

准分子激光投影直刻微加工制作微机械*

李呈德 万 盈 陈 涛 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 简要描述了新开发的准分子激光微加工装备的结构特点. 系统地研究了准分子激光直刻高分子聚合物的机制及其与微结构制作精度的关系. 并以 PVC 微结构原型及其复制件的制作为例, 讨论了准分子激光投影直刻用于 LIGA 工艺的可行性. 研究表明准分子激光投影直刻微加工技术可用于制作微机械.

关键词 微机电系统 准分子激光 微加工 LIGA 技术

微机电系统(MEMS)研究的目標是要制造出能在现实空间执行各种特定任务的微型集成机电系统^[1]. 构成 MEMS 的各个微结构的功能可以是电的、磁的、机械的、光学的、化学的、气动、液动或热力的, 这就要求采用具有各种不同性能的材料及相应的加工手段^[2, 3].

由于将驱动器、传感器、控制器和执行机构在毫米或几百微米尺度的空间里高密度集成起来形成微机电系统的思想源于电子电路的大规模集成, 故早期的静电式微电机、微传感器等都是在传统的集成电路 VLSI 工艺基础上发展起来的. 这种表面微加工技术仅仅适于硅材料, 并限于平面结构, 厚度很薄^[4]. 然而对于集成系统, 力或力矩的输出能力取决于器件单位芯片面积能提供的能量密度, 而硅平面技术不能满足大的结构高度即大深宽比的要求. 另外由于这种基于传统光刻和各向异性腐蚀硅微机械, 结晶学取向性限制了能获得的形状.

Ehrfeld^[5]等人用电子加速器产生的同步辐射 X 射线进行光刻, 结合电铸和注塑技术发展出同步辐射 LIGA 技术. 同步辐射光源有着极好的准直性, 而且 X 射线的吸收是在原子过程中完成的, 驻波问题得以回避, 光刻胶上的图形偏差几乎为零, 可获得深宽比达 100:1, 最大深度在 500 μm 以上的微结构. LIGA 方法更为可贵之处在于, 光刻工序用于制作最初的电铸模, 然后以电铸、注塑方式大批量复制金属或有机物产品, 解决了成本效益问题. 然而同步辐射 X 射线光刻的掩模制备极为困难^[6]. 首先由于 X 射线穿透大多数非金属和金属材料, 掩模吸收体图形须选用高原子序数、对 X 射线吸收系数大的重元素如金、钨等材料制作; 其次, 同步辐射 X 射线光刻只能使用 1:1 共形掩模, 尺寸小, 制作困难. 同步辐射 LIGA 工艺不仅同步辐射设施庞大、昂贵, 掩模制备费用也很大.

本文采用紫外波长的准分子激光, 以掩模投影方式直刻高聚物材料, 可选用多种普通高聚物制作精密微结构, 这些微结构可直接作为 MEMS 零件, 也可作为 LIGA 工艺的原型.

1 准分子激光投影微加工装备

准分子激光为中低重复频率深紫外脉冲激光,常规平腔准分子激光器的输出光束具有长宽比约为 2:1 的矩形光束截面,两个方向光强分布规律不同,并且两个方向光束发散度差别较大,故不宜采用聚焦光斑扫描串行加工方式.然而却很适于采用集成电路光刻机的掩模投影方式,因为成像光学系统的分辨率 $R \propto \lambda/NA$,KrF 激光的波长为 248 nm,ArF 激光波长为 193 nm,比汞弧灯 i 线短许多,有望获得高横向分辨率.另外,许多高分子材料对准分子激光的吸收系数很高,光子穿透深度很浅,故可获高纵向分辨率.经图形掩模成像的高光强激光脉冲高精度地直接去除材料,而无须经历常规光刻工艺里曝光后显影等复杂工序.图 1 是我们新近开发的准分子激光微加工系统^[7]结构图.

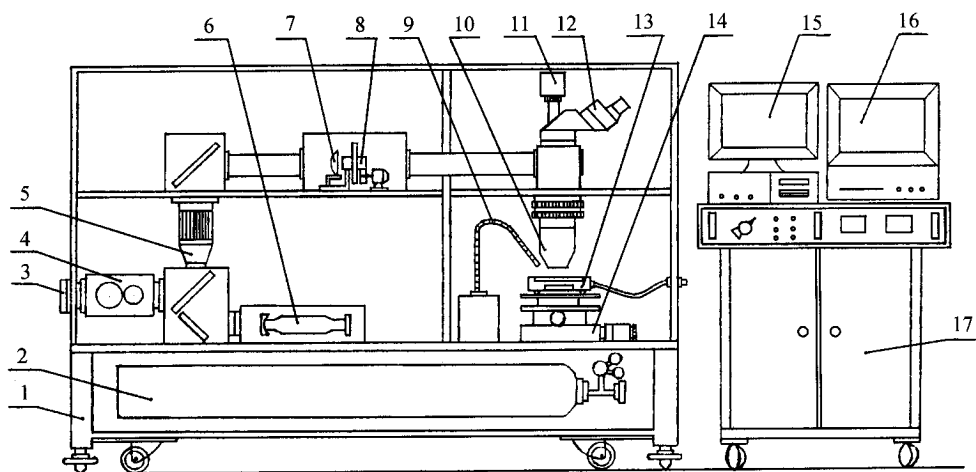


图 1 准分子激光掩模投影微加工系统结构图

1,防震机架;2,辅助气体;3,激光入口;4,衰减器;5,光束均匀器;6,氦氟激光;7,场镜;8,掩模单元;9,光纤照明;
10,成像物镜;11,CCD 相机;12,目镜观察;13,样品室;14,X-Y-Z 数控台;15,计算机;16,监视器;17,控制柜

LAMBDA-Physik LPX305iF 型 KrF 准分子激光器输出波长为 248 nm,最高单脉冲能量为 1200 mJ,最高脉冲重复率为 50 Hz,横截面为 36 mm × 16 mm 光束.光束先经数控衰减器实现输出能量从预置值的 10% ~ 95% 连续稳定调节.衰减器由步进电机驱动旋转的介质膜平面反射镜构成.光束整形均匀器和场镜构成掩模照明系统,向掩模提供面均匀性优于 ± 2%、照明数值孔径和部分相干系数适应投影成像物镜的照明.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 7 × 7 柱面透镜阵列构成的蝇眼将光束切分成 49 个子光束,最后由集光镜将这些子光束叠加.

掩模可以采用形状简单的光阑,也可采用常规石英铬版掩模,以制作高分辨图形.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),还降低了对掩模承受高功率激光脉冲的要求.这种微缩投影物镜要求高分辨率,大像场尺寸,畸变小,工作距离大.本系统配有一个像差校正良好、共轭距离为 750 mm 的 10 × 全石英双远心物镜,数值孔径 $NA = 0.2$,像场

直径 2 mm,分辨率为 2 μm ,像方工作距离约 60 mm.

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 100 mm,采用光栅尺构成闭环控制系统,双向重复定位精度为 3 μm .Z 轴为小行程升降台,行程为 10 mm,分辨率为 0.5 μm .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.

待加工基片放在一个不锈钢密封样品室里的不锈钢盘上,不锈钢盘经加工抛光成光学表面.带有密封胶圈的样品室盖上有直径为 50 mm 的石英窗口,以便深紫外激光射入.样品室底部有等边三角形分布的 3 只精密螺钉,以调平基片.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.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.

显微镜和 CCD 摄像机构成观察系统.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基片,并设有可调光强同轴环形照明冷光源,以适应不同类型的基片,获得最佳观察效果.基片对准工作在准分子激光击发前采用尝试法进行.

2 准分子激光直刻高分子聚合物

在脉冲激光投影直刻材料的微加工过程中,若仅从光学角度考虑问题,那么被激光光束辐照的区域向深度方向的延伸(光子的穿透深度),即为激光去除的部分,基片上的残留形体即为所得微结构,其横向尺寸精度由光学系统的分辨率决定,纵向尺寸精度则由激光单脉冲刻蚀深度决定.然而实际上,残留形体的尺寸精度受激光与物质相互作用的机制所制约.比如波长为 10.6 μm 光子能量 $h\nu = 0.12 \text{ eV}$ 的 CO_2 激光,以及波长为 1.06 μm 光子能量 $h\nu = 1.2 \text{ eV}$ 的 Nd:YAG 激光,以加热汽化机制去除材料,则会因热传导而使非辐照区汽化、熔化、形成熔凝再铸层、残留热应力等热影响区.

波长为 248 nm 的 KrF 准分子激光光子能量 $h\nu = 5.0 \text{ eV}$.虽然这光子能量也并不算高,但考虑到高分子聚合物材料的大分子是由几万个原子以几十个原子构成的单体重复排列而成,而这些原子通常是 H, C, O, N, 并且 C—H 键结合能只有 3.5 eV, KrF 激光光子能量比它高.在准分子激光照射下,处于高度激发状态的固态聚合物材料为光诱导化学键直接断裂,转化成为挥发性碎片.图 2(a)为 KrF 激光以 2 J/cm^2 ,脉冲重复率 4 Hz 在聚碳酸酯(PC)基片上投影刻蚀的矩形槽.刻蚀槽的周边平直、四角明锐、侧壁陡直,底面平整光洁,仍透明如初,有着光学表面粗糙度.

然而准分子激光并不是对于所有高聚物材料加工都有效.高分子聚合物主链或单体单元(链节)中的 C—O, N—N, C—N 键的结合能是所有准分子激光波长所不及的, N—O, C—C 和 O—O 键合能也高于 KrF 激光光子的 5.0 eV,即准分子激光并不能把所有的化学键都击断.图 2(b)为 KrF 激光以 1 J/cm^2 ,脉冲重复率 4 Hz 在聚乙烯(PE)片上投影刻蚀的矩形槽,刻蚀槽底面出现粗大波纹,热熔化重凝现象在刻蚀过程中表现得很明显.

图 3(a)和(b)分别为实验所测 PMMA 和 PVC 的刻蚀速率与激光能量密度关系曲线.这曲线表明:当准分子激光的能量密度低于某一数值,即阈值时,不发生明显刻蚀;当超过这个能量密度阈值后,材料被破坏.激光能量密度超过阈值能量密度后,刻蚀速率迅速上升.入射激光

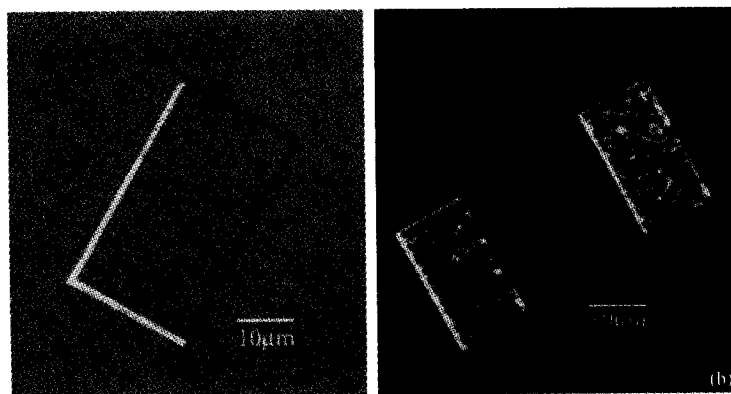


图 2 KrF 激光在高聚物上刻蚀的矩形槽

(a) 2 J/cm^2 , 4 Hz 刻蚀聚碳酸脂 PC; (b) 1 J/cm^2 , 4 Hz 刻蚀聚乙烯 PE

能量密度继续提高,刻蚀速率的上升呈现饱和,即平台化趋势,提高能量密度而刻蚀率增加不多.单脉冲刻蚀深度可小于 $0.05 \mu\text{m}$,微结构的纵向尺寸可通过脉冲计数精密控制.

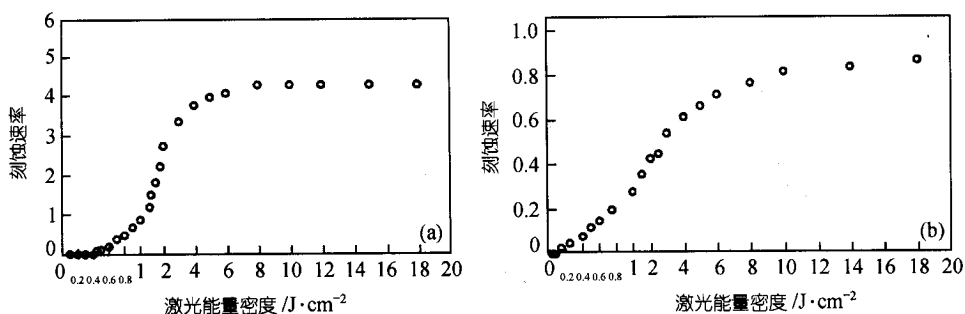


图 3 248 nm KrF 激光刻蚀(a)PMMA 和(b)PVC 的刻蚀速率与激光能量密度之间的关系

准分子激光刻蚀聚合物是一个非常复杂的过程,包括了很多分子竞争和继续反应步骤和现象.我们对聚甲基丙烯酸甲酯、聚酰亚胺、聚碳酸脂、聚氯乙烯、聚酰胺、聚氨脂、聚乙烯、聚苯乙烯、聚乙烯对苯二甲酯、聚苯撑硫、聚四氟乙烯、聚偏二氯乙烯等高分子材料进行刻蚀实验.测定其刻蚀速率与辐照激光能量密度的关系;寻找分光光度计测定的低光强吸收系数与纳秒脉冲准分子激光刻蚀形态之间的关系,测定激光脉宽、刻蚀羽辉、低于破坏阈值的激光脉冲预调质等因素对刻蚀过程的影响,并采用激光诱导荧光技术(LIF)测量刻蚀羽辉中粒子的转动能和振动能分布,来换算刻蚀表面温度,区别热过程还是电子过程起作用.

研究表明,准分子激光刻蚀切削高分子聚合物的过程,是光化学分解和热激活分解共同作用的结果.即使对于一个量子效率为一的光破碎过程,振动激发也会产生热.结果在激发态里振动能将最终把固体加热到某个程度.光解占主要地位时,可获高分辨、轮廓明锐微结构;热解占主要地位则此材料不适于制作微结构.

3 准分子激光微加工用于 LIGA 技术制作微机械的讨论

图 4(a)为波长 248 nm 的 KrF 激光以能量密度 0.4 J/cm^2 , 脉冲重复率 20 Hz 在 PVC 基片上直刻的微结构, 其投影缩小比为 10:1. 从图中可见在刻蚀坑底部有锥状颗粒突起. 这是因为起初的激光脉冲喷溅出来的物质微碎片落在基片上形成细小颗粒, 这些沉积下来的残渣就像是微型掩模, 阻挡了其下面材料的刻蚀. 这种原始“种子”被后继而来的刻蚀脉冲“放大”而形成锥形柱状突起. 因此采用吹残渣系统是必要的.

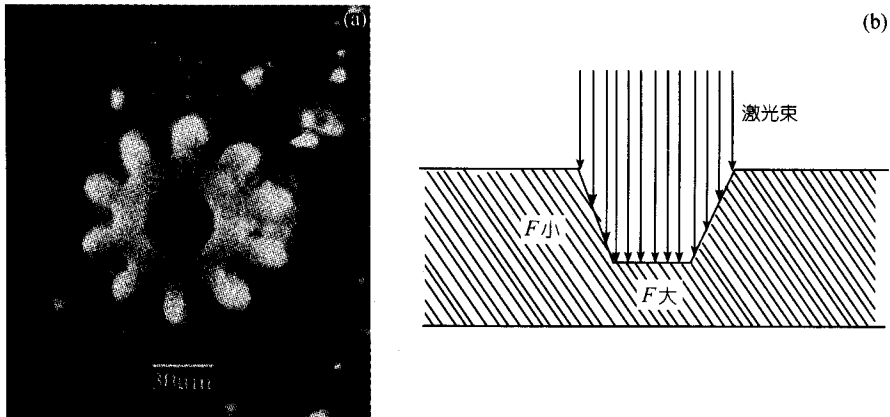


图 4 248 nm KrF 激光以能量密度 0.4 J/cm^2 , 脉冲重复率 20 Hz 在 PVC 基片上直刻的微结构(a)和低刻蚀能量密度下侧壁倾角形成示意(b)

从图 4(a)也可看到齿轮的上小下大的结构. 进一步的实验表明, 准分子激光在能量密度较低时所钻的孔, 孔缘清晰但是锥形的. 如果被加工试件很厚, 在加工过程中不增加入射激光能量密度, 则孔最后将终止而形成盲孔. 孔呈锥形起初是由于衍射效应使图形边缘区域能量密度下降从而刻蚀速率下降所致, 锥度一旦产生, 将由于光束斜射在孔壁上降低了能量密度, 这使锥度又进一步加剧, 如图 4(b)所示. 但是侧壁倾角是随入射激光能量密度的增大而减小的. 图 5 给出了在一定条件下得到的微型齿轮及其局部放大结构.

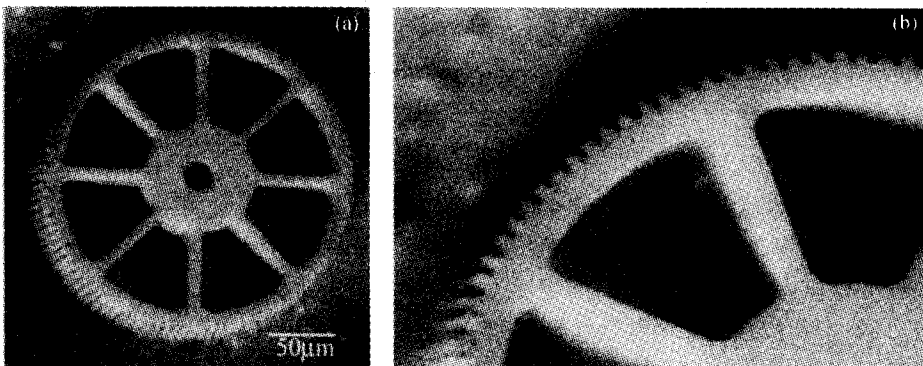


图 5 辅助气体吹拂, 激光能量密度为 1.0 J/cm^2 , 脉冲重复率为 10 Hz 时得到的侧壁垂直的 PVC 直齿圆柱微齿轮(a)及其局部放大(b)

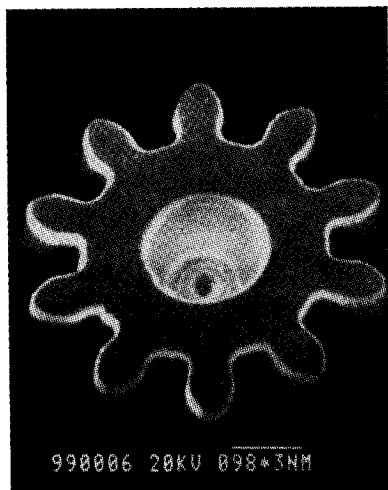


图 6 经电铸工序复制的金属镍微齿轮

另一方面,微结构的侧壁倾角依赖于投影物镜的数值孔径 NA. 数值孔径小,则切口呈上大下小的内锥;数值孔径大,则切口呈上小下大的喇叭形. 因此适当选择激光能量密度与物镜的数值孔径相适配,可获得侧壁垂直的纵向轮廓. 从而满足铸模复制的要求.

我们将 PVC 基片置于密闭样品室中,在激光刻蚀过程中通以 He 气吹拂,并将激光能量密度提高到 1.0 J/cm^2 ,脉冲重复率为 10 Hz 时得到侧壁垂直的微型齿轮及其局部放大结构如图 5 所示. KrF 激光刻蚀的微结构先经镀膜,然后再经电铸工序复制的金属镍微齿轮如图 6 所示.

4 结论

准分子激光处于远紫外波段(ArF 激光的 193 nm , KrF 激光的 248 nm),从光学系统角度可获比传统的可见光曝光系统和较先进的汞弧灯近紫外光(365 nm , 436 nm)曝光系统更高的横向分辨率. 由于材料对短波长光的吸收率高,光子穿透深度浅,从而可获高的纵向加工精度. 准分子激光单光子能量大,它们能击断某些聚合物的化学键而实现对某些高聚物材料的以光解为主的刻蚀过程,未受激光辐照部分材料不受热影响. 由于准分子激光可对多种高分子聚合物材料进行高精度刻蚀加工,材料选择余地很大. 同步辐射使用的掩模为 1:1 共形掩模,尺寸小,制作困难. 准分子激光直刻加工为投影缩小式,掩模制备容易. 另外,准分子激光设备比起同步辐射源来廉价得多. 准分子激光投影直刻微加工可用于 LIGA 技术制备微机械.

参 考 文 献

- 1 周兆英,叶雄英,崔天宏,等. 微米纳米技术及微型机电系统. 光学精密工程, 1998, 6(1): 1~7
- 2 Murakami K, Wakabayashi Y, Minami K, et al. Cryogenic dry etching for high aspect ratio microstructures. In: Proc IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, 1993. 65~70
- 3 Guckel H, Skrobis K J, Klein J, et al. Deep X-ray lithography for micromechanics. SPIE, 1994, 2045: 290~297
- 4 Benecke W. Nutzung der Mikromechanik in Anwendungen, Mikromechanik. Berlin: Springer, 1989. 343~431
- 5 Ehrfeld W, Munchmeyer D. 3-Dimensional microfabrication using synchrotron radiation. Nucl Instrum and Meth in Phy Res, 1991, A303: 523~526
- 6 伊福廷,吴坚武,晋 明,等. LIGA 技术的掩模制造. 微细加工技术, 1995(2): 33~36
- 7 李呈德,万 盈,左铁钊. 实用型准分子激光微细加工机研制. 光学精密工程, 1999, 7(1): 79~84