

激光与光电子学进展

基于光学频率梳的表面形貌测量方法

吴冠豪^{*†}, 施立恒[†], 李尔格

清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084

摘要 表面形貌检测是工业生产和科学研究所需的关键技术之一, 高精度和高效率是该领域一直以来的发展方向。光学频率梳有着独特宽光谱、窄线宽和稳定频率的特性, 展现了优越的计量潜力, 在表面形貌测量领域有着重要的应用并取得了重要的进展。首先介绍了光学频率梳的定义; 根据不同的技术路线, 分类回顾了光学频率梳在形貌测量中的研究现状及特点; 最后, 对基于光频梳的形貌测量技术进行了展望。

关键词 光学频率梳; 形貌检测; 干涉; 显微; 轮廓术

中图分类号 TH741

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223339

Surface Topography Measurement Technology Based on Optical Frequency Comb

Wu Guanhao^{*†}, Shi Liheng[†], Li Erge

State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Surface topography measurement is one of the key technologies for industrial production and scientific research, and the pursuit of high accuracy and high efficiency has always been the direction of the field. With its unique broad spectrum, narrow linewidth, and stable frequency characteristics, optical frequency combs show superior metrology potential and have been developed for a variety of topography measurement techniques. First, the definition of optical frequency combs is introduced; the current research status and characteristics of optical frequency combs in topography measurement are categorized and reviewed according to different technical lines; finally, the outlook of optical frequency comb-based topography measurement techniques is presented.

Key words optical frequency comb; topography measurement; interference; microscopy; profilometry

1 引言

器件的表面特征和结构尺寸等三维形貌信息反映了器件的物理性质和功能特性, 对器件表面形貌的检测能力是现代工业生产的基本需求^[1]。特别是近几十年, 半导体^[2]、微机电系统(MEMS)^[3]、光学工程^[4]、摩擦学^[5]等领域快速发展, 对表面形貌检测的精度、测量范围和测量速度等参数提出了更高的要求。形貌检测技术发展至今, 形成了多种成熟方法^[6-8]。其中, 光学方法因高测速、高精度、非接触的特点得到了广泛应用。

从原理上, 基于光学技术的形貌测量方法可细分

为以摄影测量^[9]为代表的被动式测量和包括几何法^[10]、飞行时间法^[11]、干涉法^[1, 12]在内的主动式测量。被动式测量通过对单一或多个视角的图像进行匹配来计算物体的三维模型, 通常在成本较低且精度需求不高的情况下使用^[13]。主动式光学测量通过投射预定义的光点或图像, 根据反射光来重构物体表面。几何法使用相机捕获物体表面的照明光, 结合相机坐标系与照明坐标系的精确建模, 便能通过三角测量重建被照明物体上各点的坐标^[14]。以结构光为代表的几何方法^[15-16]成本低廉, 适合于精度要求不高的快速测量应用, 在各种工业检测场景十分常见。飞行时间法基于脉冲测距, 将测得的脉冲往返飞行时间乘以光速直接

收稿日期: 2022-12-17; 修回日期: 2023-01-05; 录用日期: 2023-01-06; 网络首发日期: 2023-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(51835007, 92150104)

通信作者: *guanhaowu@mail.tsinghua.edu.cn

[†]共同第一作者

得到单个测量点的距离值,再通过空间扫描得到测量“点云”,即激光雷达^[17]。直接测量光脉冲需要较高的探测带宽以保证精度,另一种常见方法则通过牺牲测量模糊范围对照明光进行强度调制,利用调制波相位解算飞行时间^[18],目前手机等设备的 TOF 相机多是采用该原理^[14]。对于微纳米级的精密测量需求,一般选择干涉法,这是现代光学计量中最精确的测量技术,主要包括单波长移相干涉^[19]、相干扫描干涉^[20]和扫频干涉^[21]3 类方案。其中,单波长移相干涉存在相位模糊的问题,因此只能检测光滑的光学元件表面或深度有限的微小结构;相干扫描干涉采用低相干光源,通过垂直扫描提取相干位置实现相位解包裹,但其光源的空间相干性通常很低,测量视场较小,一般用于毫米级以下尺度的表面检测;扫频干涉结合多个波长信息以避免相位模糊,扫描速度快、视场大,但其测量范围受限于焦深,目前工业应用较少。

在上述方法中,光源本身的性能是影响光学形貌测量方法效果的主要因素之一。比如脉冲的定时抖动会导致飞行时间测量的不确定性^[22]、激光线宽影响相位测量的分辨率^[23]、空间相干性限制了全场测量的视场大小等。面对越来越复杂的测量挑战,研究人员自然地想到通过优化光源来扩展光学形貌测量方法应用范围的内容,突破传统方法的测量极限。21 世纪初,光学频率梳(光频梳)的发现^[24]推动了计量学的巨大进步。光频梳的光谱由一系列频率间隔相等的离散纵模组成,其光频率可以直接和射频相互转换,极大简化了光学频率溯源方式。在米的重新定义下^[25],光学精密计量的最高准确度被提高了几个数量级^[26]。由于光频

梳的频率稳定性,可以作为标尺来校准计量光源^[27],也可以凭借其本身优良的时间与光谱特性作为计量光源使用^[28]。在近年来的研究中,基于光频梳的形貌测量方法在许多场景下弥补了传统光学方法的原理缺陷^[29],得到了业界大量关注。

本文旨在回顾光学频率梳在形貌测量领域的研究现状,总结不同技术路线的特点,阐述光频梳为形貌测量带来的机遇。介绍光频梳的原理和表征;根据不同的技术路线,介绍光频梳在形貌测量领域的进展;对介绍的不同技术进行比较;最后进行总结和展望。

2 光学频率梳

最初的光学频率梳来源于锁模激光器。锁模激光器输出一种周期稳定的超短脉冲激光,这种脉冲函数可以通过傅里叶级数表示,频域上可以看作一系列间隔相等的纵模序列,每个纵模对应傅里叶级数的一项。如图 1 所示,锁模激光器的频率有两个自由度:一个是重复频率 f_{rep} ,即相邻两纵模之间的频率间隔,其倒数为脉冲的时间周期;另一个是载波相位偏移频率 f_0 ,表示相邻两脉冲的载波相位相对于脉冲包络的滑移。这样,锁模激光器的第 n 根纵模频率可以表示为

$$f_n = nf_{\text{rep}} + f_0 \quad (1)$$

只有当 f_{rep} 和 f_0 都被固定时,才能得到一组稳定且唯一的纵模序列,如同一把精密的刻尺。这种完全由微波频率定义的光频可以参考至时间基准,也可以直接转换为超低相位噪声的射频信号。广义上,频率特性符合式(1)的光源都可称为光学频率梳。

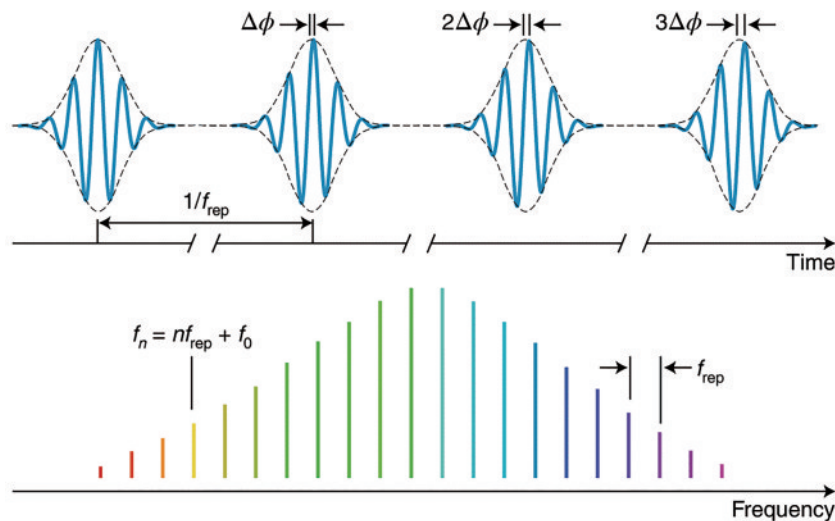


图 1 光频梳的原理^[30],其中载波包络偏移相位 $\Delta\phi = 2\pi f_0/f_{\text{rep}}$

Fig. 1 Principle of an optical frequency comb^[30], where the carrier-envelope phase is $\Delta\phi = 2\pi f_0/f_{\text{rep}}$

光频梳具有良好的时间重复性和相位稳定性,非常适合于几何量测量,已被证明是当前最具潜力的光源之一^[31],其适用范围覆盖皮米级的振动测量^[32]到千

米级的卫星编队测距^[33]。最直接的形貌测量方法可使用一个光频梳测距仪对样品表面进行面扫描,得到与测距精度相当的形貌测量结果。光频梳通常由数

十万根单纵模构成,其光谱宽、相干长度短的特性有利于抑制传统激光干涉的寄生条纹干扰^[34]和 ASE 噪声^[35],也可以直接用于相干定位;它同时保持了和普通激光相当的空间相干性,意味着在大视场下仍能得到可溯源至波长的测量结果;甚至可以利用色散元件将光频梳梳齿从空间上分离,使各个单纵模作为独立的光学探针“洒”在一片区域实现并行测量。正是由于这种多功能特性,基于光频梳诞生了不同类型的形貌测量新方法、新技术,它们展示出超越传统方法的测量能力。

3 基于光频梳的形貌测量技术

基于光频梳的形貌测量技术脉络如图 2 所示。对于大多数形貌测量技术来说,距离测量是其基本实现原理。利用光频梳可溯源的高精度、稳定的窄脉冲和

宽光谱等特性,已经发展了基于光频梳的相位式测距^[36]、脉冲对准测距^[33, 37]和光谱干涉测距^[38-39]等方法。将单点测距系统在平面展开,结合面阵探测器(如 CCD 等)进行并行探测,便能将单点测距系统扩展为全场形貌测量系统^[40-42]。但阵列探测器的灵敏度、带宽和采样率通常远低于单点探测器,不适合对检测信号中包含较高频率分量的测距原理进行扩展,因此许多研究人员选择了空间编码^[43]或机械扫描机构^[44-45]来实现基于光频梳测距的非并行形貌测量。另一方面,光频梳光谱具有独特的分立纵模的特点,可以通过色散元件分解成大量离散的测量通道,结合一些测距原理能够实现线扫描形貌测量^[46-47],甚至全场测量^[48]。在基于测距的研究之外,光频梳多纵模、高精度的特点有助于实现快速、高动态范围的同轴数字全息^[49],其也受到了广泛关注。

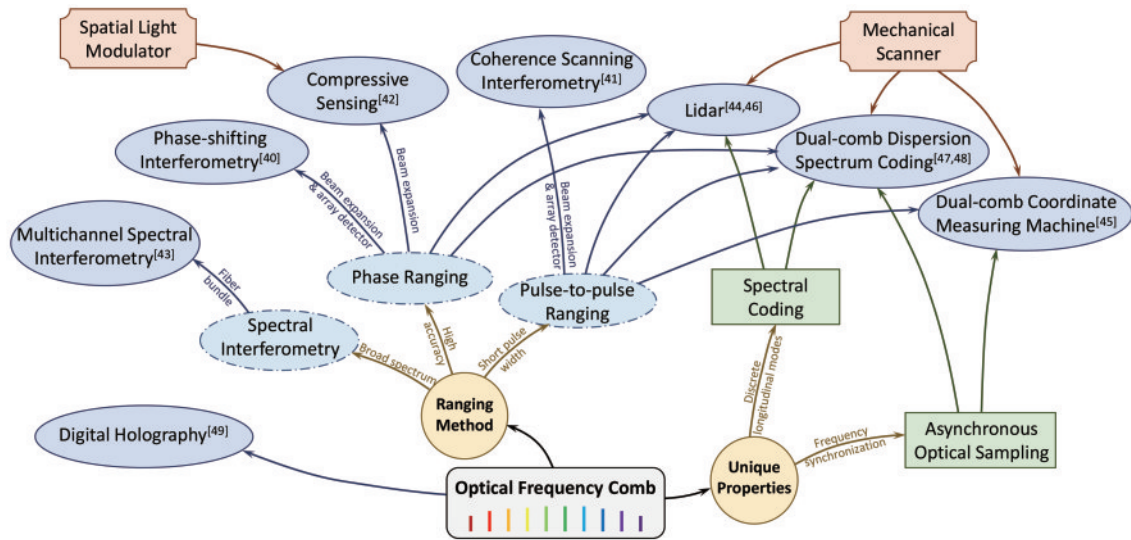


图 2 光频梳形貌测量技术脉络

Fig. 2 Venation of optical-frequency-comb-based profilometry

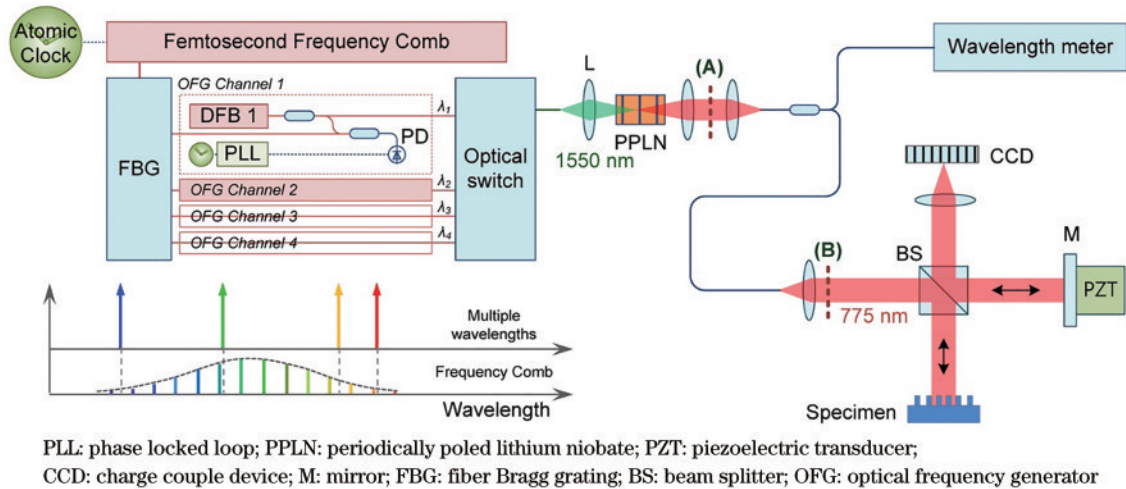
从实现形式上看,光频梳在形貌测量的应用主要有 3 种形式:第一种是将光频梳作为光频上的标尺,对传统测量方法所使用的光源波长进行标定,提升其准确度;第二种是基于相对成熟的光频梳测距技术,结合扫描装置对测量区域进行逐点扫描测距,最后合成三维形貌;最后是将光频梳作为直接测量光源,利用其独特的时频域特性进行全场形貌测量。

3.1 参考到光频梳的传统形貌测量

多波长移相干涉通过引入额外的波长来扩展单波长移相干涉的非模糊范围,从而实现更好的台阶结构测量。然而,非模糊范围对波长的不确定性非常敏感,为保证测量精度,必须对所用波长进行精确校准^[50]。韩国科学技术研究院的 Hyun 等^[51]在 2013 年提出了一种使用光频梳校准的多波长干涉仪,如图 3 所示。他们通过提取光频梳的 4 根不同纵模分别校准 4 台分布反馈(DFB)激光器,得到了 $3.44 \times 10^{-12} @ 10 \text{ s}$ 的波长

稳定度,将相位测量的非模糊范围扩大了 64500 倍,从而在 50 mm 非模糊范围内实现了 3.13 nm 的重复精度。该系统的一次测量共需要记录 24 帧图像,考虑到移相速度和信号处理速度,单次测量时间为 400 ms,且具有很大的优化空间。2018 年,清华大学的 Zhang 等^[52]报道了使用光梳参考的扫描干涉仪,其具有 1 nm 的重复精度和 45 nm 的不确定度,这种方法的测量范围在理论上没有限制,同样为大型工业样品的快速精密检测提供了潜在应用。

与单波长移相干涉仪一样,基于单波长数字全息的形貌测量同样面临着模糊范围的问题。一种常见的解决方式是引入多波长数字全息。2018 年,日本德岛大学的 Yamagiwa 等^[53]将可调谐外腔激光二极管(ECLD)与光频梳的一根纵模锁相,得到了窄线宽且高精度的可调连续激光。他们将这种光源用于多波长数字全息,构建了从 1.5 μm 到 4 mm 的合成波长链,通

图3 光频梳参考的多波长干涉系统方案示意图^[51]Fig. 3 Schematic of frequency-comb-referenced scheme of multi-wavelength interferometer^[51]

过全息术重构的三维形貌精度达到了 25 nm,并且该合成波长链还能进一步扩展至 1.20 μm。

3.2 基于光频梳单点测距的形貌测量技术

本质上,形貌测量可以看作空间分布的一系列测距结果的集合。随着光频梳测距技术的快速发展和不断成熟^[54-56],人们开发了许多基于扫描光频梳测距仪实现的形貌测量系统。为保证扫描点云的生成效率,用于形貌测量的测距仪需要针对测量场景进行优化,其中一个关键需求便是较高的测量速度。美国国家标准与技术研究院(NIST)的Coddington等^[33]于2009年首次提出了双光梳测距技术,其由于高测速、高精度和大非模糊范围的特点非常符合形貌检测的需求。2018年,德国卡尔斯鲁厄理工学院的Koos等与卡尔蔡司公司^[45]合作开发了基于双光梳测距的坐标测量机。在该系统中,平均后的测距值输出速度为 3.3 kHz,这允许在连续扫描测量探头的同时快速记录大量点,且各点的重复精度在微米量级。考虑到工业现场应用的恶劣环境,该系统基于双色修正折射率原理,消除了光纤元件因温度引起的漂移,从而允许关键的光电元件远离测试现场。同年,Koos等与瑞士联邦理工学院的Kippenberg团队^[57]合作发表了基于耗散克尔孤子(DKS)微腔双光梳的测距研究,其单点测量精度在 96.4 MHz的测量速度下达到了 284 nm,能够在子弹飞行过程中测量其轮廓,有望进一步提高形貌测量效率。我国华东师范大学的李文雪团队^[58]在2021年报道了一种基于紧密锁定双光梳光谱的形貌测量方案。凭借双光梳之间的高相干性,这种新方法可以在一次测量中同时获得透射光谱和距离信息,有助于在形貌检测的同时推断样品的化学组成。

光学微波鉴相器(OMPD)是微波光子应用中的常见器件,一般用于生成超低噪声微波^[59-60]。2018年,韩国科学技术研究院的Kim等^[61]提出了将OMPMD作为飞行时间探测器(EOS-TD),从而直接测量光频梳

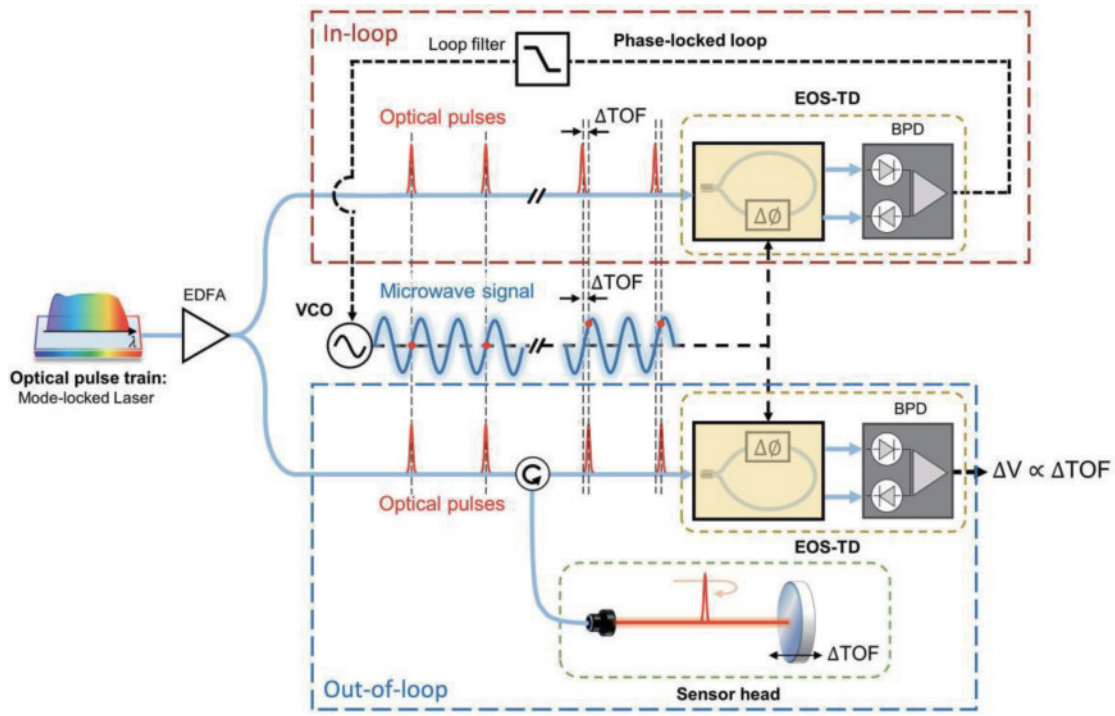
脉冲飞行时间的方法。如图4所示,该方法首先使用一个EOS-TD,将压控振荡器(VCO)输出的微波频率闭环锁定在光频梳重复频率的整数倍上;再另取光频梳的一路光作为测距光照射待测样品,将返回光送入另一个EOS-TD;在OMPMD中,对光脉冲与对齐的微波相位进行采样,将采样结果转换为电压输出;在一定的测量范围内,输出电压与脉冲飞行时间一一对应,因此可以实现速度等同于光频梳重复频率的快速测距。在 9.1 mm的非模糊范围内,该方法在平均 40 ms后的测量精度可达 15 nm。该团队在2020年对该方法做了改进^[44]:将VCO直接替换为高速探测器,探测光频梳时域脉冲信号,利用EOS-TD对探测器的响应信号进行采样,得到的单点测距重复精度在 4 ns时就达到了 14 nm,平均 5 ms后达到了 180 pm。结合扫描振镜成像系统,改进方法对复杂表面形貌测量的重复精度约 10 nm(单点平均 0.5 ms)。

虽然光频梳测距技术凭借显著的高精度和高测速优势,在许多高端装配制造领域逐步替代了传统测距技术。但在形貌检测应用中,机械扫描的精度限制了测距系统的整体性能,这也是单点扫描方式的共性问题^[62]。随着机械加工和控制技术的升级,基于扫描光频梳测距仪进行形貌测量的短板将被逐渐填补,但在精密计量应用中,前景更广的是基于光频梳的全场形貌测量。

3.3 基于光频梳的全场形貌测量

1) 色散光谱编码

从光谱上看,光频梳是由大量间隔相等的频率纵模构成的,因此可以通过色散元件直接将光频梳的各个纵模在空间上分离^[63],这时便能得到一组空间编码的激光阵列。这种色散光谱编码方式仅需一次脉冲往返便能收集一片区域信息,对需要高速成像的领域有着较大的吸引力^[64-67]。2018年,华东师范大学的Wang等^[47]报道了一种基于双光梳测距和光谱编码的线扫描

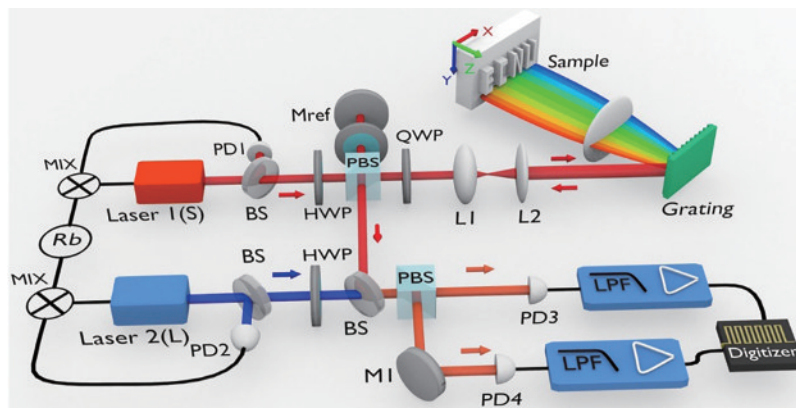


EOS-TD: electro-optic-sampling-based timing detector; EDFA: erbium-doped fibre amplifier; BPD: balanced photodetector; VCO: voltage-controlled oscillator

图 4 基于 OMPD 的飞行时间测距^[44], 锁相环内(红色框内)参考光频梳构建低噪声射频源, 环外(蓝色框内)用于 TOF 测距
Fig. 4 Time-of-flight (TOF) ranging based on OMPD^[44], in the PLL (in the red box), the reference optical frequency comb is used to construct a low-noise RF source, and out-of-loop (in the blue box) is used for TOF ranging

系统, 该系统能够同时测量表面形貌及其反射率, 如图 5 所示。双光梳光谱的相频斜率与样品的高度分布成正比, 因此可以根据单个子频率梳^[69]的光谱相位直接获得 2.28 mm 长的线场轮廓, 再配合垂直扫描单元便能实现面测量。重复频率差为 5 kHz 时, 其单次线

测量的重复精度为 11.7 μm, 而在平均 1 s 后可以达 159 nm。2021 年, 华东师范大学的闫明团队^[68]研究了基于电光梳的色散光谱编码成像, 并通过单光子计数器实现了弱光下的线阵成像。



Rb: rubidium clock; PD: photodetector; BS: beam splitter; HWP: half-wave plate; QWP: quarter-wave plate; PBS: polarization beam splitter; L: lens; M: mirror; LPF: low-pass filter; MIX: mixer

图 5 通过线扫描光谱编码的双光梳形貌测量系统^[47]
Fig. 5 Line-scan spectrum-encoded dual-comb interferometry^[47]

日本德岛大学的研究团队^[70]在相衬显微镜的研究中, 也选择了光栅光谱编码与双光梳光谱结合的形式。他们在 2018 年将光栅和虚拟成像相控阵 (VIPA) 结合, 使光频梳梳齿展开为二维阵列, 实现了 kHz 速度的

无扫描共焦成像^[48], 利用各个梳齿的单波长相位, 可以对纳米结构的表面形貌进行重构。在之后的几年, 该团队还引入了光学图像放大技术^[71]和图像校正技术^[72], 使单次测量重复精度达到了 14 nm。

2) 相干扫描干涉

传统的相干扫描干涉以白光干涉仪为主流,常用于对表面结构或纹理的精密非接触测量,是精密器件制造、工艺开发等应用中的关键环节^[1]。然而白光干涉仪以机械位移为基准,限制了其测量速度和准确度;且白光的低空间相干性大大限制了其测量视场^[34]。2006年,日本新潟大学的 Choi 等^[73-74]基于光频梳脉冲对准测距的原理^[75],利用相位调制将重复频率扫描范围扩展到了吉赫兹量级,从而能够分辨微米级的表面起伏。受限于当时的技术条件,通过相位调制产生的光梳谱宽仅有 2 nm(FWHM),限制了该方法的测量精度。到2012年,该课题组^[76]引入了超连续谱光源,在 17.2 $\mu\text{m/s}$ 的垂直扫描速度下将测量重复精度提高到了 0.6 μm 。

2013年,韩国科学技术研究院的 Joo 等^[77]将光频梳相干扫描干涉用于微电子结构的快速全场形貌测量,如图 6 所示。该系统通过额外的光纤构建了不等

臂的干涉光路,这种光学延迟将重复频率的变化转换为参考脉冲和测量脉冲之间的光程扫描。得益于电动位移台、压电陶瓷和电光相位调制器的串联控制,光频梳的重复频率能够以溯源至原子钟的准确度得到快速扫描,其理论上的最大垂直扫描速度可达 100 m/s,因此限制实际测量速度的主要因素是相机帧率和信号处理的速度^[78]。对于 70 μm 的台阶高度,该系统的重复精度达到了 45.1 nm,并且测量范围可以得到进一步扩展^[79]。此外,由于光频梳的高空间相干性,可以通过扩束来灵活调控测量视场大小^[41],而不用担心条纹对比度降低的问题。2018年,他们^[80]将该方法应用于 50 mm 直径的粗糙 SiC 凹面镜形貌测量,得到了 0.1 μm 的重复精度,进一步证明了光频梳相干扫描干涉在大视场下的测量能力。2020年,该方法被扩展为多波段的并行测量系统,实现了对不同目标、不同需求的并行精密形貌测量^[81]。

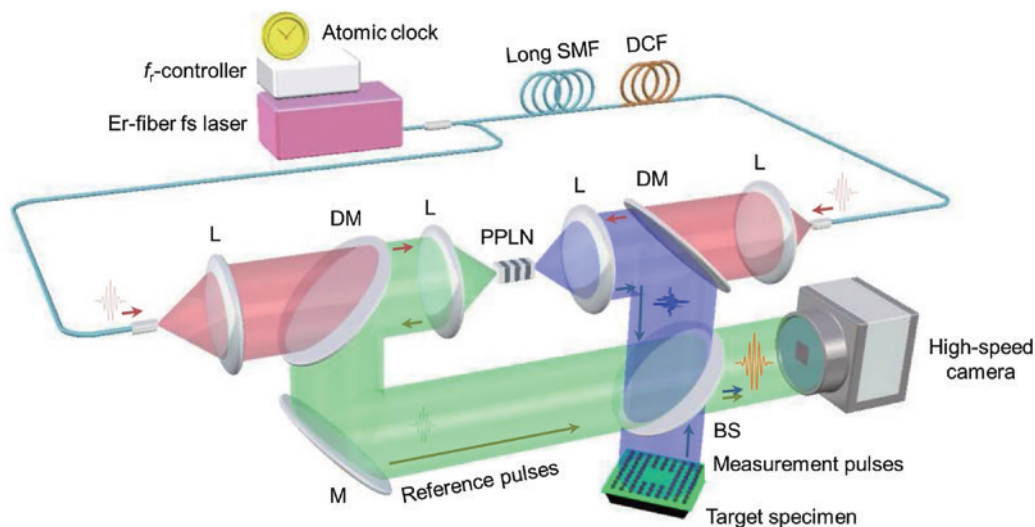


图 6 基于扫描光频梳重复频率的相干扫描干涉形貌测量^[77]

Fig. 6 Coherent scanning interference profilometry based on scanning optical frequency comb repetition frequency^[77]

本课题组研究了用于求解相干扫描干涉相位解的迭代最小二乘算法^[40],并结合合成波长技术,在 2020 年实现了从脉冲对准到载波干涉相位的溯源^[82]。在相干扫描干涉中,干涉包络的顶点位置(EPP)和载波干涉(CWI)相位都反映了表面高度信息。其中,CWI的分辨率能达到纳米级,但其非模糊范围最大仅为半波长;而 EPP 具有较大的非模糊范围,但其定位精度不高,无法直接与 CWI 结果衔接。为了使 EPP 解能够过渡至 CWI 解,基于合成波长干涉(SWI)的原理,在干涉仪中分别添加了不同波长的光学带通滤波器来提取移相干涉相位,构成了数十微米的合成波长,用于衔接 EPP 的测量范围和 CWI 的测量精度,如图 7 所示。合成波长的引入有效克服了脉冲对准方法的精度限制,使得光频梳相干扫描干涉技术对 70 μm 的台阶高度的测量重复性达到了 7 nm,展现了微纳器件超精密检测的能力和应用潜力。

3) 空间编码

常见的光学形貌测量一般使用 CCD 等面阵感光器件获取全场光学信息,再从中解耦形貌特征,但面阵感光器件由于低灵敏度、低带宽等特性不适合用来直接采集光频梳时域信号^[83]。通过数字微镜器件(DMD)等空间光调制器件对光场进行空间编码,再使用单像素光电探测器和计算成像技术能够检测到高频干涉信号的全场分布^[84]。特别是结合压缩感知技术后,可以通过少于图像像素总数的样本数量完成图像信息的重建^[85-86],压缩率主要取决于样品的稀疏程度。2013年,日本宇都宫大学的 Pham 等^[43]首次报道了基于光频梳模间拍频测距的单像素形貌测量系统,测量所用的谐波频率为 988 MHz,对应于 15.18 cm 的非模糊范围,不使用压缩感知时能够实现 100 μs 每像素的测量速度和微米级重复精度。将 DMD 替代传统空间光调制器,这种改进能够实现更快的测量速度和更高

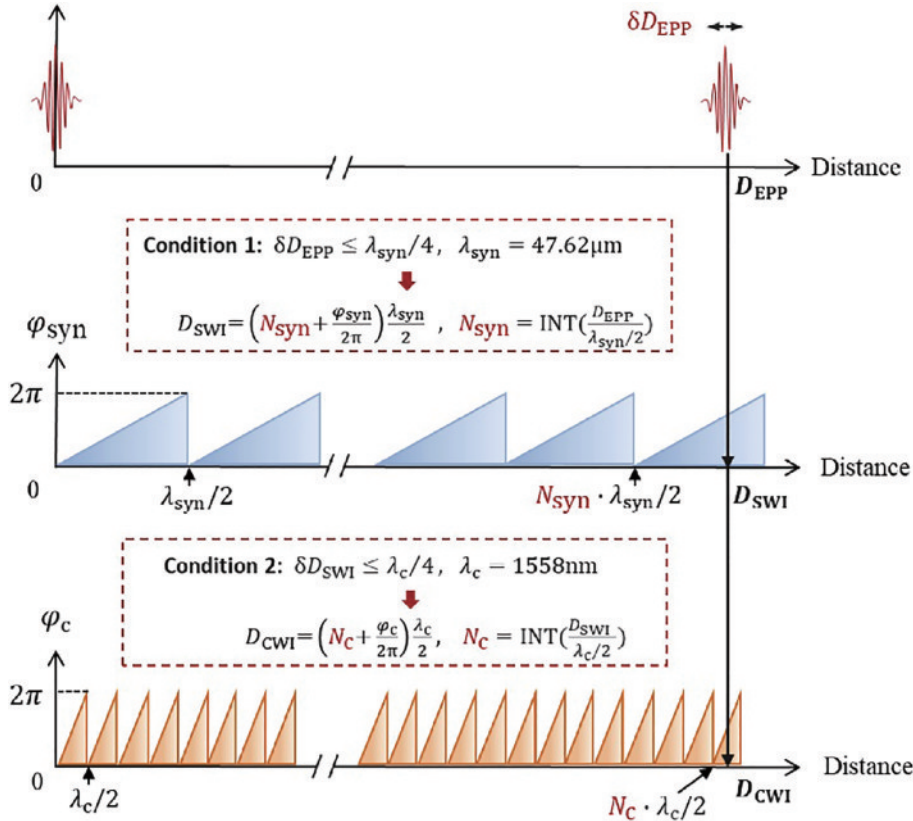


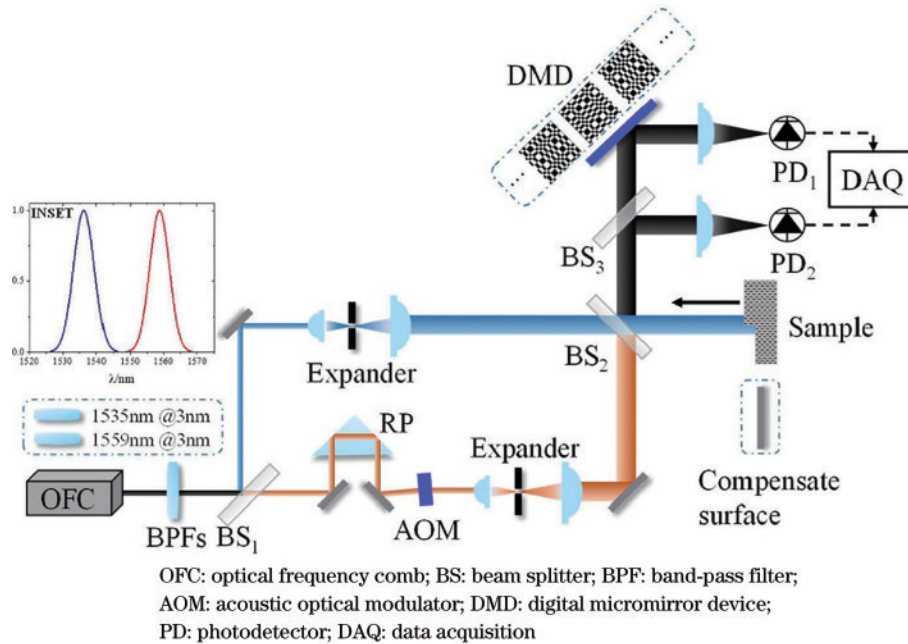
图 7 通过合成波长链接脉冲对准与载波干涉相位的表面形貌重建原理^[82]

Fig. 7 Principle of surface topography reconstruction by synthetic-wavelength-linked pulse alignment and carrier interference phase^[82]

的横向分辨率^[87]。在模间拍频测距的基础上,该团队^[88]在 2017 年成功利用单像素相机实现了射频相位到光频相位的过渡,实现了 8.7 nm 的测量精度。

本课题组^[89]于 2021 年提出了基于光频梳外差干涉和合成波长法的单像素形貌测量系统,其用于

MEMS 器件检测,在百微米级的垂直测量范围内重复精度可达 5 nm。为提高该系统的测量效率,本课题组^[90]同年提出了基于优化矩阵测量基排序的压缩采样算法,系统如图 8 所示。该系统前端是一个基于光频梳的外差干涉仪,探测端的 DMD 被加载不同的掩模



OFC: optical frequency comb; BS: beam splitter; BPF: band-pass filter; AOM: acoustic optical modulator; DMD: digital micromirror device; PD: photodetector; DAQ: data acquisition

图 8 基于 DMD 的单像素光频梳形貌测量系统^[90]

Fig. 8 Schematic of single pixel optical frequency comb profile measurement system based on DMD^[90]

图案,并使用单像素探测器记录各个掩模下的外差信号。每组外差信号的振幅和相位能够与所有像素产生映射关系,因此通过部分测量基也能重建部分形貌信息,重建质量与所用测量基的重要性有关^[91]。优化矩阵测量基排序能够有效解决固定排序哈达玛基对波前敏感的问题,在采样压缩率为 20% 的条件下实现了 5 nm 重复精度,而不需要复杂的波前校正,全场单次测量用时至 6 ms,表现出良好的压缩效果。

4) 光谱干涉

对于一个以光频梳为光源的迈克耳孙干涉仪来说,当测量脉冲和参考脉冲未完全对准时,其干涉光谱上的各个纵模会因为随光频连续变化的相位差产生强度调制,在整个光谱上表现为周期性波动^[39]。因此,使用光谱仪直接测量干涉光谱后也能得到测量脉冲与参考脉冲的距离信息。2020 年,天津大学的 Zhao 等^[92]通过单点扫描的形式将光频梳光谱干涉应用于形貌检

测,实现了优于 7 μm 的重复精度。2022 年,该团队^[93]将这项技术用于水下三维成像,重复精度达到了 8 μm 。

受到光谱仪分辨率的限制,光谱干涉的测量范围一般被限制在毫米级^[94]。日本电气通信大学的 Minoshima 等^[95]早在 1994 年就提出了啁啾脉冲三维成像技术,通过啁啾将脉冲光谱在时域展开,再通过探针脉冲对啁啾脉冲进行采样即可完成测量,其测量范围完全取决于啁啾量。2017 年,他们^[96]提出了基于光频梳的啁啾光谱干涉技术,通过从光谱仪中定位最低频率的光谱干涉条纹位置来确定探针脉冲对啁啾脉冲的采样位置。通过自制的线阵光谱仪,该方法可以实现线扫描的三维形貌测量,对于高达 3 m 的台阶结构也能得到 10 μm 以内的重复精度。2020 年,该团队^[97]引入卷积算法,使啁啾光谱干涉的垂直分辨率达到了 0.35 μm 。如图 9 所示,他们^[42]于 2021 年通过在系统

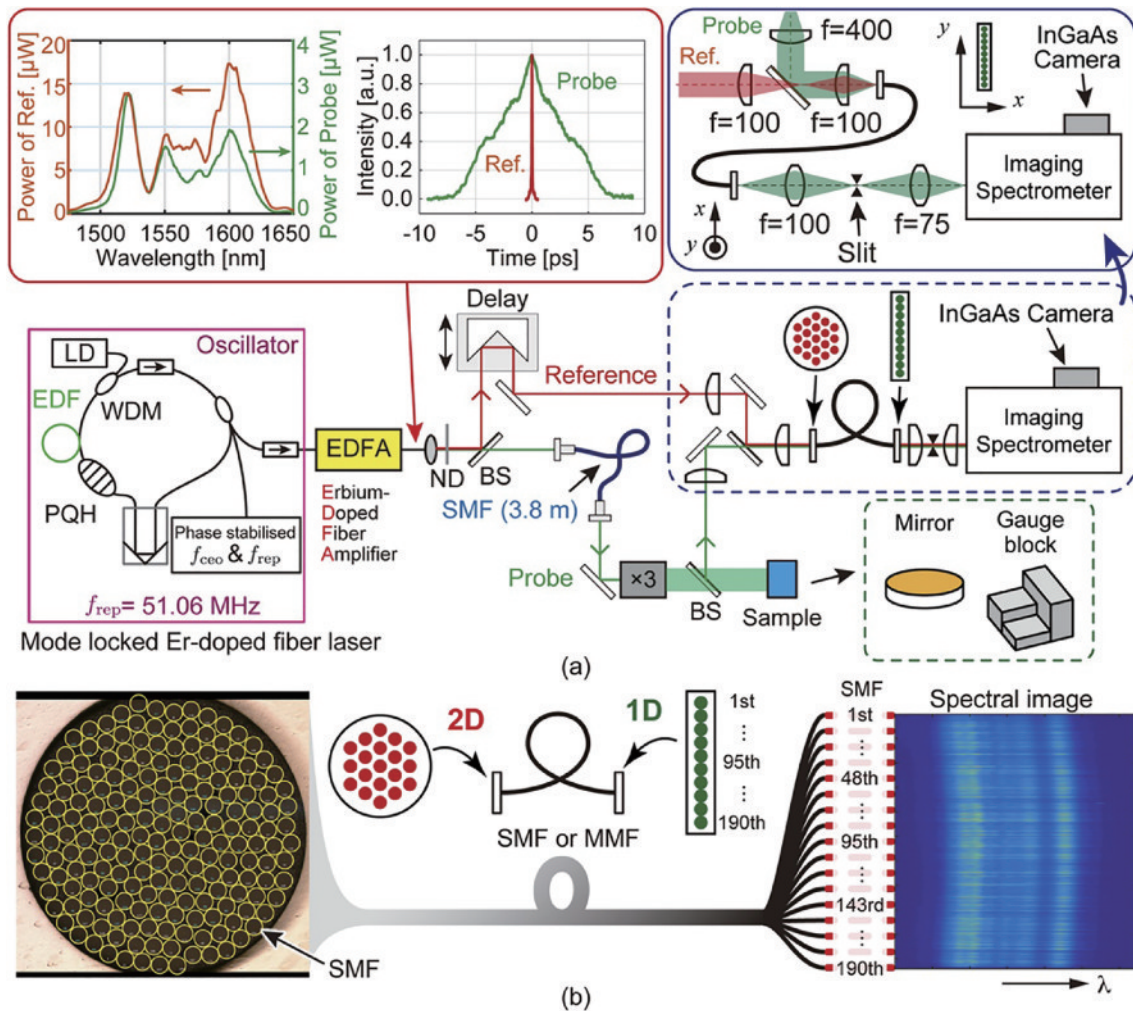


图 9 基于光学频率梳啁啾光谱干涉的单次曝光三维成像^[42]。(a)实验装置图,左上角为光频梳光谱和自相关曲线;(b)左边是由 190 根单模光纤组成的光纤束探头,右图为成像光谱仪捕获的光谱图

Fig. 9 One-shot three-dimensional imaging by spectral interferometry of a chirped optical frequency comb^[42]. (a) Diagram of the experimental setup, in which the optical frequency comb spectrum and autocorrelation curve are shown in the upper left corner; (b) a fiber bundle probe consisting of 190 single-mode fibers is shown on the left, and the spectrum captured by the imaging spectrometer is shown on the right

中添加光纤束搭建了二维光谱仪,实现了动态范围达 10^6 、单次曝光的全场形貌测量系统。该系统可以根据实际需求灵活调节啾啾量,以平衡测量范围与垂直分辨率,理论的垂直分辨率极限可达 nm 级。这种单次曝光成像技术能够满足从工厂车间到生物工程的快速测量需求,但目前的局限是可测的像素数量较少。

5) 数字全息

数字全息利用干涉直接记录物光的波前信息,通过传播方程反演来自物体的光场幅度和相位,从而解耦出物体的三维形貌。2012年,德国 Stuttgart 大学的 Körner 等^[49]将高重复频率的光频梳直接应用于数字全息中,从而通过单幅全息图获得多重切片效果。他们使用 Fabry-Pérot 腔将光频梳的重复频率放大到 5.994 GHz,使得脉冲重复间隔缩短至 50.00 mm,通过调整脉冲对准的位置,便能得到包含任意位置的多重全息切片。

2021年,德国马克斯·普朗克量子光学研究所的 Hänsch 团队^[98]报道了基于双光梳光谱的数字全息,其系统原理如图 10 所示。该系统采用高重复频率、窄带宽的双电光梳,由信号光梳发出的周期性脉冲序列照亮一个物体,被物体散射的波在相机传感器处与本振光梳干涉,用相机连续记录干涉图样。基于双光梳光谱原理,可以获得每个像素上不同波长散射光的幅度和相位,从而实现全息形貌重构。

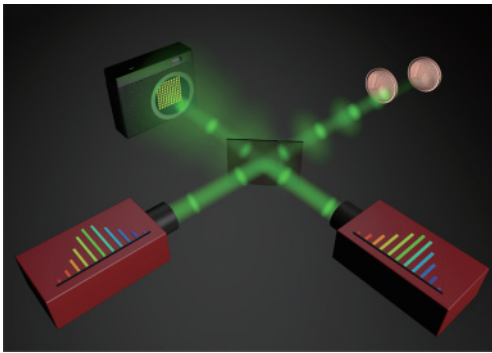


图 10 双光梳数字全息系统原理^[98]

Fig. 10 Principle of dual-comb digital holography^[98]

4 方法比较

已从测量原理的角度分类介绍了基于光频梳的形貌测量技术,而对于用户来说,也非常关心测量的实现方式。将以上方法分成单点扫描、线扫描和全场测量 3 类,并选择其中具有代表性的工作成果进行比较,如图 11 所示。从测量范围上考虑,由于单点扫描和线扫描方式的投射光线能量比较集中,更适合于远距离探测,如对米量级工件的形貌测量等应用。但机械扫描装置本身存在较大的不确定度,因此对于微纳米级精度要求的场景,采用全场探测的方式更为稳定可靠。通常使用动态范围(测量范围/精密度)来评价系统的

整体性能,这和一次测量中总信息量紧密相关,除了测量原理外,对系统更大的限制来自于测量时间、噪声水平、像素数量等因素。因此在选择测量方式时,还需要考虑应用场景和实施成本,以确保能够体现光频梳形貌测量的优越性。

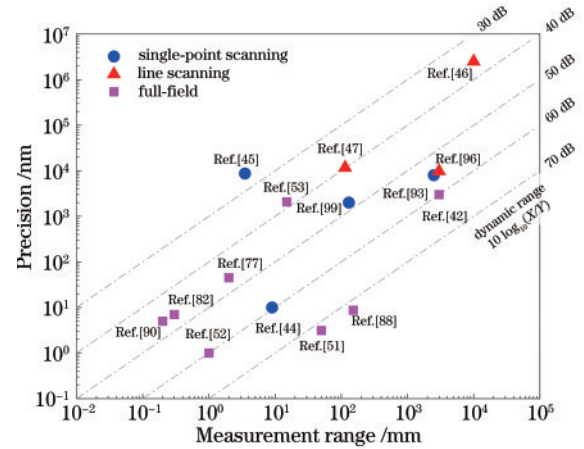


图 11 代表性光频梳形貌测量技术比较,不同工作的测试条件并不统一

Fig. 11 Comparison of representative comb-based topography measurement techniques, the test conditions of different works are not uniform

5 总 结

虽然光学形貌测量方法已广泛应用在工业生产和科学研究中,但如何实现大范围、高精度、高测速的在线测量始终是一大挑战。光学频率梳凭借宽光谱、窄线宽和可溯源至频率基准的准确性的特点为几何计量学带来了新的突破。特别是近十年来,随着光频梳测距技术的不断发展,越来越多的研究人员从不同的路线开展了基于光频梳的形貌测量技术研究,展现了基于光频梳的形貌测量技术超越传统方法的优异性能。在业内对集成小型化光频梳的不断推动下,基于光频梳的形貌测量系统有望在诸多场景代替传统的形貌测量设备,为生产和科研提供更准确、更高效的支持。

参 考 文 献

- [1] de Groot P. Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(1): 1-65.
- [2] Patti R S. Three-dimensional integrated circuits and the future of system-on-chip designs[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2006, 94(6): 1214-1224.
- [3] Espinosa H D, Prorok B C, Fischer M. A methodology for determining mechanical properties of freestanding thin films and MEMS materials[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2003, 51(1): 47-67.
- [4] Zhang X D, Zeng Z, Liu X L, et al. Compensation strategy for machining optical freeform surfaces by the combined on- and off-machine measurement[J]. *Optics*

- Express, 2015, 23(19): 24800-24810.
- [5] Novak E, Stout T. Interference microscopes for tribology and corrosion quantification[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6616: 66163B.
- [6] TAYLOR HOBSON[EB/OL]. [2022-10-08]. <https://www.taylor-hobson.com/>.
- [7] BRUKER[EB/OL]. [2022-10-08]. <https://www.bruker.com/>.
- [8] Wu D X, Fang F Z. Development of surface reconstruction algorithms for optical interferometric measurement[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2021, 16(1): 1-31.
- [9] Fonstad M A, Dietrich J T, Courville B C, et al. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2013, 38(4): 421-430.
- [10] Salvi J, Fernandez S, Pribanic T, et al. A state of the art in structured light patterns for surface profilometry[J]. Pattern Recognition, 2010, 43(8): 2666-2680.
- [11] Kwak H, Ahn C, Na Y J, et al. 785-nm frequency comb-based time-of-flight detection for 3D surface profilometry of silicon devices[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(5): 3150908.
- [12] Shen H, Zhu R H, Gao Z S, et al. Design and fabrication of computer-generated holograms for testing optical freeform surfaces[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(3): 32201-32205.
- [13] 丁少闻, 张小虎, 于起峰, 等. 非接触式三维重建测量方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 070003.
Ding S W, Zhang X H, Yu Q F, et al. Overview of non-contact 3D reconstruction measurement methods[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 070003.
- [14] Marrugo A G, Gao F, Zhang S. State-of-the-art active optical techniques for three-dimensional surface metrology: a review[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2020, 37(9): B60-B77.
- [15] Zhang S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 106: 119-131.
- [16] Won R. Structured light spiralling up[J]. Nature Photonics, 2017, 11(10): 619-622.
- [17] Dong P L, Chen Q. Lidar remote sensing and applications[M]. Boston: CRC Press, 2017.
- [18] Hansard M, Lee S, Choi O, et al. Time-of-flight cameras: principles, methods and applications[M]. London: Springer, 2013.
- [19] Creath K. V phase-measurement interferometry techniques[J]. Progress in Optics, 1988, 26: 349-393.
- [20] Sandoz P, Devillers R, Plata A. Unambiguous profilometry by fringe-order identification in white-light phase-shifting interferometry[J]. Journal of Modern Optics, 1997, 44(3): 519-534.
- [21] Yamaguchi I, Yamamoto A, Yano M. Surface topography by wavelength scanning interferometry[J]. Optical Engineering, 2000, 39(1): 40-46.
- [22] Shi H S, Song Y J, Liang F, et al. Effect of timing jitter on time-of-flight distance measurements using dual femtosecond lasers[J]. Optics Express, 2015, 23(11): 14057-14069.
- [23] Smith D T, Pratt J R, Howard L P. A fiber-optic interferometer with subpicometer resolution for dc and low-frequency displacement measurement[J]. The Review of Scientific Instruments, 2009, 80(3): 035105.
- [24] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, et al. Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis[J]. Science, 2000, 288(5466): 635-640.
- [25] Quinn T J. Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2001)[J]. Metrologia, 2003, 40(2): 103-133.
- [26] 特奥多尔·亨施, 潘笃武. 精密度的追求[J]. 自然杂志, 2007, 29(1): 12-20.
Hänsch T W, Pan D W. Passion for precision[J]. Chinese Journal of Nature, 2007, 29(1): 12-20.
- [27] Schuhler N, Salvadé Y, Lévêque S, et al. Frequency-comb-referenced two-wavelength source for absolute distance measurement[J]. Optics Letters, 2006, 31(21): 3101-3103.
- [28] 李岩. 光频梳在精密测量中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8): 1841-1858.
Li Y. Precision measurement and spectroscopic applications of femtosecond optical frequency combs[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 1841-1858.
- [29] Kim S W, Jang Y S, Park J, et al. Dimensional metrology using mode-locked lasers[M]//Gao W. Metrology. Precision manufacturing. Singapore: Springer, 2019: 1-34.
- [30] Picqué N, Hänsch T W. Frequency comb spectroscopy [J]. Nature Photonics, 2019, 13(3): 146-157.
- [31] Fortier T, Baumann E. 20 years of developments in optical frequency comb technology and applications[J]. Communications Physics, 2019, 2: 153.
- [32] Iwasaki A, Nishikawa D, Okano M, et al. Temporal-offset dual-comb vibrometer with picometer axial precision [J]. APL Photonics, 2022, 7(10): 106101.
- [33] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, et al. Rapid and precise absolute distance measurements at long range [J]. Nature Photonics, 2009, 3(6): 351-356.
- [34] Oh J S, Kim S W. Femtosecond laser pulses for surface-profile metrology[J]. Optics Letters, 2005, 30(19): 2650-2652.
- [35] Kim D, Lu Y, Park J, et al. Rigorous single pulse imaging for ultrafast interferometric observation[J]. Optics Express, 2019, 27(14): 19758-19767.
- [36] 张晓声, 易旺民, 胡明皓, 等. 基于飞秒激光模间拍频法的大尺寸测距方法[J]. 物理学报, 2016, 65(8): 080602.
Zhang X S, Yi W M, Hu M H, et al. Large-scale absolute distance measurement using inter-mode beat of a femtosecond laser[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(8): 080602.
- [37] Zhou S Y, Le V, Xiong S L, et al. Dual-comb

- spectroscopy resolved three-degree-of-freedom sensing [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(2): 243-251.
- [38] Wang J D, Lu Z Z, Wang W Q, et al. Long-distance ranging with high precision using a soliton microcomb[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(12): 1964-1972.
- [39] Joo K N, Kim S W. Absolute distance measurement by dispersive interferometry using a femtosecond pulse laser [J]. *Optics Express*, 2006, 14(13): 5954-5960.
- [40] Wang Y, Xiong S L, Wu G H. Femtosecond laser-based phase-shifting interferometry for optical surface measurement [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(11): 113105.
- [41] Joo W D, Park J, Kim S, et al. Phase shifting interferometry for large-sized surface measurements by sweeping the repetition rate of femtosecond light pulses [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2013, 14(2): 241-246.
- [42] Kato T, Uchida M, Tanaka Y, et al. One-shot three-dimensional imaging using a two-dimensional spectrometer with a fiber bundle[J]. *Optics Express*, 2021, 29(26): 43778-43792.
- [43] Pham Q D, Hayasaki Y. Optical frequency comb interference profilometry using compressive sensing[J]. *Optics Express*, 2013, 21(16): 19003-19011.
- [44] Na Y J, Jeon C G, Ahn C, et al. Ultrafast, sub-nanometre-precision and multifunctional time-of-flight detection[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(6): 355-360.
- [45] Weimann C, Messner A, Baumgartner T, et al. Fast high-precision distance metrology using a pair of modulator-generated dual-color frequency combs[J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 34305-34335.
- [46] Riemensberger J, Lukashchuk A, Karpov M, et al. Massively parallel coherent laser ranging using a soliton microcomb[J]. *Nature*, 2020, 581(7807): 164-170.
- [47] Wang C, Deng Z J, Gu C L, et al. Line-scan spectrum-encoded imaging by dual-comb interferometry[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(7): 1606-1609.
- [48] Eiji H S, Takeo M, Takahiko M, et al. Scan-less confocal phase imaging based on dual-comb microscopy [J]. *Optica*, 2018, 5(5): 634-643.
- [49] Körner K, Pedrini G, Alexeenko I, et al. Short temporal coherence digital holography with a femtosecond frequency comb laser for multi-level optical sectioning[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7237-7242.
- [50] Falaggis K, Towers D P, Towers C E. Method of excess fractions with application to absolute distance metrology: theoretical analysis[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(28): 5484-5498.
- [51] Hyun S, Choi M, Chun B J, et al. Frequency-comb-referenced multi-wavelength profilometry for largely stepped surfaces[J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 9780-9791.
- [52] Zhang W P, Wei H Y, Yang H L, et al. Comb-referenced frequency-sweeping interferometry for precisely measuring large stepped structures[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(5): 1247-1253.
- [53] Yamagiwa M, Minamikawa T, Trovato C, et al. Multicascade-linked synthetic wavelength digital holography using an optical-comb-referenced frequency synthesizer[J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 26292-26306.
- [54] 周维虎, 石俊凯, 纪荣祎, 等. 飞秒激光频率梳精密测距技术综述[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(8): 1859-1868. Zhou W H, Shi J K, Ji R Y, et al. High-precision distance measurement using femtosecond laser frequency comb[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(8): 1859-1868.
- [55] Li Y P, Cai Y W, Li R M, et al. Large-scale absolute distance measurement with dual free-running all-polarization-maintaining femtosecond fiber lasers[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(9): 091202.
- [56] 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.
- [57] Trocha P, Karpov M, Ganin D, et al. Ultrafast optical ranging using microresonator soliton frequency combs[J]. *Science*, 2018, 359(6378): 887-891.
- [58] Deng Z J, Liu Y, Zhu Z W, et al. Achieving precise spectral analysis and imaging simultaneously with a mode-resolved dual-comb interferometer[J]. *Sensors*, 2021, 21(9): 3166.
- [59] Xie X P, Bouchand R, Nicolodi D, et al. Photonic microwave signals with zeptosecond-level absolute timing noise[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(1): 44-47.
- [60] Jung K, Kim J. Subfemtosecond synchronization of microwave oscillators with mode-locked Er-fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(14): 2958-2960.
- [61] Lu X, Zhang S Y, Jeon C G, et al. Time-of-flight detection of femtosecond laser pulses for precise measurement of large microelectronic step height[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(7): 1447-1450.
- [62] Lichti D D. A review of geometric models and self-calibration methods for terrestrial laser scanners[J]. *Boletim De Ciências Geodésicas*, 2010, 16(1): 1-17.
- [63] Diddams S A, Hollberg L, Mbele V. Molecular fingerprinting with the resolved modes of a femtosecond laser frequency comb[J]. *Nature*, 2007, 445(7128): 627-630.
- [64] Mahjoubfar A, Goda K, Ayazi A, et al. High-speed nanometer-resolved imaging vibrometer and velocimeter [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(10): 101107.
- [65] Mahjoubfar A, Chen C, Niazi K R, et al. Label-free high-throughput cell screening in flow[J]. *Biomedical Optics Express*, 2013, 4(9): 1618-1625.
- [66] Dong X, Zhou X, Kang J Q, et al. Ultrafast time-stretch microscopy based on dual-comb asynchronous optical sampling[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(9): 2118-2121.
- [67] Feng P P, Kang J Q, Tan S S, et al. Dual-comb spectrally encoded confocal microscopy by electro-optic modulators[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(11): 2919-2922.
- [68] Hu H Q, Ren X Y, Wen Z Y, et al. Single-pixel photon-counting imaging based on dual-comb interferometry[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(6): 1379.
- [69] Zhu Z B, Wu G H. Dual-comb ranging[J]. *Engineering*,

- 2018, 4(6): 772-778.
- [70] Hase E J, Minamikawa T, Miyamoto S, et al. Scan-less, kilo-pixel, line-field confocal phase imaging with spectrally encoded dual-comb microscopy[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(1): 6801408.
- [71] Mizuno T, Tsuda T, Hase E J, et al. Optical image amplification in dual-comb microscopy[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 8338.
- [72] Mizuno T, Nakajima Y, Hata Y Y, et al. Computationally image-corrected dual-comb microscopy with a free-running single-cavity dual-comb fiber laser[J]. *Optics Express*, 2021, 29(4): 5018-5032.
- [73] Choi S, Yamamoto M, Moteki D, et al. Frequency-comb-based interferometer for profilometry and tomography [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(13): 1976-1978.
- [74] Choi S, Kurokawa T. Profilometry based on optical frequency comb[C]//2009 Conference on Lasers & Electro Optics & The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, August 30-September 3, 2009, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2009.
- [75] Ye J. Absolute measurement of a long, arbitrary distance to less than an optical fringe[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(10): 1153-1155.
- [76] Choi S, Kasiwagi K, Kasuya Y, et al. Multi-gigahertz frequency comb-based interferometry using frequency-variable supercontinuum generated by optical pulse synthesizer[J]. *Optics Express*, 2012, 20(25): 27820-27829.
- [77] 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): 15323-15334.
- [78] You J, Kim Y J, Kim S W. GPU-accelerated white-light scanning interferometer for large-area, high-speed surface profile measurements[J]. *International Journal of Nanomanufacturing*, 2012, 8(1/2): 31.
- [79] Park J, Kim S, Kim B S, et al. Tuning range extension of pulse repetition rate using chirped fiber Bragg gratings [J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 1413-1420.
- [80] Lu Y, Park J, Yu L D, 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.
- [81] Lu Y, Park J, Bian D, et al. Simultaneous 3-D surface profiling of multiple targets by repetition rate scanning of a single femtosecond laser[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2020, 21(2): 211-217.
- [82] Wang Y, Xu G Y, Xiong S L, et al. Large-field step-structure surface measurement using a femtosecond laser [J]. *Optics Express*, 2020, 28(15): 22946-22961.
- [83] Shibuya K, Minamikawa T, Mizutani Y, et al. Scan-less hyperspectral dual-comb single-pixel-imaging in both amplitude and phase[J]. *Optics Express*, 2017, 25(18): 21947-21957.
- [84] DeVerse R A, Coifman R R, Coppi A C, et al. Application of spatial light modulators for new modalities in spectrometry and imaging[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4959: 12-22.
- [85] Duarte M F, Davenport M A, Takhar D, et al. Single-pixel imaging via compressive sampling[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 83-91.
- [86] Donoho D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [87] Pham Q D, Hayasaki Y. Optical frequency comb profilometry using a single-pixel camera composed of digital micromirror devices[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(1): A39-A44.
- [88] Pham Q D, Hayasaki Y. Combining phase images measured in the radio frequency and the optical frequency ranges[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(11): 2062-2065.
- [89] Xu G Y, Wang Y, Xiong S L, et al. Digital-micromirror-device-based surface measurement using heterodyne interferometry with optical frequency comb[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(25): 251104.
- [90] Xu G Y, Wang Y, Chen J Y, et al. Compression-coding-based surface measurement using a digital micromirror device and heterodyne interferometry of an optical frequency comb[J]. *Optics Express*, 2021, 29(14): 22240-22251.
- [91] Sun M J, Edgar M P, Gibson G M, et al. Single-pixel three-dimensional imaging with time-based depth resolution [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12010.
- [92] Zhao H H, Zhang Z Q, Xu X Y, et al. Three-dimensional imaging by frequency-comb spectral interferometry[J]. *Sensors*, 2020, 20(6): 1743.
- [93] Zhao H H, Xu X Y, Qian Z W, et al. High precision underwater 3D imaging of non-cooperative target with frequency comb[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 148: 107749.
- [94] Xiong S L, Chen J Y, Zhou S Y, et al. Influence of spectral resolution on dispersive interferometry of optical frequency comb[J]. *Optics Communications*, 2022, 503: 127464.
- [95] Minoshima K, Matsumoto H, Zhang Z G, et al. Simultaneous 3-D imaging using chirped ultrashort optical pulses[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1994, 33(9B): L1348.
- [96] Kato T, Uchida M, Minoshima K. No-scanning 3D measurement method using ultrafast dimensional conversion with a chirped optical frequency comb[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 3670.
- [97] Kato T, Uchida M, Tanaka Y, et al. High-resolution 3D imaging method using chirped optical frequency combs based on convolution analysis of the spectral interference fringe[J]. *OSA Continuum*, 2020, 3(1): 20-30.
- [98] Vicentini E, Wang Z H, van Gasse K, et al. Dual-comb hyperspectral digital holography[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(12): 890-894.
- [99] XTIA[EB/OL]. [2022-10-08]. <https://xtia.co.jp/>.