

引用格式: XU Sijia, YU Yanhao, CHEN Qidai. Water-assisted Femtosecond Laser Silicon Carbide Micro-hole Machining (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(6):0650106

徐思佳,于颜豪,陈岐岱. 基于水辅助的飞秒激光碳化硅微孔加工(特邀)[J]. 光子学报, 2021, 50(6):0650106

基于水辅助的飞秒激光碳化硅微孔加工(特邀)

徐思佳,于颜豪,陈岐岱

(吉林大学 电子科学与工程学院 集成光电子国家重点实验室, 长春 130012)

摘要:在 350 μm 厚的碳化硅样品上加工了直径 200 μm 的微孔,研究了基于水辅助的飞秒激光碳化硅微孔加工方法。探讨了空气中加工微孔与水辅助加工微孔的差别。水降低了加工区域的温度,大大减少了氧化反应的发生,而且加工产生的碎屑由水带走,避免了热影响区的形成,降低了样品粗糙度。加工出的微孔侧壁光滑,无热影响区,在工业中有实际应用的价值。该加工方法使加工形貌良好的碳化硅微孔成为现实,有望应用于碳化硅的工业加工中。

关键词:飞秒激光;水辅助;碳化硅;微孔;热影响区

中图分类号: TN249

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215006.0650106

Water-assisted Femtosecond Laser Silicon Carbide Micro-hole Machining (Invited)

XU Sijia, YU Yanhao, CHEN Qidai

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: A water-assisted femtosecond laser silicon carbide micro-hole machining method is proposed, and a 200 μm diameter micro-hole is processed on a 350 μm thick silicon carbide sample. The difference between processing micro-holes in air and water-assisted processing of micro-holes is discussed. Water reduces the temperature of the processing area, greatly reducing the occurrence of oxidation reactions. The debris produced by processing is taken away by the water, avoiding the formation of HAZ and reducing the roughness of the sample. The processed micro-holes have smooth sidewalls and no HAZ, which has practical application value in industry. The processing method makes it a reality to process silicon carbide micropores with good morphology, and is expected to be applied to the industrial processing of silicon carbide.

Key words: Femtosecond laser; Water-assisted; Silicon carbide; Micro-hole; HAZ

OCIS Codes: 140.7090; 010.7340; 160.4670; 230.4000

0 引言

以半导体材料为基础的集成电路、电力电子器件、光电子器件,是通信、计算机、网络技术等信息产业的重要基石,在国家的发展中起着极为重要的作用。硅(Si)、锗(Ge)等第一代半导体材料目前应用十分普遍,但其性能已经不满足新兴产业多样化的需求。与硅相比,第三代半导体材料碳化硅(SiC)具有更高的禁带宽度、更高的热导率以及优异的化学性能,成为半导体照明、新能源汽车及高速轨道交通等产业的

基金项目:国家重点研发计划(No. 2017YFB1104600)

第一作者:徐思佳(1996—),男,博士研究生,主要研究方向为飞秒激光微纳加工。Email: xusj20@mails.jlu.edu.cn

导师(通讯作者):于颜豪(1986—),男,工程师,博士,主要研究方向为飞秒激光微纳加工。Email: yanhao_yu@jlu.edu.cn

收稿日期:2021-04-15;录用日期:2021-05-20

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

核心^[1-8]。

但是由于碳化硅自身的高硬度以及高脆性,使其难以进行微纳加工。传统的机械加工方式容易导致碳化硅的碎裂。与常规方法相比,激光加工是一种有效的微加工手段^[9-13],它的优势在于无接触加工,对材料几乎不会产生力的影响,不会有材料碎裂的风险。而且激光聚焦后的焦点极小,使得激光加工的精度很高。2017年,KIM Byunggi等用纳秒激光对碳化硅进行了钻孔研究^[14],激光虽然能去除材料形成微孔,但加工的微孔侧壁形貌十分粗糙,加工中形成的碎屑附着在孔的侧壁,锥度也很大,根本无法进行实际应用。飞秒激光脉冲持续时间小,比纳秒激光峰值功率更大,能进行更精细的加工。2018年,ZHANG Ru等用飞秒激光对碳化硅材料进行了沟槽加工^[15],飞秒激光加工后的侧壁更加平整,在材料去除方面更有优势,但在沟道两侧发现热影响区的存在,碳化硅氧化后在沟道两侧形成了堆积,这限制了激光微加工的实际应用。

针对上述问题,本文提出了基于水辅助的飞秒激光碳化硅微孔加工方法。比较了在空气和水中加工的碳化硅微孔形貌并研究了脉冲能量对孔形貌的影响。实验结果表明,在水下进行激光加工钻孔,水对加工区域起到降温作用,减少了氧化反应的发生,并且水有带走加工产生碎屑的功能,能有效解决热影响区问题。实验得到了侧壁光滑的碳化硅微孔。给碳化硅难以进行加工的问题提供了解决方法。

1 实验

1.1 实验装置

飞秒激光加工碳化硅的实验装置示意图如图1所示。实验所用激光器(Light Conversion)为波长是1 030 nm的飞秒激光器,脉宽为290 fs,最大功率10 W,最大单脉冲能量200 μ J。三维位移平台(Newport)的XY轴行程为5 cm,Z轴行程4.8 mm。CCD相机连接到计算机,以便在加工过程中对碳化硅样品表面随时进行观察。使用NA为0.25的10倍显微镜物镜将激光聚焦到碳化硅的表面上,激光脉冲重复频率为50 kHz,聚焦后光斑直径约为 $1.22\lambda/NA=5.03 \mu\text{m}$ 。

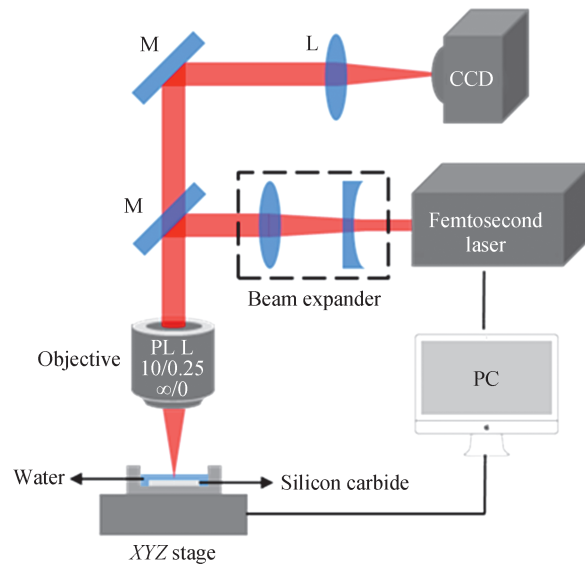


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic of the experimental set up

1.2 飞秒激光去除材料机理

飞秒激光作用在材料的过程是,首先光子能量传递给电子,电子吸收能量实现跃迁又将能量通过碰撞传递给其他电子,引发雪崩电离。随后能量快速积累并通过电子-声子耦合向晶格传递,晶格吸收能量形成高温高压的区域,改变焦点周围材料物性(融化和气化等),材料即被去除。这一过程持续时间极短,故飞秒激光加工形成的热效应很小,这是飞秒激光用来去除来材料的优势所在。通常来说,激光能量越强,能量堆积效果越明显,对材料去除的速度越快,但激光焦点影响的范围也会相应增大。平衡他们之间的关系有利于进行更高效精密的加工。

1.3 实验方法

激光打孔常用的方法有冲击式和旋切式。冲击式钻孔是使激光脉冲不断作用在一点来实现微孔的加工,通常需要极高的能量,这种方法虽然速度极快,但是存在出入孔径不一致的弊端,微孔入口通常会因为能量的聚集形成一个直径比微孔大很多的坑洞,这在某些精密元件中是不可以接受的。旋切式钻孔所需能量没有冲击式高,通过使激光焦点和样品发生相对位移来实现加工,激光在样品上形成圆环加工痕迹,而且圆环的宽度可以自由设定,控制Z轴不断移动使激光一层一层的去除材料达到加工微孔的目的。本实验中选择旋切式来进行微孔加工,样品是厚度为 $360\ \mu\text{m}$ 的碳化硅样品,分别在丙酮和去离子水超声清洗 $10\ \text{min}$,然后将其固定在三维位移平台上的凹槽内进行加工。

2 实验结果

使用激光功率为 $2\ \text{W}$,重复频率为 $50\ \text{kHz}$,扫描速度为 $2\ \text{mm/s}$ 的加工参数进行对比加工。图2显示了在空气和水下微孔初步加工的形貌,以及能谱仪(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)分析结果,可以看出,水辅助加工碳化硅微孔的形貌比空气中加工的更好。如图2(a)所示,在空气中加工微孔的过程中,硅与氧气反应生成氧化硅,在加工区域产生粉状物质,与ZHANG Ru等^[15]加工时发现的热影响区形成的原因相同。这层粉末状物质堆积在微孔上方,阻挡了激光的继续深入,随着加工深度的增加,激光难以发挥去除材料的作用,导致加工微孔形貌粗糙,而且难以加工出通孔。对产生的物质进行了EDS能谱分析,如图2(c)所示发现其中有氧元素,而且比例很高,这表明产生了氧化硅物质,导致微孔加工效果不佳。为解决这一问题,我们将碳化硅置于水中加工。通过水辅助飞秒激光加工的方式有两个好处:1)水对加工区域起到降温作用,减少了氧化反应的发生,大大降低氧化硅堆积对激光加工效果带来的影响;2)水有带走加工产生碎屑的功能,有效的降低了微孔的粗糙度,避免了热影响区的产生。加工结果如图2(b)所示,加工微孔的侧壁明显光滑,不存在粉末碎屑。然后在加工区域进行EDS能谱分析,发现其中只包含碳元素和硅元素。在水中加工可以避免氧化反应,使微孔有更好的加工形貌。

脉冲能量的大小是影响材料去除的重要因素。由于激光能量越大焦点影响范围越大,为得到形貌更

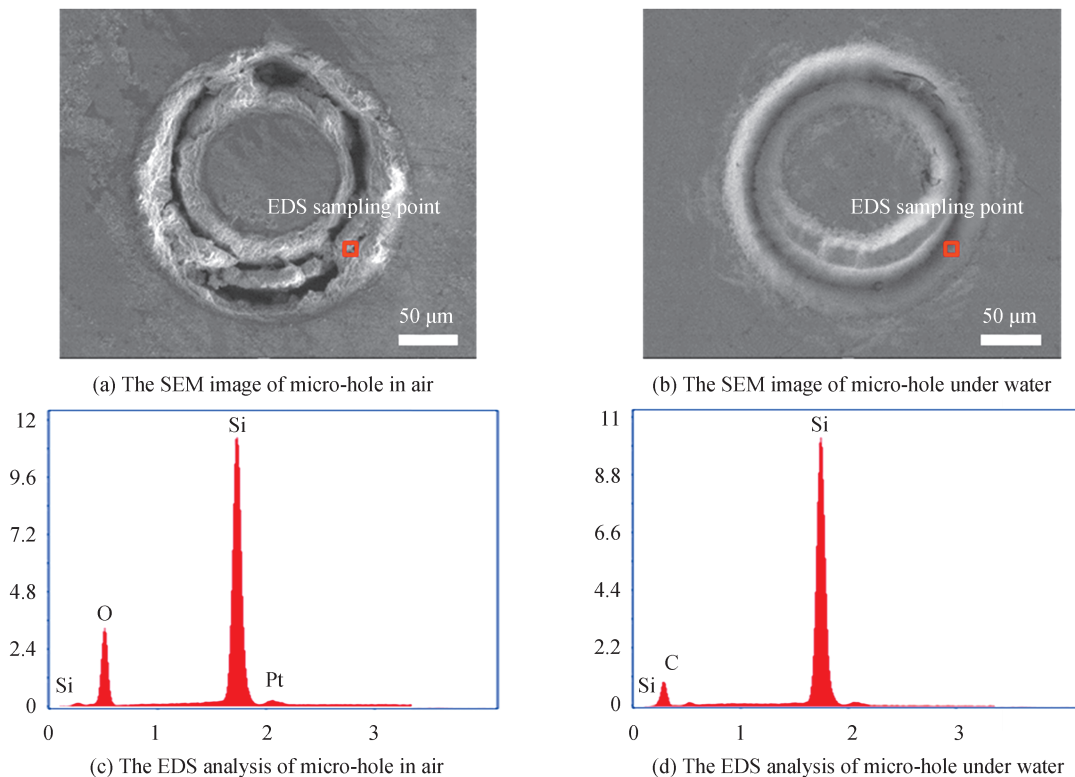


图2 微孔的SEM图像和EDS分析
Fig.2 The SEM image and EDS analysis of micro-hole

好,孔径更小的微孔,研究了脉冲能量与微孔的深度和直径的关系。图3显示了孔的深度和直径对脉冲能量的依赖性,孔的深度及直径由三维景深共聚焦显微镜测得。脉冲能量从 $5\ \mu\text{J}$ 增加到 $40\ \mu\text{J}$ 时,随着脉冲能量的增加,孔的深度逐渐增加,在脉冲能量达到 $25\ \mu\text{J}$ 时形成通孔。微孔的直径也随着脉冲能量的增加而增加。因为加工微孔的方式为旋切式加工,脉冲能量增加时,超过去除碳化硅的能量阈值的焦点作用范围越大,对孔外侧材料去除能力越强,导致微孔的孔径随着增大而增大。为避免入口孔径扩大导致微孔形貌不佳,脉冲能量的选择控制在 $25\sim 30\ \mu\text{J}$ 之间。

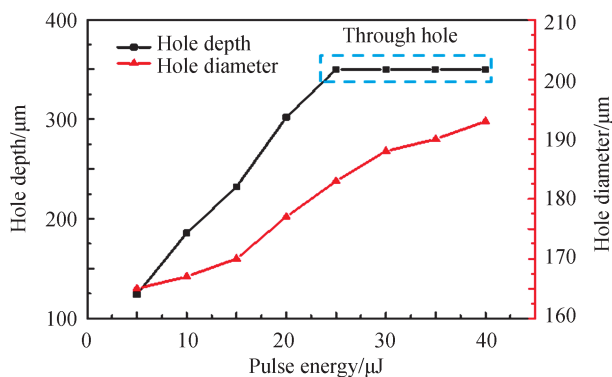


图3 孔的深度和直径与脉冲能量的关系

Fig.3 Depth and diameter of the hole versus pulse energy

通过不断调整加工参数,选择激光功率为 $1.5\ \text{W}$,重复频率为 $50\ \text{kHz}$,扫描速度为 $0.8\ \text{mm/s}$ 的参数进行加工,如扫描电镜侧视照片图4(a)所示,得到了形貌较好的微孔,可以看出孔的入口处没有形成氧化硅堆积的热影响区,激光作用后气化的材料随着水向一侧流去,使得侧壁上几乎不存在残留的碳化硅,微孔侧壁十分光滑。但是在微孔的入口处还能观察到比较明显的激光作用痕迹。激光聚焦点能量分布呈高斯分布,由于激光焦点开始加工时聚焦于材料表面,随着激光焦点深入碳化硅内部时,焦点上半部分能量在微孔入口处停留时间较长,材料被不断去除,导致入口处的孔径较大,不利于实际应用。

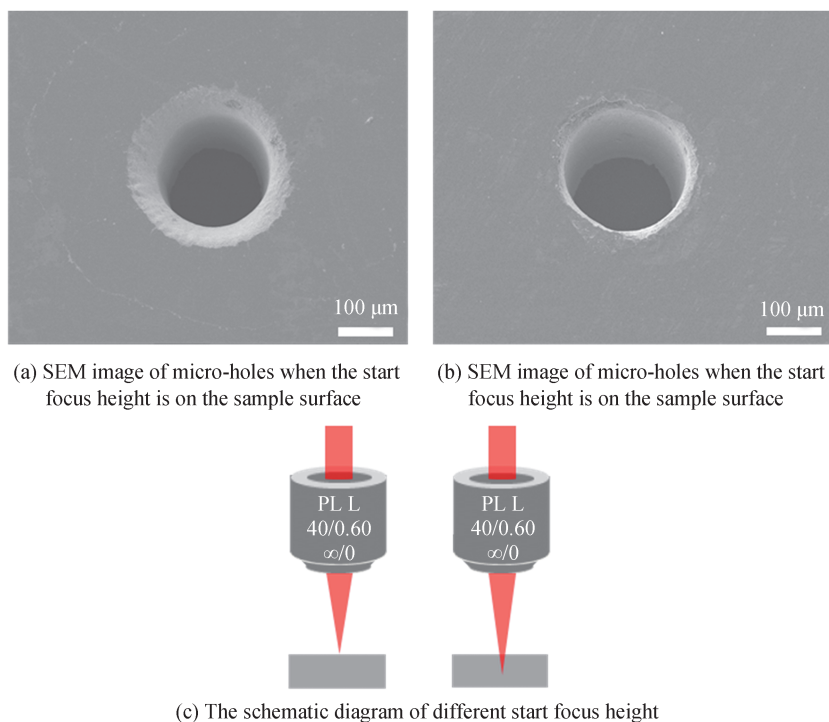


图4 不同起始加工深度加工微孔的SEM图像及示意图

Fig.4 The SEM images and schematic diagram of micro-holes processed at different initial processing depths

为解决这一问题,令激光焦点初始加工位置位于碳化硅表面下方,此时激光能量多集中于材料内部。当激光焦点深入样品内部时,激光能量对表面的影响较小,多作用于侧壁,避免了激光能量使微孔入口出现扩张。经过对深入样品距离的摸索,我们选择将焦点深入样品表面下方 15 μm 进行加工。与激光焦点初始位置位于样品表面加工的微孔相比,激光焦点位于样品表面下方时加工的微孔拥有同样光滑的侧壁,而且激光能量对入口的破坏更小。通过水辅助飞秒激光加工碳化硅的方式,经过对参数的摸索,得到了侧壁光滑,无热影响区的微孔。

3 结论

本文比较了波长为 1 030 nm 的飞秒激光在空气和水下加工的微孔形貌。通过扫描电子显微镜和 X 射线能谱对其形貌和化学组成进行了 SEM 和 EDS 表征。实验结果表明,与空气相比,在水中用飞秒激光加工碳化硅制备的微孔形貌更好,水对加工区域起到降温作用,减少了氧化反应的发生并能带走加工产生的碎屑。通过调整加工激光焦点的初始位置,可以降低激光能量对微孔表层的破坏,最终得到了侧壁光滑,无热影响区的碳化硅微孔。因此,水辅助碳化硅激光加工是一种非常有效的激光加工碳化硅材料的方法,可以给碳化硅的工业加工提供有效帮助。

参考文献

- [1] ZHANG Bo, DENG Xiaochuan, ZHANG Yourun, et al. Recent development and future perspective of silicon carbide power devices——opportunity and challenge[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2009, 4(2): 111-118.
张波, 邓小川, 张有润, 等. 宽禁带半导体 SiC 功率器件发展现状 & 展望[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 4(2): 111-118.
- [2] WANG Xuemei. Researches and applications of wide bandgap SiC power devices in electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 371-379.
王学梅. 宽禁带碳化硅功率器件在电动汽车中的研究与应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 371-379.
- [3] SHENG Kuang, GUO Qing. Prospects of SiC power electronic device application in power grid[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(3): 87-90+9.
盛况, 郭清. 碳化硅电力电子器件在电网中的应用展望[J]. 南方电网技术, 2016, 10(3): 87-90+9.
- [4] ZHAO Min, HE Wenzhi, ZHU Haochen, et al. Application and prospect of silicon carbide in energy field[J]. Shanghai Energy Conservation, 2017, (10): 578-582.
赵敏, 贺文智, 朱昊辰, 等. 碳化硅在能源领域的应用及展望[J]. 上海节能, 2017, (10): 578-582.
- [5] JIANG Wenhai. Analysis of the development and application of silicon carbide power electronic devices[J]. China High-Tech Enterprises, 2015, (36): 37-38.
姜文海. 试析碳化硅电力电子器件发展及其应用[J]. 中国高新技术企业, 2015, (36): 37-38.
- [6] MORKOC H, STRITE S, GAO G B, et al. Large-band-gap SiC, III-V nitride, and II-VI ZnSe-based semiconductor device technologies[J]. Journal of Applied physics, 1994, 76(3): 1363-1398.
- [7] YAMAMURA K, TAKIGUCHI T, UEDA M, et al. Plasma assisted polishing of single crystal SiC for obtaining atomically flat strain-free surface[J]. CIRP Annals, 2011, 60(1): 571-574.
- [8] PECHOLT B, GUPTA S, MOLIAN P. Review of laser microscale processing of silicon carbide[J]. Journal of Laser Applications, 2011, 23(1): 012008.
- [9] MISHCHIK K, BEUTON R, CAULIER O D, et al. Improved laser glass cutting by spatio-temporal control of energy deposition using bursts of femtosecond pulses[J]. Optics Express, 2017, 25(26): 33271-33332.
- [10] WANG, X, ZHENG H Y, CHU P L, et al. High quality femtosecond laser cutting of alumina substrates[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(6): 657-663.
- [11] SUGIOKA K, CHENG Y. Ultrafast lasers—reliable tools for advanced materials processing [J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(4): e149-e149.
- [12] MALINAUSKAS M, ŽUKAUSKAS A, HASEGAWA S, et al. Ultrafast laser processing of materials: from science to industry[J]. Light: Science & Applications, 2016, 5(8): e16133.
- [13] HUANG Yigang, TANG Fei, GUO Zheng, et al. Accelerated ICP etching of 6H-SiC by femtosecond laser modification [J]. Applied Surface Science, 2019, 488: 853-864.
- [14] KIM B, IIDA R, DOAN D H, et al. Mechanism of nanosecond laser drilling process of 4H-SiC for through substrate vias [J]. Applied Physics A, 2017, 123(6): 392-392.
- [15] ZHANG Ru HUANG Chuanzhen WANG Jun, et al. Micromachining of 4H-SiC using femtosecond laser[J]. Ceramics International, 2018, 44(15): 17775-17783.