

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.01.03

表面微/纳米计量中的光学测量方法综述

袁琳, 郭彤*, 郭心远, 祝敏豪, 万一夫

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 微纳检测技术旨在以微/纳米级的精度测量加工表面特征, 在加工过程的控制、建立表面特征与功能间的联系等方面具有重要作用。光学测量方法具有高精度、快速和无损的特点, 是微纳检测技术研发的重要内容。本文介绍了表面形貌和薄膜的光学测量方法, 并对各方法的特点及应用场合进行了对比总结。微纳制造技术加工的表面具有结构日益小型化、特征日益复杂化的特点, 因此开发多模式测量系统是微纳检测技术的发展趋势。

关键词: 光学测量方法; 表面形貌; 薄膜; 多模式测量系统

中图分类号: TB96

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2023)01-0030-18

Review of optical measurement methods in surface micro/nano metrology

YUAN Lin, GUO Tong*, GUO Xinyuan, ZHU Minhao, WAN Yifu

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin, 300072, China)

Abstract: Micro-nano detection technology aims to measure the characteristics of machined surface with micro/nano measurement accuracy, which plays an important role in controlling the machining process and establishing the relationship between surface characteristics and functions. Optical measurement method is an important part of micro-nano detection technology because of its high accuracy, fast speed and non-destructiveness. This paper introduces the common optical measurement methods of surface topography and film parameters, and compares and summarizes the characteristics and application occasions of each method in detail. The surface processed by micro-nano manufacturing technology has the development trend of miniaturization of structure and complexity of characteristics. Therefore, it is of great significance to build the multi-mode measurement system for micro-nano detection technology.

Key words: optical measurement method; surface topography; film; multi-mode measurement system

0 引言

微纳制造技术广泛应用于微机电系统^[1-2]、半导体^[3-4]和医疗^[5-7]等领域, 是衡量国家高端制造水平的重要指标。不同的加工技术会产生不同类型的表面, 例如光滑表面(光学自由曲面^[8-9]、微流控芯片表面^[10]等)、大斜率表面(车刀表面^[11-12]、高深宽比孔洞^[13]等)、粗糙表面(激光

加工表面、增材制造表面^[14]等)以及薄膜沉积界面^[15]等。表面决定了工件的功能和外观, 因此, 实现表面的准确检测对评价加工质量和可靠性, 保证加工工艺稳定性和器件良品率具有重要意义。

微纳检测技术旨在以微/纳米级的精度测量加工表面特征, 包括表面结构与关键尺寸、面形、波纹度和粗糙度等, 在对加工过程的控制、建立表面特征与功能间的联系等方面有重要作用^[16]。

收稿日期: 2022-10-14; 修回日期: 2022-11-13

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0107001)

引用格式: 袁琳, 郭彤, 郭心远, 等. 表面微/纳米计量中的光学测量方法综述[J]. 计测技术, 2023, 43(1): 30-47.

Citation: YUAN L, GUO T, GUO X Y, et al. Review of optical measurement methods in surface micro/nano metrology[J]. Metrology and measurement technology, 2023, 43(1):30-47.



根据所使用传感器的不同,微纳检测技术可分为:基于机械相互作用的方法、基于电/磁场的方法、基于光/电辐射的方法和基于图像的方法。光学测量方法是通过光束与表面的相互作用获得一定的光学响应来实现测量,由于其具有高精度、快速和无损的特点,一直是微纳检测技术研发的重要内容。

本文围绕表面形貌和薄膜参数的光学测量方法的基本原理、系统结构和研究进展等方面进行综述,对测量方法的特点及应用场合进行总结和对比,同时结合目前表面结构日益小型化、特征日益复杂化的特点,指出开发多模式光学测量系统是微纳检测技术的发展趋势。

1 表面形貌的光学测量方法

在过去的几十年里,众多研究表明表面形貌和表面功能间存在联系^[17-18],因此,进行表面形貌的准确测量具有重要意义。表面形貌的光学测量方法主要包括共聚焦法、显微结构光照明法、显微干涉法和变焦法等。

1.1 共聚焦法

共聚焦法^[19]根据共轭成像原理实现测量,由Minsky于1957年提出,并搭建了第一台共聚焦显微镜。光路中使用针孔结构限制照明,光源发出的光经过照明针孔后,通过物镜照射在样品表面,再经过探测针孔被探测器接收。当样品表面位于焦平面位置时,所探测到的信号最强。针孔结构能够阻挡焦平面以外的杂散光和离焦信号,提高了测量的轴向分辨力。

使用针孔限制照明范围的测量方式需要对样品进行逐点扫描实现表面形貌的测量,因此测量速度较慢。后续共聚焦法的相关研究大多聚焦于并行共聚焦技术,通过在系统中使用多针孔掩模(Nipkow盘)^[20-21]、微透镜阵列^[22]、数字微镜^[23]等器件,将光束“分割”为独立的点光源,再通过并行探测器接收返回光,实现测量速度和光线利用率的提升。其中带有微透镜和Nipkow转盘的共聚焦系统^[24]已被横河电机、尼康和奥林巴斯等公司商业化,系统结构如图1所示。共聚焦方法具有较高的水平分辨力,垂直分辨力和物镜的数值孔径相关,能够测量局部斜率较大的样品。除此

之外,由于共聚焦系统可以配置激光光源来激发荧光团,因此在医学和生物等领域具有广泛研究与应用^[25]。

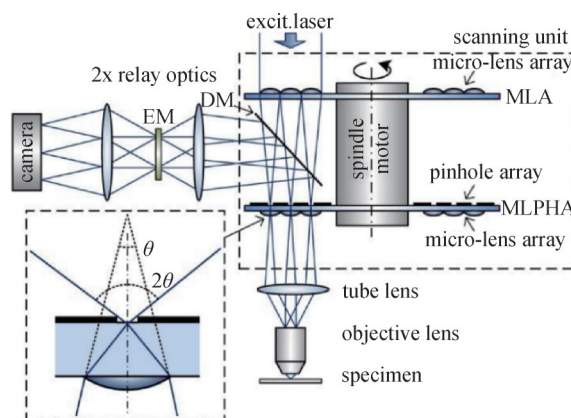


图1 转盘式共聚焦法的系统结构示意图^[24]

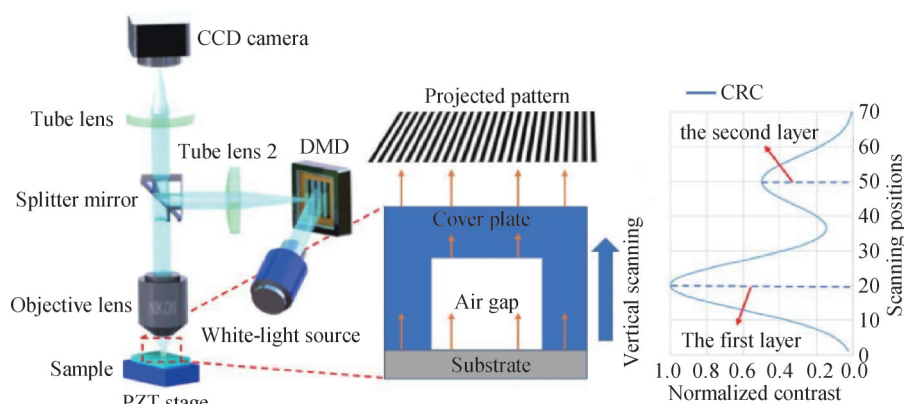
Fig.1 Schematic diagram of spinning-disk confocal microscopy^[24]

1.2 显微结构光照明法

结构光照明的应用领域是通过使用空间编码的结构光,将高频信息调制到可测量的低频频段中,实现超分辨显微,以及将多种形式的结构光投影至待测量区域,通过解算相位等方式实现三维测量。但此类方法受投影图案、系统稳定性的影响,难以实现纳米级的高精度测量。

中国科学院光电技术研究所开展了显微结构光照明法的相关研究以实现表面形貌的高精度测量。区别于传统激光三角法的结构光投影技术,该方法中入射至样品表面的结构光和返回光同轴,系统结构如图2所示。由于微反射镜(DMD)和相机的空间位置对称,因此样品和DMD在相机中清晰成像的位置相同,通过计算和清晰度相关的调制曲线,检测DMD在相机中清晰成像的位置,最终实现表面形貌的测量^[26-27]。

经典的调制曲线提取方法为相移法,由于包含“起停”过程,测量效率较低,因此相关研究主要围绕着提升测量速度开展,例如傅里叶变换法^[28]、基于时域相移的快速测量方法^[29]和基于空间区域的相移重构算法^[30]等。除此之外,也有部分研究聚焦于提高调制度函数的灵敏度,例如构建多相机配置的测量系统进行差分计算^[31-32]等。显微结构光照明的垂直分辨力主要和物镜的数值孔径相关,具有能够实现低反射率、透明样品测量的特点。

图2 显微结构光照明法系统结构及原理示意图^[27]Fig.2 Schematic diagram of structured-illumination microscopy^[27]

1.3 显微干涉法

显微干涉法具有高精度的特点,在表面形貌测量领域占据重要位置^[33]。基本实现原理为:光源发出的光分为两束,分别照射在样品和参考镜表面,通过探测器接收反射光产生的干涉信号,解算信号中和表面信息相关的参数,实现表面形貌的测量。常见的显微干涉结构为 Michelson 型、Mirau 型和 Linnik 型,系统结构如图 3 所示。根据使用光源的不同,可将显微干涉法分为单色光相移法和白光干涉法。

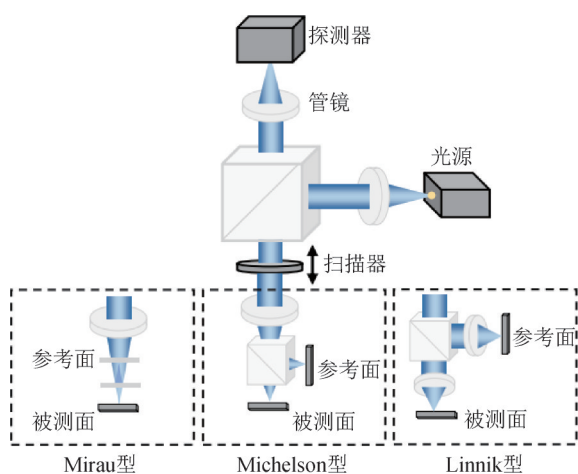


图3 显微干涉法的系统结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of microscopic interferometers

1.3.1 单色光相移法

单色光相移法通过时间相移法或空间相移法^[34-37]解算相位,实现表面形貌测量。由于干涉光强度对两束光间的光程差变化较敏感,当参考镜移动半个波长的长度时,干涉光强度会发生一个周期的变化^[38],因此具有纳米级别分辨能力。由于影响

测量精度的主要因素为相移误差,因此单色光相移的相关研究集中于相位提取算法的改进。单色光相移法是较成熟的表面形貌测量方法,在环境扰动较小时,测量的重复性优于 1 nm,但由于反三角函数的计算具有多值性,会产生相位模糊的影响,单色光相移技术所测量样品的高度需连续变化无突变,两点间的高度差不大于光源波长的四分之一^[39-40]。

1.3.2 白光干涉法

白光干涉法中系统使用的光源为光谱连续的宽带光,垂直扫描白光干涉法和白光干涉光谱法是其中被广泛研究和应用的方法。垂直扫描白光干涉法具有快速、准确和非接触的优点,与单色光相移法相比,测量不受相位模糊的影响,可用于高度非连续变化、结构复杂的样品测量^[41],是目前应用最广泛且成熟的显微干涉测量方法;白光干涉光谱法以零光程差位置作为参考点,测量不受相位模糊的影响,扩展了测量范围,与垂直扫描白光干涉法相比,测量不需要垂直扫描过程,提高了测量效率^[42]。

1.3.2.1 垂直扫描白光干涉法

垂直扫描白光干涉法使用相机接收白光干涉信号,通过检测具有表面高度依赖性的条纹对比度,实现表面形貌的恢复。相干峰探测算法是垂直扫描白光干涉法的核心,主要可分为时域和频域算法,其中频域算法具有高精度的特点,是相干峰探测算法的热门研究方向。Gianto 等人^[43]分析了四种相干峰检测算法,通过建立理论模型仿真了垂直扫描白光干涉信号,向仿真信号中加入非线性偏置和高斯噪声,评价不同算法检测相干

峰位置的准确性。除此之外,还有一些创新性的相干峰检测算法的提出,如模板匹配法^[44-45]、不同检测算法间的结合^[46-47]等,都在不同程度上实现了测量速度、测量精度等方面的提升。

垂直扫描白光干涉法的应用限制主要为机械扫描过程影响了测量效率,且扫描步长需要满足采样定理以保证精度。因此,提升测量速度、减少或移除机械扫描过程是研究的主要方向。Jeon等人^[48]搭建了基于空间相移的垂直扫描白光干涉系

统,如图4(a),通过偏振相机获取具有不同相移量的信号,根据强度计算条纹对比度。图4(b),4(c)为扫描步距600 nm时的扫描信号和对比度曲线提取结果,可以看出此方法的步距不受采样定理的限制,同时,能够使用非等间隔的扫描步距,测量速度有较大的提升。Pavliček等人^[49]基于焦距可调谐透镜搭建了垂直扫描白光干涉系统,通过标定确定光程差和电压变化的线性关系,实现了无机械扫描的测量。

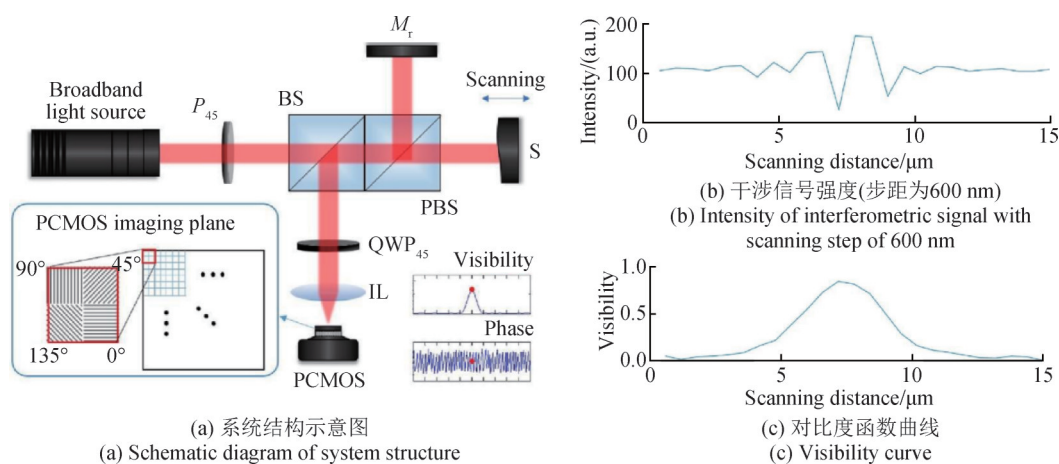


图4 基于空间相移的垂直扫描白光干涉系统^[48]

Fig.4 Vertical scanning white light interferometer based on spatial phase shifting^[48]

由于干涉法容易受到周围环境的影响(如振动、气流和温度变化),较难应用于工业现场,因此振动补偿技术的相关研究也得到了广泛关注^[50-51],可分为被动补偿方法和主动补偿方法^[52-55]。Tereschenko等人^[54]实现了针对垂直扫描白光干涉法的被动补偿技术,搭建了迈克尔逊型干涉仪,以共光路为基础,集成了以红外激光为光源的单点式参考干涉光路,两种不同波长的光由滤光片分离。由于两个干涉光路受到相似的振动影响,测量完成后根据单点式参考干涉光路的测量结果,对失真的垂直扫描白光干涉信号进行重新排序插值,实现信号的重建。

1.3.2.2 白光干涉光谱法

白光干涉光谱法的系统中使用狭缝、衍射光栅等器件,将白光干涉信号在谱域展开,再由探测器接收。传统白光干涉光谱法是单点式测量方法,因此一些研究致力于开发线轮廓^[56-57]和区域形貌^[51, 58]的测量系统。Guo等人^[56]搭建了线轮廓测量的白光干涉光谱系统,如图5(a)所示。

样品和参考镜表面反射的测量光和参考光发生干涉,空间位置某一测量线的光通过狭缝,再经过衍射光栅发生色散并由光谱相机接收,光谱相机中形成波长-测量位置坐标系,即每一行为空间点的白光干涉光谱信号。线测量的白光干涉光谱系统可以应用于“卷对卷”的测量。

为进一步实现区域形貌的测量,研究者提出了基于波长扫描的白光干涉光谱法。Guo等人^[51]使用声光可调滤波器(AOTF)实现波长扫描,搭建的白光干涉光谱系统如图5(b)所示。根据驱动AOTF的电信号频率和波数的对应关系,能够获取相机中每个像素点的白光干涉光谱信号,实现样品表面的区域形貌测量。但光源模块价格较昂贵,AOTF对光源强度的衰减较大,需使用高功率白光光源,同时,输出波长的半峰宽等因素会影响测量精度。

光学频率梳以相等的时间间隔发射一系列的超短光脉冲,在频域上表现为等间隔分布的窄线宽光学纵模组成的宽光谱,因此光学频率梳与干涉

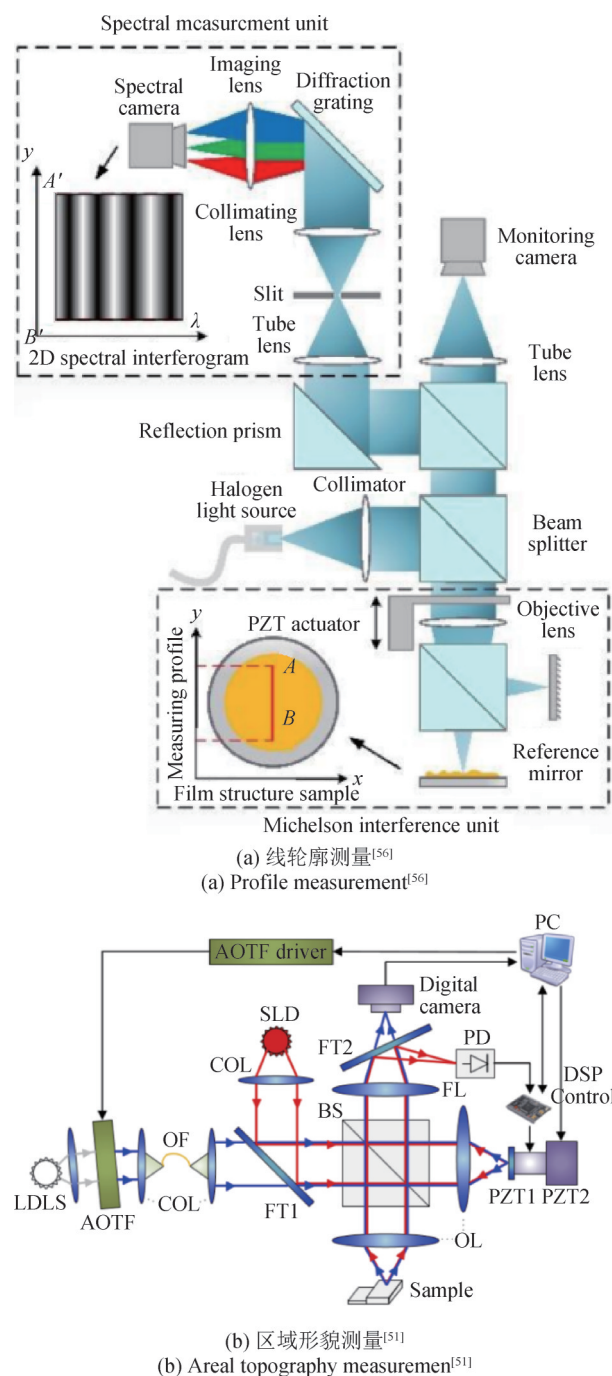


图5 白光干涉光谱系统结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of white-light spectral microscopic interferometer

光谱法的结合,与传统光源相比能够实现更大范围的表面形貌测量^[59],但由于设备价格昂贵、系统结构复杂,还未见应用于工业现场的相关报道。

1.4 变焦法

变焦法将光学显微测量系统的小景深特点和垂直扫描相结合,在样品高度与聚焦状态间建立

联系,相关的国际ISO规范标准于2015年制定。图6所示为系统结构及测量原理示意图^[14],由于物镜的景深较小、视场内各像素点的样品高度不同,因此图像中只有部分像素点为聚焦状态。在垂直扫描过程中采集不同聚焦程度的图像,计算依赖表面高度的聚焦评价曲线,实现表面形貌的测量^[12]。但由于被测表面需要具有足够的纹理信息用以识别聚焦状态,所以被测表面的粗糙度参数 S_a 应大于 15 nm ^[16]才能获得良好的测量效果,因此该方法无法测量低反射率、纹理信息欠缺的表面。

变焦法的测量精度和物镜的景深有关,具有鲁棒性强和可测量粗糙、大斜率表面的特点,被广泛应用于精密制造、增材制造和航空航天等领域。近期相关研究从方法研究和应用研究两方面进行总结。

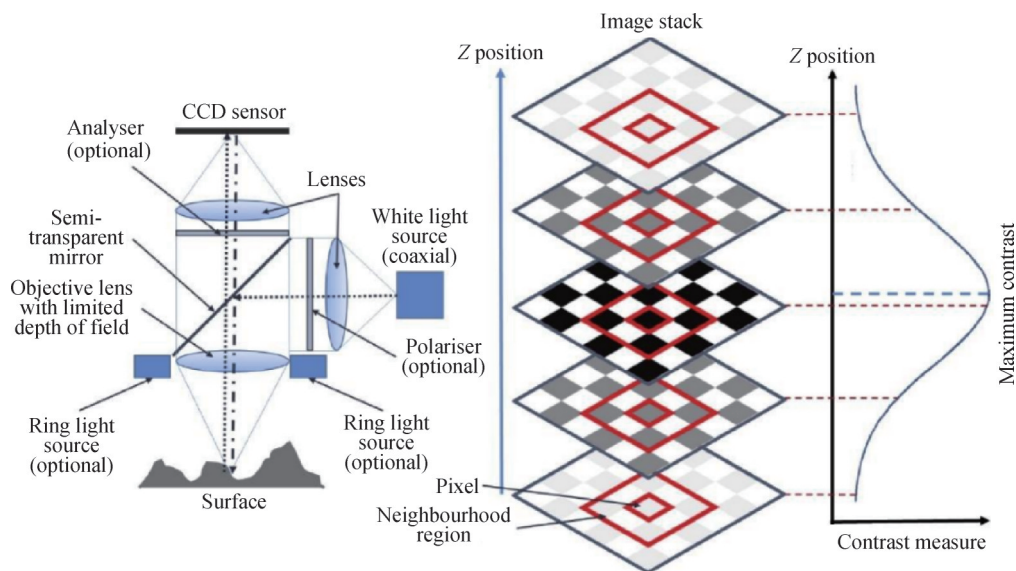
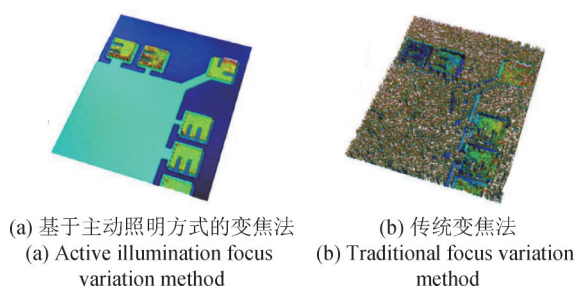
1.4.1 方法研究

聚焦评价函数用于评价聚焦状态,是变焦法能够实现准确测量的关键,因此相关研究从变焦法提出至今一直在进行,主要包括:改进传统算法中的算子^[60]、提出全新的算法^[61-63]以及评价函数中自适应窗^[60, 64]等,目的是提升聚焦评价的精度、提高算法对噪声的鲁棒性。Pertuz等人^[65]根据实现原理将聚焦评价函数分为六类,并提出了评价聚焦评价函数性能的参数,包括窗口尺寸敏感性、噪声鲁棒性和图像对比度的敏感性等。

变焦法通过识别垂直扫描过程中的聚焦状态恢复表面形貌,因此无法测量低反射率、纹理信息欠缺的表面/界面。为克服这一限制,变焦法中引入了调制照明的方式,通过投影的图案增加表面纹理信息,从而增加垂直扫描过程中对比度的变化,因此又被称为基于主动照明方式的变焦法^[66-67]。图7所示为分别使用基于主动照明方式的变焦法和传统变焦法的MEMS器件的表面形貌测量结果,可以看出两种照明方式的平面部分测量结果有明显差异。

1.4.2 应用研究

加工过程中对工件进行离线测量的检测方式效率较低,在线或在机的测量能够实现闭环控制和早期缺陷检测,节约时间成本,因此变焦法的系统研究主要围绕着小型化、自动化以及实现更

图6 变焦法系统结构及测量原理示意图^[14]Fig.6 Schematic diagram of focus variation method^[14]

(a) 基于主动照明方式的变焦法
(a) Active illumination focus variation method

(b) 传统变焦法
(b) Traditional focus variation method

图7 MEMS器件的测量结果^[67]Fig.7 Measurement results of MEMS sample using focus variation method^[67]

灵活测量等方面开展。Santoso 等人^[68-69] 构建了紧凑型变焦测量系统, 如图8所示, 系统整体长度为250 mm, 圆柱外壳直径为80 mm, 对比传统系统结构, 紧凑型系统极大地缩小了体积, 可用于不同类型机床加工现场的在机测量, 节约了时间和成本。

Riedl 和 Danzl 等人^[70-71] 构建了基于协作机器人的变焦测量系统, 对比传统的工业机器人, 协作机器人能够实现多角度定位, 一定程度上减小了复杂几何形状的表面光学测量方法的限制, 该系统已成功应用于生产线上刀具的原位检测, 实现了刀具出厂的质量检测和加工过程中的磨损量化。

变焦法的最大可测量斜率达到 87° ^[72], 因此被广泛应用于表面大斜率、粗糙样品的测量。金属

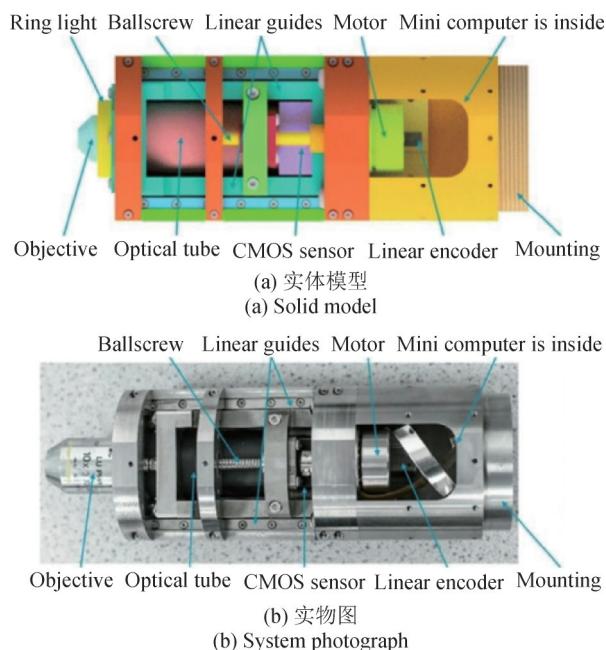
图8 紧凑型变焦法的测量系统^[69]

Fig.8 Compact focus variation microscope

增材制造样品具有表面对比度差、深宽比高和大斜率等特征, Newton 等人^[14] 使用变焦法测量了此类增材制造样品的表面形貌。Tian 等人^[11] 使用变焦法测量了车刀的表面形貌, 结合国际ISO规范标准中磨损参数的定义, 提取切削刃的磨损参数, 并对比了不同加工参数的磨损情况。除此之外, 还有一些刀具(如铣刀)^[72]、孔洞类样品的测量研究。

表1 光学表面形貌测量方法的特点及应用场合的对比

Tab.1 Comparison of characteristics and application of optical methods for surface topography measurement

方法	特点	应用场合
共聚焦法	垂直分辨力与物镜数值孔径相关, 最高可达1 nm	水平分辨力要求较高; 表面斜率小于72°
显微结构光照明法	垂直分辨力与物镜数值孔径相关, 最高可达10 nm	低反射率、透明样品
显微干涉法	垂直分辨力与物镜数值孔径无关, 优于1 nm; 测量过程易受环境干扰	纳米级高精度; 不适用于测量大斜率表面
变焦法	垂直分辨力与物镜数值孔径相关; 环境干扰的鲁棒性强	不适用于高精度测量; 能够测量大斜率、粗糙表面, 可测量最大斜率达87°

1.5 对比总结

通过查阅文献和商业化设备中的指标, 对上述光学表面形貌测量方法进行简单总结, 如表1所示, 可以看出不同测量方法有各自的特点和应用场合。共聚焦法的垂直分辨力和物镜的数值孔径相关, 能够应用于水平分辨力要求较高的场合; 显微结构光照明法的垂直分辨力同样和数值孔径相关, 能够测量低反射率、透明的样品; 显微干涉法对于高精度测量的应用场合具有无可替代的地位, 其中的白光干涉法不受相位模糊的限制, 可用于高度非连续变化、结构复杂样品表面形貌的测量, 但对大斜率表面具有一定的测量限制, 测量易受环境干扰; 变焦法具有对环境干扰的鲁棒性强、可测量大斜率和粗糙表面的特点, 但不适用于高精度的测量。

2 薄膜参数的光学测量方法

在第四产业时代, 薄膜结构对于发展更智能、更高端的设备具有重要意义, 因此针对其的测量手段至关重要^[73-74], 待测量参数通常包括薄膜厚度、均匀性和折射率。光学方法是较成熟的检测手段, 具有较高的可靠性和精度, 主要包括椭圆偏振法、反射光谱法、共聚焦法和白光干涉法。

2.1 椭圆偏振法

椭圆偏振法^[75-77]是商业化最普及和最可靠的方法, 通常用来作为薄膜折射率和厚度测量的高精度基准, 其测量原理主要基于线偏振光从样品表面反射后光的相对振幅和相位发生的变化。光谱型椭圆偏仪对比单色光椭圆偏仪, 能够收集更多的表面信息, 实现更可靠的薄膜折射率和厚度测量, 但由于系统中通常包含旋转偏振组件来实现入射光各种偏振态的设置, 机械运动会带来测量的不

稳定和测量时间较长的问题, 因此近期的相关研究主要围绕去除机械运动过程、缩短测量时间等方面开展。

Li等人^[78]搭建了基于45°双驱动对称光弹性调制器的椭圆偏系统, 测量过程中无需机械运动过程, 实验结果证明了系统的高重复性和灵敏度, 采集速度可达1毫秒/点。Kim等人^[79]实现了空间相位延迟光谱椭圆偏系统, 单次数据采集后即可提取角度信息并有希望发展为实时测量系统。除此之外, 成像式光谱椭圆偏仪^[80-82]的研究也得到了广泛关注。Kim等人^[82]通过使用物镜和成像光谱仪构建系统, 单次测量即可获得薄膜厚度的线轮廓, 进而通过扫描获取薄膜厚度的三维轮廓, 系统结构和测量结果如图9所示。

椭圆偏振法测量的薄膜厚度通常小于1 μm, 为实现薄膜折射率和厚度的同时测量, 需要已知材料的色散模型^[83], 难以实现没有组分信息情况下的测量。拟合结果受初值准确性的影响较大, 因此需要较准确的折射率和厚度初值的先验知识, 否则拟合易陷入局部最优。除此之外, 椭圆偏振法的系统采用倾斜双臂结构, 系统较复杂难以和其他表面形貌测量方法集成。

2.2 反射光谱法

反射光谱法^[84-86]是常用的、已商业化普及的薄膜参数测量方法, 与椭圆偏法相比, 其系统结构简单、测量速度快, 测量原理为: 光束由样品表面反射后, 光谱的相对强度发生变化, 通过测量反射光谱和由模型得到的理论反射光谱间的拟合, 实现折射率和厚度的测量。传统反射光谱法是单点式测量, 为提高测量效率, 一些研究^[84, 87-88]致力于开发成像式反射光谱法, 实现薄膜厚度的三维轮廓测量。Kim等人^[87]搭建了成像式反射光谱

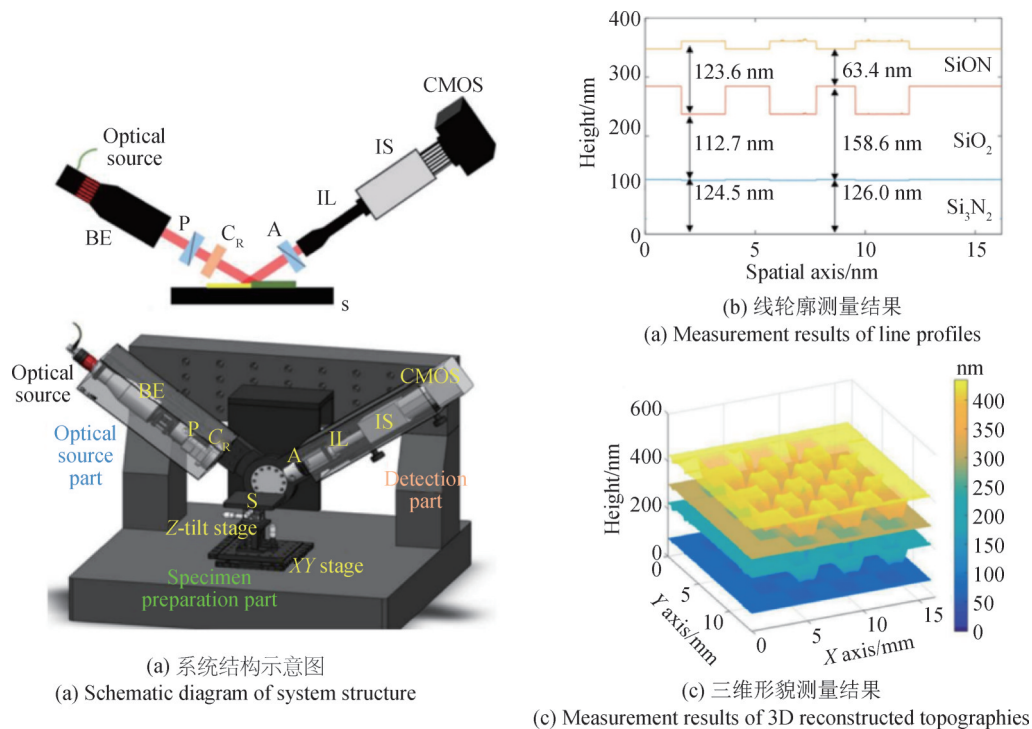
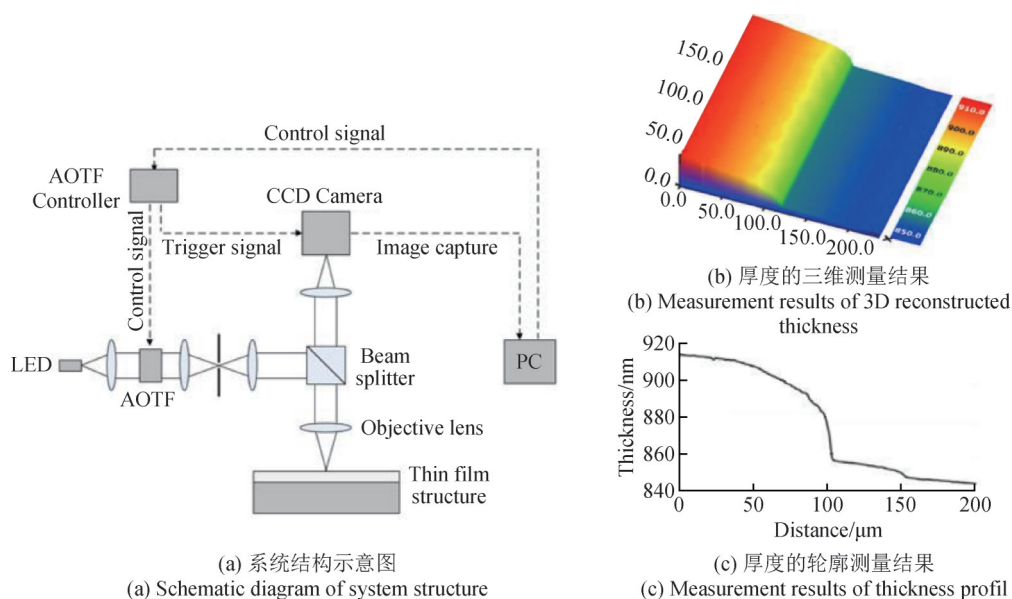
图9 成像式椭圆仪^[82]Fig.9 Imaging ellipsometry^[82]图10 成像式反射光谱法^[87]

Fig.10 Imaging spectroscopic reflectometry

系统，如图10所示，使用AOTF实现波长扫描，通过物镜显微成像，实现了 640×480 像素大小的薄膜厚度的三维轮廓测量。

由于系统结构简单、测量精度高，反射光谱法作为经济、高效的薄膜折射率和厚度的测量方法，被广泛应用于工业和生物领域^[89-90]，如在薄

膜制备过程中的实时监控等。但与椭圆偏振法的应用限制相同，为实现薄膜折射率和厚度的同时测量，需要材料色散模型、折射率和厚度初值的先验知识，且拟合结果受初值准确性的影响较大。

2.3 共聚焦法

共聚焦法通过检测垂直扫描过程中的样品表

面位于焦平面的位置实现表面形貌的检测,同理,能够通过分离薄膜内部各界面的峰值信号^[91-92]实现薄膜厚度的测量。该方法结构简单、易操作,常应用于工业领域的微气泡、透明板等样品的测量。由于薄膜和空气折射率的差异,光束在这两

种介质的交界处会发生折射,因此扫描位移和薄膜实际厚度值不匹配。Choi等人^[93]基于几何模型实现了单层/双层薄膜厚度的测量,原理如图11所示。对于单层薄膜,当光束移动 Δz 的位移量时,薄膜厚度 t 可表示为

$$t = \Delta z \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \Delta z \frac{n_2}{n_1} \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{\sin \theta_1}{n_2} \right)^2}{1 - \left(\frac{\sin \theta_1}{n_1} \right)^2}} = \Delta z \sqrt{\frac{n_2^2 - NA^2}{n_1^2 - NA^2}} \quad (1)$$

式中: NA 为物镜的数值孔径; θ_1 为光束入射角度; θ_2 为光束折射角度; n_1 和 n_2 分别为介质的折射率。当物镜数值较小时,可以简化为 $t = n_2 \cdot \Delta z$, 同理亦可得双层薄膜厚度的计算公式。

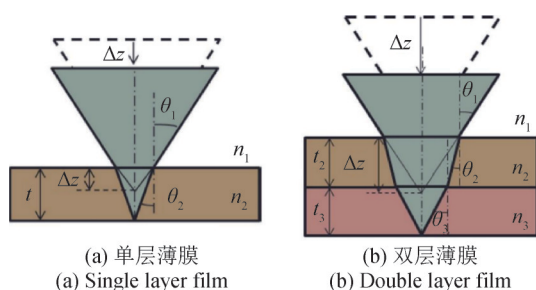


图11 共聚焦法薄膜测量原理示意图^[93]

Fig.11 Principle of film thickness measurement by confocal method

共聚焦法无法实现折射率和厚度的同时测量,为克服这一局限性,Iliev等人^[94]搭建了双光纤探头的共聚焦测量系统。两个独立光纤探头的焦点保证重合,由几何模型计算薄膜的折射率和厚度,并分析了影响测量精度的因素,如多模光纤的噪声等。受物镜景深的影响,共聚焦法在薄膜高精度测量领域的应用受到一定限制。

2.4 白光干涉法

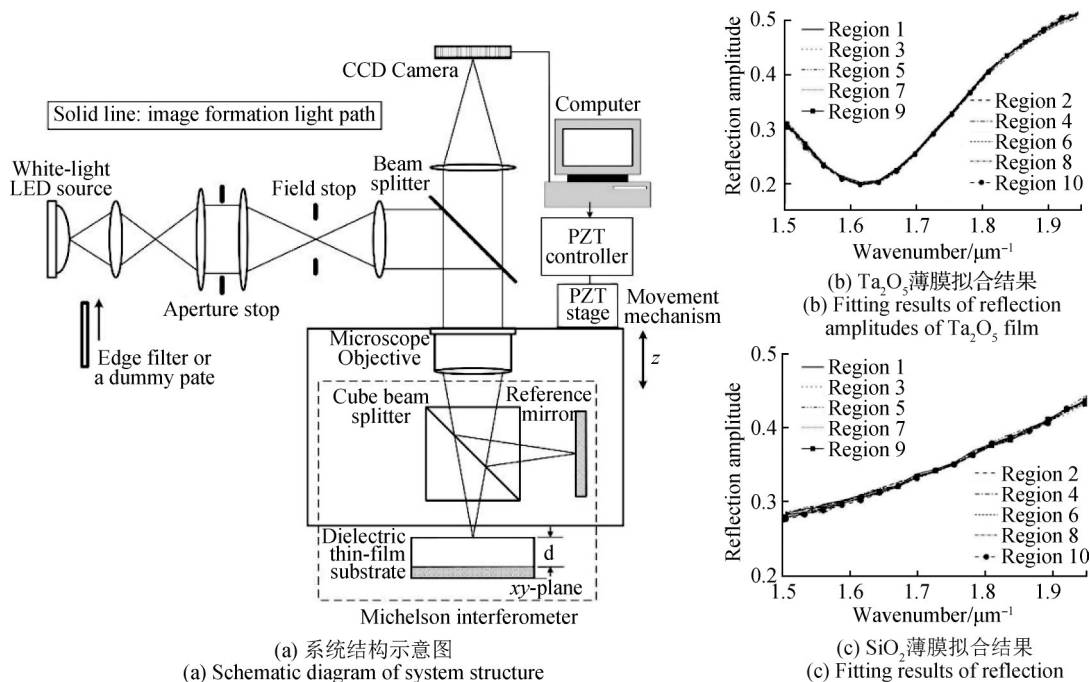
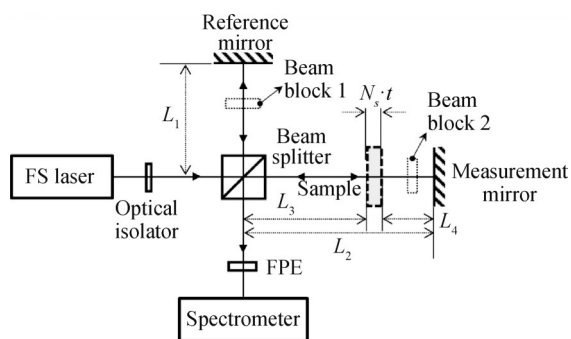
白光干涉测量技术中,干涉光会携带样品表面信息对其中的一些参数进行解算,从而获得薄膜的折射率和厚度。大多数薄膜测量的研究工作围绕垂直扫描白光干涉法和白光干涉光谱法展开,垂直扫描白光干涉法由于能实现高精度的表面形貌测量而得到广泛关注。当测量薄膜样品时,信号中包含分别来自于上表面和下表面的两个相干峰,通过在时域或频域建立理论模型^[95-101],进行测量值和由模型得到的理论值间的拟合,从而实

现薄膜折射率和厚度的测量。

垂直扫描白光干涉信号进行频域变换后获得了波数-强度的关系,通过建立薄膜的反射光谱理论模型,进行测量值和理论值的拟合,能够实现折射率和厚度的测量,主要可分为基于傅里叶相位、幅值、相位与幅值的组合参数等方法。Li等人^[95]对垂直扫描白光干涉信号进行傅里叶变换,进行由反射光谱模型得到的理论值和测量值间的拟合,获得薄膜的折射率和厚度,并研究了光源强度标定、波数和基底折射率的准确性对测量的影响。拟合情况如图12所示,测量结果与椭圆偏振法相比,差异在1%以内,且通过逐个像素点的计算实现高水平分辨力的测量。

Dong等人^[99]对基于傅里叶变换的振幅和相位等参数方法的灵敏度进行了对比,研究了薄膜折射率和厚度、物镜数值孔径和光谱范围对测量结果的影响。此类方法和反射光谱法的应用限制相同,需要预先已知材料的色散模型以及用于非线性拟合的折射率和较精确的厚度初值,虽然能够实现薄膜厚度的三维轮廓的测量,但对相机中每个像素点都进行非线性拟合的计算效率较低。除此之外,上述方法中扫描器的精度、光源稳定性、照明的均匀性以及预标定过程的准确性,都会影响所提取反射光谱的准确性,从而影响测量精度。

白光干涉光谱法具有能够测量绝对距离的特点,一些透射式测量方法通过对比光路中放置与移除薄膜样品的绝对距离差异,建立方程计算折射率和厚度。图13所示为透射式测量方法较经典的系统结构及测量原理的示意图^[102],通过测量无样品时的光程差 $OPD1$ 、放置样品和挡片2时的光程差 $OPD2$ 和 $OPD3$ 、仅放置样品的光程差 $OPD4$,

图 12 垂直扫描白光干涉法测量薄膜^[95]Fig.12 Measurement of film by vertical scanning white light interferometry^[95]图 13 透射式白光干涉光谱法测量原理示意图^[102]Fig.13 White-light spectral microscopic interferometer for transparent film measurement^[102]

建立方程

$$\begin{aligned} OPD1 &= L_2 - L_1 \\ OPD2 &= L_3 - L_1 \\ OPD3 &= L_3 - L_1 + N_s t \\ OPD4 &= L_2 + (N_s - 1)t - L_1 \end{aligned} \quad (2)$$

通过联立方程,可获得薄膜的折射率 N_s 和厚度 t ,最终实现了BK7(硼硅酸玻璃)和紫外熔融石英等样品的测量。在此基础上,还有一些研究围绕测量不确定度的分析^[103-104]、实现多层薄膜物理厚度的测量方法^[105]、实现多层薄膜折射率和厚度的同时测量^[106]等方面展开。可以看出,透射式测量法比较适用于厚膜的测量,尚无法测量带基

底的薄膜。由于需要进行光束的对准,透射式测量法中系统使用的光源主要为超辐射发光二极管和飞秒激光器,其中飞秒激光光学频率梳具有更高的空间相干性^[107-108],但设备价格较昂贵。

对于包含基底薄膜的测量,Ghim等人^[109]搭建了基于偏振原理的白光光谱干涉系统,通过系统结构设置分离薄膜自身产生的干涉信号和薄膜与参考镜产生的干涉信号,建立方程实现折射率和厚度的解耦。该方法无需机械扫描过程,对外界振动有一定的抑制能力,能够实现折射率和厚度的快速测量,但系统包含两个光谱仪和若干偏振光学元件,结构复杂、成本较高。

白光干涉光谱信号的相位和波数间具有一定的相关关系^[107-110],测量平面镜时,解包裹相位关于波数呈线性关系。测量薄膜样品时,受薄膜内部多次反射的影响,解包裹相位中会包含非线性部分^[110],且仅与薄膜光学属性相关。因此在白光干涉光谱法中,一些测量方法通过构建非线性相位的理论模型,对测量和理论的非线性相位进行拟合,获得待测量参数^[111-113]。由于使用白光干涉光谱信号的相位信息而非强度信息,此类方法具有良好的稳定性和准确性,但非线性拟合计算对

拟合参数的初值精度具有一定的要求,且由于折射率和厚度在理论模型中的耦合关系,这类方法主要用于已知折射率时厚度的测量。

2.5 对比总结

对上述光学薄膜测量方法的特点及应用场合进行简单总结,如表2所示,椭圆偏振法和反射光谱法是商业化应用最广泛的经典方法,测量结果经常被用作高精度的测量基准,但椭圆偏振法的

系统结构复杂难以和其他测量方法集成,两种测量方法都需要材料色散模型、折射率和厚度初值的先验知识,拟合结果受初值影响大。共聚焦法的测量精度由物镜数值孔径决定,难以实现薄膜折射率和厚度的同时测量。白光干涉法中干涉信号的强度、相位等参数能够和薄膜光学属性建立关系,具有开发新方法的可能性,同时能够实现薄膜表面/界面的形貌测量。

表2 光学薄膜测量方法的特点及应用场合的对比

Tab.2 Comparison of characteristics and application of optical methods for film measurement

方法	特点	应用场合
椭圆偏振法	测量精度高、系统结构复杂	特别适合测量纳米级薄膜;测量薄膜厚度通常小于1 μm ;已知材料色散模型、折射率和厚度初值先验知识
反射光谱法	测量精度高、系统结构简单	薄膜厚度测量范围大,可达15 nm ~ 250 μm^* ;已知材料色散模型、折射率和厚度初值先验知识
共聚焦法	测量精度受限; 折射率和厚度同时测量需特殊系统结构	可测量毫米级薄膜;不适用于高精度测量
白光干涉法	测量精度高,多为基于理论模型拟合; 方法具有多变性	不适用于测量纳米级薄膜;能够测量薄膜表面/界面形貌

注:“*”为Filmetrics公司制造的,F20-EXR型号的商业化反射光谱仪。

3 发展趋势

目前,微纳制造技术加工的表面具有结构日益小型化、特征日益复杂化的发展趋势^[114-115],如图14所示,而不同测量方法有各自的特点和适用

场合;同时,表面形貌和薄膜测量设备通常需要分别使用,带来了测量效率低、难以实现空间位置的匹配等问题。因此,开发多模式的测量系统对满足不同精度和场合的测量需求、解决表面计量技术中的复杂问题具有重要意义。

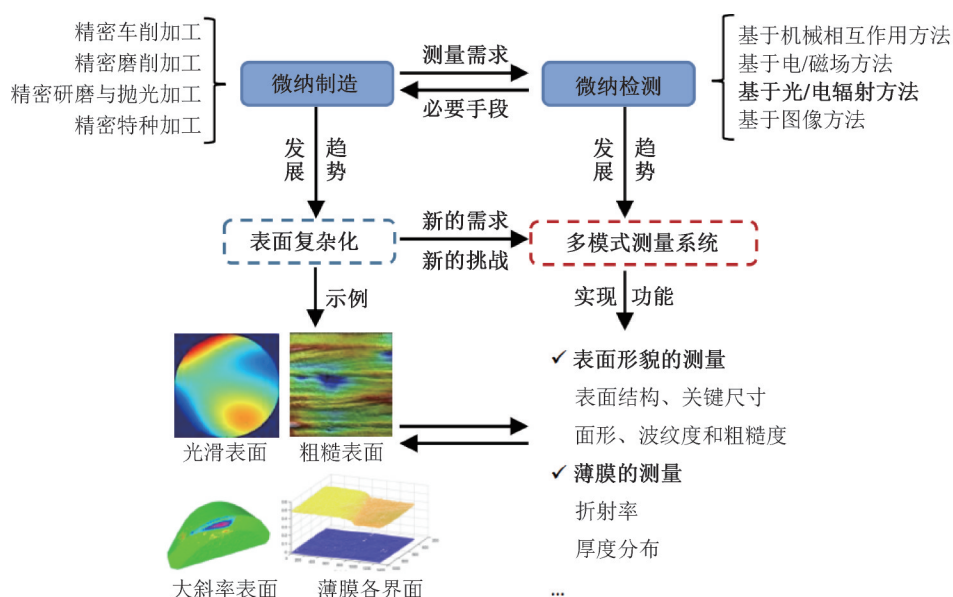


图14 多模式测量系统发展的迫切需求

Fig.14 Development requirements of multi-mode measurement system

表面形貌的光学测量方法有各自的特点和应用场合, 为满足不同场景的测量需求, 许多商业化公司进行了多模式测量系统的开发。美国 KLA 公司开发了型号 Zeta-20 的多模式光学轮廓仪, 显微结构光照明法和垂直扫描白光干涉法是系统的核心方法。同时进一步开发了面向晶圆检测的光学轮廓仪 (型号 Zeta-388), 在实现多模式检测功能的基础上, 配备了机械臂实现全自动的晶圆检测。西班牙 Sensofar 公司开发了型号 S-neox 的多模式光学轮廓仪, 集成了干涉法、共聚焦法和变焦法等测量功能。可见, 对于表面形貌的测量, 国外公司的多模式光学测量系统的开发已取得了一定的成果, 但仪器价格昂贵, 可达数十万至上百万元。

薄膜多模式测量方法的相关研究, 主要集中于白光干涉法和其他薄膜测量方法的结合^[116-123]。Yun 等人^[123]将白光干涉光谱法和椭偏法结合, 系统结构如图 15 所示, 通过快门实现两种测量模式的切换, 使用椭偏法测量薄膜各层的厚度, 并将测量结果用于分离白光干涉光谱法中薄膜表面产生的相位和薄膜本身产生的相位。最终实现了四

层薄膜各界面厚度的线轮廓测量, 并通过扫描获得了薄膜各层厚度的三维轮廓。从图 15 (a) 可以看出, 测量光束经过了两次样品表面的反射, 因此相应的模型也随之进行了修改。Kim 等人^[116]在此基础上进行了改进, 使用空间相位延迟器代替旋转偏振组件, 能够实现实时的测量。除此之外, 还有白光干涉法和反射光谱法结合^[117, 119, 122]、白光干涉法和共聚焦法结合^[120-121]等多模式测量方法。

我国有部分研究单位在进行多模式光学测量系统的开发, 如天津大学^[51]等, 但起步较晚, 距离形成商业化仪器有一定差距。

4 总结

本文对表面形貌和薄膜的光学测量方法进行综述, 主要围绕基本原理、系统结构和研究进展等方面展开, 并指出了微纳检测技术的发展趋势是开发多模式测量系统。主要内容可总结为以下几个方面:

1) 综述了表面形貌光学测量方法, 介绍了共聚焦法、显微结构光照明法、显微干涉法和变焦法, 并对这些方法的特点、应用场合等方面进行了详细的总结和对比。共聚焦法的水平分辨能力较高; 显微结构光照明法能够实现低反射率、透明样品表面形貌的测量; 显微干涉法的垂直分辨力优于 1 nm, 在高精度测量的应用场合具有重要地位; 变焦法能够测量大斜率、粗糙的表面。表面形貌方法的研究趋势为提高测量精度、提升测量速度、增强复杂表面的可测性。

2) 综述了薄膜参数光学测量方法, 介绍了椭圆偏振法、反射光谱法、共聚焦法和白光干涉法, 总结和对比了不同方法的特点和应用场合。椭圆偏振法和反射光谱法的商业化应用广泛、测量精度高; 共聚焦法能够测量毫米级的薄膜; 白光干涉法多为基于理论模型拟合的方法, 测量精度高, 并且能够实现薄膜表面/界面形貌的测量。薄膜参数测量方法的研究趋势是解决一些新型薄膜材料的测量问题, 如材料的色散模型、折射率和厚度初值未知时的测量。

3) 分析了微纳检测技术的发展趋势, 针对目前表面结构日益小型化、特征日益复杂化的现状, 以及使用多种方法/设备进行测量带来的效率低、

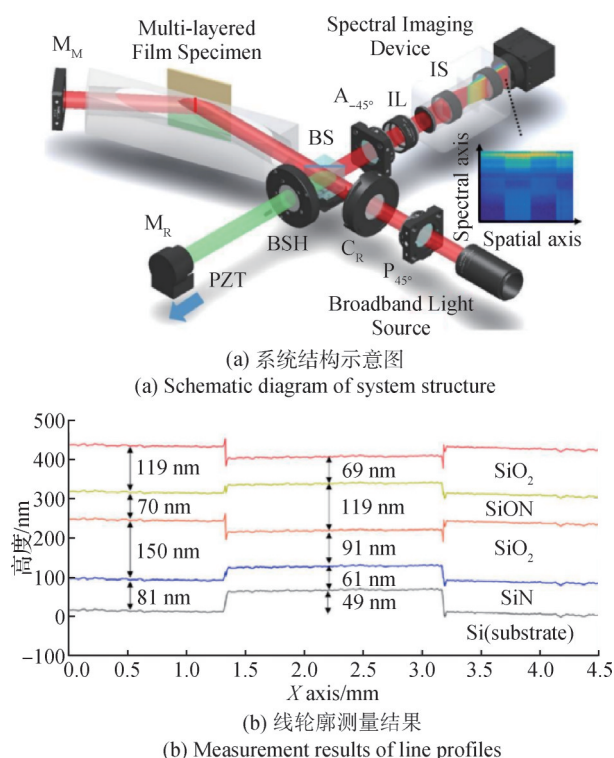


图 15 基于白光干涉光谱法和椭偏法的多模式薄膜测量系统^[123]

Fig.15 Multi-mode film measurement system combining white-light interferometry and ellipsometry

难以实现空间位置的匹配等问题, 本文指出了开发多模式光学测量系统是微纳检测技术的发展趋势。目前我国急需自主开发具有高精度、高适应性的多模式光学测量系统, 破解“卡脖子”的难题。

参考文献

- [1] GIANG D T H, DUC N H, AGNUS G, et al. Fabrication and characterization of PZT string based MEMS devices[J]. *Journal of science: advanced materials and devices*, 2016, 1(2): 214 – 219.
- [2] MARTÍN-PALMA R J, MARTÍNEZ-DUART J M. Nanotechnology for microelectronics and photonics[M]. Netherlands: Elsevier, 2017: 243 – 263.
- [3] GUO X, XUE Z, ZHANG Y. Manufacturing of 3D multi-functional microelectronic devices: challenges and opportunities[J]. *NPG Asia materials*, 2019, 11(1): 11 – 29.
- [4] LAU J H. Recent advances and new trends in nanotechnology and 3D integration for semiconductor industry[J]. *ECS transactions*, 2012, 44(1): 805 – 825.
- [5] SHANJANI Y, KANG Y, ZARNESCU L, et al. Endothelial pattern formation in hybrid constructs of additive manufactured porous rigid scaffolds and cell-laden hydrogels for orthopedic applications[J]. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 2017, 65(1): 356 – 372.
- [6] GONG S, SCHWALB W, WANG Y, et al. A wearable and highly sensitive pressure sensor with ultrathin gold nanowires[J]. *Nature communications*, 2014, 5(1): 3132.
- [7] DAVIS M E, CHEN Z, SHIN D M. Nanoparticle therapeutics: an emerging treatment modality for cancer[J]. *Nature reviews drug discovery*, 2008, 7(9): 771–782.
- [8] LI J, SHEN H, ZHU R. Method of alignment error control in free-form surface metrology with the tilted-wave-interferometer[J]. *Optical engineering*, 2016, 55(4): 44101.
- [9] FANG F Z, ZHANG X D, WECKENMANN A, et al. Manufacturing and measurement of freeform optics [J]. *CIRP annals - manufacturing technology*, 2013, 62(2): 823 – 846.
- [10] KITSARA M, KONTZIAMPASIS D, AGBULUT O, et al. Heart on a chip: micro-nanofabrication and microfluidics steering the future of cardiac tissue engineering[J]. *Micro-electronic engineering*, 2019, 203–204(1): 44–62.
- [11] TIAN Y, WECKENMANN A, HAUSOTTE T, et al. Measurement strategies in optical 3D surface measurement with focus variation[C]. *Proceedings of the 11th IMEKO TC14 symposium on laser metrology for precision measurement and inspection in industry*. Hungary: International Measurement Federation Secretariat, 2013: 336 – 340.
- [12] LEACH R. *Advances in optical surface texture metrology*[M]. Britain: IOP Publishing, 2020(3): 1 – 30.
- [13] JIANG X, SENIN N, SCOTT P J, et al. Feature-based characterisation of surface topography and its application[J]. *CIRP annals - manufacturing technology*, 2021, 70(2): 681 – 702.
- [14] NEWTON L, SENIN N, GOMEZ C, et al. Areal topography measurement of metal additive surfaces using focus variation microscopy[J]. *Additive manufacturing*, 2019, 25(1): 365 – 389.
- [15] CHEN K N, CHENG C A, HUANG W C, et al. Bonding temperature optimization and property evolution of su-8 material in metal/adhesive hybrid wafer bonding[J]. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 2011, 11(8): 6969 – 6972.
- [16] QUINTEN M. *A practical guide to surface metrology*[M]. Germany: Springer, 2019: 1 – 40.
- [17] ARDI D T, LI Y G, CHAN K H K, et al. Surface topography and the impact on fatigue performance[J]. *Surface topography: metrology and properties*, 2015, 3(1): 15007.
- [18] GRZESIK, WIT. Prediction of the functional performance of machined components based on surface topography: state of the art[J]. *Journal of materials engineering and performance*, 2016, 25(10): 4460 – 4468.
- [19] 郝梦凡, 李备. 基于条纹式转盘的共聚焦三维形貌测量技术[J]. *工具技术*, 2022, 56(4): 110 – 113.
- HAO M F, LI B. Confocal 3D topography measurement technology based on striped disk[J]. *Tool engineering*, 2022, 56(4): 110 – 113. (in Chinese)
- [20] TANAAMI T, OTSUKI S, TOMOSADA N, et al. High-speed 1-frame/ms scanning confocal microscope with a microlens and Nipkow disks[J]. *Applied optics*, 2002, 41(22): 4704 – 4708.
- [21] MERTZ J. Optical sectioning microscopy with planar or structured illumination [J]. *Nature methods*, 2011, 8(10): 811 – 819.
- [22] TIZIANI H J, ACHI R, KRÄMER R N, et al. Theoretical analysis of confocal microscopy with microlenses [J]. *Applied optics*, 1996, 35(1): 120 – 125.
- [23] GREGOR I, ENDERLEIN J. Image scanning microscopy [J]. *Current opinion in chemical biology*, 2019, 51(1): 74 – 83.
- [24] AZUMA T, KEI T. Super-resolution spinning-disk confocal microscopy [J]. *Optics express*, 2019, 27(1): 1 – 10.

- cal microscopy using optical photon reassignment[J]. *Optics express*, 2015, 23(11): 15003 – 15011.
- [25] 但超, 谢华桃, 王峥嵘, 等. 角膜激光共聚焦显微镜在单眼感染性角膜炎疾病诊断中的应用[J]. *现代生物医学进展*, 2022, 22 (8): 1444 – 1449.
- DAN C, XIE H T, WANG Z R, et al. Application of corneal laser confocal microscope in the diagnosis of monocular infectious keratitis [J]. *Progress in modern biomedicine*, 2022, 22(8): 1444 – 1449. (in Chinese)
- [26] XIE Z, TANG Y, ZHOU Y, et al. Surface and thickness measurement of transparent thin-film layers utilizing modulation-based structured-illumination microscopy[J]. *Optics express*, 2018, 26(3): 2944 – 2953.
- [27] XIE Z, TANG Y, WEI H, et al. Optical sectioning microscopy for multilayer structure with micro-scale air gaps measurement [J]. *IEEE photonics technology letters*, 2019, 31(2): 141 – 144.
- [28] XIE Z Y, TANG Y, ZHOU Y, et al. Application of two-dimensional fourier transform in structured - illumination microscopy[C]. *Proceedings of the 2017 2nd International Seminar on Applied Physics, Optoelectronics and Photonics*. China:DEStech Publications, 2017: 272 – 277.
- [29] LIU L, TANG Y, XIE Z, et al. Fast surface profilometry utilizing structured illumination microscopy based on the time-domain phase-shift technique [J]. *Applied optics*, 2019, 58(30): 8180 – 8186.
- [30] XIE Z, TANG Y, DENG Q, et al. Single-exposure modulation-based structured illumination microscopy using spatial area phase-shift[J]. *Optics and lasers in engineering*, 2022, 150(1): 106855.
- [31] XIE Z, TANG Y, FENG J, et al. Accurate surface profilometry using differential optical sectioning microscopy with structured illumination[J]. *Optics express*, 2019, 27 (8): 11721 – 11733.
- [32] HAN C, TANG Y, XIE Z, et al. Fast structured illumination microscopy with a large dynamic measurement range[J]. *Applied optics*, 2021, 60(17): 5169 – 5176.
- [33] 胡小唐, 傅星, 刘庆纲, 等. 微纳检测技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2009.
- HU X T, FU X, LIU Q G, et al. Micro-nano detection technology[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2009. (in Chinese)
- [34] NOVAK M, MILLER D J, BROCK N, et al. Analysis of a micropolarizer array-based simultaneous phase-shifting interferometer[J]. *Applied optics*, 2005, 44(32): 6861 – 6868.
- [35] GUO R, YAO B, GAO P, et al. Parallel on-axis phase-shifting holographic phase microscopy based on reflective point-diffraction interferometer with long-term stability[J]. *Applied optics*, 2013, 52(15): 3484 – 3489.
- [36] LI J, LU X, ZHANG Q, et al. Dual-channel simultaneous spatial and temporal polarization phase-shifting interferometry[J]. *Optics express*, 2018, 26(4): 4392 – 4400.
- [37] SIVAKUMAR N R, TAN B, VENKATAKRISHNAN K. Measurement of surface profile in vibrating environment with instantaneous phase shifting interferometry [J]. *Optics communications*, 2006, 257(2): 217 – 224.
- [38] 马龙, 郭彤, 赵健, 等. 基于白光相移干涉术的微结构几何尺寸表征[J]. *纳米技术与精密工程*, 2011, 9 (1): 39 – 43.
- MA L, GUO T, ZHAO J, et al. MEMS Geometric parameters measurement based on white light phase shifting interferometry [J]. *Nanotechnology and precision engineering*, 2011, 9(1): 39 – 43. (in Chinese)
- [39] HARIHARAN P, OREB B F, EIJU T. Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm[J]. *Applied optics*, 1987, 26(13): 2504 – 2506.
- [40] VILLALOBOS-MENDOZA B, GRANADOS-AGUSTIN F S, AGUIRRE-AGUIRRE D, et al. Phase shifting interferometry using a spatial light modulator to measure optical thin films[J]. *Applied optics*, 2015, 54(26): 7997 – 8003.
- [41] HARASAKI A, SCHMIT J, WYANT J C. Improved vertical-scanning interferometry[J]. *Applied optics*, 2000, 39 (13): 2107 – 2115.
- [42] SERIZAWA T, SUZUKI T, CHOI S, et al. 3-D surface profile measurement using spectral interferometry based on continuous wavelet transform [J]. *Optics communications*, 2017, 396(1): 216 – 220.
- [43] GIAN TO G, SALZENSTEIN F, MONTGOMERY P. Comparison of envelope detection techniques in coherence scanning interferometry [J]. *Applied optics*, 2016, 55 (24): 6763 – 6774.
- [44] HUANG Y, GAO J, ZHANG L, et al. Fast template matching method in white-light scanning interferometry for 3D micro-profile measurement[J]. *Applied optics*, 2020, 59(4): 1082 – 1091.
- [45] KISELEV I, KISELEV E I, DREXEL M, et al. Precision of evaluation methods in white light interferometry. Correlation method[J]. *Measurement*, 2018, 123(1): 125 – 128.

- [46] VO Q, FANG F, ZHANG X, et al. Surface recovery algorithm in white light interferometry based on combined white light phase shifting and fast fourier transform algorithms[J]. *Applied optics*, 2017, 56(29): 8174 – 8185.
- [47] LEI Z, LIU X, CHEN L, et al. A novel surface recovery algorithm in white light interferometry[J]. *Measurement*, 2016, 80(1): 1 – 11.
- [48] JEON J W, JEONG H W, JEONG H B, et al. High-speed polarized low coherence scanning interferometry based on spatial phase shifting[J]. *Applied optics*, 2019, 58(20): 5360 – 5365.
- [49] PAVLIČEK P, KUČERA J. Coherence scanning interferometry with a focus - tunable lens [J]. *Applied optics*, 2019, 58(34): G91 – G95.
- [50] DENG Q, LIU J, TANG Y, et al. Spatial modulation-assisted scanning white - light interferometry for noise suppression[J]. *IEEE photonics technology letters*, 2018, 30(4): 379 – 382.
- [51] GUO T, GUO X, WEI Y. Multi - mode interferometric measurement system based on wavelength modulation and active vibration resistance[J]. *Optics express*, 2021, 29(22): 36689 – 36703.
- [52] CHEN D, SCHMIT J, NOVAK M. Real-time scanner error correction in white light interferometry [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9276(1): 92760I.
- [53] TEALE C, BARBASTATHIS G, SCHMIDT M A. Vibration compensated, scanning white light interferometer for in situ depth measurements in a deep reactive ion etcher[J]. *Journal of microelectromechanical systems*, 2019, 28(3): 441 – 446.
- [54] TERESCHENKO S, TERESCHENKO P, TERESCHENKO L, et al. Passive vibration compensation in scanning white-light interferometry [J]. *Applied optics*, 2016, 55(23): 6172 – 6182.
- [55] JIANG X, WANG K, GAO F, et al. Fast surface measurement using wavelength scanning interferometry with compensation of environmental noise [J]. *Applied optics*, 2010, 49(15): 2903 – 2909.
- [56] GUO T, ZHAO G, TANG D, et al. High-accuracy simultaneous measurement of surface profile and film thickness using line-field white-light dispersive interferometer[J]. *Optics and lasers in engineering*, 2021, 137(1): 106388.
- [57] TANG D, GAO F, JIANG X. On-line surface inspection using cylindrical lens-based spectral domain low-coherence interferometry[J]. *Applied optics*, 2014, 53(24): 5510 – 5516.
- [58] ZHANG T, GAO F, JIANG X. Surface topography acquisition method for double-sided near-right-angle structured surfaces based on dual-probe wavelength scanning interferometry[J]. *Optics express*, 2017, 25(20): 24148 – 24156.
- [59] ZHAO H, ZHANG Z, XU X, et al. Three-dimensional imaging by frequency - comb spectral interferometry [J]. *Sensors*, 2020, 20(6): 1743.
- [60] JANG H S, YUN G, MUTAHIRA H, et al. A new focus measure operator for enhancing image focus in 3D shape recovery [J]. *Microscopy research and technique*, 2021, 84(10): 2483 – 2493.
- [61] LEE I, MAHMOOD M T, CHOI T. Robust focus measure operator using adaptive log-polar mapping for three-dimensional shape recovery[J]. *Microscopy and microanalysis*, 2015, 21(2): 442 – 458.
- [62] YAN T, WU P, QIAN Y, et al. Multiscale fusion and aggregation PCNN for 3D shape recovery [J]. *Information sciences*, 2020, 536(1): 277 – 297.
- [63] KALEEM M, MAHMOOD M T. Combining focus measures through genetic algorithm for shape from focus[C]. *Proceedings of the 5th International Conference on Information Science and Applications*. United States: IEEE Computer Society, 2014: 6847377.
- [64] LEE I, SHIM S, CHOI T. Improving focus measurement via variable window shape on surface radiance distribution for 3D shape reconstruction[J]. *Optics and lasers in engineering*, 2013, 51(5): 520 – 526.
- [65] PERTUZ S, PUIG D, GARCIA M A. Analysis of focus measure operators for shape-from-focus[J]. *Pattern recognition*, 2013, 46(5): 1415 – 1432.
- [66] MARTÍNEZ P, BERMUDEZ C, CARLES G, et al. Metrological characterization of different methods for recovering the optically sectioned image by means of structured light [J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11782(1): 117820Q.
- [67] BERMUDEZ C, P MARTÍNEZ, CADEVALL C, et al. Active illumination focus variation [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11056(1): 110560W.
- [68] SANTOSO T, SYAM W P, DARUKUMALLI S, et al. Development of a compact focus variation microscopy sensor for on-machine surface topography measurement[J]. *Measurement*, 2022, 187(1): 110311.
- [69] SANTOSO T, SYAM W P, DARUKUMALLI S, et al. On-machine focus variation measurement for micro-scale hybrid surface texture machining[J]. *The international jour-*

- nal of advanced manufacturing technology, 2020, 109(9-12): 2353 – 2364.
- [70] RIEDL M, DANZL R, FELBERBAUER M, et al. High-resolution geometry measurement with a collaborative robot [J]. MM science journal, 2019(1): 3386 – 3392.
- [71] DANZL R, LANKMAIR T, CALVEZ A, et al. Robot solutions for automated 3D surface measurement in production[C]. Proceedings of the 18th International Congress of Metrology. French: EDP Sciences, 2017: 15002.
- [72] DANZL R, HELMLI F, SCHERER S. Focus variation-a robust technology for high resolution optical 3D surface metrology[J]. Strojniški vestnik-journal of mechanical engineering, 2011, 5(3): 245–256.
- [73] HWANG C S. Prospective of semiconductor memory devices: from memory system to materials [J]. Advanced electronic materials, 2015, 1(6): 1400056.
- [74] JOO K, PARK H. Recent progress on optical tomographic technology for measurements and inspections of film structures[J]. Micromachines, 2022, 13(7): 1074.
- [75] TOLMACHEV V A. Determining the thickness of thick transparent films by multiangle ellipsometry [J]. Journal of optical technology, 2002, 69(1):58 – 60.
- [76] URBAN I F. Ellipsometry algorithm for absorbing films[J]. Applied optics, 1993, 32(13): 2339 – 2344.
- [77] HASSANI K, ABBASZADEH K. Thin film characterization with a simple Stokes ellipsometer[J]. European journal of physics, 2015, 36(2): 25017.
- [78] LI K, ZHANG R, JING N, et al. Fast and full range measurements of ellipsometric parameters using a 45° dual-drive symmetric photoelastic modulator [J]. Optics express, 2017, 25(5): 5725 – 5733.
- [79] KIM D H, YUN Y H, JOO K. SPARSE (spatially phase-retarded spectroscopic ellipsometry) for real - time film analysis[J]. Optics letters, 2017, 42(16): 3189 – 3192.
- [80] DARAKCHIEVA V, BOOSALIS A, ZAKHAROV A A, et al. Large - area microfocal spectroscopic ellipsometry mapping of thickness and electronic properties of epitaxial graphene on Si-and C-face of 3C-SiC(111)[J]. Applied physics letters, 2013, 102(21): 213116.
- [81] SEO Y B, YUN Y H, JOO K. 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.
- [82] KIM D H, YUN Y H, JOO K. 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.
- [83] BORN M, WOLF E, HECHT E. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light[J]. Physics today, 2000, 53(10): 77–78.
- [84] KIM K, KIM S, KWON S, et al. Volumetric thin film thickness measurement using spectroscopic imaging reflectometer and compensation of reflectance modeling error[J]. International journal of precision engineering and manufacturing, 2014, 15(9): 1817 – 1822.
- [85] PRADEEP J A, AGARWAL P. Determination of thickness, refractive index, and spectral scattering of an inhomogeneous thin film with rough interfaces [J]. Journal of applied physics, 2010, 108(4): 43515.
- [86] 廖荣, 张海燕, 杨铁铮, 等. 光反射干涉谱新方法测试薄膜厚度和光学常数[J]. 中国测试, 2013, 39 (6): 10 – 13.
- LIAO R, ZHANG H Y, YANG T Z, et al. New method for measuring thickness and optical constants of thin film based on light reflection interference spectrum [J]. China measurement & test, 2013, 39(6):10 – 13. (in Chinese)
- [87] KIM K, KWON S, PAHK H J. Fast Analysis of film thickness in spectroscopic reflectometry using direct phase extraction[J]. Current optics and photonics, 2017, 1(1): 29 – 33.
- [88] OHLÍDAL M, OHLÍDAL I, Klapetek P, et al. Measurement of the thickness distribution and optical constants of non-uniform thin films[J]. Measurement science and technology, 2011, 22(8): 85104.
- [89] LU H, WANG M R, WANG J, et al. Tear film measurement by optical reflectometry technique[J]. Journal of biomedical optics, 2014, 19(2): 27001.
- [90] HANCHAK M S, VANGSNESS M D, BYRD L W, et al. Profile measurements of thin liquid films using reflectometry[J]. Applied physics letters, 2013, 103(21): 211607.
- [91] COSCI A, QUERCIOLO F, FARNESI D, et al. Confocal reflectance microscopy for determination of microbubble resonator thickness [J]. Optics express, 2015, 23(13): 16693 – 16701.
- [92] LI S, THORSEN T, XU Z, et al. Microvalve thickness and topography measurements in microfluidic devices by white-light confocal microscopy [J]. Applied optics, 2009, 48(27): 5088 – 5094.
- [93] CHOI Y, YOO H, KANG D. Large-area thickness measurement of transparent multi-layer films based on laser

- confocal reflection sensor[J]. *Measurement*, 2020, 153(1): 107390.
- [94] ILEVIK, WAYNANTR W, BYRNESK R, et al. Dual-confocal fiber-optic method for absolute measurement of refractive index and thickness of optically transparent media[J]. *Optics letters*, 2002, 27(19): 1693 – 1695.
- [95] LI M, WAN D, LEE C. Application of white-light scanning interferometer on transparent thin-film measurement [J]. *Applied optics*, 2012, 51(36): 8579 – 8586.
- [96] LEE H J, HAN S H, AN S Y, et al. Measurement of the refractive index of a transparent film using interferometry[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11056(1): 110563J.
- [97] CLAVEAU R, MONTGOMERY P, FLURY M, et al. Local inspection of refractive index and thickness of thick transparent layers using spectral reflectance measurements in low coherence scanning interferometry[J]. *Optical materials*, 2018, 86(1): 100 – 105.
- [98] KITAGAWA K. Surface and thickness profile measurement of a transparent film by three - wavelength vertical scanning interferometry[J]. *Optics letters*, 2014, 39(14): 4172 – 4175.
- [99] DONG J T, LU R S. Sensitivity analysis of thin-film thickness measurement by vertical scanning white-light interferometry[J]. *Applied optics*, 2012, 51(23): 5668 – 5675.
- [100] MANISCALCO B, KAMINSKI P M, WALLS J M. Thin film thickness measurements using scanning white light interferometry[J]. *Thin solid films*, 2014, 550(1): 10 – 16.
- [101] GUO X, GUO T, YUAN L. Measurement of film structure using time-frequency-domain fitting and white-light scanning interferometry[J]. *Machines*, 2021, 9(12): 336.
- [102] PARK J, KIM J, AHN H, et al. A review of thickness measurements of thick transparent layers using optical interferometry [J]. *International journal of precision engineering and manufacturing*, 2019, 20(1): 463 – 477.
- [103] JIN J, MAENG S, PARK J, et al. Fizeau-type interferometric probe to measure geometrical thickness of silicon wafers[J]. *Optics express*, 2014, 22(19): 23427 – 23432.
- [104] JIN J, KIM J W, KANG C, et al. Thickness and refractive index measurement of a silicon wafer based on an optical comb[J]. *Optics express*, 2010, 18(17): 18339 – 18846.
- [105] BAE J, PARK J, AHN H, et al. Total physical thickness measurement of a multi-layered wafer using a spectral-domain interferometer with an optical comb [J]. *Optics express*, 2017, 25(11): 12689 – 12697.
- [106] PARK J, BAE J, KIM J, et al. Physical thickness and group refractive index measurement of individual layers for double-stacked microstructures using spectral-domain interferometry[J]. *Optics communications*, 2019, 431(1): 181 – 186.
- [107] ZHANG J, XIONG S, ZHANG R, et al. Fast measurement of the thickness and group refractive index distribution of solid plates by line-field dispersive interferometry [J]. *Optics express*, 2022, 30(18): 33274 – 33287.
- [108] 吴冠豪, 周思宇, 杨越棠, 等. 双光梳测距及其应用[J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 1504002.
- WU G H, ZHOU S Y, YANG Y T, et al. Dual-comb ranging and its applications[J]. *Chinese journal of lasers*, 2021, 48(15): 1504002. (in Chinese)
- [109] GHIM Y, KIM S. Thin-film thickness profile and its refractive index measurements by dispersive white-light interferometry[J]. *Optics express*, 2006, 14(24): 11885 – 11891.
- [110] GHIM Y, RHEE H, YANG H, et al. Thin-film thickness profile measurement using a Mirau-type low-coherence interferometer [J]. *Measurement science & technology*, 2013, 24(7): 75002.
- [111] GUO T, YUAN L, CHEN Z, et al. Single point Linnik white-light spectral microscopic interferometer for surface measurement[J]. *Surface topography: metrology and properties*, 2018, 6(3): 34008.
- [112] GUO T, CHEN Z, LI M, et al. Film thickness measurement based on nonlinear phase analysis using a Linnik microscopic white-light spectral interferometer [J]. *Applied optics*, 2018, 57(12): 2955 – 2961.
- [113] DEBNATH S K, KOTHIYAL M P, SCHMIT J, et al. Spectrally resolved white-light phase-shifting interference microscopy for thickness-profile measurements of transparent thin film layers on patterned substrates[J]. *Optics express*, 2006, 14(11): 4662 – 4667.
- [114] FANG F Z, ZHANG X D, GAO W, et al. Nanomanufacturing - perspective and applications [J]. *CIRP annals - manufacturing technology*, 2017, 66(2): 683 – 705.
- [115] FANG F. Atomic and close-to-atomic scale manufacturing —A trend in manufacturing development[J]. *Frontiers of mechanical engineering*, 2016, 11(4): 325 – 327.
- [116] KIM J S, JOO K N. Single-shot characterization of multi-film structures based on combined spectral interferometry and spatially recorded spectroscopic ellipsometry[J]. *Applied optics*, 2019, 58(21): 5637 – 5643.
- [117] HLUBINA P. Spectral reflectometry and white-light interferometry used to measure thin films [J]. *Proceedings of*

- SPIE, 2004, 5457(1): 756 – 764.
- [118] LU H, WANG M R, MANNS F, et al. Combination of optical coherence tomography and reflectometry technique for eye measurement [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8567(1): 85672C.
- [119] ARENDS A A, GERMAIN T M, OWENS J F, et al. Simultaneous reflectometry and interferometry for measuring thin-film thickness and curvature [J]. Review of scientific instruments, 2018, 89(5): 55117.
- [120] OHMI M, NISHI H, KONISHI Y, et al. High-speed simultaneous measurement of refractive index and thickness of transparent plates by low-coherence interferometry and confocal optics [J]. Measurement science & technology, 2004, 15(8): 1531 – 1535.
- [121] KIM S, NA J, KIM M J, et al. Simultaneous measurement of refractive index and thickness by combining low-coherence interferometry and confocal optics [J]. Optics express, 2008, 16(8): 5516 – 5526.
- [122] JO T, KIM K, KIM S, et al. Thickness and surface measurement of transparent thin-film layers using white light scanning interferometry combined with reflectometry [J]. Journal of the optical society of Korea, 2014, 18(3): 236 – 243.
- [123] YUN Y H, JOO K. Novel combined measurement system to

characterize film structures by spectral interferometry and ellipsometry [J]. Optics express, 2018, 26(26): 34396 – 34411.

(本文编辑: 郑燕)



第一作者: 袁琳 (1993—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为表面光学测量方法。



通讯作者: 郭彤 (1977—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光学精密测量技术。