

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.XXXX.XX.01

超微光斑角分辨偏振散射仪原位校准方法

王威, 刘佳敏*, 崔雪, 江浩*, 刘世元

(华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 现有的超微光斑角分辨偏振散射仪校准方法需基于旋转偏振器或液晶延迟器实现整体仪器系统参数的校准, 存在操作复杂、难以一次性解耦多个校准参数、引入额外误差源等不足。针对此问题, 本研究团队提出一种超微光斑角分辨偏振散射仪系统参数原位分步校准方法。借鉴消光椭圆偏测量原理, 依次对起偏器方位角、分束器透射与反射椭圆偏参数、波片延迟量与方位角、偏振分束器透射与反射椭圆偏参数、物镜正交偏振光透过率等参数进行精确校准。采用该方法对自主研发的超微光斑角分辨偏振散射仪进行校准, 并利用校准后的仪器对标准 SiO₂ 薄膜与矩形光栅样件进行测量, 结果表明: 原位校准后仪器的膜厚测量重复性可达 0.1 nm, 光栅形貌参数与标准值高度一致, 验证了所提出的超微光斑角分辨偏振散射仪原位校准方法的有效性。

关键词: 角分辨偏振散射仪; 超微光斑照明; 频域空域协同成像; 原位校准; 纳米薄膜测量; 消光椭圆偏原理; 测量重复性; 形貌检测

中图分类号: TB92; TH74; O43

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795(XXXX)XX-0001-13

In-situ calibration method for ultra-micro-spot angle-resolved polarization scatterometer

WANG Wei, LIU Jiamin*, CUI Xue, JIANG Hao*, LIU Shiyuan

(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Existing calibration methods for ultra-micro-spot angle-resolved polarization scatterometers rely on rotating polarizers or liquid crystal retarders to calibrate the overall system parameters, resulting in complex operational procedures, difficulty in simultaneously decoupling multiple calibration parameters, and the introduction of additional error sources. To address these limitations, we propose an in-situ, stepwise calibration strategy for the system parameters of an ultra-micro-spot angle-resolved polarization scatterometer. Inspired by the principle of extinction ellipsometry, key system parameters — including the polarizer azimuth, ellipsometric parameters of the beam splitter in transmission and reflection, waveplate retardation and azimuth, ellipsometric parameters of the polarization beam splitter in transmission and reflection, and the orthogonally polarized transmittance of the objective lens — are sequentially calibrated with high precision. The proposed method was applied to calibrate a self-developed ultra-micro-spot angle-resolved polarization scatterometer, which was subsequently used to measure standard SiO₂ thin films and rectangular grating samples. The results demonstrate that, after in-situ calibration, the instrument achieved a film-thickness measurement repeatability of 0.1 nm, and the extracted grating morphology parameters exhibited excellent agreement with standard values, thereby verifying

收稿日期: 2025-10-20; 修回日期: 2025-12-08

基金项目: 湖北省重大科技攻关项目(JD)(2023BAA008-2)

引用格式: 王威, 刘佳敏, 崔雪, 等. 超微光斑角分辨偏振散射仪原位校准方法[J]. 计测技术, XXXX, XX(X): 1-13.

Citation: WANG W, LIU J M, CUI X, et al. In-situ calibration method for ultra-micro-spot angle-resolved polarization scatterometer[J]. Metrology & Measurement Technology, XXXX, XX(X): 1-13.



the effectiveness of the proposed calibration method.

Key words: angle-resolved polarization scatterometer; ultra-micro-spot illumination; frequency-spatial domain hybrid imaging; in-situ calibration; nanoscale thin-film measurement; extinction ellipsometry principle; measurement repeatability; morphology characterization

0 引言

随着集成电路(Integrated Circuit, IC)制造工艺的持续发展, IC器件关键尺寸同步微缩至亚5 nm节点范畴^[1]。在这一极限尺度下, 传统二维平面结构难以满足IC器件高集成度与高性能的双重需求, 多重曝光技术的引入使器件结构逐渐演化为复杂的微区三维堆叠结构^[2-3]。器件微区膜层厚度、结构关键尺寸、套刻误差(Overlay, OV)等参数的在线精确测量, 直接关系IC器件的制造良率与最终性能。传统测量技术(例如基于扫描电子显微镜、原子力显微镜的测量技术等)虽具备较高的测量分辨力, 但受制于测量效率、成本及潜在破坏性, 难以满足IC器件规模化制造中在线测量的需求^[4-8]。

在此背景下, 基于散射的光学测量技术(例如基于角分辨散射仪、光谱分辨型散射仪的测量技术)已逐步成为IC制造中的关键测量技术^[9-11]。此类技术具有非接触、非破坏性、高效率及低成本等优势, 在过去数十年已被广泛应用于薄膜厚度、结构关键尺寸及OV等参数的在线测量^[12-16]。但传统角分辨散射仪的光斑尺寸难以匹配先进IC器件微区纳米薄膜或纳米结构测量需求, 所采集衍射图像仅以光强分布为特征, 存在信息量过少、难以支撑超薄纳米薄膜厚度与复杂纳米结构形貌参数鲁棒提取的不足。

针对此问题, 本研究团队研制了一种超微光斑角分辨偏振散射仪(Angle-resolved Polarization Scatterometer, ARPS), 其可通过单发测量捕获临界照明条件下待测样件的频域衍射图像与实空间图像, 结合探测光束偏振态的调制解调, 基于衍射信号的非线性回归分析和代数化分析, 实现对微区纳米薄膜厚度(20 ~ 1 000 nm)、复杂纳米结构形貌参数、套刻误差等工艺参数的精确测量, 在先进IC制造在线测量中发挥关键作用。该超微光斑角分辨偏振

散射仪中偏振器、分束器、偏振分束器与物镜等关键器件的偏振特性会直接影响测量精度, 因此必须通过高精度校准以保障系统测量性能。

现有的超微光斑角分辨偏振散射仪校准方法需基于旋转偏振器或液晶延迟器实现整体仪器系统参数的校准, 存在操作复杂、难以一次性解耦多个校准参数、引入额外误差源导致校准准确性降低等不足^[17]。针对上述问题, 本研究团队提出一种原位校准方法, 分步骤校准超微光斑角分辨偏振散射仪的关键元件, 借助高灵敏度电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)相机采集多角度光强数据, 结合基于正向光学模型的最小二乘算法, 精确提取各个器件的偏振特性参数。在此基础上, 利用校准后的仪器捕获待测纳米薄膜和纳米结构的正交检偏频域图像, 利用基于严格耦合波分析(Rigorous Coupled Wave Analysis, RCWA)方法^[18-19]的正向模型, 对所采集的频域衍射信号开展最小二乘回归分析, 提取纳米薄膜厚度与纳米结构形貌参数, 验证所提出的校准方法的有效性。

1 仪器原理

图1为自主研发的超微光斑角分辨偏振散射仪原理示意图。光源(型号为EQ-77X-QZ-S)出射的宽带光束被准直镜(型号为AC254-080-A-ML)准直, 之后被高数值孔径物镜(型号为Objective EC Epiplan-Apochromat 100x/0.95 BD DIC M27)以临界照明方式汇聚于样品表面, 随后物镜采集由样品衍射的不同级次衍射光, 并由偏振分束器(型号为CCM1-PBS25-532)分束成P偏振光衍射图案和S偏振光衍射图案, 分别成像于主光路的CCD相机1和CCD相机2(型号均为BFS-U3-32S4M-C)。为提高系统的测量精度及重复性, 需调节物镜后焦面形状, 以筛选物镜后焦面中不同平面波分量^[20]。鉴于高数值物镜的后焦面位于物镜内部, 需采用中继透镜1(由型号为AC254-040-A-ML和AC254-150-

A-ML的2个子镜组成)将物镜后焦面中继至照明光路中,之后采用自主设计的半连续型环形光阑调节此物镜后焦面形状。通过设置环形光阑的形状和方向,可实现入射角和方位角的优化选择。

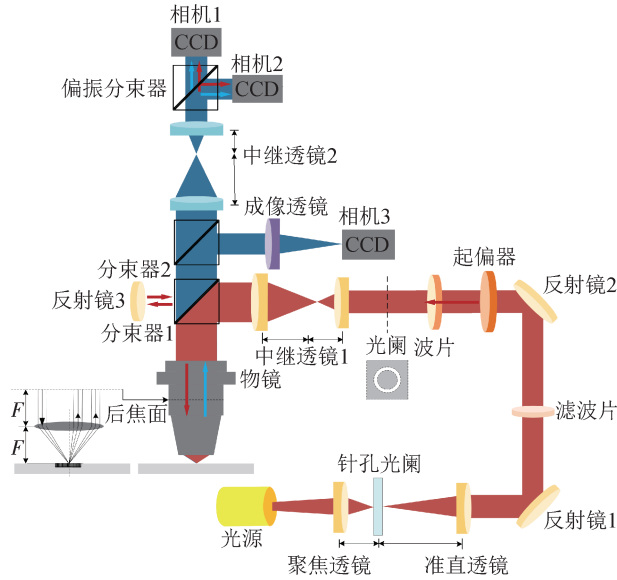


图1 超微光斑角分辨偏振散射仪原理示意图
Fig.1 Schematic diagram of the ultra-micro-spot angle-resolved polarization scatterometer

伴随IC制造工艺节点持续微缩,器件内部用于套刻误差检测的套刻标记尺寸不断减小,其有效结构尺寸可缩小至1~5 μm^[21],且往往分布在局部功能单元内部。为实现对微米级局域结构的精准散射测量,需要显著缩小探测光斑尺寸,以避免跨区域采样造成的散射信号混叠。因此,在仪器中引入缩光斑模块,该模块由聚焦透镜(型号为AC254-045-A-ML)、针孔光阑(型号为PS1-400H)、准直透镜组成。光源发出的光经400 μm芯径光纤(型号为MMC400L-0.37-PC-2)传输后,首先由聚焦透镜汇聚至针孔光阑处,针孔光阑将汇聚光束约束为200 μm直径光斑,基于上述准直透镜、中继透镜1与物镜的焦距关系与放大倍率特性,使样品表面生

成的探测光斑直径小于2.2 μm。需要指出的是,光斑尺寸减小,虽能实现微区结构的散射测量,但同步缩小了有效视场,对样品定位、对准精度及扫描效率均提出了更高的要求。为应对这一挑战,仪器结合实时空间成像与精密三维位移台,实现微区快速定位与重复定位,从而保证小光斑条件下的测量精度与速度满足实际需求。

散射光采集通道能够捕获样品散射场的频域谱信息,并在物镜后焦面形成光瞳图像。安装在主光路中的一组中继透镜2(由型号为AC254-125-A-ML和AC254-100-A-ML的2个子镜组成)可以将光瞳图像中继至CCD相机1和CCD相机2成像面。仪器入射光强度不均匀,因此引入反射镜3(型号为BB1-E02)来监测入射光的变化,反射镜3直接将探测光束反射至相机以形成参考光信号,便于校准高数值孔径(Numerical Aperture, NA)物镜的透射损失。在辅助光路上,通过分束器2(型号为MBS1455-A)反射方向的出射光被成像透镜(型号为AC254-125-A-ML)汇聚于CCD相机3(型号为GS3-U3-23S4M-C),以实现待测样件的实空间成像。上述过程基于偏振显微成像原理完成,最终实现探测视场内待测样品基本形貌的实时监测。

纳米薄膜与纳米结构的测量灵敏度通常受探测光束的波长和偏振态的影响^[22-23],当样品是非对称纳米结构时,上述影响更加显著。在入射光路中,更换滤波片对探测光束进行波长滤波,改变起偏器(型号为PGT-2012)方位角来调制探测光束的偏振态,均可改善仪器的测量灵敏度和精度。同时,将四分之一波片(型号为WPQ10M-532)引入至入射光路中起偏器的后端,可丰富探测光束的偏振态调制范围,有利于更多系统参数的校准并保障校准精度。此外,将滤波片安装于起偏器前端,可避免引入滤波片的残余偏振效应。仪器整体系统模型为

$$s_{out}(\varphi, \theta) = \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = M_{PBS} M_{BST} M_{BST} \left[R \left(-\varphi - \frac{\pi}{2} \right) M_M M_{OBJ}(\theta) M_S(\varphi, \theta) M_{OBJ}(\theta) R(\varphi) \right] \cdot M_{BSR} [R(-\varphi_C) M_C R(\varphi_C)] [R(-\varphi_P) M_P R(\varphi_P)] s_{in} \quad (1)$$

式中: $s_{out}(\varphi, \theta)$ 为出射光斯托克斯向量,其中 φ 为方位角, θ 为入射角; s_0 为总光强, s_1 为水平/垂

直线偏振分量差, s_2 为+45°/-45°线偏振分量差, s_3 为右旋/左旋圆偏振分量差; M_{PBS} 为偏振分束器的

Mueller矩阵; M_{BST} 为分束器透射通道的Mueller矩阵; $R(\varphi)$ 为绕入射面方位角 φ 的坐标系旋转Mueller矩阵; M_{M} 为反射变换矩阵; $M_{\text{Obj}}(\theta)$ 为显微镜物镜的Mueller矩阵,该Mueller矩阵是一个关于入射角 θ 的函数; $M_{\text{s}}(\varphi, \theta)$ 为样品的Mueller矩阵; M_{BSR} 为分束器反射通道的Mueller矩阵; M_{C} 为波片的Mueller矩阵; M_{P} 为起偏器的Mueller矩阵; s_{in} 为入射光斯托克斯向量。

超微光斑角分辨偏振散射仪如图2所示,频域与空域成像的协同应用显著增强了系统测量能力与数据可信度。频域成像通过采集样品后焦面的角分辨散射光强分布,高灵敏度地反映纳米结构的周期性、衍射级次及偏振响应,为薄膜膜厚、光栅形貌参数及套刻误差的精确提取提供核心信息;空域成像则实时记录样品表面光斑的位置、形状及聚焦状态,为测量过程提供空间参考。频域与空域成像协同处理不仅可补偿光斑偏移和振动引起的误差,提高重复性与精度,还可有效表征非对称或局部非均匀结构。在原位校准中,空域像提供光路参考,频域像用于提取系统偏振参数,两者结合实现多参数联合优化,显著提升仪器整体性能。相较传统角分辨散射仪,该系统具

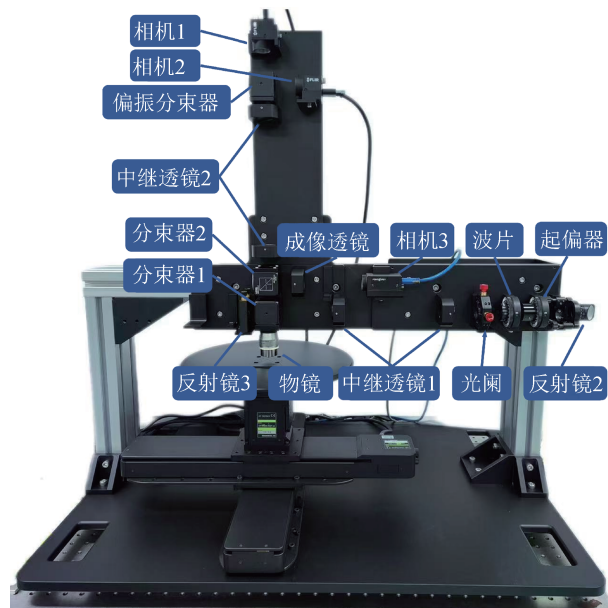


图2 超微光斑角分辨偏振散射仪

Fig.2 Ultra-micro-spot angle-resolved polarization scatterometer

备双通道正交偏振频域成像、参考光及实空间成像采集、超微光斑照明等模块,可测量更小关键尺寸及更复杂纳米结构的样件。

2 校准方法

所研制的超微光斑角分辨偏振散射仪是一种应用于IC制造过程中的高精度测量仪器,既可实现套刻误差测量,也能表征纳米结构形貌。由于光路中起偏器、波片、物镜、分束器和偏振分束器等元器件会不可避免地引入偏振效应畸变,若不加以补偿,将严重影响测量精度^[24]。传统的系统联合标定方法通常将光源偏振态、物镜偏振特性及探测器响应等多个未知参数统一构建为一套高维优化模型,利用同一组散射数据同时反演系统全部参数。尽管该方法在概念上实现了“全局式”求解,但其多参数耦合程度高、可辨识性不足,对初值与噪声敏感,在实际在线散射测量中往往难以获得稳定且唯一的标定结果。针对该问题,本文对上述关键元器件进行分步骤标定,并将已标定参数作为先验信息依次引入后续校准步骤,实现仪器系统参数的精确校准。本研究中,原位校准采用各向同性标准样品,通过测量其散射光强分布,获得系统关键元件的等效校准参数,从而对仪器进行分步标定,无需直接求取Mueller矩阵各项元素。校准时采用波长为532 nm的激光光源,标准样件为J. A. Woollam公司生产的20 nm厚度标准SiO₂薄膜,其膜厚值通过高精度光谱偏振仪标定,在光学计量领域被广泛用作参考标准。校准核心思路是:逐一分离并拟合各光学元件的偏振参数,以减少耦合效应干扰;将前一步的结果作为先验信息导入下一步,确保参数反演的精度与唯一性。超微光斑角分辨偏振散射仪校准步骤如图3所示。

第一步,通过在反射镜3位置引入检偏器和CCD相机,获取检偏器0°~360°连续旋转下的光强分布。利用归一化数据构建理论响应模型,并结合最小二乘(Levenberg-Marquardt, LM)算法进行反演拟合,得到起偏器方位角及分束器透射端的Mueller矩阵参数。该结果作为后续步骤的先验信息。

第二步,在辅助光路成像透镜处放置检偏器

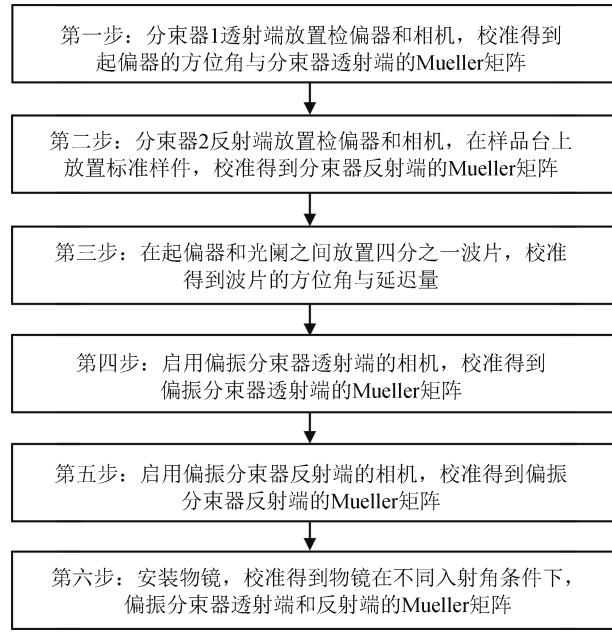


图3 超微光斑角分辨偏振散射仪校准步骤

Fig.3 Calibration steps of the ultra-micro-spot angle-resolved polarization scatterometer

与 CCD 相机，并在样品台处放置标准 SiO₂ 薄膜。通过相同的旋转测量与拟合方法，提取分束器 1 和 2 反射端的椭圆参数。

第三步，在光路中加入四分之一波片。通过旋转检偏器测量光强分布，并基于模型拟合确定波片的方位角与延迟量。此后利用该波片生成的多种偏振态，为偏振分束器及物镜的校准提供额外信息。

第四步与第五步，分别对偏振分束器透射端与反射端进行校准。在相应 CCD 相机上采集不同波片方位角下的光强数据，并通过模型拟合得到透射端和反射端的 Mueller 矩阵。为增强物理的可解释性，Mueller 矩阵被分解为波片延迟量、圆振幅各向异性、旋光角度、偏振双向衰减及退偏参

数等基本物理量的乘积。

第六步，在完成上述器件校准的基础上引入物镜，通过主光路的两通道 CCD 分别采集频域像数据，拟合得到物镜在不同入射角下的偏振参数振幅比 Ψ_{OBJ} 与相位差 Δ_{OBJ} 。考虑到物镜材料吸收与表面反射带来的强度衰减，首先需标定物镜的透过率函数，具体做法为：在无物镜与有物镜条件下，分别测量标准样件的正交检偏频域衍射图像，通过光强对比分析得到正交检偏后的透过率分布，并通过多项式拟合获得透过率随入射角变化的函数。正交检偏后的透过率分布，表征了物镜在指定偏振态探测光束照明下的各向同性与各向异性透过率。

前五步的校准结果如图 4 所示。图 5(a)、图 5(b) 分别为物镜在正交检偏状态下的透过率分布图；图 5(c)、图 5(d) 分别为正交检偏状态下随入射角变化的透过率曲线拟合效果图。

将透过率校正结果嵌入至系统模型后，采用 LM 算法对所采集衍射图像光强进行拟合，获得物镜的偏振效应参数 Ψ_{OBJ} 与 Δ_{OBJ} 。图 6 分别展示了偏振分束器透射(P)与反射(S)通道的校准结果，并绘制了不同入射角下的 Ψ_{OBJ} 和 Δ_{OBJ} 。使用多项式函数对不同入射角下的椭圆参数结果进行拟合，得到 Ψ_{OBJ} 和 Δ_{OBJ} 关于入射角的函数，代入物镜的 Mueller 矩阵中，即可得到物镜的偏振效应模型。

为确保最小二乘拟合的精度与物理合理性，在参数初始化过程中充分考虑各元件的物理特性及取值范围，并对参数空间加以约束，以避免局部最优解或非物理解。各器件的校准结果如表 1 所示。将物镜的拟合结果进一步表示为入射角的多项式函数，以便嵌入系统模型用于后续的结构参数反演。

物镜在 P 通道的校准结果如式(2)和式(3)所示，在 S 通道的校准结果如式(4)和式(5)所示。

$$\Psi_{\text{OBJ}} = 1.89 \times 10^{-7} \cdot (^\circ)^{-3} \cdot \theta^4 + 1.81 \times 10^{-4} \cdot (^\circ)^{-2} \cdot \theta^3 - 0.01 \cdot (^\circ)^{-1} \cdot \theta^2 + 0.33 \cdot \theta + 44.1^\circ \quad (2)$$

$$\Delta_{\text{OBJ}} = 0.01 \cdot (^\circ)^{-1} \cdot \theta^2 - 0.37 \cdot \theta - 0.65^\circ \quad (3)$$

$$\Psi_{\text{OBJ}} = 1.45 \times 10^{-4} \cdot (^\circ)^{-1} \cdot \theta^2 + 0.01 \cdot \theta + 44.67^\circ \quad (4)$$

$$\Delta_{\text{OBJ}} = -2.92 \times 10^{-4} \cdot (^\circ)^{-1} \cdot \theta^2 - 0.33 \cdot \theta + 4.46^\circ \quad (5)$$

3 实验结果分析

3.1 薄膜表征

通过前述原位校准方法，能够有效消除关键光

学元件的残余偏振效应，显著提升超微光斑角分辨偏振散射仪在纳米结构测量中的精度与重复性。为进一步验证校准效果及系统性能，对不同厚度的标准 SiO₂ 薄膜样品进行测量实验，并进行结果分析。

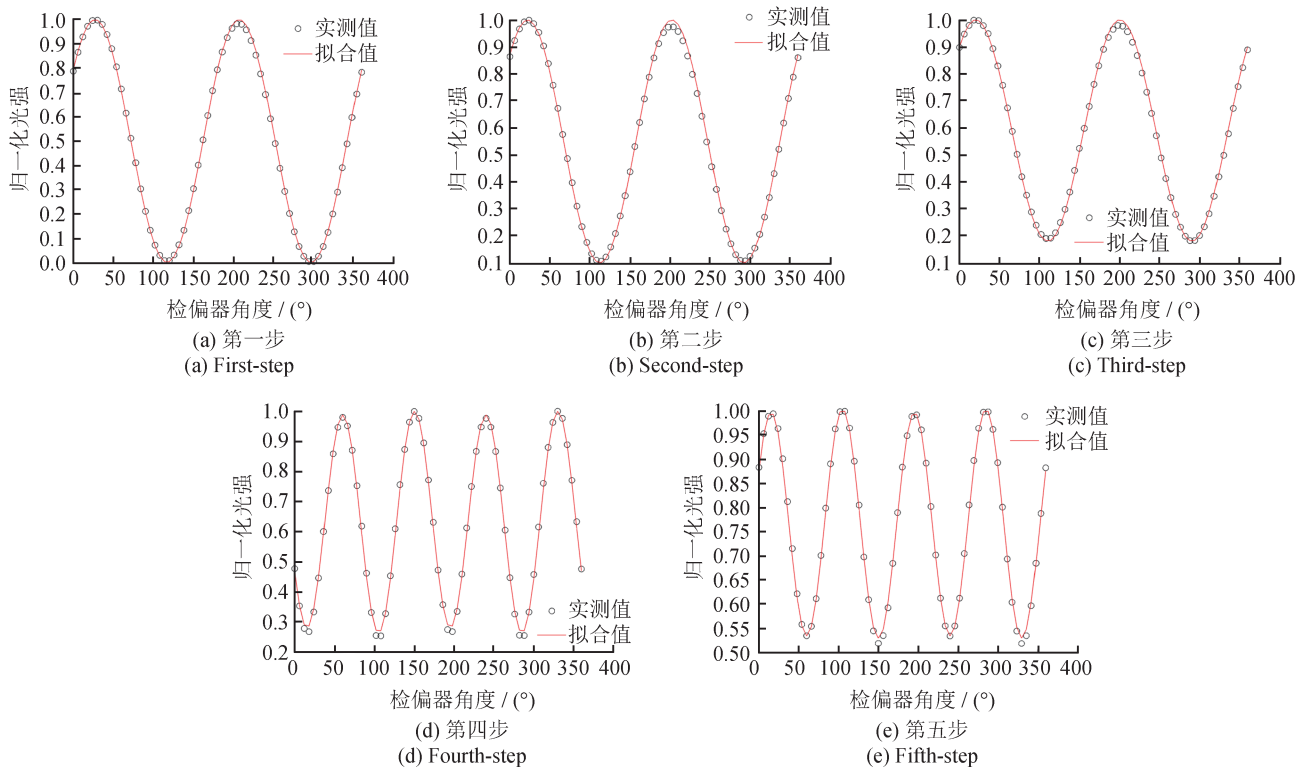


图4 校准的拟合图

Fig.4 Calibration fitting diagrams

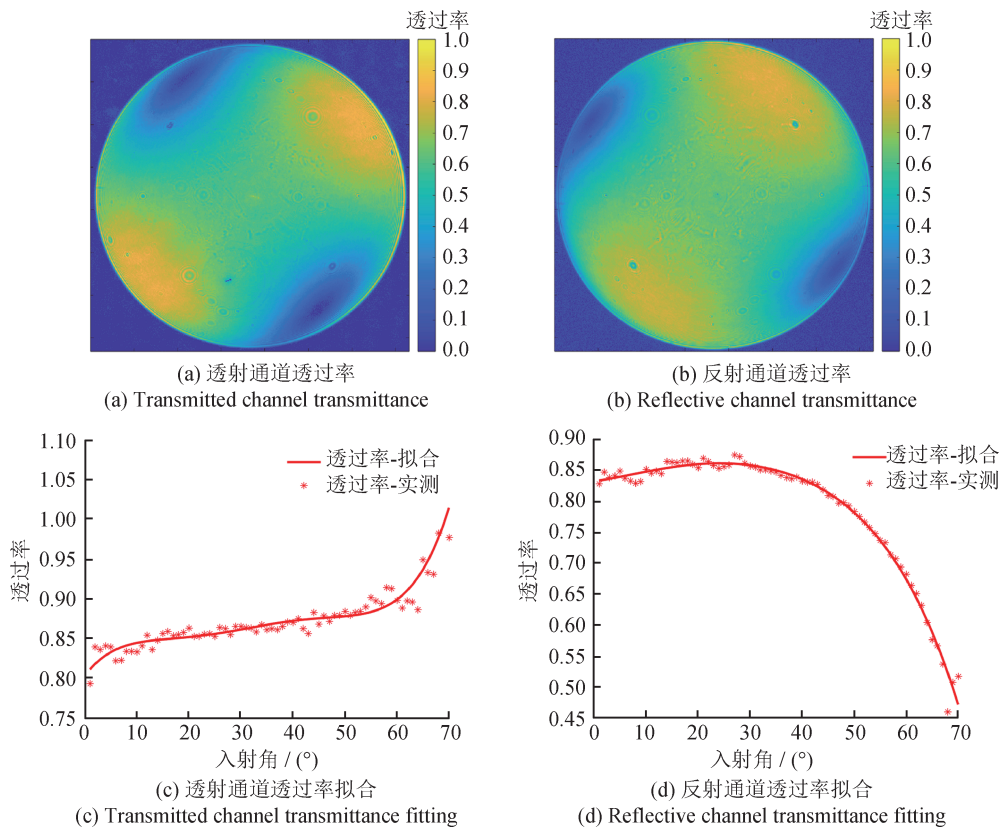


图5 物镜透过率图

Fig.5 Objective lens transmittance diagram

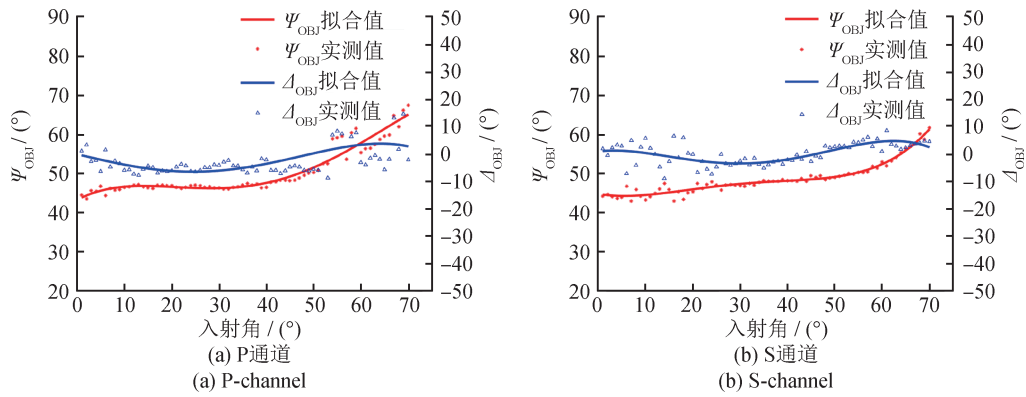


图6 物镜校准结果

Fig.6 Objective lens calibration results

表1 校准的拟合结果

Tab.1 Calibration fitting results

校准步骤1					校准步骤2		校准步骤3		
起偏器		分束器			分束器		波片		
方位角 $\varphi_p / (^\circ)$	透射振幅比 $\Psi_{BST} / (^\circ)$	透射相位差 $\Delta_{BST} / (^\circ)$	反射振幅比 $\Psi_{BSR} / (^\circ)$	反射相位差 $\Delta_{BSR} / (^\circ)$	延迟量 $\delta / (^\circ)$	方位角 $\varphi_c / (^\circ)$			
43.321	46.988	6.121	45.716	69.039	89.444	0.775			
校准步骤4					校准步骤5				
偏振分束器					偏振分束器				
透射延迟量 $\delta_{PBST} / (^\circ)$	透射圆形振幅各向异性 R_{PBST}	透射旋光角 $\gamma_{PBST} / (^\circ)$	透射双向衰减率 D_{PBST}	透射退偏参数 p_{PBST}	反射延迟量 $\delta_{PBSR} / (^\circ)$	反射圆振幅各向异性 R_{PBSR}	反射旋光角 $\gamma_{PBSR} / (^\circ)$	反射双向衰减率 D_{PBSR}	反射退偏参数 p_{PBSR}
2.309	-0.263	1.714	0.686	0.83	28.586	0.037	0.234	0.116	-0.288

首先，为获得薄膜的反射率信息，需要对原始数据进行预处理。分别采集薄膜样品的反射光频域像与参考光频域像，并在同一条件下获取无样品情况下的噪声图像，如图7所示。通过逐像素减去噪声信号，再将处理后的反射光频域像与参

考光频域像相除，得到实测反射率图像。物镜存在材料本征吸收和表面反射效应，导致光强在往返传输中发生衰减，因此需利用前述物镜透过率函数对反射率进行修正，进而获得可与RCWA建模结果相对应的有效反射率。

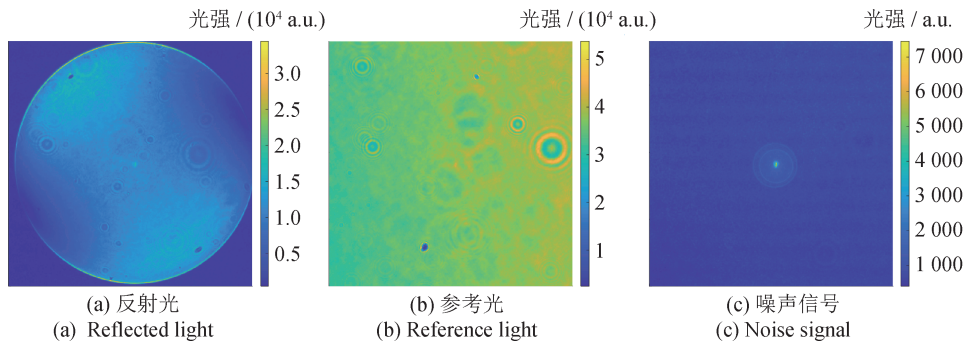


图7 薄膜样件的实测频域像

Fig.7 Actual measured frequency domain images of the thin-film sample

在参数提取过程中，从有效反射率数据中随机选取指定入射角与反射率范围内的50个像素点作为拟合对象。结合已标定的起偏器、波片、分束器、物镜及偏振分束器的椭偏参数，构建包含入射角与方位角信息的系统模型。随后，通过LM算法与基于RCWA计算的后焦面理论反射率信息进行迭代拟合，拟合是否成功以均方误差(Mean-Square Error, MSE)低于经验阈值 S_{MSE} (本文取 $S_{MSE} < 1 \times 10^{-3}$) 为判据，并结合参数收敛性与残差分布检查，以避免过拟合，从而实现纳米薄膜厚度参数的反演提取。纳米薄膜参数提取流程如图8所示。

实验中所用物镜的数值孔径 $N_A = 0.95$ ，对应的可测入射角范围为 $0^\circ \sim 71.8^\circ$ ；样品台具备三轴移动功能，分辨力为0.2微米/脉冲，台面尺寸为 $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ ，行程为20 mm，可满足对焦与定位需求。为保证测量的重复性精度，选取厚度20 ~ 1 000 nm的七组标准 SiO_2 薄膜样品，在532 nm激光光源、 45° 线偏振入射条件下，分别在透射通道(P偏振)和反射通道(S偏振)进行30次重复测量。实验过程中，参考光与噪声信号保持稳定，因此同一组参考与噪声数据被用于所有样品的校正。

重复性测量精度采用 3σ (三倍标准偏差) 指标进行评估，定义如式(6)所示。 3σ 表征了测量结果的离散程度，其值越小，说明系统测量重复性越好。

$$3\sigma = 3 \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

式中： n 为重复次数， x_i 为第 i 次测量值， \bar{x} 为平

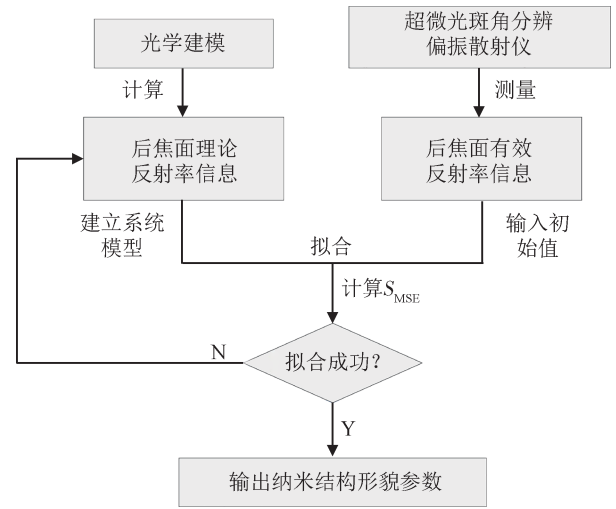


图8 纳米薄膜参数提取流程图

Fig.8 Extraction flowchart of nano film parameters

均值。

图9分别展示了厚度为22、65、1 000 nm的 SiO_2 薄膜的反射率图像及采样点。

在实验分析中，对每个样品的反射率数据进行参数反演，得到相应的薄膜厚度。 SiO_2 薄膜(Si基底)样品30次重复膜厚测量结果如表2所示。

表2中的数据结果显示：所提取的厚度参数与Mueller矩阵椭偏仪RC2的标定值高度一致，验证了仪器在薄膜厚度测量方面的准确性与重复性。同时，各样品的重复性精度表现出良好一致性，拟合厚度的 3σ 值普遍在0.1 nm量级。P偏振方向的测量重复性优于S偏振方向，但在部分样品(如85 nm厚度薄膜)中，S偏振方向的 3σ 值偏大，反映出不同厚度样品对偏振态的依赖性差异。

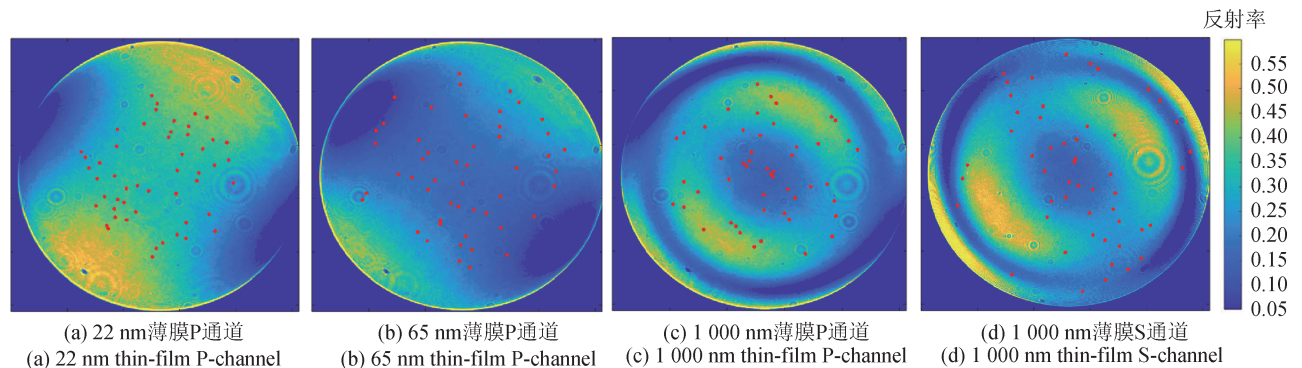


图9 薄膜后焦面反射率图像及采样点

Fig.9 Thin-film back focal plane reflectance images and sampling points

表2 SiO₂薄膜(Si基底)样品30次重复膜厚测量结果

Tab.2 Results of 30 repeated thickness measurements of the SiO₂ film (on Si substrate)

单位: nm

SiO ₂ 薄膜(Si基底)	RC2测量值	P方向膜厚 d 均值	P方向 3σ 值	S方向膜厚 d 均值	S方向 3σ 值
22	22.15	23.031	0.025	21.605	0.110
33	33.04	33.137	0.020	33.032	0.050
65	64.55	64.786	0.018	64.514	0.048
76	76.00	74.794	0.016	75.948	0.030
85	85.17	84.942	0.062	84.867	0.145
113	113.89	112.974	0.017	112.449	0.051
1 000	982.42	978.879	0.022	980.672	0.068

3.2 标准光栅表征

为了提取矩形光栅的纳米结构参数，测量并记录不同衍射级次的反射率并结合 RCWA 正向建模，实现光栅结构的逆向参数反演。由于频域像中包含多个衍射级次的信号，需要使用环形光阑将零级光与正、负一级光分离。此外，在图像预处理中，还需去除不同衍射级次的重叠干扰，以保证各衍射级次反射率的独立提取。

在光栅参数反演中，本研究并非对样品实空间进行扫描采样，而是从后焦面 (Back Focal Plane, BFP) 频域像中选取用于拟合的数据点。BFP 图像中的每个像素均对应一个独立的散射角，反映了特定衍射级次下的光强分布，因此选取这些点实质上是在不同空间频率通道上对光栅结构的散射响应进行采样。本研究从 BFP 图像中随机选取 160 个覆盖不同衍射级次及不同散射角的点进行非线性拟合，以增强频域信息的多样性。在给定衍射级次、入射角和方位角参数的基础上，基于包含各光学元件校准结果的系统模型，采用 LM 非线性最小二乘方法将 RCWA 正向反射率与实测数据进行匹配拟合，以提取光栅结构参数。矩形光栅周期在制造过程中精度较高，因此周期参数采用参考值，拟合仅针对线宽 C_0 和槽深 H 。光栅参数提取流程如图 10 所示。

为防止过拟合，在反演算法中施加了物理先验约束与参数边界条件(例如膜厚非负、线宽不大于周期等)，以排除非物理解。同时，对测量数据

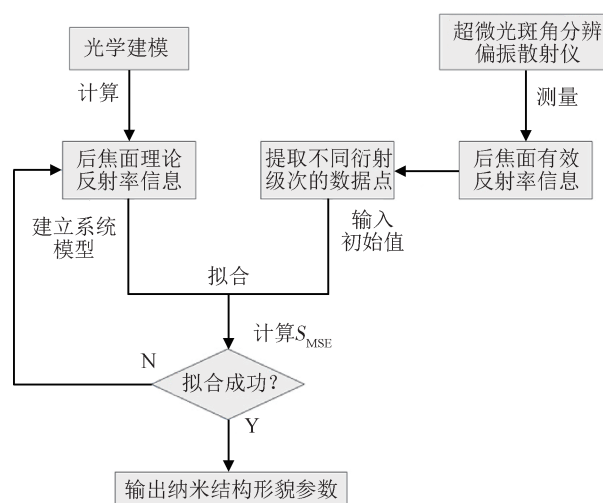


图 10 光栅参数提取流程图

Fig.10 Extraction flowchart of grating parameters

中的高噪声区域(例如光阑边缘)、饱和像素进行了加权处理或数据屏蔽。当拟合不收敛或结果异常时，检查并剔除异常数据点、重新初始化参数、调整优化算法步长，以及根据残差分析反向修正理论模型的初始假设或参数范围。

需要说明的是，160 个点的选取源于对不同采样数量的系统性测试结果。实验表明：当采样点数量少于 100 个时，拟合结果容易受到局部噪声影响，收敛稳定性不足；当采样点数量超过 150 个后，反演参数随采样数量的变化趋于饱和，进一步增加采样点数对拟合精度的提升有限，会引入空间冗余信息并增加计算时间。因此，综合拟合精度、噪声鲁棒性和计算效率，将采样点数量设

定为160个。

与薄膜测量的分析方法类似，光栅表征同样需要对实测数据进行背景校正。具体而言，首先采集参考光与反射光图像并进行比值运算，以降低背景噪声，如图11所示。由于光栅的频域成像

依赖物镜成像，因此需进一步利用物镜透过率系数对反射率进行修正，从而获得有效反射率。通过图像处理方法识别不同衍射级次的位置，并在有效反射率区域内的0、+1、-1衍射级次中随机选取160个数据点，利用LM最小二乘算法完成拟合。

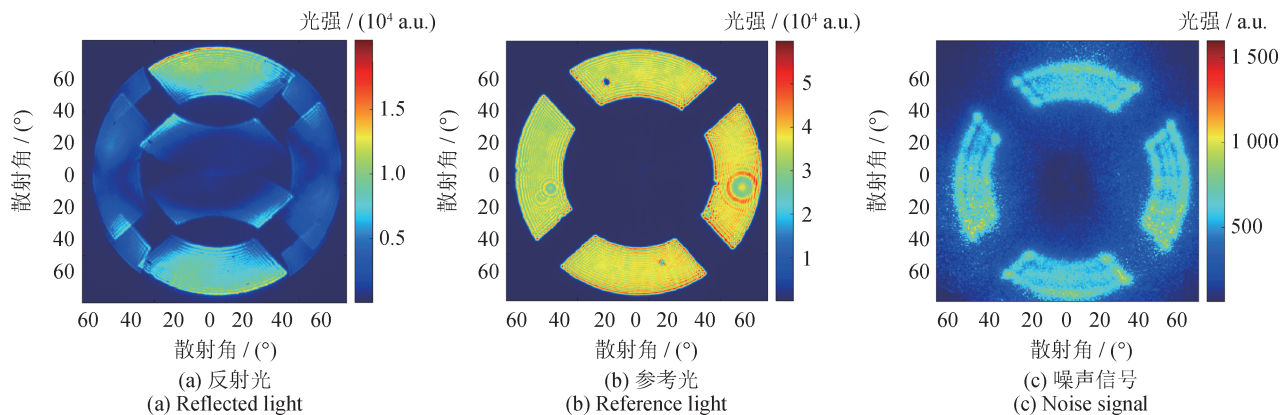


图11 光栅样件的实测频域像

Fig.11 Actual measured frequency domain image of the grating sample

选用周期为600 nm的矩形硅光栅作为实验样品，其理论结构参数为：线宽 $C_D = 282$ nm， $H = 350$ nm，如图12所示。采用 45° 线偏振入射光，在P通道与S通道分别进行30次重复测试。矩形光栅后焦面反射率图像及采样点如图13所示。

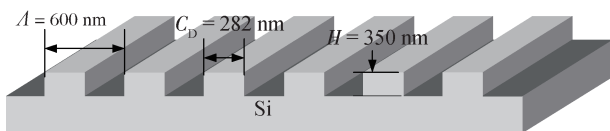


图12 矩形硅光栅参数示意图

Fig.12 Schematic diagram of rectangular silicon grating parameters

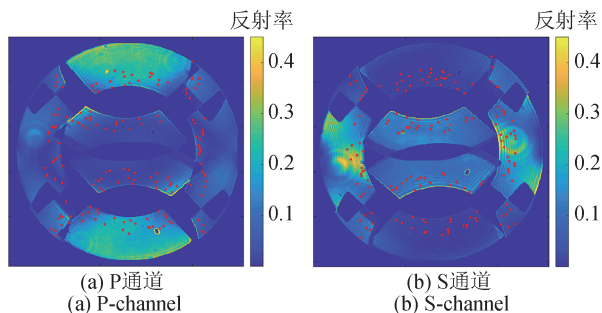


图13 矩形光栅后焦面反射率图像及采样点

Fig.13 Rectangular grating back focal plane reflectance images and sampling points

最终的拟合结果如图14所示。在P通道下得到的拟合参数为 $C_D = 281.65$ nm， $H = 350.60$ nm，与参考值高度一致，误差在工艺允许范围内；而在S通道下得到的拟合参数为 $C_D = 261.73$ nm， $H = 403.96$ nm，偏差较大。这是由于矩形光栅衍射主要沿光栅线的垂直方向展开，不同偏振态对结构参数的敏感性存在差异，导致S通道的测量灵敏度低于P通道^[25]。在该测量配置情况下，P通道的测量结果更具有可信度。在拟合结果中，部分曲线与实测数据之间存在较大偏差。经溯源分析发现，这些异常点主要分布在光栅边缘区域。环形光栅具有锐截止特性，导致边缘区域光场分布不稳定，从而在CCD成像过程中引入非确定性噪声，降低了测量数据的可信度。相比之下，远离光栅边缘的区域受衍射效应影响较小，光强分布更加均匀，因此表现出更高的测量重复性和更优的拟合一致性。

需要强调的是，本研究基于RCWA的反演过程依赖于理想化的几何模型，而实际加工的纳米薄膜与光栅结构通常存在圆角、倾斜侧壁、形貌随机性等偏差。因此，本文获得的薄膜厚度、 C_D 、 H 等参数并非严格意义上的绝对几何尺寸，而应理

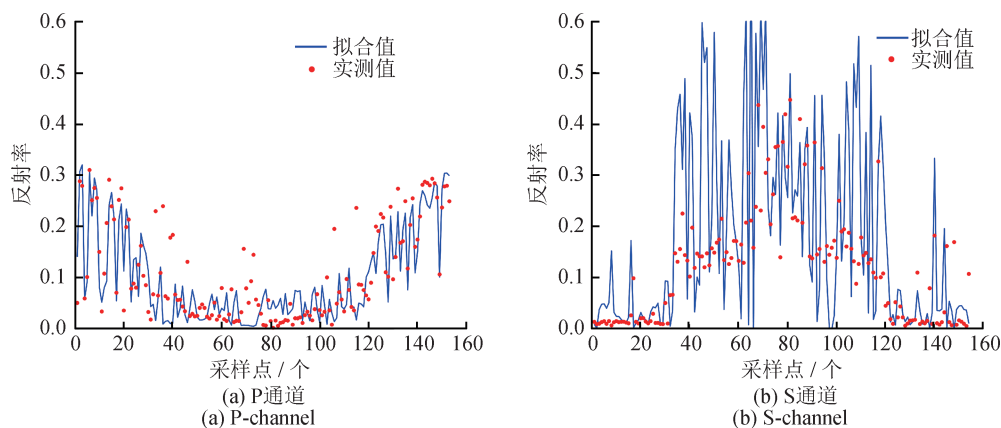


图14 矩形光栅反射率拟合结果

Fig.14 Rectangular grating reflectance fitting results

解为在光学响应上最接近实测散射强度分布的等效几何尺寸。这些等效参数可视为采样区域内最小二乘意义下的结构平均值，反映了局部等效厚度或等效 C_D ，而非真实结构的逐点形貌。基于模型的光学计量具有其固有特性：等效参数对工艺变化高度敏感，因此在工艺监控、制程优化和相对偏差追踪方面具有显著优势；但由于模型与真实结构之间存在形貌差异，其用于绝对几何尺寸测量的溯源准确性仍存在一定局限。

4 结论

本研究团队提出了一种用于超微光斑角分辨偏振散射仪的原位分步校准方法，基于消光椭圆测量原理，精确校准了起偏器、波片、分束器、偏振分束器及物镜的系统参数，并结合多角度光强采集和最小二乘优化，实现了偏振参数的高精度提取。实验结果表明：校准后的仪器在纳米薄膜厚度测量中重复性 (3σ) 达到 0.1 nm 量级，矩形光栅形貌参数与标准参考值高度一致，验证了所提出校准方法在改善仪器测量精度方面的有效性。该方法为微区纳米薄膜厚度与复杂纳米结构的高精度测量提供了有力支撑，并为推动先进 IC 复杂纳米结构测量技术的应用奠定基础。尽管本系统已在膜厚与光栅结构的测量中展示出优异的重复性，但仍可能存在部分未完全消除的系统性误差，例如光源强度的时间漂移、探测器噪声、偏振链路中的残余相位误差以及模型与真实结构之间的形貌差异。未来将进一步针对这些因素进行系统

性的误差建模与补偿，以持续提升绝对量化的精度。同时，可探索与机器学习结合的混合反演框架，在保证模型物理可解释性的基础上，提升对高维参数空间的拟合能力。随着系统模型逼真度与反演算法效率的进一步提升，经该校准方法标定后的仪器有望在高深宽比结构、多层堆叠结构等更复杂应用中实现高精度测量。

参考文献

- [1] NEISSER M. International roadmap for devices and systems lithography roadmap[J]. Nanopatterning, Materials, and Metrology, 2021, 20(4): 044601.
- [2] GODA A. 3-D NAND technology achievements and future scaling perspectives [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(4): 1373-1381.
- [3] 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.
- [4] GARCIA R, PÉREZ R. Dynamic atomic force microscopy methods[J]. Surface Science Reports, 2002, 47(6/7/8): 197-301.
- [5] KOPANSKI J J, MAYO S. Intermittent-contact scanning capacitance microscope for lithographic overlay measurement[J]. Applied Physics Letters, 1998, 72(19): 2469-2471.
- [6] FRASE C G, GNIESER D, BOSSE H. Model-based SEM for dimensional metrology tasks in semiconductor and mask industry [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(18): 183001.
- [7] KLEIN T, BUHR E, FRASE C G. TSEM: a review of scanning electron microscopy in transmission mode and

- its applications [J]. *Advances in Imaging and Electron Physics*, 2012, 171: 297–356.
- [8] 夏承晟, 邓惠文, 赵书浩, 等. 芯片表面形貌检测方法
及系统研制[J]. *计测技术*, 2023, 43(1): 137–142.
XIA C S, DENG H W, ZHAO S H, et al. Chip morpho-
logy measurement method and system development [J].
Metrology & Measurement Technology, 2023, 43 (1) :
137–142. (in Chinese)
- [9] WANG F, ZHANG Q Y, LU H L, et al. Improving the
measurement performance of angle-resolved scatterometry
by use of pupil optimization [J]. *Metrology, Inspection,
and Process Control for Microlithography XXVI*, 2012,
8324: 83242M.
- [10] WURM M, ENDRES J, PROBST J, et al. Metrology of
nanoscale grating structures by UV scatterometry [J]. *Op-
tics Express*, 2017, 25(3): 2460–2468.
- [11] 张义博, 贺文俊, 洪惠敏. 大视场双通道 Micro-LED 晶
圆缺陷光学检测系统设计 [J]. *计测技术*, 2025, 45
(2): 56–67.
ZHANG Y B, HE W J, HONG H M. Design of a dual-
channel optical inspection system with large field of view
for Micro-LED wafer defects [J]. *Metrology & Measure-
ment Technology*, 2025, 45(2): 56–67. (in Chinese)
- [12] DASARI P, SMITH N, GOELZER G, et al. A comparison
of advanced overlay technologies [J]. *Metrology, Inspec-
tion, and Process Control for Microlithography XXIV*,
2010, 7638: 76381P.
- [13] LI J, LIU Y D, DASARI P, et al. Advanced diffraction-
based overlay for double patterning [J]. *Metrology, Inspec-
tion, and Process Control for Microlithography XXIV*,
2010, 7638: 76382C.
- [14] 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): 403–426.
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 & Op-
toelectronics Progress*, 2022, 59(9): 403–426. (in Chi-
nese)
- [15] 李一鸣, 杨霖, 王晓浩, 等. 光刻套刻误差测量技术.
激光与光电子学进展 [J], 2022, 59(9): 391–402.
LI Y M, YANG L, WANG X H, et al. Overlay metrology
for lithography machine [J]. *Laser & Optoelectronics Prog-
ress*, 2022, 59(9): 391–402. (in Chinese)
- [16] 张利斌, 韦亚一. 集成电路制造工艺波动与对准套刻
技术 [J]. *光学学报(网络版)*, 2025(13): 93–113.
ZHANG L B, WEI Y Y. Relationship between process
variation and alignment overlay technology in integrated
circuit manufacturing [J]. *Acta Optica Sinica (Online)*,
2025(13): 93–113. (in Chinese)
- [17] SHENG S, CHEN X G, CHEN C, et al. Eigenvalue cali-
bration method for dual rotating-compensator Mueller ma-
trix polarimetry [J]. *Optics Letters*, 2021, 46 (18) :
4618–4621.
- [18] CHATEAU N, HUGONIN J P. Algorithm for the rigorous
coupled-wave analysis of grating diffraction [J]. *Journal of
the Optical Society of America A*, 1994, 11 (4) : 1321–
1331.
- [19] LIU S Y. Estimation of the convergence order of rigorous
coupled-wave analysis for binary gratings in optical critical
dimension metrology [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51
(8): 081504.
- [20] ZHANG J S, LIU J M, ZHU J L, et al. In-situ calibration
of the objective lens of an angle-resolved scatterometer for
nanostructure metrology [J]. *Applied Optics*, 2023, 62
(15): 3829–3838.
- [21] CALADO V, DEPRE J, MASSACRIER C, et al. Study
of μ DBO overlay target size reduction for application
broadening [C] // *Metrology, Inspection, and Process Con-
trol for Microlithography XXXII*, San Jose, USA. SPIE,
2018: 6.
- [22] LEE J, YIM I, PARK B S, et al. Multi-wavelength con-
tinuous-bias DBO metrology for improved ADI process-ro-
bustness [C] // *Metrology, Inspection, and Process Control
XXXVIII*, San Jose, USA. SPIE, 2024: 136.
- [23] MENG K, HU D Y, WANG K, et al. Optimized overlay
metrology based on polarization eigenstate of Mueller ma-
trix [J]. *Optics Express*, 2025, 33(6): 13358–13375.
- [24] LI J H, LI Y Q, LIU K, et al. Hybrid calibration method
of a wide-view-angle Mueller polarimeter for hyper-numeri-
cal-aperture imaging systems [J]. *Chinese Optics Letters*,
2020, 18(8): 081202.
- [25] CHEN X G, LIU S Y, ZHANG C W, et al. Improved
measurement accuracy in optical scatterometry using cor-
rection-based library search [J]. *Applied Optics*, 2013,
52(27): 6726–6734.



第一作者：王威(1999—)，男，博士研究生，主要研究方向为面向IC的套刻误差测量。



通信作者：刘佳敏(1994—)，男，讲师，主要研究方向为IC纳米材料及纳米结构测量检测、极短波长计算光刻、原位 Mueller 矩阵椭偏等。2020年10月至2025年11月在华中科技大学智能制造装备与技术全国重点实验室从事博士后研究，后留校从事教学与科研工作。



作者简介：崔雪(2000—)，女，硕士，主要研究方向为纳米结构测量检测。



通信作者：江浩(1979—)，男，教授，博士生导师，主要研究方向为光刻成像理论与计算光刻技术、纳米光学测量技术与仪器、集成电路IC制造在线缺陷检测技术与装备等。是湖北省杰出青年基金获得者，担任中国仪器仪表学会集成电路测量与仪器分会常务委员、光电技术与系统集成分会理事，中国光学学会光学测试专业委员会委员、光电技术专业委员会委员，中国硅酸盐学会薄膜与涂层分会理事等职务。



作者简介：刘世元(1970—)，男，教授，博士生导师，现任先进光刻机技术教育部工程研究中心常务副主任，是国家杰出青年科学基金获得者、国家科技创新领军人才、英国物理学会(IOP)会士、中国微米纳米技术学会会士。主要研究方向为纳米光学测量技术与仪器、集成电路IC制造在线测量技术与装备、光刻成像理论与计算光刻、新型椭偏仪研制与光电材料表征测量等。获湖北省技术发明一等奖、中国仪器仪表学会技术发明一等奖、日内瓦国际发明金奖等荣誉。