

全光纤皮秒激光切割蓝宝石晶圆的实验研究

胡小豹¹, 郝强¹, 郭政儒¹, 曾和平^{1,2}

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

²华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062

摘要 搭建了中心波长为 1064 nm 的光纤激光器装置。全保偏光纤结构的锁模脉冲种子源结合选频单元和全光纤放大器, 实现了重复频率连续可调、脉冲串中脉冲数可选、微焦量级单脉冲能量的皮秒激光输出。通过优化选取激光器的输出参数, 对厚度为 110 μm 的蓝宝石晶圆进行了切片。观察多种激光参数下切片后的微观形貌, 发现单脉冲能量、脉冲串的脉冲数以及光束的光斑圆度会显著影响切割效果。在重复频率 100 kHz、脉冲串内 7 脉冲、光斑圆度大于 97%、平均功率 0.37 W、划切速度 600 mm/s 时, 芯片外观最佳, 良品率高达 99.58%。

关键词 激光制造; 光纤激光器; 超短脉冲; 隐形切割; 蓝宝石晶圆

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0102016

Dicing of Sapphire Wafer with All-Fiber Picosecond Laser

Hu Xiaobao¹, Hao Qiang¹, Guo Zhengru¹, Zeng Heping^{1,2}

¹School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

²State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China

Abstract An all-fiber ultrafast laser system was demonstrated by utilizing polarization-maintaining fibers and polarization-maintaining fiber components. The central wavelength of the system was 1064 nm. A passively mode-locked fiber laser, a pulse selector, and subsequent fiber amplifiers realized micro joule pulse energy with tunable repetition rate and alterable pulse number in a single pulse string. In addition, an application of this laser system was carried out on dicing of 110 μm thick sapphire wafer. Experimental results showed that the pulse energy, the pulse number in a single pulse string, and the beam quality significantly affected the ablation performance. Up to 99.58% yield rate was achieved by using 100 kHz repetition rate, 7 pulses in a pulse string, 97% beam circularity, 0.37 W average power, and 600 mm/s dicing speed.

Key words laser manufacturing; fiber laser; ultrafast pulse; stealth dicing; sapphire wafer

OCIS codes 140.3390; 140.3450; 220.4610

1 引言

近年来, 发光二极管(LED)的应用越来越广泛^[1-2]。目前, GaN 基 LED 芯片大都使用蓝宝石基板做衬底, 原因在于蓝宝石具有高硬度、良好的电绝缘性、高耐磨性、优良的热导率以及化学性能稳定等特点^[3-4]。LED 芯片中 GaN 层厚度通常只有 5 μm 左右, 蓝宝石衬底厚度一般为 400~500 μm , 经过打磨工艺后基底厚度为 100 μm 左右。故对 LED 芯片的切割实际上就是对蓝宝石的切割。由于蓝宝石的硬度仅次于金刚石且脆性高, 传统的机械加工容易产生废屑、崩边、裂纹等不良影响, 机械接触式的加工方法使得刀具损耗增

收稿日期: 2016-06-24; 收到修改稿日期: 2016-07-28

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ150092)、国家自然科学基金(11404211)、上海市自然科学基金(13ZR1458100)

作者简介: 胡小豹(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: xiaobao_hu@foxmail.com

导师简介: 郝强(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事超快激光技术方面的研究。

E-mail: qianghao@usst.edu.cn(通信联系人)

加了大量的加工成本^[5]。此外,机械接触式的切割方法需要较宽的切割道且效率低下,逐渐被市场淘汰。化学刻蚀法也常用来制备蓝宝石基 LED 芯片^[6],其加工工艺复杂、效率低,环境污染严重。为了克服上述加工方法的缺点,激光精细加工迎来了巨大的发展机遇。对于激光加工来说,高峰值功率密度的激光可以实现高速的切割,切割道比传统机械划片方法窄,能够有效提升晶圆的加工品质和良品率。Tamhankar 等^[7-8]用 355 nm 半导体抽运调 Q 纳秒固体激光对蓝宝石基片进行表面划切实验,发现窄脉宽激光的烧蚀阈值较低。在合适的能量密度下,重复频率 200 kHz 下的切槽比 50 kHz 下宽约 1.5 倍,且切槽较深。Migliore^[9]发现切割 100 μm 厚硅片时,椭圆光斑的切割速度是圆形光斑的 2 倍,但是当椭圆的长轴与切割方向存在夹角时会影响加工质量及槽宽。激光的表面切割与传统加工相比虽然有很多的优点,但是仍有许多不足,如切割道宽度不够窄、切片速度相对较慢、材料表面产生碎屑等。隐形切割技术是最近发展的切割方法,它是将激光聚焦于材料内部,加工过程无粉尘产生,切割道的表面和侧壁光滑,切片速度快,良品率高。

近年,超快激光器的应用逐渐拓展,已成为多种精细加工的首选光源与设备。曹文深等^[10]利用 1064 nm 皮秒激光加工系统在室温、空气气氛条件下制备出了超疏水聚四氟乙烯表面。杨成娟等^[11]使用中心波长为 1064 nm、脉冲宽度为 10 ps、重复频率 1000 kHz 的 Nd:VAN 激光系统诱导晶体硅,发现随着脉冲功率的增加,诱导产物中的 SiO₂ 含量逐步上升而晶体硅的含量逐渐减少。吕晓占等^[12]用中心波长为 1064 nm 的皮秒激光辐照并结合化学腐蚀调控工艺制备出了高效减反射晶体硅表面。

光纤激光器,特别是超快光纤激光器近年发展迅速。光纤激光器体积小、重量轻、集成度高、无需水冷、免维护,成为工业应用的优良解决方案。全封闭的柔性光路大大简化了激光器内部结构,提高了光路系统的稳定性;光纤较大的表面积体积比有利于自然散热而无需水冷处理;高掺杂浓度的稀土光纤使得抽运光的光光转化效率达到 70% 以上。特种双包层光子晶体光纤的出现使得高功率超快激光输出成为可能^[13-15],其大模场面积在提供了高能量增益的同时,能够满足超短脉冲放大对非线性抑制的要求。超快光纤激光器单脉冲能量高、光束质量好、热影响区域小的特点,使其在精细加工领域将有大量的应用。

本实验采用自行研制的超快光纤激光器,使用隐形切割技术加工蓝宝石晶圆。使用不同单脉冲能量、不用脉冲串内脉冲数以及不同光斑圆度的激光进行加工,观察了晶圆的截面和表面并分析了这些参数对切片效果的影响。

2 实验材料及装置

超快激光隐形切割蓝宝石晶圆的实验装置如图 1 所示。光纤皮秒激光器出射的光束过光闸后由一对高反镜 m1 和 m2 准直,再通过高反镜 m3 反射垂直进入显微聚焦镜。为了避免反复开关激光器,在外部用光闸开启和关闭激光光束。调整显微聚焦镜在 z 轴上的位置可改变激光焦点在晶圆内部的聚焦位置。CCD 1 用于实时监测聚焦点位置,CCD 2 用来观察切割后晶圆内部不同深度的切割效果。待加工晶圆放置在一个可在 xy 平面移动和旋转的平台上。

所用的超快光源为全偏偏光纤结构的皮秒激光器。激光器采用分离式结构,分为主机模块与输出模块,

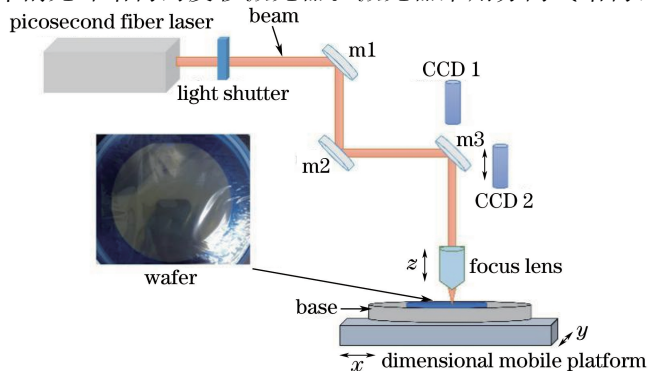


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

两模块之间用光纤保护铠甲连接。其中,种子源为中心波长 1064 nm、重复频率 20 MHz、用半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模的振荡器。振荡器输出的平均功率为 5 mW 的激光脉冲经由两级单模光纤预放大器将平均功率提升至百毫瓦量级。预放大后的激光通过声光调制器。声光调制器驱动模块上加载一个调制信号使之产生载波信号控制声光调制器。改变调制信号的频率及占空时间,可实现重复频率可变、脉冲数可选的激光输出。如设定调制信号的频率为 100 kHz、占空时间为 100 ns,则最终激光输出的重复频率为 100 kHz,脉冲串内的脉冲数为 2。当调制信号的占空时间为 300 ns 时可实现 6 脉冲输出。综合考虑体积、散热及功耗等因素,激光器中声光调制器的电脉冲调制信号时间宽度最大可设为 400 ns,故最大可实现 8 脉冲输出。实验中,脉冲串意为脉冲间隔为 50 ns 的脉冲个数,即某选定重复频率下连续输出的脉冲个数。主放大器使用掺镱双包层保偏光子晶体光纤作为增益介质,单脉冲能量最高可达 10 μ J,典型脉冲宽度 20 ps。激光器输出脉冲为线偏振态,偏振对比度大于 20 dB。通过内置扩束器可使光斑直径达 6 mm,发散角小于 0.01 mrad,光斑圆度保持在 97% 以上。

图 2(a)为采用频率计数器测量的激光器在 100 kHz 重复频率、单脉冲工作方式的测试图,说明激光器种子源具有极高的短期稳定性,无丢脉冲现象发生。100 kHz 重复频率情况下,0.5 Hz 的重复频率变化对应于振荡器 100 Hz 的重复频率漂移,这与振荡器温度控制范围在 1 $^{\circ}$ C 以内匹配,说明激光器振荡器及系统温度控制满足要求。图 2(b)为重复频率 100 kHz、平均功率 0.9 W 时的长期稳定性测试图,测试时间 10 h。上述测试表明激光器性能稳定,满足实验要求。

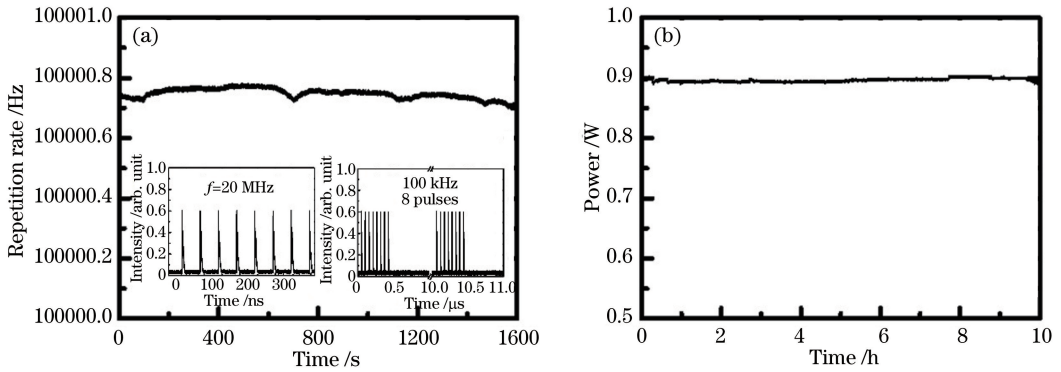


图 2 激光器稳定性测试。(a)重复频率稳定性,左侧插图为 20 MHz

激光种子源脉冲序列,右侧插图为重复频率 100 kHz 时的 8 脉冲输出;(b)功率稳定性

Fig. 2 Stability of the laser system. (a) Repetition frequency stability, the left inset is the mode locked pulse train at 20 MHz repetition rate, and the right inset shows 8 pulses in a single pulse train at 100 kHz repetition rate; (b) power stability

3 结果与讨论

3.1 隐形切割原理

隐形切割技术分切片和裂片两个过程^[16]。首先,将晶圆吸附在扩张膜上,如图 1 插图所示。图 3(a)为切片过程示意图。该过程是将激光束从晶圆背面(非 GaN 面)照射并聚焦于距离背面表面的约 1/3 深度处,

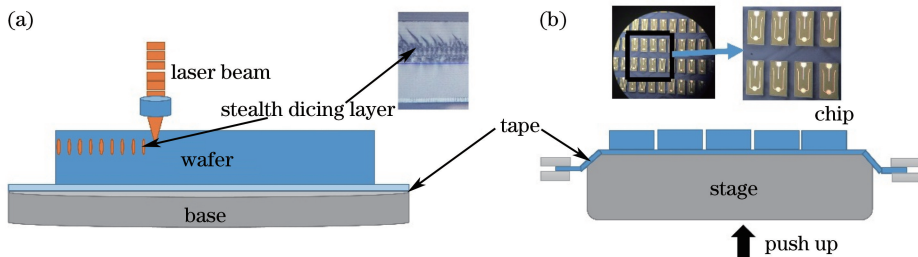


图 3 (a)切片装置示意图;(b)裂片装置示意图

Fig. 3 (a) Schematic for dicing; (b) schematic for splitting

通过调节激光器的参数使焦点处的能量密度高于改质阈值。当脉冲聚焦在蓝宝石晶圆内部时,激光焦点处的蓝宝石晶体发生局部熔融。由于熔融状态下蓝宝石的密度较结晶状态时高,所以会在熔融区留下一些小的真空孔隙。当该熔融区附近的温度冷却到蓝宝石熔点之下时,仅有部分熔融态蓝宝石发生重结晶,其余熔融态蓝宝石将处于无定型状态,最终形成一个高位错密度点,即改质点。以一连串改质点作为分割起点,在热应力作用下分别向晶圆的正反两面产生龟裂^[17]。这种由内而外的龟裂不会在表面产生碎屑,无需去离子水清洗,既简化了生产环节,又节省了生产成本。Kumagai等^[18]用中心波长为 $1.1\ \mu\text{m}$ 、单脉冲能量为 $4.5\ \mu\text{J}$ 的激光划切厚度 $100\ \mu\text{m}$ 的硅晶圆,并模拟了晶圆内部的温度变化。结果表明在焦点周围的焦平面上热影响区为 $7\ \mu\text{m}$ 左右,这个宽度小于一般传统切割道的宽度($50\ \mu\text{m}$ 左右)。因此,隐形切割是一种窄化切割道的加工方式,能够大大提高晶圆片的芯片容量及产率。图3(b)所示为裂片过程示意图。由于切片过程使各LED芯片之间产生裂纹,但尚未彻底分离,为了使LED芯片彻底分离,就需要裂片过程。将切片后粘有晶圆的扩张膜固定在一个二维平台上,通过对蓝宝石晶圆施加外力促使芯片分离。

3.2 现象及讨论

超短脉冲激光加工过程中,影响激光加工的因素较多。对于超快激光系统,可以把超快激光光束特征参数大致分成三类。第一类为脉冲能量,即在某时间范围内照射在待加工部位的总能量,主要影响加工速度和制品外观;第二类为光束特性,如光斑模式、光束质量、光斑圆度等,影响制品外观和品质;第三类为峰值功率(与脉冲宽度密切相关),在保证制品外观的前提下,影响制品品质,如LED芯片的电性能或良品率。上述特征综合表现为焦点的峰值功率密度和焦斑形状。因此,多种参数在加工效果上的相互影响,使得光源系统与机械控制系统的调试过程异常复杂耗时。将从单脉冲能量、光斑圆度、脉冲串内脉冲数三个方面依次分析和讨论超快激光对LED晶圆加工的影响。

3.2.1 单脉冲能量对切片效果的影响

为了研究单脉冲能量对切片效果的影响,无须考虑脉冲串内的脉冲数目,因此,单脉冲能量仅与平均功率和重复频率有关。在重复频率为 $100\ \text{kHz}$ 、切片速度为 $600\ \text{mm/s}$ 的参数下,采用不同平均功率进行切片。上表面的划线效果如图4所示。从图4可以看出,当功率为 $0.27\ \text{W}$ 时,晶圆没有明显裂纹。原因在于平均功率过低导致单脉冲能量不足,龟裂程度不够。当平均功率增加至 $0.32\ \text{W}$ 时,可以看出有明显裂纹,且裂纹较细。当平均功率增加至 $0.4\ \text{W}$ 时,可以看到裂纹加粗。此时,除了某些地方裂纹稍粗之外,龟裂效果尚可接受。当平均功率进一步增加至 $0.5\ \text{W}$ 时,裂纹明显变粗,其中,有些位置已经超出切割道的宽度,效果不佳。故在LED晶圆切片时,当单脉冲能量过低时,焦点处的能量密度较小,从改质层向两面的龟裂不足以使晶圆分裂。当单脉冲能量适中时,可使晶圆分裂而又不至于烧蚀过度。当单脉冲能量过高时,热影响区域范围过大以至于超过切割道的宽度,对芯片造成损伤。

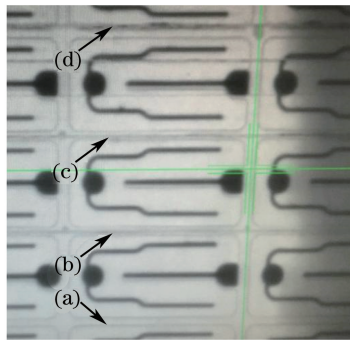


图4 不同平均功率下的切片外观图。(a) $0.27\ \text{W}$; (b) $0.32\ \text{W}$; (c) $0.4\ \text{W}$; (d) $0.5\ \text{W}$

Fig. 4 Extrinsic feature of chips diced at different average power. (a) $0.27\ \text{W}$; (b) $0.32\ \text{W}$; (c) $0.4\ \text{W}$; (d) $0.5\ \text{W}$

3.2.2 光斑圆度对切片效果的影响

输出端空间隔离器会影响激光器的光斑圆度,通过调节光束射入空间隔离器的角度可以获得不同圆度的光斑输出。为了研究光斑圆度对切片效果的影响,实验过程中对激光器的输出光斑进行调制,通过固定其它参数,在外部改变光斑圆度分别至小于 80% 、约 85% 及大于 95% 。LED晶圆上表面的裂片效果如图5所

示,其中绿色直线为基准线。如图 5(a)所示,光斑圆度小于 80%时,能量在各个方向上的分布一致性较差,导致光束在蓝宝石晶圆内部聚焦时产生各向不均匀的应力,最终形成较为弯曲的裂纹。当光斑的圆度逐渐改善至 85%甚至 95%以上时,激光的能量在各方向上的分布逐渐一致,晶圆中焦点周围的应力在各方向上的分布也趋于一致。因此,在裂片时,裂纹仅会沿着打孔的方向产生,从而形成较好的直线度,如图 5(b)和 5(c)所示。

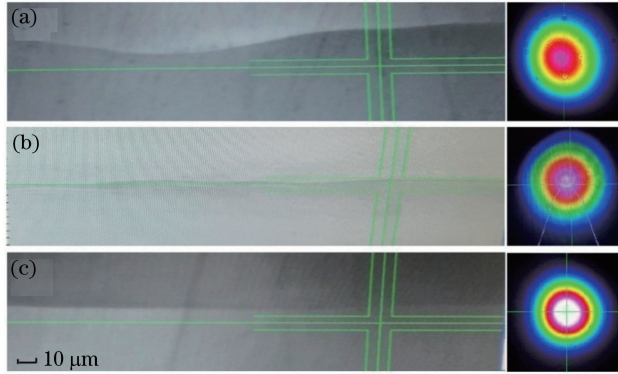


图 5 不同光斑圆度下的切片外观图。(a)圆度小于 80%;(b)圆度约为 85%;(c)圆度大于 95%
Fig. 5 Extrinsic feature of chips diced by laser with different spot roundness. (a) Less than 80%; (b) about 85%; (c) more than 95%

3.2.3 脉冲串个数对切片效果的影响

隐形切割实际上是一个在晶圆内部高速连续的打点过程。隐形切割效果与激光器的重复频率、脉冲串的脉冲数、单脉冲能量及平台移动速度有关。单脉冲能量及光斑圆度主要影响 LED 的加工外观。当外观测试通过后,进入脉冲峰值功率的优化环节,进一步观察 LED 裂片后的断面效果。对于集成化的光纤激光器成品来说,较难实现对脉冲宽度的连续调节,因此,通过调整脉冲串内的脉冲个数实现对脉冲峰值功率的优化控制。脉冲串内子脉冲的时间间隔与激光振荡器的重复频率相关,而脉冲串之间的时间间隔与激光器最终输出时的重复频率相关。脉冲串的脉冲数决定在同一个打点位置重复打点的次数。

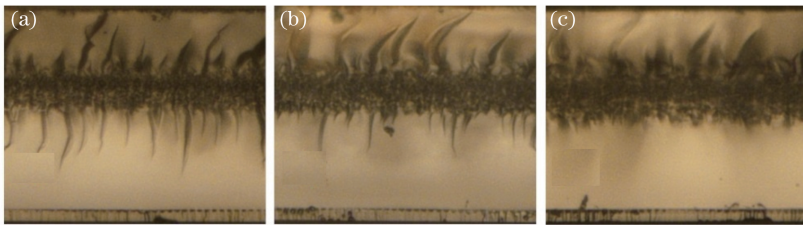


图 6 不同脉冲数下的切片截面效果图。(a)2 脉冲;(b)4 脉冲;(c)6 脉冲
Fig. 6 Cross sections of chips diced with different number of pulses. (a) 2 pulses; (b) 4 pulses; (c) 6 pulses

图 6(a)~(c)分别为 2 脉冲($1.7 \mu\text{J}/\text{pulse}$)、4 脉冲($0.88 \mu\text{J}/\text{pulse}$)、6 脉冲($0.61 \mu\text{J}/\text{pulse}$)的切片效果。芯片中间的黑色部分即为改质层。实验发现随着脉冲串内脉冲数的逐步增加,改质层下方的槽纹数目明显减少、延伸深度显著改善。脉冲串的总能量为 $3.5 \mu\text{J}$ 左右,增加子脉冲数至 6 时,有效分散了皮秒脉冲的能量,达到优化峰值功率密度的目的,说明子脉冲能量均匀、峰值功率适中,断面效果极佳。

由于 GaN 层在改质层下部,向上方延展的槽纹不会影响芯片性能,但向下方延展的槽纹会显著影响芯片的良率。通常情况下认为二极管是反向截止的,即反向电流约为零。通过测试反向电流值 I_R 的大小(I_R 的参考值为 $2 \mu\text{A}$),可以判断芯片的加工质量。 I_R 值太大(大于 $2 \mu\text{A}$),PN 结特性较差,易被击穿,则为残次品; I_R 值越小(小于 $2 \mu\text{A}$),说明 PN 结特性越好,越不易击穿,即为良品。良品率即为良品与切片总数的比值,良品率值越大越好。

在 6 脉冲和 7 脉冲条件下,各切割了 5 片蓝宝石晶圆样品,以检测该皮秒激光的性能及芯片的电性能良品率。10 片未切割的晶圆上 LED 的良品率约为 99.5%。切割后 LED 的良品率如表 1 所示。从表 1 中可以明显看出,采用 100 kHz、6 脉冲激光参数时,第 1 片至第 5 片晶圆良品率下降的平均值约为 1.61%。其

中,样品中良品率下降的最大值由第3片样品产生,约为2.7%。当脉冲串内脉冲数从6脉冲优化到7脉冲时,第6至第10片芯片的良品率有了明显提升,良品率均超过99%。其中,最高可达99.58%,说明良品率几乎无衰减。

表1 不同脉冲数切片的LED芯片良品率

Table 1 Yield rate of LED chips diced with different number of pulses

Sample No.	Yield rate /%	Sample No.	Yield rate /%
1	97.64	6	99.44
2	98.34	7	99.58
3	96.80	8	99.05
4	98.05	9	99.17
5	98.62	10	99.58

4 结 论

采用自行研制的1064 nm皮秒光纤激光器对蓝宝石晶圆进行切片加工。在激光器研制方面,采用全保偏光纤结构实现了最高单脉冲能量10 μ J的皮秒脉冲输出。采用平均功率0.37 W、重复频率100 kHz、脉冲串内7脉冲、光斑圆度大于97%的激光切割了LED晶圆,获得的芯片外观及良品率满足工业现场(良品率衰减小于1%)的要求。

参 考 文 献

- [1] Yang Furui, Jiang Zhenyu, Shen Jianhua, *et al.* Research on performance of an integrated chip with blue LED and GaN PD for bi-directional lighting communication[J]. *Optical Instruments*, 2015, 37(3): 253-258.
杨馥瑞, 蒋振宇, 沈建华, 等. 蓝光LED和GaNP集成芯片双向照明通信性能研究[J]. *光学仪器*, 2015, 37(3): 253-258.
- [2] Zou Bing, Zhang Wenjun, Xu Ge, *et al.* The technology of micro-size LED display[J]. *Optical Instruments*, 2015, 37(4): 293-298.
邹兵, 张文君, 徐阁, 等. LED微显示技术[J]. *光学仪器*, 2015, 37(4): 293-298.
- [3] Gao Huiying. The trends and the state of China's LED substrate [J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2011(7): 1-6.
高慧莹. 国内LED衬底材料的应用现状及发展趋势[J]. *电子工业专用设备*, 2011(7): 1-6.
- [4] Akselrod M S, Bruni F J. Modern trends in crystal growth and new applications of sapphire[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2012, 360: 134-145.
- [5] Matsumaru K, Tanaka A, Ishizaki K. Advanced thin dicing blade for sapphire substrate[J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2005, 6(2): 120-122.
- [6] Kawan A, Yu S J, Park H J, *et al.* Fabrication of geometric sapphire shaped InGaN/Al₂O₃(S) LED scribed by using wet chemic etching[J]. *Journal of Korean Physical Society*, 2014, 64(4): 591-595.
- [7] Patel R S, Tamhankar A, Edwards T. Diode-pumped solid-state UV lasers improve LED sapphire wafer scribing[J]. *Photonics Spectra*, 2010, 44(10): 46-48.
- [8] Tamhankar A, Patel R. Optimization of UV laser scribing process for light emitting diode sapphire wafers[J]. *Journal of Laser Applications*, 2011, 23(3): 032001.
- [9] Migliore L. Enhancing silicon cutting performance by shaping the focused beam[C]. *SPIE*, 2007, 6458: 64580W.
- [10] Cao Wenshen, Zhao Yan, Wu Yan, *et al.* Super-hydrophobic surface of polytetrafluoroethylene fabricated by picosecond laser and phenomenon of total internal reflection underwater[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0903008.
曹文深, 赵艳, 吴燕, 等. 皮秒激光制备超疏水聚四氟乙烯表面及其水下全反射研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0903008.
- [11] Yang Chengjuan, Mei Xuesong, Wang Wenjun, *et al.* Influence of laser power variation on laser-induced changes of crystalline silicon[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0106006.
杨成娟, 梅雪松, 王文君, 等. 皮秒激光功率变化对诱导晶体硅变化的影响[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(1): 0106006.

- [12] Lü Xiaozhan, Ji Lingfei, Wu Yan, *et al.* Fabrication of high performance anti-reflection silicon surface by picosecond laser scanning irradiation with chemical corrosion[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0403006.
吕晓占, 季凌飞, 吴 燕, 等. 皮秒激光-化学复合法制备高效减反射晶硅表面微结构研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0403006.
- [13] Hu Minglie, Song Youjian, Liu Bowen, *et al.* Development and advanced application of femtosecond photonic crystal fiber laser technique[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1660-1670.
胡明列, 宋有建, 刘博文, 等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展及其前沿应用[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1660-1670.
- [14] Li Feng, Yang Zhi, Zhao Wei, *et al.* Hundred micro-joules level femtosecond fiber laser amplification system [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(12): 1202005.
李 峰, 杨 直, 赵 卫, 等. 百微焦级飞秒光纤激光放大系统[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1202005.
- [15] Yang Kangwen, Hao Qiang, Li Wenxue, *et al.* High-power femtosecond pulses fiber laser system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 40(7): 1254-1256.
杨康文, 郝 强, 李文雪, 等. 高功率飞秒脉冲光纤激光系统[J]. 红外与激光工程, 2009, 40(7): 1254-1255.
- [16] Ohmura E, Fukuyo F, Fukumitsu 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.
- [17] Ohmura E, Kawahito Y, Fukumitsu K, *et al.* Analysis of internal crack propagation in silicon due to permeable pulse laser irradiation: study on processing mechanism of stealth dicing[C]. SPIE, 2010, 7996: 799603.
- [18] Kumagai M, Uchiyama N, Ohmura E, *et al.* Advanced dicing technology for semiconductor wafer-stealth dicing[C]. IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing, 2006: 215-218.