材料、结构与工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021063005

AlN 陶瓷的飞秒激光表面加工及制孔应用

王海龙，李　铁，王宏建*

（松山湖材料实验室，广东 东莞 523808）

摘　要： 采用飞秒激光对 AlN 陶瓷进行表面加工实验，分析了激光能量密度和扫描速度对加工表面形貌和尺寸的影响，优选出兼顾加工质量与效率的工艺参数区间，即能量密度 10～14 J/cm^2，扫描速度 20～30 mm/s。基于此，以螺旋扫描轨迹于 AlN 陶瓷上进行制孔应用，成功实现了无崩边及微裂纹等缺陷的圆孔、方孔及跑道孔加工。该研究验证了飞秒激光加工高质量多孔型的可行性，推动了硬脆材料激光制孔技术在半导体功率器件领域的应用。

关键词： AlN；飞秒激光；表面加工；制孔

中图分类号： TN249　**文章编号：** 1001－5868(2021)05－0668－04

Femtosecond Laser Surface Processing of AlN Ceramic and Drilling Application

WANG Hailong, LI Tie, WANG Hongjian

(Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan 523808, CHN)

Abstract: The experiments of surface processing were performed on AlN ceramic by femtosecond laser, and the effects of laser energy density and scanning speed on the surface morphology and size were analyzed. Considering the processing quality and efficiency, the optimized parameters of energy density of 10～14 J/cm^2 and scanning speed of 20～30 mm/s were selected. Based on this, the spiral scanning track was applied to drill holes on AlN ceramic. The round, square and runway holes without micro-crack and edge chipping were successfully realized. This study verifies the possibility of femtosecond laser processing high-quality holes with multi-shapes. It promotes the application of laser drilling technology for hard and brittle materials in the field of semiconductor power devices.

Key words: AlN; femtosecond laser; surface processing; drilling

0　引言

AlN 陶瓷因具有高热导率、低介电常数和低介质损耗等性能优势，是制造半导体功率器件的理想材料。微孔广泛应用于半导体功率器件中，除普遍存在的圆孔之外，不同的功能往往需要异形孔结构。AlN 陶瓷的硬脆特性使得传统的机械加工方式极易引起材料破碎，制孔难度大。采用激光非接触加工则不存在上述问题，是加工陶瓷的理想手段[1]。对于长脉冲激光，由于加工过程中大量的热效应积累易产生显著的材料熔渣、微裂纹等，大幅降低了加工精度，难以满足半导体功率器件对陶瓷微孔的加工要求[2]。飞秒激光由于脉冲作用时间极短、峰值功率极高，材料得以在瞬间去除，特别适宜于 Al_2O_3，TiC，SiC 等硬脆材料的高质量制孔[3-6]。对于 AlN 陶瓷的飞秒激光加工研究多集中于烧蚀机理及圆孔加工方面[7-9]，异形孔加工较为欠缺。

本文研究了飞秒激光能量密度与扫描速度对 AlN 陶瓷表面加工形貌及尺寸的影响，优选出无崩边、无微裂纹等加工缺陷的工艺参数区间，并以此为指导运用于圆孔及方孔、跑道孔等异形孔的加工，为飞秒激光在半导体功率器件领域陶瓷材料的制孔应用提供了技术支持。

收稿日期：2021－06－30.

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

1　实验

以厚度为 250 μm 的 AlN 陶瓷为对象，采用波长为 515 nm、脉宽为 223 fs 的飞秒激光（Pharos-PH1，Light Conversion，Lithuania）进行加工实验。如图 1 所示为飞秒激光在材料表面的环形扫描轨迹示意图。

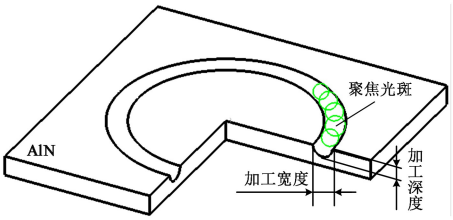


图 1　飞秒激光的环形扫描轨迹示意图

飞秒激光聚焦于 AlN 陶瓷表面，光斑直径为 9 μm。设定重复频率为 100 kHz、同轴气压为 0.4 MPa，采用不同的激光能量密度、扫描速度，各组重复实验三次。对已加工完成的材料置于无水乙醇中超声清洗 30 min。采用扫描电子显微镜（JSM-IT500，Jeol，Japan）对样品的加工表面进行形貌观察，样品加工区域的尺寸通过激光共聚焦显微镜（VKX-1100，Keyence，Japan）检测。

2　结果与讨论

2.1　AlN 陶瓷加工表面形貌分析

如图 2 所示为不同能量密度及扫描速度下，AlN 陶瓷的加工表面形貌。由图可见，飞秒激光在 AlN 陶瓷表面加工出了一系列圆环轨迹。显然，圆环的宽度与深度随飞秒激光能量密度与扫描速度的变化而变化。值得注意的是，尽管加工表面形貌的差异较大，但加工区域附近均未出现飞溅物堆积的材料熔渣。这主要是因为飞秒激光加工过程中，材料发生多光子吸收现象，进而在材料内部形成等离子体。激光作用时，等离子体会吸收激光能量，直至材料被加工完成。由于等离子体的冷凝作用，加工过程中形成的熔渣多由超细粉末构成，可由超声清洗而轻易去除，获得干净的加工表面[10]。

可以看到，增大能量密度、降低扫描速度会加剧 AlN 陶瓷的崩边现象。因此，能量密度 18 J/cm^2、扫描速度 15 mm/s 的加工工艺参数下，AlN 陶瓷圆环加工区域的崩边现象最为严重。对于特定的激光光源与被加工材料，通常存在着特定的热平衡时间常数。当激光作用材料与能量的耦合时间大于热平衡时间时，存在于加工过程中的热扩散效应将更为显著。更高的脉冲能量通常会延长耦合时间，当超过临界值时，热效应将会对加工区域周边的材料产生影响[11]。另外，热效应会增大材料的温差，从而在加工区域形成热应力，当超过了材料的强度极限时，则可能形成加工缺陷[12]。

对于降低能量密度、增大扫描速度的情况，AlN 陶瓷加工表面则不存在崩边等缺陷，且圆环内壁较为光滑。考虑到 AlN 陶瓷在飞秒激光加工过程中会分解，同时与空气环境下的 O_2 反应形成 Al_2O_3，在加工区域的底部可观察到部分孔洞。这可能是由材料加工时发生的化学反应所致[13]。

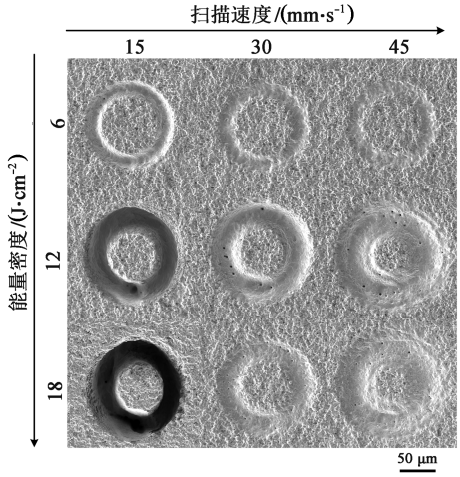
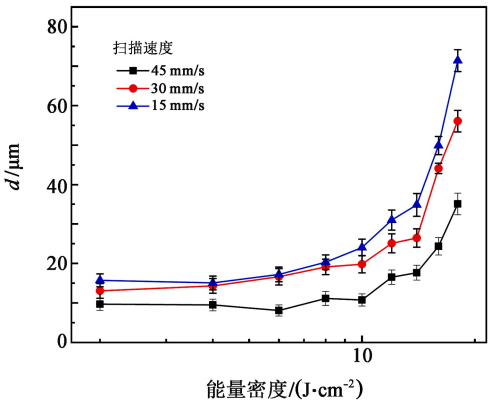


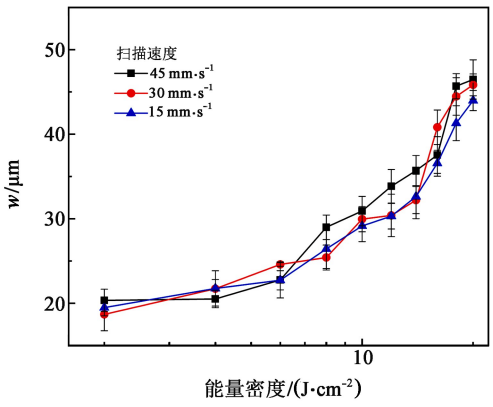
图 2　AlN 陶瓷的飞秒激光加工表面形貌

2.2　AlN 陶瓷加工表面尺寸分析

如图 3 所示为不同扫描速度下 AlN 陶瓷加工表面圆环深度与宽度随能量密度的变化关系，其中横坐标为能量密度的对数坐标。由图 3(a)可知，随着能量密度的增大，AlN 陶瓷的圆环加工深度（d）逐渐增加。当能量密度低于 10 J/cm^2 时，加工深度的增长较为缓慢；当能量密度高于 10 J/cm^2 时，加工深度迅速增大。这可以归因为不同激光能量密度下材料烧蚀率与光学穿透深度与电子热扩散深度之间存在的变化规律[14]。相同能量密度下，加工深度随扫描速度的增大而减小。这可能是由于更高的扫描速度下，作用于材料加工区域的脉冲数减少，降低了激光脉冲的重叠率，导致材料单位面积上加工的激光能量降低，故而加工深度变浅。从图 3(b)可观察到，AlN 陶瓷的圆环加工宽度（w）与能量密度呈近乎线性增长的关系，且不同扫描速度下，圆环加工宽度的区别并不大。这表明能量密度对 AlN 陶瓷加工表面圆环宽度的影响要大于扫描速度。

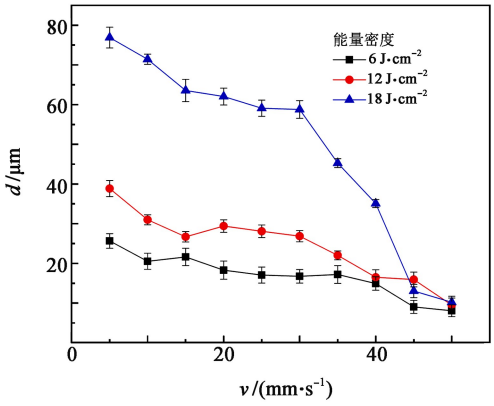


(a) 加工深度随能量密度的变化

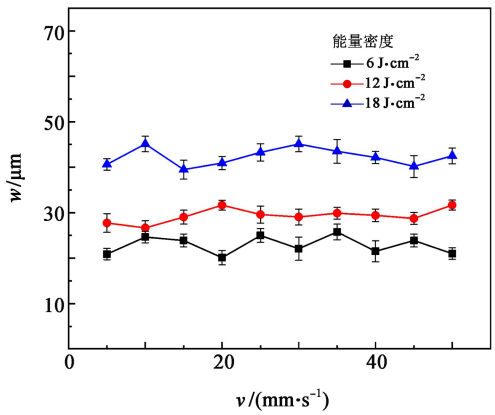


(b) 加工宽度随能量密度的变化

图 3 AlN 陶瓷加工表面随飞秒激光能量密度的变化关系



(a) 加工深度随扫描速度的变化



(b) 加工宽度随扫描速度的变化

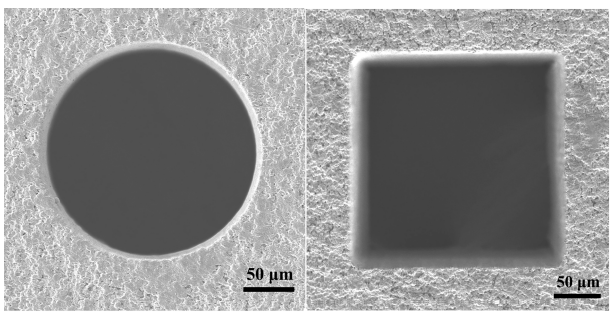
图 4 AlN 陶瓷加工表面随飞秒激光扫描速度的变化关系

如图 4 所示为不同能量密度下 AlN 陶瓷加工表面圆环深度与宽度随扫描速度的变化关系。由图 4(a)可知，随着扫描速度的增大，AlN 陶瓷圆环加工深度逐渐减小，在更高的能量密度下，此种趋势更为明显。在能量密度为 6 J/cm^2 时，材料加工深度的变化范围很窄，这说明在低能量密度下，扫描速度对加工深度的影响较小。值得注意的是，材料的加工宽度随能量密度增大而增大，但对于同样的扫描速度下，材料的加工尺寸稳定在一定的范围内，如图 4(b)所示。考虑到加工宽度与飞秒激光烧蚀的作用直径相关，那么根据高斯光束烧蚀直径与能量密度之间的关系可知[15]，在固定的能量密度下，获得的材料加工宽度也相对一致。

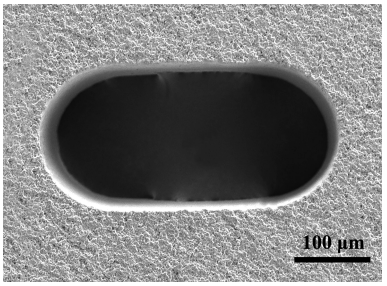
根据上述分析可知，能量密度与扫描速度是影响 AlN 陶瓷加工表面形貌与尺寸的重要工艺参数。由于在实际加工过程中，能量密度较低时，材料的去除量较小，不利于提高加工效率。因此，在确保加工质量的前提下，应当选取加工效率更高的工艺参数，即能量密度为 10～14 J/cm^2，扫描速度范围为 20～30 mm/s。

3 飞秒激光制孔应用

基于前述激光能量密度与扫描速度对 AlN 陶瓷表面加工形貌与尺寸的影响，这里根据优选的工艺参数，分别选取不同的螺旋扫描轨迹，对半导体功率器件中常用的圆孔及异形孔等进行制孔应用。如图 5 所示为飞秒激光在 AlN 陶瓷表面的制孔应用。对于如图 5(a)所示的圆孔而言，没有出现椭圆孔形，孔圆度几乎为 100%。如图 5(b)所示的方孔加工较圆孔复杂，成形也较为困难。加工时除要保证孔口无崩边、孔内壁平滑外，还需在转角位置处通过



(a) 圆孔 (b) 方孔



(c)　跑道孔

图 5　AlN 陶瓷的飞秒激光制孔应用结果

适当的圆弧过渡。如图 5(c)所示的跑道孔是圆孔与方孔的结合，不仅需加工出光滑的圆弧段，还要与直线段形成连续的自然过渡。采用飞秒激光加工 AlN 陶瓷获得的孔周边及内壁无飞溅物堆积，且近无重铸层，达到了理想的制孔效果。

4　结论

本文采用飞秒激光对 AlN 陶瓷进行了表面加工及制孔应用，获得了能量密度与扫描速度对圆环加工形貌及尺寸影响的变化规律。能量密度的增大及扫描速度的降低会加剧 AlN 陶瓷的崩边。圆环的加工深度与宽度均随能量密度的增大而增大，但更高的扫描速度下，加工的圆环深度更浅，加工宽度则不存在此种现象。增大扫描速度，圆环的加工深度逐渐减小，在高能量密度下更为明显。相比之下，扫描速度对加工宽度的影响并不显著。综合考虑加工质量与效率，可获得较优的工艺参数范围为能量密度 10～14 J/cm^2，扫描速度 20～30 mm/s。以此为依据，通过螺旋扫描方式，成功实现了无微裂纹、无崩边等加工缺陷的高质量圆孔、方孔及跑道孔的加工。验证了飞秒激光对硬脆材料实现高质量制孔的可行性，拓宽了激光制孔技术在半导体功率器件领域的应用范围。

参考文献：

[3] 梅雪松，杨子轩，赵万芹. 电子陶瓷基板表面激光孔加工综述[J]. 中国激光，2020，47(5)：0500011.
Mei X S，Yang Z X，Zhao W Q. Laser hole drilling on surface of electronic ceramic substrates[J]. Chin. J. Lasers，2020，47(5)：0500011.

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

[5] 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.

[6] Wang X C，Zheng H Y，Chu P L，et al. Femtosecond laser drilling of alumina ceramic substrates[J]. Appl. Phys. A，2010，101：271-278.

[7] Zhang Y，Wang Y，Zhang J，et al. Effects of laser repetition rate and fluence on micromachining of TiC ceramic[J]. Mater. Manuf. Processes，2016，31：832-837.

[8] 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.

[9] Hirayama Y，Yabe H，Obara M. Selective ablation of AlN ceramic using femtosecond，nanosecond，and microsecond pulsed laser[J]. J. Appl. Phys.，2001，89(5)：2943-2949.

[10] Kim S H，Balasubramani T，Sohn I B，et al. Precision microfabrication of AlN and Al_2O_3 ceramics by femtosecond laser ablation[J]. Proc. of SPIE，2008，6879：68791O.

[11] Kim S H，Sohn I B，Jeong S. Ablation characteristics of aluminum oxide and nitride ceramics during femtosecond laser micromachining[J]. Appl. Surf. Sci.，2009，255：9717-9720.

[12] Li C，Lee S，Nikumb S. Femtosecond laser drilling of alumina wafers[J]. J. Electron. Mater.，2009，38(9)：2006-2012.

[13] 王晓健. 飞秒激光烧蚀陶瓷的加工机理及工艺过程研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2009.
Wang X J. Investigation of processing mechanisms in femtosecond laser ablation of ceramics[D]. Harbin：Harbin Institute of Technol.，2009.

[14] 袁根福，曾晓雁. 硬脆性无机材料激光成形加工研究与应用现状[J]. 激光与光电子学进展，2002，39(6)：47-51.
Yuan G F，Zeng X Y. Status and prospect of laser machining researches and applications on hard and brittle materials[J]. Laser Optoelectron. Progress，2002，39(6)：47-51.

[15] 任　丽，王海林，唐跃进，等. 激光打孔对氮化铝绝缘性能的影响[J]. 超导技术，2006，34(6)：451-455.
Ren L，Wang H L，Tang Y J，et al. The impact of laser drilling on insulating strength of AlN ceramics[J]. Superconductivity，2006，34(6)：451-455.

[16] Nolte S，Momma C，Jacobs H，et al. Ablation of metals by ultrashort laser pulses[J]. J. Opt. Soc. Am. B，1997，14(10)：2716-2722.

[17] Liu J M. Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes[J]. Opt. Lett.，1982，7(5)：196-198.

作者简介：

王海龙(1985－)，男，安徽人，硕士，工程师，主要研究方向为超快激光加工技术；

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。