

文章编号: 1001-3806(2012)03-0293-05

半导体晶圆激光切割新技术

黄福民, 谢小柱*, 魏昕, 胡伟, 苑学瑞

(广东工业大学 机电工程学院, 广州 510006)

摘要: 激光切割半导体晶圆具有切槽窄、非接触式加工和加工速度快等特点, 但仍然存在材料重凝、热影响区较大和易产生裂纹等问题。为了解决这些问题, 分析了问题的成因, 并分别从激光器、光学系统和加工介质3个方面详细介绍了—些新型半导体晶圆激光切割技术, 阐述其基本原理, 分析其优缺点及主要应用和研究领域, 为进一步研究和工业化应用提供了技术参考。

关键词: 激光技术; 激光切割; 半导体晶圆; 影响因素; 激光器

中图分类号: TG485 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.03.002

Newly developed techniques for laser dicing wafer

HUANG Fu-min, XIE Xiao-zhu, WEI Xin, HU Wei, YUAN Xue-rui

(Faculty of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Laser dicing semiconductor wafer has advantages of narrow kerf, non-contact processing and high dicing velocity etc. However, there still exist some problems, such as redeposition of melting material, large heat affected zone and cracking easily. In order to overcome these problems, the causes were analyzed and a series of newly-developed methods were introduced in detail from three aspects, i. e., lasers, optical systems and processing mediums. Simultaneously, the basic principles were described. Furthermore, advantages, disadvantages and applications of laser dicing technique were analyzed, which provides valuable technical references for further research and industrial applications.

Key words: laser technique; laser dicing; semiconductor wafer; influencing factors; lasers

引言

近年来, 随着光电产业的迅猛发展, 高集成和高性能的半导体晶圆需求也越来越大, 如硅、第III-V代和第II-VI代复合型材料(GsAs、蓝宝石和低 k (k 为介电常数)材料)等。为了大幅度节约成本和提高制作速率, 在大批量生产中往往在晶圆上沉积集成电路芯片或电路元件结构, 然后再分割成各个单元, 最后再进行封装和焊接。因此, 晶圆切割技术对提高成品率和封装效率有着重要影响。传统晶圆切割技术主要有金刚石切割法^[1]和化学蚀刻法^[2]。金刚石切割存在的问题有: (1) 宽切槽(50 μm ~100 μm)、晶圆利用率较低; (2) 难加工脆性和高强度材料, 易产生裂纹、碎片和分层等; (3) 刀具易磨损, 需要消耗大量去离子水, 增加了成本。化学蚀刻法亦存在一些不足, 如刻蚀速度慢、污染环境和不适用于化学稳定的材料等。激光切割技术集光学、精密机械、

电子技术和计算机技术于一体。与传统加工方法相比, 它具有以下优点: (1) 加工速度快; (2) 窄切槽(10 μm ~30 μm)、晶圆利用率较高; (3) 非接触加工, 适合薄晶圆; (4) 自动化程度高, 任意图形切割。目前, 激光切割技术可以用于切割硅、低 k 材料、发光二极管衬底、微机电系统和薄膜太阳能电池等光电及半导体材料。与此同时, 加工过程中产生的重凝、熔屑和裂纹以及晶粒强度等问题阻碍其进一步发展和应用。为解决现有激光切割存在的问题, 国内外学者竞相研究和探索新技术和工艺, 若这些新型技术和工艺能够高效柔性地解决这些问题, 必将具备良好的产业化前景。

1 晶圆激光切割过程和存在的问题

1.1 切割过程

晶圆激光切割可以分为划片切割和穿透切割两种情况。激光划片切割是在材料表面切割出深度约为晶圆厚度的1/4~1/3的凹槽(见图1a), 然后通过裂片工艺将晶圆沿划槽分裂并得到晶粒(见图1b)。激光穿透切割过程就是直接切穿整个厚度并分离得到晶粒(见图1c)。晶粒由于热作用而不会分离, 故穿透切割需要扩晶过程而不是裂片工艺来得到晶粒。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50805027)

作者简介: 黄福民(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为激光加工技术。

* 通讯联系人。E-mail: xiaozhuxie@gdut.edu.cn

收稿日期: 2011-09-19; 收到修改稿日期: 2011-11-01

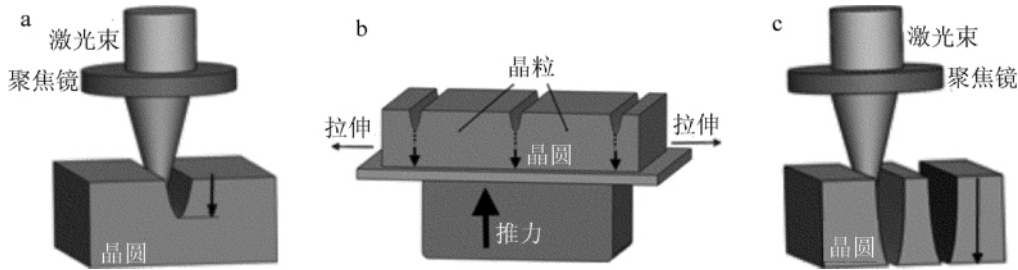


图1 激光切割过程示意图

a—激光划片切割 b—裂片 c—穿透切割

1.2 存在的问题

半导体晶圆的激光切割主要考虑切割速度和切割质量,具体包括切割速度、材料溅射重凝、热影响区、裂纹和晶粒强度等。激光-材料去除机理决定很难完全消除热影响区,而过大热影响区会降低芯片性能,故晶粒强度往往也是激光切割中一个重要间接指标。重凝指去除材料堆积并粘结在切槽周围,这会破坏晶圆表面或芯片结构且使之报废,同时增加额外无效吸收并降低加工速度。裂纹受到过大热应力也会产生无规则断裂和炸裂。造成这些缺陷有很多原因,如能量密度、重复频率、扫描速度、脉宽、焦深、波长、加工介质等。

为此,众多学者探索新技术或工艺来解决这些问题,其主要思路侧重于激光器、光学系统以及辅助条件的改进等方面,下面将从这3方面分别介绍这些新方法和新技术。

2 晶圆的新型激光切割技术

2.1 激光器

2.1.1 短波长 最初受制于激光器的发展,晶圆激光切割多采用Nd:YAG基频(1.06 μm)半导体抽运固体(dioxide pump solid-state, DPSS)激光器。但其长波长、大光斑和长作用时间造成大量热损伤,且降低了芯片强度和性能。同时,由于短波长激光器(即DPSS倍频)的发展,故众多学者都对其进行了研究。

(1) 二倍频(532nm)。SHIUANN^[3]研究了激光密度与划槽深度、宽度和深宽比之间的关系。他发现,厚度为70 μm 厚晶圆的切割速度为金刚石切割的2.5倍,且加工质量很好。XIE等人^[4]研究了工艺参量(激光功率、扫描速度、重复频率和扫描次数)与蓝宝石划槽深度、宽度和深宽比之间的关系,并检测了其加工质量。他们发现,在中等功率、小重复频率、中等扫描速度和多次扫描时,将会得到较好质量和较大深度。

(2) 三倍频(335nm)。由于激光器的普及和较高吸收率,故相关研究较多。强度方面,KIM等人^[5]发现,75 μm 、50 μm 和25 μm 厚晶粒的3点弯曲强度仅为

机械加工的17.4%、46.7%和65.4%,这与TOFTNESS等人^[6]的研究数据类似。他们都证实激光切割的晶粒强度会降低且低于机械加工,这间接说明其具有较大热影响。切割速度方面,KIM等人^[5]发现,硅片切割速度分别为金刚石单步和多步切割速度的3倍和1.5倍。LIZOTTE^[7]发现200 μm 厚硅片的切割速率为20mm/s。ILLY等人^[8]发现蓝宝石的烧蚀率为0.5 $\mu\text{m}/\text{pulse}$ ~2 $\mu\text{m}/\text{pulse}$ 。加工质量方面,ILLY等人^[8]发现高功率会使蓝宝石产生裂纹和崩边(限于200J/cm²以下),这与LI等人^[9]的硅片研究结果一致。

2.1.2 超短脉冲方式加工 目前倍频DPSS激光脉宽一般都是纳秒级,加工过程仍然存在一定热效应。窄脉宽也被认为是减小热应力的有效手段,材料迅速被去除,故具有更小热作用。短脉冲由于具有脉宽极窄(皮秒或飞秒级)和极高峰值功率的特点,加工区域的热影响区很小,可大大改善激光切割晶圆质量。现有研究都表明,飞秒激光加工的加工质量比其它长脉宽激光加工的好,如无重凝、凸起、微裂纹和熔削等,渐渐在精密加工中占有一席之地。

切割质量方面,YOKOTANI等人^[10]发现硅片加工质量优于纳秒脉宽(无重凝和颜色变化,小热影响区),这与RICE等人^[11](蓝宝石和SiC)的研究结果类似。加工速度方面,CRAWFORD等人^[12]发现硅片烧蚀率为12nm/pulse(520mJ/cm²)。STOIAN等人^[13]发现蓝宝石的微烧蚀和强烈烧蚀的烧蚀率分别为50nm/pulse和500nm/pulse。晶粒强度方面,SUDANI等人^[14]发现短脉宽和小重复频率时的晶粒3点弯曲强度更大。传统飞秒激光的低速、高成本、低平均功率和低可靠性(稳定性)等问题阻碍了其工业应用。如果采用低功率高频率,则会得到较好的质量和速度,但商用所能提供的频率也就只有几千赫兹,故总体上其效率较低。

2.1.3 新型激光器 铜蒸气激光器。这种激光器由英国牛津激光公司研制,且具有短脉宽、高重复频率和高峰值功率等特点。其基频(511nm绿光和578nm黄光)二倍频后得到UV 255nm和289nm波长。由于短

波长更利于吸收,故相关研究都集中于 255nm 波长。ILLY^[8]和 GU 等人^[15]发现,激光切割后的 LED 晶粒的输出功率(亮度)、 $I-V$ 和漏电流特性都没有显著差异,这说明热作用并没有影响芯片。ILLY 等人^[8]发现蓝宝石烧蚀率为 $0.3\mu\text{m}/\text{pulse} \sim 2.1\mu\text{m}/\text{pulse}$ ($10\text{J}/\text{cm}^2 \sim 100\text{J}/\text{cm}^2$),同时这种激光可以顺利穿透切割较厚蓝宝石,如 $430\mu\text{m}$ 厚蓝宝石晶圆(切缝宽度为 $30\mu\text{m}$,深宽比高达 $14^{[15]}$)。质量方面,ILLY^[8]和 GU 等人^[15]都未发现任何裂纹和碎屑,且切割晶粒壁部很平滑。

光纤激光器。美国 IMRA 公司将飞秒激光(波长 1035nm ,脉宽 400fs)与光纤结合在一起,形成了光纤飞秒激光。YOSHINO^[16]和 SHAH 等人^[17]发现在蓝宝石上划出 $40\mu\text{m} \times 75\mu\text{m}$ (宽度 \times 深度)的切槽(其去除率约高达 $3.7 \times 10^{-3}\text{mm}^3/\text{s}$)。同时,划切 $100\mu\text{m}$ 厚蓝宝石的有效速率高达 $80\text{mm}/\text{s}$,这已经很接近工业要求的 $100\text{mm}/\text{s}$ 。采用脉冲光纤激光器(波长 1060nm)划切 $430\mu\text{m}$ 厚的蓝宝石,得到了 $10\mu\text{m} \times 80\mu\text{m}$ (宽度 \times 深度)的精细切槽,该激光器成本低,有望实现工业应用。

2.2 光学系统

2.2.1 隐形聚焦(stealth dicing, SD) 传统激光切割晶圆都是基于靶材吸收所致烧蚀(去除性熔化和蒸发等)机理,故激光波长都位于靶材吸收区域。而日本 Hamamatsu Photonics 公司发明了激光隐形切割技术,其研究领域包括单晶/掺杂硅片、蓝宝石、低 k 材料和 GaAs 等晶圆。

激光隐形切割基本原理如图 2 所示^[18]。传统 DPSS 激光器(纳秒级红外)透过材料表面,并聚焦于内部。当内部激光功率密度超过临界值时,可以在任意深度上形成带状 SD 层(多晶层/高位错密度层和微裂纹/孔洞),如图 3 所示。然后再通过扩晶得到晶粒。这种技术避免了传统激光切割由于熔化等所致热损伤等缺点,且非常适合于超薄半导体硅片的高速和高质切割。以 $50\mu\text{m}$ 厚硅片为例,切割速率高达 $300\text{mm}/\text{s}^{[19]}$ 。

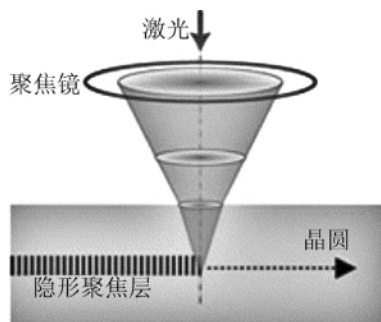


图2 激光隐形切割过程示意图

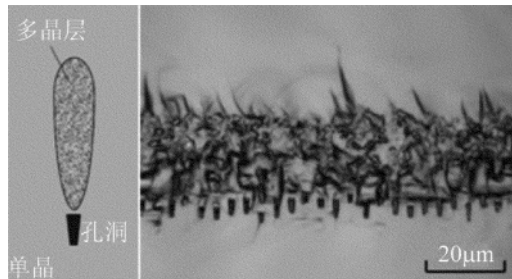


图3 SD层

2.2.2 水导激光 传统激光切割都需要考虑聚焦、焦深和调焦问题,同时调焦是一项较为复杂的过程。水导激光加工由瑞士联邦科学院发明,且由瑞士 Synova SA 公司享有专利并已商业化的技术,其研究领域包括 GaAs、SiC、Si 和低介电常数 k 的晶圆等。其基本原理如图 4 所示^[20],这种技术将 DPSS 激光(Nd:YAG 基频、二倍频或三倍频)耦合于头发大小(直径约为喷嘴直径($25\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$)的 85%)的低压($30 \times 10^5\text{Pa} \sim 500 \times 10^5\text{Pa}$)去离子、过滤和消气纯净水柱中。水柱作为一种液态光学波导使激光以全反射方式在其中传播并传送其到材料表面,使材料仅仅在水柱直径内烧蚀并切割晶圆。其具有很多优点:如很长无需调焦加工范围(约为喷嘴直径的 1000 倍);高切割速率($50\mu\text{m}$ 厚硅片的切割速率高达 $250\text{mm}/\text{s}$ 以上,比传统砂轮划切快 5 倍~10 倍^[21]);加工质量较好(较小热影响区,无粒子污染和重凝,平行切边等);高晶粒断裂强度(威布尔分布值比普通锯切大 50%^[21])。

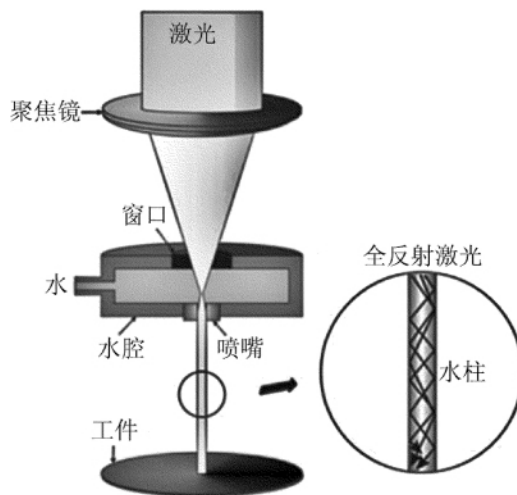


图4 水导激光切割示意图

2.2.3 双焦点聚焦 这种技术通过双焦点激光(两个同轴不同焦距的焦点)来增加实际焦深,从而提高加工深度。最初这种技术通过双聚焦透镜来实现,但其有很多不足,如较大焦点间距($10\text{mm} \sim 100\text{mm}$)、较大焦斑直径(几百微米)、固定焦点能量和焦点间距等,都限制了其在晶圆切割中的运用。最近加拿大瑞尔森大学的 VENKATAKRISHNAN 等人^[22]使用平凸

镜、分光和波片等对其进行了改进,如图5所示。其前后焦点功率比例可以通过旋转 $\lambda/2$ 波片调节,且后焦点位置可以通过改变平凸镜曲率半径来改变,这样可以显著性提高系统的可控性和实用性。

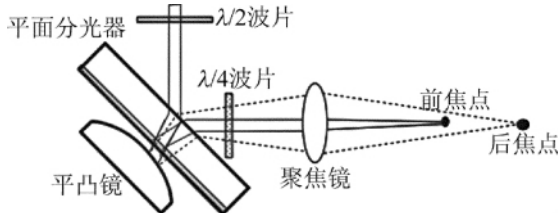


图5 双焦点聚焦示意图

当传统DPSS激光器的两个焦点分别聚焦于硅片表面和内部时,可以高速和高质量地切割硅片。穿透深度(切割深度)较大,适合切割厚硅片且切割速度能提高2倍~4倍。切边没有碎片,断面干净,少重凝物,质量优于单焦点切割。在切缝宽度方面,以切割250 μm 厚硅片为例,双焦点切缝宽度是单焦点切缝宽度的一半(约为25 μm)^[22-23]。

2.2.4 脉冲整形 圆形光斑决定了其加工时需要保证一定叠加比(即合适扫描速度和重复频率),才能保证连续切割(避免脉冲分离)和切割边缘更光滑(锯齿状貌边缘会增加机械应力和多层材料脆性)。同时高斯密度分布决定了其不均匀烧蚀特性(中心处的高能量将会得到更高的烧蚀率,而边缘会有很少或不发生烧蚀)。脉冲整形主要是通过相关光学仪器设备将激光整形为均匀能量分布或其它形状的光斑。MIGLIORE^[24]发现,经过柱透镜整形后的椭圆光斑的4点弯曲强度都大于圆光斑(100 μm 厚硅片分别为232MPa和352MPa)。他们还^[25]发现其划片速率约为圆光斑的两倍(100 μm 厚硅片的切割速率分别为83mm/s和163mm/s),这与OSTENDORF等人^[26]的研究结果类似,这些都证实了椭圆光斑可以增加切割效率。但长椭圆型或长方形光斑也带来光学定位调节问题,因为长轴与切割方向间的夹角(即使很小)都会影响其加工质量和槽宽。

2.3 加工介质

2.3.1 气体介质 除了常温常压空气外,现在晶圆切割中使用气体介质有惰性气体和反应气体。SUDANI等人^[14]发现 N_2 可以减少烧蚀硅片材料重凝,且改善切割边缘粗糙度。KLOTZBACH等人^[27]发现辅助气体He和Ar都能提高硅片切割速度,这与VENKATAKRISHNAN等人^[23]的研究类似(SF_6 提高硅片切割速度近2.5倍)。KIM等人^[5]发现 CF_4 能增加低 k 晶粒3点弯曲强度(约为空气和机械切割的1.5倍和4倍)。

2.3.2 水介质 水介质也称为水约束范围,分为水浴和水薄膜加工。在水浴加工中,靶材上水层厚度大约为1mm~20mm;在水薄膜加工时,通过持续溅射形成水平或垂直水薄膜。DAMINELLI等人^[28]发现其可以得到更好加工质量(更小溅射颗粒、重凝层和溅射物污染面积,更少熔削和表面凸起),这与JANG等人^[29]的研究一致。JANG等人^[29]发现硅片烧蚀速率比空气中快,而ZHU等人^[30]发现薄膜厚度为1.1mm时,硅片烧蚀率最高(62nm/pulse)。

3 结论

(1) 由于光电产业的迅猛发展,需要制造高集成、高性能的半导体晶圆,推动了晶圆激光切割技术的发展。晶圆激光切割过程有两种方式:划片切割和穿透切割。在薄晶圆和超薄晶圆以及多层复合材料方面,激光切割比传统金刚石切割具有更大的优势,更适合工业化应用。

(2) 基于烧蚀加工的传统激光切割半导体晶圆存在的主要问题有存在重凝、热应力大和易碎片等,提高激光器性能、改进光学传输和聚焦系统和改善辅助条件是提高划片质量和效率的有效途径。

参考文献

- [1] MATSUMARU A, TAKATA A, ISHIZAKI K. Advanced thin dicing blade for sapphire substrate [J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2005, 6(2): 120.
- [2] RAO R, BRADBY J E, WILILAMS J S. Patterning of silicon by indentation and chemical etching [J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(12): 123113/1-423113/3.
- [3] SHIUANN L K. Laser as a future direction for wafer dicing: parametric study and quality assessment [C]//31st International Conference on Electronics Manufacturing and Technology. Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE 2006: 506-509.
- [4] XIE X Zh, HUANG F M, WEI X, et al. Experimental study of laser dicing sapphire substrate by green DPSS laser [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7844: 78440T/1-78440T/7.
- [5] KIM D, KIM Y, SEONG K, et al. Evaluation for UV laser dicing process and its reliability for various designs of stack chip scale package [C]//59th Electronic Components and Technology Conference. San Diego, USA: IEEE 2009: 1531-1536.
- [6] TOFTNESS R F, BOYLE A, GILLEN D. Laser technology for wafer dicing and microvia drilling for next generation wafers (invited paper) [J]. Proceedings of SPIE 2005, 5713: 54-66.
- [7] LIZOTTE T. Laser dicing of chip scale and silicon wafer scale packages [C]//28th International Electronics Manufacturing Technology Symposium. San Jose, USA: IEEE/CPMT/SEMI (R) 2003: 1-5.
- [8] ILLY E K, KNOWLES M, GU E, et al. Impact of laser scribing for efficient device separation of LED components [J]. Applied Surface Science, 2005, 249(1/4): 354-361.
- [9] LI M W, KEVIN H. Study of silicon micromachining using diode-pumped solid-state lasers [J]. Processings of SPIE, 2004, 5339: 64-72.
- [10] YOKOTAM A, MATSUO N, KAWAHARA K, et al. Development

- of dicing technique for thin semiconductor substrates with femtosecond laser ablation [J]. Proceedings of SPIE 2002 4637: 180-187.
- [11] RICE G, JONES D, KIM K S, *et al.* Micromachining of gallium nitride, sapphire, and silicon carbide with ultrashort pulses [J]. Proceedings of SPIE, 2003 5147: 299-307.
- [12] CRAWFORD T H R, BOROWIEC A, HAUGEN H K. Femtosecond laser micromachining of grooves in silicon with 800nm pulses [J]. Applied Physics 2005 80(8): 1717-1724.
- [13] STOIAN R, ASHKENASI D, ROSENFELD A, *et al.* Laser ablation of sapphire with ultrashort pulses [J]. Proceedings of SPIE 2000, 3885: 121-131.
- [14] SUDANI N, VENKATAKRISHNAN K, TAN B. Laser singulation of thin wafer: die strength and surface roughness analysis of 80 μ m silicon dice [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(7/8): 850-854.
- [15] GU E, JEON C W, CHOI H W, *et al.* Micromachining and dicing of sapphire, gallium nitride and micro LED devices with UV copper vapour laser [J]. Thin Solid Films 2004 453(1): 462-466.
- [16] YOSHINO F, SHAH L, FERMAN M, *et al.* Micromachining with a high repetition rate femtosecond fiber laser [J]. Journal of Laser Micro/Nanoengineering, 2008, 3(3): 157-162.
- [17] SHAH L, FERMAN M E. High power femtosecond fiber chirped pulse amplification system for high speed micromachining [J]. Journal of Laser Micro/Nanoengineering, 2006, 1(3): 176-180.
- [18] OHMURA E, FUKUYO F, FUKUMISTU K, *et al.* Internal modified-layer formation mechanism into silicon with nanosecond laser [J]. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 2006, 17(1/2): 381-384.
- [19] OHMURA E, KUMAGAI M, NAKANO M, *et al.* Analysis of processing mechanism in stealth dicing of ultra thin silicon wafer [J]. Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing, 2008, 2(4): 540-549.
- [20] DELPHINE P, AKOS S, FRANK W, *et al.* Particle-free semiconductor cutting using the water jet guided laser [J]. Proceedings of SPIE 2005 5713: 240-246.
- [21] PERROTTET D, HOUSH R, RICHERZHAGEN B, *et al.* Heat damage-free laser-microjet cutting achieves highest die fracture strength [J]. Proceedings of SPIE 2005 5713: 285-292.
- [22] TAN B, VENKATAKRISHNAN K. Dual-focus laser micro-machining [J]. Journal of Modern Optics, 2005, 52(17): 2603-2611.
- [23] VENKATAKRISHNAN K, TAN B. Thin silicon wafer dicing with a dual-focused laser beam [J]. Journal of Micromechanics and Micro-engineering, 2007, 17(12): 2505-2515.
- [24] MIGLIORE L. Enhancing silicon cutting performance by shaping the focused beam [J]. Proceedings of SPIE 2007, 6458: 64580W/1-64580W/9.
- [25] MIGLIORE L, LEE K S, JEONG-MOOG K, *et al.* Advances in laser singulation of silicon [C] // Conference Proceeding of ICALEO. San Jose, USA: Laser Institute of America 2006: 237-242.
- [26] OSTENDORF A, KULIK C, BAUER T, *et al.* Ablation of metals and semiconductors with ultrashort pulsed lasers: improving surface qualities of microcuts and grooves [J]. Proceedings of SPIE 2004, 5340: 153-163.
- [27] KLOTZBACH T, MAELZER S, KUNTZE T *et al.* Influence of gas on cutting silicon with solid state laser [J]. Proceedings of SPIE, 2004 5339: 488-493.
- [28] DAMINELLI G, KRUGER J, KAUTEK W. Femtosecond laser interaction with silicon under water confinement [J]. Thin Solid Films, 2004 467(1/2): 334-341.
- [29] JANG D, KIM D. Liquid-assisted excimer laser micromachining for ablation enhancement and debris reduction [J]. Journal of Laser Micro/Nanoengineering, 2006, 1(3): 221-225.
- [30] ZHU S, LU Y F, HONG M H. Laser ablation of solid substrates in a water-confined environment [J]. Applied Physics Letters, 2001, 79(9): 1396-1398.