

碳化硅晶圆超快激光多脉冲模式和脉冲串模式隐形切割技术研究

任云鹏*, 涂新诚, 何坤, 程力, 叶云霞, 任旭东, 任乃飞

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 碳化硅具有优秀的物理化学性能,是制作耐高温高压电子器件的关键材料,应用前景广阔。碳化硅硬度大,传统的机械切割存在崩边大、芯片破损和晶圆利用率低等问题,隐形切割因切割质量好和加工效率高脱颖而出。在多脉冲模式下采用控制变量法研究了碳化硅晶圆隐形切割时激光单脉冲能量、进给间距、脉冲重复频率、脉冲宽度和扫描速度对上下表面烧蚀道宽度、崩边尺寸和断面形貌的影响规律。针对多脉冲模式下存在的崩边大和断面粗糙度高等问题,采用脉冲串模式切割。结果表明,脉冲串模式可以更有效地实现内部改质,从而减小崩边,降低断面粗糙度。

关键词 激光技术; 超快激光; 碳化硅; 隐形切割; 脉冲串模式; 崩边; 断面粗糙度

中图分类号 TN249 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230517

1 引言

随着现代工业技术的快速发展,人们对电子器件的工作性能要求日益增高。碳化硅(SiC)由于具有宽带隙、高饱和电子迁移率、高热导率等优秀特性,在高温高压环境下展现出巨大的应用潜力,被广泛应用于机械电子、生物医学、新能源、航天航空等领域^[1-10]。

目前,SiC 晶圆加工仍以金刚石刀轮切割为主,由于晶圆材料和刀轮硬度接近,金刚石切割存在崩边严重、工具损耗大、速度较慢等问题。随着半导体制造业向小型化和薄层化方向发展,金刚石切割已无法满足要求。

激光被认为是精密加工 SiC 的有效工具,与金刚石刀轮切割技术相比,激光切割为非接触式加工,且具有较高的切割速度、灵活的切割路径和较高的晶圆利用率^[11-12],可以实现高质量、高精度的加工^[13-14]。

国内外学者针对 SiC 激光切割进行了广泛的研究。Savriama 等^[15]使用紫外纳秒激光半烧蚀切割 4H-SiC 晶圆,并建立模型研究了脉冲能量、扫描次数、离焦量和扫描速度对划切深度的影响,发现脉冲能量和扫描速度对划切效果的影响最大。张炜等^[16]采用红外飞秒激光对 4H-SiC 进行了全烧蚀切割,分析了脉冲重复频率、脉冲能量、切割速度和扫描速度对切槽宽度和深度的影响,从而获得了最佳的切割参数。Huang 等^[17]采用紫外纳秒激光对 4H-SiC 进行了全烧蚀切割,研究了激光重复频率、平均功率、扫描速度等工艺参数

对崩边、断面形貌的影响。Saman 等^[18]利用激光辐照产生的热应力沿着扫描路径分离晶圆,利用传感器揭示了裂纹扩展的机理,结合有限元法分析了加工过程中的应力分布。Pauchard 等^[19]采用水导激光切割晶圆,在加工的同时对材料进行冷却处理并去除熔渣,降低了激光的热影响,提升了晶圆表面质量。

激光烧蚀产生的热效应会引入热影响区和微裂纹,导致晶圆的有效使用面积缩小,激光烧蚀切割带来的飞溅物污染也会对芯片性能造成影响。激光热裂切割中裂纹的扩展方向难以控制,导致芯片在分离过程中偏离切割路径,产生较大的崩边。激光水导切割对设备的精度要求高,且晶圆损耗较大,芯片的生产成本较高。为了提高 SiC 晶圆的激光切割质量和加工效率,Ohmura 等^[20]提出了激光隐形切割技术,该方法产生的热效应小、污染少、崩边小,几乎无材料损耗,切割效率较高,提高了晶圆的出片率。这些优势使激光隐形切割成为 SiC 晶圆切割的理想加工方式,引起了学界和工业界的广泛关注^[21-23]。但隐形切割形成的改质层对芯片性能有重要的影响,如改质层的不合理分布会降低 LED 芯片的外量子效率,影响其发光性能^[24]。因此,对 SiC 的隐形切割工艺进行深入研究对于提高芯片的性能有重要的意义。

本文采用控制变量法研究了激光隐形切割中激光单脉冲能量、进给间距、脉冲重复频率、脉冲宽度和扫描速度对改质区域上下表面烧蚀道宽度、崩边尺寸和断面形貌的影响规律。针对 SiC 晶圆切割中存在的崩

收稿日期: 2023-02-13; 修回日期: 2023-03-23; 录用日期: 2023-04-03; 网络首发日期: 2023-04-13

通信作者: *renyp@ujs.edu.cn

边尺寸大、断面粗糙度高等问题,采用了脉冲串(Burst)模式进行隐形切割,通过对烧蚀道、崩边和崩面进行表征分析,研究了脉冲串模式加工工艺提高隐形切割质量的机制。

2 试验设备与方法

本试验所用装置为高功率超快激光微纳加工系统,其主要参数如表 1 所示。激光加工光路如图 1 所示,通过扩束镜将光束放大 4 倍后得到直径约为 8 mm 的出射光斑,经过偏振片和衰减片后进入 6 mm 入射孔径的高倍物镜(主要参数如表 2 所示),聚焦后光斑直径约为 1.5 μm ,在电荷耦合元件(CCD)相机的引导下,通过控制高精度运动平台将激光焦点移至加工位置,运动平台的主要参数如表 3 所示。本文所用的试

验材料为直径为 4 inch (1 inch=2.54 cm)、厚度为 300 μm 的 4H-SiC 双面抛光晶圆。使用激光共聚焦显微镜对切割结果进行分析。

表 1 超快激光器主要参数

Table 1 Main parameters of ultrafast laser

Parameter	Content
Wavelength	1030 nm
Pulse duration	270 fs-10 ps
Frequency	50 kHz-20 MHz
Maximum power	80 W
Maximum pulse energy	160 μJ
Beam quality	$M^2 < 1.3$
Beam mode	TEM ₀₀ Gaussian mode

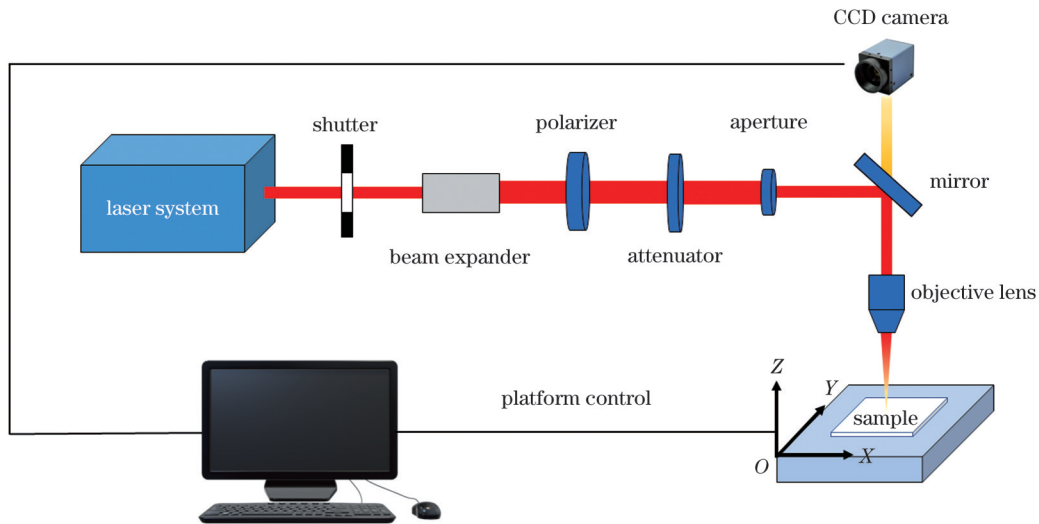


图 1 激光加工光路示意图

Fig. 1 Schematic of laser processing optical path

表 2 物镜主要参数

Table 2 Main parameters of objective lens

Parameter	Value
Magnification	50 \times
Numerical aperture	0.65
Focal length	4 mm
Working distance	10 mm
Wavelength range	480-1800 nm

表 3 运动平台主要参数

Table 3 Main parameters of movement platform

Parameter	X-axis direction	Y-axis direction	Z-axis direction
Maximum travel of platform	200 mm	600 mm	100 mm
Maximum speed	800 mm/s	800 mm/s	200 mm/s
Repeat positioning accuracy	$\pm 1 \mu\text{m}$	$\pm 1 \mu\text{m}$	$\pm 1 \mu\text{m}$
Positioning accuracy	$\pm 2 \mu\text{m}$	$\pm 2 \mu\text{m}$	$\pm 2 \mu\text{m}$
Resolution	0.01 μm	0.01 μm	0.01 μm

图 2 为激光隐形切割的原理图,激光透过试样聚焦在内部,通过非线性吸收效应,在材料内部形成改质层,改质层材料的分子键被破坏,产生裂纹,材料的连接变得脆弱而易于裂开。

本文采用多层进给法完成切割过程,图 3 为隐形切割的加工流程图。首先将激光聚焦在材料下表面,加工出一条烧蚀道(可为后续裂纹走向提供引导)。然后移动平台 Z 轴,使激光焦点从下表面逐层向上表面运动。在此过程中,激光光束沿进给方向对材料内部进行多次改质。为确保整个截面改质充分,加工持续到上表面产生等离子体时停止。改质完成后,在表面沿平行于改质面的方向施加应力完成裂片。

除了常见的按照固定频率输出激光脉冲的方式外,本文还采用了一种新的激光加工模式,即脉冲串模式。通常情况下,激光脉冲序列中相邻脉冲的时间间隔由种子源的重复频率决定,而对于脉冲串模式,可以通过调节脉冲拾取器中双晶体管逻辑电平(TTL)信

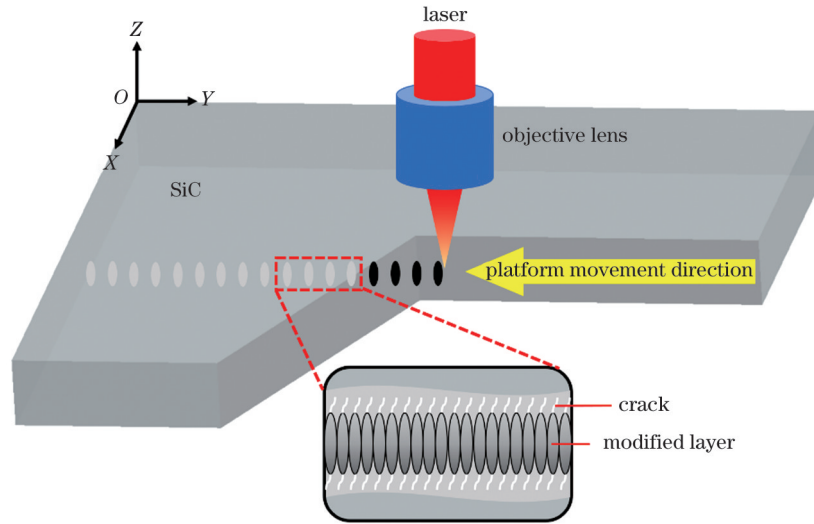


图 2 隐形切割原理图

Fig. 2 Schematic of stealth dicing

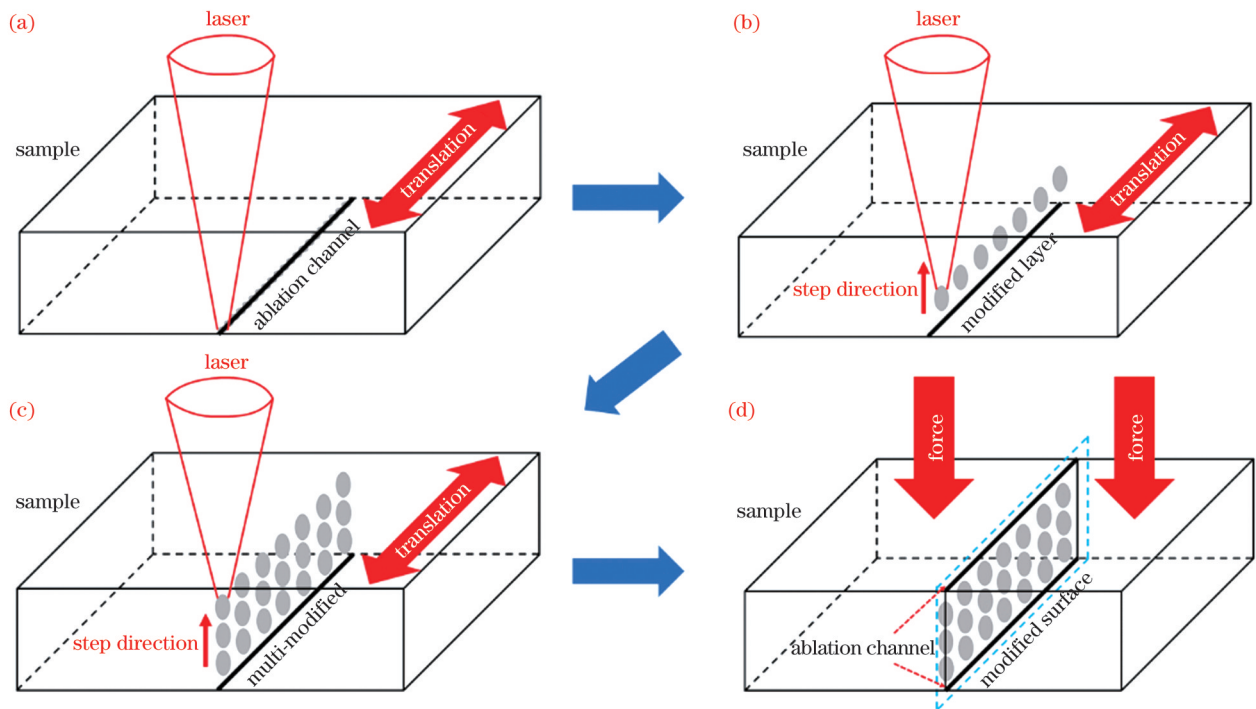


图 3 激光隐形切割加工流程图。(a)下表面预制烧蚀道;(b)在内部形成改质层;(c)沿进给方向多层改质;(d)沿改质面裂片
Fig. 3 Flow chart of laser stealth dicing. (a) Prefabricating ablation channel on bottom surface; (b) modified layers formed inside; (c) multi-modifying along step direction; (d) splitting along modified surface

号的周期和重复频率,在种子源脉冲中选取多个具有相同重复频率的子脉冲作为脉冲序列输出(图 4)。

图 5 为多脉冲模式和脉冲串模式下的脉冲示意图。如图 5(a)所示,多脉冲模式下的重复频率为 f , 脉冲的时间间隔 (T) 为 $\frac{1}{f}$, 单脉冲能量恒定为 E_p 。在脉冲串模式下,如图 5(b)、(c)所示,可以选择 $2 \sim n$ 个子脉冲组成脉冲包络,两个脉冲包络的时间间隔不变仍为 T , 单脉冲能量 E_p 不变,子脉冲的时间间隔

由种子源的重复频率决定 ($T_s = \frac{1}{f_s}$)。脉冲串模式可以在保持单脉冲能量不变的前提下通过调整脉冲包络中子脉冲的数量,改变激光的平均输出功率。本文子脉冲的时间间隔为 50 ns, 每个子脉冲的能量为 $0 \sim 10 \mu\text{J}$ 。

本文通过控制变量法研究了激光单脉冲能量、进给间距、脉冲重复频率、脉冲宽度和扫描速度对切割结果的影响规律,并在最优参数下对比了多脉冲模式和脉冲串模式下隐形切割的结果。

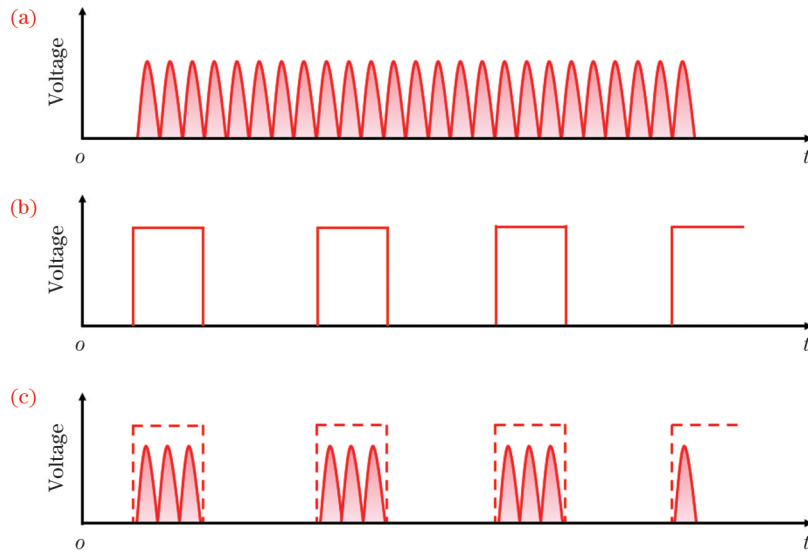
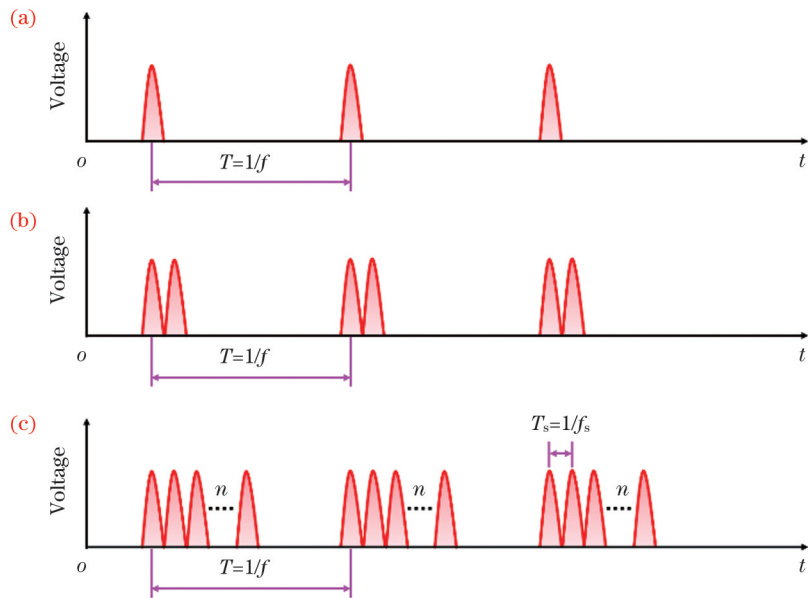


图 4 内部脉冲选择示意图。(a)种子源脉冲序列;(b)TTL电平信号;(c)选取的脉冲

Fig. 4 Schematics of internal pulse pick. (a) Pulse sequence of seed source; (b) TTL level signal; (c) picked pulses

图 5 多脉冲模式与脉冲串模式脉冲示意图。(a)单个脉冲;(b)两个子脉冲;(c) n 个子脉冲Fig. 5 Schematics of multi-pulse mode and burst mode pulse. (a) single pulse; (b) two sub-pulses; (c) n sub-pulses

3 结果与讨论

3.1 多脉冲模式下的隐形切割结果

3.1.1 单脉冲能量对切割结果的影响

激光加工参数设置如下:每层扫描次数为1,进给间距为每次 $+20\ \mu\text{m}$ (正号表示向上进给),平台移动速度为 $100\ \text{mm/s}$,激光脉冲宽度为 $10\ \text{ps}$,脉冲重复频率为 $100\ \text{kHz}$,单脉冲能量分别为 $4, 6, 8, 10\ \mu\text{J}$ 。

不同单脉冲能量下的切割结果如图6(a1)~(b4)所示。当单脉冲能量从 $4\ \mu\text{J}$ 增大到 $10\ \mu\text{J}$ 时,上表面烧蚀道宽度从 $7.9\ \mu\text{m}$ 增加到 $25.7\ \mu\text{m}$,下表面烧蚀道宽度从 $3.8\ \mu\text{m}$ 增加到 $11.3\ \mu\text{m}$ 。这是因为当激光焦点从材料下表面向上移动接近上表面时,上表面的激光能量密度会超过材料的烧蚀阈值,产生烧

蚀痕,下表面由于离激光焦点越来越远,烧蚀痕宽度的增加明显小于上表面。虽然提高单脉冲能量可以使材料内部的改质更加充分,降低裂片难度,但过大的单脉冲能量会使上表面烧蚀严重,增加烧蚀道宽度。

裂片后试样的崩边和断面形貌如图6(c1)~(e3)所示,当单脉冲能量为 $6, 8, 10\ \mu\text{J}$ 时,材料在厚度方向上已被完全改质。当单脉冲能量为 $4\ \mu\text{J}$ 时,材料无法裂片,这是因为激光能量太低,改质区域较小,改质形成的裂纹无法在空间上连续,造成裂片失败^[25]。当单脉冲能量为 $10\ \mu\text{J}$ 时,材料内部发生强烈的非线性吸收,改质形成的裂纹可控性差,导致上下崩边尺寸和断面粗糙度(S_a)都较大。当单脉冲能量为 $8\ \mu\text{J}$ 时,材料内部的非线性吸收强度减小,使得上表面崩边尺寸从

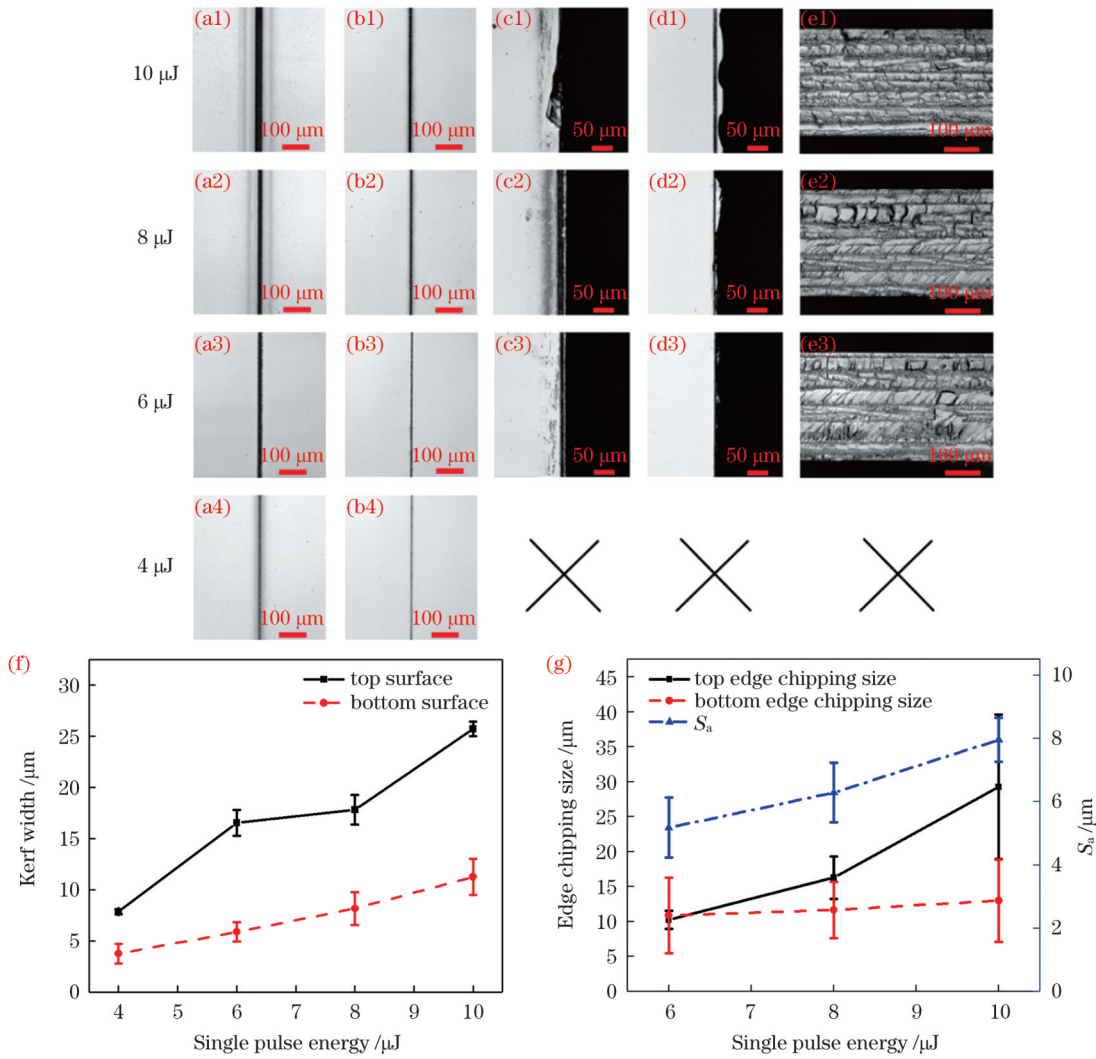


图 6 多脉冲模式下脉冲能量对切割效果的影响。(a1)~(a4)上表面形貌;(b1)~(b4)下表面形貌;(c1)~(c3)上表面崩边形貌;(d1)~(d3)下表面崩边形貌;(e1)~(e3)断面形貌;(f)单脉冲能量与烧蚀道宽度的关系;(g)单脉冲能量与上下崩边尺寸、断面粗糙度的关系

Fig. 6 Influence of pulse energy on cutting effect under multi-pulse mode. (a1)–(a4) Morphologies of top surface; (b1)–(b4) morphologies of bottom surface; (c1)–(c3) edge chipping morphologies of top surface; (d1)–(d3) edge chipping morphologies of bottom surface; (e1)–(e3) cross-section morphologies; (f) influence of single pulse energy on kerf width; (g) influence of single pulse energy on top and bottom edge chipping sizes and cross-section roughness

29.3 μm 减小到 16.3 μm,下表面崩边尺寸从 13.0 μm 减小到 11.7 μm,断面粗糙度从 8.0 μm 降低到 6.3 μm。当单脉冲能量为 6 μJ 时,材料内部光吸收反应的受控性较好,改质层分布均匀,纵向上生成的裂纹连续性较好,稳定性高,上表面崩边尺寸减小到 10.2 μm,下表面崩边尺寸减小到 10.9 μm,断面粗糙度降低到 5.2 μm,切割质量最好。

3.1.2 进给间距对切割结果的影响

激光加工参数如下:每层扫描次数为 1,平台移动速度为 100 mm/s,激光脉冲宽度为 10 ps,脉冲重复频率为 100 kHz,单脉冲能量为 6 μJ,进给间距分别为每次 +5、+10、+20 μm。

观察图 7(a1)~(b3)可知,当进给间距从 +5 μm 增加到 +20 μm 时,上表面的烧蚀道宽度从 15.9 μm 增

加到 16.9 μm,下表面烧蚀道宽度从 5.1 μm 增加到 5.9 μm,两者的变化均在 1 μm 以内,可见进给间距对上下表面烧蚀程度的影响不大。

裂片后,从图 7(c1)~(e3)可以看到,当进给间距为 +10 μm 和 +20 μm 时,上下崩边和断面粗糙度都较大。原因如下:由于微爆炸应力,改质区域周围会产生微裂纹,微裂纹在改质过程中上下连接,并在外力作用下扩展,从而使晶圆裂开。如果进给间距太大导致微裂纹无法上下连接,则难以得到较高的切割质量。当进给间距为 +5 μm 时,材料内部形成连续的裂纹,裂片时不易发生斜裂,因此上表面崩边尺寸减小到 7.8 μm,下表面崩边尺寸减小到 2.1 μm,断面粗糙度降低到 3.1 μm。增大进给间距可以提高加工效率,但过大的进给间距会降低内部改质效果,造成较大的崩边尺寸

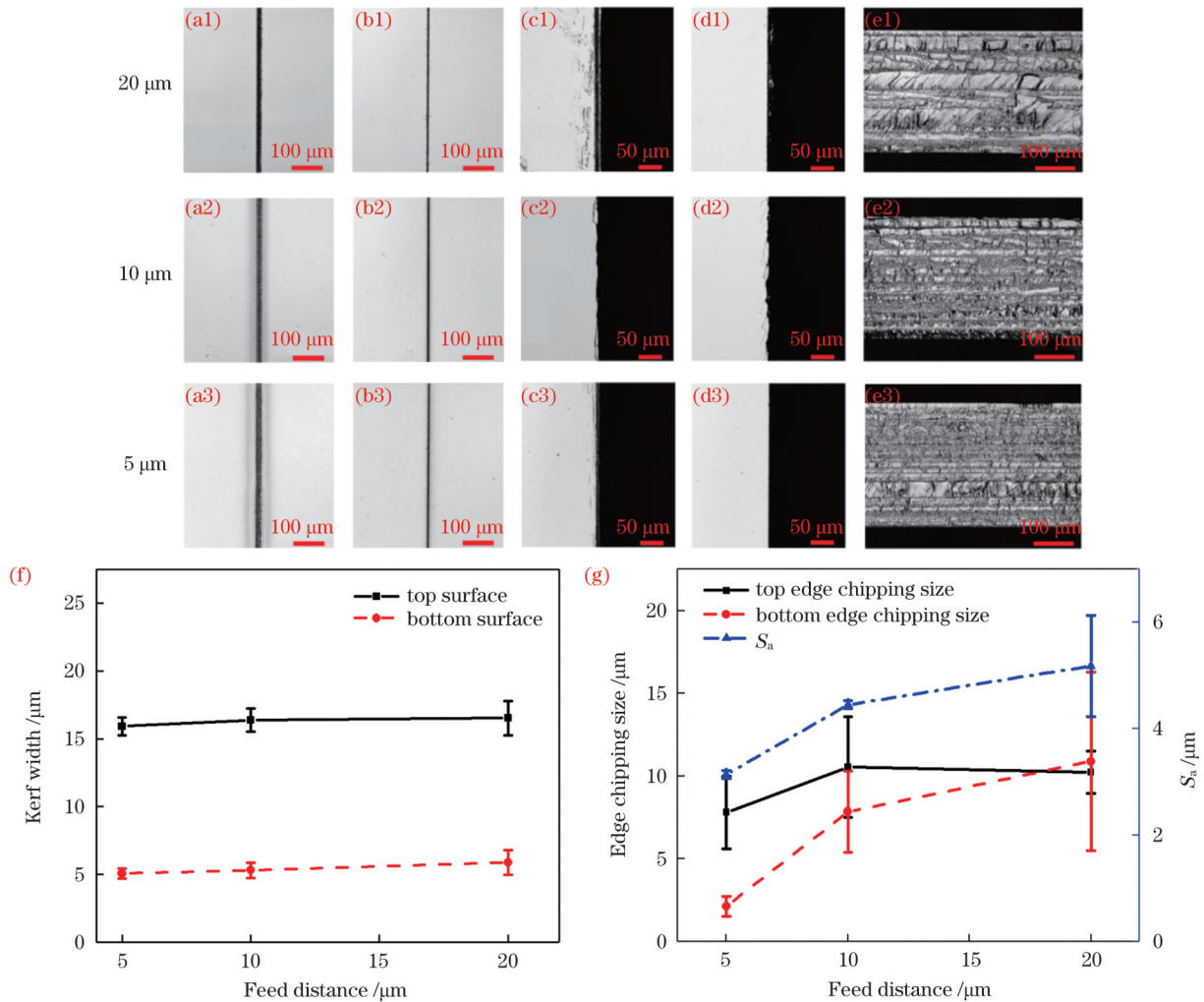


图7 多脉冲模式下的进给间距对切割效果的影响。(a1)~(a3)上表面形貌;(b1)~(b3)下表面形貌;(c1)~(c3)上表面崩边形貌;(d1)~(d3)下表面崩边形貌;(e1)~(e3)断面形貌;(f)进给间距与烧蚀道宽度的关系;(g)进给间距与上下崩边尺寸、断面粗糙度的关系

Fig. 7 Influence of feed distance on cutting effect under multi-pulse mode. (a1)–(a3) Morphologies of top surface; (b1)–(b3) morphologies of bottom surface; (c1)–(c3) edge chipping morphologies of top surface; (d1)–(d3) edge chipping morphologies of bottom surface; (e1)–(e3) cross-section morphologies; (f) influence of feed distance on kerf width; (g) influence of feed distance on top and bottom edge chipping sizes and cross-section roughness

和断面粗糙度。

3.1.3 脉冲重复频率对切割结果的影响

激光加工参数如下:每层扫描次数为1,进给间距为每次+5 μm,平台移动速度为100 mm/s,激光脉冲宽度为10 ps,单脉冲能量为6 μJ,脉冲重复频率分别为50、100、300、500 kHz。

不同脉冲重复频率下的切割结果如图8(a1)~(b4)所示。当脉冲重复频率为50 kHz时,由于脉冲间隔时间过长,材料表面处积累的激光能量密度低,因此上表面烧蚀痕浅且不均匀,下表面不能形成连续的烧蚀痕。当脉冲重复频率从100 kHz增大到500 kHz时,上表面烧蚀道宽度从15.4 μm增加到17.6 μm,下表面烧蚀道宽度仅从4.8 μm增加到5.9 μm。这是因为当重复频率较高时,会出现明显的脉冲积累效应,形成连续的烧蚀道。当激光焦点自下向上

移动时,材料上表面持续接受激光辐照并积累能量,而下表面逐渐离焦,烧蚀痕宽度的增长幅度小于上表面。

裂片后,材料崩边和断面形貌如图8(c1)~(e4)所示。在50 kHz的脉冲重复频率下,积累的激光能量较少,仅能对材料上半部分进行改质,在厚度方向上没有形成连续的裂纹;上表面因有烧蚀道的引导,崩边尺寸较小,而下表面由于裂纹和烧蚀道均不连续,因此存在较大崩边。当重复频率为300 kHz和500 kHz时,材料内部积累的能量增多,改质产生的裂纹可控性较差,导致上表面崩边尺寸从8.2 μm增大到9.5 μm,下表面崩边尺寸从1.5 μm增大到5.8 μm,断面粗糙度从3.2 μm增加到4.9 μm。当脉冲重复频率为100 kHz时,材料内部形成的裂纹可控性较好,崩边尺寸和断面粗糙度都得到明显的改善。

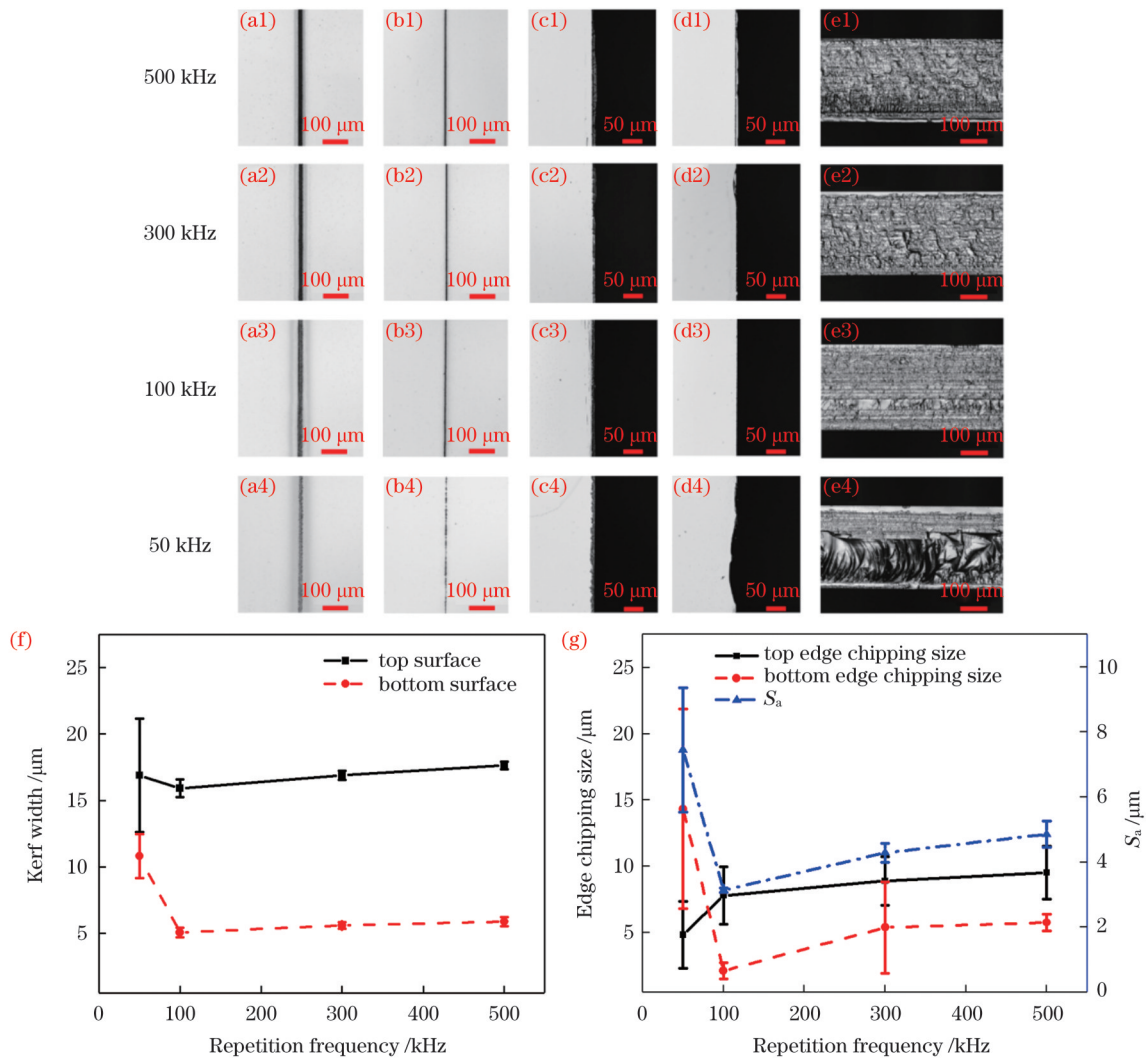


图 8 多脉冲模式下重复频率对切割效果的影响。(a1)~(a4)上表面形貌;(b1)~(b4)下表面形貌;(c1)~(c4)上表面崩边形貌;(d1)~(d4)下表面崩边形貌;(e1)~(e4)断面形貌;(f)重复频率与烧蚀道宽度的关系;(g)重复频率与上下崩边尺寸、断面粗糙度的关系

Fig. 8 Influence of repetition frequency on cutting effect under multi-pulse mode. (a1)–(a4) Morphologies of top surface; (b1)–(b4) morphologies of bottom surface; (c1)–(c4) edge chipping morphologies of top surface; (d1)–(d4) edge chipping morphologies of bottom surface; (e1)–(e4) cross-section morphologies; (f) influence of repetition frequency on kerf width; (g) influence of repetition frequency on top and bottom edge chipping sizes and cross-section roughness

3.1.4 脉冲宽度对切割结果的影响

激光加工参数如下:每层扫描次数为1,进给间距为每次 $+5\ \mu\text{m}$,平台移动速度为 $100\ \text{mm/s}$,激光脉冲重复频率为 $100\ \text{kHz}$,单脉冲能量为 $6\ \mu\text{J}$,脉冲宽度分别为 $1, 5, 10\ \text{ps}$ 。

不同脉冲宽度下切割后的上下表面形貌如图9(a1)~(b3)所示。随着脉冲宽度的减小,上表面的烧蚀道宽度从 $16.7\ \mu\text{m}$ 增大到 $23.6\ \mu\text{m}$,下表面烧蚀道宽度从 $5.0\ \mu\text{m}$ 增大到 $7.6\ \mu\text{m}$ 。原因是激光脉冲宽度越小,激光脉冲峰值功率越高,材料上下表面处的激光能量密度越大,产生的烧蚀道越宽。

裂片后的崩边和断面形貌如图9(c1)~(e3)所示。当脉冲宽度为 $1\ \text{ps}$ 时,激光峰值功率过高,触发了强烈的非线性光电离,在激光作用下产生大量等离子体,阻

碍激光能量向深处传输,材料内部仅上半部分有改质效果,下半部分为未改质的白亮层;上表面因有烧蚀道引导,崩边尺寸仅为 $7.3\ \mu\text{m}$,下表面由于无改质形成的裂纹,因此崩边尺寸高达 $53.4\ \mu\text{m}$ 。当脉冲宽度为 $5\ \text{ps}$ 时,改质区域变大,但裂纹连续性变差,当从上向下裂片时,出现较大的崩边尺寸和断面粗糙度。当脉冲宽度为 $10\ \text{ps}$ 时,激光峰值功率较低,载流子产生的速度较慢,等离子体对激光传输的阻碍作用较小,激光能量沿轴向稳定传输^[26],材料内部的改质较为充分,产生的裂纹连续性好,裂片后崩边尺寸和断面粗糙度都较小。

3.1.5 扫描速度对切割结果的影响

激光加工参数如下:每层扫描次数为1,进给间距为每次 $+5\ \mu\text{m}$,激光脉冲宽度为 $10\ \text{ps}$,脉冲重复频率

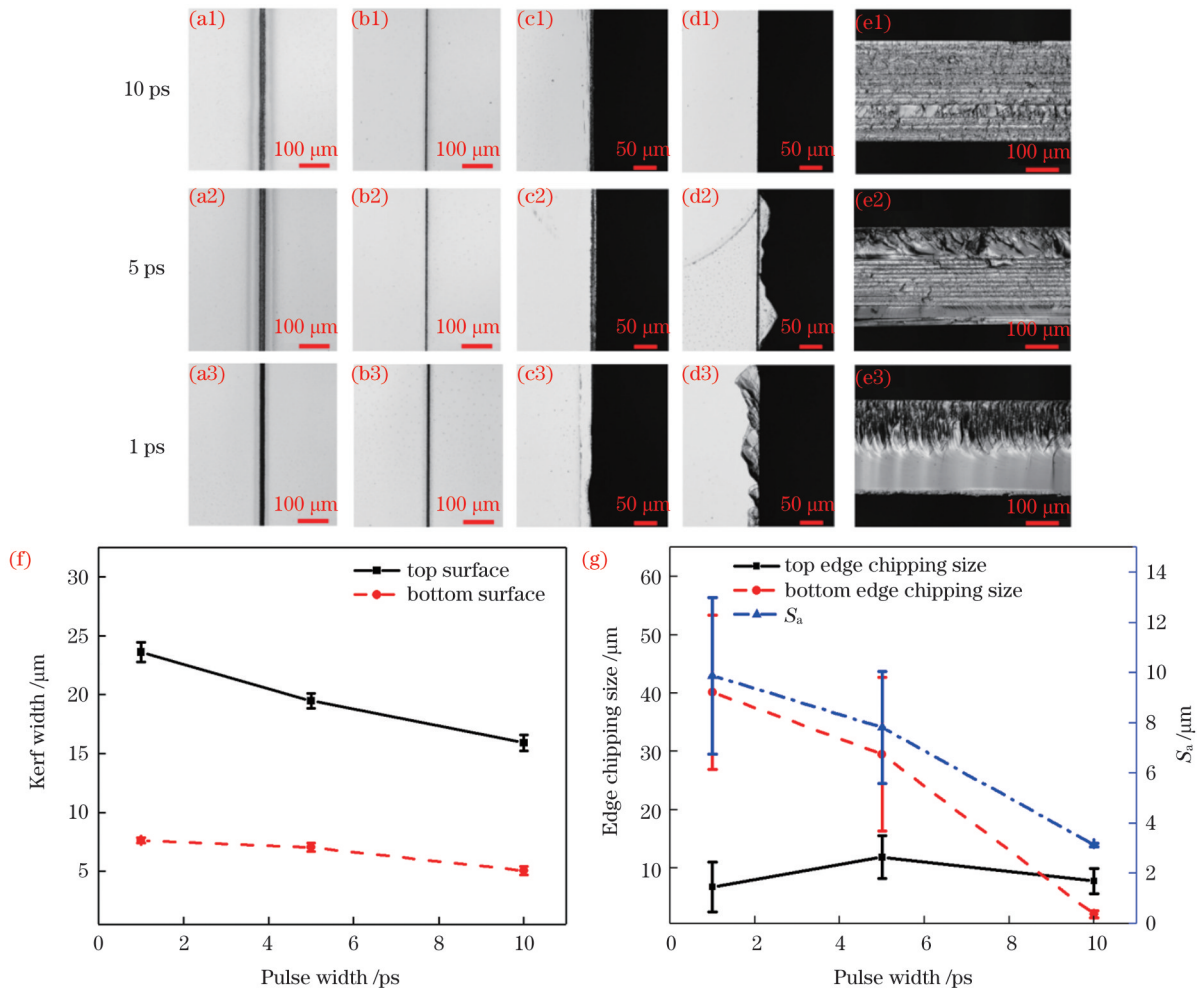


图9 多脉冲模式下脉冲宽度对切割效果的影响。(a1)~(a3)上表面形貌;(b1)~(b3)下表面形貌;(c1)~(c3)上表面崩边形貌;(d1)~(d3)下表面崩边形貌;(e1)~(e3)断面形貌;(f)脉冲宽度与烧蚀道宽度的关系;(g)脉冲宽度与上下崩边尺寸、断面粗糙度的关系

Fig. 9 Influence of pulse width on cutting effect under multi-pulse mode. (a1)–(a3) Morphologies of top surface; (b1)–(b3) morphologies of bottom surface; (c1)–(c3) edge chipping morphologies of top surface; (d1)–(d3) edge chipping morphologies of bottom surface; (e1)–(e3) cross-section morphologies; (f) influence of pulse width on kerf width; (g) influence of pulse width on top and bottom edge chipping sizes and cross-section roughness

为 100 kHz,单脉冲能量为 6 μJ ,平台移动速度分别为 50、100、150 mm/s。

不同扫描速度下切割后的上下表面形貌如图 10(a1)~(b3)所示。当扫描速度从 50 mm/s 增大到 150 mm/s 时,上表面烧蚀道宽度从 17.4 μm 减小到 15.3 μm ,下表面烧蚀道宽度从 4.8 μm 减小到 4.0 μm 。这是因为扫描速度越快,作用于材料上单位长度的脉冲个数越少,光斑搭接率越低,激光对单位长度材料的辐照时间越短,表面处产生烧蚀的能量密度越低,烧蚀道宽度越小;反之,烧蚀道宽度越大。

裂片后的试样崩边和断面形貌如图 10(c1)~(e3)所示。当扫描速度为 150 mm/s 时,材料吸收的激光能量较少,厚度方向上的改质范围较小,内部无法形成连续的裂纹,难以稳定引导裂纹传播,导致上下表面崩边尺寸较大,分别为 10.3 μm 和 9.0 μm 。当扫描速度为 100 mm/s 时,材料改质较为充分且裂纹连续性好,上

下崩边尺寸和断面粗糙度都较小。当扫描速度为 50 mm/s 时,激光对单位长度材料的辐照时间较长,材料内部虽已被完全改质,但产生的裂纹可控性较差,导致上表面崩边尺寸增加到 9.5 μm ,下表面崩边尺寸增加到 7.4 μm ,断面粗糙度增加到 4.6 μm 。高速扫描虽然可提高切割效率,但是材料内的改质范围较小,易引起较大的崩边尺寸和断面粗糙度,采用较低的扫描速度可得到较好的改质效果和较小的崩边尺寸^[27]。

3.2 脉冲串模式下的隐形切割结果

根据多脉冲模式切割的结果,采用脉冲串模式对 4H-SiC 晶圆进行切割,并与多脉冲模式的切割结果进行对比分析。

激光加工参数如下:每层扫描次数为 1,进给间距为每次 +5 μm ,平台移动速度为 100 mm/s,激光脉冲宽度为 10 ps,脉冲重复频率为 100 kHz,单脉冲能量为 6 μJ ,脉冲串模式下子脉冲数分别为 1、3、5、7(分别用

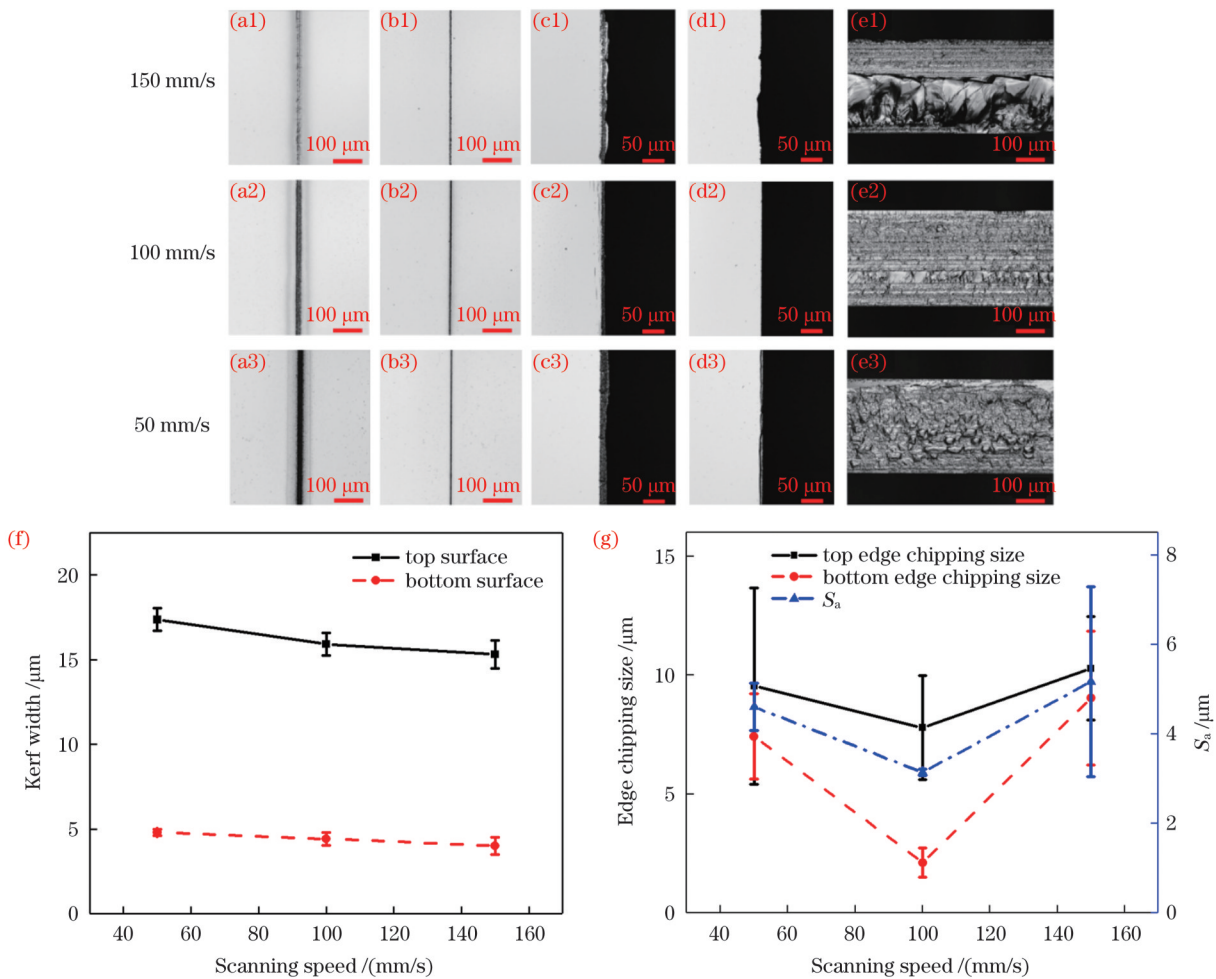


图 10 多脉冲模式下扫描速度对切割效果的影响。(a1)~(a3)上表面形貌;(b1)~(b3)下表面形貌;(c1)~(c3)上表面崩边形貌;(d1)~(d3)下表面崩边形貌;(e1)~(e3)断面形貌;(f)扫描速度与烧蚀道宽度的关系;(g)扫描速度与上下崩边尺寸、断面粗糙度的关系

Fig. 10 Influence of scanning speed on cutting effect under multi-pulse mode. (a1)–(a3) Morphologies of top surface; (b1)–(b3) morphologies of bottom surface; (c1)–(c3) edge chipping morphologies of top surface; (d1)–(d3) edge chipping morphologies of bottom surface; (e1)–(e3) cross-section morphologies; (f) influence of scanning speed on kerf width; (g) influence of scanning speed on top and bottom edge chipping sizes and cross-section roughness

B1、B3、B5、B7 表示), 子脉冲间隔为 50 ns。

从图 11(a1)~(b4) 可以看到, 随着子脉冲个数的增加, 上表面烧蚀道宽度从 $15.9 \mu\text{m}$ 增加到 $24.5 \mu\text{m}$, 这是由多个子脉冲带来的热积累效应造成的。下表面烧蚀道宽度在 $5 \mu\text{m}$ 以内变化且总宽度小于 $10 \mu\text{m}$ 。采用脉冲串模式切割会使上下表面烧蚀道宽度增加, 但上下表面崩边尺寸会得到明显的抑制, 特别是当子脉冲个数为 5 时, 上表面崩边尺寸从 $7.8 \mu\text{m}$ 减小到 $1.2 \mu\text{m}$, 下表面崩边尺寸从 $2.1 \mu\text{m}$ 减小到 $1.0 \mu\text{m}$, 如图 11(c1)~(d4) 所示。这是因为在多脉冲模式下, 每个周期内只有一个脉冲, 激光与材料相互作用的时间太短, 材料内部产生的裂纹连贯性不好。采用脉冲串模式切割时, 通过调整激光脉冲包络中的子脉冲数量, 可增加激光与材料的作用时间, 实现更充分的改质, 形成连续性更好的裂纹, 从而减小崩边尺寸。但这并不意味着子脉冲数量越多越好, 随着子脉冲数的增

加, 每个脉冲包络的总能量增加, 材料内的非线性吸收反应剧烈, 形成的裂纹可控性变差, 崩边尺寸增加。

采用多脉冲模式(对应 B1)和脉冲串模式切割的断面形貌如图 11(e1)~(e4) 所示。在多脉冲模式下, 断面内存在许多未改质的白亮层, 断面粗糙度较高。采用脉冲串模式切割后, 随着子脉冲数量的增加, 断面粗糙度先降低后升高。超快激光通过非线性效应在材料中激发出自由电子, 库伦斥力引起微爆, 破坏碳化硅的化学键, 形成改质层^[28]。多脉冲模式下产生的自由电子太少, 而电子密度的高低对材料的改质有直接影响^[29]。脉冲串模式通过控制子脉冲数量影响自由电子密度, 后续子脉冲在第一个子脉冲的基础上实现对材料的进一步改质, 使改质更充分、更均匀, 从而降低了断面粗糙度^[30-31]。随着子脉冲数量的增加, 单个脉冲包络的总能量过大, 材料被过度改质, 裂纹传播不稳定, 裂片后断面的粗糙度反而增加。

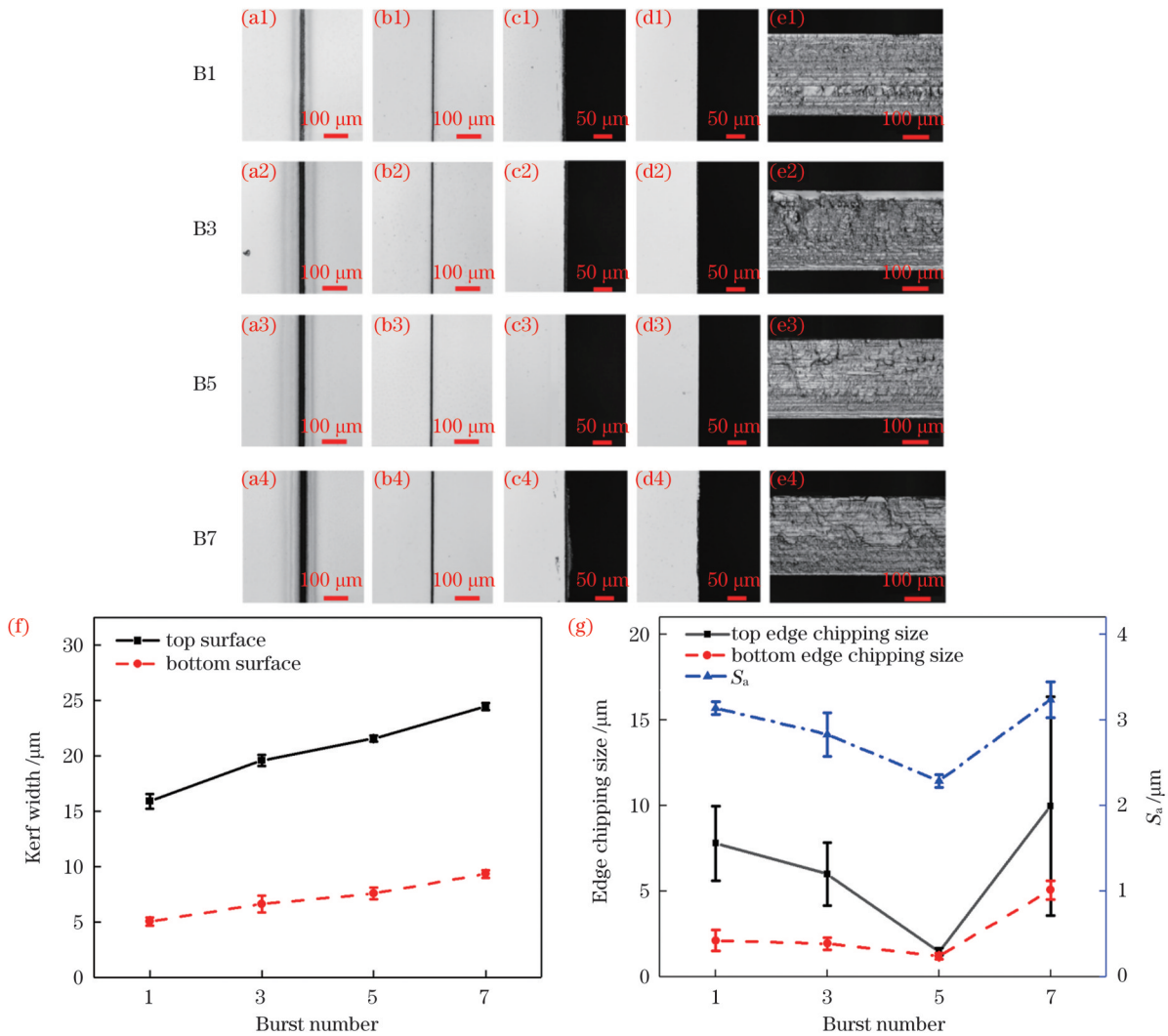


图 11 脉冲串模式下子脉冲数对切割效果的影响。(a1)~(a4)上表面形貌;(b1)~(b4)下表面形貌;(c1)~(c4)上表面崩边形貌;(d1)~(d4)下表面崩边形貌;(e1)~(e4)断面形貌;(f)子脉冲数与烧蚀道宽度的关系;(g)子脉冲数与上下崩边尺寸、断面粗糙度的关系

Fig. 11 Influence of sub-pulse number on cutting effect under burst mode. (a1)–(a4) Morphologies of top surface; (b1)–(b4) morphologies of bottom surface; (c1)–(c4) edge chipping morphologies of top surface; (d1)–(d4) edge chipping morphologies of bottom surface; (e1)–(e4) cross-section morphologies; (f) influence of sub-pulse number on kerf width; (g) influence of sub-pulse number on top and bottom edge chipping sizes and cross-section roughness

4 结 论

采用控制变量法研究了多脉冲模式下激光脉冲能量、进给间距、脉冲重复频率、脉冲宽度和扫描速度对 4H-SiC 晶圆上下表面烧蚀道宽度、崩边尺寸及断面形貌的影响规律。研究发现:当单脉冲能量为 6 μJ,进给间距为 +5 μm,脉冲重复频率为 100 kHz,脉冲宽度为 10 ps,扫描速度为 100 mm/s 时,可以获得最好的切割结果,上下表面切割道宽度分别为 15.9 μm 和 5.1 μm,上下表面崩边尺寸分别为 7.8 μm 和 2.1 μm,断面粗糙度为 3.1 μm。

为了进一步改善崩边尺寸和断面形貌,研究了脉冲串模式对切割结果的影响。结果显示,采用脉冲串模式可以提高改质裂纹的连续性,减小崩边尺寸。当

子脉冲数为 5 时,上下表面切割道宽度分别为 21.4 μm 和 7.6 μm,上表面崩边尺寸最小为 1.2 μm,下表面崩边尺寸最小为 1.0 μm,比相同切割参数下多脉冲模式的崩边尺寸分别减小了 85% 和 52%。在脉冲串模式下,当子脉冲数量为 5 时,断面粗糙度最低为 2.3 μm,比相同切割参数下多脉冲模式的断面粗糙度减小了 26%。这是由于脉冲串模式下产生的自由电子密度较高,材料改质更充分、更均匀,从而断面粗糙度降低。与多脉冲激光隐形切割相比,脉冲串模式的使用增加了激光隐形切割参数的调节维度,有利于获得更好的切割效果。

参 考 文 献

[1] Millán J, Godignon P, Perpiñá X, et al. A survey of wide bandgap power semiconductor devices[J]. IEEE Transactions on Power

- Electronics, 2014, 29(5): 2155-2163.
- [2] She X, Huang A Q, Lucía Ó, et al. Review of silicon carbide power devices and their applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10): 8193-8205.
- [3] Qian X, Jiang P Q, Yang R G. Anisotropic thermal conductivity of 4H and 6H silicon carbide measured using time-domain thermoreflectance[J]. Materials Today Physics, 2017, 3: 70-75.
- [4] 许泓, 任荣杰. 碳化硅器件在节能减排领域的应用展望[J]. 中国能源, 2018, 40(8): 43-47.
- Xu H, Ren R J. Application prospect of silicon carbide devices in the field of energy saving and emission reduction[J]. Energy of China, 2018, 40(8): 43-47.
- [5] 刘金婷, 贺瑞, 刘瑞莹, 等. 碳化硅半导体材料应用及发展前景[J]. 科技创新导报, 2019, 16(25): 74-74, 76.
- Liu J T, He R, Liu R Y, et al. Application and development prospect of silicon carbide semiconductor material[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2019, 16(25): 74-74, 76.
- [6] Valle-Mayorga J, Gutshall C P, Phan K M, et al. High-temperature silicon-on-insulator gate driver for SiC-FET power modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11): 4417-4424.
- [7] 麦玉冰, 谢欣荣. 第三代半导体材料碳化硅(SiC)研究进展[J]. 广东化工, 2021, 48(9): 151-152, 155.
- Mai Y B, Xie X R. The research progress of the third generation semiconductor materials SiC[J]. Guangdong Chemical Industry, 2021, 48(9): 151-152, 155.
- [8] Han S F, Yu H J, He C J, et al. Laser slicing of 4H-SiC wafers based on picosecond laser-induced micro-explosion via multiphoton processes[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 154: 108323.
- [9] Oliveros A, Guiseppi-Elie A, Sadow S E. Silicon carbide: a versatile material for biosensor applications[J]. Biomedical Microdevices, 2013, 15(2): 353-368.
- [10] Guo X, Peng Z, Ding P, et al. Nonlinear optical properties of 6H-SiC and 4H-SiC in an extensive spectral range[J]. Optical Materials Express, 2021, 11(4): 1080-1092.
- [11] Lin Q Y, Fan Z J, Wang W J, et al. The effect of spot overlap ratio on femtosecond laser planarization processing of SiC ceramics[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 129: 106270.
- [12] Cvetković S, Morsbach C, Rissing L. Ultra-precision dicing and wire sawing of silicon carbide (SiC) [J]. Microelectronic Engineering, 2011, 88(8): 2500-2504.
- [13] Phillips K C, Gandhi H H, Mazur E, et al. Ultrafast laser processing of materials: a review[J]. Advances in Optics and Photonics, 2015, 7(4): 684-712.
- [14] Watanabe W, Li Y, Itoh K. Ultrafast laser micro-processing of transparent material[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 78: 52-61.
- [15] Savriama G, Baillet F, Barreau L, et al. Optimization of diode pumped solid state ultraviolet laser dicing of silicon carbide chips using design of experiment methodology[J]. Journal of Laser Applications, 2015, 27(3): 032009.
- [16] 张炜, 刘涛, 何家乐, 等. 飞秒激光全划切超薄碳化硅基片[J]. 表面技术, 2023, 52(1): 306-313.
- Zhang W, Liu T, He J L, et al. Full dicing of ultra-thin silicon carbide substrate by femtosecond laser[J]. Surface Technology, 2023, 52(1): 306-313.
- [17] Huang Y, Li Y, Shen Y, et al. Research on ultraviolet femtosecond pulsed laser cutting 4H-SiC[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11717: 117172D.
- [18] Saman A M, Furumoto T, Ueda T, et al. A study on separating of a silicon wafer with moving laser beam by using thermal stress cleaving technique[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 223: 252-261.
- [19] Pauchard A, Obi S, Lee K, et al. Low-k wafer scribing using water jet-guided laser technology with 10 ns lasers[C] //2009 IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, May 10-12, 2009, Berlin, Germany. New York: IEEE Press, 2009: 115-118.
- [20] 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.
- [21] 胡小豹, 郝强, 郭政儒, 等. 全光纤皮秒激光切割蓝宝石晶圆的实验研究[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0102016.
- Hu X B, Hao Q, Guo Z R, et al. Experimental study on all-fiber picosecond laser cutting sapphire wafer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0102016.
- [22] 王雪, 崔志勇, 王兵, 等. 侧壁粗化 GaN 基倒装芯片光提取效率的模拟分析[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0723001.
- Wang X, Cui Z Y, Wang B, et al. Simulation and analysis of light extraction efficiency of GaN-based flip chip with sidewall roughness [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 0723001.
- [23] 张怀智, 徐家明, 张兰天, 等. 硅晶圆多焦点激光隐切算法与实验[J]. 中国激光, 2022, 49(2): 0202018.
- Zhang H Z, Xu J M, Zhang L T, et al. Algorithm and experiment of silicon wafer multifocus laser stealth dicing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(2): 0202018.
- [24] 纪明阔. LED 皮秒激光隐形切割工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017: 13-14.
- Ji M K. Study on invisible cutting technology of LED picosecond laser[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017: 13-14.
- [25] 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[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7996: 799603.
- [26] Velpula P K, Bhuyan M K, Courvoisier F, et al. Spatio-temporal dynamics in nondiffractive Bessel ultrafast laser nanoscale volume structuring[J]. Laser & Photonics Reviews, 2016, 10(2): 230-244.
- [27] 宋燕国, 郭旭, 王嫣鸾, 等. 皮秒脉冲隐形切割碳化硅晶圆实验研究[J]. 光学仪器, 2022, 44(3): 88-94.
- Song Y G, Guo X, Wang Y L, et al. Research on stealth dicing silicon carbide wafer by picosecond laser pulses[J]. Optical Instruments, 2022, 44(3): 88-94.
- [28] Ohmura E, Fukuyo F, Fukumitsu K, et al. Modified-layer formation mechanism into silicon with permeable nanosecond laser [J]. International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering, 2007, 1(6): 677-691.
- [29] Amina, Ji L F, Yan T Y, et al. Ionization behavior and dynamics of picosecond laser filamentation in sapphire[J]. Opto-Electronic Advances, 2019, 2(8): 190003.
- [30] Mishchik K, Beuton R, Caulier O D, et al. Improved laser glass cutting by spatio-temporal control of energy deposition using bursts of femtosecond pulses[J]. Optics Express, 2017, 25(26): 33271-33282.
- [31] Javaux C, Mishchik K, Dematteo-Caulier O, et al. Effects of burst mode on transparent materials processing[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9351: 93510M.

Study of Stealth Dicing of Silicon Carbide Wafers Under Ultrafast Laser Multi-Pulse Mode and Burst Mode

Ren Yunpeng*, Tu Xincheng, He Kun, Cheng Li, Ye Yunxia, Ren Xudong, Ren Naifei
School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China

Abstract

Objective With the rapid development of modern industrial technology, silicon carbide has broad application prospects owing to its excellent physical and chemical properties. Compared to conventional cutting methods, laser stealth dicing has the benefits of less debris with higher cutting accuracy. The research on the effect of laser parameters on surface ablation, edge chipping and cross-section roughness, and the development of new laser cutting techniques are of great practical significance to the development of silicon carbide cutting technology.

Methods In this study a high power ultrafast laser processing system is used to cut out 300 μm thick SiC wafers with the diameter of 4 inch (1 inch=2.54 cm). Firstly, the effects of laser single pulse energy, feed distance, pulse repetition frequency, pulse width and scanning speed on cutting results are investigated using the control variables method. Based on the results of the multi-pulse mode (Fig. 5(a)), the burst mode (Figs. 5(b) and (c)) is used to reduce the edge chipping size and cross-section roughness. In burst mode, sub-pulses with the same pulse repetition rate as the output pulse sequence are selected from seed source pulses by adjusting the transistor-transistor logic (TTL) signal in the acousto-optic modulator (Fig. 4). The surface ablation, edge chipping size and cross-section roughness are analyzed using laser confocal microscopy.

Results and Discussions The effects of laser single pulse energy, feed distance, pulse repetition frequency, pulse width and scanning speed on cutting results under the multi-pulse mode are investigated. If the pulse energy is lower than 4 μJ , modified layers cannot be formed inside the SiC wafers, resulting in failure to separate the wafer (Fig. 6). The feed distance has little effect on kerf width, however, the significant effects on edge chipping size and cross-section roughness are observed (Fig. 7). A too low or too high pulse repetition frequency results in large kerf width, large edge chipping size and high cross-section roughness (Fig. 8). Appropriately increasing pulse width can improve the quality of surface, edge and cross-section (Fig. 9). Utilizing the appropriate scanning speed can reduce kerf width, edge chipping size and cross-sectional roughness (Fig. 10). Based on these results, the burst mode is used to cut the wafers. It is confirmed that the cutting accuracy significantly improves under the burst mode (Fig. 11). Because interaction time between the laser and material is too short in multi-pulse mode, the density of free electrons is too low and the internal material modification is insufficient, which affects the quality of the edge and cross-section. The burst mode extends the interaction time between the laser and material which induces a high density of free electrons and good internal crack continuity. Therefore, the edge chipping size and cross-sectional roughness are reduced.

Conclusions This study investigates the effects of laser pulse energy, feed distance, pulse repetition frequency, pulse width and scanning speed on the top and bottom surfaces, edge chipping and cross-section of SiC wafers in multi-pulse mode using the control variable method. It is identified that the best cutting results are produced under the single pulse energy of 6 μJ , +5 μm feed distance, 100 kHz pulse repetition frequency, 10 ps pulse width, and 100 mm/s scanning speed. The kerf width on the top and bottom surfaces is 15.9 μm and 5.1 μm , respectively, the top and bottom surface edge chipping size is 7.8 μm and 2.1 μm , respectively, and the cross-section roughness is 3.1 μm . To further improve the edge size and cross-section morphology, the burst mode effect on the cutting results is investigated. It is confirmed that burst mode improves the continuity of modified cracks and reduces edge chipping size. When the number of sub-pulses is five, the kerf width on the top and bottom surfaces is 21.4 μm and 7.6 μm , respectively, and the minimum edge chipping size on the top and bottom surfaces is 1.2 μm and 1.0 μm , respectively, which is 85 and 52% less than those under the same cutting parameters in multi-pulse mode. Also at five sub-pulses, the lowest cross-section roughness is 2.3 μm , which is 26% less than that under the same cutting parameters in multi-pulse mode. This is because of the high density of free electrons generated in multi-pulse mode, which results in full and homogeneous material modification, thus reducing cross-section roughness. The burst mode increases dimensionalities of the laser stealth dicing parameters compared with multi-pulse laser stealth cutting and facilitates better cutting results.

Key words laser technique; ultrafast laser; silicon carbide; stealth dicing; burst mode; edge chipping; cross-section roughness