

光谱共焦显微技术研究进展

丁万云¹, 王宇航^{2*}, 张韬², 秦浩², 王吉祥²¹东北林业大学计算机与控制工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150000;²东北林业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150000

摘要 光谱共焦显微技术结合了共焦显微镜的高空间分辨率和光谱分析的高波长分辨率, 凭借精度高、适用性强、无损检测等特性, 广泛应用于工业生产、生物医疗和半导体芯片等领域。首先介绍点光谱共焦系统的原理, 指出点光谱共焦检测效率低的缺点。其次, 针对光谱共焦显微技术的关键性能指标改善, 阐述了在光源、色散物镜和光谱信号检测等方面所取得的主要成果, 并对各类光源进行定性对比。随后展示光谱共焦显微技术的扫描方法, 梳理了相关研究进展, 并总结了相关方法的优点和缺点。最后, 展望光谱共焦显微技术未来的发展趋势。

关键词 光谱共焦显微技术; 精密测量; 宽光谱光源; 色散物镜; 扫描成像

中图分类号 TH822

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP240611

Advances in Chromatic Confocal Microscopy

Ding Wanyun¹, Wang Yuhang^{2*}, Zhang Tao², Qin Hao², Wang Jixiang²¹College of Computing and Control Engineering, Northeast Forestry University,
Harbin 150000, Heilongjiang, China;²College of Mechanical Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150000, Heilongjiang, China

Abstract Chromatic confocal microscopy (CCM) combines the high spatial resolution of confocal microscope and the high wavelength resolution of spectral analysis. By virtue of the high precision, strong applicability, and nondestructive detection, it is widely used in the fields of industrial production, biomedicine, semiconductor chips, and other fields. This paper first introduces the principle of point chromatic confocal system and points out its drawback of low detection efficiency. Second, for improving the key performance indexes of chromatic confocal microscopy, the main achievements made in light source, dispersive objective lens, and spectral signal detection are described, and qualitative comparisons are made between various types of light sources. Subsequently, the scanning methods of chromatic confocal microscopy are demonstrated, the relevant research progress is sorted out, and the advantages and disadvantages of the relevant methods are summarized. Finally, the future developments of chromatic confocal microscopy are also prospected.

Key words chromatic confocal microscopy; precision measurement; broad spectrum light source; dispersive objective; scanning imaging

1 引言

1.1 概述

以电子信息、航空航天等为代表的高技术制造业是国民经济的先导产业, 对培育我国国际竞争与合作新优势具有重要意义。在高技术制造业中, 质量控制环节在保证产品质量和提高生产效率等方面发挥着至关重要的作用。光谱共焦显微技术是一种非接触式高

精度测量技术, 随着科技的快速进步, 现已发展为各种形式的传感器, 不断满足质量控制环节中提出的尺寸测量^[1]、缺陷检测^[2]和三维形貌扫描^[3]等需求, 部分应用如图 1 所示。应用最为广泛的光谱共焦传感器是点光谱共焦传感器^[4]。市场上主要的商业级光谱共焦传感器厂商有法国 Stil、加拿大 LMI、德国 Micro-epsilon 和中国的 Think-focus、LightE-tech 等。图 2 给出了部分商业级点光谱共焦传感器产品的轴向分辨率和量程

收稿日期: 2023-11-12; 修回日期: 2023-12-15; 录用日期: 2023-12-20; 网络首发日期: 2023-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(51805119)、国家重点研发计划(2019YFB2004900)、中央高校基本科研业务费专项资助(2572023CT14-05)、黑龙江重点研发计划(GZ200220105)

通信作者: *wangyuhang@nefu.edu.cn

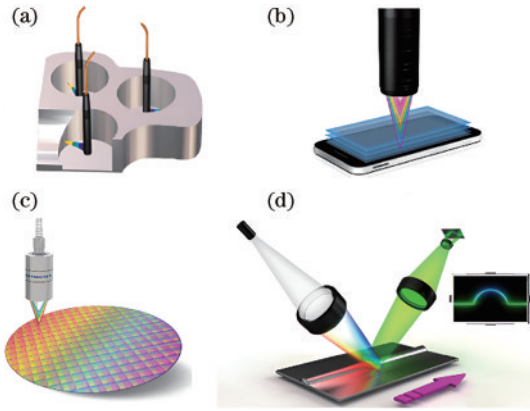


图 1 光谱共焦传感器应用。(a) 工件内径测量; (b) 面板间隙测量; (c) 晶圆缺陷检测; (d) 焊接质量检测
Fig. 1 Chromatic confocal sensor applications. (a) Measurement of the inner diameter of workpieces; (b) panel gap measurement; (c) wafer defect detection; (d) welding quality measurement

所涵盖的范围。

1.2 测量原理

1961年,Marvin Minsky发明了第一台共焦扫描显微镜^[5]。其中,“共焦”指的是物体表面焦点和图像平面焦点间的共轭关系,即光学成像系统中的照明点和检测点具有相同的焦距。典型的点光谱共焦系统如图3所示,宽光谱光源发出的复色光经过照明孔、分光棱镜后,被物镜色散,最后投射到被测物体表面。由于不同波长的光在同一介质中的折射率不同,所有波长在 λ_{\min} 至 λ_{\max} 之间的光都会沿着光轴聚焦在不同的位置。因此,轴向测量范围 z 可表示为

$$z = f(\lambda_{\max}) - f(\lambda_{\min}), \quad (1)$$

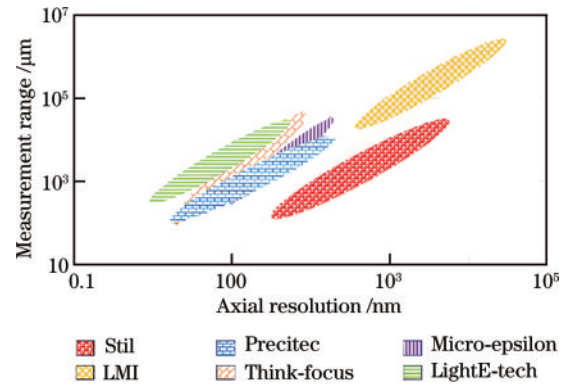


图 2 部分商业级点光谱共焦传感器的性能参数范围
Fig. 2 Range of performance parameters for selected commercial grade spot chromatic confocal sensors

式中: f 是焦距与波长 λ 的函数; z 的大小取决于宽光谱光源工作波段范围内最大波长与最小波长的光会聚在共焦平面上的距离之差。只有聚焦在待测物体表面的波长光线能够以最大程度通过检测孔进入到光谱仪中,其他离焦光或杂散光会被检测孔所阻挡。当光谱仪感知到光谱,就可以提取出峰值波长,从而准确定位表面高度。轴向强度^[6]可以计算为

$$\begin{cases} I(u) = \left[\frac{\sin(\frac{u}{4})}{\frac{u}{4}} \right]^4, \\ u(\lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} z \frac{a^2}{f(\lambda)^2} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: u 是归一化的轴向光学坐标; a 为透镜的孔径。可以推断出,当被测物位于共焦点时,探测到的光强最大。

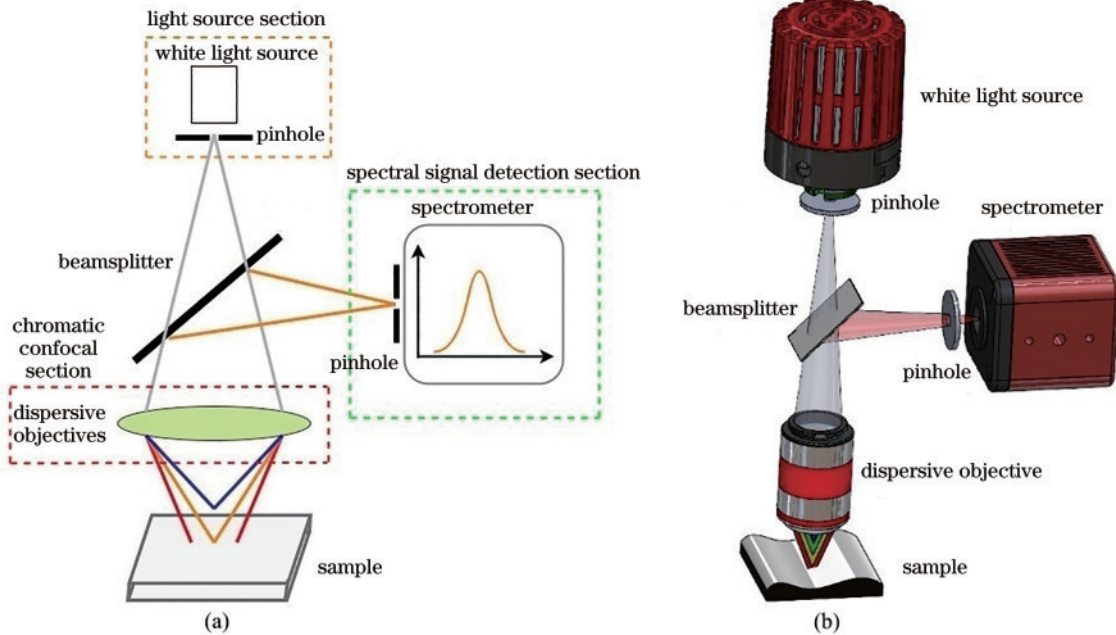


图 3 点光谱共焦系统。(a) 点光谱共焦系统原理图; (b) 点光谱共焦系统结构图
Fig. 3 Schematic of point chromatic confocal system. (a) Schematic of the system principle; (b) structure of the system

在测量样品的三维轮廓时,点光谱共焦系统由于一次测量仅能得到单个测量点的轴向高度信息,还需要一个高速稳定的二维位移平台^[7]。然而,平台的连续移动会产生如振动、定位误差等测量不确定性,严重影响测量结果。针对高检测速度或大检测物体的场景,学者们提出了移动焦点位置或增加每次测量点数等方法,同时通过改善光谱共焦测量系统的关键技术提高系统整体测量性能。

目前,国外对该领域的研究已经较为成熟,而国内相关研究较少,同时国内进行商业级光谱共焦传感器研发的企业虽逐年增多,但产品性能较国外产品仍存在一些差距。因此开展光谱共焦显微技术的综述工作具有一定的学术价值和应用价值。本文首先说明点光谱共焦系统的应用场景和基本原理;然后概括分析宽光谱光源、色散物镜、光谱信号检测及处理等核心技术;同时,论述光谱共焦测量技术的扫描方法;最后,总结光谱共焦测量技术的未来发展方向。

2 光谱共焦显微技术的发展现状

从功能上来说,光谱共焦系统主要由光源部分、共焦光学部分和光谱信号检测部分组成,它们共同决定了共焦扫描检测系统的性能^[8]。为了提升整体的检测能力,学者们针对宽光谱光源、色散物镜和光谱信号处理算法等光谱共焦系统的关键技术展开研究。

2.1 宽光谱光源

宽光谱光源是影响共焦系统测量范围的首要因素,也决定了色散物镜的材料和光谱仪的类型,因此光源的选择至关重要。常见的宽光谱光源包括氙灯^[9]、卤钨灯^[10]、卤素灯^[11]、白光LED^[12-13]。其中氙灯、卤钨灯和卤素灯的光谱范围较大且分布均匀,但是照射效率低,工作温度较高,需要配备大体积的冷却装置,不利于系统集成和稳定。白光LED具有性能稳定、寿命长、易集成、价格低廉等优点,缺点是光谱带宽窄,限制轴向测量范围。

另外,Shi等^[14]最先将飞秒激光耦合到光子晶体光纤中得到超连续光谱光源,不但将光谱范围拓展至350~1750 nm,也大幅提升了照射效率和信噪比,其光路如图4(a)所示。Chen等^[15]利用锁模飞秒激光器开发了共焦系统,其光谱范围由原来的50 nm扩展到180 nm(1.46~1.64 μm),虽然测量范围仅40 μm,但后期的研究提高到250 μm^[16]。基于Chen等的研究,Matsukuma等^[17]针对超连续光谱光源,在1100~1700 nm的光谱范围内,将测量范围由最初的40 μm扩大至200 μm,且减弱了测量范围扩大对系统精度的不利影响。Csóke等^[18]采用超发光二极管(SLD,光谱范围830~930 nm)搭配电子可变衰减器实现了360 μm的测量范围,进一步扩大了测量量程,其系统结构如图4(b)所示。

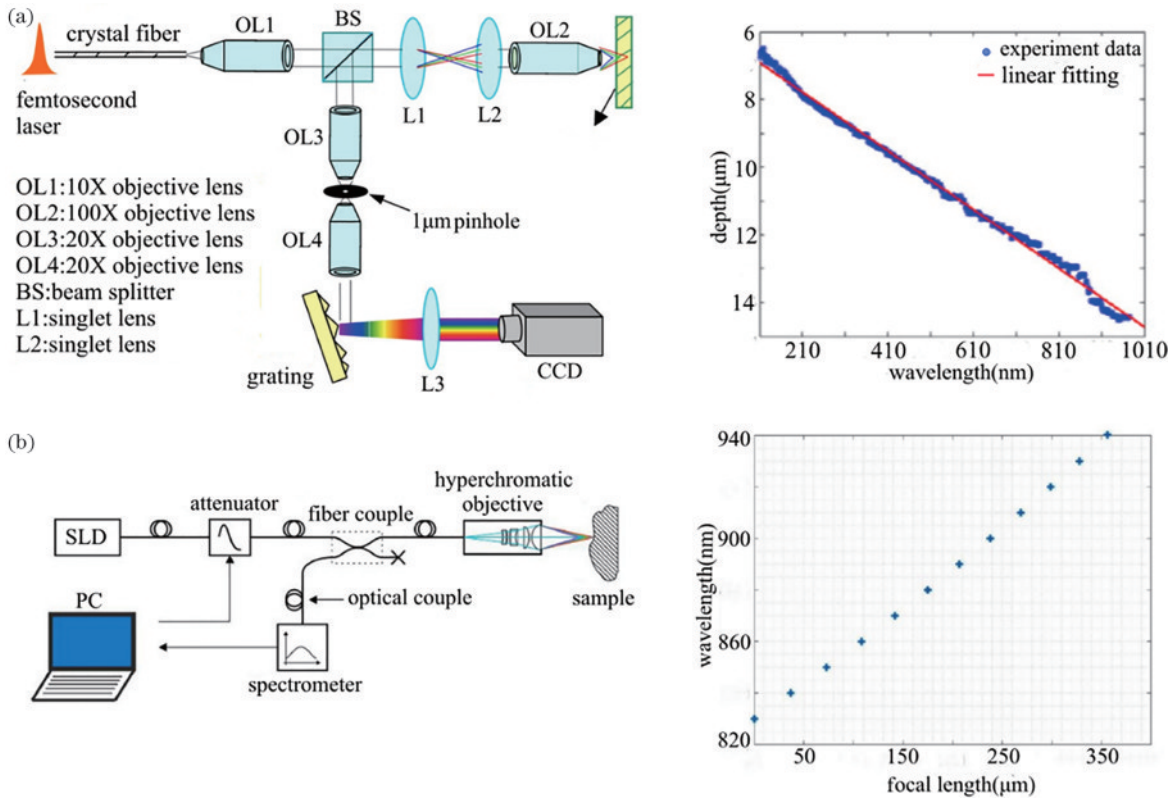


图4 光谱共焦系统的光源。(a) 超连续激光及其波长深度映射图^[14]; (b) SLD及其波长深度映射^[18]

Fig.4 Light source of chromatic confocal system. (a) Super-continuum laser and its wavelength depth mapping^[14]; (b) SLD and its wavelength depth mapping^[18]

因为高相干性和高稳定性,飞秒激光可以说是光谱共焦系统的理想光源,但是价格昂贵,光谱连续性较差;SLD具有均匀的光谱密度,虽然其光谱稳定性较差,可通过适当的信号处理和光学设计来改善。目前,白光LED以低成本、高稳定、易集成等优势广泛应用于光谱共焦的科研和商业领域。图5展示了不同类型宽光谱光源的特性。

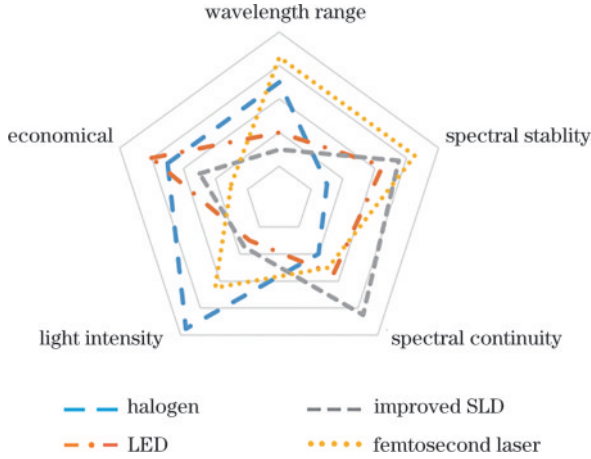


图5 不同类型的宽光谱光源特性

Fig. 5 Characteristics of various types of broad spectrum light sources

2.2 色散物镜

色散物镜是光谱共焦系统的核心,其光学特性直接决定了系统的测量性能。例如色散物镜的放大倍数决定了系统的视场,数值孔径决定了系统的横向和轴

向分辨率,光谱色散范围决定了系统的量程。国内外研究人员分别从理论分析和结构设计上进行了深入研究。早先,Novak等^[19]提出了一种设计色散物镜的方法,描述了物镜的纵向色差与波长的线性关系。Zhang等^[20]介绍了双胶合透镜的初始结构,并根据色散特性,将双胶合透镜分为L型和S型,推导出L型初始结构更适用于设计色散范围更大的物镜,S型初始结构适用于设计数值孔径较大的物镜。Chen等^[21]建立了一个二维光谱信号模型,用于描述光谱共焦系统中的信号强度-波长-位移关系,利用该模型可以深入评估光谱信号,进而提高色散物镜的测量性能。Förster等^[22]分别对折射透镜和折衍混合的双胶合透镜进行了系统研究,结果表明,在折射系统中,将阿贝数较低的材料和阿贝数较高的材料组合在一起能够获得较大的轴向色散。对于折衍混合系统,折射部分材料应采用尽可能小的阿贝数。Claus等^[23]根据波动光学,探讨了色散物镜的像差和样品表面粗糙度对共焦信号的作用和影响,实验结果表明:色散物镜的像差会引起测量范围1%以上的误差;采用数值孔径NA较小的物镜检测样品形貌会增大系统噪声。并得到了消除噪声的NA约束条件,即

$$NA \geq 2 \cdot \sqrt{2} \frac{R_d}{l_{corr}}, \quad (3)$$

式中:NA为物镜数值孔径; R_d 为样品表面粗糙度均方根; l_{corr} 为相关长度,表示表面高度的自相关函数绝对值低于其零滞值1/e的距离。具有不同NA值的物镜测量结果对比如图6所示。

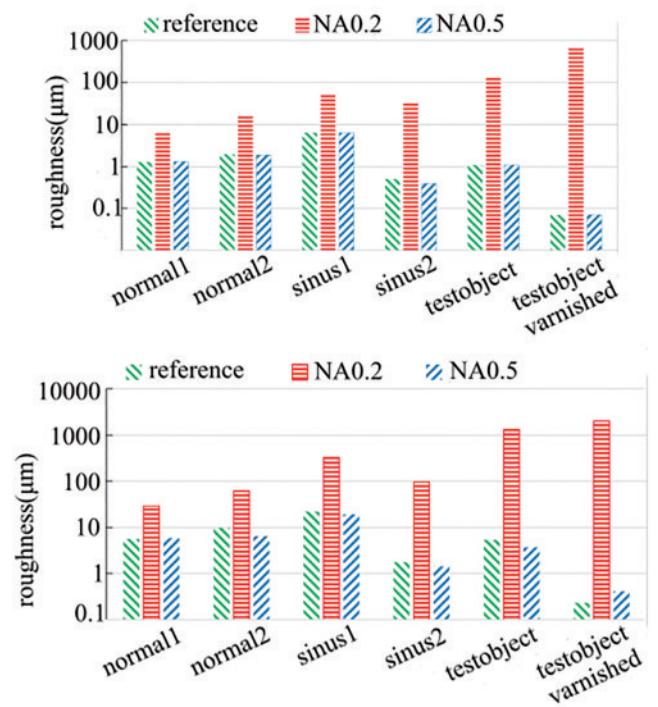
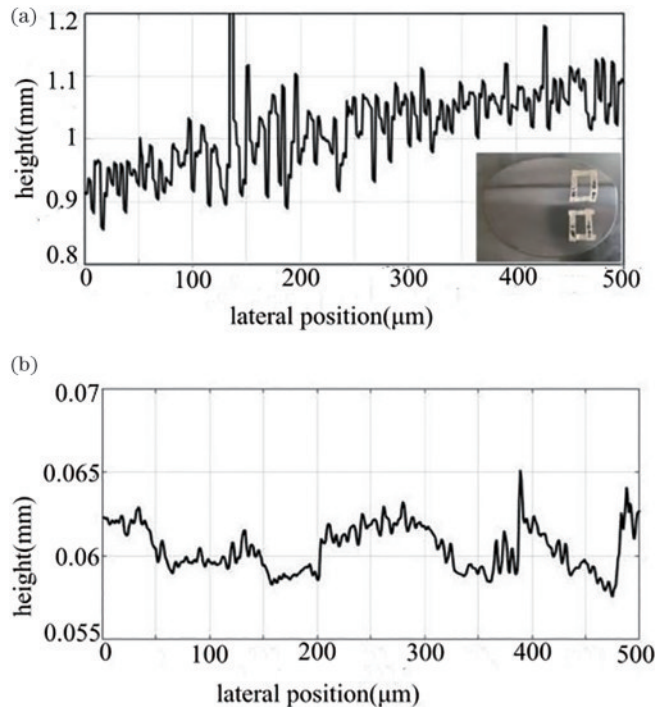


图6 具有不同NA值的物镜关于高度和粗糙度测量结果对比^[23]。(a)高度测量结果对比;(b)粗糙度测量结果对比

Fig.6 Comparison of objective lenses with different NA regarding height and roughness measurements^[23]. (a) Comparison of measured height; (b) comparison of measured roughness

同时,国内许多学者^[24-30]基于以上理论设计了各类线光谱共焦系统的色散物镜。吴雨晴^[24]采用多重结构设计的色散物镜的线扫描宽度可达 26 mm,但轴向测量范围仅为 1.08 mm。刘若虚^[25]利用棱镜和柱透镜进行色散共焦,实现了 14.26 mm 的视场范围和 8.4 mm 的扫描宽度。Huang 等^[29]利用逆向光路设计的色散物镜的线扫描宽度为 16 mm,色散线性

度优于 0.9997。Chen 等^[30]采用双远心结构设计的色散物镜的视场宽度达到 13.88 mm,虽然双远心结构能够提高色散物镜的精确性和稳定性,但是结构复杂,自主设计成本较高,不利于推广。单轴线光谱共焦色散物镜的技术指标对比如表 1 所示,其中技术指标包括轴向量程比 (DARR) 和横向量程比 (LLRR)^[31]。

表 1 单轴线光谱共焦系统的色散物镜相应的横向空间分辨率、轴向空间分辨率、成像范围、线长、DARR 和 LLRR

Table 1 Lateral spatial resolution, axial spatial resolution, imaging range, line length, DARR, and LLRR of some dispersive objective lenses for single-axis line spectral confocal systems

Reference	Lateral resolution / μm	Axial resolution / μm	Imaging range / μm	Line length / μm	DARR	LLRR
[26]	4	4	4120	8100	1030	2025
[27]	2	0.56	370	16000	660.7	8000
[32]	0.5	0.1	40	Not provided	400	Not applicable
[33]	10	0.6	2400	8000	4000	800
[24]	5	Not provided	1080	26000	Not applicable	5200

2.3 光谱信号检测

光谱共焦系统中,需要从样品表面反射的光谱信号中提取出最大光强及其对应的波长,进而由波长和深度的映射关系得到样品的形貌信息。所以,峰值波长定位算法对系统的测量结果准确性和稳定性有着重大影响。

峰值波长定位算法主要有两类。一种是拟合法,包括抛物线拟合^[34]、高斯拟合^[35]、Sinc 拟合^[36]等。拟合算法的精度较高,然而缺点是计算效率低,难以满足高速测量应用对效率的要求。Chen 等^[37]提出了一种从轴向响应信号中定位峰值的抛物线拟合算法,该算法与半峰全宽无关,比传统拟合算法的准确度提高了约 40%,精度提高了 10%。后来 Chen 等^[38]又提出了一种补偿拟合差分算法,通过信号差分因子补偿了峰形不对称造成的定位误差。另一种是质心法,由 Ruprecht

等^[39]最先提出,其在计算效率方面具有显著优势,但误差较大,结果波动严重,不适合用于要求高精度结果的系统。Bai 等^[40]提出了一种改进的质心峰值提取算法,阈值化前,在光谱信号的真实像素中插值若干虚拟像素,提高了稳定性,校准重复性为 $\pm 0.3 \mu\text{m}$,固定位置的标准偏差最佳值为 $0.009 \mu\text{m}$,其算法原理如图 7 所示。Chen 等^[41]针对共焦系统中不对称的轴向响应信号的峰值定位,提出了一种具有误差补偿的非对称鲁棒质心算法,相比传统质心算法,显著减小了定位偏差。王佳怡等^[42]利用光纤式色散共焦测量系统和激光干涉仪定量比较了峰值法、质心法、高斯拟合法和样条插值法的峰值波长提取性能,以 $2 \mu\text{m}$ 步进间距进行 10 次位移测量并计算相对偏差,测量结果如图 8 所示,结果表明高斯拟合法的精度较高且适应性更好。

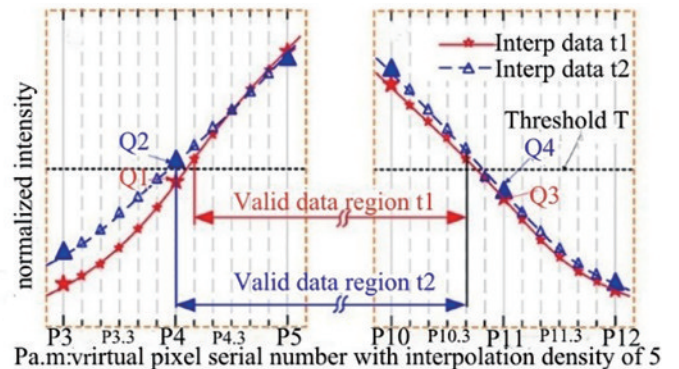
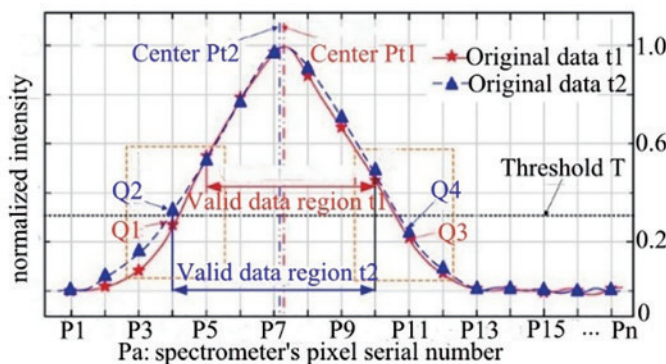


图 7 阈值峰值提取算法^[40]

Fig. 7 Schematic of the thresholding peak extraction algorithm^[40]

同时,许多学者从其他角度对峰值波长提取算法进行改进。Li 等^[43]提出了一种基于自适应模态分解的重叠峰值提取算法,用于厚度测量。Liu 等^[44]提出

了一种基于移位、差分、线性拟合、零点和峰值缺省计算的峰值提取算法,与高斯拟合法相比,该算法大大提高了效率,可应用于实时线扫描共焦系统。还有学者

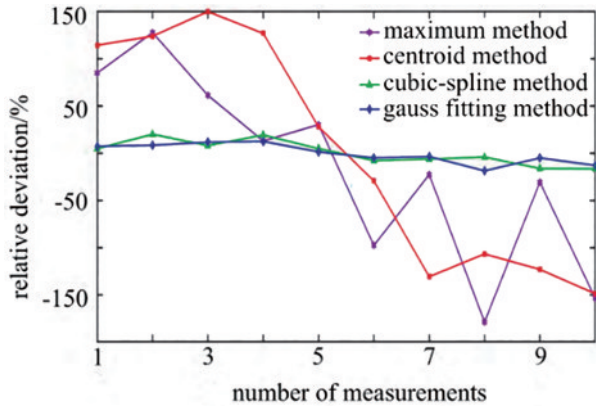


图 8 不同峰值定位算法下各位置的相对步进误差(2 μm 步进)^[42]
 Fig. 8 Relative deviation of each position under different peak wavelength extraction algorithms (2 μm step)^[42]

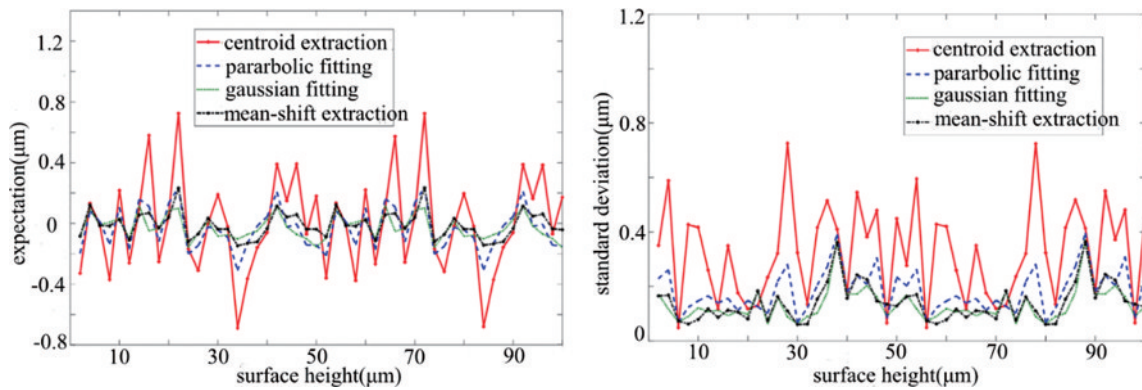


图 9 不同算法峰值提取误差的期望值和标准差^[45]
 Fig. 9 Expectation value and standard deviation of the peak extraction errors of different algorithms^[45]

表 2 不同算法峰值提取误差的均方根期望值和标准差

Table 2 RMS expectation and RMS standard deviation of the peak extraction errors of different algorithms

Parameter	Centroid algorithm	Parabolic fitting	Gaussian fitting	Mean-shift based extraction
RMS _{EX} / μm	0.3155	0.1426	0.0840	0.0891
RMS _{STD} / μm	0.3692	0.1638	0.1465	0.1546

3 光谱共焦显微技术的扫描方法

光谱共焦显微系统的关键指标包括测量范围、分辨率、线性误差等,研究人员在光谱共焦测量系统的关键技术方面不断创新,大幅提高测量能力。而在实际应用中,检测效率也是非常重要的。高速的扫描和数据采集不但大大减少样品处理时间,有效提高工作效率,还有助于实时监测和及时干预,保证获取数据的可靠性和准确性。为此,学者们将共焦系统与振镜、声光偏转器等设备结合或利用柱透镜、光纤束、微透镜阵列等光学元件提出了多种扫描方法。目前,主要的扫描方法包括单点扫描共焦扫描方法、线光谱共焦扫描方法和并行共焦扫描方法^[49]。

3.1 单点扫描共焦扫描方法

3.1.1 基于振镜的共焦扫描方法

振镜由于其设计机理与电流表的原理相似,又称

将图像处理、机器学习等技术应用到共焦系统的峰值定位。Lu 等^[45]提出了基于 mean-shift 聚类理论的峰值定位算法,在保持较高精度的同时提高计算速度 70 倍以上,不同算法的峰值提取效果对比如图 9 和表 2 所示。李春艳等^[46]利用广义回归神经网络拟合替代峰值波长提取算法,提高光谱信噪比和稳定性,实现了优于传统算法的共焦系统轴向信号响应曲线表征。Chen 等^[47]提出了一种基于序列图像聚焦区域获取深度(SFF)的算法,该算法首次实现了同一视场内对不同反射率材料的表面检测。左洪昊^[48]提出了两种基于等量代换的光谱信号检测算法,对 CCD 矩阵所得的灰度值图像滤波、降维后分别通过高斯拟合和神经网络的监督学习进行峰值定位,在不采用反射光栅的情况下,降低硬件成本的同时保证系统微米级别的检测精度。

为检流计式扫描振镜,包括伺服系统和反射镜两部分。通过伺服电机带动反射镜来回摆动,实现光束在物体表面上的三维扫描。振镜包括单轴和双轴两类,虽然双轴振镜可以进行二维扫描和定位,但稳定性、集成性、经济性都不如单轴振镜,因此在自动光学检测等实时系统^[50-53]中,单轴振镜应用较为广泛。

精度高、控制好和测量范围广是振镜扫描的优点,但是为了精确控制反射镜的转角,振镜的扫描频率不高。为了提高振镜的扫描速度,Yoo 等^[50]采用迭代学习控制(ILC)来控制振镜的快速扫描运动,其扫描速度可达 412 行/s,与商业扫描振镜相比,其均方根误差减少至 1/73。Ito 等^[51]搭建了一个基于振镜的共焦位移传感器,通过无模型强化学习精确控制振镜,实现 1 m/s 的扫描速度。Mac 等^[52]开发了一种扩展景深的轴向线扫描共焦显微镜,利用一维振镜实现以 20 frame/s 的速率进行最大 315 μm × 315 μm × 80 μm

的立体扫描,使得生物检测过程中实时立体成像成为可能。Chen 等^[53]将线光源、成像模块与振镜集成,开发了一种新型线扫描光谱共焦探测器,其光路和系统结构如图 10 所示。该探测器不需要机械扫描平台就可实现全视场测量,其测量误差低于 $0.239 \mu\text{m}$,标准

偏差为 $0.126 \mu\text{m}$,测量速度可达 8000 line/s 。振镜虽然能够以高分辨率进行快速扫描,但由于其扫描机制,扫描轨迹是非线性的,因此对于获得准确的扫描结果,需要进行复杂的扫描算法处理。这增加了系统设计和调试的复杂性。

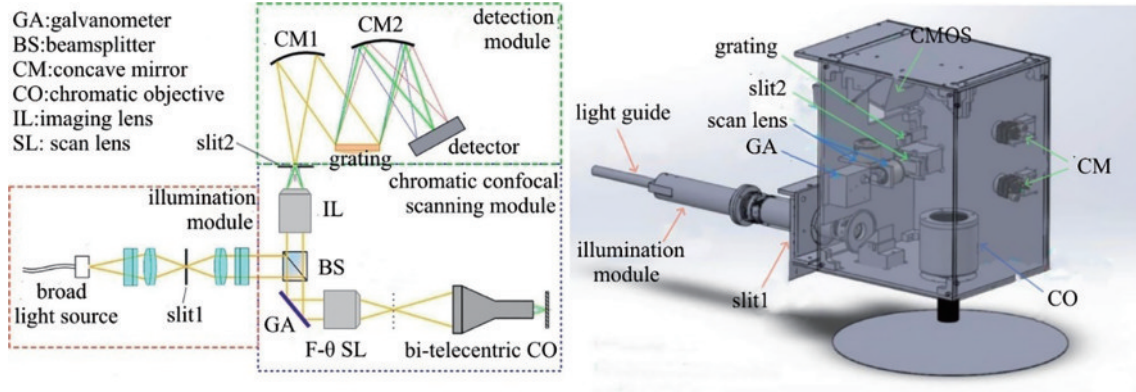


图 10 基于振镜的共焦扫描方法^[53]。(a) 原理图;(b) 系统结构

Fig. 10 Confocal scanning microscopy based on galvanometer^[53]. (a) Schematic of the principle; (b) system structure

3.1.2 基于声光偏转器的共焦扫描方法

上文提及的振镜是基于旋转反射镜的原理进行扫描的,属于机械扫描,存在机械惯性,扫描速度和稳定性都比较有限^[54]。而声光偏转器(AOD)是基于声光效应的,能在不受机械惯性的情况下实现高速光偏转,扫描速度是传统振镜的 10 倍以上^[55];并且,声光偏转器可以采用逐行模式对样品表面进行整体扫描,也可以只检测待测表面中的个别区域,减少检测时间。Szulzycki 等^[56]、Bansal 等^[57]、Duocastella 等^[33]将共焦系

统与声光偏转器相结合,其扫描速率达到 40 kHz 以上,如图 11(a)所示。除了利用单个声光偏转器作为偏转光束器件,还可以将两个或多个声光偏转器按照一定的顺序组合^[58-60],能够实现 kHz 级别扫描速度的全视场三维检测,如图 11(b)所示。声光偏转器具有扫描速度快、扫描方式多样等优点,但其一般配合激光器使用,成本较高,而且对温度、湿度等环境条件比较敏感,需要额外的控制和调节措施来保持稳定的性能。

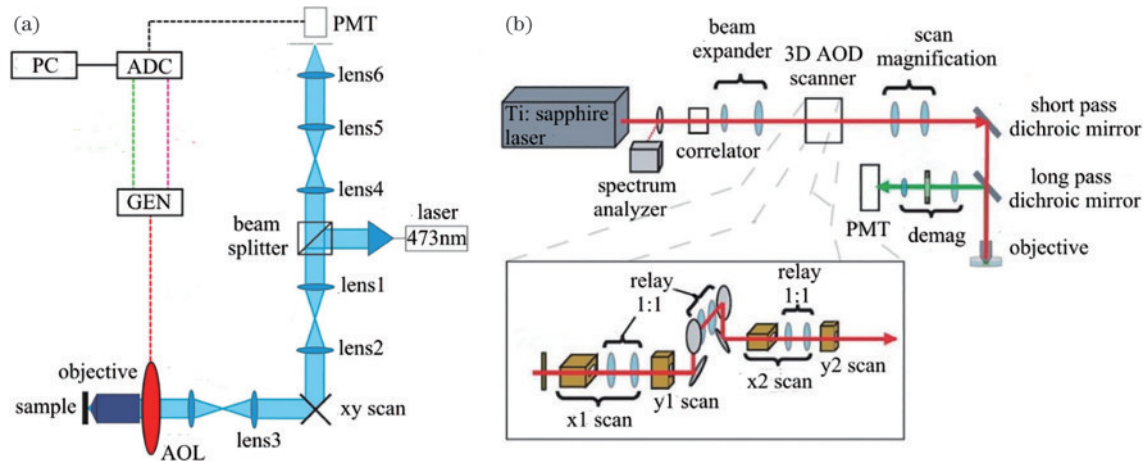


图 11 基于声光偏转器的共焦扫描方法。(a) 单独使用^[56];(b) 组合使用^[58]

Fig. 11 Confocal scanning microscopy based on acousto-optic deflectors. (a) Used alone^[56]; (b) used combined^[58]

3.2 线光谱共焦扫描方法

线光谱共焦技术是点光谱共焦技术的延伸^[27],可看作特殊的多点共焦扫描。将点光谱共焦系统中的针孔都置换为狭缝,光源通过狭缝形成线光源,可以看作无数个点光源的集合,线形光聚焦到待测样品表面,再被反射到线阵探测器上,配合一维位移平台就能实现

快速三维检测。显然,线光谱共焦扫描有效提高了检测效率,对比点光谱共焦,相当于增加了一个扫描维度。但是,由于狭缝的尺寸远远大于针孔,杂散光的滤除能力较弱,这就导致在分辨能力方面,线光谱共焦系统表现较差。Han 等^[61]利用声光偏转器和线阵扫描相机构建的一个线扫描共焦系统,实现了 60 frame/s

扫描速度,远高于商用共焦显微镜的最大采集速度 (<24 frame/s)。2005年,Im等^[62]将扫描速度提升至191 frame/s。赵家旺等^[63]将线扫描应用到共焦显微镜,利用柱面透镜产生线照明,利用振镜引导聚焦直线,与采集单点图像共焦显微镜相比,图像采集速度提高104倍。Hu等^[64]开发了一种新型线扫描光谱共焦传感器,采用分光器件使面阵CMOS获得最大功率的光信号,配合高精度位移装置能够以90 frame/s的扫描速度,每秒32000点生成三维图像。

从结构上,线光谱共焦分为同轴和双轴两种形式,它们的系统结构如图12所示,它们的区别是照明臂和探测臂是否采用同一光路。双轴线光谱共焦的优点是大幅削弱杂散光对系统的影响,且无需分光器件,大大提高了光能利用率。除了上面提到的同轴线光谱共焦扫描,研究人员也对双轴线光谱共焦扫描进行深入研究。Yazaki等^[65]基于色散光纤和一对衍射光栅设计了一种暗场线扫描表面检测仪,该装置的扫描速度比传统同轴共焦系统高近1000倍,能够以

25 mm的扫描宽度、20 m/s的扫描速度检测尺寸小于10 μm的缺陷,其光路如图13所示。Dong等^[66]提出了一种基于激光散射法的大孔径高速线扫描系统,其由一个旋转多角镜和一个远心扫描透镜实现线扫描,由响应时间极短的光电倍增管探测器检测每个聚焦点的散射信号。待测样品垂直于激光线运动,实现高速大面积检测。该系统的激光线长为60 mm,分辨率小于0.5 μm,能够在14 min内对810 mm×450 mm的光学元件进行检测。Tao等^[67]设计了一种新型共焦线扫描设备用于检测大口径光学元件缺陷,该设备包括暗场成像系统(DFIS)和明场成像系统(BFIS),其中分辨率较低的DFIS用于快速检测和大致测量,分辨率较高的BFIS用于精确检测和精细测量。该仪器可在6 min内对810 mm×460 mm的光学元件完成扫描,检测精度可达3 μm。对晶圆、光学元件、手机面板等高反射材料的表面缺陷检测,双轴线光谱共焦技术能够在高扫描速度下保持稳定精确的识别能力,具有较好的发展前景。

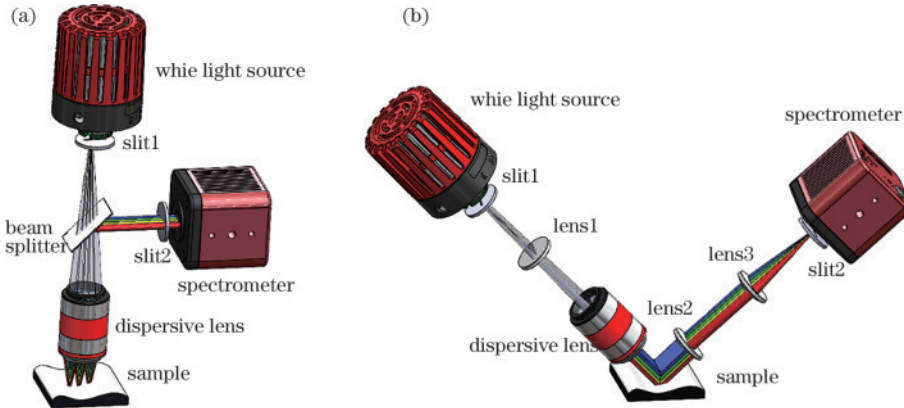


图 12 线光谱共焦扫描方法。(a) 同轴线光谱共焦系统结构;(b) 双轴线光谱共焦扫描系统结构

Fig. 12 Line chromatic confocal microscopy. (a) Coaxial chromatic confocal system structure; (b) biaxial chromatic confocal scanning system structure

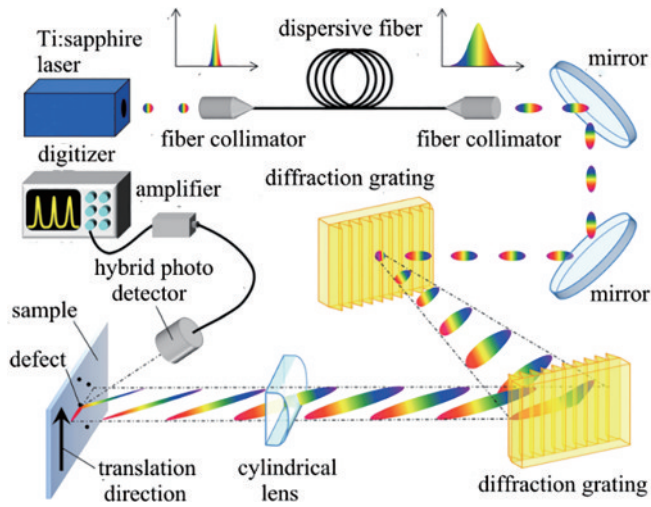


图 13 暗场线扫描表面检测仪示意图^[65]

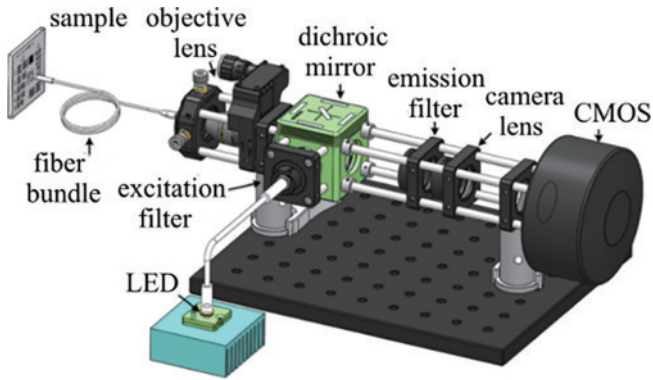
Fig. 13 Schematic of the dark-field line-scanning surface inspector^[65]

3.3 并行共焦扫描方法

3.3.1 基于光纤束的共焦扫描方法

光纤束,是将许多长度一定、极细的光导纤维集成束,两端按一一对应关系紧密排列而成^[68-69]。作为传输光信号的一种光纤组合,光纤束能够将光源发出的光分束后形成光能均匀的点阵列光源来实现并行共焦光路,从而对待测样品进行多点同步检测,提高成像速度,其系统结构如图14所示。Hughes等^[70]将光纤束用于共聚焦内窥镜,配合高速线阵CCD相机可实现120 frame/s的高信噪比成像。张雅丽等^[71-72]提出了基于光纤束的并行同轴和双轴光谱共焦测量系统,这两类系统都是利用光纤束形成线光源,通过线扫描实现平行测量的,测量精度可达微米级,相较于单点测量系统,测量效率分别提升约38倍和18倍。

光源、光纤间的距离和光纤耦合都决定了光纤束

图 14 基于光纤束的共焦扫描方法^[65]Fig. 14 Confocal scanning microscopy based on fiber bundle^[65]

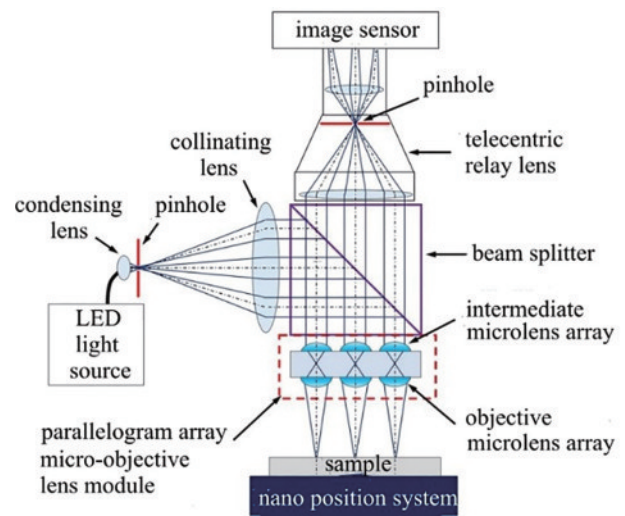
传输光信号的效果,进而影响共焦系统的精度。Lane 等^[73]在光纤束共焦系统中引入空间光调制器来提高光利用率。马力等^[74]根据光纤束共焦系统理论,结合抽样定理和光纤束中光纤的排列特点,得出光纤束的光纤间距与物镜的放大率决定了系统横向分辨率的结论。Vaishakh^[75]利用高斯理论研究了相邻光纤间的耦合效应,发现增加光纤束参数 D/R 值后可以大大降低相邻光纤造成成像对比度低的影响,其中 D 是光纤束中相邻光纤的芯距, R 为光纤束中一根光纤的纤芯半径。

3.3.2 基于微透镜阵列的共焦扫描方法

微透镜阵列是一种分光器件,能够分割光束并将其聚焦到指定的位置。微透镜阵列具有光能利用率高、阵列排列多样、视场范围较大等特点。微透镜阵列既可以与光源组合产生点列阵光源^[76-78],又可以用作色散物镜^[79],实现大视场共焦检测。然而,作为物镜使用时,微透镜的工作距离很短。对此,Choi 等^[80]通过将两个微透镜阵列和一个远心光学系统相结合,克服微透镜阵列焦距很小的限制,搭建的共焦成像系统提供 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的视场,扫描范围为 $100\ \mu\text{m}$,其系统结构如图 15 所示。Shin 等^[81]提出了一种由两个晶片级微透镜阵列组成的平行四边形阵列微物镜模块,并将其集成到共焦成像系统中。该系统的视场宽度为 28 mm ,工作距离为 $445\ \mu\text{m}$,横向分辨率为 $1.55\ \mu\text{m}$,可实现单向无限扫描。然而,微透镜阵列制作复杂,且易受杂散光影响,从而削弱共焦系统的准确性。王永红^[82]仔细研究了基于微透镜阵列的共焦成像技术,分析了各种误差因素如光学系统、探测系统、导轨和外界环境等对检测精度的影响,并对如何改善和消除这些误差提出建议和要求。

3.3.3 基于数字微镜装置的共焦扫描方法

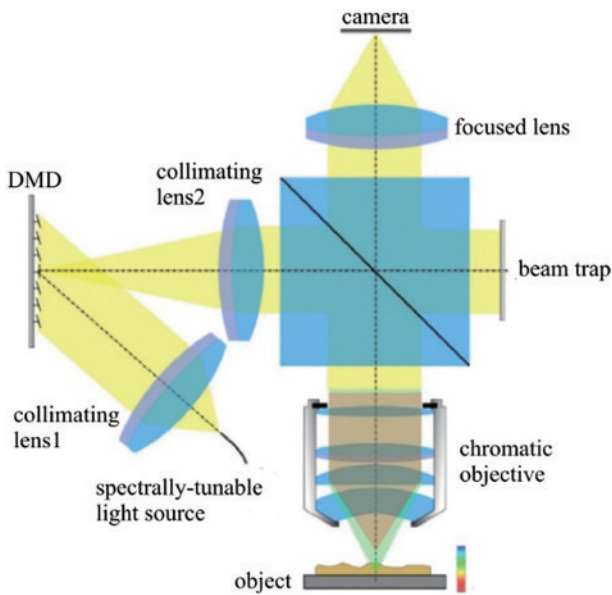
1987 年,科学家 Hornbeck 发明了一种电子输入、光学输出的微机电系统,称为数字微镜装置(DMD),它由许多铝制反射镜面组成,每个镜面能够绕其对角线旋转轴偏转 $\pm 12^\circ$,即 DMD 的微镜都有 3 种状态,即 $+12^\circ$ 、 0° 、 -12° 。DMD 上的每一个微镜都可以通过程

图 15 基于微透镜阵列的共焦扫描方法^[80]Fig. 15 Confocal scanning microscopy based on microlens array^[80]

序控制,因而很容易实现对光线的分束,以及对分束后的光线粗细、间距等参数的控制,与其他分光器件相比,DMD 具有无可比拟的便捷性^[83]。Luo 等^[84]利用 DMD 制作了一种可编程光源,并将其与基于 DMD 的共焦装置相结合,该装置的扫描速度比传统的阵列快 300 倍,其系统光路如图 16 所示。张一等^[85]搭建了基于 DMD 的并行共焦检测系统,该系统的测量范围为 $120\ \mu\text{m}$,测量精度可达微米级,并能够对被测物表面进行三维重构。在此基础上,Yu 等^[86]采用大口径色散管镜改进系统,将其轴向测量范围增大至 $300\ \mu\text{m}$ 。Chen 等^[87]采用 DMD 和多光谱传感器设计了一种面扫描彩色共焦显微镜,其测量视场为 $1.8\text{ mm} \times 1.3\text{ mm}$,可一次实现全视场光谱成像。DMD 的缺点是它对分束后的光线不会产生会聚作用,当采用 DMD 进行共焦测量时,相比采用微透镜阵列,纵、横向分辨率都会下降^[88]。

4 总结与展望

光谱共焦显微系统的整体性能主要由光源、色散物镜、光谱信号检测与处理算法决定。图 5 对比了各类光源的特点,其中改善稳定性的超辐射发光二极管兼顾了光源的光谱特性和经济成本,可作为光谱共焦显微系统中光源的选择之一。为了获得较大的轴向色散,折射光学元件构成的色散物镜需要采用阿贝数差异较大的两种材料组合;折衍混合构成的色散物镜需要采用阿贝数尽量小的材料;而混合结构的色散物镜具有更好的色散线性度和更精确的色散控制特性,因此可作为物镜的优选设计方案。目前常用的峰值波长定位算法中,拟合法和质心法各有优缺点,mean-shift 迭代算法和广义回归网络算法兼具两者之长,SFF 算法更是实现了在同视场对不同反射率材料的检测,扩大了光谱共焦技术的应用范围。

图 16 基于 DMD 的共焦扫描系统^[84]Fig. 16 Confocal scanning microscopy based on DMD^[84]

由于自身特性,点光谱共焦测量系统测量效率低,不适用于对较大物体表面形貌的高速检测。因此,研究人员通过结合光学设备或设计光学元件,创新扫描方法,改善测量效果。表 3 总结了光谱共焦显微技术的扫描方法的特点。

表 3 光谱共焦显微技术的扫描方法对比

Table 3 Comparison of scanning methods for chromatic confocal microscopy

Scanning method	Advantage	Disadvantage
Focus shifting confocal scanning method	High precision, large measuring range	Lower imaging frame
Line spectral confocal scanning method	Higher imaging frame	Lower lateral resolution
Parallel confocal scanning method	High imaging rate, flexible structure	Low light efficiency, poor anti-interference

先进制造技术的进步需要高精度测量技术的支持,而光谱共焦显微技术作为一种迅速发展的高精度测量技术,凭借测量精度高、适应范围广、无损检测、三维成像能力等优势在表面形貌测量、生产实时监测、生物学成像等领域备受青睐,如玻璃、薄膜等透明材料的厚度测量,流水线产品的密封性和完整性检测,人体组织扫描成像等。同时,伴随工业应用的不断扩展,对高精度测量的需求也不断促进光谱共焦技术的更新和迭代。具体而言,光谱共焦技术的未来发展方向主要有以下几个方面。

1) 光谱特性更稳定、更连续的宽光谱光源。如多个不同波段的微型发光二极管按一定规律排列组合,可实现更广泛的光谱范围,通过控制不同发光二极管

的电流或亮度来调节各波段的光强,以扩展测量范围;结合偏振技术,通过控制光的偏振方向和相位,减少光谱中的波动和漂移,从而提高光源光谱稳定性。

2) 色散物镜设计。利用衍射光学元件、超构光学元件等,实现光线的精确调控和波前修正,进一步提高物镜的分辨率和对比度;引入自聚焦光学元件,实现对焦的自动调节,提高图像的清晰度。

3) 多种扫描方法配合。如使用振镜来控制线形光束的扫描方向,振镜的快速扫描能够实现高速的光谱数据采集,提高系统的时间分辨率;微透镜用于分割和聚焦光线,将其投射到光纤束上,通过光纤束传输到光谱仪中进行光谱测量,实现多点同时采集,提高系统的空间分辨率和采样效率。

4) 融合人工智能、神经网络等计算机技术优化光谱信号检测与处理算法。通过学习大量的光谱数据,自动提取特征,如可以使用递归神经网络(RNN)来处理时间序列的光谱数据,或使用深度学习模型进行背景去噪、曲线拟合等任务,提高信号检测的准确性和信号处理的鲁棒性;结合神经网络的特征提取和增强,增加光谱数据的信息量和辨识度,提高信号的分辨率和灵敏度。

参 考 文 献

- [1] Ye L, Qian J, Haitjema H, et al. On-machine chromatic confocal measurement for micro-EDM drilling and milling [J]. Precision Engineering, 2022, 76: 110-123.
- [2] Qu D J, Zhou Z D, Li Z W, et al. Wafer eccentricity deviation measurement method based on line-scanning chromatic confocal 3D profiler[J]. Photonics, 2023, 10 (4): 398-412.
- [3] Lishchenko N, O'Donnell G E, Culleton M. Contactless method for measurement of surface roughness based on a chromatic confocal sensor[J]. Machines, 2023, 11(8): 836-862.
- [4] Leach R K. Optical measurement of surface topography [M]. Berlin: Springer, 2011: 10-11.
- [5] Browne M A, Akinyemi O, Crossley F, et al. Stage-scanned chromatically aberrant confocal microscope for 3-D surface imaging[J]. Proceedings of SPIE, 1992, 1660: 532-541.
- [6] Keller P J, Schmidt A D, Wittbrodt J, et al. Reconstruction of zebrafish early embryonic development by scanned light sheet microscopy[J]. Science, 2008, 322 (5904): 1065-1069.
- [7] 白昊东, 徐南, 周建康, 等. 紧凑长轴向色散光谱共焦镜头[J]. 光学学报, 2023, 43(14): 1422001. Bai H D, Xu N, Zhou J K, et al. Compact long-axial dispersive chromatic confocal lens[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(14): 1422001.
- [8] Duque D, Garzón J. Effects of both diffractive element and fiber optic based detector in a chromatic confocal system[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 50: 182-189.

- [9] Pruss C, Ruprecht A, Körner K, et al. Diffractive elements for chromatic confocal sensors[EB/OL]. [2023-11-12]. https://www.dgao-proceedings.de/download/106/106_a1.pdf.
- [10] 邵谭彬, 郭文平, 席英皓, 等. 大量程光谱共焦位移传感器设计及性能评估[J]. 中国激光, 2022, 49(18): 1804002. Shao T B, Guo W P, Xi Y H, et al. Design and performance evaluation of chromatic confocal displacement sensor with high measuring range[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(18): 1804002.
- [11] Lel V V, Al-Sibai F, Liefken A, et al. Local thickness and wave velocity measurement of wavy films with a chromatic confocal imaging method and a fluorescence intensity technique[J]. Experiments in Fluids, 2005, 39(5): 856-864.
- [12] Zhang Z L, Lu R S, Zhang A L, et al. Monochromatic LED-based spectrally tunable light source for chromatic confocal sensors[J]. Optical Engineering, 2023, 62(2): 024102.
- [13] 白昊东, 赵阳, 周建康, 等. 性能参数可调的宽视场轴向色散镜头[J]. 光学学报, 2023, 43(20): 2022001. Bai H D, Zhao Y, Zhou J K, et al. Wide field-of-view axial dispersion lens with adjustable performance parameters[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(20): 2022001.
- [14] Shi K B, Li P, Yin S Z, et al. Chromatic confocal microscopy using supercontinuum light[J]. Optics Express, 2004, 12(10): 2096-2101.
- [15] Chen X G, Nakamura T, Shimizu Y, et al. A chromatic confocal probe with a mode-locked femtosecond laser source[J]. Optics Laser Technology, 2018, 103: 359-366.
- [16] Chen C, Sato R, Shimizu Y, et al. A method for expansion of Z-directional measurement range in a mode-locked femtosecond laser chromatic confocal probe[J]. Applied Sciences, 2019, 9(3): 454-468.
- [17] Matsukuma H, Sato R, Shimizu Y, et al. Measurement range expansion of chromatic confocal probe with supercontinuum light source[J]. International Journal of Automation Technology, 2021, 15(4): 529-536.
- [18] Csóke L T, Kautny S, Domján L, et al. Development and validation of a surface profiling system for end of line monitoring of microstructured elastomer seals based on chromatic confocal microscopy[J]. Precision Engineering, 2022, 77: 365-374.
- [19] Novak J, Miks A. Hyperchromats with linear dependence of longitudinal chromatic aberration on wavelength[J]. Optik, 2005, 116(4): 165-168.
- [20] Zhang Z L, Lu R S. Initial structure of dispersion objective for chromatic confocal sensor based on doublet lens[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 139: 106424.
- [21] Chen C, Leach R, Wang J, et al. Two-dimensional spectral signal model for chromatic confocal microscopy [J]. Optics Express, 2021, 29(5): 7179-7196.
- [22] Förster E, Stumpf D, Werner L, et al. Hyperchromatic lens doublets with an extremely small equivalent Abbe number employing diffractive elements and refractive materials with exceptional dispersion properties[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2022, 39(11): 1992-2000.
- [23] 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.
- [24] 吴雨晴. 光谱共焦位移测量系统的研制[D]. 北京: 北京交通大学, 2022: 43-44. Wu Y Q. Development of spectral confocal displacement measurement system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022: 43-44.
- [25] 刘若虚. 具有轴向色散的线光谱共焦 3D 测量光学技术研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2021: 35-36. Liu R X. Research on optical technology of line spectrum confocal 3D measurement with axial dispersion[D]. Suzhou: Soochow University, 2021: 35-36.
- [26] 鞠明岐. 白光共焦线扫描测距仪优化设计与数据处理方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021: 41-42. Ju M Q. Optimal design and data processing method of chromatic confocal line-scan measuring[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021: 41-42.
- [27] 杨洁. 线扫描光谱共焦光学系统研究与设计[D]. 苏州: 苏州大学, 2021. Yang J. Research and design of line scanning chromatic confocal optical system[D]. Suzhou: Soochow University, 2021.
- [28] 刘万. 基于线扫描光谱共焦测量系统的数据处理与校准算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021. Liu W. Research on data processing and calibration algorithm based on line scanning chromatic confocal measurement system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [29] Huang T T, Yang J, Ma T. Design of a line-scanning dispersive objective lens for chromatic confocal displacement sensor[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 12071: 120710S.
- [30] Chen H R, Chou Y F, Yang F S, et al. Galvo-scanning chromatic confocal microscopy for high-speed 3-D surface measurement[C]//Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN 2022), November 15-18, 2022, Singapore. Singapore: ASPEN, 2022: 497.
- [31] Sharma G, Singh K. Ultralong imaging range chromatic confocal microscopy[J]. Advanced Photonics Research, 2023, 4(1): 2200116.
- [32] 张志强. 光谱共焦线扫描测量方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021: 56-57. Zhang Z Q. Research on the measurement method of line-scan chromatic confocal microscopy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021: 56-57.
- [33] Duocastella M, Vicidomini G, Diaspro A. Simultaneous multiplane confocal microscopy using acoustic tunable lenses[J]. Optics Express, 2014, 22(16): 19293-19301.
- [34] 朱鸿. 光谱共焦位移传感器信号处理与校准研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019: 57-59. Zhu H. Research on signal processing and calibration of spectral confocal displacement sensor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019: 57-59.

- [35] Chen C, Wang J, Liu X J, et al. Influence of sample surface height for evaluation of peak extraction algorithms in confocal microscopy[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(22): 6516-6526.
- [36] Luo D, Kuang C F, Liu X. Fiber-based chromatic confocal microscope with Gaussian fitting method[J]. *Optics Laser Technology*, 2012, 44(4): 788-793.
- [37] Chen C, Wang J, Leach R, et al. Corrected parabolic fitting for height extraction in confocal microscopy[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 3682-3697.
- [38] Chen C, Yang W J, Wang J, et al. Accurate and efficient height extraction in chromatic confocal microscopy using corrected fitting of the differential signal [J]. *Precision Engineering*, 2019, 56: 447-454.
- [39] Ruprecht A K, Wiesendanger T F, Tiziani H J. Signal evaluation for high-speed confocal measurements[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(35): 7410-7415.
- [40] Bai J, Li X H, Wang X H, et al. Chromatic confocal displacement sensor with optimized dispersion probe and modified centroid peak extraction algorithm[J]. *Sensors*, 2019, 19(16): 3592-3604.
- [41] Chen C, Chai C C, Liu X J, et al. Asymmetry robust centroid localization in confocal microscopy[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(8): 1933-1936.
- [42] 王佳怡, 刘涛, 唐晓锋, 等. 光纤式色散共焦三维测量系统及算法比较研究[J]. *光子学报*, 2021, 50(11): 1112001. Wang J Y, Liu T, Tang X F, et al. Fiber-coupled chromatic confocal 3D measurement system and comparative study of spectral data processing algorithms [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(11): 1112001.
- [43] Li J F, Zhao Y L, Du H, et al. Adaptive modal decomposition based overlapping-peaks extraction for thickness measurement in chromatic confocal microscopy [J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 36176-36187.
- [44] Liu L J, Ma H, Shi Z D, et al. A real-time peak extraction algorithm for dynamic displacement measurement based on spectral confocal microscopy[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 2112(1): 012015.
- [45] Lu W L, Chen C, Zhu H, et al. Fast and accurate mean-shift vector based wavelength extraction for chromatic confocal microscopy[J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(11): 115104.
- [46] 李春艳, 李庚鹏, 刘继红, 等. 基于 GRNN 的光谱共焦位移测量方法分析与研究[J]. *光子学报*, 2022, 51(3): 0330001. Li C Y, Li G P, Liu J H, et al. Analysis and research on spectral confocal displacement measurement method based on GRNN[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(3): 0330001.
- [47] Chen Y S, Chen L C. 3-D optical microscopy with a new synthetic SFF algorithm to reconstruct surfaces with various specular and diffusive reflectance[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 126(5): 2011-2023.
- [48] 左洪昊. 基于等量代换的光谱共焦位移传感器信号检测算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021: 55-57. Zuo H H. Research on signal detection algorithm of spectral confocal displacement sensor based on equivalent substitution[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021: 55-57.
- [49] 王玥颖, 刘旭, 郝翔. 三维表面形貌测量中的共聚焦显微成像技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(8): 0811007. Wang Y Y, Liu X, Hao X. Advances of confocal microscopy in three-dimensional surface topography measurement[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(8): 0811007.
- [50] Yoo H W, Ito S, Schitter G. High speed laser scanning microscopy by iterative learning control of a galvanometer scanner[J]. *Control Engineering Practice*, 2016, 50: 12-21.
- [51] Ito S, Poik M, Csencsics E, et al. High-speed scanning chromatic confocal sensor for 3-D imaging with modeling-free learning control[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(29): 9234-9242.
- [52] Mac K D, Qureshi M M, Na M, et al. Fast volumetric imaging with line-scan confocal microscopy by electrically tunable lens at resonant frequency[J]. *Optics Express*, 2022, 30(11): 19152-19164.
- [53] Chen H R, Chen L C. Full-field chromatic confocal microscopy for surface profilometry with sub-micrometer accuracy[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 161: 107384.
- [54] 胡庆磊. 飞秒激光声光扫描的色散补偿研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018: 64-65. Hu Q L. On the compensation of dispersion of femtosecond laser acousto-optic scanning[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018: 64-65.
- [55] Xu J P, Stroud R. Acousto-optic devices: principles, design, and applications[M]. New York: Wiley, 1992: 42-45.
- [56] Szulzycki K, Savaryn V, Grulkowski I. Rapid acousto-optic focus tuning for improvement of imaging performance in confocal microscopy[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(10): C14-C18.
- [57] Bansal V, Patel S, Saggau P. High-speed addressable confocal microscopy for functional imaging of cellular activity[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2006, 11(3): 034003.
- [58] Reddy G D, Kelleher K, Fink R, et al. Three-dimensional random access multiphoton microscopy for functional imaging of neuronal activity[J]. *Nature Neuroscience*, 2008, 11(6): 713-720.
- [59] Akemann W, Léger J F, Ventalon C, et al. Fast spatial beam shaping by acousto-optic diffraction for 3D non-linear microscopy[J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 28191-28205.
- [60] Konstantinou G, Kirkby P A, Evans G J, et al. Dynamic wavefront shaping with an acousto-optic lens for laser scanning microscopy[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6283-6299.
- [61] Han S M, Im K B, Park H, et al. High speed slit-scanning confocal laser microscopy with an acousto-optic beam deflector and a line scan camera[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2005, 5701: 164-171.

- [62] Im K B, Han S M, Park H, et al. Simple high-speed confocal line-scanning microscope[J]. *Optics Express*, 2005, 13(13): 5151-5156.
- [63] 赵家旺, 张运海, 王发民, 等. 线扫描虚拟结构调制共聚焦显微成像[J]. *中国光学*, 2021, 14(2): 431-445.
Zhao J W, Zhang Y H, Wang F M, et al. Line-scanning confocal microscopic imaging based on virtual structured modulation[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 431-445.
- [64] Hu H, Mei S, Fan L M, et al. A line-scanning chromatic confocal sensor for three-dimensional profile measurement on highly reflective materials[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(5): 053707.
- [65] Yazaki A, Kim C, Chan J, et al. Ultrafast dark-field surface inspection with hybrid-dispersion laser scanning [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(25): 251106.
- [66] Dong J T. Line-scanning laser scattering system for fast defect inspection of a large aperture surface[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(25): 7089-7098.
- [67] Tao X, Zhang Z T, Zhang F, et al. A novel and effective surface flaw inspection instrument for large-aperture optical elements[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, 64(9): 2530-2540.
- [68] 袁冠伟. 光纤束共焦显微系统的理论分析与设计[D]. 南昌: 南昌大学, 2008: 77-78.
Yuan G W. Theoretical analysis and design on optic-fiber bundle confocal microscopical system[D]. Nanchang: Nanchang University, 2008: 77-78.
- [69] Dong J T, Zhang T D, Yang L, et al. Dark-field line confocal imaging with point focality and extended line field for bulk defects detection[J]. *Chinese Optics Letters*, 2023, 21(4): 041203.
- [70] Hughes M, Yang G Z. High speed, line-scanning, fiber bundle fluorescence confocal endomicroscopy for improved mosaicking[J]. *Biomedical Optics Express*, 2015, 6(4): 1241-1252.
- [71] Zhang Y L, Yu Q, Wang C, et al. Design and research of chromatic confocal system for parallel non-coaxial illumination based on optical fiber bundle[J]. *Sensors*, 2022, 22(24): 9596-9614.
- [72] 张雅丽. 基于光纤束的并行彩色共聚焦测量系统设计与实验研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2022: 48-49.
Zhang Y L. Design and experiment study of parallel chromatic confocal measurement system based on optical fiber bundle[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2022: 48-49.
- [73] Lane P M, Dlugan A L, Richards-Kortum R, et al. Fiber-optic confocal microscopy using a spatial light modulator[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(24): 1780-1782.
- [74] 马力, 袁冠伟, 赖秀娟, 等. 光纤束共焦显微成像[J]. *南昌大学学报(理科版)*, 2008, 32(5): 431-434.
Ma L, Yuan G W, Lai X J, et al. Imaging of optic-fiber bundle confocal microscopy[J]. *Journal of Nanchang University (Natural Science)*, 2008, 32(5): 431-434.
- [75] Vaishakh M. Confocality in image fiber bundle based microscope: a theoretical analysis[J]. *Optik*, 2011, 122(21): 1947-1949.
- [76] 田维坚, 丁志华, 郭履容, 等. 一种全场三维共焦检测的新方法[J]. *光学学报*, 1998, 18(6): 101-105.
- Tian W J, Ding Z H, Guo L R, et al. A new method for full-field three-dimensional confocal detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(6): 101-105.
- [77] 尹可. 基于微透镜阵列的多光束共焦成像系统若干问题的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 55-56.
Yin K. Research on parallel confocal imaging system with micro-lens array[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 55-56.
- [78] Suresh S A, Vyas S, Chen W P, et al. Multifocal confocal microscopy using a volume holographic lenslet array illuminator[J]. *Optics Express*, 2022, 30(9): 14910-14923.
- [79] Tiziani H J, Uhde H M. Three-dimensional analysis by a microlens-array confocal arrangement[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(4): 567-572.
- [80] Choi W, Shin R, Lim J, et al. Design methodology for a confocal imaging system using an objective microlens array with an increased working distance[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33278.
- [81] Shin R, Choi W, Kim T, et al. Gigapixel confocal imaging using a massively parallel optical probe array with single directional infinite scanning[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 7658.
- [82] 王永红. 基于全场并行共焦的检测技术与系统研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004: 72-73.
Wang Y H. Research on the detecting technologies and system based on whole-field parallel confocal[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2004: 72-73.
- [83] 余卿, 余晓芬, 刘天文, 等. 数字微镜器件用于并行共焦测量的再研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0523005.
Yu Q, Yu X F, Liu W W, et al. Re-studies on parallel confocal measurement system with digital micromirror device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0523005.
- [84] Luo D, Taphanel M, Claus D, et al. Area scanning method for 3D surface profilometry based on an adaptive confocal microscope[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 124: 105819.
- [85] 张一, 余卿, 张昆, 等. 基于数字微镜器件的并行彩色共聚焦测量系统[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(4): 859-866.
Zhang Y, Yu Q, Zhang K, et al. Parallel chromatic confocal measurement system based on digital micromirror device[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(4): 859-866.
- [86] Yu Q, Zhang Y L, Zhang Y, et al. A novel chromatic confocal one-shot 3D measurement system based on DMD[J]. *Measurement*, 2021, 186: 110140.
- [87] 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.
- [88] 余卿, 余晓芬, 崔长彩, 等. 并行共焦测量中的并行光源技术综述[J]. *中国光学*, 2013, 6(5): 652-659.
Yu Q, Yu X F, Cui C C, et al. Survey of parallel light source technology in parallel confocal measurement[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 652-659.