

文章编号: 1002-1582(2025)05-0634-07

显微光谱拟合法在微区薄膜表征中的优化与应用

孙习茹, 伍滨和*

(东华大学 物理学院, 上海 201600)

摘 要: 近年来随着晶圆和显示面板上的图案尺寸逐渐减小, 对微小区域内薄膜参数的高精度测量需求愈发迫切。为实现多点、快速、无损的薄膜参数表征, 文章构建了一套基于光学显微镜的微区测量系统(分辨率 $5\sim 50\mu\text{m}$), 结合光谱拟合法对薄膜参数进行提取。针对高数值孔径(NA)物镜引起的复杂入射角分布与光强非均匀分布问题, 文章选取高斯模型作为权重函数对建模误差进行补偿, 通过优化模型参数获得更符合显微测量系统特性的反射率值。实验结果表明该方法显著提高了测量精度, 薄膜厚度测量误差均小于1.2%, 重复测量相对标准差优于2%, 适用于在微小区域的高精度厚度测量与结构识别, 能够实现多点扫描与形貌表征。

关 键 词: 光学测量; 显微光谱技术; 微区表征; 薄膜厚度; 数值孔径

中图分类号: O484.5

文献标识码: A

Optimization and application of microspectroscopic fitting method in micro-region thin film characterization

SUN Xiru, WU Binhe*

(College of Physics, Donghua University, Shanghai 201600, China)

Abstract: In recent years, as the pattern sizes on wafers and display panels continue to shrink, the demand for high-precision measurement of thin-film parameters in small areas has become increasingly urgent. To achieve multi-point, fast, and non-destructive thin-film parameter characterization, a micro-region measurement system based on optical microscopy (resolution: $5\sim 50\mu\text{m}$), combined with spectral fitting methods for extracting thin-film parameters, is presented. To address the complex incident angle distribution and non-uniform light intensity distribution caused by high numerical aperture (NA) objectives, a Gaussian model is selected as the weight function to compensate for modeling errors. By optimizing the model parameters, reflection values that better align with the characteristics of the microscopy system are obtained. Experimental results show that this method significantly improves measurement accuracy, with thin-film thickness measurement errors below 1.2%, and the relative standard deviation of repeat measurements better than 2%. This approach is suitable for high-precision thickness measurement and structural identification in small areas, enabling multi-point scanning and morphology characterization.

Keywords: optical measurement; microspectroscopy; micro-region characterization; thin film thickness; numerical aperture

0 引 言

长期以来, 薄膜测量是显示和半导体行业中

产品质量控制的重要工具^[1]。高精度、快速地测量薄膜材料的物理性质, 如厚度、光学常数、介电常数等, 对提升产品性能控制、优良率筛查和生产

收稿日期: 2025-04-21; 收到修改稿日期: 2025-06-22

基金项目: 上海市自然科学基金(24ZR1402600)

作者简介: 孙习茹(1999—), 女, 硕士研究生, 从事薄膜微区特性表征研究。skullxray@163.com

伍滨和(1976—), 男, 研究员, 博士, 从事微纳光电材料与器件研究。

* 通讯作者: bhwu@dhu.edu.cn

效率具有重要意义^[2]。随着半导体晶圆与显示面板图案越来越小也越来越复杂,微小区域薄膜厚度的精确测量需求显著提升^[3]。已有多项技术被广泛应用于薄膜厚度与折射率测量,例如光谱拟合法、光谱椭圆偏法、白光干涉法和峰值检测法等^[4,5]。其中,光谱拟合法因其无损、适应性强,在半导体行业中被广泛用于表征常见薄膜与多层结构^[6]。

传统测量系统多具备较大的视场且常采用单点采集的方式,难以满足高密度集成电路与高分辨率显示面板中微区结构的测量需求。因此,亟需开发具备小视场、高空间分辨率与高适应性的测量系统^[7]。

光学显微镜技术因其非接触、快速与易操作等特点,成为满足此需求的理想方案^[8]。其高分辨率与灵敏度可实现对微米至纳米尺度区域薄膜厚度、光学常数及均匀性的精确分析^[9]。因此,本研究搭建了基于光学显微镜的微区测量系统,将显微测量技术与光谱拟合法结合。为进一步减小测量区域并提高光源稳定性,系统不仅配备了显微镜内置的石英钨卤素灯光源,还外接了氙灯冷光源。通过更换不同数值孔径(NA)的物镜,系统可调节分辨率大小(约5~50 μm),以适应不同图案尺寸和复杂度的测量区域。为实现薄膜多点自动扫描,获取目标区域的可见光反射光谱,样品平台配备了步进电机。结合适用材料的色散模型与传输矩阵法(Transfer Matrix Method, TMM)生成理论反射率,再通过模拟退火(Simulated Annealing, SA)与遗传算法(Genetic Algorithm, GA)混合优化算法进行拟合,从而提取目标区域内薄膜的厚度与折射率。

然而,在使用上述测量系统时采用NA较大的物镜以提升空间分辨率,但随之而来的入射角分布复杂性及反射光强的空间非均匀性,成为制约测量精度的重要因素^[10]。

目前,已有多项研究致力于修正显微镜条件下的反射率测量建模。Pliski等提出以积分方式考虑物镜内所有可能入射角对反射率的综合影响,并引入“有效角度”(Effective Angle)取代传统模型中的单一入射角参数^[11]。该方法虽涵盖角度分布,但实质上仍为一种平均化处理,无法完全替代完整的角度积分模拟。Saigal等假设入射光强在样品表面聚焦于某一点并呈均匀分布,将光斑划分为同心圆环,依据面积分布加权计算各入射角反射率^[12]。该方法较“有效角度”模型更贴近实际光学行为,但在高数值孔径条件下,大角度区域的贡献被高估,从而导致拟合厚度偏差较大。Hut-

zler等在Saigal的基础上引入高斯分布作为第二权重函数来描述光强分布,通过两权重函数的乘积及归一化处理实现修正^[13]。该方法能更准确地反映物镜与光强分布的影响,但未充分考虑显微系统中实际光源分布,没有对高斯模型的参数进行讨论,而是以经验值或简化设定处理,进而限制了模型的拟合精度。

基于前人的研究,本研究在现有模型的基础上进行了改进,引入了描述非均匀光强分布的高斯函数模型作为权重函数,通过对入射角度进行积分,得到了更符合显微测量系统所得到的反射率值。考虑到实际光源的分布,根据不同光源类型设定了可调参数,并结合实验测量数据进行拟合优化,从而反演出最符合当前系统特性的有效光强权重分布。修正后的模型在多个样品上的应用结果显示拟合误差 $<1.2\%$ 。将修正后的薄膜厚度测量结果与扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)得到的数据进行对比分析,修正后的厚度结果与SEM参考值的偏差低于1%,可以看出本研究为薄膜材料的高精度表征提供了可靠的修正方法。

本研究选取了SbTe、SiO₂薄膜作为测试对象,分别从静态厚度测量和多点形貌扫描两个层面展开系统评估,进一步说明所提出方法在准确性、重复性及局部形貌表征能力方面的优势,为显微光谱拟合法在更广泛的薄膜测量领域中,提供理论和实验依据。

1 薄膜表征方法

1.1 实验装置

为实现高精度、高空间分辨率的微区反射率测量,本研究搭建了一套显微反射光谱测量系统。如图1所示,实验装置包括一台奥林巴斯显微镜(型号BX60M),光源分别采用显微镜系统内置的100 W石英钨卤素灯,以及由显微镜侧端口通过直径为100 μm 的光纤引入的HLD-II氙灯光源,显微镜配置不同物镜(NA=0.1、0.25、0.4、0.75、0.9),分辨率约为5~50 μm 。光束通过分束器传送到物镜,经过紫外光滤波后,反射光由光谱仪(Ideal Optics PG2000Pro)检测。样品支架装载在由五相步进电机(XA04A-R201)驱动控制的电位移平台(KOHZU, XA07A)上,其聚焦像素可在XY方向进行扫描,定位精度为 $\pm 0.5 \mu\text{m}$,最大扫描范围1 cm $\times$ 1 cm。通过移动样品台,实现对薄膜多点扫描测量,获得目标区域在可见光范围内的反射光谱并分析形貌。

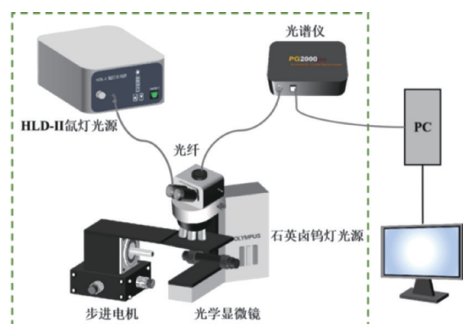


图1 显微反射光谱测量实验装置图

根据对比法，首先对标准镜面光强 $I_{\text{SAM}}(\lambda)$ 和样品表面光强 $I_{\text{STD}}(\lambda)$ 的光谱分别进行测量。由已知标准镜面的光谱反射率 $R_{\text{STD}}(\lambda)$ 得到样品表面的绝对光谱反射率 $R_{\text{SAM}}(\lambda)$ [14]

$$R_{\text{SAM}}(\lambda) = \frac{I_{\text{SAM}}(\lambda)}{I_{\text{STD}}(\lambda)} R_{\text{STD}}(\lambda) \quad (1)$$

1.2 计算原理

本研究采用传输矩阵法（Transfer Matrix Method, TMM）来计算样品在不同波长下的反射率[15]。在已知薄膜的复折射率 $\tilde{n}(\lambda) = n(\lambda) + ik(\lambda)$ 和薄膜厚度 d 的前提下，通过麦克斯韦方程组推导出光波在双层或多层光学介质中的传播方程。利用这些方程，进一步计算光学系统的反射率 $R(\lambda, d, n, k)$ ，其中 λ 表示光波的波长， d 是薄膜的厚度， n 和 k 分别表示薄膜的折射率和消光系数，且这两个参数会随波长变化。如图2所示，薄膜上下界面上都有无数次反射，为了方便处理，归并所有同方向的波，正方向取+号，负方向取-号， E 和 H 是指界面1和2上的电场和磁场。

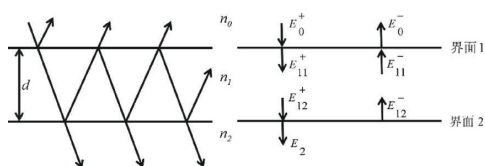


图2 单层膜的电场示意图

设某光学薄膜折射率为 n_1 ，导纳为 η_1 ，几何厚度为 d_1 ，光线以入射角 θ 进入，其中入射介质和基底的折射率分别为 n_0 和 n_g ，导纳分别为 η_0 和 η_g 。在此条件下，在波长 λ 下的反射率的计算公式可以通过以下传输矩阵推导出

$$\begin{bmatrix} E_0 \\ H_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & \frac{i}{\eta_1} \sin \delta_1 \\ i\eta_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_2 \\ H_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 \cos \theta \quad (3)$$

对于S分量 $\eta = n \cos \theta$ ，对于P分量 $\eta = n / \cos \theta$ ，

矩阵定义为基片和薄膜组合的特征矩阵。

组合导纳

$$Y = \frac{i \sin \delta_1 + \eta_g \cos \delta_1}{i \frac{\eta_g}{\eta_1} \sin \delta_1 + \cos \delta_1} \quad (4)$$

振幅反射系数

$$r = \frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \quad (5)$$

反射率

$$R = r \cdot r^* \quad (6)$$

代入化简

$$R(\lambda) = \left(\frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right) \cdot \left(\frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right)^* \quad (7)$$

根据以上公式计算出S分量和P分量的 R_s 和 R_p ，就可以计算出光线经过薄膜系统后的反射率

$$R(\lambda) = \frac{1}{2} [R(\lambda)_p + R(\lambda)_s] \quad (8)$$

1.3 目标函数

在本研究中，使用光谱拟合方法来精确测量薄膜的光学参数。为了保证拟合的准确性，首先需要构建一个评价函数，也可以称为最小优化目标函数。这个函数的作用是衡量计算值和实际值之间的偏差，并通过最小化该偏差来优化薄膜的光学参数。在已知光学参数和薄膜厚度的情况下，通过TMM计算出不同波长下的反射率。然而，光学参数和薄膜厚度通常是未知的，因此通过假设一组初始值来进行反推。通过计算得到的反射率与实际测量值进行比较，并寻找使得误差最小的参数组合，从而确定薄膜的真实光学特性。本文中采用目标函数计算式，可表示为

$$F(d, c_1, c_2, \dots) = \sum_{\lambda_0}^{\lambda_s} [R(\lambda_k) - R(\lambda_k, d, c_1, c_2, \dots)]^2 \quad (9)$$

式中， $F(d, c_1, c_2, \dots)$ 是目标函数， $R(\lambda_k)$ 表示在波长 λ_k 处测得的反射率， $R(\lambda_k, d, c_1, c_2, \dots)$ 是根据薄膜参数计算得到的该波长下的理论反射率。目标函数的值依赖于薄膜的几何厚度以及描述色散模型的参数 c_1, c_2 等。通过最小化目标函数，可以确定薄膜的厚度和这些参数的值。从测量的反射率曲线中确定薄膜的光学常数和厚度是一个逆问题，容易受到局部极小值的影响，尤其在拟合参数较多或样品膜层较薄的情况下尤为明显。因此，本研究中引入了SA与GA相结合的混合全局优化算法，以提高在复杂拟合场景下的全局搜索能力[16]。此外，根据所选色散模型的复杂程度、测量波长范围以及优化参数的上下限设置，拟合时间有所不同。通过合理控制优化参数数量并动态调整搜索空间，可在

保证精度的前提下有效控制优化时间。

1.4 误差修正

在光学显微测量中,物镜的NA决定了其能够收集光的角度范围,对于较大的NA测量到的反射光谱不是单一角度入射的结果,而是多个不同角度的光路径叠加后的值。因此使用大NA高倍物镜来测量薄膜厚度时,需要进行校正。在极端情况下,未经校正的测量厚度可能比实际厚度小多达10%^[11]。

首先,使用显微镜系统内置的100W石英钨卤素灯光源,对一个由已知光学参数的SiO₂薄膜和Si衬底组成的结构进行了反射率测量,使用NA分别为0.1和0.9的物镜将光聚焦到样品上,得到图3中测量值光谱(红色实线),将入射角设为垂直入射,得到图3中计算值光谱(黑色虚线)。从图3可以看出,图3(a)中的测量结果与计算结果非常吻合。然而,图3(b)中的测量谱与图3(a)中的谱有显著差异。对于NA为0.9的物镜,较大的入射角占主导地位,图3(b)中的谱线的峰值相对于图3(a)中的峰值发生了蓝移。这表明,对于干涉效应显著的样品,使用显微镜进行测量会导致与垂直入射计算的结果存在显著的偏差。因此,使用显微镜测得的谱线既不符合常规测量结果,也无法通过简单的模拟再现。

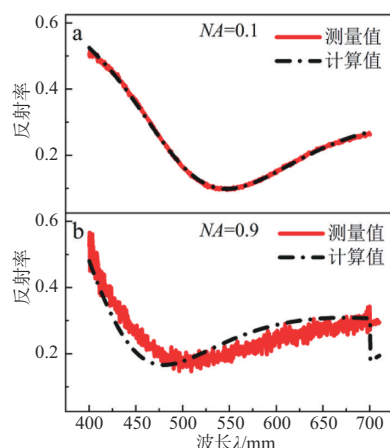


图3 不同数值孔径下SiO₂(300 nm)在Si上的反射率谱

更进一步,除了入射角分布带来的误差外,显微系统中反射光的空间强度分布也是影响测量精度的重要因素。受衍射效应影响,通过显微镜聚焦后的光束在样品平面上并非理想的“点”光斑,而是形成具有中心主峰和环状副峰结构的艾里斑。在实际显微反射率测量中,反射光还需经过物镜并通过多模光纤耦合传输至光谱仪,光纤的耦合行为不仅影响信号传输效率,还显著影响了探测端所感知的空间光强分布^[17]。但由于光纤的包层不是完全不透明,部分光的倏逝场会透射并干涉,从而抑制了艾里斑中的旁瓣,导致光束

强度分布更加平滑,接近于高斯分布。因此,为准确描述高NA显微系统中真实的入射条件,不仅需引入角度加权机制,还需结合非均匀光强分布的影响,对修正模型进行进一步校正,以提升光谱拟合精度与参数反演的可靠性。因此反射率应由以下积分获得,该积分形式不仅考虑了不同入射角度对反射率的影响,还引入了光源在角度空间中的实际强度分布,从而更全面地反映显微系统中的物理入射条件

$$R(\lambda) = \frac{\int_0^{\theta_m} R(\lambda, \theta) \omega(\theta) \sin \theta d\theta}{\int_0^{\theta_m} \omega(\theta) \sin \theta d\theta} \quad (10)$$

在这里 $R(\lambda)$ 是在 λ 处的理论反射率, $\theta_m = \arcsin(NA)$,而 $\omega(\theta)$ 是一个权重函数,表示光强的角分布,这里使用高斯分布

$$\omega(\theta) = \exp\left[-\frac{(\theta - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (11)$$

Hutzler等通过反向光路成像方法,观察到光纤出射后经物镜聚焦所形成的光斑,其横截面亮度分布高度符合高斯函数拟合结果^[13]。为更真实地描述系统中不同入射角的能量分布并提升厚度拟合精度, $\omega(\theta)$ 被定义为一个高斯函数, μ 表示高斯分布的中心位置,也即光强分布的主峰对应的角度,这里设为0^[18]。 σ 是高斯分布的标准差,控制分布的“宽度”,为了避免忽略显微系统中光源实际分布,在接下来的工作中会根据不同光源类型,进一步分析并选取最合适的取值,构建更加贴近真实入射角分布的权重模型。

2 实验结果

2.1 薄膜厚度

对于显微镜内置石英钨卤素灯光源,NA的大小是已知的,光照范围可以充满视场范围,为了找到 σ 的良好近似形式,对显微系统进行简单有效的标定,如图4所示,计算在中心波长 $\lambda=550\text{nm}$ 时,使用不同权重函数的反射率值随NA的变化趋势。将计算所得的反射率与前文所提到的已知光学参数的SiO₂/Si结构的实验测量结果进行了详细对比。

图4清晰地显示,反射率计算结果可以通过假设 $\omega(\theta)$ 服从高斯分布的方式与反射率测量结果匹配,与之前讨论的结果一致。在此高斯模型中当 $\sigma = \theta_m/2$ 或 $\theta_m/3$ (黑色、蓝色曲线)时,理论计算值与实验数据在各个数值孔径下的拟合误差最小。相比之下,若直接采用Saigal所提出的角度分

布^[12]（绿色曲线）的简单加权，则在高 NA 条件下拟合误差显著增加。这一现象表明，对于高 NA 系统中复杂的角度分布特性，简单近似不足以准确描述系统响应，而采用高斯分布模型能够更合理地反映显微光学系统中实际的光场特性，提供更为可靠的光谱拟合基础。

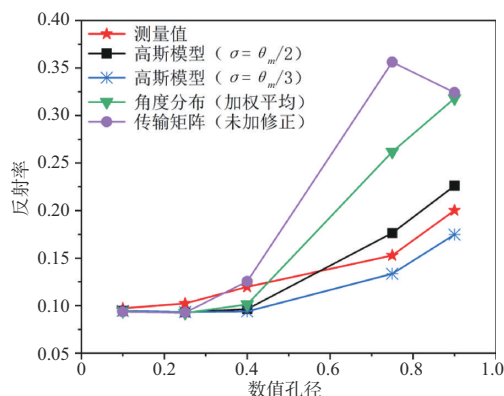


图4 550nm时不同数值孔径下测量值和不同模型计算值

根据以上分析，对一层覆盖在 Si 上的 SiO₂ 薄膜进行了光谱拟合，其光学参数未知。薄膜的复折射率采用 Cauchy 模型，反射率则使用 TMM 方法计算， $\omega(\theta)$ 服从高斯分布， $\sigma = \theta_m/2$ 。图 5 显示了显微镜内置石英钨卤素灯光源对不同数值孔径下测量的反射光谱的拟合结果。SiO₂ 厚度测量结果分别为 $NA=0.4$, $d=297.7\text{nm}$; $NA=0.75$, $d=293.0\text{nm}$; $NA=0.9$, $d=296.7\text{nm}$ 。采用高斯分布进行修正能够更有效地补偿拟合误差，拟合出的厚度在各 NA 下均稳定在标定厚度 ($d=300\text{nm}$) 的 4nm 以内，均方根误差 $RMSE=4.6\text{nm}$ 。

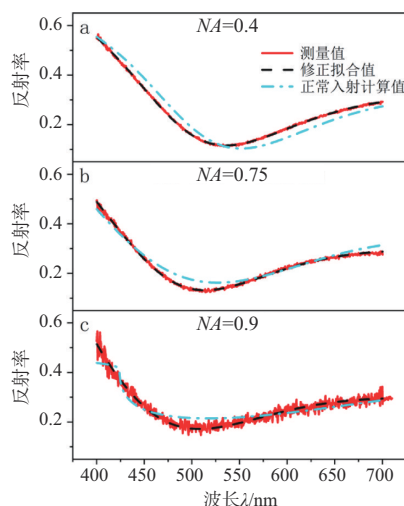


图5 石英钨卤素灯光源在不同数值孔径下的拟合结果

为了提高光源的稳定性缩小测量区域以适应微小结构的光谱测量需求，本研究从显微镜侧面引入了 HLD-II 型氙灯冷光源，通过直径为 100 μm 的多模光纤将光耦合至显微系统，如图 6

所示，由于光纤引入的入射光线小于物镜的完整照明孔径，其实际照射范围不足以覆盖整个物镜前端视场，因此无法直接确定有效的 NA。在高斯分布中，99.73% 的数据位于均值 $\pm 3\sigma$ 的范围内^[19]，因此，将最大入射角设定为 3σ 是一种有效的方法。

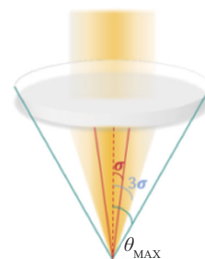


图6 氙灯光源入射光线实际入射路径图

为此，本文将缩放因子 σ 作为唯一拟合参数，通过测量具有已知厚度和光学常数的标准样品，反推出等效的有效数值孔径及其对应的光强分布。这一拟合方法不仅能够还原系统中的真实照明条件，还能将获得的缩放因子视作系统的一个光学特征参数。该标定方法同样适用于不同的显微测量系统。在表 1 中列出了不同数值孔径下，氙灯光源所对应的最佳拟合参数。

表1 不同数值孔径下氙灯光源对应的最佳匹配参数

NA	0.4	0.75	0.9
σ	0.211	0.358	0.389

实验表明，该缩放因子对于特定物镜和光纤耦合条件下较为稳定，可以在后续不同样品的反射率测量和光谱拟合过程中重复使用。

如图 7 所示，使用析氙灯光源的对上一节所使用的膜系结构进行反射光谱测量和拟合，可以看到修正后的曲线在 400~700nm 的可见光波段修正后的拟合曲线（黑色）与测量曲线（红色）展现出了优异的一致性，相较于原始模型（蓝色），修正后的目标函数值显著降低，修正后的误差也得到了明显优化，由原来的 $\pm 37.0\text{nm}$ 减少至了 $\pm 2.1\text{nm}$ 。对于不同 NA 的拟合结果，可以进一步观察到： $NA=0.4$ 时，拟合结果为 296.7nm； $NA=0.75$ 时，拟合结果为 292.0nm； $NA=0.9$ 时，拟合结果为 299.7nm。这些数据表明，随着数值孔径的增大，拟合结果略有不同，但都在优化后的误差范围内，同时对于不同 NA 也具备良好的适应性。

为进一步验证所提出方法在薄膜厚度测量中的准确性与可靠性，选取 SbTe 与 SiO₂ 两类薄膜进行实验测试，并将本研究的方法拟合结果与冷场发射扫描电子显微镜 (SEM, JSM-7500F) 测得的截面数据进行对比。结果表明，在采用石英钨

卤素灯与氙灯两种光源的情况下，光学测量结果与 SEM 数据均保持在 1.2nm 以内的误差范围内。其中，氙灯作为冷光源在稳定性与光谱连续性方面更具优势，其测量值与 SEM 数据的偏差更小，表现出更高的一致性。特别地，对于 SiO₂ 样品，最大相对误差低于 0.3%，进一步验证了所提出方法的高精度和通用性。综上所述，该显微光谱系统在结合误差修正模型后，具备较强的测量准确性和稳定性，适用于微纳尺度下多种薄膜材料的快速、非破坏性厚度表征。

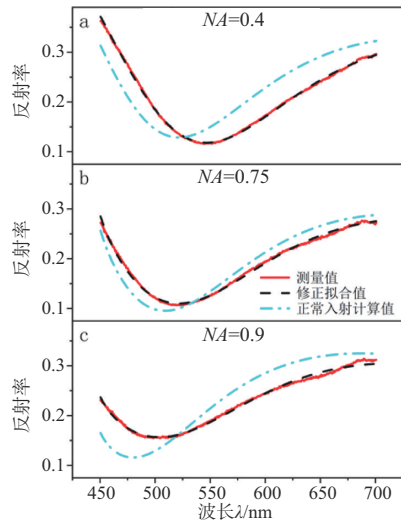


图 7 氙灯光源在不同数值孔径下的拟合结果

表 2 不同薄膜测量结果对比

测量方法	SEM	石英钨卤素灯	氙灯
SbTe(厚度/nm)	100.0	98.8	99.3
SiO ₂ (厚度/nm)	296.0	295.4	296.1

2.2 重复性评估

重复性是薄膜测量方法的重要指标，良好的重复性意味着该方法能够在多个测量过程中保持一致的结果，并有效避免偶然误差或环境因素带来的干扰。为系统评估本研究方法重复性和稳定性，分别对 SiO₂ 薄膜 ($d=300\pm4.0\text{nm}$) 和 SbTe 薄膜 ($d=100\pm1.2\text{nm}$) 进行十次独立测量。为了确保数据的代表性，所有的测量数据均严格按照相同的步骤执行，并通过重复实验来验证结果的一致性。

如图 8 所示，SiO₂ 薄膜测得厚度的相对标准偏差 (RSD) 为 1.64%，SbTe 薄膜测得的厚度 RSD 为 1.31%。从实验结果来看，薄膜厚度测量方法的重复性非常好，尤其是在多次独立测量下，测量数据之间的差异非常小 (RSD 均小于 2%)。这些结果表明，所采用的方法能够有效减少偶然误差或环境因素对测量结果的影响。

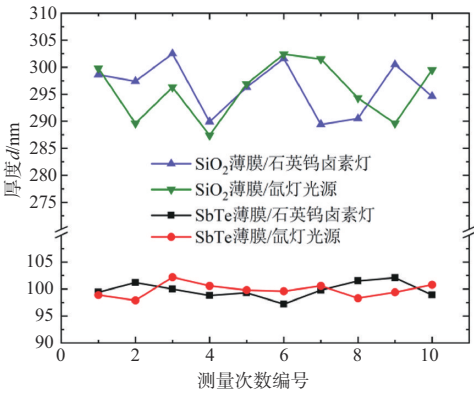


图 8 十次重复实验的厚度拟合结果

2.3 多点扫描对形貌表征

在薄膜材料的研究与应用过程中，除了厚度的精确控制之外，薄膜的表面形貌，包括粗糙度和微观结构，在决定其光学和机械性能方面有着重要影响^[20]。因此，使用高分辨率测量系统对薄膜材料厚度扫描和表面形貌分析也是评估薄膜质量的关键步骤之一。图 9 展示了本研究搭建的显微镜和步进电机系统进行的三维薄膜厚度分布分析。该实验设计使用 NA=0.75 的物镜，步进电机通过在 X-Y 方向上设置 0.25mm 的横向间隔，在整个测量区域内，共采集了 16×16 个点，测量结果显示，薄膜的平均厚度为 295.8nm，与 SEM 测量结果中给出的厚度值 296.0nm 非常接近，这验证了该方法在薄膜厚度测量方面的高一致性和准确性。

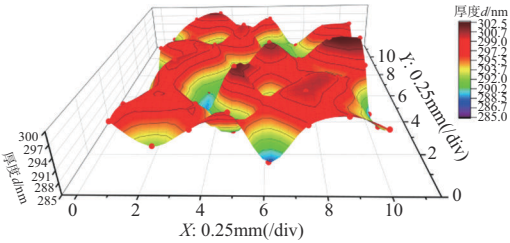


图 9 基于 16×16 采样点的表面形貌拟合图

测量区域内的最大厚度和最小厚度之间的差异为 17.0nm，而表面算术平均粗糙度 (Sa) 为 2.6nm。研究已声明拟合误差 <1.2% (对应平均厚度 295.8nm 时误差约 ±3.8nm)。实际测量中最大厚度差高于拟合误差的 2 倍，表明该差异更可能是真实表面形貌的反映，而非模型系统性误差。

3 结 论

本研究提出了一种优化的修正模型，设定可调参数并结合实验测量数据进行拟合优化，反演出最符合当前系统特性的有效光强权重分布。修正了高 NA 物镜带来的广泛入射角分布和非理想光源分布带来的影响，显著提高了薄膜厚度测量的

准确性。实验结果表明,该方法与 SEM 结果高度一致,表现出良好的精度和稳定性。通过步进电机实现了薄膜三维厚度分布分析,验证了其在小范围内的高精度和可靠性。

尽管结果显示有很好的准确性,但薄膜表面粗糙度和光源非理想分布仍可能影响测量精度。未来可进一步优化光源校正模型,扩展至其他薄膜材料的测量。本研究所构建的微区光学测量系统以及对误差修正的方案,为薄膜的高精度、无损、高适应性测量提供了可靠方案,尤其适用于晶圆制造中微小图案结构的质量控制与工艺参数调节。未来可以把本研究的方案进行多通道并行检测并加入深度学习辅助建模,有望进一步提升系统测量效率与智能化水平,推动微纳光学检测技术在先进制造领域的深入应用。

参考文献:

- [1] Hasan M, Ahmed S D, Ansar A, et al. Film thickness and its influence[M]. *Thin Films and Coatings: Engineering Applications*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025:49—72.
- [2] 吴传超, 苏宏锦, 张治, 等. 基于傅里叶红外光谱分光的椭圆偏膜测量技术[J]. *光学技术*, 2025, 51(02):252—256.
Wu Chuanchao, Su Hongjin, Zhang Zhi, et al. Ellipsometric thin film measurement technology based on fourier transform infrared spectroscopy[J]. *Optical Technology*, 2025, 51(02):252—256.
- [3] Bai C, Sun X, Liu Z, et al. Decoupled measurement of silicon-based film and substrate thickness by hybrid reflectance spectroscopy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 182:112143.
- [4] Purz T L, Hipsley B T, Martin E W, et al. Rapid multiplex ultrafast nonlinear microscopy for material characterization[J]. *Optics Express*, 2022, 30(25):45008—45019.
- [5] Jin Y, Yu K. A review of optics-based methods for thickness and surface characterization of two-dimensional materials[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54(39):393001.
- [6] Sánchez-Arriaga N E, Tiwari D, Hutabarat W, et al. A spectroscopic reflectance-based low-cost thickness measurement system for thin films: development and testing[J]. *Sensors*, 2023, 23(11):5326.
- [7] Kim K, Kim S, Kwon S, et al. Volumetric thin film thickness measurement using spectroscopic imaging reflectometer and compensation of reflectance modeling error[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2014, 15:1817—1822.
- [8] Frisenda R, Niu Y, Gant P, et al. Micro-reflectance and transmittance spectroscopy: a versatile and powerful tool to characterize 2D materials[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(7):074002.
- [9] Schwarz J, Niebauer M, Römmling L, et al. Spectro-spatial unmixing in optical microspectroscopy for thickness determination of layered materials[J]. *Advanced Optical Materials*, 2025, 13(5):2402502.
- [10] Schwarz J, Niebauer M, Kolešnik-Gray M, et al. Correlating optical microspectroscopy with 4×4 transfer matrix modeling for characterizing birefringent van der Waals materials[J]. *Small Methods*, 2023, 7(10):2300618.
- [11] Pliskin W, Esch R. Effect of numerical aperture of microscope objectives on film thickness determinations[J]. *Journal of Applied Physics*, 1968, 39(7):3274—3276.
- [12] Saigal N, Mukherjee A, Sugunakar V, et al. Angle of incidence averaging in reflectance measurements with optical microscopes for studying layered twodimensional materials[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(7):073105.
- [13] Hutzler A, Fritsch B, Matthus C D, et al. Highly accurate determination of heterogeneously stacked Van-der-Waals materials by optical microspectroscopy[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1):13676.
- [14] Urbánek M, Spousta J, Běhounek T, et al. Imaging reflectometry in situ[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(25):6309—6313.
- [15] Born M, Wolf E. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light[M]. Elsevier, 2013.
- [16] 荆龙康, 蒋玉蓉, 倪婷. 自适应模拟退火遗传算法在薄膜厚度及光学常数反演中的应用[J]. *光学技术*, 2012, 38(02):218—222.
Jing Longkang, Jiang Yurong, Ni Ting. Application of adaptive simulated annealing genetic algorithm in thin film thickness and optical constant inversion[J]. *Optical Technology*, 2012, 38(02):218—222.
- [17] Mayeh M, Farahi F. Laser beam shaping and mode conversion in optical fibers[J]. *Photonic Sensors*, 2011, 1:187—198.
- [18] Bruna M, Borini S. Assessment of graphene quality by quantitative optical contrast analysis[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, 42(17):175307.
- [19] Casiraghi C, Hartschuh A, Lidorikis E, et al. Rayleigh imaging of graphene and graphene layers[J]. *Nano letters*, 2007, 7(9):2711—2717.
- [20] Awan T I, Afsheen S, Kausar S. Thin-film attributions[M]. *Thin Film Deposition Techniques: Thin Film Deposition Techniques and Its Applications in Different Fields*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025:189—217.