

基于偏振态空间调制的紧凑型偏振光谱仪

陶泽¹, 刘佳敏¹, 张传维^{1,2*}, 陈修国¹, 江浩¹, 刘世元^{1,2}

(1. 华中科技大学 数字制造装备与技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 武汉颐光科技有限公司, 湖北 武汉 430075)

摘要: 提出并实现了一种紧凑型偏振光谱仪, 该仪器采用光谱仪阵列, 使测量光谱范围覆盖可见光波段; 采用部分平行光路设计, 简化了测量配置和系统校准方法; 运用入射面旋转效应, 实现了偏振态的空间并行调制, 减少了测量时间. 对多组样品测量的结果证明了该紧凑型偏振光谱仪测量的准确性. 由于测量速度快、结构简单且易于在线集成, 该紧凑型偏振光谱仪作为一种实时在线测量工具极具潜力.

关键词: 偏振光谱仪; 紧凑型; 可见光谱

中图分类号: TH744 **文献标识码:** A

Compact Polarized Spectrometer Based On Spatial Modulation of Polarization State

TAO Ze¹, LIU Jia-Min¹, ZHANG Chuan-Wei^{1,2*}, CHEN Xiu-Guo¹, JIANG Hao¹, LIU Shi-Yuan^{1,2}

(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, 430075, China)

Abstract: A new compact polarized spectrometer is reported and implemented. An array consisting of two spectrometers is employed in the proposed polarized spectrometer to enable the measurement in the entire visible spectral range, which is necessary for the measurement of different sample types. Only one polarization optical element is used in the optics system with the partially parallel optical path design, which significantly simplifies the configuration and calibration of the system. The compact polarized spectrometer utilizes the incident plane rotating effect to modulate the polarization state in space domain, which consequently reduces the measurement time. The accuracy of the proposed compact polarized spectrometer is demonstrated by measuring test samples with different thicknesses. In consideration of the advantages, such as fast speed, compact and concise structure, eases integration, the proposed instrument shows great potential to be a powerful tool for on-line measurement in thin film manufacturing.

Key words: polarized spectrometer, compact, visible spectrum

PACS: 07.60.Rd

引言

偏振光学仪器是一种利用偏振光与偏振器件的作用, 实现样品物理量或者光束偏振态测量的非接

触式精密仪器, 其主要包括光谱椭偏仪、偏振光谱仪和偏振仪等. 其中光谱椭偏仪和偏振光谱仪利用已知偏振态的椭圆偏振光与待测样品作用, 检测样品反射或者透射前后的偏振态变化, 通过数值拟合计

收稿日期: 2015-11-19, 修回日期: 2016-04-05

Received date: 2015-11-19, revised date: 2016-04-05

基金项目: 基于散射场层析广义椭偏仪的三维纳米结构测量理论与方法 (51475191); 基于 MOEMS 技术的微型光谱椭偏仪研制 (2014BEC052); 基于穆勒矩阵椭偏实时测量的可控纳米褶皱制备机理研究 (2015CFB278); 纳米光学测量技术与仪器创新群体 (2015CFA005)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51475191); the Key Technology Support Program of Hubei Province of China (2014BEC052); the Natural Science Foundation of Hubei Province of China (2015CFB278, 2015CFA005)

作者简介 (Biography): 陶泽 (1990-), 男, 重庆人, 博士生, 主要研究领域为微型光谱椭偏仪. E-mail: zetao@hust.edu.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: chuanweizhang@hust.edu.cn

算,提取出待测样品的信息^[1-3]. 根据探测光的偏振态调制方式,这类偏振光学仪器可分为消光调制式^[4]、旋转偏振器件调制式^[5-8]和光弹调制式^[9]等. 目前,偏振光学仪器广泛应用于半导体和有机材料等领域,主要用于测量块体和薄膜材料的光学常数、薄膜厚度以及微结构特性^[10]. 例如,利用偏振光学仪器对纳米压印光栅的退偏效应^[11]、纳米压印光栅的形貌不对称^[12]和纤连蛋白吸附^[13]等进行测量和研究. 与常用的扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)、扫描隧道显微镜(Scanning Tunneling Microscope, STM)和原子力显微镜(Atomic Force Microscopy, AFM)等仪器相比,偏振光学仪器具有与样品非接触、对样品无破坏,测量环境非真空以及光谱灵敏度高等优点.

现有的偏振光学仪器大多采用旋转偏振器件,或者通过光弹调制器来实现探测光的偏振态调制,这两种方式都会使探测光偏振调制部分和仪器整体体积变得庞大. 为了扩大偏振光学仪器在工业领域的应用,满足其在工业生产中的在线原位测量需求,近年来,国内外许多科研机构开展了偏振光学仪器的微型化研究,他们利用光学元件的空间偏振调制^[14-16]或者偏振元件的阵列布置^[17,18],代替偏振器件旋转或者光弹元件调制等环节,实现了仪器的微型化或者静态测量. 其中最具代表性的是: Takashi Sato 等^[14]采用电子束光刻和反应离子刻蚀等技术,将四分之一波片阵列和偏振器阵列集成到电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)图像传感器上,实现了偏振光学仪器的单波长静态测量以及微型偏振检测模块与探测器的集成. Sang Heon Yel 等^[15]巧妙地运用分束器和物镜构建的入射面旋转效应,将光路系统中的偏振光学元件减少至两个,简化了仪器系统配置,实现了单波长静态测量和光路的紧凑分布. Mao Peng Hui 等^[18]将多个微型偏振器进行集成,实现了单波长静态测量和偏振检测模块的微型化. 然而,上述偏振光学仪器只能采用单色光探测并且大多只能测量分析单层膜结构和已知光学常数的样品. 此外,由于光路系统中偏振光学元件较多,需要校准的系统参数较多,例如起偏器、检偏器和波片的方位角等,导致系统参数耦合严重.

提出并实现了一种覆盖可见光谱范围的紧凑型偏振光谱仪,该紧凑型偏振光谱仪采用空间偏振调制和部分平行光路设计,使仪器系统光路变得紧凑,同时光路系统中的偏振元件数目减少到一个,避免了系统参数校准的耦合现象;采用光谱仪阵列实现

了可见光谱范围的测量. 相比于只能采用单色光探测并且只能测量分析单层膜结构和已知光学常数样品的单波长偏振光学仪器,基于偏振态空间调制的紧凑型偏振光谱仪的探测光覆盖可见光谱范围,理论上可以测量分析多层膜结构,而且通过光学常数建模可以对未知光学常数的样品进行测量分析. 此外,为评估该紧凑型偏振光谱仪的测量精度以及在线测量的可行性,本文研究了所用光谱仪信噪比与光谱数据测量时间的对应关系,对不同信噪比对测量精度的影响进行仿真分析,提出了保证一定测量精度要求的最短光谱数据测量时间. 通过与穆勒矩阵椭圆偏振测量结果的对比,证明了该紧凑型光谱偏振光谱仪测量结果的准确性.

1 系统原理与参数配置

1.1 光路设计

为尽量简化椭圆偏振测量的光路系统并使其变得紧凑,采用了分束器和会聚透镜,让光学元件沿垂直于样品表面的方向分布. 基于偏振态空间调制的双通道紧凑型偏振光谱仪的元器件布置如图 1 所示,其中通道 I 和通道 II 分别用红色和蓝色边线区分. 系统包括光源、准直透镜、光阑、分束器、线栅偏振器、会聚透镜、会聚小透镜阵列和微型光谱仪阵列.

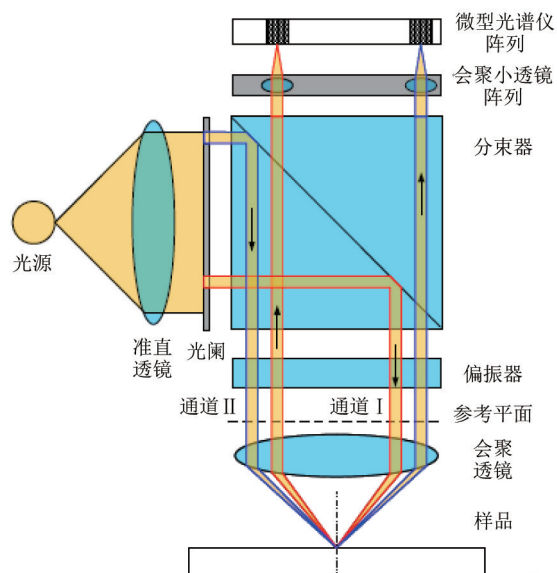


图 1 双通道紧凑型偏振光谱仪元器件布置示意图
Fig. 1 Schematic of components for a compact polarized spectrometer with two channels

在该系统光路中,采用分束器改变入射光束方向,且光束垂直于分束器表面入射和出射,使起偏光路和检偏光路垂直于样品表面;采用会聚透镜使入

射光束以一定角度与样品作用,在对探测光束进行会聚和准直的同时实现对样品的微光斑测量.相对于传统偏振光学仪器起偏光路和检偏光路的倾斜分布,该紧凑型偏振光谱仪的平行分布使得仪器内部空间利用率大大提高,有效减小了仪器体积.另外,充分利用起偏光路与检偏光路平行的优势,将同一偏振器先后作为起偏器(对探测光进行第一次偏振调制)和检偏器(对探测光进行第二次偏振调制),实现对探测光的起偏和检偏调制.由于整个系统光路中只有一个偏振光学元件,起偏器方位角和检偏器方位角相对固定,因此在系统参数校准时,只需设置一个参数.相对于其他偏振光学仪器系统校准参数较多的情况,该系统避免了由于非线性回归算法产生的多参数耦合问题.

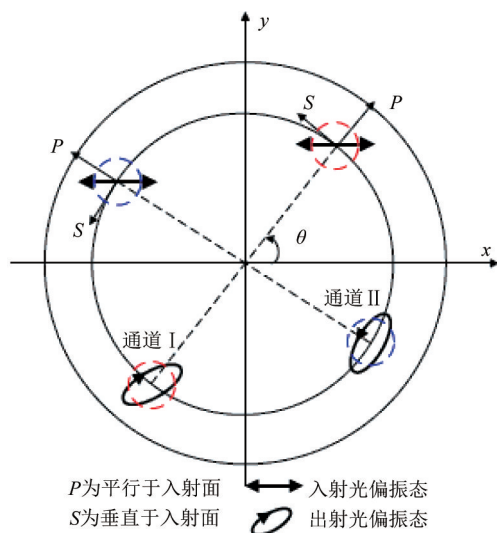


图2 起偏光束和检偏光束偏振态在图1中参考平面上的分布

Fig. 2 Distribution of states of polarization of the generating polarization beam and analyzing polarization beam, respectively, on the reference plane in Fig. 1

在该光路系统中,为了实现两个偏振态探测光同时与样品作用,采用旋转入射面的方式对探测光偏振态进行调制.基于上述光路设计的偏振态空间调制原理示意图如图2,图中红色和蓝色虚线圆分别对应图1中的通道I和通道II. y 轴上半区间表示入射光束的偏振态,下半区间表示经样品反射及透镜准直后光束的偏振态.假设偏振器透射轴平行于 x 轴,根据入射面的定义,通道I的入射光束同时包含 P 偏振态波和 S 偏振态波,且 P 分量和 S 分量的比值与方位角 θ 相关,方位角 θ 为 x 轴正方向到入射面的角度,逆时针方向为正.在 $x-y$ 平面内,由于

通道I和通道II的方位角不同,使得两通道光束在各自入射面内的偏振态不同,进而实现两不同偏振态同时与样品作用.在这里,入射面旋转效应的作用类似于旋转起偏器或者旋转检偏器,其实现了将探测光偏振态调制方式由时间域向空间域的转变.在偏振态空间调制的基础上,采用两光谱仪分别探测两通道的出射光,实现了紧凑型偏振光谱仪的多波长静态测量.需要说明的是,本节阐述的光路设计不局限于双通道分布形式,图1和图2采用双通道分布形式目的是便于原理阐述和读者理解.

1.2 测量原理及校准

基于偏振态空间调制的紧凑型偏振光谱仪与旋转起偏器式椭圆偏振仪的测量配置类似,从检偏器出射的光束,其电场可表示为^[1]:

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \mathbf{J}_p \mathbf{R}(-P) \mathbf{J}_s \mathbf{R}(-P) \mathbf{J}_p \mathbf{E}_{\text{in}}, \quad (1)$$

其中, $\mathbf{E}_{\text{in}} = [1, 0]^T$ 为进入起偏器的电场, T 表示对矩阵取转置, $P = P_0 + \theta$ 为偏振器作为起偏器的方位角, P_0 为在图2中 $x-y$ 坐标系下 x 轴正方向到偏振器透射轴的角度. J_p 和 J_s 分别表示偏振器和测量样品的琼斯矩阵, $\mathbf{R}(-P)$ 为坐标旋转矩阵.

$$\mathbf{J}_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{J}_s = \begin{bmatrix} \sin(\Psi) \exp(i\Delta) & 0 \\ 0 & \cos(\Delta) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{R}(-P) = \begin{bmatrix} \cos(P) & -\sin(P) \\ \sin(P) & \cos(P) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

在 $x-y$ 坐标系中,对于不同的方位角 θ ,入射光和出射光形成不同的入射面即构成偏振光谱仪的不同测量配置条件,假设系统光学元件性能完美(分束器偏振无关,无色散,透反射率比1:1;消色差透镜无色,散透射率为1等),则光谱仪测量光强可表示为 θ 和 λ 的函数.

$$I(\theta, \lambda) = \xi(\lambda) \{ 1 + \alpha(\lambda) \cos[2(P_0 + \theta)] + \beta(\lambda) \cos[4(P_0 + \theta)] \} + I_D(\theta, \lambda), \quad (5)$$

$$\xi = \frac{1}{8} I_0 [3 - \sin(2\psi) \cos(\Delta)], \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{8 \sin^2(2\psi) - 4}{3 - \sin(2\psi) \cos(\Delta)}, \quad (7a)$$

$$\beta = \frac{\sin(2\psi) \cos(\Delta) + 2}{3 - \sin(2\psi) \cos(\Delta)}, \quad (7b)$$

其中, ξ 是系统常数,与入射光强 I_0 成正比, I_D 是系统暗噪声,本文后面的光强 I 均为减去系统暗光强后的光强值.在公式(6)和(7)中, ψ 和 Δ 为测量样

品的椭圆偏参数,与探测光波长相关,可由菲涅尔公式(Fresnel equations)或者薄膜传输矩阵计算得到.基于薄膜传输矩阵理论,根据公式(5)建立的光学系统模型,以样品薄膜厚度为拟合参数,不同方位角下测量的光谱信号比值为拟合对象,对理论光谱数据和测量光谱数据进行拟合,可以计算出测量样品的薄膜厚度.

依前述光路设计和测量原理,提出的紧凑型偏振光谱仪采用双通道并行测量模式即通过光阑将大直径准直光束约束为两不同方位角 θ 的小直径准直光束.在1.3节“偏振器方位角确定”中将说明如何确定两个方位角,经确定后,两通道方位角相对位置固定.在对样品薄膜厚度进行测量计算之前,我们需要对系统参数进行校准标定.基于偏振态空间调制的静态测量方式,对于同一波长的两通道探测光,由于准直光束光斑的不均匀,分束器的偏振特性,不同探测器的差异,导致入射光强不同,经过分束器的反射率和透射率不同,探测器响应不同;对于同一通道的不同波长探测光,由于透镜的色散效应,导致分束器的平均反射和透射率不同.考虑以上因素,公式(5)不再适合实际测量系统,为使系统模型更符合实际测量系统,我们增加一个与波长和通道数有关的透射特性因子 $\eta_i(\lambda)$ 到系统模型中,则光谱仪测量光强可表示为:

$$I(\theta, \lambda) = \xi(\lambda)\eta_i(\lambda)\{1 + \alpha(\lambda)\cos[2(P_0 + \theta_i)] + \beta(\lambda)\cos[4(P_0 + \theta_i)]\} + I_D(\theta_i, \lambda), \quad (8)$$

鉴于在两次测量中,同一通道元件的色散特性不变,同一波长对应的两通道透射特性因子比值不变,为消除两通道差异和光学元件色散对测量带来的误差,本文采用测量双标准样品进行系统参数校准,校准拟合对象为:

$$W(\lambda) = \frac{I_{21}/I_{11}}{I_{22}/I_{12}}, \quad (9)$$

其中 I_{ij} 为减去系统暗噪声的测量光强,下标 i 和 j 分别代表测量光强的通道和标准样品.根据前面建立的光学系统模型,以第一通道起偏器方位角 P_1 为拟合参数, W 为拟合对象,利用Levenberg-Marquardt算法进行非线性迭代拟合,得到起偏器方位角 P_1 的

校准结果和两通道差异因子 η_2/η_1 .两者将作为已知配置参数代入样品薄膜厚度测量计算中.

1.3 偏振器方位角确定

提出的紧凑型偏振光谱仪的系统配置参数包括入射角、测量时间、两通道起偏器及检偏器方位角,其中入射角由会聚透镜自身会聚特性决定.为了提高测量光谱信号对样品薄膜厚度变化的灵敏度,本节对两通道起偏器和检偏器的方位角进行配置优化.根据该紧凑型偏振光谱仪的光路设计和测量原理,本文采用对双通道测量光强比值取样品薄膜厚度微分的形式来表示测量样品膜厚的灵敏度.

$$\sigma = \frac{d}{dh}[I(\theta_2)/I(\theta_1)] \quad (10)$$

为尽可能保证测量信号在可见光范围的较大光谱响应,并且便于实现元件在系统中的准确定位,本文选定 $\theta_1 = 0^\circ, P_0 = 90^\circ$ 即第一通道起偏器方位角为 90° ,检偏器方位角为 -90° .根据公式(5)和(10)对测量样品膜厚的灵敏度进行仿真,仿真条件为:样品的薄膜材料为二氧化硅(SiO_2),厚度分别为100 nm和300 nm,入射角为 18.4° ,仿真结果如图3所示.

分析图3可知,在第二通道方位角等于 90° 时即第二通道起偏器方位角为 180° ,检偏器方位角为 -180° ,测量样品薄膜厚度灵敏度最大.当两通道分别以 0° 和 90° 方位角分布时,在各自所在的入射面内,入射线偏振光偏振方向分别与入射面垂直(S 偏振态)和平行(P 偏振态). S 偏振光束和 P 偏振光束是一对最常见的正交各向异性直角坐标矢量偏振光束,对于各向同性薄膜,用这两种偏振态光来测量样品是合理的.在该入射条件下,公式(8)分别简化为:

$$I(0^\circ, \lambda) = \frac{\eta_1 I_0}{8}[1 + \sin^2(2\psi)] \quad (11a)$$

$$I(90^\circ, \lambda) = \frac{\eta_2 I_0}{8}[9 - 8\sin^2(2\psi)] \quad (11b)$$

从公式(11a)和(11b)可看出,测量光强与样品椭圆偏参数具有明确的解析关系.然而在实际测量过程中,两通道方位角不能精确设置为 0° 和 90° ,而两通道相对位置固定,其方位角误差均为 β ,则两通道对应的测量光强应是:

表1 光谱数据测量时间与信噪比关系

Table 1 Relationship between measuring time of spectral data and signal noise ratio

编号	T01	T02	T03	T04	T05	T06	T07	T08	T09	T10
测量时间/ms	56	112	168	224	280	336	392	448	504	560
信噪比	351	499	596	658	762	820	882	960	1062	1114

$$I(0^\circ + \beta, \lambda) = \frac{\eta_1 I_0}{8} [3 + 2\cos(4\beta) + 4\cos(2\beta) - 8\cos(2\beta)\sin^2(2\psi) + (\cos 4\beta - 1)\sin(2\psi)\cos(\Delta)] \quad (12a)$$

$$I(90^\circ + \beta, \lambda) = \frac{\eta_2 I_0}{8} [3 + 2\cos(4\beta) - 4\cos(2\beta) + 8\cos(2\beta)\sin^2(2\psi) + (\cos 4\beta - 1)\sin(2\psi)\cos(\Delta)] \quad (12b)$$

在运用公式(12)对测量数据进行分析时,由于入射光强随时间变化,且各通道的透射特性系数不能独立校准,用两通道的测量配置不能计算出样品的椭圆偏参数,因此下文的“实验和结果”中以两通道的光强比值对样品进行分析。

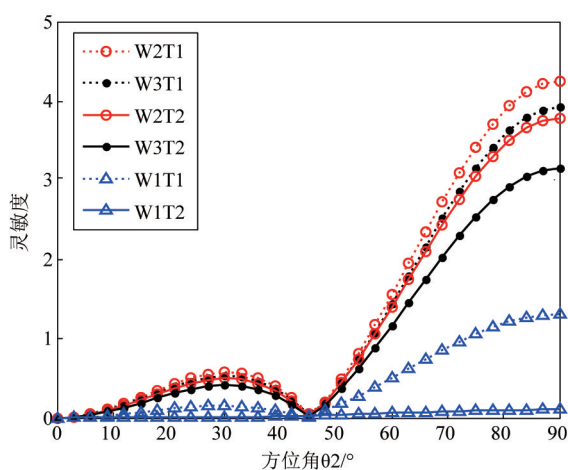


图3 在不同波长和薄膜厚度下,第二通道方位角与测量样品薄膜厚度灵敏度关系,图中W1、W2和W3分别对应波长405 nm、532 nm和633 nm,T1和T2分别对应样品薄膜厚度100 nm和300 nm

Fig. 3 Relationship between the azimuth of the second channel and the sensitivity of sample thickness with different wavelengths and sample thicknesses, W1, W2 and W3 indicate wavelength of 405nm, 532 nm and 633 nm, respectively, T1 and T2 indicate sample thickness of 100 nm and 300 nm, respectively

1.4 测量时间确定

提出的紧凑型偏振光谱仪,将探测光偏振态由时间域串行调制转变为空间域并行调制,测量过程减少了偏振器或相位延迟器旋转与光谱仪光强采集同步的环节,使光谱仪数据处理时间即为该紧凑型偏振光谱仪测量时间,提高了测量速度.在光谱仪其他设置不变的条件下,光谱仪数据处理时间与光谱仪平均次数成正比,平均次数少,测量光谱的信噪比小,则测量精度较低;平均次数多,测量光谱信噪比大,测量精度较高,但若测量时间过长,不适于工艺的在线检测.采用的光谱仪(Maya2000Pro, Ocean

Optics Inc.),其测量时间与信噪比的对应关系如表1.

对于常规的光学测量仪器,影响其测量精度的因素主要包括元件安装位置误差、杂散光和信号噪声.本文通过在光路系统中合适位置设置光阑有效减少了杂散光的影响,此外对于该紧凑型偏振光谱仪,其系统参数校准过程采用原位校准,偏振器安装引起的方位角误差将不会影响样品薄膜厚度的准确测量,因此信噪比将是影响系统参数校准精度和样品薄膜厚度测量精度的主要因素.下面将根据测量时间与信噪比的关系,通过仿真不同信噪比对薄膜厚度测量精度的影响,在保证一定测量精度要求下,确定合适的测量时间.根据公式(5)计算双通道的理论光强 $I_{\text{theory}}(\lambda, \theta)$,并加上一定信噪比的随机噪声,随机噪声计算公式^[19]如下:

$$I_{\text{noise}}(\theta) = \frac{k \cdot I_{\text{rms}}(\theta)}{\text{SNR}} \quad (13)$$

$$I_{\text{rms}}(\theta) = \sqrt{\frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{\text{theory}}^2(\lambda, \theta) d\lambda} \quad (14)$$

其中 k 是均值为0服从正太分布的随机向量,SNR是信噪比, λ_1 和 λ_2 为光谱分析中波长的最小值和最大值.

利用上述随机噪声光强 I_{noise} ,根据1.2节的测量和校准方法,对系统参数校准和样品薄膜厚度测量进行仿真,通过求第一通道起偏器方位角 P_1 和薄膜厚度的仿真值与其真实值的差值,计算仿真结果的误差.仿真条件为:两标准样品的薄膜材料为 SiO_2 ,厚度分别为24 nm和341 nm,待测样品的薄膜材料为 SiO_2 ,名义厚度分别为50 nm、100 nm和300 nm.入射角为 18.4° , $P_0 = 90^\circ$,第一通道方位角 θ_1 为 0° ,第二通道方位角 θ_2 为 90° ,仿真结果如图4和图5所示.分析图4和图5可知,第一通道起偏器方位角 P_1 和薄膜厚度的误差随信噪比增大而降低,当信噪比大于500时,对于膜厚小于300 nm的样品,薄膜厚度测量误差小于1 nm.结合表1中测量时间和信噪比的关系,在该测量精度下,确定理论最少测量时间为168 ms,该测量时间满足大部分工艺的在线测量.此外,当信噪比增大到1200时, P_1 的误差任然较大,而对应的膜厚误差较小,因此可推断 P_1 的误差对样品薄膜厚度测量精度的影响较小.

2 实验与结果

双通道紧凑型偏振光谱仪实验平台实物如图6

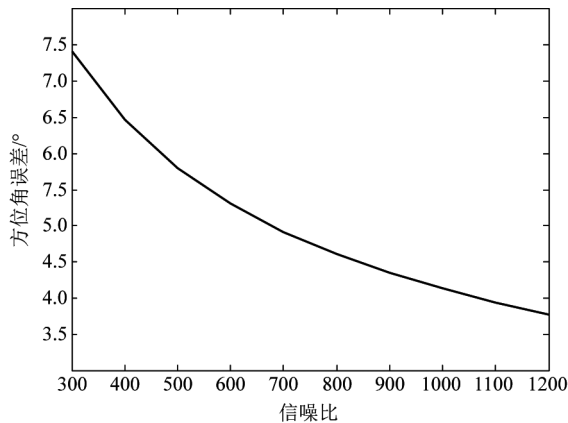
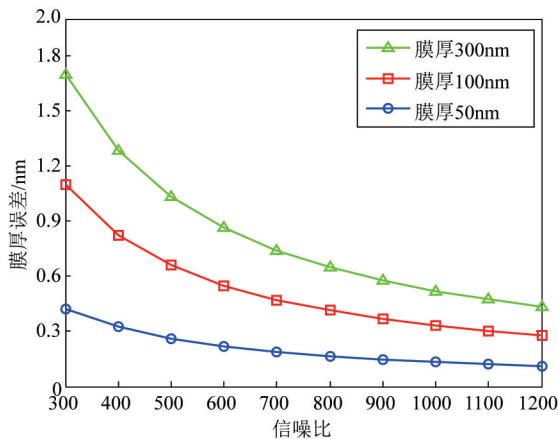
图4 起偏器方位角 P_1 校准误差与信噪比关系图Fig.4 Relationship between calibration error of the polarizer azimuth P_1 and signal noise ratio

图5 三个不同样品膜厚测量误差与信噪比关系图

Fig.5 Relationship between thickness measuring error of three different samples and signal noise ratio

所示,其中主光路包括准直透镜、光阑、分束器、偏振器、会聚透镜和会聚小透镜阵列.由光源(HPX-2000, Ocean Optics)发出的白光经光纤耦合,透镜准直得到平行光束,然后经光阑约束为两方位角相差 90° 的光束.两准直光束经分束器(NPB0125-5, 武汉优光科技有限责任公司)反射,沿垂直于样品表面方向先后通过偏振器(WP25L-UB, Thorlabs)和消色差会聚透镜(47633INK, Edmund),经会聚后在透镜焦平面与样品作用.样品反射光束再次通过消色差会聚透镜得到准直光束,该准直光束依次通过偏振器、分束器和阵列会聚透镜(LA1116-A, Thorlabs),最后经光纤耦合进入光谱仪(Maya2000Pro, Ocean Optics).

本实验的计算光谱范围为 $400 \sim 700 \text{ nm}$,考虑透镜在该范围对探测光的色散作用,采用消色差会

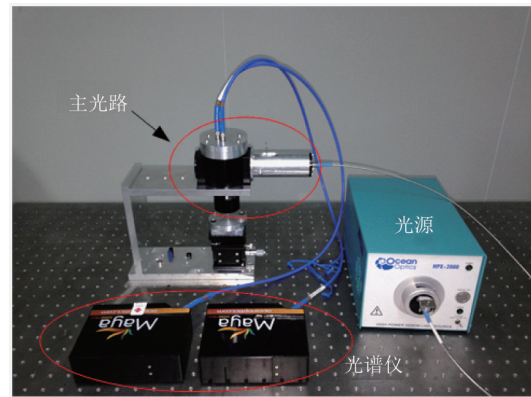
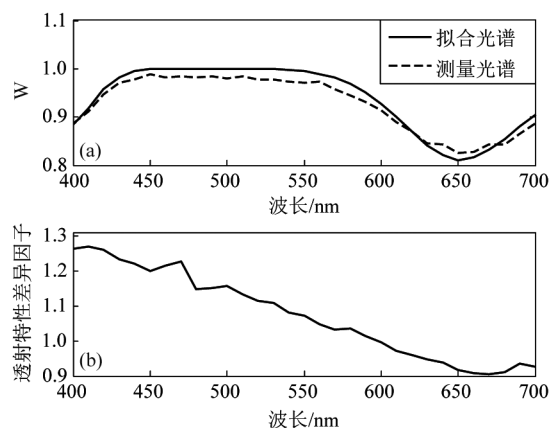


图6 双通道紧凑型偏振光谱仪实验平台

Fig.6 Experimental platform of the compact polarized spectrometer with two channels

聚透镜进行测量.根据透镜参数和实验配置,我们对透镜色散作用导致的入射角和探测光斑变化进行分析.直径为 2 mm 的探测光束平行于透镜光轴方向入射到其表面,经会聚后,与样品作用,将会聚光束几何轴线与透镜光轴的夹角作为入射角,以透镜有效焦距 30 mm 进行计算,入射角为 18.43° (对应波长 587.5 nm).在该计算光谱范围, 400 nm 波长对应的入射角约为 18.64° , 700 nm 波长对应的入射角约为 18.36° ,最大光斑直径约 1.2 mm ,最小光斑直径约 0.8 mm .由以上数据可知,在该计算光谱范围,消色差会聚透镜色散作用导致的入射角和探测光斑变化较小,本文暂不分析透镜色散作用对测量结果的影响.

图7 系统参数校准结果,(a)考虑 η 的测量光谱及拟合光谱图,(b)两通道差异因子光谱图Fig.7 The calibration results of the system parameters, (a) measuring and fitting spectrogram by considering η , (b) differential factor spectrogram of the two channels

实验对 6 片 SiO_2 薄膜样品进行测量分析,其中 2 片用于系统参数校准.该样品的制备工艺采用干

氧和湿氧混合生长的常规硅热氧化工艺,具体工艺流程可参考文献[20]. 测量样品由表层 SiO_2 和基底硅(Si)组成,表层 SiO_2 厚度名义值分别为 24nm、30nm、60nm、110nm、120nm 和 343nm,对应 SiO_2 厚度,将样品进行编号为 S1、S2、S3、S4、S5 和 S6. 考虑光源光强和光谱仪测量光强随时间的变化对测量精度的影响,采用多次测量求均值的方法对样品进行测量分析. 测量标准样品 S1 和 S6 对系统参数进行校准. 以公式(9)中光强比值 W 为光谱拟合对象,考虑两通道的差异,对测量光谱进行拟合,系统参数校准拟合结果及两通道差异因子如图 7 所示. 校准结果为: $P_1 = 95.93^\circ$, 误差残余值为 0.0084. 由校准结果可知,偏振器实际方位角与 1.3 节中的设计方位角相差较大,其原因主要是偏振器安装存在的偏差,使偏振器透射轴在系统坐标系中的角度 P_0 大于 90° ,从而使第一通道偏振器实际方位角变大. 尽管如此,基于偏振态空间调制的紧凑型偏振光谱仪的光路设计,其校准参数只有第一通道的起偏器方位角,消除了校准过程中非线性拟合过程造成的多参数耦合误差,系统参数校准结果相对可信度高.

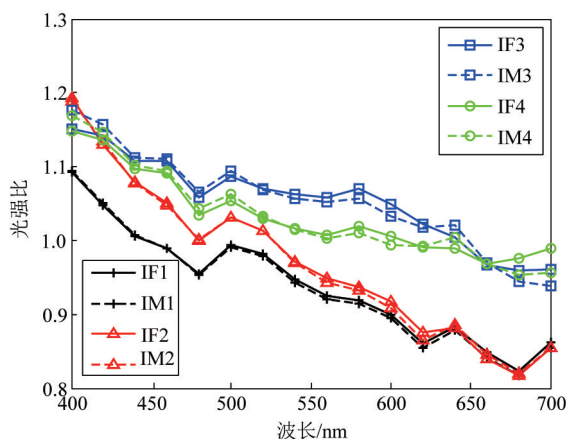


图 8 多个样品的测量拟合结果,图中 IF2、IF3、IF4 和 IF5 分别是样品 S2、S3、S4 和 S5 的拟合结果,IM2、IM3、IM4 和 IM5 分别对应样品 S2、S3、S4 和 S5 的测量结果

Fig. 8 Fitting and measuring results of multiple samples. IF2, IF3, IF4 and IF5 indicate the fitting results for samples S2, S3, S4 and S5, respectively; IM2, IM3, IM4 and IM5 indicate the measuring results for samples S2, S3, S4 and S5, respectively

系统参数校准后,对样品 S2、S3、S4 和 S5 进行测量分析. 以样品的厚度名义值为拟合初始值,以两通道光强比值为光谱拟合对象,对样品测量光谱进行拟合,测量及拟合结果如图 8 所示. 本文用武汉颐光科技有限公司的 ME-L 型穆勒矩阵椭偏仪对相同样品的 SiO_2 厚度进行测量,其测量结果和紧凑型偏

振光谱仪的测量结果见表 2,其中薄膜厚度后面的不确定度对应的置信概率为 95%,不确定度的估计公式^[21]为: $V = 1.96 \times \sqrt{C}$,其中 C 为样品薄膜厚度的协方差元素. 为提高较薄样品 S2 和 S3 的测量准确性,实验增加了光谱仪扫描次数,因而其测量不确定度值相对其他样品较小. 对比表 2 中测量的 SiO_2 厚度,本文提出的紧凑型偏振光谱仪与商用椭偏仪的测量结果非常接近,证明了该紧凑型偏振光谱仪的测量准确性. 但在测量 SiO_2 厚度较薄的样品 S2 时,其测量结果不太理想,测量误差达 6%. 由于实际测量过程中存在两通道差异因子,且该因子的校准误差会影响样品膜厚的测量结果,因而表 2 中测量结果与图 5 中仿真结果趋势不完全相同.

表 2 紧凑型偏振光谱仪和穆勒矩阵椭偏仪测量多组薄膜样品的结果

Table 2 Measuring results of multiple thin film samples by compact polarized spectrometer and Muller matrix ellipsometer

仪器类型	样品 S2	样品 S3	样品 S4	样品 S5
紧凑型偏振光谱仪	32.51 ± 0.002	62.29 ± 0.0003	110.93 ± 0.16	119.02 ± 0.15
ME-L	30.67	63.01	111.94	119.54

3 结论

提出的紧凑型偏振光谱仪采用分束器和会聚透镜共同产生的人射面旋转效应,实现了探测光偏振态调制方式由时间域向空间域的转变,缩短了测量时间;采用部分平行光路设计和静态测量方式,提高了仪器系统的空间利用率,极大缩小了仪器的整体体积;采用光谱仪阵列,使测量光谱范围覆盖可见光波段,扩大了可测量分析样品范围(包括多层膜结构和未知光学常数的样品). 此外,提出的双标准样品原位校准方法,从理论上消除了空间域偏振态调制引起的不同方位角透射特性差异的影响. 在最大程度简化的偏振光谱仪测量配置下(整个偏振光谱仪光路系统中偏振调制元件只有一个偏振器),对多片不同 SiO_2 厚度的硅基薄膜样品进行测量,并与穆勒矩阵椭偏仪测量结果对比,对比结果证明了该紧凑型偏振光谱仪测量的准确性.

References

- [1] FUJIWARA H. *Spectroscopic ellipsometry principles and applications* [M]. New York: Wiley, 2007, 93-94.
- [2] BRACCO G, HOLST B. *Surface science techniques* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2013, 99-101.

(下转第 583 页)

References

- [1] GRABHERR M, MILLER M, MICHALZIK R, *et al.* High-power VCSELs: single devices and densely packed 2-D-arrays[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1999, **5**(3): 495–502.
- [2] MILLER M, GRABHERR M, KING R, *et al.* Improved output performance of high-power VCSELs[J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2001, **7**(2): 210–216.
- [3] GESKE J, MACDOUGAL M, COLE G, *et al.* High-power VCSELs for smart munitions [C]. *Proceedings of SPIE*, 2006, **6287**(628703): 1–12.
- [4] SEURIN J F, GHOSH C L, KHALFIN V, *et al.* High-power vertical-cavity surface-emitting arrays[C]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6876(68760D).
- [5] SEURIN J F, XU G, GUO B M, *et al.* Efficient vertical-cavity surface-emitting lasers for infrared illumination applications[C]. *Proceedings of SPIE*, 2011, **7952**(7), 669–674.
- [6] MOENCH H, DEPPE C, DUMOULIN R, *et al.* Modular VCSEL solution for uniform line illumination in the kW range[C]. *Proceedings of SPIE*, 2012, **8241**(2), 161–167.
- [7] AOKI Y, MIYAMOTO M, NAITO H, *et al.* 200-W operation of an Ion-implanted vertical-cavity surface-emitting laser array[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2014, **50**(7): 510–514.
- [8] D'ASARO L A, SEURIN J F, WYNN J D, High-power, high efficiency VCSELs pursue the goal[J]. *Photonics Spectra*, 2005, (February), 64–66.
- [9] ZHANG L S, NING Y Q, ZENG Y G, *et al.* High-power bottom-emitting vertical-cavity surface-emitting lasers under continuous-wave, quasi-continuous-wave, and pulsed operation[J]. *Applied Physics Express*, 2011, **4**(5), 1166–1173.
- [10] OTAKE N, KOJIMA E, YAMADA H, *et al.* High-pulsed-power (49W) vertical-cavity surface-emitting laser with five quantum wells by uniform current injection into large emitting area [J]. *IEICE Electronics Express*, 2011, **8**(2):109–113.
- [11] LIU D, NING Y Q, ZENG Y G, *et al.* High-power-density high-efficiency bottom-emitting vertical-cavity surface-emitting laser array[J]. *Applied Physics Express*, 2011, **4**(5), 1166–1173.
- [12] ZHANG X, NING Y Q, ZENG Y G, *et al.* 980-nm high-power low-divergence VCSELs achieved by optimization of current density distribution[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, **48**(1), 42–48.
- ~~~~~
- (上接第 563 页)
- [3] AZZAM R M A, BASHARA N M. *Ellipsometry and polarized light* [M]. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1977, 153–156.
- [4] AZZAM, R M. Two-reflection null ellipsometer without a compensator[J]. *Journal of physics E: Scientific instruments* 1975, **9**: 596–572.
- [5] CHEN Liang-Yao, DAVID W L. Scanning ellipsometer by rotating polarizer and analyzer[J]. *Appl. Optics*, 1987, **26**(24): 5221–5238.
- [6] STOYAN C R, TZANIMIR V A. Rotating analyzer – fixed analyzer ellipsometer based on null type ellipsometer[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1999, **70**(7): 3077–3083.
- [7] COLLINS R W, JOOHYUN K. Dual rotating-compensator multichannel ellipsometer; instrument design for real-time Mueller matrix spectroscopy of surfaces and films[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1999, **16**(8): 1997–2006.
- [8] LIU Shi-Yuan, CHEN Xiu-Guo, ZHANG Chuan-Wei. Development of a broadband Mueller matrix ellipsometer as a powerful tool for nanostructure metrology[J]. *Thin Solid Films*, 2015, **584**: 176–185.
- [9] JELLISON G E, JR., MODINE F A. Two-modulator generalized ellipsometry; theory[J]. *Appl. Optics*, 1997, **36**(31): 8190–8198.
- [10] ASPNES D E. Spectroscopic ellipsometry—Past, present, and future[J]. *Thin Solid Films*, 2014, **571**: 334–344.
- [11] CHEN Xiu-Guo, ZHANG Chuan-Wei, LIU Shi-Yuan. Depolarization effects from nanoimprinted grating structures as measured by Mueller matrix polarimetry[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, **103**(151605): 1–4.
- [12] CHEN Xiu-Guo, ZHANG Chuan-Wei, LIU Shi-Yuan, *et al.* Mueller matrix ellipsometric detection of profile asymmetry in nanoimprinted grating structures [J]. *J. Appl. Phys.*, 2014, **116**(194305): 1–7.
- [13] RODENHAUSEN K B, SCHMIDT D, KASPUTIS T, *et al.* Generalized ellipsometry in-situ quantification of organic adsorbate attachment within slanted columnar thin films [J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(5): 5419–5428.
- [14] TAKASHI S, TAKESHI A, YOSHIHIRO S, *et al.* Compact ellipsometer employing a static polarimeter module with arrayed polarizer and wave-plate elements[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22):4963–4967.
- [15] SANG H Y, SOO H K, YOON K K, *et al.* Angle-resolved annular data acquisition method for microellipsometry[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(26):18056–18065.
- [16] KOOPS R, SONIN P, VEGHEL M V, *et al.* A compact new-concept ellipsometer for accurate large scale thin film measurements[J]. *J. Opt.*, 2014, **16**(065701): 1–9.
- [17] KAZAMA A, YAMADA Y, YAMADA T, *et al.* Compact and high-speed ellipsometer [J]. *Proc. SPIE*, 1992, **1681**:183–188.
- [18] MAO Peng-Hui, ZHENG Yu-Xiang, CHEN Yue-Rui, *et al.* Study of the new ellipsometric measurement method using integrated analyzer in parallel mode [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(10):8641–8650.
- [19] AL-ASSAAD R M, BYRNE D M. Error analysis in inverse scatterometry. I. modeling [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, **24**(2):326–338.
- [20] STEPHEN A C. *The science and engineering of microelectronic fabrication* [M]. New York: Oxford University Press, 2001.
- [21] WUBBELER G, KRYSSTEK M, ELSTER C. Evaluation of measurement uncertainty and its numerical calculation by a Monte Carlo method[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2008, **19**(084009): 1–4.