

基于 Mueller 矩阵成像椭偏仪的纳米结构几何参数大面积测量

陈修国 袁奎 杜卫超 陈军 江浩 张传维 刘世元

Large-scale nanostructure metrology using Mueller matrix imaging ellipsometry

Chen Xiu-Guo Yuan Kui Du Wei-Chao Chen Jun Jiang Hao Zhang Chuan-Wei Liu Shi-Yuan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 070703 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.070703

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.070703>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

空间调制稳态微型快拍成像测偏技术研究

[Static subminiature snapshot imaging polarimeter using spatial modulation](#)

物理学报.2016, 65(5): 050702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.050702>

椭偏精确测定透明衬底上吸收薄膜的厚度及光学常数

[Accurate determination of thickness values and optical constants of absorbing thin films on opaque substrates with spectroscopic ellipsometry](#)

物理学报.2015, 64(11): 110702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.110702>

基于 Mueller 矩阵椭偏仪的纳米压印模板与光刻胶光栅结构准确测量

[Accurate measurement of templates and imprinted grating structures using Mueller matrix ellipsometry](#)

物理学报.2014, 63(18): 180701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.180701>

弹光调制型成像光谱偏振仪中的高精度偏振信息探测研究

[The research of polarized information detection for photo-elastic modulator-based imaging spectropolarimeter](#)

物理学报.2013, 62(6): 060702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.060702>

用斜入射光反射差法无标记实时监测不同浓度兔 IgG 和山羊抗兔 IgG 反应的动力学过程

[Label-free and real-time detection of interactional dynamic processes of rabbit IgG with different concentrations and goat anti-rabbit IgG by oblique-incidence reflectivity difference method](#)

物理学报.2012, 61(6): 060703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.060703>

基于Mueller矩阵成像椭偏仪的纳米结构几何参数大面积测量*

陈修国¹⁾ 袁奎¹⁾ 杜卫超¹⁾ 陈军¹⁾ 江浩^{1)†} 张传维¹⁾²⁾ 刘世元¹⁾²⁾

1)(华中科技大学, 数字制造装备与技术国家重大实验室, 武汉 430074)

2)(武汉颐光科技有限公司, 武汉 430075)

(2015年10月14日收到; 2016年1月5日收到修改稿)

为了实现有效的工艺监控, 在批量化纳米制造中对纳米结构的关键尺寸等几何参数进行快速、低成本、非破坏性的精确测量具有十分重要的意义. 光学散射仪目前已经发展成为批量化纳米制造中纳米结构几何参数在线测量的一种重要手段. 传统光学散射测量技术只能获得光斑照射区内待测参数的平均值, 而对小于光斑照射区内样品的微小变化难以准确分析. 此外, 由于其只能进行单点测试, 必须要移动样品台进行扫描才能获得大面积区域内待测参数的分布信息, 从而严重影响测试效率. 为此, 本文将传统光学散射测量技术与显微成像技术相结合, 提出利用 Mueller 矩阵成像椭偏仪实现纳米结构几何参数的大面积快速准确测量. Mueller 矩阵成像椭偏仪具有传统 Mueller 矩阵椭偏仪测量信息全、光谱灵敏度高的优势, 同时又有显微成像技术高空间分辨率的优点, 有望为批量化纳米制造中纳米结构几何参数提供一种大面积、快速、低成本、非破坏性的精确测量新途径.

关键词: 纳米结构, 纳米测量, 光学散射测量, Mueller 矩阵成像椭偏仪

PACS: 07.60.Fs, 42.25.Fx, 81.07.-b, 42.30.-d

DOI: 10.7498/aps.65.070703

1 引言

纳米制造是指产品特征尺寸为纳米量级的制造技术, 即特征尺寸在 100 nm 以内的制造技术. 为了实现有效的工艺监控, 在批量化纳米制造中对纳米结构的特征线宽、高度、侧壁角、周期间距等几何参数进行快速、低成本、非破坏性的精确测量具有十分重要的意义. 目前, 纳米结构几何参数测量的主要手段是扫描电子显微镜和原子力显微镜, 其优点是都可以满足纳米级尺寸的测量, 但其显著缺点是速度慢、成本高、设备操作复杂、难以集成到制造工艺线上实现在线测量. 与之相比, 光学测量方法具有速度快、成本低、无接触、非破坏和易于在线集

成等优点, 因而一直在先进工艺监测与优化控制领域得到广泛应用.

光学测量方法大致可以分为两类, 一类是不需要模型 (model-free) 的方法, 另一类是基于模型 (model-based) 的方法^[1]. 不需要模型的方法如传统光学显微镜, 其基本原理是通过显微光学镜头采集待测结构的几何轮廓形貌图像, 进而通过边缘检测等图像处理算法识别并提取出待测结构的几何尺寸. 这种测量方法简单直观, 不涉及到复杂的数学运算, 因而在微米和亚微米工艺在线检测等领域获得了广泛应用, 如基于显微机器视觉的自动光学检测系统^[2]. 但是当纳米结构的特征尺寸达到亚波长纳米量级时, 由于存在光学分辨率极限限制的问题, 使得这种“所见即所得”的光学测量方法即

* 国家自然科学基金 (批准号: 51475191, 51405172)、国家重大科学仪器设备开发专项 (批准号: 2011YQ160002)、中国博士后科学基金 (批准号: 2014M560607, 2015T80791)、湖北省自然科学基金 (批准号: 2015CFB278) 和教育部长江学者与创新团队发展计划 (批准号: IRT13017) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hjiang@hust.edu.cn

便是在最佳焦平面上也无法获得清晰成像,因此无法满足亚波长纳米结构关键尺寸的精确测量要求.与传统光学显微镜这类不需要模型的方法不同,基于模型的方法如基于光谱椭偏仪(spectroscopic ellipsometry)的光学散射测量方法,它通过测量待测结构(一般为周期性结构)零级衍射光在反射前后偏振状态的变化(即振幅比和相位差),然后将其与理论光学建模计算出的振幅比和相位差相比较,进而从中反演并提取出待测结构的几何参数.尽管光谱椭偏仪的测量过程不如传统光学显微镜简单直观,但是却不存在后者受光学分辨率极限限制的问题.同时由于其光谱灵敏度高和对材料选择性低的优点,因而在各向同性薄膜材料的光学特性表征与薄膜厚度测量中获得了广泛的应用^[3-7].光谱椭偏仪自2000年前后开始应用于亚波长纳米结构的关键尺寸测量^[8,9],此时通常被称为光学散射仪(optical scatterometry).尽管与测量表面粗糙度的光学散射仪在名称上完全相同,但其工作原理截然不同.由于其主要目的是用于关键尺寸测量,因此也被称为光学关键尺寸(optical critical dimension, OCD)测量仪.

近年来,随着纳米结构特征尺寸的不断减小,纳米结构测量领域出现了一些新的挑战,如纳米结构线边粗糙度和线宽粗糙度等形貌特征的表征.这些形貌特征并不随着纳米结构特征尺寸按比例减小,使得这些原先可以忽略的形貌特征随着纳米结构特征尺寸的不断减小对器件性能造成越来越显著的影响^[10,11].美国国家标准技术研究院的研究表明,随着纳米结构特征尺寸的不断减小,基于传统光谱椭偏仪的光学散射测量技术正逐渐接近其光谱灵敏度极限^[12].为此,国际上不少研究机构都对光学散射测量技术展开了有益的探索.其中,基于Mueller矩阵椭偏仪(Mueller matrix ellipsometry, MME)的光学散射测量技术由于可以获得更为丰富的测量信息并且具有更高的光谱灵敏度,近年来引起了研究者的广泛关注.法国国家科学研究中心界面与薄膜物理实验室(CNRS-LPICM)自2005年开始致力于采用Mueller矩阵椭偏仪对光栅结构的关键尺寸及套刻误差等参数进行测量^[13-15],他们强调Mueller矩阵椭偏仪可以获得比传统光谱椭偏仪丰富得多的信息,并且特别指出改变方位角以实现锥形衍射的重要性^[14].OCD测量设备供应商Nanometrics公司报道了用Mueller

矩阵椭偏仪对光栅结构的套刻误差及非对称性等特征的测量^[16,17],指出传统光谱椭偏仪对套刻误差及非对称性等特征的偏移方向不敏感.与此相反,Mueller矩阵椭偏仪对套刻误差及非对称性等特征的偏移方向和大小均非常敏感.通过进一步研究Mueller矩阵中不同元素与套刻误差及非对称性等特征之间的关系,有望实现对上述特征的快速测量.作者所在实验室研制出了国内首台高精度宽光谱Mueller矩阵椭偏仪^[18],利用Mueller矩阵椭偏仪首次发现了纳米压印过程中由于残胶厚度不均匀等因素所引起的退偏效应,实验结果表明在考虑了退偏效应之后,不仅可以提高光栅结构线宽、线高、侧壁角以及残胶厚度等参数的测量准确度,而且可以直接得到光斑照射区域内残胶厚度的不均匀性参数^[19-21].

从最根本的测量机理而言,传统椭偏测量技术(包括传统光谱椭偏仪和Mueller矩阵椭偏仪等技术)采用的是光斑照射区平均测试方法,所获得的测量信息本质上是样品实际测量信息与照射至样品表面的光斑卷积之后的结果,因此只能获得全部光斑照射区域内样品待测参数的平均值.传统椭偏测量技术的纵向分辨率由其光谱灵敏度决定,对于膜厚测量精度一般可以达到埃级;其横向分辨率由照射至样品表面的光斑直径和样品台移动精度决定,传统微光斑椭偏仪的光斑直径一般从25 μm 至3 mm不等^[22].传统椭偏测量技术的上述特点使其存在两方面的不足:一方面是对所有小于光斑照射区域内待测对象的微小变化均难以进行准确的检测分析,特别是当样品的待测参数分布不均匀时,平均化测试将会得出错误的结果;另一方面是传统椭偏测量技术一次测量只能获得当前光斑照射区域内的单点信息,要获得样品上多点或者大面积区域内的信息需要移动样品台进行多次测量或者点扫描,从而严重影响测试效率.为此,研究人员将传统椭偏测量技术与显微成像技术相结合提出了成像椭偏测量技术^[23,24].

成像椭偏测量技术兼具传统椭偏测量技术和显微成像技术两者的优点.首先是其成像模式可以获得样品上包含整个视场的大面积区域内的测量信息,由此可以实时地观测样品的状态,也可以直观地确认被测区域;其次是成像椭偏仪所获得的图像的每一个像素点都对应一组独立的椭偏信息(对于光谱椭偏仪为振幅比和相位差,对于Mueller矩

阵椭偏仪为 Mueller 矩阵), 因此具有与传统椭偏测量技术相当的纵向分辨率. 成像椭偏仪的横向分辨率通常可以达到几个微米量级, 通过进一步优化仪器的光路设计甚至可以达到接近光学衍射极限水平的横向分辨率, 远高于传统椭偏测量技术的横向分辨率. 通过对所获得图像的各个像素点进行独立的椭偏测试, 可以准确实时地重构包含整个视场的大面积区域内待测样品的三维显微形貌, 不需要像传统椭偏测量技术那样进行点点扫描, 因此可以极大地提高样品的分析测试效率.

成像椭偏测量技术自 20 世纪 80 年代出现以来, 无论是其自身技术的发展还是应用都得到了推广. 在技术层面, 成像椭偏测量技术已从最开始的基于消光式椭偏仪的成像椭偏测量技术^[23,24]发展到全 Mueller 矩阵型成像椭偏测量技术^[25,26]. 在应用层面, 目前成像椭偏测量技术已广泛应用于纳米薄膜表征以及分子生物学和生物医学中疾病诊断等方面. 例如, 利用成像椭偏仪对单分子膜层^[27]、蛋白质膜层^[28]、石墨烯膜层^[29]、太阳能光伏电池中的薄膜层^[30]等进行表征, 利用成像椭偏仪对细菌^[31]、视网膜疾病^[32]、癌症^[33]等进行检测与诊断. 总的来说, 目前已有的研究很少直接面向批量化纳米制造过程中的工艺监测与控制, 尽管有将 Mueller 矩阵椭偏仪用于纳米结构测量的研究, 也有利用成像椭偏仪对纳米薄膜进行表征的报道, 但是将 Mueller 矩阵椭偏仪与显微成像技术相结合发展 Mueller 矩阵成像椭偏测量技术 (Mueller matrix imaging ellipsometry, MMIE) 并将其用于纳米结构几何参数大面积测量方面, 目前尚未引起广泛关注.

2 基本原理

2.1 仪器测量原理

本文在实验中采用的测量仪器是自主搭建的双旋转补偿器型 Mueller 矩阵成像椭偏仪, 其基本原理如图 1 所示. 从光源 (Energetiq 公司 LDLS Eq-99XFC) 出来的光先后经过消色差透镜对 L_1 (Thorlabs 公司 MAP105050-A)、单色仪 M (北京卓立汉光 Omni- λ 320i)、消色差透镜对 L_2 (Thorlabs 公司 MAP107575-A) 会聚至光纤 F (B&W Tek 公司 FRS-400-0.22-1.5-BB-SW) 一端. 从光纤另一端

出来的光经准直镜 L_3 (Thorlabs 公司 AC254-100-A-ML) 之后变为一平行光束. 该平行光束先后经过起偏器 P、补偿器 C_{r1} 之后入射至待测样品表面. 从待测样品表面反射之后的平行光束再经过补偿器 C_{r2} 、检偏器 A、成像透镜 L_4 之后进入互补金属氧化物半导体 (CMOS) 相机. 其中, 起偏器 P 和检偏器 A 为 α -BBO 格兰-泰勒偏振片 (武汉优光科技 PGT6312), 对应消光系数小于 5×10^{-6} ; 补偿器 C_{r1} 和 C_{r2} 为由两片零级 1/4 石英波片组成的消色差补偿器; 成像透镜 L_4 为一工作距离为 250 mm 的远心镜 (深圳灿锐光学科技 XF-T1 X250D), 对应的光学放大倍率为 1 : 1; 相机为一款带有全局快门 CMOS 传感器的工业相机 (Applied Vision 公司 Manta G-235B/C), 该相机共有 1936×1216 个像素点, 每个像元尺寸为 $(5.86 \times 5.86) \mu\text{m}^2$. 待测样品和 CMOS 相机分别处于成像透镜 L_4 的物像共轭面上, 且为了能够获得整个待测样品表面的清晰成像, 相机在安装时其中心轴与仪器反射光路光轴之间成一定微小角度. 此外, 光路中所有消色差透镜 (L_1 — L_3) 表面均镀有波长范围 400—700 nm 的增透膜.

光路中两个补偿器 C_{r1} 和 C_{r2} 分别安装在两个伺服电机 (Applimotion 公司 HO-63-AE-000) 的中空轴中, 并按照 $\omega_1 = 5\omega$ 和 $\omega_2 = 3\omega$ 的转速比同步旋转 (ω 为基频). 相机上任意像素所收集到的光束对应的 Stokes 向量 \mathbf{S}_{out} 可以表示为^[26,34]

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{\text{out}} = & [\mathbf{M}_A \mathbf{R}(A)] \cdot [\mathbf{R}(-C_2) \mathbf{M}_{C_2}(\delta_2) \mathbf{R}(C_2)] \\ & \times \mathbf{M}_S [\mathbf{R}(-C_1) \mathbf{M}_{C_1}(\delta_1) \mathbf{R}(C_1)] \\ & \times [\mathbf{R}(-P) \mathbf{M}_P \mathbf{R}(P)] \cdot \mathbf{S}_{\text{in}}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中, \mathbf{M}_P , \mathbf{M}_A , $\mathbf{M}_{C_1}(\delta_1)$, $\mathbf{M}_{C_2}(\delta_2)$ 和 \mathbf{M}_S 分别为起偏器、检偏器、旋转补偿器 1、旋转补偿器 2 和样品对应的 Mueller 矩阵; $\mathbf{R}(\alpha)$ 为对应光学元件的旋转矩阵, 其中 α 可以表示起偏器和检偏器的透光轴方向与入射面的夹角 P 和 A 以及旋转补偿器 1 和旋转补偿器 2 的快轴方向与入射面的夹角 C_1 和 C_2 , 这里, $C_1 = 5\omega t + C_{S1}$, $C_2 = 3\omega t + C_{S2}$, C_{S1} 和 C_{S2} 分别为两个旋转补偿器的初始快轴方向与入射面的夹角; δ_1 和 δ_2 分别表示旋转补偿器 1 和旋转补偿器 2 对应的相位延迟量; $\mathbf{S}_{\text{in}} = [1, 0, 0, 0]^T$, 为入射光束对应的 Stokes 向量.

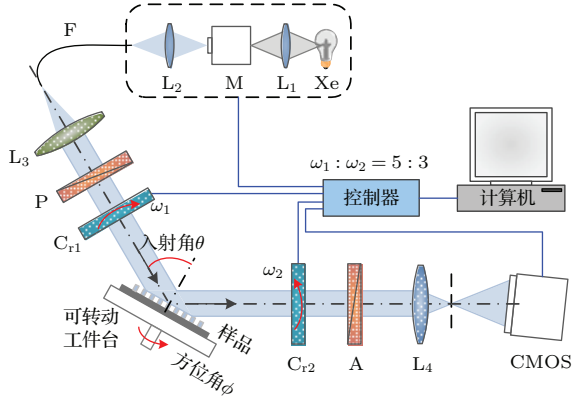


图1 (网刊彩色) 双旋转补偿器型 Mueller 矩阵成像椭偏仪测量原理示意图 其中, Xe, 光源; L₁ 和 L₂, 会聚透镜; M, 单色仪; F, 光纤; L₃, 准直镜; P, 起偏器; C_{r1}, 旋转补偿器 1 (起偏臂端旋转补偿器); C_{r2}, 旋转补偿器 2 (检偏臂端旋转补偿器); A, 检偏器; L₄, 成像透镜; CMOS, CMOS 相机

Fig. 1. (color online) Scheme of the dual rotating-compensator Mueller matrix imaging ellipsometer: Xe, light source; L₁ and L₂, focusing lenses; M, monochromator; F, fiber; L₃, collimating lens; P, polarizer; C_{r1}, the 1st rotating compensator (rotating compensator in the arm of the polarization state generator); C_{r2}, the 2nd rotating compensator (rotating compensator in the arm of the polarization state analyzer); A, analyzer; L₄, imaging lens; CMOS, CMOS camera.

将 (1) 式展开可以得到相机上对应像素所采集到的光强信号的表达式为

$$\begin{aligned}
 I(t) &= I_{00} M_{11} \left\{ a_0 + \sum_{n=1}^{16} [a_{2n} \cos(2n\omega t - \varphi_{2n}) + b_{2n} \sin(2n\omega t - \varphi_{2n})] \right\} \\
 &= I_0 \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{16} [\alpha_{2n} \cos(2n\omega t - \varphi_{2n}) + \beta_{2n} \sin(2n\omega t - \varphi_{2n})] \right\}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

其中, I_{00} 是探测器的光谱响应函数; M_{11} 为样品 Mueller 矩阵中对应第一行和第一列的元素; φ_{2n} 为相位且是 C_{S1} 和 C_{S2} 的函数; $I_0 = I_{00} M_{11} a_0$, $\alpha_{2n} = a_{2n}/a_0$ 和 $\beta_{2n} = b_{2n}/a_0$ 分别表示直流分量和归一化后的交流分量. 由于待测样品对应的 Mueller 矩阵元素 M_{ij} ($i, j = 1, 2, 3, 4$) 为谐波系数 α_{2n} 和 β_{2n} 的线性组合, 利用 Hadamard 分析^[35], 便可以从谐波系数 $\{I_0, \alpha_{2n}, \beta_{2n}\}$ 中求出待测样品在对应像素处的 Mueller 矩阵元素. 相机上所有像素对应的 Mueller 矩阵即构成了待测样品的成像 Mueller 矩阵. 利用单色仪对波长进行连续扫描,

便可以获得全光谱范围 (400—700 nm) 内的成像 Mueller 矩阵测量数据. 此外, 仪器的起偏臂、检偏臂以及样品台均可以转动, 以便选择纳米结构测量时合适的入射角 θ 和方位角 ϕ .

2.2 测量数据分析

在基于 Mueller 成像椭偏仪的纳米结构测量中, 尽管 Mueller 矩阵成像椭偏仪可以获得待测纳米结构的像, 即成像 Mueller 矩阵, 但是却不能像传统显微镜测量方法一样, 直接从所测得的像中获得待测结构的尺寸信息. 这是由于, 一方面图 1 所示 Mueller 矩阵成像椭偏仪在测量中只能收集待测样品的镜面反射光. 即当样品为周期性纳米结构时, 仪器只能收集其零级衍射光, 而无法收集到更高级次的衍射光, 因而无法获得纳米结构的像, 也就无法从所测得的成像 Mueller 矩阵中进一步提取待测纳米结构的几何参数. 成像 Mueller 矩阵之所以称之为“像”, 其原因在于待测样品上不同区域 (区域大小一般为微米量级) 对应的 Mueller 矩阵之间存在着差异, 这种差异 (或对比) 体现在所测得的成像 Mueller 矩阵上即呈现为不同区域的像. 另一方面是当待测纳米结构的特征尺寸达到亚波长纳米量级时, 成像测量技术由于存在光学分辨率极限限制的问题, 使其即便是在最佳焦平面上也无法获得清晰成像, 因而也就无法从所测得的像中获取待测结构的准确几何尺寸. 为了获得待测纳米结构的几何参数, 本文采用基于模型的方法, 即将测量得到成像 Mueller 矩阵与通过理论建模计算出的成像 Mueller 矩阵相匹配, 从中反演并提取出待测纳米结构的几何参数. 总结而言, 基于 Mueller 成像椭偏仪的纳米结构测量之数据分析主要涉及两方面的问题: 一方面是纳米结构光学特性建模; 另一方面是参数提取, 即从测量数据中提取出待测纳米结构的几何参数.

同其他光学散射测量方法一样, 基于 Mueller 矩阵成像椭偏仪的纳米结构测量方法目前也只限于周期性纳米结构的测量. 对于周期性纳米结构如光栅结构的光学特性可以采用严格耦合波分析 (rigorous coupled-wave analysis, RCWA)^[36–38] 方法进行建模求解. 如图 2 所示, 利用 RCWA 进行电磁场建模主要包括三个步骤^[39]: 1) 由 Maxwell 方程求得入射区和透射区的电磁场表达式; 2) 对光栅

区域内的介电常数与电磁场进行 Fourier 展开, 然后由 Maxwell 方程或者 Helmholtz 方程导出耦合波

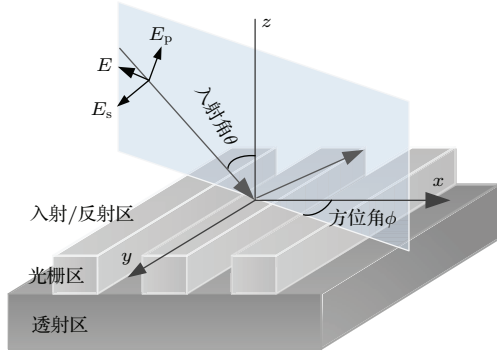


图2 基于严格耦合波分析的电磁场建模示意图

Fig. 2. Scheme of a light beam incidence upon a one-dimensional grating structure.

方程组; 3) 在光栅区域的上下边界运用电磁场边界条件, 通过一定的矩阵运算便可以求得各级次衍射波的振幅系数. 根据所求得的零级衍射波的振幅系数可以进一步计算出待测样品的 Jones 矩阵 \mathbf{J} ,

$$\begin{bmatrix} E_{rp} \\ E_{rs} \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} E_{ip} \\ E_{is} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{pp} & r_{ps} \\ r_{sp} & r_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{ip} \\ E_{is} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中, Jones 矩阵 \mathbf{J} 的左右两侧分别表示出射和入射偏振光对应的 Jones 向量, $E_{p,s}$ 分别表示平行和垂直于入射面的电场分量. 当测量过程中不存在退偏效应或者退偏效应可以忽略时, 对应的 Mueller 矩阵 \mathbf{M} 与 Jones 矩阵 \mathbf{J} 之间存在如下关系式 [3]:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(|r_{pp}|^2 + |r_{sp}|^2 + |r_{ps}|^2 + |r_{ss}|^2) & \frac{1}{2}(|r_{pp}|^2 + |r_{sp}|^2 - |r_{ps}|^2 - |r_{ss}|^2) & \text{Re}(r_{pp}r_{ps}^* + r_{sp}r_{ss}^*) & \text{Im}(r_{pp}r_{ps}^* + r_{sp}r_{ss}^*) \\ \frac{1}{2}(|r_{pp}|^2 - |r_{sp}|^2 + |r_{ps}|^2 - |r_{ss}|^2) & \frac{1}{2}(|r_{pp}|^2 - |r_{sp}|^2 - |r_{ps}|^2 + |r_{ss}|^2) & \text{Re}(r_{pp}r_{ps}^* - r_{sp}r_{ss}^*) & \text{Im}(r_{pp}r_{ps}^* - r_{sp}r_{ss}^*) \\ \text{Re}(r_{pp}r_{sp}^* + r_{ps}r_{ss}^*) & \text{Re}(r_{pp}r_{sp}^* - r_{ps}r_{ss}^*) & \text{Re}(r_{pp}r_{ss}^* + r_{ps}r_{sp}^*) & \text{Im}(r_{pp}r_{ss}^* - r_{ps}r_{sp}^*) \\ -\text{Im}(r_{pp}r_{sp}^* + r_{ps}r_{ss}^*) & -\text{Im}(r_{pp}r_{sp}^* - r_{ps}r_{ss}^*) & -\text{Im}(r_{pp}r_{ss}^* + r_{ps}r_{sp}^*) & \text{Re}(r_{pp}r_{ss}^* - r_{ps}r_{sp}^*) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中 $\text{Re}(\cdot)$ 和 $\text{Im}(\cdot)$ 分别表示复数的实部和虚部. 在实际应用, 通常将 Mueller 矩阵元素进行归一化, 归一化后的 Mueller 矩阵元素定义为 $m_{ij} = M_{ij}/M_{11}$ ($i, j = 1, 2, 3, 4$). 特别地, 当入射面与光栅线条垂直, 即方位角 $\phi = 0^\circ$ 时, 对应光栅的 Jones 矩阵为对角矩阵 ($r_{sp} = r_{ps} = 0$). 由 (4) 式可进一步求得对应 Mueller 矩阵为

$$\mathbf{M} = \frac{1}{2} (|r_{pp}|^2 + |r_{ss}|^2) \times \begin{bmatrix} 1 & -\cos 2\Psi & 0 & 0 \\ -\cos 2\Psi & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin 2\Psi \cos \Delta & \sin 2\Psi \sin \Delta \\ 0 & 0 & -\sin 2\Psi \sin \Delta & \sin 2\Psi \cos \Delta \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中, 归一化系数 $(|r_{pp}|^2 + |r_{ss}|^2)/2$ 为样品反射率, Ψ 和 Δ 分别为振幅比角和相位差角.

从 Mueller 矩阵成像椭圆偏仪探测器上每个像素点测量得到的 Mueller 矩阵光谱中反演并提取出待测纳米结构几何参数的过程是一个典型的逆衍射问题求解过程, 该逆问题的输入为样品的测量

Mueller 矩阵光谱, 输出为待测纳米结构的几何参数值, 逆问题的求解目标是找到一组几何参数值使得通过光学特性模型计算得到的 Mueller 矩阵光谱能够最佳匹配实际测得的 Mueller 矩阵光谱. 对于探测器上任一像素点, 上述逆衍射问题的求解过程用数学语言可以表述为

$$\hat{p} = \arg \min_{p \in \Omega} \chi_r^2 = \arg \min_{p \in \Omega} \left\{ \frac{1}{15N - K} \times \sum_{k=1}^N \sum_{i,j=1}^4 \left[\frac{m_{ij,k}^{\text{meas}} - m_{ij,k}^{\text{calc}}(\mathbf{p})}{\sigma(m_{ij,k})} \right]^2 \right\}, \quad (6)$$

其中, 向量 \mathbf{p} 为由待测纳米结构几何参数组成的向量; Ω 为待测参数的取值空间; \hat{p} 为最终提取的几何参数值; k 表示光谱点; i 和 j 表示 Mueller 矩阵元素; N 为总光谱点个数; K 为待测参数个数, 即向量 \mathbf{p} 的维度; $m_{ij,k}^{\text{meas}}$ 和 $m_{ij,k}^{\text{calc}}$ 分别表示实际测得的 Mueller 矩阵与理论计算得到的 Mueller 矩阵在第 k 个光谱点处的元素; $\sigma(m_{ij,k})$ 为对应 Mueller 矩阵元素 m_{ij} 在第 k 个光谱点处的测量标准差; χ_r^2 表示测量 Mueller 矩阵光谱与理论 Mueller 矩阵光谱之间的拟合误差. 对于 (6) 式的求解, 具体可以采用诸如 Levenberg-Marquardt 算法之类的非线性回归

方法^[40]或者库匹配方法^[41,42]. 其中, 非线性回归方法主要用于单个或者若干像素点测量数据的参数提取, 对于大面积区域内(通常包含十几万甚至上百万个像素点)测量数据的分析则可以选择库匹配方法以提高参数提取速度.

3 实验

纳米压印是一种利用模板将图形转移至衬底上的批量化纳米制造工艺. 在纳米压印过程中, 模板的质量直接决定了后续压印结构的质量. 本文在实验中利用自主研制的 Mueller 矩阵成像椭偏仪对纳米压印中的硅基光栅模板进行测量分析. 图 3 为一利用电子束光刻得到的硅基光栅模板, 其周期约为 800 nm. 图 3(a) 中亮色矩形区域为光栅区域, 其大小约为 750 μm × 1800 μm, 其余区域为硅基底. 图 3(b) 给出了光栅区域在低倍显微镜下的放大图, 其中 x 方向为光栅周期方向. 从图 3(b) 可以看到, 光栅区域中靠近右边缘有部分区域的颜色异于其他区域, 该部分区域对应光栅在测量过程中由于人为原因造成的破损区域. 图 3(c) 给出了硅基光栅模板的断面扫描电镜 (SEM) 图 (FEI 公司 Nova NanoSEM450) 及光学特性建模中所采用的几何模型. 如图所示, 我们采用梯形模型来表征光栅的截面轮廓, 其待测几何参数包括顶部线宽 p_1 、线高 p_2 和侧壁角 p_3 . 此外, 在参数提取过程中需要事先确定组成样品的每一种材料的光学常数. 对于硅的光学常数, 由于其相对稳定, 在实验中直接采用文献^[43]中给出的测量数据.

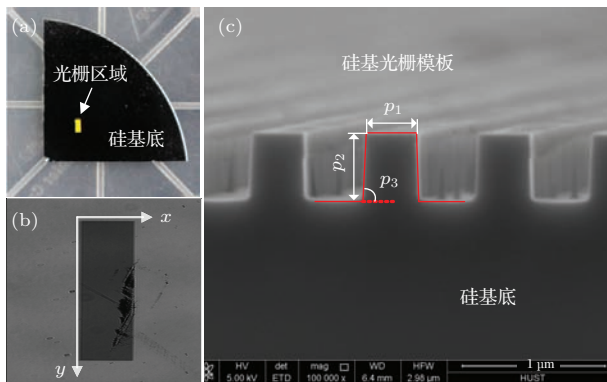


图 3 (网刊彩色) (a) 硅基光栅模板样品; (b) 光栅区域放大图; (c) 光栅结构断面 SEM 图及光学特性建模中采用的几何模型
Fig. 3. (color online) (a) The photograph of the Si grating template; (b) the magnified image of the grating region; (c) the cross-sectional SEM micrograph and the geometrical model of the grating structure.

4 结果与讨论

利用自主研制的 Mueller 矩阵成像椭偏仪对图 3 所示的硅基光栅模板样品在入射角 $\theta = 60^\circ$ 、方位角 $\phi = 0^\circ$ 条件下进行测量. 图 4 给出了样品在波长 $\lambda = 500$ nm 条件下所测得的成像 Mueller 矩阵. 由 (5) 式可知, 当方位角 $\phi = 0^\circ$ 时, Mueller 矩阵中除了主对角块元素 $m_{12}, m_{21}, m_{22}, m_{33}, m_{34}, m_{43}$ 和 m_{44} ($m_{11} = 1$) 不为零之外, 其余斜对角块元素均等于零. 对比图 4 可以看出, 成像 Mueller 矩阵斜对角块元素在整个视场内的测量误差基本都在 $\pm 5\%$ 以内. 此外, 由于硅光栅区域对应 Mueller 矩阵与硅基底对应 Mueller 矩阵之间的差异, 我们可以很容易地从图 4 所示的成像 Mueller 矩阵的主对角块元素中识别出样品的光栅区域 (即图中矩形区域). 不过由于仪器只能收集光栅结构的零级衍射光, 而无法收集到更高级次的衍射光, 使得无法从图 4 所示成像 Mueller 矩阵中进一步获得光栅结构的像. 除此之外, 还可以从图 4 观察到光栅区域中的破损部分. 由于破损部分的结构不再是简单的周期性结构, 其光学特性表现为一般 (粗糙表面) 散射问题, 其对应 Mueller 矩阵的斜对角块元素亦不再为零^[44]. 如图 4 所示, 散射使得破损区域对应 Mueller 矩阵的斜对角块元素值明显异于其他区域的斜对角块元素值. 根据所获得的成像 Mueller 矩阵, 我们可以直观地选择所要分析的区域. 通过对所选区域中所有像素点测得的 Mueller 矩阵光谱进行参数提取便可以重构出纳米结构的三维显微形貌. 在后续的数据分析中, 我们将选择光栅区域的上半部分 (大小约为 750 μm × 850 μm) 进行参数提取以尽可能避开光栅的破损区域.

图 5 给出了光栅结构待测几何参数 p_1 — p_3 及其测量不确定度 $u(p_1)$ — $u(p_3)$ 对应的的三维显微图. 其中, 测量不确定度对应的置信概率为 95%, 第 i ($i = 1, 2, 3$) 个待测参数 p_i 的不确定度估计公式为 $u(p_i) = 1.96 \times \chi_r \times \sqrt{C_{ii}}$, χ_r 为拟合误差 χ_r^2 的开平方, C_{ii} 为待测参数协方差矩阵的第 i 个对角元素^[45]. 由图 5 可以看出, 仍有一小部分光栅破损区域在最终的三维显微图中, 不过其对应的参数提取结果与不确定度值都明显异于其他区域. 在数据分析中, 我们忽略了靠近光栅区域边缘的 2 个像素点, 以保证所有待分析像素点对应样品上的区域内包

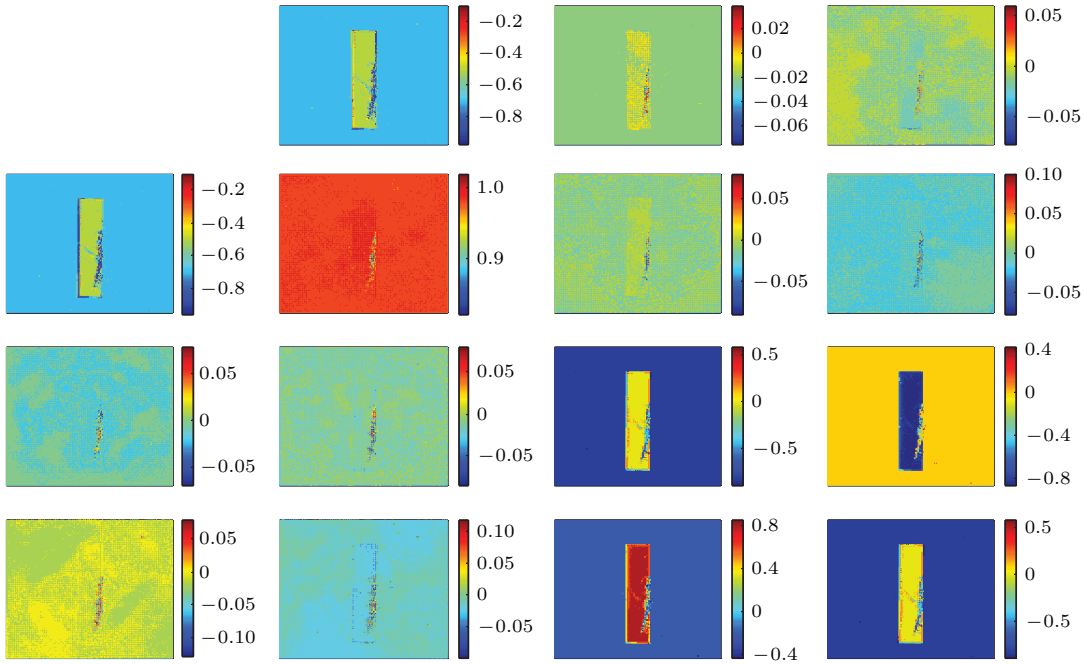


图4 (网刊彩色) 硅基光栅模板在波长 $\lambda = 500 \text{ nm}$ 下测得的成像 Mueller 矩阵 ($m_{11} = 1$), 其中矩形区域对应硅基光栅模板样品的光栅区域

Fig. 4. (color online) The imaging Mueller matrix (normalized to m_{11} , which is not shown) of the Si grating template measured at the wavelength of $\lambda = 500 \text{ nm}$. The central rectangular region corresponds to the grating region of the Si grating template.

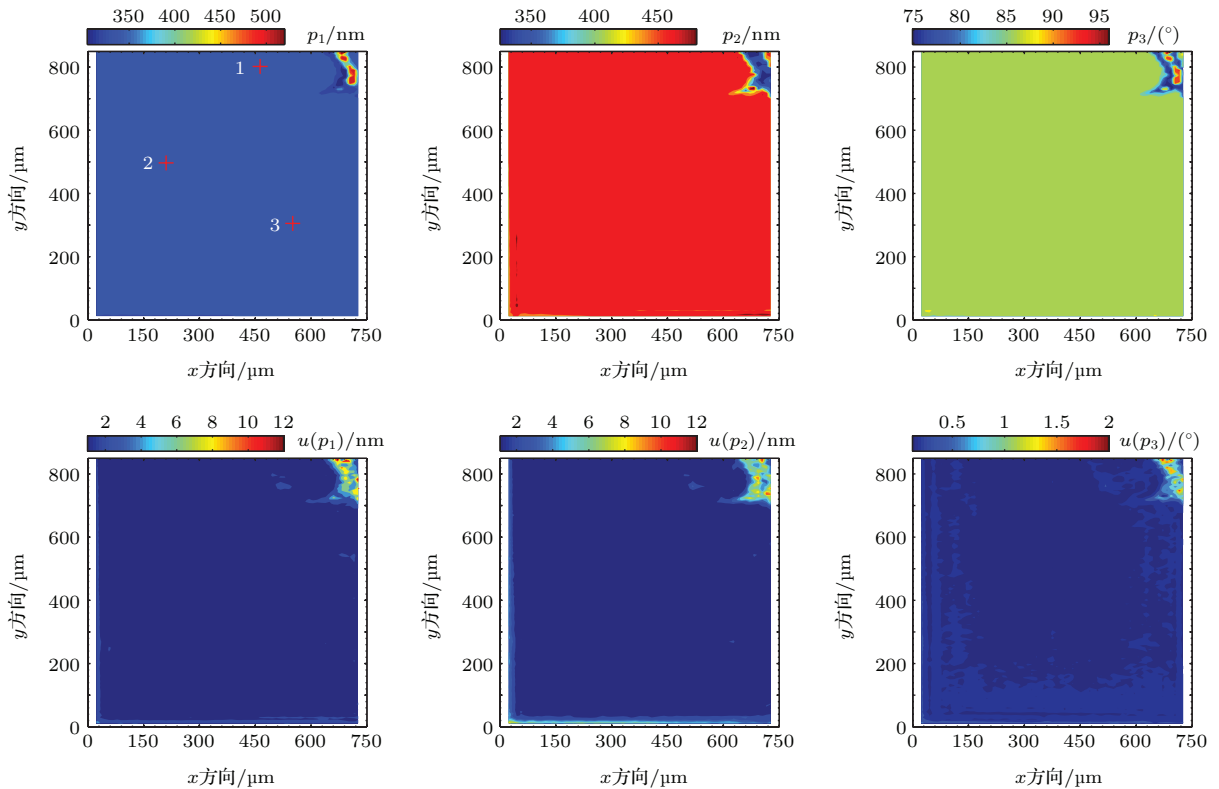


图5 (网刊彩色) 从成像 Mueller 矩阵测量数据中反演得到的光栅结构待测几何参数 p_1-p_3 及其测量不确定度 $u(p_1)-u(p_3)$ 对应的三维显微图 (图示坐标与图 3(b) 所示坐标一致), 其中, 测量不确定度对应的置信概率为 95%, 图中 3 个“+”符号分别对应表 1 中 3 个像素点所在位置

Fig. 5. (color online) Three-dimensional microscopic maps of geometrical parameters p_1-p_3 as well as their uncertainties $u(p_1)-u(p_3)$ (with 95% confidence limits) of the Si grating structure. The coordinate system is consistent with that shown in Fig. 3(b). The three “+” symbols respectively correspond to the positions of the three pixels in Table 1.

括足够且相同的光栅周期个数. 图5所示三维显微图的横向分辨率主要取决于相机的像素大小、成像物镜的图像放大倍率以及入射角. 对于自主研发的Mueller矩阵成像椭偏仪而言, 图5沿着 x 和 y 两个方向的横向分辨率分别为 $11.72\ \mu\text{m}$ 和 $5.86\ \mu\text{m}$. 由图5可以看出, 光栅结构的几何参数

值在所分析区域内的变化比较均匀. 为了进一步评估Mueller矩阵成像椭偏仪测量结果, 我们从图中随机挑选了3个像素点(其所在位置如图5中“+”所标识)对应的参数提取结果, 并将其与扫描电镜以及传统Mueller矩阵椭偏仪测量结果进行比较.

表1 硅基光栅模板MMIE单像素测量结果与SEM和MME测量结果之比较

Table 1. Comparison of the MMIE, SEM and MME measurements. The MMIE-measured results are extracted from Mueller matrix spectra collected by a single pixel of the camera.

待测参数	SEM 测量结果	MME 测量结果	MMIE 测量结果 ^a		
			像素点1	像素点2	像素点3
p_1/nm	350	346.7 ± 1.17	351.8 ± 1.22	351.0 ± 1.34	351.5 ± 1.35
p_2/nm	472	470.9 ± 1.03	470.1 ± 1.18	470.0 ± 1.29	469.8 ± 1.24
$p_3/(\text{^\circ})$	88	86.8 ± 0.15	87.5 ± 0.16	87.4 ± 0.17	87.4 ± 0.18

注: ^a 从 Mueller 矩阵成像椭偏仪相机上单个像素测量光谱中提取出的待测参数值.

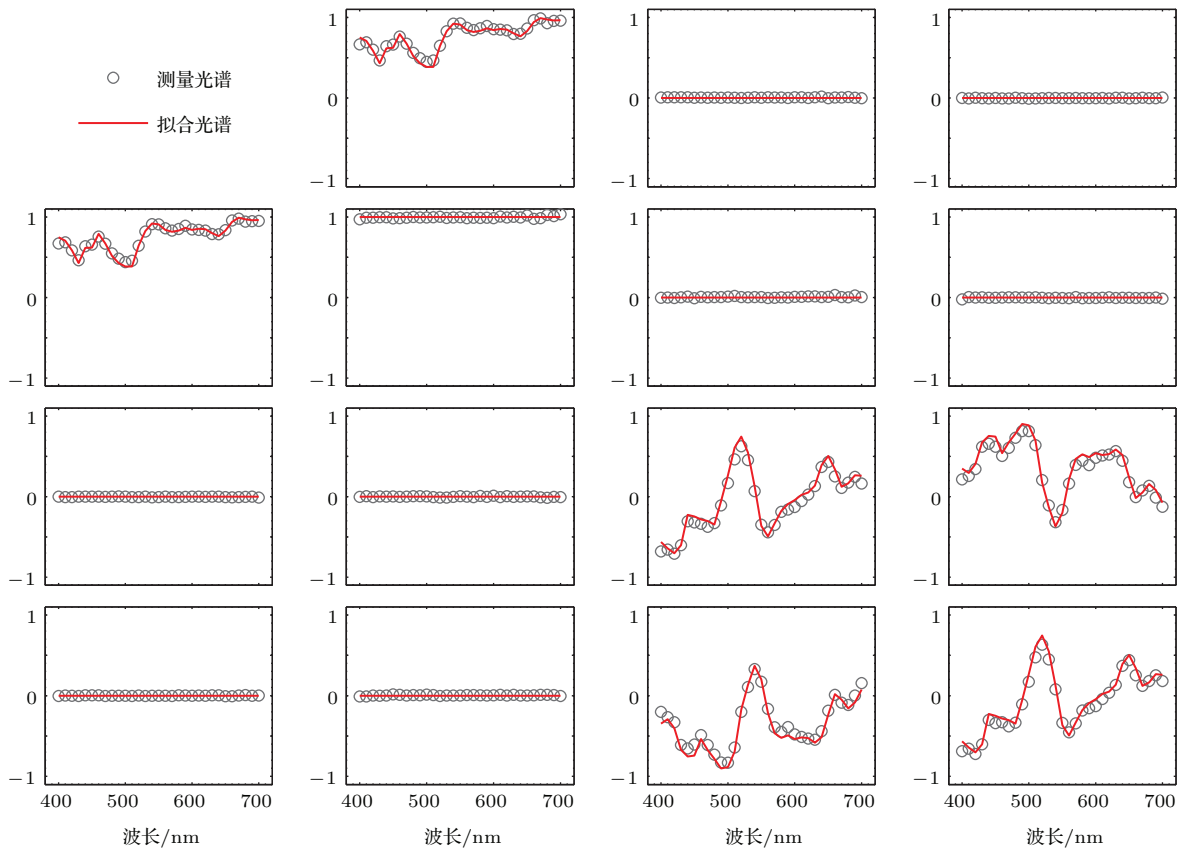


图6 Mueller矩阵成像椭偏仪相机上单个像素(对应表1中像素点2)的测量Mueller矩阵光谱及其拟合光谱. 测量实验中, 波长范围为400—700 nm, 波长分辨率为10 nm, 入射角和方位角分别为 $\theta = 60^\circ$ 和 $\phi = 0^\circ$

Fig. 6. Fitting results of the calculated best-fit Mueller matrix spectra and the measured spectra collected by a single pixel (corresponds to pixel 2 in Table 1) of the MMIE camera. The wavelengths are varied from 400 to 700 nm with increments of 10 nm. The incidence and azimuthal angles are fixed at $\theta = 60^\circ$ and $\phi = 0^\circ$, respectively.

表1列出了硅基光栅模板 Mueller 矩阵成像椭偏仪单像素测量结果与扫描电镜以及 Mueller 矩阵椭偏仪(武汉颐光科技 ME-L ellipsometer)测量结果的比较. 在利用 Mueller 矩阵椭偏仪对样品进行测量时, 测量条件与 Mueller 矩阵成像椭偏仪相同, 即波长范围为 400—700 nm, 入射角和方位角分别固定在 60° 和 0° . 需要说明的是, Mueller 矩阵椭偏仪测量时的光斑直径约 200 μm , 因而远大于 Mueller 矩阵成像椭偏仪单像素测量时的等效光斑大小(约 $5.86 \mu\text{m} \times 5.86 \mu\text{m}$). 由表1可以看出, Mueller 矩阵成像椭偏仪单像素测量结果与扫描电镜以及 Mueller 矩阵椭偏仪测量结果相比均比较一致. 图6给出了对应 Mueller 矩阵成像椭偏仪像素点 2 处测量 Mueller 矩阵光谱及其拟合光谱, 两者之间的拟合误差 $\chi_r^2 = 55.3$. 我们计算了测量 Mueller 矩阵光谱对应的退偏指数, 其定义为 $DI = \sqrt{[\text{Tr}(\mathbf{M}\mathbf{M}^T) - m_{11}^2]/3m_{11}^2}$ 且 $0 \leq DI \leq 1$ [46], 其中 $\text{Tr}(\cdot)$ 表示矩阵的迹, $DI = 0$ 和 $DI = 1$ 分别对应完全退偏 Mueller 矩阵和完全非退偏 Mueller 矩阵. 计算结果表明, 全光谱范围内 $|DI - 1| < 0.054$, 与测量误差量级相当, 因而在光学特性建模过程中忽略退偏效应, 直接采用(4)和(5)式来计算样品的理论 Mueller 矩阵. 由图6可以看出, 理论 Mueller 矩阵光谱能够较好地吻合测量 Mueller 矩阵光谱.

5 结 论

本文利用自主研发的 Mueller 矩阵成像椭偏仪对纳米压印中的硅基光栅模板进行了测量. 实验结果表明, Mueller 矩阵成像椭偏仪在每一波长、每一入射角和每一方位角下都可以获得一个 4×4 阶的成像 Mueller 矩阵. 成像 Mueller 矩阵的每一个元素都对应样品上包含整个视场的大面积区域内的一幅空间图像. 根据所测得的成像 Mueller 矩阵可以直观地选择所要分析的区域. 通过对所选区域内所有像素点采集到的 Mueller 矩阵光谱数据进行分析, 并结合基于模型的求解方法, 可以快速准确地重构出整个分析区域内光栅结构的三维显微形貌.

参考文献

[1] Weidner P, Kasic A, Hingst T, Ehlers C, Philipp S, Marschner T, Moert M 2008 *Proc. SPIE* **7155** 71550Y

[2] Rau H, Wu C H 2005 *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **25** 940
 [3] Azzam R M A, Bashara N M 1977 *Ellipsometry and Polarized Light* (Amsterdam: North-Holland) pp148–152
 [4] Zhang Q X, Wei W S, Ruan F P 2011 *Chin. Phys. B* **20** 047802
 [5] Zhang J T, Wu X J, Li Y 2012 *Chin. Phys. B* **21** 010701
 [6] Zhang T, Yin J, Ding L H, Zhang W F 2013 *Chin. Phys. B* **22** 117801
 [7] Li J, Tang J Y, Pei W, Wei X H, Huang F 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 110702 (in Chinese) [李江, 唐敬友, 裴旺, 魏贤华, 黄峰 2015 物理学报 **64** 110702]
 [8] Huang H T, Kong W, Terry Jr F L 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 3983
 [9] Niu X, Jakatdar N, Bao J W, Spanos C J 2001 *IEEE Trans. Semicond. Manuf.* **14** 97
 [10] Gustin C, Leunissen L H A, Mercha A, Decoutere S, Lorusso G 2008 *Thin Solid Films* **516** 3690
 [11] Leung G, Chui C O 2011 *IEEE Electron Dev. Lett.* **32** 1489
 [12] Silver R, Germer T, Attota R, Barnes B M, Bundary B, Allgair J, Marx E, Jun J 2007 *Proc. SPIE* **6518** 65180U
 [13] Novikova T, de Martino A, Ossikovski R, Drévilion B 2005 *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **31** 63
 [14] Novikova T, de Martino A, Hatit S B, Drévilion B 2006 *Appl. Opt.* **45** 3688
 [15] Novikova T, de Martino A, Bulkin P, Nguyen Q, Drévilion B 2007 *Opt. Express* **15** 2033
 [16] Kim Y N, Paek J S, Rabello S, Lee S, Hu J, Liu Z, Hao Y, McGahan W 2009 *Opt. Express* **17** 21336
 [17] Li J, Hwu J J, Liu Y, Rabello S, Liu Z, Hu J 2010 *J. Micro Nanolith. MEMS MOEMS* **9** 041305
 [18] Liu S Y, Chen X G, Zhang C W 2015 *Thin Solid Films* **584** 176
 [19] Chen X G, Zhang C W, Liu S Y 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 151605
 [20] Chen X G, Liu S Y, Zhang C W, Wu Y P, Ma Z C, Sun T Y, Xu Z M 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 180701 (in Chinese) [陈修国, 刘世元, 张传维, 吴懿平, 马智超, 孙堂友, 徐智谋 2014 物理学报 **63** 180701]
 [21] Ma Z C, Xu Z M, Peng J, Sun T Y, Chen X G, Zhao W N, Liu S S, Wu X H, Zou C, Liu S Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 039101 (in Chinese) [马智超, 徐智谋, 彭静, 孙堂友, 陈修国, 赵文宁, 刘思思, 武兴会, 邹超, 刘世元 2014 物理学报 **63** 039101]
 [22] Losurdo M, Bergmair M, Bruno G, Cattelan D, Cobet C, de Martino A, Fleischer K, Dohcevic-Mitrovic Z, Esser N, Galliet M, Gajic R, Hemzal D, Hingerl K, Humlicek J, Ossikovski R, Popovic Z V, Saxl O 2009 *J. Nanopart. Res.* **11** 1521
 [23] Mishima T, Kao K C 1982 *Opt. Eng.* **21** 1074
 [24] Jin G, Jansson R, Arwin H 1996 *Rev. Sci. Instrum.* **67** 2930
 [25] Arteaga O, Baldrís M, Antó J, Canillas A, Pascual E, Bertran E 2014 *Appl. Opt.* **53** 2236
 [26] Liu S Y, Du W C, Chen X G, Jiang H, Zhang C W 2015 *Opt. Express* **23** 17316
 [27] Zhou Y, Valiokas R, Liedberg B 2004 *Langmuir* **20** 6206
 [28] Yu Y, Jin G 2005 *J. Colloid Interface Sci.* **283** 477

- [29] Wurstbauer U, Röling C, Wurstbauer U, Wegscheider W, Vaupel M, Thiesen P H, Weiss D 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 231901
- [30] Shan A, Fried M, Juhász G, Major C, Polgár O, Németh Á, Petrik P, Dahal L R, Chen J, Huang Z, Podraza N J, Collins R W 2014 *IEEE J. Photovolt.* **4** 355
- [31] Bae Y M, Park K W, Oh B K, Lee W H, Choi J W 2005 *Colloids Surf. A* **257–258** 19
- [32] Twietmeyer K M, Chipman R A, Elsner A E, Zhao Y, van Nasdale D 2008 *Opt. Express* **16** 21339
- [33] Novikova T, Pierangelo A, Manhas S, Benali A, Validire P, Gayet B, de Martino A 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 241103
- [34] Collins R W, Koh J 1999 *J. Opt. Soc. Am. A* **16** 1997
- [35] Fujiwara H 2007 *Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications* (New York: Wiley) p121
- [36] Moharam M G, Grann E B, Pommet D A, Gaylord T K 1995 *J. Opt. Soc. Am. A* **12** 1068
- [37] Li L F 1997 *J. Opt. Soc. Am. A* **14** 2758
- [38] Liu S Y, Ma Y, Chen X G, Zhang C W 2012 *Opt. Eng.* **51** 081504
- [39] Chen X G 2013 *Ph. D. Dissertation* (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology) (in Chinese) [陈修国 2013 博士学位论文 (武汉: 华中科技大学)]
- [40] Zhang C W, Liu S Y, Shi T L, Tang Z R 2009 *J. Opt. Soc. Am. A* **26** 2327
- [41] Chen X G, Liu S Y, Zhang C W, Zhu J L 2013 *Measurement* **46** 2638
- [42] Chen X G, Liu S Y, Zhang C W, Jiang H 2013 *Appl. Opt.* **52** 6727
- [43] Herzinger C M, Johs B, McGahan W A, Woollam J A, Paulson W 1998 *J. Appl. Phys.* **83** 3323
- [44] Letnes P A, Maradudin A A, Nordam T, Simonsen I 2012 *Phys. Rev. A* **86** 031803
- [45] Chen X G, Liu S Y, Gu H G, Zhang C W 2014 *Thin Solid Films* **571** 653
- [46] Gil J J, Bernabeu E 1986 *Opt. Acta* **33** 185

Large-scale nanostructure metrology using Mueller matrix imaging ellipsometry*

Chen Xiu-Guo¹⁾ Yuan Kui¹⁾ Du Wei-Chao¹⁾ Chen Jun¹⁾ Jiang Hao^{1)†}
Zhang Chuan-Wei¹⁾²⁾ Liu Shi-Yuan¹⁾²⁾

1) (State Key Laboratory for Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

2) (Wuhan EOptics Technology Co. Ltd. , Wuhan 430075, China)

(Received 14 October 2015; revised manuscript received 5 January 2016)

Abstract

In order to achieve effective process control, the fast, inexpensive, nondestructive and accurate nanoscale feature measurements are extremely useful in high-volume nanomanufacturing. The optical scatterometry has currently become one of the important approaches for in-line metrology of geometrical parameters of nanostructures in high-volume nanomanufacturing due to its high throughput, low cost, and minimal sample damage. Conventional scatterometry techniques can only obtain the mean geometrical parameter values located in the illumination spot, but cannot acquire the microscopic variation of geometrical parameters less than the illumination region. In addition, conventional scatterometry techniques can only perform monospot test. Therefore, the sample stage must be scanned spot by spot in order to obtain the distribution of geometrical parameters in a large area. Consequently, the final test efficiency will be greatly reduced. Accordingly, in this paper, we combine conventional scatterometry with imaging techniques and adopt the Mueller matrix imaging ellipsometry (MMIE) for fast, large-scale and accurate nanostructure metrology. A spectroscopic Mueller matrix imaging ellipsometer is developed in our laboratory by substituting a complementary metal oxide semiconductor camera for the spectrometer in a previously developed dual rotating-compensator Mueller matrix ellipsometer and by placing a telecentric lens as an imaging lens in the polarization state analyzer arm of the ellipsometer. The light wavelengths in the developed imaging ellipsometer are scanned in a range of 400–700 nm by using a monochromator. The spectroscopic Mueller matrix imaging ellipsometer is then used for measuring a typical Si grating template used in nanoimprint lithography. The measurement results indicate that the developed instrument has a measurement accuracy of better than 0.05 for all the Mueller matrix elements in both the whole image and the whole spectral range. The three-dimensional microscopic maps of geometrical parameters of the Si grating template over a large area with pixel-sized lateral resolution are then reconstructed from the collected spectral imaging Mueller matrices by solving an inverse diffraction problem. The MMIE-measured results that are extracted from Mueller matrix spectra collected by a single pixel of the camera are in good agreement with those measured by a scanning electron microscope and the conventional Mueller matrix ellipsometer. The MMIE that combines the great power of conventional Mueller matrix ellipsometry with the high spatial resolution of optical microscopy is thus expected to be a powerful tool for large-scale nanostructure metrology in future high-volume nanomanufacturing.

Keywords: nanostructure, nanometrology, optical scatterometry, Mueller matrix imaging ellipsometry

PACS: 07.60.Fs, 42.25.Fx, 81.07.-b, 42.30.-d

DOI: 10.7498/aps.65.070703

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51475191, 51405172), the National Instrument Development Specific Project of China (Grant No. 2011YQ160002), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant Nos. 2014M560607, 2015T80791), the Provincial Natural Science Foundation of Hubei, China (Grant No. 2015CFB278), and the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University of China (Grant No. IRT13017).

† Corresponding author. E-mail: hjiang@hust.edu.cn