

紧凑长轴向色散光谱共焦镜头

白昊东^{1,2}, 徐南^{1,2}, 周建康^{1,2*}, 邹快盛^{1,2}, 沈为民^{1,2}¹苏州大学光电科学与工程学院教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;²苏州大学光电科学与工程学院江苏省先进光学制造技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

摘要 为提高和扩大光谱共焦位移传感器的测量精度和测量范围,并解决像方测量大数值孔径和物方光纤小数值孔径匹配下镜头过长的问题,设计一种紧凑型长轴向色散光谱共焦镜头。色散镜头用 5 个球面镜片,在工作波长 450~700 nm 内轴向色散范围达 3.5 mm,波长和焦移线性拟合相关系数为 0.97,像方数值孔径为 0.48,光学长度为 135 mm。在相同的镜头参数下,该色散镜头的轴向长度相比普通色散镜头减少了约 35%。最后利用设计的色散镜头搭建光谱共焦位移测量系统,并进行性能评估实验。实验结果表明,该系统的最大测量标准差为 0.05 μm ,最大平均绝对误差为 0.04 μm ,实际轴向分辨率优于 0.5 μm ,对被测物的最大测量角约为 28.5°。

关键词 光学设计; 光谱共焦; 轴向色散; 反望远结构

中图分类号 O433;O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230561

1 引言

1955 年 Marvin^[1]发明了共焦显微镜,用来检测物体的三维形貌信息。目前它已经成为半导体行业、材料科学、生物学、医学检测和诊断^[2]的重要工具。它的工作原理是:光源经小孔和显微物镜后聚焦在被测物上,反射的光逆向传播,再次通过显微物镜和共焦小孔,被探测器接收,由于入射小孔、出射小孔和像方焦点形成光学共轭,只有当被测物在物镜焦面时反射光才最有可能被探测器接收形成最强光斑。当被测物离焦时,反射光在小孔处形成离焦光斑,大部分反射光无法通过共焦小孔,由此可以克服光学镜头焦深限制,增强光学纵向探测能力。共焦显微镜需要通过轴向扫描最大光强来确定物体位置,因此检测时间比较长^[3]。

光谱共焦位移传感器是在共焦显微镜的基础上发展来的,具有共焦显微镜纵向探测的高分辨能力。入射的复色光在色散镜头轴向形成光谱色散,当被测物体处于有效色散范围内时通过分析反射光的波长来确定被测物的轴向位置,极大地提高了检测速度。色散镜头是光谱共焦位移传感器中的一个重要组成部分,镜头的色散范围和数值孔径等参数决定了仪器的轴向探测能力。刘乾等^[4]利用高色散玻璃和双胶合透镜设计了色散范围为 1 mm 的色散镜头,使用齐明透镜和双胶合透镜来减小球差,像方数值孔径为 0.3,但由于物方数值孔径仅 0.05,镜头整体较长。田雨等^[5]通过分析线性色散产生条件,设计了一款线性判定系数达

0.9972 的色散镜头,但色散范围仅 150 μm ,量程较小。杨锐等^[6]采用四级串联结构,在 400~700 nm 波段内实现了 30 mm 的色散范围,但光学系统的轴向长度达 477 mm,不利于传感器的小型化。邵谭彬等^[7]采用 4 片球面透镜设计了色散范围约为 10 mm 的色散镜头,实现了较大的测量范围,但像方数值孔径仅 0.12,不能测量大倾角物体同时轴向分辨率受限,而且几何光斑半径超过了 90 μm 。国外的 Shi 等^[8]设计了轴向色散为 7 μm 的色散镜头,分辨率小于 1 μm ,但仪器量程较小,仅能检测微小起伏的面形。Miks 等^[9]设计了轴向色散为 1.2 mm 的色散镜头,工作波长间隔为 300 nm,但物方和像方数值孔径都太小。根据目前的研究,色散镜头的物方或像方数值孔径都比较小时,镜头整体比较长,不利于色散镜头的小型化。本文将商用小数值孔径光纤作为输入端,设计出一种紧凑型大像方数值孔径的色散镜头,对色散镜头进行加工装调和测试,搭建了一套光谱共焦位移测量系统并进行了性能测试。

2 光谱共焦位移传感器原理分析和性能指标

2.1 原理分析

图 1 为光谱共焦位移传感器的工作原理,该传感器主要由光源、色散镜头和光谱仪组成。光源发出的复色光经小孔限束、分束板反射后透过色散镜头产生轴向色散,工作波长为 $\lambda_{\min} \sim \lambda_{\max}$ 的光聚焦在不同的轴

收稿日期: 2023-02-16; 修回日期: 2023-03-02; 录用日期: 2023-03-14; 网络首发日期: 2023-03-25

通信作者: *health@suda.edu.cn

向位置,当被测面位于波长 λ_0 所处的高度时,波长为 λ_0 的反射光以最大能量通过光谱仪前的共焦小孔,其他波长的光在被测面由于处于离焦状态而光能量密度低,反射后被共焦小孔再次限制从而导致进入光谱仪的能量弱,由此可以提高位移传感器的轴向分辨能力。光谱仪会获取类高斯曲线信号,中心峰值波长为 λ_0 ^[10],曲线的半峰全宽由小孔尺寸、色散镜头像方数值孔径、轴向色散范围等决定。当建立波长与轴向位置的对应关系时,可得到被测物的轴向位置信息。一般色散镜头波长与焦移的曲线关系要求接近线性,从而使不同波长处的轴向测量分辨率保持一致。本文中光源位于色散镜头的物方,被测物位于色散镜头的像方,色散镜头像方数值孔径不仅影响传感器的轴向分辨率,而且决定了能够测试表面的最大倾斜角度。目前市面上的光谱共焦位移传感器大多用Y形分束光纤代替分束板,Y形光纤的共同端连接色散镜头,分叉的两端分别接光源和光谱仪。当使用光纤端输出时,光纤纤芯既是点光源出射孔又是收光孔,和色散镜头的轴向色散条带构成光学共轭关系。由于光纤可弯曲并且长度可替换,传感器的探头使用更加灵活,但Y形光纤数值孔径一般为0.12~0.22,限制了色散镜头物方数值孔径的大小。

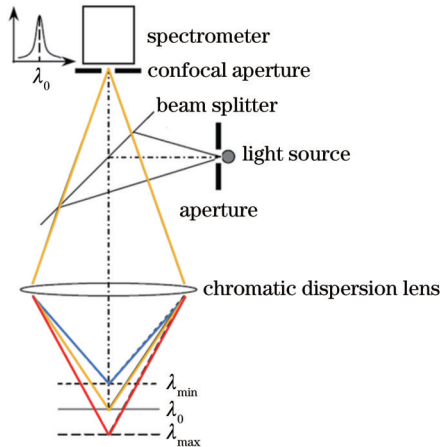


图1 光谱共焦位移传感器的工作原理

Fig. 1 Working principle of the chromatic confocal displacement sensor

2.2 性能指标

对于光谱共焦位移传感器,表征其特性的主要性能指标有轴向测量范围、线性度和轴向分辨率等。传感器的轴向测量范围由色散镜头的色散范围决定,如图1所示,经过色散镜头后,不同波长的光聚焦在不同的轴向位置,测量范围指在工作波长范围内最大波长 λ_{\max} 与最小波长 λ_{\min} 的位置差,延长轴向色散可以增大测量范围,但光能量会减弱,仪器信噪比降低。而增大色散镜头的像方数值孔径会提高测量信噪比,但会使镜头像差增大,线性度和色散范围也会受到影响,因此需要平衡色散镜头设计指标。

线性度指波长与焦移之间的线性相关程度,高线性度可保障各个波长处测量精度的一致性。由于玻璃材料的非线性色散特性,需要多种玻璃进行平衡,使色散镜头在色散范围内的色散率接近线性。色散镜头的线性度通常使用回归分析进行评估,利用最小二乘法对波长和焦移进行线性拟合。假设波长和焦移线性拟合方程的表达式^[11]为

$$Y = kx + b, \quad (1)$$

$$\begin{cases} k = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) y_i}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \\ b = \bar{y} - k\bar{x} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: x 为波长值, x_i 为第*i*个波长值, \bar{x} 为所有波长值的平均值; y_i 为第*i*个焦移值, \bar{y} 为所有焦移值的平均值; Y 表示拟合的焦移值。在回归分析中使用相关系数 R^2 来进行评估,表达式为

$$R^2 = \frac{\sum_i (Y_i - \bar{y})^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}, \quad (3)$$

R^2 在0~1之间变化,相关系数 $R^2=1$ 时,表示波长和焦移为完全线性关系,随着数值降低逐渐偏离线性关系。轴向分辨率与接收到反射光信号的半峰全宽有关,半峰全宽指光信号峰高一半处的宽度,通常认为半峰全宽越窄,传感器的轴向分辨率越高。在高轴向分辨率情况下,可不考虑光源的发光光谱特性,被测物表面对不同波长光的反射率、探测器的量子响应效率。光谱共焦位移传感器对任意波长的轴向响应光强^[12]为

$$I(\lambda) = \left\{ \frac{\pi a^2}{\lambda f} \operatorname{sinc} \left[\frac{\pi a^2 k (\lambda - \lambda_0)}{2\lambda f^2} \right] \right\}^4, \quad (4)$$

式中: a 是传感器镜头的孔径; λ 是任意波长; λ_0 是聚焦在被测物处光的波长; f 是传感器镜头的焦距; k 是式(1)的斜率,与轴向色散范围和工作波段有关。对式(4)进行归一化,近似写成

$$I(\lambda) \approx \left\{ \operatorname{sinc} \left[\frac{2\pi k (\lambda - \lambda_0) NA^2}{\lambda} \right] \right\}^4, \quad (5)$$

式中: NA 为传感器镜头的像方数值孔径。本文采用数值举例的方法进行分析,假设聚焦在被测物处光的波长 λ_0 为550 nm,数值孔径 NA 的变化范围为0.1~0.9,工作波长区间为400~700 nm,轴向色散范围取0.12, 0.18, 0.24, 0.3 mm,相应的斜率 k 为400, 600, 800, 1000,其代表单位波长对应的位移量,如 k 为400时代表1 nm波长宽度对应0.4 μm 的轴向移动距离量。

选取535~565 nm波长范围内的仿真曲线,从图2(a)可以看到,镜头的像方数值孔径 NA 越大,半峰全宽越窄。从图2综合来看,斜率 k 越大,半峰全宽越窄。所以可以得出结论:色散镜头的轴向分辨率与像方数值孔径 NA 和轴向色散范围成正相关,但大数值孔径和长轴向色散范围在镜头设计上存在制约,需要平衡考虑。

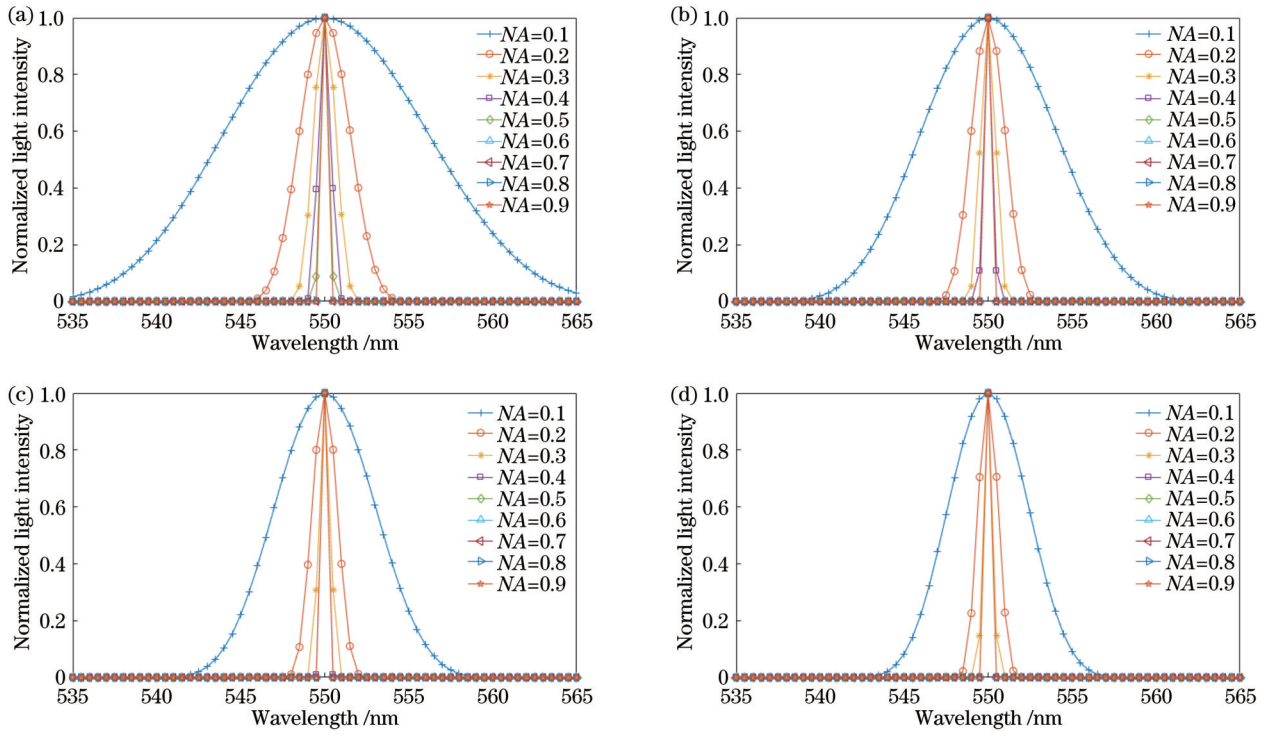


图 2 不同斜率和像方数值孔径对半峰全宽的影响。(a) $k=400$; (b) $k=600$; (c) $k=800$; (d) $k=1000$

Fig. 2 Effect of different slopes and image space numerical apertures on full width at half maximum (FWHM). (a) $k=400$; (b) $k=600$; (c) $k=800$; (d) $k=1000$

3 色散镜头的设计和分折

色散镜头不仅要产生轴向光谱色散,还要保证波长和焦移具有较好的线性度,初始结构^[13-15]满足

$$\begin{cases} \varphi = \sum_{j=1}^N \varphi_j \\ \sum_{j=1}^N \frac{\varphi_{dj}}{v_{dj}} = \frac{-\delta'_{CF}}{f'^2(1-m)^2}, \\ \sum_{j=1}^N \frac{R_{\lambda j}}{v_{dj}} \varphi_{dj} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: φ 为色散镜头的光焦度; φ_j 为第 j 个透镜的光焦度; N 为透镜个数; φ_{dj} 和 v_{dj} 分别为第 j 个透镜在波长 d 处的光焦度和阿贝数; δ'_{CF} 为 C 波长和 F 波长之间的轴向色散; f' 为焦距; m 为横向放大倍率; $R_{\lambda j}$ 为第 j 个透镜在波长 λ 处的色散系数。 $R_{\lambda j}$ 表示为

$$R_{\lambda j} = \frac{n_{\lambda j} - n_{A_j}}{n_{C_j} - n_{A_j}} - \frac{\lambda - \lambda_A}{\lambda_C - \lambda_A}, \quad (7)$$

式中: $n_{\lambda j}$ 为第 j 个透镜在波长 λ 处的折射率; n_{A_j} 为第 j 个透镜在波长 A 处的折射率; n_{C_j} 为第 j 个透镜在波长 C 处的折射率。它们的具体关系式^[16]为

$$n(\lambda) = \sqrt{(A_0 + A_1\lambda^2 + A_2\lambda^{-2} + A_3\lambda^{-4} + A_4\lambda^{-6} + A_5\lambda^{-8})}, \quad (8)$$

式中: A_0, A_1, A_2, A_3, A_4 和 A_5 是不同 λ 阶次项的系数。还可看出单片玻璃的轴向色散是非线性的,为了获得较好的线性色散,需要至少使用两种不同的玻璃材料,

而且要得到较大的色散范围,应选择阿贝数相差较大的玻璃材料。

目前光谱共焦位移传感器的光源大多为低数值孔径的光纤光源,色散镜头的物方数值孔径由于光纤数值孔径的限制通常比较小,为增大传感器的轴向分辨率和倾斜面测量角度,要求色散镜头具有大的像方数值孔径,但这会导致镜头轴向长度比较长。为了减小色散镜头的轴向长度,采用反摄远(负正正)结构作为初始结构,如图 3 所示,由前组和后组两部分组成。前镜片组的焦距为负,可以通过增大物方发散角缩短物距,从而减小色散镜头的整体长度。图 3 中 θ 为物方孔径角, θ' 为边缘光线经过前镜片组后与光轴的夹角,图中虚线和实线后镜片组所在的位置分别为不采用和采用反摄远结构时的位置,可见采用前负镜组后整个光学系统的长度可缩短 d_1 。假设色散镜头缩短比例为 Γ ,并将入射光线在前组边缘的高度 h_{entry} 与最大边缘光线高度 h_{max} 之比定义为反摄远因子 r ,一般 r 取 $0.25 \sim 0.8$ ^[17]。根据图 3 的三角比例,可得

$$\begin{cases} \Gamma = r + (1-r)\tan\theta/\tan\theta' \\ r = h_{\text{entry}}/h_{\text{max}} \end{cases} \quad (9)$$

图 4 为缩短比例 Γ 和 r, θ' 的关系图,要想获得较小的缩短比例 Γ ,需要减小反摄远因子 r 并且增大 θ' ,但 θ' 越大会使前镜片组的光焦度越大,引入更多像差,设计中应综合考虑 θ' 的值。后镜片组的焦距为正,主要作用是矫正球差和产生近线性的轴向光谱色散。在设置

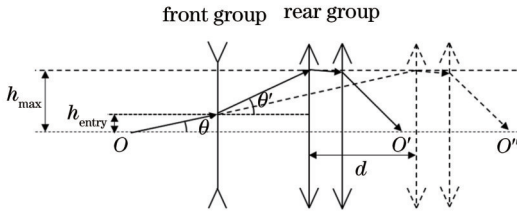
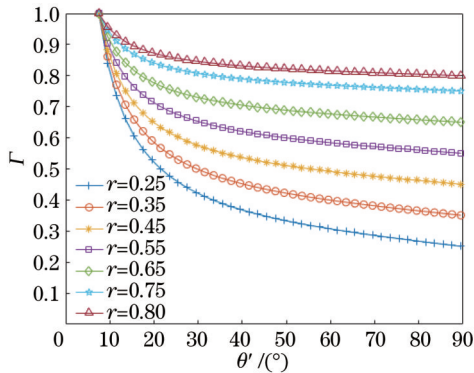


图 3 反摄远结构

Fig. 3 Inversed telephoto structure

初始结构时,通常最后一个透镜被设计成具有高折射率的半球形,有助于增大像方数值孔径的同时降低球差。

图 4 缩短比例 Γ 和 r, θ' 的关系Fig. 4 Relationship between the shortening ratio Γ and r, θ'

镜片实例化采用 3 个镜片实现,前组采用单片双凹型负透镜来增大发散角,后组选择 2 片玻璃种类不同的透镜来产生轴向光谱色散。首先在成都光明公司提供的玻璃库中剔除掉特殊、生产频次低和不常用的玻璃种类,然后依据式(6)编写自动组合筛选算法挑选剩余的玻璃,最终选择一种冕牌玻璃 H-K9L 和一种火石玻璃 H-ZF52。这两种玻璃阿贝数相差大,可以产生较长的轴向色散,火石玻璃具有较大的折射率,有助于减小球差,且两种玻璃价格低,易于批量化生产。

色散镜头的物方是轴上点,主要矫正的像差为球差。球差大时会影响色差的利用,即某一波长光束在镜头不同孔径会聚点与其他波长光束的聚焦位置重合,从而使光谱仪接收的光信号半峰全宽增大,严重影响位移传感器的轴向分辨率。为降低球差,对色散镜头后组进行拆分,通过分解光焦度减小光线在每个镜面上的入射角,并且把后组镜片中的最前一个面和最后一个面分别弯向物方和像方,更有利于减小小像差。虽然拆分透镜的数量越多,球差会越小,但是镜片的数量过多会使系统变得复杂,根据文献[18]球差与拆分透镜数量的关系(拆分到 3 片以上时,球差减小得比较缓慢),将后组两个镜片都分别拆分成 2 片,可以在增加较少镜片数量的情况下最大程度降低球差,球差可以下降到 30% 左右。拆分后透镜的光焦度按照密接薄透镜公式计算,不改变总的光焦度和放大率,由式

(6)可知不会影响轴向色散长度。

本文将传感器的工作波段选择为可见光 450~700 nm 波段,轴向测量范围定为 3.5 mm,物方选择数值孔径为 0.13 的光纤光源,为提高传感器的轴向分辨率并平衡色散范围,适当降低设计难度,像方数值孔径暂定为 0.5。利用光学设计仿真软件 ZEMAX 进行优化,首先将初始结构参数输入到软件中,在波长 450~700 nm 内设置 6 个多重结构,然后约束波长和焦移的线性度并使轴向色差大于 3.5 mm,选取默认评价函数中的波前差为评价标准,同时综合控制焦距、数值孔径和各个结构下的像差,使各波长在焦点位置处的弥散斑在艾里斑附近,最终的优化结果如图 5 所示。色散镜头在工作波长 450~700 nm 处的轴向色散为 3.5 mm,像方数值孔径为 0.48,总长为 135 mm,最大直径为 44 mm,设计中光阑的大小会随着波长的变化而变化,本设计将光阑设置在第一个镜片的前表面,并保持不变。如果不采用反摄远结构,相同的物方数值孔径和像方数值孔径下镜头总长至少为 206 mm,由此可知该反摄远结构的色散镜头的缩短比例 $\Gamma=65\%$,轴向长度减少了 35%。

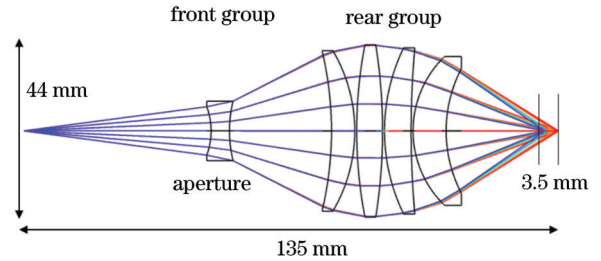


图 5 色散镜头

Fig. 5 Chromatic dispersion lens

图 6 为色散镜头在波长 450, 500, 550, 600, 650, 700 nm 下的点列图,可以看出光线基本都在艾里斑直径 1.71 μm 以内,其中波长 450 nm 处的最大均方根 (RMS) 光斑半径为 2.7 μm ,球差得到很好控制,成像质量较好。

对波长和焦移进行线性拟合,评估色散镜头测量分辨率的一致性,即色散镜头的线性度,结果如图 7 所示。黑点为设计的色散位置,直线为拟合出的直线,表示在工作波长 450~700 nm 内设计镜头的各波长色散位置点距离此直线的偏离均方差最小,可以看出色散镜头的轴向色散为 3.512 mm,通过计算得线性相关系数为 $R^2=0.97$,在波长范围两端和中心波长处设计的色散位置和拟合位置偏差最大,接近 0.5 mm,表示了线性偏离的绝对值。在 450 nm 波长处斜率 k 值最大,意味着单位波长的改变对应着距离的快速改变,测量分辨率高于平均位置测量分辨率;在 700 nm 波长处 k 值最小,意味着单位波长的改变对应着距离的缓慢改变,此处的测量分辨率会略低于平均水平;中心波长处

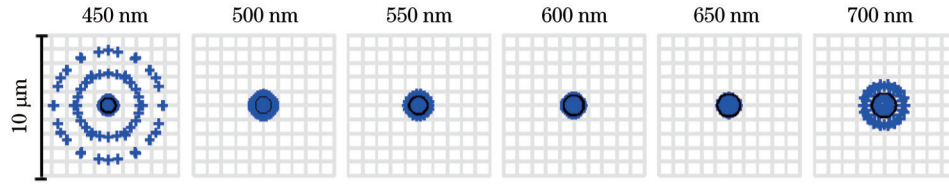


图 6 点列图

Fig. 6 Spot diagrams

设计值和直线虽然偏离较大,但测量分辨率和平均水平十分接近。应用二次或高次多项式曲线拟合,建立波长和位置的一一对应关系,采用三次曲线拟合,结果如虚线所示,拟合曲线与设计值的相关系数 $R^2=1$,从而保证了测量的高精度,但在不同波长处由于斜率 k 不同,不同波长处轴向分辨率略有不同。

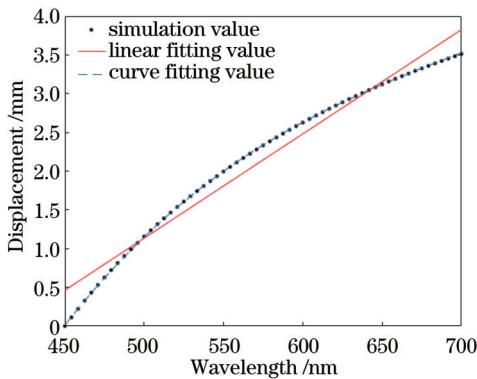


图 7 波长与焦移线性拟合曲线

Fig. 7 Linear fitting curve of wavelength and focal shift

将色散镜头的像方数值孔径 NA 和斜率 k 代入式 (5),可计算出 450, 575, 700 nm 波长处的半峰全宽分别为 0.0088, 0.0112, 0.0136 nm, 平均半峰全宽约为 0.0112 nm。光谱共焦位移传感器的轴向分辨率 σ_d 、光谱工作范围 $\Delta\lambda$ 、轴向色散范围 ΔL 和半峰全宽 F_{FWHM} 的关系式为

$$\frac{\Delta L}{\sigma_d} = \frac{\Delta\lambda}{F_{FWHM}}, \quad (10)$$

式中: $\Delta L=3.5 \times 10^6$ nm, $\Delta\lambda=250$ nm。可得

$$\sigma_d = \frac{\Delta L \times F_{FWHM}}{\Delta\lambda} = 0.15 \mu\text{m}, \quad (11)$$

因此在理想情况下,该传感器的平均轴向分辨率为 0.15 μm 。综上所述,本文设计的色散镜头的性能参数如表 1 所示。

4 实验及结果分析

采用 ZYGO 干涉仪检测装调好的色散镜头,具体实验装置如图 8 所示。激光聚焦点置于色散镜头物方焦点处,光束经色散镜头后聚焦在标准球面反射镜的球心位置,然后再经球面反射镜原路返回,反射光返回 ZYGO 干涉仪后与参考光束相遇产生干涉条纹,检测结果如图 9 所示。产生的干涉条纹明暗相间,波前

表 1 色散镜头的性能参数

Table 1 Performance parameters of chromatic dispersion lens

Parameter	Value
Wavelength /nm	450-700
Volume numerical aperture	0.13
Image numerical aperture	0.48
Maximum measuring angle /($^\circ$)	28.7
Axial measuring range /mm	3.5
Average axial resolution / μm	0.15
Linearity R^2	0.97
Optical length /mm	135

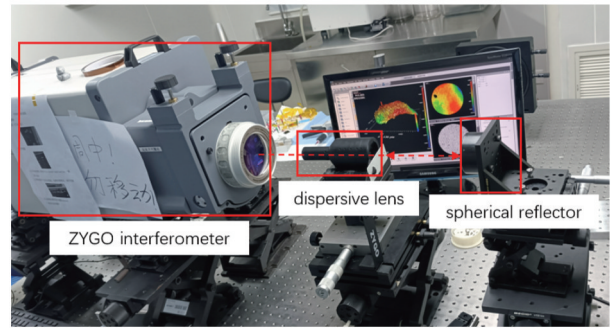


图 8 干涉检测实验装置

Fig. 8 Interference detection experimental device

RMS 为 0.029 λ ,表明装调后的色散镜头像质较优。

光谱共焦位移测量系统选择卤钨灯(HL-2000)作为白光光源,光谱仪(USB2000+)的分辨率为 1.5 nm,选择纤芯直径为 50 μm 、分光比为 1:1 的 Y 形分束光纤连接主要部件,它有 1 个入口端和 2 个出口端,入口端与色散镜头连接,出口端分别与光源和光谱仪连接。在测量系统开始工作前,需要先标定波长和焦移的关系,标定实验原理如图 10(b)所示。光源发出的光经过 Y 形分束光纤的一个出口端和入口端后从色散镜头出射,经被测物反射后回到色散镜头,一部分光经过 Y 形分束光纤的入口端和另一个出口端后进入光谱仪。采用双面反射镜作为被测物,反射镜双面平行度小于 5",利用位移平台移动被测物位置,反射镜的一面用色散镜头进行检测并用光谱仪测量光谱,另一面用点激光位移传感器(LK-G30,基恩士公司)进行检测并记录下位移,点激光位移传感器的距离测量精度为 0.05 μm ,在 450~700 nm 的工作波段内位移差为

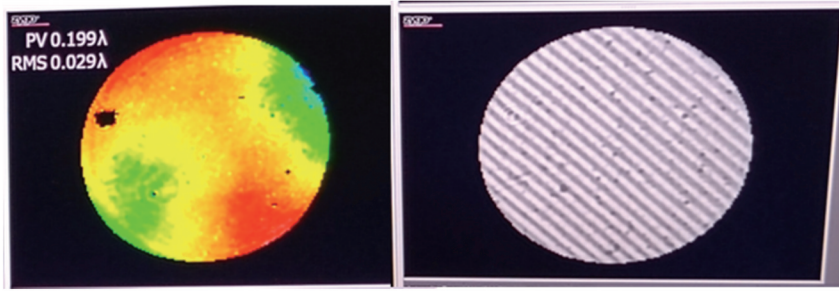


图 9 ZYGO干涉仪检测结果
Fig. 9 Detection result of the ZYGO interferometer

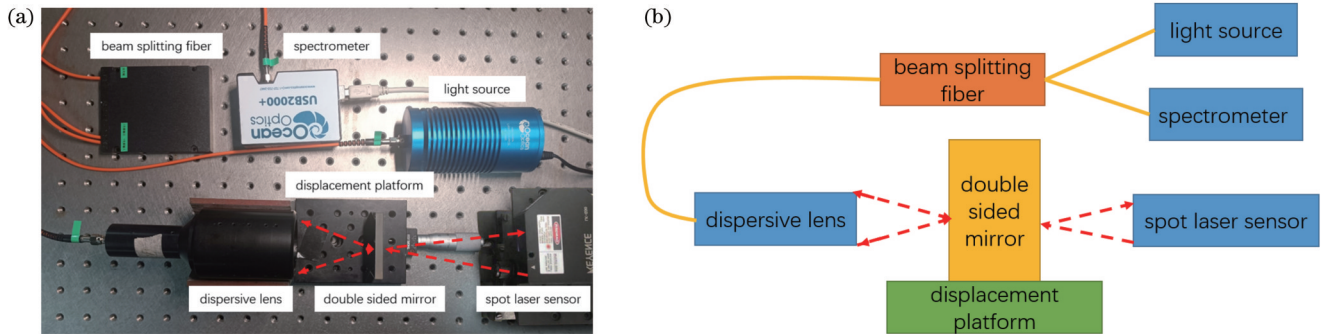


图 10 标定实验。(a)实物图;(b)原理图
Fig. 10 Calibration experiment. (a) Physical diagram; (b) schematic diagram

3.5244 mm。一共检测了 45 个点,对得到的波长-位移数据进行拟合,标定曲线公式为

$$y = 9.257 \times 10^4 \cdot \lambda^3 - 1.958 \times 10^5 \cdot \lambda^2 + 1.46 \times 10^5$$

$$\lambda - 3.448 \times 10^4, \quad (12)$$

该曲线与检测点的相关系数 $R^2=1$ 。为了验证测量的可重复性,开展了标准差和平均绝对误差测试。将反射镜作为被测物,在工作波长 450,575,700 nm 附近处分别对标准量块表面进行 100 次检测,对所测得的光谱进行峰值提取,根据式(12)求解出位置并将其作为测量值,处理后的数据如图 11 所示,测量标准差和平均绝对误差如表 2 所示。可以看到系统的最大测量标准差为 $0.05 \mu\text{m}$,最大平均绝对误差为 $0.04 \mu\text{m}$,而且波长越长,误差越小。测量的误差一方面来源于光源的不稳定性,采用的卤钨灯在工作时会产生大量的热,光谱会随着温度的变化而产生波动;另一方面来源于光谱仪内部的噪声,例如暗电流、背景辐射噪声、读出噪声。从图 7 可以看到,波长越长,拟合曲线的斜率越小,表示单位波长对应的位移量越小,对于长波和短波处同样的波长误差量,如果转换成位移信息,短波处的位移误差要大于长波处的位移误差。

在轴向分辨率测试中,选取高度差(H)为 0.2, 0.5, $1 \mu\text{m}$ 的标准样品进行测试,标准样品的高度误差小于 $0.05 \mu\text{m}$,对每个标准样品分别检测 20 次,对采集到的光谱数据进行峰值提取并计算出高度差,检测结果如图 12 所示。当高度差为 $0.2 \mu\text{m}$ 时,实际检测结果基本被噪声覆盖,无法进行分辨;当高度差为

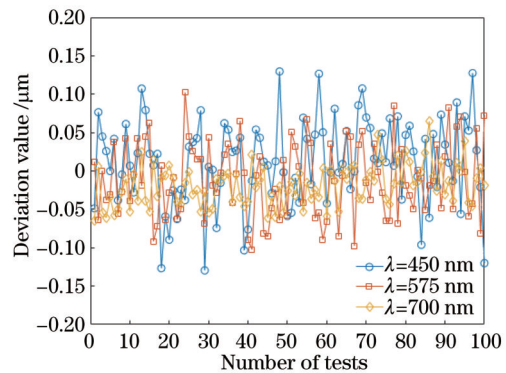


图 11 检测误差
Fig. 11 Detection error

表 2 测量标准差和平均绝对误差
Table 2 Measured standard deviation and average absolute error

Wavelength /nm	Measured standard deviation / μm	Average absolute error / μm
450	0.05	0.04
575	0.05	0.04
700	0.03	0.02

$0.5 \mu\text{m}$ 和 $1 \mu\text{m}$ 时,检测结果中不存在负值,可以进行分辨。因此该传感器的轴向分辨率在 $0.2 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 之间,低于理论值 $0.15 \mu\text{m}$ 。主要原因是:理论分析时采用的是点光源,而实际采用的光纤纤芯直径为 $50 \mu\text{m}$,实际的分辨率与纤芯直径和镜头光学点扩散函数的卷

积效应有关,这会增大半峰全宽,导致轴向分辨率降低,如果采用纤芯直径更小或接近镜头艾里斑直径的光纤和分辨率更高的光谱仪,光谱信号的半峰全宽会更窄,能进一步提升轴向分辨率。另外轴向分辨率测试结果的误差要比重复性测试结果要大,主要原因是轴向分辨率测试是对高度差进行检测,需要检测两个点然后相减,两个点的检测都会产生误差,而重复性测试是对一个点进行多次检测,相比之下,轴向分辨率测试实验的误差要大些。

最后进行最大测量角度测试,实验装置如图 13 所示,将被测物反射镜放置在旋转台上,旋转台角度刻线分辨率为 1° ,图中水平虚线为光轴方向,反射镜前表面与光轴垂直方向的夹角即为测量的角度,通过旋转台对反射镜进行旋转,记录下每次旋转的角度和光谱数据。测试结果如图 14 所示,可以看到随着角度的增大,探测器接收到的反射光信号也越来越弱,在旋转到

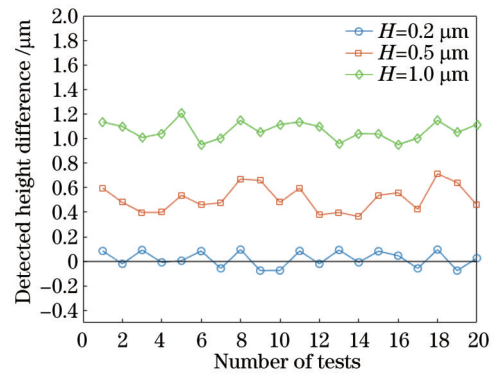


图 12 轴向分辨率测试

Fig. 12 Axial resolution test

29° 时,探测器得到的光谱数据已经完全被噪声覆盖了,无法得出检测结果,所以该色散镜头的最大测量角度约为 28.5° ,与色散镜头 NA 为 0.48 时的理论值 28.7° 相接近。

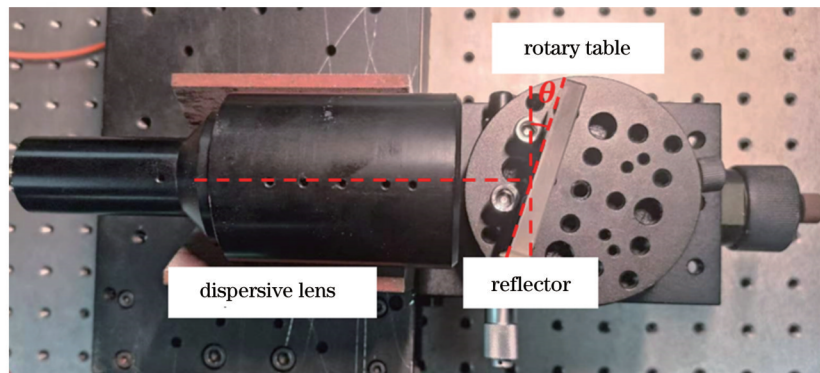


图 13 最大测量角度测试装置

Fig. 13 Maximum measuring angle test setup

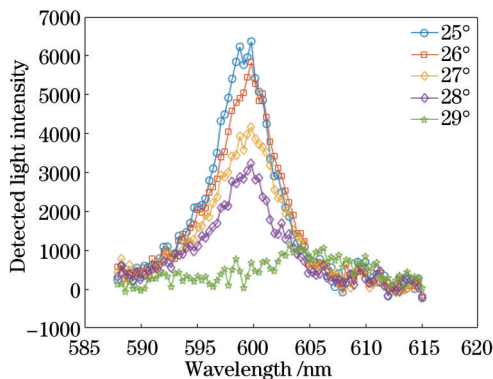


图 14 最大测量角度测试结果

Fig. 14 Maximum measuring angle test result

通过对分辨率、测量范围、重复性及可探测角度的测试,所设计的镜头达到了设计的要求。后续通过构建横向两维位移台,可进行物体三维形貌的测量。

5 结 论

采用反摄远结构设计了一种紧凑型长轴向色散光

谱共焦镜头,在同样的性能参数下,该镜头的轴向长度比普通有限距共轭色散镜头减少约 35%,并给出了长度缩短比例公式,其对设计小物方数值孔径和大像方数值孔径的光谱共焦镜头具有指导意义。应用中,扩大色散范围即增加测量距离、增大像方数值孔径、保持近线性的色散性能是光谱共焦镜头追求的目标,但三种参数又和测量系统的能量利用率、镜头的体积、复杂程度等相关,增大像方数值孔径会提高测量信噪比,但会使镜头像差增大,线性度和色散范围也会受到影响。镜头设计中,需要降低球差并扩大色差,依据镜头拆分数量与球差的关系并采用了两种玻璃种类,实现 0.48 像方数值孔径,能够测试 28.5° 的倾斜表面。为进一步提高测量的倾斜面角度,需要提高镜头的像方数值孔径,并进一步增加镜片数量,随着非球面加工工艺趋于成熟,采用非球面校正球差也成为大数值孔径镜头的选择。如果采用纤芯直径更小的光纤和分辨率更高的光谱仪,能进一步提升测量系统的轴向分辨率。所提方法设计的光谱共焦色散镜头有利于位移或 3D 测量仪器的小型化,而且较少的镜片数量和玻璃种类有利

于光谱共焦色散镜头商业化推广应用。

参 考 文 献

- [1] Marvin M. Microscopy apparatus: US3013467[P]. 1961-12-19.
- [2] 李滨. 激光共焦显微镜在结膜炎诊断治疗中的应用[J]. 中国激光医学杂志, 2021, 30(1): 48.
Li B. The application of a laser confocal microscope in the diagnosis and treatment of conjunctivitis[J]. Chinese Journal of Laser Medicine & Surgery, 2021, 30(1): 48.
- [3] Goodman D S. Theory and practice of scanning optical microscopy[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1987, 4(3): 551-552.
- [4] 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. The design of a dispersive objective for chromatic confocal displacement sensor[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(7): 131-135.
- [5] 田雨, 刘宾. 光谱共焦位移传感器色散镜头设计[J]. 光学技术, 2018, 44(3): 381-384.
Tian Y, Liu B. The design of a dispersion lens for a chromatic confocal displacement sensor[J]. Optical Technique, 2018, 44(3): 381-384.
- [6] 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): 15-19.
Yang R, Yun Y, Xie B, et al. The design of a dispersive objective lens of a large linear chromatic confocal 3D surface profiler[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(5): 15-19.
- [7] 邵谭彬, 郭文平, 席英皓, 等. 大量程光谱共焦位移传感器设计及性能评估[J]. 中国激光, 2022, 49(18): 1804002.
Shao T B, Guo W P, Xi Y H, et al. Design and performance evaluation of large-range spectral confocal displacement sensor [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(18): 1804002.
- [8] Shi K B, Li P, Yin S Z, et al. Chromatic confocal microscopy using supercontinuum light[J]. Optics Express, 2004, 12(10): 2096-2101.
- [9] Miks A, Novak J, Novák P. The theory of hyperchromats with linear longitudinal chromatic aberration[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 5945: 59450Y.
- [10] 黄伟华, 贺春景, 赵维谦, 等. 激光共焦 LIBS 显微成像系统的研制[J]. 光学学报, 2020, 40(24): 2430002.
Huang W H, He C J, Zhao W Q, et al. The development of a confocal LIBS microscope[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(24): 2430002.
- [11] 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. The design of a spectral confocal chromatic displacement sensor objective[J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(8): 62-66.
- [12] Browne M A, Akinyemi O, Boyde A. Confocal surface profiling utilizing chromatic aberration[J]. Scanning, 1992, 14(3): 145-153.
- [13] Novak J, Miks A. Hyperchromats with linear dependence of longitudinal chromatic aberration on wavelength[J]. Optik, 2005, 116(4): 165-168.
- [14] Miks A, Novak J, Novák P. The theory of hyperchromats with linear longitudinal chromatic aberration[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 5945: 59450Y.
- [15] Miks A, Novák J, Novák P. The theory of a chromatic sensors for topography measurements[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6609: 66090U.
- [16] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2016: 53-56.
Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2016: 53-56.
- [17] Zhang Y Q, Gross H. Systematic design of microscopy objectives. Part II: lens modules and design principles[J]. Advanced Optical Technologies, 2019, 8(5): 349-384.
- [18] Fischer R E. Optical system design[M]. 4th ed. New York: McGraw Hill, 2004: 66-68.

Compact Long-Axial Dispersive Chromatic Confocal Lens

Bai Haodong^{1,2}, Xu Nan^{1,2}, Zhou Jiankang^{1,2*}, Zou Kuaisheng^{1,2}, Shen Weimin^{1,2}

¹Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China;

²Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China

Abstract

Objective The chromatic confocal displacement sensor forms a spectral dispersion of polychromatic light along the axial direction of the dispersion lens. When an object is within the effective dispersion range, its axial position can be determined by analyzing the wavelength of the reflected light. This sensor offers high detection accuracy, fast detection speed, and good stability, making it a crucial tool for the semiconductor industry, material science, biology, medical detection, and diagnostics. The dispersion lens is an important component of the chromatic confocal displacement sensor. The axial detection ability of the sensor is determined by its dispersion range and numerical aperture. This study found that a relatively small object or image numerical aperture of the dispersion lens results in a long overall length that hinders its miniaturization. In this study, we aim to develop a dispersion lens with a large numerical aperture and small volume to enhance the measurement accuracy and range of the chromatic confocal displacement sensor.

Methods This paper presents the working principle of the chromatic confocal displacement sensor, then examines the

factors affecting its main performance indicators, such as axial measurement range, linearity, and axial resolution. The axial measurement range of the sensor is determined by the axial chromatic aberration of the dispersion lens, and a combination of at least two glasses is required for optimal linearity. The control variable method is used to analyze the influence of image numerical aperture, working wavelength, and dispersion range on the axial resolution. Subsequently, the study investigates the factors affecting the shortening ratio in the reverse telephoto structure. Finally, the optical design structure is processed and modified based on experiments conducted to validate the accuracy of the theoretical analysis.

Results and Discussions The dispersion lens, designed using the reverse telephoto structure, has a shorter axial length and a larger image numerical aperture. The axial optical length is 135 mm, and the image numerical aperture is 0.48. With the same lens parameters, the axial length of the dispersion lens is about 35% shorter compared with that of the standard dispersion lens. The axial dispersion of the lens is 3.5 mm. While extending the axial dispersion can increase the measurement range, it also weakens the optical energy and reduces instrument signal-to-noise ratio. Increasing the image square numerical aperture of the dispersion lens improves the measurement signal-to-noise ratio but also increases head aberration, and affects linearity and dispersion range. Therefore, it is necessary to balance the design index of the dispersion lens. The image quality detection and performance evaluation experiments conducted on the adjusted dispersion lens show a maximum measurement standard deviation of $0.05\ \mu\text{m}$, a maximum average absolute error of $0.04\ \mu\text{m}$, and the actual axial resolution is better than $0.5\ \mu\text{m}$. The maximum measurement angle for the measured object is approximately 28.5° , confirming the accuracy of the theoretical analysis.

Conclusions In this study, a compact long-axial dispersive spectral confocal lens with chromatic dispersion is designed by using the reverse telephoto structure. The design reduces the axial length of the lens by about 35% compared with conventional finite-range conjugate dispersion lens with the same performance parameters. A length reduction ratio formula is provided, which serves as a guide for designing chromatic confocal lenses with small object numerical aperture and large image numerical apertures. In application, the goals of the spectral confocal lens include expanding the dispersion range, increasing the numerical aperture of the image, and maintaining the near-linear dispersion performance. However, these three parameters are also related to energy utilization of the measurement system, volume, and the complexity of the lens. Increasing the numerical aperture of the image will improve the measurement signal-to-noise ratio but will increase the image aberration of the lens head, and the linearity and dispersion range will also be affected. The axial resolution of a dispersion lens is positively correlated with the image numerical aperture and the axial dispersion range, but the large numerical aperture and the long-axial dispersion range constraint the lens design and need to be balanced. The lens has an image square numerical aperture of 0.48 and can measure angles up to 28.5° inclined surface. To further improve the image square numerical aperture of the lens, it is necessary to increase the number of lens. As aspheric processing technology matures, aspheric correction of spherical aberration becomes an option for large numerical aperture lenses. Using optical fiber with smaller core diameter and spectrometer with higher resolution can further improve the axial resolution of the measurement system. The spectral confocal dispersion lens design in this study is advantageous for miniaturization displacement or three dimensional measuring instruments. Fewer lenses and glass types are conducive to commercial adoption and application.

Key words optical design; chromatic confocal; axial dispersion; reverse telephoto structure