

椭偏成像技术研究进展

张裕, 连洁*, 魏铭洋, 姜清芬, 王宸琳, 王月明, 许镇

山东大学信息科学与工程学院山东省激光技术与应用重点实验室, 山东 青岛 266235

摘要 椭偏成像技术是为适应各种器件和材料小而精的趋势, 在传统椭偏技术的基础上结合成像技术发展起来的一门测量技术。随着纳米技术的快速发展, 该技术也呈现快速发展的趋势, 在材料科学、生物学、半导体等很多领域有着广泛的应用。围绕该技术介绍它的原理和优缺点, 对该技术的发展历程进行了梳理, 描述该技术在材料科学、生物医学领域的应用进展, 展望该技术的发展趋势。椭偏成像技术综述有助于促进该技术的发展和在更多领域的应用。

关键词 成像技术; 椭偏测量术; 光谱; 纳米薄膜; 生物传感器

中图分类号 O433.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1000001

Research Progress of Imaging Ellipsometry

Zhang Yu, Lian Jie*, Wei Mingyang, Jiang Qingfen, Wang Chenlin, Wang Yueming, Xu Zhen

Shandong Key Laboratory of Laser Technology and Application, School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao 266235, Shandong, China

Abstract Imaging ellipsometry is a measurement technology developed using traditional ellipsometry combined with imaging technology to adapt to the small and precise trends of various devices and materials. With the rapid development of nanotechnology, the technology has shown a trend of rapid developments and a wide range of applications in many fields, such as materials science, biology, and semiconductor. In this paper, we introduce the principle, advantages, and disadvantages of this technology. Furthermore, we comb the development history and describe the application progresses of this technology in material science and biomedicine, while discussing developing trends of this technology. This study hopes to serve as a review article on ellipsometric imaging technology and help promote the development of the technology and its application in more fields.

Key words imaging technology; ellipsometry; spectrum; nano-film; biological sensor

1 引 言

椭偏成像技术是一种在传统椭偏技术和光学成像系统基础上发展而来的, 以 charge coupled device (CCD)^[1-2] 或 complementary metal-oxide-semiconductor transistor (CMOS) 为探测器实现高

横向分辨率的椭偏测量技术^[3]。

随着各种技术的发展, 传统椭偏测量技术已经无法满足测量要求。从根本的测量原理来看, 传统椭偏测量技术测量时采用的是光斑照射区平均测试方法, 分析的数据是全部光斑照射区域内样品待测参数的平均值^[4], 这不仅难以准确地检测分析小

收稿日期: 2021-03-19; 修回日期: 2021-04-21; 录用日期: 2021-06-02

基金项目: 国家自然科学基金(12074214)、国家重点基础研究发展计划(2015CB921003)、山东省重点研发计划(2017GGX201008)

通信作者: *lianjie@sdu.edu.cn

于光斑照射区域内待测对象的微小变化,对于待测参数分布不均匀的样品也会得到错误的结果,无法满足对样品性能的表征要求。另外,传统椭偏仪横向分辨率主要取决于光斑直径和样品台位移精度,其光斑直径一般为 3~25 mm,每次测量时只能获得当前光斑照射区域内的信息,需要移动样品台进行多次测量才能获得大面积区域内的光学信息,测量效率受到严重影响。在这种情况下,提高椭偏测量的空间分辨率和测量效率成了必要研究的方向。

椭偏成像技术由传统椭偏测量系统结合光学成像技术、图像采集技术、计算机技术构成,纵向分辨率与传统椭偏测量术相当,膜厚测量精度可达埃级,同时具有高横向分辨率、高灵敏度;可以对样品表面光学成像的每个像元进行椭偏测量,得到微区特性的精确定位测量,极大提高了对微纳区域的表征能力,横向分辨率达到微米级;还可以对同一光斑区域的多元样品进行观测,弥补了传统测量技术的不足^[5]。目前,具有传统椭偏测量技术和光学成像系统两者优点的椭偏成像技术发展迅猛,为纳米检测、生物医学、半导体工业、集成电路等领域的材料性能表征提供了极大便利。

本文将从测量原理、发展历程、应用等方面深层次地描述椭偏成像技术,以此来帮助研究者系统了解该技术,在结构和应用上进一步发展该技术,扩展该技术的应用范围。

2 椭偏成像测量原理

椭偏成像技术的测量基于传统椭偏测量术^[6],即用偏振光波为探测光照射样品,样品对入射光波进行调制,使得反射光中载有样品的信息。椭偏测量系统包括三个基本部分^[7]:起偏部分、样品部分和检偏部分。起偏部分用于产生偏振态已知的椭圆偏振探测光;补偿器和起偏器相结合可以产生任意形态的椭圆偏振,探测光倾斜入射到样品表面,与样品相互作用使得反射光偏振态发生变化,从而载有样品信息;反射光经过检偏器后变成线偏振光,通过显微成像系统,椭偏成像在 CCD 相机等图像传感器上;摄像机采集的模拟信号通过视频显示器显示,并进一步经图像采集卡进行 A/D 转换,转变成数字图像文件进入到计算机^[8]。通过计算机,对数字图像文件进行分析获得样品的信息。

2.1 光在各向同性且均匀的界面反射原理

一束单色光投射在一各向同性且材质均匀的

界面上,上半部分折射率为 n_1 ,下半部分折射率为 n_2 ,光会在界面处发生反射和折射,如图 1 所示。其中 \mathbf{E}_{ip} 、 \mathbf{E}_{rp} 和 \mathbf{E}_{tp} 分别为 p 光的入射、反射和折射电矢量, \mathbf{E}_{is} 、 \mathbf{E}_{rs} 和 \mathbf{E}_{ts} 分别为 s 光的入射、反射和折射电矢量, θ_1 和 θ_2 为入射角和折射角。光波电矢量可以分解为振动方向平行于入射面的 p 光和振动方向垂直于入射面的 s 光。分别定义 p 光和 s 光的反射系数 r_p 和 r_s ,由麦克斯韦方程组和边界条件,能够推导出 p 光、s 光的反射系数与介质折射率、入射角和折射角的关系,即菲涅耳反射系数:

$$r_p = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} = \frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)}, \quad (1)$$

$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} = -\frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}. \quad (2)$$

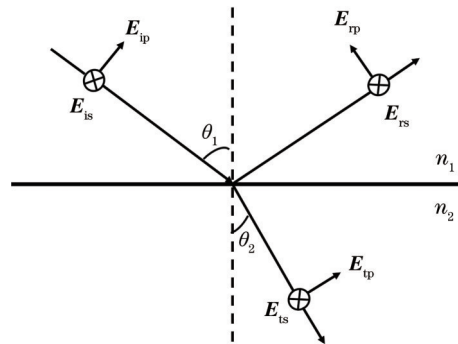


图 1 单色光在各向同性且材质均匀的界面上的反射和折射示意图

Fig. 1 Schematic of the reflection and refraction of monochromatic light on an isotropic and uniform material interface

2.2 椭偏测量原理

一束单色光,振幅为 E_i ,与直角坐标系 x 轴的夹角为 α ,将其分解为沿直角坐标系 x 轴的 p 光和沿直角坐标系 y 轴的 s 光。则入射光 p 光和 s 光的振幅分别为 \mathbf{E}_{ip} 和 \mathbf{E}_{is} ,入射光经过薄膜的反射后,p 光和 s 光的振幅分别变为 $\mathbf{E}_{ip}r_p$ 和 $\mathbf{E}_{is}r_s$,相应的相位变为 δ_{rp} 和 δ_{rs} ,故 p 光和 s 光的反射光电矢量分别为

$$\mathbf{E}_x = E_i \cos(\alpha r_s) \sin \alpha \cos(\omega t - k_z - \delta_{rs}) = E_{rs} \cos(\omega t - k_z - \delta_{rs}), \quad (3)$$

$$\mathbf{E}_y = E_i \sin(\alpha r_p) \cos \alpha \cos(\omega t - k_z - \delta_{rp}) = E_{tp} \cos(\omega t - k_z - \delta_{rp}). \quad (4)$$

消去时间因子 t ,便可得到反射波电矢量末端的运动轨迹:

$$\left(\frac{E_y}{E_{tp}}\right)^2 + \left(\frac{E_x}{E_{rs}}\right)^2 - 2\frac{E_y}{E_{tp}}\frac{E_x}{E_{rs}}\cos \Delta = \sin^2 \Delta, \quad (5)$$

式中: $\Delta = \delta_p - \delta_s$ 。式(5)实际上就是椭圆方程。

也就是说线偏振光入射,与待测样品发生相互作用后,由于p光和s光的反射率不同,反射光不再是线偏振光,而变成了椭圆偏振光,引入参量 $\tan\Psi$ 和 Δ , Δ 表示 p 光分量和 s 光分量的相位差, $\tan\Psi$ 表示反射后两个分量振幅比 E_p/E_s 。定义

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan\Psi \cdot e^{i\Delta} \quad (6)$$

ρ 由各层薄膜的折射率、消光系数和膜层厚度等参量决定,故可表达为

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan\Psi \cdot e^{i\Delta} = f(\lambda, \theta_1, n_1, n_2, k_2, n_3, k_3, d), \quad (7)$$

式中: n_1 、 n_2 和 n_3 分别为空气、薄膜和衬底的折射率; k_2 和 k_3 分别为薄膜和衬底的消光系数。通过对 Ψ 和 Δ 的拟合,可以得出被测物体的参量。

椭圆偏技术按采样原理可以分为消光式^[9]和光度式^[10-11],也称为零椭圆偏法与非零椭圆偏法。消光式椭圆偏测量方法^[12-13]在每一个波长通过旋转起偏器和补偿器后寻找到合适的角度,使经样品反射后的偏振光为线性偏振光,然后调整检偏器角度产生消光效果后,记录此时检偏器和起偏器相对于入射平面的角度,计算出样品对应的参数。光度式椭圆偏测量方法则是对探测器接收到的光强进行傅里叶分析,推导出所测样品的特性,并不需要测量角度,尽可能排除了人为误差,测量速度快,但其非线性效应大。

2.3 系统成像原理

椭圆偏成像技术根据成像原理可以划分为两类:机械扫描椭圆偏成像和光学椭圆偏成像。机械扫描椭圆偏成像采用单光束测量,利用样品台的机械扫描获取整个样品信息。受到机械扫描速度的限制,机械扫描椭圆偏成像测量速率较低。光学椭圆偏成像采用光学成像技术,对待测区域进行二维成像,可以实现高横向分辨率、高速率测量。

成像椭圆偏仪的成像系统大多采用显微物镜和成像透镜组成的成像放大系统。放大成像的原理如图2所示^[14],将样品放置在物镜的工作距离处,按照几何光学成像原理在成像透镜的后焦面成放大的实像。

其中物镜内部有很多透镜组合而成, f' 为物镜的等效后焦点, f 为成像透镜的焦点。系统的放大率可以根据成像透镜的焦距获得,计算公式为

$$L_e = L_d \frac{f_i}{f_w}, \quad (8)$$

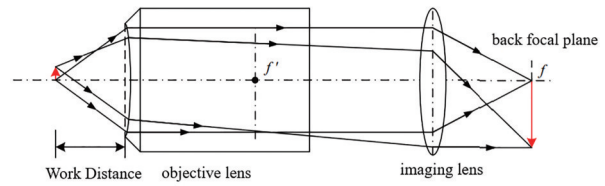


图2 成像椭圆仪放大倍率原理图^[14]

Fig. 2 Schematic of magnification of imaging ellipsometer^[14]

式中: L_e 为系统的实际放大倍率; L_d 为物镜的设计放大率; f_i 为成像系统中成像透镜的焦距; f_w 为计算理论放大率时和物镜耦合的成像透镜的焦距。

相机探测到的样品的面积可以根据放大率求出,计算公式为

$$s = \frac{w}{L_e} \cdot \frac{h}{L_e}, \quad (9)$$

式中: s 为样品在相机中的实际探测面积; h 、 w 分别为相机感光芯片的高、宽。由于样品和物镜成倾角,成像系统的清晰视场为所成像中的一条线,根据透镜焦距和成像倾角可以计算出成像变形量。通过二级成像原理弥补一级成像的缺陷,利用一级成像在空间上呈现样品实像,然后通过二级成像,在相机的感光芯片上成像。椭圆偏成像是相机经过光电转换,再进行 A/D 转换后形成的,图像传感器中的电信号与接收的光强成正比,因此可以从采集的图像中获取样品的表面形貌和厚度分布。分析椭圆偏图像时要求原始成像图具有较好的成像质量,因此可以采用连续抓取-时间积分法来提高图像的信噪比,以此改善图像的质量。通过采用多样点平均法来降低随机噪声对图像定量分析的影响,提高可靠性^[15]。

3 椭圆偏成像技术发展进程

椭圆偏成像技术最早出现于 20 世纪 80 年代,由于集成电路的特征尺寸越来越小,为了实现对半导体集成电路表面的定量分析与测量,人们首次将显微成像扫描与椭圆偏测量技术相结合。这种方法将入射光束聚焦到一个微小的点上,然后前后扫描样品,依次覆盖整个表面。由该方法研发出的显微成像扫描椭圆偏仪^[16-17]采用机械扫描,具有测量速度慢的问题,应用范围较小。直到 1988 年,新西兰维多利亚大学的 Beaglehole^[18]提出的椭圆偏成像技术摆脱了显微扫描成像的局限,使用 CCD 相机采集椭圆偏图像,将成像技术与椭圆偏技术相结合,研发出成像椭圆

偏仪,该椭偏仪可以观测油滴在云母基地上的扩散过程,极大提高了测量效率。

3.1 从单波长椭偏成像到光谱椭偏成像

20世纪90年代,基于椭偏测量技术的椭偏光学显微成像^[19]发展开来。1996年,中科院靳刚教授与瑞典林雪平大学的 Jansson 和 Arwin^[20]以起偏器-补偿器-样品-检偏器(PCSA)椭偏仪^[21]为基础,采用准直扩展光束为入射光,CCD相机作为探测器,如图3所示,对硅基层透明薄膜进行可视化,横向分辨率达到 $5\ \mu\text{m}$ 。该技术在由起偏器、补偿器、样品和检偏器组成的消光式椭偏仪中使用光度式,在衬底裸露部分进行消光调节,然后在保持补偿器方位角、偏振器方位角不变的情况下使用光度式进行操作,根据反射光的强度实现材料厚度的可视化。该技术对薄层沉积过程中厚度分布的在线动态可视化具有很大的应用前景。该椭偏成像技术使用的是单一波长入射样品,结构如图3所示^[8]。

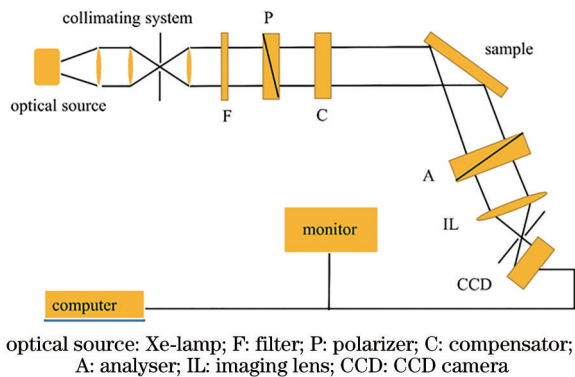


图3 具有扩展光束、固定偏振组件和CCD相机的成像椭偏仪结构示意图^[8]

Fig.3 Schematic of an imaging ellipsometer with an expanded beam, fixed polarizing components, and a CCD camera^[8]

该成像椭偏系统被应用于研究多种蛋白分子在固相表面的吸附机理^[22]和多种抗原-抗体之间的相互作用^[19]等,并且成功地检测了人体内分泌激素等。

2001年日本激光与电子实验室开发了一种彩色椭偏成像系统^[23],利用白光源和一个三色滤光片产生三种波长的单色光,能够在纳米尺度上快速得到样品的厚度和折射率的分布情况,横向分辨率可以达到 $10\ \mu\text{m}$ 。该系统采用彩色CCD摄像机,将来自样品表面的反射光的每个偏振转换为强度分布,该强度分布是膜厚度和折射率的函数;并且将强度分布显示为颜色分布,当样品的折射率均匀时,样

品的厚度变化就可以快速表现为颜色的差异。该系统虽然利用不同滤光片产生三种波长的单色光,可以进行三波长测量,但是无法得到样品的宽光谱信息。

2004年,法国的Boher等^[24]设计出一种光谱椭偏成像系统,采用白光源和四个滤光片分别得到不同波长的单色光波,横向空间分辨率也已经优于 $10\ \mu\text{m}$ 。

德国的Nanofilm公司研制了一种通过更换滤光片来获取多个波长下样品参数的光谱椭偏成像系统^[25],该系统可以对样品进行更多波长下的特性研究,但仍然无法提供连续光谱的测量。研究人员意识到需要实现连续光谱扫描和成像功能,才能对样品实现全面的研究分析。

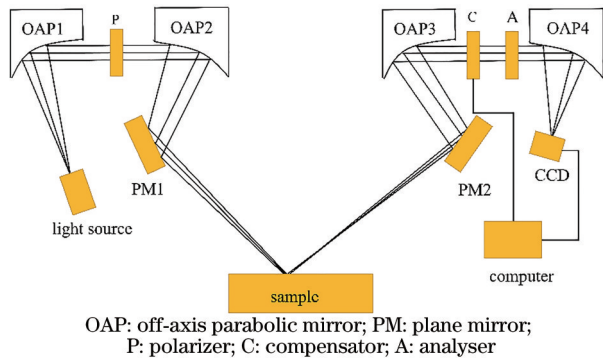
之后的研究便将光谱椭偏^[26]和椭偏成像的优点结合。韩国庆熙大学和中科院力学所先后将单色仪应用到椭偏成像技术中^[27-28],研究出的连续波长扫描的光谱椭偏成像系统弥补了之前光谱测量的不足^[29-31],实现单波长到多波长的光谱测量;可以测量材料在不同波长下的特性,获取样品上各微区的光谱椭偏信息及其分布,具有可达到原子层分析水平的纵向分辨能力、可达光学衍射极限的横向分辨能力、连续可调的光谱分辨能力以及秒量级的时间分辨能力。该系统能对具有复杂横向微结构的大面积纳米级层构样品参数的空间分布特性和光谱特性进行快速的测量和分析,还可以对表面动态过程进行实时分析,为分析复杂横向结构的大面积纳米级层构样品提供了一种有效的方法。

在从单波长椭偏成像发展到多波长椭偏成像的过程中,横向分辨率也从 $10\ \mu\text{m}$ 级发展到亚微米级,达到光学衍射极限。

3.2 光谱椭偏成像的发展

光谱椭偏技术出现后,拓宽光谱范围成为重要的研究方向。2009年日本东京大学Sato等^[32]提出了一种新型的光谱椭偏成像技术。之前光谱椭偏成像使用单色仪实现光谱测量,但单色仪光谱带宽较窄,阻挡大部分来自光源的能量,使入射光强度变弱,测量结果不理想。而新型技术利用宽带光源和白光干涉技术,在入射臂采用扫描干涉仪,通过扫描参考镜获得傅里叶光谱实现光谱测量,光源的光谱分布是中心波长为 $610\ \text{nm}$ 和半峰全宽为 $170\ \text{nm}$ 。该技术极大地拓宽了光谱带宽,增大了光强,测量结果更加准确。

椭偏仪大多采用透镜将宽带光束聚集在样品表面,然而透射式光学系统^[33-34]设计无法满足宽光谱的测量要求,在深紫外情况下会产生明显的色差问题。直到2013年,电子科技大学物理电子学院和中科院微电子所改变聚焦成像系统,研制了基于全反射聚焦光学系统的深紫外(DUV)宽带光谱椭偏仪^[35]。该椭偏仪采用基于离轴抛物面镜和平面反射镜的全反射式光学系统实现宽光谱(200~1000 nm)测量,离轴抛物面镜用于产生或聚焦准直光束,平面反射镜用于改变光束方向并补偿由离轴抛物面镜反射引起的偏振态变化,解决了色差问题。2016年,合肥工业大学和中国科学院微电子所在深紫外宽带光谱仪的基础上增加快速旋转补偿器式的椭偏结构,该结构实现了宽光谱成像,将光谱范围拓宽到深紫外波段,横向分辨率约为 $8.77\ \mu\text{m}\times 4.92\ \mu\text{m}$,并减小了系统误差。其测量结构如图4所示^[36]。



OAP: off-axis parabolic mirror; PM: plane mirror; P: polarizer; C: compensator; A: analyser

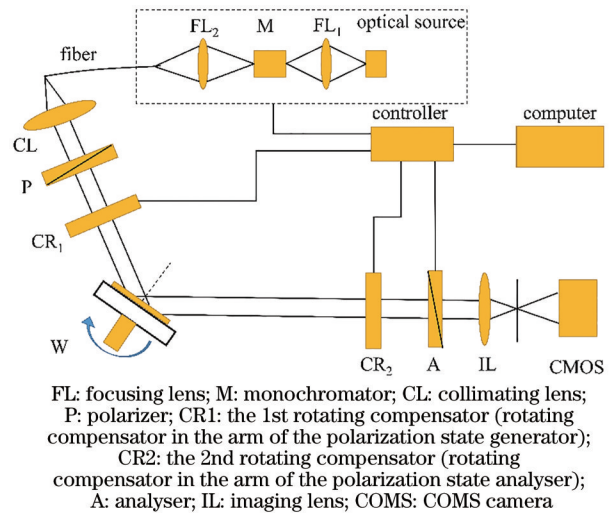
图4 全反射式椭偏成像系统结构示意图^[36]

Fig. 4 Schematic of total reflection ellipsometer imaging system^[36]

在拓宽光谱范围的同时,提高测量速度和准确性也成为成像椭偏仪的重要研究方向。2010年,清华大学吴学健等^[37]发明了一种基于磁光效应的成像椭偏仪,应用于对样品表面纳米尺度薄膜厚度分布的观测。它通过磁光调制技术来调整接收光的偏振方向;采用面阵探测器获取样品表面的椭偏图像;采取用磁光调制器取代传统步进电机转动起偏器、补偿器或检偏器光轴的方法来实现椭偏仪的测量,采用磁光调制器改变接收光的偏振方向,可以得到更高的偏振方向控制精度和重复精度,而且磁光调制器的调制速度更快。该技术

给成像椭偏仪发展提供了新的方向,极大地提高了测量速度。

随着纳米结构特征尺寸的不断减小,传统光谱椭偏测量技术正在逐渐接近其光谱灵敏度极限^[4],无法为纳米制造提供有效的工艺监控。2015年华中科技大学刘世元课题组将Muller矩阵椭偏仪与显微成像技术相结合,提出了Muller矩阵成像椭偏仪。相比传统光谱椭偏仪,Muller矩阵椭偏仪可以获得更丰富的信息,提供更高的灵敏度并且可以改变方位角以实现锥型衍射^[38],可以实现纳米结构几何参数的大面积快速准确测量^[39]。该系统采用双旋转补偿器,具有宽波段测量能力,系统校准和数据处理都更加简便。该方法不仅具有传统Muller矩阵椭偏仪的优势,还拥有了显微成像技术高分辨率的优点,光谱范围达到190~1000 nm。在2016年,他们完成了国内首台高精度宽光谱Muller矩阵椭偏仪设备,其椭偏成像结构如图5所示^[4]。



FL: focusing lens; M: monochromator; CL: collimating lens; P: polarizer; CR1: the 1st rotating compensator (rotating compensator in the arm of the polarization state generator); CR2: the 2nd rotating compensator (rotating compensator in the arm of the polarization state analyser); A: analyser; IL: imaging lens; COMS: COMS camera

图5 双旋转补偿器型 Mueller 矩阵成像椭偏仪示意图^[4]

Fig. 5 Schematic of dual rotating compensator Mueller matrix imaging ellipsometer^[4]

光源发出的光经过消色差透镜和单色仪会聚至光纤,通过光纤的光经过准直透镜变为一束平行光,该光束经过起偏器和旋转补偿器后入射样品,样品的反射光经过旋转补偿器、检偏器和成像透镜后进入 CMOS 相机。相机上各像素接收的光束对应的 Stokes 向量可以表示为

$$S_{\text{out}} = S_{\text{in}} [M_A R(A)] \times [R(-C_2) M_{C_2}(\delta_2) R(C_2)] \times M_S [R(-C_1) M_{C_1}(\delta_1) R(C_1)] \times [M(-P) M_P M(P)], \quad (10)$$

式中： M_P 、 M_A 、 $M_{C_1}(\delta_1)$ 、 $M_{C_2}(\delta_2)$ 和 M_S 分别为起偏器、检偏器、旋转补偿器和样品的Muller矩阵； δ_1 和 δ_2 表示旋转补偿器1和2的相位延迟量； $R(\epsilon)$ 为各光学元件的旋转矩阵，其中 ϵ 可以表示入射面与双旋转补偿器的快轴方向的夹角 C_1 、 C_2 ，也可以表示入射面和起偏器、检偏器的透光轴方向的夹角 P 和 A ； S_m 为入射光束的Stokes向量，为 $[1\ 0\ 0\ 0]^T$ 。将式(10)展开，可得对应像素采集的光强信号表达式^[40-41]；利用Hadamard分析^[42]，可以从谐波系数中求出待测样品对应像素处的Muller矩阵元素。

2018年，韩国汉阳大学应用物理系研究出一种双反射椭偏成像系统^[43]，对两个样品的偏振态变化进行比较，提供两个样品差异的非零图像。该系统以一种样品为基准，另一个为测试样品，去除了调零过程，图像获取速率可以达到摄像机的最高帧率，提高了测量速度，也减小了人为误差；而且对光束强度的均匀性没有要求，测量性能大大提高，可以实时检测样品表面缺陷和污染。

2019年日本东北大学采用三步相移椭偏成像技术，以椭偏测量术结合时间相移^[44-47]图像处理单元进行相移成像椭偏测量。与光度法相比，该技术通过四分之一波片(QWP)和旋转线性偏振片(RLP)插入相移，根据旋转线性偏振片的方位角进行连续采集，在恒定旋转速度下，选择具有相等角度间隔的三个角度，在恒定时间内得到三幅图，用于测量纳米材料厚度，结构如图6所示^[48]。

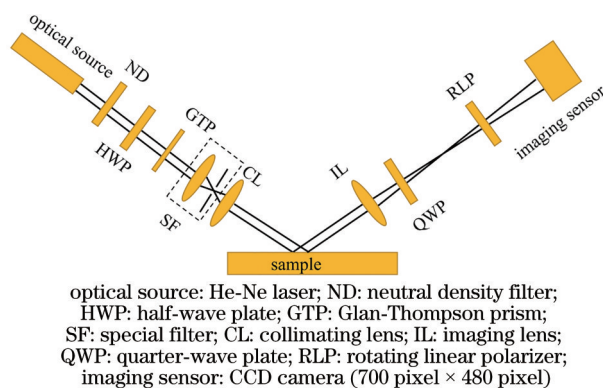


图6 三步相移成像椭偏仪结构示意图^[48]

Fig. 6 Schematic of three-step phase shift imaging ellipsometer^[48]

其中，使用QWP和RLP插入相移。由于相移图像是根据RLP的方位角连续采集的，所以这种方法属于时间相移技术。由于具有公共光路，时间相移技术相比空间相移技术具有更高的精度。图7为

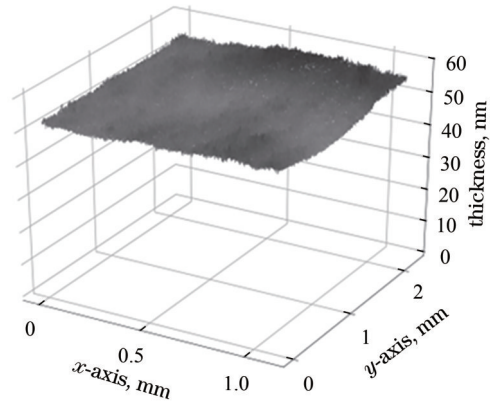


图7 硅衬底上的二氧化硅薄膜厚度分布^[48]

Fig. 7 Thickness profile of the SiO_2 nanofilm on the Si substrate^[48]

使用该系统获得的硅衬底上的二氧化硅纳米薄膜的厚度分布。厚度剖面在 $1.10\text{ mm} \times 2.21\text{ mm}$ 的面积上几乎是平坦的，在水平和垂直方向上的空间分辨率分别为 $1.58\ \mu\text{m}$ 和 $4.62\ \mu\text{m}$ 。该系统与光谱椭偏之间的平均厚度差小于 3 nm ，尽管包含大量的数据点，测量结果与标准值的偏差小于 2.5 nm 。

通过与磁光调制、时间相移和双反射等技术的结合，光谱椭偏技术提高了测量速度和准确性。通过与Muller矩阵的结合，光谱椭偏技术不再受光学分辨率极限的限制，提高了测量的准确性，可以获得更丰富的信息。

2019年华中科技大学发明了基于液晶调相的垂直物镜式Muller矩阵成像椭偏仪^[49]，该仪器所用系统改变了之前普通倾斜镜面成像的结构，根本上避免了焦深小、视场窄的问题，可实现高分辨率、宽视场测量，可用于对纳米薄膜几何参数的测量。

2018年韩国朝鲜大学提出用于表征多层膜结构的大面积光谱成像椭偏仪^[50]，利用宽带光源和成像光谱仪，光谱范围可以达到 $400\sim 800\text{ nm}$ 。准直光束通过扩束器扩展，直径达到 30 mm ，通过低放大率成像透镜^[51]得到旋转补偿器旋转引起的偏振变化的光谱-空间强度图像，该图像可以表征相对较大区域的薄膜厚度剖面，横向分辨率也已经达到 $4\ \mu\text{m}$ 。至此，椭偏成像技术已经实现大视场、宽光谱成像，可以应用在更多方面。

根据测量的要求，椭偏成像技术可以用作定性技术、准定量技术或完全定量技术。但是在进行完全定量测量时，需要更精确的校准、校正和计算^[52]。2019年，中科院上海光学精密机械研究所针对Muller矩阵成像椭偏仪的系统误差源提出了一种新

的简化分析法,分析了成像椭偏仪的系统误差源和随机误差源对测量结果的影响,适用于Muller矩阵成像椭偏仪的误差评定、误差源指标分解及元件误差补偿^[53]。

国外椭偏成像研究开始比较早,以椭偏成像技术为基础的科技研发较为迅速,科研人员所研制出的各种成像椭偏仪器也逐渐商品化。德国的Nanofilm公司于1997年最早发布了第一台商品化成像椭偏仪Nanofilm_I-Elli2000,2004年全球第一台光谱成像椭偏仪Nanofilm_EP3_SE问世。2013年,更名为Accurion的Nanofilm公司推出了最新一代的成像椭偏仪Nanofilm_EP4。Nanofilm_EP4SE可以对各种基板/材料上的石墨烯薄片进行直接的可视化椭偏分析,实现对多层石墨烯的薄膜厚度和光学性质的测量;该仪器也可以用于对太阳能电池、单分子层、蛋白质相互作用等方面的研究^[54]。截至目前,椭偏成像技术已经在各个应用方面得到比较全面的发展。

国内椭偏成像技术虽然起步较晚,但经过研究

人员的不断钻研,发展较为迅速,从开始的基于消光式椭偏仪的椭偏成像测量技术发展到全Mueller矩阵型椭偏成像测量技术^[55],实现了大面积宽光谱测量,已基本走向了成熟,不亚于国外椭偏成像技术。

4 椭偏成像技术应用

随着计算机的发展,椭偏成像技术由于自身的优势与特点,结合其他测量方法,能获得更为丰富的信息,在材料科学、生物学、半导体工业等领域得到广泛的应用。

在材料学方面,椭偏成像主要应用于对纳米薄膜的研究。例如,成像椭偏仪的横向分辨率达到 $1\ \mu\text{m}$ ^[48],光学特性映射到石墨烯薄片上之后,椭偏成像技术就可以用来从任何衬底上确定石墨烯薄膜的形状和层数,从中提取其光学性质从而分析不同衬底对石墨烯性质的影响^[56]。图8为成像椭偏仪获得的石墨烯薄片灰度图和光学显微镜获得的石墨烯薄片的对比。

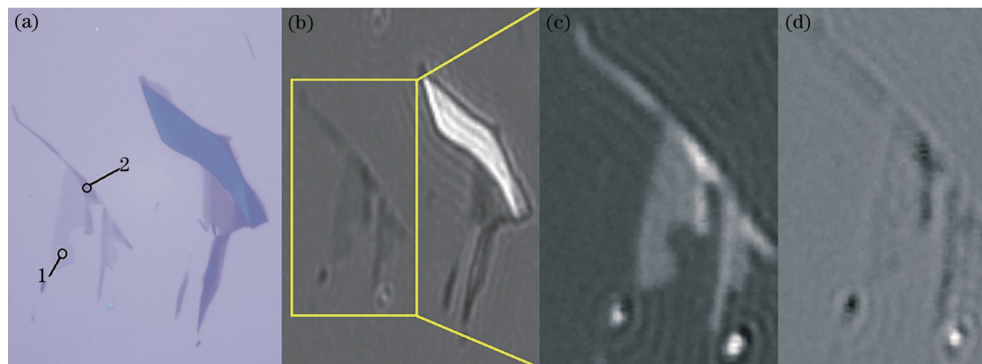


图8 成像椭偏仪获得的石墨烯薄片灰度图和光学显微镜获得的石墨烯薄片的对比。(a)不同层数的石墨烯片的光学显微照片,数字代表石墨烯层数;(b)石墨烯片在二氧化硅/硅上的成像椭偏灰度图;(c)(d)以更高的分辨率显示图8(b)中方框

区域的椭偏 Ψ 和 Δ 图

Fig. 8 Comparison of grayscale images of graphene sheets obtained by imaging ellipsometry and graphene sheets obtained by optical microscopy. (a) Optical micrograph of graphene sheets with different layers, the numbers in the figure represent the number of graphene layers; (b) ellipsometric grayscale image of graphene sheets on silica/silicon; (c)(d) ellipsometric Ψ diagram and Δ diagram of the box area in Fig. 8(b) displayed at a higher resolution

对比图8(a)和图8(b)~(d)可以看出,成像椭偏适用于区分单层和双层石墨烯。在此之后,成像椭偏技术实现从单波长测量到光谱测量的突破,为测定由飞秒激光诱导的离子迁移刻写的通信波导的折射率对比度和色散提供了有效方法^[57],并且能够提供有效的光谱分辨率,从而获得波导的色散指数。除此之外,椭偏成像技术可以用于对导电聚合物膜层的研究,通过椭偏成像可以获得聚合物层的

空间分布信息和不同厚度层的显著形态差异^[58]。此外,椭偏成像还应用在原位测试方面。例如对界面氧化层变化的分析可以显示氧化层厚度变化,精确到纳米级^[59]。对于水媒质中油滴到达石英固体表面上时形貌的变化,椭偏成像能够准确地测定在液滴和界面之间发生薄膜排水时液滴轮廓的变化。该技术对厚膜和薄膜的测量都很敏感,无需扫描表面,可实时生成薄膜轮廓^[60]。到目前为止,椭偏成

像技术在纳米材料检测方面已经取得长足的进步, 椭圆光谱成像已经可以对复杂二维分布的纳米层结构薄膜样品进行快速光谱成像定量测量, 给具有复杂横向结构的大面积多层纳米薄膜样品的表征提供了方法, 同时满足了高分辨率、快速准确、结果直观、实时监测的要求。

在生物学方面, 椭圆成像技术是研究生物分子、固体表面吸附以及生物分子之间相互作用的一种简单、高效、准确的手段^[5]。绝大多数生物单分子薄膜是非常薄且是透明的, 椭圆显微成像技术适合于观测如此薄的膜层^[54]。椭圆成像技术与 CCD 相机的结合, 克服了机械扫描成像速度慢的问题, 使得实时检测成为可能, 推动了该技术与生物芯片技术的组合^[22, 61], 能够用于研究各种生物分子特异性结合反应, 并能实时观察分子间相互作用过程, 从而进行有关表面实时吸附的动力学行为的研究。椭圆成像系统能够通过检测抗原和抗体复合膜层, 检测到各种抗体和抗原^[62]。除了与生物芯片技术组合, 椭圆成像生物传感器 (IEB) 以高灵敏度和对被测生物分子的干扰和破坏最小而得到广泛应用^[63]。靳刚教授课题组在成功研制成像椭圆仪后致力于将该技术与生物医学结合^[64-65], 极大推动 IEB 技术的发展。如今, IEB 已被广泛应用于肿瘤早期诊断^[66]、临床治疗标志物检测^[67]、生物分子相互作用分析^[68-70], 已经发展成能够实现高灵敏度、高通量、高特异性、低样品消耗的多样品检测的强大生物传感器。椭圆成像检测具有在测试的过程中不需要标记待测物、不会影响待测物的生物活性、提高测量准确性的优点。随着光度式成像椭圆仪的出现和发展, 测量的速度和精度也逐步提高, 促进了该技术进一步与生物技术的结合, 与酶联免疫法和放射免疫法检测^[71]形成互补, 在生物医学、细胞学和临床医学等领域的研究中发挥重要的作用。

在半导体方面, 椭圆成像技术可以有效检测半导体材料的形态、均匀性和光学性能。例如, 检测噻吩-亚苯基低聚物晶体等在微电子器件和柔性电子方面有巨大潜力的有机半导体微晶, 快速观察和区分单层和多层微晶, 获得双轴半导体材料的光学特性。2020 年, 韩国三星设计了一种基于椭圆成像的半导体器件的检查方法^[72], 用于检测半导体材料的晶态、形状、化学结构和电导率等性质。该技术还可以用于对激光二极管 (LD) 的检测^[73], 可以检测 LD 发射表面上的抗反射涂层的光学性质, 从而获

得 LD 的发射波长、线宽、寿命、稳定性。

5 技术展望

椭圆成像测量技术迄今发展仅二十几年, 仍然是一个新兴的领域, 有着广阔的前景和巨大的发展空间, 主要的发展趋势可以分为如下几个方面。

1) 光谱椭圆成像技术发展至今可以实现 200~1000 nm 波段的测量, 在对纳米结构的测量与表征中, 可能需要获得更短波段的偏振信息, 从而达到更高的横向分辨率, 以分析样品的特性。实现椭圆成像技术对更宽波段的测量是重要研究方向。

2) 在医学方面的应用中, 椭圆成像技术可以和很多生物技术相结合, 实现各个层面的应用。例如与人工智能技术相结合实时监测病人身体的癌细胞, 及时做出反应, 配合医生对患者进行康复治疗。

3) 将椭圆成像技术的最新发展实用化, 研制可用于工业生产过程中使用的成像椭圆仪, 在半导体、微电子等产品的生产过程中实现实时监测。

4) 通过解决图像传感器的低频响应和降低系统噪声来减小图像采集的误差。

6 总 结

综述了椭圆成像技术的发展历程、原理和应用。随着薄膜材料、半导体器件以及生物分子学的发展, 椭圆成像技术越来越受到重视, 成为椭圆测量领域研究的热点。

椭圆成像技术保持了传统椭圆测量术非接触式测量、对样品无损害的优点, 并在测量上弥补了传统椭圆测量技术的不足, 具有以下优点: 测量精度高, 不仅可达到原子层量级的纵向灵敏度, 还具有可达光学衍射极限的横向分辨能力, 可以对精细横向微结构的纳米层状样品进行全表面测量; 非苛刻性, 对待测样品限制少, 可以实现多样品测量; 结果直观, 通过 CCD 成像, 可以直观地看到样品形貌, 排除测量中的伪信号, 从而使测量更加准确。

现在的椭圆成像技术在波长范围、测量面积、精确度、测量速度等方面得到很大程度的改进, 可以获得样品包含整个视场的大面积区域内的测量信息, 实时观测样品的状态, 实现大视场宽光谱测量, 在纳米薄膜、生物医学等方面具有极大的应用价值。

研究人员利用椭圆成像技术可实现各种液体环境下的椭圆分析, 并且可以实现和多种技术联用, 这些新技术新特点进一步拓展了椭圆成像技术

的应用领域,也为成像椭偏仪的发展带来新的机遇。相信在不久的将来,椭偏成像技术必将在薄膜检测、生物传感器、半导体、微电子等领域发挥更加重要的作用。

参 考 文 献

- [1] 薛利军, 李自田, 李长乐, 等. 光谱成像仪 CCD 焦平面组件非均匀性校正技术研究[J]. 光子学报, 2006, 35(5): 693-696.
Xue L J, Li Z T, Li C L, et al. Study on the hyper-spectral CCD imager non-uniformity correction algorithm[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(5): 693-696.
- [2] 游海洋, 贾建虎, 陈剑科, 等. 面阵 CCD 探测的全自动椭圆偏振光谱系统研究[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(1): 45-50.
You H Y, Jia J H, Chen J K, et al. The study of a auto ellipsometer system by using a two-dimensional CCD array detector[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2003, 22(1): 45-50.
- [3] Jin G, Tengvall P, Lundström I, et al. A biosensor concept based on imaging ellipsometry for visualization of biomolecular interactions[J]. Analytical Biochemistry, 1995, 232(1): 69-72.
- [4] 陈修国, 袁奎, 杜卫超, 等. 基于 Mueller 矩阵成像椭偏仪的纳米结构几何参数大面积测量[J]. 物理学报, 2016, 65(7): 070703.
Chen X G, Yuan K, Du W C, et al. Large-scale nanostructure metrology using Mueller matrix imaging ellipsometry[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(7): 070703.
- [5] 王战会, 靳刚. 光学椭偏成像技术在生物分子研究中的应用[J]. 生物工程学报, 2000, 16(4): 429-432.
Wang Z H, Jin G. Imaging ellipsometry in biomolecule research[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2000, 16(4): 429-432.
- [6] 包学诚. 椭偏仪的结构原理与发展[J]. 现代科学仪器, 1999(3): 58-61.
Bao X C. The construction, principle and development of ellipsometer[J]. Modern Scientific Instruments, 1999(3): 58-61.
- [7] 张恒. 基于光度法及混合法的自动椭偏仪研究[D]. 广州: 华南师范大学, 2005: 21-30.
Zhang H. Research on the automatic ellipsometer based on photometric & unite method[D]. Guangzhou: South China Normal University, 2005: 21-30.
- [8] 崔高增. 深紫外成像光谱椭圆偏振仪校准方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014: 12-16.
Cui G Z. Study of DUV imaging spectroscopic ellipsometer of system calibration[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014: 12-16.
- [9] 吴启宏. 与消光式兼容的光度椭偏仪的原理[J]. 光学学报, 1987, 7(7): 618-621.
Wu Q H. Principle of a photometric ellipsometer compatible with null ellipsometer[J]. Acta Optica Sinica, 1987, 7(7): 618-621.
- [10] Chen Y Y, Meng Y H, Jin G. Optimization of off-null ellipsometry for air/solid interfaces[J]. Applied Optics, 2007, 46(35): 8475-8481.
- [11] Wang G L, Arwin H, Jansson R. Optimization of off-null ellipsometry in sensor applications[J]. Applied Optics, 2004, 43(10): 2000-2005.
- [12] Mishima T, Kao K C. Detection of thickness uniformity of film layers in semiconductor devices by spatially resolved ellipso-interferometry[J]. Optical Engineering, 1982, 21(6): 216074.
- [13] Harke M, Stelzle M, Motschmann H R. Microscopic ellipsometry: imaging monolayer on arbitrary reflecting supports[J]. Thin Solid Films, 1996, 284/285: 412-416.
- [14] 代恒. 立式成像椭偏仪研制及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018: 7-10.
Dai H. Development and application of vertical imaging ellipsometer[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018: 7-10.
- [15] 孟永宏, 靳刚. 椭偏光学显微成像系统中的图像采集及处理技术[J]. 光学精密工程, 2000, 8(4): 316-320.
Meng Y H, Jin G. Technique of image grabbing and processing in ellipsometric imaging system[J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(4): 316-320.
- [16] Erman M, Theeten J B. Spatially resolved ellipsometry [J]. Journal of Applied Physics, 1986, 60(3): 859-873.
- [17] Karlsson L M, Schubert M, Ashkenov N, et al. Adsorption of human serum albumin in porous silicon gradients monitored by spatially-resolved spectroscopic ellipsometry[J]. Physica Status Solidi (c), 2005, 2(9): 3293-3297.
- [18] Beaglehole D. Performance of a microscopic imaging ellipsometer[J]. Review of Scientific Instruments, 1988, 59(12): 2557-2559.
- [19] Jin G, Meng Y H, Xing J H, et al. Visualization of molecule interaction between antigen and antibody: one of the ellipsometric imaging applications[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3548: 131-135.
- [20] Jin G, Jansson R, Arwin H. Imaging ellipsometry

- revisited: developments for visualization of thin transparent layers on silicon substrates[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1996, 67(8): 2930-2936.
- [21] 王志刚, 冯书文, 严汉章. 关于 PCSA 式椭圆偏仪测量区域的研究[J]. *山东大学学报(自然科学版)*, 1987, 22(1): 86-93.
- Wang Z G, Feng S W, Yan H Z. Discussion of the measuring zones of PCSA ellipsometer[J]. *Journal of Shandong University*, 1987, 22(1): 86-93.
- [22] Jin G, Wang Z H, Meng Y H, et al. Imaging ellipsometry for the visualization of bio-molecular layers[C]//*Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, November 1, 1998, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 1998: 6324909.
- [23] Tanooka D, Adachi E, Nagayama K. Color-imaging ellipsometer: high-speed characterisation of in-plane distribution of film thickness at nano-scale[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2001, 40(2R): 877-880.
- [24] Boher P, Thomas O, Piel J P, et al. A new multiple wavelength ellipsometric imager: design, limitations and applications[J]. *Thin Solid Films*, 2004, 455/456: 809-818.
- [25] 靳刚, 孟永宏. 一种变入射角度光谱椭圆成像测量的系统和方法: CN101231239A[P]. 2008-07-30.
- Jin G, Meng Y H. System and method for variable incident angle spectral ellipsometry imaging measurement: CN101231239A[P]. 2008-07-30.
- [26] Funke S, Wurstbauer U, Miller B, et al. Spectroscopic imaging ellipsometry for automated search of flakes of mono- and n-layers of 2D-materials[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 421: 435-439.
- [27] Choi A J, Kim T J, Kim Y S, et al. Study on crystallization of a-Si measured by imaging spectroscopic ellipsometry[J]. *Journal- Korean Physical Society*, 2006, 48(6): 1544-1547.
- [28] Choi A J, Ghong T H, Kim Y D, et al. Imaging ellipsometry study on the Ni-mediated crystallization of a-Si[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(11): 113529.
- [29] 孟永宏. 光谱椭圆成像系统研究[D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2007: 13-36.
- Meng Y H. Study of imaging spectroscopic ellipsometry[D]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007: 13-36.
- [30] 靳刚, 孟永宏. 入射角度扫描椭圆成像测量方法和装置: CN1699967A[P]. 2005-11-23.
- Jin G, Meng Y H. Incidence angle scanning ellipsometric imagery measurement method and apparatus: CN1699967A[P]. 2005-11-23.
- [31] 孟永宏, 靳刚. 一种用于椭圆测量中的光强调节方法和装置: CN101231238A[P]. 2011-09-14.
- Meng Y H, Jin G. Method and device for adjusting light intensity in ellipsometry: CN101231238A[P]. 2011-09-14.
- [32] Sato S, Ando S. Interferometric imaging ellipsometry: fundamental study[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7405: 74050F.
- [33] Wei L H. Small spot ellipsometer: US6515744[P]. 2003-02-04.
- [34] Li G G, Liu T, Genio E, et al. Broadband polarization spectrometer with inclined incidence and optical measurement system: US8767209[P]. 2014-07-01.
- [35] Song G Z, Cui G Z, Chen Y Q, et al. DUV broadband spectroscopic ellipsometer based on all-reflective focussing optical system[C]//*2013 Third International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control*, September 21-23, 2013, Shenyang, China. New York: IEEE Press, 2013: 492-495.
- [36] 姜春光, 谌雅琴, 刘涛, 等. 全反射式宽光谱成像椭圆偏仪[J]. *光电工程*, 2016, 43(1): 55-59.
- Jiang C G, Chen Y Q, Liu T, et al. All-reflective broadband spectroscopic imaging ellipsometer[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, 43(1): 55-59.
- [37] 吴学健, 张继涛, 李岩. 一种基于磁光效应的成像椭圆偏仪: CN101852591A[P]. 2010-10-06.
- Wu X J, Zhang J T, Li Y. An imaging ellipsometer based on magneto-optical effect: CN101852591A[P]. 2010-10-06.
- [38] Novikova T, de Martino A, Hatit S B, et al. Application of Mueller polarimetry in conical diffraction for critical dimension measurements in microelectronics[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(16): 3688-3697.
- [39] Chen X G, Du W C, Yuan K, et al. Development of a spectroscopic Mueller matrix imaging ellipsometer for nanostructure metrology[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(5): 053707.
- [40] Liu S Y, Du W C, Chen X G, et al. Mueller matrix imaging ellipsometry for nanostructure metrology[J]. *Optics Express*, 2015, 23(13): 17316-17329.
- [41] Collins R W, Koh J. Dual rotating-compensator multichannel ellipsometer: instrument design for real-time Mueller matrix spectroscopy of surfaces and

- films[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1999, 16(8): 1997-2006.
- [42] Fujiwara H. Spectroscopic ellipsometry: principles and applications[M]. New York: Principles and Applications, 2007: 120-121.
- [43] Park S, Kim E, Kim J, et al. Comparison null imaging ellipsometry using polarization rotator[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2018, 57(5): 052501.
- [44] Torres J F, Komiya A, Shoji E, et al. Development of phase-shifting interferometry for measurement of isothermal diffusion coefficients in binary solutions [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(9): 1287-1296.
- [45] Shoji E, Komiya A, Okajima J, et al. Development of quasi common path phase-shifting interferometer for measurement of natural convection fields[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(25/26): 7460-7470.
- [46] Rogala E W, Barrett H H. Phase-shifting interferometer/ellipsometer capable of measuring the complex index of refraction and the surface profile of a test surface[J]. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 1998, 15(2): 538-548.
- [47] Pak H K, Law B M. 2D imaging ellipsometric microscope[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, 66(10): 4972-4976.
- [48] Shoji E, Komiya A, Okajima J, et al. Three-step phase-shifting imaging ellipsometry to measure nanofilm thickness profiles[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 112: 145-150.
- [49] 陈修国, 陈军, 陈超, 等. 基于液晶调相的垂直物镜式 Muller 矩阵成像椭偏仪: CN106595521B[P]. 2019-12-13.
Chen X G, Chen J, Chen C, et al. Vertical objective-type Muller matrix imaging ellipsometer based on liquid crystal phase modulation: CN106595521B[P]. 2019-12-13.
- [50] Kim D H, Yun Y H, Joo K N. LASIE: large area spectroscopic imaging ellipsometry for characterizing multi-layered film structures[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2018, 19(8): 1125-1132.
- [51] Seo Y B, Yun Y H, Joo K N. 3D multi-layered film thickness profile measurements based on photometric type imaging ellipsometry[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2016, 17(8): 989-993.
- [52] Asinovski L, Beaglehole D, Clarkson M T. Imaging ellipsometry: quantitative analysis[J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2008, 205(4): 764-771.
- [53] 孟泽江, 李思坤, 王向朝, 等. Muller 矩阵成像椭偏仪误差源的简化分析方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0911002.
Meng Z J, Li S K, Wang X Z, et al. Simplified analytical method for error sources in Mueller matrix imaging polarimeter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0911002.
- [54] 靳刚, 赵子彦. 生物分子吸附膜层的图像显示——光学椭偏显微成像技术应用之一[J]. *测试技术学报*, 1998, 12(3): 166-171.
Jin G, Zhao Z Y. Image display of biomolecular adsorption films: one of the applications of optical ellipsometry microscopy[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 1998, 12(3): 166-171.
- [55] Arteaga O, Baldrís M, Antó J, et al. Mueller matrix microscope with a dual continuous rotating compensator setup and digital demodulation[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(10): 2236-2245.
- [56] Wurstbauer U, Röling C, Wurstbauer U, et al. Imaging ellipsometry of graphene[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(23): 231901.
- [57] Moreno-Zarate P, Gonzalez A, Funke S, et al. Imaging ellipsometry determination of the refractive index contrast and dispersion of channel waveguides inscribed by fs-laser induced ion-migration[J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2018, 215(19): 1800258.
- [58] Abrantes L M, Correia J P, Jin G. The heterogeneous growth of P(3MeTh): an ellipsometric study[J]. *Electrochimica Acta*, 2001, 46(26/27): 3993-3999.
- [59] Verhagen T, Rodriguez A, Vondráček M, et al. Chemical vapour deposition of MoS₂ for energy harvesting: evolution of the interfacial oxide layer[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2020, 3(7): 6563-6573.
- [60] Goodall D G, Stevens G W, Beaglehole D, et al. Imaging ellipsometry/reflectometry for profiling the shape of a deformable droplet as it approaches an interface[J]. *Langmuir*, 1999, 15(13): 4579-4583.
- [61] Arwin H. Spectroscopic ellipsometry and biology: recent developments and challenges[J]. *Thin Solid Films*, 1998, 313/314: 764-774.
- [62] Elwing H. Protein absorption and ellipsometry in biomaterial research[J]. *Biomaterials*, 1998, 19(4/5): 397-406.

- [63] Gruber P, Marques M P C, Szita N, et al. Integration and application of optical chemical sensors in microbioreactors[J]. *Lab on a Chip*, 2017, 17(16): 2693-2712.
- [64] Liu H Y, Shen J, Liu W, et al. Imaging ellipsometry biosensor: basic theory, principles of operation, and applications[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2020, 38(2): 024002.
- [65] 陈艳艳, 靳刚. 实时光学蛋白质芯片生物传感器[J]. *纳米科技*, 2006(6): 33-36.
Chen Y Y, Jin G. Real-time optical protein microarray biosensor[J]. *Nanoscience & Nanotechnology*, 2006(6): 33-36.
- [66] Zhang H G, Qi C, Wang Z H, et al. Evaluation of a new CA15-3 protein assay method: optical protein-chip system for clinical application[J]. *Clinical Chemistry*, 2005, 51(6): 1038-1040.
- [67] 李一珂, 靳刚, 牛宇, 等. 光学蛋白质芯片技术在生物检测中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(S1): 353-354.
Li Y K, Jin G, Niu Y, et al. Application of optical protein chip technology in biological detection[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(S1): 353-354.
- [68] Kang T F, Niu Y, Jin G. Visualization of the interaction between tris and lysozyme with a biosensor based on total internal reflection imaging ellipsometry[J]. *Thin Solid Films*, 2014, 571: 463-467.
- [69] Wang Z H, Jin G. Covalent immobilization of proteins for the biosensor based on imaging ellipsometry[J]. *Journal of Immunological Methods*, 2004, 285(2): 237-243.
- [70] 陈艳艳, 靳刚. 椭圆偏光生物传感器及生物医学应用[J]. *中国医学科学院学报*, 2006, 28(4): 596-599.
Chen Y Y, Jin G. Protein microarray bisensor based on imaging ellipsometry and its biomedical applications[J]. *Acta Academiae Medicinae Sinicae*, 2006, 28(4): 596-599.
- [71] Tengvall P, Lundström I, Liedberg B. Protein adsorption studies on model organic surfaces: an ellipsometric and infra-red spectroscopic approach[J]. *Biomaterials*, 1998, 19(4/5): 407-422.
- [72] 李明俊, 金郁来, 郑在晃, 等. 基于椭圆偏光的检查方法以及制造半导体器件的方法: CN112289696A [P]. 2021-01-29.
Li M J, Jin Y L, Zheng Z H, et al. Inspection method based on ellipsometry and method for manufacturing semiconductor device: CN112289696 A[P]. 2021-01-29.
- [73] Accurion. Application note: quality control of anti reflection coating on front facet of laser diodes[EB/OL]. (2018-03-26)[2021-03-15]. https://www.accurion.com/imaging-ellipsometry/applications/laser-diodes/application_note_ld.pdf.