

# 长脉冲激光辐照强场阴极材料碳化硅释气特性研究

陈威 吕燕 王程明 吴鼎 丁洪斌\*  
(大连理工大学 物理学院 大连 116000)

## The Outgassing Characteristics of Silicon Carbide as an Intense-Field Cathode Material Under Long-Pulse Laser Irradiation

CHEN Wei, LYU Yan, WANG Chengming, WU Ding, DING Hongbin\*  
(School of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116000, China)

**Abstract** In this work, a Nd:YAG laser operating at a wavelength of 1064 nm with a pulse width of 750  $\mu\text{s}$  was utilized to simulate pulsed thermal shock on silicon carbide (SiC) material, aiming to investigate its outgassing characteristics under ultra-high vacuum conditions (pressure of  $8.5 \times 10^{-7}$  Pa). The study primarily delved into the influence of laser energy, laser spot size, and the number of laser pulses on SiC gas release characteristics. Throughout the laser pulse thermal shock process, chamber pressure variations and outgassing gas composition ( $\text{N}_2^+$ ) changes were monitored by using a full-range vacuum gauge and a quadrupole mass spectrometer (QMS). The results showed that gas molecules (particles) began to release when the laser energy density was increased to  $6.46 \text{ J/cm}^2$ , with a noticeable increase when the laser energy density further increased. Additionally, it was found that an appropriate laser energy density could effectively induce gas release from the SiC material surface, while excessively high energy density could lead to material damage, with the experimentally determined damage threshold of SiC being  $22.49 \text{ J/cm}^2$ . Moreover, the laser spot size on the SiC surface was adjusted by moving the distance from the laser to the SiC surface with a fixed laser energy of 139 mJ to investigate the gas releasing characteristics. The maximum number of particles released per unit area is at a beam diameter of 0.68 mm, corresponding to a laser energy density of  $38.04 \text{ J/cm}^2$ , which was not the maximum laser energy density. This indicates that the number of particles released per unit area of SiC is not only related to the laser energy density but also to the size of the laser irradiation area. Furthermore, under a laser energy density of  $25.76 \text{ J/cm}^2$ , an increase in the number of pulses was found to incrementally elevate the gas release quantity of SiC. However, the quantity of particles released per pulse and the depth of ablation pits induced by each pulse demonstrated a gradual decline with increasing pulse count. This may be due to the decrease in material surface roughness caused by repeated laser irradiation, thereby reducing the material's absorption efficiency of laser energy.

**Keywords** Laser thermal shock, Outgassing, SiC, High-power microwave source

**摘要** 文章在超高真空( $8.5 \times 10^{-7}$  Pa)条件下采用波长 1064 nm, 脉宽 750  $\mu\text{s}$  的激光模拟脉冲热冲击, 对碳化硅(SiC)材料的释气特性进行了实验研究。主要探讨了激光能量、激光光斑大小和激光脉冲数对 SiC 释气特性的影响。通过全量程真空规和四极杆质谱仪(QMS)监测了激光脉冲热冲击过程中真空腔室内气压和质谱检测的气体成分( $\text{N}_2^+$ )的变化。研究表明, 增加激光能量密度为  $6.46 \text{ J/cm}^2$  时, SiC 表面开始有气体分子(粒子)释放; 随着激光能量密度的进一步增加, 释气量也进一步增加。当激光能量密度达到  $22.49 \text{ J/cm}^2$  时, SiC 表面释放的气体分子(粒子)数明显增多。研究还表明, 适当的激光能量密度可以有效诱导 SiC 材料表面的气体释放, 但过高的能量密度可能导致材料损伤, 实验测定的 SiC 损伤阈值为  $22.49 \text{ J/cm}^2$ 。在激

收稿日期: 2024-04-08

基金项目: 高功率微波技术重点实验室基金项目 (HPM2210); 国家自然科学基金项目 (12375208)

\* 联系人: E-mail: [hding@dlut.edu.cn](mailto:hding@dlut.edu.cn)

光能量为 139 mJ 的条件下,通过调节聚焦透镜焦点到 SiC 表面的距离改变光斑直径,单位面积释放的粒子数在光斑直径为 0.68 mm 处达到最大值,此时的激光能量密度为 38.04 J/cm<sup>2</sup>,并不是最大的激光能量密度。这说明 SiC 单位面积释放的粒子数不仅与激光能量密度相关,还与激光辐照区域面积大小相关。在激光能量密度为 25.76 J/cm<sup>2</sup> 的条件下,随着脉冲数的增加, SiC 的释气量逐渐增加,但每次脉冲引起的粒子释放量和烧蚀坑深度随脉冲数逐渐减小。其原因可能是由于激光重复辐照导致材料表面粗糙度降低,从而降低材料对激光能量的吸收效率。

**关键词** 激光热冲击 释气 碳化硅 高功率微波源

中图分类号: TB742

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202404002

强流脉冲电子束源是高功率微波装置的核心部件之一,主要用于产生强流相对论电子束<sup>[1-3]</sup>。随着高功率微波源在军事领域的广泛应用,对微波源的需求逐渐从提高输出功率向提高输出能量发展。在高功率微波源设备运行过程中,阴极表面的发射微点在预击穿电流的作用下,温度升高,释放其表面吸附气体以及内部滞留的气体,并在其附近加剧等离子体的形成,进而产生脉冲缩短现象,导致微波脉冲提前终止<sup>[4-6]</sup>。因此,选取低放气率阴极材料是确保高功率微波源长期稳定运行的关键<sup>[7]</sup>。SiC 纳米材料是一种宽带隙半导体材料,以其具有纳米级发射尖端、大长径比、高熔点、高导热率、高击穿电压、低脱气率及优良的热、化学稳定性等优点,成为优选的强流脉冲电子束及高功率微波源的阴极材料<sup>[8-10]</sup>。本研究在高真空环境中采用长脉冲激光模拟热冲击对 SiC 的局部受热释气特性进行研究,评估不同激光参数对 SiC 表面的损伤。研究方法依托于近年来本课题组发展的激光诱导解吸附-四极杆质谱(LID-QMS)<sup>[11-13]</sup>和激光诱导烧蚀-四极杆质谱(LIA-QMS)技术<sup>[14-17]</sup>。这两种技术已经被成功应用于离线检测托卡马克装置面向等离子体壁材料表面氦、氢滞留的诊断研究。激光诱导解吸附和激光诱导烧蚀四极杆质谱实验装置的工作原理就是通过脉冲激光局部加热材料使吸附在材料中的气体成分释放,并通过 QMS 来监测被释放的物种成分。课题组成员 Lyu Yan 等<sup>[12]</sup>通过使用 LID-QMS 技术对 W 基底上的聚变燃料 D 滞留进行了定量研究。Oelmann J 等<sup>[14]</sup>使用 LIA-QMS 技术,对多层膜太阳能电池中的氢进行了检测分析。在本论文中,通过改变激光参数(激光能量、激光光斑尺寸及激光脉冲数)对强场阴极材料 SiC 样品进行辐照,使用精密真空规监测激光脉冲所引起的真空腔室内气压的变化(可换算被释放的总粒子数)通过四极杆质谱仪(QMS),监测了激光脉冲热冲击的过程中真空腔室内气压和气体成分的变化。因为强场电极材料的

真空释气主要成份为 N<sub>2</sub> (比 O<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 高约 3 个量级),所以在本论文中使用 QMS 重点研究了 N<sub>2</sub> 离子流强度随激光参数改变的变化趋势。为了进一步分析激光烧蚀对 SiC 释气行为的具体影响,通过激光共聚焦显微镜测量了烧蚀区域的具体尺寸和深度。

## 1 实验

图 1 为实验装置示意图,脉冲解吸附激光是 Nd:YAG 激光器(Beamtech Nimma 650),激光波长为 1064 nm,激光脉宽为 750 μs,激光光束的空间轮廓近似于高斯分布,时间轮廓近似于矩阵分布。激光通过位于真空室赤道面的石英窗口耦合到真空室,石英窗口距离样品表面约为 20 cm,样品被置于如图 1 所示的样品架上。为了避免激光能量的波动,实验是在最大平均输出激光能量 600±10 mJ 的基础上,通过调整由半波片和偏振立方体组成的能量衰减器来改变激光能量。激光能量是由激光能量计(Newport842-PE)测量得到。使用焦距为 60 cm 的石英平凸透镜对激光进行聚焦,并通过移动此平凸透镜改变激光辐照在样品表面的光斑大小。通过调节样品架与安装在二维精密移动镜架上的镜面,实现激光束在样品表面的扫描。由于激光束与样品表面法线的夹角小于±1.5°,扫描过程中激光光斑大小的变化可以忽略不计。在脉冲激光辐照后,使用精密真空规(PKR251, Pfeiffer)记录真空腔室内气压的变化,使用精密四极杆质谱仪(HAL3F-RC, HIDEN)检测激光脉冲诱导释放的气体的成分。样品表面形貌的变化通过使用激光共聚焦显微镜(MICROMESURE 2; STIL. SA, France)进行测量表征。本研究采用 20×20×1 mm 的 SiC 薄片,在进行正式实验之前,将 SiC 薄片放入无水乙醇中使用超声波清洗 50 min 以去除表面的污渍。为了避免酒精所携带的碳氢化合物污染真空腔室,使用去离子水超声清洗 10 min,并将其烘干,放入腔室,准备实验。

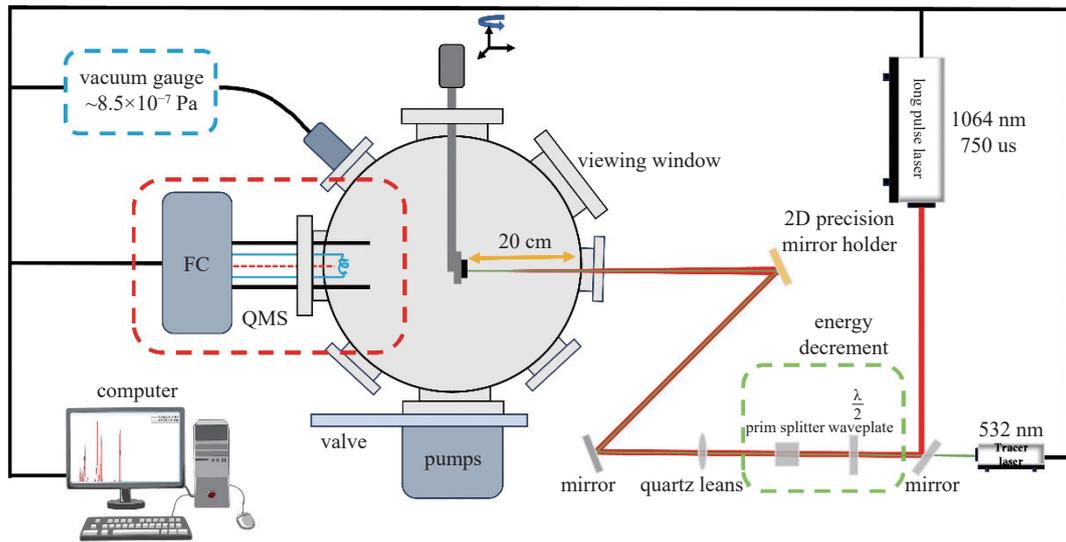


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

## 2 结果与讨论

### 2.1 背景气压及激光脉冲气压

如图 2 所展示, 为了更准确地测量由激光脉冲诱导的 SiC 释气量变化, 本研究的所有实验均在静态真空条件下进行。具体操作为, 在进行激光脉冲辐照前, 先关闭连接到真空泵的闸板阀门。此时, 气压信号会呈线性上升, 这一现象主要是由于真空室内壁的脱气所导致的。图 2 中的蓝色曲线是将 SiC 样品放入测量室后, 在未进行激光辐照的情况下, 关闭抽气阀门之后气压的线性上升情况。通过对这一过程进行线性拟合, 得到斜率约为  $1.12 \times 10^{-7} \text{ Pa/s}$ 。考虑到实验室真空计的精度, 本研究真空计的最小气压检测信号估计为  $2.0 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ 。这意味着, 如果激光脉冲前后气压变化小于  $2.0 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ , 则认为没有气体被释放。而激光辐照后观察到气压骤然增加, 如图 3 红色曲线, 随后由于真空室的脱气而再次线性上升。由激光辐照而产生的实际信号通过激光辐照后的气压信号上升值减去背景信号的上升值来获得, 在进行一次激光辐照后打开真空腔室的闸板阀门, 使背景压力恢复至与上次测量相同 ( $p_{BG} = 8.5 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ ) 后, 再次关闭阀门, 重复上次操作。为使数据更加准确, 每组实验重复 3 次。

假设在整个实验过程中, 腔室内的气体处于理想状态, 通过使用式 (1) 可算得由于单次脉冲而引起气压变化导致腔室内物质的量的增长, 再通过式 (2) 可得到 SiC 表面脱附的总粒子数, 由式 (3) 可算得由一次激光脉冲导致 SiC 表面单位面积释放的粒子数。

$$\Delta n = \frac{\Delta p \cdot V}{R \cdot T} \quad (1)$$

$$\Delta N = \Delta n \cdot N_a \quad (2)$$

$$\Delta N_b = \frac{\Delta N}{A} \quad (3)$$

其中,  $\Delta p$  是脉冲激光引起的腔室内净气压增加量, 单位为 Pa;  $\Delta n$  是脉冲激光引起的 SiC 表面脱附的总气体的物质的量, 单位为 mol;  $V$  是腔室的体积, 本论文中  $V = 0.019441 \text{ m}^3$ ;  $R$  是理想气体常数, 其值为  $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $T$  表示气体的温度, 本论文  $T = 300 \text{ K}$ ;  $N_a$  为阿伏伽德罗常数, 其值为  $N_a = 6.02214076 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ;  $\Delta N$  是单次激光释放的总粒子数;  $\Delta N_b$  为单位面积释放的粒子数, 单位为  $\text{cm}^{-2}$ ;  $A$  为激光辐照在 SiC 表面的光斑面积, 单位为  $\text{cm}^2$ 。

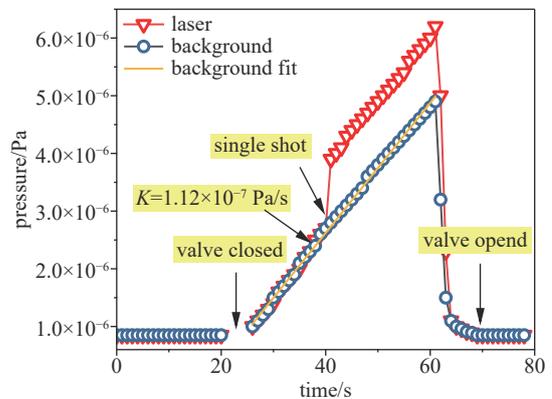


图2 气压随时间变化

Fig. 2 Pressure variation with time

### 2.2 激光能量对 SiC 脱附信号的影响

图 3 展示了在基压  $p_{BG} = 8.5 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ , 恒定光斑

直径  $d = 1 \text{ mm}$  的条件下, 通过使用不同激光能量辐照 SiC 表面, 进而改变辐照在表面的激光能量密度。实验测量的单位面积释放的粒子数随激光能量密度的变化如图 3(a) 所示, 从图中可以看到, 当激光能量密度在低于约  $6.46 \text{ J/cm}^2$  时, 真空规未检测到任何气压信号, 随着激光能量密度的增大, SiC 表面开始有粒子被释放, 但其增长速度缓慢, 此时所检测到的粒子数信号是由激光解吸 SiC 表面所吸附的气体信号。当激光能量密度约为  $22.49 \text{ J/cm}^2$  时, 其释放的粒子数明显增多, 此时单位面积释放的粒子数约为  $1.43 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ 。通过激光共聚焦显微镜对样品表面进行扫描, 发现 SiC 表面在激光能量密度大于等于  $22.49 \text{ J/cm}^2$  时开始出现轻微损伤(定义该值为 SiC 材料的激光烧蚀/损伤阈值)。实验表明, SiC 材料的激光烧蚀斑的形状是不均匀的, 如图 3(b) 所示, 且损伤的程度随激光能量密度的增加而加剧, 相应的单位面积释放粒子数也随之增强。当出现 SiC 表面损伤之后, 所测得的释气量数值不仅反映了 SiC 在体相中滞留的气体和表面吸附的气体的释放, 还包括由于表面烧蚀而产生的团簇粒子的贡献。图 3(c) 给出了采用四级杆质谱仪记录的 SiC 表面单位面积产生的  $m/q = 28 \text{ amu/e}$  离子 ( $\text{N}_2^+$ ) 流与激光能量密度的关系。与图 3(a) SiC 表面单位面积释放的粒子数相比, 这两者的变化趋势大致相似。当激光能量高于  $29.36 \text{ J/cm}^2$  时, 单位面积产生  $m/q = 28 \text{ amu/e}$  离子 ( $\text{N}_2^+$ ) 流的变化趋势开始减缓。这表明在较高的激光能量密度下, 可能有更多种类的气体分子被释放, 与单纯的  $m/q = 28 \text{ amu/e}$  离子 ( $\text{N}_2^+$ ) 释放相比, 这些其他气体的释放对总体气压升高的影响更为显著。以上结果说明, 适当的激光能量密度可以有效诱导 SiC 表面的气体释放, 但过高的能量密度可能导致材料损伤。

### 2.3 激光光斑尺寸对 SiC 脱附信号的影响

在固定的激光能量条件下(能量约为  $139 \text{ mJ}$ ), 通过移动聚焦透镜的位置来改变焦点到样品表面的距离 ( $\Delta z$ ), 变化的范围是从  $-12 \text{ cm}$  到  $0 \text{ cm}$ , 研究其对 SiC 单位面积释放粒子数及质谱信号强度的影响。 $\Delta z$  的改变直接影响激光辐照在样品表面的光斑尺寸, 进而影响作用于 SiC 表面的激光能量密度。图 4(a) 为在给定激光能量条件下, SiC 表面的光斑尺寸和激光能量密度随  $\Delta z$  变化的规律,  $\Delta z$  在  $-12 \text{ cm} \sim 0 \text{ cm}$  之间变化时, 光斑直径  $d$  的变化范围为

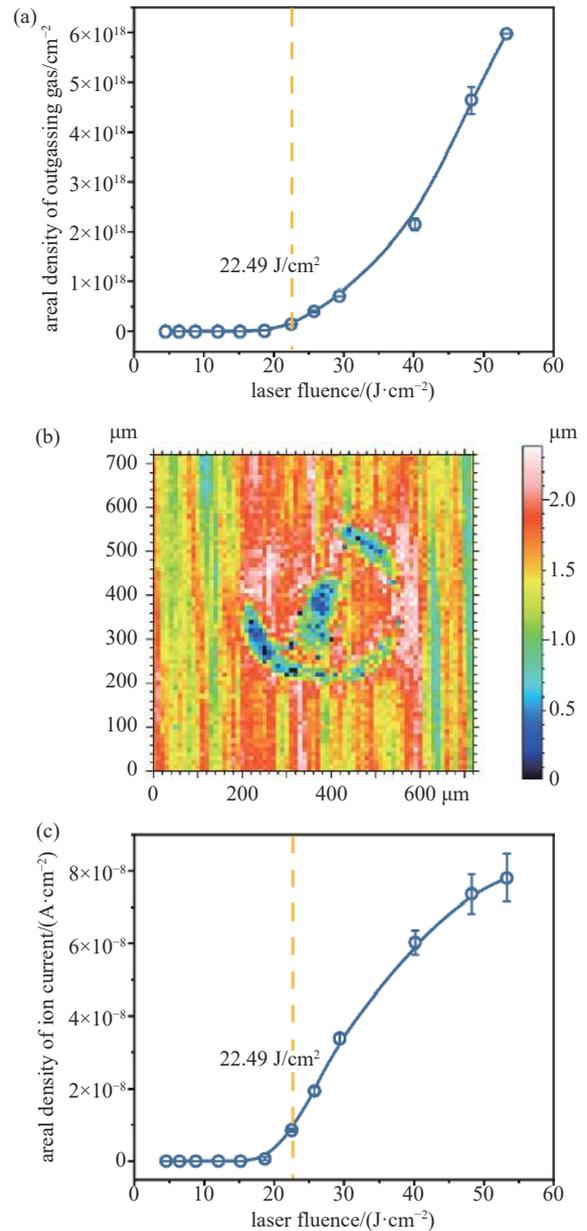


图3 SiC 材料在固定光斑尺寸为  $1 \text{ mm}$  时。(a) 单位面积释放粒子数随激光能量密度的变化趋势, (b) 在激光能量密度为  $22.49 \text{ J/cm}^2$  时 SiC 表面烧蚀 2D 分布, (c) 单位面积产生  $m/q = 28 \text{ amu/e}$  离子 ( $\text{N}_2^+$ ) 流随激光能量密度的变化趋势

Fig. 3 When the fixed spot size of laser in SiC material is  $1 \text{ mm}$ . (a) Areal density of outgassing gas as a function of laser fluence, (b) 2D distribution of SiC surface ablation at a laser fluence of  $22.49 \text{ J/cm}^2$ , (c) areal density of ion current with  $m/q = 28 \text{ amu/e}$  ( $\text{N}_2^+$ ) as a function of laser fluence

$1.495 \text{ mm} \sim 0.637 \text{ mm}$ , 激光能量密度从  $7.92 \text{ J/cm}^2$  增加到  $43.61 \text{ J/cm}^2$ 。如图 4(b) 给出了 SiC 表面单位面积释放的气体粒子数随激光光斑尺寸的变化

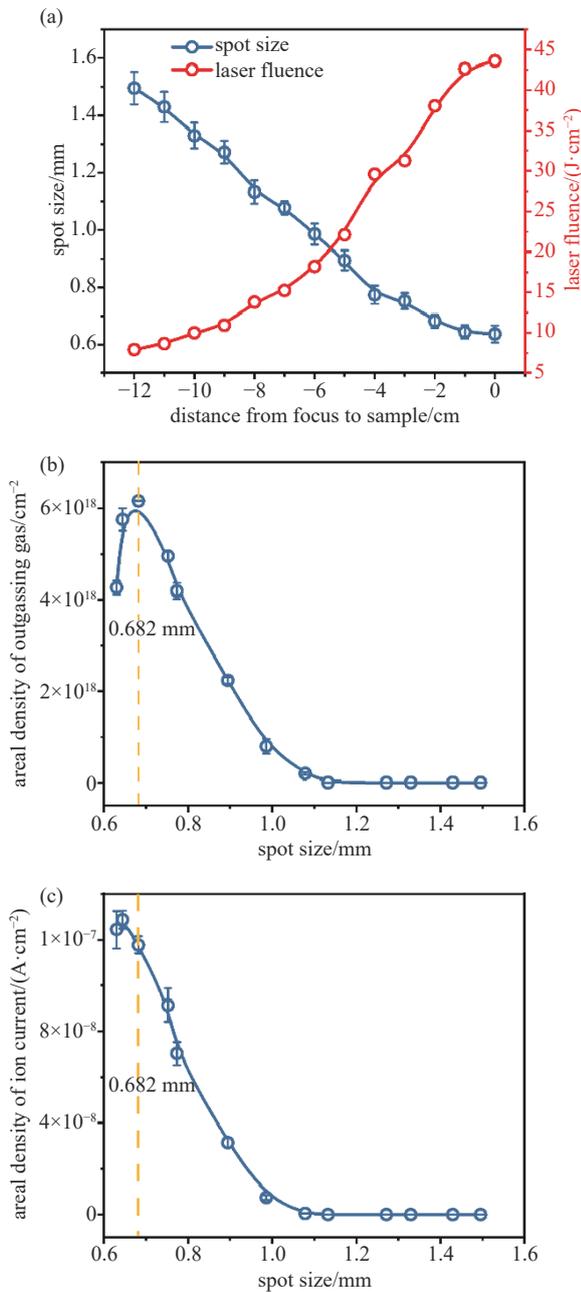


图4 SiC 材料在激光能量为 139 mJ 时。(a) 光斑尺寸和激光能量密度随焦点到 SiC 表面距离的变化趋势, (b) SiC 表面单位面积释放粒子数随光斑尺寸的变化趋势, (c) 单位面积产生  $m/q=28$  amu/e 离子 ( $N_2^+$ ) 流随光斑尺寸的变化趋势

Fig. 4 When the fixed energy of laser in SiC material is 139 mJ. (a) Trends in spot size and laser fluence with changes in the distance from the focus to the SiC surface, (b) areal density of outgassing gas as a function of spot size, (c) areal density of ion current with  $m/q = 28$  amu/e ( $N_2^+$ ) as a function of spot size

趋势, 从图中可以明显观察到, 随着光斑尺寸的增大, SiC 表面单位面积释放的粒子数先增大后减小,

在光斑直径为 0.682 mm 时达到最大值为  $6.16 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ 。而后随着光斑尺寸的进一步增大, 单位面积释放的粒子数开始下降。这表明由激光辐照释放的单位面积粒子数并不是在光斑尺寸最小处 (对应激光能量密度最大值), 而是存在一个特定的光斑尺寸  $d = 0.682 \text{ mm}$ , 此时激光能量密度为  $38.04 \text{ J/cm}^2$ 。值得注意的是, 单位面积产生  $m/q = 28 \text{ amu/e}$  离子 ( $N_2^+$ ) 流的变化趋势与单位面积释放的粒子数有所不同, 如图 4 (c) 所示, 在光斑直径  $d = 0.645 \text{ mm}$  时, 激光能量密度为  $42.63 \text{ J/cm}^2$  时释放的粒子数达到最大值。

### 2.4 激光脉冲次数对 SiC 脱附信号的影响

在此研究中, 作者对 SiC 在激光能量密度为  $25.76 \text{ J/cm}^2$  的条件下施加不同数量的激光脉冲, 探讨了连续热冲击 (即激光脉冲数) 对其粒子数释放量和质谱信号强度的影响, 考虑到在研究中每一次激光脉冲都会导致烧蚀坑大小的变化, 故仅计算了释放的总粒子数。实验中脉冲间隔设定为 1 分钟, 以确保能够准确捕捉每一次激光脉冲后的信号变化。结果如图 5 所示, 随着脉冲数的增加, 烧蚀深度、释放的总粒子数和  $m/q = 28 \text{ amu/e}$  离子 ( $N_2^+$ ) 流都在增加, 且增加速率有减缓趋势。具体如表 1 所示, 该表展示了在不同脉冲区间里平均单次脉冲所引起的烧蚀坑深度和释放的粒子数的变化情况, 可以看到第一个脉冲所引起的烧蚀深度以及粒子数的增加是最强的, 随着激光脉冲数的增加, 每次脉冲所引起的深度变化和释放粒子数都在减弱。这种减弱可能是因为在非连续激光脉冲中, 烧蚀深度和粒子释放量的增加并非仅由激光能量的直接累积所导致, 而是与材料表面形态的演变紧密相关。随着激光的重复辐照, 辐照区域的材料会反复融化和冷却, 进而形成了新的表面形貌, 降低表面的粗糙度, 影响了激光能量的吸收效率。另外, 初期激光脉冲可能已经移除了大量吸附能 ( $E_a$ ) 较低的气体物种分子, 使得在后续脉冲中释放的粒子数减少。

通过改变激光的参数, 大致估算了在不同条件下单位面积释放的粒子数和释放的总粒子数。在该实验中, 为了尽可能准确地测量 SiC 的释放粒子数, 将总释放粒子数分为了两部分, 即 SiC 自身放气及腔室的本底释气和漏气引起的粒子数增多与样品受到激光脉冲加热后的释放粒子数<sup>[18]</sup>。而对于 SiC 来说, 其释放粒子数与材料微结构及制备处理

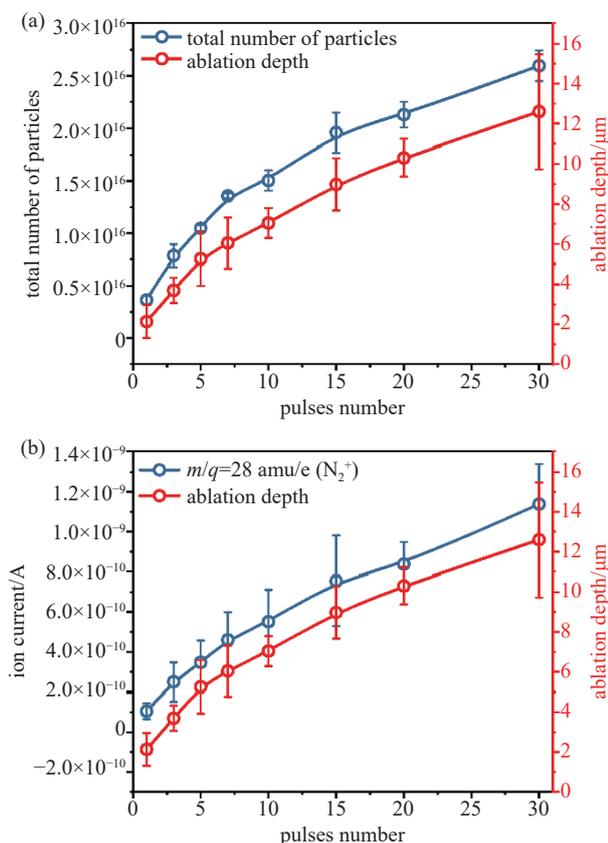


图5 SiC材料在激光能量密度为 $25.76 \text{ J/cm}^2$ 时。(a) SiC释放总粒子数与烧蚀深度随脉冲个数的变化趋势, (b)  $m/q = 28 \text{ amu/e}$ 离子( $\text{N}_2^+$ )流与烧蚀深度随脉冲个数的变化趋势

Fig. 5 When the fixed laser fluence in SiC material is  $25.76 \text{ J/cm}^2$ . (a) Total number of particles as a function of pules number, (b) ion current with  $m/q = 28 \text{ amu/e}$  ( $\text{N}_2^+$ ) as a function of pules number

表1 不同脉冲区间下平均单次激光脉冲对SiC深度变化及粒子释放数

Tab. 1 Average depth change and number of particles released from SiC per laser pulse across different pulse intervals

脉冲区间	平均单次脉冲深度变化/ $\mu\text{m}$	平均单次脉冲释放粒子数
1	2.14	$3.65 \times 10^{15}$
2-3	0.781	$2.14 \times 10^{15}$
4-5	0.776	$1.30 \times 10^{15}$
6-9	0.396	$1.21 \times 10^{15}$
21-30	0.230	$4.70 \times 10^{14}$

工艺紧密相关。还有一些其他外界因素也会影响释放粒子数的多少,比如SiC样品安装时,暴露大气中,也将引起粒子数的增高;不同的表面粗糙度也会影响材料对激光能量的吸收,进而影响所测材料

的释放粒子数。对于同一块样品,表面吸附的物质(通常是水汽)与周围空间的压力成一定的比例<sup>[19]</sup>,因此在封闭的真空室中,当泵组向真空腔室外抽气时, SiC 吸附的水汽也会减少。而实验前的处理过程(比如烘烤和清洗)的差别,也会影响碳 SiC 所释放的粒子数特征。

### 3 结论

本文在超高真空( $8.5 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ )条件下,通过采用长脉冲激光辐照模拟热冲击的方式,研究了SiC在不同激光能量密度、不同激光光斑尺寸和不同脉冲数条件下的释气特性,研究表明,在不同激光能量密度条件下,在达到其释放粒子数的能量阈值约 $6.46 \text{ J/cm}^2$ 后,随着激光能量密度的增加, SiC 的表面单位面积脱附的粒子数也增加,当能量密度达到 $22.49 \text{ J/cm}^2$ 时,样品表面发生了轻微的损伤, SiC 单位面积脱附的粒子数迅速增加,约 $1.43 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ ,因此, SiC 烧蚀损伤阈值为 $22.49 \text{ J/cm}^2$ 。在不同激光光斑尺寸条件下,存在一个最优的光斑直径 $d = 0.68 \text{ mm}$ ,此时脉冲激光能量密度为 $38.04 \text{ J/cm}^2$ ,单位面积释放的粒子数约为 $6.16 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ 。当激光光斑直径为最小值 $d = 0.64 \text{ mm}$ 时,此时辐照在 SiC 表面的激光能量密度达到最大值 $43.60 \text{ J/cm}^2$ ,单位面积释放的粒子数约为 $4.36 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ 。在激光能量密度为 $25.76 \text{ J/cm}^2$ 下,对样品表面进行不同脉冲数的激光辐照,结果表明,随着脉冲数的增加,释放的粒子数逐渐增加,但单次脉冲引起的粒子释放和烧蚀深度逐渐减小,这可能是由于前面脉冲已经移除了大量吸附能( $E_a$ )较低的气体物种分子,后续脉冲释放的粒子为具有高吸附能的物种(深度滞留的气体),其数目较少,另外在多次激光辐照下,样品表面产生融化,粗糙度变小,影响了样品的激光的吸收效率,使得后续脉冲粒子释放效率下降。

### 参考文献

- [1] Schamiloglu E. High power microwave sources and applications; proceedings of the 2004 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (IEEE Cat No 04CH37535), F, 2004 [C]. IEEE
- [2] Xun T, Zhao Y, Yang H, et al. Developments of pulsed electron beam sources for high-power microwave applications[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 101351-101358
- [3] Xun T, Yang H W, Zhang J, et al. Development of high performance, high-current pulsed electron beam sour-

- ces[J]. *High power laser and particle beam*, 2020, 32(2): 7 (荀涛, 杨汉武, 张军, 等. 高性能强流脉冲电子束源关键技术研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32(2): 7 (in Chinese))
- [4] Agee F. Evolution of pulse shortening research in narrow band, high power microwave sources[J]. *IEEE transactions on plasma science*, 1998, 26(3): 235–245
- [5] Li S M, Li Y D, Liu Z. Particle-in-cell simulation of field breakdown in a relativistic backward wave oscillator[J]. *High power laser and particle beam*, 2017, 29(6): 16–19 (李姝敏, 李永东, 刘震. 相对论返波管中击穿现象粒子模拟 [J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29(6): 16–19 (in Chinese))
- [6] Zhang X, Xiao R, Chen C, et al. A method for improving power capability of relativistic backward wave oscillator[J]. *High power laser and particle beam*, 2011, 23(11): 3069–3072 (张晓微, 肖仁珍, 陈昌华, 等. 一种提高相对论返波管功率容量的方法 [J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(11): 3069–3072. (in chinese))
- [7] Krasik Y, Gleizer Z, Yarmolich D, et al. Characterization of the plasma on dielectric fiber (velvet) cathodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98(9): 093308
- [8] Jang C, Kim T, Lee S, et al. Low-resistance ohmic contacts to SiC nanowires and their applications to field-effect transistors[J]. *Nanotechnology*, 2008, 19(34): 345203
- [9] Xun T, Zhao X, Li G, et al. High-current, pulsed electron beam sources with SiC nanowire cathodes[J]. *Vacuum*, 2016, 125: 81–84
- [10] Wang L, Li C, Yang Y, et al. Large-scale growth of well-aligned SiC tower-like nanowire arrays and their field emission properties[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2015, 7(1): 526–533
- [11] Zlobinski M, Philipps V, Schweer B, et al. Laser induced desorption as tritium retention diagnostic method in ITER[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2011, 86(6-8): 1332–1335
- [12] Lyu Y, Li C, Wu D, et al. Characterization on deuterium retention in tungsten target using spatially resolved laser induced desorption-quadrupole mass spectroscopy[J]. *Physica Scripta*, 2021, 96(12): 124040
- [13] Yehia-Alexe S, Groza A, Serbanescu M, et al. Considerations on hydrogen isotopes release from thin films by laser induced ablation and laser induced desorption techniques[J]. *Spectrochimica Acta Part B-Atomic Spectroscopy*, 2023, 208: 106774
- [14] Oelmann J, Gierse N, Li C, et al. Depth-resolved sample composition analysis using laser-induced ablation-quadrupole mass spectrometry and laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2018, 144: 38–45
- [15] Oelmann J, Li C, Brezinsek S, et al. Depth resolved analysis of hydrogen in W7-X graphite components using laser-induced ablation-quadrupole mass spectrometry (LIA-QMS)[J]. *Nuclear Materials and Energy*, 2019, 18: 153–158
- [16] Zhao D, Yi R, Oelmann J, et al. Ex situ analysis of W7-X divertor plasma-facing components by picosecond laser diagnostics[J]. *Physica Scripta*, 2020(T171): 014018
- [17] Lyu Y, He Z, Wang X, et al. Characterization of helium retention in the inhomogeneous co-deposited layers using a long pulse laser induced ablation-quadrupole mass spectroscopy[J]. *Nuclear Materials and Energy*, 2022, 33: 101268
- [18] Li A, Fan Y, Qian B, et al. Outgassing rate analysis of a velvet cathode and a carbon fiber cathode[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(18): 185901
- [19] Shen Y, Zhang H, Xia L, et al. Vacuum outgassing behavior of carbon nanotube cathode with high-intensity pulsed electron emission[J]. *Plasma Science and Technology*, 2015, 17(2): 129–133