

飞秒与纳秒激光刻蚀单晶硅对比研究

杨 焕 黄 珊 段 军 杜 敏

(华中科技大学光电子科学与工程学院武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 采用输出功率 8 W 的 355 nm Nd:YVO₄ 纳秒激光器和 3 W 的 1030 nm 飞秒激光器对 0.4 mm 的单晶硅的刻蚀进行了对比研究,研究了激光的单脉冲能量密度,脉冲宽度,脉冲耦合率等参数对加工质量和精度的影响。实验结果表明,飞秒激光加工的热效应要小于紫外纳秒激光,同时飞秒脉冲产生了纳米条纹,但随着加工次数的增加,纳米条纹也直接导致了不规则裂纹的产生。这说明飞秒激光的加工优越性也是有条件的,当需要对材料进行大量去除之类的加工时,成本相对较低的紫外纳秒激光可能更为适合。

关键词 激光技术;激光微加工;355 nm 纳秒激光;1030 nm 飞秒激光;单晶硅;纳米条纹

中图分类号 TG485;V261.8 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0103003

Contrastive Study on Laser Ablation of Single-Crystal Silicon by 1030 nm Femtosecond Laser and 355 nm Nanosecond Laser

Yang Huan Huang Shan Duan Jun Du Min

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, College of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract A 355 nm Nd:YVO₄ nanosecond laser with output power of 8 W and a 1030 nm femtosecond laser with output power of 3 W are used for etching the single-crystal silicon. The effects of laser ablation parameters including laser fluence, pulse width spot overlap rate, and processing times on the processing accuracy and quality are investigated and analyzed. The heating effect of femtosecond laser is less than ultraviolet nanosecond laser, and nanometer fringes are generated with the laser pulse of femtosecond level, but many cracks appear for the superposition of nanometer fringes as the processing times increases. The experimental results indicate that the advantage of femtosecond laser processing is not absolute, and relatively cheap ultraviolet nanosecond laser may be more suitable for the cases where plenty of materials need to be removed.

Key words laser technique; laser microprocessing; 355 nm nanosecond laser; 1030 nm femtosecond laser; single-crystal silicon; nanometer fringe

OCIS codes 140.3390; 140.3610; 140.7090

1 引 言

单晶硅作为制造微纳器件的理想材料,在电子行业和太阳能行业都有广泛的用途。但是它属于典型的共价键结合的材料,硬度高,脆性大,难以加工。以前一般利用金刚砂轮和离子束等特种加工方法对硅片进行切割和各种微细加工,因工艺特点的局限

性而使其应用范围在一定程度上受到限制。由于激光加工可以方便地将激光束和数控技术结合起来,并通过选择激光波长、控制激光参数来控制加工质量^[1],因此利用激光对单晶硅片进行刻蚀加工具有重要的应用价值。

近年来,紫外纳秒激光因波长短、材料吸收率

收稿日期: 2012-07-26; 收到修改稿日期: 2012-09-17

基金项目: 国家 863 计划(2011AA030208)、国家自然科学基金重点项目(51135005)和国家自然科学基金(51005083)资助课题。

作者简介: 杨 焕(1985—),男,博士研究生,主要从事激光微加工方面的研究。E-mail: hylaser@gmail.com

导师简介: 段 军(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事激光微加工方面的研究。E-mail: duans@mail.hust.edu.cn (通信联系人)

高、加工速度快、热影响区小、可聚焦光斑尺寸小等特点,已成为电子行业中半导体材料的常规加工手段^[2~4]。而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^[5~7]。利用飞秒激光在硅片表面进行各种微细加工的基础和应用研究已经引起越来越多的关注,如 Herrmann 等^[8]理论分析了不同参数的超短脉冲对硅表面烧蚀过程的影响;Besner 等^[9]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;苗恩铭等^[10]研究了飞秒激光加工中的热熔化和热传递现象。然而,对于两种最常规的微加工光源,关于对两者加工结果的对比研究并不多见。另外,已有的飞秒激光研究的主要对象为钛宝石飞秒激光器,其最大的局限性是维护和调试都较为复杂,而且频率太低,并不适合于工业应用,本文则对适合于工业应用的高频率飞秒激光器进行研究。

本文利用自主研发的激光微加工系统,分别配备相应的飞秒激光器和紫外纳秒激光器,研究了激光的单脉冲能量密度、脉冲宽度、脉冲耦合率及加工

次数等参数对加工效果的影响,并对相关加工机理进行分析,对比了两种激光器的优缺点,对于实际的生产应用和激光器的选型具有指导意义。

2 实验设备

实验设备如图 1 所示,采用振镜扫描和工作台联动的方式可以大大提高加工精度和速度。光学系统由扩束准直镜、扫描振镜加远心扫描透镜系统组成,微加工工作台为直线电机十字工作台,重复精度为 $\pm 1 \mu\text{m}$,保证在加工大图形时实现无缝拼接,另外采取了真空吸附装置对加工样品进行固定,避免了设备的机械振动对加工精度的影响。表 1 所示为紫外纳秒激光器和飞秒激光器相对应的参数对比。与紫外激光器相比,飞秒激光器虽然最高输出功率偏低,但频率可调范围很大,因此飞秒激光器可以获得更高的单脉冲能量。通过理论计算并结合实验结果,在现有光路系统下,紫外纳秒激光器的最小聚焦光斑直径 $12 \mu\text{m}$,飞秒激光器的最小聚焦光斑直径为 $9 \mu\text{m}$ 。

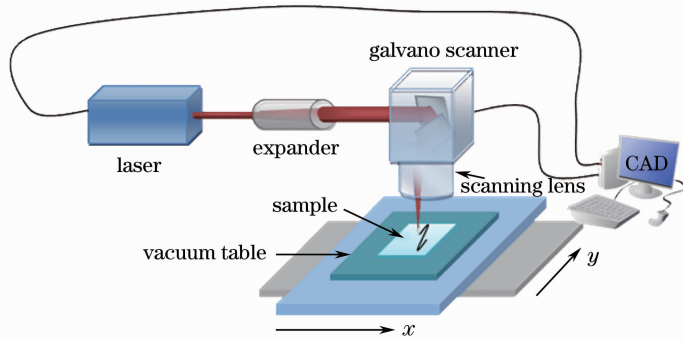


图 1 激光微加工实验设备原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the laser microprocessing experimental setup

表 1 激光器的主要参数

Table 1 Main parameters of the lasers

Laser parameter	Nanosecond laser	Femtosecond laser
Wavelength /nm	355	1030
Maximum power /W	7.5	3
Repetition frequency /kHz	10~100	1~300
Fluence /(J/cm^2)	0~382.1	0~1656.2
Pulse width /ns	12~60	5×10^{-4}
Quality factor M^2	less than 1.1	less than 1.1

3 实验结果和分析

3.1 单脉冲能量密度的影响

为了研究并对比单脉冲能量密度对加工精度和

质量的影响,保持紫外纳秒激光和 1030 nm 飞秒激光的重复频率同为 100 kHz,单脉冲能量密度从 $7.55 \text{ J}/\text{cm}^2$ 增加到 $62.9 \text{ J}/\text{cm}^2$,将单个激光脉冲对硅片实际产生作用区域的宽度定义为有效刻蚀直径,图 2 为紫外纳秒激光和飞秒激光单脉冲能量密度对激光有效刻蚀直径的影响。可以看到,能量密度增加,有效刻蚀半径也随之增加,但有效刻蚀半径的增长率不断减小,这是因为两种激光器的光斑能量分布均为典型的高斯分布,当激光能量较低时,聚焦光斑边缘处能量密度未达到作用阈值,故有效刻蚀直径小于光斑的理论直径,随着激光功率的增长,光斑边缘处的能量达到并超过阈值,此时有效刻蚀直径大于光斑的理论直径。由于高斯光束本身的特

性,随着激光能量的进一步增加,有效刻蚀直径受理论光斑的尺寸限制,边缘未达到作用阈值处的能量增加值也越来越小,因此有效刻蚀直径的增加率逐渐减小,当激光能量高于某一特定值时,我们将会发现有效刻蚀直径不再增加。

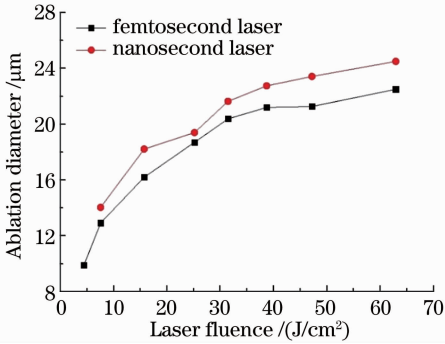


图2 激光能量密度对有效刻蚀光斑大小的影响

Fig. 2 Effect of laser fluence on effective ablation diameter

图3为单个激光脉冲作用于单晶硅的扫描电镜图片,两种不同性质的激光对单晶硅的作用具有明显的差别。图3(a)显示当能量较低时飞秒激光器的整个光斑能量分布较为均匀,刻蚀区域无熔化物的飞溅,刻蚀边缘的重凝区较为明显,随着激光功率

的增加,聚焦光斑边缘处的能量增加,当能量密度为38.69 J/cm²时,如图3(b)所示,刻蚀区明显增大,边缘出现飞溅,这验证了飞秒激光的冷加工是有条件的,当能量较高时热作用仍然存在,由于飞秒激光作用的时间极短,其表现为喷发的熔体以极高的冷却速率凝固。图3(c)、(d)为不同能量密度下紫外纳秒激光器的作用结果,图中显示紫外纳秒激光的能量分布具有较为典型的高斯分布特征,大部分能量聚集在光斑中心,基底材料的液化再凝固十分明显,这说明在加工的过程中硅材料迅速液化,膨胀压力骤然增大导致熔融态的硅向四周喷发,然后又迅速凝固。与紫外纳秒激光加工结果相比,飞秒加工虽然在加工结果中仍然可以观察到液态相的重凝,但其热作用现象要轻微很多,而紫外纳秒加工过程为典型的材料熔化后喷发,加工产生的熔渣较多,加工区域分层较为明显,熔渣在加工区域四周重新凝固后产生一圈突起。对图3中两种激光作用样品的重熔层和未加工区域分别做能谱分析测试,均得到如图4所示结果,结果显示所测试区域的物质成分均为单质硅,没有探测出氧或其他元素,这说明实验虽然是在大气环境中进行,但由于硅的化学稳定性,两种激光的加工过程中都没有发生硅的氧化。

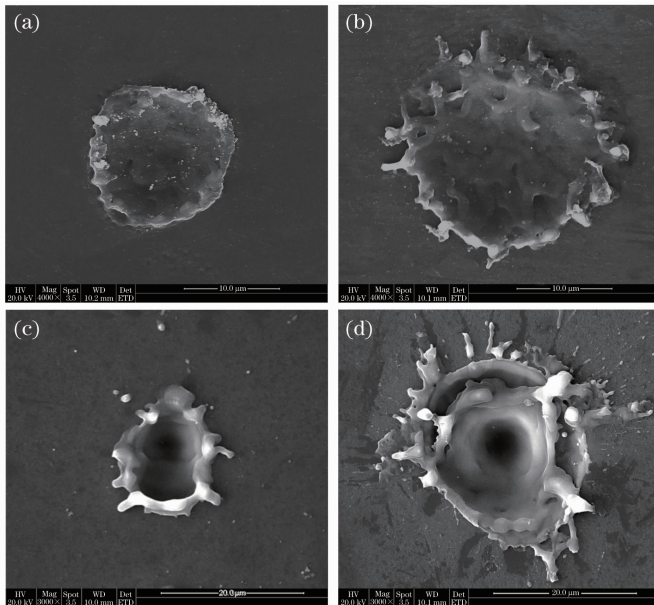


图3 激光刻蚀硅片的扫描电镜图片。(a)飞秒激光,7.55 J/cm²; (b)飞秒激光,38.69 J/cm²; (c)纳秒激光,7.55 J/cm²; (d)纳秒激光,38.69 J/cm²

Fig. 3 Scanning electron laser microscope images of the laser-ablated silicon. (a) Femtosecond laser, 7.55 J/cm²; (b) femtosecond laser, 38.69 J/cm²; (c) nanosecond laser, 7.55 J/cm²; (d) nanosecond laser, 38.69 J/cm²

在以往的研究中,脉冲激光与固体材料相互作用过程中的非平衡能量传输一直受到广泛的关注,对短时间和微小空间内非平衡态热传导过程的研究

以双温模型最有代表性。从一维非稳态热导方程出发,将自由电子和晶格看成温度由各自方程表示的两个独立系统,表示为

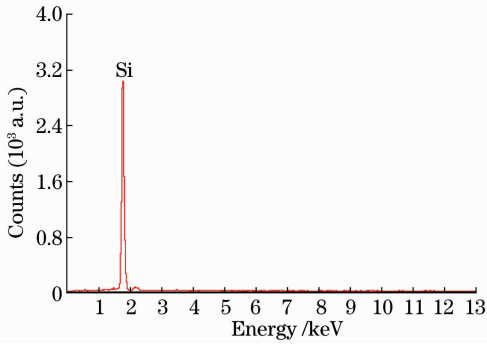


图 4 重熔层的能谱分布图

Fig. 4 Spectral energy distribution of remelted layer

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} k \frac{\partial T_e}{\partial x} - g(T_e - T_i) + S(x, t), \quad (1)$$

$$C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = g(T_e - T_i), \quad (2)$$

式中 $S(x, t)$ 代表源项, $S(x, t) = I(t)A\alpha \exp(-\alpha x)$, x 代表光传输方向, 与材料表面相垂直, $A = 1 - R$ 与 α 代表材料表面穿透率与吸收系数, $I(t)$ 代表光强, C_e 、 C_i 为电子和晶格的比热, T_e 、 T_i 为电子和晶格的温度, k 为电子导热率, g 为电子-晶格耦合参数。以上两个方程具有三个时间域: τ_e 、 τ_i 、 τ_L , 其中 $\tau_e = C_e/g$ 是电子的冷却时间, $\tau_i = C_i/g$ 是晶格的加热时间 ($\tau_e \ll \tau_i$), τ_L 是脉冲宽度。这三个时间定义了三个不同的激光-材料相互作用时间范围, 即纳秒、皮秒及飞秒。

纳秒激光的去除过程是热作用和光化学作用的混合作用过程。在图 3 所示的结果中, 烧蚀痕迹和飞溅物明显, 热作用占主要方面。由于纳秒激光脉冲满足条件 $\tau_L \gg \tau_i$, 此时 $T_e = T_i$, 双温模型简化为一维热传导方程:

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k_0 \partial T / \partial x) + I_0 \alpha \exp(-\alpha x). \quad (3)$$

结合实验结果可知, 在热作用过程中, 激光先把材料加热到熔点, 然后再加热到沸点, 随着材料的汽化, 产生汽化压力, 促使熔融物质喷溅而出。

飞秒激光满足条件 $\tau_L \ll \tau_e$, 对于比电子冷却时间 τ_e 还短的激光作用时间, 等效于 $C_e T_e / t \gg g T_e$, 因为飞秒脉冲作用的时间非常短, 可不考虑电子与晶格的耦合, 这个过程可以认为是从固态到气态的直接转化。在这个过程中, 晶格在皮秒量级的时间内被迅速加热, 变成蒸气或等离子体状态, 以近真空中的速度迅速膨胀, 热传导基本上可以忽略, 这与飞秒激光加工实验结果中的液态相较纳秒激光加工弱很多是相符合的。

3.2 脉冲耦合率的影响

对于脉冲激光来说, 实际的加工往往是一个多脉冲耦合的过程, 而光斑耦合率 (ϵ_{OL}) 是由加工速度 (V)、脉冲频率 (F) 和有效刻蚀直径 (D) 决定的, 可表示为

$$\epsilon_{OL} = \frac{D - (V/F)}{D} \times 100\%. \quad (4)$$

由于 D 由单脉冲的能量密度决定, 所以在能量一定时减小频率或增大加工速度都会使耦合率减小。如图 5 所示, 保持飞秒激光重复频率 3 kHz、脉冲能量密度 68.15 J/cm² 不变, 加工速度依次为 100、50、30、10 mm/s, 光斑耦合率依次为 0、39.6%、63.7%、87.9%, 光斑依次叠加, 后一个光斑会覆盖掉前一个光斑部分的加工痕迹, 因此从图中可以判断出加工的轨迹方向, 如图 5(b) 中加工方向由下而上, 而图 5(c) 激光是从上往下扫描。随着加工速度的减小, 相邻脉冲之间的距离减小, 单位区域内所积累的能量也越多, 导致重熔层厚度的增加, 另外随着加工速度的减小, 刻蚀线边缘的纳米条纹也更为明显。

3.3 加工次数的影响

在实际的加工过程中, 除了多脉冲的耦合以外, 往往需要在同一位置进行多次加工以达到相应的加工效果。图 6 分别为两个激光器在脉冲能量密度为 7.9 J/cm², 频率 100 kHz, 加工速度 500 mm/s 的情况下加工 50 次的扫描电镜图片。将图 6 结合图 5 分析, 可知当使用飞秒激光时, 随着加工次数的增加, 切口处熔渣不断增加, 重熔层厚度增加, 同时纳米条纹也变得更为明显, 在纳米条纹深度增加的同时, 纳米条纹与重熔层之间沿加工方向产生了一系列不规则的裂纹, 由于飞秒激光本身能量为高斯分布, 导致产生纳米条纹的调制光强度由内到外逐渐变弱, 距离加工线中心近处的调制光强度相对较强, 该区域内的调制光随加工次数的增加多次叠加在一起, 就产生图中所示的不规则裂纹。图 6(b) 所示为紫外纳秒激光的加工结果, 同样可以观察到大量的熔渣和重熔层, 但区别是既无纳米条纹, 在加工线的边缘也无不规则的裂纹, 这就进一步验证了不规则裂纹的产生与纳米条纹具有直接关系。

对于条纹的形成已有大量的文献研究^[11,12], 入射光照射在材料表面后产生散射, 由于散射光与入射光都是相干的, 彼此干涉后, 受到调制的干涉光辐照在材料的表面上形成了干涉条纹, 在某一方向的干涉效应与入射光束的偏振态有关。根据干涉理论, 条纹与入射光束的偏振方向平行。干涉条纹的

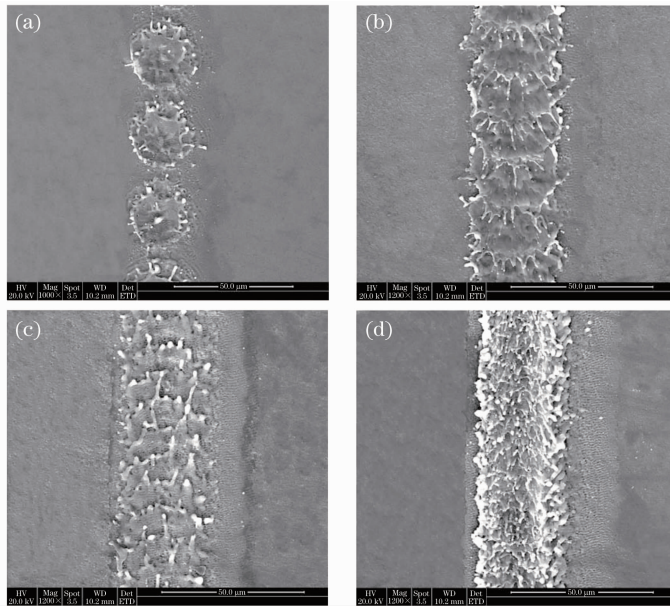


图 5 光斑耦合率对加工质量的影响。(a) 0%;(b) 39.6%;(c) 63.7%;(d) 87.9%

Fig. 5 Effect of spot overlap rate on ablation quality. (a) 0%; (b) 39.6%; (c) 63.7%; (d) 87.9%

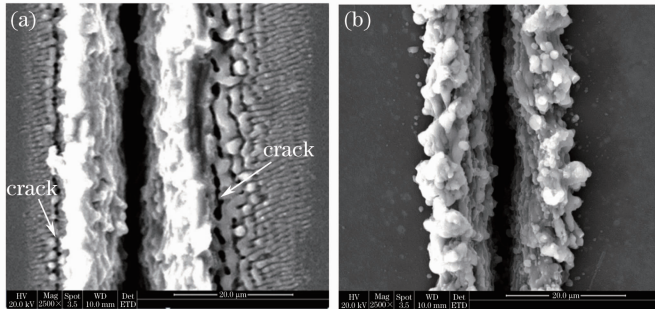


图 6 多次数加工的结果。(a)飞秒激光,50次;(b)紫外纳秒激光,50次

Fig. 6 Results of multiple processing. (a) Femtosecond laser, 50 times; (b) nanosecond laser, 50 times

周期 d 可以计算为

$$d = \frac{\lambda}{(n \pm \sin \theta)}, \quad (5)$$

式中 λ 为入射激光的波长, θ 为激光的入射角度, n 为材料的折射率, 实验中激光一直为垂直入射, 且实验在空气 中进行, 所以干涉条纹的周期与飞秒激光的波长相等, 这与实验所得的数据完全吻合。且随着叠加脉冲数量的增加, 条纹的分辨率不断加强。与该现象相对应的是在使用紫外纳秒激光时, 并未观测到纳米条纹, 这说明条纹的形成受脉冲宽度的影响较大。目前并未有较系统的理论对这方面的原因进行详细的解释。从刻蚀的机理上来分析, 紫外激光刻蚀过程中热作用较为明显, 激光对材料的作用过程为从融化到蒸发, 要想得到高分辨率的条纹, 必须使材料在短时间内迅速汽化, 而紫外纳秒激光并不满足此条件, 另外一方面紫外光的热传导高于干涉光对材料的热作用, 导致无法产生可观测到的

干涉条纹。

4 结 论

利用自主研发的激光微加工平台分别装备飞秒激光器和紫外纳秒激光器, 对比研究了两种激光的激光脉宽、单脉冲能量密度、光斑耦合率和加工次数对单晶硅加工的影响规律。结果表明, 高频率飞秒激光器与紫外激光器相比, 虽然其脉冲较窄, 热作用要小很多, 但在能量较高和多次加工时, 仍然会有大量的液态相的重凝。由于单晶硅材料本身化学性质稳定, 两种激光在加工过程中均未发生材料的氧化, 所以无需在保护气体环境中进行加工。飞秒激光在能量较高或多次加工时, 入射光与散射光干涉, 会产生明显的纳米条纹, 条纹的周期为激光的波长, 随着激光能量的增强和加工次数的增加, 条纹的深度和清晰度都增加, 但同时在材料表面沿加工方向产生不规则裂纹, 这是由于纳米条纹的产生受脉冲宽度

的影响。这说明了飞秒激光作为相对先进的加工手段,其理想的加工结果的获取也是有条件的,由本文实验结果可推测飞秒激光更适用于特种薄材料的加工,而对于超过一定厚度的类单晶硅材料,选用紫外纳秒激光进行加工可能更为合适,同时加工成本也较低。

参 考 文 献

- 1 Wang Zhong, He Li, Xie Yunhui *et al.*. Research on infrared laser scribing technology of single mesa diode wafer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0203002
王 中, 何 里, 谢云辉等. 单台面二极管晶圆红外激光划片工艺研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(2): 0203002
- 2 Liu Chunyang, Sun Lidong, Fu Xing *et al.*. Si microstructure fabricated by 355 nm nanosecond pulsed laser and its fluorescence microscopy study [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2139~2142
刘春阳, 孙立东, 傅 星等. 355 nm 纳秒脉冲激光在硅表面照射形成微结构及其荧光检测[J]. 中国激光, 2010, **37**(8): 2139~2142
- 3 Tom M. Corboline, Edward C. Rea, Corey M. Dunskey *et al.*. High-power UV laser machining of silicon wafers[C]. *SPIE*, 2003, **5063**: 495~500
- 4 Mingwei Li, Kevin Hartke. Study of silicon micromachining using diode-pumped solid-state lasers [C]. *SPIE*, 2004, **5339**: 64~72
- 5 Peng Yan, Wen Ya, Zhang Dongsheng *et al.*. Effect of the relation between femtosecond laser power and pulse number for fabricating surface-microstructured silicon[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1203005
彭 滢, 温 雅, 张冬生等. 飞秒激光功率与脉冲数的比例关系对制备硅表面微结构的影响[J]. 中国激光, 2011, **38**(12): 1203005
- 6 Wang Gang, Yang Xichen, Liang Ming *et al.*. Femtosecond laser processing microporous in aluminum foil [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(5): 051403
汪 刚, 杨洗陈, 梁 铭等. 铝箔微孔的飞秒激光加工工艺的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(5): 051403
- 7 Chen Changshui, He Huili, Li Jianghua *et al.*. The research and application of ultrafast laser microstructured silicon[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(3): 030003
陈长水, 何慧丽, 李江华等. 超快激光微构造硅的研究与应用[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(3): 030003
- 8 R. F. W. Herrmann, J. Gerlach, E. E. B. Campbell. Ultrashort pulse laser ablation of silicon: an MD simulation study [J]. *Appl. Phys. A*, 1998, **66**(1): 35~42
- 9 S. Besner, J. Y. Degorce, A. V. Kabashin *et al.*. Influence of ambient medium on femtosecond laser processing of silicon[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2005, **247**(1-4): 163~168
- 10 Miao Enming, Chen Suxin, Niu Pengcheng *et al.*. Thermal diffusion and thermal melting in femtosecond laser micromachining[J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2011, **42**(4): 224~228
苗恩铭, 陈甦欣, 牛鹏程等. 飞秒激光微加工中热融化与热传递现象研究[J]. 农业机械学报, 2011, **42**(4): 224~228
- 11 A. Borowiec, H. K. Haugen. Subwavelength ripple formation on the surfaces of compound semiconductors irradiated with femtosecond laser pulses[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(25): 4462~4464
- 12 J. H. Ma, X. J. Meng, J. L. Sun *et al.*. Effect of excess Pb on crystallinity and ferroelectric properties of PZT (40/60) films on LaNiO₃ coated Si substrates by MOD technique[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2004, **240**(1-4): 275~279

栏目编辑: 宋梅梅