

基于时空整形的超快激光碳化硅深亚波长纳米刻蚀技术研究

高晨 陈琳 张中印 张国栋 王江 程光华

Study onnanoscale etching of silicon carbide for deep-subwavelength features based on spatiotemporally shaped ultrafast laser pulses

GAO Chen, CHEN Lin, ZHANG Zhong-yin, ZHANG Guo-dong, WANG Jiang, CHENG Guang-hua

引用本文:

高晨, 陈琳, 张中印, 张国栋, 王江, 程光华. 基于时空整形的超快激光碳化硅深亚波长纳米刻蚀技术研究[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2026-0054

GAO Chen, CHEN Lin, ZHANG Zhong-yin, ZHANG Guo-dong, WANG Jiang, CHENG Guang-hua. Study onnanoscale etching of silicon carbide for deep-subwavelength features based on spatiotemporally shaped ultrafast laser pulses[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2026-0054

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2026-0054>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

460 mm口径单轴支撑碳化硅主镜的优化设计

Optimized design of single-axis supported SiC mirror with aperture of 460 mm

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 460 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0172>

角度复用的光学加密超表面的超快激光嵌套加工方法研究

Angle-multiplexed optically encrypted metasurfaces fabricated by ultrafast laser induced spatially selective-modified nanograting structures

中国光学 (中英文). 2023, 16(4): 889 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0228>

不锈钢表面高质量微陷阱结构的激光辅助水射流加工

Laser-assisted water jet machining of high quality micro-trap structures on stainless steel surfaces

中国光学 (中英文). 2024, 17(6): 1476 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2024-0004>

基于间接波前整形的近红外二区荧光共聚焦成像研究

NIR-II fluorescence confocal imaging based on indirect wavefront shaping

中国光学 (中英文). 2024, 17(1): 150 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0070>

小闪耀角单晶硅光栅结构参数优化及制备工艺

Optimization of structural parameters and fabrication of monocrystalline silicon gratings with small blazed angle

中国光学 (中英文). 2024, 17(5): 1139 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0056>

基于非对称混合等离子体结构的双槽超紧凑偏振分束器

Double-slot ultra-compact polarization beam splitter based on asymmetric hybrid plasmonic structure

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1215 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022-0028>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-09

基于时空整形的超快激光碳化硅深亚波长 纳米刻蚀技术研究

高 晨¹, 陈 琳¹, 张中印², 张国栋¹, 王 江¹, 程光华^{1*}

(1. 西北工业大学光电与智能研究院, 西安 710072;

2. 西北工业大学集成电路学院(微电子学院), 西安 710072)

摘要: 飞秒激光自组干涉协同近场增强效应和孵化效应能够实现深亚波长纳米刻蚀, 然而其结构形成通常依赖表面随机散射中心以及多脉冲反馈, 存在一致性差、重复性差、激光参数敏感等问题。本文提出时空协同的激光能量调控策略, 以提升 4H-SiC 单晶表面纳米槽刻写质量。在空间域, 采用单狭缝和双狭缝光束整形重构焦平面能量分布, 抑制能量横向扩散, 增强孵化效应和自组干涉效应; 在时间域, 引入 GHz 脉冲串调控能量注入时序, 降低瞬时能量沉积强度并延长退火时间。通过静态定点辐照与动态扫描实验, 系统探究不同调控手段下的表面形貌演化规律及纳米槽成形机制。结果表明, 单狭缝整形后的椭圆焦斑可增强孵化效应和弱退火作用, 获得一致性与边缘规整的 62 nm 最窄槽宽; 双狭缝整形进一步增强了干涉场约束效应, 降低了纳米槽成形对随机散射中心的依赖, 将最小可控槽宽压缩至 34 nm; 在双狭缝整形基础上引入 GHz 脉冲串, 400 ps 间隔子脉冲的分步能量注入可降低瞬时强激发并抑制重熔堆积物和颗粒附着, 使纳米槽最小可控槽宽进一步降低至 24.5 nm。时空协同调控策略为第三代半导体表面高精度、低损伤、高重复性的纳米制造提供了有效技术方案与理论依据。

关键词: 超快激光微纳加工; 碳化硅; 狭缝光束整形; 脉冲串; 纳米槽

中图分类号: TN249

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2026-0054

CSTR: 32171.14.CO.2026-0054

Study on nanoscale etching of silicon carbide for deep-subwavelength features based on spatiotemporally shaped ultrafast laser pulses

GAO Chen¹, CHEN Lin¹, ZHANG Zhong-yin², ZHANG Guo-dong¹, WANG Jiang¹, CHENG Guang-hua^{1*}

(1. School of Artificial Intelligence, Optics and Electronics, Northwestern
Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. School of Integrated Circuits (School of Microelectronics), Northwestern
Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

* Corresponding author, E-mail: guanghuacheng@nwpu.edu.cn

Abstract: Femtosecond-laser-induced self-organized interference, together with near-field enhancement and incubation effects, enables deep-subwavelength nanoetching. However, the formation of such structures usu-

收稿日期: xxxx-xx-xx; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2024YFB4609200)

Supported by

ally relies on random surface scattering centers and multi-pulse feedback, leading to poor uniformity, limited repeatability, and high sensitivity to laser parameters. In this work, a spatiotemporal laser-energy modulation strategy is proposed to improve the writing quality of nanogrooves on 4H-SiC single-crystal surfaces. In the spatial domain, single-slit and double-slit beam shaping are employed to reconstruct the focal-plane energy distribution, suppress lateral energy spreading, and enhance the incubation and self-organized interference effects. In the temporal domain, a GHz burst mode is introduced to regulate the energy-deposition sequence, reduce the instantaneous energy-deposition intensity, and extend the annealing time. Static irradiation and dynamic scanning experiments were conducted to systematically investigate the surface morphology evolution and nanogroove formation mechanism under different modulation strategies. The results show that the elliptical focal spot formed by single-slit shaping enhances the incubation and annealing effects, producing nanogrooves with improved uniformity and edge regularity and a minimum groove width of 62 nm. Double-slit shaping further strengthens the interference-field confinement, reduces the dependence of nanogroove formation on random scattering centers, and decreases the minimum controllable groove width to 34 nm. By introducing GHz burst pulses on the basis of double-slit shaping, stepwise energy deposition through sub-pulses with a 400 ps interval reduces instantaneous strong excitation and suppresses molten redeposition and particle attachment, further decreasing the minimum controllable groove width to 24.5 nm. This spatiotemporal modulation strategy provides an effective technical approach and theoretical basis for high-precision, low-damage, and highly repeatable nanomanufacturing on third-generation semiconductor surfaces.

Key words: ultrafast laser nanofabrication; silicon carbide; slit beam shaping; burst mode; nanogroove

1 引 言

碳化硅(SiC)作为典型的第三代宽禁带半导体材料,具有高击穿电场、高热导率、高电子饱和漂移速度以及优异的化学稳定性等特性,在高功率电子器件、高频器件及极端环境电子学领域具有重要应用价值^[1]。SiC 基功率器件、微纳光子器件及表面功能结构的发展,对其表面高精度、低损伤微纳结构加工技术提出了更高要求。特别是在亚波长尺度下构筑周期或非周期纳米结构,可显著调控材料的光学、电学与界面特性^[2],因此实现 SiC 表面深亚波长尺度纳米结构的可控加工已成为先进微纳制造的重要研究方向^[3]。

飞秒激光具有超短脉宽和高峰值功率等特点^[4],能够在极短时间内将能量高度局域地沉积到材料,并可通过雪崩电离、多光子吸收等非线性过程实现透明介质、宽禁带半导体等非金属硬脆材料的高精度微纳加工^[5-6]。在特定条件下,飞秒激光可以在材料表面诱导自组织周期结构(Laser-Induced Periodic Surface Structures, LIPSS)或深亚波长纳米结构。这一过程通常涉及入射激光与表面散射波或表面等离子激元之间的自组干涉

效应^[7-8],同时伴随多脉冲作用下的孵化效应^[9],使材料损伤阈值逐渐降低,从而实现纳米尺度结构的形成,拓展了飞秒激光加工的极限能力^[10]。

2003 年 Shimotsuma 等人利用飞秒激光 LIPSS 效应在石英玻璃内部制备了体纳米光栅,纳米槽宽度约 10 nm^[11]。随后, Bhardwaj 等人在石英玻璃表面实现了光栅刻写,借助酸腐蚀,清晰地呈现了纳米槽结构,纳米槽宽度小于 10 nm,并揭示了纳米平面的生长机理^[12]。2008 年 Taylor 等首次在石英玻璃表面实现了单纳米槽、双纳米槽、三纳米槽以及多纳米槽的并行刻写,发现高周期纳米光栅具有强双折射效应^[13]。此后,利用飞秒激光自组干涉直写涡旋相位片、相位衍射光栅等器件走向应用。2019 年 Li 等人在氧化钛薄膜上实现了宽度低至 18 nm 的单纳米槽直写,发现光学远场可以诱导近场击穿,并且初始纳米孔会出现局域近场增强的现象^[14]。2025 年 Zhang 等人利用非衍射贝塞尔光束,通过激光诱导空化形成的纳米孔洞作为自生散射源,实现了特征尺寸低至 7 nm、深宽比超过 1 000 的极端纳米制造^[15]。这些工作表明,飞秒激光远场加工在特定材料体系和反馈机制下具备突破衍射极限并实现极小尺寸

结构加工的能力,然而,对于高硬度宽禁带半导体表面深亚波长纳米槽刻写,其结构一致性和表面洁净度仍需进一步提升。

飞秒激光在半导体材料中诱导 LIPSS 结构同样吸引了研究者的极大兴趣。2017 年法国 LP3 实验室研究人员利用固体浸没聚焦实现了在硅内部进行三维超快激光折射率调制,为在半导体中实现热致密物质条件以及微爆炸实验提供了新的可能性^[16]。2020 年 Wang 等人进一步利用时间整形的飞秒激光脉冲串提升了在硅内部加工能力^[17]。2024 年 Liu 等利用飞秒激光自组干涉协同近场增强效应在单晶硅表面刻写了纳米槽和大面积纳米光栅^[18]。这是由于该结构的形成过程对激光能量、光斑形貌及扫描参数高度敏感,导致加工结构在尺寸一致性、形貌均匀性和重复性方面存在不足。2025 年 Solana 等人提出利用 Ronchi 光栅将飞秒激光分为两束光实现自组干涉增强,将激光诱导周期性表面结构(LIPSS)和激光干涉结合,在干涉图案中叠加 LIPSS 效应,实现了高精度激光图案化的调控。由于 4H-SiC 在近红外波段具有显著的非线性吸收和自聚焦效应^[19],飞秒激光在 SiC 上的研究已涉及烧蚀阈值^[20]、微结构制备^[21]及内部缺陷调控^[22]。近期有研究发现可以利用 SiC 表面声子极化激元构筑超构表面,并应用于红外传感方面^[23],这表明 SiC 表面高质量纳米结构的可控加工对其功能应用至关重要。通过飞秒激光在 SiC 表面实现深亚波长纳米刻蚀仍面临显著挑战。因此,如何从能量空间分布与时间注入过程两个维度协同调控激光与 SiC 相互作用,是提升深亚波长纳米加工稳定性与可重复性的关键。为此,本文提出了单/双狭缝光束整形技术抑制能量横向扩散、引入 GHz 脉冲串模式调控能量注入时序的策略,从飞秒激光空间域与时间域两个维度协同提升飞秒激光刻蚀 SiC 单晶纳米槽的槽宽一致性与边缘规整度,阐明了激光时空形态与材料响应的构效关系,为 SiC 高性能纳米制造提供技术方案和理论依据。

2 实验方法

实验系统由掺镱的固体飞秒激光器(Carbide, Light Conversion)、高精度位移平台(ANT130,

Aerotech)、电光开关在线显微监测模块以及计算机控制单元组成。实验所用激光器内部集成声光可编程色散滤波器,可实现常规单脉冲输出以及 GHz 脉冲串输出,脉冲串模式下,子脉冲间隔 400 ps,子脉冲个数可调。实验中保持中心波长 1035 nm,脉宽 230 fs,重频 100 kHz,偏振方向为水平线偏振。激光束经过扩束系统后,光斑直径约为 6 mm,再通过二分之一波片和偏振分光棱镜组成的衰减片后经聚焦透镜聚焦在样品上,聚焦物镜 NA=0.65(Mitutoyo 50× NIR HR)。其中,在线显微监测模块借助 LED 照明的反射光路,对激光焦点的作用位置及样品表面加工形貌进行实时观测。实验样品为双面抛光的 4H 单晶碳化硅,电阻率 0.015~0.028 $\Omega\cdot\text{cm}$,晶向<0001>,表面粗糙度小于 0.5 nm。在激光加工前,对样品依次进行丙酮、乙醇和去离子水的超声清洗,每种溶剂处理时间为 10 分钟,以确保样品表面达到实验所需的初始清洁度。清洗完成后将样品吹干并固定于位移平台上,借助在线观测系统对样品进行调平,随后精细调整光路,使物镜聚焦后的激光束垂直入射至样品表面,并保证激光焦平面与待加工表面重合,加工过程中激光焦点位置保持不变。实验中通过程序控制机械快门开闭并驱动位移平台运动,以实现激光在样品表面的定点辐照以及预设轨迹扫描加工。激光加工结束后,将样品依次置于丙酮、乙醇和去离子水中进行超声清洗,每次清洗时长为 6 分钟。样品表面形貌表征采用 Tescan MIRA 场发射扫描电子显微镜(SEM, Scanning Electron Microscope),其分辨率达亚纳米级,可清晰呈现所加工纳米槽形貌特征;截面形貌通过聚焦离子束(FIB, Focused Ion Beam)系统进行定点截面制备与观测,该技术通过高能镓离子束对选定区域进行可控的垂直刻蚀,制备出可供观测的横截面,并利用系统内集成的双束系统对截面进行高分辨率成像,是获取纳米结构真实截面信息最直接、可靠的技术手段之一。

3 狭缝整形后的纳米槽特征

3.1 单狭缝的纳米槽特征

已有研究结果表明,飞秒激光诱导基于 LIPSS 的纳米槽形成过程通常始于表面初始散射中心,

入射光与散射波在材料表面发生相干叠加,沿光束纵向轴生成的近场分量驱动,产生了一系列近场和远场相长干涉图案。由于场强、散射体大小和局部加工阈值的修改之间存在正反馈,这种不稳定性将被非线性放大^[24-25],这种随机起始和反馈放大的特征虽然有利于突破远场衍射极限,但也容易导致纳米槽位置、槽宽和边缘形貌出现波动。为此,本文首先在光路中引入单狭缝进行空间滤波,将入射高斯光斑重构为沿垂直激光偏振方向(扫描方向)拉伸的椭圆光斑,通过压缩平行偏振方向的有效能量沉积范围,抑制横向随机预

改性,同时利用扫描方向上长轴光束分布引入有序预调制和弱再加热作用,从而增强纳米槽成形稳定性。

3.1.1 静态定点辐照形貌演化

为揭示单狭缝光束整形作用下 SiC 材料上 LIPSS 的形成过程,在固定单脉冲能量 13 nJ 的条件下,改变定点辐照脉冲个数,观察材料表面形貌随脉冲累积的演化规律,如图 1 所示。该能量略高于 SiC 表面损伤阈值,能够较为清晰地反映多脉冲作用下材料从初始改性、局部去除到纳米槽稳定形成的动态过程。

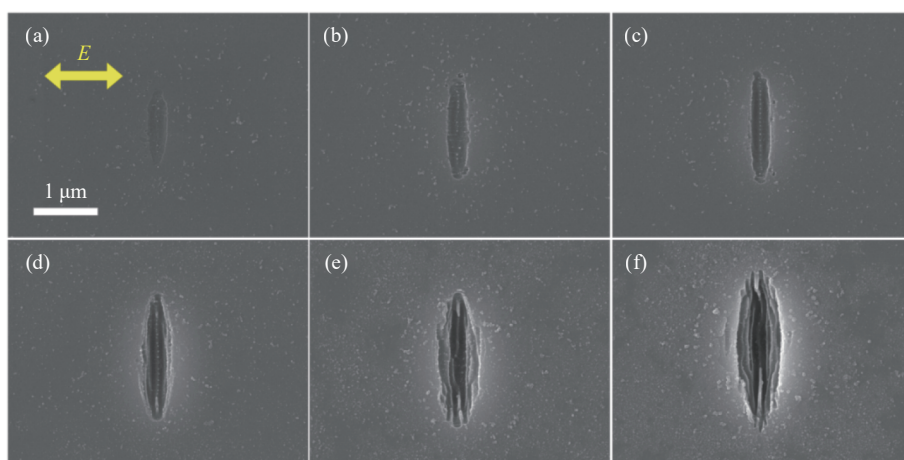


图 1 单脉冲能量 13 nJ, 不同脉冲数, 微结构的演化过程, 图(a)至图(f)脉冲数依次是 4、6、8、10、12、14

Fig. 1 Evolution of microstructures on the upper surface of SiC under a single-pulse energy of 13 nJ: (a) 4, (b) 6, (c) 8, (d) 10, (e) 12, and (f) 14.

当施加 4 个脉冲时, SiC 表面首先出现轻微的椭圆形改性区域, 并且其沿狭缝整形后的光斑长轴方向延展, 表明单狭缝将原始高斯光斑调制为具有明显各向异性的能量分布。此阶段材料尚未发生明显刻蚀, 在中心光斑高场强区域可以观察到垂直于激光偏振方向延伸的离散纳米点阵列, 为后续结构的形成提供了初始散射中心。脉冲数增加至 6 时, 中心区域的离散纳米点增多并发生连接, 形成宽度均匀且边缘相对平直的清晰浅刻蚀痕迹。该结构具有良好的方向性与连续性, 说明在多脉冲累积作用下初始散射中心与入射光场的相互作用逐渐增强, 局域近场增强和孵化效应共同促进材料沿预定方向去除。此时, 槽状结构已初步形成, 但边缘尚不清晰, 结构处于由离散损伤点向连续纳米槽转变的过渡阶段。脉冲数进一步增加至 8 时, 中心刻蚀痕迹明显加深并

趋于连续, 纳米槽主体结构基本形成, 槽两侧开始出现轻微的材料堆积, 表明局部区域已经发生材料熔融、迁移和再凝固过程。值得注意的是, 脉冲数的持续叠加带来更强的能量累积, 但该阶段结构并未出现明显的横向扩展, 表明单狭缝整形后较陡峭的横向能量梯度有效抑制了非目标区域的随机改性和材料去除。当脉冲数达到 10 时, 纳米槽形貌进一步稳定, 结构连续性和边缘清晰度明显提高, 沿纳米槽方向延伸均匀, 此阶段可认为是单狭缝整形条件下纳米槽由初始形成进入稳定刻蚀的关键阶段。脉冲数继续增加至 12 和 14 时, 纳米槽深度和周围改性程度进一步增加, 但其主体槽状形貌未出现严重的横向失控扩展。综上, 图 1 所示的静态定点辐照结果表明, 单狭缝整形通过重构焦平面能量分布, 有效抑制能量横向扩散和随机预改性, 为后续动态扫描中获得

连续、均匀且边缘清晰的深亚波长纳米槽提供了物理基础。可以预期沿着聚焦光斑的长轴扫描时, 约 2 微米焦斑长轴的两侧光强较低, 能产生更多的缺陷, 增强孵化效应; 而长椭圆光束的后部分能起到退火效果, 有利于增加纳米槽的均匀性。

3.1.2 动态扫描下的纳米槽制备与形貌分析

在静态定点辐照实验的基础上, 采用单狭缝整形光束进行动态扫描刻写, 扫描方向垂直激光偏振方向, 以验证各向异性能量分布对纳米槽连续成形的调控效果。图 2 给出了单狭缝整形后制

备的典型纳米槽形貌及其截面结构。由图 2(a) 的三维结构示意图和图 2(b) 的表面形貌 SEM 图可见, 所获得纳米槽沿扫描方向连续延伸, 边缘较为平直, 槽两侧未出现明显随机分叉或大范围旁向损伤, 进一步验证了单狭缝整形能够有效约束能量沉积区域。图 2(c) 的 FIB 截面形貌表明, 该结构并非单纯的表面重铸脊, 而是具有明确深度的槽状纳米刻蚀结构, 其截面深度可由图 2(c) 测得。单狭缝整形获得的最小槽宽约为 62 nm, 约为入射波长的 1/17, 说明该方法可以在远场聚焦条件下实现超衍射极限尺寸结构的稳定刻写。

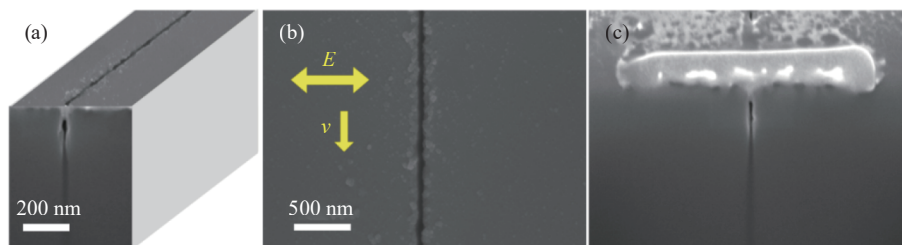


图 2 (a) 纳米槽 3D 形貌示意图; (b) 纳米槽形貌 SEM 图; (c) 纳米槽截面形貌 SEM 图

Fig. 2 (a) Schematic of 3D morphology of nanogroove; (b) SEM image of nanogroove morphology; (c) SEM image of cross-sectional morphology.

结合 3.1.1 的静态定点辐照实验, 从 LIPSS 形成机理看, 纳米槽的产生可以理解为先初始缺陷诱导、近场增强、多脉冲反馈放大的连续演化过程。飞秒激光作用 SiC 表面并形成瞬态高载流子密度区域, 使材料介电性质在极短时间发生改变; 随后表面微缺陷、初始纳米凹坑会打破光场对称性, 引入入射场与表面散射场的干涉耦合, 并在局部区域形成增强吸收; 随着脉冲数累积, 已形成结构又进一步作为新的散射源和近场增强源, 使后续脉冲的能量更倾向于沉积在同一位置, 从而形成脉冲间正反馈。单狭缝整形的作用在于将这种原本容易横向漂移的反馈过程限制在扫描轨迹中心, 使纳米槽沿预定方向连续复制和延伸。光束在垂直于扫描方向被压缩, 形成沿扫描方向拉伸的椭圆光斑, 该能量分布变化带来两种关键效应。首先, 垂直扫描方向上陡峭的能量梯度极大抑制了能量向扫描轨迹两侧的扩散, 从根本上降低了扫描轨迹两侧形成随机预改性点的概率。其次, 沿扫描方向的低强度前缘会先于中心高能区作用于材料表面, 可引入缺陷

态、局部吸收增强和损伤阈值降低, 增强孵化效应并形成均匀的预改性区, 为随后中心高能区能量沉积提供响应较为一致的种子, 低强度后缘在扫描过程中可对已加工区域起到弱再加热与退火作用。上述过程有助于提高能量沉积与材料去除的稳定性, 从而提升纳米槽宽度一致性和边缘规整性。

图 3 进一步给出了单脉冲能量 19 nJ 条件下, 扫描速度对纳米槽槽宽和槽深的影响规律。在 0.90~1.20 mm/s 范围内, 槽宽随扫描速度增大而略有增加, 并且槽深随扫描速度增大呈单调降低趋势。这一关联规律的建立, 为实现纳米槽宽度及深度的可控调节提供了直接的实验依据, 即通过协同调节能量与速度, 可在一定范围内实现对纳米槽几何尺寸的预测。然而, 这一现象背后蕴含的物理机制远非“单位面积脉冲数减少”所能完全解释。这种变化特征表明, 扫描速度不仅仅改变了局部区域的能量累积, 还可能进一步影响激光能量在内部的沉积方式, 其具体机制仍有待后续进一步研究。

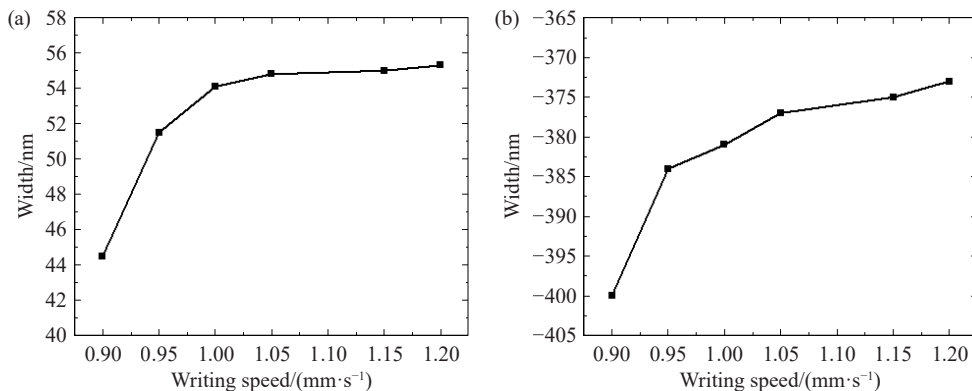


图3 单脉冲能量 19 nJ 下,不同加工速度纳米槽 (a) 宽度和 (b) 深度的变化趋势

Fig. 3 Trends in (a) width and (b) depth of nanogrooves with different processing speeds under a single-pulse energy of 19 nJ.

综上,单狭缝光束整形通过压缩横向能量分布、延展扫描方向作用长度和调控脉冲间反馈过程,有效降低了飞秒激光诱导纳米槽形成中的随机性。在该模式下,纳米槽最小可控槽宽约为 62 nm,且在 0.90~1.20 mm/s 扫描速度窗口内保持连续、可重复的槽状形貌,并显著提高纳米槽边缘规整性。

3.2 双狭缝的纳米槽特征

单狭缝整形属于对高斯光束的被动空间滤波,其对能量局域性的提升主要来源于横向能量扩散抑制,为进一步增强光场对纳米槽成形位置和横向尺寸的约束能力,本文在空间域引入双狭缝干涉整形。扩束后的飞秒激光通过中心间距为 1.6 mm、狭缝宽度为 0.6 mm 的双狭缝后,被分割为两束相干子光束,并在物镜焦平面附近重新叠加形成稳定的干涉调制光场,使入射光场在横向上具有更强的能量局域性和更陡峭的有效阈值边界,从而有利于降低纳米槽形成过程中对随机散射中心的依赖^[26-27]。双狭缝整形后,两束相干光在焦平面形成的干涉增强区相当于为后续的近场反馈过程提供了一个外部确定的能量模板,使纳米槽的起始位置不再完全由随机缺陷决定,而是受到预设干涉场与材料局域响应的共同约束。

为探究双狭缝空间干涉整形对纳米槽宽度的调控效果,固定单脉冲能量为 10 nJ,以 0.95~1.20 mm/s 的速度在 SiC 表面进行动态扫描刻写。在该参数窗口内,纳米槽槽宽随扫描速度升高而逐渐增大,表现出与 3.1 节单狭缝整形实验相似的变化规律。当扫描速度为 0.95 mm/s 时,可获得约 34 nm 的最小可控槽宽,随着扫描速度逐渐增加至 1.2 mm/s,槽宽逐渐增加至约 50 nm。

由于双狭缝整形的关键优势在于将横向扩散抑制进一步推进为干涉场主动约束,双狭缝整形后最小可控槽宽由单狭缝条件下的约 62 nm 进一步压缩至约 34 nm。基于 LIPSS 的纳米槽形成来源于外部干涉光场、表面散射反馈和多脉冲孵化效应之间的协同作用,双狭缝整形通过干涉场约束效应在扫描速度调控的基础上进一步增强能量沉积位置的确定性,并对纳米槽横向尺寸形成更强的空间约束。双狭缝整形通过提高初始能量沉积位置的确定性,降低了纳米槽成形对随机表面缺陷的敏感性,可拓宽深亚波长纳米槽的稳定加工窗口。这一优势,为后续制备对特征尺寸、边缘质量和重复性要求较高的功能纳米结构提供了工艺基础。

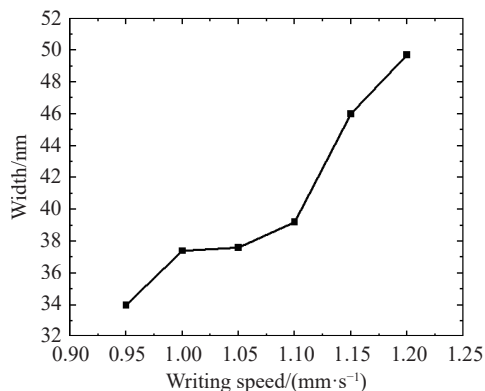


图4 双狭缝整形后,不同加工速度纳米槽宽度变化趋势

Fig. 4 Trends in nanogroove width with different processing speeds after double-slit shaping.

4 双狭缝-GHz 脉冲串协同调控下的纳米槽刻写特征

前述空间整形主要改善的是横向能量约束能

力以及能量沉积位置的确定性, 对于飞秒激光加工中瞬时高峰值功率诱发的剧烈相变、熔融物喷溅、重铸沉积以及颗粒污染等问题仍难以完全抑制。本文在双狭缝空间整形的基础上, 进一步引入 GHz 脉冲串, 通过时间域能量分步注入调控 SiC 表面的材料响应过程, 进一步实现纳米槽宽压缩和表面质量提升的协同优化。实验中基础重频仍保持 100 kHz, 子脉冲间隔设定为 400 ps。

4.1 静态定点辐照形貌演化

为探究 GHz 脉冲串模式对 SiC 表面形貌演化的影响, 本文采用静态定点辐照实验观察表面形貌随脉冲串个数演化行为。设定每个脉冲串由 5 个间隔 400 ps 的子脉冲构成, 脉冲串总能量 6 nJ。脉冲串个数为 4 时, SiC 表面已出现可分辨的初始损伤结构, 如图 5(a) 所示, 表现为两个沿着

垂直于激光偏振方向分布的对称微坑, 并在中心区域形成轻微连接。这表明少数脉冲串作用下, 表面散射场与入射光场之间已经产生偏振相关耦合, 两个微坑可以作为初始局域散射中心, 使后续子脉冲能量优先沉积于微坑及其连接区域, 诱导局部吸收增强和近场反馈。当脉冲串个数增加至 6 时, 初始双坑进一步发展为垂直于偏振方向延伸的椭圆损伤区域, 如图 5(b)。此时两个对称微坑连通并加深, 形成明显的槽状刻蚀特征, 同时损伤区域边缘出现轻微隆起和不规则重构, 表明局部材料已经发生了熔融、流动和再凝固。当脉冲串个数进一步累加至 10 个时, 中心槽状结构已经明显形成并沿着垂直于偏振方向进一步加深, 如图 5(c)。该阶段结构出现更清晰的多条槽状起伏, 同时外围重熔痕迹显著加重, 材料去除和热累积效应显著增强。

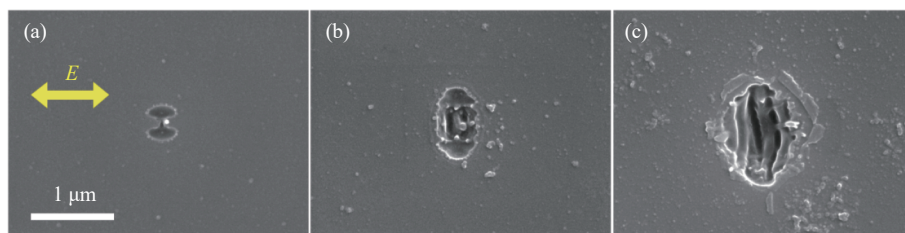


图 5 GHz 脉冲串能量 6 nJ, 不同脉冲串个数, 微结构的演化过程, 图(a)至图(c)脉冲串个数分别是 4、6、10

Fig. 5 Evolution of microstructures under GHz burst irradiation with a burst energy of 6 nJ. Panels (a)–(c) correspond to burst numbers: (a) 4, (b) 6, and (c) 10.

在能量注入过程中, 400 ps 间隔的子脉冲并非简单叠加能量, 而是在时间域上将飞秒激光的瞬时能量沉积分解为序列化作用过程, 使后续子脉冲能够作用于尚未完全恢复的改性区域, 从而增强近场反馈和局域吸收。与常规单脉冲瞬时强激发相比, GHz 脉冲串模式有利于降低单次能量沉积的剧烈程度, 同时保留多脉冲反馈对槽状结构形成的促进作用, 为后续动态扫描中获得连续、窄槽宽且表面质量更高的纳米槽提供了时间域调控基础。

4.2 动态扫描下的纳米槽制备与形貌分析

基于静态定点辐照中观察到的槽状结构演化过程, 进一步在动态扫描条件下研究双狭缝-GHz 脉冲串模式对纳米槽连续刻写质量的影响。由于 4.1 节静态定点辐照实验所得结构仍伴随明显的喷溅重熔痕迹, 本节在保持 400 ps 子脉冲间隔的基础上, 将每个脉冲串的子脉冲个数进一步优

化为 3 个。实验中, 狭缝前脉冲串能量为 0.49 μJ , 扫描速度范围保持 0.95~1.20 mm/s, 图 6 给出了不同扫描速度下纳米槽槽宽的变化规律, 以及扫描速度为 1 mm/s 时获得的典型 SEM 形貌。该图表明, 在双狭缝-GHz 脉冲串模式下, SiC 表面能够形成连续、清晰的深亚波长纳米槽结构, 并且同常规单脉冲模式下呈现出类似的槽宽随扫描速度增大而增大的趋势。当扫描速度为 0.95 mm/s 时, 纳米槽最小可控槽宽约为 24.5 nm; 随着扫描速度增加至 1.20 mm/s, 槽宽逐步增大至 43.8 nm。该结果与第 3.2 节中双狭缝常规单脉冲模式形成的约 34 nm 最小可控槽宽相比, 进一步将纳米槽尺寸压缩至 24.5 nm, 验证了在双狭缝干涉空间整形限定能量沉积位置的基础上, GHz 脉冲串通过时间域调控能够进一步压缩纳米槽槽宽。此外, 图 6 中表面形貌 SEM 图还显示, GHz 脉冲串模式下纳米槽周围的重熔堆积物和颗粒状附着明显

减少,表面更加洁净,边界也更加清晰。常规单脉冲作用时,能量在极短时间内集中沉积,容易引发局部高温高压、快速相变和熔融物喷射,冷却后在纳米槽两侧形成随机重铸层和颗粒污染。而本文所用 GHz 脉冲串将总能量分配至多个相隔 400 ps 的子脉冲中,使单个子脉冲的瞬时能量密度降低,从而减弱单次强激发导致的剧烈材料喷射。同时,400 ps 间隔的子脉冲间隔使前序子脉冲诱导的局部激发、温升和缺陷改性尚未消失,后续子脉冲可继续作用于该区域,相当于在时间尺度上延长弱再加热和退火过程,使材料以更受限的方式逐步移除,从而有效抑制熔融物喷射与再沉积过程,提高纳米槽边缘规整性与表面洁净度。

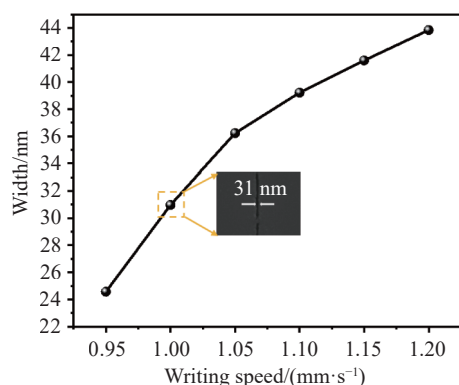


图6 GHz 脉冲串模式下,不同加工速度纳米槽宽度的变化规律

Fig. 6 Variation in nanogroove width with different processing speeds in GHz burst mode.

参考文献:

- [1] BERESNA M, KAZANSKY P G. Polarization diffraction grating produced by femtosecond laser nanostructuring in glass[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(10): 1662-1664.
- [2] BERESNA M, GECEVIČIUS M, KAZANSKY P G. Polarization sensitive elements fabricated by femtosecond laser nanostructuring of glass [Invited] [J]. *Optical Materials Express*, 2011, 1(4): 783-795.
- [3] DREVINSKAS R, KAZANSKY P G. High-performance geometric phase elements in silica glass[J]. *APL Photonics*, 2017, 2(6): 066104.
- [4] DREVINSKAS R, BERESNA M, ZHANG J Y, et al.. Ultrafast laser - induced metasurfaces for geometric phase manipulation[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(1): 1600575.
- [5] MINGAREEV I, HORN A. Time-resolved investigations of plasma and melt ejections in metals by pump-probe shadowgraphy[J]. *Applied Physics A*, 2008, 92(4): 917-920.
- [6] 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.
- [7] SIPE J E, YOUNG J F, PRESTON J S, et al.. Laser-induced periodic surface structure. I. Theory[J]. *Physical Review B*, 1983, 27(2): 1141-1154.
- [8] MIYAJI G, MIYAZAKI K. Origin of periodicity in nanostructuring on thin film surfaces ablated with femtosecond laser

5 结 论

本文针对飞秒激光在 4H-SiC 表面刻写纳米槽时存在的槽宽一致性差以及重熔堆积明显等问题,采用空间整形与时间整形相结合的时空协同调控策略。单狭缝通过空间光场重构降低横向能量扩散对纳米槽成形的影响,椭圆形聚焦光斑的外延部分能够起到预热和退火效果,提升纳米槽刻写的一致性;双狭缝整形引入外部干涉场,提高了能量沉积位置的确定性,进一步限制了纳米槽的宽度;GHz 脉冲串模式将能量注入过程分解为多步作用,降低了常规单脉冲模式下瞬时强激发引起的熔融物喷射和再沉积,双狭缝-GHz 脉冲串模式协同作用下最小可控槽宽达到 24.5 nm,同时显著减少周围重熔堆积物和颗粒附着。本研究结果表明,从空间滤波、干涉设计到时空协同的调控维度演进,是实现纳米结构精度递进式优化的关键。

本文的创新点在于调控策略的创新,利用了时空激光能量协同优化策略。在 SiC 表面纳米槽刻写中,应用单/双狭缝空间整形与脉冲串时域调控技术,实现了从能量空间分布到注入时序的全流程优化。该策略显著提升了纳米槽的形貌一致性、边缘质量与表面洁净度,体现了多维度激光调控在纳米加工中的关键作用。

- pulses[J]. *Optics Express*, 2008, 16(20): 16265-16271.
- [9] BONSE J, KRÜGER J, HÖHM S, *et al.*. Femtosecond laser-induced periodic surface structures[J]. *Journal of Laser Applications*, 2012, 24(4): 042006.
- [10] BIRNBAUM M. Semiconductor surface damage produced by ruby lasers[J]. *Journal of Applied Physics*, 1965, 36(11): 3688-3689.
- [11] SHIMOTSUMA Y, KAZANSKY P G, QIU J R, *et al.*. Self-organized nanogratings in glass irradiated by ultrashort light pulses[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91(24): 247405.
- [12] BHARDWAJ V R, SIMOVA E, RAJEEV P P, *et al.*. Optically produced arrays of planar nanostructures inside fused silica[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(5): 057404.
- [13] TAYLOR R, HNATOVSKY C, SIMOVA E. Applications of femtosecond laser induced self-organized planar nanocracks inside fused silica glass[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2008, 2(1-2): 26-46.
- [14] LI ZH Z, WANG L, FAN H, *et al.*. O-FIB: far-field-induced near-field breakdown for direct nanowriting in an atmospheric environment[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1): 41.
- [15] ZHANG G D, RUDENKO A, STOIAN R, *et al.*. Ultrafast laser high-aspect-ratio extreme nanostructuring of glass beyond $\lambda/100$ [J]. *Ultrafast Science*, 2025, 5: 0103.
- [16] CHANAL M, FEDOROV V Y, CHAMBONNEAU M, *et al.*. Crossing the threshold of ultrafast laser writing in bulk silicon[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 773.
- [17] WANG A D, DAS A, GROJO D. Ultrafast laser writing deep inside silicon with THz-repetition-rate trains of pulses[J]. *Research*, 2020, 2020: 8149764.
- [18] LIU M T, LU B L, LV J, *et al.*. Polarization-dependent anisotropy of LIPSSs' morphology evolution on a single-crystal silicon surface[J]. *Micromachines*, 2024, 15(2): 200.
- [19] GUO X, PENG Z Y, DING P B, *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.
- [20] REITANO R, BAERI P. Excimer laser induced thermal evaporation and ablation of silicon carbide[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1996, 116(1-4): 369-372.
- [21] ZHANG R, HUANG CH ZH, WANG J, *et al.*. Micromachining of 4H-SiC using femtosecond laser[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(15): 17775-17783.
- [22] OBARA G, SHIMIZU H, ENAMI T, *et al.*. Growth of high spatial frequency periodic ripple structures on SiC crystal surfaces irradiated with successive femtosecond laser pulses[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 26323-26334.
- [23] NAN L, MANCINI A, WEBER T, *et al.*. Angular dispersion suppression in deeply subwavelength phonon polariton bound states in the continuum metasurfaces[J]. *Nature Photonics*, 2025, 19(6): 615-623.
- [24] LIN ZH Y, LIU H G, JI L F, *et al.*. Realization of ~ 10 nm features on semiconductor surfaces via femtosecond laser direct patterning in far field and in ambient air[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(7): 4947-4952.
- [25] ZHANG Y CH, JIANG Q L, CAO K Q, *et al.*. Extremely regular periodic surface structures in a large area efficiently induced on silicon by temporally shaped femtosecond laser[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(5): 839-847.
- [26] LONG M Q, HAN R ZH, CAO K Q, *et al.*. High-quality diffractive optical elements on sapphire efficiently processed using shaped femtosecond laser[J]. *Photonics Research*, 2026, 14(4): 1299-1313.
- [27] LI K, HAN R ZH, SUO M Q, *et al.*. High quality nanogratings far beyond diffraction limits on silicon efficiently fabricated using femtosecond laser dual-beam interference direct writing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 181: 111505.

作者简介:



高 晨(2001—), 女, 陕西咸阳人, 西北工业大学硕士研究生, 主要从事飞秒激光微纳加工技术等方面的研究。
E-mail: gaochen716@mail.nwpu.edu.cn



程光华(1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事超短脉冲激光技术, 超快激光与物质相互作用、飞秒激光微纳加工技术等方面的科学研究。
E-mail: guanghuacheng@nwpu.edu.cn