

激光与光电子学进展

用于表面形貌测量的扫描白光干涉技术进展

苏榕^{1*}, 刘嘉宇^{1,2}, 乔潇悦^{1,3}, 简振雄^{1,2}, 张政^{1,4}, 温荣贤¹, 陈成¹, 任明俊², 朱利民²¹中国科学院上海光学精密机械研究所精密光学制造与检测中心, 上海 201800;²上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240;³中国科学院上海光学精密机械研究所, 中国—俄罗斯“一带一路”激光科学联合实验室, 上海 201800;⁴上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093

摘要 扫描白光干涉术是目前最精确的表面形貌测量技术之一,被广泛应用于工业与科研领域。从发明至今的三十余年间,在精密光学、半导体、汽车及航天等先进制造领域的需求牵引下,该技术不断取得新的进展与突破。本文从技术应用、方法和算法创新、系统设计、理论模型、校准与误差补偿等方面,总结了过去二十年扫描白光干涉技术的重要进展,对该领域进一步发展提出了展望。

关键词 测量; 白光干涉术; 表面形貌; 计量学; 光学成像; 干涉显微术; 先进制造

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223228

Advances in Scanning White Light Interferometry for Surface Topography Measurement

Su Rong^{1*}, Liu Jiayu^{1,2}, Qiao Xiaoyue^{1,3}, Jian Zhenxiong^{1,2}, Zhang Zheng^{1,4}, Wen Rongxian¹,
Chen Cheng¹, Ren Mingjun², Zhu Limin²¹Precision Optical Manufacturing and Testing Center, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;²School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;³China-Russia Belt and Road Joint Laboratory on Laser Science, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;⁴School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract Scanning white light interferometry is one of the most accurate surface topography measurement techniques. It is widely used in various industrial and scientific research fields. Since its invention more than thirty years ago, the progress and breakthroughs of this technique have been continuously made, driven by the demands of advanced manufacturing sectors such as precision optics, semiconductors, automotive and aerospace. This paper summarizes the important progress of scanning white light interferometry in the past two decades from the aspects of its applications, new measurement methods and algorithms, system designs, theoretical modeling, calibration and error compensation, and puts forward the prospect of further development in this field.

Key words measurement; white light interferometry; surface topography; metrology; optical imaging; interference microscopy; advanced manufacturing

1 引言

扫描白光干涉术(scanning white light interferometry,

SWLI)是用于测量材料表面形貌最精确的技术之一,属于反射式干涉显微术的一种类型。在干涉测量与成像技术发展的历程中,许多其他技术和扫描白光干涉

收稿日期: 2022-12-01; 修回日期: 2022-12-19; 录用日期: 2022-12-22; 网络首发日期: 2022-12-31

基金项目: 科技部国家重点研发计划(2022YFE0204800)、中国科学院国际伙伴计划项目(181231KYSB20200040)、国家自然科学基金(62105204)、上海市高新技术领域项目(22511102103)

通信作者: *surong@siom.ac.cn

术拥有相同或非常相似的工作原理。这些技术被冠以不同的名称,例如相干雷达(coherence radar),垂直扫描干涉术(vertical scanning interferometry),白光相移干涉术(white light phase shifting interferometry),全视场时域光学相干层析术(full-field time-domain optical coherence tomography)以及相干扫描干涉术(coherence scanning interferometry, CSI)。其中,CSI被ISO-25178标准推荐作为白光干涉这类技术在表面测量学领域的术语。然而,考虑到扫描白光干涉术是一个被广泛使用的名称,尤其在中文学术与工程研究领域,在本文中我们将使用该术语。

在使用扫描白光干涉仪测量物体表面形貌时,需要沿光轴方向对物体进行扫描,在扫描过程中,物体表面逐渐通过成像物镜的焦平面。通常,扫描器每推进大约 $\lambda/8$ 的距离(λ 为光源中心波长),相机会被触发并采集一幅图像。在整个扫描过程中相机记录下一系列二维图像(图1),并依次堆叠形成三维干涉图像数据,再逐像素点地进行表面形貌重构。该技术的

首要特点就是宽带光源的使用,例如发光二极管(LED)或卤素光源,这类光源的相干长度远小于激光光源的相干长度。因此,扫描白光干涉仪的干涉信号被快速衰减的相干包络调制,仅在探测光和参考光的光程差接近零时出现。通过判断相干包络峰值的位置,可以在亚微米级不确定度范围内计算出待测表面的高度。如果结合条纹的相位信息,可以把表面高度测量不确定度降低至亚纳米量级。值得注意的是,相干包络的形状并不是只由光源光谱决定的,也取决于成像系统的数值孔径(NA)及空间相干度,这一点会在第4节中详细说明。扫描白光干涉术中相干包络的峰值位置可以用于确定条纹级次,找出零级条纹,实现绝对距离的测量,既可以避免使用相位解包裹技术,又可以消除激光干涉术中常见的 2π 混淆(2π ambiguity)现象。这一特性赋予了扫描白光干涉术大跨度的应用场景,包括测量平整光滑的表面、含有台阶和断层的表面、粗糙表面以及具有复杂曲率和斜率变化的表面。

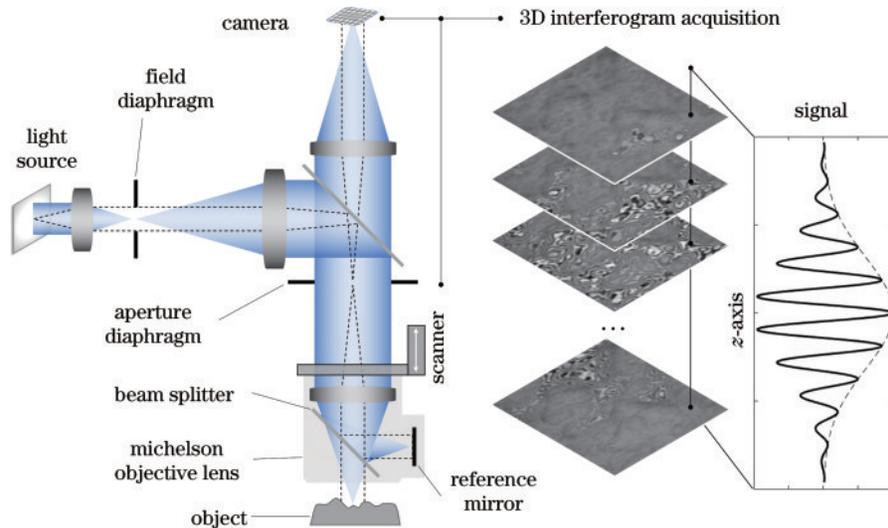


图1 扫描白光干涉仪光路结构与成像原理示意图

Fig. 1 Schematic optical setup of SWLI system and its image formation principle

扫描白光干涉术另一个鲜明的技术特点在于横向分辨率与纵向测量精度的相对独立性。作为一种显微成像技术,扫描白光干涉仪与传统宽场显微镜的主要区别在于干涉物镜的使用,因此,也被称为“显微镜下的干涉仪”。常用的显微物镜主要为Mirau和Michelson型(图2)。前者主要用于大NA和10~100倍放大率的情况,后者适用于小NA和小于10倍放大率的情况。扫描白光干涉仪也可以采用Linnik干涉仪架构,在干涉仪的探测和参考臂上分别使用两枚相同的显微物镜。Linnik白光干涉系统具有长工作距的优点,尤其体现在为了实现高分辨率成像而使用大NA物镜的情况下。

在无光学像差,即衍射受限条件下,根据Abbe对成像分辨率的定义,基于非相干照明的光学显微镜可以达到的横向分辨率极限为 $\lambda/2N_A$ (N_A 为系统数值孔

径)。大NA系统分辨率高但视场小,小NA系统虽然分辨率低但拥有大视场的优势,这一点对扫描白光干涉仪也不例外。然而,在表面特征的横向尺寸大于系统横向分辨率的情况下,扫描白光干涉仪纵向测量精度取决于对干涉条纹的分析,而不受限于成像系统的景深(可估算为 λ/N_A^2)。因此,该技术可以在使用低倍物镜进行大视场成像的同时,不损失纵向测量精度。这是非干涉成像系统通常不具有的特点。

现代的扫描白光干涉技术自20世纪80年代末发明以来得以不断发展。不少学者针对该技术的原理和应用撰写了综述文章^[1-9]。本文主要聚焦于扫描白光干涉术近二十年来的技术进展,需要了解该技术基本工作原理的读者可以参考上述文章。本文第2节介绍了扫描白光干涉术在工业和科研领域的应用,第3节

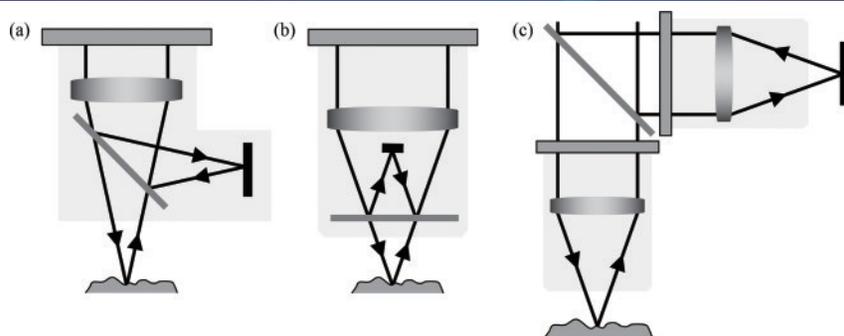


图 2 扫描白光干涉术常用干涉仪架构。(a)Michelson 型;(b)Mirau 型;(c)Linnik 型

Fig. 2 Most commonly used types of interferometers in SWLI. (a) Michelson; (b) Mirau; (c) Linnik

总结了测量方法、算法和系统设计方面的创新,第 4 节总结了理论模型以及成像机理方面的研究进展,第 5 节介绍了在表面形貌测量中的校准与误差补偿方法,最后做出了总结与展望。

2 技术应用

基于扫描白光干涉术的表面形貌测量技术已被广泛应用于半导体、光学、汽车、航空航天、医疗设备和能源等制造领域。本节从表面纹理参数表征、高斜率表面、增材制造表面和膜层测量,以及功能型成像几个方面总结了扫描白光干涉术在工业和科研中的应用。

2.1 表面纹理参数表征

使用扫描白光干涉术可以测量的表面类型多种多样,从测量得到的表面形貌图可以计算分析表面微观纹理的参数,例如表征用于天文观测的大型天线面板的表面纹理^[10]、表征标准质量的 316 不锈钢的表面纹理^[11]、测量和控制燃油注射系统的表面质量^[12]、通过分析岩石表面纹理进行矿物鉴定并研究不同地表的岩石运动^[13]、分析水泥浆表面纹理对微生物生长的影响^[14]、测量涡轮机叶片表面形貌^[15]、检测毛玻璃表面质量和亚表面缺陷^[16-17],以及检测激光惯性约束聚变实验中靶丸表面缺陷^[18]。

扫描白光干涉术结合正弦调制移相技术可以提高信噪比(SNR),并将噪声密度降低到 $0.1 \text{ nm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 水平,适用于测量超光滑表面的粗糙度^[19]。在生物医学领域:Mabwa 等^[20]研究了 Ge-Sb-Se 复合玻璃光纤的表面形貌对材料细胞毒性反应的影响;Lazzini 等^[21]表征了食品工业中通过特殊设计和激光加工的表面,研究了表面纹理参数与激光加工参数之间的关系,以及表面纹理对细胞粘附性和表面生物膜形成的影响;Speidel 等^[22]用扫描白光干涉仪测量电化学加工后的表面,利用表面梯度信息快速表征晶胞方向分布,其结果可与电子背向散射衍射法相媲美;Bermudez 等^[23]结合反馈分析和有限元建模,通过在激光加工机床内集成一个小型化白光干涉测头,实现了在机检测和闭环激光加工过程。在关键尺寸(critical dimension, CD)

为微米或亚微米量级的超表面测量中,为解决微结构台阶边缘产生的测量误差问题:Sun 等^[24]提出了一种基于边缘定位二值化方法和 Morlet 小波变换的表面重构算法,实验结果表明该方法对不同占空比的超表面结构测量结果与扫描电子显微镜一致;Xin 等^[25]利用卷积神经网络处理扫描白光干涉条纹以获取丰富的强度和相位信息,通过测量 1800 lp/mm 全息光栅验证了该方法能够提高横向分辨率。

2.2 高斜率表面测量

当待测表面是完美镜面时,如果其倾斜角度 β 大于 $\arcsin(N_A)$,则反射光线将超出物镜可接受的圆锥范围(图 3),这种情况下扫描白光干涉仪可以测到的最大表面斜率由物镜 NA 决定。

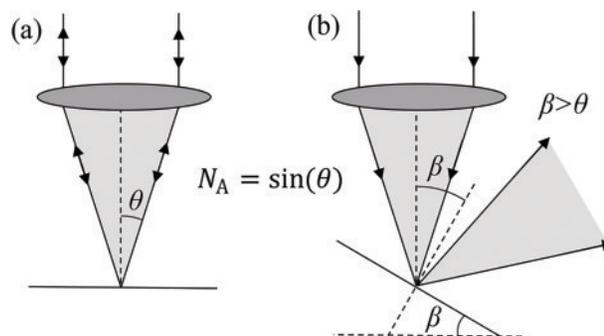


图 3 扫描白光干涉仪测量倾斜镜面的 NA 圆锥极限。(a)倾斜角度为 0° ; (b)倾斜角度 β 大于 θ

Fig. 3 NA cone limit of SWLI when measuring a tilted optical flat. (a) 0° tilt; (b) the tilt angle β larger than the NA cone limit angle θ

随着技术进步,最先进的扫描白光干涉仪能够测量斜率超出传统 NA 圆锥极限的非镜面表面^[26-27],这是因为物镜收集了来自倾斜表面微观纹理的背向散射光,并通过高动态范围(high dynamic range, HDR)测量技术或信号过采样技术提高散射信号的信噪比,获得足以重构表面的干涉条纹。这些技术将在第 3 节中展开讨论,在小节 5.6 中会介绍高斜率表面测量的建模方法。

2.3 增材制造表面测量

表面形貌可以看作是增材制造工艺流程的“指纹”特征。通过研究金属粉末床熔合 (powder bed fusion, PBF) 工艺中的焊接轨迹、焊接波纹、附着颗粒和表面凹陷等表面纹理特征,可以提取有用的信息来优化增材制造工艺,从而提高产品质量并减少能源和材料的消耗^[28-29]。但是,增材制造的表面形貌通常非常复杂,包含大量局部高斜率和松散颗粒状的表面结构。无论是接触式还是非接触式方法,精

确测量增材制造表面是一项非常挑战的任务。图 4 展示了使用高端商业扫描白光干涉仪测量的增材制造表面。

Senin 等^[30]使用多种光学和非光学技术测量了金属增材制造表面并对结果进行了比较,包括成像共聚焦显微镜、变焦显微镜、扫描白光干涉仪和 X 射线计算层析。通过分析和比较测量结果的差异,增加对增材制造表面形貌测量机理的理解。

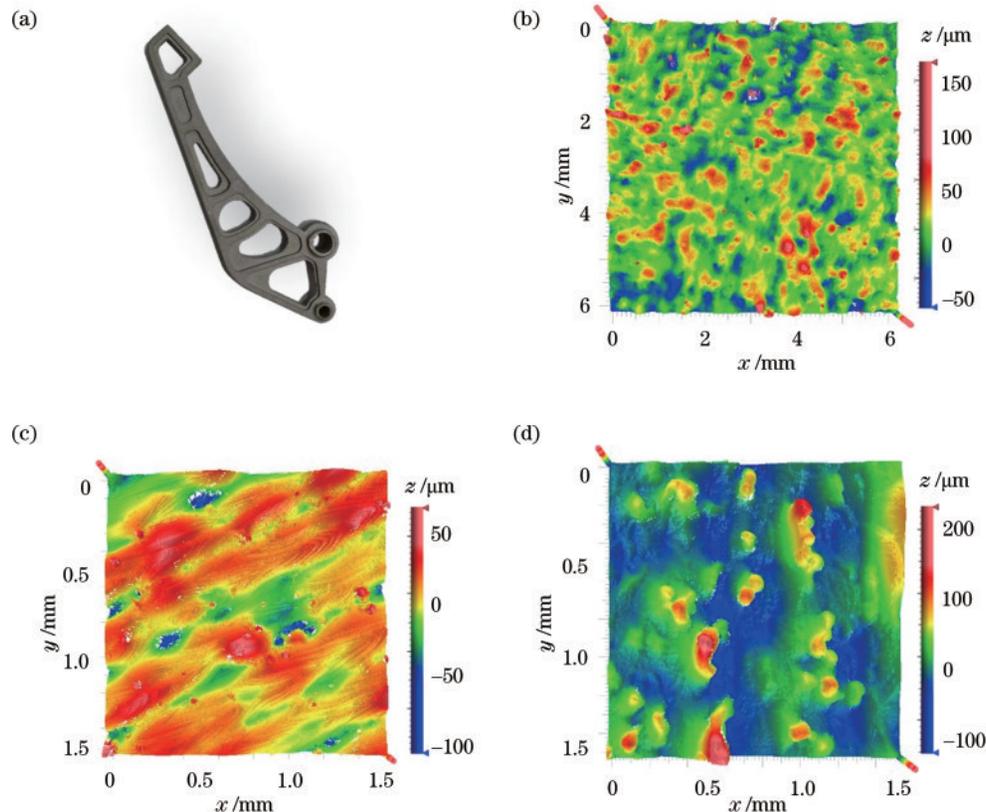


图 4 通过扫描白光干涉仪测量的增材制造表面示例。(a)PBF Al-Si-10Mg 样品实物图 (来自诺丁汉大学 Helia Hooshmand 博士); (b)激光 PBF Al-Si-10Mg 样品表面;(c)激光 PBF Ti-6Al-4V 样品表面;(d)电子束 PBF Ti-6Al-4V 样品表面

Fig. 4 Additively manufactured surfaces measured by SWLI. (a) A PBF Al-Si-10Mg sample (image courtesy of Dr Helia Hooshmand at University of Nottingham); (b) laser PBF Al-Si-10Mg sample surface; (c) laser PBF Ti-6Al-4V sample surface; (d) electron beam PBF Ti-6Al-4V sample surface

利用高动态范围测量和信号过采样技术, Fay 等^[31]使用扫描白光干涉仪实现了增材制造塑料和金属零件的高质量测量。通过对不同材料和工艺的增材制造金属表面进行一系列实验, Gomez 等^[32]定量分析了上述两种技术的测量效果,提供了有关数据覆盖率、测量面积和测量时间的优化建议。

另外, Gomez 等^[33]使用扫描白光干涉仪对喷墨三维打印 (inkjet 3D printing) 的透明聚合物的形貌演变进行了实验研究,包括点、线、膜和蜂窝状聚合物表面结构,旨在通过表面形貌测量对喷墨 3D 打印工艺进行控制和优化。

2.4 膜层测量

很多材料表面覆盖有功能型膜层,例如光学元件表面的增透和增反膜,以及金属表面的陶瓷保护膜。通常,膜层上表面与空气接触,其折射率差异能够产生足够清晰的干涉条纹。膜层的下表面与衬底材料接触,二者折射率差异决定了白光干涉条纹的对比度。测量亚表面界面还需要仪器具有足够高的光学层析能力,一般来说,这种层析能力主要取决于白光干涉仪相干包络的宽度。

研究表明,扫描白光干涉仪适用于测量透明或半透明的膜层(如图 5 所示案例),例如二氧化硅单层膜

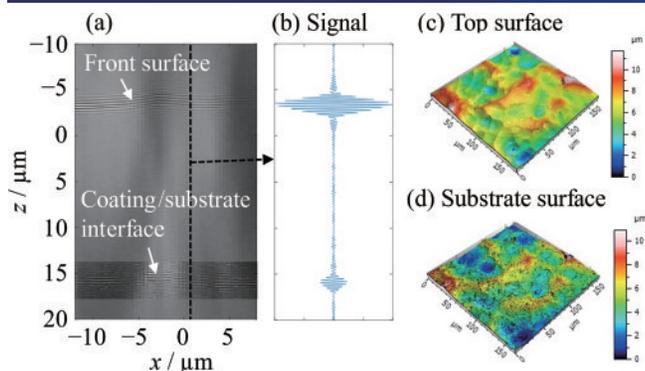


图 5 扫描白光干涉仪测量金属表面的陶瓷膜层^[44]。(a)三维干涉条纹截面图；(b)表面一点沿 z 轴的一维干涉信号；(c)(d)膜层上下表面的形貌图,可用于计算膜层厚度分布

Fig. 5 SWLI measurement of a ceramic coating on a metal surface^[44]. (a) Cross-sectional slice through the 3D SWLI interferogram; (b) one-dimensional interference signal at a single surface point along the z -axis; (c) (d) topography of the top surface and the substrate, from which the coating layer thickness can be calculated

上下表面的形貌和厚度^[34]、硅晶圆上的膜层^[35]、透明软质光刻胶薄膜^[36]、半透明粗糙羟基磷灰石层^[37]、二氧化钛^[38]和氧化锆^[39]等导电氧化物薄膜、薄膜光伏材料^[40]、硅材料上的碳和陶瓷涂层^[41]、多层薄膜^[42]、结晶高分子薄膜^[43]以及具有复杂形貌金属表面的陶瓷膜层^[44]。

如果薄膜厚度大于相干包络的宽度,那么薄膜的光学厚度可以由上下两个表面分别对应的相干包络的峰值间距测得(图6),如已知薄膜材料折射率,就可以计算出其物理厚度。当薄膜厚度小于相干包络的宽度[图6(b)]时,例如 $10\text{ nm}\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ 量级,那么通过寻找相干包络的峰值就很难分离薄膜的上下表面。

在这种情况下,基于模型的薄膜分析技术可以测量 10 nm 以下的膜厚^[42,45-46]。该方法首先对干涉信号建模并生成数据库,再进行数据库搜索寻找与实验结果匹配度最高的薄膜参数。使用该方法时通常需要薄膜和基底材料的复折射率先验信息,然而,通过多变量数据库拟合法可以同时解出两种材料的复折射率。

另一种测量厚度为几十纳米的薄膜的方法是“螺旋共轭场”函数法^[47]。该函数等同于一条受薄膜反射率调制的螺旋线,可以确定局部范围内的薄膜结构。使用该方法时需要提供关于薄膜色散的先验信息或使用已知参数的薄膜做校准。

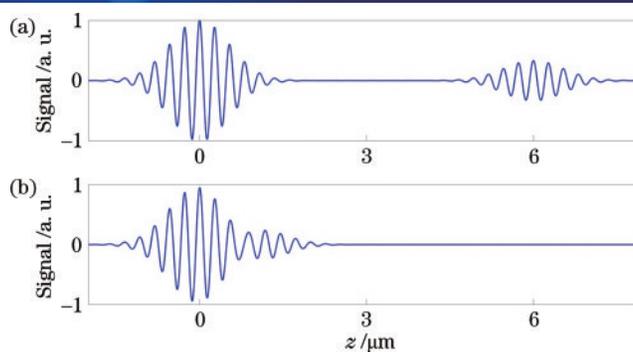


图 6 仿真测量置于空气中的薄膜材料(中心波长为 532 nm ,带宽为 100 nm ,NA为 0.3 ,薄膜材料折射率为 2)。(a) $3\text{ }\mu\text{m}$ 薄膜干涉信号；(b) $0.6\text{ }\mu\text{m}$ 薄膜干涉信号

Fig. 6 Simulated measurement of films surrounded by air (central wavelength is 532 nm , bandwidth is 100 nm , NA is 0.3 , and the refractive index of the film is 2). (a) Interference signal for $3\text{ }\mu\text{m}$ -thick film; (b) interference signal for $0.6\text{ }\mu\text{m}$ -thick film

2.5 功能型成像

如引言中提到,扫描白光干涉术是一种干涉显微成像技术,除了用于表面形貌测量外,还能够实现具有特殊用途和功能的成像与测量。例如,使用基于模型的方法可用于测量基底材料或吸收膜层的折射率谱,这种方法被用于测量镀金膜前后的二氧化硅材料^[46],以及带有二氧化硅和氧化锆薄膜的硅、金和金钯合金的表面^[48]。通过使用已知反射率的样品进行校准,可以提取扫描白光干涉仪的光谱特征,从而推导出待测表面的局部反射光谱^[49]。使用局部范围内的光谱信息可进一步优化形貌测量,以减小在介电和导电材料样品测量中由复折射率导致的纳米级高度误差^[50]。通过引入基准面,可以同时测量材料的折射率分布和厚度分布^[51]。

频闪技术与干涉仪的结合可用于动态测量。Nakano等^[52]开发了一种频闪移相干涉仪对材料表面声波的传播进行了可视化呈现。基于频闪效应,de Groot^[53]使用扫描白光干涉仪测量了振荡表面。Hanhijarvi等^[54]通过将频闪同步超连续谱光源(工作波长 $1.1\sim 1.7\text{ }\mu\text{m}$)集成到扫描低相干干涉仪中,测量了嵌入在 $4\text{ }\mu\text{m}$ 厚度硅制微机电系统(MEMS)中的振荡表面。Heikkinen等^[55]使用波长 $400\sim 620\text{ nm}$ 、功率为 150 mW 的宽带光源搭建了一台频闪扫描白光干涉仪(图7),对工作在 2.72 MHz 的电容式微型超声波换能器薄膜的表面形貌进行了测量。

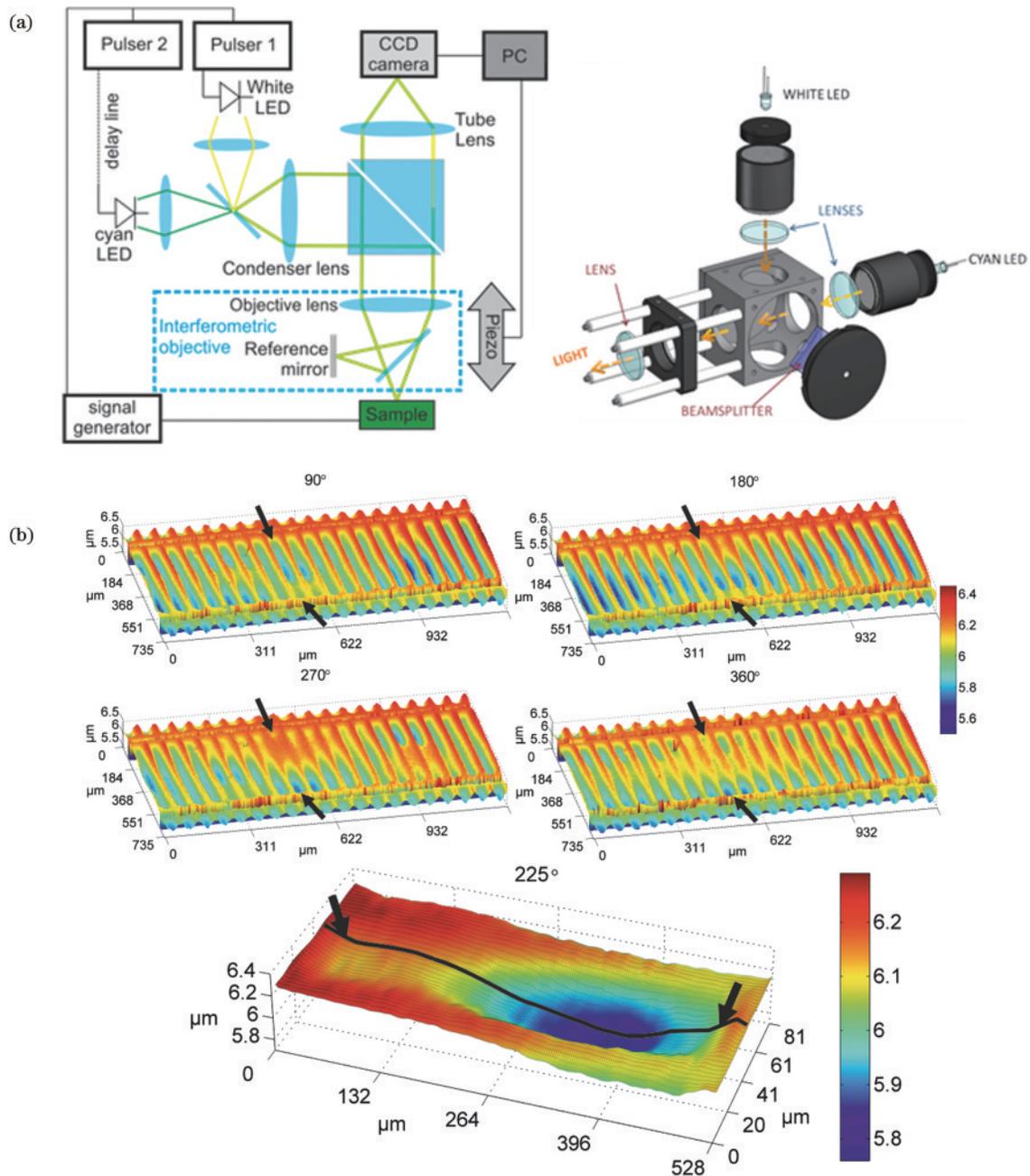


图 7 频闪扫描白光干涉仪。(a)系统光路和结构图;(b)2.72 MHz正弦信号驱动下的电容式微型超声波换能器薄膜的表面形貌动态测量结果^[55]

Fig. 7 Stroboscopic SWLI. (a) Optical setup of the system; (b) measurement of the surface topography of a capacitive micromachined ultrasonic transducer membrane operating at 2.72 MHz^[55]

3 技术进展

在过去 20 年中,随着光源、探测器、成像光学元件和精密位移台等关键光机电元器件的发展,扫描白光干涉技术得到了长足的进步,其中包括表面形貌重构算法、仪器信噪比、分辨率和空间带宽的提升、成像模式、新型光源的使用以及新的系统设计,本节将从上述几方面进行总结。

3.1 表面形貌重构算法

扫描白光干涉仪获取的三维干涉图像中,在每个

像素点处沿光轴方向的信号受到相干包络调制,利用包络的峰值或质心位置能够初步判断表面高度以及条纹级次,再结合条纹的相对相位信息可以精确定位零级条纹的绝对相位,对初步判断的表面高度值进行精调。多年来研究者们提出了很多种表面重构方法,这些方法主要可分为四种模式:相移算法、包络探测法^[56-57]、频域分析法^[58-59]以及信号相关法^[60],Harasaki等^[61]使用了五步相移法求解条纹的对比度以及相位,基于条纹对比度确定了最佳对焦位置,确定了条纹级次。Pavliček和Michálek^[62]研究了基于 Hilbert 变换的

包络探测法中噪声对测量不确定度的影响。Montgomery 和 Gianto^[63-64]比较了 Hilbert 变换以及小波变换在包络探测中的区别,并提出了使用 Teager-Kaiser 能量算子求解表面高度的方法。Hissmann 和 Hamprecht^[65]将贝叶斯方法引入表面重构中,判断重构形貌中的离群点并将之去除。Guo 等^[66]使用 Carré 相移算法来提取包络中的相位信息,此算法允许移相器灵活选用等间隔移相值。

用扫描白光干涉仪测量倾斜表面、大曲率表面以及台阶锐利边缘时有可能产生相位跳跃误差(图 8)。通过利用表面的先验信息,使用数字滤波的方式,可以针对一些特定表面消除相位跳跃问题。Ghim 和 Davies^[67]使用了双波长重构方法减小了大斜坡表面的相位跳跃误差。Ma 等^[68]使用了短时傅里叶变换分析条纹以减小相位误差。Vo 等^[69]将相移法与傅里叶方法结合,减小了测量台阶时的相位误差。Huang 等^[70]将质心法与参考条纹信号相关法相结合以提升测量台阶的精度。Wu 和 Fang^[71]在综述文章中对表面重构算法进行了详细的总结。

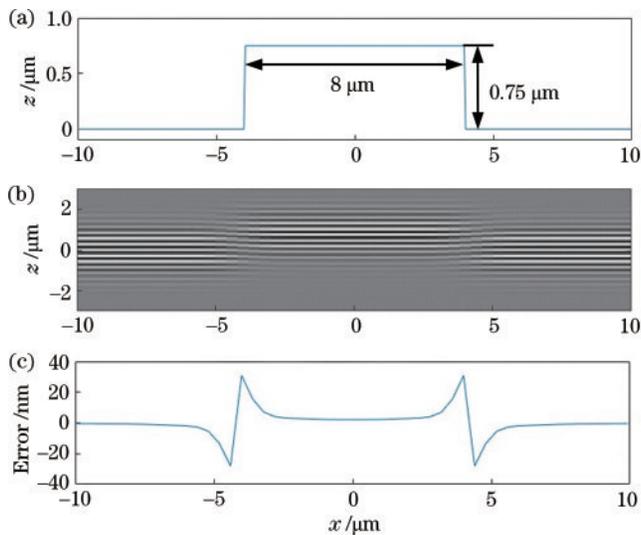


图 8 矩形台阶表面仿真测量结果。(a)待测台阶截面轮廓线(台阶宽 8 μm,高 0.75 μm);(b)干涉图截面;(c)测量结果与真值的差别,可以看出“蝠翼效应”

Fig. 8 Simulated SWLI measurement of a step height with sharp edges. (a) Profile of the step height (width is 8 μm, height is 0.75 μm); (b) cross-sectional interferogram; (c) difference between the simulated measurement and the ground truth, the batwing effect is obvious

3.2 信噪比提升

在现代扫描白光干涉仪中,信号过采样和高动态范围测量技术是提升仪器信噪比的重要手段^[19,32]。通常,一个条纹周期需要四个采样点(沿光轴方向),即采集四幅干涉图,相应的采样距离为 1/8 波长。根据中心极限定理,信号的采样率越高,测量的不确定度越小^[72],信号过采样通过提高采样频率等效地提升了信

噪比,与此同时,单个条纹周期所需的干涉图数量相应增加,测量速度也随之减慢。高动态范围测量通过使用不同的相机曝光时间或者照明强度,使用多重曝光采集图像,合成一幅高动态范围图像,从而提高采集信号的信噪比。

Gomez 等^[32]在其研究中阐明了,对于低反射率表面、具有复杂纹理的表面以及具有大斜坡的表面,如增材制造的金属表面,适合采用信号过采样的方式提高测量质量,对于反射率或者斜率变化较大的表面,高动态范围测量效果更佳。实验结果表明,两种提升仪器信噪比的方式均可以增加测量复杂和粗糙表面的有效数据。

此外,Wiesner 等^[73]研究了测量粗糙表面过程中散斑对测量不确定度的影响,通过依次改变照明的方向,相机依次采集相互独立的散斑图案,从每个散斑图案中选择最亮的区域来计算表面高度。通过实验验证,该方法能够有效减少粗糙表面测量过程中的异常值。

3.3 分辨率和带宽提升

扫描白光干涉测量的横向分辨率受限于光学系统的衍射效应。De Groot 等^[74]利用严格耦合波分析法(rigorous coupled-wave analysis, RCWA)对间距为 190 nm、横向宽度为 80 nm 的矩形光栅的表面散射现象进行建模,通过正向模拟生成了中心波长为 570 nm 的扫描白光干涉条纹数据,形成大数据库,再通过对实验数据进行最小二乘库搜索,计算出光栅结构的横向关键尺寸。该方法在横向参数上测量灵敏度达到 1 nm,实验结果与原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)的测量结果一致。

扫描白光干涉仪的测量范围取决于显微成像系统的视场,通常在 100 μm~10 mm 之间。Olszak^[75]开发了一种横向扫描的白光干涉测量技术,提高了测量速度,不需要子孔径拼接也能扩大测量范围。文献^[76]也提到了类似的方法。

Yang 等^[77]发明了一种将扫描白光干涉术和 AFM 结合的共路测量技术,首先通过白光干涉仪测量样品表面形貌,确定纳米尺度缺陷的大致位置并将其移动至视场中央,然后将 AFM 探针安装至显微物镜视场中央,通过调节使得探针悬臂表面产生白光干涉条纹,用于反馈探针针尖的高度信息,从而实现大视场内纳米尺度缺陷的测量。

数据融合(data fusion)技术也可用于扩展了扫描白光干涉测量的空间动态范围。Wang 等^[78]使用高分辨光强图像中的阴影与形状信息,将低分辨率的表面形貌数据与相应的高分辨率光强数据相融合,提高了低倍率物镜系统的横向分辨率。为了提高测量视场范围,Leach 等^[79]利用不同传感器的优势,开发了一种多传感器数据融合方法,将摄影测量(photogrammetry)和扫描白光干涉测量相结合,后者为前者提供了高分辨率数据,而前者为后者提供了大范围内的精确定位。此融合方法的最终目标是同时实现高精度坐标测量和

表面形貌测量。

为了超越光学系统的衍射极限,研究者提出了微球辅助干涉测量方法^[80-81]。Perrin 等^[82]首次将微球辅助成像应用于 Linnik 架构的扫描白光干涉仪中,将近场光场通过贴近待测表面的微球耦合进入远场成像系统之中,并基于有限元方法(FEM)对成像过程进行建模。实验结果表明,该方法可以将系统横向分辨率提高 4.7 倍(空气中)。Pahl 等^[83]也使用 FEM 建立了该成像方法的模型,考虑了大 NA 的影响,并把横向分辨率提升的原因归功于局部 NA 的提升。

3.4 瞳成像技术

瞳成像,即把高 NA 显微物镜的瞳平面(即后焦面)成像到相机上,可提供聚焦光斑内表面结构的角分辨光学特性。在瞳平面收集到的白光干涉图案可以转换成椭圆偏信息,并用于测量薄膜的厚度和折射率。这些信息还可用于精确重建具有复杂微纳结构的表面形貌^[84]。

Paz 等^[85]基于瞳成像,将傅里叶散射测量方法与扫描白光干涉术相结合(图 9),以提高散射测量的纵向灵敏度。研究者通过比较测量和仿真得到的光谱,提出了基于模型求解逆向散射问题的方法,实现了对硅基线状光栅的亚波长级表面特征的测量。

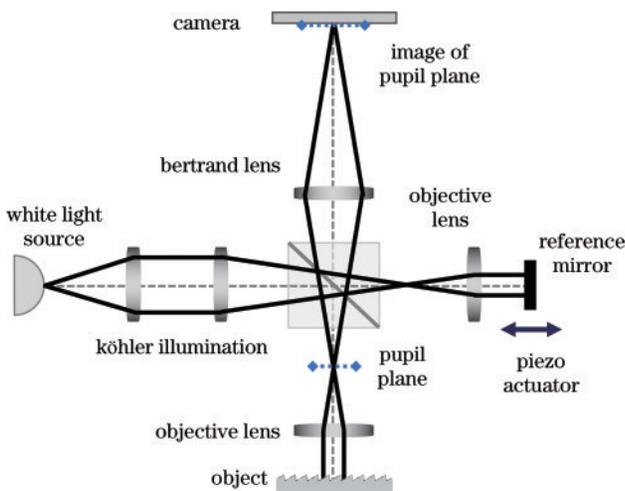


图 9 基于扫描白光干涉术与瞳成像的傅里叶散射测量仪器光路示意图

Fig. 9 Schema of the optical setup of Fourier scatterometer based on SWLI and pupil imaging

Gödecke 等^[86]将扫描白光干涉法、穆勒偏振法和傅里叶散射法集成到一套瞳成像系统中,从而能获得角度和波长分辨的穆勒矩阵,利用多个不相关的光场信息通道数据实现多参数复杂纳米结构的精确测量,这是传统的角分辨或光谱分辨散射仪所难以解决的。通过对比仿真和实测得到的穆勒矩阵,他们实现了对亚波长硅基线状光栅微结构的宽度、高度和侧壁角的精确测量。

3.5 光源

LED 和白炽灯是扫描白光干涉仪中最常用的光

源。白光干涉仪在测量高斜率表面和尖锐的边缘时容易出现系统误差,使用两个不同中心波长的 LED 光源,有可能降低从相干包络和相位分别得到的高度值之间的差异^[87]。

飞秒脉冲激光器拥有宽光谱、短时间相干的特性,也可以用于实现“白光”干涉测量。飞秒脉冲激光的高空间相干性能够在在大视场内保持较高的条纹对比度,适用于对半导体芯片、平板显示器件和光伏电池进行大范围测量^[88]。Joo 等^[89]通过铷原子钟(rubidium atomic clock)对激光的脉冲重复率溯源,以 10 nm 的重复度测量了约 67 μm 高的台阶。Lu 等^[90]利用一个时间相干长度约为 30 μm 的掺铒光纤飞秒激光器,开发了一台扫描白光干涉仪来测量粗糙的碳化硅表面。Kassamakov 等^[91]使用基于 Nd:YAG 泵浦微结构光纤的超连续谱(supercontinuum)光源开发白光干涉仪,该光源可提供 20~35 mW 的高输出功率,有利于低反射率样品的测量。

3.6 系统设计

本小节将介绍与扫描白光干涉术相关的干涉仪和物镜的新设计以及扫描方法的创新。Roy 等^[92]基于几何相位(geometric phase)原理(本质上类似于消色差),研制了一种大 NA 扫描白光干涉仪,通过几何相移技术可以减小幅翼效应或 2π 相位跳跃带来的误差^[93]。

为了测量超光滑表面,Freischlad^[94]设计了一种借助虚拟参考面的干涉仪,以消除参考光束中的中、高空间频率成分对粗糙度测量的影响。实验表明,残余系统波数误差小于 0.02 nm(均方根值)。Ullmann 等^[95]搭建了串联干涉仪和偏振消色差的 Michelson 干涉仪,用于在长工作距(>150 mm)下进行绝对长度和形状测量。

De Groot 和 Biegen^[96]开发了新型大视场干涉物镜以扩展其扫描白光干涉仪的应用范围,其中包括一种安装于物镜塔台的 1.4 倍干涉物镜,以及一种具有 34 mm \times 34 mm 视场的 0.5 倍干涉物镜(图 10)。第一种物镜可以被称为“de Groot-Biegen”干涉物镜,包含一个平面分光镜和一个部分透过的参考镜,它们与物镜系统同轴。这两块元件略微倾斜,避免反射光线进入成像光瞳,确保干涉条纹具有足够的对比度。

为了测量动态样本,Dunsby 等^[97]开发了一种单帧白光干涉测量技术,只需要单次拍摄就可以同时获取四幅相移图。Jeon 等^[98]基于空间相移技术,开发了一种使用偏振 CMOS 相机的扫描白光干涉系统以提高测量速度,该系统可突破由 Nyquist 采样极限决定的纵向扫描步长。

为了减小环境振动对测量的影响,Wiersma 和 Wyant^[99]开发了一台使用同步相位传感器的扫描白光干涉仪,可以在 40 nm 振幅的振动干扰下,以 1.5 nm 重复度和 400 nm 纵向扫描步长,测量 4.5 μm 高的台阶。Tereschenko 等^[100]提出了基于 Linnik 架构的红外-

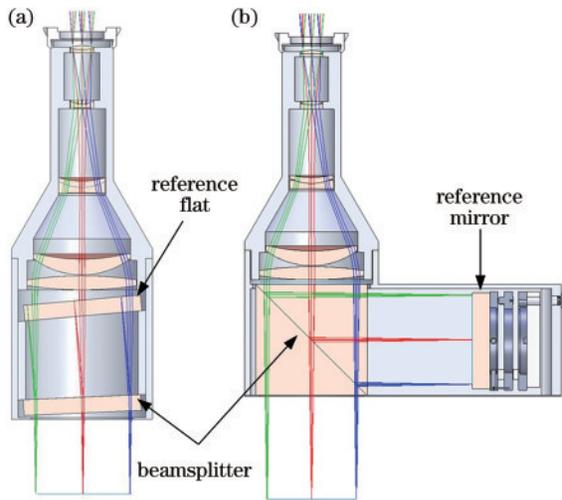


图 10 干涉物镜设计图(由 Zygo 公司提供)。(a)“De Groot-Biegen”干涉物镜;(b)0.5 倍 Michelson 干涉物镜

Fig. 10 Interferometric objective lens design (courtesy of Zygo Corporation). (a) The “De Groot-Biegen” interferometer; (b) a 0.5× interferometric objective with the Michelson geometries

白光共光路扫描白光干涉系统设计,利用红外光路干涉系统中参考平面镜的高频振动进行相位调制,实现 2 kHz 的位移测量,基于该位移信息对同步白光干涉表面形貌测量结果进行振动补偿。Serbes 等^[101]将此方法用于 Mirau 型架构的扫描白光干涉仪中,实现了同样的抗振效果。

传统的扫描白光干涉系统通常使物镜相对于测量系统进行机械扫描运动,以获取三维图像数据。Pavliček 等^[102-103]提出了一种新的扫描白光干涉方案,他们使参考平面进行机械扫描运动,同时采用电动变焦透镜使物体在成像过程中保持清晰。

3.7 子孔径拼接

虽然“de Groot-Biegen”等新型大视场干涉物镜能显著地扩大扫描白光干涉仪的横向视场,但往往是以牺牲物镜 NA 为代价,相应地,横向分辨率和表面可测最大斜率也会减小。横向视场与分辨率是一对相互制约的指标,通过算法将一系列相邻子视场内的形貌信息拼接得到大视场、高分辨率形貌信息是一种能突破上述限制的手段,被称为子孔径拼接(sub-aperture stitching)。该技术通过将宽场光学轮廓仪与多自由度机械位移系统相结合,按特定轨迹依次获取待测表面不同位置处于视场内的形貌信息,然后根据相邻子视场重叠区域内微观形貌对应关系来实现形貌数据的全局匹配,并同时实现重叠部分的数据融合,最终得到大视场高分辨率形貌数据。

针对光学元件表面形貌测量,Colonna de Lega 等^[104]报道了基于五轴运动工件台的扫描白光干涉仪,实现了直径约 1.5 mm、纵向高度差约 290 μm 的手机镜头元件形貌测量,其中面形误差峰谷值(peak-to-

valley, PV)值约 0.16 μm ,通过该测量还能获得镜头头机械装配定位面的加工误差。Chen 等^[105]将子孔径拼接技术运用到偶次非球面、鸥翼型(gull-wing)非球面的测量中,并且在标准凹球面上与计算机生成全息(computer-generated holography, CGH)干涉测量做了对比,实验结果证明上述拼接方法的 PV 精度可优于 0.1 μm 。此外,Vivo 等^[106]利用子孔径拼接技术测量了 1.3 m 长、面形误差在纳米量级的 X 射线反射镜,其结果与 Fizeau 干涉拼接以及长程轮廓仪(long trace profiler, LTP)的测量结果高度吻合,面形误差的均方根(RMS)值为 6.6 nm。

在微结构的测量上,Tang^[107]通过卡方检验(chi-squared test)拟合实现了大面积微结构的测量。Chen 等详细地介绍了微结构拼接流程,与传统面形测量中拼接不同,微结构测量的拼接过程往往可采用图像特征匹配算法,例如尺度不变特征变换(SIFT)^[108]和加速稳健特征(SURF)算法^[109]来获取不同子视场之间的对应关系,进而实现不同子视场之间的全局匹配,基于上述逻辑 Chen 等^[110]采用 50 倍物镜(188 $\mu\text{m} \times 141 \mu\text{m}$ 视场)测量了 CGH 器件在 0.75 mm \times 0.75 mm 范围的形貌。文献[111-112]中报道了菲涅耳透镜以及单点金刚石车削正弦表面的拼接测量(图 11)。

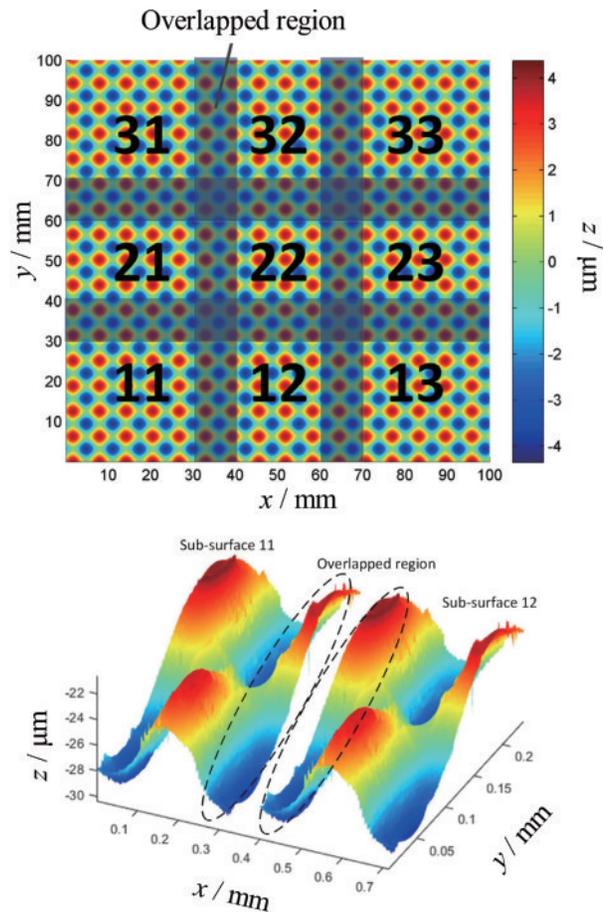


图 11 单点金刚石车削正弦表面的子孔径拼接测量结果^[112]
Fig. 11 Sub-aperture stitching measurement result of a single-point diamond turned sinusoidal surface^[112]

在曲面基底微结构的测量上,Liu等^[113]利用扫描白光干涉仪和一个旋转的砂轮轴,实现了砂轮周向形貌的完整重建。Guo等^[114]使用 Zygo 的扫描白光干涉仪,配合多轴工件台对工件的旋转与移动,实现了半球形轴承及其表面微螺旋槽的形貌重建,其中槽深的测量误差约为 0.027 μm。

4 理论模型

对扫描白光干涉成像机理的理解和建模是支撑仪器光学系统设计、表面重构算法及校准技术取得创新性进展的关键,也是评价测量不确定度、分析误差产生机理的基石。完整的表面测量模型以干涉显微成像模型为核心,另外还包括振动、电噪声、扫描线性度、数字信号处理等各项误差源对测量结果的影响。

本章节将总结不同复杂程度的扫描白光干涉术模型,包括从空间低维度到高维度、从线性到非线性的模型。在本节中我们提到的二维成像是指在垂直于光轴(z 轴)的 x - y 平面内的成像;有时,二维成像也指在 x - z 平面内对物体剖面的成像,通过引入 y 向坐标变量, x - z 平面内的成像模型可拓展为完整的三维成像模型。为了在术语上便于区分,本文中我们把前者称为二维成像,后者称为二维剖面成像。

4.1 一维成像模型

最简单的扫描白光干涉模型是基于低相干干涉术的一维干涉信号产生模型。在该模型中,干涉条纹的对比度取决于探测光与参考光的光程差。在扫描过程中,干涉条纹被相干包络调制,(在基础一维模型中)相干包络的形状取决于照明光谱。一维模型不考虑待测表面产生的散射以及光学系统衍射极限对成像的影响,且假设物体表面反射光的相位变化与表面沿光轴方向的高度成正比。随着理论的发展,de Groot 和 Colonna de Lega^[115]提出的一维模型可以考虑系统 NA 和照明光谱对成像的影响,通过对不同角度和不同波长的入射光束所产生的干涉信号进行非相干叠加,实现对高 NA 情况下扫描干涉信号的模拟。在该模型中,白光干涉信号作为纵向扫描位置 z 的函数,表达式为

$$I(z) = \int_0^{\infty} \int_0^1 g(\beta, k, z) U(\beta) V(k) \beta d\beta dk, \quad (1)$$

式中:方向余弦 $\beta = \cos(\theta)$, θ 为入射角; k 为波数; $U(\beta)$ 为物镜瞳平面上的光强分布; $V(k)$ 为光源光谱分布。干涉项表示为

$$g(\beta, k, z) = R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos[2\beta k(h - z)], \quad (2)$$

式中: R_1 和 R_2 分别为待测光路和参考光路的等效光强反射率; h 为表面高度。

在这一模型中,相干包络的形状取决于照明光谱和系统 NA,分别对应着时间和空间相干度。使用一

维模型可以有效地对薄膜测量过程进行建模,Roy等^[116]在其模型中考虑了薄膜的多重反射效应,并以金属衬底介电薄膜为例进行了讨论。

4.2 二维成像模型和传递函数

二维扫描白光干涉成像模型考虑了表面衍射和散射以及成像系统有限二维光瞳的影响。作为干涉显微镜的一种类型,扫描白光干涉仪分辨表面细微结构的能力同样遵循 Abbe 成像理论——图像对比度取决于物镜收集衍射和散射光的能力。在空间平移不变(shift invariant)条件下,二维成像系统的成像能力可以通过其二维传递函数来表征,通常被分为两种情况:1)相干照明下的相干传递函数(coherent transfer function, CTF),也称振幅传递函数(amplitude transfer function, ATF);2)非相干照明下的光学传递函数(optical transfer function, OTF),当照明光瞳和成像光瞳相同时,OTF 是 CTF 的自相关函数。关于光学成像系统传递函数的基础理论已经发展得较为成熟,可参考经典著作,例如 Goodman^[117]的《傅里叶光学导论》。

为了研究台阶结构尖锐边缘处产生的蝠翼效应,Harasaki 和 Wyant^[118]通过将台阶上下表面近似为两个左右错位的孔径,根据孔径衍射模型,准确预测了当台阶高度小于光源相干长度时出现的蝠翼效应。Xie等^[119]使用一维模型对表面每个 x - y 位置处沿 z 轴方向的干涉信号进行仿真,依次排列形成一组三维图像,然后使用二维 OTF 信息对三维图像栈进行 x - y 平面内的数字滤波,该模型考虑了成像系统有限 NA 的衍射效应,但没有考虑物体表面散射效应。

虽然基于基础傅里叶光学(elementary Fourier optics, EFO)的成像模型已经很成熟,但该理论并没有被广泛用于阐释干涉成像机理,至少在公开的文献中未有明确的记录。直至近年来,de Groot 和 Colonna de Lega^[120]详细推导了用于表面形貌测量的干涉成像系统的二维 EFO 模型,该模型考虑了成像系统衍射效应和表面散射效应。为满足 EFO 模型适用范围,表面高度的变化需要远小于景深。在此近似条件下,表面由一个合适的平面代替,平面上总的光场(即入射场与散射场的相干叠加)的相位被认为与表面高度变化成正比,然后通过平面波二维角谱(angular spectrum)的传播来计算二维图像的形成。在相干照明情况下,可以利用二维 CTF 对角谱进行滤波,而在部分相干或非相干照明情况下,模型则需要考虑不同照明分量成像结果的非相干叠加,为了进一步简化该积分计算过程,可以使用等效波长的概念来平均扩展光源中不同照明光波矢分量对成像的影响。在这种情况下,通过使用二维 OTF 过滤等效波长对应的二维角谱,可以在误差容许范围内替代非相干叠加这一积分计算过程。

仪器传递函数(instrument transfer function, ITF)被定义为表面形貌测量值与真值的空间频谱分量的比值,对于用户来说 ITF 是表征仪器对待测表面空间频

率响应的重要指标^[121-122]。对于高度变化远小于景深的表面,二维 OTF 可以用来预测 ITF。尽管受到上述表面高度条件的限制,EFO 模型是探究扫描白光干涉测量机理、预测表面形貌测量结果的理论工具,是一种在简单性、准确性和计算效率之间取得平衡的模型。

4.3 三维成像模型和传递函数

由于扫描白光干涉仪经常被用于测量高度变化较大的三维表面形貌,有必要理解三维图像的形成机理。三维干涉显微成像可以被看作一个三维线性平移不变的滤波过程^[123],该过程可以由成像系统的三维传递函数来表征,此概念早已被应用于光学显微成像领域^[124]。

McCutchen^[125]提出了广义三维光瞳的概念,相当于系统的三维 CTF。基于广义三维光瞳概念的成像模型不受伴轴条件限制,因此适用于 NA 较大的系统。三维扫描白光干涉成像模型结合了三维成像理论与表面散射模型。在 Kirchhoff 近似(也称为 Kirchhoff 表面散射理论)条件下,白光干涉成像系统将表面形貌信息传递到三维干涉图像的过程可以用三维表面传递函数(surface transfer function, STF)来表征。在该模型中,表面形貌信息的载体是物体表面的“表层膜模型”(foil model,被定义为任一 x - y 位置处沿 z 方向的一维 Dirac Delta 函数,仅在该 x - y 位置对应的表面高度处不为零^[126-127])。三维 STF 的有效性主要取决于 Kirchhoff 近似的有效性,其主要限制条件是表面局部的曲率半径必须远远大于波长^[128]。

三维 STF 是一个复数量(图 12),它的幅值决定了白光干涉仪的空间频率通带,其相位则揭示了成像系统的光学像差^[129]。扫描白光干涉仪的三维点扩散函数是三维 STF 的傅里叶变换,从点扩散函数可以很容易地计算出各种判据(如 Rayleigh、Sparrow 以及 Abbe 判据)下的系统空间分辨率。

Coupland 等^[126-127]从标量波动方程出发,推导了 Kirchhoff 近似下扫描白光干涉术的三维成像模型;Gu^[124]和 Sheppard 等^[130-131]在共聚焦显微术的三维成像和传递函数理论方面进行了长期、深入且全面的研究。在这几位前人工作的基础上,Su 等^[127]针对表面形貌测量领域,建立了一套统一的三维干涉显微成像理论,通过散射振幅(scattering amplitude)将光散射、全息术与干涉显微术联系起来(有兴趣的读者可参考综述文章^[132],进一步了解干涉术与全息术之间的关系),分析了不同近似条件下物体的散射势(scattering potential)不同表现形式的深层物理意义,明确线性散射模型的使用范围,通过对比 McCutchen 广义三维光瞳和 Ewald 球概念,推导了物体频谱空间、波矢空间以及干涉图像频谱空间之间的关系,将非线性多重散射情况下的三维干涉显微成像模型涵盖在同一理论框架内,严格证明了传统二维成像与表面测量模型是三维理论

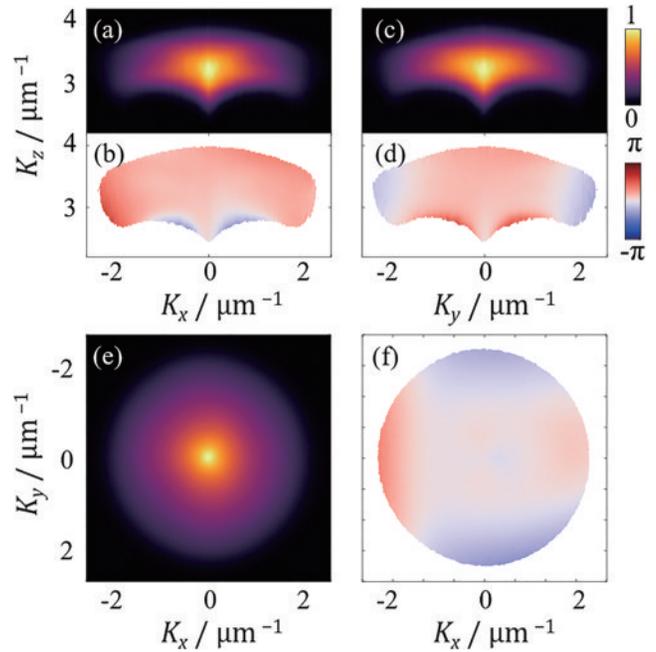


图 12 实验测得的商业扫描白光干涉仪三维 STF(中心波长为 570 nm,带宽为 100 nm,NA 为 0.55)^[129]。(a)(c)三维 STF 幅值的纵向截面图;(b)(d)三维 STF 相位的纵向截面图;(e)(f)光瞳面内的二维 STF 的幅值和相位,二维 STF 由三维 STF 沿纵向的积分得到[在无像差系统中,(b)(d)(f)中的相位应为零]

Fig. 12 Experimentally measured 3D STF of a commercial SWLI (central wavelength is 570 nm, bandwidth is 100 nm, NA is 0.55)^[129]. The cross sections of (a)(c) magnitude and (b)(d) phase of the 3D STF; (e)(f) magnitude and phase of the in-pupil 2D STF. The 2D STF is calculated as a projection of the 3D STF along the longitudinal direction [in an aberration-free system, the phase terms in (b)(d)(f) should be zero]

Xie 等^[133]和 Lehmann 等^[134]在 Kirchhoff 近似条件下研究了 NA 为 0.9 的扫描白光干涉仪对矩形光栅剖面轮廓的信号形成机理,该二维剖面成像模型中入射和散射光波被限制在入射平面(即 x - z 平面)内。实际上,具有尖锐边缘和局部大曲率结构的表面违反了 Kirchhoff 近似的适用范围,在研究矩形光栅这类表面时,应谨慎使用基于这种近似的白光干涉模型。然而,即便拥有尖锐边缘,如果光栅的振幅远小于波长,则基于 Kirchhoff 近似的白光干涉模型与二维 EFO 模型极为相似,二者准确度可以满足大部分研究的需要^[127]。

Xie 等^[133]和 Lehmann 等^[134]还提出了基于 Debye 衍射积分的白光干涉成像模型,该积分考虑了成像系统有限孔径的衍射以及偏振效应,与广义三维光瞳的概念密切相关。然而,该模型中使用了基于 EFO 的表面散射模型,只适用于高度变化较小的表面。

综上所述,在线性(单次表面散射)情况下,最常用的二维和三维扫描白光干涉模型都是基于 Kirchhoff 近似和 EFO 微小表面高度变化近似条件。

4.4 线性区域以外的图像形成

对于直角台阶、粗糙表面、沟槽、高深宽比的孔洞以及迂回形(re-entrant)结构等表面形貌特征,多重散射是不可忽略的,需要严格的、基于精确求解 Maxwell 方程组的散射模型来描述多重散射现象。目前,研究人员已建立了几种基于严格散射模型的扫描白光干涉成像模型。

在小节 3.3 中我们介绍了使用 RCWA 的白光干涉模型可以预测间距为 190 nm 的矩形光栅的干涉条纹数据^[74]。RCWA 方法通常只适用于周期性结构^[135],而边界元方法(boundary element method, BEM)可用于预测任意复杂表面的散射场^[136],与 FEM 的体积离散相比, BEM 只沿表面求解线性偏微分方程,因此计算效率更高。给定一个特定的入射平面波, BEM 模型可以预测角度分辨的远场散射;然后利用散射振幅的概念,通过全息记录(holographic recording)过程在空间频域中生成扫描白光干涉数据;最后,通过对空间频域数据进行傅里叶变换,形成特定入射角和波长对应的干涉图。在非线性干涉成像模型中,不同入射角和波长产生的干涉图需要多次迭代生成,并进行非相干合成,才能得到最终的扫描白光干涉图像^[137]。图 13 展示了基于 BEM 的严格模型预测干涉成像的结果,可以看到多重表面散射导致了异常的干涉条纹。Fang 等^[138]在实验中观测到相同现象,并基于 V 型槽底部产生三重反射的假设,提出了有效的误差补偿方法。

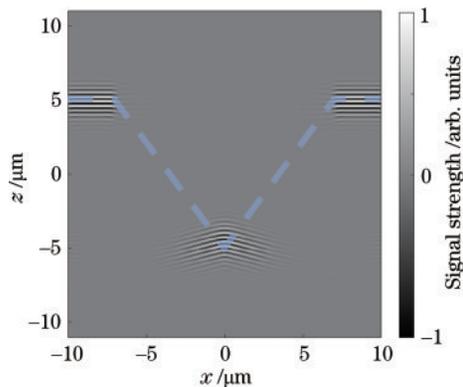


图 13 严格白光干涉成像模型准确预测 V 型表面结构(70°底角)产生的倒 V 型干涉条纹

Fig. 13 Simulated interferogram of a vee-groove with the dihedral angle of 70° and the depth of 10 mm using a rigorous SWLI model. The reversed interference fringe can be observed

一种略为简单的严格模型使用 FEM 计算出表面附近平面内的近场散射场,然后,在考虑有限 NA 的情况下,可以通过平面波角谱的传播来计算像平面上的场分布^[139]。

此类严格求解的方法计算量大、耗时长,现有的严格扫描白光干涉成像模型都是将入射波矢和散射波矢限制在入射平面内,即 $x-z$ 平面。然而,将此类模型拓

展为全三维模型并没有主要的理论障碍。

5 校准与误差补偿

校准(calibration)对于计量级测量仪器来说非常重要,是实现量值溯源(traceability)的基础。本节将对扫描白光干涉仪校准及误差补偿技术的进展进行总结。

5.1 分辨率与噪声

横向分辨率被定义为当仪器对表面高度的响应下降至 50% 时所对应的测试板空间周期值^[140]。传统方法中,横向分辨率是通过测量分辨率测试板来表征的,例如星形测试板或啁啾相位光栅(chirped phase grating)这种具有连续变化的周期性结构的标准样品^[141]。

轴向分辨率(axial resolution)经常被错误地用作表面形貌测量仪器的性能评价指标,很容易与本文所讨论的扫描白光干涉仪的仪器噪声(instrument noise)混淆^[142]。如果只关注物体的外表面,例如 100% 反射的金属材料,则轴向上不存在需要分辨的邻近两点,此时轴向分辨率的概念对于白光干涉测量基本没有意义。但在测量薄膜、涂层或亚表面特征时,轴向分辨率是表征光学层析能力的重要指标。

表面形貌测量噪声(measurement noise)是一种随机误差,可以通过重复性测试来定量表征。通过(多次测量)平均法或(两次测量)相减法可以从样品表面形貌测量结果中分离得到测量噪声^[143]。噪声密度(noise density)也是评价仪器性能的一项重要指标,它能够体现表面形貌不相关数据点数量及测量耗时对测量精度的影响^[144],同时关注扫描白光干涉仪的噪声和噪声密度有利于更全面地了解仪器测量能力。

仪器噪声是指最佳测量条件下的测量噪声。通常,扫描白光干涉术的仪器噪声是通过测量一个垂直于光轴放置的光学平面来评估的。相机散粒噪声是导致仪器噪声的一个主要因素,与干涉图像数据采集总时间呈平方根关系。Pavliček 和 Hýbl^[145]利用 Cramer-Rao 不等式研究了由散粒噪声引起的仪器噪声的理论极限。然而,实验和模拟结果都表明,当增加光学平面的倾斜角度和存在环境振动时,测量噪声都会增大^[72,146]。通过对多次测量结果取平均值,或增加干涉信号采样频率,都可以降低仪器噪声。前者无论待测表面形貌是否存在变化或倾斜,都可以有效降低噪声;然而,在存在环境振动的情况下,信号过采样法只有在表面高度变化(包含倾斜的平面)小于成像系统景深时,才能有效降低噪声^[72]。另外,在扫描白光干涉仪中由压电致动器引起的振动可以通过输入整形技术来减小,即通过设计第二指令信号来抵消致动器第一指令的振动^[147-148]。

5.2 线性度和放大系数

台阶高度标准件(step height standard)常用于校准扫描白光干涉仪轴向放大系数(amplification coefficient)和线性度(linearity)。为了对整个纵向测量

范围进行校准,需要将同一台阶高度标准件放在不同纵向位置进行测量^[149]。

Zygo公司提出了一种校准放大系数的新方法,有望替代传统台阶高度测量法^[150]。这种方法通过使用光谱仪将波长溯源至 546.074 nm 198 Hg 谱线,建立了波长标准,然后将该标准与干涉仪的光程扫描联系起来。与台阶高度测量法相比,这种新校准方法的不确定度更低,且能直接溯源到国际单位“米”的定义。

5.3 横向畸变

横向畸变(lateral distortion)存在于几乎所有光学成像系统中,扫描白光干涉仪亦不例外,在表面形貌测量中,横向畸变会导致与视场位置有函数关系的系统误差。传统测量横向畸变的方法是通过测量二维栅格(areal cross grating)标准件来实现的^[149,151],有时也称为空间像法,但这种方法的校准精度受到标准件制造精度的限制。基于自校准技术的横向畸变校正方法不受限于标准件精度,利用刚性标准件几何形状不变的特性,通过在多个位姿(通常是平移和旋转)测量该标准件^[152],使用迭代优化^[153]和最小二乘法^[154]等数学方法分离标准件误差与仪器横向畸变。自校准技术结合图像相关算法后,可通过测量带有随机表面特征的平面,实现扫描白光干涉仪的横向畸变校正^[155](图 14)。

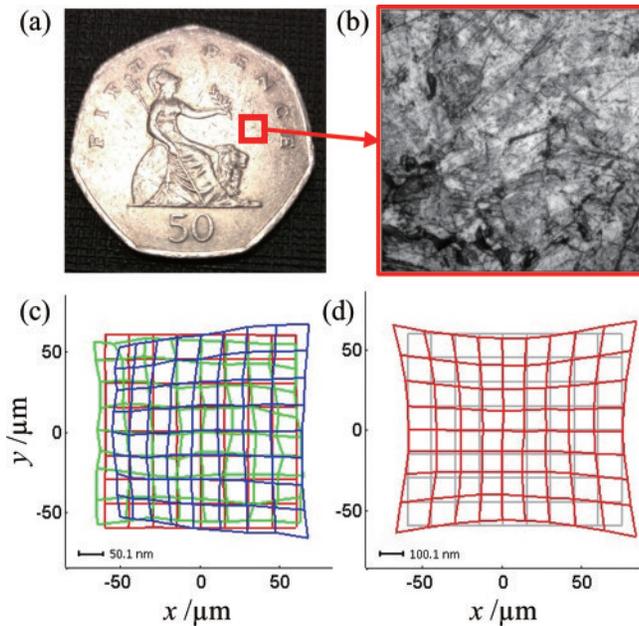


图 14 基于图像相关点计算和自校准技术可以利用任意表面进行纳米级精密度的横向畸变测量^[155]。(a)硬币表面;(b)干涉显微镜下的局部表面光强图;(c)典型三位姿自校准测量;(d)某商业扫描白光干涉仪的横向畸变

Fig. 14 Nanometer-precision lateral distortion can be measured using an arbitrary surface based on image correlation and self-calibration^[155]. (a) An arbitrary coin surface; (b) intensity image of a local surface region under the interference microscope; (c) three measurement positions in a typical self-calibration procedure; (d) measured lateral distortion of a commercial SWLI

另外,基于自校准技术的横向畸变校正方法也可应用于测量表面面形的非索干涉仪^[156]。

5.4 光学像差

光学像差,例如球差和色差^[129,157-161],以及其他高阶像差^[129]会降低扫描白光干涉测量的精度。此外,离焦也会显著影响白光干涉仪的传递函数,降低空间带宽和分辨率^[162]。

在扫描白光干涉测量中,通常是采用数字信号后处理(digital post processing)方法来调整表面形貌测量结果,降低像差导致的测量误差,例如使用相位解包裹的方法代替条纹级次判断以避免 2π 跳跃,或使用低通滤波消除奇异点^[159-160]。这些方法可能会导致额外的测量误差,并降低横向分辨率。最近,Su等^[129]提出了一种基于物理模型的像差校正方法,利用仪器三维传递函数的信息对原始干涉条纹数据进行修补,不依赖于任何数字信号处理。

5.5 多种材料

在干涉仪这种测量相位的仪器中,光在材料表面反射时产生的相位变化取决于材料的光学特性^[163-164]。相位变化会引发扫描白光干涉术中 10 nm 到 100 nm 量级的高度测量误差。这种误差可通过测量材料的光学特性进行补偿^[165-166]。如果已知不同材料在可见光波段的折射率信息,可以使用基于模型的扫描白光干涉术校正由于反射相位变化导致的表面形貌误差^[46]。

5.6 高斜率表面

人造功能型表面常在宏观和微观尺度上具有不同的倾斜角。对于类似镜面的表面来说,最大可测倾斜角为 $[90^\circ - \arcsin(N_A)]$,被称为NA圆锥极限,具有更大倾斜角的镜面基本不可测。现实中许多表面具有微观纹理,在被照射时会产生散射。通过捕获背向散射光,扫描白光干涉术可测量倾斜角度超过NA圆锥极限的表面。然而,这种情况下的纹理测量存在明显误差,Thomas等^[27,167]通过建立严格的白光干涉显微成像模型,研究了仪器对表面纹理在不同倾斜程度下的信号响应(图 15),然而分析倾斜表面微观纹理测量不确定度的方法还有待进一步研究。

Coupland和Lobera^[168]提出了一种有可能提高扫描白光干涉术对高斜率等复杂表面测量能力的方法,并通过仿真结果初步验证了这个概念。首先他们针对V型槽,台阶和迂回形结构,建立了基于FEM、考虑多重散射的扫描白光干涉成像模型,通过挖掘干涉信号中的多重散射信号,并反复迭代对比仿真与测量结果,逆向求解高斜率表面的形貌信息。

另外,测量倾斜表面时,白光干涉的条纹间距和相干包络与测量水平表面时不同^[169-170]。Sheppard和Larkin应该是最早对这一现象做出理论解释的学者。

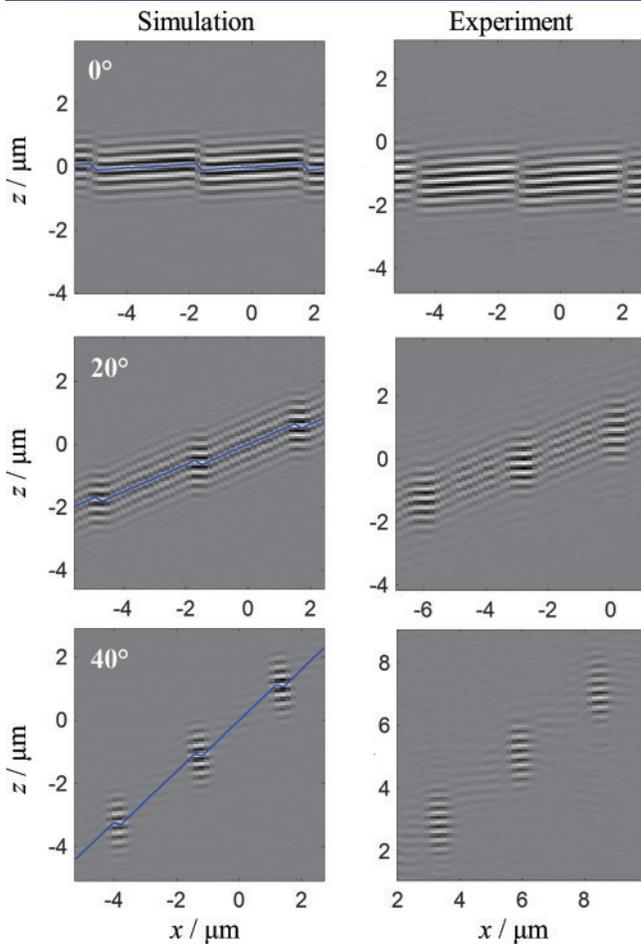


图 15 使用 BEM 扫描白光干涉成像模型, 仿真 0.55 NA 干涉物镜测量不同倾斜程度的闪耀光栅的干涉条纹图。光栅振幅峰谷值约为 200 nm, 频率为 300 lp/mm^[27], 蓝色实线代表模型中使用的光栅轮廓线

Fig. 15 Modeled (left column) and experimental (right column) fringes of a blazed grating at different tilts. An SWLI model based on the BEM is used. The PV amplitude of the grating is 200 nm and the frequency is 300 lp/mm^[27]. The solid blue line represents the surface profile used in the model

5.7 传递函数

仪器传递函数(ITF)是表征仪器对表面空间频率响应的重要指标^[122],其定义在小节 4.2 中已做介绍。假设仪器的信号响应与表面的空间频率呈现线性函数关系,则 ITF 可用于评价系统整体的测量性能。光学系统是扫描白光干涉仪中最重要的组成部分(仪器还包括机械和电子等系统)。因此,光学系统的传递函数作为仪器物理模型的关键元素,可用于估算扫描白光干涉仪的 ITF^[171]。

若表面高度变化极小(例如小于 $\lambda/8$),扫描白光干涉仪的 ITF 可近似等同于系统的二维光学传递函数^[121]。在 Kirchhoff 近似条件下,扫描白光干涉仪的三维表面传递函数定量地给出了仪器在三维空间频域内对表面成像的信号响应^[126-127,129]。ITF 可以被近似为三维表面传递函数在二维频域内的投影,该近似同样

只在表面高度变化极小时有效。

扫描白光干涉仪的三维 STF 可以通过测量一个直径已知、球度误差可忽略不计的精密小球表面来确定,小球直径需远大于波长,且小于视场。根据扫描白光干涉仪的线性理论^[126],三维 STF 等于三维干涉图与球冠表层膜模型的空间频谱的比值。Mandal 等^[172]首次对扫描白光干涉仪的三维 STF 进行了表征和校正。Su 等^[173-174]研究了球面误差对三维 STF 准确性的影响,通过精细的实验设计以及分析大量实验数据证明了三维 STF 表征方法的正确性和实用性,基于 STF 相位信息构建逆向滤波器,实现了对仪器光学像差的补偿,并通过该补偿技术将复杂表面测量精度提高到纳米级^[129](图 16)。另外,利用三维 STF 还可以计算仪器的横向分辨率^[127,175]。

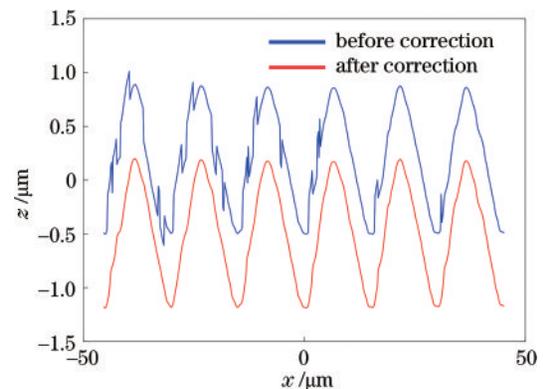


图 16 校正前后正弦表面(周期为 15 μm , 振幅为 1.35 μm)测量结果对比,斜坡处 2π 误差被有效消除

Fig. 16 SWLI measurement of a sinusoidal surface (pitch is 15 μm , PV amplitude is 1.35 μm) before and after the error correction. The 2π errors are effectively removed

5.8 虚拟仪器

2019 年,ISO(213 号)技术委员会 16 号工作组发布了第一个针对表面形貌测量仪器校准的国际标准(ISO 25178-600)^[176],包括光学测量仪器。该校准框架涉及测量仪器的 7 项计量学特征(metrological characteristics),包括:增益系数(amplification coefficient)、线性度(linearity deviation)、平面度(flatness deviation)、测量噪声(measurement noise)、形貌空间分辨率(topographic spatial resolution)、 x - y 坐标映射偏离度(x - y mapping deviations)、形貌保真度(topography fidelity)。ISO 25178-700 描述了评估它们的方法和相对应的材料度量(material measure)标准件^[177]。Leach 等^[178]在综述文章中对这些计量特征及其评价和使用方法进行了总结。通过使用恰当的方法和材料度量评估测量仪器的计量学特征,并将得到的数值放入到相应的测量模型中,可以实现对测量不确定度的评估。

第七项计量学特征“形貌保真度”囊括了导致测量不确定度的所有影响因素,包括由于大斜率和大曲率

产生的误差。虽然形貌保真度已经被正式引入 ISO 标准,但目前标准委员会还没有找到一种合理且普遍适用的评估形貌保真度的方法。

Su 和 Leach^[179] 提出了通过虚拟仪器 (virtual instrument) 评价特定任务 (task-specific) 的形貌保真度

和测量不确定度的方法,开发了虚拟扫描白光干涉仪技术(其概念如图 17 所示),通过建立一系列物理模型,精准模仿特定仪器的性能,对待测表面的数字模型进行虚拟测量。利用虚拟测量结果可以准确预测各类测量误差、计算形貌保真度以及评价测量不确定度。

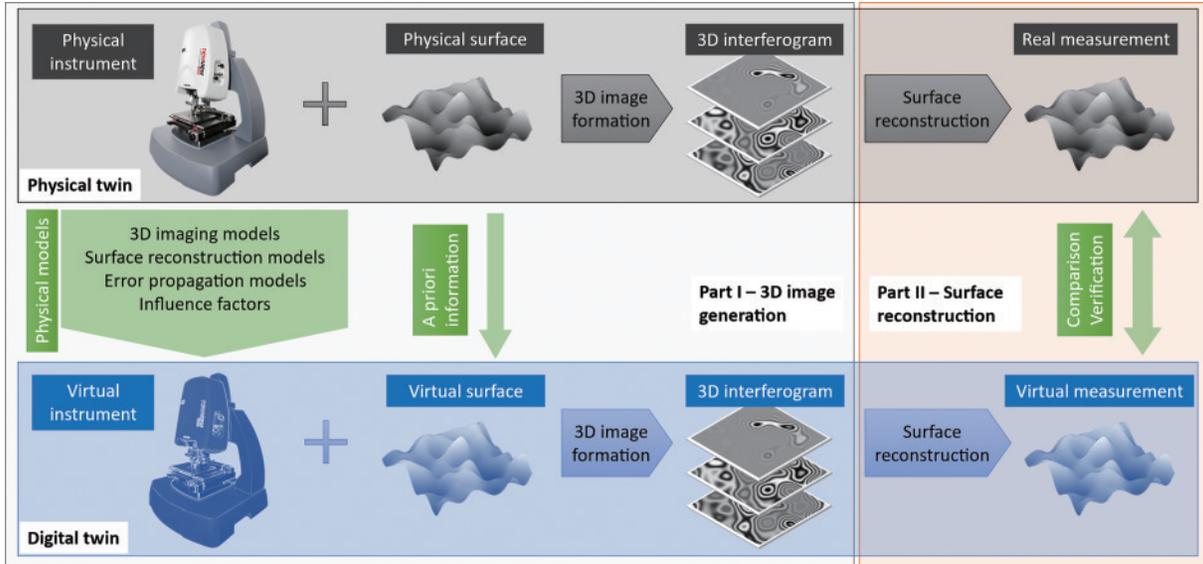


图 17 虚拟光学表面形貌测量仪器概念示意图^[179]

Fig. 17 Concept of the virtual SWLI for surface topography measurement^[179]

6 结束语

扫描白光干涉术经历了三十多年的发展,在制造业与科研领域的广泛应用中得到了验证,某种程度上成为了高精度表面形貌测量技术的标杆,尤其在半导体、精密光学、消费电子等产业的牵引下,其测量功能和性能得到持续提升。作为一种光学测量手段,扫描白光干涉术先天具有高精度、快速、高数据密度和非接触式测量等优势;其他关键技术特点包括(但不限于):宽场成像方式保障了优异的噪声密度,亚纳米级纵向测量精度无需依赖于物镜 NA 和视场范围,宽带光源和低相干度实现了表面高度的绝对测量。在新型元器件、系统设计、测量方法、软件算法的赋能下,扫描白光干涉术不但能够测量精密制造的光滑表面和微纳尺度表面特征结构,同样可以胜任针对百微米级粗糙度增材制造表面的测量任务,打破了对传统干涉测量的认知,进一步拓展了其应用范围。

本文按递进的空间维度和复杂程度分类,总结了干涉成像理论方面的主要研究成果。对测量机理认知的提升带动了测量和校准技术的进步,最显著的效果就是测量精度的提高。校准技术的发展同时也推动着国际标准的制定,有利于完善仪器性能的评价方法和体系,为有效鉴别仪器的优劣提供依据,为推动高端仪器的发展以及工业大数据的可靠获取提供保障。

当前,集成电路等先进制造领域对表面测量技术提出的挑战主要来自于:表面特征结构的细微化,甚至

趋近于近原子尺度;跨越米级到微纳尺度的高动态范围测量;自由曲面、衍射光学元件以及仿生学表面等功能型复杂表面的质量控制;不损失精度的低成本、高通量检测;以及嵌入制造过程中的在线检测。

以扫描白光干涉术为代表的光学测量技术,充分利用了光的波动属性以及干涉和全息成像的优势,以光的波长作为“尺子”,在先进的光学、电子和机械元件的支撑下,将在先进制造与智能制造中充当越来越重要的角色。

参 考 文 献

- [1] Schmit J, Creath K, Wyant J C. Surface profilers, multiple wavelength, and white light interferometry [M]//Malacara D. Optical shop testing. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons 2007: 667-755.
- [2] Damian V, Bojan M, Schiopu P, et al. White light interferometry applications in nanometrology [J]. Proceedings of SPIE 2009, 7297: 72971H.
- [3] Hariharan P. White-light interference microscopy [M]// Hariharan P. Basics of interferometry. 2nd ed. New York: Academic Press, 2010.
- [4] de Groot P. Coherence scanning interferometry [M]// Leach R K. Optical measurement of surface topography. Heidelberg: Springer, 2011: 187-208.
- [5] Bauer W, Weber M, Chanbai S. White light interferometry [M]// Wang Q J, Chung Y W. Encyclopedia of tribology. Heidelberg: Springer, 2013: 4115-4127.
- [6] de Groot P. Principles of interference microscopy for the

- measurement of surface topography [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(1): 1-65.
- [7] de Groot P. Interference microscopy for surface structure analysis [M]// Yoshizawa T. *Handbook of optical metrology principles and applications*. Boca Raton: CRC Press, 2015: 791-828.
- [8] de Groot P. A review of selected topics in interferometric optical metrology [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2019, 82(5): 056101.
- [9] Su R. Coherence scanning interferometry [M]// Leach R K. *Advances in optical surface texture metrology*. Bristol: IOP Publishing, 2020: 2-1—2-27.
- [10] Chinellato S, Pernechele C, Carmignato S, et al. Surface measurements of radio antenna panels with white-light interferometry [J]. *Proceedings of SPIE 2010*, 7739: 77392T.
- [11] Laopornpichayanuwat W, Visessamit J, Tianprateep M. 3-D surface roughness profile of 316-stainless steel using vertical scanning interferometry with a superluminescent diode [J]. *Measurement*, 2012, 45(10): 2400-2406.
- [12] Sachs R, Stanzel F. Interference microscopy for clean air-how optical metrology is improving quality control of fuel injection systems [C]// *Proceedings of Fringe 2013: 7th International Workshop on Advanced Optical Imaging and Metrology*, August 29, 2013, Berlin: Springer, 2013, 535-538.
- [13] Mukhtar H, Montgomery P, Gianto, et al. Rock surface roughness measurement using CSI technique and analysis of surface characterization by qualitative and quantitative results [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, 8(1): 012028.
- [14] Apedo K L, Montgomery P, Serres N, et al. Geometrical roughness analysis of cement paste surfaces using coherence scanning interferometry and confocal microscopy [J]. *Materials Characterization*, 2016, 118: 212-224.
- [15] Zou Y, Li Y, Kaestner M, et al. Low-coherence interferometry based roughness measurement on turbine blade surfaces using wavelet analysis [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 82: 113-121.
- [16] Sergeeva M, Khrenikov K, Hellmuth T, et al. Sub surface damage measurements based on short coherent interferometry [J]. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 2010, 5: 10003.
- [17] Bae E, Kim Y, Park S, et al. Large-aperture ground glass surface profile measurement using coherence scanning interferometry [J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 1106-1113.
- [18] 尹智瑶, 郭仁慧, 杨鑫, 等. 基于白光干涉的 ICF 靶丸表面缺陷测量方法 [J]. *光学学报*, 2022, 42(10): 1012004.
Yin Z, Guo R, Yang X, et al. Measurement method for surface defects on ICF capsules based on white light interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(10): 1012004.
- [19] Fay M, Colonna de Lega X, de Groot P. Measuring high-slope and super-smooth optics with high-dynamic-range coherence scanning interferometry [C]// *Proceedings of Optical Fabrication and Testing*, June 22-26, 2014, virtual event. Optical Society of America, 2014: OW1B-3.
- [20] Mabwa D, Kubiena T, Parnell H, et al. Evaluating the cytotoxicity of Ge-Sb-Se chalcogenide glass optical fibres on 3T3 mouse fibroblasts [J]. *RSC Advances*, 2021, 11(15): 8682-8693.
- [21] Lazzini G, Romoli L, Blunt L, et al. Design and characterization of textured surfaces for applications in the food industry [J]. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2017, 5(4): 044005.
- [22] Speidel A, Su R, Mitchell-Smith J, et al. Crystallographic texture can be rapidly determined by electrochemical surface analytics [J]. *Acta Materialia*, 2018, 159: 89-101.
- [23] Bermudez C, Martinez P, Cadevall C, et al. High-speed, roll to roll coherence scanning interferometry in a laser texturing process [C]// *Proceedings of the 19th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology*, June 3-7, 2019, Bilbao, Spain. EUSPEN, 2019: 176-177.
- [24] Sun Y F, Gao Z S, Ma J Q, et al. Surface topography measurement of microstructures near the lateral resolution limit via coherence scanning interferometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 152: 106949.
- [25] Xin L, Liu X, Yang Z M, et al. Three-dimensional reconstruction of super-resolved white-light interferograms based on deep learning [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 145(12): 106663.
- [26] Fay M F, Colonna de Lega X, Schmidt M. Measuring high-slope parts using coherence scanning interferometry [C]// *Proceedings of the 29th Annual Meeting of American Society of Precision Engineering*, November, 2014, Boston, US. ASPE, 2014: 604-608.
- [27] Matthew T, Su R, de Groot P, et al. Optical topography measurement of steeply-sloped surfaces beyond the specular numerical aperture limit [J]. *Proceedings of SPIE 2020*, 11352: 1135207.
- [28] Townsend A, Senin N, Blunt L, et al. Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review [J]. *Precision Engineering*, 2016, 46: 34-47.
- [29] Leach R K, Bourell D, Carmignato S, et al. Geometrical metrology for metal additive manufacturing [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2019, 68(2): 677-700.
- [30] Senin N, Thompson A, Leach R K. Characterisation of the topography of metal additive surface features with different measurement technologies [J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(9): 095003.
- [31] Fay M, Badami V G, de Lega X. Characterizing additive manufacturing parts using coherence scanning interferometry [C]// *ASPE Spring Topical Meeting on Dimensional Accuracy and Surface Finish in Additive Manufacturing*. ASPE, 2014: 135-138.
- [32] Gomez C, Su R, Thompson A, et al. Optimization of surface measurement for metal additive manufacturing using coherence scanning interferometry [J]. *Optical*

- Engineering, 2017, 56(11): 111714.
- [33] Gomez C, Campanelli C, Su R, et al. Surface-process correlation for an ink-jet printed transparent fluoroplastic [J]. Surface Topography: Metrology and Properties, 2020, 8(3): 034002.
- [34] 郭彤, 王瑞杰, 马龙, 等. 基于白光扫描干涉术的厚膜几何参数测量 [J]. 光电子·激光, 2011, 22(9): 1380-1383.
- Guo T, Wang R J, Ma L, et al. Geometric parameter measurement of thick films by white light scanning interferometry [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2011, 22(9): 1380-1383.
- [35] Chang S P, Xie T B, Sun Y L. Measurement of transparent film using vertical scanning white-light interferometry [C]//Proceedings of the 4th International Symposium on Instrumentation Science and Technology, August 8-12, 2006, Harbin, China. ISIST'2006: 1063-1067.
- [36] 刘淑杰, 张元良, 张洪潮. 透明软质薄膜的表面形貌测量 [J]. 中国光学, 2014, 7(2): 326-331.
- Liu S J, Zhang Y L, Zhang H C, Profile measurement of thin transparent soft film surface [J]. Chinese Optics, 2014, 7(02): 326-331.
- [37] Pecheva E, Montgomery P, Montaner D, et al. White light scanning interferometry adapted for large-area optical analysis of thick and rough hydroxyapatite layers [J]. Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids, 2007, 23(7): 3912-3918.
- [38] 薛晖, 沈伟东, 顾培夫, 等. 基于白光干涉的光学薄膜物理厚度测量方法 [J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1877-1880.
- Xue H, Shen W D, Gu P F, et al. Thickness measurement of thin film based on white-light spectral interferometry [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7): 1877-1880.
- [39] Yoshino H, Abbas A, Kaminski P, et al. Measurement of thin film interfacial surface roughness by coherence scanning interferometry [J]. Journal of Applied Physics, 2017, 121(10): 105303-105310.
- [40] Yang Y, Mansfield D. Characterisation of thin films using a coherence scanning interferometry [J]. Journal of Materials Science and Chemical Engineering, 2015, 3(1): 15.
- [41] Maniscalco B, Kaminski P M, Walls J M. Thin film thickness measurements using scanning white light interferometry [J]. Thin Solid Films, 2014, 550: 10-16.
- [42] de Groot P, Colonna de Lega X, Fay M. Transparent film profiling and analysis by interference microscopy [J]. Proceedings of SPIE 2008, 7064: 706401.
- [43] 郑萃, 姚雪容, 史颖, 等. 结晶高分子薄膜的内部和表面结构及光学性能 [J]. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(11): 7.
- Zhen C, YAO X R, Shi Y, et al. Internal structure, surface morphology and optical property of semicrystalline polymer films [J]. Chemical Propellants and Polymeric Materials, 2018, 34(11): 7.
- [44] Feng X B, Senin N, Su R, et al. Optical measurement of surface topographies with transparent coatings [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 121: 261-270.
- [45] de Groot P, Colonna de Lega X. Angle-resolved three-dimensional analysis of surface films by coherence scanning interferometry [J]. Optics Letters, 2007, 32(12): 1638-1640.
- [46] Fay M, Dresel T. Applications of model-based transparent surface films analysis using coherence-scanning interferometry [J]. Optical Engineering, 2017, 56(11): 111709-1-111709-6.
- [47] Mansfield D. Extraction of film interface surfaces from scanning white light interferometry [J]. Proceedings of SPIE 2008, 7101: 71010U.
- [48] Yoshino H, Kaminski P M, Smith R, et al. Refractive index determination by coherence scanning interferometry [J]. Applied Optics, 2016, 55(15): 4253-4260.
- [49] Claveau R, Montgomery P, Flury M, et al. Local reflectance spectra measurements of surfaces using coherence scanning interferometry [J]. Proceedings of SPIE 2016, 9890: 98900Q.
- [50] Marbach S, Claveau R, Wang F T, et al. Wide-field parallel mapping of local spectral and topographic information with white light interference microscopy [J]. Optics Letters, 2021, 46(4): 809-812.
- [51] Watanabe K, Ohshima M, Nomura T. Simultaneous measurement of refractive index and thickness distributions using low-coherence digital holography and vertical scanning [J]. Journal of Optics, 2014, 16(4): 045403.
- [52] Nakano K, Hane K, Okuma S, et al. Visualization of 50 MHz surface acoustic wave propagation using stroboscopic phase-shift interferometry [J]. Optical Review, 1997, 4(2): 265-269.
- [53] de Groot P. Stroboscopic white-light interference microscopy [J]. Applied Optics, 2006, 45(23): 5840-5844.
- [54] Hanhijarvi K, Kassamakov I, Aaltonen J, et al. Through-silicon stroboscopic characterization of an oscillating mems thermal actuator using supercontinuum interferometry [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(4): 1418-1420.
- [55] Heikkinen V, Kassamakov I, Paulin T, et al. Stroboscopic scanning white light interferometry at 2.7 MHz with 1.6 μm coherence length using a non-phosphor LED source [J]. Optics Express, 2013, 21(5): 5247-5254.
- [56] Larkin K G. Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1996, 13(4): 832-843.
- [57] Sandoz P. Wavelet transform as a processing tool in white-light interferometry [J]. Optics Letters, 1997, 22(14): 1065-1067.
- [58] de Groot P, Deck L. Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain [J]. Journal of Modern Optics, 1995, 42(2): 389-401.
- [59] de Groot P, Colonna de Lega X, Kramer J, et al. Determination of fringe order in white-light interference microscopy [J]. Applied Optics, 2002, 41(22): 4571-

- 4578.
- [60] Kino G S, Chim S S C. Mirau correlation microscope [J]. *Applied Optics*, 1990, 29(26): 3775-3783.
- [61] Harasaki A, Schmit J, Wyant J C. Improved vertical-scanning interferometry [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(13): 2107-2115.
- [62] Pavlicek P, Michalek V. White-light interferometry-envelope detection by Hilbert transform and influence of noise [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(8): 1063-1068.
- [63] Montgomery P, Salzenstein F, Montaner D, et al. Implementation of a fringe visibility based algorithm in coherence scanning interferometry for surface roughness measurement [J]. *Proceedings of SPIE* 2013, 8788: 87883G.
- [64] Gianto G, Salzenstein F, Montgomery P. Comparison of envelope detection techniques in coherence scanning interferometry [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(24): 6763-6774.
- [65] Hissmann M, Hamprecht F A. Bayesian surface estimation for white light interferometry [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(1): 015601.
- [66] Guo T, Ma L, Chen J P, et al. Microelectromechanical systems surface characterization based on white light phase shifting interferometry [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(5): 053606.
- [67] Ghim Y S, Davies A. Complete fringe order determination in scanning white-light interferometry using a Fourier-based technique [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(12): 1922-1928.
- [68] Ma S, Quan C, Zhu R, et al. Application of least-square estimation in white-light scanning interferometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(7): 1012-1018.
- [69] 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.
- [70] 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.
- [71] Wu D, Fang F. Development of surface reconstruction algorithms for optical interferometric measurement [J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2021, 16(1): 1-31.
- [72] Gomez C, Su R, de Groot P, et al. Noise reduction in coherence scanning interferometry for surface topography measurement [J]. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2020, 3(1): 68-76.
- [73] Wiesner B, Hybl O, Hausler G. Improved white-light interferometry on rough surfaces by statistically independent speckle patterns [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(6): 751-757.
- [74] de Groot P, Colonna de Lega X, Liesener J, et al. Metrology of optically-unresolved features using interferometric surface profiling and RCWA modeling [J]. *Optics Express*, 2008, 16(6): 3970-3975.
- [75] Olszak A. Lateral scanning white-light interferometer [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(22): 3906-3913.
- [76] Chen L C, Le M T, Lin Y S. 3-D micro surface profilometry employing novel Mirau-based lateral scanning interferometry [J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(9): 094004.
- [77] Yang W, Liu X, Hu C, et al. Rapid characterization of nano-scale structures in large-scale ultra-precision surfaces [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106200.
- [78] Wang J, Su R, Leach R K, et al. Resolution enhancement for topography measurement of high-dynamic-range surfaces via image fusion [J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 34805-34819.
- [79] Leach R K, Sims-Waterhouse D, Medeossi F, et al. Fusion of photogrammetry and coherence scanning interferometry data for all-optical coordinate measurement [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2018, 67(1): 599-602.
- [80] Montgomery P, Lecler S, Leong-Hoi A, et al. High Resolution Surface Metrology Using Microsphere-Assisted Interference Microscopy [J]. *Physica Status Solidi A*, 2019, 216(13): 1800761.
- [81] Perrin S, Lecler S, Montgomery P. Microsphere-assisted interference microscopy [M]//Astratov V. Label-free super-resolution microscopy. Cham: Springer, 2019: 443-469.
- [82] Perrin S, Leong-Hoi A, Lecler S, et al. Microsphere-assisted phase-shifting profilometry [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(25): 7249-7255.
- [83] Pahl T, Hüser L, Hagemeyer S, et al. FEM-based modeling of microsphere-enhanced interferometry [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3: 1-13.
- [84] Colonna de Lega X, de Groot P. Characterization of materials and film stacks for accurate surface topography measurement using a white-light optical profiler [J]. *Proceedings of SPIE* 2008, 6995: 69950P.
- [85] Paz V F, Peterhänsel S, Frenner K, et al. Solving the inverse grating problem by white light interference Fourier scatterometry [J]. *Light: Science & Applications*, 2012, 1(11): e36.
- [86] Gödecke M L, Frenner K, Osten W. Model-based characterisation of complex periodic nanostructures by white-light Mueller-matrix Fourier scatterometry [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2(3): 237-50.
- [87] Niehues J, Lehmann P, Bobey K. Dual-wavelength vertical scanning low-coherence interferometric microscope [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(29): 7141-7148.
- [88] Oh J S, Kim S-W. Femtosecond laser pulses for surface-profile metrology [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(19): 2650-2652.
- [89] Joo W-D, Kim S, Park J, et al. Femtosecond laser pulses for fast 3-D surface profilometry of microelectronic step-structures [J]. *Optics Express*, 2013, 21(13): 15323.
- [90] Lu Y, Park J, Yu L, et al. 3D profiling of rough silicon carbide surfaces by coherence scanning interferometry

- using a femtosecond laser [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(10): 2584-2589.
- [91] Kassamakov I, Hanhijärvi K, Abbadi I, et al. Scanning white-light interferometry with a supercontinuum source [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(10): 1582-1584.
- [92] Roy M, Svahn P, Cherel L, et al. Geometric phase-shifting for low-coherence interference microscopy [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2002, 37(6): 631-641.
- [93] Roy M, Schmit J, Hariharan P. White-light interference microscopy: Minimization of spurious diffraction effects by geometric phase-shifting [J]. *Optics Express*, 2009, 17: 4495-4499.
- [94] Freischlad K. Sub-angstrom surface metrology with a virtual reference interferometer [J]. *Proceedings of SPIE* 2012, 8493: 84930B.
- [95] Ullmann V, Emam S, Manske E. White-light interferometers with polarizing optics for length measurements with an applicable zero-point detection [J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(8): 084010.
- [96] de Groot P, Biegen J F. Interference microscope objectives for wide-field areal surface topography measurements [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(7): 074110.
- [97] Dunsby C, Gu Y, French P M W. Single-shot phase-stepped wide-field coherence gated imaging [J]. *Optics Express*, 2003, 11: 105-115.
- [98] 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.
- [99] Wiersma J T, Wyant J C. Vibration insensitive extended range interference microscopy [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(24): 5957-5961.
- [100] Tereschenko S, Lehmann P, Zellmer L, et al. Passive vibration compensation in scanning white-light interferometry [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(23): 6172-6182.
- [101] Serbes H, Hagemeyer S, Lehmann P. Mirau-type coherence scanning interferometer with integrated vibration compensation [J]. *Proceedings of SPIE* 2022, 12137: 1213707.
- [102] Pavliček P, Kučera J. Coherence scanning interferometry with a focus-tunable lens [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(34): G91-G95.
- [103] Pavliček P, Mikeska E. White-light interferometer without mechanical scanning [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 124: 105800.
- [104] Colonna de Lega X, Dresel T, Liesener J, et al. Optical form and relational metrology of aspheric micro optics [C]//*Proceedings of 32th Annual Meeting of American Society for Precision Engineering*, October, 2017 Charlotte, US. ASPE, 2017: 20-23.
- [105] Chen S, Lu W, Guo J, et al. Flexible and high-resolution surface metrology based on stitching interference microscopy [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 151: 106915.
- [106] Vivo A, Barrett R, Perrin F. Stitching techniques for measuring X-ray synchrotron mirror topography [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(2): 021710.
- [107] Tang S. Stitching: high-spatial-resolution microsurface measurements over large areas [J]. *Proceedings of SPIE* 1998, 3479: 43-49.
- [108] Lowe D G. Object recognition from local scale-invariant features [C]. *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Computer Vision*, September 20-27, 1999, Kerkyra, Greece. IEEE Press, 1999, 2: 1150-1157.
- [109] Bay H, Tuytelaars T, Gool L V. SURF: Speeded up robust features [C]//*Proceedings of the 9th European Conference on Computer Vision*, May, 2006, Graz, Austria. Springer, 2006: 404-417.
- [110] Chen S, Lu W, Chen W, et al. Efficient subaperture stitching method for measurement of large area microstructured topography [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 127: 105974.
- [111] Lu W, Chen S, Zhang K, et al. Characterization of diffractive relief structures over large areas by stitching interference microscopic topography [J]. *Measurement*, 2022, 202: 111850.
- [112] Liu M Y, Cheung C F, Cheng C H, et al. A Gaussian process and image registration based stitching method for high dynamic range measurement of precision surfaces [J]. *Precision Engineering*, 2017, 50: 99-106.
- [113] Liu M Y, Cheung C F, Feng X, et al. A self-calibration rotational stitching method for precision measurement of revolving surfaces [J]. *Precision Engineering*, 2018, 54: 60-69.
- [114] Guo J, Zhai D, Lu W, et al. Topography measurement of helical grooves on a hemisphere based on stitching interference microscopy [J]. *Optics and Laser Technology*, 2022, 152: 108133.
- [115] de Groot P, Colonna de Lega X. Signal modeling for low-coherence height-scanning interference microscopy [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(25): 4821-4830.
- [116] Roy M, Cooper I, Moore P, et al. White-light interference microscopy: effects of multiple reflections within a surface film [J]. *Optics Express*, 2005, 13(1): 164-170.
- [117] Goodman J W. *Introduction to Fourier Optics* [M]. 4th ed. New York: Freeman W H, 2017.
- [118] Harasaki A, Wyant J C. Fringe modulation skewing effect in white-light vertical scanning interferometry [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(13): 2101-2106.
- [119] Xie W, Lehmann P, Niehues J. Lateral resolution and transfer characteristics of vertical scanning white-light interferometers [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(11): 1795-1803.
- [120] de Groot P, Colonna de Lega X. Fourier optics modeling of interference microscopes [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2020, 37(9): B1-B10.
- [121] Colonna de Lega X, de Groot P. Lateral resolution and instrument transfer function as criteria for selecting surface metrology instruments [C]//*Proceedings of Optical Fabrication and Testing*, June 24-28, 2012,

- Monterey, CA, US. Optica Publishing Group, 2012: OTu1D. 4.
- [122] de Groot P. The instrument transfer function for optical measurements of surface topography [J]. *Journal of Physics: Photonics*, 2021, 3(2): 024004.
- [123] Coupland J M, HolographyLobera J., tomography and 3D microscopy as linear filtering operations [J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19(7): 074012.
- [124] Gu M. *Advanced optical imaging theory* [M]. Heidelberg: Springer, 2000.
- [125] Mccutchen C. Generalized aperture and the three-dimensional diffraction image [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1964, 54(2): 240-244.
- [126] Coupland J M, Mandal R, Palodhi K, et al. Coherence scanning interferometry: linear theory of surface measurement [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(16): 3662-3670.
- [127] Su R, Coupland J M, Sheppard C J R, et al. Scattering and three-dimensional imaging in surface topography measuring interference microscopy [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2021, 38(2): A27-A42.
- [128] Beckmann P, Spizzichino A. *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces* [M]. Madison Heights: Artech Print on Demand, 1987.
- [129] Su R, Thomas M, Liu M, et al. Lens aberration compensation in interference microscopy [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 128: 106015.
- [130] Sheppard C J R, Gu M. The significance of 3-D transfer functions in confocal scanning microscopy [J]. *Journal of Microscopy*, 1992, 165(3): 377-390.
- [131] Sheppard C J R, Connolly T, Gu M. Scattering by a one-dimensional rough surface, and surface profile reconstruction by confocal imaging [J]. *Physical Review Letters*, 1993, 70(10): 1409.
- [132] de Groot P J, Deck L L, Su R, et al. Contributions of holography to the advancement of interferometric measurements of surface topography [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(1): 1-20.
- [133] Xie W, Lehmann P, Niehues J, et al. Signal modeling in low coherence interference microscopy on example of rectangular grating [J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14283-14300.
- [134] Lehmann P, Xie W, Allendorf B, et al. Coherence scanning and phase imaging optical interference microscopy at the lateral resolution limit [J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 7376-7389.
- [135] Moharam M, Gaylord T K. Three-dimensional vector coupled-wave analysis of planar-grating diffraction [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1983, 73(9): 1105-1112.
- [136] Simonsen I. Optics of surface disordered systems [J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 2010, 181(1): 1-103.
- [137] Thomas M, Su R, Nikolaev N, et al. Modeling of interference microscopy beyond the linear regime [J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(3): 034110.
- [138] Fang F, Zeng Z, Zhang X, et al. Measurement of micro-V-groove dihedral using white light interferometry [J]. *Optics Communications*, 2016, 359: 297-303.
- [139] Bischoff J, Pahl T, Lehmann P, et al. Model-based dimensional optical metrology [J]. *Proceedings of SPIE 2020*, 11352: 113520P.
- [140] Giusca C L, Leach R K. Calibration of the scales of areal surface topography measuring instruments: part 3. Resolution [J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(10): 105010.
- [141] Eifler M, Ströer F, Hering J, et al. User-oriented evaluation of the metrological characteristics of areal surface topography measuring instruments [J]. *Proceedings of SPIE 2019*, 11056: 110560Y.
- [142] de Groot P. The meaning and measure of vertical resolution in optical surface topography measurement [J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(1): 54.
- [143] Giusca C L, Leach R K, Helary F, et al. Calibration of the scales of areal surface topography-measuring instruments: part 1. Measurement noise and residual flatness [J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(3): 035008.
- [144] de Groot P, Disciacca J. Surface-height measurement noise in interference microscopy [J]. *Proceedings of SPIE 2018*, 10749: 107490Q.
- [145] Pavliček P, Hýbl O. White-light interferometry on rough surfaces: measurement uncertainty caused by noise [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(4): 465-473.
- [146] Liu M, Cheung C F, Ren M, et al. Estimation of measurement uncertainty caused by surface gradient for a white light interferometer [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(29): 8670-8677.
- [147] Mun J I, Jo T, Kim T, et al. Residual vibration reduction of white-light scanning interferometry by input shaping [J]. *Optics Express*, 2015, 23(1): 464-470.
- [148] Song Z, Guo T, Fu X, et al. Residual vibration control based on a global search method in a high-speed white light scanning interferometer [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(13): 3415-3422.
- [149] Giusca C L, Leach R K, Helary F. Calibration of the scales of areal surface topography measuring instruments: part 2. Amplification, linearity and squareness [J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(6): 065005.
- [150] de Groot P, Beverage J. Calibration of the amplification coefficient in interference microscopy by means of a wavelength standard [J]. *Proceedings of SPIE 2015*, 9526: 952610.
- [151] Henning A, Giusca C, Forbes A, et al. Correction for lateral distortion in coherence scanning interferometry [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2013, 62(1): 547-550.
- [152] 乔潇悦, 陈欣, 丁国清, 等. 基于最小二乘法的自校准位姿方案 [J]. *光学学报*, 2019, 38(12): 1212001.
- Qiao X Y, Chen X, Ding G Q, et al. Scheme for position self-calibration based on least square method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 38(12): 1212001.
- [153] Ekberg P, Stibler L, Mattsson L. A new general

- approach for solving the self-calibration problem on large area 2D ultra-precision coordinate measurement machines [J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(5): 055001.
- [154] Qiao X, Chen X, Ekberg P, et al. Self-calibration for the 2D stage based on weighted least squares [J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(12): 125015.
- [155] Ekberg P, Su R, Leach R K. High-precision lateral distortion measurement and correction in coherence scanning interferometry using an arbitrary surface [J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 18703-18712.
- [156] Qiao X, Bai Y, Ding G, et al. Measurement and correction of lateral distortion in a Fizeau interferometer based on the self-calibration technique [J]. *Optics Express*, 2022, 30(20): 36134-36143.
- [157] Pfortner A, Schwider J. Dispersion error in white-light Linnik interferometers and its implications for evaluation procedures [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(34): 6223-6228.
- [158] Colonna de Lega X. Aberration characterization using frequency domain analysis of low-coherence interferograms [J]. *Proceedings of SPIE 2004*, 5531: 208-219.
- [159] Lehmann P. Vertical scanning white-light interference microscopy on curved microstructures [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(11): 1768-1770.
- [160] Lehmann P, Kühnhold P, Xie W. Reduction of chromatic aberration influences in vertical scanning white-light interferometry [J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(6): 065203.
- [161] Shahinian H, Hovis C D, Evans C J. Effect of retrace error on stitching coherent scanning interferometry measurements of freeform optics [J]. *Optics Express*, 2021, 29(18): 28562-28573.
- [162] Su R, Thomas M, Leach R K, et al. Effects of defocus on the transfer function of coherence scanning interferometry [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(1): 82-85.
- [163] Doi T, Toyoda K, Tanimura Y. Effects of phase changes on reflection and their wavelength dependence in optical profilometry [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(28): 7157-7161.
- [164] Harasaki A, Schmit J, Wyant J C. Offset of coherent envelope position due to phase change on reflection [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(13): 2102-2106.
- [165] Palodhi K, Coupland J M, Leach R K. Absolute surface topography measurement of composite structures using coherence scanning interferometry [C]//*Proceedings of the 11th International conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology*, date, 2011, Como, Italy. Euspen, 2011: 255-258.
- [166] Raid I, Eifler M, Kusnezowa T, et al. Calibration of ellipso-height-topometry with nanoscale gratings of varying materials [J]. *Optik*, 2015, 126(23): 4591-4596.
- [167] Thomas M, Su R, de Groot P, et al. Surface measuring coherence scanning interferometry beyond the specular reflection limit [J]. *Optics Express*, 2021, 29(22): 36121-36131.
- [168] Coupland J M, Lobera J. Measurement of steep surfaces using white light interferometry [J]. *Strain*, 2010, 46(1): 69-78.
- [169] Sheppard C J R, Larkin K. Effect of numerical aperture on interference fringe spacing [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(22): 4731-4734.
- [170] Lehmann P, Tereschenko S, Allendorf B, et al. Spectral composition of low-coherence interferograms at high numerical apertures [J]. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 2019, 15(1): 1-9.
- [171] de Groot P, Colonna de Lega X, Su R, et al. Does interferometry work? A critical look at the foundations of interferometric surface topography measurement [J]. *Proceedings of SPIE 2019*, 11102: 111020G.
- [172] Mandal R, Coupland J M, Leach R K, et al. Coherence scanning interferometry: measurement and correction of three-dimensional transfer and point-spread characteristics [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(8): 1554-1563.
- [173] Su R, Coupland J M, Wang Y, et al. Tolerance on sphere radius for the calibration of the transfer function of coherence scanning interferometry [J]. *Proceedings of SPIE 2017*, 10329: 103290L.
- [174] Su R, Wang Y, Coupland J M, et al. On tilt and curvature dependent errors and the calibration of coherence scanning interferometry [J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 3297-3310.
- [175] Su R, Thomas M, De Groot P, et al. Determination of the lateral resolution of an interference microscope using a micro-scale sphere [C]//*Proceedings of 33th Annual Meeting of American Society of Precision Engineering*, November 4-9, 2018, Las Vegas, Nevada, USA.
- [176] ISO. Geometrical product specifications (GPS) -surface texture: areal: part 600: metrological characteristics for areal-topography measuring methods: ISO 25178-600: 2019[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2009.
- [177] ISO. Geometrical product specifications (GPS) - surface texture: areal: part 600: calibration, adjustment and verification of areal topography measuring instruments: ISO/CD 25178-700: 2020[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2020.
- [178] Leach R K, Haitjema H, Su R, et al. Metrological characteristics for the calibration of surface topography measuring instruments: a review [J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 32(3): 032001.
- [179] Su R, Leach R K. Physics-based virtual coherence scanning interferometer for surface measurement [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2(2): 120-135.