

光刻对准关键技术的发展与挑战

邱俊^{1,2}, 杨光华¹, 李璟^{1,2*}, 卢增雄^{1,2}, 丁敏侠¹¹中国科学院微电子研究所, 北京 100029;²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 随着半导体产业的高速发展, 集成电路制造中光刻工艺特征尺寸极限化微缩, 套刻精度的要求也愈来愈极端严苛。本文基于影响套刻精度的核心技术, 即对准技术, 对该技术中精密测量传感系统的设计和微纳测量对象对准标记的设计两个方面进行了归纳分析, 就业内国际顶尖科技公司的技术发展进行了整理, 并详细介绍了他们在对准测量技术路径演化进程中所起到的推动作用。同时, 还对当前国内各相关技术团队在该方向的最新研究成果进行了总结。以此为基础, 进一步讨论了面向更为先进的工艺节点, 光刻对准技术的改进方向和优化思路, 从而为获得更高精度的套刻性能提供重要的技术参考。

关键词 集成光学; 对准; 标记; 套刻; 光刻; 集成电路

中图分类号 O436 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS230637

1 引言

光刻技术在集成电路制造中具有重要作用, 无论是半导体器件、光电器件, 还是微纳机电系统的制备, 都离不开光刻工艺^[1-2]。光刻机的三大性能指标中, 套刻误差是监测光刻工艺好坏的一个关键指标^[3]。随着集成电路(IC)芯片集成度的增加, 关键尺寸的不断减小, 工业界对于光刻过程中的套刻精度要求也在不断提高^[4-7]。套刻通常指光刻过程中每一层图形都需要精确转移到硅片面上的正确位置, 使其相对于上一层图形的位置误差在容限范围之内^[8]。对于投影光刻机而言, 不同层之间的误差主要取决于系统的对准精度, 因此对准系统的在线测量精度是影响套刻性能的关键因素。一般来说, 套刻误差只允许在光刻分辨力的 $1/3 \sim 1/5$ 范围以内, 而对准误差只允许在套刻误差的 $1/3$ 以内^[9]。

在大规模 IC 制造过程中, 往往需要进行反复多次光刻工艺的步骤, 这要求曝光每一层图形前都需要和硅片上已形成的图层进行精确对准^[10-12]。因此, 在目标区域内需设置用以精确测量和计算位置信息的标记, 通过对标记位置信息的捕获, 得出需要动态调整补偿的微位移信息。由于在实际工艺过程中硅片都会发生形变, 如薄膜沉积工艺导致硅片翘曲等, 为此, 需要将硅片面划分成多个区域, 并布置 20~40 个标记分布覆盖, 更加准确地确定各个曝光场的位置信息。

随着光刻技术的不断发展, 对准技术的精度要求

由 20 世纪 80 年代的亚微米量级^[13-14]发展到 2002 年的纳米量级^[15-19], 甚至 2016 年后的亚纳米量级^[20-21]。现有高端光刻设备中所采用的对准技术, 根据光线的传输方式是否经过曝光系统, 可以分为共轴系统和离轴系统^[3]。主流光刻机厂家如阿斯麦、尼康、佳能等公司均使用过共轴和离轴对准技术。阿斯麦的对准系统主要基于相位光栅的相移原理; 尼康的对准系统则根据不同的场景来更换不同测量原理的对准技术, 如基于相位光栅的光强原理^[22-24]、基于图像处理原理^[22, 25-26], 以及基于外差干涉^[22, 27-30]等; 佳能的对准系统基于相位光栅的光强原理^[31-33]或基于图像处理原理^[34]。不同对准技术路线所对应的标记设计也存在较大差异, 并且各自存在的问题和解决方案也不相同。因此有必要对该项技术的测量原理和技术路线进行整理和分析, 为其后续的发展提供参考和思路。

本文主要对光刻对准技术的研究现状展开介绍, 首先分别对阿斯麦公司、尼康公司和佳能公司的技术路线和应用进行了整理, 并介绍了适用于不同对准技术的对准标记设计方案。然后汇总了当前国内各研发团队的最新研究成果。最后分析了先进技术节点中所面临的挑战, 以及针对这些挑战, 对准技术未来可能的发展趋势。

2 国外光刻对准技术

全球的高端光刻机市场长期由阿斯麦公司 (ASML)、尼康公司 (Nikon) 和佳能公司 (Canon) 占

收稿日期: 2023-03-07; 修回日期: 2023-04-13; 录用日期: 2023-05-06; 网络首发日期: 2023-06-28

通信作者: *lijing2018@ime.ac.cn

据^[35],其光刻机核心技术在集成电路行业内具有厚实的发展基础和前瞻代表性。自 20 世纪 70 年代起,光刻机随着所用光源的改进和工艺创新先后经历了大致五代产品发展^[36-37],每次改进和创新都使得光刻机所能实现的最小关键尺寸进一步缩小,这也要求在光刻过

程中,套刻精度要不断地提高。为了解决这一问题,三家公司在光刻机更新迭代的过程中,其对准技术也在不断地改进。各对准技术的特点总结如表 1 所示,各对准标记的特点总结如表 2 所示,各公司对准技术演进路线图如图 1 所示。

表 1 阿斯麦、尼康、佳能的对准技术特点
Table 1 Characteristics of alignment technologies of ASML, Nikon, and Canon

Company	Technology	Light source	Relationship between optical path and exposure system	Characteristic
ASML	Through-the-lens (TTL)	633 nm laser	Coaxial	High signal-to-noise ratio; good process stability
	Advanced technology using high-order enhanced alignment (ATHENA)	532 and 633 nm laser	Off-axis	Good process stability; mitigate interference cancellation; strong robustness
	Smart alignment sensor hybrid (SMASH)	532, 633, 780, and 850 nm laser	Off-axis	Insensitivity to even aberrations; no reference grating; larger numerical aperture (NA); simultaneous alignment in X/Y direction
	Multi wavelength and high process adaptive alignment (ORION)	12 wavelength laser	Off-axis	More measurement channels; strong system stability; less impact due to asymmetry
Nikon	Laser step alignment (LSA)	633 nm laser	Coaxial	High sensitivity; high recognition ability
	Field image alignment (FIA)	Halogen lamp	Off-axis	Mitigate interference cancellation; simultaneous alignment in X/Y direction
	Laser interferometer alignment (LIA)	633 nm laser	Coaxial	Optical heterodyne interferometry; large lighting area; less impact due to coarse particles
Canon	TTL	laser	Coaxial	High signal-to-noise ratio; good process stability
	Off axis alignment (OAL)	Halogen lamp	Off-axis	Low workload of color difference correction design; mitigate interference cancellation

2.1 阿斯麦对准技术与对准系统的演变

阿斯麦公司的对准技术主要基于相位光栅位置测量(PGA)原理。PGA方法最早于1974年在美国专利中提出^[38],其基本原理如图2所示^[39]。入射光束照射相位光栅生成不同级次的衍射光束,衍射光束入射参考光栅发生干涉。采用光电二极管测量光束强度,并扫描相位光栅标记,生成周期性的测量信号,提取测量信号的相位,获得光栅标记的位置信息^[39]。

相位光栅位置测量中,当光栅的周期为 d 、扫描距离为 x 时,相位光栅的第 m 衍射级次的相移为

$$\varphi_m = \frac{2m\pi}{d} x, \quad (1)$$

因此,当 $\pm m$ 衍射级次发生干涉时,其相位差为

$$\Delta\varphi_m = \frac{4m\pi}{d} x, \quad (2)$$

因此,可以通过拟合测量信号的相位,确定光栅标记的位置信息,即

$$x = \frac{d}{4m\pi} \Delta\varphi_m. \quad (3)$$

阿斯麦公司的单工件台光刻机最初曾采用过同轴(TTL)对准技术。因TTL对准技术仅使用一阶衍射光,位置精度不能满足日渐提高的对准需求,为了进一步提高对准精度并改善工艺环节对测量信号的影响,设计了高衍射级次增强型对准技术(ATHENA)。后来,为兼容尼康公司和佳能公司的对准标记,推出了自参考型对准技术(SMASH)。此后,为进一步减小标记非对称性的影响,提高对准精度,开发了多波长高工艺适应型对准技术(ORION),其已被应用于阿斯麦推出的极紫外光刻机商用机型中。下面将对阿斯麦公司各个时期的对准技术及其相应的对准标记进行具体介绍。

2.1.1 TTL对准技术

图3为采用PGA方法的TTL对准技术^[40-42]。He-Ne激光器出射S偏振光,该S偏振光被偏振分束器

表 2 阿斯麦、尼康、佳能对准标记特点

Table 2 Characteristic of alignment marks of ASML, Nikon, and Canon

Company	Alignment mark	Dimension	Characteristic
ASML	Extended primary mark (XPA)	Two-dimensional	Grating with two periods; large area
	Scribe-lane primary mark (SPM)	One-dimensional	Split XPA into X and Y directions; small area
	Short SPM (SSPM)	One-dimensional	Same width as SPM mark; about half length of SPM mark; lower wafer quality than SPM
	Narrow short SPM (NSSM)	One-dimensional	Smaller width than SPM markers; same length as SSPM mark; lower wafer quality than SSPM
	SMASH marks	Two-dimensional	180° symmetry; various forms; one scan to achieve alignment in two directions
Nikon	LSA mark	One-dimensional	Including search mark and enhanced global alignment (EGA) mark; single or multiple bars composed of grid shape
	FIA mark	Two-dimensional	Including search mark and EGA mark; search mark are reticulated; EGA mark consisting of one-dimensional gratings in X and Y directions
	LIA mark	Two-dimensional	Similar with FIA marks
Canon	TTL mark	One-dimensional	Tilt to middle; 45° from scanning direction
	OAL mark	Two-dimensional	Cross alignment mark with large area or long strip alignment mark with small area; one scan to achieve alignment in two directions

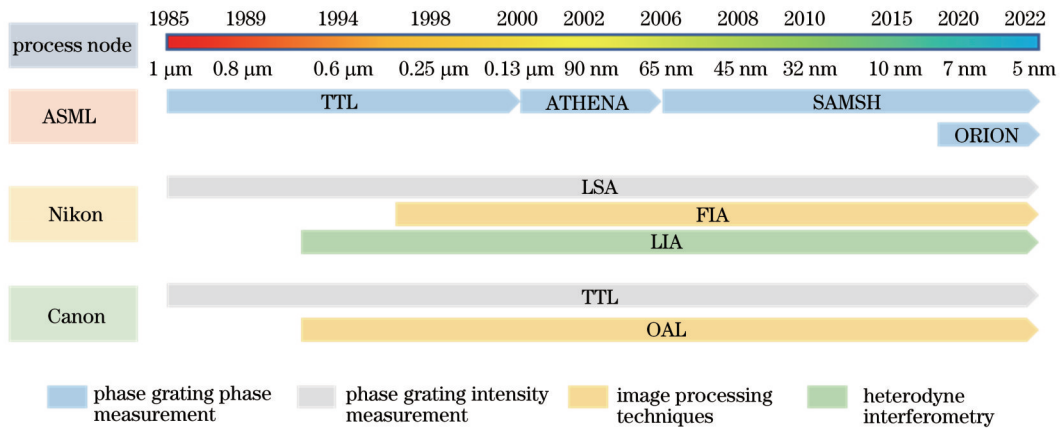


图 1 阿斯麦、尼康、佳能的对准技术演进路线

Fig. 1 Evolution route of alignment technologies of ASML, Nikon, and Canon

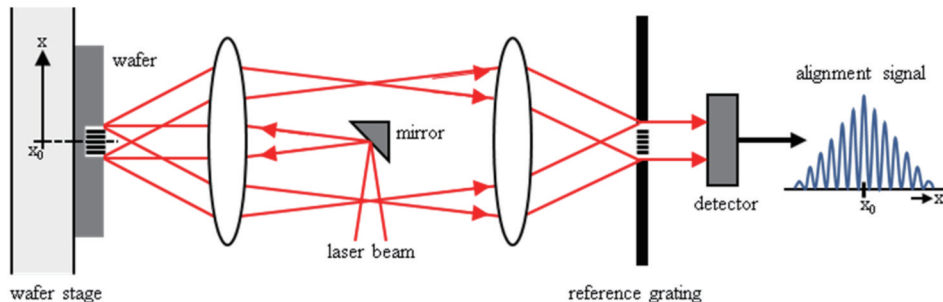


图 2 PGA 方法示意图^[39]

Fig. 2 Schematic diagram of phase grating alignment (PGA) method^[39]

(PBS)反射后,经过1/4波片变为圆偏振光,然后被投影物镜聚焦成直径1 mm左右的光斑,入射硅片对准标记。经光栅衍射后,生成不同的衍射级次。衍射光被光阑滤波,仅有±1衍射级次能够通过投影物镜继续向前传播,通过1/4波片后变为P偏振光,透过PBS后打在掩模对准标记上。透过掩模对准标记的光被分光棱镜分成两束光,其中一束光通过透镜组成像在CCD图像传感器上,另一束则通过透镜导向光电探测器。

前传播,通过1/4波片后变为P偏振光,透过PBS后打在掩模对准标记上。透过掩模对准标记的光被分光棱镜分成两束光,其中一束光通过透镜组成像在CCD图像传感器上,另一束则通过透镜导向光电探测器。

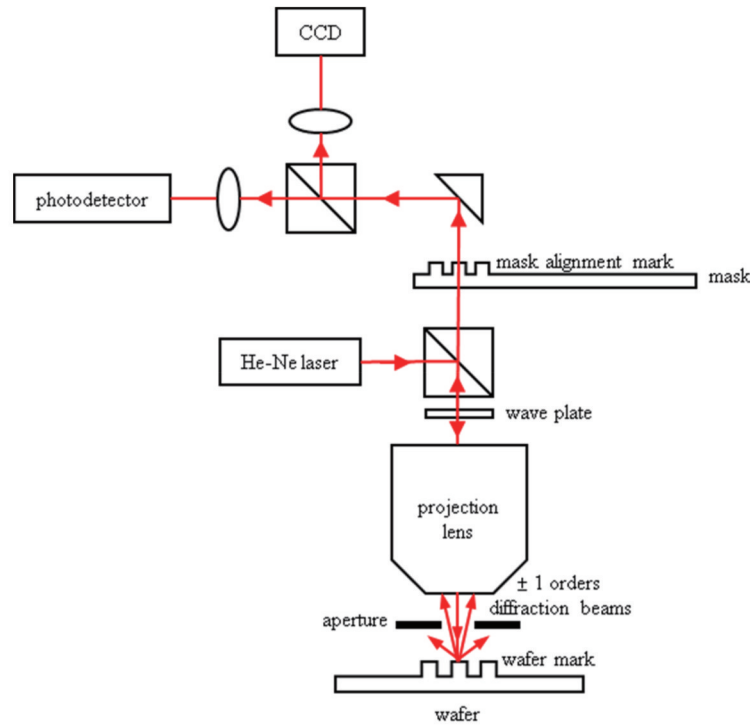


图3 TTL对准技术示意图^[41]
Fig. 3 Schematic diagram of TTL alignment technology^[41]

TTL对准技术采用空间滤波形式,仅选用±1级衍射光束产生测量信号,遮挡零级次和其他高衍射级次,提高测量信号的信噪比。采用点探测器测量光束透射强度,能够实现高速测量。在波长固定的情况下,衍射光束的衍射角较小,当工艺发生变化时,引起的偏移较小,可以忽略。

TTL对准技术采用的对准标记为四象限扩展(XPA)标记。该标记由4个象限、2种周期组成,其示意图如图4所示^[43]。使用两个略微不同的周期,可以扩大传感器的捕获范围。由于该标记较大,约为 $400\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$,因此无法放置在芯片之间的划片槽区域,目前该标记放置在传输图像传感器(TIS)上用来实现掩模对准。

随着半导体制造技术的发展,TTL对准技术开始面临新工艺的一些挑战。位置精度理论上与衍射级次成正比,TTL对准技术仅采用±1级衍射光,位置精度受到限制,需要采用更高的衍射级次提高位置精度。TTL对准技术仅采用了633 nm对准波长,当槽深满足一定条件时,会出现干涉相消的现象,导致对准信号强度为零,传感器失效。对准信号强度随槽深的变化曲线如图5所示。投影物镜是针对曝光波长优化的,而曝光波长与TTL对准技术测量波长并不相同,其对

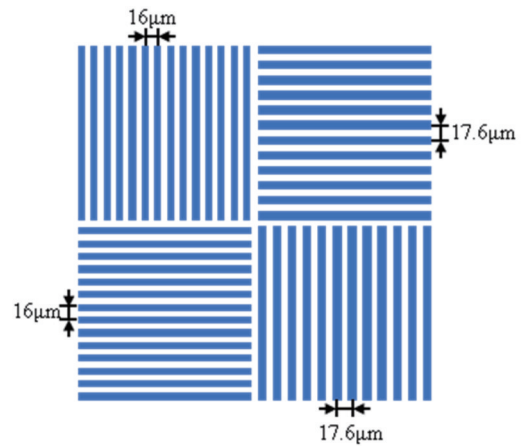


图4 由四个光栅组成的XPA标记示意图^[43]
Fig. 4 Schematic diagram of XPA mark composed of four gratings^[43]

应的焦平面不在同一位置,需要用色差校正元件做补偿,所以TTL对准技术需要和投影物镜协同设计,增大了设计难度和研发成本。

2.1.2 ATHENA

基于这些挑战,阿斯麦公司提出了ATHENA,其示意图如图6所示^[14,44-49]。光源为633 nm和532 nm的激光光源。两个对准波长的入射光通过射频调制器调

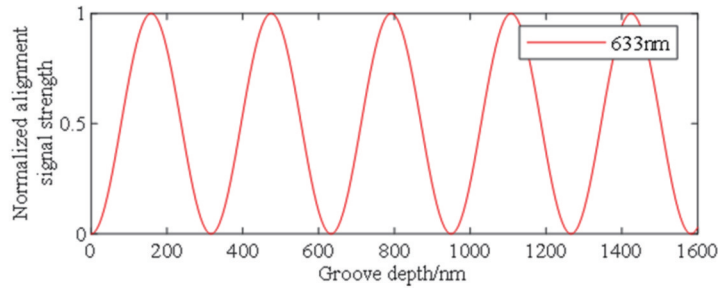


图 5 TTL 对准技术中归一化 ±1 级衍射光对准信号强度随槽深的变化曲线^[14]

Fig. 5 Curve of normalized ±1 order diffraction light alignment signal strength versus slot depth in TTL alignment technology^[14]

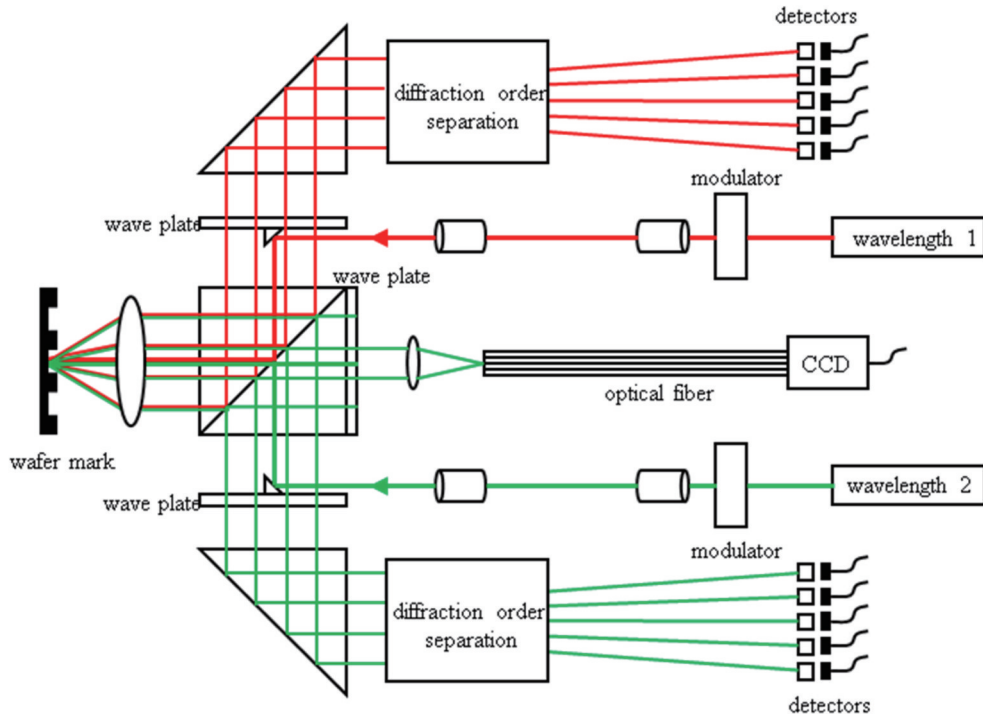


图 6 ATHENA 示意图^[45]

Fig. 6 Schematic diagram of ATHENA^[45]

制后,由光纤引入光学系统,通过反射棱镜和 PBS 合束,然后入射对准标记。经过标记衍射后,两个波长的入射光再次经过 PBS。此时两个波长的入射光偏振方向相差 90°。其中 S 偏振的入射光经过 PBS 后被向上反射出去;P 偏振的入射光透过 PBS 继续传播,两次经过 1/4 波片后变为 S 偏振光,然后被 PBS 向下反射出去。每个波长的入射光在各自方向上传播,由空间滤波器滤波,其中每个波长包含了 ±1, …, ±7 衍射级次。这些衍射级次经过光楔后传播方向彼此分开。在像面的不同位置上,正负衍射级次干涉形成干涉条纹,如图 7 所示^[40]。

该对准技术相比于 TTL 对准技术拥有明显的优势^[43]。衍射级次方面,ATHENA 使用了 7 个衍射级次,由于高衍射级次的测量周期小、分辨率高、灵敏度高,测量精度得到了提高。同时,在对准波长方面,新引入了 532 nm 对准波长以缓解干涉相消的问题,在

200~1600 nm 槽深范围内,测量信号强度不存在“零”点,如图 8 所示^[14,47]。针对 TTL 对准系统需要和投影物镜协同设计的问题,ATHENA 将对准光路与投影物镜光路分开,保证对准系统和投影物镜可独立研发。此外,在工艺稳定性方面,ATHENA 可针对不同的工艺选择合适的波长和衍射级次,减小工艺对测量精度的影响,具有一定的工艺鲁棒性^[44-45,50]。

随着对准技术的改进,对准标记的设计也随之发展。ATHENA 标记示意图如图 9 所示^[43]。针对 XPA 标记尺寸过大的问题,阿斯麦将 XPA 标记中的 X 部分和 Y 部分拆开来,形成标准型 SPM-X 和 SPM-Y 标记应用于 ATHENA,长条形的设计使其便于放置在划片槽区域。

为了进一步缩小对准标记占用的面积,阿斯麦又做了进一步的改进,推出了缩短的划片槽主要标记 (SPM),即 SSPM,以及变窄的 SSPM,即 NSSM,如图

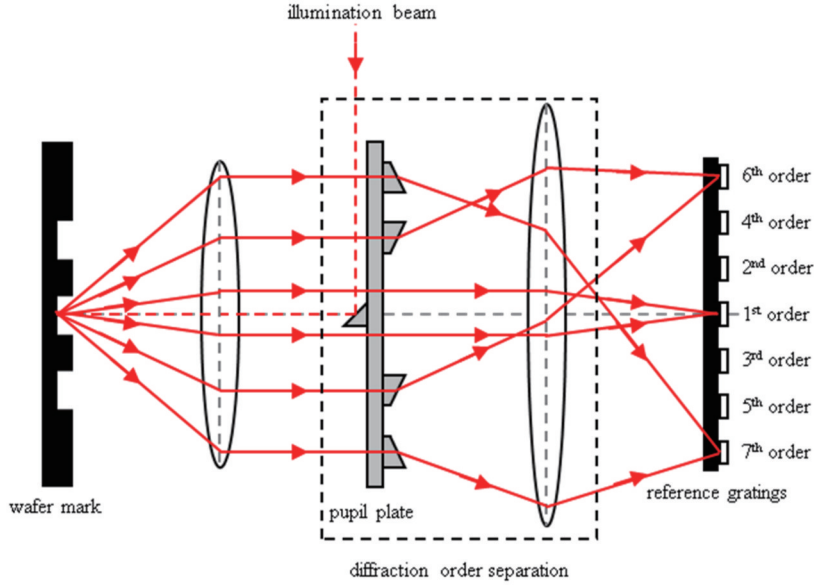


图 7 ATHENA 中衍射级分离示意图^[40]

Fig. 7 Schematic diagram of diffraction stage separation in ATHENA^[40]

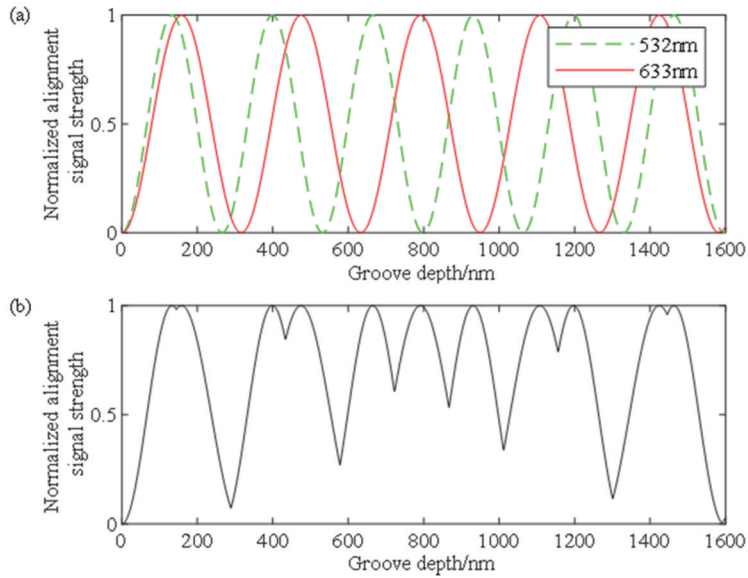


图 8 ATHENA 中归一化 $\pm 1 \sim \pm 7$ 级衍射光对准信号强度随槽深的变化曲线^[14,47]。(a)各波长对应归一化对准信号强度；(b)归一化对准信号强度最大值

Fig. 8 Curve of normalized $\pm 1 \sim \pm 7$ order diffraction light alignment signal strength versus slot depth in ATHENA^[14,47]. (a) Normalized alignment signal strength corresponding to each wavelength; (b) maximum normalized alignment signal strength

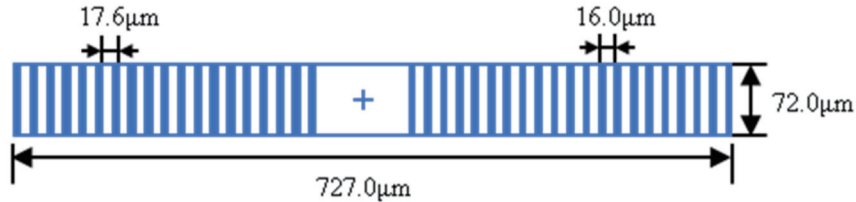


图 9 ATHENA 标记示意图^[43]

Fig. 9 Schematic diagram of ATHENA mark^[43]

10 所示^[3]。在 ATHENA 系统中,由于光斑较大,约为 700 μm ,因此 SSPM 和 NSSM 的硅片质量(WQ)值较传统的 SPM 小^[51]。因此,通过缩短标记减小了占用区域,通过变窄标记减小了与器件的串扰,但是对于捕获

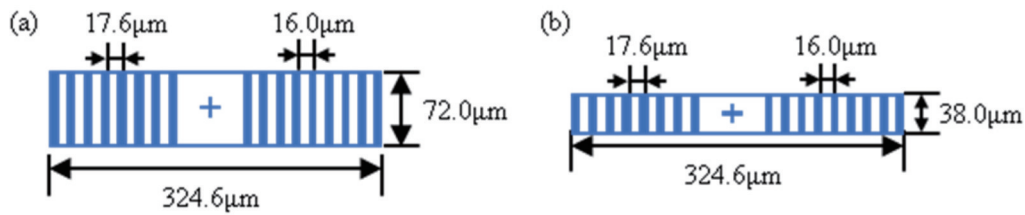


图 10 SPM 标记改进示意图^[3]。(a) SSPM-X 标记示意图(图像旋转 90°即为 SSPM-Y 标记);(b) NSSM-X 标记示意图(图像旋转 90°即为 NSSM-Y 标记)

Fig. 10 Schematic diagram of SPM mark improvement^[3]. (a) Schematic diagram of SSPM-X mark (Image rotated by 90° is SSPM-Y mark); (b) schematic diagram of NSSM-X mark (Image rotated by 90° is NSSM-Y mark)

标记提出了更高的要求。

随着技术节点的不断缩小,新工艺和新材料的推出又给对准技术带来了额外的问题。多重曝光技术的发展需要引入硬掩模材料,但这些材料仅透过近红外光。对准标记设计方面,需要优化光栅周期和光栅方向,研究具有任意周期和方向的光栅。另一方面还需要兼容主流公司的对准标记。不同厂家光刻机使用的对准标记形状完全不同,甚至同一个厂家不同型号光刻机使用的对准标记也可能略有差别,如果要兼容主流厂家所有的标记形状,需要提出一种可拆卸或可更换参考光栅的设计,而这些将对产品维护构成挑战。

2.1.3 SMASH 及 ORION

基于上述问题,阿斯麦提出了基于自参考干涉的 SMASH^[15,52-53]。该技术取消参考光栅,通过自参考干

涉仪生成两个旋转 180°光栅标记的像,可以兼容周期在 1.6~16 μm 范围内、满足 180°旋转对称的任何对准标记。并引入了近红外波段 780 nm 和 850 nm 光源,解决硬掩模材料吸收可见光问题。此外,SMASH 的物镜数值孔径(NA)为 0.6,可以收集更多的衍射级信号,提高对准精度。

SMASH 的测量原理,如图 11 所示^[39,53]。光源分别包含 532、633、780、850 nm 四个波长,在物镜镜组的作用下照射对准标记。对准标记将入射光衍射为 $\pm 1, \dots, \pm 11$ 衍射级次,它们由物镜镜组准直并进入自参考干涉仪。自参考干涉仪形成输入信号的两个图像,二者重叠在一起,并且相对旋转 180°使相反衍射级重叠,最后通过一个点探测器测量所有衍射级干涉生成的测量信号。

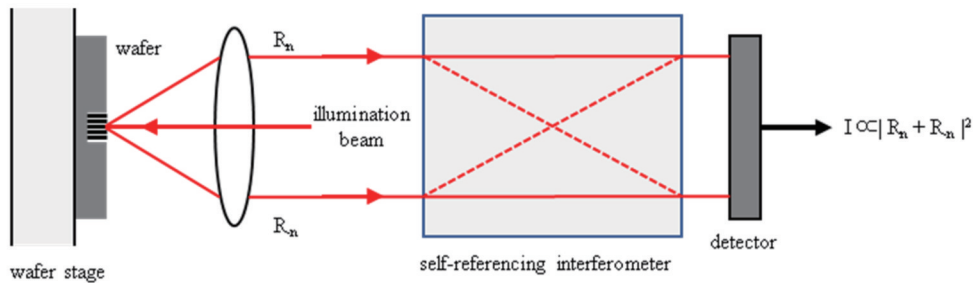


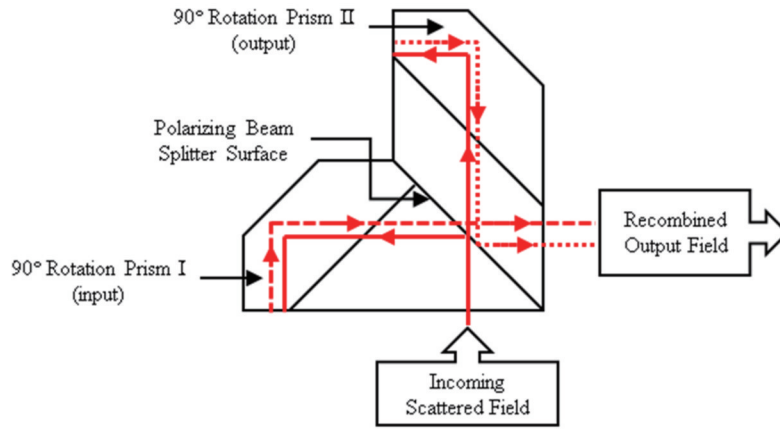
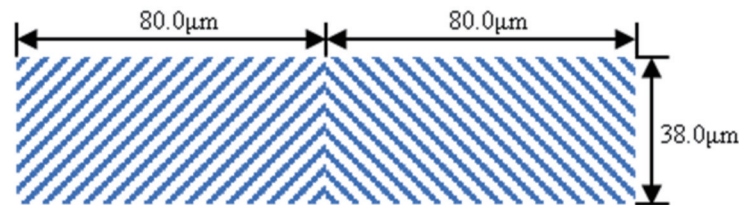
图 11 SMASH 原理示意图^[39,53]

Fig. 11 Schematic diagram of SMASH^[39,53]

自参考干涉仪通常由两个屋脊棱镜和一个 PBS 组成,其结构如图 12 所示^[53]。入射光进入自参考干涉仪后经 PBS 分光面,分为 P 偏振光和 S 偏振光,并各自沿光路在屋脊棱镜中反射三次后经 PBS 分光面出射。此时,两束光波面旋转 180°,但是由于偏振方向正交,须经过偏振片后发生干涉。最后通过扫描标记获得周期性变化的测量信号。

与 TTL 对准技术和 ATHENA 相比较,SMASH 中的自参考干涉仪的两出射波面 180°旋转对称特性,使得系统对偶次像差不敏感,如硅片离焦等。且由于对准结构中没有参考光栅,使得标记设计更加灵活,并且兼容现有各种对称对准标记。此外,更大 NA 使得系统可以接受更高衍射级次,提高对准精度。

SMASH 可以采用与 ATHENA 类似的 SSPM 和 NSSM。对于 SMASH 系统来说,由于光斑大小约为 36 μm,捕获对准标记的难度更大。由于 SMASH 是基于自参考相位光栅的对准原理,不需要参考光栅,只要对准标记表现出 180°对称的特征,就可以实现对对准标记中心位置的准确测量,因此可以使用相对大量的不同对准标记形式,如平行线、网格图案或棋盘格栅等,可以兼容主流厂家的对准标记^[52]。SMASH 对准标记如图 13 所示^[3],它是由一系列旋转了 45°的等间距线条构成。该标记的最大优点是,一次扫描就可以同时确定 X 和 Y 方向的位置。而 2.1.2 中介绍的 SPM-X 和 SPM-Y 标记是分开的,必须分别测量。因此 SMASH 对准效率大大提高。

图 12 SMASH 中干涉仪模块结构示意图^[53]Fig. 12 Schematic diagram of interferometer module structure in SMASH^[53]图 13 SMASH 标记示意图^[3]Fig. 13 Schematic diagram of SMASH mark^[3]

目前, SMASH 广泛用于中高端光刻机中^[54]。四种波长光源的使用使得 SMASH 能够避免特定波长光束被材料吸收的问题。此外, SMASH 在光栅标记周期和方向方面提供了足够的设计自由度, 满足了大部分厂商标记的设计。但是随着技术节点的不断缩小, 为提高对准精度需减小标记周期, 当标记周期只有 $1\ \mu\text{m}$ 左右甚至接近于测量波长时, 衍射光束超出 SMASH 系统的捕获范围。另一方面, 当标记因工艺步骤导致非对称性时, 正负衍射级次的相位不能完全相等, 导致产生对准位置偏差^[55-57]。随着特征尺寸的进一步缩小, 标记非对称性问题逐渐成为制约对准精度的主要因素, 需要对对准技术进一步探索改进。

2017 年, 阿斯麦公司进而推出了 ORION, 为面向 $7\ \text{nm}$ 技术节点的浸没式光刻机 NXT: 2000i 实现 $1.4\ \text{nm}$ 套刻精度提供了技术支撑^[8]。至今为止, ORION 被应用于 NXT: 2050、NXT: 3400C 等型号的光刻机。目前公开的文献资料较少, 下面基于可获取的少量公开信息对 ORION 进行简要介绍, 与 SMASH 相对照有以下几点改进^[58-59]:

1) 引入更多的测量通道, 测量波长从 4 个扩展为 12 个^[59], 每个测量波长可以选择 TE 偏振和 TM 偏振, 增加了系统的稳定性;

2) 光学系统的 NA 从 0.6 增加到 0.7, 可以适用于更小周期的标记, 提高了测量精度;

3) 改进了机械设计, 整个系统更加稳定, 减小了振

动的影响;

4) 采用了优化波长权重法减小标记非对称性的影响, 提高了工艺的鲁棒性。

ORION 仍然基于 PGA 原理^[58]。

综上, 阿斯麦公司各代对准技术的性能参数总结如表 3 所示。从表中可以看出, 为了保证测量的稳定性和高精度, 系统测量波长的种类和衍射级次的数量都随着技术更迭而增加, 光斑尺寸则随之减小。为了使系统能够捕获更高衍射级次的衍射光, 透镜的 NA 也在逐步增加。

2.1.4 对准精度提升方法研究

为提升对准精度, 阿斯麦公司从软件、算法、模型、布局优化等方面进行了研究。首先采用 D4C (design for control) 软件设计、筛选满足要求的对准标记; 然后通过最佳颜色权重 (OCW) 方法, 即给不同波长、偏振的测量结果配置权重, 减小标记非对称性对测量精度的影响; 采用高阶硅片对准 (HOWA) 模型描述硅片的形状和位置, 再通过硅片对准模型映射 (WAMM) 方法, 即根据对准测量结果和套刻测量结果的相关性, 进一步分离标记形变和硅片形变; 最后通过优化标记的布局, 在对准精度和生产效率之间取得平衡, 优化后采用 HOWA 模型确定曝光场位置, 提高对准精度。下面具体介绍。

1) D4C 软件

D4C 软件最初用于设计套刻标记, 后来随着对准

表 3 阿斯麦对准技术参数特点

Table 3 Parameter characteristics of ASML alignment technologies

Technology	TTL	ATHENA	SMASH	ORION
Process node /nm	130	90	65-5	7-5
Measuring wavelength /nm	633	532, 633	532, 633, 780, 850	12 wavelengths
Capture range / μm	± 44	± 44	± 44	± 44
Spot size / μm	700	700	~ 36	< 36
Diffraction order range(@period is 16 μm)	± 1	± 7	± 11	± 13
NA	0.05	0.3	0.6	0.7
Interference generation method	Reference grating	Reference grating	Self-reference interference	Self-reference interference

精度要求的提高,逐渐用于对准标记的设计过程。图 14 为 D4C 软件评价、筛选标记的主要依据^[60-61],包括:可加工性(Printability)、可探测性(Detectability)、与产品结构的一致性(Device matching),以及工艺鲁棒性(Process robustness)。图 15 为 D4C 软件设计标记的流程图^[57],由图中可知,首先输入标记的类型,确定细分方式,如扫描方向细分、非扫描方向细分以及两个方向同时细分(图 16)^[61];同时还需要考虑标记细分的尺

寸与加工结构的相似性,保证标记结构和产品结构在光刻过程的一致性,且通过光学邻近效应修正(OPC)等优化工艺窗口;然后再考虑后处理过程中膜层厚度的变化,以及处理过程中标记形貌的变化和产品结构变化的一致性;然后再经过传感器光学模型,确定其测量信号的强度保证其可探测性;最后通过计算标记的关键性能指标(KPI)值和各波长测量结果的差异等,筛选标记。

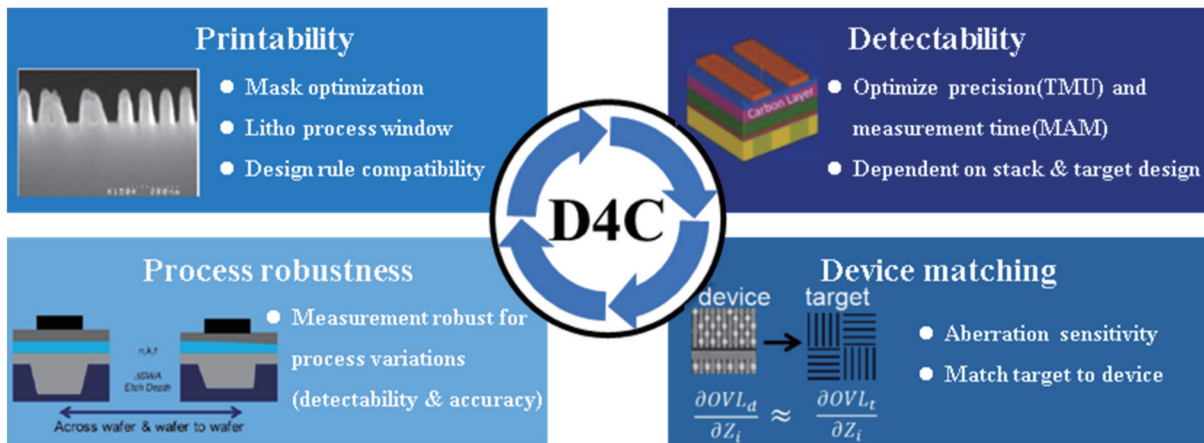


图 14 D4C 软件评价、筛选标记依据^[60-61]

Fig. 14 Basis of D4C software evaluation and screening marks^[60-61]

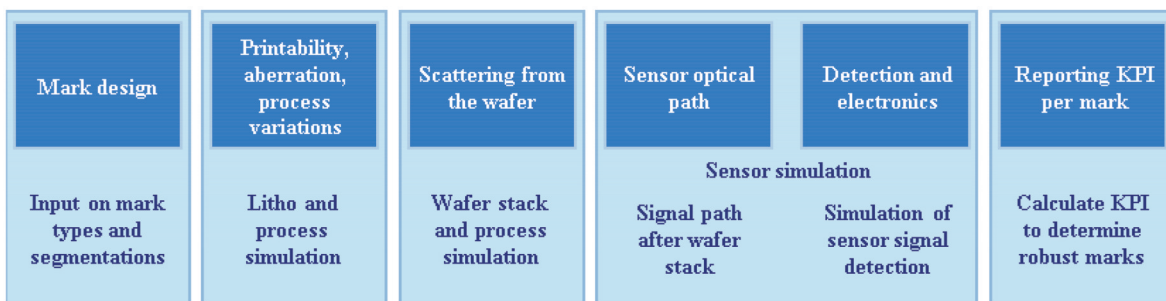


图 15 D4C 软件设计标记流程图^[57]

Fig. 15 Flow chart of D4C software design marking^[57]

2) OCW 方法

标记在加工以及后处理过程中,如刻蚀、化学机械抛光等,发生非对称形变,引入额外的相位变化,导致位置误差^[55-57],如图 17 所示。由于非对称形变引入的

相位变化对于不同波长和偏振具有不同的敏感度,因此,可以通过给不同波长和偏振的测量结果配置权重,获得一个对于标记形变最不敏感的组合,以此来减小标记形变对于测量精度的影响,即 OCW 方法^[57-58, 62-63]。

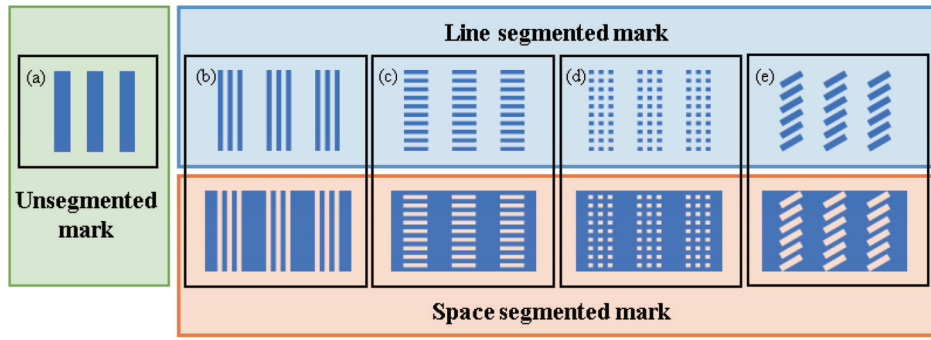


图 16 标记的类型以及细分方法^[61]。(a)无细分标记;(b)扫描方向细分标记;(c)非扫描方向细分标记;(d)扫描方向和非扫描方向同时细分标记;(e)倾斜细分标记

Fig. 16 Type of mark and segmented method^[61]. (a) Unsegmented mark; (b) scan direction segmented mark; (c) non-scan direction segmented mark; (d) scan direction and non-scan direction segmented marks; (e) inclined segmented mark

该方法的基本原理如图 18 所示^[63]。该算法通过机器学习的方式,利用大量硅片对准校正参数和对准精度数据进行学习、训练、分析和验证,对各波长的权重进行最优配置。2017 年,ORION 传感器首次配备了

OCW 模块。通过 OCW 优化各波长在组合信号中的权重,并将其应用于对准校正过程中。根据实际测试^[58],证明了 OCW 可以将硅片间的对准误差减少约 0.8 nm。

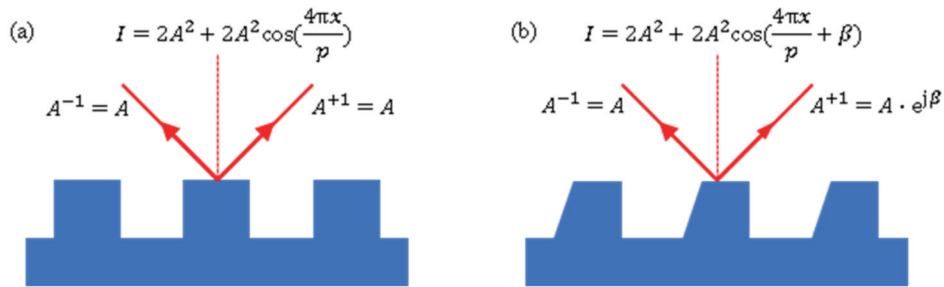


图 17 标记非对称形变导致位置误差^[57]。(a)标记对称情况示意图;(b)标记非对称情况示意图

Fig. 17 Mark asymmetric deformation resulting in position error^[57]. (a) Schematic diagram of marking symmetry; (b) schematic diagram of marking asymmetry

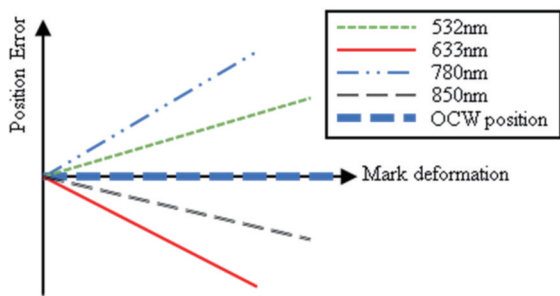


图 18 OCW 方法原理图^[63]

Fig. 18 Schematic diagram of OCW method^[63]

3) WAMM 方法

对准模型被用于准确描述硅片的形状和位置,以提高对准精度。阿斯麦公司的 HOWA 模型通过拟合特定阶次多项式模型来获得对准标记测量值。模型的阶次越高,需要计算的模型参数越多,典型的三阶模型(HOWA3)包含 20 个参数。该模型主要包含以下三个部分^[64]:

- ① 硅片的物理形状和位置;

② 非对准标记区域的模型外推误差,如硅片边缘区域;

③ 对准标记测量误差,如工艺引起的对准标记非对称形变。

其中②与③与标记形变相关而不反映硅片形变,将其作为对准参考会引入额外的对准误差,因此需要对模型参数进行筛选,仅使用①作为对准测量参考。为了实现该目标,阿斯麦在 HOWA 模型的基础上引入了 WAMM 算法^[58,64-65]。其基本原理为:通过分析特定参数对应的对准与套刻的相关性判断其分类,若二者没有明显相关性,即该参数仅影响了对准误差而没有出现在套刻误差中,因此该参数属于①类;反之则说明该参数同时影响了对准误差和套刻误差,即属于②或③,需要被滤除。

基于分析结果生成模型映射矩阵 M ,其对于对准模型的效果如图 19 所示^[64]。例 1 中对准模型仅包括硅片形变,即①类参数,经矩阵 M 过滤后并没有产生变化;例 2 中对准模型仅包括标记形变,即②和③类参数,经矩阵 M 过滤后对准模型变为 0;例 3 中对准模型

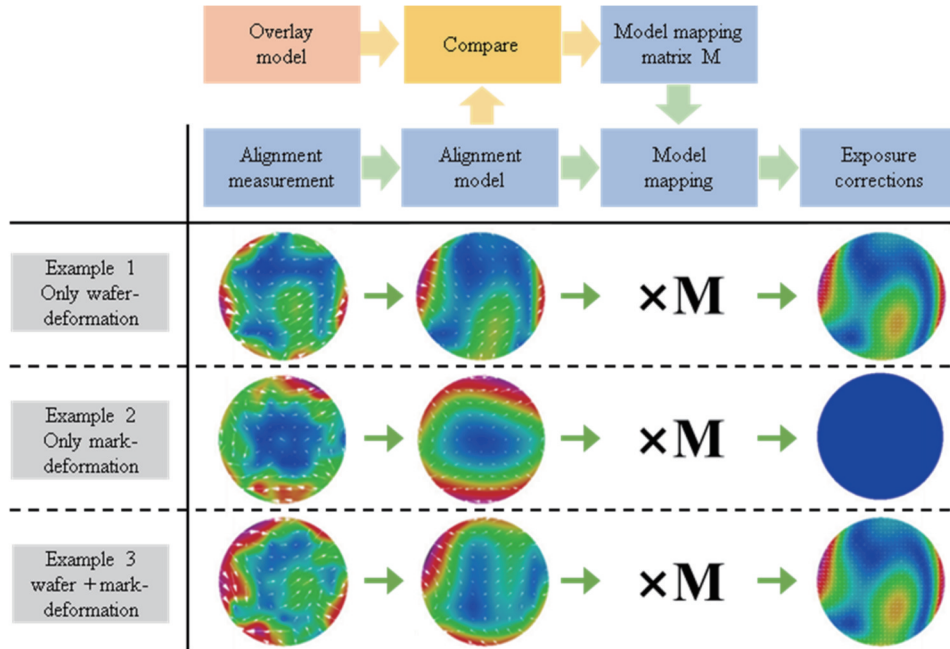


图 19 WAMM 模型映射矩阵 M 过滤效果仿真实验验证结果^[64]

Fig. 19 Simulation results of filtering effect of WAMM model mapping matrix M ^[64]

包括全部的三类参数,经矩阵 M 过滤后仅保留①类参数,与例 1 结果相同。

当 WAMM 算法应用于制造过程中时,可以在不增加对准采样个数,不需要额外的对准标记的条件下,提升光刻机的对准精度^[58,64-65]。

4) 对准标记布局优化

如 2.1.4 节所述,为了满足不断提高的对准精度要求,对准模型逐渐发展以准确描述硅片位置和形变。为了确保高阶模型的多项式函数能够被准确拟合,需要在硅片上放置更多、更密集的对准标记,对准时间也会随之增长。在大批量生产过程中,为满足吞吐量要求,要求测量对准标记所需的时间不能超过前一批次硅片曝光所需的时间^[66]。因此,需要对标记布局进行优化,在对准精度和生产效率之间取得平衡。

对准标记布局优化方案通常分为基于数据^[67-69]和基于几何^[68,70]的方案。基于数据的布局优化方案采用迭代方法优化标记位置,以尽可能少的标记满足对准要求。该方法可以优化特定硅片的标记布局,但需要基于密集测量产生的大量数据集。基于几何的布局优化方案通常依赖于硅片的曝光区域和芯片的布局以及对准模型等几何信息。该方法根据最优几何分布生成标记布局方案,但可能会忽略硅片的局部特征。

阿斯麦公司提出了一种基于计量点迭代的对准标记布局优化方法^[69]。该方法主要包括以下步骤:

- ① 确定初始计量点位置;
- ② 根据当前计量点位置划定禁区范围,确定多个候选计量点位置;
- ③ 对每个候选计量点位置的信息量提升效果进行评估,将信息量提升最大的候选计量点位置纳入计

量点位置集合;

④ 判断当前计量点提供信息量能否满足对准需求,若不能则重复步骤②、③,反之则迭代完成,计量点位置即为优化后的对准标记布局位置。

该方法需要合理选择初始计量点数量和禁区范围半径,以保证最终布局方案在标记均匀性、信息性和算法速度之间达到相对平衡。布局优化后采用 HOWA 模型确定曝光场位置,提高对准精度。

2.2 尼康的对准技术

尼康公司主要有激光步进对准(LSA)、场像对准(FIA)、激光干涉对准(LIA)三种对准技术。其中 LSA 作为标准配置,FIA 和 LIA 作为可选配置^[22]。下面分别对这三种对准技术及其所使用的对准标记进行介绍。

2.2.1 LSA

LSA 是指激光步进对准,它是一个暗场下的衍射光或散射光的探测系统^[71]。其三维示意图如图 20(a)所示^[23]。入射光被 PBS 分成沿 X、Y 方向相互垂直的两束偏振光。X、Y 方向光路对称,X 方向对准光路原理示意图如图 20(b)所示^[24]。当执行对准操作时,工件台带动硅片在 XY 平面扫描,激光干涉仪将记录入射光位置。数字信号处理系统(DSP)将±1 级衍射光信号与入射光位置相关联,得到硅片上对准标记的具体位置。

尼康对准过程包括搜索对准和增强型全局对准(EGA)两个步骤^[24]。通过搜索对准可以计算出硅片的旋转,通过 EGA 则可以得到硅片在 X 方向和 Y 方向的偏移量。对准标记也需要分别针对这两个步骤进行设计。LSA 的对准标记示意图如图 21 所示^[24]。

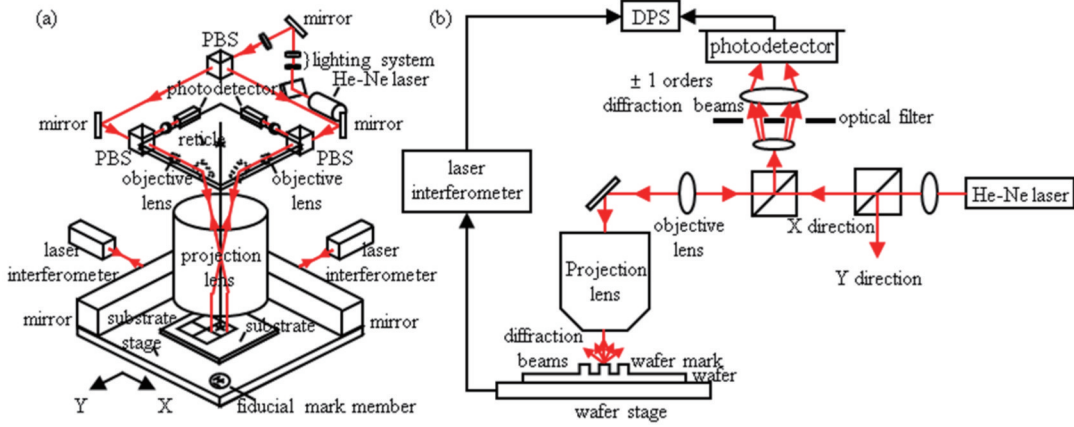


图 20 LSA 示意图。(a) 三维示意图^[23]；(b) X 方向原理示意图^[24]

Fig. 20 Schematic diagram of LSA. (a) Three-dimensional diagram^[23]；(b) schematic diagram of X direction^[24]

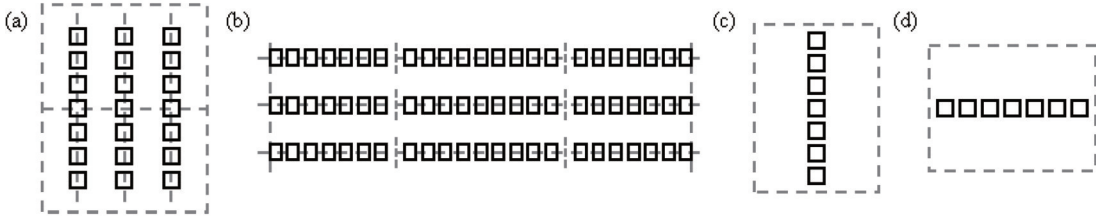


图 21 LSA 标记^[24]。(a) Search 标记-X；(b) search 标记-Y；(c) EGA 标记-X；(d) EGA 标记-Y

Fig. 21 LSA mark^[24]. (a) Search mark-X；(b) search mark-Y；(c) EGA mark-X；(d) EGA mark-Y

LSA 的优点是高灵敏度和高识别能力,其缺点在于光线在衬底和光刻胶之间多次反射会形成干涉条纹,影响对准信号。在处理金属层时,由于其表面相对粗糙,且金属层的对准标记容易受到化学机械抛光等工艺的影响发生不对称的变化,所以容易产生干扰信号。而在对准标记比较浅时,标记产生的衍射光较弱,探测器信号强度低,当遇到干扰信号时容易发生对准报警。针对非对称标记及较浅标记的测量问题,尼康分别采用 FIA 和 LIA 对其进行补充辅助,但增加了系统复杂度和维护难度。

2.2.2 FIA

FIA 即场像对准技术,在尼康 NSRG7/I7 系列光刻机开始采用^[72]。FIA 原理示意图如图 22 所示^[22]。卤素灯发出的白光通过滤光片照射到硅片对准标记上。衍射光被分束器反射,依次通过相位差板、成像透镜、指标板后成像在 CCD 上,再传送至图像处理单元 (IPU) 以获得对准标记的相对位置。

相位差板是在 NSR2205I14 型设备的 FIA 光学系统上首次安装^[73],环形孔径光阑与相位差板构成类似于相衬显微镜的结构,从而提高图像对比度^[25,73],该功能主要应用在测量高度差较小的标记上。

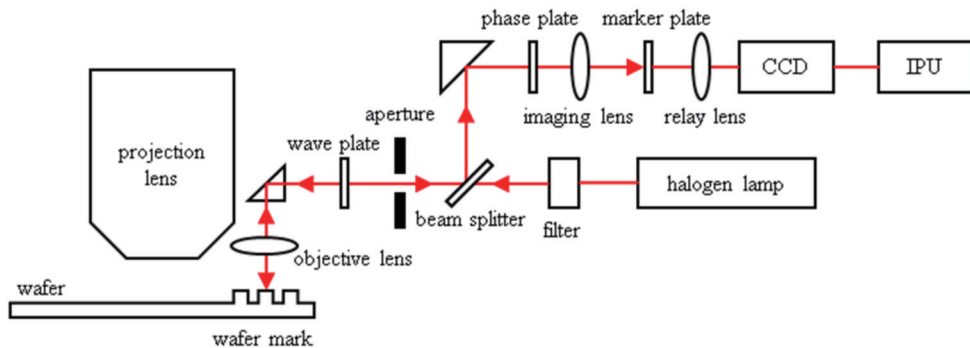


图 22 FIA 原理示意图^[22]

Fig. 22 Schematic diagram of FIA^[22]

FIA 的对准标记可以采用 X、Y 方向共同组合的对准标记,通过单次对准实现两个方向的位置测量。

FIA 的标记示意图如图 23 所示^[73]。搜索标记为互相垂直的条形光栅组成的网状标记。EGA 标记整体呈

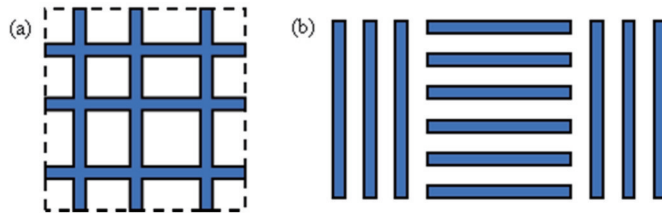


图 23 FIA 标记^[73]。(a) Search 标记; (b) EGA 标记
Fig. 23 FIA mark^[73]. (a) Search mark; (b) EGA mark

长条形,可以放置于硅片的狭窄区域。

FIA 采用宽光谱光源照明,能避免“干涉相消”现象。测量信号通过图像处理能减少非对称性对准标记引起的对准误差,提高对准精度。其缺点在于对低对比度、低台阶差异的对准标记其检测能力较差。

2.2.3 LIA

LIA 是激光干涉对准,它通过利用两束频率相差

不大的激光束照射硅片对准标记并发生衍射,特定级次的衍射光相干产生外差干涉条纹,作为对准信号被探测器捕获。将对准信号与照射参考光栅获得的参考信号进行对比,根据二者的相位差即可得到硅片对准标记相对于参考标记的位置偏移量^[74]。其原理示意图如图 24 所示^[22]。

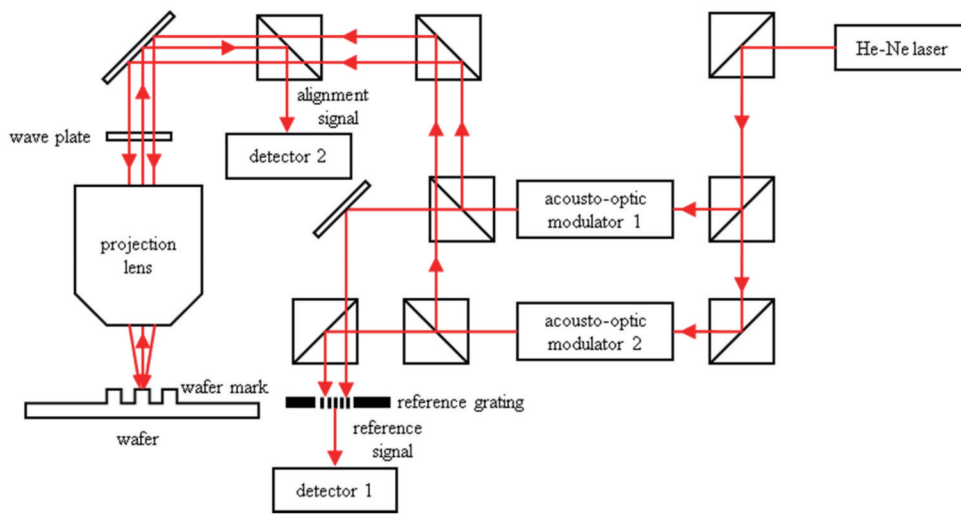


图 24 LIA 原理示意图^[22]
Fig. 24 Schematic diagram of LIA^[22]

LIA 的对准标记设计与 FIA 类似,在此不再重复说明。由于在较宽的照明区域内,只有特定空间频率范围内的信号被采集用于 LIA 对准,表面粗糙颗粒所产生的信号的空间频率与对准信号相差较大,因此 LIA 受表面粗糙颗粒的影响较小,适用于表面粗糙的硅片。相比于 FIA, LIA 从较大的照明区域采集信息,而不是仅识别标记的边缘位置信息,因此 LIA 也适用于沟槽较浅的对准标记和极低对比度的金属层^[74]。

综上所述,尼康公司的三种对准技术分别适用于不同特征的对准标记,其特点对比如表 4 所示。LSA 基于相位光栅的光强测量原理,具有产出高、精度高等优点,能够适用于大多数类型的对准标记;FIA 采用宽带光源,能够避免“干涉相消”现象发生,主要用于粗糙平面及标记不对称的硅片;LIA 采用外差干涉技术,能够适用于沟槽较浅的标记和极低对比度的金属层。

表 4 尼康对准技术参数特点

Table 4 Parameter characteristics of Nikon alignment technologies

Technology	LSA	FIA	LIA
Light source	He-Ne laser	Halogen lamp	He-Ne laser
Illumination mode	Dark field illumination	Bright field illumination	Bright field illumination
Technology	Phase grating intensity measurement	Image processing techniques	Heterodyne interferometry
Scope of application	Most marks	Rough plane/Asymmetric marks	Shallow groove marks/ Metallic layer

2.3 佳能的对准技术

佳能公司的对准方案基于光强检测原理,采用光学系统将硅片对准标记成像在 CCD 表面,结合模式识别算法得到对准标记的坐标。佳能公司的对准技术主要分为同轴式 TTL 和离轴式 OAL 对准技术,下面对这两种对准技术进行介绍。

2.3.1 TTL 对准技术

TTL 对准技术是利用投影物镜来完成对准的一种对准技术,在 20 世纪 80、90 年代被各大光刻机公司所广泛采用。佳能公司的 TTL 对准技术^[31-33]与 2.1.1 节中阿斯麦公司基于 PGA 原理的 TTL 对准技术不同,其基于相位光栅的光强原理进行对准,通过测量±1 级衍射光的光强变化确定标记位置,具有较高的灵敏度。其原理示意图如图 25 所示^[31]。

佳能公司的 TTL 对准标记如图 26 所示^[31]。 $W_1 \sim W_4$ 和 $M_1、M_2$ 分别为硅片和掩模板上的对准标记。当入射光照射到标记位置时会产生脉冲信号,根据硅片脉冲信号与掩模板脉冲信号的时间间隔即可分析得

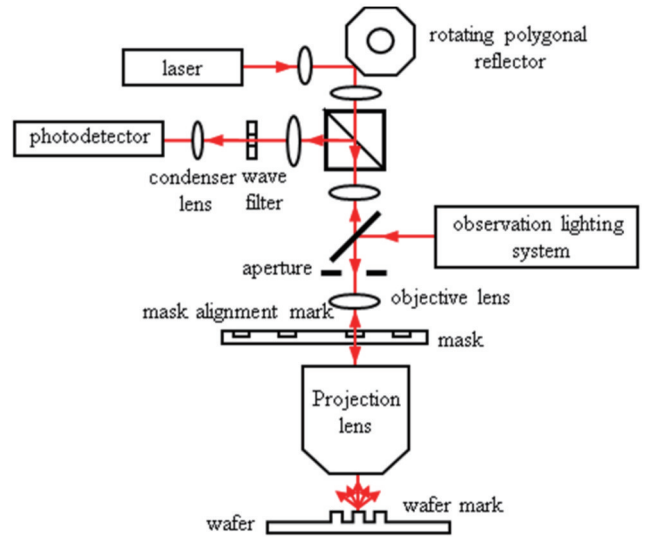


图 25 TTL 对准技术原理示意图^[31]

Fig. 25 Schematic diagram of TTL alignment technology^[31] 到硅片与掩模板的相对位置,从而实现硅片对准。



图 26 TTL 对准标记示意图^[31]

Fig. 26 Schematic diagram of TTL alignment mark^[31]

2.3.2 OAL 技术

OAL 技术是离轴式对准技术,其原理与 2.2.2 节中的 FIA 类似。单工件台光刻机的 OAL 原理示意图如图 27 所示^[34],采用的宽光谱光源可减小光刻胶上下表面反射光发生干涉对测量结果的影响。对准光束不经过投影物镜,所以只需对光源波长做色差校正,简单易用。如果运用双工件台技术^[75-76],OAL 可布置在空间较大的测量平台,可以进一步设计提高对准精度的复杂光路。

常见的 OAL 对准标记如图 28 所示^[77-78]。其中十

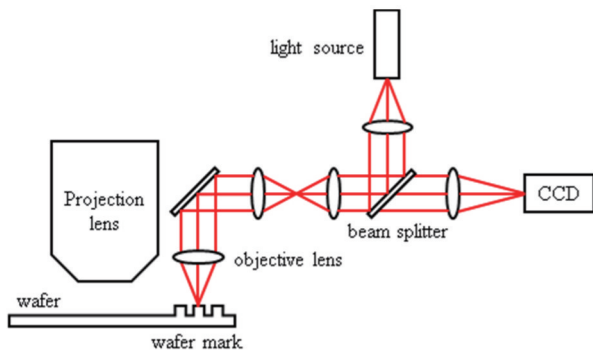


图 27 单工件台光刻机的 OAL 原理示意图^[34]

Fig. 27 Schematic diagram of OAL for single stage lithography machine^[34]

字形对准标记由 X 方向和 Y 方向的条形标记组成。该标记能够一次扫描实现 X、Y 方向的对准,大大提高对准效率。长条形对准标记面积更小,能够放置于硅片上较小的狭缝中。

2.4 国外光刻对准技术对比

阿斯麦、尼康、佳能三家公司的光刻对准技术原理并不相同,下面对各公司技术特点进行对比。

阿斯麦公司的光刻对准技术包括 TTL、ATHENA、SMASH、ORION 四种。主要基于 PGA 原理,根据相位光栅的光强拟合相位确定位置,可采用高衍射级次提高测量精度,且余弦拟合可以减小噪声的影响;并且采用点探测器,与面阵探测器相比,更适用于弱信号测量,测量速度快;但对浅槽深标记,测量信号对比度较低,且较易受到标记形变的影响。

尼康公司的光刻对准技术包括 LSA、FIA、LIA 三种。其中 LSA 基于相位光栅的光强测量,具有高灵敏度,但较易受到杂散光的影响;FIA 基于图像测量,可以测量较小深度的标记,但容易受到光学系统像差的影响,且需采用面阵探测器,测量速度较慢;LIA 基于外差干涉测量,可以降低硅片表面粗糙颗粒造成的影响,对空气扰动和信号强度变化不敏感,即使对于较弱的信号仍可保持较好的重复性,但系统相对复杂。

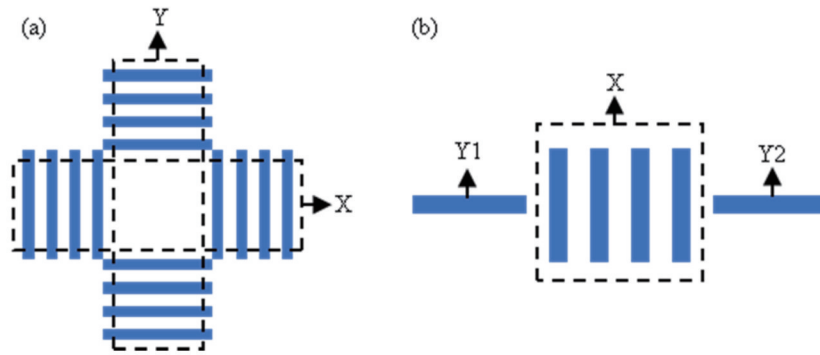


图 28 OAL 对准标记。(a) 十字形对准标记^[77]; (b) 长条形对准标记^[78]

Fig. 28 OAL alignment mark. (a) Cross alignment mark^[77]; (b) long strip alignment mark^[78]

佳能公司的光刻对准技术包括 TTL 和 OAL 两种。其中 TTL 基于相位光栅的光强测量,通过模式识别算法得到对准标记的位置,同样具有高灵敏度,但是容易受到杂散光的影响。而 OAL 技术基于图像测量,容易受到光学系统像差的影响。

3 国内研究团队的对准技术探索

目前,国内开展基于 PGA 原理进行技术研发的团队主要有上海微电子装备有限公司(SMEE)、中国科

学院光电技术研究所(IOE)、哈尔滨工业大学(HIT)、中国科学院上海光学精密机械研究所(SIOM),以及中国科学院微电子研究所(IME)。

3.1 SMEE 的多光栅标记对准系统

2009 年,SMEE 提出一种多光栅标记对准系统,该系统基本结构如图 29(a)所示^[79],其对准标记结构示意图如图 29(b)所示^[79]。其中大周期光栅的衍射光用于捕获光栅标记和粗对准,小周期光栅的衍射光用于粗对准基础上的精对准,提高测量精度。

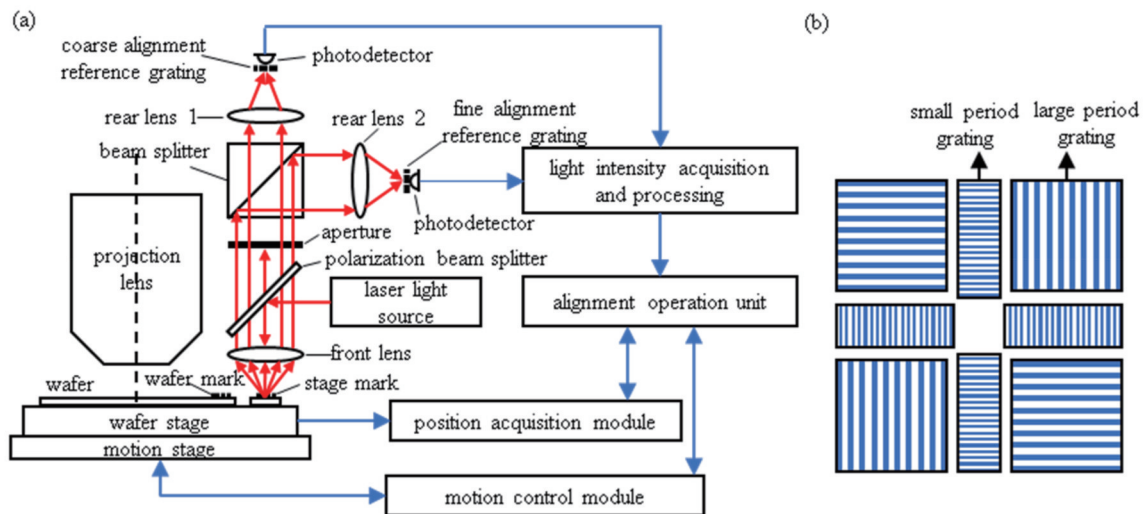


图 29 多光栅对准系统^[79]。(a) 对准系统结构图; (b) 对准标记结构图

Fig. 29 Multi grating alignment system^[79]. (a) Structure diagram of alignment system; (b) structure diagram of alignment mark

该系统与 ATHENA 相比具有以下优势:

- 1) 采用精细子光栅以保证对准精度;
- 2) 仅采用光栅的±1级衍射光,省去了 ATHENA 系统中的光楔,降低了工程实现难度;
- 3) 粗对准光束和精对准光束分别在不同的成像光路中干涉成像,避免了粗对准信号和精对准信号之间的串扰。

3.2 IOE 的基于叠栅条纹的对准技术

IOE 主要研究基于叠栅条纹的 PGA 系统,并取得突破性进展^[16,80]。其原理如图 30 所示^[16]。该方法利用

了不同周期的标记生成叠栅条纹的放大效应,通过提取叠栅条纹的相位信息,获得标记位置信息。该方法对准精度理论上可达到纳米量级^[16],主要应用于接触式以及接近式光刻对准系统中。

为了提高对准效率,IOE 在上述研究的基础上,提出了四象限光栅对准标记^[81]、二维 Ronchi 光栅对准标记^[82]和复合光栅对准标记^[83]。其中四象限光栅对准标记如图 31 所示^[81]。硅片与掩模上的标记在入射光照下相互叠加,形成对二者间距高度敏感的叠栅条纹。通过解调叠栅条纹的相位,不需要借助外部参考即可

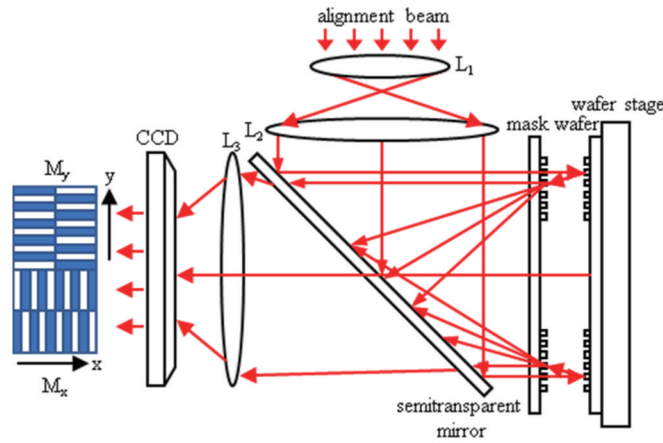


图 30 基于叠栅条纹的反射式对准光路^[16]

Fig. 30 Reflection-style alignment optical path based on Moiré fringes^[16]

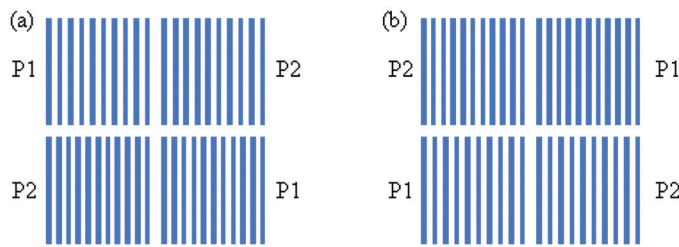


图 31 四象限光栅叠栅条纹对准标记^[81]。(a)硅片光栅标记；(b)掩模光栅标记

Fig. 31 Four-quadrant gratings Moiré fringe alignment mark^[81]. (a) Silicon wafer grating mark; (b) mask grating mark

得到对准误差,使粗对准和精对准的实现更加方便和简化。经实验表明^[81],使用该对准方法产生的对准误差在 10 nm 以下。为了对四象限光栅叠栅条纹的对比度等参数进行优化,IOE 后续还进行了大量研究^[84-87]。

3.3 HIT 的多衍射级次同步混叠干涉测量方法

2015 年, HIT 提出一种多衍射级次同步混叠干涉测量方法^[88-89],如图 32 所示^[89]。该方法采用了反射镜和直角棱镜等实现了 + m 衍射级次和 - m 衍射级次的 180° 旋转对称,探测器获得的信号为两个存在 90° 相位延迟的正交干涉信号。通过对这两个信号的同步检测,可以实现位移测量。

与 SMASH 相比,该方法具有以下优势:

1) 通过反射镜和直角棱镜的组合实现光束的反向剪切干涉,减小了 SMASH 系统中干涉仪模块的加工难度;

2) 通过采用多阶光栅干涉仪和多通道相位提取方法,可以同时产生多个等效测量结果,从而实现稳定一致的测量;

3) 低阶信号划定测量结果范围,高阶信号实现高精度测量。经实验验证^[88],该系统对一维光栅的绝对位置测量结果与 He-Ne 激光干涉仪测量结果相比,标准差小于 11.48 nm。

3.4 SIOM 的对准方法改进及误差校正

2017 年, SIOM 提出一种自相干叠栅条纹对准方法,其原理如图 33 所示^[21]。该方法利用反射镜和双折

射晶体使不同衍射级次的光束发生重合,进而形成两组周期具有一定差异的干涉条纹,并在对准系统像面上进一步发生干涉,形成叠栅条纹。通过提取相位信息,获得标记的位置信息。

与 SMASH 相比,自相干叠栅条纹对准方法具有以下优势^[21]:

1) 采用静态图像处理方法,对准过程中不需要扫描对准标记,避免了运动带来的对准误差;

2) 叠栅条纹能够将对准位置偏移量放大,有效提高探测灵敏度,减小套刻误差,对准精度可达到 2 nm。

2018 年, SIOM 对标记非对称形变导致的对准误差进行了研究^[90-91]。采用有限元法分析楔角和圆角非对称性对位置测量精度的影响,并根据波长和偏振对非对称性敏感度的差异,减小非对称性对位置测量精度的影响。仿真结果表明^[91],在槽深和槽宽分别变化 4 nm 和 80 nm 的情况下,当对准标记产生圆角和楔角形状非对称形变时,利用所提方法可修正标记非对称形变引入的对准误差至小于 0.13 nm。

3.5 IME 的对准关键技术研究

2019 年起, IME 针对对准关键技术中的难点与工艺相结合进行研究,包括相位光栅型标记设计^[92-93]、探测器件的优化改进^[94],以及误差分析^[95]等。

针对标记中零级和偶衍射级次衍射效率高,造成测量信号对比度小,杂散光影响严重等问题,提出一种对准标记设计方法,使零级和偶衍射级次缺级,同时增

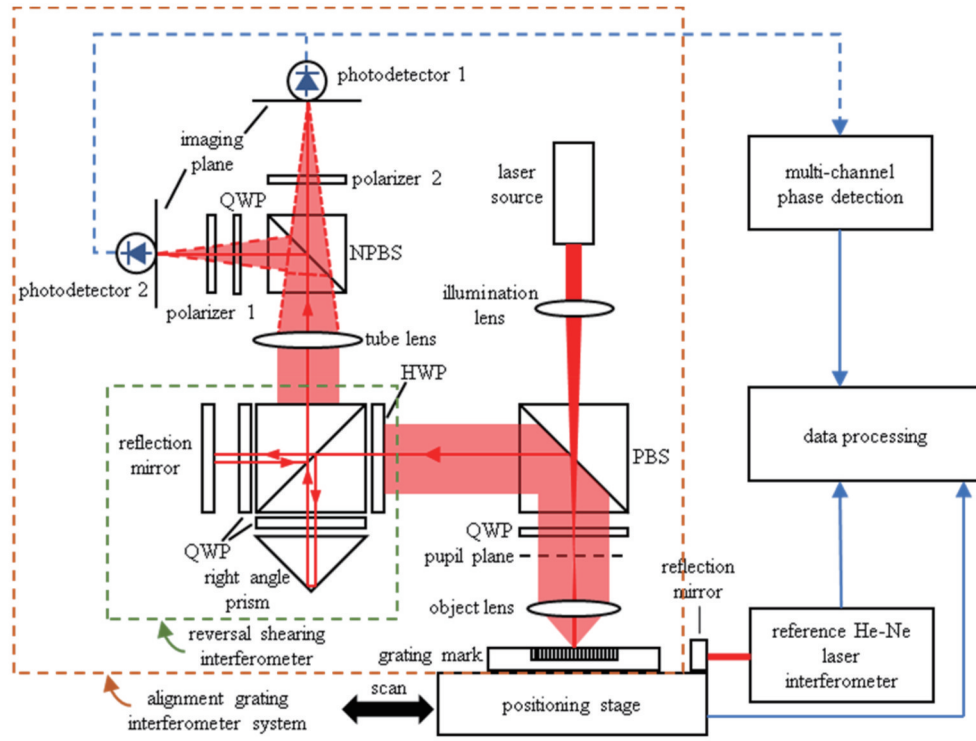


图 32 多阶光栅干涉法同时实现多通道绝对位置对准^[89]

Fig. 32 Simultaneous multi-channel absolute position alignment by multi-order grating interferometry^[89]

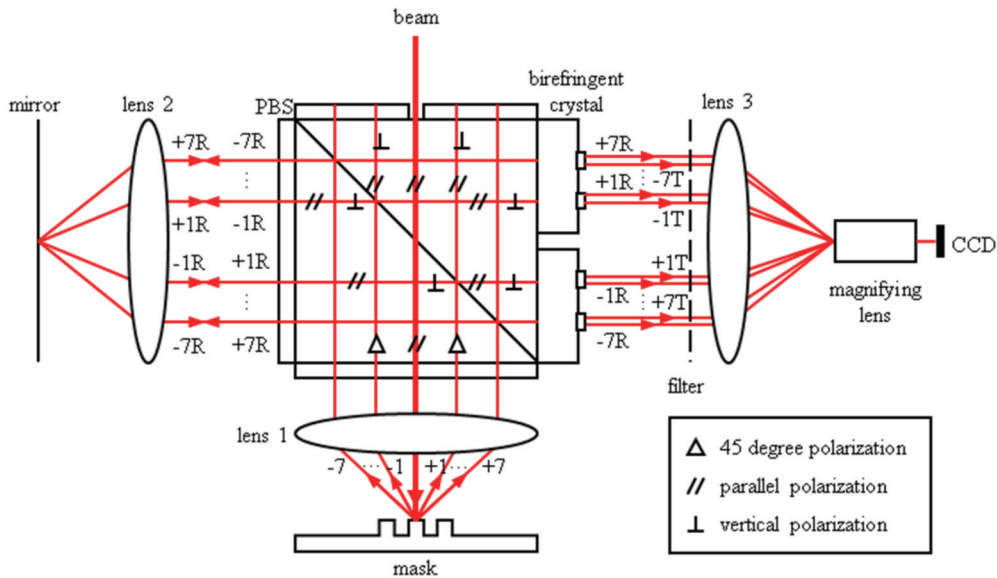


图 33 自相干叠栅条纹对准技术原理图^[21]

Fig. 33 Principle diagram of self-coherence Moiré fringe alignment technology^[21]

强高奇衍射级次衍射效率,并设计了IME3和IME5两种对准标记^[92]。与常用的AH53相比,IME3和IME5的第7衍射级次衍射效率均提高了50倍以上,第9衍射级次信号的衍射效率均提高了30倍以上,各标记衍射效率如图34所示^[92]。

针对自参考光干涉仪入射光束的偏振态变化问题,分析了自参考干涉仪棱镜入射光椭圆偏角 ψ 、椭圆度 $\tan \epsilon$ 和自参考干涉仪上下棱镜光程差对干涉对比度的

影响;并针对自参考干涉仪退偏效应,分析了退偏对于测量的光学系统的结果的影响,并用基于反射面膜层优化的方法进行退偏补偿^[94]。

针对工艺过程导致标记非对称性问题,研究了非对称性对位置精度的影响规律,分析了非对称相位光栅衍射场理论模型,并分析了几种典型非对称性的影响,提出了多衍射级次权重优化法。与OCW不同,该方法重在寻找最优衍射级次权重组合而不是最优波长

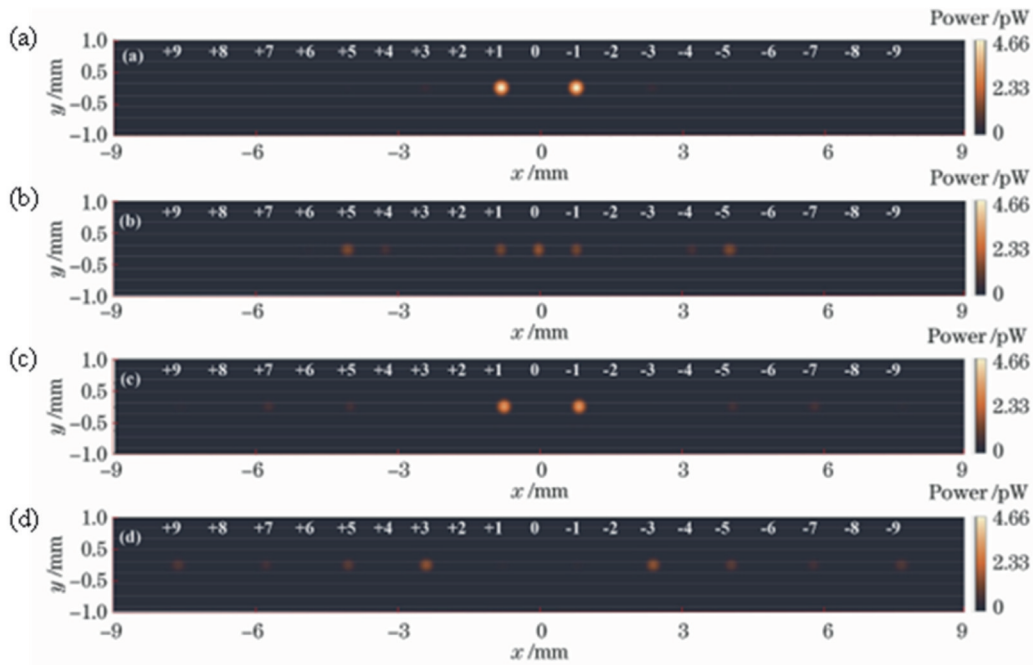


图 34 各标记衍射效率对比图^[92]。(a) AH11; (b) AH53; (c) IME3; (d) IME5

Fig. 34 Comparison diagram of diffraction efficiency of each mark^[92]. (a) AH11; (b) AH53; (c) IME3; (d) IME5

权重组合。经仿真实验验证^[95],可测量并修正标记非对称性对位置精度的影响至 0.05 nm 以内。

4 对准技术的改进方向与展望

随着器件特征尺寸的不断缩小,套刻精度需达到 1~2 nm,这对于对准技术精度要求越来越高。为了获得更高的对准精度,可以做以下几方面的改进:

1) 优化光机结构

由 2.1 节中的式(3)可得,衍射级次越高,其测量信号的对准精度越高。因此为了提高对准精度,需要优化光机结构,如使用具有更高 NA 的物镜或改变光路以增大 NA,从而获得更高衍射级次的测量信号,并缩小照射光斑尺寸,减小信号串扰。同时,由于零级光束没有携带标记位移信息,为杂散光的主要来源,因此,可以在光机结构中遮挡零级,提高测量信号的对比度以及动态范围,提高对准系统的重复性。最后,通过光机结构的优化,提高光束位置、指向以及偏振的稳定性,提高测量系统的稳定性。

2) 引入更多的偏振态和波长

由 2.1.3 节及 2.1.4 节的分析可知,随着技术节点的不断减小,标记非对称性对位置精度的影响成为制约对准精度的主要因素,因此需研究非对称性对位置精度的影响规律,并修正非对称性对位置精度的影响。由于不同波长、偏振状态以及衍射级次对非对称性具有不同的敏感度,因此可以利用这种敏感度的差异,修正非对称性对位置精度的影响。目前,ORION 传感器已采用 12 个波长,为了进一步减小非对称性对位置精度的影响,可以引入更多波长,如 16 个波长、24 个波长

等,并且为了探测金属层以及硬掩模层下的对准标记,可以选择红外波段。同时,入射光束可以选择不同的偏振状态,以及获得不同偏振态的测量信号,进一步减小非对称性对位置精度的影响。

3) 对准标记结构与布局优化

由 2.1.4 节可知,对准精度的提高需要优化对准标记。为了提高标记放置的灵活性,需引入更小的对准标记。目前对准标记主要通过光栅周期变化来改变光束衍射信息,超表面技术能在较小区域内实现对光场的调控^[96-98],可将其应用于对准标记设计,以减小标记尺寸,丰富对准信号信息。结合 2.1.4 节和 3.5 节可知,可通过改变标记细分方式,增强目标衍射级衍射效率,提高测量信号对比度,进而提高对准精度。由 2.1.4 节分析可知,为平衡对准时间和吞吐量之间的关系,需要对标记布局进行优化。可以考虑根据硅片的几何信息确定标记初始位置,再通过基于数据的优化方案进行迭代优化,以实现优化时间和优化效果间的相对平衡。

4) 选择不同的定位系统,实现更稳定的控制系统定位补偿

在对准系统中,硅片台的外部定位系统提供了对准标记的准确位置信息^[99]。在空气环境中,如深紫外(DUV)等光刻机中,可以采用平面光栅定位系统。与双频激光干涉仪相比,平面光栅可以溯源到光栅的栅距,以微晶玻璃等低膨胀系数材料制成的光栅栅距受环境扰动的影响较小,而且由栅距误差导致的系统性误差可以被有效补偿。在真空环境中,如极紫外(EUV)光刻机中,可以采用双频激光干涉仪定位系

统。由于双频激光干涉仪系统的光源在真空条件下波长保持不变,减小了环境变化对波长的影响。因此,在不同的环境条件下,可以选择不同的定位系统,实现更稳定的定位补偿。

5 总 结

集成电路制造产业的快速发展对光刻机光刻对准和套刻精度提出了越来越高的要求。光刻对准技术的发展对衍射光场的调控、高级次衍射信号的提取与分析、非对称性微纳结构的探测与应用、混合型微观结构与光场的作用等提出了更多的挑战。本文在梳理对准技术的发展历程中,以需求和问题为导向进行了全方位的对比和整理,提出了对准技术的改进思路和未来的发展方向,为提高对准和套刻精度提供参考。

参 考 文 献

- [1] Sharma E, Rathi R, Misharwal J, et al. Evolution in lithography techniques: microlithography to nanolithography[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(16): 2754.
- [2] 李艳丽, 刘显和, 伍强. 先进光刻技术的发展历程与最新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(9): 0922006.
- [3] Li Y L, Liu X H, Wu Q. Evolution and updates of advanced photolithography technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 0922006.
- [4] 韦亚一. 超大规模集成电路先进光刻理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [5] Wei Y Y. Theory and application of advanced lithography for VLSI[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [6] Shchegrov A V, Leray P, Paskover Y, et al. On product overlay metrology challenges in advanced nodes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11325: 113251P.
- [7] Orji N G, Badaroglu M, Barnes B M, et al. Metrology for the next generation of semiconductor devices[J]. *Nature Electronics*, 2018, 1(10): 532-547.
- [8] Bunday B D, Bello A, Solecky E, et al. 7/5 nm logic manufacturing capabilities and requirements of metrology[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10585: 105850I.
- [9] 李一鸣, 杨霖, 王晓浩, 等. 光刻套刻误差测量技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(9): 0922023.
- [10] Li Y M, Yang L, Wang X H, et al. Overlay metrology for lithography machine[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 0922023.
- [11] 王向朝, 戴凤钊. 集成电路与光刻机[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [12] Wang X Z, Dai F Z. Integrated circuit and lithographic tool[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [13] 姚汉民, 胡松, 邢廷文. 光学投影曝光微纳加工技术[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2006: 83.
- [14] Yao H M, Hu S, Xing T W. Optical projection exposure micro-nano processing technology[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2006: 83.
- [15] Zhu T, Li Y Q. Design and simulation of a wafer stage for extreme ultra violet lithography[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2005, 3(4): 314-318.
- [16] Jonckheere R, Lorusso G F, Goethals A M, et al. Full Field EUV Lithography Turning into a Reality at JMEC[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6607: 66070H.
- [17] 袁琼雁, 王向朝. 国际主流光刻机研发的最新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(1): 57-64.
- [18] Yuan Q Y, Wang X Z. Recent development of international mainstream lithographic tools[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(1): 57-64.
- [19] Saitoh K, Ohsawa H, Sentoku K, et al. Overlay accuracy of Canon synchrotron radiation stepper XFPA for 0.15 μm process[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 1996, 14(6): 4303-4307.
- [20] Navarro R, Keij S, Boef A D, et al. Extended ATHENATM alignment performance and application for the 100 nm technology node[J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4344: 682-694.
- [21] Miyasaka M, Saito H, Tamura T, et al. The application of SMASH alignment system for 65-55-nm logic devices[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6518: 65180H.
- [22] 朱江平, 胡松, 于军胜, 等. 基于等效叠栅的反射式光刻对准模型研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0909001.
- [23] Zhu J P, Hu S, Yu J S, et al. Alignment scheme research based on equivalent overlapped gratings for reflective lithography alignment[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(9): 0909001.
- [24] Verstappen L, Mos E, Wardenier P, et al. Holistic overlay control for multi-patterning process layers at the 10nm and 7nm nodes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9778: 97781Y.
- [25] Gorhad K, Sharoni O, Dmitriev V, et al. Co-optimization of RegC and TWINSCAN corrections to improve the intra-field on-product overlay performance[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9778: 97783D.
- [26] Mulkens J, Hinnen P C, Kubis M, et al. Holistic optimization architecture enabling sub-14-nm projection lithography[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2014, 13(1): 011006.
- [27] de Graaf R, Weichselbaum S, Droste R, et al. NXT: 1980Di immersion scanner for 7 nm and 5 nm production nodes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9780: 978011.
- [28] 杜聚有, 戴凤钊, 步扬, 等. 基于自相干叠栅条纹的光刻机对准技术[J]. *中国激光*, 2017, 44(12): 1204006.
- [29] Du J Y, Dai F Z, Bu Y, et al. Alignment technique using Moire fringes based on self-coherence in lithographic tools[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(12): 1204006.
- [30] 何峰, 吴志明, 王军, 等. Nikon 光刻机对准系统概述及模型分析[J]. *电子工业专用设备*, 2009, 38(4): 8-12, 18.
- [31] He F, Wu Z M, Wang J, et al. Nikon stepper alignment system and analysis of alignment modeling[J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2009, 38(4): 8-12, 18.
- [32] Aoki A, Yokota M. Method and apparatus for exposure process: US5298761[P]. 1994-03-29.
- [33] 罗涛. Nikon 光刻机激光步进对准系统研究[J]. *电子与封装*, 2019, 19(8): 44-47.
- [34] Luo T. Research on laser step alignment system of nikon stepper[J]. *Electronics & Packaging*, 2019, 19(8): 44-47.
- [35] 小林满, 安田雅彦. 测量方法、测量装置、曝光方法及曝光装置: CN1961407A[P]. 2009-02-18.
- [36] Kobayashi M, Yashiko A. Exposing equipment, exposing method, and manufacturing method for element: CN1961407A[P]. 2009-02-18.
- [37] 冲田晋一. 对准信息显示方法及其程序、对准方法、曝光方法、组件制造方法、显示系统、显示装置、程序及测定/检查装置: CN101006555A[P]. 2009-04-15.
- [38] Flanders D C, Smith H I, Austin S. A new interferometric alignment technique[J]. *Applied Physics Letters*, 1977, 31(7): 426-428.
- [39] Mizutani H, Nishi K J. Aligning device for exposure apparatus: US5214489[P]. 1993-05-25.
- [40] Ota K, Komatsu K. Projection scanning exposure apparatus with synchronous mask/wafer alignment system: US5506684[P]. 1996-04-09.
- [41] Ota K, Inoue J. Position transducer and exposure apparatus with same: US20010046037[P]. 2001-11-29.
- [42] Ayata N, Yamada Y. Mask aligner with a wafer position detecting device: US4794648[P]. 1988-12-27.

- [32] Uda K, Oda K, Ayata N. Alignment and exposure apparatus: US4669867[P]. 1987-06-02.
- [33] Omata T. Projection exposure apparatus: US4616130[P]. 1986-10-07.
- [34] Sato H. Exposure apparatus and device manufacturing method: US8384878[P]. 2013-02-26.
- [35] 郭乾统, 李博. 基于光刻机全球产业发展状况分析我国光刻机突破路径[J]. 集成电路应用, 2021, 38(9): 1-3.
Guo Q T, Li B. Analysis on breakthrough path of lithography in China based on development of lithography industry in the world [J]. Application of IC, 2021, 38(9): 1-3.
- [36] 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(1): 28-42.
Zong N, Hu W M, Wang Z M, et al. Research progress on laser-produced plasma light source for 13.5 nm extreme ultraviolet lithography[J]. Chinese Optics, 2020, 13(1): 28-42.
- [37] 陈宝钦. 光刻技术六十年[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922031.
Chen B Q. Lithography technology during the past six decades [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922031.
- [38] Jacobs B A J, Kramer P. Apparatus for aligning a mask with respect to a semiconductor substrate: US3811779[P]. 1974-05-21.
- [39] den Boef A J. Optical metrology of semiconductor wafers in lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8769: 876907.
- [40] Wittekoek S, van den Brink M A, Linders H F D, et al. Deep-UV wafer stepper with through-the-lens wafer to reticle alignment[J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1264: 534-547.
- [41] Koren R N Y, Simons H J G, Jeunink A B. Alignment system and methods for lithographic systems using at least two wavelengths: US20040130690[P]. 2004-07-08.
- [42] Wittekoek S, van der Werf J, George R A. Phase gratings as wafer stepper alignment marks for all process layers[J]. Proceedings of SPIE, 1985, 0538: 24-31.
- [43] Opitz J, Laidler D W. Comparison of ATHENA™ and TTL alignment capability in product wafers[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4689: 852-862.
- [44] Rivera G, Rozzoni L, Castellana E, et al. Overlay performance on tungsten CMP layers using the ATHENA alignment system [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 3998: 428-440.
- [45] Bornebroek F, Burghoorn J, Greeneich J S, et al. Overlay performance in advanced processes[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4000: 520-531.
- [46] Pugh G M, Giorgi M R. Evaluation of ASML ATHENA alignment system on Intel front-end overlay processes[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4689: 286-294.
- [47] Huijbregste J, van Haren R J F, Jeunink A, et al. Overlay performance with advanced ATHENA alignment strategies[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5038: 918-928.
- [48] Laidler D, Megens H, Lalbahadoersing S, et al. Advances in process overlay: ATHENA alignment system performance on critical process layers[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4689: 397-408.
- [49] Neijzen J H M, Morton R D, Dirksen P, et al. Improved wafer stepper alignment performance using an enhanced phase grating alignment system[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3677: 382-394.
- [50] Seltmann R, Demmerle W, Staples M, et al. Overlay budget considerations for an all-scanner fab[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4000: 896-904.
- [51] Cui Y T, Goodwin F, van Haren R. Segmented alignment mark optimization and signal strength enhancement for deep trench process[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5375: 1265-1277.
- [52] Kreuzer J L. Self referencing mark independent alignment sensor: US6628406[P]. 2003-09-30.
- [53] Keij S, Setija I, van der Zouw G, et al. Advances in phase-grating-based wafer alignment systems[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5752: 948-960.
- [54] van Schoot J, van Setten E, Troost K, et al. High-NA EUV lithography exposure tool: program progress[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11323: 1132307.
- [55] Leray P, Laidler D, Cheng S, et al. Achieving optimum diffraction based overlay performance[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7638: 76382B.
- [56] Bhattacharyya K, den Boef A, Storms G, et al. A study of swing-curve physics in diffraction-based overlay[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9778: 97781I.
- [57] Menchtchikov B, Socha R, Raghunathan S, et al. Computational scanner wafer mark alignment[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10147: 101471C.
- [58] Menchtchikov B, Socha R, Zheng C M, et al. Reduction in overlay error from mark asymmetry using simulation, ORION, and alignment models[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10587: 105870C.
- [59] Verhoeven E, Schuurhuis R, Mastenbroek M, et al. 0.33 NA EUV systems for high-volume manufacturing[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11609: 1160908.
- [60] Leray P. Metrology challenges for in-line process control[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10145: 1014503.
- [61] Kim Y S, Hwang Y S, Jung M R, et al. Improving full-wafer on-product overlay using computationally designed process-robust and device-like metrology targets[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9424: 942414.
- [62] Socha R. Holistic method for reducing overlay error at the 5 nm node and beyond[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11328: 113280V.
- [63] Ma J G, Yu M, Lambregts C, et al. Holistic alignment approach for on-product overlay improvement on DUV lithography process with combined solutions[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11327: 113270S.
- [64] Jeong I H, Kim H S, Kong Y O, et al. Improved wafer alignment model algorithm for better on-product overlay[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10961: 109610A.
- [65] Megens H, Brinkhof R, Aarts I, et al. Holistic feedforward control for the 5 nm logic node and beyond[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10961: 109610K.
- [66] Schmitt-Weaver E, Willems L, van der Laan H, et al. An integrated approach to holistic metrology qualification for multi-patterning process layers: Am: advanced metrology[C]//2016 27th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC), May 16-19, 2016, Saratoga Springs, NY, USA. New York: IEEE Press, 2016: 413-418.
- [67] Chen X M, Preil M E, Le Goff-Dussable M, et al. Automated method for overlay sample plan optimization based on spatial variation modeling[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4344: 257-266.
- [68] Lee H, Han S J, Kim M, et al. In-depth analysis of sampling optimization methods[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9778: 97781E.
- [69] Wildenberg J S, Mos E C. Method of determining a measurement subset of metrology points on a substrate, associated apparatus and computer program: US9811006[P]. 2017-11-07.
- [70] Chue C F, Chiou T B, Huang C Y, et al. Optimization of alignment/overlay sampling and marker layout to improve overlay performance for double patterning technology[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7520: 75200G.
- [71] Murakami S, Matsuura T, Ogawa M, et al. Laser step alignment for a wafer stepper[J]. Proceedings of SPIE, 1985, 0538: 9-16.
- [72] Nagayama T, Nakajima S, Sugaya A, et al. New method to reduce alignment error by optical system[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5038: 849-860.
- [73] 宛文峰. NSR2205I14 型光刻机对准方式分析[J]. 设备管理与

- 维修, 2018(11): 99-100.
- Wan W F. Analysis of alignment mode of NSR2205I14 mask aligner[J]. Plant Maintenance Engineering, 2018(11): 99-100.
- [74] 戈亚萍. 相位光栅对准技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2008: 4-6.
- Ge Y P. Study on phase grating alignment technology[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008: 4-6.
- [75] Mishima K. Detection apparatus and exposure apparatus using the same: US6707533[P]. 2004-03-16.
- [76] Mishima K. Position detection method and apparatus, and exposure method and apparatus: US20050179898[P]. 2005-08-18.
- [77] Tanaka H. Position detection apparatus, position detection method, exposure apparatus, device manufacturing method, and substrate: US6949755[P]. 2005-09-27.
- [78] Tanaka H. Alignment mark, alignment apparatus and method, exposure apparatus, and device manufacturing method: US7158233[P]. 2007-01-02.
- [79] 李运锋, 王海江, 韦学志, 等. 用于光刻装置的多光栅标记对准系统[J]. 微纳电子技术, 2009, 46(8): 494-497.
- Li Y F, Wang H J, Wei X Z, et al. Alignment system with multi-grating mark for lithographic apparatus[J]. Micronanoelectronic Technology, 2009, 46(8): 494-497.
- [80] Zhou S L, Hu S, Fu Y Q, et al. Moiré interferometry with high alignment resolution in proximity lithographic process[J]. Applied Optics, 2014, 53(5): 951-959.
- [81] Zhu J P, Hu S, Yu J S, et al. Four-quadrant gratings Moiré fringe alignment measurement in proximity lithography[J]. Optics Express, 2013, 21(3): 3463-3473.
- [82] 司新春, 佟军民, 唐燕, 等. 基于二维 Ronchi 光栅的纳米光刻对准技术研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0910001.
- Si X C, Tong J M, Tang Y, et al. Lithography alignment technology based on two-dimensional Ronchi grating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 0910001.
- [83] 司新春, 唐燕, 胡松, 等. 基于复合光栅的大范围高精度对准方法[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0105003.
- Si X C, Tang Y, Hu S, et al. High-precision alignment technique with large measurement range based on composite gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0105003.
- [84] Di C L, Zhu J P, Yan W, et al. A modified alignment method based on four-quadrant-grating moiré for proximity lithography [J]. Optik, 2014, 125(17): 4868-4872.
- [85] Di C L, Yan W, Hu S, et al. Moiré -based absolute interferometry with large measurement range in wafer-mask alignment[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(4): 435-438.
- [86] Zhu J P, Hu S, Zhou P, et al. Experimental study of Talbot imaging Moiré-based lithography alignment method[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 58: 54-59.
- [87] Zhu J P, Hu S, You Z S, et al. Gap-optimized Moiré phase imaging alignment for proximity lithography[J]. Optical Engineering, 2015, 54(1): 017105.
- [88] Tao Z, Cui J W, Tan J B. Simultaneous multi-channel absolute position alignment by multi-order grating interferometry[J]. Optics Express, 2016, 24(2): 802-816.
- [89] Tao Z, Tan J B, Cui J W. Linear response, multi-order grating interferometry using a reversal shearing imaging system[J]. Optics Letters, 2015, 40(19): 4552-4555.
- [90] Du J Y, Dai F Z, Bu Y, et al. Calibration method of overlay measurement error caused by asymmetric mark[J]. Applied Optics, 2018, 57(33): 9814-9821.
- [91] 杜聚有, 戴凤钊, 王向朝. 标记非对称形变导致的对准误差修正方法及其在套刻测量中的应用[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0704004.
- Du J Y, Dai F Z, Wang X Z. Calibration method for alignment error caused by asymmetric deformation of mark and its application in overlay measurement[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0704004.
- [92] 杨光华, 王宇, 李璟, 等. 增强型相位光栅衍射效率研究[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1205001.
- Yang G H, Wang Y, Li J, et al. Diffraction efficiency of enhanced phase grating[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1205001.
- [93] Yang G H, Li J, Wang Y, et al. Analytic design of segmented phase grating for optical sensing in high-precision alignment system[J]. Sensors, 2021, 21(11): 3805.
- [94] 徐孟南, 卢增雄, 齐月静, 等. 光束偏振对自参考干涉信号对比度的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(23): 2326002.
- Xu M N, Lu Z X, Qi Y J, et al. Influence of beam polarization on contrast of self-referencing interference signal[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(23): 2326002.
- [95] 杨光华, 王宇, 李璟, 等. 相位光栅非对称性对位置测量精度的影响[J]. 光学学报, 2021, 41(19): 1905001.
- Yang G H, Wang Y, Li J, et al. Effect of phase grating asymmetry on position measurement accuracy[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(19): 1905001.
- [96] 李雄, 马晓亮, 罗先刚. 超表面相位调控原理及应用[J]. 光电工程, 2017, 44(3): 255-275, 376.
- Li X, Ma X L, Luo X G. Principles and applications of metasurfaces with phase modulation[J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(3): 255-275, 376.
- [97] 廖琨, 甘天奕, 胡小永, 等. 基于介质超表面的片上集成纳米光子器件[J]. 光学学报, 2021, 41(8): 0823001.
- Liao K, Gan T Y, Hu X Y, et al. On-chip nanophotonic devices based on dielectric metasurfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823001.
- [98] Remnev M A, Klimov V V. Metasurfaces: a new look at Maxwell's equations and new ways to control light[J]. Physics-Uspokhi, 2018, 61(2): 157-190.
- [99] 张志平, 杨晓峰. 激光外差干涉技术在光刻机中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922017.
- Zhang Z P, Yang X F. Application of laser heterodyne interference technology in lithography[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922017.

Development and Challenges of Lithographical Alignment Technologies

Qiu Jun^{1,2}, Yang Guanghua¹, Li Jing^{1,2*}, Lu Zengxiong^{1,2}, Ding Minxia¹

¹*Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*

²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract

Significance Lithography technology is crucial for manufacturing all kinds of semiconductor integrated circuits. Overlay, a major performance indicator, is critical to monitor the lithography quality. Together with the increasing density of integrated circuit (IC) chips and continuously shrinking critical dimension, alignment accuracy for lithographic overlay is required to be extreme. Overlay usually refers to the process where each layer of the pattern needs to be accurately transferred to the correct position on the silicon wafer so that its position error relative to the previous layer of the pattern is within the tolerance range. The position error among different layers mainly depends on the alignment system situated inside the lithographic equipment. Thus, the measurement capability of an alignment system is very important, since the budget of the overlay budget is set to be just one-third to one-fifth of the resolution of a node, and the budget of alignment is only allowed to be within one-third of the overlay.

For each lithography step, the alignment system measures special marks at certain targeted locations. By calculating the mark positions, microscopic aligning errors can be captured dynamically and compensated when necessary. Moreover, considering the wafer deformation during the process, such as the warpage caused by thin film deposition, the partition is needed with 20-40 marks placed in each region of the wafer. By these means, every exposure field is measured and controlled precisely.

With the continuous development of lithography, alignment systems have achieved measurement accuracy from a sub-micrometer level in the 1980s to a nanometer level in 2002 and then reached a sub-nanometer level in 2016. Advanced lithography companies, such as ASML, Nikon, and Canon, evolve distinctly with their alignment technologies. At the same time, the designs of the alignment marks vary significantly based on the characteristics of specific alignment systems. Consequently, it is crucial to categorize and analyze the measurement principles and technology paths of the alignment systems. It is also important to provide references and insights for successive development.

Progress The high-end litho-equipment global market has been dominated by ASML, Nikon, and Canon. Since the 1970s, lithography machines have briefly been through five generations of products, featured by advanced light-source technologies and process innovations. These improvements successively reduced critical dimensions and refined overlay. To address the technical problems, the three companies have continuously developed their alignment technologies. We summarize the characteristics of alignment hardware systems (Table 1), the corresponding alignment mark designs (Table 2), and the evolutionary roadmap of each company's alignment technology (Fig. 1).

ASML built its alignment system based on the phase grating principle. In the beginning, its single stage system adopted the coaxial through-the-lens (TTL) aligning method, for which only the first-order diffraction signals were considered. The advanced technology using high-order enhanced alignment (ATHENA) system was invented to reduce the influence of the production process on diffraction signals. Later, smart alignment sensor hybrid (SMASH) was introduced to ensure compatibility with the alignment marks of Nikon and Canon. Furthermore, ORION was developed to reduce the effect of mark asymmetry on alignment accuracy and was released together with ASML's commercial extreme ultraviolet (EUV) lithography machines.

ASML conducted research to improve alignment accuracy, such as special mark-design software, color weighted or polarization algorithms, high-order deformation models, and layout optimized via error separation or grid mapping.

Nikon applied various aligning methods based on specific scenarios, including phase grating intensity, image processing, and heterodyne interference. Canon then adopted either phase grating or image processing for its alignment system.

Besides the above international giants, we also investigate the domestic teams who are actively exploring alignment improvements. Shanghai Micro Electronics Equipment (Group) Co., Ltd. (SMEE) proposed multi-grating marks with large and small periods for coarse and fine alignment. Institute of Optoelectronics Technology, Chinese Academy of Sciences (IOE) conducted an overlapped grating equivalent comparing with the transmission type. Harbin Institute of Technology (HIT) put forward a multi-channel and multi-order grating interferometry for stable position measurement and alignment. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences (SIOM) proposed Moiré

fringes to enhance the detection sensitivity. Image processing methods were employed to avoid motion errors. Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences (IME) proposed a mark design method that makes zero and even order diffraction automatically miss while the diffraction efficiency of higher odd orders was enhanced. The team also provided a depolarizer-compensation method based on an optimized reflective film layer. Additionally, they investigated the effect of mark asymmetry and proposed a weighted optimization for different diffraction orders.

Conclusion and Prospects The rapid development of the IC industry has triggered increasingly higher demands for lithographic alignment accuracy and overlay. The development of alignment technology poses challenges to the diffraction field, such as extraction and analysis of higher diffraction orders, recognition and compensation of asymmetric signals, and interactions with mixed optical structures. To realize higher alignment accuracy, technology therefore could evolve through improving optical components, analyzing polarization states and wavelength influences, optimizing the interaction structures and layouts, and even considering suitable positioning mechanisms. We comprehensively investigate and summarize the development of alignment technology from perspectives of demands and problems, solutions, and improvements. The future improvement directions are pointed out to provide a meaningful reference for relevant studies.

Key words integrated optics; alignment; mark; overlay; lithography; integrated circuit