

脉冲激光对单晶硅打孔的研究

吴常顺,冯国英,刘彩飞

(四川大学 电子信息学院 激光微纳工程研究所,四川 成都 610064)

摘要:采用波长为 1 064 nm 的重复脉冲激光对单晶硅进行打孔实验,观测了小孔烧蚀深度以及表面孔径大小随脉冲个数的变化规律,并对激光辐照单晶硅的热力学过程进行了理论分析。研究结果表明:入射激光在穿过等离子体到达单晶硅的表面时,光斑尺寸会有所增大,小孔孔径会大于聚焦光束尺寸。小孔内的等离子体本身具有很高的温度,高温等离子体在膨胀过程中会通过热辐射和热传导等过程向小孔周围传递热量,这也会对小孔孔径起到一定的拓展作用。当脉冲个数低于 6 个时,孔深随入射脉冲个数的增加近似线性增长,而后开始缓慢增长直至保持不变,这主要是由激光等离子体屏蔽效应决定的。

关键词:激光器; 脉冲个数; 烧蚀深度; 孔径大小; 等离子体

中图分类号: O437 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0206007

Research on drilling hole of single crystal by pulse laser

Wu Changshun, Feng Guoying Liu Caifei

(Institute of Laser & Micro/Nano Engineering, College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: The laser drilling holes processing experiment was conducted on the silicon under the radiation of a 1 064 nm nanosecond repetitive pulse laser. Variation rule of holes' diameter transferring with laser pulse number and the depth of the holes could be both observed through this experiment. Meanwhile it analyzed the thermodynamic process of pulse laser irradiating silicon as well. The result shows that being confined by the narrow hole, the hot plasma expands rapidly inside the channel. It transmits a large fraction of its energy to the hole walls by radiative and convective heat transport, thereby contributing to the radial expansion of the hole. The hole depth growth rate have linear increase with pulse number when the pulse number is under 6, after that it becomes slower and slower until remain stable, which is mainly due to plasma shielding effect.

Key words: laser; pulse number; ablation depth; hole diameter; plasma

收稿日期:2015-06-05; 修订日期:2015-07-15

基金项目:国家自然科学基金(60890203)

作者简介:吴常顺(1988-),男,硕士生,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。Email:scu_sss@souhu.com

导师简介:冯国英(1969-),女,教授,博士生导师,博士,主要从事激光与光通信、新型激光技术方面的研究。

Email:guoying-feng@scu.edu.cn

0 引言

激光打孔技术在现代工业加工中占据重要地位,与传统机械钻孔相比较,具有加工精度高,加工质量好的优良特点。激光打孔可以避免传统机械打孔无法避免的一些缺陷,因而激光打孔在工业加工中显得尤为重要。激光打孔以激光为热源,使激光作用区域的材料发生融化、气化,从而达到局部材料去除的目的^[1]。

单晶硅在光电探测器件和集成电路等电子工业中占据重要地位,因此对单晶硅材料加工方面的研究也一直是热门话题。激光经透镜聚焦后可以获得较小尺寸的光斑,并且单晶硅对大部分波长的激光具有较好的吸收,因此研究激光对单晶硅打孔具有重要的意义。

随着激光技术的不断发展和现代制造业对微孔的要求,人们对激光打孔技术进行了深入的研究。F. Brandi^[2]等人研究了纳秒紫外激光光斑尺寸对小孔烧蚀率的影响,认为光斑尺寸越大,等离子体屏蔽效应越显著,并建立了相关的理论模型。Nadezhda M^[3]等人研究了等离子体对激光微孔的影响,认为激光等离子体可作为附加热源作用于靶材,从而对小孔深度的增加具有一定的促进作用。刘丹^[4]等人研究了等离子体对纳秒激光烧蚀单晶硅的影响,但只考虑了等离子体屏蔽效应而忽略了等离子体的热力学效应。Tan^[5]等人分析了深紫外纳秒激光对单晶硅微孔的形貌特点,并对比了不同激光脉冲能量下的小孔形貌。

文中采用了重复激光脉冲对单晶硅进行打孔实验,观测并记录了小孔烧蚀深度以及孔径大小随激光脉冲个数的变化规律,并对激光作用单晶硅的热力学过程进行了分析。

1 实验方案及结果

1.1 实验方案

实验装置如图 1 所示。实验中打孔所采用的激光器为 Nd:YAG 激光器,脉冲宽度为 7 ns,输出波长为 1 064 nm,光束质量因子 $M^2 < 4.4$,光强空间分布为高斯型。He-Ne 激光光源用于光束准直。将表面抛光的单晶硅固定在三维移动平台上以实现样品精确定

位加工,通过计算机软件控制三维移动平台的移动。分光镜将入射激光分成两束,一束经透镜($f=45$ mm)聚焦后用于样品加工,另一束用于激光能量监测,所采用的能量计为 Ophir 公司的 PE25 能量计。使用 KEYENCE VHX-600 三维显微镜对小孔形貌和烧蚀深度进行观测。

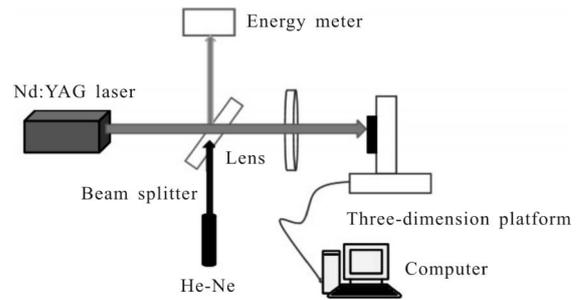


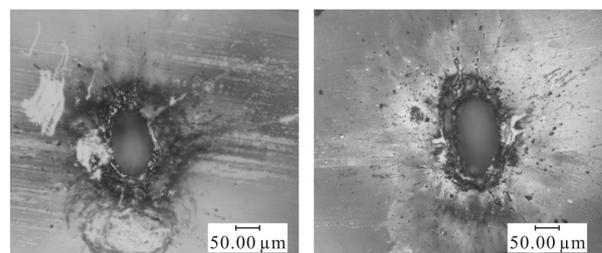
图 1 实验装置图

Fig.1 Experimental setup

1.2 实验结果

文中所采用的激光器输出能量为 14 mJ,激光光束经透镜聚焦后光斑半径为 $60 \mu\text{m}$,脉冲频率为 1 Hz。虽然单脉冲激光具有极高的光强,但由于其脉冲作用时间较短,热渗透深度较浅,单脉冲加工的微孔通常无法满足加工要求,这就需要重复脉冲加工来达到目的^[6]。

图 2 为不同脉冲个数加工微孔的表面形貌图。从图中可以看出,损伤区域主要由中心凹坑和凹坑周围辐射状物质组成,这些辐射状物质是激光等离子体冲击波挤压凹坑内熔融物质喷溅引起的,具有明显的流动迹象。并且,当入射激光脉冲个数较少时烧蚀点周围的喷溅物较少,当入射激光脉冲个数较



(a) 5 个脉冲作用后的形貌 (b) 20 个脉冲作用后的形貌

(a) Topography of the crater with five pulses (b) Topography of the crater with twenty pulses

图 2 不同脉冲个数烧蚀后的微孔表面形貌

Fig.2 Topography of the craters ablated by different count of pulses

多时烧蚀点周围的喷溅物质较多。随着辐照脉冲个数的增多,在烧蚀点周围会出现一些大的冷凝颗粒,这是脉冲累积导致沉积物累积的直接结果。

图 3 是烧蚀深度随脉冲个数的变化规律。从图中可以看出,在激光打孔的最初阶段,小孔的烧蚀深度近似线性增长,随着脉冲个数的增加,小孔的烧蚀深度开始缓慢增长直至维持不变。当激光辐照脉冲个数小于 6 个时,小孔的烧蚀深度随脉冲个数增加迅速增长,这个阶段的辐照脉冲称之为“高效脉冲”;当激光脉冲个数大于 8 个时,小孔的烧蚀深度随脉冲个数的增加而缓慢增长,这个阶段的辐照脉冲我们称之为“低效脉冲”;当脉冲个数超过 20 个时,小孔的烧蚀深度几乎不再随脉冲个数的增加而增长,这个阶段的辐照脉冲我们称之为“无效脉冲”。表 1 为不同辐照脉冲个数加工的小孔入口孔径。从表中可以看出,小孔入口孔径随辐照脉冲个数的增多并没有发生明显的变化,表明小孔入口孔径基本不依赖于辐照激光脉冲个数。并且,笔者发现小孔入口孔径大于聚焦光束尺寸。

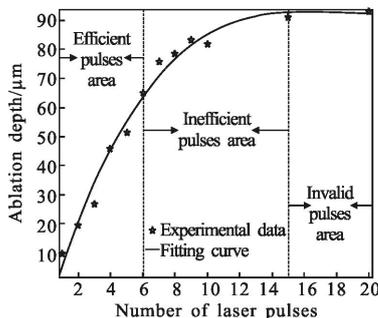


图 3 烧蚀深度随脉冲个数的变化规律

Fig.3 Changes in depth with the pulses number

表 1 不同脉冲个数加工的小孔深度

Tab.1 Diameter of the crater processed by different

count of pulses

Count of pulse number	Diameter of holes/μm
1	138.49
2	142.13
3	142.03
4	143.65
5	144.8
6	144.81
7	144.80
8	144.51
9	144.32
10	143.79
15	144.00
20	145.82

2 数值分析

2.1 单脉冲辐照单晶硅的热效应

脉冲激光辐照在单晶硅表面,会引起表面脉冲能量的沉积,导致单晶硅表面剧烈升温,脉冲作用过程中和作用后,单晶硅的温升情况可以用下式表示^[7]:

$$T(r, z, t) = \frac{2I_a \kappa^{1/2}}{K} t^{1/2} \text{ierfc} \left[\frac{z}{2(\kappa t)^{1/2}} \right] \quad t \leq \tau \quad (1)$$

$$T(r, z, t) = \frac{2I_a \kappa^{1/2}}{K} \left\{ t^{1/2} \text{ierfc} \left[\frac{z}{2(\kappa t)^{1/2}} \right] - (t - \tau)^{1/2} \text{ierfc} \left[\frac{z}{2\kappa(t - \tau)^{1/2}} \right] \right\} \quad t > \tau \quad (2)$$

式中:ierfc 为互补误差函数; I_a 为激光辐照在单晶硅表面的有效功率密度。对于高斯光束定义为:

$$I_a = (1 - R) E / \pi \omega_0^2 \tau \exp(-r^2 / \omega_0^2) \quad (3)$$

式中: ω_0 为激光脉冲聚焦在单晶硅表面时的光斑半径; t 为脉冲作用时间; z 为垂直于靶材表面的深度; K 为热导率; κ 为热扩散系数,热导率和热扩散系数的关系为 $\kappa = K / (\rho c)$; ρ 和 c 分别为单晶硅的密度和比热容; R 为单晶硅表面对 1 064 nm 波长入射激光的反射率。

2.2 单脉冲作用下光斑半径对烧蚀孔径大小的影响

激光器输出能量呈高斯分布,在光斑内能量分布并不均匀,而是从光斑中心位置沿四周逐渐减小,只有能量达到或者超过靶材的熔融阈值的光斑区域才能产生烧蚀作用^[8]。脉冲作用过程中,随着辐照时间的推移,单晶硅表面继续吸收入射激光能量,激光作用 7 ns 时达到单晶硅熔融阈值的径向范围最大。

图 4 为不同光斑半径对应的单晶硅表面径向温度分布($t = 7$ ns), T_m 为单晶硅的融化温度。从图中可以看出,单晶硅表面径向温度呈高斯分布,光斑中心位置温度最高,沿径向则逐渐减小。随着光斑半径的增大,一方面光斑中心位置温度逐渐减小,另一方面径向温度分布范围越宽广,因此烧蚀孔径大小不会随着光斑半径的变化单调变化。当光斑半径分别为 40、50、60 μm 时,超过单晶硅熔点的径向范围随着光斑半径的增大而增大;当光斑半径为 128、142 μm 时,超过单晶硅熔点的径向范围随着光斑半径的增大而减小。光斑半径为 142 μm 时,超过单晶硅熔点的径向范围最小。图 5 为烧蚀孔径大小随光斑半径变化的关系。从图中可以看出,当光斑半径小于 150 μm

时,烧蚀孔径随光斑半径的增大而增大;当光斑尺寸大于 150 μm 时,烧蚀孔径随着光斑半径的增大而减小;当光斑尺寸超过 250 μm 时,入射激光将不再能使单晶硅表面发生融化。烧蚀孔径大小先是随光斑半径的增大而增大,当光斑半径增大到一定值时,烧蚀孔径达到最大值,而后开始随着光斑半径的增大而减小,整体变化趋势呈抛物线状。

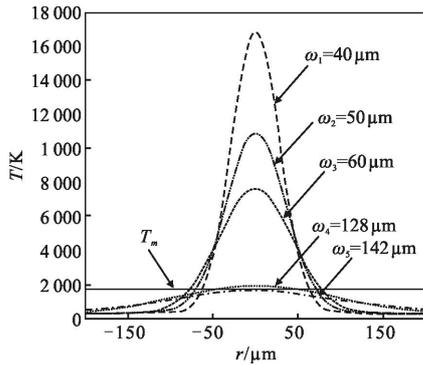


图 4 不同光斑半径对应的单晶硅表面径向温度分布
Fig.4 Radial direction temperature distribution for different beam radius

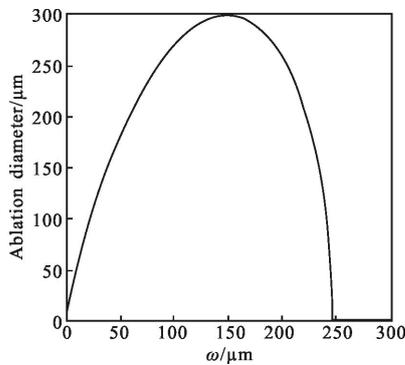


图 5 烧蚀孔径大小随光斑半径的变化
Fig.5 Aperture changes with laser beam radius

2.3 单脉冲作用下激光能量对烧蚀孔径的影响

图 6 为不同激光能量对应的单晶硅表面径向温度分布($t=7\text{ ns}$), 为单晶硅的融化温度。从图中可以看出,单晶硅表面径向温度呈高斯分布,并且入射激光能量越大,单晶硅表面温度越高,温度径向分布范围也越宽广,达到烧蚀阈值的径向光斑范围也越大,这就会导致烧蚀孔径的增大。图 7 为烧蚀孔径大小随激光能量变化的关系。从图中可以看出,只有入射激光能量达到一定值时才能使单晶硅表面发生融化,这个值就是单晶硅的熔融损伤阈值。当入射激光

能量超过单晶硅熔融阈值时,烧蚀孔径大小先是随激光能量的增大快速增大而后开始缓慢增大,烧蚀孔径大小随入射激光能量的增大整体呈指数增长。

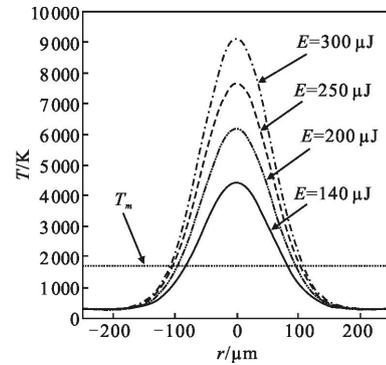


图 6 不同激光能量对应的单晶硅表面径向温度分布
Fig.6 Radial direction temperature distribution for different laser energy

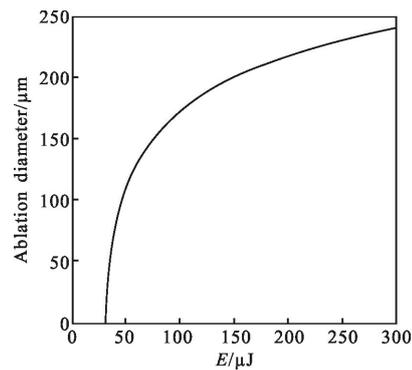


图 7 烧蚀孔径随激光能量的变化
Fig.7 Aperture changes with different laser energy

2.4 等离子体冲击波效应

强脉冲激光辐照在单晶硅表面时,首先对单晶硅表面几十微米厚的材料加热,热量迅速向内部传导,形成大区域材料的升温直至融化^[9];随着辐照时间的延长,温度升高会导致材料的吸收率增大,加热剧烈,部分熔融材料形成蒸气,高温气态物质在强激光作用下很容易发生电离形成等离子体。实验中所采用的激光平均功率密度为 $1.77 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$, 达到了激光等离子体形成的阈值条件,并且在实验中观察到了耀眼的等离子体闪光,说明有等离子体产生。

根据 Phipps 等提出的压力负荷解析表达式,可以得出靶材表面等离子体冲击波对靶材表面的压强为^[10]:

$$P_p(\text{kbar})=b \times I_a(\text{GW/cm}^2)^{0.7} \times \lambda(\mu\text{m})^{-0.3} \tau(\text{ns})^{-0.15} \quad (4)$$

式中： λ 为激光脉冲波长； b 为材料决定的常数，其中对于单晶硅 $b=0.5$ 。根据公式(3)、(4)和激光脉冲相关参数可以模拟单晶硅表面等离子体冲击波压强分布规律，如图 8 所示。

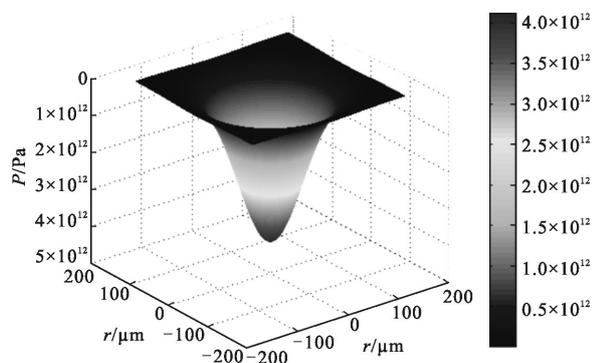


图 8 等离子体压强的空间分布

Fig.8 Distribution of laser plasma pressure

从图中可以看出，等离子冲击波压强在光斑中心位置最大，沿四周则急剧减小。等离子体冲击波会对靶材熔融层产生强烈的冲击，为烧蚀区的熔融物的排出提供强大的驱动力。等离子体冲击波产生的反冲力克服液体表面张力等约束力^[11]，迫使小孔内部的熔融物以亚声速或超声速向外喷溅。激光脉冲结束后，部分喷溅物质在烧蚀区周围冷凝形成辐射状的沉积物。这些附着在小孔周围的沉积物将严重影响小孔质量，减少激光能量可以减小激光等离子体的影响，从而可以提高小孔的加工质量，但打孔效率也随之大大降低。

3 实验结果分析

烧蚀深度先是随着激光脉冲个数的增多近似线性增长而后开始缓慢增长，认为这主要是等离子体屏蔽效应造成的。随着激光脉冲烧蚀前沿不断向靶材内部深入，激光光束会发生离焦效应，进而导致激光光斑半径变大，入射激光发生散焦。理想情况下激光光束聚焦在靶材表面，深度为 z 处的光束半径可表示为^[12]：

$$\omega(z) = \omega_0' \sqrt{1 + \left(M^2 \frac{\lambda z}{\pi \omega_0'} \right)^2}, \quad \omega_0' = \omega_0 / \sqrt{2} \quad (5)$$

计算分析发现，当孔深较小时，离焦效应对激光功率密度的影响较小；当孔深较大时，激光功率密度

会随着小孔深度的增加大幅下降。实验中得到的最大孔深约为 $100 \mu\text{m}$ ，离焦效应导致的激光功率密度下降不到 0.5%，可以忽略离焦效应的影响。因此，我们认为激光等离子体是影响烧蚀深度随脉冲个数变化趋势的主要因素。

等离子体屏蔽效应的产生会阻止部分入射激光能量与靶材直接耦合，这将降低靶材对入射激光能量的利用率^[13]，不利于小孔深度的增长。当激光脉冲个数小于 6 个时，等离子体屏蔽效应不显著，大部分入射激光可以穿过等离子体到达小孔的底部，烧蚀深度随脉冲个数的增加快速增长；当入射脉冲个数大于 8 个时，等离子体的线度不断增加，等离子体的瞬时屏蔽效应不断增强^[14]，以至于越来越多的入射激光能量被等离子体吸收，只有少量入射激光穿过等离子体层到达小孔的底部，烧蚀深度随激光脉冲个数的增多开始缓慢增长；当入射激光脉冲个数大于 20 个时，小孔内的熔融物质无法有效的从小孔内排出，脉冲作用结束后熔融物质在小孔内重铸，此时烧蚀深度随激光脉冲个数的增加几乎不再增长。

小孔入口孔径大于激光聚焦光斑尺寸，这主要是因为等离子体的一些固有特性会增大小孔的孔径。等离子体在吸收入射激光能量的同时，也会通过热传导和热辐射等过程向外释放能量。等离子体本身具有很高的温度，它会以热能的形式通过热传递和热辐射向小孔四周传递热量，从而对小孔孔径起到拓展作用。Rockstroh^[15]研究证明， CO_2 激光辐射铝靶时，当激光功率密度为 $6 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 时，由于等离子体对入射激光光束的折射，激光光斑面积增大了 8%；当激光功率密度为 $1 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 时，激光光斑面积扩大了 23%。Breitling^[16]等人采用脉冲激光对金属打孔过程中，也观察到了类似的实验现象。很显然，当入射激光穿过等离子体到达单晶硅表面时，光斑尺寸会有所增大。正如前面所讨论的那样，在一定范围内，烧蚀孔径会随着光斑半径的增大而增大。

实验中，发现小孔表面孔径随着辐照激光脉冲个数的增加没有明显的变化，小孔表面孔径基本不依赖辐照脉冲个数，这时小孔烧蚀孔径由单脉冲激光能量和光斑尺寸决定。小孔表面孔径跟单脉冲激光能量和光斑尺寸的关系详见前面的分析。

4 结 论

文中采用波长为 1 064 nm 的纳秒重复脉冲激光对单晶硅进行打孔实验,观测了小孔烧蚀深度随脉冲个数的变化规律,并分析了脉冲激光烧蚀单晶硅的热力学过程,研究结果表明:

(1) 小孔烧蚀深度随脉冲个数的增加先是线性增加而后开始缓慢增长,这主要是等离子体屏蔽效应决定的。当辐照脉冲个数小于 6 个时,小孔深度较浅,等离子体屏蔽效应不显著,小孔深度增加迅速;当辐照脉冲个数大于 8 个时,小孔表面等离子体层越来越厚,等离子体屏蔽效应不断加强,能够直接辐照到小孔底部的激光能量越来越少,小孔深度开始缓慢增长。

(2) 激光光束穿过等离子体时,由于等离子体会对激光光束产生折射,导致光斑尺寸变大,最终小孔入口孔径会大于聚焦光束尺寸。此外,等离子体本身具有很高的温度,其会通过热辐射和热传导等过程向小孔传递热量,这也会对小孔孔径起到一定的拓展作用。

参考文献:

- [1] Tunna L, O'Neill W, Khan A, et al. Analysis of laser micro drilled holes through aluminium for micro-manufacturing applications[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, 43 (9): 937-950.
- [2] Burdet N, Brindi F, Carzino R, et al. Very large spot size effect in nanosecond laser drilling efficiency of silicon [J]. *Optics Express*, 2010, 18(22): 22488-22494.
- [3] Bulgakova N M, Evtushenko A B, Shukhov Y G, et al. Role of laser-induced plasma in ultradeep drilling of materials by nanosecond laser pulses [J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(24): 10876-10882.
- [4] Dan L, Duan-Ming Z. Vaporization and plasma shielding during high power nanosecond laser ablation of silicon[J]. *Chinese Physics Letters*, 2005, 25(4): 1368-1371.
- [5] Tan B. Deep micro hole drilling in a silicon substrate using multi-bursts of nanosecond UV laser pulses [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16(1): 109-112.
- [6] Liu Huixia, Yang Shengjun, Wang Xiao, et al. Experiment study and numerical simulation of pulsed laser ablation crater [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36 (1): 220-223. (in Chinese)
- [7] 刘会霞, 杨胜军, 王霄, 等. 脉冲激光烧蚀凹腔的实验分析与数值模拟[J]. *中国激光*, 2009, 36(1): 220-223.
- [7] Allman. *Laser-beam Interactions with Materials Physical Principles and Applications* [M]. Beijing: Science Press, 1994: 55. (in Chinese)
- [8] 奥尔曼. *激光与物质相互作用原理及应用*[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 55.
- [8] Tunna L, O'Neill W, Khan A, et al. Analysis of laser micro drilled holes through aluminium for micro-manufacturing applications[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, 43 (9): 937-950.
- [9] Chu Qingchen, Yu Gang, Lu Guoquan, et al. Two-dimensional numerical investigation for the effects of laser process parameters on hole type during laser drilling [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(6): 1-6. (in Chinese)
- [9] 褚庆臣, 虞钢, 卢国权, 等. 激光打孔工艺参数对孔型影响的二维数值模拟研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(6): 1-6.
- [10] Phipps C R, Turner T P, Harrison R F, et al. Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF, and CO₂ single-pulse lasers[J]. *Journal of Applied Physics*, 1988, 64(3): 1083.
- [11] Semak V V, Knorovsky G A, MacCallum D O, et al. Effect of surface tension on melt pool dynamics during laser pulse interaction[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 39(3): 590-595.
- [12] Konstantinos Salonitis, Aristidis Stourmaras, George Tsoukantas, et al. A theoretical and experimental investigation on limitations of pulsed laser drilling [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 183(1): 96-103.
- [13] Zhou Jun, Tsai Hai-Lung, Wang Peichung. Transport phenomena and keyhole dynamics during pulsed laser welding[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2006, 128(7): 680.
- [14] Zhang Duanming, Li Zhihua, Guan Li, et al. Kinetic Principle of Pulse Laser Deposition [M]. Beijing: Science Press, 2011: 45-64. (in Chinese)
- [14] 张端明, 李智华, 关丽, 等. *脉冲激光沉积动力学原理*[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 45-64.
- [15] Herman P R, Breitling D, Ruf A, et al. Fundamental aspects in machining of metals with short and ultrashort laser pulses [C]//SPIE, 2004, 5339: 49-63.
- [16] Chan C L, Mazumder J, Chen M M. Effect of surface tension gradient driven convection in a laser melt pool: Three-dimensional perturbation model[J]. *Journal of Applied Physics*, 1988, 64(11): 6166.