

文章编号:1002-2082(2007)03-0321-07

# 激光分离脆性材料的研究

周圣丰<sup>1,2</sup>, 曾晓雁<sup>1,2</sup>

(1. 武汉光电国家实验室 激光科学与技术研究部, 武汉 430074;

2. 华中科技大学 光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

**摘要:** 传统分离脆性材料的技术由于易产生残余应力、显微裂纹与边部碎屑等缺陷,越来越不能满足半导体工业高精度与高清洁度的要求。激光微细加工技术以无污染、无接触及加工精度高、操作柔性好等优势,正成为一种很有潜力的脆性材料精密加工技术。介绍了用于分离脆性材料的几种典型激光微细加工技术,包括激光烧蚀切割技术、激光诱导张应力控制微裂纹扩展技术与激光剥离技术的工艺原理、特点及研究现状,指出了其存在的主要问题并探讨了其改进措施。最后预测了激光分离技术的发展前景。

**关键词:** 激光微细加工;激光烧蚀切割;微裂纹扩展控制;激光剥离;脆性材料

中图分类号: TN249-34

文献标志码: A

## Laser separation of brittle material

ZHOU Sheng-feng<sup>1,2</sup>, ZENG Xiao-yan<sup>1,2</sup>

(1. Division of Laser Science and Technology, Wuhan National Laboratory for Optoelectronics,

Wuhan 430074, China; 2. School of Optoelectronics Science and Engineering,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The traditional separation techniques of brittle materials can not meet the high precision and high cleanliness requirements in the semiconductor industry because they are susceptible to some flaws, such as residual stress, micro-cracks, chippings on the edge. However, the laser micro-processing technique is becoming a potential precision processing technique for brittle materials because of its advantages, such as non-pollution, non-contact, high processing precision and operational flexibility. The principle of processing, characteristic and research status on the several typical laser micro-processing techniques, such as laser ablation cutting technique, micro-crack propagation control technique by laser-induced tension, laser lift-off technique used to separate brittle materials are reviewed. The main problems existing in the techniques are pointed out and the improvements are briefly discussed. The development prospect of laser separation techniques is also predicted.

**Key words:** laser micro-processing; laser ablation cutting; micro-crack propagation control; laser lift-off; brittle material

## 引言

脆性材料如Si、玻璃、陶瓷、石英、GaN等由于具有热膨胀系数小、强度高、硬度大与光电性能优

异而被广泛地应用于光电子、生物医疗与国防等领域<sup>[1-5]</sup>。传统的分离技术如金刚石砂轮划片、水喷、超声加工等技术,由于产生残余应力、断片、边部碎

收稿日期:2006-09-20; 修回日期:2007-01-08

作者简介:周圣丰(1977—),男,湖北天门人,博士研究生,主要从事激光微细加工、材料表面激光强化与改性的研究。

E-mail: zsf1228@yeah.net

屑与显微裂纹等缺陷,越来越不能满足半导体工业低成本、高精度与高效率的要求<sup>[6]</sup>。基于此,激光微细加工技术以其无接触、热损伤小、切口窄、无碎屑与加工灵活等特点,正在成为精密加工脆性材料的关键技术。本文主要介绍了3种典型激光微细加工技术,包括激光烧蚀切割技术、激光诱导张应力控制微裂纹扩展技术与激光剥离技术在分离脆性材料中的应用,并对其发展趋势进行了简要论述。

## 1 分离脆性材料的激光微细加工技术

### 1.1 激光烧蚀切割技术

激光烧蚀切割脆性材料是利用激光束产生的高密度能量,使材料在短时间内熔化甚至气化,然后用辅助吹气将熔渣吹除,随着激光束的移动而形成切缝,称为激光烧蚀分离法。它具有切速快、切缝窄、切割边缘光滑等优点,因此被广泛地应用于脆性材料的加工领域。但是,激光烧蚀切割脆性材料极易在切口断面形成热裂纹,使材料强度大大降低;而且激光烧蚀切割脆性材料是一个高度非线性的过程,要精确预测或分析裂纹产生的机理是相当困难的。因此,近年来,关于激光烧蚀切割脆性材料过程中裂纹的形成机理以及如何消除裂纹已成为研究的焦点。

Smith<sup>[7]</sup>通过实验发现,连续波长的CO<sub>2</sub>激光烧蚀切割陶瓷时,产生裂纹的趋势随着激光切割速度的增加而增加。后来K. Li等人<sup>[8]</sup>应用有限元方法得到了激光烧蚀切割薄陶瓷片的应力分布,结果发现并不是在切割前沿形成裂纹,而是在材料内部形成,并且在高激光功率与低切割速度条件下不易形成裂纹,理论上获得了与Smith相同的实验结果。但是他们建立的模型过于简单,并不能全面反映各个切割工艺参数对切割质量的影响规律。1999年,澳大利亚的G. Lu等人<sup>[9]</sup>也在实验中得到了相同的规律,并且应用无量纲的方法,建立了激光烧蚀切割薄陶瓷片产生裂纹的经验模型,有效地预测与优化了激光切割工艺参数,但是对于厚陶瓷板的激光切割,该经验模型的误差很大,适用性并不强。由于没有对材料的热应力进行分析,导致裂纹形成机理的研究并不透彻。但研究者对于无裂纹的激光烧蚀切割还在孜孜不倦地进行研究,并且提出了降低与消除裂纹的方法,即预热<sup>[10]</sup>、使用脉冲激光以及多道次切割的方法<sup>[11-12]</sup>。但是在激光功率高达500 W的条件下,切割速率却不到1 mm/s,由于切割速度太低,在如此高的激光切割功率下,极易诱

导边缘裂纹的产生以及由于切割面材料的烧蚀而形成熔渣,降低切割质量。湖南大学的洪蕾等人<sup>[13]</sup>应用调Q的脉冲CO<sub>2</sub>激光,通过高功率快速多道次切割的方法,获得了无裂纹的切口,但由于激光能量密度过高,在基体上残留有重凝层,影响了切缝的边缘形貌。而调Q高脉冲的CO<sub>2</sub>激光器价格昂贵,导致加工成本过高;当采用多道次切割时,虽然可以减小单道次激光切割的功率,但切割速度明显降低,故工业应用前景并不被看好。通过应用2束同步的激光束(一束散焦的低功率激光加热脆性材料形成预切割沟槽,另一束聚集的激光沿着沟槽切割脆性材料)可以有效地改善激光作用区的温度均匀性,从而降低裂纹的形成。在功率小于150 W的条件下,切割厚度为2.54 mm的陶瓷时,切割速度提高到了6.86 mm/s<sup>[14]</sup>。

影响激光烧蚀切割脆性材料的质量因素有很多,如激光功率、切割速度、光斑尺寸、材料厚度及热物理性能、喷嘴孔径等,因此,建立激光切割工艺参数数学模型,对合理选择激光切割工艺参数与优化工艺具有十分重要的意义。英国的I. Black等人<sup>[11-12]</sup>建立了CO<sub>2</sub>激光烧蚀切割陶瓷片的数据库,应用优化的激光切割工艺参数,在氧气辅助条件下,成功地切割了厚度达9.5 mm的陶瓷片。哈尔滨工业大学的周岩等人<sup>[15-16]</sup>应用连续波长的CO<sub>2</sub>激光器对熔融石英进行了烧蚀切割,并应用回归分析技术建立了激光加工工艺参数与材料厚度、切缝尺寸之间的数学模型。研究发现激光烧蚀切割石英晶体时,由于激光功率过大,导致曲线切割时温度梯度过大,从而得出产生过大的热应力是形成切向裂纹的主要原因的结论。到目前为止,虽然得到了激光切割工艺参数与切割质量的某些规律,但该技术尚处于实验室研究阶段,切割质量还有待于进一步提高,特别是切口处裂纹的形成机理与消除还有大量的工作要做。

从以上文献的研究结果可以看出,激光切割过程中产生裂纹的主要原因是由于材料过热引起的,而且由于激光烧蚀作用产生的重凝物会污染基片。因此,应用脉冲短、峰值功率高的Nd:YAG激光器作为加热源,在水下切割脆性材料给激光无裂纹切割提供了一个新的途径<sup>[17]</sup>。凌磊等人<sup>[18]</sup>应用Nd:YAG激光烧蚀切割法在水浴条件下对硅片进行了切割试验。虽然在激光烧蚀切割过程中产生的烧蚀物对硅片的污染面积有所减小,但切割速度很低,只有10 μm/s。中科院上海光机所的楼祺洪等人<sup>[19]</sup>认为

准分子激光(193 nm 的 ArF 激光器)波长与脉冲短,对脆性材料的切割热效应小。通过将常规的球面透镜改为柱面透镜后,激光切割速度得到了很大提高。但该方法的不足之处在于,使用的准分子激光器价格昂贵,导致加工成本居高不下;由于水对激光能量的吸收作用,导致激光功率增加,扫描速度降低;激光扫描后还要用机械力或手工沿着激光扫描路径将硅片掰开,导致激光切割效率低。因此,其工业应用前景不容乐观。

## 1.2 激光诱导张应力控制微裂纹扩展技术

早在 19 世纪 70 年代, Lumley 等人<sup>[20]</sup>就率先提出了应用激光诱导张应力控制裂纹扩展技术分离脆性材料的思想。他们利用 CO<sub>2</sub> 激光作用区由于快速加热与冷却而产生的张应力,成功地实现了陶瓷等脆性材料沿着激光扫描路径的分离。实验中所使用的激光能量比激光烧蚀、激光划片等要小,而切割速度则快得多,因此,在加工脆性材料方面具有无比广阔的应用前景。为了进一步降低激光功率,减小热损伤区以及提高分离速度,在切割过程中使用水冷系统来加快脆性材料的冷却,从而产生更大的张应力<sup>[21]</sup>。这种改进为研究激光诱导张应力控制裂纹扩展分离技术注入了新的活力。此后,有关提高控制激光热裂纹分离脆性材料效率的专利大量涌现<sup>[22-23]</sup>。应用上述专利中所描述的方法进行脆性材料的分离时,脆性材料并不能自动完成分离,而要用机械力或手工将其沿激光扫描的路径掰开,大大降低了激光切割效率,导致其工业应用前景并没有象人们想象的那样乐观。俄罗斯的 Kondratenko<sup>[24]</sup>提出了在激光诱导张应力控制微裂纹扩展分离脆性材料的过程中,在材料的上面或下面同步引入超声振动装置的方法,而不必应用机械力将激光作用后的材料掰开,从而可以快速并高效地完成脆性材料的彻底分离。虽然后来 Sysoev 等人<sup>[25]</sup>提出了多种提高激光切割效率与改善激光在沿曲线分离脆性材料时裂纹偏离激光扫描路径的方法,比如预热法、超声波、气动装置等,并且报道了应用辅助超声波渗透的控制热裂纹扩展技术实现了玻璃厚度达 20 mm 的分离。但上述 2 篇文献中都未报道激光器类型、激光加工工艺参数、切割质量与精度等实验结果。

随着关于激光诱导张应力控制微裂纹扩展分离脆性材料研究的深入,应用该方法在切割陶瓷与玻璃方面得到了很大发展。台湾的 Tsai 等人<sup>[26]</sup>在没有应用水冷系统的情况下,应用双光束即首先应

用 Nd:YAG 激光形成预切沟槽或缺口,然后应用 CO<sub>2</sub> 激光扫描诱导裂纹的形核与长大,分离了厚度达 10 mm 的陶瓷片,且分离的陶瓷片边缘整齐光滑,无残余裂纹与碎屑。但是,在 CO<sub>2</sub> 激光功率不到 50 W 的情况下,切割速度太低,只有 (1~3) mm/s。为了有效地对液晶显示器玻璃进行分离,应用了水冷系统和对 LCD 玻璃预先施加一个三点力的弯矩,如图 1 所示。三点力弯矩沿厚度方向将液晶显示器玻璃片弯曲到一定偏差,使玻璃片在受到散焦激光热作用前,在表面预先产生张应力  $\sigma_1$ ,当激光扫描时由于热膨胀而产生压应力;当激光扫描后,立即利用水冷喷嘴对激光热作用区进行快速冷却,此时,激光加热区由于快速冷却凝固而产生张应力  $\sigma_2$ ,当产生的张应力之和  $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 > \sigma_b$  ( $\sigma_b$  为液晶显示器玻璃的最大断裂强度)时,裂纹就会沿着激光扫描方向进行扩展,从而实现液晶显示器玻璃的分离。利用水冷系统对 LCD 玻璃进行控制微裂纹扩展分离,液晶显示器玻璃的边部质量得到了很大提高。当激光功率为 50 W 时,获得了最大为 115 mm/s 的切割速度。但应用该装置对玻璃进行曲线即非对称分离时则遇到了很大困难,原因在于曲线的拐角处存在着应力集中,导致裂纹扩展出现分支。英国的 Paterson 等人<sup>[27]</sup>为了解释和控制激光切割过程中裂纹的扩展,应用有限元分析软件建立了激光切割玻璃的数值模型。虽然该模型考虑了激光加热与冷却过程,而且与实际切割过程十分接近,但不足之处是该模型只适合于激光直线切割。到目前为止,对于激光诱导张应力控制微裂纹扩展曲线切割脆性材料的机理研究未见报道。

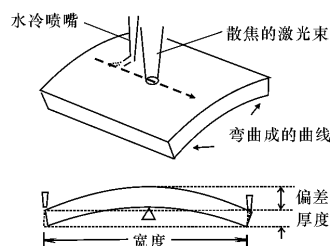


图 1 带有弯矩与水冷系统的激光分离 LCD 玻璃的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram for laser separation of LCD glass with bending and water cooling systems

硅片与 LED 器件的无污染与高精度的切割一直是半导体工业界追求的目标。为了降低应用激光烧蚀法切割硅片时产生大量激光烧蚀物对器件与

基片的污染, 日本的 Yamada 等人<sup>[28]</sup>应用 Nd : YAG 激光控制微裂纹扩展技术, 在硅片的下面安置了一个冷冻块系统来降低激光对硅片的热影响。当硅片温度被控制在  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 断裂表面的粗糙度由室温分离时的  $2\text{ }\mu\text{m}$  下降为  $1\text{ }\mu\text{m}$ , 裂纹轨迹与激光扫描路径之间的偏差小于  $100\text{ }\mu\text{m}$ 。俄罗斯的 Kondratenko 等人<sup>[29]</sup>应用激光控制微裂纹扩展分离 LED 器件的切割宽度不到  $1\text{ }\mu\text{m}$ , 热影响区很小, 无碎屑与污染物, 测试结果表明激光切割过程并没有损坏器件的性能。但文献中并没有给出激光切割的工艺参数, 也未对其机理进行深入的研究。近年来, 激光诱导张应力控制微裂纹扩展分离脆性材料也引起了国内少数研究者的兴趣。浙江大学的陶伟明等人<sup>[30]</sup>应用有限元软件 Abaqus 对激光控制裂纹扩展沿直线对称切割厚度为  $1.77\text{ mm}$  的钠钙玻璃板进行了仿真, 但未考虑冷却系统对切割质量的影响, 并且未见有实验结果的报道。

### 1.3 激光剥离技术

宽带隙半导体材料 GaN 被广泛地应用于蓝光发光二极管、激光二极管等光电子器件领域。由于 GaN 与衬底蓝宝石晶格相差较大, 导致异质外延生长的晶体结构中存在着高密度位错缺陷, 严重影响 GaN 的光电性能; 此外, 蓝宝石的导热性能很差, 使 GaN 基器件的散热问题突出; 而且在几乎绝缘的蓝宝石上难以制作 GaN 基器件的电极。应用激光剥离技术制备自支撑的大面积 GaN 薄膜, 近年来受到人们的广泛关注。其基本原理是采用介于 GaN 禁带能与蓝宝石禁带能之间的激光, 从蓝宝石一侧扫描, 激光透过蓝宝石被界面处的 GaN 吸收, 由于激光的热作用, GaN 在大于  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$  的条件下分解出氮气与低熔点 Ga, 当加热到高于 Ga 的熔点时, GaN 与蓝宝石衬底开始分离, 然后将 GaN 薄膜转移到散热性良好的金属基板上, 从而提高 LED 器件的发光性能。到目前为止, Chu 等人<sup>[31]</sup>已成功地应用激光剥离技术, 在 Cu 基板上制备了面积达  $(1\text{ }000\times 1\text{ }000)\text{ }\mu\text{m}^2$  的 GaN 基 LED 器件, 其最大输出功率约为蓝宝石衬底的 2.2 倍。基于相同的原理, 应用激光剥离技术把在玻璃基板上制备的应用于有源液晶显示器的低温多晶硅薄膜转移到廉价的塑料薄膜上已成为近年来研究的热点。日本的 S. Inoue 等人<sup>[32]</sup>将在低于  $425\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下制备的低温多晶硅薄膜, 成功地应用准分子激光将其从玻璃基板上剥离后转移到了塑料薄膜上, 而激光剥离并没有损坏低温多晶硅薄膜的性能, 其加工过程如图 2 所示。首先将薄

膜晶体管用水溶性粘胶剂粘到第一次要转移的基片上, 然后利用对起始基片透光性较好的准分子激光进行照射; 当薄膜晶体管受到准分子激光的热辐射后, 在与起始基片的界面处分解出  $\text{H}_2$ , 从而实现薄膜晶体管与起始基片的分离; 接着用非水溶性粘胶剂将塑料薄膜基片粘到薄膜晶体管上; 最后用有机溶剂如丙酮等将水溶性胶去除, 完成薄膜晶体与第一次要转移基片的分离, 即实现薄膜晶体向塑料薄膜基片的转移。到目前为止, 已成功地在塑料薄膜上制备了起始电压为  $(1\sim 2)\text{ V}$ , 场效应迁移率为  $(50\sim 60)\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  的有源液晶显示器。由于塑料薄膜完全不同于玻璃基板, 在化学腐蚀方面受到限制, 导致与传统的 CMOS 工艺的兼容性较差。因此, 科研工作者将目光投向了金属箔片, 而不锈钢箔片由于优异的耐液体和气体的渗透性能以及在  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  的高温快速退火温度下可以保持不变形, 近年来引起了人们的广泛兴趣。Ma 等人<sup>[33]</sup>在不锈钢箔片上制备了起始电压为  $3.5\text{ V}$ , 场效应迁移率为  $0.9\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  的掺氢非晶硅薄膜。由于在高温下存在着多晶硅薄膜与不锈钢箔片热膨胀系数不匹配的问题, 因此, 他们认为掺氢的非晶硅薄膜有可能更适合于不锈钢箔片。但是, 在金属箔片上制备用于有源液晶显示器的薄膜晶体管存在着金属污染器件的问题, 所以如何降低金属的污染以及提高器件的可靠性成为在金属箔片上制备起始电压低以及高迁移率的薄膜晶体管的瓶颈。

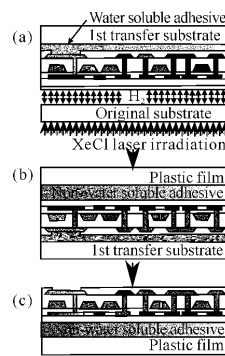


图2 激光剥离薄膜晶体管的加工过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram for laser lift-off of thin-film transistor

## 2 存在的问题与改进措施

激光烧蚀切割脆性材料的工艺参数多, 切割过程复杂, 由于激光的热作用, 导致材料过热, 极易形

成微裂纹,很难在实验中进行观察与测量。而应用有限元方法建立的裂纹形成模型存在着很多假设,与实际切割过程有很大的差距,导致有些文献中对裂纹形成机理的研究仅存在于定性的描述;更为严重的是激光烧蚀切割形成的烧蚀物会污染基片,采用低功率多道次切割却又降低了切割速度,而在水下切割由于水对激光能量的吸收作用,导致激光能量增加与器件性能的损坏。应用激光诱导张应力控制微裂纹扩展技术为无切缝切割脆性材料提供了一个新的途径,激光能量得到了很大的降低,而且切缝平直、无碎屑、无显微裂纹。但切割速度太低,需要复杂的在线裂纹监控系统。因此,要实现快速与高质量的脆性材料分离,仍需要开展大量的基础性研究工作,特别是脆性材料的可加工性与断裂机理的研究,从本质上认识激光分离脆性材料的机理;各种脆性材料激光分离数据库的建立,为有限元模型的建立提供合理的参数,建立实际分离过程的三维模型,从而优化工艺参数;实现激光作用区加热温度的实时测量与在线裂纹控制系统的集成,从而从根本上解决脆性材料精密加工中的低效率、低质量与高成本的现状。

虽然激光剥离技术被认为是一种可以制备无损伤与大面积自支撑 GaN 材料的新方法,但激光与 GaN 相互作用对薄膜的表面粗糙度与光电性能的影响还有待更深入的研究。此外,激光分离 GaN 时, GaN 薄膜较脆且受力不均匀时易破裂,因此,保持 GaN 薄膜的完整性,成为制备大面积自支撑 GaN 薄膜的首要问题。可以采用优化工艺如能量密度均匀且高于阈值能量密度的激光束来避免 GaN 薄膜的开裂;采用柔韧性较好的胶如环氧树脂、氰基丙烯酸酯及有机硅树脂等将 GaN 薄膜与硅片或玻璃片粘结,从而减小激光扫描蓝宝石基 GaN 薄膜时,在界面处产生的  $N_2$  压力作用于 GaN 薄膜而产生的应变,同时,硅片或玻璃片可以为 GaN 薄膜提供支撑,从而保证 GaN 薄膜的完整性。利用激光剥离技术在塑料薄膜上制备低温多晶硅薄膜晶体管方面,有 3 个问题不可以回避:第一是由于塑料薄膜不能承受高于  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  的高温,导致多晶硅薄膜晶体管在低温下不能得到高质量的门绝缘层与沟道硅层,因为在此低温下掺杂物还没有完全被激活;其二是由于塑料薄膜受热易膨胀,导致不能用光刻形成精密的电路图形;第三是塑料薄膜完全不同于玻璃基板,在化学腐蚀方面受到限制,导致与传统的 CMOS 工艺的兼容性较差。而采用

散热性能良好的金属箔片作基底时,金属离子对器件性能的影响还有待更进一步的研究。因此,开发耐高温的塑料薄膜作为多晶硅薄膜晶体管的基底,将制备好的电路直接粘贴到塑料薄膜作基底的多晶硅薄膜晶体管器件上,可以解决掺杂物在低温下不能被激活以及在电路制备方面与 CMOS 工艺不兼容的问题,使在塑料基片上制备的多晶硅薄膜晶体管有源液晶示器像在纸上一样显示,而不再需要价格昂贵的石英玻璃作为基片,从而满足高精度显示与低成本的要求。

### 3 激光分离技术的展望

纵观分离脆性材料的各种激光微细加工技术,发现都有不同的优点和不足的地方。与国外相比,国内在激光分离脆性材料方面投入的资金以及研究人员方面还有很大的差距,所以若要提升我国半导体工业的制造水平,加大激光分离脆性材料方面的研究势在必行。近几年来,激光器向短波长、短脉冲方向发展,使激光对材料的热影响减少,从而真正实现冷加工成型、无污染和无裂纹分离脆性材料是大势所趋。

尽管目前激光分离脆性材料还处于实验室研究阶段,距离广泛应用还有很长的路要走,但在科研工作者的共同努力下,激光分离技术将与 CAD/CAM 技术以及机器人技术相互融合与渗透,在未来的微生物芯片与微机电系统等领域开辟出自己独特的空间。

参考文献:

- [1] MENG H Y, JI Y C, CHENG W W, et al. Crack-free direct-writing on quartz and glass for microfluidic chip development[J]. SPIE, 2004, 5662: 101-106.
- [2] 洪蕾, 李力均. 工种陶瓷激光切割工艺的试验研究[J]. 中国机械工程, 2000, 11(12): 1410-1413.  
HONG Lei, LI Li-jun. Research on laser cutting tests for engineering ceramics[J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(12): 1410-1413. (in Chinese)
- [3] MISKYS C R, KELLY M K, AMBACHER O, et al. Freestanding GaN-substrates and devices[J]. Phys. Stat. Sol. (c), 2003(6): 1627-1650.
- [4] 王耀祥. 光学玻璃的发展及其应用[J]. 应用光学, 2005, 26(5): 61-66.  
WANG Yao-xiang. Development and application of optical glasses[J]. Journal of Applied Optics, 2005,

- 26(5): 61-66. (in Chinese)
- [5] 刘青,陈钧均,郭丽丽. 超短激光脉冲对宽带光学物质的微加工[J]. 应用光学,2006,27(5):428-432.  
LIU Qing, CHEN Jun-jun, GUO Li-li. Micro-machining of wide-band optical materials with ultra-short laser pulses[J]. Journal of Applied Optics, 2006,27(5):428-432. (in Chinese)
- [6] HERMANN C. Laser cutting of glass[J]. SPIE, 2000,4102:219-226.
- [7] SMITH R N. Fracture characteristics of an aluminum oxide ceramic during continuous wave carbon dioxide laser cutting[J]. SPIE,1991,1722:337-347.
- [8] LI K, SHENG P. Plane stress model for fracture of ceramics during laser cutting [J]. Int. J. Mach. Tools Manufacture,1995,35(11):1493-1506.
- [9] LU G, SIORES E, WANG B. An empirical equation for crack formation in the laser cutting of ceramic plates[J]. Journal of Materials Processing Technology,1999,88(15):154-158.
- [10] COSP J P, RAMIREZ DEL VALLE A J, FORTEA J G, et al. Laser cutting of high-vitrified ceramic materials: development of a method using a Nd : YAG laser to avoid catastrophic breakdown [J]. Materials Letters,2002,55(4):274-280.
- [11] BLACK I, CHUA K L. Laser cutting of thick ceramic tile[J]. Optics and Laser Technology, 1997, 29(4): 193-205.
- [12] BLACK I. Laser cutting speeds for ceramic tile: a theoretical-empirical comparison [J]. Optics and Laser Technology,1998,30(2):95-101.
- [13] HONG L, LI J L, JU C L. Investigation of cutting of engineering ceramics with Q-switched pulse CO<sub>2</sub> laser[J]. Optics and Lasers in Engineering,2002,38(5):279-289.
- [14] TRIANTAFYLIDIS D. Dual laser beam modification of high alumina ceramics [J]. Journal of Laser Application, 2003,15(1):49-54.
- [15] 周岩,刘晓胜,杨乐民. 熔融石英激光切割表面形貌的研究[J]. 激光杂志,2003,24(3):70-72.  
ZHOU Yan, LIU Xiao-sheng, YANG Le-min. Study on the surface appearance of laser beam cutting fused quartz crystals [J]. Laser Journal, 2003,24(3):70-72. (in Chinese)
- [16] 周岩,刘晓胜,陈向阳,等. 石英晶体激光切割参数建模[J]. 激光技术,2000,24(2):74-78.  
ZHOU Yan, LIU Xiao-sheng, CHEN Xiang-yang, et al. Modeling on the parameters of laser cutting quartz crystal[J]. Laser Technology, 2000,24(2): 74-78. (in Chinese)
- [17] MORITA N. Pulsed laser processing of ceramics in water[J]. Applied Physics Letters,1988,52(23): 1965-1966.
- [18] 凌磊,楼祺洪,李抒智,等. 水浴条件下YAG 倍频激光切割Si 片的实验研究[J]. 激光技术,2004,28(2):131-143.  
LING Lei, LOU Qi-hong, Li Shu-zhi, et al. Microcutting Si wafer in water bath by second harmonic output of YAG laser [J]. Laser Technology,2004,28(2):131-143. (in Chinese)
- [19] 楼祺洪,章琳,叶震寰,等. 紫外激光切割Si 片的实验研究[J]. 激光技术,2002,26(4):250-254.  
LOU Qi-hong, ZHANG Lin, YE Zhen-huan, et al. Experimental research on Si cutting by using UV excimer laser[J]. Laser Technology, 2002,26(4):250-254. (in Chinese)
- [20] LUMLEY R M. Controlled separation of brittle materials using a laser [J]. American Ceramic Society Bulletin, 1969,48(1):850-854.
- [21] KONDRATENKO V S. Method of splitting non-metallic materials: US,5609284[P]. 1997-05-11.
- [22] HOEKSTRA B L, PIEROLA J A. Method and apparatus for separating non-metallic substrates utilizing a supplemental mechanical force applicator: US,6252197 B1[P]. 2001-06-26.
- [23] CHOO D H, KIM B I. Laser cutting apparatus and method: US,6407360 B1[P]. 2002-06-18.
- [24] KONDRATENKO V S. Cutting method for brittle non-metallic materials (two variants): US, 20040251290A1[P]. 2004-12-16.
- [25] SYSOEV V K, ZAKHARCHENKO A V, VYATLEV P A. Increasing the efficiency of controllable laser thermal cleavage of insulating materials [J]. Journal of Optics Technology, 2004,71(2): 117-120.
- [26] TSAI C H, CHEN H W. Laser cutting of thick ceramic substrates by controlled fracture technique [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003,136(10):166-173.
- [27] PATERSON N, TAWN A. On the numerical modeling of laser shearing of glass sheets used to optimize production methods [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2004, 218(1):1-11.
- [28] YAMADA K, UEDA T, HOSOKAWA A, et al. Thermal damage of silicon wafer in thermal

- cleaving process with pulsed laser and CW laser [J]. SPIE, 2006,6107: 1-10.
- [29] KONDRATENKO V, TCHERNYKH S, GINDIN P. Laser controlled thermocracking die separation technique for sapphire substrate based devices[J]. Phys. Stat. Sol. (c), 2003(7):2232-2235.
- [30] 陶伟明, 毕国丽, 章惠全, 等. 钠钙玻璃板激光热应力切割过程的有限元仿真[J]. 浙江大学学报, 2005,39(9):1423-1426.
- TAO Wei-ming, BI Guo-li, ZHANG Hui-quan, et al. Finite element simulation of laser-controlled thermal stress separation of soda-lime glass plate [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005,39(9): 1423-1426. (in Chinese)
- [31] CHU J T, KUO H C, KAO C C, et al. Fabrication of p-side down GaN vertical light emitting diodes on copper substrates by laser lift-off[J]. Phys. Stat. Sol. (c), 2004,1(10):2413-2416.
- [32] INOUE S, UTSUNOMIYA S, SAEKI T. Surface-free technology by laser annealing (SUFTLA) and its application to poly-Si TFT-LCDs on plastic film with integrated drivers [J]. IEEE Transaction on Electron Devices, 2002, 49(8):1353-1359.
- [33] MA E Y, WAGNER S. Amorphous silicon transistors on ultrathin steel foil substrates[J]. Applied Physics Letters, 1999,74(18):2661-2662.

## 微光夜视技术国防科技重点实验室

微光夜视技术国防科技重点实验室, 依托中国兵器工业第二〇五研究所建立, 位于陕西省西安市高新技术产业园区。主要从事微光夜视技术方面的研究, 下设 7 个研究室, 一个中外专家、学者工作站, 开展基础性、前瞻性研究, 为重点实验室科学研究提供指导和技术支持。重点实验室现有人员 53 人, 其中研究员级高工 6 人, 高级工程师 17 人。现已建立起了一支老中青结合、结构合理的科研队伍。拥有军用光学硕士点、博士点以及一个博士后科研工作站, 已培养了一大批高层次的微光专业人才。微光重点实验室拥有 MBE、高性能光阴极激活分析装置和俄歇电子能谱仪等一大批高精尖的科研设备和完整的微光器件研制线, 可为微光夜视技术研究提供优越的环境, 可以设计开发 X 光、紫外、可见、近红外波段各类成像和探测器件。

根据“强化基础、提高能力、军民结合、跨越发展”的国防科技发展战略, 紧密围绕高新技术和军工主导产业发展的需要, 进一步加强开放与交流, 进一步发挥重点实验室的国防科研平台和高层次人才培养作用, 进一步加强国防应用基础研究和共性技术集成研究, 深入开展新思想、新概念、新原理、新技术、新系统等方面的探索研究, 实现我国微光夜视技术的跨越式发展。

(贺 彬)