

光谱共焦传感器关键技术研究进展(特邀)

卢荣胜*, 张紫龙, 张艾琳, 封志伟, 徐艳, 杨刘杰

合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009

摘要 精密测量技术是先进制造业得以高速发展的基础。光谱共焦传感器具有测量精度高、检测速度快、系统集成度高等技术优势,已成为先进制造领域当前备受关注的精密测量技术之一。首先,介绍光谱共焦测量原理,分析构成光谱共焦传感器的关键器件;然后,针对点光谱共焦传感器,综述构成传感器的色散物镜、宽光谱光源、光谱检测装置,以及光谱处理算法等关键技术方面的研究进展;其次,针对线扫描光谱共焦传感器,综述扫描方式、光路结构、光谱检测装置,以及光谱信息处理方法等关键技术;最后,总结当前光谱共焦传感器的研究重点、难点,以及未来的技术发展方向。

关键词 光谱共焦传感器; 色散物镜; 宽光谱光源; 光谱仪; 峰值提取

中图分类号 TP74

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232639

Research Progress on Key Technologies of Chromatic Confocal Sensors (Invited)

Lu Rongsheng*, Zhang Zilong, Zhang Ailin, Feng Zhiwei, Xu Yan, Yang Liuji

School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology,
Hefei 230009, Anhui, China

Abstract Precision measurement technology is the cornerstone of the rapid advancement of advanced manufacturing. Chromatic confocal sensors, with technological advantages such as high measurement accuracy, rapid detection speed, and high system integration, have become one of the precision measurement technologies currently garnering significant attention in the field of advanced manufacturing. This article begins by introducing the principles of chromatic confocal measurement and analyzing the crucial components comprising the chromatic confocal sensor. Subsequently, focusing on point chromatic confocal sensors, it provides an overview of the research progress in key technologies such as the dispersive objective lens, broad-spectrum light source, spectral detection device, and spectral processing algorithms that constitute the sensor. In the case of line scanning chromatic confocal sensors, it summarizes the critical technologies related to scanning methods, optical path structures, spectral detection devices, and methods for processing spectral information. Finally, it concludes by summarizing the current research focus, challenges, and future technological development directions of chromatic confocal sensors.

Key words chromatic confocal sensor; dispersion lens; wide spectral light sources; spectrometer; peak extraction

1 引言

光谱共焦传感器由共焦显微技术发展而来^[1],是近几年发展非常迅速的一种光电式位移传感器。它利用特殊设计的色散物镜将包含多种波长的复色光按照波长递增或者递减的方式聚焦在光轴上,形成一系列连续的测量点,然后通过光谱仪检测工件表面的聚焦光波,进而转换为对应的高度信息。光谱共焦传感器可实现绝对长度的测量,最高测量分辨率可达纳米级,测量精度保持在几十纳米。另外光谱共焦传感器,通

过扩展的轴向测量范围,避免了经典的共焦测量技术中轴向扫描对焦的过程,极大地提升了测量效率,为表面形貌、工件厚度、粗糙度、透明材料厚度测量提供了一种全新的测量手段。该技术一经问世便受到众多学者和公司的关注,目前已成为 ISO25178 国际标准推荐的一种非接触三维测量技术。

光谱共焦传感器根据横向(光轴垂轴方向)测量范围又可以分为点光谱共焦传感器和线扫描光谱共焦传感器。点光谱共焦传感器在与光轴垂直的 XY 平面上单次只能测量一个点的位置,要获得三维表面形貌需

收稿日期: 2023-12-07; 修回日期: 2023-12-21; 录用日期: 2023-12-21; 网络首发日期: 2023-12-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF0715502)、安徽省重点研发计划项目(202304a05020013)

通信作者: *rslu@hfut.edu.cn

要配合额外的二维扫描。线扫描光谱共焦传感器在点传感器的基础上扩展了系统在 XY 平面方向上的测量范围,可实现单方向或者区域内的扫描测量,大幅度提升了传感器的测量效率。

在先进制造领域,业界使用的光谱共焦传感器目前仍以国外产品为主,例如:法国的 STIL^[2]、德国的 Precitec^[3]和 Micro-Epsilon^[4]、荷兰的 LMI^[5]、日本的基恩士^[6]和欧姆龙^[7]等。国内相关研究起步较晚,目前市场占有率较低,具有代表性的有上海思显^[8]、深圳立仪科技^[9]、深圳海伯森^[10]等。

本文主要介绍光谱共焦传感器中各项关键技术的研究进展。首先,简述光谱共焦传感器测量原理,并分析构成光谱共焦传感器的关键器件。其次,围绕点光谱共焦传感器,论述构成传感器的色散物镜、宽光谱光源、光谱检测装置,以及光谱处理算法等关键技术的研究现状;然后,从扫描方式、光路结构、光谱检测装置,以及光谱信息处理方法等方面针对线扫描光谱共焦传感器的研究现状进行综述。最后,总结讨论当前光谱共焦传感器的研究重点、难点,以及未来的技术发展方向。

2 光谱共焦传感器测量原理

利用光学系统轴向色差的光谱共焦测量技术由共焦显微成像技术发展而来,最早由 Molesini 等^[1]于

1984 年提出。该技术使用复色光源代替焦显微技术中的单色光源,利用色散物镜的轴向色散将光波波长与聚焦位置编码对应,并利用光谱仪的横向色散进行波长解码,以获取聚焦位置信息,从而扩展了传统共焦系统的轴向测量范围,避免了测量系统轴向对焦的过程,提升了测量效率。

图 1 为光谱共焦测量系统两种典型光路结构^[11-12]。宽光谱光源 S 发出的复色光经色散物镜轴向扩散后,沿光轴方向形成一系列的聚焦谱锥,谱锥在光轴上聚焦位置与聚焦波长唯一对应,构成一组确定的编码关系。波长最小的光和波长最大的光所对应的焦点位置的间距确定了光学系统的测量范围。当样品处于系统测量范围内时,其表面只有一种波长的光处于聚焦态,其他波长的光处于失焦点。由于光源针孔 P_s 、光谱仪针孔 P_d 和任意波长光的焦点 λ_M 均互为共轭点,只有聚焦在样品表面的光可以反射到光谱仪针孔处并进入光谱仪内部光路,而其他波长的光则因失焦,导致大部分光散射到空间中,无法返回穿过光谱仪针孔 P_d 。且由于针孔的空间滤波效果,只有极少量失焦的光进入光谱仪内部。由此,光谱仪可检测到一个尖锐的单峰信号,该信号所确定的峰值波长即为聚焦在样品表面的光波波长,通过波长-位移测量曲线便可换算成高度信息。

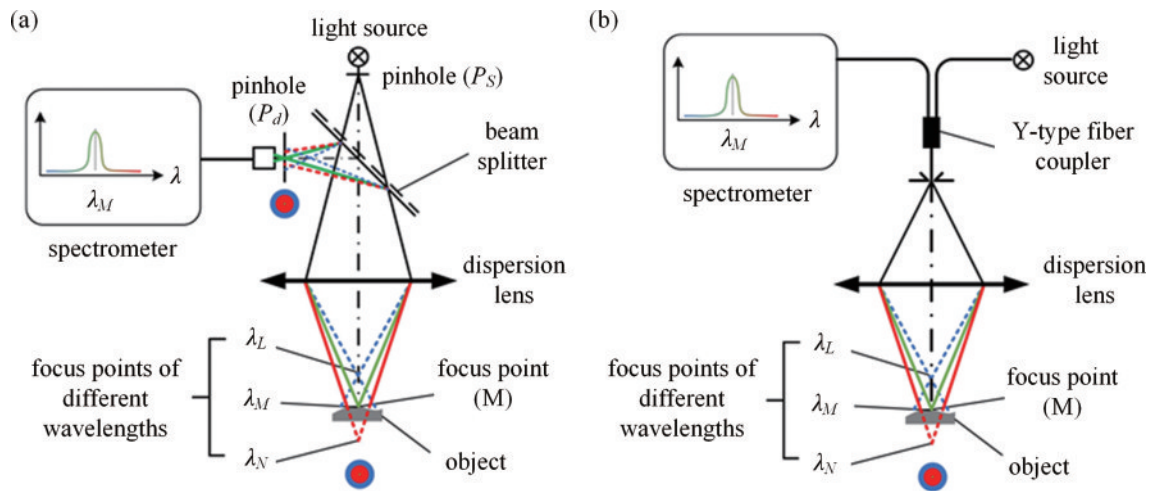


图 1 光谱共焦测量技术原理^[11-12]。(a)基于针孔和分光镜结构;(b)基于 Y 型光纤结构

Fig. 1 Principle of chromatic confocal measurement technology^[11-12]. (a) The structure based on pinhole and beamsplitter; (b) the structure based on Y-type fiber

图 1 中两种光路结构不同之处在于共轭针孔与分光镜选用的器件。在图 1(a)所示的结构中,分光镜通常采用立方分光棱镜或者平板分光镜,不仅占据一定的空间,而且还需要精准装配。同样地,一对共轭的针孔也要确保空间位置的一致性以及对称性。这对整个光谱共焦光路系统的装配提出了非常严格的要求,也不利于仪器的小型化。图 1(b)所示的结构使用熔融 Y 型光纤耦合器代替图 1(a)中的分光镜,实现入射光路与反射光路的分离,以光纤端口代替针孔,起到空间滤

波作用。Y 型光纤可避免共焦光路对分光镜和共轭针孔的精密装配的要求,有利于色散物镜的轻量化和小型化。Y 型光纤的应用,使光源、光谱仪和色散物镜更为独立,三者的相对位置可以根据实际的检测环境要求灵活调整。

3 点光谱共焦传感器关键技术研究进展

Molesini 在提出光谱共焦测量技术之初便指出了

该技术的核心:1)能够产生轴向色差的色散物镜;2)复色光源;3)能够检测波长信息的光谱仪器,并预测了此项技术将在表面检测领域大放异彩。此后更多的学者、机构和企业围绕光谱共焦测量技术的核心展开了研究,共同推动着光谱共焦测量技术的蓬勃发展。

3.1 色散物镜

色散物镜是光谱共焦传感器的核心器件,其产生的轴向色散性能决定了光谱共焦测量系统的测量范围。众多学者围绕色散物镜的结构设计、色散物镜的色散范围提升,以及色散线性度提升等开展了丰富的研究。

Miks 等^[13-15]根据初级像差理论推导了折射透镜组可产生的轴向色差,并根据光学材料的阿贝数以及相对色散系数分析出折射透镜组至少需要 3 种光学材料

才能产生线性色散,并给出相应的设计示例,但都基于密接透镜组模型,并未考虑透镜光焦度过大导致的球差问题,难以应用到实际的物镜设计中。

中国工程物理研究院机械制造工艺研究所刘乾等^[16-17]深入研究了核心器件色散物镜的光学性能,探讨了色散物镜中透镜材料的选择方案,给出了优化模型和求解方法,并使用可产生最大色散的材料组合进行色散物镜的设计,得到了线性度较好的色散物镜。该课题组还推导了光学系统轴向色散的传递公式,提出一种正负透镜组均采用线性色散光焦度组合且正负透镜组分离的镜头结构,如图 2 所示。该物镜在 430~710 nm 光谱范围内可生成 1 mm 的轴向色散,轴向色散与波长之间的相对非线性度为 4.6%,分辨力优于 0.5 μm ,全程测量误差小于 2 μm ^[18-19]。

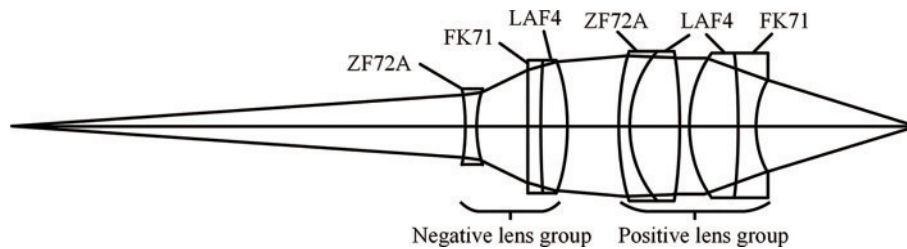


图 2 线性色散物镜^[18]

Fig. 2 Linear dispersion lens group^[18]

上述色散物镜为独立的整体结构,色散物镜的轴向色差和聚焦任务分散到物镜中每一个镜片上,因此各镜片所承担的功能不可分离。对于不同的设计需求,则需要重新设计物镜所有结构。为此,许多新颖的设计方法将色散物镜的光学性能进行分割,采用分段式的物镜结构,将不同光学任务分散到物镜的不同结构中。

图 3 为一种准直与色散分离的物镜结构^[20],该物镜利用空气间隔消色差透镜准直入射光束,后接非球面镜实现入射光束的聚焦和轴向色散。以“白光”LED 作为光源可实现 1.2 mm 的测量范围,全量程内最大测量误差为 9 μm 。采用这种先准直后聚焦色散的设计思路,只需更换聚焦色散镜便可获得不同的轴向色差。

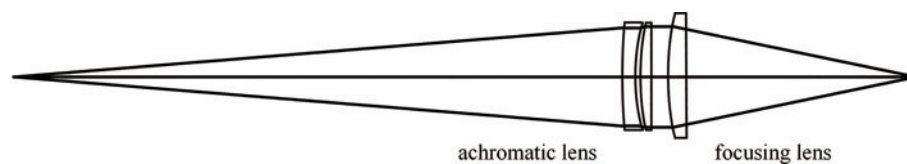


图 3 商用透镜组合的色散物镜^[20]

Fig. 3 Dispersion objectives for commercial lens combinations^[20]

也有按照色散和聚焦功能分离的设计思路单独设计的色散管镜,图 4 为一组采用球面透镜构建的色散管镜,可产生 160 mm 的超大轴向色差^[21]。利用该色散管镜与不同聚焦能力的物镜结合可获得所需的测量范围。将色散管镜与 4 倍和 10 倍放大倍率的商用物镜

组合,可分别获得 1300 μm 和 255 μm 的测量范围,轴向分辨率为 2 μm 和 0.4 μm 。

多组双胶合透镜级联的方式也可以用于扩展系统的轴向色差^[22-23],图 5 为一套四组结构级联的色散物镜,其中包含了 8 组双胶合透镜,可实现 120 μm 的轴

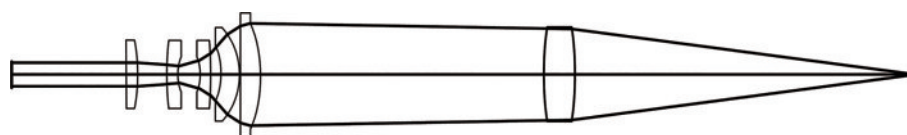
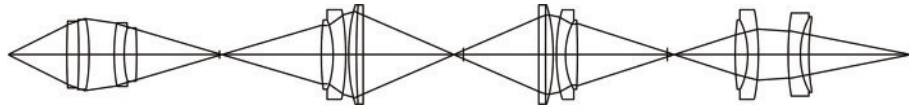


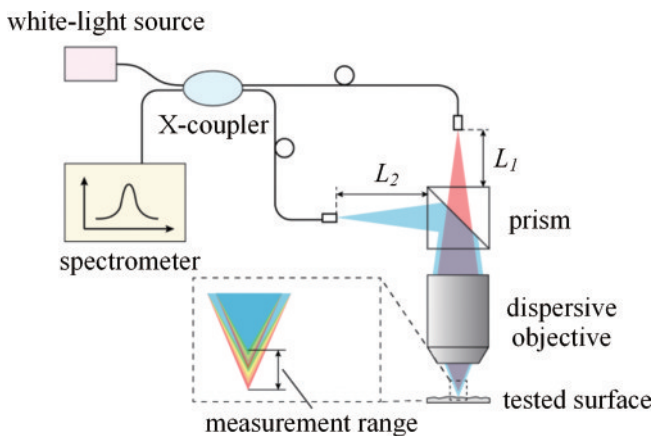
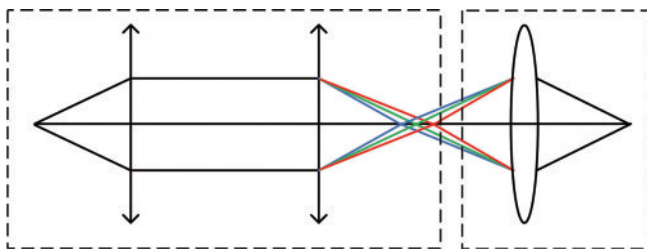
图 4 超大色散范围的色散管镜^[21]

Fig. 4 Dispersion tube lens with large dispersion range^[21]

图 5 四组级联的色散物镜^[23]Fig. 5 Four cascaded dispersion objectives^[23]

向色差,然而过多的透镜以及中间像增加了系统的复杂程度,难以保证系统的光效率。

除了在物镜结构上的改进,也有学者另辟蹊径,从设计方法上来提升色散物镜的性能。图 6 为一种双光源的色散物镜,采用两组光源组合的思路来扩展色散物镜的轴向测量范围^[24]。利用轴向物距不同使得像距不同的原理,将两个轴向位置不同的光源通过分光棱镜合并到一起,使其各自通过色散物镜后的轴向色散范围叠加,从而实现了物镜轴向测量范围的扩展。设计结果显示,合并前的色散分别为 119.9 μm 和 120.3 μm ,合并后的色散范围为 209.6 μm ,双色散物镜的轴向测量范围相比于单色散扩大了 1.75 倍。Yang 等^[25]的设计思路更加新颖,利用逆向光路设计思路来设计优良线性度的色散物镜,如图 7 所示,将设定好的不同物距的单个光会聚到同一像距的同一像点上,由此可用同样的评价指标来判定系统的性能,此设计思路可保证系统色散的线性度。

图 6 双光源光谱共焦测量系统^[24]Fig. 6 Dual light source chromatic confocal measurement system^[24]图 7 逆向色散法^[25]Fig. 7 Reverse dispersion method^[25]

本课题组以色散物镜初始结构为切入点,详细研究了色散物镜中第一组负光焦度双胶合透镜的结构类

型和产生的初始色差特征,提出了 L-type 和 S-type 两种色散类型,并进一步研究了两种色散类型对色散物镜产生的色散范围和像方数值孔径的影响^[26]。研究结果表明,S-type 色散的双胶合透镜更适用于设计大数值孔径的色散物镜,L-type 色散的双胶合透镜更适用于设计大色散范围的色散物镜,该结论有助于设计人员选用更合适的色散物镜初始结构。

除了常规折射透镜系统,具有自聚焦特性的梯度变折射率透镜(GRIN)也可用于构建色散物镜,例如:一种基于径向 GRIN 透镜的色散物镜在 420~620 nm 波长范围内产生的轴向色散达到 1215 μm ,波长与轴向色散的线性相关系数 R^2 为 99.69%^[27]。与同类传统色散物镜相比,GRIN 色散物镜结构紧凑、直径小、测量范围和测量分辨率明显提高,在实际应用过程中更容易实现精确测量。

随着衍射光学的发展,利用光的衍射效应分光的衍射光学元件(DOE)逐渐被应用到各种各样的光学系统中。DOE 利用光的衍射角与波长相关的特性可将不同波长的光分离并聚焦在光轴不同位置上。DOE 产生的色散特征与折射透镜相反,复色光经 DOE 聚焦后长波长的光聚焦位置小于短波长的光。对折射光学元件(ROE)而言,短波长的光的焦点小于长波长的光,如图 8 所示。对于衍射光学元件,同一级次下的衍射光的焦距仅由光波波长决定,DOE 色散特性如式(1)所示,其中, m 是衍射级次, λ 是工作波长, r_1 是第一区域的半径。因此 DOE 可以轻松产生线性色散,由此引起了众多学者的关注,并将其运用到光谱共焦色散物镜的研究中^[28]。

$$f_m(\lambda) = \frac{r_1^2}{m\lambda} \quad (1)$$

DOE 元件与高倍显微物镜的组合是一种常用的色散物镜结构形式。Dobson 等^[29]使用 DOE 分别与 40 倍和 60 倍的显微物镜结合,在 800~900 nm 光谱带宽范围内分别实现了 55 μm 和 25 μm 的轴向色散,并对二元光栅和四相级 DOE 表面形貌进行测量,所得结果与常规共焦显微镜成像的样品轮廓吻合良好。有学者^[30-32]将 DOE 与 50 倍显微物镜组合,在 700~1000 nm 的光谱范围内产生超过 200 μm 的色散范围,并进一步分析了系统的轴向光谱响应和所测共焦光谱的半波峰宽与轴向分辨率的关系。

DOE 元件的微纳结构有助于系统结构的小型化。图 9 是一款直径仅为 2 mm 的微型光谱共焦传感器^[33-34],该传感器由球透镜和非涅耳波带片组合而成,

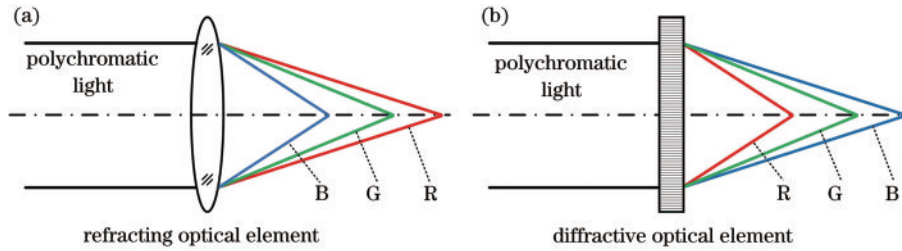


图 8 折射光学元件与衍射光学元件的色散。(a)折射光学元件;(b)衍射光学元件

Fig. 8 Dispersion of ROE and DOE. (a) Refracting Optical Element; (b) diffractive Optical Element

可实现 $50\ \mu\text{m}$ 的轴向色散,且会聚光束数值孔径达到 0.4,半球透镜可将光路折转 90° 以实现横向扫描的效果。有学者将准直聚焦透镜与 DOE 元件集成在同一个基底上,构建了一种高度集成的微光学系统,以特定角度发射测量光束和收集反射光束进行测量^[35]。

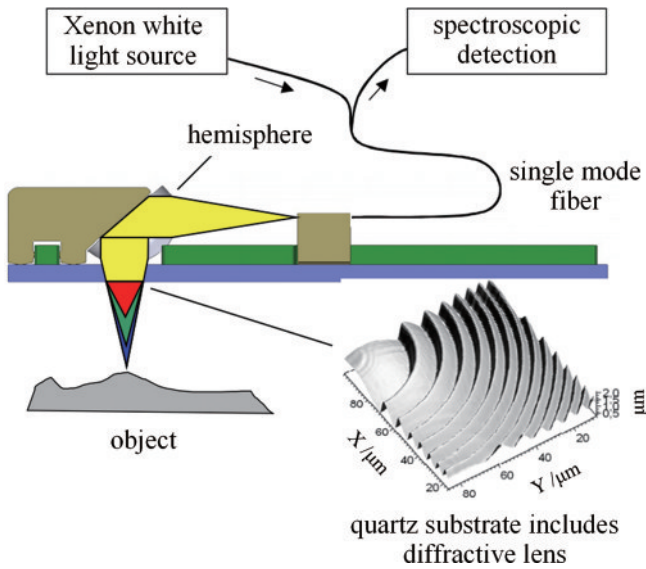


图 9 直径小于 $2\ \text{mm}$ 的小型化彩色共聚焦传感器^[33]

Fig. 9 Miniaturized chromatic confocal point sensor with a diameter smaller than $2\ \text{mm}$ ^[33]

利用成品的 DOE 元件构建色散物镜是一种高效便捷的实现方式,如一种采用 Thorlabs 成品菲涅耳透镜与 20 倍放大倍率的显微物镜组合的色散系统可实现 $1.3\ \text{mm}$ 的轴向测量范围,系统轴向测量分辨率优于 $0.5\ \mu\text{m}$,并可对透明玻璃片厚度进行有效检测^[36]。也有采用欧姆龙 ZW-S30 光纤同轴位移传感器测头内部的菲涅耳透镜组建的色散物镜,配合“白光”LED,实现了 $4\ \text{mm}$ 的测量范围,全量程内位移测量误差为 $\pm 8\ \mu\text{m}$ ^[37]。虽然成品菲涅耳透镜的使用可以简化色散物镜的设计流程,但是色散物镜的性能大多会受到成品菲涅耳透镜自身性能的限制,而设计加工的 DOE 元件可实现更优良的性能,图 10(a)为采用标准光刻技术设计加工的直径为 $11.27\ \text{mm}$ 、主焦距为 $50\ \text{mm}$ 的相位菲涅耳带片(FZP),图 10(b)为使用该 FZP 为色散物镜的光谱共焦测量系统,该系统可实现 $16\ \text{mm}$ 的测量范围,轴向分辨率达 $0.8\ \mu\text{m}$,位移测量精度优

于 0.4% ^[38]。

DOE 元件虽然具有较强的色散性能,但难以实现高数值孔径,因此有一些学者研究 DOE 元件和折射元件组合光学系统的性能。Hillenbrand 等^[12]对比了衍射元件和折射元件的组合与纯衍射元件的色散效果,如图 11 所示,证实了折衍混合系统的性能要优于纯衍射系统。在折射光学系统中加入 DOE 元件也同样可以提升光学系统产生的轴向色差。研究表明,对于同一个折射光学系统,加入 DOE 元件后可将系统的轴向色差扩展 5 倍^[39-40]。混合非球面衍射透镜(HAD)则将非球面透镜的低球差和衍射光学元件的高色散性能优势加以结合,可将系统的动态范围增加两倍,同时将分辨率提升 $\sqrt{5}$ 倍^[41]。Förster 等^[42]从透镜的材料特性研究,将不同材料的透镜组合得到其等效的阿贝数,并且比较了纯衍射元件、纯折射元件,以及折衍混合元件的阿贝数极值。研究表明,在保证成像质量的前提下,纯折射元件可得到的阿贝数极值为 -2.5 ,混合元件为 0.4 。混合元件的阿贝数极值比单个衍射元件的阿贝数小很多,由此可获得 8 倍以上的色散范围。

表 1 为点光谱共焦传感器中色散物镜典型结构及特点对比。虽然衍射光学元件可实现理想的色散范围,结合折射透镜效果更佳,是一个不错的研究方向。但是,衍射光学元件的多级衍射效应,使得物镜光效严重降低,且其他级次的反射光会对系统的信噪比产生不良影响。此外,衍射元件受制作工艺影响,难以实现高数值孔径,因此无法实现高精度测量效果。相比之下,折射光学元件构成的色散物镜应用广泛,加工工艺成熟,可选择材料与面型结构丰富,可以满足多种设计需求,仍是当下主要研究对象。对比市面上的成熟产品,绝大部分色散物镜仍采用折射透镜的方案,仅少数产品采用了 DOE 元件。

3.2 宽光谱光源

宽光谱光源是光谱共焦测量技术得以实现的基础,光源的光谱范围在一定程度上决定了系统的测量范围、测量速度和稳定性。除了提升色散物镜的性能外,也有众多学者以光源为切入点展开研究。

早期的研究应用中,通常使用卤钨灯^[32, 43]、氙灯^[12, 33, 44]、汞灯^[35]类似的电弧灯作为光源,这类光源所

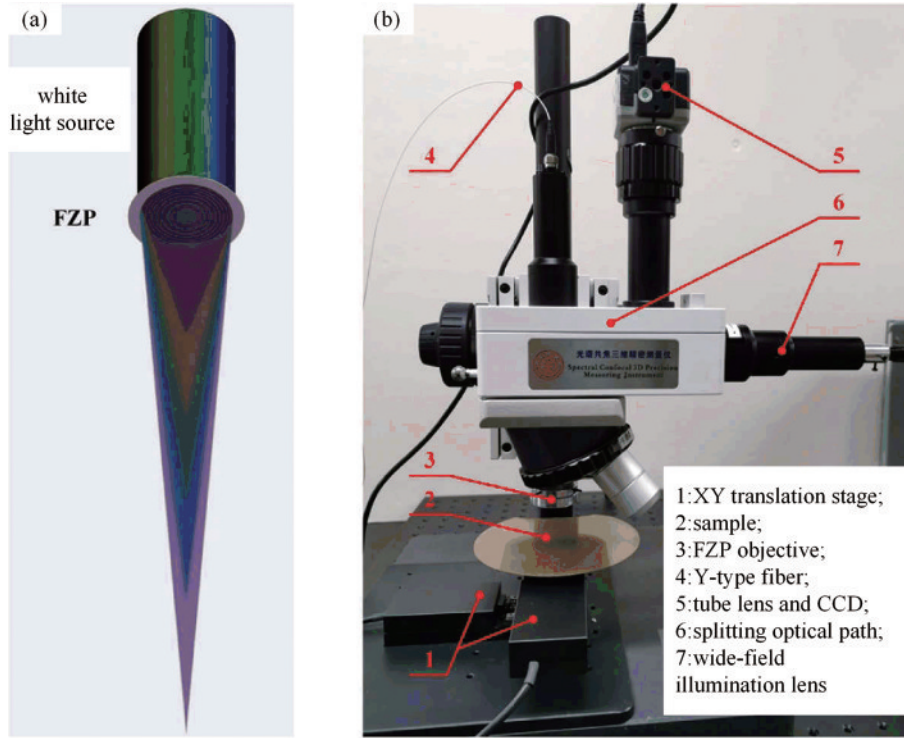


图 10 基于 FZP 的光谱共焦测量系统^[38]。(a)FZP;(b)测量系统

Fig. 10 Chromatic confocal measurement system based on FZP^[38]. (a) FZP; (b) measurement system

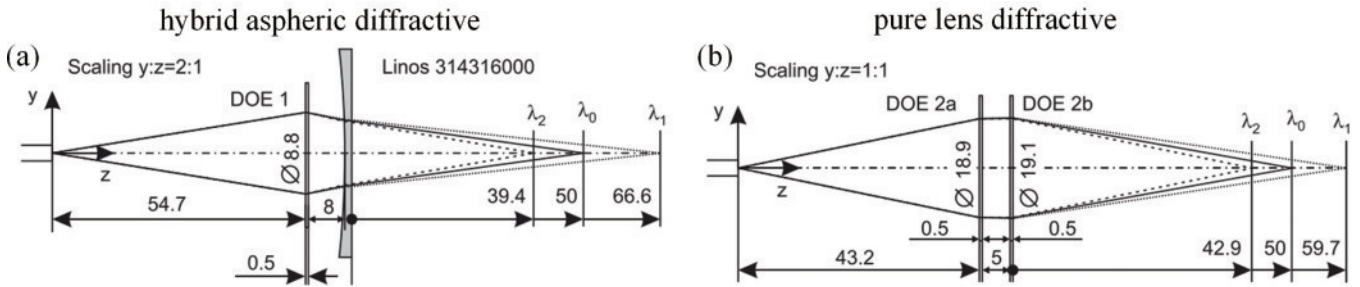


图 11 折衍混合透镜与纯衍射透镜的色散^[12]。(a)混合非球面衍射透镜;(b)纯衍射透镜

Fig. 11 Dispersion of hybrid lens and pure diffractive lens^[12]. (a) Hybrid aspheric diffractive; (b) pure lens diffractive

表 1 色散物镜结构性能对比

Table 1 Comparison of structure and performance of dispersive objective lenses

Structure of objective lenses	Merit	Limitation
Overall structure	Compact structure and good performance	Great design difficulty
Separation of collimation and dispersion	Easy to achieve different dispersion ranges by replacing the dispersion group	Balance performance requirements for lens sets
ROE Separation of dispersion and focusing	Easy to achieve different dispersion ranges by replacing the objective lenses	Limited by microscopic objectives
Cascade of multi-lens groups	Easy to extend the dispersion range	Low light efficiency and complex structure
GRIN	Compact structure and small diameter	Single structural form
Combination of DOE and high-power microscope objective	Easy to produce axial chromatic aberration	Limited by microscopic objectives
DOE FZP	Good dispersion ability and excellent performance	High production process requirements
Combination of DOE and ROE	High objective performance	High design requirements

产生的光谱稳定且亮度高,但此类灯泡体积大、产热高、使用寿命短,而且使用过程中需要一定的预热稳定过程。

“白光”LED,通常是以蓝光 LED 芯片或者红光 LED 芯片为基底,配以不同的荧光材料,通过混合荧光粉受激发射的黄光、绿光、红光或者蓝光与基底光形

成光谱范围较宽的“白光”。“白光”LED 因其小巧的体积、长的使用寿命、高效的发光效率,逐渐成为光谱共焦测量技术中主流的光源^[45]。

随着激光光源与光纤的发展,超连续谱激光光源^[46]根据光纤的非线性效应可展宽输入脉冲光谱,从而实现超宽的光谱输出。其输出光谱具有高亮度、高稳定性等优点,已成为现阶段的研究热点之一。如图 12 所示,Shi 等^[47-48]使用飞秒激光脉冲与光子晶体光

纤(PCF)耦合后产生的白光光谱带宽超 1000 nm,且照明光强远超氙灯。Minoni 等^[49]使用脉冲激光器与微结构光纤(MOF)耦合,产生了光谱范围为 500~900 nm 的超连续谱光源,在 280 μm 测量范围内系统的相对测量精度优于 0.36%。Chen 等^[50]利用锁模飞秒激光器将光源光谱范围扩展到红外波段(1480~1640 nm),可实现 40 μm 的轴向测量范围,分辨率可达 30 nm。

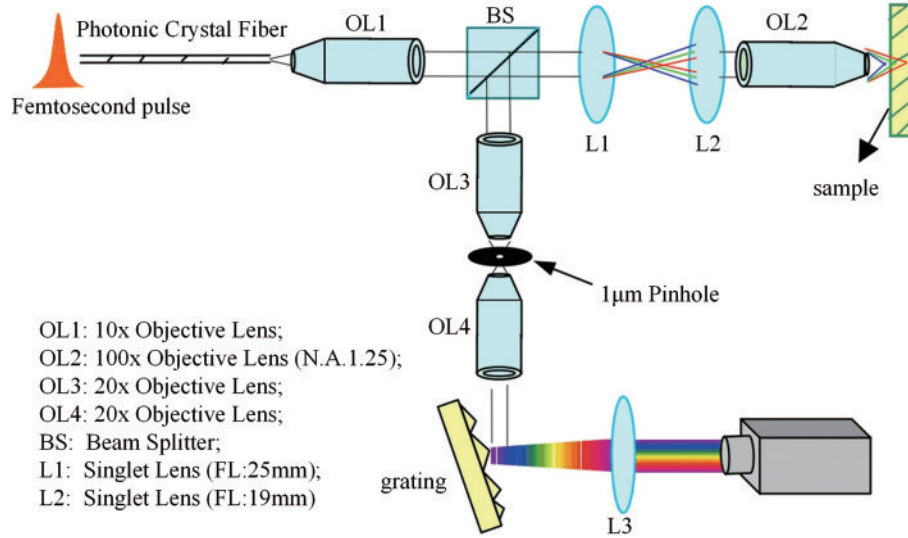


图 12 基于超连续谱光源的光谱共焦测量系统^[47]

Fig. 12 Chromatic confocal measurement system based on supercontinuum light source^[47]

此外,扫频光源(SS)也可以提供宽光谱照明,这种扫频光源快速、连续、重复地产生一定波长范围内的光,从而产生与宽带光源相似的等效波长范围。相应的反射光谱接收装置使用光电探测器,可以消除传统光谱共焦显微镜由于光谱仪而造成的灵敏度低和速度受限等关键缺陷。图 13 为基于频扫光源的光谱共焦测量系统,可以实现更高的灵敏度和更快的检测速度^[51]。但是该光源光谱扫频范围仅为 50 nm,可供使用的波段较少。

理想条件下,光谱共焦传感器在不同位置处采集到的共焦谱应为一组强度基本接近的波峰,即如图 14(a)所示的等能光谱分布。这些信号的强度不受波长的影响,因此就需要光源的出射光谱的功率分布呈均匀分布。然而,在实际应用中,没有理想的等能光源,光谱功率分布难以保证相对均匀,从而导致光谱仪所检测的波峰信号强度受到调制。不同波长位置处对应的波峰强度也不一致,存在较大落差。图 14(b)为白光 LED 作为光源时光谱共焦传感器所检测的波峰信号,在短波处所测得信号强度较低,此时信号的信噪比相对较低,将影响测量结果的可靠性^[20]。

常用光源的光谱功率分布特性(SPD)如图 15 所示,可以看出,在整个光谱范围内,光源输出的光谱功率分布特性并不均匀,在整个光谱带宽内,光谱功率变

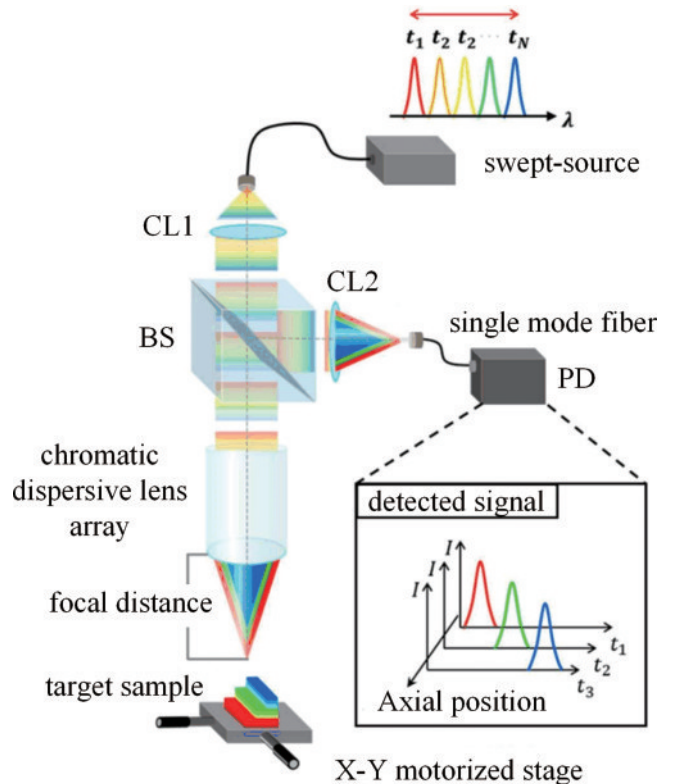


图 13 基于扫频光源的光谱共焦测量系统^[51]

Fig. 13 Swept-source-based chromatic confocal measurement system^[51]

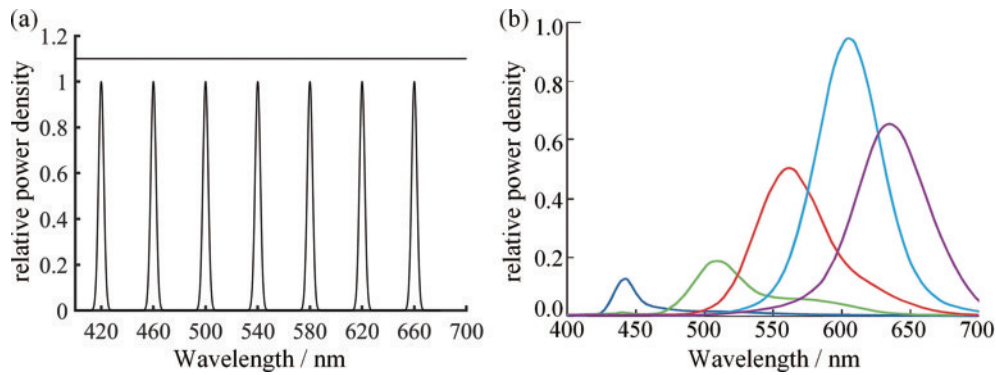


图 14 光谱仪所测共焦光谱^[20]。(a)等能白光下的测量信号光谱分布;(b)白光LED下的测量信号光谱分布

Fig. 14 The confocal spectrum measured by the spectrometer^[20]. (a) Spectral distribution of measurement signal with uniform power white light; (b) spectral distribution of measurement signal with white LED

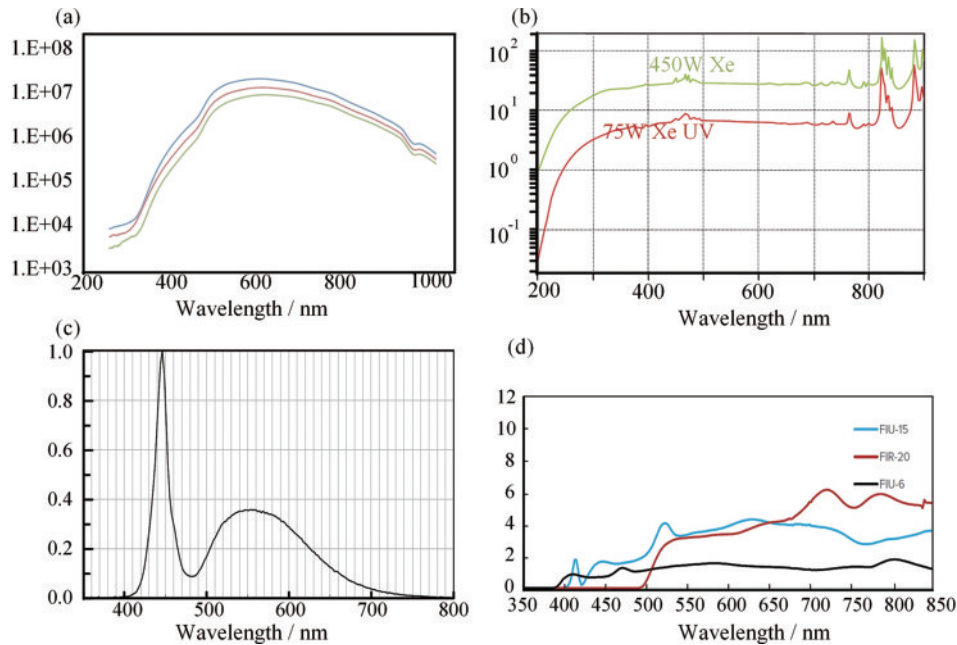


图 15 不同光源光谱分布特性。(a)卤钨灯光谱分布^[52];(b)氙灯光谱分布^[53];(c)白光LED光谱分布^[54];(d)超连续谱光源光谱分布^[55]

Fig. 15 SPD characteristics of different light sources. (a) SPD of tungsten halogen lamps^[52]; (b) SPD of xenon lamp^[53]; (c) SPD of white LED^[54]; (d) SPD of supercontinuum light sources^[55]

化显著,特别是白光LED和卤钨灯,在短波处的光强严重下降。更重要的是,光源输出的光谱功率分布特性是固定的,不具备可调节性。光源光谱功率分布特性可视为一条包络线,光谱仪所检测到的波峰信号的强度会受到这条包络线的调制影响。

光源技术的发展也不断推动着光谱共焦技术的进步,滨松集团旗下Energetiq公司研发出的单点激光驱动光源技术(LDLS)不仅可以在170~2100 nm的光谱范围内提供超高发光亮度,且光谱功率分布非常均匀,如图16(a)所示。LDLS一种非常理想的宽光谱光源,但是其昂贵的价格不适合光谱共焦传感器的产品化^[56]。

Sunlike^[57]全光谱技术采用紫光LED芯片技术与TRI-R荧光粉技术激发出与太阳光谱相近的发光光

谱,如图16(b)所示。Sunlike技术模拟太阳光谱,降低常规蓝光芯片激发白光中的有害蓝光成分,所发出的光谱范围宽、能量分布均匀,且LED在体积、成本、使用寿命上都有着显著的优势,因此这种全光谱LED也是一种非常合适的光源。

激光驱动光源技术和Sunlike全光谱LED产生的均匀宽光谱虽然非常适合光谱共焦传感器,但也有一定的局限性。为了更好地实现轴向色差,色散物镜中通常会包含多种光学材料^[13-14],其中不乏一些高折射率低阿贝数的高色散材料。而光学玻璃的光谱透过率与波长相关,特别是高色散材料,其在短波段透过率更低。因此,对于这种光谱功率固定的宽光谱光,由于色散物镜的光谱透过率不是常量,也会影响最终采集到的共焦峰强度^[58]。为此,本课题组^[58]提出一种基于单

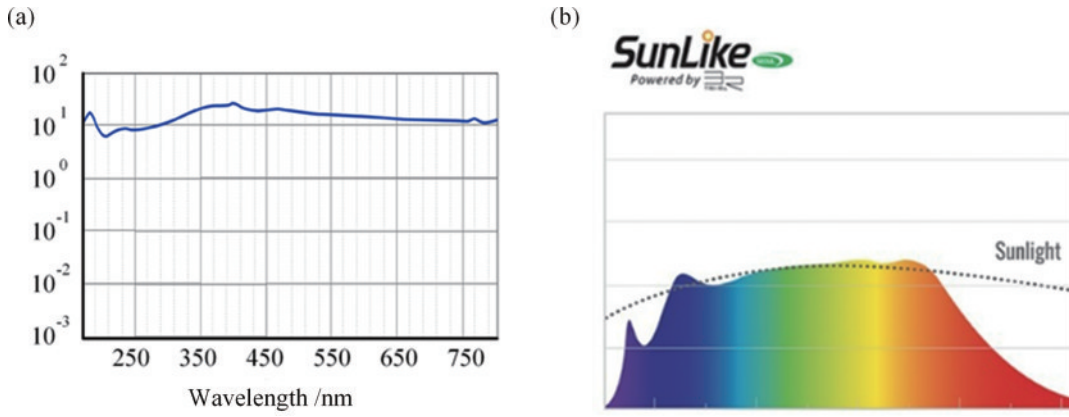


图 16 先进光源技术。(a)激光驱动白光^[56]; (b)Sunlike 全光谱 LED^[57]

Fig. 16 Advanced light source technology. (a) Laser driven light source^[56]; (b) Sunlike full spectrum LED^[57]

色 LED 的多通道融合光谱功率分布可调节的宽光谱光源, 来降低光谱共焦传感器中测量信号受光源自身的光谱功率分布特性和色散物镜的光谱透过率特性的调制影响。该光源利用光纤阵列传输 18 种峰值波长的单色 LED 辐射光谱, 并融合为 400~700 nm 范围的

宽光谱, 如图 17 所示, 该复合光源可通过调节每种 LED 发光强度改变光源输出的光谱功率分布特性。研究表明, 该光源可有效降低光源本身的光谱功率分布特性和色散物镜的透射特性对测量信号的影响, 保障光谱检测的准确性。

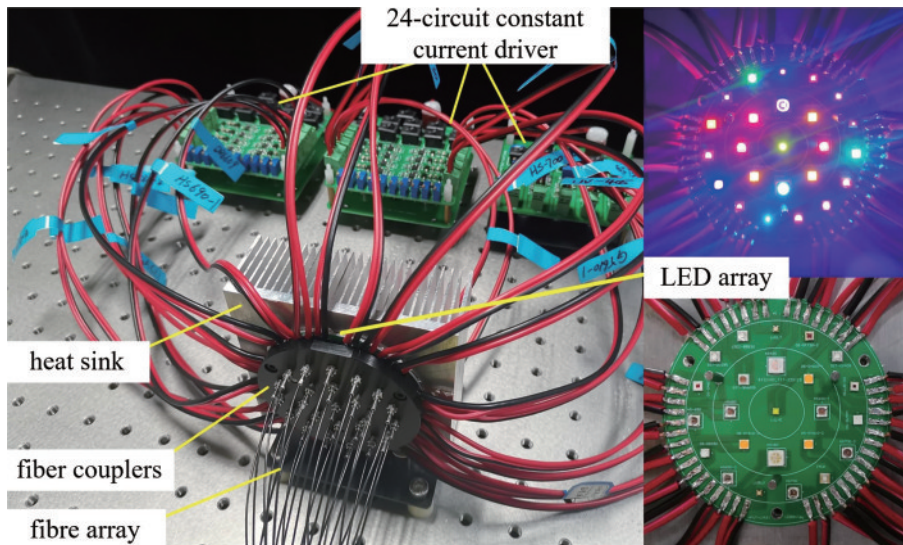


图 17 光谱功率分布可调节光源^[58]

Fig. 17 Spectral power distribution tunable light source^[58]

表 2 为光谱共焦测量技术中典型光源技术特点的对比。光源技术的发展也不断推动着光谱共焦技术的进步, 特别是超连续谱光源和激光驱动光源技术, 产生的光谱范围宽、亮度高且稳定性强。但是此类光源的构成复杂、价格昂贵, 并不适合产品开发。商业应用中的光谱共焦传感器绝大多数使用的是体积小、使用寿命长, 且成本极低的白光 LED。

3.3 光谱检测装置

光谱检测装置是光谱共焦测量技术的必要条件, 通过光谱检测装置确定测量过程中聚焦在样品表面的光波波长, 便可据此转换为对应的高度信息, 进而实现样品形貌的测量。

微型光纤光谱仪是光谱共焦测量技术中最常用的

一种光谱检测装置, 它是一种利用光学系统的横向色差进行信息测量的光学系统。光谱仪的出现要早于光谱共焦测量技术, 因此现阶段有许多成熟的商用光谱仪可直接集成到光谱共焦测量系统中用于光谱成分的确定。微型化的光纤光谱仪因其外形小巧、检测速度快、检测光谱范围宽等优势成为大多数研究人员首选的光谱检测装置, 所选用的光谱仪主要来自美国的海洋光学^[21, 49, 59-62]、荷兰的爱万提斯^[63-65], 以及国内的复享光学^[66-67]等。图 18 为 3 种典型的微型光纤光谱仪光路结构: 图 18(a) 为基本型切尼-特纳 (C-T) 光路结构, 其光路结构上下对称, 形似字母 M, 也称为 M 型光谱仪, 对称的光路像差优化效果更好, 具有更佳的光谱分辨率; 图 18(b) 为从 M 型光路演变而来的非对称交叉

表 2 典型光源技术特点对比
Table 2 Comparison of typical light source

Light source	Merit	Limitation
Tungsten halogen lamp/Xenon lamp	High intensity and wide spectral range	High heat production, low light-energy coupling efficiency, and non-adjustable spectral power distribution
White LED	Small size, low cost, long lifetime, and easy to integrate	Limited wavelength range and uneven spectral power distribution
Supercontinuum white light	Broad wavelength range and uniform energy distribution	Large size, expensive, and non-adjustable spectral power distribution
Laser driven light source	Broad wavelength range, uniform energy distribution, long lifetime, and easy to integrate	Expensive and non-adjustable spectral power distribution
Sunlike full-spectrum LED	Broad wavelength range, uniform energy distribution, long lifetime, small size, and low cost	Non-adjustable spectral power distribution
Spectrally tunable light source	Broad wavelength range, uniform and adjustable spectral power distribution, long lifetime, and low cost	Large size and complex adjustment process

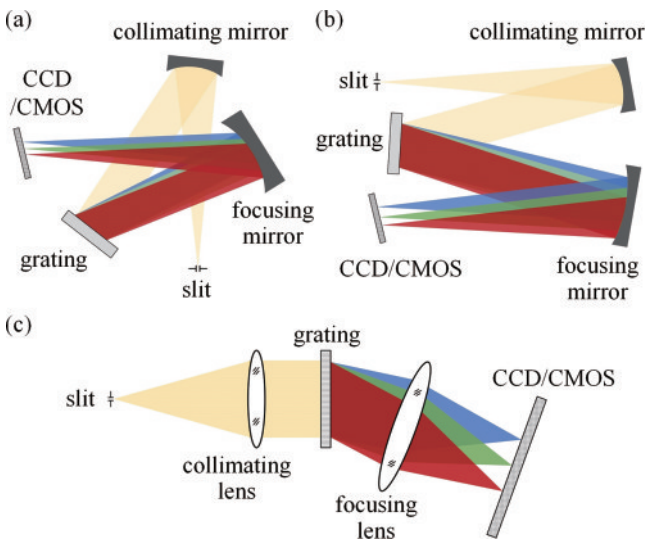


图 18 光纤光谱仪的 3 种典型光路结构。(a) 非对称交叉 C-T 型光谱仪；(b) 对称非交叉 C-T 型光谱仪；(c) L-G-L 光谱仪
Fig. 18 Three typical optical path structures of optical fiber spectrometer. (a) Crossed-asymmetric Czerny-Turner spectrometer; (b) symmetric Czerny-Turner spectrometer; (c) L-G-L spectrometer

型 C-T 光谱仪结构,交叉的光路可使光谱仪结构更为紧凑,是微型光谱仪最常用的一种光路结构;图 18(c) 为基于透射光栅的透镜-光栅-透镜(LGL)光路结构,这种结构采用透射式光栅,可提高光谱仪的光效,结构简单,可用于高速光谱测量应用中。无论哪种光路结构,光束在光谱仪内部的传递路径基本相同。光束从狭缝入射后经过凹面反射镜或准直透镜准直后照射到光栅,光栅产生的衍射光将不同波长的光分散成不同衍射角的平行光束,通过聚焦凹面镜或聚焦透镜聚焦在探测器表面,形成不同光谱的狭缝像。

除了直接使用商业成品的光纤光谱仪外,也有研究人员利用商用透镜、光栅和 CCD 组建光谱检测系统^[20, 36, 47, 65, 68-71]。其中,大多采用图 19 所示的光路结构^[20],该光路由透镜和反射光栅构成,结构简单易调

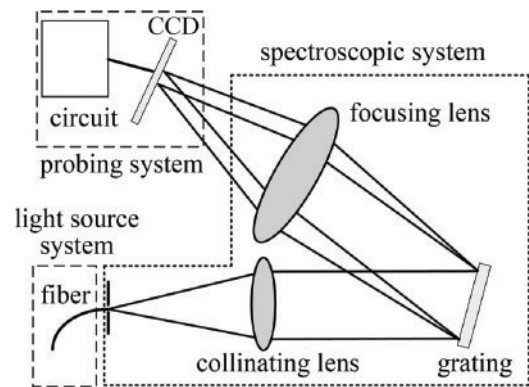


图 19 基于透镜与反射光栅的结构^[20]
Fig. 19 Structure based on lens and reflection grating^[20]

节,但占据的空间较大。也有采用非交叉对称的 C-T 结构^[70-71],以及基于透射光栅的透镜-光栅-透镜光路结构来进行光谱检测的^[69],如图 18(b)和图 18(c)所示。无论是商用成品光谱仪,还是自行搭建的光谱仪,其基本结构和功能基本一致,都利用光栅或者棱镜将入射光分散到探测器上来确定共焦波长。

光谱仪性能直接决定了光谱共焦位移传感器的工作性能,其尺寸也决定了光谱共焦位移传感器控制模块的体积。光谱仪作为一个相对独立的子系统,其自身的发展也常以提升系统分辨率、提高系统光通量、减小系统尺寸为目标,因此,光谱仪自身性能的提升可直接作用于光谱共焦传感器,进而为光谱共焦传感器性能的提升增添新动力。

光谱分辨率决定了微型光谱仪对光谱信号的识别提取能力,也决定了光谱共焦位移传感器的测量准确度。在高分辨率光谱仪方面,劳伦斯利弗莫尔国家实验室的研究人员^[72]利用透射式光栅和消色差物镜,减少光学组件的数量以及保证每个组件的吞吐量和效率,在入射狭缝为 30 mm 的情况下,实现了近紫外到可见波段的高分辨率、高通量的光谱仪,其结构如图 20 所示。

图 21 为一种利用三棱镜和平面衍射光栅两个色散元件搭配图像空间远心透镜和微透镜阵列构成的成

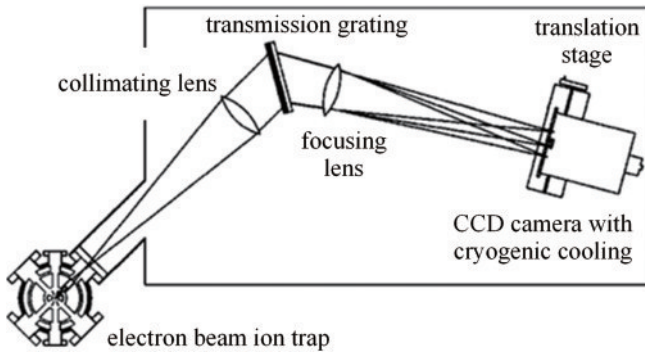


图 20 透镜加透射式光栅光谱仪^[72]

Fig. 20 Lens and transmission grating spectrometer^[72]

像光谱仪系统,该系统在 48.8° 视场角的情况下可实现 1.6 nm 的光谱分辨率^[73]。

在可见光范围内,色散棱镜和透射光栅的光学材料具有良好的透过性,使用透射式结构能够维持足够的光通量,因此对于光谱共焦位移传感器,这类透射式结构在光通量方面具有较大的优势。然而由于不同光学材料对不同波长的光线有不同的折射率,在设计阶段需要对色差进行严格校正。

反射式结构由于光学膜系反射率的原因会产生一定的能量损失,但是其光学元件对宽光谱范围的光线具有较为一致的作用效果,并且具有良好的拓展性,具有更强的像差校正能力。

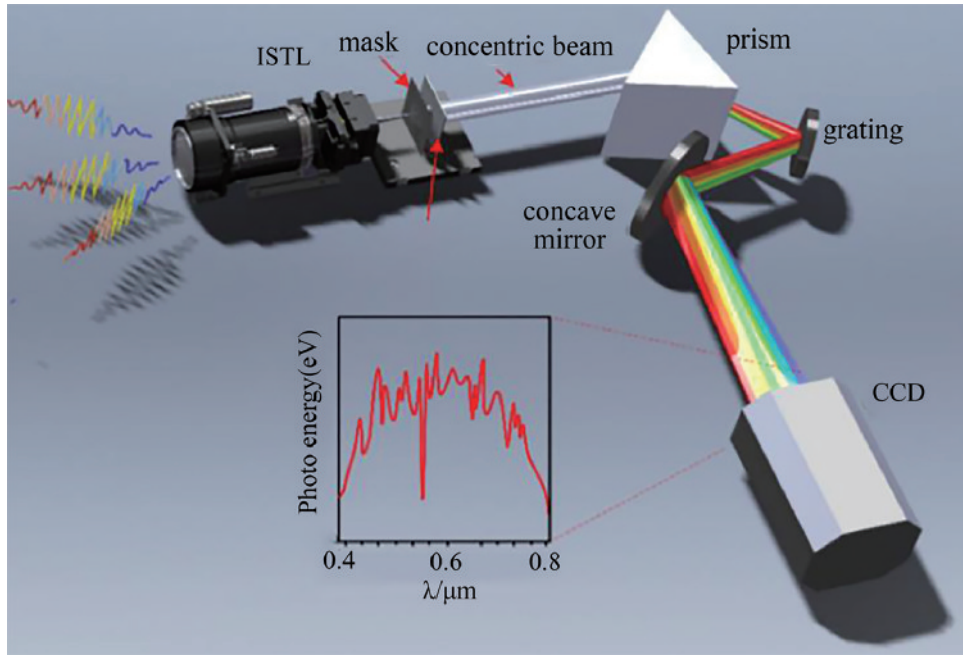


图 21 双色散成像光谱仪^[73]

Fig. 21 Double dispersion imaging spectrometer^[73]

C-T 结构是最常用的反射式结构。传统的 C-T 光谱仪由于像散的存在,会有一部分能量未打在探测器上,造成能量的损失,这种情况可在光路系统中增加一些光学镜片加以改善。光路结构如图 22 所示,在传统 C-T 结构中的聚焦镜和探测器之间增加一个柱面镜来校正整个波段的像散,可有效增加光谱仪的光通量^[74]。此外也可在聚焦镜和探测器之间增加楔形柱面透镜^[75]、切斜透镜^[76]或者带有自由曲面的柱面透镜^[77]来矫正像散,从而提升光谱仪系统的光通量。

Xia 等^[78]通过深入分析散光校正的理论和方法,将传统 C-T 光谱仪中的球面准直镜替换为子午柱面镜和弧矢柱面镜,如图 23 所示。其中,弧矢柱面镜用于校正整个光谱仪结构的像散,子午柱面镜用于准直狭缝处的入射光,该光路结构可在校正整个 C-T 光谱仪结构像散的同时不影响其原本的光学性能,同时也提高了整个光谱仪结构的光通量。

Feng 等^[79]从传统 C-T 光谱仪出发,利用广义

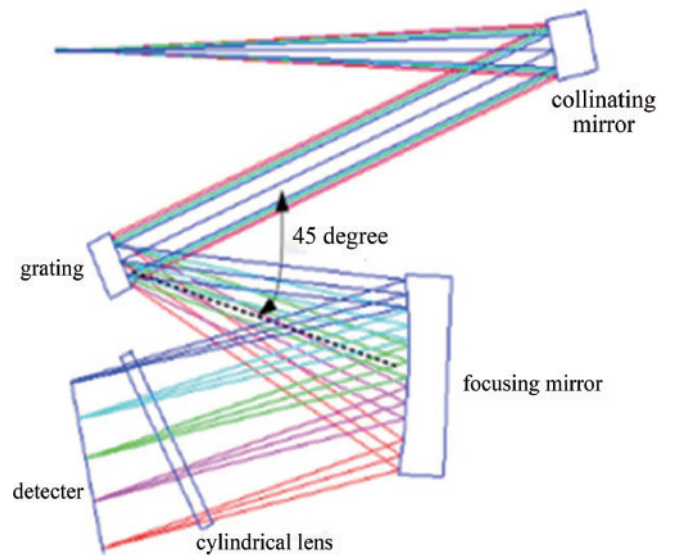


图 22 C-T 光谱仪增加柱面透镜^[74]

Fig. 22 C-T spectrometer with cylindrical lens^[74]

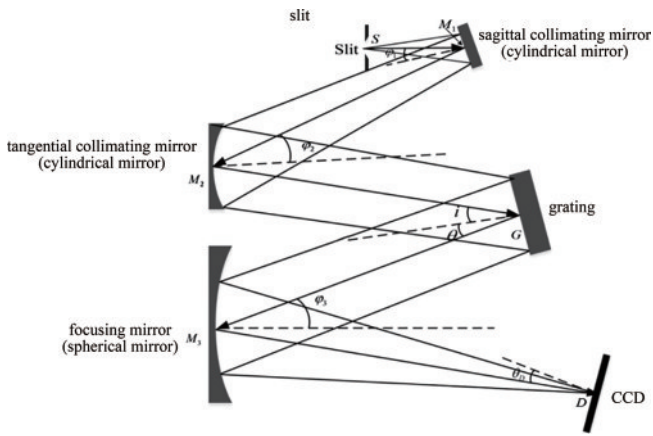


图 23 改进型 Czerny-Turner 光谱仪结构^[78]
Fig. 23 Improved C-T spectrometer structure^[78]

Coddington 公式分别计算每个镜片的子午像距和弧矢像距,进而建立 C-T 光谱仪子午面和弧矢面之间像距的联系,最后用面阵探测器来接收不同视场的光,其结构如图 24 所示。该结构通过控制柱面镜的角度、曲率来使不同视场的光谱叠加在一起,形成覆盖探测器更大面积的光谱,提高了系统的光通量。

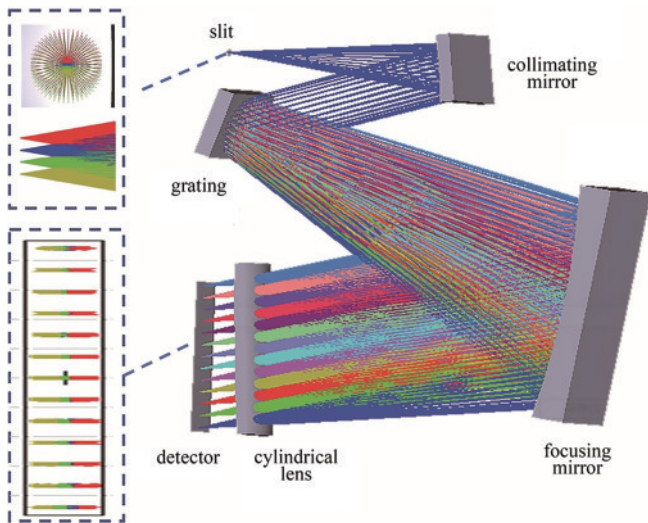


图 24 多视场光谱仪^[79]
Fig. 24 Multi-field spectrometer^[79]

光谱仪的小型化对于光谱共焦传感器的集成具有重要的意义,如何在保证光学性能的同时进一步小型化微型光谱仪也是重要的研究方向。图 25 为基于 M 型结构的改进型光路结构^[80],该结构在入射狭缝和准直镜之间引入一枚半球透镜,不仅成功地校正了光谱仪中存在的像散问题,还显著地增加了光通量,提高了光谱仪的性能,而且减小了后续的球面镜以及平面衍射光栅的尺寸,在一定程度上减小了微型光谱仪的尺寸。类似地,在入射狭缝与准直镜之间加入一块双凸透镜可达到“压缩”光线的效果^[81],缩小后续的球面镜以及光栅的尺寸,有效地解决了光谱仪中的像散问题,并在保持高光通量的同时,实现了出色的高分辨率,减

小了微型光谱仪的尺寸,具体如图 26 所示

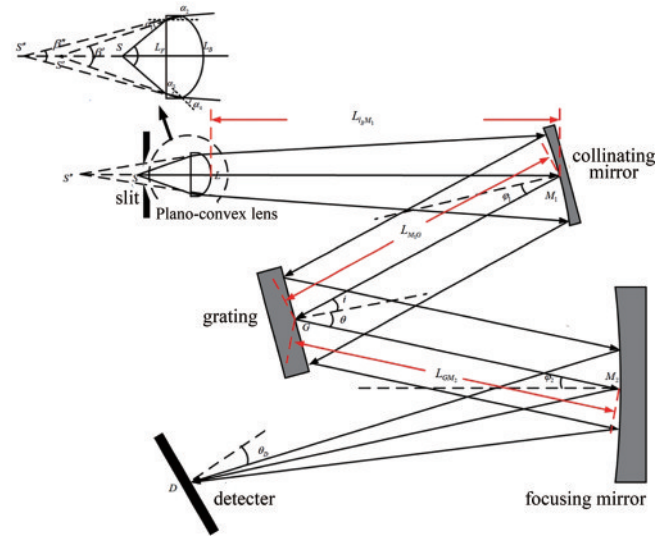


图 25 增加半球透镜的 C-T 光谱仪^[80]
Fig. 25 C-T spectrometer with hemispherical lens^[80]

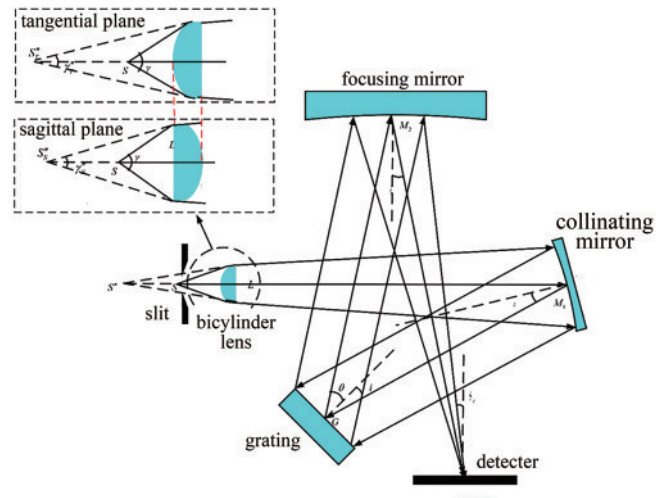


图 26 增加双凸透镜的 C-T 光谱仪^[81]
Fig. 26 C-T spectrometer with convex lens^[81]

Feng 等^[82]从 Coddington 公式出发,推导出光谱仪子午面和弧矢面的焦距,将传统 Czerny-Turner 光谱仪中的球面镜全部替换成柱面镜,光线首先经过弧矢准直柱面镜来控制弧矢面的尺寸,进而所有镜片的弧矢面尺寸都会变小,后续则都通过子午柱面镜进行准直和聚焦,通过这种方式设计了一款超薄微型光谱仪,进一步促进了光谱仪的小型化,其弧矢面的厚度仅为 2 mm 并且具备高通量、高分辨率的优点,如图 27 所示。

除了利用光谱仪来确定共焦光谱,也有部分研究人员利用波长响应特性来确定轴向位置。Kim 等^[44]利用 50:50 的分光镜将测量光束分成两个子光束,分别传输到两个独立的光电倍增管 (PMT) 内,其中,一路设置有变透射率滤光片,如图 28(a) 所示。该滤光片的透射率与波长相关且唯一对应,两个 PMT 采集的光强之比就是滤光片的透过率,因此可利用两个 PMT

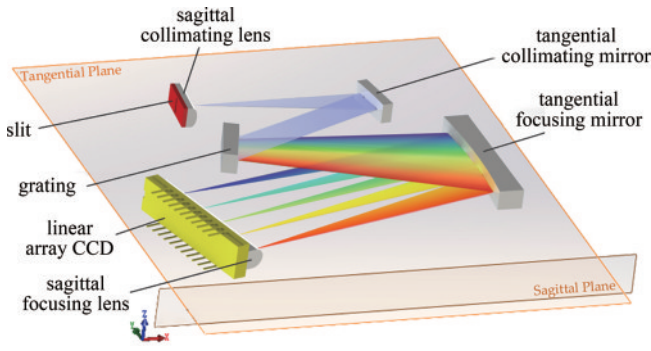


图 27 超薄光谱仪^[82]

Fig. 27 Ultrathin spectrometer^[82]

信号强度之比所得的透过率来计算聚焦位置。由于 PMT 无需时间积分,因此可将测量速度提升至数百兆赫兹,远超光谱仪的检测速度。Chen 等^[83]则使用两台 CCD 分别采集由两个宽度不同的狭缝产生的共焦信号,如图 28(b)所示,并对其进行差分归一化处理,将测量高度与信号差分比线性对应,其测量速度满足原

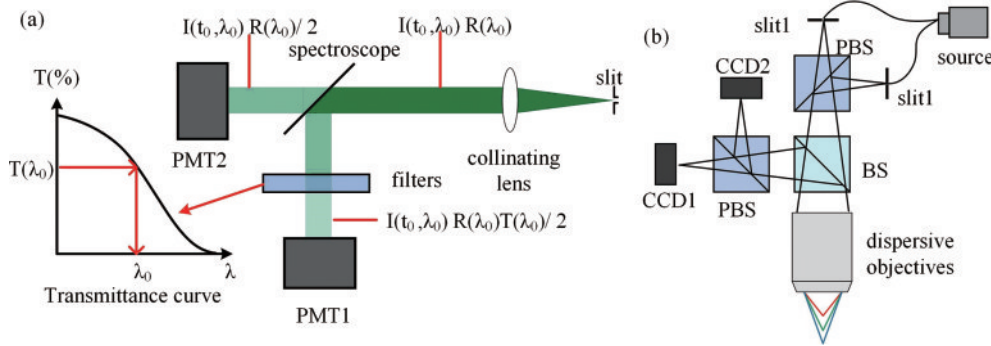


图 28 光谱检测装置。(a)基于光谱透过率^[44]; (b)基于两路 CCD 信号差分比^[83]

Fig. 28 Spectral detection devices. (a) Based on spectral transmittance^[44]; (c) based on the differential ratio of two CCD signals^[83]

3.4 共焦光谱处理方法

由于光谱仪是绝大多数光谱共焦测量系统采用的光谱检测装置,因此这里我们讨论的光谱处理相关工作都是针对光谱仪采集的光谱信号。理想情况下,光谱仪采集到的共焦光谱为一个带宽非常窄的脉冲信号,可以轻易且准确地确定峰值波长。然而受色散物镜像差、光谱仪自身像差,以及其他外部因素影响,光谱仪采集到的往往是一个展宽的共焦光谱信号,并伴随着一定量的随机噪声。因此准确高效地提取出共焦光谱的峰值波长是保障系统测量精度的重要条件。

对于光谱共焦测量系统,光谱仪通常采集的共焦光谱为单峰信号,较少出现双峰及多峰,因此在常规光谱测量应用中的峰值波长提取算法可直接移植到光谱共焦测量技术中。常用的峰值波长提取算法或者寻峰算法包括:极值法、最大光强法^[86]、质心法,以及质心法的改进形式^[20, 87],还有应用最广泛的函数拟合法。其中:极值法与最大光强法原理简单,但要求共焦光谱的

位自动光学检测设备(AOI)对时间的严格要求。Chen 等^[50, 84-85]同样利用两个子光路信号差分比来确定轴向聚焦位置。

无论是光谱仪,还是其他的光谱检测装置,其核心思想都是将光学系统的轴向聚焦位置转换为另一种更容易检测到且唯一确定的物理量,例如光波波长、光谱透过率等。光谱仪因其悠久的历史以及广泛的应用,是目前光谱共焦测量技术中最常用也是最稳定的光谱检测装置,但是光谱仪的检测速度一直是制约光谱共焦传感器检测速度的最大因素。光电倍增管可以极大地提升系统的测量速度,但其可利用的光谱范围较小,且波长分辨率低,反而降低了光谱共焦测量系统的性能。虽然光谱仪的检测速度无法与 PMT 匹敌,但它性能卓越且稳定,而且光谱仪自身的发展也可以直接应用到光谱共焦测量技术中,具有持续且可观的进步空间。因此无论是成熟的商用光谱共焦传感器还是用于科研的光谱共焦测量系统,光谱仪仍是主流的光谱检测装置。

带宽较窄,也容易受到随机噪声的影响,普适性不强;质心法以及改进形式的质心法则以光谱信号的强度为权重寻峰,算法简洁、运算量小,但也容易受随机噪声影响;函数拟合法则利用不同的拟合函数对原始光谱数据进行拟合来寻峰,常用的拟合函数包括抛物线函数^[36]、 sinc^2 函数^[88]、洛伦兹函数^[89]、高斯函数^[37, 59]等。拟合法的好处在于抗噪性高,因此峰值提取精度高,采用不同的拟合函数得到的效果也有所不相同,但是函数拟合法计算量大,在效率上并不占优。此外,针对光谱共焦测量技术中的光谱数据处理方法,特别是提升共焦光谱峰值波长提取精度及运算效率等方面涌现出许多优秀的成果。

中国工程物理研究院材料研究所 Bai 等^[66]提出一种改进的质心峰值提取算法,在像素间插入多个虚拟像素值,降低随机噪声产生的波动影响。经实验验证,采用改进的质心算法后,可将焦点波长测量波动范围减小 $0.012 \mu\text{m}$ 。此外,通过引入空间带通滤波器降低传统折射透镜的球差和投射损耗,并使用 X 形光纤耦

合器为系统增加一组参考臂,最大限度地减小光源变化的影响以及样品表面对光波的反射率变化。研究表明,该系统的位置稳定性可达 $\pm 0.36 \mu\text{m}$,轴向分

辨率为 $1 \mu\text{m}$ ^[67],如图 29 所示。该研究者提出的自参考色散校正方法适用于不同类型的光源和样品表面^[90],有效地提升了光谱共焦测量系统的轴向测量精度。

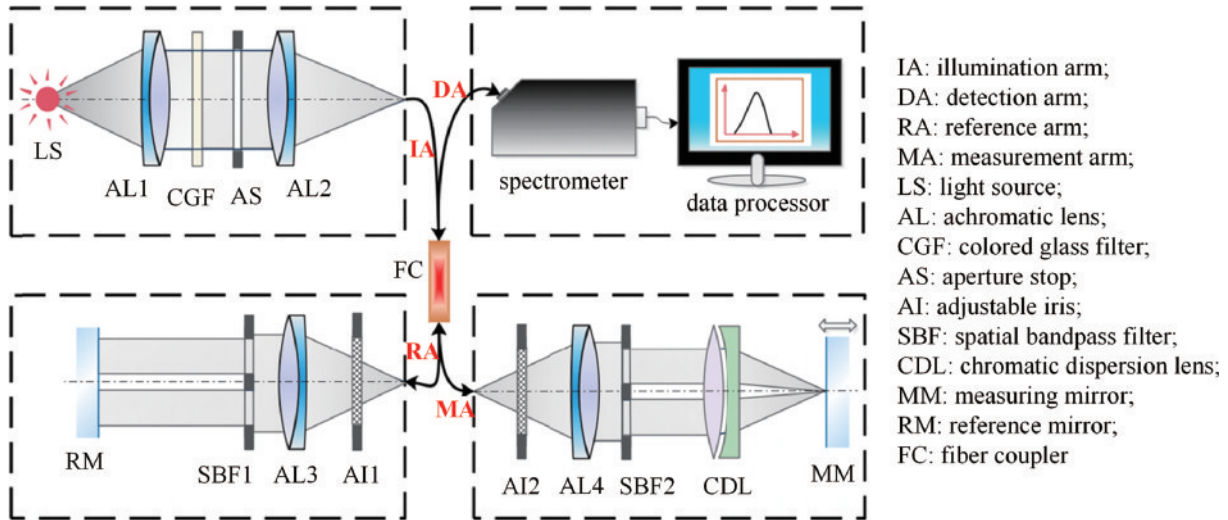


图 29 带有参考光谱的光谱共焦测量系统^[67]

Fig. 29 Chromatic confocal measurement system with reference spectrum^[67]

华中科技大学 Chen 等^[61, 91-92]提出修正差分拟合法和均值偏移算法进行寻峰,其寻峰精度与高斯拟合法相当,在寻峰效率上有大幅提升。该团队还建立了一种二维光谱信号模型来描述彩色共聚焦显微镜的信号强度-波长-位移特性,利用该模型,研究了共聚焦装置的尺寸特性、高色差物镜的位移波长特性和单色像差的影响。该团队表示利用该模型,可以进一步对光谱信号进行评估,以提高彩色共聚焦显微镜的测量性能。

神经网络的迅速发展也为光谱共焦信号处理方法提供了新思路,文献[93]提出一种基于广义回归神经网络(GRNN)的光谱拟合方法,其拟合精度优于传统的最值法、质心法、高斯拟合等算法,能够有效地抑制色散模型波长提取引起的模型波动,提高系统测量的分辨率与稳定性。

除了在算法层面的提升,硬件上的改进也可以提升测量速度,例如采用 FPGA 加速解码算法的计算,不仅可加快信号处理的时间,而且减少了数据传输消耗的时间。研究表明,该方案可在 CCD 工作周期内完成所有结果的计算,实现实时测量^[94]。

4 扫描光谱共焦测量系统关键技术研究进展

传统的点光谱共焦测量系统将轴向信息与波长编码,能够有效避免纵向扫描,但仍需要额外的横向扫描以获取三维形貌,这一过程是制约传感器测量效率的重要原因。为此,众多学者对光谱共焦测量系统进行了深入研究,提出多种扫描方案以提高测量精度与检测效率。根据扫描方式不同,可以分为线扫描与区域扫描,根据光路结构,可以分为同轴系统与双轴系统。

本小节从扫描方式、光路结构、光谱检测装置,以及光谱信息处理方法等方面,着重介绍扫描光谱共焦测量系统关键技术的研究进展。

4.1 扫描方式

以线状、多点线阵形式进行扫描的光谱共焦装置被称为光谱共焦线扫描系统,以区域点阵形式进行扫描的光谱共焦装置被称为光谱共焦区域扫描系统。这两种光谱共焦测量系统可以有效提高并行化扫描能力。

4.1.1 线扫描

光谱共焦线扫描系统能够直接得到横向的一维信息,结合轴向色散可以实现二维扫描。根据扫描线的实现方式的不同,可以将此类系统再细分为狭缝式扫描系统与移动光束式扫描系统。

狭缝式扫描是通过用狭缝孔径代替针孔来实现的。1998 年, Lin 等^[95]最先提出了这种线扫描光谱共焦技术,结构如图 30 所示。柱面镜将准直光会聚成一条线光源后通过狭缝孔径实现空间滤波,由衍射透镜实现轴向色散。配合 100 倍物镜使用时能够达到 $0.023 \mu\text{m}$ 的纵向分辨率,与使用传统共聚焦显微镜操作的表面轮廓仪相当。然而衍射元件的数值孔径较低且无法与物镜组合,导致元件数目较多,系统设计繁杂且体积庞大、建造成本高。Ruprecht 等^[96]采用与 Lin 等^[95]基本相同的扫描方案,其设计的光学系统具有 0.4 的数值孔径与 2.4 mm 的视场直径,测量范围为 0.7 mm,光谱带宽为 $55 \mu\text{m}$,但分辨率较差。

国内学者对狭缝式扫描系统也有研究。Chen 等^[97]提出的狭缝扫描光谱共焦系统将包含至少两个透镜的折射透镜组作为色散元件。与 Lin 等提出的系统相比,该系统能够实现较大的数值孔径,简化系统构成,克服

场曲导致聚焦点不在同一水平面的问题,也可以大幅降低研制成本。方案中介绍了 3 种类型的空间滤波器,

如图 31 所示。用一维小孔阵列代替狭缝可以有效降低信号串扰问题,而光纤束更易于调整小孔间距。

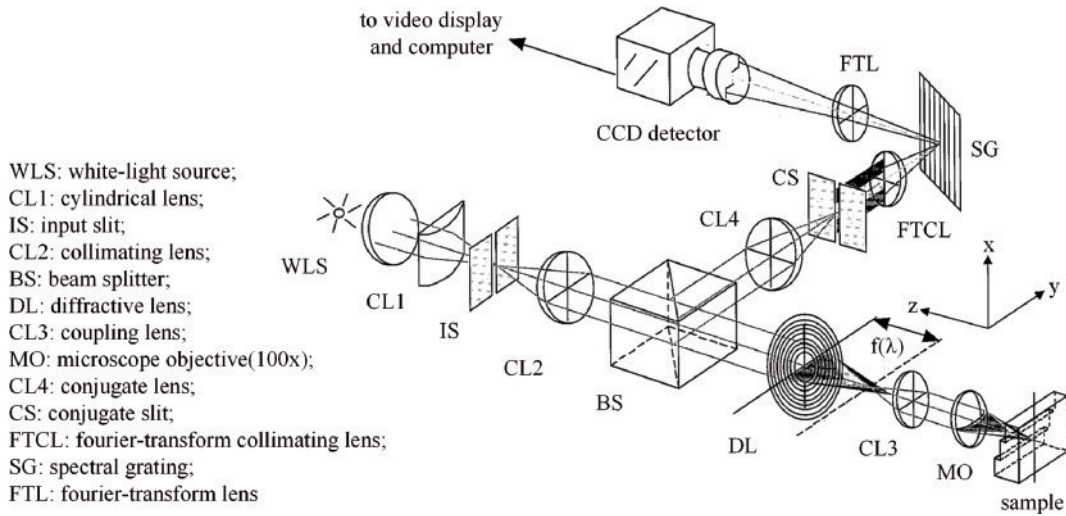


图 30 基于狭缝孔径的光谱共焦系统^[95]

Fig. 30 Chromatic confocal system based on slit aperture^[95]

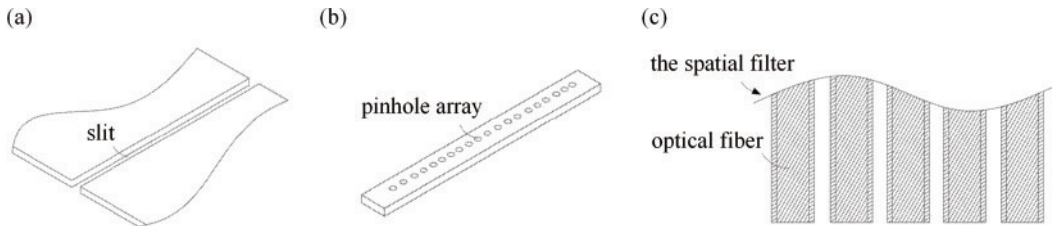


图 31 空间滤波器的类型。(a)狭缝孔径;(b)针孔阵列;(c)光纤阵列^[97]

Fig. 31 The type of spatial filter. (a) Slit; (b) pinhole array; (c) optical fiber array^[97]

由于光纤束有着比狭缝更好的光谱带宽,可以提高测量效率和测量精度,因此后续研究中多用光纤束实现线扫描^[98, 100],如图 32 所示。光谱共焦系统中的光学元件一般使用球面透镜。无论是通过哪种方式得到线光源,光束在通过球面透镜时都会受到轴外像差的影响,从而降低分辨率。因此,可使用多个柱面透镜代替球面镜,如图 33 所示^[99]。柱面透镜能够得到相对较大、非对称的数值孔径,有利于滤除离焦光,提高测量精度,而且可以降低像差的影响。然而,定制多个柱面镜的成本远高于常规球面镜。

无论是多点线阵列还是狭缝孔径都不可避免地会使探测器相邻像素之间信号产生串扰,导致测量精度下降,而通过光束移动产生扫描线的系统设计方案可以有效避免这个问题。移动光束扫描是通过使用振镜等设备改变光束在光瞳平面的入射角来完成的。此类系统的扫描速度足够快,而且光束质量高、光效率高。

扫描振镜通常通过反馈控制调节镜面倾斜角度来控制光束传播方向,并包含有角度传感器以测量镜子角度^[101-102]。图 34 为利用一组振镜实现横向点光束扫描的光谱共焦系统^[69]。准直光的传播由振镜 GM1、

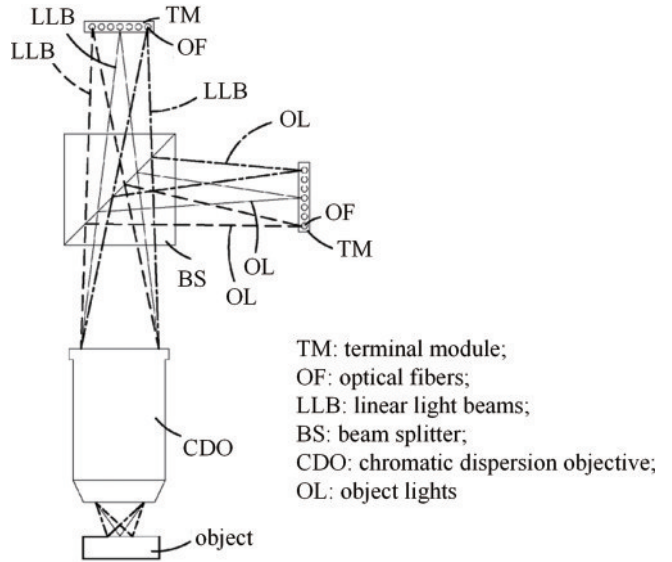


图 32 基于共轭光纤束的多点扫描系统^[98]

Fig. 32 Multi-point scanning system based on conjugate fiber bundles^[98]

GM2 控制,色散由平凸球面透镜实现,两个平凸透镜对 d 光为无焦系统,因此需要与物镜组合后成像在被测物表面。该装置在 500~600 nm 波段具有 69 μm 的

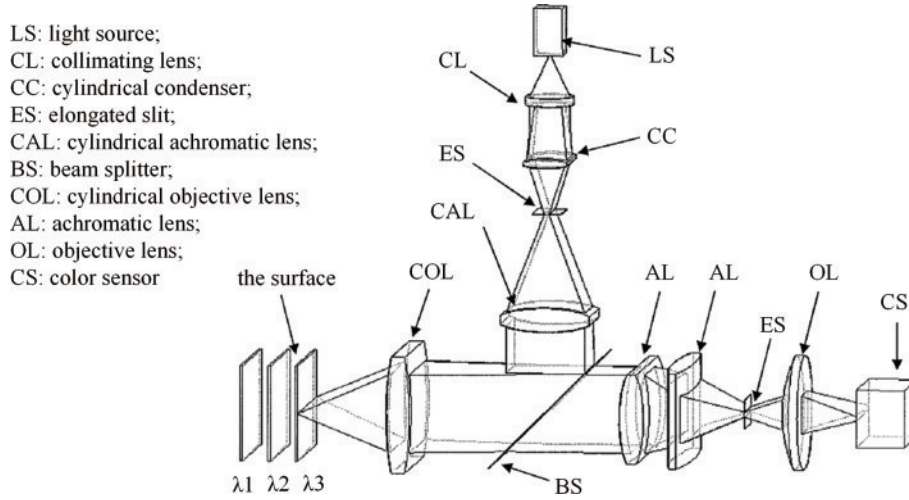


图 33 柱面镜线扫描光谱共焦结构示意图^[99]

Fig. 33 Structure of line scanning chromatic confocal based on cylindrical mirror^[99]

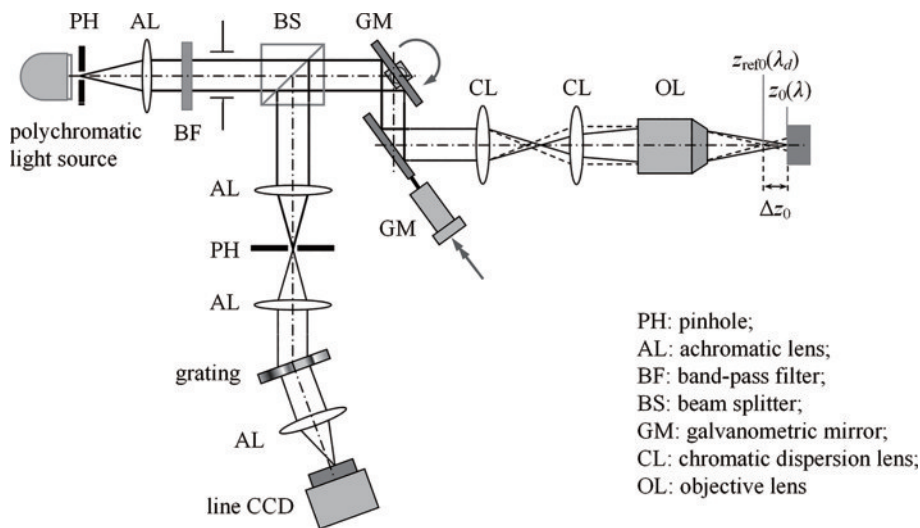


图 34 基于双振镜的光束移动式扫描系统^[69]

Fig. 34 Beam mobile scanning system based on double galvanometer^[69]

纵向扫描范围,深度分辨率达到 $0.72 \mu\text{m}$,振镜扫描范围为 $\pm 0.9^\circ$,横向视场为 $284 \mu\text{m} \times 284 \mu\text{m}$,横向分辨率为 $0.66 \sim 0.80 \mu\text{m}$ 。在此基础上,Ito 等^[101]利用单个振镜实现了一种光谱共焦集成扫描系统。通过控制扫描振镜,光点的平均扫描速度为 1 m/s ,可以以 1.25 frame/s 的帧速率获取 $200 \text{ pixel} \times 200 \text{ pixel}$ 的形貌和厚度图像,有利于实现在线扫描。图 35 为一套利用二维快速转向镜实现的扫描光谱共焦测量系统^[103],其原理与扫描振镜类似。数据驱动的校准程序能够精确组合快速转向镜的偏转角度与到样品表面的距离,因此可以直接获得正确重建的三维图像。此装置能够实现高达 1 frame/s 的帧速率和 $0.35 \text{ mm} \times 0.25 \text{ mm} \times 1.8 \text{ mm}$ 的测量体积,横向和轴向分辨率分别为 $2.5 \mu\text{m}$ 和 76 nm 。另外陈亮嘉教授团队^[70-71]采用单个振镜实现了测量光束的横向扫描,结构如图 36 所示。该系统的色散物镜采用双远心设计,可以满足无光学像差的全视场测量。所开发系统的测量偏差保持在

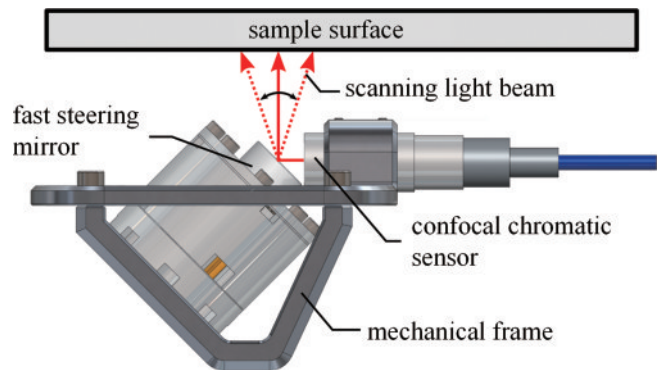


图 35 基于转向镜的光束移动式扫描系统^[103]

Fig. 35 Beam mobile scanning system based on steering mirror^[103]

$0.239 \mu\text{m}$ 以下,并且测量速度超过 8000 line/s 。

除了上面两种线扫描方式,还有一种比较特殊的线扫描系统。德国学者 Hillenbrand 等^[104]在 2013 年提出一种利用分段衍射光学元件实现多点扫描的方法,如图 37 所示。图 37(a)为光谱共焦多点传感器的结构

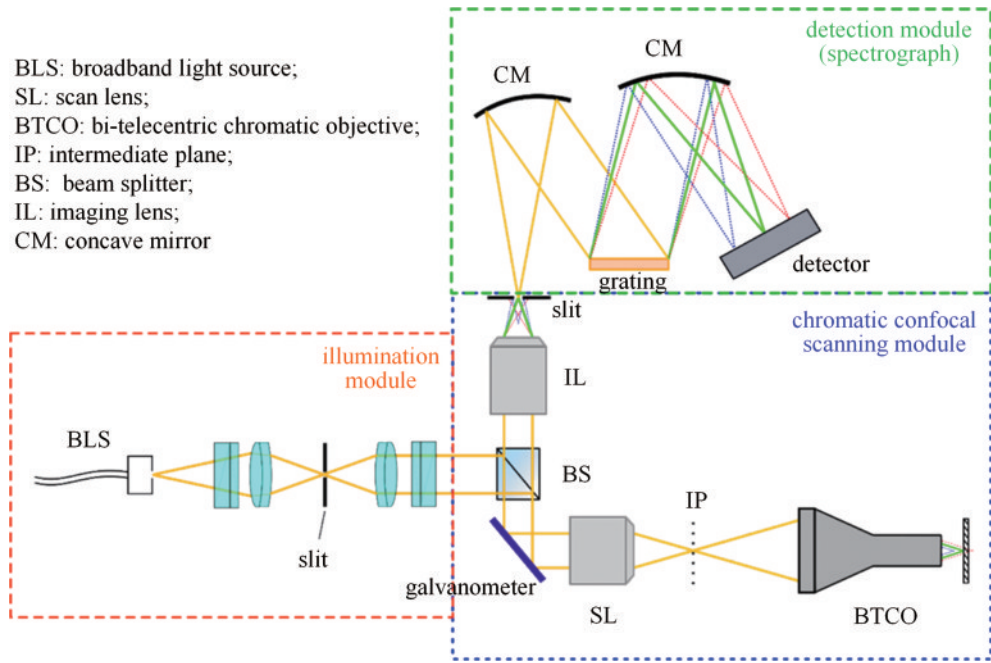


图 36 振镜扫描全视场光谱共焦系统^[70]

Fig. 36 Galvanometer scanning full field chromatic confocal system^[70]

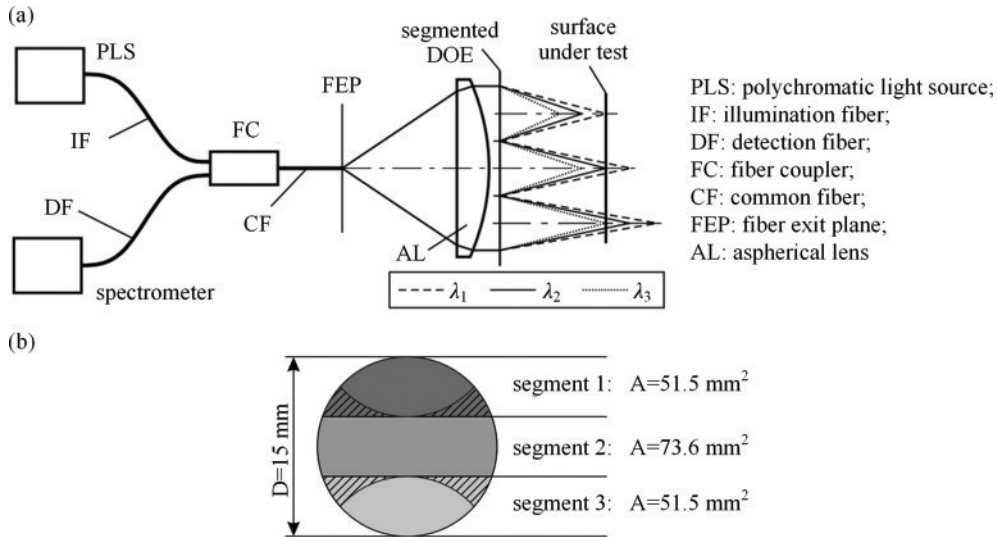


图 37 彩色共焦三点传感器^[104]。(a)结构示意图；(b)分段衍射元件的布局

Fig. 37 Chromatic confocal three-point sensor^[104]. (a) Structure diagram; (b) layout of segmented diffraction elements

示意图,该系统将总光谱带宽分为多个波段,每个波段通过分段衍射元件分配给不同的横向测量点。增色差透镜由非球面透镜和分段衍射元件组成,衍射透镜的分段见图 37(b),图中非阴影区域为有效通光区域。不同的横向通道具有不同的焦距范围,可以使用单个光谱仪并行评估多个通道。所展示的三点传感器具有 9 mm 的测量范围与 50 μm 的轴向分辨率,每个测量点间距为 5 mm。但衍射元件的多个衍射级次与光束分段的设计可能导致光能效率大幅降低。

不同类型的线扫描系统有各自的优劣。狭缝式扫描系统虽然有利于实现系统集成化、小型化,但扫描点之间容易因为信号串扰导致测量分辨率下降,扫描线

的长度也会受到狭缝或光纤束长度的限制。光束移动式扫描系统相当于使光源相对于透镜的光轴移动,从而移动测量光点,光束质量、光效率也较高。这种扫描方式的缺点在于仪器比较复杂,引入额外的光学元件也会引入像差与对准误差等问题。

4.1.2 区域扫描

光谱共焦区域扫描系统能够直接得到横向的二维信息,结合轴向色散可以实现三维扫描。根据包含光学器件类型的不同,此类系统可以再细分为针孔阵列扫描系统与可编程阵列扫描系统。

针孔阵列扫描通常会使用一个多孔器件,通过改变图像平面中光源与检测共轭点的位置实现点阵扫

描,可以有效地提高扫描速率。此类装置可以并行覆盖整个视场的一个区域,而不是单个点或线段。Tiziani 等^[105]于 1994 年首次将旋转的尼普科夫(Nipkow)圆盘与轴向光谱编码技术结合,得到了三维成像光谱共焦显微镜。Nipkow 转盘的制作比较复杂,对针孔的尺寸和位置要求严格,并且转盘上同一时刻只有一组针孔透光,视场小、光能利用率低。转盘转动时带来的振动误差会对测量精度造成影响,且长久使用后磨损,无论是扫描速度还是测量准确性都无法得到保证。此后还衍生出使用固定微透镜阵列与微透

镜阵列转盘的扫描系统方案,如图 38 所示^[96, 106-108]。微透镜(衍射菲涅耳元件)阵列中的每个微透镜都会重新准直物体反射的光,并成像在 CCD 彩色相机上。基于微透镜阵列转盘的扫描系统将微透镜呈螺旋状排列在旋转圆盘上,结合了 Nipkow 转盘的快速扫描速率与基于微透镜系统的高光效率。然而由于微透镜阵列周期的限制,衍射元件无法实现较大的数值孔径,因此系统的横向分辨率有所降低。此外,还会把杂散光传递到探测器之中,相邻像素点之间的信号串扰较为严重,从而降低了系统的信噪比与测量精度。

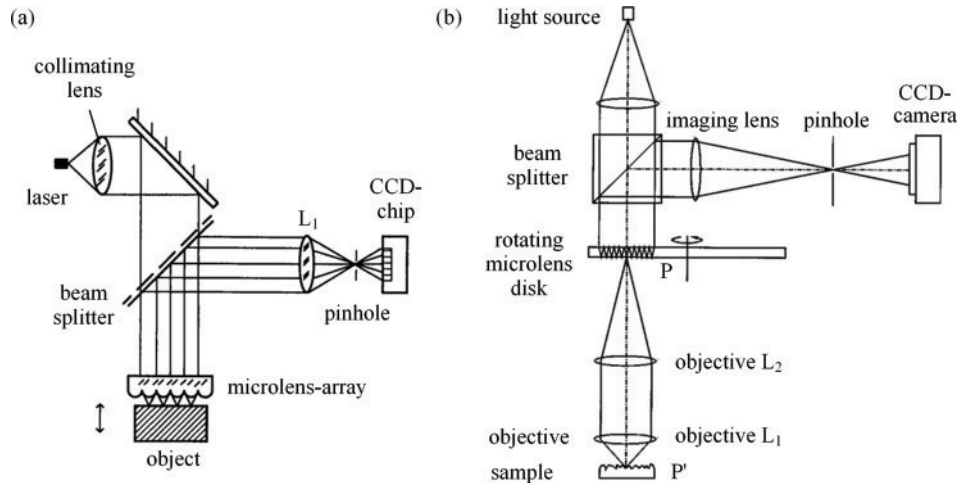


图 38 三维扫描系统装置图。(a)基于微透镜阵列^[107]; (b)基于微透镜转盘^[108]

Fig. 38 3D scanning system installation diagram. (a) Based on microlens array^[107]; (b) microlens-based turntables^[108]

使用以矩阵排列的固定针孔阵列的共焦显微镜被称为直视共焦显微镜,它不带有针孔阵列的旋转盘^[109-110]。将轴向光谱编码与其结合可以称之为光谱共焦直视扫描系统。Hillenbrand 等^[111]在 2012 年使用针孔阵列进行并行光谱信息编码。成像系统通过组合折射与衍射元件来产生特定的纵向色差。针孔阵列传感器的横向分辨率主要由针孔尺寸和针孔间距决定。减小针孔间距会提高系统的空间分辨率和能量效率,但针孔之间存在的串扰会导致光谱分辨率损失。为了减少横向通道之间的串扰,针孔的间隔在针孔直径的 10 倍以上^[112]。为了在提高空间分辨率的同时保持光谱分辨率,针孔阵列需要横向移动。于是,该学者在 2015 年将原本静态的小孔阵列与微机械制动器相结合,提出了可驱动针孔阵列扫描方法,系统结构如图 39 所示^[113]。微机械制动器的总运动范围为 200 μm ,在扫描模式下可以在静态针孔阵列的针孔间隔域得到纵向信息,并显著提高横向分辨率。驱动针孔阵列横向移动就能实现探测点在被测物表面的扫描,从而实现全场测量。

显然,小孔阵列由于针孔串扰问题还需要额外的机械运动,而可编程阵列扫描系统可以完全避免机械运动,提高三维形貌测量的速度。可编程阵列扫描系统使用具有数百万个单独控制像素的二维区域的微机电系

统(MEMS)实现横向扫描,例如数字微镜设备(DMD)^[114-116]。2000 年,Cha 等^[117]将带有衍射光学元件的光谱共焦系统和可以进行横向扫描的 DMD 组合。该系统的分辨率与精度与使用传统机械扫描得到的分辨率与精度相当。德国 Luo 等^[118]于 2020 年提出一种基于倾斜焦场的三维表面轮廓测量的直接区域扫描方法,图 40(a)为系统示意图。将自设计光源中的 DMD 与扫描系统中的 DMD 配合使用,可以让光谱编码在 DMD 的每一列上。对于色散物镜,每个波长的光都对应不同入射角度,且均为准直光入射,由此可以产生倾斜于原光轴的扫描焦线。照明场的倾斜由照明波长的横向变化和光学系统的轴向色差来实现,图 40(b)为不同的扫描平面图。该系统比传统针孔扫描系统的扫描速率提高了 300 倍以上,同时轴向不确定度增加到 2.5 倍。

除了 DMD 器件,液晶显示器(LCD)也可以作为虚拟针孔阵列和相应的检测针孔阵列^[119]。系统结构如图 41 所示,使用两块 LCD 分别作为照明处小孔和探测处小孔。横向扫描通过打开 LCD 上的不同像素来实现。光源出射光经过 LCD 所显示的针孔阵列后形成点阵光源,入射到色散镜头,被样品反射后进入探测部分。在该系统中没有机械结构的运动,避免了因机械运动带来的时间消耗,但其扫描速度会受到 LCD 帧率的限制。

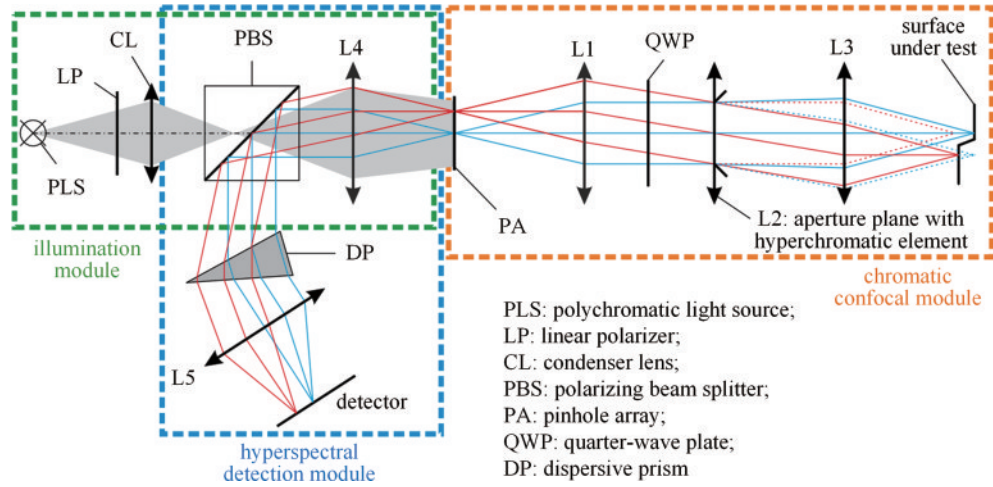


图 39 基于单针孔阵列的点阵扫描系统^[113]

Fig. 39 Dot matrix scanning system based on single pinhole array^[113]

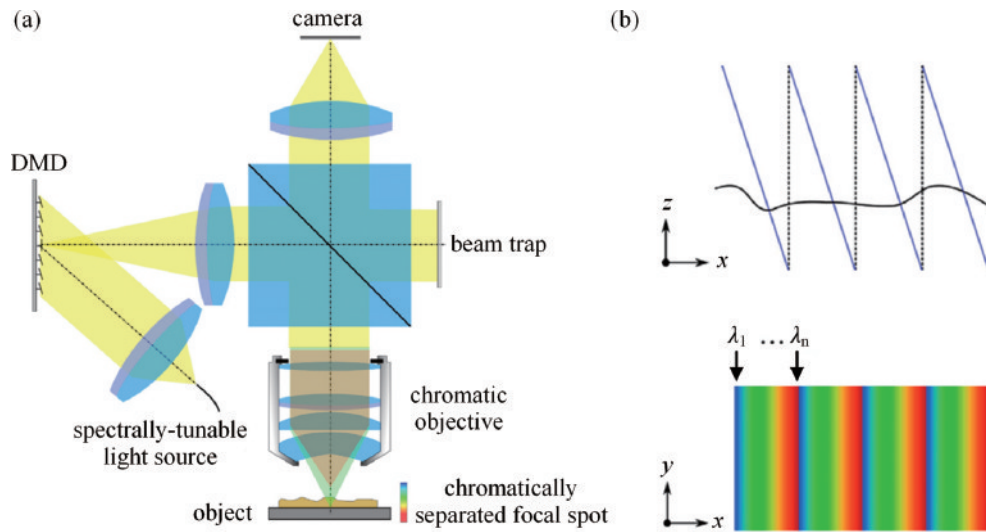


图 40 基于 DMD 的横向扫描系统^[118]。(a) 系统示意图；(b) 扫描平面图

Fig. 40 DMD-based lateral scanning system^[118]. (a) Schematic diagram of the system; (b) scanning floor plan

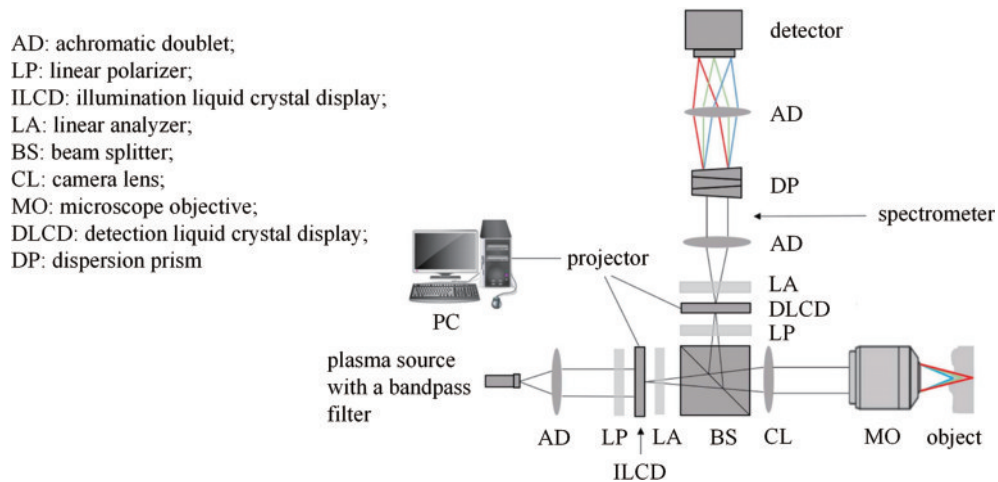


图 41 包含液晶显示器面板的光谱共焦扫描系统^[119]

Fig. 41 Chromatic confocal scanning system with LCD panel^[119]

Chen 等^[120-122]也对可编程阵列扫描系统进行了研究,光谱共焦系统的基本结构如图 42(a)所示,利

用 DMD 做光路开关,形成与探测器像素一一共轭的小孔阵列。图 42(b)展示了 DMD 的使用方式,通

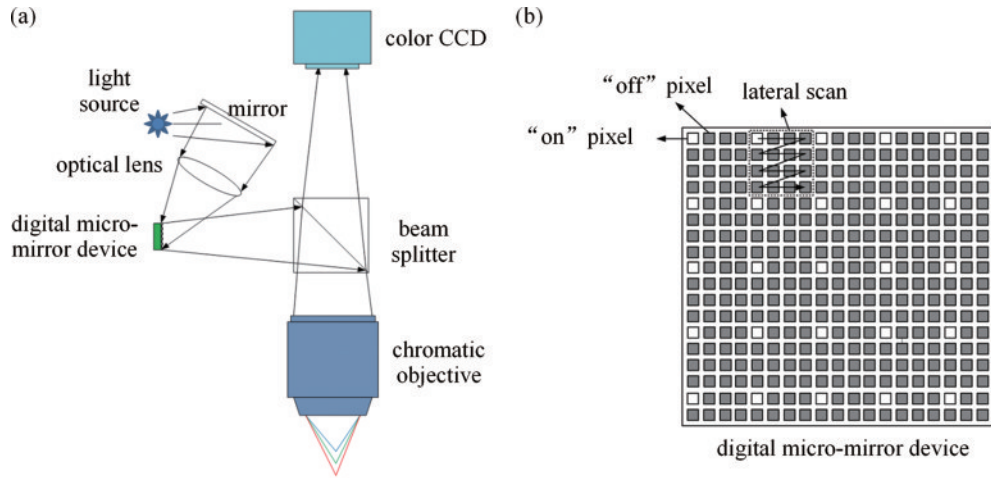


图 42 基于 DMD 的光谱共焦系统^[120]。(a) 系统示意图; (b) DMD 投影图案

Fig. 42 Chromatic confocal system based on DMD^[120]. (a) System diagram; (b) DMD projection pattern

过控制微镜的翻转以实现光路的通断,从而实现测量点在被测表面的横向移动,达成全场扫描测量的效果。

针孔阵列扫描是一种比较简便地实现区域扫描的方法,有着相对简单的系统结构。但由于针孔尺寸与间距的影响,这类系统普遍存在光效率低、反向散射噪声高的问题。为了降低串扰,小孔阵列扫描系统还需要额外的机械运动,可能会影响扫描速率。另一种可编程阵列扫描系统借助一些微机电设备实现无机械运

动的三维扫描,可以对针孔阵列的针孔尺寸和间距进行编程,从而能够控制扫描时间和光学性能。可编程阵列扫描系统能够有效缓解针孔信号的串扰问题,也提高了区域扫描方式的灵活性,但同样存在光效率较低的问题。

总之,光谱共焦测量系统在点扫描基础上有多种扫描方式。关于光谱共焦线扫描和区域扫描系统,仍有很多研究、发展的空间。表 3 汇总了扫描式光谱共焦测量系统的各种实现方法的技术特点。

表 3 光谱共焦测量系统扫描方式的性能对比

Table 3 Performance comparison of scanning modes of chromatic confocal measurement system

Scanning method		Merit	Limitation
Line scanning	The slit	Simple system structure	Multi-pinhole crosstalk and limited scan line length
	The moving beam	High beam quality and high light efficiency	Complex system structure and difficult system alignment
Area scanning	The pinhole array	Simple system structure and fast scanning speed	Multi-pinhole crosstalk, low light efficiency, and high backscatter noise
	The programmable array	Direct 3D scanning, flexible scanning method, and fast scanning speed	Low light efficiency and complex system structure

4.2 光路结构

第 4.1 节介绍的扫描式光谱共焦测量系统所用的光路结构均为光谱共焦技术中的典型同轴光路,即照明光路与测量光路同轴,是光谱共焦技术的典型光路结构。其中,色散物镜通常为双远心物镜,以确保不同波长的光形成的测量线长相同。图 43 为远心测量光束和非远心测量光束示意图^[70-71]。远心测量光在不同波长焦平面产生的测量线长相同,非远心测量光束则在不同波长焦平面上形成的线长不同,而且轴外视场光束倾斜照射,会损失部分反射光。因此,在同轴式扫描光谱共焦测量系统中,色散物镜通常采用双远心的光路结构。

除了同轴光路结构,还有另一种采用双轴共焦光路的技术路线。双轴共焦系统中照明光路与测量光路

分离,但二者的焦点重合。已有研究证明双轴共焦光路能够有效抑制离焦光和多重散射光,大幅提高了扫描系统的空间分辨率^[123-124]。

光谱共焦三角测量(CCT)传感器将光谱共焦技术与三角法测量原理相结合,这个定义最早由德国学者 Taphanel^[125]提出。在 2012 年与 2015 年,该学者分别提出了两种 CCT 结构,如图 44 所示的基于凹面衍射光栅的狭缝式线扫描 CCT 系统以及如图 45 所示的基于折射与衍射元件的线扫描 CCT 系统,其中,狭缝由光纤束实现^[126-128]。扫描系统中采用镜面对称的设计,并使用光学滤波片与线扫描多光谱相机来替代光谱仪,提高了系统测量速度。

华侨大学 Yu 等^[129-131]搭建了如图 46 所示的基于倾斜照明的双轴光谱共焦点扫描系统。为了提高测量透

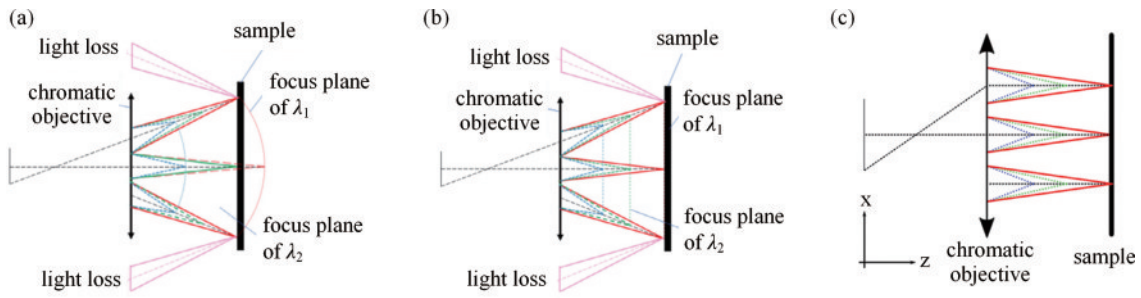


图 43 不同类型的物镜光路^[71]。(a)非平场非远心物镜；(b)平场非远心物镜；(c)平场远心物镜

Fig. 43 Different types of objective light path^[71]. (a) Non-flat field non-telecentric objective; (b) flat-field non-telecentric objective; (c) flat-field telecentric objective

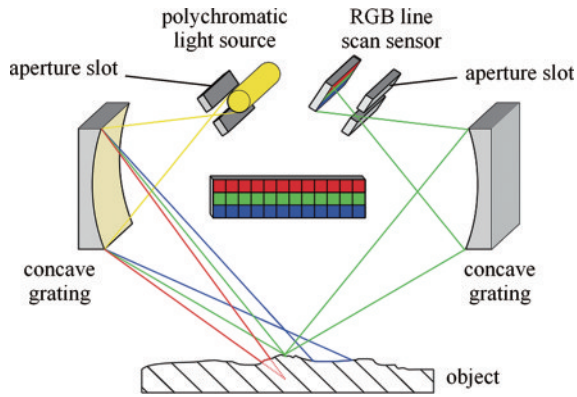


图 44 基于凹面光栅的 CCT 系统^[126]

Fig. 44 CCT system based on concave grating^[126]

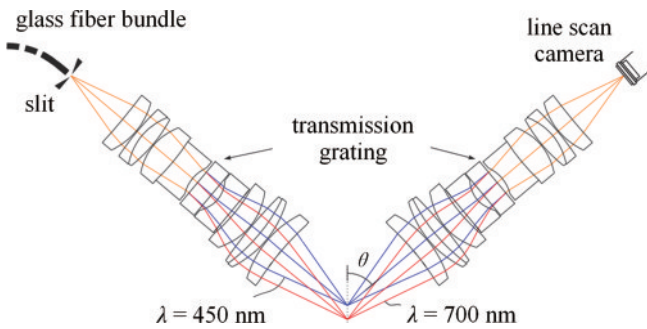


图 45 基于折射与衍射元件的 CCT 系统^[128]

Fig. 45 CCT system based on refraction and diffraction elements^[128]

明被测样品厚度时的信噪比与光能效率,对于透明样品,双轴系统的照射光束在样品上下表面聚焦得到两个光点,对应的两个成像光束在空气介质中相互平行而不重合,有利于波长信息的分离与提取。采用彩色相机代替光谱仪对成像光束中波长进行分析,只需要使用转换算法将颜色信息转换为波长值即可。

虽然光谱共焦双轴测量系统在扫描时存在与激光三角法相似的遮挡和阴影问题,而且此类系统对光学系统结构与系统装调的要求较高,但是其有着优越的分辨能力与应用需求,具有巨大的研究潜力。

4.3 光谱检测装置及光谱信息处理方法

点光谱共焦测量系统单次测量采集的光谱信息只

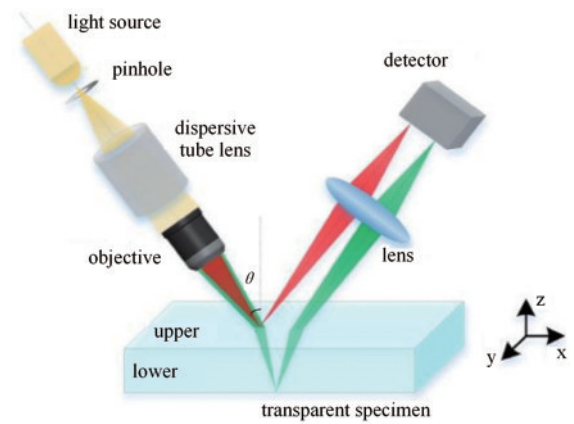


图 46 倾斜照明的双轴光谱共焦系统^[130]

Fig. 46 Biaxial chromatic confocal system for inclined illumination^[130]

包含轴向一个维度的光谱信息,因此使用线阵 CCD/COMS 构建的光谱仪可将所有信息展开并确定聚焦位置。而对于扫描式的光谱共焦测量系统,其单次测量所采集到的光谱信息增加了横向的维度,因此线阵 CCD/CMOS 无法将所有的光谱信息完全展开,需要使用可将横向测量点分开的面阵 CCD/CMOS 进行光谱分析。由此,面阵光谱仪或者面阵相机是扫描式光谱共焦测量系统中常用的光谱检测装置。

图 47 的线扫描光谱共焦测量系统使用透镜、反射光栅和面阵 CMOS 构成一套可同时测量 396 个扫描点的面阵光谱仪,每秒可测 32000 个测量点^[100]。

图 48 的测量系统使用快照高光谱相机采集单行测量点^[132]。在该系统中,快照相机入射端设置有与光源端处相同的针孔阵列来区分横向测量位置,而光谱测量系统内部采用色散棱镜对入射光谱进行横向分离。可通过使用不同楔形角的棱镜来控制不同光谱成分的分散程度。但是常规的色散棱镜会引入一定量的畸变像差,从而降低像质量,最终降低物体的共焦图像,为此可采用双阿米西棱镜(DAP)来构建面阵光谱仪^[119, 133-134],如图 49 所示,DAP 由一个高色散棱镜和两个低色散棱镜构成,产生的畸变非常小,从而可以提高评价线的像质,提高测量精度。同样地,面阵光谱仪性能上的提升也可以应用于扫描式的光谱共焦测量系统

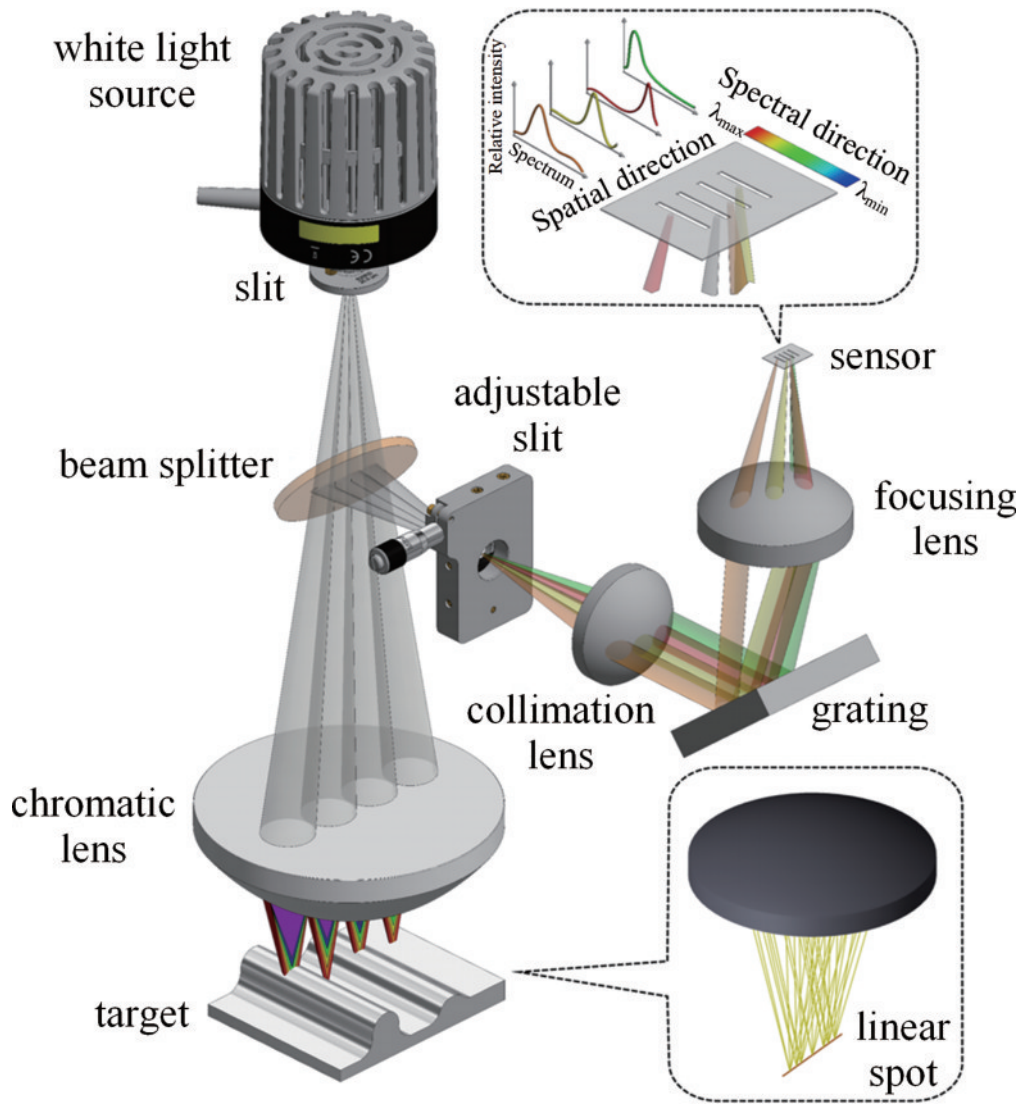


图 47 面阵光谱仪^[100]

Fig. 47 Area array spectrometer^[100]

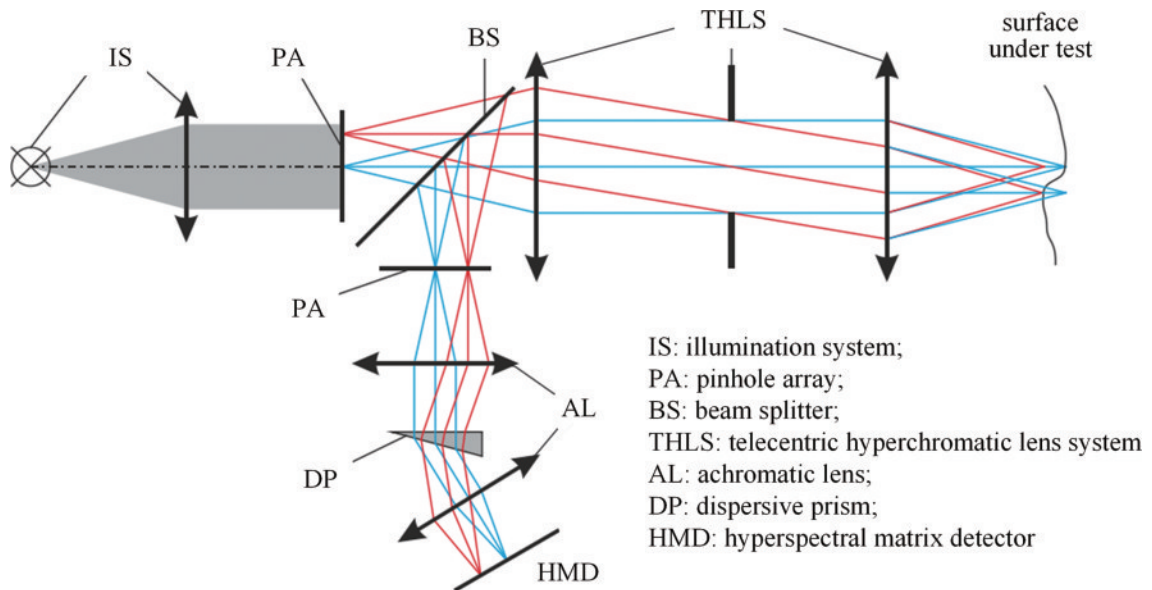


图 48 双针孔高光谱相机^[132]

Fig. 48 Double pinhole hyperspectral camera^[132]

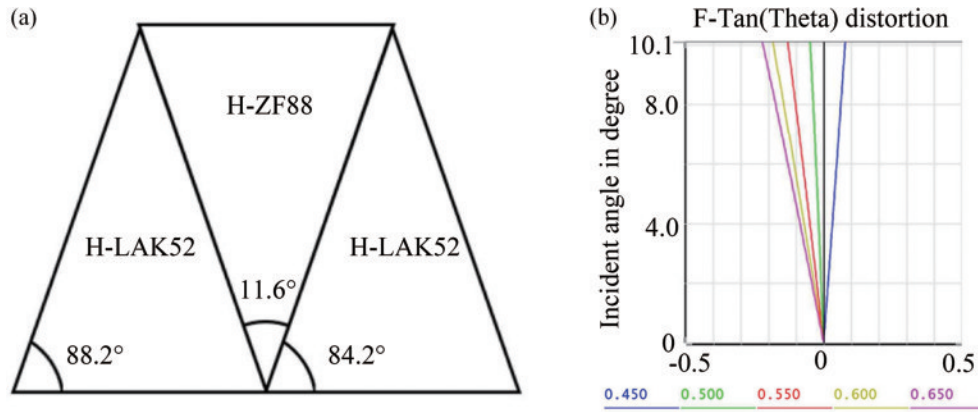


图 49 双阿米西棱镜^[119]
Fig. 49 Double Amici prism^[119]

中,这里不再详述。

对于双轴光路系统,其采用彩色相机代替光谱仪对成像光束中波长进行分析,相应的光谱处理方法也有所变化,它不再需要确定峰值波长,而是将 RGB 彩

色空间转换为 HSI 彩色空间,其中,H 值是与波长唯一相关的参量,通过转换后的 H 值可确定对应的聚焦波长,其原理如图 50 所示^[129-131],但用彩色相机在测量彩色被测物时会产生光谱偏移问题。

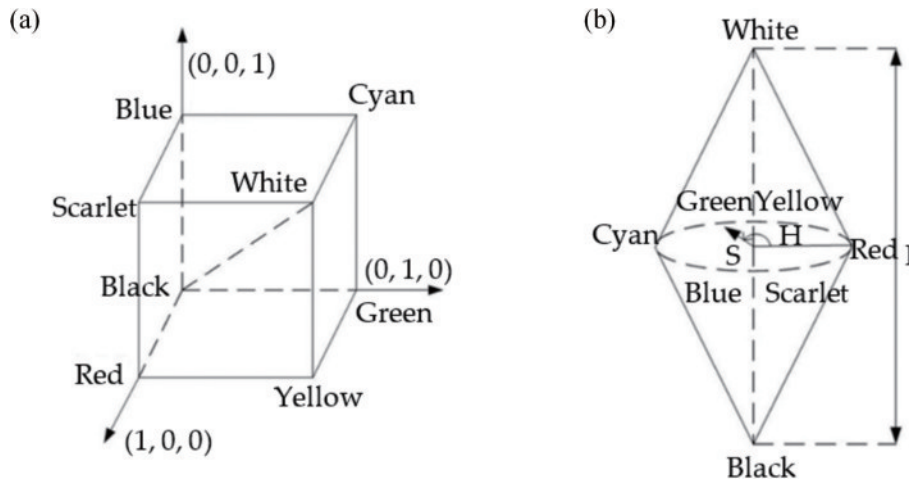


图 50 RGB 与 HSI 转换^[131]
Fig. 50 Conversion of RGB to HSI^[131]

在扫描式的光谱共焦测量系统中,根据技术路线的不同,对应的光谱测量装置和光谱处理方法也有所变化,但其本质过程依旧是通过各种方法确定聚焦在测量面上的波长信息,进而转换为高度信息。

以上从扫描方式、光路结构、光谱检测装置及光谱信息处理方法综述了扫描光谱共焦测量技术中各项关键技术的研究进展。相关领域各项技术的发展也推动着光谱共焦测量技术的持续提升,进一步满足生产制造中对精密测量的需求。

5 总结与展望

光谱共焦测量技术因其优异的测量精度和效率吸引着众多研究者进入该领域,并应用光谱共焦测量技术满足多种测量需求。回顾国内外光谱共焦测量技术的发展历程,大量程、高精度、高速测量一直都是研究者追求的目标,众多学者也都从宽光谱光源、色散物

镜、扫描方式、光谱检测装置,以及光谱数据处理方案等方面展开研究,共同推动光谱共焦测量技术的进步。目前以下几项仍是研发光谱共焦传感器要继续攻克的关键技术,具体包括:

1) 高亮且均匀的宽光谱光源。光源的光谱范围很大程度上决定了光谱共焦传感器的测量范围。光源的高强度为光谱仪提供了足够的入射光,是光谱仪实现高速采集的必要条件。光源的光谱特性则影响着测量信号的信噪比。因此一款光强足够且谱功率可调的宽光谱光源是实现高性能传感器的基础。

2) 像质优良的色散物镜。优良的成像质量是确保光谱共焦传感器高性能的根本。色散物镜的色散范围、数值孔径和色散特性曲线的线性度都会影响光谱共焦传感器的性能,但是这些性能需要根据不同的测量需求确定。真正影响传感器测量性能的是色散物镜的成像质量。色散物镜需要在宽光谱波段实现所需轴

向色差的同时,使每种波长的球差尽量减小以实现最佳的测量效果,这是一项非常具有挑战性的工作。

3) 高速灵敏的光谱仪。光谱仪的积分时间和数据传输时间是影响光谱共焦传感器采样速率的根本因素。光谱仪噪声的抑制也是保障光谱共焦传感器测量精度的重要因素。因此研究与开发高速光谱仪是光谱共焦传感器测量领域的一个重要研究方向。

4) 高效准确的峰值提取算法。准确快速的峰值波长提取算法也是保障光谱共焦传感器测量精度,提升测量效率的重要因素。

5) 高效稳定的扫描方式。扩展共焦传感器横向方向上测量范围和分辨率、提升测量效率是扫描式光谱共焦传感器的研究热点。稳定且快速的横向扫描或者区域扫描技术是多维度提升光谱共焦传感器测量效率的一个有效途径。

光谱共焦测量技术因其自身独特的技术优势,受到了工业检测领域的青睐,随着我国智能制造的不断发展,光谱共焦测量技术及其应用也迎来了发展的黄金期,将朝着更精确、更快速、更便携的方向进一步发展,助力我国制造业迈向更智能的时代。

参 考 文 献

- [1] Molesini G, Pedrini G, Poggi P, et al. Focus-wavelength encoded optical profilometer[J]. Optics Communications, 1984, 49(4): 229-233.
- [2] Stil. STIL-General Catalogue[EB/OL]. [2023-09-05]. https://www.marposs.com/media/19004/d-1/t-file/STIL-Brochure_CN.pdf.
- [3] Precitec. CHRcodile C[EB/OL]. [2023-09-05]. <https://www.precitec.cn/optical-3d-metrology/products/point-sensors/chrocodile-c/>.
- [4] Micro-Epsilon. ConfocalDT[EB/OL]. [2023-09-05]. <http://www.micro-epsilon.com.cn/uploads/soft/220608/cat-confocalDT-cn.pdf>.
- [5] Lmi Technology. FocalSpec 3D Line Confocal Sensors Technical Specifications[EB/OL]. [2023-09-05]. <https://lmi3d.com/resource/focalspec-3d-line-confocal-sensors-technical-specifications/>.
- [6] Keyence. Confocal Displacement Sensor CL-3000 series[EB/OL]. [2023-09-05]. <https://www.keyence.com.cn/products/measure/laser-1d/cl-3000/>.
- [7] Omron. Fibre optic coaxial displacement sensors ZW-7000/5000 series[EB/OL]. [2023-09-05]. https://www.fa.omron.com.cn/data_pdf/cat/zw-7000_5000_sdne-cn5-004_4_10.pdf?id=3500.
- [8] Thinkfocus. Chromatic confocal displacement sensor[EB/OL]. [2023-09-05]. <http://www.think-focus.com/product/82.html>.
- [9] Light-Technology. Chromatic confocal displacement sensor D40A33XL series[EB/OL]. [2023-09-05]. <https://www.lighte-tech.com/show-37-619.html>.
- [10] Hypersen. Chromatic confocal sensor HPS-CFL025[EB/OL]. [2023-09-05]. <http://hypersen.com.cn/product/detail/30.html>.
- [11] Cohen-Sabban J, Gaillard-Groleas J, Crepin P J. Extended-field confocal imaging for 3D surface sensing[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5252: 366-371.
- [12] Hillenbrand M, Mitschunas B, Wenzel C, et al. Hybrid hyperchromats for chromatic confocal sensor systems[J]. Advanced Optical Technologies, 2012, 1(3): 187-194.
- [13] Miks A, Novak J, Novák P. Theory of hyperchromats with linear longitudinal chromatic aberration[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5945: 59450Y.
- [14] Novak J, Miks A. Hyperchromats with linear dependence of longitudinal chromatic aberration on wavelength[J]. Optik, 2005, 116(4): 165-168.
- [15] Miks A, Novak J, Novák P. Theory of chromatic sensor for topography measurements[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6609: 66090U.
- [16] 刘乾, 杨维川, 袁道成, 等. 光谱共焦位移传感器的色散物镜设计[J]. 光电工程, 2011, 38(7): 131-135.
Liu Q, Yang W C, Yuan D C, et al. Design of dispersive objective for chromatic confocal displacement sensor[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(7): 131-135.
- [17] Liu Q, Yang W C, Yuan D C, et al. Optimization and selection of materials for dispersive objective of chromatic confocal microscope[J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(8): 111-117.
刘乾, 杨维川, 袁道成, 等. 光谱共焦显微镜中色散物镜材料的优化选择[J]. 光电工程, 2012, 39(8): 111-117.
- [18] 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 Q, Yang W C, Yuan D C, et al. Design of linear dispersive objective for chromatic confocal microscope[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(10): 2473-2479.
- [19] 刘乾, 王洋, 杨维川, 等. 线性色散设计的光谱共焦测量技术[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(5): 58-63.
Liu Q, Wang Y, Yang W C, et al. Chromatic confocal microscope with linear dispersive objective[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(5): 58-63.
- [20] 王津楠. 光谱共焦位移传感器研究与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
Wang J N. Research and design of spectral confocal displacement sensor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [21] Cui C C, Li H, Yu Q, et al. Design of adjustable dispersive objective lens for chromatic confocal system[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(4): 875-883.
- [22] 王安苏. 基于光谱共焦原理的三维表面形貌测量的光学系统研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2018.
Wang A S. Research on optical system for measuring three-dimensional surface topography based on spectral confocal principle[D]. Suzhou: Soochow University, 2018.
- [23] 杨锐, 云宇, 解滨, 等. 光谱共焦三维形貌仪用超大色散线性物镜组设计[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(5): 051002.

- Yang R, Yun Y, Xie B, et al. Design of dispersive objective lens of large linear chromatic confocal 3D surface profiler[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30(5): 051002.
- [24] Wang X J, Ma T. Chromatic confocal sensor with dual dispersion for extending the measuring range[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 12072: 120720P.
- [25] Yang J, Ma T, Huang T T. Design of chromatic confocal quantitative inverse dispersive objective lens[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11763: 117638T.
- [26] 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.
- [27] Li C Y, Li K, Liu J H, et al. Design of a confocal dispersion objective lens based on the GRIN lens[J]. *Optics Express*, 2022, 30(24): 44290-44299.
- [28] 王玉龙, 李杰, 侯溪, 等. 基于衍射色散原理的光谱共焦位移测量技术综述[J]. *半导体光电*, 2023, 44(1): 1-7. Wang Y L, Li J, Hou X, et al. Review of chromatic confocal displacement measurement techniques based on diffractive dispersion[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2023, 44(1): 1-7.
- [29] Dobson S L, Sun P C, Fainman Y. Diffractive lenses for chromatic confocal imaging[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(20): 4744-4748.
- [30] Reyes J G, Meneses J, Plata A, et al. Axial resolution of a chromatic dispersion confocal microscopy[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5622: 766-771.
- [31] Garzón R J, Meneses J, Tribillon G, et al. Chromatic confocal microscopy by means of continuum light generated through a standard single-mode fibre[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2004, 6(6): 544-548.
- [32] 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.
- [33] Pruss C, Ruprecht A, Körner K, et al. Diffractive elements for chromatic confocal sensors[EB/OL]. [2023-08-09]. https://www.dgao-proceedings.de/download/106/106_a1.pdf.
- [34] Ruprecht A K, Pruss C, Tiziani H J, et al. Confocal micro-optical distance sensor: principle and design[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5856: 128-135.
- [35] Sinzinger S, Arrizon V, Jahns J. Confocal imaging with diffractive optics and broadband light sources[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3002: 186-189.
- [36] 邓楠. 基于菲涅耳透镜的光谱共焦测量系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022. Deng N. Research on spectral confocal measurement system based on Fresnel lens[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [37] 宁书铭. 光谱共焦位移测量关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021. Ning S M. Research on key technology of spectral confocal displacement measurement[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- [38] Liu T, Wang J Y, Liu Q, et al. Chromatic confocal measurement method using a phase Fresnel zone plate[J]. *Optics Express*, 2022, 30(2): 2390-2401.
- [39] Berkovic G, Shafir E, Golub M A, et al. Multi-wavelength fiber-optic confocal position sensor with diffractive optics for enhanced measurement range[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6619: 66190U.
- [40] Berkovic G, Shafir E, Golub M A, et al. Multiple-fiber and multiple-wavelength confocal sensing with diffractive optical elements[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, 8(7): 1089-1092.
- [41] Rayer M, Mansfield D. Chromatic confocal microscopy using staircase diffractive surface[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(23): 5123-5130.
- [42] Förster E, Stumpf D, 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.
- [43] Hutley M C, Stevens R F. The use of a zone-plate monochromator as a displacement transducer[J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1988, 21(11): 1037-1044.
- [44] 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.
- [45] Park H M, Kwon U, Joo K N. Vision chromatic confocal sensor based on a geometrical phase lens[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(10): 2898-2901.
- [46] Alfano R R, Shapiro S L. Emission in the region 4000 to 7000 Å via four-photon coupling in glass[J]. *Physical Review Letters*, 1970, 24(11): 584-587.
- [47] Shi K B, Li P, Yin S Z, et al. Chromatic confocal microscopy using supercontinuum light[J]. *Optics Express*, 2004, 12(10): 2096-2101.
- [48] Shi K B, Nam S H, Li P, et al. Wavelength division multiplexed confocal microscopy using supercontinuum [J]. *Optics Communications*, 2006, 263(2): 156-162.
- [49] Minoni U, Manili G, Bettoni S, et al. Chromatic confocal setup for displacement measurement using a supercontinuum light source[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 49: 91-94.
- [50] 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.
- [51] Jeong D, Park S J, Jang H, et al. Swept-source-based chromatic confocal microscopy[J]. *Sensors*, 2020, 20(24): 7347.
- [52] Oceanoptics. Oceanoptics Catalog 2012[EB/OL]. [2023-09-05]. http://www.ainnotech.com/ainnotech/pdf/06/1_1/4OCE-HR4000+CG-UV-NIR.pdf.
- [53] Zolix. GUANGPU-V20[EB/OL]. [2023-09-05]. <https://www.zolix.com.cn/filespace/files/GUANGPU-V20.pdf>.

- [54] Nichia. NVSW119C[EB/OL]. [2023-09-05]. [https://led-ld.nichia.co.jp/api/data/spec/led/NVSW119CT-C\(4841B\)Crxx%20R70.pdf](https://led-ld.nichia.co.jp/api/data/spec/led/NVSW119CT-C(4841B)Crxx%20R70.pdf).
- [55] Nktphotonics. SuperK FIANIUM Datasheet[EB/OL]. [2023-09-05]. <https://contentnktphotonics.s3.eu-central-1.amazonaws.com/SuperK-FIANIUM/SuperK%20FIANIUM%20Datasheet.pdf>.
- [56] Hamamatsu. EQ-99X LDLS[EB/OL]. [2023-09-05]. <http://www.hamamatsu.com.cn/UserFiles/upload/file/20200323/EQ99X-CAL-data-sheet.pdf>.
- [57] SeoulsemiconSeoul. SunLike[EB/OL]. [2023-09-05]. <http://www.seoulsemicon.com/cn/technology/SunLike/>.
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] 武芄樾. 光谱共焦位移传感器设计技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2012.
Wu P Y. Research on design technology of spectral confocal displacement sensor[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2012.
- [61] 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.
- [62] Olsovsky C, Shelton R, Carrasco-Zevallos O, et al. Chromatic confocal microscopy for multi-depth imaging of epithelial tissue[J]. *Biomedical Optics Express*, 2013, 4(5): 732-740.
- [63] 高鑫, 邓文怡, 牛春晖. 基于彩色共焦的位移测量系统研究[J]. *光学技术*, 2012, 38(1): 83-88.
Gao X, Deng W Y, Niu C H. Research of displacement measurement system based on chromatic confocal[J]. *Optical Technique*, 2012, 38(1): 83-88.
- [64] 金博石, 邓文怡, 牛春晖, 等. 光谱共焦测量系统中的色散透镜组设计[J]. *光学技术*, 2012, 38(6): 660-664.
Jin B S, Deng W Y, Niu C H, et al. Design of dispersive lens group for chromatic confocal measuring system[J]. *Optical Technique*, 2012, 38(6): 660-664.
- [65] 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.
Wu Y Q. Development of spectral confocal displacement measurement system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [66] 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.
- [67] Bai J, Li X H, Zhou Q, et al. Improved chromatic confocal displacement-sensor based on a spatial-bandpass-filter and an X-shaped fiber-coupler[J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 10961-10973.
- [68] Liu C M, Lu G Y, Liu C Y, et al. Compact chromatic confocal sensor for displacement and thickness measurements [J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 34(5): 055104.
- [69] 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.
- [70] Chen H R, Chen L C. Quasi-area-scan chromatic confocal microscopy for full-field surface profilometry with sub-micrometer accuracy[J]. *SSRN Electronic Journal*, 2022: 4147703.
- [71] 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.
- [72] Utter S B, Crespo López-Urrutia J R, Beiersdorfer P, et al. Design and implementation of a high-resolution, high-efficiency optical spectrometer[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2002, 73(11): 3737-3741.
- [73] Zeng C B, Han Y, Liu B, et al. Optical design of a high-resolution spectrometer with a wide field of view[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 140: 106547.
- [74] Lee K S, Thompson K P, Rolland J P. Broadband astigmatism-corrected Czerny-Turner spectrometer[J]. *Optics Express*, 2010, 18(22): 23378-23384.
- [75] Xue Q S. Astigmatism-corrected Czerny-Turner imaging spectrometer for broadband spectral simultaneity[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(10): 1338-1344.
- [76] Zhong X, Zhang Y, Jin G. High performance Czerny-Turner imaging spectrometer with aberrations corrected by tilted lenses[J]. *Optics Communications*, 2015, 338: 73-76.
- [77] Xia G, Qu B X, Liu P, et al. Astigmatism-corrected miniature czerny-turner spectrometer with freeform cylindrical lens[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(8): 081201.
- [78] Xia G, Wu S, Wang G D, et al. Astigmatism-free Czerny-Turner compact spectrometer with cylindrical mirrors[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(32): 9069-9073.
- [79] Feng Z W, Xia G, Zhang L, et al. Advantages of multiple field of view spectrometer[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 160: 107308.
- [80] Wu S, Wang T, Huang C, et al. Advanced optical design of Czerny-Turner spectrometer with high flux and low aberration in broadband[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(11): 3077-3083.
- [81] Zhou Q, Zou Z Y. Astigmatism-free Czerny-Turner spectrometer with a low f-number by a bicylinder lens[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(27): 7985-7990.
- [82] Feng Z W, Xia G, Lu R S, et al. High-performance ultra-thin spectrometer optical design based on coddington's equations[J]. *Sensors*, 2021, 21(2): 323.
- [83] Chen L C, Nguyen D T, Chang Y W. Precise optical surface profilometry using innovative chromatic differential confocal microscopy[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(24): 5660-5663.
- [84] 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.
- [85] Sato R, Chen C, Matsukuma H, et al. A new signal processing method for a differential chromatic confocal probe with a mode-locked femtosecond laser[J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(9): 094004.
- [86] Shi K B, Li P, Yin S Z, et al. Surface profile measurement using chromatic confocal microscopy[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5606: 124-131.
- [87] Ruprecht A K, Wiesendanger T F, Tiziani H J. Signal evaluation for high-speed confocal measurements[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(35): 7410-7415.
- [88] Tan J B, Liu C G, Liu J, et al. Sinc² fitting for height extraction in confocal scanning[J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(2): 025006.
- [89] Ćwikła M, Zakrzewski A, Koruba P, et al. Preliminary design of longitudinal chromatic aberration sensor implemented to laser processing head[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11385: 1138502.
- [90] Bai J, Li X H, Wang X H, et al. Self-reference dispersion correction for chromatic confocal displacement measurement[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 140: 106540.
- [91] 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.
- [92] 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.
Zhu H. Research on signal processing and calibration of spectral confocal displacement sensor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [93] 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.
- [94] Yuan Y, Liu T, Zhang L, et al. FPGA-based detection module for the chromatic confocal measurement sensor [C]//2021 International Conference of Optical Imaging and Measurement (ICOIM), August 27-29, 2021, Xi'an, China. New York: IEEE Press, 2021: 178-181.
- [95] 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.
- [96] Ruprecht A K, Koerner K, Wiesendanger T F, et al. Chromatic confocal detection for high-speed microtopography measurements[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5302: 53-60.
- [97] Chen L C, Chen C N, Chang Y W. Slit-scan multi-wavelength confocal lens module and slit-scan microscopic system and method using the same: US20100188742[P]. 2010-07-29.
- [98] Chen L C, Wu Y L, Chang Y W. Linear chromatic confocal microscopic system: US8599372[P]. 2013-12-03.
- [99] Deng J W, Zhang Z Y, Chen F H, et al. Chromatic confocal scanning apparatus: US20140043619[P]. 2014-02-13.
- [100] 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.
- [101] 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.
- [102] Aylward R P. Advanced galvanometer-based optical scanner design[J]. *Sensor Review*, 2003, 23(3): 216-222.
- [103] Wertjanz D, Kern T, Csencsics E, et al. Compact scanning confocal chromatic sensor enabling precision 3-D measurements[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(25): 7511-7517.
- [104] Hillenbrand M, Lorenz L, Kleindienst R, et al. Spectrally multiplexed chromatic confocal multipoint sensing[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22): 4694-4697.
- [105] Tiziani H J, Uhde H M. Three-dimensional image sensing by chromatic confocal microscopy[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(10): 1838-1843.
- [106] Tiziani H J, Uhde H M. Three-dimensional analysis by a microlens-array confocal arrangement[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(4): 567-572.
- [107] Tiziani H J, Achi R, Kramer R N. Chromatic confocal microscopy with microlenses[J]. *Journal of Modern Optics*, 1996, 43(1): 155-163.
- [108] Tiziani H J, Wegner M, Steudle D. Confocal principle for macro- and microscopic surface and defect analysis[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1): 32-39.
- [109] Fewer D T, Hewlett S J, McCabe E M, et al. Direct-view microscopy: experimental investigation of the dependence of the optical sectioning characteristics on pinhole-array configuration[J]. *Journal of Microscopy*, 1997, 187(1): 54-61.
- [110] 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.
- [111] Hillenbrand M, Grewe A, Bichra M, et al. Chromatic information coding in optical systems for hyperspectral imaging and chromatic confocal sensing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8550: 85500D.
- [112] McCabe E M, Fewer D T, Ottewill A C, et al. Direct-view microscopy: optical sectioning strength for finite-sized, multiple-pinhole arrays[J]. *Journal of Microscopy*, 1996, 184(2): 95-105.
- [113] Hillenbrand M, Weiss R, Endrödy C, et al. Chromatic confocal matrix sensor with actuated pinhole arrays[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(15): 4927-4936.
- [114] 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.
- [115] Hanley Q S, Verveer P J, Gemkow M J, et al. An optical sectioning programmable array microscope implemented with a digital micromirror device[J]. *Journal of Microscopy*, 1999, 196(3): 317-331.
- [116] 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.
- [117] Cha S, Lin P C, Zhu L J, et al. Nontranslational three-dimensional profilometry by chromatic confocal microscopy with dynamically configurable micromirror scanning[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(16): 2605-2613.
- [118] 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.
- [119] Cui Q, Liang R G. Chromatic confocal microscopy using liquid crystal display panels[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(8): 2085-2090.
- [120] Chen L C, Li H W, Chang Y W. Full-field chromatic confocal surface profilometry employing DMD correspondence for minimizing lateral cross talks[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8321: 832120.
- [121] Chen L C. Full-field chromatic confocal surface profilometry employing digital micromirror device correspondence for minimizing lateral cross talks[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(8): 081507.
- [122] 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.
- [123] Stelzer E H K, Lindek S. Fundamental reduction of the observation volume in far-field light microscopy by detection orthogonal to the illumination axis: confocal theta microscopy[J]. *Optics Communications*, 1994, 111(5/6): 536-547.
- [124] Wang D, Chen Y, Wang Y, et al. Comparison of line-scanned and point-scanned dual-axis confocal microscope performance[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(24): 5280-5283.
- [125] Taphanel M. Device for optically determining the surface geometry of a three-dimensional sample: WO2013064395 [P/OL] 2013-10-15[2023-08-09]. <https://patentscope2.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2013064395>.
- [126] Taphanel M. Filter optimization approach for a chromatic confocal triangulation sensor[EB/OL]. [2023-06-09]. <https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/379955>.
- [127] Taphanel M, Beyerer J. Fast 3D in-line sensor for specular and diffuse surfaces combining the chromatic confocal and triangulation principle[C]//2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, May 13-16, 2012, Graz, Austria. New York: IEEE Press, 2012: 1072-1077.
- [128] Taphanel M, Zink R, Längle T, et al. Multiplex acquisition approach for high speed 3D measurements with a chromatic confocal microscope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9525: 95250Y.
- [129] Yu Q, Zhang Y L, Shang W J, et al. Thickness measurement for glass slides based on chromatic confocal microscopy with inclined illumination[J]. *Photonics*, 2021, 8(5): 170.
- [130] Yu Q, Wang C, Zhang Y L, et al. Error analysis and correction of thickness measurement for transparent specimens based on chromatic confocal microscopy with inclined illumination[J]. *Photonics*, 2022, 9(3): 155.
- [131] 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.
- [132] Hillenbrand M, Grewe A, Bichra M, et al. Parallelized chromatic confocal sensor systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8788: 87880V.
- [133] Li S B, Song B F, Peterson T, et al. MicroLED chromatic confocal microscope[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(11): 2722-2725.
- [134] Li S B, Liang R G. DMD-based three-dimensional chromatic confocal microscopy[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(14): 4349-4356.