

极紫外光刻中的边缘放置误差控制

曹晶^{1,2}, 杨文河^{1,2}, 刘泽旭^{1,2}, 陈韞懿^{1,2}, 魏鑫^{1,2}, 林楠^{1,2*}¹中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800;²超强激光科学与技术重点实验室(中国科学院), 上海 201800

摘要 极紫外(EUV)光刻是 7 nm 及以下技术节点芯片大规模量产的关键技术。随着技术节点的减小、工艺复杂性的增加,芯片的良率面临着巨大挑战。边缘放置误差(EPE)是量化多重曝光技术过程中制造图案保真度的最重要指标。EPE 控制已成为多重曝光和 EUV 融合光刻时代最大的挑战之一。EPE 是关键尺寸(CD)误差和套刻误差的结合。在 EUV 光刻中,光学邻近效应和随机效应是引起光刻误差的重要因素。光学邻近效应校正(OPC)可以使 EPE 最小化。对于最先进的技术节点,EPE 通常由随机效应主导,因此需要对 EPE 进行建模,尤其是对随机效应进行严格的建模,以分析影响 EPE 的关键参数。选择不同的测量手段对关键参数进行测量并优化 EPE 是提高芯片良率的重要途径。本文首先综述了 EPE 在 EUV 光刻中的重要作用,然后讨论了 OPC 和随机效应、EPE 模型及涉及的关键参数,并介绍了关键参数的测量方法,最后总结和展望了与 EPE 相关的技术。

关键词 测量; 极紫外光刻光源; 套刻; 光学邻近效应校正; 对准

中图分类号 TN215 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231470

1 引言

自 2019 年极紫外(EUV)光刻技术投入集成电路批量生产以来,EUV 光刻技术已经成为 7 nm 及以下技术节点芯片大批量生产(HVM)的重要手段。随着半导体制造工艺向 3 nm 技术节点推进,为确保集成电路器件的正常运行,迫切需要减小边缘放置误差(EPE)^[1]。EPE 是量化多重光刻技术过程中图案保真

度的最重要指标^[2-3]。EPE 控制已成为多重曝光技术和 EUV 融合光刻时代最大的挑战之一^[4-5]。

如图 1(a)所示,EPE 是关键尺寸(CD)误差和套刻误差的结合^[1,3,5]。在典型的互补光刻中,EPE 的最大值为周期的四分之一^[5]。技术节点的迭代对 EPE 的要求越来越严苛。更重要的是,EPE 预算中各组成部分的占比也在发生变化,其中随机误差的占比快速增加^[1,3,5-6]。EPE 预算包括系统误差、局部随机误差和全

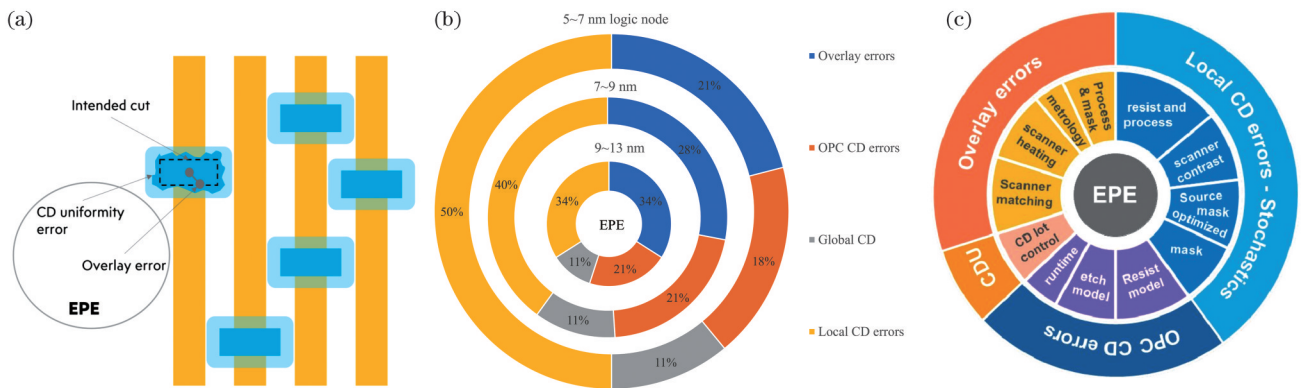


图 1 EPE 示意图。(a)EPE 组成示意图^[1], The IEEE copyright line (©2023 IEEE), 已得到重印许可, 通过 Copyright Clearance Center, Inc.; (b)EPE 预算各组成部分占比随技术节点迭代的变化图^[1,3]; (c) 5 nm 技术节点的 EPE 预算控制途径^[5], 已得到重印许可, Copyright 2018 SPIE

Fig. 1 Schematics of EPE. (a) Composition diagram of EPE^[1], The IEEE copyright line (©2023 IEEE), reprinted with permission, permission conveyed through Copyright Clearance Center, Inc.; (b) the changes in the distribution of EPE budget components with the iteration of logic node^[1,3]; (c) EPE budget control approaches for the 5 nm logic node^[5], reprinted with permission, Copyright 2018 SPIE

收稿日期: 2023-12-01; 修回日期: 2024-01-03; 录用日期: 2024-01-08; 网络首发日期: 2024-01-26

通信作者: *nanlin@siom.ac.cn

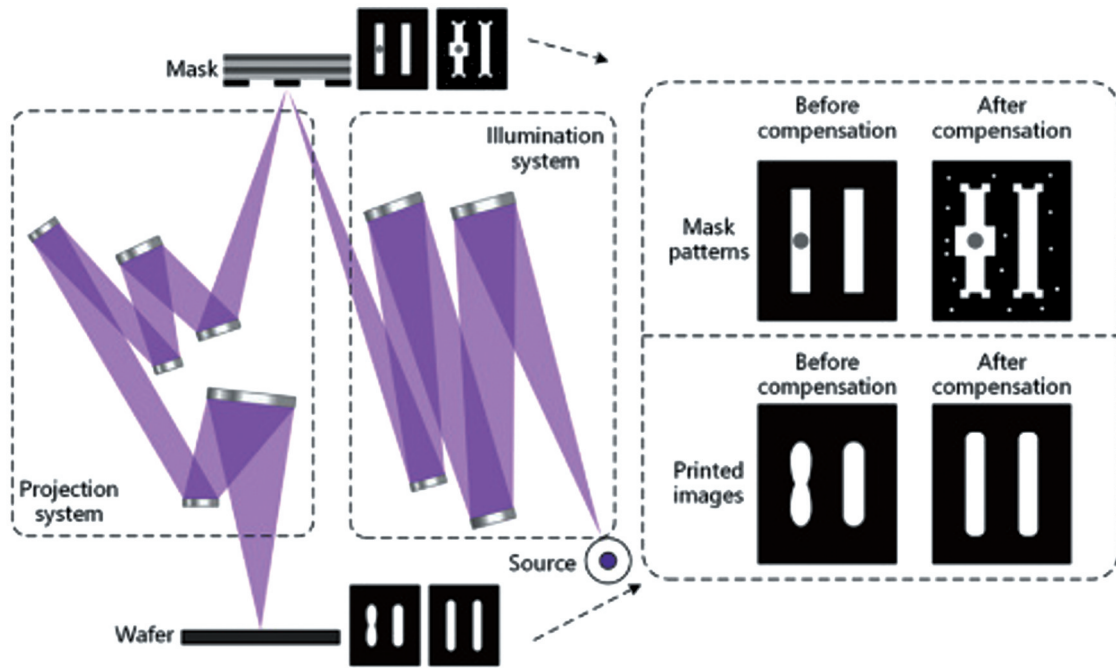


图 3 包含补偿的 EUV 成像系统示意图^[14], 已得到重印许可, © Optical Society of America (或 Optica Publishing Group)
 Fig. 3 Schematic of EUV imaging system with compensation^[14], reprinted with permission, © Optical Society of America (or Optica Publishing Group, as applicable)

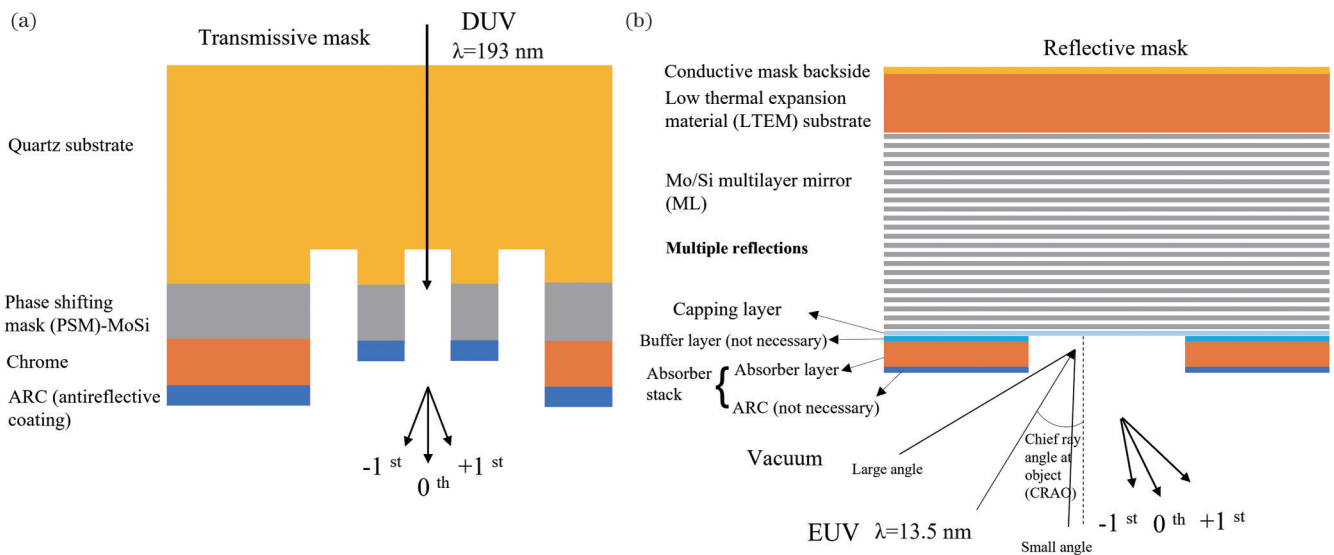


图 4 掩模形貌示意图^[18] (经许可修改, Copyright 2016 SPIE, 通过 Copyright Clearance Center, Inc.). (a) 1.35NA, 浸没式 DUV 光刻, 193 nm 波长; (b) 0.33NA, EUV 光刻, 13.5 nm 波长

Fig. 4 Diagrams of the mask topography^[18] (adapted with permission, Copyright 2016 SPIE, permission conveyed through Copyright Clearance Center, Inc.). (a) 1.35NA DUV immersion lithography at 193 nm wavelength; (b) 0.33NA EUV lithography at 13.5 nm wavelength

貌^[17-18]。EUV 光刻中采用 Bragg 多层膜结构来实现较高的反射率 ($\approx 70\%$, 入射角范围为 $-12^\circ \sim +12^\circ$)^[19]。掩模上的入射角控制在 $-11^\circ \sim +11^\circ$ 以内, 以保证高的反射率^[20]。多层膜镜上局部凹陷和凸块在纳米尺度上的深度或高度变化会导致打印图像的局部强度降低^[21]。

OPC 会受到空间相干性、像差、多重曝光、多次刻蚀和工艺参数等因素的影响。以 10 nm 节点的 EUV

OPC 模型为例, 图 5(a) 给出了每个物理效应对 OPC 模型误差的贡献^[22], 其中 3D 掩模效应的影响最为严重。EUV 光刻系统的数值孔径 ($NA=0.33$) 比 DUV 光刻系统 ($NA=1.35$) 小很多, 因而光刻机像差导致的图像平移更加明显 (比如前者的彗差是后者的 4 倍)。考虑到套刻误差预算和制造 EUV 镜比较困难, 对于 5 nm 节点, 实际像差 (均方根, RMS) 控制在 0.18 nm 左右^[23]。

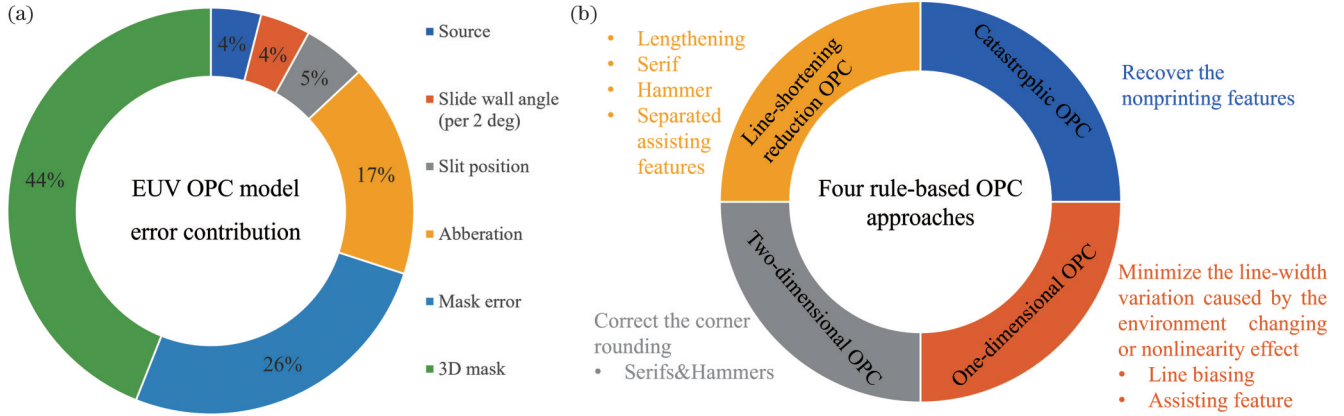


图 5 EUV OPC 误差的贡献量和基于经验 OPC 的方法。(a)EUV OPC 模型中每个物理效应对误差贡献的分布图(10 nm 节点 OPC 模型)^[22]; (b) 4 种典型的基于经验 OPC 的方法^[12]
 Fig. 5 Contribution of each physical effect on EUV OPC model error and the rule-based OPC. (a) Contribution of each physical effect on EUV OPC model error (10 nm node OPC modeling)^[22]; (b) typically four rule-based OPC approaches^[12]

1) 3D 掩模效应

Mo/Si 多层膜反射镜穿透深度的入射角度依赖性、光的斜入射和掩模吸收层形貌所导致的几种成像效应通常被称为 3D 掩模效应^[20,24-25]。3D 掩模效应对成像有重要影响^[7],会导致晶圆级别的偏离预期集成电路设计的变化^[24]。对于浸没式 DUV 光刻,在 -16.5° 到 16.5° 的入射角范围内,照明是对称的,一些 3D 掩模效果彼此相反,可以抵消^[18]。

对于 EUV 光刻,掩模处的数值孔径 NA_{mask} 和晶圆处的数值孔径 NA_{wafer} 满足

$$NA_{\text{mask}} = \frac{NA_{\text{wafer}}}{M}, \quad (1)$$

式中: M 为投影系统的缩放倍率(通常为 $4\times$)。可见,在投影系统缩放倍率不变的情况下,增大晶圆处数值孔径的同时掩模处数值孔径也需要相应增大。当物面主光线角度(CRAO,定义如图 4(b)所示)为 6° 时,在数值孔径大于 0.4 的光刻系统中,入射光和反射光的锥体会发生重叠^[26]。增大 CRAO 可以使上述光锥分离,但会带来更严重的 3D 掩模效应^[27]。在数值孔径为 0.33、缩放倍率为 $4\times$ 的光刻系统中,掩模上的最大角度为 10.7° ,而在数值孔径为 0.55 的光刻系统中,关键(扫描)Y 方向上的最大角度可以扩展到 17° ,会对成像效果产生严重影响^[20]。

掩模吸收层的选择对图像形成起着重要作用。吸收层的材料决定了衍射级次的振幅和相位,进而决定了最佳焦点(BF)和焦深(DOF)^[28]。考虑到斜入射和吸收层厚度,吸收层会产生阴影^[27]。照明中主光线角度存在非零的情况,模拟显示,阴影效应导致的图像偏移在 Y 方向上约为 1.7 nm,在 X 方向上约为 0.6 nm,与套刻误差的控制要求(2.5 nm)相当^[23]。因此,阴影效应带来的偏差不容忽视,应采用 OPC 进行校正。

2) 空间相干性

与 DUV 类似,EUV 也是一种部分相干成像系统。

在部分相干照明系统中,最小周期(P_{min})的计算公式为

$$P_{\text{min}} = \frac{1}{1 + \sigma_c} \frac{\lambda}{NA}, \quad (2)$$

式中: σ_c 为部分相干系数; λ 为光源波长; NA 为数值孔径。

完全相干时, σ_c 为 0。对于部分相干光, $0 < \sigma_c < 1$, 可以增强分辨率。部分相干照明系统可以使 ± 1 阶衍射通过低通滤波,但这对于相干光系统来说就比较困难^[29]。随着部分相干光的维度持续增加, σ_c 可能超过 1。当 $\sigma_c > 1$ 时, $P_{\text{min}} = \frac{\lambda}{2NA}$ ^[30]。对于 OPC,可采用在掩模图案旁添加辅助线的方法来减小部分相干变化的影响^[31]。

3) 工艺参数

上述瑞利分辨率的讨论考虑了衍射的影响。对于光刻,还需要考虑光刻胶效应和分辨率增强等因素的影响^[29]。引入了工艺参数(k_1),用式(3)来描述光刻投影可获得的 CD 或分辨率^[32]。

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA}, \quad (3)$$

式中: R 为 CD 或分辨率或半周期(HP); k_1 为工艺参数; λ 为光源波长; NA 为数值孔径。

在 DUV 光刻过程中,当 k_1 值大于 0.4 时,OPC 并不十分显著^[33]。对于 193 nm 浸没式光刻技术来说(以 $NA=1.35$ 、最小周期为 90 nm 为例, k_1 为 0.315),光学邻近效应对其影响非常严重(最大 OPC 可达 28.5 nm); 由于 EUV 光刻具有相对较大的工艺参数(以 $NA=0.33$ 、最小周期为 40.5 nm 为例, k_1 为 0.495),故其 OPC 通常小于 3 nm^[33]。

2.1.2 OPC 的实现方法

从 250 nm 技术节点开始,在光刻工艺中有必要采用 OPC,此时线宽开始与曝光波长(248 nm)接近^[34]。OPC 的实现方法主要有基于经验的 OPC 和基于模型

的 OPC。基于经验的 OPC 适合简单的设计,4 种典型的基于经验的 OPC 方法^[12]如图 5(b)所示。100 nm 技术节点需要考虑基于模型的 OPC^[35]。OPC 包括模型和程序构建、几何校正及其验证^[36]。通过迭代使校正后的几何形状与目标几何形状尽可能接近。OPC 的关键在于建立精确的光刻模型,包括光学模型和光刻胶模型^[37]。基于模型的 OPC 适合复杂的图案设计,可以实现高精度校正,但比较耗时,计算成本较高。为此,人们提出了几种快速掩模优化方法,如反演光刻、基于线性回归的 OPC 和基于非线性回归的 OPC^[38]。亚分辨率辅助图形(SRAF)可以用于提高给定周期下的 DOF 和曝光宽容度,并有助于将 BF 移到所需聚焦方向^[39]。除此之外,机器学习 OPC 也受到广泛关注^[11,40]。

克希霍夫近似或薄掩模近似(TMA)假设掩模图案为二维,即忽略掩模图案的三维效应。掩模的透射由布局的“完美阴影”来定义。二元掩模的暗区和亮区分别具有 0 和 1 的传输,相位为常数^[19]。克希霍夫近似方法简单且耗时短,但这种二维近似只考虑了由光刻胶和底层堆叠引起的 BF 偏移,没有考虑掩模的贡献,不能准确预测与图案相关的 BF 偏移(BF 随着光刻周期的变化而变化)^[41]。

对于先进 DUV 光刻,当掩模上图形的半周期远小于曝光波长时,光刻系统的数值孔径更高并采用更强的 RET,需要考虑掩模的三维形貌效应,并进行严格的电磁场(EMF)分析,如时域有限差分(FDTD)分析,以便对所产生的晶圆图案进行精准预测^[42]。

对于 EUV 光刻,由于掩模的离轴照明,吸收层厚度和 EUV 波长的比值大(通常 Cr 或 TaN 吸收层厚度为 50~100 nm,而 EUV 波长为 13.5 nm),需要用严格的 EMF 求解来模拟掩模后光的衍射^[43-44]。FDTD 可以用来模拟三维 EUV 掩模^[45]。由于波长短、掩模厚度大,完全的三维模拟耗时长,而且对计算机内存要求较高。考虑到 FDTD 的计算成本过高,研究人员利用 EUV 照明光源、M3D 库和校准后的掩模离焦,计算得到了一种快速近似的 M3D 滤波器。在照明光源保持不变的情况下,该滤波器可用于计算任意形状和分布的掩模图案^[42]。

2.2 EUV 光刻的随机效应

EUV 光刻中观察到的复杂光刻胶行为包括随机效应、与周期相关的模糊以及对带外(OOB)辐射的增强灵敏度,OPC 可对这些影响进行预先补偿^[46]。EUV 和高数值孔径 EUV 光刻技术引起的图案化光刻胶薄膜的随机变化和缺陷是一个新的计量问题^[47-48]。随机效应包括随机 CD 变化(传统上用线/空打印的 LER 或线宽粗糙度(LWR)、接触或点打印的 LCDU 等度量来量化)、局部 EPE 和随机打印失败^[46]。接下来首先介绍 EUV 光刻胶曝光机理,随后重点介绍 EUV 随机效

应对关键参数的影响,最后探讨基于随机效应的光刻胶模型。

2.2.1 EUV 光刻胶曝光机理

与 DUV 光刻胶的曝光机理不同,EUV 光刻胶曝光机理涉及复杂的物理和化学过程。

1) 物理机理

EUV 光子能量高(≈ 92 eV,高于光刻胶原子种类的电子结合能),可以与光刻胶中的任意成分发生强烈的相互作用,通过光电离产生电子。原电子(能量 ≈ 80 eV)进一步电离,产生二次电子(能量为 10~60 eV)。这些较低能量的电子(和它们留下的自由基正离子空穴)引起化学反应,导致 EUV 光刻胶的溶解度发生变化^[49-51]。

2) 化学机理

最常用的 EUV 光刻胶是基于 KrF 和 ArF 光刻胶平台的化学放大型光刻胶(CAR),由于 EUV 光刻旨在用于产生超出 ArF 光刻分辨率限制的特征和周期,因此 EUV 光刻胶必须具有非常高的分辨率和低的 LER^[52]。CAR 主要由低 EUV 吸收的有机材料和功能化学成分(如光酸产生剂(PAG)或猝灭剂)组成。DUV 光刻胶中酸的生成途径主要为入射光子的直接激发;但对于 EUV 光刻胶来说,EUV 光直接激发对酸的产生没有显著贡献,这是由于酸的产生主要取决于二次电子^[53]。PAG 分解产生酸,在曝光后烘焙(PEB)中作为催化剂。酸扩散并催化高分子发生脱保护反应,导致曝光区域和未曝光区域之间的溶解度产生差异(如曝光区域的光刻胶溶于显影液而非曝光区域不溶解),显影后获得图案。虽然 CAR 有许多优点,但其主要的局限性在于曝光区域产生的催化剂有可能扩散到未曝光区域。大量的扩散会有效地模糊图像,降低分辨率。在 5 nm 和 3 nm 的先进技术节点上光刻图案,需要不超过 7 nm 的模糊,以获得高分辨率的空间像^[46]。EUV 光子的能量更高,可能出现的另一个问题是聚合物交联,因此,在低到中等剂量下,光刻胶表现出正胶行为,而在较高剂量下则表现出负胶行为^[52]。基于无机纳米颗粒或团簇的非 CAR(如含强吸收元素铪或锡的非 CAR)不需要 PAG 和猝灭剂,化学均匀性高,受到广泛关注^[54]。

在相同的能量下,EUV(13.5 nm)光束所包含的光子数约为 DUV(193 nm)光束的 7%。根据泊松统计,光子起伏是光子总数的平方根,EUV 的光子涨落大约是 DUV 的 3.8 倍^[23]。光子随机效应在 DUV 光刻时就存在,但其 CD 足够大,可以确保吸收足够的光子。EUV 光刻的随机性会产生许多不良影响,如 LER 和局部关键尺寸(LCD)变化^[8]。随机散粒噪声模型的图像模拟显示,当数值孔径分别为 0.55 和 0.33 时,LCDU 分别为 3.8 nm 和 4.6 nm。在 0.33NA 和 0.55NA 系统中,随机 CD 变化是最大的图像误差,大于关键尺寸均匀性(CDU)误差(≈ 3 nm)、套刻误差(≈ 2 nm)和

掩模误差 ($\approx 1 \text{ nm}$)^[25]。随机缺陷的量子力学基础在于, EUV 辐射(光子)和物质(包括光刻胶的分子成分, 以及由原 EUV 光子和光刻胶成分相互作用产生的电子)都是具有有限数量的离散粒子, 它们仅在离散位置产生和相互作用, 并沿着随机、离散的轨迹移动^[46]。电子在光刻胶中的移动超过了 10 nm , 这对于理解 EUV 光刻胶中的噪声、LER 和 CDU 变化具有重要意义^[49]。如图 6(a) 所示, 随机效应控制主要有三个途径, 即光刻胶、曝光剂量和空间像对比度^[55]。

2.2.2 EUV 随机效应对关键参数的影响

图 6(b) 给出了影响 LER 形成的因素^[56]。对于 DUV 光刻, LWR/LER 与曝光能量的关系不大, 但对于 EUV 光刻, LWR/LER 对曝光剂量高度依赖^[23]。产酸率控制着光刻胶与光子散粒噪声 (PSN) 的贡献比例, 产酸率随曝光剂量的变化而变化: 在低曝光剂量下, 产酸率接近于一个常数, 即初始产酸率 (通常为 $0.3\sim 3$); 由于 PAG 的耗竭, 产酸率随曝光剂量的增加而降低; 在低曝光剂量下, 随机效应中无论是光刻胶还是 PSN 占主导, LER 都与曝光剂量平方根的倒数成比例; 在高曝光剂量下, 光刻胶贡献项增大; 在足够高的曝光剂量下, 增加曝光剂量甚至可能使 LWR 变差^[8]。材料的优化同样影响着最佳曝光剂量的选择^[57]。分辨率 (R)、线边缘粗糙度 (L) 和灵敏度 (S) 三者需要权衡 (即 RLS 三角, 如图 6(c) 所示), 它们之间的关系^[58]为

$$R^3 \cdot L^2 \cdot S \sim Z, \quad (4)$$

式中: Z 为常数。

LCDU 和图像对比度与曝光剂量有关。NXE: 3350 上的实验显示, 提高图案的对比度可以降低 LCDU, LCDU 与 N_{ILS} (N_{ILS} 是归一化图像对数斜率) 近似呈线性关系^[59]。LCDU 和曝光剂量的平方根倒数成比例, 这表明了一定特征尺寸下曝光剂量不确定的散粒噪声特性。0.55NA 光刻机的高图像对比度会导致显著的 LCDU 降低。对于一个可接受的 LCDU, 相比于 0.33NA, 0.55NA 系统可以减少所需曝光剂量^[26]。

2.2.3 基于随机效应的光刻胶模型

1) 蒙特卡罗模拟

蒙特卡罗模型是一种统计模型, 处理过程简单, 已被广泛用于随机问题的建模。如: Maas 等^[54]利用蒙特卡罗模拟 EUV 光刻中金属氧化物基非化学放大光刻胶对 LCDU 的影响, 结果显示, 金属氧化物团簇的直径应小于 1 nm , 否则粒度将对 LCDU 产生严重影响。

2) 多元泊松传播模型 (MPPM)

MPPM 将计数统计理论用于确定关键材料、反应和曝光成分的局部纳米级密度^[60]。图 6(d) 给出了 CAR 的 MPPM 流程图。该模型主要包含 5 个随机变量 ($RV1\sim RV5$), 并且所有的随机项都被视为符合泊松分布。该模型将曝光过程中发生的主要反应概括为各 RV 值的传递, 按其反应特点进行组合并输出最终

的 RV 值。根据输入的空间像, 可研究的图案特征包括 LER、LWR、LCDU 等^[60]。MPPM 可以研究 CAR 或非 CAR 中各随机项的相对重要性: 对于 CAR, 材料的随机效应和光子随机效应贡献相当^[61]。更进一步, 可将二维 MPPM 模型扩展为一个完整的三维模型, 以模拟三维参数对整体光刻胶性能的作用, 如第三维度对酸模糊的影响^[62]。

3 EPE 模型

Mulkens 等^[2]提出的 EPE 计算方法 (本文将其简称为“Mulkens EPE 模型”) 被广泛采用, 但它所包含的随机因素并不够严格。对于最先进的技术节点, 随机误差在晶圆上的 EPE 占比已超过 50% , 因而需要定量 EPE 预算中的随机误差^[63]。除了 EPE 预算计算之外, 在大批量生产中使用套刻数据时也需要考虑随机因素。随机计量数据的正确使用有利于理解套刻误差对晶粒 (Die) 失效率概率的影响。Mack 等^[63]提出了一种计算更严格的 EPE 解析方法 (本文将其简称为“Mack EPE 模型”)。

接下来介绍 Mulkens EPE 模型和 Mack EPE 模型, 重点介绍 Mack EPE 模型对随机误差的建模。

3.1 Mulkens EPE 模型

如图 7(a) 所示, EPE 是指两个关键特征边缘 (模块和线性结构) 相对于它们的理想位置的相对位移。假设所有的全局变化都在晶粒到晶粒水平, 而所有的系统和局部随机性都在晶粒内水平, Mulkens 等^[2,5]提出了一种计算 EPE 的解析方法, 将不同的 EPE 预算组成部分联系起来, 如式 (5) 所示 (注: 文中变量和对应图片中变量表述有所区别, 图片保留原出处格式, 文中按国标规定书写, 下同)。

$$E_{\text{PE}_{\text{max}}} = \frac{H_{\text{Ropc}}}{2} + \frac{3\sigma_{\text{PBA}}}{2} + \frac{6\sigma_{\text{LWR}}}{\sqrt{2}} + \sqrt{(3\sigma_{\text{OVL}})^2 + \left(\frac{3\sigma_{\text{CDU}}}{2}\right)^2}, \quad (5)$$

其中,

$$\sigma_{\text{LWR}} = \sqrt{\sigma_{\text{LWR, line}}^2 + \sigma_{\text{LWR, block}}^2}, \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{CDU}} = \sqrt{\sigma_{\text{CDU, line}}^2 + \sigma_{\text{CDU, block}}^2}, \quad (7)$$

式中: $E_{\text{PE}_{\text{max}}}$ 为边缘放置误差的最大值; H_{Ropc} 是由 OPC 残差引起的 CD 误差的一半; σ_{PBA} 为邻近偏差均值 (PBA) 误差; σ_{LWR} 为 LWR 误差; σ_{OVL} 为光刻图案的位置偏移误差; σ_{CDU} 为 CDU 误差。

σ_{PBA} 源于不同光刻机之间的变化, 数值上等于光刻机之间的场平均 CD。当使用不同类型的光刻机 (如 ArF 光刻机和 KrF 光刻机) 时, 需要考虑邻近匹配^[64]。当使用单一光刻机组合时, 可以不用考虑 σ_{PBA} ^[6]。EUV 光刻技术虽然可以使用单次曝光对关键层进行图案化, 但对于不太关键的层, DUV 可实现总成本最小化, 因此光刻需要 EUV 和 DUV 搭配使用^[5]。 σ_{LWR} 来源于光刻胶和光子随机效应, 属于局部误差。

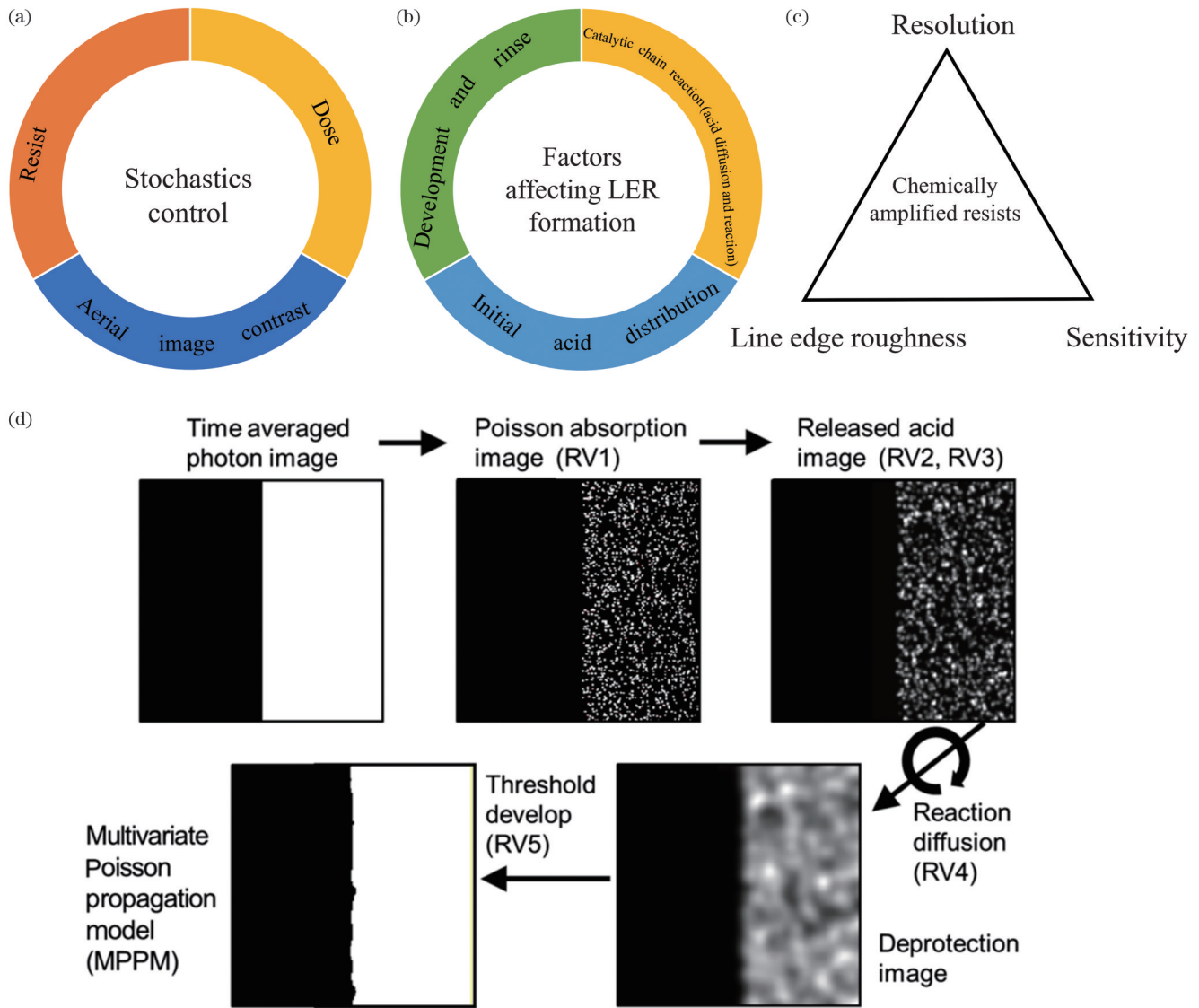


图 6 EUV 光刻用光刻胶。(a)控制随机效应的三种主要途径^[55];(b)影响 LER 形成的因素^[56];(c)CAR 的分辨率、线边缘粗糙度和灵敏度关系图(RLS 三角);(d)CAR 的多元泊松传播模型流程图^[60],已得到重印许可, Copyright 2018 SPIE, 通过 Copyright Clearance Center, Inc.

Fig. 6 Resists for EUV lithography. (a) Three main approaches to controlling stochastics^[55]; (b) the factors of affecting LER formation^[56]; (c) schematic representation of the relationship between resolution, line edge roughness, and sensitivity in CAR (the RLS triangle); (d) depiction of the multivariate Poisson propagation model (MPPM) model flow for CAR^[60], reprinted with permission, Copyright 2018 SPIE, permission conveyed through Copyright Clearance Center, Inc.

σ_{OVL} 属于全局误差。 σ_{CDU} 属于全局误差,包括掩模误差、光刻机误差和来自刻蚀和沉积过程的 CD 误差^[5]。

图 7(b)给出了结合各种 CD 和套刻误差计算 EPE 的计量方法。总的 EPE 通过计量输入的计算组合得到^[5]。光学和电子束晶圆测量系统在这一体系结构中占有重要地位。

为了适应更具挑战性的图形要求,EPE 需要一种整体方法来实现,该方法结合了掩模的计算优化(比如 OPC)、晶圆的套刻误差/CD 计量,可以更好地利用 DUV 光刻机、EUV 光刻机和其他工艺(如刻蚀)等进行优化^[3]。

图 7(c)给出了 Mulkens EPE 优化流程图(五步迭

代法),具体步骤为:1) 图案工艺设计;2) 光源掩模协同优化(SMO);3) 掩模 OPC;4) CD 变化控制(场和晶圆);5) 套刻计量与控制。

SMO 是一种计算光刻技术,通过同时优化光源与掩模图形来提高光刻成像质量。EUV 光刻的光学系统为反射式系统,掩模厚度大于光源波长(13.5 nm)。EUV 光刻和基于传统光刻的计算光刻技术存在很大差异^[65]。SMO 是一种关键的 RET,是提高 EUV 光刻成像质量的重要手段之一。随着技术节点的进一步推进,芯片设计的复杂度增加,计算光刻在光刻工艺开发和芯片制作过程中发挥着越来越重要的作用。机器学习在解决掩模优化方面具有巨大潜力^[11]。

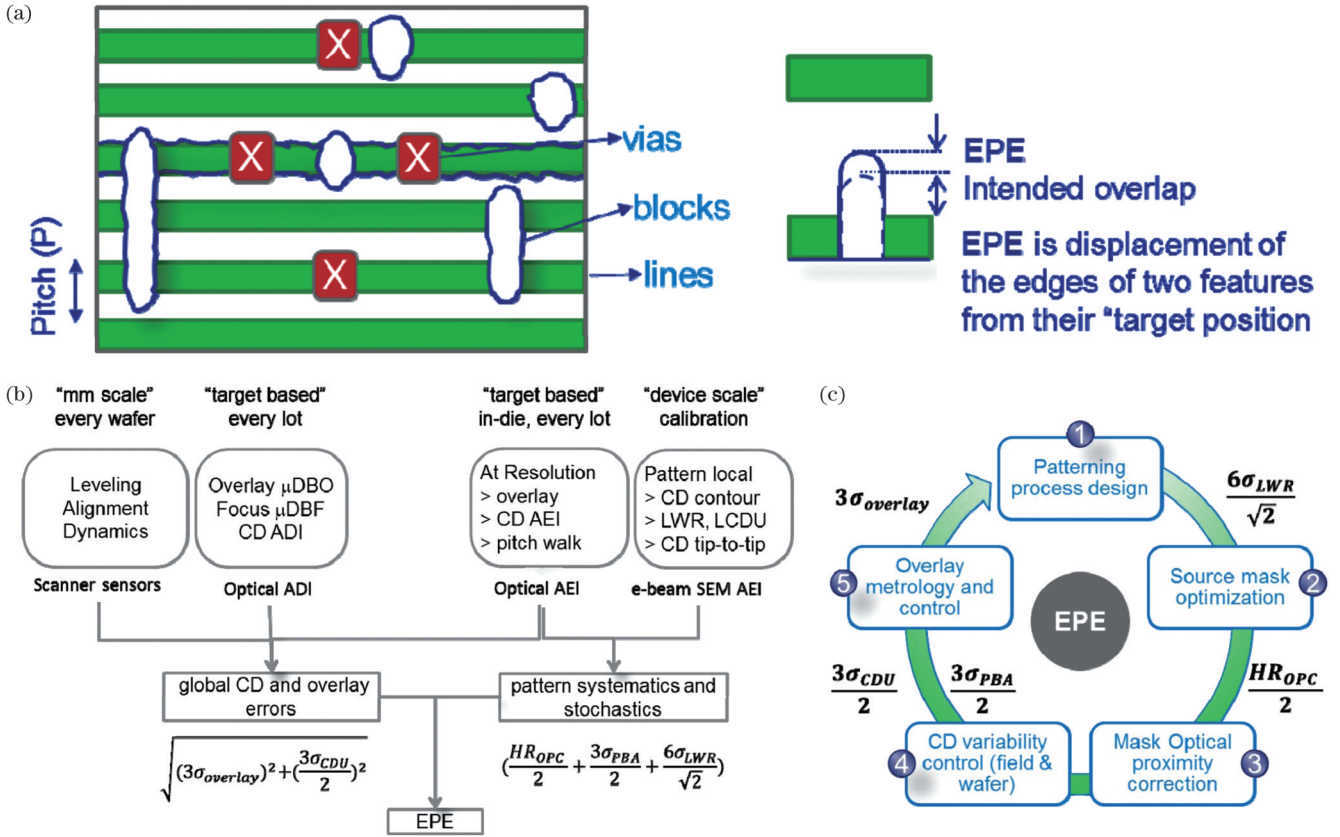


图 7 EPE 定义、计算和优化流程^[5], 已得到重印许可, Copyright 2018 SPIE。(a)EPE 的定义; (b)结合各种 CD 和套刻误差计量方法计算 EPE 的示意图; (c)EPE 优化流程图 (五步迭代法)
 Fig. 7 Definition, calculation, and optimization flow of EPE^[5], reprinted with permission, Copyright 2018 SPIE. (a) Definition of EPE; (b) diagram of the calculation of EPE from various CD and overlay metrology inputs; (c) EPE optimization flow (five-step iterative process)

3.2 Mack EPE 模型

Mack 等^[63]提出一种计算更加严格的 EPE 的解析方法。Mack EPE 模型适用于互补光刻的情况(密集的线和空由第二个图案步骤切割得到)。经正交切割特征修正的线、空和心轴图案的几何结构图如图 8 所示。

该模型通过对光刻图案失效的情况进行建模获得 $E_{PE_{max}}$ 。如图 8 所示,虽然只用到一条线,但该线两侧的空和心轴在统计上可以不同。光刻工艺失效形式如下: C_{D_1} 以及 C_{D_2} 缺失会导致切割不完整, C_{D_3} 与 C_{D_4} 缺失会导致过量切割达到下一个线。

对于一个打印-切割图案而言,决定失效形式的 C_D 可以表示为 $C_{D_{out}}$ 、 $C_{D_{line}}$ 、 $C_{D_{space}}$ 、 O_{VL} 以及周期 P (具体见图 8)。以 C_{D_1} 为例,它可表示为

$$C_{D_1} = \frac{C_{D_{out}}}{2} - \frac{C_{D_{line}}}{2} - O_{VL}, \quad (8)$$

式中: O_{VL} 为切和线之间的垂直套刻误差; $C_{D_{out}}$ 为垂直维度的切特征; $C_{D_{line}}$ 为水平线垂直宽度。

当 $C_{D_1} \leq 0$ 时,认为光刻工艺失效。

假设 $\sigma_{C_{D_{out}}}$ 、 $\sigma_{C_{D_{line}}}$ 和 O_{VL} 彼此统计独立并符合高斯分布,则失效形式 C_{D_1} 的 σ^2 可表示为

$$\sigma_{C_{D_1}}^2 = \frac{1}{4} (\sigma_{C_{D_{out}}}^2 + \sigma_{C_{D_{line}}}^2) + \sigma_{O_{VL}}^2 \quad (9)$$

在 C_{D_1} 造成的失效形式中, $\sigma_{C_{D_{out}}}$ 和 $\sigma_{C_{D_{line}}}$ 来源于不同的工艺过程,它们之间彼此独立,不需要考虑相关系数。

$C_{D_{line}}$ 的误差可以分为全局误差和局部误差。当解释失效率时,全局误差可以分为系统(跨晶片和跨场)和随机变化。前者可以视为 $C_{D_{line}}$ 平均值的偏移量,后者可统计表示为 σ_{GCDU} 。随机效应导致局部误差。总的 CDU 为

$$\sigma_{CDU}^2 = \sigma_{GCDU}^2 + \sigma_{LCDU}^2 \quad (10)$$

这里的 LCDU 不是整条线的关键尺寸的变化,而是与切割图案尺寸相同长度的线段的关键尺寸的变化。

当切割图案线长度 (L) 远大于相关长度 (ξ) 时, σ_{LWR} 和 $\sigma_{LCDU_{line}}$ 的关系^[66-67]为

$$\sigma_{LCDU_{line}} \approx \sigma_{LWR-inf} \sqrt{\frac{(2H+1)\xi}{L} \left(1 - \frac{\xi}{L}\right)}, \quad (11)$$

其中,

$$\sigma_{LWR-inf}^2 = \sigma_{CD}^2(L) + \sigma_{LWR}^2(L), \quad (12)$$

式中: $\sigma_{LWR-inf}$ 为无限长度图案的线宽粗糙度; L 为切割特征的线长度; ξ 为相关长度; H 为粗糙度指数; $\sigma_{LWR}(L)$ 与 $\sigma_{CD}(L)$ 分别代表有限长度图案的线宽粗糙

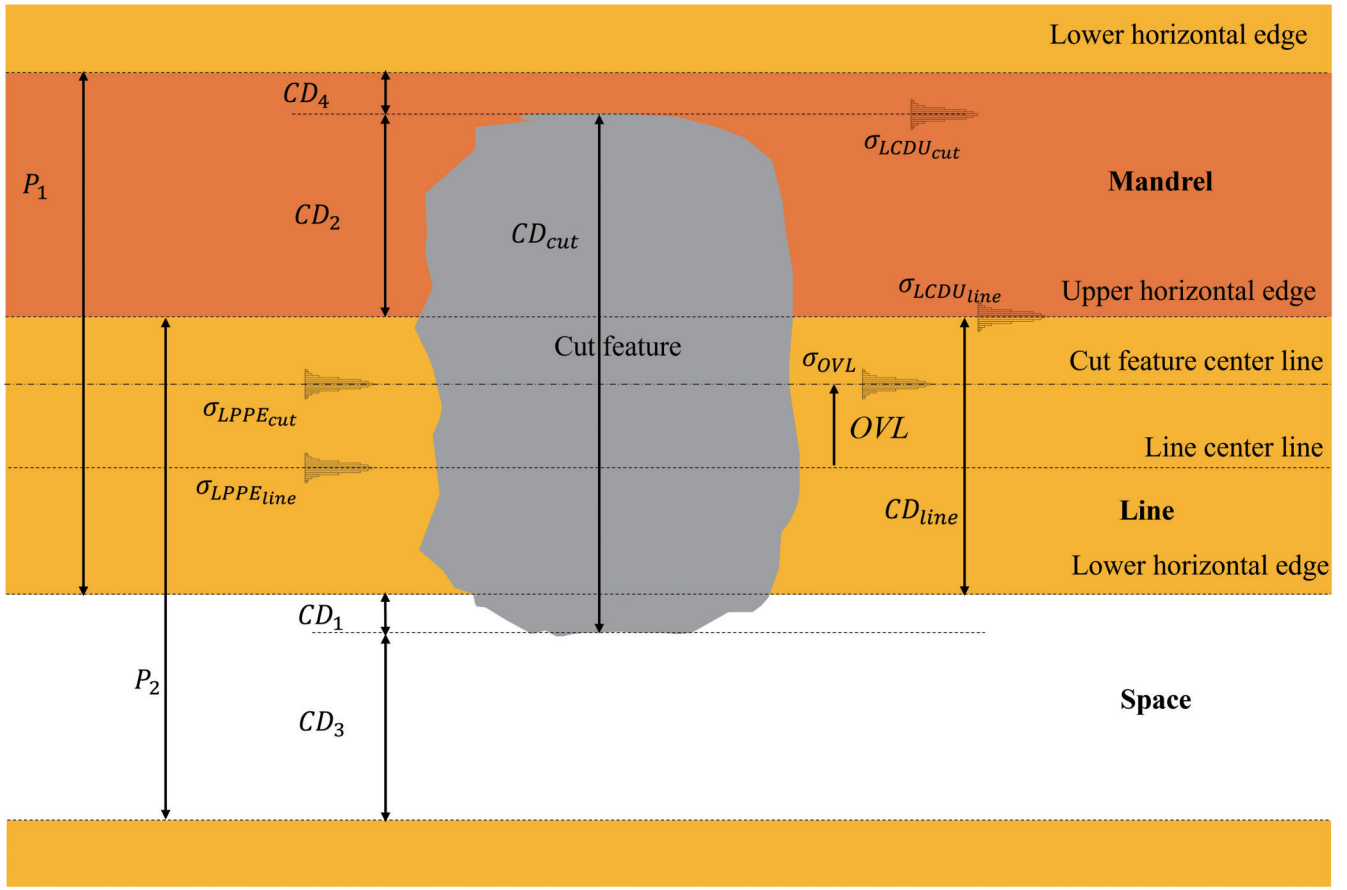


图 8 经正交切割特征修正的线、空和心轴图案的几何结构图(含随机参数)^[63], 经许可修改, Copyright 2023 SPIE

Fig. 8 Geometry of a generic line, space, and mandrel pattern modified by an orthogonal cut feature (with stochastic parameters)^[63], adapted with permission, Copyright 2023 SPIE

度与线宽的 σ 值。

同理可以得到 $\sigma_{LCDU_{cut}}$ 、 $\sigma_{LWR_{inf}}$ 、相关长度和粗糙度指数的量化见文献^[67]。可以通过扫描电子显微镜 (SEM) 测量线的宽度^[68]和图案的关键尺寸^[66,68], 在此基础上便可以得到 $\sigma_{LWR}(L)$ 与 $\sigma_{CD}(L)$ 。

为了估算套刻误差的局部变化, 需要考虑线和切的局部图案放置误差 (PPE)。 O_{VL} 的计算公式为

$$O_{VL} = O_{VL}(x, y) + P_{PE_{line}} + P_{PE_{cut}}, \quad (13)$$

式中: $O_{VL}(x, y)$ 为套刻误差平均值; x 和 y 代表晶圆、场或晶粒内位置; $P_{PE_{line}}$ 和 $P_{PE_{cut}}$ 分别为线段和切割特征的 PPE (平均值通常为 0, 对于给定的图案为定值, 即所谓的非 0 偏移量)。 σ_{OVL}^2 可以表示为

$$\sigma_{OVL}^2 = \sigma_{Res}^2 + \sigma_{LPPE_{cut}}^2 + \sigma_{LPPE_{line}}^2 \quad (14)$$

结合式(12)和式(15), 失效形式 C_D 的 σ^2 为

$$\sigma_{C_{D_1}}^2 = \frac{1}{4} \sigma_{CDU_1}^2 + \sigma_{Res}^2 + \sigma_{LPPE_{cut}}^2 + \sigma_{LPPE_{line}}^2, \quad (15)$$

其中,

$$\sigma_{CDU_1}^2 = \sigma_{LCDU_{cut}}^2 + \sigma_{GCDU_{cut}}^2 + \sigma_{LCDU_{line}}^2 + \sigma_{GCDU_{line}}^2 \quad (16)$$

基于上述过程得到的测量数据, 可以基于偏移计数进行失效概率预测。定义一个高斯累积分布函数用于判断失效率, 即

$$f(x_0, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \int_{-\infty}^{x_0} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx, \quad (17)$$

式中: x_0 为失效阈值; μ 为失效形式 C_D 的名义平均值。

当 $x_0 = 0$ 时, 通常 $\mu \gg \sigma$, 公式(17)可以化简为

$$f(x_0 = 0, \mu, \sigma) \approx \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi} \mu} \exp\left(-\frac{\mu^2}{2\sigma^2}\right) \quad (18)$$

由于失效率与 $\frac{\sigma}{\mu}$ 成正比, 通过定义不同失效形式

下的 $\frac{\sigma}{\mu}$, 以 C_{D_1} 为例, 如式(19)所示, 将 C_{D_1} 表示为 C_{D_1}

目标值 ($C_{D_1-nominal}$) 与 ΔC_{D_1} (由 $C_{D_{cut}}$ 、 $C_{D_{line}}$ 和 O_{VL} 造成的全局系统误差) 之差, 如式(20)所示。最终, 可以得到 $E_{PE_{max}}$ (即 $C_{D_1-nominal}$), 如式(21)所示。

$$\frac{\sigma_{C_{D_1}}}{C_{D_1}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{4} \sigma_{CDU_1}^2 + \sigma_{OVL}^2}}{\frac{1}{2}(C_{D_{cut}} - C_{D_{line}}) - O_{VL}}, \quad (19)$$

$$C_{D_1} = C_{D_1-nominal} - \Delta C_{D_1}, \quad (20)$$

$$E_{PE_{max}} = \Delta C_{D_1} + k\sigma_{C_{D_1}}, \quad (21)$$

式中: k 为乘数因子。

4 EPE 关键参数测量

EPE 可以通过结合 CD 和套刻误差来计算^[5]。CD 和套刻误差计量是半导体行业计量的重要组成部分。本节分别对 CD 和套刻误差测量方法进行介绍,重点对各种检测方法的原理和优缺点进行总结,并分析其发展趋势。

4.1 CD 测量方法

精确测量纳米结构的尺寸(通常包括纳米尺度特征的宽度、高度、侧壁角和线边缘粗糙度/线宽度粗糙度等)对于工艺开发和控制至关重要^[69]。通常,线宽是最重要的参数,因此在制造过程计量中,它经常被描述为 CD。随着光刻技术的极限被推到小于 10 nm 技术节点,对 CD 的控制变得更加具有挑战性^[70]。本节先对 CD 测量的要求、方法及其原理进行介绍,而后探讨 CD 测量的发展趋势。

4.1.1 CD 测量要求

如式(3)所示,CD 随着数值孔径的增大而减小,并与曝光波长和 k_1 成正比^[32]。增大数值孔径需要考虑焦深和视场等因素;减小波长需要考虑可选取的光源、使用环境、所需光学材料和光刻胶等因素。增大数值孔径和减小曝光波长是非常复杂的选择^[46]。减小 k_1 需要考虑成像质量,可以利用 RET 来提高成像质量^[71]。

目前计算机芯片内部器件结构的 CD 为 5~7 nm,并且还在不断减小^[72]。器件的 3D 复杂性也在不断增加^[73]。为了实现纳米级的特征均匀性,半导体制造商将在线尺寸测量纳入制造过程中,以保证严格的过程控制^[74]。HVM 不仅需要过程控制技术满足 CD 计量不确定度要求,还需要满足自动化、高通量、在线计量、非破坏性和统计显著等特征^[75]。

4.1.2 CD 测量方法及其原理

目前在线计量 CD 的测量方法包括成像技术和光谱/散射/基于模型的技术,前者主要包括特征尺寸测量用扫描电子显微技术(CD-SEM)和特征尺寸测量用原子力显微技术(CD-AFM),后者主要包括光学 CD 法(OCD)和特征尺寸测量用小角 X 散射法(CD-SAXS)。

1) CD-SEM

CD-SEM 是集成电路在线测量最通用的技术之一。SEM 原理是:利用聚焦的高能电子束扫描样品,光束与物质相互作用后产生二次电子或背散射电子等信号,这些电子(和其他信号)被探测器收集,得到亚纳米级分辨率的特征形貌参数^[76]。电子束检测灵敏度高,但吞吐量较光学检测方法低^[77]。SEM 的测量速度较慢,视场较小(约为 1~2 μm),不适合快速批量控制,使用大视场(如 12 μm ,分辨率为 1 nm)系统可以将吞吐量提高至少一个数量级。采用多电子束系统可使吞吐量比大视场单光束系统提高 1~2 个数量级^[5]。SEM 难以对样品进行三维测量,存在绝缘体荷电问

题,易对样品造成污染或损伤,如引起光刻胶收缩^[75]。CD-SEM 的测量不确定度对于现代技术的发展至关重要。采用参考计量学和数值模拟方法可对 SEM 进行校正,但这两种方法用于偏差校正时速度较慢,需要采用实时 CD-SEM 进行偏差校正^[78]。

2) CD-AFM

AFM 采用经典的光学杠杆技术来检测悬臂梁的弯曲和扭转,其测量大多采用间歇接触模式^[79]。AFM 具有分辨率高(垂直方向 $< 0.01 \text{ nm}$, 横向 $< 1 \text{ nm}$)、可进行三维测量、在线兼容性和纳米级测量精度等优点^[76]。为了精确地测量纳米尺度的特征,探针的尺寸必须具有很高的精度^[80]。

在半导体工业,通常会制造具有陡峭侧壁的微/纳米结构,传统的 AFM 不适合甚至无法对其进行测量^[81]。可以利用倾斜法^[82]或采用具有特殊几何结构的探针^[83]进行测量。为了使不同的表面结构能够被探针接触,还需要采用新的扫描策略和附加反馈回路^[84]。对于倾斜法,虽然所用探针形状简单(如锥形),但多次测量需要在不同的探针角度下进行(最多可偏离法线 $\pm 40^\circ$),测量数据集对准和融合的不确定性可直接影响测量的不确定度。CD-AFM 虽然可以在单个图像中获得纳米特征的三维形状,但所用到的探针的几何形状更复杂,对探针的表征提出了严峻挑战^[85]。如图 9(a)所示,CD-AFM 所用探针为圆盘形状,以优化侧壁接触。由于探针磨损会直接影响测量精度,CD-AFM 探针磨损也是需要考虑的问题^[86]。CD-AFM 是一种无损的参考计量仪器,主要用于样品的物理参数标定^[87]。CD-AFM 可以被用于 EUV 掩模标准品的精确和可追溯校准^[79]。

3) OCD

OCD 也被称为光学散射测量,是一种间接测量方法。将椭偏法和/或反射法应用于周期性光栅目标,入射光照射到光栅目标上,测量不同波长光在不同偏振下的散射,收集原始光谱,并通过基于模型的解进行回归或匹配预制的多参数库来求解多个参数,以描述测量目标^[75]。正向散射模型的数值求解方法包括严格耦合波分析(RCWA)、FDTD、边界元法(BEM)和有限元法(FEM)^[88]。求解逆问题的方法有两种:一种是基于模型的方法,如库搜索和非线性回归法(如 Levenberg-Marquardt 算法和人工神经网络);另一种是无模型方法,如最大贡献分量回归(MCCR)^[89]。非周期结构建模会使 OCD 出现建模问题,机器学习解决方案在未来过程控制和监控方面有很大潜力^[90]。

OCD 可以实现亚纳米精度(但测量的量是整个探测区域的平均值),可以在一次快速的单次测量中提供丰富的几何信息(如 CD、侧壁角、沟槽深度和薄膜厚度),得到的测量数据具有无损和高通量的优点,可用于获取高采样的在线测量数据^[91]。如果光子能够穿透

目标结构, OCD可在单次测量中表征整个目标结构, 直至硅衬底^[92]。但 OCD 所获得的参数是入射光斑区域(直径通常为 15~40 μm)内特征尺寸的统计平均值, 因而不能测量离散特征^[75]。随着先进节点下结构的复杂度增加, 参数互相关问题变得越来越严重, 另外, 随着特征尺寸的减小, 一些特征参数将受到量子限制, 如折射率(n)和消光系数(k)非常依赖于特征的尺寸和几何形状^[75, 93]。

除了对 OCD 的基本工具特性进行改进外, 还可以通过增加测量信息的多样化来提高 OCD 的计量能力。目前, 大多数 OCD 解决方案都是基于完善的宽带光谱反射和椭圆偏振技术^[94]提出的, 这些技术还可以在不同的入射角、方位角、偏振和波长下对样品进行测量。图 9(b)给出了多通道 OCD 示意图(包括正入射和斜入射照明及收集通道)。基于穆勒矩阵光谱椭圆偏振法的散射测量可用来表征复杂的三维结构^[95]。

4) CD-SAXS

该方法将周期性光刻结构阵列视为衍射光栅, 通过分析衍射图样提取光栅中结构的物理尺寸信息。由于 X 射线的波长足够小, 其衍射模式可以用经典的衍射理论来分析^[72]。CD-SAXS 是基于经典的 X 射线散射的方法, 避免了与 n, k 光学特性相关的问题, 并且对电子密度对比度敏感^[75]。X 射线穿透力强, 很容易探测到埋藏或嵌入的结构。CD-SAXS 示意图如图 9(c)所示, 将周期性纳米结构放入准直的 X 射线束中(以线光栅为例, 光栅轴线平行于旋转轴), 旋转样品, 测量透射散射随入射角的变化, 光束散度决定了测量的角分辨率(光束散度必须足够小, 以分辨单个散射峰)^[74]。CD-SAXS 可用于确定周期、CD、剖面侧壁角、线高及其相关线边粗糙度和线宽粗糙度等信息^[96]。

由于数据在倒易空间中, 长度尺度越小, 散射角就越大, 因而越容易分辨^[76]。CD-SAXS 在测量亚纳米精度线光栅的平均形状方面具有非常大的潜力^[70]。但是, CD-SAXS 利用倒易空间映射(RSM), 需要用多个入射角度(AOI)扫描来获取样品的倒易空间子集并解决逆问题, 以提取纳米结构的参数, 从而对吞吐量造成了很大限制^[97]。

CD-SAXS 主要有透射式(T-SAXS)和掠入射式(GI-SAXS)两种测量模式^[88]。T-SAXS 的 X 射线束可以聚焦到 100 μm 以下的光斑尺寸, 可以穿透公称厚度为 0.7 mm 的硅晶圆^[72]。GI-SAXS 所需采样面积较大, 通常为几平方毫米^[72], 但可用于许多存储器(因为其中的大面积电路是大型的单个光栅)^[75]。基于同步加速器的 X 射线束流被广泛用于 CD-SAXS 的开发, 但不适宜在同步加速器源上建立生产线。缺乏足够亮度的实验室 X 射线源是影响 CD-SAXS 进入市场的重要原因^[74]。除了对光源的亮度进行改进(提高了大约一个数量级)外, 还可以利用 CD-SAXS 检测新的存储结构, 例如叠层高深宽比闪存(3D NAND)和动态

随机存取存储器(DRAM), 其密集的高纳米结构阵列使得 X 射线的散射强度提高了几个数量级, 从而使得目前的实验室 X 射线源能够在几分钟内完成厂内测量^[72]。而 3D NAND 的待测参数多, 利用 OCD 测量逆问题求解时参数之间的耦合程度越发严重^[88]。

4.1.3 CD 测量发展趋势

高数值孔径 EUV 光刻的焦深较小, 需要使用更薄的光刻胶剂薄膜(厚度 < 15 nm)^[25], 这对传统的 CD 计量(如光学 CD 或 SEM)提出了重大挑战^[98]。随着特征尺寸要求发展到 < 20 nm, 显影过程中的图形倒塌成为一个严重的限制因素, 在如此小的周期下, 倒塌的临界长宽比接近 1:1, 因而, 需要使用极薄的光刻胶来确保图案化的顺利进行^[46]。随着光刻胶厚度的减小, SEM 图像质量(如噪声水平和图像对比度)急剧下降^[99]。为了获得稳健可靠的测量结果(尤其是对于复杂的二维图形), 需要低噪声的 CD-SEM 图像。在图像采集过程中减少 CD-SEM 噪声的做法(如增加帧数和增加光束电流)增加了采集时间, 并有可能损伤样品(尤其是对电子敏感、厚度小的 EUV 光刻胶^[99])。人工智能算法在图像处理领域受到了广泛关注, 已有人将深度学习神经网络用于 SEM 低帧图像的去噪^[100]。更薄的光刻胶允许 AFM 达到更高的深度精度和更高的吞吐量^[98]。将 AFM 与功率谱密度(PSD)分析相结合, 可以测量和描述图案的微小形貌变化^[101]。凭借 X 射线的穿透能力以及对重建特征尺寸的高空间分辨率, CD-SAXS 能够用于高长宽比结构的测量^[72]。

传统的光电成像虽然取得了长足发展, 但其成像性能已经接近极限, 并且通常需要复杂的透镜结构, 同时, 其高分辨率和广域相互制约。计算成像技术通过对光场信息(如相位、光谱和偏振)进行采集与计算, 可获得传统成像无法达到的信息利用率与解译度, 在增大成像视场、提升成像分辨率和扩大探测距离等方面具有很大优势^[102]。例如: 结构光照明显微镜(SIM)通过将高频信息调制进入光学系统传递函数实现了超分辨, 通过引入非线性可使分辨率进一步提高^[103]; 叠层成像先收集样品不同位置处的衍射图案, 然后采用迭代方法获得重构图案, 其传递函数理论完美, 分辨率受波长限制^[104]。叠层成像示意图如图 9(d)所示。叠层成像, 如 EUV 叠层成像^[105]和 X 射线叠层成像^[106], 由于具有无透镜成像等优点, 在半导体测量与检测方面也具有巨大潜力。

4.2 套刻误差测量

目前, 半导体元件(如存储器和逻辑中央处理单元)是以一层一层的方式构建的。套刻误差指在特定层内已光刻曝光并显影的图案与另一层中预先存在的底层结构的横向位移^[97]。不同光刻工艺技术对套刻误差的要求不同。单次曝光工艺下, 套刻误差通常要求为半周期的四分之一, 但对于双重曝光, 套刻误差通常要求为半周期的六分之一^[5]。这主要是因为随着技术

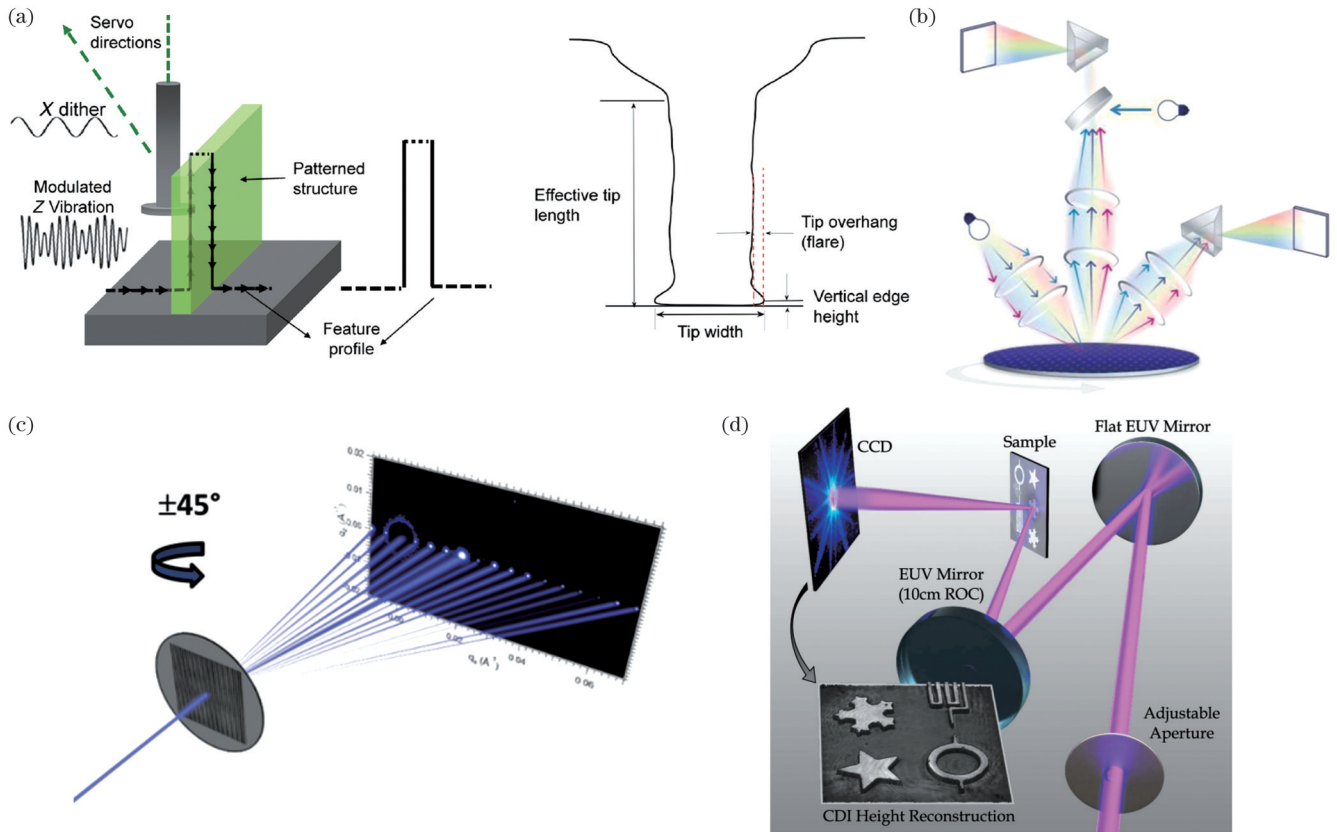


图9 CD测量方法示意图。(a)CD-AFM^[86],已得到重印许可, Copyright 2020 SPIE,通过 Copyright Clearance Center, Inc.;(b)多通道OCD示意图^[94](包括正入射和斜入射照明及收集通道),已得到重印许可, Copyright 2021 SPIE;(c)CD-SAXS结构图^[74],已得到重印许可, Copyright 2017 SPIE,通过 Copyright Clearance Center, Inc.;(d)反射模式菲涅耳平面叠层成像的实验装置^[105],已得到重印许可, © Optical Society of America (或 Optica Publishing Group)

Fig. 9 Schematics of CD metrology method. (a) CD-AFM^[86], reprinted with permission, Copyright 2020 SPIE, permission conveyed through Copyright Clearance Center, Inc.; (b) multichannel OCD^[94] (including normal incidence, oblique illumination, and collection channels), reprinted with permission, Copyright 2021 SPIE; (c) CD-SAXS geometry^[74], reprinted with permission, Copyright 2017 SPIE, permission conveyed through Copyright Clearance Center, Inc.; (d) experimental setup of reflection-mode Fresnel ptychography^[105], reprinted with permission, © Optical Society of America (or Optica Publishing Group, as applicable)

节点的更迭,工艺复杂度增加,光学邻近误差、光子和光刻胶随机性等因素的影响越来越大^[5,9,63],导致EPE预算中各参数的误差占比发生了变化。如图1(b)所示,套刻误差占比从9~13 nm技术节点的34%下降到5~7 nm技术节点的21%^[3]。目前,高端制造业实现的套刻精度为1~2 nm,套刻误差计量要求精度在0.1~0.2 nm之间^[97]。套刻误差控制预算的不断紧缩推动了套刻误差计量技术的发展^[107-108]。本小节首先介绍套刻误差管控流程,然后介绍套刻误差测量技术,最后探讨套刻误差测量的发展趋势。

4.2.1 套刻误差管控流程

图10(a)给出了高空间频率套刻误差控制方案示意图^[109]。在光刻工艺中,套刻误差的控制由三部分协同完成,这三部分分别是光刻机对准系统、套刻误差测量系统以及计算机模型计算与修正反馈系统。

套刻误差的控制流程具体可分为以下3步骤^[110]:

1) 光刻机对准系统测量掩模上图形和硅片的位

置,完成对准并实施曝光。

2) 套刻误差显影后测量(ADI):测量不同层上套刻标识之间的相对偏移,并将其作为当前层图形与参考层图形的套刻误差。该步骤通常需要高的采样频率(每批次采样测量约800个点×4片晶圆^[111]),之后把所测得的套刻误差数据输入对准修正软件,根据模型计算套刻误差值可被修正的量,并反馈给光刻机,对曝光位置作进一步修正。

3) 套刻误差刻蚀后测量(AEI)。每隔数天测量,每次测量约1万个点×2片晶圆^[111]。随着尺寸减小,对晶粒内套刻误差控制的要求越来越高。典型的AEI计量偏置校正技术通常使用CD-SEM,但其采样频率低。先进的技术节点推动了更高的光刻套刻规格(如更高的吞吐量)。为此,可将高频穆勒矩阵椭偏仪与基于物理的机器学习算法相结合,以便在达到高测量扫描吞吐量的同时还能确保测量的高准确度^[112]。

总套刻误差预算来源主要包括光刻机、工艺、计量

和掩模^[113]。随着器件复杂度的增加,需要考虑新的套刻误差来源,如最新的 3D NAND 技术节点需要考虑由应力引起的器件内套刻误差^[114]。工艺(比如化学机械研磨和刻蚀)引起的误差超过其预算的一半^[115]。对于 10 nm 及以下的设备节点,许多基于工艺(如刻蚀、退火和化学机械抛光)的表面位移会对套刻误差预算有影响。晶圆-晶圆和晶圆内部的工艺变化可能导致

面内表面位移发生显著变化,最终影响套刻误差^[116]。针对不同的套刻误差来源,需要采取相应的优化方式^[117]。套刻误差优化流程^[5]如图 10(b)所示。首先,确保将 ArF 浸没式光刻机平台和 EUV 光刻机平台之间的内在设计差异最小化;然后,将光刻机网格校准设置为公共参考;接下来,校正来自光学、掩模夹持和保护膜差异的场内系统。

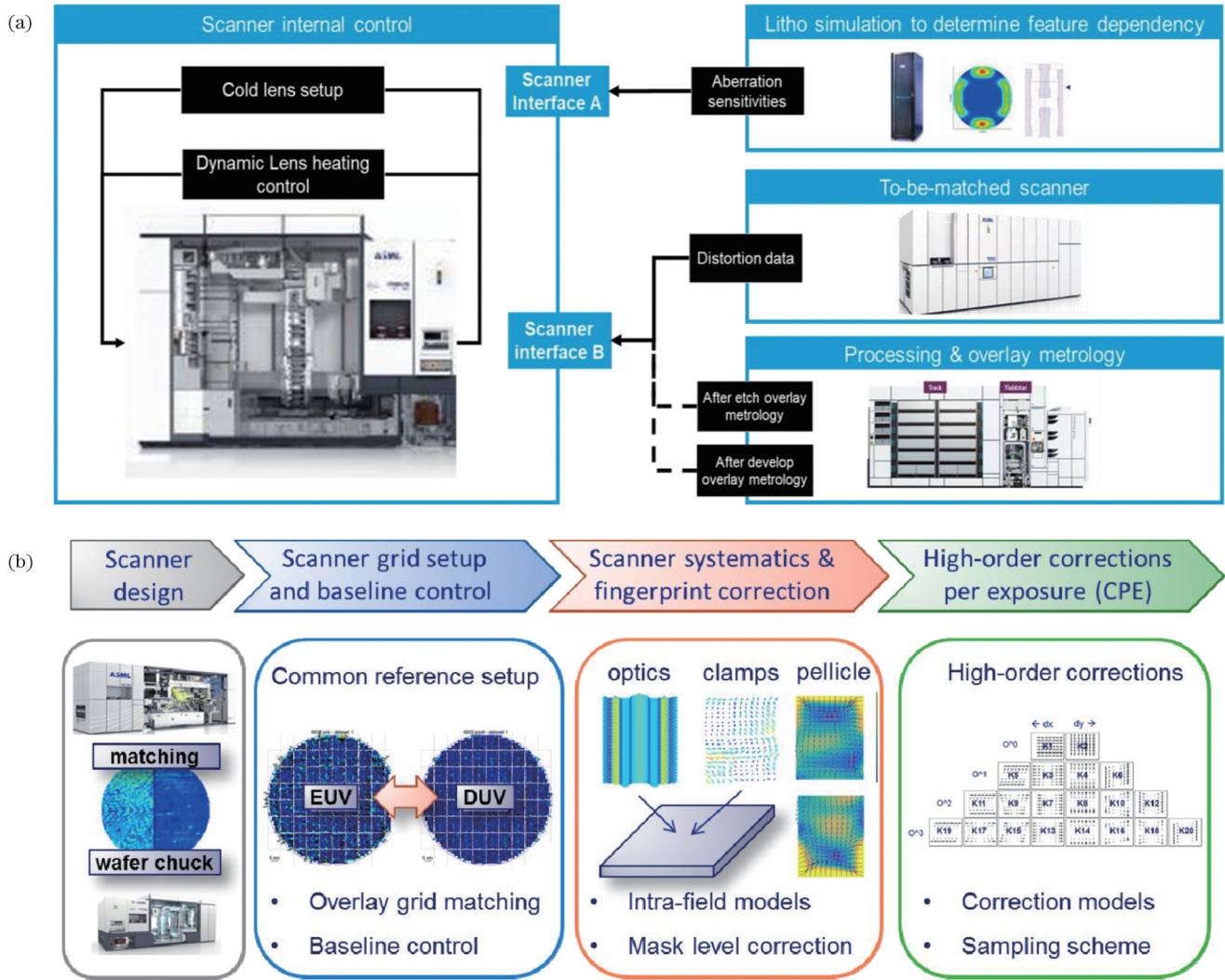


图 10 套刻误差控制示意图和优化流程图。(a)高空间频率套刻误差控制示意图^[109],已得到重印许可, Copyright 2022 SPIE; (b)套刻误差优化流程图^[5],已得到重印许可, Copyright 2018 SPIE

Fig. 10 Overlay control schemes and optimization flow. (a) Schematic of the high spatial frequency overlay control scheme^[109], reprinted with permission, Copyright 2022 SPIE; (b) overlay optimization flow^[5], reprinted with permission, Copyright 2018 SPIE

4.2.2 套刻误差测量技术

套刻误差测量主要是基于光学原理的测量,如基于图像的套刻测量(IFO)和基于衍射原理的套刻测量(DBO)^[88]。鉴于光学测量技术准确度的限制,亟待开发辅助或新测量手段^[118],如基于电子束的套刻误差辅助测量技术。

1) IBO

IBO是集成电路制造中最常用的测量套刻误差值的技术之一,它通过探测不同层上套刻标识的相对偏

移来获得相应的套刻误差。这种技术在套刻标识而不是产品本身上进行测量,这种不匹配会导致从套刻标识推断出的套刻误差与实际设备的套刻误差(OPO)存在偏差^[119]。随着逻辑设计规则要求不断缩小至 3 nm, OPO 成为限制良率的最关键因素之一^[9]。IBO 存在自身测量技术精度有限、测量设备之间的匹配和测量设备导致的测量误差(TIS)高的问题^[120]。

工艺会严重影响套刻标识,从而导致与不准确性相关的误差,需要进行标识设计^[121]。TIS是一种由工

具不对称引起的测量误差,通常用于表征计量工具的准确度。套刻测量的非准确度误差通常由透镜像差、透镜对准、光照对准和被测标识上的不对称引起。TIS 会影响总测量不确定度 (TMU) 和工具对工具的匹配。可通过对每个位点进行 0° 和 180° 测量来纠正,但这样做降低了吞吐量,不适合 HVM。利用机器学习算法可以预测 IBO 的 TIS 校正^[122]。

由于引入了硬掩模 (如 TiN), 基于光学的套刻误差测量更加困难^[117]。扫描探针显微镜 (SPM) 在光学不透明材料的套刻误差测量方面具有广阔的应用前景,如地下超声共振力显微镜 (SSURFM) 可用于 IBO^[123]。

2) DBO

如图 11(a) 所示, DBO 套刻标识被设计成光栅图案^[124]。对经上下结构衍射后的正负一阶衍射光的干涉信号进行测量, 衍射光强度与套刻误差 (O_v) 的关系^[125]为

$$I_{+1} = I_b + I_0 \cos\left(\beta + \frac{2\pi}{P_D} O_v\right), \quad (22)$$

$$I_{-1} = I_b + I_0 \cos\left(\beta - \frac{2\pi}{P_D} O_v\right), \quad (23)$$

式中: I_{+1} 和 I_{-1} 分别为正负一阶衍射光强度; I_b 为恒定背景强度; I_0 为含套刻信息的干涉项的强度; β 为相位项; P_D 为所用光栅周期。

两个一阶衍射光的不对称干涉强度 A 定义为

$$A = I_{+1} - I_{-1} = 2I_0 \cos(\beta) \sin\left(\frac{2\pi}{P_D} O_v\right). \quad (24)$$

套刻误差通常在几纳米, P_D 通常在几百纳米^[125], 因此式 (24) 可以近似为

$$A = K O_v, \quad (25)$$

其中,

$$K = 2I_0 \cos(\beta) \frac{2\pi}{P_D}, \quad (26)$$

式中: K 为比例因子。

为获得套刻误差, 在顶部和底部光栅的设计中使用了两个固定且相反的位移 $+d$ 和 $-d$ 。测量到的相应的 A^+ 和 A^- 可以表示为

$$A^+ = K(O_v + d), \quad (27)$$

$$A^- = K(O_v - d), \quad (28)$$

套刻误差的计算公式为

$$O_v = d \frac{A^+ + A^-}{A^+ - A^-}. \quad (29)$$

理想情况下, 用于计算套刻误差的信号仅来自上下光栅之间套刻标识产生的不对称信号。但实际上, 工艺引起的不对称, 如光栅不对称和光栅不均衡也会对上述测量的不对称信号产生贡献^[126]。理论研究表明, 收集高阶衍射光强可以在很大程度上削弱化学机械研磨和刻蚀等工艺导致的光栅非对称变形对测量

的影响^[127]。

当套刻标识对称时, 测量精度仅受光子散粒噪声的限制。套刻标识变形会给测量精度带来很大影响, 而且这一影响远超出了基本光子散点噪声限制对测量的影响。在传统的单一波长套刻读取一个套刻标识的基础上, 还需要额外的信息: 当套刻标识变形较小时, 额外信息可以来自多个波长; 较大的不对称标识变形会引起显著的重心偏移, 需要套刻标识多样化或对堆栈进行描述^[124]。

多波长测量方法可以理解为单波长测量的延伸。基于式 (29) 可以得到公式^[124]

$$A^+(\lambda, \theta, P_{ol}) = A^-(\lambda, \theta, P_{ol}) \frac{O_v + d}{O_v - d} + C, \quad (30)$$

式中: λ 为测量波长; θ 为测量入射角; P_{ol} 为测量偏振; C 是与测量条件、加工无关的常数。

如图 11(b) 所示, 至少测 2 个波长才可以通过斜率获得套刻误差。当不对称很小到中等程度时, 可准确测量套刻误差。如图 11(c) 左图所示, 大部分套刻标识的不对称 ($\approx 95\%$) 仅影响 A^+/A^- 的偏移量, 不影响斜率; 但在有些情况下, 会同时影响偏移量和斜率, 如图 11(c) 右图所示。

对于单晶粒器件来说, 需要在晶粒内测量套刻误差。对于这种晶粒测量, 为使测量结果不受测量标识周围产品结构的影响, 可以采用基于偏振角分辨光学散射测量的 μ DBO^[128]。图 11(d) 给出了 μ DBO 的套刻误差测量方法示意图。由于套刻误差, 顶部光栅与底部光栅不对准, 会产生正负一阶衍射效率的不对称性。套刻误差的计算公式^[129]为

$$O_v = \frac{P}{2\pi} \arctan \left[\tan \left(\frac{2\pi}{P_\mu} d \right) \left(\frac{\Delta I^+ + \Delta I^-}{\Delta I^+ - \Delta I^-} \right) \right], \quad (31)$$

其中,

$$\Delta I^+ = I_4 - I_2, \quad (32)$$

$$\Delta I^- = I_3 - I_1, \quad (33)$$

式中: P 为所用光栅周期; d 为在顶层引入的偏移量。

与基于强度的套刻误差测量相比, 基于相位测量的 cDBO 可以提供更稳定准确的套刻误差测量, 在一些情况下可以降低对多波长技术的要求^[129]。图 11(e) 给出了 cDBO 的套刻误差测量方法示意图。顶部和底部光栅有不等的周期 (比如 M-pad 代表顶部光栅的周期大于底部光栅的周期, 而 W-pad 则相反)。由于 cDBO 的衍射方向不再相同, 因此将出现条纹图案, 其周期 P_m 仅取决于所使用的两个周期, 即

$$P_m = \frac{P_1 P_2}{|P_1 - P_2|}. \quad (34)$$

套刻误差被编码到 4 个条纹图案的错位中。通过添加 M 相位和 W 相位来提取套刻误差^[129], 即

$$2\pi \frac{P_1 + P_2}{P_1 P_2} O_v = [(\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_3 - \varphi_4)], \quad (35)$$

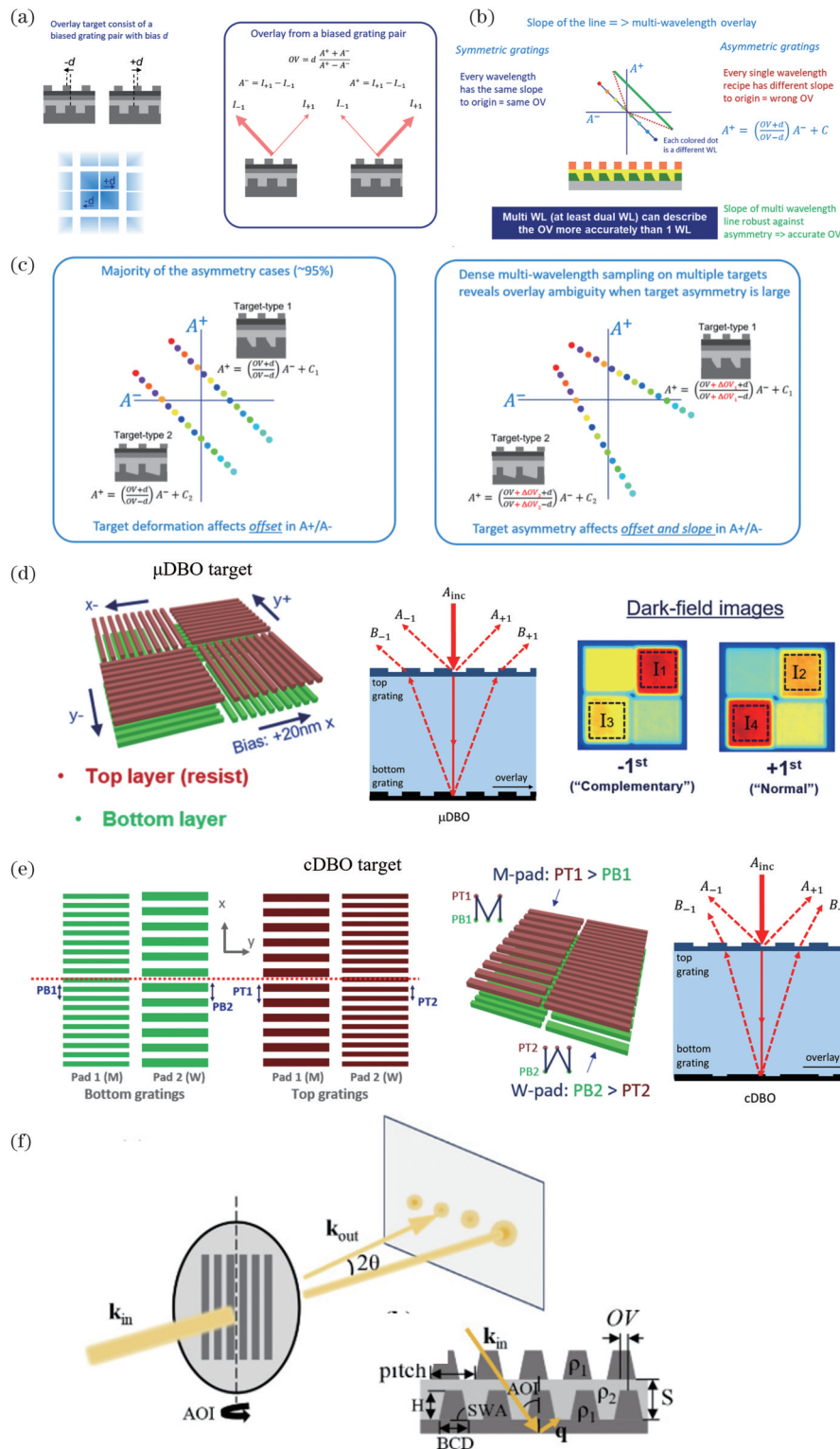


图 11 套刻误差测量方法示意图。DBO 方法^[124]: (a) 单波长, (b) 多波长套刻提取, (c) 左图展示的是套刻标识不对称性只影响 A^+/A^- 的偏移量, 右图展示的是套刻标识不对称性影响 A^+/A^- 的偏移量和斜率, 已得到修改许可, Copyright 2021 SPIE; (d) μ DBO 和 (e) cDBO 方法^[129], 已得到修改许可, Copyright 2021 SPIE; (f) CD-SAXS 测量套刻误差示意图和套刻标识光栅的横截面图^[97], 已得到重印许可, ©Optical Society of America (或 Optica Publishing Group)

Fig. 11 Schematics of overlay metrology method. DBO method^[124]: (a) single wavelength, (b) multi-wavelength overlay extraction, (c) the left image shows that the target asymmetry only affects the offset in A^+/A^- , and the right image shows that the target asymmetry affects the offset and slope in A^+/A^- , reprinted with permission, Copyright 2021 SPIE; (d) μ DBO and (e) cDBO^[129], adapted with permission, Copyright 2021 SPIE; (f) schematic of CD-SAXS overlay metrology and the cross-sectional view of the overlay target grating^[97], reprinted with permission, ©Optical Society of America (or Optica Publishing Group, as applicable)

式中: φ 为相位。

套刻误差测量信号微弱,基于相干放大和像差校正技术的暗场数字全息显微镜(df-DHM)可以提高套刻误差测量信号的强度、信噪比等,有助于进一步提高套刻误差测量的准确度^[130]。

3) SEM

传统的基于光学套刻误差测量的套刻标识尺寸在数十微米量级($\approx 16\ \mu\text{m}$),远大于实际器件的图案尺寸。基于SEM的套刻误差测量可将 $2\ \mu\text{m}$ 甚至更小尺寸的图案集成到晶粒中,CD-SEM可以有效测量晶粒内的套刻标识^[131]。更进一步,通过轮廓提取后处理可以对无套刻标识的OPO进行测量^[119]。对于光学套刻误差测量,当套刻标识数量不足或套刻标识在半导体曝光场中分布不均匀时,结合CD-SEM技术有助于提高模型的校正能力^[132]。

4.2.3 套刻误差测量的发展趋势

2022—2025年,市场细分的套刻误差计量需求趋势预期主要为降低OPO、增加套刻误差测量样品数目、减小套刻标识尺寸、提高ADI/AEI控制和引入新的工艺材料^[133]。套刻误差测量技术的检测光源大多为可见光,但随着纳米结构CD的不断减小,不同参数之间的相互影响将削弱其适用性,从而导致这些方法的灵敏度下降,因而基于X射线的套刻计量将展现出一定的发展潜力^[97]。CD-SAXS测试套刻误差示意图如图11(f)所示。高数值孔径EUV光刻技术给套刻误差控制带来了新的挑战^[134]。考虑到测量设备的成本和半导体工艺生产线的效率,不可能对每一个晶圆和/或批次都进行测量,这意味着一些偏差不能被捕获,无法及时检测到工艺漂移。基于此,虚拟计量(VM)受到广泛关注^[135]。

5 结 论

技术节点的迭代和工艺复杂性的增强对EPE提出了越来越严格的要求。优化EPE预算,涵盖了从掩模设计到光刻控制再到最终图案控制的整个工艺流程。光学邻近误差、光子和光刻胶随机性等因素的影响越来越大,如何对EPE进行更加严格的建模和计算,尤其是对随机效应建模,是未来的重要发展方向。

计算光刻在光刻工艺开发和芯片制作过程中发挥的作用越来越重要。分辨率增强技术可对掩模进行优化并可实现晶圆精确成像。相对于DUV光刻,EUV光刻利用了反射掩模,并采用了斜入射。3D掩模效应和吸收层吸收等对成像有重要影响。OPC,一种分辨率增强技术,在集成电路的设计到制造过程都起着重要作用。机器学习OPC也受到广泛关注。

与DUV光刻胶曝光机理相比,EUV光刻胶曝光机理涉及复杂的物理和化学过程。原电子和二次电子如何与光刻胶中的物质相互作用需要进一步研究。EUV光刻中的光子随机效应给LER和LCDU带来了

更加严峻的挑战。研究并控制EUV光刻中的随机效应对于提高光刻工艺的稳定性至关重要。可通过蒙特卡罗模型和多元泊松传播模型对随机效应进行模拟。

随着技术节点的推进和器件复杂度的增加,传统的测量手段难以满足CD的测量需求。改进仪器、优化建模,或者引入其他领域的测量方法具有重要意义。基于计算成像技术的测量具有巨大的潜力。套刻误差仍是制约器件良率提高的重要因素,同时还需要考虑额外的套刻误差来源以及减小这些误差的方法。基于光学的套刻误差测量已取得了长足发展,但在技术发展上仍面临诸多挑战,亟待开发辅助或新测量手段。

参 考 文 献

- [1] Ngo A T, Dey B, Halder S, et al. Machine learning-based edge placement error analysis and optimization: a systematic review[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2023, 36(1): 1-13.
- [2] Mulkens J, Hanna M, Slachter B, et al. Patterning control strategies for minimum edge placement error in logic devices[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10145: 1014505.
- [3] Bhattacharyya K. Tough road ahead for device overlay and edge placement error[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10959: 1095902.
- [4] Ma Y S, Hong L, Word J, et al. Reduction of systematic defects with machine learning from design to fab[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11329: 1132909.
- [5] Mulkens J, Slachter B, Kubis M, et al. Holistic approach for overlay and edge placement error to meet the 5 nm technology node requirements[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10585: 105851L.
- [6] Jeong J, Lee J, Kim J, et al. Understanding advanced DRAM edge placement error budget and opportunities for control[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11325: 1132506.
- [7] Sakr E, DeLancey R, Hoppe W, et al. High accuracy OPC modeling for new EUV low-K1 mask technology options[J]. Proceedings of SPIE, 2023, 12495: 124950P.
- [8] Mack C A. Metrics for stochastic scaling in EUV lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11147: 111470A.
- [9] Shchegrov A V, Leray P, Paskover Y, et al. On product overlay metrology challenges in advanced nodes[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11325: 113251P.
- [10] van Es R, van de Kerkhof M, Minnaert A, et al. EUV for HVM: towards an industrialized scanner for HVM NXE3400B performance update[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10583: 105830H.
- [11] Ciou W L, Hu T, Tsai Y Y, et al. Machine learning optical proximity correction with generative adversarial networks[J]. Journal of Micro/Nanopatterning, Materials, and Metrology, 2022, 21(4): 041606.
- [12] Ma X, Arce G R. Rule-based resolution enhancement techniques [M]//Computational lithography. Singapore: John Wiley & Sons, Inc., 2010: 37-47.
- [13] Voelkel R, Vogler U, Bich A, et al. Advanced mask aligner lithography: new illumination system[J]. Optics Express, 2010, 18(20): 20968-20978.
- [14] Cheng W, Li S K, Wang X Z, et al. Through-focus EUV multilayer defect compensation considering optical proximity correction[J]. Applied Optics, 2022, 61(15): 4437-4448.
- [15] Chen G D, Li S K, Wang X Z. Efficient optical proximity correction based on virtual edge and mask pixelation with two-phase sampling[J]. Optics Express, 2021, 29(11): 17440-17463.
- [16] Neumann J T, Gräupner P, Kaiser W, et al. Interactions of 3D mask effects and NA in EUV lithography[J]. Proceedings of SPIE,

- 2012, 8522: 852211.
- [17] Yan P Y. Masks for extreme ultraviolet lithography[M]//Rizvi S. Handbook of photomask manufacturing technology. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [18] Finders J, de Winter L, Last T. Mitigation of mask three-dimensional induced phase effects by absorber optimization in ArFi and extreme ultraviolet lithography[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2016, 15(2): 021408.
- [19] Erdmann A, Fühner T, Evanschitzky P, et al. Optical and EUV projection lithography: a computational view[J]. *Microelectronic Engineering*, 2015, 132: 21-34.
- [20] van Setten E, Bottiglieri G, de Winter L, et al. Edge placement error control and Mask3D effects in high-NA anamorphic EUV lithography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10450: 104500W.
- [21] Jonckheere R. Overcoming EUV mask blank defects: what we can, and what we should[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10454: 104540M.
- [22] Coskun T H, Wallow T, Chua G S, et al. EUV OPC modeling and correction requirements[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9048: 90480W.
- [23] Wu Q, Li Y L, Yang Y S, et al. A photolithography process design for 5 nm logic process flow[J]. *Journal of Microelectronic Manufacturing*, 2019, 2(4): 19020408.
- [24] Last T, de Winter L, van Adrichem P, et al. Illumination pupil optimization in 0.33-NA extreme ultraviolet lithography by intensity balancing for semi-isolated dark field two-bar M1 building blocks[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2016, 15(4): 043508.
- [25] Gao W M, Wiaux V, Hoppe W, et al. Double patterning at NA 0.33 versus high-NA single exposure in EUV lithography: an imaging comparison[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10583: 105830O.
- [26] van Schoot J B P, Jasper J H C M. Fundamentals of EUVL scanners[M]//Bakshi V. EUV lithography. 2nd ed. Bellingham: SPIE Press, 2018: 593-649.
- [27] Neumann J T, Gräupner P, Kaiser W, et al. Mask effects for high-NA EUV: impact of NA, chief-ray-angle, and reduction ratio[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8679: 867915.
- [28] Burkhardt M, Chen Z, Halle S, et al. Focus considerations of design pitches and absorber choice for EUV random logic[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 12051: 120510C.
- [29] Ma X, Arce G R. Introduction[M]//Computational lithography. Singapore: John Wiley & Sons, Inc., 2010: 1-18.
- [30] Wong A K K. Optical imaging and resolution[M]//Weeks A R J. Resolution enhancement techniques in optical lithography. Bellingham: SPIE Press, 2009: 31-70.
- [31] Kroyan A, Levenson D, Tittel F K. Coping with the impact of lens aberrations in the context of wavefront engineering[J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3334: 832-838.
- [32] Bruning J H. Optical lithography: 40 years and holding[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6520: 652004.
- [33] Wu Q, Li Y L, Yang Y S, et al. A study of image contrast, stochastic defectivity, and optical proximity effect in EUV photolithographic process under typical 5 nm logic design rules[C]//2020 China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC), June 26-July 17, 2020, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2020.
- [34] Hou Y Q, Wu Q. Optical proximity correction, methodology and limitations[C]//2021 China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC), March 14-15, 2021, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2021.
- [35] Liebmann L W. Resolution enhancement techniques in optical lithography: it's not just a mask problem[J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4409: 23-32.
- [36] Chen Y C, Li T H, Lin H Y, et al. A portable pattern-based design technology co-optimization flow to reduce optical proximity correction run-time[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10588: 105881O.
- [37] Wang X L, Zhao X M, Chen B C, et al. Implementing an OPC-based analysis method for evaluating the capabilities of photoresist and identifying hot spots[C]//2023 International Workshop on Advanced Patterning Solutions (IWAPS), October 26-27, 2023, Lishui, Zhejiang Province, China. New York: IEEE Press, 2023.
- [38] Matsunawa T, Yu B, Pan D Z. Optical proximity correction with hierarchical Bayes model[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9426: 94260X.
- [39] Chen Z, Burkhardt M, Sieg S, et al. EUV sub-resolution assist feature impact: experimental and simulation evaluation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2023, 12494: 124940U.
- [40] Kim C, Lee S, Park S, et al. Machine learning techniques for OPC improvement at the sub-5 nm node[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11323: 1132317.
- [41] Szucs A, Planchot J, Farys V, et al. Advanced OPC mask-3D and resist-3D modeling[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9052: 905208.
- [42] Ho B C P, Doebler J, Niroomand A. OPC model building for EUV lithography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11147: 1114714.
- [43] Erdmann A. Modeling and simulation[M]//Rizvi S. Handbook of photomask manufacturing technology. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [44] Pistor T V, Adam K, Neureuther A. Rigorous simulation of mask corner effects in extreme ultraviolet lithography[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 1998, 16(6): 3449-3455.
- [45] Erdmann A, Kalus C K, Schmoeller T, et al. Efficient simulation of light diffraction from three-dimensional EUV masks using field decomposition techniques[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5037: 482-493.
- [46] Okoroanyanwu U. Chemistry of the limiting issues of photochemical and radiochemical resists and approaches to their solutions[M]//Chemistry and lithography. Vol. 2: Chemistry in lithography. 2nd ed. Bellingham: SPIE Press, 2023: 555-608.
- [47] de Bisschop P, Hendrickx E. Stochastic printing failures in EUV lithography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10957: 109570E.
- [48] 2023 update International Roadmap for Devices and Systems (IRDSTM), Metrology[EB/OL]. [2024-01-02]. <https://irds.ieee.org/editions/2023/20-roadmap-2023-edition/123-irds%E2%84%A2-2023-metrology>.
- [49] Brainard R L, Neisser M, Gallatin G, et al. Photoresists for EUV lithography[M]//Bakshi V. EUV lithography. 2nd ed. Bellingham: SPIE Press, 2018: 493-591.
- [50] Narasimhan A, Grzeskowiak S, Ackerman C, et al. Mechanisms of EUV exposure: electrons and holes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10143: 101430W.
- [51] Narasimhan A K, Grzeskowiak S, Srivats B, et al. Studying thickness loss in extreme ultraviolet resists due to electron beam exposure using experiment and modeling[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2015, 14(4): 043502.
- [52] Levinson H. J. EUV resists [M]//Extreme ultraviolet lithography. Bellingham: SPIE Press, 2020: 111-140.
- [53] Kozawa T, Okamoto K, Nakamura J, et al. Feasibility study on high-sensitivity chemically amplified resist by polymer absorption enhancement in extreme ultraviolet lithography[J]. *Applied Physics Express*, 2008, 1(6): 067012.
- [54] Maas R, van Lare M C, Rispens G, et al. Stochastics in extreme ultraviolet lithography: investigating the role of microscopic resist properties for metal-oxide-based resists[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2018, 17(4): 041003.
- [55] van Schoot J, Lok S, van Setten E, et al. High-NA EUV lithography exposure tool: advantages and program progress[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11517: 1151712.
- [56] Kozawa T, Tagawa S. Radiation chemistry in chemically amplified resists[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, 49(3R): 030001.
- [57] Chunder A, Latypov A, Biafore J J, et al. Systematic assessment

- of the contributors of line edge roughness in EUV lithography using simulations[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10583: 105831N.
- [58] Wallow T, Higgins C, Brainard R, et al. Evaluation of EUV resist materials for use at the 32 nm half-pitch node[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6921: 69211F.
- [59] Finders J, Wuister S, Last T, et al. Contrast optimization for 0.33NA EUV lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9776: 97761P.
- [60] Naulleau P, Gallatin G. Relative importance of various stochastic terms and EUV patterning[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2018, 17(4): 041015.
- [61] Naulleau P, Anderson C, Chao W L, et al. Stochastics and EUV patterning in the 1x-nm regime[J]. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2016, 29(6): 797-802.
- [62] Long L T, Neureuther A R, Naulleau P P. 3D modeling of EUV photoresist using the multivariate Poisson propagation model[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11609: 116091C.
- [63] Mack C A, Adel M. Overlay and edge placement error metrology in the era of stochastics[J]. Proceedings of SPIE, 2023, 12496: 1249609.
- [64] Kim Y K, Pohling L, Hwee N T, et al. Proximity matching for ArF and KrF scanners[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7272: 72723A.
- [65] Zhang Z N, Li S K, Wang X Z, et al. Source mask optimization for extreme-ultraviolet lithography based on thick mask model and social learning particle swarm optimization algorithm[J]. Optics Express, 2021, 29(4): 5448-5465.
- [66] Mack C A. Analytical expression for impact of linewidth roughness on critical dimension uniformity[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2014, 13(2): 020501.
- [67] Constantoudis V, Patsis G P, Leunissen L H A, et al. Line edge roughness and critical dimension variation: fractal characterization and comparison using model functions[J]. Journal of Vacuum Science Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2004, 22(4): 1974-1981.
- [68] Constantoudis V, Papavieros G, Gogolides E, et al. Challenges in line edge roughness metrology in directed self-assembly lithography: placement errors and cross-line correlations[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2017, 16(2): 024001.
- [69] Dai G L, Hahm K, Bosse H, et al. Comparison of line width calibration using critical dimension atomic force microscopes between PTB and NIST[J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(6): 065010.
- [70] Choïnet T, Hammouti A, Gagneur V, et al. Critical dimension measurement: from synchrotron small angle X-ray scattering to industrial optical scatterometry techniques[J]. Proceedings of SPIE, 2023, 12496: 124961K.
- [71] Liao W P, Liu H L, Lin Y F, et al. I-line photolithographic metalenses enabled by distributed optical proximity correction with a deep-learning model[J]. Optics Express, 2022, 30(12): 21184-21194.
- [72] Wu W L, Kline R J, Jones R L, et al. Review of the key milestones in the development of critical dimension small angle X-ray scattering at National Institute of Standards and Technology[J]. Journal of Micro/Nanopatterning, Materials, and Metrology, 2023, 22: 031206.
- [73] Bunday B, Germer T A, Vartanian V, et al. Gaps analysis for CD metrology beyond the 22 nm node[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8681: 86813B.
- [74] Kline R J, Sunday D F, Windover D, et al. X-ray scattering critical dimensional metrology using a compact X-ray source for next generation semiconductor devices[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2017, 16(1): 014001.
- [75] 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.
- [76] Orji N G, Badaroglu M, Barnes B M, et al. Metrology for the next generation of semiconductor devices[J]. Nature Electronics, 2018, 1: 532-547.
- [77] Malloy M, Thiel B, Bunday B D, et al. Massively parallel E-beam inspection: enabling next-generation patterned defect inspection for wafer and mask manufacturing[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9423: 942319.
- [78] Ukraintsev V, Banke W, Zagorodnev G, et al. CD-SEM real time bias correction using reference metrology based modeling[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10585: 105850W.
- [79] Dai G L, Hahm K, Sebastian L, et al. Comparison of EUV photomask metrology between CD-AFM and TEM[J]. Nanomanufacturing and Metrology, 2022, 5(2): 91-100.
- [80] Orji N G, Itoh H, Wang C M, et al. Tip characterization method using multi-feature characterizer for CD-AFM[J]. Ultramicroscopy, 2016, 162: 25-34.
- [81] Hussain D, Ahmad K, Song J M, et al. Advances in the atomic force microscopy for critical dimension metrology[J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(1): 012001.
- [82] Fouchier M, Pargon E, Bardet B. An atomic force microscopy-based method for line edge roughness measurement[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(10): 104903.
- [83] Liu L, Xu J G, Zhang R, et al. Three-dimensional atomic force microscopy for sidewall imaging using torsional resonance mode[J]. Scanning, 2018, 2018: 7606037.
- [84] Zhang R, Wu S, Liu L, et al. Adaptive-angle scanning method for 3D measurement with atomic force microscopy[J]. Measurement Science and Technology, 2019, 30(9): 095005.
- [85] Dai G L, Xu L Y, Hahm K. Accurate tip characterization in critical dimension atomic force microscopy[J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(7): 074011.
- [86] Orji N G, Dixon R G, Lopez E, et al. Wear comparison of critical dimension-atomic force microscopy tips[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2020, 19(1): 014004.
- [87] Rana N, Archie C, Foucher J. Reconciling measurements in AFM reference metrology when using different probing techniques[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7971: 797117.
- [88] 陈修国, 王才, 杨天娟, 等. 集成电路制造在线光学测量检测技术: 现状、挑战与发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922025.
- Chen X G, Wang C, Yang T J, et al. Inline optical measurement and inspection for IC manufacturing: state-of-the-art, challenges, and perspectives [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922025.
- [89] Zhu H P, Lee Y, Shan H M, et al. A maximum contributed component regression for the inverse problem in optical scatterometry[J]. Optics Express, 2017, 25(14): 15956-15966.
- [90] Das S, Hung J, Halder S, et al. Machine learning for predictive electrical performance using OCD[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10959: 109590F.
- [91] Wang Q, Liu X H, Wu Q, et al. An optical critical dimension (OCD) study with standard structures[C]//2023 International Workshop on Advanced Patterning Solutions (IWAPS), October 26-27, 2023, Lishui, Zhejiang Province, China. New York: IEEE Press, 2023.
- [92] Kim Y N, Paek J S, Rabello S, et al. Device based in-chip critical dimension and overlay metrology[J]. Optics Express, 2009, 17(23): 21336-21343.
- [93] Barnes B M, Silver R M, Schmucker S, et al. Extensibility of optics-based metrology for sub-5 nm technology[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10585: 1058504.
- [94] Schmidt D, Durfee C, Pancharatnam S, et al. OCD enhanced: implementation and validation of spectral interferometry for nanosheet inner spacer indentation[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11611: 116111U.
- [95] Korde M, Kal S, Pereira C, et al. Optical characterization of multi-

- NST nanowire test structures using Mueller matrix spectroscopic ellipsometry (MMSE) based scatterometry for sub 5 nm nodes[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10959: 109590X.
- [96] Wang C Q, Jones R L, Lin E K, et al. Characterization of correlated line edge roughness of nanoscale line gratings using small angle X-ray scattering[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 102(2): 024901.
- [97] Zhang J H, Chen X G, Yang T J, et al. X-ray-based overlay metrology using reciprocal space slicing analysis[J]. Optics Letters, 2023, 48(24): 6380-6383.
- [98] Moussa A, Severi J, Lorusso G F, et al. High NA EUV: a challenge for metrology, an opportunity for atomic force microscopy[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11854: 1185410.
- [99] Lorusso G F, Beral C, Bogdanowicz J, et al. Metrology of thin resist for high NA EUVL[J]. Proceedings of SPIE, 2022, 12053: 120530O.
- [100] Moly A, Schuch N, Robert F, et al. Self-supervised deep learning neural network for CD-SEM image denoising using reduced dataset [J]. Proceedings of SPIE, 2023, 12496: 124961D.
- [101] Moussa A, Saib M, Paolillo S, et al. Localized power spectral density analysis on atomic force microscopy images for advanced patterning applications[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10959: 109591O.
- [102] 邵晓鹏, 刘飞, 李伟, 等. 计算成像技术及应用最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(2): 020001.
Shao X P, Liu F, Li W, et al. Latest progress in computational imaging technology and application[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(2): 020001.
- [103] Samanta K, Joseph J. An overview of structured illumination microscopy: recent advances and perspectives[J]. Journal of Optics, 2021, 23(12): 123002.
- [104] Rodenburg J, Maiden A. Ptychography[M]//Hawkes P W, Spence J C H. Springer handbook of microscopy. Cham: Springer, 2019: 819-904.
- [105] Seaberg M D, Zhang B S, Gardner D F, et al. Tabletop nanometer extreme ultraviolet imaging in an extended reflection mode using coherent Fresnel ptychography[J]. Optica, 2014, 1(1): 39-44.
- [106] Holler M, Guizar-Sicairos M, Tsai E H R, et al. High-resolution non-destructive three-dimensional imaging of integrated circuits[J]. Nature, 2017, 543: 402-406.
- [107] Dettoni F, Bouyssou R, Dezauzier C, et al. Enhanced 28 nm FD-SOI diffraction based overlay metrology based on holistic metrology qualification[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10145: 101452B.
- [108] Jo S, Kim J, Park Y, et al. SEM ADI on device overlay: the advantages and outcome[J]. Proceedings of SPIE, 2023, 12496: 124960K.
- [109] Klinkhamer F, Smeets B, Thijssen T, et al. On-scanner high-spatial-frequency overlay control using a distortion manipulator[J]. Proceedings of SPIE, 2022, 12051: 120510K.
- [110] Park D K, Kim H S, Seo M Y, et al. Unique method for controlling device level overlay with high-NA optical overlay technique using YieldStar in a DRAM HVM environment[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10585: 105850V.
- [111] Koonmen J. Applications products and business opportunity[R]. Eindhoven: ASML Small Talk, 2021.
- [112] Yeh F, Chouaib H. Scatterometry and machine learning for in-die overlay solution[J]. Proceedings of SPIE, 2023, 12496: 124962R.
- [113] Shin J, Kang H, Choi S, et al. Study of process contributions to total overlay error budget for sub-60-nm memory devices[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2007, 25(6): 2444-2446.
- [114] Liu Y L, Chang L T, Hsu K B, et al. Investigation of device overlay variation and control metrology in 3D-NAND process[J]. Proceedings of SPIE, 2023, 12496: 1249628.
- [115] Chen K H, Huang J, Yang W T, et al. Litho process control via optimum metrology sampling while providing cycle time reduction and faster metrology-to-litho turn around time[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7971: 797105.
- [116] Anberg D, Owen D M, Lee B H, et al. A study of feed-forward strategies for overlay control in lithography processes using CGS technology[C]//2015 26th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC), May 3-6, 2015, Saratoga Springs, NY, USA. New York: IEEE Press, 2015: 395-400.
- [117] Subramany L, Hsieh M, Li C, et al. 20 nm MOL overlay case study[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9050: 90502Q.
- [118] Abramovitz Y, Levin G, Sarig L, et al. Accuracy assessment between on-product and on-optical-target overlay metrology with SEM and STEM[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11325: 1132508.
- [119] Bourguignon T, Le Gratiet B, Pradelles J, et al. High spatial frequency on-device overlay characterization using CD-SEM contours[J]. Proceedings of SPIE, 2023, 12496: 124960J.
- [120] Shih V, Huang J, Wang W, et al. A sophisticated metrology solution for advanced lithography: addressing the most stringent needs of today as well as future lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7520: 75201A.
- [121] Dettoni F, Shapoval T, Bouyssou R, et al. Image based overlay measurement improvements of 28 nm FD-SOI CMOS front-end critical steps[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10145: 101450C.
- [122] Katz S, Ophir B, Shusterman U, et al. Machine learning for tool induced shift (TIS) reduction[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11325: 113252C.
- [123] Tamer M S, van der Lans M, Sadeghian H. Image-based overlay measurement using subsurface ultrasonic resonance force microscopy[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10585: 105850O.
- [124] Hsieh H C, Cheng J M, Yeh Y C. Optimized wavelength selection for diffraction-based overlay measurement by minimum asymmetry factor variation with finite-difference time-domain simulation[J]. Applied Optics, 2022, 61(6): 1389-1397.
- [125] Bhattacharyya K, den Boef A, Noot M, et al. A complete methodology towards accuracy and lot-to-lot robustness in on-product overlay metrology using flexible wavelength selection[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10145: 101450A.
- [126] Yang W H, Lin N, Wei X, et al. Improving accuracy and sensitivity of diffraction-based overlay metrology[J]. Chinese Optics Letters, 2023, 21(7): 071204.
- [127] Mathijssen S G, Davis T, den Boef A, et al. Fundamental understanding of the interplay between target and sensor brings diffraction based overlay to the next level of accuracy[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11611: 1161121.
- [128] Bhattacharyya K, Ke C M, Huang G T, et al. On-product overlay enhancement using advanced litho-cluster control based on integrated metrology, ultra-small DBO targets and novel corrections[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8681: 868104.
- [129] Matsunobu M, Nishiyama T, Inoue M, et al. Novel diffraction based overlay metrology utilizing phase-based overlay for improved robustness[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11611: 1161126.
- [130] Messinis C, van Schaijk T T M, Pandey N, et al. Fast and robust overlay metrology from visible to infrared wavelengths using dark-field digital holographic microscopy[J]. Proceedings of SPIE, 2022, 12053: 120530B.
- [131] Hasumi K, Inoue O, Okagawa Y, et al. SEM-based overlay measurement between via patterns and buried M1 patterns using high-voltage SEM[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10145: 101451J.
- [132] Wu C Z, Xu D Y, Yuan H, et al. Hybrid overlay control solution with CDSEM and optical metrology[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11611: 116111G.
- [133] Katz S, Grauer Y, Megged E. Optical overlay metrology trends in advanced nodes[J]. Proceedings of SPIE, 2022, 12053: 120530N.
- [134] Weiss M. Overlay challenges in the era of high-NA[J]. Proceedings of SPIE, 2023, 12496: 1249603.
- [135] van Dijk L, Adal K M, Chastan M, et al. Excursion detection and root-cause analysis using virtual overlay metrology[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11611: 1161132.

Controlling Edge Placement Error in Extreme Ultraviolet Lithography

Cao Jing^{1,2}, Yang Wenhe^{1,2}, Liu Zexu^{1,2}, Chen Yunyi^{1,2}, Wei Xin^{1,2}, Lin Nan^{1,2*}

¹State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese

Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Key Laboratory of Ultra-Intense Laser Science and Technology (CAS), Shanghai 201800, China

Abstract

Significance Extreme ultraviolet (EUV) lithography is considered to be the most promising technology for fabricating technology nodes of 7 nm and below in high volume manufacturing (HVM). Due to the shrinkage of semiconductor device features and the increase in process complexity, achieving an acceptable yield is challenging. Edge placement error (EPE) quantifies the pattern fidelity of a device structure created in a multi-patterning scheme. It is urgent to reduce EPE to guarantee the proper functioning of semiconductor devices. Therefore, controlling EPE is one of the most serious challenges in the field of multi-patterning and EUV lithography.

EPE is a complex metric, involving error components from various process steps (e. g. , lithography and etching steps). It is the combination of critical dimension (CD) errors and overlay errors (see Fig. 1(a)). The ratio of each component to the EPE budget changes with the iteration of the logic node (see Fig. 1(b)). Stochastic contributions to the EPE budget are increasing rapidly (>50%). Hence, the accurate estimation and measurement of each component of EPE, particularly the stochastic components, are critical to enabling a holistic approach to EPE control and thereby improving the yield. A holistic approach is adopted to optimize the EPE budget (see Fig. 2).

This review is organized in five parts. First, we take a broad view of EPE in EUV lithography. Second, we highlight the characteristics peculiar to EUV lithography, considering the optical proximity correction (OPC) and stochastics. Third, we discuss two EPE models, including the optimization flow and the calculation process of EPE from metrology inputs (e. g. , CD and overlay). Fourth, we present the metrologies of CD and overlay errors, summarizing the advantages and disadvantages of each method. Finally, we discuss the techniques for EPE.

Progress The typical deep ultraviolet (DUV) immersion lithography works with a transmissive mask, while EUV works with a reflective one (see Fig. 4). In addition, the EUV mask is exposed under oblique incidence. Some characteristics such as flare, mask absorber behavior, and mask three-dimensional effects (M3D effects) need to be considered. For instance, M3D effects cause wafer-level deviations from the intended design of an integrated circuit. To address these issues, OPC can be used. The EUV OPC model error contribution of each physical effect is presented in Fig. 5(a). Typically, rule-based and model-based approaches are used. Sub-resolution assist features (SRAF) can be used to improve the depth of focus and exposure latitude at a given pitch. In addition, exploring machine learning OPC is also an important tendency. For EUV lithography, due to off-axis illumination and the large ratio between absorber thickness (50–100 nm) and operating wavelength (13.5 nm), the mask needs rigorous electromagnetic field (EMF) solvers to simulate the light diffraction from the mask. The finite difference time domain (FDTD) method can be used to simulate the 3D masks, but it is computationally expensive and time-consuming. An approximate M3D filter calculation method based on an M3D library and a mask defocus is applied to predict the patterns on wafers.

The energy of EUV (13.5 nm, ~92 eV) is larger than the resist atomic species' electron binding energies, and ionization is the main mechanism. In resist, the electrons can travel farther than 10 nm, which has implications for the understanding of noise, critical dimension uniformity (CDU), and line edge roughness (LER) variations. The stochastic nature of EUV lithography brings many undesirable effects, and it becomes worse when trying to manufacture at high resolution and high throughput. For EUV lithography, local critical dimension uniformity (LCDU) and LER are typically large because of the increased presence of stochastic noise in low doses. Three main approaches to controlling stochastics exist (see Fig. 6(a)). The stochastics can be simulated by Monte Carlo models or multivariate Poisson propagation models (MPPM).

For the most advanced nodes, stochastics are generally considered to be the dominant aspect of an EPE budget. It is necessary to explore new methods to properly account for the stochastics in EPE budgets. Mulkens *et al.* provide a method that is widely applied. It is a computational method that links different EPE budget components. The definition of EPE is shown in Fig. 7(a). The calculation process of EPE from various CD and overlay metrology inputs is illustrated in Fig. 7(b). The EPE optimization flow (a five-step iterative process) is presented in Fig. 7(c). Mack *et al.* propose a more rigorous, stochastics-aware disposition approach for complementary lithography. By using measurable quantities, this model realizes the accurate prediction of EPE-based failure rates for lot dispositioning. The above two models are reviewed.

With the CD shrinkage, the complex 3D architectures also increase. Worse still, for high NA EUV lithography, due to the reduction in the depth of focus, we apply thinner resist films (<15 nm). It brings a great challenge to conventional CD metrology (e. g. , optical CD and CD-SEM). The mechanism, key limits, and challenges of CD metrology are summarized. Computational imaging is a promising technique because of the merits of higher resolution and a larger optical field of view.

Tight and effective overlay control is essential to securing yield. The main contributors to the overlay budget are the scanner, mask, process, and overlay metrology. The overlay optimization flow is illustrated in Fig. 10(b). Optical overlay metrology has been widely adopted for overlay control. Imaging-based overlay (IBO) and diffraction-based overlay (DBO) are the two dominant technologies. The schematic overlay metrology method of DBO is shown in Fig. 11(a)–(e). When the logic design rules are down to 3 nm, on-product overlay (OPO) is becoming the most important factor limiting yields. Overlay error metrology and systems with higher accuracy (sub-nm scale) are in demand. The accuracy limitations of optical overlay metrology promote complementary overlay metrology (e. g. , electron beam-based overlay metrology).

Conclusions and Prospects Reducing EPE is essential to enabling high yields in manufacturing processes. In this paper, OPC and stochastics in EUV lithography are highlighted. Two models of EPE are reviewed, and the principal components of an EPE budget are systematically discussed. A holistic approach is significant to meet the severe demands of patterning in EPE control. It combines computational mask optimization (e. g. , OPC), wafer metrology overlay/CD, co-optimization with other processes (e. g. , etch), the high-order actuation capability of DUV, and an EUV scanner. New characterization techniques are critical to providing more accurate descriptions of errors in EUV lithography. Computational imaging is a promising approach by which to increase the resolution of the inspection of masks/chips. Machine learning shows economic potential in EPE analysis. This topic is of significance to the roadmap toward technology nodes of 3 nm and below in the semiconductor industry.

Key words measurement; extreme ultra violet lithography light source; overlay; optical proximity correction; alignment