

文章编号 1004-924X(2017)04-0875-09

彩色共焦系统可调制色散物镜设计

崔长彩¹, 李 煌¹, 余 卿^{2,3*}, 叶瑞芳²

(1. 华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021;

3. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

摘要:针对彩色共焦距测量系统中测量范围和分辨率的调制问题,采用色散和聚焦功能分离的思路设计了一款色散物镜,其色散功能由纯球面折射透镜组成的色散管镜来实现,聚焦功能则采用商业物镜实现。使用ZEMAX软件对色散管镜的结构、材料及像差进行了设计及优化,仿真结果显示所设计的色散管镜在可见光范围内能获得优于230 mm的轴向线性色散,实际加工的成品管镜的轴向线性色散范围可达160 mm。实验测量了色散管镜及它结合不同聚焦物镜后的色散特性。实验结果表明,色散管镜结合不同聚焦能力的物镜能够具有高线性度的轴向色散区域;结合4倍和10倍放大倍率的商用物镜,分别获得了1300 μm 和225 μm 的测量范围,其轴向分辨率分别为2 μm 和0.4 μm ,实现了测量范围和分辨率的调制。

关键词:表面形貌检测;彩色共聚焦;色散物镜;轴向色散;轴向分辨率

中图分类号:TN247 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20172504.0875

Design of adjustable dispersive objective lens for chromatic confocal system

CUI Chang-cai¹, LI Huang¹, YU Qing^{2,3*}, YE Rui-fang²

(1. Institute of Manufacturing Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

3. Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai Science and Technology, Shanghai 200093, China)

* Corresponding author, E-mail: yuqing@hqu.edu.cn

Abstract: Aiming at the adjustment of measuring range and resolution in Chromatic Confocal Microscopy (CCM), a dispersive objective for chromatic confocal system was designed, which can realize chromatic dispersion and focusing function separately. The chromatic dispersion was achieved through a dispersion tube lens, which was composed of pure spherical refraction lens. The focusing function was accomplished by a commercial objective lens. The structure, material and aberrations of the dispersive tube lens were designed and optimized by ZEMAX software. The simulation shows that the axial linear chromatic dispersion is better than 230 mm in visible waveband. Moreover the axial linear

收稿日期:2016-12-09;修订日期:2017-01-24.

基金项目:福建省科技计划项目-对外合作项目(No. 2015I0004);厦门市科技计划项目-对台科技合作项目(No. 3502Z20151232);大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室研究基金资助项目(No. JMTZ201503)

dispersion range of the finished tube lens can be up to 160 mm. The dispersion characteristics of the tube lens combined with different focusing objective lenses were determined experimentally. The results show that the axial dispersion region with high linearity can be maintained in the case of different focusing objective lens. With commercial objective lens of 4x and 10x magnification, the measurement ranges of 1 300 μm and 225 μm are obtained with axial resolution of 2 μm and 0.4 μm respectively. Thus, the modulation of measurement range and resolution is achieved.

Key words: surface topography detection; chromatic confocal; dispersive objective; axial dispersion; axial resolution

1 引 言

表面形貌检测是精密加工技术的重要组成部分。随着加工工艺水平的发展,对形貌检测的范围、精度及速率的要求越来越高。在现有的接触式和非接触式表面形貌检测方法中,白光干涉形貌测量和激光共聚焦测量等方法能够通过轴向层析^[1-2]来实现表面形貌的三维恢复,具有精度高、范围大等优势。然而,这些轴向扫描极其耗时,难以满足快速形貌恢复的需求。彩色共聚焦显微技术(Chromatic Confocal Microscopy, CCM)是激光共聚焦扫描显微技术的重要分支,不仅具有轴向层析的能力,还在检测速度方面具有优势,因此成为 ISO25178-602^[3]推荐的表面形貌检测方法,适用于对测量速度要求较高、精度在亚微米级别的表面形貌检测。CCM 最早由 Molesini 等^[4]提出,采用复色光源,通过轴向色散获得波长和位移的映射关系,并结合共聚焦光路获得锐利信号和轴向层析能力,省去了传统激光共聚焦显微镜的轴向扫描过程。文献[5]和文献[6]采用商用 CCM 测头,分别用于砂轮和砂纸的表面形貌检测,在牺牲较小分辨率的情况下极大地提高了检测速率。但砂轮磨粒的粒高具有多样性,部分磨粒会超出 CCM 测头的量程,此时需要重新设计 CCM 色散物镜,并开发能够快速调制测量范围的 CCM 系统。

CCM 测量范围是由复色光源和色散物镜获得的线性轴向色散决定的,所以在光源光谱特性确定的情况下,色散物镜参数是决定系统测量范围的关键因素。事实上色散物镜不仅决定测量范围,它的数值孔径(Numerical Aperture, NA)还在很大程度上影响了系统的轴向分辨率。诸多学者对于色散物镜的各项性能进行了研究,这些研

究主要围绕色散的线性度、色散范围、数值孔径等的提高展开^[7]。其中,轴向线性色散范围的获取主要采用衍射元件和折射元件。衍射元件具有折射率一致的特性,能够获取线性度极其优秀的色散能力,较早应用到 CCM 系统中,如 90 年代 Sarah L. Dobson 等^[8]开发的 CCM 系统。为了提高衍射元件的色散范围,需要提高光源的光谱范围和衍射层级,而宽光谱光源的成本昂贵,并且高衍射层级所导致的透过光信号能量剧烈衰减,因而衍射色散透镜通常只能获得较小的色散范围。低阿贝值的折射元件相对具有更强的色散能力,但折射元件的部分色散特性会导致色散非线性,因此单种材料的折射透镜所提供的色散难以满足 CCM 的需求。针对两种色散元件的优缺点,国外研究者提出了复合式设计方案,如 2012 年 Matthia Hillenbrand 等^[9]设计了衍射和折射元件的复合式色散透镜组,折衷了两种方式的优缺点。而国内 CCM 色散物镜主要采用折射透镜组的设计方案^[10-11],只适用于检测数厘米到数百微米的材料厚度。

不论采用哪种色散获取方式设计色散物镜,其色散范围通常都是固定的^[12-14],当测量范围改变时色散物镜需要重新进行设计。由于色散物镜的实质是色散和聚焦两部分功能的实现,国外 CCM 探测器针对不同聚焦倍数的色散物镜通常设计分离的色散部分。这种设计一方面用较高 NA 值物镜解决了衍射光学元件(Diffraction Optical Element, DOE)色散的 NA 值较小的问题,提高了系统的轴向分辨率;另一方面不同聚焦能力的物镜结合 DOE 色散能获得不同的色散范围,从而获得不同的测量范围和测量精度。由此可以推论,在线性色散范围足够大的情况下结合不同聚焦能力的物镜能够获得色散范围的调制。

综上所述,色散范围可调制的关键为大范围

线性色散元件的设计。由于折射元件能够实现相对更大的色散范围,通过合理分配阿贝值和光焦度能矫正色散的非线性问题^[15],如2012年北京信息科技大学金博石等^[16]设计的衍射透镜色散元件能够获得2.2 mm的轴向色散,而2013年牛春晖等研究的折射透镜组设计方案^[17]获得了20 mm的线性色散范围,因此折射元件相比DOE更加适合色散和聚焦分离的设计思路。国内的折射元件色散物镜虽然具有一定的线性色散范围,如张宁等研制的透明材质厚度检测系统^[18],其色散物镜具有20 mm以上的可用色散范围,但其色散能力仍有待进一步的拓展。

本文采用色散和聚焦分离的设计思路,解除不再依赖色散部分NA值,选择合理的初始结构放大色散并且对非线性色散进行矫正,在保证色散线性度的情况下提高色散范围。通过ZEMAX设计方案并加工装配色散管镜。仿真数据表明,这种方案理论上能获取更大范围的线性色散。最后,搭建共聚焦单点测量光路,对多种聚焦透镜结合色散管镜的色散特性进行实验,结果表明设计方案能够实现色散范围和轴向分辨率的调制。

2 系统原理和物镜设计

2.1 CCM 测量原理

图1所示为彩色共焦原理图。其中,复色光源经过小孔变成点光源,由准直透镜调制成平行光。经过分光镜后,由色散透镜对光线进行轴向色散,再由物镜聚焦最终使得不同波长的光线汇聚于光轴的不同位置上。测量斑的横向截面为不同波长构成的同心环,聚焦在焦面位置的光线的光强最大;被测物表面将测量斑信号反射回分光镜,并在探测器前的小孔前成像。光源处小孔、探测器小孔以及物方焦面为共轭关系。标定光线波长与被测物面位移的映射关系,由此可通过测定波长来获得被测物的高度信息。

从彩色共聚焦原理可见,系统的轴向色散功能是建立波长和位移映射的前提,而物镜的聚焦能力则会对轴向色散进行压缩,因此直接决定了系统的轴向测量范围。对于光学检测系统,物镜的NA值与响应信号的半峰宽存在密切关系,NA值较大的物镜能获得更高的轴向分辨率。对于轴向色散范围确定的光路,物镜的NA值与系

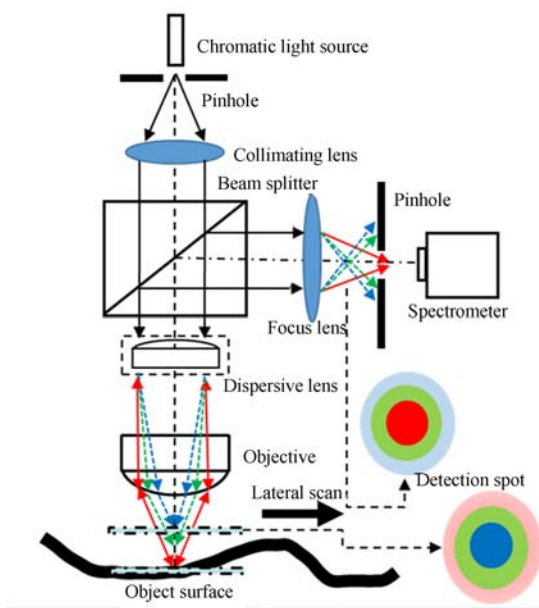


图1 彩色共焦原理图

Fig. 1 Principle of chromatic confocal microscope

统的轴向分辨率成正比,而与系统的测量范围成反比。

在设计CCM色散物镜时需要合理分配色散和聚焦,使得它们最终符合测量范围和精度的需要。色散和聚焦的分模块实现能够更灵活地应对新的测量需求。

2.2 透镜组的设计和验证

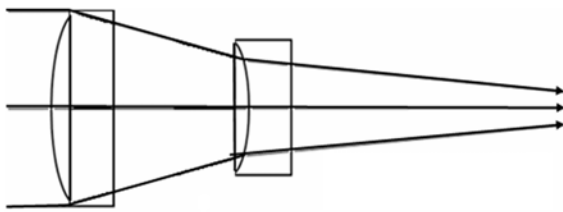
由于采用色散和聚焦分离的设计方法,色散部分的NA值和系统分辨率并无直接关联,在设计时具有更高的自由度;聚焦部分由一系列双凸聚焦透镜和商用物镜组成。管镜结合物镜的参数设计目标如表1所示。

表1 色散物镜的设计目标

Tab. 1 Achievable parameters of dispersion objective			
方案适用情况	采用物镜型号	线性色散范围	轴向分辨率
1 mm 轴向测量范围	普通双凸透镜	≥ 2 cm	$5 \mu\text{m}$
$300 \mu\text{m}$ 轴向测量范围	10倍和4倍	$\geq 500 \mu\text{m}$	$0.5 \mu\text{m}$

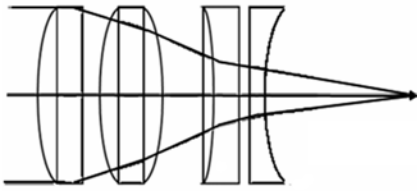
2.2.1 色散管镜设计

这里采用ZEMAX仿真软件进行色散管镜的设计,拟定光源光谱波段为486.1~656.3 nm,取587.6 nm为主设计波长。设计内容主要包括初始化结构、折射玻璃材料以及单色波长的球差、彗差、场曲。



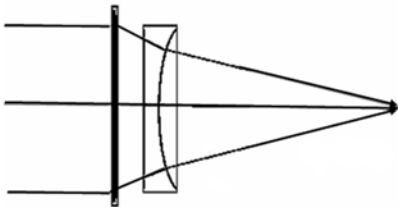
(a) 色散放大

(a) Dispersion amplify



(b) 透镜拆分

(b) Lens split



(c) 衍射元件

(c) DOE

图 2 色散管镜的组成

Fig. 2 Composition of dispersion tube lens

单片折射透镜不能获得线性色散,因此采用图 2 所示的光路结构,以获得线性色散并扩大色散范围。这 3 种结构设计各有侧重:图 2 (a)采用阿贝值不同的两组正负光焦度透镜组^[19-20]来矫正色散线性度,并组成轴向色散范围放大机构;图 2 (b)对已经具有一定色散能力的透镜采用拆分的方法来矫正低次球差^[14],从而提高色散线性度和抑制单波长相差;图 2 (c)则采用商用 CCM 探测器广泛使用的 DOE^[9],折中了衍射透镜和折射透镜的特点。为了使色散和聚焦分离,需要将色散部分的轴向色散最大化,因此,本文不使用 DOE 而采用色散范围更有优势的折射元件来设计色散管镜。通过色散放大获得充足的色散范围,色散管镜的初始结构如图 3 所示,通过透镜拆分来抑制单色波长相差。同时,为了便于调整光路中各模块间的距离,这里采用无限远心照明方式的折射透镜设计方案。

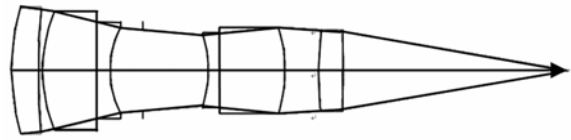


图 3 色散管镜设计初始结构

Fig. 3 Initial structure of dispersion tube lens

选定初始结构后,设置 ZEMAX 多重优化函数。首先,以两组胶合透镜材料为主自变量、以正向线性色散为目标进行优化,获得初步的正向色散模块。在此基础上,以透镜表面曲率半径、间距为自变量,以色散范围为主要目标进行优化,获得具有较大轴向色散能力的透镜组结构。为了修正色散的线性度,采用 ZEMAX 的多重优化函数,设置一系列等差设计波长,并以各波长的轴向色差相等为优化目标。最后对工作范围内多组波长的球差、场曲、横向色差以及多角度视场彗差进行抑制。最终优化结构如图 4 所示。

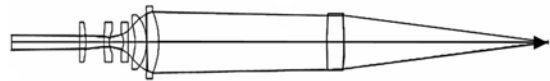
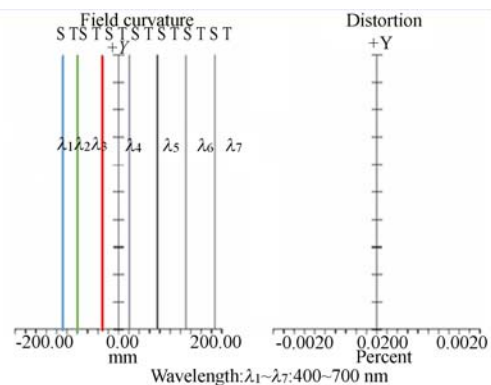


图 4 色散管镜的优化结果

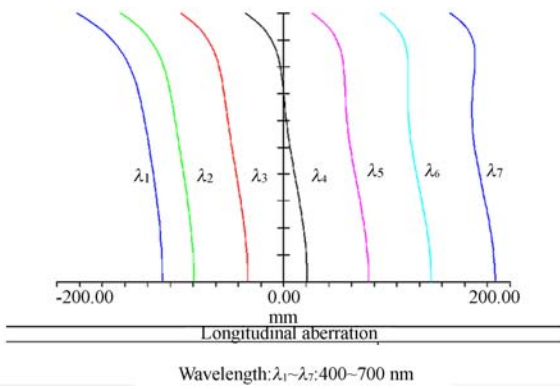
Fig. 4 Optmized structure of dispersion tube lens

场曲仿真结果如图 5(a)所示。由图 5 (a)可知,复色场曲较小、且色散距离分布较为均匀。色散管镜的球差特性如图 5(b)表示,仿真结果显示各波长的球差基本一致,曲线较为平滑和垂直,横向不同波长的纵向截面信号覆盖不明显。图 5(c)为轴向色散的仿真结果,获得的色散范围为 230 mm,色散线性度拟合判定系数 R^2 优于 0.998。其设计参数见表 2。



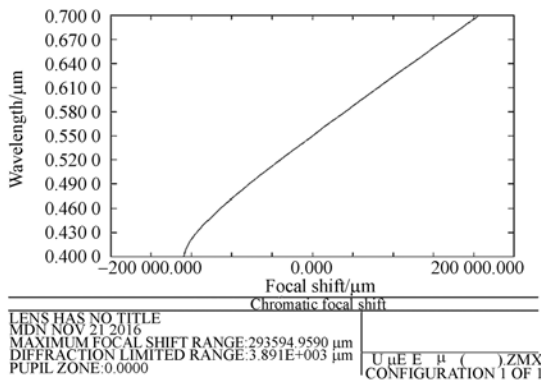
(a) 场曲

(a) Field distortion



(b) 球差

(b) Longitudinal aberration



(c) 轴向色散

(c) Axis chromatic shift

图 5 色散管镜仿真结果

Fig. 5 Simulation results of dispersion tube lens

表 2 物镜设计参数

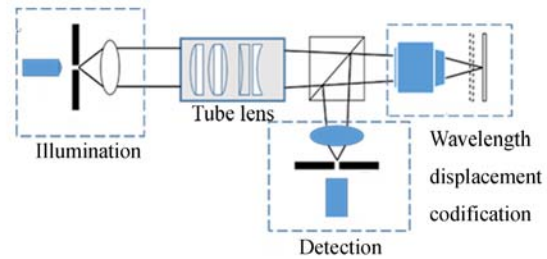
Tab. 2 Designed parameters of dispersion lens

表面序列	曲率半径/mm	间距/mm	材料
1	Infinity	Infinity	
2	Infinity	27.16	
3	117.8	2.89	H-QF50A
4	-19.588	8.03	
5	50	1.86	H-ZLAF75A
6	4.851	5.08	
7	-3.945	2.04	H-ZF62
8	-86.3	2.42	
9	-10.617	4.78	H-LAK51A
10	-8.84	0.1	
11	-325.1	4.94	H-LAK52
12	-15.812	745.849	

2.2.2 实验验证

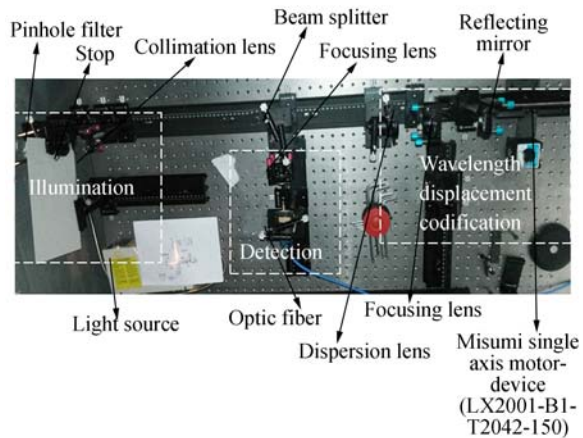
如图 6(a)所示,实验系统采用共聚焦光路设

置,主要包括照明光路、波长位移调制和波长检测 3 个部分。实物系统如图 6(b)所示,照明部分由复色光源(Moritex 公司 MHF-V501)组成,并由自带的光纤引出,经过小孔滤波器后得到点光源,点光源经由准直透镜得到准直光信号。准直光经过测量支路的色散管镜后,在轴向获得大范围线性色散,并由聚焦物镜对色散进行波长和轴向位置的调制。采用单轴驱动器(MISUMI 公司 LX2001-B1-T2042-150)驱动反射镜将测量端信号反射回光路,经过分光镜反射到波长检测支路。检测支路利用汇聚透镜将信号聚焦在直径为 400 μm、数值孔径为 0.22 的光纤头前,由光纤连接的海洋光学光谱仪 HR2000+获得中心波长信号。



(a) 实验系统示意图

(a) Schematic diagram of experimental system



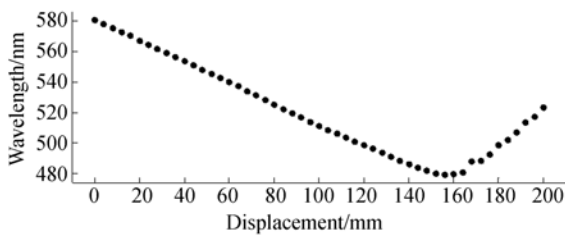
(b) 实验系统照片

(b) Photo of experimental system

图 6 共聚焦光路实验装置图

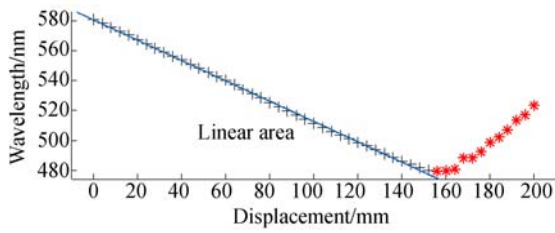
Fig. 6 Experimental apparatus of confocal optical path

为了获得色散管镜的性能参数,结合聚焦物镜后的测量能力设计了如下几项实验:(1)色散管镜的色散特性实验;(2)色散管镜结合不同聚焦能力的双凸透镜的色散特性实验;(3)采用 4×和 10×商用物镜情况下的色散特性和分辨率实验。



(a) 全波段波长-位移曲线

(a) Full length wavelength-displacement data



(b) 线性范围

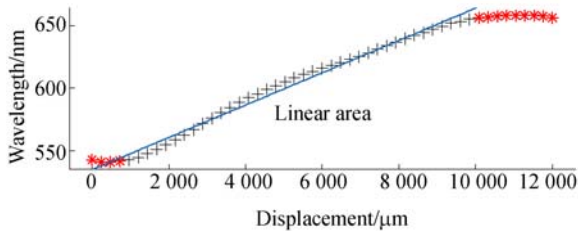
(b) Linearity range

图 7 色散管镜的色散特性

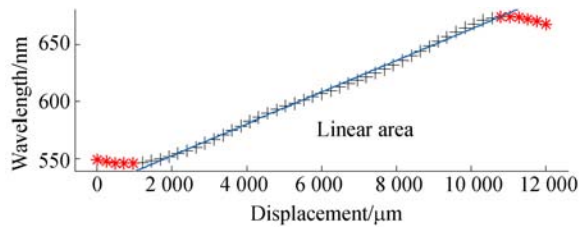
Fig. 7 Wavelength-displacement coding of dispersion tube lens

在图 6 (b)所示的实验台上,去除聚焦物镜,直接移动反射镜测量色散管镜的色散位移特性数据。结果表明,色散管镜具有优于 160 mm 的线性色散范围,且线性拟合后判定系数 R^2 优于 0.99,如图 7 所示。由于单轴驱动器的机械误差,去程和返程数据并不完全重合,但拟合曲线基本一致。

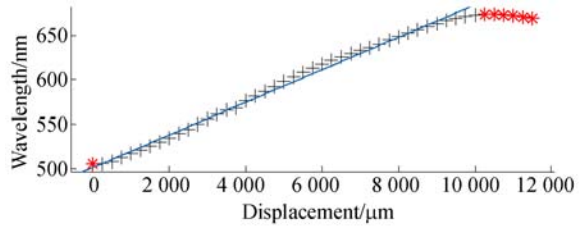
将聚焦透镜换成不同焦距的双凸透镜,移动反射镜分别采集不同焦距双凸透镜结合色散管镜的色散位移特性,如图 8 所示。双凸透镜对色散管镜提供的色散进行再编辑后,色散范围随着聚焦能力的提升而压缩,且轴向色散仍然具有较为优秀的线性度,由此表明通过改变透镜焦距能够调制线性色散范围。



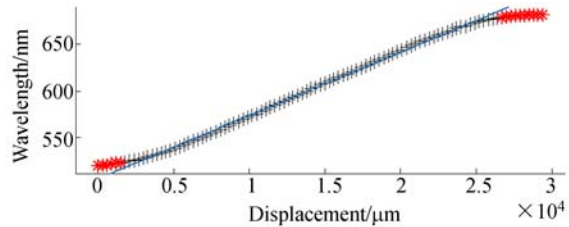
(a) 100 mm



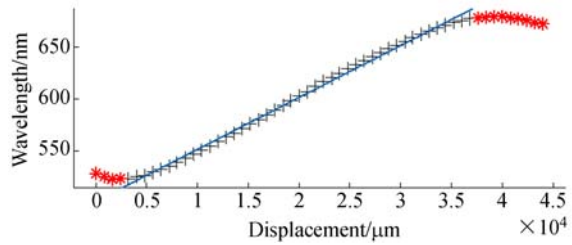
(b) 120 mm



(c) 180 mm



(d) 250 mm



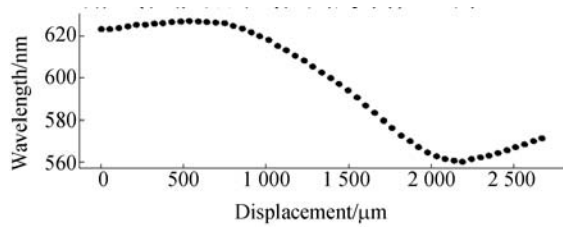
(e) 300 mm

图 8 焦距不同时色散管镜结合双凸透镜的色散特性

Fig. 8 Wavelength-displacement coding of dispersion lens combined with focusing lens for different focal lengths

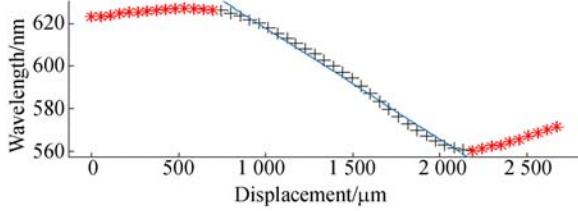
为了进一步了解色散管镜能适用的聚焦物镜,将聚焦透镜分别换成 4×和 10×的商用物镜进行测试,分别检测各自的色散位移特性和极限分辨率。其中,4×物镜结合色散管镜获得的实验结果如图 9 所示。4×商用物镜虽然极大地压缩了色散范围,但仍有 1 300 μm 的线性色散区间,对此区间做线性拟合的线性判定系数 R^2 为 0.998。

对此线性区间进行分辨率实验,逐渐缩小反



(a)全波段波长-位移曲线

(a) Full length wavelength-displacement data



(b)线性范围

(b) Linearity range

图 9 色散管镜结合 4×商用物镜的色散特性

Fig. 9 Wavelength-displacement coding of dispersion lens combined with 4× commercial objectives

射镜移动步距并采集色散位移数据。通过单轴驱动器位移实验可知,1 脉冲对应 0.2 μm。由图 10 可见,步距低于 10 脉冲后失去线性度,可以判定 25 脉冲为系统可辨步距,即 4×物镜可实现优于 5 μm 的轴向分辨率。

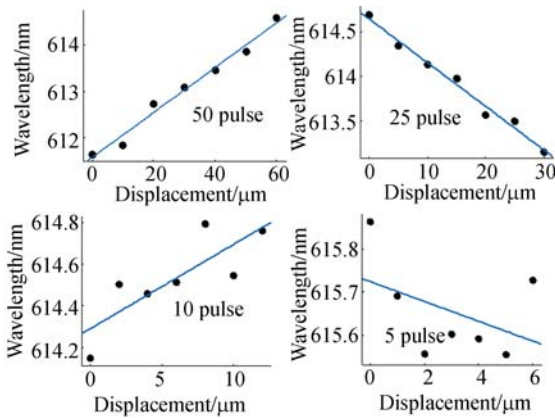
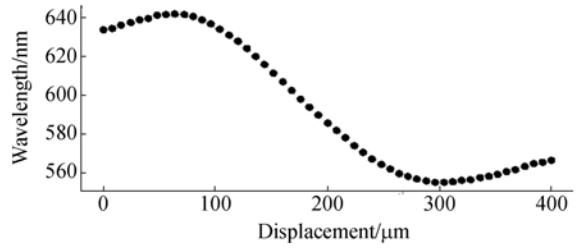


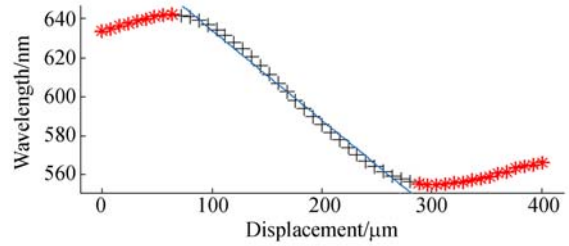
图 10 色散管镜结合 4×商用物镜的分辨率实验结果
Fig. 10 Results of resolution experiment on dispersion lens combined with 4× commercial objective

将聚焦透镜更换为 10×商用物镜后,仍然保持主要波长范围内的线性色散,范围压缩至 250 μm。截取线性色散区间线性拟合的判定系数 R^2



(a)全波段波长-位移曲线

(a) Full length wavelength-displacement data



(b)线性范围

(b) Linearity range

图 11 色散管镜结合 10×商用物镜色散特性

Fig. 11 Wavelength-displacement coding of dispersion lens combined with 10× commercial objective

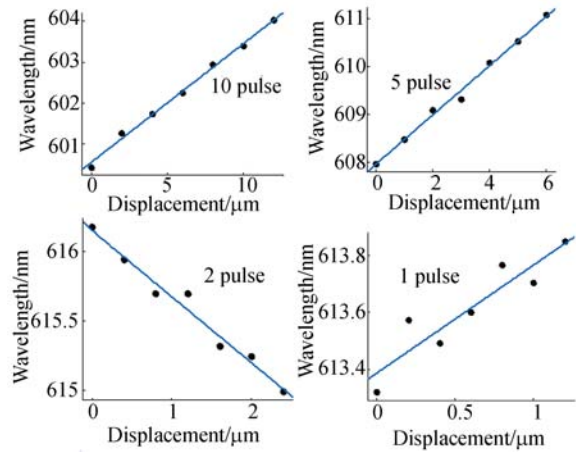


图 12 色散管镜结合 10×商用物镜的分辨率实验结果
Fig. 12 Results of resolution experiment on dispersion lens combined with 10× commercial objective

为 0.986 7。同样对 10×物镜进行分辨率实验,结果如图 12 所示,当步距缩小至 1 脉冲时,开始失去线性,此时的线性拟合判定系数 R^2 为 0.950 7。2 个脉冲时,步距的线性在一定程度上受到单轴驱动器精度因素的影响,但依然保持较好

的线性度,因此判定 $10\times$ 物镜时的最小分辨率为 2 脉冲,即约为 $0.4\ \mu\text{m}$ 。

所设计的测量系统在实验中体现出良好的测量范围和分辨率,但仍存在以下几个问题:

(1)光源光谱特性并不理想,可用波段为 $550\sim 680\ \text{nm}$,且不同波长的光强并不相等,这在很大程度上限制了管镜的实际色散效果,以及光谱仪采集中心波长的准确性。若采用光谱特性更大优秀的光源,能够获得更大的测量范围和精度。

(2)光学元件的固有缺陷和光路搭建误差使光路共轭关系并不理想,从而导致采集的中心波长与位移的映射关系存在误差。

3 结 论

在彩色共聚焦测量系统中,为实现对其测量

范围和精度的调制,本文通过分析色散物镜功能采用将色散和聚焦分离的设计思路,设计了一款基于纯球面折射透镜的色散管镜,获得了 $160\ \text{mm}$ 以上的线性色散范围。通过测试不同聚焦物镜结合色散管镜的色散特性,验证色散和聚焦分离的设计能够实现的线性色散范围从几十毫米量级到几百微米,可以根据不同的测量对象灵活设置系统。而在精度方面,色散管镜结合 $10\times$ 商用物镜获得了接近 $0.4\ \mu\text{m}$ 的轴向分辨率,具有较高的测量精度。实验结果表明,结合不同聚焦透镜所设计的色散物镜能够保持一定区域的轴向线性色散,且线性色散区域与物镜的聚焦能力成反比,而测量色散范围内可达到的分辨率与物镜的聚焦能力成正比。该色散管镜的测量范围和测量精度的调制可通过变换物镜倍数来实现。

参考文献:

- [1] 崔长彩,余卿,张遂,等. 金刚石砂轮表面形貌测量系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3167-3174.
CUI CH C, YU Q, ZHANG A, *et al.*. Measurement system of surface topography for diamond grinding wheel[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12): 3167-3174. (in Chinese)
- [2] 余卿,余晓芬,崔长彩,等. 并行共焦测量中的并行光源技术综述[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 652-659.
YU Q, YU X F, CUI CH C, *et al.*. Survey of parallel light source technology in parallel confocal measurement[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 652-659. (in Chinese)
- [3] International Organization for Standardization. ISO 25178-602 Geometrical product specification (GPS)-surface texture: areal-part 602: Nominal characteristics of non-contact (confocal chromatic probe) instruments[S]. International Organization for Standardization, 2010.
- [4] MOLESINI G, PEDRINI G, POGGI P, *et al.*. Focus-wavelength encoded optical profilometer [J]. *Optics Communications*, 1984, 49(4): 229-233.
- [5] DARAFON A, WARKENTIN A, BAUER R. Characterization of grinding wheel topography using a white chromatic sensor[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, 70: 22-31.
- [6] DARAFON A. *Measuring and modeling of grinding wheel topography* [D]. Dalhousie: Dalhousie University, 2013.
- [7] BLATEYRON F. *Chromatic Confocal Microscopy* [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2011: 71-106.
- [8] DOBSON S L, SUN P C, FAINMAN Y. Diffractive lenses for chromatic confocal imaging[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(20): 4744-4748. [9] HILLENBRAND M, MITSCHUNAS B, WENZEL C, *et al.*. Hybrid hyperchromats for chromatic confocal sensor systems[J]. *Advanced Optical Technologies*, 2012, 1(3): 187-194.
- [10] 马小军,高党忠,杨蒙生,等. 应用白光共焦光谱测量金属薄膜厚度[J]. 光学精密工程, 2011, 19(1): 17-22.
MA X J, GAO D ZH, YANG M SH, *et al.*. Measurement of thickness of metal thin film by using chromatic confocal spectral technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 17-22. (in Chinese)
- [11] 乔杨,张宁,徐熙平,等. 基于共焦法的透镜厚度测量系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(7): 1635-1641.
QIAO Y, ZHANG N, XU X P, *et al.*. Design of lens thickness measurement system based on confocal technology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(7): 1635-1641. (in Chinese)

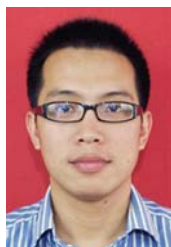
- [12] 高鑫, 邓文怡, 牛春晖. 基于彩色共焦的位移测量系统研究[J]. 光学技术, 2012, 38(1): 83-88.
GAO X, DENG W Y, NIU CH H. Research of displacement measurement system based on chromatic confocal[J]. *Optical Technique*, 2012, 38(1): 83-88. (in Chinese)
- [13] 武芃樾, 袁道成. 光谱共焦位移传感器镜头设计研究[J]. 工具技术, 2012, 46(2): 81-83.
WU P Y, YUAN D CH. Research of design of lenses used for chromatic confocal displacement sensor[J]. *Tool Engineering*, 2012, 46(2): 81-83. (in Chinese)
- [14] 武芃樾. 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 of Design of Chromatic Confocal Spectral Sensor*[D]. Miangyang; China Academy of Engineering Physics, 2012. (in Chinese)
- [15] MIKS A, NOVAK J, NOVÁK P. Theory of hyperchromats with linear longitudinal chromatic aberration[J]. *SPIE*, 2005, 5945: 59450Y.
- [16] 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 SH, DENG W Y, NIU CH H, *et al.*. Design of dispersive lens group for chromatic confocal measuring system[J]. *Optical Technique*, 2012, 38(6): 660-664. (in Chinese)
- [17] 牛春晖, 李晓英, 郎晓萍. 光谱共焦透镜组设计及性能优化[J]. 北京信息科技大学学报, 2013, 28(2): 42-45.
NIU CH H, LI X Y, LANG X P. Design and performance optimization of chromatic confocal lens [J]. *Journal of Beijing Information Science and Technology University*, 2013, 28(2): 42-45. (in Chinese)
- [18] 张宁, 徐熙平, 吴嘉辉, 等. 基于复色共焦的透明材料厚度测量系统研究[J]. 长春理工大学学报:自然科学版, 2013, 36(5): 1-6.
ZHANG N, XU X P, WU J H, *et al.*. Research on the measurement system of transparent material's thickness based on polychromatic confocal technology[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2013, 36(5): 1-6. (in Chinese)
- [19] 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.
LIU Q, YUAN W CH, YUAN D CH, *et al.*. Optimization and selection of materials for dispersive objective of chromatic confocal microscope[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(8): 111-117. (in Chinese)
- [20] 朱万彬, 钟俊, 莫仁芸, 等. 光谱共焦位移传感器物镜设计[J]. 光电工程, 2010, 37(8): 62-66.
ZHU W B, ZHONG J, MO R Y, *et al.*. Design of spectral confocal chromatic displacement sensor objective[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(8): 62-66. (in Chinese)
- [21] 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.

作者简介:



崔长彩(1972—),女,山东胶南人,教授,博士生导师,1996年于佳木斯大学获得学士学位,2003年于哈尔滨工业大学获得博士学位,2005-2009年于华中科技大学机械工程博士后流动站从事博士后研究,2011-2012年英国HUDDERSFIELD大学精密技术中心访问学者,主要从事表面形貌评定技术、表面形貌测量技术及自动测量仪器的研究。E-mail: cuicbc@hqu.edu.cn

通信作者:



余卿(1983—),男,江西新余人,博士,副教授,2005年、2011年于合肥工业大学分别获得学士、博士学位,2014年至今在上海理工大学光学工程博士后流动站从事博士后研究,主要从事光电检测、精密机械设计方面的研究。E-mail: yuqing@hqu.edu.cn