

## 观点和展望

## 基于同步辐射极紫外光源的掩模缺陷表征技术\*

张芷赫<sup>1)2)</sup> 刘海岗<sup>2)†</sup> 王勇<sup>2)‡</sup> 邵仁忠<sup>2)††</sup>

1) (上海大学钱伟长学院, 上海 200444)

2) (中国科学院上海高等研究院, 上海同步辐射光源, 上海 201210)

(2025年7月1日收到; 2025年8月31日收到修改稿)

基于 13.5 nm 工作波长的缺陷表征技术是突破极紫外 (extreme ultraviolet, EUV) 掩模制备质量瓶颈的关键基础。同步辐射光源能产生波长稳定可调谐、洁净无污染的 EUV 光束, 是开展掩模缺陷表征研究的理想光源。本文综述了国际知名同步辐射 EUV 光源掩模缺陷表征平台的工作原理、性能指标及技术优缺点, 深入剖析了结合傅里叶合成照明的离轴波带片全场成像、结合扫描技术与相干衍射成像的叠层衍射成像这两类主流表征方案, 同时指出了掩模缺陷检测和分析一体化、光源微型化、成像技术优势互补的发展趋势。本文结论不仅为下一代 EUV 掩模缺陷表征平台设计提供了参考范例, 也为国产化 6 英寸 EUV 掩模缺陷表征系统的实际研制提供了一定的工程实践价值。

**关键词:** 极紫外掩模, 同步辐射光源, 掩模缺陷检测与分析, 傅里叶合成照明

**PACS:** 02.10.Yn, 33.15.Vb, 98.52.Cf, 78.47.dc

**DOI:** 10.7498/aps.74.20250864

**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250864

## 1 引言

极紫外 (extreme ultraviolet, EUV) 光刻是一种曝光波长为 13.5 nm 的光刻技术。与深紫外 (deep ultraviolet, DUV) 光刻相比, EUV 光刻可实现更高的单次曝光分辨率<sup>[1]</sup>, 是芯片制程进入 7 nm 以下的关键技术。EUV 掩模作为芯片的“图纸”, 其合格与否与芯片良率直接挂钩。遗憾的是现有工艺无法制造无缺陷掩模, 因此必须发展高灵敏度的表征技术, 避免因缺陷导致器件失效的情况发生<sup>[2]</sup>。

目前在 EUV 掩模缺陷表征领域有两种主流光源, 即同步辐射光源和放电等离子体 (discharge-produced plasma, DPP) 光源。DPP 光源通过高压放电激发 Sn 等离子体产生 EUV 辐射, 具有体

积紧凑、成本可控的优势, 可实现高速、高稳定性在线表征。但在表征多层膜内部缺陷时 DPP 光源会产生一系列特定问题, 且其不可调谐的波长无法适应下一代 6.7 nm BEUV(beyond EUV) 光刻, 因此长远科研能力略有不足。

同步辐射光源利用的是相对论性电子在磁场中偏转产生的同步辐射中的 EUV 光, 具有波长稳定可调谐、光束洁净无污染等优点。自 20 世纪 80 年代末, 从概念提出到技术攻关, 几乎所有 EUV 光刻技术的验证均是通过同步辐射光源完成<sup>[3,4]</sup>。从国际上研究团队对同步辐射光源的研究现状判断, 波荡器产生的高亮度、高相干性光束是未来开展 EUV 掩模微场曝光表征的选择趋势。由于同步辐射产生的光波长是连续可调的, 因此该技术路线具备更好的扩展性, 可满足未来更高数值孔径

\* 国家重点基础研究发展计划 (973 计划)(批准号: 2021YFA1601000) 和国家自然科学基金 (批准号: 12175297) 资助的课题。

† 通信作者. E-mail: liuhg@sari.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: wangyong@sari.ac.cn

†† 通信作者. E-mail: tairz@sari.ac.cn

(numerical aperture,  $NA$ ) 和更短波长的发展趋势, 更加适合作为 BEUV 研究型功能平台. 同时, 近年国际上加快研制的紧凑型加速器 (同步辐射) 光源 (周长一般 30 m 左右)<sup>[5,6]</sup> 可以放置在芯片厂商的厂房内, 极大提高了研发、生产效率, 证明了同步辐射路线的产业价值.

本文针对同步辐射 EUV 光源开展的 EUV 掩模缺陷在线检测 (inspection) 和分析 (review) 技术的原理、优缺点和发展趋势进行详细阐述. 深入对比了两大主流成像方案下各 EUV 掩模缺陷表征平台的性能指标, 给出了未来掩模缺陷表征技术的发展参考.

## 2 EUV 掩模缺陷表征的技术难点

EUV 掩模缺陷的表征难点主要由掩模结构和 EUV 光束特点共同造成. 如图 1 所示, EUV 掩模由许多不同材料制造的复杂光学系统构成: 包括低热膨胀玻璃基板、反射多层膜涂层、保护多层膜的缓冲层以及图形化吸收层. 与透射式 DUV 光刻系统不同的是, EUV 光会被绝大多数材料强烈吸收, 单层反射镜无法有效反射, 因此 EUV 掩模必须采用 Mo/Si 交替组成的布拉格多层膜反射镜结构. 为达到 64%—72% 的峰值反射率, 通常需要堆叠 40—50 层, 总厚度超 300 nm<sup>[7]</sup>, 以至于传统表征技术, 如电子束检测 (electron beam inspection, EBI) 无法穿透至深层界面发现缺陷. 此外, Mo/Si 多层膜在紫外到可见光波段均不透明, 传统技术无法复现其曝光的真实状况, 所以采用与光刻工艺相同工作波长 (即在波长) 的光进行缺陷表征才是国际上公认的最真实有效的手段<sup>[3]</sup>.

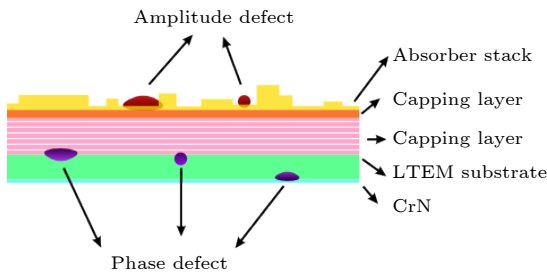


图 1 EUV 掩模结构及典型缺陷

Fig. 1. EUV mask structure and typical defects.

如图 1 所示, 根据反射光的振幅变化或相位变化, EUV 掩模上的缺陷可分为振幅缺陷和相位缺

陷, 二者均会改变多层膜的反射特性, 导致掩模质量远远低于试产、量产线要求, 故业内均认为合格掩模上 50 nm 以下的缺陷不能超过 3 个<sup>[4]</sup>. 振幅缺陷是在掩模抛光或清洁中产生, 通常位于多层膜顶部, 会直接阻挡 EUV 光从掩模到晶圆的传输, 导致曝光能量不足或不均匀, 影响光刻图案质量<sup>[7]</sup>. 相位缺陷则通常来自基板缺陷, 如制造初期留下颗粒或凹坑; 多层膜沉积中化学机械抛光、清洁或操作中引起的微小高度变化等<sup>[7]</sup>. 当 EUV 光从缺陷区域反射时, 会与相邻正常区域的反射波发生干涉, 影响衍射谱相位<sup>[7]</sup>, 并最终导致光刻图案位置偏移或形状变化. EUV 掩模的多层膜结构对相位缺陷极为敏感. 此外, 相比捕捉光强异常便可检测的振幅缺陷, 相位缺陷由于不改变总光强, 需要依赖叠层衍射成像 (ptychography) 这类相位敏感技术<sup>[8]</sup>, 这也是 EBI 等传统表征手段逐渐被淘汰的原因之一.

当前全球商业化掩模缺陷表征设备主要采用 DPP 光源, 然而受《瓦森纳协定》管控, 美国商务部禁止 EUV 级 DPP 光源技术向中国出口, DPP 光源难以在中国形成大规模商用. 日本 Lasertec 目前是该行业的垄断资本, 早在 1976 年就成功研发了全球首台自动 LSI 掩模检测系统<sup>[9]</sup>, 更在 2017 年针对最先进制程发布了集成 EUV 掩模缺陷在线检测和分析功能的 ABICS E120<sup>[9]</sup>, 几乎垄断了掩模缺陷表征市场; 剩余份额也被德国 Carl Zeiss 的 AIMS 系统占据<sup>[10]</sup>. 虽然中国哈尔滨工业大学实现了 DPP 光源关键技术攻关<sup>[11]</sup>, 但距产业商用尚且遥远. 比如等离子体位置漂移会导致光源输出功率不稳定和光谱纯度下降<sup>[11]</sup>; Sn 液滴沉积到掩模表面会造成碎屑污染<sup>[11]</sup>. 而同步辐射光源功率稳定、清洁无污染、可扩展性强, 更易表征相位缺陷, 因此成为中国开展掩模缺陷表征研究的战略选择.

## 3 EUV 掩模缺陷表征的成像技术

EUV 掩模缺陷表征包括在线检测和分析<sup>[12]</sup>. 在线检测是指对掩模上的缺陷进行快速定位, 通过毫米级的光斑快速扫描整个掩模, 得到每个视场内的缺陷信息. 分析是指进一步针对检测中有缺陷的区域进行高分辨成像分析, 获得更具体的形态和结构等信息. 基于同步辐射 EUV 光源的掩模缺陷成

像方法从早年利用 EUV 发射电子显微镜 (EUV-PEEM) 进行驻波场照明<sup>[13]</sup>, 发展为当今分辨率和相位敏感性更高的两大主流技术: 结合傅里叶合成照明 (Fourier synthesis illumination, FSI) 的离轴波带片全场成像、结合扫描技术与相干衍射成像 (coherent diffractive imaging, CDI) 的叠层衍射成像, 本节将简介其原理及特性.

### 3.1 结合 FSI 的离轴波带片全场成像

离轴波带片成像是一种针对非对称光路设计的衍射光学成像技术<sup>[14]</sup>, 其分辨率  $R$  由下式决定:

$$R = \frac{\lambda}{2NA(1+\sigma)} \quad (1)$$

其中,  $\lambda$  为照明波长,  $NA$  为离轴波带片的数值孔径,  $\sigma$  为照明相干因子. 离轴波带片通过精密调控几何结构与入射光的角度, 可提高  $NA$ 、补偿离轴像散、校正像差, 使 EUV 光束在 FSI 系统中高效聚焦<sup>[15,16]</sup>, 进而增强成像分辨率. FSI 是离轴波带片全场成像中常用的照明手段<sup>[14]</sup>, 图 2(a) 展示了当前主流的三镜 FSI 系统, 美国先进光源 (advanced light source, ALS)<sup>[17]</sup> 和上海同步辐射光源 (Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF)<sup>[2]</sup> 均采用此设计思路. 其中含动态 EUV 微机电系统 (micro-electro-mechanical system, MEMS) 振镜可调控频域控制光束角度和扫描轨迹, 以合成任意形状、强度分布的照明模式和  $\sigma$ . 再通过扫描样品或调整波带片倾角, 经平面镜和椭球镜后生成微米级聚焦光斑对掩模表面进行逐点成像<sup>[15,16]</sup>, 有效提升了光学系统分辨率和成像质量. 此外, 离轴波带片还能避免同轴成像中物镜与探测器的遮挡

问题, 支持大角度倾斜照明, 从而增强了对多层膜内部缺陷的穿透能力<sup>[15]</sup>.

### 3.2 叠层衍射成像

叠层衍射成像 (或称扫描相干衍射成像) 是一种结合扫描技术和 CDI 以突破传统成像视场限制的方法<sup>[8,18]</sup>. 通常将掩模划分为多个小区域, 采用高相干照明光束在样品上逐点扫描, 并采集相邻扫描重叠区域的系列衍射图案, 得到样品具有确定相位关系的微弱且连续的衍射信号<sup>[8]</sup>. 根据玻恩近似条件, 远场处的相干衍射图样即为样品的傅里叶变换<sup>[19]</sup>, 缺陷区域的波前相位畸变便转化为含振幅衰减与相位延迟信息的复反射率  $D$ . 结合原有照明光束 (探针) 的光场分布  $E$  即可利用叠层迭代引擎算法<sup>[18,20]</sup> 计算出样品特定位置的出射波  $\varphi_1$ , 即:

$$\varphi_1(\mathbf{r}) = E(\mathbf{r}) D(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}), \quad (2)$$

其中  $\mathbf{r}$  为样品平面内垂直于光轴的矢量,  $\mathbf{r}_1$  为样品与探针的相对位移. 交替更新探针和样品信号, 利用重叠区域的冗余性,  $\varphi_1$  便能唯一收敛至真实解<sup>[20]</sup>, 重建样品信息. 再借助精确的扫描位置坐标将各区域的图像拼合, 最终即可形成完整的掩模结构图像.

叠层衍射成像无需高  $NA$  照明或光学元件即能以高分辨率和高通量同时获取样品的高分辨率振幅与相位信息<sup>[21]</sup>, 但要求光斑尺寸足够小、相干度足够高以测量远场强度分布<sup>[20]</sup>. 与其他无透镜技术相比, 重叠区域的数据冗余给予了重建过程鲁棒性, 省去了参考光束<sup>[20]</sup>. 叠层衍射成像的非破坏性、相位敏感性和三维成像, 使其成为唯一能在线宽小于 3 nm 的节点中同时捕获表面振幅缺陷、

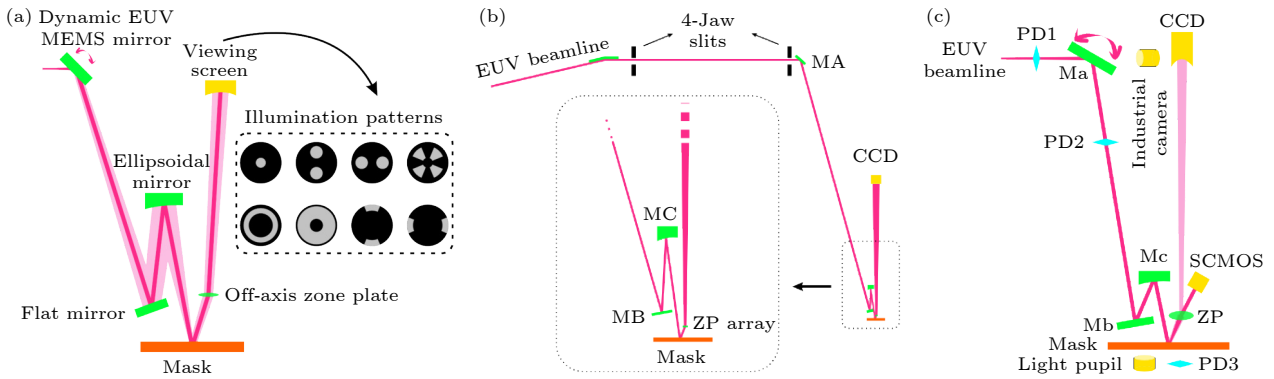


图 2 (a) 傅里叶合成照明光路图及照明模式样例; (b) SHARP 的光路设计<sup>[17]</sup>; (c) SSRF-BL09B1A 的光路设计  
Fig. 2. (a) Schematic optical layout of FSI and representative illumination patterns; (b) optical path design of SHARP<sup>[17]</sup>; (c) optical path design of SSRF-BL09B1A.

内部相位缺陷及界面畸变的表征手段<sup>[8,18]</sup>, 被瑞士光源 (Swiss light source, SLS) 广泛应用于平台设计与技术优化<sup>[22]</sup>.

#### 4 基于同步辐射光源的 EUV 掩模缺陷表征平台

以两大成像技术为基础, 结合与之特性相符的光学、机械设计, 国际上已有四大同步辐射光源实现了掩模缺陷的高分辨率表征. 分别是 ALS 建设的高数值孔径在线掩模检测项目 (SEMATECH high-*NA* actinic reticle review project, SHARP)<sup>[17]</sup>、SLS 建设的反射式 EUV 掩模扫描无透镜成像显微镜 (reflective-mode EUV mask scanning lensless imaging microscope, RESCAN)<sup>[20]</sup>、日本新斯巴鲁光源 (new SUBARU) 建设的 EUV 微场相干散射成像系统 (micro-coherent scattering microscopy, Micro-CSM)<sup>[23]</sup> 和 SSRF 正在研制的 EUV 掩模缺陷在线检测和分析一体化系统平台 (SSRF-BL09B1A)<sup>[2]</sup>. 本节将对上述提到的各 EUV 掩模缺陷表征平台展开叙述并分析其优缺点.

##### 4.1 SHARP

SHARP 是 ALS 设计并于 2013 年投入使用的第 3 代 EUV 在线掩模缺陷表征显微镜<sup>[24]</sup>, 是首台将 FSI 无损相干性控制与离轴波带片全场成像结合的显微镜<sup>[24]</sup>, 也是首台使用动态 EUV MEMS 振镜的设备<sup>[24]</sup>. SHARP 设置在 ALS 11.3.2 光束线, 末端聚焦光斑处的 EUV 功率 (92 eV) 约为 14  $\mu\text{W}$  @0.1%BW、能量分辨率  $E/\Delta E$  (92 eV) 约为  $10^{-4}$ 、光斑直径约为 250  $\mu\text{m}$ , 已实现  $0.424 \text{ s}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-2}$  的流量比、22 nm 半节距 (half pitch, hp) 的空间分辨率<sup>[17]</sup>. SHARP 的主要光路设计是如图 2(b) 所示的三镜 FSI 系统<sup>[17]</sup>, MA 和掩模位于 MC 两焦点处, 可将光斑聚焦 10 倍, 有效提高了功率密度. MA 把同步辐射的窄发散静态光束合成为动态填充任意角分布的模式, 覆盖  $1^\circ$ — $19^\circ$  的入射角和  $6^\circ$ ,  $8^\circ$  及  $10^\circ$  的中心光线角 (CRA), 实现了无损 FSI 调节<sup>[24]</sup>.

SHARP 最大的特点在于集成了 60—70 个不同光学参数的离轴波带片阵列、用于相位成像的泽尼克 (Zernike) 相位对比波带片以及用于测试波前恢复技术的预设像差波带片, 可切换多种成像模式, 覆盖 0.25—0.625 的  $4\times NA$  值和  $\pm 25^\circ$  之间的

5 个独立方位角<sup>[24]</sup>. 这种快速切换部分相干性照明的能力, 大大提高了成像分辨率. 同时, 阵列均采用椭圆波带片<sup>[24,25]</sup>以精确模拟非对称 *NA* 与分辨率的差异, 弥补了单透镜系统无法实现真实变形放大的缺点. 但由于 SHARP 工作视场只有 30  $\mu\text{m}$  直径的圆形区域, 表征前需要对掩模进行预加载, 建立测量坐标系进行全掩模的导航和粗准焦后才能进行分析<sup>[26]</sup>, 故在线检测能力有所欠缺, 无法快速定位缺陷. 尽管如此, SHARP 仍代表了目前 EUV 掩模缺陷分析的极限分辨率, 是同步辐射 EUV 光源开展在波长成像的标杆.

##### 4.2 RESCAN

瑞士保罗谢勒研究所 (Paul Scherrer Institute, PSI) 设计的 RESCAN 于 2016 年投入使用, 首次实现了反射模式下 EUV 掩模的 Ptychography 高分辨成像<sup>[20]</sup>. RESCAN 安装在 SLS XIL-II 光束线的一个专用分支上, EUV 光功率 (92 eV) 约为 30 mW、能量分辨率  $E/\Delta E$  (92 eV) 约为 4%、光斑直径约为 10  $\mu\text{m}$ <sup>[22]</sup>. 如图 3 所示, RESCAN 仅配备两面反射镜, 保证了掩模光通量最大化. 聚光镜 M1 将光束聚焦到靠近样品的平面上, 反射镜 M2 则以  $6^\circ$  的入射角将光束引向掩模, 再用 CCD 收集反射信号, 最后通过叠层迭代引擎算法重建出掩模图案<sup>[20,22]</sup>.

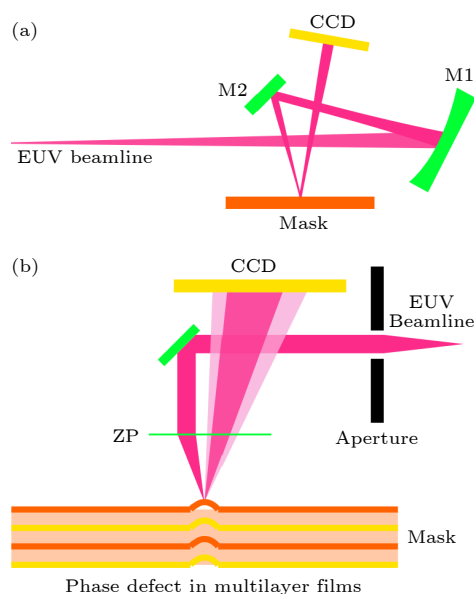


图 3 (a) RESCAN 的光路设计<sup>[22]</sup>; (b) Micro-CSM 的光路设计<sup>[23]</sup>

Fig. 3. (a) Optical path design of RESCAN<sup>[22]</sup>; (b) optical path design of Micro-CSM<sup>[23]</sup>.

通过分析扫描掩模不同区域收集到的衍射图像, RESCAN 可以依靠自身完成掩模缺陷的在线检测和分析. 理想情况下, 这两个步骤可使用同一组数据完成而不影响检测通量<sup>[20]</sup>. RESCAN 的在线检测能力来源于扫描散射对比显微技术 (SSCM), 即通过比较掩模实际衍射图与无缺陷的参考衍射图的差异来定位缺陷. 掩模周期性结构的衍射通常呈现强峰, 而孤立小缺陷的衍射强度较低, 因此探测掩模与缺陷衍射的干涉信号即可追踪缺陷来源. 此后再利用叠层衍射成像对其位置和特征进行分析. RESCAN 采用无透镜设计规避了光学元件  $NA$  限制, 已测得极限分辨率为 34 nm, 且仅需扩大探针面积即可提升有效  $NA$ <sup>[22]</sup>. 这种高度可扩展性使其成为未来技术发展的理想方案.

### 4.3 Micro-CSM

New SUBARU 在其 BL10 光束线研制了 Micro-CSM, 并于 2013 年投入使用. 该系统是一种微相干 EUV 散射显微镜, EUV 光能量分辨率 ( $92\text{ eV}$ )  $E/\Delta E$  约为 1300、光斑直径约为  $0.23\ \mu\text{m}$ <sup>[23]</sup>, 专用于小尺寸相位缺陷分析<sup>[23]</sup>. Micro-CSM 基于 CDI 设计了如图 3(b) 所示光路. Micro-CSM 首先用小孔光阑限制入射光束尺寸, 然后采用波带片 (zone plate, ZP) 将其聚焦在掩模上, 最后用 CCD 采集掩模反射光的信号. ZP 的一半区域在掩模上方, 有效  $NA$  约为 0.08, EUV 光束入射角约为  $6.8^\circ$ . CCD 相机与掩模平行, 对应系统的  $NA$  约为 0.27, 光束接收角为  $\pm 16^\circ$ . Micro-CSM 进行实验后测得极限分辨率为  $30\text{ nm hp}$ <sup>[23]</sup>, 同时发现散射信号受缺陷在多层膜中的位置影响, 即多层膜散斑与缺陷衍射的干涉效应会干扰成像<sup>[23]</sup>. 此外, 通过 60, 30 nm 宽缺陷分析<sup>[23]</sup> 对比发现, 缺陷尺寸也会对信号产生影响<sup>[23]</sup>. 以上结果均体现出 Micro-CSM 对多层膜沉积后的微小相位缺陷的高敏感分析能力. 然而, Micro-CSM 需要借助其他设备完成在线检测后才能对缺陷进行分析, 高效性有所不足.

### 4.4 SSRF-BL09B1A

SSRF 在 BL09B 光束线搭建了 EUV 掩模缺陷在线检测和分析一体化系统平台 SSRF-BL09B1A, 覆盖能量范围为 80—500 eV. 其配置包含线密度 50 l/mm 和 250 l/mm 两块光栅单色器, 可分别实现的能量分辨率  $E/\Delta E$  ( $92\text{ eV}$ ) 约为

1000 和 8000<sup>[2,3]</sup>, 以满足不同  $NA$  的波带片成像. 如图 2(c) 所示, SSRF-BL09B1A 的光路设计与 SHARP 类似, 即采用相同的三镜 FSI 系统, 也同样能 10 倍聚焦 EUV 光束于掩模表面. 与 SHARP 不同的是, SSRF-BL09B1A 额外使用 SCMOS 探测器直接采集掩模反射光的暗场信号, 可利用暗场空间关联谱技术快速发现和定位缺陷可疑位置, 实现在线检测功能<sup>[27]</sup>. 当掩模无缺陷区域被曝光时, SCMOS 仅采集到零级光, 即亮场信号; 当缺陷被曝光时, SCMOS 还会采集到零级光区域外的弱衍射信号, 即暗场信号. 由于缺陷尺寸在几十 nm, 相对于掩模处 mm 级光斑而言, 暗场信号非常微弱. 所以为了提高灵敏度, 需对临近暗场信号做空间关联计算. 当缺陷出现时, 观察关联谱函数值的突变即可快速发现缺陷的可疑位置.

SSRF-BL09B1A 的分析部分仍使用离轴波带片放大掩模反射光到 CCD 进行全场成像. 基于三镜 FSI 系统形成大  $NA$  角, 可通过编程实现任意填充花样的照明条件, 如图 2(a) 所示. 同时配置不同  $NA$  的离轴波带片, 可对定位的缺陷实现最高优于  $20\text{ nm}$ <sup>[27]</sup> 理论分辨率的分析. 截至目前, 针对 6 英寸 EUV 掩模, SSRF-BL09B1A 使用  $4\times NA = 0.5$  的离轴波带片和单次相干照明开展的缺陷分析分辨率已达到  $48\text{ nm hp}$ , 未来将采用  $4\times NA = 0.625$  的离轴波带片和 FSI 进一步优化.

通过对比上述各个实验系统平台的性能, 可以归纳出有关性能参数, 如表 1 所示.

表 1 国际知名同步辐射光源与表征设备对比  
Table 1. Comparison of internationally renowned synchrotron radiation sources and characterization equipment.

光源	ALS	SLS	New SUBARU	SSRF
平台	SHARP	RESCAN	Micro-CSM	SSRF-BL09B1A
功能	分析	在线检测+分析	分析	在线检测+分析
成像技术	全场成像	叠层衍射成像	相干衍射成像	全场成像
92 eV 能量分辨率 ( $E/\Delta E$ )	$10^{-4}$	4%	1300	1000—8000
光斑直径/ $\mu\text{m}$	30	10	0.23	>25
分辨率/nm	22	34	30	20(设计)

由表 1 可知, 采用全场成像技术的 SHARP 和 SSRF-BL09 B1 A 相较 RESCAN 和 Micro-CSM 具有更高的成像分辨率. 虽然 SHARP 和 SSRF 由弯铁光源供能, 空间相干性较差, 但 FSI 可快速调

节相干照明条件予以补偿,使其能更真实地模拟 EUV 光刻曝光过程中缺陷对成像的影响. SHARP 和 Micro-CSM 无法依靠自身提供缺陷的可疑位置,需要通过烦琐的前置操作进行预判. 而 RESCAN 和 SSRF-BL09B1A 兼具在线检测和分析两种功能,极大提高了缺陷表征效率与精度. 综合来说,在线检测和分析一体化的 SSRF-BL09B1A 具有较优秀的性能指标和发展潜力,填补了中国掩模表征从实验方法到系统应用的空白,为国产 EUV 光刻技术的突破和大规模生产提供了前期研究和技术储备.

## 5 基于同步辐射 EUV 掩模表征技术的未来发展趋势

未来 EUV 掩模缺陷表征技术的发展主要呈现“光源微型化”和“技术一体化”的特点:微型化的同步辐射光源为缺陷表征的产业化铺好了道路;而技术一体化除了表征设备本身集成在线检测和分析功能外,两大主流成像技术也有优势互补的趋势,本节将对此举例说明.

### 5.1 紧凑型加速器光源

尽管同步辐射 EUV 光源具有波长稳定、洁净无污染、波长可调谐等优点,但其设施依赖性和时间成本仍是产业应用的瓶颈,为此体积小巧的紧凑型加速器光源吸引了国际上一些研究机构和商业机构的兴趣. 例如韩国浦项加速器实验室 (Pohang Accelerator Laboratory, PAL) 于 2022 年完成建设的 PAL-EUV 装置,仅用  $11.5\text{ m}\times 11.5\text{ m}$  的尺寸就产生了 400 MeV 束流能量的 EUV 光<sup>[5]</sup>. 但 PAL-EUV 外部设施偏大,主环周长约 40 m,占地超过  $130\text{ m}^2$ <sup>[5]</sup>,不利于产业应用.

PSI 则提出了一种紧凑型低发射度加速器的设计,即用于光掩模检测的紧凑型储存环 (compact storage ring for actinic mask inspection, COSAMI)<sup>[6]</sup>. 为解决紧凑性和低发射度的相互冲突和保持光束高亮度, COSAMI 采用第三代光源衍射极限储存环,通过所谓“顶部注入”技术,将储存环叠加在更高位置的增强器上,而直线加速器注入器则安装在增强环周界内. 高度集成的设计使 COSAMI 在占地面积仅为  $12\text{ m}\times 5\text{ m}$ 、周长只有 25.8 m 的同时,理论上能产生 430 MeV 的电子束

能量,和通量为  $1.35\times 10^{15}\text{ phs/s}/0.1\% \text{ BW}$  的 EUV 光束<sup>[6]</sup>. 遗憾的是,该设计尚未实施,但中国 SSRF 也在开展类似的紧凑型 EUV 加速器光源的研制工作,目前正在建设中.

### 5.2 傅里叶叠层成像

对含透镜的成像技术来说,系统分辨率与光学元件的  $NA$  密切相关. 目前透镜性能已接近理论极限,然而 X 射线成像领域尚无同等性能的物镜可用,这引发了人们对无透镜成像法的浓厚兴趣. 随着 Ptychography 的发展与成熟,2016 年 Simons 等<sup>[28]</sup>提出了一种创新方向——傅里叶叠层成像. 此方法把 Ptychography 的“相位恢复技术”思想应用到傅里叶合成照明中,通过改变照明方向同时保持其他照明条件不变,使样品的空间频率成分在物镜孔径内扫描,重建光瞳函数,兼具高数值孔径物镜的分辨率和低数值孔径系统的大视场,实现了基于透镜的可见光成像技术的像差消除.

SLS 根据此前对叠层衍射成像技术深刻的研究经验, Wakonig 等<sup>[29]</sup>于 2019 年发展了一种傅里叶叠层成像的新设计方案,即扫描穿过物镜和探测器的衍射光束,不仅避免了改变入射角时保持照明恒定的复杂性,且最大分辨率由扫描捕获的最大衍射角决定,不受光学元件限制. 扫描范围拓展了物镜的  $NA$ ,形成等效合成透镜,超越了现有光学器件的  $NA$  极限. 实验表明,傅里叶叠层成像通过简单调整数据采集策略即可显著增强成像分辨率<sup>[29]</sup>. 此方法用高效元件替代了高分辨率物镜,满足了实验室级光源的低相干需求<sup>[21]</sup>,其应用必将影响未来 EUV 掩模检测中对成像方案的选择偏好,并为现有成像技术提供重要补充.

## 6 结论与展望

基于 13.5 nm 在波长掩模缺陷表征技术是 EUV 掩模制备质量的保障,同步辐射光源凭借能产生的波长稳定、洁净无污染的 EUV 光而成为开展掩模缺陷表征研究的重要技术手段. 本文系统梳理了国际四大同步辐射光源在掩模表征领域的技术发展现状,深入剖析其工作原理、技术优势与局限性,并对未来发展趋势进行了前瞻性探讨. 结果表明,面向 EUV 掩模缺陷检测与分析的具体需求,下一代系统平台需深度集成在线检测与分析功能、

发展新型紧凑光源、创新结合各成像技术优势以提升成像系统  $NA$ 、使理论分辨率突破 20 nm、满足未来 EUV 光刻产业向更高  $NA$  ( $>0.55$ ) 及更短波长 (6.7 nm) 发展的需求. 本文所得结论可为国内 EUV 掩模一体化表征设备的研制提供参考范例, 为构建自主可控的 EUV 光刻产业链提供关键技术储备.

## 参考文献

- [1] Sivakumar S 2011 *16th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC 2011)* Hongkong, China, January 25–28, 2011 p402
- [2] Liu H G, Meng X Y, Zhang X Z, Zhao B, Zhao J, Guo Z, Wu Y Q, Wang Y, Tai R Z 2024 *Patent* CN117890382A [2024-4-16] (in Chinese) [刘海岗, 孟祥雨, 张祥志, 赵波, 赵俊, 郭智, 吴衍青, 王勇, 郇仁忠 2024 中国专利 CN117890382A [2024-4-16]]
- [3] Su Z J, Liu H G, Meng X Y, Zhang X Z, Zhao B, Guo Z, Wang Y, Tai R Z 2025 *Nucl. Tech.* **48** 030102 (in Chinese) [苏子净, 刘海岗, 孟祥雨, 张祥志, 赵波, 郭智, 王勇, 郇仁忠 2025 核技术 **48** 030102]
- [4] Cui M Q, Wang J, Miao J W, Huang Y Y, Tang E S, Xian D C, Shao J H, Xue S, Xu Z L, Sun J H 1995 *High Energy Phys. Nucl. Phys.* **19** 82 (in Chinese) [崔明启, 王俊, 缪建伟, 黄宇营, 唐鄂生, 冼鼎昌, 邵景鸿, 薛松, 徐正良, 孙剑辉 1995 高能物理与核物理 **19** 82]
- [5] Ko J H, Kim M W, Lee S, Han J H, Hong J 2024 *J. Korean Phys. Soc.* **84** 189
- [6] Bergmann R M, Bieri T, Craievich P, Ekinci T G, Gough M N, Rivkin C R, Schulz T S, Stingelin A S, Wrulich V V A, Callegher A Z, Zennaro R 2017 *13th International Topical Meeting on the Applications of Accelerators* Quebec, Canada, July 31–August 4, 2017 p217
- [7] Rastegar A, Jindal V 2012 *28th European Mask and Lithography Conference (EMLC 2012)* Dresden, Germany, January 17–18, 2012 p83520W
- [8] Pfeiffer F 2018 *Nat. Photonics* **12** 9
- [9] Miyai H, Kohyama T, Todoroki T 2021 *Photomask Japan 2021* Japan, April 20–21, 2021 p119080H
- [10] Gwosch K, Capelli R, Roesch M, Nicholls R, Langbehn B, Mohn M, Verch A, Albert M, Kersteen G, Winkler A, Müller C, Krannich S 2023 *SPIE Photomask Technology + Extreme Ultraviolet Lithography 2023* Monterey, California, USA, October 1–5, 2023 pPC127500O
- [11] Zhao H J, Li H G, Yan L, Li C 2016 *Cyber Secur. Data Govern.* **35** 8 (in Chinese) [赵红军, 李昊罡, 颜亮, 李川 2016 网络安全与数据治理 **35** 8]
- [12] Spie Photomask Technology V, International B 2015 *SPIE Photomask Technology* Monterey, California, USA, September 29–October 1, 2015 p271
- [13] Lin J, Weber N, Maul J, Hendel S, Rott K, Merkel M, Schoenhense G, Kleineberg U 2007 *Opt. Lett.* **32** 1875
- [14] Li H, Wu X B, Han X Q, Ma H, Sha P F 2023 *Chin. J. Lasers* **50** 113 (in Chinese) [李慧, 吴晓斌, 韩晓泉, 马赫, 沙鹏飞 2023 中国激光 **50** 113]
- [15] Yang L, Ma Z, Liu S, Jiao Q, Zhang J, Zhang W, Pei J, Li H, Li Y, Zou Y, Xu Y, Tan X 2022 *Sensors* **22** 1113
- [16] García-Escudero A, Navarro-Bustos G, Umbría-Jiménez S, González-Cámpora R, Galera-Davidson H 2017 *Rev. Soc. Esp. Quim. Clin.* **50** 113
- [17] Goldberg K, Mochi I, Benk M, Allezy A, Dickinson M, Cork C, Zehm D, Macdougall J, Anderson E, Salmassi F, Chao W, Vytla V, Gullikson E, DePonte J, Jones M S G, Van Camp D, Gamsby J, Ghiorso W, Huang H, Cork W, Martin E, Van Every E, Acome E, Milanovic V, Delano R, Naulleau P, Rekawa S 2013 *SPIE Advanced Lithography* San Jose, California, February 24–28, 2013 p867919
- [18] Pan X Y, Bi X X, Dong Z, Geng Z, Xu H, Zhang Y, Dong Y H, Zhang C L 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 054202 (in Chinese) [潘新宇, 毕筱雪, 董政, 耿直, 徐哈, 张一, 董宇辉, 张承龙 2023 物理学报 **72** 054202]
- [19] Fan J D, Jiang H D 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 218702 (in Chinese) [范家东, 江怀东 2012 物理学报 **61** 218702]
- [20] Lee S, Guizar-Sicairos M, Ekinci Y 2014 *SPIE Advanced Lithography* San Jose, California, February 23–27, 2014 p904811–1
- [21] Wojdyla A, Benk M, Naulleau P, Goldberg K 2018 *Image Sensing Technologies: Materials, Devices, Systems, and Applications V* Gaylord Palms Hotel, Orlando, April 16–19, 2018 p106560W
- [22] Mochi I, Helfenstein P, Mohacsi I, Rajendran R, Kazazis D, Yoshitake S, Ekinci Y 2017 *J. Micro/Nanolithogr. , MEMS, MOEMS* **16** 041003
- [23] Tanaka Y, Harada T, Amano T, Usui Y, Watanabe T, Kinoshita H 2014 *Jpn. J. Appl. Phys.* **53** 06JC03
- [24] Miyakawa R, and Naulleau P 2019 *Synchrotron Radiat. News* **32** 15
- [25] Benk M, Wojdyla A, Chao W, Salmassi F, Oh S, Wang Y-G, Miyakawa R, Naulleau P, Goldberg K 2016 *SPIE Advanced Lithography* San Jose, California, February 21–25, 2016 p97761J–1
- [26] Goldberg K, Benk M, Wojdyla A, Mochi I, Rekawa S, Allezy A, Dickinson M, Cork C, Chao W, Zehm D, Macdougall J, Naulleau P, Rudack A 2014 *SPIE Advanced Lithography* San Jose, California, February 23–27, 2014 p90480Y–1
- [27] Li X L, Meng X Y, Wang Y, Liu H G, Zhang Y F, Zhang X Z, Zhao B, Zhao J, Tai R Z 2025 *Phys. Scr.* **100** 045533
- [28] Simons H, Poulsen H F, Guigay J P, Detlefs C 2016 arXiv: 1609.07513 [physics.ins-det]
- [29] Wakonig K, Diaz A, Bonnin A, Stampanoni M, Bergamaschi A, Ihli J, Guizar-Sicairos M, Menzel A 2019 *Sci. Adv.* **5** eaav0282

## VIEWS AND PERSPECTIVES

**Mask defects characterization techniques based on synchrotron radiation extreme ultraviolet light source\***ZHANG Zhihe<sup>1)2)</sup> LIU Haigang<sup>2)†</sup> WANG Yong<sup>2)‡</sup> TAI Renzhong<sup>2)††</sup>1) (*Qian Weichang College, Shanghai University, Shanghai 200444, China*)2) (*Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF), Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China*)

( Received 1 July 2025; revised manuscript received 31 August 2025 )

**Abstract**

The multilayer structure of extreme ultraviolet (EUV) masks limits the penetration depth of traditional inspection techniques at non-working wavelengths, thus hindering the effective examination of buried phase defects. Developing defect characterization techniques operating at the 13.5 nm wavelength is crucial for overcoming the quality bottleneck in EUV mask fabrication. Synchrotron radiation light source, with their stable EUV wavelength, cleanliness, and high power density, represents an ideal light source for EUV mask defect characterization research. In this work the current state of technology development for mask characterization at the world's four major synchrotron radiation facilities are systematically reviewed. Through comparative analysis, their working principles, technical advantages, and limitations are investigated in depth, and provide a forward-looking discussion on future trends. In response to the specific requirements for EUV mask defect detection and review, this paper discusses the requirements for the next-generation system platform, which integrates deep detection and review functions, develops novel compact light sources, and innovatively combines the advantages of various imaging techniques to improve the numerical aperture ( $NA$ ) of imaging systems. This aims to achieve a theoretical resolution of over 20 nm, meeting the future demands of the EUV lithography industry for higher  $NA$  ( $>0.55$ ) and shorter wavelengths (6.7 nm). Regarding the prospects of extending synchrotron radiation to industrial applications, a compact synchrotron radiation source, which can be developed on-site in semiconductor facilities, is introduced to accelerate the research and development cycle, while achieving the synergistic integration of imaging technologies. This paper focuses on the application of phase recovery principle of ptychography to Fourier synthesis illumination (FSI), achieving aberration correction in lens-based systems through synthetic aperture extension. In this paper, the working principles, performance benchmarks, technical challenges, and emerging development trends of existing synchrotron radiation-based EUV mask characterization techniques are investigated. It provides an important reference for designing next-generation EUV mask characterization system platforms.

**Keywords:** extreme ultraviolet (EUV) mask, synchrotron radiation source, mask defect inspection and review, Fourier synthesis illumination

**PACS:** 02.10.Yn, 33.15.Vb, 98.52.Cf, 78.47.dc**DOI:** [10.7498/aps.74.20250864](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250864)**CSTR:** [32037.14.aps.74.20250864](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250864)

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2021YFA1601000) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12175297).

† Corresponding author. E-mail: [liuhg@sari.ac.cn](mailto:liuhg@sari.ac.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [wangyong@sari.ac.cn](mailto:wangyong@sari.ac.cn)

†† Corresponding author. E-mail: [tairz@sari.ac.cn](mailto:tairz@sari.ac.cn)

## 基于同步辐射极紫外光源的掩模缺陷表征技术

张芷赫 刘海岗 王勇 邵仁忠

## Mask defects characterization techniques based on synchrotron radiation extreme ultraviolet light source

ZHANG Zhihe LIU Haigang WANG Yong TAI Renzhong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 200201 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250864

CSTR: 32037.14.aps.74.20250864

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250864>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 激光诱导放电等离子体极紫外辐射的模拟

Simulation of extreme ultraviolet radiation of laser induced discharge plasma

物理学报. 2024, 73(1): 015203 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231158>

#### 低密度SnO<sub>2</sub>靶激光等离子体极紫外光及离带热辐射

Radiation of extreme ultraviolet source and out-of-band from laser-irradiated low-density SnO<sub>2</sub> target

物理学报. 2023, 72(6): 065201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222385>

#### 双激光脉冲打靶形成Gd等离子体的极紫外光谱辐射

Characteristics of extreme ultraviolet emission from Gd plasma produced by dual pulse laser

物理学报. 2022, 71(3): 035202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211450>

#### 基于匀光管的极紫外消相干和光强均匀化仿真研究

Simulation study of decoherence and light intensity uniformization for extreme ultraviolet of uniform light pipe

物理学报. 2024, 73(11): 114201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240335>

#### 激光锡等离子体的状态参数分布和极紫外波段辐射的模拟研究

Numerical simulation of state parameter distributions and extreme ultraviolet radiation in laser-produced tin plasma

物理学报. 2025, 74(3): 033201 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241321>

#### 极紫外光源及高荷态离子诱导下甲烷的脱氢通道碎裂机制

Fragmentation mechanism of methane dehydrogenation channel induced by extreme ultraviolet and high charge ions

物理学报. 2024, 73(4): 044101 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231377>