

准分子激光直接刻蚀单晶硅研究¹

马炳和¹, 苑伟政¹, 李铁军², 李晓莹¹, 王丽戈²

(西北工业大学 飞行器制造工程系, 陕西 西安 710072; 2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

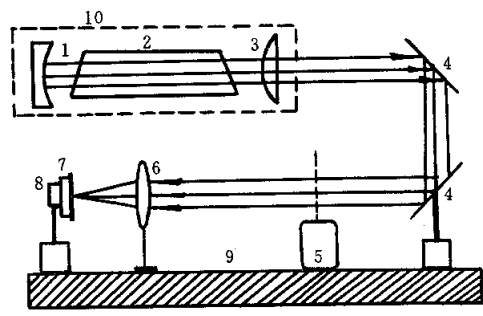
摘 要:与传统的投影曝光微细加工方法相比,激光直写具有高柔性、低成本和胜任三维微型结构加工的优点。采用非稳腔的聚焦准分子激光(KrF, $\lambda=248\text{ nm}$)对单晶硅材料进行直接刻蚀,从微结构刻蚀的形状尺寸及加工过程的热效应等方面研究了准分子激光直接刻蚀单晶硅的加工特性。重点考察了加工中的热效应,研究表明准分子激光与被加工材料的相互作用并非完全基于非热机理,加工过程亦有热作用参与,进一步提出了准分子激光刻蚀加工的“热影响区”概念用以评价和解释准分子激光的“冷加工”特性。同时观察分析了脉冲激光对硅基底造成的破坏现象,讨论了冲击作用的成因。

关 键 词:准分子激光,直接刻蚀,“冷加工”特性,热影响区,冲击破坏
中图分类号:TH16 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-2758(2000)03-0491-05

微结构加工中的直接刻蚀(direct etching)方法属于直写(direct writing)加工。直写指不引入图形转印过程直接在材料上加工得到微型结构。相对于应用曝光原理的其它微细加工方法(如光刻制版术、LIGA 或准 LIGA 技术等),直写具有简捷、灵活、成本低和适应立体微结构制作的显著优势,在微结构件加工领域具有巨大发展潜力^[1]。直写加工方式包括高能束直接刻蚀或气体辅助刻蚀、激光诱导化学气相沉积(LCVD)等;高能束直接刻蚀在以去除材料得到微实体结构方面,因简便、高效而拥有广阔的应用前景。作为新型高能束,准分子激光波长极短,均分布于紫外波段(使其可能达到更高的分辨率、高光子能量并对应较大的材料吸收率),脉宽窄而发散角极小。这些优异特性使其近年来在微细加工领域倍受注目^[1~3]。硅材料的硬度和杨氏模量高,抗腐蚀性好,具有光、电、磁、力合一的传感特性等,使其成为最重要的微机械材料^[4]。鉴于硅材料在微机械领域的重要性和准分子激光及直接刻蚀加工的巨大应用潜力,对准分子激光直接刻蚀硅材料展开研究显得尤其必要。

1 准分子激光直接刻蚀实验

1.1 实验装置
实验装置及加工光路如图 1 所示。采用 Lambda Physik 公司的 Compex 150 型准分子激光器,以



- 1 后腔镜 2 放电室 3 前腔镜
- 4 反射镜 5 能量仪 6 聚焦透镜
- 7 靶子 8 靶托与电机
- 9 隔振平台 10 准分子激光器

图 1 实验装置

闸流管作开关元件,采用紫外光预电离放电泵浦方式。工作介质为 KrF,缓冲气体为氖气。实验中该激光器的主要性能参数如表 1 所示。

表 1 准分子激光器主要性能参数

工作气体 Laser medium	KrF
波长 wavelength/nm	248
频谱宽度 spectral width/nm	1
光束尺寸 beam dimensions/mm ²	6×20
脉宽 full width at half-maximum(FWHM)/ns	25
重复频率 repetition rate/Hz	实验取 1~100 可调
发散全角 beam divergence/mrad	0.1~0.3
激光单脉冲能量 energy per pulse/mJ	实验取 3~114 可调
稳定度 pulse-to-pulse stability	当单脉冲能量为 450 mJ 时,<±3%

1.2 试件材料

本实验靶材为单晶硅,如表 2 所示。

表 2 实验用单晶硅材料

	1 [#] Si	2 [#] Si	3 [#] Si
类型与晶向	N(100)	P(100)	N(111)
电阻率 $\rho/\Omega\cdot\text{cm}$	1.5~3.0	2~4	80~120
厚度 $\delta/\mu\text{m}$	420	420	350

1.3 实验结果

实验目的是研究单晶硅的准分子激光直接刻蚀规律,为制作三维微结构提供实验及理论基础。加工形式以微孔和细槽为主,通过改变单脉冲能量、加工脉冲数等,对刻蚀深度、热效应与冲击现象等进行了研究。进行刻蚀实验时,取 1、20、40、60、80 等 5 种不同的加工脉冲数,单脉冲能量在 3~114 mJ 范围内分别取出 9 组不同数值,再与 3 种单晶硅材料结合得到了至少 135 组有关数据。

(1) 光斑与加工外形尺寸

图 2 所示为一典型的激光刻蚀微孔的扫描电镜照片。由于聚焦激光束的功率密度极高,可达 $10^{10}\text{W}/\text{cm}^2$,故微孔的形状基本由加工光束的横剖面形状决定。准分子激光束横剖面内互相垂直的两个方向上的发散角不同,这导致聚焦光斑形状略呈椭圆形,试件上的加工外形也随之呈椭圆形,其长轴约 $400\mu\text{m}$,短轴约 $100\mu\text{m}$ 。孔底平坦,没有锐状凸凹和残余物。压缩光斑直径对得到小尺寸微孔很重要^[6],实验所用 KrF 激光功率已足够满足加工要求,采用非稳腔后,发散角比稳定腔减小一半,得到了更小的聚焦尺寸。说明微细加工过程中准分子激光采用非稳腔模式有助于得到发散角小、平行性高的输出光

束。为提高加工光束的圆度、匀化能量分布,可利用光纤等光波导或蝇眼透镜予以匀化处理或采用注入锁定等技术。为进一步缩小焦斑尺寸,还可考虑发散-会聚聚焦方式或小孔光阑等技术^[5,6]。

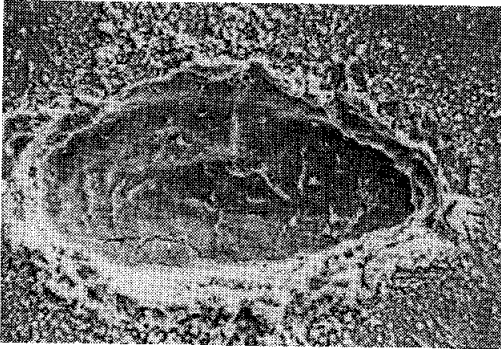


图 2 扫描电镜照片:1[#]Si, 53mJ, 40 个脉冲

(2) 热效应

图 3 的扫描电镜照片反映了微孔边缘的覆盖物情况。在金相显微镜下,同样也能看到加工后的微孔周围覆盖着极细微的一层薄膜,并显现出等厚干涉光环。经 X 射线分析仪鉴定其构成元素与基体材料没有差别,可断定微孔外缘覆盖物是材料刻蚀过程

中形成的熔融飞溅物的冷凝态,这证明加工过程有热作用。图 4 所示为垂直于加工光束方向平移硅片刻蚀得到的槽壁的微观形貌,表面呈现平行的条棒状隆起,这是在激光加工后的快速冷却过程中,伴随硅片平移产生了与温度梯度方向一致的胞晶^[7]。上述均表明准分子激光直接刻蚀也伴有热作用,并非人们通常认为的单纯的“冷加工”过程。

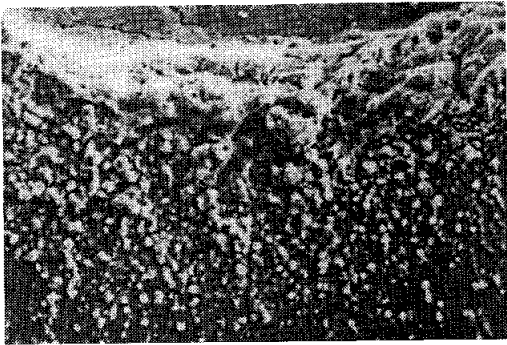


图 3 微孔边缘的飞溅物(对应图 2 箭头所指位置)

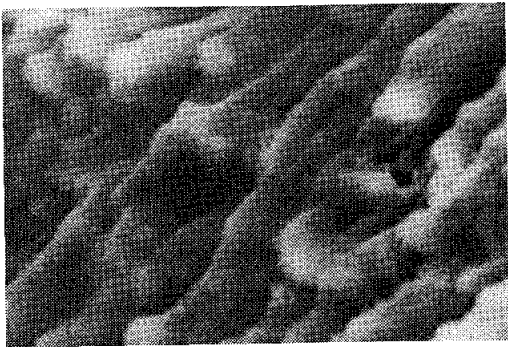


图 4 槽壁上的胞晶

但准分子激光又与通常基于热能作用的高温加工激光(如 CO₂、YAG 激光等)不同,适当选取单脉冲能量与重复频率等参数,准分子激光所形成的热影响会很小。如图 5 所示,刻蚀加工所表现的热影响基本为零——对比被加工孔壁和周围的基体材料,几乎看不出任何由于热作用而造成的区别(如高温熔融态的遗留痕迹与裂纹等)。

值得强调的是应将准分子激光刻蚀加工过程的“热量”与它造成的“热影响区”作为两个不同概念加以区别。刻蚀形成的飞溅物与胞晶说明:准分子激光与材料相互作用过程有热作用并非纯粹光化学的冷加工过程;但这不一定会形成严重的热影响区。实验证明,在适当条件下单晶硅材料可得到极轻微热影

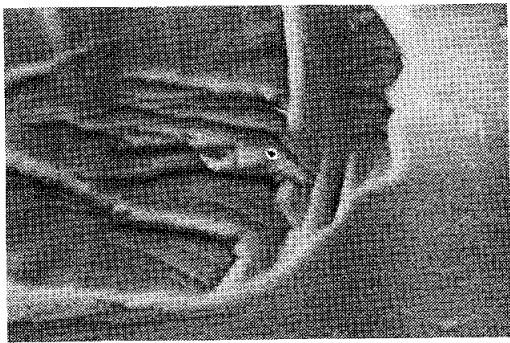


图 5 孔壁与基体材料的对比:1[#]Si, 42 mJ, 10 脉冲

响的刻蚀结果,这可以归因于以下因素:① 紫外准分子激光具有高的光子能量;② 准分子激光的脉宽极窄,仅为 25 ns;③ 硅材料强烈吸收紫外辐射,很薄的表层(典型厚度为 0.1~0.5 μm)就能吸收大量光能。这使被加工材料能在瞬间去除,即使加工过程有热作用也来不及传播出去对周围材料造成较大影响。大部分能量将消耗于材料的刻蚀过程以及被刻蚀掉的材料带走。直接影响加工表面质量的正是热影响区的大小和严重程度,而不应仅是有无热量生成。实验中小热影响区的情况正是理想的微细加工过程所希望的。可见,确切地说准分子激光用作“冷光源”或“冷加工工具”并不是因为加工材料时仅发生与热量无关的光化学反应,实际也有热作用。只不过对光吸收系数较大的一些材料,在已加工表面的热影响表现不明显。

注意观察还会发现:有些刻蚀加工的硅片,在背对微孔处存在损伤情况——呈现崩离出碎屑后残留下来的不规则小坑;同时随准分子激光输出能量的增大和脉冲数增多,其破坏程度有所加剧,如图 6、图 7 所示。很明显,不规则小坑状损伤属于持续冲击作用造成的脆性破坏,可称之为冲击破坏。

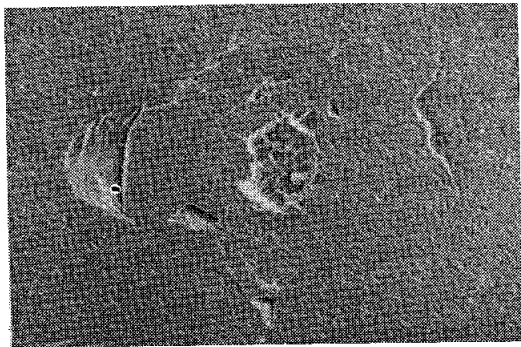


图 6 硅片上的冲击破坏:3[#]Si, 114 mJ, 20 个脉冲

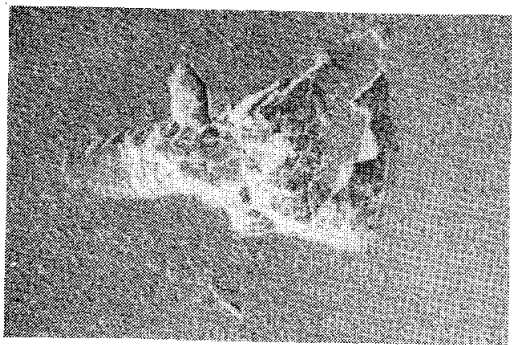


图7 硅片上的冲击破坏: $3^{\#}\text{Si}$, 114 mJ, 40 个脉冲

2 关于冲击破坏现象的讨论

对聚焦准分子激光直接刻蚀加工过程的冲击作用做分析考察:

(1) 激光照射后材料体积急剧膨胀、喷射以及瞬间的热作用造成激波。聚焦斑点处的局部硅材料在极短时间内强烈吸收脉冲光能,直接击断化学键形成大量极细微颗粒或吸收能量转化成热,材料于瞬间汽化成稠密的热等离子体^[3,6]。这都将造成该处材料体积急剧膨胀,在受到周围基体束缚的情况下,这部分被加工材料会以不同存在状态从加工出喷射出去。其中基体对被加工材料的反作用冲力是实现加工去除的重要原动力。体积爆胀与瞬间喷射都会引起激波,其强度与光束通量以及等离子体的性质有关。激波在材料中传播,并且在硅片背面形成张力脉冲,若足够大会引起材料的微观断裂。另外相对金属而言,半导体材料导热能力有限,脉宽窄而能量密度高的准分子激光于瞬间形成的加工热会在加工区附近形成较大的温度梯度。这对热脆性材料单晶硅来说,容易在微小区域内造成脆性破坏。

(2) 表面原子逸出产生冲击波。当刻蚀深度极小或激光能量较低时,只是表层材料的微观变化也能引起冲击。当脉冲激光的功率密度达 10^9 W/cm^2 以上、脉冲持续时间为 20~40 ns 时,激光能使材料表面层迅速汽化。在表面原子逸出期间会发生动量脉冲,产生冲击波。冲击强度大约 10^4 Pa ,其影响范围为靠近照射表面附近的区域^[6]。它足以使激光束冲击区的显微组织呈现位错的缠结网格,结构类似于经高爆炸冲击及快速平面冲击的材料中的亚结构。

(3) “击穿”空气发生爆炸。聚焦后的准分子激光能量极高,足以“击穿”空气发生爆炸(加工过程中,伴随每一脉冲都能听到“击穿”空气的脆响)。爆

炸形成的冲击波是其能量发散的一种形式,也会对基体产生冲击。

(4) 光压作用。激光束自身也会对材料造成压力,即所谓的光压作用。由质能公式,光子质量 $m_{\varphi} = h\nu/c^2$,为有限的确定值。光子有一定运动质量 m_{φ} 和速度 c ,所以也具有动量 $m_{\varphi}c = h/\lambda$ 。当光照射到物体表面上时,对物体的反射或吸收面将有压力作用。光压的存在是绝对的,只是一般情况下量值极小可以忽略。但对于聚焦激光微加工,准分子激光光子能量高、聚焦后的作用面积极小、被加工的又是薄的脆性材料,在这种条件下,应对光压的影响进行分析。通过实验中的光子动量、脉宽和聚焦斑点面积,可估算出准分子激光束作用在靶面的瞬间压强约为 $6.65 \times 10^{10} \text{ Pa}$ (相当于 6.6 个大气压)。计算结果的量值很大,但实际光子与硅微粒子不只是简单的粒子碰撞,还会有能量的转化、转移和吸收耗散等过程,上面的计算结果只是基于粗略的理想模型。究竟有多大成分用于微粒子间的碰撞过程,光压大小及影响程度如何,尚需进一步分析研究。总之,在聚焦激光微加工过程中,光压的影响值得探讨。

由上述分析,准分子激光刻蚀加工的冲击来源于多方面。有些可避免,如采用真空环境可避免空气“击穿”形成激波,多数只能减少而不能绝对消除。造成本实验晶片破坏的原因应是多方面的,相对而言第一种情况的影响更主要些。为尽量减少破坏几率,可考虑下述措施:① 采用真空加工环境;② 允许的情况下采用低一些的光束能量;③ 加工脆性材料时,脉冲激光的频率可适当放慢些,使应力释放有一定时间,避免剧烈频繁的累积效应造成裂纹扩展;④ 必要时可考虑冷却措施。

3 结 论

准分子激光直接刻蚀作为新型的直写加工方式,在三维微结构加工领域具有大的应用潜力。以 KrF 准分子激光对重要的微机械材料单晶硅进行直接刻蚀实验,研究表明:

(1) 准分子激光的光束参数对加工后的形状尺寸有重要影响,为提高精度可考虑采用非稳腔、匀化处理和改变聚焦方式等措施。

(2) 准分子激光在直接刻蚀加工过程中伴有热量产生,并不是通常认为的——绝对的“冷加工光源”;但它在单晶硅上形成的热影响区可做到很小,对提高微加工质量极为有利。

(3) 准分子激光聚焦加工过程中有多方因素引起冲击作用,应引起注意。

参考文献:

[1] 马炳和. 微机械的准分子激光直写加工与三维微测量技术研究:[硕士学位论文]. 西安:西北工业大学,1998

[2] Laude L D. Excimer Lasers. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994

[3] Brannon J H. Excimer-Laser Ablation and Etching. IEEE Circuits & Devices, 1990, 18~24

[4] Petersen K E. Silicon as a Mechanical Material. Proc of IEEE, 1982, 70(5): 420~457

[5] 高鸿奕,楼祺洪,董景星等. XeCl 准分子激光光束均匀器及其应用. 光学学报,1996,16(10)

[6] 王加金. 激光加工技术. 北京:中国计量出版社,1992

[7] 潘清跃. 激光快速凝固下材料的组织形成规律研究:[博士学位论文]. 西安:西北工业大学,1996

[8] Watson T A, Rowan C. Industrial Excimer Laser Beam Properties. Applied Surface Science, 1996, 532~536

Micromachining of Monocrystal Silicon by
Excimer Laser Direct Etching

Ma Binghe¹, Yuan Weizheng¹, Li Tiejun², Li Xiaoying¹, Wang Lige²

(1. Department of Aeronautical Manufacturing Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)
(2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710074)

Abstract: Microfabrication technique is crucial to the development of MEMS (micro-electro-mechanical systems). Compared with projection processes, laser direct writing has such advantages as high flexibility and potential capability of fabricating 3D-micromechanical structures. We for the first time in China carried out experiments on direct etching of monocrystal silicon with focused KrF excimer laser ($\lambda=248$ nm) beam as shown in Fig. 1. We mainly studied the thermal effect in excimer laser etching and the influence of beam property on processing results. Our main conclusions are as follows:

- (1) Excimer laser etching is not just a non-thermal processing, so we highlight the concept of “heat-affected zone (HAZ)” here, which is helpful to appreciate and explain “cold processing property” of excimer laser material processing.
- (2) The beam property and operation parameters are crucial to the etched shape and size. To improve micromachining performance, the unstable cavity, proper focusing mode and beam homogenizer should be considered.
- (3) The impact breakage formed in silicon wafers was also observed and the relevant causes were analyzed.

Key words: excimer laser, direct etching, “cold processing”property, heat-affected zone (HAZ), impact breakage