

# 聚酰亚胺基底金属薄膜激光刻蚀温度场分布

张宏伟<sup>1</sup> 任 妮<sup>2</sup> 薛红涛<sup>1</sup> 汤富领<sup>1</sup> 闫晓东<sup>1</sup> 路文江<sup>1</sup> 刘孝丽<sup>2</sup>

<sup>1</sup>兰州理工大学材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050

<sup>2</sup>兰州空间技术物理研究所真空低温技术与物理国家级重点实验室, 甘肃 兰州 730000

**摘要** 为研究脉冲激光刻蚀聚酰亚胺基底镀金属薄膜过程, 采用有限元软件 COMSOL Multiphysics 构建高斯脉冲激光辐照复合材料的 2 维非稳态物理模型, 通过求解热传导方程计算不同功率激光辐照金属薄膜的温度场分布, 讨论不同激光参数对刻蚀进程的影响。模拟结果表明: 刻蚀深度主要受激光功率密度的影响, 且随着金属薄膜厚度的增加, 激光刻蚀深度先减小后保持不变。在刻蚀过程中, 为了更好地保护基底, 应选择大功率短脉宽的激光参数; 由于铜薄膜比铝薄膜更难刻蚀, 在铜薄膜的刻蚀过程中应选择较大功率密度的激光。结果有助于理解激光刻蚀过程, 对实际刻蚀过程有一定的指导意义。

**关键词** 激光技术; 脉冲激光; 激光刻蚀; 金属薄膜; 聚酰亚胺; 温度场; 刻蚀深度

中图分类号 TN249; O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0503009

## Temperature Distribution for Laser Etching of Metal Thin Films on Polyimide Substrate

Zhang Hongwei<sup>1</sup> Ren Ni<sup>2</sup> Xue Hongtao<sup>1</sup> Tang Fuling<sup>1</sup> Yan Xiaodong<sup>1</sup>  
Lu Wenjiang<sup>1</sup> Liu Xiaoli<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Material Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China

<sup>2</sup>National Key Laboratory of Vacuum and Cryogenic Technology on Physics, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou, Gansu 730000, China

**Abstract** In order to study the pulse laser etching process of metal thin films on polyimide substrate, a two-dimensional transient physical model of Gaussian distribution pulse laser irradiation in composite material is established with the finite element analysis software COMSOL Multiphysics. The temperature distribution of metal thin films is calculated under irradiation of pulse lasers with different powers by means of solving the thermal conduction equations. The influences of different laser parameters on etching process are discussed. Simulation results show that the ablation depth is mainly affected by the laser power density, and it decreases at first and then keeps constant with increase of metal film's thickness. During the etching process, it is appropriate to choose laser parameters of higher power and shorter pulse width in order to well protect the substrate from damage. As copper film etching is much more difficult than aluminum film etching, higher laser power density should be selected for copper film etching. Results are instructive and helpful to understand the actual laser etching process.

**Key words** laser technique; pulse laser; laser etching; metal thin films; polyimide; temperature field; ablation depth

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 160.5470; 350.3390

## 1 引 言

激光刻蚀也称为激光烧蚀, 是利用脉冲激光将材料表面迅速加热气化, 达到材料局部去除的过程。它具

收稿日期: 2016-01-18; 收到修改稿日期: 2016-02-05

基金项目: 国家自然科学基金(51135005)、兰州空间技术物理研究所开放基金项目(合同 510 审支(2015)X07-005 号)

作者简介: 张宏伟(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光加工过程模拟方面的研究。E-mail: 995687117@qq.com

导师简介: 汤富领(1973—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事功能材料计算与设计方面的研究。

E-mail: tfl03@mails.tsinghua.edu.cn(通信联系人)

有高速、高精度<sup>[1]</sup>、高适应性等特点,同时还具有非接触、不引入应力、热影响区小、刻蚀面质量好、刻蚀时无噪音、刻蚀过程容易实现自动化控制等优点,因此激光刻蚀在材料加工领域<sup>[2-4]</sup>,特别是航空、航天器部件<sup>[5]</sup>的加工过程中得到了广泛的应用。例如,在国防领域及武器系统中采用镀膜/激光刻蚀加工卫星天线<sup>[6]</sup>,就是利用激光刻蚀技术将天线反射器的聚酰亚胺基底上沉积的金属薄膜加工成高精度的功能薄膜图形。金属的熔点比聚酰亚胺的气化点高,金属薄膜在刻蚀过程中被激光加热、熔化乃至气化,其温度达到或高于基底材料的气化点,导致基底材料分解,对部件的功能产生不利影响<sup>[7]</sup>。当工件由2种或2种以上热、光物性相差很大的材料组成时,刻蚀过程会变得复杂,往往不能获得满意的刻蚀效果,因此,研究聚酰亚胺基底上金属薄膜刻蚀过程的能量转化、温度分布以及薄膜的去除机理,对于制造功能部件具有重要意义。针对这些问题,杨建平<sup>[8]</sup>通过分析激光脉冲作用于金属薄膜后的能量吸收及演化过程,证实了金属薄膜/复合材料组合体系在纳秒级脉冲激光作用下,因复合材料易气化的特性而发生特有的薄膜/基底界面分离现象。刘孝丽<sup>[9]</sup>采用有限元分析方法模拟了激光对聚酰亚胺基底上铝薄膜的刻蚀过程,验证了在脉冲激光作用下由于基底材料易分解而产生的薄膜/基底界面分离的物理机制。

激光刻蚀聚酰亚胺基底上金属薄膜的过程,受激光功率、波长、模式、光斑尺寸、扫描方式及扫描速度、材料的热物理特性、试样的几何尺寸及其表面状态等多参数的综合影响<sup>[10-11]</sup>,由于激光作用的时间很短,且激光刻蚀过程中的传热传质过程较为复杂,很难用实验方法直接测量其瞬时温度分布,难以研究激光刻蚀聚酰亚胺基底上金属薄膜的影响因素。本文采用有限元分析软件 COMSOL Mutiphysics 模拟了纳秒激光刻蚀金属薄膜/聚酰亚胺材料组合体系,通过分析各参数对温度场及刻蚀过程的影响,得到了适合刻蚀铝、铜薄膜的激光参数。

## 2 COMSOL Mutiphysics 数值模拟过程

### 2.1 理论模型的建立

用 COMSOL Mutiphysics 软件建立了聚酰亚胺基底金属薄膜 2 维有限元模型,如图 1 所示。金属薄膜/聚酰亚胺组合由聚酰亚胺基底和金属薄膜组成,分别建立计算模型。聚酰亚胺基底宽度为 130  $\mu\text{m}$ ,金属薄膜厚度分别为 1.5、2、3、5、7、10、20  $\mu\text{m}$ ,宽度为 50  $\mu\text{m}$ 。金属薄膜与聚酰亚胺上下复合,均匀地分布在基底上。

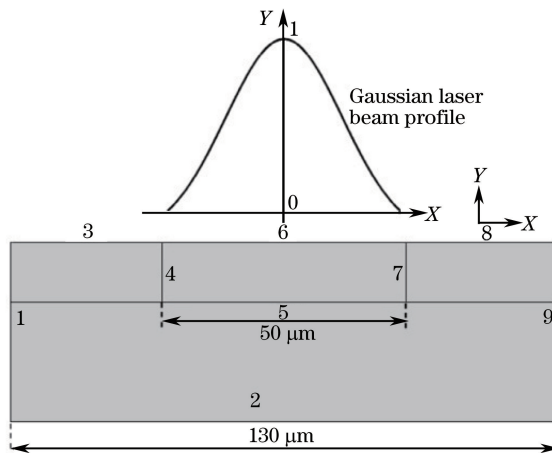


图 1 几何模型

Fig. 1 Geometric model

波长为 1064 nm 的激光束垂直入射于金属薄膜表面,激光束能量为高斯分布,聚焦后的激光光斑直径为 50  $\mu\text{m}$ ,脉冲宽度为 100 ns,重复频率为 20 kHz,金属薄膜分别为纯铜和纯铝,金属薄膜/聚酰亚胺组合材料的热物理性质如表 1、2、3 所示。

整个计算域采用三角形网格划分,为保证瞬态温度场计算的精度,对激光辐照区域的网格进行了加密。由于高密度激光刻蚀涉及的影响因素众多,因此对模拟过程进行了必要的简化,做出如下假设:

表 1 铝薄膜的热物理性质

Table 1 Thermal physical properties of aluminum thin film

	Solid state	Liquid state
Density / (kg/m <sup>3</sup> )	2700	2700
Specific heat / [J/(kg · K)]	595.66 + 1.51T - 0.0021 T <sup>2</sup>	1176.73
Heat conductivity / [W/(m · K)]	39.65 + 1.68T - 0.0054 T <sup>2</sup>	40.94 + 0.073T - 2.28 × 10 <sup>-5</sup> T <sup>2</sup>
Absorptivity <sup>[12]</sup>	354.67 × 10 <sup>-4</sup> × √(-1.0 + 1.25 × 10 <sup>-2</sup> T)	354.67 × 10 <sup>-4</sup> × √(10.7 + 1.45 × 10 <sup>-2</sup> × T)
Melting point /K	933	
Boling point /K	2793	
Latent heat of fusion / (kJ/mol)	10.79	
Latent heat of evaporation / (kJ/mol)	293.4	

表 2 铜薄膜的热物理性质

Table 2 Thermal physical properties of copper thin film

	Solid state	Liquid state
Density / (kg/m <sup>3</sup> )	8960	8960
Specific heat / [J/(kg · K)]	342.76 + 0.13T + 5.54 × 10 <sup>-5</sup> T <sup>2</sup>	516.16
Heat conductivity / [W/(m · K)]	423.74 - 0.31T + 0.001 T <sup>2</sup>	423.74 - 0.31T + 0.001 T <sup>2</sup>
Absorptivity <sup>[12]</sup>	354.67 × 10 <sup>-4</sup> × √(-0.125 + 0.675 × 10 <sup>-2</sup> T)	354.67 × 10 <sup>-4</sup> × √(6.2 + 1.02 × 10 <sup>-2</sup> × T)
Melting point /K	1357.6	
Boling point/K	2836	
Latent heat of fusion / (kJ/mol)	13.050	
Latent heat of evaporation / (kJ/mol)	300.30	

表 3 聚酰亚胺的热物理性质

Table 3 Thermal physical properties of polyimide

Material	Density / (kg/m <sup>3</sup> )	Specific heat / [J/(kg · K)]	Heat conductivity / [W/(m · K)]	Melting point /K
Polyimide	1420	2000	0.385	443

1) 材料各向同性,且在整个刻蚀过程中金属薄膜和聚酰亚胺基底没有发生分离;能量除辐射和热对流外,没有其他损失途径。

2) 材料去除以气化蒸发为主,忽略液态金属的喷射,且不考虑金属处于液态时受到的作用力,忽略材料去除的力学作用,温度达到气化点材料即被去除。

3) 在脉冲激光加热过程中,金属温度一旦达到气化点,即将其热物理性质设定成空气的热物理性质<sup>[13]</sup>。

激光刻蚀过程中材料发生剧烈的热作用,材料内部的瞬态热传热方程可描述为

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q - Q', \quad (1)$$

式中  $t$  和  $T$  分别为时间和瞬时温度,  $\rho$ 、 $c_p$  和  $k$  分别为材料的密度、比热容和热导率,  $\nabla$  为梯度算子,  $Q$  为材料吸收的激光能量,  $Q'$  为因热对流和辐射所损失的热量。金属对激光的吸收通常发生在表层很薄的范围内,因此模拟过程中将激光热源以表面热流形式加载,能量强度呈高斯分布,作用在模型中心,表面热流密度为

$$P_g = \frac{2PA}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{2x^2}{r^2}\right), \quad (2)$$

式中  $P$  为激光峰值功率,  $r$  为激光光斑半径,  $\exp\left(-\frac{2x^2}{r^2}\right)$  代表激光的高斯分布,  $A$  为金属薄膜对激光的吸收率,它主要取决于金属的电阻率。对于波长为 1064 nm 的激光,金属对其吸收率应用 Hagen-Rubens 公式<sup>[14]</sup>

$$A(T)_{1064 \text{ nm}} = 354.67 \sqrt{\Omega(T)}, \quad (3)$$

式中  $\Omega(T)$  为金属的电阻率。

## 2.2 相变处理及边界条件选择

金属薄膜在激光的持续辐照下,经历固态、液态、气态三个过程。金属薄膜的热物理性质是随温度变化的函数,在融化点和气化点处会发生突变。为了避免数值的不稳定性和求解过程的不收敛,数值模拟中认为熔点和气化点不是一个单一的温度点,而是一个很短的温度区间,固-液转变和液-气转变过程中存在一个糊状区域,即在固-液或液-气两种物相之间存在一个糊状区作为过渡区间<sup>[15]</sup>。在相变过程中,处于糊状温度区间材料的密度  $\rho$ 、比热容  $c_p$  和热导率  $k$  通过下列方程给出

$$k = \theta k_{\text{phase1}} + (1 - \theta) k_{\text{phase2}}, \quad (4)$$

$$c_p = \theta c_{p,\text{phase1}} + (1 - \theta) c_{p,\text{phase2}} + L_{f/v} \frac{d\alpha}{dT}, \quad (5)$$

$$\rho = \frac{\theta \rho_{\text{phase1}} c_p + (1 - \theta) \rho_{\text{phase2}} c_{p,\text{phase2}}}{\theta c_{p,\text{phase1}} + (1 - \theta) c_{p,\text{phase2}}}, \quad (6)$$

式中  $\theta \in [0, 1]$  为糊状区未转变部分的体积分,  $\alpha$  为在 COMSOL 软件中处理相变的平滑函数。在固-液转变过程中 phase1 和 phase2 分别代表固相和液相,而在液-气转变过程中 phase1 和 phase2 分别代表液相和气相,熔化潜热  $L_f$  和 气化潜热  $L_v$  在熔化和气化过程中分别应用到(6)式中。

图 1 描述了模拟过程中使用的边界条件。由于激光辐照材料是在常温下进行的,有限元模型的初始边界条件为

$$T(x, y, t) \Big|_{t=0} = 293 \text{ K}. \quad (7)$$

激光加热过程中模型的 3、8 边界使用了热对流和热辐射边界条件,其方程为

$$\mathbf{n} \cdot (k \nabla T) = h (T_{\text{amb}} - T) + \epsilon \sigma (T_{\text{amb}}^4 - T^4), \quad (8)$$

式中  $\mathbf{n}$  为边界的法向矢量,  $h = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ <sup>[16]</sup> 为对流换热系数,  $T_{\text{amb}}$  为周围环境的温度,  $\epsilon = 0.04$  为金属的热辐射率且  $\sigma$  为玻尔兹曼常数。1、3、9 边界使用了热绝缘边界条件

$$\mathbf{n} \cdot (k \nabla T) = 0. \quad (9)$$

6 边界使用热流、热辐射和热对流边界条件

$$\mathbf{n} \cdot (k \nabla T) = \varphi P_g + h (T_{\text{amb}} - T) + \epsilon \sigma (T_{\text{amb}}^4 - T^4), \quad (10)$$

式中  $\varphi$  为系数,其中  $0 \leq t \leq n\tau$  时,  $\varphi = 1$ ; 当  $t \geq n\tau$  时  $\varphi = 0$ ,  $n$  为除 0 之外的自然数,  $\tau$  为激光脉冲宽度。

5 边界为金属层与聚酰亚胺层的交界面,其热流及温度连续,即

$$\mathbf{n} \cdot (k_{\text{metal}} \nabla T) = \mathbf{n} \cdot (k_{\text{PI}} \nabla T) = 0, \quad (11)$$

式中  $k_{\text{metal}}$  为金属的热导率,  $k_{\text{PI}}$  为聚酰亚胺的热导率。

## 3 模拟结果与分析

### 3.1 激光刻蚀过程的温度场模拟

依据上述物理模型,用多物理场耦合分析软件 Comsol Mutiphysics 对金属薄膜/聚酰亚胺组合受激光辐照引起的温度场进行模拟计算。图 2 是厚度为  $5 \mu\text{m}$  的纯铜金属薄膜在激光平均功率为  $4 \text{ W}$  下,经过激光辐照  $100 \text{ ns}$  时的温度场分布,图中  $T_v$  为气化温度,  $T_m$  为熔点。由图 2(a)可知:在激光刻蚀金属薄膜/聚酰亚胺组合的过程中,金属薄膜经历了固-液-气 3 个状态的转变,且这个过程所用的时间仅为不到  $60 \text{ ns}$ ;其中液-气转变过程比固-液转变过程更迅速,因为金属薄膜在固态比在液态时对激光的吸收率低。由图 2(b)可知:金属薄膜表面中心的温度最高且温升速率最快,最先达到金属的气化温度,即激光刻蚀是从中心点开始的,随着径向距离的增加温升速度逐渐降低,温度的分布和激光功率分布相仿,呈高斯型。对比图 2(b)和图 2(c)可知:激光刻蚀过程中,沿光斑径向和纵向的温度变化都很陡,即在两个方向的热影响区都很小且径向的热影响区大于纵向的热影响区,这主要是因为激光功率呈高斯分布,中心的功率密度远大于四周的功率密度。同时由于金属与聚酰亚胺的热物理性质相差很大,在聚酰亚胺和金属薄膜的结合面附近温度产生陡变。

图 3 是厚度为  $5 \mu\text{m}$  的纯铜金属薄膜在不同激光功率下经过激光辐照  $100 \text{ ns}$  时的温度场分布。由图 3 可知:随激光功率的增加金属表面的温度增加的更快,固-液转变和液-气转变也更迅速,即材料更容易被刻蚀掉。

图 4 是金属薄膜厚度为  $5 \mu\text{m}$ 、激光平均功率为  $4 \text{ W}$  时,铜、铝薄膜温度随时间的变化曲线。由图 4 可

知:金属铝比金属铜更容易气化,即固-液转变和液-气转变所用的时间更短,这是因为金属铝对 1064 nm 激光的吸收率更大,且熔化热和气化热更低,同时熔点和气化点也相对较低。

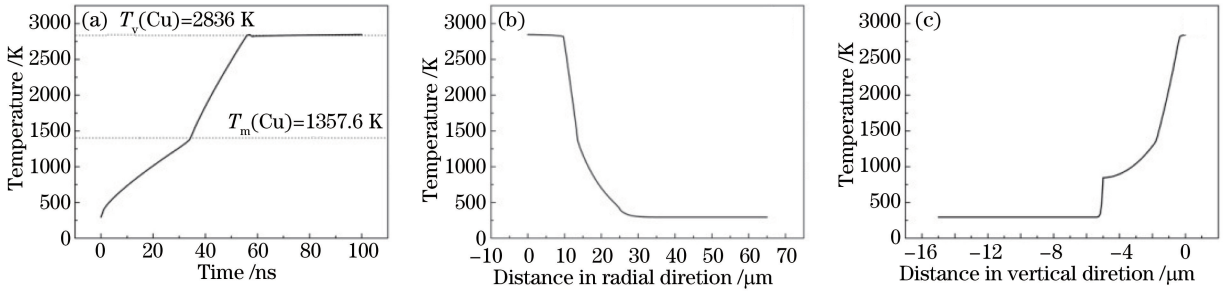


图 2 100 ns 时的温度分布。(a) 铜表面在激光辐照中心点处温度随时间的变化曲线; (b) 铜表面沿径向的温度分布; (c) 铜薄膜/聚酰亚胺组合沿纵向的温度分布

Fig. 2 Temperature distributions at 100 ns. (a) Temperature on copper surface at the center of laser irradiation versus time; (b) radial distribution of temperature field on copper surface; (c) vertical distribution of temperature on copper film/polyimide surface

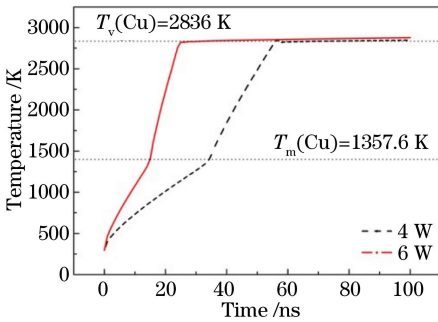


图 3 不同激光功率下铜表面在激光辐照中心点处温度随时间的变化曲线

Fig. 3 Variation curves of temperature on copper surface under different laser powers at the center of laser irradiation versus time

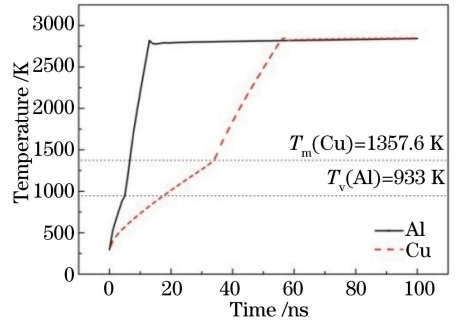


图 4 不同金属表面在激光辐照中心点处温度随时间的变化曲线

Fig. 4 Variation curves of temperature on different metal surfaces at the center of laser irradiation versus time

图 5 为铜薄膜/聚酰亚胺组合在激光平均功率为 6 W、薄膜厚度为 10  $\mu\text{m}$  时,铜薄膜内部中心点在一个脉冲内的温度变化曲线。由图 5 可知:金属薄膜在激光加热的过程中温度迅速升高,且在激光关闭之后又迅速冷却,但最终冷却的温度大于起始加热时的温度,即金属薄膜经过一个激光脉冲的加工后出现温度累积。

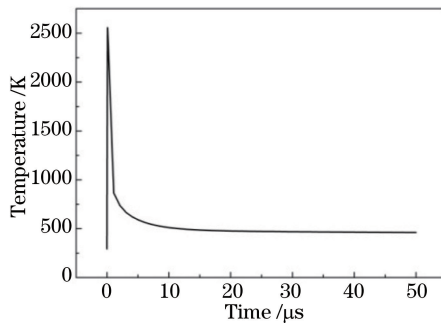


图 5 铜薄膜内部中心点在一个脉冲周期内温度随时间的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of temperature at the center point within copper film in a pulse cycle versus time

综上所述,在激光刻蚀聚酰亚胺/金属薄膜组合的过程中,金属薄膜的温度瞬间达到气化温度;当激光停止辐照后,金属薄膜快速冷却。气化和液化时间随着激光功率的增加而逐渐变短。金属铝比金属铜更易达到气化温度,即更容易被激光烧蚀掉。经过一个脉冲周期后,金属薄膜出现温度累积。



### 3.2 激光刻蚀金属薄膜/聚酰亚胺组合过程模拟

#### 3.2.1 单脉冲激光刻蚀模拟分析

当激光照射到金属表面时,部分能量被金属薄膜吸收并转化成热能,其表面温度上升并向金属内部传导;随着时间增加,局部薄膜经历固-液-气状态的转化,而后随着金属蒸气的蒸发和激光辅助气体对金属蒸气的吹离,金属薄膜被激光逐渐刻蚀。将金属的气化温度作为激光刻蚀温度,对金属薄膜/聚酰亚胺组合被刻蚀过程进行了模拟。

图6为不同激光功率下,金属薄膜厚度为 $10\ \mu\text{m}$ 、脉冲宽度为 $100\ \text{ns}$ 时刻蚀深度和刻蚀半径随激光功率的变化曲线。由图6可知:金属薄膜的刻蚀深度随激光功率的增加几乎呈线性关系,而刻蚀半径随激光功率的增加逐渐增加,而后趋于平缓,这是因为激光功率的分布呈高斯型,即激光中心的功率密度最大,离激光中心越远功率密度也越小。铝比铜的刻蚀深度大,这说明在同等条件下铝薄膜/聚酰亚胺组合比铜薄膜/聚酰亚胺组合更容易被刻蚀。

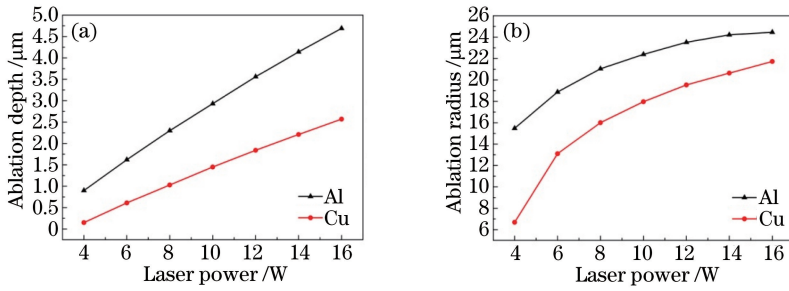


图6 (a)刻蚀深度和(b)刻蚀半径随激光功率的变化曲线

Fig. 6 Variation curves of (a) ablation depth and (b) ablation radius versus laser power

图7为激光功率为 $4\ \text{W}$ 时,金属刻蚀深度随金属薄膜厚度的变化曲线。由图7可知:金属薄膜的刻蚀深度随金属薄膜厚度的增加先降低,金属薄膜厚度达到 $5\ \mu\text{m}$ 后,刻蚀深度将不再随着金属薄膜的厚度增加而变化。这主要是因为激光在一个脉冲内对材料的纵向热影响区小,仅局限在几个微米的厚度。

图8为金属薄膜厚度为 $5\ \mu\text{m}$ 、激光功率为 $4\ \text{W}$ 时,激光刻蚀深度随不同激光脉冲宽度的变化曲线。由图8可知:金属薄膜的刻蚀深度随激光脉冲宽度的增加逐渐减小,这是因为在一个脉冲周期内,激光的加热时间随着脉冲宽度的增加而增加,但其功率密度随脉冲宽度的增加而大幅度降低。对比图6、图8可以得出,激光刻蚀深度主要受激光功率密度的影响。

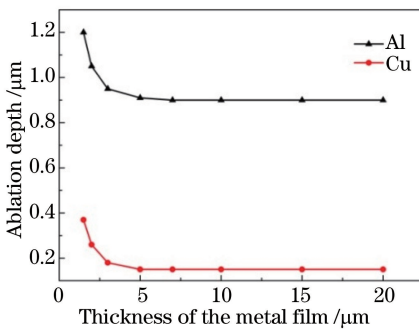


图7 激光刻蚀深度随金属薄膜厚度的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of laser ablation depth versus thickness of the metal film

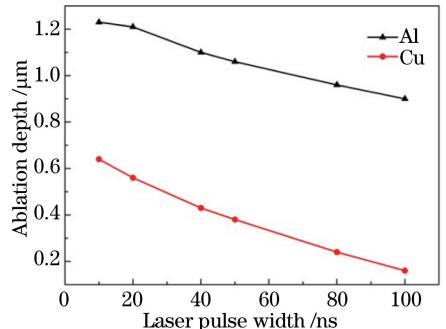


图8 激光刻蚀深度随激光脉冲宽度的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of laser ablation depth versus the laser pulse width

#### 3.2.2 多脉冲激光刻蚀模拟分析

激光刻蚀较薄的金属薄膜时,一个脉冲即可将聚酰亚胺基底上的金属薄膜刻蚀掉;但对于厚度较大(大于 $5\ \mu\text{m}$ )的金属薄膜,一个脉冲不能完全将金属薄膜刻蚀。模拟了激光功率为 $6\ \text{W}$ 、金属薄膜为 $10\ \mu\text{m}$ 时多脉冲作用下激光刻蚀的情况。

图9为金属薄膜为纯铝时刻蚀深度和半径随脉冲个数的变化曲线。由图9可知:激光刻蚀深度随脉冲

个数近似呈线性增加,这与文献[17]的结果趋势一致。刻蚀半径随脉冲个数的增加逐渐增加而后趋于平缓,且增加量仅为  $3\ \mu\text{m}$ 。刻蚀深度的增加量大于刻蚀宽度的增加量,且随着脉冲数的增加,刻蚀形貌逐渐呈喇叭形。这是由于多个脉冲的光斑是重合的,而且激光能量呈高斯分布,光斑四周的能量较小。

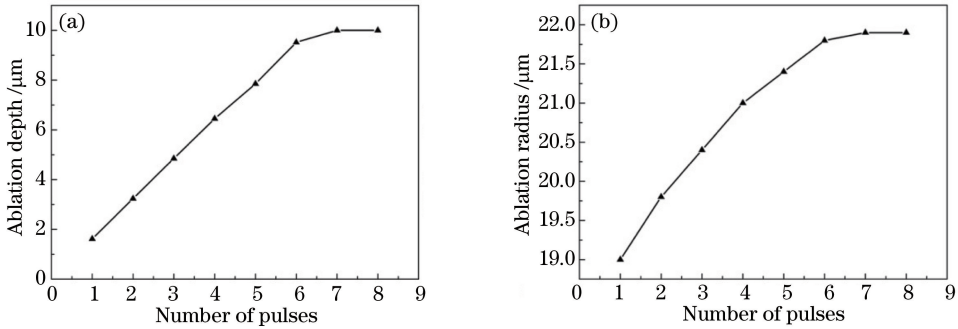


图 9 (a) 刻蚀深度和 (b) 刻蚀半径随激光脉冲个数的变化曲线

Fig. 9 (a) Ablation depth and (b) ablation radius versus laser pulse numbers

图 10 为金属薄膜为铜时,聚酰亚胺内部的点在每个激光加热后与加热冷却后的温度曲线,基本上随脉冲个数增加线性增加。由图 10 可知:每次激光脉冲加工完毕冷却后,聚酰亚胺内部的温度都大于前次激光加热后的温度,这是因为聚酰亚胺在激光加热完成后,尽管经过了冷却但由于其热导率很小,内部的热量很难传导出去,因此在每个脉冲过后都有热的积累,这对保护基底显然是不利的。因此在激光刻蚀金属薄膜/聚酰亚胺组合过程中,应尽量使用较少的脉冲个数,即在选择激光参数时,应该使用大功率短脉冲宽度的激光;由于金属铜比金属铝更难刻蚀,在同等条件下,应该选用更大功率和更短脉冲宽度的激光参数来刻蚀铜薄膜。

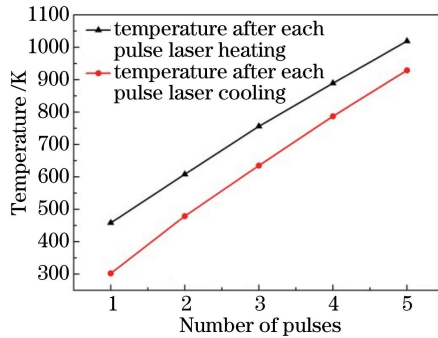


图 10 基底内部点在每个激光脉冲过后的温度

Fig. 10 Temperatures of the interior points of substrate after each laser pulse

总之,激光的刻蚀深度主要由激光功率密度决定。由于激光功率为高斯分布,在 10 个脉冲内激光刻蚀深度随脉冲个数的增加呈线性增加;刻蚀半径随脉冲个数增加,增加的幅度不大且趋于不变,刻蚀形貌逐渐呈喇叭形。为了更好地保护基底,应选择大功率短脉宽的激光参数;由于铜比铝更难刻蚀,在铜的刻蚀过程中应选择较大功率密度的激光参数。

## 4 结 论

使用 Comsol Mutiphysics 有限元软件建立了高斯分布的脉冲激光刻蚀聚酰亚胺基底金属薄膜的 2 维非稳态物理模型,并对刻蚀过程进行了数值模拟。研究表明:激光刻蚀过程中金属薄膜在激光作用的中心点温升最快,沿着径向向外温升速度逐渐降低。刻蚀深度主要受激光功率密度的影响,且随着金属薄膜厚度的增加,激光刻蚀深度先减小后保持不变。在多脉冲刻蚀过程中,刻蚀深度随脉冲个数(小于等于 10)增加线性增加,刻蚀形貌逐渐呈喇叭形。为了更好地保护基底,应选择大功率短脉宽的激光参数;铜比铝更难刻蚀,在铜的刻蚀过程中应选择较大功率密度的激光参数。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Hongjie, Guo Wengang, Dong Zhaohui, *et al.*. Application of laser etching technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(5): 469-472.  
王宏杰, 郭文刚, 董兆辉, 等. 激光刻蚀技术的应用[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(5): 469-472.
- 2 Zhao Shiqiang, Li Ling. Numerical investigation of phase change during thermal ablation of gold films induced by femtosecond laser[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1214001.  
赵士强, 李 凌. 飞秒脉冲激光烧蚀金膜的相变传热研究[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1214001.
- 3 Chen Bing, Zhu Weihua, Chen Peng, *et al.*. Mechanism of femtosecond laser ablating CuZr amorphous alloy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 041406.  
陈 冰, 朱卫华, 陈 鹏, 等. 分子动力学模拟飞秒激光烧蚀 CuZr 非晶合金的机理[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 041406.
- 4 Jia Nana, Deng Chuanlu, Pang Fufei, *et al.*. Research on excimer laser etching technology for achieving optical waveguide end face[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0303012.  
贾娜娜, 邓传鲁, 庞拂飞, 等. 光波导端面的准分子激光刻蚀技术研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303012.
- 5 Peng Guoliang, Du Taijiao, Liu Feng, *et al.*. Simulation study of laser energy coupling coefficient in the process of ablating glasses fiber/epoxy composites[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0203001.  
彭国良, 杜太焦, 刘 峰, 等. 激光烧蚀玻璃纤维/环氧树脂复合材料的能量耦合率模拟研究[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0203001.
- 6 Yang Jianping, Chen Xuekang, Wu Gan, *et al.*. Laser ablation and its application in fabrication of spacecraft antennas[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2011, 29(3): 51-54, 62.  
杨建平, 陈学康, 吴 敢, 等. 激光刻蚀技术及其在航天器天线制造中的应用[J]. 航天制造技术, 2011, 29(3): 51-54, 62.
- 7 Chung C K, Tan T K, Lin S L, *et al.*. Fabrication of sub-spot-size microchannel of microfluidic chip using CO<sub>2</sub> laser processing with metal-film protection[J]. Micro & Nano Lett, 2012, 7(8): 736-739.
- 8 Yang Jianping, Chen Xuekang, Wu Gan, *et al.*. Mechanism of nano-second laser ablation of metallic thin film on composite material[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603031.  
杨建平, 陈学康, 吴 敢, 等. 纳秒激光刻蚀复合材料基金属薄膜机制研究[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603031.
- 9 Liu Xiaoli, Xiong Yuqing, Yang Jianping, *et al.*. Simulation of temperature field for laser etching of aluminum thin films on polyimide substrate[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0703006.  
刘孝丽, 熊玉卿, 杨建平, 等. 激光刻蚀聚酰亚胺基底铝薄膜的温度场模拟[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0703006.
- 10 Conde J C, Lusquinos F, González P, *et al.*. Laser ablation of silicon and copper targets. Experimental and finite elements studies[J]. Appl Phys A, 2004, 79(4): 1105-1110.
- 11 Zhang Fei, Duan Jun, Zeng Xiaoyan, *et al.*. Study of blind holes drilling on flexible circuit board using 355 nm UV laser [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(12): 3143-3148.  
张 菲, 段 军, 曾晓雁, 等. 355 nm 紫外激光加工柔性线路板盲孔的研究[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3143-3148.
- 12 Xie J, Kar A, Rothenflue J A, *et al.*. Temperature-dependent absorptivity and cutting capability of CO<sub>2</sub>, Nd : YAG and chemical oxygen-iodine lasers[J]. Journal of Laser Applications, 1997, 9(2): 77-85.
- 13 Lim H S, Yoo J. FEM based simulation of the pulsed laser ablation process in nanosecond fields [J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2011, 25(7): 1811-1816.
- 14 Chen Yanbei. Temperature rise, stress, fluctuation of stress and evolution of plastic zone during laser heating of metal plat[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2009.  
陈彦北. 金属板激光加热时的温升、应力、应力波动和塑性区演化[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- 15 Nedjar B. An enthalpy-based finite element method for nonlinear heat problems involving phase change[J]. Computers & Structures, 2002, 80(1): 9-21.
- 16 Moncayo M A, Santhanakrishnan S, Vora H D, *et al.*. Laser surface modification of alumina: Integrated computational and experimental analysis[J]. Ceramics International, 2013, 39(6): 6207-6213.
- 17 Liu Huixia, Yang Shengjun, Wang Xiao, *et al.*. Experiment study and numerical simulation of pulsed laser ablation crater [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(1): 219-223.  
刘会霞, 杨胜军, 王 霄, 等. 脉冲激光烧蚀凹腔的实验分析及数值模拟[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 219-223.