

晶圆金属表面纳米颗粒暗场检测系统设计

邓泉^{1,2}, 赵泽宇^{1,2}, 林鹤^{1,3}, 刘玲^{1,2}, 李夏楚秦¹, 杨根森^{1,2}, 罗先刚^{1,2*}¹中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209;²中国科学院大学光电学院, 北京 100049;³电子科技大学自动化工程学院, 四川 成都 610054

摘要 缺陷检测是基于金属膜层激发表面等离子体进行超衍射加工前的重要工艺流程,但目前先进空白晶圆缺陷检测设备光源多位于深紫外波段,恰好在 KrF 等深紫外光刻胶的感光范围内,检测带有该光刻胶的晶圆表面时易导致光刻胶感光而改性失效。针对此问题,笔者提出并设计了一种基于可见光波段的激光偏振暗场检测装置。该装置利用晶圆表面顶层银膜的偏振转换特性,通过调控入射光的偏振态与入射角,使微粗糙银膜表面的弱散射光偏振态与膜层表面颗粒的散射光偏振态产生差异,然后利用偏振器件对来自银膜表面的散射光进行部分滤除,有效提高了颗粒信号的信噪比。实验结果表明:所设计的装置在不影响光刻胶的同时还可以减少金属膜层表面散射所带来的缺陷误检。在对百纳米级颗粒进行检测时,由于使用了激光照明及高灵敏度的 sCMOS 作为探测器件,本装置单次曝光时间仅为 150 μs ,是奥林巴斯公司基于白光的 DSX1000 暗场显微镜的 4% 左右。通过抑制噪声,笔者采用该装置实测了均方根(RMS)粗糙度为 3.4 nm 的银膜表面上直径为 61 nm 的聚苯乙烯乳胶颗粒,结果显示,该装置在探测极限和探测效率上较 DSX1000 均有较大提升。

关键词 测量; 光学检测; 散射测量; 表面粗糙度; 偏振调控; 纳米颗粒; 信噪比

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230444

1 引言

表面等离子体(SP)是指金属表面自由电子的一种相干集体振荡^[1-2],其可在亚波长区域明显增强电磁场强度,并且其等效波长远小于真空波长。与表面等离子体相关的技术,如超透镜^[3-7]、反射腔共振镜^[8-10]、双曲超材料^[11-12]等技术,在超衍射成像及微纳加工等领域极具发展前景。以简单超透镜模型为例,晶圆表面有底层光刻胶和顶层银膜,通过银膜激发表面等离子体激元干涉可以得到超衍射图形^[8],如果银膜表面存在较多的颗粒等缺陷,将极大地影响成像效果,因此需要对其进行表面颗粒检测。

无图案晶圆表面缺陷检测的光学技术主要有干涉法^[13-15]、衍射法^[16-18]及散射法^[19-21]三类,其中散射法中的暗场散射技术具有灵敏度和效率高的特点,因此被广泛应用于实际生产中^[21]。散射法通过检测缺陷的散射光来判定表面情况,它通过所建立的标准直径聚苯乙烯乳胶(PSL)颗粒散射光强的“相关曲线”将采集的散射光强度转换为缺陷的等效尺寸^[22-23]。由于颗粒散射能的大小与波长呈负相关,因此为了检测到更小的颗粒,商用化设备采用的检测光源逐渐发展到了深紫外,

例如美国 KLA 公司研制的 Surfscan 系列中的 Surfscan SP7^{XP} 采用深紫外照明结合多通道探测能满足 5 nm 节点工艺的缺陷检测需求^[24]。国内在这方面的起步较晚,目前最先进的是深圳中科飞测科技股份有限公司(以下简称“中科飞测”)生产的 SPRUCE-800,但其即使采用 266 nm 光源也只能检测到直径为 32 nm 的颗粒,并且在该检测指标下已经无法保证捕获率。

目前,实验室主要采用暗场缺陷检测设备对带有光刻胶和顶层银膜的超透镜模型进行表面颗粒等缺陷的检测,如果选用基于白光的暗场散射显微镜,如奥林巴斯的 DSX1000,不仅难以获得表面缺陷分布全貌,而且颗粒检测能力只能达到 100 nm,此外曝光时间还比较长,自动化程度低,采集效率也不高;如果选用深紫外波段的检测设备,如中科飞测的 SPRUCE-800,虽然可以解决暗场散射显微镜的不足,但一些紫外光刻胶(KrF、i 线等)的感光范围恰好覆盖了入射光波段,易导致光刻胶感光而失效,无法参与后续曝光等工艺。暗场缺陷检测设备在使用过程中往往需要反复摸索其工艺参数以避免光刻胶感光,而且这些工艺参数只对一种模型有效,同时此类设备也极其昂贵。总的来说,当前实验室尚没有一种具有针对性和简易性的

收稿日期: 2023-01-09; 修回日期: 2023-02-08; 录用日期: 2023-03-15; 网络首发日期: 2023-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(62005288)、国家重点研发计划(2021YFA1401000)

通信作者: *lxg@ioe.ac.cn

低成本专用设备能够弥补以上不足。

笔者设计了一种基于可见波段的激光偏振暗场检测实验验证装置,同时采用灵敏度更高的科研级相机(sCMOS)探测颗粒的散射信号。该装置利用晶圆表面顶层银膜的偏振转换特性,通过调控入射光的偏振态与入射角,使微粗糙银膜表面的弱散射光偏振态与膜层表面颗粒的散射光偏振态产生差异,然后利用偏振器件对来自银膜表面的散射光进行部分滤除,从而降低其进入 sCMOS 的比例,提高了颗粒的信噪比。实验结果表明,相较于基于白光的暗场散射显微镜,在百纳米级颗粒检测时,本装置单次曝光时间仅为 150 μs ,并且实测出了均方根(RMS)粗糙度为 3.4 nm(评估面积均为 $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$)的银膜表面上 61 nm 的 PSL 颗粒,在探测极限和工作效率方面都取得了更好的效果;相较于深紫外检测设备,本装置不会使底层光刻胶改性失效。

2 基本原理

暗场物镜收集的光场分为两部分,一是作为信号的颗粒散射场,二是作为噪声的膜层散射场,这是由膜层表面不是理想镜面导致的。在颗粒较大时,信号强度远大于噪声,但随着颗粒减小,信号强度逐渐衰减到噪声水平,甚至更小,检测难度增大。下面对两者进行分析。

2.1 银膜表面的散射

采用微扰理论处理入射光在银膜表面的散射分布。在银膜粗糙度较小的情况下,将膜层表面看作是理想平面与一个小扰动的叠加,由于 $\sigma \ll \lambda$ (σ 为均方根粗糙度, λ 为波长),可以只考虑一级近似散射场,由此得到微分散射系数^[25-26]为

$$\frac{1}{I_0} \frac{dI}{d\Omega} = \frac{16\pi^2}{\lambda^4} \cos \theta_0 \cos \theta_s^2 Q_{p,p}(\theta_0, \theta_s, \varphi_s, N) S(K_s - K_0), \quad (1)$$

式中: θ_0 为入射角,如图 1(a)所示; θ_s 为散射角; φ_s 为偏转角; $N = (n - ik)$; $dI/d\Omega$ 为单位立体角的光能量; I_0 为入射光能量; K_s, K_0 为散射光和入射光波矢的大小; $Q_{p,p}(\theta_0, \theta_s, \varphi_s, N)$ 代表与入射角、散射角与偏转角相关的几何因子,其中 p_i 和 p_s 分别为入射光、散射光的偏振状态; $S(K_s - K_0)$ 为微粗糙表面的功率谱密度函数,表示表面的微观不规则性。二维微粗糙表面的功率谱密度函数可表示为

$$S(f_x, f_y) = S\left(\frac{\sin \theta_s \cos \varphi_s - \sin \theta_0}{\lambda}, \frac{\sin \theta_s \cos \varphi_s}{\lambda}\right). \quad (2)$$

2.2 颗粒在银膜表面的散射

颗粒与银膜之间存在复杂的相互作用,因此颗粒在银膜上的散射不同于其在自由空间的散射,需要进行更全面的考虑。本文采用双交互模型^[27-28]分析颗粒

在银膜上的散射场,原理如图 1(b)所示,假设半径为 d 的 PSL 颗粒位于银膜表面上方,其入射场由两部分组成,一是直接照射在颗粒上的入射场,二是经银膜表面反射后二次照射到颗粒的入射场。假设直接入射场为 E_0 ,则入射总场可表示为

$$E_i = E_0 + \alpha \cdot J(\theta_i) \cdot E_0, \quad (3)$$

式中: α 表示两入射光的相位差, $\alpha = \exp(2d \cos \theta_i \cdot 2\pi i/\lambda)$,其中 θ_i 为入射角, d 为 PSL 颗粒的半径; $J(\theta_i) = \begin{bmatrix} r_s(\theta_i) & 0 \\ 0 & r_p(\theta_i) \end{bmatrix}$ 表示镜面反射的琼斯矩阵, $r_s(\theta_i)$ 、 $r_p(\theta_i)$ 分别表示 θ_i 角下 s 光和 p 光在银膜表面的反射系数。同理,对散射场进行分析。除了颗粒直接散射场外,还会有经银膜表面反射的散射场,总散射场 E_s 可表示为

$$E_s = E_s(\theta_s, \varphi_s) + \beta \cdot J(\theta_s) \cdot E_s(\pi - \theta_s, \varphi_s), \quad (4)$$

式中: $E_s(\theta_s, \varphi_s)$ 表示在 (θ_s, φ_s) 方向上的散射电场; $\beta = \exp(2d \cos \theta_s \cdot 2\pi i/\lambda)$ 表示两散射光的相位差。结合瑞利散射和双向反射分布函数(BRDF)^[29]可得到 PSL 颗粒在银膜表面的散射分布为

$$\text{BRDF}_{\text{PSL}} = \frac{16\pi^4}{\lambda^4} \left(\frac{n_{\text{PSL}}^2 - 1}{n_{\text{PSL}}^2 + 2} \right)^2 \frac{d^6}{\cos \theta_i \cos \theta_s} \frac{n}{A} |J_{\text{PSL}} \cdot e|^2, \quad (5)$$

式中: n_{PSL} 为颗粒的折射率; n 表示面积为 A 的表面上颗粒的数量; e 为入射光偏振态的单位琼斯矢量;

$J_{\text{PSL}} = \begin{bmatrix} j_{ss} & j_{ps} \\ j_{sp} & j_{pp} \end{bmatrix}$ 表示颗粒的散射琼斯矩阵,各分量的表

达式为

$$\begin{cases} j_{ss} = [1 + \beta r_s(\theta_s)] [1 + \alpha r_s(\theta_i)] \cos \varphi_s \\ j_{ps} = -[1 + \beta r_s(\theta_s)] [1 - \alpha r_p(\theta_i)] \cos \theta_i \sin \varphi_s \\ j_{sp} = -[1 - \beta r_p(\theta_s)] [1 + \alpha r_s(\theta_i)] \cos \theta_s \sin \varphi_s \\ j_{pp} = -[1 + \beta r_p(\theta_s)] [1 + \alpha r_p(\theta_i)] \sin \theta_i \sin \varphi_s \\ -[1 - \beta r_p(\theta_s)] [1 - \alpha r_p(\theta_i)] \cos \theta_i \cos \theta_s \cos \varphi_s \end{cases} \quad (6)$$

2.3 偏振转换原理

提高信噪比的原理如图 1(c)所示。在偏振光入射下,颗粒散射光一般为椭圆偏振光,而银膜表面并非理想平面,因此会在空间中带来一定的薄膜散射,这就是噪声的来源。偏振光入射银膜表面时,由于银的折射率存在虚部,给 s、p 分量带来一定的相位差,因此银膜表面空间散射光的偏振特性与颗粒散射光的偏振特性会出现差异^[30],该差异同时受入射光偏振态和角度的影响。s、p 分量的反射系数分别为

$$r_s = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} = |r_s| \exp(i\varphi r_s), \quad (7)$$

$$r_p = -\frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} = |r_p| \exp(i\varphi r_p). \quad (8)$$

相位差变化为 $\Delta\varphi = \varphi r_s - \varphi r_p$,空间散射光的偏

振特性由此发生变化。本系统选用长工作距物镜,通过调节入射光的偏振态以及改变入射角,使物镜视场内信号光的偏振态与噪声光的偏振态出现最大差异,然后调节暗场接收光路的偏振片以尽可能使噪声被滤除同时使颗粒散射光尽可能通过,从而提高信噪比。须注意到,视场内微粗糙银膜上散射光的偏振态并非

完全一致,而是在一定范围变化,因此只能选择最优偏振态作最大滤除,但这同时也会对颗粒信号有一定衰减作用,于是选用了更灵敏的 sCMOS 作为探测相机。最佳入射偏振态以及偏振片的调节角度可利用反射光的偏振态^[30-31]进行求解,或者利用正交试验法以颗粒信噪比作为评判标准进行确定。

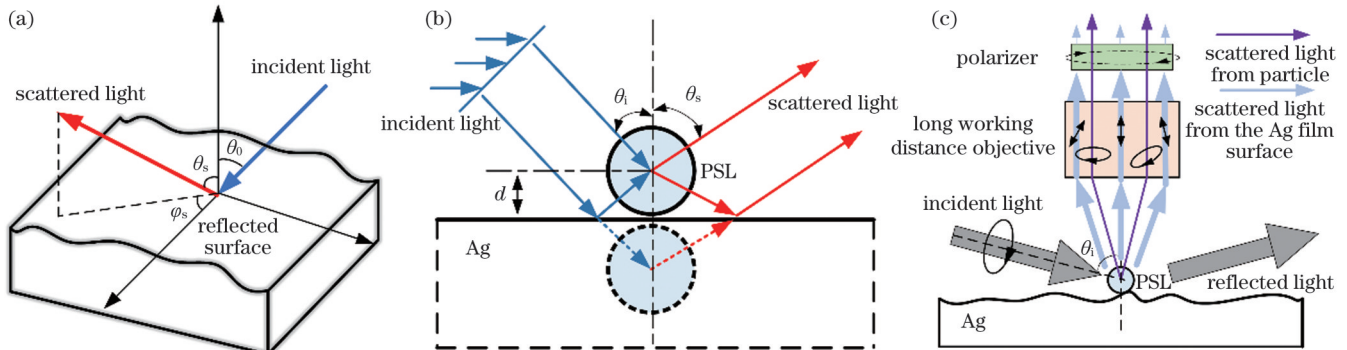


图 1 理论模型及原理说明。(a)银膜表面的散射;(b)双交互模型原理;(c)偏振调控原理

Fig. 1 Theoretical model and principle description. (a) Scattering of silver film surface; (b) double interaction model principle; (c) principle of polarization modulation

3 仿真结果

本文采用时域有限差分方法(FDTD方法),结合仿真软件FDTD Solutions,建立了纳米颗粒及表面粗糙度均不同的散射模型,对暗场检测微粗糙银膜表面的纳米颗粒散射进行了仿真分析。

3.1 银膜透射率仿真

激发表面等离子体可以得到超衍射图形,但表面颗粒将影响图形质量,为保证得到高质量图形,需要对表面进行颗粒检测,但目前实验室所使用的 SPRUCE-800 的 266 nm 检测光源在检测过程中易透射至光刻胶层,导致光刻胶改性失效。以 266 nm 作为

入射仿真波长,银膜厚度的变化范围为 20~60 nm,入射角在 0°~80°之间,通过软件建立的仿真模型如图 2(a)所示,在银膜的底部有能量监视器(以计算透射率)。仿真结果如图 2(b)所示。266 nm 检测光源经过银膜后仍有较大透射率,膜厚越小,透射率越大,在银膜厚度为 30 nm 时,透射率也普遍高于 0.15,而实际膜厚往往小于 30 nm,这就使得感光范围包含 266 nm 的紫外光刻胶在该检测波段下易改性失效。自制紫外光刻胶 K4 在 SPRUCE-800 下的检测效果如图 2(c)所示,可以在表面发现 K4 发生了明显的改性现象,无法进行后续的曝光等工艺,因此需要研发低成本的基于可见光的检测设备。

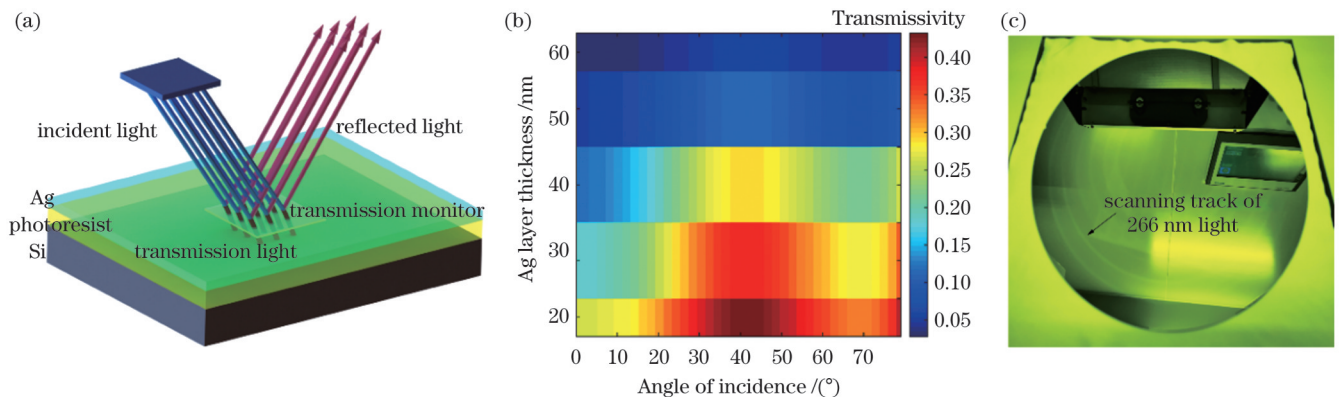


图 2 透射率仿真模型及结果。(a)仿真模型;(b)透射率仿真结果;(c)经 266 nm 光检测后的 K4 光刻胶表面

Fig. 2 Transmission simulation model and simulation result. (a) Simulation model; (b) transmittance simulation result; (c) K4 photoresist surface detected by 266 nm light

3.2 颗粒在明暗场检测技术下的仿真

采用可见光(473 nm)作为测试光源,利用构建 S 矩阵的方法仿真得到了银膜表面半径为 100 nm 的

PSL 颗粒在明暗场两种检测方法下的检测结果。入射光通过数值孔径为 0.82 的显微物镜对表面进行照明,暗场收集的数值孔径范围为 0.82~0.92。明场检测仿

真结果如图 3(a) 所示,从图中可以看出在 365 nm 照明下明场技术只能观测到反射场,颗粒信号淹没在背景信号中,无法检测出颗粒,检测能力受衍射极限制约。暗场检测仿真结果如图 3(b) 所示,从图中可以看出暗场过滤了反射场,能够检测出颗粒信号,说明暗场技术的检测能力优于明场,但由于暗场主要接收颗粒

的散射信号,因此其电场强度相对于明场弱了许多。由瑞利散射公式可知,颗粒散射信号受入射波长的影响,入射波长越短,颗粒的散射信号越强,但短波光源价格昂贵,系统调节不便,容易影响光刻胶,如果能够降低背景噪声,一样可以提高系统对颗粒的检测能力。

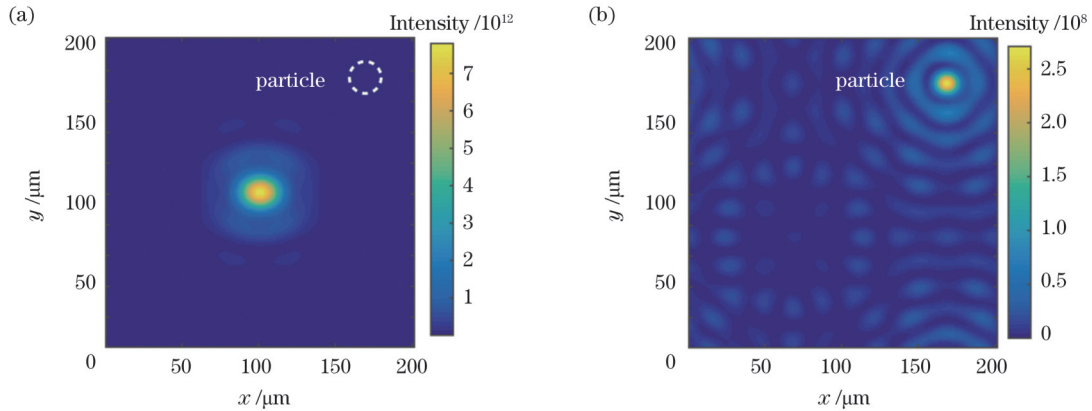


图 3 明暗场检测仿真图像。(a) 明场仿真结果; (b) 暗场仿真结果

Fig. 3 Simulation results of brightness and dark fields detection. (a) Brightness field simulation result; (b) dark field simulation result

3.3 颗粒在银膜表面的散射场仿真

利用全场散射源 (TFSF) 对银膜表面的纳米颗粒进行散射场仿真与远场投影,以 473 nm 的 p、s 偏振光入射,同时使用 PSL 与 SiO₂ 两种不同材料的纳米颗粒,颗粒半径扫描以 20 nm 为梯度,扫描范围为 20~80 nm。两种颗粒散射能的仿真结果如图 4 所示。散射能受到材料、直径、光源偏振态的影响,其中直径的影响尤为突出。随着颗粒尺寸增大,散射能急剧增大。对直径小于 120 nm 的颗粒进行检测时,颗粒在 p 光入射时的散射能比 s 光入射时的散射能更大,因此 p 光入射更有利于检测;而对直径大于 120 nm 的颗粒进行检测时,结果相反。本次实验最终使用的是椭圆偏振光,颗粒在椭圆偏振光入射下的散射能介于 p 光和 s 光之间。在 55° 入射条件下,不同直径颗粒的散射场分布如图 5(a)~(h) 所示,可以看出散射主要集中在前向散射

方向,不同直径颗粒在同种入射条件下的散射场分布不同,同一直径颗粒在不同偏振光照射下的散射场也不同,这为研发多探测器系统进行颗粒粒径检测提供了依据。

3.4 微粗糙银膜表面的散射仿真

采用平面波入射 + Bloch 边界条件分析了均方根 (RMS) 粗糙度为 8 nm 的微粗糙银膜表面的双向散射分布函数 (BSDF),观察微粗糙表面散射光的空间分布。入射波段为 473 nm,依次改变入射光角度为 0°、30°、60°,得到的由表面粗糙度引起的空间散射角度分布如图 6(a)~(c) 所示。在微粗糙表面作用下,空间散射光,即进入散射系统的背景噪声,主要集中在靠近反射光的方向;当探测器位于银膜表面正上方时,使用大角度入射有利于减轻表面颗粒散射信号的背景噪声。

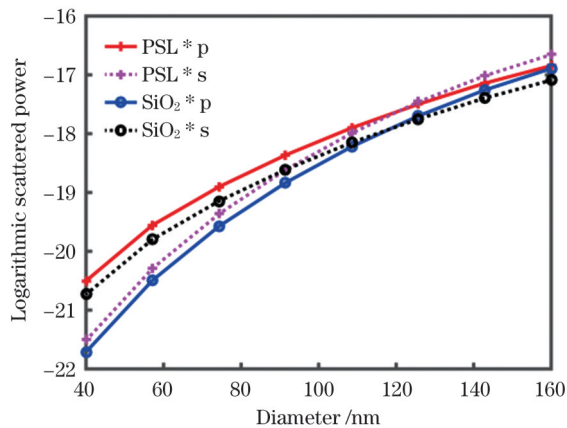


图 4 PSL 与 SiO₂ 颗粒在 p 光和 s 光入射下的散射能

Fig. 4 Scattering energy of PSL and SiO₂ particles under p and s light incidence

4 总体方案

检测系统总体方案如图 7 所示。采用 473 nm 激光光源作为测试光源,激光器发出的光经由空间耦合器耦合入光纤后由准直镜出射,出射光依次通过带有旋转台的偏振片、λ/4 波片调控偏振状态,最后经可调光阑入射至晶圆表面,其中 λ/4 快轴方位恒位于 45° 方向。整体入射调控光路经旋转台转接至三角形固定器上,通过下方 1 号双向运动工作台可调控光在晶圆表面的入射位置,旋转台用于控制入射角度。晶圆安装在多轴倾斜工作台与三轴工作台构成的复合调节台上,以便调平晶圆以及控制晶圆运动,采集不同区域图像完成后续图像拼接。反射光路与入射光路具有相同的机械结构,反射光经由光阑进入偏振分析仪,光阑的

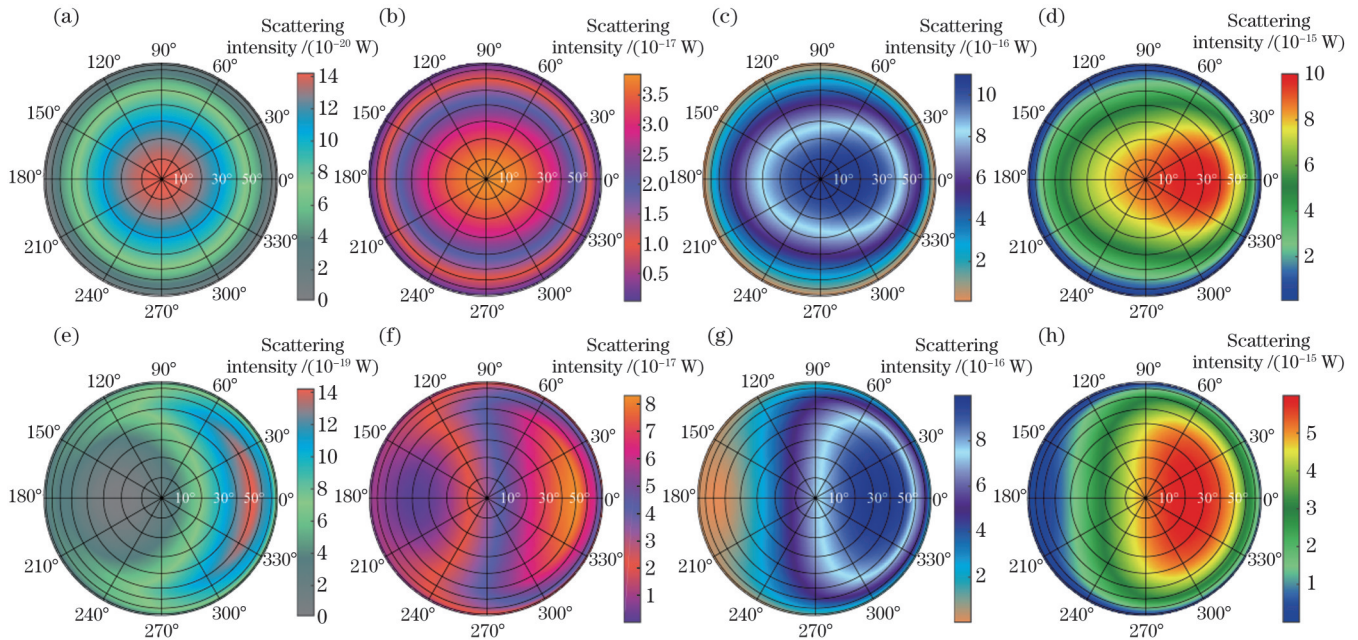


图 5 不同直径的 PSL 颗粒在 p 光和 s 光入射下的散射场分布。(a)~(d) 半径分别为 20、40、60、80 nm 的 PSL 颗粒在 p 光入射下的散射能空间分布；(e)~(h) 半径分别为 20、40、60、80 nm 的 PSL 颗粒在 s 光入射下的散射能空间分布
 Fig. 5 Scattering field spatial distribution of PSL particles with different diameters under p and s light incidence. (a)–(d) Spatial distribution of scattering energy of PSL particles with radius of 20, 40, 60, 80 nm under p light incidence; (e)–(h) spatial distribution of scattering energy of PSL particles with radius of 20, 40, 60, 80 nm under s light incidence

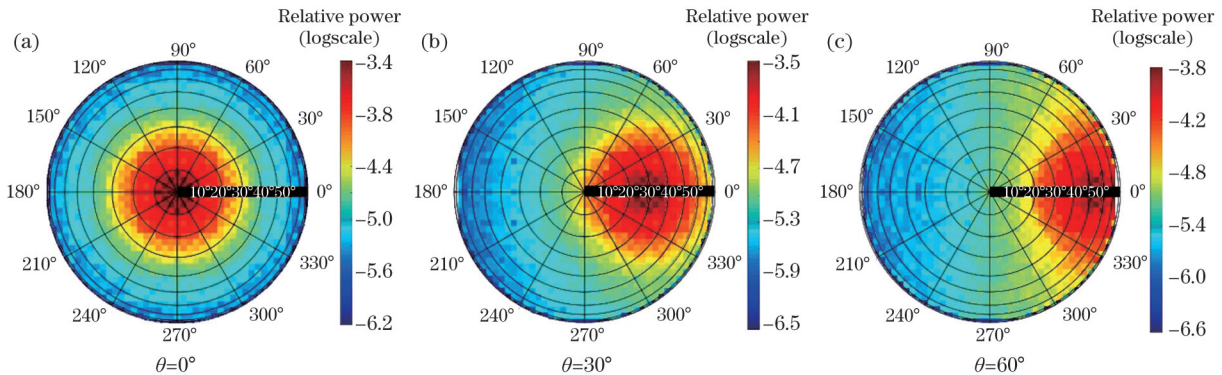


图 6 不同入射角下的仿真结果。(a) 0° 入射角下的仿真结果；(b) 30° 入射角下的仿真结果；(c) 60° 入射角下的仿真结果
 Fig. 6 Simulation results with different incident angles. (a) Simulation result at 0° incident angle; (b) simulation result at 30° incident angle; (c) simulation result at 60° incident angle

作用在于调节入射光斑大小及去除部分杂散光, 偏振分析仪用于分析反射光偏振态, 以便在实验中分析、确定入射状态^[28]。暗场接收光路主要用来接收信号, 银膜表面的噪声光与颗粒散射光先经无限远校正长工作距物镜出射, 物镜入瞳位置较高, 进入入瞳的噪声光偏振状态差异较小, 当噪声光与信号光有不同的偏振状态时, 旋转偏振片尽可能过滤掉噪声光, 降低光路中噪声光的占比(即提高信噪比), 最后经由管镜被灵敏度极高的 sCMOS 接收。各器件均含有相应调节与固定工装并配有遮光罩, 整体固定于二维运动平台与二维角度调节台构成的复合台上, 以调节物镜姿态及捕捉入射光斑位置。本次实验选择的入射角度为 55°, 以颗粒信噪比作为评判标准设计正交试验从而确定各偏振

片的角度。

5 实验结果

实际搭建的系统如图 8(a) 所示。采用直径分别为 100、50 nm 的商用化标准 PSL 小球作为检测目标。检测样片的基本加工工艺流程如图 8(b) 所示, 在硅片表面刻蚀标记, 将标记区域作为待检测区域, 随后进行匀胶、磁控溅射镀膜、反应离子束刻蚀(采用原子力显微镜检测表面 RMS)、颗粒溶液雾化等工艺。在本实验中通过控制反应离子束刻蚀的功率以及刻蚀时间加工出了不同表面粗糙度的银膜, 利用雾化器将经稀释、超声振荡后的颗粒溶液喷洒在银膜表面, 使 PSL 小球均匀分布在银膜表面的标记区域。同时, 在实验过程

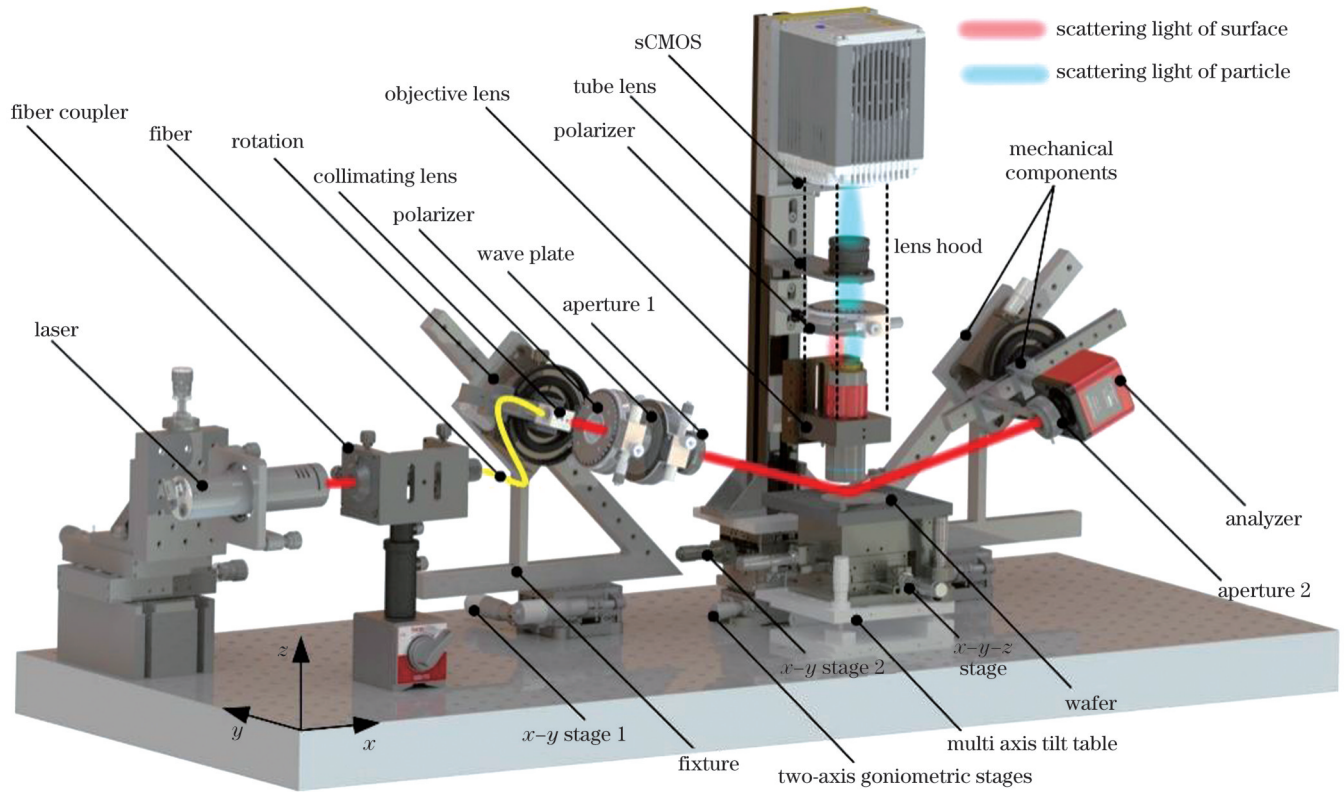


图 7 总体方案三维图

Fig. 7 Three-dimensional diagram of overall scheme

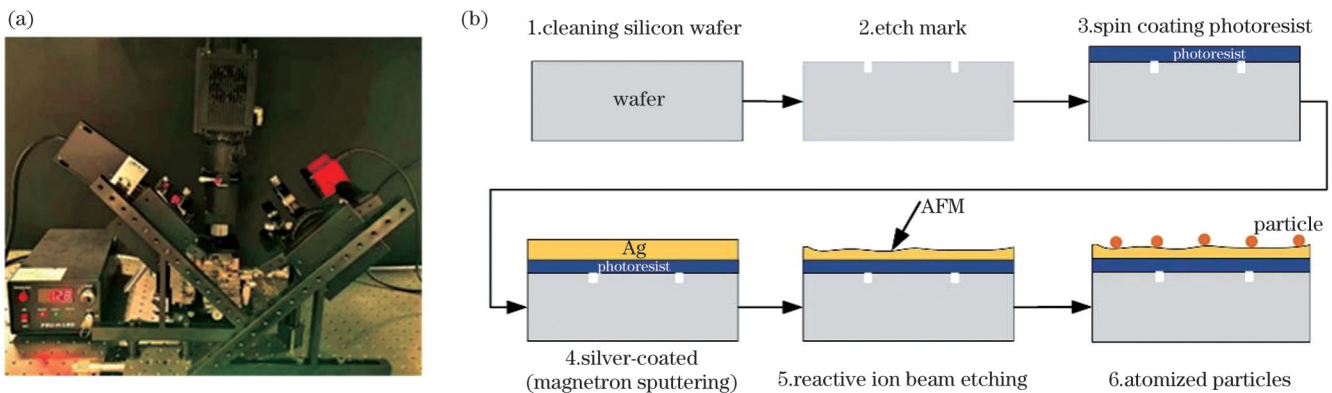


图 8 搭建的实验系统及工艺流程图。(a)实验系统；(b)样片的加工工艺流程图

Fig. 8 Experimental system and process flow diagrams. (a) Experimental system; (b) schematic of the process of fabricating samples

中,样品应尽可能保存在真空环境中,以减缓银膜的氧化。最后,采用扫描电镜验证自建系统对 50 nm 直径颗粒的检测结果,同时采用 DSX1000 和自建系统对 100 nm 直径颗粒进行检测并对检测结果进行对比。

5.1 不同粗糙度条件下的背景噪声对比

在相机曝光参数相同的情况下,对银膜表面 RMS 粗糙度分别为 2.4、4.9、8 nm 的三个雾化有 100 nm 直径颗粒的样片进行观察,结果如图 9(a)~(c)所示。随机选择图 9(a)~(c)的局部区域进行灰度变换,灰度变换后的结果如图 9(e)~(g)所示,提取其中无明显颗粒位置处 20 个像素区域的灰度值,提取结果如图 9(h)所示。观察图 9(h)可以发现随着膜层的粗糙度增大,背

景噪声不断变大。这是由于表面粗糙度越大,银膜散射就越强烈,进入暗场散射系统的杂散光就越多,当检测小颗粒时,由于小颗粒的散射信号很弱,很容易造成误判。图 9(f)和图 9(g)的差异不明显,这可能是当前刻蚀参数不当造成的。多次在原子力显微镜下检测 RMS 粗糙度为 8 nm 的膜层,结果中均出现了如 9(d)标注所示的凹坑,这可能是造成 RMS 粗糙度变大的主因。除凹坑区域外,其他区域的 RMS 粗糙度评定与 4.9 nm RMS 粗糙度银膜的相差不大。

5.2 偏振调控下的效果展示

取 RMS 粗糙度为 2.4 nm 的样片进行观察,旋转入射光路上的波片,改变入射光偏振态,得到的图像如

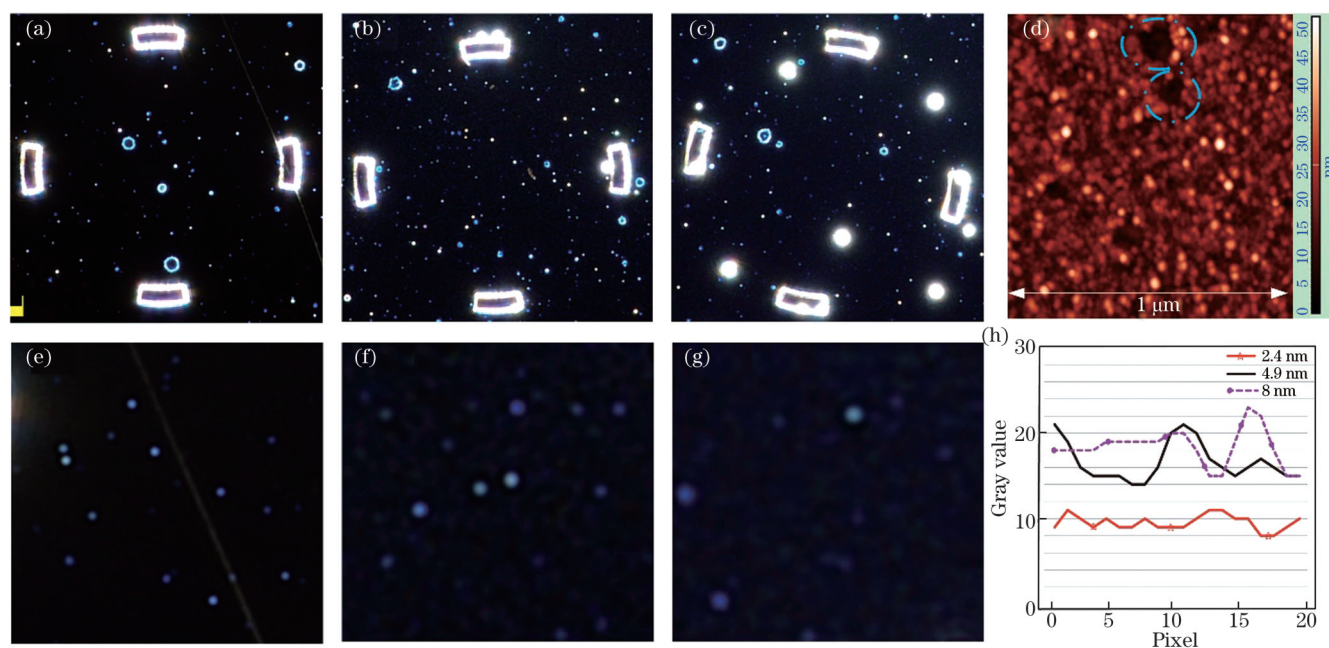


图 9 不同 RMS 粗糙度值膜层表面颗粒的实测结果。(a)~(c) RMS 粗糙度分别为 2.4、4.9、8 nm 的样片在暗场显微镜下的观察结果；(d) RMS 粗糙度为 8 nm 的样片在原子力显微镜下的扫描结果；(e)~(g) 图 (a)~(c) 的局部区域；(h) 不同 RMS 粗糙度下的背景噪声曲线

Fig. 9 Detection results of particles on film surface with different RMS roughness values. (a)–(c) Observation results of the samples with RMS roughness of 2.4, 4.9 and 8 nm under dark field microscope; (d) scanning results of the sample with RMS roughness of 8 nm under AFM; (e)–(g) local areas of Figs. 9 (a), (b) and (c); (h) background noise curves under different RMS roughness values

图 10(a)~(c) 所示。取图像上有明显颗粒的区域的灰度值来评定颗粒信号的变化情况, 评定结果如图 10(d) 所示, 可以发现颗粒信号的对比度有明显减弱的现象。

这表明随着入射偏振态的改变, 系统对颗粒检测的能力也会发生改变, 合理的偏振态调控可以提高系统对颗粒的检测能力。

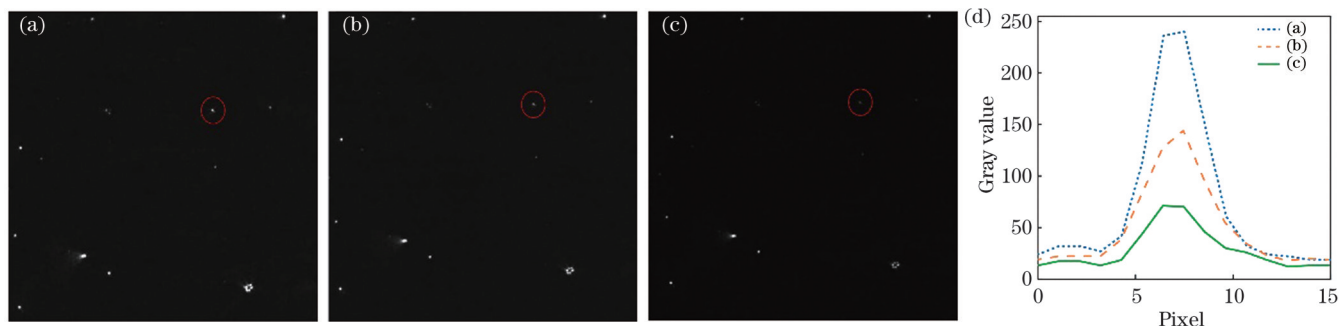


图 10 自建系统对 RMS 粗糙度为 2.4 nm 的样片的实测结果。(a)~(c) 三种不同偏振光入射下的检测结果；(d) 与三图对应的颗粒信号曲线

Fig. 10 Detection results of the experimental system on the sample with RMS roughness of 2.4 nm. (a)–(c) Detection results with three different polarized light incidence; (d) particle signal curve corresponding to Fig. 10 (a), (b) and (c)

固定入射偏振态, 旋转暗场接收光路上的偏振片 20° , 得到了图 11(a)、(b) 所示的图像; 在图像上无明显颗粒的随机区域内取 101 个像素点的灰度值评定背景噪声的变化情况, 评定结果如图 11(c) 所示。由图 11(c) 可知将偏振片旋转 20° 后, 灰度均值从 16.3 变为 17.4, 这表明膜层表面的散射光为偏振光, 因此可以利用暗场接收光路上的偏振片对该光进行一定程度的滤除, 以降低噪声。

以上实验表明利用偏振调控可以降低背景噪声从

而提高系统对颗粒的检测能力。对于更小颗粒的检测场合, 随着颗粒变小, 散射强度急剧降低, 而膜层的散射强度不变, 此时易将膜层散射的背景噪声当作颗粒信号, 如果此时能够降低背景噪声便能降低颗粒的误检率。

5.3 颗粒检测结果

RMS 粗糙度为 2.4 nm 的样片上 100 nm 颗粒的检测结果如图 12(a)~(d) 所示, 其中图 12(a) 是未添加颗粒时 1# 标记区域的检测结果, 添加颗粒后的检测结果

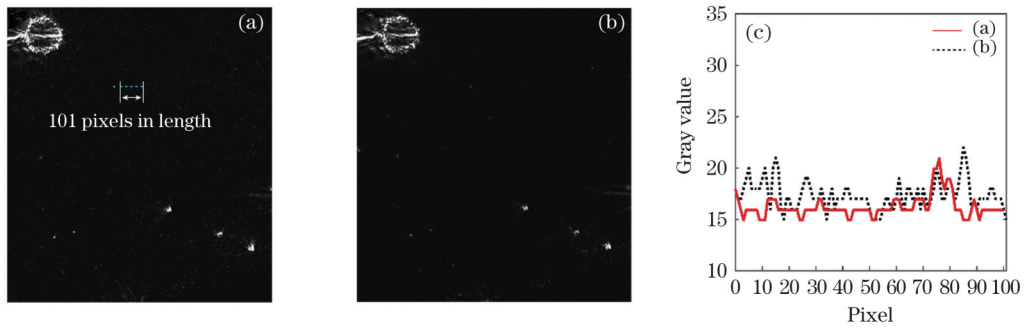


图 11 自建系统对 RMS 粗糙度为 4.9 nm 的样片的实测结果。(a) 偏振片在初始位置下的观察结果；(b) 偏振片旋转 20° 后的观察结果；(c) 两图对应的背景噪声曲线

Fig. 11 Detection results of the samples with RMS roughness of 4.9 nm by our own experimental system. (a) Detection result with the polarizer at initial position; (b) detection result after 20° rotation of the polarizer; (c) background noise curves corresponding to Figs. 11 (a) and (b)

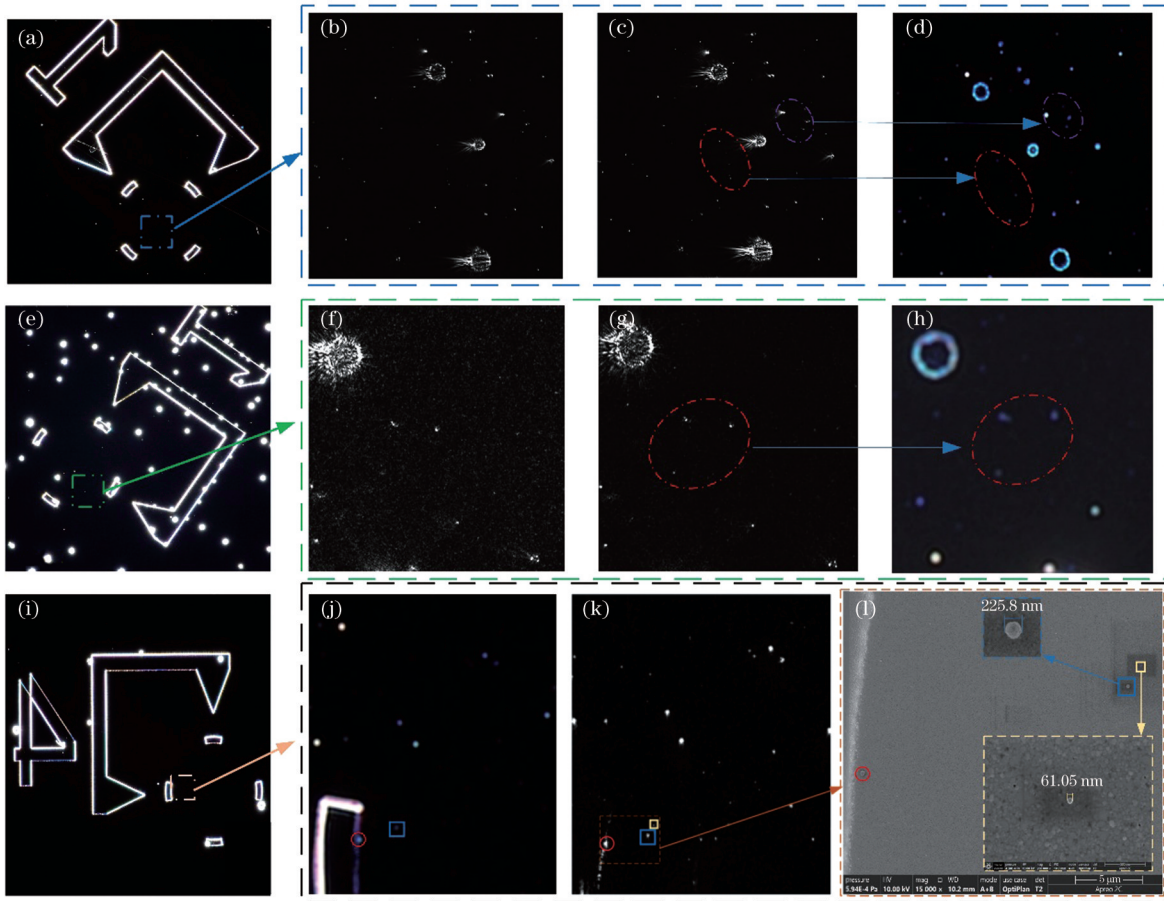


图 12 颗粒的实测结果。(a) RMS 粗糙度为 2.4 nm 的样片添加颗粒前的检测结果；(b) 样片上添加 100 nm 颗粒后，暗场接收光路上不加偏振片时自建系统的检测结果；(c) 自建系统调控偏振状态后的检测结果；(d) DSX1000 的检测结果；(e) RMS 粗糙度为 8 nm 的样片添加颗粒前的检测结果；(f) 样片上添加 100 nm 颗粒后，暗场接收光路上不加偏振片时自建系统的检测结果；(g) 自建系统调控偏振状态后的检测结果；(h) DSX1000 的检测结果；(i) RMS 粗糙度为 3.4 nm 的样片添加颗粒前的检测结果；(j) 样片上添加 50 nm 颗粒后 DSX1000 的检测结果；(k) 自建系统偏振调控后的检测结果；(l) 颗粒的扫描电镜照片

Fig. 12 Particle detection result. (a) Detection results before adding 100 nm particles to the sample with RMS roughness of 2.4 nm; (b) detection results of the self-built experimental system without polarizer on the dark field receiving optical path after adding 100 nm particles; (c) detection results of the self-built experimental system after modulating the polarization state; (d) detection results of DSX1000; (e) detection results before adding 100 nm particles to the sample with 8 nm RMS roughness; (f) detection results of the self-built experimental system without polarizer on the dark field receiving optical path after adding 100 nm particles; (g) detection results of the self-built system with modulating the polarization state; (h) detection results of DSX1000; (i) detection results before adding particles to the sample with 3.4 nm RMS roughness; (j) detection results of DSX1000 after adding 50 nm particles to the sample; (k) detection results of the self-built experimental system after modulating the polarization state; (l) SEM image of the particles

如图 12(b)~(d)所示,未进行偏振调控时的检测结果如图 12(b)所示,经过正交试验确定入射偏振态以及暗场接收光路上的偏振片角度后颗粒的检测结果如图 12(c)所示,图 12(d)是使用 DSX1000 对样片的观察结果。自建系统对颗粒的检出率稍微高于 DSX1000,并且自建系统使用激光照明以及更灵敏的 sCMOS 感光,单次曝光时间仅为 150 μs ,而 DSX1000 自动计算的单次曝光时间为 38 ms,自建系统曝光时间是 DSX1000 的 4% 左右,检测效率得到极大提升,这对下一步开展整片扫描具有重要意义。在本次实验中,选用的旋转台的旋转精度为 0.02° ,可见光在金属膜层表面的相位变化会受入射角的影响,相位变化是非线性的,随着入射角和入射偏振态变化,空间散射光的偏振特性也会发生变化,从而会影响偏振滤除效果。在 55° 入射条件下,当入射角的旋转运动误差控制在 $-0.3^\circ \sim 0.3^\circ$ 以内时,颗粒的检测效果无明显变化;散射接收光路上的偏振片在 $-0.2^\circ \sim 0.2^\circ$ 以内转动时,偏振滤除效果无明显变化。

RMS 粗糙度为 8 nm 的样片上 100 nm 颗粒的检测结果如图 12(e)~(h)所示,各图含义与前文相同,由于 8 nm 样片较前者粗糙,能观察到背景中较为明显的“霾”现象,即背景噪声较大。经偏振调控后的检测结果如图 12(g)所示,相对于图 12(f)而言,图 12(g)中有明显的背景噪声抑制效果。经扫描电镜验证,图 12(f)~(h)左上角的最大亮斑为颗粒团聚区,因此有很强的散射光强,并且由于使用的是单侧光照,因此在与入射方向垂直的边缘区域会出现较强的“毛刺”现象。

RMS 粗糙度为 3.4 nm 的样片上 50 nm 颗粒的检测结果如图 12(i)~(l)所示,其中图 12(i)为添加颗粒前的检测结果,图 12(j)为添加颗粒后 DSX1000 的检测结果,图 12(k)为自建系统经过偏振调控后的检测结果,图 12(l)为电镜扫描结果。自建系统经偏振调控后可以检测到银膜表面 61 nm 的 PSL 颗粒,检测能力高于 DSX1000。

为了获得整个表面的颗粒全貌,需要对图像进行拼接。首先对初始图像进行增强、滤波操作,然后检测待拼接图像中的 SURF 特征点,提取每个特征点对应的特征描述向量,在匹配的特征点处估计待拼接图像的几何变换关系(在匹配过程中采用 M-estimator Sample Consensus(MSAC)算法去除误匹配点,完成图像融合),最后对整图进行颗粒区域分割,统计颗粒数量。

6 结 论

笔者有针对性地开展了基于金属膜层激发表面等离子体进行超衍射加工这一领域缺陷检测的相关研究工作,通过偏振调控技术抑制了背景噪声,用 473 nm 检测光源实测了银膜表面 61 nm 的 PSL 颗粒,避免了紫外、深紫外光刻胶在现有深紫外设备检测过程中易

改性失效的问题,并且该方案具有向其他波段扩展的能力,原理上可以按光刻胶感光特性灵活选择不同的波长,在不影响光刻胶的同时提高对颗粒的检测能力。此外,本装置在进行 100 nm 颗粒检测时,单次曝光时间为 150 μs ,具有较高的检测效率。

参 考 文 献

- [1] Atwater H A. The promise of plasmonics[J]. Scientific American, 2007, 296(4): 56-63.
- [2] Fang N, Lee H, Sun C, et al. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens[J]. Science, 2005, 308(5721): 534-537.
- [3] Luo X G. Plasmonic metalens for nanofabrication[J]. National Science Review, 2018, 5(2): 137-138.
- [4] Chang C, Chen W, Chen Y, et al. Recent progress on two-dimensional materials[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2021, 37(12): 2108017.
- [5] Wang J, Li Z C, Liu W N. Rigorous analysis and systematical design of double-layer metal superlens for improved subwavelength imaging mediated by surface plasmon polaritons[J]. Nanomaterials, 2022, 12(20): 3553.
- [6] 李柱, 王长涛, 孔维杰, 等. 用于可见光波段切趾成像的宽带消色差超表面滤波器[J]. 光电工程, 2021, 48(5): 200466. Li Z, Wang C T, Kong W J, et al. Broadband achromatic metasurface filter for apodization imaging in the visible[J]. Opto-Electronic Engineering, 2021, 48(5): 200466.
- [7] 周毅, 梁高峰, 温中泉, 等. 光学超分辨平面超构透镜研究进展[J]. 光电工程, 2021, 48(12): 210399. Zhou Y, Liang G F, Wen Z Q, et al. Recent research progress in optical super-resolution planar meta-lenses[J]. Opto-Electronic Engineering, 2021, 48(12): 210399.
- [8] 王长涛, 赵泽宇, 高平, 等. 表面等离子体超衍射光学光刻[J]. 科学通报, 2016, 61(6): 585-599. Wang C T, Zhao Z Y, Gao P, et al. Surface plasmon lithography beyond the diffraction limit[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(6): 585-599.
- [9] Luo Y F, Kong W J, Zhao C W, et al. Subdiffraction nanofocusing of circularly polarized light with a plasmonic cavity lens[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2019, 7(19): 5615-5623.
- [10] Gao P, Pu M B, Ma X L, et al. Plasmonic lithography for the fabrication of surface nanostructures with a feature size down to 9 nm[J]. Nanoscale, 2020, 12(4): 2415-2421.
- [11] Poddubny A, Iorsh I, Belov P, et al. Hyperbolic metamaterials[J]. Nature Photonics, 2013, 7(12): 948-957.
- [12] Beliaev L Y, Takayama O, Melentiev P N, et al. Photoluminescence control by hyperbolic metamaterials and metasurfaces: a review[J]. Opto-Electronic Advances, 2021, 4(8): 210031.
- [13] Zhou R J, Edwards C, Bryniarski C, et al. White-light interferometric microscopy for wafer defect inspection[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9336: 93362P.
- [14] Liu H Y, Sun X Q, Wang X, et al. The localized enhancement of surface plasmon standing waves interacting with single nanoparticles[J]. Plasmonics, 2021, 16(6): 2109-2116.
- [15] Sun X Q, Liu H Y, Jiang L W, et al. Detecting a single nanoparticle by imaging the localized enhancement and interference of surface plasmon polaritons[J]. Optics Letters, 2019, 44(23): 5707-5710.
- [16] Wang B, Tanksalvala M, Zhang Z, et al. A new metrology technique for defect inspection via coherent Fourier scatterometry using orbital angular momentum beams[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11611: 116110L.
- [17] Kolenov D, Urbach H P, Pereira S F. Effect of polarization in evanescent wave amplification for the enhancement of scattering in

- nanoparticles on surfaces[J]. *OSA Continuum*, 2020, 3(4): 742-758.
- [18] Kolenov D, Zadeh I E, Horsten R C, et al. Direct detection of polystyrene equivalent nanoparticles with diameter of 21 nm ($\sim\lambda/19$) using coherent Fourier scatterometry: erratum[J]. *Optics Express*, 2022, 30(16): 29841-29843.
- [19] 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. Research on particle detection method on substrate surface based on scattered light dark field microscopy[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [20] 陆敏, 王治乐, 张树青, 等. 表面缺陷的偏振散射表征方法及区分原理[J]. *光学学报*, 2021, 41(12): 1229001.
Lu M, Wang Z L, Zhang S Q, et al. Polarization scattering characterization and discrimination principle of surface defects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 1229001.
- [21] 陈修国, 王才, 杨天娟, 等. 集成电路制造在线光学测量检测技术: 现状、挑战与发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(9): 0922025.
Chen X G, Wang C, Yang T J, et al. Inline optical measurement and inspection for IC manufacturing: state-of-the-art, challenges, and perspectives[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 0922025.
- [22] Dong J T. Line-scanning laser scattering system for fast defect inspection of a large aperture surface[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(25): 7089-7098.
- [23] 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.
- [24] KLA[EB/OL]. [2023-02-06]. <https://www.kla.com/zh-hans/products/substrate-manufacturing#defect-inspection>.
- [25] Stover J C. Surface roughness measurements of curved surfaces by light scatter[J]. *Optical Engineering*, 1982, 21(6): 987-990.
- [26] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
Tang J F, Gu P F, Liu X. Modern optical thin film technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006.
- [27] Germer T A. Angular dependence and polarization of out-of-plane optical scattering from particulate contamination, subsurface defects, and surface microroughness[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(33): 8798-8805.
- [28] Nahm K B, Wolfe W L. Light-scattering models for spheres on a conducting plane: comparison with experiment[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(15): 2995-2999.
- [29] Zhang Y H, Yang Y Y, Li C, et al. Defects evaluation system for spherical optical surfaces based on microscopic scattering dark-field imaging method[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(23): 6162-6171.
- [30] Cho S, Lee J, Kim H, et al. Super-contrast-enhanced darkfield imaging of nano objects through null ellipsometry[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(23): 5701-5704.
- [31] Zhu J L, Liu J M, Xu T L, et al. Optical wafer defect inspection at the 10 nm technology node and beyond[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2022, 4(3): 032001.

System Design for Dark-Field Detection of Nanoparticles on Wafer Metal Surface

Deng Quan^{1,2}, Zhao Zeyu^{1,2}, Lin He^{1,3}, Liu Ling^{1,2}, Li Xiachuqin¹, Yang Gensen^{1,2}, Luo Xiangang^{1,2*}

¹State Key Laboratory of Optical Technologies on Nano-Fabrication and Micro-Engineering, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, Sichuan, China;

²School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, Sichuan, China

Abstract

Objective Defect detection is an essential process for realizing superdiffraction fabrication based on metal film layer excitation surface plasmons. However, the light source of most existing advanced defect detection equipment operates in the deep ultraviolet band (DUV), which is within the light-sensitive range of DUV photoresists such as KrF. The overlap of working wavelengths between the defect detection equipment and the DUV photoresist can result in a loss of photoresist efficacy. Furthermore, to avoid the influence of the detection equipment's working wavelength on the photoresist when DUV equipment is used to detect particles on the surface of the film, it is necessary to tune the equipment's incident intensity several times. Moreover, the equipment parameters after tuning are only effective for a single film structure. It is necessary to retune equipment parameters when changing the thickness, material, and the number of film layers, which is time consuming and labor intensive. Therefore, a defect-detection device with a wide range of applications that avoids photoresist-sensitive bands must be developed to address this challenge.

Methods In this study, visible laser polarization defect detection equipment consisting of three parts: polarization modulation, dark-field detection, and motion control (Fig. 8), is theoretically and experimentally demonstrated. A more sensitive scientific CMOS (sCMOS) is used to detect particle scattering signals. The equipment utilizes the polarization conversion principle of a silver film on the top layer of the wafer surface. By modulating the polarization state and incident angle of the incident light, the scattered light polarization states on the slightly rough silver film surface and the particles on the film surface are different. On the receiving side, the light scattered from the surface of the silver film is partially filtered using a polarization detection device, which improves the signal-to-noise ratio of the particle signal to achieve defect detection.

Based on the aforementioned principles, experimental equipment was developed to verify particle detectability [Fig. 8(a)]. Standard polystyrene latex (PSL) spheres with diameters of 100 and 50 nm were used as detection targets. Etching marks on the surface of the silicon wafer were used as the detection area, and subsequent processes such as photoresist spin-coating, magnetron sputtering coating, reactive ion beam etching (AFM surface roughness detection), and particle solution atomization were performed on the wafer [Fig. 8(b)]. In this experiment, silver films with different surface roughness were processed by controlling the power and etching time of reactive ion beam etching. After dilution and ultrasonic vibration, the particle solution was sprayed onto the surface of the silver film using an atomizer such that standard PSL particles with diameter 100 and 50 nm were uniformly distributed in the surface labeled area. In addition, the samples were maintained under a vacuum insofar as possible during the experiment to decelerate oxidation of the silver film.

Results and Discussions The effect of surface roughness on particle detection was subsequently analyzed. Samples with different surface roughness values were observed using identical camera exposure parameters (Fig. 10). Experimental results show that as the silver film surface roughness increases, the background noise obtained from the experiment also increases, which can cover up the signal of small-particle defects and cause misclassification. To reduce the effect of surface roughness on particle detection, a polarization device was introduced into the detection equipment and the effect of the incident light polarization state on the signal-to-noise ratio of particles was analyzed. Based on the results, it can be observed that the signal-to-noise ratio of particles differs with different polarization states of the incident light [Fig. 12(a)–(d)]. In the detection experiment involving 100 nm particles, the single exposure time of this equipment was only 150 μs , which is 4% of the DSX1000 dark-field microscope based on white light, and the detection efficiency was significantly improved. Finally, it was confirmed using a scanning electron microscope that the proposed experimental system could detect 61 nm PSL particles [Fig. 12(l)].

Conclusions This study conducted targeted research based on defect detection during the plasmon super-diffraction fabrication of metal film layer surfaces. Background noise was suppressed by the polarization modulation technique, and the PSL particles with diameter of 61 nm on the silver film surface were detected with a 473 nm light source for inspection. The equipment operates in the visible wavelength band, which differs from the sensitive wavelength band of the DUV photoresist, thus, effectively avoiding photoresist failure. The proposed method can be theoretically extended to other wavelengths, which can be flexibly selected according to photoresist sensing characteristics, and can improve particle detectability without loss of photoresist efficacy. The proposed solution has a straightforward structure, high practicality, low cost, and good prospects for application in the field of micro-nano fabrication.

Key words measurement; optical inspection; scattering measurement; surface roughness; polarization manipulation; nano-particles; signal-to-noise ratio