刻机动态气体锁的研制提供实验依据。

2 动态气体锁实验验证系统

2.1 系统组成

动态气体锁实验验证系统主要包括动态气体锁、模拟硅片台腔(CV)室、模拟投影物镜腔(ECV)室、系统台架和各真空设备,如图 1 所示。

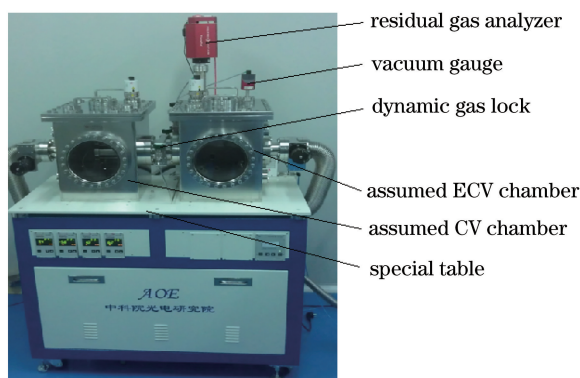


图 1 动态气体锁实验验证系统

Fig. 1 Experimental system of the DGL

模拟 CV 室和模拟 ECV 室固定在系统台架上,通过其真空抽气系统将腔内的气体排出,并通过真空计监测两腔室的真空度。动态气体锁处于模拟 CV 室和模拟 ECV 室之间,其两侧均通过阀门和管道连接到清洁气体源。模拟 CV 室中放置污染气体发射源,通过阀门和管道连接到污染气体源。在模拟 ECV 室上连接四极质谱系统,用于测量其内部的气体组分及分压力;清洁气体和污染气体通气管道上都连有各自的流量控制器,用于监控各气体流量。

动态气体锁实验验证系统模型剖面图如图 2 所示,展示了动态气体锁、污染发射源、模拟 CV 室和模拟 assumed CV chamber dirty-gas source dynamic gas lock assumed ECV chamber

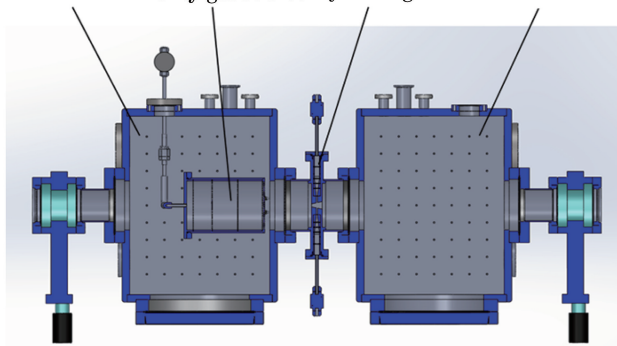


图 2 动态气体锁实验验证系统剖面图

Fig. 2 Sectional illustration for experimental system of the DGL

ECV 室的内部关系。动态气体锁的窄口端面向模拟 CV 室,其宽口端面向模拟 ECV 室。

2.2 动态气体锁结构

动态气体锁结构如图 3 所示。动态气体锁的气流通道两端分别与模拟 CV 室和模拟 ECV 室相通,呈喇叭口状;通过充气管道将外部气源的清洁气体注入气流通道内;气体锁法兰用于连接模拟 CV 室和模拟 ECV 室。

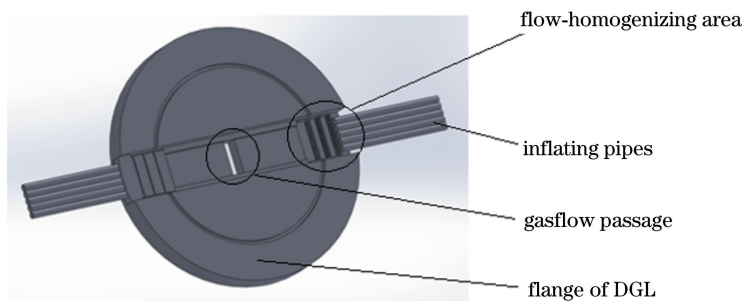


图 3 动态气体锁结构图

Fig. 3 Illustration of the DGL

为使气体喷口内通气均匀,需增加气流匀化区以得到均匀气流。由外部清洁气体气瓶连接一个总气体管路,接着一通多连接一排(如 5 组)等直径充气管道,并在充气管道喷口处依次设置漏孔孔径由大到小的三排均匀金属网格板。经过三重金属网格板的导流,清洁气体最终均匀地流向气流通道。

2.3 污染发射源结构

硅片上 EUV 光斑尺寸近似为 $2\text{ mm} \times 26\text{ mm}$ 的矩形。虽然在同一时刻只有该光斑尺寸内的光刻胶受到 EUV 辐照,但光刻胶释放污染气体的过程相当复杂, EUV 辐照过后还会残余放气,而且 EUV 光斑在硅片上扫描迅速,前一扫描窗口释放的污染气体气流还未稳定,下一扫描窗口就已经放气。为了简化该放气过程,简化污染发射源的结构设计,假设在整个硅片范围内同时放气。

为模拟真实 CV 室中的硅片,模拟 CV 室内的污染发射源为轴对称圆盘,其结构如图 4 所示。发射室通过发射源支撑架固定在模拟 CV 室内;发射室通过通气管道与污染气体气源连接;仅由发射室的发射面向动态气体锁向外喷射气体,且发射面与动态气体锁中心轴对准。为使污染气体喷射均匀,在污染发射源结构内部也布置有包含多重金属网格板的气流匀化装置。

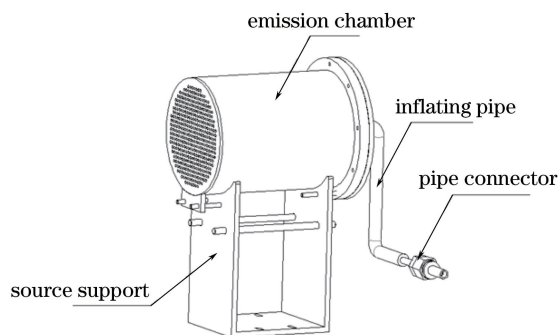


图 4 污染发射源结构图

Fig. 4 Illustration of the dirty-gas source

3 真空系统设计

在实验开始前,需要使用真空抽气系统对真空腔室抽真空,以达到实验所需的极限真空要求;在实验过程中,通入污染气体和清洁气体后,该真空抽气系统正常工作,以维持腔内真空度的动态平衡。另外,为确保四极质谱计的正常稳定工作,其工作环境压力需小于 0.01 Pa ,而参考 EUV 光刻机实际工作情况,该实验验证系统腔内工作气压一般为几帕,当实验过程中通入的清洁气体流量增大时其腔内气压甚至达到百帕量级。

这样导致在该实验验证系统的工作气压下四极质谱计不能直接使用。所以要设计一套合理的真空系统,除了能够对该实验验证系统的真空腔室抽真空,还能够在真空压力不匹配的情况下正常使用四极质谱计测得真空腔室中的气体组分及分压。

3.1 真空抽气系统详细设计

对模拟 CV 室和模拟 ECV 室进行无油真空系统设计,其极限真空度需优于 5×10^{-4} Pa,选取无油分子泵作为主泵,无油机械泵作为其前级泵^[15]。为简化系统,拟选用一套真空抽气系统对两腔室共同抽真空。

对模拟 CV 室和模拟 ECV 室,分别使用两组不同量程的真空计来测量其真空度。选用 PFEIFFER 公司 PKR251 普通规管对真空腔室进行真空度粗测;选用 CMR364 薄膜规对真空腔室进行真空度精确测量。

选用四极质谱计为 PFEIFFER 公司的 QMG220M2,其探测质量数范围为 $1 \sim 200$ amu。为确保四极质谱计的正常稳定工作,在质谱室和模拟 ECV 室之间连接有微调阀;通过调节该微调阀,可以设置不同的流导使模拟 ECV 室内的气体流入质谱室。为确保气流始终由模拟 ECV 室流入质谱室,即使质谱室内的气压低于模拟 ECV 室,需要增设一套抽气泵组单独对质谱室抽气。选用微调阀为 PFEIFFER 公司的 UDV046 微量进气阀;质谱室抽气系统选用 HiPace80 分子泵与 MVP070 干式机械泵的组合真空泵组。

3.2 腔室真空系统最终布局

腔室真空系统最终布局如图 5 所示,主要包括动态气体锁部分(第 I 部分)、模拟 CV 室部分(第 II 部分)、模拟 ECV 室部分(第 III 部分)、质谱室部分(第 IV 部分)和腔室共用泵组(第 V 部分)。

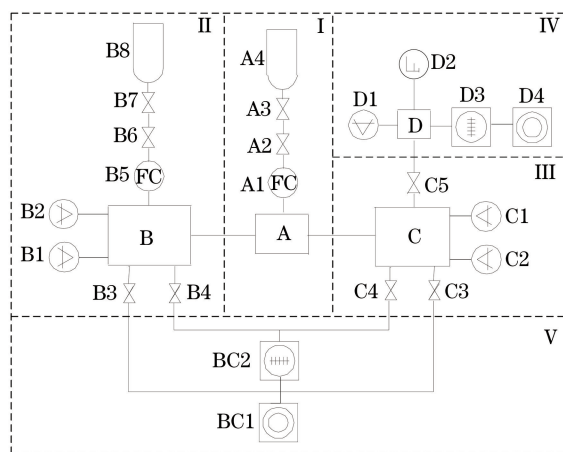


图 5 腔室真空系统最终布局

Fig. 5 Vacuum pumping layout for the DGL experimental system

对第 I 部分, A 为动态气体锁,其两端分别与模拟 CV 室 B 和模拟 ECV 室 C 相连; A4 为清洁气体气瓶,其上连接有截止阀 A3 和减压阀 A2;减压阀 A2 和动态气体锁 A 之间有精确控制清洁气体流量的流量控制器 A1。

对第 II 部分, B 为模拟 CV 室。其上连接有两个真空计,用于测量模拟 CV 室 B 的真空度,分别为大量程低精度的粗测真空计(普通规管 B1)和小量程高精度的精测真空计(薄膜规 B2)。两个阀门连接在模拟 CV 室 B 上,分别为与分子泵 BC2 相连的主抽阀 B4,与机械泵 BC1 相连的旁抽阀 B3。B8 为污染气体气瓶,其上连接有截止阀 B7 和减压阀 B6;减压阀 B6 和污染发射源(图 5 中未画出,安装在模拟 CV 室 B 内)之间有精确控制污染气体流量的流量控制器 B5。

对第 III 部分, C 为模拟 ECV 室。其上连接有两个真空计,用于测量模拟 ECV 室 C 的真空度,分别为大量程低精度的粗测真空计(普通规管 C1)和小量程高精度的精测真空计(薄膜规 C2)。两个阀门连接在模拟 ECV 室 C 上,分别为与分子泵 BC2 相连的主抽阀 C4,与机械泵 BC1 相连的旁抽阀 C3。C5 为微调阀,连接在质谱室 D 和模拟 ECV 室 C 之间,用于调节由模拟 ECV 室 C 流入质谱室 D 的气体流量。

对第 IV 部分, D 为质谱室。其上连接有真空计 D1 和四极质谱计 D2; D1 用于测量质谱室 D 中的真空度,确保四极质谱计 D2 能够正常工作; D2 用于测量质谱室 D (也即模拟 ECV 室 C) 中的气体种类和分压。质谱室泵组由分子泵 D3 和机械泵 D4 组成,用于维持质谱室 D 中的真空度。

第V部分为模拟 CV 室和模拟 ECV 室共用泵组,由分子泵 BC2 和机械泵 BC1 组成,用于为模拟 CV 室 B 和模拟 ECV 室 C 抽真空。

4 实验验证方法

该实验验证系统用污染气体发射源替代硅片室中因 EUV 辐照而放气的硅片,用缩比的模拟 CV 室和模拟 ECV 室替代 EUV 光刻机中的真空腔室,并将一套动态气体锁原型装置连接到两模拟腔室之间。通过高精度流量控制系统来精确控制污染气体发射源的污染气体放气率和动态气体锁的清洁气体流量;通过四极质谱计来监测模拟 ECV 室中的气体组分和分压力。这样,当污染气体发射源以一定的放气率释放污染气体时,可以通过四极质谱计测得 DGL 工作前后模拟 ECV 室中的污染气体分压力相对真空腔室本底的增量,由动态气体锁抑制率的理论研究结果可求得在该种条件下的动态气体锁抑制率^[14]。通过改变污染气体的放气率、清洁气体种类和清洁气体流量等条件,可以得到一系列的动态气体锁抑制率;通过分析这些抑制率的规律,可以验证动态气体锁的理论模型和其抑制率的影响因素。

在实际 EUV 光刻机中,硅片释放的污染物成分主要是水蒸气和碳氢化合物,且对大相对分子质量的碳氢化合物的分压要求比水要高得多,所以在进行仿真时,主要考虑大相对分子质量的碳氢化合物。为简化仿真过程,取仿真时的污染气体为最常见的单一乙醇。在实际 EUV 光刻机中,由动态气体锁注入的清洁气体分子与硅片释放的欲流向投影物镜腔室的污染气体分子发生近似线性弹性碰撞,使污染气体分子回流入硅片室从而达到抑制污染气体分子向投影物镜腔室扩散的效果。该抑制效果取决于参与碰撞的清洁气体分子数目的多少(对应宏观的清洁气体流量)、污染气体分子数目的多少(对应污染气体放气率)、清洁气体相对分子质量的大小(对应清洁气体种类)和污染气体相对分子质量的大小(对应污染气体种类)。为了获得稳定的污染气体气源,并与仿真时所选用乙醇(相对分子质量 46)近似等效,在实验过程中选用二氧化碳(相对分子质量 44)作为污染气体。

EUV 真空动态气体锁实验验证系统的验证方法如下:对模拟 CV 室和模拟 ECV 室抽真空,使两腔室的真空度接近极限本底,使用四极质谱计测量模拟 ECV 室内污染气体的分压值 P_{01} ;保持两腔室共用抽气泵组正常工作,通过污染发射源向模拟 CV 室内注入污染气体;在动态气体锁不工作的情况下,使用四极质谱计测量模拟 ECV 室内污染气体的分压值 P_{11} ;关闭污染发射源,对两腔室抽真空,再次使真空度接近极限本底,使用四极质谱计测量模拟 ECV 室内污染气体的分压值 P_{02} ;打开动态气体锁,以一定气体流量注入一定种类清洁气体,同时以与前次相同的污染气体流量再次打开污染发射源,经一定时间后两腔室的真空度稳定,使用四极质谱计测量模拟 ECV 室内污染气体的分压值 P_{12} ;这样可以得到该种类清洁气体在该清洁气体流量下针对该污染气体流量的动态气体锁抑制率为 $[(P_{11} - P_{01}) - (P_{12} - P_{02})] / (P_{11} - P_{01})$;连续上述实验过程,可以得到在不同清洁气体和不同气体流量下的一系列动态气体锁抑制率,以验证理论和仿真结果。

5 实验验证结果及其分析

利用上述动态气体锁实验验证系统及提出的验证方法,开展动态气体锁实验,并对实验结果进行分析,以验证 EUV 真空下动态气体锁的理论模型和其抑制率的影响因素。

5.1 真空腔本底实验结果

保持污染发射源及动态气体锁处于关闭状态,对动态气体锁实验验证系统进行抽真空。经过一段时间后,模拟 CV 室和模拟 ECV 室的真空度都达到 1.6×10^{-4} Pa。通过四极质谱计测试模拟 ECV 室本底的气体组分,结果如图 6 所示。图 6 中纵坐标为用离子流表示的气体分压值,且显示为对数坐标。

图 6 中显示的质谱图能够反映腔内气体的成分,图中每一个峰对应一种质荷比(即质量数)的离子。对大多数气体而言,除了对应质量数的主峰外,还存在一系列由碎片峰和同位素峰组成的副峰,所有的主峰和副峰叠加在一起形成了最终完整的质谱图。涉及的气体因副峰相对主峰而言为小量,所以在实验结果分析中,舍去副峰的影响,即认为质谱图中某质荷比全部对应该质量数的气体组分。这样,用四极质谱计直接测得的离子流和真实气体分压之比可根据质谱计对气体的相对灵敏度(离子流和气体分压的比例系数)通过计

算得出。该相对灵敏度需在恒定工作状态下注入已知质量数的单纯气体加以校准,且对同一质谱计和同一气体而言,在相同的测试环境下可认为该相对灵敏度为定值。因为校准工作极其复杂和困难,且所涉及的实验关键在于动态气体锁工作前后的结果对比,而不管真实气体分压值的大小,所以直接用离子流表示气体分压。

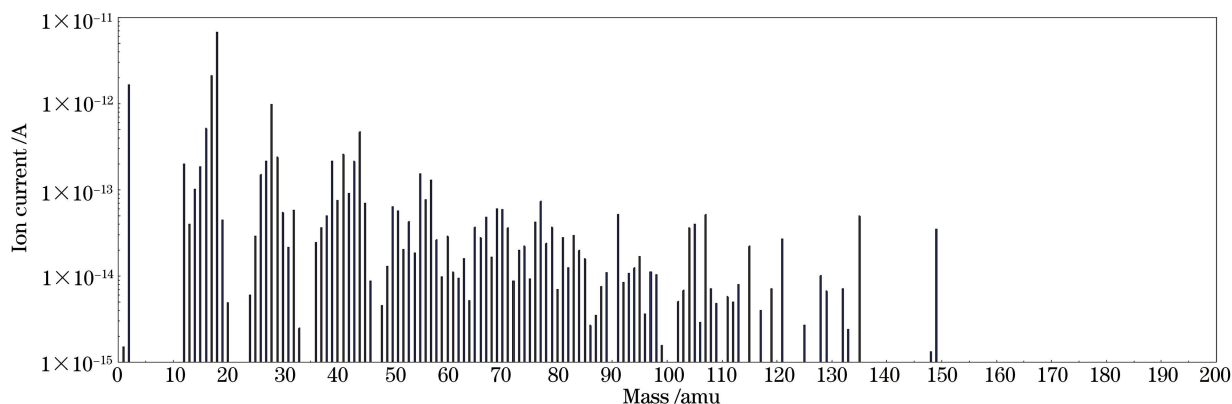


图 6 模拟 ECV 室本底实验质谱图

Fig. 6 Mass spectrum of the assumed ECV chamber at base pressure

由图 6 可知,质量数为 1~100 amu 的气体占绝大部分,100~150 amu 的气体极微量,150~200 amu 的气体几乎没有。模拟 ECV 室本底气体组分主要由氢气(质量数 2 amu)、水(质量数 18 amu)、氮气(质量数 28 amu)、CO₂(质量数 44 amu)等组成,对应的用离子流表示的分压值分别为 1.66×10^{-12} , 6.80×10^{-12} , 9.85×10^{-13} , 4.69×10^{-13} 。

5.2 仅通入污染气体的实验结果

保持动态气体锁处于关闭状态,并保持动态气体锁实验验证系统的抽气系统正常工作,打开污染发射源向模拟 CV 室内注入污染气体 CO₂。在不同 CO₂ 流量下的质谱室真空度和气体分压值(用离子流表示)如表 1 所示 sccm 表示每分钟标准升。

表 1 仅通入污染气体的实验结果

Table 1 Results of the partial pressure when the dirty gas is inflated alone

CO ₂ flux /sccm	Vacuum degree of mass spectrometer chamber /Pa	Partial pressure of mass number 44 /A	Partial pressure of mass number 28 /A
0.00	6.3×10^{-5}	4.69×10^{-13}	9.85×10^{-13}
0.03	6.8×10^{-5}	1.21×10^{-12}	1.39×10^{-12}
0.05	7.8×10^{-5}	2.12×10^{-12}	2.10×10^{-12}
0.10	1.0×10^{-4}	4.39×10^{-12}	3.54×10^{-12}
0.20	1.3×10^{-4}	1.07×10^{-11}	7.93×10^{-12}
0.30	1.6×10^{-4}	1.92×10^{-11}	1.38×10^{-11}
0.40	1.8×10^{-4}	2.95×10^{-11}	2.05×10^{-11}
0.50	2.1×10^{-4}	4.14×10^{-11}	2.80×10^{-11}
0.60	2.4×10^{-4}	5.50×10^{-11}	3.68×10^{-11}
0.70	2.7×10^{-4}	7.17×10^{-11}	4.54×10^{-11}
0.80	3.0×10^{-4}	9.12×10^{-11}	5.57×10^{-11}
0.90	3.3×10^{-4}	1.13×10^{-10}	6.60×10^{-11}

由表 1 可知,随着注入 CO₂ 流量的增加质谱室真空度(即质谱室总压)近似线性增加,这使测得的各气体分压值也近似线性增加。另外,随着注入 CO₂ 流量的增加,质量数 28 和质量数 44 的分压逐渐增加且增加幅度越来越大,说明质量数为 28 的气体主峰上存在 CO₂ 的副峰。质量数 28 和质量数 44 分压的增加除了部分是因为质谱室总压的增加外,主要是因为往腔内注入了 CO₂。

舍去质谱结果中副峰的影响,即认为 CO₂ 完全对应质谱结果中质量数为 44 的气体,可得到 CO₂ 气体

分压值(用离子流表示)和 CO₂ 流量的关系,如图 7 所示。由图 7 可直观看出,随着注入二氧化碳流量的增加,二氧化碳分压逐渐增加。

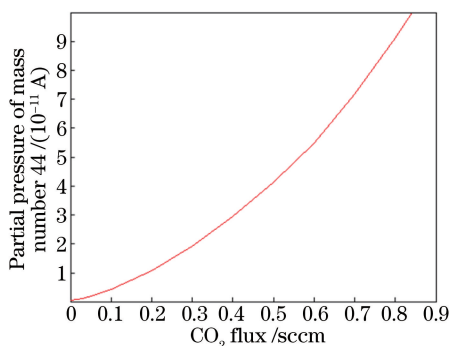


图 7 仅通入污染气体的实验结果

Fig. 7 Experiment results when the dirty gas is inflated alone

5.3 污染气体和清洁气体同时通入的实验结果

以清洁气体种类、清洁气体流量和污染气体放气率为影响因素,分别实验如下三种情况:相同清洁气体种类、相同污染气体放气率、不同清洁气体流量;相同清洁气体种类、相同清洁气体流量、不同污染气体放气率;相同清洁气体流量、相同污染气体放气率、不同清洁气体种类。

5.3.1 清洁气体种类相同、流量不同,污染气体放气率相同

同等条件下扩散系数和抑制率不随污染气体放气率的改变而改变,本节实验中取污染气体 CO₂ 总流量恒为 0.1 sccm。由表 1 可知,当污染气体 CO₂ 总流量为 0.1 sccm 时,质谱室真空度为 1.0×10^{-4} Pa。为避免质谱室总压的增加对实验结果的影响,本小节的实验都在质谱室真空度为 1.0×10^{-4} Pa 的情况下测量,这样模拟 ECV 室中二氧化碳分压的增加完全是因为往腔内注入了二氧化碳。

注入动态气体锁的清洁气体为氩气,总流量分别取为 1,2,3,4,5,6 slm。slm 为每分钟标准毫升。在每次进行实验前,都对腔室抽真空并记录本底气体分压值。各种不同清洁气体流量下的氩气和二氧化碳分压值(用离子流表示)如表 2 所示。

表 2 通入 0.1 sccm 污染气体和不同流量清洁气体的实验结果

Table 2 Results of the partial pressure when inflating 0.1 sccm dirty-gas and different purge-gas flux

Ar flux /slm	CO ₂ flux /sccm	Partial pressure of mass number 40 /A	Partial pressure of mass number 44 /A
0	0	9.66×10^{-14}	1.52×10^{-13}
1	0.1	2.95×10^{-11}	6.79×10^{-13}
0	0	1.08×10^{-13}	1.46×10^{-13}
2	0.1	2.59×10^{-11}	5.41×10^{-13}
0	0	9.78×10^{-14}	1.31×10^{-13}
3	0.1	2.29×10^{-11}	4.68×10^{-13}
0	0	7.54×10^{-14}	1.12×10^{-13}
4	0.1	1.85×10^{-11}	3.46×10^{-13}
0	0	1.01×10^{-13}	9.93×10^{-14}
5	0.1	2.02×10^{-11}	3.40×10^{-13}
0	0	1.01×10^{-13}	9.08×10^{-14}
6	0.1	1.87×10^{-11}	3.22×10^{-13}

由表 2 可求得各种条件下动态气体锁工作时流入 ECV 环境的污染气体总量,即为每次通入清洁气体和污染气体后得到的污染气体的分压值 P_{12} 与通气前本底的污染气体的分压值 P_{02} 之差。由表 1 可求得动态气体锁不工作时流入 ECV 环境的污染气体总量,即为仅通入污染气体后得到的污染气体的分压值 P_{11} 与通气前本底的污染气体的分压值 P_{01} 之差。这样可求得动态气体锁抑制率,如表 3 所示。

表 3 通入 0.1 sccm 污染气体和不同流量清洁气体的抑制率计算结果

Table 3 Suppression ratio results when inflating 0.1 sccm dirty-gas and different purge-gas flux

Ar flux / slm	CO ₂ flux /sccm	Partial pressure of mass number 44 /A				Suppression ratio /%
		P_{01}	P_{11}	P_{02}	P_{12}	
1	0.1	4.69×10^{-13}	4.39×10^{-12}	1.52×10^{-13}	6.79×10^{-13}	86.6
2	0.1	4.69×10^{-13}	4.39×10^{-12}	1.46×10^{-13}	5.41×10^{-13}	89.9
3	0.1	4.69×10^{-13}	4.39×10^{-12}	1.31×10^{-13}	4.68×10^{-13}	91.4
4	0.1	4.69×10^{-13}	4.39×10^{-12}	1.12×10^{-13}	3.46×10^{-13}	94.0
5	0.1	4.69×10^{-13}	4.39×10^{-12}	9.93×10^{-14}	3.40×10^{-13}	93.9
6	0.1	4.69×10^{-13}	4.39×10^{-12}	9.08×10^{-14}	3.22×10^{-13}	94.1

由表 3 可知,当污染气体放气率恒定时,增加清洁气体总流量将使动态气体锁抑制率逐步增加。当清洁气体总流量达到 4 slm(对应 $66.7 \text{ mbar} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$, $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$)以上时,动态气体锁抑制率近似恒定为 94%。

当清洁气体种类和污染气体放气率相同、清洁气体流量不同时,实验结果与仿真结果的对比如图 8 所示。仿真时所选清洁气体为氢气,污染气体为乙醇,且乙醇放气率为 $4.5 \times 10^{15} \text{ molecule} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;实验时所选清洁气体为氩气,污染气体为二氧化碳,且二氧化碳放气率为 $5.24 \times 10^{18} \text{ molecule} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由图 8 可知,实验和仿真结果都验证了动态气体锁抑制率随清洁气体总流量的增加而增加。实验和仿真结果在具体数值上有较大差异,这主要是由实验模型和仿真模型的差异导致的。本实验验证系统的真空腔特征尺寸为百毫米量级,动态气体锁部分的总厚度(模拟 ECV 室和模拟 CV 室的壁面间距)约为 200 mm;仿真模型的真空腔特征尺寸为米量级,动态气体锁部分的厚度为 20 mm。虽然通过仿真和实验求得的动态气体锁抑制率具体数值不同,但是其抑制率随清洁气体总流量的变化趋势都是一致的。

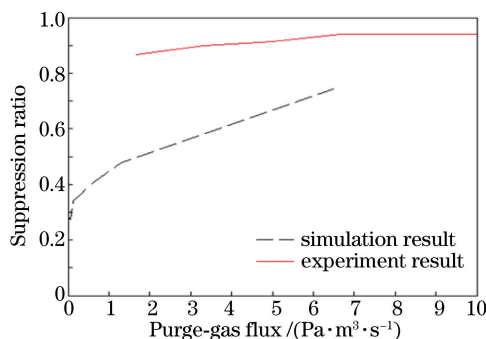


图 8 不同清洁气体总流量时实验结果和仿真结果的对比

Fig. 8 Suppression ratio comparison of simulation and experiment results under different purge-gas flux

5.3.2 清洁气体种类相同、流量相同,污染气体放气率不同

当氩气总流量为 4 slm($66.7 \text{ mbar} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$)时,可近似对应氩气总流量为 $65 \text{ mbar} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ 的仿真条件,为与仿真结果进行对比,本节实验中取氩气的总流量恒为 4 slm。为了避免质谱室总压对实验结果的影响,在实验过程中,当注入不同二氧化碳流量时质谱室真空度与表 1 中对应值一致。各种不同污染气体放气率下的氩气和二氧化碳分压值(用离子流表示)如表 4 所示。由表 4 可知,在 Ar 总流量恒为 4 slm 的情况下,随着注入 CO₂ 流量的增加实验结果中二氧化碳分压(质量数 44)逐步增加。很明显,质量数 44 分压值的增加是由质谱室总压增加和 CO₂ 流量增加共同导致的。

由表 1 和表 4 中实验结果,并借用表 3 中相关结果,可得到通入 4 slm 清洁气体和不同流量污染气体的抑制率计算结果,如表 5 所示。虽然在表 4 中质谱室总压增加和 CO₂ 流量增加共同导致质量数 44 分压值的增加,但相同污染气体放气率时质谱室总压一致,故计算动态气体锁抑制率时排除了质谱室总压的影响,求得的抑制率变化完全是由 CO₂ 流量增加导致的。

由表 5 可知,当清洁气体总流量恒定时,增加污染气体放气率将使腔内污染气体分压值近似成比例增加。动态气体锁抑制率随污染气体放气率的增加而缓慢增加,变动幅度在 $\pm 4\%$ 范围内,即在 $\pm 4\%$ 误差内能得到“同等条件下动态气体锁抑制率不随污染气体放气率的改变而改变”的结论。

表 4 通入 4 slm 清洁气体和不同流量污染气体的实验结果

Table 4 Results of the partial pressure when inflating 4 slm purge-gas and different dirty-gas flux

Ar flux /slm	CO ₂ flux /sccm	Partial pressure of mass number 40 /A	Partial pressure of mass number 44 /A
0	0.00	1.12×10^{-13}	6.83×10^{-14}
4	0.03	5.40×10^{-12}	1.34×10^{-13}
4	0.05	7.94×10^{-12}	1.71×10^{-13}
4	0.20	3.39×10^{-11}	3.83×10^{-13}
4	0.30	6.15×10^{-11}	8.13×10^{-13}
4	0.40	7.68×10^{-11}	8.76×10^{-13}
4	0.50	1.11×10^{-10}	1.12×10^{-12}
4	0.60	1.41×10^{-10}	1.27×10^{-12}
4	0.70	1.85×10^{-10}	1.53×10^{-12}
4	0.80	2.29×10^{-10}	1.73×10^{-12}
4	0.90	2.82×10^{-10}	1.97×10^{-12}

表 5 通入 4 slm 清洁气体和不同流量污染气体的抑制率计算结果

Table 5 Suppression ratio results when inflating 4 slm purge-gas and different dirty-gas flux

Ar flux /slm	CO ₂ flux /sccm	Partial pressure of mass number 44 /A				Suppression ratio
		P_{01}	P_{11}	P_{02}	P_{12}	
4	0.03	4.69×10^{-13}	1.21×10^{-12}	6.83×10^{-14}	1.34×10^{-13}	91.1%
4	0.05	4.69×10^{-13}	2.12×10^{-12}	6.83×10^{-14}	1.71×10^{-13}	93.8%
4	0.1	4.69×10^{-13}	4.39×10^{-12}	6.83×10^{-14}	3.46×10^{-13}	92.9%
4	0.2	4.69×10^{-13}	1.07×10^{-11}	6.83×10^{-14}	3.83×10^{-13}	96.9%
4	0.3	4.69×10^{-13}	1.92×10^{-11}	6.83×10^{-14}	8.13×10^{-13}	96.0%
4	0.4	4.69×10^{-13}	2.95×10^{-11}	6.83×10^{-14}	8.76×10^{-13}	97.2%
4	0.5	4.69×10^{-13}	4.14×10^{-11}	6.83×10^{-14}	1.12×10^{-12}	97.4%
4	0.6	4.69×10^{-13}	5.50×10^{-11}	6.83×10^{-14}	1.27×10^{-12}	97.8%
4	0.7	4.69×10^{-13}	7.17×10^{-11}	6.83×10^{-14}	1.53×10^{-12}	97.9%
4	0.8	4.69×10^{-13}	9.12×10^{-11}	6.83×10^{-14}	1.73×10^{-12}	98.2%
4	0.9	4.69×10^{-13}	1.13×10^{-10}	6.83×10^{-14}	1.97×10^{-12}	98.3%

当清洁气体种类和流量相同、污染气体放气率不同时,实验结果与仿真结果的对比如图 9 所示。仿真时所选清洁气体为氩气,污染气体为乙醇,且氩气总流量为 $65 \text{ mbar} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$;实验时所选清洁气体为氩气,污染气体为二氧化碳,且氩气总流量为 $66.7 \text{ mbar} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由图 9 可知,实验和仿真结果都验证了动态气体锁抑制率与污染气体放气率无关。同样,实验和仿真结果在具体数值上有较大差异,这主要是由实验模型和仿真模型的差异造成的。

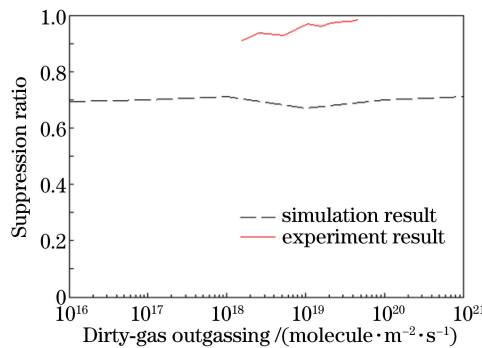


图 9 不同污染气体放气率时实验结果和仿真结果的对比

Fig. 9 Suppression ratio comparison of simulation and experiment results under different dirty-gas flux

5.3.3 清洁气体种类不同、流量相同,污染气体放气率相同

为避免实验过程中因引入氢气带来的不安全因素,本节实验不使用氢气作为清洁气体,而取清洁气体种

类为氦气、氟气、氮气。与前文类似,取污染气体总流量恒为 0.1 sccm ,且质谱室真空度为 $1.0 \times 10^{-4} \text{ Pa}$,得到各种不同气体流量下的二氧化碳分压值(用离子流表示)如表 6 所示。由表 1 和表 6 中实验结果,可得到通入 4 slm 或 2 slm 清洁气体、 0.1 sccm 污染气体的抑制率计算结果,如表 7 所示。

表 6 通入 0.1 sccm 污染气体和 4 slm 或 2 slm 清洁气体的实验结果

Table 6 Results of the partial pressure when inflating 0.1 sccm dirty-gas and 4 slm or 2 slm purge-gas

Purge-gas	Purge-gas flux /slm	CO ₂ flux /sccm	Partial pressure of mass number 44 /A
Ar	0	0	1.12×10^{-13}
Ar	4	0.1	3.46×10^{-13}
N ₂	0	0	1.07×10^{-13}
N ₂	4	0.1	3.47×10^{-13}
Ar	0	0	1.46×10^{-13}
Ar	2	0.1	5.41×10^{-13}
N ₂	0	0	9.67×10^{-14}
N ₂	2	0.1	3.72×10^{-13}
He	0	0	9.12×10^{-14}
He	2	0.1	4.77×10^{-13}

表 7 通入 0.1 sccm 污染气体和 4 slm 或 2 slm 清洁气体的抑制率计算结果

Table 7 Suppression ratio results when inflating 0.1 sccm dirty-gas and 4 slm or 2 slm purge-gas

Purge-gas	Purge-gas flux /slm	CO ₂ flux /sccm	Partial pressure of mass number 44 /A				Suppression ratio
			P_{01}	P_{11}	P_{02}	P_{12}	
Ar	4	0.1	4.69×10^{-13}	4.39×10^{-12}	6.83×10^{-14}	3.46×10^{-13}	92.9%
N ₂	4	0.1	4.69×10^{-13}	4.39×10^{-12}	1.07×10^{-13}	3.47×10^{-13}	93.9%
Ar	2	0.1	4.69×10^{-13}	4.39×10^{-12}	1.46×10^{-13}	5.41×10^{-13}	89.9%
N ₂	2	0.1	4.69×10^{-13}	4.39×10^{-12}	9.67×10^{-14}	3.72×10^{-13}	93.0%
He	2	0.1	4.69×10^{-13}	4.39×10^{-12}	9.12×10^{-14}	4.77×10^{-13}	90.2%

由表 7 可知,当清洁气体总流量和污染气体放气率都恒定时,能够近似验证“动态气体锁抑制率随清洁气体分子量的增加而缓慢增加”的仿真结果,同等条件下增加清洁气体流量可以相应增加动态气体锁抑制率,这与 5.3.1 节得到的结论是一致的。

当清洁气体流量和污染气体放气率相同、清洁气体种类不同时,实验结果与仿真结果的对比如图 10 所示。仿真时清洁气体总流量为 $65 \text{ mbar} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$,污染气体为乙醇,且乙醇放气率为 $4.5 \times 10^{15} \text{ molecule} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;实验时清洁气体总流量为 $33.3 \text{ mbar} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$,污染气体为二氧化碳,且二氧化碳放气率为 $5.24 \times 10^{18} \text{ molecule} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由图 10 可知,实验和仿真结果都验证了动态气体锁抑制率随清洁气体相对分子质量的增加而缓慢增加。同样,实验和仿真结果在具体数值上有较大差异,这主要是由实验模型和仿真模型的差异造成的。

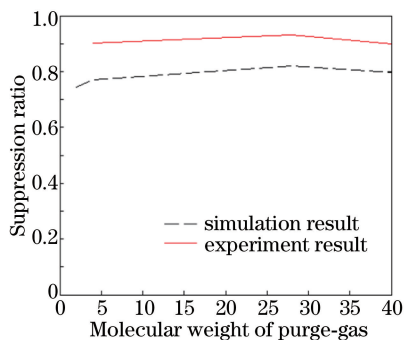


图 10 清洁气体种类不同时实验结果和仿真结果的对比

Fig. 10 Suppression ratio comparison of simulation and experiment results under different purge-gas

6 结 论

设计了一套 EUV 真空动态气体锁实验验证系统,介绍了该系统的动态气体锁、污染发射源等组成部分;进行了真空抽气系统的详细设计,形成了具有实际可操作性的真空系统的最终布局;指出了该系统的实验验证方法,为顺利开展动态气体锁实验,得到合理的实验结果提供了有效保障。另外,利用该系统进行了动态气体锁实验,并对实验结果进行分析,以验证 EUV 真空下动态气体锁的理论模型和其抑制率的影响因素。

通过实验研究,得出以下主要结论:1)该实验验证系统及真空系统设计能够满足动态气体锁抑制率的实验需求;2)仅通入污染气体时,随着注入污染气体流量的增加,腔室中污染气体的分压也近似成比例增加;3)当污染气体放气率恒定时,增加清洁气体总流量将使动态气体锁抑制率逐步增加;4)当清洁气体总流量恒定时,增加污染气体放气率将使腔内污染气体分压值近似成比例增加,动态气体锁抑制率随污染气体放气率的增加而缓慢增加,在 $\pm 4\%$ 误差内能得到“同等条件下动态气体锁抑制率不随污染气体放气率的改变而改变”的结论;5)当清洁气体总流量和污染气体放气率都恒定时,动态气体锁抑制率随清洁气体相对分子质量的增加而缓慢增加。

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.
夸 克, 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[M]. Bellingham: SPIE Press, 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.
- [4] Harned N, Moors R, van Kampen M, *et al.* Strategy for minimizing EUV optics contamination during exposure[R]. EUVL Symposium, 2008.
- [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(1-4): 659-662.
- [6] Jonkers J. EUV-transparent interface structure: US6683936B2[P]. 2004-01-27.
- [7] Roux S. Method for recycling gases used in a lithography tool: US7087911B2[P]. 2006-08-08.
- [8] Jacobs J H W, Brewster B D, Livesey R G. 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, 8322: 83222U.
- [10] Schoormans C C J, Eussen E J M, Koenen W H G A, *et al.* Lithographic apparatus and device manufacturing method: US7557903B2[P]. 2009-07-07.
- [11] 陈进新, 王魁波, 王 宇, 等. 一种动态气体锁: CN201310320652.9[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: CN201310343253.4[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] Chen Jinxin, Wang Yu, Xie Wanlu. Theoretical investigation on suppression ratio of dynamic gas lock for extreme ultraviolet lithography[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 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(5): 053401.
- [15] 徐成海. 真空工程技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006