

193 nm 光刻曝光系统的现状及发展

巩岩 张巍

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要 投影曝光工艺是集成电路制造过程中的关键环节, 曝光系统的工艺水平已成为衡量微电子制造技术的重要标志。重点介绍了目前 193 nm 光刻设备曝光系统的发展现状和趋势, 以及为提高曝光质量所采用的相关分辨率增强技术, 通过分析曝光系统的构成和其中的关键技术, 探讨了国内研制相关曝光设备所面临的挑战。

关键词 投影光刻; 曝光系统; 分辨率增强; 照明; 投影物镜; 综述

中图分类号: TN305.7 文献标识码: A

Present status and progress in 193 nm exposure system in lithography

GONG Yan, ZHANG Wei

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Lithographic exposure is the key process in the manufacture of integrated circuit, and the performance of exposure system decides the level of microelectronic manufacture technology. In this paper, the present status and progress in 193 nm exposure system are described. The resolution enhancement technologies widely used in 193 nm lithography, such as off-axis illumination, phase shifting mask and optical proximity correction, are also introduced. By showing the composition and key technologies of the exposure system, the challenges in development of lithography instrument are discussed.

Key words: projection lithography; exposure system; resolution enhancement technology; illumination; projection lens; review

1 引言

作为微电子技术的标志, 集成电路(Integrated Circuit, IC)的发展日新月异。自 70 年代 IC 诞生

至今, 短短几十年, 经历了从小规模到超大规模和特大规模集成电路的发展阶段^[1], 其进步得益于微电子技术和微细加工技术的迅速发展。投影曝光光刻系统是目前微电子领域的主流设备, 其曝光工艺是 IC 制造过程中最为重要的工艺步骤之

一。它的主要作用是将掩模板上的图形精确复制到硅片上,为下一步进行刻蚀或者离子注入工序做好准备。该工艺成本约为整个硅片制造成本的 $1/3$, 耗时间约占整个硅片工艺时间的 $40\% \sim 60\%$ 。

1979 年美国 GCA 公司推出了第一台分步重复投影曝光机,被视为曝光技术的里程碑。1991 年美国 SVG 公司又推出了步进扫描曝光机,它集分步投影曝光机的高分辨率和扫描投影曝光机的大视场、高效率于一身,适合特征宽度 $< 0.25 \mu\text{m}$ 线条的大规模生产。由于光学曝光技术不断创新,步进扫描投影曝光技术不断突破人们预期的光学曝光极限,使之成为当前曝光机采用的主流技术^[2,3]。

根据瑞利衍射定理 $R = k_1 \lambda / NA$, 其中 R 代表分辨率, k_1 代表工艺因子, λ 代表工作波长, NA 代表光学系统数值孔径。为了提高分辨率,光学曝光系统的波长 λ 不断缩小,从 436 nm 、 365 nm 的近紫外(NUV)进入到 248 nm 、 193 nm 的深紫外(DUV)。全球生产光学光刻机的 3 大巨头 ASML、Nikon 和 Canon 公司均在 2003 年以前推出了商业化的 193 nm ArF 步进扫描曝光机,如 2001 年 ASML 推出的 PAS5500/900 型, NA 为 $0.45 \sim 0.60$, 分辨率为 $150 \sim 130 \text{ nm}$; Nikon 公司的 NSR-S203A 型, NA 为 0.68 , 分辨率为 150 nm ; Canon 公司的 FPA-5000AS1 型, NA 为 0.60 , 分辨率为 130 nm 。另外, ASML 和 Canon 于 2002 年分别推出的 PAS5500/1100 型和 FPA-5000AS3 型, NA 均为 0.75 , 分辨率分别可达到 $90 \sim 75 \text{ nm}$ 和 100 nm 。目前, 193 nm ArF 步进扫描光刻机已成为 90 nm 节点的主流设备。在此基础上,通过浸液技术的引入, 193 nm 步进扫描光刻机已被进一步延伸至更高的节点目标。国际半导体协会(ITRS)在 2003 版的《国际半导体技术路线图》^[4]中,增加了一个提高光刻分辨率的可能解决方案——浸液式光刻(Immersion lithography)。2004 年 12 月《国际半导体技术路线图》编委会又对《国际半导体技术路线图》进行了修订,把 193 nm 光刻(非浸液式)扩展到 90 nm 节点,并且撤消了离子投影光刻和近接 X 射线光刻。而在 2005 年的蓝图中,浸液式光刻继续着其既有的发展态势,成为 2007

年达到 65 nm 、2010 年达到 45 nm 、2013 年达到 32 nm 和 2016 年达到 22 nm 节点的关键技术。

193 nm 光刻机包括高性能准分子激光器、高精度工件台、双波长干涉仪和大数值孔径曝光系统等几个重要组成部分,其关键部件设计和制造涉及到应用光学、精密机械及控制、精密环控等诸多领域的技术和工艺。本文重点介绍 193 nm 光刻技术中的关键之一——曝光系统的发展现状,以及与曝光系统相关的光刻分辨率的提高技术,通过分析曝光系统的构成和其关键技术,探讨国内研制相关曝光设备所面临的挑战。

2 193 nm 光刻现状及浸液式光刻技术

2002 年以前,业界普遍认为 193 nm 光刻无法延伸到 65 nm 节点,但浸液式光刻技术的发展为其带来了转机。通过曝光波长的不断减小和数值孔径的不断增大,以及各种分辨率增强技术的不断探索,将工艺因子 k_1 逐步降低,现已迎来了 65 nm 半导体制造量产时代。在 45 nm 器件的生产中,可选择的光刻方法有 k_1 为 0.3 的大数值孔径 ArF 干法光刻和 k_1 为 0.35 的大数值孔径 ArF 浸液式光刻。

所谓浸液式光刻是指在曝光镜头和硅片之间充满水(或其它液体)代替空气,通过介质折射率的增大提高投影物镜的数值孔径,从而提高曝光系统的分辨率,同时浸液能够增大系统焦深,有利于改善光刻曝光系统的工艺窗口。目前,人们已经成功利用相移掩模等分辨率增强技术(Resolution Enhancement Technology, RET)将 193 nm 干法光刻延伸至 65 nm 节点。随着 193 nm 浸液式光刻技术的进步,预计在 2009 年 193 nm 浸液式光刻技术将在 45 nm 节点实现大规模量产。如果采用折射率为 1.56 的浸入液,结合 Pack-and-cover 等先进的分辨率增强技术,极可能将 193 nm 浸液式光刻延伸至 32 nm 节点,更进一步,如果找到折射率 > 1.6 的浸入液,再配合把掩模图形拆成两个来降低密度的 pitch-splitting 等先进工艺方法, 193 nm 浸液式继续延伸至 22 nm 节点也是有可能的^[5,6]。

国际上, ASML、Nikon 和 Canon 等主要光刻设

备制造厂商从 2004 年起就提供 193 nm 浸液式光刻机供各大芯片制造商使用。至今,已开发出多种型号的 193 nm 浸液式光刻机。特别是对于 $NA > 1.0$ 的第二代浸液式光刻机,研发速度也相当迅速。2004 年夏天美国半导体芯片制造技术研究与开发联合体 Sematech(Austin, Texas)和 Exitech(Oxford, UK)宣布联合研发全球第一台超 NA 的 193 nm 浸液式光刻机。2005 年夏天在 Austin 的 Sematech 安装,这台浸液式光刻机的曝光部分由 Corning Tropol 完成,水浸没部分和 ArF 激光源由 Lambda Physik 完成,光刻机 NA 达到了 1.3,可用于 45 nm 节点工艺。ASML 随后也推出 NA 为 1.2 的 193 nm 浸液式光刻机。而 Nikon Precision 公司在 2005 年下半年推出了 NA 为 1.07 的 S609B 型 193 nm 浸液式光刻机,并于 2006 年下半年推出 NA 为 1.3 的 S610C 型 193 nm 浸液式光刻机。表 1 列出了一些厂商所推出的 193 nm 浸液式光刻机典型参数。

表 1 近年的 193 nm 浸液式光刻机产品

Tab. 1 Productions of 193 nm immersion lithographic devices

年份	厂商	型号	NA	光刻尺寸/nm
2004	ASML	TwinScanAT 1150i	0.75	90
2005	ASML	TwinScanAT 1250i	0.85	65
2005-2006	ASML	TwinScanXT 1400Ei	0.93	65/45
2005-2006	ASML	TwinScanXT 1700Fi	1.2	45
2007	ASML	TwinScanXT 1900i	1.35	≤ 40
2005-2006	Nikon	NSR-S609	1.07	55/45
2006 下半年	Nikon	NSR-S610C	1.3	45
2007	Canon		≥ 1.2	

虽然浸液式光刻受到极大的关注并已取得显著进展,但仍面临着巨大挑战。2006 版《国际半导体技术路线图》^[4]中光刻内容指出浸液式光刻的挑战在于:控制由于浸没环境引起的缺陷,包括气泡和污染影响;抗蚀剂与流体的相容性等;折射率 > 1.65 的流体满足粘度、吸收和流体循环要求;满足透镜设计吸收和双折射要求的折射率 < 1.65 的透镜材料。

3 曝光系统分辨率增强技术

除缩小曝光波长和增大数值孔径的方法外,对于曝光系统,通常还需要采用离轴照明(Off-axis Illumination, OAI)、相移掩模(Phase-shifting Mask, PSM)、光学临近效应校正(Optical Proximity Correction, OPC)等分辨率增强技术才能够获得满足要求的系统分辨率。此外,随着投影物镜 NA 的增加,光束偏振态对系统分辨率的影响日益增强,所以对于高 NA 曝光系统还需要控制光束偏振状态从而进一步改善系统的成像质量。

3.1 离轴照明技术

离轴照明技术最早由日本学者于 1991 年提出^[7,8]。所谓离轴照明指的是采用倾斜照明方式,入射光束偏离主光轴方向一个倾斜角,由透过掩模图形的 0 级光和其中一束 1 级衍射光(+1 级或 -1 级)经透镜系统在光刻胶表面干涉成像,如图 1(a)所示。与传统照明的三光束成像相比,离轴照明能够提高系统分辨率、增加焦深并提高成像对比度。

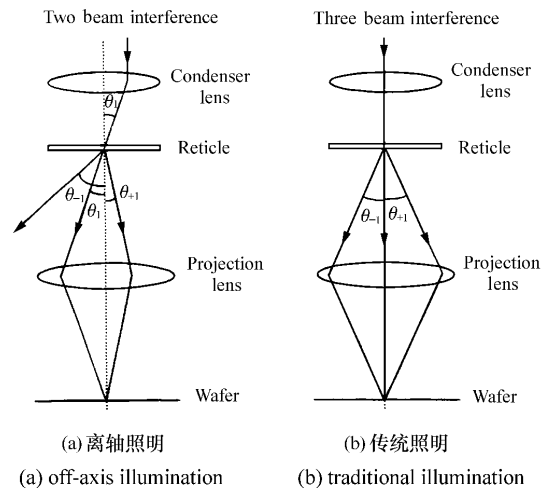


图 1 传统照明与离轴照明示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of illumination configurations of illuminating system

常用的离轴照明方式如图 2 所示,有环形、四极、偶极照明等,其中 σ 为照明相干因子,其定义为照明系统的 NA 与投影光学系统的 NA 之比。

不同的离轴照明方式对分辨率的改善、焦深与对比度的提高程度不同,因此,在实际使用中,照明方式及其参数必须根据具体的掩模图形进行设置。一般地,掩模几何图形通常至少有两个方向,环形照明通常对固定栅距、任意方向的密集线条非常有利。对于单一方向的密集线条,两极照明是最理想的。如果掩模图形都是两个相互垂直方

向上的线条,适合采用四极照明方式。近年来,随着光刻图形线宽的不断缩小和特殊复杂图形的要求,在光刻中采用了光源优化的方法,因此需要一些特殊的照明方式。如图 2(f)是 ASML 提出的 Bulls-eye 照明方式,它对于特定的图形能够有效改善光刻的工艺窗口,提高投影曝光的成像质量^[9]。

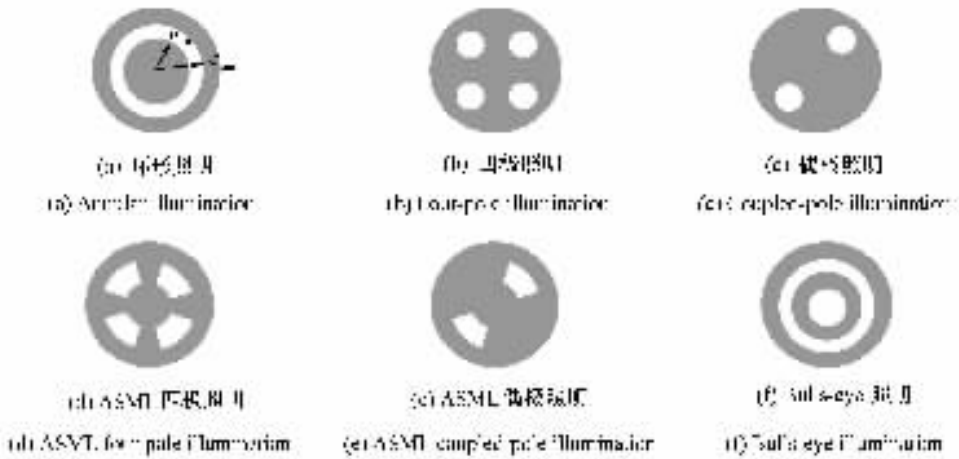


图 2 常用离轴照明方式

Fig. 2 Several modes of off-axis illumination

3.2 相移掩模

1982 年 Levenson 等人提出了相移掩模技术^[10],实现了比传统方法更高的分辨率。相移掩模种类很多,其改善光刻分辨率的机理和能力也有差异,但基本思想都是在掩模上一些透光区选择性地引入相移层。相移层的引入,使掩模上有、无相移器的透光区域透过的光之间产生 180° (或其奇数倍)的相位差或再辅之以透过率变化,从而改变掩模图形空间频率分布和空间像分布,使硅片表面相邻透光孔像之间因相消干涉而使暗区强度减弱。根据能量守恒定律,则特征图形亮区像强度必然增加,因而提高了像对比度、强度分布斜率和像质,使得因对比度较差而无法分辨的图形变得可以分辨,故 PSM 能够提高系统的分辨率。同时,由于亮区光场分布变陡,也改善了曝光过程的工艺宽容度,降低了曝光工艺的难度,有助于曝光质量和曝光效率的提升。

3.3 光学邻近效应校正

由于微细图形尺寸不断减小,密集度愈来愈

高,当掩模上微细图形临界尺寸接近或小于曝光波长时,衍射光场之间的迭加产生明显的相互干涉效应,可以引起曝光图样相对原设计图样产生畸变,带来线宽偏差、线条长度缩短和边角圆化等诸多问题,大大超出工业光刻的偏差容许极限,这种光衍射导致的投影光刻图形的邻近畸变被称为光学邻近效应(Optical Proximity Effect, OPE)^[11,12],设法消除这种邻近畸变的技术被称为光学邻近校正(Optical Proximity Correction, OPC)。OPC 是采用预畸变掩模图形来改善光学成像和最终光刻图形质量的一种波前工程。所谓预畸变掩模,就是在原设计掩模上通过偏置疏密线条的宽度或增加一些微细的亮暗辅助线条来补偿光学光刻成像过程因高频信息损失而导致空间像畸变,减少曝光图形的邻近效应,从而改善最终光刻图形质量。

校正策略大致可分成基于校正规则(Rules-Based Approach)的 OPC 和基于物理模型(Model-Based Approach)的 OPC^[13]。基于校正规则的方

法是根据曝光系统的参数和掩模图形参数的规律,建立一套校正规则和校正图形数据库,然后据此规则对设计掩模图形进行优化校正。这种方法的优点是计算速度快,依据一定的规则可确定相同曝光显影条件下任何形状掩模的预畸变。但是为了获得好的校正则必须进行大量的列表、建库工作,这使得计算较为繁琐。基于物理模型的方法是依据计算得到空间像强度分布或抗蚀剂的一维轮廓,利用迭代算法或类似的数学模型,反推出可补偿邻近效应偏差的掩模结构,并用修正后的掩模图形来成像,评判校正效果。这种方法的优点是校正效果好,但运算量大,每次计算需花费较长的时间。鉴于以上两类方法的特点,目前,大量的 OPC 技术研究通过将两类方法结合,并根据掩模的具体情况进行光学邻近校正,以减少模拟计算量,提高校正的效率和质量。

3.4 偏振控制

当投影物镜 $NA > 0.8$ 时,光束的偏振特性会严重影响成像质量,特别是 p 偏振会降低成像对比度,影响系统分辨率。另外,偏振光的点扩散函数分布不对称,光强分布沿着偏振方向扩散。对于线条图形,当偏振方向与线条平行时,光强透过率较高,有利于成像。因此,根据掩模图形,采用相应的偏振光束配合离轴照明,能进一步提高系统的分辨率和成像质量^[14]。

影响光束偏振性质的主要因素是元件材料的双折射效应(包括材料固有双折射和应力双折射效应)和元件表面所镀膜层的偏振特性。因此,采用偏振光束照明对照明系统中偏振装置后的元件提出了更为严格的要求,故应减少偏振装置到掩模之间元件的数目。对于这些元件,应采用无应力装调,其表面所镀膜层需进行偏振优化。

在照明系统中,光束偏振态控制可以通过加入偏振装置来实现。常用于光束偏振态控制的元件主要有 4 类:(1)基于双折射原理的偏振器;(2)采用二向色材料的偏振器件;(3)基于布儒斯特效应的偏振器件;(4)线栅偏振器(Wire Grid Polarizer)。线栅偏振器通过在透明基底上排列金属线栅获得,当光束通过线栅后,与金属栅线平行的偏振被吸收而获得垂直于线条的偏振光。由于

栅线偏振器具有较好的灵活性,可以根据应用需求通过设置线栅图形实现不同的偏振态控制。例如采用如图 3 所示线栅偏振器^[15]可以获得切向偏振光束,因此在照明系统中,将这样的元件配合其它相应的离轴照明技术,可提高系统成像质量。

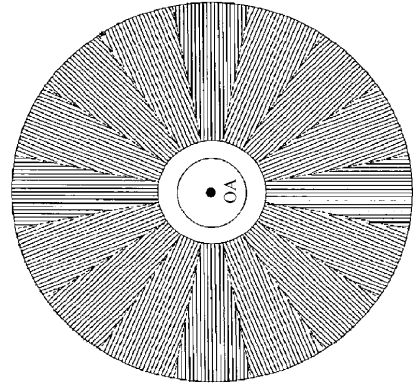


图 3 用于产生切向偏振的线栅偏振器结构示意图^[15]

Fig. 3 Schematic diagram of patterned grid polarizer producing tangentially polarized light.^[15]

偏振器的线栅可采用铝、金、银等导电性能良好的金属材料,基底可选用融石英、氟化钙等。线栅周期一般为波长量级。线栅偏振器的制作,可先在基底上镀制金属膜层并涂布光刻胶,再通过电子束直写将线栅图形转印到光刻胶,最后通过离子束刻蚀金属膜层获得线栅。

4 193 nm 光刻曝光系统的组成

光刻机的核心是曝光系统,其组成主要包括光源、照明系统和投影物镜,如图 4 所示。

4.1 光源

光源是光刻设备的重要组成部分,193 nm 光刻系统采用 ArF 准分子激光器作为光源。ArF 分子只存在于准稳定激发态,当不稳定的准分子分解成两个组成原子时,激发态发生衰减,同时发射出激光。激光器通过两个平板电极的高压(10 ~ 20 kV)脉冲放电来激发高压惰性气体和卤素的混合物,使之维持着激发态的分子多于基态分子,实现激光发射。

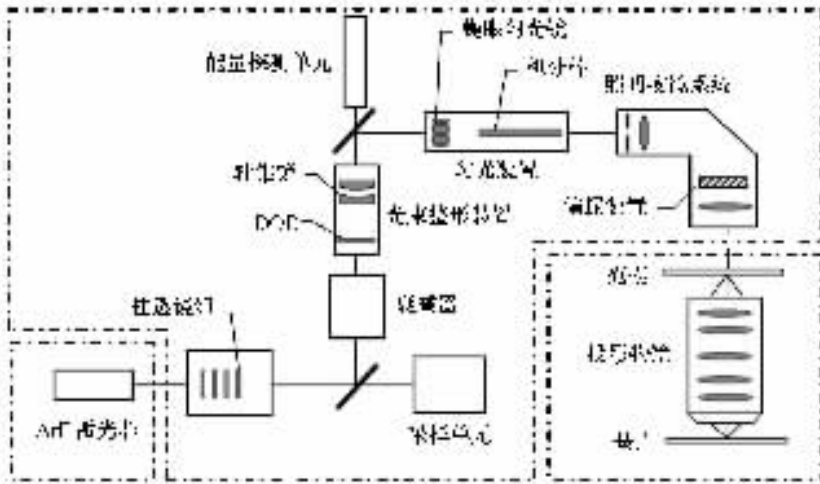


图 4 曝光系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of exposure system

用 ArF 准分子激光器作为光刻光源的优点很多,主要表现在:输出光波长短、强度高、曝光时间短(几个脉冲就可完成曝光)、谱线宽度窄、色差小、输出模式多、时间和空间基本不相干,光路设计上可以省去滤波部分等等。光学光刻对准分子激光的要求非常高,其中最为关键的问题是如何在高重复频率下保持窄带宽和稳定性,而且要求带宽必须尽可能压缩,一般带宽值应 < 1 pm。目前,光刻设备上应用的激光器功率约 20 W,脉冲频率 4 ~ 6 kHz,光谱半宽度可达到 0.35 pm^[16],甚至更窄。

同时,光刻要求光源具有很好的光束均匀性。准分子激光的光场分布不同于普通的单模高斯光场分布,光斑通常呈矩形。尽管准分子激光光场分布的均匀性比其它的激光均匀性要好,但由于准分子激光器在大体积、高电压、高压电状态下运转,容易导致放电增益不均匀,而且若工作气体比例改变,则在输出脉冲能量变化的同时,光束截面的强度分布有着较大起伏^[17]。这与实际应用需要还有一定的差距,需要通过照明系统进行调整和控制。

4.2 照明系统

照明系统的功能主要是对 ArF 准分子激光器输出的光束进行扩束、整形、匀光,并通过光通量的控制为掩模提供一定尺寸和形状均匀、稳定的照明。此外照明系统还要实现离轴照明和对光束

偏振态的偏振控制等分辨率增强技术。

照明系统一般主要由扩束装置、光束整形装置、匀光装置、照明物镜系统、狭缝单元、偏振装置以及衰减器、采样单元、能量探测单元等辅助单元组成,如图 4 所示。

4.2.1 ArF 准分子激光的扩束

由于 ArF 激光器的出射光束为矩形光斑,且两垂直方向上光强分布不同。因此,扩束系统可采用两组柱透镜(每组两块)分别对两方向进行扩束,其基本配置如图 5 所示^[18]。柱透镜组的性能和结构参数需根据 ArF 激光器出射光束的形状、发散角等来确定。

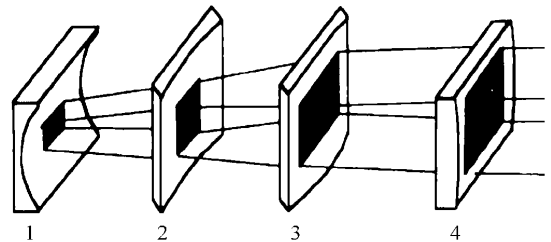


图 5 扩束装置组成示意图^[18]

Fig. 5 Schematic diagram of laser beam expanding unit^[18]

4.2.2 光束整形与离轴照明技术

光束整形的目的主要是调节照明相干因子和实现离轴照明。目前用于实现离轴照明的光束整形元件主要有两类。

一类是折射光学元件(Refractive Optical Element, ROE),其特点是衍射效率高,制作相对容易,但是其对于光强分布的控制能力较弱,可用来实现环形等简单的离轴照明方式。采用轴锥镜实现环形照明的光束整形系统如图6所示,其中移动透镜组和补偿透镜组用以调节照明相干因子 σ_{out} 。轴锥镜组通过改变两轴锥镜的间距调节环形照明的环宽,当两轴锥镜间距为零时变为传统照明。

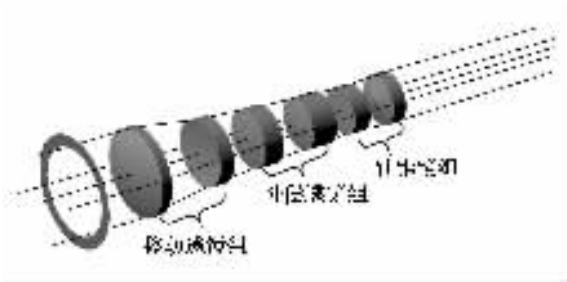


图6 用于实现环形照明的轴锥镜系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of axicon unit producing annular illumination

另一类是衍射光学元件(Diffractive Optical Element, DOE),其特点是光束整形能力强,对出射光束的光强分布能够进行精确的控制,可实现复杂形状的照明方式,图形陡边性好,但元件对加工精度要求较高^[19, 20]。用于实现离轴照明的DOE设计可采用多台阶位相结构,其台阶数与衍射效率的关系可用 $\eta = |\sin(\pi/N)|(\pi/N)^2$ 近似计算,其中 N 为DOE的台阶数,当 $N=8$ 时,DOE的衍射效率理论上可达94.9%。DOE设计一般采用基于线性变换的迭代方法,其特点是算法简单,收敛速度快^[21]。常用的DOE加工方法包括:二元掩模套刻法、灰度掩模法、无掩模直写法。二元掩模套刻方法是由二元掩模板经多次图形转印、套刻形成台阶式浮雕表面,是发展最早,最成熟,也是当前最常用的一种方法。但是多个高精度掩模制作的成本很高,对掩模对准精度要求较高。灰度掩模法所用掩模板透射率分布是多层次的,经一次图形转印即形成连续或台阶表面结构,具有成本低、周期短、方法简便之优点,但加工精度较低。无掩模直写法无需掩模板,仅通过改变曝光强度直接在光刻胶上形成台阶或连续浮雕结构。其中电子束直写曝光分辨率高,曝光线宽可

<100 nm。

4.2.3 匀光技术

常用的光束均匀方法有棱镜组均匀器、两级蝇眼均匀器、积分棒或这几种方法的组合^[22]。棱镜组均匀器简单,但均匀效果较差。两级蝇眼均匀器是目前光刻机系统中常用的光束传输均匀系统,如图7所示,由两组蝇眼透镜阵列组成,每组透镜为母线相互垂直交叉焦距相同的柱透镜做成的 $m \times m$ 阵列。 m 越大获得的光束均匀度越好,但会增加元件加工的难度和成本。两级蝇眼均匀器可以实现很高的均匀性,也有较好的透过率,但光路对准要求较高。

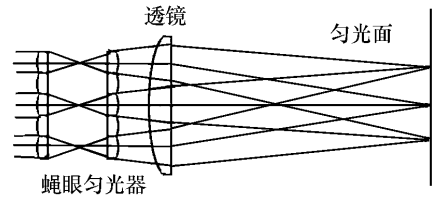


图7 蝇眼匀光器原理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of fly eye beam homogenizer

积分棒^[23]的工作原理如图8。在投影光刻系统中,采用了一个截面为矩形的积分棒。激光束通过聚焦透镜聚焦于积分棒的入射端面中心,经过积分棒内壁的多次全反射,最后在积分棒的出射端面迭加而形成均匀照明面。积分棒的出射端面通过照明镜组成像于被照明物体(掩模板)上,从而使物体得到均匀照明。当积分棒横截面积一定时,棒越长均匀效果越好,但是随着长度的增加积分棒侧壁的反射及材料吸收所引起的透过率损失将增大,需要综合考虑匀光效果和透过率损失,进行优化平衡。

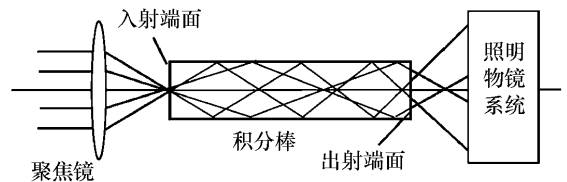


图8 积分棒原理示意图

Fig. 8 Schematic diagram of integrator rod

由于光刻曝光系统对于照明的均匀性要求很高,采用单一元件进行匀光很难达到均匀性指标,

因此匀光系统常用复合匀光方式,如两级蝇眼均匀器与积分棒联用。

4.2.4 照明物镜系统

照明物镜系统组成如图 9 所示,包括准直镜组,反射镜和聚光镜组。一般采用双远心光路设计,其数值孔径应与投影物镜相匹配,即 NA 略大于 $\sigma \times |M| \times NA$,其中 M 为投影物镜的放大倍率 ($-1/4$) σ 为相干因子最大值。照明物镜系统设计应根据匀光系统的出射参数,利用光学设计软件进行优化。

设计,其数值孔径应与投影物镜相匹配,即 NA 略大于 $\sigma \times |M| \times NA$,其中 M 为投影物镜的放大倍率 ($-1/4$) σ 为相干因子最大值。照明物镜系统设计应根据匀光系统的出射参数,利用光学设计软件进行优化。

4.3 物镜系统

光刻物镜是投影式光刻机的核心部件,要求具有衍射极限的成像质量、高分辨力及极小畸变,其性能直接决定了光刻机的图形传递能力^[24-26]。图 10 为 Nikon 公司折射式投影镜头的发展历程,可见为了提高物镜的数值孔径和成像性能,其光学结构变得越来越复杂。虽然原则上可通过使用非球面代替部分球面来简化系统,但是非球面加工和检测难度较大,因此限制了其使用数量。此外,目前能够用于 193 nm 的透镜材料仅有融石英和氟化钙等少数材料,而氟化钙价格昂贵且难于加工。因此,材料的单一性增加了设计难度,不利于消除系统色差。

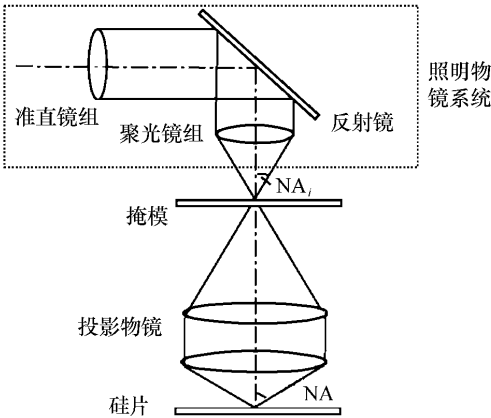


图 9 照明物镜系统示意图

Fig. 9 Schematic diagram of illumination lens system

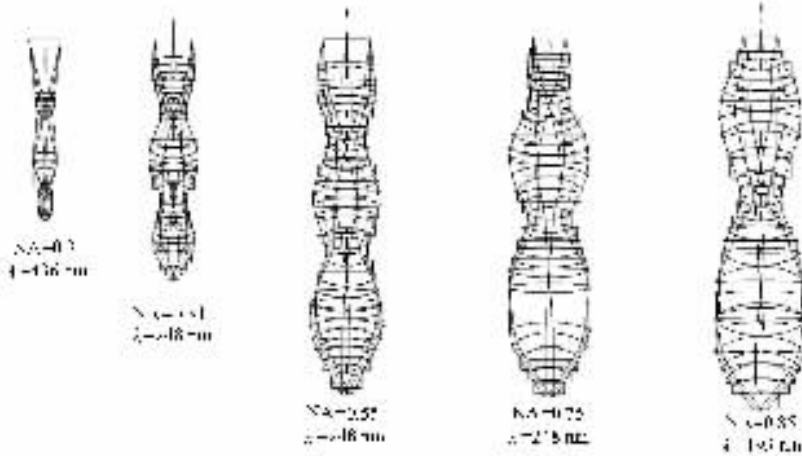


图 10 Nikon 投影物镜结构图^[23]

Fig. 10 Optical configurations of microlithographic lenses of Nikon company^[23]

尽管理论上折射式镜头能够扩展到很高的数值孔径,但是由于受到材料和光刻机尺寸的限制,这种扩展并不现实。因此,要研制超高 NA 镜头,须采用新型的折/反射式镜头,能够在保持光刻机尺寸不变条件下使镜头更加紧凑和更易操作。另外,折/反射式镜头的主要优势在于能够对色差进行控制。即使只用一种透镜材料,经过优化的折/反射式镜头也能够严格地控制色差。然而,折/反

射式镜头的研制需要克服许多设计难题,比如局部光斑、入射角和热像差以及偏振状态控制能力的保持等。通过选择多/单轴的配置方式、优化反射镜的数量与类型等细节参数,将有助于解决上述设计问题。未来曝光系统物镜的发展趋势是采用非球面元件及采用折/反射混合系统,从而在降低光学元件数量的同时,满足越来越高的成像质量要求。但这也对光学加工和系统装调提出了更

高的要求。图 11 为目前几种折/反射式镜头的可选形式。

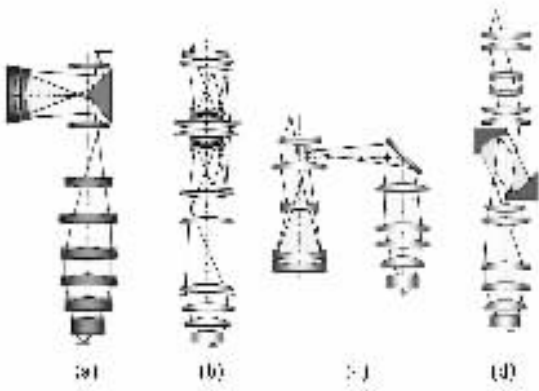


图 11 反射折射式镜头的几种形式^[24]

Fig. 11 Variety of design concepts for catadioptric system for ArF lithography^[24]

除了设计成像完善的光学系统和精选优质的光学玻璃外,制造光刻物镜的关键还在于光学加工、结构设计、装配以及相关的测试技术等。目前物镜系统的透镜片数近 30 片,最大口径近 300 mm,每个透镜从材料选择到加工、测试、装配,要求都非常严格^[27]。例如投影透镜的面形误差,装配后还需保证 PV 值 $< \lambda/50$, 20 多个空气间隔的公差均 $< \pm 1 \mu\text{m}$, 60 多个折射面的角偏心误差均 $< 3''$, 其中对成像质量影响大的部位,空气间隔公差要 $< \pm 0.5 \mu\text{m}$, 角偏心误差 $< 1''$ 。

5 国内现状及面临的挑战

我国微电子专用设备的研制起步相对来说并不落后国外,但是,由于长期以来在集成电路装备发展战略上的问题,国家在产品研发上投入的财力、人力和物力不足,使得微电子专用设备研制和样机产业化工作进展缓慢,造成我国集成电路装备技术水平与国外存在较大的差距。就总体而言,在投影光刻设备方面相对发达国家落后 3~4 代,技术水平也有近 10 年的差距。目前,我国约

有 10 家企业和研究机构从事 IC 装备的研究与开发,其研究方向和研发产品涉及材料制备、制版设备、前工序设备、后工序设备等领域,并已形成一定层次的产品研发能力和相应的技术积累,基本覆盖了 IC 制造的整个生产过程。“十五”之前,这些工作基本上都停留在 i 线和 g 线光刻设备的研发和生产上。“十五”期间,上海市制定了将微电子工业作为支柱产业的发展战略,同时国家也在上海成立了专业光刻设备研发中心,开展 193 nm 光刻机相关技术攻关及相关设备、产品的研发工作,现已完成了 193 nm 光刻机样机的装配、调试和初步的曝光实验。该样机的研制采用了国际合作的方式,曝光光学系统由法国一家公司研制完成,并在此基础上进行整机集成。从国际上高端光刻机的研发历程来看,每一代新产品的推出必然要经过基础研究、关键技术攻关、样机研发、产品产业化等几个重要阶段。虽然通过购买国外部件走整机集成的路线能够跳过基础研究与关键技术攻关阶段,缩短设备的研制周期,但始终无法系统地掌握高端光刻机的核心技术。因此,要实现我国 193 nm 投影光刻设备的自主研制,仍然需要针对光刻机的关键技术进行攻关研究,走原始创新的道路。

由以上介绍可见,193 nm 曝光光学系统几乎涉及到了应用光学领域所有的关键技术。就我国当前的应用光学发展水平而言,研制这样的系统还有相当大的难度。另一方面,近 20 年来,我国国力迅速增强,与 193 nm 曝光光学系统研制密切相关的应用光学基础技术得到了长足的发展,在光学系统设计、非球面光学表面加工、高精度光学表面检测、复杂系统装调等方面已具备了相关的技术基础。因此,组织国内优势力量协同攻关,合理分配资源,经过一段时间的艰苦努力,一定能够取得相应关键技术的突破,实现投影曝光设备的跨越式发展,从而促进国内集成电路制造行业逐步形成研发与生产相互推动的良性循环发展模式,并以光刻曝光技术的突破带动我国整个 IC 制造装备和产品进入国际一流行列。

参考文献:

[1] 王相森. 光学光刻技术的发展历程及趋势[J]. 微处理机, 2002, 11(4): 1-2.

- WANG X S. The growing and trend of optical photolithographic technology[J]. *Microprocessors* 2002 ,11 (4) :1-2.(in Chinese)
- [2] JOHN H B. Optical lithography 40 years and holding[J]. *SPIE* 2007 6520 652004/1-13.
- [3] COTE D ,AHOUSE D ,GALBURT D *et al.* . Advances in 193nm lithography tool[J]. *SPIE* 2000 4000 542-550.
- [4] <http://www.itrs.net/link/2003ITRS/litho2003.pdf>[Z].
- [5] JOS D K ,CHRISTIAN W ,RICHARD D *et al.* . Performance of a 1.35NA ArF immersion lithography system for 40-nm applications[J]. *SPIE* 2007 6520 65201Y/1-14.
- [6] TAKAYUKI U ,TAKAO T ,KAZUYUKI Y *et al.* . Benefit of ArF immersion lithography in 55 nm logic device manufacturing[J]. *SPIE* 2007 6520 652009/1-10.
- [7] NOGUCHI M ,MURAKI M ,IWASAKI Y *et al.* . Sub-half micron lithography system with phase shifting effect[J]. *SPIE* , 1992 ,1674 92-96.
- [8] SHRIRAIISHI N ,HIRUKAWA S ,TAKEUCHI Y *et al.* . New imaging technique for 64M-DRAM[J]. *SPIE* ,1992 ,1674 : 741-746.
- [9] JO F ,ANDRE E ,GEERT V *et al.* . Experimental evaluation of bulls-eye illumination for assist-free random contact printing at sub-65 nm node[J]. *SPIE* 2006 6154 615412/1-12.
- [10] LEVENSON M D ,WISWANATHAN N S ,SIMPSON R A *et al.* . Improving resolution in photolithography with a phase-shifting mask[J]. *IEEE Transaction on Electron Devices* ,1982 ,ED-29(12) :1828-1836.
- [11] CHIEN P ,CHEN M. Proximity effects in submicron optical lithography[J]. *SPIE* ,1987 ,772 35- 41.
- [12] LIN A C ,LIN B J. A study of projected optical images for typical IC mask patterns illuminated by partially coherent light [J]. *IEEE Transaction on Electron Devices* ,1983 ,ED-30(10) :1251-1263.
- [13] 石瑞英 ,郭永康. 光学邻近校正改善亚微米光刻图形质量[J]. 半导体技术 2001 3(26) 20-26.
SHI R Y ,GUO Y K. Optical proximity correction for improving pattern quality in submicron photolithography[J]. *Semiconductor Technology* 2001 3(26) 20 -26.(in Chinese)
- [14] KONSTANTIONS A ,WILHELM M. Polarization effects in immersion lithography[J]. *SPIE* 2004 5377 329-343.
- [15] MICHAEL M A ,HARRY S. Patterned grid element polarizer[P]. US Patent Application ,No. 7304719. 2007.
- [16] RAINER P ,KLAUS V ,HANS S A *et al.* . High power 193 nm excimer lasers for DUV lithography[J]. *SPIE* 2001 , 4346 577-584.
- [17] 孙晓泉 ,吕跃广. 激光对抗原理与技术[M]. 北京 :解放军出版社 2000.
SUN X Q ,LU Y G. *The Principles and Technology of Laser Countermeasures*[M]. Beijing :PLA Publishing House 2000. (in Chinese)
- [18] KAG H L ,DOH H K ,JONG S K *et al.* . Design of illumination system for ArF excimer laser step-and-scanner[J]. *SPIE* ,1998 3334 997-1004.
- [19] RYUJI H ,NOBUHITO T ,KIMIO I *et al.* . Optimization of source distribution for half-wavelength DOE[J]. *SPIE* 2006 , 6283 62832U/1-12.
- [20] MARC D H ,ROBERT E H ,JAMEY C C. Design and fabrication of customized illumination patterns for low K_1 lithography a diffractive approach[J]. *SPIE* 2001 4346 1436-1442.
- [21] 张巍 ,张晓波 ,舒方杰 ,等. 采用分步迭代算法设计制作衍射光学元件[J]. 强激光与粒子束 2005 ,11(17) :1665-1668.
ZHANG W ,ZHANG X B ,SHU F J *et al.* . Design of diffractive optical elements by step iterative algorithm[J]. *High Power Laser and Particle Beams* 2005 ,11(17) :1665-1668.(in Chinese)
- [22] 叶震寰 ,楼祺洪 ,李红霞 ,等. 准分子激光光束均匀技术[J]. 激光技术 2005 2(29) 207-212.
YE ZH H ,LOU Q H ,LI H X *et al.* . Beam homogenizing technology for UV excimer laser[J]. *Laser Technol.* 2005 2 (29) 207-212.(in Chinese)
- [23] 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 7(35) 982-985.
GUO L P ,HUANG H J ,WANG X ZH. Study of integrator rod in step and scan lithography[J]. *Acta Photonica Sinica* ,

2006 ,7(35) 982-985.(in Chinese)

- [24] 陈旭南 ,罗先刚 ,林妩媚 ,等. 工作波长 193 纳米投影光刻物镜研究设计[J]. 微细加工技术 2001 ,2 :24-26.
CHEN X N ,LUO X G ,LIN W M *et al.* . Design of 193 nm projection lithography lens[J]. *Micro Fabr. Technol.* 2001 ,
2 :24-26.(in Chinese)
- [25] TOMOYUKI M ,YASUHIRO O ,DAVID M W *et al.* . The lithographic lens :its history and evolution[J]. *SPIE* 2006 ,
6154 :615403/1-14.
- [26] WILLI U ,HANS J R ,RUSS H. Development of dioptric projection lenses for deep ultraviolet lithography at Carl Zeiss
[J]. *J. Microlithography ,Microfabr. Microsyst.* 2004 ,1(3) 87-96.
- [27] 李连进. 光刻机镜头的结构设计与装配[J]. 天津理工学院学报 2004 ,1(20) 24-26.
LI L J. Design and assembly of projection lithography lens[J]. *J. Tianjin Institute of Technology* 2004 ,1(20) 24-26.
(in Chinese)

作者简介 巩岩(1968—) 男 ,吉林梅河口人 ,博士 ,研究员 ,博士生导师 ,主要研究方向为光学系统设计 ,短波段光学技术。E-mail :gongy@sklao.ac.cn。

张巍(1978—) 男 ,黑龙江大庆人 ,博士 ,助理研究员 ,主要从事衍射光学元件设计 and 应用等方面的研究。
E-mail :wzhangys@sina.com。