

激光与光电子学进展

浸没式光刻机浸液系统污染控制研究现状及进展

付婧媛, 苏芮*, 阮晓东, 付新

浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310058

摘要 浸没式光刻是实现 5 nm 以上线宽高性能超大规模集成电路产品制造的关键技术。相比传统干式光刻, 浸没式光刻需在末端物镜和硅片之间填充浸没液体。浸没液体的高折射率可以提高光刻机的数值孔径和曝光分辨率, 但也对浸没式光刻的污染控制提出了挑战。为了减少曝光缺陷, 提升曝光良率, 需要对浸液系统中的各类污染物进行高精度检测与精准控制, 以达到超洁净流控。从浸没式光刻技术的原理出发对比分析了干式光刻与浸没式光刻, 概述了浸没式光刻机的发展历程, 着重介绍了浸没式光刻浸液系统中几种污染物的产生机理、检测方法和控制手段, 为进一步提高浸没式光刻芯片的曝光良品率提供了理论基础。

关键词 浸没式光刻机; 浸没系统; 污染机理; 污染检测; 污染控制

中图分类号 TN305.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.0922014

Research Status and Progress of Contamination Control in Immersion Liquid System of Immersion Lithography Machine

Fu Jingyuan, Su Rui*, Ruan Xiaodong, Fu Xin

State Key Laboratory of Fluid Power & Mechatronic Systems, Zhejiang University,
Hangzhou 310058, Zhejiang, China

Abstract Immersion lithography is a crucial technology for the exposure process in the production of high-performance very large-scale integrated circuits with line widths greater than 5 nm. Compared to the traditional dry lithography, the immersion liquid fills the space between the last projective objective and the wafer of immersion lithography. The immersion liquid could improve the numerical aperture and exposure resolution due to its high refractive index; however, it poses a challenge to immersion lithography contamination control. To reduce the exposure defects and increase the manufacturing yield, high-precision detection and the control of various contaminants in the immersion system, i. e., achieving the ultra-clean flow control, must be implemented. This paper discusses the development of immersion lithographic equipment by introducing the principles of immersion lithographic technology and comparing dry and immersion lithography. The focus is on the review of the contaminants for the immersion system of immersion lithography, including their generation mechanism, detection methods, and control techniques. It will serve as a theoretical basis for further improving the chip yield after exposure.

Key words immersion lithography; immersion system; contamination mechanism; contamination detection; contamination control

收稿日期: 2022-01-28; 修回日期: 2022-03-03; 录用日期: 2022-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(52105071)、中央高校基本科研业务费专项资金(2021QNA4002)

通信作者: *srhello@zju.edu.cn

1 引言

光刻机是将光刻技术应用到集成电路加工中的设备,其工作原理是通过透镜的折射作用,将掩模板上的电路图案投影到硅片上,并通过硅片的步进扫描以及最终的物化反应完成集成电路的批量制备。

浸没式光刻是目前集成电路制造中的主流技术,通过在最后一块投影物镜和硅片之间填充高折射率浸没液体增大数值孔径,从而提升光刻分辨率,但浸没式光刻也带来一些影响系统曝光性能的新问题。相比干式光刻机,浸没式光刻机独有的浸没液体成为曝光光学系统中污染物的主要来源,而光刻工艺对污染物的控制提出了极高的要求^[1]。浸没液体中的污染物包括颗粒、金属离子、有机化合物、小分子物质等,这些污染物不仅会导致桥接、微孔、颗粒附着等曝光缺陷,直接影响芯片制造良品率,还会因为浸没头被污染导致浸液系统失效,间接影响到芯片的制造产率和成本。这就要求浸液系统在制备浸没液体的同时,必须避免液体在流控过程中引入二次污染。本文从浸没式光刻技术的原理出发对比了干式光刻与浸没式光刻,概述了浸没式光刻机的发展历程,并着重介绍了浸没式光刻的几种污染物产生机理、检测方法和控制手段。

2 浸没式光刻机的发展现状

光刻技术的性能可通过两个重要参数来评价:一个是光刻分辨率 R ,即通过光刻技术在晶圆表面形成可清晰分辨的最小特征图形(如相等的线条和间距),分辨率越小,表明光刻技术能制造的产品越小,在每个晶圆上可以制造更多的芯片或用相同尺寸的芯片可制造出更复杂的图案^[2];另一个是焦深(DOF),可反映曝光系统成像质量和晶圆表面位置的关系,即在焦深范围内,焦深越大,刻蚀的清晰图案范围越大,获得的光刻线条质量也越高。因此,提高光刻技术的曝光性能,可以从减小分辨率和增加焦深方面入手。光刻技术中的分辨率和焦深 D_F 可分别表示为^[3-4]

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA} = k_1 \frac{\lambda}{n \sin \theta}, \quad (1)$$

$$D_F = k_2 \frac{\lambda}{n \sin^2 \theta} = k_2 \frac{n \lambda}{NA^2}, \quad (2)$$

式中, k_1 、 k_2 为工艺因子,由工艺因素和波前工程技术决定, λ 为激光波长, θ 为半孔径角, NA 为数值孔

径, n 为投影透镜到硅片表面之间介质的折射率。可以发现,减少曝光光源的波长、提高投影物镜的数值孔径或降低工艺因子均可提高光刻机的分辨率^[5-7]。

早期的光刻机为干式光刻机,通过减小曝光波长并采用分辨率增强技术降低光刻工艺因子。20世纪70年代以来,光刻机曝光光源的波长逐渐从436 nm(G线)、356 nm(I线)、248 nm(KrF)发展到193 nm(ArF),相应的透镜数值孔径也从0.6、0.75、0.85增大到0.93。光学光刻技术先后经历接触式光刻、接近式光刻、全硅片扫描投影式光刻、分步重复投影式光刻以及目前普遍采用的步进扫描投影式光刻^[2]。极紫外光刻(EUVL)技术的出现,将光刻波长降低到13.5 nm,极大提高了曝光分辨率,目前,阿斯麦(ASML)公司在该领域处于领先地位。

图1为干式光刻与浸没式光刻的原理^[8]。在193 nm干式光刻技术中最后一块物镜与硅片之间的介质为空气,对应的折射率 $n=1$,而浸没式光刻技术中填充的液体为超纯水,对应的折射率 $n=1.44$ ^[9],大于空气的折射率。可根据瑞利公式提高曝光分辨率,使光刻机的曝光线宽达到38 nm左右,通过多重曝光能将工艺节点延伸至5 nm^[10]。在数值孔径不变的情况下,更大的折射率也能获得更大的焦深,增加了光刻的清晰范围。浸没式光刻技术不仅提高了曝光的分辨率、增大了焦深,同时也继承了干式光刻技术大部分组件。

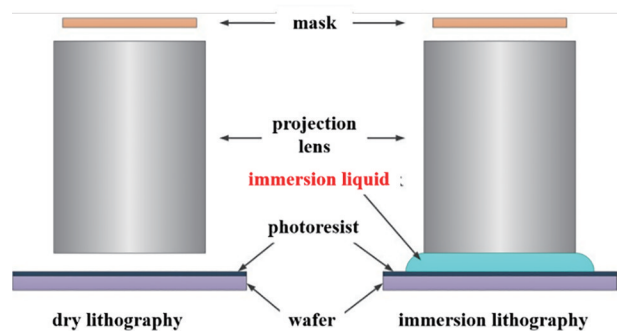


图1 干式光刻与浸没式光刻的对比^[8]

Fig. 1 Comparison of dry lithography and immersion lithography^[8]

浸没式光刻的基本原理来自意大利工程师Giovanni Amici在19世纪发明的浸没式显微镜,即通过填充液体提高显微镜的分辨率^[11]。Tabarelli等^[12]提出将浸没式原理应用于光刻机,把最后一块物镜浸没在水槽中,即完全浸没式原理;Yoshio

等^[13]提出在最后一块物镜与硅片的待曝光局部区域间填充液体,即局部浸没式原理。之后,人们对浸没液体的测定、数值孔径与曝光场的关系、光刻胶排气、气泡的形成与消除、液体与物镜和工作台的振动耦合以及液体介质的污染等浸没式光刻相关基础问题进行了大量研究。ASML公司推出了世界上第一台浸没式光刻机样机,标志着光刻领域开启了新的篇章。

光刻机浸液系统的核心部件包括提供最后一

片液体镜头的高精密装置(浸没头)以及浸没流场控制单元(浸没单元)。为了实现曝光过程中均匀温升,抑制污染物向物镜的沉积,同时防止浸没液体在动态扫描过程中的泄露,浸没单元需要实现流场稳定、均匀的流速及压力分布,以维持浸没流场的动态稳定及动态密封,同时在曝光结束后快速消除流场中的液体。因此,需要对浸没头及其控制单元的结构进行精确设计。图2为浸没头和浸没单元的示意图。

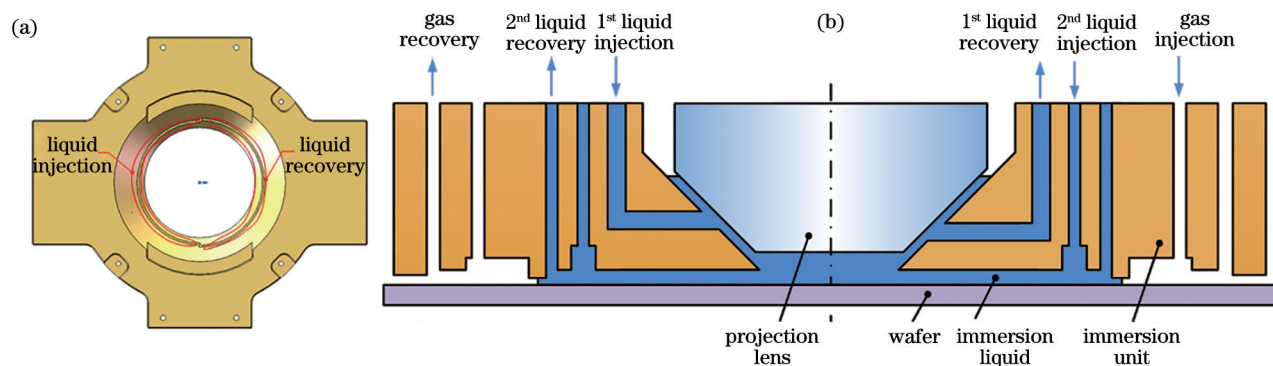


图2 光刻机浸没系统核心部件的示意图。(a)浸没头;(b)浸没单元

Fig. 2 Schematic diagrams of key components of lithography immersion system. (a) Immersion nozzle; (b) immersion unit

浸没式光刻很好地继承了干式投影式光刻机成熟的技术,最大程度上保留了原有光刻机设备,仅需对部分装备进行改造^[14]。目前,ASML公司最先进的TWINSCAN NXT:2050i步进扫描式浸没式光刻机的数值孔径可达到1.35,单次曝光分辨率小于38 nm,结合多重曝光技术可实现5 nm的工艺节点以及每小时295晶圆片的产率(wph)。经过技术的不断迭代和升级,浸没式光刻机已发展成技术先进、工艺成熟、性能稳定的主流设备,在集成电路制造领域发挥着不可替代的作用^[15-16]。

3 浸没式光刻浸液系统的污染研究

液体介质是浸没式光刻机曝光光学系统的重要组成部分,介质的污染会直接影响芯片制造良品率。随着光刻线宽的不断缩小,对污染控制的要求也越来越高,因此,自浸没式光刻机诞生以来,液体介质污染就一直是学界和业界高度关注的问题。浸没式光刻中,污染的产生具有特异性,与扫描系统、材料(如光刻胶、顶部涂层、底部抗反射涂层)和工艺设置等多种因素有关^[17]。实际曝光过程中,浸没液体中可能会出现污染物、颗粒杂质及气泡,且受到局部温升或应力的干扰,这些因素都会严重影响浸没流场的均匀性,导致浸没液体折射率不连

续,降低曝光微环境的质量^[18]。污染物若附着于物镜下表面,会降低物镜的透射性能^[19-20]。颗粒污染物会悬浮在浸没流场或附着于光刻胶表面,在曝光时影响曝光线条或在显影时残留在光刻胶表面^[21-22]。此外,在承片台高速扫描的工况下,浸没液体不可避免地会残留在硅片表面,形成液滴和纳米液膜,液滴和液膜挥发会引起硅片局部变形和液渍残留,引入新的缺陷^[17, 23]。

研究污染物在浸没流场中的迁移特性时,通常采用三维计算流体动力学模型,建立浸没流场初始填充过程中物镜与硅片之间的流体速度/压力分布,以获得间隙完全填充的流动参数和最优区域^[24]。Chen等^[25]研究了刷新周期时间和流场的速度分布,结果表明,最大浸没流场的更新时间随分配口的增加而增加,这可能会导致透镜污染;Chen等^[26]对流体填充间隙也进行了仿真研究,结果表明,晶圆的快速移动有助于提高最小流速,减少低速区。图3为浸没流场扫描状态下的污染物浓度分布,可以发现,污染物随硅片扫描呈现不同区域内的反向流动,进而导致浸没头回收口附近的缝隙流体污染^[19]。Ma等^[27-28]结合冲洗点胶流量、氮气点胶配方、点胶位置、晶圆转速等参数,构建了粘性流体力学模型,优化了晶圆表面光刻胶残留物的去除方法。

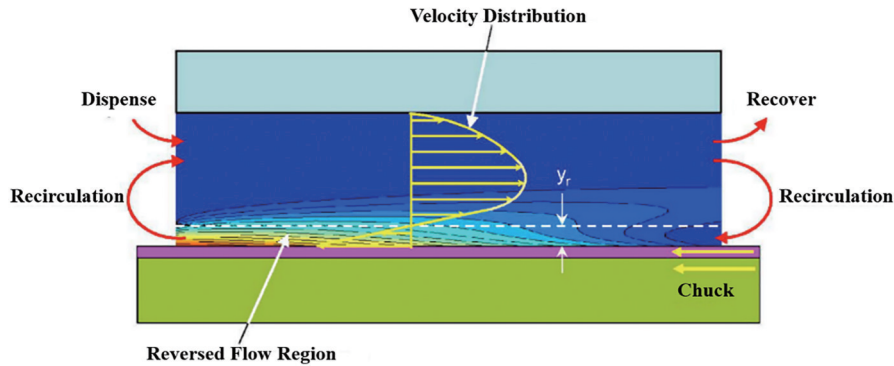


图 3 反向流结构的浸没式光刻扫描原理图^[19]

Fig. 3 Schematic diagram of immersion lithography scanning in the opposed flow configuration^[19]

3.1 浸没式光刻浸液系统污染分类

3.1.1 液渍

晶圆上的液渍残留是浸没流场在高速扫描运动下引起的后退弯月面泄漏,主要体现在两方面:一是流场中的液膜牵拉,伴随着后退接触角(RCA)接近 0° ,液膜收缩断裂,形成残留液滴^[29];二是液体惯性力大于自由边界处的表面张力引起的液体泄漏^[30]。液渍污染会造成晶圆表面缺陷,其原理在于残留液渍与光刻胶作用并扩散至光刻胶内部^[31-32],溶解其内部材料,同时导致混合层的形成,改变特征线宽(CD),造成晶圆表面产生桥

接、线距扩张甚至大面积涂抹等缺陷,直接影响芯片良品率^[33-35]。在曝光后烘过程中,升高的温度进一步增强了液渍局部的物理和化学反应^[36];液滴蒸发导致溶解速率降低,可能会改变聚合物的物理结构或发生水的解堵反应抑制^[37]。Brandl等^[38]通过对比曝光前后的润湿时间评估液渍暴露在多层光刻胶中的效果,结果表明,曝光前后的润湿导致晶圆缺陷的形貌发生变化,不同处理条件下晶圆表面的扫描电子显微(SEM)缺陷图像如图4所示。此外,不同的顶部涂层、涂层厚度和真空度均会影响液渍引入的缺陷。

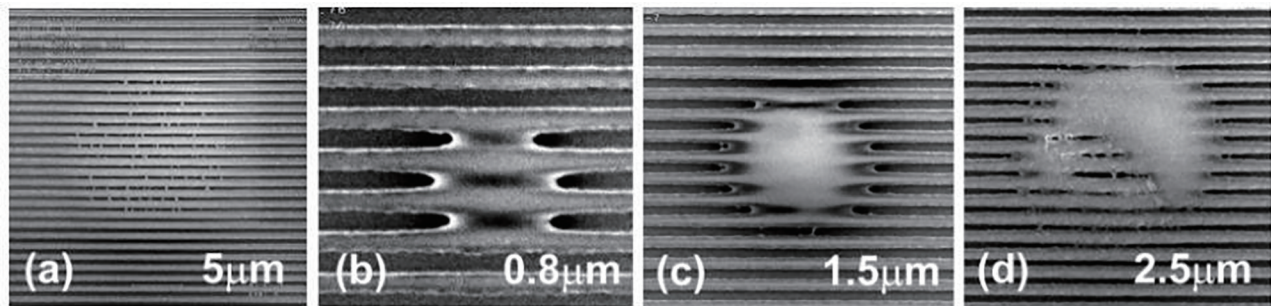


图 4 不同处理条件下晶圆表面的 SEM 图像。(a)曝光前润湿(尺寸为 $5\ \mu\text{m}$);(b)曝光后润湿(尺寸为 $0.8\ \mu\text{m}$);(c)曝光后润湿(尺寸为 $1.5\ \mu\text{m}$);(d)曝光后润湿(尺寸 $2.5\ \mu\text{m}$)^[38]

Fig. 4 SEM images of wafer surface under different processing conditions. (a) Wetting before exposure (size is $5\ \mu\text{m}$); (b) wetting after exposure (size is $0.8\ \mu\text{m}$); (c) wetting after exposure (size is $1.5\ \mu\text{m}$); (d) wetting after exposure (size is $2.5\ \mu\text{m}$)^[38]

研究人员对液膜或液滴的表面亲疏水参数(静态接触角、后退接触角、前进接触角等)展开了大量研究^[33]。Terai等^[39]研究了吸水性对动态接触角滞后的影响,用表面涂层溶解速率作为指标估算溶胀厚度。Liang等^[40]建立了动态液体泄漏模型,跟踪水渍泄漏并识别其在晶圆上的位置,明确了缺陷的类型、残留的来源和浸没系统的临界设置。Kocsis等^[41]研究了液滴形成过程与后退接触角、工件台移

动速度和移动路径的关系,解释了液滴造成光刻缺陷的原因。结果表明,在一定的后退接触角下,高低液面之间存在一个急剧过渡,且过渡角随着工件台移动速度的提高和浸没头移过晶圆边缘区域的增大而增大。此外,颗粒、小分子有机物等也会伴随液滴尺寸的变化形成聚集性污染,图5为空气中吸附到涂层表面的污染物在液滴蒸发过程中发生的凝聚现象^[42]。

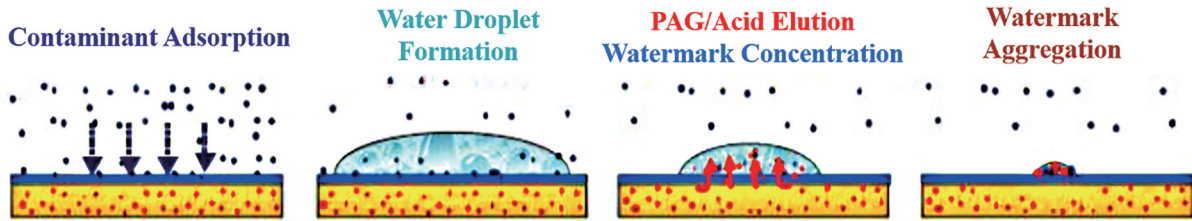


图 5 空气杂质的聚集机理^[42]

Fig. 5 Aggregation mechanism of air impurities^[42]

光刻胶吸水性能的研究方法通常有椭圆仪孔隙率(EP)法和石英晶体微天平(QCM)法。EP 法的重复性好,对可控光刻胶变化的响应与预期一致,但仅限于收集热力学数据;QCM 法可提供水吸收动力学方面的直接信息^[43]。QCM 的分析结果表明,超纯水的渗透速率和表面涂层的局部拓扑结构,对减少甚至消除浸没性缺陷起着重要作用^[44]。针对由液渍引起的缺陷控制,人们提出了多种改进措施,如控制扫描条件、优化顶部涂层材料疏水性、进行曝光后冲洗、优化洗脱剂配方、精密微环境控制。

3.1.2 颗粒

作为浸没流场中的另一项污染源,颗粒物一旦附着在晶圆表面,会导致芯片短路及耐压劣化,同样造成芯片性能的下降。对于光刻机浸液系统,一方面要对液体进行超洁净处理,以满足国际半导体产业协会(SEMI)颁布的 F63 对浸没液体洁净度的要求;另一方面,要在输控过程中,避免过流表面材料的颗粒物脱落带来的液体二次污染。因此,浸液系统对其流控元件的性能提出了严格约束条件,包括泵、阀等具有运动功能的流控元件,避免因摩擦

而产生的颗粒污染。目前仅超洁净磁悬浮泵和隔膜阀等零部件可满足其功能和性能要求。

除浸液系统本身携带的颗粒污染外,随着浸没液体渗透到晶圆涂层中,顶部涂层会脱落颗粒及细小残留物,这是造成晶圆表面浸渗缺陷的主要原因,该缺陷会在曝光之后转移到光刻图案上^[45]。Wallraff 等^[46]实现了各种薄膜表面上微粒形成过程的可视化检测,利用含荧光微粒的液滴进行视频拍摄,分析结果表明,这些颗粒广泛分布在硅等接触角较低的材料表面,并集中在光刻胶或涂层表面直径为 50~100 μm 的小片区域。Tamura 等^[47]研究了晶圆边缘几何形状对颗粒附着性能的影响,结果表明,涂层后残留的薄片或颗粒在短边晶圆上更容易剥落。Kocsis 等^[41]的研究解释了缺陷的产生机制,即浸没液体与晶圆片、晶圆台物理接触时,产生的液体动态作用力,导致硅片边缘的光刻胶或其他附着力较弱的膜脱落。颗粒在去除涂层后转移到光刻胶上,这种颗粒转移是由表面涂层去除过程中光刻胶表面产生的电压引起的^[21],控制光刻胶厚度及其表面电压可以显著降低颗粒转移速率,其原理如图 6 所示。

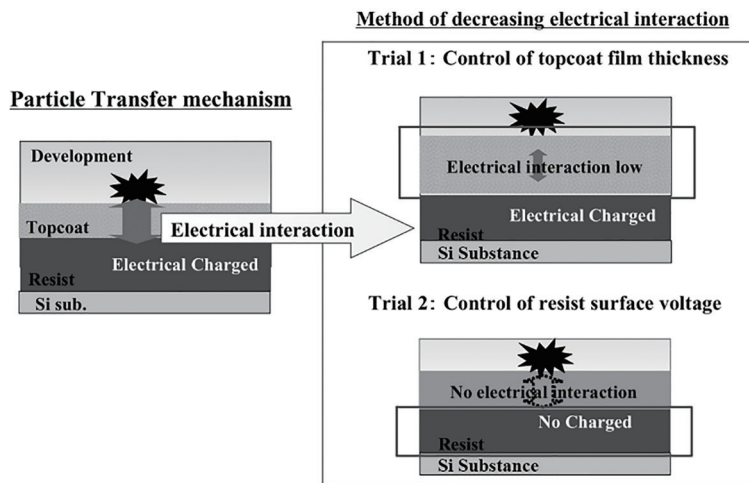


图 6 顶部涂层去除后涂层颗粒向光刻胶表面的转移机理^[21]

Fig. 6 Transfer mechanism of particles on the topcoat to the resist after topcoat removal^[21]

3.1.3 有机污染

浸液系统中的有机污染物同样会导致光刻的良品率下降,需要进行严格控制。因此,浸液系统对于流控元件提出的约束条件为泵、阀、管道、接头等流控元件的所有过流表面必须采用化学稳定性极高的材料,如超纯聚四氟乙烯(PTFE)、超纯可溶性聚四氟乙烯(PFA)和超纯 316L 不锈钢。所有流控元件在服役之前要执行严格的清洗流程,以满足其洁净度要求。

对于浸没液体而言,有机污染主要来自光刻胶及其附着材料。由于光刻胶在浸没液体中呈现浸润和粘附状态,其中光酸发生剂、淬灭剂等会被液体溶解,从而改变介质的折射率,同时流体迁移至物镜下表面,长时间的累积将造成物镜的“镜头起雾”效应,使系统杂散光增加、透过率减弱、照明光场性能下降,从而影响光刻分辨率^[48-49]。这类污染物通常被称为雾霾,如硫酸铵^[50]。此外,表面涂层会影响工艺窗口和光刻胶剖面,涂层材料的折射率、厚度、酸度及其与光刻胶的化学相互作用和浸泡时间均是有机污染的主要影响因素^[51]。一些添加剂,如内框胶粘剂(IFWA)会释放气体,对曝光性能产生影响^[50]。

人们对光刻材料,特别是其中的光酸发生剂(PAG)在浸没液体中的浸出特性开展了大量研究。全氟丁基磺酸三苯基𬬪盐(TPS-PFBS)在大多数实

验中被用作 PAG 模型^[52],研究表明,光酸的空间污染演变依赖于浸没液体的流场流态,存在复杂的非线性路径^[53]。层流条件下脱落物停留时间的量级为 1 s,任何距离表面超过 100 μm 的物体均可能在沉积到表面之前被冲走^[54]。光刻胶显影疏水性、聚合物聚集性、PEG 扩散长度是光酸污染微桥接缺陷形成的关键因素^[55]。在光刻胶具有顶部涂层的情况下,PAG 的浸出过程表现为两种机制:一种是涂层表面的快速浸出,另一种是内嵌界面的缓慢浸出^[20]。PAG 的浸出量与光刻胶和浸没液体的接触时间相关,随着接触时间的增加,一些特异性分子片段在光刻胶表面的浓度增加,这表明光刻胶树脂在曝光下部分分解生成可自由迁移的分子基团。图 7 为曝光下光刻胶树脂的羧基化反应^[56]。

PAG 中的阴离子对其光酸污染特性有重要影响。有机污染物浸出主要依赖于聚合物的自由体积和 PAG 的阴离子大小,即光刻胶中的自由体积为光生酸提供了迁移通道,对其中聚合物的浸出速率差产生影响^[57]。疏水阴离子越多,饱和浓度越低,但随着阴离子链长度的增加,浸出时间常数增大^[58]。人们针对特异性光刻胶材料的污染物浸出也有大量研究,模拟浸泡实验结果表明,可溶型涂层表面和层内剩余的水可能干扰光刻胶曝光后烘(PEB)的脱保护反应,从而造成碱性显影剂可溶型涂层的浸没缺陷^[59],如图 8 所示。

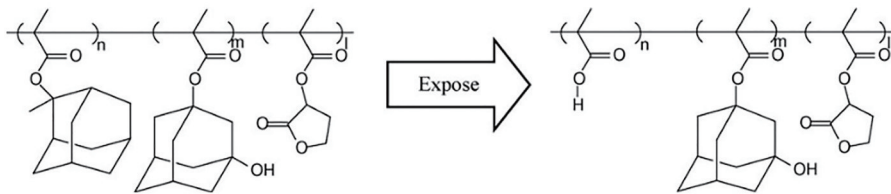


图 7 曝光下光刻胶树脂的羧基化反应^[56]

Fig. 7 Carboxylation of photoresist resin due to exposure^[56]

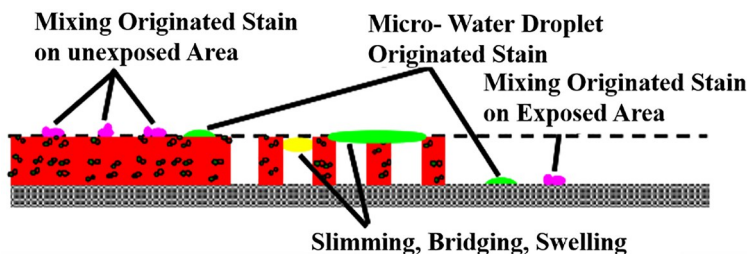


图 8 光刻胶浸入式缺陷的来源推测和产生机制^[59]

Fig. 8 Estimated origins and mechanism of resist immersion defects^[59]

3.2 浸没式光刻浸液系统污染检测

为了确定光刻机浸液系统中污染物的含量及

其时空演变规律,需要对浸没流场、晶圆、光刻胶等引入污染的单元进行检测,了解基质和污染物的性

质,如尺寸、形状、形态、成分、挥发性、浓度,以进行精确的污染物检测与控制。针对浸没液体污染主要采取的检测方式包括用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)进行元素分析、用总有机碳(TOC)分析仪进行总碳含量分析、用液体粒子计数器进行颗粒物尺寸及数量分析。针对光刻胶表面的检测方法主要包括SEM、液体闪烁计数、X射线光电子能谱(XPS)、液相色谱-质谱联用(LC-MS)、飞行时间二次离子质谱(TOF-SIMS)等^[56, 60];针对晶圆表面的污染检测方法主要包括俄歇电子能谱(AES)、XPS、TOF-SIMS和低能离子散射(LEIS)等。全反射X射线荧光(TXRF)可进行晶圆边缘的金属污染测量, TXRF与化学气相分解(VPD)可用于检测晶圆边缘和斜面上的污染^[61]。图9为大部分检测方式

的检测分辨率与检测限的气泡对比图^[62]。其中,针对表面检测,动态二次离子质谱(Dynamic SIMS)的检测分辨率最高。

图像识别研究在晶圆检测方面具有重要作用^[63-64]。台湾积体电路制造股份有限公司(简称为台积电)^[65]利用光学图像和扫描电镜图像的相关性提出了一种对晶圆缺陷类型进行分类并识别缺陷形成机理的有效方法;Robinson等^[66]实施了无图案和有图案的晶圆边缘检查,以确保实现和维持最先进光刻性能所必需的工艺控制水平。此外,流体与光污染解耦法^[67]、互相关法^[68]的运用也确保了图像处理的清晰度。阿斯麦(ASML)公司^[69]开发了浸入缺陷基线创建和监测方法,基于高分辨率亮场检测并结合SEM实现了覆盖整个曝光区域范围的缺陷检测。

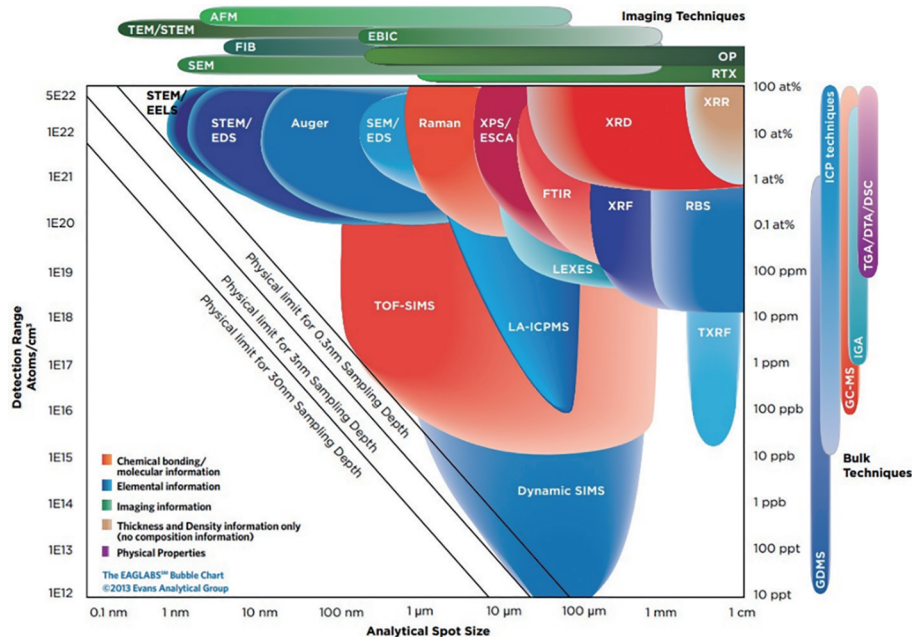


图9 检测分辨率与检测限的气泡对比图^[62]

Fig. 9 Bubble chart of analytical resolution vs detection limit^[62]

3.3 浸没式光刻污染控制

浸没式光刻的污染控制主要分为三个方面: 1)对浸没液体的污染控制,通过滤除颗粒、离子交换膜/混床去除金属及有机物、UV灯杀菌等进一步提升超纯水的洁净度; 2)对晶圆表面的污染控制,主要通过对晶圆清洗、吹扫等方式去除污染物; 3)对物镜表面的污染控制,主要通过镀膜等方式改善物镜表面的亲疏水性质,防止污染物的附着和聚集。

3.3.1 过滤

在浸液系统中,过滤是去除颗粒、小分子有机

物、金属离子等污染物的重要环节。过滤器关键材料的选取、结构设计和膜表面技术等决定了过滤器的性能。Varanasi等^[70-71]研究了利用高密度聚乙烯(HDPE)生产的两种2 nm过滤器并进行了对比实验。一种经过标准清洗,另一种经过专门的超清洗,结果表明,相比标准清洗,超清洗过滤器的总金属可提取物和有机可提取物有大幅度下降。用于超洁净流体输控的过流表面材料PTFE和PFA,也广泛应用于滤膜材料中,从而保持了浸液系统材料的一致性^[72]。此外,针对特异性的污染物可设计专用的过滤器,如消除胺类的过滤器就是基于化学过滤器对

目标气体分子扩散系数的依赖性而特制的,且该过滤器具备蜂窝状结构,以增大气体接触面积。此外,采用经特殊处理的离子交换树脂,对三乙胺和 N-甲基吡咯烷酮(NMP)等胺类物质具有良好的吸附性能和去除率^[73]。

新型过滤器的研发有赖于过滤材料和技术的不 断进步。Entegris 推出了新一代 UPE 和 Oktolex TM,前者克服了流速和孔径之间的平衡,且与一系列化学物质兼容;后者基于定制的膜改性技术选择性地去除污染,提高了非筛分颗粒的捕获能力,解决了新配方化学物质的污染来源^[74-75]。

3.3.2 前/后处理工艺

对于晶圆的污染控制主要是曝光后的清洗,对晶圆工作台的定期清洗可防止颗粒引起的曝光缺陷^[76],按照清洗工艺流程可分为预冲洗和后冲洗。预冲洗可以在曝光前冲洗掉颗粒,且对边缘颗粒的

清洗效果较好,能有效去除弱附着顶部涂层和晶圆边缘残留物^[77],同时也能降低图案膨胀缺陷^[78]。对显影缺陷到刻蚀缺陷转移速率的研究表明,预冲洗在某些复杂刻蚀工艺,如沟槽图案和密纹图案中会产生缺陷,且降低了转移速率^[79]。后冲洗工艺则不会在沟槽图案和密纹图案上产生浸泡缺陷。东京电子的研究人员利用旋洗工艺站(SRS)和后浸洗工艺站(PIR)组件,研究曝光前后冲洗工艺对 55 nm 线型和空间型的影响,表明该组件中的冲洗工艺对于减少浸没光刻的桥接缺陷是非常有效的^[80]。日本 SOKUDO 公司利用自研的清洗工艺及后浸洗工艺,通过减少水印和缺失图案缺陷,降低了晶圆的浸没缺陷^[81]。在浸没头中,可以通过周期性重复清洁过程保持投影透镜的清洁度,并防止在浸没头内产生颗粒^[82],该清洗方式可用于投影透镜和浸没头的清洗,图 10 为无损伤清洗系统的原理^[76]。

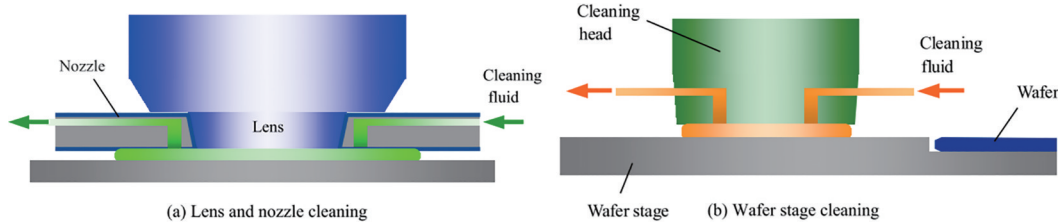


图 10 AS7 清洗系统的基本结构^[76]

Fig. 10 Basic structure of the AS7 cleaning system^[76]

清洗剂的使用也可以显著增强晶圆的清洗效率和效果^[83]。Bhattacharyya 等^[84]配制了用于湿法清洗的清洗剂,并采用二流体喷雾清洗法,使晶圆的颗粒去除效率得到了显著提高。Chen 等^[85]研制出一种高 pH 中性、无卤化物的清洗配方“3x”,在 ASML 的测试台上显示出了良好的清洁性能。此外,排气吹扫^[86]、光刻前边缘抛光^[87]等工艺也能去除污染。背面洗涤对晶圆背面和斜面均有良好的

清洗效率,该方式的颗粒去除效率超过 98%^[88]。改进浸没头在晶圆上的扫描路径能减少缺陷,由于浸没头范围大于曝光场,在步进扫描运动时浸没头会覆盖邻近的区域,前一次扫描留下的粒子可能浸入到曝光区,导致曝光缺陷^[89]。针对该问题,Liang 等^[89]提出了正常浸没式光刻曝光路径与特殊浸没式光刻曝光路径两种扫描路径优化方案,其原理如图 11 所示。可以发现,两种新路径都能使扫描方向

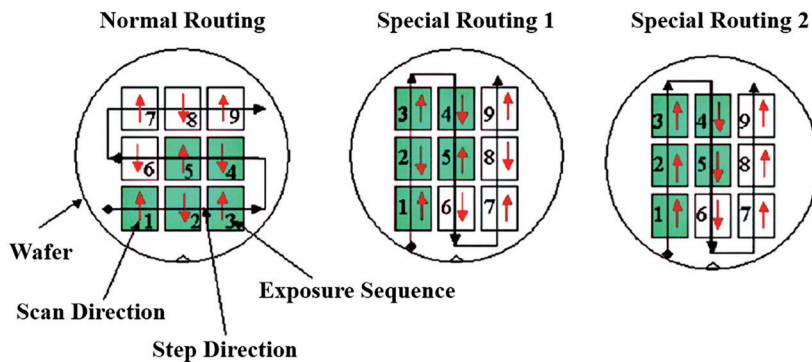


图 11 正常浸没式光刻曝光路径与特殊浸没式光刻曝光路径^[89]

Fig. 11 Normal immersed lithographic exposure routing and 2 defect-reducing special routings^[89]

与场步进方向平行,特殊路径 2 可将正常路径的每片 19.7 个缺陷降到每片 4.8 个缺陷。

3.3.3 过流表面控制

通过材料表面改性或镀膜改善其疏水特性也可以减少污染物在表面的聚集和附着,提高材料的自清洁性能和抗污性能。因此,改善光刻胶涂层的膜层特性可以有效抑制浸没缺陷的产生。Terai 等^[90]通过六甲基二硅氮烷(HMDS)与硅烷偶联剂(SCa)处理晶圆获得了高疏水性,解决了倒角周围的薄膜分离和微液滴问题。Gu 等^[91]采用超声分散二氧化硅纳米颗粒(NPs)辅助浸没固化工艺,

成功制备了具有降低反射、防雾和防污染综合性能的聚乙烯醇(PVA)/SiO₂涂层。Tomita 等^[33]的研究表明,使用碱溶性保护膜可以达到与干式曝光相同或更好的缺陷控制效果,有望实现比溶剂溶性保护膜更经济的制程。Tango 等^[92]进行了极性转换型光刻胶材料的研发,以满足无顶部涂层光刻胶快速扫描和低缺陷的需求。其中,碱响应聚合物添加剂是最佳的解决方案,合理的聚合物设计能同时实现高后退接触角和低静态接触角,该共聚物具有高水解率和良好的缺陷控制潜力。图 12 为极性转换型光刻胶的制备过程。

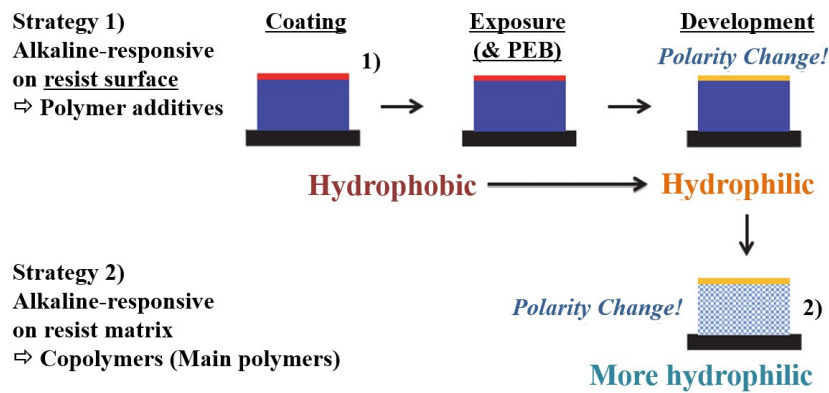


图 12 极性转换型光刻胶的制备过程^[92]

Fig. 12 Preparation process of polarity-changed polymeric resist materials^[92]

物镜下表面的污染问题同样可通过镀膜层表面改性提高其疏水性能解决。一般的镀膜材料,如 SiO₂、MgF₂、Al₂O₃、LaF₃ 的接触角均小于 50°, 无法满足抗污要求。通过提升小分子氟化物、甲基等表

面能较低的基团含量可以提高表面疏水性,使材料的接触角从 33° 提升到 110°^[48], 如图 13 所示。因此,膜层表面疏水性能的稳定性问题还需要进一步研究。

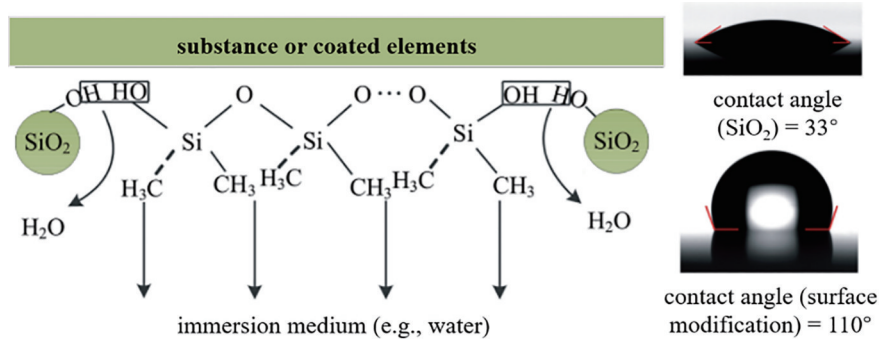


图 13 物镜镀膜表面的疏水改性^[48]

Fig. 13 Hydrophobic modification of objective lens coated surface^[48]

4 结 论

浸没式光刻机特有的浸液流场污染问题对光刻工艺和污染控制提出了更高的要求。目前在光

刻机浸液系统中的污染研究主要面临以下挑战。

1) 浸没流场各类污染物的溯源。浸液系统流控和晶圆浸没式光刻过程各类工艺繁多,使寻找各类污染物的来源进而研究其污染机理变得困难,因

此,需要深入理解过流表面材料的理化特性以及光刻胶及其附属成分的光化学反应特性和水动力学耦合过程,研究材料界面自由能随温度、界面方向以及界面微观结构的变化规律,明确流体介质在过流表面的铺展动力学及其随温度和流速变化的物理规律,从而揭示在流体传输中固-液耦合作用对污染物引出的影响。

2) 过流表面痕量污染元素的检测。目前在光刻机浸液系统中应用最广泛的污染元素检测方式是通过电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)进行液体中组分检测。作为研究过流表面多项污染物附着及其在流体中引入机理的关键一环,各类表面色谱、能谱检测手段由于分辨率相对较低、检测区域相对较小的问题,尚不能满足浸液系统对于污染检测的时效性和可靠性。因此,需要针对现有检测方法进行检测限和扫描速度的不断突破,开发新型的表面痕量元素检测手段,并进一步揭示表面污染附着与实际服役过程中污染物随流体迁移的对应关系。

人们通过不断优化检测和控制方法实现在流体、晶圆和物镜下表面的液渍、颗粒、金属、非金属等污染物的精准控制,随着浸没式光刻线宽的不断减小,对浸没流场的污染物含量提出了更严苛的要求,这意味着浸没式光刻污染控制的准确性和稳定性需要不断提升,检测仪器的精度和分辨率需要不断增强。同时,对浸液系统的材料、工艺、零部件的要求也会不断提高。未来,还需将检测与控制方法进行有机结合,以实现浸没式光刻机浸液系统污染的在线跟踪和精准控制。

参 考 文 献

- [1] 傅新, 陈晖, 陈文昱, 等. 光刻机浸没液体控制系统的研究现状及进展[J]. 机械工程学报, 2010, 46(16): 170-175.
Fu X, Chen H, Chen W Y, et al. Developments and prospects of immersion control system in immersion lithography machine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(16): 170-175.
- [2] Hong X. Introduction to semiconductor manufacturing technology[M]. 2nd ed. Bellingham: SPIE, 2012.
- [3] Owa S, Nagasaka H. Advantage and feasibility of immersion lithography[J]. Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2004, 3(1): 97-103.
- [4] Mulkens J, Flagello D G, Streefkerk B, et al. Benefits and limitations of immersion lithography[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2004, 3(1): 104-114.
- [5] Luehrmann P F, Jr, van Oorschot P, Jasper H, et al. 0.35- μm lithography using off-axis illumination[J]. Proceedings of SPIE, 1993, 1927: 103-124.
- [6] Levenson M D. Extending the lifetime of optical lithography technologies with wavefront engineering [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1994, 33 (12B): 6765-6773.
- [7] 翁寿松. 90 nm 工艺及其相关技术[J]. 微纳电子技术, 2003, 40(4): 40-44.
Weng S S. 90 nm process and its relevant technology [J]. Semiconductor Information, 2003, 40(4): 40-44.
- [8] 袁琼雁, 王向朝, 施伟杰, 等. 浸没式光刻技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(8): 13-20.
Yuan Q, Wang X, Shi W, et al. Development of immersion lithography[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(8): 13-20.
- [9] Lin B J. Immersion lithography and its impact on semiconductor manufacturing[J]. Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2004, 3(3): 377-500.
- [10] El-Morsi M, Nellis G, Schuetter S, et al. Full wafer simulation of immersion fluid heating[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2005, 23(6): 2596-2600.
- [11] Expressions™ Molecular. Giovanni Battista Amici (1786-1863) [EB/OL]. [2015-11-13]. <https://micro.magnet.fsu.edu/optics/timeline/people/amici.html>.
- [12] Tabarelli W, Lobach E W. Apparatus for the photolithographic manufacture of integrated circuit elements: US4509852[P]. 1985-04-09.
- [13] Yoshio F, Nobutaka M. Projection exposure method and system: world intellectual property organization WO/1999/049504[P]. 1999-09-30.
- [14] Owa S, Nagasaka H. Immersion lithography; its potential performance and issues[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5040: 724-733.
- [15] Bouchoms I, Leenders M, Kuit J J, et al. Extending 1.35 NA immersion lithography down to 1x nm production nodes[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8326: 83260L.
- [16] Brandt P, Sardana C, Ibbotson D, et al. Comparison between e-beam direct write and immersion lithography for 20 nm node[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9423: 942311.
- [17] Wei Y Y, Brandl S, Goodwin F. Formation mechanism of 193 nm immersion defects and defect

- reduction strategies[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6923: 69231Y.
- [18] Fu X, Huang Y, Hu L, et al. Flow behavior control in immersion lithography[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2017, 53: 190-203.
- [19] Nellis G F, El-Morsi M S, van Peski C K, et al. Contamination transport in immersion lithography[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2006, 5(1): 013007.
- [20] Gaugiran S, Feilleux R, Sourd C, et al. Leaching mechanisms in immersion lithography with or without top coat[J]. Microelectronic Engineering, 2007, 84(5/6/7/8): 1054-1057.
- [21] Takahashi N, Shimura S, Kawasaki T. Transfer mechanism of defects on topcoat to resist pattern in immersion lithography process and effects on etching process[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6519: 65191Z.
- [22] Wei Y Y, Brainard R L. Advanced processes for 193-nm immersion lithography[M]. Bellingham: SPIE, 2009.
- [23] Niiyama T, Kawai A. Formation factors of watermark for immersion lithography[C]//Digest of Papers Microprocesses and Nanotechnology 2005, October 25-28, 2005, Tokyo, Japan. New York: IEEE Press, 2005: 32-33.
- [24] Abdo A, Nellis G, Wei A, et al. Optimizing the fluid dispensing process for immersion lithography[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2004, 22(6): 3454-3458.
- [25] Chen W Y, Chen Y, Zou J, et al. Effect of liquid dispensing on flow field for immersion lithography[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2009, 27(5): 2192-2199.
- [26] Chen H, Chen W Y, Zou J, et al. Simulation of the velocity distribution for immersion lithography[C]//2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, July 14-17, 2009, Singapore. New York: IEEE Press, 2009: 1566-1571.
- [27] Ma L, Wu Q, Dong L S, et al. Development defect model for immersion photolithography[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2018, 17(2): 023502.
- [28] Ma L, Xu B Q, Wu Q, et al. Optimized parameters selected on the basis of the development defect model [J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2018, 17(4): 043508.
- [29] Streefkerk B, Mulkens J, Moerman R, et al. A dive into clear water: immersion defect capabilities[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6154: 61540S.
- [30] Burnett H, Shedd T, Nellis G, et al. Control of the receding meniscus in immersion lithography[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2005, 23(6): 2611-2616.
- [31] Carcasi M, Hatakeyama S, Nafus K, et al. Defectivity reduction by optimization of 193-nm immersion lithography using an interfaced exposure-track system[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6153: 61533J.
- [32] Nakagawa H, Nakamura A, Dougauchi H, et al. Improvement of watermark defect in immersion lithography: mechanism of watermark defect formation and its reduction by using alkaline-soluble immersion topcoat[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6153: 61531R.
- [33] Tomita T, Shimoaoki T, Enomoto M, et al. An investigation on defect-generation conditions in immersion lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6153: 61533M.
- [34] Farys V, Gaugiran S, Cruau D, et al. Investigation on immersion defectivity root cause[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6533: 653308.
- [35] Ercken M, Gronheid R, Foubert P, et al. Investigation of new selection criteria for an optimized immersion process[J]. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2006, 19(4): 539-546.
- [36] Wei Y. Non-lensing defects and defect reduction for 193i[EB/OL]. [2008-02-10]. <https://spie.org/news/0976-non-lensing-defects-and-defect-reduction-for-193i?SSO=1>.
- [37] Kanna S, Inabe H, Yamamoto K, et al. Materials and process parameters on ArF immersion defectivity study[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6153: 615308.
- [38] Brandl S, Watso R, Pierson B, et al. Investigation of immersion related defects using pre- and post-wet experiments[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6154: 61540T.
- [39] Terai M, Kumada T, Ishibashi T, et al. Mechanism of immersion specific defects with high receding-angle topcoat[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6519: 65191S.
- [40] Liang F J, Chang H, Shiu L H, et al. Immersion defect reduction, part I: analysis of water leaks in an

- immersion scanner[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6520: 65204U.
- [41] Kocsis M, van den Heuvel D, Gronheid R, et al. Immersion specific defect mechanisms: findings and recommendations for their control[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6154: 615409.
- [42] Ishibashi T, Hanawa T, Suganaga T, et al. Studies of the mechanism for immersion specific defects[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6153: 61533I.
- [43] Foubert P, Kocsis M, Gronheid R, et al. Measurement and evaluation of water uptake by resists, top coats, stacks, and correlation with watermark defects[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6519: 65190E.
- [44] Otaguro A, Lee J W, Itani T, et al. Analysis of 193 nm immersion specific defects[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6153: 61531P.
- [45] Enomoto M, Hatakeyama S, Niwa T, et al. 193 nm immersion process defect generation and reduction mechanism investigation using analytical methods[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6153: 61533L.
- [46] Wallraff G M, Larson C E, Breyta G, et al. The effect of photoresist/topcoat properties on defect formation in immersion lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6153: 61531M.
- [47] Tamura T, Onoda N, Fujita M, et al. Focus, dynamics, and defectivity performance at wafer edge in immersion lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6924: 692419.
- [48] 毕丹丹, 张立超, 时光. 浸没式光刻投影物镜光学薄膜[J]. 中国光学, 2018, 11(5): 745-764.
Bi D D, Zhang L C, Shi G. Optical coatings for projection objective immersion lithography[J]. Chinese Optics, 2018, 11(5): 745-764.
- [49] 马晓喆, 张方, 黄惠杰. 光刻机照明光场强度分布校正技术研究[J]. 中国激光, 2021, 48(20): 2005001.
Ma X Z, Zhang F, Huang H J. Correction technology for illumination field intensity profile in photolithography machine[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(20): 2005001.
- [50] Grenon B J, Brinkley D. Identification of a new source of reticle contamination[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9985: 998516.
- [51] Stepanenko N, Kim H W, Kishimura S, et al. Top coat or no top coat for immersion lithography? [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6153: 615304.
- [52] Liberman V, Switkes M, Rothschild M, et al. Studies of consequences of photo-acid generator leaching in 193 nm immersion lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6154: 615416.
- [53] Liberman V, Rothschild M, Palmacci S T, et al. Impact of photoacid generator leaching on optics photocontamination in 193-nm immersion lithography [J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2007, 6(1): 013001.
- [54] Liberman V, Palmacci S T, Hardy D E, et al. Controlled contamination studies in 193-nm immersion lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5754: 148-153.
- [55] Gou L J, Nair V, Mori H, et al. Reduction of micro-bridging defects for 193 nm immersion resist[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7972: 79721P.
- [56] Sado M, Teratani T, Fujii H, et al. Influences of water on photoresist surface in immersion lithography technology[J]. Applied Surface Science, 2008, 255(4): 1018-1021.
- [57] Oh S K, Kim J Y, Jung Y H, et al. Studies on leaching of photoresist components by water[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5753: 790-798.
- [58] Dammel R R, Pawlowski G, Romano A, et al. Resist component leaching in 193-nm immersion lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5753: 95-101.
- [59] Hanawa T, Suganaga T, Ishibashi T, et al. Studies on immersion defects using mimic immersion experiments[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6153: 61531O.
- [60] Conley W, LeSuer R J, Fan F F, et al. Understanding the photoresist surface-liquid interface for ArF immersion lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5753: 64-77.
- [61] Takahara H, Tsugane K. Trace metallic contamination analysis on wafer edge and bevel by TXRF and VPD-TXRF[J]. Solid State Phenomena, 2009, 145/146: 105-108.
- [62] Evans Analytical Group. Analytical resolution vs detection limit[EB/OL]. [2021-01-04]. http://mcf.tamu.edu/wp-content/uploads/2017/09/EAG_Resolution_VsDetectionLimit.pdf.
- [63] Selmann R, Wirtz R. Method and system for detecting particle contamination in an immersion lithography tool: US8605250[P]. 2013-12-10.
- [64] Pollentier I, Ercken M, Foubert P, et al. Resist profile control in immersion lithography using scatterometry measurements[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5754: 129-140.

- [65] Shiu L H, Liang F J, Chang H, et al. Immersion defect reduction, part II: the formation mechanism and reduction of patterned defects[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6520: 652012.
- [66] Robinson C, Bright J, Corliss D, et al. Monitoring defects at wafer's edge for improved immersion lithography performance[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6924: 69244O.
- [67] Liberman V, Rothschild M, Palmacci S T, et al. Laser durability studies of high index immersion fluids: fluid degradation and optics contamination effects[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6520: 652035.
- [68] Zhang L B, Ma L, Chen R, et al. Pattern quality and defect evaluation based on cross correlation and power spectral density methods[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2018, 36(5): 052902.
- [69] Englard I, Stegen R, Vanoppen P, et al. Novel approach for immersion lithography defectivity control to increase productivity[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6922: 69223U.
- [70] Varanasi R, Mesawich M, Connor P, et al. Advanced lithographic filtration and contamination control for 14 nm node and beyond semiconductor processes[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10146: 101462B.
- [71] Varanasi R, Umeda T, Mesawich M, et al. Enhanced cleaning for the point-of-use filter and its effectiveness on wafer defectivity in immersion ArF lithography process[J]. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2017, 30(6): 639-643.
- [72] Wu A W, Xia A N. An exploration of the use of fluoropolymers in photofiltration[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10960: 109601U.
- [73] Imai A, Tanahashi T, Yamana K, et al. Molecular contamination control technologies for high NA 193 nm lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6153: 615332.
- [74] Kohyama T, Kaneko F, Miura K, et al. Filter technology developments to address defectivity in leading-edge photoresists[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10960: 109601X.
- [75] Wu A W, Xia A N, Bayana H. A new tailored point-of-use filter to reduce immersion lithography downtime and defects[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10960: 109601Y.
- [76] Chibana T, Kobayashi M, Nakano H, et al. Immersion defect performance and particle control method for 45 nm mass production[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6924: 69241B.
- [77] Nakano K, Seki R, Sekito T, et al. Control and reduction of immersion defectivity for yield enhancement at high volume production[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7274: 72741P.
- [78] Watso R D, Laursen T, Pierson B, et al. Defect testing using an immersion exposure system to apply immediate pre-exposure and post-exposure water soaks[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6520: 65204V.
- [79] Miyahara O, Shimoaoki T, Wakamizu S, et al. Defect transfer from immersion exposure process to post processing and defect reduction using novel immersion track system[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6519: 651924.
- [80] Matsunaga K, Kondoh T, Kato H, et al. Defectivity reduction studies for ArF immersion lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6519: 65191T.
- [81] Shigemori K, Wang S P, Tedeschi L, et al. Defectivity process optimization on immersion topcoat less resist stacks[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7273: 72732B.
- [82] Kobayashi M, Nakano H, Arakawa M, et al. Contamination and particle control system in immersion exposure tool[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6520: 652014.
- [83] de Jong A M C P, Jansen H, Leenders M H A, et al. Lithographic apparatus and contamination removal or prevention method: US7916269[P]. 2011-03-29.
- [84] Bhattacharyya D, Hong W, Peng K, et al. Reduction of extra pattern defects in immersion layer reworks by cleans recipe optimization: CFM: contamination free manufacturing[C]//2016 27th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC), May 16-19, 2016, Saratoga Springs, NY, USA. New York: IEEE Press, 2016: 229-232.
- [85] Chen T N, Korzenski M B, Bilodeau S, et al. Environmentally benign in-line cleaning solutions for immersion lithography tools[J]. Solid State Phenomena, 2012, 187: 307-310.
- [86] Hao B T, Lang D C. Lens contamination prevention device and method: US10539887[P]. 2020-01-21.
- [87] Okazaki M, Maas R, Ko S H, et al. Wafer edge polishing process for defect reduction during immersion lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6922: 69223A.

- [88] Ehara K, Ema T, Yamasaki T, et al. CD and defect improvement challenges for immersion processes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7273: 727322.
- [89] Liang F J, Shiu L H, Chen C K, et al. Defect reduction with special routing for immersion lithography[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2007, 6(1): 010501.
- [90] Terai M, Ishibashi T, Hagiwara T, et al. Novel wafer bevel treatment for water immersion lithography[J]. *Journal of Photopolymer Science and Technology*, 2008, 21(5): 665-672.
- [91] Gu Y J, Liu H Y, Yang J L, et al. Surface-engraved nanocomposite coatings featuring interlocked reflection-reducing, anti-fogging, and contamination-reducing performances[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2019, 127: 366-374.
- [92] Tango N, Yamamoto K, Shirakawa M, et al. Challenges and progress in defectivity for advanced ArF lithography process[J]. *Journal of Photopolymer Science and Technology*, 2019, 32(3): 445-448.