

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.01.05

多层微纳薄膜的高精度检测技术进展

祝源浩, 董佳琦, 宋有建*, 胡明列

(天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 在半导体、机械加工等行业中广泛应用的多层微纳薄膜通常是由数个纳米厚度的单层膜叠加形成的,在其制造过程中,由于工艺条件所限,薄膜厚度的均匀性会出现误差,进而影响其性能。因此薄膜厚度的准确测量至关重要,亟需一种无损、高精度、快速的检测技术对薄膜的厚度及其均匀性进行测量、检测。回顾近年来多层膜在不同领域的应用现状,分析了目前应用于多层膜厚度测量的技术(如X射线衍射等)及其不足,以及椭圆偏振法技术的研究进展,最后介绍了机器学习在厚度测量中的应用,并对未来机器学习与测量结合的前景进行了展望。

关键词: 多层薄膜; 薄膜测量; 椭偏仪; 机器学习

中图分类号: TB96 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795(2023)01-0058-12

Review of high precision measurements of multilayer micro-nano films

ZHU Yuanhao, DONG Jiaqi, SONG Youjian*, HU Minglie

(Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology of Ministry of Education,
School of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Multilayer micro nano films widely used in semiconductor, mechanical processing and other industries are usually formed by superposition of several single-layer films with nanometer thickness. Due to the limitations of process conditions in the manufacturing process, the film thickness may have uniformity errors, which will affect the performance of the films. Therefore, the accurate measurement of the film thickness is very important, and a nondestructive, high-precision and fast detection technology is urgently needed to measure and detect the thickness and uniformity of the film. This paper reviews the application status of multilayer films in different fields in recent years, analyzes the current technologies of multilayer thickness measurement, such as X-ray diffraction, and their shortcomings, and also reviews the research progress of ellipsometry. Finally, the application of machine learning in thickness measurement is introduced, and the prospect of the combination of machine learning and measurement in the future is discussed.

Key words: multilayer film; film measurement; ellipsometer; machine learning

0 引言

随着制造业的发展与科技水平的进步,多层微纳薄膜广泛应用于半导体制造^[1]、航空航天^[2]、核工业^[3]、医疗仪器^[4]、光学器件^[5]等领域。多

层微纳薄膜通常是由数个纳米厚度的单层膜叠加形成,由于工艺条件所限,在制造过程中会使薄膜厚度的准确性以及均匀性偏移,会严重影响其性能,因此,对薄膜厚度进行准确快速测量尤为重要。迄今为止,已经出现了各种方法来测量多

收稿日期: 2022-10-18; 修回日期: 2022-11-04

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2018B090944001)

引用格式: 祝源浩, 董佳琦, 宋有建, 等. 多层微纳薄膜的高精度检测技术进展[J]. 计测技术, 2023, 43(1): 58-69.

Citation: ZHU Y H, DONG J Q, SONG Y J, et al. Review of high precision measurements of multilayer micro-nano films[J]. Metrology and measurement technology, 2023, 43(1): 58-69.



层薄膜材料的厚度^[6]，例如台阶法^[7]、透射电子显微镜^[8]等。这些常用的厚度测试方法，具有高分辨力的优点，然而由于检测过程中有破坏性以及检测时间过长，这些技术无法用于快速检查或者对薄膜生长状态的监测。

无损检测可以在不破坏材料基本结构，不影响材料性能的前提下，对材料的表面、厚度等进行检测和评价，以评估产品参数性能是否满足设计需求^[9]。随着现代工业的快速发展和产品线的需求，对无损检测技术的要求也随之提高。亟需一种快速、精准、便捷的无损检测方式用于生产中的实时监测。本文通过介绍多层微纳薄膜的应用现状，分析现有的无损检测技术优点与缺点，对未来监测薄膜生产的方式进行了展望。

1 多层微纳薄膜的应用现状

薄膜是元素沉积在基底材料上形成的特殊二维材料。由于厚度尺寸远小于其他方向，薄膜会表现出一些特殊的理化性质，因而在各领域都有着广泛的应用^[10]。不同领域需要多层薄膜的功能特性不同，因而制造材料、结构等也有很大差异。可根据材料种类的不同分为金属薄膜、合金薄膜、半导体薄膜等；也可以根据性质的不同分为电学薄膜、光学薄膜、硬质薄膜与耐蚀膜等^[7]。

半导体领域通常需要容量高、体积小的储存设备来储存数据。目前采用二维结构的储存设备已接近极限，相邻存储单元之间的干扰难以克服，因而出现了采取三维结构的闪存设备^[11]。

3D NOT-AND (NAND) 闪存器件是目前商业上最成功的3D半导体器件，如图1所示，通过垂直堆叠数百个厚度在纳米量级的半导体层，提供比二维结构闪存设备更好的效果。但是在三维闪存器件的制造中，制造工艺不可避免地会在材料层中产生应力，从而导致材料的微小形变，引起厚度与表面形状的变化。即使每层的厚度变化很小，当层数增加时，最终产品的电路性能也会受到一定的影响^[13-14]。因此准确测量每层的厚度对防止半导体层不均匀沉积至关重要。目前这类薄膜采用的材料为半导体，金属卤化物或二氧化硅，单层厚度通常小于1 nm，层数在100层以上。

极紫外光刻技术在芯片制造中被广泛采用，

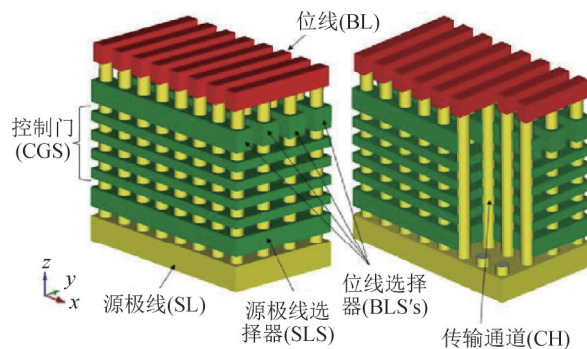


图1 3D NAND闪存设备示意图^[12]

Fig.1 Schematic diagram of 3D NAND flash memory device^[12]

作为极紫外光刻技术中极为重要的环节，Mo/Si多层膜技术的目标是实现高反射率、膜厚高均匀性以及高稳定性等^[15-16]。Mo/Si多层膜膜层厚度分布不均匀会在光学元件面形上引入额外像差，为了保证光学系统的成像质量，必须严格控制多层膜引起的厚度变化。为了达到近衍射极限分辨力要求，以EUVL两镜系统为例，多层膜的贡献量需要控制在0.1 nm (RMS值)以内，相应多层膜膜厚均匀性检测指标需要优于0.05 nm (RMS值)。对于面向产业化的EUVL六镜系统，多层膜贡献量控制及检测精度要求更为苛刻^[17]。

在机械加工制造领域，对于各种刀具的使用条件越来越严苛，尤其对使用于干切削与高速切削工艺中的刀具提出了更高的要求。氮化钛、氮化铝等金属氮化物薄膜具有硬度高、耐磨性好等优点，附在刀具上能够明显提高硬度和耐磨性能^[18]，但是由于单层结构过于单一，性能无法满足更高的要求。因此美国伊利诺大学的Koehler于1970年首先提出了纳米多层膜的构想^[19]，通过在垂直于基板的方向上堆叠不同材料，有效提升薄膜的硬度性能以及使用寿命。多层微纳膜相对于单层膜来说，有着更好的摩擦性能与机械性能^[20]，采用的材料通常为金属、金属氮化物或类金刚石碳单质薄膜，单层薄膜的厚度小于10 nm，层数超过200层。

涂层作为与薄膜结构相似的材料，可以在恶劣的外部环境下保护设备不受损坏，使其能够安全有效地工作。目前，涂层技术已经在医疗器械、航空航天等领域得到了广泛的应用^[21-22]。但由于涂层喷涂工艺水平不高，难以保证涂层材料的均匀覆盖和涂层厚度的准确性。为保证涂层能够满

足应用需求,需要检测装置对涂层厚度进行评定。不同的设备对涂层厚度的要求不同,需要根据其所实现的具体功能来决定。涂层厚度往往大于薄膜材料,处于 μm 至 nm 量级。而涂层覆盖不均匀,过薄过厚都会导致涂层性能大大降低。涂层材料根据不同的用途形成不同种类,目前包含的种类有非导电陶瓷、有机材料涂层、导电复合材料涂层等^[23]。

基于纳米化学合成法制备的新型二维材料,具有完全不同于块体材料的丰富物理化学性能,应用十分广泛,需要有效的表征分析方法和手段来揭示二维纳米材料的尺寸、缺陷等^[24]。新型纳米材料的研发也需要更准确的特征表征。因此,对材料进行清晰、精确的表征对理解其结构特征和功能属性十分重要。

2 薄膜制备方法

目前薄膜制备常用的方法为物理气相沉积(Physical Vapor Deposition, PVD)和化学气相沉积(Cheical Vapor Deposition, CVD)^[25],两种方法都是气相生长的化工技术,通过将原材料气体引入反应腔体,利用高温下化学反应或磁控溅射、离子镀方式在基底表面沉积形成薄膜。使用这些方式制备的薄膜附着力好、沉积速率快、工艺流程简单,应用广泛^[26]。

原子层沉积(Atomic layer deposition, ALD)是一种在衬底上制备高质量材料薄膜的技术,优点为厚度控制精确和均匀性高,在薄膜封装领域有巨大的应用潜力^[27]。ALD已广泛应用于半导体、泛半导体、环境与能源等新兴领域,并逐渐成为未来智能制造不可或缺的一部分^[28]。ALD依赖于连续使用以循环方式依次发生的自终止气固化学反应。典型的ALD循环如图2所示,分为两个半循环,第一个半循环包括前体分子在活化表面上的吸附,以及清除挥发性反应副产物和过量前体,在第一个半循环后,前体的亚单层已经通过化学反应吸附在活化表面上。在第二个半循环期间,活化表面上的单亚层分子与反应物分子作用,形成沉积薄膜。第二个半周期通过另一个吹扫步骤完成,以去除挥发性反应副产物和过量的反应物。在整个ALD循环后,沉积材料的亚单层,表面基团再次与循环开始时相似,随后,可以重复该循环以沉积具有目标厚度的薄膜。

在前驱分子与活化基底反应过程和反应物与前驱分子反应过程中,需要对生长薄膜厚度进行实时测量以判断反应是否完成。同时也可以根据测量结果调整温度、气压等参数,控制沉积速率和薄膜性能。因此需要在线测量方法对沉积过程进行实时监控。

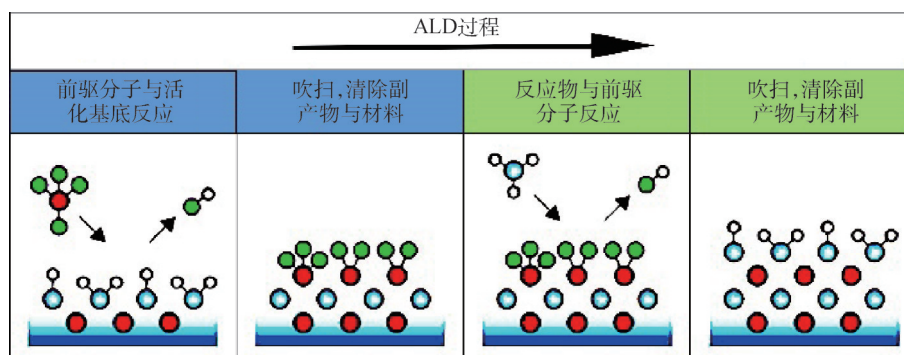


图2 典型ALD过程

Fig.2 Typical ALD process

3 离线检测方式分析

迄今为止,各类先进的表征技术已广泛应用在微纳薄膜的研究实践中^[29],且随着科研人员的研究和探索,不断有新的测量技术和理论出现,使测量速度、精确度逐渐提升,测量方式也由有损变为无损。薄膜材料因用途不同使其性质不同,

厚度也有很大差异,因而没有一个测量方式可以应用于所有薄膜检测,需要根据薄膜材料、厚度范围、精确度等因素综合选择。

3.1 台阶法

台阶法也称探针测量法,诞生于20世纪30年代,测量原理是利用一根探针在被探测物体表面移动得到样品的变化,以获得厚度测量结果^[30]。

台阶法由于具有测量精度高、测量范围大、稳定性好等优点,目前仍在使用。美国 KLA Tencor 公司生产的 P-16+ 型号的测量仪器,分辨力最大可以达到 0.001 nm [29]。探针在划过物体表面时不可避免地会造成损伤,而探测测量的量是相对厚度变化,因此必须露出基底以得到薄膜厚度,这使应用场合受到很大限制 [29]。

3.2 X射线衍射法

X射线衍射作为一种很常用的材料结构分析方法,可以简单高效地分析材料内部晶体结构,应用广泛 [25, 31]。其测量原理是利用 X 射线照射进入晶体材料时,晶格原子内的自由电子在入射线束电场的作用下围绕其平衡位置振动,同时对外辐射同频的电磁波 [32]。原子的规则性周期排列导致部分原子散射波在特定的方向上发生相互干涉增强,从而出现特定的衍射花样。合成波的强度与方向直接相关,通过收集晶体材料对 X 射线的衍射信息,可以对晶体内部的结构特性进行分析,同时也可以对材料组成元素进行定性和定量的分析 [33]。

相较于单层膜材料,多层膜材料由于其内部含有周期一定的重复结构,因而衍射峰较窄,分辨力更高,甚至可达到 0.01 nm [35],如图 3 所示。

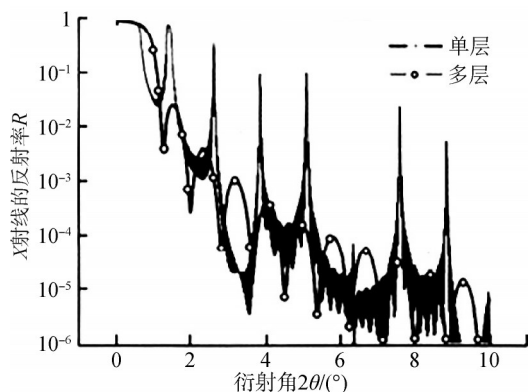


图3 多层膜与单层膜衍射曲线比较^[34]

Fig.3 Comparison of diffraction curves of multilayer and single layer films^[34]

而薄膜材料的厚度减小到 nm 量级时,入射 X 射线束在薄膜中的光程变得极短,产生的衍射信号微弱,不易被探测器收集检测。同时 X 射线具有很高的穿透能力,入射 X 射线很容易穿透薄膜材料照射到基材并与基材发生衍射,产生强烈的衍射信号。强度的差异导致薄膜的信号被淹没,无法准确分

离。为了克服缺点,通常将 X 射线的入射角减小 [36] 从而增大其在材料中的光程,可以有效降低基底材料的干扰,也可以引入入射线的角度与射线强度参量,对样品进行多维衍射,实现多参量测量 [37]。

3.3 电子显微镜

电子显微镜的原理是利用高速电子束代替光束进行成像,由于电子的波长远远小于光波,因此可以得到比传统光学显示器更好的分辨力,放大倍数可以从 5 倍至 1000000 倍,甚至更高倍,极限分辨力可达 0.2 nm [38]。

扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 是通过电子束与样品表面的相互作用来获取样品表面状态、晶体结构等信息。目前利用二次电子信号成像扫描电子显微镜的分辨力可以达到原子级别,同时具有高放大倍数、制样简单等优点 [38]。

透射电子显微镜 (Transmission Electron Microscopy, TEM) 是利用电磁透镜对电子束聚焦进行成像。当电子束透过样品时,内部携带了结构信息 [39],电子束出射后经物镜聚焦后成像,从像中同样可以得到薄层材料的尺寸,结晶性等参数。透射电子显微镜的分辨力远高于扫描电子显微镜。2008 年,美国伯克利大学研发了分辨力可以达到 0.05 nm 的球差矫正 TEM [40],在低加速电压时,TEM 分辨能力较弱,但仍可以达到 0.14 nm [41]。因此,透射电子显微镜广泛用于观察样品的精细结构,在材料学、物理学和生物学等领域是重要且基础的表征手段。但由于 TEM 在使用之前需要对样品进行切片,样品厚度要小于 100 nm [42],同时缺少 SEM 所具有的放大倍率可连续变化、立体感强等优点 [43],因此 TEM 虽有更高的分辨力,但实际应用范围却不如 SEM。

3.4 扫描隧道显微镜

扫描隧道显微镜 (Scanning Tunneling Microscope, STM) 的工作原理是隧道效应,将导体探针接近样品,当距离非常小时,样品和探针的电子云将会重叠,在电压的作用下,电子会穿过探针与样品之间的势垒形成电流 [44]。隧道电流的大小与样品探针的间隔有关,检测探针在不同位置的电流大小,即可得到样品表面的高度。STM 的

放大率可超过一千万倍,分辨力可达 0.01 nm ^[42]。STM可以在很多复杂的环境中测量,例如真空,液体中,同时也可以适应很宽的工作温度范围,但由于STM只能对导体材料进行测量,因此应用受到很大的限制^[42]。

3.5 原子力显微镜

为了弥补STM无法对绝缘体材料成像的缺点,1986年,在STM的基础上出现了原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)^[45]。AFM利用微悬臂上的探针与被测样品原子之间产生的相互作用力,来获取被测样品的表面形貌及表面粗糙度等信息^[44],其分辨力与STM一样可以达到原子级别,可直接得到被测样品表面结构信息且适用范围不受限制,可以在绝缘体的测量中使用,也可以在原子级制造中通过机械或电化学方法去除部分原子层^[46],近些年来得到了广泛的应用^[47]。

目前,离线检测方式的精度较高,通常可以达到原子级别,但是由于采样点测量和处理耗时较长、工作量较大,难以应用于在线测量。有些方法(例如STM, TEM等)需要对样品进行切削以形成剖面结构或台阶结构,而台阶法由于探针需要与样品接触,无法实现无损测量^[43]。多维X射线衍射则由于数据处理繁琐、普适性低,且由于离线检测方式存在一定缺点,因此在实际工程应用中很难用于实时监测薄膜生长,更多的用于产品的质量检测以及对其他测量方式的检验^[48]。伴随着生产力的提高,大批量生产多层微纳薄膜材料成为现实需要,因此可以快速精确地测量多层薄膜厚度与均匀性的方法成为了实际需求。

4 在线测厚方法

多层薄膜的制备过程通常为逐层沉积方式,可以采用在线测厚方法,实时测量已沉积薄膜的厚度并改变沉积过程的参数,以得到更理想的沉积结果。

4.1 石英晶体法

石英晶体具有压电效应,可以将表面质量转化为谐振频率的变化,基于此,可以构建石英晶体微天平检测原子层沉积薄膜生长过程^[49]。石英晶体微天平可以检测纳克量级的质量变化,其结构简单、灵敏度高、成本低,应用广泛^[50]。

4.2 面型检测法

由于镀膜前后的基底会发生形变,因此可以对其进行面形检测^[51],通过衡量基底表面形变量表征薄膜的厚度。中国科学院长春光机所的王辉等人基于面形检测对多层膜均匀性测量方法进行了研究^[17],通过测量基底镀膜前后的表面形变数据(基底需采用高复现支撑装置并形变数据将其转换为薄膜厚度数据),实验结果表明面形检测拟合结果与反射率计数据拟合结果之间偏差的RMS值为 0.057 nm ,验证了基于面形检测方法评估光学元件多层膜均匀性的可行性。

4.3 椭圆偏振测量法

椭圆偏振法(Spectroscopic Ellipsometry, SE)^[52]是目前测量微纳薄膜厚度使用最多的方法之一,可以用于测量多种材料(包括半导体、金属、多层膜等),也可以用于在较宽的光谱范围内测定薄膜厚度和光学常数^[53]。

作为一种非接触、无损伤的测量方法,SE的精度很高,原则上足以检测相当于 0.01 单原子层^[53-54]厚度的变化,并能同时测量出多个物理量,如:膜厚、膜折射率和吸收系数^[55]。因此,该技术通常被应用于物理和化学气相沉积技术研究薄膜生长的过程。SE相较于SEM, AFM等方法测量速度更快,可以满足工业生产中对于样品表面薄膜生长过程的监控。Klaus等人于20世纪90年代末已经报道了ALD过程中用于厚度监测的SE^[56]。

上述三种方法均为在线测量方法,精度高,可以在制造中发现缺陷。但是石英晶体法与面形检测法对基底的要求很高,并且面形检测需要基底有一定的复现性,而当薄膜层数增加时,测量速度会受到较大的影响。而椭圆偏振法对基底和镀层的要求少、适用范围广,作为在线检测方式有显著优点,所以下一节对该方法进行详细介绍。

5 椭圆偏振法

5.1 椭圆偏振法基本原理

椭圆偏振法的基本原理是当偏振光在薄膜表面发生反射时,反射光偏振态将会发生变化,变化的大小与薄膜厚度有确定的关系,通过计算不同偏振光振幅和相位的变化,可以得到薄膜厚度与折射率等信息。基本方程为

$$\rho = \frac{\hat{r}_p}{\hat{r}_s} = \frac{r_p}{r_s} e^{i(\delta_p - \delta_s)} = \text{tg} \psi \cdot e^{i\Delta} \quad (1)$$

式中： $\hat{r}_p$ 和 $\hat{r}_s$ 分别为水平分量（P分量）与垂直分量（S分量）的复振幅； r_p 与 r_s 分别为两个分量的幅值； δ_p 和 δ_s 分别为两个分量的相位； $\text{tg} \psi \cdot e^{i\Delta}$ 为反射系数比，椭偏仪可以测量反射系数比，这仅与薄膜的厚度有关系，可以解算出待测样品的厚度信息^[57]。

椭偏仪系统基本上由光源和探测器单元组成，如图4所示。通过光源和一组光学元件（如偏振器和延迟器），定义了入射光在表面上的偏振。反过来，反射光的偏振则由另一个偏振器与检测器（光电二极管、二极管阵列或光电倍增管）组合确定。在SE中，偏振变化是针对特定波长范围内的一组波长确定的。根据获得的椭圆偏振数据，可以推导出薄膜厚度与波长范围内光学常数色散之间的函数关系。最后通过代入材料的色散模型，得出材料的厚度^[59]。

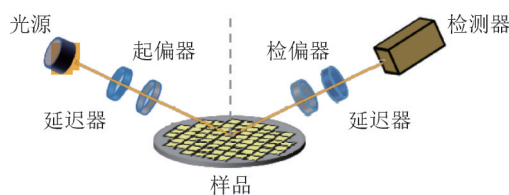


图4 椭偏仪示意图^[58]

Fig.4 Schematic diagram of ellipsometer^[58]

5.2 多层膜测量

对于多层微纳薄膜的测量，一般来说需要建立多层模型，其中每一层都具有一定的光学厚度，并且每一层都会影响反射光的偏振态^[57]。从测量中获得的原始数据包含光与多层样品相互作用引起的偏振变化。这一般是一个包含多层样品厚度和测量结果 ψ 和 Δ 的超越方程。由于直接求解方程过于复杂，难以得到准确结果^[59]，因此通常通过模型的拟合来得到各层薄膜的厚度，这就需要预先对多层材料进行建模。

首先对多层微纳薄膜物理结构进行分析^[54]，建立物理模型。其次通过光学常数获悉薄膜的材料特性，建立多层膜色散模型^[60]。考虑到实际应用中的薄膜材料，光学常数通常是已知的，模型可以计算出不同厚度对应的反射率或透射率曲线。随后，通过假设多层膜模型中的未知厚度参数，

获得预期多层膜的色散曲线，最终将得到的测量结果与预先计算值进行比较，通过评价函数判断拟合结果，并反演得到样品特征^[61]。

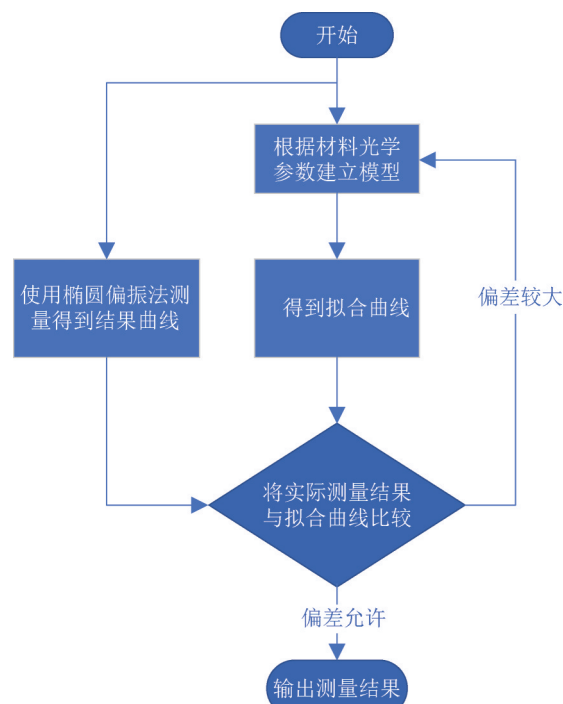


图5 椭偏仪测量多层膜流程图

Fig.5 Flow chart of multilayer film measurement with ellipsometer

对于非常薄的薄膜，其厚度和光学常数通常是相关的，并且参数的相关性随着薄膜厚度的减小而增加。因此，从椭偏测量数据中提取厚度等参数时，必须谨慎对待超薄薄膜，并且对拟合参数之间的相关性进行研究^[58]。

椭偏法具有很多优点，但也有很多因素影响其测量准确度（如环境噪声、系统误差、样品表面的粗糙度、色散模型的选择）。由于椭偏法可以在薄膜沉积过程中非接触性测量薄膜各种参数，通过测量结果实时调整薄膜沉积过程设置，因此SE在薄膜制造领域具有广阔的应用前景。同时精确的生长控制可以用于化学物质表面层的光学特性研究或超薄半导体和金属薄膜尺寸效应的研究^[62]。

5.3 穆勒椭圆偏振

对于椭偏测量技术而言，传统的椭圆偏振仪只能测量2个参数——振幅比 ψ 和相位差 Δ ，还会导致样品部分参数信息的缺失^[63]。但在测量时，通过改变偏振光入射角等参数，可以获得更多的结果。穆勒矩阵椭偏仪通过在起偏器和检偏器与

样品中间分别加入补偿器,可以实现单次测量获得样品穆勒矩阵的全部16个元素,从而得到更为丰富的测量信息(如样品的各向异性、退偏信息等)。穆勒矩阵椭偏仪可以用来测多层同质或异质薄膜,但是由于使用了穆勒矩阵描述光在介质中的传播而不是使用琼斯矩阵^[64],因此需要对不同的薄膜结构重新建立模型,以此来提高测量精度。

6 机器学习

近年来,机器学习被广泛用于帮助研究人员进行分类、测量等工作。机器学习可以模拟人脑学习过程,通过对已有的数据集学习,进而获得分类、判断计算结果的能力。机器学习可以在没有物理解释的情况下展示出所需结果和测量参数之间的相关性,避免了复杂的物理建模过程,同时减轻了计算的压力。

在椭圆偏振法中可以得知,理论光学建模过程十分繁琐,由于每层的厚度都会影响光谱椭圆偏振光谱和反射光谱^[65],因此,随着层数的增加,在测量仪器误差以及不同制造条件下每层材料特性变化的影响下,光谱椭圆偏振法进行准确的厚度表征变得更加困难。而与拟合方法^[66]相比,机器学习的方式可以更有效、更快速地表征多层结构的厚度。

在多层微纳薄膜的厚度测量中,尤其在使用椭圆偏振方法时,往往面临着复杂多层膜模型的建立,而机器学习利用研究人员通过其他方式训练出的模型来分析薄膜厚度,可以提高测量速度,减少工作量^[58]。

机器学习的关键在于选择合适的模型与数据足够的训练集。通常,训练集包含测量数据与薄膜各层厚度。测量数据可以由不同测量方式得到,最常见的是由椭圆偏振仪测量得到的光谱曲线,也可以使用光声法或干涉法得到测量结果。而薄膜各层厚度的测量需要较为精确的数据,因此可以使用TEM或AFM完成。而对于数据不多的情况,可以采用噪声注入^[67]的方式来增加数据点,获得更好的学习效果。

对于不同测量方式得到的数据,可以通过选择不同的机器学习模型来实现测量数据与结果的关联。早在2010年,浙江大学楚栋等人采用遗传

退火算法,对1~4层光学薄膜样品进行大量测试,并对总厚度在10 nm~5 μm 的多层薄膜进行测量,测量结果误差小于1%,证明该算法的可靠性^[60]。

人工神经网络(ANN)的厚度表征先前也已有报告,但这些机器学习算法仅对小于10层的少数层进行了表征。随着半导体行业的发展,需要测量大于200层的半导体器件的方法^[68]。Hyunsoo Kwak等人使用TEM对其横截面进行成像,得到的图像被用作薄膜厚度的参考,对于模型的输入,则采用椭圆偏振光谱法与反射光谱法测量。Hyunsoo Kwak等人通过对支持向量回归(SVR)、线性回归,深度神经网络(DNN)和人工神经网络(ANN)等进行研究后,对148个正常样本(125个样本的训练集和23个样本的测试集)进行训练,得到训练结果如图6所示,从左至右分别为预测最佳、平均、最差层的厚度偏移值。最终实现了对大于200层的氧化物/氮化物多层叠层的每一层非破坏性地测量,均方根误差为0.16 nm^[58]。

对于椭圆偏振法测量的数据,通过采用不同的机器学习模型进行测试,如支持向量回归、线性回归模型和人工神经网络,可以获得不同的效果,其中线性回归模型的学习速度最快,在Hyunsoo Kwak的实验中仅需要550 s即可完成模型建立,并且表现较好。这仅用于采用椭圆偏振法测量得到的数据,当采用其他方式测量时,往往采用不同的模型,例如光声法^[69]、X射线衍射法^[70]等。华东理工大学的Zhou Xu等人针对无损检测金属氧化层厚度的方法进行了研究。实验采用太赫兹光在氧化层内多次的反射回波作为输入信号,并进行小波降噪,分别对反向传播模型(BP)、主成分分析(PCA)、极端学习机(ELM)、粒子群优化(PSO)以及混合模型进行学习。最终证明采用PCA-PSO-ELM模型的氧化皮厚度预测性能最佳,其中PCA模型负责减小数据维度,PSO-ELM模型负责预测^[71]。

在实际测量中,机器学习的应用可以协助科研人员获取有用信息。对于不同测量方法产生庞大而复杂的数据集,机器学习可以有效地提取其中的特征。

匈牙利Máté Ficzer等人将数码相机获得的图像与深度学习相结合,以像素为单位测量了药片

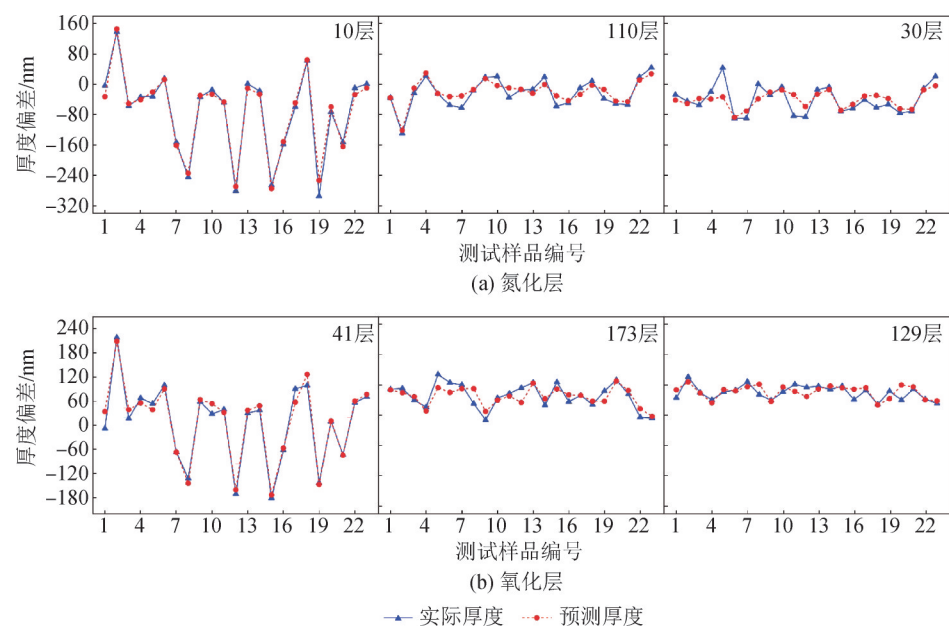


图6 Hyunsoo Kwak对23个试样的厚度预测结果^[58]

Fig.6 Thickness prediction results for 23 test samples by Hyunsoo Kwak^[58]

表1 多种薄膜厚度测量方式比较

Tab.1 Comparison of various film thickness measurement methods					
测量方式	分辨率/nm	适用范围	特点	测量范围	是否在线
台阶法	0.001	多层膜剖面	具有破坏性	5 nm~1000 μm	否
X射线衍射法	0.01	半导体,金属等材料	多层膜相较于单层膜更加精准	5 nm~10 μm	否
原子力显微镜等	0.01~0.5	多层膜剖面	可以对表面进行均匀性检测,但测量需破坏结构	0.5 nm~10 μm	否
椭圆偏振法	0.01	半导体,金属等材料	精度高,但操作复杂	0.1 nm~10 μm	是
面型检测	0.1	有基底的单层材料	测量多层膜速度较慢,且对基底要求较高	10 nm左右	是
机器学习法	0.1~1	半导体,金属等材料	用智能算法代替理论推导,尤其适用于计算量大的多层膜	与数据测量方式有关	与数据测量方式有关

包衣的厚度，并且识别和分类了包衣的缺陷。针对包衣的缺陷，通过小刀、毛刷等工具，制作出了包含一系列缺陷的药片用以对模型进行训练。当药片在传送带上运行时，通过拍摄的图像可以分析出药片上的缺陷。为测量包衣的厚度，研究人员首先测量了无包衣的药片直径和重量，随后通过测量包衣的药片重量增值，估计有完整包衣的药片的直径。最后通过具有半透明表面的传送带和照明装置，测量包衣药片的直径，从而确定厚度。使用此方法测量的包衣厚度大致为数十微米^[72]。

但相较于椭圆偏振法、光声测量、X射线衍射等测量方法背后模型的建立较简单，通常不需要

进行较多的处理就能得到测量结果，因此相对来说，机器学习对于这些方法的提升不大。对于会产生较大数据集的测量方式，机器学习可以较好的帮助计算。

7 总结与展望

应对多层薄膜应用的现状，现有测量方法均有自身的优缺点。针对各类显微镜，如原子力显微镜等，虽然测量分辨率很高、技术成熟，但其需要对薄膜材料进行切割露出剖面才可进行多层膜厚度的测量，具有破坏性。逐层测量的方式由于薄膜制造方式改变而变得可行，但存在测量速

度慢,成本高昂等缺点。

相比之下,使用椭圆仪可以无损地快速地测量多层膜的数据,并利用不同的物理模型准确计算出具体每一层的厚度及均匀性。缺点是,物理模型的建立与材料本身有很深的联系,并且随着薄膜厚度的减小,联系越密切^[73];薄膜层数的增加也会提升模型建立与计算的难度。测量中机器学习的应用可以极大地加快计算的速度,提高测量准确性。目前机器学习与多种测量方法的结合均有报道,如光声、X射线衍射。机器学习可以有效避免过于复杂的物理建模过程,直接将测量数据与所需数据通过特定的算法相关。这使得测量能力极大地依赖于选择的算法模型。目前应用线性模型的效果最好,但还是无法得到与物理建模相近的效果。因此未来还需对不同算法模型展开研究,以期得到更准确的结果。

参考文献

- [1] LI Y, QUADER K N. NAND flash memory: challenges and opportunities [J]. Computer, 2013, 46(8): 23-29.
- [2] 赵新龙, 赵竞. 红外隐身涂层的研究进展[J]. 红外, 2012, 33(6): 1-6.
ZHAO X L, ZHAO J. Progress of infrared stealth coating [J]. Infrared, 2012, 33(6): 1-6. (in Chinese)
- [3] 敖浚轩. 新型高性能铈酰离子吸附材料制备及应用研究[D]. 上海: 中国科学院大学, 2020.
AO J X. The preparation and application of novel high performance uranium adsorbent [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [4] 张鹏. 硅基植入式医疗器械用超薄膜聚合物涂层的灭菌效果[J]. 粘接, 2022, 49(5): 108-111, 121.
ZHANG P. Sterilization effect of ultra-thin polymer coating for silicon-based implantable medical devices [J]. Adhesion, 2022, 49(5): 108-111, 121. (in Chinese)
- [5] 薛晖. 光学薄膜光学特性检测中若干关键问题的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
XUE H. Research on some key problems in optical characterization of optical coatings [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. (in Chinese)
- [6] 李加福, 朱小平, 杜华, 等. 金属薄膜厚度测量技术分析[J]. 计量技术, 2020(7): 62-65, 50.
LI J F, ZHU X P, DU H, et al. Metallic thin film thickness measurement technology and its analysis [J]. Measurement technique, 2020(7): 62-65, 50. (in Chinese)
- [7] 唐文彦, 张军, 李慧鹏. 触针法测量表面粗糙度的发展及现状[J]. 机械工艺师, 2010(10): 40-42.
TANG W Y, HANG J, LI H P. Development and present situation of surface roughness measurement by stylus method [J]. Mechanical technicians, 2010(10): 40-42. (in Chinese)
- [8] KANG K, LEE K H, HAN Y M, et al. Layer-by-layer assembly of two-dimensional materials into wafer-scale heterostructures[J]. Nature, 2017, 550(7675): 229-233.
- [9] 王胜新. 基于超声的多层异质薄膜材料厚度检测方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
WANG S X. A research on thickness measurement method of multilayer heterogeneous films based on ultrasonic [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017. (in Chinese)
- [10] 赵明琳. 新型纳米功能薄膜材料的椭圆偏振光谱研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
ZHAO M L. Ellipsometry study of novel nanoscale functional films [D]. Jinan: Shandong University, 2017. (in Chinese)
- [11] MICHELONI R, ARITOME S, CRIPPA L. Array architectures for 3-D NAND flash memories [J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(9): 1634-1649.
- [12] 刘竑. 三维NAND闪存字线控制研究与改进[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
LIU H. 3D NAND flash wordLine control research and improvement [D]. Xian: Xidian University, 2020. (in Chinese)
- [13] SINGH H. Overcoming challenges in 3D NAND volume manufacturing [J]. Solid state technology, 2017, 60(5): 18-21.
- [14] MIYAJI K, YANAGIHARA Y, HIRASAWA R, et al. Control gate length, spacing, channel hole diameter, and stacked layer number design for bit-cost scalable-type three-dimensional stackable NAND flash memory [J]. Japanese journal of applied physics, 2014, 53(2): 024201.
- [15] CERRINA F, BOLLEPALLI S, KHAN M, et al. Image formation in EUV lithography: multilayer and resist properties [J]. Microelectronic Engineering, 2000, 53(1-4): 13-20.
- [16] SPILLER E, BAKER S L, MIRKARIMI P B, et al. High-performance Mo-Si multilayer coatings for extreme-ultraviolet lithography by ion-beam deposition [J]. Applied optics, 2003, 42(19): 4049-4058.
- [17] 王辉, 周烽, 喻波, 等. 基于面形检测的光学元件多层膜均匀性测量[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 267-272.
WANG H, ZHOU F, YU B, et al. Measurement of thickness uniformity of optic multilayer based on surface figure

- measurement [J]. Chinese journal of lasers, 2015, 42 (7): 267-272. (in Chinese)
- [18] SCHNEIDER J M, ROHDE S, SPROUL W D, et al. Recent developments in plasma assisted physical vapour deposition [J]. Journal of physics D: applied physics, 2000, 33(18): 173-186.
- [19] KOEHLER J S. Attempt to design a strong solid [J]. Physical review B, 1970, 2(2): 547-551.
- [20] 阎红娟, 田沁叶, 刘峰斌, 等. 调制周期对TaN/TiSiN纳米多层膜微观结构与性能影响[J]. 热喷涂技术, 2019, 11 (4): 25-30.
- YAN H J, TIAN Q Y, LIU F B, et al. Microstructure and properties of TaN/TiSiN with different modulation period [J]. Thermal spray technology, 2019, 11 (4): 25-30. (in Chinese)
- [21] 刘志, 郭年华, 宋庆功, 等. 飞机蒙皮涂层发展概述[J]. 中国涂料, 2010, 25 (2): 17-20.
- LIU Z, GUO N H, SONG Q G, et al. Summary on the development of aircraft dope [J]. China coatings, 2010, 25 (2): 17-20. (in Chinese)
- [22] 李贺军, 薛晖. C/C 复合材料高温抗氧化涂层的研究现状与展望[J]. 无机材料学报, 2010, 25 (4): 337-343.
- LI H J, XUE H, FU Q G, et al. Research status and prospect of anti-oxidation coatings for Carbon/Carbon composites [J]. Journal of inorganic materials, 2010, 25 (4): 337-343. (in Chinese)
- [23] 陈飞. 导电聚苯胺纳米复合材料的制备、性能及其应用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- CHEN F. Preparation, properties and applications of conducting polyaniline nanocomposites [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014. (in Chinese)
- [24] 林翰. MXene与硅烯二维纳米材料的设计合成与生物医学应用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- LIN H. Design, Synthesis and biomedical applications of emerging two-dimensional MXene and silicene [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [25] 田沁叶. TaN/TiSiN纳米多层膜微观结构与力学性能研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2020.
- TIAN Q Y. Study on microstructure and mechanical properties of TaN/TiSiN multilayer films [D]. Beijing: North China University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [26] 杨文茂, 刘艳文, 徐禄祥, 等. 溅射沉积技术的发展及其现状[J]. 真空科学与技术学报, 2005 (3): 204-210.
- YANG W M, LIU Y W, XU L Y, et al. Review of film growth by sputtering technology [J]. Chinese journal of vacuum science and technology, 2005(3): 204-210. (in Chinese)
- [27] 刘春艳, 王源, 殷成雨, 等. 利用原子层沉积技术实现机电致发光器件的薄膜封装[J]. 发光学报, 2022, 43 (8): 1281-1299.
- LIU C Y, WANG Y, YIN Y C, et al. Thin-film encapsulation of organic light emitting diode by atomic layer deposition [J]. Chinese journal of luminescence, 2022, 43 (8): 1281-1299. (in Chinese)
- [28] ZHANG J, LI Y, CAO K, et al. Advances in atomic layer deposition [J]. Nanomanufacturing and metrology 2018, 1: 112-124.
- [29] 徐春晖. 纳米薄膜厚度的光学测量方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.
- XU C H. Research on optical measurement methods of nanometer film thickness [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [30] 辛金栋. 纳米级金属薄膜厚度的SPR检测方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- XIN J D. Detection of nanometer scale thin metal film's thickness based on surface plasmon resonance effect [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese)
- [31] 许鹏. 基于X射线衍射及拉曼光谱技术分析棉花纤维发育过程中的结晶度变化[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.
- XU P. Cellulose crystallinity in development of cotton based on XRD and raman spectroscopy [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021. (in Chinese)
- [32] GUENETTE J P, SMITH S E. Burnout: Prevalence and associated factors among radiology residents in new england with comparison against United States resident physicians in other specialties [J]. American journal of roentgenology, 2017, 209(1): 136-141.
- [33] CALABRESE E J. X-Ray treatment of carbuncles and furuncles (boils): A historical assessment [J]. Human & experimental toxicology, 2013, 32(8): 817-827.
- [34] 麦振洪. 薄膜结构X射线表征[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- MAI Z H. X-ray characterization of film structure [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [35] 张立超. 纳米级薄膜厚度的精确测量[J]. 光机电信息, 2010, 27 (10): 45-49.
- ZHANG L C. Accurate determination of thicknesses for nanometer thin films [J]. Optoelectronic information, 2010, 27 (10): 45-49. (in Chinese)
- [36] 吴珊妮. 纳米多层隔热膜的制备及性能研究[D]. 海口: 海南大学, 2019.
- WU S N. Preparation and properties nano-multilayers

- with low thermal conductivity[D]. Haikou: Hainan University, 2019. (in Chinese)
- [37] 赵斌. 多维X射线衍射及其在纳米薄膜的应用[D]. 北京: 中国地质大学, 2020.
- ZHAO B. Multidimensional X-ray diffraction and its applied research in nano films[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020. (in Chinese)
- [38] 阮囡. 扫描电子显微镜中二次电子成像机制和分辨力的 Monte Carlo 模拟[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- RUAN Z. Monte Carlo simulation on the generation and image resolution of secondary electron in scanning electron microscopy[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
- [39] 沈若涵. 透射电子显微镜中的三维重构新方法[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
- SHEN R H. New methods for three-dimensional reconstruction in the transmission electron microscope [D]. Changsha: Hunan University, 2021. (in Chinese)
- [40] KISIELOWSKI C, FREITA B, BISCHOFF M, et al. Detection of single atoms and buried defects in three dimensions by aberration-corrected electron microscope with 0.5 Å information limit[J]. Microscopy and microanalysis, 2008, 14(5): 469-477.
- [41] LINCK M, HARTEL P, UHLEMANN S, et al. Chromatic aberration correction for atomic resolution TEM imaging from 20 to 80 kV [J]. Physical review letters, 2016, 117(7): 76-101.
- [42] 秦春. 基于多重扫描器的原子力显微镜系统研制[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- QIN C. Development of atomic force microscope based on multi-scanner [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [43] 熊丹. 基于 AFM 与干涉光谱的薄膜厚度测量系统 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- XIONG D. Thin film thickness measurement system based on AFM and interference spectrum [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)
- [44] 陈欢. 新型快速原子力显微镜的研制及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- CHEN H. A new type of atomic force microscope with fast scan speed [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [45] BINNIG, QUATE, GERBER. Atomic force microscope [J]. Physical review letters, 1986, 56(9): 930-933.
- [46] MATHEW P T, RODRIGUEZ B J, FANG F. Atomic and close-to-atomic scale manufacturing: A review on atomic layer removal methods using atomic force microscopy [J]. Nanomanufacturing and metrology, 2020, 3(3): 167-186.
- [47] 武兴盛. 原子力显微镜纳米级定位平台设计与测试技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2019.
- WU X S. Research on design and testing technology of atomic force microscope nano-level positioning platform [D]. Taiyuan: North University of China, 2019. (in Chinese)
- [48] KONG D, MICHIHATA M, TAKAMASU K, et al. In-process measurement of thickness of cured resin in evanescent-wave-based nano-stereolithography using critical angle reflection [J]. Nanomanufacturing and metrology, 2018, 1(2): 112-124.
- [49] 李占锋, 尚丽平. 薄膜厚度的石英晶体差动在线测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2001 (S1): 99-100.
- LI Z F, SHANG L P. Film thickness on-line measurement method by quartz crystal differential [J]. Chinese journal of scientific instrument, 2001(S1): 99-100. (in Chinese)
- [50] 胡建国. 石英晶体微天平 (QCM) 质量灵敏度的关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- HU J G. Research on key technology of mass sensitivity of quartz crystal microbalance [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021. (in Chinese)
- [51] 王辉, 于杰, 周烽, 等. 高复现性面形检测支撑装置研制[J]. 中国激光, 2012, 39 (11): 136-140.
- WANG H, YU J, ZHOU F, et al. Development of mirror mount for ultra-high reproducibility metrology [J]. Chinese journal of lasers, 2012, 39(11): 136-140. (in Chinese)
- [52] HILFIKER J N, PRIBIL G K, SYNOWICKI R, et al. Spectroscopic ellipsometry characterization of multilayer optical coatings [J]. Surface & coatings technology, 2019, 357: 114-121. (in Chinese)
- [53] 王益朋. 薄膜厚度的椭圆偏振光法测量[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- WANG Y P. Film thickness measurement based on ellipsometry [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- [54] KINOSITA K, YAMAMOTO M. Recent developments in ellipsometry that are useful for thin film studies [J]. Thin solid films, 1976, 34(2): 283-289.
- [55] LI H H, CUI C C, XU X P, et al. A review of characterization of perovskite film in solar cells by spectroscopic ellipsometry [J]. Solar energy, 2020, 212: 48-61.
- [56] LANGEREIS E, HEIL S B S, KNOOPS H C M, et al. In situ spectroscopic ellipsometry as a versatile tool for studying atomic layer deposition [J]. Journal of physics d-applied physics, 2009(7): 42.
- [57] MAJOR G H, CHAPMAN S C, CHAPMAN J T, et al.

- Spectroscopic ellipsometry of SU-8 photoresist from 190 to 1680 nm (0.740–6.50 eV)[J]. *Surface and Interface Analysis*, 2021, 53(1):5–13.
- [58] KWAK H, RYU S, CHO S, et al. Non-destructive thickness characterization of 3D multilayer semiconductor devices using optical spectral measurements and machine learning[J]. *Light: advanced manufacturing*, 2021, 2:1.
- [59] TIKHONRAVOV A V, AMOTCHKINA T V, TRUBETSKOV M K, et al. Optical characterization and reverse engineering based on multiangle spectroscopy [J]. *Applied optics*, 2012, 51(2):245–254.
- [60] 楚栋, 宫兴致, 程梁, 等. 基于遗传退火算法的多层薄膜厚度测量[J]. *光电工程*, 2010, 37(2): 45–49.
- CHU D, GONG X Z, CHENG L, et al. Multilayer film thickness measurement based on genetic simulated annealing algorithm[J]. *Opto-electronic engineering*, 2010, 37(2):45–49. (in Chinese)
- [61] 周士翔. 吸收型薄膜光学常数的反演拟合算法研究[D]. 华中科技大学, 2021.
- ZHOU S X. Research on inversion and fitting algorithm of optical constants of absorptive film [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [62] HERZINGER C M, JOHS B, MCGAHAN W A, et al. Ellipsometric determination of optical constants for silicon and thermally grown silicon dioxide via a multi-sample, multi-wavelength, multi-angle investigation[J]. *Journal of applied physics*, 1998, 83(6):3323–3336.
- [63] LI J, HWU J J, LIU Y, et al. Mueller matrix measurement of asymmetric gratings [J]. *Journal of microlithography mems and moems*, 2010, 9(4).
- [64] 杜黎明, 管钰晴, 孔明, 等. 基于穆勒椭偏的纳米薄膜厚度测量与溯源[J]. *微纳电子技术*, 2021, 58(12): 1121–1127.
- DU L M, GUAN Y Q, KONG M, et al. Measurement and traceability of nano-film thickness based on mueller ellipsometry [J]. *Micronanoelectronic technology*, 2021, 58(12):1121–1127. (in Chinese)
- [65] NAZAROV A, NEY M, ABDULHALIM I. Parallel spectroscopic ellipsometry for ultra-fast thin film characterization[J]. *Optics express*, 2020, 28(7):9288–9309.
- [66] POLGAR O, FRIED M, LOHNER T, et al. Comparison of algorithms used for evaluation of ellipsometric measurements—Random search, genetic algorithms, simulated annealing and hill climbing graph-searches [J]. *Surface science*, 2000, 457(1–2):157–177.
- [67] ZUR R M, JIANG Y L, PESCE L L, et al. Noise injection for training artificial neural networks: A comparison with weight decay and early stopping[J]. *Medical physics*, 2009, 36(10):4810–4818.
- [68] BATTIE Y, ROBERT S, GEREIGE I, et al. Demonstration of the feasibility of a complete ellipsometric characterization method based on an artificial neural network [J]. *Applied optics*, 2009, 48(28):5318–5323.
- [69] 杨晨. 高性能光声成像技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- YANG C. Photoacoustic imaging with enhances sensitivity, resolution and speed [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021. (in Chinese)
- [70] OVIEDO F, REN Z, SUN S, et al. Fast and interpretable classification of small X-ray diffraction datasets using data augmentation and deep neural networks[J]. *Npj computational materials*, 2019.
- [71] XU Z, YE D, CHEN J, et al. Novel terahertz nondestructive method for measuring the thickness of thin oxide scale using different hybrid machine learning models[J]. *Coatings*, 2020, 10(9):805.
- [72] FICZERE M, MESZAROS L A, KALLAI-SZABO N, et al. Real-time coating thickness measurement and defect recognition of film coated tablets with machine vision and deep learning[J]. *International journal of pharmaceutics*, 2022.
- [73] YUAN Y, YAO C, SHEN W, et al. Polarization measurement method based on liquid crystal variable retarder (LCVR) for atomic thin-film thickness [J]. *Nanomanufacturing and metrology*, 2022, 5(2):159–166.

(本文编辑:田艳玲)

第一作者: 祝源浩 (2000—), 硕士研究生, 主要研究方向为超短脉冲激光技术。



通讯作者: 宋有建 (1981—), 英才副教授, OPTICA, IEEE 的高级会员, 从事超短脉冲激光技术及精密测量应用研究。

