

# 飞秒激光在空气和水中对硅片烧蚀加工的实验研究<sup>\*</sup>

王 锐<sup>1)</sup> 杨建军<sup>1)†</sup> 梁春永<sup>2)</sup> 王洪水<sup>2)</sup> 韩 伟<sup>1)</sup> 杨 阳<sup>1)</sup>

1) 南开大学现代光学研究所, 光电信息科学技术教育部重点实验室, 天津 300071)

2) 河北工业大学材料科学与工程学院, 天津 300130)

(2008 年 6 月 9 日收到, 2008 年 12 月 10 日收到修改稿)

采用 1 kHz, 800 nm, 50 fs—24 ps 的钛宝石激光脉冲对单晶硅样品在空气和水溶液环境中的烧蚀加工特性进行了研究. 实验观察到了超短脉冲激光在空气氛围中烧蚀形成的双层环状结构, 分析揭示了加工区域中心和边缘的烧蚀物理机制分别为热熔化和库仑爆炸, 并测量了双层环状结构半径随入射激光能量、脉冲数及持续时间等的变化关系. 结果表明获取较大深-宽比的加工效果需选择小能量脉冲激光的多次作用. 在水溶液环境中, 实验发现飞秒激光在样品表面诱导产生了亚微米量级的多孔状结构, 而皮秒激光则更容易实现对硅表面的非热性去除. 这是由于激光诱导的光机械应力和空泡效应随脉冲宽度变大而增强所致, 在实验上确立了区分这两种不同加工状态的临界脉冲宽度.

关键词: 飞秒激光, 硅片, 激光加工

PACC: 4255R, 4262A, 4265

## 1. 引 言

近年来, 飞秒激光凭借其超短持续时间和超高峰值功率, 已经在金属、半导体和透明介质等材料表面和内部实现了微米或纳米量级的加工、改性和修复等多种处理<sup>[1-3]</sup>, 为制备各种结构和功能性微器件提供了一种全新的技术途径. 硅作为一种重要的半导体材料, 在微电子和光学等领域内有着非常重要的地位和广阔的应用前景. 利用飞秒激光在硅表面进行各种微细加工的基础和应用研究已经引起国内外学者愈来愈多的关注. 例如, 基于分子动力学模型, Herrmann 等<sup>[4]</sup>理论分析了不同参数的超短脉冲激光对硅表面烧蚀过程的影响. Bone 等<sup>[5]</sup>研究了脉冲宽度为 5—400 fs 的钛宝石飞秒激光在空气中对晶体硅的烧蚀去除效果, 发现了不同入射激光通量情况下烧蚀形成的多种表面形貌结构, 以及其烧蚀阈值不随脉冲宽度和脉冲数量变化的实验现象. 事实上, 当激光加工的环境条件改变时, 激光烧蚀效果及其物理机制也均将发生相应的变化. 最近, Ren 等<sup>[6]</sup>通过实验研究表明, 飞秒激光对表面具有水层的硅材料去除率比空气情况下提高了约 2 倍, 同时

也有效地减弱了加工过程中的氧化现象. 另外, Besner 等<sup>[7]</sup>分析比较了 800 nm, 250 fs 的激光在真空、空气和水环境中对硅表面的烧蚀特征. 实验发现激光烧蚀过程在较低入射光能量条件下基本相同, 而高能量入射激光的烧蚀效果将严格依赖于样品周围的加工环境. 然而, 目前飞秒激光在不同工作环境下对硅片表面的烧蚀物理机制仍未完全清楚. 另一方面, 在不同加工环境下超短脉冲激光特征参数(如波长、脉冲宽度、能量和脉冲数等)对硅表面烧蚀效果的影响也有待于进一步探索和研究.

在本文中, 我们采用重复频率为 1 kHz、中心波长为 800 nm、最大单脉冲能量约为 2 mJ、脉冲宽度在 50 fs—24 ps 范围内连续可调的钛宝石激光, 对单晶硅在空气和水溶液环境下的烧蚀特性进行了研究. 首先, 实验观测了不同参数的超短脉冲激光在空气氛围中对硅片表面烧蚀结构的影响, 并对其中的物理现象进行了分析和讨论. 然后, 将样品放置在水溶液环境中, 分析比较了不同能量和持续时间的超短脉冲激光对样品表面烧蚀导致的物理现象, 发现皮秒脉冲激光比飞秒脉冲激光更容易实现对硅材料表面的非热性去除, 并在实验上确立了区分这两种不同加工状态的临界脉冲宽度.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 30874092, 60637020)和教育部博士点基金(批准号: 20070055066)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: jjyang@nankai.edu.cn

## 2. 实验装置

实验采用美国光谱物理公司生产的钛宝石飞秒激光放大系统作为光源. 首先, 从振荡器输出的飞秒激光经光栅色散啁啾展宽至皮秒量级后, 被注入到由再生和多通结构组成的激光放大器中. 该放大器采用脉冲重复频率为 1 kHz 的全固体 Nd:YLF 倍频激光( Evolution-30 )作为抽运源. 放大的激光脉冲经光栅对压缩后可以获得中心波长为 800 nm、脉冲宽度为 50 fs、最大单脉冲能量约为 2 mJ 的激光. 另外, 我们可通过调节压缩装置中光栅对之间的距离, 实现输出激光脉冲宽度在 50 fs—24 ps 之间的连续调谐. 激光脉冲的持续时间通过单次自相关仪进行实时监测. 系统输出的超短激光脉冲为水平线偏振光, 光束直径约为 8 mm.

实验装置如图 1 所示, 飞秒激光脉冲经过一个中性可调衰减器后, 被一个物镜( 放大倍率为 10, 数值孔径为 0.25 )聚焦到表面抛光、厚度为 0.3 mm 的单晶硅片样品上, 焦点处的光斑直径约为 10  $\mu\text{m}$ . 在实验中, 加工样品被水平固定在三维精密移动平台上, 其中  $x$ ,  $y$  和  $z$  轴的单步移动精度为 1  $\mu\text{m}$ . 在保持聚焦光束不动的情况下, 通过控制三维移动平台来实现样品表面的精确定位加工. 实验过程中样品位置的移动、入射激光脉冲数及其脉冲宽度的改变均是通过计算机程序实现协调运作. 整个实验过程均是在千级的超净环境下进行.

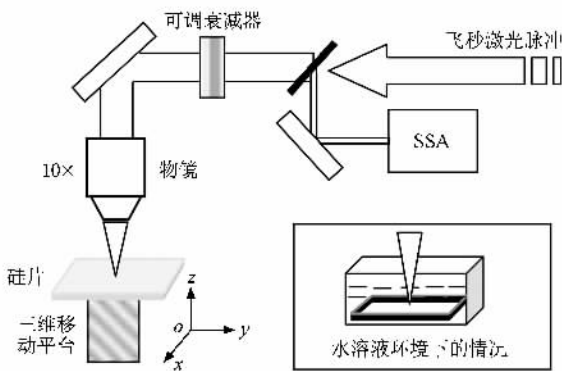


图 1 飞秒激光对单晶硅片烧蚀加工的实验装置示意图

首先, 在空气环境中, 我们将单晶硅样品移至物镜的焦点位置处进行激光烧蚀, 分析比较了入射激光能量、脉冲数和脉冲持续时间等参数对加工过程的影响. 然后, 我们将样品放置于一个 5 cm  $\times$  5 cm  $\times$  4 cm 顶端开口的容器底部, 并向其中注入高度约为

1.5 mm 的纯净水, 通过改变样品与物镜焦点之间的距离以及入射激光能量和脉冲持续时间等参数来研究水溶液环境下超短脉冲激光对单晶硅片样品表面的加工情况. 激光烧蚀效果通过 Hitachi S-4300 型扫描电子显微镜( SEM )进行观测.

## 3. 实验结果与分析

### 3.1. 在空气中超短脉冲激光对硅片的烧蚀加工情况

在空气实验环境下, 我们首先研究了在脉冲宽度  $\tau = 50$  fs 时, 入射激光能量和脉冲数对样品表面烧蚀的影响. 图 2 所示为实验得到的 SEM 图像, 其中上半部分表示激光能量为 20  $\mu\text{J}$  的烧蚀情形, 下半部分表示激光能量为 200  $\mu\text{J}$  的烧蚀情形. 显然, 不同的入射激光能量和脉冲数, 硅片的烧蚀效果都将呈现出双层圆环状结构的共同特征. 其中内环区域具有较深的烧蚀深度, 并伴有明显的热熔痕迹, 而外环区域内的烧蚀深度较浅, 且具有光滑的烧蚀表面. 例如, 对于入射激光能量  $E = 20$   $\mu\text{J}$  的情况, 单个脉冲的作用使得内、外环区域内的烧蚀效果相差不多, 即两者均具有较小的烧蚀深度和光滑的烧蚀表面. 当脉冲数增加至  $N = 7$  时, 烧蚀区域的内、外环状结构开始变得不同, 其中内环中心区域的烧蚀深度增大, 且其边缘残留有明显的热熔物, 而外环区域的烧蚀深度虽然在此时也获得了一定程度的增强, 但其烧蚀表面仍为光滑的非热熔特征. 随着入射激光脉冲数  $N$  的继续增加, 烧蚀区域内双层环状结构的区别更加明显. 当脉冲数  $N = 20$  时, 中心区域内的烧蚀效果已变成孔洞结构, 且其边缘堆积有大量的热熔状残留物, 而外环区域依然保持原有的非热熔特征. 当脉冲数  $N = 5000$  时, 飞秒激光的烧蚀过程将变得更加剧烈, 此时将有大量的烧蚀物颗粒或粉尘散落并覆盖在几乎整个烧蚀区域. 当入射激光能量增加到  $E = 200$   $\mu\text{J}$  时, 烧蚀区域内双层环状结构随激光脉冲数的演化与上述情况类似, 且这种变化效果更为明显.

针对上述实验现象, 我们分析了聚焦激光束作用在硅片表面诱发的主要物理过程. Stoian 等<sup>[8]</sup>的研究结果表明, 对于半导体和介质材料, 当入射激光强度较弱时, 材料去除的主要物理机制为库仑爆炸. 这种由于静电场效应而导致的材料去除过程较弱, 烧蚀深度较浅, 且去除表面光滑. 而当入射激光强度较

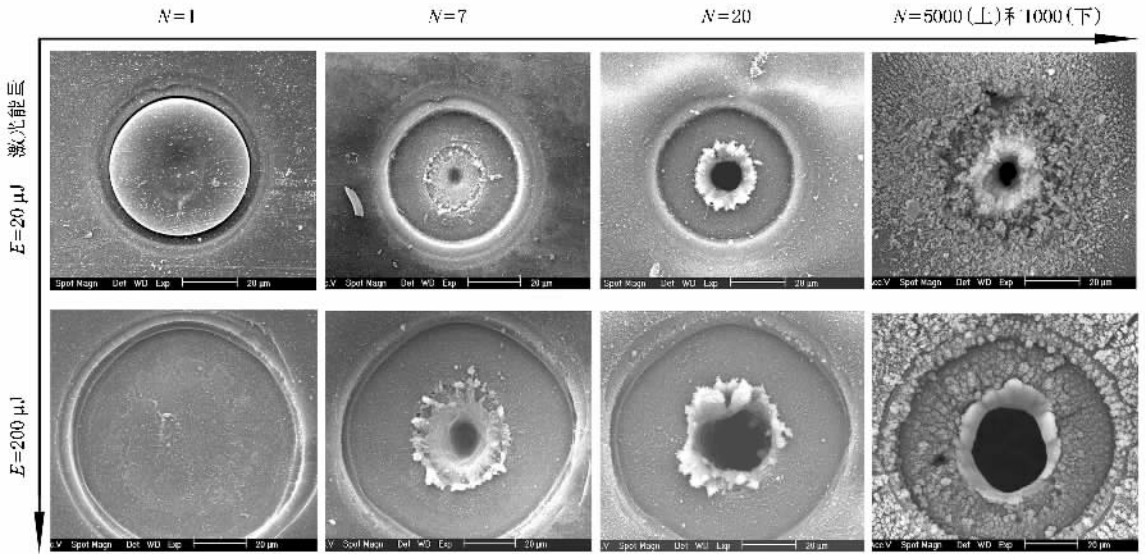


图 2 在空气环境中,近红外飞秒激光脉冲(50 fs, 800 nm)对单晶硅表面的烧蚀效果随脉冲数  $N$  的演化情况。上半部分表示入射激光能量为  $20 \mu\text{J}$  的情形,下半部分表示入射激光能量为  $200 \mu\text{J}$  的情形

高时,材料去除的主要物理过程将以热熔化为主导,这种剧烈的烧蚀过程无疑会增大材料的去除深度,冷却后的熔化物也将环绕并积聚在烧蚀区域的周围,从而使得烧蚀区域表面显得粗糙。在我们的实验中,由于入射激光脉冲的空间强度分布近似为高斯光束,从而导致激光中心和边缘部分对应的空间区域内产生两种不同的烧蚀效果,即中心高光强部分的烧蚀过程以热熔化为主,而边缘低光强部分的烧蚀过程则以库仑爆炸为主,如图 3 所示。前者具有较小烧蚀深度和光滑表面等一些非热去除特征,而后者则会具有明显的热熔化痕迹。这些烧蚀特征均与我们的实验观测结果符合。从而表明上述实验获得

的内、外环状烧蚀结构实际上是分别基于热熔化和库仑爆炸的物理过程。

为了深入分析其中不同物理过程对飞秒激光烧蚀效果的影响,我们实验测量了不同入射激光能量导致的烧蚀区域内、外圆环半径随脉冲数  $N$  的变化关系。如图 4(a)所示,对于给定激光能量条件下,烧蚀区域的外环半径  $R$  将不随脉冲数  $N$  的增加而发生变化,而烧蚀区域的内环半径  $r$  则表现出以下两种不同的变化趋势:首先随着激光脉冲数的增加而迅速增大,当到达某一特定值时便保持相对的稳定。当入射激光脉冲数相同时,烧蚀区域的内、外环半径均将随着入射激光能量的增加而变大。从图 4(a)还可以看出,区分烧蚀区域内环半径  $r$  不同变化趋势的临界脉冲数  $N_c$  将随着入射激光能量  $E$  的增加而减小。例如:当  $E = 20 \mu\text{J}$  时,  $N_c = 7$ ,而当  $E = 200 \mu\text{J}$  时,  $N_c = 6$ 。由于激光强度空间分布的中心部分的烧蚀过程主要依赖于传统的热熔化方式,因此,在此位置处前一个脉冲导致的烧蚀效果将会直接影响到后续激光对材料的去除过程,即脉冲累积效应在热熔主导的激光烧蚀过程中表现较为明显,从而使得烧蚀区域内环半径  $r$  在初始阶段将随着脉冲数的逐步增多而变大。对于给定的入射激光能量,当脉冲数到达一定值时,烧蚀导致的热影响区将不再随激光脉冲数的增多而进一步扩展。另一方面,由于激光强度空间分布的边缘部分的光强对材料作用是基于库仑爆炸的轻度非热烧蚀,并伴随有光滑的去除表面,即脉冲累积效应在该烧蚀过程中的影响可以忽略,从

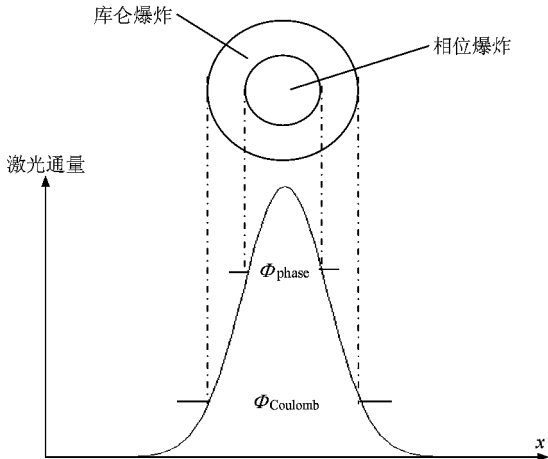


图 3 飞秒激光在空气环境中对单晶硅表面实现双层环状结构烧蚀的物理过程。其中  $\Phi_{\text{phase}}$  表示相位爆炸的能量阈值,  $\Phi_{\text{Coulomb}}$  表示库仑爆炸的能量阈值

而导致激光烧蚀区域的外环半径  $r$  将几乎不随脉冲数的增加而变化. 另外, 由于库仑爆炸具有一定的能量阈值, 高能量激光脉冲的作用意味着非热去除区域的范围将会进一步扩展. 换言之, 在以库仑爆炸为主导的非热作用过程中, 烧蚀区域的外环半径  $R$  将主要由入射激光能量  $E$  所决定, 而并非由激光脉冲数  $N$  所决定.

为了进一步证实上述结论, 我们将脉冲宽度  $\tau = 50$  fs, 脉冲数  $N = 3$  的激光照射到样品表面, 实验研究了在空气环境下不同入射激光能量对硅片表面烧蚀去除的影响, 其相应的烧蚀效果如图 5 所示. 当  $E = 5 \mu\text{J}$  时, 烧蚀区域的内、外环半径分别为  $r = 15.7 \mu\text{m}$  和  $R = 23.6 \mu\text{m}$ , 而当  $E = 100 \mu\text{J}$  时, 烧蚀区域的内、外环半径则分别增加为  $r = 18.1 \mu\text{m}$  和  $R = 39.4 \mu\text{m}$ . 图 4(b) 所示为给定脉冲数的情况下, 实验测得的烧蚀区域内、外环半径随激光能量的依赖关系. 从图 4(b) 可以看出, 随着入射激光能量的逐步增加, 烧蚀区域外环的半径  $R$  将迅速增大, 而内环半径  $r$  的变化则显得相对比较平缓, 且当到达某一特定值时便保持相对的稳定.

另外, 我们分析比较了在入射总光能量  $E_T$  恒定 ( $E_T = 400 \mu\text{J}$ ) 的情况下, 强、弱脉冲经过不同次数作用后对材料表面的去除效果. 如图 4(a) 所示, 单个脉冲能量  $E = 2 \mu\text{J}$  的激光经过 200 次作用后, 其烧蚀效果为一个半径约  $5 \mu\text{m}$  的孔洞结构, 并具有较大的烧蚀深度. 然而, 当单个脉冲能量增大到  $E = 20$  和  $200 \mu\text{J}$  时, 飞秒激光分别经历了 20 次和 2 次作用过程后, 相应的去除效果均表现为明显的双层环状结构, 且中心区域孔洞结构的半径逐步增大, 但相应的烧蚀深度则明显减弱, 如图 4(b) 和 (c) 所示. 该实验结果表明, 在飞秒激光对硅片的烧蚀过程中, 如果我们要想获得较高精度和较大深度的加工效果, 需要选择小能量激光脉冲的多次作用过程; 反之, 如果要想获得较大的烧蚀面积和较小的烧蚀深度, 则应选择大能量激光脉冲, 并减少其作用次数.

在实验中, 我们通过调整激光放大系统中压缩光栅对之间的距离, 测量和分析了空气环境下超短脉冲激光持续时间对硅片烧蚀加工的影响. 图 7 表示在入射激光能量  $E = 200 \mu\text{J}$  情况下脉冲宽度分别为  $\tau = 50$  fs,  $4$  ps 和  $22$  ps 的激光对硅片表面进行烧蚀后得到的 SEM 图像. 从图 7 可以看出, 随着激光脉冲宽度的增加, 烧蚀区域内不仅出现了多层的环状结构, 而且中心部分的热影响区也将增大, 样品表

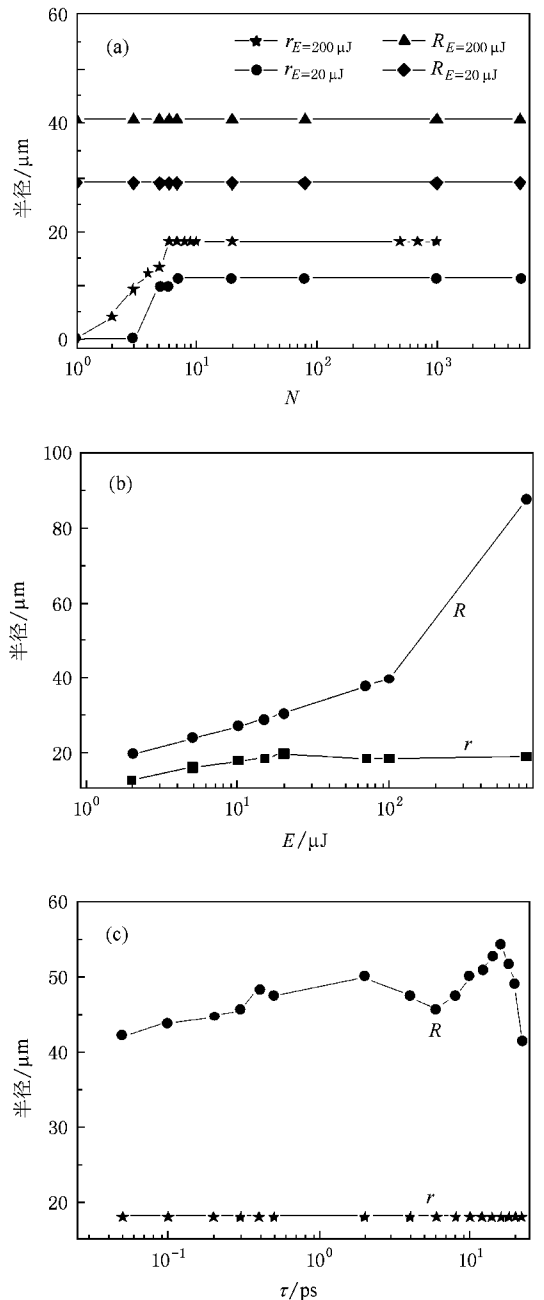


图 4 超短脉冲激光在空气环境中对硅片样品表面烧蚀造成的内、外环结构半径随激光脉冲参数的变化关系 (a) 不同脉冲能量照射时内、外环半径随脉冲数的变化关系 ( $\tau = 50$  fs), (b) 内、外环半径随入射激光能量的变化关系 ( $N = 3$ ,  $\tau = 50$  fs) (c) 内、外环半径随激光脉冲宽度的变化关系 ( $E = 200 \mu\text{J}$ ,  $N = 100$ )

面烧蚀残留物由原来的颗粒状逐步变成了熔融状. 这些现象在一定程度上说明激光烧蚀机理随脉冲宽度的变化发生了相应的转变. 随后, 我们又对不同脉冲宽度条件下激光烧蚀获得的内、外环结构尺寸进行了测量, 其相应的变化关系如图 4(c) 所示. 从图 4(c) 可以发现, 随着脉冲宽度的增加, 环形烧蚀

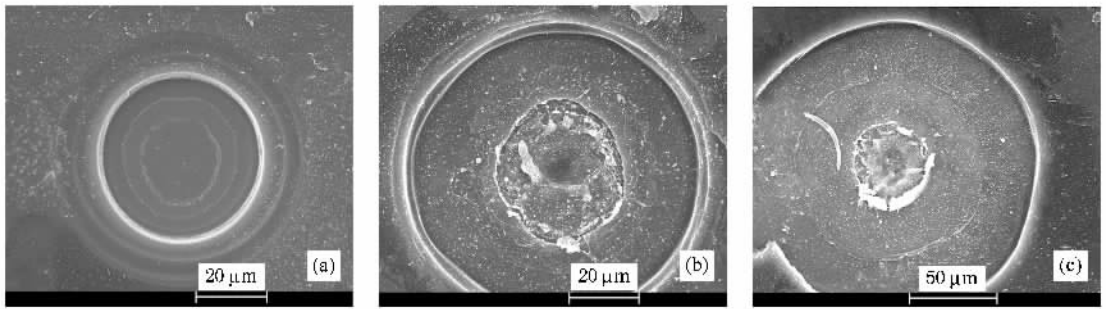


图 5 在空气环境下,不同能量的飞秒激光对硅片表面烧蚀效果的影响  $N = 3, \tau = 50 \text{ fs}$ . (a)  $E = 5 \mu\text{J}$  (b)  $E = 100 \mu\text{J}$  (c)  $E = 800 \mu\text{J}$

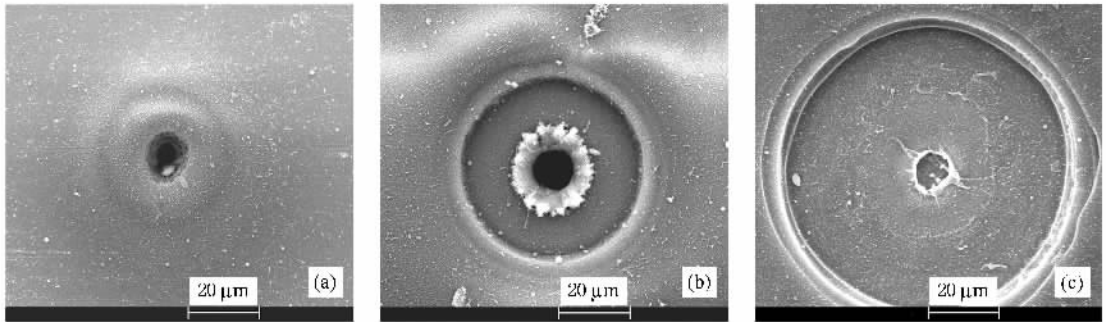


图 6 在空气环境下,当入射总能量恒定( $E_T = 400 \mu\text{J}$ )时强、弱飞秒激光对硅片表面进行不同次数作用后的烧蚀效果 (a)  $E = 2 \mu\text{J}$  和  $N = 200$  (b)  $E = 20 \mu\text{J}$  和  $N = 20$  (c)  $E = 200 \mu\text{J}$  和  $N = 2$

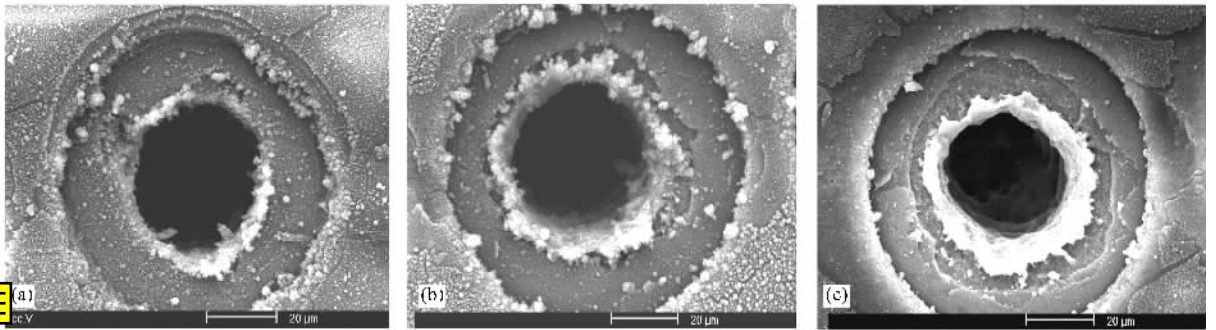


图 7 在空气环境下,当  $E = 200 \mu\text{J}, N = 100$  时不同的激光脉冲宽度对硅片表面烧蚀效果的影响 (a)  $\tau = 50 \text{ fs}$  (b)  $\tau = 4 \text{ ps}$  (c)  $\tau = 22 \text{ ps}$

结构的外径逐渐增大,当  $\tau = 16 \text{ ps}$  时,外径值达到最大,然后它将随着脉冲宽度的继续增加而迅速下降.而环形烧蚀结构的内径却随着脉冲宽度的变化基本保持不变.

### 3.2. 在水溶液环境中超短脉冲激光对硅片的烧蚀加工情况

在实验中,我们将单晶硅片样品放置在纯净水环境中,调节样品表面至物镜焦点下方  $0.4 \text{ mm}$  处,分析研究了超短脉冲激光能量和脉冲宽度对硅片表面烧蚀效果的影响,实验得到的 SEM 图像如图 8 所示.与空气环境中的情况相比较,对于给定脉冲宽度  $\tau = 500 \text{ fs}$  时,不同能量( $E = 50$  和  $100 \mu\text{J}$ )的飞秒激光在水溶液环境中对硅片表面的烧蚀效果具有明显的不同,其主要特点是烧蚀区域没有产生双层的圆

环状结构,而是呈现出经热熔-冷却-凝固形成的胶状态,其中杂乱分布着许多微小的孔状结构,此时的材料去除量也明显减弱.实验发现这种多孔状烧蚀现象在不同能量飞秒激光的水环境烧蚀过程中普遍存在.随后,我们在保持上述入射激光能量不变的条件下,将脉冲持续时间分别调整为  $2$  和  $4 \text{ ps}$ ,分析比较了水溶液环境中不同脉冲宽度对硅片烧蚀加工的影响.从图 8 所示的 SEM 图像中可以发现,在给定入射激光能量的情况下,随着脉冲宽度的增加,激光辐照区域的表面形貌将从原来的多孔凝胶状态逐步过渡为颗粒破碎去除态,其中的热熔现象逐步减弱,烧蚀去除量逐步增加.当脉冲宽度为  $\tau = 4 \text{ ps}$  时,激光辐照区域表现为不规则的层状剥落效果,材料去除量均显著增加.激光加工过程中的热熔化现象完

全消失,烧蚀区域的表面变得较为光滑,但其边缘部分具有明显的撕裂痕迹.实验发现,这种非热去除方式可以延续至脉冲宽度为 10 ps.若将入射激光能量增加至  $E = 100 \mu\text{J}$  甚至更大时,上述现象依然存在,

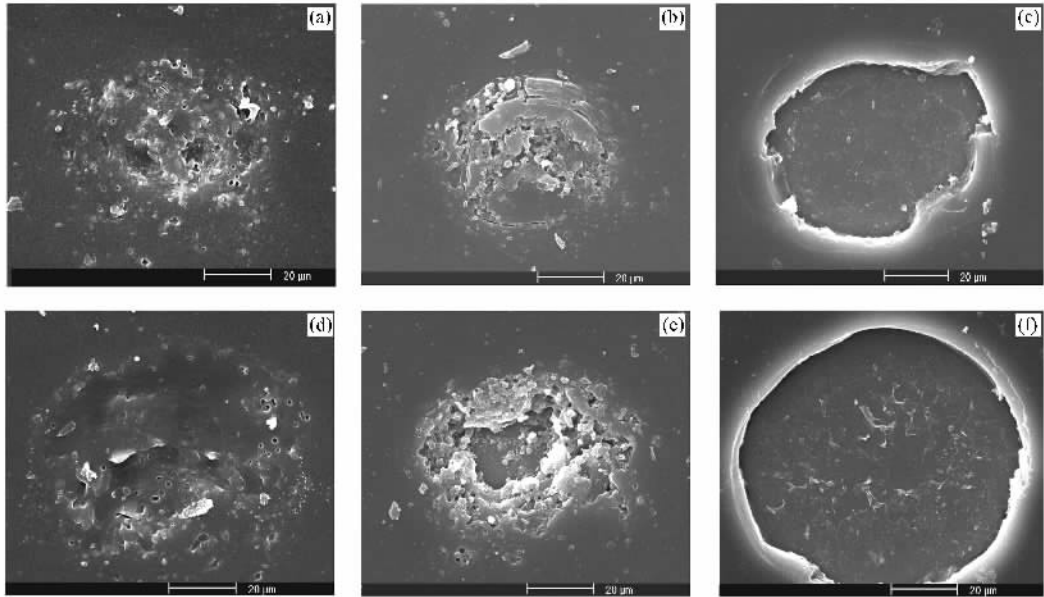


图 8 在水溶液环境下,不同激光能量和不同激光脉冲宽度对硅片烧蚀效果的影响 ( $N = 3$ ) (a)  $E = 50 \mu\text{J}$ ,  $\tau = 500 \text{ fs}$  (b)  $E = 50 \mu\text{J}$ ,  $\tau = 2 \text{ ps}$ , (c)  $E = 50 \mu\text{J}$ ,  $\tau = 4 \text{ ps}$  (d)  $E = 100 \mu\text{J}$ ,  $\tau = 500 \text{ fs}$  (e)  $E = 100 \mu\text{J}$ ,  $\tau = 2 \text{ ps}$  (f)  $E = 100 \mu\text{J}$ ,  $\tau = 4 \text{ ps}$

事实上,由于水的电离能(6.5 eV)比硅片电离能(8.15 eV)小,高强度的超短脉冲激光在到达样品之前就将水电离,并伴随有相应的高温、高压等离子体产生.初始以超声速膨胀的等离子体必将造成水溶液中的冲击波和空泡现象<sup>[9,10]</sup>.当入射激光脉冲宽度  $\tau < 4 \text{ ps}$  时,一方面,由于激光脉冲的空间分布尺寸远小于光束聚焦区域的瑞利长度,使得聚焦区域内激光脉冲的传输效应不可忽略,激光聚焦过程中的水溶液电离位置将不断地沿着光束方向前移.飞秒激光脉冲的这种移动电离方式将使得透过等离子体区域的光能降低,并且激光脉冲宽度越窄,光能穿透等离子体效率越低<sup>[11]</sup>.另一方面,飞秒激光的高峰值强度将使其在水溶液传输过程中不可避免地产生自聚焦、成丝和超连续谱等一些非线性现象,从而将导致抵达样品表面的光能进一步衰减.另外,随着入射激光脉冲宽度的变窄,其中产生的冲击波强度会明显减弱,空泡的尺寸也会逐步减小<sup>[12,13]</sup>.所有这些效应均将导致飞秒激光在水环境中对硅片样品的烧蚀深度减小.图 8 中 500 fs 激光烧蚀区域内出现的多孔状结构可以理解为由溶液中随机分布的空泡效应所致,其直径约在几百纳米的量级.

当入射激光的脉冲宽度  $\tau > 4 \text{ ps}$  时,激光脉冲的空间分布尺寸大于光束聚焦区域的瑞利长度<sup>[11]</sup>.此时激光聚焦区域内水溶液的电离仅与光束的时间

并且样品表面发生完全非热去除的脉冲宽度仍保持  $\tau = 4 \text{ ps}$ .在此,我们将其定义为区分飞秒激光在水溶液环境中‘热’与‘非热’两种不同加工状态的临界脉冲宽度.

分布状况有关,脉冲前沿产生的等离子体可通过不断吸收脉冲后沿的光能而使得其中的电子浓度和温度增加,从而导致相应的冲击波和空泡效应进一步加强.在此状态下,激光脉冲诱导产生的光机械效应将起主导作用<sup>[14]</sup>.入射激光的脉冲宽度越大,其中的光-机械转换效率就越高.当光-机械应力超过样品表面的束缚力时,一部分材料将会被去除,并呈现不规则的撕裂痕迹.正是超短脉冲激光在水溶液中存在上述两种不同的电离物理过程,才使得我们能够观察到如图 8 所示的激光烧蚀结果.显然,在纯净水溶液环境中,飞秒量级的超短脉冲激光对硅片表面的烧蚀并没有独特的优势.相反,若要获得较大的烧蚀深度和光滑的去除表面则应采用皮秒量级的激光脉冲.

## 4. 结 论

通过上述实验研究和理论分析,我们证实了实验环境和激光脉冲等参数对单晶硅的烧蚀去除过程具有重要的影响.在空气环境中,不同参数的超短脉冲激光均在单晶硅表面形成中心深且粗糙,边缘浅且光滑的双层环状结构.该实验现象可用较低激光能量诱发的库仑爆炸和较高能量导致的热熔化物理机制得到解释.实验还测量了这两种作用下烧蚀面积随入射

激光参数的变化关系.与空气中的烧蚀情况不同,不同能量的飞秒激光在水溶液环境中通常导致样品表面产生亚微米量级的“多孔状”烧蚀结构,而皮秒激光则较容易对硅表面造成不规则非热去除.实验测得区分这两种不同加工状态的临界脉冲宽度约为 4 ps.这主要是由于入射激光对水的电离作用使得其中光-机

械应力的转换效率随着脉冲宽度的增加而减弱.这些研究结果将有助于进一步深入理解超短脉冲激光对材料微细加工的物理过程.

非常感谢母国光教授和朱晓农教授对本项研究提供的技术支持与帮助.

- [ 1 ] Yang J , Zhao Y , Zhu X 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 094101
- [ 2 ] Deng Y P , Jia T Q , Leng Y X , Lu H H , Li R X , Xu Z Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2216 ( in Chinese ) [ 邓蕴沛、贾天卿、冷雨欣、陆海鹤、李儒新、徐至展 2004 物理学报 **53** 2216 ]
- [ 3 ] Yu B H , Dai N L , Wang Y , Li Y H , Ji L L , Zheng Q G , Lu P X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5821 ( in Chinese ) [ 余本海、戴能利、王 英、李玉华、季玲玲、郑启光、陆培祥 2007 物理学报 **56** 5821 ]
- [ 4 ] Herrmann R , Gerlach J , Campbell E 1998 *Appl. Phys. A* **66** 35
- [ 5 ] Bone J , Baudach S , Kruger J , Kautek W , Lenzner M 2002 *Appl. Phys. A* **74** 19
- [ 6 ] Ren J , Kelly M , Hesselink L 2005 *Opt. Lett.* **30** 1740
- [ 7 ] Besner S , Degorce J , Kabashin A , Meunier M 2005 *Appl. Surf. Sci.* **247** 163
- [ 8 ] Stoian R , Ashkenasi D , Rosenfeld A , Kelly R , Campbell E 2000 *Phys. Rev. B* **62** 13167
- [ 9 ] Vogel A , Noack J , Nahen , Theisen K , Busch S , Parlitz U , Hammer D , Noojin G , Rockwell B , Birngruber R 1999 *Appl. Phys. B* **68** 271
- [ 10 ] Lu J , Xu Q , Chen X , Shen Z , Ni X , Zhang S , Gao C 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 3890
- [ 11 ] Hammer D , Jansen E , Frenz M , Noojin G , Thomas R , Noack J , Vogel A , Rockwell B , Welch A 1997 *Appl. Opt.* **36** 5630
- [ 12 ] Noack J , Hammer D , Noojin G , Rockwell B , Vogel A 1998 *J. Appl. Phys.* **83** 7488
- [ 13 ] Vogel A , Linz N , Freidank S , Paltauf G 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 038102
- [ 14 ] Perez D , Lewis L 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 255504

## Femtosecond laser ablation of silicon wafers in air and water<sup>\*</sup>

Wang Rui<sup>1)</sup> Yang Jian-Jun<sup>1)†</sup> Liang Chun-Yong<sup>2)</sup> Wang Hong-Shui<sup>2)</sup> Han Wei<sup>1)</sup> Yang Yang<sup>1)</sup>

1) *Institute of Modern Optics , Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology of Ministry of Education , Nankai University , Tianjin 300071 , China )*

2) *School of Materials Science and Engineering , Hebei University of Technology , Tianjin 300130 , China )*

( Received 9 June 2008 ; revised manuscript received 10 December 2008 )

### Abstract

In this paper , we investigate laser ablation of silicon wafers in air and water through using Ti :sapphire femtosecond laser with central wavelength of 800 nm and pulse duration of 50 fs—24 ps at a repetition rate of 1 kHz. Unique concentric rings are observed on the sample surfaces during the laser ablation in ambient air. Formation mechanisms of the inner and outer ablative structures are attributed to the thermal melting and Coulomb explosion , respectively. The influence of laser parameters , such as the laser energy , the number of pulses and the pulse duration on the radius of the ablation ring is observed experimentally. It is found that drilling a blind hole with large aspect ratio usually requires multiple laser shots with relatively small pulse energy. In the water surroundings , femtosecond laser ablation results in porous microstructure formation in the irradiated area. However , laser pulses with picosecond duration lead to large material removal by evidently nonthermal processes. Theoretical analysis suggests that this phenomenon could be explained by the photo-mechanical stress and bubble cavitation , which are strengthened with increasing pulse duration. The critical pulse width separating the two different ablation processes in the water ambience is determined experimentally for the first time.

**Keywords :** femtosecond lasers , silicon wafer , laser micromachining

**PACC :** 4255R , 4262A , 4265

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 10874092 , 60637020 ) and the Doctoral Foundation of Ministry of Education , China ( Grant No. 20070055066 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail jjiyang@nankai.edu.cn