

实用型准分子激光微细加工机研制

李呈德 万盈 左铁钊

(北京工业大学国家产学研激光技术中心 北京 100022)

摘要 介绍了研制成功的掩模投影式实用型准分子激光微细加工机的主要技术指标、结构特点、研制中解决的关键单元技术,并简要介绍其应用。

关键词 准分子激光刻蚀 微细加工 掩模投影技术

1 引言

自从首次报道准分子激光能获得快速、高分辨光刻^[1]以来,人们在八十年代即对准分子激光光刻进行了大量研究^[2]。尽管电子束、X射线、离子束具有更短的波长,在提高分辨率方面有更多好处,但曝光源、掩模、抗蚀剂、成像光学系统方面存在极大的困难。而相反,准分子光刻有着明显的经济性和现实性,它将光学光刻扩展至DUV和VUV,其高功率大大缩短了基片曝光时间,分辨率易获得亚微米线宽,掩模和抗蚀剂问题易解决,因此人们从来未停止对准分子光刻设备的开发。1992年美国IBM公司将准分子光刻机用于生产线上^[3],商品化的XL-1型193nm光刻机^[4]能获得0.25 μm 线宽光刻胶图形。最近的相移掩模技术,将准分子光刻分辨率提高到0.13 μm 以下^[5]。

另一方面,准分子激光直刻有机和无机物材料方面有着独到之处,单脉冲去除深度在0.05 μm ~0.1 μm 之间,这使得通过简单的脉冲计数即可获得高精密切削。将准分子光刻装备进行适合于材料加工的改进,如使掩模及整个光学系统能承受更大激光峰值功率密度,采用高倍率投影物镜,设计实时残渣去除系统等等,则非常适于新近迅速发展起来的微结构、微机械的加工技术。目前,英国Exitech公司^[6],德国Microlas公司^[7],日本滨松光子公司^[8]先后推出了商品化微结构加工用准分子激光微加工装备。

北京工业大学国家产学研激光技术中心,在校“211”重点建设经费支持下,于1996年开始历经两年,研制成功NCLT型实用准分子激光微加工机,各项指标达到了预期目标。

2 技术指标

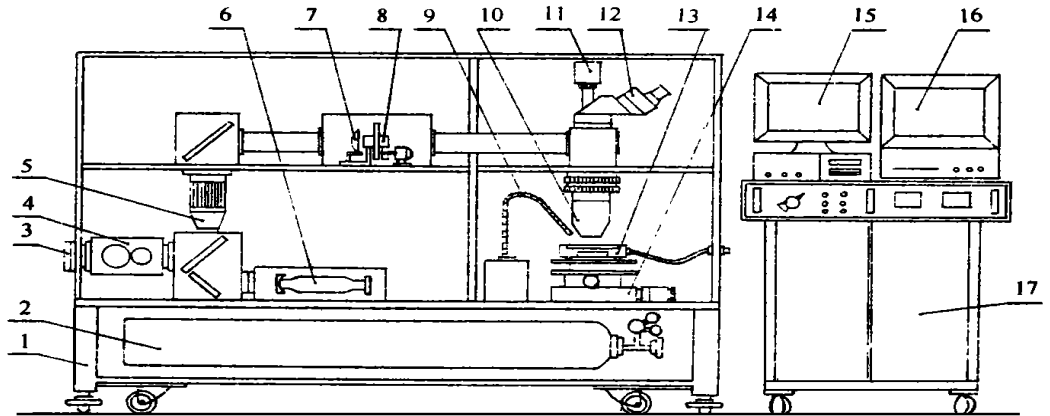
NCLT 型准分子激光微细加工装备的技术指标见表 1

Table 1 Specification of the tool

| subsystem | main components | specification |
|---------------------------------|--|--|
| laser | λ - physik LPX 305iF | KrF 248nm pulse energy 1200mJ maximum repetition rate 50Hz |
| beam delivery system | attenuator | CNC control output energy variable from 10% to 95% |
| | fly's eye homogenizer | NA = 0.015 beam size at mask plane $2 \times 2 \sim 20 \times 20 \text{mm}^2$ uniformity $\pm 2\%$ RMS |
| mask unit | rotatable mask rack | CNC control |
| | variable rectangular aperture | micrometer controlled blades length of side 0~10mm |
| | diaphragm | diameter $\Phi 0.10 \sim \Phi 2.00$ roundness 0.005 |
| projection optics | 10 \times refractive objective | conjugate length 750mm numerical aperture NA = 0.2 resolution $2\mu\text{m}$ image size $\Phi 2$ |
| | 25 \times Schwarzschild reflective objective | conjugate length 750mm numerical aperture NA = 0.3 resolution $2\mu\text{m}$ image size $\Phi 0.2$ |
| workpiece stages | X - Y | travel 100mm, maximum speed 5mm/s bidirectional repeatability $\pm 3\mu\text{m}$ |
| | Z | travel 10mm, resolution $0.5\mu\text{m}$ |
| | Θ | accuracy $\pm 0.1^\circ$ |
| monitoring and alignment system | viewing and alignment | eye observation magnification $3.5 \times \sim 200 \times$ CCD-TV magnification $22 \times \sim 500 \times$ He-Ne laser lighting mask fibre lamp lighting workpiece |
| | monitoring | B/W CCD image processing system laser pulse energy monitor 0.1mJ ~ 20J |
| control system | PC based controller, pentium PII 266 computer, I/O devices | integrates operation of laser firing, X - Y - Z - Θ stages, attenuator and mask |
| gas environment | stainless steel chamber with silica window | assistant gas such as He or etching gas such as Cl_2 |
| frame | anti-vibration table | anti vibration, dust free, beam path enclosure, laser safety |

3 系统结构

NCLT 型准分子激光微细加工机的结构如图 1 所示。它的工作原理与分步重复投影光刻非常相似,其光学系统设计成用激光均匀地照明掩模,然后用缩小投影镜头将掩模的像投射到被加工基片上。



1- anti- vibration trolley 2- assistant gas 3- laser in 4- attenuater 5- homogenier 6- He- Ne laser
7- field lens 8- mask unit 9- fibre illumination 10- projection lens 11- CCD camera 12- viewer
13- sample chamber 14- X - Y - Z stage 15- PC system 16- monitor 17- console

Fig. 1 Schematic diagram of the laser micromachining tool

光源为一台 LAMBDA - Physik LPX305iF 工业型准分子激光器,其输出单脉冲能量为 1200mJ(也可选配其它类型准分子激光器)。光学系统针对 KrF 的 248nm 波长设计(也可为 193nm ArF 激光和 308nm 的 XeCl 激光设计)。激光微细加工机主要由:数控衰减器、光束整形均匀器、数控掩模架及可变光阑单元、缩小投影物镜、精密数控工件台、吹残渣及充反应气体工件室、观察对准系统、过程监视与能量监测系统、数控系统、防震机架、机箱及光路密闭、激光安全互锁等部分构成,其功能及技术要点详述如下:

3.1 数控衰减器

准分子激光器的单脉冲输出能量是由放电高压控制的,激光器在电压接近最高高压工作时,输出脉冲对脉冲能量稳定性较高,而激光器工作在电压接近阈值高压时,输出单脉冲能量波动很大。因此,不能通过调节放电高压获得连续变化且稳定的能量输出。而是让激光器在稳定的高能量状态运行,采用衰减器实现连续稳定调节。本衰减器由步进电机驱动旋转的介质膜平面反射镜构成,输出能量从 10% - 95% 连续变化。通过 CNC 数控,实现激光能量、脉冲重复频率、工件位置、运动速度等加工参数联合编程。

3.2 光束整形均匀器

光束整形均匀器和场镜构成掩模照明系统。准分子激光器输出的光束截面呈长宽比约为 2 : 1 的矩形,纵横方向光强分布规律不同,纵横发散度亦不同,面均匀性远远不能满足掩模投

影系统的需要。掩模照明系统向掩模提供面均匀性优于 $\pm 2\%$ 、照明数值孔径和部分相干系数适应投影成像镜头的照明。本光束整形均匀器,先用柱面扩束镜组将光束整形成方形,再用两个 7×7 柱面透镜阵列构成的两面蝇眼将光束切分成 49 个子光束,最后由集光镜将这些子光束叠加。它是一个变焦系统,集光镜焦面掩模平面光斑大小可由 $2 \times 2 \text{mm}^2$ 到 $20 \times 20 \text{mm}^2$ 连续变化,均匀性达 $\pm 2\%$,不镀膜反射膜光学效率为 60%,镀 AR 膜光学效率达 85%。照明数值孔径为 $NA = 0.015$,掩模附近的场镜将光束整形均匀器的最后一面蝇眼成像到缩小投影镜头的入瞳处。

3.3 数控旋转掩模架及可变光阑单元

NCLT 现采用两类掩模:一类是常规石英铬版掩模,以制作高分辨图形。另一类为通孔光阑,现开发了三种。第一种是由两对正交的刀片构成的边长连续可变矩形光阑,刀片由千分尺测微螺杆操纵,矩形孔尺寸从 0 ~ 10mm 变化,由步进马达驱动,通过 CNC 控制,实现模孔的变化与工件台编程联动;第二种是直径不同的高精度圆形光阑组,用机械加工方法制造。直径为 0.10mm 到 2.00mm 一组共十五个;第三种为用化学刻蚀或 YAG 固体激光加工机在金属片上制作的 S 形、形等形孔。掩模架为可数控转动的圆盘形掩模夹持器,其中央是通光窗口为 $\Phi 24$ 的圆形夹槽,周围均布四个通光窗口为 $20 \times 20 \text{mm}^2$ 的石英铬版掩模夹持器,及安装可变矩形光阑。圆孔光阑装夹在中央夹槽,如将形孔光阑装夹在中央夹槽,通过编程令掩模架以某种方式旋转,可在基片上加工出所需的特殊几何形状。

3.4 缩小投影成像物镜

投影成像物镜将掩模成像到被加工基片上,同时使基片上的激光能量密度比掩模上的能量密度提高缩小倍率的平方倍(当然还得考虑光学系统传输效率)。大大降低对掩模承受高功率激光脉冲的要求,也降低了对激光源输出能量的要求。这种投影物镜属于具有平像场显微物镜像质的照相物镜,要求高分辨率,大平像场尺寸,畸变小,工作距离大。NCLT 激光微加工机现有两个投影成像镜头,共轭距离为 750mm,其中一个为 $10 \times$ 全石英折射式物镜,数值孔径 $NA = 0.2$,像场直径 2mm,分辨率为 $2 \mu\text{m}$,像方工作距离为 64mm。另一个为 $25 \times$ 折射式 Schwarzschild 物镜,数值孔径 $NA = 0.3$,像场直径 0.2mm,分辨率 $2 \mu\text{m}$,像方工作距离为 45mm。

3.5 精密数控工件台

通过 X-Y-Z 三维精密数控工件台的平移运动和数控掩模架的旋转运动,实现各种加工模式。如分步重复模式、光栅扫描模式等,以实现各种复杂对称和非对称三维结构的加工。本系统采用的工件台,X-Y 轴行程为 100mm,最高运行速度为 5mm/s ,采用光栅尺构成闭环控制系统,双向重复定位精度为 $3 \mu\text{m}$ 。Z 轴为小行程升降台,行程为 10mm,分辨率为 $0.5 \mu\text{m}$ 。它不仅提供 Z 方向运动,还与精密手动调节高度的镜头架配合,提供灵敏的聚焦调节。

3.6 吹残渣及充反应气体工件室

待加工基片放在一个不锈钢密封盒里的不锈钢盘上,不锈钢盘经加工抛光成光学表面。带有密封胶圈的不锈钢盒盖上有直径为 50mm 的石英窗口,以便深紫外激光射入。盒底有等边三角形分布的三只精密螺钉,以调平基片。盒子侧面装有进出气管及气压计。在激光刻蚀加工过程中通入适量辅助气体以吹除产生的残渣,获得良好的加工表面质量。也可通入腐蚀性反应气体如 Cl_2 气,以进行激光诱导化学刻蚀加工。

3.7 观察对准系统

NCLT 采用三目头摄像体视显微镜改装研制的观察系统,操作者可通过目镜和通过 CCD 摄像机输出到工业监视器同时观察样品。目视观察倍率从 $3.5 \times \sim 200 \times$ 可调,CCD-CRT 屏幕观察倍率从 $22 \times \sim 500 \times$ 可调,用可调光强的石英卤素灯通过装在柔性臂里的光纤传输离轴照明样品,并设有可调光强同轴环形照明冷光源,以适应不同类型的样品,获得最佳对比度和成像分辨率。基片对准工作在准分子激光击发前进行,将扩束准直的 He-Ne 激光背照射掩模或光阑,经投影物镜将掩模或光阑成像在基片上,手动调节镜头台精密调焦和对准后,通过数轴 Z 轴升降台实现对 248nm 激光精密对焦。

3.8 刻蚀加工过程监视及激光能量监测

NCLT 采用基于 586 计算机 PCI 总线的 VIDEO-PCI-XR 高速黑白图像采集卡,实时采集 CCD 摄像机的视频信号。加工结束后,可连续重放光刻蚀加工的全过程。能量监测采用分辨率为 0.1mJ 的 IP-550 激光能量探测头配 LE-3C 数字显示激光能量计,测量范围为 $0.1\text{mJ} \sim 20\text{J}$ 。

3.9 数控系统

NCLT 使用一台奔腾 P-266MHz、内存 64Mb、硬盘 2Gb 联想计算机,配以步进电机驱动卡、可编程脉冲发生器、图像采集卡等硬件和相应软件,实现对工件台 X-Y-Z 轴的运动速度及坐标、激光脉冲触发、衰减器输出能量、掩模架转速及转角等激光加工参数联合编程控制,并对刻蚀加工过程进行实时图像采集。

3.10 机架、机箱、光路密闭及安全防护

机架采用减震结构,机箱设有观察窗及废气抽气系统,整个光路作防尘密闭,以防尘埃落在光学件上,特别是导光系统反射镜上的尘埃形成激光冷斑,并且光学件上的尘埃与高峰值功率密度的激光脉冲作用会缩短光学件的寿命。机箱顶部装有激光警示灯,并且箱门与激光击发联锁,箱门打开则激光停止。

4 应 用

NCLT 型准分子激光微细加工机是一个整体化多用途的激光加工装备。它适合于在有机物及陶瓷和晶体等无机物材料上进行微钻孔、微切割,制作微结构,它能以工件扫描方式移动均匀激光束在整个基片面积上进行光栅式扫描,亦可用多种掩模投影方法制作图形。对于重复性图形,可用分步重复法制作,对于复杂图形或结构,可用多级掩模依次投影刻蚀或多种投影光阑串行钻孔或雕刻方式操作而得,此外还可由掩模架与工件台的同步运动,来制作旋转对称或非对称的结构。刻装备特别适于为 LIGA 工艺制造微器件原型。

致谢:对施定远、肖荣诗、陈涛、裴宇韬、陈凯、王志勇、雷旬、崔怀洋、鲍勇等参加此项工作的同志表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 Jain K, Willson C G, Lin B J. Ultrafast High-resolution contact lithography with excimer laser. IBM J Res Dev, 1982, 26: 151 ~ 153

- 2 Jain K. Advances in excimer laser lithography. Proc SPIE, 1986, 710: 35 ~ 42
- 3 Wolbold G E, Tessler C L, Tudryn D J. Characterization, set-up and control of a manufacturing laser ablation tool and process. Proc SPIE, 1992, 1835: 62 ~ 69
- 4 Elliott D J. Sub-micron deep-UV imaging with a catadioptric step-and-repeat exposure system. Proc SPIE, 1992, 1835: 52 ~ 61
- 5 Imai A. O. 13 μ m pattern delineation using KrF excimer laser light. J of Appl Phys, Part 1-Regular Papers Short Notes & Review Papers, 1994, 33 12B: 6816 ~ 6822
- 6 Specification of series S-7000 excimer laser micromachining system. Hanborough Park, Long Hanborough, Oxford OX8 8LH, U K 1996
- 7 Sarbach U, Kahlert H J. Excimer laser based microstructuring using mask projection techniques. High-lights of Lambda Physik, 1993, (40): 2 ~ 4
- 8 高晓萍. 激光微细加工装置及其应用. 光机电信息, 1996, 13(12): 26 ~ 30

Development of a Practical Excimer Laser Micromachining Tool

LI Cheng-De, WAN Ying, ZUO Tie-Chuan

(National Center of Laser Technology, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022)

Abstract

The specification, constitution features and some critical problems for a practical excimer laser micromachining tool with mask projection techniques are described. Its applications are briefly introduced.

Key words: Excimer laser ablation, Micromachining, Mask projection techniques

李呈德 男, 1962年12月12日出生, 北京工业大学博士, 现主要从事激光微细加工技术研究。