

## 双步激光辐射提升纳秒激光抛光单晶硅的表面

任英明<sup>1,2</sup>, 张志宇<sup>1\*</sup><sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 单晶硅是一种重要的半导体材料。通常,铸锭切片后的单晶硅表面易产生较深的沟槽、凹坑和裂纹等缺陷。针对这一问题,提出了一种双步激光辐射的方法,其在修复表面缺陷的同时,可以降低表面粗糙度。首先,通过有限元法模拟对不同激光参数下可修复的缺陷深度进行预测。然后,在  $0.50 \text{ J/cm}^2$  的较高能量密度下,利用较深的表面层熔化修复各种深度的表面缺陷。然而,由于高能量密度下引发的热毛细管流易造成高频特征残留在表面上,故会导致表面粗糙度增加。接着,使用一个  $0.20 \text{ J/cm}^2$  的低能量密度再次辐射同一表面,可有效消除残留的高频特征。最终,原始表面粗糙度为  $1.057 \mu\text{m}$  的表面经过双步激光辐射后可获得一个表面粗糙度为  $26 \text{ nm}$  的无缺陷光滑表面。

**关键词** 激光光学; 单晶硅表面缺陷; 纳秒激光辐射; 有限元模拟; 毛细管流动; 表面张力

中图分类号 TH162

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0714004

## Surface of Nanosecond Laser Polished Single-Crystal Silicon Improved by Two-Step Laser Irradiation

Ren Yingming<sup>1,2</sup>, Zhang Zhiyu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Single-crystal silicon is an important semiconductor material. Generally, the surface of single-crystal silicon after ingot slicing is prone to deep surface defects, such as grooves, pits, and cracks, etc. To solve this problem, a two-step laser irradiation method is proposed, which can repair surface defects and decrease surface roughness at the same time. First, the repairable defect depth is forecasted by finite element method (FEM) simulation under different laser parameters. Then, surface defects with various depths can be repaired by using the deeper surface layer melting at a higher energy density of  $0.50 \text{ J/cm}^2$ . However, the thermal capillary flow caused by high energy density can easily lead to the residual high-frequency features on the surface, which will lead to the increase of surface roughness. Subsequently, the residual high frequency features can be effectively eliminated by re-radiating the same surface with a low energy density of  $0.20 \text{ J/cm}^2$ . Finally, the surface with the original surface roughness of  $1.057 \mu\text{m}$  is irradiated by the two-step laser to obtain a defect-free smooth surface with a surface roughness of  $26 \text{ nm}$ .

**Key words** laser optics; single-crystal silicon surface defects; nanosecond laser irradiation; finite element simulation; capillary flow; surface tension

收稿日期: 2021-09-02; 修回日期: 2021-09-30; 录用日期: 2021-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(51775531,11803037)

通信作者: \*zhangzhiyu@ciomp.ac.cn

# 1 引言

高质量的单晶硅在半导体、微机械和光电子行业中有着广泛的应用<sup>[1-3]</sup>,通常通过铸锭切片、表面研磨和表面抛光等工艺生产硅晶片<sup>[4]</sup>,并且依靠这些加工工艺生产出纳米级表面粗糙度的超光滑表面在技术上是可行的。然而,工件与加工工具的直接接触将导致这些加工过程不可避免地引起非晶层、位错和微裂纹等亚表面损伤<sup>[5]</sup>。另外,在晶片边缘和凹口处,由于它们具有较大的曲率和尖角等特殊形状,故很难通过刀具直接接触进行加工<sup>[6]</sup>。因此,采用一种更加行之有效的加工方式是非常有必要的。

激光表面处理具有精度高、易于实现自动化和选择性辐射等诸多优点,可进行任何取向的选区熔化<sup>[7-8]</sup>。具有极高能量密度的激光几乎可以熔化甚至汽化任何材料,并且由于它非接触式的加工方式,故可做到有效避免亚表面损伤的产生。近年来,国内外研究人员将激光用于表面缺陷修复的研究逐渐出现。虽然国内进行激光修复单晶硅表面缺陷的研究甚少,但是 Wang 和 Liew<sup>[9]</sup>使用 CO<sub>2</sub> 激光辐射超声波加工后产生裂纹的玻璃表面,在 300 mm/min 的扫描速度和 5 W 的平均激光功率下获得了没有裂纹的光滑表面。为了修复研磨引起的亚表面损伤, Niitsu 等<sup>[10]</sup>使用纳秒脉冲 Nd:YAG 激光辐射金刚石研磨后的硼掺杂单晶硅晶片的边缘和凹口,最终将受损区域修复为具有纳米级表面粗糙度的单晶结构。此外,研磨、抛光不但会造成表面和亚表面损伤的产生,而且存在加工效率低和不易控制的缺

点。因此,将激光用于整个过程会极大地提高材料的表面质量。然而,铸锭切片后产生的缺陷深度有时会高达 5 μm 左右,虽然在利用较大的激光能量将其全部熔化后可修复所有深度的缺陷,但是此时会产生热毛细管流动,引起高频误差,从而使表面粗糙度增加。因此,协调激光能量以获得理想的表面质量依然具有极大的挑战性。

在本研究中,为了修复单晶硅切片时导致的表面缺陷并降低表面粗糙度,提出了一种双步激光辐射的方法。首先,通过建立热传导方程对不同激光能量密度下不同深度的温度进行模拟,以此获得修复不同深度缺陷的最佳能量密度。然后,在切片后的单晶硅表面进行不同能量的纳秒脉冲激光辐射,有限元模拟结果得到了有效验证。接着,研究了不同激光参数下材料的表面特性。最终,利用双步激光辐射工艺,获得了一种具有纳米级表面粗糙度的无缺陷单晶硅表面。

## 2 实验条件和仿真

### 2.1 实验条件

在实验中,铸锭切片后的单晶硅(100)被用作样品。图 1 显示了激光辐射前原始表面的三维表面形貌和横截面轮廓曲线。在铸锭切片后,单晶硅表面出现一些平行的沟槽、缺口和裂纹等缺陷。沿图 1(a)中的线 A 测量的表面轮廓曲线如图 1(b)所示,其中箭头代表测量方向。切片引起的表面缺陷深度范围为 1~4 μm。另外,通过激光扫描共聚焦显微镜(CLSM)测得的单晶硅的原始表面粗糙度为 1.057 μm。

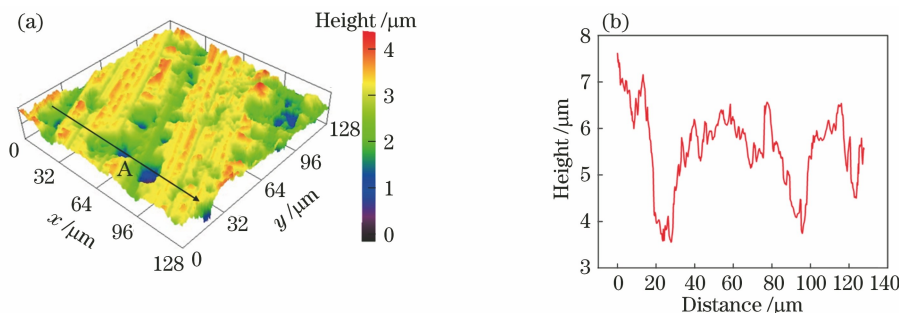


图 1 原始表面的三维表面形貌和横截面轮廓曲线。(a)原始表面的三维表面形貌;(b)图 1(a)中沿线 A 方向的横截面轮廓曲线

Fig. 1 Three-dimensional surface topography of original surface and cross-sectional profile curve; (a) Three-dimensional surface topography of original surface; (b) cross-sectional profile curve along line A direction in Fig. 1(a)

根据激光对材料的穿透能力<sup>[6]</sup>,采用波长为 532 nm 的 EP30-G8 纳秒脉冲激光器,它的输出功率可调范围为 0~20 W。所使用的聚焦透镜为焦距为 160 mm 的 f-θ 镜头,冷却方式为空冷。激光聚焦

光斑的直径为 80 μm,通过调节与焦点的偏移距离可改变激光在材料表面的光斑直径。在实验中,利用扫描振镜系统完成对表面区域的扫描辐射。实验过程中主要利用激光打标控制软件设定具体加工条

件,包括扫描间距、扫描速度和重复频率等。

表 1 总结了激光辐射条件。当激光辐射时,为保持一个较高的脉冲重叠率,将扫描速度设置为 50 mm/s,重复频率设置为 150 kHz。当光斑直径是 80 μm 时,为了使光束覆盖整个表面,使用 10~40 μm 的扫描间距进行扫描,相应的光束重叠率范围为 50%~87.5%。此外,为了获得不同的能量密度,使用 5~18 W 的平均激光功率。所有的激光辐射实验在室温(294~300 K)下进行。

表 1 激光辐射条件

Table 1 Laser irradiation conditions

Process parameter	Value
Wavelength /nm	532
Pulse width /ns	52
Spot diameter /μm	80
Repetition frequency /kHz	150
Laser average power /W	5~18
Scanning velocity / (mm · s <sup>-1</sup> )	50

## 2.2 激光辐射仿真

在激光修复中,只有当工件材料的熔化深度大于最深的沟槽和裂纹深度时才能使所有缺陷得到修复。为了建立激光能量密度与熔化深度之间的关系,使用 COMSOL Multiphysics 软件对激光引起的温度变化进行了有限元分析(FEM)。如图 2 所示,在激光辐射点周围建立三维坐标系,其中  $d$  为样品的直径, $h$  为样品的高度。在实验中,假设激光束沿  $y$  方向以速度  $v$  移动,激光辐射会导致单晶硅表面温度迅速升高。由于激光修复的机理主要是表面层的熔化,故大气中的热量散失和材料的蒸发可忽略不计。

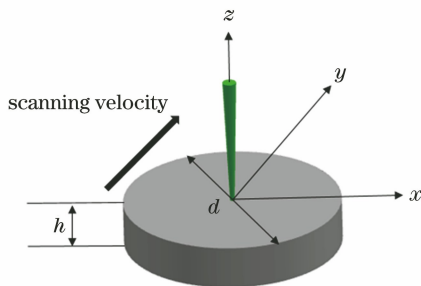


图 2 激光辐射模型中使用的坐标系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of coordinate system used in laser irradiation model

该问题的热传导方程可表示为

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q, \quad (1)$$

式中: $\rho$  是密度; $C_p$  是比热容; $T$  是温度; $t$  是激光辐

射时间; $k$  是热传导系数; $Q$  是热量,其表达式为

$$Q(x, y, z, t) = \alpha R \frac{P}{\pi r^2} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{r^2}\right] \exp(-\alpha z), \quad (2)$$

式中: $P$  是激光平均功率; $r$  是高斯激光在  $1/e^2$  处的半径,其中  $e$  是固定常数,其值约为 2.718; $R$  是能量吸收率; $\alpha$  是吸收系数,其表达式为

$$\alpha = \frac{4\pi i_k}{\lambda}, \quad (3)$$

式中: $i_k$  是折射率的虚部; $\lambda$  是激光波长。

由于单晶硅的激光辐射是一种传热过程,故材料在蒸发前会受到表面张力的驱动。然而,在一个高能量密度和短脉冲的激光辐射下,熔体流动引起的表面迁移可以忽略不计。因此,在模拟中忽略了因熔融体流动而产生的表面形态的改变。

硅的热导率和比热容都与温度有关,当激光辐射时,随着工件温度的升高,材料表面逐渐熔化。在这个过程中,不仅会产生相变潜热,材料的导热系数、比热容还会随着温度变化。单晶硅的热导率和比热容随温度的变化如图 3 所示。可以发现,随着温度的升高,材料的比热容在增加,导热系数在减小。当比热容升高时,单位时间内升高相同的温度将需要吸收更多的热量。另外,较高的表面温度会导致导热系数降低,这不但降低了热扩散率,而且限制了激光入射脉冲之间表面温度的降低。

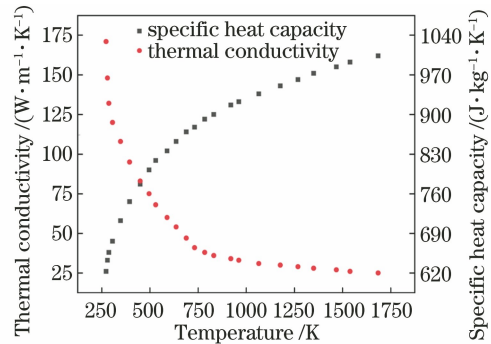


图 3 单晶硅的热导率和比热容随温度的变化

Fig. 3 Thermal conductivity and specific heat capacity of single-crystal silicon varying with temperature

图 4 给出了单个激光脉冲辐射时,长度为 1 mm,深度为 0.5 mm 的截面材料的温度变化。当激光脉冲辐射到材料表面时,表面温度迅速升高并逐步延伸到表面以下区域。在各种能量密度下,最高温度均处于表面光束中心位置,并且光束随着时间的增加向周围扩散,温度逐渐降低。此外,随着能量密度的增加,激光辐射后的热影响区域逐渐增大。

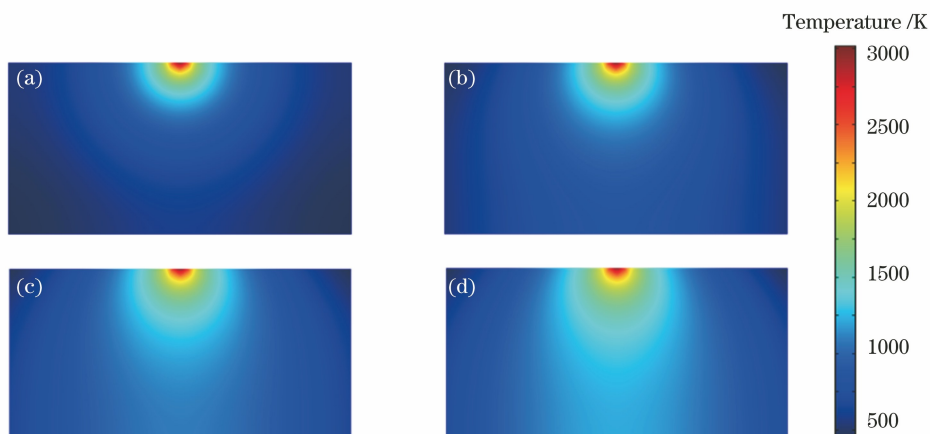


图 4 不同能量密度下单脉冲辐射时 FEM 仿真的温度分布。(a)  $0.27 \text{ J/cm}^2$ ; (b)  $0.42 \text{ J/cm}^2$ ; (c)  $0.50 \text{ J/cm}^2$ ; (d)  $0.58 \text{ J/cm}^2$

Fig. 4 Temperature distribution simulated by FEM during monopulse irradiation under different energy densities.

(a)  $0.27 \text{ J/cm}^2$ ; (b)  $0.42 \text{ J/cm}^2$ ; (c)  $0.50 \text{ J/cm}^2$ ; (d)  $0.58 \text{ J/cm}^2$

图 5 显示了在各种激光能量密度下,距离表面不同深度(0,1,2,3,4  $\mu\text{m}$ )的温度随时间的变化曲线。如图 5(a)所示,当能量密度是  $0.27 \text{ J/cm}^2$  时,辐射于材料表面的光束中心处的最高温度是 1625 K。由于单晶硅的熔点是 1686 K,故此时单晶硅表面不会出现熔化现象。当激光能量密度增加到  $0.42 \text{ J/cm}^2$  时,表面最高温度(2004 K)大于单晶硅的熔点,材料表面可以发生比较充分的熔化。然而,此时在 4  $\mu\text{m}$  深度处,温度降低至单晶硅熔点以下的 1626 K,这将导致表面缺陷不能被全部修复。因

此,将能量密度继续增加到  $0.50 \text{ J/cm}^2$  进行模拟,这时材料表面最高温度达到 2463 K,低于单晶硅的沸点(2627 K),并且在 4  $\mu\text{m}$  深度处的温度(2184 K)仍高于单晶硅的熔点。随后,当激光能量密度增加到  $0.58 \text{ J/cm}^2$  时,表面最高温度高达 2899 K,高于单晶硅的沸点。此时,材料表面部分材料将被蒸发,进而导致表面粗糙度增加。因此,根据仿真结果,使用  $0.50 \text{ J/cm}^2$  的激光能量密度将可以获得最好的修复效果。

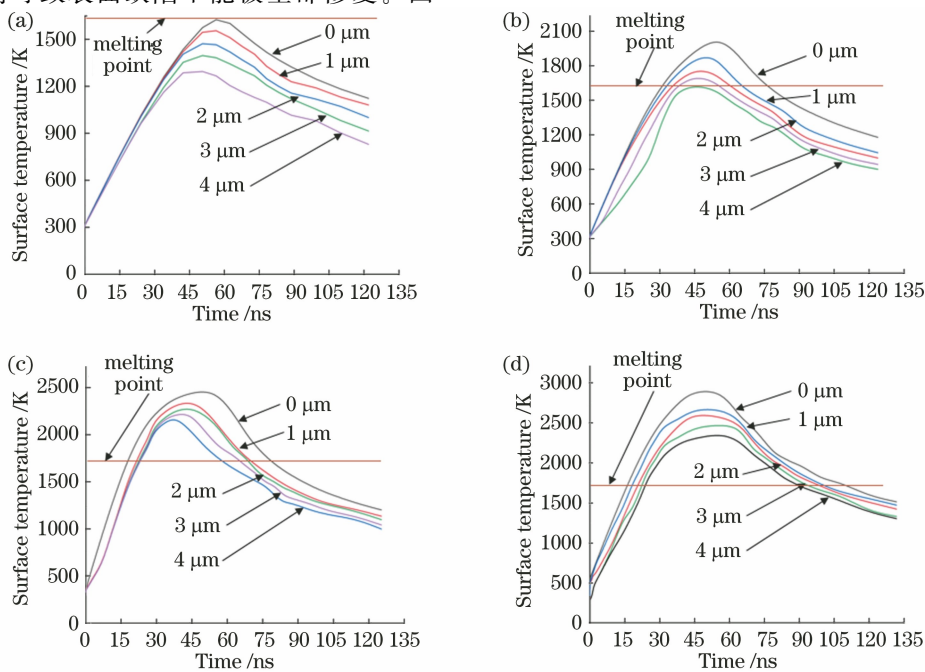


图 5 不同能量密度下距表面不同深度处的温度变化。(a)  $0.27 \text{ J/cm}^2$ ; (b)  $0.42 \text{ J/cm}^2$ ; (c)  $0.50 \text{ J/cm}^2$ ; (d)  $0.58 \text{ J/cm}^2$

Fig. 5 Temperature changes at different depths from surface under different energy densities.

(a)  $0.27 \text{ J/cm}^2$ ; (b)  $0.42 \text{ J/cm}^2$ ; (c)  $0.50 \text{ J/cm}^2$ ; (d)  $0.58 \text{ J/cm}^2$

### 3 结果与讨论

#### 3.1 激光能量密度的影响

为了验证仿真结果,首先对单晶硅表面进行不同能量密度下的单线激光辐射。图 6 给出了以不同激光能量密度辐射材料时的表面形貌。如图 6(b)所示,当以  $0.16 \text{ J/cm}^2$  的能量密度进行激光辐射时,因为激光引起的最高温度低于材料的熔点,所以材料表面几乎不产生熔化现象。当激光能量密度增加到  $0.27 \text{ J/cm}^2$  时,从图 6(c)中可以看出,表面只有少部分区域被熔化,并且熔化深度较浅,清晰可见未熔化的沟槽、凹坑等。当将激光能量密度进一步增加到  $0.42 \text{ J/cm}^2$  时,可以发现,这时大部分区域已经被熔化,但依然存在少量未熔化的部分,并且由于熔化深度不足以将深层次的裂纹缺陷完全修复,因此受热膨胀而张开的裂纹会出现在表面上<sup>[11]</sup>,如

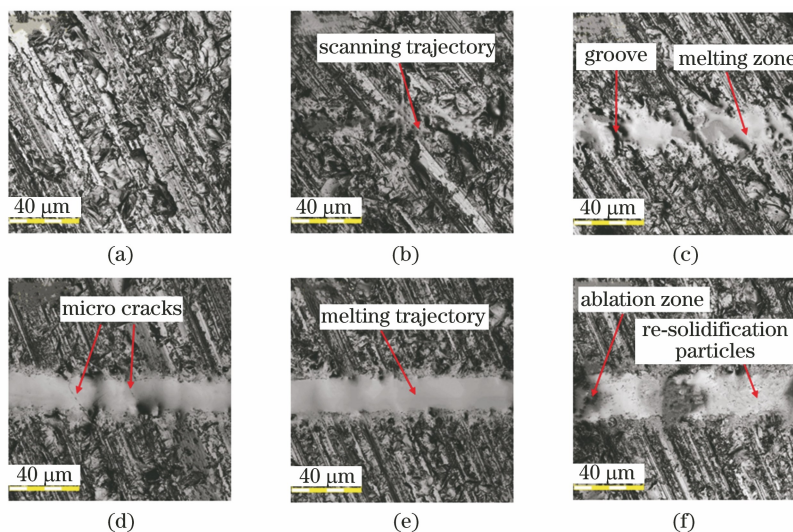


图 6 不同激光能量密度下单线扫描时单晶硅的二维表面形貌。(a)原始表面;(b)  $0.16 \text{ J/cm}^2$  ;  
(c)  $0.27 \text{ J/cm}^2$  ;(d)  $0.42 \text{ J/cm}^2$  ;(e)  $0.50 \text{ J/cm}^2$  ;(f)  $0.58 \text{ J/cm}^2$

Fig. 6 Two-dimensional surface topographies of single-crystal silicon during single-line scanning under different energy densities. (a) Original surface; (b)  $0.16 \text{ J/cm}^2$  ; (c)  $0.27 \text{ J/cm}^2$  ; (d)  $0.42 \text{ J/cm}^2$  ; (e)  $0.50 \text{ J/cm}^2$  ; (f)  $0.58 \text{ J/cm}^2$

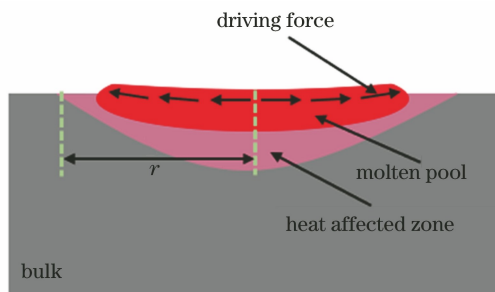


图 7 Marangoni 流动示意图

Fig. 7 Schematic diagram of Marangoni flow

图 6(d)所示。为了使更深的材料被熔化,继续将能量密度增加到  $0.50 \text{ J/cm}^2$ ,从图 6(e)中可以看出,光束扫描过的区域会产生一条均匀的熔化轨迹,表面没有微裂纹产生,表明各种深度的缺陷已被全部修复。此时,熔池内的流动以 Marangoni 对流为主并随能量密度的增加而逐渐增强,表面张力梯度大于液体的黏性力。熔池中心具有最高的温度,表面张力最高的区域位于熔池的边缘,驱动力指向外边缘,如图 7 所示。这种沿着熔池表面的流动导致材料在重新凝固时易产生一些高低起伏的高频特征,从而使表面粗糙度增加。最后,当激光能量密度为  $0.58 \text{ J/cm}^2$  时,由于表面最高温度大于单晶硅的沸点,故激光辐射的区域有少量的材料被蒸发后重新固化于表面上,并且表面出现部分的烧蚀现象,表明此时激光能量大于单晶硅的烧蚀阈值,如图 6(f)所示。

#### 3.2 光束重叠率的影响

从图 6 中可以看到,当激光能量密度为  $0.50 \text{ J/cm}^2$  时可以获得较好的修复效果。为了实现更大区域的激光修复,使用不同的光束重叠率进行实验。从图 8(a)中可以看出,当光束重叠率是 50.0%时,由于激光束高斯能量分布,因此光束边缘处的材料并未被熔化。此时的表面较粗糙,表面粗糙度为  $496 \text{ nm}$ ,如图 9 所示。因此,为了使整个表面发生熔化,需要提高光束重叠率。当光束重叠率提高到 62.5%时,材料表面大部分区域被熔化,表面粗糙度也有所降低,但在光束边缘处依然存在一

些残留的凹坑、缩孔和麻点等,如图 8(b)所示。进一步增加光束重叠率到 75.0%,如图 8(c)所示。可以发现,整个表面均被熔化轨迹覆盖,此时的表面粗糙度被降低至 98 nm。然而,由于熔融材料会从低表面张力向高表面张力区域流动,故激光辐射后重新固化的表面存在一些波纹状的高频特征,这会增加表面粗糙度。最终,将光束重叠率增加到

87.5%,如图 8(d)所示。可以看出,在较高的光束重叠率下,能量的累积效应会导致部分材料被烧蚀,并且出现一些蒸发后的材料重新凝固附着在表面上。此外,从图 9 中可以清晰地看到,热毛细管流动的增加会导致表面起伏更加严重,进而使得表面粗糙度提高至 352 nm。

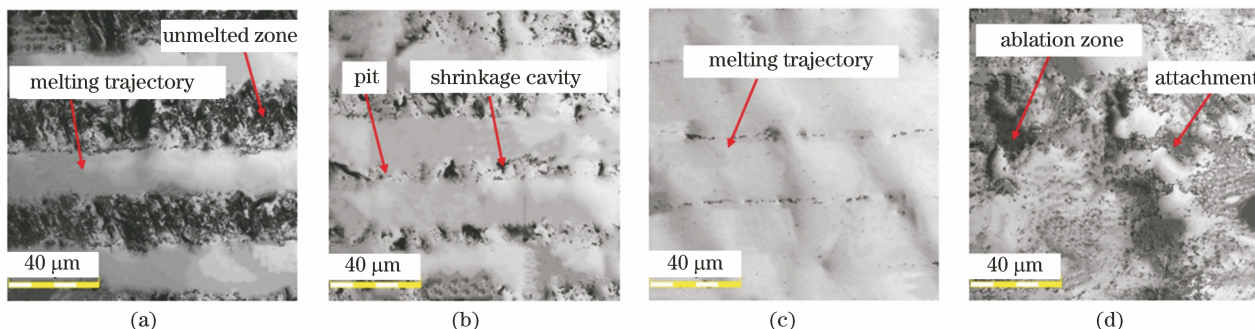


图 8 当激光能量密度为  $0.50 \text{ J/cm}^2$  时不同光束重叠率下单晶硅的二维表面形貌。

(a) 50.0%; (b) 62.5%; (c) 75.0%; (d) 87.5%

Fig. 8 Two-dimensional surface topographies of single-crystal silicon under different beam overlap ratios when laser energy density is  $0.50 \text{ J/cm}^2$ . (a) 50.0%; (b) 62.5%; (c) 75.0%; (d) 87.5%

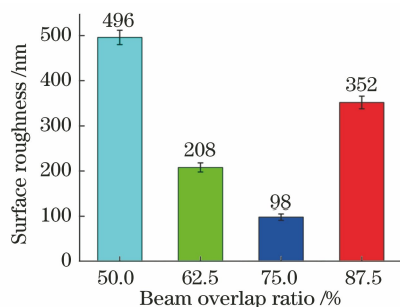


图 9 当激光能量密度为  $0.50 \text{ J/cm}^2$  时不同光束重叠率下被辐射的单晶硅的表面粗糙度

Fig. 9 Surface roughness of irradiated single-crystal silicon under different beam overlap ratios when laser energy density is  $0.50 \text{ J/cm}^2$

### 3.3 第二步激光辐射

为了去除第一步激光辐射引起的高频误差,降低表面粗糙度,使用较低的激光能量密度对同一区域进行辐射。图 10 给出了在图 8(c)的基础上,不同激光能量辐射下的二维表面形貌。如图 10(a)所示,当激光能量密度为  $0.12 \text{ J/cm}^2$  时,材料表面熔化量较小,残留在表面上的高频特征没有得到有效改善,并且从图 11 中可以看出此时的表面粗糙度仍然高达 85 nm。当继续将激光能量密度增加到  $0.20 \text{ J/cm}^2$  时,从图 10(b)中可以看出,原有的高低起伏的表面经激光再次熔化后在表面张力和毛细管效应的作用下得到有效平滑,高频特征被改善,表面粗糙度降低到 26 nm。此时,材料表面熔池较小,热

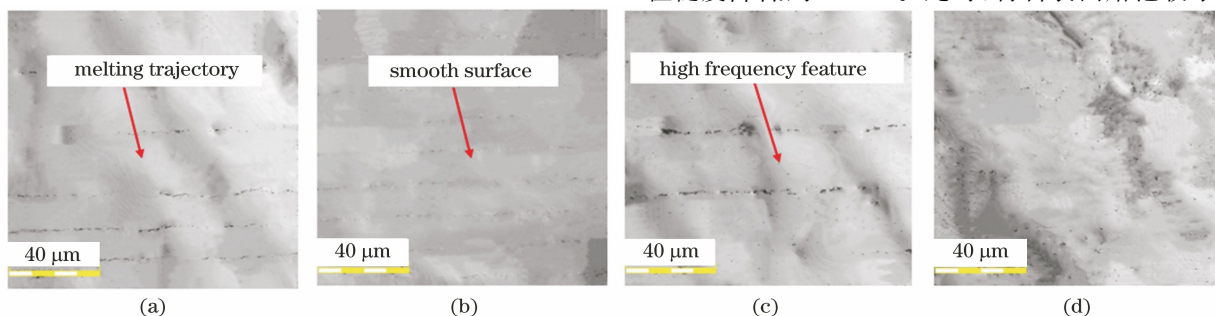


图 10 当光束重叠率是 75.0% 时,不同激光能量密度下第二次辐射后的二维表面形貌。

(a)  $0.12 \text{ J/cm}^2$ ; (b)  $0.20 \text{ J/cm}^2$ ; (c)  $0.28 \text{ J/cm}^2$ ; (d)  $0.36 \text{ J/cm}^2$

Fig. 10 Two-dimensional surface morphologies after second irradiation under different laser energy densities when beam overlap ratio is 75.0%. (a)  $0.12 \text{ J/cm}^2$ ; (b)  $0.20 \text{ J/cm}^2$ ; (c)  $0.28 \text{ J/cm}^2$ ; (d)  $0.36 \text{ J/cm}^2$

毛细管流动可忽略不计,温度梯度相对较小。在表面张力相对高的区域,熔化的波纹表面作为静止毛细波分布于材料表面。由于重新凝固前熔融材料的黏度较大,故第一步激光辐射残留的波纹状高频特征将减少,进而产生更加光滑的表面<sup>[12]</sup>。如图 10(c)、(d)所示,当激光能量密度增加到  $0.28 \text{ J/cm}^2$  和  $0.36 \text{ J/cm}^2$  时,随着材料表面熔化量的增加,较多的熔融材料流动导致材料表面重新出现凹凸不平的现象。在这两种能量密度下,材料的表面粗糙度分别是  $91 \text{ nm}$  和  $157 \text{ nm}$ ,如图 11 所示。因此,可以发现,在采用  $0.50 \text{ J/cm}^2$  的能量密度进行第一步激光辐射后采用  $0.20 \text{ J/cm}^2$  的能量密度在同一区域进行第二次辐射可以修复所有深度的表面缺陷,并且可以获得较低的表面粗糙度。

图 12 给出了原始区域与激光辐射区域及其横截面轮廓图。从图 12(a)中可以看出,在原始区域中,单晶硅表面存在较多切片引起的沟槽、缺口和裂纹等缺陷。然而,在两次激光辐射后的表面中,由于第一次表面熔化产生的热毛细管效应和第二次表面熔化产生的表面张力和毛细管效应,故表面变得较

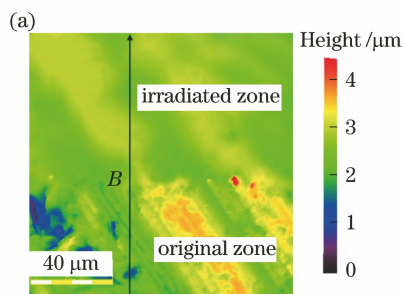


图 12 原始区域与激光辐射区域及其横截面轮廓曲线。(a)原始区域与激光辐射区域;

(b)图 12(a)中沿线 B 方向的横截面轮廓曲线

Fig. 12 Original zone and irradiated zone and their cross-sectional profile curves. (a) Original zone and irradiated zone; (b) cross-sectional profile curve along line B direction in Fig. 12(a)

## 4 结 论

提出了一种双步激光辐射的方法来修复铸锭切片造成的单晶硅的表面缺陷,同时降低了表面粗糙度。首先,通过 FEM 模拟预测出了可用于修复缺陷的最佳激光能量密度,并且通过实验验证了这一结果。然而,由于表面缺陷最大深度高达  $4 \mu\text{m}$ ,故一次激光扫描后的热毛细管流动会在表面残留一些高频特征。因此,本研究采用较低能量密度在同一区域进行第二步扫描以去除残留的高频特征,从而达到了较好的抛光效果。结果表明,通过双步激光辐射可以在铸锭切片后的单晶硅表面实现原子级表

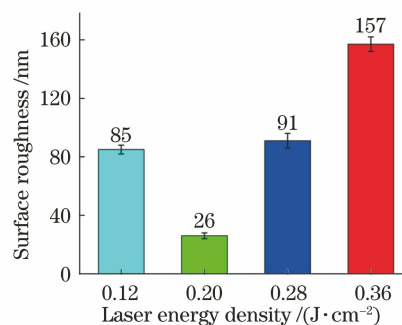
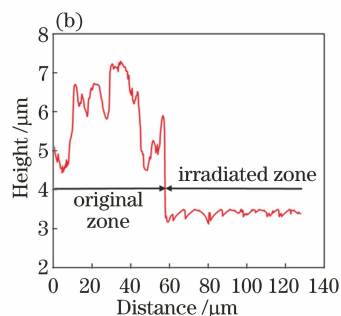


图 11 当光束重叠率是  $75.0\%$  时,不同激光能量密度下第二次辐射后的表面粗糙度

Fig. 11 Surface roughness after second irradiation under different laser energy densities when beam overlap ratio is  $75.0\%$

为平滑。此外,如图 12(b)所示,在原始区域与激光辐射区域的横截面轮廓图中,原始区域中表面缺陷的最大深度轮廓高达  $4 \mu\text{m}$ ,经过双步激光辐射后横截面轮廓的最大起伏在  $0.5 \mu\text{m}$  内。这个结果表明,激光辐射导致的表面层熔化会迫使熔融材料重新分布,进而可以修复表面缺陷并且显著降低表面粗糙度。



面完整性和纳米级表面粗糙度。该工艺不涉及材料去除、无排放、无污染,为超精密单晶硅制造提供了有效的新方法。

## 参 考 文 献

- [1] Cristea D, Obreja P, Kusko M, et al. Fabrication of polymer micro-optical components for integration in silicon MOEMS [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6993: 699307.
- [2] Saha A, Jiang C M, Martí A A. Carbon nanotube networks on different platforms [J]. Carbon, 2014, 79: 1-18.
- [3] Cristea D, Craciunoiu F, Caldararu M F. Silicon

- optoelectronic integrated circuits for MOEMS [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4019: 516-525.
- [4] Chen Y, Hu X Z, Li W. Upgrading design of high-precision double-sided grinding and polishing machine for large-size silicon wafer [J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2010, 29(6): 586-590.  
陈毓, 胡晓珍, 李伟. 高精度大尺寸硅晶片的双面研磨抛光机改进设计 [J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2010, 29(6): 586-590.
- [5] Guo X G, Guo D M, Kang R K, et al. Theoretical study on the monocrystal silicon nanometric grinding process [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(23): 2847-2851.  
郭晓光, 郭东明, 康仁科, 等. 单晶硅纳米级磨削过程的理论研究 [J]. 中国机械工程, 2008, 19(23): 2847-2851.
- [6] Yan J W, Kobayashi F. Laser recovery of machining damage under curved silicon surface [J]. CIRP Annals, 2013, 62(1): 199-202.
- [7] Kreimeyer M, Wagner F, Vollertsen F. Laser processing of aluminum-titanium-tailored blanks [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2005, 43(9): 1021-1035.
- [8] Malinauskas M, Žukauskas A, Hasegawa S, et al. Ultrafast laser processing of materials: from science to industry [J]. Light: Science & Applications, 2016, 5(8): e16133.
- [9] Wang J S, Liew P J. Repair of ultrasonic machining induced surface/subsurface cracks by laser irradiation [J]. Optics & Laser Technology, 2019, 111: 497-508.
- [10] Niitsu K, Tayama Y, Kato T, et al. Laser recovery of grinding-induced subsurface damage in the edge and notch of a single-crystal silicon wafer [J]. Surface Topography, 2019, 7(1): 015013.
- [11] Ren Y M, Zhang Z Y. Influences of initial surface conditions on response characteristics of amorphous silicon films to nanosecond laser irradiation [J]. Micromachines, 2021, 12(7): 807.
- [12] Perry T L, Werschmoeller D, Li X C, et al. Pulsed laser polishing of micro-milled Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V samples [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2009, 11(2): 74-81.