

基于飞秒激光的覆铜板刻蚀工艺

张晓, 刘凯, 王明娣*, 倪玉吉, 潘煜, 刘金聪, 倪超, 张文杰

苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021

摘要 针对传统电路板集成方式的局限性, 提出基于飞秒激光的覆铜板线路成形技术。采用飞秒激光对覆铜板进行单因素实验和正交实验, 结果表明, 在激光功率、频率、扫描速度、扫描次数以及离焦量等因素中, 扫描次数对刻蚀深度和表面粗糙度的影响最大, 激光频率的影响最小; 采用优化后的激光参数进行刻蚀, 可以将表面铜层完全除去, 得到高质量的刻蚀区域而不伤及底层基材。

关键词 激光技术; 飞秒激光; 覆铜板; 刻蚀; 电路

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1214003

Etching Technology for Copper-Clad Laminates Based on Femtosecond Laser

Zhang Xiao, Liu Kai, Wang Mingdi*, Ni Yüji, Pan Yü,

Liu Jincong, Ni Chao, Zhang Wenjie

School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

Abstract With the aim of overcoming the limitations of traditional circuit-board integration methods, a copper-clad board-line forming technology based on femtosecond laser is proposed. Single-factor and orthogonal experiments are performed on a copper-clad laminate using femtosecond laser. Among influencing factors such as laser power, frequency, scanning speed, number of scans, and defocusing amount, the number of scans has the largest influence on the etching depth and surface roughness, while the laser frequency has the smallest influence on both. By etching the copper-clad laminate with optimized laser parameters, the surface copper layer can be removed completely to obtain a high-quality etched region without damaging the substrate underneath.

Key words laser technique; femtosecond laser; copper-clad laminate; etching; circuit

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引 言

目前, 印制电路板(PCB)行业对高密度电路板需求显著增长^[1]。在众多种类的电路板中, 柔性电路板(FPC)的应用尤为突出, 其质量轻、体积小、挠曲性好, 在众多便携式电子产品中应用广泛^[2]。传统电路板制作工艺复杂, 需要使用酸碱溶液腐蚀设备, 因而在电路板制作过程中, 传统方法污染严重且资源消耗巨大^[3]。

激光加工属于非接触式加工的一种, 具有加工精度高、绿色环保以及高效等特点, 近年来在覆铜板加工中的应用越来越广泛。Robinson 等^[4]通过实

验证明了扫描速度快且扫描次数多时飞秒激光可以应用于机械微加工; Chkalov 等^[5]采用飞秒激光实现了 PCB 上拓扑结构的精确成形, 避免了对周围区域的物理和热损伤; 张菲等^[6]对比了 355 nm 的紫外激光器和 1064 nm 的红外激光器对覆铜板的刻蚀效果, 认为紫外激光器更适用于覆铜板铜层的刻蚀; 凌磊等^[7]利用 355 nm 和 266 nm 波长的固体倍频紫外激光, 在不同聚焦透镜的实验条件下对多层电路板进行微刻蚀, 并得到最佳刻蚀参数; 施克明等^[8]采用波长为 342 nm 的飞秒激光刻蚀 PCB 覆铜板, 实现了铜层的完全去除, 同时不伤及基材层; 倪超等^[9]采用紫外飞秒激光在铜厚 18 μm 的 PCB 覆

收稿日期: 2019-05-27; 修回日期: 2019-07-18; 录用日期: 2019-08-14

基金项目: 国家自然科学基金(51675360)、苏州市科技计划项目(SYG201805)、苏州市相城区科技计划项目《重点产业技术创新专项》(201701)

* E-mail: wangmingdi@suda.edu.cn

铜板上刻蚀出深度为 $17.863\ \mu\text{m}$ 且底面光滑的窗口区域。

由于 FPC 覆铜板的力学性能较差,应用飞秒激光进行刻蚀的机理也不同于 PCB,因此需要进一步研究。飞秒激光具有超短脉宽,加工过程中热影响区极小,因而在 FPC 的线路加工方面具有很好的应用前景。本文使用紫外波段飞秒激光对 FPC 覆铜板的铜层进行刻蚀工艺的单因素和正交实验研究,探究刻蚀质量与激光功率、频率、扫描速度、扫描次数以及离焦量之间的关系。

2 实 验

2.1 实验设备与器材

采用 DelphiLaser 公司紫外波段的 Nd:YAG 飞秒激光设备,激光功率为 6 W,波长为 342 nm,激光为高斯光束,脉冲宽度为 330 fs,聚焦光斑直径约为 $20\ \mu\text{m}$ 。

实验选用聚酰亚胺基 FPC 覆铜板,此类电路板在柔性电路板中最常见,其规格众多,本实验采用的 FPC 覆铜板为永得胜 1mil PI 10ZCu C/N:18,表层铜箔厚度为 $35\ \mu\text{m}$,材质为压延铜,中间层为胶粘层,基材 PI(聚酰亚胺)的厚度为 $25.4\ \mu\text{m}$,对覆铜板整体厚度进行测量,测量结果为 $75.59\ \mu\text{m}$,如图 1 所示。由此可以计算出胶粘层的厚度为 $15.19\ \mu\text{m}$ 。

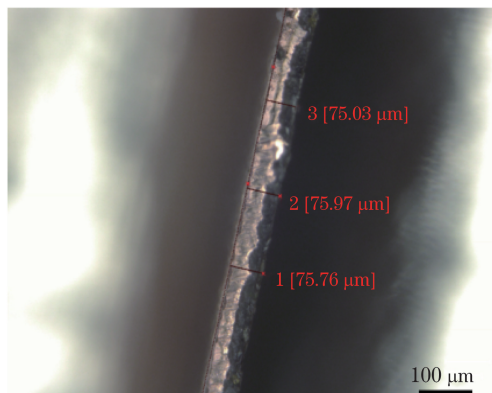


图 1 FPC 覆铜板超景深测量结果

Fig. 1 Ultra depth of field measurement results of FPC copper-clad laminate

2.2 实验方案

铜层的刻蚀实验主要探究激光功率、激光频率、扫描速度、扫描次数和离焦量等工艺参数对刻蚀质量的影响,并分析各工艺参数对刻蚀质量的影响权重,最后对工艺参数进行优化并验证。具体实验方案如图 2 所示。

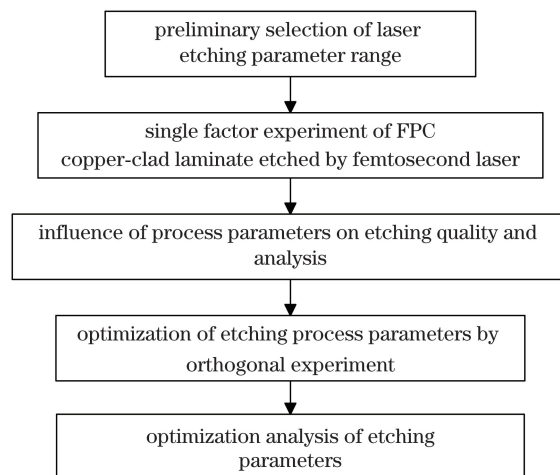


图 2 实验方案

Fig. 2 Experimental scheme

3 实验分析

采用紫外波段飞秒激光刻蚀 FPC 铜层,目的是刻蚀掉覆铜板表面的铜层,且不伤及底层的 PI,得到使加工区域刻蚀质量良好且底面平整的工艺参数,为后续细微线路的成形制造提供依据,具体的刻蚀模型及扫描路径如图 3 所示。

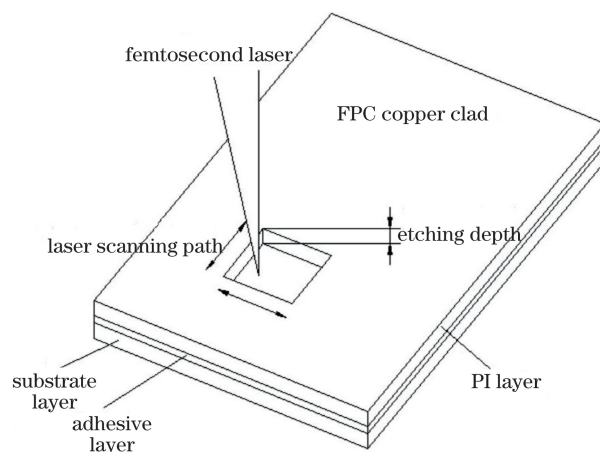


图 3 FPC 铜层刻蚀模型及扫描路径

Fig. 3 FPC copper etching model and scanning path

首先进行单因素实验,确定合适的工艺参数范围,为正交实验提供依据。根据已有的实验数据,激光功率取 $50\sim 400\ \text{mW}$,频率取 $20\sim 60\ \text{kHz}$,扫描速度取 $30\sim 70\ \text{mm/s}$,扫描次数取 $1\sim 4$ 次,离焦量取 $-0.3\sim 0.3\ \text{mm}$,表 1 给出了飞秒激光刻蚀加工 FPC 覆铜板铜层的工艺参数及实验结果。

3.1 单因素实验结果分析

3.1.1 飞秒激光功率对铜层刻蚀质量的影响

图 4 所示为不同激光功率下刻蚀区域深度和粗糙度的变化曲线,扫描速度为 $30\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$,频率为

表 1 飞秒激光刻蚀 FPC 覆铜板铜层工艺参数及实验结果

Table 1 Process parameters and experimental results of FPC copper laminate etched by femtosecond laser

Serial number	Power /mW	Scanning speed / (mm·s ⁻¹)	Frequency /kHz	Scanning times	Defocusing amount /mm	Etching depth / μm	Roughness / μm
1	70	30	30	3	0	20.04	1.39
2	170	30	30	3	0	23.62	1.54
3	270	30	30	3	0	31.94	1.77
4	370	30	30	3	0	67.57	2.23
5	470	30	30	3	0	Through	Through
6	370	30	20	3	0	55.43	1.45
7	370	30	40	3	0	33.02	2.15
8	370	30	50	3	0	28.80	2.01
9	370	30	60	3	0	23.32	1.89
10	370	40	30	3	0	32.73	2.01
11	370	50	30	3	0	28.32	1.85
12	370	60	30	3	0	26.82	1.72
13	370	70	30	3	0	24.17	1.65
14	370	30	30	1	0	23.08	1.84
15	370	30	30	2	0	30.66	2.04
16	370	30	30	4	0	Through	Through
17	370	30	30	5	0	Through	Through
18	370	30	30	3	0.3	42.87	2.03
19	370	30	30	3	0.15	48.15	2.14
20	370	30	30	3	-0.15	69.77	2.97
21	370	30	30	3	-0.3	Through	Through

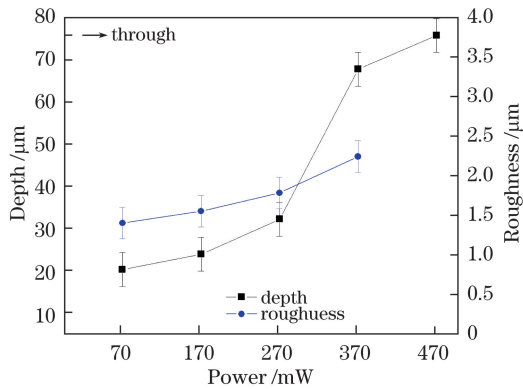


图 4 飞秒激光功率与铜层刻蚀区域深度和粗糙度的关系曲线

Fig. 4 Relationship among femtosecond laser power, depth, and roughness at the etched area of copper layer

30 kHz, 离焦量为 0 mm, 扫描次数为 3。可以看出, 刻蚀深度随着激光功率的增大而增大, 因为随着激光功率的增大, 输入到铜层的单脉冲能量增大, 致使更多的材料因能量积累达到沸点而被汽化去除, 功

率为 470 mW 时, FPC 被刻穿; 刻蚀区域的粗糙度随着激光功率的增大而增大, 激光功率增大导致激光单脉冲能量上升, 刻蚀所形成沟壑的深度增大, 使得刻蚀区域表面的粗糙度增大。综合考虑刻蚀区域的深度和粗糙度, 选取激光功率为 280~322 mW。

3.1.2 飞秒激光频率对铜层刻蚀质量的影响

图 5 所示为不同重复频率下刻蚀区域深度和粗糙度的变化曲线, 激光功率为 370 mW, 扫描速度为 30 mm·s⁻¹, 离焦量为 0 mm, 扫描次数为 3。刻蚀区域的深度随着激光频率的增大呈现先增大后减小的趋势, 激光频率较低时, 单个激光脉冲能量较大, 随着激光频率的增加, 激光脉冲作用在材料表面的次数增加, 材料吸收的能量也随之增加, 更多的材料因为吸收激光的能量而被去除, 当激光频率增长到 30 kHz 之后, 虽然激光脉冲与材料作用的次数增加, 但单个激光脉冲的能量下降, 较少的材料达到烧蚀阈值而被去除, 故而刻蚀深度随着频率的增加而减小; 随着激光频率的增加, 刻蚀区域表面的粗糙度

先增大而后平缓下降,这主要是因为随着激光频率的增大,激光输出能量先增大后减小,而激光能量越大,刻蚀后材料表面形貌的变化也越大,因而表面粗糙度也越大。综合考虑刻蚀区域的深度与粗糙度,选取激光频率为 35~39.5 kHz。

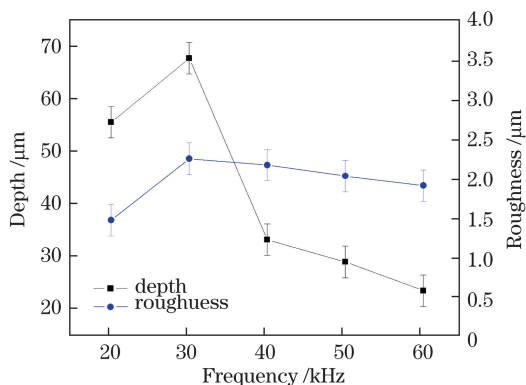


图 5 飞秒激光频率与铜层刻蚀区域深度和粗糙度的关系曲线

Fig. 5 Relationship among femtosecond laser frequency, depth, and roughness in the etched area of copper layer

3.1.3 飞秒激光扫描速度对铜层刻蚀质量的影响

图 6 所示为不同扫描速度下刻蚀区域深度和粗糙度的变化曲线,激光功率为 370 mW,频率为 30 kHz,离焦量为 0 mm,扫描次数为 3。刻蚀区域的深度随着扫描速度的增大而减小,由于激光功率和频率固定,故单个激光脉冲的能量固定,此时材料吸收激光能量的总量主要取决于激光与材料的作用时间,而随着激光扫描速度的增大,光斑搭接率下降^[10],单位面积上激光与材料作用的时间减少,材料吸收的能量随之减少,因而扫描速度越大,刻蚀深度越小;刻蚀区域的粗糙度随着激光扫描速度的增大而减小,这是因为扫描速度增大,单位时间内单位体积材料吸收的能量减少,激光作用后引起表面形貌的变化减小,所以扫描速度越大,刻蚀区域表面越光滑,粗糙度越小。综合考虑刻蚀区域的深度和粗糙度,选取扫描速度为 36~39 mm·s⁻¹。

3.1.4 飞秒激光扫描次数对铜层刻蚀质量的影响

图 7 所示为不同扫描次数下刻蚀区域深度和粗糙度的变化曲线,激光功率为 370 mW,频率为 30 kHz,离焦量为 0 mm,扫描速度为 30 mm·s⁻¹。刻蚀区域深度和粗糙度随着刻蚀次数的增多而增大,随着扫描次数的增多,激光与材料作用的时间增加,材料吸收的能量增大,因而刻蚀深度和刻蚀粗糙

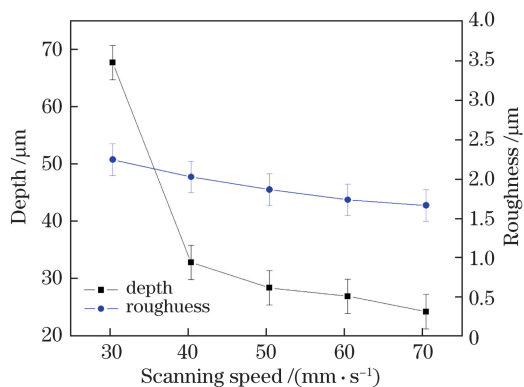


图 6 飞秒激光扫描速度与铜层刻蚀区域深度和粗糙度的关系曲线

Fig. 6 Relationship among scanning speed of femtosecond laser, depth, and roughness in the etched area of copper layer

度也增大,当扫描次数超过 3 时,过多输入的激光能量导致材料被完全刻穿。综合考虑刻蚀区域深度和粗糙度,选取扫描次数为 1~4。

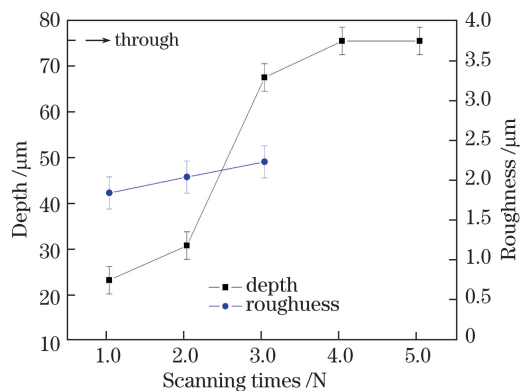


图 7 飞秒激光扫描次数与铜层刻蚀区域深度和粗糙度的关系曲线

Fig. 7 Relationship among femtosecond laser scanning times, depth, and roughness in the etched area of the copper layer

3.1.5 飞秒激光离焦量对铜层刻蚀质量的影响

图 8 所示为不同离焦量下刻蚀区域深度和粗糙度的变化曲线,激光功率为 370 mW,频率为 30 kHz,扫描次数为 3,扫描速度为 30 mm·s⁻¹。可以看出,刻蚀深度随着离焦量的增大而减小,当正离焦量为 0~0.3 mm 时,刻蚀过程发生在铜层和胶粘剂层,焦点位于材料上方,此时照射在材料上的光束为散焦激光,材料从铜层到 PI 层单位面积所获得的平均能量依次减少,并且加工过程中烧蚀形成的等离子体会引起激光散射,从而使得激光注入的能量减少^[4];随着离焦量的减小,单位面积材料所获得的能量增大,更多的材料因能量达到烧蚀阈值而被去

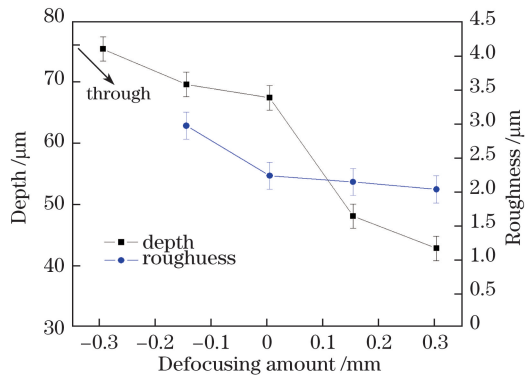


图 8 飞秒激光离焦量与铜层刻蚀区域深度和粗糙度的关系曲线

Fig. 8 Relationship among femtosecond laser defocusing amount, depth, and roughness in the etched area of copper layer

除,刻蚀深度逐渐增大;当离焦量为 0 时,刻蚀过程发生在铜层、胶粘层和 PI 层,由于 PI 层的去除方式以降解为主,去除单位体积材料所需能量较少,因而

刻蚀深度急剧增大,且底部 PI 层也被烧蚀,严重影响刻蚀质量。

刻蚀区域粗糙度随着离焦量的减小而增大,随着离焦量的增大,作用于胶粘层和 PI 层的光斑能量密度增大,刻蚀过程发生的塑性变形加重,因而刻蚀区域的粗糙度逐渐变大。综合考虑刻蚀区域的深度和粗糙度,选取离焦量为 0.12~0.3 mm。

3.2 正交实验结果分析

本实验研究的紫外波段飞秒激光刻蚀 FPC 的工艺参数主要有平均功率(A)、扫描速度(B)、扫描次数(C)、离焦量(D)和重复频率(E),各个因素均取 4 个水平,根据单因素实验结果,设计正交实验,各刻蚀工艺参数的因素水平如表 2 所示。

根据表 2 所列的因素水平,各个因素均取 4 个水平因子来设计 $L_{16}(4^5)$ 正交实验表。采用刻蚀区域深度和粗糙度作为评价指标,正交实验要素设计及结果如表 3 所示。

表 2 因素水平表

Table 2 Factor level table

Level	Average power /mW	Scanning speed / (mm·s ⁻¹)	Scanning times	Defocusing amount /mm	Repetition frequency /kHz
1	280	36	1	0.12	35.0
2	294	37	2	0.18	36.5
3	308	38	3	0.24	38.0
4	322	39	4	0.30	39.5

表 3 正交实验要素设计及结果

Table 3 Element arrangement and results of orthogonal test

Serial number	Level					Depth /μm	Roughness /μm
	A	B	C	D	E		
1	1	1	1	1	1	21.15	1.28
2	1	2	2	2	2	30.10	1.57
3	1	3	3	3	3	31.40	1.60
4	1	4	4	4	4	73.08	1.19
5	2	1	2	3	4	30.46	1.56
6	2	2	1	4	3	15.77	1.51
7	2	3	4	1	2	69.23	1.37
8	2	4	3	2	1	29.62	1.67
9	3	1	3	4	2	Through	Through
10	3	2	4	3	1	Through	Through
11	3	3	1	2	4	14.87	1.50
12	3	4	2	1	3	25.97	1.85
13	4	1	4	2	3	Through	Through
14	4	2	3	1	4	39.22	2.48
15	4	3	2	4	1	32.46	1.67
16	4	4	1	3	2	16.01	1.34

从表 3 的实验结果可以看出,采用紫外波段飞秒激光刻蚀 FPC 覆铜板铜层时,刻蚀深度和粗糙度随工艺参数的不同而变化,该变化过程非常复杂,难以采用统一的数学模型精确描述。因此优化设计时,优先保证刻蚀深度能够满足要求,即完全除去 FPC 覆铜板表面的铜层,在此基础上,寻求一个使刻蚀区域粗糙度更小的工艺参数。

在表 4 给出的极差分析结果中, k_1 为各个因素取第一水平时,响应实验结果的平均值, k_2 为每个因素取第二水平时,各个实验结果的平均值,以此类推;Range 为各个因素在 4 个水平均值下的极差值,根据极差值的大小可得出各因素对刻蚀深

度和粗糙度的影响权重。各因素对刻蚀深度的影响从大到小依次为 C、B、A、D、E,即扫描次数对刻蚀深度的影响权重最大,而激光频率的影响权重最小。分析刻蚀深度时,需要在完全去掉铜层的情况下,使刻蚀深度尽可能小,从而保证不会伤及基材层,对参数优化后选用 $A_2 B_4 C_3 D_2 E_3$ (A_2 即指因素 A 取第二水平, B_4 即指因素 B 取第四水平, C_3 即指因素 C 取第 3 水平, D_2 即指因素 D 取第 2 水平, E_3 即指因素 E 取第 3 水平);而各因素对刻蚀区域粗糙度的影响从大到小同样为 C、B、A、D、E,实验选择了粗糙度更小的一组工艺参数,即 $A_1 B_1 C_4 D_4 E_2$ 。

表 4 极差分析

Table 4 Range analysis

Item	Level average	Power /mW	Scanning speed /($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	Scanning times	Defocusing amount /mm	Frequency /kHz
Depth	k_1	38.93	50.70	16.95	38.89	39.71
	k_2	36.27	40.17	29.75	37.55	47.73
	k_3	48.01	36.99	45.96	38.37	37.18
	k_4	40.82	36.17	73.37	49.23	39.41
	Range	11.74	14.53	56.42	11.68	10.55
Roughness	k_1	1.41	1.42	1.41	1.75	1.54
	k_2	1.53	1.85	1.66	1.58	1.43
	k_3	1.68	1.54	1.92	1.50	1.65
	k_4	1.83	1.51	1.28	1.46	1.68
	Range	0.42	0.43	0.64	0.29	0.25

采用综合平衡法^[11-12]对选出的两种工艺参数进行优选:

1) 激光功率对刻蚀深度和粗糙度的影响权重都排在第 3 位,在两种工艺参数之下,铜层均已被完全去除且未伤及底层 PI,此时应追求表面平整,选择表面粗糙度更好的一组参数,即选择 A_1 ,故因素 A 取第 1 水平;

2) 扫描速度对两者的影响权重均排在第 2 位,当 B 取第 1 和第 4 水平时,FPC 表面铜层均已被去除,但 B 取第 1 水平时刻蚀深度为 $50.70\ \mu\text{m}$,激光已经伤及底层 PI,因此,因素 B 应该取第 4 水平;

3) 扫描次数对两者的影响权重都排在第 1 位,当因素 C 取第 3、第 4 水平时,铜层均已被去除,但 C 取第 4 水平时刻蚀深度达到 $73.37\ \mu\text{m}$,已接近材料的总厚度,激光能量过大,故因素 C 取第 3 水平;

4) 离焦量对两者的影响权重都排在第 4 位,当因素 D 取第 2、第 4 水平时,铜层均已被去除且并未伤及底层 PI,此时刻蚀区域粗糙度的优先级更高,

故因素 D 取第 4 水平;

5) 激光频率对两者的影响权重都排在第 5 位,当因素 E 取第 2、第 3 水平时,铜层均已被完全去除且未伤及底层 PI,此时应追求表面平整,选择表面粗糙度更好的一组参数,故因素 E 取第 2 水平。

根据上述分析结果,选择的最优参数组合为 $A_1 B_4 C_3 D_4 E_2$,即激光功率取 $280\ \text{mW}$,扫描速度取 $39\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$,扫描次数取 3,离焦量取 $0.3\ \text{mm}$,激光频率取 $36.5\ \text{kHz}$ 。

3.3 实验验证

采用上述最优参数对 FPC 覆铜板进行刻蚀,通过 3D 激光显微镜对刻蚀区域进行观测,观测图像如图 9 所示,其中刻蚀区域的平均深度为 $35.73\ \mu\text{m}$,平均粗糙度为 $1.21\ \mu\text{m}$,结果表明,当前刻蚀区域位于胶粘层,铜层已完全去除且未损伤基材层,刻蚀深度达到要求。

从图 9(a)可以看出,在显微相机的拍摄环境下,表层铜质材料会反射光源光束,从而呈现“光亮”

的效果,以此图像效果作为评判依据,刻蚀区域边缘与角落无铜质材料残留,刻蚀区域底面较为平整,刻蚀区域表面平整度达到预期要求。

上述测评方法均从宏观角度对刻蚀结果进行评

判,从微观角度对刻蚀效果进行分析时,可以选择对刻蚀区域进行元素含量测量,测量结果如图 10 所示。同时,对未刻蚀的 FPC 覆铜板铜层元素进行测量,两者各元素原子数分数如表 5 所示。

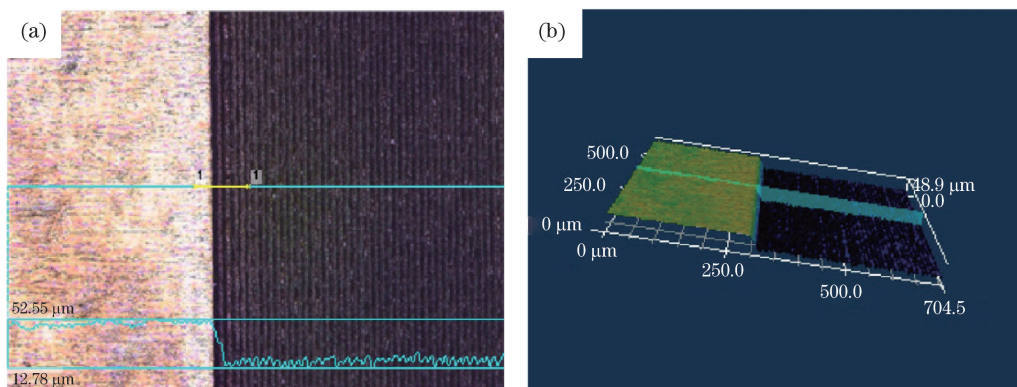


图 9 3D 激光显微镜测量结果。(a) 刻蚀窗口; (b) 3D 形貌

Fig. 9 Measurement results of 3D laser microscope. (a) Etching window; (b) 3D morphology

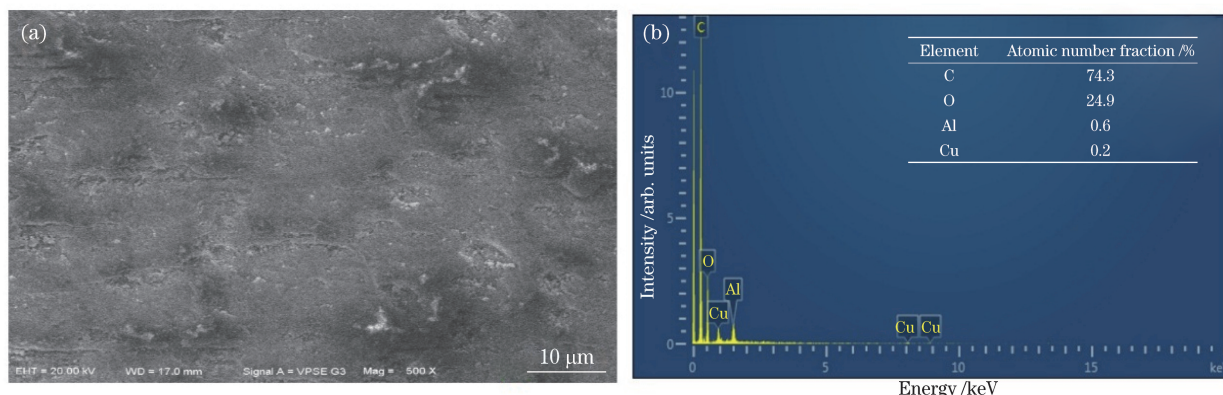


图 10 刻蚀区域 EDS 测量结果。(a) 刻蚀区域微观形貌; (b) EDS 谱图

Fig. 10 EDS measurement results of etched area. (a) Micro morphology of etched area;

(b) EDS spectrum

表 5 各元素原子数分数

Table 5 Atomic number fraction of each element

Area	Atomic number fraction /%		
	C	O	Cu
Original FPC board layer	0.2	1.1	98.7
Etched bottom area	74.3	24.9	0.2

由表 5 结果可知,相比于刻蚀前,刻蚀后区域表面的 C、O 元素含量均大幅上升,铜层以下的胶粘层以及 PI 层所含的主要元素为 C、O;而 Cu 元素的含量大幅下降,相对于整体元素分布,Cu 元素在刻蚀区域的占比微乎其微,说明飞秒激光已完全除去 FPC 覆铜板的铜层。由于刻蚀后材料表面还含有微量 Cu 元素,因此,还需测量材料表面的导电性能,万用表的测量结果表明,刻蚀后材料表面不导

电,说明该工艺参数合理有效。

综上所述,采用优化后的工艺参数对 FPC 覆铜板铜层进行飞秒激光刻蚀,可以将铜层完全去除,得到高精度、高质量的刻蚀区域。

4 结 论

综合分析单因素实验和正交实验的结果可知,在 FPC 铜层的刻蚀实验中,各个参数对刻蚀效果的影响权重依次为扫描次数、扫描速度、平均功率、离焦量以及重复频率。采用优化后的参数刻蚀铜层后,铜含量下降到初始含量(原子数分数)的 0.2%,同时完整保留了底层的 PI,该结果为细微线路的成形提供了依据。

使用飞秒激光刻蚀 FPC 覆铜板表面的部分铜层,剩余部分可组成细微线路,即用于线路成形制

造,这对于飞秒激光应用于细微线路成形制造具有重要指导意义,但对于其与基材层的相互作用还需要进行进一步的研究和论证。

参 考 文 献

- [1] Zhang Y S, Peng Y, Liang S Y, *et al.* The quick inspection system for flexible printed circuit board based on image contrast technology[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2005, 41(2): 220-222.
张宜生, 彭毅, 梁书云, 等. 基于图象比对技术的柔性印刷电路板检测系统[J]. *计算机工程与应用*, 2005, 41(2): 220-222.
- [2] Zhang J P. A new process for PCB fabrication[C]// *China Lighting Forum-Proceedings of the Symposium on Green Lighting and Low Carbon Technology*, September 16-17, 2010, Beijing, China. [S.l.: s.n.], 2010: 204-208.
张金平. 一种 PCB 制作新工艺[C]// *中国照明论坛——绿色照明与低碳技术科技研讨会论文集*, 2010年9月16日-17日, 中国, 北京. [出版地不详: 出版者不详] 2010: 204-208.
- [3] Fu J Z. Development status and trend of intelligent manufacturing equipment[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Magazine*, 2014, 31(8): 959-962.
傅建中. 智能制造装备的发展现状与趋势[J]. *机电工程*, 2014, 31(8): 959-962.
- [4] Robinson G M, Jackson M J. Femtosecond laser micromachining of aluminum surfaces under controlled gas atmospheres[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2006, 15(2): 155-160.
- [5] Chkalov R V, Kochuev D A, Khorkov K S, *et al.* Precision formation of PCB topologies by femtosecond laser radiation[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1164(1): 012018.
- [6] Zhang F, Zeng X Y, Li X Y, *et al.* Laser etching and cutting printed circuit board by 355 nm and 1064 nm diode pumped solid state lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(10): 1637-1643.
张菲, 曾晓雁, 李祥友, 等. 355 nm 和 1064 nm 全固态激光器刻蚀印刷电路板[J]. *中国激光*, 2008, 35(10): 1637-1643.
- [7] Ling L, Lou Q H, Ye Z H, *et al.* Ablation of circuit board by pulsed UV laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(10): 953-955.
凌磊, 楼祺洪, 叶震寰, 等. 紫外激光刻蚀多层线路板初步研究[J]. *中国激光*, 2003, 30(10): 953-955.
- [8] Shi K M, Wang M D, Chen T Y, *et al.* Study on technology and quality of etching copper clad laminate with femtosecond laser[J]. *Applied Laser*, 2018, 38(1): 81-88.
施克明, 王明娣, 陈添禹, 等. 飞秒激光扫描刻蚀覆铜板工艺及质量研究[J]. *应用激光*, 2018, 38(1): 81-88.
- [9] Ni C, Wang M D, Shi K M, *et al.* Study on optimization of orthogonal test for femtosecond laser etching copper clad laminate[J]. *Applied Laser*, 2018, 38(5): 787-793.
倪超, 王明娣, 施克明, 等. 飞秒激光刻蚀覆铜板的正交试验优化研究[J]. *应用激光*, 2018, 38(5): 787-793.
- [10] Zhu R, Zhang Y K, Sun G F, *et al.* Numerical simulation of residual stress fields in three-dimensional flattened laser shocking of 2024 aluminum alloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(8): 0802007.
朱然, 张永康, 孙桂芳, 等. 三维平顶光束激光冲击 2024 铝合金的残余应力场数值模拟[J]. *中国激光*, 2017, 44(8): 0802007.
- [11] Wang H J, Li Y L, Li P. Orthogonal experiment on laser cutting of AZ31B magnesium aluminum alloys[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(10): 101405.
王洪建, 李永亮, 李平. 激光切割 AZ31B 镁铝合金正交实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(10): 101405.
- [12] Chen T Y, Wang M D, Yang G L, *et al.* Removal of cable shield material by YAG laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 1214002.
陈添禹, 王明娣, 杨桂林, 等. 利用 YAG 激光去除线缆屏蔽材料[J]. *光学学报*, 2017, 37(12): 1214002.