

文章编号 2095-1531(2014)03-0442-07

真空条件下不同波长固体激光 烧蚀单晶硅的实验研究

齐立涛

(黑龙江科技大学 机械工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022)

摘要:通过倍频 Nd:YAG 固体激光的基波得到波长分别为 532、355 和 266 nm 的激光,研究了单晶硅(Si)对不同波长固体激光的吸收规律和 3 种不同波长激光在真空条件下烧蚀单晶 Si 的烧蚀特征。结果表明,单晶 Si 对波长为 100 ~ 370 nm 的紫外激光具有很好的吸收效果;在其他条件相同时,532 nm 波长激光烧蚀单晶 Si 所需最低单脉冲能量($E_p = 30 \mu\text{J}$)是 355 和 266 nm 波长激光烧蚀单晶 Si 所需最低单脉冲能量($E_p = 15 \mu\text{J}$)的 2 倍;532、355 和 266 nm 的激光烧蚀单晶 Si 的烧蚀阈值随着波长的变短而变小。

关键词:Nd:YAG 固体激光;激光波长;单晶硅;烧蚀阈值

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20140703.0442

Different wavelength solid-state laser ablation of silicon wafer in vacuum

QI Li-tao

(School of Mechanical Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China)

* Corresponding author, E-mail: qtlx@hotmail.com

Abstract: Lasers with wavelengths of 532 nm, 355 nm and 266 nm are obtained using harmonic generation of a Nd:YAG solid-state laser by nonlinear optical crystal. The relationship between the absorption of single crystal silicon and the laser wavelength and ablation characteristics of single crystal silicon by 3 different wavelength lasers under vacuum condition are studied. The results show that single crystal silicon has a good absorption of ultraviolet laser in the wavelength range of 100 – 370 nm, and under the same conditions, the minimum single pulse energy for 532 nm laser ablation of silicon is 30 μJ and the minimum single pulse energy for 355 nm or 266 nm laser ablation of silicon is 15 μJ . The ablation threshold values of 532 nm, 355 nm and 266 nm laser ablation of silicon are different, which become smaller with the decrease of wavelength.

Key words: Nd:YAG laser; laser wavelength; silicon; ablation threshold

收稿日期:2013-12-12;修订日期:2014-02-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51205113);黑龙江省留学归国人员科学基金资助项目(No. LC2011C35);教育部留学回国人员科研启动基金项目;黑龙江科技学院引进人才资助项目(No. 2012-03)

1 引言

随着微制造技术的发展,单晶硅(Si)在半导体工业中的应用日趋广泛。在微机电系统(MEMS)领域中不仅需要平面硅片,也需要Si梁、Si桥和探针臂等结构件、执行机构件、弹性功能件等不定性硅片。实现高速、高质量加工单晶Si是目前研究的热点。激光加工作为一种有效的加工方法受到越来越多的关注。激光加工中,影响加工质量的因素有很多,如激光波长、脉冲能量、脉冲宽度等^[1]。近年来,随着半导体泵浦激光技术和非线性光学的不断发展,不同波长的固体激光在材料加工领域的应用越来越广泛。激光波长对激光加工影响规律的研究也越来越多。日本Namba等人通过对不同波长Nd:YAG固体激光在不同材料表面的反射与吸收以及激光在倍频时转换效率的研究,对比分析了不同波长激光烧蚀材料的加工效率,对激光加工中波长选择进行了优化^[2-3]。但是,激光和材料作用的过程十分复杂,波长的优化不仅受被吸收光以及晶体转换效率的影响,还受到激光照射过程中激光和材料作用的影响。英国Tunna等人对1 064 nm、532 nm、355 nm波长调Q固体激光烧蚀金属铜进行了研究,得到不同波长固体激光烧蚀金属铜的最大去除深度,分别为2.21 $\mu\text{m}/\text{pulse}$ (1 064 nm), 13.3 $\mu\text{m}/\text{pulse}$ (532 nm)和6.68 $\mu\text{m}/\text{pulse}$ (355 nm),而产生上述结果的原因主要是由于不同波长激光在金属铜表面的不同反射率和形成的等离子体不同机制^[4]。另外,不同波长激光加工材料的加工特征也不同,日本Okamoto等人利用倍频的YAG激光微细加工SiC和AlN陶瓷材料,对其加工特征进行了研究,结果表明,在真空中比在空气中加工效率高,烧蚀区域周围存在氧化层,而在266 nm波长激光加工时材料被氧化的程度较高^[5]。近年来,由于激光在多个领域内的应用越来越广泛,国内学者对于不同波长激光加工材料的研究也越来越多。高卫东等人对单晶Si的1 064 nm波长Nd:YAG脉冲激光损伤特性进行了研究,研究结果表明,在1 064 nm单脉冲激光作用下,单晶Si主要表现为热作用下熔融烧蚀破坏;

而在自由脉冲激光作用下,单晶Si在较低能量密度照射下表现为热-力耦合作用下的解离剥蚀破坏,而能量密度较高时,为熔融破坏技术^[6]。国内包凌东等人研究了355 nm紫外重复脉冲激光烧蚀单晶Si的热力学过程,对整个烧蚀过程进行了观测,结果表明,紫外激光加工Si是基于热、力效应共同作用的结果,热效应提供了材料被去除的条件,力效应加大了烧蚀深度和孔径比,而等离子体的产生对烧蚀过程有一定的限制作用^[7]。俞君等人对比分析了紫外和红外两种激光对材料加工的影响规律,得出了紫外激光在加工中具有明显的优势^[8]。张菲等人对355和1 064 nm全固态激光器刻蚀印刷电路板进行了研究,得出不同波长激光可用来加工印刷电路板的的不同部分,主要受激光波长的影响^[9]。此外,不同波长固体激光在蓝宝石晶圆划切、陶瓷材料加工和半导体芯片切割等领域有着广泛的研究和应用^[10-12]。由此可见,激光波长对激光加工的质量有着很重要的作用,不同波长激光在材料表面的吸收特征和烧蚀特征直接影响激光加工的质量。针对上述问题,本文利用非线性光学晶体对YAG产生的基频(1 064 nm)激光进行倍频,进行532、355、266 nm波长激光烧蚀单晶Si的实验,研究了单晶Si对不同波长固体激光的吸收规律和3种不同波长固体激光烧蚀单晶Si的烧蚀特征。

2 实验设备和方法

实验中用非线性光学晶体倍频YAG激光产生的532、355、266 nm波长激光进行烧蚀单晶Si的研究,系统结构如图1所示。激光器为泵浦灯泵浦的Nd:YAG固体激光器,经过调Q后,脉冲宽度为几ns,重复频率为3 Hz,基波时单脉冲最大能量为1 mJ。激光烧蚀时,脉冲数量通过计算机控制激光器电源来实现,激光脉冲能量利用激光器电源和中性滤波片进行调整。实验过程中,工件放在密闭的真空腔中,利用分子涡轮泵抽取真空,真空腔的真空度可达 1.33×10^{-4} Pa。激光束通过焦距为50 mm的透镜聚焦后垂直入射在工件的表面。被照射后的工件放在装有酒精的超声波清洗仪中进行清洗,通过扫描电子显微镜

(SEM)进行表面形貌的观测。实验中使用的 Si 为 p 型(100)。

YAG 固体激光器可产生 1 064 nm 波长范围的连续和脉冲激光。利用非线性光学晶体,可将 YAG 固体激光进行多次倍频,得到不同波长的激光。本实验进行了基频的二次、三次和四次倍频。利用 KTP 和 KD*P 非线性光学晶体实现激光频率转换。首先,从 Nd:YAG 谐振腔中发出的基波(ω :1 064 nm)经过非线性光学晶体 KTP 进行二次倍频(2ω :532 nm),得到波长为 1 064 nm 和波长为 532 nm 的激光,经过分光镜滤除波长为 1 064 nm 的激光,得到波长为 532 nm 的激光。其次,把波长为 532 nm 的激光经过非线性光学晶体 KD*P 进行二次倍频(4ω :266 nm),可以得到波长为 532 和 266 nm 的激光,经过分光镜滤除波长为 532 nm 的激光,得到波长为 266 nm 的激光。而后,为了得到 355 nm 波长的激光,从非线性光学晶体 KTP 出来的同时具有 1 064 和 532 nm 的激光束直接在经过非线性光学晶体 KD*P,可以得到光束的和倍频(3ω :355 nm),因此,可得到波长为 1 064,532 和 355 nm 的激光,经过分光镜滤除波长为 1 064 和 532 nm 的激光,得到波长为 355 nm 的激光。

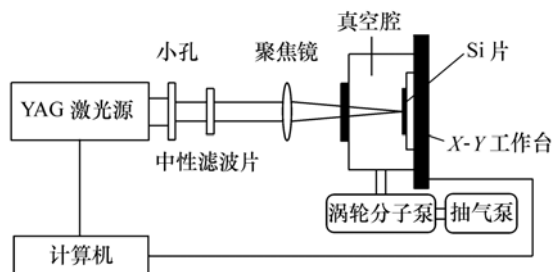


图1 532,355 和 266 nm 波长激光烧蚀单晶 Si 的系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup for 532, 355 and 266 nm laser ablation of single crystal Si

3 实验结果与讨论

3.1 单晶 Si 对不同波长固体激光的吸收

单晶 Si 对不同波长的激光的反射率(R)和

吸收系数(α)可通过式(1)和式(2)算得^[13-14],所得结果如图2和图3所示。从图2和图3中可以看出,在紫外区域光的反射率要明显高于其他区域。在波长 100~370 nm 的区域,单晶 Si 对激光的吸收系数最高。

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}, \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}. \quad (2)$$

式中, R 是反射率, n 是折射率的实数部分, k 是折射率或者吸收率的虚数部分, α 是吸收系数, λ 为激光波长。

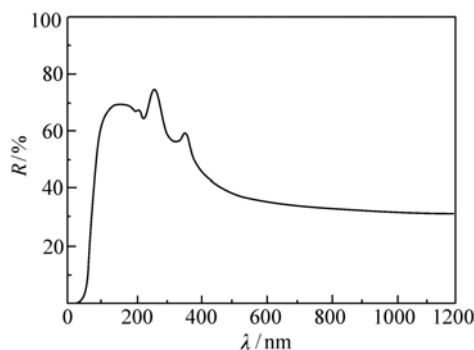


图2 单晶 Si 的反射率

Fig. 2 Reflectivity of single crystal Si

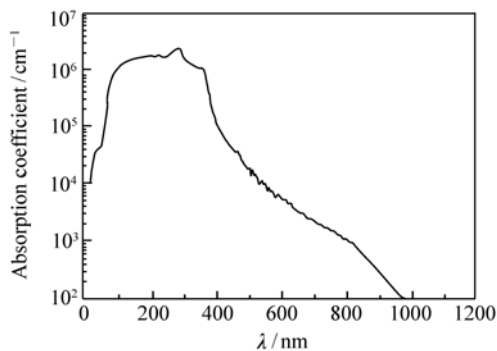


图3 单晶 Si 的吸收系数

Fig. 3 Absorption coefficient of single crystal Si

激光微细加工被认为是在工件表面上很薄的一层上进行的工艺过程。通过计算可以得到在离工件表面 10、5 和 1 nm 的吸收率,计算结果如图4所示。从图4中可以看出,单晶 Si 对激光的吸收率在紫外区域较高,特别是波长范围 100~370 nm 的激光。

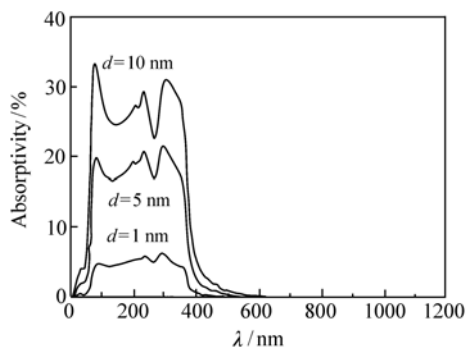


图4 单晶 Si 在不同深度对激光的吸收率

Fig. 4 Absorptivity of single crystal Si to laser in different depth

3.2 532、355 和 266 nm 波长固体激光烧蚀单晶 Si 的烧蚀特征

实验中,利用非线性光学晶体获得 532、355 和 266 nm 波长激光后,用不同的脉冲能量 (E_p) 和脉冲数量 (N) 的激光对放置在真空腔中的单晶 Si 试件进行照射。照射后,将试件放在装有酒精的超声波清洗仪中进行清洗,利用扫描电子显微镜对试件进行观测。532、355 和 266 nm 波长激光烧蚀单晶 Si 的观测结果分别如图 5、图 6 和图 7 所示。在图 5 ~ 7 中,图片左侧为单脉冲能量 (E_p),图片上方的数量 (N) 为照射的脉冲数量,

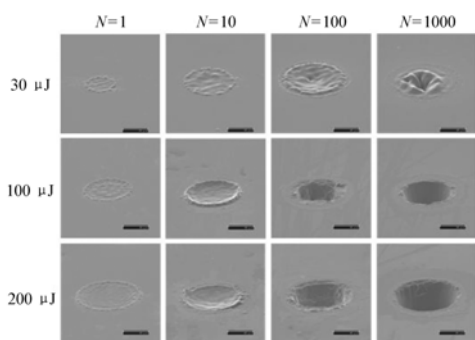


图5 532 nm 波长激光烧蚀单晶 Si 的 SEM 图(标尺:30 μm)

Fig. 5 SEM images of 532 nm laser ablation of single crystal Si

图中的每个小图片对应于不同脉冲能量和脉冲数量照射的结果。

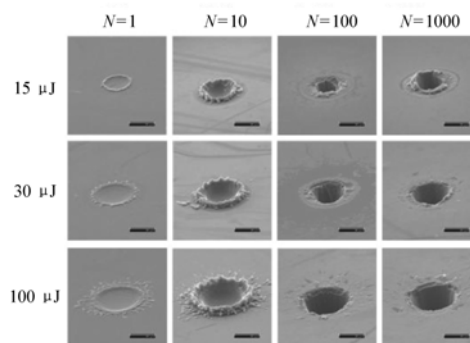


图6 355 nm 波长激光烧蚀单晶 Si 的 SEM 图(标尺:20 μm)

Fig. 6 SEM images of 355 nm laser ablation of single crystal Si

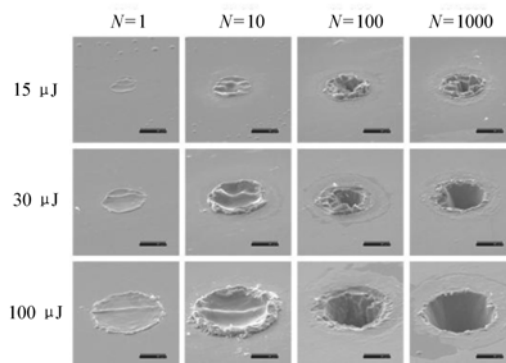


图7 266 nm 波长激光烧蚀单晶 Si 的 SEM 图(标尺:20 μm)

Fig. 7 SEM images of 266 nm laser ablation of single crystal Si

图 5 ~ 7 中,3 种不同波长激光烧蚀单晶 Si 表现出一些相同的现象和规律。烧蚀区域的直径随着脉冲能量的增加而变大,而脉冲数量对于烧蚀区域的直径的改变不大。当激光脉冲能量较小时,少量的脉冲数量照射可得到较好的加工效果,烧蚀区域内的熔融物质容易排出,但是滞留在烧蚀区域的周围。随着脉冲数量的增加,烧蚀区域的深度增加,使得熔融物的排出变得困难,部分滞留在烧蚀区域中,使得烧蚀区域的质量变坏。

3 种不同波长激光烧蚀单晶 Si 的最低单脉冲能量不同。在图 5 中,532 nm 波长激光烧蚀单晶 Si 所需要的最低单脉冲能量为 $E_p = 30 \mu\text{J}$,在图 6

和图7中,355和266 nm波长激光烧蚀单晶Si所需要的最低单脉冲能量为 $E_p = 15 \mu\text{J}$,二者之间呈现2倍的关系。这主要是由于单晶Si对3种不同波长激光的吸收率、破坏机理以及烧蚀阈值不同而导致的。在3.1节中,通过计算和分析可知,单晶Si对波长100~370 nm的激光有着很高的吸收率。3种不同波长激光的单光子能量不同,而355和266 nm波长激光的单光子能量要大于532 nm波长激光的单光子能量,且大于单晶Si的结合键能,使得烧蚀过程中光热蚀除和光化学蚀除占有比例不同,使得3种不同波长激光烧蚀单晶Si的最低单脉冲能量不同。但是3种不同波长激光烧蚀单晶Si中光热蚀除和光化学蚀除还有待于深入的研究。另外,3种不同波长激光烧蚀单晶Si的烧蚀阈值对烧蚀单晶Si的最低单脉冲能量也起着一定的作用,3种不同波长激光烧蚀单晶Si的烧蚀阈值在3.3节中进行了详细的说明。

当激光脉冲能量较高时,少量的脉冲数量照射时(如 $N=1$),烧蚀区域的质量较好,熔融物质被从烧蚀区域中被排出,但堆积在烧蚀区域的周围。当脉冲数量增加到一定范围内时($N=25\sim 250$),烧蚀区域及其周围的加工质量变差。这是由于烧蚀孔的形成,影响了熔融物的排出,堆积在烧蚀孔内和孔的周围,使得烧蚀孔的质量变差。随着脉冲数量的不断增加($N>500$),烧蚀孔内及其周围的质量逐渐变好。

由此可见,脉冲数量对于加工质量有着比较明显的影响。在加工过程中应该选择合理的脉冲数量以达到加工的目的。在脉冲数量较多时,可明显改善烧蚀孔内及其周围的质量,主要是激光的高斯光束进行二次加工的效果,二次加工使得烧蚀孔内的熔融物重新被烧蚀去除,烧蚀孔及其周围的表面质量得到改善。但照射过程中熔融物质从烧蚀孔内的排出及孔周围的去除还需要进行深入的研究。

3.3 532、355和266 nm波长激光烧蚀单晶Si的烧蚀阈值

532 nm波长激光烧蚀单晶Si所需要的最低

单脉冲能量为 $E_p = 30 \mu\text{J}$,355 nm和266 nm波长激光烧蚀单晶Si所需要的最低单脉冲能量为 $E_p = 15 \mu\text{J}$ 。主要是由于单晶Si对3种不同波长激光的吸收率、破坏机理以及烧蚀阈值不同而导致的。532、355和266 nm波长激光烧蚀单晶Si的烧蚀阈值可通过计算得到。

选择不同单脉冲能量的激光照射单晶Si表面,经SEM检测得到烧蚀区域的直径数据,通过数值拟合计算可以得到激光烧蚀材料的烧蚀阈值。

对于高斯光束,其空间能量密度分布 $\phi(r)$ 可表示为:

$$\phi(r) = \phi_0 e^{-2r^2/\omega_0^2}, \quad (3)$$

式中, r 为光束边缘到光束中心的距离(μm), ϕ_0 为激光束的能量密度(J/cm^2), ω_0 为高斯光束束腰(μm)。激光的能量密度与脉冲能量的关系为:

$$\phi_0 = \frac{2E_p}{\pi\omega_0^2}, \quad (4)$$

式中, E_p 为激光的脉冲能量。在激光烧蚀材料的过程中,激光烧蚀区域和光束束腰以及激光能量密度存在如下的规律^[15]:

$$D^2 = 2\omega_0^2 \ln\left(\frac{\phi_0}{\phi_{th}}\right). \quad (5)$$

式中, ϕ_{th} 为材料的烧蚀阈值(J/cm^2), D 为烧蚀区域的直径(μm)。由于激光脉冲能量和能量密度之间的线性关系,可通过测量被烧蚀区域的直径以及激光脉冲能量,求出烧蚀阈值,图8为单脉冲266 nm波长激光烧蚀单晶Si的烧蚀区域的直径与激光能量的关系。通过上述方法计算得到532、355和266 nm波长激光烧蚀单晶Si的烧蚀阈值,如表1所示。532、355和266 nm波长激光烧蚀单晶Si的烧蚀阈值不同,532 nm波长激光需要的烧蚀阈值最大,355和266 nm波长激光的烧蚀阈值小一些。因为355和266 nm波长激光的单光子能量要大于单晶Si中Si—Si键的键能(2.35 eV),因此在照射的过程中,除了光热蚀除外,还有光化学蚀除,而532 nm波长激光在照射的过程中,只存在光热蚀除^[16]。

表1 532、355和266 nm 波长激光
烧蚀单晶 Si 的烧蚀阈值

Tab.1 Ablation threshold values of 532 nm, 355 nm
and 266 nm laser ablation of single crystal Si

参数名称	参数值		
波长 λ/nm	532	355	266
烧蚀阈值 $\phi_{th}/(\text{J}\cdot\text{cm}^{-2})$	1.83	1.76	1.23

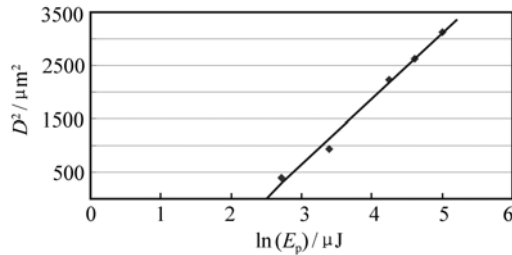


图8 266 nm 波长激光单脉冲照射单晶 Si 中烧蚀孔径与激光能量的关系图

Fig.8 Relationship between the diameter of the ablated area and the pulse energy at 266 nm wavelength laser

参考文献:

- [1] 刘晋春,白基成,郭永丰.特种加工[M].5版.北京:机械工业出版社,2010.
LIU J CH,BAI J CH,GUO Y F. *Non-traditional Machining*[M]. 5th ed. Beijing:China Machine Press,2010. (in Chinese)
- [2] HE L,NAMBA Y. Spectroscopic analysis for machining of inorganic materials with the harmonics of a Nd:YAG laser[J]. *Prec. Eng.*,2000,24(4):357-363.
- [3] HE L,NAMBA Y,NARITA Y. Wavelength optimization for machining metals with the harmonic generations of a short pulsed Nd:YAG laser[J]. *Prec. Eng.*,2000,24(3):245-250.
- [4] TUNNA L,KEARNS A,O'NEILL W,*et al.*. Micromachining of copper using Nd:YAG laser radiation at 1064, 532, and 355 nm wavelengths[J]. *Optics Laser Technology*,2001,33:135-143.
- [5] OKAMOTO Y,SAKAGAWA T,NAKAMURA H,*et al.*. Micro-machining characteristics of ceramics by harmonics of Nd:YAG laser[J]. *J. Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*,2008,2(4):661-667.
- [6] 高卫东,田光磊,范正修,等.单晶硅材料的1064 nm Nd:YAG 脉冲激光损伤特性研究[J].材料科学与工程学报,2005,23(3):317-320.
GAO W D,TIAN G L,FAN ZH X,*et al.*. Laser damage process in single-crystalline silicon with different 1064 nm Nd:YAG laser modes[J]. *J. Materials Science Eng.*,2005,23(3):317-320. (in Chinese)
- [7] 包凌东,韩敬华,段涛,等.纳秒紫外重复脉冲激光烧蚀单晶硅的热力学过程研究[J].物理学报,2012,61(19):197901.
BAO L D,HAN J H,DUAN T,*et al.*. Investigation of thermodynamic process of silicon ablated by nanosecond UV repetitive pulse laser[J]. *Acta. Phys. Sin.*,2012,61(19):197901. (in Chinese)
- [8] 俞君,曾智江,朱三根,等.紫外激光在微细加工技术中的优势研究[J].红外,2008,29(6):9-13.

4 结 论

本文对532、355和266 nm 波长激光真空条件下烧蚀单晶 Si 进行了研究。得到了单晶 Si 对不同波长激光的吸收和烧蚀特性,主要结论如下:

(1)单晶 Si 对激光的吸收率在紫外区域较高,特别是波长范围为100~370 nm 的激光。

(2)烧蚀孔的直径随着脉冲能量的增加而变大,而脉冲数量对于孔径的改变不大,但是烧蚀区域随着脉冲数量的增加而不同。在其他条件相同条件下,532 nm 波长激光烧蚀单晶 Si 所需要的最低单脉冲能量($E_p = 30 \mu\text{J}$)是355和266 nm 波长激光烧蚀单晶 Si 所需要的最低单脉冲能量($E_p = 15 \mu\text{J}$)的2倍,主要是由于单晶 Si 对3种不同波长激光的吸收率、破坏机理以及烧蚀阈值不同导致的。

(3)532、355和266 nm 波长激光烧蚀单晶 Si 的烧蚀阈值不同,分别为 $\phi_{th}(532) = 1.83 \text{ J/cm}^2$, $\phi_{th}(355) = 1.76 \text{ J/cm}^2$, $\phi_{th}(266) = 1.23 \text{ J/cm}^2$,随着激光波长变短,烧蚀阈值变小。

- YU J, ZENG ZH J, ZHU S G, *et al.*. Research on advantages of UV laser in fine processing technology[J]. *Infrared*, 2008, 29(6):9-13. (in Chinese)
- [9] 张菲, 曾晓雁, 李祥友, 等. 355 nm 和 1064 nm 全固体激光器刻蚀印刷电路板[J]. *中国激光*, 2008, 35(10):1637-1643.
- ZHANG F, ZENG X Y, LI X Y, *et al.*. Laser etching and cutting printed circuit board by 355 nm and 1064 nm diode pumped solid state lasers[J]. *Chinese Laser*, 2008, 35(10):1637-1643. (in Chinese)
- [10] 黄欢, 杨立军, 王懋露, 等. 紫外激光划切蓝宝石晶圆的实验研究[J]. *电加工与模具*, 2009, 5:35-38.
- HUANG H, YANG L J, WANG M L, *et al.*. The experimental research of sapphire dicing by a UV laser[J]. *Electromachining Mould*, 2009, 5:35-38. (in Chinese)
- [11] 杨松涛, 韩微微, 张文斌, 等. 355 nm 激光新型陶瓷加工研究[J]. *电子工业专用设备*, 2011, 2:8-11.
- YANG S T, HAN W W, ZHANG W B, *et al.*. Investigation of 355 nm laser ceramics machining[J]. *Equipment for Electronic Product Manufacturing*, 2011, 2:8-11. (in Chinese)
- [12] 王磊. 紫外激光在半导体芯片切割中优势的研究[J]. *电子工业专用设备*, 2010, 4:13-16.
- WANG L. Research on advantage of UV laser in semiconductor wafer cutting[J]. *Equipment for Electronic Product Manufacturing*, 2010, 4:13-16. (in Chinese)
- [13] HE L M. Micromachining for making optical computer using harmonic generations of solid-state lasers[D]. Kasugai: Chubu University, 1999.
- [14] POPRAVE R 著. 激光制造工艺-基础、展望和创新实例[M]. 张冬云, 译. 北京:清华大学出版社, 2008:10-21.
- POPRAVE R. *Lasertechnik für die Fertigung-Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den Innovativen Ingenieur*[M]. ZHANG D Y, Transl. Beijing:Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)
- [15] LIU J M. Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes[J]. *Optics Letters*, 1982, 7:196-198.
- [16] DULEY W W. *UV Lasers: Effects and Applications in Materials Sciences*[M]. UK:Cambridge University Press, 1996.

作者简介:



齐立涛(1977—),男,黑龙江绥化人,博士,讲师,硕士生导师,2000年于大庆石油学院获得学士学位,2003年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,2010年于日本中部大学获得博士学位,主要从事激光和材料作用机理、激光加工和先进制造技术等方面的研究。E-mail:qltx@hotmail.com