

超短激光抛光微加工的数学建模与实验研究

徐 刚 戴玉堂 肖 翔

(武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要 157 nm 是对硬脆材料进行激光表面微加工的理想波段。构建数学模型以探讨激光抛光材料时工艺参数对表面粗糙度 R_a 的影响,使用最小二乘法推导出粗糙度的计算式。利用 157 nm 激光对 GaN 外延片进行了抛光微加工的基础实验。通过比较多组模拟与实验粗糙度值,发现理论粗糙度值与实际的测量值之间有一定误差,但相对误差都在 15% 以下,最小的相对误差为 4%。以低于 15 Hz 的脉冲频率和高于 0.7 mm/min 的扫描速度进行激光扫描刻蚀时,可以获得较低的表面粗糙度。数学模型合理地解释了抛光后底面沟壑的形成,为今后改善加工质量提供了理论依据。

关键词 激光技术;157 nm 激光抛光;表面粗糙度;数学模型

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0603003

Study on Mathematical Modeling and Experiment of Ultrashort Laser Polishing Micro-Processing

Xu Gang Dai Yutang Xiao Xiang

(National Engineering Laboratory of Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract As one of the ultra-precision machining tools, 157 nm laser is an ideal means of surface micro-machining for hard and brittle materials. By establishing the mathematical model, the effects of the process parameters on the etched surface roughness (R_a) are discussed for laser polishing of materials. The roughness calculation formula is derived by using the least squares method. Experimental studies on polishing micro-processing of LED-GaN semiconductor films have been performed using excimer laser with 157 nm wavelength. Through the comparison of multiple sets of theoretical and experimental roughness values, there is an error between them, but the relative errors are all below 15%, and the smallest relative error is only 4%. For 157 nm laser spanning, the ablated surface with lower roughness can be obtained when the laser repetition rate is lower than 15 Hz and the scanning velocity is higher than 0.7 mm/min. The mathematical model can reasonably explain the groove formation mechanism of the etched GaN surface, which provides a theoretical basis to improve the processing quality.

Key words laser technique; 157 nm laser polishing; surface roughness; mathematical model

OCIS codes 140.7240; 140.3390; 350.3390

1 引 言

超短激光加工作为具有广泛应用的前沿技术,是理想的超精密微加工手段之一。超短激光朝着波长超短和脉冲超短的两个方向发展,其中分别以 157 nm 准分子激光和飞秒激光最具代表性。157 nm 准分子激光的单光子能量高达 7.9 eV,可直接击断材料的化学键,对材料的热影响极小,刻蚀精

度高^[1];飞秒激光可以实现飞秒量级(10~15 fs)的脉冲输出,作用于材料的时间很短,峰值功率高^[2,3]。它们较传统的加工方式,更容易获得较高的加工精度和理想的加工效果,是目前激光技术研究的前沿和热点。

随着微机电系统(MEMS)中的微光机电系统(MOEMS)技术的发展,对器件的表面精度提出了

收稿日期: 2013-01-20; **收到修改稿日期**: 2013-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(51175393)和湖北省自然科学基金(2011CDA055)资助课题。

作者简介: 徐 刚(1985—),男,博士研究生,主要从事激光微加工方面的研究。E-mail: xugang524@163.com

导师简介: 戴玉堂(1964—),男,博士,教授,主要从事激光微加工方面的研究。E-mail: daiyt68@163.com

更高的要求,如器件表面超小范围的抛光就是精密微加工的范例之一^[4]。传统的抛光技术如机械抛光^[5]、化学抛光^[6]以及最近研究的磁流体抛光等^[7],虽然也可以达到很高的精度,但主要是针对大范围抛光,无法实现小范围高精度抛光^[8,9]。激光抛光是一种新型材料表面抛光技术,可实现小范围高精度表面处理。天津大学张峰烈等^[10]采用纳秒紫外脉冲激光对 316L 不锈钢材料进行微抛光,并分析了扫描速度、离焦距离等因素对激光微抛光效果的影响。美国威斯康星大学的 Vadali 等^[11]提出了脉冲激光微抛光的金属表面粗糙度的预测模型,有利于找到激光加工的最佳工艺参数。

对于超短激光的抛光微加工的研究还处于初始阶段,特别是通过建立数学模型来分析激光抛光过程的研究目前尚未取得很好的成果^[12]。本文针对上述问题,以 157 nm 超短波长激光抛光 GaN 半导体材料为对象,对激光抛光材料的底面粗糙度进行了数学建模,并进行了实验验证。

2 157 nm 激光抛光加工模拟分析

扫描路径在激光抛光加工中是非常重要的工艺因素之一,直接影响到加工质量的好坏。根据前期研究工作,兼顾加工效率和数控编程的简易性,激光抛光扫描路径宜选用如图 1 所示的弓字型扫描路径。

的主要原因之一,因此如何尽可能消除加工过程中形成的沟壑是降低加工表面粗糙度的关键。

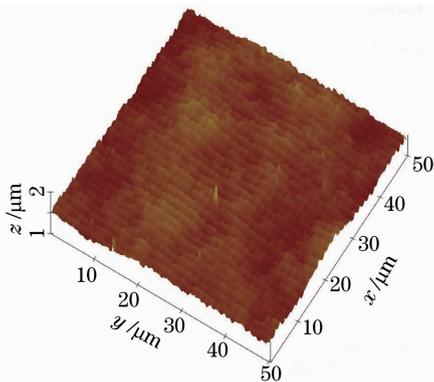


图 2 激光抛光后的 AFM 图

Fig. 2 AFM image after laser polishing

为了更清晰地了解影响激光加工材料表面粗糙度的参数,用数学模型来构建沟壑的形成原理,可以为分析各工艺参数对加工质量的影响找出相应的规律,以及将激光微加工的各工艺参数最优化得到最佳的工艺参数组合提供一定的理论基础。图 3 为用图形的形式构造光斑重叠的示意图,157 nm 激光光束通过掩模板后呈矩形,光斑的宽度为 a ,每行扫描后光斑的偏移量为 b 。黑色区域表示第 N 次扫描,红色区域表示第 $N+1$ 次扫描。最终刻蚀的深度是两次扫描共同作用的结果,即材料表面的刻蚀深度是激光多次扫描深度按一定规律的叠加。

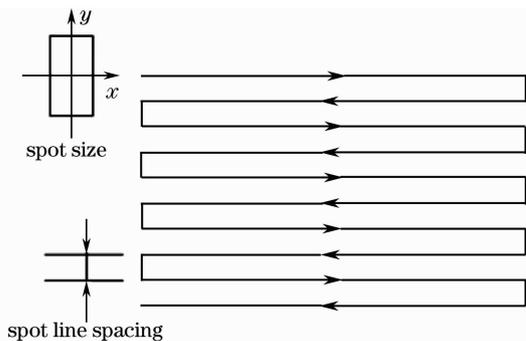


图 1 激光抛光路径

Fig. 1 Laser polishing path

用 157 nm 激光对 GaN 外延片进行抛光实验,扫描加工 $120\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ 的矩形面。刻蚀后的 GaN 外延片放在浓度为 30% (体积分数) 的 HCl 溶液中用超声波清洗器清洗 30 min。用美国 Veeco 精密仪器公司的 Nanoscope IV 型原子力显微镜 (AFM) 观察被刻蚀面的表面形貌,图 2 为选取的被刻蚀面中 $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ 的区域。从图中可以看出扫描行之间存在沟壑,这可能是造成刻蚀面不平整

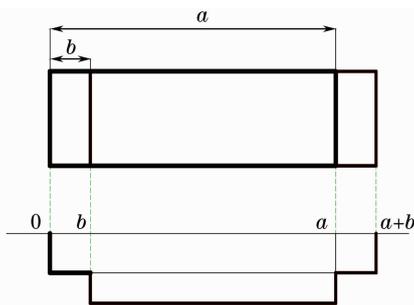


图 3 光斑重叠的示意图

Fig. 3 Schematic of spot overlap

本文将用解析式的方式来推导表面粗糙度的计算式。前期研究发现,当材料获得足够的单位面积累积辐射能后,刻蚀深度与扫描循环次数呈线性增加关系。这说明一定能量刻蚀的深度是固定值,随着刻蚀深度的加深,能量几乎没有什么损耗。假定光斑单独扫描一行的深度为固定值 c , $f_k(x)$ 表示第 k 次行扫描后刻蚀的深度。用分段函数解析式表示每次单独行扫描的深度为

$$\begin{cases} f_1(x) = c, & 0 < x \leq a \\ f_2(x) = c, & b < x \leq a + b \\ f_3(x) = c, & 2b < x \leq a + 2b \\ f_4(x) = c, & 3b < x \leq a + 3b \\ \dots & \dots \\ f_k(x) = c, & kb < x \leq a + kb \\ f_{k+1}(x) = c, & (k+1)b < x \leq a + (k+1)b \\ \dots & \dots \\ f_n(x) = c, & nb < x \leq a + nb \end{cases}, (1)$$

式中 $a = kb + a \% b$, $a \% b$ 表示 b 对 a 整除后的余数。

157 nm 激光抛光加工材料后,表面最终刻蚀的深度是每次单独行扫描共同作用的结果,因此刻蚀总深度为各单独行扫描深度的线性叠加。即刻蚀的总深度为

$$f(x) = f_1(x) + f_2(x) + \dots + f_k(x) + f_{k+1}(x) + \dots + f_n(x). \quad (2)$$

各分段函数相加求和,计算的结果为

$$f(x) = \begin{cases} c & 0 < x \leq b \\ 2c & b < x \leq 2b \\ 3c & 2b < x \leq 3b \\ \dots & \dots \\ kc & (k-1)b < x \leq kb \\ (k+1)c & kb < x \leq a \\ kc & a < x \leq (k+1)b \\ (k+1)c & (k+1)b < x \leq a+b \\ kc & a+b < x \leq (k+2)b \\ \dots & \dots \end{cases}. \quad (3)$$

由上式可以解释:1)GaN 外延片被抛光表面的上边缘是逐渐加深的,当光斑偏移量每增加 b 时,材料被刻蚀的深度加深 c ;2)刻蚀表面的沟壑是宽度为 $a - kb$ (也可以表示为 $a \% b$)、深度为 kc 的细条与宽度 $(k+1)b - a$ 、深度 $(k+1)c$ 的细条交替出现,沟壑的起伏周期正好为光斑微移动量 b 。

在表面粗糙度的模型中,轮廓最小二乘法中线是一条判定粗糙度参数的基准线。即在采样长度内,轮廓线上的每一点到轮廓中线的距离的平方和最小,它是确定粗糙度模型的基础。表面粗糙度 R_a 的模型如图 4 所示, x 轴表示轮廓的走向, y 轴表示轮廓的测量幅值, y'_i 表示轮廓线上的测量点到中线的距离,虚线表示用最小二乘法确定的轮廓中线。则轮廓中线的回归方程可表示为

$$\hat{y} = k + mx. \quad (4)$$

轮廓线上任一测量点到轮廓中线的距离为

$$y'_i = y_i - k - mx_i. \quad (5)$$

粗糙度值 R_a 是采样点到轮廓中线的绝对值的算术平均值,可以通过用下式计算得到:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y'_i| dx. \quad (6)$$

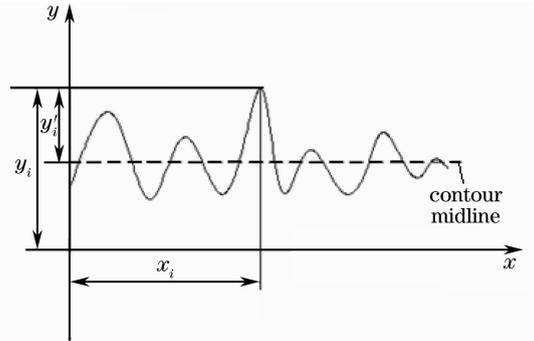


图 4 表面粗糙度的模型

Fig. 4 Model of surface roughness

由(3)式可知,抛光面边缘的刻蚀深度逐渐加深,中间的区域是周期性的沟壑起伏,在随后的实验中也得到了很好的证实。因此,有理由认为抛光面中间区域的沟壑是造成抛光表面粗糙度的主要原因之一。将(3)式分段函数的形式,用二维图形绘制表示,设沟壑的基本深度为 t 。抛光刻蚀后表面沟壑的数学模型可以表示为图 5 中的虚线。根据(4)式用最小二乘法计算各轮廓中线的各系数,最后确定轮廓中线的方程。

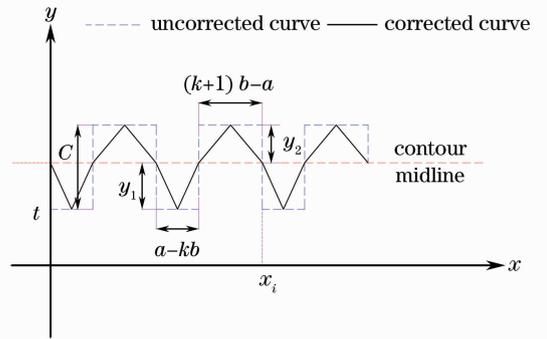


图 5 表面沟壑的数学模型

Fig. 5 Model of surface grooves

在 $[0, x_i]$ 范围内,通过计算得

$$\begin{cases} \bar{x} = b \\ \bar{y} = y_i + t = \frac{[(k+1)b - a]c}{b} + t, \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} m = 0, \\ k = \bar{y} - m\bar{x} = \frac{[(k+1)b - a]c}{b} + t. \end{cases} \quad (8)$$

用最小二乘法计算各轮廓中线的各系数,最后确定轮廓中线的方程。轮廓中线方程为

$$y = \frac{[(k+1)b-a]c}{b} + t. \quad (9)$$

粗糙度值 R_a 是采样点到轮廓中线的绝对值的算术平均值,可以通过用下式计算得到:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y'_i| dx = \frac{2(a-kb)[(k+1)b-a]c}{b^2}. \quad (10)$$

由于实际抛光刻蚀加工中,侧壁的材料会吸收一部分能量,所以沿刻蚀方向都会存在一定锥度。因此,表面沟壑的数学模型可以修正为图 6 中的实线。

对修正后的模型进行重新计算,粗糙度值 R_a 可以表示为

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y'_i| dx = \frac{(a-kb)[(k+1)b-a]c}{b^2}. \quad (11)$$

表 1 不同工艺参数抛光后粗糙度 R_a 的测量值与理论值比较

Table 1 Roughness R_a comparison of measurement and theoretical values for different polishing process parameters

Process Parameters				Measured value /nm	Theoretical value /nm	Relative error /%
Spot size / μm	Offset b / μm	Pulse frequency f /Hz	Scanning speed v /(mm/min)			
15×15	2	10	0.8	24.20	28.12	-14.0
20×15	3	10	0.7	26.64	28	-4.9
20×15	2	8	0.7	21.8	25.7	-15.2
20×15	2	8	0.7	34.6	32.14	7.7
20×15	2	10	0.9	28.8	25	15.2
20×15	2	10	0.6	41.46	37.5	10.6
20×15	3	20	0.8	54.45	50	8.9
20×15	2	20	0.8	58.4	56	4.3
20×15	3	10	0.4	48.0	50	-4.0

表 1 示出了其中 9 组工艺参数加工后粗糙度 R_a 的测量值以及与理论值的比较。从表中可以看出得到的理论粗糙度值与实际的测量值之间有一定误差,但相对误差都在 15% 以下,最小的相对误差为 4%,说明粗糙度的理论模型对指导激光的抛光加工具有一定的参考价值。

图 6 给出了扫描速度 v 与理论粗糙度以及实际粗糙度之间的关系,该组实验中,选取加工工艺参数为光斑大小 $20 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$,偏移量 b 为 $2 \mu\text{m}$,脉冲频率 f 为 10 Hz,扫描速度依次为 0.6、0.7、0.8、0.9 mm/min。从图中可以看出粗糙度与扫描速度呈反比关系,即扫描速度越快,粗糙度值越小。可以看到,扫描速度在 0~1 mm/min 范围内,随着扫描速度的增大,粗糙度值下降明显。但实验中发现在

3 实验验证

157 nm 激光抛光刻蚀 GaN 外延片后,被刻蚀面的表面粗糙度是衡量抛光效果的重要指标。为了验证上一节中对激光抛光 GaN 表面粗糙度的理论研究,利用上文中的粗糙度数学模型,采用多种激光参数对 GaN 材料进行了抛光实验,选取合适的加工工艺参数,使被刻蚀面的表面粗糙度最小,加工质量达到最佳。

单个行扫描刻蚀的理论深度可以表示为

$$c = \frac{Lft}{v}, \quad (12)$$

式中 L 表示光斑的宽度, f 表示激光脉冲频率, t 表示单脉冲刻蚀深度, v 表示激光扫描速度。由此得粗糙度理论表达式

$$R_a = \frac{(a-kb)[(k+1)b-a]Lft}{b^2 v}. \quad (13)$$

扫描速度大于 1 mm/min 后,粗糙度值下降不明显,而且可能会造成光斑分离,能量辐射不完全。这是由倒数曲线的性质所决定的,所以不宜选取过高的扫描速度 v 值。

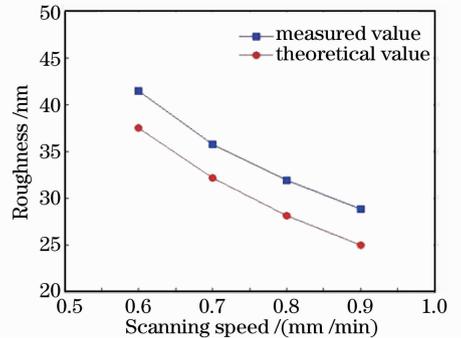


图 6 粗糙度与扫描速度的关系

Fig. 6 Relationship between roughness and scanning speed

粗糙度与激光脉冲频率 f 之间的关系如图 7 所示,工艺参数取值为光斑大小 $20\ \mu\text{m}\times 15\ \mu\text{m}$,偏移量 b 为 $2\ \mu\text{m}$,扫描速度 v 为 $1.0\ \text{mm}/\text{min}$ 。可以看到,脉冲频率 f 取值越大,粗糙度 R_a 越大,加工质量越差。但要注意在实际加工过程中,频率 f 值过小会导致光斑分离,能量分散,造成加工表面不完全刻蚀,表面粗糙度反而变大,因此脉冲频率 f 不要选取得过小,应与扫描速度等相关参数进行综合考虑。

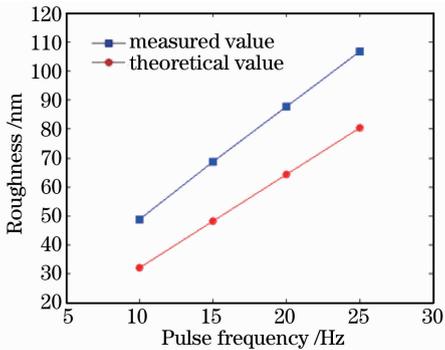


图 7 粗糙度与脉冲频率的关系

Fig. 7 Relationship between roughness and pulse frequency

在加工过程中,有很多因素都会影响到材料刻蚀表面的粗糙度,首先是单脉冲能量输出的不稳定性。单脉冲的不稳定性造成了沟壑在行扫描方向上的水平跳动,沟壑的幅度也有起伏变化。其次,激光矩形光斑的能量不均匀、被刻蚀表面存在少量的热作用、加工后浓 HCl 溶液的清洗不完全等,这些都是影响到实际粗糙度与理论粗糙度之间误差的因素。

4 结 论

以 $157\ \text{nm}$ 激光抛光加工氮化镓材料为对象,用数学解析式的方法构建数学模型,并运用最小二乘法推导出了加工表面粗糙度 R_a 的计算式。通过与实验比较,理论粗糙度值与实际加工粗糙度值的相对误差均在 15% 以内。该模型较为合理地解释了抛光后底面沟壑的形成,为今后改善加工质量提供了理论依据。

参 考 文 献

- 1 Dai Yutang, Xu Gang, Tong Xinlin. Deep UV laser etching of GaN epilayers grown on sapphire substrate [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2012, **212**(2): 492~496
- 2 Tang Wanyi, Zhou Ming, Ren Naifei *et al.*. Surface morphology and optical absorption of femtosecond laser microstructured silicon coated with AZO film [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1207001
唐万羿,周明,任乃飞等.飞秒激光微构造硅表面镀AZO膜的形貌及其光学吸收性能[J].*中国激光*, 2011, **38**(12): 1207001
- 3 P. Moreno, C. Mendez, A. Garcia *et al.*. Femtosecond laser ablation of carbon reinforced polymers [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2006, **252**(12): 4110~4119
- 4 S. Gloora, W. Lüthya, H. P. Webera *et al.*. UV laser polishing of thick diamond films for IR windows [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 1999, **138**(1): 135~139
- 5 Xu Xuefeng, Guo Quan, Huang Yishen *et al.*. Chemical mechanical polishing using magnetic composite abrasives slurry and experimental study on polishing performance [J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2011, **47**(21): 186~192
许雪峰,郭权,黄亦申等.磁性复合磨粒化学机械抛光技术及其加工试验研究[J].*机械工程学报*, 2011, **47**(21): 186~192
- 6 V. C. Venkatesh, S. Lzman. Development of a novel binderless diamond grinding wheel for machining IC chips for failure analysis [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2007, **185**(1-3): 31~37
- 7 Zhang Feng, Deng Weijie. Magnetic-medium assistant polishing of silicon modification layer on silicon carbide surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(11): 116001
张峰,邓伟杰.碳化硅表面硅改性层的磁介质辅助抛光[J].*光学学报*, 2012, **32**(11): 1116001
- 8 Dai Yifan, Shi Feng, Peng Xiaoqiang *et al.*. Deterministic figuring in optical machining by magnetorheological finishing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 198~205
戴一帆,石峰,彭小强等.光学镜面磁流变确定性修形的实现 [J].*光学学报*, 2010, **30**(1): 198~205
- 9 J. L. Weyher, S. Müllera, I. Grzegoryb *et al.*. Chemical polishing of bulk and epitaxial GaN [J]. *J. Cryst. Growth*, 1997, **182**(1-2): 17~22
- 10 Zhang Fenglie, Fu Xing, Liu Chunyang. Influences of nanosecond pulsed laser on parameters in micro-polishing of stainless steel 316L [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2011, **9**(7): 370~376
张峰烈,傅星,刘春阳.纳秒脉冲激光对316L不锈钢微抛光效果的影响 [J].*纳米技术与精密工程*, 2011, **9**(7): 370~376
- 11 M. Vadali, C. Ma, N. A. Duffie *et al.*. Pulsed laser micro polishing: surface prediction model [J]. *J. Manufacturing Processes*, 2012, **14**(3): 307~315
- 12 Yuan Julong, Wang Zhiwei, Wen Donghui *et al.*. Review of the current situation of ultra-precision machining [J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2007, **43**(1): 35~48
袁巨龙,王志伟,文东辉等.超精密加工现状综述 [J].*机械工程学报*, 2007, **43**(1): 35~48

栏目编辑:宋梅梅