

# 激光刻蚀聚酰亚胺基底铝薄膜的温度场模拟

刘孝丽 熊玉卿 杨建平 王 瑞 吴 敢 任 妮

兰州空间技术物理研究所真空技术与物理重点实验室, 甘肃 兰州 730000

**摘要** 为了研究 1064 nm 激光刻蚀聚酰亚胺基底铝薄膜的作用机理,采用有限元分析软件 ANSYS 模拟了激光对聚酰亚胺基底上铝薄膜的刻蚀过程,分析了激光脉冲作用于铝薄膜表面时的能量传输及转化过程,获得了铝薄膜及聚酰亚胺基底中的温度场分布,进一步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/基底界面分离机制。

**关键词** 薄膜; 激光刻蚀; 铝薄膜; 聚酰亚胺; 温度场; 分离机制

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0703006

## Simulation of Temperature Field for Laser Etching of Aluminum Thin Films on Polyimide Substrate

Liu Xiaoli Xiong Yuqing Yang Jianping Wang Rui Wu Gan Ren Ni

Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics,  
Lanzhou, Gansu 730000, China

**Abstract** In order to study 1064 nm laser etching mechanism for aluminum thin films on polyimide substrate, the etching process of aluminum thin films is simulated by finite element analysis software ANSYS. By analyzing the laser energy absorbing and transforming process within aluminum thin films, temperature field distribution of thin films induced by laser ablation is obtained, and the separation mechanism of aluminum thin films from polyimide substrate resulted by the decomposability of polyimide is verified.

**Key words** thin films; laser etching; aluminum thin films; polyimide; temperature field; separation mechanism

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 160.5470

## 1 引 言

聚酰亚胺(PI)由于分子链中存在十分稳定的芳杂环结构单元,使它不仅具有优良的机械与电气特性,而且具有良好的耐高、低温性能,特别是抗辐射能力,而且易于合成及加工,使其在航空、航天中具有广泛的用途<sup>[1-2]</sup>。例如,以聚酰亚胺为基底的金属薄膜被广泛应用于航空、航天器部件中。制造这类部件的一种有效技术是利用激光刻蚀技术将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。其加工难点在于,刻蚀过程中,金属薄膜刻蚀中被激光加热后熔化乃至气化,其温度一般会达到或高于聚合物基底材料的分解温度,导致基底材料发生分解<sup>[3]</sup>。当薄膜和基底材料的热、光物性相差很大时,往往不能获得满足要求的刻蚀结果,实现预期的功能。因此,研究聚酰亚胺基底上金属薄膜刻蚀过程的能量转化及温度分布,分析薄膜的去除机理,对于制造功能部件具有重要意义。

激光刻蚀是一个多工艺参数综合作用的过程,受到激光功率、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>[4-5]</sup>。各工艺参数对激光刻蚀结果有不同的影响,并且由于激光作用时间很短,难以用试验的方法直接测量其瞬时温度分布,从而对其相变

收稿日期: 2015-01-30; 收到修改稿日期: 2015-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(51135005)

作者简介: 刘孝丽(1986—),女,博士研究生,从事激光与物质相互作用方面的研究。E-mail: shantianzi@126.com

导师简介: 熊玉卿(1969—),男,博士,研究员,博士生导师,从事薄膜物理与技术等方面的研究。

E-mail: xiongyq@hotmail.com(通信联系人)

过程和机理进行深入研究。在前期试验研究工作的基础上<sup>[2]</sup>,采用有限元分析软件 ANSYS 模拟了纳秒脉冲激光刻蚀金属铝薄膜/聚酰亚胺材料组合,通过分析激光脉冲作用于铝薄膜后的能量吸收及演化过程,验证了铝薄膜/聚酰亚胺组合在纳秒级脉冲激光作用下特有的膜基界面分离机制的合理性,可以实现对这种组合结构的高精度无损刻蚀。

## 2 ANSYS 数值模拟过程

### 2.1 模型的建立

#### 2.1.1 几何模型的建立

金属薄膜/聚酰亚胺组合由聚酰亚胺基底和铝薄膜组成,将基底与铝膜分开建模,考虑二维结构,基底材料宽度为 60  $\mu\text{m}$ ,铝薄膜尺寸为 60  $\mu\text{m}$ ×2  $\mu\text{m}$ ,铝薄膜均匀分布在基底上,模型如图 1 所示。

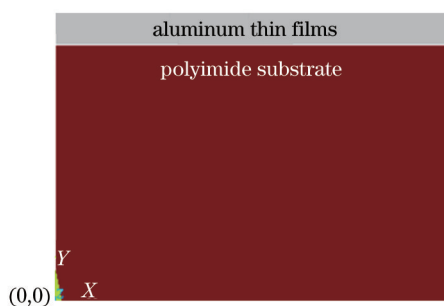


图 1 几何模型

Fig.1 Geometric model

#### 2.1.2 有限元模型

选用二维热分析单元 PLANE55,单元具有 4 个节点,每个节点只有一个温度自由度,可进行二维稳态或瞬态热分析问题。本文为瞬态分析,有限元模型如图 2 所示,网格在激光作用处及铝薄膜处加密。

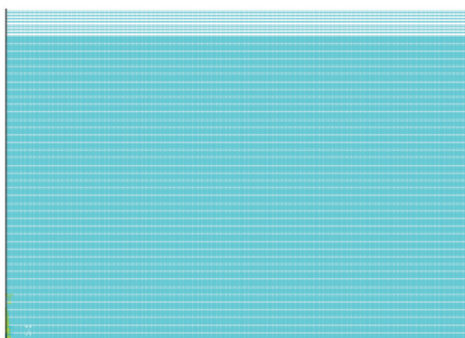


图 2 有限元模型

Fig.2 Finite elements model

### 2.2 参数确定

对于激光作用下铝薄膜/聚酰亚胺组合的温度分布有限元分析,需要考虑到多种因素,包括薄膜材料与基底材料的物理性质、激光参数、激光加载方式、激光作用前的初始温度等。

#### 2.2.1 材料属性

采用的材料热物理性能如表 1、2 所示<sup>[6]</sup>。

表 1 聚酰亚胺的热物理性质

Table 1 Thermal properties of polyimide

Materials	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

表 2 铝的热物理性质

Table 2 Thermal properties of aluminum

Density / $(\text{kg}/\text{m}^3)$	Melting point /K	Heat conductivity / $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$		Specific heat / $[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$	
		Temperature /K	Value	Temperature /K	Value
2700	933	100	206	0	0
		300	229	932	$1.6857\times 10^9$
		500	268	934	$2.7614\times 10^9$
		700	104	1273	$3.6226\times 10^9$
		800	122		

### 2.2.2 初始条件

初始条件是初始时刻材料内部温度分布的情况。由于激光辐照铝薄膜/聚酰亚胺组合是在常温下进行,因此,在有限元模型中需要定义初始温度  $T$ :

$$T(x,y,t)|_{t=0} = 300 \text{ K} . \quad (1)$$

激光与被刻蚀材料的作用过程可以分为两个阶段: 1) 激光能量到达材料表面,被材料吸收,在表面形成一个过热区域,吸收过程受材料表面状态影响。对于金属薄膜,电子吸收激光光子能量并转换为热能的时间约为 0.01 ns; 2) 在材料表面形成温度场后,热量在材料中传递,使材料发生熔化、汽化等状态变化,实现对材料的刻蚀。这个过程主要受热物理过程支配,由材料的热导率、比热容、相变和汽化潜热等参数决定。

### 2.2.3 激光加载设置

表面铝薄膜对激光的吸收系数为 0.08,激光器输出的光束为一个高斯分布的圆斑,考虑到激光的单向性,可以认为作用在铝膜表面的光斑相对于发射初始光斑大小不变。光束在横截面内的光强分布用公式表示为<sup>[7]</sup>:

$$I(x,y,z) = I(0,0,z) \exp\left(-\frac{2r^2}{r_b^2}\right), \quad (2)$$

式中  $I(x,y,z)$  为截面上距离中心点  $r$  处的光强,  $I(0,0,z)$  为离腔心距离为  $z$  的截面中心处的光强,  $r$  为该截面上一点到中心点的距离,  $r_b$  为激光光斑半径。

由(2)式可见,对于高斯光束,在横截面中心光强最大,随着远离中心距离的增加,光强以指数的平方下降。当激光照射到薄膜表面时,在很短的时间内,能量由光能转化为热能,在仿真软件中,加载的激光热载荷以热流率、热流密度、对流、温度等形式给出<sup>[8-9]</sup>。在建模时,可以认为薄膜表面获得一个瞬间热流密度载荷,则热流密度  $Q(x,t)$  为

$$Q(x,t) = PA/\pi r^2 \exp\left(-\frac{x^2}{r^2}\right), \quad (3)$$

式中  $P$  为激光峰值功率,  $A$  为材料表面吸收率,  $r$  为激光光斑半径,  $\exp\left(-\frac{x^2}{r^2}\right)$  代表高斯分布。

### 2.2.4 激光参数

激光为高斯分布,激光功率为 4 W,频率为 20 kHz,脉宽为 100 ns,光斑直径为 40  $\mu\text{m}$ 。

## 3 仿真结果分析

### 3.1 不同时段铝薄膜/聚酰亚胺的温度场分布

图 3 是 1064 nm 激光对铝薄膜/聚酰亚胺组合刻蚀的数值模拟结果,图中清晰显示了激光刻蚀过程中材料组合内部各个时段的温度场分布情况。部分图片为了便于观察进行了适当地放大。

当激光照射到铝薄膜表面时,大部分激光能量被铝膜表面反射(在室温下,铝对波长 1064 nm 的激光吸收率为 8%),进入铝薄膜的激光能量被很浅的表层(10~100 nm)吸收,波长为 1064 nm 的激光在铝薄膜中的穿透深度约为 16.9 nm,远小于被刻蚀铝薄膜的厚度(一般为微米量级)。因此,分析认为,激光对于薄膜深层的作用应该是通过热传导实现的。

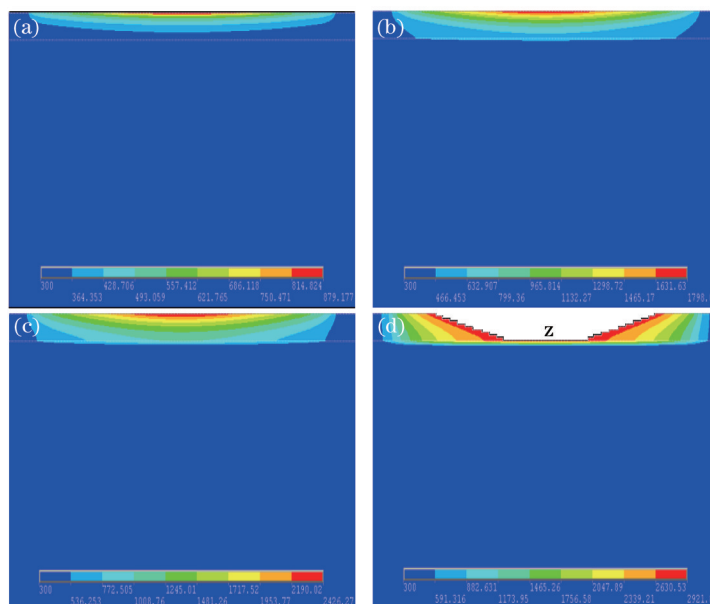


图3 激光刻蚀材料组合内部不同时段温度场。(a)  $t=5$  ns; (b)  $t=20$  ns; (c)  $t=35$  ns; (d)  $t=200$  ns

Fig.3 Temperature distribution within thin films/substrate system at different time. (a)  $t=5$  ns; (b)  $t=20$  ns; (c)  $t=35$  ns; (d)  $t=200$  ns

分析各个时段温度场分布结果可以看出,如图3(a)、(b)所示,激光脉冲作用于铝薄膜后,部分能量被铝薄膜吸收并转换为热能,使其表面温度升高并向更深层传导。随着时间的增加,如图3(c)所示,局部铝薄膜温度超过金属的熔化温度,铝薄膜出现表面局部被刻蚀现象,此时金属铝薄膜与聚酰亚胺界面处的温度也高于基底材料的热分解温度,基底材料分解,在薄膜与基底间形成气隙,导致金属铝薄膜/聚酰亚胺界面失去结合力,气化所产生的蒸气压力形成一个高压区,使金属薄膜与基底表面产生间隙。随着温度的升高,材料对激光束的吸收率增加,使局部材料迅速受热熔化。此时,铝薄膜表面的吸收率已接近100%,几乎所有的入射激光能量均被吸收用来加热铝薄膜,铝薄膜一旦与基底表面分离,原先存在的热传导通路被阻断,导致熔化材料迅速达到气化温度,在铝薄膜材料中心剧烈蒸发气化,产生强烈的反冲力将熔化材料喷射抛出,铝薄膜被进一步刻蚀去除。由于在仿真过程中无法模拟热传导通路阻断,所以如图3(d)所示,基底材料已经被刻蚀掉。但在实际刻蚀中,当激光功率为4 W,频率为20 kHz,脉宽为100 ns,光斑直径为40  $\mu\text{m}$ 时,刻蚀结果比较理想。

### 3.2 激光作用35 ns材料内部深度方向的温度场分布

图4是在激光辐照35 ns时被刻蚀材料组合内部沿径向的温度分布模拟结果。

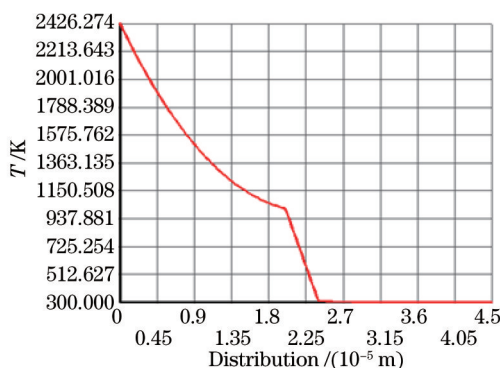


图4 激光刻蚀材料组合内部沿径向的温度分布

Fig.4 Radial temperature distribution within laser etched material system

结合图1与图4可知,当激光辐照35 ns时,在 $y=20.02 \mu\text{m}$ 处与 $y=19.8 \mu\text{m}$ 处温差 $\Delta T \approx 200$  K,如此大的温差极易形成较大的应力梯度,由于基底与铝薄膜的弹性模量相差很远,这导致了两者在形变程度上的差异,由此产生由应力诱导而发生的分层剥落。

## 4 结 论

采用有限元分析软件 ANSYS 模拟了脉冲激光对聚酰亚胺基底上铝薄膜的刻蚀过程。通过分析激光作用于铝薄膜后的能量吸收及转化过程,验证了铝薄膜/聚酰亚胺组合在纳秒级脉冲激光作用下的界面分离机制。

1) 当薄膜/基底界面处的温度高于基底材料的热分解温度时,金属薄膜与基底材料间的结合力消失,基底材料分解并在薄膜与基底间形成气隙。铝薄膜一旦与基底表面分离,原先存在的热传导通路被阻断,导致熔化材料迅速达到气化温度,在铝薄膜材料中心内剧烈蒸发气化,产生强烈的反冲力将熔化材料喷射抛出,铝薄膜被进一步刻蚀去除。

2) 由于基底与金属薄膜的弹性模量相差很大,导致两者形变程度产生巨大差异,形成由应力诱导而发生的分层剥落。

## 参 考 文 献

- 1 Zhang Boming, Liu Shuang. Investigation on status and prospective application of composite multifunctional structures technology[J]. *J Astronautics*, 2007, 28(2): 493-497.  
张博明, 刘 双. 航天器多功能结构的研究现状及其应用前景[J]. *宇航学报*, 2007, 28(2): 493-497.
- 2 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.
- 3 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 Letters*, 2012, 7(8): 736-739.
- 4 Conde J C, Lusquinos F, Gonzalez P, *et al.*. Laser ablation of silicon and copper targets, experimental and finite elements studies[J]. *Applied Physics A*, 2004, 79(4-6): 1105-1110.
- 5 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.
- 6 Du Shaojun, Lu Qisheng, Shu Bohong. Calculation of laser-induced temperature increment and thermal stress of Al-film reflector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30(2): 128-130.  
杜少军, 陆启生, 舒柏宏. 激光辐照下铝膜反射镜温升和热应力的计算[J]. *红外与激光工程*, 2001, 30(2): 128-130.
- 7 Li T, Zhou C L, Liu Z G, *et al.*. Simulation of laser ablation of crystalline silicon solar cells by ANSYS[C]. *International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks*, 2011: 5228-5231.
- 8 Zang Yannan, Ni Xiaowu, Chen Yanbei. Simulation of long pulsed laser drilling on metal based on birth and death method of ANSYS[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0603005.  
臧彦楠, 倪晓武, 陈彦北. 基于 ANSYS 生死单元法的长脉冲激光金属打孔仿真[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0603005.
- 9 Qian Danhao, Wei Long, Xie Haiyin. Numerical simulation of temperature field pulse laser marking hard brittle material based on ANSYS[J]. *Optical Technique*, 2013, 39(6): 530-534.  
钱丹浩, 魏 龙, 谢海银. 基于 ANSYS 的硬脆性材料脉冲激光打标温度场数值模拟[J]. *光学技术*, 2013, 39(6): 530-534.

栏目编辑: 张浩佳