

# 空气中和水下激光等离子体冲击波对硅表面形貌的影响

周子豪 李晓红 谢长鑫 朱敏 冯杰

西南科技大学-中国工程物理研究院激光聚变研究中心极端条件物质特性联合实验室, 四川 绵阳 621010

**摘要** 利用Nd:YAG纳秒脉冲激光(波长为532 nm)分别在空气中和水下对单晶硅进行单脉冲辐照,研究了在介质/硅片界面产生的激光等离子冲击波对硅表面形貌的影响。通过压电传感器对辐照过程中冲击波力学信号进行采集,利用扫描电子显微镜(SEM)对辐照后的硅片进行表征。结果表明:在相同能量强度下,水下辐照硅表面所产生的冲击波平均速度为空气中的1.5~2倍,力学强度约为空气中的10倍;水下硅表面的熔坑中心处出现了许多凸起的球状物以及下凹的孔洞,边缘处没有沉积物且具有波纹状结构,而空气中硅表面熔坑中心处较为光滑,边缘处具有一圈圈的沉积物。研究表明,在介质/硅片界面产生等离子冲击波所引起的热-力学效应是硅表面形貌形成的主要原因。与空气介质相比,在水下由于水的约束作用而引起更大的冲击波力学强度,以及由于水的存在而发生爆发式沸腾的热学现象共同导致了在水下和空气中硅表面形成了截然不同的形貌。

**关键词** 激光技术;材料;激光等离子体;冲击波;单晶硅;表面形貌

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.101405

## Silicon Surface Topography by Laser-Induced Plasma Shock Waves in the Air and under Water

Zhou Zihao Li Xiaohong Xie Changxin Zhu Ming Feng Jie

*Joint Laboratory for Extreme Conditions Matter Properties, Southwest University of Science and Technology and Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang, Sichuan 621010, China*

**Abstract** The morphologies of silicon surfaces are modified with the single Nd:YAG nanosecond laser pulse (wavelength 532 nm) in the air and water. The influence of laser induced plasma shock waves in the medium/silicon interface on silicon surface topography is studied. The shock wave mechanical signals are gathered by piezoelectric sensors and the morphology of silicon surfaces is observed by scanning electron microscopes (SEM). It is found that at the same energy level, the average speed of the underwater shock wave generated by irradiating the silicon surface under water is 1.5~2 times higher than that in air, and the mechanical strength under water is about 10 times higher than that in air. By observing the silicon surface morphology, it is found that many raised bulbs and recessed holes appears at the center of the craters on silicon surface under water, with corrugated structure but no sediment at the edges. While the center of the craters on silicon surface in air are relatively smooth, with circles of sediment at the edges. Thermal-mechanical effect induced by plasma shock waves generated at the medium/silicon interface is the main reason of silicon surface topography formation. Under water, greater mechanical strength of the shock wave induced by restriction effect of water, and explosive boiling thermal phenomena result in completely different topography as compared with those in air.

**Key words** laser technique; materials; laser plasma; shock wave; silicon; surface topography

**OCIS codes** 140.3390; 160.6030; 220.4000; 350.5400; 350.7420

收稿日期: 2015-04-16; 收到修改稿日期: 2015-05-27; 网络出版日期: 2015-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(11204250)、四川省教育厅重点基金(12ZA186)、极端条件物质特性联合实验室开放基金(12zxjk02)

作者简介: 周子豪(1992—),男,本科生,主要从事激光与物质相互作用的研究。E-mail: zzhphysics@163.com

导师简介: 李晓红(1977—),女,博士,教授,主要从事激光对固体材料的表面改性研究。

E-mail: lixiaohong@swust.edu.cn(通信联系人)

## 1 引言

随着激光技术的发展,利用激光对材料表面进行改性处理<sup>[1-13]</sup>已越来越受到重视。通过纳秒激光在材料表面产生激光等离子冲击波来进行材料改性已在多个领域得到应用,包括激光冲击波强化(LSP)<sup>[2-3]</sup>、激光冲击波成形<sup>[4-5]</sup>、激光冲击波抗腐蚀<sup>[6-7]</sup>和激光冲击波微结构制造<sup>[8-9]</sup>等。其中,基于激光等离子体冲击波效应的微结构制造技术在半导体材料上具有重大应用价值,因为具有一定微结构的半导体材料可用于制备性能更好的功能性器件,而且与传统的处理方法相比,这种方法具有制备方法简单、加工效率高、非接触、对材料没有选择性等优势<sup>[10]</sup>。硅是一种重要的半导体材料,表面具有一定微结构的硅材料在红外探测器、太阳能电池以及平板显示器等领域都有着重要的应用前景<sup>[11]</sup>。由于在不同环境介质下纳秒激光在材料表面产生激光等离子冲击波具有截然不同的热-力学效应,最终生成的微结构形状和尺寸也有很大差别,因此研究在不同环境下激光等离子体冲击波对硅表面形貌的影响具有重要的意义。Craciun等<sup>[12]</sup>在空气中利用纳秒脉冲激光诱导硅表面微结构,发现由激光等离子体冲击波的热学效应而导致的相爆炸(爆炸性沸腾)在微结构形成过程中具有重要影响;Karimzadeh等<sup>[13]</sup>在二甲亚砜液体(DMSO)和水中利用纳秒脉冲激光诱导硅表面微结构,发现由于液体的约束作用而增强的激光等离子体冲击波力学效应是微结构形成的重要因素。

用波长为 532 nm 的 Nd:YAG 纳秒脉冲激光分别在空气中和水下对单晶硅进行单脉冲辐照。通过扫描电子显微镜(SEM)对辐照后的硅片进行表征,并对辐照过程中激光等离子体冲击波力学信号的采集,以及辐照过程中热学效应的分析,研究了在不同介质/硅片界面产生的等离子冲击波所引起的热-力学效应对硅表面形貌的影响。

## 2 实验方法

实验采用单面抛光<100>取向的单晶硅片作为样品。实验前先将样品放置在丙酮和甲醛中依次超声清洗 15 min,接着使用氮气吹干,最后将样品固定在高纯度石英水槽内。

实验所搭建的光路图如图 1 所示。采用脉宽为 10 ns、重复频率为 10 Hz、中心波长为 1064 nm 的 Nd:YAG 纳秒(NS)脉冲激光器,通过二次倍频得到 532 nm 激光,利用焦距为 1600 nm 和焦距为 1100 nm 的透镜以及小孔光阑共同组成的空间滤波器对光斑进行整形,整形后的光束经过一个分光比为 3:1 的分光镜,使高能的光束经过聚焦透镜聚焦到固定于石英水槽内的硅样品表面,而低能量的光束经过衰减进入光电探测器当中,两束光分别到达硅样品表面和光电探测器的光程相等。在硅样品表面附近固定一个聚偏氟乙烯(PVDF)探针式压电传感器,将压电传感器和光电探测器连接到最高测试频率为 1 GHz 的双通示波器中。

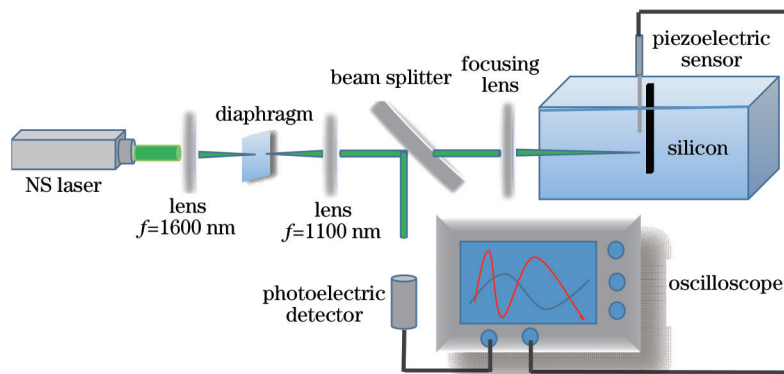


图 1 纳秒脉冲激光诱导硅表面微结构实验装置示意图

Fig.1 Experimental setup for silicon surface microstructures induced by nanosecond laser pulse

将硅样品置于空气当中(水槽内不加水),用单脉冲激光聚焦于硅样品表面,同时光电探测器和压电传感器记录的信号将显示在示波器上,以光电探测器的信号作为压电传感器信号的计时零点,提取压电传感器所采集的力学信号。然后,向水槽内加入自来水,并调整硅片的位置使单脉冲激光聚焦于水下硅样品表面(硅表面水层厚度约 20 mm),同时提取压电传感器所采集的力学信号。最后利用 SEM 对激光辐照后的硅样品表面进行分析。

### 3 实验结果

#### 3.1 空气中和水下产生的激光等离子体冲击波力学信号

实验过程中对于同一条件下的力学信号进行了多次测量,由于结果较为稳定故只选择其中的一次测量结果。不同能量强度下单脉冲激光分别作用空气中和水下硅片所产生的冲击波力学信号如图2所示。

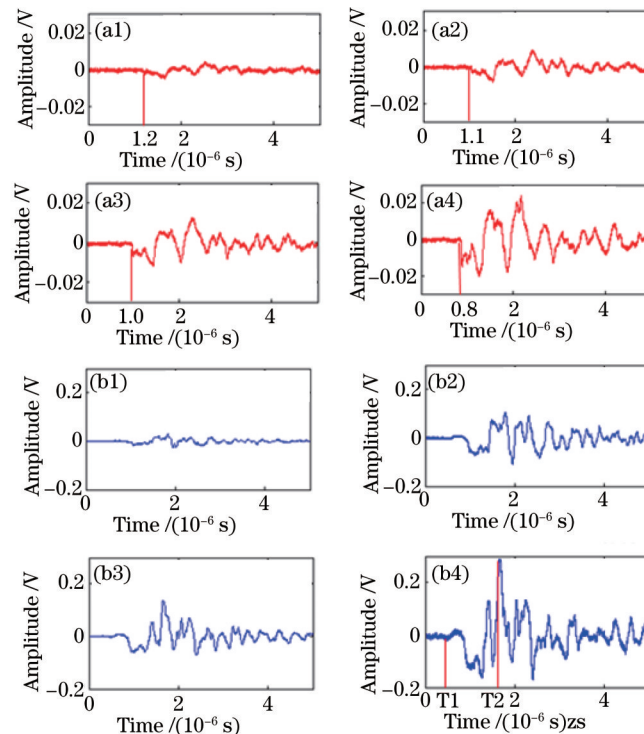


图2 不同能量强度下单脉冲激光分别作用空气中和水下单晶硅的冲击波力学信号。(a)空气中;(b)水下

Fig.2 Monocrystalline silicon is irradiated with single laser pulse in the air and water respectively at different energy intensity shockwave mechanical signals. (a) In the air; (b) in the water

图2(a)为空气中不同能量强度下单脉冲激光辐照单晶硅所产生的力学信号[(a1)、(a2)、(a3)、(a4)对应的能量强度分别为2、4、6、8 mJ]。以图2(a)中(a1)为例,可以看到,在激光与硅样品作用过程中,探测器在经过1.2  $\mu\text{s}$ 后才探测到冲击波信号,随后开始产生多个信号峰,信号峰的峰值先在较短时间内达到最大,然后逐渐减小直至消失。对比图2(a)中的(a1)、(a2)、(a3)、(a4),可以看到随着能量逐渐增加,开始探测到信号所需时间逐渐减少,产生的最大峰值逐渐增大。

图2(b)为水中不同能量强度下单脉冲激光辐照单晶硅所产生的冲击波力学信号[(b1)、(b2)、(b3)、(b4)对应的能量强度分别为2、4、6、8 mJ]。可以看到,其冲击波信号规律与空气中的类似:均是在经过一段时间后探测器开始探测到信号,随后产生多个信号峰,信号峰的峰值先在较短时间内达到最大值,然后逐渐减小直至消失。随着能量的逐渐增加,开始探测到信号所需时间逐渐减少,产生的最大峰值逐渐增大。

但是,对比图2(a)和图2(b)可以明显地看到,在相同能量下,水下开始探测到冲击波信号所需时间比空气中短,且水下产生的最大峰值约为空气中的10倍。

#### 3.2 空气中和水下诱导的硅表面形貌

不同能量强度下单脉冲激光分别作用于空气中和水下硅片所产生的表面形貌如图3所示。图3(a)为空气中不同能量强度下单脉冲激光辐照后硅样品在不同倍数下的表面形貌图(从左到右对应的能量强度分别为2、4、6、8 mJ,从上到下是放大倍数分别为1000、3000倍)。可以看到,在空气中经过单脉冲激光辐照后的单晶硅表面出现了一个熔坑,在中央处表面较光滑,边缘处有一圈沉积物。随着能量强度的增加,熔坑更大,熔融的更深,且边缘处出现更多圈沉积物。

图3(b)为水中不同能量强度下单脉冲激光辐照后硅样品在不同放大倍数下的表面形貌图(从左到右对应的能量强度分别为2、4、6、8 mJ,从上到下是放大倍数分别为1000、3000、10000倍)。在水下经单脉冲激光

辐照后的单晶硅,其表面熔坑中心处出现许多凸起的小球和下巴孔洞,边缘处不存在沉积物,且具有波纹状结构。随着能量强度的增加,中心处刻蚀深度加剧,表面更均匀,微结构尺寸更小,总体呈现珊瑚状结构,边缘处波纹状结构更多,且褶皱程度加大。

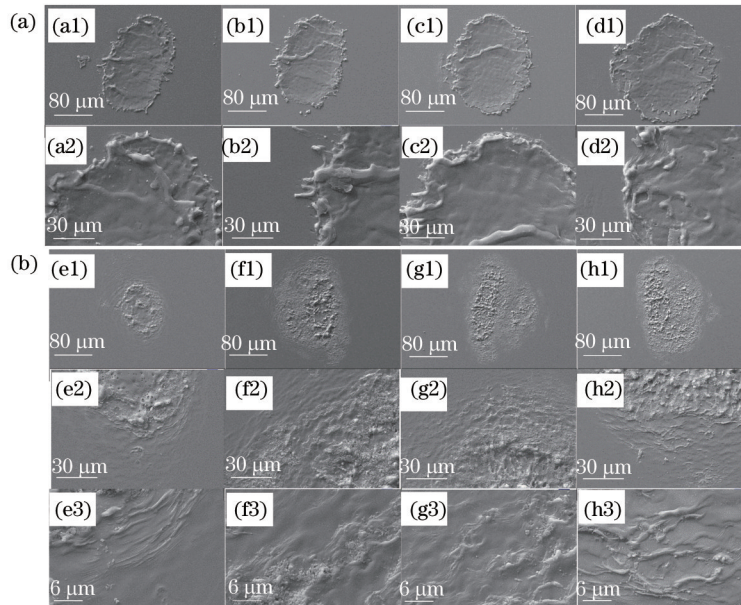


图3 不同能量强度下单脉冲激光分别作用空气中和水下的单晶硅在不同放大倍数下SEM图。(a)空气中;(b)水下  
Fig.3 Monocrystalline silicon was irradiated with single laser pulse in the air and water respectively at different energy intensity silicon surfaces under different magnification SEM figures. (a) In the air; (b) in the water

对比图3(a)和图3(b)可以明显地看到,在相同能量强度下,水下硅样品的熔坑中心处出现了许多凸起的球状物以及下凹的孔洞,边缘处没有沉积物且具有波纹状结构,而空气中硅样品熔坑中心处较为光滑,边缘处具有一圈圈的沉积物。

## 4 结果分析

纳秒脉冲激光辐照硅表面时,硅片将迅速吸收激光能量,短时间内温度急剧上升,发生熔化和气化。若此时持续加热,气化后的硅蒸汽将继续吸收激光能量,使其温度进一步升高,形成等离子体<sup>[1]</sup>。但是,在激光和硅片的相互作用过程中,介质的击穿会严重地影响耦合到硅片表面的能量。如果介质的击穿发生在激光束到达硅片表面之前,激光能量几乎全部被介质击穿产生的等离子体所吸收,硅样品就不能有效地吸收激光能量并蒸发,甚至不能形成等离子体。根据文献[14-15],对于波长为532 nm的纳秒脉冲激光而言,在一个标准大气压下,干洁空气的击穿阈值约为 $2.5 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$ ;自来水的击穿阈值约为 $1.1 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 。而实验中所用的最高激光功率密度为 $7 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ (能量8 mJ,光斑直径120 μm,脉冲持续时间10 ns),因此,可以不考虑介质的击穿。

在脉冲激光辐照硅片表面形成高温高压等离子体同时,等离子体区域迅速向外扩展,从而形成一系列向介质中传播的压缩波。随着激光的持续辐照,陆续产生的压缩波会形成一个阵面陡峭的冲击波。在激光作用后期,由于功率密度减小,将会有一系列稀疏波的产生使得冲击波波阵面压力降低<sup>[16]</sup>。在图2中已经较为明显地反映出了这一演化过程,以图2(b)中的(b4)为例,首先在T1时刻探测器接收到信号,开始产生一系列峰值较小的信号峰,即为等离子体区域向外扩展时向介质传输的一系列压缩波;随后,在T2时刻出现一个最大信号峰值,即为压缩波形成的冲击波;最后,在达到最大峰值后,冲击波开始分解为一系列的稀疏波,直至消失。随着能量的逐渐增加,产生的冲击波最大峰值也逐渐增加。

在图2中注意到,从激光辐照到硅样品表面到探测器探测到信号均需要1 μs左右的时间,在实验过程中探测器距离激光作用硅片焦点处约为1 mm,且激光与硅片相互作用产生等离子体的时间以及探测器的响应时间均为纳秒量级<sup>[17]</sup>,相对微秒量级可以忽略不计,因此可以认为在激光作用到硅片到探测器开始探测到信号这段时间为冲击波从焦点处到探测器所花时间。

在图 2(a)和图 2(b)的对比中可以明显看到在相同能量下,水下开始探测到冲击波信号所需时间比空气中短,这是由于介质密度不同,冲击波的传播速度也有所不同,水的密度约为空气的 800 倍,因此与空气中冲击波相比,水下冲击波传播的速度更快。表 1 为不同环境下探测器开始探测到信号所需时间以及这段时间中冲击波的平均速度(Start time 1, Velocity 1 分别为空气中的时间和平均速度;Start time 2, Velocity 2 分别为水下的时间和平均速度),由表 1 可以看到,相同能量下水下冲击波的平均速度为空气中的 1.5~2 倍,这与文献[18]报道的结果基本一致。

表 1 不同环境下探测器开始探测到信号的时间以及这段时间中冲击波的平均速度

Table 1 Detector detects the start time of the signal and this time the average speed of the shock wave under different environments

Number	Energy /mJ	Start time 1 / $\mu\text{s}$	Velocity 1 /(km·s <sup>-1</sup> )	Start time 2 / $\mu\text{s}$	Velocity 2 /(km·s <sup>-1</sup> )
1	2	1.2	0.83	0.8	1.25
2	4	1.1	0.91	0.6	1.67
3	6	1.0	1.00	0.5	2.00
4	8	0.8	1.25	0.4	2.50

在对比图 2(a)和图 2(b)中也可以明显看到在相同能量下,水下产生的冲击波最大峰值远大于空气中冲击波的最大峰值,具体如表 2 所示(其中 Peak 1 为空气中冲击波的最大峰值,Peak 2 为水下冲击波的最大峰值)。由表 2 可以看到,相同能量下水下冲击波的最大峰值约为空气中的 10 倍,与 Fabbro 等<sup>[2]</sup>的研究一致,这是因为靶材附近的水做了冲击波的约束层,在约束层的作用下,激光冲击波对靶材的冲量传递效率就有了很大的提高,即约束层产生了增压效果。

表 2 不同环境下冲击波的最大峰值

Table 2 Maximum peak value of shock wave under different environments

Number	Energy /mJ	Peak 1 /V	Peak 2 /V
1	2	0.004	0.03
2	4	0.009	0.10
3	6	0.013	0.14
4	8	0.024	0.28

在图 3(a)和图 3(b)的对比中,可以看到在空气和水这两种介质下激光辐照过后的硅表面出现了完全不同的形貌结构,这是由于在不同环境介质下纳秒激光在材料表面产生激光等离子冲击波具有截然不同的力学和热学效应而导致的<sup>[19]</sup>。

前面已经分析了空气中和水下硅表面产生的等离子体冲击波的力学效应差异,而在这两种介质/硅片界面产生等离子冲击波所引起的热学效应差异,则主要是由于水的存在而导致的。当高能量、短脉冲激光透过水层后聚焦照射在水中的硅表面时,在水/硅的交界面上,激光被吸收的功率密度分别造成了硅和水的温升,应该包括硅和水两个方面,即:

$$I = I_m + I_l, \quad (1)$$

式中  $I_m$  为硅片所吸收的激光功率密度部分,  $I_l$  为水所吸收的激光功率密度部分<sup>[20]</sup>。对于激光辐照水/硅界面的温度分布,可以认为:1) 考虑到纳秒脉冲激光的热渗透深度很小,激光光斑中心处的热传导遵循一维模型;2) 由于水层厚度较小,忽略水对光斑的改变以及激光吸收而导致的能量损失;3) 在固液交界面处,水和硅片的温度相同。因此硅片和水的一维傅里叶热传导方程分别为

$$I_m(r, t) = \frac{\partial^2 T_m(z, t)}{\partial z^2} - \frac{1}{\beta_m} \frac{\partial T_m(z, t)}{\partial t}, \quad (2)$$

$$I_l(r, t) = \frac{\partial^2 T_l(z, t)}{\partial z^2} - \frac{1}{\beta_l} \frac{\partial T_l(z, t)}{\partial t}, \quad (3)$$

式中  $r$  为轴对称坐标系中的径向位置,  $t$  为时间,  $T_m(z, t)$ 、 $T_l(z, t)$  分别为靶材和水在时刻  $t$ 、深度  $z$  处的温度,  $\beta_m$ 、 $\beta_l$  分别为靶材和水的扩散率。由于激光能量在时间上为矩形脉冲,因此激光辐照部位的温度为

$$T(z,t) = \frac{2A I_m \sqrt{\beta_m}}{\lambda_m} \left[ \sqrt{t} \operatorname{erfc} \frac{z}{\sqrt{4\beta_m t}} - \sqrt{t-t_{on}} \operatorname{erfc} \frac{z}{\sqrt{4\beta_m(t-t_{on})}} \right], \quad 0 \leq t \leq t_{on}, \quad (4)$$

$$T(0,t) = \frac{2A I_m \sqrt{\beta_m}}{\lambda_m} \left[ \sqrt{t} - \sqrt{t-t_{on}} \right], \quad t > t_{on}, \quad (5)$$

式中  $t_{on}$  为激光脉冲宽度,  $A$  为硅材料表面的吸收率,  $\lambda_m$  为硅的热导率<sup>[21]</sup>。根据上式就可以通过数值计算得到聚焦区域的硅表面温度随时间的变化曲线,其温度在激光辐照的纳秒脉冲内急剧升温,当脉冲能量结束后又快速下降,到几百摄氏度后下降速度逐渐变慢。由于高能量短脉冲激光的这种高能量密度、高升温率的作用特点(其热流密度高达兆瓦每平方米量级,温度变化率达  $10^7$  K/s 以上),导致近固体表面的水超高过热,瞬间产生大量气泡并形成气泡群,发生爆发式沸腾现象,又称为快速瞬态核化沸腾<sup>[12]</sup>。

根据对介质/硅片界面产生等离子冲击波所引起的热-力学效应的分析,可以很好地解释图 3(a)和图 3(b)中硅表面所出现完全不同的形貌结构。在相同能量强度下,水下硅样品的熔坑中心处出现了许多凸起的球状物以及下凹的孔洞,而空气中硅样品熔坑中心处较为光滑,这是由于在水下硅表面熔融过程中因为水的存在产生了大量气泡并形成气泡群,发生爆发式沸腾现象,液态硅中气泡的融入,使得最终成型时水下硅片熔坑中心出现了许多凸起的小球和下凹孔洞,而空气中则不存在这种爆发式沸腾现象,所以空气中硅片熔坑中心处较为光滑。而在熔坑边缘处,水下硅片没有沉积物且具有波纹状结构,而空气中硅片边缘处具有一圈圈的沉积物,这由于水的清洗使得水下硅片熔坑边缘处没有沉积物<sup>[22]</sup>,同时由于相同能量强度下水下硅表面产生的等离子体冲击波的力学强度约为空气中的 10 倍,所以水下硅片熔坑边缘处具有明显的波纹状结构,并且随着能量强度增加,波纹的褶皱程度加大。而在空气中作用硅表面时空气不具备清洗的作用,而且产生的激光等离子体冲击波力学强度较水下作用时小很多,所以空气中硅片熔坑边缘处只有一圈圈的沉积物。

## 5 结 论

采用波长为 532 nm 的 Nd:YAG 纳秒脉冲激光分别在空气中和水下对单晶硅进行单脉冲辐照,在其表面形成了截然不同的形貌。研究表明,在介质/硅片界面产生等离子冲击波所引起的热-力学效应,是其表面形貌形成的主要原因。在相同能量强度下,由于水下激光等离子体冲击波的力学强度约为空气中的 10 倍,并且水具有清洗的作用,使得水下硅表面的熔坑边缘处没有沉积物且具有波纹状结构,而空气中硅表面熔坑边缘处只有一圈圈的沉积物;同时由于辐照过程中,高能量短脉冲激光的高升温率的作用特点以及水的存在,使得在固液界面处的水发生爆发式沸腾现象,从而导致水下硅样品的熔坑中心处出现了许多凸起的球状物以及下凹的孔洞,而空气中不存在这种爆发式沸腾现象,所以其熔坑中心处较为光滑。通过对比在水下和空气中纳秒激光单脉冲辐照硅表面时激光等离子体冲击波的热-力学效应,以及辐照后硅表面形貌,明确了在水下和空气中激光等离子体冲击波诱导硅表面微结构的生成机制,对基于激光冲击波效应的微结构制造技术提供了一定的理论和实验基础。

## 参 考 文 献

- 1 Xie Changxin, Li Xiaohong, Zhu Min, *et al.*. Silicon surface microstructures induced by single nanosecond laser pulse [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(11): 114101.  
谢长鑫, 李晓红, 朱敏, 等. 单脉冲纳秒激光诱导硅表面微结构[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(11): 114101.
- 2 Fabbro R, Fournier J, Ballard P. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry[J]. *J Appl Phys*, 1990, 68(2): 775-784.
- 3 Luo Sihai, He Weifeng, Zhou Liucheng, *et al.*. Effects of laser shock processing on high temperature fatigue properties and fracture morphologies of K403 nickel-based alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0903001.  
罗思海, 何卫锋, 周留成, 等. 激光冲击对 K403 镍基合金高温疲劳性能和断口形貌的影响[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0903001.
- 4 Gao L, Yu J, Zhang Y. Numerical simulation and experiment of TA2 sheet forming under laser shock[J]. *Chin Opt Letters*, 2006, 4(8): 472-475.
- 5 Zhang Qinglai, Wang Rong, Hong Yanxin, *et al.*. Study on laser shock forming and fracture behavior of metal sheet[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0403010.

- 张青来, 王 荣, 洪妍鑫, 等. 金属板料激光冲击成形及其破裂行为研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0403010.
- 6 Zhang L, Zhang Y K, Lu J Z, *et al.*. Effects of laser shock processing on electrochemical corrosion resistance of ANSI 304 stainless steel weldments after cavitation erosion[J]. Corrosion Science, 2013, 66(8): 5-13.
- 7 Li Xingcheng, Zhang Yongkang, Lu Yalin, *et al.*. Research of corrosion resistance for AZ31 magnesium alloy by laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0403002.
- 李兴成, 张永康, 卢雅琳, 等. 激光冲击 AZ31 镁合金抗腐蚀性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0403002.
- 8 Chu J P, Rigsbee J M, Banas G, *et al.*. Laser-shock processing effects on surface microstructure and mechanical properties of low carbon steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 1999, 260(1-2): 260-268.
- 9 Liu Yuanxun, Wang Xi, Wu Xianqian, *et al.*. Surface morphology and deformation mechanism of 304 stainless steel treated by laser shock peening[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0103004.
- 柳沅汛, 王 曦, 吴先前, 等. 激光冲击处理 304 不锈钢表面的形貌特征及其机理分析[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0103004.
- 10 Huang Z, Carey J E, Liu M, *et al.*. Microstructured silicon photodetector[J]. Appl Phys Lett, 2006, 89(3): 033506.
- 11 Huang W Q, Zhang R T, Wang H X, *et al.*. Laser on porous silicon after oxidation by irradiation and annealing[J]. Optics Communications, 2008, 281(20): 5229-5233.
- 12 Craciun V, Bassim N, Singh R K, *et al.*. Laser-induced explosive boiling during nanosecond laser ablation of silicon[J]. Applied surface science, 2002, 186(1-4): 288-292.
- 13 Karimzadeh R, Anvari J Z, Mansour N. Nanosecond pulsed laser ablation of silicon in liquids [J]. Applied Physics A, 2009, 94(4): 949-955.
- 14 Han Xiaoyu, Yang Xiaoli. Numerical calculation of atmospheric breakdown threshold induced by laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(11): 1655-1659.
- 韩晓玉, 杨小丽. 激光大气击穿阈值的数值分析[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(11): 1655-1659.
- 15 Zong Siguang, Wang Jiang'an, Cao Shui, *et al.*. Cavitation and Sound Radicalization with Laser-Induced Breakdown in Liquid[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 14-15.
- 宗思光, 王江安, 曹 水, 等. 激光击穿液体介质的空化与声辐射[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 14-15.
- 16 Gacek S, Wang X W. Dynamics evolution of shock waves in laser-material interaction[J]. Applied Physics A: Materials Science and Processing, 2009, 94(3): 675-690.
- 17 Wang Juan, Chen Chuansong, Man Baoyuan, *et al.*. Time-resolved spectrum analyses of laser induced Si-plasma emission[J]. Laser Journal, 2009, 30(3): 20-21.
- 王 娟, 陈传松, 满宝元, 等. 激光诱导硅等离子体的时间分辨发射光谱分析[J]. 激光杂志, 2009, 30(3): 20-21.
- 18 Ning Xin, Li Xiaoyan, Yang Zhihuan, *et al.*. A comparative study on the propagation speed and physical parameters of underwater blast wave and air blast wave[J]. Medical Journal of Chinese People's Liberation Army, 2004, 29(2): 97-99.
- 宁 心, 李晓炎, 杨志焕, 等. 水下冲击波和空气冲击波传播速度及物理参数的对比研究[J]. 解放军医学杂志, 2004, 29(2): 97-99.
- 19 Choo K L, Ogawa Y, Kanbargi G, *et al.*. Micromachining of silicon by short-pulse laser ablation in air and under water [J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 372(1-2): 145-162.
- 20 Vogel A, Noack J, Nahen K, *et al.*. Energy balance of optical breakdown in water at nanosecond to femtosecond time scales[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 1999, 68(2): 271-280.
- 21 Ueno I, Shoji M. Thermal-fluid phenomena induced by nanosecond-pulse heating of materials in water[J]. Journal of Heat Transfer, 2001, 123(6): 1123-1132.
- 22 Kruusing A. Underwater and water-assisted laser processing: Part 1-general features, steam cleaning and shock processing [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2004, 41(2): 307-327.

栏目编辑: 张浩佳