材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20260202001

熔融流动对多脉冲飞秒激光加工SiC烧蚀形貌的影响

葛茗轩[1,2]，董淑宏[1,2]*

（江南大学 1. 机械工程学院；2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室，江苏 无锡 214122）

摘　要： 飞秒激光因其优异的加工质量，在微纳加工领域受到广泛关注。尽管已有实验观察到飞秒激光烧蚀SiC过程中因熔融飞溅形成重铸层，但相关机理的理论建模仍较为匮乏。文章结合改进的多物理场耦合预测模型与实验表征，系统研究了多脉冲飞秒激光作用下熔体流动影响SiC烧蚀形貌的演化机制。首先探究了SiC的烧蚀阈值及其累积效应，随后通过系统调控脉冲数和激光能量密度揭示了多脉冲诱导下熔融材料的去除与再沉积的动态循环过程，并采用近阈值能量密度成功制备高质量微孔。经模拟与实验验证，该研究优化了脉冲能量分配，显著提升了烧蚀效率，为飞秒激光加工SiC及其他宽禁带半导体材料提供了理论支撑与工艺参考。

关键词： 飞秒激光；多脉冲；碳化硅；熔融流动；烧蚀形貌

中图分类号： TN249　**文章编号：** 1001－5868(2026)04－0681－09

Mechanism of Molten Flow on the Ablation Morphology of SiC Irradiated by Multi-Pulse Femtosecond Laser

GE Mingxuan[1,2], DONG Shuhong[1,2]

(1. School of Mechanical Engineering; 2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, CHN)

Abstract: The femtosecond laser has garnered extensive attention in the field of micro/nano fabrication owing to its superior processing quality. Although experimental observations have revealed the formation of recast layers caused by molten splashing during the femtosecond laser ablation of silicon carbide (SiC), theoretical modeling regarding the underlying mechanisms remains scarce. In this study, an improved multiphysics-coupled predictive model combined with experimental characterization was employed to systematically investigate the evolution mechanism of molten flow on SiC ablation morphology under multi-pulse irradiation. The ablation threshold and its accumulation effect in SiC were examined. The pulse number and laser fluence were modulated systematically, revealing the dynamic cycle of material removal and redeposition induced by multi-pulse irradiation, which enables the fabrication of high-quality micro-holes using near-threshold fluence. Furthermore, simulation and experimental validation facilitated the optimization of pulse energy distribution, resulting in a significant enhancement of ablation efficiency.

Key words: femtosecond laser; multi-pulse; SiC; molten flow; ablation morphology

收稿日期：2026－02－02.

基金项目：半导体材料激光精密制造技术与装备项目(2023YFB4605100).

* **通信作者：**董淑宏

0 引言

近年来，SiC作为第三代半导体材料，凭借其优异的综合性能与稳定的晶体结构，在半导体、功率电子、机械化工等多个高端领域展现出不可替代的应用价值[1-2]。随着其在微纳尺度功能器件与结构中的广泛应用，对加工精度和效率的要求日益严苛。然而，SiC固有的高硬度、强脆性及化学惰性使其成为典型的难加工材料，传统机械加工方法难以满足高质量、低损伤、微结构的制造需求[3-4]。

飞秒激光加工技术具有非接触、超精细、可实现衍射极限等优势，为SiC等硬脆材料的微纳加工提供了有效解决方案[5]。同时，其热影响区极小，适用于高精度微结构制造[6-7]。其中，多脉冲飞秒激光加工通过累积效应显著提升烧蚀效率，已成为研究热点[8-9]。累积效应使材料在多脉冲辐照下，内部能量持续积累，导致有效烧蚀阈值降低、光学吸收增强[10]。已有研究表明，多脉冲作用下的烧蚀阈值远低于单脉冲阈值[11]，且随着子脉冲数量增加，阈值注量进一步下降，其中脉冲串模式的累积效应弱于常规脉冲模式[12]。此外，子脉冲间隔被证实对累积行为具有显著调制作用，进而影响烧蚀深度与形貌特征[13]。飞秒激光辐照还会引发4H-SiC晶格损伤、表面重构等多尺度响应，这些变化与脉冲能量和累计脉冲数密切相关[4]。Omeñaca等[14]将多脉冲累积效应引入烧蚀模型，建立了实验与理论之间的桥梁。Vanwersch等[15]则结合几何依赖性与热累积效应，优化了双温模型，提升了对复杂烧蚀行为的模拟能力。

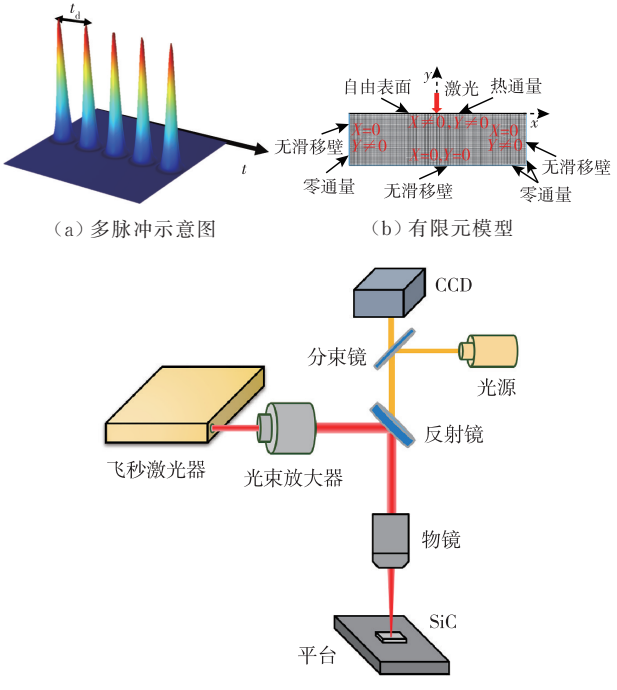
尽管如此，多脉冲激光的损伤机制仍尚未完全明确。Jo等[16]结合泵浦-探针成像与高速相机技术，提出应力波传播是损伤形成的关键因素，且随着脉冲数增加，应力波与损伤的位置会发生动态迁移。Zhan等[17]基于光生载流子激发与电子-声子耦合的多尺度建模框架，证实脉冲串可通过调控载流子动力学有效提升加工效率。Liu等[18]指出热损伤是影响2.5D C/SiC微孔质量的主要因素，且沿孔深方向，热损伤程度由顶部严重逐渐趋于底部缓和。Zhou等[19]对SiC/SiC复合材料的研究进一步表明，随着能量密度或有效脉冲数增加，热累积效应与氧化程度增强，产物形貌呈现规律性演化。Xu等[20]则系统分析了高重复频率下的热累积机制，指出材料响应机制随脉冲能量与重复频率提升，由非热主导逐渐过渡至热烧蚀主导。

综上所述，尽管多脉冲激光加工中的热累积效应已在实验层面得到广泛验证，但缺乏针对双温模型与熔体流动的多物理场耦合模拟研究。为此，本文致力于构建一种改进的多物理场耦合有限元模型，引入蒸发与相爆炸双去除机制，以准确描述多脉冲飞秒激光刻蚀SiC过程中的熔融流动行为及其对最终表面形貌的影响。通过系统模拟不同工艺参数下的烧蚀过程，并与飞秒激光加工实验结果进行对比验证，验证了模型的准确性。

1 建模与实验

1.1 有限元模拟

多脉冲示意图如图1(a)所示。实验激光频率为1 MHz，对应基础脉冲间隔为1 μs，模拟参数(光束尺寸、脉冲持续时间和波长)与实验保持一致。有限元模型如图1(b)所示，构建x-y平面的二维模型，并采用最大单元尺寸为0.35 μm的自由四面体网格。在传热模块中，上边界设为热通量以考虑双去除机制的热量耗散，其余为绝热边界，激光热源设为体热源。在流动模块中，上边界采用自由表面条件，其余为无滑移壁面。动网格与变形几何设置中，上边界可自由变形，左右边界x方向固定，下边界完全固定。通过在上边界定义法向网格速度来



(a) 多脉冲示意图　(b) 有限元模型

(c) 飞秒激光加工设备示意图

图1 飞秒激光建模与实验

表征蒸发与相爆炸。此外，模型采用自适应时间步长策略，在保证计算精度的同时优化了求解效率。

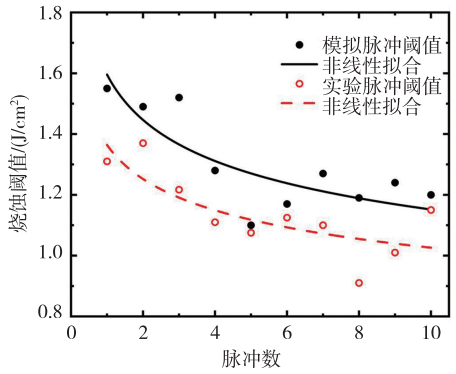
1.2　飞秒激光处理实验

为验证模型准确性，开展了 4H-SiC 的飞秒激光烧蚀实验。晶片尺寸为 10 mm×10 mm×0.35 mm，激光设备最大平均功率为 30 W，脉宽为 170 fs，波长为 1 030 nm，重复频率为 1 MHz，光束质量 M^2<1.2，聚焦光斑直径约为 10 μm。选用 MPLFLN20× 物镜，光路如图 1(c)所示，烧蚀坑间距设为 100 μm。利用扫描电子显微镜(SEM)和白光干涉仪(WLI)对烧蚀形貌进行观测表征。

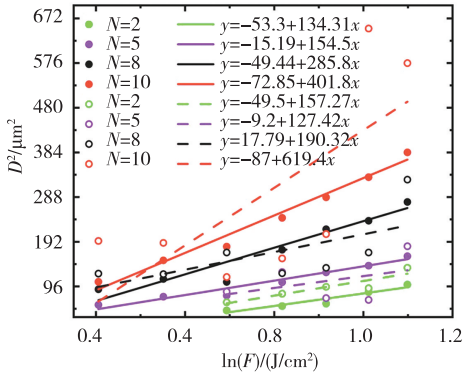
2　分析与讨论

2.1　多脉冲烧蚀阈值测定及其累积效应

不同脉冲数下的烧蚀阈值如图 2(a)所示。阈值随脉冲数增加逐渐减小，表明多脉冲叠加通过能量累积效应降低了触发烧蚀所需的最小能量密度，这与图 2(b)中线性拟合截距随脉冲数增加而减小的现象一致。此外，随着脉冲数进一步增加，阈值下降趋势逐渐趋缓，说明后续脉冲的增益效果减弱。通过模拟得到 SiC 累积系数为 0.86，与 0.90 的实验值吻合良好。该系数越低，表明材料的累积效应越显著。值得注意的是，该数值与现有研究报道的半导体及金属材料的累积系数范围相近，通常介于 0.75～0.9 之间[12,14,21]。



(a)　不同脉冲数下的烧蚀阈值



(b)　多脉冲下激光能量对数对烧蚀直径平方的影响

图 2　多脉冲累积效应

2.2　多脉冲下的电子-晶格演化

通过电子-晶格演化来探究激光能量传递特性。当激光能量密度为 2.3 J/cm²，脉冲数为 5 时的电子-晶格温度如图 3 所示。其中黄色区域为激光作用的初始阶段，电子与晶格处于非平衡态；蓝色区域为能量沉积阶段，电子与晶格达到平衡态且电子-晶格初次耦合的时间为 3.5 ps；蓝色方框圈出的放大图为材料达到凝固点的特殊状态，此时，时域探针测得材料温度反常上升，材料达到凝固点后发生凝固潜热释放热量，后续则是纳秒的凝固阶段。在第二个脉冲作用开始前，材料温度并未冷却到室温，且随着脉冲数量的逐渐累加，每个脉冲作用前的材料温度也逐渐累加，从而形成热累积效应。

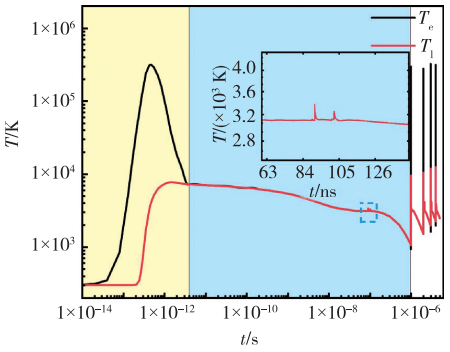
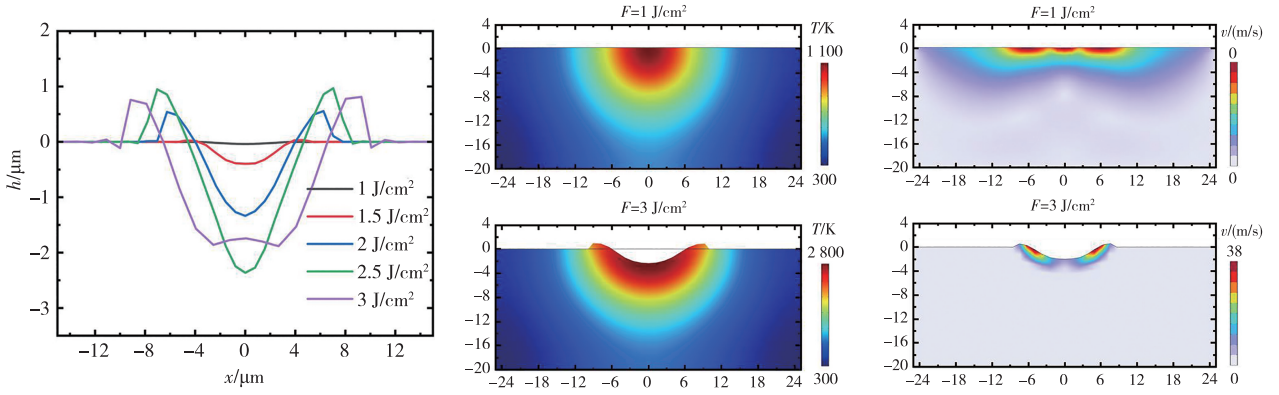


图 3　电子-晶格温度

2.3　多脉冲烧蚀的热效应累积及其烧蚀形貌演变

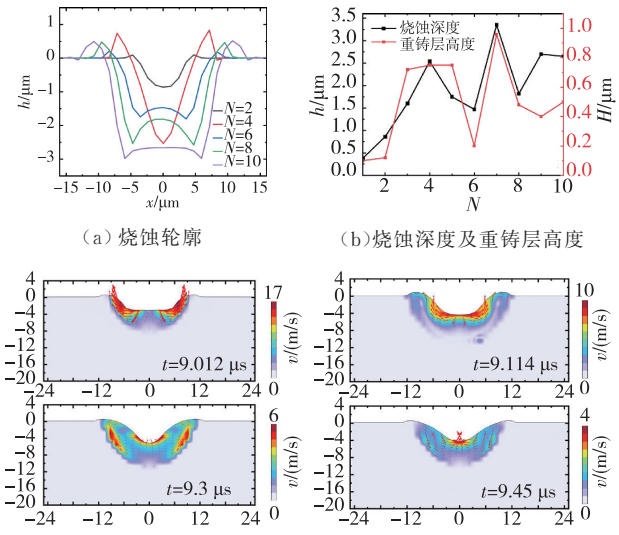
激光能量密度对烧蚀坑的形貌演变起着关键作用。如图 4(a)所示，当激光能量密度上升时，烧蚀深度 h 与烧蚀直径 D 逐渐增加。此外，烧蚀坑边缘的重铸突起现象愈发明显，当能量密度达到 3 J/cm²时，烧蚀坑底部中心出现材料沉积，导致烧蚀深度反常降低。图 4(b)的温度云图进一步揭示了热量分布的情况，当激光能量密度为 1 J/cm²时，经过 5 个脉冲作用并冷却后，材料中心温度为 1 100 K；而当能量密度上升至 3 J/cm²时，在同一时刻，材料中心温度高达 2 800 K。如图 4(c)为图 4(b)对应的速度云图，当能量密度为 1 J/cm²时，材料未发生明显的烧蚀现象，尚未形成熔池；而当能量密度达到 3 J/cm²时，材料内部的流速显著增加，出现了明显的熔融流动行为。



（a）不同能量密度下烧蚀轮廓　（b）温度云图　（c）速度云图

图4　脉冲数为5的烧蚀形貌

脉冲数不仅会引发累积效应，还主导材料沉积行为。如图5(a)所示，低脉冲数下烧蚀坑呈锥形，在第6个脉冲作用后出现材料沉积，坑底开始突起，且突起程度随脉冲数增加先急剧后趋于平缓。图5(b)揭示了沉积与重铸层高度H的动态关系：初始阶段的重铸层高度随脉冲数增加而上升，烧蚀深度同步增加；当重铸层达到一定高度后，被后续脉冲烧蚀并转化为底部沉积，导致烧蚀深度降低；随后重铸层再次累积，底部沉积被去除，烧蚀深度回升。这一循环使烧蚀深度与重铸层高度呈现波动增长，形貌在锥孔与底部突起间交替演变。此外，烧蚀形貌受光斑直径影响显著。光斑范围内的重铸层易被后续脉冲去除并在坑底堆积；而位于光斑外的重铸层难以被激光作用，无法形成有效沉积，最终在多脉冲作用下形成稳定的锥孔结构。



（a）烧蚀轮廓　（b）烧蚀深度及重铸层高度

（c）第10个脉冲下随时间变化的流速云图

图5　能量密度为3 J/cm²，不同脉冲数下的烧蚀形貌

图5(c)阐明了沉积机理：当第10个脉冲作用时，熔融物在反冲压力下向外喷溅；随着热影响区扩大，坑边重铸层在表面张力驱动下回流，最终冷却沉积于坑底。

图6展示了在不同脉冲数和激光能量密度条件下，WLI测得的多脉冲飞秒激光烧蚀坑形貌。当能量密度固定时，随着脉冲数的增加，烧蚀坑的直径和深度逐渐增大，烧蚀形貌也变得更为清晰。随着脉冲数的累积，材料的去除量逐步增加。当脉冲数固定时，激光能量密度对烧蚀结果的影响同样显著。当能量密度为1.5 J/cm²时，激光能量接近材料的烧蚀阈值，因而无法形成明显的烧蚀坑。随着能量密度的提高，烧蚀坑的深度和直径均随之增大，加工效果明显增强。值得注意的是，如图中红色框选区域所示，在高激光能量密度或大脉冲数的条件下，烧蚀区域出现了明显的熔融物堆积和热影响区扩大现象，这导致脉冲能量分布不再均匀，形成了

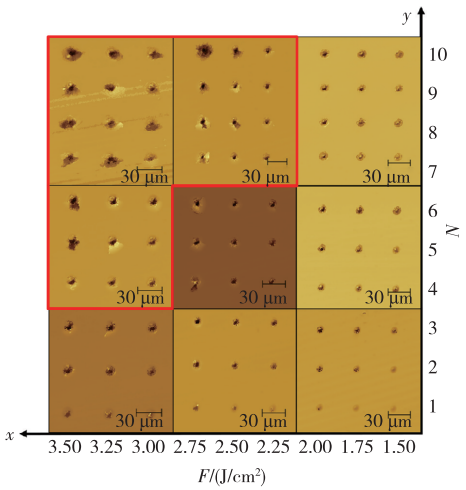


图6　多脉冲飞秒激光加工中不同脉冲数与激光能量条件下的WLI图

不规则的孔洞形貌，显著降低了烧蚀坑的质量和加工精度。这说明，过高的能量密度并不一定有利于高质量微结构的制备。相反，在较低能量密度、接近材料烧蚀阈值的条件下，尽管单脉冲作用难以有效诱导材料的相变或蒸发，但在多脉冲的累积效应作用下，仍能实现材料的可控去除，并加工出形貌规整、边缘清晰的高质量微孔。

不同脉冲数与激光能量条件下的飞秒激光多脉冲加工所形成的表面三维形貌如图 7 所示。通过 WLI 获取的形貌数据以色彩变化直观呈现高度分布特征，其中红色区域代表较高区域，蓝色区域代表较低区域。其中，烧蚀坑边缘存在显著的高度梯度变化，其成因在于当飞秒激光与材料相互作用时，瞬时高温熔融区在极短时间内经历相爆炸、蒸发喷溅的动态过程，喷溅物在烧蚀坑边缘重新凝固堆积，形成典型的边缘突起结构。随着能量密度和脉冲数的增加，表面的高度起伏变得更加剧烈和复杂，尤其是在高能量密度下，边缘区域的高度波动幅度显著增大，熔融重铸现象较为明显，这源于多脉冲累积引发的热积累。前序脉冲未完全冷却时后续脉冲持续注入能量，导致熔池寿命延长、熔融层流动性增强，形成火山口状结构。此外，过高的能量密度与脉冲数叠加会导致能量分布及热应力梯度失衡，诱发材料局部碎裂以及烧蚀坑边缘崩坏。而在低能量密度接近烧蚀阈值的条件下，尽管烧蚀坑底部呈现出一定的不规则隆起，但其孔形整体保持较好的圆度，且未出现边缘崩坏现象。这一结果源于多脉冲累积效应在阈值附近的作用机制逐步降低材料的烧蚀阈值，实现可控去除，同时避免了单脉冲高能量密度下的剧烈热效应。材料去除机制以相爆炸为主导，辅以有限的热熔融，从而在保证孔形精度的同时抑制热影响区扩展。

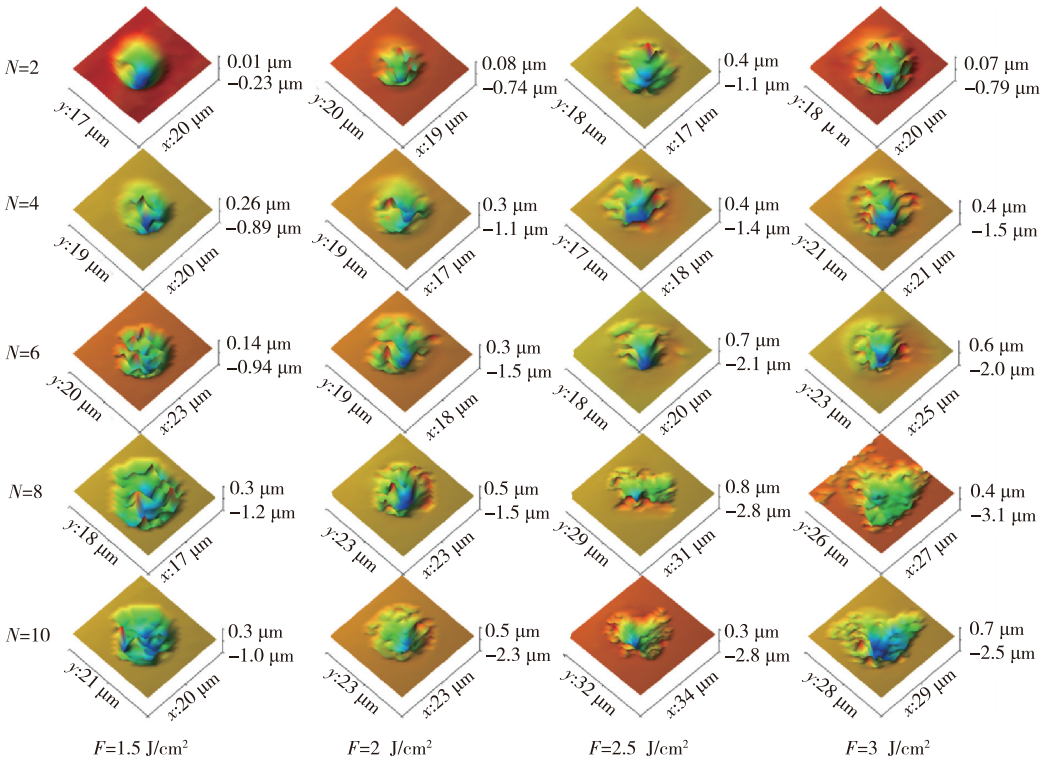
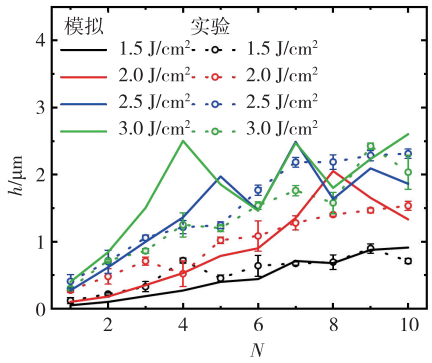


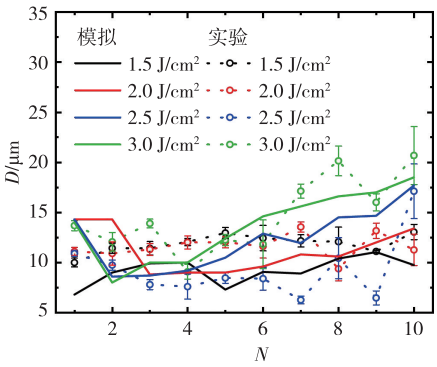
图 7　不同脉冲数与激光能量条件下的表面三维形貌

不同脉冲数与激光能量条件下的烧蚀深度和烧蚀直径模拟与实验数据如图 8 所示。整体来看，模拟结果与实验数据拟合较好，烧蚀深度的平均误差为 23.7%，烧蚀直径的平均误差为 22.8%。在固定激光能量密度条件下，烧蚀深度和烧蚀直径均呈现波动上升趋势；随着激光能量密度的提高，波动幅值显著增大。烧蚀深度随脉冲数增加而逐渐增大，但增速逐渐放缓。烧蚀直径随脉冲数增加虽略有增大，但变化幅度相对较小，仅在烧蚀深度达到阶段性饱和时出现明显波动，这表明烧蚀宽度的扩展主要受深度饱和状态调控。值得注意的是，在低能量密度条件下，模拟与实验数据拟合良好，而在高能量密度条件下，两者差异逐渐增大。这主要是由于高能量密度下熔融物质流体动力学行为复杂

化以及相爆炸等非线性效应显著，导致实际烧蚀过程与模型假设之间出现偏差，从而造成模拟结果与实验数据之间的系统性差异。



（a）烧蚀深度

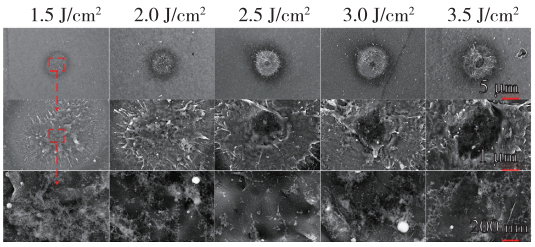


（b）烧蚀直径

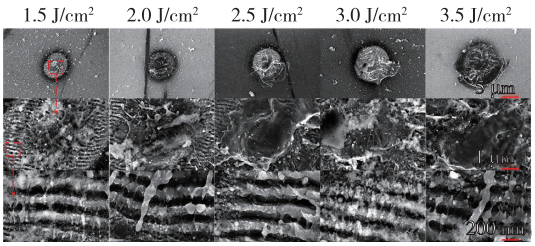
图8 不同脉冲数与激光能量条件下的烧蚀数据

为了深入探究在脉冲数固定的条件下，激光能量密度对SiC烧蚀形貌的调控机制，本研究采用SEM对辐照区域进行表征。图9(a)描绘了当脉冲数为2时，不同能量密度下照射区域的表面形貌及其局部放大图。在5 μm尺度下，当激光能量在1.5 J/cm²时，材料表面仅产生轻微的烧蚀特征；随着激光能量密度的增加，烧蚀坑深度增加且形貌逐渐清晰，烧蚀边缘区域的衬度变暗，表明热影响区随能量的增加而增大。选取烧蚀坑中心进行放大，在1 μm刻度下，烧蚀中心区域可观察到由熔融物喷溅后冷凝形成的重铸层，而在烧蚀坑外围区域则分布着由等离子体羽流沉积形成的微纳颗粒。值得注意的是，随着激光能量密度的增加，烧蚀坑底部的微观形貌发生了显著转变，初始阶段的絮状沉积物逐渐消失，进而形成平滑的沉积结构，且分布趋于零散。在低能量密度下，激光诱导局部熔融，形成浅坑和絮状沉积物；当能量密度增加时，剧烈的熔体流动和相爆炸导致了更厚的重铸层和颗粒物的形成。同时，在高能量密度下更强的反冲压促使熔融物在坑底重新分布，使得原本松散的絮状沉积物在高温高压环境下发生团聚或熔合，最终演化为更为致密的沉积结构。

图9(b)展示了当脉冲数为10时，不同能量密度下照射区域的表面形貌及其局部放大图。能量密度从1.5 J/cm²到3.5 J/cm²，图中均清晰呈现出周期性表面结构，说明通过调控脉冲数可有效控制该结构的形成。值得注意的是，这些周期性结构主要集中分布在烧蚀坑孔洞的边缘。这一现象表明，中心区域的激光强度较高，导致材料去除更为剧烈，从而抑制了周期性表面结构的形成；而边缘区域的条件则更有利于此类结构的产生和发展。



（a）N=2



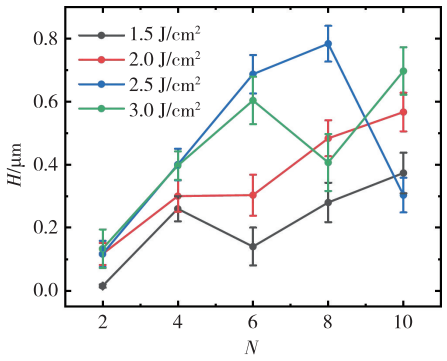
（b）N=10

图9 不同脉冲数下SEM图像

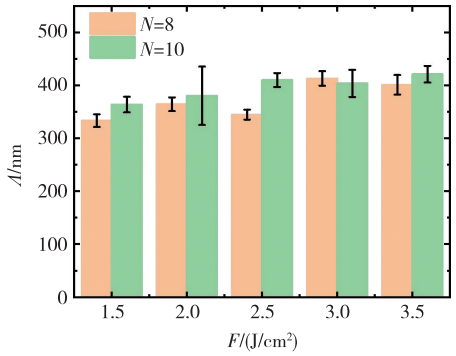
WLI下烧蚀坑边缘的重铸层高度如图10(a)所示，激光能量密度和脉冲数增加会产生熔融凸起，从而导致重铸层高度升高，而后续高度下降则是由于脉冲的去除作用。SEM下的沟槽周期大小如图10(b)所示，增大脉冲数后会产生亚波长周期性表面结构，且随着能量密度和脉冲数累加，周期大小会增加。

2.4 不同能量配比下的烧蚀形貌

为深入探究脉冲配比对烧蚀形貌的影响，在脉冲间隔恒定的条件下，进一步分析了不同能量配比下的烧蚀轮廓。如图11所示，实验将总能量按不同配比分配给3个脉冲，分别为能量由低到高、均匀分布以及由高到低。结果表明，前两种配比的烧蚀去除效果较为相似；而当能量序列由高到低时，烧蚀去除量显著增大。这主要归因于材料烧蚀过



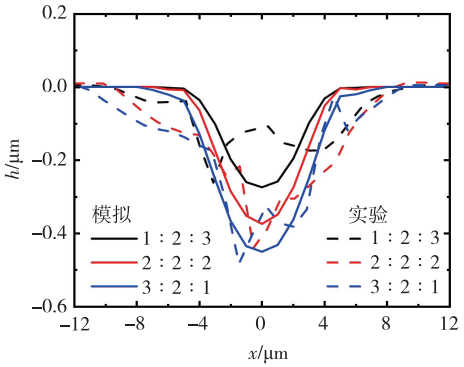
（a）WLI下的重铸高度



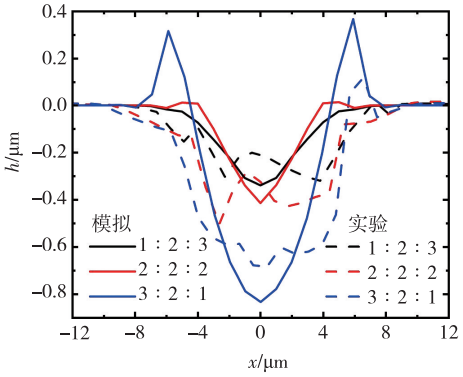
（b）SEM下的沟槽周期

图 10　表面形貌

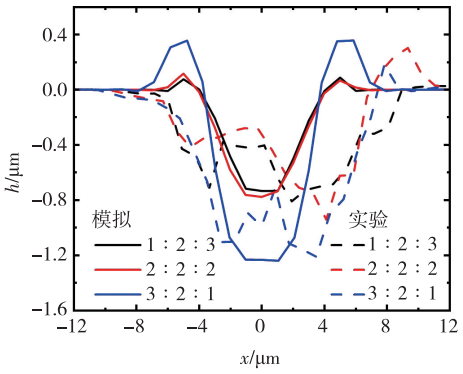
程中的热累积效应。高能起始序列可使材料在首脉冲作用下迅速跨越相变与去除阈值，进入高效烧蚀区，并为后续脉冲维持高温高梯度热场，促进连续熔融与相爆炸。相反，低能起始序列的初始加热可能处于亚阈值或近阈值状态，能量多耗散于热传导，未能有效助力后续脉冲的去除作用，导致整体效率下降。随着激光能量密度的增加，高能起始序列始终维持最高的材料去除效率，展现出显著优势。此外，当总能量较低时，模拟与实验均未观察到烧蚀坑边缘突起，这说明在低能量密度下，采用高能起始序列可获得较好的加工效果。



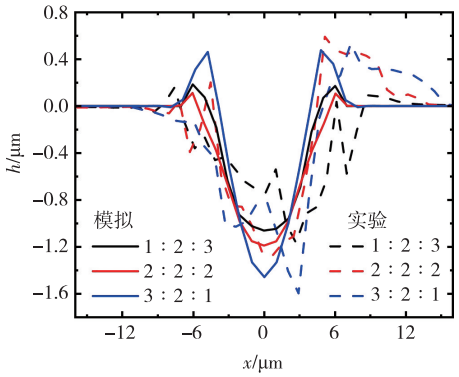
（a）　$F_{总}$=4.5 J/cm²



（b）　$F_{总}$=6 J/cm²



（c）　$F_{总}$=7.5 J/cm²

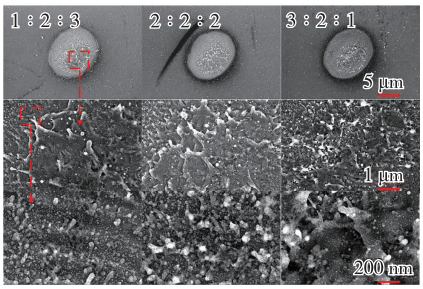


（d）　$F_{总}$=9 J/cm²

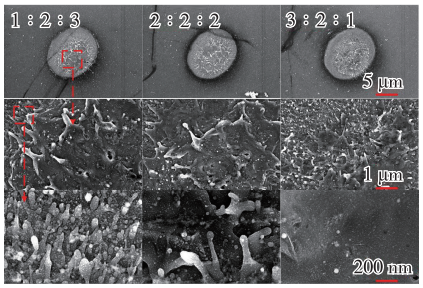
图 11　不同脉冲能量配比下的烧蚀轮廓

不同脉冲配比下的 SEM 形貌如图 12 所示。保持总能量不变，改变激光能量配比导致烧蚀形貌呈现出明显的差异。具体而言，当能量分布由低到高时，烧蚀边缘可观察到明显的周期性表面结构。相比之下，在能量均匀分布及由高到低分布时，烧蚀形貌则缺乏这种周期性特征。这是由于当能量分布由低到高时，首个低能脉冲不足以引发剧烈烧蚀，但可在材料表面诱导出微弱的周期性波纹结构，形成初始表面调制。随着后续脉冲能量递增，这些初始调制被逐步放大，形成规则

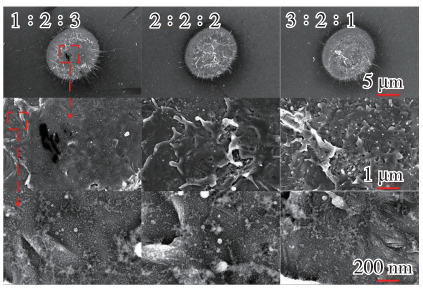
的周期性表面结构。该过程依赖渐进式增加的能量输入模式，使得表面结构在受控条件下逐步演化，从而保留有序特征。而当能量均匀分布或由高到低时，尤其是高能起始序列，首脉冲即带来强烈的相爆炸和快速材料喷溅，导致表面迅速进入非稳态烧蚀状态，初始表面调制被破坏或直接跨越有序演化阶段，进入剧烈熔融与去除过程。因此，周期性结构难以形成，形貌整体呈现无序特征。



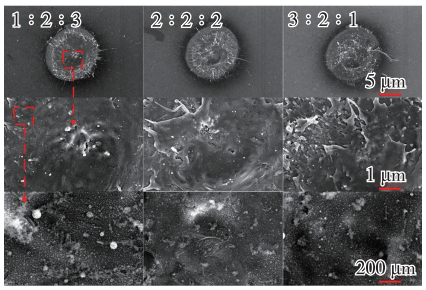
（a） $F_{总}$=4.5 J/cm²



（b） $F_{总}$=6 J/cm²



（c） $F_{总}$=7.5 J/cm²



（d） $F_{总}$=9 J/cm²

图12 不同脉冲能量配比下的SEM形貌

此外，高能起始序列相较于低能起始序列，其烧蚀边缘区域的衬度变暗，表明前者的热影响区更为显著，热累积效应强于后者，对应图11，高能起始序列始终维持最高的材料去除效率。当激光总能量上升时，不同配比下的烧蚀坑形貌趋于一致。烧蚀喷溅物重新凝固，形成重铸层；而烧蚀坑底部因长时间处于高温熔融态，随后快速冷却固化，形成光滑或致密的再凝固层；上表面的絮状沉积物则主要由喷溅液滴在飞行中部分氧化或团聚后沉降而成。这些特征在高能量条件下普遍存在，因此不同配比下的形貌趋于一致。

低能起始有利于精细结构的构建与热损伤抑制，适用于表面微纳结构加工；高能起始则利于快速材料去除，适用于高效刻蚀；而当总能量较高时，所有路径均趋向于剧烈烧蚀主导机制，初始差异被弱化。因此，合理设计脉冲能量序列，可实现对烧蚀形貌、热影响程度及去除效率的协同优化，为飞秒激光在微纳加工、表面改性及高效率制造中的应用提供灵活可控的技术手段。

3 总结

本文结合理论模拟与实验表征，系统研究了多脉冲飞秒激光加工SiC过程中的烧蚀行为与形貌演化机制。研究结果表明，所建立的多物理场模型能够较好地预测SiC的烧蚀阈值与材料去除特性，模拟结果与实验数据具有良好的一致性。通过分析不同脉冲数下的烧蚀阈值，证实了激光在材料表面的逐脉冲累积是影响烧蚀过程的关键因素。模拟中电子-晶格温度随脉冲数增加而持续升高，直观揭示了热积累的动态过程，进一步验证了累积效应的存在。在此基础上，探讨了脉冲数与能量密度对烧蚀形貌的协同影响，提出烧蚀坑底部出现的沉积结构源于坑边缘重铸层在高温下重新熔融，并在表面张力驱动下发生回流所致。通过对比模拟与实验所得烧蚀坑截面，并结合SEM与WLI的表征结果，发现当能量密度接近烧蚀阈值时，烧蚀坑形貌较为规则，材料去除质量较高。并进一步验证，优化子脉冲能量分配可有效提升材料去除效率。本研究为深入理解多脉冲飞秒激光与宽禁带半导体材料的相互作用机制提供了理论依据，并为高效率、高精度激光加工SiC工艺的优化提供了指导方向。

参考文献：

[1] Yan Z, Mei X, Wang W, et al. Theoretical investigation of multipulse femtosecond laser processing on silicon carbide: ablation, shielding effect, and recast formation[J]. Optics & Laser Technology, 2025, 181: 111976.

[2] 王宏建, 杨　涛, 廖润钱, 等. SiC及其功率器件的激光制孔研究进展[J]. 半导体光电, 2021, 42(4): 458-463, 478.
Wang Hongjian, Yang Tao, Liao Runqian, et al. Research progress on laser drilling of silicon carbide and its power devices[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(4): 458-463, 478.

[3] Wang L, Zhao Y, Zhao Y, et al. Design and fabrication of bulk micromachined 4H-SiC piezoresistive pressure chips based on femtosecond laser technology[J]. Micromachines, 2021, 12(1): 56.

[4] Wang M, Tian C, Zheng R, et al. Effects of single- and multi-pulse femtosecond laser irradiation on N-type 4H-SiC surface morphology, structural transformation, and accompanying defect generation[J]. Optics & Laser Technology, 2026, 193: 114189.

[5] 王宏建, 杨　涛, 吴小雪, 等. 飞秒激光能量密度对SiC陶瓷微孔加工的影响[J]. 半导体光电, 2021, 42(6): 864-867, 874.
Wang Hongjian, Yang Tao, Wu Xiaoxue, et al. Effect of femtosecond laser energy density on drilling of SiC ceramic[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(6): 864-867, 874.

[6] Gu Z, He Y, Ji J, et al. Numerical simulation and experimental study of the shape variation influence on stainless steel drilling with picosecond laser[J]. Optics & Laser Technology, 2025, 181: 112021.

[7] Tang Z Q, Li Y F, Wang G, et al. Research advances of femtosecond laser drilling microholes in hard and brittle materials[J]. Optics & Laser Technology, 2025, 185: 112572.

[8] Li G, Fan R, Long Y, et al. Material removal mechanism and surface quality in low-fluence femtosecond laser ablation of polycrystalline diamonds[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2025, 337: 118731.

[9] Kiran Kumar K, Samuel G L, Shunmugam M S. Theoretical and experimental investigations of ultra-short pulse laser interaction on Ti_6Al_4V alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 263: 266-275.

[10] Huang C, Han R, Chen Y, et al. Pulse-duration and multi-pulse accumulation effects of picosecond laser-induced damage in aluminum membrane gratings[J]. Optics & Laser Technology, 2025, 192: 114024.

[11] Zhang J, Chen Y, Hu M, et al. An improved three-dimensional two-temperature model for multi-pulse femtosecond laser ablation of aluminum[J]. Journal of Applied Physics, 2015, 117(6): 063104.

[12] Gaudiuso C, Giannuzzi G, Volpe A, et al. Incubation during laser ablation with bursts of femtosecond pulses with picosecond delays[J]. Optics Express, 2018, 26(4): 3801.

[13] He K, Ren Y, Dai Z, et al. Theoretical and experimental study of ablation of fused silica by femtosecond laser bursts[J]. Optics Communications, 2023, 537: 129440.

[14] Omeñaca L, Olaizola S M, Rodríguez A, et al. Experimental study and numerical modelling on multi-pulse laser ablation of aluminium with femtosecond laser[J]. Optics & Laser Technology, 2025, 184: 112481.

[15] Vanwersch P, Nagarajan B, Van Bael A, et al. Three-dimensional pulse-based modelling of femtosecond laser ablation of metals: validation with grooves[J]. Micromachines, 2023, 14(3): 593.

[16] Jo H, Ito Y, Hattori J, et al. High-speed observation of damage generation during ultrashort pulse laser drilling of sapphire[J]. Optics Communications, 2021, 495: 127122.

[17] Zhan N, Jia J, Guo B, et al. Efficiency enhancement by transient electron dynamic control in shaped femtosecond laser fabrication of metals[J]. Applied Surface Science, 2022, 603: 154441.

[18] Liu C, Li C, Gao L, et al. Micro-hole drilling of 2.5D C/SiC composite with picosecond laser: numerical modeling and experimental validation on hole shape evolution[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 81: 852-864.

[19] Zhou N, Yuan S, Gao M, et al. Investigations on the oxidation behavior and removal mechanism of SiC/SiC composites by multi-pulse femtosecond laser ablation[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 3408-3425.

[20] Xu J, Li Z, Guo C, et al. Ultrafast laser thermal ablation of ceramic materials[J]. Ceramics International, 2025, 51(22): 36493-36510.

[21] Allahyari E, Nivas J J, Skoulas E, et al. On the formation and features of the supra-wavelength grooves generated during femtosecond laser surface structuring of silicon[J]. Applied Surface Science, 2020, 528: 146607.

作者简介：

葛茗轩(2001—)，男，硕士研究生，主要研究方向为飞秒激光加工碳化硅烧蚀形貌的影响机理研究；

董淑宏(1988—)，男，江苏省连云港市人，副教授，博导，主要研究方向为锂电池用真空镀膜设备研发。