

激光与光电子学进展

极紫外光刻掩模缺陷检测与补偿技术研究

成维^{1,2}, 李思坤^{1,2}, 张子南^{1,2}, 王向朝^{1,2*}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 极紫外(EUV)光刻机是推动集成电路向先进技术节点发展的核心装备,已应用于7 nm及以下技术节点芯片的量产。高成像质量是EUV光刻机应用于芯片量产的基础。作为成像系统的重要组成部分,掩模是影响EUV光刻成像质量的重要因素。EUV掩模的制造过程中会产生以多层膜缺陷为代表的掩模缺陷,显著降低光刻成像质量。对EUV掩模缺陷的位置、尺寸和形貌等进行准确检测,并根据检测结果进行缺陷补偿是确保光刻成像质量的重要手段。为了有效补偿掩模缺陷对光刻成像质量的影响,需要建立快速准确的含缺陷掩模模型。本文结合本团队在掩模缺陷检测和补偿技术领域的研究工作,介绍了典型的含缺陷掩模仿真方法,总结了现有掩模缺陷检测技术,介绍了掩模缺陷补偿技术的研究进展。

关键词 光刻; 极紫外光刻; 掩模缺陷检测; 掩模缺陷补偿; 掩模模型

中图分类号 TN305.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.0922022

Research on Mask Defect Inspection and Compensation Techniques in Extreme Ultraviolet Lithography

Cheng Wei^{1,2}, Li Sikun^{1,2}, Zhang Zinan^{1,2}, Wang Xiangzhao^{1,2*}

¹Laboratory of Information Optics and Opt-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Extreme ultraviolet (EUV) lithographic tool is the core equipment to promote the development of integrated circuits to advanced technology nodes, and has been introduced into high volume manufacturing (HVM) of 7 nm technology node chips and below. High imaging quality is the basis of the application of the EUV lithography for HVM. As an important component of the EUV lithography imaging system, mask is a critical factor that affects the imaging quality. Mask defects, especially multilayer defects, are embedded in the EUV mask during the manufacturing process and result in the degradation of the imaging quality. To assure the imaging quality of EUV lithography, it is important to obtain the location, size, and profile of the mask defect accurately by inspection and compensate for the mask defects according to the information of them. Fast and accurate models for defective mask can help to compensate for the degradation of the imaging quality resulting from the mask defects effectively. In this paper, combining with the research work of our group in the field of mask defect inspection and defect compensation, the typical defective mask simulation methods are introduced, the existing mask inspection techniques are summarized, and the research progress of mask defect compensation techniques are introduced.

Key words lithography; extreme ultraviolet lithography; mask defect inspection; mask defect compensation; mask model

收稿日期: 2022-03-28; 修回日期: 2022-04-11; 录用日期: 2022-04-12

通信作者: *wxz26267@siom.ac.cn

1 引言

光刻机是极大规模集成电路制造的核心装备^[1]。光刻机分辨率的不断提高是集成电路按照摩尔定律持续微细化的关键要素^[2-3]。EUV 光刻是一种曝光波长为 13.5 nm 的光刻技术。与曝光波长更大的深紫外(DUV)光刻技术相比,EUV 光刻可实现更高的单次曝光分辨率^[4]。随着 EUV 光刻技术的不断发展,EUV 光刻机已应用于 7 nm 及以下节点芯片的量产^[4]。与透射式的 DUV 光刻系统不同,由于 EUV 光会被绝大多数材料强烈吸收^[5],EUV 光刻系统中包括掩模在内的光学元件均采用反射式光学结构^[5]。

掩模是光刻成像系统的重要组成部分。随着芯片制造技术节点的降低,EUV 掩模的结构越来越复杂,对成像质量的影响也逐渐增大^[6]。EUV 掩模主要由基底、吸收层与多层膜组成^[7]。基底对整个 EUV 掩模起支撑作用。基底表面的缺陷在多层膜沉积过程中会造成多层膜的变形,是引起多层膜缺陷的主要因素之一^[8]。EUV 掩模吸收层与 DUV 掩模吸收层作用相似,根据集成电路的设计图形对吸收层进行刻蚀开孔形成掩模图形^[4]。EUV 多层膜是 EUV 掩模中特有的结构,通常由 40~50 对钼/硅(Mo/Si)双层膜构成,对 13.5 nm 的 EUV 光具有较高的反射率^[8]。EUV 掩模缺陷,尤其是多层膜缺陷,会导致掩模成像质量下降,是影响 EUV 光刻良率的重要问题之一^[7]。

多层膜缺陷是 EUV 掩模中特有的缺陷^[9]。由于 EUV 光刻的曝光波长短,尺寸仅为纳米量级的多层膜缺陷可使掩模衍射谱产生明显的振幅与相位变化^[10-11],从而对 EUV 光刻的成像质量造成严重影响。由于理想的无缺陷掩模难以制造^[12],在掩模制造完成后,需对掩模上缺陷的位置、尺寸和形貌等进行检测,并根据检测结果制定补偿方案以减小缺陷带来的影响^[9]。在不破坏多层膜的情况下,难以直接修复多层膜缺陷。因此一般采用掩模图形偏移规划技术与掩模修正技术对多层膜缺陷进行补偿^[13-14]以降低缺陷对掩模成像的影响。为了有效减小掩模缺陷对光刻成像质量的影响,需要快速准确地仿真缺陷对掩模衍射谱和空间像的影响^[10]。

针对 EUV 掩模缺陷问题,国内外研究人员在含缺陷掩模仿真、掩模缺陷检测以及掩模缺陷补偿等技术领域进行了大量研究^[15]。本文综述国内外研究进展以及本团队在含缺陷掩模仿真^[10,13,16-17],掩模缺陷检测^[18-19]以及掩模缺陷补偿^[14,20-21]领域的研究

工作。在含缺陷掩模仿真方面,介绍多种严格电磁场仿真方法以及近似仿真方法,分析各种仿真方法的优缺点。在掩模缺陷检测方面,介绍多种空白掩模检测与有图形掩模检测技术。在掩模缺陷补偿方面,介绍掩模图形偏移规划技术与掩模修正技术,并分析各自的优缺点。

2 含缺陷掩模仿真方法

EUV 含缺陷掩模仿真方法主要分为严格电磁场仿真方法与近似仿真方法两类。严格电磁场仿真方法通过求解麦克斯韦方程组获取掩模衍射谱,精度高,但对于 EUV 含缺陷掩模此类三维形貌复杂的物体,严格电磁场仿真速度较慢。近似仿真方法可实现对含缺陷掩模的快速仿真,但仿真精度低于严格仿真,适用于需要对含缺陷掩模进行大量仿真的缺陷补偿技术。

2.1 严格电磁场仿真方法

时域有限差分法(FDTD)是一种已被广泛用于不同电磁场仿真领域的经典电磁场计算方法^[22]。采用足够精细的网格划分,FDTD 法可实现对具有复杂结构的物体的高精度电磁场仿真计算,可用于含缺陷掩模衍射谱的仿真。FDTD 法将所仿真的物体划分成离散的立方元胞,对于每个立方元胞,采用差分计算代替偏微分计算,按一定的时间步长结合边界条件迭代求解时域的麦克斯韦微分方程组^[7]。然而,采用差分近似代替偏导数所带来的误差会影响 FDTD 求解的稳定性^[4]。为保证 FDTD 求解的稳定性,需要足够小的时间步长与空间步长^[22],这使得 FDTD 对大面积含缺陷掩模的仿真计算耗时较长,限制了其在三维 EUV 含缺陷掩模仿真中的应用。

严格耦合波分析法(RCWA)和波导法(WG)均基于模式理论和傅里叶展开的严格电磁场仿真方法^[23-25]。这类方法将周期性介质物体分割为多层薄层结构,各薄层在 z 方向具有均匀的电介质分布,通过将各薄层的电磁场与电介质分布展开为傅里叶级数,结合麦克斯韦方程组及界面处电磁场切向分量的连续性条件,可求解仿真物体的远场衍射谱分布^[5]。相较 FDTD,这类方法对于周期性介质物体在仿真计算速度及收敛性上均具有更为优异的性能,对于 EUV 无缺陷掩模的仿真计算有明显的优势。然而这类方法对于 EUV 含缺陷掩模这类具有复杂三维形貌的物体需要精细的网格划分与较高的截断级次以保证足够的精度,对于较大面积

的三维含缺陷非周期型掩模的仿真计算速度较慢^[4]。

尽管严格电磁场仿真方法能提供较为精确的仿真结果,但其对于 EUV 含缺陷掩模此类三维形貌复杂的物体仿真速度较慢,针对此问题,研究人员提出了多种可对 EUV 含缺陷掩模衍射谱进行快速仿真的近似仿真方法。

2.2 近似仿真方法

由于吸收层和多层膜,尤其是含缺陷多层膜的光学传播物理过程差异较大,将吸收层、多层膜分解仿真的掩模结构分解法可较好地实现 EUV 含缺陷掩模衍射谱的快速精确仿真。

不同的吸收层模型与多层膜模型组合在一起可得到不同的基于掩模结构分解的 EUV 掩模快速仿真模型。Clifford 等^[26-27]将基于边界点脉冲修正的吸收层模型分别与基于单平面近似和光线追迹法的多层膜模型通过傅里叶变换连接在一起,建立了可用于 EUV 含缺陷掩模近似仿真的 RADICAL 模型。对于含缺陷多层膜反射谱的计算,Gullikson 等^[28]提出的单平面近似模型采用多层膜表面的相位突变近似表征缺陷引起的相位变化,未考虑多层膜表面以下的形变的影响,而 Clifford 等^[26]在此基础上提出了改进单平面近似模型,由于多层膜缺陷掩模沉积过程中趋于平滑,多层膜缺陷表面形貌导致的相位突变不足以表征缺陷引起的相位变化,采用多层膜表面以下某层的形态引起的相位突变近似表征缺陷引起的相位变化,提高对缺陷造成的多层膜衍射谱的相位变化仿真的准确性。当多层膜缺陷较大时,仅用相位突变近似不能保证仿真的准确性,需要考虑缺陷对多层膜反射率振幅的影响^[7, 27]。光线追迹法采用菲涅耳公式计算每一对 Mo/Si 双层膜的反射和透射系数^[7]。在光的入射过程中,光线随多层膜中缺陷导致膜层倾斜作相应的倾斜,而在光的出射过程中,该方法将多层膜近似为无缺陷理想多层膜^[7]。当多层膜缺陷较大时,缺陷将导致多层膜结构严重变形,此时近似误差较大^[26]。RADICAL 适用于对缺陷较小的 EUV 含缺陷掩模进行快速仿真。

为进一步提高 RADICAL 仿真的准确性,Luminescent Technologies(LT)公司的研究人员对 RADICAL 进行了优化^[4],提出了基于掩模结构分解的 DPS 仿真工具。相较 RADICAL,在吸收层模型部分,DPS 优化了在入射光角度不同时的吸收层

边界斜率的边界修正参数^[29],在含缺陷多层膜模型部分,DPS 中采用 Stern 多层膜生长模型建立更符合多层膜沉积物理过程的缺陷形貌,进一步提高了对 EUV 含缺陷掩模衍射谱仿真的精度^[30]。

Evanschitzky 等^[31]提出了基于波导法的掩模结构分解数据库方法。该方法将严格仿真中耗时较长的 EUV 含缺陷多层膜传输矩阵离线计算并存储在数据库中,而相对耗时较短的吸收层传输矩阵在线计算,并与数据库中存储的含缺陷多层膜传输矩阵匹配结合以对 EUV 含缺陷掩模整体进行仿真,从而达到提升仿真速度的效果。然而,该方法需要建立完备的多层膜数据库才可实现对 EUV 含缺陷掩模的快速仿真。

本团队的刘晓雷等^[10]基于单平面近似法建立了一种 EUV 含缺陷多层膜仿真简化模型。将基于基尔霍夫薄掩模修正的吸收层模型与基于单平面近似法的多层膜模型结合,组成基于结构分解的 EUV 含缺陷掩模仿真模型^[5]。基于单平面近似的 EUV 含缺陷多层膜仿真简化模型中,分别采用相位突变和反射系数振幅衰减表示缺陷对多层膜反射系数相位和振幅的影响,简化模型的基本结构如图 1^[10]所示。

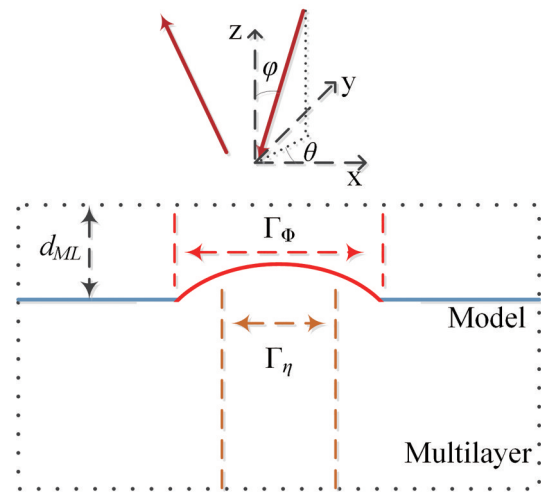


图 1 基于单平面近似的 EUV 含缺陷多层膜仿真简化模型^[10]
Fig. 1 Simplified model for defective EUV multilayer based on single surface approximation^[10]

图 1 中 Γ_η 和 Γ_ϕ 分别为振幅衰减和相位突变的影响范围, d_{ML} 为多层膜的平面镜等效面与多层膜上表面的距离, φ 和 θ 分别为入射光方向与 z 轴的夹角和入射光在 xoy 平面上的投影与 x 轴的夹角。若采用方向余弦表示入射光方向,则入射光方向与 x 轴方向和 y 轴方向夹角的方向余弦 α_{in} 和 β_{in} 可由

$(\alpha_m, \beta_m) = (\sin \varphi \cos \theta, \sin \varphi \sin \theta)$ 计算。含缺陷多层膜的衍射谱 $G(\alpha_m)$ 可根据下式计算,

$$G(\alpha_m) = \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} d_{ML} \sqrt{1 - \alpha_m^2 - \beta_m^2}\right) \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \eta(x, \Delta) \exp[j\Phi(x, \Delta)] \times r_{ML} \times \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} d_{ML} \sqrt{1 - \alpha_m^2 - \beta_m^2}\right) \times \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \alpha_m x\right) dx, \quad (1)$$

式中: α_m 为含缺陷多层膜衍射谱的 m 级衍射光的方向余弦; λ 为 EUV 曝光波长; $\eta(x, \Delta)$ 为反射系数的振幅衰减系数; $\Phi(x, \Delta)$ 为等效相位突变; r_{ML} 为理想多层膜的等效平面镜反射系数。反射系数的振幅衰减系数 $\eta(x, \Delta)$ 和等效相位突变 $\Phi(x, \Delta)$ 计算公式^[5]为

$$\eta(x, \Delta) = \begin{cases} f_\eta(x, \Delta), & x \in \frac{\Gamma_\eta}{p}, \\ 1, & x \in \text{others} \end{cases} \quad (2)$$

$$\Phi(x, \Delta) = \begin{cases} \frac{2\pi}{\lambda} h_\Phi(x, \Delta) (\sqrt{1 - \alpha_m^2 - \beta_m^2} + \sqrt{1 - \alpha_m^2 - \beta_m^2}), & x \in \frac{\Gamma_\Phi}{p}, \\ 0, & x \in \text{others} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $f_\eta(x, \Delta)$ 为在振幅衰减影响范围 Γ_η 内的振幅衰减函数; $h_\Phi(x, \Delta)$ 为在相位突变影响范围 Γ_Φ 内的相位突变等效传播距离; p 为多层膜的周期。

基于单平面近似的 EUV 含缺陷多层膜仿真模型将多层膜等效为特定面上的反射镜, 具有仿真速度快的优点^[5]。然而对非高斯型缺陷, 难以通过简单的表达式计算缺陷对多层膜反射系数的影响, 且当入射角较大时, 理想平面镜近似不再准确, 模型仿真精度降低^[4]。

本团队的刘晓雷等^[13]基于等效膜层法建立了一种 EUV 含缺陷多层膜快速仿真模型, 可对含不同形态缺陷的 EUV 多层膜进行仿真。该模型根据缺陷影响范围将含缺陷多层膜划分为无缺陷区域

和含缺陷区域, 并采用等效膜层法计算不同位置处的含缺陷多层膜复反射系数^[5]。将基于基尔霍夫薄掩模修正的吸收层模型与基于等效膜层法的多层膜模型结合, 得到基于结构分解法的 EUV 含缺陷掩模仿真模型。

如图 2 所示, 含缺陷多层膜中, 缺陷的影响区域为缺陷中心位置为中心, 两倍的表面缺陷半峰全宽范围内, 将该范围内的区域划分为含缺陷区域 S_2 , 该范围外的区域划分为无缺陷区域 S_1 。采用等效膜层法计算含缺陷多层膜的不同位置处的复反射系数^[5]。在计算复反射系数时, 多层膜上入射光的角度需根据多层膜表面形貌进行调整, 调整量由该位置处多层膜表面的斜率决定。获取含缺陷多层膜的

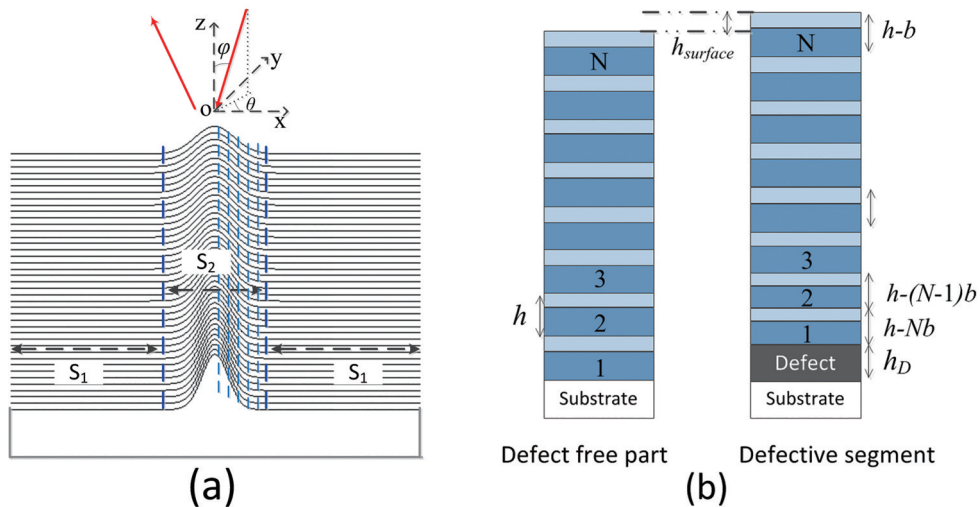


图 2 基于等效膜层法的仿真模型。(a)含缺陷多层膜的划分;(b)无缺陷多层膜和含缺陷多层膜的膜厚分布^[5]

Fig. 2 Simulation model based on equivalent film layer method. (a) Partition of defective multilayer; (b) thickness distribution of layers for defect-free and defective multilayer^[5]

反射系数后,计算含缺陷多层膜衍射谱^[5],表示为

$$G(\alpha_n) = \int_S \tilde{A}_0 \cdot P(x, \phi) \cdot \tilde{r}(x, \phi) \exp(-j2\pi \frac{\alpha_n}{\lambda} x) dx = \int_{S_1} \tilde{A}_0 \cdot \tilde{r}_0(\phi) \exp(-j2\pi \frac{\alpha_n}{\lambda} x) dx + \int_{S_2} \tilde{A}_0 \cdot P(x, \phi) \cdot \tilde{r}(x, \phi_x) \exp(-j2\pi \frac{\alpha_n}{\lambda} x) dx, \quad (4)$$

式中: \tilde{A}_0 为入射光的复振幅; $P(x, \phi)$ 为入射光到多层膜表面的往返相位差; ϕ 为光入射到多层膜无缺陷区域 S_1 表面的入射角; ϕ_x 为光入射到多层膜含缺陷区域 S_2 表面的入射角; $\tilde{r}_0(\phi)$ 为多层膜的无缺陷区域 S_1 的复反射系数; $\tilde{r}(x, \phi_x)$ 为多层膜的含缺陷区域 S_2 的复反射系数; α_n 为多层膜衍射谱 n 级衍射光的方向余弦。

为了进一步提高基于等效膜层法的 EUV 含缺陷多层膜仿真方法的速度与精度,本团队的张恒等^[16]对该方法进行了改进,提出了含缺陷改进型等效膜层法,为了提升仿真速度,该方法取反射场离散傅里叶变换后的 $n(n < 3)$ 个核心级次,并根据入射角的大小进行 Hopkins 频移计算衍射谱。为了提高仿真精度,与原等效膜层法,根据含缺陷掩模表面斜率变化调整等效入射角的方法不同,该方法利用多层膜表面法向量与入射光矢量的夹角调整等效入射角,以更好地符合缺陷表面形貌^[4]。由于在实际 EUV 掩模缺陷检测过程中,对掩模缺陷的位置、尺寸以及多层膜形貌的测量均存在一定误差。张恒等^[17]采用机器学习方法对 EUV 含缺陷多层膜的模型参数——高斯形貌调制因子进行调整,将理论模型与标准数据进行校正匹配,进一步提高了该近似仿真方法的仿真精度。

3 掩模缺陷检测技术

准确地检测 EUV 掩模中缺陷的位置、尺寸和

形貌等信息是对缺陷进行有效补偿的基础。在 EUV 掩模制造的不同阶段需要采用不同的检测技术对 EUV 掩模缺陷进行检测。在空白掩模检测阶段,采用空白掩模检测技术对空白掩模上缺陷的位置和尺寸进行检测,采用多层膜缺陷形貌检测技术得到空白掩模上的多层膜缺陷的三维形貌信息。在有图形掩模检测阶段,采用有图形掩模检测技术对有图形掩模上不同类型的缺陷的位置和尺寸进行检测,采用空间像测量技术得到掩模缺陷处的空间像,根据空间像可分析缺陷对掩模成像的影响。

3.1 空白掩模的缺陷检测

3.1.1 缺陷位置与尺寸检测

对 EUV 空白掩模上缺陷的位置与尺寸进行检测的设备可分为工作波长空白掩模检测设备与非工作波长空白掩模检测设备。工作波长的检测设备指采用 EUV 光对 EUV 掩模进行检测的设备,而不采用 EUV 光(采用 DUV 光、可见光、电子束等)的 EUV 掩模检测设备称为非工作波长检测设备^[8]。采用 DUV 光的非工作波长空白掩模检测设备主要包含 488 nm、266 nm、193 nm 三代检测设备^[32],如:Lasertec 公司采用的光源波长为 488 nm 的光学检测设备 Lasertec M1350,光源波长为 266 nm 的光学检测设备 Lasertec M7360^[33],KLA-Tencor 公司生产的光源波长为 193 nm 的光学检测设备 Teron Phasur 系列^[34-35]。Lasertec M1350 与 Lasertec M7360 的检测原理均基于共聚焦显微镜^[33],但由于检测波长的不同,可以达到的检测分辨率也不同。非工作波长光学检测设备 Lasertec M1350 检测分辨率可达 65 nm, Lasertec M7360 检测分辨率可达 50 nm^[36]。由于非工作波长光在 Mo/Si 多层膜中会迅速衰减,所有可见光,DUV 光与电子束检测设备对于 EUV 多层膜缺陷进行检测的灵敏度都受到了限制。不同波段的光能穿透的 Mo/Si 双层膜层数如表 1^[37]所示。除 EUV 光以外,非工作波长的光所能穿透的双层膜层数都不足多层膜的 1/3。

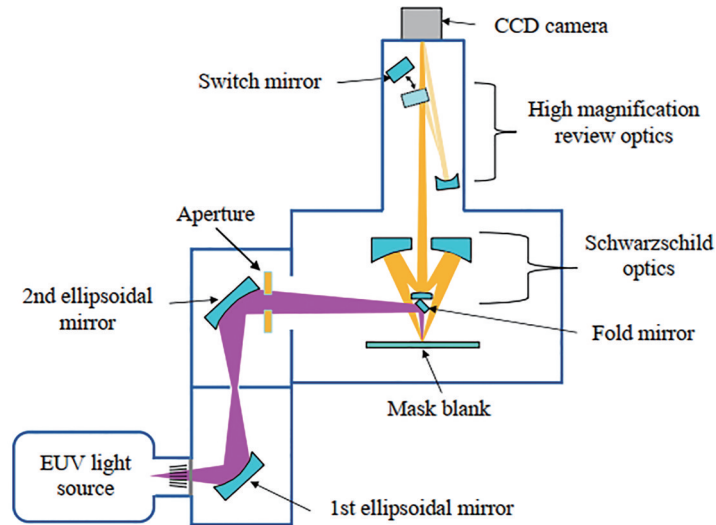
表 1 不同波长的光在多层膜中的穿透深度^[37]

Table 1 Penetration depth of different wavelengths used in the EUV multilayer^[37]

Wavelength /nm	13.5	193/199	257/266	365	488	532	e-beam
Penetration depth (bi-layers)	31	3	2	5	12	11	1-2

穿透深度的不足导致非工作波长检测设备对掩模表面过于敏感且难以检测小的相位型缺陷^[37-38],非工作波长检测设备的局限使得工作波长检测设备的研发十分必要。

目前工作波长空白掩模检测设备已有 Lasertec 公司的 ABI 设备^[39]。如图 3 所示,ABI 设备主要包含 EUV 光源,由两个椭球面镜和一个折叠镜组成的照明系统,用于成像的 Schwarzschild 光学元件,

图 3 ABI 的光学设置示意图^[40]Fig. 3 Schematic diagram of the optical setup for the ABI^[40]

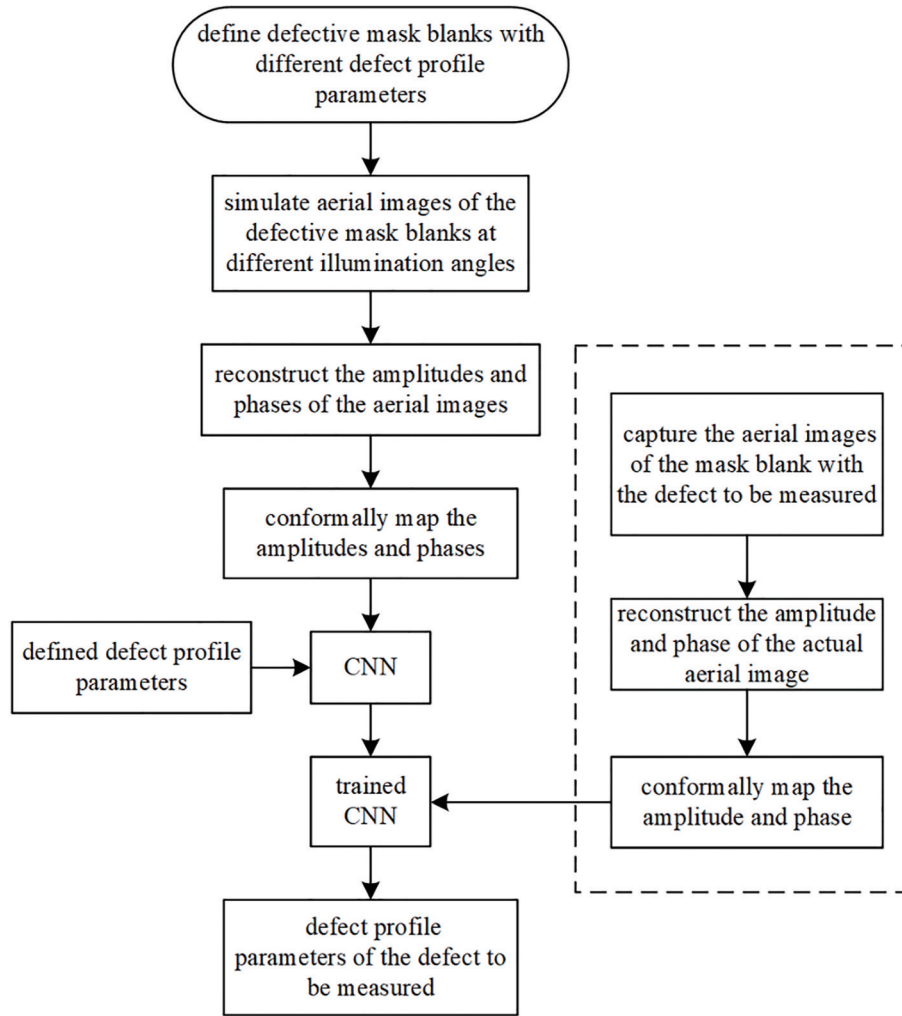
可切换平面镜、凹球面反射镜和对 EUV 光敏感的 CCD^[40]。ABI 设备可在检测模式与复检模式两种模式下运行。在检测模式下,高放大率复检光学元件部分中的凹球面反射镜不参与成像,EUV 光被椭球面镜收集和反射然后被折叠镜反射照射到空白掩模上,空白掩模的反射光通过被 Schwarzschild 光学元件的内 NA 和外 NA(内 NA 为 0.1,外 NA 为 0.27)限制的区域由 CCD 接收。检测模式下成像放大率为 26 倍^[40]。在复检模式下,若采用暗场成像,则调整可伸缩的平面镜使得光线经凹球面反射镜放大,最终以 1200 倍(26×46.15)放大率成像得到缺陷位置的高分辨率图像,可获取更精确的缺陷位置与尺寸信息^[41],若采用明场成像,则需另外调整掩模上方的折叠镜使得照射在掩模上的光中心主入射角为 6° ,以获取能反映更多缺陷反射信息的 1200 倍放大的明场图像^[42]。目前 ABI 已能 100% 检测出高度大于 1 nm,宽度大于 33 nm 的缺陷,可满足 16 nm hp (half-pitch) 节点要求^[41]。

3.1.2 多层膜缺陷三维形貌检测

多层膜缺陷的表面形貌可用现有的检测设备[如原子力显微镜(AFM)]进行测量,但多层膜中的相位型缺陷是由位于多层膜底部的缺陷造成的多层膜变形^[8],此类缺陷对掩模成像质量的影响取决于其三维形貌^[43],仅测量缺陷表面形貌难以满足缺陷仿真分析与补偿的需求。透射电子显微镜(TEM)可精确测量相位型缺陷的三维形貌,但它是一种破坏性测量方式,实际生产中无法直接用于缺陷三维形貌测量^[8]。LT 公司提出了一种基于

Stearn 生长模型^[44]的相位型缺陷形貌重建方法^[45]。该方法采用 AFM 测量缺陷表面形貌,将缺陷表面作为起始面计算表面下多层膜中每一层的形貌,并通过与 TEM 对样本缺陷的测量结果进行标定建立缺陷形貌重建模型。以 AFM 测得的缺陷表面形貌作为输入,利用完成标定后的缺陷形貌重建模型重建相位型缺陷三维形貌。该模型可对缺陷三维形貌进行准确重建,但仅可用于与标定时沉积条件相同的情况。不同于基于生长模型的掩模缺陷形貌重建方法,基于空间像对缺陷参数重建的方法可对不同沉积条件下的多层膜相位型缺陷三维形貌进行重建。Xu 等^[46]提出了一种基于空间像的缺陷形貌重建方法。该方法采用强度传输方程恢复空间像相位,采用主成分分析的方法提取空间像特征值,并利用神经网络重建缺陷参数。Chen 等^[47]提出了一种基于空间像的改进型缺陷形貌重建方法,优化了使用的人工神经网络,提高了重建精度。

本团队的成维等^[18-19]提出了一种新的基于空间像的 EUV 光刻掩模相位型缺陷形貌重建方法,进一步提高了缺陷参数重建精度,对凸起型与凹陷性缺陷形貌参数均有较好的重建效果。该方法采用包含表面形貌参数与底部形貌参数的高斯型等效缺陷模型表征相位型缺陷。采用傅里叶叠层成像(FP)^[48]重建含缺陷空白掩模空间像复振幅。设计了可将重建的空间像振幅与相位图像映射为缺陷形貌参数的基于空洞残差网络^[49]的卷积神经网络(CNN)模型。在振幅与相位图像输入神经网络前

图 4 缺陷形貌参数重建流程图^[19]Fig. 4 Flow chart of the defect profile parameter reconstruction^[19]

先对图像进行共形映射^[50],使得 CNN 可以更高效地提取振幅与相位的特征。采用设计的 CNN 进行缺陷参数重建的流程图如图 4 所示。在掩模缺陷参数重建过程中,首先采用大量预先设定的缺陷参数以及相应的振幅与相位图像对 CNN 进行训练,得到训练后 CNN。获取含待测缺陷掩模的振幅与相位图像,进行共形映射后输入训练后 CNN,输出待测缺陷的缺陷形貌参数。仿真结果表明该方法可精确重建掩模相位型缺陷形貌参数,且在存在噪声干扰的时候仍可保证较好的重建精度。

3.2 有图形掩模的缺陷检测

3.2.1 缺陷位置与尺寸检测

为了对有图形掩模上不同类型的缺陷的位置和尺寸进行准确检测,研究人员研发了多种有图形掩模检测设备。波长为 257 nm 的 DUV 有图形掩模检测设备曾被作为 EUV 有图形掩模检测的选择,

在吸收层上沉积抗反射涂层可增加检测波长为 257 nm 时的成像对比度^[38]。但当技术节点向前推进的时候,DUV 有图形掩模检测设备光源波长为获得更高的分辨率向 193 nm 发展^[36]。若将导致硅片面成像特征尺寸(CD)变化 $\geq 10\%$ 的缺陷定义为影响成像的缺陷,则检测波长为 193 nm 的 DUV 有图形掩模检测设备可准确检测出 CD 为 28 nm 的掩模图形中影响成像的缺陷,但对 CD 为 24 nm 的掩模图形缺陷检测变得困难^[38]。随着芯片制造向更小节点发展,DUV 有图形掩模检测设备的分辨率逐渐无法满足需求。

电子束掩模检测设备也可用于 EUV 有图形掩模缺陷检测^[15],相较 193 nm 的 DUV 有图形掩模检测设备,电子束掩模检测设备的分辨率有很大优势,但检测速率过低。将灵敏度设为 40 nm 时,检测 100 nm \times 100 nm 区域缺陷需耗时 10 h,而当灵敏度

设为 30 nm 时,需耗时 25 h。检测速率过低是电子束掩模检测设备最大的问题^[38],为加速检测过程,多电子束掩模检测技术和电子束与光学成像器件结合的检测技术正在研发中。

EUV 工作波长有图形掩模检测设备 (APMI) 使用与 EUV 光刻机曝光波长相同的检测光^[15]。更短的检测光波长也使得 APMI 相较 DUV 有图形掩模检测设备具有更高的分辨率。由于 EUV 掩模多层膜的特殊结构,只有使用 EUV 光的检测设备可以检测出有图形掩模中的相位型缺陷^[51]。随着 EUV 薄膜技术(在掩模上覆盖薄膜防止在掩模操作和曝光过程中被污染)的发展^[12],对 APMI 的需求变得更加迫切。目前采用厚度小于 50 nm 的多晶硅作为 EUV 薄膜,然而 DUV 光并不能穿透这类薄膜,这使得 DUV 有图形掩模检测设备无法实现透过薄膜的掩模缺陷检测^[51]。Lasertec 公司推出了 EUV 工作波长有图形掩模检测设备 ACTIS A150,填补了工作波长有图形掩模检测设备的空白^[51]。ACTIS A150 的技术基础源自 Lasertec 推出的 EUV 工作波长空白掩模设备,可用于检测吸收层缺陷,多层膜中的振幅型缺陷与相位型缺陷^[52]。为保证足够高的 EUV 掩模图形图像对比度,ACTIS A150 采用 0.28 的高成像数值孔径。ACTIS A150 光源采用锡基 EUV 光源,其高转换效率有助于产生高亮度的 EUV 光。此外,与其他 EUV 工作波长掩模检测相同,采用 ACTIS A150 的掩模检测必须在真空条件中进行,因此对 ACTIS A150 中的掩模处理系统的清洁度要求非常高^[51]。

RESCAN 是 Paul Scherrer Institute 研发的基于扫描相干衍射成像的有图形掩模检测设备^[53]。RESCAN 采用无透镜成像系统,无透镜成像的特征使得 RESCAN 突破了传统成像系统的数值孔径与像差限制,最小可探测 10 nm × 10 nm 的缺陷,并且可以通过相位恢复算法提供空间像相位信息,完成 100 mm × 100 mm 掩模检测所需时间约为 7 h^[53]。RESCAN 采用扫描散射对比显微成像技术 (SSCM) 完成快速缺陷检测,采用扫描相干衍射成像技术 (SCDI) 完成精确缺陷定位^[54]。RESCAN 使用相干光照明有图形掩模的一定区域,然后收集远场衍射图像,通过测量与分析这些远场衍射图像推测是否存在缺陷以及获取缺陷处的空间像^[54]。对于有图形掩模检测来说,可以对被薄膜保护的 EUV 掩模进行检测十分重要,而 RESCAN 无透镜成像的

设计使其在实施透过薄膜的检测时没有几何限制^[55]。

3.2.2 缺陷的空间像测量

对 EUV 掩模缺陷所在位置进行空间像测量,根据空间像可判断缺陷是否对掩模成像造成影响。在缺陷修复或补偿后需对含缺陷掩模进行空间像测量以确认缺陷影响已得到减弱与补偿。

目前已有的掩模空间像测量设备主要包括: Carl Zeiss 公司研发的空间像测量系统 AIMS^[56-57], SEMATECH 研发的 SEMATECH 高 NA 工作波长掩模复检设备 SHARP^[58]。这两种空间像测量设备均采用波长为 13.5 nm 的照明光。AIMS 采用与 EUV 光刻机相似的照明条件与相同的物方数值孔径模拟光刻机成像^[57],与 EUV 光刻机采用 4 倍缩小的投影物镜系统不同的是,AIMS 采用放大率大于 500 的投影物镜系统,由 CCD 相机收集放大的空间像^[56]。SHARP 系统是一种基于同步加速器的 EUV 显微镜,采用与 EUV 光刻相同的中心主入射角与物方数值孔径模拟光刻机成像。采用可提供 900 倍放大率的离轴波带片系统将空间像成像在 CCD 上^[58]。SHARP 系统通过应用 FP 成像技术可实现空间像的相位的恢复,可更好地对 EUV 掩模相位型缺陷进行检测^[58]。

4 掩模缺陷补偿技术

根据掩模缺陷补偿方式的不同,掩模缺陷补偿技术可分为掩模图形偏移规划技术与掩模修正技术两类^[4]。掩模图形偏移规划技术通过规划图形位置,尽可能多地将缺陷覆盖在吸收层非透光区域下方,从而降低缺陷对成像的影响。掩模修正技术通过改变缺陷周围的吸收层图形或多层膜分布来减小缺陷对空间像的影响。通过单一的方法难以消除掩模上所有缺陷的影响,将两种缺陷补偿方法结合使用可最大限度降低掩模缺陷对成像质量的影响^[7]。

4.1 掩模图形偏移规划技术

掩模图形偏移规划技术通过合理调整和规划掩模图形与含缺陷空白掩模的相对位置,使多层膜缺陷尽可能多地被掩模上的吸收层非透光区域覆盖,从而降低缺陷对成像的影响^[4]。掩模图形偏移规划技术主要包括掩模图形偏移、图形旋转、图形微形变、掩模子图形布图规划及掩模图形与空白掩模匹配等技术^[4]。Yan 等^[59]提出的图形偏移法中,首先对缺陷位置进行定位标记,然后利用边界的空

余区域对吸收层图形进行 x 、 y 方向的移动,使得空白掩模上的缺陷位于吸收层非透光区域的下方,避免缺陷对掩模成像的影响,实现缺陷补偿。Burns 等^[60]在采用 x 、 y 方向偏移自由度的图形偏移法的基础上增加了图形旋转,引入 0° 、 90° 、 180° 和 270° 的旋转自由度。增大图形偏移的自由度可增大缺陷被完全覆盖的概率,提高缺陷补偿的成功率^[60],Zhang 等^[61]在此基础上引入了小角度旋转,进一步增加了图形偏移的自由度。前述的图形偏移法都是对整个吸收层图形进行偏移或旋转,对吸收层图形中的空余区域利用度有限。Kagalwalla 等^[62]提出了布图规划法,合理规划掩模子图形块的分布位置,使得更多的缺陷可被覆盖。然而对固定分组的吸收层图形与空白掩模进行规划仍未充分利用掩模信息,Garetto 等^[63]提出对多组具有不同吸收层图形和具有不同缺

陷分布的空白掩模进行合理的匹配,进一步增大了缺陷完全被吸收层非透光区域覆盖的可能性。

图形偏移量是决定图形偏移法的实施效果的关键参数。本团队的 Liu 等^[20]提出两种图形偏移法中最佳偏移量的确定方法,分别基于缺陷影响的最小化和缺陷覆盖数目的最大化确定最佳偏移量。图形偏移法通过移动掩模图形位置,尽可能多地将缺陷覆盖在吸收层非透光区域下方,从而降低缺陷对成像的影响,因此可利用缺陷未被吸收层非透光区域覆盖的部分计算缺陷影响。在基于缺陷影响最小化确定最佳偏移量时,由于对空白掩模和掩模图形整体计算缺陷影响计算量较大,在计算缺陷影响 D 的过程中,仅考虑每个缺陷影响范围内的区域将有效减少计算量,该方法将进行图形偏移后的缺陷影响^[7]表示为

$$D(s) = \sum_{i=1}^N \iint_{\text{defect } i} A_{\text{defect}}(i, x, y) \cdot A_{\text{pattern}}(i, s, x, y) dx dy, \quad (5)$$

$$A_{\text{defect}}(i, x, y) = \begin{cases} |h_d(i, x, y)|, & \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \leq W_{\text{FWHM } i} \\ 0, & \text{others} \end{cases},$$

$$A_{\text{pattern}}(i, s, x, y) = \begin{cases} 1, & (x, y) \in \text{open region} \\ 0, & \text{others} \end{cases}$$

式中: s 为图形偏移量; N 为空白掩模上的缺陷数目; $A_{\text{defect}}(i, x, y)$ 表征缺陷的影响; $A_{\text{pattern}}(i, s, x, y)$ 表征第 i 个缺陷处于吸收层图形区的部分; $h_d(i, x, y)$ 为第 i 个缺陷在 (x, y) 处的表面缺陷高度; (x_i, y_i) 为第 i 个缺陷的中心位置; $W_{\text{FWHM } i}$ 为第 i 个缺陷的半峰全宽。在基于缺陷覆盖数目的最大化确定最佳偏移量时,对于每个缺陷,建立一个使得该缺陷影响为零的图形偏移量的集合,即采用该集合内的图形偏移量时相应的缺陷被吸收层非透光区域完全覆盖。将所有缺陷的图形偏移量集合互相重叠,获取采用不同图形偏移量时相应的缺陷覆盖数目,使得完全覆盖的缺陷数目最多的图形偏移量为最佳偏移量^[7]。基于缺陷影响的最小化和缺陷覆盖数目的最大化的方法各有利弊,当掩模缺陷可以被吸收层非透光区域完全覆盖的时候,两种方法得到的最佳偏移量是相同的,当缺陷不能被完全覆盖的时候,需要按照需求选择最佳偏移量确定方法。

4.2 掩模修正技术

掩模修正技术通过对缺陷相邻区域的吸收层图形或多层膜材料分布进行一定的修正,以补偿由

缺陷引起的掩模成像质量降低^[4]。Ray-Chaudhuri 等^[64]在 1999 年提出可采用类似光学临近效应的方法对 EUV 掩模图形进行修正以补偿多层膜缺陷对掩模成像质量的影响,并基于仿真与实验验证了该方法的有效性。

EUV 多层膜缺陷造成掩模多层膜变形,同时影响掩模衍射谱的振幅与相位,引起最佳焦面处的局部强度损失以及泊松曲线的倾斜,对最佳焦面以及离焦面的成像质量均造成了影响^[65]。

为了补偿缺陷对最佳焦面处成像质量的影响,LT 公司提出了基于迭代仿真优化的缺陷补偿方法^[66],在该方法中,首先对比含缺陷掩模阈值像与目标图像,找到阈值像中每一个和目标图像不同的像素,然后在这些像素对应的区域对吸收层边界像素进行修正,该方法对于一维图形可得到较好补偿效果,但有时候会无法收敛,而且当将该方法用于二维图形中时会产生不满足掩模制造规则的小像素图形^[29]。为改善该问题,LT 公司提出了基于水平集掩模图形表征的缺陷补偿方法^[29],提高了修正图形的连续性。Erdmann 等^[67]将遗传算法与

Nelder-Mead 单纯形法结合提出了一种缺陷补偿方法,该方法在预优化阶段采用近似模型仿真掩模衍射谱,采用遗传算法进行优化,而后期优化过程中采用精确的严格模型仿真掩模衍射谱,采用单纯形法进行优化,在保证修正效果的同时加快了优化速度。尽管上述掩模修正技术可对掩模最佳焦面处的成像质量进行较好的补偿,然而并未考虑缺陷对离焦面成像的影响。

为了在保证掩模最佳焦面处成像质量的同时改善含缺陷掩模离焦面的成像质量,增大工艺窗口,McIntyre 等^[65]提出了一种对缺陷引起的振幅与相位效应均进行修正的缺陷补偿方法,对于凸起型缺陷与凹陷型缺陷采用了不同的修正方法。两种缺陷均可采用吸收层修正法修正振幅效应,但对于凸起型缺陷,采用移除缺陷区域部分多层膜的方式修正相位效应,对于凹陷性缺陷,采用在缺陷区域多层膜上沉积 Ru 材料的方式修正相位效应^[65]。由于移除多层膜是一种破坏性方法,LT 公司的 Pang 等^[45]提出了可通过在凸起型缺陷的周围沉积环形的碳层以修正相位效应,避免了直接破坏多层膜结构。GlobalFoundries 公司的 Zhao 等^[68]提出了对缺

陷引起的振幅与相位效应均进行修正的非破坏性的缺陷补偿方法。该方法对凸起型与凹陷性缺陷具有普适性。该方法首先通过额外的吸收层偏移展平泊松曲线的倾斜,同时会导致 CD 的过度增大,然后通过沉积吸收材料 Al 的方式将 CD 减小至目标值,该方法可有效改善掩模离焦面的成像质量。

本团队的张恒^[4]提出一种基于自适应协方差矩阵进化策略(CMA-ES)的掩模缺陷补偿方法。并分别利用基于快速严格耦合波分析(RCWA)和机器学习的 EUV 含缺陷掩模仿真方法提升缺陷补偿速度^[21]。另外,Zhang 等^[21]在缺陷补偿的同时,考虑对光学邻近效应的校正,进一步提高了含缺陷掩模成像质量。在该缺陷补偿方法中,采用位置与尺寸可变的矩形修正图形来实现对掩模图形的修正。该方法采用如图 5 所示的两种补偿图形的初始化策略,在初始化策略 1 中,矩形图形区域边界为整体掩模边界,而在初始化策略 2 中,将矩形图形区域缩小为以缺陷中心为区域中心的小矩形域。当在缺陷补偿的同时进行光学邻近效应校正时,在掩模原图形每个边界及角点位置处也添加矩形修正图形^[4]。

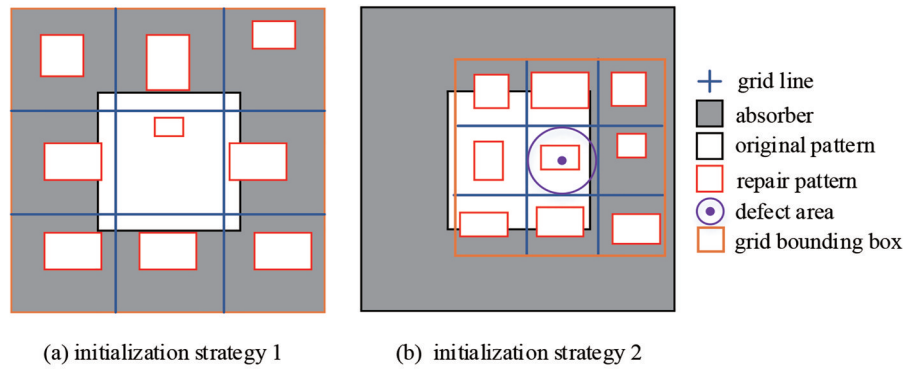


图 5 两种初始化补偿图形示意图。(a)初始化图形 1;(b)初始化图形 2^[4]

Fig. 5 Schematic diagram of two initialization repair patterns. (a) Initialization pattern 1; (b) initialization pattern 2^[4]

该方法采用 CMA-ES 算法优化掩模修正图形。CMA-ES 采用多元正态分布表征解的分布,通过对种群和搜索路径的学习提高优化效率^[14]。优化过程中通过评价修正后含缺陷掩模空间像和阈值

像与无缺陷掩模空间像和阈值像的差异以及修正后含缺陷掩模阈值像与目标图形之间的差异评估掩模修正效果,同时进行缺陷补偿和光学邻近效应校正优化时的评价函数为

$$\begin{aligned}
 f_{DC+OPC} = & a_1 \sqrt{\sum_{x_i, y_i} |I(\hat{x}_i, \hat{y}_i, z)_{\text{aerial}}^{\text{compensated}} - I(\hat{x}_i, \hat{y}_i, z)_{\text{aerial}}^{\text{defect-free}}|} + a_2 \sqrt{\sum_{x_i, y_i} |I(\hat{x}_i, \hat{y}_i, z)_{\text{thresholded}}^{\text{compensated}} - I(\hat{x}_i, \hat{y}_i, z)_{\text{thresholded}}^{\text{defect-free}}|} + \\
 & b_1 \sqrt{\sum_{x_i, y_i} |I(\hat{x}_i, \hat{y}_i, z)_{\text{thresholded}}^{\text{compensated}} - I(\hat{x}_i, \hat{y}_i, z)_{\text{thresholded}}^{\text{target}}|} + b_2 \sqrt{\sum_{x_i, y_i} |I(\hat{x}_i, \hat{y}_i, z)_{\text{thresholded}}^{\text{compensated}} - I(\hat{x}_i, \hat{y}_i, z)_{\text{thresholded}}^{\text{target}}|} * \\
 & \mathbf{M}_{\text{edge}} + b_3 \sqrt{\sum_{x_i, y_i} |I(\hat{x}_i, \hat{y}_i, z)_{\text{thresholded}}^{\text{compensated}} - I(\hat{x}_i, \hat{y}_i, z)_{\text{thresholded}}^{\text{target}}|} * \mathbf{M}_{\text{corner}}, \quad (6)
 \end{aligned}$$

式中： a_1 、 a_2 和 b_1 、 b_2 、 b_3 分别对应于缺陷补偿和光学邻近效应校正相关的加权系数；上标“compensated”和“defect-free”表示补偿后和无缺陷，“target”表示目标图形；下标“aerial”和“thresholded”分别代表空间像和阈值光刻胶像； M_{edge} 和 M_{corner} 分别为掩模图形边界和角点的权值系数矩阵^[4]。仿真结果表明，该方法对多层膜缺陷与光学邻近效应导致的掩模成像质量降低有很好的补偿效果。通过在评价函数中添加离焦像相关的评价指标，该方法可在优化掩模最佳焦面处成像质量的同时改善含缺陷掩模离焦面的成像质量。

5 结束语

高成像质量是确保 EUV 光刻机性能指标的前提。作为成像系统的重要组成部分，掩模是影响 EUV 光刻成像质量的重要因素。EUV 掩模缺陷，尤其是多层膜缺陷，会显著降低光刻成像质量。对 EUV 掩模中缺陷的位置、尺寸和形貌等进行准确检测，并根据检测结果进行缺陷补偿是提升光刻成像质量的重要手段。快速准确地对含缺陷 EUV 掩模进行仿真是缺陷补偿的前提。本文结合本团队对掩模缺陷检测和补偿技术的研究，介绍了典型的含缺陷掩模仿真方法，总结了现有的掩模缺陷检测技术，介绍了掩模缺陷补偿技术的研究进展。

含缺陷 EUV 掩模模型是研究掩模缺陷对成像影响的重要工具，也是缺陷补偿技术的基础。为了研究含缺陷 EUV 掩模的成像特点，人们提出了多种含缺陷掩模仿真方法，主要包括严格电磁场仿真方法与近似仿真方法。对吸收层和多层膜分别进行仿真的掩模结构分解法可以实现 EUV 含缺陷掩模的快速精确仿真。针对不同的需求，将不同的吸收层模型与多层膜模型组合可以建立不同的 EUV 掩模结构分解仿真方法。本团队对结构分解法进行了研究，提出并改进了单平面近似法和等效膜层法这两种 EUV 含缺陷多层膜仿真方法。结合吸收层的边界脉冲修正模型，本团队建立了快速准确的含缺陷掩模仿真模型。

准确地检测缺陷的位置、尺寸和形貌等信息是对缺陷进行有效补偿的基础。在掩模制造的不同阶段需要采用不同功能的检测设备对掩模缺陷进行检测。在空白掩模检测阶段，人们设计了多种空白掩模检测设备用于检测空白掩模上缺陷的位置和尺寸，提出了多种缺陷三维形貌检测技术对空白

掩模上的多层膜缺陷的三维形貌进行测量，在有图形掩模检测阶段，人们设计了多种有图形掩模检测设备用于检测有图形掩模上不同类型的缺陷的位置和尺寸，设计多种空间像测量设备对含缺陷掩模空间像进行测量。本团队对多层膜缺陷三维形貌检测技术进行了研究，提出了一种非破坏性方法。该方法可以准确重建多层膜缺陷三维形貌参数，在缺陷补偿时对掩模缺陷进行更准确的表征。

掩模缺陷补偿是提高含缺陷 EUV 掩模成像质量的重要手段，国内外主流的掩模缺陷补偿技术主要包括掩模图形偏移规划技术与掩模修正技术这两类。本团队对这两类缺陷补偿技术进行了研究。针对图形偏移规划技术，本团队提出了两种最佳偏移量的确定方法。分别基于缺陷影响的最小化和缺陷覆盖数目的最大化确定最佳偏移量，为图形偏移提供了评价指标。针对掩模图形修正技术，本团队提出了一种基于 CMA-ES 算法的掩模缺陷补偿方法，在缺陷补偿的同时对光学邻近效应进行校正，有效提高了成像质量。

随着芯片制造向更先进技术节点发展，EUV 掩模对成像质量的影响越来越大，这对掩模缺陷仿真、检测的精度以及掩模缺陷补偿的效果提出了更高的要求。掩模缺陷仿真、检测与补偿都需要在尽可能保证精度的同时不断加快计算或检测的速度。随着 EUV 光刻机的发展，新的 EUV 掩模结构和材料将得到应用，掩模缺陷仿真、检测与补偿等技术的研究也将不断拓展，提高 EUV 光刻的成像质量，保障 EUV 光刻在更先进技术节点芯片制造中的应用。

参 考 文 献

- [1] 王向朝, 戴凤钊, 李思坤, 等. 集成电路与光刻机 [M]. 北京: 科学出版社, 2020.
Wang X Z, Dai F Z, Li S K, et al. Integrated circuit and lithographic tool [M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [2] 王向朝, 戴凤钊, 唐峰, 等. 光刻机像质检测技术-上册 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
Wang X Z, Dai F Z, Tang F, et al. Image quality measurement techniques for lithographic tools (volume I) [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [3] 王向朝, 戴凤钊, 唐峰, 等. 光刻机像质检测技术-下册 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
Wang X Z, Dai F Z, Tang F, et al. Image quality measurement techniques for lithographic tools (volume II) [M]. Beijing: Science Press, 2021.

- [4] 张恒. 三维极紫外光刻掩模建模及缺陷补偿技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2019.
Zhang H. Study on three-dimensional mask modeling and defect compensation method in extreme ultraviolet lithography[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [5] 曹宇婷. 极紫外投影光刻掩模衍射简化模型及其应用[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2012.
Cao Y T. Simplified mask diffraction model and its application in extreme ultraviolet lithography[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [6] Capelli R, Dietzel M, Hellweg D, et al. Actinic metrology platform for defect review and mask qualification: flexibility and performance[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10957: 109570X.
- [7] 刘晓雷. 极紫外光刻掩模建模与缺陷补偿方法研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2015.
Liu X L. Study on mask modeling and defect compensation method in extreme ultraviolet lithography [D]. Shanghai. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [8] Bakshi V. EUV lithography[M]. 2nd ed. Bellingham: SPIE Press, 2018.
- [9] Jonckheere R. Overcoming EUV mask blank defects: what we can, and what we should[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10454: 104540M.
- [10] 刘晓雷, 李思坤, 王向朝. 极紫外光刻含缺陷多层膜衍射谱仿真简化模型[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0905002.
Liu X L, Li S K, Wang X Z. Simplified model for defective multilayer diffraction spectrum simulation in extreme ultraviolet lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0905002.
- [11] Hashimoto T, Yamanashi H, Sugawara M, et al. Lithographic characterization of EUVL mask blank defects[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5374: 740-750.
- [12] Wood O R. EUVL: challenges to manufacturing insertion[J]. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2017, 30(5): 599-604.
- [13] 刘晓雷, 李思坤, 王向朝. 基于等效膜层法的极紫外光刻含缺陷掩模多层膜仿真模型[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0622005.
Liu X L, Li S K, Wang X Z. Simulation model based on equivalent layer method for defective mask multilayer in extremeultra violet lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0622005.
- [14] Zhang H, Li S K, Wang X Z, et al. Optimization of defect compensation for extreme ultraviolet lithography mask by covariance-matrix-adaption evolution strategy [J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2018, 17(4): 043505.
- [15] Jonckheere R. EUV mask defectivity-a process of increasing control toward HVM[J]. Advanced Optical Technologies, 2017, 6(3/4): 203-220.
- [16] 张恒, 李思坤, 王向朝. 基于改进型结构分解的极紫外光刻掩模衍射谱快速仿真方法[J]. 光学学报, 2018, 38(1): 0105001.
Zhang H, Li S K, Wang X Z. A rapid simulation method for diffraction spectra of EUV lithography mask based on improved structural decomposition[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 0105001.
- [17] 张恒, 李思坤, 王向朝, 等. 基于机器学习校正的极紫外光刻含缺陷掩模仿真方法[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1222002.
Zhang H, Li S K, Wang X Z, et al. 3D rigorous simulation of defective masks used for EUV lithography via machine learning-based calibration[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1222002.
- [18] 成维, 李思坤, 王向朝, 等. 极紫外光刻掩模相位型缺陷的形貌重建方法[J]. 光学学报, 2020, 40(10): 1005001.
Cheng W, Li S K, Wang X Z, et al. Method for profile reconstruction of phase defects in extreme ultraviolet lithography mask[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(10): 1005001.
- [19] Cheng W, Li S K, Wang X Z, et al. Extreme ultraviolet phase defect characterization based on complex amplitudes of the aerial images[J]. Applied Optics, 2021, 60(17): 5208-5219.
- [20] Liu X L, Li S K, Wang X Z, et al. Optimal shift of pattern shifting for mitigation of mask defects in extreme ultraviolet lithography[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena, 2015, 33(5): 051603.
- [21] Zhang H, Li S K, Wang X Z, et al. Fast optimization of defect compensation and optical proximity correction for extreme ultraviolet lithography mask[J]. Optics Communications, 2019, 452: 169-180.
- [22] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.

- Ge D B, Yan Y B. Finite difference time domain method for electromagnetic wave[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2002.
- [23] Zhu Z R, Lucas K, Cobb J L, et al. Rigorous EUV mask simulator using 2D and 3D waveguide methods [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5037: 494-503.
- [24] Evanschitzky P, Erdmann A. Three dimensional EUV simulations: a new mask near field and imaging simulation system[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5992: 59925B.
- [25] Smaali R, Besacier M, Schiavone P. Three-dimensional rigorous simulation of EUV defective masks using modal method by Fourier expansion[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6151: 615124.
- [26] Clifford C H, Neureuther A R. Smoothing based fast model for images of isolated buried EUV multilayer defects[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6921: 692119.
- [27] Clifford C H, Neureuther A R. Fast simulation methods and modeling for extreme ultraviolet masks with buried defects[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2009, 8(3): 031402.
- [28] Gullikson E M, Cerjan C, Stearns D G, et al. Practical approach for modeling extreme ultraviolet lithography mask defects[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2002, 20(1): 81-86.
- [29] Pang L L, Clifford C, Hu P, et al. Compensation for EUV multilayer defects within arbitrary layouts by absorber pattern modification[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7969: 79691E.
- [30] Pang L Y, Satake M, Li Y, et al. EUV multilayer defect compensation (MDC) by absorber pattern modification: improved performance with deposited material and other progresses[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8522: 85220J.
- [31] Evanschitzky P, Shao F, Erdmann A. Efficient simulation of extreme ultraviolet multilayer defects with rigorous data base approach[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2013, 12(2): 021005.
- [32] Jonckheere R, van den Heuvel D, Pacco A, et al. Towards reduced impact of EUV mask defectivity on wafer[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9256: 92560L.
- [33] Urbach J P, Cavelaars J F W, Kusunose H, et al. EUV substrate and blank inspection with confocal microscopy[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5256: 556-565.
- [34] Broadbent W H, Alles D S, Giusti M T, et al. Results from a new 193 nm die-to-database reticle inspection platform[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7748: 774828.
- [35] Broadbent W, Inderhees G, Yamamoto T, et al. EUV reticle inspection with a 193 nm reticle inspector [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8701: 87010W.
- [36] Antohe A O, Kearney P, Godwin M, et al. Production of EUV mask blanks with low killer defects[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9048: 90480H.
- [37] Tchikoulaeva A, Miyai H, Suzuki T, et al. EUV actinic blank inspection: from prototype to production [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8679: 86790L.
- [38] Liang T, Magana J, Chakravorty K, et al. EUV mask infrastructure readiness and gaps for TD and HVM[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9635: 963509.
- [39] Yamane T, Kim Y, Takagi N, et al. Performance in practical use of actinic EUVL mask blank inspection [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9256: 92560P.
- [40] Yamane T, Amano T, Takagi N, et al. Advances in the detection capability on actinic blank inspection[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9776: 97761G.
- [41] Miyai H, Suzuki T, Takehisa K, et al. The capability of high magnification review function for EUV actinic blank inspection tool[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8701: 870118.
- [42] Kamo T, Takai K, Iida N, et al. Evaluation of etched multilayer mask for 0.33 NA EUVL extension [C]//Proceedings of International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography, October 24, 2016, Hiroshima, Japan. [S.l.: s.n.], 2016.
- [43] Kwon H J, Harris-Jones J, Teki R, et al. Printability of native blank defects and programmed defects and their stack structures[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8166: 81660H.
- [44] Stearns D G, Mirkarimi P B, Spiller E. Localized defects in multilayer coatings[J]. Thin Solid Films, 2004, 446(1): 37-49.
- [45] Pang L Y, Satake M, Li Y, et al. EUV multilayer defect compensation (MDC) by absorber pattern modification, film deposition, and multilayer peeling techniques[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8679: 86790U.
- [46] Xu D B, Evanschitzky P, Erdmann A. Extreme ultraviolet multilayer defect analysis and geometry reconstruction[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2016, 15(1): 014002.
- [47] Chen Y, Lin Y B, Chen R, et al. EUV multilayer

- defect characterization via cycle-consistent learning [J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 18493-18506.
- [48] Zheng G, Horstmeyer R, Yang C. Wide-field, high-resolution Fourier ptychographic microscopy[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(9): 739-745.
- [49] Yu F, Koltun V, Funkhouser T. Dilated residual networks[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, July 21-26, 2017, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2017: 636-644.
- [50] Zhang Y L, Zhou T K, Fang L, et al. Conformal convolutional neural network (CCNN) for single-shot sensorless wavefront sensing[J]. *Optics Express*, 2020, 28(13): 19218-19228.
- [51] Miyai H, Kohyama T, Suzuki T, et al. Actinic patterned mask defect inspection for EUV lithography [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11148: 111480W.
- [52] Liang T, Tezuka Y, Jager M, et al. EUV mask infrastructure and actinic pattern mask inspection[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11323: 1132310.
- [53] Mochi I, Helfenstein P, Mohacs I, et al. RESCAN: an actinic lensless microscope for defect inspection of EUV reticles[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2017, 16(4): 041003.
- [54] Rajendran R, Mochi I, Helfenstein P, et al. Towards a stand-alone high-throughput EUV actinic photomask inspection tool: RESCAN[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10145: 101450N.
- [55] Mochi I, Helfenstein P, Rajeev R, et al. Through-pellicle inspection of EUV masks[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10583: 105831L.
- [56] Capelli R, Hellweg D, Dietzel M, et al. Aerial image based metrology of EUV masks: recent achievements, status, and outlook for the AIMS EUV platform[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10583: 1058311.
- [57] Hellweg D, Dietzel M, Capelli R, et al. Actinic review of EUV masks: challenges and achievements in delivering the perfect mask for EUV production[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10451: 104510J.
- [58] Benk M P, Chao W L, Miyakawa R H, et al. Upgrade to the SHARP EUV mask microscope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10957: 109570V.
- [59] Yan P Y, Wagner C. EUVL ML blank fiducial mark generation via local heating[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5374: 254-260.
- [60] Burns J, Abbas M. EUV mask defect mitigation through pattern placement[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7823: 782340.
- [61] Zhang H B, Du Y L, Wong M D F, et al. Layout small-angle rotation and shift for EUV defect mitigation[C]//ICCAD '12: Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Design, November 5-8, San Jose, CA, USA. New York: ACM Press, 2012: 43-49.
- [62] Kagalwalla A A, Gupta P, Hur D H, et al. Defect-aware reticle floor planning for EUV masks[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7974: 79740Z.
- [63] Garetto A D, Capelli R, Blumrich F, et al. Defect mitigation considerations for EUV photomasks[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2014, 13(4): 043006.
- [64] Ray-Chaudhuri A K, Cardinale G, Fisher A, et al. Method for compensation of extreme-ultraviolet multilayer defects[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 1999, 17(6): 3024-3028.
- [65] McIntyre G, Gallagher E, Robinson T, et al. Through-focus EUV multilayer defect repair with nanomachining[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8679: 86791I.
- [66] Clifford C H, Chan T T, Neureuther A R, et al. Compensation methods using a new model for buried defects in extreme ultraviolet lithography masks[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7823: 78230V.
- [67] Erdmann A, Evanschitzky P, Bret T, et al. Modeling strategies for EUV mask multilayer defect dispositioning and repair[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8679: 86790Y.
- [68] Zhao S, Qi Z J. Phase-independent multilayer defect repair for EUV photomasks[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9985: 998517.