

文章编号 1004-924X(2026)13-2033-17

单晶碳化硅的双脉冲皮秒激光协同机械裂片 复合切割加工

赵元豪^{1,2}, 姚 鹏^{1,2*}, 褚东凯^{1,2*}, 杨梓萌^{1,2}, 王庆伟^{1,2}, 屈硕硕^{1,2}

(1. 山东大学机械工程学院先进射流工程技术研究中心, 山东 济南 250061;

2. 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061)

摘要: 为稳定分离碳化硅并降低切割损伤, 提出一种双脉冲皮秒激光协同机械裂片复合的切割方法。通过加工断裂引导沟槽与应力诱导断裂协同作用的工艺路线, 实现材料的高质量稳定切割。系统研究了双脉冲延迟、分层扫描间隔、激光功率和扫描速度对烧蚀行为、裂片稳定性及断面质量的影响。实验结果表明, 双脉冲时序调控可显著增强双脉冲协同作用, 在延迟 1 ps 时材料去除能力最佳, 单次加工沟槽深度较单脉冲提高 81.34%; 分层扫描间隔 30 μm 时, 切割质量、效率与裂片可控性匹配较优; 最佳激光功率为 18.6 W、扫描速度为 15 mm/s。随着烧蚀的不断增强, 侧壁区域 C、O 元素含量升高而 Si 元素降低, 表明激光作用诱导了 Si 挥发、C 富集及氧化改性。该加工技术能够实现碳化硅材料的切割分离, 在优选参数条件下加工可形成更稳定的裂片引导沟槽和内部裂纹, 更有利于获得低损伤、高可控的碳化硅切割质量, 为碳化硅等硬脆单晶材料的高质量激光切割提供了技术储备。

关键词: 激光加工; 4H-SiC; 皮秒激光; 双脉冲; 激光切割

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20263413.2033

CSTR: 32169.14.OPE.20263413.2033

Double-pulse picosecond lasers and mechanical cleaving combined cutting process for SiC

ZHAO Yuanhao^{1,2}, YAO Peng^{1,2*}, CHU Dongkai^{1,2*}, YANG Zimeng^{1,2},

WANG Qingwei^{1,2}, QU Shuoshuo^{1,2}

(1. Center for Advanced Jet Engineering Technologies (CaJET), School of Mechanical Engineering,
Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of the Ministry of Education,
Jinan 250061, China)

* Corresponding author, E-mail: yaopeng@sdu.edu.cn; chudongkai@sdu.edu.cn

Abstract: To achieve stable separation and reduce cutting-induced damage, a double-pulse picosecond lasers and mechanical cleaving combined cutting process for SiC has been proposed. High-quality and stable cutting of the material was achieved through a process route that integrates the machining of fracture-guid-

收稿日期: 2026-04-19; **修订日期:** 2026-05-12.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2024YFB4608903); 国家自然科学基金资助项目 (No. U23A20632); 山东省自然科学基金重大基础研究资助项目 (No. ZR2023ZD34); 山东省重大科技创新工程资助项目 (No. 2023CXGC010207)

ing grooves with stress-induced fracture. Meanwhile, the effects of double-pulse delay, scanning interval, laser power, and scanning speed on the ablation behavior, cleaving stability, and cross-sectional quality were systematically investigated. The double-pulse sequence markedly enhanced pulse synergy. The highest material removal was achieved at a 1 ps delay, where the single-pass groove depth increased by 81.34% relative to that of a single pulse. An interlayer scanning interval of 30 μm provided the best overall balance among cutting quality, efficiency, and cleaving controllability. The optimal laser power and scanning speed were 18.6 W and 15 mm/s, respectively. Elemental analysis showed increased C and O contents but decreased Si content in the sidewall with increasing ablation, indicating Si volatilization, C enrichment, and oxidation induced by laser irradiation. The proposed technique enables the cutting and separation of silicon carbide. Under optimized conditions, it generates more stable cleaving-guiding grooves and internal cracks, which is beneficial for achieving low-damage and highly controllable SiC cutting. The research findings provide a technical foundation for high-quality laser cutting of hard and brittle single-crystal materials such as SiC.

Key words: laser fabrication; 4H-SiC; picosecond laser; double-pulse; laser cutting

1 引言

碳化硅(SiC)是第三代半导体材料中的典型代表,兼具宽禁带、高击穿电场、高热导率和强化化学稳定性等特征,在高压、高频、高温与耐辐射器件与模块的制造领域中日益广泛应用,在新能源汽车、光伏发电、5G 通讯、航空航天等高新产业中也具有重要的应用价值,是提升电力电子系统效率和性能的关键材料^[1-2]。因此,面向碳化硅的高质量、低损伤、高一致性切割加工需求日益突出,碳化硅的材料分离工艺逐渐成为影响材料利用率、器件边缘完整性和制造良率的关键环节^[3-4]。

然而,碳化硅是一种典型的硬脆难加工材料,具有高硬度、高脆性、耐高温的优良机械性能^[5],这使得碳化硅的切割加工面临诸多困难。目前,各类工艺路线已有相关研究与探索。长期以来,传统机械切割仍是碳化硅切割的主要工艺之一,典型方法包括金刚石刀片划片和线锯切割等^[3,6]。Wang 等^[7]采用两类结合剂金刚石刀片开展了碳化硅高速微划片研究,系统考察了各类工艺参数对材料崩边数量及面积的影响,发现树脂结合剂刀片在崩边控制和表面形貌方面优于金属结合剂刀片。Feng 等^[8]制备最薄的 0.048 mm 的超薄金刚石刀片,这表明传统切割工艺正试图通过减薄刀片来压缩切缝宽度和材料损失,但加工质量仍高度依赖刀具结构且加工成

本进一步升高。针对碳化硅的线锯切割技术,已经形成了游离磨粒线锯切割、固结磨粒线锯切割以及超声辅助金刚石线锯振动切割等诸多技术路线,相比刀片划片进一步降低了切割道材料损失,提高了切割质量^[9]。Hardin 等^[10]使用超细金刚石线锯对碳化硅进行了切片实验和表面损伤分析,切割后材料表面粗糙度仅约为 0.2 μm ,但线锯磨损快、寿命短,脱落磨粒会随线锯往复嵌入材料并形成微裂纹。总体来看,机械切割加工碳化硅虽然工艺成熟,但其本质上的接触式加工特征决定了刀具磨损、机械应力集中和脆性破坏难以完全避免。碳化硅的机械切割工艺虽然具备设备成熟和产业基础优势,但仍普遍存在切缝损耗大、刀具寿命有限、边缘崩裂抑制困难以及高质量与高效率难以兼顾等缺点^[3,6]。

为降低机械切割带来的材料损伤和刀具寿命缩短等问题,超快激光切割逐渐成为碳化硅切割加工的重要研究方向^[4]。超快激光是指脉冲宽度达到皮秒级的超短脉冲激光,具有脉宽短、峰值功率高、热影响区相对较小和高分辨率等诸多优势^[11]。相比传统机械方法,激光切割具有非接触、易于路径控制、切缝窄和自动化程度高等优点,在硬脆材料切割领域具有显著优势^[12]。Molian 等^[13]开展了 4H-SiC 的皮秒脉冲激光烧蚀与微加工研究,验证了采用超短脉冲激光对碳化硅进行直接去除的可行性,为后续超快激光切割研

究奠定了基础。Zhao 等^[14]探究了主要激光参数对 4H-SiC 烧蚀表面形貌的影响,指出沟槽截面形状和表面质量对相关工艺参数具有较强依赖性,反映出激光加工对工艺参数优化工作的较大需求。Rehman 等^[15]从材料响应角度系统研究了飞秒激光作用下碳化硅表层及亚表层的结构演化,发现激光作用后晶态 SiC 会形成薄非晶层及伴随堆垛层错和变形的亚表层损伤。Feng 等^[16]进一步研究了激光烧蚀碳化硅过程中的重铸层行为,明确重铸层是激光烧蚀中难以回避的热损伤形式之一。这说明即使超快激光具有近似冷加工的优势并避免了接触式加工的机械损伤,激光烧蚀切割仍然存在不可忽视的结构改性、熔融缺陷和边缘崩裂等损伤,激光加工形式也存在材料去除效率较低、加工工艺参数复杂、沟槽锥度和侧壁粗糙度控制困难等问题。

为了提高激光烧蚀切割的材料去除效率并改善相关质量,考虑引入激光脉冲时序调控,使用双脉冲激光进行碳化硅的激光加工。与单脉冲激光直接烧蚀相比,双脉冲激光通过调控脉冲延迟与能量分配,利用前脉冲预调材料状态、后脉冲强化能量耦合,从而有助于降低烧蚀阈值、提高能量利用率并改善加工质量^[17-18]。Jiang 等^[19]进行了双脉冲飞秒激光高深径比微孔加工实验,在较优脉冲延迟条件下,孔深和深径比均可获得约 1.3~1.4 倍提升,表明引入双脉冲并调节脉冲时序可以有效提高激光加工能力。Chu 等^[20]在熔融石英上的双脉冲光束加工表明,与单脉冲相比,双脉冲可使光改性区显著扩大,优化参数改性区纵横比可达约 1 500:1,说明双脉冲有助于扩大纵向有效作用区并提升后续去除效率。Matsunaga 等^[21]针对 4H-SiC 开展了双脉冲飞秒激光表面激发烧蚀研究,指出双脉冲能够在更低能量密度下实现加工并有助于抑制加工面的贯穿损伤,证明双脉冲激光高质量切割碳化硅具有现实可行性。总体来看,双脉冲激光在加工碳化硅等硬脆材料时具有明显优势^[22-23],通过降低烧蚀阈值、提高材料去除效率、增大沟槽深宽比来降低达到材料分离深度所需的功率和扫描次数,从而减轻热积累及由此引发的重铸、裂纹和边缘损伤等问题,并提高加工效率。

基于此,本研究以碳化硅为对象,构建双脉

冲皮秒激光协同机械裂片复合切割加工技术,通过引入机械应力裂片降低切割材料所需的材料去除率和裂纹深度,从而进一步降低激光加工带来的热影响和表面损伤。通过加工断裂引导沟槽与施加机械应力诱导断裂协同作用的工艺路线,实现碳化硅的高质量稳定切割。同时,系统研究了双脉冲延迟、分层扫描间隔、激光功率和扫描速度对烧蚀行为、切割质量及裂片稳定性的影响,阐述了双脉冲时序延迟调控对碳化硅激光烧蚀的协同增强作用,分析了分层扫描功率、扫描速度等参数对切割质量的优化规律并建立了最优工艺参数体系,结合元素面分布阐述了断裂侧壁的成分演化和分布规律;为碳化硅低损伤、高可控的激光切割复合加工技术提供理论与技术储备。

2 实 验

2.1 实验材料

本实验所用材料为北京天科合达半导体股份有限公司生产的导电型 4H-SiC 晶圆,晶圆厚度为 350 μm ,是机械加工和半导体领域常用典型晶型和厚度尺寸。其上下表面均经过化学机械抛光(CMP)处理,以减小初始表面粗糙度差异所引起的光散射及局部吸收不均^[24]。为满足裂片实验及显微表征的测试需求,将晶圆加工为 10 mm $\times$ 10 mm 的方形片状试样。样品的具体参数见表 1。由于 4H-SiC 的 Si 面与 C 面在力学性能及加工响应方面存在差异,实验中激光均由 Si 面入射。

表 1 4H-SiC 晶圆的材料参数	
Tab. 1 Material parameters of 4H-SiC wafers	
Material parameters	4H-SiC
Diameter/mm	100
Thickness/ μm	350 $\pm$ 25
Wafer orientation	Deflect 4.0 $^{\circ}\pm$ 0.5 $^{\circ}$ toward <11-20>
Surface roughness/nm	Si-side $R_a\leq 0.2$; C-side $R_a\leq 5$
Resistivity/($\Omega\cdot\text{cm}$)	≤ 0.1
Refractive index@ 1 064 nm	$n_o\approx 2.58$; $n_e\approx 2.63$

2.2 双脉冲皮秒激光加工光路与双脉冲输出时序

本研究使用近红外皮秒脉冲激光器作为激光切割加工平台的激光源。该激光器的中心波长为 1 064 nm,脉宽为 15 ps,最大输出功率为 50 W,输出光束能量分布呈高斯型,适用于各类硬质合金、陶瓷与单晶材料等硬脆材料的精密加工,其详细参数见表 2。

表 2 激光器的主要参数

Tab. 2 Main parameters of laser

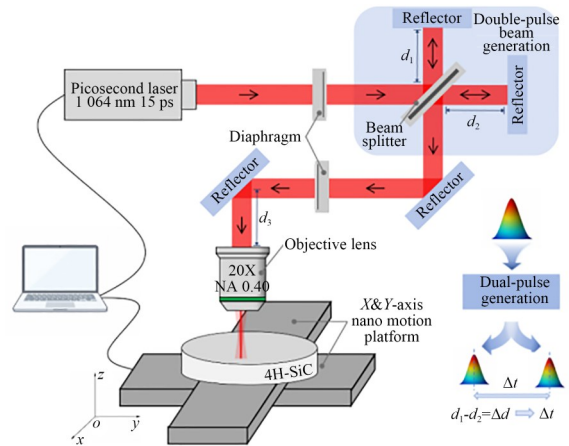
Technical Parameters	BGL-1064-50B
Wavelength/nm	1 064
Pulse width/ps	15
Maximum repetition frequency/kHz	100
Maximum power/W	50
Maximum single pulse energy/ μJ	500
Beam quality	$M^2 \leq 1.3$

图 1 为双脉冲激光加工实验系统。激光束由激光器发出后,首先经过光阑,并通过反射镜传输至基于半透半反分光镜构建的双脉冲生成光路。入射光束经分光镜分为能量按 1:1 分配的两束子光束,两束光束分别沿光程 d_1 和 d_2 传播,经反射镜反射后再次返回分光镜并实现合束,从而形成具有时空重合特性的同轴双脉冲光束。该双脉冲光束由两束能量相等的子脉冲光束组成,随后经反射镜导入高分辨率物镜(放大倍数 $20\times$; $N_a=0.40$; $W_D=5.89$)进行聚焦,实现对材料的高精度聚焦并提高激光加工能力。运动控制系统由三轴纳米运动平台构成,用于精确控制激光焦点位置及样品相对位移,从而保证激光切割过程中的加工精度与工艺稳定性。

光路装置可通过光学位移平台精密调节反射镜位置,实现子脉冲光束在分束后的光程可控。当两束子脉冲光束之间存在光程差时,其合束后形成的双脉冲在时间上将产生相应的时序差,该时序差定义为双脉冲延迟 Δt 。 Δt 由光程差控制,其计算公式为:

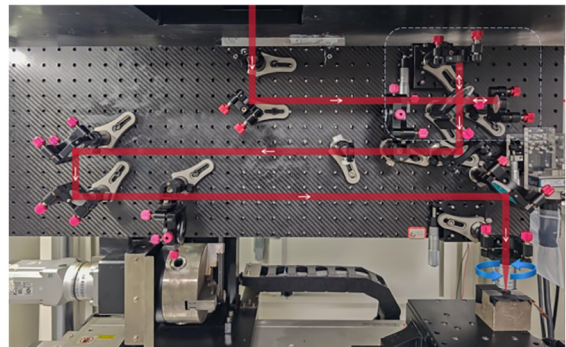
$$\Delta t = \frac{2\Delta d}{c} = \frac{2|d_1 - d_2|}{c}, \quad (1)$$

其中: Δt 是双脉冲延迟, Δd 是光程差, c 是光速。



(a) 加工示意图

(a) Schematic diagram of processing



(b) 加工装置

(b) Processing equipment

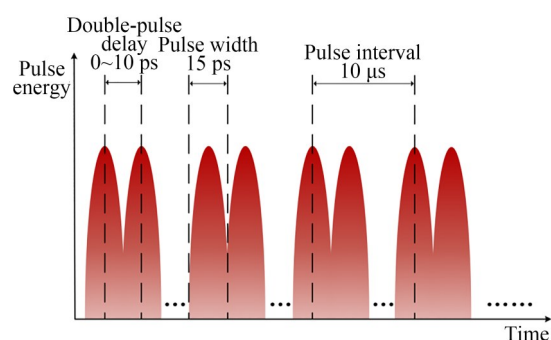
图 1 皮秒双脉冲激光加工光路

Fig. 1 Optical path for picosecond double-pulse laser processing

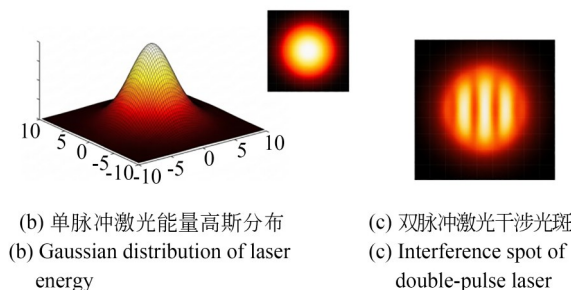
取光速为 3×10^8 m/s,令 $\Delta t=1$ ps,计算得到光程差 $\Delta d=1.5 \times 10^{-4}$ m=150 μm 。由此得出,光程差每增大或缩小 150 μm 对应双脉冲延迟将增加 1 ps,装置可调节的范围对应双脉冲延迟 0~10 ps。

激光形成的激光双脉冲输出时序如图 2(a) 所示。双脉冲延迟由上所述过程进行调控,影响两个子脉冲之间的时间差。由于双脉冲由相同单脉冲激光分束形成,每个子脉冲的脉冲宽度将与激光器输出脉宽一致,为 15 ps。类似的,每两对双脉冲之间的脉冲间隔由激光器输出单脉冲的重复频率决定,最大重复频率为 100 kHz,对应时序间隔为 10 μs 。激光器输出的高斯光束如图 2(b) 所示。将分束后的两束子脉冲光束在光路中调整为时空同步,此时光斑将形

成如图 2(c)所示的干涉条纹光斑。使用该时序进行材料加工时,第一子脉冲将先在材料表面烧蚀激发自由电子、等离子体以及局部升温熔融,并进一步引起吸收系数等材料光学参数瞬时变化,从而增强第二子脉冲的能量吸收和能量耦合作用^[23,25-26]。由此可知,双脉冲光束能够实现更高效的能量利用与材料去除,既降低了切割加工所需的激光能量,又有效抑制了材料烧蚀及热影响区的扩展。



(a) 脉冲能量随时间输出
(a) Output of pulse energy over time



(b) 单脉冲激光能量高斯分布
(b) Gaussian distribution of laser energy
(c) 双脉冲激光干涉光斑
(c) Interference spot of double-pulse laser

图 2 双脉冲激光脉冲输出时序与光斑能量分布示意图
Fig. 2 Timing of dual-pulse laser pulse output and schematic diagram of light spot energy distribution

2.3 激光切割工艺路线与主要工艺参数

与激光烧蚀贯穿切割相比,双脉冲皮秒激光协同机械裂片复合加工更有利于实现碳化硅的高效低损伤切割。直接激光分离容易引发表面热损伤并伴随较高能量消耗^[27-28]。当前工艺可提高激光加工效率并降低所需加工深度,从而减少扫描次数并降低激光能量,进而实现低损耗、高效率加工,同时抑制断裂边缘的崩边、热影响及其他缺陷。

本研究采用的加工方案如图 3 所示。首先,利用激光在样品上表面沿预定分离轨迹加工导

向沟槽;随后,施加外部机械载荷,使材料在沟槽底部应力集中区域萌生脆性微裂纹,并延应力驱动下沿材料内部方向扩展;最终,实现沿激光加工路径的贯穿断裂与分离。该方案在保证切割可实现性的同时,尽可能降低激光直接去除材料引起的表层损伤。

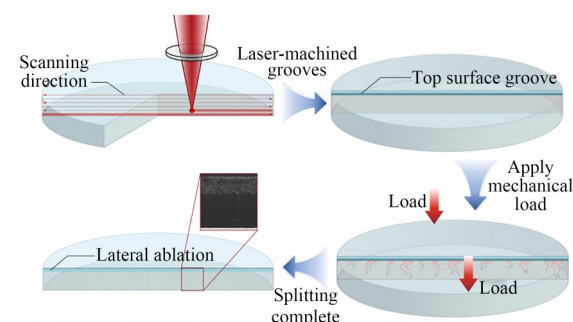
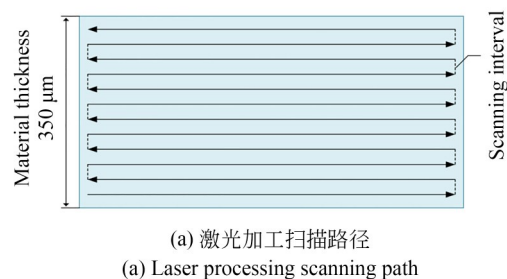
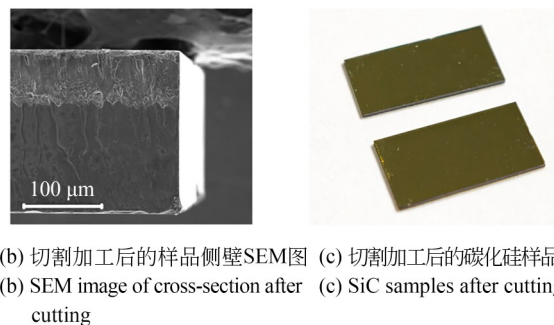


图 3 双脉冲皮秒激光协同机械裂片复合切割工艺示意图
Fig. 3 Schematic diagram of double-pulse picosecond lasers and mechanical cleaving combined cutting process

为进一步降低切割过程中的材料去除量及上表面烧蚀程度,采用负离焦激光重复扫描的加工策略,替代传统激光直接聚焦于材料上表面进行沟槽烧蚀的工艺方案,如图 4 所示。具体而言,



(a) 激光加工扫描路径
(a) Laser processing scanning path



(b) 切割加工后的样品侧壁SEM图 (c) 切割加工后的碳化硅样品
(b) SEM image of cross-section after cutting (c) SiC samples after cutting

图 4 激光加工扫描路径与加工后样品
Fig. 4 Laser processing scanning path and post-processing sample

激光焦点初始设置于材料下表面,随后在重复扫描过程中按照预设扫描间隔逐层上移,从而实现沟槽的渐进式成形。

该方法有助于将激光作用区域由材料内部向上表面逐步推进,预加热材料内部形成热缺陷,同时降低表层材料的热积累与烧蚀损伤,提高切割过程的可控性与断面质量。

对于本文所采用的激光切割工艺路线而言,切割效率及加工质量主要受双脉冲延迟、扫描层间间隔(扫描次数)、激光功率和扫描速度等工艺参数的共同影响。

2.4 实验表征方法与主要检测指标

为系统评估激光切割后的加工质量及损伤特征,本研究对切割加工后的样品进行了系统表征,采用光学显微镜、扫描电子显微镜(SEM, JMS-7610F, Japan)以及激光共聚焦显微镜

(LCM, VK-X200K, Kierns, Japan),对样品断裂侧壁及上下表面的相关形貌与几何参数进行了检测与分析。在工业应用中,激光切割质量的评价通常以在保证切割过程稳定性的前提下,尽可能减小表面损伤为主要目标。本研究围绕切割质量控制与工艺优化,重点对上表面烧蚀/崩边宽度、下表面崩边/热影响区宽度以及侧壁烧蚀深度3个关键参数进行测量与评估,结果如图5所示。这些参数能够较为直接地反映激光加工过程中材料去除行为、热作用程度及边缘损伤特征。此外,针对典型参数下的切割加工样品,本研究使用能量色散谱仪(EDS, X-maxN, Oxford, UK)对切割后侧壁进行元素面分布分析,从成分演变维度研究加工过程对材料的影响,为切割工艺参数的优化提供实验依据,并为相关加工机理分析提供支撑。

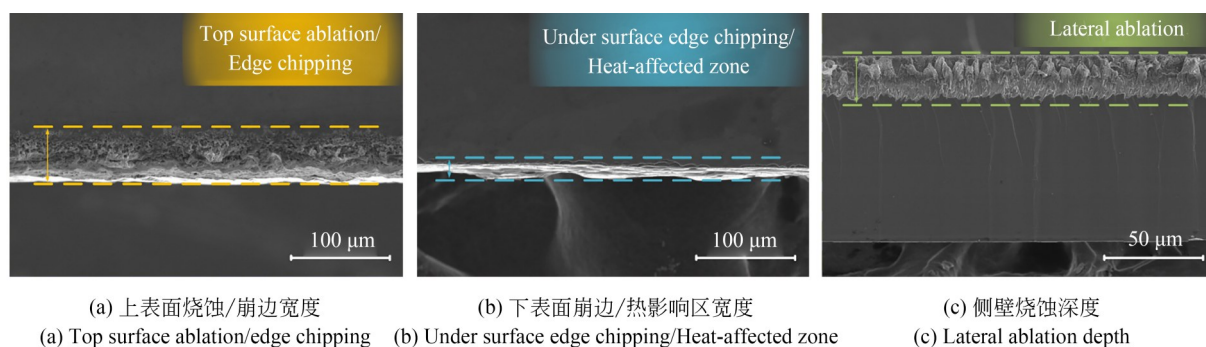


图5 碳化硅激光切割实验主要检测指标

Fig. 5 Main test indicators for SiC laser cutting experiments

3 实验结果与讨论

3.1 激光双脉冲延迟对烧蚀深度的影响

为了系统验证双脉冲激光相较于普通单脉冲激光的加工优越性,并考察不同双脉冲延迟下的双脉冲协同作用对碳化硅表面烧蚀行为的影响,开展了仅改变双脉冲延迟的单因素实验。在实验过程中,固定激光功率为28 W、扫描速度为2 mm/s,进行材料上表面直线沟槽加工。为了凸显不同双脉冲延迟下的加工深度差异,每条沟槽进行10次重复扫描,以加工后沟槽深度作为评价去除材料能力的主要指标。

实验结果如图6所示,沟槽深度随双脉冲延

迟的变化呈现出明显的先增大后减小的规律。当 Δt 由0 ps增加至1 ps时,沟槽深度由84.8 μm 逐步增大至117.5 μm ,达到本组实验的最大值。与 $\Delta t=0$ ps时相比,烧蚀深度提高了约38.6%,表明适当的双脉冲延迟能够显著增强材料去除能力。当 $\Delta t < 3$ ps时,双脉冲光束具有的双脉冲协同作用可以显著提高相同激光功率下的加工能力,说明在较小延迟范围内双脉冲仍具有较好的协同增强作用。随着双脉冲延迟进一步增大,沟槽深度整体呈下降趋势。当双脉冲延迟进一步增大至8~10 ps时,显著低于小延迟条件下的加工结果。

通过现有相关研究可知,双脉冲激光加工

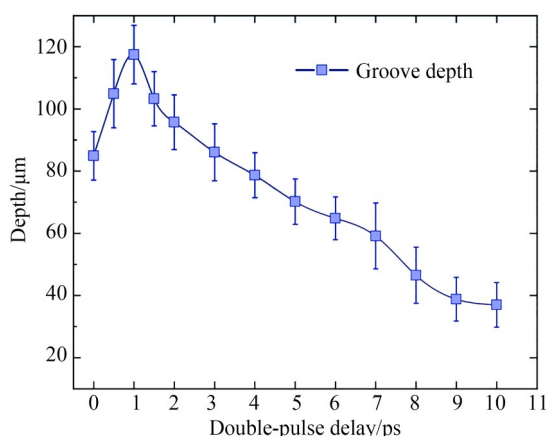


图 6 双脉冲激光延迟对烧蚀直线沟槽深度的影响(重复扫描 10 次)

Fig. 6 Effect of double-pulse laser delay on depth of processed grooves (10 repeated scans)

优势主要来源于脉冲时序对材料瞬态光学状态和能量沉积过程的调控:第一子脉冲首先诱导材料产生自由载流子、瞬态缺陷与局部温升熔融导致光学常数变化,使第二子脉冲作用时,材料处于更易吸收激光能量的预激发状态^[29-30]。与单脉冲相比,合理延迟的双脉冲可增强后脉冲与自由载流子或高温改性区域之间的耦合,使更多激光能量沉积于材料内部或沟槽底部,从而提高烧蚀效率、增大沟槽深宽比并降低达到目标加工深度所需的能量输入^[23]。由图 6 可知,当双脉冲延迟处于 0~1 ps 时,激光烧蚀深度逐渐上升,烧蚀深度未达到最大值。其主要原因在于两束子脉冲在时间上过于接近,第一子脉冲诱导的多光子电离、雪崩电离和自由载流子积累尚未充分发展为最有利于后脉冲吸收的瞬态高吸收状态,因而第二子脉冲与材料之间的耦合增强作用仍未达到最佳。随着延迟增加至 1 ps 附近,第一子脉冲诱导的自由载流子、缺陷态和局部热激发仍处于有效状态范围内,材料吸收系数提高,而烧蚀羽辉和喷出物尚未扩展到严重遮挡后脉冲传播的程度。此时第二子脉冲能够与已被预激发的 4H-SiC 作用区发生更有效的能量耦合,使更多能量沉积于材料表面及沟槽底部,增强纵向烧蚀和材料去除,因此获得最大沟槽深度。

当双脉冲延迟继续增大至 1 ps 时,激光烧蚀深度逐渐下降,第一子脉冲诱导的自由载流子逐渐发生复合、扩散并向晶格传递能量,瞬态高吸收状态减弱,预激发增强效应随之下降。同时,第一子脉冲加热烧蚀导致材料气化和颗粒碎屑喷出,阻碍第二子脉冲的加工作用,导致到达材料表面及沟槽底部的有效能量密度降低。当双脉冲延迟进入数皮秒至十余皮秒范围后,第一子脉冲诱导产生的瞬态等离子体羽辉逐渐出现并向外扩张,第二子脉冲在传播过程中更易受到等离子体的吸收、散射、反射及去聚焦作用,出现等离子体屏蔽现象,削弱第二子脉冲的烧蚀能力^[20,26,31]。此外,相关研究表明,当双脉冲延迟达到数十皮秒至亚微秒量级时,第一子脉冲引起的瞬态效应逐渐衰减,双脉冲间的协同作用减弱,第二子脉冲对材料的作用趋于独立,此时烧蚀深度会进一步下降。

综上所述,双脉冲延迟对单晶碳化硅的烧蚀行为具有显著调控作用,且存在明显的最优延迟区间。该区间由多种影响因素共同作用形成。首先影响该区间的影响因素是材料本身的瞬态响应时间:包括 4H-SiC 的禁带宽度、激光波长下的多光子吸收特性、自由载流子寿命、载流子复合/扩散时间、电子-声子耦合时间、热扩散时间、烧蚀阈值等^[32]。其次,激光的相关参数也会产生影响,较显著因素包括脉宽、波长、瞬时功率、能量分配比、光斑形态、偏振状态等^[33]。此外,加工过程中的气体环境与加工步骤也会通过烧蚀状态和碎屑排出对双脉冲加工产生影响。

为进一步验证双脉冲激光加工系统相较传统单脉冲光束的加工优势,选取前述实验确定的最优双脉冲延迟 $\Delta t=1$ ps,在前文相同条件下开展单、双脉冲激光单次扫描直线沟槽加工对比实验。与单脉冲对照组相比,延迟为 1 ps 的双脉冲激光将沟槽烧蚀深度由 $5.52 \mu\text{m}$ 提高至 $10.01 \mu\text{m}$,增幅达到 81.34%。图 7 展示了单、双脉冲激光单次加工直线沟槽的几何形貌和截面轮廓。可以看出,除沟槽深度提升外,双脉冲加工后的槽形质量也得到明显改善。实验观察表明,双脉冲加工沟槽槽边未出现明显的碎屑

堆积现象,沟槽轮廓更加清晰,同时具有更大的沟槽锥度。这一结果说明,在最优延迟条件下,双脉冲之间能够形成有效的时序协同作用,显著

增强激光能量与材料之间的耦合效率,从而提高单次扫描的材料去除能力。后续实验均选取双脉冲延迟为 1 ps 作为最优参数区间。

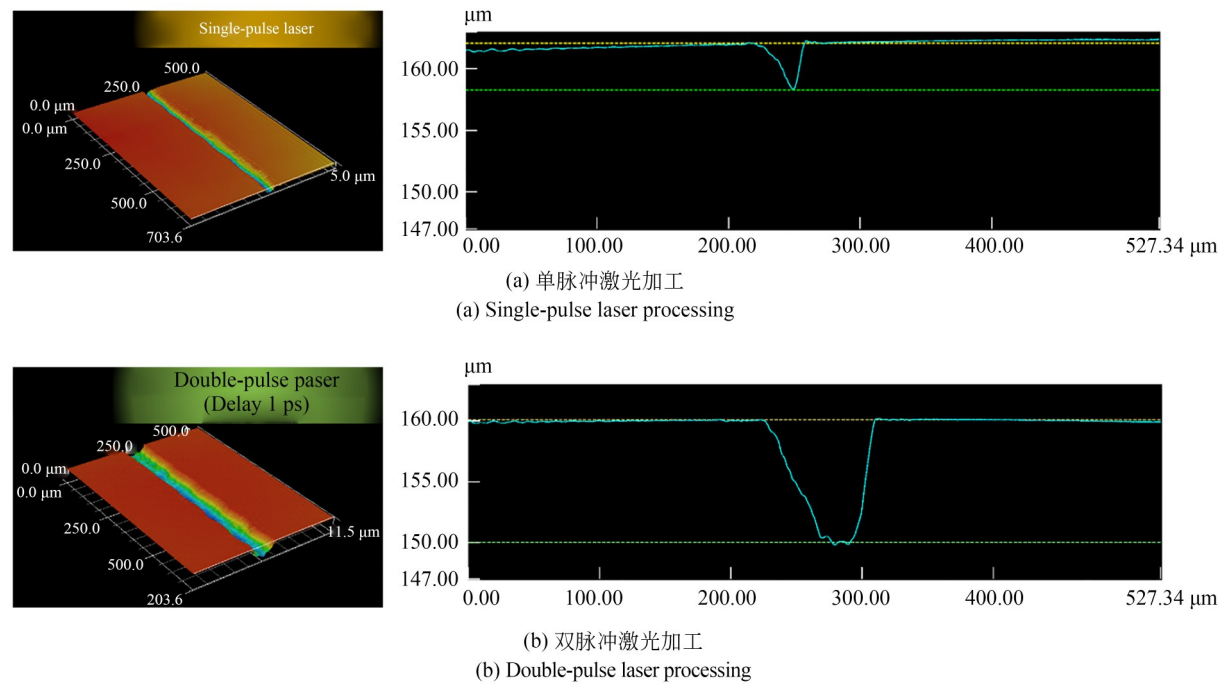


图 7 单、双脉冲激光单次加工的直线沟槽形貌

Fig. 7 Linear groove morphology produced by a single or double pulse laser in a single processing operation

3.2 分层扫描策略对激光烧蚀深度与裂片可控性的影响

在激光切割工艺中,分层扫描间隔直接决定相邻扫描轨迹的重叠程度及重复扫描次数,

因此对加工效率、烧蚀深度和裂片质量具有重要影响。在功率为 18.6 W、扫描速度为 2 mm/s 的条件下,开展了分层扫描间隔距离为 10~50 μm 的单因素实验。实验结果如图 8 所示,随着

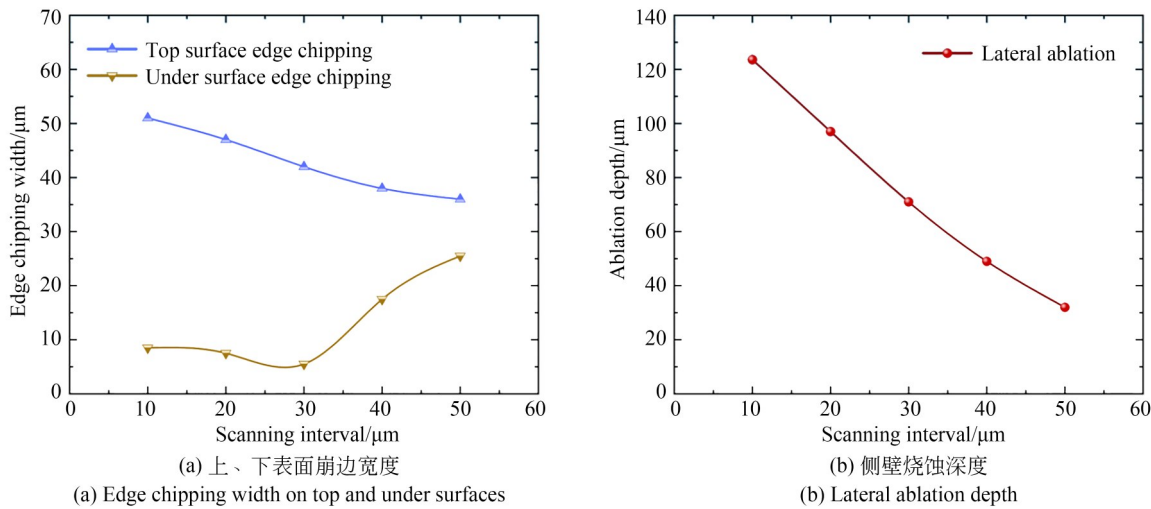


图 8 激光分层扫描间隔距离对切割质量和烧蚀深度的影响

Fig. 8 Effect of laser scanning interval on cutting quality and ablation depth

扫描间隔增大,由于能量累计减少和扫描次数减少,侧面烧蚀深度和上表面烧蚀崩边宽度逐渐减小。同时,下表面崩边在较大扫描间隔条件下明显加剧,这表明裂片稳定性下降,切割质量变差。总体来看,较小的扫描间隔有利于获得较深的烧蚀层,裂片稳定,但会增加扫描次数,降低加工效率,同时会导致上下表面出现更大的热损伤;增大扫描间隔可以降低烧蚀深度,提高效率,但会降低裂片稳定性,使得下表面出现大量崩边。

综合加工质量、加工效率和工艺简便性,30 μm 扫描间隔下各项指标匹配较优,既能保证较小的上下表面损伤,又可获得较为充分的侧面烧蚀深度,有利于后续裂片过程的稳定与可控。后续实验均选取扫描间隔距离为30 μm 作为最优工艺策略。

3.3 激光功率设定对激光烧蚀深度与激光切割质量的影响

在分层扫描激光切割工艺中,激光能量是影响光束与材料相互作用强度的关键参数,直接决定材料的烧蚀去除能力、裂片引导沟槽成型质量以及后续裂片过程的稳定性与可控性。为合理确定适用于分层扫描切割的能量参数,首先在扫描速度为2 mm/s的条件下开展了激光功率为9.3~37.2 W的单因素直线划槽预实验,以沟槽宽度和深度表征不同功率下的基本烧蚀响应。

预实验结果如图9所示。随着激光功率升高,沟槽深度整体持续增加,沟槽宽度增大趋势较缓,说明功率提升首先显著增强了激光沿深度方向的烧蚀能力。当功率处于9.3~18.6 W时,沟槽深度由较低水平迅速提升,表明材料去除过程开始进入有效烧蚀区间;当功率继续增至23.25 W时,沟槽深度仍保持较快增长,而沟槽宽度变化相对较慢,该区间内激光能量能够更有效地转化为纵向烧蚀而非横向损伤扩展。当功率进一步提高时,沟槽深度的增幅逐渐减缓,而宽度增长趋于明显,表明继续提高功率对有效加深沟槽的促进作用有限,反而可能加剧表面热作用和边缘损伤。基于上述结果,选取13.95~23.25 W作为后续切割实验的主要功率考察区间。

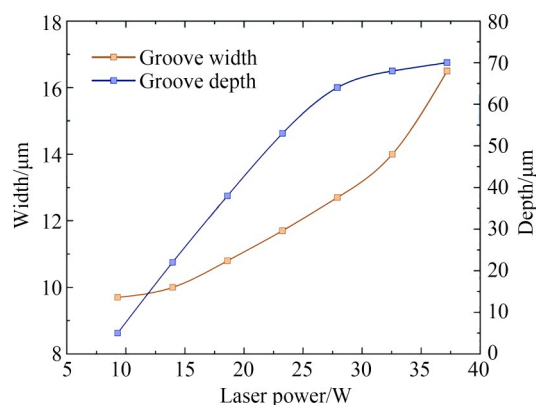


图9 激光功率对烧蚀直线沟槽宽度、深度的影响

Fig. 9 Effect of laser power on width and depth of processed grooves

进一步在扫描速度为15 mm/s的条件下进行了激光切割单因素实验,结合考察切割质量,对适宜的功率范围进行综合评价。切割实验结果如图10所示,随着激光功率增大,侧壁烧蚀深度与上表面烧蚀和崩边宽度近似线性增长。同时,下表面崩边宽度随激光功率增大出现先降低后升高的趋势。这是由于功率较低时,侧壁烧蚀深度不足,难以在材料内部建立连续而有效的损伤层,后续裂片过程缺乏稳定的应力引导路径,进而使下表面更易出现崩边现象。尽管此时上表面烧蚀较轻,但由于沟槽导向能力不足,切割工艺稳定性较差。随着功率提高至15~20 W,侧壁烧蚀深度明显增加,而上下表面损伤仍保持在相对可控范围内,说明该阶段能够较好地兼顾材料去除能力与切割质量。当功率继续升高后,随着侧壁烧蚀深度进一步增加,上表面烧蚀宽度和下表面热影响区也开始明显扩大,此时下表面损伤主要展现为热影响区等热损伤增大,较高激光功率引起更强的热积累和更剧烈的表层损伤,导致切割边缘质量下降。

当激光功率处于17.5~20 W时,下表面崩边/热影响区维持较低水平,能够形成较为充分的侧壁烧蚀层,裂片路径的稳定性和可控性较好。因此,本研究分层扫描切割工艺的优选能量参数为18.6 W,对应输出激光单脉冲能量为186 μJ 。

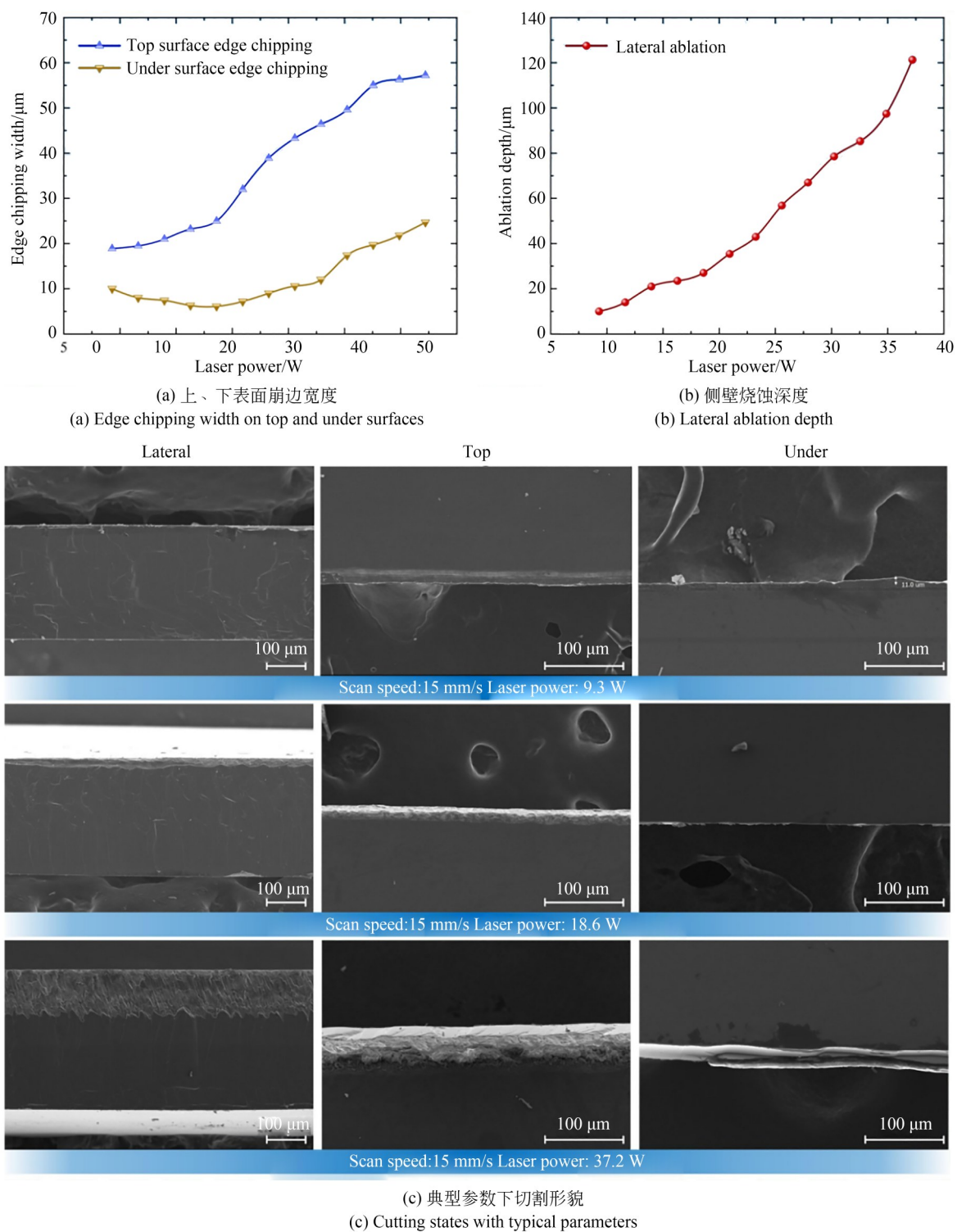


图 10 激光功率对切割质量和烧蚀深度的影响

Fig. 10 Effect of laser power on cutting quality and ablation depth

3.4 扫描速度对激光切割质量的影响

扫描速度是激光切割工艺中的关键参数之一,既直接影响加工效率,又与材料热累积和烧蚀行为相关,是控制切割损伤和优化加工质量的

重要参数。为考察扫描速度对碳化硅切割质量的影响,本文在功率固定为 18.6 W 条件下,开展了扫描速度为 2~50 mm/s 的单因素切割实验,结果如图 11 所示。

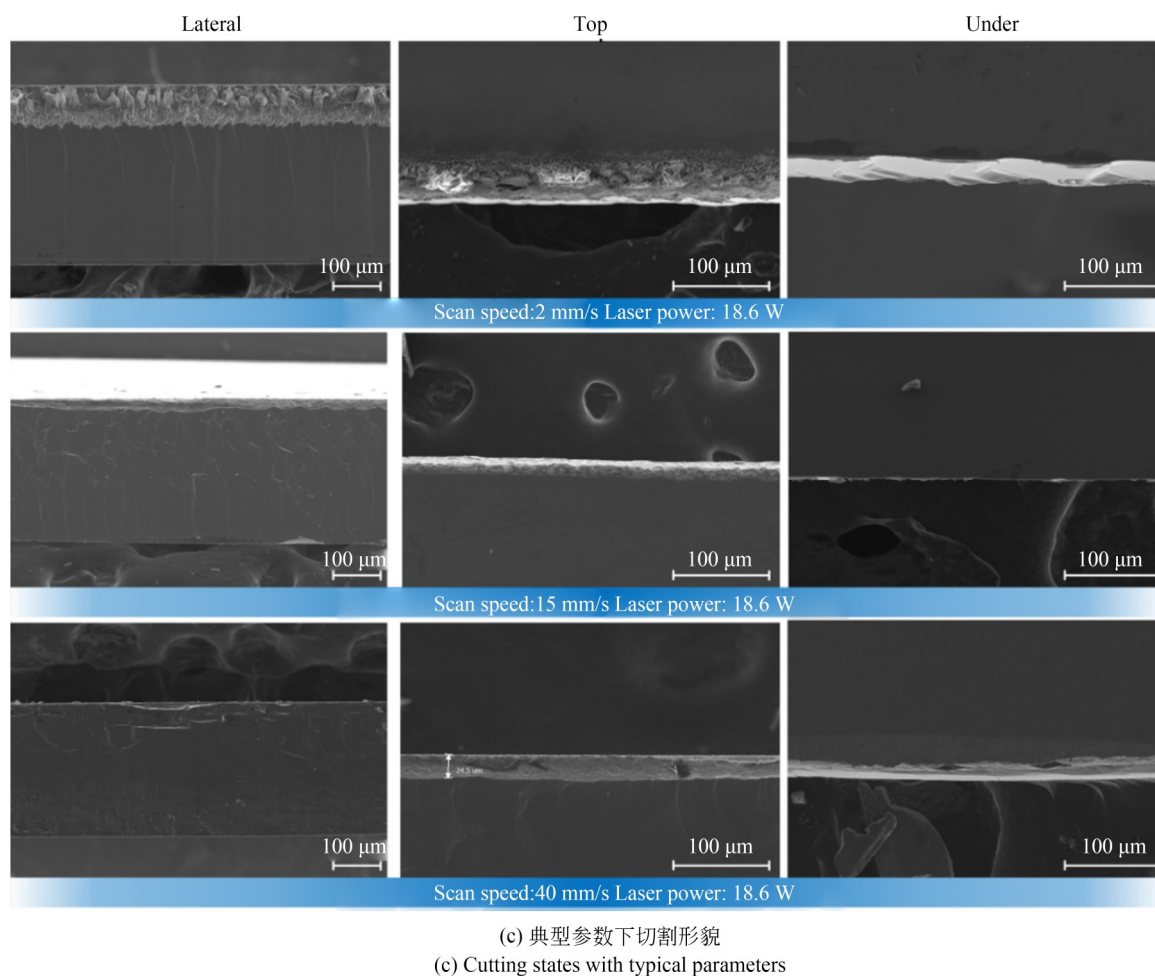
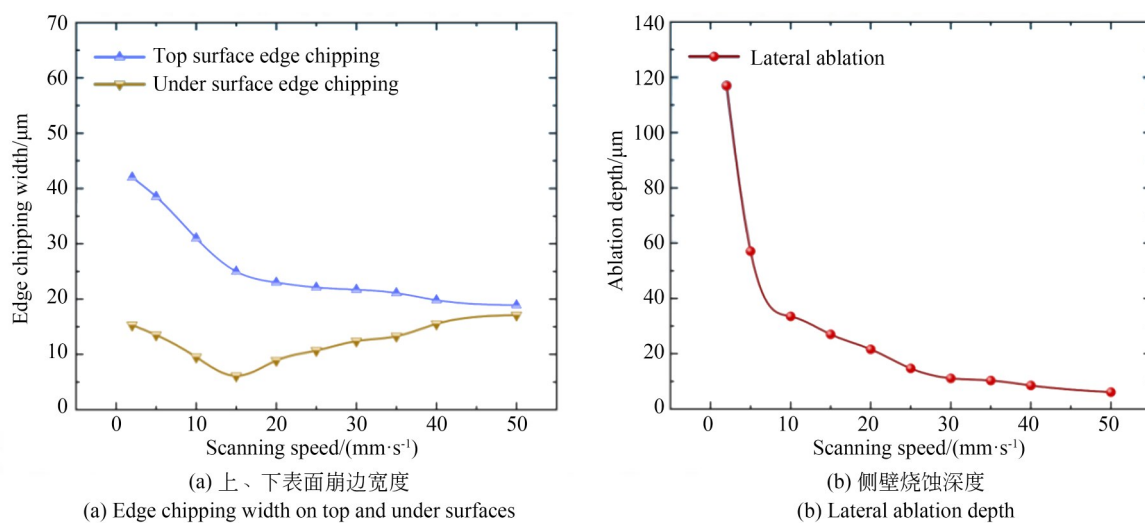


图 11 激光扫描速度对切割质量和烧蚀深度的影响

Fig. 11 Effect of laser scanning speed on cutting quality and ablation depth

实验结果表明,扫描速度对切割形貌和损伤特征具有显著影响。随着扫描速度的提高,侧面烧蚀深度明显减小,上表面烧蚀宽度整体呈下降

趋势,说明较高扫描速度能够有效降低单位长度能量沉积,减弱烧蚀作用和表面损伤。当扫描速度较低时,激光在材料表面的作用时间较长,热

积累效应更为明显,因此侧面烧蚀更深、上表面烧蚀更宽,同时下表面热影响区也相对较大。过强的烧蚀与热作用会加重表面损伤,不利于切割质量控制。

随着扫描速度的进一步增大,材料烧蚀程度快速下降,下表面损伤在一定范围内先减小后再次增大。这表明适当提高扫描速度有助于抑制热影响、改善下表面质量,但当扫描速度过高时,裂片引导沟槽成型不足,裂片导向能力减弱,下表面切割稳定性随之下降。同时,在高速扫描条件下,平台运动过程中的振动和定位误差影响也更加明显,从而降低了切割工艺的整体稳定性。

综合考虑切割质量与加工效率,15~25 mm/s 的扫描速度区间既能有效控制上、下表面损伤,又具有裂片稳定性,兼顾加工效率。在已满足工业生产中的边缘表面质量控制和加工效率需求的前提下,选择具有更高切割稳定性的 15 mm/s 作为最佳扫描速度参数。

3.5 材料断裂面元素演变分析

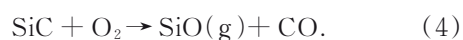
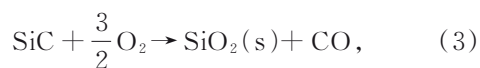
针对典型参数下的切割样品,本文进一步对断裂侧壁进行了 SEM/EDS 表征,进行断裂面元素面分布表征,从元素组成演变分析激光加工对材料的影响,为工艺优化及加工机理研究提供依据。结合前文实验,选取了 4 组典型切割断面进行能谱分析,元素面分布结果如图 12 所示。所选 4 组样品和对应参数分别为:未加工对照组;轻度烧蚀组样品(功率为 9.3 W,扫描速度为 50 mm/s);中度烧蚀组样品(功率为 18.6 W,扫描速度为 15 mm/s);重度烧蚀组样品(功率为 23.3 W,扫描速度为 2 mm/s)。

由图 12 可见,随着烧蚀程度的增加,侧壁区域的元素组成呈现出明确的规律性变化,即碳元素和氧元素质量分数逐渐升高,而硅元素质量分数持续降低。其中,C 元素的质量分数由对照组的 36.77% 逐步升高至重度烧蚀时的 41.51%,O 元素由 0.25% 显著升高至 5.18%,而 Si 元素则由 62.97% 持续下降至 53.31%。总体来看,从未加工到重度烧蚀,C 元素增加,O 元素显著增加,而 Si 元素显著降低,其元素演化趋势如图 13 所示,这表明激光作用后材料表层发生了显著的成分重构与氧化改性。

首先,激光高温引起了 SiC 相分离与 Si 的挥发损失。当激光照射材料时,表层会瞬间产生高温区,已有相关模拟结果表明,激光作用区峰值温度可超过 8 000 K^[34],从而诱发表层剧烈烧蚀、飞溅和热影响区形成。侧壁热损伤的重要表现之一即为热分解和石墨化,其本质是 Si 气化逸出后导致 C 富集,如式(2)所示。在大气环境下,该过程尤其容易出现在改性层或切缝侧壁附近^[35]。从激光诱导碳化硅表面石墨化角度看,高能光子注入可促进 Si-C 键断裂并使 Si 发生升华^[36],从而在表面留下富碳残余层。随着激光能量密度和重复作用次数增加,分离出的 Si 更易随热气流挥发或从表面逸出,使得残留区域富碳且硅元素含量下降。



其次,O 元素随烧蚀程度升高而增加,反映出空气环境下侧壁表面发生了明显氧化改性。激光照射后的 SiC 表面形成了 Si-O 化合物,且在氧气环境中可获得更明显的氧参与反应效应^[37]。从 SiC 高温氧化机理看,其氧化通常包括被动氧化与主动氧化两类:在较高氧势条件下,SiC 可形成以 SiO₂ 为主的氧化层,如式(3)所示;在较低氧势和高温条件下,则可能生成挥发性 SiO 亚氧化物并伴随 CO 释放^[38-40],如式(4)所示:



在激光切割过程中,侧壁区域经历瞬时高温、重复脉冲热积累及与空气充分接触,易在局部形成 SiO/SiO₂ 残留层或含氧再沉积产物,因此 EDS 中 O 元素含量随着烧蚀增强而不断上升,且在重度烧蚀阶段出现显著跃升。在重度烧蚀情况下,其侧壁近表层由残余 SiC、富碳石墨化相和硅氧化物相共同构成,这也是侧壁颜色加深、再凝固附着物增多及脆化损伤加剧的成分改性基础。

从侧壁形貌看,轻度烧蚀组侧壁出现局部片层剥离和浅表裂纹,说明激光已能够在断裂路径附近形成初始损伤层,但烧蚀作用仍较弱;中度烧蚀组侧壁损伤分布更均匀,表层裂纹和烧蚀痕迹较为连续,表明此时材料表面已形成较为稳定的损伤结构,有利于后续裂片沿预定路径扩展;重度烧蚀组则出现明显的顶部粗糙烧蚀层和表

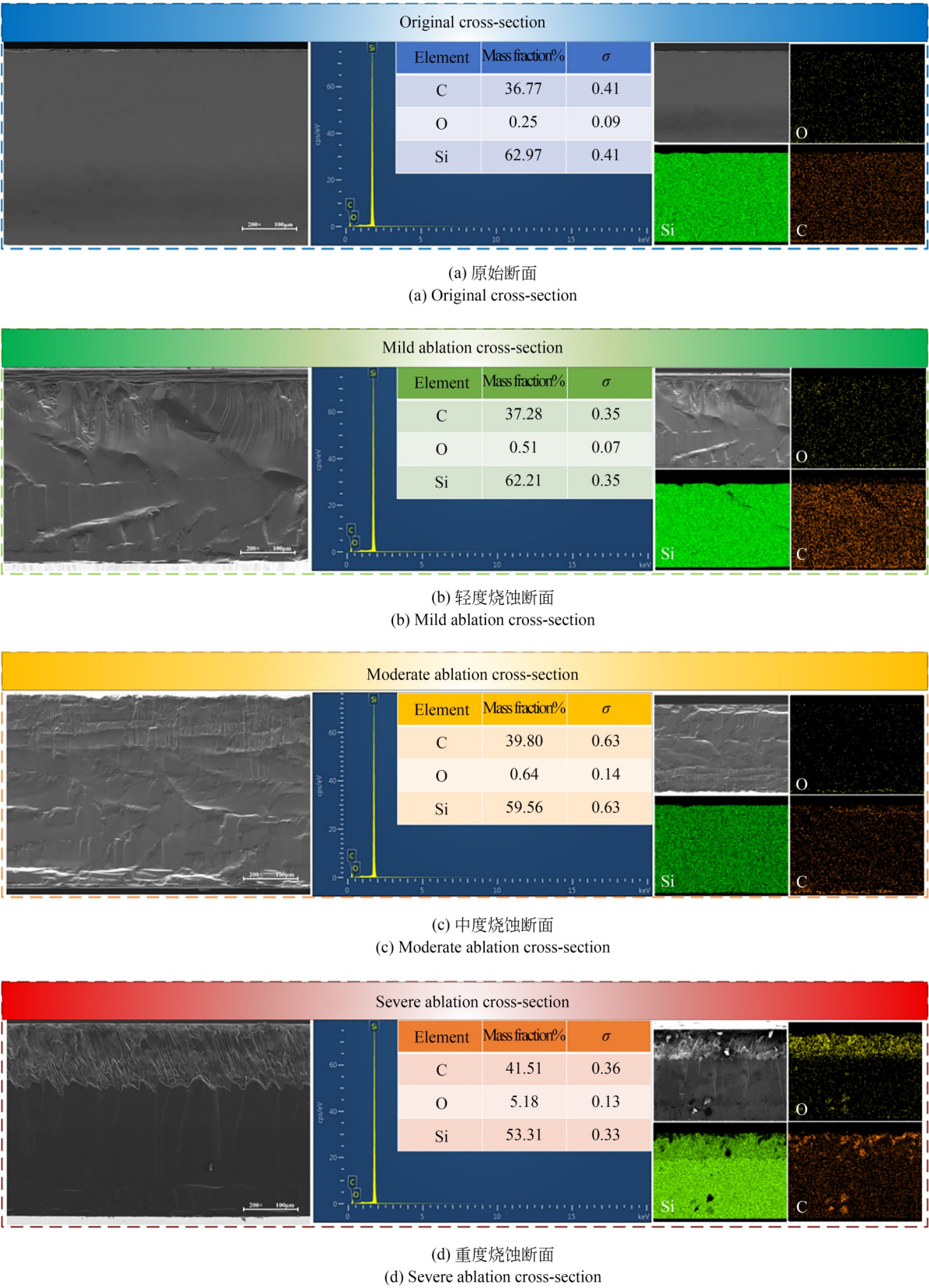


图 12 碳化硅的激光切割加工后典型样品断面的 SEM/EDS 表征

Fig. 12 SEM/EDS images of typical cross-sections of SiC samples after laser cutting

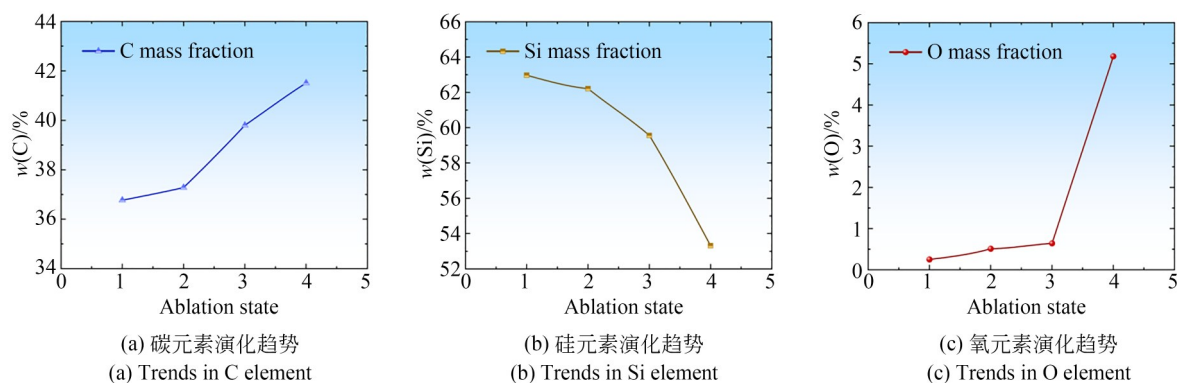


图 13 断面中主要元素质量分数随烧蚀加重的演化趋势

Fig. 13 Trends in mass fractions of major elements in cross-section as ablation intensifies

面破坏,侧壁上部呈现严重熔蚀与重铸特征,局部裂纹和缺陷进一步扩展,反映出过高能量输入导致热影响显著增强。

综合元素分析与侧壁形貌结果可知,激光加工对碳化硅断裂侧壁的影响具有显著的烧蚀变化特征:轻度烧蚀条件下预损伤不足;中度烧蚀时侧壁损伤与成分改性相对适中,更有利于形成可控裂片路径;重度烧蚀参数下虽能增强材料去除作用,但会引起明显氧化、热影响、Si元素流失及侧壁质量恶化,不利于获得低损伤切割表面。从成分稳定性和裂纹可控扩展的角度看,中度烧蚀状态,即功率 $P=18.6\text{ W}$,扫描速度 $v=15\text{ mm/s}$,更适合作为本研究工艺优化的目标区间,这也符合验证了前述参数优化实验给出的最优参数。

4 结 论

本文围绕 $350\text{ }\mu\text{m}$ 4H-SiC晶片,构建了碳化硅的双脉冲皮秒激光协同机械裂片复合切割加工路线,系统揭示了双脉冲时序调控、分层扫描策略及多个工艺参数对烧蚀行为、裂片稳定性和断面质量的影响规律,为碳化硅低损伤、高可控切割提供了工艺优化依据。双脉冲光束相较单脉冲光束显著影响激光能量耦合与材料去除能力。在较小延迟范围内双脉冲协同作用明显,可提高烧蚀深度并改善沟槽成形质量。最优延迟 1 ps 条件下,单次扫描烧蚀深度较单脉冲光束提

高 81.34% 。分层扫描间隔决定扫描次数、能量累积及裂片可控性。较小间隔有利于形成更深侧壁烧蚀层,但会加剧表面热损伤并降低效率;较大间隔虽可提高效率,却会削弱裂片导向能力并加重下表面崩边。综合加工质量、效率与工艺简便性, $30\text{ }\mu\text{m}$ 为最优层间间隔。激光功率和扫描速度共同决定切割质量窗口。参数过低时沟槽深度不足,裂片稳定性差;参数过高时热影响区和表面烧蚀显著增加。结合侧壁烧蚀深度、上下表面损伤及加工稳定性,优选激光功率为 18.6 W ,对应单脉冲能量 $186\text{ }\mu\text{J}$,优选扫描速度区间为 15 mm/s 。侧壁元素和形貌分析结果表明,随烧蚀程度增加,碳、氧元素质量分数升高而硅元素降低,表明激光作用诱发了材料表层相分离、Si挥发损失、C富集及氧化改性。中度烧蚀状态下侧壁损伤与成分改性较为适中,更有利于形成稳定、可控的裂纹扩展路径,对应参数功率 $P=18.6\text{ W}$,扫描速度 $v=15\text{ mm/s}$ 。

作者贡献声明:

赵元豪:实验方法提出,实验设计,论文构思与撰写;

姚 鹏、褚东凯:论文审核与编辑,提供资源,项目管理;

杨梓萌、王庆伟:实验数据整理和分析;

屈硕硕:论文审核。

参考文献:

- [1] WANG SH CH, ZHAN M J, WANG G, *et al.* 4H-SiC: a new nonlinear material for midinfrared lasers[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(5): 831-838.
- [2] MA Y, GUAN Y CH. Recent progress on laser-assisted machining for silicon carbide materials [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2025, 151: 623-654.
- [3] 刘夫, 周玉彪, 颜思源, 等. 碳化硅晶圆片划片切割方法综述[J]. *激光与红外*, 2025, 55(5): 643-650.
- LIU F, ZHOU Y B, YAN S Y, *et al.* Review of scribing and dicing methods for silicon carbide wafers [J]. *Laser & Infrared*, 2025, 55(5): 643-650. (in Chinese)
- [4] PENG Y Y, ZENG J S, XIE X ZH, *et al.* Laser machining of silicon carbide: current status, applications and challenges[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 191: 113376.
- [5] 郭金笛. 碳化硅基半导体材料硬度及热导率研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- GUO J D. *Research on Hardness and Thermal Conductivity of Silicon Carbide-Based Semiconductor Materials*[D]. Jinan: Shandong University, 2021. (in Chinese)
- [6] 邹苗苗, 窦菲. 碳化硅晶圆切割方法综述[J]. *超硬材料工程*, 2022, 34(3): 35-41.
- ZOU M M, DOU F. Review of silicon carbide wafer cutting methods[J]. *Superhard Material Engineering*, 2022, 34(3): 35-41. (in Chinese)
- [7] WANG X, YUAN Z W, ZHUANG P, *et al.* Study on precision dicing process of SiC wafer with diamond dicing blades[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2021, 4(3): 033004.
- [8] FENG Y R, LI K N, DOU ZH, *et al.* High-speed dicing of SiC wafers with 0.048 mm diamond blades via rolling-slitting[J]. *Materials*, 2022, 15(22): 8083.
- [9] 李伦, 李淑娟, 汤奥斐, 等. SiC单晶片线锯切割技术研究进展[J]. *机械强度*, 2015, 37(5): 849-856.
- LI L, LI SH J, TANG A F, *et al.* Research progress on cutting technology of sic mono-crystal wafer with wire saw[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2015, 37(5): 849-856. (in Chinese)
- [10] HARDIN C W, QU J, SHIH A J. Fixed abrasive diamond wire saw slicing of single-crystal silicon carbide wafers [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2004, 19(2): 355-367.
- [11] JIANG K R, ZHANG P L, SONG SH J, *et al.* A review of ultra-short pulse laser micromachining of wide bandgap semiconductor materials: SiC and GaN[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2024, 180: 108559.
- [12] CAO H, LI Y F, WANG G, *et al.* Laser dicing of semiconductor wafers: Research status and current challenges[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2025, 186: 108786.
- [13] MOLIAN P, PECHOLT B, GUPTA S. Picosecond pulsed laser ablation and micromachining of 4H-SiC wafers [J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255(8): 4515-4520.
- [14] ZHAO Z Q, ZHAO L, PENG Y. Experimental study on femtosecond laser ablation of 4H-SiC substrate[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2024, 34(2): 025005.
- [15] REHMAN Z U, JANULEWICZ K A. Structural transformations in femtosecond laser-processed n-type 4H-SiC[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 385: 1-8.
- [16] FENG SH CH, ZHANG R, HUANG CH ZH, *et al.* An investigation of recast behavior in laser ablation of 4H-silicon carbide wafer[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2020, 105: 104701.
- [17] 张超, 李敏, 叶柏臣, 等. 飞秒激光时空整形的电子动态调控微孔加工[J]. *光电工程*, 2022, 49(2): 210389.
- ZHANG CH, LI M, YE B CH, *et al.* Electrons dynamics control micro-hole drilling using temporally/spatially shaped femtosecond laser [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2022, 49(2): 210389. (in Chinese)
- [18] JIA X SH, CHEN Y Q, LIU L, *et al.* Combined pulse laser: Reliable tool for high-quality, high-efficiency material processing [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 153: 108209.
- [19] JIANG L, FANG J Q, CAO Q, *et al.* Femtosec-

- ond laser high-efficiency drilling of high-aspect-ratio microholes based on free-electron-density adjustments[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(31): 7290.
- [20] CHU D K, YAO P, SUN X Y, *et al.* Ablation enhancement of fused silica glass by femtosecond laser double-pulse Bessel beam[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2020, 37 (11) : 3535.
- [21] MATSUNAGA K, HAYASHI T, KUROKAWA S, *et al.* Investigation of surface excitation effect for ablation of 4H-SiC substrate using double-pulse beam [C]. *X-Ray Lasers* 2016. Cham: Springer International Publishing, 2018: 321-326.
- [22] KIM E, SHIMOTSUMA Y, SAKAKURA M, *et al.* 4H-SiC wafer slicing by using femtosecond laser double-pulses [J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(7): 2450-2460.
- [23] CHU D K, LI W ZH, QU S S, *et al.* Femtosecond laser double pulse Bessel beam ablation of silicon[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(35): 10802.
- [24] CHEN J Q, XIE X ZH, PENG Q F, *et al.* Effect of surface roughness on femtosecond laser ablation of 4H-SiC substrates[J]. *Journal of Central South University*, 2022, 29(10): 3294-3303.
- [25] LIN ZH Y, JI L F, HONG M H. Enhancement of femtosecond laser-induced surface ablation *via* temporal overlapping double-pulse irradiation [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(3): 271.
- [26] KIM J, KIM S, KIM B, *et al.* Study of through glass *via* (TGV) using Bessel beam, ultrashort two-pulses of laser and selective chemical etching [J]. *Micromachines*, 2023, 14(9): 1766.
- [27] TSAI CH H, CHEN H W. Laser cutting of thick ceramic substrates by controlled fracture technique [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 136(1/2/3): 166-173.
- [28] ZHANG L, XIE J, ZHU L M. Experimental study on ductile-to-brittle behavior and crystal orientation in micro-crack induced severing of 4H-SiC and sapphire [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, 106: 102481.
- [29] ZHAO X, SHIN Y C. Ablation enhancement of silicon by ultrashort double-pulse laser ablation[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(11): 111907.
- [30] WANG ZH, JIANG L, LI X W, *et al.* High-throughput microchannel fabrication in fused silica by temporally shaped femtosecond laser Bessel-beam-assisted chemical etching[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(1): 98-101.
- [31] 任云鹏, 涂新诚, 何坤, 等. 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[J]. *中国激光*, 2023, 50(20): 2002405.
- REN Y P, TU X CH, HE K, *et al.* Study of stealth dicing of silicon carbide wafers under ultrafast laser multi-pulse mode and burst mode [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50 (20) : 2002405. (in Chinese)
- [32] OTOBE T, HAYASHI T, NISHIKINO M. Effect of plasma formation on the double pulse laser excitation of cubic silicon carbide [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(17): 171107.
- [33] CHEN ZH CH, JIANG L, LIAN Y L, *et al.* Enhancement of ablation and ultrafast electron dynamics observation of nickel-based superalloy under double-pulse ultrashort laser irradiation [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 21: 4253-4262.
- [34] HUANG Y H, ZHOU Y Q, LI J M, *et al.* Femtosecond laser surface modification of 4H-SiC improves machinability[J]. *Applied Surface Science*, 2023, 615: 156436.
- [35] LIU F, XU J, YAN SH Y, *et al.* Mechanism and regulation of thermal damage on picosecond laser modification dicing of SiC wafer[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 493: 152737.
- [36] WANG Q J, ZHANG R, CHEN Q K, *et al.* A review of femtosecond laser processing of silicon carbide[J]. *Micromachines*, 2024, 15(5): 639.
- [37] XIE X ZH, PENG Q F, CHEN G P, *et al.* Femtosecond laser modification of silicon carbide substrates and its influence on CMP process[J]. *Ceramics International*, 2021, 47 (10) : 13322-13330.
- [38] JACOBSON N, HARDER B, MYERS D. Oxidation transitions for SiC part I. active-to-passive transitions [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2013, 96(3): 838-844.
- [39] JACOBSON N S, MYERS D L. Active oxidation of SiC [J]. *Oxidation of Metals*, 2011, 75 (1): 1-25.

- [40] HARDER B, JACOBSON N, MYERS D. Oxidation transitions for SiC part II. passive-to-active

transitions [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2013, 96(2): 606-612.

作者简介:



赵元豪(2001—),男,山东临沂人,硕士研究生,2024年于四川大学获得学士学位,主要从事超快激光微纳制造和超精密加工技术方面的研究。E-mail: 202414381@mail.sdu.edu.cn

通讯作者:



褚东凯(1991—),男,山西吕梁人,博士,副教授,硕士生导师,2020年于中南大学获得博士学位,主要从事超快激光微纳制造、仿生吸波功能性表面制备、超精密加工技术方面的研究。E-mail: chudongkai@sdu.edu.cn

通讯作者:



姚鹏(1979—),男,博士,教授,博士生导师,2002年、2005年于东北大学分别获得学士学位和硕士学位,2011年于东北大学(日本)获得博士学位,主要从事磨削与超精密加工技术、智能制造与检测技术和超快激光微纳加工技术方面的研究。E-mail: yao-peng@sdu.edu.cn