

激光与光电子学进展

皮秒激光扫描硅材料微孔自成形行为及机理研究

李鑫^{1,2}, 张彤^{1,2}, 季凌飞^{1,2*}, 张犁天^{1,2}¹北京工业大学材料与制造学部激光工程研究院, 北京 100124;²北京工业大学跨尺度激光成型制造技术教育部重点实验室, 北京 100124

摘要 采用脉宽为 10 ps、频率为 200 kHz、波长为 1064 nm 的皮秒激光在硅表面扫描会自成形微孔结构, 通过改变脉冲能量密度、扫描速度和扫描次数, 实验研究了微孔的演变规律。结果表明: 不同参数对微孔的影响可以归纳为脉冲能量密度和单位面积内有效脉冲数。随着脉冲能量密度的增加, 微孔逐渐向沟槽两侧移动, 由初始的随机排列演变成一维线性均匀排列; 随着单位面积内有效脉冲数的增加, 边缘两侧微孔数量由少变多, 尺寸由小变大, 最终消失。通过模拟温度场分析了不同温度下材料相变和表面张力的变化, 发现在表面张力的驱动下液相硅凝固形成凸起, 凸起导致激光能量不均匀沉积, 最终形成微孔。这表明微孔自成形的物理机理为激光诱导材料相变和马拉戈尼效应的共同作用。

关键词 激光光学; 皮秒激光扫描; 微孔结构; 硅; 自成形

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0114005

Study on Self-Forming Behavior and Mechanism of Silicon Microholes by Picosecond Laser Scanning

Li Xin^{1,2}, Zhang Tong^{1,2}, Ji Lingfei^{1,2*}, Zhang Litian^{1,2}¹Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;²Key Laboratory of Trans-Scale Laser Manufacturing Technology, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract Scanning silicon surface with a picosecond laser with pulse width of 10 ps, frequency of 200 kHz and wavelength of 1064 nm will self-form microhole structure. By changing pulse energy density, scanning speed and scanning times, the evolution law of microhole is studied experimentally. The results show that the influence of different parameters on microholes can be summarized as pulse energy density and effective pulse number per unit area. With the increase of pulse energy density, the microholes gradually move to both sides of the groove, from the initial random arrangement to the one-dimensional linear uniform arrangement. With the increase of effective pulse number per unit area, the number of microholes on both sides of the edge changes from less to more, and the size changes from small to large, and finally microholes disappear. By simulating the temperature field, the change of phase transition and surface tension of materials at different temperatures was analyzed. It was found that liquid silicon solidified under the drive of surface tension to form protrusions, which led to uneven deposition of laser energy and finally formed microholes. This indicates that the physical mechanism of microhole self-forming is the combined action of laser-induced material phase transformation and Marangoni effect.

Key words laser optics; picosecond laser scanning; microhole structure; silicon; self-formation

收稿日期: 2021-03-19; 修回日期: 2021-04-09; 录用日期: 2021-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(51975017)、北京市教委科技计划(KZ202110005012)、国家重点研发计划(2018YFB1107500)

通信作者: *ncltji@bjut.edu.cn

1 引言

超快激光作用于固体材料,如玻璃、陶瓷、金属、半导体等多种材料表面时,会产生不同形貌的表面微纳结构,目前已成为十分活跃的研究领域^[1-6]。不同于使用传统脉冲或连续激光光束扫描固体材料表面仅会形成凹型沟槽结构,当超快激光用扫描的方式辐照固体材料表面时,在扫描路径处将自成形一系列高度有序的微孔。Li等^[7]通过飞秒激光扫描硅基表面获得了微尺度光栅结构,在光栅底部出现了微孔。Hnatovsky等^[8]使用垂直于切割方向的线偏振飞秒激光对硅表面进行了划线扫描,观察到从均匀烧蚀至形成清晰纳米孔结构的演化过程。Kanaujia等^[9]使用飞秒激光线扫描硅材料产生周期性波纹和孔洞结构,分析了激光能量密度和脉冲数对微结构的影响。Zhao等^[10]使用皮秒激光扫描镍合金表面发现了“浅V”、“双V”和“深V”的沟槽结构,随扫描次数的增加在沟槽底部会出现排列清晰的微孔。Goodarzi等^[11]研究了飞秒扫描硅表面发现随着激光通量在聚焦区边缘的减小,边缘的微孔和凸起的直径也逐渐减小。本课题组^[12-14]采用皮秒激光结合化学腐蚀的双重调控工艺,制备出具有减反射疏水的微纳米双结构锥孔绒面(单晶硅)和多孔硅绒面(多晶硅),在特定的脉冲能量和光斑重叠率下,单晶硅表面上会出现均匀排列的微孔阵列。

关于微孔形成的机理在此前工作中已进行了讨论。Ma等^[15]使用飞秒激光逐行扫描硅表面,产生了纳米波纹、纳米凸起和纳米孔三种微结构,他们认为这些微结构是由于激光辐照硅衬底所产生的表面等离子体与激光耦合的结果。Ji和Zhang等^[16-17]认为超快激光扫描材料表面初始形成的沟槽结构影响了激光光场能量的再分布,初始结构对纳米孔阵列的产生起着至关重要的作用。Liu等^[18]则通过飞秒激光扫描铝表面发现熔化区径向温度梯度导致径向表面张力梯度,马兰戈尼效应对微孔的产生起主要作用。显然,微孔自成形是一个复杂的激光与物质相互作用的过程。目前为止,激光扫描微孔自成形的物理机制仍没有统一结论。

为进一步探究超快激光扫描自成形微孔的演变规律和物理机制,本文采用脉宽为 10 ps、波长为 1064 nm 的皮秒激光对扫描硅表面自成形微孔结构的行为进行研究,探索了激光能量密度、重复扫描

次数、扫描速度对硅表面微孔自成形的影响规律。并通过建立有限元模型来模拟温度场随时间变化的规律,从材料相变和温度梯度导致表面张力变化的角度解释了微孔自成形的物理机制。

2 实验材料及方法

选用厚度为 500 μm 的 p 型 (100) 单面抛光单晶硅片进行实验。实验前后分别将硅片浸没于纯水中使用频率为 65 kHz 的超声波清洗 5 min,然后用压缩空气将硅表面吹干,以去除表面杂质和碎屑。选用的激光器为德国 Edgewave 公司生产的皮秒激光器,脉宽为 10 ps,重复频率为 200 kHz,波长为 1064 nm,光源近似高斯型脉冲,光束质量因子 $M^2 \leq 1.3$ 。激光器出光后,经振镜聚焦到待加工材料的表面,辐照光斑直径为 40 μm 。实验中皮秒激光扫描方式为单行扫描,扫描方向始终为从左向右,如图 1 所示。

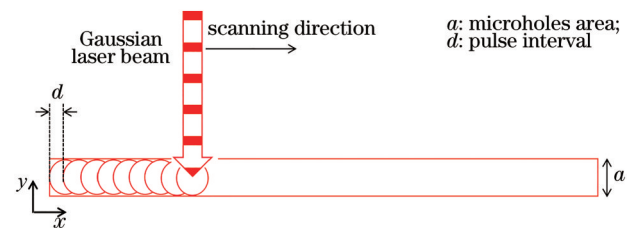


图 1 激光扫描路径示意图

Fig. 1 Laser scanning path diagram

使用控制变量法,研究探讨激光扫描工艺参数对微孔的影响规律。分别改变脉冲能量密度、扫描次数和扫描速度在硅表面进行扫描实验。使用 OLS3100 型激光扫描共聚焦显微镜 (LSCM) 和 S-3400N 型扫描电子显微镜 (SEM) 对硅片表面微孔的微观形貌进行观察。

能量密度 J 公式为

$$J = \frac{P}{\pi f \omega_0^2}, \quad (1)$$

式中: P 为激光功率; f 为重复频率; ω_0 为激光光斑半径。

3 实验与分析

3.1 激光脉冲能量密度对微孔的影响规律

在激光扫描速度为 1000 mm/s,重复扫描次数 30 次的条件下,微孔形貌随激光能量密度的演化规律如图 2 所示。当脉冲能量密度为 0.28 J/cm² 时,沿扫描路径区域开始出现大量不规则微孔结构;当

表 1 激光功率和能量密度对照表

Table 1 Comparison table of laser power and energy density

Power P / W	0.7	1.3	1.7	2.0	4.0	6.0	8.0	12.0	16.0
Energy density $J / (J \cdot cm^{-2})$	0.28	0.52	0.68	0.79	1.59	2.39	3.18	4.77	6.37

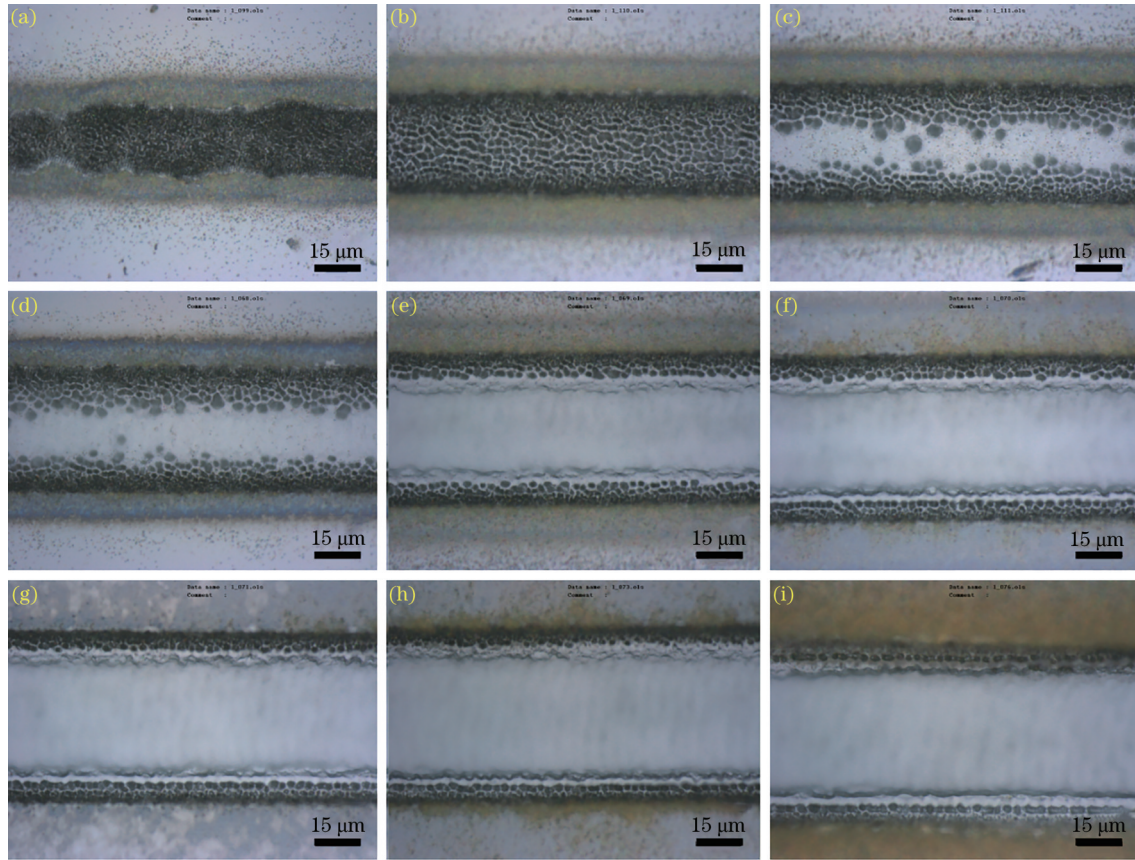


图 2 不同脉冲能量密度下微孔图像, 50 倍。(a) 0.28 J/cm²; (b) 0.52 J/cm²; (c) 0.68 J/cm²; (d) 0.79 J/cm²; (e) 1.59 J/cm²; (f) 2.39 J/cm²; (g) 3.18 J/cm²; (h) 4.77 J/cm²; (i) 6.37 J/cm²

Fig. 2 Microhole images of different pulse energy densities, $\times 50$. (a) 0.28 J/cm²; (b) 0.52 J/cm²; (c) 0.68 J/cm²; (d) 0.79 J/cm²; (e) 1.59 J/cm²; (f) 2.39 J/cm²; (g) 3.18 J/cm²; (h) 4.77 J/cm²; (i) 6.37 J/cm²

脉冲能量密度为 0.52 J/cm² 时, 沟槽中心微孔尺寸变大, 如图 2(a)、(b) 所示。随着脉冲能量密度的增加, 中心区域开始发生熔化。继续增加激光能量密度, 微孔结构逐步演变成底部平滑的沟槽, 微孔开始向沟槽边缘两侧移动, 如图 2(c)~(f) 所示。当脉冲能量密度达到 3.18 J/cm² 后, 微孔在沟槽的两侧形成一维线性分布, 此后微孔尺寸几乎不受激光脉冲能量的影响, 如图 2(g)~(i) 所示。

图 3(a)、(b) 和 (c)、(d) 分别为脉冲能量密度为 0.52 J/cm² 和 3.18 J/cm² 时的 SEM 和局部放大图像。由图 3(a)、(b) 可见, 脉冲能量较低时, 微孔和凸起位置随机、大小不一。由图 3(c)、(d) 可见, 当脉冲能量密度达到 3.18 J/cm² 时, 在扫描路径边缘两侧有一维线性排列的微孔, 平均微孔直径为

1061.75 nm, 呈准周期性。此外还存在沟槽边缘纳米级条纹和沟槽底部微米级条纹。

3.2 重复扫描次数对微孔的影响规律

固定激光扫描速度为 1000 mm/s, 脉冲能量密度 3.18 J/cm², 图 4 为不同扫描次数下微孔图像。当扫描 1 次时, 材料表面出现沟槽, 由于激光光束呈高斯分布, 沟槽呈“U”形, 如图 4(a) 所示。当扫描次数达到 5 次后, 沟槽边缘两侧逐渐出现微孔结构。初期微孔较小, 随着扫描次数的增加微孔尺寸逐渐变大, 数量越来越多, 如图 4(b)~(e) 所示。经过 30 次重复扫描后, 可以观察到高度有序的微孔, 微孔呈一维线性排列于沟槽两侧, 微孔尺寸约为 1 μm, 如图 4(f) 所示。当扫描次数继续增大到 60 次时, 微孔边缘开始出现熔化甚至塌陷, 如图 4(g)~(i) 所示。

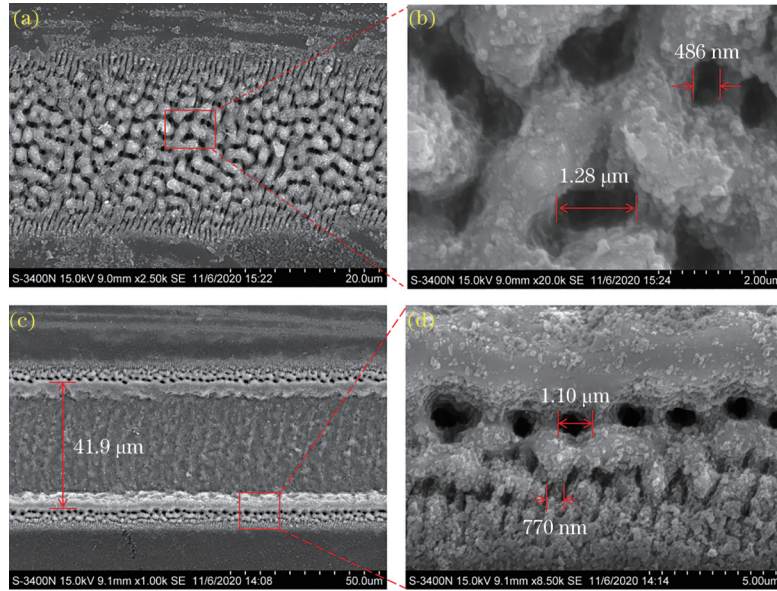


图 3 实验结果。(a)沟槽 SEM 图;(b)图(a)的局部放大图;(c)微孔 SEM 图;(d)图(c)的局部放大图

Fig. 3 Experimental results. (a) SEM of grooves; (b) a partial enlargement of Fig. (a); (c) SEM of microholes; (d) a partial enlargement of Fig. (c)

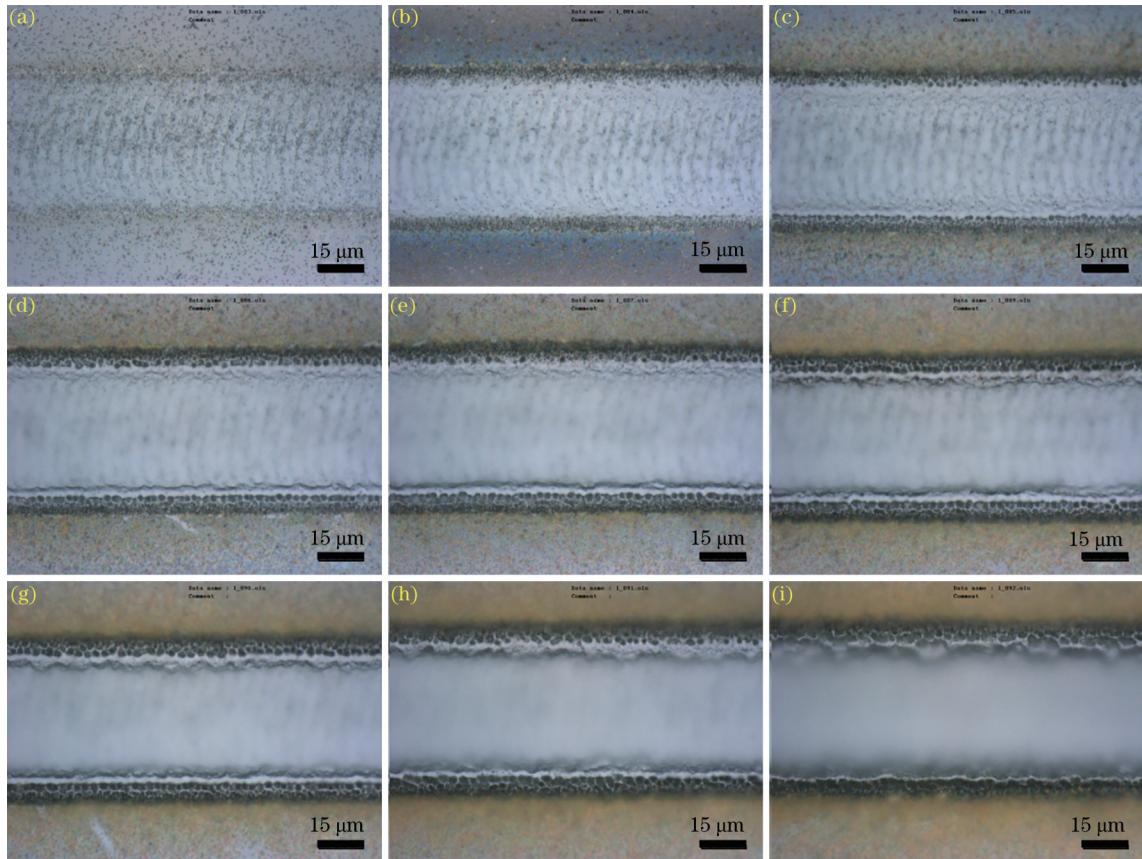


图 4 不同重复扫描次数下微孔图像,50倍。(a) 1次;(b) 5次;(c) 10次;(d) 15次;(e) 20次;(f) 30次;(g) 40次;(h) 50次;(i) 60次

Fig. 4 Microhole images of different repeat scan times, $\times 50$. (a) 1 time; (b) 5 times; (c) 10 times; (d) 15 times; (e) 20 times; (f) 30 times; (g) 40 times; (h) 50 times; (i) 60 times

3.3 扫描速度对微孔的影响规律

图 5 为激光脉冲能量密度 3.18 J/cm^2 , 重复扫描

次数 30 次时,微孔随扫描速度的演化规律。可以看出,当扫描速度为 1400 mm/s 时,沟槽边缘仅产生少

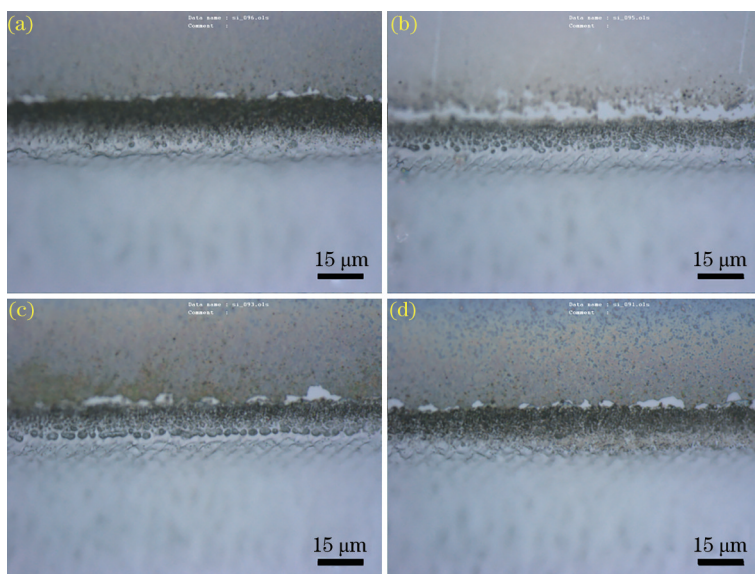


图 5 不同扫描速度下单侧微孔图像,100倍。(a) 1400 mm/s;(b) 1200 mm/s;(c) 1000 mm/s;(d) 800 mm/s

Fig. 5 Unilateral microhole images at different scanning speeds, $\times 100$. (a) 1400 mm/s; (b) 1200 mm/s; (c) 1000 mm/s; (d) 800 mm/s

量微孔,如图 5(a)所示。当扫描速度为 1200 mm/s 时,微孔逐渐增多,如图 5(b)所示。当扫描速度为 1000 mm/s 时,微孔排列比较清晰完整,如图 5(c)所示。当扫描速度为 800 mm/s 时,微孔消失,如图 5(d)所示。显然,扫描速度降低导致微孔从零星产生到逐渐增多,最终消失。

3.4 微孔自成形行为机理分析

为了分析不同温度下硅材料相变的过程,采用 COMSOL Multiphysics 建立皮秒脉冲激光扫描硅的三维对称温度场模型。材料各部分均匀传热,建模过程为理想状态。模型尺寸为 $0.2 \text{ mm} \times 0.15 \text{ mm} \times 0.07 \text{ mm}$ 。对模型进行自由四面体网格划分,最小网格单元尺寸为光斑直径的 $1/5$,环境温度为 $24 \text{ }^\circ\text{C}$ 。采用移动高斯分布激光作为热源加载到材料表面,单个脉冲功率密度分布函数为^[19]

$$P(x, y, t) = \frac{2P}{\pi\omega_0^2} \exp\left(-2\frac{x^2+y^2}{\omega_0^2}\right) \frac{t}{\tau^2} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (2)$$

式中: t 为热源加载时间; τ 为激光脉冲宽度。

本实验热传导的过程遵循基于傅里叶定律和能量守恒的热传导方程为^[19]

$$\kappa \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (3)$$

式中: κ 为材料热传导系数; T_s 为材料的瞬时温度; ρ 和 c 分别为材料的密度和比热容。

对扫描速度为 1000 mm/s,单次扫描下硅表面的温度场进行了模拟,温度场模拟结果显示硅表面最高

温度与脉冲能量密度成正比例关系,如图 6 所示。

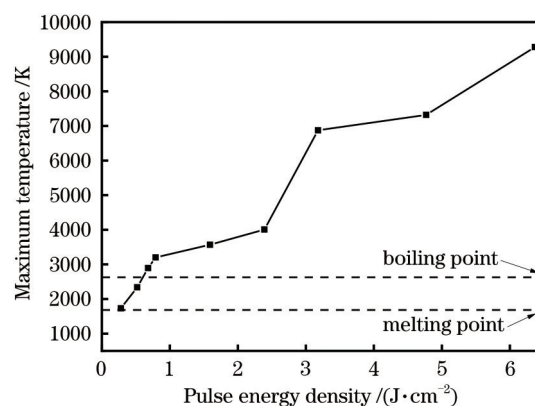


图 6 不同脉冲能量密度下表面最高温度曲线图

Fig. 6 Surface maximum temperature curves of different pulse energy densities

激光的高斯分布导致温度场分布服从中间高四周低的规律。随着脉冲能量密度的增加,仿真结果显示材料表面最大温度不断升高,如图 2 所示微孔出现从随机分布大小不一,然后向沟槽两侧移动,最后在沟槽两侧一维线性分布的规律。当脉冲能量密度为 0.28 J/cm^2 时,仿真结果显示材料表面最高温度 $T=1704 \text{ K}$,在熔点和沸点之间 ($1683 \text{ K} \leq T < 2628 \text{ K}$),材料熔化并出现液相,图 7 为一个脉冲周期内的温度场仿真图。材料从沟槽中心首先达到熔点 (1683 K),发生熔化,在图 3(b)中微孔处观察到许多圆形结构,这种圆形结构被认为是熔融再凝固的标志,这验证了仿真的正确性。激光脉冲结束后,由于没有持续热源的提供,且热量向四周扩

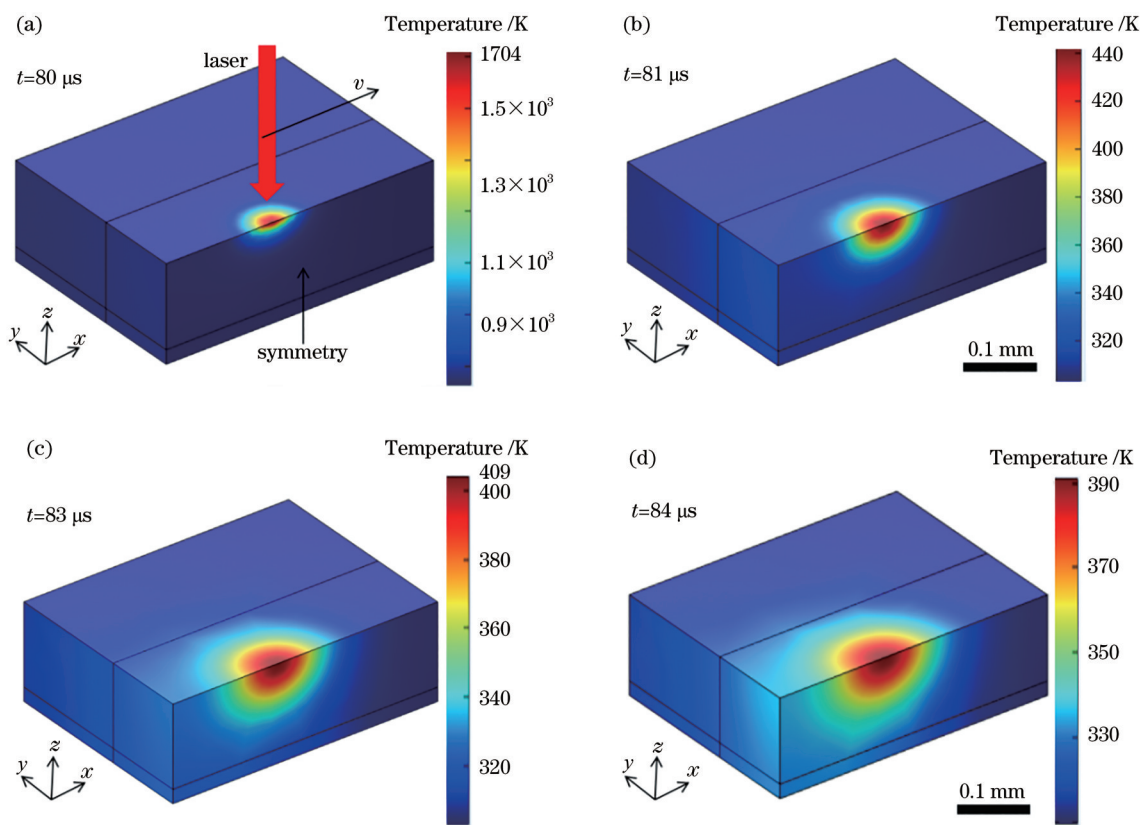


图 7 一个脉冲周期内温度场仿真图。(a) 80 μs ; (b) 81 μs ; (c) 83 μs ; (d) 84 μs

Fig. 7 Simulation of temperature field in a pulse cycle. (a) 80 μs ; (b) 81 μs ; (c) 83 μs ; (d) 84 μs

散损耗,因此表面温度会迅速下降。不均匀的温度梯度会引起马兰戈尼效应,材料在表面张力的驱动下从高温区流向低温区。当前除表面张力外还存在三种力分别是反冲压力、重力和浮力^[20],但由于液相区较薄且脉冲能量密度较低,它们对表面形貌的影响较小。此时液相材料不能充分流动,材料不稳定。在随后的冷却凝固的过程中,材料四周首先发生凝固,固液界面逐渐向中心推动。由于液态单晶硅的密度($\rho_1=2.52\text{ g/cm}^3$)大于固态单晶硅的密度($\rho_2=2.32\text{ g/cm}^3$)^[21],在凝固过程中,材料表面随机聚集形成初始的凸起结构,使表面变得粗糙。这种随机的凸起结构作为一种陷光结构,会使更多的激光能量在这里累积,导致后续的激光能量不均匀沉积,最终形成如图 3(a)所示的随机分布大小不一的微孔。当脉冲能量密度为 0.68 J/cm^2 时,仿真结果显示材料表面最高温度 $T=2895\text{ K}$,达到沸点 ($2628\text{ K}\leq T<3186\text{ K}$),光斑中心辐照区域的温度最先超过沸点(硅的沸点 2628 K),材料发生汽化蒸发。诱导的几倍于环境压力的反冲压力使表面材料以气体和液滴的形式向四周喷发,沟槽中心区域微孔开始被“擦除”,微孔向沟槽两侧移动,最终形

成如图 3(c)所示的一维线性分布微孔。当脉冲能量密度大于 0.79 J/cm^2 时,仿真结果显示材料表面最高温度 $T=5922\text{ K}$,大于 3186 K ($T\geq 0.9T_c$,热力学临界温度 $T_c=3540\text{ K}$)^[22],自发成核率随温度升高呈指数增长,材料发生剧烈的相爆炸,气体和液滴剧烈向四周喷发,沟槽变深。微孔的演变过程经历了随机凸起、随机微孔和沟槽两侧排列微孔三个过程,为方便理解,微孔形成的过程如图 8 所示。

通过改变扫描次数和扫描速度来调控微孔,本质上是改变了单位面积内有效脉冲数 N_e 为

$$N_e = n \frac{2\omega_0 f}{v}, \quad (4)$$

式中: ω_0 为光斑半径; v 为扫描速度; n 为扫描次数。

图 9 为沟槽边缘处不同有效脉冲数与最大温度之间的变化曲线,两者成正比,在沟槽边缘处不同温度下材料将发生不同程度相变。随着有效脉冲数的增加,仿真结果显示沟槽边缘最大温度逐渐升高,如图 4 和图 5 所示微孔出现从无到有,数量逐渐增多,然后均匀排列,最终消失的规律。当有效脉冲数为 8 时,仿真结果显示沟槽边缘温度为 662 K ,未达到熔点 (1683 K),未发生熔化,如 4(a) 所示无

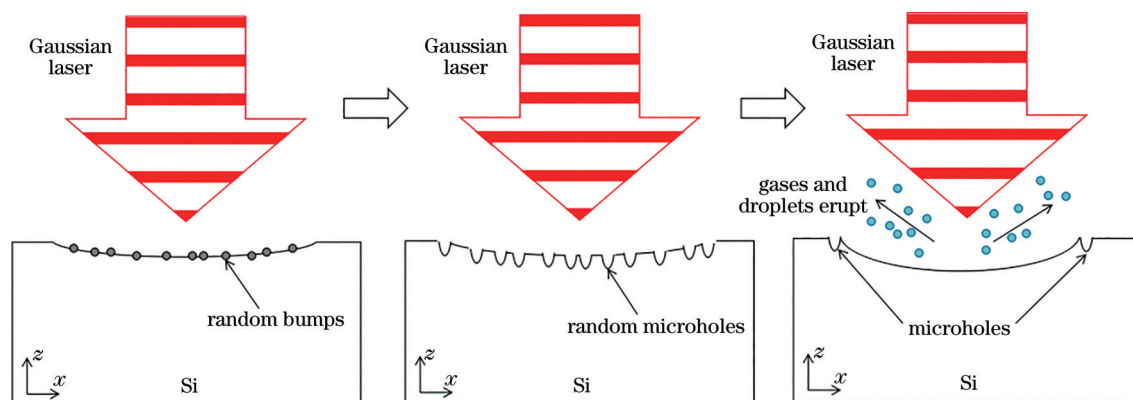


图 8 微孔演化过程原理图

Fig. 8 Schematic of microhole evolution process

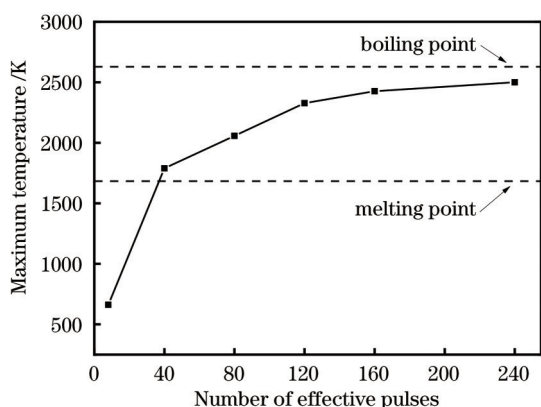


图 9 沟槽边缘处最大温度与单位面积内有效脉冲数关系曲线

Fig. 9 Relationship between maximum temperature at edge of groove and number of effective pulses per unit area

微孔。当有效脉冲数为 40 时,仿真结果显示沟槽边缘温度为 1789 K,达到熔点,沟槽边缘两侧温度升高主要来源于热传导,边缘处激光能量较低,随着能量不断累积,边缘温度也逐渐升高。液相硅凝固形成凸起,凸起导致激光能量不均匀沉积,最终形成如图 4(b)所示初始微孔。沟槽中心由于激光能量集中,温度较高,如图 4 所示此处微孔首先被“擦除”。当有效脉冲数为 240 时,仿真结果显示沟槽边缘温度为 2500 K,初始形成的微孔作为种子源,由于孵化效应导致微孔逐渐增多,尺寸逐渐变大,如图 4(f)所示最终微孔均匀排列在沟槽两侧。随着脉冲数的继续增多,当沟槽边缘温度超过硅的沸点时,材料发生汽化蒸发,如图 5(d)所示此时微孔逐渐消失。

4 结 论

本文采用波长为 1064 nm,脉宽为 10 ps 的皮秒

激光在硅表面扫描自成形微孔结构,得到了激光参数对微孔的影响规律。当脉冲能量密度为 3.18 J/cm^2 ,单位面积有效脉冲数为 240 时,可以在激光扫描的沟槽两侧边缘产生排列均匀的微孔。结合有限元分析软件建立了皮秒激光扫描硅表面的温度场模型,阐明了微孔自成形的机理,获得以下结论:随着激光能量的累积,材料表面温度分布不均匀,材料产生不同程度的相变和由表面张力差异导致的马兰戈尼效应是影响微孔的根本因素。扫描的方式可以实现微孔的大面积制备,将用于制备功能性材料,但表面温度超过沸点时微孔会消失,微孔的利用与消除取决于具体需求。本文对皮秒激光扫描微孔自成形行为和机理进行了研究,该研究对进一步理解超快激光扫描微孔自成形的过程有借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] Zhao B, Zheng X, Zou T T, et al. Control of subwavelength periodic surface structure formation with femtosecond laser pulses[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 111404.
赵波, 郑昕, 邹婷婷, 等. 表面亚波长周期结构的飞秒激光调控制备[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(11): 111404.
- [2] Xie Z W, Dong S Y, Yan S X, et al. Morphological adjustment of 304 stainless steel by picosecond laser micro-nano fabrication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 031402.
谢志伟, 董世运, 闫世兴, 等. 皮秒激光微纳加工 304 不锈钢形貌调控[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 031402.
- [3] Lei Y H, Yang J J, Cong C, et al. Fabrication of homogenous subwavelength grating structures on metallic glass using double-pulsed femtosecond lasers

- [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106273.
- [4] Jiang G C, Pan R, Chen C H, et al. Ultrafast laser fabricated drag reduction micro-nano structures and their corrosion resistance[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(8): 0802005.
江国琛, 潘瑞, 陈昶昊, 等. 超快激光制备水面减阻微纳结构及其耐腐蚀性研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(8): 0802005.
- [5] Bai X, Chen F. Recent advances in femtosecond laser-induced superhydrophobic surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0114003.
白雪, 陈烽. 飞秒激光制备超疏水表面的研究进展[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0114003.
- [6] Bian Y C, Wang Y L, Xiao Y, et al. Controllable micro/nano structure surface fabricated by femtosecond laser and its applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 111406.
边玉成, 王宇龙, 肖轶, 等. 飞秒激光制备可控微纳结构表面及应用研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(11): 111406.
- [7] Li B J, Zhou M, Zhang W, et al. Comparison of structures and hydrophobicity of femtosecond and nanosecond laser-etched surfaces on silicon[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 263: 45-49.
- [8] Hnatovsky C, Shvedov V G, Krolikowski W. The role of light-induced nanostructures in femtosecond laser micromachining with vector and scalar pulses[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12651-12656.
- [9] Kanaujia P K, Bulbul A, Parmar V, et al. Ultrafast laser based hybrid methodology of silicon microstructure fabrication for optoelectronic applications[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 420: 63-69.
- [10] Zhao W Q, Wang L Z, Yu Z S, et al. A processing technology of grooves by picosecond ultrashort pulse laser in Ni alloy: enhancing efficiency and quality[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 111: 214-221.
- [11] Goodarzi R, Hajiesmaeilbaigi F, Bostandoost E. Self-organized fractal-like structures formation on the silicon wafer surface using the femtosecond laser pulses[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 128: 106008.
- [12] Lü X Z, Ji L F, Wu Y, et al. Fabrication of high performance anti-reflection silicon surface by picosecond laser scanning irradiation with chemical corrosion[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(4): 0403006.
吕晓占, 季凌飞, 吴燕, 等. 皮秒激光-化学复合法制备高效减反射晶硅表面微结构研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0403006.
- [13] Lv X, Ji L F, Wu Y, et al. Porous silicon with double band photoluminescence fabricated by chemical-assisted picosecond laser irradiation[J]. *Journal of Laser Applications*, 2016, 28(2): 022002.
- [14] Ji L F, Lv X, Wu Y, et al. Hydrophobic light-trapping structures fabricated on silicon surfaces by picosecond laser texturing and chemical etching[J]. *Journal of Photonics for Energy*, 2015, 5(1): 053094.
- [15] Ma Y C, Si J H, Sun X H, et al. Progressive evolution of silicon surface microstructures via femtosecond laser irradiation in ambient air[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 313: 905-910.
- [16] Ji X, Jiang L, Li X W, et al. Femtosecond laser-induced cross-periodic structures on a crystalline silicon surface under low pulse number irradiation[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 326: 216-221.
- [17] Zhang C Y, Yao J W, Liu H Y, et al. Colorizing silicon surface with regular nanohole arrays induced by femtosecond laser pulses[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(6): 1106-1108.
- [18] Liu H G, Lin W X, Lin Z Y, et al. Self-organized periodic microholes array formation on aluminum surface via femtosecond laser ablation induced incubation effect[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(42): 1903576.
- [19] Gao L Y, Zhou J Z, Sun Q, et al. Numerical simulation and surface morphology of laser-cleaned aluminum alloy paint layer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0502002.
高辽远, 周建忠, 孙奇, 等. 激光清洗铝合金漆层的数值模拟与表面形貌[J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0502002.
- [20] Feng S C, Zhang R, Huang C Z, et al. An investigation of recast behavior in laser ablation of 4H-silicon carbide wafer[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2020, 105: 104701.
- [21] Wang X C, Zheng H Y, Tan C W, et al. Fabrication of silicon nanobump arrays by near-field enhanced laser irradiation[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(8): 084101.
- [22] Tsidis G D, Fotakis C, Stratakis E. From ripples to spikes: a hydrodynamical mechanism to interpret femtosecond laser-induced self-assembled structures[J]. *Physical Review B*, 2015, 92(4): 041405.