

# 激光与光电子学进展

## 半导体激光加工中光学元件吸热对设备 聚焦位置的影响

董志超<sup>1</sup>, 梁庭<sup>1\*</sup>, 雷程<sup>1</sup>, 官凯勋<sup>1</sup>, 武学占<sup>1</sup>, 齐蕾<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中北大学仪器与电子学院仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;

<sup>2</sup>北方自动控制技术研究所, 山西 太原 030051

**摘要** 介绍了激光射线在吸收介质中的衰减模型, 通过射线功率、透镜表面温度分布、热力学性质、沉积功率、透镜折射率变化等仿真计算, 分析了半导体加工过程中由光学元件吸热导致的透镜聚焦径向位置变化, 通过仿真计算得出输出功率为 20 W 的紫外激光精细加工设备的径向聚焦位置偏移为 14  $\mu\text{m}$ , 并且通过激光加工实验、激光共聚焦显微镜观测、台阶仪测量等方式验证了仿真分析结果, 对激光加工在半导体行业中容易忽视的问题进行了比较全面的分析论证。

**关键词** 激光光学; 紫外激光; 光学元件; 聚焦位置; 半导体

中图分类号 O437 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0114013

### Influence of Optical Element Heat Absorption on Focus Position of Equipment in Semiconductor Laser Processing

Dong Zhichao<sup>1</sup>, Liang Ting<sup>1\*</sup>, Lei Cheng<sup>1</sup>, Gong Kaixun<sup>1</sup>, Wu Xuezhao<sup>1</sup>, Qi Lei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;

<sup>2</sup>Northern Institute of Automatic Control Technology, Taiyuan, Shanxi 030051, China

**Abstract** We introduced the attenuation of rays in the absorbing medium. The proposed model was used to analyze the radial position change in the lens focus due to the optical element's heat absorption in the semiconductor processing process through simulation calculations, such as ray power, lens surface temperature distribution, thermodynamic property, deposition power, and lens refractive index change. The radial focus position deviation of the ultraviolet laser fine processing equipment with a laser source power of 20 W was calculated to be 14  $\mu\text{m}$ ; the simulation analysis results were verified by laser processing experiments, laser confocal microscope observation, and step meter measurement. Problems commonly overlooked in the semiconductor industry were analyzed and demonstrated in this article.

**Key words** laser optics; ultraviolet laser; optical element; focus position; semiconductor

## 1 引言

激光对半导体材料的加工一直以来都是半导

体行业的热门研究课题, 紫外激光加工硅、SOI、碳化硅、石英、蓝宝石等半导体材料在半导体行业更是得到了广泛的应用。紫外激光精细加工技术因

收稿日期: 2021-07-30; 修回日期: 2021-08-01; 录用日期: 2021-09-08

基金项目: 山西省重点研发计划项目(201903D121123)、山西省自然科学基金(201801D221203)、中央引导地方科技发展资金(YDZX20201400001664)、高等学校科技创新项目(1810600108MZ)

通信作者: [liangtingnuc@163.com](mailto:liangtingnuc@163.com)

其无需掩模、波长短、脉冲宽度窄、重复频率高、脉冲能量高、光束质量优异、聚焦光斑极小和热加工影响区小等优点,在电子行业<sup>[1-3]</sup>、微流控芯片加工<sup>[4-6]</sup>、宽禁带材料刻蚀<sup>[7]</sup>、薄膜外延生长<sup>[8]</sup>、光学元件<sup>[9]</sup>、半导体材料加工<sup>[10-12]</sup>等方面具有良好的应用前景。紫外激光精细加工系统可以将 20 W 的单模激光辐射传输到要进行切割、打孔或打标的表面,但即使用于聚焦光束的光学元件几乎完全透明,这些光学元件吸收的热量也会降低激光系统聚焦光束的能力。

紫外激光精细加工设备中的激光具有较高的单光子能量,在加工半导体材料的过程中,高的光子能量可以直接使分子或原子之间的化学键发生断裂,激光通过化学作用对半导体材料表面进行加工并产生纳米结构,最终出现光化学效应<sup>[13-15]</sup>。利用光化学效应进行半导体材料加工,可以使半导体材料表面的热负载减小,同时受热影响的区域较小,最终能够形成与飞秒激光加工效果可比的优秀加工截面。要实现如此精细的激光加工控制,对激光加工过程中由光学元件吸热导致的聚焦位置变化的研究就显得尤为重要。本文对半导体激光加工过程中由光学元件吸热导致的折射率变化和由透镜热膨胀导致的聚焦位置变化情况进行仿真计算以及切割实验验证。

## 2 射线在吸收介质中的衰减模型

透镜中产生的热量可以通过多种机制来改变射线的路径,这些机制主要包括折射率的温度依存性和透镜的热膨胀。

在激光聚焦系统中,射线通过中继成像进行追踪,并可以在其中沉积能量,导致透镜被加热。对光学元件折射率的温度依存性和透镜的热膨胀情况进行仿真,可计算出由热量导致的激光聚焦位置变化。

假设吸收系数保持不变,吸收介质中平面波的强度  $I$  和功率  $P$  会随着光波的传播呈指数衰减。

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{2k_0 \kappa L}{n}\right), \quad (1)$$

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{2k_0 \kappa L}{n}\right), \quad (2)$$

$$k_0 = 2\pi/\lambda_0, \quad (3)$$

$$L = ct, \quad (4)$$

式中: $k_0$ 为自由空间波数; $\lambda_0$ 为自由空间波长; $L$ 为

介质中的光程长度; $c$ 为真空中的光速; $t$ 是当前时间; $I_0$ 为初始平面波强度; $P_0$ 为初始平面波功率。复折射率表示为  $n - \kappa i$ ,其中  $n$  和  $\kappa$  均为无量纲实数。 $\kappa$  的正值对应于衰减介质,负值则对应于增益介质。

射线功率仅因周围介质的吸收或增益而发生改变,不受射线聚焦或散焦的影响。当一束细射线聚焦时,强度增加;当一束细射线发散时,强度降低。通过射线热源多物理场耦合,射线由于吸收而失去的任何能量都会在底层中变成等量的热量。

## 3 仿真分析与实验

本实验使用波长为 355 nm 的德龙紫外激光精细加工设备,其激光光源功率为 20 W,重复频率在 20~100 kHz 可调,占空比在 20%~80% 可调,可以获得直径小于 60  $\mu\text{m}$  的聚焦光斑,最大功率密度达到  $7 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ ,利用全固态紫外激光器结合机器视觉系统可以实现高精度加工,并以此加工系统为参考进行建模仿真分析。

### 3.1 模型搭建

紫外激光精细加工设备的激光聚焦系统模型如图 1 所示,该模型由两个相同的石英玻璃平凸透镜组成。利用第一个透镜对光纤(数值孔径为 0.1)的输出进行准直,并利用第二个透镜将准直光束聚焦到目标表面。

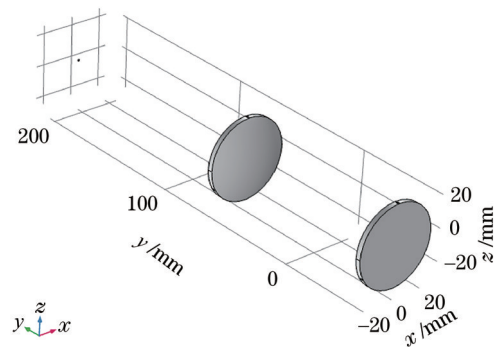


图 1 激光聚焦系统模型

Fig. 1 Laser focusing system model

所设计模型由两个直径为 50 mm 的熔融石英玻璃透镜组成,其有效焦距为 150 mm。这些透镜用来聚焦自由空间波长  $\lambda_0=355 \text{ nm}$  的激光束,并假设透镜固定放置在三个位置。对两个不同功率(1 mW 和 20 W)的激光源进行仿真来模拟透镜温度变化对激光射线路径的影响。在使用 1 mW 的激光源时,热效应可以忽略不计。在释放 20 W 光束

时,透镜温度的变化会导致聚焦平面位置发生改变。对位移场分量设置手动缩放,以提高第一次迭代过程的收敛性。

### 3.2 仿真接口与研究步骤

仿真使用几何光学接口来追踪射线通过激光聚焦系统的路径,并使用固体传热和固体力学接口对透镜的热膨胀进行模拟。

射线轨迹和温度分布通过双向耦合相互影响,即射线轨迹影响温度场,温度场又直接地或通过产生的结构变形来干扰射线轨迹。本文使用专用的“射线加热”接口和双向耦合射线追踪研究步骤,以自洽的方式求解射线轨迹和温度。双向耦合射线追踪研究中,可以建立一个求解器循环,射线轨迹和温度在交替步骤中进行多次迭代计算。每次迭代的结果用于指派在随后的迭代中不求解的变量值。这种迭代循环也可以通过在求解器序列中添加 for 和 end for 节点来手动设置,本文使用双向耦合射线追踪研究自动将这些节点添加到求解器序列中。

### 3.3 射线功率与透镜表面温度分布仿真

透镜温度仿真主要是对透镜的表面温度以及温度变化对折射率的影响和透镜受热膨胀的变化进行仿真计算。使用具有 18 个环的六边环锥体分布射线,共释放 1027 条射线,仿真结果如图 2 所示,20 W 的射线沿传播路径的灰度着色表示射线传输的功率,它在自由空间中是恒定的,随着透镜的吸收而减小。图 3 所示为透镜表面温度分布,在两个透镜中温度分布几乎相同。透镜的最高温度约为 295 K,虽然温度的变化幅度只有 2 K,但是这会导致聚焦位置发生微米量级的改变,而微米级的变化

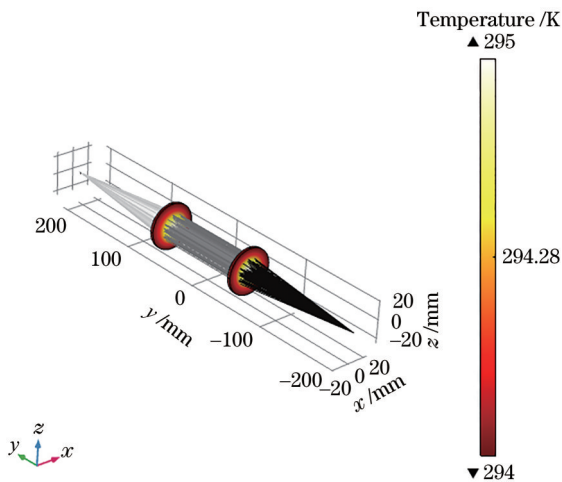


图 2 激光射线分布  
Fig. 2 Laser beam distribution

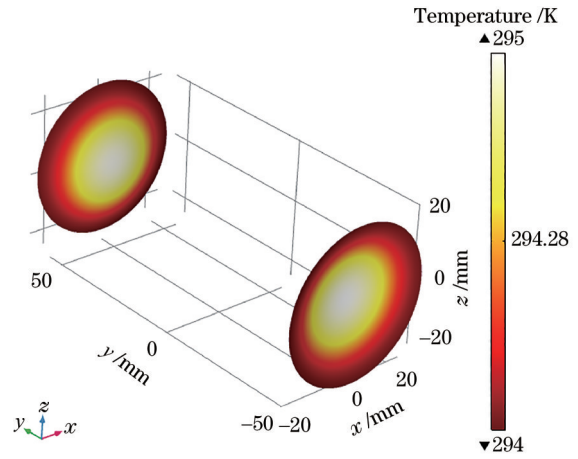


图 3 透镜表面温度分布

Fig. 3 Temperature distribution on lens surface

在 MEMS 加工中是不可忽略的。

### 3.4 热力学仿真

为了研究由光学元件吸热导致的激光聚焦位置偏移,对透镜进行热力学仿真分析是十分必要的,图 4 所示为透镜吸收高功率激光而产生的 von Mises 应力和形变,最大 von Mises 应力为 0.11 MPa,最大相对变形量约为 0.1 mm。

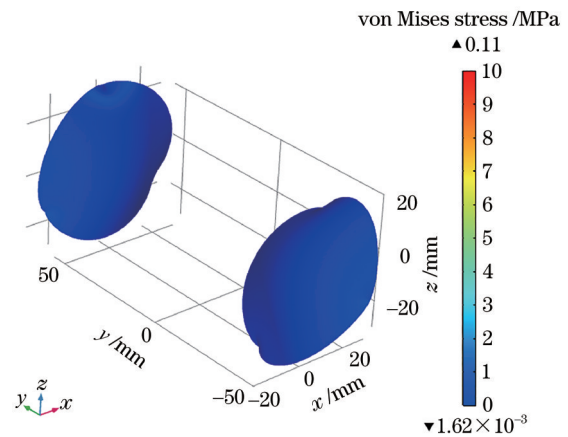


图 4 透镜的应力和形变

Fig. 4 Stress and deformation of lens

### 3.5 沉积功率以及透镜折射率变化仿真

透镜温度随着透镜的沉积功率的变化而改变,进而导致其折射率发生变化。由于射线会穿过目标,因此不能使用沉积射线功率的内置累加器,本文使用自定义累加器进行仿真,图 5 所示为透镜以及目标表面的沉积功率仿真结果。透镜的最大功率密度约为 0.01 mW/mm<sup>3</sup>。由于存在离散化误差,它呈现出一定的不对称性,沉积功率在透镜内的不同网格单元之间是分段不连续的。目标表面

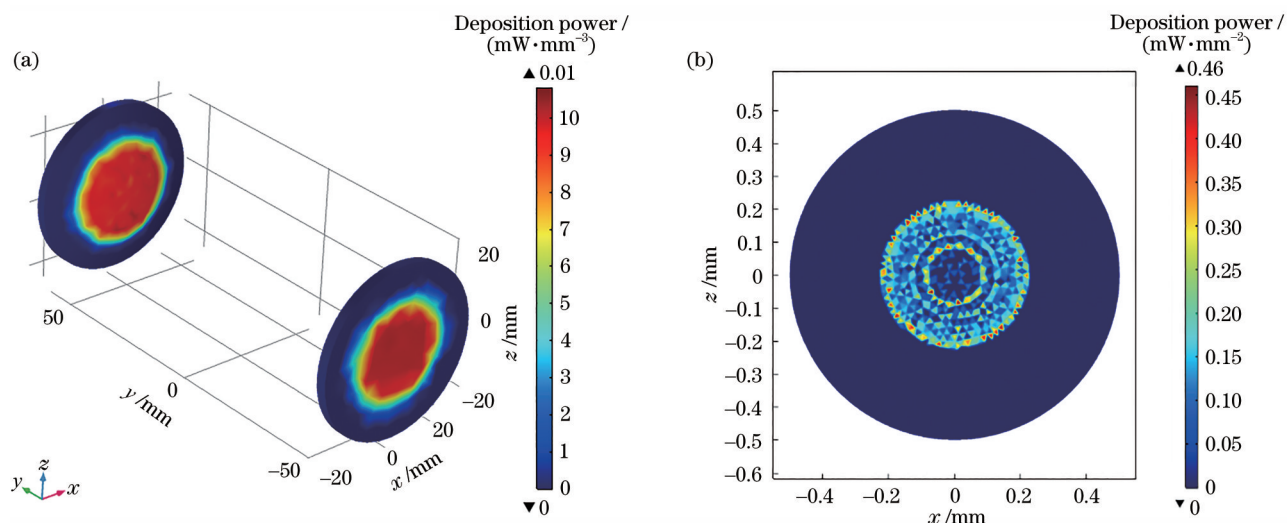


图 5 沉积功率。(a)透镜的沉积功率;(b)目标表面的沉积功率

Fig. 5 Deposition power. (a) Deposition power of the lens; (b) deposition power on target surface

边界的最大功率密度约为 0.46 kW/mm<sup>2</sup>。

图 6 所示为聚焦透镜的折射率变化情况,其中折射率相对变化量为计算得到的折射率实部 ( $n_r$ )

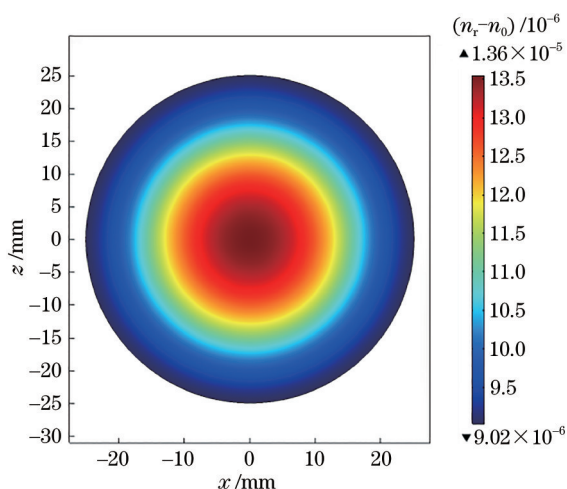


图 6 聚焦透镜折射率变化

Fig. 6 Refractive index change of focusing lens

与室温下的折射率实部 ( $n_0$ ) 之差。可以看到,折射率相对变化量在中心位置达到最大值,大约比边缘位置提高了 50%。

### 3.6 透镜聚焦径向位置变化仿真

为了更精确地追踪射线,使用过滤器节点来绘制一小部分射线,当射线在焦平面附近时,使用较小的间隔进行射线追踪研究,图 7 所示为点尺寸方均根误差(RMS)与焦平面位置的函数关系,图 8 则为低功率和高功率光束在最佳焦平面上的点列图。可以看到:低功率和高功率光束的最佳焦平面与原点的距离分别为 206.4593 mm 和 206.4453 mm,最小的位置偏移约为 14  $\mu\text{m}$ ;这些平面上的点尺寸 RMS 相似。

### 3.7 聚焦位置变化实验结果与分析

激光加工是激光与被加工物质之间的相互作用,影响加工结果的参数主要有激光能量、切割材料、材料厚度、切割速率,实验过程中控制切割材料、材料厚度与切割速率不变,尽量保证加工结果

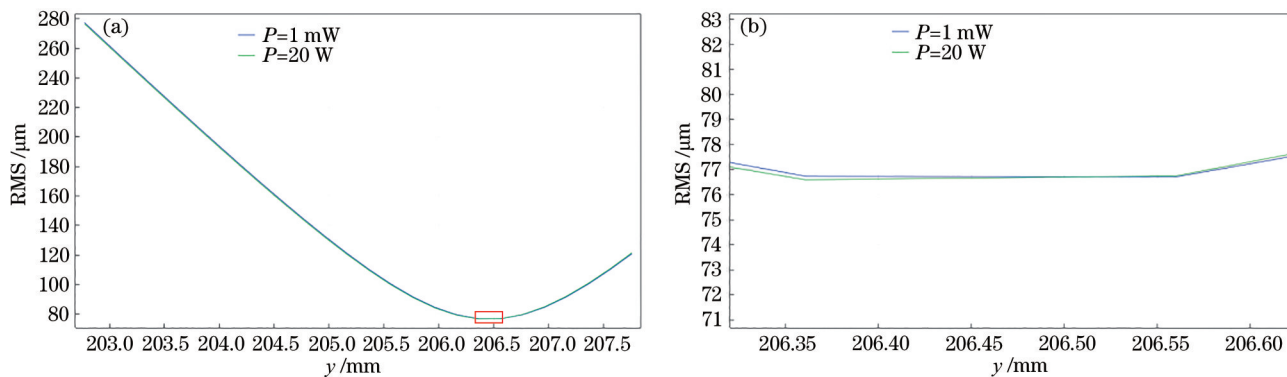


图 7 点尺寸 RMS 与焦平面位置的函数关系。(a)整体变化曲线;(b)图 7(a)的部分放大图

Fig. 7 Relationship between RMS of point size and position of focal plane. (a) Overall change curves; (b) enlargement in Fig. 7(a)

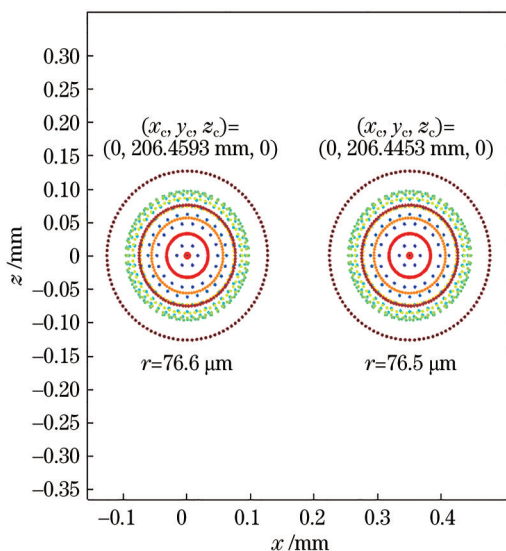


图 8 光束在最佳焦平面上的点列图

Fig. 8 Spot diagram of beam on the best focal plane

仅受加工表面获得的激光能量的影响,而获得的激光能量随着光学元件聚焦位置而变化,具体实验在德隆紫外激光精细加工设备上进行,为保证材料具有代表性,采用硅片(硅基芯片在半导体行

业中占有 85% 以上的市场)进行实验,为保证加工平面水平,采用 4 寸(1 寸=3.33 cm)双抛硅片。将 4 寸双抛硅片安装在加工平台上,制冷机通电,待冷却液温度低于 293 K 时开始加工,调节转速为 4000 r/min,激光重复频率为 40 kHz,占空比为 55%,切割速率为 1 mm/s,调整初始聚焦位置为机器视觉下最佳聚焦位置进行激光纵向连续划片加工,采用日本奥林巴斯公司的 LEXT OLS4100 激光共聚焦显微镜观察划道表面以及底部的形貌,使用机器宽度测量模块对划道的宽度进行测量,使用形貌扫描模块对划道表面以及底部形貌进行表征。使用美国 KLA-Tencor 公司生产的 P7 台阶仪对划道过渡区域深度变化进行精密测量。需要注意的是,即使激光加工设备有自带的吸尘系统,在加工过程中依然会有颗粒物飞溅到硅片表面,因此加工结束后将硅片放入去离子水中超声清洗 10 min,然后使用氮气吹干,整个加工及测试过程在 1000 级超净间中进行,以排除空气中灰尘对实验结果的影响。图 9 为实验所使用的紫外激光精细加工设备实物图。



图 9 实验装置。(a)紫外激光加工设备;(b)紫外激光器;(c)加工平台

Fig. 9 Experimental device. (a) Ultraviolet laser processing equipment; (b) ultraviolet laser instrument; (c) processing platform

图 10 所示为加工过程中聚焦光斑的变化情况,可以看到,随着加工时间的推移,聚焦光斑逐渐变小、变暗,说明紫外激光设备的元件聚焦位置发生变化。

图 11 所示为激光共聚焦显微镜下划道 3 个区域的形貌及划道宽度测量结果。划道大致分为 3 个区域:初始区域(上部),即机器视觉系统下最佳聚焦位置加工区域;过渡区域(中部),即光学元件吸热导致透镜聚焦位置变化,进而导致激光加工划道深度及宽度变化的区域;稳定区域(下部),即光学元件达到热平衡状态后,透镜聚焦位置不再发生变化,从而划道深度及宽度不再发生变化

的区域。为研究光斑聚焦位置偏移对加工结果的影响,对 3 个区域的测试结果进行分析,分析结果如下。

初始区域的划道宽度为 113  $\mu\text{m}$ ,过渡区域的划道宽度为 83  $\mu\text{m}$ ,稳定区域的划道宽度均为 82  $\mu\text{m}$ 。从最佳聚焦位置与焦点偏移后的加工结果可以看出:随着加工时间的推移,光学元件吸热升温,聚焦位置发生变化,进而导致划道宽度变窄;再经过一段时间,当光学元件与被加工材料达到热平衡,划道宽度不再发生变化。

图 12 所示为过渡区域的台阶仪测量结果,由于台阶仪探针只能沿水平方向移动,故将待测划道倾

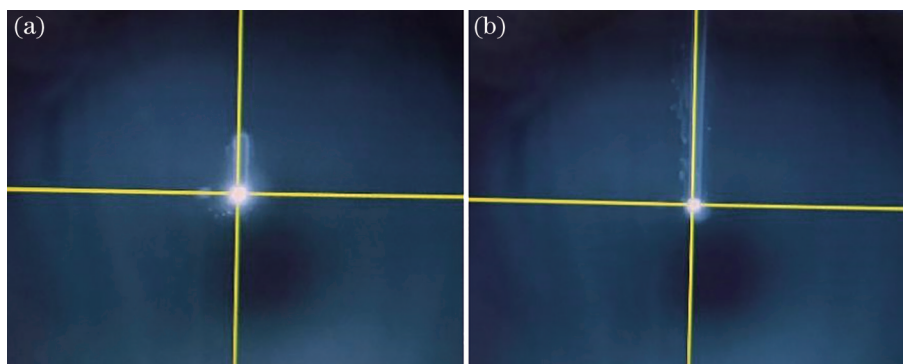


图 10 聚焦光斑变化情况。(a)初始光斑;(b)稳定后光斑

Fig. 10 Change of focusing spot. (a) Light spot at initial position; (b) stabilized light spot

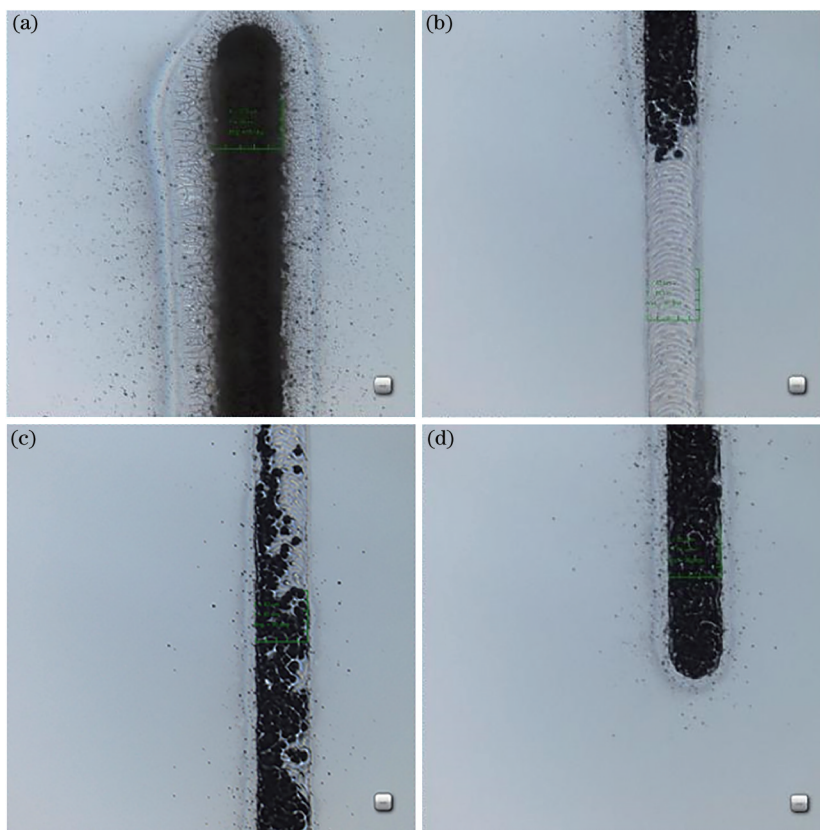


图 11 划道区域形貌。(a)初始区域;(b)过渡区域;(c)稳定区域(初始);(d)稳定区域(末尾)

Fig. 11 Morphologies of cutting areas. (a) Initial cutting area; (b) transition area; (c) initial stable area; (d) ending stable area

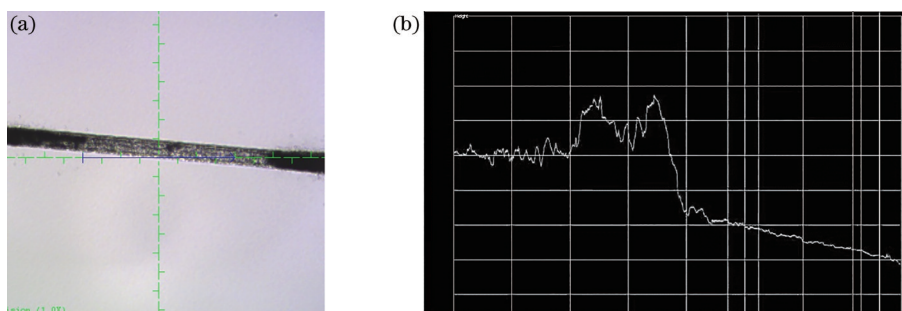


图 12 台阶仪测试结果。(a)台阶仪测量位置;(b)台阶形貌

Fig. 12 Measurement results of step profiler. (a) Measuring position of step profiler; (b) step morphology

斜放置,以 4 寸双抛硅片表面为参照水平面进行台阶测量。图 13 所示为过渡区域的激光扫描 2D 以及 3D 形貌。从台阶仪以及激光扫描测量结果可以看出,过渡区域的划道深度逐渐变浅。

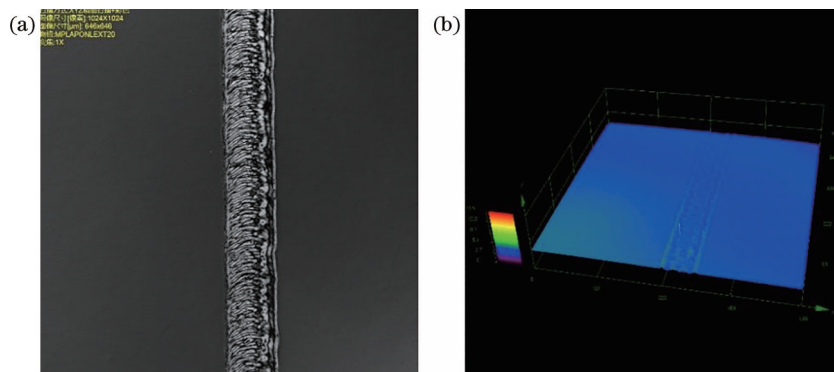


图 13 过渡区形貌。(a) 2D 形貌;(b) 3D 形貌

Fig. 13 Morphologies of transition area. (a) 2D morphology; (b) 3D morphology

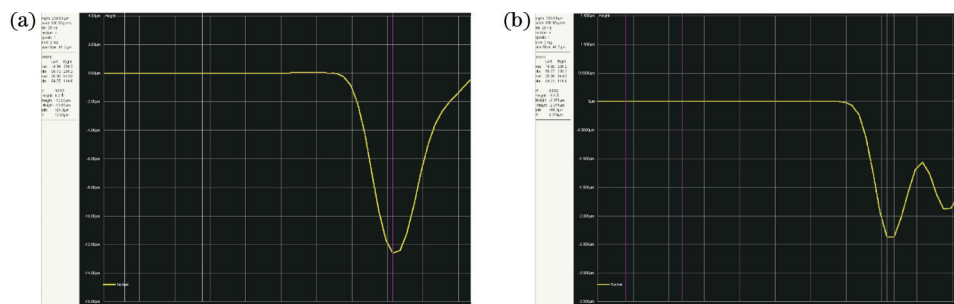


图 14 划道深度(10次)。(a)初始区域;(b)稳定区域

Fig. 14 Processing depth (ten times). (a) Initial cutting area; (b) stable area

由图 14 所示的实验结果可知,透镜聚焦位置的变化会直接影响划道宽度以及深度,进而影响半导体芯片的加工结果。

## 4 结 论

从仿真分析及实验结果可以看出:1)激光加工系统的光学元件吸热会导致聚焦光斑位置发生变化,随着光学元件吸收热量的增加,聚焦位置发生变化,这将导致划道宽度与深度发生变化,影响加工产品的表面形貌以及最终性能;2)当激光加工光学元件以及被加工硅片经过 2.48 s 达到热平衡之后,聚焦光斑、划道宽度及深度几乎不再发生变化,即光斑聚焦位置不再改变;3)光学元件吸热会导致激光聚焦位置变化,这将导致机器视觉下最佳聚焦位置与实际最佳聚焦位置不一致;4)已知焦平面偏移数值、热平衡时间,在确定加工工艺时应相应调整工艺参数和工艺流程,避免产生不理想的加工结果。

实验结果与仿真分析结果一致,即加工元件吸

图 14 所示为初始区域和稳定区域的深度测量结果。为提高测量结果的精确度,采用每隔 5 min 加工一次,重复 10 次取平均值的方式,得出加工初始区域与稳定区域的深度差平均值为 1.0259  $\mu\text{m}$ 。

热会导致透镜聚焦位置发生变化。因此在激光加工,尤其是激光精细加工过程中,对设备聚焦位置的实际变化情况进行研究是十分必要的。对由光学元件吸热导致的聚焦光斑位置变化进行仿真分析,根据仿真分析结果对设备聚焦位置进行相应调整才能得到加工表面均匀、性能优异稳定的产品。

本研究结果对激光加工硅材料具有一定的参考价值,虽然未进行其他半导体材料的加工实验,但光学元件吸热导致的聚焦位置变化显然对所有半导体材料的精密加工都具有一定的影响。由于激光加工是激光与被加工物质之间的相互作用,激光聚焦位置仅是众多影响参数之一,以后的工作将围绕光学元件聚焦位置变化与半导体材料的具体相互作用展开。

## 参 考 文 献

- [1] Ng K L, Yuan J, Cheung J T, et al. Electron field emission characteristics of electrochemical etched Si

- tip array[J]. *Solid State Communications*, 2002, 123(5): 205-207.
- [2] Zorba V, Tzanetakis P, Fotakis C, et al. Silicon electron emitters fabricated by ultraviolet laser pulses [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(8): 081103.
- [3] Sánchez F, Morenza J L, Aguiar R, et al. Whiskerlike structure growth on silicon exposed to ArF excimer laser irradiation[J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 69(5): 620-622.
- [4] Li Q S, Liang T, Lei C, et al. 355 nm all-solid-state ultraviolet laser direct writing and etching of microchannels in borosilicate glass[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0802003.  
李奇思, 梁庭, 雷程, 等. 355 nm 全固态紫外激光直写刻蚀硼硅玻璃微通道[J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0802003.
- [5] Liao K, Wang W J, Mei X S, et al. Fabrication of millimeter-scale deep microchannels in fused silica by femtosecond laser filamentation effect[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 142: 107201.
- [6] Cui P L, Liu Z Y. Enhanced flow boiling of HFE-7100 in picosecond laser fabricated copper microchannel heat sink[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 175: 121387.
- [7] Herman P R, Beckley K R, Jackson B C, et al. Processing applications with the 157-nm fluorine excimer laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 2992: 86-95.
- [8] Bogaerts W, Wiaux V, Taillaert D, et al. Fabrication of photonic crystals in silicon-on-insulator using 248-nm deep UV lithography[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, 8(4): 928-934.
- [9] Lorenz M, Kaidashev E M, von Wenckstern H, et al. Optical and electrical properties of epitaxial (Mg, Cd)<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>O, ZnO, and ZnO:(Ga, Al) thin films on *c*-plane sapphire grown by pulsed laser deposition [J]. *Solid-State Electronics*, 2003, 47(12): 2205-2209.
- [10] Agrawal V, Devani R, Mitra S K. Identification of process parameters of microfabrication with excimer laser[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2007, 6(4): 049701.
- [11] Lee Y H, Choi K J. Analysis of silicon via hole drilling for wafer level chip stacking by UV laser[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2010, 11(4): 501-507.
- [12] Bai F, Zhao Q Z. Ultrafast laser annealing of semiconductors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(11): 110001.  
柏锋, 赵全忠. 超短脉冲激光半导体材料退火[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(11): 110001.
- [13] Yuan W Z, Ma B H. Micro-machinability of monocrystal silicon by direct etching using excimer laser[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 200(1/2/3): 390-397.
- [14] Torrisi L, Borrielli A, Margarone D. Study on the ablation threshold induced by pulsed lasers at different wavelengths[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2007, 255(2): 373-379.
- [15] Kaliteevskaia N A, Seisyan R P. Modeling of photochemical changes and photodarkening of AsSe films under pulse vacuum ultraviolet radiation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4423: 36-41.