激光刻蚀 2 μm 铝/聚酰亚胺（PI）材料体系技术研究

刘孝丽[1]，熊玉卿[2]，周利成[1]，王瑞[2]，钟浩[1]，任立庆[1]，任妮[2]

（1.榆林学院 能源工程学院，陕西 榆林，719000；
2.兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室，兰州 730000）

摘 要：目的 研究对激光刻蚀图形形貌可能产生影响的几个参数，如激光功率、填充比等，优化激光束刻蚀制备 2 μm 铝膜/PI 的工作参数，提高刻蚀质量。**方法** 利用 ANSYS 软件对激光刻蚀 2 μm 铝膜/PI 过程中薄膜铝表面的能量传输及转化过程进行模拟，了解刻蚀形貌与单个脉冲的激光工艺参数的关系。根据模拟结果，使用 LSP2000 激光器，采用不同的激光输出功率和扫描方式、填充比等参数对样品进行刻蚀。利用扫描电镜等对激光刻蚀制备后的样品表面形貌进行研究，从而获得优化工艺参数。**结果** 采用波长为 1064 nm 的 Nd:YAG 激光器，利用蛇形扫描方式及 45°方向填充，填充密度为 0.03 mm，在激光功率 5 W、激光频率 20 kHz、脉宽 100 ns、光斑直径 40 μm、激光扫描速度为 565.7 mm/s 的工艺参数下，刻蚀边界整齐。**结论** 纳秒刻蚀过程既有光热去除，也有应力去除，激光刻蚀工艺参数的优化在一定程度上改善了刻蚀边界质量，有利于提高激光刻蚀精度。

关键词：激光束刻蚀；铝/聚酰亚胺；图形形貌；扫描速度；应力

中图分类号：TB333；TN249 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2018)10-0321-07

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.10.044

Technological Study on Laser Etching of 2 μm Aluminum Film/PI Material System

***LIU Xiao-li*[1], *XIONG Yu-qing*[2], *ZHOU Li-cheng*[1], *WANG Rui*[2], *ZHONG Hao*[1], *REN Li-qing*[1], *REN Ni*[2]**

(1.School of Energy Engineering, Yulin University, Yulin 719000, China;
2.Key Laboratory of Vacuum Technology and Physics, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

ABSTRACT: The work aims to study the parameters affecting morphology of laser etched patterns such as laser power and filling density, optimize working parameters for laser beam etching of 2 μm aluminum film/PI, and further improve etching quality. Finite element software ANSYS was adopted to simulate energy transfer and conversion process on Al film during laser etching of 2 μm aluminum film/in PI process, and reveal the relationship between etching morphology and laser process parameters of a single pulse. Based on the simulation results, Al film on polyimide substrate was etched with a LSP2000 laser

收稿日期：2018-01-18；修订日期：2018-03-20
Received：2018-01-18；**Revised**：2018-03-20
基金项目：榆林学院科研启动基金（17GK09）
Fund：Supported by Research Staring Foundation of Yulin University (17GK09)
作者简介：刘孝丽（1986—），女，博士，讲师，主要研究方向为激光与物质相互作用研究。
Biography：LIU Xiao-li (1986—), Female, Doctor, Lecturer, Research focus: laser interaction with materials.
通讯作者：熊玉卿（1969—），男，博士，研究员，博士生导师，主要研究方向为薄膜物理与技术研究。邮箱：xiongyq@hotmail.com
Corresponding author：XIONG Yu-qing (1969—), Male, Doctor, Research fellow, Doctoral tutor, Research focus: thin films science and technology. E-mail: xiongyq@hotmail.com

etching system in the combinations of different laser power, scanning mode and filling density. Surface morphology of the laser etched sample was analyzed with scanning electron microscope (SEM). Neat etching edges of 2 μm Al/PI could be obtained under following parameters: a 1064 nm Nd: YAG laser with frequency of 20 kHz, pulse width of 100 ns, spot diameter of 40 μm, laser power of 5 W, radial scanning pitch of 0.04 mm, serpentine scanning mode, filling in direction of 45°, filling density of 0.03 mm, and scanning speed of 565.7 mm/s. Nanosecond etching process involves not only thermal interaction but also stress removal. Optimization of laser etching process parameter scan be used to obtain smooth etching edges and improve accuracy of laser etching.

KEY WORDS: laser beam etching; aluminum/polyimide; pattern morphology; scanning speed; stress

频率选择面是由非金属材料基底及基底上具有特殊周期性图形的金属薄膜构成[1-2]，在国防领域有着非常广泛的应用。由于可以在任意复杂曲面上精准定位、形成各种复杂形状图形以及高精度加工等特点，激光刻蚀技术为复杂曲面上频率选择图形制备的首选技术。美国、德国、日本等国家已将其应用于卫星天线及武器装备的频率选择面的加工制造中[3-6]。由于高精度数控系统及软件控制方面的技术水平的局限性，国内在大面积复杂曲面激光刻蚀技术方面的研究起步较晚，研究工作开展不成熟，目前雷达罩频率选择表面的研究还处于研发阶段，未见加工应用的报道[7]。兰州空间技术物理研究所在国内率先开展三维曲面激光刻蚀加工技术的研究，目前的激光刻蚀技术水平能够满足频率选择面加工精度为 ± 0.05 mm 的要求。然而，随着探测雷达和通信技术向更高频段发展，战机隐身雷达罩和通信卫星天线等频率选择面的金属薄膜振子图形精度需提高到 0.02 mm 以上，但是复合材料基底和金属薄膜在热、力学性能方面有非常大的差异[8-9]，要真正达到 0.02 mm 以上高精度、高性能加工，还需要对很多技术问题开展深入研究。

1 研究方法

选用 1064 nm Nd: YAG 激光器（LSP2000），通过不同的激光输出功率和扫描方式、填充比等对样品进行刻蚀。样品件为在聚酰亚胺基底上，利用电弧离子镀沉积的厚度为 2 μm 的金属铝薄膜。利用 JSM 6510 型扫描电镜检测刻蚀后的表面形貌。利用 ANSYS 模拟分析研究激光对聚酰亚胺基底上铝薄膜的刻蚀过程，分析激光脉冲刻蚀铝薄膜表面时的能量传输及转化过程。根据理论计算，结合模拟与实验结果，确定激光刻蚀的最优工作参数。

2 结果分析

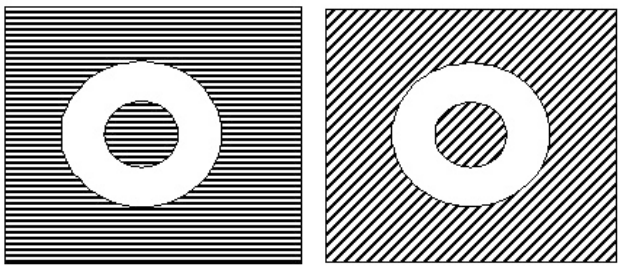
本研究的目的在于通过图形振子刻蚀轨迹优化设计，激光刻蚀控制参数优化（包括激光输出功率、重复频率、扫描方式等），进一步提高激光刻蚀图形的质量，获得高精度刻蚀图形。

2.1 刻蚀轨迹优化设计

振镜扫描是振镜电机带动反射镜偏转，进而带动激光光束在扫描平面上移动，进行扫描。它的机械部分是由 *X*、*Y* 两个振镜组成的振镜头，每个振镜电机轴上都安装了一个反射镜片，这两个反射镜相互配合，偏转不同的角度，就可以带动激光束在扫描平面上扫出完整的图形。而在试验中发现，激光刻蚀图形振子相邻搭接区域非常容易产生毛刺缺陷，甚至会出现基底损伤，从而影响最终刻蚀图形的质量[10-11]。经分析发现，搭接区域产生毛刺、刻蚀图形的畸变以及基底易刻伤的原因之一是振镜扫描填充刻蚀轨迹不合理，所以本文对振镜扫描填充刻蚀进行详细研究，进而提高刻蚀质量。

2.1.1 填充方式及轨迹优化

在试验中以贴片式圆环图形振子为例，如图 1 所示。图 1a 中采用的水平填充方式，易在图形相邻搭接区产生重叠刻蚀（由于水平是等间距填充），从而易对基底造成损伤或者残留。采用图 1b 的 45°方向填充方式，能够有效避免图形搭接区的重叠刻蚀或残留，图形刻蚀边界与填充线轨迹处激光刻蚀重叠度精确保持同一个值。

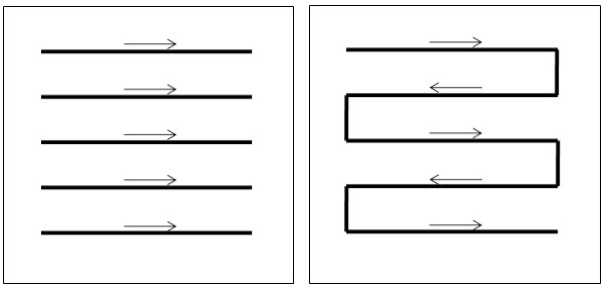


a 水平方向　　b 45°方向

图 1 贴片式图形振子刻蚀填充方向优化设计

Fig.1 Optimal design of filling direction and mode of patch type for etching: a) horizontal direction, b) 45° direction

扫描轨迹的选择是影响振镜刻蚀效率的主要原因之一，如图 2 所示。图 2a 为水平顺序扫描方式，图 2b 采用的是蛇形轨迹扫描方式。采用蛇形扫描方式能够有效避免振镜空驰现象，进而提高扫描振镜刻蚀效率。



a 水平线形填充　　b 蛇形填充

图 2　贴片式图形振子刻蚀填充方式
Fig.2 Design of filling mode of patch type for etching: a) horizontal linear filling, b) serpentine filling

2.1.2　填充密度优化

激光振镜扫描刻蚀分为单元图形的法向刻蚀和曲面分区法向扫描刻蚀两种，分区法向扫描刻蚀依据加工曲面的曲率半径进行刻蚀。两种刻蚀方式在进行刻蚀图形绘制时，根据需要来设置单元图形轮廓点密度，或者是采用多边形进行无限逼近的方式，以达到刻蚀边界平滑整齐的效果。振镜扫描是振镜电机带动反射镜偏转，进而带动激光光束在扫描平面上移动进行扫描。它的机械部分是由 X、Y 两个振镜组成的振镜头（如图 3），X 方向的填充密度和激光参数有关（见应力分析部分），Y 方向的填充密度即振镜扫描轨迹间的距离，主要和光斑尺寸有关。而针对不同厚度的薄膜，完全刻蚀掉薄膜所需激光束斑的尺寸是有所变化的（不同光斑尺寸能量密度不同）。因此，根据薄膜厚度设计出合理的填充密度，即应有一定的扫描重叠度，才能完全刻蚀掉所要去除的金属薄膜。

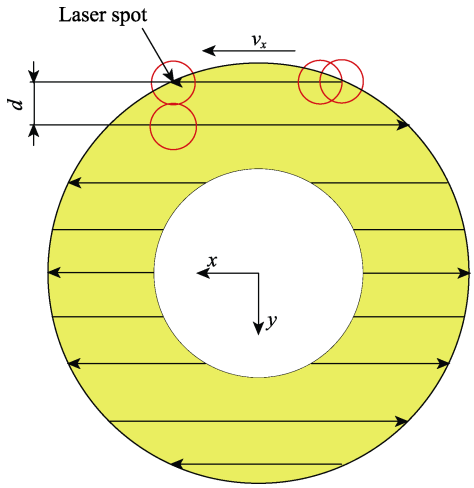


图 3　扫描光斑耦合图
Fig.3 Trace of laser spot for pattern etching

针对不同厚度的金属薄膜，刻蚀需要选择不同的填充密度，研究的过程中以金属 Al 薄膜（不同厚度）进行了反复试验，并确定了 Y 方向填充间距 d 与金属薄膜厚度的关系（如图 4 所示）。结果表明，激光扫描填充密度基本与金属薄膜厚度呈线性关系。对于本项目开展的试验件，其表面金属铝薄膜厚度为 2 μm，选择的最佳填充密度为 0.04 mm。

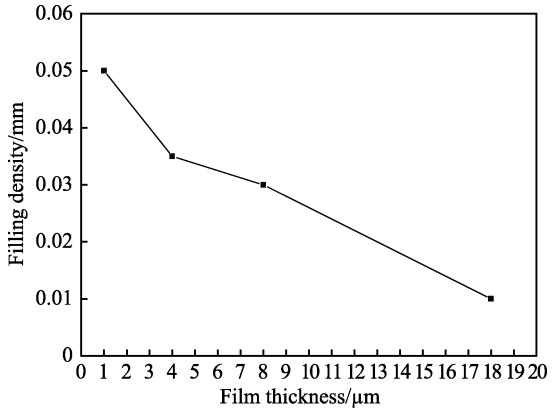


图 4　刻蚀铝膜厚度与填充密度关系
Fig.4 Relationship between film thickness and filling density

2.2　激光刻蚀参数优化

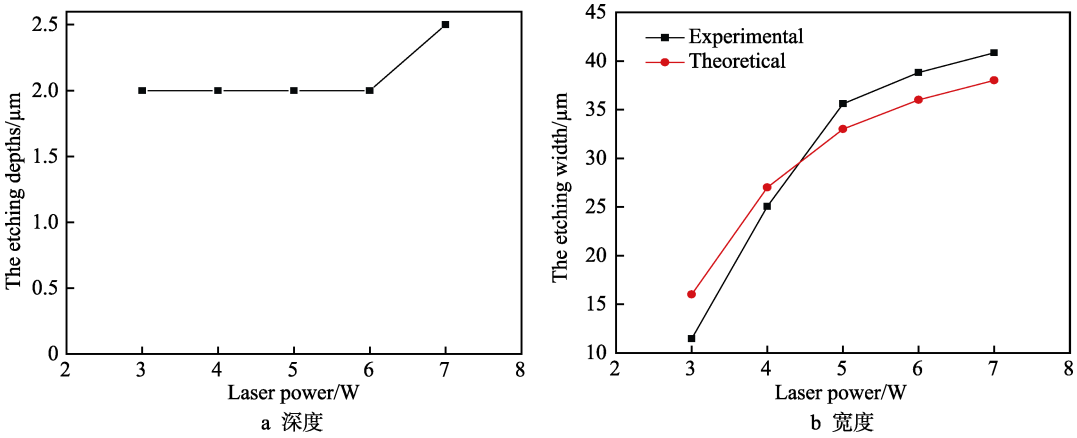
要保证平滑、去除干净、基底无损伤的刻蚀效果，还要对激光光斑尺寸、输出功率、扫描速率等参数进行调整优化。

2.2.1　光斑尺寸

刻蚀激光光斑尺寸对于刻蚀图形精度及刻蚀效率都有影响。激光光斑越大，刻蚀效率越高，但线宽精度越低；反之，激光光斑越小，刻蚀效率越低，但刻蚀精度越高。对采用不同激光光斑刻蚀的线宽精度进行分析可得，采用 100 μm 光斑刻蚀产生的锯齿状漏刻部分高度约 7 μm，刻蚀效率较高；采用 50 μm 光斑刻蚀的最大误差约 3.3 μm，刻蚀效率较高；采用 20 μm 光斑刻蚀的最大误差约 1.5 μm，但刻蚀效率大幅度降低。综上所述，采用 50 μm 光斑刻蚀效率较高，且其最大误差 3.3 μm 为可接受范围。综合刻蚀效率以及光斑刻蚀最大误差两方面因素，确定的光斑尺寸为 40 μm。

2.2.2　激光功率

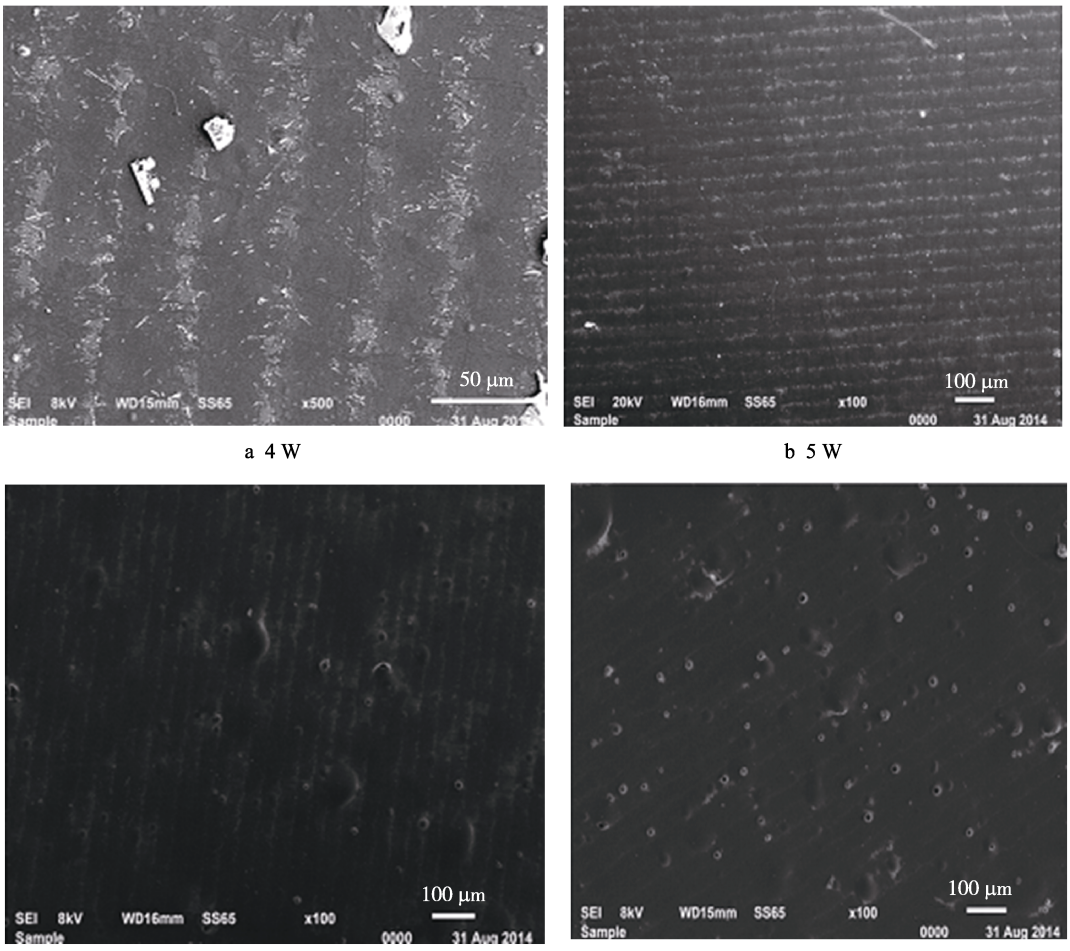
激光输出功率直接影响图形刻蚀质量。由于需要精确刻蚀金属薄膜，并且不能损伤基底材料，因此利用 ANSYS 软件模拟不同激光功率刻蚀聚酰亚胺基底上的铝膜。模拟试验中合理简化试验件模型，并在其他刻蚀参数不变的情况下，改变激光输出功率进行模拟研究。图 5 是分别采用不同激光输出功率对试验件刻蚀深度的模拟结果。激光输出功率为 3~6 W 时，刻蚀深度为 2 μm；激光输出功率为 7 W 时，刻蚀深度为 2.5 μm（大于薄膜厚度），基底受到损伤。尽管本实验室目前不能准确地测量刻蚀深度，但可以根据基底损伤程度推测刻蚀深度（如图 6 所示），与模拟结果基本吻合。从图 5b 可得，随着激光功率从 3 W



a 深度　　b 宽度

图 5　单脉冲刻蚀宽度、深度与激光功率模拟关系图

Fig.5 Simulated relationship between single pulse etching width (a), depth (b) and laser power



a 4 W　　b 5 W

c 6 W　　d 7 W

图 6　不同功率下的激光刻蚀 SEM 图

Fig.6 SEM images of laser etched morphology at different power

增加到 7 W，模拟刻蚀宽度从 16 μm 到 38 μm 逐渐变化。利用扫描电镜测量试验刻蚀宽度，对比测量结果（图 6）与模拟结果（图 5b）可以看出，模拟结果与实验结果误差较小。

根据上述模拟结果和相关理论计算 2 μm 铝膜/聚酰亚胺组合体系的损伤阈值。求解高斯光束方程，得到激光能量与斑点直径之间的关系式如式（1）[12-13]：

$$D^2=2\omega^2\ln\left(E/E_{th}\right) \tag{1}$$

D 是激光光斑直径，通过模拟结果可以得到单脉冲刻蚀宽度（如图 5b 所示）。ω 为高斯光束直径，E 为激光能量，E_{th} 为阈值能量。选取系列激光能量值，计算出相应的 ln$E$ 与 D^2 数值，对其进行线性拟合求出 ω。根据实验结果得到 ω 的最小值是 $\sqrt{1985/2}$ = 31.5 μm，此处即为焦点。焦点处的线性拟合如图 7

所示，纵坐标为直径的平方，横坐标为能量。将拟合直线外推至能量轴的截距，即光斑直径为零时，可以计算出阈值能量，通过公式(2)可计算阈值能量密度 F_{th}，阈值能量密度也就是铝薄膜刚开始被移除时的能量密度。

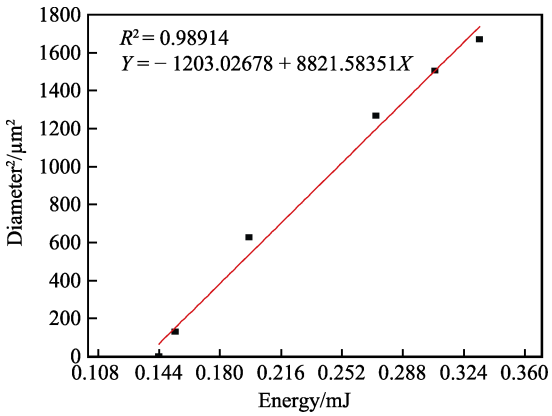


图 7　刻蚀焦点处的线性拟合图
Fig.7 Linear fitting of etching focal point

$$F_{th} = 2E_{th} / \pi\omega^2 \tag{2}$$

带入数据，2 μm 铝薄膜刻蚀阈值能量密度 F_{th} 为 9.92 J/cm^2。如图 8 所示，激光能量密度高于阈值能量密度的区域，汽化去除是主导作用；低于阈值能量密度的区域即刻蚀边界，应力去除起主导作用。

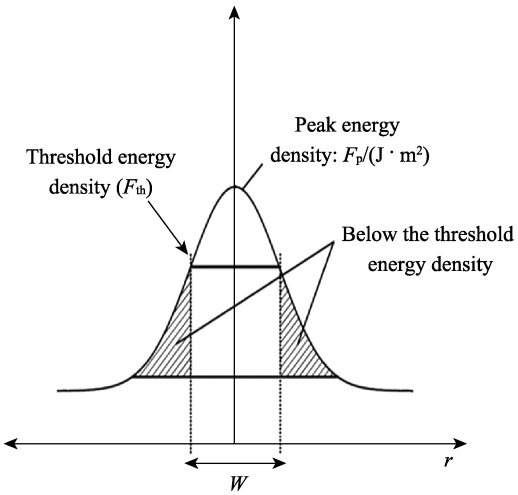


图 8　高斯脉冲激光分布图
Fig.8 Gauss pulse laser distribution

由图 5 可知，激光功率为 5~6 W 时，刻蚀宽度为 32~36 μm。采用 5~6 W 的激光功率刻蚀时，刻蚀边界区域能量仍低于阈值能量密度，因而刻蚀边界应力去除起主导作用，所以控制刻蚀边界质量，需讨论应力去除效应。

2.2.3　应力去除

从图 9 可以看出，刻蚀边缘碎屑主要是由应力 1 和 2 相结合引起[14-15]。沿当前光斑边缘的切线方向为应力 1，前一个光斑残留拉应力沿光斑边缘的法线方向即为应力 2。当 θ>90°时，相邻的两个光斑的应力 1 与 2 相结合，结合点之后的区域难以刻蚀去除，碎屑形成。当 θ<90°时，应力 1 与应力 2 无法相接，形成干净的刻蚀边缘。所以为了获得边缘干净的刻蚀图形，必须保持 0°<θ<90°。角度 θ 与扫描速度 v、激光频率 f 和激光光斑直径 D 的关系式为：

$$\sin\left(90-\frac{\theta}{2}\right)=\frac{\upsilon}{Df} \tag{3}$$

$$0°<\theta<90° \text{ 则 } \frac{1}{\sqrt{2}}<\frac{v}{Df}<1 \text{。}$$

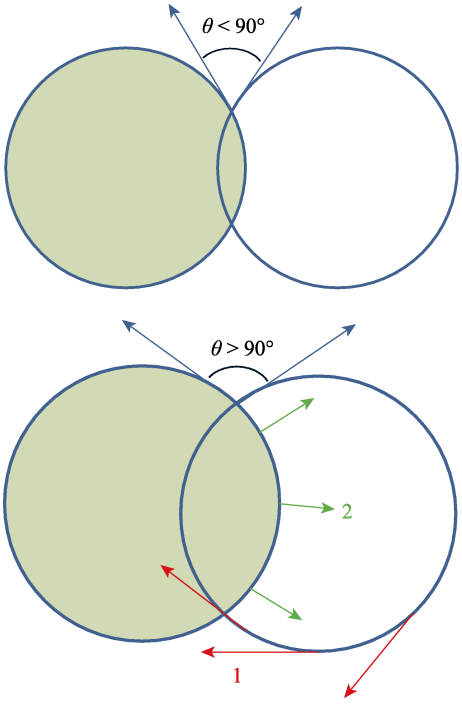
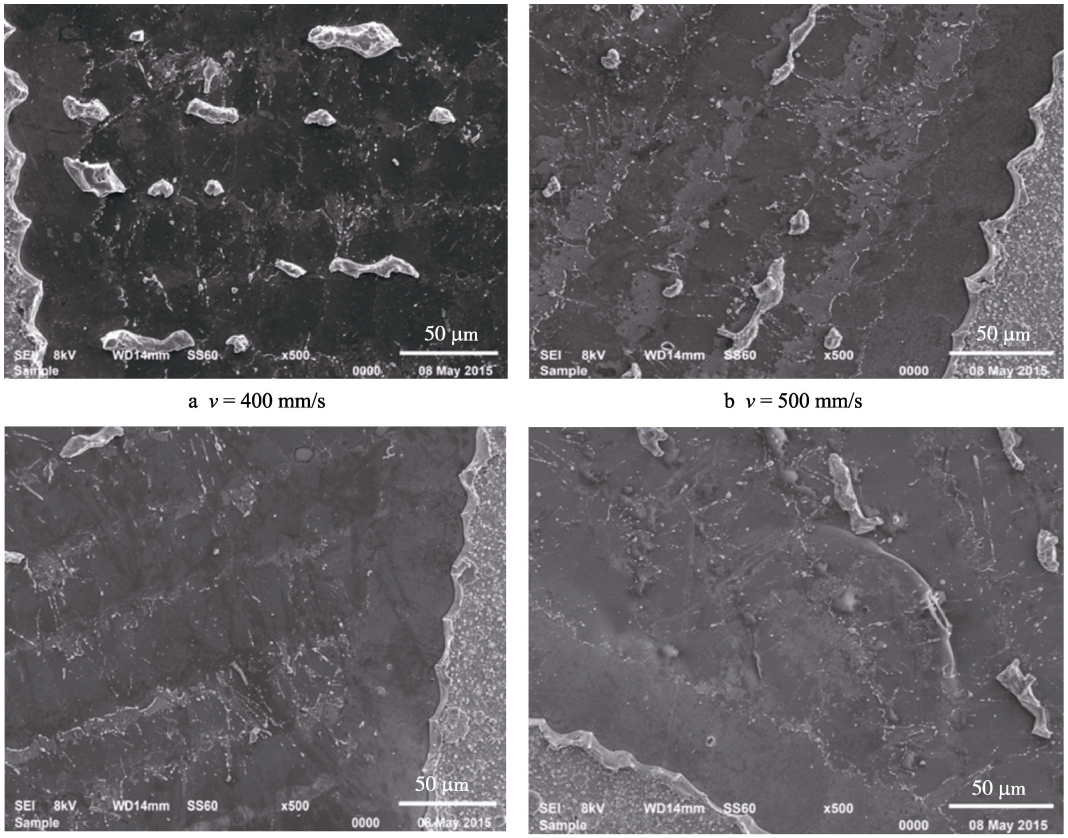


图 9　边缘碎屑形成原理图
Fig.9 Schematic diagram of edge chippings

当激光功率和频率保持不变时，改变刻蚀速度使得相邻光斑搭接夹角接近 90°，刻蚀效果最优。激光频率（f）为 20 kHz、激光光斑直径（D）为 40 μm，激光刻蚀扫描速度为 565.7 mm/s 时，相邻光斑的夹角 θ=90°，搭接率较小，刻蚀边界干净，效果最佳。根据计算结果进行了不同扫描速度刻蚀的验证试验，结果如图 10 所示，550 mm/s 时实际刻蚀效果最好，与计算值相近。

根据以上分析可得，刻蚀 2 μm 铝薄膜聚酰亚胺基底组合体系，激光参数为：激光波长 1064 nm，频率 20 kHz，脉宽 100 ns，激光光斑直径 40 μm，功率 5 W，蛇形轨迹扫描以 45°方向填充，扫描速度 550 mm/s。采用以上工艺数据进行实验研究，图案为环形结构。图 11 为样品刻蚀图。样品无毛刺，边界整齐，刻蚀效果良好。



a v = 400 mm/s　　b v = 500 mm/s

c v = 550 mm/s　　d v = 600 mm/s

图 10　不同扫描速度刻蚀铝/聚酰亚胺组合的 SEM 图（铝膜厚度 2 μm）

Fig.10 SEM image of aluminum/PI system combination setched at different scanning speed

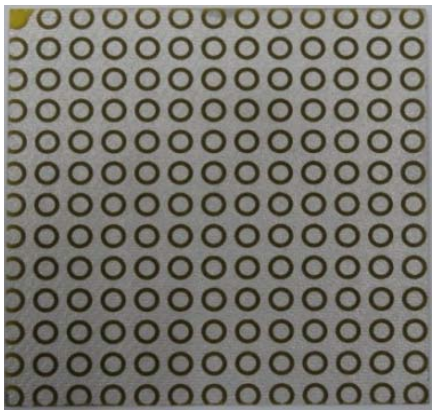


图 11　刻蚀铝/PI 组合样品图（铝膜厚度 2 μm）

Fig.11 Etching Al/PI material sample (Al film thickness as 2 μm)

3　结论

1）由激光刻蚀铝/聚酰亚胺组合能量分析可以得出，铝薄膜的去除不仅是汽化的结果，且边界处由应力诱导而发生的刻蚀去除也起一定的作用。刻蚀时既要考虑光斑中心能量密度分布，也要考虑应力引起的边界毛刺现象，才能保证刻蚀质量。

2）在试验研究中发现，图形振子相邻搭接区域较容易产生毛刺缺陷，甚至会出现基底损伤现象，进而影响最终激光刻蚀图形的质量。经仔细分析研究，填充方式和扫描轨迹都对图形质量有显著影响。最后确定出合理的工作方式和参数。

3）根据理论分析和模拟结果，确定了最优激光工作参数，进行了铝/聚酰亚胺组合的激光刻蚀试验，获得了预期的效果。

参考文献：

[1] MUNK B A. Frequency selective surfaces: theory and design[M]. New York: Wiley, 2000.

[2] 方芳. 频率选择表面天线副反射面研制[J]. 电子机械工程, 2009, 25(5): 41-43.
FANG Fang. Investigation of frequency selective surface product[J]. Electro mechanical engineering, 2009, 25(5): 41-43.

[3] LEE S W, ZIMMERMAN M L, FUJIKAWA G, et al. Designs for the ATDRSS tri-band reflector antenna[J]. Antennas & propagation society international symposium, 1991, 2(2): 666-669.

[4] YAMATO M, IZURU N, IROYUKIS H, et al. Development of dual gridded reflector antenna for superbird-C[J]. AIAA 21th ICSSC, 1998, 98-127: 332-335.

[5] 张惠丽. 大型复合材料卫星天线的制造技术[J]. 航天返回与遥感, 1994, 15(4): 51-54.

ZHANG Hui-li. Manufacturing technology of large composite satellite antenna[J]. Spacecraft recovery & remote sensing, 1994, 15(4): 51-54.

[6] 戚发轫, LAUX L, REINDL M, 等. 东方红三号卫星的机械太阳阵和通信天线[J]. 中国空间科学技术, 1991, 11(5): 1-7.
QI Fa-ren, LAUX L, REINDL M, et al. Mechanical solar array and antenna for the Chinese DFH-3satellite system[J]. Chinese space science and technology, 1991, 11(5): 1-7.

[7] 杨科. 20/30 GHz 频率选择面技术研究[J]. 空间电子技术, 2007, 4(4): 34-36.
YANG Ke. 20/30 GHz research on frequency selective surface technology[J]. Space electronic technology, 2007, 4(4): 34-36.

[8] 王瑞, 陈学康, 任妮, 等. 金属薄膜/有机材料基体系激光刻蚀研究[J]. 稀有金属材料, 2013, 42(S2): 240-242.
WANG Rui, CHEN Xue-kang, REN Ni, et al. Laser ablation the combination of metal film/organics material[J]. Rare metal mat eng, 2013, 42(S2): 240-242.

[9] 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.
LIU Xiao-li, XIONG Yu-qing, YANG Jian-ping, et al. Simulation of temperature field for laser etching of aluminum thin films on polyimide substrate[J]. Chinese journal of lasers, 2015, 42(7): 0703006.

[10] 杨建平. 复杂材料体系激光刻蚀加工的技术与工程问题研究[D]. 兰州: 兰州空间技术物理研究所, 2011.
YANG Jian-ping. Research on the technology and engineering problems of laser etching for complex material system[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Physics, 2011.

[11] 张菲. 电子材料紫外激光微加工技术与机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
ZHANG Fei. Study on UV laser micro processing technology and mechanism for electronic materials[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012.

[12] CHEN M, HO Y, HSIAO W, et al. Analysis of thermal effect on transparent conductive oxide thin films ablated by UV laser[J]. Thin solid films, 2009, 518: 1067-1071.

[13] LIM Y C, BOUKANY P E, FARSON D F, et al. Direct-write femtosecond laser ablation and DNA combing and imprinting for fabrication of a micro/nanofluidic device on an ethylene glycol dimethacrylate polymer[J]. Journal of micromechanics & micro engineering, 2011, 21(1): 015012.

[14] 张超, 张庆茂, 郭亮, 等. 非晶硅薄膜太阳能电池的紫外激光刻蚀工艺[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(1l): 2751-2757.
ZHANG Chao, ZHANG Qing-mao, GUO Liang, et al. Ablating process with 355 nm laser foramorphous silicon thin-film solar cell[J]. High power laser and particle beams, 2012, 24(1l): 2751-2757.

[15] 张宏伟, 任妮, 薛红涛, 等. 聚酰亚胺基底金属薄膜激光刻蚀温度场分布[J]. 中国激光, 2016(5): 0503009.
ZHANG Hong-wei, REN Ni, XUE Hong-tao, et al. Temperature distribution for laser etching of metal thin films on polyimide substrate[J]. Chinese journal of lasers, 2016, 43(5): 0503009.