

前 言

先进光刻机是制造高端芯片的利器，再次纳入 2021~2035 年国家重大科技规划。2002 年，中国科学技术部启动了集成电路制造需要的 100nm 氟化氩光刻机研制项目。2006~2020 年，《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》正式启动“极大规模集成电路制造技术及成套工艺”项目，自主研制了 90nm 技术节点氟化氩光刻机样机，并依托上海集成电路研发中心获得光刻胶曝光图形。2021~2035 年，中国相关企业、科研院所和高等院校持续攻坚克难，不断攻克先进光刻机光源的设计和研制技术、照明系统和物镜系统的设计和研制技术、光学零部件的设计-加工-制造技术、光刻机系统一体化协同设计和研制技术等难题。这些研发和制造技术是中国光刻机自主研制的必经之路。

在芯片制造中，光刻机将掩模母版上的图形结构高精度地复制到硅片上的光刻胶中。通过多道光刻工艺，获得所需要的集成电路结构。光刻机主要由激光光源、照明系统、物镜系统、高速运动的掩模台及硅片台等核心子系统组成。国外研制光刻机的企业严密封锁先进光刻机相关的光学系统设计、加工和制造、高精度检测、系统集成等核心技术。光刻机的光源、照明系统、物镜系统、工件台、对准系统、调焦-调平系统及光刻工艺等一体化协同设计研制技术，鲜见公开报道。因此，必须持续不断地完善光刻机整机系统的一体化协同设计研制技术，并保障光刻机的光刻性能和芯片制造的质量。2006~2020 年，我国启动了 90nm 技术节点的氟化氩干式光刻机研制(数值孔径为 0.75)；2017 年，我国启动了 28~14nm 技术节点的浸没式氟化氩光刻机研制(数值孔径为 1.35)；同时启动了极紫外光刻机物镜系统和照明系统的设计和研制(数值孔径为 0.33 和 0.55)。

作者在国外做了多年研究，2002 年 2 月回国至今，一直从事先进光刻机曝光系统(照明系统和物镜系统)的研究，创建先进深紫外和极紫外光刻机照明系统和物镜系统的光学设计方法和技术、照明系统和物镜系统的协同设计研制技术。

本书在介绍光刻机发展简史的基础上，聚焦深紫外光刻机和极紫外光刻机曝光系统的设计方法和技术，创建物镜系统和照明系统的协同设计研制技术。首先，在深紫外光刻机曝光系统设计中，突破传统设计方法，提出物镜系统分组设计方法与多维度参数优化技术；通过交替分组与复合迭代优化方法，构建多目标自动优化模型，获得波像差与畸变均低于 1nm 的浸没式深紫外光刻机物镜系统，使深紫外光刻机物镜系统的光学性能接近极限值；创新性建立深紫外光刻机照明系统

的双向设计方法，设计能够实现多种照明模式且照明均匀性高达 99%的照明系统。其次，在极紫外光刻机曝光系统设计中，利用分组设计方法，创建双向实际光线追迹方法，实现极小像差的极紫外光刻机物镜系统的设计，系统成像性能接近衍射极限；建立变倍率物镜系统离轴分组设计理论，创建并设计满足一体化集成条件的低遮拦变倍率物镜系统；创新性建立逆向照明系统设计技术，设计多套匹配物镜的高均匀性(优于 99%)照明系统，并实现物镜-照明系统设计的深度协同匹配，获得先进的高性能深紫外和极紫外光刻机曝光系统设计。

希望本书能为从事光刻机物镜系统和照明系统的设计与研制、掩模设计与制造、光刻工艺研发、集成电路设计与制造、光学及精密仪器研制领域的研究人员、工程师、教师和学生等，提供先进光刻机曝光系统光学设计的新方法和新技术，进一步促进相关领域的发展。

感谢刘菲、魏立冬、刘晓林、曹振、刘岩、梅秋丽、毛珊珊、闫旭、姜家华、郝倩、张心怡等研究生为本书撰写做出的贡献。感谢陈雨情、南雁北、张振坤、仲晓楠、马悦、李佟等研究生参与本书的修改和整理工作。

限于作者水平，书中难免存在不妥之处，恳请读者批评指正。

李艳秋

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 光刻机发展简介	1
1.2 深紫外光刻机曝光系统光学设计	3
1.2.1 深紫外光刻机物镜系统的光学设计	3
1.2.2 深紫外光刻机照明系统的光学设计	7
1.3 极紫外光刻机曝光系统光学设计	11
1.3.1 极紫外光刻机物镜系统的光学设计	12
1.3.2 极紫外光刻机照明系统的光学设计	16
参考文献	20
第 2 章 光刻机曝光系统光学设计基础	29
2.1 光学表面结构	29
2.1.1 球面	29
2.1.2 非球面	30
2.1.3 自由曲面	31
2.2 光刻机物镜系统的光学设计基础	34
2.2.1 光刻机物镜系统的设计方法	35
2.2.2 光刻机物镜系统的优化方法	36
2.2.3 成像光学系统像质评价方法	39
2.3 光刻机照明系统的光学设计基础	49
2.3.1 光能及其计算	49
2.3.2 照明系统基本组成	53
参考文献	54
第 3 章 浸没式深紫外光刻机物镜系统光学设计	56
3.1 浸没式深紫外光刻机物镜系统设计基础	56
3.1.1 浸没式深紫外光刻机物镜系统设计的主要性能	56
3.1.2 浸没式深紫外光刻机物镜系统的光学材料	57
3.2 浸没式深紫外光刻机物镜系统分组设计方法	58
3.2.1 浸没式深紫外光刻机物镜系统分组方法	58

3.2.2	光学元件增减与面型优化方法	59
3.2.3	浸没式深紫外光刻机物镜系统初始结构设计方法	62
3.3	浸没式深紫外光刻机物镜系统设计	69
3.3.1	多维度参数优化策略	69
3.3.2	公差分析方法	70
3.3.3	NA1.35 深紫外物镜系统优化设计	72
	参考文献	79
第 4 章	深紫外光刻机照明系统光学设计	81
4.1	深紫外光刻机照明系统设计基础及方案	81
4.1.1	深紫外光刻机照明系统的设计基础	81
4.1.2	深紫外光刻机照明系统的设计方案	83
4.2	深紫外光刻机照明系统双向设计方法	85
4.2.1	深紫外光刻机照明系统的匀光照明子系统设计	85
4.2.2	深紫外光刻机照明系统的光束整形子系统设计	86
4.2.3	深紫外光刻机照明系统的偏振照明子系统设计	94
4.3	深紫外光刻机照明系统设计	100
4.3.1	NA1.35 深紫外光刻机照明系统设计	100
4.3.2	照明系统仿真分析	105
4.3.3	照明光源仿真分析	106
	参考文献	109
第 5 章	极紫外光刻机物镜系统光学设计	112
5.1	极紫外光刻机物镜系统设计基础	112
5.1.1	匀倍率极紫外光刻机物镜系统设计基础	112
5.1.2	变倍率极紫外光刻机物镜系统设计基础	113
5.2	极紫外光刻机物镜系统分组设计方法	115
5.2.1	极紫外光刻机物镜系统分组方法	115
5.2.2	匀倍率极紫外光刻机物镜系统初始结构设计方法	116
5.2.3	变倍率极紫外光刻机物镜系统初始结构设计方法	123
5.3	极紫外光刻机物镜系统设计	130
5.3.1	极紫外光刻机物镜系统优化方法	130
5.3.2	NA0.33 匀倍率极紫外光刻机物镜系统设计	130
5.3.3	NA0.55 变倍率极紫外光刻机物镜系统设计	134
	参考文献	137
第 6 章	极紫外光刻机照明系统光学设计	139
6.1	极紫外光刻机照明系统设计基础及方案	139

6.1.1	极紫外光刻机照明系统设计基础	139
6.1.2	极紫外光刻机照明系统设计方案	140
6.2	极紫外光刻机照明系统逆向设计方法	141
6.2.1	极紫外光刻机照明系统中继镜组设计	142
6.2.2	极紫外光刻机照明系统双排复眼设计	151
6.2.3	极紫外光刻机照明系统双排复眼对位匹配方法	158
6.3	极紫外光刻机照明系统设计	163
6.3.1	极紫外光刻机照明系统光源	163
6.3.2	匀倍率极紫外光刻机照明系统设计	164
6.3.3	变倍率极紫外光刻机照明系统设计	167
	参考文献	176

第 1 章 绪 论

1.1 光刻机发展简介

1965 年, 摩尔预言集成电路(integrated circuit, IC)上的晶体管数量, 按每 18 个月增加一倍的速度发展^[1-3]。光刻机作为大规模集成电路制造的核心设备, 其不断发展让摩尔定律“生命不竭”。

1960~1970 年, 光刻机主要分为接触式光刻机和接近式光刻机^[4]。接触式光刻机很容易污染掩模, 而接近式光刻机与掩模之间能保持一个合适的空隙, 可避免掩模被污染^[5]。1973 年, Perkin Elmer 公司研制了第一台扫描式光刻机 Micralign^[6], 该光刻机数值孔径(numerical aperture, NA)为 0.17, 采用波长为 400nm 的汞灯照明, 光刻成像分辨率为 $2\mu\text{m}$ 。如图 1.1.1(a)所示, 扫描式光刻机在整个硅片上单次扫描完成单次曝光, 并能避免掩模和光刻胶的污染。

1980 年, 步进式光刻机问世^[7]。早期步进式光刻机物镜的 NA 为 0.28, 采用波长为 436nm 的汞灯照明(G 线), 光刻成像分辨率为 $1.25\mu\text{m}$ 。如图 1.1.1(b)所示, 步进式光刻机单次曝光面积只有 1~2 个芯片的区域。曝光过程如下: 先曝光一小块区域, 再步进至下一个区域进行曝光。

20 世纪 80 年代末, 步进-扫描式光刻机问世^[8], 光刻机物镜系统的 NA 进一步增大, 光刻成像分辨率进一步提高。如图 1.1.1(c)所示, 在步进-扫描式光刻过程中, 扫描曝光单个区域后(虚线框所示), 再步进至下一个区域进行扫描曝光。这种步进-扫描方式沿用至今, 深紫外(deep ultraviolet, DUV)和极紫外(extreme ultraviolet, EUV)光刻机曝光系统均采用步进-扫描式。

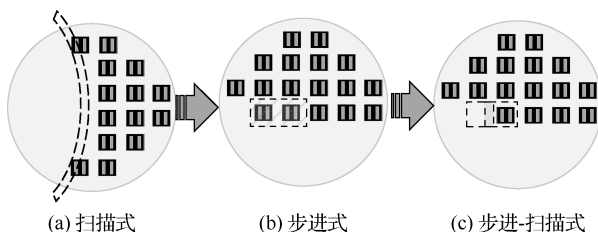


图 1.1.1 投影式光刻机曝光示意图

步进-扫描式光刻机的核心子系统包括投影曝光光学系统、掩模台、硅片台、对准系统、调焦调平系统、掩模及硅片的传输系统等^[9], 其中光刻机投影曝光光

学系统如图 1.1.2 所示。

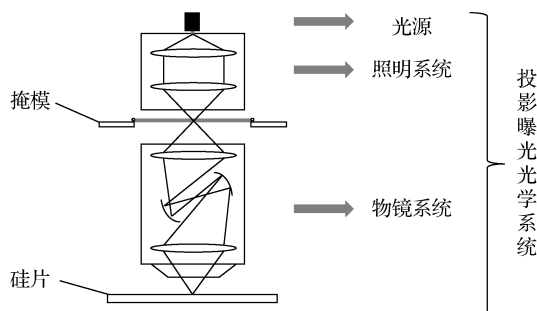


图 1.1.2 光刻机投影曝光光学系统

光刻机光源发出的光经过照明系统调控，可产生不同的照明模式(如传统照明(conventional illumination, CI)、环形照明(annular illumination, AI)、四极照明(quasar illumination, QI)、二极照明(dipole illumination, DI)、自由照明(freeform illumination)等)。依据光刻需求，不同照明模式的光经掩模进入物镜系统，其出射光在硅片上旋涂的光刻胶中成像，并经过显影、定影等多道工序，完成在光刻胶中的光刻成像。光刻成像分辨率用晶圆上光刻胶成像的特征尺寸(critical dimension, CD)表示^[10]：

$$CD = k_1 \frac{\lambda}{NA} \quad (1.1.1)$$

其中， k_1 为工艺因子； λ 为曝光光源波长；NA 为物镜系统的像方数值孔径。

由式(1.1.1)可知，提高光刻成像分辨率的途径包括缩短 λ 、增加 NA、降低 k_1 。如图 1.1.3 所示，曝光系统设计 λ 时经历了 436nm(g-line)、365nm(i-line)、248nm(氟

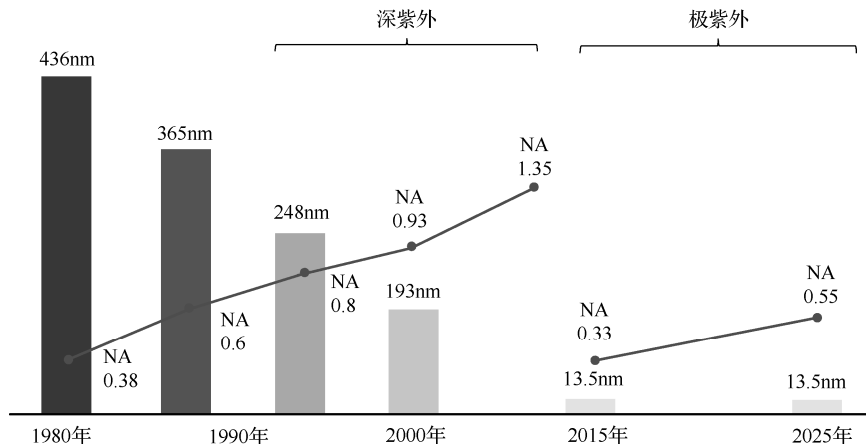


图 1.1.3 光刻机发展历程图

化氪(KrF))、193nm(氟化氪(ArF))和 13.5nm(极紫外)的发展历程。

下面分别概述深紫外光刻机曝光系统光学设计和极紫外光刻机曝光系统光学设计。

1.2 深紫外光刻机曝光系统光学设计

深紫外光刻机的曝光系统由物镜系统和照明系统组成。物镜系统的功能是将掩模上的图形复制到硅片上涂敷的光刻胶中；照明系统的功能是实现光刻成像性能需求的多种照明模式，并在掩模上形成均匀照明。本节介绍深紫外光刻机物镜系统和照明系统的发展历程及相关设计方法。

1.2.1 深紫外光刻机物镜系统的光学设计

光刻机物镜系统设计参照经典高斯型照相物镜的设计。随着光刻分辨率和产率要求的不断提高，曝光波长不断缩短，NA 不断增大，深紫外光刻机物镜系统经历了折射式物镜系统和折反射式物镜系统两个发展阶段，产生了以下一系列关键技术：早期全球面深紫外光刻机物镜系统 NA 为 0.3~0.6；引入非球面面型，实现了 NA0.9 的物镜系统设计；引入像方浸没技术(折射率 1.44 的去离子水作为浸没液体)，实现了 NA>1 的物镜系统设计；引入折反射式结构，实现了 NA1.3 的物镜系统设计，如图 1.2.1 所示^[11]。

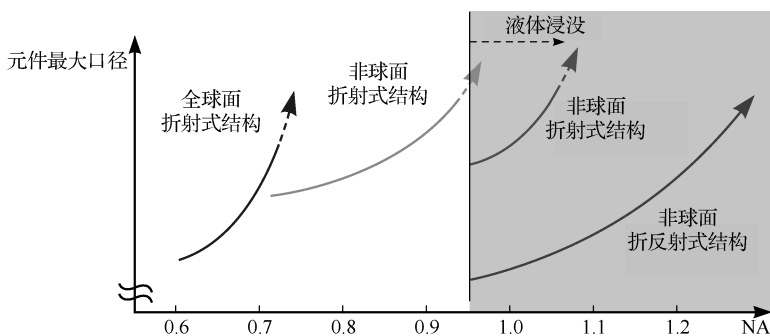


图 1.2.1 增大 NA 的关键技术

1. 折射式深紫外光刻机物镜系统

20 世纪 90 年代初，光刻机开始采用波长为 248nm 和 193nm 的准分子激光光源。深紫外光刻机物镜系统采用氟化钙(CaF₂)和熔融石英(fused silica)作为光学材料。上述两种材料的折射率相对较低，需将物镜系统的光焦度分配到较多的元件上，实现像差校正。如图 1.2.2 所示^[12]，NA0.75 的 KrF 光刻机物镜系统采用步进-

扫描的方式,在 $26\text{mm}\times 5.5\text{mm}$ 的视场内、涂有光刻胶的硅片上,实现光刻曝光成像。步进-扫描曝光可降低轴外像差的校正难度。如图 1.2.3 所示,NA0.85 的 ArF 光刻机物镜系统采用非球面设计^[12]实现像差校正。光刻机物镜系统引入非球面可减少镜片数量并减小口径,改变物镜系统光焦度的分布,物镜结构从双腰结构演变成单腰结构^[13,14],有利于像差校正。

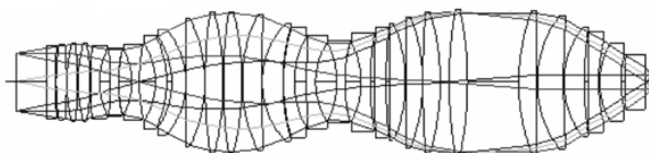


图 1.2.2 NA0.75 的 KrF 光刻机物镜系统

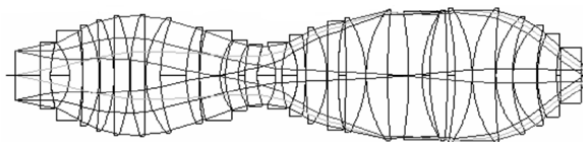


图 1.2.3 NA0.85 的 ArF 光刻机物镜系统

光刻机曝光系统设计是研制光刻机的关键,但关于光刻机曝光系统详实、全面的信息鲜见报道。国内外公开发表的深紫外光刻机物镜系统设计方法主要包括形态参数法、全局搜索法、鞍点构造法、分组设计方法,具体介绍如下。

1998 年, Sasian 等^[15]提出了形态参数法,利用物镜设计的两个重要参数,即光焦度(用 W 表示)和对称度(用 S 表示)量化了光焦度的分布和系统的对称特性^[16]。2003 年, Cheng 等^[17]以物镜形态参数作为判据,实现了 NA0.62 全折射式深紫外光刻机物镜系统的设计。

2005 年, Yabe^[18]提出了全局搜索法,通过一组虚拟面,对物镜系统进行全局移动搜索,在 NA0.85 全折射式深紫外光刻机物镜系统中,确定新增非球面的最佳位置,实现了波像差小于 0.01λ 的 NA0.85 ArF 光刻机物镜系统的设计。

2008 年, Marinescu 等^[19]提出了鞍点构造法,通过寻找光学系统新的局部最小值结构,构建物镜系统的结构网络。在全折射式 KrF 光刻机物镜系统中,反复引入新的薄弯月透镜,构造鞍点和新的优化变量。在 KrF 光刻机物镜系统中利用鞍点构造法设计的物镜结构网络如图 1.2.4 所示。

2004 年, Ulrich 等^[20]提出了分组设计方法,实现了缩小倍率为 4、NA0.80 的全折射式 KrF 光刻机物镜系统的设计。2007 年, Dodoc 等^[21]和 Matsuyama 等^[22]将全折射式 KrF 物镜系统分为物方镜组和像方镜组,并进行分组设计,进一步改变像方镜组的结构,优化浸没物镜系统,设计了 NA1.05 浸没式深紫外光刻机物镜

系统。然而,设计者未公开各镜组的设计方法。

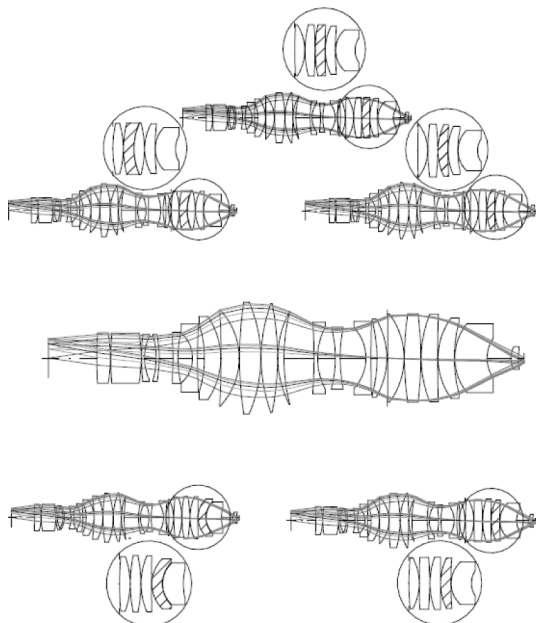


图 1.2.4 在 KrF 光刻机物镜系统中利用鞍点构造法设计的物镜结构网络^[19]

2002 年,面向 90~100nm 集成电路制造,中国启动 NA0.75 深紫外光刻机的研制。2017 年,中国实现了首套 NA0.75 Epolith A075 型深紫外光刻机物镜系统的研制,达到了全视场平均波像差优于 4nm、平均畸变优于 5.7nm 的核心技术指标^[23]。

2. 折反射式深紫外光刻机物镜系统

全折射式光刻机物镜系统的 NA 受光学元件口径和系统总长的限制。因此,ArF 光刻机物镜系统采用折反射式结构。在这种结构中,凹面反射镜具有正光焦度,并与正透镜在场曲的贡献中相反,能够拓展负透镜组的场曲校正空间、减小负透镜组所承担的光焦度,从而有效地控制系统总长和光学元件口径。

目前,浸没式深紫外光刻机物镜系统均采用折反射式结构。卡尔蔡司(Carl Zeiss)、尼康(Nikon)和佳能(Canon)公司均设计了浸没式 ArF 光刻机物镜系统^[24-26],并且它们的浸没式步进-扫描光刻机已用于集成电路制造。尼康的折反射式 ArF 光刻机物镜系统如图 1.2.5(a)所示,该结构通过引入 Schupmann 结构,矫正系统场曲。虽然该结构的两个光学臂极大地增加了机械装调复杂度,但是将垂直于光轴的机械臂中凹面反射镜作为可变形镜,可补偿光刻过程中产生的热像差效应^[27,28]。卡尔蔡司负责阿斯麦尔(Advanced Semiconductor Material Lithography, ASML)的

折反射式 ArF 光刻机物镜系统的制造与装调,如图 1.2.5(b)所示,该结构引入 In-line 结构,矫正系统场曲。所有光学元件均具有光轴旋转对称性,有利于在系统加工、装调过程中,保证良好的机械稳定性^[29]。与图 1.2.5(b)类似,图 1.2.5(c)所示的结构也仅有一个光轴,该结构利用两个反射镜构成的反射镜组矫正系统场曲,反射镜组两端的中间像大小比例接近 1:1,有助于系统像差的校正,且反射镜数量少,有利于加工装调。

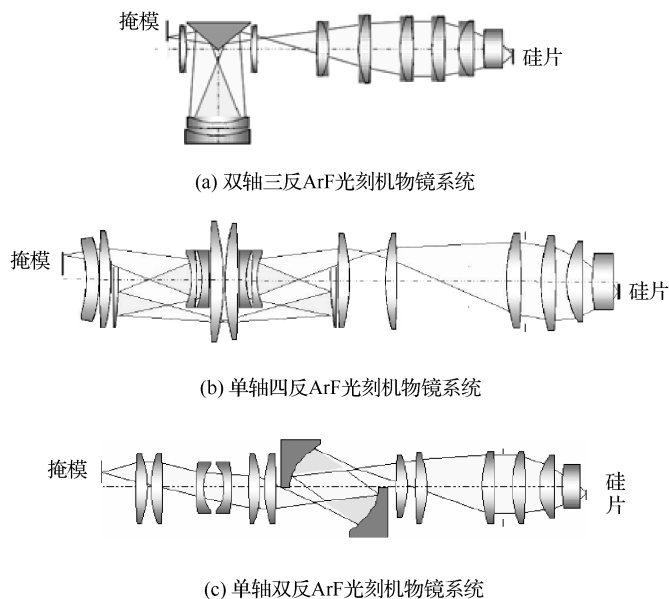


图 1.2.5 浸没式折反射式 ArF 深紫外光刻机物镜系统结构形式^[11]

浸没式深紫外光刻机物镜系统结构复杂,设计及优化的结构参数维度高,像差控制要求严格,是光刻机曝光系统设计难度最大的光学子系统^[30]。国内各大科研团队对浸没式深紫外光刻机物镜系统的设计方法进行了大量探索和研究。

2013 年,李艳秋团队^[31]建立了分组设计方法,设计了 NA1.20 折反射式深紫外光刻机物镜系统;2015 年,李艳秋团队的刘晓林^[32]建立了多维度参数优化方法,设计了 NA1.35 折反射式深紫外光刻机物镜系统,并对物镜系统的偏振像差进行了控制;2017 年,Li 等^[33]提出了分组设计方法,该方法根据深紫外光刻机物镜系统中间像的特性,将整个物镜系统分为三个子镜组,并根据各子镜组的特点及设计要求,选择与之对应的光学结构进行调整和优化,使其满足光学特性和像差校正的要求,通过该方法设计并实现了 NA1.20 折反射式 ArF 光刻机物镜系统。2019 年,李艳秋团队^[34]通过形态参数法实现了 NA1.20 自由曲面深紫外光刻机物镜系统设计,如图 1.2.6 所示。

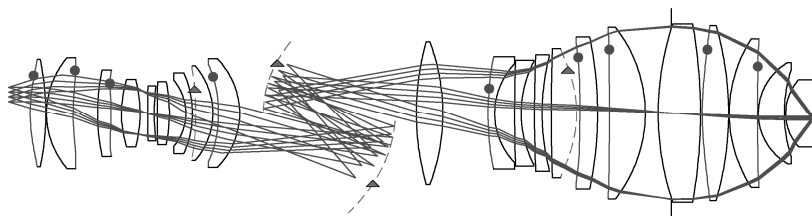


图 1.2.6 NA1.20 自由曲面深紫外光刻机物镜系统结构图

2022 年, Li 等^[35]提出复合分组设计方法, 完成了 NA1.35 深紫外光刻机物镜系统的初始结构设计, 建立多目标自动优化设计模型, 实现了波像差小于 0.75nm, 畸变小于 0.2nm 的 NA1.35 深紫外光刻机物镜系统的设计, 如图 1.2.7 所示。

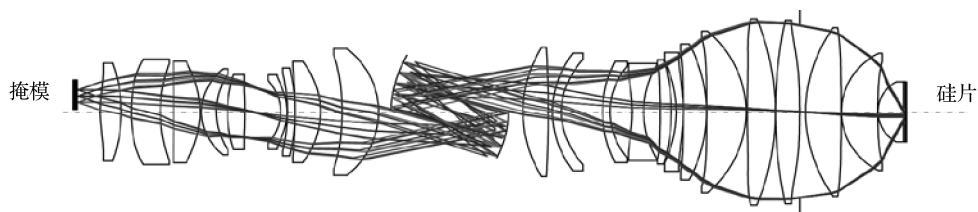


图 1.2.7 NA1.35 深紫外光刻机物镜系统结构图^[28]

除了李艳秋团队之外, 国内其他团队也对浸没式深紫外光刻机物镜系统的设计方法进行了研究。2014 年, 白瑜等^[36]和吕保斌等^[37]分别优化设计了 NA1.35 折反射式深紫外光刻机物镜系统。2015 年, 徐明飞等^[38]提出了一种自动优化设计方法, 设计了 NA1.30 三反式 ArF 光刻机物镜系统, 降低了设计过程中全视场的最大波像差, 在局部优化程序开始前, 设置一个自动调节采样视场权重的循环程序, 实现自动平衡全视场波像差^[38]; 2016 年, 刘军^[39]以 NA1.20 传统非球面物镜系统为初始结构, 通过逐步增加 Q-type 非球面个数, 设计了 NA1.35 ArF 光刻机物镜系统。

综上所述, 国内外相关研发机构均对深紫外光刻机物镜系统进行了研究。相关浸没式深紫外光刻机物镜系统的设计方法, 将在第 3 章进行详细叙述。

1.2.2 深紫外光刻机照明系统的光学设计

深紫外光刻机照明系统的作用是在掩模获得高均匀照明, 并产生各种照明模式^[40]。光刻机照明系统的性能直接影响芯片制造的质量及产率。典型的深紫外光刻机照明系统如图 1.2.8 所示, 主要由激光器、偏振单元、光束整形单元和均匀照明单元组成。激光器发出的光经过偏振单元对光的偏振态进行调制, 调制后的光束经光束整形单元, 在光瞳平面形成所需要的二次光源, 二次光源通过均匀照明单元并在掩模实现高均匀照明。

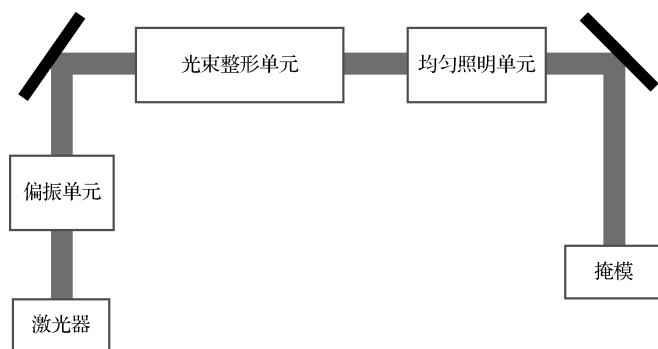


图 1.2.8 典型的深紫外光刻机照明系统

深紫外光刻机系统采用的光源是 ArF 准分子激光器^[41-43]。ArF 准分子激光器是一种高效率、高能脉冲激光器，其出射光斑为非对称状态，水平方向为高斯分布，竖直方向为超高斯分布(平顶分布)，如图 1.2.9 所示为 ArF 准分子激光器出射光斑的光强分布。ArF 准分子激光光源具有波长短、强度高、线宽窄、色差小、无时空相干性等性能^[44]。

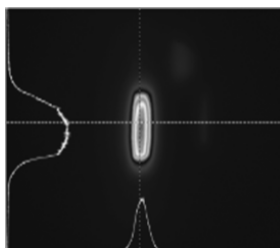


图 1.2.9 ArF 准分子激光器出射光斑的光强分布

深紫外光刻机照明系统的照明模式主要包括离轴照明(off-axis illumination, OAI)、二极照明、四极照明、自由照明。早期采用硬光阑获得不同的离轴照明模式^[45]。由于硬光阑的部分遮挡，一部分光能损失，小视场实验系统有时采用硬光阑实现离轴照明^[46]。

衍射光学元件(diffractive optical element, DOE)的微结构通过控制光束的相位或振幅，实现高效率衍射和整形，产生所需结构的照明模式^[47-49]。DOE 可实现多种照明模式和简单的自由照明模式^[50]，如图 1.2.10 所示。由于光刻分辨率不断提高，照明模式的复杂程度也越来越高。在不同照明模式之间切换时，需更换不同的 DOE 实现不同的照明模式，而衍射效应会引起背景噪声，造成能量损失，降低 DOE 的衍射效率^[50]。

为了克服上述 DOE 存在的不足，ASML 和卡尔蔡司合作研发了微反射镜阵列光束整形单元(Flex Ray)，并在 NA1.35 TWINSCAN XT:1950HI 光刻机中首次使

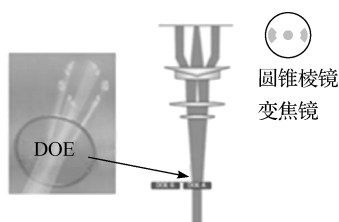
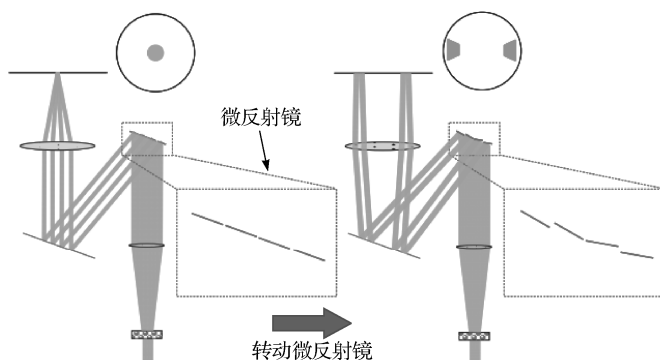


图 1.2.10 DOE 生成的照明光源

用了 Flex Ray 元件^[51-53]。Flex Ray 由上千个微反射镜组成，通过独立改变每个微反射镜正交方向的倾斜角度，实现任意的照明模式^[54-57]，如图 1.2.11 所示。采用这种方法，不需要更换光学元件，即可实现任意的照明模式，且照明系统能量损失几乎为零。

图 1.2.11 Flex Ray 工作示意图^[53]

在图 1.2.11 左侧，所有的微反射镜处于初始状态，可实现传统照明；在图 1.2.11 右侧，一部分微反射镜沿顺时针旋转，另一部分微反射镜沿逆时针旋转，可实现二极照明。Flex Ray 的硬件结构主要分为光束分割单元、微反射镜阵列和转像聚光镜^[54-57]三个部分。其中，核心部件是微反射镜阵列，其数目为数千个，每个微反射镜的尺寸为几十微米到几十毫米。如图 1.2.11 所示，微反射镜阵列位于转像聚光镜的前焦面，照明系统的光瞳位于转像聚光镜的后焦面，转像聚光镜将经过微反射镜出射光束的角度变换为空间强度，形成傅里叶变换关系。为了保证每个微反射镜上都有光束入射，避免光能量损失，需要利用光束分割单元，将入射的准直平行光束转换为多个子光束。

2014 年，Li 等^[58]设计了 71×71 个子单元的微反射镜阵列，提出了一种混合设计方法，即瞬时和序列相结合的方法，能够快速和准确地获得光斑的最优位置，通过调整每个微反射镜的倾斜角，能在光瞳平面实现任意强度和形状的照明光源。2020 年，曾宗顺等^[59]提出基于遗传算法的微反射镜阵列角位置分布算法，该算法

获得了微反射镜阵列角位置分布,可精准实现任意照明模式。

随着光刻分辨率的不断提高,物镜的 NA 不断增大,光波的偏振特性对光刻分辨率的影响也越来越大,需要采用高偏振度的偏振光照明掩模。传统的偏振光照明模式包括 TM(transverse magnetic)、TE(transverse electric)和 X 、 Y 偏振等,如图 1.2.12 所示。

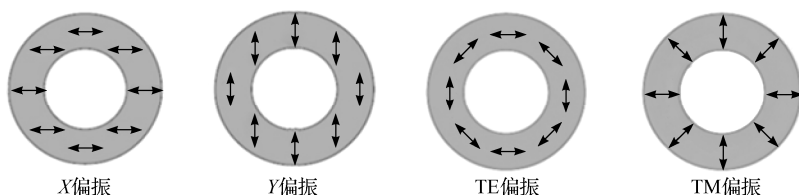


图 1.2.12 传统的偏振光照明模式示意图

2011 年, Hansen^[60]首次将光束偏振态引入光源-掩模优化(source-mask optimization, SMO)技术,实现任意分布的光源-掩模-偏振态优化(source-mask-polarization optimization, SMPO)光源。同年,佳能公司使用偏振全息(polarization hologram)元件,实现 SMPO 光源^[61]。然而,一块偏振全息元件只能产生一种特定的光源。ASML 公司在微反射镜阵列前,沿一个方向依次插入 $\lambda/2$ 波片,调制入射微反射镜阵列的光束偏振态,进而实现 SMPO 光源^[62,63]。2014 年, Li 等^[64]提出通过采用二维错位优化 $\lambda/2$ 波片的相对位置,获得 SMPO 光源的方法,提高了系统能量利用效率和偏振态优化自由度,如图 1.2.13 所示。

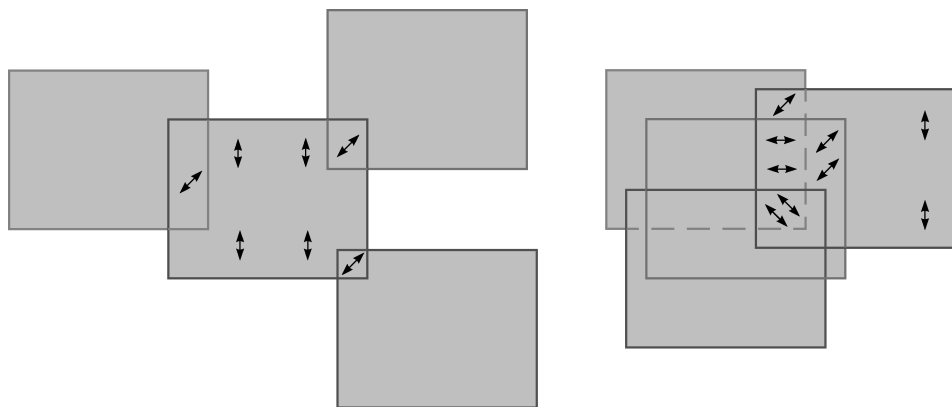


图 1.2.13 波片位置优化过程示意图

匀光单元可实现掩模的均匀照明。早期,光刻机照明系统采用匀光棒,实现掩模的均匀照明^[65],匀光棒结构示意图如图 1.2.14 所示。匀光棒的优点是通过增加其长度,提高子光源的个数,可以获得更好的照明均匀性^[66]。然而,匀光棒