

三维表面形貌测量中的共聚焦显微成像技术研究进展

王玥颖^{1,2}, 刘旭^{1**}, 郝翔^{1,2*}¹浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027;²浙江大学嘉兴研究院智能光电创新中心, 浙江 嘉兴 314000

摘要 随着精密仪器制造和半导体加工产业的蓬勃发展,对微小结构表面形貌的观察和测量是现代科学研究的一个重要方向。激光扫描共聚焦显微成像技术因高分辨率、高信噪比和优秀的层切能力在三维表面形貌测量领域备受青睐。介绍共聚焦显微成像技术的基本原理,并对适用于三维表面形貌测量领域的共聚焦显微成像方法进行综述,包括共聚焦成像的不同扫描方法、不同探测手段及基于光谱的共聚焦成像技术。最后,对共聚焦显微成像技术未来的发展趋势进行展望。

关键词 共聚焦显微成像技术; 三维表面形貌测量; 扫描成像; 轴向定位

中图分类号 Q436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230533

Advances of Confocal Microscopy in Three-Dimensional Surface Topography Measurement

Wang Yueying^{1,2}, Liu Xu^{1**}, Hao Xiang^{1,2*}¹College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China;²Intelligence Optics and Photonics Research Center, Jiaxing Research Institute, Zhejiang University, Jiaxing 314000, Zhejiang, China

Abstract With the rapid development of precision instrument manufacturing and semiconductor processing industry, the observation and measurement of micro-structure surface profile has become an important orientation of scientific research. Laser scanning confocal microscopy becomes popular in three-dimensional (3D) surface topography because of its high resolution, high signal-to-noise ratio, and excellent optical sectioning ability. In this paper, we first introduce the basic principle of the confocal microscopy. Further, various confocal microscopic methods used in 3D surface topography measurement are reviewed, including different scanning methods, different detection methods, and different spectral-based confocal imaging methods. Finally, the future developments of confocal microscopy are also prospected.

Key words confocal microscopy; three-dimensional surface topography measurement; scanning imaging; axial localization

1 引言

随着科技的快速发展,半导体器件以及光学或机械的微器件的设计日益朝着更微小、更复杂的三维微结构方向发展,以期提升产品性能并实现更复杂的功能,这无疑给工业生产带来了巨大难题。所以,在精密仪器制造和半导体加工中对微器件的三维结构实现高效率和高精度的无接触测量,对保证产品质量和性能至关重要。为了实现这个目标,光学显微镜、电子显微镜和原子力显微镜等无接触的检测设备在三维表面形

貌测量上得到了大力发展与应用。在这些设备中,电子显微镜和原子力显微镜拥有更高的检测精度,但是电子显微镜仅能观察导电样品,一般需要对样品进行镀膜处理,无法实现无接触测量,而原子力显微镜成像视场较小且受探头影响大,因而在应用上相对受限。相对而言,光学成像的显微方法虽然检测精度略有逊色,但对差异化的成像条件和不同性质的样品有更高的泛用性,所以更受工业生产青睐。进一步地,研究者们也开发了很多技术实现了更高效的高精度光学检测。因此,在微器件的尺寸测量与缺陷检测上,光学成

收稿日期: 2023-01-26; 修回日期: 2023-02-21; 录用日期: 2023-03-06; 网络首发日期: 2023-03-10

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划培育项目(92050115)、国家重点研发计划(2022YFB3206000)、中央高校基本科研业务费专项资金(2022QZJH29)、浙江省自然科学基金重点项目(LZ21F050003)、浙江省“领雁”研发攻关计划(2022C01077)

通信作者: *haox@zju.edu.cn; **liuxu@zju.edu.cn

像的显微方法得到了广泛应用。

光学成像是人们最早观测微观尺度的方式,也是最直接的方式。但是,光学观测微观的手段被衍射极限所限制,并不能看清无限小的物体。根据瑞利判据,推导出的一般光学成像系统的横向和轴向分辨率为

$$d_{xy} \approx \frac{0.61\lambda}{n \sin \alpha} = \frac{0.61\lambda}{NA}, \quad (1)$$

$$d_z \approx \frac{\lambda}{n(\sin \alpha)^2}, \quad (2)$$

式中: λ 为系统工作波长; n 是介质的折射率; α 是系统中能收集到的光的最大角度的一半; $n \sin \alpha$ 称为系统的数值孔径(NA)。分辨率宽度即为系统艾里斑的半

峰全宽。

虽然瑞利判据原理上规定了显微镜所能达到的分辨率极限,但是实际上如图 1(a)所示的传统的宽场成像的光学显微镜无法达到这个分辨率,因为噪声及背景信号会影响系统成像的信噪比,使原本可以分辨的图像淹没在噪声和背景中而无法分辨。对于传统宽场显微镜,尽管可以通过光路和电路的优化来减少系统的噪声,但是来自焦平面外的背景信号对成像的影响仍然无法避免,这极大地影响了宽场显微镜的成像质量。因此,Minsky^[1-3]提出了共聚焦显微镜的构想,通过新的显微镜架构来实现显微镜成像质量的提升。此后,经过众多研究者的不断努力,激光扫描共聚焦成像技术趋于完备。

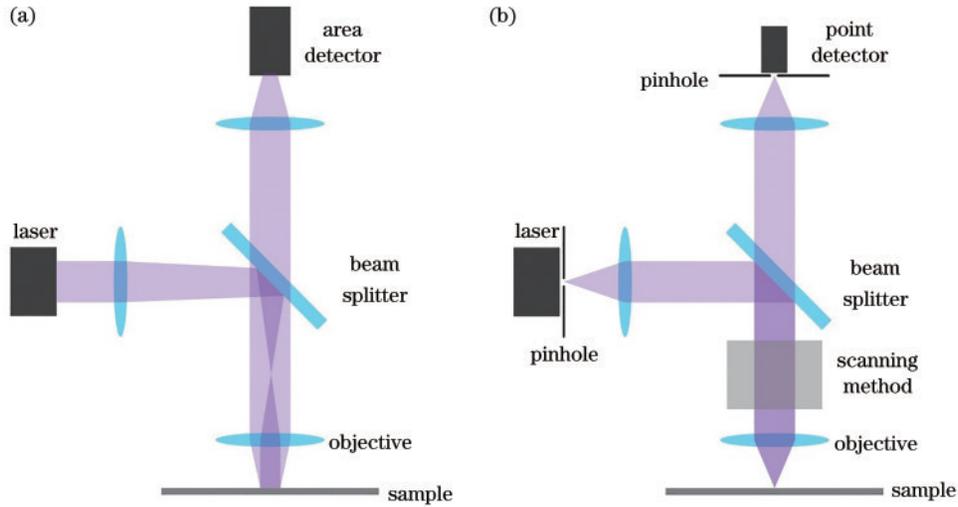


图 1 宽场显微镜与共聚焦显微镜成像示意图。(a) 宽场显微镜;(b) 共聚焦显微镜

Fig. 1 Imaging schematic of wide field microscope and confocal microscope. (a) Wide field microscope; (b) confocal microscope

激光扫描共聚焦成像技术(laser scanning confocal microscopy)的典型光路如图 1(b)所示,其中最关键的元件是照明端和探测端分别放置的与样品焦平面共轭的两个小孔。成像时,照明光经过第一个小孔后被物镜聚焦在样品焦平面上,形成聚焦的光斑,被这个光斑照明的样品反射照明光或被激发产生荧光,由此产生的信号经过第一个小孔后被探测器收集,即完成了点到点的成像。照明端小孔的作用是限制照明光,形成点照明而非照明整个宽场平面;探测端的小孔则是为了滤除离焦的背景信号,这可以显著减少系统成像的背景,提升成像的分辨率和信噪比,并使系统具有优秀的轴向层切能力。共聚焦系统的成像点扩散函数(PSF)或称有效点扩散函数为

$$F_{\text{eff}}(\mathbf{r}) = F_{\text{exc}}(\mathbf{r}) \times [F_{\text{emi}}(\mathbf{r}) \otimes \text{pinhole}(\mathbf{r})]. \quad (3)$$

共聚焦系统中的小孔尺寸同时控制着系统的进光量和分辨率,当小孔无限小时,系统获得最大的分辨率提升(最窄的PSF半峰全宽),但此时系统进光量无限小,信噪比也无限低;而倘若小孔的尺寸开得太大,则失去了滤波作用,系统成像PSF与宽场相当。因此,通常使用宽度相当于一个艾里斑大小的小孔,此时系

统分辨率相比宽场提升了 $\sqrt{2}$ 倍,在成像效果上实现了分辨率和信噪比的平衡^[4]。得益于共聚焦小孔的优秀层切能力,共聚焦系统的三维成像可以通过三维层切扫描直接实现。对于三维形貌测量,其轴向定位能力与由衍射极限推导的轴向分辨率无直接关系,三维扫描的步长及精度决定了最后的检测精度。由此可见,激光扫描共聚焦成像可直接实现高分辨率的三维成像。

共聚焦系统的简单、稳定和高信噪比使得该技术在医学、生命科学和工业上备受青睐,有着广泛的应用。在精密仪器制造和半导体加工产业中,应用于三维表面形貌测量的共聚焦显微技术的发展主要集中于系统的扫描方法、探测数据分析和照明光谱编码3个方面。首先,系统的扫描方法逐渐从单点扫描向并行扫描发展,通过显著减少扫描次数来缩短成像时间;其次,在探测手段上,主要的研究思路则是在不进行轴向扫描的情况下,仅通过探测端的调整从二维扫描的结果获取样品的三维信息,进而带来成像速度的提升;最后,对于光谱编码,将传统的单色光源照明更换为宽谱照明,利用色散原理对采集信号进行光谱解析,使系统

在单次扫描过程中能够多获取一个维度的信息,最终也表现为系统成像速度的提高。基于这 3 个最主要的技术发展思路,研究者们一直在着力改进,发展更快速、更大视场、更高检测精度的共聚焦显微技术。本文将从这 3 个技术发展方向展开,综述应用于三维表面形貌测量的共聚焦显微技术。

2 共聚焦扫描方法

相较于普通光学显微镜的宽场成像,共聚焦成像技术最大的缺点在于需要通过扫描的方法获得图像,所以成像速度相对受限。另一方面,如何实现不同方向上的扫描也是共聚焦研究的一大命题。最朴素的方法是,让激光通过物镜后聚焦在光轴上并保持不动,让样品相对于聚焦点移动,这样系统的像差会被降到最低,但是缺点是需要使用大行程、高精度、快速的横向乃至三维位移台^[1],成本极高且往往成像速度受限。所以,在实际研究中,大部分还是采用样品固定不动而光束对样品进行扫描的方法,或者仅在三维层切时移动样品,二维扫描由光束扫描完成。现在比较主流的扫描方法有单点扫描共聚焦成像、针孔盘扫描共聚焦成像、空间光调制器(SLM)扫描共聚焦成像、线扫描共聚焦成像。

2.1 单点扫描共聚焦成像

2.1.1 基于振镜的共聚焦成像

振镜(GM),通常指检流计镜,是一个由伺服电机控制的反射镜片,电机根据输入的电信号转动,带动反射镜发生偏转。振镜扫描的共聚焦方法是最经典的激光扫描共聚焦方法之一,通过两个转动方向相互正交的振镜,理论上可以将光束聚焦到物镜收集角内的任意三维空间点,轻松地实现三维共聚焦扫描^[5],如图 3(a)和图 3(e)所示。振镜扫描的好处是准确性非常高,并且易于电脑控制^[6],缺点就是它的频率较低,一般是百赫兹以内,限制了扫描速度。然而,考虑到在扫描过程中两片振镜的速度要求是不一样的,即存在一片“快镜”和一片“慢镜”。快镜用于每行的快速点扫描;而慢镜用于列扫描,只需要在扫完一行移动一次,频率要求远低于快镜。所以,研究者们引入谐振镜作为快镜,仍然使用检流计镜作为慢镜^[7]。谐振镜(resonant scanning mirror)的原理和检流计镜类似,但是频率更高,可以高达 16 kHz^[8]。通过运用谐振镜并且进行算法上的差值补偿,可以实现快速大视场的三维共焦扫描。振镜扫描共聚焦的方法因稳定性高、扫描角度大和控制方便的优点,在商用共聚焦显微镜中得到了广泛使用。微机电系统(MEMS)的技术可以让振镜扫描共聚焦更加集成化和小型化^[9]。进一步地,如果将微机电系统集成的反射镜更换为集成可变形镜,则可以在成像过程中实现聚焦和球差校正,实现三维扫描并提升系统的成像质量^[10]。

2.1.2 基于声光偏转器的共聚焦成像

基于振镜的共聚焦系统是通过振镜的机械运动实

现扫描的,为了进一步突破振镜受限的扫描速度,并且排除机械运动对系统的干扰,声光偏转器(acousto-optical deflector)被引入到共聚焦成像系统中^[11-12]。声光偏转器是通过声光晶体施加机械波实现对入射其中的光信号角度进行调制的器件,反应迅速快且没有机械运动,有利于系统的快速控制与系统稳定性。声光偏转器具有极高的扫描频率,可以高达 100 MHz^[11]。作为单轴扫描器件,声光偏转器通常和振镜组合使用,达到两轴快速扫描的效果^[13]。另一方面,结合非单点扫描的原理,如本文稍后会详细介绍的线扫描的共聚焦方法,声光偏转器可作为其唯一的扫描器件^[14-15],实现系统的快速扫描。

2.2 并行扫描共聚焦

2.2.1 基于针孔盘的共聚焦成像

不同于一次只能扫描样品一个点的反射振镜扫描的方案,针孔盘的扫描方案可以同时进行多点扫描,进而提升共聚焦显微镜的扫描速度^[16-17]。Nipkow 针孔盘是一种多个针孔规律排列的金属圆盘,如图 2 所示,圆盘上的小孔以阿基米德螺旋式排列^[18]。照明光打在圆盘上同时会照亮几百到几千个针孔,金属圆盘被固定在电机上,成像时电机带动金属圆盘以恒定速度旋转,使得透过针孔的照明光遍历整个样品视场,系统的结构及成像方法如图 3(b)和图 3(f)所示。这些针孔既充当共聚焦激发的小孔,在返回的探测光路中又充当探测器前的小孔,所以这个系统的探测器一般使用面阵探测器如 CCD 或 CMOS 而非单点探测器。相比单点扫描方案,这个方案显著提升了扫描速度,能够实现对光学切片图像的真正实时观察^[17],并使系统更加简化与稳定,数据处理也更加容易。但是,Nipkow 针孔盘扫描的方案也存在很多问题。一方面,为了避免同时扫描的不同小孔之间的串扰,针孔盘上的小孔排列相对稀疏,这导致只有不到 1% 的照明光可以通过

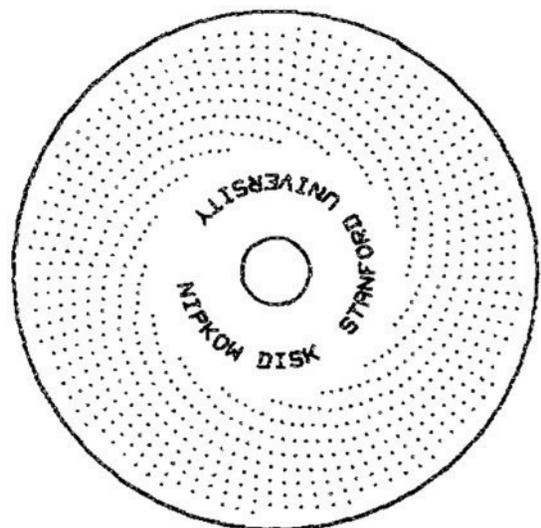


图 2 Nipkow 针孔盘示意图^[17]

Fig. 2 Schematic of the Nipkow disk^[17]

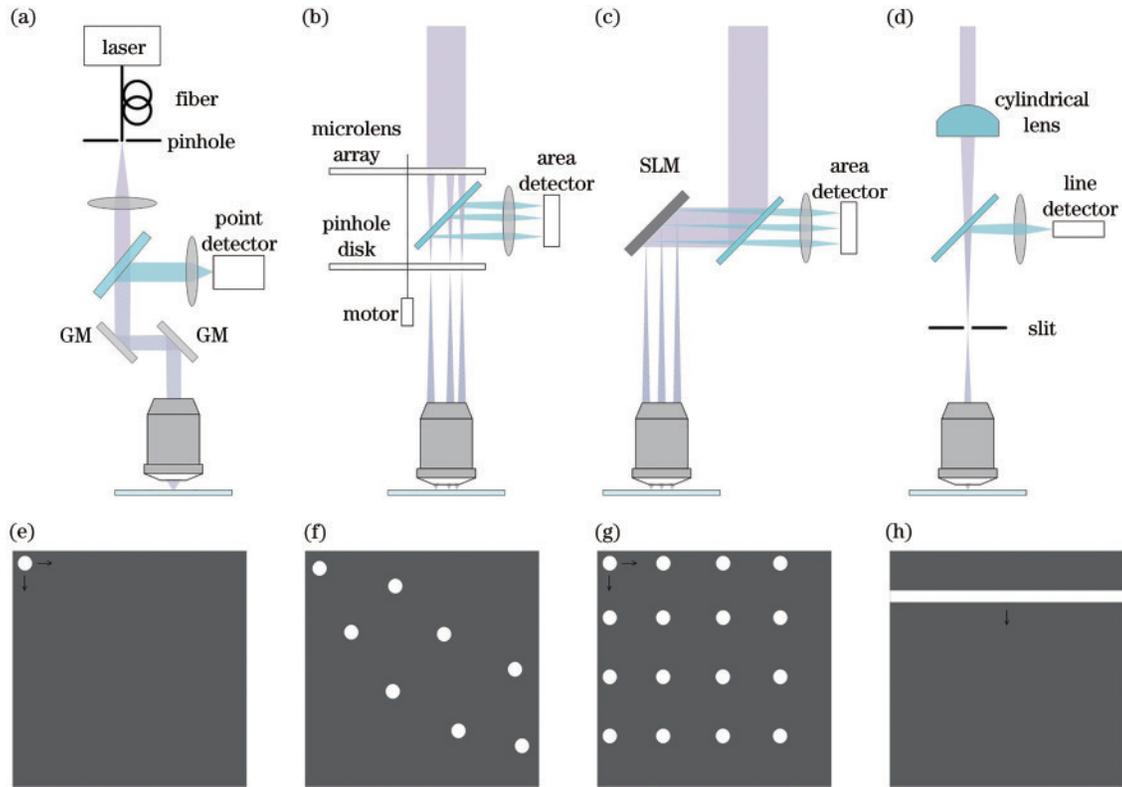


图 3 不同的共聚焦扫描方法及其样品面上扫描示意图。(a)(e) 振镜单点扫描的共聚焦方法；(b)(f) 针孔盘的共聚焦方法；(c)(g) 基于空间光调制器的并行扫描共聚焦方法；(d)(h) 线扫描的共聚焦方法

Fig. 3 Different confocal scanning methods and scanning schematic on the sample plane. (a) (e) Single point scanning confocal microscopy based on GM; (b) (f) confocal microscopy using Nipkow disk; (c) (g) parallel scanning confocal microscopy based on SLM; (d) (h) line scanning confocal microscopy

针孔照明样品,系统的光能利用率非常低,并且金属的针孔盘会使没通过小孔的那部分光发生反射,给系统带来大量杂散光,影响成像。另一方面,针孔盘限制了系统扫描的视场,使其固定而无法灵活改变,并且只能应用于样品的快速二维扫描,而样品三维形貌的测量必须依靠其他轴向扫描方法才能实现。

于是,Tiziani等^[19]对Nipkow针孔盘扫描共聚焦系统进行改进,在针孔盘前加上与每个针孔一一对应的微透镜阵列,这样可以提高系统的光能利用率,并且在相同分辨率的情况下允许系统使用更小数值孔径的物镜以获得更大的扫描视场。但是,微透镜阵列和针孔盘的对齐是一件非常困难的事情,并且微透镜阵列还会减小系统的工作距离。2002年Tanaami等^[20]进一步优化了系统,在光照均匀性、探测信噪比等方面做出了改进,实现了毫秒级的成像速度。

除了Nipkow针孔盘这种旋转式针孔盘,2016年Jeong等^[21]发明了一种新的基于固定针孔板的直视共聚焦成像方法(DVCM)。这种方法直接在光路中放置不同于Nipkow针孔圆盘的另一种针孔板,这个针孔板上是规律网格状排列的阵列针孔,其数量与成像像素数一致,并且探测光不经过针孔板而直接传输到与焦面共轭的面阵探测器上,让面阵探测器的每个像元充当探测针孔,无需任何扫描可以直接成像。这种方

法优点在于系统成像速度快,也无需图像处理,系统没有任何机械运动元件,稳定性高且易于集成,但会损失成像分辨率,同样无法避免针孔板只能对固定视场进行成像的缺点。对于系统的进一步改进,可以在面阵探测器前也放置一个共轭的针孔板,进一步提升系统的成像质量^[22]。

2.2.2 基于空间光调制器的共聚焦成像

除了基于固定针孔盘的并行扫描方法,为了提高系统的灵活性,不局限于固定视场,研究者们进一步应用空间光调制器实现了可编程的阵列针孔并行扫描^[23-25]。空间光调制器,尤其是铁电液晶空间光调制器,是一种振幅调制器件,能够对入射光振幅进行逐个像素点的调制,且调制速度最高可达千赫兹级别。如图3(c)和图3(g)所示,空间光调制器可以对光束进行调制,生成阵列针孔照明样品,实现快速的并行扫描^[23-24]。另外,空间光调制器也可以对光束的波前进行调制,实现对并行探测共聚焦系统的像差矫正^[26],以及实现变焦距的轴向扫描^[27]。基于空间光调制器的共聚焦成像系统仍然和针孔盘扫描的方法一样,具有光能利用率较低的问题。在最新的研究中,Luo等^[28]在基于空间光调制器的并行扫描共聚焦系统中加入微透镜阵列,将空间光调制器生成的多点阵列与微透镜阵列对齐,提升了该系统的光能利用率,并改善了系统的

照明不均匀性。

数字微镜阵列(DMD)也可以视作一种广义上的空间光调制器,因为它也可以对光场进行一定的操纵,但是其原理和一般的空间光调制器有所区别。顾名思义,数字微镜阵列是一组阵列排布的微型反射镜,每一个微镜可以绕着各自的旋转轴进行确定角度的偏转,所以可以视作一组由电压控制的阵列反射式光开关。数字微镜阵列的优势在于其反应迅速,调制频率高达 22 kHz,灵活性强,而且微镜之间的间隙不到微镜尺寸的 1/10,填充度很高,光能利用率高。所以既可以通过控制数字微镜阵列生成阵列式针孔,实现高速并行扫描,也可以让它充当衍射元件,实现轴向扫描。1997 年,Liang 等^[25]首次使用 DMD 实现可编程的并行扫描共聚焦,相比较 Nipkow 针孔盘的方案,明显提升了系统的光能利用率,该方法的继续优化也以并行扫描的数字微镜阵列针孔排布设计为核心^[29-31],旨在降低并行针孔的串扰,提升成像的三维分辨率。单个针孔尺寸越小,成像的三维分辨率越高;当针孔间距大于针孔自身尺寸时对分辨率无影响,但是会影响最终图像的对比度,当针孔间距 4 倍于针孔尺寸时,系统能在快速成像的同时得到较高对比度的图像^[31]。

无论是铁电液晶空间光调制器还是数字微镜阵列,基于空间光调制器的并行扫描方法中针孔的尺寸和位置排布都可以根据需求进行编辑,可以根据应用场景及时调整系统的相关扫描参数,有效地提高了系统灵活性。

2.3 线扫描共聚焦成像

线扫描共聚焦^[32-34],如图 3(d)和图 3(h)所示,使用一个狭缝代替传统点扫描共聚焦照明端的小孔,使聚焦在样品面上的光不是一个点而是一条线。其对应接收端的小孔也需要换成共轭的狭缝,并且使用线阵探测器而非单点探测器来收集样品的信号。此时,对光斑不需要进行二维扫描,仅需沿垂直于照明线的方向扫描即可。狭缝的作用和单点扫描的共聚焦系统中小孔的作用一致,即滤除离焦的信号。因此,线扫描共聚焦在兼顾低背景和高轴向分辨率优势的同时,显著提升了系统的成像速度。但是,在沿照明线的方向上,狭缝相当于一个无限大的小孔,因此会损失该方向上的横向分辨率。2005 年,Im 等^[32]利用柱面镜生成线性光斑,利用声光偏转器实现扫描,成功实现了高达 191 frame/s 的扫描速度,并获得了微米级的成像分辨率,该方法可以广泛应用于诸多三维扫描场景。

进一步地,2015 年,Kim 等^[35]在此基础上进一步开发了一种暗场线扫描共聚焦显微镜,用于快速检测晶圆表面的灰尘。他们使用线激光代替用柱面镜生成线性光斑的方案,并且让激光固定不动而让样品相对于照明光源发生移动,有效简化了系统构架,使得系统体积更小,集成度更高,提升了系统的稳定性。另外,他们引入了暗场的照明方式,即照明光以一定角度照射

样品,而接收信号的 CCD 探测器与聚焦光斑呈另一不同角度,因此光滑表面的照明光会被完全反射而不进入此探测器,瑕疵引起的散射光却能较好地收集。2017 年,Dong^[36]使用旋转多边形镜将激光束扫描为激光线,利用 $f-\theta$ 透镜,每个入射激光束会聚到对应的聚焦点,结合响应时间极短的光电倍增管,进一步提高了这个方案的光通量,有效增强了信号强度,提升了系统成像的信噪比。暗场线扫描共聚焦的方法对划痕、麻点等表面缺陷较为敏感,并且兼顾成像速度与分辨率,在大尺寸晶圆的缺陷检测上有较好的发展前景。

3 基于探测数据分析的共聚焦方法

3.1 差动探测共聚焦成像

在共聚焦成像系统中,要想探测器前的小孔起到抑制离焦信号的作用,其位置需要与样品焦面上的光斑严格共轭,如果位置偏移,则在焦信号光强损失掉而离焦信号会相应加强。因此,离焦放置的小孔可以起到分辨轴向位移的作用。受此启发,2000 年 Wang 等^[37]研究设计了差动探测共聚焦系统,如图 4(a)所示。该系统将传统共聚焦成像系统中具有复合共轭关系的小孔和探测器更换为两组分别置于焦前和焦后对称位置的小孔和探测器,计算两个探测器获得信号差值与样品轴向位置的函数关系,从而实现对样品表面的三维定位。这个方法不需要进行轴向扫描层切,仅通过二维扫描便可获取轴向信息,并且提高了共聚焦系统的轴向探测精度,最高可以实现 100 μm 成像范围内 2 nm 的轴向分辨率。差动共聚焦的轴向定位方法因在大范围内对轴向位置的高度敏感的特性而在精密光学元件的三维表面测量上有着较多的应用,如透镜及光学系统的半径、厚度、焦距和景深测量^[38-42]。进一步地,通过使用多色激光器,可以在不牺牲横向分辨率的情况下进一步扩大轴向定位的范围^[43]。这个方法同样也可以应用在双轴共聚焦显微镜上,提升系统的轴向定位精度^[44]。

2012 年,Zhao 等^[45]设计了一种分光瞳面的共聚焦成像构架,如图 4(b)所示。该方法将物镜后瞳面一分为二,入射光从一半光瞳内入射而来自样品的反射光从另一半光瞳内出射,这样照明光和探测光不共用同一光路,提高了系统的光能利用率。对于这样的系统,在探测端同样可以利用差动共聚焦的思想,通过在探测光斑上选取关于中心对称的两个不同小区域(点 A 和点 B)作为“虚拟针孔”,将这两个区域的信号相减来对样品进行轴向定位。利用这种方法对标准台阶样品进行扫描,实现了 0.77 μm 的横向分辨率和 5.5 nm 的轴向定位精度。

2019 年,Sun 等^[46]在差动共聚焦探测系统原先的两个探测器的基础上加入了第三个探测器,该探测器放置在传统共聚焦的焦面位置。通过将两个在焦探测

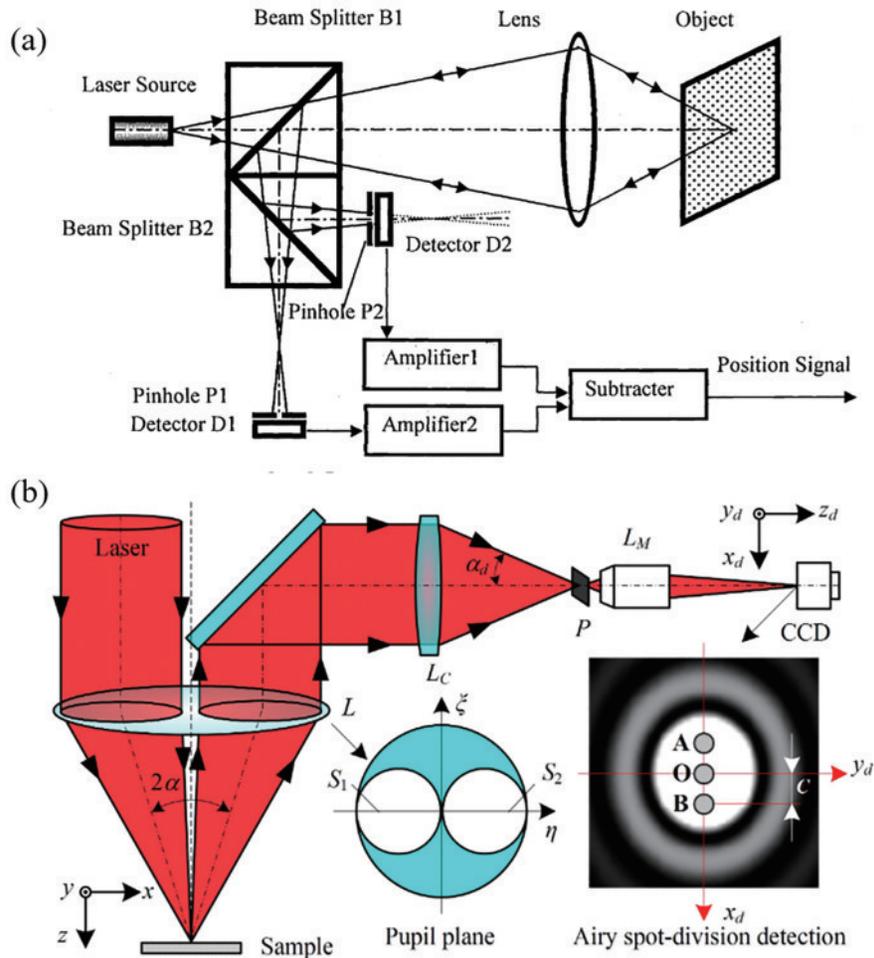


图 4 差动探测的共聚焦轴向定位方法。(a) 差动探测共聚焦^[37];(b) 分光瞳面的共聚焦^[45]

Fig. 4 Laser differential confocal for axial localization. (a) Laser differential confocal^[37]; (b) divided-aperture differential confocal^[45]

器信号减去两个离焦探测器的信号,相较于原来的差动共聚焦系统,该方法可以将轴向分辨率提高 35%。然而,该系统将光分成了三份,在低光强的情况下信噪比较差,所以不适合观测对光强有限制的生物样品,但在材料、机械、化学等具有更好的耐光性的样品上有着较好的应用。进一步地,利用同样的三探测器原理,在上述分光瞳面的共聚焦系统中,通过选取中心和两个关于中心对称的不同小区域的“虚拟针孔”,将这三个区域的信号做差分运算,可以进一步提升系统的轴向分辨率^[47],该方法将原有的探测范围提升了 1 倍,并实现了 2 nm 的轴向定位精度。

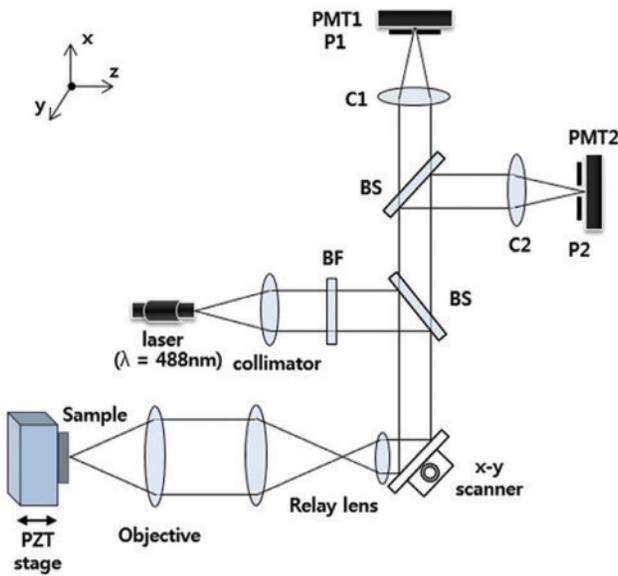
除此以外,差动探测的思路也可以拓展到基于不同扫描方法的共聚焦系统中,比如前面所述的线扫描共聚焦系统。2022 年,赖东明等^[48]设计了一套使用双线阵相机进行差动探测的线扫描共聚焦系统,该系统兼具线扫描快速大视场和差动探测高轴向定位精度,可以实现快速大范围的三维形貌测量。

3.2 双探测共聚焦显微成像

在共聚焦系统中,除了小孔的轴向位移可以起到分辨信号轴向位置的作用,小孔尺寸带来的信号强度变化同样也会反映一定的轴向信息。如果小孔尺寸较

小,则抑制离焦信号的能力强,即样品远离焦面时信号强度会减弱;而如果小孔尺寸较大,则采集到的信号强度对样品的轴向位移不敏感,更能反映样品本身的反射信号强度。因此,如果使用两个不同尺寸的小孔并对其信号强度做比值,也可以实现对样品的轴向定位。基于这样的原理, Lee 等^[49-50]设计了双探测共聚焦反射显微镜(DDCRM),如图 5 所示,这套系统通过分束器将光分成两束,然后这两束光分别通过两个不同尺寸的针孔聚焦在两个点探测器上。由于针孔尺寸不同,每个检测器测量得到的不同强度的信号可以反映样品相对于焦平面的轴向位移,由此可以得出系统的特性曲线,即这两个信号强度的比值和样品轴向位移之间的函数关系。因此,DDCRM 系统可用于高速测量样品的表面轮廓,每个点的轴向坐标可以通过两个探测器的信号比值直接得到。

双探测共聚焦系统的成像速度优化可以借鉴前面 DMD 并行扫描共聚焦的思想。2018 年 Lee 等^[51]进一步设计了多点扫描的双探测共聚焦显微镜(MS-DDCRM)。这套系统使用 DMD 扫描的方式替代之前的振镜扫描方案,可以实现同时多点并行扫描,同时 DMD 也充当系统中的针孔,因此也可以用两个 CCD

图 5 双探测的共聚焦轴向定位方法^[49]Fig. 5 Dual-detection confocal for axial localization^[49]

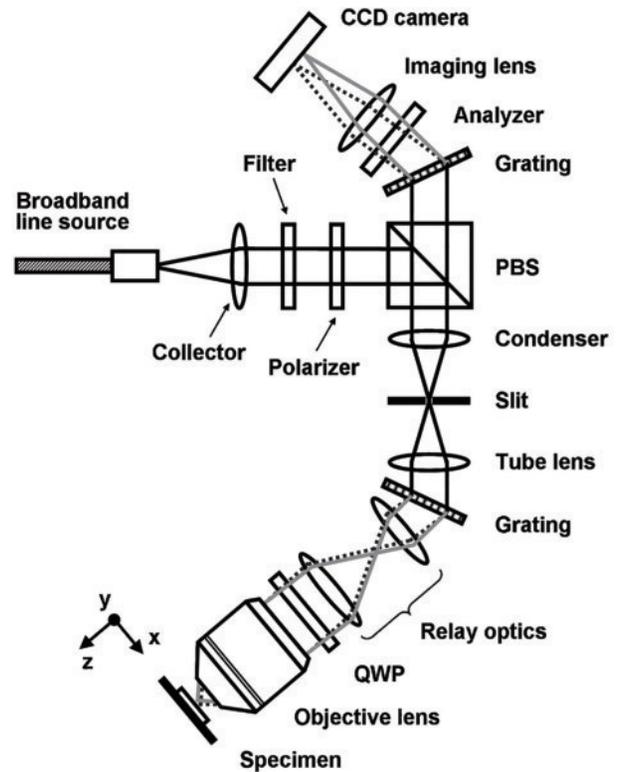
代替之前的单点探测器,并根据所需的针孔尺寸在每个 CCD 前设置合适放大倍率的中继透镜组,最终通过对两个 CCD 采集到的信号进行比值处理还原样品的轴向信息。该方法可以成倍提升成像速度,并且进一步扩大成像视场,实现快速的三维大体积成像。为了进一步提升系统的轴向分辨率,可以在系统光路中添加掩模板,将原本焦点处的高斯光斑编辑为环形光斑^[52],实验结果表明这个方法可以在不明显损失系统横向分辨率的前提下将双探测共聚焦系统的轴向分辨率相应提高 1 倍。

4 基于照明光谱编码的共聚焦方法

4.1 横向光谱编码(光谱线扫描的共聚焦成像)

横向光谱编码的共聚焦成像方法^[53]也可以视作一种线扫描的成像方法,但是其原理与上述的线扫描共聚焦有很大区别。光谱编码共聚焦利用了宽谱光源的色散特性,通过光栅或棱镜等色散元件,将宽谱光源色散成横向上的彩色线型光斑,接收端也采用具有光谱分辨力的器件来收集信号,如彩色 CCD 或光谱仪,其典型系统如图 6 所示。成像时,系统只需要沿着垂直于彩色线型光斑的方向进行扫描即可。在该系统中,沿光谱方向的样品分布位置与照明波长一一对应,故通过光谱分析即可解出样品沿光谱方向的位置信息,并且该方向的分辨率也取决于系统的光谱分辨率。

1998 年, Tearney 等^[53]提出了基于衍射光栅的光谱编码共聚焦成像方法,使用光纤充当共聚焦系统中的小孔来抑制离焦信号,系统简单且易小型化。2006 年, Kim 等^[54]则将光谱编码技术与前文所述的线扫描共聚焦结合,其中宽谱线光源沿直线照明正交方向进行光谱编码,实现了无需扫描的二维光谱编码狭缝共聚焦成像。2015 年, Hwang 等^[55]使用波长扫描光源设

图 6 光谱线扫描的共聚焦方法^[53]Fig. 6 Spectrally encoded confocal microscopy^[53]

计了光谱编码共聚焦成像系统,这种光源的波长随扫描时间变化,所以使用光栅就可以实现对样品面沿色散方向的扫描。同时,由于光源波长随时间变化而不同,波长对应不同横向位置,所以样品的横向坐标与时间也相对应,因此可以不使用具有光谱分辨力的探测器,改为单点探测器探测信号强度即可,能够提升系统的信噪比。该方法虽然不能提升扫描速度,但是可以省去一个方向的机械扫描,有利于系统的稳定性和集成度的提升。2019 年, Feng 等^[56]设计开发了一套基于电光调制器的双梳干涉系统,该系统可以提高功率效率并进一步实现 2D 无扫描成像,最快实现了 3 MHz 的成像帧率。

4.2 轴向光谱编码(色散共聚焦)

轴向光谱编码的共聚焦成像方法^[57-59]一般称为色散共聚焦成像,同样需要使用宽谱光源,但是产生色散的是轴向色散元件,如平凸透镜、色散物镜或者衍射透镜等,其典型系统如图 7(a)所示。通过这些色散元件,最终在物镜后产生较大的轴向色散,一般来说蓝色光波长短焦距短,会聚在样品靠上的位置,红色光波长长焦距长,会聚在样品靠下的位置,最终在物镜后形成铅笔状的彩虹光束。由于共聚焦系统中位于探测器前小孔的限制,只有来自焦面的信息才可以被探测器收集到,所以被扫描点的轴向位置可以通过分析探测到信号的中心波长,并根据系统的色散程度计算得出。换言之,高度信息被编码在了轴向光谱中,解算探测光谱即可实现样品的轴向定位。色散共聚焦的优势在于

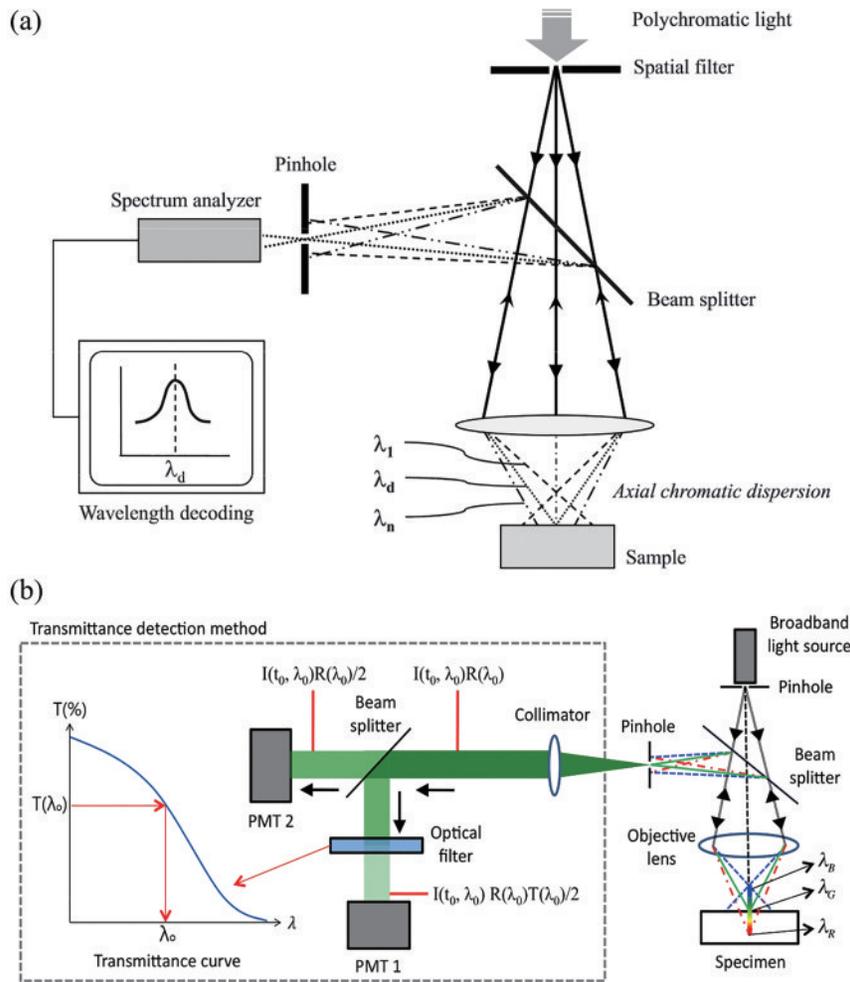


图 7 共聚焦成像系统。(a)色散共聚焦成像系统示意图^[59]; (b)基于透射率检测的色散共聚焦快速检测原理^[60]

Fig. 7 Confocal imaging system. (a) Schematic of dispersion confocal imaging system^[59]; (b) principle of dispersion confocal fast detection based on transmission detection^[60]

无需轴向扫描即可实现快速准确的轴向定位,其轴向探测范围和轴向分辨率由色散元件和探测器的光谱分辨率决定,探测范围覆盖几毫米到几十毫米,分辨率可达几纳米到几百纳米。轴向扫描速度则取决于光谱仪的读出速率,可以高达数十千赫兹^[60]。

色散元件的发展是色散共聚焦研究最核心的内容。色散元件一般有折射和衍射两种原理^[61]。最早的色散共聚焦成像系统由 Molesini 等^[57]提出,使用平凸透镜引入轴向色散的方式,可以获得 40 μm 范围内 100 nm 的轴向定位精度。平凸透镜就是一种典型的折射色散元件,即利用透镜材料对不同波长的光折射率不同的原理使经过透镜的宽谱光发生色散。1992 年, Browne 等^[58]使用了色散物镜来改进这个系统,早期的其他研究^[62-63]也主要致力于设计不同的色散物镜。折射色散元件易于设计与加工,但有着色散特性不固定以及色散曲线非线性等缺点,会对测量的精度和稳定性造成很大影响。因此,研究者们后续将目光投向了衍射元件。衍射色散元件引入的色散与波长严格成反比,有着较好的线性度,并且色散能力更加

灵敏,使色散共聚焦后期的数据分析可以大大简化。1997 年, Dobson 等^[64]率先使用菲涅耳波带片来产生色散。然而,菲涅耳衍射片虽然可以在仿真上实现非常好的色散效果,但是实际加工时精度不足,导致在实验中不能获得较好的结果。另外,菲涅耳透镜的数值孔径通常非常小,并且无法加工成物镜。2012 年, Hillenbrand 等^[65]设计了一种折射元件与衍射元件结合的色散共聚焦系统,相比于具有纯衍射元件的系统,可以将轴向色散范围拓展近 1 倍,并且在设计上可以让衍射元件获得更高的衍射效率。

色散共聚焦的成像方法只需要依赖系统中的色散元件,所以色散共聚焦可以和前面提到的很多方法相结合。比如,可以通过结合并行扫描或者线扫描的方式来提升系统的横向成像速度,从而提升系统整体三维测量的速度。Tiziani 等^[62-66]在色散共聚焦系统中引入针孔盘实现快速扫描,进一步地,引入了微透镜阵列来提高系统的光能利用率。1998 年, Lin 等^[67]则在色散共聚焦系统中引入线扫描。2000 年, Sungdo Cha 则使用了 DMD 并行扫描的方法实现了 3 Hz 扫描速度下

390 nm 的轴向分辨率。

虽然色散共聚焦系统在扫描时的照明是多点并行的,但是由于其接收端的光谱解析设备只能以串行的方式处理数据,光谱的解析速度会限制系统的成像速度,所以研究者们也对色散共聚焦的检测装置展开了研究。他们注意到,在色散共聚焦系统中,探测到的光谱信息中的有效部分只有强度峰值处的波长。基于这个思路,2013 年 Kim 等^[60]设计了一种基于透射率检测的快速检测方法,这个方法使用 2 个光电倍增管(PMT)和 1 个滤光片代替光谱仪,实际的检测光路如图 7(b)所示。使用分束镜将探测光分为能量均等的两份,用两个 PMT 分别收集这两份光,其中一个 PMT 前放置一片滤光片。由于这个滤光片的透过率关于波长单调变化,所以探测信号的峰值波长可以通过两个 PMT 收集到的信号的比值直接还原。这种方法免去了对光谱信号的扫描,可以有效提升测量速率。2021 年, Prause 等^[68]将这种探测方法与针孔板并行共聚焦思路相结合,实现了单帧直接成像的色散共聚焦。另一种解决这个问题的思路是使用衍射光栅和位置敏感探测器(position sensitive detector),提取光谱峰值波长位置^[69],进而实现快速轴向定位。

5 总结与展望

在过去的几十年里,科技进步推动着精密仪器制造和半导体加工产业蓬勃发展。面对日益复杂的三维微器件,三维表面形貌测量成为了工业生产中的一大热点。在工业生产中,产品的质量检测主要包括两个内容:一是产品的尺寸检测,也就是标定器件的关键尺寸是否符合要求,这要求检测必须具有较高的检测精度;二是产品的缺陷检测,也就是工作表面上是否有划痕、麻点等可能影响器件正常工作的瑕疵,这一点上则

只要求检出率高而对检测精度要求较弱。尺寸检测和缺陷检测决定了最终产品的性能和良率,这对工业生产的产能和效率起到了决定性作用。而对于工业生产来说,光学显微镜,尤其是共聚焦显微镜是应用于尺寸测量和缺陷检测的一个重要技术。相对于一般宽场显微镜而言,共聚焦显微镜拥有更高的分辨率和优秀的层切能力,进而拥有更高的三维检测精度,因而适用于尺寸检测;共聚焦显微镜更高的信噪比优势则能够提升其对微小瑕疵的检出能力,所以在缺陷检测中也有着较好的应用。因此,共聚焦的显微探测方法备受研究者瞩目,也取得了重大进展。本文综述了用于三维表面形貌测量的各种共聚焦检测方法的原理及研究进展。

共聚焦的显微方法由于必须要通过扫描来实现全视场的成像,其成像速度相对受限。然而,在工业生产中,速度则是生产效率的重要影响因素。因此如何在牺牲成像分辨率和信噪比的前提下,提高三维共聚焦的扫描速度,是研究者的聚焦方向。并行扫描和线扫描的共聚焦成像思路可以直接提升二维扫描速度,最终缩短体成像的总时间,但同时会一定程度上损失二维的分辨率和信噪比。相比之下,色散轴向定位、差分轴向定位以及双探测轴向定位等方法可以在横向扫描过程中获取样品的轴向位置信息,实现在不明显损失横向分辨率的前提下快速轴向定位,因此在近些年备受青睐。其中,色散轴向定位可以实现更高的定位精度,但需要改用宽谱激光器,同时成像速度也相对较慢;而差分轴向定位和双探测轴向定位在系统上更为简易,仅需要对探测光路进行调制便可实现快速轴向定位,但是相对来说定位精度较低。表 1 对这些用于三维表面形貌测量的共聚焦技术进行了定性对比总结。

表 1 用于三维形貌测量的共聚焦方法对比

Table 1 Comparison of different confocal methods for 3D topography measurement

Strategy	Technique	Advantage	Limitation	Reference
Scanning method	Point scanning confocal microscopy	High light efficiency, variable scanning range	Slow frame rate	[5, 13]
	Parallel scanning confocal microscopy	Fast frame rate	Low light efficiency, fixed field of view	[17, 20, 23, 25]
	Line scanning confocal microscopy	Fast frame rate, no fast-axis scanning device needed	Low light efficiency, fixed scanning range, poor fast-axis resolution	[32-34]
Detection method	Laser differential confocal microscopy	Fast frame rate, high axial resolution, no axial scanning device needed	Low detection efficiency, limited axial localization range with high resolution	[37, 45]
	Dual-detection confocal microscopy	Fast frame rate, simple data processing, no axial scanning device needed	Low detection efficiency, poor axial resolution	[49-50]
Spectral based method	Spectrally encoded microscopy	No fast-axis scanning device needed	Slow frame rate	[53, 55]
	Chromatic confocal microscopy	High axial resolution, large axial localization range, no axial scanning device needed	Slow frame rate	[57-59]

在工业生产这样的应用场景中,除了快速成像,系统的简单易用、轻便小型化及长期使用的稳定性也是着重考量的指标。因此,微机电系统(MEMS)技术的应用有助于系统更加紧凑并降低能耗,更有利于系统的集成应用。

总体而言,共聚焦的各类成像方法因简单、稳定、集成度高、信噪比高、层切能力优异等优势在三维形貌测量中有着广泛运用。在未来,用于三维形貌测量的共聚焦成像方法将向着大视场、快速成像和高分辨率方向发展,同时也应当注重减小系统体积、降低系统复杂度、提高系统稳定性和适用性,以期更加适应工业生产的不同场景需求,助力精密仪器制造和半导体加工产业的发展。

参 考 文 献

- [1] Minsky P M. Microscopy apparatus: US 3013467[P]. 1957-11-07.
- [2] Minsky P M. Confocal microscope[J]. United States Patents, 1961: 6.
- [3] Minsky P M. Memoir on inventing the confocal scanning microscope[J]. Scanning, 1988, 10(4): 128-138.
- [4] Weisshart K. The basic principle of airyscanning[J]. Zeiss Technology Note, 2014, 22.
- [5] Callamaras N, Parker I. Construction of a confocal microscope for real-time x - y and x - z imaging[J]. Cell Calcium, 1999, 26(6): 271-279.
- [6] Trepte O, Liljeborg A. Computer control for a galvanometer scanner in a confocal scanning laser microscope[J]. Optical Engineering, 1994, 33(11): 3774-3780.
- [7] 胡茂海, 杨晓春. 共聚焦显微镜激光高速扫描控制系统设计及实现[J]. 应用光学, 2011, 32(4): 797-800.
Hu M H, Yang X C. High-speed laser scanning control system for confocal microscopy[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(4): 797-800.
- [8] Kim C S, Yoo H. Three-dimensional confocal reflectance microscopy for surface metrology[J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(10): 102002.
- [9] Ra H, Taguchi Y, Lee D, et al. Two-dimensional MEMS scanner for dual-axes confocal *in vivo* microscopy [C]//19th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, January 22-26, 2006, Istanbul, Turkey. New York: IEEE Press, 2006: 862-865.
- [10] Liu T B, Dickensheets D L. MEMS 3-dimensional scanner for handheld confocal microscope[C]//2017 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN), August 13-17, 2017, Santa Fe, NM, USA. New York: IEEE Press, 2017.
- [11] Seo J, Kang D K, Park S, et al. 3D image reconstruction using optical sectioning in confocal scanning microscopy[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4564: 58-65.
- [12] Bansal V, Patel S, Saggau P. High-speed confocal laser scanning microscopy using acousto-optic deflectors and a digital micromirror device[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5324: 47-54.
- [13] Lee S, Kang D K, Yoo H, et al. Design and performance evaluation of reflection confocal microscopy using acousto-optical deflector and slit detector[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5324: 235-241.
- [14] 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 SPIE, 2005, 5701: 164-171.
- [15] Li Y G, Liu L, Amthor F, et al. High-speed line-scan confocal imaging of stimulus-evoked intrinsic optical signals in the retina[J]. Optics Letters, 2010, 35(3): 426-428.
- [16] Petráň M, Hadravský M, Egger M D, et al. Tandem-scanning reflected-light microscope[J]. Journal of the Optical Society of America, 1968, 58(5): 661-664.
- [17] Xiao G Q, Corle T R, Kino G S. Real-time confocal scanning optical microscope[J]. Applied Physics Letters, 1988, 53(8): 716-718.
- [18] Fuseler J, Jerome W G, Price R L. Types of confocal instruments: basic principles and advantages and disadvantages[M]//Basic confocal microscopy. Cham: Springer, 2018: 187-213.
- [19] Tiziani H J, Uhde H M. Three-dimensional analysis by a microlens-array confocal arrangement[J]. Applied Optics, 1994, 33(4): 567-572.
- [20] Tanaami T, Otsuki S, Tomosada N, et al. High-speed 1-frame/ms scanning confocal microscope with a microlens and Nipkow disks[J]. Applied Optics, 2002, 41(22): 4704-4708.
- [21] Jeong H J, Yoo H, Gweon D. High-speed 3-D measurement with a large field of view based on direct-view confocal microscope with an electrically tunable lens [J]. Optics Express, 2016, 24(4): 3806-3816.
- [22] Kim C S, Kim W, Lee K, et al. High-speed color three-dimensional measurement based on parallel confocal detection with a focus tunable lens[J]. Optics Express, 2019, 27(20): 28466-28479.
- [23] Smith P J, Taylor C M, Shaw A J, et al. Programmable array microscopy with a ferroelectric liquid-crystal spatial light modulator[J]. Applied Optics, 2000, 39(16): 2664-2669.
- [24] Taylor C M, McCabe E M. Programmable array microscope employing two ferroelectric liquid crystal spatial light modulators[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4261: 33-39.
- [25] Liang M H, Stehr R L, Krause A W. Confocal pattern period in multiple-aperture confocal imaging systems with coherent illumination[J]. Optics Letters, 1997, 22(11): 751-753.
- [26] Neil M A A, Wilson T, Juskaitis R. A wavefront generator for complex pupil function synthesis and point spread function engineering[J]. Journal of Microscopy, 2000, 197(3): 219-223.
- [27] Zou L M, Pang M S, Zhou M J, et al. Multifocal axial confocal microscopic scanning with a phase-only liquid crystal spatial light modulator[J]. Proceedings of SPIE,

- 2015, 9446: 94462X.
- [28] Luo T P, Yuan J, Chang J, et al. Resolution and uniformity improvement of parallel confocal microscopy based on microlens arrays and a spatial light modulator[J]. *Optics Express*, 2023, 31(3): 4537-4552.
- [29] Zhang Y B, Strube S, Molnar G, et al. Parallel large-range scanning confocal microscope based on a digital micromirror device[J]. *Optik*, 2013, 124(13): 1585-1588.
- [30] Zhang Y B, Zeng A J, Huang H J, et al. Large-area three-dimensional profilometer based on digital micromirror device[J]. *Journal of Optical Technology*, 2015, 82(2): 102-107.
- [31] 朱茜, 杨西斌, 李思愚, 等. 基于数字微镜器件并行共焦成像的光点阵列优化[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0118001.
- Zhu Q, Yang X B, Li S M, et al. Spot array optimization of parallel confocal imaging based on digital micromirror device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0118001.
- [32] 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.
- [33] Dusch E, Dorval T, Vincent N, et al. Three-dimensional point spread function model for line-scanning confocal microscope with high-aperture objective[J]. *Journal of Microscopy*, 2007, 228(2): 132-138.
- [34] Gareau D S, Abeytunge S, Rajadhyaksha M. Line-scanning reflectance confocal microscopy of human skin: comparison of full-pupil and divided-pupil configurations [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(20): 3235-3237.
- [35] Kim M S, Choi H S, Lee S H, et al. A high-speed particle-detection in a large area using line-laser light scattering[J]. *Current Applied Physics*, 2015, 15(8): 930-937.
- [36] 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.
- [37] Wang F S, Tan J B, Zhao W Q. Optical probe using differential confocal technique for surface profile[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4222: 194-197.
- [38] Zhao W Q, Sun R D, Qiu L R, et al. Laser differential confocal ultra-long focal length measurement[J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 20051-20062.
- [39] Zhao W Q, Sun R D, Qiu L R, et al. Laser differential confocal radius measurement[J]. *Optics Express*, 2010, 18(3): 2345-2360.
- [40] Wang Y, Qiu L R, Song Y X, et al. Laser differential confocal lens thickness measurement[J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(5): 055204.
- [41] Yang J M, Qiu L R, Zhao W Q, et al. Laser differential reflection-confocal focal-length measurement[J]. *Optics Express*, 2012, 20(23): 26027-26036.
- [42] Zhao W Q, Zhang X, Wang Y, et al. Laser reflection differential confocal large-radius measurement[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(31): 9308-9314.
- [43] Tan J B, Liu J, Wang Y H. Differential confocal microscopy with a wide measuring range based on polychromatic illumination[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(5): 054013.
- [44] Zhao W Q, Jiang Q, Qiu L R, et al. Dual-axes differential confocal microscopy with high axial resolution and long working distance[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(1): 15-19.
- [45] Zhao W Q, Liu C, Qiu L R. Laser divided-aperture differential confocal sensing technology with improved axial resolution[J]. *Optics Express*, 2012, 20(23): 25979-25989.
- [46] Sun Y B, Zhao W Q, Qiu L R, et al. Axial high-resolution differential confocal microscopy[J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(12): 125402.
- [47] Li R J, Zhang R R, Cui H, et al. Divided-aperture dual-differential confocal microscopy[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11914: 1191414.
- [48] 赖东明, 孔令华, 练国富, 等. 双线阵相机的线扫描差动共聚焦检测方法[J]. *应用光学*, 2022, 43(2): 298-303.
- Lai D M, Kong L H, Lian G F, et al. Differential confocal measurement method of linear scanning based on dual linear array camera[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(2): 298-303.
- [49] Lee D R, Kim Y D, Gweon D G, et al. High speed 3D surface profile without axial scanning: dual-detection confocal reflectance microscopy[J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(12): 125403.
- [50] Lee D R, Jang S, Lee M W, et al. Compact fiber optic dual-detection confocal displacement sensor[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(27): 7631-7635.
- [51] Lee D, Gweon D G, Yoo H. Multipoint scanning dual-detection confocal microscopy for fast 3D volumetric measurement[J]. *Journal of Microscopy*, 2018, 270(2): 200-209.
- [52] Lee D R, Gweon D G, Yoo H. Annular-beam dual-detection confocal reflectance microscopy for high-speed three-dimensional surface profiling with an extended volume[J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(4): 045403.
- [53] Tearney G J, Webb R H, Bouma B E. Spectrally encoded confocal microscopy[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(15): 1152-1154.
- [54] Kim J, Kang D, Gweon D. Spectrally encoded slit confocal microscopy[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(11): 1687-1689.
- [55] Hwang J, Kim S, Heo J, et al. Frequency- and spectrally-encoded confocal microscopy[J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 5809-5821.
- [56] 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.
- [57] Molesini G, Pedrini G, Poggi P, et al. Focus-wavelength encoded optical profilometer[J]. *Optics Communications*, 1984, 49(4): 229-233.
- [58] Browne M A, Akinyemi O, Boyde A. Confocal surface profiling utilizing chromatic aberration[J]. *Scanning*, 1992, 14(3): 145-153.
- [59] Chun B S, Kim K, Gweon D. Three-dimensional surface profile measurement using a beam scanning chromatic

- confocal microscope[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2009, 80(7): 073706.
- [60] Kim T, Kim S H, Do D, et al. Chromatic confocal microscopy with a novel wavelength detection method using transmittance[J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 6286-6294.
- [61] 张昆. 基于色域空间调制技术的彩色共聚焦三维形貌测量系统及其实验研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2020.
Zhang K. Chromatic confocal three-dimensional topography measurement system based on color spatial modulation technology and experimental research[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2020.
- [62] Tiziani H J, Uhde H M. Three-dimensional image sensing by chromatic confocal microscopy[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(10): 1838-1843.
- [63] Maly M, Boyde A. Real-time stereoscopic confocal reflection microscopy using objective lenses with linear longitudinal chromatic dispersion[J]. *Scanning*, 1994, 16(3): 187-192.
- [64] Dobson S L, Sun P C, Fainman Y. Diffractive lenses for chromatic confocal imaging[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(20): 4744-4748.
- [65] Hillenbrand M, Mitschunas B, Wenzel C, et al. Hybrid hyperchromats for chromatic confocal sensor systems[J]. *Advanced Optical Technologies*, 2012, 1(3): 187-194.
- [66] Tiziani H J, Uhde H M. Three-dimensional analysis by a microlens-array confocal arrangement[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(4): 567-572.
- [67] Lin P C, Sun P C, Zhu L J, et al. Single-shot depth-section imaging through chromatic slit-scan confocal microscopy[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(28): 6764-6770.
- [68] Prause K, Herkommer A, Pinzer B R, et al. Single-shot high speed aerial chromatic confocal metrology sensor[J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(12): 124110.
- [69] Zhuo G Y, Hsu C H, Wang Y H, et al. Chromatic confocal microscopy to rapidly reveal nanoscale surface/interface topography by position-sensitive detection[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(8): 083106.