动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022021601

光谱共焦测量技术综述

王 梓[1,2]，石俊凯[1*]，陈晓梅[1]，姜行健[1]，李冠楠[1]，
霍树春[1]，高 超[1,2]，朱 强[1,2]，周维虎[1,2]

（1. 中国科学院微电子研究所 光电技术研发中心，北京 100029；2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要： 测量技术正不断向着精密化、智能化、集成化的方向发展，具有代表性的光谱共焦测量技术是在激光共焦显微技术的基础上发展而来，利用色散原理和光谱仪解码分析实现高精度测量。光谱共焦测量技术可进行位移测量、三维重建、表面粗糙度检测和厚度检测，具有无接触、高效率、在线测量等优点，在精密测量中发挥着重要作用，被广泛应用于微电子、工程材料、生物医学和航空航天等领域。近年来，光谱共焦系统在光学系统结构、光学镜头设计、光源优化和数据处理算法等各个方面取得了重大进展。文章对光谱共焦测量技术进行综述，论述了光谱共焦测量技术相较于其他测量方法的优势，综述了光谱共焦技术的测量原理、发展历程与应用进展，并对光谱共焦测量技术的发展趋势进行了展望。

关键词： 光谱共焦显微术；激光共焦扫描显微术；微纳测量；精密测量

中图分类号： TP394.1；TH742 **文章编号：** 1001－5868(2022)04－0752－08

Chromatic Confocal Microscopy Measurement Technique：A Review

WANG Zi[1,2]，SHI Junkai[1]，CHEN Xiaomei[1]，JIANG Xingjian[1]，LI Guannan[1]，
HUO Shuchun[1]，GAO Chao[1,2]，ZHU Qiang[1,2]，ZHOU Weihu[1,2]

（1. Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences，Optoelectronic R&D Center，Beijing 100029，CHN；
2. University of Chinese Academy of Sciences，Beijing 100049，CHN）

Abstract： Measurement technology is constantly developing in the direction of precision，intelligence and integration，and one of the most representative methods is chromatic confocal microscopy (CCM). CCM is developed on the basis of laser scanning confocal microscope，using the dispersion principle and spectrometer decoding analysis to achieve high-precision measurement. It can perform displacement measurement，3D reconstruction，surface roughness inspection and thickness inspection，and has the advantages of contactless，high efficiency and online measurement，which are playing an important role in precision measurement and widely used in microelectronics，engineering materials，biomedical and aerospace fields. In recent years，significant developments have been made in various aspects of CCM systems，such as optical system structure，optical lens design，light source optimization and data processing algorithms. This paper reviewed the chromatic confocal microscopy based on extensive research，discussed the advantages of CCM compared with other measurement methods，reviewed the measurement principle，development history and application progress of chromatic confocal microscopy，and outlooked the development trend of CCM.

Key words： chromatic confocal microscopy；laser scanning confocal microscopy；micro-nano measurement；precision measurement

收稿日期：2022－02－16.

基金项目：国家重点研发计划项目(2021YFB2012000，2019YFB2005600)；清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室开放基金项目(TH20-01)；国家自然科学基金项目(51905528).

* **通信作者：**石俊凯 **E-mail：** shijunkai@ime.ac.cn

0　引言

近年来，微纳米尺度的加工和制造技术取得了飞速发展，也对相关精密测量技术提出了更高的要求。精密测量技术已经被广泛应用于航空航天、汽车、医疗、微电子等领域[1-3]。发展精密测量检测技术有助于提高检测效率，优化加工制造工艺，对提升产业竞争力具有重要意义。

微纳尺度的精密测量技术大致可以分为两种：接触式测量和非接触式测量。目前接触式测量有两种，一种是机械探针式轮廓仪[4]，具有直观方便、适用范围广、测量精度高等优点，是一种传统的表面形貌测量方法[5]。另一种是扫描探针显微镜，常见的有扫描隧道显微镜（Scanning Tunneling Microscope，STM）和原子力显微镜（Atomic Force Microscope，AFM）等，这类表面测量仪器的分辨率可达原子水平，样品制备简单，在微电子领域有着重要的应用[6-7]。然而，接触式方法在测量过程中容易损伤被测件表面，对外界干扰敏感[8]，且设备价格昂贵，不适用于要求快速在线检测的工业生产。

非接触式检测技术由于其无损测量的特性，在微纳尺度的形貌测量领域具有独特优势。非接触式测量主要有光学法、电磁法、超声波法等，而光学测量由于其反应快、测量精准、非接触的特性，正发挥着越来越重要的作用。常用的光学测量技术主要包括干涉测量法、三角测量法和共焦显微法等[9]。干涉测量法测量精度高，但易受外界因素影响，需要配套光学防震平台并在恒温室内进行实验[10]。三角测量法仪器结构简单，性价比高，可实现较高的测量精度和分辨率，但测量精度易受外界扰动的影响，对测量环境，如温度变化，要求较高[11]。相比于前两种方法，共焦显微法装置结构简单，抗干扰能力强，适用于大多数样品。共聚焦技术因其卓越的分辨率和散射光抑制能力，已成为常用的三维形貌测量方法。然而共焦显微镜需要沿轴向逐层扫描，严重限制了测量效率。为了解决这一瓶颈，人们提出了光谱共焦法，在原有的共焦显微法的基础上，采用宽光谱的复色光（白光）作为测量光，兼具测量精度和效率的优势，已被广泛应用于三维重建、缺陷检测、表面粗糙度检测、位移测量、厚度测量等领域。本文在广泛调研的基础上，对光谱共焦测量技术进行综述，论述了光谱共焦测量技术在微电子和生物医学等领域的应用情况。

1　光谱共焦显微技术的工作原理

1.1　激光共焦显微技术

激光共焦扫描显微镜（Laser Scanning Confocal Microscope，LSCM）技术，弥补了原有显微镜在三维微结构分析与测量方面的不足，在位移测量、三维重建、表面粗糙度检测和透明样品厚度检测上具有独特的优势[12]。LSCM 采用共轭焦点成像原理，如图 1 所示，光源、被测物体和光电探测器三者处于彼此对应的共轭位置。在实际测量中，光束通过照明针孔后，依次经过分光镜和显微物镜聚焦于被测物体的表面，然后携带被测物信息的反射光束经过物镜后由分光镜反射到探测针孔处。只有当样品位于焦平面时，反射光束才能通过探测针孔进入探测器并获得最强信号。而当样品位于焦平面以外时，反射光束则无法或只有小部分功率能通过探测针孔。利用探测针孔屏蔽焦点以外的杂散光来提高分辨率，将探测信号强度最大的位置识别为正确高度，从而实现共焦测量[13]。

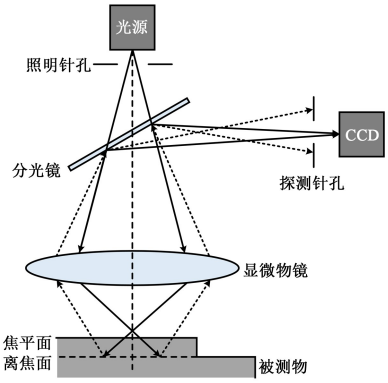


图 1　激光共焦扫描显微镜原理图

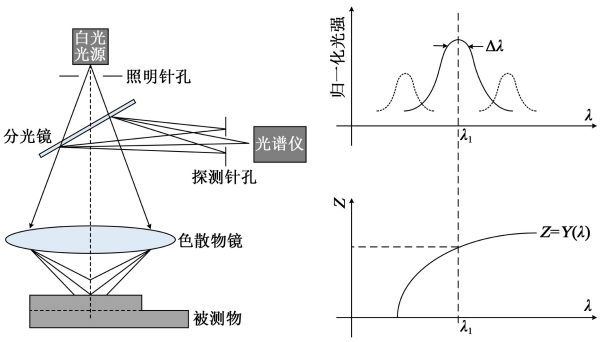
为了获得样品完整的三维形貌信息，可以利用扫描技术来补偿该方法视场小的缺陷。首先通过三维扫描装置完成某一高度的逐点扫描，由探测器探测信号的强度变化并建立二维图像。再沿光轴方向移动样品，逐层对样品进行扫描。最后，通过解码技术对一系列二维图像进行处理，完成对样品三维形貌的重建和测量分析[14]。

1.2　光谱共焦显微技术

为了提高测量效率，人们进一步提出了基于色散原理的光谱共焦显微技术（Chromatic Confocal Microscopy，CCM）。其工作原理如图 2(a)所示，测量光束通过照明针孔后，依次经过分光镜和色散物镜，聚焦到样品表面。在色散物镜的作用下，不同波

长的光具有不同的焦距，对应的焦点沿光轴方向依次排列。测量时，只有位于样品表面的焦点对应的单色光可以通过探测针孔进入光谱仪获得最大信号，而其他波长的测量光无法通过探测针孔，从而实现光谱共焦测量。

为了获得样品的三维轮廓信息，光谱共焦法需要借助于二维扫描装置。对于待测样品高度的起伏，需要通过光谱仪解码并依据标准模块拟合出的波长与位移(λ-Z)转换曲线，如图 2(b)所示，计算出被测物对应的共焦位置，从而获得被测样品信息[15]。该方法可以实现层析扫描，极大地提高了测量效率。此外，对于光谱共焦测量技术，即使被测物体倾斜角较大也不会影响测量精度[16]，测量精度最高可达$\pm$0.02%[17]，非常适用于高精密光学表面形貌测量领域。



(a) 工作原理示意图 (b) 位移与波长的转换关系

图 2 光谱共焦显微系统工作原理及扫描曲线

2 光谱共焦显微技术的发展现状

2.1 国内外研究现状

随着精密测量技术应用需求的增长，国内外许多学者都对基于光谱共焦原理的测量技术进行了深入研究，在光学系统结构、光学镜头设计、光源优化和数据处理算法等方面取得了重大进展。

2.1.1 国外研究进展

国外学者对于光谱共焦技术的研究开展较早，1994 年 Tiziani 等[18]首次在共焦显微法的基础上结合色散技术，建立了光谱共焦显微系统的雏形，此后人们在此基础上从系统的各个方面开展了实验研究，不断改进优化该技术。

在光源方面，2006 年 Dudley 等[19]提出引入超连续谱光源，获得了更大的测量范围和更高的测量横向分辨率[20-21]。2013 年 Minonin 等[22]在此基础上，设计了基于超连续谱光源和消色差空间滤波器的测量装置，与数据处理算法相结合，测量相对精度达 0.36%，相比传统方法提高了近一个数量级。2021 年 Matsukuma 等[23]讨论了超连续光谱在双探针光谱共焦探头中的应用(装置如图 3 所示)，通过数值仿真评估了检测灵敏度和可测量范围。结果显示，使用超连续谱光源的双探针光谱共焦系统可以将测量范围扩大五倍，达到 200 μm。

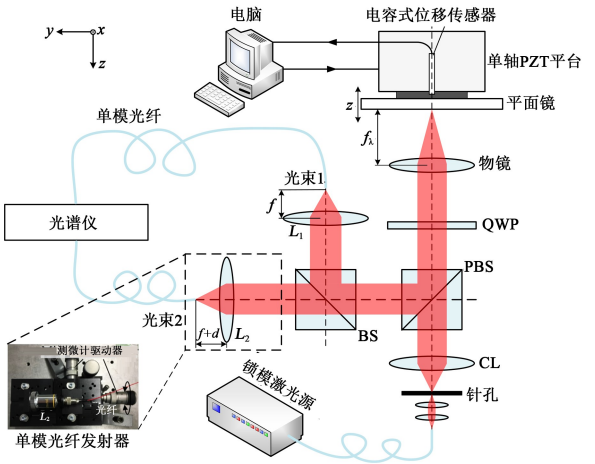


图 3 基于双探针光探头的光谱共焦系统示意图[24]

在系统优化方面，2013 年 Kim 等[25]提出了一种新型光谱共焦显微系统，如图 4 所示，利用滤色器的透射率来检测峰值波长，以提高传统光谱仪测量速度，实现了 108 μm 的深度检测范围、1.54 μm 的轴向分辨率和 0.98 μm 的横向分辨率。该方法测量速度受限于光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)的速度，可以达到几百兆赫兹。

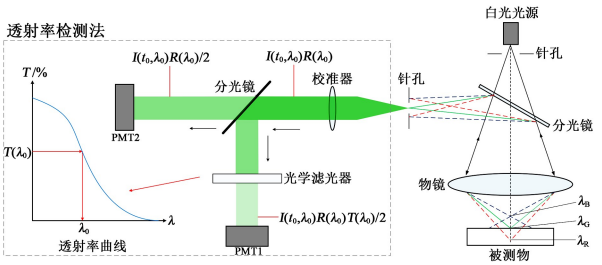
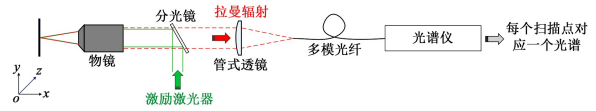


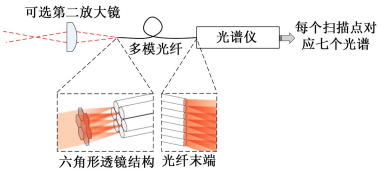
图 4 基于透射法的光谱共焦系统示意图[25]

2016 年 Clemens 等[26]对共焦显微系统进行改进，用光纤替换光阑，如图 5(a)所示，然而，其横向分辨率与理论上的共焦极限(用接近零的纤芯直径获得)相比，下降了约 30%。为了最大限度地提高耦合效率，实验进一步改进了系统结构。如图 5(b)所示，在光纤前端采用了一个六边形的小透镜阵列，见图 5(c)。实验结果表明横向分辨率提高了 41%，能够在提供高共焦分辨率的同时提高光收集效率。

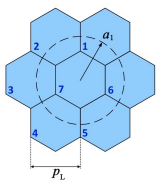
且部件之间只通过一根灵活的光纤连接，使得基于光纤的光谱共焦显微系统非常适用于工业生产[27]。



（a）　基础型



（b）　改进型



（c）　六边形透镜阵列[26]

图 5　基础型与改进型光纤耦合共焦显微系统及其六边形透镜阵列

2020 年 Dawoon 等[28]提出了一种基于扫频源的光谱共焦系统（Swept Source Based-CCM），与基于白光光源的传统 CCM 相比，该系统的测量光具有更窄的线宽和更高的强度。最终以单点 5 ms 的测量时间获得了样品的表面轮廓图像，且在扫描波长为 770～820 nm 范围时，测量范围达 360 μm。

在数据处理及误差分析方面，2012 年 Wang 等[29]研究了光阑大小对深度分辨率及光强的影响，并使用 0.03，0.5 和 2 nm 的光阑以及无光阑进行实验，证明了所用光阑大小与深度分辨率和光强成反比关系。2014 年 Nouira 等[30]讨论了两个测量范围分别为 20 和 350 μm 的光谱共聚焦探头的特性，对不同材料、表面粗糙度、颜色、倾斜角和形状的样品进行实验测试，分析了不确定度，考虑了热膨胀、探头机械运动等因素导致的误差来源。实验结果表明光谱共焦探头对这些因素很敏感，测量精度与以上因素导致的误差密切相关。2021 年 Seppä 等[31]开发了一种适用于沟槽样品的深度校准方法，并研究了不同样品表面、倾斜角和颜色对测量精度的影响，实验使用 LCI1200 传感器，测量范围为 11.3 mm×2.8 mm，测量精度达到亚微米级别。研究发现样品颜色对测量影响很小，非镜面表面测量结果也相对稳定，即使在极端情况下，测量区域为陡峭的镜面时最大误差仅为 1%。由于基于集成可调透镜的光学系统允许快速轴向扫描，所以无需对组件进行平移，但是改变可调透镜的焦距通常会破坏整个系统的像差平衡。2021 年 Strother 等[32]对光学系统调谐引起的球面和轴向色差开发了一种近似解析算法，可同时针对调谐引起的球面像差和色差对系统进行校正，具有非常高的矫正性（小于 0.06λ）。

2.1.2　国内研究进展

国内的研究起步较晚，但近年来获得了较大的进展。2013 年刘乾等[33]设计了一种特殊的利用线性色散光焦度组合的镜头结构。采用所设计的色散物镜搭建的光谱共焦系统在扫描波长为 430～710 nm 范围时达到了 1 mm 的测量范围，可达到优于 0.3 μm 的轴向分辨率和优于 5 μm 的横向分辨率。2017 年王津楠等[34]在设计过程中选择白光 LED 作为传感器的光源，并使用光纤耦合器代替复杂的分光棱镜式光学系统结构。通过双频激光干涉仪对系统进行标定和测量，实验结果表明该系统在扫描波长为 435～655 nm 范围时达到了 1.7 mm 的测量范围，平均测量精度为 1.8 μm。2018 年 Yu 等[35]从理论上分析了样品颜色对测量的影响，提出了一种颜色校正方法，并测量了三种不同颜色金属板的高度，以验证该方法的可行性。实验数据显示，使用颜色校正方法，测量误差可以控制在 10 nm 以内，与校正前的测量结果相比，测量精度提高了一个数量级以上。2019 年 Lu 等[36]提出了描述位移响应特征的方法，用峰值提取算法提取光谱信号峰值波长，应用精确的色散模型来确定位移与波长的关系，优化径向基函数网络，以提供光谱信号和色散模型的残余拟合误差之间的映射。与常规的表征方法相比，混合径向基函数网络方法的测量精度提高了 14%。2021 年 Chen 等[37]建立了一个二维光谱信号模型来描述信号的强度、波长和位移的关系，并说明了设计参数的影响，包括系统装置的尺寸、色散特性和单色像差，实验结果验证了模型的正确性。该研究首次说明了尺寸特征和光学像差对于光谱共焦系统的重要性。

2.2　光谱共焦显微技术的应用

光谱共焦显微技术由于适合大倾斜面、焦距小、精度高、可灵活集成，无需额外配件等优点[38]，在位移测量、三维重建、表面粗糙度检测和薄膜及透明材料厚度检测等方面具有一定优势。

2.2.1　位移测量、三维重建

微观位移测量及三维重建是光谱共焦技术最广泛的应用。与其他非接触式位移传感器相比，共焦位移传感器对被测样品表面的要求较低[39]。微机电系统（Micro Electro Mechanical System，MEMS）技术是在纳米和微米尺度上的电气和机械部件的整合，由于其具有尺寸小、功耗低、性能优越等优

点[40]，被广泛应用于生物、医学、国防、自动化、航空、电信等领域[41]。微观形貌是影响 MEMS 器件性能的关键因素之一，提高器件轮廓测量精度，有助于优化制造工艺，提高器件良率，为研发高端器件提供有力的支撑。2021 年 Hu 等[42]开发了一套实用性强的光谱共焦传感器，并针对高反射材料的三维轮廓测量，开发了相关的关键算法。理论分析和仿真表明，Z(深度)、X(光纤布局方向)和 Y(线扫描方向)方向对应的分辨率分别为 0.6，10 和 5 μm，线长为 8 mm，景深为 2.4 mm。实验结果表明，该传感器测量精度为 0.886 μm，扫描速度为 90 f/s。该结果对于光学、半导体或微机械等领域中高反射材料的三维形貌和厚度的精密测量具有重要意义。

光谱共焦技术拥有可以在单个图像中对多个组织深度进行成像的优点，被广泛应用于生物医疗领域中。2019 年 Zint 等[43]开发了一套基于光谱共焦成像系统的光学口腔内扫描仪，设备的测量不确定度(37.8 μm)、扫描速度等参数和整体性能，可以与现有最先进的商用口腔内扫描仪相媲美，且性价比更高。2021 年 Kulkarni 等[44]基于光谱共焦技术开发了一款低成本的光谱共焦内窥镜(Chromatic Confocal Endomicroscope，CCE)，使用定制的微型物镜和光谱仪，将不同的波长聚焦到不同的组织深度，可实现以细胞级分辨率对组织的横截面进行成像，可以直接观察完整人体组织的细胞形态特征，无需活检和组织病理学检测，可应用于口腔粘膜、卵巢组织、结肠粘膜、食管组织、神经胶质瘤组织、宫颈诊断等。

光谱共焦系统对于大尺度测量，以及在航空航天、汽车领域对高梯度自由曲面的复杂部件测量等方面也有很好的应用前景。光谱共焦系统一次扫描的特点可以避免重新夹装工件所带来的系统误差，在线测量系统可以有效反馈零件的加工质量。2021 年 Wang 等[45]利用光谱共焦系统对超精密金刚石削车机床进行扫描，确定扫描参数并生成数控检测程序，实现了对高梯度自由曲面的在线测量。实验结果表明，所开发的测量系统可以满足行业要求，且测量时间比离线检测时间提高一倍，仿真计算结果显示，其最大偏差小于 1.5 nm，实际测量偏差约为 2 μm。

2.2.2 表面粗糙度检测

表面粗糙度是影响许多类型工业产品的质量、性能和寿命的重要特征，如食品包装、机械、生物医学部件、半导体、光学器件等。近年来，各行各业在工业生产中越来越需要表面粗糙度的在线测量，以提供实时反馈并减少制造过程中重新对准和重新定位的系统误差。2020 年 Fu 等[46]开发了一套基于光谱共焦传感器的表面测量系统，实现了表面粗糙度的在线测量，使用该系统测量表面粗糙度的相对误差低于 5%，为精密加工表面质量的在线检测提供了可行方案。2020 年 Claus 等[47]开发了一套光路仿真工具，讨论了像差和表面粗糙度对光谱共聚焦信号和由此产生的测量误差的作用和影响。2021 年周勇等[48]为了提高加工检测效率，在三坐标测量机上集成了光谱共焦位移传感器，搭建了一台在线表面粗糙度测量仪。经实验验证，该测量系统粗糙度参数的测量重复性为 0.002 6 μm，与传统的样品检测时间相比缩短近 30%。

2.2.3 薄膜及透明材料厚度检测

光谱共焦测量技术由于其反射光的光强不会影响测量结果，能够适应透明件刚度低、表面易划伤等优点，已被广泛应用于测量薄膜及透明样品的厚度。2010 年，Miks 等[49]针对测量平面平行板的厚度和透镜的中心厚度时诱发的测量误差进行了研究，并得出了材料色散和像差造成的误差计算公式。2011 年马小军等[50]设计了一种相向对顶安装的特殊光谱共焦系统结构，实现了对厚度为 10～100 μm 的自制样品的厚度及厚度分布的精确测量，系统的测量不确定度在 0.12 μm 左右。2016 年周勇等[51]设计了一种透镜中心厚度测量光学系统，以工作波长建立多重结构的方式，校正该系统的单色像差。通过操作数控制各个组态间反射面与系统的距离，使得光学系统产生 30 mm 左右的轴向色差。实验中对不同厚度透镜进行测试，测试结果表明：设备的最大测量范围可达 30 mm 以上，其测量精度为 ±5 μm，总测量时间小于 2 s，适用于大批量、高精度、快速透镜中心厚度检测。2017 年，Boettcher 等[52]提出了一种新的混合单次成像方案，结合光谱共焦技术和干涉技术，可实现同时测量半透明材料的厚度和折射率。重叠峰提取的准确性在光谱共焦对超薄透明薄膜的厚度测量中起着关键作用。2020 年 Li 等[53]提出了一种自适应模态分解方法来提取超薄材料的重叠。实验测试表明，与传统的非线性拟合算法相比，所提出算法的精度提升了约 40%。

对于透明试样的测量，传统的光路显示出两个主要的缺点。首先，成像轴与被测表面垂直。对于

高透明度和低折射率的材料，反射光将非常弱。低信噪比将大大影响测量性能。其次，光能的效率相当低。分光器的应用使得接收器的能量只有光源的 1/4。为了解决这些限制，2021 年 Yu 等[54]基于倾斜照明开发了一种特殊的光谱共焦系统来测量透明试样的厚度，建立了透明样品厚度测量的数学模型，并讨论了倾斜角 θ 的影响。实验结果表明，轴向测量精度达到微米级，重复性优于 0.75 μm。

3　总结与展望

光谱共焦技术是一种非接触无损伤的高效光学测量技术，能够实现具有亚微米级分辨率的实时三维测量。光谱共焦技术正在不断地从学术研究走向成熟的工业应用，可进行位移测量、三维重建、表面粗糙度检测和厚度检测，被广泛应用于工程材料、生物医学、微电子和航空航天等领域。本文论述了共焦显微技术相较于其他测量方法的优势，综述了共焦法衍生出的光谱共焦技术的测量原理、发展历程与应用进展，归纳和总结了目前光谱共焦技术的发展现状，展望其发展趋势主要有以下几方面：

(1)将光学波长范围扩大到近红外区域，以便获得更大的测量范围；

(2)减少测量误差，进一步提高共焦分辨率的测量分辨率和测量精度；

(3)提高测量效率、降低成本，使其可投入批量生产使用。

未来，光谱共焦显微技术将朝着高精度、高效率、低成本的方向发展，测量系统的结构优化和测量数据算法处理的改进都将是重点研究方向。

参考文献：

[1] Mullan F, Bartlett D, Austin R S. Measurement uncertainty associated with chromatic confocal profilometry for 3D surface texture characterization of natural human enamel[J]. Dental Materials, 2017, 33(6): e273-e281.

[2] Jumelle C, Hamri A, Egaud G, et al. Comparison of four methods of surface roughness assessment of corneal stromal bed after lamellar cutting[J]. Biomedical Optics Express, 2017, 8(11): 4974-4986.

[3] Zamofing T, Hugli H. Applied multifocus 3D microscopy [C]// Two-and Three-Dimensional Vision Systems for Inspection, Control and Metrology, 2004: 134-144.

[4] 曹欢玲，宋源普，张雪芬，等. 轮廓仪触针引起的测量误差分析[J]. 工业计量，2012(S1)：126-127.
Cao Huanling, Song Yuanpu, Zhang Xuefen, et al. Analysis of measurement errors caused by stylus of profilometer[J]. Industrial Metrology, 2012(S1): 126-127.

[5] 刘利焕，汪　杰. 表面粗糙度轮廓仪快捷定位装置的设计改进[J]. 机械，2017，44(12)：74-76.
Liu Lihuan, Wang Jie. Design improvement of surface roughness profiler quick positioning device[J]. Machinery, 2017, 44(12): 74-76.

[6] Sychugov I, Omi H, Murashita T, et al. Optical and electrical characterization at the nanoscale with a transparent probe of a scanning tunnelling microscope [J]. Nanotechnology, 2009, 20(14): 145706.

[7] Ortlepp I, Stauffenberg J, Manske E. Processing and analysis of long-range scans with an atomic force microscope (AFM) in combination with nanopositioning and nanomeasuring technology for defect detection and quality control [J]. Sensors, 2021, 21(17): 5862.

[8] Grochalski K, Mendak M, Jakubowicz M, et al. Differences in roughness parameter values from skid and skidless contact stylus profilometers[J]. Advances in Science and Technology. Research J., 2021, 15(1): 58-70.

[9] Li Y H, Feng Q B. Overview of optical 3D profile measurement[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(3): 143-147.

[10] Wyant J C. White light interferometry[C]// Holography: A Tribute to Yuri Denisyuk and Emmett Leith, 2002: 98-107.

[11] Kienle P, Batarilo L, Akgül M, et al. Optical setup for error compensation in a laser triangulation system[J]. Sensors, 2020, 20(17): 4949.

[12] 曾毅波，蒋书森，黄彩虹，等. 激光共焦扫描显微镜在微机电系统中的应用[J]. 光学精密工程，2008，16(7)：1241-1246.
Zeng Yibo, Jiang Shusen, Huang Caihong, et al. Application of laser confocal scanning microscopy in microelectromechanical systems[J]. Optical Precision Engineering, 2008, 16(7): 1241-1246.

[13] Chen L C, Tan P J, Wu G W, et al. High-speed chromatic confocal microscopy using multispectral sensors for sub-micrometer-precision microscopic surface profilometry[J]. Measurement: Sensors, 2021, 18: 100165.

[14] 赵　俊，任永峰. 激光共聚焦扫描显微镜在腐蚀形貌表征中的应用[J]. 腐蚀与防护，2018，39(8)：599.
Zhao Jun, Ren Yongfeng. Application of laser confocal scanning microscopy in corrosion morphology characterization [J]. Corrosion and Protection, 2018, 39(8): 599.

[15] 闫勇刚，刘志浩，朱小平，等. 彩色光谱共焦传感器误差溯源及其校准方法分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版)，2021，40(5)：117-123.
Yan Yonggang, Liu Zhihao, Zhu Xiaoping, et al. Analysis of error trace ability of color spectral confocal sensor and its calibration method[J]. J. of Henan University of Technol. (Natural Science Edition), 2021, 40(5): 117-123.

[16] 石钊铭. 基于线阵光谱共焦的舰载显控台 LED 软板涂胶微

纳级三维测量[J]. 舰船电子工程，2020，40(8)：146-150，161.

Shi Zhaoming. Micro- and nano-level 3D measurement of LED soft board coating on shipboard display consoles based on line array spectral confocal[J]. Ship Electronics Engineering，2020，40(8)：146-150，161.

[17] 王富生，谭久彬. 表面微观轮廓的高分辨率光学测量方法[J]. 光学精密工程，2000，8(4)：309-315.

Wang Fusheng，Tan Jiubin. High-resolution optical measurement method for surface microprofile [J]. Optical Precision Engineering，2000，8(4)：309-315.

[18] Tiziani H J，Uhde H M. Three-dimensional image sensing by chromatic confocal microscopy[J]. Appl. Optics，1994，33(10)：1838-1843.

[19] Dudley J M，Genty G，Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. Rev. of Modern Physics，2006，78(4)：1135.

[20] Shi K，Li P，Yin S，et al. Chromatic confocal microscopy using supercontinuum light [J]. Opt. Express，2004，12(10)：2096-2101.

[21] Meneses J，Tribillon G，Gharbi T，et al. Chromatic confocal microscopy by means of continuum light generated through a standard single-mode fibre[J]. J. of Optics A：Pure and Appl. Optics，2004，6(6)：544.

[22] Minoni U，Manili G，Bettoni S，et al. Chromatic confocal setup for displacement measurement using a supercontinuum light source[J]. Optics & Laser Technol.，2013，49：91-94.

[23] Matthias H，Lucia L，Roman K，et al. Spectrally multiplexed chromatic confocal multipoint sensing[J]. Opt. Lett.，2013，38(22)：4694-4697.

[24] Chen X，Nakamura T，Shimizu Y，et al. A chromatic confocal probe with a mode-locked femtosecond laser source [J]. Optics & Laser Technol.，2018，103：359-366.

[25] Kim T，Kim S H，Do D，et al. Chromatic confocal microscopy with a novel wavelength detection method using transmittance[J]. Opt. Express，2013，21(5)：6286-6294.

[26] Roider C，Ritsch-Marte M，Jesacher A. High-resolution confocal Raman microscopy using pixel reassignment [J]. Opt. Lett.，2016，41(16)：3825-3828.

[27] Matthias H，Lucia L，Roman K，et al. Spectrally multiplexed chromatic confocal multipoint sensing[J]. Opt. Lett.，2013，38(22)：4694-4697.

[28] Jeong D，Park S J，Jang H，et al. Swept-source-based chromatic confocal microscopy[J]. Sensors，2020，20(24)：7347.

[29] Wang P，Kirkland A，Nellist P. Chromatic confocal electron microscopy with a finite pinhole size[J]. J. of Physics：Conf. Series，2012：012002.

[30] Nouira H，El-Hayek N，Yuan X，et al. Characterization of the main error sources of chromatic confocal probes for dimensional measurement [J]. Measurement Science and Technology，2014，25(4)：044011.

[31] Seppä J，Niemelä K，Lassila A. Metrological characterization methods for confocal chromatic line sensors and optical topography sensors [J]. Measurement Science and Technology，2018，29(5)：054008.

[32] Strother J A. Reduction of spherical and chromatic aberration in axial-scanning optical systems with tunable lenses[J]. Biomedical Opt. Express，2021，12(6)：3530-3552.

[33] 刘 乾，杨维川，袁道成，等. 光谱共焦显微镜的线性色散物镜设计[J]. 光学精密工程，2013，21(10)：2473-2479.

Liu Qian，Yang Weichuan，Yuan Daocheng，et al. Design of linear dispersive objectives for spectral confocal microscopy[J]. Optical Precision Engin.，2013，21(10)：2473-2479.

[34] 王津楠，陈凤东，刘炳国，等. 基于白光 LED 的光谱共焦位移传感器[J]. 中国测试，2017，43(1)：69-73.

Wang Jinnan，Chen Fengdong，Liu Bingguo，et al. Spectral confocal displacement sensor based on white LEDs[J]. China Testing，2017，43(1)：69-73.

[35] Yu Q，Zhang K，Zhou R，et al. Calibration of a chromatic confocal microscope for measuring a colored specimen[J]. IEEE Photonics J.，2018，10(6)：1-9.

[36] Lu W，Chen C，Wang J，et al. Characterization of the displacement response in chromatic confocal microscopy with a hybrid radial basis function network[J]. Opt. Express，2019，27(16)：22737-22752.

[37] Chen C，Leach R，Wang J，et al. Two-dimensional spectral signal model for chromatic confocal microscopy [J]. Opt. Express，2021，29(5)：7179-7196.

[38] Bai J，Li X，Wang X，et al. Chromatic confocal displacement sensor with optimized dispersion probe and modified centroid peak extraction algorithm[J]. Sensors，2019，19(16)：3592.

[39] Qi Y，Lu Z，Ma J，et al. Research on micro displacement measurement technology based on chromatic confocal method [C]// 9th Inter. Symposium on Adv. Optical Manufacturing and Testing Technologies：Micro-and Nano-Optics，Catenary Optics，and Subwavelength Electromagnetics，2019：108401G.

[40] Algamili A S，Khir M H M，Dennis J O，et al. A review of actuation and sensing mechanisms in MEMS-based sensor devices[J]. Nanoscale Research Letters，2021，16(1)：1-21.

[41] Zhu J，Liu X，Shi Q，et al. Development trends and perspectives of future sensors and MEMS/NEMS [J]. Micromachines，2020，11(1)：7.

[42] Hu H，Mei S，Fan L，et al. A line-scanning chromatic confocal sensor for three-dimensional profile measurement on highly reflective materials [J]. Rev. of Scientific Instruments，2021，92(5)：053707.

[43] Zint M，Stock K，Claus D，et al. Development and verification of a snapshot dental intraoral three-dimensional scanner based on chromatic confocal imaging [J]. J. of

Medical Imaging, 2019, 6(3): 033502.

[44] Kulkarni N, Masciola A, Nishant A, et al. Low-cost, chromatic confocal endomicroscope for cellular imaging in vivo[J]. Biomedical Optics Express, 2021, 12(9): 5629-5643.

[45] Wang Y, Xi M, Liu H, et al. On-machine noncontact scanning of high-gradient freeform surface using chromatic confocal probe on diamond turning machine[J]. Optics & Laser Technol., 2021, 134: 106569.

[46] Fu S, Kor W S, Cheng F, et al. In-situ measurement of surface roughness using chromatic confocal sensor [J]. Procedia CIRP, 2020, 94: 780-784.

[47] Claus D, Nizami M R. Influence of aberrations and roughness on the chromatic confocal signal based on experiments and wave-optical modeling [J]. Surface Topography: Metrology and Properties, 2020, 8(2): 025031.

[48] 周　勇, 李建军, 赵天明, 等. 基于光谱共焦的在线集成表面粗糙度测量方法[J]. 计量学报, 2021, 42(6): 753-758.
Zhou Yong, Li Jianjun, Zhao Tianming, et al. Online integrated surface roughness measurement method based on spectral confocal[J]. J. of Metrology, 2021, 42(6): 753-758.

[49] Miks A, Novak J, Novak P. Analysis of method for measuring thickness of plane-parallel plates and lenses using chromatic confocal sensor[J]. Appl. Optics, 2010, 49(17): 3259-3264.

[50] 马小军, 高党忠, 杨蒙生, 等. 应用白光共焦光谱测量金属薄膜厚度[J]. 光学精密工程, 2011, 19(1): 17-22.
Ma Xiaojun, Gao Dangzhong, Yang Mengsheng, et al. Application of white light confocal spectroscopy to measure the thickness of metal thin films[J]. Optical Precision Engineering, 2011, 19(1): 17-22.

[51] 周　勇, 郭帮辉, 王潇询, 等. 透镜中心厚度测量系统光学设计[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 88-94.
Zhou Yong, Guo Banghui, Wang Xiaoxun, et al. Optical design of lens center thickness measurement system[J]. Adv. in Laser and Optoelectronics, 2016, 53(3): 88-94.

[52] Boettcher T, Gronle M, Osten W. Single-shot multilayer measurement by chromatic confocal coherence tomography [C]// Optical Measurement Systems for Industrial Inspection Ⅹ, 2017: 103290K.

[53] Li J, Zhao Y, Du H, et al. Adapative modal decomposition based overlapping-peaks extraction for the thickness measurement in chromatic confocal microscopy[J]. Opt. Express, 2020, 28(24): 36176-36187.

[54] Yu Q, Zhang Y, Shang W, et al. Thickness measurement for glass slides based on chromatic confocal microscopy with inclined illumination [J]. Photonics, 2021, 8(170): 8050170.

作者简介：

王　梓(1998—)，女，北京市人，硕士研究生，主要从事微纳测量方面的研究；

石俊凯(1986—)，男，天津市宁河区人，博士，副研究员，2015 年于天津大学精仪学院获得博士学位，主要从事光学精密测量、微纳检测及飞秒激光方面的研究。