

二元光学器件激光直写技术的研究进展

颜树华, 戴一帆, 吕海宝, 李圣怡

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要：二元光学器件的激光直写技术可克服传统的半导体工艺(掩模套刻法或多次沉积薄膜法)所带来的加工环节多、对准精度难以控制、周期长、成本高等问题,可进一步提高二元光学器件的制作精度和衍射效率。分析了二元光学器件激光直写的基本原理,对已有的各种激光直写方法和最新研究成果进行了综述,并展望了其发展趋势。

关键词：二元光学;激光直写;变灰度掩模法

中图分类号: TN305.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-5868(2002)03-0159-04

Research Advances in Technology of Laser Direct Writing for Binary Optical Elements

YAN Shu-hua, DAI Yi-fan, LU Hai-bao, LI Sheng-yi

(College of Mechatronics Eng. and Automation, National Univ. of Defense Technol., Changsha 410073, CHN)

Abstract: The technology of laser direct writing for binary optical elements can overcome the disadvantages caused by the traditional semiconductor technologies, such as multiprocessing steps, difficulty in controlling the accuracy of alignment, long period, and high cost, etc. It can improve the manufacturing precision and diffraction efficiency of binary optical elements. The basic principle of laser direct writing for binary optical elements is analyzed in this paper, followed by overview of available laser direct writing methods and recent progress. Finally, the future development is forecasted.

Key words: binary optics; laser direct writing; gray-scale mask method

1 引言

激光直写技术是随着大规模集成电路的发展而于 20 世纪 80 年代中期提出的,虽然历史并不很长,但却取得了长足的进步。在 90 年代初,激光直写系统开始广泛应用于二元光学器件^[12]的制作,大大提高了二元光学器件的性能,为二元光学技术的推广应用打下了良好的基础。

最初的激光直写系统采用无扫描的直写方式,直写过程中以栅格作为行程标记。后来发展成有扫描的直写方式,逐个图形扫描而无需行程标记。90 年代中期,德国的夫琅和费微电子电路及系统研究所(Fraunhofer Institute of Microelectronic Circuits and System)提出了一种基于空间光调制器 SLM 的新型

激光直写系统^[3,4],每次使一定面积的图形曝光,而不像常规激光直写系统那样逐点曝光,从而大大提高了直写速度。各种激光直写系统所采用的光源有氩-铜气体激光器、钕钇石榴石固体激光器,以及到后来的氯化氙、氟化氙激光光源。

2001 年,中科院长春光学精密机械与物理研究所成功研制了二元光学器件激光直写设备,并实现了曲面直角坐标和极坐标两种直写方式。

2 二元光学器件的激光直写原理

所谓激光直写,就是利用强度可变的激光束对涂在基片表面的抗蚀材料变剂量曝光,显影后在抗蚀层表面形成所要求的浮雕轮廓。因其一次成形且无离散化近似,器件的衍射效率和制作精度比传统半导体工艺套刻制作的器件均有较大提高。

图 1 以闪耀光栅为例,描述了激光直写制作连

续表面浮雕结构二元光学器件的原理。首先由器件表面的设计结构(图中为锯齿形)和抗蚀材料的显影特性计算确定表面各点所需的曝光剂量分布,并将该数据存入计算机,然后对基片上抗蚀剂进行扫描式逐点曝光。恰当地选择实验参数即可在显影后得到与理想结构十分接近的浮雕结构,对其进一步刻蚀还可将抗蚀剂表面结构转移到基片上。激光直写的最大优点是器件定位后可一次写出多相位阶数或连续相位的二元光学器件,从而避免了多次掩模套刻丧失的共轴精度。总之,激光直写法较适用于高精度单件或小批量生产。

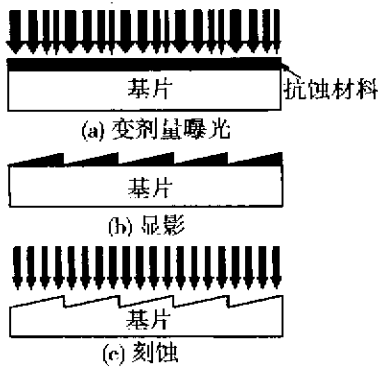


图1 二元光学器件激光直写基本原理

3 直角坐标方式的激光直写系统

直角坐标方式的激光直写系统^[5,6]如图2所示,表面涂有光刻胶的基片置于 $x-y$ 平台上,被聚焦的He-Cd激光束($\lambda = 442\text{nm}$)对其进行光栅式扫描并变剂量曝光。 $x-y$ 平台置于4个气垫支柱支撑的花岗石平台上,由线性马达驱动,并由激光干涉仪精确定位。用一声光调制器控制He-Cd激光束的强度,经物镜聚焦于基片上,对光刻胶进行变剂量曝光。CCD摄像头可检测物镜聚焦情况,并由压电陶瓷控制实现自动聚焦。另外,花岗石底座下还设有主动抗振装置。整个系统由计算机控制,实现同步操作。

该类激光直写系统的典型工作参数如下: $x-y$ 平台的滑动范围为 $300\text{mm} \times 300\text{mm}$,静态定位精度 100nm ,动态定位精度 150nm ,干涉仪脉冲当量 20nm ,声光调制器控制激光束强度的变化为256个灰阶,物镜的放大倍率为50,焦斑大小 $1.5\mu\text{m}$ ($1/e$ 光强点),扫描线间距 $1\mu\text{m}$,写入速度 10mm/s ,完成一个 10mm 圆片的曝光需要23h。

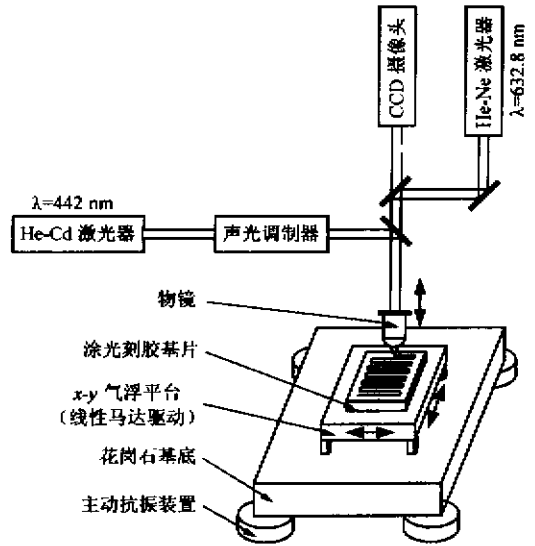


图2 基于 $x-y$ 精密平台的激光直写系统

4 极坐标方式的激光直写系统

极坐标方式的激光直写系统^[7]如图3所示,He-Cd激光束经两声光调制器后,由高数值孔径的物镜汇聚,并由压电陶瓷控制自动聚焦于涂有光刻胶的基片上。当聚焦光斑不动时,回转平台随气浮转轴匀速旋转,使基片上的一个圆环等剂量曝光(假定其它参数不变),此时曝光圆环的宽度等于聚焦光斑的大小,而一维平台的线性移动可改变聚焦光斑偏离回转平台的中心,即改变基片上曝光小圆环的半径,从而可对整个基片曝光。大动态范围声光调制器随着一维平台的移动实时调整光束强度,以满足曝光强度的要求。因为当回转平台的转速不变,曝光圆环的半径随一维平台的移动而增大时,若要得到等剂量的曝光,就只有增大激光束的强度。高速声光调制器控制激光束强度的变化,以产生256个灰阶的曝光剂量。

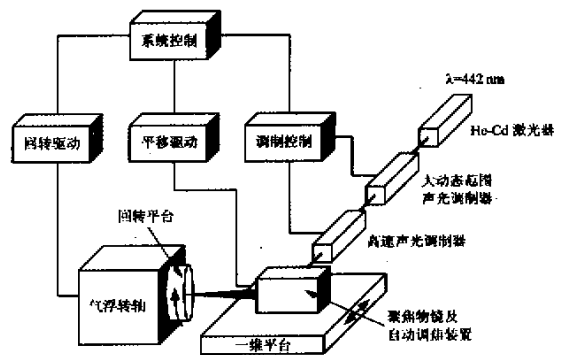


图3 基于回转平台的激光直写系统

5 扫描形式的激光直写系统

该类激光直写系统是对直角坐标方式的激光直写系统的改进^[8]。一个20面的多面体以500r/s的速度旋转,经扫描光学组后使被反射的光束形成10kHz的扫描光束,在y方向形成256 μm 宽度的扫描范围。当激光束在y方向上256 μm 的宽度范围内扫描运动时,被曝光的基片同时在x方向上匀速运动,从而合成基片上的任意图形,完成预定的直写设计。由于光线的扫描速度比x-y平台的移动速度快,因而该系统可适当提高直写速度。

6 直角坐标和极坐标组合的激光直写系统

该种类型可在同一系统中可实现直角坐标和极坐标两种激光直写方式^[9]。在200mm \times 200mm \times 40mm的直角坐标范围内,以及在 ϕ 400mm的极坐标范围内,可实现亚微米定位精度的激光直写光刻。

7 基于空间光调制器的激光直写系统

前述几种激光直写系统可以说是逐点曝光的直写系统。最近几年,出现了逐个图形曝光的激光直写系统^[10],其原理如图4所示。该种激光直写系统利用一个空间光调制器按输入的CAD数据对入射光进行高速、高密度的可编程相位调制,在调制器的顶反射层得到一个由众多像素构成的相位图。当由氯化氙(XeCl)或氟化氙(KrF)激光源产生的激光束射入时,通过分光镜将此相位图映射到硅片上,转变

为强度调制的图形,完成预定图形的曝光。

目前,根据此原理已研制出逐个图形曝光的直写系统的样机。该样机的调制器可以产生512 \times 464个像素,每个像素的尺寸为20 μm \times 20 μm ,曝光图像的频率可达130Hz。以此速率可以在1h内完成一个0.6 μm 工艺的100mm圆片的曝光。

8 各种激光直写系统的比较

直角坐标方式(包括扫描形式)的激光直写系统是最典型的直写系统,常用于大规模集成电路中专用芯片的小批量开发和生产。但由于相当一部分二元光学器件是中心对称形式,用直角坐标方式的系统直写时操作比较复杂,且所得到的二元光学器件的性能有所降低。而极坐标方式的激光直写系统更适用于此种情况。直角坐标和极坐标组合的激光直写系统,显然兼有二者的优点,但直写系统本身结构复杂。基于空间光调制器的激光直写系统是逐个图形曝光的激光直写系统,克服了逐点曝光直写系统速度太慢、器件表面比较粗糙(表面粗糙容易引起漫散射,降低器件光学性能)等缺点,直写系统本身结构亦有所简化,所制作的二元光学器件性能有所提高,并大大降低了生产成本,缩短了生产周期。

当然,激光直写技术本身亦存在一些缺点,其最大的问题是不能精确控制轮廓深度。加工轮廓深度与曝光强度、扫描速度、抗蚀剂材料、显影液配方和温度状态以及显影时间等多种因素有关,任何一个因素的改变都会引起轮廓深度误差,目前只能依赖于操作人员的经验和恒定的工作条件来控制深度误差。另外一个问题是连续轮廓器件共同面临的问题,由于抗蚀材料和基底的刻蚀速度不同会引起转移轮廓变形^[11]。

9 激光直写灰度掩模

变灰度掩模法^[113]是目前正在积极探索的一种新的二元光学器件制作方法,其基本原理(见图5)是制作一张带不同灰度等级的掩模版,以精确控制曝光量,从而产生所需的三维浮雕结构。变灰度掩模法可以用来制作任意轮廓的光学器件,单个掩模包含一组二元掩模的全部信息,不但掩模制作简单、成本低,且抗蚀剂处理与掩模制作无关。该方法经一次图形转印即在基片的抗蚀材料上形成多台阶或连续变化的浮雕轮廓,具有成本低、周期短、方法简

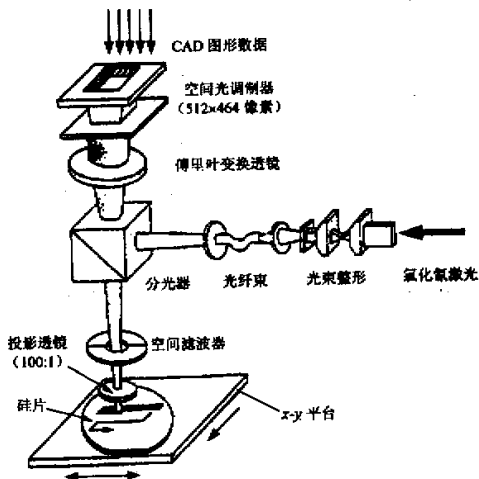


图4 基于空间光调制器的激光直写系统

便之优点,且无套刻对准误差问题。

灰度掩模的制作是变灰度掩模法的关键。目前国外在此方面的研究工作开展的十分活跃^[4]。美国迈阿密大学的 Wang M R 和 Su Heng 利用激光直写设备在高能离子束轰击敏感玻璃 HEBSG 上制作灰度掩模^[5],再使用稀释氢氟酸直接刻蚀灰度掩模平面。使用该方法研制了 16 个灰阶的 3×3 的微透镜阵列,衍射效率接近 94%(16 个灰阶的理论衍射效率约为 99%)。

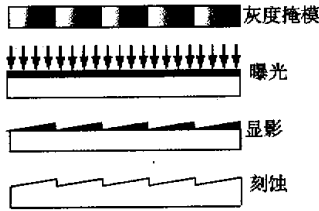


图 5 二元光学器件的变灰度掩模法制作原理

10 展望

激光直写技术在近 20 年取得了长足进展,给二元光学器件的制作提供了一条新的途径。逐点曝光的激光直写系统现已基本成熟,而基于空间光调制器的逐个图形曝光的激光直写系统还有待于进一步完善,这是今后发展的主要方向之一。由于变灰度掩模法所具有的一系列优点,使其适合于快速、大规模地制作高性能、低成本的二元光学器件,因此利用激光直写系统,特别是利用逐个图形曝光的激光直写系统制作高精度的灰度掩模,是今后研究的重点。当然,轮廓深度和轮廓变形的精确控制亦是急需解决的主要问题。

参考文献:

- [1] Gale M T, Rossi M, Kunz R E, et al. Laser writing and replication of continuous-relief Fresnel microlenses[A]. OSA Technical Digest Series: Diffractive Optics[C]. Washington: OSA, 1994. 306 - 309.
- [2] Kunz R E, Rossi M. Phase - matched Fresnel elements[J]. Opt. Commun., 1993, 97: 6 - 9.
- [3] Kück H. New system for fast submicron laser direct writing [J]. Proc. SPIE, 1995, 2440.
- [4] Seltmann R. New system for fast submicron optical

direct writing[J]. Microelectronic Engineering, 1996, 30.

- [5] Gale M T, Lang G K, Raynor J M, et al. Fabrication of micro-optical elements by laser direct writing in photoresist [J]. Proc. SPIE, 1991, 1506: 65 - 70.
- [6] Gale M T, Rossi M, Pedersen J, et al. Fabrication of continuous-relief micro-optical elements by direct laser writing in photoresist[J]. Opt. Eng., 1994, 33: 3556 - 3566.
- [7] Poleshchuk A G, Churin E G, Koronkevich V P, et al. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure[J]. Appl. Opt., 1999, 38: 1295 - 1301.
- [8] Zhang Y. 1.0 micron linewidth laser direct write system[A]. Proc Semiconductor Technology Manufacturing Conference[C]. 1994. 321 - 338.
- [9] 张景和, 廖江红, 刘伟, 等. 二元光学元件激光直接写入设备的研制[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(2): 154 - 157.
- [10] Paufler J, Kück H, Seltmann R, et al. High - throughput optical direct write lithography[J]. Solid State Technology, 1997, 6: 175 - 182.
- [11] 金国藩, 严瑛白, 鄢敏贤, 等. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [12] Korolkov V P, Malyshev A I, Nikitin V G, et al. Application of gray-scale LDW-glass masks for fabrication of high-efficiency DOE[J]. Proc. SPIE, 1999, 3633: 129 - 138.
- [13] Daschner W, Long Pin. Cost - effective mass fabrication of multilevel diffractive optical elements by use of a single exposure with a gray-scale mask on high - energy beam - sensitive glass[J]. Appl. Opt., 1997, 36: 4675 - 4680.
- [14] 李红军, 李凤友, 于利民, 等. 灰度掩模技术[J]. 微细加工技术, 2000(1): 10 - 15.
- [15] Wang M R, Su Heng. Laser direct - write gray - level mask and one-step etching for diffractive microlens fabrication[J]. Appl. Opt., 1998, 37: 7568 - 7576.

作者简介:

颜树华(1969 -)男, 湖南省邵东县人, 副教授, 在职博士研究生。主要从事光电传感及检测、二元光学等的教学和科研工作。获部委级科技进步二等奖 1 次和发明专利 1 项, 发表科研论文 30 余篇。