

文章编号: 0253-2239(2006)03-0467-4

## 飞秒激光的波长对 SiC 材料烧蚀的影响\*

陈洪新<sup>1</sup> 贾天卿<sup>2</sup> 黄 敏<sup>1</sup> 赵福利<sup>1</sup> 许宁生<sup>1\*\*</sup> 徐至展<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275  
<sup>2</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800)

**摘要:** 利用 10 倍的显微镜将近红外飞秒激光脉冲汇聚到宽带隙半导体材料 6H SiC 的前表面, 研究样品的烧蚀及诱导微细结构。用扫描电镜 (Scanning electron microscope, SEM) 及光学显微镜测量烧蚀斑。利用烧蚀面积与激光脉冲能量的关系确定 SiC 的烧蚀阈值。给出了 SiC 样品的烧蚀阈值与飞秒激光波长的依赖关系。实验结果表明, 可见光区随波长增加, 烧蚀阈值从 0.29 J/cm<sup>2</sup> 增加到 0.67 J/cm<sup>2</sup>; 而在近红外区, SiC 的烧蚀阈值为 0.70 J/cm<sup>2</sup> 左右, 基本上不随激光波长变化而改变。结合计算结果, 可以认为在飞秒激光烧蚀 SiC 的过程中, 在近红外区, 光致电离和碰撞电离均起到了重要的作用; 而在可见光区, 光致电离的作用相对大一些。

**关键词:** 超快光学; 烧蚀阈值; 微加工; 飞秒激光; 光致电离; 碰撞电离

中图分类号: O439 文献标识码: A

## Visible-Infrared Femtosecond Laser-Induced Optical Breakdown of 6H SiC

Chen Hongxin<sup>1</sup> Jia Tianqing<sup>2</sup> Huang Min<sup>1</sup> Zhao Fuli<sup>1</sup> Xu Ningsheng<sup>1</sup> Xu Zhizhan<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Zhongshan University, Guangzhou 510275  
<sup>2</sup> State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract:** To study the damage mechanism and micromachining of 6H SiC, the femtosecond (fs) laser pulse is focused on the front of the sample by a 10× microscope objective lens. The ablation pits are measured with scanning electron microscope (SEM) and optical microscope (OM). The experimental results indicate that high quality microstructures can be fabricated in SiC crystal. Based on the dependence of ablation area on laser pulse energy, the threshold fluence is determined accurately, and the wavelength dependence of SiC ablation threshold fluence is given. The threshold fluence of SiC is found to increase with the incident laser wavelength from 0.29 J/cm<sup>2</sup> to 0.67 J/cm<sup>2</sup> in the visible region, while it remains almost constant (about 0.70 J/cm<sup>2</sup>) for NIR laser. For the NIR laser pulses, both photoionization and impact ionization play important role in electronic excitation, while for visible lasers, photoionization is dominant.

**Key words:** ultrafast optics; ablation threshold; micromachining; femtosecond laser; photoionization; impact ionization

### 1 引 言

由于其宽的带隙、大的饱和电子漂移速度、高的临界雪崩击穿电场和高的热导率等优良物理特性, SiC 已在微电子机械系统 (MEMS) 领域引起了人们极大的兴趣。各种 SiC 基微电子机械系统器件, 如温度传感器、气体传感器、气压传感器、微电动机及谐振器等, 均已器件化并应用在高温、高频、高辐射等极端环境中<sup>[1,2]</sup>。然而, 由于 SiC 高的硬度及良好

的化学稳定性, 很难用通常的化学方法来加工、制造。常用的、最直接的 SiC 微加工方法是反应离子刻蚀法 (RIE)。该法已用来加工单层 SiC 微结构器件。然而, 其低的刻蚀速率、对 Si 和 SiO<sub>2</sub> 的选择性差等缺点, 大大限制了该法在 SiC 微加工中的应用。微模型技术 (micromolding technique) 已被应用在 SiC 表面微加工中, 但工艺过程非常复杂。

飞秒激光与材料的作用时间极短、峰值功率非

\* 国家自然科学基金 (60108002) 资助课题。

作者简介: 陈洪新 (1979~2005), 男, 山东新泰市人, 中山大学博士研究生, 主要从事宽带隙纳米材料的超快光谱特性及飞秒激光微加工方面的研究。

\*\* 通信联系人。E-mail: stsxns@zsu.edu.cn

收稿日期: 2005-05-08; 收到修改稿日期: 2005-07-01

常高等特点,多光子电离及碰撞电离成为主要的烧蚀机制,热传导及其对周围材料造成的热损伤可以忽略<sup>[3,4]</sup>。由于热效应小、精度高、加工速率高、不用模具(直写)等优点,飞秒脉冲激光微加工日益受到人们的重视<sup>[5~8]</sup>,有望成为制作 SiC 微器件的一种新的、可靠的方法。与其他透明材料相比, SiC 飞秒激光微加工方面的研究工作还比较少<sup>[9~11]</sup>。目前主要是利用波长 800 nm 飞秒激光进行微加工。

本文采用光学参变放大器(OPA)输出的波长可调谐的飞秒激光,研究了波长对 SiC 材料烧蚀的影响,测定了 SiC 在不同波长飞秒激光照射下的烧蚀阈值,讨论了飞秒激光烧蚀的物理机理。

## 2 实验装置

钛宝石飞秒激光系统(美国光谱物理公司)可输出 130 fs、800 nm、0.7 mJ 的飞秒激光。该飞秒激光通过光学参变放大器后,可产生连续调谐的近紫外(300 nm)至红外(10  $\mu\text{m}$ )飞秒激光脉冲。通过转动格兰棱镜可连续调节入射到样品上的激光能量。激光经显微物镜聚焦后垂直照射在样品的前表面。

通过显微物镜和 CCD 监视器时时监控样品表面的烧蚀情况,样品是 6H SiC 晶体圆片,直径 50 mm,厚度 10 mm,双面光学抛光,装在三维移动靶架上。在烧蚀阈值测量过程中,样品上的每点都打三枪。利用扫描电镜和光学显微镜测量烧蚀斑形貌。

## 3 结果与讨论

当飞秒激光强度很弱时, SiC 材料表面会因库仑微爆炸而出现轻微的烧蚀斑,有时伴有纳米粒子的形成;当激光强度较强时,表面会形成粗糙的烧蚀坑。并由此提出了“轻微”烧蚀(“gentle” ablation)和“重”烧蚀(“strong” ablation)的概念<sup>[12]</sup>。我们在实验研究中也观察到了类似的情形。图 1 为扫描电镜(JSM-6330F)观察到的 509 nm、能量分别为(a)11  $\mu\text{J}$ 和(b)6  $\mu\text{J}$ 激光照射下的烧蚀坑形貌。显然由于能量较高,(a)中烧蚀形成的喷出物较(b)中多。另外,在每幅图中,烧蚀坑的边缘由于激光能量较低而形成类似“轻微”烧蚀形貌,而中央则由于激光能量很高而形成明显的“重”烧蚀坑。

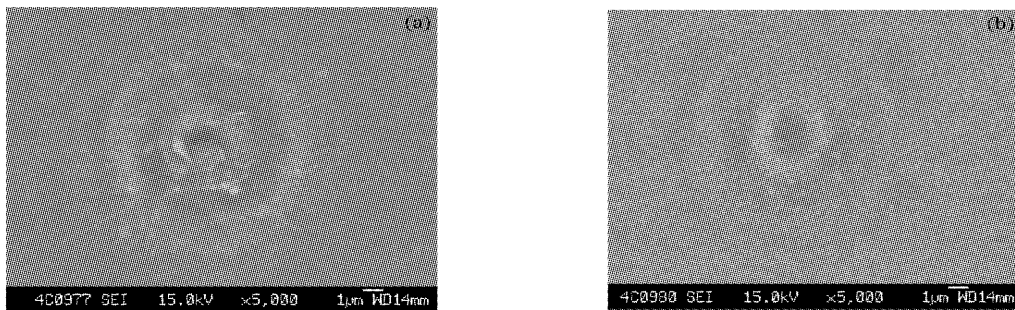


图 1 509 nm 飞秒激光照射后 SiC 前表面的扫描电镜图,激光能量分别为:(a) 11  $\mu\text{J}$ , (b) 6  $\mu\text{J}$

Fig. 1 SEM micrograph of the front-surface damage of the SiC crystal produced by 509 nm fs laser pulses of energy: (a) 11  $\mu\text{J}$ , (b) 6  $\mu\text{J}$

图 2 为 509 nm、6  $\mu\text{J}$ 、1 kHz 激光照射下的烧蚀坑形貌扫描电镜图。烧蚀坑的边界非常清楚,没有明显的热应力、热熔化及热传导导致的烧蚀和裂纹,表明热传导及其对周围材料造成的热损伤可以忽略。烧蚀坑的尺寸与激光光斑大小相当,可以通过控制激光光斑大小来精确控制烧蚀斑大小。此外,微加工的速率非常高。以上都说明了 SiC 飞秒激光微加工的优势及其潜在的应用前景。

透明介质的破坏阈值是近年来的研究热点,这是因为所用的激光能量与阈值能量的相对关系对微加工形状、尺寸、质量等都有非常重要的影响。确定材料损伤阈值的方法大致有以下几种:一是采用原位散射光探测法,观察是否有等离子体出现;二是探

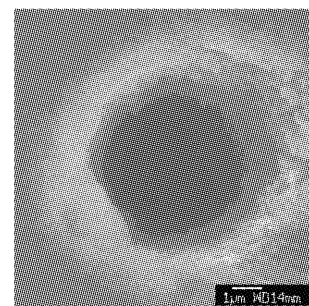


图 2 509 nm, 6  $\mu\text{J}$ , 1 kHz 飞秒激光照射后, SiC 前表面的扫描电镜图

Fig. 2 SEM micrograph of the front-surface damage of the SiC crystal produced by 509 nm, 1 kHz fs laser pulses of energy 6  $\mu\text{J}$

测激光照射下样品表面发射光谱,观察是否有等离子体发光出现;三是样品取下后在显微镜下观察是否有永久性损伤<sup>[13]</sup>;还有一种是文献<sup>[14]</sup>提出的外推法,通过将烧蚀体积与激光强度的线性关系曲线外推至  $V=0$  处得出材料的破坏阈值。本文采用外推法确定材料的烧蚀阈值。

观察到材料的烧蚀面积与激光脉冲能量较好的对数依赖关系,结果如图 3 所示。利用激光光束场强在横截面上的高斯分布,通过对单脉冲积分可以得到激光强度分布与脉冲能量  $U$  的关系:

$$E = \frac{2U}{\pi R_0^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{R_0^2}\right), \quad (1)$$

其中  $E$  为能量密度,  $U$  为脉冲能量,  $r$  为烧蚀坑的半径,  $R_0$  为激光的束腰半径。同一种材料破坏时临界能量密度  $E$  保持为一定值,因此脉冲能量与烧蚀面积呈较好的对数关系。在直线上任取两点,利用方程

(2) 可以计算得到  $F_{th}$  和  $R_0$ :

$$\ln\left(\frac{U_1}{U_2}\right) = \frac{2(r_1^2 - r_2^2)}{R_0^2}, \quad (2)$$

利用该关系来确定烧蚀阈值,可以适当加大激光的能量,以减小测量脉冲能量和材料烧蚀面积的相对误差,有效地避免系统误差和测量  $R_0$  时所引入的人为误差<sup>[4]</sup>。计算结果显示,对 1650 nm 和 1860 nm 的入射激光,激光的束腰半径  $R_0$  分别约为 6.3  $\mu\text{m}$  和 6.1  $\mu\text{m}$ ,其对应的 6H SiC 晶体的烧蚀阈值分别约为 0.67  $\text{J}/\text{cm}^2$  和 0.73  $\text{J}/\text{cm}^2$ 。

利用这种方法,测量了不同波长飞秒激光照射下, SiC 的烧蚀阈值对波长的依赖关系。结果如图 4 所示。显然,在可见光区, SiC 的烧蚀阈值随波长增加而增加;而在近红外激光照射下,在实验误差范围内,烧蚀阈值基本上不随入射激光波长而变化。

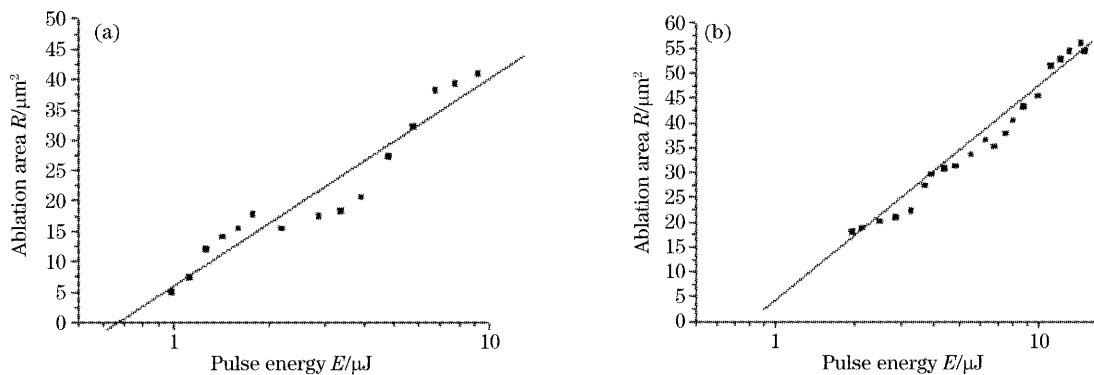


图 3 烧蚀体积与激光能量的关系,激光波长分别为(a) 1650 nm, (b) 1860 nm

Fig. 3 Relationship of the ablation volume as a function of laser energy at (a) 1650 nm and (b) 1860 nm

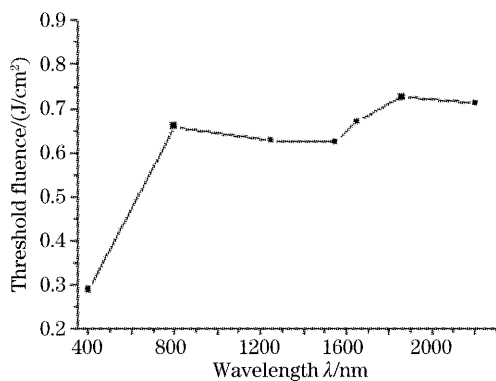


图 4 SiC 烧蚀阈值与波长的依赖关系。

实线代表烧蚀阈值的总体变化趋势

Fig. 4 Wavelength dependence of the ablation threshold for SiC. Solid lines show the general trend of the ablation thresholds

ZnSe、ZnS 等宽带隙半导体材料是由隧穿电离导致破坏的,碰撞电离不起重要作用<sup>[11]</sup>。图 5 为

Keldysh 理论及量子微扰方法计算所得的 6H-SiC 晶体光致电离速率(PI)及碰撞电离速率的波长依赖关系,实线为光致电离速率而点线为雪崩速率,其单位分别为  $10^{33} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $10^{12} \text{ s}^{-1}$ 。激光的电场强度为 66  $\text{MV}/\text{cm}$ ,对应材料在近红外区的破坏阈值。光致电离速率随波长变化出现剧烈抖动,这是由电子抖动引起的。碰撞电离速率随激光波长增加而有一个增加的过程,这是因为长波长激光的频率低一些,更有利于电子的加速,获得更大的动能,导致碰撞电离速率有一个增加的过程。如果不考虑碰撞电离,800 nm 激光作用下材料的破坏阈值将比 2200 nm 的高出一倍以上。然而,实验结果表明,在近红外区材料的破坏阈值几乎不随波长而变化。因此,我们认为 SiC 的飞秒激光烧蚀机制为:光致电离(包括多光子电离和隧穿电离)将价带电子激发到导带,形成自由电子,这些自由电子在激光场中不断加速获得能量而使其动能迅速增加,当其动能超过材

料的带隙宽度时,这些电子与价带电子发生碰撞碰撞电离,导带电子数目指数增加,从而产生库仑微爆炸。在近红外区,随激光波长增加,光致电离速率逐渐减小,而碰撞电离速率逐渐增加,正是两种电离速率随波长的变化关系,导致了 SiC 近红外区烧蚀阈值基本上不随波长变化而变化。在可见区,光致电离的作用较碰撞电离作用大,从而导致了烧蚀阈值随波长增加而增加。

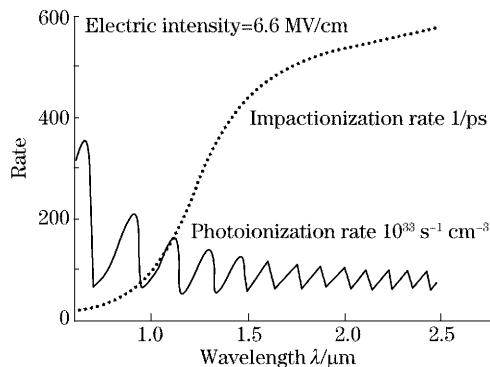


图 5 计算得到的光致电离速率(实现)与碰撞电离速率(点线)随入射激光波长的变化

Fig. 5 The calculated photoionization rate (solid line) and impact ionization rate (dot line) changing with the wavelength

## 4 结 论

利用光学参变放大器输出的波长可连续调谐的近红外飞秒激光,研究了 6H SiC 晶体的烧蚀阈值与飞秒激光波长的依赖关系。利用烧蚀面积与脉冲能量的依赖关系,测得了材料的烧蚀阈值和激光的束腰半径。实验结果表明,在 130 fs 激光照射下, SiC 的烧蚀阈值在可见光区随激光波长增加而增加,而在近红外区则基本与波长无关。在飞秒激光烧蚀 SiC 的过程中,在不同波长区间光致电离和碰撞电离起到的作用各不相同。在近红外区,光致电离和碰撞电离均起到了重要的作用;而在可见光区,光致电离的作用相对大一些。本文的结果还表明,利用飞秒激光可以在 SiC 等宽带隙半导体材料中诱导高质量的微细结构。

## 参 考 文 献

- 1 Anita Lloyd Spetz, Peter Tobias, Amir Baranzahi *et al.*. Current status of silicon carbide based high-temperature gas sensors[J]. *IEEE Trans. Electron Device*, 1999, **46**(3): 561~566
- 2 Ni Xiaochang, Wang qingyue. Finite difference method for thermal analysis of femtosecond picosecond pulse laser ablation on metal surface[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(3): 277~280 (in Chinese)  
倪晓昌,王清月. 飞秒、皮秒激光烧蚀金属表面的有限差分热分析[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3): 277~280
- 3 Jia T Q, Xu Z Z, Li X X *et al.*. Microscopic mechanisms of ablation and micromachining of dielectrics by using femtosecond lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(24): 4382~4384
- 4 T. Q. Jia, Z. Z. Xu, X. X. Li *et al.*. Mechanisms in fs-laser ablation in fused silica[J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **95**(9): 5166~5171
- 5 Li Chengde, Wang Danling, Luo Le *et al.*. Femtosecond laser application in three dimensional micro systems[J]. *Physics*, 2000, **29**(12): 719~723 (in Chinese)  
李承德,王丹翎,罗乐等. 飞秒激光在三维微细体系中的应用[J]. *物理*, 2000, **29**(12): 719~723
- 6 Guanghua Cheng, Yishan Wang, J. D. White *et al.*. Demonstration of high-density three-dimensional storage in fused silica by femtosecond laser pulses[J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **94**(3): 1304~1307
- 7 Shen Yibing, Yang Guoguang, Hou Xiyun. Research on phenomenon of the super-resolution in laser lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(11): 1512~1517 (in Chinese)  
沈亦兵,杨国光,侯西云. 激光光刻中的超分辨现象研究[J]. *光学学报*, 1999, **19**(11): 1512~1517
- 8 Liu Zhi, Li Ruxin, Yu Wei *et al.*. Heating of planar metal targets by ultrashort laser pulses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1297~1304 (in Chinese)  
刘智,李儒新,余玮等. 飞秒超短脉冲激光加热金属平面靶[J]. *光学学报*, 2000, **20**(10): 1297~1304
- 9 Yuanyuan Dong, Pal Molian. Femtosecond pulsed laser ablation of 3C-SiC thin film on silicon[J]. *Appl. Phys. A*, 2003, **77**: 839~846
- 10 Yuanyuan Dong, Pal Molian. Coulomb explosion-induced formation of highly oriented nanoparticles on thin films of 3C-SiC by the femtosecond pulsed laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(1): 10~12
- 11 D. M. Simanovskii, H. A. Schwettman, H. Lee *et al.*. Midinfrared optical breakdown in transparent dielectrics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(10): 107601-1~10760-4
- 12 Harald O. Jeschke, Martin E. Garcia, Matthias Lenzner *et al.*. Laser ablation thresholds of silicon for different pulse durations: theory and experiment[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2002, **197~198**: 839~844
- 13 B. C. Stuart, M. D. Fiet, A. M. Rubenchik *et al.*. Laser-induced damage in dielectrics with nanosecond to subpicosecond pulses[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**(12): 2248~2251
- 14 M. Lenzner, J. Krüger, S. Sartania *et al.*. Femtosecond optical breakdown in dielectrics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **80**(18): 4076~4079