文章编号：1001-3806(2012)01-0013-03

深紫外激光对 GaN 薄膜的激光抛光研究

陈赛华，戴玉堂*，肖 翔，丁莉云

(武汉理工大学 光纤传感技术国家工程实验室，武汉 430070)

摘要： 为了研究 157nm 深紫外激光的激光抛光加工特性，采用小光斑对 GaN 半导体薄膜进行了微平面扫描刻蚀。通过探讨激光工艺参量与激光抛光质量的影响关系，得到了最佳的工艺参量范围。结果表明，随着激光抛光扫描速率的增加，材料加工表面粗糙度值 R_a 逐渐减小，其中扫描速率在 0.014mm/s ~ 0.015mm/s 处，激光抛光质量最高；而激光抛光扫描间距的减小，或者脉冲频率的增加，都将导致被加工表面粗糙度增大；当脉冲频率取 8Hz 时，抛光效果较好，表面粗糙度值 $R_a \approx 20$nm。

关键词： 激光技术；深紫外激光；GaN 薄膜；激光抛光；微平面；表面粗糙度

中图分类号： TN249 **文献标识码：** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.01.004

Investigation on laser polishing of GaN film using deep ultraviolet laser

CHEN Sai-hua, DAI Yu-tang, XIAO Xiang, DING Li-yun

(Key Laboratory of Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: To study laser polishing performance of the 157nm deep ultraviolet (UV) laser, micro-surface laser etching of GaN semiconductor film was performed using a small laser-spot. After investigating the influencing relationships between the process parameters and the polishing quality, ideal process parameters were obtained. The results show that the etched surface roughness R_a gradually decreases with the speed of laser scan. When the scan speed is 0.014mm/s ~ 0.015mm/s, the polishing quality of the etched surface is the best. With the decreasing of scan shift rate perpendicular to scan direction or with the increasing of laser repetition rate, the etched surface roughness would increase. As the laser repetition rate is 8Hz, the polishing effect is preferable and the surface roughness R_a is about 20nm.

Key words: laser technique; deep ultraviolet laser; GaN thin-film; laser polishing; micro facet; surface roughness

版权所有 © 《激光技术》编辑部

引 言

GaN 基材料属于第 3 代半导体材料，具有禁带宽度大、导热性能好、化学稳定性好、抗辐射和电子饱和漂移速度高等优点，在制作大功率、高频和短波长光电子器件方面有广阔的应用前景。GaN 基材料常温下化学性质稳定，不适合湿法刻蚀加工。目前，干法刻蚀是 GaN-LED[1] 器件刻蚀的主要工艺。激光直接刻蚀作为一种干法刻蚀，不仅有望用于 GaN-LED 台面刻蚀，还有可能作为精密划片工具使用，这是因为激光在刻槽、划线方面要远远优于离子或等离子体刻蚀方式。

157nm 准分子激光是最近发展起来的波长最短的激光加工工具，其光子能量高达 7.9eV，可直接击断许多难加工材料的化学结合键，或激发材料的光化学反应，且形成的热影响区极小，是较为理想的“冷”加工工具[2]。

由于准分子激光光斑为方形，光斑范围内各点能量密度不可能绝对均匀。制作一个平整的微平面或台面时，需要利用尺寸适当的小光斑进行扫描加工，即本文中所说的“激光抛光”[3]。作者利用 157nm 深紫外激光，对 GaN 外延片进行激光抛光加工，探讨激光工艺参量对加工质量的影响。

1 实验设备与方法

本实验中采用英国 Exitech 公司生产的 M2000 双激光(157nm DUV laser /355nm DPSS laser) 加工机。157nm 准分子激光器输出波长 157nm 深紫外激光，工作气体为 F_2 混合气[4-6]，脉冲宽度 20ns，激光器最大输出能量 25mJ[7]。鉴于 157nm 激光极易被氧分子或水蒸气所吸收，将光路限制在充满氮气的环境中。激光束经匀光整形后[8]，通过一个高分辨率的氟化钙投射镜照射在工件上。

本实验中以蓝宝石衬底 GaN 外延片作为加工对

基金项目：国家自然科学基金资助项目(50775169；50802069)

作者简介：陈赛华(1985-)，女，硕士研究生，研究方向为激光微加工、超精密数控加工等。

* 通讯联系人。E-mail：daiyt68@163.com

收稿日期：2011-06-24；收到修改稿日期：2011-07-04

象。首先利用 157nm 激光对 GaN 薄膜进行微平面扫描抛光，加工完成后用浓 HCl 酸或 HF 酸在超声波清洗器中清洗试件。随后利用扫描电镜 JSM-5610 观察材料表面加工形貌，并用原子力显微镜 DI Nanoscope IV 辅助评价抛光质量，进而对大量实验结果进行分析。

2 实验结果

以下分别从激光抛光扫描速率、扫描间距、脉冲频率、光斑尺寸、激光能量密度等方面研究各工艺参量对激光抛光加工质量的影响。

2.1 扫描速率对抛光质量的影响

在单脉冲激光能量密度和脉冲频率一定的条件下，扫描速率越低，材料表面接受辐照的时间越长，接收的光子数越多，导致材料的去除量越大；但过低的速率会出现局部能量过于集中的现象，抛光质量因此变差。反之，当扫描速率过高，超过一定范围时，材料表面吸收的光子能量减少，刻蚀效率相应降低，而且会出现辐照光斑分离的现象，导致材料有的部分不能得到足够的光子辐照，从而使表面粗糙度变大，影响激光抛光的加工质量。本实验中选取扫描速率于 0.008mm/s ~0.017mm/s 范围内变动，其它参量则保持不变，以探讨扫描速率对抛光质量的影响。

作者在脉冲频率 10Hz、光斑大小 15μm × 20μm、扫描间距 2μm 的条件下，通过改变扫描速率 v 的大小，在 GaN 薄膜表面扫描加工 200μm × 120μm 大小的矩形微平面。

图 1a ~ 图 1c 分别为不同扫描速率下的 GaN 加工面的扫描电镜图像。不难看出，随着扫描速率的提高，台面刻蚀深度[9] 减小的同时，表面平整度明显变好。经过多次重复实验，通过处理平均粗糙度 R_a 值与扫描速率 v 的关系数据，分析得出两者具有近似线性关系。在 0.010mm/s ~0.015mm/s 范围内，图 1a ~ 图 1c 加工区域的表面粗糙度 R_a 值分别为 36.494nm，34.171nm 和 28.797nm，由此证明随着扫描速率的增大，抛光质量相应提高。当然，如前所述，过高的扫描速率会带来局部无光照的现象，从而降低激光抛光质量。从多次试验结果总结出，扫描速率一般在 0.014mm/s ~0.15mm/s 处，抛光质量最高。

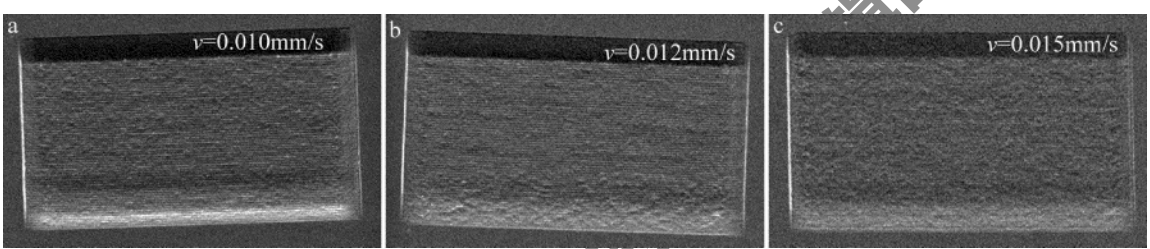

Fig. 1 Scanning electron microscope photograph of etched surfaces at different scan speeds

2.2 扫描间距对抛光质量的影响

激光抛光加工是通过工作台带动工件移动完成的。在微平面扫描加工过程中，通常工件相对于激光束沿 x 轴(左右)方向移动。x 方向扫描加工完成后，工件在垂直于扫描方向(y 轴)移动一个微小距离 Δy(即扫描间距)后，继续下一次扫描加工。为了研究扫描间距 Δy 值与抛光质量的关系，在脉冲频率 10Hz、光斑大小 15μm × 20μm、扫描速率 0.012mm/s 的条件下，通过改变 Δy 值的大小(取 2μm 和 3μm)，对 GaN 外延片表面 200μm × 120μm 矩形范围进行扫描。图 2 为原子力显微镜测得的局部粗糙度波动曲线。

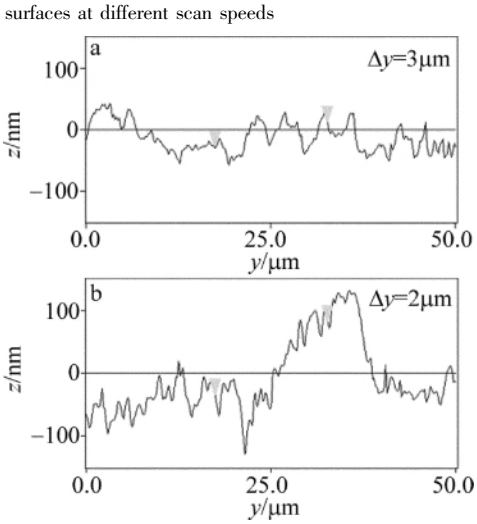

Fig. 2 Roughness curve measured with atomic force microscope

如图 2 所示，随着扫描间距的减小，波动曲线上下变化幅度增加，表面平整度降低。通过原子力显微镜测得，图 2a 和图 2b 的微平面粗糙度值 R_a 分别为 34.171nm 和 23.843nm。

在加工过程中，扫描间距 Δy 值增大或减小时，光斑重合区域会发生变化。Δy 值过大时，非重合区域与重合区域的刻蚀深度差异较大，被加工面平整度降低；反之，Δy 值过小时，扫描效率低且平整度也不理想。多次试验结果表明，扫描间距 Δy 值取 3μm 时，加工效果较好。

2.3　脉冲频率对抛光质量的影响

为了研究脉冲频率[10]对激光抛光质量的影响，选用 15μm×20μm 的光斑，在 200μm×120μm 矩形范围进行扫描加工。扫描间距为 2μm，其它参量如表 1 所示，加工后测得的表面粗糙度也示于表 1 中。

Table 1　Machining conditions and results

velocity/(mm·s^{-1})	frequency/Hz	surface roughness R_a/nm
0.013	8	20.749
0.013	10	31.566
0.013	20	62.394

显然，脉冲频率的增加导致微平面粗糙度值明显变大。这是因为当脉冲频率较大时，刻蚀率变大，残留物质增多，从而降低激光抛光质量。为维持一定的扫描效率，且避免扫描光斑出现不连续辐照现象，脉冲频率也不宜取得太小。在该组试验中，脉冲频率的最佳区域为 8Hz～10Hz。

2.4　光斑尺寸对抛光质量的影响

光斑大小也是对抛光质量与效率产生直接影响的重要参量之一。本试验中选取 15μm×15μm，15μm×20μm(扫描方向均为 15μm)两种尺寸的光斑，对 200μm×120μm的矩形范围进行扫描。其它参量设定为：扫描速率 0.013mm/s、脉冲频率 10Hz、扫描间距 2μm。

图 3 为两种大小光斑扫描加工的微平面局部扫描电镜图像。从图 3 中可以看出，图 3a 中蚀面总体较平整，无异样形貌，图 3b 中刻蚀面存在不规则的凸起。经测量，图 3a 和图 3b 中的刻蚀面粗糙度 R_a 值分别为 26.032nm 和 31.566nm。多次试验表明，选用较小的光斑尺寸，有利于提高表面加工质量。当然，这里必须兼顾扫描加工效率，因而光斑尺寸也不能过小，通常以 10μm～15μm 较适宜。

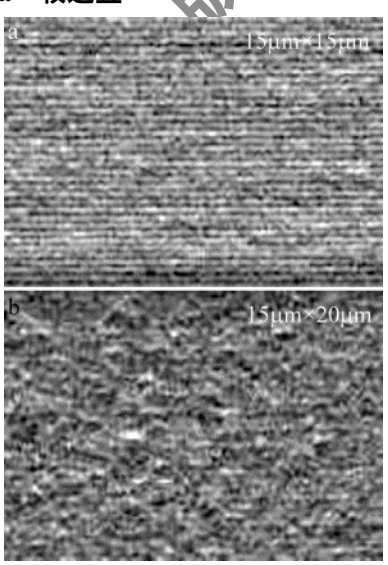

Fig. 3　Scanning electron microscope photograph of etched surfaces at different spot size

2.5　激光能量密度对抛光质量的影响

激光能量密度[7]的大小对扫描加工有很大的影响。微平面扫描试验结果显示，激光能量密度较大时，微平面(未清洗之前)加工区域外围存在很多微小颗粒状残屑。这是由于加工过程中光解物质吸收足够光子能量[11]后体积急剧膨胀，迅速飞离加工区域所致。而能量密度小时，加工过程形成的光解物质不能及时排出，会堆积在微平面内部形成许多细小颗粒而残留下来。这些颗粒在清洗处理之后部分仍会留在表面，从而影响微平面抛光加工质量。图 4 为激光能量密度较小(约 1.3mJ/cm^2)时，微平面加工区域的扫描电镜局部图像。

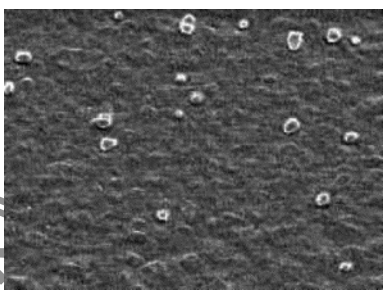

Fig. 4　Scanning electron microscope photograph of etched at low laser fluence

从图 4 可以看出，加工表面残留有许多细小颗粒，这些细小颗粒必然造成表面粗糙度升高，从而降低激光抛光质量。当然，激光能量密度也不能过高，那样会导致热影响区扩大甚至出现溶化痕迹。所以，在激光抛光过程中，激光能量密度应在一个适当范围内选取，通常取 2.5mJ/cm^2～4mJ/cm^2。

3　结　论

利用 157nm 激光对 GaN 薄膜材料进行微平面扫描加工(激光抛光)，分析和探讨了工艺参量对微平面抛光质量的影响。实验证明，扫描速率在 0.010mm/s～0.015mm/s 范围内，激光抛光表面粗糙度与扫描速率具有近似线性关系。一般地，脉冲频率的增大、扫描间距的减小或光斑尺寸的增加，均会降低激光抛光加工质量。激光能量密度也是影响加工效果的关键因素之一。

参　考　文　献

[1] DAI Y T, XU G, CUI J L, *et al*. Micro etching of GaN-based semiconductor materials using 157nm laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(12): 3138-3142(in Chinese).

[2] DAI Y T, CUI J L, XU G, *et al*. Influence of laser parameters on etching performance during 157nm laser micromachining [J]. Laser Technology, 2011, 35(1): 36-85(in Chinese).

[3] CHEN L, YANG Y Q. Mechanism and application of laser polishing [J]. Surface Technology, 2003, 32(5): 49-52(in Chinese).

(下转第 36 页)

版权所有©《激光技术》

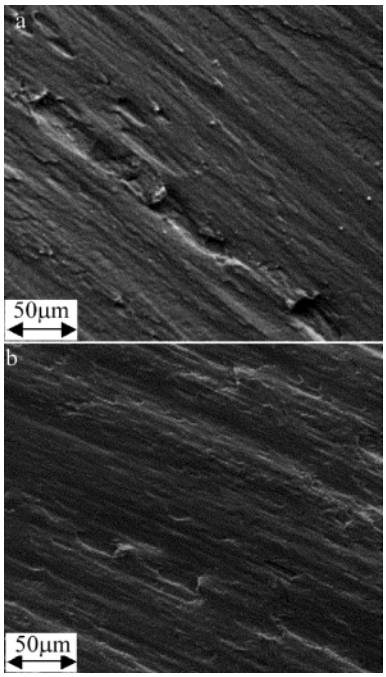

Fig. 6 Comparison of machined surface of traditional cutting and laser-assisted cutting
a—traditional cutting b—laser-assisted cutting

3 结 论

(1) 设计了激光辅助切削的实验过程和工艺参量,在带有自动变速装置的 CA6140 型车床上,进行了碳石墨 M104 密封环车削过程的常规切削与激光辅助切削的对比实验研究。

(2) 由于激光的热软化效应,使得激光辅助切削的主切削力和径向力分别比常规切削下降了 23.5% 和 19.9%;在激光辅助切削中,大部分的热量都被切屑带走,温度数值与常规切削比较接近;激光辅助切削中切削力的减小和切削温度的合理分布,使得刀具磨损小,刀具利用率提高;由于切削力和刀具磨损减小,激光辅助切削的表面加工质量提高。

(3) 激光辅助切削具有切削力小、刀具利用率高等优点,因而可以在难加工材料的加工中发挥很大的作用。若能合理匹配加工参量和激光参量,则切削效率能进一步提高。

参 考 文 献

[1] LI J. Laser assisting heating cutting technology [J]. Machinery Design and Manufacture, 2009, 49(12): 174-176(in Chinese).

[2] JIANG R B, LIAN L C, YAN C. Analysis of the performance in the turning engineering ceramics by laser heating [J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2010, 38(9): 84-87(in Chinese).

[3] CHANGA C W, KUO C P. An investigation of laser-assisted machining of Al_2O_3 ceramics planning [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(3/4): 452-461.

[4] BRECHER C, ROSEN C, EMONTS M. Laser-assisted milling of advanced materials [J]. Physics Procedia, 2010, 5(2): 259-272.

[5] WAN Y, AI X, LIU Z Q, *et al*. Tool wear and fracutre in high speed milling aluminum alloy 7050-T7451 [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(4): 103-108(in Chinese).

[6] MELKOTE S, KUMAR M, HASHIMOTO F, *et al*. Laser assisted micro-milling of hard-to-machine materials [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2009, 58(1): 45-48.

[7] JEON Y, PFEFFERKORN F. Effect of laser preheating the workpiece on micro end milling of metals [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2008, 130(1): 1-9.

[8] WANG Y, LI Y H, LIAO C R, *et al*. Study on arts and crafts of stainless steel micro-cantilever prepared with femtosecond laser [J]. Laser Technology, 2010, 34(3): 347-347(in Chinese).

[9] PFEFFERKORN F, LEI S, JEON Y, *et al*. A metric for defining the energy efficiency of thermally assisted machining [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(5): 357-365.

[10] SINGH R, MELKOTE S. Laser-assisted mechanical micromachining [M]. London: Springer, 2008: 10-11.

版权所有© 《激光技术》编辑部

(上接第 15 页)

[4] OBATA K, SUGIOKA K, AKANE T, *et al*. Influence of laser fluence and irradiation timing of F2 laser on ablation properties of fused silica in F2-KrF excimer laser multi-wavelength excitation process [J]. Applied Physics, 2001, A73(6): 755-759.

[5] MUTAPCIC E, IOVENITTI P, HAYES J P. A 3D-CAM system for quick prototyping and microfabrication using excimer laser micromachining [J]. Microsystem Technologies, 2005, 12(1/2): 128-136.

[6] FUJIKAWA T, SHIBASKI Y, ANDO S, *et al*. New photoresist materials for 157nm lithography [J]. Chemical of Materials, 2003, 15(7): 1512-1517.

[7] LI W L, LI Y, LI W. Mechanism study of silica ablating on photonic crystal fiber by 157nm laser [J]. Laser Technology, 2006, 30(6): 601-604 (in Chinese).

[8] DU G J, CHEN T, ZUO T Ch, *et al*. Lens array homogenizer for excimer lasers [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2005, 16(3): 279-281(in Chinese).

[9] ZHAO Z Y, HOU D S, DONG X Ch, *et al*. Research on etching properties of polycarbonate by KrF excimer laser [J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(2): 4-7(in Chinese).

[10] FU G S, CHU L Z, ZHOU Y, *et al*. Influence of pulse repetition rate on morphology of nanocrystalline silicon film prepared by pulsed laser deposition [J]. Chinese Journal of Laser, 2005, 32(9): 1254-1257 (in Chinese).

[11] DEGN H Y, RAO Y J, RAN Z L, *et al*. Photonic crystal fiber based Fabry-Pérot sensor fabricated by using 157nm laser micromachining [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(2): 254-258(in Chinese).