

激光与光电子学进展

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

陈修国^{*}, 王才, 杨天娟, 刘佳敏, 罗成峰, 刘世元^{**}

华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074

摘要 在线测量检测技术与装备是保证集成电路(IC)制造质量和良率的唯一有效技术手段,在IC制造过程中必须对IC纳米结构的关键尺寸、套刻误差,以及缺陷等进行快速、非破坏、精确测量与检测。本文首先从尺寸测量和缺陷检测两个方面介绍了IC制造在线光学测量检测技术的研究现状。在此基础上,进一步分析了先进技术节点中所面临的一些新的纳米测量挑战,如更小的特征尺寸、更复杂的三维结构。最后,展望了IC制造在线光学测量检测技术的未来发展趋势。

关键词 测量; 集成电路制造; 纳米测量; 光学测量; 光学检测; 关键尺寸; 套刻误差; 缺陷

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.0922025

Inline Optical Measurement and Inspection for IC Manufacturing: State-of-the-Art, Challenges, and Perspectives

Chen Xiuguo^{*}, Wang Cai, Yang Tianjuan, Liu Jiamin, Luo Chengfeng, Liu Shiyuan^{**}

*State Key Laboratory of Digital Manufacturing and Equipment, Huazhong University of
Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China*

Abstract Inline measurement and inspection technologies and equipments are the only effective means to ensure manufacturing quality and yield of integrated circuits (IC). It is of great significance to realize fast, nondestructive, and precise measurement and inspection of critical dimension (CD), overlay, defects, and so on, during IC manufacturing. In this paper, we first review the current status of optical measurement and inspection techniques for dimensional metrology and defect inspection in IC manufacturing, including CD and overlay measurement, unpatterned and patterned wafer defect inspection, as well as mask defect inspection. Then, we introduce the potential measurement and inspection challenges in advanced technology nodes, for example, smaller feature sizes and more complex three-dimensional architectures. Finally, we present the perspectives of optical measurement and inspection for future IC manufacturing, including hybrid metrology, ultra-short wavelength metrology, high- and super-resolution imaging, as well as advanced data analytics.

Key words measurement; integrated circuits manufacturing; nanometrology; optical measurement; optical inspection; critical dimension; overlay error; defect

1 IC制造与IC测量检测

集成电路(IC)制造是指把沙子(二氧化硅)制

成IC芯片的整个制造过程,其中包括IC设计、晶圆制备、硅片制造、封装与测试等关键环节。IC测量检测贯穿整个IC制造过程,是IC制造过程工艺控

收稿日期: 2021-11-09; 修回日期: 2021-12-10; 录用日期: 2021-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(52022034, 52130504, 51727809)、湖北省重点研发计划(2020BAA008)

通信作者: *xiuguo@hust.edu.cn; **shyliu@hust.edu.cn

制和良率管理的关键。根据所处的工艺环节,IC 测量检测可分为前道测量检测与后道测量检测。前道测量检测施于晶圆制备与硅片制造过程,包括硅片制造过程中所形成的各种薄膜厚度、纳米结构的关键尺寸(CD)、套刻误差等尺寸参数的测量以及(无图形和有图形)晶圆表面缺陷的检测;它是一种以物性为主的测试,用以检验所加工纳米结构的实际参数是否满足设计要求,确保产品性能与良率达到规定水平。后道测量检测施于硅片制造之后、芯片封装环节,包括封装前的电学参数测量以及封装后的功能和电气特性检测等;它是一种以电性为主的测试,用以检查芯片产品的性能是否符合要求。狭义上对 IC 测量检测的认识主要集中在封测环节即后道测量检测。事实上,前道测量检测对芯片制造起着至关重要的作用,它是提高产品良率、降低生产成本、推进工艺迭代的重要环节,并在很大程度上决定了代工厂的竞争力^[1]。本文主要针对前道测量检测中的相关技术进行综述。

目前用于 IC 测量检测的技术主要有扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)、原子力显微镜(AFM),以及光学测量技术等^[2-3]。其中,SEM、TEM、AFM 尽管都可以实现纳米级尺度的尺寸测量(如用于纳米结构关键尺寸测量的 CD-SEM 和 CD-AFM)与缺陷检测(如电子束检测),但其显著缺点是测量速度慢、成本高、设备操作复杂。与之相比,光学测量技术具有测量速度快、无接触、非破坏和易于在线集成等优点,因而在 IC 制造工艺控制和良率管理中获得了广泛应用。

从测量原理上来看,光学测量技术可以分为成像式测量技术与非成像式测量技术。成像式测量技术如光学显微镜,通过获取最佳焦平面处待测样品的成像信息并结合相关图像处理算法以提取待测参数,具有测量过程简单、直观的优点。但是,由于受光学衍射极限的限制,传统显微成像技术在可见光波段最小仅能分辨约 200 nm 的样品特征。非成像式测量技术如反射仪,通过测量待测样品在不同波长或者入射角下的反射率信息并结合逆问题求解相关方法来提取待测参数。非成像式测量技术的测量过程尽管不如成像式测量技术简单、直观,且通常涉及复杂的逆问题求解,但是其测量不受光学衍射极限的限制,可以用于亚波长和深亚波长纳米结构的测量。

本文将首先从尺寸测量和缺陷检测两个方面

介绍 IC 制造在线光学测量检测技术的研究现状。其中,尺寸测量方面分别介绍 IC 纳米结构关键尺寸测量和套刻误差测量,缺陷检测分别介绍无图形晶圆表面缺陷检测、有图形晶圆表面缺陷检测,以及光刻掩模图形缺陷检测。在此基础上,进一步介绍先进技术节点中所面临的一些新的纳米测量挑战,以及针对这些挑战在线光学测量检测技术未来可能的发展趋势。最后是总结与展望。

2 IC 制造在线光学测量检测技术研究现状

2.1 关键尺寸测量

目前在 IC 制造过程中,对纳米结构 CD、高度、侧壁角(SWA)等形貌参数的测量主要依赖于一种称之为光学散射仪的非成像式测量技术。光学散射仪亦称光学关键尺寸(OCD)测量仪,其本质上是一种基于模型的测量技术,通过测量(周期性)纳米结构的散射信息,求解逆散射问题来重构待测纳米结构的三维形貌。然而,实际芯片中的纳米结构通常都是非周期性的,为了实现工艺监控,如图 1^[4]所示,通常在芯片的划线槽内加工出一系列具有周期性特征的目标光栅,这些目标光栅所在区域的大小通常小于 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 。在 IC 制造过程中,光学散射仪的实际测量对象即为这些目标光栅。

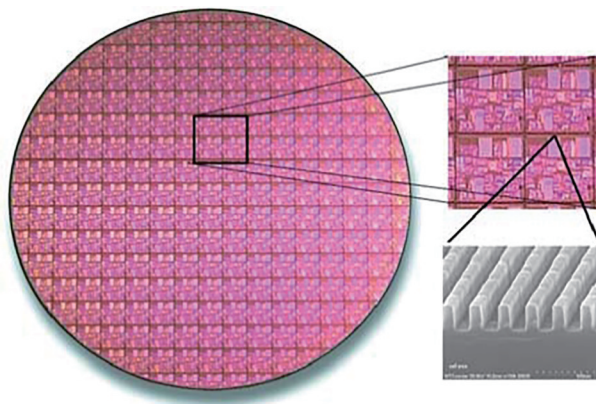


图 1 芯片划线槽内的目标光栅^[4]

Fig. 1 Target gratings in the scribe lines of IC chips^[4]

图 2 为光学散射测量基本流程,其过程包括两个关键问题,即正问题和反问题^[2,5-6]。其中,正问题是通过合适的散射测量装置获取待测纳米结构的散射信息,主要涉及仪器测量问题;反问题则是从测量得到的散射数据中提取待测纳米结构的三维形貌参数。首先,根据先验知识对待测纳米结构三维形貌进行参数化表征;然后,对光与纳米结构间

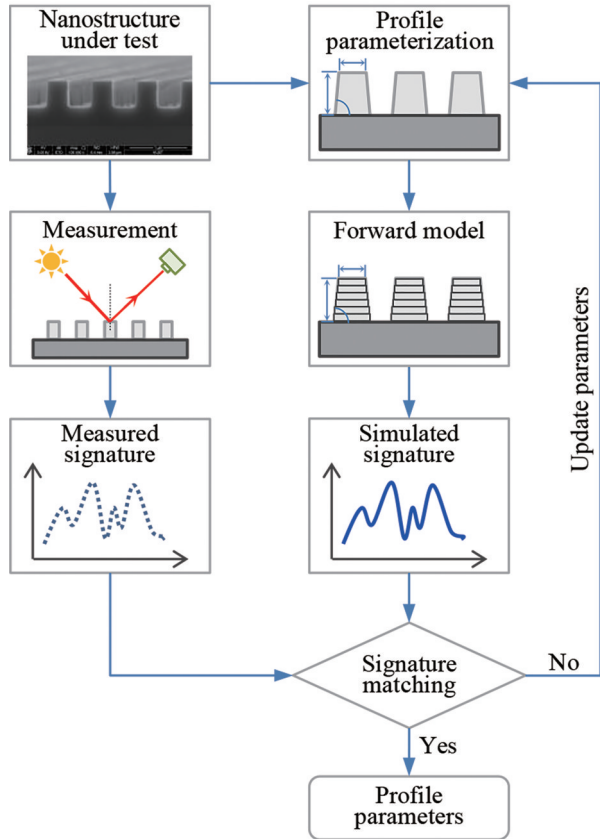


图 2 光学散射测量基本流程^[6]

Fig. 2 Overview of the principle of optical scatterometry^[6]
 相互作用进行建模,构建正向散射模型,将散射信号同待测形貌参数关联起来;最后,通过求解逆散射问题来提取待测形貌参数值,其目标是寻找一个

最优的散射模型输入参数,使得该形貌参数计算出来的散射数据能够最佳匹配测量数据。接下来将分别围绕光学散射测量中的正问题和反问题进行介绍。

2.1.1 正问题

由于光学散射测量技术主要用于周期纳米结构的测量,其散射信号分布完全由光栅公式决定,

$$\sin \theta_i + \sin \theta_m = m \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad (1)$$

式中: θ_i 为入射角; θ_m 为第 m ($m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$)级衍射光对应的衍射角或散射角; λ 为入射波长; Λ 为光栅周期。许多不同类型的光学散射装置已被用于收集待测纳米结构的衍射信息,如图 3^[6]所示,这些散射装置根据入射角 θ_i 、散射角 θ_m 和波长 λ 的不同配置可以大致分为两类,即:角分辨散射仪和光谱散射仪。

1) 角分辨散射仪。一种典型的角分辨散射仪是由 McNeil 等^[7-8]提出的 $2-\theta$ 散射仪。如图 3(a)所示, $2-\theta$ 散射仪采用单色光源,它通过扫描入射光及对应的零级衍射光来获取不同角度下待测样品的反射率或透射率信息。这里只收集零级衍射光是因为零级衍射光比其他级次的衍射光具有更高的强度,从而具有更高的信噪比。而且,相比高级次的衍射光,对于任意波长和任意周期大小的纳米结构而言,零级衍射光总是存在的。

另一种角分辨散射仪如图 3(b)所示,用探测器

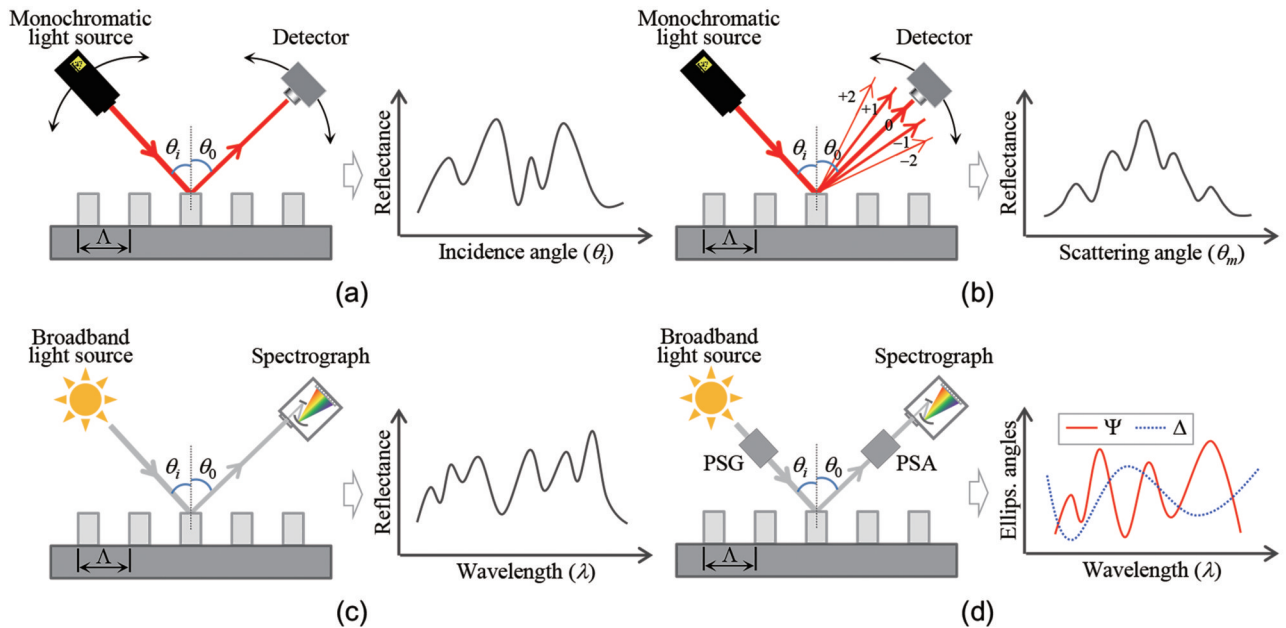


图 3 不同光学散射测量装置示意图。(a) (b)角分辨散射仪; (c) (d)光谱散射仪^[6]

Fig. 3 Schematic of different scatterometric setups. (a) (b) Angular scatterometers; (c) (d) spectroscopic scatterometers^[6]

(如 CCD 相机)收集某一入射角下不同散射角对应的强度信号。此类散射测量装置可称为散射角分辨散射仪[对应地,图 3(a)所示散射测量装置可称为入射角分辨散射仪]。在实际应用中,为了确保能够收集到足够多的散射信息,可采用短波长光源,例如极紫外(EUV)光源^[9-12]和 X 射线光源^[13-22]。

2) 光谱散射仪。与角分辨散射仪相比,光谱散射仪通常采用宽谱光源,如图 3(c)所示。与 $2-\theta$ 散射仪类似,光谱散射仪通常也只收集待测样品的零级衍射光。此外,为了区分不同波长下的散射信息,在光谱散射仪的探测端通常采用光谱仪进行分光探测。

一种典型的光谱散射仪是基于光谱椭偏仪(SE)的散射仪,如图 3(d)所示。椭偏仪是一种利用光的偏振态改变信息来分析样品的光学仪器,被广泛应用于材料光学常数与薄膜厚度的表征和测量^[23-24],自 2000 年左右,也被引入并应用到 IC 纳米结构关键尺寸的测量^[25-26]。如图 3(d)所示,在基于 SE 的散射仪中的入射光路和出射光路分别有一个偏振态发生器(PSG)和偏振态分析器(PSA)。PSG 和 PSA 由偏振器件(如偏振片、相位延迟器)组

成,分别用于偏振态的调制和解调。

基于传统光谱椭偏仪的散射仪在测量时通常只能获得 2 个椭偏参数,即振幅比角 Ψ 和相位差角 Δ ,主要用于各向同性样品的表征和测量。如果样品存在各向异性或者测量过程中存在退偏效应,则需要用到穆勒矩阵椭偏仪(MME)。与传统光谱椭偏仪相比,MME 每次测量都可以获得一个 4×4 阶穆勒矩阵共 16 个参数,其中包含了更多待测样品信息。鉴于此,基于 MME 的散射仪在 IC 纳米结构关键尺寸测量中展现出了良好的潜力和优势^[27-33]。

表 1 总结了角分辨散射仪与光谱散射仪的特点。本节在叙述散射测量装置时,将其分成了角分辨散射仪与光谱散射仪两种类型进行讨论。需要说明的是,在实际应用中,为了提高测量灵敏度,通常将两种散射测量方式相结合。例如,在角分辨散射仪中,使用波长可调光源,以获取多波长下的角分辨散射信息。同样,在光谱散射仪中,入射角也并不是固定不动的,而是可以调整的,以便选择在更为灵敏的入射条件下进行测量,或者获取多入射角下的光谱信息进行数据分析以便于逆问题求解过程中待测参数间的解耦。

表 1 角分辨散射仪与光谱散射仪特点^[6]

Table 1 Characteristics of angular scatterometry and spectroscopic scatterometry^[6]

Technique	Pros	Cons
Angular scatterometry	<p>Since a single wavelength is used, no assumption about dielectric functions of the sample materials is required in data analysis.</p> <p>Structural pitch can be measured simultaneously for the scattering-angle-resolved scatterometry.</p> <p>Relatively easy to extend to short wavelength ranges, such as EUV and X-ray.</p>	<p>Contain moving components for the $2-\theta$ scatterometry as well as some scattering-angle-resolved scatterometry techniques using goniometers, which will limit the measurement speed.</p> <p>Large experimental setup, especially for the scattering-angle-resolved scatterometry.</p>
Spectroscopic scatterometry	<p>Measurement can be very fast, especially for the spectroscopic reflectometry based scatterometry.</p> <p>Very high vertical resolution (sub-nm) for the ellipsometric scatterometry.</p> <p>More measurement information can be acquired, especially for the MME-based scatterometry, which is beneficial for parameter decorrelation in data analysis.</p>	<p>Need to pre-determine optical constants of sample materials in a broad spectral range.</p> <p>Need achromatic optical components and detectors with broad spectral responsivity.</p> <p>Need delicate calibrations for accurate measurement, especially in the ellipsometric scatterometry.</p>

2.1.2 反问题

光学散射测量中的反问题指的是从散射测量数据到待测纳米结构三维形貌参数的映射过程,其关键在于:1)构建光与待测纳米结构间相互作用的正向散射模型;2)选择合适的求解算法,将正向散

射模型计算出来的散射数据与测量得到的散射数据进行匹配,以提取出待测纳米结构的三维形貌参数。

由于光学散射测量所面临的测量对象的特征尺寸一般为波长量级或者亚波长量级,沟槽深度较

大(达到几个波长量级),标量衍射理论中的假设和近似已不再成立。此时,光的偏振性质和不同偏振光之间的相互作用对光的衍射结果具有重要的影响,必须采用严格的矢量衍射理论来构建纳米结构的正向散射模型。矢量衍射理论基于电磁场理论,需在适当的边界条件上严格地求解麦克斯韦方程组。

目前已经发展了多种纳米结构正向散射模型的数值求解方法,如有限元法(FEM)^[34-35]、边界元法(BEM)^[36-37]、时域有限差分法(FDTD)^[38]、严格耦合波分析(RCWA)^[39-44]。其中,RCWA亦称傅里叶模态法(FMM),由于其数值求解过程比较简单、计算速度快、实现相对容易,因而在光学散射测量中获得了广泛应用。

RCWA是一种确定性的微分求解方法,它通过对光栅区域的电磁场及介电函数进行傅里叶展开,进而将偏微分方程的求解问题变为常微分方程的特征值与特征向量的求解问题。利用RCWA来求解纳米结构正向散射模型的过程主要包括以下三个步骤:1)根据瑞利展开,得到入射区域和透射区域的电磁场表达式;2)根据弗洛凯定理对光栅区域内的介电常数及电磁场进行傅里叶级数展开,并由麦克斯韦方程组或者亥姆霍兹方程导出耦合波方程;3)在光栅区域的上、下边界应用电磁场边界条件,然后通过一定的代数运算即可求得各衍射级次的幅值系数。根据所求得的幅值系数,可以进一步计算各衍射级次的反射率、椭圆参数及穆勒矩阵等^[45]。

根据光栅的面型,可以将RCWA方法大致按照矩形光栅结构和任意面型光栅结构两种情况进行讨论,如图4^[6]所示。对于矩形光栅结构的RCWA方法较为简单,不需要采用分层近似处理方法,可以直接进行计算,且计算过程一般都是稳定的^[39]。与之相比,任意面型光栅结构如阶梯光栅、正弦光栅的RCWA方法比较复杂。在计算时,需要首先对光栅面型进行分层处理,然后对每一层按照矩形光栅的RCWA方法进行计算,最后再把不同层的计算结果通过边界条件关联起来^[40]。而且,由于任意面型光栅结构的RCWA方法在进行计算时,往往会遇到数值溢出及不稳定现象,所以在求解过程中需要使用一些特殊的迭代求解算法,如透射矩阵(简称 T 矩阵)算法^[40]、反射矩阵(简称 R 矩阵)算法^[42-43]、散射矩阵(简称 S 矩阵)算法^[42,44]。

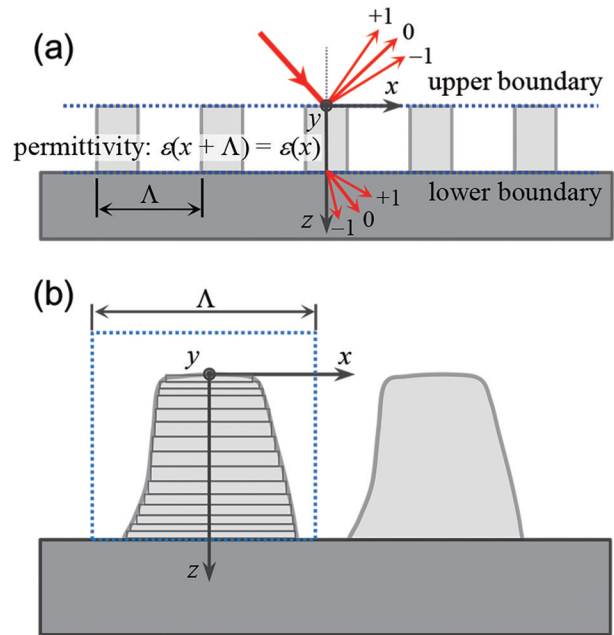


图4 光栅结构。(a)光入射至矩形光栅结构的衍射情况;
(b)任意面型光栅结构的分层近似^[6]

Fig. 4 Grating structure. (a) Diffraction of light incident on the rectangular grating structure; (b) hierarchical approximation of arbitrary planar grating structures^[6]

在光学散射测量中,从散射测量数据中提取出待测纳米结构三维形貌参数的本质上是一类典型的逆散射问题的求解过程。针对此类逆问题的研究,目前主要从理论和方法两个层面展开。在理论层面,主要研究逆问题解的存在性和唯一性等基本数学问题^[46-48]。在方法层面,则主要研究逆问题的快速鲁棒求解方法。如图5^[45]所示,目前主要有两种求解方法,即库匹配法和非线性回归法。在基于库匹配的参数提取过程中,事先根据待测参数的变化范围建立散射仿真数据库,然后将测量数据同数据库中的仿真数据进行比较,其中能够最佳匹配测量数据的仿真数据所对应的待测参数值即为最终测量结果^[49-50]。非线性回归法则将测量数据同由正向散射模型计算出来的仿真数据按照某种最优化算法,如常用的Levenberg-Marquardt算法^[51],进行匹配并根据二者之间的差异不断调整输入参数直至差异降至允许范围内。库匹配法的特点是可以实现待测参数的快速提取,但是需要事先建立并存储庞大的仿真数据库,而且参数提取准确度会受到数据库中网格间距的限制。非线性回归法的特点是不需要建立仿真数据库,且可以收敛到比较准确的结果,但是由于每次迭代都要调用正向散射模型来计算仿真数据,使得其参数提取过程非常耗时。

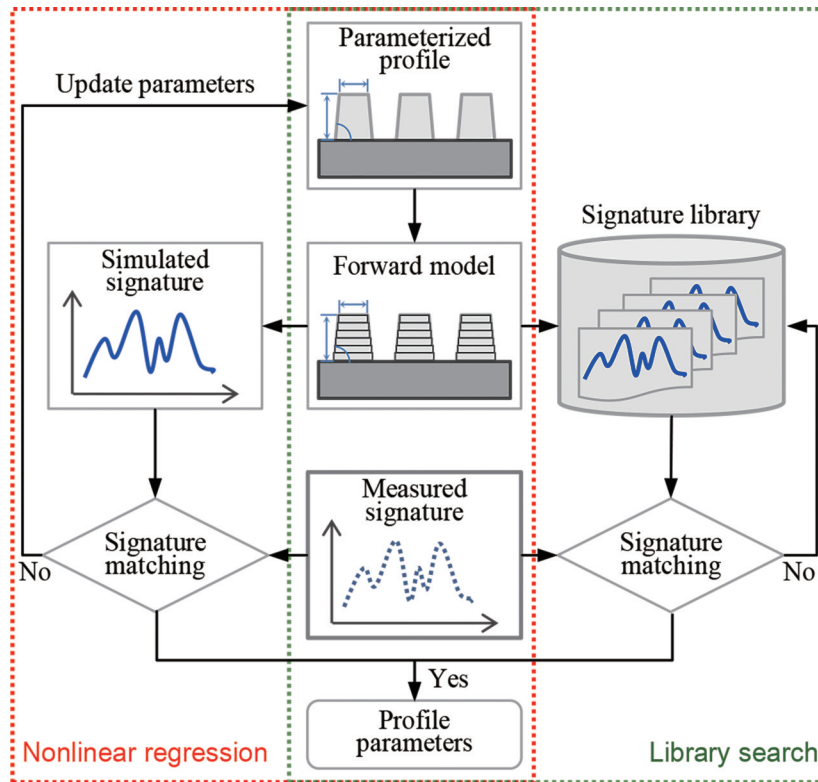


图 5 基于非线性回归和库匹配方法的参数提取流程^[45]

Fig. 5 Parameter extraction process based on nonlinear regression and library search methods^[45]

2.2 套刻误差测量

套刻误差是指 IC 制造中晶圆上当前层图形相对于参考层图形沿 x 和 y 方向的偏差。理想情况是当前层与参考层的图形正对准,即套刻误差是零。为了保证在上下两层中所设计的电路能够可靠地连接,当前层与参考层的套刻误差必须小于图形特征线宽的 $1/3 \sim 1/5$ ^[52]。套刻误差的快速测量与精确评估,是光刻机运行参数优化与工艺良率管理的关键。从基本测量原理上来看,光学套刻误差测量技术可以分为:基于成像的套刻误差

(IBO)测量技术和基于衍射的套刻误差(DBO)测量技术。下面分别针对这两种套刻误差测量技术进行叙述。

2.2.1 基于成像的套刻误差测量技术

IBO 测量技术利用具有图像识别和测量功能的高分辨率明场光学显微镜,测量专门设计的套刻标记中图形位置的偏差来实现套刻误差的测量。图 6^[53-55]为 IBO 技术中常用的几类典型套刻标记结构示意图。以 Frame-in-Frame 标记为例,通过判断显微图像中分别位于前层与当前层的内外层方框

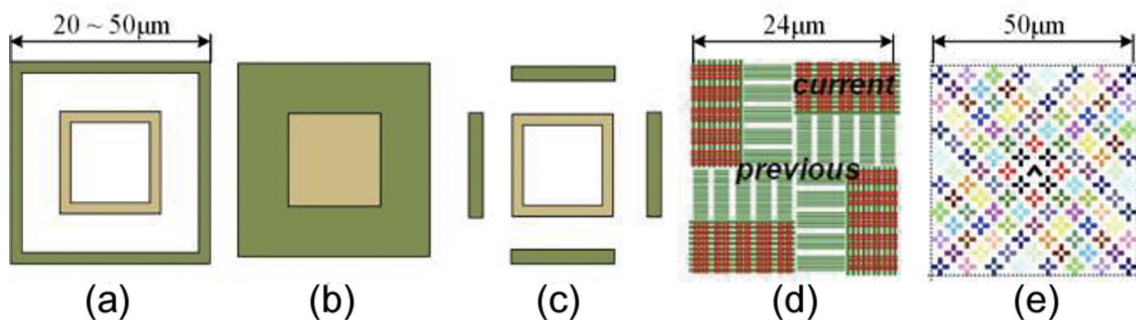


图 6 常用 IBO 套刻标记^[53-55]。(a) Frame-in-Frame 标记;(b) Box-in-Box 标记;(c) Bar-in-Bar 标记;(d) 先进成像计量标记;(e) Blossom 标记

Fig. 6 Commonly used IBO marks^[53-55]. (a) Frame-in-Frame; (b) Box-in-Box; (c) Bar-in-Bar; (d) advanced imaging metrology; (e) Blossom mark

的中心在 x 与 y 方向的偏移,即可确定两个方向的套刻误差值。

在 IBO 测量技术中,透镜像差和照明系统缺陷容易导致测量结果中存在偏移,这种偏移也被称为工具引起的偏移(TIS)。测量结果中的 TIS 可以通过将硅片分别置于 0° 和 180° 方位进行测量予以修正^[56]。然而,在实际应用中,TIS 除了受透镜像差和照明系统缺陷的影响之外,加工工艺的变化(如薄膜厚度的变化)也会影响 TIS。而且,后者只能通过选择合适的照明波长和照明角度来减小。已有研究表明,IBO 技术中的 TIS 往往数倍于 DBO 技术^[57]。

2.2.2 基于衍射的套刻误差测量技术

DBO 测量技术中的套刻标记为专门设计的纳米光栅结构,通过测量套刻标记的衍射信号,如光谱或角分辨谱等,通过一定的方法提取套刻误

差^[58-60]。依据提取套刻误差方法的不同,DBO 技术可进一步分为基于模型的 DBO 技术(mDBO)和基于经验的 DBO 技术(eDBO)。其中,mDBO 技术的套刻误差提取方法与光学散射测量中采所用的参数提取方法类似,即首先对光与套刻标记间相互作用进行建模,然后将模型计算的散射信号与测量数据进行匹配,以提取套刻误差值。

eDBO 测量技术基于以下经验关系,即当套刻误差 ϵ 在一定范围内时,周期性套刻标记的正负一级衍射光光强差 ΔI 与套刻误差 ϵ 之间存在近似的线性关系,

$$\Delta I = K \times \epsilon, \quad (2)$$

式中: K 为比例系数。在应用中,为了消除式(2)中对未知系数 K 的依赖,在设计套刻标记时,可以在上下两层光栅套刻标记间人为引入一大小相同,但方向相反的偏移量, $+d$ 和 $-d$, 如图 7 所示。

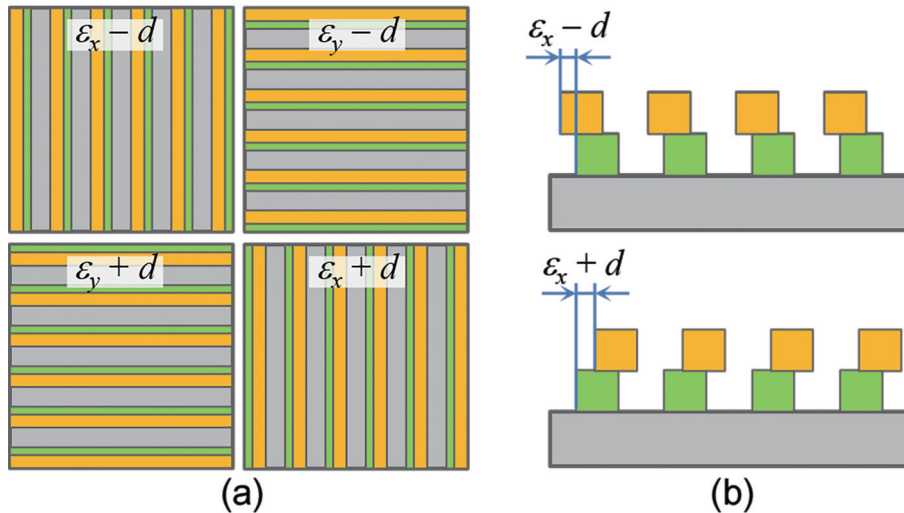


图7 eDBO 技术中的典型套刻标记。(a)套刻标记俯视图;(b)沿 x 方向套刻标记截面图

Fig. 7 Typical overlay marks in eDBO technology (a) Top view; (b) cross-section view along the x -direction

显然,此时两组套刻标记中的总套刻偏差分别为 $\epsilon + d$ 和 $\epsilon - d$ 。根据式(2)可以分别得到这两组套刻标记对应的正负一级衍射光光强差 ΔI^+ 和 ΔI^- :

$$\begin{cases} \Delta I^+ = K \times (\epsilon + d) \\ \Delta I^- = K \times (\epsilon - d) \end{cases} \quad (3)$$

于是,由式(3)可得套刻误差值为

$$\epsilon = d \frac{\Delta I^+ + \Delta I^-}{\Delta I^+ - \Delta I^-} \quad (4)$$

在上述两种 DBO 测量技术中,mDBO 只需要一组套刻标记即可实现一个方向的套刻误差测量,而 eDBO 则需要两组套刻标记(分别对应偏移量 $+d$ 和 $-d$)才能实现一个方向的套刻误差测量,

因此 mDBO 技术中套刻标记在掩模版上所占据的面积更小。此外,在当前的 eDBO 技术中,为了能够同时收集到套刻标记的正负一级衍射光,在系统设计时通常采用大数值孔径(NA)物镜,如图 8 所示的角分辨散射仪,同时套刻标记的周期 P_{pitch} 与入射波长 λ 及 NA 之间必须满足: $P_{pitch} \geq \lambda/NA$ 。由于空气中物镜的数值孔径小于 1,于是套刻标记的周期必然大于测量波长,从而进一步导致 eDBO 技术中套刻标记需要占据较大的面积。尽管如此,由于 eDBO 技术测量过程无需求解正向散射模型,可以实现套刻误差的快速测量,因此该技术已成为目前工业界重要的套刻误差测量技术之一,如荷兰

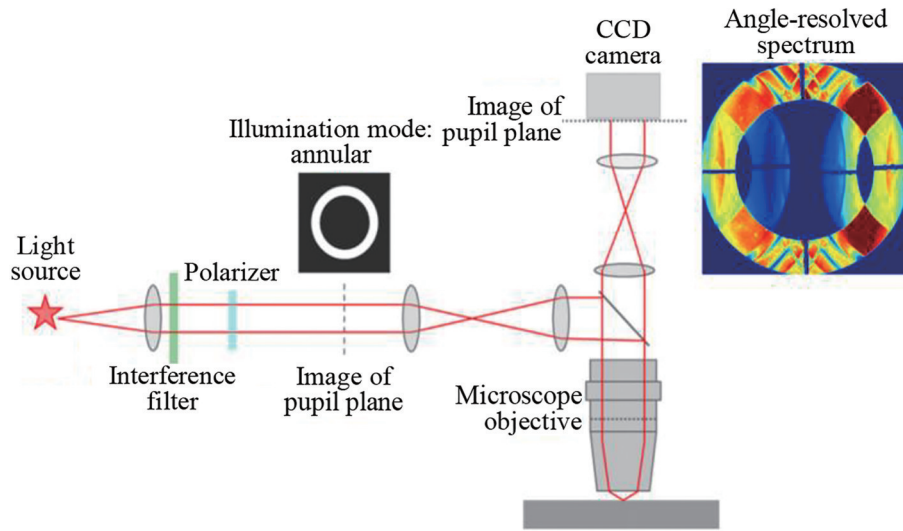


图 8 用于测量正负一级衍射光光强差的角分辨散射仪^[56]

Fig. 8 Angular scatterometer for measuring the intensity difference between the positive and negative first-order diffraction light^[56]

ASML公司的YieldStar系列产品^[56]。

此外,零级衍射光对应的 4×4 阶穆勒矩阵中包含了丰富的待测样品信息,能够识别纳米结构非对称特征的大小与偏移方向^[61-63]。当套刻误差不为零时,套刻标记可被视为一失去对称性的光栅结构。已有研究指出,穆勒矩阵的斜对角块元素与套刻误差之间也存在类似式(2)的近似线性关系,因此也可以用于实现套刻误差的快速测量^[29,64]。与基于正负一级衍射光的eDBO技术相比,这种基于零级衍射光穆勒矩阵的eDBO技术在套刻误差测量过程中不需要限制套刻标记的周期大小,因此在先进技术节点套刻误差测量应用中具有一定的优势。

2.3 无图形晶圆表面缺陷检测

无图形晶圆一般是指裸硅片或者有一些空白薄膜的硅片,其中后者主要用作测试片。无图形晶圆上的典型缺陷包括颗粒、残留物、刮伤、晶体原生凹坑、裂纹等,这些缺陷会影响后续工艺的加工质量,并最终影响产品的良率。目前,无图形晶圆表面缺陷检测的光学技术,依据其基本光学原理,可分为干涉法^[65-68]和散射法^[69-83]。

干涉法通过相干光之间的光程差来测定样品的表面形貌,其中单色光相移干涉法和白光扫描干涉法是进行颗粒缺陷检测的两种主要方法。单色光相移干涉法原理图如图9所示,样品表面的反射光与物镜内的参考光通过相互干涉产生干涉条纹,利用相差与高度的关系即可测量样品表面缺陷。由于干涉图的数据处理需要使用相位解包络算法,

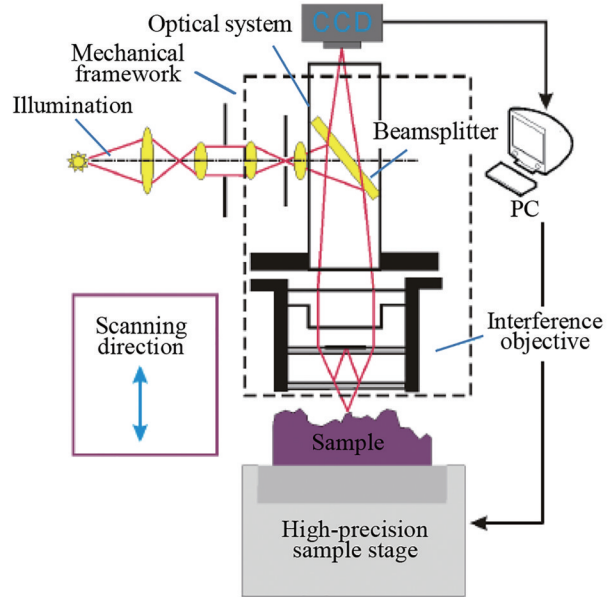


图 9 单色光相移干涉法^[67]

Fig. 9 Schematic of the monochromatic phase-shifting interferometer^[67]

要求相位差不能大于一个周期,从而限制了单色光相移干涉法的应用范围^[65-66]。白光扫描干涉法^[67]可以解决单色光相移干涉法中相位受限的问题,该方法的干涉条纹扫描整个被测表面,最大光强与物镜焦平面对应并包含表面的高度信息。白光扫描干涉法的纵向分辨率可达 0.1 nm ,但横向分辨率只能达到 $0.5 \mu\text{m}$ 。此外,干涉对比显微镜^[68]有潜力在波长缩放后恢复信号,并提升对具有高度变化缺陷的检测能力。此方法的主要技术难点在于窄焦深工艺窗对系统工程的要求十分严格。

散射法利用缺陷对入射光的散射特性进行缺陷检测,是一种应用广泛的缺陷检测法。依据表面缺陷散射特性来检测基体表面缺陷的方法有多种,例如激光散射共聚焦显微系统^[69-71]、滤波成像法^[72-73]、暗场散射法^[74-80]和明场散射法^[81-82]等。

激光散射共聚焦显微系统是一种通过结合激光散射与共聚焦显微镜来获得所需缺陷信息的技术^[69-70]。其基本原理如图 10 所示,利用探测针孔实现点照明与点探测,沿光轴方向移动物体即可获得由缺陷导致的沿深度方向分布的光散射信号。该系统具有较好的抗干扰能力,系统分辨率可达 150 nm,深度方向的信息可以成三维的像,并有较好的纵向分辨率。然而激光散射共聚焦显微系统需要使用高 NA 高倍率物镜才能获得亚微米的分辨率,这导致检测的视场变小,表面缺陷检测效率降低。Tiziani 等^[71]在系统中使用透镜阵列代替单个高倍率物镜,从而在 NA 不变的情况下增大视场至毫米量级,但是这种系统过于复杂和昂贵。

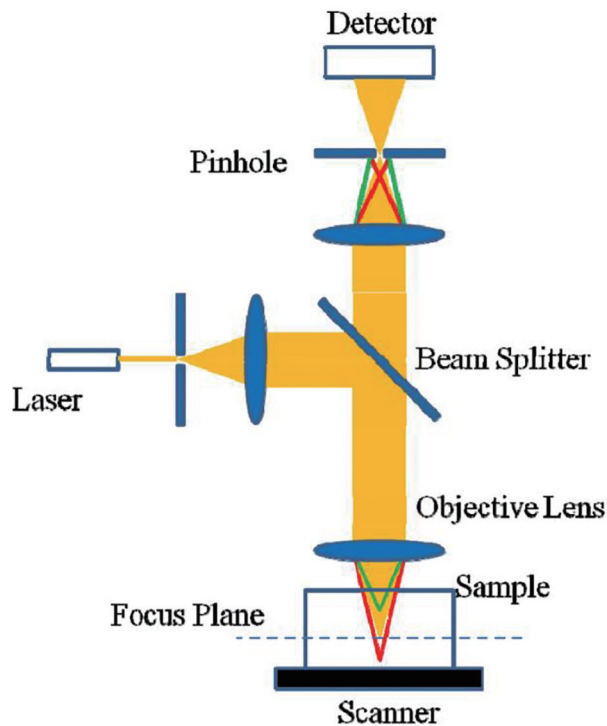


图 10 激光散射共聚焦显微系统^[70]

Fig. 10 Schematic of laser scattering confocal microscope^[70]

低通滤波成像法通过限制测量信号中携带缺陷信息的高频成分,获得亮背景下的缺陷暗斑图像^[72]。但是当缺陷很小时,其产生的散射光很弱,导致系统的对比度和检测精度很低,因而该方法难

以对微小缺陷进行检测。高通滤波与低通滤波相反,通过去除低频信号,获得由缺陷散射的高频信号,得到暗背景下的颗粒亮图像。Liu 等^[73]提取了大量的晶圆图像特征并建立了标准库,通过从待检测晶圆表面提取标准图像并利用光谱作差的方法实现了晶圆表面缺陷的检测,使检测速度和精度得到大幅度的提升。

暗场散射是一种快速、非接触、非破坏、灵敏度高的在线检测技术,非常适合于无图形晶圆表面的缺陷检测,在 IC 制造过程中被广泛采用^[74]。这种技术本身不能直接成像,而是利用散射光来确定缺陷的存在与否,并通过标准直径的聚苯乙烯乳胶(PSL)粒子建立的光强“关联曲线”将缺陷的散射光强度转化为等效尺寸^[75-76]。

艾立夫^[77]利用 FDTD 对晶圆表面颗粒的散射光分布情况进行了仿真计算,设计并搭建了一套基于散射光暗场成像原理的晶圆表面颗粒检测系统,可以检测 100 nm 的 PSL 粒子。Huang 等^[75]提出了一种基于实验薄雾和缺陷数据的光学孔径设计和优化方法,该方法通过在光路上添加一个经优化的光学孔径来过滤粗糙薄膜的薄雾信号,提高了商用激光表面扫描检查系统的灵敏度,将无图形晶圆检测的应用范围扩展到更粗糙的薄膜上。van der Walle 等^[78-79]将多方位照明集成到快速纳米颗粒扫描器上,以减小基体表面粗糙度造成的背景散射信号变化,从而降低检测系统的阈值,提高缺陷检测系统的灵敏度。

目前国际上主流的无图形晶圆表面缺陷检测装备主要是基于暗场散射检测原理。例如,德国 Viscom 公司推出的 MX100IR 可实现缺陷的检测与分类;日本 Lasertec 公司推出的 M3320 不仅能够观察缺陷的三维形状,还能判断缺陷的种类;美国 KLA 公司的 Surfscan SP 系列可实现晶圆表面纳米级缺陷的检测。KLA 公司在晶圆缺陷检测装备领域一直处于领先地位,其最新推出的 Surfscan SP7 缺陷检测系统可检测 7 nm 尺寸的缺陷。图 11 展示了 KLA 公司的 Surfscan SP1 缺陷检测系统原理,该系统有倾斜入射和垂直入射两个入射角,以及“宽”和“窄”两个信号收集通道,它们彼此相互组合形成四种检测模式。由于散射信号的强度分布与缺陷的形状、尺寸、材料以及基体膜层有关,因而可依据入射光和收集通道的模式不同对缺陷进行分类。KLA 公司在新的缺陷检测系统中将收集通

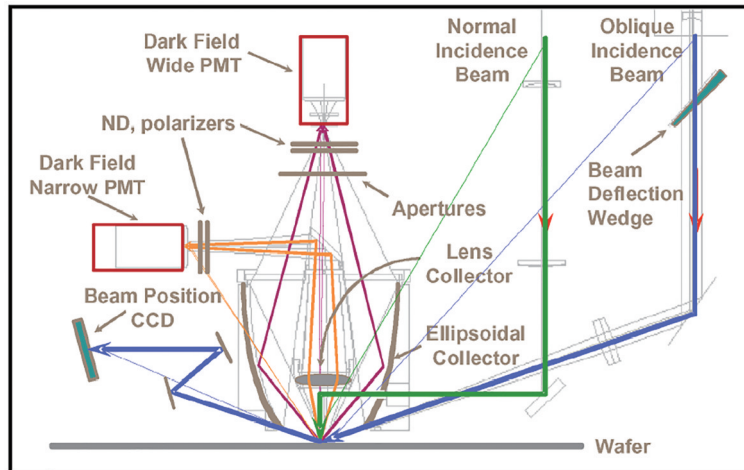


图 11 美国 KLA 公司的 Surfscan SP1 缺陷检测系统原理图^[74]

Fig. 11 Schematic of the Surfscan SP1 inspection system from KLA Corporation^[74]

道改为透镜,并对入射和出射光的偏振态进行调制,以提高系统的检测分辨率和缺陷分类能力^[80]。

明场散射的无图形表面缺陷检测系统原理与暗场散射相反,明场系统利用反射角与入射角相同且源自基底的反射光束来构造图像。暗场系统可以检测到远比系统分辨率或者光斑小的缺陷,而明场系统探测的缺陷大小与系统分辨率相仿^[81]。Roy 等^[82]开发了一种基于傅里叶散射法的明场技术,可以检测表面上 100 nm 尺度的缺陷;相较于暗场散射,这种方法的功率更小,适用于大多数表面,包括在高功率照明下易损坏的基片。由于明场和暗场系统各有优缺点,例如某些样品在明场系统下对比度好,而另一些则在暗场系统下更清晰,因而缺陷检测系统通常包含这两种检测系统,两者之间的区别也逐渐模糊^[83]。

2.4 有图形晶圆表面缺陷检测

IC 制造包括光刻、刻蚀、沉积、掺杂、抛光等关键工艺,通过这几类工艺的数百道组合与重复,才能在裸硅片上最终生成 IC 器件所需的纳米结构图形。在实际的大批量生产制造过程中,由于不可避免存在各种工艺误差和环境污染,因而生成的 IC 纳米结构也不可避免存在各种缺陷^[3],不仅包括纳米颗粒、凹陷、突起、刮伤、断线、桥接等表面缺陷,还包含空洞、材料成分不均匀等亚表面和内部缺陷。

对于硅片上已成型图形的缺陷检测,目前常用的方法有干涉法。Zhou 等^[84]提出了共光路光学干涉显微成像技术,能够有效地抑制背景图案和检测系统引起的噪声,提高缺陷信号的信噪比。图 12 为所提共光路光学干涉显微镜原理图,相比于传统的

双路干涉仪,共光路设计对振动噪声具有更好的鲁棒性。Zhou 等利用此干涉显微镜获得了被测样品表面的振幅和相位分布图像,并提出了“多阶差分-缝合-基于卷积的低通滤波”的数据处理算法,利用此算法可显著消除具有平移不变性或者随时间变化的噪声,提高缺陷信号在振幅和相位分布图像中的对比度,实现了在可见光(波长 532 nm)照明下最小线宽为 20 nm 的结构缺陷的识别。Nativ 等^[85]在传统明场显微镜的基础上,引入差分干涉光路模块以实现干涉图像的获取,相比于传统的明场显微镜提高了缺陷信号的对比度。传统的差分干涉显微镜通常使用偏振器件进行分光,该方法不需要偏振器件,将明场显微镜的输出光束导入差分干涉模块,仪器设计更简单且易于实现。

对于已成型图形缺陷检测的另一个方法是基于衍射或者散射信息的光学检测技术。Barnes 等^[86-87]提出离焦扫描显微镜技术,结合二维光强分布和离焦维度的检测信息实现三维图像数据分析,提高了缺陷识别的能力。相比于传统的光学显微镜只采集物镜的最佳焦平面上的图像,离焦扫描显微镜通过采集不同离焦位置上的光强信息,来增加检测的信息量,提高检测灵敏度。如图 13 所示,在传统的明场光学显微镜基础上,将被测样品沿着光轴方向移动至不同的离焦位置处并采集对应的图像,得到了包括离焦维度在内的三维图像数据。Barnes 等利用此三维图像数据进行差分处理,实验验证了可以实现 16 nm 尺度缺陷的识别,并通过仿真分析指出该方法的理论检测分辨能力可以达到 10 nm。

为了进一步提高缺陷检测的灵敏度,使其能够

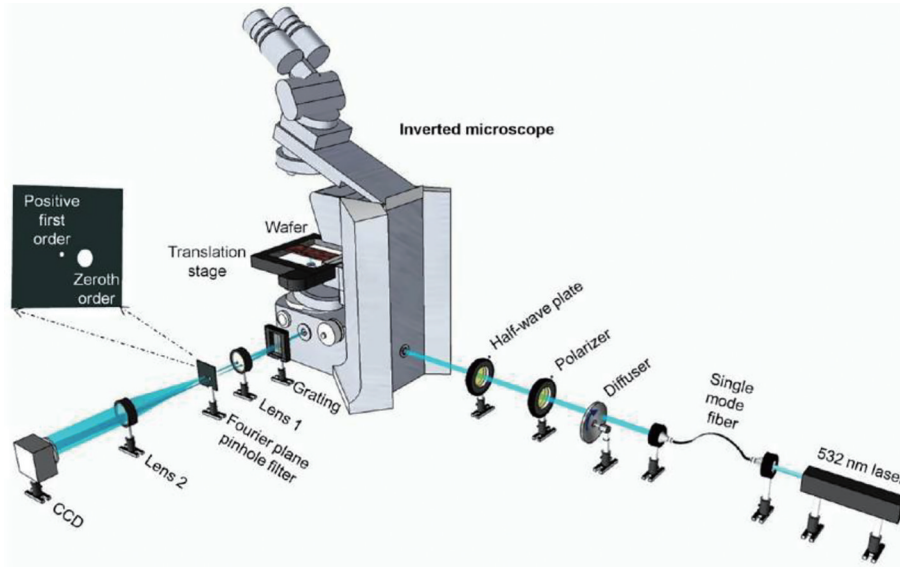


图 12 基于共光路的干涉显微镜^[84]

Fig. 12 Schematic of the common-path interferometric microscope^[84]

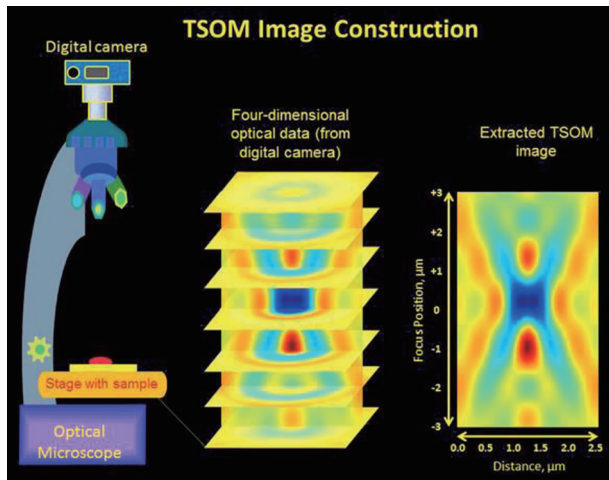


图 13 离焦扫描显微镜原理图^[87]

Fig. 13 Schematic of the through-focus scanning microscope^[87]

检测 10 nm 以下的缺陷,新的检测方法也被提出。Zhu 等^[88]提出了基于机械功和机械力的缺陷检测方法。如图 14 所示,传统光学检测技术通常测量光的相位、振幅或者偏振态,与此不同的是,该方法将光和物质作用的横向散射力产生的机械功和机械力作为测量参量,并利用明场显微镜扫描不同的离焦位置,实现了 10 nm 尺度缺陷的准确识别,证实了该方法具有极高的灵敏度并对噪声具有良好的鲁棒性。

尽管上述方法能够获得优异的缺陷检测灵敏度,但它们的检测效率与长期测量稳定性尚难以满足 IC 芯片制造产线的要求,而为了平衡检测灵敏度与检测效率的需求,当前半导体工业界的主流硅片

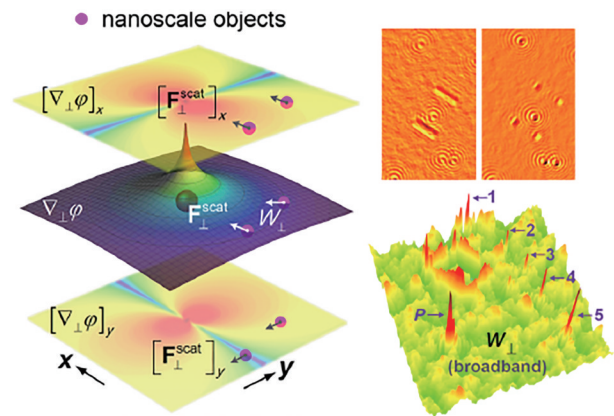


图 14 基于机械功和机械力的缺陷检测方法^[88]

Fig. 14 Defect inspection based on mechanical work and force^[88]

图形结构缺陷检测装备仍然是基于光学显微镜技术的明场光学散射原理^[3,89]。图 15 为典型的明场光学缺陷检测装备的光路原理^[90],其采用柯勒照明光路将高亮宽谱等离子体光源光束调制成超均匀、特定光束截面形状的偏振光束;随后利用高 NA 低像差的物镜收集硅片结构图形缺陷引起的散射光,再通过折反混合透镜组与变焦透镜组相结合的成像光路将散射光成像至时间延迟积分(TDI)相机;最后利用基于片对片的图像差分处理算法实现缺陷信号的准确识别。目前,美国 KLA 公司所开发的高端 K39XX 系列和 K29XX 系列明场光学缺陷检测装备能够实现亚 30 nm 的缺陷检测灵敏度,并且产率能够维持 1WPH (Wafer Per Hour) @36 nm,能够适用于 1X nm 及以下节点工艺生产线上的硅片结

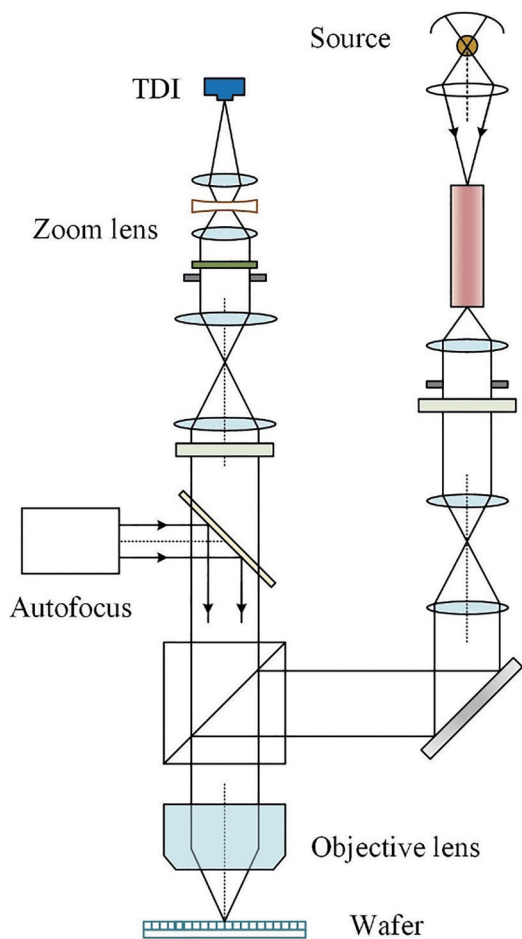


图 15 典型明场光学缺陷检测装备的光路原理^[90]

Fig. 15 Schematic of typical defect inspection based on bright field microscopy^[90]

构图形缺陷检测^[91-92]。

同时,鉴于明场光学缺陷检测装备的缺陷检测性能强烈依赖于照明与成像系统的检测配置条件,例如检测波段、光束偏振态、照明光束截面形状以及物镜 NA 等^[93],因此亦有诸多理论仿真研究工作专注于利用仿真工具开展明场光学缺陷检测装备的缺陷检测配置优化与灵敏度仿真分析,以应对硅片结构图形尺寸收缩所带来的缺陷检测挑战^[94]。Fujii 等^[94]曾利用结合了近场计算和傅里叶光学成像计算的仿真工具开展了缺陷检测灵敏度仿真,揭示了照明光束的偏振态控制与波段选择的必要性,其仿真方法如图 16 所示。Silver 等^[95-96]先后采用三维 FDTD 电磁仿真工具对定制化的晶圆图形结构缺陷开展了灵敏度仿真计算,通过空间像的差分图像结果揭示了照明光束入射角、波长及其偏振态对缺陷散射信号信噪比的影响机制。这些代表性工作为明场光学缺陷检测装备的未来拓展提供了可

供借鉴的思路。

2.5 光刻掩模图形缺陷检测

在光刻工艺中,必须事先设计并制备一组具有特定几何图形的光刻掩模(mask),作为复制批量生产用版,供光刻工艺曝光之用。在实际的光刻掩模生产制造过程中,也不可避免地会存在各种缺陷,而且这些缺陷会经由光刻工艺批量复制到所有硅片中。

随着光刻工艺进入 KrF 及 ArF 光源主导的深紫外(DUV)光刻时代,掩模误差增强因子也将在曝光过程中显著地增加,掩模关键尺寸均匀性与掩模缺陷越来越难以控制,同时掩模上的缺陷尺寸逐渐从百纳米量级缩减至数十纳米量级,这对掩模缺陷检测波长与光刻波长的波长一致性、缺陷检测灵敏度、缺陷检测效率提出了更高要求^[97]。日本先进掩模检测技术公司(Advanced Mask Inspection Technology)研制了采用 257 nm 和 199 nm 波长的 DUV 掩模缺陷检测系统^[98-100],其采用空间上分离的透射光与反射光成像技术实现掩模的透射图像与反射图像并行采集,并结合片对片(Die-to-Die)与片对库(Die-to-Database)缺陷处理算法实现缺陷信号的准确捕获^[101],其基本光路原理如图 17 所示。为了实现缺陷信号的高效率捕获,透射光图像与反射光图像均通过 TDI 图像传感器进行扫描捕获,同时透射光与反射光成像的重叠区域用于识别缺陷特征信号。

与此同时,针对上述 199 nm 波长的掩模缺陷检测系统,通过引入高 NA 光学系统和超分辨率方法^[102],能够进一步拓展此系统的掩模缺陷检测灵敏度与检测适应能力,使其能够适用于 32 nm 及以下节点工艺。此外,美国 KLA 公司也先后开发了 TeraScanHR 与 TeraScanXR 掩模缺陷检测系统^[103-105],并引入新的片对片与片对库算法以增强掩模平面检测、空间像平面检测与晶圆平面检测的分辨力与灵敏度^[106],从而应对在 DUV 光刻时代中由分辨率增强技术所引起的掩模缺陷检测挑战。

随着 EUV 光刻成为 7 nm 及以下节点的主要技术,相应地,也发展出了基于 EUV 光源的原波长光刻掩模缺陷检测技术和装备。日本兵库大学研究团队基于高次谐波 EUV 光源技术,提出 EUV 相干散射显微成像技术,并对 EUV 掩模周期性结构展开研究,获得了 100 nm 周期性孔洞的图

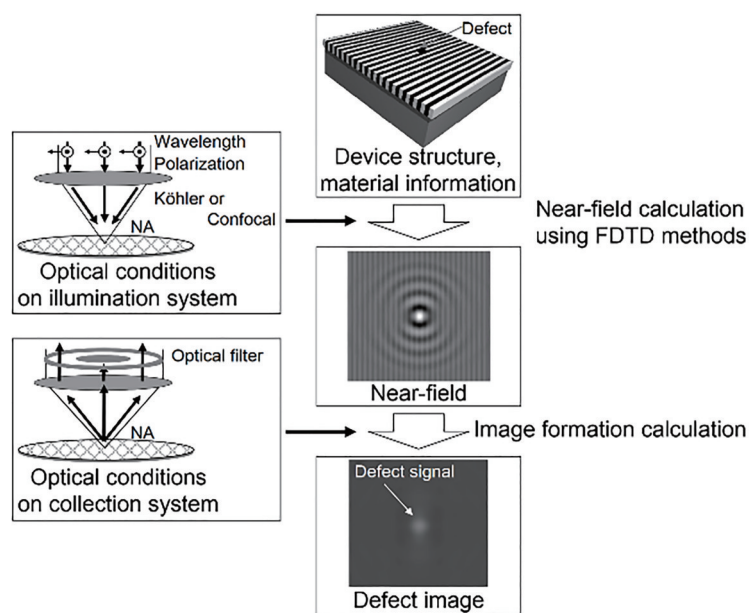


图 16 明场光学缺陷检测灵敏度仿真方法^[94]

Fig. 16 Simulation method for sensitivity of deflection inspection based on bright field microscopy^[94]

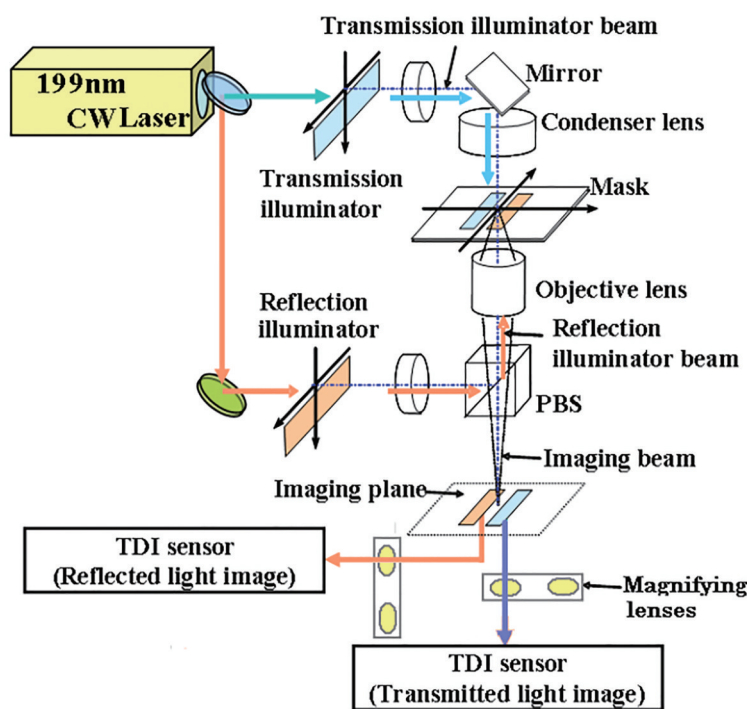


图 17 基于 199 nm 波长连续激光的透射-反射并行成像的掩模缺陷检测系统^[99]

Fig. 17 Schematic of mask defect inspection system with concurrent transmission and reflection image acquisition using 199 nm continuous wave laser^[99]

像^[107-108]。瑞士保罗谢勒研究所研究团队利用 EUV 光源提出基于相干衍射成像的无透镜扫描成像显微镜的检测方法^[109-110]。如图 18 所示,无透镜扫描成像显微镜使用反射式光学系统,利用平面镜进行两次反射将极紫外光入射至被测样品表

面,从样品表面发出的散射光不经过任何透镜直接被探测器收集。无透镜设计的优势在于收集到的样品表面发出的散射光将不再受光学系统 NA 的限制,从而可以收集到更多的散射空间频率信息。Mochi 等^[110]利用无透镜扫描成像显微镜实现

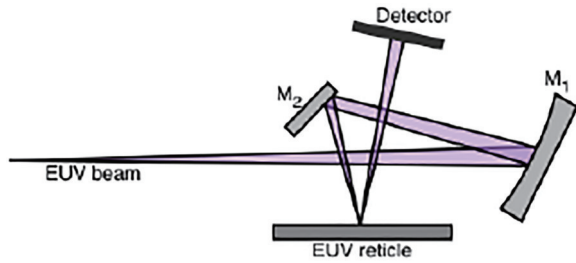


图 18 无透镜扫描成像显微镜原理^[110]

Fig. 18 Schematic of the scanning lensless imaging microscope^[110]

了对掩模版上 10 nm 尺度缺陷的清晰成像与识别。日本 Lasertec 公司在 EUV 掩模缺陷检测领域占据垄断地位,其研制出了首台 EUV 掩模缺陷检测系统 ACTIS A150^[111]。ACTIS A150 使用了 13.5 nm

波长的 EUV 光源,可分辨半周期为 35 nm 的光栅掩模,实现了 20 nm 以下尺度的掩模结构缺陷的检测。

3 先进技术节点中的纳米测量挑战

近年来,随着多重曝光、定向自组装(DSA)、EUV 光刻等先进制造工艺的日趋成熟,指导 IC 制造发展趋势的摩尔定律虽然放缓,但仍然保持延续。如图 19^[112]所示,目前 IC 器件的 CD 已经突破至 5 nm 技术节点,并可望一直延拓至 2 nm 节点以下^[52]。当 CD 逼近 3 nm 节点时,部分缺陷尺寸将小至 3~6 个硅原子尺度。随着 IC 器件 CD 不断逼近原子尺度,传统光学纳米测量技术也逐渐逼近其测量灵敏度极限^[113-115]。

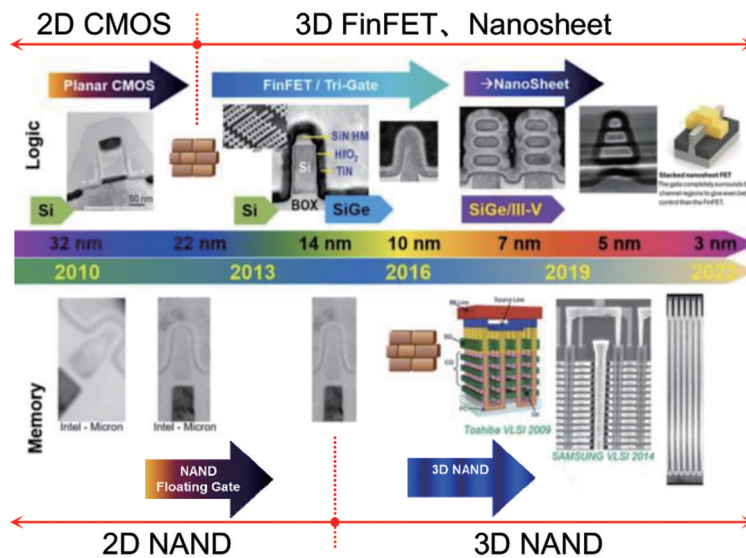


图 19 IC 器件技术节点发展趋势^[112]

Fig. 19 IC device technology node development trend^[112]

为了保证 CD 不断缩小时 IC 器件依然保持优良性能,其结构设计已从简单平面结构转向复杂三维结构,如鳍式场效应晶体管(FinFET)和叠层高深宽比闪存(3D NAND)结构^[113-114]。传统平面互补型金属氧化物半导体(CMOS)结构的待测参数一般只有 5~6 个,与之相比,FinFET 结构至少包含 12 个待测参数。3D NAND 结构叠层越多,存储容量越大,但深宽比越高,结构待测参数也就越多。韩国三星公司在 2020 年已量产 128 层 3D NAND 闪存,深宽比高达 40:1 以上。待测参数越多,使得 OCD 测量逆问题求解过程中参数之间的耦合程度愈加严重。

此外,随着 IC 器件 CD 的不断减小,量子限制效应变得越来越显著,特别是在 10 nm 及以下技术

节点中。由于量子限制效应,导致 IC 器件结构的三维形貌同其材料间的光学特性间存在着不可忽略的耦合性。图 20 为硅的介电函数随膜厚及纳米线尺寸的变化关系曲线^[113]。由图可以看出,与体硅材料的介电函数相比,当硅薄膜的厚度为 7 nm 时,硅的介电函数减小约 5%,而当硅薄膜厚度为 4 nm 时,硅的介电函数减小约 10%;同样地,当硅纳米线的尺寸为 15 nm 和 7 nm 时,对应硅的介电函数分别减小约 5% 和 10%。随着 IC 器件 CD 的不断减小,一些电学性能更优的新材料如二维材料、碳纳米管被不断引入到 IC 器件中。受量子限制效应的影响,这些新材料的介电函数同其厚度间亦存在着显著的依赖关系^[115-116]。

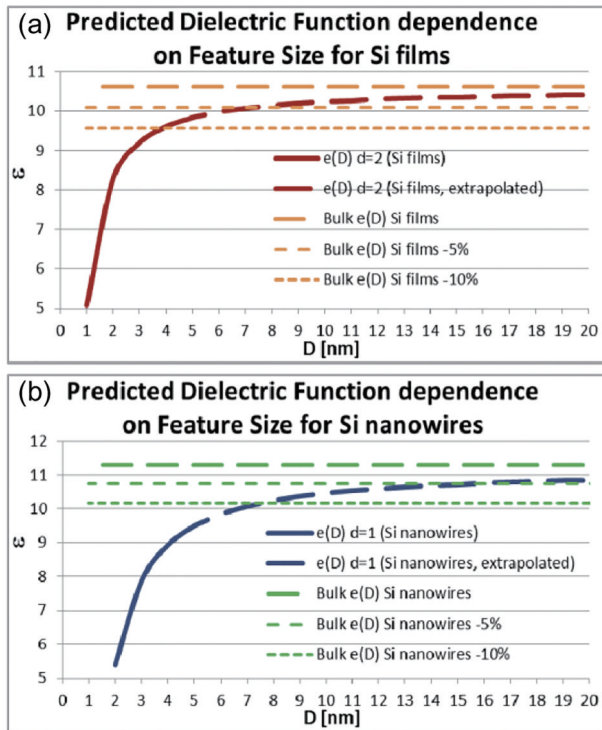


图 20 硅的介电函数随(a)膜厚及(b)纳米线尺寸的变化^[113]
Fig. 20 Dielectric function of silicon as a function of (a) film thickness and (b) nanowire size^[113]

4 IC 制造在线光学测量检测技术未来发展趋势

4.1 多模式混合测量技术

事实上,没有任何一种测量手段能够实现复杂结构全部参数的快速、高分辨、高精度测量。不同的测量手段各有自己的优缺点。例如,CD-SEM和CD-AFM等测量手段可以直接获得待测样品的像,且具有很高的分辨率,测量过程简单直观,无需像OCD测量那样,需要进行复杂的逆问题求解,但是CD-SEM和CD-AFM测量速度慢,具有一定的破坏性,且只能获得结构的表面形貌,无法获得结构内部的埋层尺寸。于是,集成多种测量手段的多模式混合测量技术成为应对未来纳米测量挑战的一种重要手段^[112]。

如上所述,在OCD测量中,参数之间的耦合会严重影响参数提取结果的精度。因此,一种可行的混合测量技术是将CD-SEM或者CD-AFM与OCD进行组合^[117-118],以此来减小OCD测量中待测参数的个数,降低参数之间的耦合性。除此之外,其他的组合方式如:AFM与SEM^[119]、AFM与TEM^[120]。混合测量技术的主要挑战在于如何充分发挥每种

测量技术的特点,实现不同测量技术间的优势互补。为此,统计和组合方法常被用于混合测量技术中,以使得每种技术达到最佳的性能,并对最终测量结果的不确定度进行合理评估^[121-122]。

4.2 极端波长纳米测量技术

随着IC器件CD的不断减小,传统光学纳米测量技术也逐渐逼近其测量灵敏度极限^[123]。光学测量技术的灵敏度与探测波长间有着直接相关关系。因此,光学纳米测量技术的一种发展趋势是采用更短的探测波长,如EUV波段、X射线波段。其中,X射线是一种波长范围在0.01~10 nm之间的电磁辐射形式,具有波长短、能量高、穿透能力强等特点。当X射线透过试样时,如果试样内部存在纳米尺度的电子密度不均匀,会在入射光束方向周围小角度范围内(一般 $0.1^\circ \sim 10^\circ$)出现散射X射线,这种现象被称为小角X射线散射(SAXS)^[124]。SAXS的物理实质在于散射体和周围介质间的电子云密度差异,对于完全均匀介质,其散射强度为零。借此现象,SAXS被广泛用于研究聚合物、纳米材料、生物分子等散射体在亚微观尺度的非均匀性信息^[125]。

近年来,国外有研究机构尝试利用SAXS开展IC纳米结构测量研究,亦称关键尺寸小角X射线散射(CD-SAXS),其基本原理与光学散射测量类似,即首先获得待测结构的SAXS图谱测量数据,然后将其与理论散射模型计算出来的仿真数据通过某种最优化算法进行匹配,能够最佳匹配测量数据的仿真数据所对应的散射模型输入数据即为纳米结构的待测形貌参数值。CD-SAXS主要有两种测量模式:透射式小角X射线散射(T-SAXS)和掠入射式小角X射线散射(GI-SAXS),其原理分别如图21(a)和(b)所示。

美国国家标准与技术研究院(NIST)利用同步辐射光源,率先开展了基于SAXS的IC纳米结构测量研究。他们通过旋转待测样件,获取透射模式下多入射角下的SAXS二维图谱,结合逆问题求解,展示了SAXS在二维纳米光栅CD、周期间距、高度、侧壁角、线边粗糙度(LER)、线宽粗糙度(LWR)等形貌参数测量中的潜力^[13-16]。NIST还尝试开发了基于桌面级X射线源的SAXS测量仪,展示了该技术用于实际IC生产线的可能性^[17]。德国联邦技术物理研究院(PTB)采用掠入射方式获取待测样品的SAXS图谱,通过采用基于FEM的散射场建模方法结合逆问题求解,测量了二维纳米光栅的CD、高

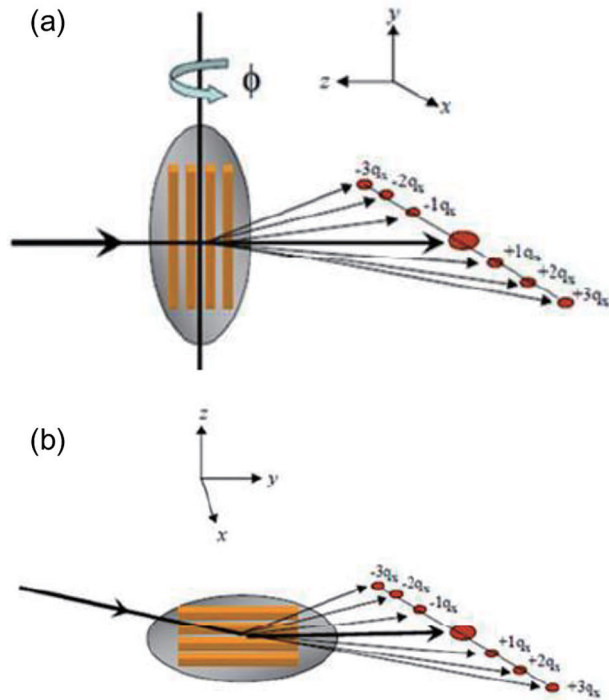


图 21 CD-SAXS。(a)透射式小角 X 射线散射测量原理；
(b)掠入射式小角 X 射线散射测量原理^[113]

Fig. 21 CD-SAXS. (a)Schematic of transmission SAXS;
(b) schematic of grazing-incidence SAXS^[113]

度、线边粗糙度等形貌参数^[18-19]。对比透射式 SAXS 测量,掠入射方式下样品表面光斑大小通常在几个厘米量级,无法满足逻辑器件纳米结构对测量光斑的要求(通常要求小于 $100\ \mu\text{m}$)^[113]。除此之外,美国纽约州立大学、芝加哥大学、布鲁克海文国家实验室等也开展了类似研究,并测量了二维纳米光栅的 CD 等形貌参数^[20-22]。

目前,CD-SAXS 测量面临的主要挑战是缺少小型紧凑的高亮度 X 射线源。与同步辐射 X 射线源相比,当前市面上的小型 X 射线源如旋转阳极 X 射线源和基于液态金属射流的 X 射线源的亮度至少低 3~4 个量级,因此尚无法满足 IC 在线测量对于测量速度的要求。下一代 X 射线源的开发需要在当前商业紧凑光源基础上至少增加 100 倍的亮度。一种可能的解决方案是使用反康普顿 X 射线源^[126-128],利用高能电子束散射光学光子,并将它们转换为硬 X 射线。

4.3 高分辨与超分辨成像技术

为了提高缺陷检测的灵敏度,一种重要的途径是提高显微成像技术的分辨率。由瑞利衍射公式可知,提高显微镜分辨率的直接途径主要有两种:一种是减小照明光波长,另一种是采用超大 NA 物

镜。例如,利用 X 射线显微镜进行 IC 纳米结构缺陷检测。目前实现 X 射线成像的两种主要方式^[129],包括宽场透射 X 射线显微术(TXM)和扫描透射 X 射线显微术(STXM),其成像分辨率完全取决于作为成像或聚焦透镜的菲涅耳波带片,由于波带片受限于加工精度的影响,因此 TXM 和 STXM 目前的实际分辨率都很难突破到 $20\ \text{nm}$ 。

相干衍射成像技术(CDI)是一种无透镜计算成像技术。该技术,包括传统 CDI 技术及其后发展起来的叠层扫描相干衍射成像技术,是在相干光源照明条件下,获取待测样品的相干衍射图像,然后通过某种迭代算法求解相位问题,直接从衍射强度数据中重构待测样品的振幅和相位信息^[130]。由于 CDI 技术不依赖于高质量的光学元件,且可以获得理论上的衍射极限分辨率,因此特别适合于 EUV、X 射线等难以制作高性能元器件的辐射源。

目前,国际上很多同步辐射光源中心都开发安装了 X 射线叠层扫描相干衍射成像系统(XP),并在物理、化学、生命、材料等众多领域开展了若干探索性研究^[131-133],其中也有研究尝试将其应用于 IC 芯片的非破坏成像^[134-136]。例如,美国 Argonne 国家实验室 Deng 等联合 Intel 公司,于 2017 年展示了 $65\ \text{nm}$ 节点 CMOS 逻辑芯片和 $32\ \text{nm}$ 节点 DRAM 存储芯片的 XP 成像,重构分辨率达到 $20\ \text{nm}$ ^[134]。瑞士保罗谢勒研究所 Holler 等^[135]结合断层扫描技术,继 2017 年实现小尺寸样品($15\ \mu\text{m} \times 8\ \mu\text{m}$)的 XP 三维成像之后,于 2019 年进一步实现了大范围区域($300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$)的 XP 多尺度三维成像,分辨率最高达到 $14.6\ \text{nm}$ ^[136],展示了 XP 在非破坏、高穿透、高分辨成像方面的巨大潜力。除此之外,国际上也有研究 EUV 叠层扫描相干衍射成像技术(EUVP),并将其用于 EUV 掩模版缺陷检测^[137-138]。同 CD-SAXS 一样,目前 XP 和 EUVP 应用于 IC 产线的主要挑战也是缺少小型紧凑的高相干性和高亮度辐射源。

除了上述的高分辨成像技术之外,一些超分辨成像技术,特别是远场超分辨成像技术,也值得特别关注^[139]。2014 年诺贝尔化学奖颁给了三位物理学家:Betzig、Hell 和 Moerner,以表彰他们在发展超分辨荧光显微镜中做出的贡献,他们的突破性工作使得光学显微镜进入了纳米尺度。这类超分辨荧光显微成像技术,如受激发射损耗荧光显微术(STED)、光激活定位显微术(PALM),以及随机光

学重建显微术(STORM),可以将传统光学显微镜的成像分辨率由 200 nm 突破至 20 nm 以下^[140]。然而其成像过程需要借助荧光分子,若要应用到 IC 测量检测领域,需要解决荧光分子在半导体材料中掺杂等一系列问题。近年来随着光学技术的不断进步,出现了一些基于其他原理的远场超分辨成像技术,如基于超振荡透镜^[141]和基于超表面透镜^[142]的超分辨成像技术。尽管目前此类超分辨成像技术还处于理论研究结果阶段,然而一旦取得突破,将会在 IC 测量检测领域有着重要的应用前景。

4.4 先进的数据分析技术

先进的数据分析是指用于大数据处理、推理、预测和决策的方法,其中包括机器学习和深度学习等^[143-144]。机器学习可以直接从数据中学习信息,而无需使用物理模型。事实证明,这在系统理解不充分或变量过多而相关性未知的情况下很有用。此外,在物理系统建模需要大量计算(或某些关系尚未完全理解)的情况下,可以使用机器学习来开发数据驱动模型,该模型速度更快,可以识别过程参数之间以前未识别的联系,并减少求解时间。例如,在 OCD 测量中,由于参数提取过程涉及复杂的正向散射模型的计算,一种方法是采用机器学习来代替正向散射模型^[145-146],以提高参数提取速度,或者减小仿真数据库的规模;特别是对于一些难以建立散射模型的 IC 结构,此方法更具有特殊的意义。在缺陷检测领域,Purandare 等^[147]提出了基于机器学习的纳米结构缺陷识别分类方法。他们利用主成分分析方法提取对于缺陷灵敏的特征,利用仿真生成的数据和实验测得的数据对机器学习模型进行训练,解决了实际应用中难以收集到大量的实验数据用于训练的问题,并实现了 9 nm 节点下的不同缺陷类型的识别。Henn 等^[148]提出了基于卷积神经网络的缺陷识别分类模型,利用 FDTD 方法,并且考虑半导体纳米结构中存在的线边粗糙度、不同波长下光学检测系统中的散粒等噪声,仿真生成了大量训练数据,理论上验证了卷积神经网络相比于传统的线性分类器具有更高的识别准确率。Imoto 等^[149]基于迁移学习建立了缺陷检测分类模型。传统的机器学习模型一般需要大量已知标签的数据集作为训练数据,然而在标注数据集的过程中会人为地引入标签的错误,造成模型预测精度的下降。而所提迁移学习模型能够有效解决这一问题,只用很少的可信赖的已标签数据和大量未标签数据实

现了不同类型缺陷的准确识别。可以预见,随着计算机技术和人工智能的发展,机器学习和深度学习等技术必将在 IC 测量检测领域获得更加广泛和深入的关注与应用。

5 结束语

为了保证 IC 制造的质量和良率,在 IC 制造过程中对 IC 纳米结构的关键尺寸以及缺陷等进行快速、非破坏、精确测量与检测具有十分重要的意义。与 SEM、TEM、AFM 等测量手段相比,光学测量技术具有测量速度快、无接触、非破坏和易于在线集成等优点,因而在 IC 制造工艺控制和良率管理中获得了广泛应用。本文针对 IC 制造前道工艺中的尺寸测量和缺陷检测需求介绍了 IC 制造在线光学测量检测技术的研究现状。其中,尺寸测量方面分别介绍了 IC 纳米结构 CD 测量和套刻误差测量,缺陷检测分别介绍了无图形晶圆表面缺陷检测、有图形晶圆表面缺陷检测,以及光刻掩模图形缺陷检测。

在 IC 纳米结构 CD 测量方面,目前主要的光学测量技术是光学散射测量技术,其本质上是一种基于模型的测量技术,它通过测量(周期性)纳米结构的散射信息(如反射率、椭偏参数),然后求解逆散射问题来重构待测纳米结构的三维形貌。在套刻误差测量方面,目前主要的光学测量技术从原理上可以分为 IBO 测量技术和 DBO 测量技术两种;相比 IBO 技术,DBO 技术不受衍射极限以及工具引起的偏移等的限制,逐渐成为先进节点中套刻误差测量的主要手段。在缺陷检测方面,目前针对无图形晶圆表面缺陷检测主要采用的是基于暗场散射的检测技术,而针对有图形晶圆表面缺陷检测和光刻掩模图形缺陷检测则主要采用的是明场光学检测技术。

随着多重曝光、定向自组装、EUV 光刻等先进制造工艺的日趋成熟,指导 IC 制造发展趋势的摩尔定律虽然放缓,但仍然保持延续。目前 IC 器件的 CD 已经突破至 5 nm 技术节点,并可望一直延拓至 2 nm 节点以下。在先进技术节点中,纳米测量面临更小 CD、复杂 3D 结构(如采用鳍式场效应晶体管 FinFET、高深宽比 3D NAND 闪存)、新材料(如二维材料、碳纳米管)等方面的挑战。针对这些挑战,IC 制造在线光学测量检测技术未来的主要发展趋势有:集成多种测量手段的多模式混合测量技术、极端波长(如 EUV、X 射线)纳米测量技术、高分辨

与超分辨成像技术,以及先进的数据分析技术(如机器学习)。

IC 制造是代表我国国家安全和经济发展的重要战略产业,尽管过去 10 年里取得了长足进步和飞速发展,但不可忽视的是我国 IC 制造产业依然存在众多亟待解决的“卡脖子”问题。除了在核心制造装备如光刻机受制于国外之外,在测量检测装备方面,目前中芯国际、长江存储等国内最先进 IC 生产线的前道工艺在线测量检测装备几乎完全被 KLA、Applied Materials、Hitachi 等国外设备商所垄断,这与国内在这一领域长期缺乏系统深入的基础研究与技术积累有着重要的因果关系。事实上,在线测量检测技术与装备是保证 IC 制造质量和良率的唯一有效技术手段。本文通过对 IC 测量检测技术特别是其中的光学测量检测技术的目前研究现状、在先进技术节点中所面临的新挑战,以及未来可能的发展趋势进行梳理和分析,期冀能够引起国内同行对该领域的关注和重视,共同推进该领域的发展。

参 考 文 献

- [1] Quirk M, Serda J. Semiconductor manufacturing technology[M]. New York: Pearson, 2000.
- [2] Diebold A C. Handbook of silicon semiconductor metrology[M]. New York: Marcel Dekker, Inc., 2001.
- [3] Ma Z, Seiler D G. Metrology and diagnostic techniques for nanoelectronics[M]. Singapore: Pan Stanford Publishing, 2017.
- [4] Losurdo M, Bergmair M, Bruno G, et al. Spectroscopic ellipsometry and polarimetry for materials and systems analysis at the nanometer scale: state-of-the-art, potential, and perspectives[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2009, 11(7): 1521-1554.
- [5] Chen X G, Liu S Y. Optical scatterometry for nanostructure metrology[M]//Gao W. Precision manufacturing. Singapore: Springer, 2019: 477-513.
- [6] Shimizu Y, Chen L C, Kim D W, et al. An insight on optical metrology in manufacturing[J]. Measurement Science and Technology, 2020, 32(4): 042003.
- [7] McNeil J R. Scatterometry applied to microelectronics processing[C]//2000 Digest of the LEOS Summer Topical Meetings. Electronic-Enhanced Optics. Optical Sensing in Semiconductor Manufacturing. Electro-Optics in Space. Broadband Optical Networks (Cat. No.00TH8497), July 24-28, 2000, Aventura, FL, USA. New York: IEEE Press, 2000: II37-II38.
- [8] Naqvi S S H, McNeil J R, Krukar R H, et al. Scatterometry and the simulation of diffraction-based metrology[J]. Microlithography World, 1993, 2(3): 5-16.
- [9] Gross H, Rathsfeld A, Scholze F, et al. Profile reconstruction in extreme ultraviolet (EUV) scatterometry: modeling and uncertainty estimates[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(10): 105102.
- [10] Henn M A, Heidenreich S, Gross H, et al. Improved grating reconstruction by determination of line roughness in extreme ultraviolet scatterometry[J]. Optics Letters, 2012, 37(24): 5229-5231.
- [11] Ku Y S, Yeh C L, Chen Y C, et al. EUV scatterometer with a high-harmonic-generation EUV source[J]. Optics Express, 2016, 24(24): 28014-28025.
- [12] Ansuinelli P, Coene W M J, Urbach H P. Automatic feature selection in EUV scatterometry[J]. Applied Optics, 2019, 58(22): 5916-5923.
- [13] Jones R L, Hu T J, Lin E K, et al. Small angle X-ray scattering for sub-100 nm pattern characterization[J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(19): 4059-4061.
- [14] 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.
- [15] Sunday D F, List S, Chawla J S, et al. Determining the shape and periodicity of nanostructures using small-angle X-ray scattering[J]. Journal of Applied Crystallography, 2015, 48(5): 1355-1363.
- [16] Sunday D F, Kline R J. Methodology for evaluating the information distribution in small angle scattering from periodic nanostructures[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2018, 17(4): 044002.
- [17] 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.
- [18] Pflüger M, Soltwisch V, Probst J, et al. Grazing-incidence small-angle X-ray scattering (GISAXS) on small periodic targets using large beams[J]. IUCrJ, 2017, 4(4): 431-438.
- [19] Herrero A F, Pflüger M, Probst J, et al. Applicability of the Debye-Waller damping factor for

- the determination of the line-edge roughness of lamellar gratings[J]. *Optics Express*, 2019, 27(22): 32490-32507.
- [20] Settens C M, Cordes A, Bunday B D, et al. Assessment of critical dimension small-angle X-ray scattering measurement approaches for FinFET fabrication process monitoring[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2014, 13(4): 041408.
- [21] Suh H S, Chen X X, Rincon-Delgadillo P A, et al. Characterization of the shape and line-edge roughness of polymer gratings with grazing incidence small-angle X-ray scattering and atomic force microscopy [J]. *Journal of Applied Crystallography*, 2016, 49(3): 823-834.
- [22] Freychet G, Kumar D, Pandolfi R J, et al. Estimation of line cross sections using critical-dimension grazing-incidence small-angle X-ray scattering[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12(4): 044026.
- [23] Azzam R M A, Bashara N M. *Ellipsometry and polarized light*[M]. Amsterdam: North-Holland, 1977.
- [24] Fujiwara H. *Spectroscopic ellipsometry: principles and applications*[M]. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [25] Niu X H, Jakatdar N, Bao J W, et al. Specular spectroscopic scatterometry[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2001, 14(2): 97-111.
- [26] Huang H T, Kong W, Terry F L, Jr. Normal-incidence spectroscopic ellipsometry for critical dimension monitoring[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(25): 3983-3985.
- [27] Novikova T, de Martino A, Hatit S B, et al. Application of Mueller polarimetry in conical diffraction for critical dimension measurements in microelectronics [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(16): 3688-3697.
- [28] Novikova T, de Martino A, Bulkin P, et al. Metrology of replicated diffractive optics with Mueller polarimetry in conical diffraction[J]. *Optics Express*, 2007, 15(5): 2033-2046.
- [29] 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.
- [30] Chen X G, Liu S Y, Zhang C W, et al. Accurate characterization of nanoimprinted resist patterns using Mueller matrix ellipsometry[J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 15165-15177.
- [31] Liu S Y, Chen X G, Zhang C W. Development of a broadband Mueller matrix ellipsometer as a powerful tool for nanostructure metrology[J]. *Thin Solid Films*, 2015, 584: 176-185.
- [32] Diebold A C, Antonelli A, Keller N. Perspective: optical measurement of feature dimensions and shapes by scatterometry[J]. *APL Materials*, 2018, 6(5): 058201.
- [33] Korde M, Kal S, Alix C, et al. Nondestructive characterization of nanoscale subsurface features fabricated by selective etching of multilayered nanowire test structures using Mueller matrix spectroscopic ellipsometry based scatterometry[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2020, 38(2): 024007.
- [34] Bao G, Chen Z, Wu H. Adaptive finite-element method for diffraction gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 2005, 22(6): 1106-1114.
- [35] Jan P, Frank S. Accelerated a posteriori error estimation for the reduced basis method with application to 3D electromagnetic scattering problems [J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2010, 32(2): 498-520
- [36] Nakata Y, Koshihara M. Boundary-element analysis of plane-wave diffraction from groove-type dielectric and metallic gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1990, 7(8): 1494-1502.
- [37] Shi Y T, Chen X G, Tan Y Y, et al. Reduced-basis boundary element method for fast electromagnetic field computation[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2017, 34(12): 2231-2242.
- [38] Taflov A, Hagness S. *Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method*[M]. 3rd ed. Boston: Artech House, 2000.
- [39] Moharam M G, Gaylord T K, Grann E B, et al. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, 12(5): 1068-1076.
- [40] Moharam M G, Gaylord T K, Pommet D A, et al. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, 12(5): 1077-1086.
- [41] Li L F. Use of Fourier series in the analysis of discontinuous periodic structures[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996, 13(9): 1870-1876.

- [42] Li L F. Formulation and comparison of two recursive matrix algorithms for modeling layered diffraction gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996, 13(5): 1024-1035.
- [43] Tan E L. Enhanced R-matrix algorithms for multilayered diffraction gratings[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(20): 4803-4809.
- [44] Tan E L. Note on formulation of the enhanced scattering-(transmittance-) matrix approach[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2002, 19(6): 1157-1161.
- [45] 陈修国. 基于广义椭偏仪的纳米结构测量理论与方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
Chen X G. Theory and method of nanostructure metrology using generalized ellipsometry[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [46] Kirsch A. Uniqueness theorems in inverse scattering theory for periodic structures[J]. *Inverse Problems*, 1994, 10(1): 145-152.
- [47] Gang B. A uniqueness theorem for an inverse problem in periodic diffractive optics[J]. *Inverse Problems*, 1994, 10(2): 335-340.
- [48] Colton D, Kress R. Inverse acoustic and electromagnetic scattering theory[M]. 3rd ed. New York: Springer, 2013.
- [49] Chen X G, Liu S Y, Zhang C W, et al. Improved measurement accuracy in optical scatterometry using fitting error interpolation based library search[J]. *Measurement*, 2013, 46(8): 2638-2646.
- [50] Chen X G, Liu S Y, Zhang C W, et al. Improved measurement accuracy in optical scatterometry using correction-based library search[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(27): 6726-6734.
- [51] Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T, et al. Numerical recipes: the art of scientific computing[M]. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [52] International Roadmap for Devices and Systems (IRDS) -yield enhancement[EB/OL]. [2021-05-04]. <https://irds.ieee.org/editions/2018/yield-enhancement>.
- [53] Rigolli P L, Rozzoni L, Turco C, et al. AIM technology for nonvolatile memories microelectronics devices[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6152: 61524C.
- [54] Ausschnitt C P, Chu W, Kolor D, et al. Blossom overlay metrology implementation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6518: 65180G.
- [55] Minghetti B, Brunner T, Robinson C, et al. Overlay characterization and matching of immersion photocusters [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7640: 76400W.
- [56] den Boef A J. Optical wafer metrology sensors for process-robust CD and overlay control in semiconductor device manufacturing[J]. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2016, 4(2): 023001.
- [57] Gao H Y, Chung W J, Aung N, et al. Comparison study of diffraction based overlay and image based overlay measurements on programmed overlay errors [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9778: 97782Q.
- [58] Li J, Liu Z, Rabello S, et al. Simultaneous overlay and CD measurement for double patterning: scatterometry and RCWA approach[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7272: 727207.
- [59] Bhattacharyya K, Wright N, van der Schaar M, et al. New approaches for scatterometry-based metrology for critical distance and overlay measurement and process control[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2011, 10(1): 013013.
- [60] Ebert M, Vanoppen P, Jak M, et al. New approaches in diffraction based optical metrology[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9778: 97782N.
- [61] Li J, Hwu J J, Liu Y D, et al. Mueller matrix measurement of asymmetric gratings[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2010, 9(4): 041305.
- [62] Novikova T, Bulkin P, Popov V, et al. Mueller polarimetry as a tool for detecting asymmetry in diffraction grating profiles[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 2011, 29(5): 051804.
- [63] Chen X G, Zhang C W, Liu S Y, et al. Mueller matrix ellipsometric detection of profile asymmetry in nanoimprinted grating structures[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(19): 194305.
- [64] Chen X G, Gu H G, Jiang H, et al. Robust overlay metrology with differential Mueller matrix calculus [J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 8491-8510.
- [65] Servin M, Rodriguez-Vera R, Moore A J. A robust cellular processor for phase unwrapping[J]. *Journal of Modern Optics*, 1994, 41(1): 119-127.
- [66] Baldi A, Bertolino F, Ginesu F. On the performance of some unwrapping algorithms[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2002, 37(4): 313-330.
- [67] 马龙. 白光扫描干涉测量方法与系统的研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.

- Ma L. Study on white light scanning interferometry: measurement method and system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [68] Thomas C E, Jr, Bahm T M, Baylor L R, et al. Direct to digital holography for semiconductor wafer defect detection and review[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4692: 180-194.
- [69] Neauport J, Cormont P, Legros P, et al. Imaging subsurface damage of grinded fused silica optics by confocal fluorescence microscopy[J]. Optics Express, 2009, 17(5): 3543-3554.
- [70] 魏通达. 共聚焦激光扫描光学显微成像关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
- Wei T D. Key technologies research in confocal laser scanning microscopy[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [71] Tiziani H J, Wegner M, Steudle D. Confocal principle for macro- and microscopic surface and defect analysis[J]. Optical Engineering, 2000, 39(1): 32-39.
- [72] 向弋川, 林有希, 任志英. 光学元件表面缺陷检测方法研究现状[J]. 光学仪器, 2018, 40(1): 78-87.
- Xiang Y C, Lin Y X, Ren Z Y. Study on surface defect detection method of optical element[J]. Optical Instruments, 2018, 40(1): 78-87.
- [73] Liu H X, Zhou W, Kuang Q W, et al. Defect detection of IC wafer based on spectral subtraction[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2010, 23(1): 141-147.
- [74] Nolot E, Arrazat B, Favier S, et al. Laser scattering: a fast, sensitive, in-line technique for advanced process development and monitoring[C]. AIP Conference Proceedings, 2007, 931: 116-120.
- [75] Huang C Y, Chu R, Neskovic G. Rough film wafer sensitivity improvement using light scattering inspection system[C]//ASMC 2013 SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, May 14-16, 2013, Saratoga Springs, NY, USA. New York: IEEE Press, 2013: 191-193.
- [76] Holsteyns F, Cheung L, van den Heuvel D, et al. The use of unpatterned wafer inspection for immersion lithography defectivity studies[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6152: 61521U.
- [77] 艾立夫. 基于散射光暗场显微的基片表面颗粒检测方法研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2019.
- Ai L F. The detection method of substrate surface particles based on dark field microscopy of scattered light[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [78] van der Walle P, Hannemann S, van Eijk D, et al. Implementation of background scattering variance reduction on the rapid nano particle scanner[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9050: 905033.
- [79] van der Walle P, Kumar P, Ityaksov D, et al. Increased particle inspection sensitivity by reduction of background scatter variance[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8681: 868116.
- [80] Liu S, Zhao G H. Methods and apparatus for polarized wafer inspection: US9874526[P]. 2018-01-23.
- [81] Stokowski S, Vaez-Iravani M. Wafer inspection technology challenges for ULSI manufacturing[C]. AIP Conference Proceedings, 1998, 449: 405-415.
- [82] Roy S, Bouwens M, Wei L, et al. High speed low power optical detection of sub-wavelength scatterer [J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(12): 123111.
- [83] Pinto Becky, 加藤昌彦, KLA-Tencor. 应对 45 nm 缺陷挑战[J]. 集成电路应用, 2008(Z1): 43-47.
- Pinto B, Kato M, KLA-Tencor. Addressing the challenge of 45 nm defects[J]. Application of IC, 2008(Z1): 43-47.
- [84] Zhou R J, Edwards C, Arbabi A, et al. Detecting 20 nm wide defects in large area nanopatterns using optical interferometric microscopy[J]. Nano Letters, 2013, 13(8): 3716-3721.
- [85] Nativ A, Feldman H, Shaked N T. Wafer defect detection by a polarization-insensitive external differential interference contrast module[J]. Applied Optics, 2018, 57(13): 3534-3538.
- [86] Barnes B M, Sohn M Y, Goasmat F, et al. Three-dimensional deep sub-wavelength defect detection using $\lambda = 193$ nm optical microscopy[J]. Optics Express, 2013, 21(22): 26219-26226.
- [87] Attota R, Kramar J. Optimizing noise for defect analysis with through-focus scanning optical microscopy [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9778: 977811.
- [88] Zhu J L, Liu Y N, Yu X, et al. Sensing sub-10 nm wide perturbations in background nanopatterns using optical pseudoelectrodynamics microscopy (OPEM) [J]. Nano Letters, 2019, 19(8): 5347-5355.
- [89] Buengener R. Defect inspection strategies for 14 nm semiconductor technology[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8466: 846607.

- [90] Lange S R. Multi-spectral defect inspection for 3D wafers: US8912495[P]. 2014-12-16.
- [91] Tolle I, Daino M. Advanced defect inspection techniques for NFET and PFET defectivity at 7 nm gate poly removal process[C]//2018 29th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC), April 30-May 3, 2018, Saratoga Springs, NY, USA. New York: IEEE Press, 2018: 17823149.
- [92] Yang J C, Penigalapati D, Chao T F, et al. Challenges in chemical mechanical planarization defects of 7 nm device and its improvement opportunities[C]//2017 China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC), March 12-13, 2017, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2017: 16866341.
- [93] Barnes B M, Zhou H, Henn M A, et al. Optimizing image-based patterned defect inspection through FDTD simulations at multiple ultraviolet wavelengths [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10330: 103300W.
- [94] Fujii T, Konno Y, Okada N, et al. Development of optical simulation tool for defect inspection[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7272: 72721A.
- [95] Silver R M, Barnes B M, Sohn Y, et al. The limits and extensibility of optical patterned defect inspection [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7638: 76380J.
- [96] Barnes B M, Quinthanilha R, Sohn Y J, et al. Optical illumination optimization for patterned defect inspection[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7971: 79710D.
- [97] Holfeld C, Katzwinkel F, Seifert U, et al. Wafer inspection as alternative approach to mask defect qualification[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6730: 673023.
- [98] Tsuji Y, Kikuri N, Murakami S, et al. Development of next-generation mask inspection method by using the feature of mask image captured with 199-nm inspection optics[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6349: 63493M.
- [99] Kikuri N, Murakami S, Tsuchiya H, et al. Development of advanced reticle inspection apparatus for hp 65 nm node device and beyond[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6283: 62830Y.
- [100] Hirano R, Ogawa R, Suzuki H, et al. Development of advanced mask inspection optics with transmitted and reflected light image acquisition[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6518: 65181U.
- [101] Tojo T, Hirano R, Tsuchiya H, et al. Advanced mask inspection optical system (AMOS) using 198.5 nm wavelength for 65-nm (hp) node and beyond: system development and initial state D/D inspection performance [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5567: 1011-1023.
- [102] Hirano R, Hirono M, Ogawa R, et al. Study of advanced mask inspection optics with super-resolution method for next-generation mask fabrication[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7272: 72722A.
- [103] Dayal A, Sier J P, Sousa W, et al. Optimized inspection of advanced reticles on the TeraScan reticle inspection tool[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5992: 599245.
- [104] Mu B, Dayal A, Goonesekera A, et al. TeraScanXR: a high sensitivity and throughput photomask inspection system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7379: 73792B.
- [105] Broadbent W H, Wiley J N, Saidin Z K, et al. Results from a new die-to-database reticle inspection platform[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5446: 265-278.
- [106] Yu C F, Lin M C, Lai M T, et al. Inspection of advanced computational lithography logic reticles using a 193-nm inspection system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7823: 78232F.
- [107] Mamezaki D, Harada T, Nagata Y, et al. Imaging performance improvement of coherent extreme-ultraviolet scatterometry microscope with high-harmonic-generation extreme-ultraviolet source[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2017, 56(6S1): 06GB01.
- [108] Nagata Y, Harada T, Watanabe T, et al. At wavelength coherent scatterometry microscope using high-order harmonics for EUV mask inspection[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2019, 1(3): 032001.
- [109] Helfenstein P, Mohacsi I, Rajendran R, et al. Scanning coherent diffractive imaging methods for actinic extreme ultraviolet mask metrology[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2016, 15(3): 034006.
- [110] Mochi I, Helfenstein P, Mohacsi 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.
- [111] Miyai H, Kohyama T, Suzuki T, et al. Actinic patterned mask defect inspection for EUV lithography [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11148: 111480W.
- [112] Bunday B D, Orji N G, Allgair J A. High volume manufacturing metrology needs at and beyond the 5 nm node[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11611: 116110F.

- [113] Bunday B D, Bello A F, Solecky E, et al. 7/5 nm logic manufacturing capabilities and requirements of metrology[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10585: 105850I.
- [114] Orji N G, Badaroglu M, Barnes B M, et al. Metrology for the next generation of semiconductor devices[J]. *Nature Electronics*, 2018, 1(10): 532-547.
- [115] Song B K, Gu H G, Fang M S, et al. Layer-dependent dielectric function of wafer-scale 2D MoS₂ [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(2): 1801250.
- [116] Gu H G, Song B K, Fang M S, et al. Layer-dependent dielectric and optical properties of centimeter-scale 2D WSe₂: evolution from a single layer to few layers[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(47): 22762-22771.
- [117] Vaid A, Yan B B, Jiang Y T, et al. A holistic metrology approach: hybrid metrology utilizing scatterometry, critical dimension-atomic force microscope and critical dimension-scanning electron microscope[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2011, 10(4): 043016.
- [118] Vaid A, Elia A, Kelling M, et al. Hybrid metrology solution for 1X node technology[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8324: 832404.
- [119] Orji N G, Dixon R G, Vladár A E, et al. Contour metrology using critical dimension atomic force microscopy[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8324: 83240U.
- [120] Celano U, Favia P, Drijbooms C, et al. Individual device analysis using hybrid TEM-scalpel SSRM metrology[C]//*Frontiers of Characterization and Metrology for Nanoelectronics (FCMN)*, March 21-23, 2017, Monterey, CA, USA. [S.l.: s.n.], 2017, 122-126.
- [121] Zhang N F, Silver R M, Zhou H, et al. Improving optical measurement uncertainty with combined multitool metrology using a Bayesian approach[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(25): 6196-6206.
- [122] Zhang N F, Barnes B M, Zhou H, et al. Combining model-based measurement results of critical dimensions from multiple tools[J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(6): 065002.
- [123] Silver R, Germer T, Attota R, et al. Fundamental limits of optical critical dimension metrology: a simulation study[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6518: 65180U.
- [124] Pauw B R. Everything SAXS: small-angle scattering pattern collection and correction[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2013, 25(38): 383201.
- [125] 朱育平. 小角 X 射线散射——理论、测试、计算及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- Zhu Y P. Small angle X-ray scattering: theory, measurement, calculation and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [126] Bech M, Bunk O, David C, et al. Hard X-ray phase-contrast imaging with the compact light source based on inverse Compton X-rays[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2009, 16(1): 43-47.
- [127] Graves W S, Brown W, Kaertner F X, et al. MIT inverse Compton source concept[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2009, 608: S103-S105.
- [128] Powers N D, Ghebregziabher I, Golovin G, et al. Quasi-monoenergetic and tunable X-rays from a laser-driven Compton light source[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(1): 28-31.
- [129] Sakdinawat A, Attwood D. Nanoscale X-ray imaging [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(12): 840-848.
- [130] 张福才, 许文慧, 何振飞, 等. 相干衍射成像研究进展: 叠层扫描相干衍射成像和相干调制成像[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(6): 0603011.
- Zhang F C, Xu W H, He Z F, et al. Progress in coherent diffraction imaging: ptychography and coherent modulation imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(6): 0603011.
- [131] Shapiro D A, Yu Y S, Tyliczszak T, et al. Chemical composition mapping with nanometre resolution by soft X-ray microscopy[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(10): 765-769.
- [132] Miao J, Ishikawa T, Robinson I K, et al. Beyond crystallography: diffractive imaging using coherent X-ray light sources[J]. *Science*, 2015, 348(6234): 530-535.
- [133] Shi X W, Burdet N, Chen B, et al. X-ray ptychography on low-dimensional hard-condensed matter materials[J]. *Applied Physics Reviews*, 2019, 6(1): 011306.
- [134] Deng J J, Hong Y P, Chen S, et al. Nanoscale X-ray imaging of circuit features without wafer etching [J]. *Physical Review B*, 2017, 95(10): 104111.
- [135] Holler M, Guizar-Sicairos M, Tsai E H, et al. High-resolution non-destructive three-dimensional imaging of integrated circuits[J]. *Nature*, 2017, 543(7645): 402-406.
- [136] Holler M, Odstreil M, Guizar-Sicairos M, et al. Three-dimensional imaging of integrated circuits with

- macro-to nanoscale zoom[J]. *Nature Electronics*, 2019, 2(10): 464-470.
- [137] Benk M P, Goldberg K A, Wojdyla A, et al. Demonstration of 22-nm half pitch resolution on the SHARP EUV microscope[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2015, 33(6): 06FE01.
- [138] Ansuinelli P, Coene W M J, Urbach H P. Improvedptychographic inspection of EUV reticles via inclusion of prior information[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(20): 5937-5947.
- [139] Montgomery P C, Leong-Hoi A, Anstotz F, et al. From superresolution to nanodetection: overview of far field optical nanoscopy techniques for nanostructures [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 682: 012010.
- [140] Hell S W, Sahl S J, Bates M, et al. The 2015 super-resolution microscopy roadmap[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, 48(44): 443001.
- [141] Rogers E T F, Lindberg J, Roy T, et al. A super-oscillatory lens optical microscope for subwavelength imaging[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(5): 432-435.
- [142] Khorasaninejad M, Chen W T, Devlin R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging[J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1190-1194.
- [143] Sze V, Chen Y H, Yang T J, et al. Efficient processing of deep neural networks: a tutorial and survey[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2017, 105(12): 2295-2329.
- [144] Rana N, Zhang Y L, Kagalwala T, et al. Leveraging advanced data analytics, machine learning, and metrology models to enable critical dimension metrology solutions for advanced integrated circuit nodes[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2014, 13(4): 041415.
- [145] Kim I, Bae Y, Gwak S, et al. Machine learning aided profile measurement in high-aspect-ratio nanostructures [J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11783: 117830K.
- [146] Wong F J, Hao Y D, Ming W M, et al. Methods to overcome limited labeled data sets in machine learning-based optical critical dimension metrology [J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11611: 116111P.
- [147] Purandare S, Zhu J L, Zhou R J, et al. Optical inspection of nanoscale structures using a novel machine learning based synthetic image generation algorithm[J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 17743-17762.
- [148] Henn M A, Zhou H, Barnes B M. Data-driven approaches to optical patterned defect detection[J]. *OSA Continuum*, 2019, 2(9): 2683-2693.
- [149] Imoto K, Nakai T, Ike T, et al. A CNN-based transfer learning method for defect classification in semiconductor manufacturing[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2018: 455-459.