

引用格式: WANG Jiayi, LIU Tao, TANG Xiaofeng, et al. Fiber-coupled Chromatic Confocal 3D Measurement System and Comparative Study of Spectral Data Processing Algorithms[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(11):1112001

王佳怡,刘涛,唐晓锋,等. 光纤式色散共焦三维测量系统及算法比较研究[J]. 光子学报, 2021, 50(11):1112001

光纤式色散共焦三维测量系统及算法比较研究

王佳怡¹, 刘涛¹, 唐晓锋¹, 胡佳琪¹, 王兴², 李国卿¹, 何韬¹, 杨树明¹

(1 西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 超快诊断技术重点实验室, 西安 710119)

摘 要: 利用 Zemax 优化设计了结构简单、低成本的非球面色散镜组, 搭建了光纤式色散共焦三维测量软硬件系统。结合实验测试数据定量比较了峰值法、质心法、高斯拟合法和样条插值法的色散共焦光谱响应峰值波长提取性能, 通过轴向分辨率和位移精度测试实验对比分析了两种测量曲线标定方法对于系统测量性能的影响。实验结果表明: 系统轴向测量范围为 1 mm, 高斯拟合法在四种峰值波长提取算法中精度较高且适应性更好, 两种标定方法对应的轴向分辨率均达到 0.2 μm , 在整个量程范围内, 位移测量精度优于 1%; 对厚度为 0.219 mm 的石英玻璃进行测量, 均值的相对误差为 0.5%。利用该系统实际测量了台阶结构、柔性电极和 MEMS 器件的三维形貌, 充分验证了本系统可实际应用于三维微观形貌和透明材料厚度的高精度测量。

关键词: 色散共焦; 三维测量; 光谱色散; 膜厚; 标定

中图分类号: TH741

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20215011.1112001

Fiber-coupled Chromatic Confocal 3D Measurement System and Comparative Study of Spectral Data Processing Algorithms

WANG Jiayi¹, LIU Tao¹, TANG Xiaofeng¹, HU Jiaqi¹, WANG Xing², LI Guoqing¹,

HE Tao¹, YANG Shuming¹

(1 State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(2 Key Laboratory of Ultra-fast Photoelectric Diagnostics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: A simple aspheric chromatic dispersion lens group of low cost is designed using Zemax, and an integrated fiber-coupled chromatic confocal 3D measurement system is developed. Performances of four peak wavelength extraction methods, i.e. the maximum method, centroid method, Gaussian fitting method and spline interpolation method, have been compared and analyzed quantitatively. In addition, calibration accuracy of Gaussian fitting method and spline interpolation method is tested and compared through the axial resolution and displacement measurement experiments. The experimental results show that the axial measurement range of the built system is 1 mm. The Gaussian fitting method has higher accuracy and better stability among the four peak extraction algorithms. The axial resolution of the system using Gaussian fitting based and spline interpolation based calibration methods can both reach 0.2 μm and the displacement measurement accuracy is better than 1% within the whole measurement range; a quartz glass with a thickness of 0.219 mm is measured, and the relative measurement error of the average value is 0.5%.

基金项目: 陕西省重点研发计划(Nos. 2021ZDLGY12-06, 2020ZDLGY04-02), 陕西省科技创新团队(No. 2019TD-011)

第一作者: 王佳怡(1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为三维光学测量技术。Email: 15040365508@163.com

导师(通讯作者): 刘涛(1984—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光学显微及精密测量技术。Email: liu8483@xjtu.edu.cn

收稿日期: 2021-05-11; 录用日期: 2021-08-16

<http://www.photon.ac.cn>

Finally, the developed system is applied to the 3D surface measurement of a step structure, a flexible electrode and a MEMS unit, and the experimental results indicate that the proposed system can perform high-precision 3D measurements of complex microstructures and transparent material thicknesses.

Key words: Chromatic confocal; 3D measurement; Spectral dispersion; Film thickness; Calibration

OCIS Codes: 120.3620; 150.1488; 120.6650; 180.6900; 060.2380;

0 引言

光学三维检测技术因其非接触、无损伤、高精度的显著优势,被广泛应用于机械、电子、光学、生物、纳米技术等领域。常见的光学三维测量方法有激光三角法^[1]、结构光法^[2]、移相干涉测量法^[3]、共焦显微测量法^[4-6]、白光干涉测量法^[7]等。共焦显微技术于20世纪50年代末提出^[4-5],通过三点共轭聚焦、针孔滤波实现对离焦杂散光的有效抑制,该技术具有轴向光学层析测量能力和高分辨率成像的主要特性^[5]。传统共焦显微测量方法必须依赖于三维光学或机械扫描,从而实现样品的三维测量,因而系统结构复杂、成本高昂、检测效率低,且由于直接依赖光强信息的处理难以实现对低反射率样品的高精度测量。色散共焦测量方法是对传统共焦测量方法的重要技术改进,主要目的是利用光谱沿轴色散代替样品的轴向机械扫描,从而提高检测效率^[8-10]。色散共焦测量方法由于依靠光谱信号进行层析测量,不直接依赖于光强,因此适合于测量极低反射率和反射率差异大的样品,这是相比其他光学类测量方法的显著优势。20世纪80年代以来^[11],色散共焦测量方法及技术发展快速,当前性能良好的色散共焦传感测量仪主要来自法国STIL、德国Micro-Epsilons和Precitec、日本Keyence等,主要应用场合为单点式的透明材料厚度、微位移的快速测量,这些光学传感测头基本采用了高成本、结构复杂的线性色散镜组。

2010年以来国内逐步开始色散共焦测量技术方面的研究,华中科技大学、上海交通大学、武汉工程大学等基于法国STIL公司的色散共焦传感器^[12-14],实现表面轮廓精密测量;苏州大学设计了最大可测倾角为43°的色散共焦表面形貌测量光学系统^[15],尚未实现三维形貌测量;中国工程物理研究院、中科院长春光机所、华侨大学等分别基于自主设计的色散镜头搭建了色散共焦实验测量研究^[16-18]。在色散共焦光谱信号数据处理方面,可采用的峰值波长提取算法主要有峰值法(或最大值法)、质心法、拟合法、插值法等^[19-25],上述方法具有各自特点,必须结合实验数据进行定量比较研究从而揭示其性能。现有色散共焦测量系统的波长-位移测量标定曲线多采用拟合法^[12-25],该方法易受实验标定过程的影响产生系统误差。综上,国内色散共焦测量技术方面的研究近几年进步较快,多集中于理论和实验探索,尚缺少高集成化、低成本、性能可靠的三维轮廓及透明材料厚度的色散共焦测量仪,也未对四种峰值提取算法、不同测量曲线标定方法的实验定量比较研究。本文自主搭建开发了白光色散共焦轮廓及厚度测量软硬件系统,进行了详细的性能实验测试;利用Zemax优化设计了由消色差透镜和非球面透镜组成的无限远色散镜组,具有结构简单、低成本的特点,采用纳米级分辨率的激光干涉仪对硬件系统进行轴向分辨率与位移精度测试实验,利用实验定量比较分析了四种峰值波长提取算法性能以及两种波长-位移测量标定方法的精度,通过对典型微结构样品三维形貌以及透明石英玻璃厚度的测量,验证了本系统在精密测量方面的应用可行性。

1 测量原理

图1为色散共焦测量基本原理示意图,宽光谱光源经照明针孔滤波后近似为点光源照明,随后由分光镜分束,透射光通过色散聚焦镜头时因不同波长的光在相同介质中的折射率差异,导致在像方产生一条连续分布的焦点线。若在轴向色散范围内放置一待测表面,复色光源(λ_{\min} 至 λ_{\max})聚焦的连续焦点将实时跟踪当前待测物点,其反射光进入探测针孔后由光谱仪探测,光谱仪探测的光谱峰值波长对应当前波长的光束恰聚焦于物平面,此时实现三点共轭聚焦成像^[5]。为实现测量系统的小型化和集成化,常选用三端口Y型光纤耦合器代替分光镜,此时光纤起到了传输光和针孔滤波的双重作用,且从系统硬件上避免了空间光路装调困难和易受环境干扰的影响。图1中,波长为 λ 的光束的聚焦面分别与照明针孔面、探测针孔面共轭,此时满足共焦条件且成像弥散斑最小,因此光谱仪接收到反射光谱中波长为 λ 强度最大,其余波长的光因离焦而被探测针孔抑制,进入光谱仪的强度锐减。位移和表面轮廓测量时色散共焦系统的轴向光强响应具有显著的单峰响应特性,通过光谱信号处理即可提取出该光强峰值对应的实际波长,将其代入预先标定好的波

长-高度编码关系曲线(测量标定曲线)即可求解得到待测物点的相对高度,借助水平二维扫描机构便可实现待测表面或透明材料内外的三维形貌检测。

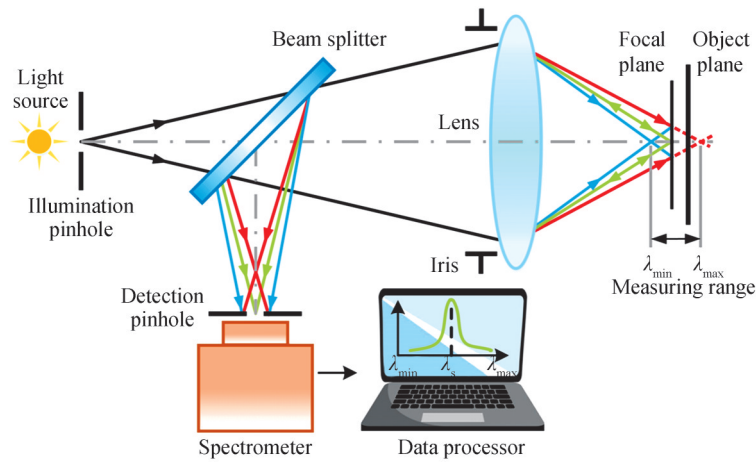


图1 色散共焦测量原理示意

Fig.1 Schematic of chromatic confocal measurement principle

利用色散共焦光谱响应信号进行透明玻璃或膜厚检测时,首先将样品调至测量范围内,材料上、下表面分别反射产生一个特定的共焦峰值波长。此时的色散共焦光谱响应曲线由位移测量的单峰信号变为明显的双峰信号,经数据处理提取得到两峰值波长对应的轴向高度坐标,通过计算两个高度间差值得到透明材料的厚度。由于光的折射,直接求解的轴向距离或高度必须利用材料的折射率参数进行校正,方可得到真实的透明材料厚度。

2 色散镜组

区别于常规结构复杂、高成本的线性色散聚焦镜组,本文设计了一种结构简单、成本低、色散性能优良的物镜组,色散曲线虽具有非线性,但利用纳米级分辨率的激光干涉仪进行高精度标定和算法优选,可实现精密测量。图2为所设计的色散聚焦镜组,由双胶合消色差透镜和单片非球面色散聚焦透镜组成,消色差透镜将焦点位置处宽光谱点光源准直为平行光,而非球面色散透镜将准直光束沿轴色散聚焦,并利用自身曲率半径变化对各孔径角下入射光线的球差进行校正。消色差透镜采用符合正负透镜补偿原则的双胶合形式,减小球差、彗差与色差,色散透镜采用了平凸结构的偶次非球面透镜。

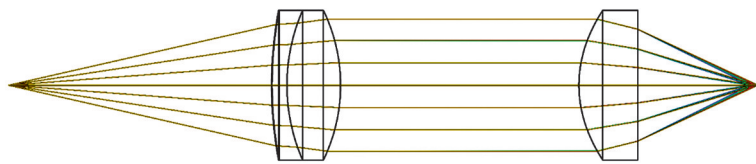


图2 色散镜组结构

Fig.2 Diagram of chromatic lens group

根据表1中本系统所选器件的主要参数,初步确定色散物镜设计要求为:物方(点光源所在空间)数值孔径NA接近0.22,像方数值孔径NA大于0.3,各像面处弥散斑RMS半径均应小于 $5\mu\text{m}$ 。由于系统主要对轴上物点成像,故设计遵循“保留色差、消除球差”的原则,优化时主要考虑轴上物点成像光斑的大小而不考虑场曲、畸变等轴外像差,分别对波长为500 nm、600 nm、700 nm和800 nm的光线进行单色像差校正,并将物镜焦距和透镜间距设为变量进行优化。最终得到色散镜组参数为:双胶合透镜焦距50 mm、非球面透镜焦距25 mm、像方数值孔径NA 0.41、有效通光口径22.5 mm、镜组工作距离32.83 mm,镜组具体面型参数如表2。

由图3可知,色散镜组在500~800 nm波段范围产生了1.16 mm理论轴向色散(轴向色差),图中轴向色

表1 主要器件参数
Table 1 Main component parameters

Component	Parameter
Light source	Wave band: 400~800 nm
Fiber coupler	Diameter: 50 μm multimode fiber, NA=0.22, 50:50 split ratio, Wave band: 400~900 nm
Spectrometer	Resolution: 0.7 nm, Wave band: 200~1 100 nm

表2 色散镜组的面型参数
Table 2 Parameters of chromatic lens group

Lens surface	Surface type	Curvature radius/mm	Thickness/mm	Optical glass	Semiaperture/mm
OBJ	Standard surface	∞	44.120	—	0.000
1	Even-order aspheric surface	63.000	0.060	1.52, 52.0	12.500
2	Standard surface	66.000	2.500	S-TIH13	12.500
3	Standard surface	31.000	9.000	S-FSL5	12.500
4	Standard surface	-28.500	40.000	—	12.500
5	Even-order aspheric surface	20.130	9.857	N-SF6	12.500
6	Standard surface	∞	18.979	—	12.500
IMA	Standard surface	∞	—	—	0.569

散曲线虽然呈明显非线性,将采用精确的标定和算法研究实现高精度测量。

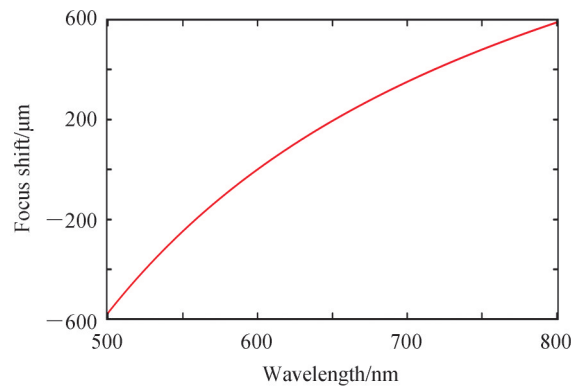


图3 色散焦移曲线
Fig.3 Dispersion focal shift curve

3 测量系统与测量曲线标定

3.1 系统集成

基于设计的色散镜组,搭建了光纤式色散共焦三维测量系统。图4(a)、4(b)分别为测量系统的实物图和核心光路原理图,系统由LED白光光源、50 μm 芯径Y型多模光纤、色散镜组、光谱仪和X-Y位移平台组成,光源及光谱仪的参数见表1,X-Y二维位移台最大行程为25 mm \times 25 mm(双向重复精度1.6 μm 、最小步进0.8 μm)。白光点光源经光纤端口1处针孔滤波后出射,被消色差透镜准直为平行光,再经过非球面透镜的调制实现轴向色散聚焦,测量时反射光场携带待测面光谱信息原路返回至端口2,再经端口3处光谱仪进行光谱分光完成单次探测。利用C++编写了系统测控软件,软件操作界面如图5,功能包括光谱数据采集存储、数据预处理、峰值波长提取、利用标定曲线求解实际高度、线扫描/面扫描测量和厚度测量以及数据的实时显示,可实现台阶高度、三维轮廓、透明材料厚度等的精密测量。



图4 色散共焦三维测量系统
Fig.4 Chromatic confocal 3D measurement system

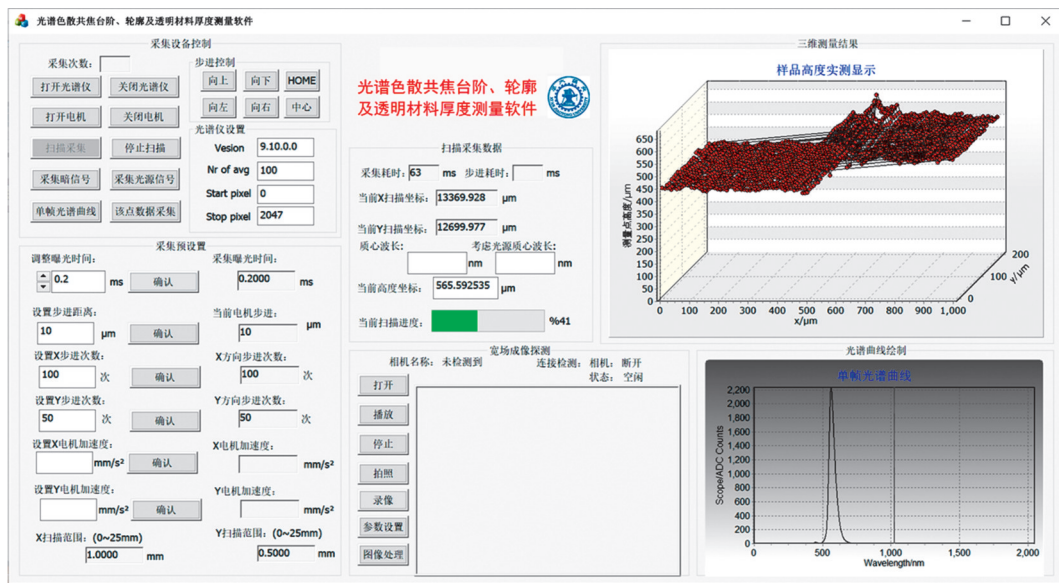


图5 系统测量软件操作界面
Fig.5 Graphical user interface of the measurement software

3.2 测量曲线标定

色散共焦测量系统的标定是实现精密测量的前提与关键,采用英国雷尼绍公司的XL-80激光干涉仪(分辨率1 nm),利用角锥棱镜和分光棱镜组成干涉反馈光路,如图6。沿光轴方向以30 μm步进完成1.05 mm

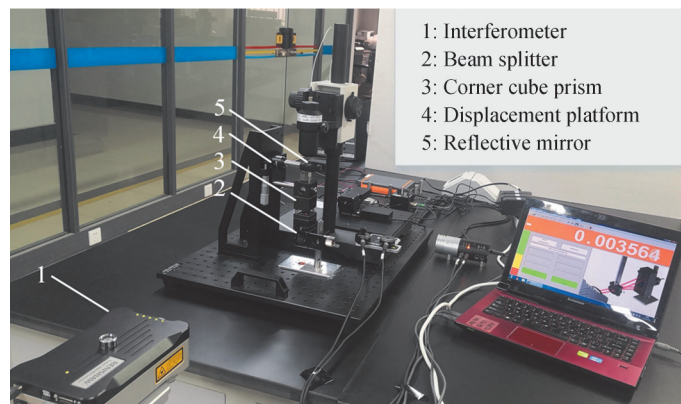


图6 色散共焦测量系统的轴向标定实验光路
Fig.6 Optical path of chromatic confocal axial calibration experiment

量程范围的波长-位移关系测定,每一位置由光谱仪连续采集5次信号,同时记录此时激光干涉仪的示值读数。

色散共焦光谱信号曲线具有明显的单峰响应特征,峰值波长的提取直接影响系统测量精度。为选取最佳的峰值波长提取算法,分别采用峰值法、(半峰)质心法、三次样条插值法以及高斯拟合法对采集到的36个位置的原始光谱数据进行峰值波长提取。通过计算每个位置下5次峰值波长提取结果的最大偏差,来评价不同提取算法的精度,实验结果如图7。可见,最大值法和插值法的提取结果具有较大波动,而高斯拟合法和(半峰)质心法测量结果波动较小,说明后两者的重复性和稳定性更好。而质心法的计算效率较高,后续分辨率测定实验的结果表明其波峰定位准确性稍差,轴向标定实验选用高斯拟合法对色散共焦光谱数据的峰值波长进行实际提取。

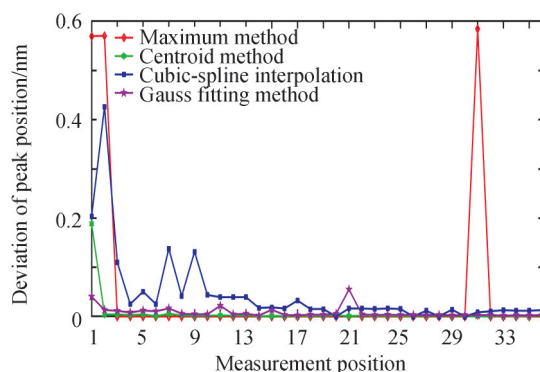


图7 四种峰值波长提取算法的比较

Fig.7 Comparison of four peak wavelength extraction algorithms

利用每个轴向位置下5次采集峰值波长的均值以及相应的干涉仪读数,进行非线性最小二乘多项式拟合,多项式次数的选择会影响拟合效果,确定系数(R-square)越接近1,均方根误差(RMSE)越接近0时,拟合效果越好。表3给出了不同次数下的拟合结果,同时考虑到次数越高测量范围边缘的过拟合效应越明显,且数据运算越复杂,为兼顾计算复杂度和拟合优度,最终选择6次多项式进行曲线拟合。曲线拟合的最大误差为2.5 μm ,具体表达式为

$$p_1(\lambda) = 1.3734 \times 10^{-11} \lambda^6 - 5.2336 \times 10^{-8} \lambda^5 + 8.2850 \times 10^{-5} \lambda^4 - 0.0698 \lambda^3 + 32.9636 \lambda^2 - 8.3001 \times 10^3 \lambda + 8.7261 \times 10^5 \quad (1)$$

式中, $p_1(\lambda)$ 为轴向相对位置坐标,单位: μm ; λ 为波长,单位: nm 。式(1)对应的结果如图8。

表3 不同阶数多项式拟合结果评估

Table 3 Goodness of polynomial fitting with different orders

Polynomial order	1	2	3	4	5	6	7	8
R-square	0.977 8	0.999 5	1	1	1	1	1	1
RMSE	47.95	7.46	2.107	1.682	1.366	0.876	0.673	0.672

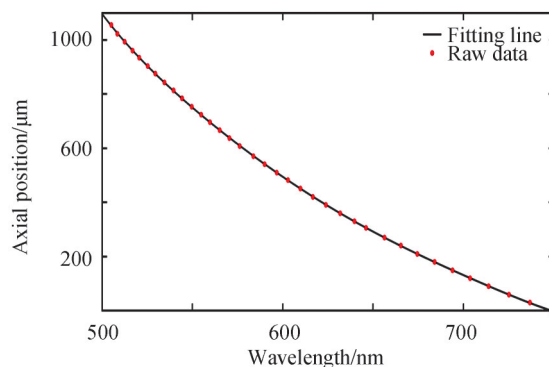


图8 标定曲线的6次多项式拟合

Fig.8 6-order polynomial fitting result of calibration curve

通常传感器的输入输出是线性关系,在其线性量程区间内的测量结果基本具有一致的灵敏度、分辨率和测量精度。针对图8的非线性标定曲线,通过遍历计算并比较36个数据点中任意两点所构成子区间的线性相关系数 r 的大小,同时使得最佳线性区间范围尽可能大,最终得到第21至第29个标定数据点所构成子区间的相关系数绝对值最大且为0.9997,对应波段为534~576 nm。此时峰值波长与轴向位置间具有良好的线性关系,因而在此区间内可获得更好的测量效果,该段的线性拟合结果如图9。曲线拟合的非线性误差为1.26%,表达式为

$$p_2(\lambda) = -5.6252\lambda + 3.8467 \times 10^3 \quad (2)$$

式中, $p_2(\lambda)$ 为轴向相对位置坐标。实际测量过程中当样品待测高度起伏不超过230 μm 时可优选此区间。

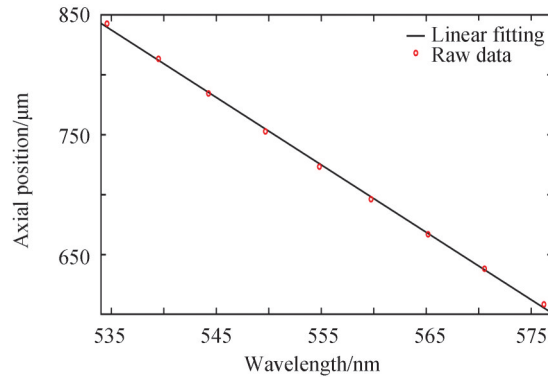


图9 标定曲线的线性测量区间
Fig.9 Linear measurement interval of calibration curve

基于多项式拟合的系统标定方法,虽然计算效率高,但存在欠拟合或过拟合现象,尤其对于高次多项式在区间两侧将引入较大的拟合误差,降低了测量精度。样条插值法可以保证标定曲线严格过测量点,进而利用有限的测量点构造出光滑的曲线,具体在两点之间平滑插值形成新的标定曲线,从而避免拟合误差。为定量比较多项式拟合法和样条插值法的标定精度,利用三次样条插值方法在相邻数据点间构造三次多项式,并在两点之间细分1000点进行插值,得到的三次样条插值标定曲线如图10。图中曲线由35036组“波长-位移”数据组成,平均波长间隔为0.007 nm,位移间隔为30 nm,并保存为插值数据查找表。

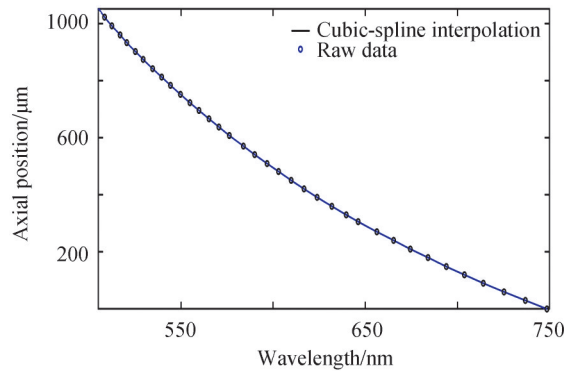


图10 标定曲线的三次样条插值
Fig.10 Cubic spline interpolation of calibration curve

4 算法定量比较

4.1 分辨率和精度测试

为了定量评价测量系统最小可识别的轴向位移量变化和测量结果的准确度,利用图6所示的标定实验系统进行轴向分辨率与位移精度的测试实验。利用一维手动微位移台,以平面反射镜为样品,在激光干涉仪的实时位移监测下使其沿轴向产生4组分别为0.2 μm 、0.4 μm 、0.8 μm 和1 μm 步进间距的台阶式往复运动,每组运动正向步进5次后,再反向步进5次回到初始位置,共11个位置,每处位置连续采集光谱数据50

次同时记录此处干涉仪位移示数。图 11(a)为某位置下采集到的单帧光谱数据图,图 11(b)为分别采用 4 种峰值波长提取算法对其进行波峰定位后的结果,最大值法直接提取出离散光谱数据的峰值点,如图 11(b)中红色空心圆点所示。(半峰)质心法将单帧光谱数据序列的质心作为峰值波长,如图 11(b)中绿色虚线所示。高斯拟合法利用光谱离散数据点拟合出一条高斯函数曲线,如图 11(b)中紫色虚线所示,紫色空心圆点为其提取出的峰值点。三次样条法利用光谱数据点插值出一条光滑曲线,如图 11(b)中蓝色虚线所示,蓝色空心圆点为其提取出的峰值点。

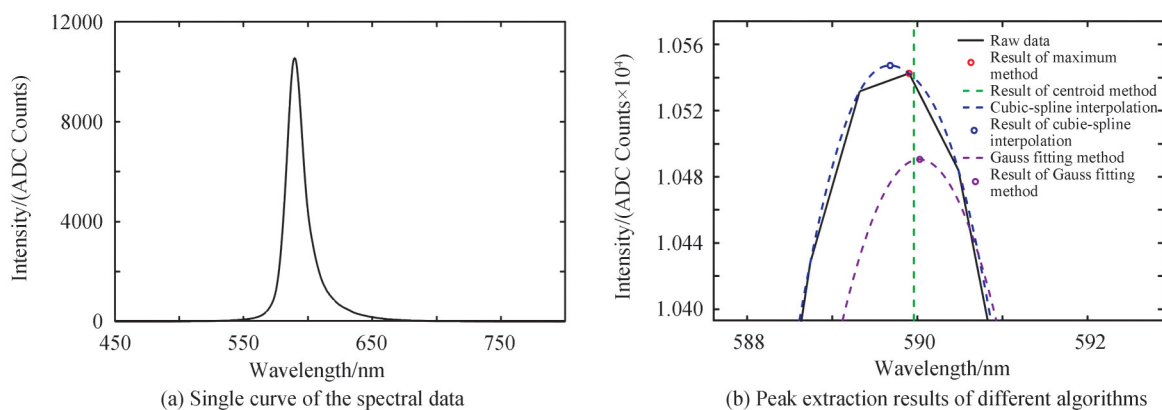


图 11 单帧光谱数据及不同算法的波峰定位结果

Fig.11 Spectral data and peak extraction results of different algorithms

方案 1 将提取到的峰值波长代入 6 次多项式计算得到实际位移值,称为拟合代入法;方案 2 基于三次样条法插值得到的标定曲线,依照查表法定位插值列表中与峰值波长最邻近位置的插值波长点,其对应的插值位移值作为实测位移值,称为插值查表法。

为评价不同波峰提取算法的准确性,分别采用峰值法、(半峰)质心法、三次样条插值法以及高斯拟合法对 $2\ \mu\text{m}$ 步进间距下的 10 次位移进行测量,通过计算实测步进与干涉仪读数的相对偏差,评价不同波峰定位算法的相对测量偏差,测量结果如图 12。可见,相比于峰值法、(半峰)质心法以及样条插值法,高斯拟合法和三次样条插值法的精度高,高斯拟合法得到的实测步进值与干涉仪真实步进偏差的均值为 $0.18\ \mu\text{m}$,相对误差为 9%。结合图 7 得出的高斯拟合法具有较优的波峰定位重复性结果,确定本文后续实验主要采用高斯拟合法进行波峰提取,进一步对比方案 1 和方案 2 的测量精度。

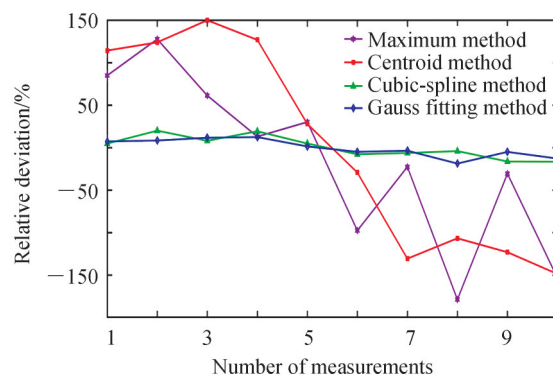


图 12 不同峰值定位算法下各位置的相对步进误差 ($2\ \mu\text{m}$ 步进)

Fig.12 Relative deviation of each position under different peak wavelength extraction algorithms ($2\ \mu\text{m}$ step)

图 13 和图 14 分别给出了使用方案 1 和方案 2 进行分辨率测试的实验结果, $0.2\ \mu\text{m}$ 分辨率实验中产生步进间隔不均匀现象是由于受到了微位移平台手动调节限制,因此实验采用激光干涉仪对反射镜位移进行实时监测以保证测量结果的有效性。可以看出两种方案均能清晰分辨出 $0.2\ \mu\text{m}$ 、 $0.4\ \mu\text{m}$ 、 $0.8\ \mu\text{m}$ 和 $1\ \mu\text{m}$ 步进下的位移变化,因此两种方案均能达到 $0.2\ \mu\text{m}$ 的轴向分辨率,但 $0.2\ \mu\text{m}$ 时测量的准确性下降。

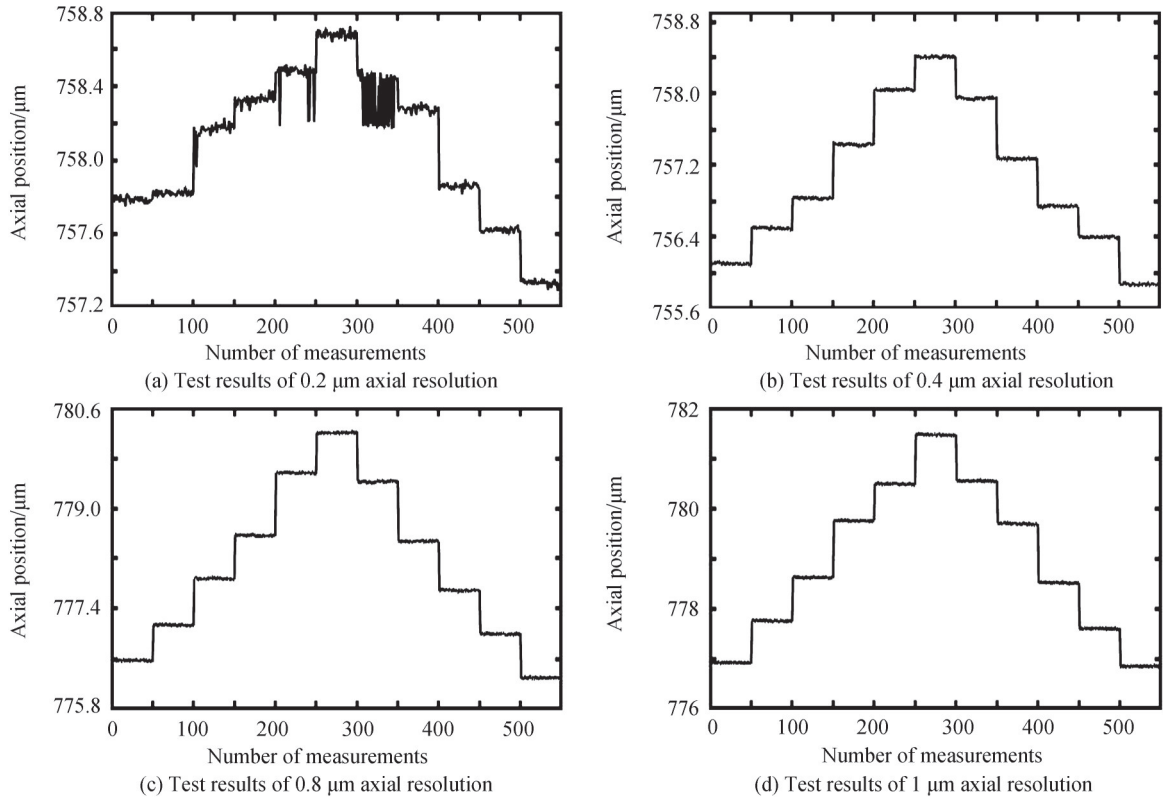


图 13 拟合标定法的轴向分辨率测试结果

Fig.13 Axial resolution test results by fitting calibration method

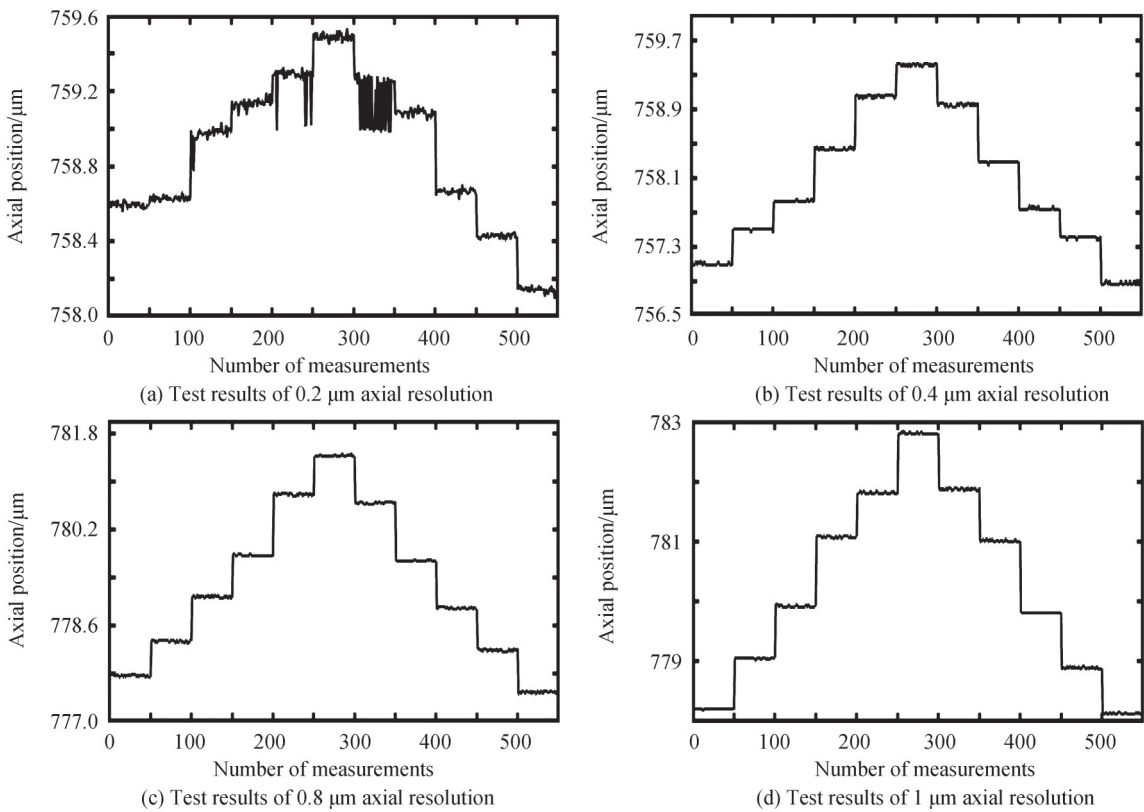


图 14 插值标定法的轴向分辨率测试结果

Fig.14 Axial resolution test results by interpolation calibration method

进一步比较两种方案的位移测量的精度,在1 mm轴向测量量程范围内,以100 μm 间隔使反射镜步进10个位置,每处连续采集50次光谱数据,并同步记录干涉仪示数,分别采用两种方案给出位移值,测量结果如表4和表5。表格第二行表示每个位置下50次实测位移数据的平均值,表格第三行表示干涉仪位置读数,表格第四行为两者间偏差值,表格最后一行表示相对偏差,即测量值偏差与干涉仪读数的比值。通过计算测量偏差的均值,得到方案1、2的轴向位移测量均值的误差分别低于1.0%和0.7%,因此位移测量精度优于1%,且采用插值标定法系统的轴向测量精度更高。

表4 采用拟合标定法得到的位移精度实验结果

Table 4 Displacement measurement results by fitting calibration method

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Test data / μm	0	100.027 8	200.037 3	300.171 6	400.267 4	499.745 4	601.105 2	700.098 5	799.445 0	900.584 5	1001.144 0
True data / μm	0	100.25	200.39	300.76	400.63	500.21	600.88	700.17	800.71	900.71	1 000.22
Deviation / μm	0	-0.222 2	-0.352 7	-0.588 5	-0.362 6	-0.464 6	0.225 2	-0.071 5	-1.265 0	-0.125 5	0.005 2
Relative deviation/%	0	0.395 4	0.334 7	0.087 2	0.012 7	0.027 9	0.044 5	0.046 6	0.059 4	0.077 0	0.924 1

表5 采用插值标定法得到的位移精度实验结果

Table 5 Displacement measurement results by interpolation calibration method

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Test data / μm	0	99.608 3	200.291 0	300.385 4	400.284 5	500.140 3	600.295 6	700.400 0	800.758 0	900.666 5	999.619 2
True data / μm	0	100.25	200.39	300.76	400.63	500.21	600.88	700.17	800.71	900.71	1 000.22
Deviation / μm	0	-0.641 7	-0.099 0	-0.374 6	-0.345 6	-0.069 8	-0.584 5	0.230 0	0.048 0	-0.043 5	-0.600 8
Relative deviation/%	0	0.640 1	0.049 4	0.124 6	0.086 3	0.013 9	0.097 3	0.032 9	0.006 0	0.004 8	0.060 1

综合图7和图12的实验数据和定量分析结果,可知高斯拟合法在四种算法中具有最优的波峰定位重复性与准确度,故峰值波长提取优选高斯拟合法。此外,采用拟合代入法与插值查表法时系统可达到相同的0.2 μm 轴向分辨率,而位移精度测试结果说明在1 mm轴向测量范围内插值查表法的整体精度更高,故为保证测量结果更准确,应采用插值法处理数据。但在实际中插值法的运算时间易受到插值点密度影响,即插值点数增多会降低算法效率,因此在实时性要求较高(如三维轮廓测量)的测量场合中可考虑选择精度次之而速度更快的拟合法进行光谱数据处理。

4.2 三维轮廓测量

为验证系统在微结构三维形貌和厚度测量方面的性能,首先对一个高度差为100 μm ,粗糙度较大的塞尺进行三维测量,如图15(a)所示,水平扫描范围800 μm ×200 μm ,扫描步进10 μm 。对初始数据采用3×3个数据宽度的窗口矩阵进行均值滤波来校正台阶边缘位置的信号失真现象,得到图15(b)与15(c)所示的截面轮廓数据与三维轮廓重建效果。采用精度较高的方案2插值查表法进行数据处理,通过计算台阶顶部平坦区域200点高度的均值与台阶底部平坦区域200点高度的均值之差,得到台阶高度为111.2 μm 。由于样品表面粗糙度较大且塞尺片样品易出现拱形弯曲而有底部空气间隙,所以测量结果会有偏离。

对柔性叉指电极的表面轮廓进行三维测量。该样品的电极基材是低反射率的PET柔性材料,表面布局有电容阵列组成的金属层结构,线宽为100 μm ,如图16(a)所示,红框所示为2 mm×1.6 mm扫描区域,扫描步进间隔20 μm 。根据效率较高的方案1标定曲线处理结果如图16(b)和图16(c)所示,平均高度约为480 μm ,三维结构清晰可见,说明系统可对反射率差异较大的样品进行有效的三维轮廓测量。

对表面微小起伏的MEMS单元表面结构进行三维测量。图17(a)为微电容MEMS光学气体生物传感器样品,红框中“十”字结构区域大小0.75 mm×0.75 mm,扫描步进间隔15 μm 。采用速度更快的方案1拟合代入法处理得到去除突变点后三维点云(图17(b))和曲面重建结果(图17(c)),高度变化在3 μm 之内,可知系统对表面结构微小起伏的样品实现了有效三维轮廓测量。

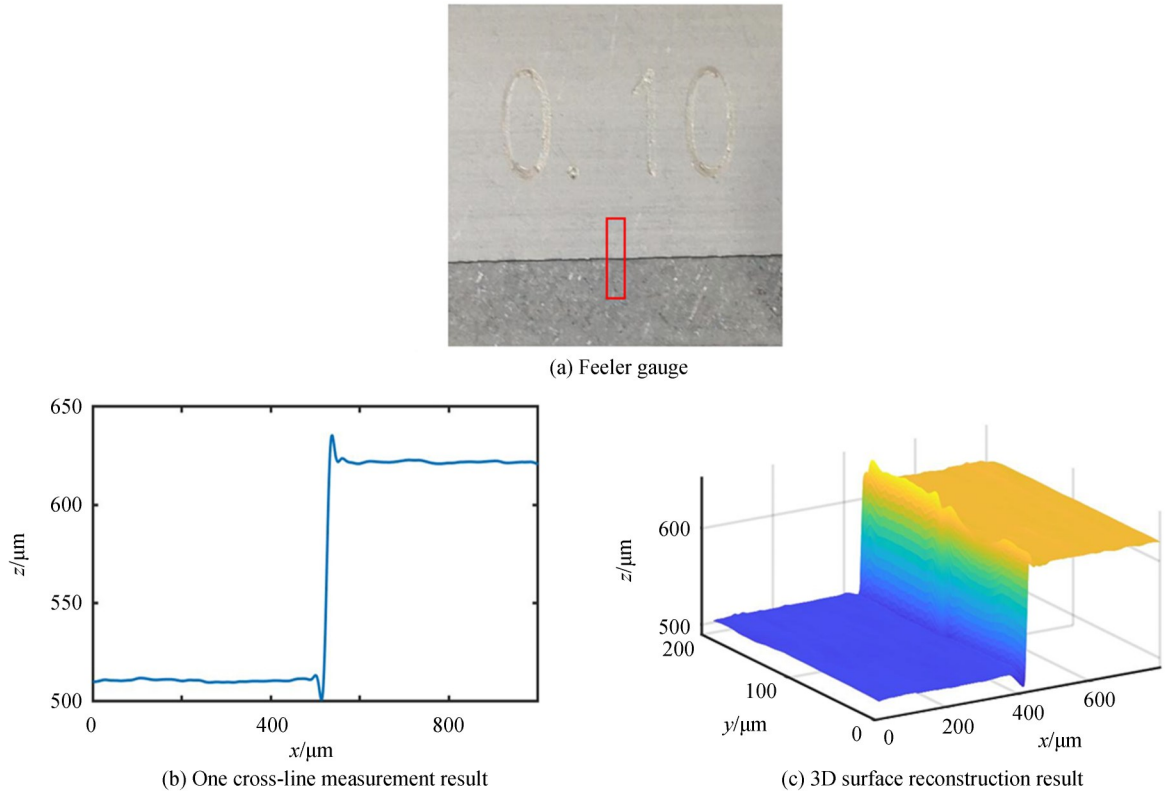


图15 塞尺台阶的测量结果
Fig.15 Measurement result of a feeler step

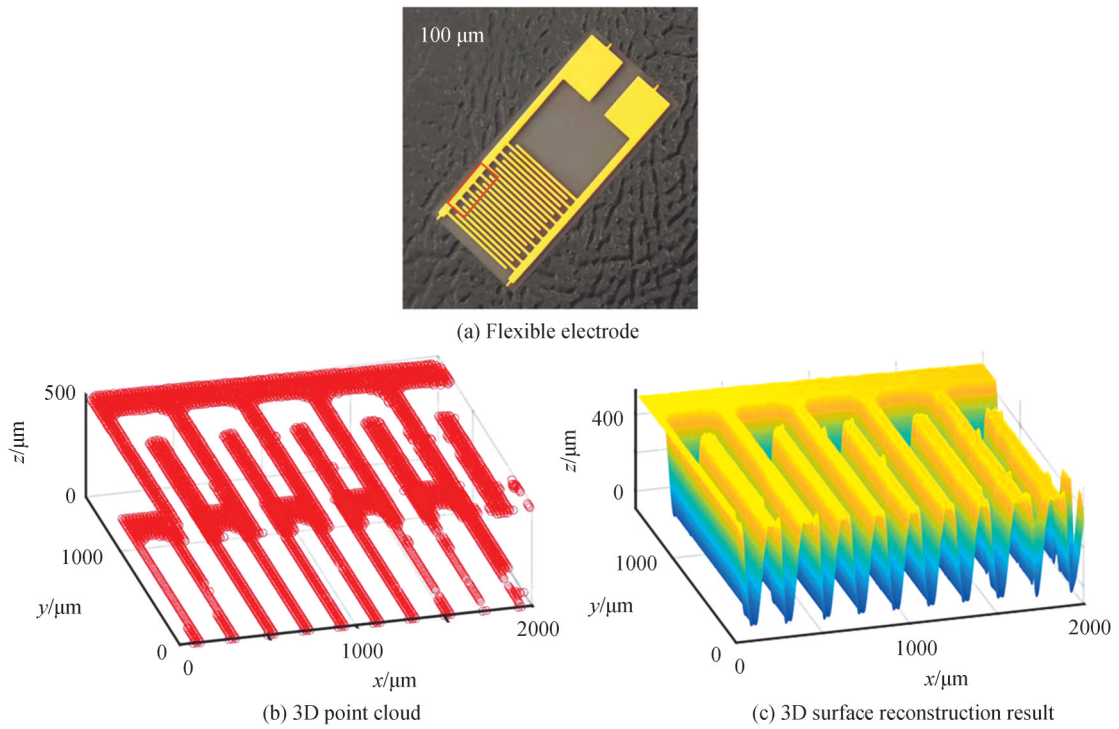


图16 柔性叉指电极三维轮廓测量
Fig.16 3D profile measurement of flexible electrode

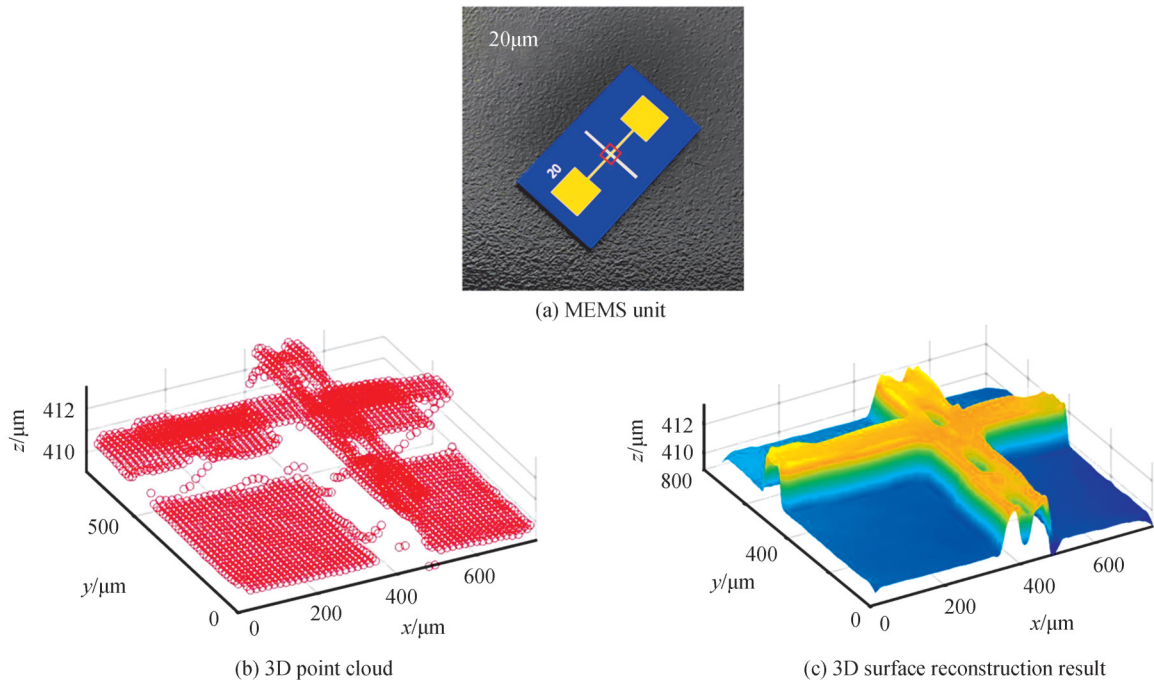


图 17 MEMS 样品三维轮廓测量
Fig.17 3D profile measurement of MEMS sample

4.3 厚度测量

色散共焦可以快速、准确测量透明材料的厚度,可同时检测出包括多种介质组合后的各层的厚度。由于光在透明介质内发生折射,因此必须考虑光的折射对直接给出的测量结果进行校正。校正依据折射定律,厚度校正模型如图 18。首先求得上下表面对应的反射峰值波长 λ_1 和 λ_2 ,即对应空气中的厚度值 h ,再利用式(3)计算实际厚度^[25]。

$$H = \frac{h \cdot \tan\theta_1}{\tan\left(\arcsin\frac{\sin\theta_1}{n'}\right)} \approx n'h \quad (3)$$

式中, h 和 H 分别是计算厚度和实际厚度,且出射角 θ_1 随波长 λ_2 变化,不同 λ_2 对应的 θ_1 值可通过导出 Zemax 色散焦移数据列表与通光半径值,并求解二者间比值的 \arctan 函数值获得,图 19 是将前述操作得到的出射角 θ_1 和 λ_2 数据列表进行 3 次多项式拟合得到的关系曲线;式(3)在角度较小的条件下,可直接采用近似。

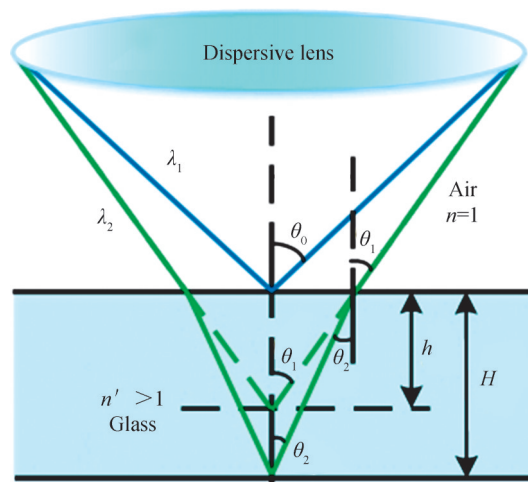


图 18 厚度校正模型^[25]
Fig.18 Thickness compensation model^[25]

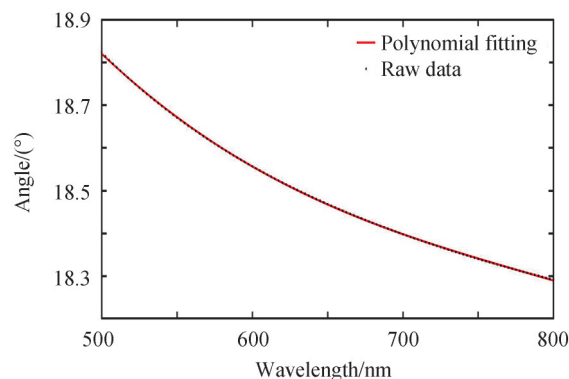


图19 波长与出射角度间拟合关系曲线
Fig.19 Relationship between angle and wavelength

对厚度约为0.2 mm、折射率为1.458 45的石英玻璃进行单点10次连续测量,以10组实测数据均值作为最终厚度结果。为衡量实测数据的离散程度,计算得到10次测量样本的标准差为2.3 μm 。测量实验结果见表6,表中第一行为计算厚度,第二行为校正后的厚度,最后一行测量误差一项通过计算实测膜厚 H 与千分尺测厚规读数0.219 mm间偏差绝对值占千分尺测厚规读数的百分比(相对误差)求得。可知本系统测量得到的石英玻璃厚度为0.218 mm(均值),均值的相对误差为0.5%。表6中第7和第9次测量结果四舍五入后与测厚规读数相同,因此这两处的相对偏差为0。

表6 石英玻璃厚度测量结果
Table 6 Measurement result of quartz glass thickness

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average
h/mm	0.145	0.144	0.148	0.144	0.144	0.144	0.146	0.148	0.146	0.143	0.145
H/mm	0.217	0.216	0.222	0.216	0.216	0.216	0.219	0.222	0.219	0.215	0.218
Deviation/%	0.91	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	0	1.37	0	1.83	0.5

5 结论

利用Zemax设计了结构简单、低成本、性能良好的色散聚焦镜组,搭建了光纤式色散共焦三维测量软硬件系统,系统在500~800 nm波段内实际轴向测量范围为1 mm,XY扫描测量范围为25 mm。利用激光干涉仪实验定量分析比较了四种峰值提取算法,即峰值法、质心法、高斯拟合法和样条插值法,高斯拟合法综合性能最优。进行了系统轴向分辨率与精度测试实验,采用了两种不同的波长-位移测量标定法,实验结果表明:拟合标定法和插值标定法条件下系统均能达到0.2 μm 的轴向分辨率,且与激光干涉仪位移比,在1 mm量程内轴向位移测量误差均低于1%。利用该系统对塞尺台阶、柔性电极、MEMS结构和石英玻璃厚度进行了三维测量,本系统可实际应用于微机械、微电子、微光学等表面轮廓、台阶、厚度等的高精度、非接触无损检测。

参考文献

- [1] WANG Teng, YANG Shuming, LI Shusheng, et al. Error analysis and compensation of galvanometer laser scanning measurement system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 2315001.
王腾, 杨树明, 李述胜, 等. 振镜激光扫描测量系统误差分析与补偿[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2315001.
- [2] HU Pengyu, YANG Shuming, ZHENG Fenghe, et al. Accurate and dynamic 3D shape measurement with digital image correlation-assisted phase shifting[J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(7): 075204.
- [3] MAO Jie, HOU Xi, WU Fan. Position error analysis in radius interferometric measurements[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(7): 0712003.
毛洁, 侯溪, 伍凡. 曲率半径干涉测量定焦误差分析[J]. 光子学报, 2015, 44(7): 0712003.
- [4] MINSKY M. Microscopy apparatus: US, 3013467[P]. 1961-12-19.
- [5] 谭久彬, 刘涛, 刘俭. 三维高分辨率共焦显微成像与测量技术理论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2014.
- [6] 刘涛. 矢量衍射远场超分辨聚焦相关理论及共焦显微成像研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [7] ZHANG Zhaoli, SU Junhong. Simulation and reconstruction of 3D microscopic morphology of damaged optical film surface

- [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 41(2): 0212002.
- 张昭琳, 苏俊宏. 光学薄膜损伤表面三维微观形貌的仿真与重构[J]. *光学学报*, 2021, 41(2): 0212002.
- [8] GARZON R J, MENESES J, TRIBILLON G, et al. Chromatic confocal microscopy by means of a continuum light generated through a standard single-mode fibre[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2004, 6(6): 544-548.
- [9] CHEN Yichang, DONG Shuping, WANG Chunchieh, et al. Using chromatic confocal apparatus for in situ rolling thickness measurement in hot embossing process[C]. *SPIE*, 2010, 7767: 77670P.
- [10] OLSOVSKY C, SHELTON R, CARRASCO Z O, et al. Chromatic confocal microscopy for multi-depth imaging of epithelial tissue[J]. *Biomedical Optics Express*, 2013, 4(5): 732-740.
- [11] MOLESINI G, PEDRINI P, POGGI F, et al. Focus-wavelength encoded optical profilometer[J]. *Optics Communications*, 1984, 49(4): 229-233.
- [12] 付骥. 基于色散共焦传感器的航空叶片型线测量[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [13] 杨柳青. 基于光谱共焦法的三维表面轮廓测量系统研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [14] 刘伯奇. 基于彩色光谱共焦的轮廓及厚度精确测量[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2018.
- [15] YANG Rui, YUN Yu, XIE Bin, et al. Design of dispersive objective lens of large linear chromatic confocal 3D surface profiler[J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2018, 30(5): 170521.
- 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): 170521.
- [16] 武芑樾. 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.
- [17] ZHOU Yong, GUO Banghui, LI Can, et al. Research on spectrum bandwidth of emergent light in lens center thickness measurement system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 081202.
- 周勇, 郭帮辉, 李灿, 等. 透镜中心厚度测量系统出射光光谱的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(8): 081202.
- [18] CUI Changcai, LI Huang, YU Qing, et al. Design of adjustable dispersive objective lens for chromatic confocal system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(4): 875-883.
- 崔长彩, 李煌, 余卿, 等. 彩色共焦系统可调制色散物镜设计[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(4): 875-883.
- [19] WANG Jinnan, CEHN Fengdong, LIU Bingguo, et al. White LED-based spectrum confocal displacement sensor [J]. *China Measurement & Testing Technology*, 2017, 43(1): 69-73.
- 王津楠, 陈凤东, 刘炳国, 等. 基于白光LED的光谱共焦位移传感器[J]. *中国测试*, 2017, 43(1): 69-73.
- [20] MA Jing, QI Yuejing, LU Zengxiong, et al. Design of linear dispersive objective for chromatic confocal displacement sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0704009.
- 马敬, 齐月静, 卢增雄, 等. 光谱共焦位移传感器线性色散物镜设计[J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0704009.
- [21] LIU Qian, YANG Weichuan, YUAN Daocheng, et al. Design of linear dispersive objective for chromatic confocal microscope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(10): 2473-2479.
- 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.
- [22] BAI Jiao, LI Xinghui, WANG Xiaohao, et al. Chromatic confocal displacement sensor with optimized dispersion probe and modified centroid peak extraction algorithm[J]. *Sensors*, 2019, 19(16): 3592.
- [23] LUO Ding, KUANG Cuifang, LIU Xu. Fiber-based chromatic confocal microscope with Gaussian fitting method [J]. *Optics and Laser Technology*, 2012, 44(4): 788-793.
- [24] MIKS A, NOVAK J, NOVAK P. Analysis of method for measuring thickness of plane-parallel plates and lenses using chromatic confocal sensor[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(17): 3259-3264.
- [25] QIAO Yang, ZHANG Ning, XU Xiping, et al. Design of lens thickness measurement system based on confocal technology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(7): 1635-1641.
- 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.