

## 高频率皮秒激光微加工石英衬底铝膜效率

金方圆<sup>1,2</sup>, 陈波<sup>1</sup>, 鄂书林<sup>1</sup>, 王海峰<sup>1</sup>, 邢妍<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 采用重复频率 100 kHz 下, 输出功率为 3.7 W 的 532 nm Nd:YAG 皮秒激光器对石英衬底微米量级的铝膜进行了烧蚀, 研究了脉宽为 10 ps 的激光单脉冲能量密度对烧蚀效率、光斑耦合率对烧蚀图形以及重复加工次数对加工精度的影响。单脉冲激光烧蚀实验证实, 皮秒激光烧蚀铝膜可分为高能量密度烧蚀与低能量密度烧蚀两个区域。光斑耦合率对烧蚀深度影响较大, 不易从理论角度控制烧蚀效率。为提高加工精度与验证求解烧蚀率的准确性, 提出重复多次加工的方法。对比了高斯线性法与高斯线性修正法的求解烧蚀率的结果, 证明了高斯线性修正法在扫描激光精细加工方面的优越性。利用高斯线性修正法求得的烧蚀效率, 模拟了激光在不同光斑耦合率下烧蚀微槽的三维轮廓图。

**关键词:** 激光微加工; 皮秒激光; 石英衬底铝膜; 烧蚀效率

中图分类号: TN241 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)11-3238-06

## Ablation rate of high frequency picosecond laser micromachining quartz substrated Al film

Jin Fangyuan<sup>1,2</sup>, Chen Bo<sup>1</sup>, E Shulin<sup>1</sup>, Wang Haifeng<sup>1</sup>, Xing Yan<sup>1,2</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A 532 nm Nd:YAG 10 ps laser with output power of 3.7 W under frequency of 100 kHz was used for ablating quartz glass substrated Al film with thickness of micron dimension. The relationship between ablation rate and single pulse laser fluence was studied, the high fluence ablation and low fluence ablation regimes for picosecond laser ablating Al film were defined. The effect of spot overlapping rates on profilograms of grooves was analyzed, results showed that the ablation depth changed greatly with spot overlapping rate, and it was difficult to obtain ablation rate theoretically from this experiment. In order to improve the precision of ablated grooves and validate the accuracy of obtained ablation rate from Gaussian Linear method (GL), a multi-pass ablating method was put forward. The ablation rates calculated from GL were compared with Corrected Gaussian Linear method (CGL), experimental results showed that CGL was suitable for calculating ablation rates of grooves. The 3D profilogram of grooves in Al film ablated by 10 ps at different spot overlapping rates were simulated through CGL calculated ablation rates.

**Key words:** laser micromachining; picosecond laser; quartz substrated Al film; ablation rate

收稿日期: 2015-03-05; 修订日期: 2015-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(10878004/A03)

作者简介: 金方圆(1989-), 男, 博士生, 主要从事微光学器件的短脉冲激光加工技术的研究。Email: jinfangyuan610@163.com

导师简介: 陈波(1961-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间光学技术方面的研究。Email: chenb@ciomp.ac.cn

## 0 引言

近年来,薄膜材料的微加工技术已被应用到诸多领域,特别是玻璃衬底的金属薄膜微加工技术在修复半导体掩膜、制作光电器件以及 MEMS 器件中的应用极其广泛。短脉冲激光因其脉冲宽度窄,能够在材料加工中实现精度高、热影响区小的特点,在诸多加工技术中脱颖而出<sup>[1-2]</sup>。

为研究单脉冲激光烧蚀材料的原理和效率,进行了一系列的研究后取得了理论和实验进展<sup>[3-4]</sup>;在激光烧蚀材料体积效率的研究上也取得了显著成效<sup>[5-6]</sup>。对于扫描激光烧蚀效率的研究,必须建立在单脉冲和扫描激光加工的理论实验之上。国内外的研究学者在这一领域做出了卓越的贡献,H. W. Choi<sup>[7]</sup>等提出了光斑耦合率的概念,研究了光斑耦合率与 ITO 材料烧蚀阈值以及沟槽烧蚀宽度的关系。D. Bruneel<sup>[8]</sup>等提出高斯线性法,定义了高斯光束的有效脉冲数,并对加工时间进行了预测。Y. D. Maio<sup>[9]</sup>等提出高斯线性修正法,计算了激光烧蚀 PZT 以及金属 Ni 的烧蚀效率。

文中对单脉冲 10 ps 激光烧蚀铝膜效率进行了理论和实验分析,证明了高斯线性修正法求解激光精细加工烧蚀效率的准确性。激光烧蚀率的精确计算,为高频率激光烧蚀沟槽形貌的预测提供了理论依据。

## 1 实验装置

实验平台的光学系统如图 1 所示,由两台电脑分别控制激光参数和平台移动。工作平台的定位精度为  $\pm 8 \mu\text{m}$ ,重复精度为  $\pm 1 \mu\text{m}$ ,保证了重复加工精度;平台架设在  $x$  轴上,上面设计真空吸附孔,使样

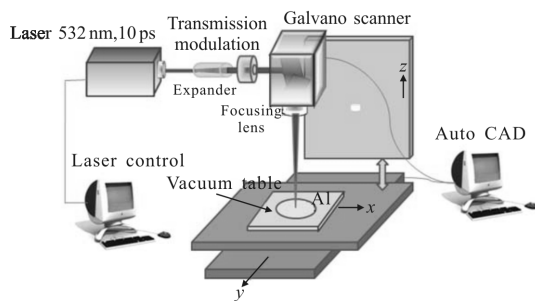


图 1 皮秒激光加工设备光学系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of optical system of picosecond laser micromachining equipment

品与平台平整贴合;激光器重复频率范围为  $f=10\sim 1\ 000\ \text{kHz}$ ,聚焦直径  $2r_a=10\ \mu\text{m}$ ,实验选用  $100\ \text{kHz}$  的激光,光束质量  $M^2<1.1$ 。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 单脉冲激光烧蚀效率

为研究不同能量密度 10 ps 激光烧蚀效率,选用蒸镀膜石英衬底上镀得的铝膜。单脉冲激光烧蚀深度  $L$  满足<sup>[9]</sup>:

$$L = \bar{l}_{\text{eff}} \ln(F/F_{\text{th}}) \quad (1)$$

式中: $F_{\text{th}}$  为烧蚀阈值; $\bar{l}_{\text{eff}}$  为平均有效穿透深度; $F=2P/(f\pi r_a^2)$  为激光能量密度; $P$  为激光功率。可见, $L$  与  $\ln(F)$  呈线性关系。

图 2 是 10 ps 激光烧蚀效率随能量密度变化的散点图及拟合直线。根据其既能验证单脉冲激光烧蚀铝膜的理论模型,又能推知满足实际加工要求所需的参数,单脉冲激光烧蚀石英衬底铝膜可分为低能量密度烧蚀和高能量密度烧蚀两个区域,且高能量密度烧蚀阈值  $F_{\text{th}}=1.70\ \text{J}/\text{cm}^2$ ,低能量密度烧蚀阈值为  $0.03\ \text{J}/\text{cm}^2$ 。对于金属,存在最优化烧蚀能量密度  $F_{\text{opt}}$ ,位于两条拟合直线的交点处<sup>[10]</sup>,10 ps 激光烧蚀铝膜的最优化能量密度约为  $2.36\ \text{J}/\text{cm}^2$ 。

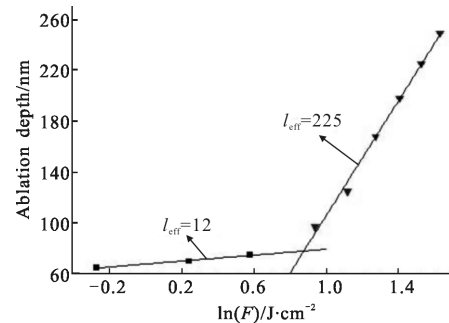


图 2 单脉冲 10 ps 激光烧蚀铝膜效率与能量密度的关系<sup>[11]</sup>

Fig.2 Relationship between ablation rate and laser fluence of 10 ps laser ablating Al film

不论是纳秒激光“热加工”还是飞秒激光“冷加工”过程,烧蚀效率均取决于材料表面温度场的分布,而吸收系数决定了温度场的分布。Xiao<sup>[12]</sup>指出,光学穿透深度  $l_{\text{opt}}$  和热穿透深度  $l_{\text{th}}$  共同影响有效穿透深度  $l_{\text{eff}}$ ,对于金属有  $l_{\text{opt}} \ll l_{\text{th}}$ ,因此,在研究高能量密度的短脉冲激光与金属作用的传热过程时,不必

考虑光学吸收系数。

皮秒激光烧蚀铝膜的热传导模型计算证明,高能量密度激光烧蚀原理为“相爆炸现象”<sup>[10]</sup>。Yang<sup>[13]</sup>通过飞秒激光烧蚀金属的热蒸发与沸腾实验证明,小于 1 nm 的金属由于热蒸发被去除,小于 10 nm 的金属由于沸腾脱离金属表面。皮秒激光烧蚀过程产生的热效应更多,在研究低能量密度激光烧蚀原理时,需考虑热吸收、光学吸收、热蒸发与沸腾等因素。

### 2.2 扫描激光烧蚀效率

对于脉冲激光来说,实际的加工往往是一个多脉冲耦合的过程,而光斑耦合率( $\epsilon_{OL}$ )是由扫描速率( $v$ )、重复频率( $f$ )和有效刻蚀直径( $D$ )决定的,可表示为<sup>[7]</sup>:

$$\epsilon_{OL} = \frac{D - (v/f)}{D} \times 100\% \quad (2)$$

为研究扫描激光烧蚀效率,首先要考虑光斑耦合度对加工图形的影响。这里研究能量密度为 3.06 J/cm<sup>2</sup>、重复频率  $f$  为 100 kHz、光斑耦合率在 25%、50%、75% 和 95% 的激光烧蚀效果。

图 3 为光学轮廓仪测得的能量密度为 3.06 J/cm<sup>2</sup>、光斑耦合率为 25% 的皮秒激光十字划线后,铝膜内部沟槽的轮廓图。取图 3(b) 中曲线底部的平均值作为烧蚀深度。能量密度为 3.06 J/cm<sup>2</sup>、脉宽为 10 ps 的激光在四种光斑耦合率下,烧蚀深度分别为 137 nm (接近单脉冲)、166 nm、390 nm 和 2 038 nm。烧蚀深度随光斑耦合率的剧烈变化表明它不能对烧蚀深度进行准确预测。

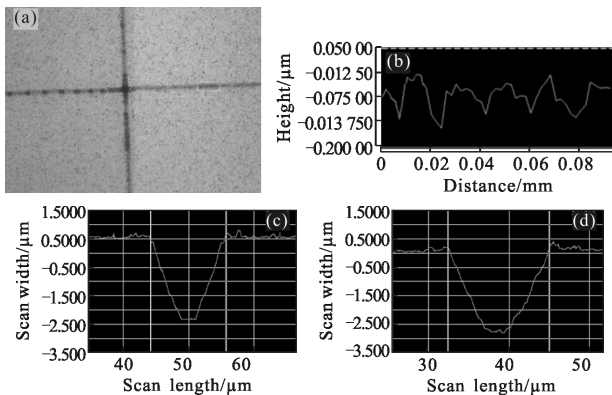


图 3 光斑耦合率为 25% 时,轮廓仪测量烧蚀沟槽的形貌图  
Fig.3 Profilogram of grooves in Al at laser spot overlapping rate of 25%

扫描加工过程中,无论是振镜还是平台的移动,均可视为激光光斑在样品表面的移动,图 4 为高斯

光束扫描加工示意图。为确定理想高斯光束在扫描加工过程中每行进一个步长  $v/f$ ,光斑对观察点的有效烧蚀深度,Bruneel D<sup>[8]</sup>提出了高斯线性法(Gaussian Linear method, GL),其原理是假设烧蚀效率随激光能量密度线性变化。 $F_{max}$  的有效脉冲数为 1,则观察点总的有效脉冲数  $N$  满足:

$$N = \sum_{k=-\infty}^{\infty} e^{-2(kv/r_{s,f})^2} \quad (3)$$

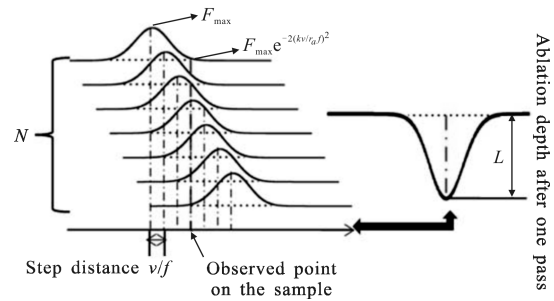


图 4 高斯光束扫描加工示意图

Fig.4 Schematic representation of stacked pulse in the case of a Gaussian shaped intensity profile

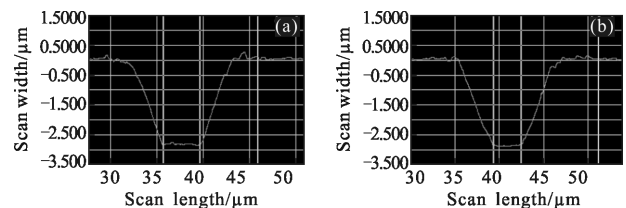
激光烧蚀效率  $\tau_{abl}$  的数学表达式为:

$$\tau_{abl} = L/N$$

式中: $L$  表示单次扫描烧蚀沟槽的深度。使用控制重复加工次数的方法验证 GL 的准确度,为加工出深度为  $e$  的沟槽,重复加工次数  $n$  满足:

$$n = \frac{e/\tau_{abl}}{N} \quad (4)$$

假设铝膜厚度为 2  $\mu$ m,取图 2 中单脉冲加工深度作为  $\tau$ , $F$  分别为 2.04 J/cm<sup>2</sup>、3.06 J/cm<sup>2</sup>、4.07 J/cm<sup>2</sup> 和 5.09 J/cm<sup>2</sup>,使  $\epsilon_{OL}=75\%$ ,为将铝膜去除,由公式(4)可得加工次数分别为 13、8、6、5,烧蚀沟槽的二维截面图分别对应图 5(a)、(b)、(c)和(d)。当选用激光的能量密度没有达到石英的烧蚀阈值时,将铝膜去除后会露出石英衬底。由图 5 可知,铝膜厚度约为 2.87  $\mu$ m;随着激光能量密度的降低和重复加工次数的增加,按照 GL 求得的加工次数不准确。



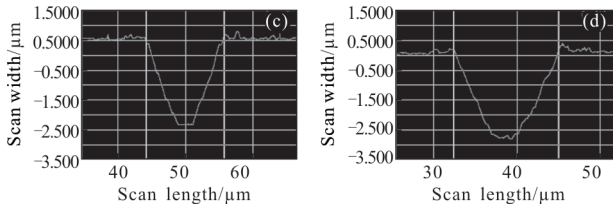


图 5 高斯线性法下,不同能量密度的皮秒激光重复加工多次烧蚀沟槽的截面图

Fig.5 Cross section of grooves ablated by multi-pass method from GL

### 2.3 高斯线性修正法

Maio Y D<sup>[9]</sup>等假设烧蚀效率随激光能量密度呈非线性关系,提出了高斯线性修正法(Corrected Gaussian Linear method, CGL)。CGL 的原理是高能量密度的激光烧蚀效率由低能量密度烧蚀效率表示。保持相同的光斑耦合率,通过累积提高能量密度  $F_{max}$ ,扫描加工得到  $m$  个沟槽,那么沟槽的深度  $L_i$  与烧蚀效率  $\tau_j$  满足如下关系  $L=A \cdot \tau$ :

$$\begin{pmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_i \\ \vdots \\ L_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1p} \\ a_{21} & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & a_{ij} & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & \cdots & a_{mp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \vdots \\ \tau_j \\ \vdots \\ \tau_p \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中:  $\tau_j$  表示所求的烧蚀效率;  $a_{ij}$  表示每个烧蚀效率对  $L_i$  的贡献量。可见,高斯线性法对应的  $A$  为对角矩阵,且满足  $a_{ii}=N$ ; 高能量密度的激光对低能量密度烧蚀率没有贡献,则  $A$  为下三角矩阵。由公式(3)得,峰值能量密度为  $F_{max}$  的激光,对应的第  $k$  分量能量密度为:

$$F_k = F_{max} \sum_{i=-\infty}^{\infty} e^{-2(kv/r_s f)^2} \quad (6)$$

假设此时  $F_k$  满足:  $F_{jmax} \leq F_k \leq F_{(j+1)max}$ , 则:

$$\tau_k = \tau_j + \frac{\tau_{j+1} - \tau_j}{F_{j+1} - F_j} (F_k - F_j) = \frac{F_{j+1} - F_k}{F_{j+1} - F_j} \tau_j + \frac{F_k - F_j}{F_{j+1} - F_j} \tau_{j+1} = \alpha_k \tau_j + \beta_k \tau_{j+1} \quad j \in N^*, 1 < j \leq i-1 \quad (7)$$

对比公式(5)即可得  $a_{ij}$  与  $\alpha_k$  和  $\beta_k$  的关系。为保证结果准确,  $a_{11}$  通过高斯线性法求得。则公式(4)可改写为:

$$n = \frac{e}{\sum_{i=-\infty}^{\infty} \tau_k \cdot e^{-2(kv/r_s f)^2}} \quad (8)$$

当光斑耦合率比较小时,矩阵  $A$  中  $a_{ij}=0$  的项比

较多,所求烧蚀效率不够准确,因此,必须采用较高光斑耦合率进行计算。这里使用  $\epsilon_{OL}=95\%$  的烧蚀效率控制  $\epsilon_{OL}=75\%$  的加工精度。

CGL 计算发现,求解过程中烧蚀沟槽所用的激光能量密度梯度变化较大时,得到的  $\tau_{abl}$  不准确。为解决此问题,对沟槽烧蚀深度随能量密度的变化进行了曲线拟合,并在烧蚀沟槽深度随能量密度为  $0.25 \sim 5.00 \text{ J/cm}^2$  变化曲线上,选取了 20 个点。图 6 为  $\epsilon_{OL}=95\%$  下,采用不同方法得到的  $\tau_{abl}$  与  $F$  的关系图。

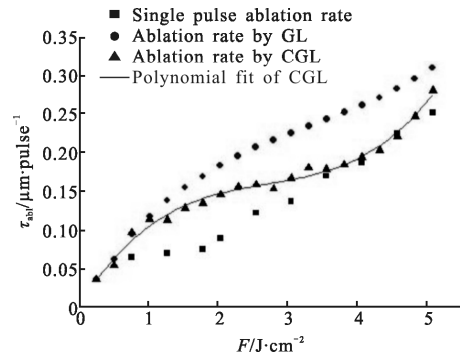


图 6 不同方法得到的激光烧蚀效率对比

Fig.6 Comparison of obtained ablation rate by different method

由图 6 可见, GL 与 CGL 求得的  $\tau_{abl}$  主要区别在能量密度为  $1.00 \sim 4.50 \text{ J/cm}^2$  范围内, GL 比 CGL 求得的烧蚀效率变化陡峭,导致所求加工次数过大。为准确求得加工次数,对 CGL 的求解结果进行了三次曲线拟合,其他能量密度的  $\tau_{abl}$  可从曲线中得到。由公式(8)得,激光能量密度为  $2.04 \text{ J/cm}^2$ 、 $3.06 \text{ J/cm}^2$ 、 $4.07 \text{ J/cm}^2$  和  $5.09 \text{ J/cm}^2$ ,  $\epsilon_{OL}=75\%$  时,完全去除铝膜所需重复加工次数分别为 9、7、6、5。为准确辨认石英衬底,使能量密度提高 1.05 倍,最终使用台阶仪测得沟槽的二维截面图如图 7 所示。

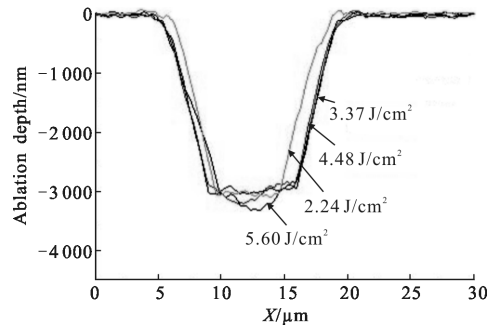


图 7 CGL 下,不同能量密度的激光重复加工多次烧蚀沟槽截面图  
Fig.7 Cross section of grooves in quartz substrated Al film ablated by multi-pass method from CGL



由图 7 可知,能量密度为  $3.37 \text{ J/cm}^2$  和  $2.24 \text{ J/cm}^2$  的激光均没达到石英的烧蚀阈值,  $4.48 \text{ J/cm}^2$  和  $5.60 \text{ J/cm}^2$  的激光均超过石英的烧蚀阈值。根据 CGL 求得重复加工次数所烧蚀的沟槽均达到加工要求。

#### 2.4 激光烧蚀铝膜微槽的模拟计算

为对激光烧蚀沟槽的形貌进行准确预测,采用图 6 中烧蚀率的拟合曲线对沟槽形貌进行模拟。步骤为:(1) 确定模拟的空间,为完整显示 5 个脉冲在光斑耦合率为 25% 烧蚀的形貌,将区域设置为  $[X, Y] = 60 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$ , 其中  $X$  方向为激光行进方向;(2) 确定模拟时间,激光频率为  $100 \text{ kHz}$ ,为满足行进距离大于  $60 \mu\text{m}$ ,模拟时间定为  $1200 \mu\text{s}$ ;(3) 使用图 6 中拟合曲线得到激光行进  $1200 \mu\text{s}$  过程中每个光斑在第一个采样点的有效能量密度对烧蚀深度的贡献量,将所有光斑对烧蚀深度贡献量求和即是烧蚀深度;(4) 将步骤(3)遍历至模拟空间所有点,既得所有采样点的烧蚀深度,最终能量密度为  $3.06 \text{ J/cm}^2$  的激光在光斑耦合率为 25%、50%、75%、95% 下,烧蚀铝膜沟槽的轮廓图,如图 8 所示。

由图 8 可知,沟槽边界均有一定的损伤,这是因为图 6 没有考虑烧蚀阈值,刨除这部分烧蚀深度后,四种光斑耦合率的激光烧蚀深度分别为  $163.9 \text{ nm}$ 、 $223.7 \text{ nm}$ 、 $410.7 \text{ nm}$  和  $1997.0 \text{ nm}$ ,误差分别为 19.6%、

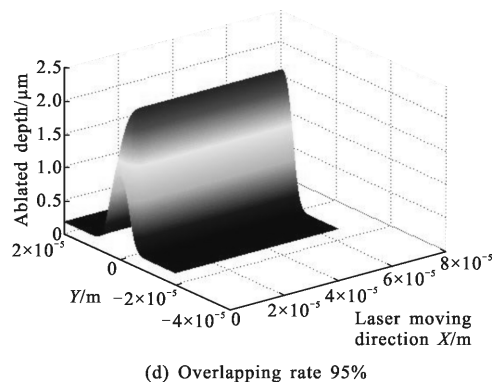
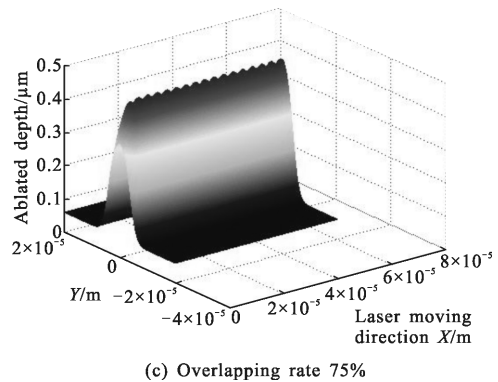
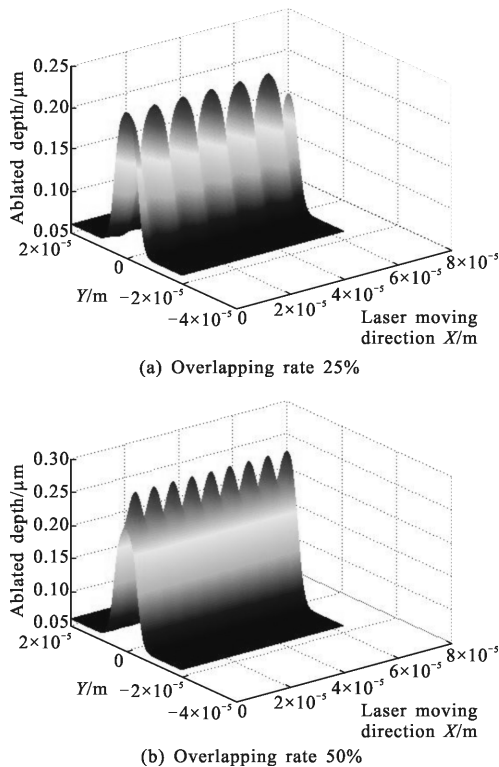


图 8 皮秒激光烧蚀沟槽形貌的三维模拟图

Fig.8 Simulated 3D profilogram of grooves ablated by PS laser

34.7%、5.3%和 2.0%。低光斑耦合率模拟误差较大:一是仪器测量精度的限制;二是由于光斑耦合现象没有占主导因素,使得烧蚀深度接近单脉冲。由于实际加工过程所用光斑耦合率可能更高,从图 8 可知,光斑耦合率高于 95% 的激光可使沟槽底部烧蚀得更均匀。

### 3 结论

(1) 利用 Lumera RAPID 皮秒激光器,研究了单脉冲  $10 \text{ ps}$  激光烧蚀石英衬底铝膜效率随能量密度变化关系。结果表明,皮秒激光对铝膜的烧蚀可分为低能量密度烧蚀和高能量密度烧蚀两个区域;高能量密度烧蚀效率主要与热吸收现象有关,而低能量密度的烧蚀效率与热吸收、光学吸收、热蒸发与沸腾等现象均有关。

(2) 研究了能量密度为  $3.06 \text{ J/cm}^2$ 、脉宽为  $10 \text{ ps}$  的激光在四种光斑耦合率下,烧蚀铝膜深度的变化,得到光斑耦合率不能控制烧蚀沟槽深度的结论。

(3) 激光光斑耦合率为 75% 的重复加工实验,证明了高斯线性法在控制沟槽烧蚀精度要求比较大方

面的不足。利用高斯线性修正法求得光斑耦合率为 95% 下,激光烧蚀铝膜的效率,并将结果应用到光斑耦合率为 75% 的重复加工实验中,证明了高斯线性修正法在扫描激光精细加工方面的优越性。

(4) 对能量密度为  $3.06 \text{ J/cm}^2$ 、脉冲宽度为 10 ps 的激光在光斑耦合率为 25%、50%、75%、95% 下,烧蚀铝膜内部沟槽过程进行了三维模拟,结果与实验相符。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Kim J, Na S. Metal thin film ablation with femtosecond pulsed laser[J]. *Opt Laser Technol*, 2007, 39(7): 1443–1448.
- [3] Comeau M G, Lewis L J. Ultrashort-pulse laser ablation nanocrystalline aluminum [J]. *Phys Rev B*, 2011, 84(22): 224110–1–16.
- [4] Shao Junfeng, Guo Jin, Wang Tingfeng. Theoretical research on dynamics of femtosecond laser ablation crystal silicon[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2419–2424. (in Chinese)  
邵俊峰, 郭劲, 王挺峰. 飞秒激光与硅的相互作用过程理论研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(8): 2419–2424.
- [5] Pietroy D, Maio Y D, Moine B, et al. Femtosecond laser volume ablation rate and threshold measurements by differential weighing[J]. *Opt Exp*, 2012, 20(28): 29900–29908.
- [6] Neuenschwander B, Jaeggi B, Schmid M, et al. Optimization of the volume ablation rate for metals at different laser duration from ps to fs[C]//SPIE, 2012, 8243: 824307.
- [7] Choi H W, Farson D F, Bovatsek J, et al. Direct-write patterning of indium-tin-oxide film by high pulse repetition frequency femtosecond laser ablation [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(23): 5792–5799.
- [8] Bruneel D, Matras G, Harzic R Le, et al. Micromachining of metals with ultra-short Ti-Sapphire lasers: prediction and optimization of the processing time [J]. *Opt Lasers Eng*, 2010, 48(3): 268–271.
- [9] Maio Y D, Colombier J P, Cazottes P, et al. Ultrafast laser ablation characteristics of PZT ceramic: Analysis methods and comparison with metals[J]. *Opt Lasers Eng*, 2012, 50(11): 1582–1591.
- [10] Jin Fangyuan, Chen Bo, E Shulin, et al. Theory analysis and experiment verification on picosecond laser ablation of Al film[J]. *Chin J Lumin*, 2014, 35(6): 754–760. (in Chinese)  
金方圆, 陈波, 鄂书林, 等. 皮秒激光烧蚀 Al 膜的理论分析与实验验证[J]. *发光学报*, 2014, 35(6): 754–760.
- [11] Harzic R Le, Breitling D, Weikert M, et al. Ablation comparison with low and high energy densities for Cu and Al with ultra-short pulses [J]. *Appl Phys A*, 2005, 80(7): 1589–1593.
- [12] Xiao S Z, Schöps A, Ostendorf A. Selective ablation of thin films by ultrashort laser pulses [J]. *Phys Proc*, 2012, 39: 594–602.
- [13] Yang J, Zhao Y, Zhu X. Theoretical studies of ultrafast ablation of metal targets dominated by phase explosion[J]. *Appl Phys A*, 2007, 89(2): 571–578.