

## 6H-SiC 的飞秒激光超衍射加工\*

云志强<sup>1)</sup> 魏汝省<sup>2)</sup> 李威<sup>1)†</sup> 罗维维<sup>1)</sup> 吴强<sup>1)</sup>  
徐现刚<sup>2)</sup> 张心正<sup>1)</sup>

1) (南开大学物理科学学院和泰达应用物理学院, 弱光非线性光子学教育部重点实验室, 天津 300457)

2) (山东大学, 晶体材料国家重点实验室, 济南 250100)

(2012年8月22日收到; 2012年10月23日收到修改稿)

利用飞秒激光直写微纳加工平台, 对 6H-SiC 材料进行了突破衍射极限的微纳结构加工研究. 使用中心波长和脉宽分别为 800 nm 和 130 fs 的钛蓝宝石激光器和荧光倒置显微镜搭建了飞秒激光直写微纳加工平台, 研究了在不同的实验条件下对 6H-SiC 的光学加工情况, 采用扫描电子显微镜对加工结构进行表征. 通过分析不同的激光功率和不同的曝光时间等实验条件下加工的分辨率, 发现分辨率随着激光功率的减小而提高, 随扫描速度的增大而提高, 且能突破光学衍射极限. 最终获得 125 nm 的加工线宽, 并加工了加工线宽 240 nm, 周期 1.0  $\mu\text{m}$  的线阵列. 研究结果为微机电系统 (MEMS) 的微器件设计开创了新的思路, 对发展 MEMS 器件具有重要意义.

**关键词:** 飞秒激光直写, 超衍射加工, 6H-SiC, 微机电系统

**PACS:** 81.05.Dz, 81.16.Nd, 85.85.+j

**DOI:** 10.7498/aps.62.068101

## 1 引言

得益于微电子技术以及微机电系统 (micro-electro-mechanical systems, MEMS) 的快速发展, 基于半导体的电子信息技术深刻地影响了人们的生活并逐渐扩展到人类文明的各个角落. 然而, 由常规的 Si, Ge 等第一代半导体材料和 GaAs, InP 等第二代半导体材料制备的 MEMS 器件, 难以满足在高温、强腐蚀等恶劣条件下工作的需要<sup>[1,2]</sup>. 作为第三代半导体材料的 SiC, 因其高饱和漂移速率、宽带隙、高热导率、高击穿电压, 低扩散速率、很好的热稳定性和化学惰性<sup>[1,3,4]</sup>, 已经被用于高温压力传感器、加速器、微马达等<sup>[5-14]</sup>. 在诸如石油钻探、航空电子设备与系统、发动机、涡轮和工业过程控制等许多工业领域, SiC MEMS 器件已经得以应用和发挥了革命性的作用.

在半导体领域, 对材料传统的微加工技术多基

于化学方法, 例如掩模加工、湿法加工、干法加工等<sup>[15-17]</sup>. 但由于 SiC 特殊的性质 (莫氏硬度为 9, 与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  相似; 努氏硬度为 2480  $\text{kg}/\text{mm}^2$ , 略高于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的 2100  $\text{kg}/\text{mm}^2$ ), 传统的微加工技术不太适用于加工 SiC<sup>[1]</sup>. 新兴起的激光直写技术等物理手段应用于 SiC 的加工具有加工速率高、不需要掩模、不依赖晶体结构、加工步骤简单等优点. 因此研究激光烧蚀加工 SiC 对于加工 MEMS 器件具有重要意义<sup>[1,10,18-20]</sup>. 但是不管是传统微加工方法, 还是激光烧蚀, 目前对 SiC 的加工尺寸都在微米量级, 在一定程度上限制了 MEMS 器件在高度集成领域的应用.

材料与激光相互作用的非线性效应只发生在光子密度达到一定阈值的有限区域内, 因而利用光学非线性的阈值效应可以实现突破衍射极限的加工<sup>[21,22]</sup>. 本文以此为基础, 采用飞秒激光系统与显微镜系统搭建了微纳加工平台, 研究了飞秒激光直写技术在 6H-SiC 上进行微纳加工的情况, 实现了

\* 国家重点基础发展研究计划 (批准号: 2010CB934101, 2012CB934201)、国家国际科技合作专项项目 (批准号: 2011DFA52870)、天津市国际科技合作项目 (批准号: 11ZCGHHZ01000) 和中央高校基本科研业务费专项资金资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: liw@nankai.edu.cn

突破衍射极限的微纳结构加工.

## 2 飞秒激光直写平台

飞秒激光直写微纳加工平台包括激光系统和显微平移系统两个主要部分. 锁模 Ti: Sapphire 激光器系统 (Spectra-Physics, USA) 包括 MaiTai 种子源、泵浦源 Empower 30 和 Spitfire 再生放大器. MaiTai 种子源产生的激光经再生放大器形成中心波长 800 nm, 脉宽 130 fs, 重复频率 1000 Hz 的脉冲激光. 显微镜平移系统包括显微物镜 (Olympus, Japan)、三维压电平移台 (Physik Instrumente, PI, Germany) 和 CCD. 图 1 为实验装置示意图: 激光脉冲经两个格兰泰勒棱镜进入显微镜系统, 由 100× 油浸物镜 ( $NA = 1.45$ ) 聚焦到样品下表面; 样品固定在 3D 平移台上的盖玻片上; 照明光经过样品后由物镜收集经透镜成像到 CCD; 中性密度衰减片和格兰泰勒棱镜用来控制激光的功率和偏振方向, 计算机连接控制 3D 平移台和 CCD 进行样品移动和实时监测. 加工完样品用无水乙醇进行超声清洗, 去除样品表面的溅出物.

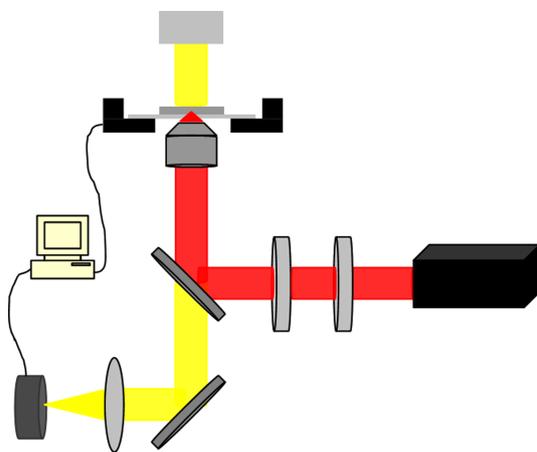


图 1 实验装置示意

## 3 6H-SiC 的超衍射加工结果与分析

首先研究了结构形貌与加工条件——激光加工功率和曝光时间 (扫描速度) 的关系. 分别在相同扫描速度不同功率和相同功率不同扫描速度的情况下在 SiC 样品上进行直线加工. 在激光功率不同的情况下的直线加工电子扫描显微镜表征结果如图 2 所示, 从右向左激光功率从 173  $\mu\text{W}$  逐渐降低到 22  $\mu\text{W}$ , 压电位移台的扫描速度是 50  $\mu\text{m/s}$ . 结果

显示加工线宽随功率的减小而变小. 线宽与激光功率的关系曲线如图 3. 功率在 100  $\mu\text{W}$  以上时, 加工线宽可以达到微米量级, 表明此时功率远远超过加工功率阈值. 功率在约 60  $\mu\text{W}$  到 100  $\mu\text{W}$  范围时, 加工线宽在亚微米量级, 功率仍然很高. 功率在约 35  $\mu\text{W}$  到 60  $\mu\text{W}$  范围时, 加工线宽在亚波长量级, 但还没有突破衍射极限 (约 400 nm). 功率在 35  $\mu\text{W}$  以下到 22  $\mu\text{W}$  时, 加工线宽已经小于 400 nm, 突破了衍射极限, 此时的条件可以进行超衍射加工. 实验中连续的最细加工线宽约为 200 nm, 已经达到了超衍射极限的加工, 但还不能进行纳米加工.

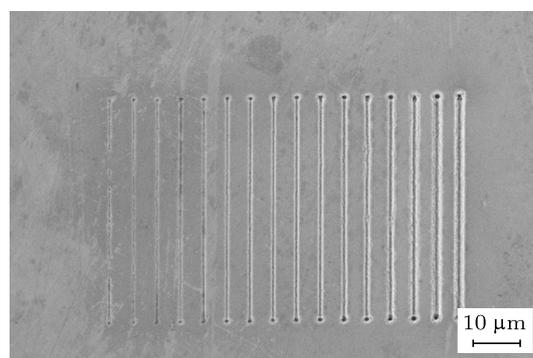


图 2 速度 50  $\mu\text{m/s}$ , 不同加工功率下的加工线型 SEM 图片

SiC 材料的能带隙为 3 eV, 波长 800 nm 光子的能量为约 1.55 eV, 800 nm 飞秒激光与 SiC 材料作用时发生多光子吸收, 光强达到一定值时, SiC 被烧蚀. 高斯光束光强表达式为

$$I(r, z) = I_0(w_0^2/w(z)^2)e^{-2[r/w(z)]^2}, \quad (1)$$

其中,  $I_0$  是峰值光强,  $w(z)$  是  $z$  处光束半径,  $w_0$  是束腰半径,  $z$  是束腰偏离加工面的值. 焦点区域平均光强与激光功率的关系为:  $I_{\text{focus}} = P/\pi w_0^2 \tau f h \nu$  ( $I = E/A \Delta t h \nu \cdot \text{photon} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $P$  是激光平均功率,  $\tau$  是脉冲半高宽,  $f$  是激光重复频率,  $h \nu$  是光子能量. 而  $I_0 = 2e^2 I_{\text{focus}} / (e^2 - 1) \approx 2.3 I_{\text{focus}}$ . 光强超过阈值的区域 SiC 发生烧蚀, 令  $I(r, z) = I_{\text{th}}$ , 由 (1) 式得到烧蚀半径与功率的关系为

$$r^2 = -0.5 w(z)^2 \ln(\pi w(z)^2 f \tau h \nu I_{\text{th}} / 2.3 P). \quad (2)$$

以  $I_{\text{th}} = I(0, 0) = 2.3 I_{\text{focus}} = 2.3 P_{\text{th}} / \pi w_0^2 \tau f h \nu$  代入 (2) 式, 把  $I_{\text{th}}$  换成  $P_{\text{th}}$ , 简化公式, 得到烧蚀宽度与激光功率的关系为

$$D = w(z) \sqrt{2 \ln[w_0^2 P / w(z)^2 P_{\text{th}}]}, \quad (3)$$

其中  $w(z)^2 = w_0^2[1 + (\lambda z/\pi w_0^2)^2]$ ,  $w_0 = 0.61\sqrt{\ln 2/2\lambda/NA}$ . 根据 (3) 式对实验数据进行拟合, 得到功率阈值  $P_{th}$  是  $12.35 \mu\text{W}$ , 计算得到  $I_{th}$  是  $1.75 \times 10^{-4} \text{ photon}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $z$  是  $680 \text{ nm}$ , 为激光束腰与加工面的偏离值.

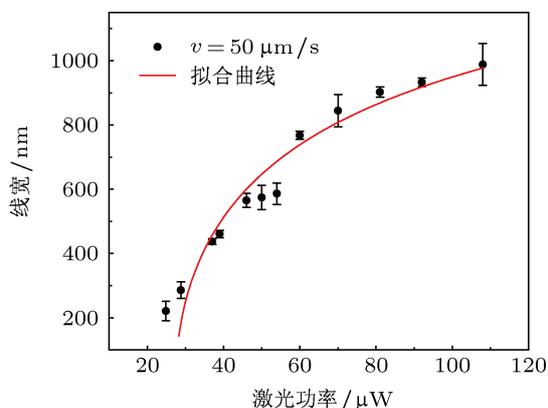


图3 加工线宽与加工功率间的关系

为了探索烧蚀的极限分辨率, 我们把激光功率降到  $15.8 \mu\text{W}$ , 并更精确地调节焦点位置, 改变平移台的扫描速度进行烧蚀. 烧蚀线宽与移动台扫描速度的关系如图 4 所示, 烧蚀线宽随着扫描速度的提高而降低. 扫描速度小于  $25 \mu\text{m/s}$  时, 加工线宽在亚微米量级, 没有突破衍射极限; 当扫描速度在  $30$  到  $45 \mu\text{m/s}$  范围时, 烧蚀线宽降到了  $200 \text{ nm}$  以下. 当移动台扫描速度  $45 \mu\text{m/s}$  时, 得到的最细线宽  $125 \text{ nm}$ , 如图 5 所示. 当扫描速度高于  $45 \mu\text{m/s}$ , 烧蚀线不再连续. 这表明在适当控制加工条件的情况下, 能在  $6\text{H-SiC}$  上得到突破衍射极限的极高分辨率的微纳结构.

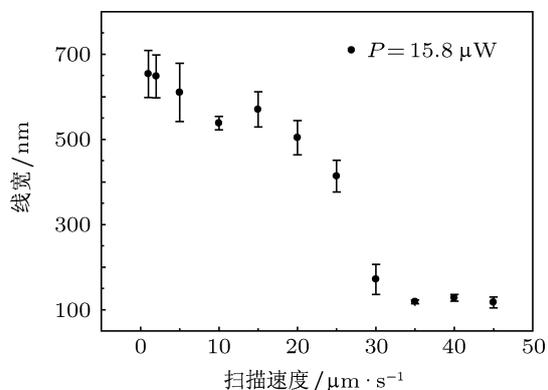


图4 加工线宽与扫描速度的关系

我们用原子力显微镜表征了不同加工条件下的刻蚀线的深度. 发现通过调整焦点在加工方向的

位置, 可以得到从  $14 \text{ nm}$  到  $30 \text{ nm}$  不同的加工深度. 通过精确调节加工功率和焦点在加工平面上的相对位置, 能实现长径比 (加工深度比线条宽度) 从最大约  $0.25$  到最小约  $0.02$  的线条加工. 这可以满足不同类型 MEMs 器件需要, 但是更大长径比结构的实现还需要进一步探索. 另外,  $6\text{H-SiC}$  是热析出方式制备石墨烯的重要材料 [23]; 在带有结构的  $6\text{H-SiC}$  上进行石墨烯的生长有望直接制备二维的单层石墨烯功能器件.

栅结构是最基本的电子学结构之一, 我们通过调节激光功率和加工速度, 得到了线宽  $240 \text{ nm}$ , 周期  $1 \mu\text{m}$  的栅结构, 如图 6 所示. 此结构没有进行清洁, 能明显看到烧蚀中的溅出物.

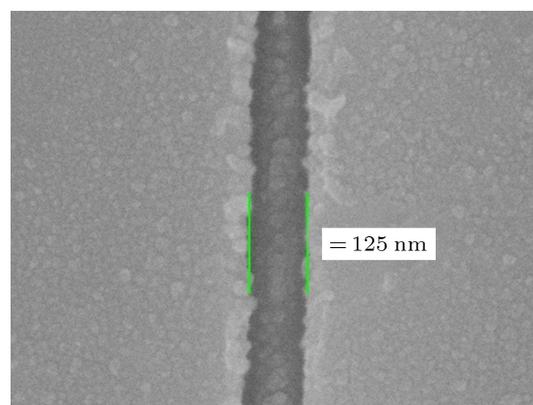


图5 超衍射极限的加工线 SEM 图片 (功率  $15.8 \mu\text{W}$ , 速度  $45 \mu\text{m/s}$ , 线宽  $125 \text{ nm}$ )

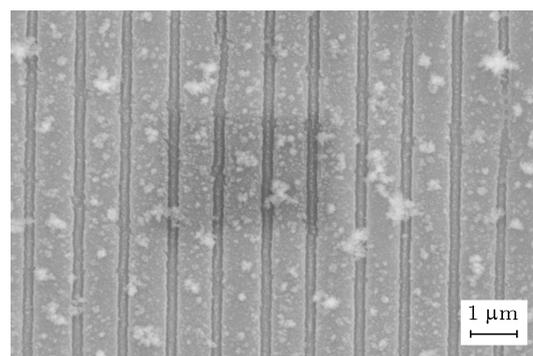


图6 周期  $1 \mu\text{m}$  线宽  $240 \text{ nm}$  的线阵列 SEM 图片

另外, 在一些烧蚀线的内部, 可以看到明显的条纹状精细结构, 如图 7 所示. 文献 [24] 研究结果表明, 激光烧蚀碳化硅过程中  $\text{SiC}$  表面发生物质迁移, 在光斑中心光强高的区域产生粗糙条纹, 条纹宽度与激光波长相似; 在光斑边缘光强低的区域产生精细条纹, 条纹宽度小于激光波长, 在百纳米左右. 图 7 中条纹宽度平均约  $99 \text{ nm}$ , 周期约  $155 \text{ nm}$ ,

属于精细条纹结构. 我们的实验中没有发现粗糙条纹, 这是由于我们采用了高倍物镜, 聚焦光斑很小, 大约为激光波长的一半, 并且激光的功率降到了 SiC 材料烧蚀阈值附近, 烧蚀区域突破了衍射极限, 所以只产生了精细条纹.

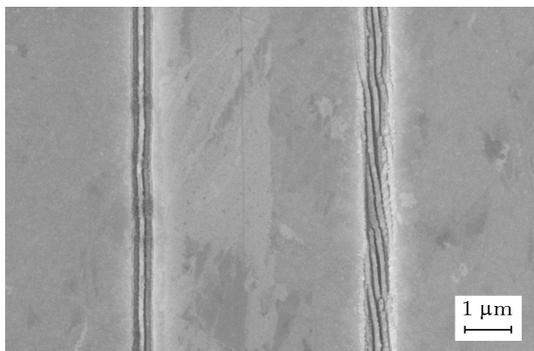


图7 加工线中的精细条纹结构

## 4 结论

我们在搭建的飞秒激光直写微纳加工平台上对 6H-SiC 进行了微纳加工研究, 获得了加工线宽和激光功率、扫描速度的关系. 结果表明, 加工机制系超快激光的烧蚀过程; 烧蚀线宽与加工的激光的能量有关. 通过适当控制激光功率和扫描速度能实现对烧蚀结构分辨率的控制, 甚至突破激光的衍射极限, 实现超衍射的微纳结构加工. SiC 的超衍射结构的实现对于 MEMS 器件尺寸的进一步减小和微纳光子学的集成有重要意义, 是进一步推动光电子信息学微型化的关键技术之一. 此外, 我们的研究也为 SiC 上石墨烯微纳结构的生长提供了一条新的思路.

- [1] Pecholt B, Gupta S, Molian P 2011 *J. Laser Appl.* **23** 1
- [2] Sarro P M 2000 *Sensors and Actuators* **82** 210
- [3] Zetterling C M 2002 *Process Technology for Silicon Carbide Devices* p7
- [4] Shang Y C, Zhang Y M, Zhang Y M 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1786 (in Chinese) [尚也淳, 张义门, 张玉明 2000 物理学报 **49** 1786]
- [5] Xu C F, Yang Y T, Liu L 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1113 (in Chinese) [徐昌发, 杨银堂, 刘莉 2002 物理学报 **51** 1113]
- [6] Okojie R S, Ned A A, Kurtz A D 1998 *Sensors and Actuators A* **66** 200
- [7] Pakula L S, Yang H, Pham H T M, French P J, Sarro P M 2004 *J. Micromech. Microeng.* **14** 1478
- [8] Young D J, Du J G, Zorman C A, Ko W H 2004 *IEEE Sensors Journal* **4** 464
- [9] Atwell A R, Okojie R S, Kornegay K T, Roberson S L, Beliveau A 2003 *Sensors and Actuators A* **104** 11
- [10] Pecholt B, Vandan M, Dong Y Y, Molian P 2008 *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **39** 239
- [11] Yassen A A, Wu C H, Zorman C A, Mehregany M 2000 *IEEE Electron Device Letters* **21** 164
- [12] Zhou Y H, Zhang Y M, Zhang Y M, Meng X Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3710 (in Chinese) [周拥华, 张义门, 张玉明, 孟祥志 2004 物理学报 **53** 3710]
- [13] Tang X Y, Zhang Y M, Zhang Y M, Gao J X 2004 *Chin. Phys.* **13** 1110
- [14] Tang X Y, Zhang Y M, Zhang Y M, Gao J X 2005 *Chin. Phys.* **14** 583
- [15] Hossain T K, Maclaren S, Engel J M, Liu C, Adesida I, Okojie R S 2006 *J. Micromech. Microeng.* **16** 751
- [16] Chai C C, Yang Y T, Li Y J, Jia H J, Han J 2001 *Res. Prog. SSE* **21** 109 (in Chinese) [柴常春, 杨银堂, 李跃进, 贾护军, 韩键 2001 固体电子学研究与进展 **21** 109]
- [17] Huang W, Chen Z Z, Chen B Y, Zhang J Y, Yan C F, Xiao B, Shi E W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3443 (in Chinese) [黄维, 陈之战, 陈博源, 张静玉, 严成峰, 肖兵, 施尔畏 2009 物理学报 **58** 3443]
- [18] Farsari M, Filippidis G, Zoppel S, Reider G A, Fotakis C 2005 *J. Micromech. Microeng.* **15** 1786
- [19] Zoppel S, Farsari M, Merz R, Zehetner J, Stangl G, Reider G A, Fotakis C 2005 *Microelectronic Engineering* **83** 1400
- [20] Desbiens J P, Masson P 2007 *Sensors and Actuators A* **136** 554
- [21] Kawata S, Sun H B, Tanaka T, Takada K 2001 *Nature* **412** 697
- [22] Dong X Z, Chen W Q, Zhao Z S, Duan X M 2008 *Sci. China* **53** 2 (in Chinese) [董贤子, 陈卫强, 赵震声, 段宣明 2008 中国科学 **53** 2]
- [23] Kang C Y, Tang J, Li L M, Pan H B, Yan W S, Xu P S, Wei S Q, Chen X F, Xu X G 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 047302 (in Chinese) [康朝阳, 唐军, 李利民, 潘海斌, 闫文盛, 徐彭寿, 韦世强, 陈秀芳, 徐现刚 2011 物理学报 **60** 047302]
- [24] Tomita T, Okada T, Kawahara T, Kumai R, Matsuo S, Hashimoto S, Kawamoto M, Yamaguchi M, Ueno S, Shindou E, Yoshida A 2010 *Appl. Phys. A* **100** 113

# Sub-diffraction-limit fabrication of 6H-SiC with femtosecond laser\*

Yun Zhi-Qiang<sup>1)</sup> Wei Ru-Sheng<sup>2)</sup> Li Wei<sup>1)†</sup> Luo Wei-Wei<sup>1)</sup> Wu Qiang<sup>1)</sup>  
Xu Xian-Gang<sup>2)</sup> Zhang Xin-Zheng<sup>1)</sup>

1) (*The KOE Laboratory of Weak-Light Nonlinear Photonics, School of Physics & TEDA Applied Physics School, Nankai University, Tianjin 300457, China*)

2) (*State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100, China*)

(Received 22 August 2012; revised manuscript received 23 October 2012)

## Abstract

Sub-diffraction-limit fabrication of 6H-SiC is investigated with femtosecond laser direct-write setup. Micro/nano-fabrication on 6H-SiC is studied with a home-made micro/nano-fabrication platform, which is integrated with a fluorescence microscope and a Ti:sapphire laser with a central wavelength of 800 nm and pulse duration of 130 fs. Micro/nano-structures are characterized with scanning electron microscope. It is found that the spatial resolution is improved with the decrease of laser power and the increase of scanning velocity. The smallest resolution achieved is 125 nm and line array with a line width of 240 nm and a period of 1  $\mu\text{m}$  is fabricated. This work paves the new way for integrated micro electro-mechanical systems devices.

**Keywords:** femtosecond laser direct-write, sub-diffraction-limit fabrication, 6H-SiC, micro-electro-mechanical

**PACS:** 81.05.Dz, 81.16.Nd, 85.85.+j

**DOI:** 10.7498/aps.62.068101

---

\* Project supported by National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2010CB934101, 2012CB934201), the International S & T Cooperation Program of China (Grant No. 2011DFA52870), International Cooperation Program of Tianjin (Grant No. 11ZCGHHZ01000), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China.

† Corresponding author. E-mail: liw@nankai.edu.cn