动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.04.002

SiC及其功率器件的激光制孔研究进展

王宏建*，杨　涛，廖润钱，宋　昶
（松山湖材料实验室，广东 东莞 523808）

摘　要： SiC作为第三代半导体材料的典型代表，因具有优异的物化性能，在功率器件领域具有极大的应用前景。文章简要介绍了激光制孔的基本原理，综述了SiC的长脉冲与超短脉冲激光制孔研究进展，对比了长脉冲与超短脉冲激光的加工特点，分析了不同脉冲宽度下SiC的制孔效果。同时，介绍了GaN/SiC，AlGaN/GaN/SiC等SiC功率器件的激光制孔研究现状。最后，指出了SiC及其功率器件激光制孔面临的挑战，并展望了未来的发展方向。

关键词： SiC；半导体；功率器件；激光制孔
中图分类号： TN249　**文章编号：** 1001－5868(2021)04－0458－06

Research Progress on Laser Drilling of Silicon Carbide and Its Power Devices

WANG Hongjian, YANG Tao, LIAO Runqian, SONG Chang
(Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan 523808, CHN)

Abstract: As a typical representative of the third generation semiconductor materials, SiC has great application prospects in the field of power devices due to its excellent physical and chemical properties. In this paper, the basic principles of laser drilling are briefly introduced. The research progresses of long pulse and ultra-short pulse laser drilling of SiC are summarized. The processing characteristics of long pulse and ultra-short pulse laser are compared, and the drilling effects of SiC under different pulse widths are analyzed. At the same time, the research status of laser drilling of SiC power devices, such as GaN/SiC and AlGaN/GaN/SiC are introduced. Finally, the challenges of laser drilling of SiC and its power devices are pointed out, and the future development directions are prospected.

Key words: SiC; semiconductor; power devices; laser drilling

0　引言

以SiC为代表的第三代半导体材料较传统的Si基材料具有更高的热导率、更高的击穿场强及更高的电子饱和速率等性能优势，在高温、高压以及高频功率器件领域具有极大的应用前景[1]。采用SiC功率器件不仅可在更为严苛的环境下正常工作，而且能够节约更多的能源，已成功运用于二极管、晶体管以及各类功率模块产品[2]。然而，功率器件的结构各有不同，需按制造要求对材料进行加工。SiC稳定的共价键原子结构使得其硬度仅次于金刚石等少数材料，加工非常困难[3]。

微孔作为重要的导通结构，广泛存在于半导体功率器件中，其加工质量对于发挥出器件的最优性能至关重要[4-5]。图1所示为SiC功率器件微孔的典型结构示意图[6]。传统的制孔主要是通过机械钻头来实现的。对于SiC而言，此种方式不仅会剧烈磨损钻头，且易造成材料崩边，严重影响加工质量。引入超声辅助机械制孔[7]，虽然可在一定程度上改善加工状态，但是难以满足功率器件对微细群孔的加工需求。非传统加工方法，如激光、射流、电火花等有利于提高制孔质量[8]。其中，激光加工因无工

收稿日期：2021－06－01.
基金项目：广东省基础与应用基础研究基金项目(2020A1515111183).
* 通信作者：王宏建

具磨损且对材料无选择性，在 Si，SiC 等硬脆材料的微细孔加工中更具优势，已成功应用于消费电子及航空航天等领域[9-10]。

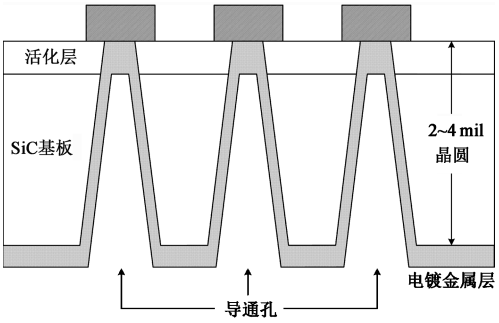


图 1　SiC 功率器件微孔的典型结构示意图[6]

本文从激光制孔的方式及不同脉冲宽度激光的加工特点出发，介绍了激光制孔的基本原理。综述了 SiC 及其功率器件的激光制孔研究进展，详细介绍了长脉冲激光、超短脉冲激光制孔及 GaN/SiC，AlGaN/GaN/SiC 等功率器件的激光制孔研究现状，指出了该研究领域面临的挑战，并对未来的发展方向进行了展望。

1　激光制孔的基本原理

激光制孔是将聚焦的激光束作用于材料表面，通过调节加工工艺参数，使得材料在瞬间熔化甚至直接蒸发而沿微孔深度方向去除的过程。根据激光束与材料的相对运动，可将激光制孔方式分为 4 种，即单脉冲制孔、多脉冲制孔、旋切制孔及螺旋制孔，如图 2 所示[11]。可以看到，采用单脉冲制孔与多脉冲制孔时，激光束静止，加工精度较低，但加工时间较短，此时加工效率也更高。相比而言，旋切制孔与螺旋制孔的加工精度较高，但需更长的加工时间，加工效率较低。实际加工时，需从多方面综合考虑具体使用何种制孔方式更为合适。

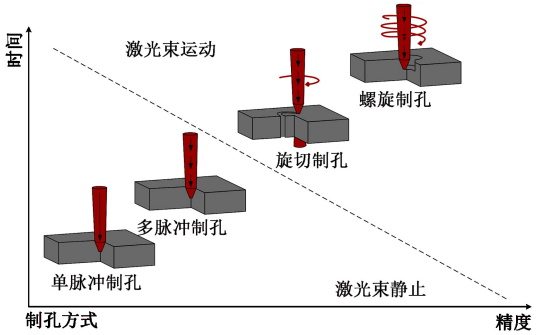


图 2　激光制孔的方式[11]

除了激光制孔的方式之外，不同的激光脉冲宽度对材料的加工效果影响很大，具体体现在激光加工的特征随着时间尺度的变化而明显变化，如图 3 所示[12]。飞秒级的超短脉冲激光与纳秒级甚至更长时间尺度的长脉冲激光相比，与材料的相互作用时间更短，峰值功率密度更高，利用冷烧蚀特性加工具有更优的制孔质量。与此同时，不同时间尺度下激光去除材料的烧蚀阈值存在显著差异，这也间接表明了超短脉冲激光的冷加工比长脉冲激光的热熔加工具有更高的精度。对于 C/SiC，SiC/SiC 等超硬耐高温复合材料的制孔加工，超短脉冲激光已展现出绝对的优势[13-14]。

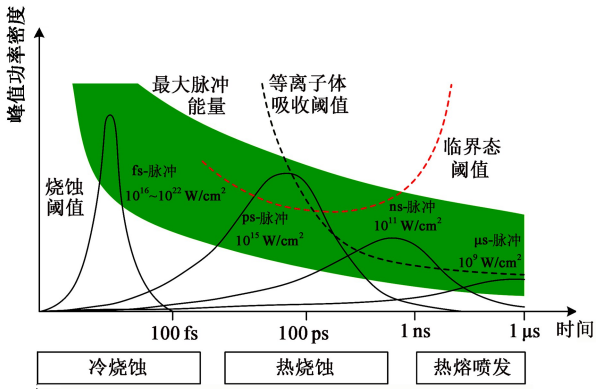


图 3　不同时间尺度下激光加工的特征[12]

2　SiC 的激光制孔研究进展

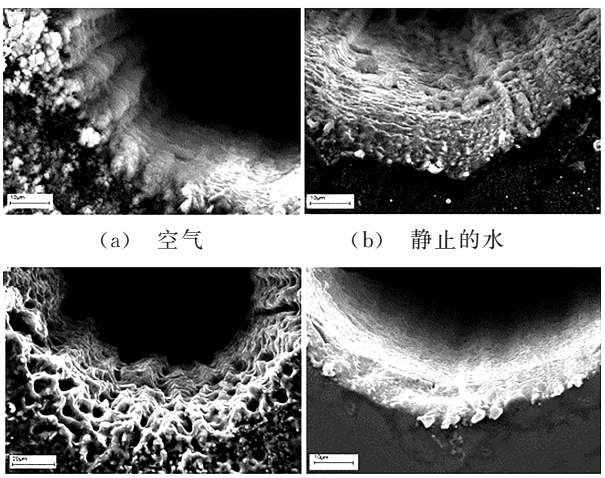
2.1　长脉冲激光制孔

SiC 的长脉冲激光制孔以纳秒激光为主。虽然长脉冲激光的加工质量不如超短脉冲激光，但是更低的加工成本与更高的加工效率使得长脉冲激光在制孔领域仍然占据着重要的地位[15]。

Doan 等[16]研究了红外纳秒激光的能量密度对 SiC 制孔孔径与深度的影响。结果表明，材料的孔径及深度均随能量密度的增大而增大，尤其是在能量密度较低时，孔形尺寸增大的趋势更为明显。当能量密度较低时，SiC 主要通过表面熔化、溅射及蒸发而去除。当能量密度增大到一定程度时，激光将穿过 SiC 表面受热分解产生的透明物质而作用于材料内部，增大了继续加工的难度。因此，存在较为合理的能量密度区间，此范围内 SiC 孔形可调节的空间更大。该课题组继续研究了水环境下 SiC 的纳秒激光制孔[17]。由于长脉冲激光主要通过热烧蚀去除材料，将 SiC 置于水介质中会降低材料的去除率。此时因受到液体清洗与冷却的作用，水环境下可有

效提高制孔质量，进而获得无熔渣、无微裂纹及无热影响区等加工缺陷的 SiC 微孔。即使对于超短脉冲激光，水介质同样可以起到提高制孔质量的作用[18]。

除了水之外，采用有机溶剂也有益于实现更为干净的微孔加工。Wee 等[19]对比研究了不同介质对纳秒激光加工 SiC 微孔的影响，如图 4 所示。观察材料的形貌可以发现，与空气环境(图 4(a))相比，液体介质(图 4(b)～(d))中加工 SiC 孔口边缘的颗粒及团簇状熔渣明显减少。然而，不同液体介质中 SiC 的形貌也各不相同。较静止的水(图 4(b))而言，流动的水(图 4(c))会加大对激光束传输的干扰程度，从而增加制孔过程中激光与材料作用的不稳定性，所以在材料加工表面形成了大量的不规则结构。对比加工结果容易发现，酒精介质下加工的 SiC 微孔质量最佳，不仅孔壁光滑，而且熔渣也最少(图 4(d))。这主要得益于酒精较低的沸点与良好的润湿性。另外，被加工材料表面上方的液体介质层厚度也会对制孔效果产生影响。厚度过浅将难以提高加工质量，但过厚又会阻碍激光加工，因此存在最优值。本项研究建议的最佳液体介质层厚度约为 500 μm。



(a) 空气 (b) 静止的水

(c) 流动的水 (d) 酒精

图 4 不同介质下的纳秒激光加工 SiC 微孔效果[19]

Kim 等[20]研究了 SiC 的纳秒激光制孔机制，发现材料表面的碳化会加速热烧蚀效应，进而在加工区域形成重铸层。即使将 SiC 置于水环境中，材料的碳化现象仍然存在，但比在空气中加工时要弱。考虑到重铸层会阻碍深孔加工，为了提高微孔的深径比，采用不同轮廓的激光束是有效途径。通常情况下，贝塞尔光束比高斯光束更适合加工高深径比的微孔，但这也取决于材料对激光波长的选择性。就 SiC 而言，1 064 nm 的红外波长具有较好的穿透性。对于该波长下的贝塞尔光束与高斯光束，前者在制孔过程中激光束的传播反而更易受到材料的干扰，此时相对稳定的高斯光束更利于加工深孔[21]。

2.2 超短脉冲激光制孔

早在 2005 年，以飞秒激光为代表的超短脉冲激光就被证实是 SiC 制孔的有效手段[22]。如图 5 所示为飞秒激光在 SiC 上加工出的阵列群孔[23]。飞秒激光加工时产生的多光子电离现象，特别是没有晶格传热的过程，使得快速实现高精度微细结构的加工成为可能，甚至能够获得亚微米级的表面粗糙度[24]。随着激光加工领域的高速发展，SiC 的超短脉冲激光制孔逐渐成为研究的热点。

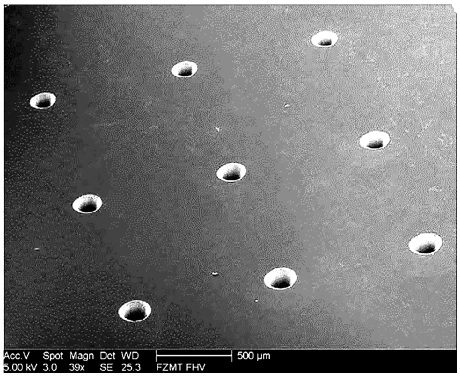
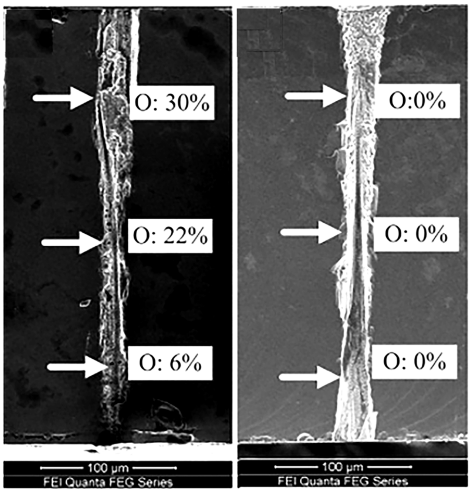


图 5 SiC 的飞秒激光阵列群孔加工[23]

激光制孔过程中产生的熔渣堆积会增大深孔加工的难度。Li 等[25]采用飞秒激光加工 SiC 微孔后，发现酒精能够有效去除材料熔渣，同时减少材料在加工表面的再次沉积。除此之外，相比于直接在空气中加工而言，酒精的挥发性可以带走激光作用材料时产生的热量，更利于深孔加工。对于在空气中经飞秒激光加工后材料存在的氧化区域，可通过化学溶剂处理。Khuat 等[26]将硝酸与氢氟酸的混合溶液对 SiC 通孔进行选择性腐蚀，检测得到的氧含量变化如图 6 所示。对于飞秒激光直接加工的 SiC 通孔截面，氧含量随微孔深度的增加而减少。此处的氧主要来自 SiC 与空气发生化学反应形成 Si 的氧化物。经混合溶液腐蚀后，再对 SiC 通孔的相应位置进行检查，发现氧含量均为 0，这说明氧化物已得到完全去除。对于制孔过程中产生更多熔渣的长脉宽激光而言，化学溶剂的腐蚀则更为有效[27]。

尽管超短脉冲激光的加工精度已远远高于长脉冲激光，但仍然会在材料加工区域周边造成损伤。

为了研究材料的损伤过程，Hattori 等[28]采用高速相机对 SiC 制孔时形成的应力波进行了实时观测。研究发现，更高的激光脉冲能量下，激光诱导的应力波更为清晰，由此造成的材料损伤也更大。随着激光脉冲宽度由飞秒延长至皮秒，应力波及损伤的区域均减小，更多地集中于材料表面，热损伤由此产生。实验证明，相同的激光脉冲能量与脉冲数下，飞秒激光沿材料轴向作用的距离更远，进而加工出更深的微孔。



（a）　腐蚀前　　（b）　腐蚀后

图 6　SiC 微孔的氧含量变化[26]

3　SiC 功率器件的激光制孔研究进展

3.1　GaN/AlN/SiC 功率器件的激光制孔

SiC 功率器件通常是以 SiC 作为基板，在其上方依次叠加多层材料形成复合结构，采用激光进行制孔，再经过封装等一系列工艺流程制作而成。GaN/AlN/SiC 是半导体场效应晶体管（Field Effect Transistor，FET）的主要材料[29]。图 7 所示为激光制孔的效果[30]。可以看到，GaN，AlN，SiC 各层材料之间均为光滑过渡，并未出现分层的现象。功率器件通常需要在材料孔壁作金属化处理，而激光能够方便调节制孔的锥度。对于层状复合材料的盲孔加工而言，激光比用 SF_6 等气体刻蚀能够更加精确地控制加工深度，且加工表面质量更好[31]。

除了常规的圆孔之外，异形孔也是功率器件常见的结构[32-33]。Vanko 等[34]使用飞秒激光在 GaN/AlN/SiC 功率器件上加工出了不同形状孔形结构，如图 8 所示。飞秒激光的冷烧蚀加工特性使得材料的边缘轮廓非常清晰，没有热损伤，获得了理想的加工效果。对于高深径比结构而言，即使是飞秒激光也会存在一定的局限。这主要体现在加工过程中产生的高温熔渣向外喷发难度增大，残留在加工区域的材料会对孔壁及底部造成烧蚀，此种现象通过改变制孔锥度可得到一定改善。

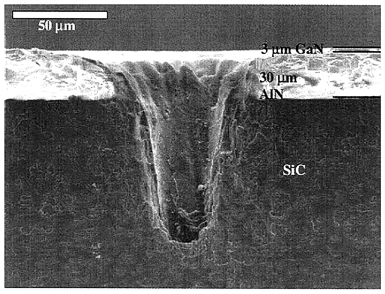
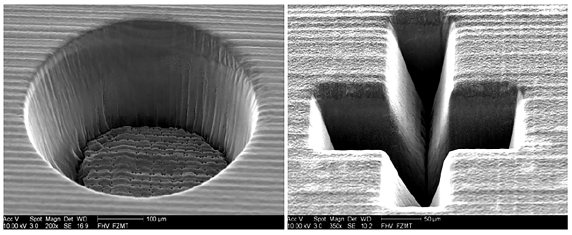


图 7　GaN/AlN/SiC 功率器件的激光制孔效果[30]



（a）　圆孔　　（b）　十字孔

图 8　不同形状的 SiC 功率器件制孔[34]

3.2　AlGaN/GaN/SiC 功率器件的激光制孔

于 SiC 基板上沉积 AlGaN/GaN 薄膜构成的复合结构主要应用于 FET 中的高电子迁移率晶体管（High Electron Mobility Transistor，HEMT）[35-37]。图 9 所示为 AlGaN/GaN/SiC 功率器件微孔结构[38]。对激光制孔前后器件的电性能进行检测，发现仅有轻微变化，说明器件的性能几乎没有受到影响。激光制孔使得多功能器件的多维互连成为可能，在确保器件原有性能的前提下，加工效率更高，有望取代传统的光刻与等离子刻蚀等加工方式[39-41]。

Wernicke 等[42]研究了紫外纳秒激光加工 AlGaN/GaN/SiC 功率器件微孔过程中 SiC 基板的形貌、成分及晶型变化。实验结果表明，对于孔壁沉积的材料熔渣，经氢氟酸腐蚀后，仍然存在数微米厚的重铸层。激光与 SiC 的作用使得材料中产生了 Si 纳米晶，且 SiC 的结晶度发生了改变。对重铸层下方的材料进行观察，发现并未产生缺陷扩展、微裂纹及晶体损伤等现象，这说明紫外纳秒激光对 SiC 的加工精度不受激光诱导晶体缺陷的限制。Krüger 等[43]对支撑 AlGaN/GaN 晶体管结构的 SiC 进行了激光制孔研究，获得的微孔形貌如图 10 所示。由图 10(a)，(c)可见，孔壁覆盖着蓬松的熔渣，这主要

是材料在空气中加工形成的 SiO_2。经氢氟酸腐蚀后，氧化物得到有效去除，孔壁的光滑程度显著提高，但仍存在材料受激光热影响而产生的重铸层，如图 10(b)，(d)所示。进一步的研究表明，重铸层的形成会影响材料的 Si/C 比例，在几十纳米的深度内才趋于一致[44]。由于 AlGaN/GaN/SiC 功率器件各层材料均不相同，等离子体刻蚀虽然也可以获得微孔结构，但需要根据材料的特性选择不同的刻蚀气氛，如 SF_6 对应 SiC，Cl_2 与 BCl_3 对应 AlGaN/GaN[45]。相比之下，激光对材料的适应性强，可在 AlGaN/GaN/SiC 功率器件上直接制孔，方便快捷。

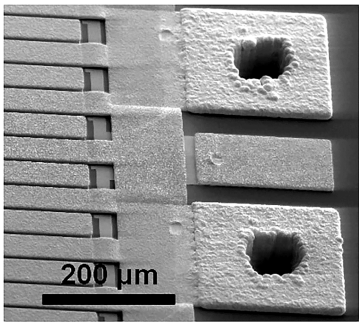
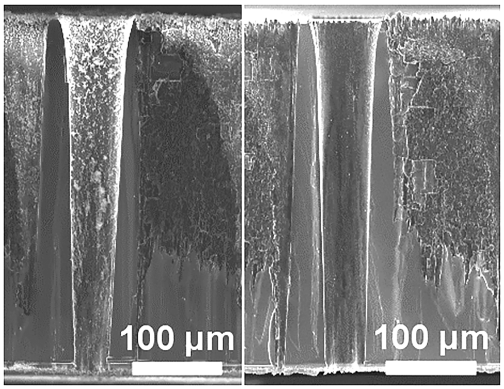
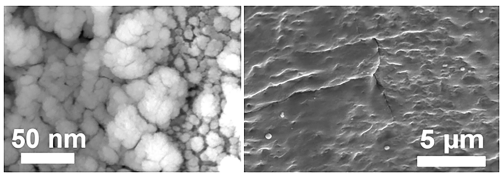


图 9 AlGaN/GaN/SiC 功率器件微孔结构[38]



(a) 腐蚀前孔壁宏观形貌 (b) 腐蚀后孔壁宏观形貌



(c) 腐蚀前孔壁微观形貌 (d) 腐蚀后孔壁微观形貌

图 10 腐蚀前后的 SiC 孔壁形貌对比[43]

4 总结与展望

本文首先介绍了激光制孔的基本原理，并分析对比了不同脉冲宽度激光对材料的作用特点及各自的加工优势与局限。基于此，综述了 SiC 的长脉冲与超短脉冲激光制孔研究进展。虽然长脉冲激光在加工成本及效率上优于超短脉冲激光，但更多的热损伤会降低制孔质量。相比而言，超短脉冲激光的加工精度更高，更容易实现高质量制孔。无论采用何种激光制孔，均会存在熔渣去除的问题，液体可在加工过程或后续处理中起到辅助作用，有利于提高制孔质量。就 SiC 功率器件而言，激光制孔不会损伤器件的原有性能，确保了使用过程中器件的可靠性，在一定程度上可取代传统的光刻与等离子刻蚀等制孔方式，已成为功率器件制孔领域的主流技术。目前，超短脉冲激光制孔的成本仍然过高，主要是国产的激光光源距国际的成熟产品仍具有一定差距。研制高功率、超短脉宽且运行稳定的超短脉冲激光器，配合超精细复合制孔工艺，并实现工业化应用，将会是该领域今后重要的研究方向。

参考文献：

[1] 王 莹. SiC：为何被称为是新一代功率半导体？[J]. 电子产品世界，2019，26(9)：79-82，47.
Wang Ying. SiC：Why is it called a new generation of power semiconductor? [J]. Electron. Eng. Prod. World，2019，26(9)：79-82，47.

[2] Wang F，Zhang Z. Overview of silicon carbide technology：Device，converter，system，and application[J]. CPSS Trans. Power Electron. Appl.，2016，1(1)：13-32.

[3] Pawar P，Ballav R，Kumar A. Machining processes of silicon carbide：A review[J]. Rev. Adv. Mater. Sci.，2017，51：62-76.

[4] Khan F A，Roof B，Zhou L，et al. Etching of silicon carbide for device fabrication and through via-hole formation[J]. J. Electron Mater.，2001，30(3)：212-219.

[5] Pearton S J，Abernathy C R，Gila B P，et al. Enhanced functionality in GaN and SiC devices by using novel processing [J]. Solid State Electron.，2004，48：1965-1974.

[6] Cho H，Lee K P，Leerungnawarat P，et al. High density plasma via hole etching in SiC[J]. J. Vac. Sci. Technol. A，2001，19(4)：1878-1881.

[7] Ohnishi O，Doi T，Kurokawa S，et al. Performance of micro PCD drills in drilling into SiC and effects of ultrasonic vibration [J]. Int. J. Nanomanuf.，2014，10(1/2)：175-184.

[8] Zhang P，Feng Q，Pei Z J，et al. Non-traditional drilling of SiC based ceramic matrix composites：A literature review[J]. Int. J. Mach. Machin. Mater.，2011，10(3)：235-259.

[9] Wang H J，Yang T. A review on laser drilling and cutting of silicon[J]. J. Eur. Ceram. Soc.，2021，41(10)：4997-5015.

[10] Wang H J，Lin H T，Wang C Y，et al. Laser drilling of structural ceramics-A review[J]. J. Eur. Ceram. Soc.，2017，37(4)：1157-1173.

[11] Fornaroli C，Holtkamp J，Gillner A. Laser-beam helical

drilling of high quality micro holes[J]. Phys. Proc., 2013, 41: 661-669.

[12] Schulz W, Eppelt U, Poprawe R. Review on laser drilling Ⅰ. Fundamentals, modeling, and simulation[J]. J. Laser Appl., 2013, 25(1): 012006.

[13] Zhang R H, Li W N, Liu Y S, et al. Machining parameter optimization of C/SiC composites using high power picosecond laser[J]. Appl. Surf. Sci., 2015, 330: 321-331.

[14] Liu Y S, Zhang R H, Li W N, et al. Effect of machining parameter on femtosecond laser drilling processing on SiC/SiC composites[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2018, 96: 1795-1811.

[15] Roth G L, Adelmann B, Hellmann R. Cutting and drilling of SiC semiconductor by fiber laser[J]. J. Laser Micro. Nanoen., 2015, 10(3): 279-283.

[16] Doan H D, Iwatani N, Fushinobu K. A study of near-infrared nanosecond laser ablation of silicon carbide[J]. Int. J. Heat Mass Tran., 2013, 65: 713-718.

[17] Iwatani N, Doan H D, Fushinobu K. Optimization of near-infrared laser drilling of silicon carbide under water[J]. Int. J. Heat Mass Tran., 2014, 71: 515-520.

[18] Wang W, Song H, Liao K, et al. Water-assisted femtosecond laser drilling of 4H－SiC to eliminate cracks and surface material shedding[J]. Int. J. Adv. Manuf. Tech., 2021, 112: 553-562.

[19] Wee L M, Khoong L E, Tan C W, et al. Solvent-assisted laser drilling of silicon carbide[J]. Int. J. Appl. Ceram. Technol., 2011, 8(6): 1263-1276.

[20] Kim B, Lida R, Doan D H, et al. Mechanism of nanosecond laser drilling process of 4H-SiC for through substrate vias[J]. Appl. Phys. A, 2017, 123: 392.

[21] Kim B, Lida R, Kiyokawa S, et al. Effect of beam profile on nanosecond laser drilling of 4H-SiC[J]. J. Laser Appl., 2018, 30(3): 032207.

[22] Farsari M, Filippidis G, Zoppel S, et al. Efficient femtosecond laser micromachining of bulk 3C-SiC[J]. J. Micromech. Microeng., 2005, 15: 1786-1789.

[23] Zoppel S, Farsari M, Merz R, et al. Laser micro machining of 3C-SiC single crystals[J]. Microelectron. Eng., 2006, 83: 1400-1402.

[24] Dong Y, Nair R, Molian R, et al. Femtosecond-pulsed laser micromachining of a 4H-SiC wafer for MEMS pressure sensor diaphragms and via holes[J]. J. Micromech. Microeng., 2008, 18: 035022.

[25] Li C, Shi X, Si J, et al. Alcohol-assisted photoetching of silicon carbide with a femtosecond laser[J]. Opt. Commun., 2009, 282: 78-80.

[26] Khuat V, Ma Y, Si J, et al. Fabrication of through holes in silicon carbide using femtosecond laser irradiation and acid etching[J]. Appl. Surf. Sci., 2014, 289: 529-532.

[27] Zekentes K, Zergioti I, Klini A, et al. Via hole formation in silicon carbide by laser micromachining[J]. Mater. Sci. Forum, 2006, 527/529: 1119-1122.

[28] Hattori J, Ito Y, Jo H, et al. High-speed observation of pulse energy and pulse width dependences of damage generation in SiC during ultrashort pulse laser drilling[J]. Appl. Phys. A, 2020, 126: 861.

[29] Kim S, Bang B S, Ren F, et al. High-rate laser ablation for through-wafer via holes in SiC substrates and GaN/AlN/SiC templates[J]. J. Semicond. Tech. Sci., 2004, 4(3): 217-221.

[30] Kim S, Bang B S, Ren F, et al. SiC via holes by laser drilling[J]. J. Electron Mater., 2004, 33(5): 477-480.

[31] Shi Y, Sun Y, Liu J, et al. UV nanosecond laser machining and characterization for SiC MEMS sensor application[J]. Sensor Actuat. A-Phys., 2018, 276: 196-204.

[32] Liu L, Chang C Y, Wu W, et al. Circular and rectangular via holes formed in SiC via using ArF based UV excimer laser[J]. Appl. Surf. Sci., 2011, 257: 2303-2307.

[33] Vanko G, Hudek P, Zehetner J, et al. Bulk micromachining of SiC substrate for MEMS sensor applications[J]. Microelectron. Eng., 2013, 110: 260-264.

[34] Vanko G, Zehetner J, Choleva P, et al. Laser ablation: A supporting technique to micromachining of SiC[C]// IEEE Inter. Conf. on Advanced Semiconductor Devices & Microsystems, 2012: 259-262.

[35] Zhang A P, Rowland L B, Kaminsky E B, et al. Microwave power SiC MESFETs and GaN HEMTs[J]. Solid State Electron., 2003, 47: 821-826.

[36] Lossy R, Liero A, Krüger O, et al. Gallium nitride powerbar transistors with via holes fabricated by laser ablation[J]. Phys. Stat. Sol., 2006, 3: 482-485.

[37] Krüger O, Grundmüller R. UV laser processing for semiconductor devices[J]. Laser Tech. J., 2013, 5: 26-30.

[38] Krüger O, Schöne G, Wernicke T, et al. Laser-assisted processing of VIAs for AlGaN/GaN HEMTs on SiC substrates[J]. IEEE Electron. Devi. Lett., 2006, 27(6): 425-427.

[39] Krüger O, Schöne G, Liero A, et al. Laser drilling of microvias in silicon carbide for AlGaN/GaN power transistors[C]// Proc. of the Third Inter. WLT-Conf. on Lasers in Manufacturing, 2005: 663-667.

[40] Anderson T, Ren F, Pearton S J, et al. Laser ablation of via holes in GaN and AlGaN/GaN high electron mobility transistor structures[J]. J. Vac. Sci. Technol. B, 2006, 24(5): 2246-2249.

[41] Anderson T J, Ren F, Covert L, et al. Comparison of laser-wavelength operation for drilling of via holes in AlGaN/GaN HEMTs on SiC substrates[J]. J. Electron. Mater., 2006, 35(4): 675-679.

（下转第478页）

纤激光器的研究[J]. 物理学报，2009(5)：3173-3178.
Deng Yixin, Tu Chenghou, Lv Fuyun. Study of self-similar pulse nonlinear polarization rotation mode-locked fiber laser[J]. J. of Physics, 2009(5): 3173-3178.

[10] 王小发，刘经惠，靳增高. 基于非线性放大环镜和 Lyot 滤波器的多波长与耗散孤子锁模态开关型掺铥光纤激光器[J]. 光子学报，2020，49(4)：6-15.
Wang Xiaofa, Liu Jinghui, Jin Zenggao. State-switchable multi-wavelength and dissipative soliton mode-locked Tm-doped fiber laser based on a combination of nonlinear amplifying loop mirror and Lyot filter[J]. J. of Photon., 2020, 49(4): 6-15.

[11] Zhou Yi, Lin Wei, Cheng Huihui, et al. Composite filtering effect in a SESAM mode-locked fiber laser with a 32-GHz fundamental repetition rate: switchable states from single soliton to pulse bunch[J]. Opt. Express, 2018, 26(8): 17458.

[12] 杨 光，楼嘉昌，韩达明，等. 基于拉锥光纤石墨烯可饱和吸收体的被动调 Q 锁模掺铥光纤激光器[J]. 中国激光，2015，42(s1)：79-83.
Yang Guang, Lou Jiachang, Han Daming, et al. Passively Q-switched mode-locked thulium-doped fiber laser by using graphene saturable absorber on tapered fiber[J]. China Laser, 2015, 42(s1): 79-83.

[13] 张 玲，王勇刚，于海娟，等. 基于单壁碳纳米管的高功率被动锁模光纤放大器[J]. 中国激光，2012,39(4)：194.
Zhang Ling, Wang Yonggang, Yu Haijuan, et al. High power passive mode-locked fiber amplifier based on single-walled carbon nanotubes[J]. China Laser, 2012,39(4): 194.

[14] Zhang H, Lu S B, Zheng J, et al. Molybdenum disulfide (MoS_2) as a broadband saturable absorber for ultra-fast photonics[J]. Opt. Express, 2014, 22(6): 7249.

[15] Duan Lina, Su Yulong, Wang Yonggang, et al. Passively mode locked erbium doped fiber laser via a D shape fiber based MoS_2 saturable absorber with a very low nonsaturable loss[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(2): 190-194.

[16] Krzempek K, Sotor J, Abramski K, et al. Compact all-fiber figure-9 dissipative soliton resonance mode-locked double-clad Er∶Yb laser[J]. Opt. Lett., 2016, 41(21): 4995-4998.

[17] Dong Ningning, Li Yuanlin, Feng Yanyan, et al. Optical limiting and theoretical modelling of layered transition metal dichalcogenide nanosheets[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 14646.

[18] Zhang Renli, Wang Jun, Zhang Xiaoyan, et al. Mode-locked fiber laser with $MoSe_2$ saturable absorber based on evanescent field[J]. Chinese Physics B, 2019, 28(1): 406-410.

[19] Chernysheva M A, Krylov A A, Kryukov P G, et al. Nonlinear amplifying loop-mirror-based mode-locked thulium-doped fiber laser[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2012, 24(14): 1254-1256.

[20] Jia Qingsong, Wang Tianshu, Ma Wanzhuo, et al. Mode-locking thulium-doped fiber laser with 1.78 GHz repetition rate based on combination of nonlinear polarization rotation and semiconductor saturable absorber mirror[J]. IEEE Photonics J., 2017, 9(3): 1-8.

[21] Wang Xiaofa, Xia Qing, Gu Bin. A 1.9 μm noise-like mode-locked fiber laser based on compact figure-9 resonator[J]. Opt. Commun., 2019, 434: 180-183.

[22] 黄诗盛，王勇刚，李会权，等. 氧化石墨烯被动锁模掺镱光纤激光器多脉冲现象的实验研究[J]. 物理学报，2014,63(8)：167-173.
Huang Shisheng, Wang Yonggang, Li Huiquan, et al. Experimental studies of multiple pulses in a passively ytterbium-doped fiber laser based on graphene-oxide saturable absorber[J]. J. of Phys., 2014,63(8): 167-173.

[23] Zhang Han, Tang Dingyuan, Knize R J, et al. Graphene mode locked, wavelength-tunable, dissipative soliton fiber laser[J]. Appl. Phys. Lett., 2010, 96(11): 51.

作者简介：

王小发(1978—)，男，湖南邵阳人，博士，副教授，研究方向为光纤激光器、固体激光器和非线性光学。

(上接第 463 页)

[42] Wernicke T, Krüger O, Herms M, et al. Analysis of materials modifications caused by UV laser micro drilling of via holes in AlGaN/GaN transistors on SiC[J]. Appl. Sur. Sci., 2007, 253: 8008-8014.

[43] Krüger O, Schöne G, Wernicke T, et al. UV laser drilling of SiC for semiconductor device fabrication[J]. J. Phys: Confer. Ser., 2007, 59: 740-744.

[44] Krüger O, Wernicke T, Würfl J, et al. Analysis of material modifications caused by nanosecond pulsed UV laser processing of SiC and GaN[J]. Appl. Phys. A, 2008, 93: 85-91.

[45] Min B G, Kim S I, Lee J M, et al. Fabrication and electrical properties of an AlGaN/GaN HEMT on SiC with a taper-shaped backside via hole[J]. J. Korean Phys. Soc., 2015, 67(4): 718-722.

作者简介：

王宏建(1989—)，男，湖南人，博士，工程师，主要研究方向为半导体材料的激光加工技术与装备。