

宽光谱穆勒矩阵椭偏技术的拓展应用

方慧雯, 杨锦宏, 章美娟, 贺胜男, 汪卫华

Extended application of wide spectrum Mueller matrix ellipsometry

引用本文:

方慧雯, 杨锦宏, 章美娟, 贺胜男, 汪卫华. 宽光谱穆勒矩阵椭偏技术的拓展应用[J]. *激光技术*, 2024, 48(1): 71-76.

FANG Huiwen, YANG Jinhong, ZHANG Meijuan, et al. Extended application of wide spectrum Mueller matrix ellipsometry[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 48(1): 71-76.

您可能感兴趣的其他文章

1. 多步旋涂CsPbBr₃薄膜复光学常数的椭偏光谱研究

引用本文: 管悦, 韩培高, 孙晓娟, 等. 多步旋涂CsPbBr₃薄膜复光学常数的椭偏光谱研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(6): 866-871.

2. 基于广义逆矩阵的BRDF模型参数拟合方法

引用本文: 赵佳乐, 周冰, 王广龙, 等. 基于广义逆矩阵的BRDF模型参数拟合方法[J]. *激光技术*, 2023, 47(3): 407-412.

3. 基于空间矢量约束的煤矿掘进机组合测量方法

引用本文: 王以忠, 安忠猛, 黄喆, 等. 基于空间矢量约束的煤矿掘进机组合测量方法[J]. *激光技术*, 2019, 43(6): 804-808.

4. 微型近红外光谱仪在苹果糖度测量中的应用研究

引用本文: 徐永浩, 宋彪, 陈晓帆, 等. 微型近红外光谱仪在苹果糖度测量中的应用研究[J]. *激光技术*, 2019, 43(6): 735-740.

5. 光纤位移传感器在PET瓶胚壁厚测量中的应用研究

引用本文: 曹育良, 韩家广, 熊显名. 光纤位移传感器在PET瓶胚壁厚测量中的应用研究[J]. *激光技术*, 2018, 42(6): 817-821.

文章编号: 1001-3806(2024)01-0071-06

宽光谱穆勒矩阵椭偏技术的拓展应用

方慧雯, 杨锦宏*, 章美娟, 贺胜男, 汪卫华

(安徽大学 物质科学与信息技术研究院, 合肥 230601, 中国)

摘要: 为了解决现有光谱穆勒矩阵椭偏检测仪的测量功能固定、不能根据实验需求满足更多物理量测量的问题, 提出了结合多物理场光学仿真与宽光谱穆勒矩阵椭偏测量数据, 以实现更多参数测量的新方案。以膜厚测量为实例, 通过比较硅基底上不同厚度、不同入射角下, 二氧化硅薄膜仿真值与椭偏仪实验测量值所得穆勒矩阵的匹配度, 得到均方误差值相对最小时的二氧化硅薄膜厚度值。结果表明, 所得膜厚结果与实际值符合得较好。该研究验证了光谱穆勒矩阵椭偏测量与仿真模拟相结合方法的可行性和有效性。

关键词: 几何光学; 椭偏技术; 仿真; 穆勒矩阵

中图分类号: O436.3

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2024.01.012

Extended application of wide spectrum Mueller matrix ellipsometry

FANG Huiwen, YANG Jinhong*, ZHANG Meijuan, HE Shengnan, WANG Weihua

(Institute of Material Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: In order to overcome the deficiency that the measurement function of the existing spectral Mueller matrix ellipsometer had been fixed and could not measure more physical quantities according to the experimental requirements, a new scheme was proposed to measure more physical parameters by combining multi-physical field optical simulation and wide-spectrum Mueller matrix ellipsometry measurement data. Taking film thickness measurement as an example, by comparing the matching degree of Mueller matrix obtained by the measured values of an ellipsometer and the simulated values of silicon dioxide films with different thicknesses and at different incident angles on a silicon substrate, the thickness value of the silica film with the smallest relative mean square error was obtained. The results show that the thickness of the film is in good agreement with the measured values. This study validates the feasibility and effectiveness of the combined method of spectral Muller matrix ellipsometry measurement and simulation.

Key words: geometrical optics; ellipsometry; simulation; Mueller matrix

0 引 言

光谱椭偏技术是一种无损检测技术, 通过测量的数据进行反向拟合, 得到薄膜的光学常数和厚度^[1]。传统的光谱椭偏仪 (spectroscopic ellipsometer, SE) 只能获得相位差和振幅比这两个测量参数^[2]。穆勒矩阵椭偏仪 (Mueller matrix ellipsometer, MME) 可以获得样品表面的 16 个穆勒矩阵参数^[3], 能够对样品的光学性质和结构信息做出一定表述^[4]。光谱椭偏技术虽被发现和使用很久, 但得益于精密加工、高分辨成像等技术, 光谱椭偏在现代科学研究和工业领域仍然应用广泛。光谱椭偏检测技术也在不断发展, 如法国国家

科学研究中心界面与薄膜物理实验室和设备供应商 Nanometrics 公司都使用 MME 对光栅结构的特点进行测量^[5]。华中科技大学学者利用 MME 研究了纳米压印过程中的退偏效应^[6], 而且还设计了具有高分辨率层析成像性能的 MME^[7]。ZHENG 等人设计搭建了单波长中红外 MME, 并且误差测量在 0.02^[8]。国际国内多个公司研发生产出不同型号宽光谱穆勒矩阵椭偏仪, 可进行镀膜工艺过程的检测, 被广泛运用到集成电路、太阳能光伏、化学等领域^[9]。目前椭偏仪已成为表征材料光学常数及薄膜厚度的标准工具^[10]。

现有的 SE 功能和可测参数已经固定, 无法用于扩展测量其它的物理参数。但光谱椭偏仪测量的相关偏振参数数据非常丰富, 包含了多种物理量信息, 通过采用适当的数据处理, 可望拓展光谱椭偏仪的应用范围, 获得更多的偏振数据和薄膜参数, 如薄膜的反射

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2019YFE03080400)

* 通信作者: 271778116@qq.com

收稿日期: 2022-12-07; 修回日期: 2023-02-24

率、透射率,并且能够根据实验需求测量多物理场情况下薄膜的光学常数,甚至测量结构复杂薄膜(例如光栅)的光学常数。本文作者将仿真软件与椭偏测量相结合,以膜厚测量为实例,通过比较仿真软件在不同入射角、不同厚度的Si基底上的SiO₂薄膜数据与椭偏测量的实验数据两者之间的拟合程度,验证该方法的可行性。

1 基本原理

1.1 椭偏仪测量原理

以SiO₂薄膜为研究对象,结构示意图如图1所示。图中, n_1 、 n_2 、 n_3 分别为环境/薄膜/基底这三者的折射率;膜厚为 d ; θ_1 为环境与薄膜界面的入射角, θ_2 为经过薄膜发生折射时的折射角(也是薄膜与基底界面的入射角), θ_3 为光线经过基底产生折射的折射角。

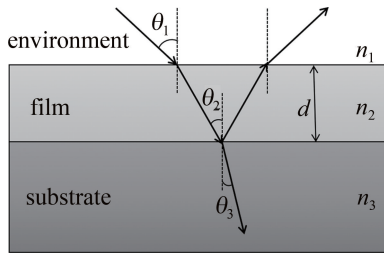


图1 光在单层薄膜系统的反射与折射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reflection and refraction of light single-layer film system

光入射在物体表面时会发生反射与折射,将光波电矢量划分为振动方向平行于入射光面的 p 光与振动方向垂直于入射光面的 s 光。由图1可知,入射光在薄膜内多次反射和折射,回到空气介质中的每束光波的振幅和相位都不同,其振幅的大小由菲涅耳公式决定,相邻两束反射光之间的相位差由光程差乘以折射率决定^[11],即:

$$2\delta = \frac{4\pi}{\lambda} dn_2 \cos\theta_2 \quad (1)$$

式中: δ 是相邻两束反射光之间的相位差; λ 为波长。

因此根据反射系数的定义, p 光和 s 光的总反射率为:

$$r_p = \frac{r_{1,p} + r_{2,p} e^{-i2\delta}}{1 + r_{1,p} e^{-i2\delta}} \quad (2)$$

$$r_s = \frac{r_{1,s} + r_{2,s} e^{-i2\delta}}{1 + r_{1,s} e^{-i2\delta}} \quad (3)$$

式中: $r_{1,p}$ 和 $r_{1,s}$ 是 p 光和 s 光在空气和薄膜界面的反射系数; $r_{2,p}$ 和 $r_{2,s}$ 是 p 光和 s 光在薄膜与衬底界面的反射系数。

引入参量 $\tan\varphi$ 描述 p 光和 s 光振幅比 E_p/E_s , Δ 表示相位差^[12],定义如下式:

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan\varphi \cdot \exp(i\Delta) = f(\lambda, \theta_1, n_1, n_2, k_2, n_3, k_3, d) \quad (4)$$

式中: k_2 为薄膜的消光系数; k_3 为基底的消光系数。由式(4)可见,椭偏参数 φ 和 Δ 可以看作 $f(\cdot)$ 的函数,与薄膜和衬底的负折射率、厚度有关,即可用椭偏参数反应薄膜的光学常数和膜厚等信息^[13]。但通过与仿真软件相结合能够得到更多的偏振信息,如薄膜的反射率、透射率,并且能够根据实验需求测量多物理场情况下薄膜的光学常数,甚至测量结构复杂薄膜(例如光栅)的光学常数。

1.2 穆勒矩阵

斯托克斯矢量(S_0 S_1 S_2 S_3)^T是描述光波偏振态的简单数学表达形式^[14]。入射光与反射光的偏振态存在联系,如下:

$$\mathbf{S}' = \mathbf{M} \mathbf{S} \quad (5)$$

式中: \mathbf{S} 为入射光的斯托克斯矢量; \mathbf{S}' 为反射光的斯托克斯矢量; \mathbf{M} 即为穆勒矩阵^[15]。

$$\begin{bmatrix} S_0' \\ S_1' \\ S_2' \\ S_3' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

2 多物理场光学仿真

多物理场光学仿真可以在单个域模型中容纳多个偏微分方程并进行多物理场的耦合^[16]。本文中仿真使用的是几何光学模块,不仅能对光线轨迹追踪还能通过边界条件的改变,来仿真不同情况。为了更好地模拟椭偏仪的测量过程,在软件中构建了椭偏仪内部结构模型,如图2所示。从光源发射宽光谱光经过起偏器变成偏振光;然后再经过第一旋转补偿器后打在样品表面,入射光经过样品反射后通过第二旋转补偿器

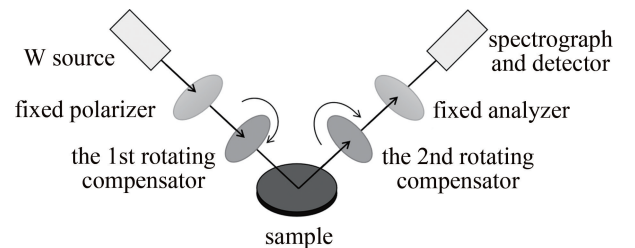


图2 椭偏仪结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of ellipsometer

器、检偏器,最后到达探测器。根据实际样品的情况对于模型样品进行设置,先设置基底的材料接着在基底上表面添加薄膜材料,再不断地改变薄膜厚度,直到最后与实际测量曲线拟合成功。本文中实例主要测量膜厚,故在仿真中以膜厚为变量,测量不同的物理参数,可以相应地设其为变量。在建模时所使用入射光源、光路、样品、测量环境等参数与椭圆仪实际测量时一致。

使用仿真软件建模后,导出不同入射光宽光谱的斯托克斯矢量数据,再根据式(6),通过 4 组入射光和对应该反射光宽光谱的斯托克斯矢量计算样品的宽光谱穆勒矩阵。其中 4 组入射光初始斯托克斯矢量为:

$$\begin{cases} \mathbf{S}_{0^\circ} = I_0 [1 & 1 & 0 & 0]^T \\ \mathbf{S}_{45^\circ} = I_0 [1 & 0 & 1 & 0]^T \\ \mathbf{S}_{90^\circ} = I_0 [1 & -1 & 0 & 0]^T \\ \mathbf{S}_c = I_0 [1 & 0 & 0 & 1]^T \end{cases} \quad (7)$$

式中: \mathbf{S}_{0° 代表的是水平偏振光; \mathbf{S}_{45° 代表的是 45° 线偏振光; \mathbf{S}_{90° 代表的是垂直偏振光; \mathbf{S}_c 代表的是圆偏振光; I_0 为光强。

3 实验与仿真数据对比

实验中使用 MP-L 穆勒椭圆偏振仪测量 Si 基底上不同厚度 SiO_2 薄膜样品在不同入射角下的穆勒矩阵。由于 SiO_2 薄膜是各向同性材料,故穆勒矩阵样式如下^[17]:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & -N & 0 & 0 \\ -N & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C & D \\ 0 & 0 & -D & C \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:参数 N 、 C 、 D 的表达式如下:

$$\begin{cases} N = \cos(2\varphi) \\ C = \sin(2\varphi) \cos\Delta \\ D = \sin(2\varphi) \sin\Delta \end{cases} \quad (9)$$

式中: φ 与 Δ 是式(4)中的椭圆参数;由式(8)可知, M_{12} 与 M_{21} 数值相等, M_{33} 与 M_{44} 数值相等, M_{34} 与 M_{43} 互为相反数,斜对角的 8 个参数都为 0;且 N 、 C 、 D 不独立,三者关系如下^[18]:

$$N^2 + C^2 + D^2 = 1 \quad (10)$$

本文中用均方误差(mean squared error, MSE) e_{MSE} 来判断实验值与仿真值匹配程度的好坏,均方误差数值越小,则两者之间拟合的越好^[19]。其定义式如下:

$$e_{\text{MSE}} = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t (Q_i - q_i)^2 \quad (11)$$

式中: t 是数据个数; Q_i 是实验值; q_i 是仿真值。 e_{MSE} 的值越小,说明实验值与仿真值匹配得越好。通过式(11)进行计算得到 e_{MSE} ,其最小时所得的厚度即为仿真软件确定的薄膜厚度。

以 Si 基底上 100.0 nm SiO_2 薄膜的测量为例,实验中入射光入射角为 60° 、波长范围 380 nm ~ 1000 nm,光路如图 2 所示,测量得到样品的穆勒矩阵。然后利用仿真软件仿真 Si 基底上 SiO_2 薄膜厚度在 100.0 nm 附近的反射过程,计算得到不同膜厚的穆勒矩阵。由于 SiO_2 薄膜是各向同性薄膜,采用式(8)的穆勒矩阵,因此只需要比较实验与仿真穆勒矩阵参数的 M_{12} 、 M_{33} 、 M_{34} ,如图 3 所示。

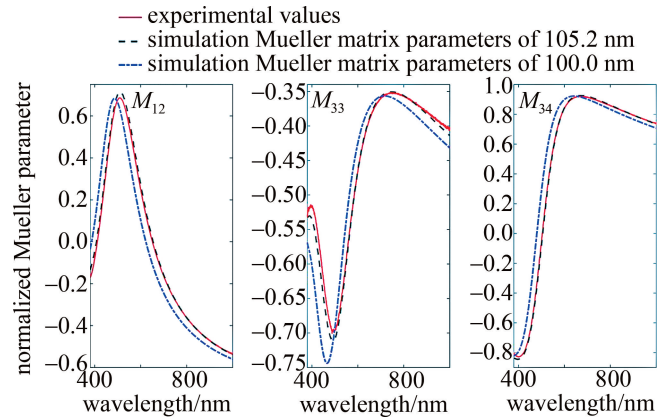


图 3 Si 基底上 100.0 nm SiO_2 薄膜实验值及两种 SiO_2 薄膜仿真穆勒矩阵参数对比图

Fig. 3 Comparison of experimental values of 100.0 nm SiO_2 thin film on Si substrate and parameters of two types of SiO_2 thin film simulation Mueller matrix

图 3 中横坐标为波长,纵坐标是归一化后的穆勒矩阵参数值。红色实线是实验测得数值,黑色虚线是 105.2 nm SiO_2 薄膜仿真值,蓝色点划线是 100.0 nm SiO_2 薄膜仿真值。由图 3 可见,实验数据与厚度为 105.2 nm SiO_2 薄膜仿真数据拟合较好,均方误差值也很小,并且满足各向同性材料的规律,则 105.2 nm 为仿真确定的薄膜厚度。图 3 中只列出 100.0 nm 与 105.2 nm 仿真结果,实际上做了多个膜厚仿真和计算,因为厚度为 105.2 nm 时仿真值与实验值的 e_{MSE} 相对最小,所以为了简洁,图中只列出了两个仿真值进行比较。以下的实验与仿真对比过程中,也是直接列出 e_{MSE} 相对最小的仿真数据。

3.1 不同入射角对比结果

以上对入射角为 60° 时实验与仿真结果进行了对比,下面比较实验与仿真的 M_{12} 、 M_{33} 、 M_{34} 在不同入射角时匹配情况。实验测量的样品标定厚度是 Si 基底

上 121.8 nm SiO_2 薄膜, 椭偏仪测量该薄膜厚度为 122.1 nm。入射角分别为 $55^\circ, 65^\circ, 75^\circ$, 其它参数同图 3。通过与图 3 相同的方法对比不同入射角时实验与仿真的 e_{MSE} , 如图 4、图 5、图 6 所示。120.5 nm 为 SiO_2 薄膜厚度最优结果。

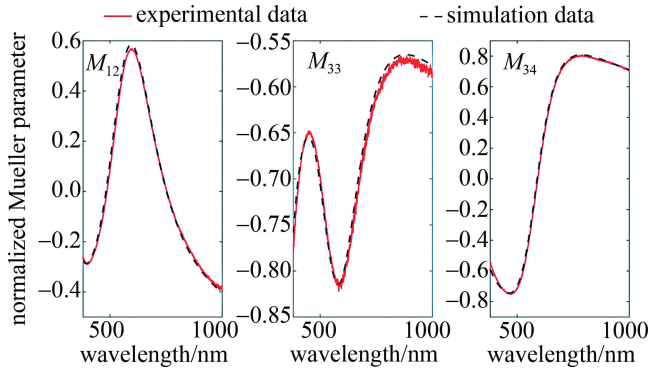


图 4 入射角 55° 下 M_{12}, M_{33}, M_{34} 实验与仿真数据对比图

Fig. 4 Comparison of M_{12}, M_{33} and M_{34} experimental and simulation data at 55° incident angle

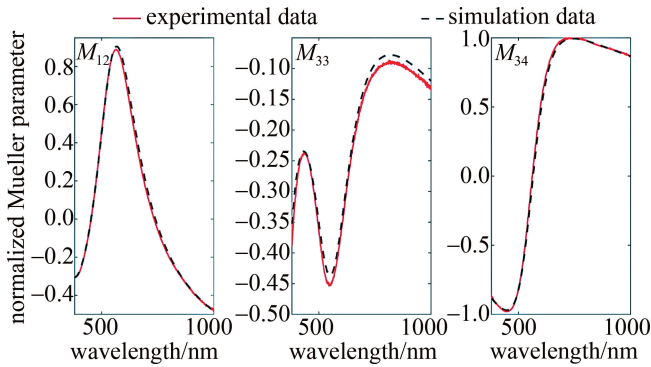


图 5 入射角 65° 下 M_{12}, M_{33}, M_{34} 实验与仿真数据对比图

Fig. 5 Comparison of M_{12}, M_{33} and M_{34} experimental and simulation data at 65° incident angle

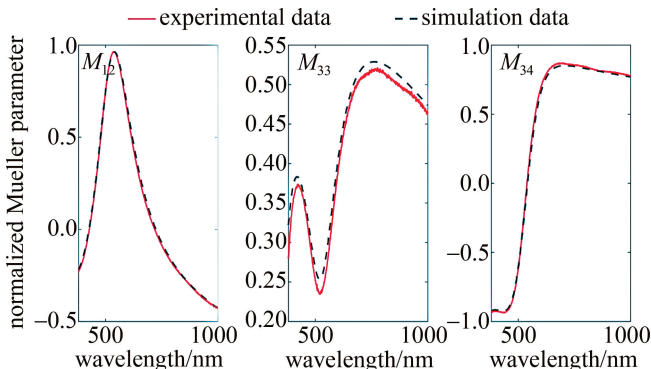


图 6 入射角 75° 下 M_{12}, M_{33}, M_{34} 的实验与仿真数据对比图

Fig. 6 Comparison of M_{12}, M_{33} and M_{34} experimental and simulation data at 75° incident angle

图 4、图 5、图 6 中黑色虚线是仿真值, 红色实线是实验值, 3 个图中 SiO_2 薄膜厚度一样, 只是在不同入射角下的 M_{12}, M_{33}, M_{34} 的实验与仿真数据对比。表 1 中

将不同入射角下的 M_{12}, M_{33}, M_{34} 的实验与仿真数据的均方误差值进行对比, 随着入射角的增大, M_{33} 的拟合效果变差, 这是由于过大的入射角会导致实验误差变大。

表 1 不同入射角下 M_{12}, M_{33}, M_{34} 的实验与仿真数据的均方误差值

Table 1 e_{MSE} of experimental and simulation data of M_{12}, M_{33} and M_{34} at different incident angles

incident angle	M_{12}	M_{33}	M_{34}
55°	1.61×10^{-4}	4.45×10^{-5}	9.32×10^{-5}
65°	8.91×10^{-4}	1.47×10^{-4}	1.79×10^{-5}
75°	1.11×10^{-4}	7.54×10^{-4}	4.14×10^{-5}

为了更进一步探究入射角对 M_{12}, M_{33}, M_{34} 的影响, 分别测量了 Si 基底上 121.8 nm SiO_2 薄膜在 $50^\circ, 52^\circ, 55^\circ, 60^\circ, 65^\circ, 70^\circ, 75^\circ$ 入射角下的 M_{12}, M_{33}, M_{34} 的数据, 并使用仿真软件对这些情况同时进行仿真, 得到的实验值与仿真值如图 7、图 8 所示。

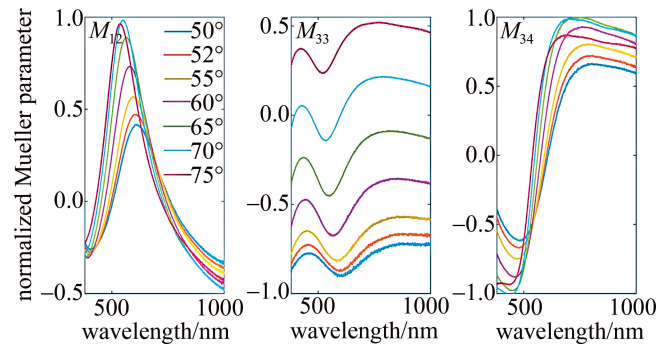


图 7 不同入射角下 121.8 nm SiO_2 薄膜的 M_{12}, M_{33}, M_{34} 实验数据图

Fig. 7 M_{12}, M_{33} and M_{34} experimental data of 121.8 nm SiO_2 film at different incident angles

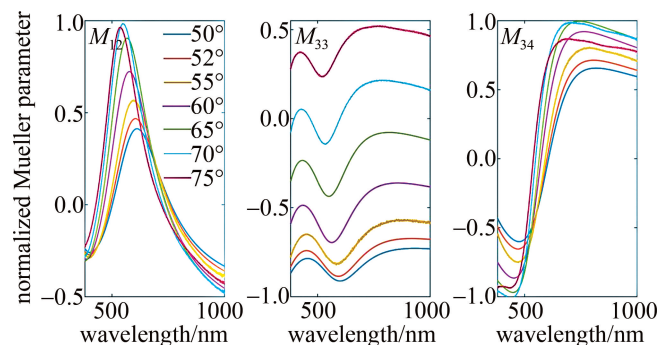


图 8 不同入射角下 121.8 nm SiO_2 薄膜的 M_{12}, M_{33}, M_{34} 仿真数据图

Fig. 8 M_{12}, M_{33} and M_{34} simulation data of 121.8 nm SiO_2 film at different incident angles

图 7 和图 8 中不同颜色表示不同入射角度, 其它参数同图 3。由图 7、图 8 可见, 不同入射角对 M_{12}, M_{33}, M_{34} 影响明显, 但相同的入射角实验与仿真结果相符度很好, 说明在这些入射角范围内进行实验与仿真拟合效果较好。

3.2 不同厚度对比结果

下面对 Si 基底上 3 种不同厚度的 SiO₂ 薄膜进行实验与仿真对比,其它参数同图 3。样品标示 SiO₂ 膜厚分别为 15.0 nm、100.0 nm、340.0 nm,椭圆仪测量的厚度分别为 15.5 nm、101.2 nm、340.6 nm。仿真结果选取 e_{MSE} 达到最小时,确定的薄膜的厚度分别为 16.5 nm、105.2 nm、340.0 nm,在表 2、表 3、表 4 中列出了最佳厚度附近的仿真数据与实测厚度的穆勒矩阵参数的 e_{MSE} 对比值,如图 9、图 10、图 11 所示。

表 2 Si 基底上 15.0 nm SiO₂ 薄膜实验测量与不同厚度仿真的 M_{12} 、 M_{33} 、 M_{34} 的 e_{MSE} 值

Table 2 Experimental measurements of e_{MSE} values of 15.0 nm SiO₂ films on Si substrate with different thickness simulations of M_{12} , M_{33} , M_{34}

thickness	M_{12}	M_{33}	M_{34}
15.0 nm SiO ₂	2.62×10^{-5}	2.11×10^{-4}	4.25×10^{-4}
16.4 nm SiO ₂	3.26×10^{-5}	7.29×10^{-5}	3.79×10^{-5}
16.5 nm SiO ₂	3.31×10^{-5}	7.07×10^{-5}	4.26×10^{-5}
16.6 nm SiO ₂	3.41×10^{-5}	6.46×10^{-5}	5.16×10^{-5}

表 3 Si 基底上 100.0 nm SiO₂ 薄膜实验测量与不同厚度仿真的 M_{12} 、 M_{33} 、 M_{34} 的 e_{MSE} 值

Table 3 Experimental measurements of e_{MSE} values of 100.0 nm SiO₂ films on Si substrate with different thickness simulations of M_{12} , M_{33} , M_{34}

thickness	M_{12}	M_{33}	M_{34}
100.0 nm SiO ₂	1.16×10^{-2}	2.12×10^{-3}	1.81×10^{-2}
105.1 nm SiO ₂	2.89×10^{-4}	1.10×10^{-4}	3.96×10^{-5}
105.2 nm SiO ₂	2.83×10^{-4}	9.87×10^{-5}	4.59×10^{-5}
105.3 nm SiO ₂	2.85×10^{-5}	8.80×10^{-5}	6.62×10^{-5}

表 4 Si 基底上 340.0 nm SiO₂ 薄膜实验测量与不同厚度仿真的 M_{12} 、 M_{33} 、 M_{34} 的 e_{MSE} 值

Table 4 Experimental measurements of e_{MSE} values of 340.0 nm SiO₂ films on Si substrate with different thickness simulations of M_{12} , M_{33} , M_{34}

thickness	M_{12}	M_{33}	M_{34}
340.1 nm SiO ₂	3.23×10^{-4}	5.62×10^{-4}	1.40×10^{-3}
340.0 nm SiO ₂	3.13×10^{-4}	5.60×10^{-4}	1.40×10^{-3}
339.9 nm SiO ₂	3.20×10^{-4}	5.66×10^{-4}	1.40×10^{-3}
340.6 nm SiO ₂	3.67×10^{-4}	5.59×10^{-4}	1.46×10^{-3}

图 9、图 10、图 11 是在入射角同为 60°时,不同厚度薄膜实验测得数据和仿真数据的对比。黑色虚线是仿真值,红色实线是实验值。由图 9~图 11 可见,仿真的厚度与实验测量厚度非常接近,总体上各穆勒矩阵参数与实际测量数据的 e_{MSE} 值都很小。

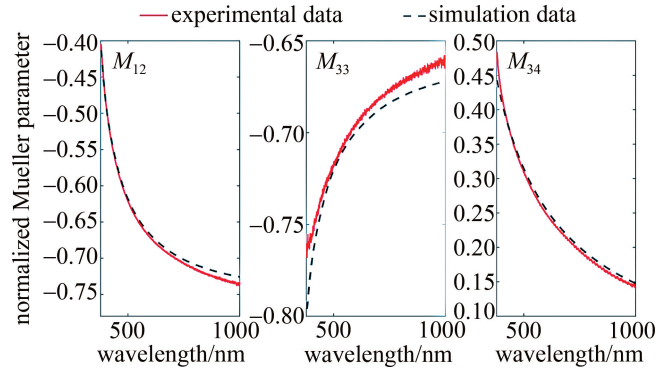


图 9 实验测量 Si 基底上 15.0 nm SiO₂ 与仿真的 16.5 nm SiO₂ 的 M_{12} 、 M_{33} 、 M_{34} 对比图

Fig. 9 Comparison between M_{12} , M_{33} and M_{34} of 15.0 nm SiO₂ on Si substrate and the simulated 16.5 nm SiO₂

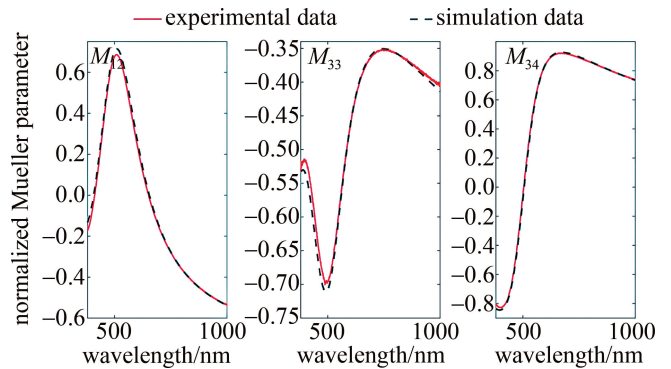


图 10 实验测量 Si 基底上 100.0 nm SiO₂ 与仿真的 105.2 nm SiO₂ 的 M_{12} 、 M_{33} 、 M_{34} 对比图

Fig. 10 Comparison between M_{12} , M_{33} and M_{34} of 100.0 nm SiO₂ on Si substrate and the simulated 105.2 nm SiO₂

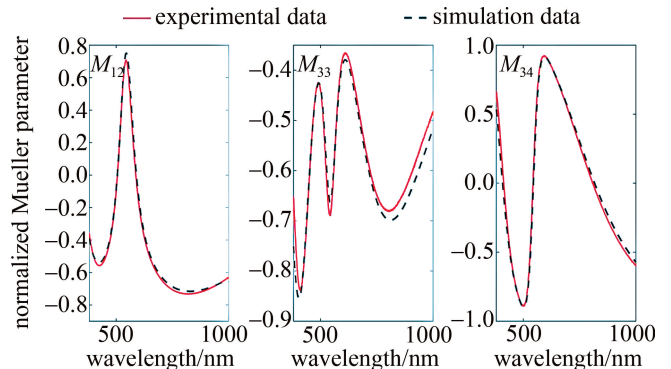


图 11 实验测量 Si 基底上 340.0 nm SiO₂ 与仿真的 340.0 nm SiO₂ 的 M_{12} 、 M_{33} 、 M_{34} 对比图

Fig. 11 Comparison between M_{12} , M_{33} and M_{34} of 340.0 nm SiO₂ on Si substrate and the simulated 340.0 nm SiO₂

4 结论

为了拓展宽光谱椭圆仪的功能,实现更多薄膜参数的测量,提出了椭圆仪实验数据与多物理场仿真相

结合实现更多物理量测量的新方法,并以膜厚测量为例进行了验证。通过对 Si 基底上 SiO₂ 膜厚实验测量与仿真得到的穆勒矩阵进行比对,获得了被测样品薄膜的厚度,所得膜厚结果与实际值符合较好。该方法可以实现多物理场环境中(不限于空气中)薄膜参数的椭偏测量。

参 考 文 献

- [1] WU M Y, HUANG Sh P. Preparation of Zr-based thin-film metallic glass and determination of optical constants [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(10): 1031001(in Chinese).
吴曼玉,黄水平. Zr 基薄膜金属玻璃的制备及其光学常数测定 [J]. *光子学报*, 2020, 49(10): 1031001.
- [2] LI J, HWU J J, LIU Y, *et al.* Mueller matrix measurement of asymmetric gratings[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2010, 9(4): 041305.
- [3] CHEN X, ZHANG C, LIU S, *et al.* Mueller matrix ellipsometric detection of profile asymmetry in nanoimprinted grating structures[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(19): 194305.
- [4] KU S, MAHATO K K, MAZUMDER N. Polarization-resolved Stokes-Mueller imaging: A review of technology and applications[J]. *Lasers in Medical Science*, 2019, 34(7): 1283-1293.
- [5] NOVIKOVA T, de MARTINO A, OSSIKOVSKI R, *et al.* Metrological applications of Mueller polarimetry in conical diffraction for overlay characterization in microelectronics[J]. *The European Physical Journal-Applied Physics*, 2005, 31(1): 63-69.
- [6] CHEN X G, LIU Sh Y, ZHANG Ch W, *et al.* Accurate measurement of nanoimprint template and photoresist grating structure based on Mueller matrix ellipsometer [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(18): 180701(in Chinese).
陈修国,刘世元,张传维,等. 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 [J]. *物理学报*, 2014, 63(18): 180701.
- [7] CHEN Ch. Research on the development and application of high-resolution tomography Mueller matrix ellipsometer [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021:11-14(in Chinese).
陈超. 高分辨层析成像穆勒矩阵椭偏仪研制与应用研究 [D]. 武汉:华中科技大学,2021:11-14.
- [8] ZHENG Zh, HOU J F. Design, calibration and test of single-wavelength mid-infrared Mueller matrix ellipsometer [J]. *Journal of Optics*, 2022, 42(18): 1812004(in Chinese).
郑州,侯俊峰. 单波长中红外穆勒矩阵椭偏仪的设计、定标与测试 [J]. *光学学报*, 2022, 42(18): 1812004.
- [9] LI W Q. Research on the development and application of high-precision wide-spectrum Mueller matrix ellipsometer [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016:10-12(in Chinese).
李伟奇. 高精度宽光谱穆勒矩阵椭偏仪研制与应用研究 [D]. 武汉:华中科技大学,2016:10-12.
- [10] FUJIWARA H. Spectroscopic ellipsometry principles and applications[M]. New York, USA: John Wiley & Sons Inc., 2007:23-25.
- [11] SHI Y J. Ellipsometry study on photoelectric properties of superconducting thin films in normal state [D]. Ji'nan: Shandong University, 2020:44-45(in Chinese).
石玉君. 超导薄膜正常态下光电性质的椭偏研究 [D]. 济南:山东大学,2020:44-45.
- [12] AZZAM R M A, BASHARA N M. Ellipsometry and polarized light [M]. Beijing: Science Press, 1986: 103-113.
- [13] GARCIA-CAUREL E, de MARTINO A, GASTON J P, *et al.* Application of spectroscopic ellipsometry and Mueller ellipsometry to optical characterization[J]. *Applied Spectroscopy*, 2013, 67(1): 1-21.
- [14] ZHAO Y, LI Y, HE W, *et al.* Polarization scattering imaging experiment based on Mueller matrix[J]. *Optics Communications*, 2021, 490: 126892.
- [15] OSSIKOVSKI R, BUGAMI B A L, GARCIA-CAUREL E, *et al.* Polarizer calibration method for Mueller matrix polarimeters[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(33): 10389-10395.
- [16] YADAV H N S, KUMAR M, KUMAR A, *et al.* COMSOL simulation of microwave plasma polishing on different surfaces[J]. *Materials Today*, 2021, 45: 4803-4809.
- [17] CHEN C, AN I, FERREIRA G M. Multichannel Mueller matrix ellipsometer based on the dual rotating compensator principle [J]. *Thin Solid Films*, 2004, 455(1): 14-23.
- [18] FENG R, QIU J, CAO Y Y. Omnidirectional and polarization insensitive nearly perfect absorber in one dimensional meta-structure[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(18): 207402.
- [19] MIAO Z, TANG Y, WEI K, *et al.* Random error analysis of normalized Fourier coefficient in dual-rotating compensator Mueller matrix ellipsometer[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(12): 125602.