

532 nm 平顶激光光束用于硅晶圆开槽的研究

李海鸥¹, 韦春荣¹, 王晓峰^{2,3*}, 张紫辰^{2,4}, 潘岭峰²¹桂林电子科技大学广西精密导航技术与应用重点实验室, 广西 桂林 541004;²中国科学院微电子研究所微电子设备技术研究室, 北京 100029;³中国科学院半导体研究所半导体集成技术工程中心, 北京 100083;⁴清华大学精密仪器系微纳制造器件与系统协同创新中心精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084

摘要 根据衍射原理,设计并制备了平顶整形元件,将激光能量由高斯分布转变为平顶分布。利用 532 nm 脉冲激光进行了硅晶圆激光划片实验,研究了激光能量、划片速度及聚焦位置对划片效果的影响。结果表明,基于平顶光束的激光划片,可实现宽约为 16 μm 、深约为 18 μm 的划槽,且槽底部平坦,槽壁陡直;与高斯光束相比,平顶光束下热影响区明显减小。

关键词 激光技术; 脉冲激光; 激光划槽; 平顶整形; 硅片; 热影响区

中图分类号 TN249 **文献标识码** B

doi: 10.3788/LOP54.091407

Study on 532-nm Flattened Laser Beam for Silicon Wafer Grooving

Li Haiou¹, Wei Chunrong¹, Wang Xiaofeng^{2,3}, Zhang Zichen^{2,4}, Pan Lingfeng²¹Guangxi Key Laboratory of Precision Navigation Technology and Application, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;²Microelectronic Equipment Technology Laboratory, Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;³Engineering Research Center for Semiconductor Integrated Technology, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;⁴State Key Laboratory of Precision Testing Technology and Instruments, Micro-Nano Manufacturing Equipment and Systems Collaborative Innovation Center, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract According to the diffraction principle, a flattened shaping element is designed and prepared, which converts a Gaussian distribution of laser energy to a flat-top distribution. The laser dicing test of silicon wafers is carried out by using the 532 nm pulsed laser and the influences of laser energy, dicing speed and focusing position on the wafer cutting effect are investigated. The results show that based on the laser dicing by flattened beams, a groove with a width of about 16 μm and a depth of about 18 μm can be obtained, whose bottom is flat and wall is steep. In addition, the heat affected zone under the flattened beam is obviously smaller than that under the Gaussian beam.

Key words laser technique; pulsed laser; laser grooving; flat-top shaping; silicon slice; heat affected zone

OCIS codes 140.3540; 140.3390; 140.3300

1 引言

随着科学技术的发展,集成电路(IC)的特征尺寸已经降到 40 nm 节点^[1]、28 nm^[2]节点甚至更小,后端

收稿日期: 2017-03-23; 收到修改稿日期: 2017-05-04

基金项目: 国家自然科学基金(61376083)、中国科学院装备研制项目、广西自然科学基金(2016GXNSFDA380021)

作者简介: 李海鸥(1974—),男,博士,教授,主要从事微波集成电路、功率器件方面的研究。

E-mail: seagull_1228@hotmail.com

* 通信联系人。E-mail: wangxiaofeng@ime.ac.cn

工序的互连技术从 Al/SiO₂ 变成铜/低介电常数材料,原因是铜和低介电常数介质层的多层互连可以提高逻辑器件的运算速度、降低串扰噪声和由阻容(RC)延迟带来的传输延迟及功率损耗。为了节约成本和提高效率,往往在一块晶圆上制作成千上万个 IC 芯片阵列,再通过划片的方式将晶圆分离成单个晶粒,以便后续封装。因此,切割质量的好坏同样影响着 IC 芯片的性能优劣。然而,低介电常数材料比 SiO₂ 更易碎、附着性更低,使用传统的刀片切割技术容易发生粘连、剥离和分层等现象。为了解决以上问题,引入了激光切割技术^[3-4],即首先利用激光划槽,再通过金刚刀使晶圆断裂分离,或者利用激光诱导热应力控制裂纹的扩展,使材料分离,达到切割的目的。激光划片的过程可以概括为:聚焦后的高能量激光束照射到材料表面,一部分入射光被反射回去,材料吸收另一部分入射光发生光热转换,被辐照区域迅速升温,达到材料的蒸发温度,此时的激光能量称为阈值能量。一旦激光能量超过阈值能量,被辐照区域就会融化、汽化或分解,形成划痕^[5]。

目前,已有多种针对硅晶圆的激光划片技术,比较典型的有水刀技术、超快激光划片技术及基于纳秒固体激光器的划片技术。例如,由瑞士 Synova SA 公司发明的水刀激光划片技术^[6-7],可消除传统激光热影响区过大、脆性重铸的缺陷,但其对设备精度要求非常高。利用皮秒、飞秒激光冷加工的特点进行晶圆划片的超快激光划片技术同样可以减小热影响区的范围,而且划片速度比普通激光划片的快很多^[8-10]。冷加工是一个复杂的过程,热效应小,在精密切割和微加工领域具有广泛的应用^[11]。但是皮秒激光器价格较高,其可靠性有待于提高。因此,基于纳秒固体激光器进行激光划片是目前工业界的主流技术。日本 DISCO 公司发明的单点高斯光束分两次开槽^[12-13],有效避免了后续使用刀片分离晶圆引起的边缘介质层破碎、分层等现象的发生,但两次开槽方式降低了划片效率,同时设备价格昂贵。荷兰 ALSI 公司将激光束分束后重叠开槽^[14-15],速度明显提高,但光束定位困难、设备要求高。长条(椭圆)光束切割^[16-17]方法有效提高了划片速度,但槽侧壁不够陡直,可能给用于后续晶片分离的刀片带来损伤。

目前已报道的纳秒固体激光器激光划片都是基于高斯光束,存在热影响区过大、边缘粗糙、侧壁不陡直等问题,因此,本文提出了使用平顶光束替换高斯光束进行划片的划片方法。利用整形元件^[18]的特性,将高斯光束转换成平顶光束进行晶圆切割实验,分析了平顶光束对晶圆切割质量的影响,研究了平顶整形激光切割晶圆的槽型、深度、宽度、表面形貌及热影响区等。

2 实验装置及实验方法

2.1 实验装置

图 1 所示为激光划片装置示意图,实验用激光器为全固态激光器,波长为 532 nm,重复频率为 20~50 kHz,最大功率为 20 W。光路系统由扩束准直镜、光阑、反射镜、平顶元件及聚焦系统组成,其中扩束镜的倍率为 6~15;光阑用于滤掉边缘的杂散光以进一步提高光束质量;45°反射镜可上下、左右和俯仰调整,确保光束垂直于移动平台;平顶元件对激光进行相位调制,从而在聚焦镜焦点附近得到符合要求的正方

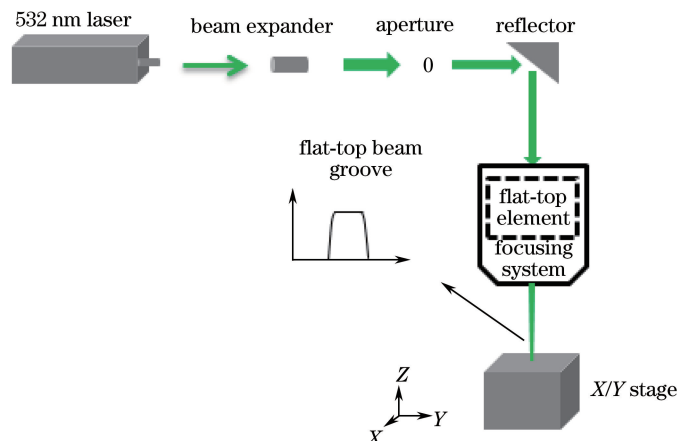


图 1 激光划片工作原理示意图

Fig. 1. Schematic of working principle for laser scribing

形平顶光斑;聚焦透镜焦距为 50 mm,聚焦系统位于垂直移动的装置上,控制激光焦点与晶圆表面的离焦量。位移平台为二维直线运动装置,由控制系统控制运动轨迹。

2.2 实验方法

实验选用半导体工业中常用的直径为 0.13 m、厚度为 0.42 mm 的单晶硅片作为试样材料。固定激光器的重复频率为 30 kHz,对应的脉冲宽度为 20 ns。以激光辐照能量、扫描速度和离焦量作为工艺参数,在空气环境下进行激光单次扫描划片实验,使用以色列 Ophir Optronics 公司开发的 SP620U 光束质量分析仪测试光斑特性,使用日本 OLYMPUS 公司开发的 SZ61 光学显微镜观察划线表面形状和热影响区分布,通过日本 OLYMPUS 公司的 LEXT OLS4000 3D 激光测量显微镜观察划槽形貌。

3 实验结果与分析

3.1 平顶光束整形效果

高斯光束的能量分布是中间高两边低,而平顶光束在光斑内的能量分布均匀。在图 1 所示的光路系统下,利用以色列 Ophir Optronics 公司生产的 SP620U 激光光束质量分析仪和其开发的第三代 BeamGage 软件,测得高斯光斑和平顶光斑,如图 2 所示。平顶光斑的边长约为 $16\ \mu\text{m}$ 。由于光斑处的温度分布与能量密度分布相关,因此平顶光束的温度分布均匀且上升沿、下降沿陡峭。当光束照射晶圆表面时,光斑直径内的材料吸收能量达到蒸发温度,控制平台移动,晶圆上就留下一条底部平坦、切口宽度与光斑直径相等的划线。

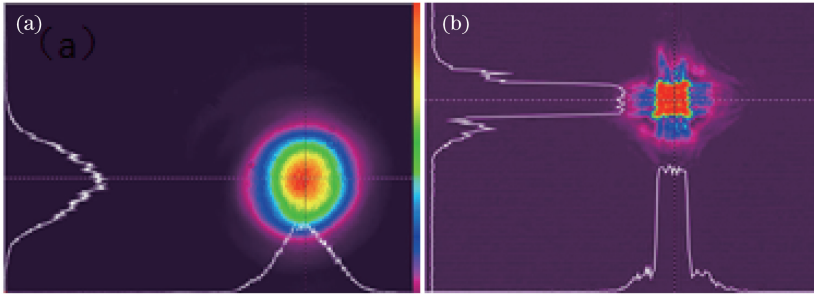


图 2 (a)高斯光斑和(b)平顶光斑实测图

Fig. 2 Measured maps of (a) Gaussian spot and (b) flat-top spot

3.2 离焦量对平顶位置的影响

离焦量定义为透镜焦点位置与晶圆表面的垂直距离,当焦点位置在晶圆表面上时,离焦量为零,当焦点位于表面上方时离焦量为正,反之离焦量为负。所有的实验设计中离焦量均为正。

由文献[15]可知,硅的阈值能量密度为 $1\ \text{J}/\text{cm}^2$,只有具有大于或等于该能量密度的激光照射,才能在硅片上留下刻槽,达到划片目的,而在低于阈值能量的激光辐照区域,硅熔化后固化,重新附着于划线槽表面附近,该区域称为热影响区。当激光能量密度为 $13.2\ \text{J}/\text{cm}^2$ 、划线速度为 $50\ \text{mm}/\text{s}$ 时,不同离焦量下晶圆划片结果如图 3 所示,其中内插图为划线槽的横截面图。由图 3 可知,随着离焦量的减小,划线槽越来越接近 V 型;在离焦量为 $0.5\ \text{mm}$ 时,划线槽底部平坦,槽壁较陡直,槽型呈 U 型,该位置为平顶整形的位置;热影响区也随着离焦量的减小而减小,这是因为越接近焦点,激光能量越集中,平顶整形的效率越高,光斑几乎占据整个能量分布区域,热影响区变小。

从图 3 中还可观察到,在划线槽的表面附近,附着有大小不一的颗粒状物质,这是因为该实验在空气环境下进行,由于空气浮动等因素,硅吸收高能量汽化,在上升过程中遇冷凝固,形成硅渣掉落在晶圆表面。

图 4 所示为离焦量对划线槽深度和宽度的影响,可以看到,离焦量越大,划线深度越小,而划线宽度越大。这是因为在激光能量一定的情况下,越接近焦点,激光能量越集中,峰值能量越大,激光透入硅片的深度就越深,光斑直径也越小,表现为划线宽度越小。由图 3 和图 4 可知,整形元件实现了将激光束从高斯分布转为平顶分布的效果;平顶光斑划线的刀口宽度约为 $16\ \mu\text{m}$,槽深约为 $18\ \mu\text{m}$,实现了槽底平坦及槽壁垂直的效果,这对工业应用具有很好的参考意义。

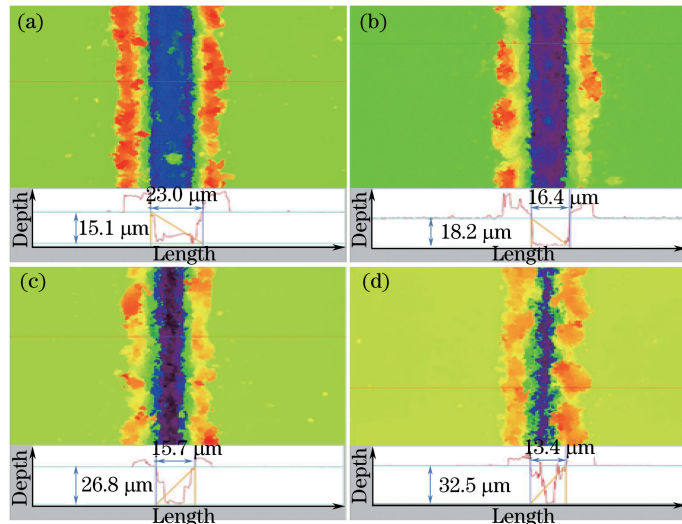


图 3 不同离焦量下的硅晶圆开槽三维图。(a) 0.6 mm;(b) 0.5 mm;(c) 0.4 mm;(d) 0.3 mm
Fig. 3 Three-dimensional maps of silicon wafer grooving under different defocusing distances.

(a) 0.6 mm; (b) 0.5 mm; (c) 0.4 mm; (d) 0.3 mm

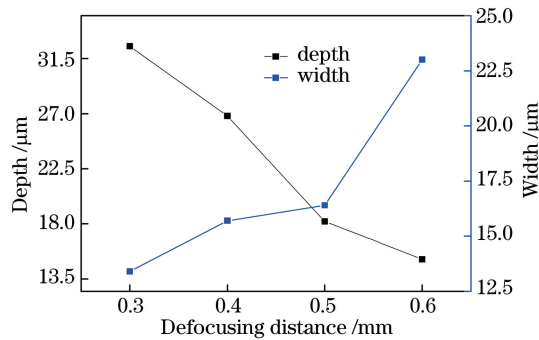


图 4 离焦量与划线深度及宽度的关系

Fig. 4 Defocusing distance versus depth and width of scribe line

3.3 激光能量对划片结果的影响

在其他参数固定不变的条件下,激光能量对划片效果的影响主要体现在划片深度、宽度和热影响区上。当激光能量增大时,单位时间内聚焦于晶圆片上的能量增加,热影响区变大,划片加深;同时,高于阈值能量的激光辐照区域变宽,即光斑直径变大,表现为划片宽度的增加。图 5 所示为平顶位置处不同激光能量下的划片效果三维图,可以看出,四个划线槽的底部均较平坦,槽壁也比较陡直,说明整形元件起到了良好的平顶整形效果。随着能量的增加,堆积的硅渣增多、范围增大,说明热影响区增大。

图 6 所示为激光能量对划线深度及宽度的影响,可以看到,划线深度和宽度都随着激光能量的增加而增大,符合前文的理论分析。而当激光能量超过一定值后,划线深度随着激光能量的增加而减小。这是因为在空气环境下,能量越高,热影响区越大,材料熔化越严重,在划片速度不高的情况下,边缘熔化的硅填到划槽里,减小了划线深度;同时,能量越高,材料汽化量也越大,在上升过程中遇冷回掉的也越多,导致线槽深度受到影响。

3.4 划片速度对划片结果的影响

当激光能量密度分别为 13.2 J/cm^2 和 17.1 J/cm^2 时,平顶位置处划片速度对划线深度和宽度的影响如图 7 所示,可以看出,在一定范围内,随着划片速度的增大,划线深度逐渐减小,而划线宽度几乎不变。原因在于,随着划片速度的增大,作用于材料表面的激光脉冲数减少,即单位面积上得到的能量减少,材料持续吸收的能量被快速中断,使得材料的汽化量减小,导致划线深度减小。由脉冲能量和光斑直径公式可知,划片速度与脉冲能量及光斑直径无关,在一定范围内,取合适的激光能量密度,恰好可以按照划片要求将材料完

全去除,而划线的宽度几乎不会变化,即速度对划线宽度影响不大。而划片速度较低时,激光与材料相互作用时间较长,大量熔化和回掉的材料填充在切口边缘,导致线宽变小。

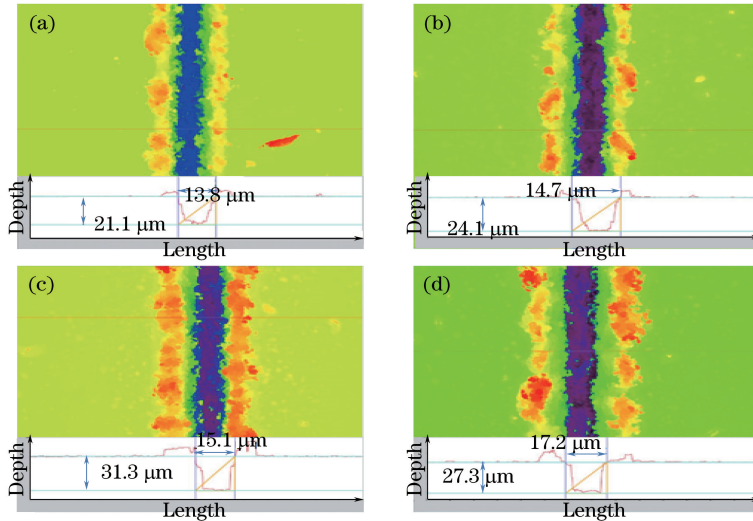


图5 不同能量密度下的硅晶圆开槽三维图。(a) $9.45 J \cdot cm^{-2}$; (b) $12.6 J \cdot cm^{-2}$; (c) $17.6 J \cdot cm^{-2}$; (d) $20.2 J \cdot cm^{-2}$

Fig. 5 Three-dimensional maps of silicon wafer grooving under different energy densities.

(a) $9.45 J \cdot cm^{-2}$; (b) $12.6 J \cdot cm^{-2}$; (c) $17.6 J \cdot cm^{-2}$; (d) $20.2 J \cdot cm^{-2}$

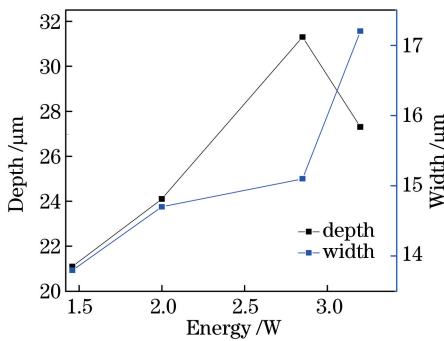


图6 激光能量与划线深度及宽度的关系

Fig. 6 Laser energy versus depth and width of scribe line

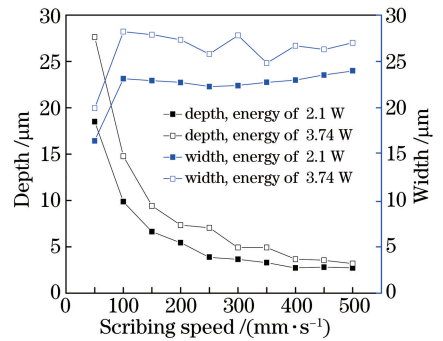


图7 划片速度与划线深度及宽度的关系

Fig. 7 Scribing speed; versus depth and width of scribe line

综上所述,划片效果与平顶位置、激光能量及划片速度等有关,平顶位置、激光能量及划片速度并不是独立地影响划线深度或者宽度,其中一个参数的改变都可能影响整个划片效果。因此,应根据实际情况合理设计这些参数,才能取得好的划片效果。

3.5 旋涂保护膜对划片结果的影响

激光划片之后,晶圆表面会附着很多硅渣,越靠近划线附近硅渣越密集,而且颗粒越大。一部分硅渣由热影响造成,当划线周围的硅吸收能量达到熔化状态时,由于硅片沿着既定轨迹快速运动,根据惯性定律和热膨胀原理,熔化的硅往划线两边延伸,遇冷后重新凝固,在边缘处形成团状的、颗粒较大的硅渣。解决的办法之一是在硅晶圆上涂覆一层保护膜。实验选用工业常用的水溶性聚乙烯醇作为保护膜,使用匀胶机进行涂覆,划片之后用去离子水清洗,该保护膜制备方便,且不影响芯片性能。图8所示为在速度 $50 mm/s$ 、激光能量 $15.4 J/cm^2$ 和旋涂保护膜的条件下,所得晶圆激光划线清洗前后的效果,可以看出,小颗粒和团状硅渣基本被清洗掉,在热影响区只残留少部分硅渣,说明使用保护膜确实起到了保护的作用,符合实验要求。因此,通过增加保护膜厚度彻底清除硅渣的方法可行。其他可行的方法还包括使用气体或者液体作为辅助介质。

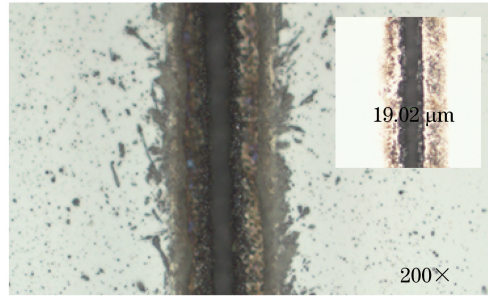


图 8 晶圆激光划线清洗前后的对比图(插图为清洗后的划线图)

Fig. 8 Comparison of wafer scribing before and after cleaning (inset is scribe line after cleaning)

4 结 论

由于表面覆盖脆性材料或低附着性材料的晶圆在划片时容易发生介质层剥落、分层等现象,传统的刀片划片技术已不能达到划片要求,而激光划片技术因其非接触式、划片线宽小及划片速度快而备受关注。然而,直接使用高斯光束进行晶圆划片存在热影响范围较大、槽侧壁不够陡直、槽底不够平坦等问题,降低了划片质量。为此,进行了基于整形元件的平顶光束激光划片实验。通过改变焦点位置、激光能量和划片速度等参数,研究了平顶分布与高斯分布的光束对晶圆划片产生的影响。结果表明,平顶位置远离焦点的区域内,在其他条件不变的情况下,能量越高划线宽度越宽,速度越高划线深度越小;使用保护膜提高了划片的质量。在激光能量密度为 13.2 J/cm^2 时,平顶光束实现了切口宽度约等于 $16 \text{ }\mu\text{m}$ 、划线深度约为 $18 \text{ }\mu\text{m}$ 、槽底平坦和槽壁陡直度高的划片效果,该方法具有良好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Shi K W, Yow K Y, Lo C. Single & multi beam laser grooving process parameter development and die strength characterization for 40 nm node low-K/ULK wafer[C]. Electronics Packaging Technology Conference IEEE, 2014: 752-759.
- [2] Hsu H C, Chu L M, Liu B, *et al.* An investigation on dicing 28-nm node Cu/low-*k* wafer with a picosecond pulse laser [J]. Journal of the Microelectronics and Packaging Society, 2014, 21(4): 63-68.
- [3] Mai T A, Housh R, Brulé A, *et al.* Dicing of high-power white LEDs in heat sinks with the water jet-guided laser[C]. SPIE, 2007, 6486: 64860A.
- [4] Fujita M, Nakata Y, Miyanaga N, *et al.* Low-stress dicing assisted by pulsed laser for multilayer MEMS[C]. SPIE, 2009, 7202: 72020F.
- [5] Sun Zhilong, Cai Zhixiang, Yang Wei. Laser cutting and scribing of 96% alumina ceramic substrate and parameter optimization[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 101404.
孙智龙,蔡志祥,杨伟. 96%氧化铝陶瓷基板的激光切割划片及工艺优化[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 101404.
- [6] Dushkina N M, Wagner F R, Boillat C, *et al.* Water jet guided laser versus saw dicing[C]. SPIE, 2003, 4977: 75-85.
- [7] Sibailly O, Richerzhagen B. Laser dicing of silicon and composite semiconductor materials[C]. SPIE, 2004, 5339: 394-397.
- [8] Lin Zhe, Ye Xiaohui, Han Jinpeng, *et al.* Patterning of graphene by femtosecond laser cutting[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0703002.
林喆,叶晓慧,韩金鹏,等. 基于飞秒激光切割的石墨烯图案化研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0703002.
- [9] Fornaroli C, Holtkamp J, Gillner A. Dicing of thin Si wafers with a picosecond laser ablation process[J]. Physics Procedia, 2013, 41: 603-609.
- [10] Gečys P, Račiukaitis G, Wehrmann A, *et al.* Scribing of thin-film solar cells with picosecond and femtosecond lasers [J]. Journal of Laser Micro/Nanoengineering, 2012, 7(1): 33-37.
- [11] Wang Dawei, Gao Xifeng. Study on kerf roughness differences between line and arc analysis and elimination of laser

- precision cutting[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0303005.
- 王大伟, 高席丰. 激光精密切割圆弧和直线粗糙度差异分析与消除[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303005.
- [12] Hiroshi M. Wafer separating method: TW97109079[P]. 2008-12-01.
- [13] Yosuke W, Ryugo O, Masaru N. Wafer dividing method: TW98108917[P]. 2009-12-01.
- [14] Borkulo J V, Hendriks R, Dijkstra P. Comparison between single & multi beam laser grooving of low-*K* layers[J]. International Symposium on Microelectronics, 2012, 1: 433-439.
- [15] Borkulo J V, Alsi R H, Netherlands B. Multi beam grooving and full cut laser dicing of IC wafers[J]. ECS Transactions, 2012, 44(1): 969-974.
- [16] Morris J H, Powers M, Rieger H. Method and apparatus for laser ablation of a target material: US6717101[P]. 2004-04-06.
- [17] Bovatsek J M, Patel R S. Highest-speed dicing of thin silicon wafers with nanosecond-pulse 355 nm Q-switched laser source using line-focus fluence optimization technique[C]. SPIE, 2010, 7585: 75850K.
- [18] Bischoff C, Jäger E, Umhofer U. Beam shaping optics for process acceleration[J]. Laser Technik Journal, 2015, 12(3): 53-57.