

全局曲线拟合实现高厚度检测分辨力的结构光照明显微术

杨可君^{1,2}, 韩陈浩磊^{1,2}, 刘磊^{1,2}, 冯金花¹, 谢仲业³, 胡松¹, 唐燕^{1*}

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, 北京 100049;

³东莞理工学院电子工程与智能化学院, 广东 东莞 523808

摘要 提出一种利用调制深度响应曲线的全局信息进行重叠峰识别的结构光照明显微术, 采用有边界约束的最优化算法解析得到薄膜样本各表面的高度, 进而实现厚度分辨力高、精度高、计算速度快的膜层厚度分布测量与表面形貌重构。根据仿真分析, 在理想条件下所提方法可将厚度检测分辨力从 483 nm 提升至 175 nm, 并通过实验证明了所提方法可减少迭代次数, 且具有较高的重复性精度。

关键词 测量; 光学检测; 结构光照明显微术; 光学薄膜; 调制深度响应; 厚度检测

中图分类号 TH742

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2012001

Global Curve Fitting for Structured Illumination Microscopy with High Thickness Detection Resolution

Yang Kejun^{1,2}, Han Chenhaolei^{1,2}, Liu Lei^{1,2}, Feng Jinhua¹, Xie Zhongye³, Hu Song¹, Tang Yan^{1*}

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

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

³School of Electrical Engineering & Intelligentization, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, Guangdong, China

Abstract This paper proposes structured illumination microscopy that utilizes the global information in the curve of modulation depth response to identify overlapping peaks and obtains the height of each surface of the thin film sample analytically with an optimization algorithm under boundary constraints. Measurement of layer thickness distribution and surface morphology reconstruction are thereby achieved in a manner of high thickness resolution, high accuracy, and rapid calculation. According to the simulation analysis, the proposed method improves the thickness detection resolution from 483 nm to 175 nm under ideal conditions. Furthermore, experiments show that the proposed method reduces the number of iterations and offers high repeatability accuracy.

Key words measurement; optical detection; structured illumination microscopy; optical thin film; modulation depth response; thickness detection

1 引言

光学薄膜器件是新能源、生物医学、材料科学、先进制造等领域的重要工具^[1-4]。随着对微观世界探索

的深入, 研究者们发现表面形貌和膜厚分布的细微变化显著影响器件的各类性能, 如力学特性、电学特性和光学特性等。因此, 薄膜器件也逐渐向结构复杂化、功能集成化的方向发展。检测是制造的前提, 面对新结

收稿日期: 2022-02-22; 修回日期: 2022-03-13; 录用日期: 2022-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(61875201, 61975211, 62005287)、四川省杰出青年科技人才项目(2020JDJQ0005)、四川省中央引导地方科技发展项目(2020ZYD020)

通信作者: *tangyan@ioe.ac.cn

构、新功能的薄膜器件,表面形貌与厚度分布的检测技术也迎来更多的挑战。

光学检测方法由于具有检测精度高、样品破坏性小、测量速度快等独特优势,成为薄膜器件结构测量的主要技术。现常用的光学检测方法有椭圆偏振法^[5]、光谱分析法^[6]和白光干涉法^[7]。椭圆偏振法和光谱分析法的测量灵敏度和精度极高,但均为逐点测量,难以实现厚度分布测量,且检测重复精度差^[8-9]。白光干涉法则是一种面检测方法,利用相干光之间的干涉现象,结合高精度位移平台纵向移动样本,获得各个结构层与参考面的干涉图样,通过定位各干涉图每个像素点的零光程差处来获得各层形貌结构。白光干涉法不仅可实现亚纳米量级精度,而且检测重复性极高,但当样本表面形貌较复杂,引起条纹变化不连续、无法获得有效干涉图时,白光干涉法无法准确获得局部像素点的相对高度,导致测量失效^[10-12]。

结构光显微照明术(SIM)作为一种非干涉光学检测方法,在活体细胞、自由曲面元件、透明元件等复杂结构对象的三维轮廓检测中广泛应用^[13-15]。SIM因具有面测量、结构适应性高等优点,近年来也在微纳器件检测领域成为研究热点。SIM的测量原理为:利用结构光图形调制对待测样本表面相对高度的敏感性,结合高精度纵向扫描设备,获得样本每个像素点的调制深度响应曲线(MDRC),在计算机中解调高度信息后,即实现对表面形貌的测量^[16-17]。针对单层结构样本,通过优化结构条纹投影方式、改变测量系统结构或提出新的调制度解析算法,该技术不仅获得 4 nm 的测量精度,还具有实时检测能力^[18-20]。2018 年 SIM 首次被用于多层结构样本的厚度检测^[21],并成功重构了各层表面轮廓。此研究中使用了解析精度较高的相移法获得 MDRC,在每个扫描位置需采集多幅条纹图。为了提高成像效率、减少原始图像数据,该团队尝试用傅里叶变换法解析调制度,实现了更快速的厚度测量和多层形貌恢复^[22]。在进一步研究高度信息提取精度提升方法的过程中,发现受到解调算法的限制,SIM 存在层间相对距离检测阈值下限。在薄膜器件中,层间相对距离表现为膜厚分布。现有的高度信息解调算法,如重心法、最大值法、局部高斯曲线拟合法等,都假设双层样本的 MDRC 为峰-峰分离的曲线,且其峰位置分别为膜表面与基底表面恰好在物镜焦面处的扫描距离,则计算出两个最值即可获得相对厚度。然而,当膜厚逐渐减小,两个峰越来越近,最终导致 MDRC 一阶导数仅有一个过零点时,基于最值运算的方法无法依次识别膜表面与基底表面,即达到膜厚测量极限。最新的一种通过对 MDRC 进行迭代优化的解析方法,能依次提取两个重叠峰,可在一定程度提升分辨能力,该方法虽然可根据经验选择并处理 MDRC 中心的部分曲线以提升计算效率,但收敛速度仍然过慢、实用性较差^[23]。

为了解决厚度测量分辨力低、解调算法计算效率低的问题,本文提出一种基于全局曲线拟合的重叠峰

识别算法,运用最优化思想,从峰重叠的 MDRC 中分离各层结构的高度信息。通过建立薄膜结构 MDRC 模型,并根据该模型构造目标函数,以峰位置为优化参数,采用有约束的最优化算法对测量曲线进行拟合,获得两个高斯峰的精确位置,依次计算得到膜表面、基底表面各个点的相对高度后,最终实现待测物的形貌重构与厚度分布检测。进一步,针对所提算法对初值敏感的特点,在仿真中分析了各参数的初值对厚度检测分辨力、测量精度、计算效率等性能的影响,并将该优化设置用于验证性实验中。最后,将实验结果与商业轮廓仪的测量结果进行对比,验证了所提方法不仅可有效提升 SIM 的厚度检测分辨力,同时具有较快的运算速度和较高的重复精度。

2 基本原理

2.1 测量原理

基于 SIM 的薄膜器件测量系统结构如图 1 所示。该系统主要由结构光场生成器件、镜筒透镜、分束镜、显微物镜、垂直扫描结构和成像元件组成。低相干光源经过结构光场生成器调制,产生结构照明光场,通过镜筒透镜 1、分束镜后平行进入显微物镜,投影在待测样本的薄膜表面,并透过薄膜、在样本基底表面反射,反射信号依次经过膜结构、物镜、分束镜、镜筒透镜 2,最终被成像元件采集并存储。

此系统的耦合对称结构,即结构光场生成器到镜筒透镜 1 和成像元件到镜筒透镜 2 的距离相等、镜筒透镜 1 到分束镜和镜筒透镜 2 到分束镜的距离相等,使得样本在垂直向上的扫描图像与结构光一起由模糊到清晰再到模糊。样本的每一层表面反射信号到达物镜焦平面时,成像元件采集的图像中黑白条纹对比清晰,同时在计算机处理获得的 MDRC 中出现一个峰值。样本每个点的形貌可以通过峰值提取获得,且各层之间的距离与此曲线峰-峰距离正相关。因此,所提方法不仅可获得薄膜结构各层的表面形貌分布,还能同步检测膜层高度。

采用余弦条纹结构光,待测物各表面形貌经该条纹调制后,相应的光强分布^[23]为

$$I_i(x, y) = A(x, y) [1 + M_i(x, y) \cos(2\pi fx + \phi_0)], \quad (1)$$

式中: $I_i(x, y)$ 表示第 i 层表面调制后的光强分布; (x, y) 为像素点坐标; i 为各表面所在层数,例如单层膜结构中, $i=1$ 为基底表面, $i=2$ 为膜层表面; $A(x, y)$ 为背景光强度; $M_i(x, y)$ 为包括物体形貌信息的调制度; f 和 ϕ_0 分别为余弦条纹的空间频率和初始相位。

假设检测对象为图 1 所示的单层膜结构样本,则采集器获得的图像反射信号包括膜表面反射信号和基底表面反射信号。当膜厚度远大于光源相干长度时,采集图像的光强分布可表示为

$$I(x, y) = A(x, y) [1 + M(x, y) \cos(2\pi fx + \phi_0)] = \sum_{i=1}^2 I_i(x, y), \quad (2)$$

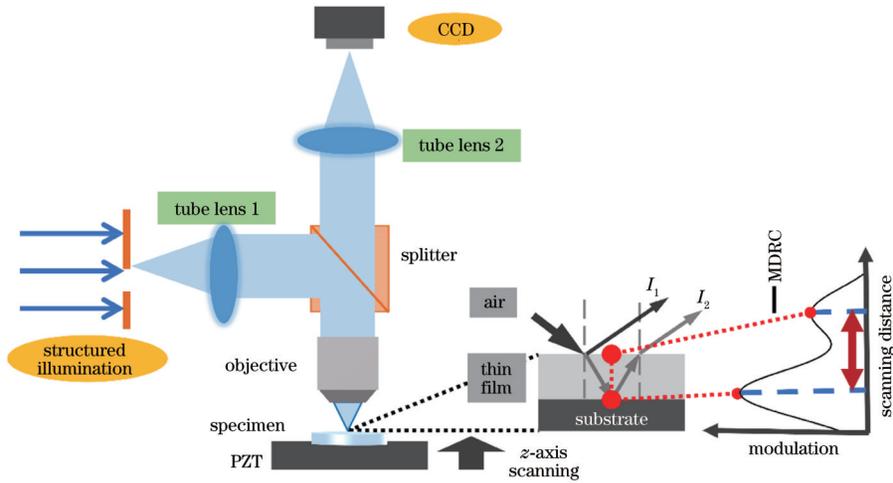


图 1 利用 SIM 检测透明膜结构的原理示意图

Fig. 1 Principle of transparent coating structure detected by SIM

式中： $M(x, y)$ 为采集图像的调制度。结合式(1)和式(2)发现,图像调制度可表示为各层形貌调制度信号的和^[23],即

$$M(x, y) = M_1(x, y) + M_2(x, y). \quad (3)$$

采用相移算法解调出图像调制度,结合纵向扫描,即得到 MDRC。根据 Nayar 等^[24]的研究结果,各层表面像素点 (x, y) 的 MDRC 与扫描位置 z 近似高斯函数关系,表示为

$$M_i(x, y, z) = R_i \exp \left[- \left(\frac{z - p_i(x, y)}{kR_{FW_i}} \right)^2 \right], \quad (4)$$

式中： R_i 表示各层调制度系数,为与该层结构的反射特性、光吸收性、表面粗糙度等材料特性有关的常量； $p_i(x, y)$ 表示该像素点恰好在物镜焦面时的轴向位置,即高斯峰位置； $k = \frac{1}{2\sqrt{\ln 2}}$ 为常数；变量 R_{FW_i} 表示各高斯函数的半峰全宽^[25](FWHM)。

$$R_{FW_i} = \frac{0.44707\lambda}{\nu(1-\nu)\sin^2[0.5\arcsin(NA/n_i)]}, \quad (5)$$

式中： λ 为光源中心波长； NA 为显微物镜的数值孔径； n_i 为反射信号穿过材料的折射率, $i=1$ 时,为膜材料折射率, $i=2$ 时,折射率则为 1； ν 为余弦条纹结构光的归一化空间频率。

$$\nu = \frac{\lambda f}{2m NA}, \quad (6)$$

式中： m 为显微物镜放大倍率。

由以上公式可知,MDRC 的峰值与样本各表面的形貌信息直接相关,因此通过峰值提取算法获得各个分信号的峰位置 p_1 和 p_2 ,就能重构样本的每一层形貌结构。进一步,结合膜材料折射率 n_1 ,可计算得到每个像素点 (x, y) 的膜层厚度:

$$D(x, y) = n_1 \cdot |p_1(x, y) - p_2(x, y)|. \quad (7)$$

2.2 重叠峰识别算法

当膜层较厚时,选择适当数值孔径的显微物镜,或

者调整扫描步距,可使得 MDRC 呈现多个峰的形状,如图 2 的点线所示。该曲线可使用现有的极大值法,通过定位 MDRC 一阶导数过零点,识别出各峰位置,进而计算厚度、重构各层形貌。但随着膜层厚度变小,峰-峰距离会越来越小,从而出现峰扭曲甚至重叠的情况,分别如图 2 的虚线、实线所示。当峰扭曲时,极大值法的提取误差较大,从而导致形貌恢复不准确;在峰完全重叠的情况下,MDRC 仅呈现一个极大值,不能区分膜表面与基底表面反射的信号,以致无法依次重构各表面的形貌,达到系统厚度检测下限。

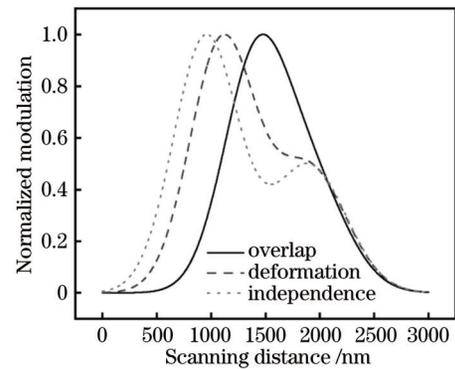


图 2 模拟三种情况下的 MDRC

Fig. 2 MDRCs in three different situations

所提方法利用全局曲线拟合(GCF)算法,在峰扭曲甚至峰重叠的情况下,识别出各个峰的位置信息,并用于重构样本厚度分布与各表面形貌。优化参数时选择和无约束迭代法^[23]相同的峰位置,利用有边界约束的最优化算法寻找模型曲线和测量曲线的最小均方差,从而实现 MDRC 全局拟合。因此,依据式(3)和式(4),寻找最优峰位置的过程可被描述为一个有边界约束的优化问题,即

$$p_{opt} = \underset{p}{\operatorname{argmin}} R_{RMS} [M'(x, y, z) - M(x, y, z)], \quad (8)$$

式中： p_{opt} 为由两个优化参数组成的向量 (p_1, p_2) ;

$M'(x, y, z)$ 为模型函数。

$$M'(x, y, z) = R_1 \exp \left\{ - \left[\frac{z - p_1(x, y)}{kR_{FW_1}} \right]^2 \right\} + R_2 \exp \left\{ - \left[\frac{z - p_2(x, y)}{kR_{FW_2}} \right]^2 \right\}, \quad (9)$$

参数 p_i, R_i 和 R_{FW_i} 在计算中满足边界约束

$$\begin{cases} 0 < p_i < s, p_i \in \mathbb{R} \\ \exp \left[- \left(\frac{z - p_i}{kR_{FW_i}} \right)^2 \right] \leq 1, R_{FW_i} < \frac{2s}{3}, i = 1, 2 \end{cases}, \quad (10)$$

式中 s 为总扫描距离。当迭代运算目标达成, 即获得最优化解 p_{opt} 时, 将两个峰位置依次代入式 (7), 便可测量膜材料层的厚度。如果将测量误差超过 10% 的厚度定义为系统不可分辨的范围, 在不同的调制度系数比、余弦结构光归一化空间频率、显微物镜数值孔径与放大倍率下, 极大值法和全局曲线拟合法的厚度检测分辨力如表 1 所示。即使 MDRC 呈峰-峰重叠形, 全局曲线拟合算法也能精确识别各峰位置, 从而实现各层结构形貌检测。因此, 相对于现有的极大值法, 全局曲线拟合算法可测量的厚度更薄, 即厚度检测分辨力更强。

表 1 不同系统参数中最大值法与全局曲线拟合法的膜厚检测分辨力

Table 1 Thickness measurement resolution by maximum-point method and GCF method under different system parameters

Ratio of modulation coefficient (R_2/R_1)	Normalized spatial frequency	Magnification	Numerical aperture (NA)	Thickness measurement resolution / nm	
				Maximum-point method	GCF method
1	0.5	100	0.9	487	198
		50	0.8	771	340
		20	0.45	3920	1585
	0.3	100	0.9	594	237
		50	0.8	1252	448
		20	0.45	6389	1760
0.5	0.5	100	0.9	483	175
		50	0.8	762	313
		20	0.45	3762	1316
	0.3	100	0.9	588	194
		50	0.8	1238	422
		20	0.45	6101	1552
0.1	0.5	100	0.9	565	201
		50	0.8	898	374
		20	0.45	4111	1742
	0.3	100	0.9	689	256
		50	0.8	1458	497
		20	0.45	6535	2033

2.3 仿真分析

根据上文描述, 重叠峰识别算法采用全局曲线拟合, 实现了厚度测量极限的突破。但是该算法的拟合精度对模型中各参量的迭代起点敏感^[26], 如峰位置初始值 p_{1ini} 和 p_{2ini} 、调制度系数 R_1 和 R_2 , 以及半峰全宽 R_{FW_1} 和 R_{FW_2} 。其中, 半峰全宽是高斯曲线轮廓的决定性参数, 对运算结果的影响最大。因此, 需要通过仿真模拟, 分析各参数对拟合精度的影响, 确定最优初始值。

模拟中的总扫描距离 s 等于 3000 nm, 样本膜厚 D 为 500 nm, 物镜数值孔径 NA 等于 0.9, 照明光源中心波长 $\lambda = 550$ nm, 余弦结构条纹归一化空间频率 $\nu = 0.5$, 膜材料折射率设为 1.3, 调制度系数比 $\frac{R_2}{R_1} = 0.4$ 。通过式 (5) 可计算得到 R_{FW_1} 和 R_{FW_2} 的理论值分

别为 800 nm 和 696 nm。

半峰全宽的设置方法有默认值法、理论值法和测量值法。其中, 默认值法是指不单独进行计算, 根据半峰全宽参数的非负性, 将其数值设定为 (1, 1), 并在提取最优峰位置的过程中, 此参量的变化范围为 $[0, s]$ 。考虑到膜材料折射率的准确值在实际中难以检测, 理论值法选择 R_{FW_2} 的理论值为初始值, 变化范围同样为 $[0, s]$ 。测量值法设定的初值是实验值, 即两峰高度重叠、形状扭曲的 MDRC 的半峰全宽值, 可通过局部高斯曲线拟合法获得, 仿真中为 934 nm。为了验证拟合算法的有效性, 将半峰全宽参数固定为理论值且在运算中保持不变, 与以上 3 种设置进行对比。添加 2% 随机噪声, 采用上述 4 种半峰全宽设定方式时, 重叠峰识别算法的性能如表 2 所示。

表 2 不同半峰全宽参数设定模式下全局曲线拟合算法与无约束迭代方法的性能比较

Table 2 Performance comparison of GCF method and unconstrained iterative method under different FWHM setting modes

Mode	Default	Theoretical	Experimental	Fixed
Value /nm	(1,1)	(696,696)	(934,934)	(800,696)
Variable range /nm	[0,3000]	[0,3000]	[0,3000]	Fixed
Number of iterations (unconstrained)	87	21	52	15
Number of iterations (constrained by GCF)	44	2	16	2
Measurement error /nm (unconstrained)	18.975	3.651	10.619	2.142
Measurement error /nm (constrained by GCF)	3.530	0.529	1.045	0.134

从迭代次数看,理论值法收敛最快,而默认值法最慢。当没有设置边界条件时,获得收敛结果至少需要 15 步,而使用全局曲线拟合算法只需要 2 次迭代。因此,有边界约束的全局曲线拟合算法相比之前的迭代算法^[23],运算效率大幅提升。从测量精度看,提取峰位置后恢复膜结构厚度,无边界和有边界时均能获得较高精度,其中理论值法的测量精度最接近固定的设定值拟合结果,即精度最高,测量值法与默认值法次之。因此,本文的全局曲线拟合算法将采用理论值法确定半峰全宽参量,仿真的 MDRC 和基于理论值法进行拟合的结果如图 3 所示。

模型函数中其他两组参数的设置,可通过分析 MDRC 的特点确定。首先,由于全局拟合需要曲线形状相对完整的 MDRC,因此通常将聚焦平面设置在纵向扫描进程的中间位置,那么峰位置初始值 p_{1mi} 和 p_{2mi} 可以分别设置为 $\frac{s}{3}$ 和 $\frac{2s}{3}$,变化范围为 $[0, s]$ 。其次,因为拟合算法的第一步是归一化处理 MDRC,所以调制系数 R_2 的变化范围为 $[0, 1]$;且由于在膜层表面大部分光信号参与折射,反射光强度相对较小,有固定关系 $R_1 > R_2$,则假设 R_1 初始值为 1,根据 R_2 采用不同值进行 50 次仿真的检测精度如表 3 所示。可看到,当 R_2 以仿真数值 0.4 为计算起点时,全局曲线拟合法厚度测

表 3 不同调制系数 R_2 初值下全局曲线拟合算法与无约束迭代方法的性能比较

Table 3 Performance comparison of GCF method and unconstrained iterative method in different start point of R_2

Reflection coefficient R_2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
RMSE of 50 iterations /nm(unconstrained)	2.588	1.817	1.260	0.422	1.203	1.935	2.464	3.198	4.000	5.212
Standard deviation /nm(unconstrained)	9.148	5.687	2.801	1.491	2.376	6.057	8.233	11.054	15.418	19.009
RMSE of 50 iterations /nm(constrained by GCF)	0.643	0.085	0.532	0.015	0.071	0.359	0.444	0.498	0.177	0.181
Standard deviation /nm (constrained by GCF)	1.846	1.611	0.716	0.136	0.684	1.657	2.174	2.468	2.529	2.775

3 实验结果

为验证所提方法的可行性,选择光刻胶为膜、硅为基底的样本进行实验。根据图 1 所示的系统结构搭建的实验系统如图 4 所示。其中低相干光源为 LED 白光,光谱带宽为 160 nm,中心波长为 550 nm;结构光生成器件为德州仪器生产的数字微反射镜阵列(DMD),单个微透镜边长 13.7 μm ,靶面大小为 1024 pixel \times 768 pixel;图像采集元件为 Watech 生产的 WAT-902H 电荷耦合器件(CCD)相机,像素尺寸为 6.25 μm \times

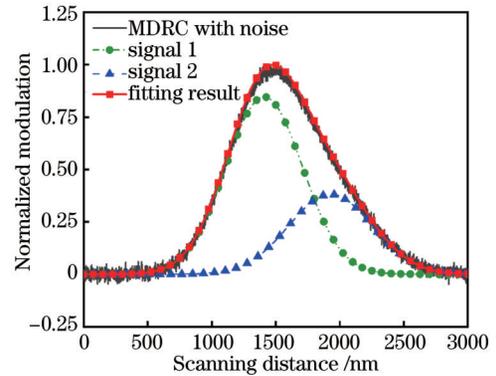


图 3 有噪声时的仿真 MDRC 及其重叠峰分离结果

Fig. 3 Simulated MDRCs with noise and separation results of overlapping peaks

量结果的标准偏差在 0.2 nm 以内,虽然随着起始值逐渐偏离 0.4,测量标准偏差逐渐增大,但每个起点 50 次测量的标准偏差均小于 3 nm,均方根误差(RMSE)均小于 0.7 nm。而无约束迭代法的最小标准偏差为 1.491 nm,且受起始值影响较大,标准偏差最大可达 19.009 nm,即全局曲线拟合算法的稳定性更好。对比均方根误差还可得出:在噪声干扰下, R_2 在 $[0, 1]$ 范围内能任选起点,全局曲线拟合法的检测结果都比无约束迭代算法具有更高精度。

6.5 μm ,共有 567 \times 768 个像素点;显微物镜的放大倍率 m 为 100,数值孔径 NA 为 0.9。

在硅片基底上旋涂 RZJ-304 光刻胶,并曝光了方形图案以在边缘形成台阶,最终制成实验样本。使用光谱仪检测样本的有膜区域,测得材料折射率为 1.674。样本沿着纵向扫描运动,并通过压电陶瓷(PZT)驱动器实现,扫描步距为 50 nm,总扫描距离为 4 μm 。每步扫描时,周期为 16 pixel 的结构光余弦条纹以相等的相位差变化 8 次。采集全部图像后,在计

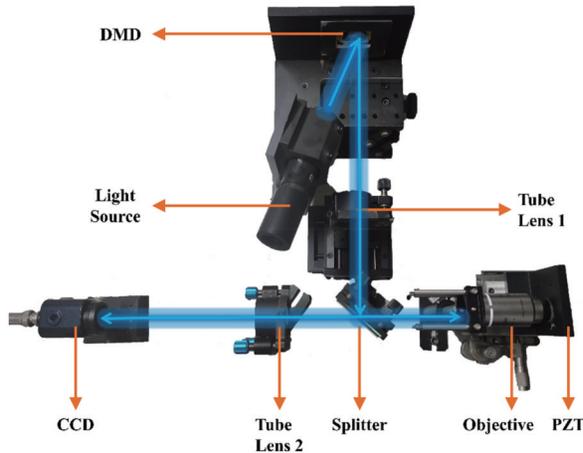


图 4 实验系统结构图^[23]

Fig. 4 Schematic of experimental system^[23]

计算机中使用相移法,解调获得所有像素点的 MDRC。根据以上参数可计算得到 R_{FW_2} 的理论值为 1443 nm,代入模型方程中,对每条 MDRC 进行重叠峰识别。样本方形图案边沿各层形貌恢复如图 5(a)所示,其中

$x=143$ pixel 的形貌剖面如图 5(b)所示,无膜结构处像素点(145, 263)和有膜层像素点(72, 114)的 MDRC 分别如图 5(c)、(d)所示。

无光刻胶区域中只有硅基底,因此 MDRC 仅有 1 个峰值;而在有光刻胶的区域中,硅表面与光刻胶表面均反射光信号,且光刻胶厚度较薄、两部分信号相互重叠,因此对应的 MDRC 为峰-峰重叠型,此时重心法、最大值法、局部高斯拟合法均无法识别两个峰位置,即达到厚度测量极限。全局曲线拟合法通过 2 次迭代运算,不仅分离出各子信号,成功重构了样本光刻胶台阶形貌,恢复了胶层下的基底平面,还高精度地检测出各峰位置,重构形貌(72, 114)像素点处膜层高度的 10 次重复测量结果如图 6 点实线所示,重复性精度可达 1.35 nm。无约束迭代法的每次运算需要至少 15 次迭代,其重复性测量精度(图 6 的虚线)为 2.90 nm,说明全局曲线拟合法不仅运算速度快,且重复性精度更高,测量结果更可靠。对比 Bruker 公司探针式轮廓仪检测结果 1364.60 nm,无约束迭代法测量的相对均方根误差为 19.21 nm,而全局曲线拟合法的相对均方根误差为 17.94 nm,证明全局曲线拟合法的检测精度较高。

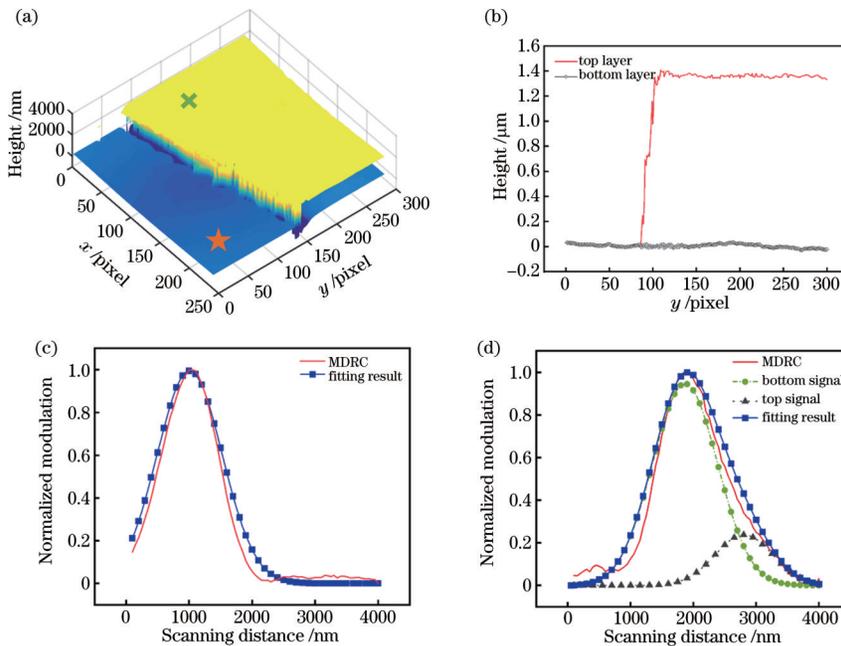


图 5 利用本文方法测量得到的样本图形边缘台阶。(a)三维形貌;(b)台阶形貌截面($x=143$ pixel);(c)无膜像素点(145, 263)的 MDRC 及其拟合结果;(d)有膜像素点(72, 114)的 MDRC 及其全局曲线拟合、重叠峰分离结果

Fig. 5 Step region on the edge of patterned sample detected by proposed method. (a) Three-dimensional topography; (b) cross-section profile when $x=143$ pixel; (c) MDRC at the pixel point (145, 263) and fitting result; (d) MDRC at the pixel point (72, 114), the fitting result, and separation result of overlapping peaks

4 结 论

为了识别出 MDRC 中相互重叠的峰值信息,进而降低结构光照明微系统的厚度检测分辨力,提出一种全局曲线拟合的峰识别算法。通过分析薄膜结构样品的 MDRC 特点,以高斯函数和为模型函数、峰值位置为优化目标、并设定非线性边界约束,对 MDRC 进

行全局拟合,成功分离高度重叠的两个峰,并恢复了样品的各层表面形貌与膜厚分布,证明了所提方法可提高厚度测量分辨力。此外,针对重叠峰识别算法对模型中多个参数的初值敏感的特性,在仿真中分析了半峰全宽、调制度系数对测量精度的影响,优化了各参数的初值设置。同时对比了无约束迭代法,证明有边界的全局曲线拟合算法计算速度更快、鲁棒性更好。实

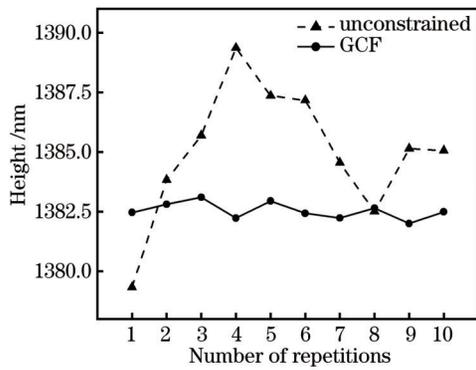


图 6 像素点(72,114)膜层高度重复性测量结果

Fig. 6 Thickness at pixel point of (72, 114) obtained from repetitive experiments

验中重复测量精度达到 1.35 nm, 相对轮廓仪测量结果的均方根误差小于 18 nm, 分别验证了所提方法的高稳定性与有效性。

参 考 文 献

- [1] Aydin E, Allen T G, de Bastiani M, et al. Interplay between temperature and bandgap energies on the outdoor performance of perovskite/silicon tandem solar cells[J]. *Nature Energy*, 2020, 5(11): 851-859.
- [2] Wang C H, Li X S, Hu H J, et al. Monitoring of the central blood pressure waveform via a conformal ultrasonic device[J]. *Nature Biomedical Engineering*, 2018, 2(9): 687-695.
- [3] 邓钟扬, 贾强, 冯斌, 等. 脉冲激光沉积高性能薄膜制备及其应用研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(8): 0802010.
Deng Z Y, Jia Q, Feng B, et al. Research progress on fabrication and applications of high-performance films by pulsed laser deposition[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(8): 0802010.
- [4] Park K K, Lee H, Kupnik M, et al. Fabrication of capacitive micromachined ultrasonic transducers via local oxidation and direct wafer bonding[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2011, 20(1): 95-103.
- [5] 魏铭洋, 连洁, 姜清芬, 等. 二维二硒化铂薄膜光学性质的椭圆偏振研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(12): 1203002.
Wei M Y, Lian J, Jiang Q F, et al. Ellipsometry study on optical properties of two-dimensional platinum selenide film[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1203002.
- [6] Youngquist R C, Carr S, Davies D E. Optical coherence-domain reflectometry: a new optical evaluation technique [J]. *Optics Letters*, 1987, 12(3): 158-160.
- [7] Kim S W, Kim G H. Thickness-profile measurement of transparent thin-film layers by white-light scanning interferometry[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(28): 5968-5973.
- [8] Jellison G E. Examination of thin SiO₂ films on Si using spectroscopic polarization modulation ellipsometry[J]. *Journal of Applied Physics*, 1991, 69(11): 7627-7634.
- [9] Yun Y H, Joo K N. Novel combined measurement system to characterize film structures by spectral interferometry and ellipsometry[J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 34396-34411.
- [10] de Groot P. Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(1): 1-65.
- [11] Li S K, Wang X Z, Tang F, et al. Nonsampled contourlet transform method for optical fringe pattern analysis in profilometry and interferometry[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(27): 7718-7725.
- [12] 邓钦元, 唐燕, 周毅, 等. 基于白光干涉频域分析的高精度表面形貌测量[J]. *中国激光*, 2018, 45(6): 0604001.
Deng Q Y, Tang Y, Zhou Y, et al. High-resolution surface topography measurement based on frequency-domain analysis in white light interferometry[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(6): 0604001.
- [13] 朱日宏, 孙越, 沈华. 光学自由曲面形检测方法与展望[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0112001.
Zhu R H, Sun Y, Shen H. Progress and prospect of optical freeform surface measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0112001.
- [14] Wang C C, Lee C W, Huang C Y, et al. Observation of nanoparticle internalization on cellular membranes by using noninterferometric widefield optical profilometry[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(13): 2458.
- [15] 王维, 王杰, 黄易杨, 等. 基于偏振透射结构光的透明物体表面缺陷检测方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(18): 1812002.
Wang W, Wang J, Huang Y Y, et al. Surface defect detection in transparent objects using polarized transmission structured light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(18): 1812002.
- [16] Neil M A, Juskaitis R, Wilson T. Method of obtaining optical sectioning by using structured light in a conventional microscope[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(24): 1905-1907.
- [17] Gustafsson M G L, Shao L, Carlton P M, et al. Three-dimensional resolution doubling in wide-field fluorescence microscopy by structured illumination[J]. *Biophysical Journal*, 2008, 94(12): 4957-4970.
- [18] York A G, Chandris P, Nogare D D, et al. Instant super-resolution imaging in live cells and embryos via analog image processing[J]. *Nature Methods*, 2013, 10(11): 1122-1126.
- [19] Xie Z Y, Tang Y, Feng J H, et al. Accurate surface profilometry using differential optical sectioning microscopy with structured illumination[J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 11721-11733.
- [20] Heist S, Zhang C, Reichwald K, et al. 5D hyperspectral imaging: fast and accurate measurement of surface shape and spectral characteristics using structured light[J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 23366-23379.
- [21] Xie Z Y, Tang Y, Zhou Y, et al. Surface and thickness measurement of transparent thin-film layers utilizing modulation-based structured-illumination microscopy[J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2944-2953.
- [22] Xie Z Y, Liu X, Yang K J, et al. Fast thickness

- measurement of thin films using two-dimensional Fourier transform-based structured illumination microscopy[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10841: 1084105.
- [23] Yang K J, Han C, Feng J H, et al. Film thickness-profile measurement using iterative peak separation structured illumination microscopy[J]. Applied Sciences, 2021, 11(7): 3023.
- [24] Nayar S K, Nakagawa Y. Shape from focus: an effective approach for rough surfaces[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 13-18, 1990, Cincinnati, OH, USA. New York: IEEE Press, 1990: 218-225.
- [25] Dan D, Yao B L, Lei M. Structured illumination microscopy for super-resolution and optical sectioning[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(12): 1291-1307.
- [26] Wang T Y, Huang L, Kang H, et al. RIFTA: a robust iterative Fourier transform-based dwell time algorithm for ultra-precision ion beam figuring of synchrotron mirrors [J]. Scientific Reports, 2020, 10: 8135.