

# 基于激光三角法对透明平板厚度测量光线补偿的研究及应用

杨桂栓<sup>1</sup> 陈 涛<sup>1</sup> 张志峰<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

<sup>2</sup>郑州轻工业学院物理与电子工程学院, 河南 郑州 450002

**摘要** 提出了一种基于激光三角法光线折射补偿对透明平板厚度测量的方法,设计了基于单激光位移传感器的透明平板厚度测量装置,并应用于准分子激光投影光刻加工透明材料时的像面校准。首先构建了激光三角法测量情形下偏折光线和透明平板位置之间的关系,分析了散射光斑因折射发生的位置偏移量与平板厚度之间的关系,以及透明平板与散射基面的间距和散射基面位置的变化对测量结果产生的影响。然后设计了基于单激光位移传感器的透明平板厚度测量装置,实验验证了散射光斑偏移量和平板厚度之间的对应关系,测得了聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)厚度测量的补偿系数为0.441。综合理论分析和实验验证,结果表明散射光斑偏移量与透明平板的厚度呈线性变化关系,透明平板与散射基面间距的大小对测量结果无影响,散射基面偏移量与传感器探头示数变化量相等。PMMA平板厚度测量的平均绝对误差小于0.01 mm,平均相对误差为0.6%,能够满足准分子激光(KrF, 248 nm)加工PMMA基生物芯片的精度要求。

**关键词** 测量;光线补偿测量;激光三角法;激光位移传感器;透明平板厚度测量;准分子激光微加工

中图分类号 TN206; O435.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0708004

## Study and Application on Transparent Plate Thickness Measurement Based on Laser Triangulation with Light Compensation

Yang Guishuan<sup>1</sup> Chen Tao<sup>1</sup> Zhang Zhifeng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

<sup>2</sup>School of Physics & Electronic Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, Henan 450002, China

**Abstract** A novel transparent plate thickness measurement method based on laser triangulation with the light compensation is put forward, and a design of transparent plate thickness measuring device is based on single laser displacement sensor, which is applied to correct the focal plane in excimer laser micromachining of transparent material based on projection lithography. Firstly, the relationship between bending light and transparent plate location based on laser triangulation method is built, and the relationship between displacement of scattering light spot and plate thickness is analyzed. The changing rules of measuring results caused by the distance between transparent plate and scattering base plate and the position change of scattering base plate are also analyzed. Then transparent plate thickness measuring device based on single laser displacement sensor is designed. The relationship between spot migration and transparent plate thickness is tested, and compensation coefficient of polymethyl methacrylate (PMMA) thickness measured by experiments is 0.441. Based on the theoretical analysis and experimental verification, the results show that laser displacement sensor readings are linear relation with the

收稿日期: 2015-01-25; 收到修改稿日期: 2015-03-02

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ030112)、北京工业大学研究生科技基金(ykj-2014-11187)

作者简介: 杨桂栓(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光微加工系统方面的研究。E-mail: yguishuan@126.com

导师简介: 陈 涛(1970—),男,教授,主要从事激光微技术、生物芯片技术和光学工程等方面的研究。

E-mail: chentao@bjut.edu.cn

thickness of transparent plate, and the distance between transparent plate and scattering surface has no effect on it. The average absolute error of PMMA plate thickness measurement is less than 0.01mm, and the average relative error is 0.6%, which can meet the precision requirements for processing biochip of PMMA base by the excimer laser (KrF, 248 nm) micromachining system.

**Key words** measurement; light compensation measurement; laser triangulation; laser displacement sensor; transparent plate thickness measurement; excimer laser micromachining

**OCIS codes** 220.4830; 230.4000; 140.3390

## 1 引言

基于激光三角测量法的激光位移传感器(LD)在位移测量中具有非接触、高精度、高效率等优点<sup>[1]</sup>,通过设计不同的测量系统,可以测量工件的偏移、厚度、振动、平整度、倾斜度、直径等参数<sup>[1-4]</sup>,因此被广泛应用于工业自动化加工、产品在线检测及质量控制等领域。LD的测量是基于被测物体表面的散射效应,表面的粗糙度直接影响到散射测量光斑的光强,文献[5]研究表明被测物体表面粗糙度越大,散射光强越大,并且粗糙度在0.8 μm左右的表面测量误差最小。对于透明平板,激光束入射到其表面主要发生透射和反射,但LD往往是CCD传感器和半导体激光器在样品同侧表面配置设计且相对位置固定,因此基于散射光斑测量的LD不易随意探测到平板表面的反射光信号,而透明平板的散射光极弱,因而无法直接测量透明平板的表面位置及厚度。

透明平板(如平面玻璃、有机玻璃等)的表面位置及厚度的测量对透明平板的加工和质量控制具有重要意义。透明平板的表面位置及厚度的测量有多种方式,目前基于光电非接触测量的方法仍然以采用反射光信号的测试方案居多,文献[6]设计了基于反射光测量的双LD探头测量玻璃厚度的方法,该方法对两个LD探头的校准比较复杂,并且透射光在玻璃底层的二次反射光对LD的测量也会产生较大的干扰;文献[7]设计了基于线结构光的反射式平板玻璃的厚度测量装置,该方法测量范围广、效率高,但由于光束宽度和CCD相机图像畸变的限制,测量精度相对不高;另外基于共焦法的透明平板厚度测量方法<sup>[8-10]</sup>,测量精度相对较高,但光谱分析对高速测量有一定的限制。

本文仍然基于激光三角法的散射光斑,利用光线透过透明平板时产生的折射偏移现象,建模分析光线偏移所产生的像移规律及厚度测量的补偿计算关系,设计了基于单LD的透明平板厚度及其表面位置测量装置,降低了测量系统的复杂度,以此来实现对透明平板的非接触、高精度、高效率的测量,并应用于准分子激光光刻投影加工聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)基生物芯片的像面校准。

## 2 激光三角法光线补偿测厚原理

激光三角法光线折射补偿测量透明平板厚度是基于激光三角测量原理,对激光三角测量光路中加入透明平板时的情况进行分析,推导出透明平板厚度测量的光线补偿计算公式。

### 2.1 激光三角测量法

根据入射光线与被测物体表面法线的关系,激光三角测量法可分为直射式和斜射式<sup>[1]</sup>,本文主要分析直射式。其测量原理如图1所示,激光器发出的激光束经聚焦投射到被测物体表面,入射激光束在被测物体表面发生散射,经散射后光线由成像透镜成像于光敏元件(CCD/PSD)的光敏面。当被测表面沿入射激光方向发生位置偏移量 $X$ 时,光线在光敏面上所成像点将产生偏移量 $X'$ 。通过处理光敏元件的光电转换信号,可以得出像点的偏移量 $X'$ 。为了提高测量精度,使被测点在一定景深范围内都能正焦成像在光敏面上,图1中的 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 必须满足Scheimpflug条件<sup>[1]</sup>,即

$$\tan \theta_1 = \beta \tan \theta_2, \quad (1)$$

式中 $\beta$ 为横向放大率, $\theta_1$ 为直射激光束与成像透镜光轴的夹角, $\theta_2$ 为光敏面与成像透镜光轴的夹角。根据三角形相似关系计算可得被测物体表面发生的偏移量 $X$ 为

$$X = \frac{LX' \sin \theta_2}{L' \sin \theta_1 - X' \sin(\theta_1 + \theta_2)}, \quad (2)$$

式中 $L$ 为成像透镜到被测物体表面的物距, $L'$ 为成像透镜到光敏面间的像距。

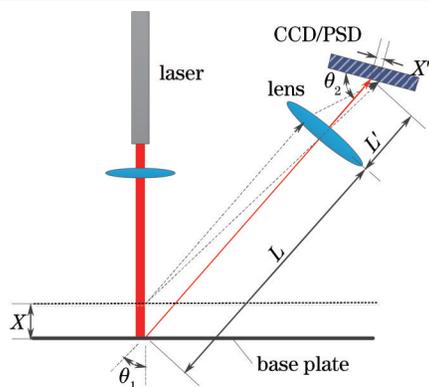


图1 激光三角测量法原理图

Fig.1 Diagram of laser measurement based on triangulation

## 2.2 激光三角法光线补偿测量厚度原理

对于直射式激光三角测量法,当光线发生散射的基面上放置不同厚度的透明平板时,如图2所示,直入射到透明平板的激光束光线的入射角趋近于零,因此几乎全部透射过平板,在平板下面的不透明基面发生散射,光点向不同方向的散射光线在通过透明平板时都将发生折射平移,其在 CCD 光敏面上的像点也发生偏移,导致激光位移传感器的测量值也发生变化。为了确定被测物体表面所产生的虚位移量(即透明平板相对厚度)  $x$  与透明平板的实际厚度(绝对厚度)  $d$  之间的补偿计算关系,根据透镜成像原理和光路可逆原理,采用散射光线中平行于成像透镜光轴的光线来确定 CCD 光敏面上的像点,以此来分析被测物体表面虚位移量  $x$  的变化。如图2所示,利用三角形相似关系可得

$$\left\{ \begin{matrix} x_1 = \frac{d_1}{d_2}, x_1 = \frac{d_1}{d_3}, x_2 = \frac{d_2}{d_3} \\ x_2 = \frac{d_2}{d_3}, x_3 = \frac{d_3}{d_3}, x_3 = \frac{d_3}{d_3} \end{matrix} \right\} \Rightarrow x \propto d . \quad (3)$$

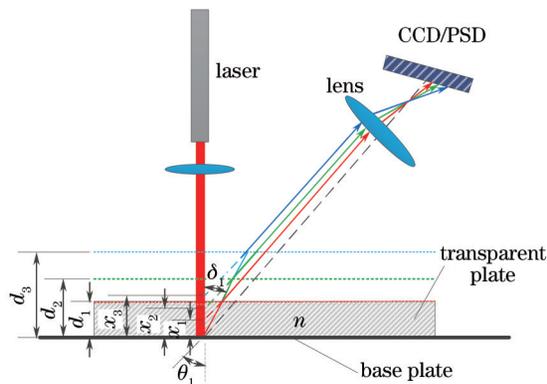


图2 激光三角法光线补偿测量原理图

Fig.2 Diagram of laser measurement based on triangulation with light compensation

另根据三角关系可知

$$d \cdot \tan \delta_1 = (d - x) \cdot \tan \theta_1 , \quad (4)$$

式中  $\delta_1$  为光线在透明平板中的折射角。透明平板相对空气的折射率  $n$  为

$$n = \frac{\sin \theta_1}{\sin \delta_1} . \quad (5)$$

由(4)式和(5)式计算可得透明平板厚度测量的光线补偿系数  $\alpha$  为

$$\alpha = \frac{x}{d} = 1 - \sqrt{\frac{1 - \sin^2 \theta_1}{n^2 - \sin^2 \theta_1}} . \quad (6)$$

在激光三角测量系统中,激光器和成像透镜及探测器是封装在一起的,即相对位置为固定的,则  $\theta_1$  值也固定,由(6)式可知,  $\alpha$  的取值仅随放入透明平板材料的不同而变化。

当测量系统的  $\theta_1$  已知时,可以根据待测平板材料相对空气的折射率  $n$ , 由(6)式求得  $\alpha$ , 然后根据 LD 表

头读数  $x$  ,再由(6)式计算得出透明平板的厚度  $d$  ;当测量系统的  $\theta_1$  未知、平板材料的折射率已知时,首先通过实验测量不同厚度的透明平板来标定  $\alpha$  ,同时根据该材料的相对折射率  $n$  由(6)式求得系统的  $\theta_1$  ,然后可以根据 LD 表头读数  $x$  ,由(6)式来测量计算任何已知材料折射率的透明平板的厚度  $d$  ;若测量系统的  $\theta_1$  、平板材料的折射率都未知,先通过实验测量不同厚度的透明平板来标定  $\alpha$  ,再由(6)式来测量计算该种材料透明平板的厚度  $d$  。

### 2.3 透明平板位置及基面移动对测量表头读数的影响

以上所分析的测量原理为透明平板紧贴光线散射基面时的情况,但在实际测量透明平板厚度或在线测量透明平板生产过程中的厚度时,透明平板与光线散射基面存在一定的间隙或要求有一定的间距  $h$  ,如图3所示,通过透明平板的光线经两次折射后仍保持平行,因此其反向延长线与法线间构成平行四边形  $OAA'O'$  ,结合图2可知,  $h$  的变化并不会引起  $x$  的变化,即透明平板与散射基面之间的间距对测量结果没有影响。

当透明平板在散射基面之上,散射基面的位置发生位移  $\Delta h$  时,如图4所示,根据光线平行所构造的平行四边形对边相等关系,可得 LD 所测得的基面位置的位移量  $\Delta x = \Delta h$  ,即 LD 测得的基面位移量就是透明平板和基面整体的位移量,同时也等于透明平板上表面的位移量。

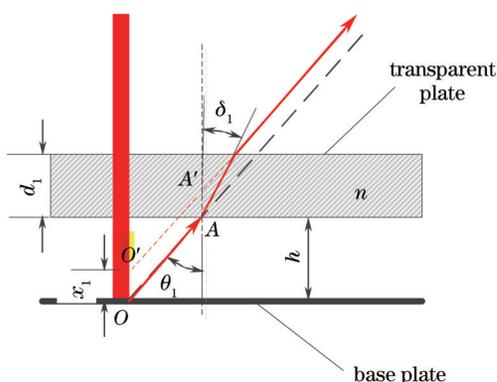


图3 透明平板距基面一定高度时,激光光线折射偏移图

Fig.3 Diagram of laser light refraction, when transparent plate is away from the base plate

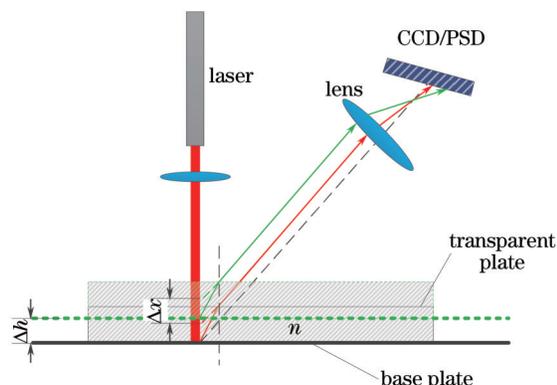


图4 光线散射基面位置的变化对激光位移传感器测量结果的影响

Fig.4 Influence of position changes of base level which light scatters from on laser displacement sensor measurement results

## 3 透明平板厚度测量实验

根据激光三角法光线折射补偿测量透明平板厚度的原理,采用KEYENCE公司的LK-G30直射式激光位移传感器(激光器为650 nm 半导体激光器,有效量程为6 mm,读数表头精确至0.1  $\mu\text{m}$  ,被测物体表面在基准面附近指示灯为绿色,在测量范围之内指示灯为黄色,超出测量范围时指示灯为黄色闪烁),搭建测量透明平板厚度的实验装置,如图5所示。LD 固定在三轴微移动平台(Zolix公司PSA050-11-Z)上,通过MC600-4B控制器控制三轴微移动平台可以调节LD相对载物台的位置,实验材料选用不同厚度的无色有机玻璃PMMA。

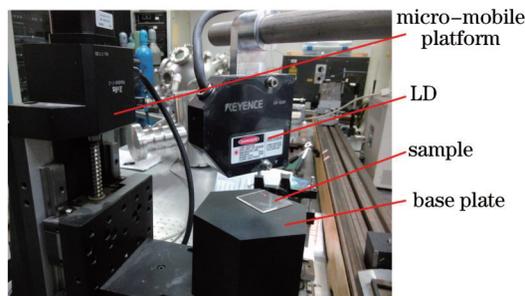


图5 基于单LD的PMMA平板厚度测量装置图

Fig.5 Device of PMMA plate thickness measurement based on single LD

### 3.1 测量系统的标定

首先调整载物台相对LD的位置,使载物台上表面作为LD的散射基准面,此时指示灯显示为绿色,设置读数表头复位,表头读数归零。标定实验选取7块不同厚度的PMMA平板作为标定样品,用千分尺测量同一块PMMA板四个不同位置处的厚度,然后将该PMMA板放置载物台上,调整微移动台的X轴和Y轴,得到四个不同位置LD表头的示数(LD数显表的后两位示数波动较大,因此读数精确到小数点后三位),测量结果如表1所示,LD测量示数 $x$ 随透明平板实际厚度 $d$ 的变化情况如图6所示,呈良好的线性关系,即与理论分析(6)式的变化规律一致,实验测得该种PMMA平板厚度测量的光线补偿系数 $\alpha$ 为0.441。

表1 系统标定的测量数据

Table 1 Data of measuring system calibration

Sample codes		1	2	3	4	5	6	7
Results measured by micrometer $d$ /mm	Point 1	1.424	1.628	1.882	2.155	2.948	3.594	4.062
	Point 2	1.431	1.632	1.880	2.142	2.929	3.602	4.053
	Point 3	1.429	1.615	1.894	2.142	2.935	3.605	4.043
	Point 4	1.422	1.609	1.894	2.152	2.945	3.599	4.051
	Average	1.427	1.621	1.888	2.148	2.939	3.600	4.052
Results measured by LD $x$ /mm	Point 1	0.629	0.714	0.829	0.952	1.299	1.586	1.780
	Point 2	0.630	0.718	0.830	0.936	1.296	1.588	1.793
	Point 3	0.635	0.713	0.830	0.947	1.296	1.582	1.786
	Point 4	0.634	0.706	0.834	0.946	1.300	1.584	1.786
	Average	0.632	0.713	0.831	0.945	1.298	1.585	1.786
$\alpha$		0.443	0.440	0.440	0.440	0.442	0.440	0.441

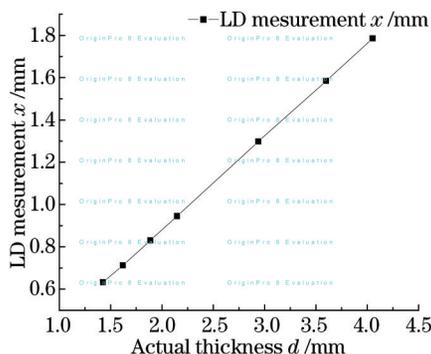


图6 LD测量示数 $x$ 随透明平板实际厚度 $d$ 的变化情况

Fig.6 Relationship between LD measurement readings and transparent plate actual thickness

### 3.2 PMMA平板厚度的测量

由标定实验得到PMMA平板的厚度补偿系数 $\alpha$ 为0.441,选取厚度不同PMMA的平板10块通过该厚度测量装置进行厚度测量,根据激光三角法光线折射补偿测量透明平板厚度的原理,得到的测量结果及系统误差如表2所示。

表2 PMMA平板厚度的测量结果

Table 2 Results of PMMA plates thickness measurements

Sample codes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Actual thickness /mm	1.334	1.945	2.386	1.206	1.608	1.332	1.328	0.979	1.479	1.891
LD measurement /mm	0.591	0.860	1.061	0.533	0.707	0.593	0.572	0.432	0.653	0.838
Calculation thickness /mm	1.340	1.950	2.406	1.209	1.603	1.345	1.297	0.980	1.481	1.900
Absolute errors /mm	0.006	0.005	0.020	0.003	0.005	0.013	0.031	0.001	0.002	0.009
Average absolute error /mm						0.0094				
Relative errors /%	0.46	0.26	0.83	0.22	0.30	0.95	2.33	0.06	0.12	0.49
Average relative error /%						0.60				

### 3.3 PMMA 平板位置对其厚度测量的影响

选取厚度为 1.881mm 的 PMMA 平板, LD 表头示数  $x$  随 PMMA 平板上移高度  $h$  的变化情况如表 3 所示, 可知 PMMA 平板与散射基面的间距的变化基本不会引起 LD 表头示数的变化, 与图 3 理论分析结果一致。

表 3 LD 表头示数  $x$  随 PMMA 平板上移高度的变化

Table 3 Change of LD reading  $x$  with change of PMMA displacement  $h$

PMMA displacement $h$ /mm	0.000	1.426	2.852	4.278	5.704	7.130	8.556
LD reading $x$ /mm	0.829	0.830	0.829	0.831	0.830	0.829	0.829

## 4 准分子激光光刻投影加工 PMMA 基生物芯片的像面校准实验

生物微流控芯片是生命科学工作者进行基因测序、基因诊断、基因识别以及基因和蛋白质功能研究的重要工具<sup>[11]</sup>。以 PMMA 高聚物材料代替硅和玻璃作为基片材料, 具有价格便宜、加工方法简单、生物兼容性好等优点<sup>[11-12]</sup>, 且准分子激光投影光刻直写入微加工方法因其灵活性大, 加工质量高, 将成为高聚物加工方法的主流<sup>[11-13]</sup>。在准分子激光投影光刻加工 PMMA 基生物微流控芯片时, 透过掩膜的激光束经高倍聚焦物镜成像, 其发散角变得更大, 在加工过程中, PMMA 基板厚度的变化及机械抖动, 都将会导致 PMMA 刻蚀面偏离投影像面, 造成聚刻蚀像点弥散、能量密度降低, 对刻蚀效果产生较大的影响。因此通过实时监测 PMMA 基板厚度的变化及刻蚀面的位置, 自动校准生物芯片基体表面与投影像面的偏差, 能够提高刻蚀精度, 提升生物芯片的加工质量。

准分子激光投影光刻加工 PMMA 基生物芯片的像面校正实验, 采用 LAMBDA PHYSIK 305IF 型准分子激光器(工作气体: KrF; 波长: 248 nm; 激光脉冲工作频率: 1~50 Hz; 脉宽: 30 ns), 微加工系统平台如图 7 所示。在加工过程中, 该系统的光路结构固定不动, 聚焦物镜的光轴沿三维微移动加工平台的  $Z$  轴方向, 刻蚀面偏离像面不超过 50  $\mu\text{m}$  可获得清晰刻蚀图样; 被加工的样品位于三维加工平台上, 加工台  $Z$  轴的运动行程为 6 mm, 精度为 1  $\mu\text{m}$ ; LD 被固定在光学平台的支架上, 与光路结构保持相对静止。在准分子激光投影光刻加工 PMMA 基生物芯片时, 采用 LD 测量 PMMA 基体的厚度来获得其上表面(即激光刻蚀面)的位置, 以此判断激光刻蚀面是否与掩膜投影成像的清晰像面发生偏离, 若发生偏离, 则基于偏移量自动调整 PMMA 基面来进行像面校正, 流程图如图 8 所示。

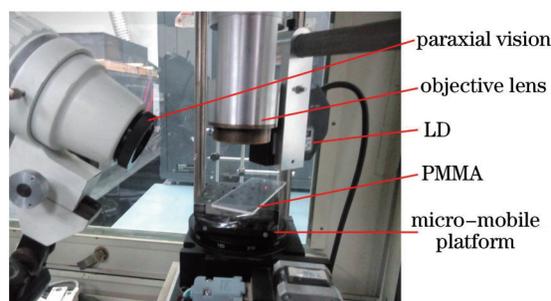


图 7 PMMA 基生物芯片的准分子激光加工平台

Fig.7 Processing platform of PMMA biochip by excimer laser

由于是调节三维微移动平台  $Z$  轴来进行像面校准, 因此首先研究了 LD 示数随  $Z$  轴移动的变化规律。分别测量了载物台上无 PMMA 基板和有 PMMA 基板(厚度为 1.420 mm)时 LD 数显表头示数随  $Z$  等间距移动的变化, 其结果如图 9 所示, 可知在像面校正时, LD 数显表数值变化与  $Z$  轴调整的位移量相等, 即与图 4 的理论分析结果一致。

像面校准实验采用如图 10(a)所示的“十”字形掩膜(3 mm×3 mm), 厚度  $d$  为 1.451 mm 的 PMMA 基板在像面处刻蚀的清晰图样(显微镜放大 100 倍的视场下观察)如图 10(b)所示。系统以该 PMMA 基板的刻蚀面为清晰像面的参考基面, 此时数显表示数置零。当载物台上放入厚度不同的 PMMA 基板时, 通过如图 8 所示的流程图来对像面进行校准。实验中, 先后对厚度为 1.850 mm 和 2.104 mm 的 PMMA 基板进行像面校正, 校正前和校正后的刻蚀效果如图 10(c)、(e)和(d)、(f)所示(1.850 mm 和 2.104 mm 的 PMMA 基板由于同 1.451 mm 厚的

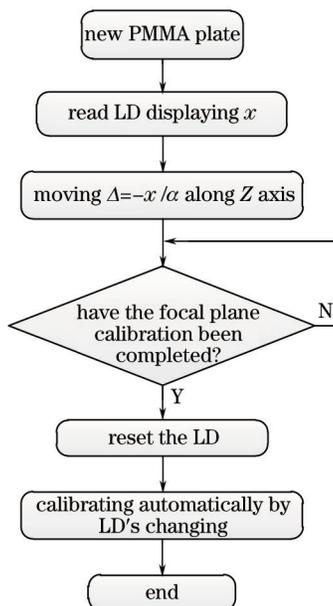


图8 像面校准工作流程图

Fig.8 Flow chart of focal plane calibration work

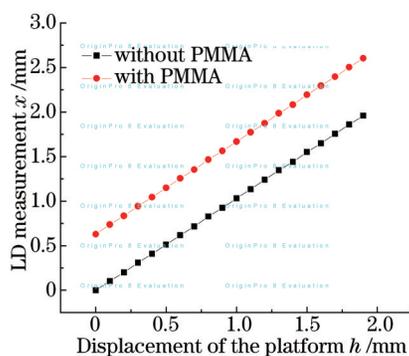


图9 LD数显表头的读数随载物台沿Z方向移动的变化情况

Fig.9 Change of LD meter readings when platform moves along the direction of Z axis

PMMA 基板不是同一批实验材料,质量稍差,产生的飞溅物较多,但经过像面校准后的刻蚀图样整体轮廓清晰),可知通过该校准方法能明显改善刻蚀图样轮廓的清晰度,并且提高了校准的精度和效率。

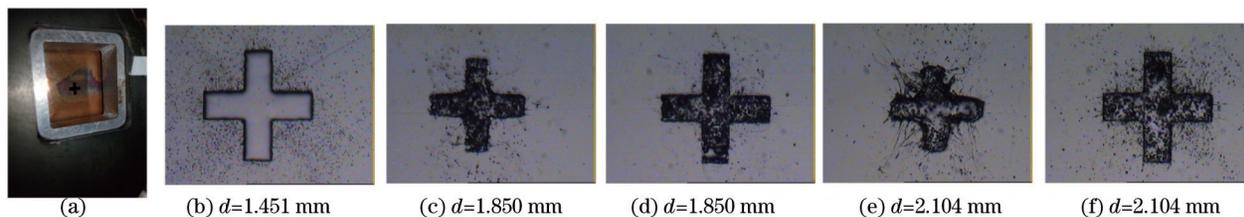


图10 掩膜及不同厚度PMMA基板像面校准前后准分子激光(单脉冲能量600 mJ,4个脉冲)刻蚀的图样。(a)掩膜;(b)厚度为1.451 mm的基板在像面处的刻蚀图样;(c)、(d)厚度为1.850 mm的基板在像面校准前后的刻蚀图样;(e)、(f)厚度为2.104 mm的基板在像面校准前后的刻蚀图样

Fig.10 Mask and etching patterns of different thickness PMMA substrates by excimer laser (single pulse energy 600 mJ, 4 pulses) before and after focal plane correction. (a) Mask; (b) etching pattern of 1.451 mm substrate on the focal plane; (c) and (d) etching patterns of 1.850 mm substrate before and after focal plane correction; (e) and (f) etching patterns of 2.104 mm substrate before and after focal plane correction

## 5 结 论

激光位移传感器直接测量透明平板的厚度存在一定的难度和误差,通过理论建模分析激光三角法光线

折射补偿测量透明平板厚度的原理,以及透明平板厚度测量实验,可以得出:1) 激光位移传感器的测量示数与透明平板的厚度呈线性变化关系,PMMA 平板的厚度测量补偿系数为 0.441;2) 透明平板与散射基面的间距大小对激光位移传感器的测量结果无影响;3) 设计的 PMMA 平板厚度测量装置的平均误差小于 0.01 mm,平均相对误差为 0.6%,能够满足准分子激光加工 PMMA 基生物芯片系统像面校准的要求。基于激光三角法的光线折射补偿厚度测量装置具有系统尺寸小、校准方便、非接触、精度高、效率高等优点,可以进一步推广到平板玻璃生产的在线检测、加工应用等领域。另外基于光线折射补偿的方法,可进一步应用于对透明介质折射率等参数的测量。

## 参 考 文 献

- 1 Feng Junyan, Feng Qibo, Kuang Cuifang. Present status of high precision laser displacement sensor based on triangulation[J]. *J Applied Optics*, 2004, 25(3): 33-36.  
冯俊艳, 冯其波, 匡萃方. 高精度激光三角位移传感器的技术现状[J]. *应用光学*, 2004, 25(3): 33-36.
- 2 Feng Qibo, Zhang Zhifeng, Chen Shiqian, *et al.*. A novel method for dynamically measuring diameters of train wheels using laser displacement transducers[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(7): 1059-1062.  
冯其波, 张志峰, 陈士谦, 等. 一种激光位移传感器动态测量列车车轮直径的新方法[J]. *中国激光*, 2008, 35(7): 1059-1062.
- 3 Zhou Junfeng, Tan Jianping. Position adjustment for the sensor used in a laser sheet-convexity measurement system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(7): 93-96.  
周俊峰, 谭建平. 激光板凸度检测系统传感器位置调节方法[J]. *光电工程*, 2005, 32(7): 93-96.
- 4 Zhifeng Zhang, Qibo Feng, Zhan Gao, *et al.*. A new laser displacement sensor based on triangulation for gauge real-time measurement[J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, 40(2): 252-255.
- 5 Chen Hao, Zhu Jigui, Xue Bin. Impact of rough surface scattering characteristics to measurement accuracy of laser displacement sensor based on position sensitive detector[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(8): 0808003.  
陈浩, 郝继贵, 薛彬. 粗糙表面散射特性对基于 PSD 的激光位移传感器测量精度的影响[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0808003.
- 6 Wang Wei, Wang Zhaoba. Capability research of glass thickness detection based on CCD displacement sensor[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2006, 9: 44-45.  
王伟, 王召巴. 基于 CCD 位移传感器在玻璃厚度测量时的性能研究[J]. *仪器技术与传感器*, 2006, 9: 44-45.
- 7 Xiao Changjiang, Zhang Jingchao, Li Xingyuan, *et al.*. Experimental research on thickness measurement of reflection-type flat glass based on line laser[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2013, 34(5): 909-912.  
肖长江, 张景超, 李兴元, 等. 基于线结构光的反射式平板玻璃厚度测量实验研究[J]. *半导体光电*, 2013, 34(5): 909-912.
- 8 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.
- 9 Wang Yun, Qiu Lirong, Song Yanxing, *et al.*. Laser differential confocal lens thickness measurement[J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(5): 055204.
- 10 Wang Yun, Qiu Lirong, Yang Jiamiao, *et al.*. Measurement of the refractive index and thickness for lens by confocal technique[J]. *Optik*, 2013, 124(17): 2825-2828.
- 11 Chen Tao, Yao Liying, Qi Heng, *et al.*. Some key problems in PMMA based PCR microfluidic biochip by excimer laser micromachining[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(s1): 146-150.  
陈涛, 姚李英, 祁恒, 等. PMMA 基 PCR 生物芯片及其准分子激光制备技术的几个关键问题[J]. *中国激光*, 2007, 34(s1): 146-150.
- 12 Yao Liying, Liu Baoan, Chen Tao, *et al.*. Micro-flow through polymerase chain reaction chip fabricated by KrF excimer laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(8): 1137-1142.  
姚李英, 刘保安, 陈涛, 等. 采用 KrF 准分子激光制备聚合酶链式反应微流控芯片[J]. *中国激光*, 2005, 32(8): 1137-1142.
- 13 Shen Xuefei, Chen Tao, Wu Jingxuan. Fabrication of microfluidic chip with two-step using excimer laser ablation micromachining technique and replica molding technology[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(9): 0903004.  
申雪飞, 陈涛, 吴靖轩. 准分子激光微加工技术结合模塑技术加工微流控芯片[J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 0903004.