

小型激光直写光刻系统

胡永璐^{1,3} 徐文东¹ 王闯^{2,3} 赵成强¹ 刘涛¹ 刘洋^{1,3}
(¹中国科学院上海光学精密机械研究所高密度光存储技术实验室, 上海 201800)
(²国家纳米科学中心, 北京 100190; ³中国科学院大学, 北京 100190)

摘要 针对早期研制的激光直写装置存在的刻写速度慢、功能不够完善的缺点,重新设计并搭建了一套小型激光直写光刻系统。该系统采用波长 405 nm 可高速模拟调制的单横模半导体激光器作为刻写光源,结构更为简单紧凑;采用正弦振荡模式控制纳米平台运动,大幅度提高了刻写速度;增加了刻写光源功率校正功能、基于互补金属氧化物半导体(CMOS)相机的样品观察功能、蓝光共聚焦成像功能以及刻录光源功率衰减以实现一般光刻胶刻写的功能。通过记忆调焦数据,刻写蓝光、辅助聚焦红光以及样品观察绿光三束光分时工作,互不干扰。实验表明,该光刻系统可在光敏薄膜材料上进行打点、刻画矢量和标量图形等多种操作,刻写范围 $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$,最少用时 100 s,刻写分辨率在 250 nm 以内。

关键词 激光技术; 激光直写; 光刻; LabVIEW; 自动聚焦

中图分类号 TN305 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1016003

Compact Laser Direct Writing System

Hu Yonglu^{1,3} Xu Wendong¹ Wang Chuang^{2,3} Zhao Chengqiang¹ Liu Tao¹ Liu Yang^{1,3}

¹Laboratory for High Density Optical Storage, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
²National Center for Nanoscience and Technology, Beijing 100190, China
³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract As the early developed laser direct writing device has low writing speed and its function is not perfect, a new compact system is designed and constructed. A 405 nm high-speed analog modulated semiconductor laser is used as the light source to make the structure more compact; the movement of the nano platform is adjusted to sinusoidal oscillating mode to increase writing speed; functions such as writing power calibration, sample observation based on complementary meta-oxide-semiconductor transistor (CMOS), blue light confocal imaging and ordinary photoresist writing are added. By recording focus date, writing light, auxiliary focusing light and sample observing light can work separately and will not interfere with each other. Experiments show that the system can plot or pattern vector and scalar graphics on arbitrary photosensitive films. It takes at least 100 s to finish writing $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ writing area with writing feature size smaller than 250 nm.

Key words laser technique; laser direct writing; lithography; LabVIEW; auto focus

OCIS codes 220.3740; 120.4640; 150.0155

1 引言

光刻技术作为微纳加工中的关键技术,是集精密光学、机械、控制、材料等先进科学技术和工程技术于一体,各种尖端交叉融合的复杂大系统产物,是制作超大规模集成电路、微机电系统、生物芯片以及衍射光学元件^[1-3]的主要手段。光刻机的研发过程及研发成果对集成电路产业和信息产业的发展具有

极大的技术带动作用。

光刻技术按照是否有掩模分为有掩模光刻和无掩模光刻,近年来,随着半导体技术的不断发展,其中的无掩模光刻技术得到了稳步发展,涌现出了如扫描电子束光刻、聚焦离子束光刻、干涉光刻、扫描探针光刻、蘸笔光刻、飞秒激光非线性光刻、浸没式阵列激光扫描光刻和无掩模等离子光刻^[4-11]等光

收稿日期: 2014-04-14; **收到修改稿日期**: 2014-05-02

作者简介: 胡永璐(1989-),女,硕士研究生,主要从事无掩模激光直写光刻方面的研究。E-mail: huyonglu@siom.ac.cn

导师简介: 徐文东(1966-),男,研究员,博士生导师,主要从事激光直写与关联成像方面的研究。

E-mail: xuwendong@mail.siom.ac.cn

刻技术。尽管这些技术各有各的优势,但都需要耗费较长的时间刻写,系统或设备也都较为复杂和昂贵,且容易受到环境的影响,设备操作均需要较为专业的人员,这些就共同导致了高投入却只有低产出的不足^[12-13]。激光直写作为一种无掩模光刻技术,是利用强度可变的激光束对基片表面的抗蚀材料实施变剂量曝光,显影后在抗蚀层表面形成所要求的图形。由于该技术只需通过控制激光强度和扫描刻写路径就可以实现高精度任意图形的刻写,系统较其他刻写方式而言更为简单,成本也更为低廉,因此,该技术适用于高精度单件或小批量的生产,在科研领域也具有广泛的应用。

本文主要介绍自主设计并搭建的无掩模激光直写光刻系统。该系统采用波长 405 nm 高速模拟电调制半导体激光器作为刻写激光光源,使用象散法^[14]检测聚焦误差并通过压电陶瓷纳米位移台带动数值孔径为 0.95 的刻写物镜进行自动聚焦,采用正弦变速扫描方式控制纳米位移平台带动样品在二维平面内运动。实验结果显示,刻写一个 $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$

的图像最少用时 100 s,刻写分辨率在 250 nm 以内。系统主要可用作科研实验平台,用于研究掩模超分辨光刻材料、光存储材料、灰度掩模材料等。

2 系统结构

小型激光直写光刻系统光路结构如图 1 所示,主要由图 1(a)激光刻写模块、图 1(b)离焦检测模块和图 1(c)样品观察模块三大部分组成。图 1(a)中,刻写光源采用波长 405 nm 高速电调制的半导体激光器,电压调节范围 $0 \sim 1\ \text{V}$ (最大不超过 1.5 V),最大输出功率 250 mW,功率稳定性标定值为 (0.5%) 2 h。刻写激光经扩束镜组、偏振分光镜、 $1/4$ 波片,到达分光镜后分为两束光束,一束通过透镜后会聚到功率探测器上,可用于刻写前对光源进行功率校正;另一束则垂直入射到刻写物镜,并最终会聚到固定在二维纳米运动平台上的样品表面,刻写物镜固定在可沿 Z 轴运动的压电陶瓷纳米位移台上。偏振分光镜左侧部分为共聚焦系统,用于刻写完成后的蓝光成像。由于系统采用的显微物镜数值孔径为

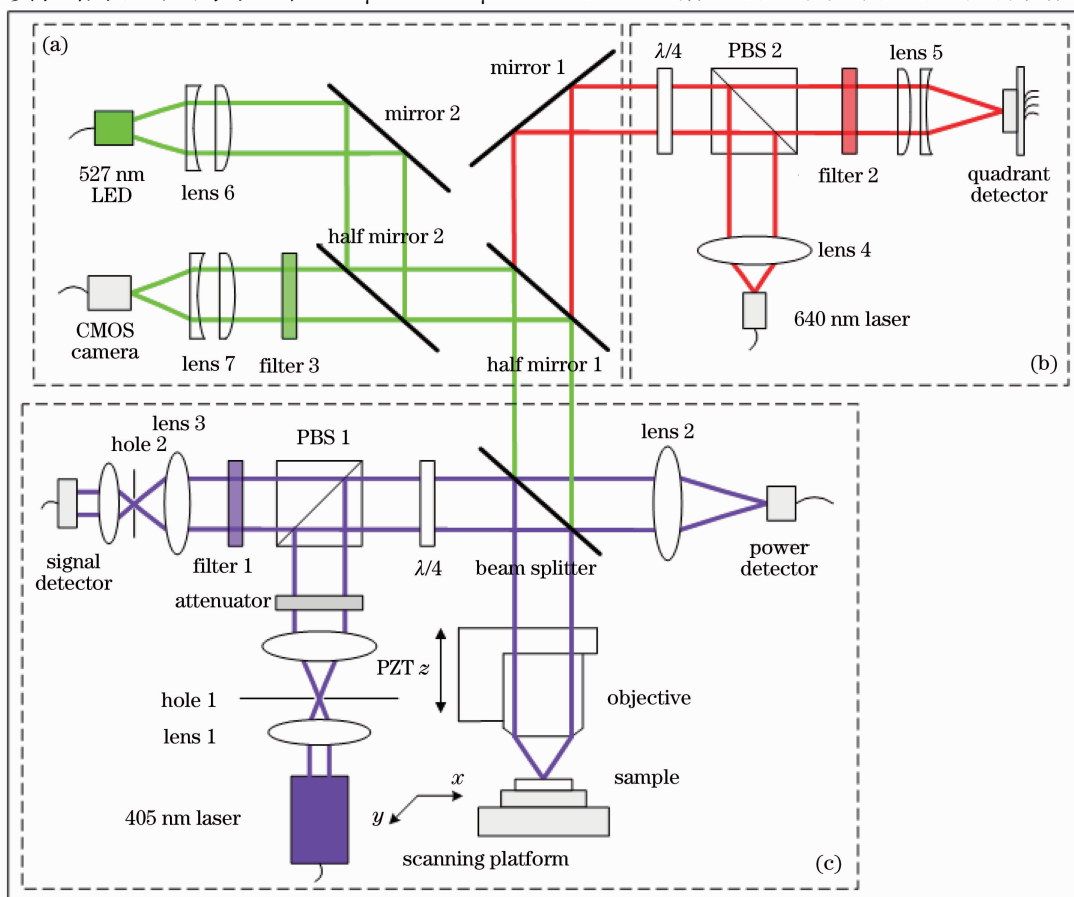


图 1 系统光路结构图。(a)样品观察模块;(b)离焦检测模块;(c)激光刻写模块

Fig. 1 Optical structure diagram of the system. (a) Sample observation module; (b) defocus detection module; (c) Laser writing module

0.95, 焦深仅为 $0.524 \mu\text{m}$, 在样品倾斜时, 无法保证样品光敏感层始终处于刻写焦深范围内, 因此系统采用象散法进行辅助聚焦, 见图 1(b)。采用波长 640 nm 红光光纤输出激光器作为辅助聚焦光源, 光束入射到样品表面后反射回四象限探测器, 通过各象限接收到的光强计算出离焦量, 并通过反馈信号控制 Z 向运动纳米平移台 (PZT Z) 带动物镜运动。离焦检测模块还可用于刻写完成后的红光成像。图 1(c) 样品观察模块采用 527 nm 的 LED 面光源作为照明光源, 照射到样品表面后反射回的光束由互补金属氧化物半导体 (CMOS) 相机接收成像。此模块用于刻写前对样品表面进行观察和刻写完成之后样品的绿光成像。

3 电子学控制

系统分为上位机和下位机两部分, 其中上位机是标准的 PC 机, 采用 LabVIEW 软件进行人机界面的设计以及数据收发、处理、显示和存储, 下位机基于现场可编程门阵列 (FPGA) 芯片开发, 通过 USB 与上位机通讯, 接收数据并控制各个独立元件 (包括 LD405、LD532、PZT Z 、PIN、四象限探测器和工件台) 的工作并反馈数据给上位机。

系统的工作流程为: 刻写光源功率校正 \rightarrow 样品

观察 \rightarrow 聚焦控制 \rightarrow 刻写 \rightarrow 成像。

3.1 刻写光源功率校正

尽管刻写光源的输出功率与调制电压间具有很好线性 [实测结果见图 2(a)], 实测经过约 0.5 h 的预热过程后输出功率长时间稳定性高达 $(0.96\%)/6 \text{ h}$ [结果见图 2(b)], 但系统在初次使用或较长时间未使用的情况下, 仍首先应对刻写光源进行功率校正, 功率校正分为调制线性校正与峰值功率校正。调制线性校正过程: 上位机逐步发送 $0 \sim 255$ 的 256 个数据给下位机, 下位机将数据发送到 DA 芯片, 将其转化为激光器电压值控制电压从零到最大值的输出, 再由功率探测器测得各点相应的功率值, 通过 AD 芯片转换后发回给上位机, 由此来找到功率与控制电压的对应关系, 并通过计算机对数据进行存档, 此数据也将是确定刻写图像各点灰度值对应调制电压的查表依据。此外, 考虑到光源输出功率的峰值随着时间的拉长 (例如使用三个月后) 会有所衰减, 不能很好地达到用户预期的功率值, 系统还增加了峰值功率校正功能: 由用户设定峰值功率后, 上位机通过发送校调指令到下位机, 下位机通过执行循环结构, 调节激光器最大电压对应的峰值功率, 使其达到用户设定值再停止循环。

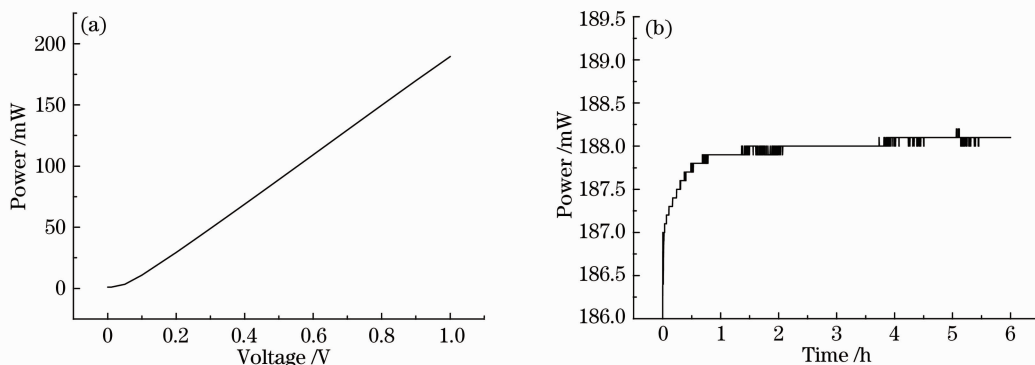


图 2 刻写激光性能测试。(a) 输出功率与调制电压关系; (b) 输出功率随时间变化曲线

Fig. 2 Writing laser performance test. (a) Relationship between output power and modulation voltage; (b) relationship between output power and working time

3.2 样品观察

此过程类似于光学显微镜操作过程, 通过粗调与微调找到绿光成像的焦点进行样品观察。由于系统采用型号为 Basler acA2500-14gm 的 CMOS 相机, 总像素 $2592 \text{ pixel} \times 1944 \text{ pixel}$, 每个像素尺寸 $2.2 \mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m}$, 而绿光成像系统的放大倍率为 44 倍, 可计算出相机每次可观察到的样品最大面积为 $129.6 \mu\text{m} \times 97.2 \mu\text{m}$, 即: 单次成像无法完全观察到

$200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 的系统刻写范围, 而需要分区域多次进行观察。通过设计自定义控件在用户界面增设一个样品观察区域选择控件, 将样品分割成 12 个感兴趣区域 (ROI)。用户一旦选中某个区域, 计算机便通过计算将该区域对应的纳米位移平台的 PZT X 与 PZT Y 值发送给下位机, 下位机控制位移平台移动到该指定位置进行分区域的样品观察。此外, 此模块还实现了通过手动输入或用鼠标在已

采集图像上选择任意感兴趣区域进行局部高帧率地观察以及保存图像等功能。

3.3 聚焦控制

系统采用象散法进行离焦检测,采用参量可手动调节的比例微分积分(PID)算法^[15]进行自动聚焦负反馈。但离焦检测并非实时进行,而是在刻写前即对样品上阵列点(如 2000×2000 个采样点)进行自动聚焦并进行Z向位移的存档,刻写或成像时在相应点直接输出Z。采用这种方式进行离焦调节的目的是:1)避免实时调焦中红光打在已刻写上导致误聚焦;2)蓝光成像时避免红光对其干扰。

3.4 刻写与成像

通过用户选择刻写图形以及需要刻写的网格点数,对其进行如图3所示的预处理,得到实际刻写时

网格点数对应的各点的刻写像素值,并将其映射到功率值,再由计算机根据3.1节中确立的电压功率关系计算出对应的刻写电源电压值,并通过USB口发送到下位机控制芯片来控制激光器电压。然而, 20000×20000 的大数据如果一次性统一进行处理,对于计算机内存而言是个挑战,程序也就无法任意在其他小内存的电脑上顺利运行。为此,在处理大数据时,将其分成200次进行处理,每次分别处理 20000×200 个数据。此外,用户可以按要求选择定脉宽或定功率的刻写方式,并可设定相应的定值大小以适应不同刻写要求的材料。在准备好数据后,先让样品纳米位移平台归位到刻写起始位置处,即可开始逐点刻写,用户界面中进程条显示刻写进程。

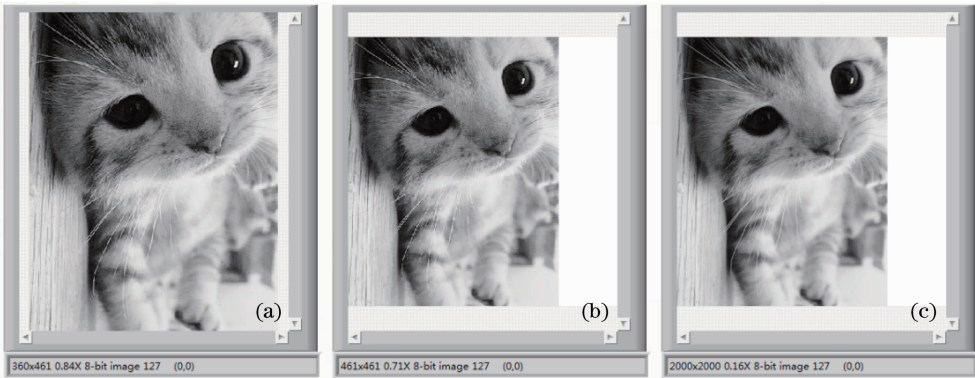


图3 图形预处理。(a)原图;(b)原图插入空白像素值后的方形图片;(c)(b)图插值为指定网格数大小后的图片

Fig. 3 Image preprocessing. (a) Original image; (b) square image with inserted blank pixels;

(c) image with specified size after interpolation of Fig. (b)

值得一提的是,在刻写过程中,纳米位移平台的运动方式不再是按照锯齿波方式运动,而是采用了正弦波模式,也就是振荡模式。由于锯齿波模式在拐点处的运动方向和速度是骤变的,如要达到较高的频率,对于位移平台性能要求很高,而采用振荡模式则可达到20 Hz,这样就大大提高了刻写速度。

平台实际运动方式说明:如图4所示,采用20 Hz作为运动频率,黑色曲线为PZT X运动曲线,其中,以第一个周期为例,0~25 ms为PZT X的去程,移动过程中进行刻写,而由于系统设定的最大网格点数为 20000×20000 ,因此在控制PZT X运动时,将正弦曲线的峰峰值等分成20000份,并找到各点对

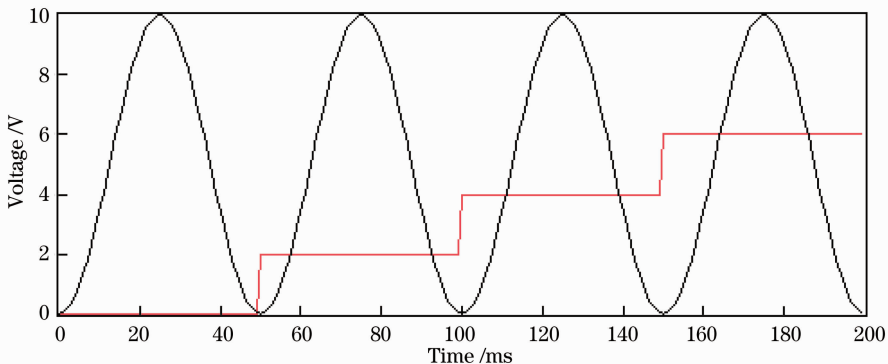


图4 扫描平台运动方式

Fig. 4 Motion mode of scanning platform

应所需的脉冲数,以确保 PZT X 以等间距进行扫描。25~50 ms 为 PZT X 的回程,此过程不进行任何刻写;红色曲线为 PZT Y 运动曲线表示,PZT X 每走一个周期,PZT Y 就相应的增加一个恒定幅值的阶跃信号(幅值大小根据需要设定)。

由于系统自带三个成像系统:基于 CMOS 相机的绿光成像、四象限红光扫描成像、共聚焦系统蓝光扫描成像。在样品刻写完成后,无需采用其他成像设备来观察(测量除外),选定一种成像方式后即可关闭其他两种光源进行成像与观察。三种成像方式各有特点:基于 CMOS 相机的绿光成像不需要逐点扫描,成像速度快;四象限红光成像采用逐点扫描方式,速度较慢,但反映了光刻层光刻前后对红光的反射情况;共聚焦蓝光成像也采用逐点扫描方式,但其分辨率高,并反映了光刻层光刻前后对蓝光的反射情况。

4 实验结果与分析

激光直写光刻系统实物图如图 5 所示,图 1 三个模块中的各元件都集成为一体,结构紧凑有序。

为检测系统离焦检测模块的功能,采用 10 Hz 平台移动频率对各点进行离焦量扫描,如图 6 所示。根据图 6(d)扫描聚焦过程中各点反馈回的离焦量

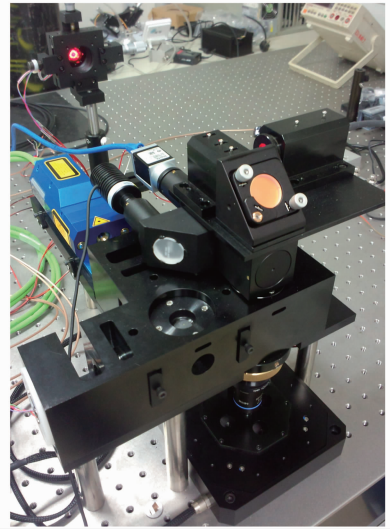


图 5 系统实物图

Fig. 5 Actual photo of the system

聚焦误差信号(FES)的数值可以发现 FES 偏移目标 FES 的误差在 0.05 范围内,根据图 6(b)S 曲线中线性部分的斜率,可计算出 PZT Z 的聚焦误差在 $0.5 \mu\text{m}$ 以内,在物镜的焦深范围,因此可判定此系统可以有效地进行离焦量检测。图 6(e)为采用 PID 算法进行自动聚焦负反馈条件下扫描的各点 PZT Z 所处的位置,即各点的离焦量数据。

由于离焦检测模块采用红光作为辅助聚焦光

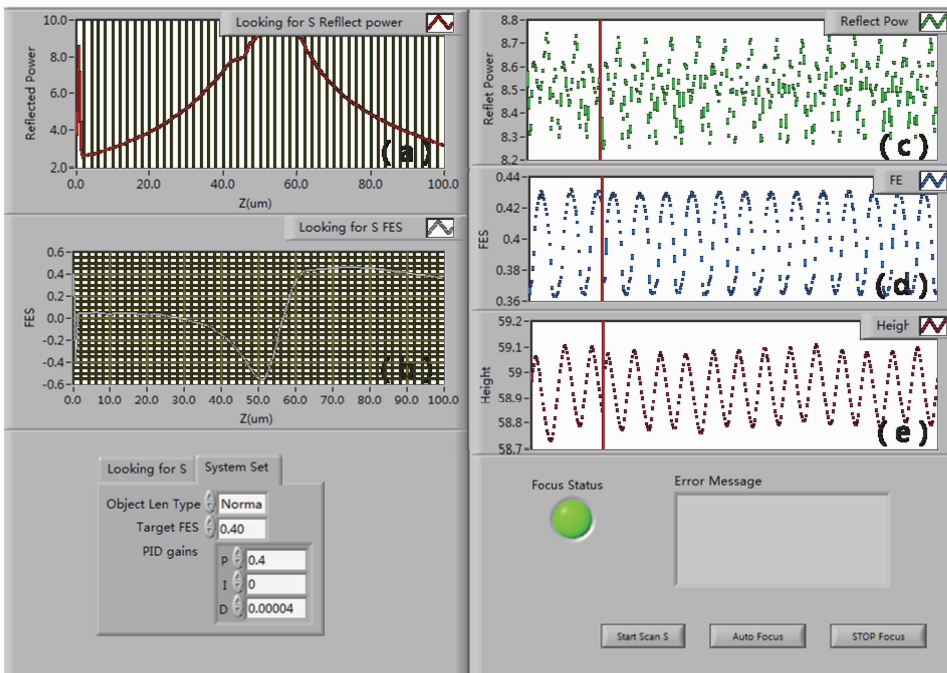


图 6 离焦检测模块。(a)S 曲线扫描行程中样品反射的光强;(b)S 曲线;(c)自动聚焦情况下扫描样品各点反射的光强;(d)自动聚焦情况下各点 FES 值;(e)自动聚焦情况下各点 PZT Z 的高度值

Fig. 6 Defocus detection module. (a) Reflected power during scanning S curve; (b) S curve; (c) reflected power in auto focus situation; (d) FES value in auto focus situation; (e) height of PZT Z in auto focus situation

源,其聚焦点与刻写蓝光实际需要的聚焦点间存在一个恒定值的偏移量,需要通过实验确定最佳刻写 FES 值。而刻写激光功率密度在焦点处最大,在焦点两侧依次递减,根据这一规律,采用相同高度和宽度(实验中采用 200 mW 功率、500 ns 脉宽)的激光脉冲刻写对光功率敏感,且具有灰度特性的 Sn 薄膜材料,刻写时每条线条具有不同的 FES,实验结果如图 7 所示。该图中有三组相同的线条簇,每组中从左往右五条线的 FES 值分别为 0.2、0.1、0、-0.1、-0.2,可以看出 FES 为 0 时所刻的线条色彩最深,可以估计 FES 为 0 时样品处于绿光焦点处。为获取更高精度,通过在 FES 为 0 左右小范围内再次进行变 FES 刻写测试,同样通过观察线条的刻写情况找到了材料的最佳刻写 FES 值为 0.02,即:红光与蓝光聚焦点存在的恒定值偏移量 FES 为 0.02,基本接近 0,这是因为系统光路图中消色差透镜将红光与蓝光的色差进行了校正使得两种颜色的

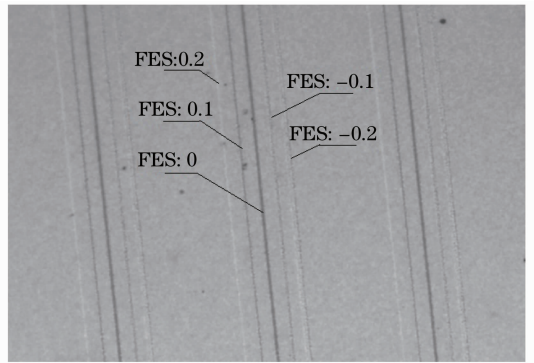


图 7 变 FES 刻写图形的显微图像
Fig. 7 Microscope image of lines with different values of FES

光会聚到了同一点。

为测试系统刻录的有效分辨率,采用 25 mW 功率,50 ns 脉宽以及最佳刻写 FES 为 0.02,在锗碲碲(GST)薄膜材料表面刻线,原子力显微镜(AFM)扫描结果如图 8 所示。

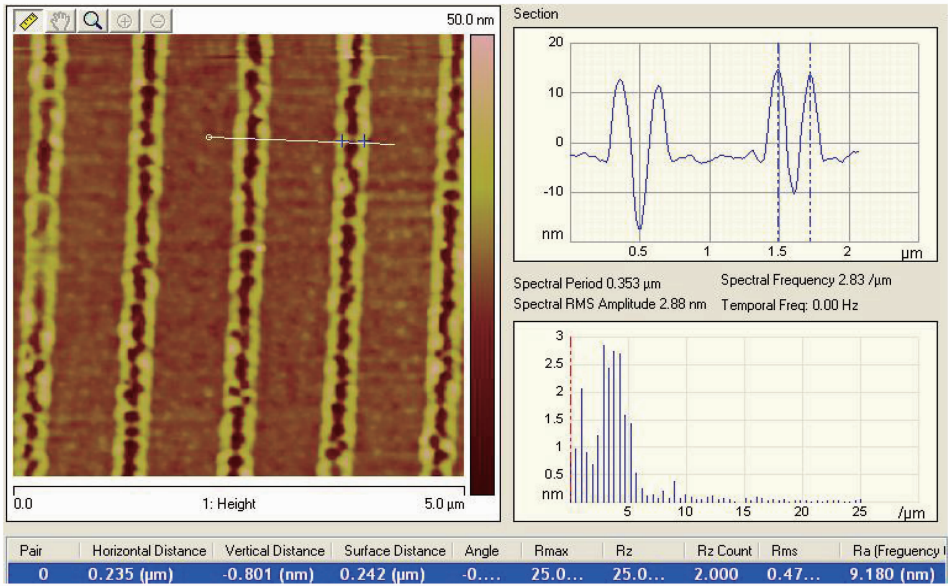


图 8 GST 材料刻写测试结果原子力显微镜扫描图
Fig. 8 AFM scanning image of writing test on GST material

从图 8 可以发现,每条刻录线两侧均有一列材料隆起,这是由于 GST 薄膜材料在受到强激光照射后受热由晶态变为了无定形态,而在两侧堆积。选取两侧隆起中心位置间的距离作为刻录有效分辨率(图中测量结果为 242 nm)判断依据,由多组数据测量结果可估计系统的刻录分辨率在 250 nm 以内。后续还将继续对 GST 材料进行测试研究,以期达到更高的系统分辨率。

为测试装置对于刻写灰度图的实现,采用上述实验中测得的最佳刻写 FES 为 0.02,用变脉宽方式在

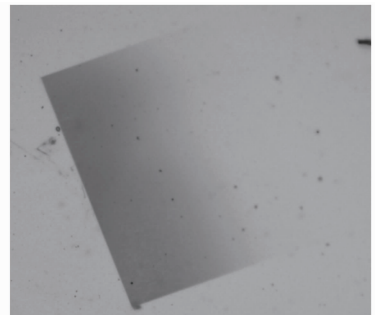


图 9 刻写灰度图显微图像
Fig. 9 Microscope image of writing sample

Sn 薄膜光刻胶表面刻写了一幅 $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ 灰度值渐变的灰度图,如图 9 所示。

此外,对于刻写过程,实验结果显示,采用频率为 20 Hz 的振荡模式控制纳米位移台运动来刻写网格点数为 2000×2000 图像的速度远大于 70 倍的锯齿波方式控制的运动速度,也就是说,原先的装置刻写一个 $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ 大小(网格点数为 2000×2000)的样品需要约 2 h,而采用系统只需 100 s,为平台运

动周期与纵轴网格点数的乘积($0.05 \times 2000\ \text{s}$)即可完成刻写。如果用户选择 10 Hz 的平台运动频率, 20000×20000 的刻写网格点数,则最多用时也仅需 2000 s。

为验证系统成像功能,采用 CMOS 相机成像的结果作为举例展示,如图 10 所示。采用 CMOS 相机的绿光成像,成像速度快,能较为清晰地观察样品刻写情况。

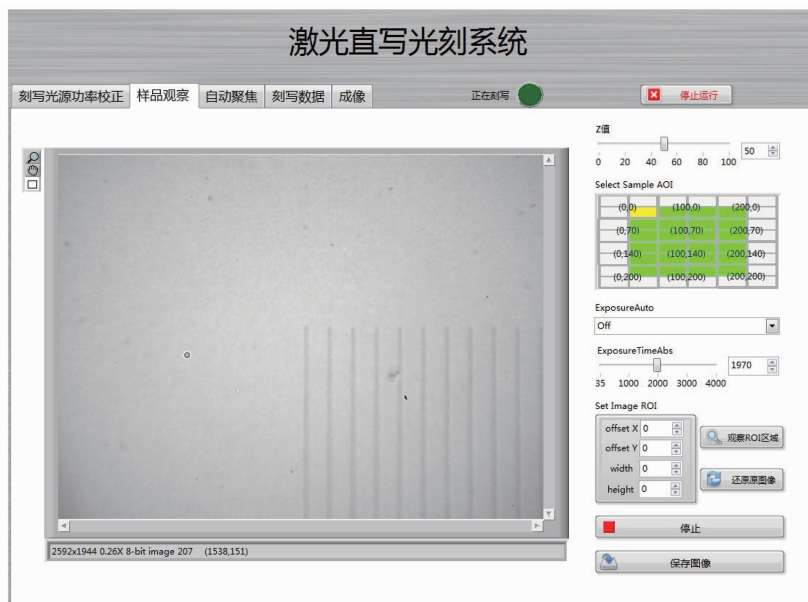


图 10 CMOS 相机观察结果

Fig. 10 Sample observation result based on CMOS camera

5 结 论

设计并搭建了一套小型激光直写光刻系统,可在多种光敏感材料表面直接进行打点、刻画矢量和标量图形等多种操作。相较于早期的激光直写装置,该系统采用了波长 405 nm 高速电调制激光器作为刻写光源,而无需采用声光调制器等设备来调制,使得结构简单紧凑的同时提高了系统分辨率;使用正弦模式控制纳米平台运动,提高了平台移动速度,刻写 $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ 图形最少用时 100 s;增加了刻写光源功率校正功能、样品观察功能、蓝光共聚焦成像功能以及刻写数据记忆功能,使得系统功能丰富而健全。该系统可用作科研实验平台,用于研究掩模超分辨光刻材料、光存储材料、灰度掩模材料等任意光敏或热敏薄膜材料,为科研领域提供一种通用型的低成本的低成本的微纳加工手段。

参 考 文 献

1 J M Bustillo, R T Howe, R S Muller. Surface micromachining

- for microelectromechanical systems [J]. IEEE, 1998, 86(8): 1552-1574.
- 2 K L Gunderson, S Kruglyak, M S Graige. Decoding randomly ordered DNA arrays[J]. Genome Research, 2004, 14(5): 870-877.
- 3 A W Martinez, S T Phillips, G M Whitesides. Three-dimensional microfluidic devices fabricated in layered paper and tape[J]. Proc. the National Academy of Sciences, 2008, 105(50): 19606-19611.
- 4 Christof Klein, Elmar Platzgummer, Hans Loeschner, et al.. Projection maskless lithography for 22 nm half-pitch and below [C]. SPIE, 2009, 10. 1117/2. 1200902. 1528.
- 5 Xijun Li, Kazuya Terabe, Hideki Hatano, et al.. Domain patterning thin crystalline ferroelectric film with focused ion beam for nonlinear photonic integrated circuits[J]. J Appl Phys, 2006, 100(10): 1234001.
- 6 Gao Sasa, Lu Qipeng, Peng Zhongqi, et al.. Analysis of heating effect on XIL deflection focus system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1234001.
- 高飒飒, 卢启鹏, 彭忠琦, 等. X 射线干涉光刻偏转聚焦系统热载影响与分析[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1234001.
- 7 Gang Luo, Guoyong Xie, Yongyi Zhang, et al.. Scanning probe lithography for nanoimprinting mould fabrication [J]. Nanotechnology, 2006, 17(12): 3018-3022.
- 8 Richard D Piner, Jin Zhu, Feng Xu, et al.. "Dip-pen" nanolithography[J]. Science, 1999, 283(5402): 661-663.
- 9 J Koch, E Fadeeva, M Engelbrecht, et al.. Maskless nonlinear lithography with femtosecond laser pulse [J]. Appl Phys A, 2006, 82(1): 23-26.

- 10 Xu Duanyi, Fan Xiaodong, Jiang Peijun, *et al.*. Laser array direct scanning photolithography with immersion lens [J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2008, 10: 1-9.
徐端颐, 范晓冬, 蒋培军, 等. 浸没式阵列激光扫描直写光刻[J]. *电子工业专用设备*, 2008, 10: 1-9.
- 11 Liang Pan, Yongshik Park, Yi Xiong, *et al.*. Maskless plasmonic lithography at 22 nm resolution[J]. *Scientific Reports*, 2011, 1: 1-6.
- 12 Tang Lulu, Hu Song, Xu Feng, *et al.*. A digital-grating-based alignment technique in maskless lithography [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(3): 244-249.
唐路路, 胡 松, 徐 峰, 等. 一种数字光栅无掩模光刻对准方法 [J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 244-249.
- 13 Li Jinlong, Hu Song, Zhao Lixin. Control technique of water surface in dual-stage lithographic system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 241-245.
李金龙, 胡 松, 赵立新. 双工件台光刻机中的焦面控制技术 [J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 241-245.
- 14 Donald K Cohen, Wing Ho Gee, M Ludeke, *et al.*. Automatic focus control: the astigmatic lens approach[J]. *Appl Opt*, 1984, 23(4): 565-570.
- 15 Zhao Yiyang, He Xiaogang. Study on automatic position setting system of stepping motor based on fuzzy PID control [J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2008, 6(151): 152-154.
赵轶彦, 何小刚. 基于模糊PID控制的步进电机自动聚焦的研究 [J]. *机械工程与自动化*, 2008, 6(151): 152-154.

栏目编辑: 韩 峰