

激光与光电子学进展

步进扫描投影光刻机照明系统技术研究进展

刘佳红^{1,2}, 张方^{1*}, 黄惠杰^{1,2**}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 光刻技术是制造集成电路的核心技术, 光刻机是制造集成电路的核心设备, 照明系统是光刻机的核心部件之一。介绍了深紫外步进扫描投影光刻机照明系统的工作原理, 重点分析了光瞳整形技术、光场匀化技术和偏振照明技术, 归纳和概述了相关的技术原理和实现方法。

关键词 光刻机照明系统; 步进扫描投影; 光瞳整形; 光场匀化; 偏振照明

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.0922011

Research Progress on Illumination System Technology of Step-and-Scan Projection Lithography Tools

Liu Jiahong^{1,2}, Zhang Fang^{1*}, Huang Huijie^{1,2**}

¹Laboratory of Information Optics and Optoelectronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Lithography technology is the core technology of manufacturing integrated circuits. Lithography tools is the core equipment of manufacturing integrated circuits, and illumination system is one of the core components of lithography machine. The working principle of the illumination system of deep ultra-violet step-and-scan projection lithography tools is introduced. The pupil shaping technology, homogenization technology, and polarization illumination technology are reviewed and analyzed. The relevant technical principles and implementation methods are summarized.

Key words lithography illumination system; step-and-scan projection; pupil shaping; homogenization; polarization illumination

1 引言

21 世纪是信息技术的时代, 集成电路作为信息技术的核心, 已成为支撑经济发展和保障国家安全的战略性、基础性和先导性产业^[1]。自 20 世纪 60 年代光刻技术发明后, 集成电路的每次跨越发展都伴随着新一代光刻技术的成功应用^[2]。光刻机的发展先后经历了接触式/接近式光刻机、步进重复投影式光刻机、干式和浸没式步进扫描投影式光刻机、极

紫外光刻机, 半导体工艺节点也从几微米发展到了几十纳米, 直至目前最新的 10 nm 以内^[3-4]。步进扫描投影式曝光技术可以增大曝光视场, 大幅提高芯片制造的产率, 是目前使用最广泛的光刻技术^[5]。

光刻机的分辨率(R)与投影物镜数值孔径(NA)、曝光光源波长(λ)、光刻工艺因子(k_1)有关, 即 $R = k_1 \times \lambda / NA$ 。通过缩短曝光光源波长、增加投影物镜数值孔径、降低工艺因子, 可以提高光刻机的分辨率。曝光光源波长先后经历了 436 nm (g

收稿日期: 2022-03-08; 修回日期: 2022-03-27; 录用日期: 2022-04-02

通信作者: *zhangfang@siom.ac.cn; **huanghuijie@siom.ac.cn

线)、405 nm(h 线)、365 nm(i 线)、248 nm(KrF)、193 nm(ArF)和 13.5 nm(EUV)的发展过程。投影物镜数值孔径也从最初的 0.28 增大到了 0.82 和 0.93,采用浸没曝光技术后,数值孔径进一步提高到 1.2 和 1.35^[6]。1995 年和 1997 年,日本 Nikon 公司和荷兰 ASML 公司分别推出了干式步进扫描投影光刻机,光刻分辨率在 200 nm 量级^[7]。2006 年,ASML 公司正式推出投影物镜数值孔径为 1.2 的浸没式光刻机,可实现 45 nm 光刻分辨率的量产曝光^[8]。2007 年,ASML 公司将投影物镜数值孔径提高至 1.35,实现了 38 nm 的光刻分辨率^[9]。在高端光刻机研发领域,我国起步较晚,在 2017 年成功研发出 90 nm 步进扫描投影式光刻机样机^[10]。

为了降低工艺因子 k_1 ,提出了多种分辨率增强技术(RET)。常见的分辨率增强技术包括离轴照明(OAI)、光学邻近效应校正(OPC)、偏振照明技术(PI)和相移掩模技术(PSM)等^[11-12]。其中离轴照

明技术在光刻分辨率提高和焦深增大方面的效果非常明显^[12]。

本文重点介绍深紫外步进扫描投影光刻机照明系统的工作原理及其功能,分析光瞳整形、光场匀化和偏振照明等技术的工作原理和实现方法,旨在为国内光刻机照明系统相关技术的研究提供参考。

2 光刻机照明系统工作原理

照明系统是光刻机曝光系统的重要组成部分之一,也是光刻机的核心部件之一。光刻机照明系统位于曝光光源与投影物镜之间,是复杂的非成像光学系统。照明系统的主要功能是为投影物镜成像提供特定光线角谱和强度分布的照明光场,照明系统的功能随着光刻机的发展在不断增强。在浸没式光刻机照明系统中为了进一步增加光刻分辨率,增加了可产生特定偏振模式的功能。图 1 为步进扫描光刻机照明系统工作原理图。

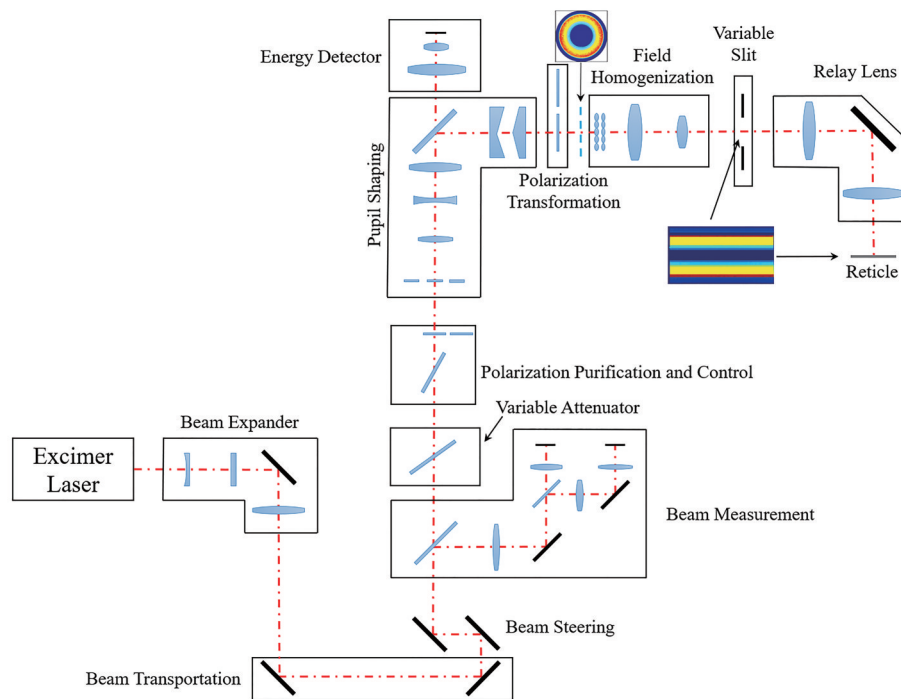


图 1 步进扫描光刻机照明系统工作原理图

Fig. 1 Schematic of illumination system of step-and-scan lithography tools

步进扫描投影式光刻机照明系统主要包括光束处理、光瞳整形、能量探测、光场匀化、可变狭缝、中继成像和偏振照明等单元。光束处理单元与曝光光源直接相连,主要实现光束扩束、光束传输、光束稳定和透过率控制等功能,其中光束稳定由光束监测和光束转向两部分组成,用于消除曝光光源出射光束的指向漂移和位置波动对照明系统性能的

影响。光瞳整形单元位于光场匀化单元之前,用于控制照射到掩模板上照明光场的光线角谱,掩模面照明光场光线角谱与光瞳面光强分布相对应,光瞳面光强分布即为照明模式。随着集成电路图形的复杂化,光刻机需要采用针对特定图形具有分辨率增强效果的定制照明模式,从而发展出可实现自由光瞳照明的光瞳整形单元。光场匀化单元用于生

成特定强度分布的照明光场,在非扫描方向上照明光场为均匀分布,在扫描方向上为梯形分布或平顶高斯分布,其作用是减小扫描曝光过程中的激光脉冲量化误差,获得更均匀的曝光剂量^[7]。可变狭缝与掩模台(承载掩模板)和工件台(承载硅片)同步运动,是实现大曝光场的关键部件。中继成像单元将可变狭缝的刀口面成像到掩模面上,以实现掩模板的照明。能量探测单元实时探测激光脉冲能量,是实现曝光剂量控制的关键单元^[13]。偏振照明主要应用于高数值孔径浸没式曝光光学系统中,是浸没式光刻机的分辨率增强技术之一。

3 光瞳整形技术

光瞳整形技术起源于部分相干成像理论^[14],在步进扫描投影式光刻机中,针对不同的掩模图形采用不同的照明模式,以增强光刻分辨率、增大焦深、提高成像对比度^[15]。常用的照明模式有传统照明、环形照明、二极照明和四极照明等^[16]。照明光瞳的性能使用光瞳特性参数进行描述,主要包括部分相干因子、光瞳椭圆度、X方向光瞳极平衡性、Y方向光瞳极平衡性、四象限光瞳极平衡性、极张角、极方位角等^[17]。在步进扫描投影光刻机中,通常基准坐标系位于掩模面,其中X轴沿非扫描方向,Y轴沿扫描方向。在NA0.82的KrF步进扫描光刻机中,光瞳椭圆度一般要求 $\leq 3\%$ ^[17];在NA1.35的ArF浸没

式光刻机中,光瞳椭圆度指标要求 $\leq 1\%$ 。

在步进扫描投影式光刻机中,光瞳整形技术主要有基于衍射光学元件(DOE)的光瞳整形技术和基于微反射镜阵列(MMA)的自由光瞳整形技术^[18]。

3.1 基于衍射光学元件的光瞳整形技术

基于衍射光学元件的光瞳整形技术起源于20世纪90年代,经过约30年的发展,其可实现的照明模式在逐步复杂化,如图2所示^[18-20]。基于衍射光学元件的光瞳整形单元主要由衍射光学元件、变焦距傅里叶变换镜组、锥形镜组和光瞳补偿器组成,如图3所示^[21-23]。衍射光学元件具有衍射效率高、设计自由度大和对入射光束横截面内强度分布的变化不敏感等优点^[16],但一个衍射光学元件只能实现一种照明模式。变焦距傅里叶变换镜组的焦距在一定范围内连续可调,其前后焦面在焦距变化过程中保持不变,衍射光学元件位于变焦距傅里叶变换镜组的前焦面,其后焦面为照明系统的光瞳面。锥形镜组由平凹锥形镜和平凸锥形镜组成,位于变焦距傅里叶变换镜组的最后一个光学表面与其后焦面之间。变焦距傅里叶变换镜组和锥形镜组相互配合实现照明模式内外相干因子的调整,变焦距傅里叶变换镜组的焦距决定照明模式内外相干因子的差值,锥形镜组中平凹锥形镜和平凸锥形镜之间的轴向间隔决定照明模式内外相干因子的大小。

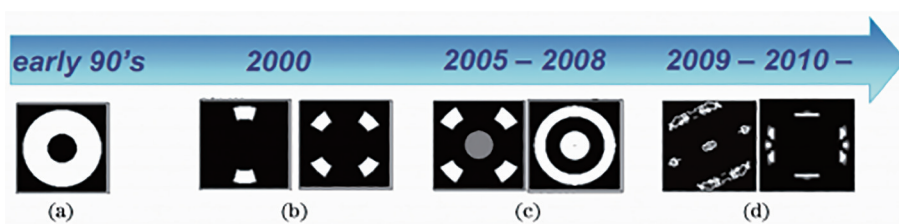


图2 照明模式发展状态图^[19]

Fig. 2 Diagram of illumination mode development state^[19]

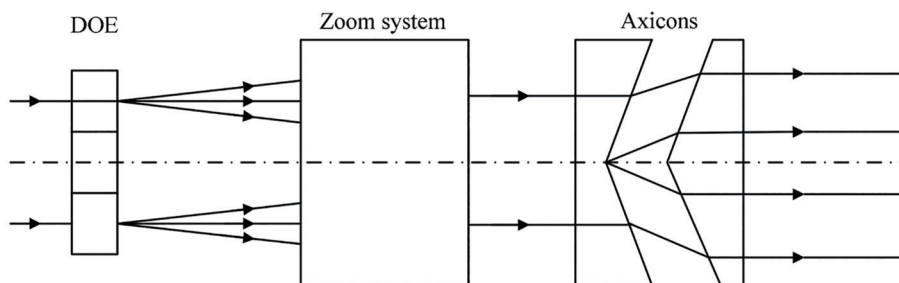


图3 基于变焦距傅里叶变换镜组和锥形镜组产生不同照明模式示意图^[21]

Fig. 3 Schematic of different illumination modes by zoom Fourier transform lens group and axicon lens group^[21]

3.2 基于微反射镜阵列的自由光瞳照明技术

基于微反射镜阵列的自由光瞳照明技术起源于 21 世纪初,由荷兰 ASML 公司首先研发并成功应用,是一种更加灵活的照明模式产生技术^[19-20]。微反射镜阵列是自由光瞳照明技术的核心器件,由数千个二维转角连续可调的微反射镜组成,通过调整微反射镜阵列的角位置分布可实现任意的照明模式^[19, 24]。与基于衍射光学元件的光瞳整形技术不同的是,采用微反射镜阵列后无需更换衍射光学元件即可实现任意的照明模式。基于微反射镜阵列的自由光瞳整形单元工作原理如图 4 所示^[25],主要由能量均衡组件、

光束分割组件、微反射镜阵列和傅里叶变换镜组组成。能量均衡组件对光束进行均匀化处理,保证入射到光束分割组件上的光束能量均匀,并且不受入射光束横截面内强度分布变化的影响。光束分割组件由微透镜阵列(MLA)组成,对光束进行分割并会聚,可降低微反射镜阵列镜面占空比的要求。微反射镜阵列对分割后的各子光束进行角谱调制,通过改变每一个反射镜的角位置就能改变光瞳面上光斑的形状和位置,从而产生特定的照明模式。傅里叶变换镜组的前焦面与微反射镜阵列的反射面重合,光瞳面上形成特定的强度分布,即特定的照明模式。

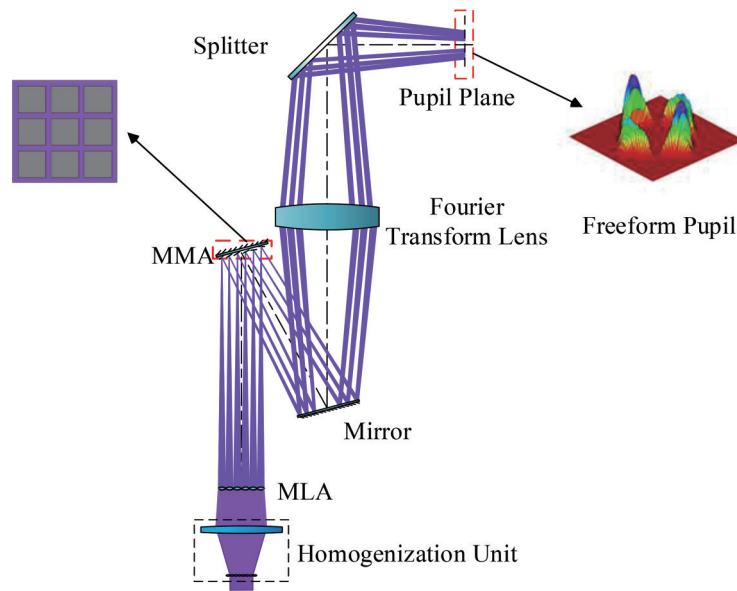


图 4 基于微反射镜阵列的光瞳整形单元工作原理图^[25]

Fig. 4 Schematic of pupil shaping based on micro-mirror array^[25]

3.3 光瞳补偿技术

随着光刻分辨率的提高,光刻机对光瞳性能的要求也越来越高,很难通过光学系统直接得到满足要求的光瞳,并且在光刻机长时间使用后,照明光瞳的性能也会逐渐劣化^[17]。为了使照明光瞳的性能满足使用需求,提出了光瞳补偿技术,现有的光瞳补偿方法或装置主要包括灰度滤光板和补偿手指等。

2002 年, Antoni^[26]采用由单片或者多片具有一定透过率分布的滤光元件组成的灰度滤光板进行光瞳补偿,如图 5(a)所示,通过转动多片滤光元件获得不同的透过率分布,实现对光瞳能量分布的补偿。由于转动的滤光元件的透过率分布是对称的,因此只能补偿对称分布的光瞳。Maul 等^[27]设计了补偿手指装置,补偿手指为具有遮光功能的杆状元件,多个遮光元件作用在照明光瞳的不同分区,在

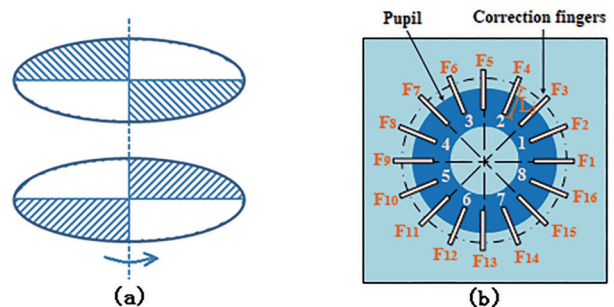


图 5 光瞳补偿技术原理图。(a)滤光器示意图^[26]; (b)补偿手指示意图^[27]

Fig. 5 Schematic of pupil compensation technology. (a) Schematic of filter^[26]; (b) schematic of compensating finger^[27]

驱动器的作用下控制补偿手指插入照明光瞳的深度,可以实现对光瞳各分区相对能量的独立补偿,如图 5(b)所示。2019 年,在补偿手指法的基础上,

Zhu 等^[28]对其补偿方法进行了研究,提出了一种可编程光瞳补偿方法,并于 2021 年提出了一种高能量利用率光瞳补偿方法,该方法通过改变基准能量的选取方式来实现^[17]。

4 光场匀化技术

良好的照明均匀性是保证光刻机在曝光场内获得均匀分辨率的重要条件。在步进扫描投影式光刻机中,曝光场指的是投影物镜的视场在硅片面

扫描曝光后形成的曝光区域,一般要求照明光场在非扫描方向(X轴)为均匀分布,在扫描方向(Y轴)为梯形分布或平顶高斯分布等,如图 6 所示^[29]。光刻机中实现光场匀化主要采用的元件为积分棒或微透镜阵列。照明光场的均匀性常用非扫描方向的积分均匀性来描述,在 90 nm 工艺节点光刻机中,照明光场积分不均匀性一般要求小于 0.6%;在 65 nm 及以下节点浸没式光刻机中,照明光场积分不均匀性要求小于 0.3%^[30]。

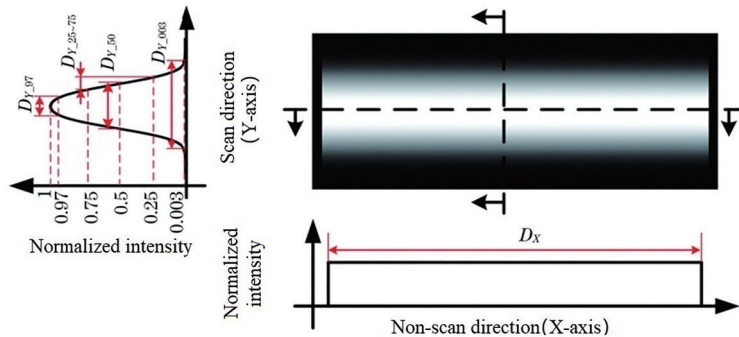


图 6 平顶高斯照明光场空间分布示意图^[29]

Fig. 6 Schematic of intensity distribution of top-Gaussian illumination optical field^[29]

4.1 积分棒匀光技术

积分棒基于全反射原理进行匀光,具有结构简单、造价低廉、易于装调等优点,在干式光刻机中常被采用,如图 7 所示。入射到积分棒内的光束在积分棒内表面进行多次全反射,每次全反射对应一个虚拟子光源,大量虚拟子光源发出的光在出射端面叠加形成相对均匀的照明光场。在横截面尺寸不变的情况下,增加积分棒的长度,可以增加全反射次数,提高照明均匀性^[31]。积分棒的透过率低,结构尺寸大,不能保偏,并且全反射限制了输出光的出射角,这些缺点均制约了其在更高曝光剂量均匀

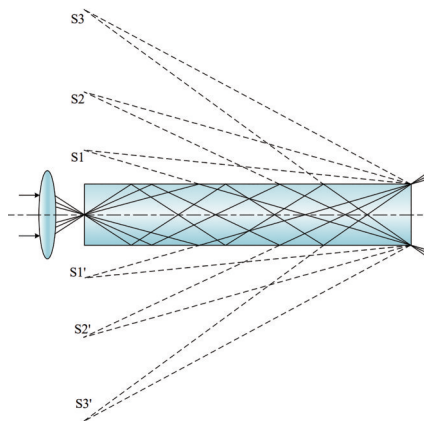


图 7 积分棒的匀光原理示意图

Fig. 7 Schematic of homogenizing principle of integrator rod

性要求的光刻机中使用,尤其在需要偏振照明功能的浸没式光刻机中。

4.2 微透镜阵列匀光技术

微透镜阵列由多个微透镜组成,具有结构尺寸小、透过率高和偏振保持等优点,且能够得到较好的光场匀化效果,原理如图 8 所示^[32]。微透镜阵列需要与聚光镜组配合使用,微透镜阵列先将入射光束分割成许多子光束,然后这些子光束在聚光镜组的后焦面上叠加得到均匀照明光场^[33]。为了消除入射光发散角对照明均匀性的影响,微透镜阵列采用两排,第二排微透镜阵列起到场镜的作用,将轴外主光线准直。第一排微透镜阵列放置于第二排微透镜阵列的前焦面上,第二排微透镜阵列中的微透镜与聚光镜组配合将第一排微透镜阵列中对应微透镜的口径成像到聚光镜组的后焦面上^[34]。微透镜阵列匀光技术适合光场强度分布不规则、空间相干性差的光束匀化^[34]。

在步进扫描投影式光刻机中,为了降低激光脉冲量化误差对曝光剂量均匀性的影响,照明光场在扫描方向上的分布为梯形,这可以通过聚光镜组像方离焦一定距离来实现^[35]。同时,为了保持扫描方向上的积分均匀性,非扫描方向上的梯形分布区域被拦掉。为了进一步降低激光脉冲量化误差对曝

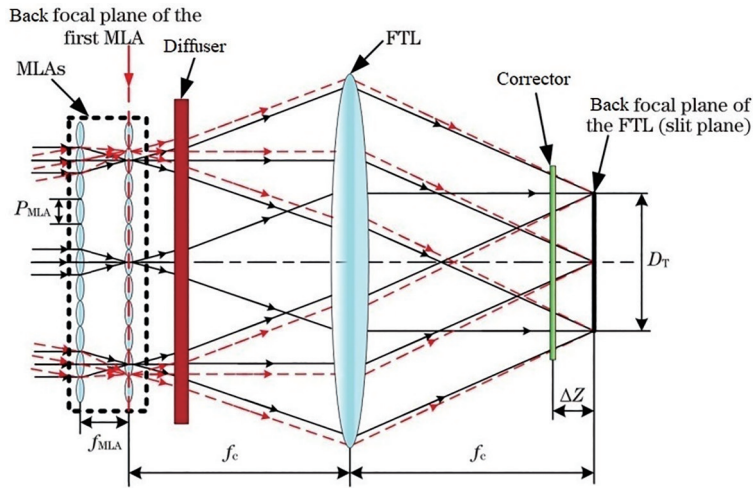


图 8 采用微透镜阵列的照明均匀化单元工作原理示意图^[32]

Fig. 8 Schematic of working principle of illumination homogenization unit with MLAs^[32]

光剂量均匀性的影响,在浸没式光刻机中采用扫描方向为平顶高斯分布的照明光场^[32]。平顶高斯照明光场可以通过在微透镜阵列之后添加一块只对扫描方向照明光场进行调制的散射板来实现^[32]。

4.3 均匀性校正技术

现有的照明均匀性校正方法主要有三种:静态灰度滤波法^[36]、动态灰度滤波法^[37]和手指阵列校正法^[38]。静态灰度滤波法通过在光路中插入一块特定透过率分布的校正板对照明光场进行校正,实现方式简单,但只能校正特定分布的照明光

场,需根据照明光场的变化进行更换。动态灰度滤波法采用两块透过率特定分布的补偿板,通过改变两块补偿板的相对位置来产生不同的透过率分布,该方法在一定程度上提高了校正能力。手指阵列式均匀性校正器原理图如图 9 所示^[39],该方法采用多个片状校正手指,通过校正手指遮挡照明光场的边缘区域实现积分均匀性校正,每个手指均可编程化运动,灵活性高。补偿手指宽度越窄,数量越多,照明光场被分割得越细,校正精度越高^[30]。

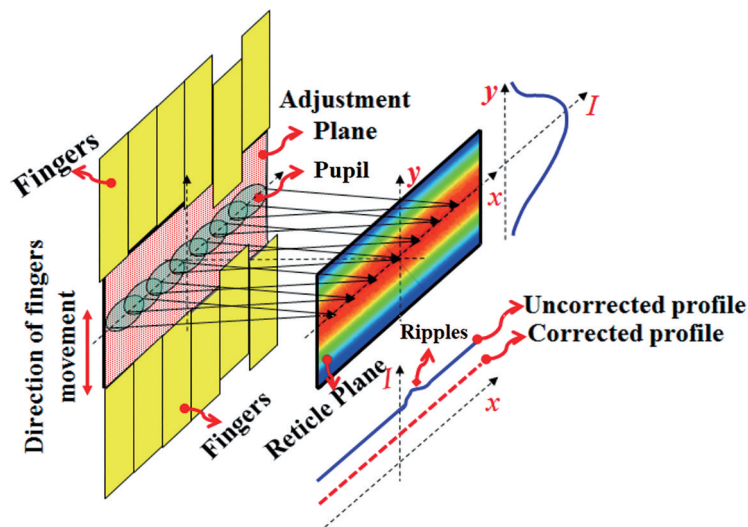


图 9 手指阵列式均匀性校正器示意图^[39]

Fig. 9 Schematic of finger array uniformity corrector^[39]

5 偏振照明技术

随着光刻分辨率的不断提高,投影物镜的数值孔径不断增大,照明光偏振特性对成像对比度的影

响也越来越大,离轴照明技术结合偏振照明技术成为高数值孔径浸没式曝光系统必备的分辨率增强手段,采用该技术可以降低工艺因子,增大工艺窗口,改善成像对比度,提高光刻分辨率^[40]。目前,浸

浸式光刻机中常用的偏振模式主要有非偏振、水平线偏振、竖直线偏振、水平-竖直线偏振和切向偏振等,如图 10 所示^[41]。衡量偏振照明的性能指标主要有偏振度(DOP)、偏振纯度(PP)和偏振强度(IPS)^[42-43]。偏振度是指完全偏振光的光强占总光强的比例,主要用于描述非偏振照明。偏振纯度是

指完全偏振光中期望偏振态光强所占总光强的比例,用于描述完全偏振照明。偏振强度是指期望偏振态光强占总光强的比例,是评价偏振照明质量的综合指标。在浸没式光刻照明系统中,对于非偏振光照明模式,要求偏振度小于 3%,对于偏振照明模式,要求偏振强度大于 95%^[41]。

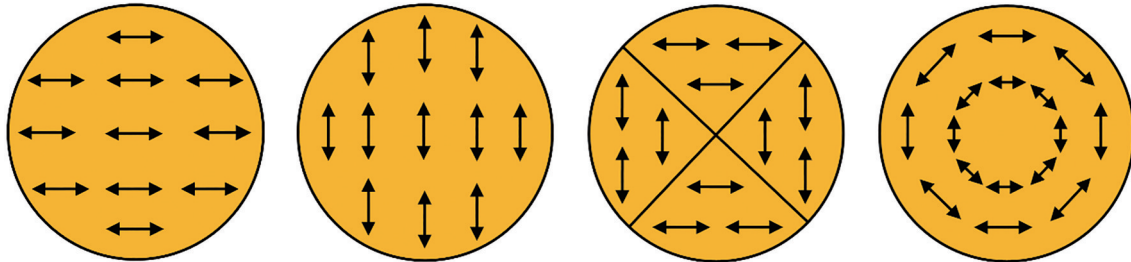


图 10 传统照明模式下常用偏振照明模式示意图^[41]

Fig. 10 Schematic of generally used polarized illumination modes under traditional illumination mode^[41]

在当前主流 ArF 浸没式扫描投影光刻机中,偏振照明模式主要由偏振纯化组件、偏振控制组件和偏振转换组件实现。偏振纯化组件具有起偏功能,可以通过双折射晶体或偏振膜实现,一般位于光瞳整形单元之前,用来产生水平或竖直线偏振光。偏振控制组件具有产生非偏振光的功能,也具有水平和垂直方向线偏振光相互转换的功能,一般位于衍射光学元件之后。偏振控制组件的非偏振光功能通过退偏器实现,水平和方向线偏振光之间的转换通过半波片实现。偏振转换组件一般位于光瞳整形单元之后,通过多个半波片组合的方式实现水平-竖直线偏振和切向偏振,如水平-竖直线偏振模式可通过一对快轴与水平或竖直线偏振光振动方向成 45° 的半波片来实现。光学材料的本征双折射和应力双折射效应以及光学元件表面薄膜的偏振特性等因素都会影响照明系统的偏振性能^[44]。

是在光学材料制备、超精密光学加工和镀膜、特种光学元器件制造等方面,相信在不久将来中国会为全球半导体制造注入更大的活力。

参 考 文 献

6 结束语

对深紫外步进扫描投影式光刻机照明系统的组成及相关技术研究进展作了归纳和概述,重点对光瞳整形技术、光场匀化技术和偏振照明技术的原理和实现方法进行了阐述,为今后光刻机照明系统相关技术的研究提供了参考。

当前高端光刻机的研发主要由荷兰 ASML 公司和日本 Nikon 公司等主导。ASML 最先进的深紫外浸没式步进扫描投影光刻机 NXT 2050i 可实现小于 28 nm 工艺节点的分辨率。虽然我国在高端光刻机的研发起步较晚,但技术也在快速提升,尤其

- [1] 国家集成电路产业发展推进纲要[J]. 中国集成电路, 2014, 23(7): 14-16.
Outline for promoting the development of national integrated circuit industry[J]. China Integrated Circuit, 2014, 23(7): 14-16.
- [2] 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 Y, Wang X Z, Shi W J, et al. Development of immersion lithography[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(8): 13-20.
- [3] 宗楠, 胡蔚敏, 王志敏, 等. 激光等离子体 13.5 nm 极紫外光刻光源进展[J]. 中国光学, 2020, 13(01): 28-42.
Zong N, Hu W M, Wang Z M, et al. Progress of laser plasma 13.5 nm extreme ultraviolet lithography light source [J]. Chinese Optics, 2020, 13(01): 28-42.
- [4] 谭俊玉, 艾照全. 7 nm 高分辨率极紫外光刻胶研究新进展 [J]. 现代化工, 2022, 42(03): 79-84.
Tan J Y, Ai Z Q. Latest progress of 7 nm high resolution extreme ultraviolet photoresist [J]. Modern Chemical Industry, 2022, 42(03): 79-84.
- [5] 姚达, 刘欣, 岳世忠. 用于曝光设备的扫描工作台技术[J]. 电子工业专用设备, 1999, 28(3): 56-61.
Yao D, Liu X, Yue S Z. Scanning workbench technology for exposure equipment[J]. Equipment for

- Electronic Products Manufacturing, 1999, 28(3): 56-61.
- [6] 刘雅丽. 超大数值孔径浸没式物镜的研发设计[J]. 中国新技术新产品, 2020(10): 80-82.
Liu Y L. Research and design of hyper numerical aperture immersion objective [J]. New Technology & New Products of China, 2020(10): 80-82.
- [7] 刘志帆. 深紫外光刻机照明系统关键检测技术研究[D]. 上海: 上海大学, 2021.
Liu Z F. Study on measurement techniques in illumination system of deep ultraviolet lithography tools[D]. Shanghai: Shanghai University, 2021.
- [8] de Klerk J, Wagner C, Droste R, et al. Performance of a 1.35 NA ArF immersion lithography system for 40-nm applications[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6520: 65201Y.
- [9] Bouchoms I, Mulkens J, de Putter S, et al. Advanced imaging with 1.35 NA immersion systems for volume production[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7640: 76401R.
- [10] 李先军, 刘建丽. 中国集成电路产业发展: “十三五”回顾与“十四五”展望[J]. 现代经济探讨, 2021(3): 87-96.
Li X J, Liu J L. The development of China's IC industry in 13th five-year period and the outlook in 14th five-year period[J]. Modern Economic Research, 2021(3): 87-96.
- [11] Petersen J S, Maslow M J, Greenway R T. An integrated imaging system for the 45-nm technology node contact holes using polarized OAI, immersion, weak PSM, and negative resists[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5754: 488-497.
- [12] 江海波, 邢廷文. 一种增大工艺窗口的光源优化方法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 101101.
Jiang H B, Xing T W. A method of source optimization to maximize process window[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 101101.
- [13] Liu Z F, Chen M, Bu Y, et al. Illumination field parameters measurement for lithographic illumination subsystem[J]. Optik, 2020, 206: 164333.
- [14] Heil T, Graupner P, Garreis R, et al. Predictive modeling of advanced illumination pupils used as imaging enhancement for low- k_1 applications[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5377: 344-356.
- [15] 龚爽, 杨宝喜, 黄惠杰. 中频面形误差对离轴照明系统光场性能的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(12): 1204003.
Gong S, Yang B X, Huang H J. Effects of mid-spatial frequency surface errors on the illumination field uniformity of off-axis illumination[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1204003.
- [16] 胡中华, 杨宝喜, 朱菁, 等. 用于投影光刻机光瞳整形的衍射光学元件设计[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0616001.
Hu Z H, Yang B X, Zhu J, et al. Design of diffractive optical element for pupil shaping optics in projection lithography system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(6): 0616001.
- [17] 朱思羽, 杨宝喜, 马晓喆, 等. 光刻机环状多分区高能量利用率光瞳校正研究[J]. 中国激光, 2021, 48(17): 1704001.
Zhu S Y, Yang B X, Ma X Z, et al. Research on high energy efficiency pupil correction based on multi-ring partition in photolithography machine[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(17): 1704001.
- [18] 胡中华, 杨宝喜, 朱菁, 等. 高分辨率投影光刻机光瞳整形技术[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(11): 111101.
Hu Z H, Yang B X, Zhu J, et al. Pupil shaping techniques in high resolution projection exposure tools[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(11): 111101.
- [19] Mulder M, Engelen A, Noordman O, et al. Performance of a programmable illuminator for generation of freeform sources on high NA immersion systems[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7520: 75200Y.
- [20] Mulder M, Engelen A, Noordman O, et al. Performance of FlexRay: a fully programmable illumination system for generation of freeform sources on high NA immersion systems[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7640: 76401P.
- [21] Fang R F, Zeng A J, Zhang S H, et al. Design of zoom system for pupil shaping of lithography tool[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 9042: 90420J.
- [22] Rioux M, Tremblay R, Bélanger P A. Linear, annular, and radial focusing with axicons and applications to laser machining[J]. Applied Optics, 1978, 17(10): 1532-1536.
- [23] Chen M, Zhang F, Zeng A J, et al. Method of pupil shaping for off-axis illumination in optical lithography [J]. Journal of Optical Technology, 2016, 83(3): 154-158.
- [24] 曾宗顺, 张方, 牛志元, 等. 基于遗传算法的微反射镜阵列角位置分布算法[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0805003.
Zeng Z S, Zhang F, Niu Z Y, et al. Angular position

- distribution algorithm of micro mirror array based on genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0805003.
- [25] Zeng Z S, Zhang F, Huang H J, et al. An excellent performance optical system for freeform pupil illumination module in immersion photolithography machine[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10827: 1082732.
- [26] Antoni M. Projection exposure device: US6535274 [P]. 2003-03-18.
- [27] Maul M, Fiolka D. Filter device for the compensation of an asymmetric pupil illumination: US8636386[P]. 2014-01-28.
- [28] Zhu S Y, Niu Z Y, Zhang F, et al. Programmable pupil correction method for photolithography illumination system[J]. Optik, 2020, 208: 164072.
- [29] 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.
- [30] 程伟林, 张方, 林栋梁, 等. 光刻机照明光场均匀性高精度校正方法研究[J]. 光学学报, 2018, 38(7): 0722001.
Cheng W L, Zhang F, Lin D L, et al. High precision correction method of illumination field uniformity for photolithography illumination system [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0722001.
- [31] 郭立萍, 黄惠杰, 王向朝. 积分棒在步进扫描投影光刻系统中的应用[J]. 光子学报, 2006, 35(7): 981-985.
Guo L P, Huang H J, Wang X Z. Study of integrator rod in step-and-scan lithography[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(7): 981-985.
- [32] Ma X Z, Zhang F, Niu Z Y, et al. Design and optimization of top-Gaussian illumination field in photolithography[J]. Optical Engineering, 2021, 60(2): 025106.
- [33] 肖艳芬, 朱菁, 杨宝喜, 等. 用于光刻机照明均匀化的微柱面镜阵列设计[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0216001.
Xiao Y F, Zhu J, Yang B X, et al. Design of micro-cylindrical-lens array used for illumination uniformization in lithography systems[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(2): 0216001.
- [34] Zimmermann M, Lindlein N, Voelkel R, et al. Microlens laser beam homogenizer: from theory to application[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6663: 666302.
- [35] Chen M, Chen L Q, Zeng A J, et al. Generation of trapezoidal illumination for the step-and-scan lithographic system[J]. Applied Optics, 2015, 54(22): 6820-6826.
- [36] Randolph J B. Uniformity filter: US6076942[P]. 2000-06-20.
- [37] Stoeldraijer J M D, Ten C J W R, Fey F H A G, et al. Lithography apparatus: EP0952491[P]. 1999-10-27.
- [38] 程伟林, 张方, 林栋梁, 等. 光刻机照明系统的多自由度均匀性校正方法[J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1022004.
Cheng W L, Zhang F, Lin D L, et al. Multi-degree-of-freedom uniformity correction method of illumination system in lithography machine[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 1022004.
- [39] Cheng W L, Zhang F, Lin D L, et al. Study on the highly intelligent uniformity correction and the application for lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10827: 108272H.
- [40] Flagello D G, Geh B, Hansen S G, et al. Polarization effects associated with hyper-numerical-aperture (>1) lithography[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2005, 4(3): 031104.
- [41] Jasper H, Modderman T, van de Kerkhof M, et al. Immersion lithography with an ultrahigh-NA in-line catadioptric lens and a high-transmission flexible polarization illumination system[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6154: 61541W.
- [42] Zhou R Y, Zhu L L, Zhang C, et al. Polarization simulation and analysis of residual birefringence in optical materials for a hyper-NA lithography illumination system[J]. Applied Optics, 2019, 58(20): 5563-5567.
- [43] Flagello D G, Hansen S, Geh B, et al. Challenges with hyper-NA ($NA > 1.0$) polarized light lithography for sub $\lambda/4$ resolution[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5754: 53-68.
- [44] Kohler C, de Boeij W, van Ingen-Schenau K, et al. Imaging enhancements by polarized illumination: theory and experimental verification[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5754: 734-750.