

# 纳秒激光刻蚀复合材料基金属薄膜机制研究

杨建平 陈学康 吴 敢 王 瑞

(兰州物理研究所表面工程技术重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要** 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,提出了金属薄膜/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存在的特有的薄膜/基底界面分离现象。提出利用这一特有的界面分离过程,可通过控制激光能量密度实现对这种结构体系的高精度、无损伤的刻蚀。利用波前衍射变换技术整形过的刻蚀激光进行了验证实验,实验结果证实了这一方法的可行性。

**关键词** 激光技术;激光刻蚀;金属薄膜;复合材料基底;物理机制

**中图分类号** O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0603031

## Mechanism of Nano-Second Laser Ablation of Metallic Thin Film on Composite Material

Yang Jianping Chen Xuekang Wu Gan Wang Rui

(Science and Technology on Surface Engineering Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract** The processings of laser energy absorption and thermal conduct are analyzed, and a mechanism of metallic film/composite substrate interface separation while metallic film in solid state due to the composite material thermal decomposition is also proposed subsequently. A new method of improving laser ablation accuracy using this mechanism and laser power distribution transform technology is proposed. Laser wavefront diffraction transform technology is employed to convert the ablation laser power density and its distribution, and the confirmed experiment is carried out.

**Key words** laser technique; laser ablation; metal film; composite material substrate; mechanism

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390; 140.0140; 240.6700

### 1 引 言

基于复合材料的结构功能一体化部件在航空航天领域中应用越来越广泛<sup>[1]</sup>,针对电磁波传输控制需要的频率选择或极化敏感反射天线就是此类部件之一<sup>[2~4]</sup>。这类部件制造的关键是在沉积有金属薄膜的复合材料结构件基体上刻蚀出高精度金属功能薄膜图形。用作反射面的复合材料结构件多为纤维增强树脂材料,而金属的熔点通常比复合材料的气化点高很多。金属薄膜在刻蚀过程中被激光加热、熔化乃至气化,其温度一般会达到或高于基底材料的气化点。当刻蚀精度要求很高时,这会带来一系列问题,主要有刻蚀效果差、金属薄膜的刻蚀边缘撕裂卷曲、基底材料烧蚀等。这是金属薄膜/复合材料体系激光加工的难点。因而,研究基于复合材料的

金属薄膜激光去除机理,对于制造这类结构/功能一体化零部件具有指导意义。从更广泛的意义上说,类似的问题在其他场合也存在,比如用激光微刻蚀来制造柔性基底上的微电路和微机电系统(MEMS)的功能结构。激光刻蚀过程中薄膜的刻蚀精度是激光微刻蚀技术能否用于众多高要求技术的关键因素之一。当工件由两种或两种以上热、光物性相差很大的材料组成时,问题会变得复杂,往往不能获得好的结果。在这种情况下,核心问题是激光刻蚀的分辨率不仅由刻蚀系统的光学分辨率决定,还取决于将薄膜从基底上去除的物理机制。

本文以纳秒脉冲高峰值功率激光刻蚀金属铝薄膜/复合材料基底结构为例,通过研究激光脉冲作用下能量的吸收和表面物态的演化过程,提出了激光

收稿日期:2011-03-21;收到修改稿日期:2011-04-11

作者简介:杨建平(1974—),男,硕士,高级工程师,主要从事激光刻蚀加工技术方面的研究。E-mail: yangjp74@163.com

导师简介:陈学康(1955—),男,博士,研究员,主要从事物理电子学和微/纳制造技术方面的研究。E-mail: xuekchen@

163.com

(通信联系人)

刻蚀金属薄膜/易烧蚀的复合材料结构时特有的薄膜/基底界面分离机制;并且利用这一薄膜/基底界面分离的特点,通过控制激光能量密度可以提高刻蚀的精度并获得原子级清洁的表面,实验结果证实了这一方法的可行性。

## 2 高斯光束用于金属/易烧蚀基底结构激光刻蚀的一般实验结果

实验采用波长  $1.064\ \mu\text{m}$ 、脉冲宽度  $10\ \text{ns}$  的红外激光作为激光源,用掩模成像方式刻蚀复合材料试板表面的金属铝薄膜。所用实验样品表面金属铝薄膜厚度约为  $1.8\ \mu\text{m}$ ,样品基底为 Kevlar 纤维增强的环氧树脂结构,金属薄膜与基底间附着力均大于  $4\ \text{N}/\text{mm}^2$ 。

当采用不同能量( $2.5\sim 4.6\ \text{mJ}$ )的激光单脉冲刻蚀复合材料基板上的金属铝薄膜时,刻蚀结果显示刻蚀区域内越来越多的金属薄膜被去除,而刻蚀区域内残留的金属薄膜边缘存在向上翻卷或撕裂状痕迹,图中可见的环状图案是由于激光衍射形成明暗区域而产生的,如图 1 所示( $\times 400$  倍,刻蚀图形直径  $0.5\ \text{mm}$ )。随着激光能量密度的增加,这些刻蚀边缘缺陷逐渐消失。当激光单脉冲能量达到一定的阈值(大于  $5\ \text{mJ}$ )时,刻蚀区域内的金属薄膜被完全去除干净,刻蚀图形的边缘较为整齐。但这种情况下会伴随出现基底呈炭黑色的现象即基底出现了损伤,而且激光能量密度越高,基底的烧蚀越明显。

采用方形光斑扫描刻蚀复合材料基底上的金属薄膜时,获得了类似的结果。图 2 为垂直移动方向呈高斯分布的激光束刻蚀扫描刻蚀获得的图形,刻蚀边缘的薄膜出现了明显的撕裂和翻卷的现象。

由此可见,一般的高斯光束刻蚀金属薄膜时边缘会出现撕裂状,无法进行精细图形的刻蚀。这显

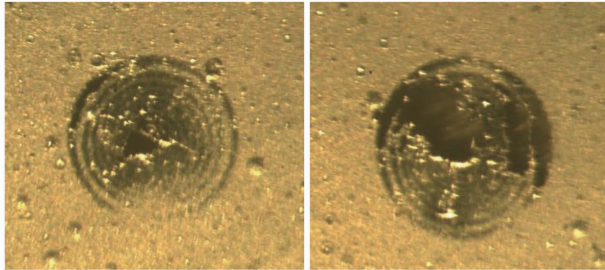


图 1 不同能量密度的单脉冲激光刻蚀复材金属薄膜的显微照片

Fig. 1 Micrograph of the ablation area on aluminum film irradiated by a single laser pulse with different power densities

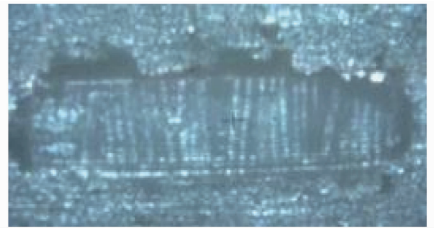


图 2 方形光斑扫描刻蚀复材金属薄膜的结果(刻蚀宽度为  $0.5\ \text{mm}$ )

Fig. 2 Laser beam scanning ablation pattern is metallic film on composite material (ablation width is  $0.5\ \text{mm}$ )

然与金属铝薄膜/Kevlar 热物性相差很大的材料结构有关。因而,纳秒激光脉冲刻蚀金属薄膜/复合材料结构体系的物理机制,以及如何利用该机制获得高精度的刻蚀边界而不损伤复合材料基底是一个值得研究的问题。

## 3 易烧蚀基底上金属薄膜刻蚀的物理过程分析

金属薄膜/复合材料基底这种热、光物性相差很大的双层材料组合体系在纳秒激光照射下的演化物理过程是一个尚未被深入研究的问题。对该问题的研究将有助于理解激光刻蚀物理过程和机制,从而对提高这类刻蚀的精度和控制刻蚀结果具有理论指导意义。

对于金属铝薄膜/Kevlar 复材基底组合材料体系,当激光照射到金属铝薄膜表面后,大部分激光能量被金属薄膜表面反射(室温下金属铝对  $1.06\ \mu\text{m}$  的 YAG 激光的吸收率仅  $8\%$ )<sup>[5]</sup>。进入到金属薄膜内部的激光能量首先在很浅的表层内( $0.01\sim 0.1\ \mu\text{m}$ )被吸收<sup>[5,6]</sup>,这个吸收层的厚度与金属薄膜材料的光吸收系数有关。对于波长  $1.06\ \mu\text{m}$  的红外激光,其在铝中的穿透深度约为  $16.9\ \text{nm}$ 。这一般远小于被刻蚀金属薄膜的厚度。因此,激光脉冲对更深层的影响实际上是通过热传导进行的。

对于纳秒级的脉冲激光照射,由于其脉冲时间很短,可以认为激光刻蚀材料的过程应该存在两个阶段。第一阶段是激光能量注入到材料表面的阶段。激光能量的吸收主要受薄膜表面的光学性质(吸收、反射)影响。对金属薄膜而言,电子吸收激光光子能量并传递给晶格的时间约为  $0.01\ \text{ns}$ ,因此可以认为在纳秒宽度激光脉冲作用时间内,吸收的激光能量已充分转换为吸收体积内的热能。由于纳秒激光的脉冲时间很短,在脉冲持续的  $1\ \text{ns}$  的时间内

热能扩散和物质的移动、去除都来不及发生,这个过程只是在表面形成一个过热的区域。第二个阶段是激光脉冲结束后的演化过程。这个演化过程完全受热物理过程支配,主要由材料的热导率、比热容、相变和气化潜热等因素决定。在这个阶段材料发生热扩散、熔化流动,乃至气化等现象。

以上可以认为是纳秒级脉冲激光照射到物质表面的基本物理图像。由此可以得出的一个结论是:表面物质的去除过程远远滞后于激光脉冲周期,并且持续时间要长得多。这是由于物质受惯性的约束,其移动乃至消失过程(也就是材料刻蚀的过程)的时间相对较长。依据实验测定估算的大气环境中刻蚀碎片飞离整体的速度小于 1000 m/s<sup>[7]</sup>,那么在 10 ns 脉冲持续时间内,表面材料无论以何种状态(固态或液态、气态)被去除,其(此处指金属薄膜)移动距离小于 1 μm。这意味着在脉冲存在的周期内,薄膜始终对激光产生屏蔽。因此,激光将不会直接照射到基底材料上。这个事实为无损伤的刻蚀提供了可能性。

文献[5]中描述了激光加热双层板过程热传导微分方程组的解,当加热区的尺寸远大于热影响深度时,即  $r_t \gg (\alpha_1 t)^{1/2}$ ,可用一维模型来处理。当热源为均匀分布且强度恒定,初始温度为 0,界面为理想接触时,上层材料温度场分布为

$$T_1(z, t) = \frac{q_0}{K_1} \sqrt{2\alpha_1 t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \xi^{|n|} \times \text{ierfc}\left(\frac{|z - zn h_1|}{\sqrt{4\alpha_1 t}}\right), \quad (1)$$

式中  $q_0$  为表面吸收的激光功率密度(最大功率密度和吸收率);ierfc( $x$ )为互补误差函数; $z$ 为沿样品厚度方向的坐标; $t$ 为时间; $\xi$ 可表示为

$$\xi = \frac{K_1(\alpha_2)^{1/2} - K_2(\alpha_1)^{1/2}}{K_1(\alpha_2)^{1/2} + K_2(\alpha_1)^{1/2}}, \quad (2)$$

$K_1$  和  $K_2$  为材料的热导率; $h_1$  为薄膜厚度; $\alpha_2$  表示接触面的热阻的倒数,根据热阻的定义  $\alpha_2 = K_1/h_1$ ; $\alpha_1$  表示上表面的热损耗系数,对于理想接触,上下层材料在界面处的温度和温度梯度是相等的。计算时用到的参数如表 1 所示。

根据这一温度分布关系和文献[8,9]中单脉冲激光加热下材料温度场的一维理论模型,计算了图 3 所示的 10 ns 的激光脉冲在 1.5 μm 厚金属铝薄膜中引起的薄膜表面和界面处温升趋势曲线。由图中的温度变化趋势可以看出,薄膜表面的温度在激光脉冲开始后迅速升高,而薄膜与基底界面处的

温度变化相对有延迟,在脉冲结束后才有大幅度的温升,这是因为表面向界面热传导需要时间。图中显示在激光脉冲结束时界面处的温升(为 200 ℃)已经达到了有机复合材料热分解的温度,而此时虽然薄膜表面温度超过了熔点,但薄膜与基底界面处温度仍然低于铝的熔点,此时的薄膜应该仍然是固态。

表 1 计算用到的参数

Table 1 Parameters used in caculation

Parameters	Values
Density / (kg/m <sup>3</sup> )	2.7 × 10 <sup>3</sup>
Thermal conductivity / [W/(m · K)]	237
Heat capacity / [kJ/(kg · K)]	907
Laser power / W	2.25
Pulse width / ns	10
Absorptivity	0.08

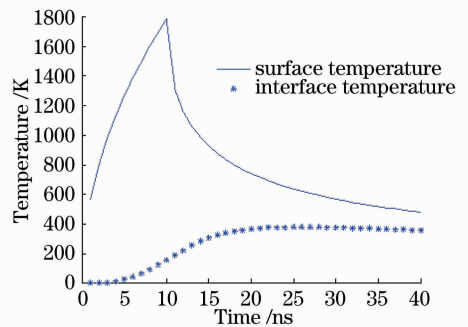


图 3 金属薄膜表面和界面处温升变化趋势曲线

Fig. 3 Temperature rising curves of metallic film surface and interface

由上述物理图像可以得出的第二个结论:对于金属/易烧蚀基底结构,在纳秒脉冲激光作用下存在特有的薄膜与基底之间的界面分离过程,这将导致热传导的突变。

树脂基复合材料结构中经常使用的环氧胶粘剂,一般在无氧气存在时环氧树脂本体热分解温度为 300 ℃。因此当界面温度高于这一热分解温度时,界面处的环氧树脂材料将出现受热分解,金属薄膜与环氧树脂间的结合力(薄膜附着力)消失。气化产生的压力使薄膜向上隆起,在金属薄膜和基底之间形成气隙。这时热传导由接触传导变为气隙中的气体传导。在这种情况下,悬浮的金属薄膜温度会进一步升高。依赖于激光功率密度,薄膜可能会保持固态也可能被熔化以至气化。而能量呈高斯分布的激光束斑辐照区域边缘的金属薄膜由于激光能量密度较低以及横向热扩散等因素,温度会较光斑中心低。光斑中心的金属层在基底环氧树脂材料分解产生的气体压力作用下垂直基底表面向外分离,并



对周围未与基底分离的薄膜造成撕扯力<sup>[10]</sup>,尤其当激光功率密度较低,薄膜会保持未熔状态,这种撕裂作用会更强。这应该是造成刻蚀区域薄膜边缘出现翻卷和撕裂现象的原因,即如图 2 所示结果。

图 4 为根据上述分析画出的纳秒级激光刻蚀金属薄膜/易烧蚀复合材料结构的物理机制。激光脉冲作用于金属薄膜后,部分能量被金属薄膜吸收并转换为热使金属薄膜表面温度升高并向更深层传导热,当局部薄膜温度超过金属的气化温度时,金属出现表面局部被刻蚀现象,如图 4(a)所示;激光能量密度增加,当金属薄膜与复合材料界面处的温度高

于基底复合材料的热分解温度时,基底材料分解在薄膜与基底间形成气隙,由于热导率的突变,导致薄膜升温速率发生明显改变,基底分解产生的高压使金属薄膜出现固态剥离,此时此刻蚀区域边缘易出现翻卷、毛刺等现象,如图 4(b)所示。如果激光能量足够强,固态剥离的金属薄膜会被熔化、气化,气化的金属材料向各个方向飞溅,可能在基底表面产生反向沉积;而当激光功率密度继续增加时,金属薄膜刻蚀机制逐渐以直接气化去除方式为主,基底易出现被烧蚀的情况,如图 4(c)所示。

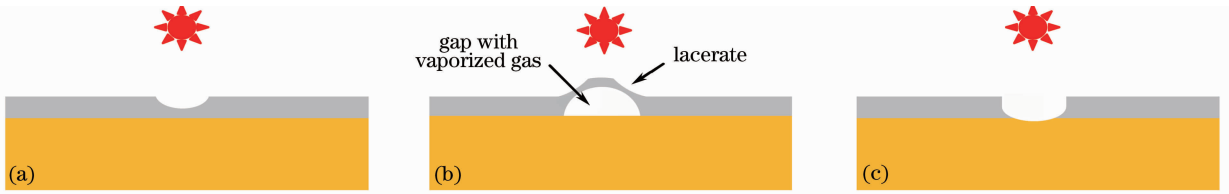


图 4 金属薄膜/复合材料结构激光刻蚀机制示意图。(a)表面局部被气化刻蚀,(b)复合材料热分解时金属薄膜出现固态剥离,(c)金属薄膜以直接气化刻蚀为主

Fig. 4 Schematic diagram for mechanism of the laser ablation metallic film on composite material substrate. (a) only skin-deep of film is ablated, (b) metallic film is peel off in solid state, (c) metallic film is completely ablated directly

因此,通过控制激光能量密度分布,可使光斑中心部分金属薄膜与基底的界面分离并保持固态,同时光斑边缘部分的金属薄膜处于熔化状态下,这样可以避免分离的薄膜对周围的撕扯,提高刻蚀的精度。这种情况下光斑中心不会出现对基底的烧蚀,可以获得原子级清洁的表面;刻蚀边缘也会变得锋锐、齐整。

#### 4 实验验证

由上述对激光刻蚀过程及实验结果的分析可知,在纳秒脉宽激光刻蚀金属薄膜/易烧蚀复合材料结构时,金属薄膜与基底之间会发生特有的界面分离现象。而这种界面分离是由于膜/基界面处的温度高于复材的热分解温度而导致的。而刻蚀激光光束的能量密度分布不仅可以影响激光在金属薄膜中形成的热场分布情况,而且可以影响金属薄膜与基底材料界面处的温度分布。拟通过控制激光能量分布来影响膜/基界面温度分布,使其光斑中心区域出现特有的金属薄膜与基底界面分离,金属薄膜以固态剥离避免对基底的损伤;而光斑边缘部分的薄膜能处于熔化状态,避免光斑中心区域的薄膜分离时对其产生撕扯,获得锋锐的刻蚀边缘,提高刻蚀的精度。

基于这一设想,希望刻蚀激光光斑能量密度分布形式是光斑中心低而周边高的火山口型分布,而且光斑边缘是非常陡峭的能量密度台阶。

采用传统的光学器件进行激光光斑和能量密度分布整形需要很复杂的光学系统组件,对于需要灵活变化的激光刻蚀加工系统来说非常不便。而基于光学衍射原理的二元光学衍射元件可以非常便利地实现激光波前衍射变换,理论上可以将刻蚀激光束整形成任意所需的光斑形状和能量密度分布模式。为了简化设计和便于工程实现,采用文献[11]中的设计制作了高峰值功率激光波前衍射变换元件,它将实际为多阶模式输出的刻蚀激光束能量分布整形成了平顶式能量分布的圆形和方形光斑,如图 5 所示。并利用这种能量密度分布的方形刻蚀光斑对金属薄膜/复合材料结构进行了扫描刻蚀验证实验,刻蚀的结果如图 6 所示。获得的刻蚀边界锋锐齐整,基底未见损伤。

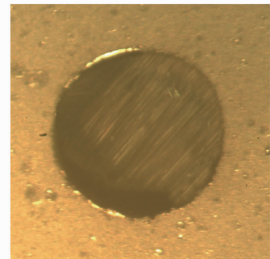


图 5 平顶能量分布圆形光斑单脉冲刻蚀金属薄膜结果  
Fig. 5 Micrograph of the ablation area by circular laser spot with flat-top power density

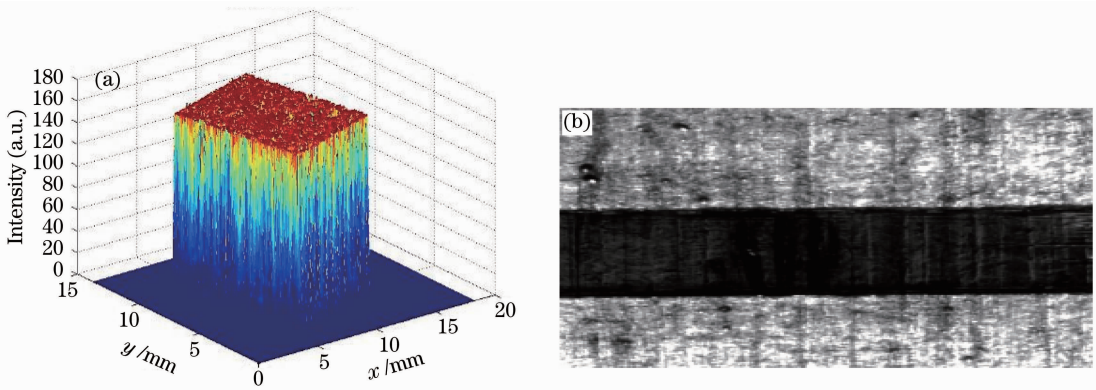


图6 用整形后的方形光斑扫描刻蚀的图形(黑色区域金属薄膜被刻蚀,宽度为0.5 mm)

Fig. 6 Laser scan ablation results with designed laser power density distribution (the dark area is ablated region, ablation width is 0.5 mm)

实验结果显示合理的激光能量密度分布方式既获得了高精度的刻蚀结果,又使得对基底复合材料的损伤最小。实验结果证实了激光能量密度分布适当,可使金属薄膜与复合材料基底出现特有的界面分离,这一机制可实现将复合材料上的金属薄膜去除干净,而不损伤基底;同时可减弱金属薄膜分离时对边缘的撕扯力,获得锋锐齐整的刻蚀边界和高刻蚀精度。

## 5 结 论

通过对脉冲激光刻蚀复合材料基金属薄膜的物理过程分析以及实验验证,提出了这一体系特有的薄膜/基底界面分离机制。即在脉冲激光作用后薄膜/基底界面处温度升高,在温度足够高时基底易烧蚀材料气化,薄膜/基底之间分离并形成气隙,热导率的变化使金属薄膜进一步升温,后续的薄膜去除的形态与激光能量密度相关。根据这一机制,可以设计合理的激光能量密度分布,获得边缘锋锐,又不损伤复合材料基底的结果。

经衍射变换元件整形后的光束刻蚀金属薄膜/复材结构的实验结果显示,改变激光能量密度分布形式可以影响金属薄膜的刻蚀去除机制,改善激光刻蚀的效果,提高刻蚀精度。并且由于刻蚀过程中实现了金属薄膜固态剥离,可以获得原子级清洁的基底表面。原子级清洁的表面可以消除不希望的漏电流,而锋锐的边界决定了可以得到的最小刻蚀线宽,这对于拓展激光刻蚀在微加工领域的应用具有重要意义。

## 参 考 文 献

1 Zhang Boming, Liu Shuang. Investigation on status and prospective application of composite multifunctional structures technology[J]. *Journal of Astronautics*, 2007, **28**(2): 493~497

张博明,刘 双. 航天器多功能结构的研究现状机器应用前景[J]. *宇航学报*, 2007, **28**(2): 493~497

2 Wan Shunsheng, Wang Xiaochun, Zhou Yifan. Antenna multiplexer of frequency selective surface [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2005, **37**(6): 787~789

万顺生,王晓春,周一帆. 频率选择表面天线复用副面的研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2005, **37**(6): 787~789

3 Yang Ke. 20/30 GHz frequency selective surface [J]. *Space Electronic Technology*, 2007, **4**(4): 34~36

杨 科. 20/30GHz 频率选择面技术研究[J]. *空间电子技术*, 2007, **4**(4): 34~36

4 Zhang Chenhui, Liu Mingchang. Study of large palisane reflected antenna surface [J]. *Electronic Process Technology*, 2005, **26**(4): 232~234

张晨晖,刘明昌. 大口径改型卡氏天线栅状反射面成型工艺研究[J]. *电子工艺技术*, 2005, **26**(4): 232~234

5 Wang Jiajin. *Laser Processing Principles and Application* [M]. Beijing: China Measure Press, 1992. 99~155

王家金. *激光加工技术* [M]. 北京: 中国计量出版社, 1992. 99~155

6 Sun Yue, Huang Haiming, Gao Suowen. Process of research in laser ablation mechanism [J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2008, **3**(2): 58~63

孙 岳,黄海明,高锁文. 激光烧蚀机理研究进展[J]. *失效分析与预防*, 2008, **3**(2): 58~63

7 Zhang Shudong, Zhang Weijun. Velocity of emission particles and shockwave produced by laser-ablated Al target [J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(8): 1512~1516

张树东,张为俊. 激光烧蚀 Al 靶产生的等离子体中辐射粒子的速度及激波[J]. *物理学报*, 2001, **50**(8): 1512~1516

8 Yan Changchun, Gu Jihua, Wu Maocheng. Study on temperature field of the material heated by monopulse laser [J]. *Laser Journal*, 2003, **24**(2): 50~52

闫长春,顾济华,吴茂成. 单脉冲激光加热下材料的温度场研究[J]. *激光杂志*, 2003, **24**(2): 50~52

9 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

10 D. S. Ivanov, B. Rethfeld. The mechanism of nanobump formation in femtosecond pulse laser nanostructuring of thin metal films [J]. *Appl. Phys. A*, 2008, **92**(4): 791~796

11 Li Ke, Shi Peng, Zhang Xiaobo *et al.*. Design and preparation of diffraction optical element in dual lens system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 1972~1977

李 珂,石 鹏,张晓波等. 双透镜系统光束整形元件的设计制作[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 1972~1977