

文章编号 1004-924X(2013)10-2473-07

光谱共焦显微镜的线性色散物镜设计

刘 乾*, 杨维川, 袁道成, 王 洋

(中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 由于色散物镜轴向色散与波长间的非线性会导致仪器整体性能下降, 本文研究了光学系统轴向色散与透镜组之间的关系, 推导了轴向色散的传递公式。为得到较大的线性轴向色散, 根据轴向色散的传递公式提出了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。光学优化设计表明, 具有正负透镜分离结构的色散物镜可以得到低的球差和大的轴向色散, 而且具有较大的工作距离。设计的色散物镜在 430~710 nm 得到了 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%, 灵敏度的波动量小于整体的 1/3, 优于之前的研究。采用所设计的色散物镜, 光谱共焦显微镜能够得到优于 0.3 μm 的轴向分辨率和优于 5 μm 的横向分辨率, 满足精密测量的需求。

关键词: 光学设计; 光谱共焦显微镜; 色散物镜; 位移传感器

中图分类号: TH742.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132110.2473

Design of linear dispersive objective for chromatic confocal microscope

LIU Qian*, YANG Wei-chuan, YUAN Dao-cheng, WANG Yang

(*Institute of Mechanical Manufacturing Technology,
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

* *Corresponding author, E-mail: liuqianblue@126.com*

Abstract: As the nonlinearity between the Axial Chromatic Aberration (ACA) and the wavelength of a dispersive objective would lower the overall performance of a chromatic confocal microscope, the dependence of the ACA of an optical system on the lens assembly was studied and the transfer principle of ACA was derived. Based on ACA transfer principle, a dispersive objective configured with a negative and a positive lens groups was proposed, in which both the negative and positive lens groups could generate the linear ACA with specified focal power distribution. Optimized result indicates that the dispersive objective based on the proposed configuration has small longitudinal aberration, a large ACA, and a long working distance. The ACA of dispersive objective is 1 mm in 430–710 nm. The relative nonlinearity of ACA is about 4.6% and the deviation of sensitivity is less than 1/3 that of a whole, superior to traditional ones. With designed dispersive objective, the chromatic confocal microscope can achieve an axial resolution of 0.3 μm and a lateral resolution of 5 μm , which satisfies the re-

quirements of precise measurement.

Key words: optical design; chromatic confocal microscope; dispersive objective; displacement sensor

1 引言

1955 年 M. Minsky 发明了共焦显微镜,经过半个多世纪的发展,它已经成为一种非常重要的微观测量手段,不仅常用于三维扫描成像,并广泛应用于生物、电子、机械等领域^[1-4]。传统的共焦显微镜需要对物体进行轴向扫描,根据光电探测器接收到的最大能量来确定被测对象的轴向高度,但 Browne 等于 1992 年提出的光谱共焦显微镜技术^[5]利用特殊物镜产生的轴向色散来进行高度测量,无需轴向扫描,从而大幅提高了测量速度。光谱共焦显微镜还具有高分辨率和能容忍大倾斜角的优点,可应用于检测轮廓、粗糙度、位移等,如代替接触式针尖用于读取文物级唱片的声音^[6],测量透明光学元件厚度^[7-8]、金属薄膜的厚度及分布^[9]等。在 ISO 标准《几何产品参数——表面微观形貌》中,光谱共焦位移传感器为微观形貌的主要测量仪器之一^[10]。

光谱共焦显微镜的轴向色散由色散物镜产生,因此,色散物镜的性能在一定程度上决定了仪器的测量范围和分辨力。常规的消色差物镜要求色差尽量小,而光谱共焦显微镜的色散物镜却要求在物方产生大的轴向色差。目前,一些研究者使用商业显微物镜加色散元件来得到轴向色差(色散),也有研究者设计专门用于光谱共焦显微镜的色散物镜。A. Ruprecht 等给出了利用衍射元件分光设计的色散物镜^[11],朱万彬等设计了一种三片式的色散物镜^[12],刘乾等利用高色散玻璃和双胶合透镜设计了一种色散物镜^[13],乔杨等设计了一种具有四片透镜(其中一片为非球面)的色散物镜^[8]。以上研究得到的轴向色散与波长都不是线性关系,影响了光谱共焦显微镜在测量范围内的灵敏度、分辨力等性能。其原因在于玻璃的折射率与波长成非线性关系,若物镜仅由一种材料的透镜组成,其轴向色散与波长仍保持非线性关系^[13]。虽然衍射光学元件的色散与波长成线性关系;但衍射光学元件存在较大的球差,不能单独用作色散物镜,须配以透镜校正球差,而折射透

镜会破坏衍射色散与波长间的线性关系^[14-16]。因此,设计轴向色散与波长成线性关系的折射物镜对光谱共焦显微镜至关重要。A. Miks 探索了利用多种玻璃材料密接的透镜产生色散与波长为线性关系的方法^[17],但只进行了方法研究,未给出实用的优化设计结果。本文根据工程需要,设计了一种用于光谱共焦显微镜的线性轴向色散物镜,并通过实验证实了所设计的色散物镜的轴向色散与波长成较好的线性关系。

2 光谱共焦显微镜工作原理

光谱共焦显微镜使用宽谱光源照明,以光谱仪(单色仪)探测共焦点的波长,其原理如图 1 所示。宽谱光通过针孔进入色散物镜,在被测物体一侧产生色散,且色散物镜将不同波长的光聚焦在光轴的不同位置,将位移信息转换为波长信息。分束光纤的公共端既可产生点光源照明,又能作为针孔滤除杂光。只有焦点在被测表面上的光才能被反射透过针孔,进入针孔后方的光谱仪,而聚焦在其它轴向位置的光则被针孔滤除无法进入光谱仪。因此,焦点在被测表面上的光波长在光谱仪中体现为峰值,由光谱仪的光谱分布可以判断被测物体的高度。光谱共焦显微镜无需机械式轴向扫描就可达到数千赫兹的采样频率,提高了测量速度。同时,采用分束光纤代替分光棱镜,不仅有效减小了显微镜前端的体积,还使系统具有较好的柔性。

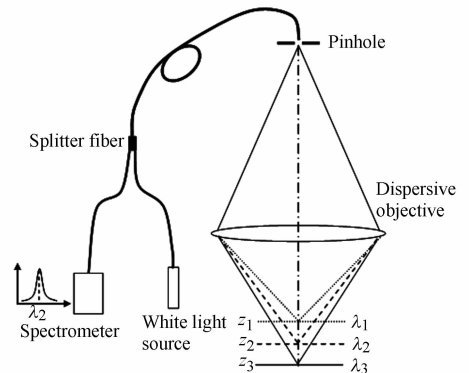


图 1 光谱共焦显微镜工作原理示意图

Fig. 1 Principle of chromatic confocal microscope

3 光学系统的线性轴向色散

3.1 轴向色散的传递

为方便设计, 以下均以针孔作为物方, 白光经色散物镜后在像方形成一系列焦点。按几何光学符号规则, 有:

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \varphi, \quad (1)$$

式中: l', l 分别为像距和物距, φ 为色散物镜的光焦度。假设色散物镜为密接薄透镜组, 则:

$$\varphi = \sum_i \varphi_i = \sum_i (n_i - 1) \Delta C_i, \quad (2)$$

式中: φ_i, n_i 分别为第 i 个单透镜的光焦度和折射率, 均为波长的函数; ΔC_i 为单透镜前后表面的曲率差, 与波长无关。将式(2)带入式(1), 并对等号两边微分, 整理可得:

$$dl' = \beta^2 dl - (1 - \beta)^2 \varphi^{-2} \sum_i dn_i \cdot \Delta C_i, \quad (3)$$

式中: $\beta = l'/l$, 为光学系统的横向放大率, 随波长变化较小, 可认为与波长无关。为便于计算和比较, 本文以 F 光(波长为 486.1 nm)和 C 光(波长为 656.3 nm)间的轴向色散来讨论。记 $dl'_{FC} = l'_F - l'_C, dl_{FC} = l_F - l_C$, 则式(3)可进一步写成:

$$dl'_{FC} = \beta^2 dl_{FC} - (1 - \beta)^2 \varphi^{-2} \sum_i (n_{Fi} - n_{Ci}) \cdot \Delta C_i = \beta^2 dl_{FC} - (1 - \beta)^2 \varphi^{-2} \sum_i \varphi_{di} / \nu_{di}, \quad (4)$$

式中: $\varphi_{di} = (n_{di} - 1) \Delta C_i$, 为第 i 个透镜 d 光(波长为 587.6 nm)的光焦度, $\nu_{di} = (n_{di} - 1) / (n_{Fi} - n_{Ci})$, 为第 i 个透镜玻璃的阿贝数。为更方便讨论透镜组的色散性质, 将式(4)稍作变换, 得:

$$dl'_{FC} = \beta^2 dl_{FC} - (1 - \beta)^2 f' \sum_i \bar{\varphi}_{di} / \nu_{di}, \quad (5)$$

式中: $f' = 1/\varphi$, 为透镜组的有效焦距。它随波长变化较小, 可认为与波长无关; $\bar{\varphi}_{di} = \varphi_{di}/\varphi$, 为归一化的光焦度分量, 则 $\sum_i \bar{\varphi}_{di} / \nu_{di}$ 为单位光焦度的密接透镜组产生的轴向色散, 记为 \bar{C} 。若 \bar{C} 为零, 则为通常用到的消色差胶合透镜。显然选择 \bar{C} 较大的透镜组有利于得到较大的轴向色散。式(5)给出了轴向色散在各个透镜组之间的传递关系, 根据此公式可以讨论系统的轴向色散情况。

将针孔看作点光源, 从针孔出射的白光色差可认为是零, 即 $dl_{FC} = 0$ 。对于倒置的显微镜, 一般有 $-1 < \beta < 0, f' > 0$ 。若 \bar{C} 一定, 则 β 绝对值越

大、 f' 越大, 系统在像方产生的轴向色散越大。系统的物方孔径角与像方孔径角通常由系统的其它参数(如针孔直径、横向分辨率等)确定, 因而可确定 β 。但 f' 增大会使得系统的长度增加, 不利于系统的小型化设计。

若色散物镜由两个透镜组组合实现, 从针孔出射的白光经过第一个透镜组后产生了像方色散 dl'_{FC} , 作为第二个透镜组的物方色散 dl_{FC} 再次得到放大, 会有利于增大系统整体的轴向色散。分析式(5)发现, 实现色散两级放大的前提是两个透镜组的 $f' \bar{C}$ 同号。这样就要求两个透镜组的 \bar{C} 符号相反。这种正负透镜组分离的结构正是本文设计的色散物镜的初始结构, 如图 2 所示。此外, 正负两个透镜组的物镜结构, 正透镜组靠近被测物体, 会使物镜的像方主平面移向物体一侧, 有利于增大物镜的工作距离。

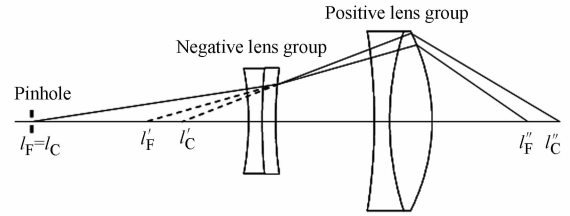


图 2 线性色散物镜的结构

Fig. 2 Configuration of linear dispersive objective

3.2 线性轴向色散的实现

式(5)中的 β, f' 随波长的变化量很小, 可视为与波长无关, 因而密接透镜组的色散性质决定了系统的色散性质。若两个透镜组均能产生线性色散, 则二者组合后的色散也与波长成线性关系。Miks 等利用密接透镜组得到了线性轴向色散^[17], 并给出了密接透镜组实现线性轴向色散的条件, 为:

$$\sum_i L_i \varphi_{di} / \nu_{di} = 0, \quad (6)$$

式中: $L_i = P_i - (\lambda_d - \lambda_c) / (\lambda_F - \lambda_c)$, 为玻璃材料的色散线性度; $P_i = (n_{di} - n_{Ci}) / (n_{Fi} - n_{Ci})$, 为单透镜玻璃材料的相对部分色散。式(6)表明, 要得到线性轴向色散至少需要两种玻璃的单透镜组合。经验表明, 组合透镜的玻璃种类越多, 越利于得到高线性度的色散, 然而使用的玻璃种类太多不利于降低成本。文献[18]使用 3 种玻璃材料组合的透镜得到轴向色散, 其相对非线性度约为 1%。在国产玻璃库中找到一组玻璃, FK71、LAF4 与

ZF72A。此玻璃组合在满足线性轴向色散条件时,单透镜以不同的光焦度组合,透镜组单位光焦度的色散可取正值和负值,有利于实现正负透镜组分离的结构形式。当 3 种透镜的光焦度之比为 $-0.67 : 3 : -1.33$ 时,单位光焦度(1 mm^{-1})下透镜组的色散 \bar{C} 约为 $8 \mu\text{m}$;当光焦度之比为 $3 : -2.89 : 0.89$ 时,单位光焦度透镜组的色散 \bar{C} 约为 $-2 \mu\text{m}$,其相对非线性度分别为 1.4% 和 4.7% 。两种情况下轴向色散与波长的关系曲线如图 3 所示。

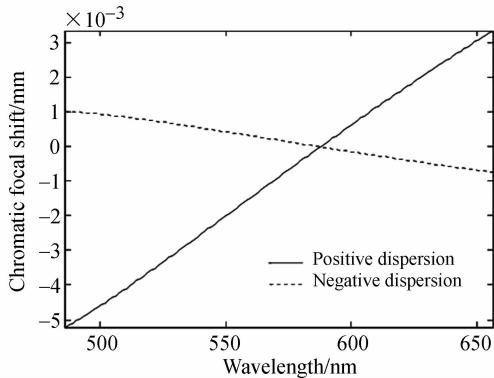


图 3 FK71、LAF4 与 ZF72A 玻璃组合的色散曲线
Fig. 3 Dispersive curves of positive and negative triplets

4 色散物镜的光学设计

共焦显微镜的轴向分辨率可用轴向点扩散函数 (PSF) 的半高全宽 (FWHM) 来表征,而 FWHM 与显微物镜的数值孔径 (NA) 有关^[19]。同样,光谱共焦显微镜的分辨率也与镜头 NA 有关,根据相关文献^[19-20],光谱共焦显微镜要得到 $1 \mu\text{m}$ 的分辨率,物镜的 NA 应不小于 0.3。针孔方的孔径角与针孔的尺寸有关,要求针孔尺寸与衍射艾里斑大小相当,使用直径为 $10 \mu\text{m}$ 的针孔,其对应的孔径角约为 0.07 rad 。为得到较大的色散范围,使用高功率白光 LED 作为光源,波长选用功率较集中的 $430 \sim 710 \text{ nm}$ 。

根据式(5)给出的轴向色散公式和前文分析,选定如图 2 所示的正负透镜组分离结构。为得到 1 mm 的轴向色散,初始结构设计如下:针孔距负透镜组 80 mm ,负透镜组焦距为 -24 mm ,正透镜组焦距为 16.6 mm ,正负透镜组间隔 10 mm 。正负透镜组均由 FK71、LAF4 与 ZF72A 三种玻璃组合而成,其光焦度按前文优化结果分配。按以

上参数构造物镜,根据式(5)得到轴向色散约为 -0.91 mm 。

在优化设计过程中发现,透镜组的透镜不必紧密胶合,稍有间隔(小于透镜组焦距绝对值的十分之一)对其色散的线性度影响不大。因此将负透镜组分拆为一个负透镜(ZF72A)和一个光焦度甚小的双胶合透镜(FK71、LAF4)。考虑到正透镜组中的 LAF4 透镜承担了整个物镜的绝大部分光焦度,为防止由曲率半径过小而导致的球差增大,将 LAF4 透镜承担的光焦度由两个 LAF4 正透镜分担,并分别与 ZF72A、FK71 的负透镜组成两组双胶合透镜。

与共焦显微镜一样,光谱共焦显微镜的物镜只对轴上点成像,因此只需校正各个波长的球差。为减小球差,正透镜组采用齐明结构。由于存在色散,各个波长在像方的聚焦位置并不一致,因此采用齐明结构不能将球差减小至零,后期还需适当降低像方数值孔径(至 0.27)以减小球差。经过优化得到的色散物镜的外形结构如图 4 所示。物镜 d 光的有效焦距约为 18.9 mm ,工作距离约为 27 mm ,大于有效焦距,这是物镜正负分离的结构带来的好处。物镜的数值孔径因波长而稍有不同,为 $0.26 \sim 0.28$ 。色散物镜在各个波长处的球差均小于 $3 \mu\text{m}$ 。图 5 给出了各波长在聚焦位置的弥散斑图样,可见在各个波长处的弥散斑均远小于艾里斑,由此表明其像质达到了衍射极限。由于加工和装调公差,图 5 中的实测光斑比衍射极限稍大,稍微降低仪器的横向分辨率,对轮廓和位移测量基本无影响。

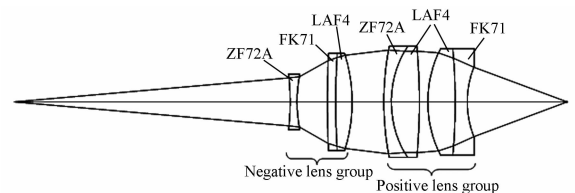


图 4 线性色散物镜的设计结果
Fig. 4 Layout of optimized dispersive objective

色散物镜在 $430 \sim 710 \text{ nm}$ 的色散约为 1 mm ,色散与波长的关系见图 6。按照图 1 的实验装置,选用分辨率为 0.2 nm 的衍射光栅光谱仪,以平面镜为被测物,每移动 $10 \mu\text{m}$ 记录光谱数据,通过数值拟合得到对应的峰值波长,进而得到光谱共焦显微镜色散与峰值波长的实测对应关

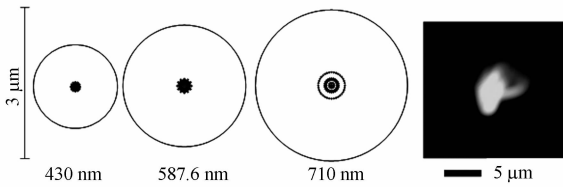


图 5 3 种波长在聚焦位置处的弥散斑与实测聚焦光斑
Fig. 5 Spot diagram of three wavelengths at respective focus planes and experimental image of focus spot

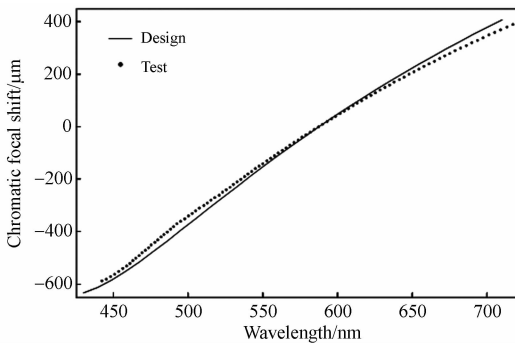


图 6 线性色散物镜轴向色散曲线

Fig. 6 Dispersive curve of linear dispersive objective

系,如图 6 所示,可见实测结果与光学设计结果十分吻合。设计的色散物镜的波长与色散关系的相对非线性度为 4.6%,并非完全线性。因为线性轴向色散条件是针对 F, d, C 3 种波长的光给出的,不可能在所有波长处将非线性度降低为零,这是由玻璃材料的性质决定的。波长范围越大,轴向色散的线性度越低;尤其是短波长频段,因为波长越短,折射率随波长的变化越大,越难在全波长范围内实现高线性度的色散曲线。文献[13]给出了一个使用一种玻璃(ZF7)产生色散的设计结果,该设计在全波长范围内的相对非线性度约为 12%。与之相比,本文所设计物镜的色散曲线的非线性度显著下降。

灵敏度表征了输出量随单位输入量的变化关系,是测量仪器的一个重要指标。光谱共焦显微镜的灵敏度定义为波长每变化 1 nm 在轴向上产生的位移(色散)大小。色散物镜的整体灵敏度为

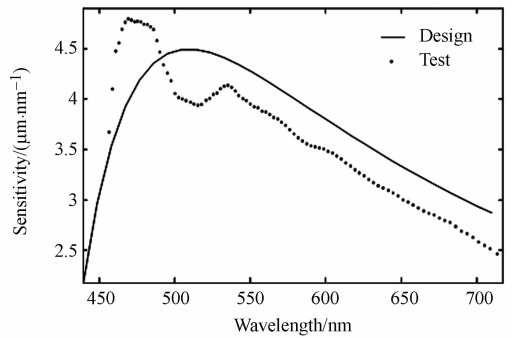


图 7 光谱共焦显微镜的灵敏度曲线

Fig. 7 Sensitivity curves of chromatic confocal microscope

色散范围与工作波长范围之比,本文设计的色散物镜的整体灵敏度约为 3.6 $\mu\text{m}/\text{nm}$ 。光谱仪的分辨率可认为是不变的,若物镜色散存在较大的非线性,则可能导致某些位置(灵敏度较低的区域)产生了位移,而光谱仪探测不到波长变化的情况。如果灵敏度在整个波长范围上波动太大,会对仪器的整体性能造成很大影响。对色散曲线求差分即可得到灵敏度,图 7 给出了光谱共焦显微镜在工作波长范围内灵敏度。从图中可以看出,由于色散与波长之间仍存在非线性,因此灵敏度有一定波动,但波动量小于整体灵敏度的三分之一,而单种玻璃材料设计的色散物镜灵敏度的波动约为整体灵敏度的三分之二^[13]。

5 结 论

本文设计了用于光谱共焦显微镜的色散物镜,其色散与波长成线性关系。物镜利用 FK71、LAF4 与 ZF72A 三种玻璃分别产生线性正色散和负色散,使用正负透镜组分离的结构有效增大了轴向色散,在 430~710 nm 产生了 1 mm 的轴向色散,其相对非线性度为 4.6%,远小于单种玻璃色散物镜色散的非线性度。使用本文设计的色散物镜,光谱共焦显微镜的横向分辨率优于 5 μm ,轴向分辨率可达 0.3 μm ,可满足微位移测量、表面轮廓形貌检测等的需求。

参考文献:

[1] 王富生, 谭久彬. 表面微观轮廓的高分辨率光学测量方法[J]. 光学精密工程, 2000, 8(4): 309-315.
WANG F SH, TAN J B. Methods of high resolu-

tion optical measurement for surface profile [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(4): 309-315. (in Chinese)

[2] 曾毅波, 蒋书森, 黄彩虹, 等. 激光共焦扫描显微镜在微机电系统中的应用[J]. 光学精密工程,

- 2008, 16(7): 1241-1246.
- ZENG Y B, JIANG SH S, HUANG C H, *et al.*. Application of laser scanning confocal microscope in micro-electro-mechanical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1241-1246. (in Chinese)
- [3] ARRASMITH C L, PATIL C A, DICKENSHEET D L, *et al.*. A MEMS based handheld confocal microscope with Raman spectroscopy for in-vivo skin cancer diagnosis [J]. *SPIE*, 2009, 7169:7169N.
- [4] AHN M K, CHUN B S, SONG C, *et al.*. Development of in-vivo confocal microscope for reflection and fluorescence imaging simultaneously [J]. *SPIE*, 2010, 7568: 756821.
- [5] BROWNE M A, AKINYEMI O, CROSSLEY F, *et al.*. Stage-scanned chromatically aberrant confocal microscope for 3-D surface imaging [J]. *SPIE*, 1992, 1660:532-541.
- [6] MCBRIDE J W, BOLTRYK P J, ZHAO Z. The relationship between surface incline and confocal chromatic aberration sensor response [J]. *SPIE*, 2007, 6618: 66181F.
- [7] MIKS A, NOVAK A, NOVAK P. Analysis of method for measuring thickness of plane-parallel plates and lenses using chromatic confocal sensor [J]. *App. Opt.*, 2010, 49(17): 3259-3264.
- [8] 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)
- [9] 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)
- [10] ISO 25178-2010: Geometric Product Specifications (GPS)- Surface texture; areal [S].
- [11] RUPRECHT A K, PRUSS C, TIZIANI H J, *et al.*. Confocal micro-optical distance sensor: principle and design [J]. *SPIE*, 2005, 5856:128-135.
- [12] 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)
- [13] 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, 28(7): 131-135.
- LIU Q, YANG W CH, YUAN D CH, *et al.*. Design of dispersive objective for chromatic confocal displacement sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 28(7): 131-135. (in Chinese)
- [14] PRUSS C, RUPRECHT A, KORNER K, *et al.*. Diffractive elements for chromatic confocal sensors [J]. *DGaO Proc.*, 2005: 106-107.
- [15] BERKOVIC G, SHAFIR E, GOLUB M A, *et al.*. Multi-wavelength fiber-optic confocal position sensor with diffractive optics for enhanced measurement range [J]. *SPIE*, 2007, 6619: 66190U.
- [16] GARZON J, GHARBI T, MENESES J. Real time determination of the optical thickness and topography of tissues by chromatic confocal microscopy [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2008, 10:1-8.
- [17] MIKS A, NOVAK J, NOVAK P. Theory of chromatic sensor for topography measurements [J]. *SPIE*, 2007, 6609: 66090U.
- [18] 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, YANG 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)
- [19] 唐志列, 黄佐华, 梁瑞生, 等. 共焦显微镜的纵向分辨率极限及其判据[J]. *量子电子学报*, 2000, 17(3): 199-204.
- TANG ZH L, HUANG Z H, LIANG R SH, *et al.*. The vertical resolution limit and its criterion

of confocal microscope [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2000, 17(3):199-204. (in Chinese)

[20] DOBSON S L, SUN P, FAINMAN Y. Diffractive lenses for chromatic confocal imaging [J]. *App. Opt.*, 1997, 36(20): 4744-4748.

作者简介:



刘 乾(1983—),男,山东单县人,博士研究生,工程师,2006 年于北京理工大学获得学士学位,2009 于中国工程物理研究院获得硕士学位,主要从事精密测量、光学设计方面的研究。E-mail: liuqianblue@126.com



杨维川(1971—),男,四川彭州人,工学学士,高级工程师,1993 年毕业于东南大学,主要从事精密测量的研究。E-mail: yangwccn@yahoo.com.cn



袁道成(1966—),男,河南信阳人,硕士,研究员,硕士生导师,1994 年于四川大学获得硕士学位,主要从事精密测量的研究。E-mail: ydccaep@263.net

导师简介:



王 洋(1963—),男,辽宁营口人,博士,研究员,博士生导师,1998 年于西北工业大学获得博士学位,主要从事超精密加工与测量方面的研究。E-mail: wangycaep@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)