

引用格式: LU Xizhao, CHEN Jialin, WEN Qiuling, et al. Short-pulse Laser-induced Plasma Micro-etching of High-temperature and High Pressure Single Crystal Diamond[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(6):0650114

卢希钊,陈嘉林,温秋玲,等.短脉冲红外激光诱导等离子体微刻蚀单晶高温高压金刚石[J].光子学报,2021,50(6):0650114

# 短脉冲红外激光诱导等离子体微刻蚀单晶高温 高压金刚石

卢希钊<sup>1</sup>,陈嘉林<sup>2</sup>,温秋玲<sup>2</sup>,陆静<sup>2</sup>,姜峰<sup>2</sup>

(1 华侨大学 机电及自动化学院,福建 厦门 361021)

(2 华侨大学 制造工程研究院,福建 厦门 361021)

**摘要:**采用短脉冲激光诱导等离子体辅助加工技术加工金刚石微结构,研究短脉冲红外激光的光强、脉宽、重复频率、靶材与金刚石基片之间的距离等加工参数对金刚石的加工线宽、槽深以及加工效果的影响。当用脉冲宽度大于4 ns的激光作用在方向良好的单晶金刚石上时,光热作用明显,诱导产生金属等离子团的能量密度达到一定阈值且复合短脉冲激光能量作用下,单晶金刚石表层温度迅速上升至600°C以上,此时金刚石表层产生了刻蚀微结构;当用脉冲宽度小于4 ns的激光轰击靶材表面时,短脉冲激光轰击靶材诱导金属等离子团,可实现背面溅射相关金属靶材,当等离子体密度达到微刻蚀阈值时也可实现金刚石背部刻蚀以及石墨化。短脉冲红外激光的脉宽、重复频率决定了沉积/刻蚀加工效果。本文研究表明短脉冲激光诱导等离子体辅助加工技术是一种新型可靠的金刚石微结构加工工艺。

**关键词:**单晶金刚石;激光诱导等离子体;短脉冲红外激光;铜靶;石墨化

中图分类号:O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215006.0650114

## Short-pulse Laser-induced Plasma Micro-etching of High-temperature and High Pressure Single Crystal Diamond

LU Xizhao<sup>1</sup>, CHEN Jialin<sup>2</sup>, WEN Qiuling<sup>2</sup>, LU Jing<sup>2</sup>, JIANG Feng<sup>2</sup>

(1 College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China)

(2 Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China)

**Abstract:** A short-pulse (<200 ns) infrared (1 064 nm) Laser Induced Plasma Assisted Ablation (LIPAA) is considered as a micro-processing technology to ablate a single crystal diamond. The mechanism of different infrared laser parameters which include laser fluence, pulse width, repetition rate etc. influence on the micro-structure linewidth and depth was explored as well as the distance between single crystal diamond and copper target. While the pulse width is greater than 4 ns, the laser interacted on the good crystal orientation of the single crystal diamond with the prominent photothermal effect, and the laser fluence of the induced metal plasma cluster reaches a certain threshold, combined with the short pulse laser energy action, the surface temperature of the single crystal diamond rises rapidly to 600°C and above. At this time, the diamond surface layer has an etched micro-structure. When the laser with a pulse width of less than 4 ns bombards the surface of the target, the short-pulse laser bombards the target to induce metal plasma clusters. At this time, back sputtering of related metal targets and back etching and graphitization can also be achieved. The metal deposition and groove profiles are impacted on the pulse width and

基金项目:国家自然科学基金(No.51835004),福建省自然科学面上基金(No.2019J01059)

第一作者:卢希钊(1976—),男,讲师,博士,主要研究方向为硬脆材料激光加工技术。Email: luxizhao@hqu.edu.cn

通讯作者:姜峰(1981—),男,教授,博士,主要研究方向机械加工技术,特种精密加工。Email: jiangfeng@hqu.edu.cn

收稿日期:2021-04-19;录用日期:2021-05-21

<http://www.photon.ac.cn>

repetition rate of infrared laser. The experimental results prove that LIPAA is a new and reliable diamond micro-structure processing technology.

**Key words:** Single crystal diamond; Laser induced plasma; Short pulse infrared laser; Copper target; Graphitization

**OCIS Codes:** 140.3460; 190.4400; 140.3440; 190.7110; 140.3390

## 0 引言

单晶金刚石(Single Crystal Diamond, SCD)被认为是目前已知自然界中硬度最高(Mohs Hardness 莫氏硬度 $\approx 10$ )、热导率高( $\approx 2\ 200\ \text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )、透明度高、化学特性稳定的下一代良好半导体基底材料,透明性良好的单晶金刚石同时拥有良好的机械力学性能和导热性,这使得金刚石在精密加工制造领域如微铣削,磨削刀具<sup>[1]</sup>、新一代金刚石半导体<sup>[2]</sup>的应用得到关注。人们利用金刚石材料制作一系列高性能器件来提升整体效益,在航空航天、机械、电子以及信息等具有非常广阔的应用前景。

单晶金刚石的热性能、硬度高以及各向异性,使得对单晶金刚石材料的加工非常困难,传统的机械加工方法如切割、抛光等难以实现对金刚石的精密加工<sup>[3]</sup>。机械抛光加工效率极低,而且会引起裂纹和划痕等损伤<sup>[4]</sup>。如何提高金刚石微纳加工的几何形貌精度<sup>[5]</sup>、高光洁度<sup>[6]</sup>、高表面完整度<sup>[7-8]</sup>,如何获得高精度和低损伤的金刚石元件已经成为金刚石研究领域中的关键问题之一。

目前在金刚石微结构制造领域中,主要利用飞秒激光<sup>[9-11]</sup>以及水导激光<sup>[12]</sup>进行直写加工,但是利用超短脉冲飞秒激光加工金刚石成本太高,且其在深度方向上加工金刚石力所不逮,而脉冲激光加工金刚石热影响区过大,由此也亟需研究单晶金刚石面对光电复合作用效果,以探索更合适的金刚石微结构新型加工技术。

短脉冲激光诱导等离子体辅助加工技术(Laser Induced Plasma Assisted Ablation, LIPAA)作为一种光电(等离子体轰击与短脉冲红外激光)复合作用透明晶体的加工方式已经实现大宽深比蓝宝石的加工<sup>[11]</sup>、Dammann Grating 光栅<sup>[12]</sup>、微流体槽沟道<sup>[13]</sup>等光电设备及LED制造领域的透明工件表面微结构及精细制造。金刚石优良的透明性,硬度较高是选择激光诱导等离子体辅助加工的基本理论依据,利用LIPAA技术加工金刚石微结构,能有效解决短脉冲红外激光器对于金刚石的直写效果差的问题,避免加工产生的大量石墨化层,是一种可靠的新型金刚石加工工艺。LIPAA是成本低廉的高效微纳加工技术,参与加工的激光普适性较高,加工速度更快、具有更高潜在精度、更好表面完整性、更小暗损伤<sup>[14-16]</sup>、更低表面粗糙度、更小热影响区<sup>[17-19]</sup>,在微纳制造领域应用前景巨大,是一种新型可靠的透明硬脆材料加工工艺<sup>[20-21]</sup>。本文采用激光诱导等离子体辅助加工技术,利用1 064 nm红外纳秒激光器输出的激光诱导铜等离子体对单晶金刚石进行微结构刻蚀,通过改变加工参数探讨其加工表面微纳结构槽宽、槽深等尺寸及光学性能的变化。

## 1 原理

短脉冲红外激光器发射红外激光光束穿过金刚石基板,辐射聚焦在平行放置底部金属靶材(铜)的上表面,靶材吸收大量的激光能量,使得在靶材表面一层很薄的区域面产生升温汽化,汽化后的粒子会继续吸收激光能量,当激光能量大于金属铜靶材料击穿阈值时,金属靶材被击穿而产生“雪崩式”电离从而形成高温高压的等离子体,等离子体继续吸收激光能量而发生局部爆炸,此时金刚石局部受热作用而产生石墨化相变,此时在该部位存在激光、等离子体以及石墨和金刚石材料的复合作用,从而在金刚石基板下表面实现离子沉积或者材料去除,其加工原理及实验装置示意图如图1所示。图1(a)是LIPAA原理,图1(b)为单晶金刚石LIPAA加工实验装置图。不同脉宽的红外激光穿过金刚石的效率不同,诱导产生的等离子体工作时,如图1(c)所示,0.6~4 ns激光作用时形成沉积、刻蚀效果,大于4 ns以上的激光,对金刚石穿透性变差,容易在金刚石表面发生正面刻蚀和背面金属沉积,如图1(d)所示。

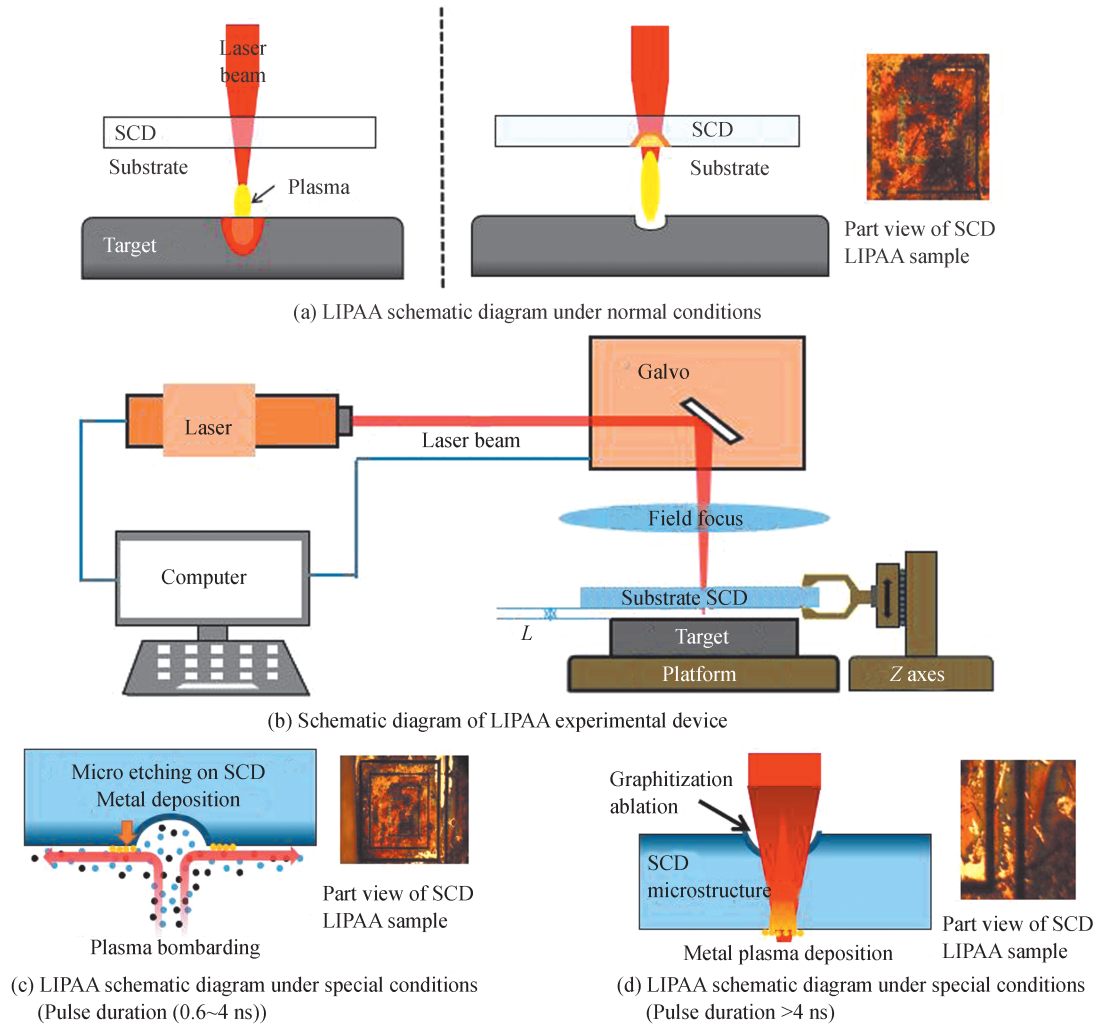


图1 LIPAA原理及实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of LIPAA principle and experimental device

## 2 实验装置及实验设计

### 2.1 实验加工激光光源

激光诱导等离子体辅助加工技术可采用不同的波长和不同脉冲宽度激光,这种选择取决于微结构加工尺寸、加工对象基板材料、靶材等。激光诱导等离子加工技术中所用激光光源为金属直接吸收率较高的1 064 nm纳秒级激光。该短脉冲红外激光适合用于加工金属,并产生大量的金属等离子体,当激光焦点聚焦在靶材上,由于红外激光对金刚石具有高穿透率,金刚石很难直接吸收并产生直写加工效果。本文实验中,为探讨不同脉冲宽度对加工效果的影响,使用了三台短脉冲红外激光器进行比较,如表1所示,脉冲宽度均涵盖了1~5 ns脉宽的加工激光。其中,一台激光器单位脉冲能量为13 mJ,激光重复频率为60~300 kHz。加工实验装置的激光光源平均功率为18 W~20 W的纳秒级光纤激光器(IPG MARK5系列型号:YLPR-0.3-A1-60-18),JPT杰普特以及武汉安扬的激光器可作为红外光源。

表1 短脉冲红外激光诱导等离子体单晶金刚石刻蚀实验光源

Table 1 Optics source of short-pulse infrared laser induced plasma micro-etching single crystal diamond

Laser type	Pulse duration/ns	Repetition rate/kHz	Diameters/ $\mu\text{m}$	Power/W	Producer
YLPR-0.3-A1-60-18	1~10	60~300	20	18	IPG
YDFLP-20-M1+-S	1~200	45~1 600	20	20	JPT opto-electronics
PicoYL-40-600-20	0.6~4	100~5 000	20	18	Yangtze Soton Laser

## 2.2 实验样品

由于激光及其诱导产生的等离子体方向性明确,加工对象选择光电作用方向向量清晰的高温高压单晶金刚石(黄河旋风 Gemesis 公司, HTHP Diamonds, 尺寸为  $2.8\text{ mm} \times 2.8\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ )。由于铜原子原子团尺寸较大,且激光作用稳定,所以选择抛光纯铜(粗糙度  $R_a$  为  $10\text{ nm}$  的紫铜)作为目标金属靶。

## 2.3 三维加工实验平台搭建

实验中,搭建激光诱导等离子加工实验平台如图 1(b)所示,调整待加工透明基板与目标金属靶间的距离,其中三维调整平台 Z 轴的工作范围为  $0\sim 5\text{ mm}$ ,金刚石样品固定在三维调整平台(如图 2(b))上进行位置调节。短脉宽红外激光诱导铜靶等离子蚀刻后,高温高压金刚石实验样品如图 2(a)所示,可见该样品上既有靶材金属的沉积,也有刻蚀的凹槽形态。金刚石拥有良好的热传导率,但当作用激光脉宽过长且扫描作用时间较长时,金刚石加工温度过高,实验表明脉冲宽度大于  $5\text{ ns}$  的红外激光连续加工易产生超过金刚石热容量的热量,在实验中易石墨化,且在超过热容量的交叉热应力作用下易损毁,如图 2(c)所示。加工加热实际如图 2(e)所示,激光加工后约  $4\sim 10\text{ s}$ ,导热至金刚石通体。实验中,在一定范围内( $0.05\text{ mm}\sim 2\text{ mm}$ )调整透明基板到目标金属靶的距离(搭建平台可实现每步增加  $0.01\text{ mm}$ )。金刚石微结构利用内置能谱仪、台式扫描电镜的显微镜所得如图 2(d)所示,采用三维视频显微镜 KH8700、扫描探针显微拉曼光谱仪等测量仪器进行形貌、产物等测量。

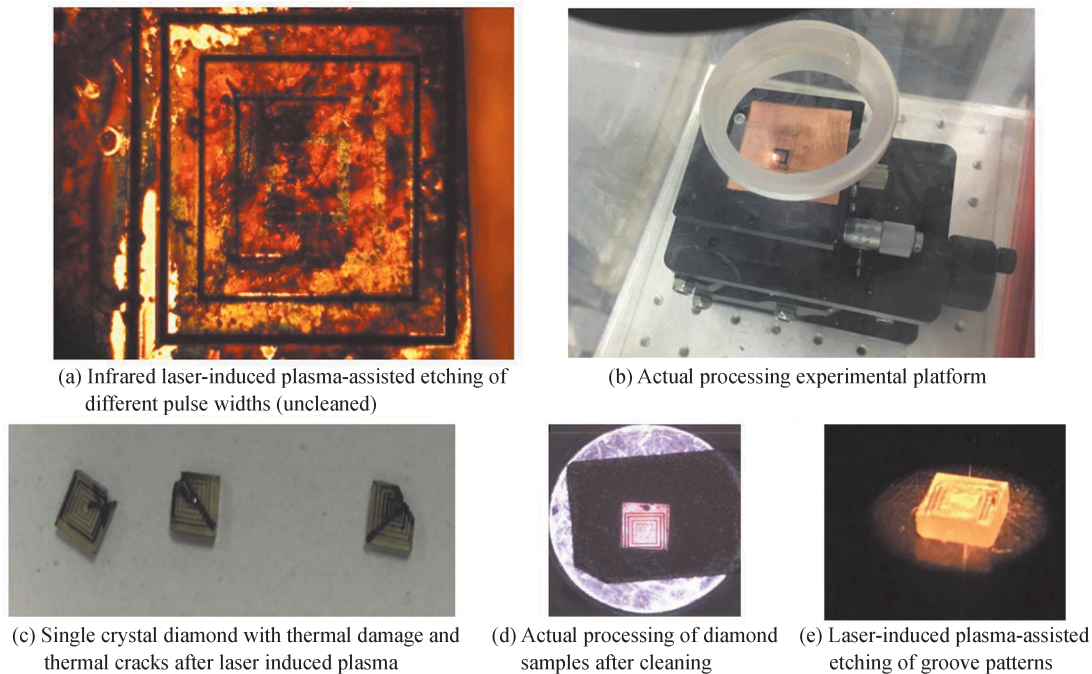


图2 LIPAA 加工后金刚石样品

Fig.2 Diamond sample diagram after LIPAA processing

## 3 结果和实验分析

### 3.1 表面温度场测量

利用 InfraTec 公司的 ImageIR5325 高速红外热像仪远距离聚焦于金刚石表面,实际测量装置如图 3(c)所示,从图 3(a)、(b)可以看出温度在金刚石表面瞬间上升至  $656^\circ\text{C}$ (不考虑该测量时的时滞效应,以及测量组中稳定出现石墨),由此可认为激光诱导等离子体和红外激光复合作用可使加工温度瞬间达到石墨化温度。

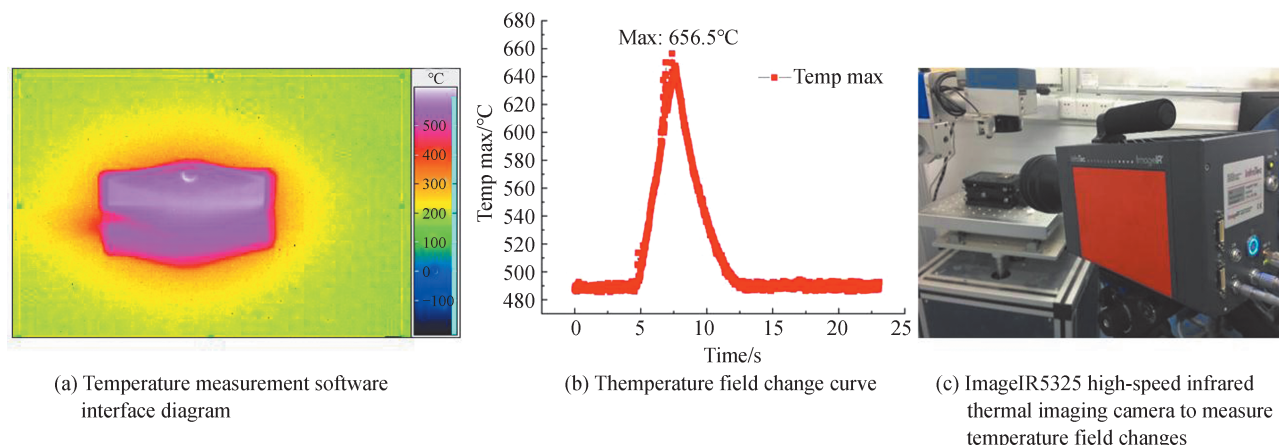


图3 测量激光诱导等离子体辅助刻蚀金刚石表面温度场  
Fig.3 Measuring the temperature field of laser-induced plasma-assisted etching of diamond surface

### 3.2 表面形貌分析

对短脉冲(2 ns)红外激光加工单晶金刚石进行分析。通过激光扫描速度和扫描路径长度计算发现,当脉冲激光持续扫描时间为4 s时,金刚石表面沉积层中断,开始出现微结构,检测内表层的内壁附着产物,发现微结构表面除了金刚石物质外,还附着有一层石墨层,如图4所示。激光诱导等离子体辅助加工金刚石微结构是通过金刚石-石墨化相变的形式,并通过去除石墨化的方法实现材料去除的。虽然材料去除方式是通过去除石墨形式去除的,但是在工业生产中要避免石墨化的发生,因为石墨较难去除且影响表面结构,因此为了获得较好的微结构表面形貌,应该合理控制加工激光参数,使石墨化程度控制在合理的范围内。

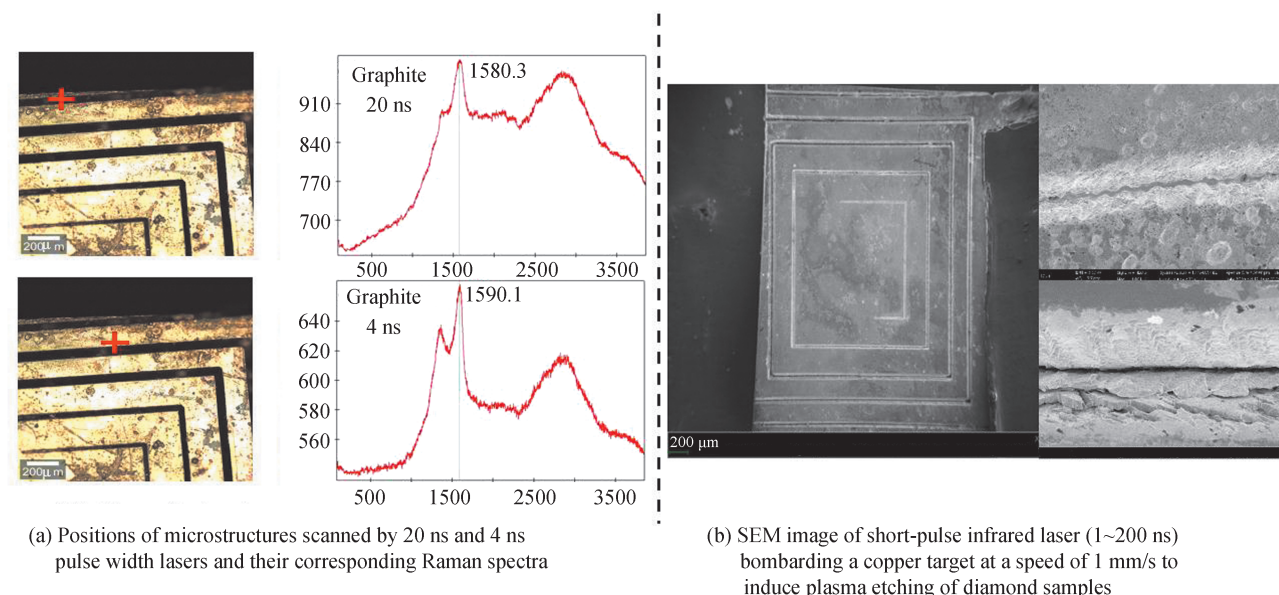


图4 金刚石微结构表面SEM形貌以及表面产物  
Fig.4 SEM topography and surface products of diamond microstructure

金刚石加工的石墨化不仅受激光扫描速度和加工次数的影响,而且受激光能量密度的影响。实验发现,LIPAA微结构的线宽取决于激光扫描速度,另一方面,深度主要受激光通量和激光重复频率的影响。

### 3.3 加工参数的影响规律

三种光源中,以5 ns脉冲宽度,90 kHz重复频率红外激光作为诱导激光源,以1 mm/s速度扫描距离金刚石基板为1 150 μm的铜靶,产生等离子体轰击金刚石,产生的单晶高温高压金刚石微结构的几何参数如图5所示。

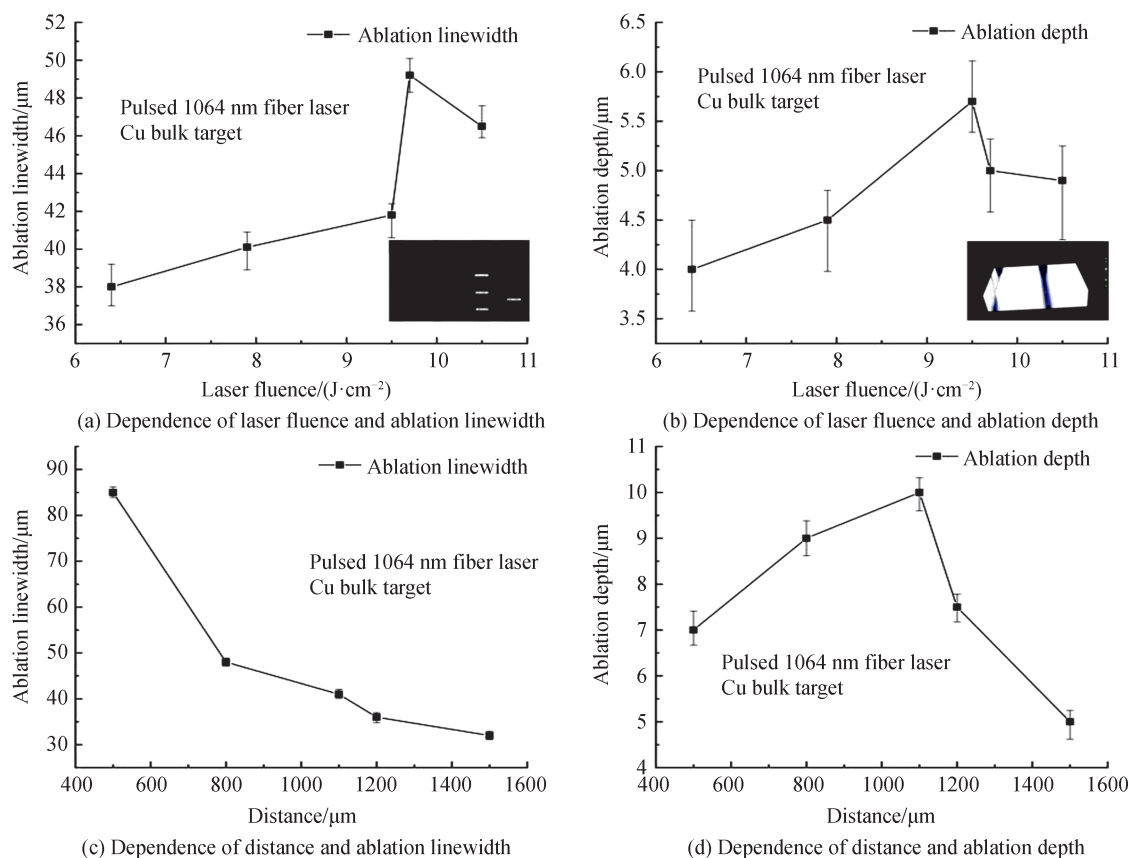


图5 低重复频率, 5 ns 激光诱导铜靶所产生的能量密度、靶基距离与微结构烧蚀线宽、深度的关系

Fig.5 The relationship between processing parameters and microstructure size during laser-induced copper target processing with low repetition frequency and 5 ns pulse width

### 1) 激光能量密度对激光诱导等离子体辅助加工的影响

激光能量密度的选择需要非常谨慎, 这样才可以尽可能地控制金刚石在加工过程中的石墨化。激光能量密度与激光其余参数的关系为

$$W=(P/R)/s \quad (1)$$

式中,  $W$  是激光能量密度,  $P$  是激光平均功率,  $R$  是激光重复频率,  $s$  是激光焦斑面积。

如图 5(a)、(b) 所示, 金刚石微结构烧蚀线宽和烧蚀深度在一定范围内随着激光能量密度的增加而线性增加。当激光能量密度到达  $9.8 \text{ J}/\text{cm}^2$  时, 烧蚀线宽随着激光能量密度的增加而减少; 当激光能量密度到达  $9.5 \text{ J}/\text{cm}^2$  时, 烧蚀深度随着激光能量密度的增加而减少。因此根据实验现象选取最优激光能量密度为  $9.5 \text{ J}/\text{cm}^2$ , 能达到较快的刻蚀效率。

### 2) 激光扫描速度对激光诱导等离子体辅助加工的影响

用扫描电镜观察激光诱导等离子加工后单晶金刚石的微结构, 如图 2(c) 所示, 在前几块单晶金刚石样品中发现大量石墨以及热应力引起的崩边和缺陷, 在后面的单晶金刚石样品加工中, 通过调整诱导等离子体的激光参数进行加工, 发现控制激光扫描速度可以控制金刚石石墨化程度。进一步研究发现, 微裂纹是由激光诱导等离子体辅助加工中实验设计不合理产生的, 通过合理设计加工顺序, 可以减小热应力集中甚至避免交叉热应力, 有效避免单晶金刚石在纳秒级激光诱导等离子体辅助加工时产生的缺陷及引起的微裂纹。

加工中, 激光扫描速度关系到激光作用目标金属靶的时间, 决定产生等离子体的数量。如果激光扫描速度太慢, 激光脉冲重叠过多, 容易产生热效应。故在选择激光扫描速度时, 为减轻金刚石的石墨化, 不宜选择过小的扫描速度。同时, 也不宜选择过大的扫描速度, 使得加工目标金属靶的时候产生的等离子体不能连续地加工。为了得到高质量的连续线, 两个相邻激光的位移速度必须小于激光光斑直径  $\varphi$ 。因此, 激光

束扫描速度  $v$  必须小于重复速率  $f$  和激光光斑直径  $\varphi$  的乘积,即  $v < f\varphi$ , 因此应当选择合适的扫描速度使得加工的线宽和加工质量相互匹配。

加工激光的光子作用于两个原子之间,原子间距离是重要因素。由于纳秒激光是单光子作用于金属表面,直接写入金属原子团间,当一个铜离子作用不足以直接使得金刚石直接剥离团聚时,而是通过第二个光子、第三个光子等等进入相互碰撞的同时,产生并增加热能,该能量集聚大到能够剥离金刚石之间的共价结合键能的时候,对金刚石共价键的破坏作用过程完成了。该作用激发铜离子并沉淀形成薄膜,沉积的金属斑点为重叠的金属铜原子等离子体团。金属斑点重叠率  $x$  使用式(2)计算。

$$x = (\varphi - v) / \varphi \times 100\% = (1 - v / f\varphi) \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $v$  是激光扫描速度,  $f$  为脉冲重复率,  $\varphi$  是目标金属靶表面的加工激光光斑直径大小。如果  $v > f\varphi$  则  $x < 0$ , 没有金属斑点重叠,此时 LIPAA 不能制造出金属薄膜。如果  $v = f\varphi$  则  $x = 0$ , 金属斑点连接并排不重叠,此时激光加工无法得到低电阻率的金属薄膜。只有当  $v < f\varphi$  且  $x > 0$ , 可以有高品质的金属斑点重叠。

### 3) 靶基距离对激光诱导等离子体辅助加工的影响

除了探究激光加工参数的影响,还研究了靶基距离对微结构的影响。

在上述系列实验中,透明基板与目标金属靶间的距离在激光诱导等离子体辅助加工中起到非常重要的作用。如图 5(c) 及 (d) 所示,在高于最低刻蚀靶基距离阈值的情况下,一定范围内,微结构烧蚀深度随着靶基距离增加而增加,到达一定距离时,烧蚀深度反而随着靶基距离的增加而减少,而烧蚀线宽随着靶基距离的持续增加而持续减少。当靶基距离增加时,等离子体会膨胀,导致点边界变大,等离子体的能量损失也增大,等离子体团分散开来,动能不足以刻蚀金刚石,从而在玻璃表面上形成一个更大范围的金属沉积。

### 4) 激光脉宽与重复频率对激光诱导等离子体辅助加工的影响

在激光直写加工中,短脉冲纳秒激光诱导等离子体辅助加工单晶金刚石,由于激光作用金刚石时间较长 ( $\gg ps$ ),其能带约为 5.45 eV, 1 064 nm 波长激光以较低的光子能量加工单晶金刚石,其单光子能量不足以实现断键的冷加工,因此在激光单独作用下,很难对金刚石造成直写加工,除非实现热量累积导致石墨化相变去除材料。当采用超短脉冲即皮秒、飞秒激光进行加工时,其单光子能量较高,足以实现金刚石断键的冷加工,因此在激光单独作用下,可以实现金刚石直写加工。

在 LIPAA 加工中,由图 2(a) 可见加工后未清洗的金刚石形态,呈现不同的金属沉积、微结构蚀刻加工效果。利用不同激光器实验证明,在短脉冲宽度 (Pulse Duration  $\geq 1$  ns) 的红外激光作用下,短脉冲激光诱导等离子体作用金刚石以产生热效应去除材料为主,伴随石墨化过程产生,且石墨化过程中形态随着脉宽不同发生差异,如图 1(c); 当短脉冲宽度 (Pulse Duration  $< 1$  ns) 更短时,尽管产生诱导等离子体,但是由于轰击铜靶产生的等离子体能量不足以刻蚀金刚石,沉积在金刚石后表面,表现为金刚石表层铜沉积效果。当短脉冲宽度 (Pulse Duration  $> 4$  ns) 较长时,容易在金刚石正表面发生正面刻蚀和背面发生金属沉积的现象,如图 1(d)。

激光重复频率为 LIPAA 过程中的关键参数之一。图 6 展示了金属铜靶与透明基板间距离为 200  $\mu m$ , 短脉宽,单脉冲能量较小的红外激光轰击铜靶,并产生高重叠率的金属等离子体进行深度加工。其中,图 6(b) 中,2 ns, 重复频率 850 kHz 的红外激光以 1 mm/s 的扫描速度  $v$  刻蚀的微结构的宽度为 66.23  $\mu m$ , 深度为 62  $\mu m$ ; 图 6(c) 中,4 ns, 重复频率 500 kHz, 对应的红外激光加工的微槽宽度为 70.02  $\mu m$ , 深度为 57  $\mu m$ ; 图 6(d) 中,20 ns, 重复频率 115 kHz, 对应的红外激光加工的微槽宽度为 54.08  $\mu m$ , 深度为 50  $\mu m$ 。

由图 6 分析可见,微槽深度随着脉冲宽度增加,重复频率的减少而减少,符合该辅助加工工艺的基本刻蚀规律,即 LIPAA 微结构的线宽取决于激光扫描速度,另一方面,深度主要受激光通量和激光重复频率的影响。

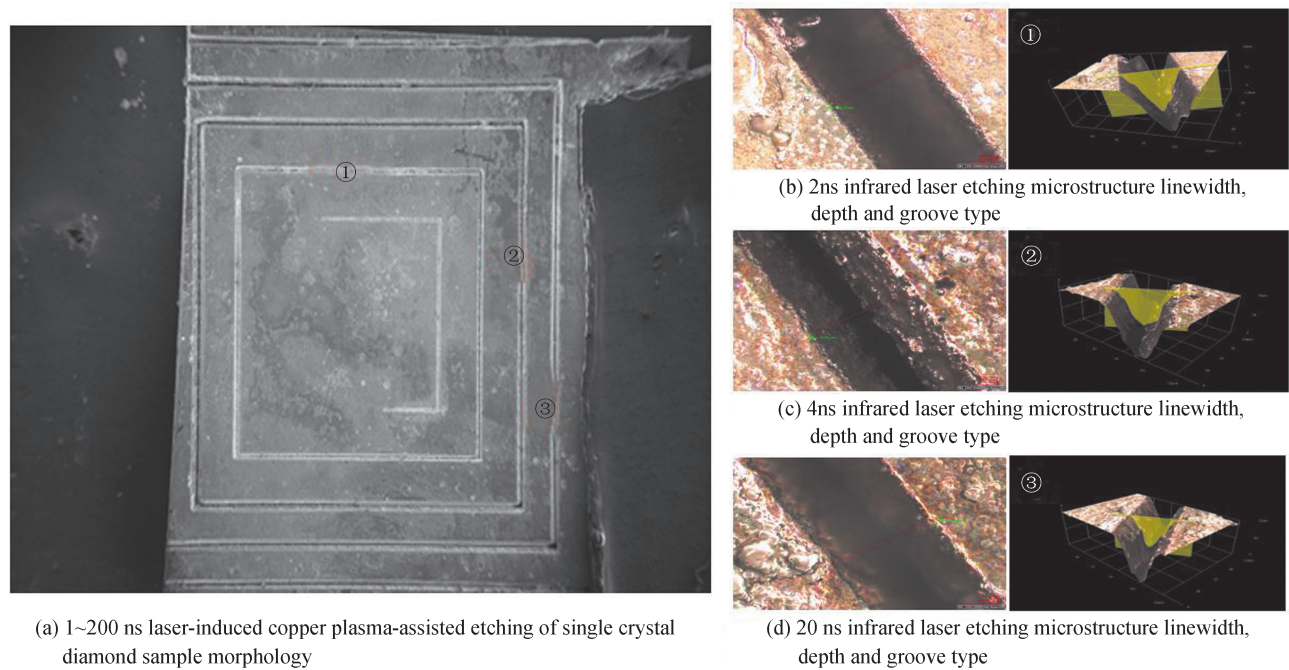


图6 扫描电镜以及三维视频光学显微镜观测不同脉宽激光诱导等离子体刻蚀的槽形态

Fig.6 Scanning electron microscope and three-dimensional video optical microscope to observe the groove morphology of laser-induced plasma etching with different pulse widths

## 4 结论

利用短脉冲 1 064 nm 红外激光器对高温高压单晶金刚石进行激光诱导等离子体刻蚀加工微结构,发现金刚石微结构的材料去除方式是通过激光、等离子体、金刚石材料复合作用下金刚石-石墨化相变方式去除的。改变加工参数,发现激光诱导等离子体加工金刚石微结构工艺的影响因素包括激光扫描速度、激光能量密度、激光加工次数、激光脉宽、激光重复频率以及靶基距离等,微结构的尺寸以及加工质量都随着这些因素的变化而变化。

### 参考文献

- [1] ZHAO Yu, LIU Huagang, YU Tianbiao, et al. Fabrication of high hardness microarray diamond tools by femtosecond laser ablation[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 140: 107014.
- [2] MA Shuangyan, WANG Enze, LU Weiyuan, et al. Study on graphitization of diamond in copper/diamond composite[J]. Material & Heat Treatment, 2007, 36(20): 24-26.  
马双彦,王恩泽,鲁伟员,等.金刚石/铜复合材料中金刚石石墨化的研究[J].热加工工艺, 2007, 36(20): 24-26.
- [3] GUO Xiaoguang, ZHAI Changheng, JIN Zhuji, et al. The study of diamond graphitization under the action of iron-based catalyst[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015(17): 162-168.  
郭晓光,翟昌恒,金洙吉,等.铁基作用下的金刚石石墨化研究[J].机械工程学报, 2015(17): 162-168.
- [4] LI Rongbin, DU Xue, ZHANG Zhihui, et al. Ultra precision machining of optical microstructure[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2003, 1(1): 57-61.  
李荣彬,杜雪,张志辉,等.光学微结构的超精密加工技术[J].纳米技术与精密工程, 2003, 1(1): 57-61.
- [5] FENG Keming, CAO Shuosheng, LEI Lisheng. Research on high-speed and high-finish grinding technology[J]. New Technology New Process, 1989, (3): 21-23.  
冯克明,曹硕生,雷力生.高速高光洁度磨削的工艺研究[J].新技术新工艺, 1989, (3): 21-23.
- [6] YAMAMURA K, TAKIGUCHI T, UEDA M, et al. High-integrity finishing of 4H-SiC (0001) by plasma-assisted polishing[J]. Advanced Materials Research, 2010, 126-128: 423-428.
- [7] LIU Zhanqiang, YANG Dong, WANG Bing. High performance cutting and high integrity machining technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, (7): 34-43.  
刘战强,杨东,王兵.高效切削与高完整性加工技术[J].航空制造技术, 2016, (7): 34-43.
- [8] SU Yongsheng, LI Liang, HE Ning, et al. Experiment of laser machining of micro-structures on the surface of polycrystalline diamond[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(8): 0803004.



- 苏永生,李亮,何宁,等.聚晶金刚石表面微结构的激光加工实验[J].中国激光,2014,41(8):0803004.
- [9] DONG Zhiwei. Processing of diamond applying femtosecond and nanosecond laser pulses [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015,44(3): 893-896.
- 董志伟.利用飞秒激光和纳秒激光脉冲加工金刚石[J].红外与激光工程,2015,44(3):893-896.
- [10] LU Xizhao, JIANG Feng, LEI Tingping, et al. Laser-induced-plasma-assisted ablation and metallization on C-plane single crystal sapphire[J]. Micromachines, 2017, 8(10): 0800300.
- [11] LIU Huagang, LI Yang, LIN Wenxiong, et al. High-aspect-ratio crack-free microstructures fabrication on sapphire by femtosecond laser ablation[J]. Optics and Laser Technology, 2020, (132): 106472.
- [12] LI Yang, LIU Huagang, HONG Minghui. High-quality sapphire microprocessing by dual-beam laser induced plasma assisted ablation[J]. Optics Express, 2020, 28(5): 6242-6250.
- [13] XU Shujia, LIU Bin, PAN Chengfeng, et al. Ultrafast fabrication of microchannels and graphite patterns on glass by nanosecond laser induced plasma-assisted ablation (LIPAA) for electrofluidic devices[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 247: 204-213.
- [14] HONG Minghui, SUGIOKA Koji, WU DongJiang, et al. Laser induced plasma assisted ablation for glass micro fabrication [C]. SPIE, 2001, 4595: 138-146.
- [15] LEE J, JANG J, TAE K. Scribing blue LED wafer using laser-induced plasma-assisted ablation with a q-switched Nd: YAG laser[C]. Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing, 2000, 237: 237-244.
- [16] ZHANG Ying, LIU Zhiguo, GUO Zhuanyun, et al. A high-sensitivity fiber grating pressure sensor and its pressure sensing characteristics[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(1): 89-91.
- 张颖,刘志国,郭转运,等.高灵敏度光纤光栅压力传感器及其压力传感特性的研究[J].光学学报,2002,22(1):89-91.
- [17] HONG Minghui, SUGIOKA Koji, LU Yongfeng, et al. Laser micro fabrication of transparent hard materials and signal diagnostics[J]. Applied Surface Science, 2002,186: 556-561.
- [18] HONG Minghui, SUGIOKA Koji, LU Yongfeng, et al. Optical diagnostics in laser induced plasma-assisted ablation of fused quartz[C]. SPIE, 2000, 4088:359-362.
- [19] XIE Xiaozhu, ZHOU Caixia, WEI Xin, et al. Laser machining of transparent brittle materials: from machining strategies to applications[J]. Opto-Electronic Advances, 2019, 2(1):180017.
- [20] HARUNA K, MAETA H, OHASHI K, et al. Thermal expansion coefficient of synthetic diamond single crystal at low temperatures[J]. Journal of Applied Physics, 1992,31: 2527-2529.
- [21] PAN Chengfeng, CHEN Keyun, LIU Bing, et al. Fabrication of micro-texture channel on glass by laser-induced plasma-assisted ablation and chemical corrosion for microfluidic devices[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 240: 314.