

激光与光电子学进展

双激光刻蚀与清洗挠性覆铜板工艺及质量研究

黄支慧¹, 叶其科², 叶其教², 廖健宏^{1*}¹华南师范大学信息光电子科技学院, 广东 广州 510006;²力捷科激光科技股份有限公司, 广东 广州 511450

摘要 针对当前纳秒激光刻蚀覆铜板盲孔普遍存在的孔底残胶(堵孔)、过蚀、侧壁损伤和后续处理工序繁琐等问题,提出了双激光同步刻蚀与清洗的技术,采用纳秒激光和纳秒匹配皮秒激光对覆铜板进行了一阶盲孔对比刻蚀试验。由试验结果得知,采用纳秒匹配皮秒激光在厚度为 49.00 μm 的覆铜板上刻蚀出了直径为 122.24 μm 、深度为 $(37.02 \pm 0.04) \mu\text{m}$ (加工要求 37.00 μm)、孔底粗糙度为 0.16 μm 、表面粗糙度为 0.25 μm 且侧壁无缩胶的盲孔。研究表明,双激光刻蚀与清洗覆铜板的工艺大幅度提高了加工精度和质量,获得了高品质盲孔,其中纳秒匹配皮秒激光在刻蚀深度(精准性)、洁净度、锥度和粗糙度方面均优于纳秒激光。

关键词 激光技术; 双激光刻蚀; 挠性覆铜板; 清洗; 盲孔

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222190

Study on Process and Quality of Dual Laser Etching and Cleaning Flexible Copper Clad Laminate

Huang Zhihui¹, Ye Qike², Ye Qijiao², Liao Jianhong^{1*}¹School of Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, Guangdong, China;²Lijieke Laser Technology Co., Ltd., Guangzhou 511450, Guangdong, China

Abstract We propose a dual laser simultaneous etching and cleaning technique to solve the issues of residual glue (blockage), over-etching, sidewall damage, and tedious subsequent processing of blind holes in copper clad laminates by nanosecond laser etching. First-order blind hole etching experiments were conducted on copper clad laminates using nanosecond and nanosecond-matched picosecond lasers. Furthermore, a blind hole with a 122.24 μm diameter, a $(37.02 \pm 0.04) \mu\text{m}$ depth (37.00 μm processing requirement), a 0.16 μm bottom roughness, and a 0.25 μm surface roughness on the side walls was etched without shrinkage on a 49.00 μm -thick copper clad plate using the nanosecond-matched picosecond laser. The results indicate a significant improvement in the processing accuracy and quality of the dual laser etching and cleaning process for the copper clad plates, thereby obtaining high-quality blind holes. In conclusion, the nanosecond-matched picosecond laser shows superior etching depth (accuracy), cleanliness, taper, and roughness compared to the nanosecond laser.

Key words laser technique; dual laser etching; flexible copper clad laminate; cleaning; blind hole

1 引言

挠性覆铜板(FCCL)作为柔性线路板(FPC)的基板材料,具有重量轻、可挠性、体积小和耐热性良好等突出优势,广泛应用于电子产品中以达到微型化和便携式的目的^[1],符合当前微型机器人^[2]、新能源汽车、5G 通信器件^[3]和柔性显示器^[4]等为代表的高精密电子

关联行业的发展趋势。但是以机械钻孔、等离子成孔和电化学腐蚀等为代表的传统微孔加工方式因受限于加工精度、效率、应力大和污染等因素^[5],而阻碍了 FPC 的应用与发展。

激光微孔加工具有对加工材料的普适性、非接触、高精度、低应力与绿色环保等显著优势,近年来在柔性线路板加工中得到大规模的应用。华中科技大学张菲

收稿日期: 2022-08-01; 修回日期: 2022-08-13; 录用日期: 2022-09-05; 网络首发日期: 2022-09-15

通信作者: *liaojh@scnu.edu

等^[6]采用 355 nm 全固态激光器对柔性线路板进行盲孔加工,通过优化工艺参数得到孔底粗糙度约为 1.063 μm 的盲孔,避免了微孔中心加工过深问题。傅茜等^[7]对比了 1064 nm 和 355 nm 激光刻蚀覆铜板的效果,得出红外激光在覆铜板刻蚀中更具优势。倪超等^[8]利用飞秒激光在铜厚度为 18 μm 的覆铜板上刻蚀出了深度约为 17.86 μm ,粗糙度约为 0.56 μm 的窗口。施克明等^[9]利用紫外飞秒激光对覆铜板进行刻蚀研究,在 18.00 μm 厚的铜层上刻蚀出了深度约为 17.76 μm ,粗糙度约为 0.52 μm 的窗口。张晓等^[10]采用紫外飞秒激光,通过正交试验法在厚度为 75.59 μm 的聚酰亚胺柔性覆铜板上进行刻蚀,分析了各参数对刻蚀深度和粗糙度的影响,并获得了最佳加工参数。

当前为提高挠性覆铜微孔加工精度和质量,研究工作主要集中在优化纳秒激光加工参数或采用超快激光(以飞秒为主)方面:前者局限于本身的属性,特别是过大的热效应问题,难以在本质上取得突破;后者存在设备成本高与加工效率较低等问题。而目前采用双激光联合刻蚀与清洗 FCCL 的研究报道较少。基于此,本文采用双激光,以分层刻蚀方式对 FCCL 进行一阶盲孔加工:首先利用紫外纳秒激光,以同心圆扫描法对铜层进行开窗;再分别采用紫外纳秒和紫外皮秒激光,以螺旋扫描法对聚合物层进行刻蚀,同时对盲孔整体进行同步的清洗;最后基于试验数据与采集的图像,以刻蚀深度的精准性、孔底和表面粗糙度为主要评判指标,结合整体形貌等方面综合对比分析了纳秒与皮秒激光加工的效果,同时检验本工艺(刻蚀与清洗)的加工质量,实现双激光对 FCCL 高精度、高质量和高洁净度的盲孔加工。

2 激光与材料相互作用机制

紫外激光与 FCCL 作用机制包括光热去除和光化学剥离^[11]。其中,在刻蚀金属时主要为光热机制,在强激光作用下,由于强烈的韧致辐射,趋肤层的自由电子吸收能量^[12]出现电子热化现象,此时电子呈现费米-狄拉克分布^[13],吸收的光子能量通过电子-声子耦合传递到晶格,晶格建立热平衡所需时间约为 100 ps^[14]。此外,不同功率密度下光热机制存在 4 个作用阶段如图 1 所示:图 1(a)为趋肤层吸收热量;图 1(b)为材料熔化凹陷(此时热波速率高于气化速率,伴随气压的升高,材料进一步向深处推进);图 1(c)为蒸发喷射;图 1(d)为气化喷射成孔^[15]。而激光输出不同功率密度所对应的主导阶段是不一样的。



图 1 不同功率密度下激光与材料相互作用的四个阶段

Fig. 1 Four stages of laser-material interaction at different power densities

的,如当输出功率密度达 $10^8\sim 10^{10}\text{ W}/\text{cm}^2$ 时,气化喷射占主导的方式去除材料,极大地减少了热效应的产生及影响。当紫外激光与聚合物作用时,同时存在光热和光化学剥离两种机制,输出的单光子能量为 3.47 eV,大于常态下聚酰亚胺中的 C—C 键和 C—N 键的键能(约为 3.4 eV),因此可直接切断这两种化学键^[16],实现相对意义上的冷加工。总体而言,为提高加工质量,应减少或避免热效应的影响,即在达到材料损伤阈值条件下,一方面以气化方式去除材料,另一方面,由于脉冲宽度与材料中电子-声子弛豫时间的关系决定了加工过程中是否有热效应的出现^[17],因此需要控制激光与材料作用时间 $\leq 10^{-12}\text{ s}$ (皮秒量级),即在晶格间发生能量传递(声子-声子弛豫)前结束^[18]。超快激光可同时满足以上条件,在皮秒脉宽下输出峰值功率极高的脉冲,瞬间达到材料的损伤阈值。此外,超快激光脉冲宽度短于绝大多数物理化学过程的特征时间^[19],且在相同频率下输出时具有更大的占空比,可获得更长的冷却时间,进一步抑制了热效应的影响^[20],此时非热过程占主导,因此加工精度和质量可得到大幅度的提高。

3 试验设计

本试验采用厚度为 49 μm 的双面 FCCL 作为试样,其中:铜箔(Cu)厚度为 12 μm (主要起导电作用);聚酰亚胺(PI)厚度为 25 μm (提供支撑作用);本次加工的一阶盲孔直径为 120 μm 、深度为 37 μm 。激光加工设备参数如表 1 所示。利用 LEXT OLS500 3D 激光共聚焦显微镜观测,采用 1405 nm 激光二极管作为光源和高灵敏度光电倍增管获取共聚焦图形,横向分辨率为 0.12 μm 。

表 1 激光加工试验设备参数

Item	Nanosecond laser	Picosecond laser
Production company	DCT	DCT
Equipment model	Direct Laser S3	Direct Laser S5
Power /W	15	15
Wavelength /nm	355	355
Beam type	Gaussian beam	Gaussian beam
Pulse width /ns	20	15×10^{-3}
Light spot diameter / μm	30	25

图 2 为试验方案。第一阶段采用紫外纳秒激光,利用同心圆扫描法,通过调整激光参数,在覆铜板上刻蚀出直径 120 μm 、厚度 12 μm 的窗口,实现对铜箔的完全去除,同时暴露聚合物层。第二阶段分别采用纳秒和皮秒激光对聚合物层进行刻蚀与清洗,利用螺旋扫描法,以激光功率、频率、扫描次数与扫描速度为四因素,各因素取四水平因子设计正交试验。通过分析刻蚀深度和粗糙度,获得各因素对刻蚀效果影响的权重

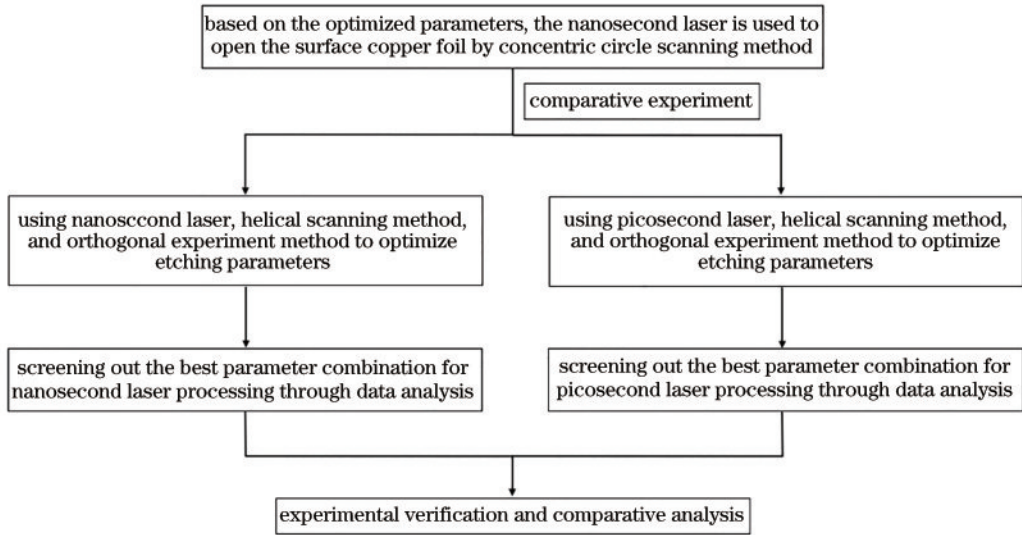


图 2 试验方案

Fig. 2 Experimental scheme

及最佳水平,通过综合平衡法筛选出最佳加工参数组合。最后,基于最佳参数组合进行验证和对比试验。图 3(c)给出了螺旋扫描法刻蚀及清洗覆铜板示意图,其中相邻路径间距为 $30\ \mu\text{m}$ 。为达到对表面重积层的清洗目的,螺旋顶面半径设置为 $80\ \mu\text{m}$,即在盲孔半径的基础上往外延展 $20\ \mu\text{m}$,在微孔周围形成一环形清

洗区。试验中使用金相显微镜和激光共聚焦显微镜对盲孔进行实时的快速扫描并采集图像,同时测量盲孔的刻蚀深度及孔底与表面粗糙度等数据。为更准确反映加工质量和误差问题,每一组参数都进行了 100 次重复试验,并且以测量面粗糙度而非线粗糙度来作为评判依据。

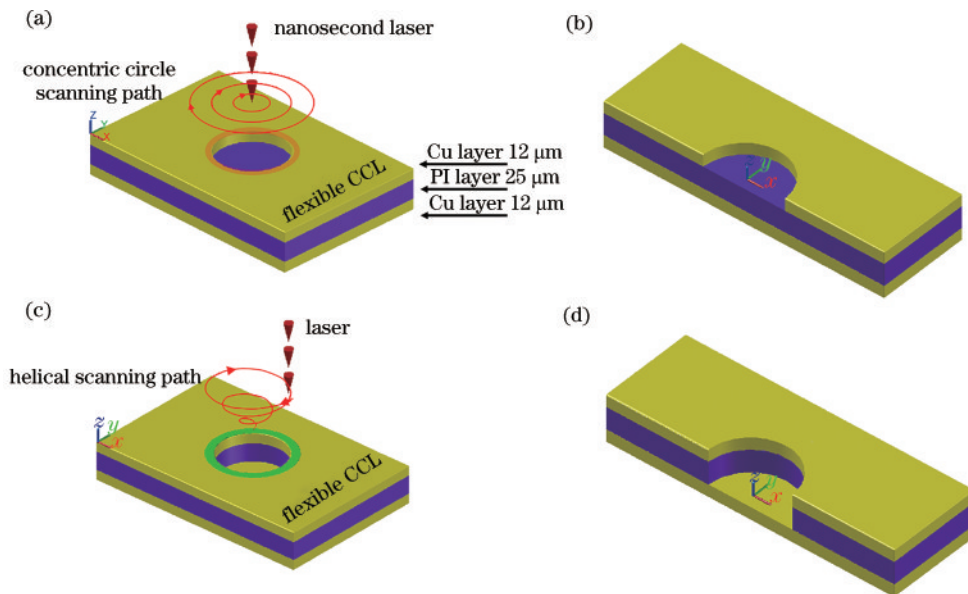


图 3 FCCL 一阶盲孔加工示意图。(a)纳秒激光同心圆扫描法刻蚀铜箔示意图;(b)铜箔层刻蚀剖面图;(c)螺旋扫描法刻蚀与清洗盲孔示意图;(d)一阶盲孔剖面示意图

Fig. 3 FCCL first-order blind hole machining schematic. (a) Schematic diagram of copper foil etching by nanosecond laser concentric scanning method; (b) copper foil layer etching profile; (c) schematic diagram of spiral scanning method of etching and cleaning blind hole; (d) schematic diagram of the first-order blind hole section

4 试验结果分析

4.1 纳秒激光开窗试验结果分析

图 4 给出了激光开窗加工图,其中图 4(a)和(b)是

在功率 $P=6\ \text{W}$ 、频率 $f=100\ \text{kHz}$ 、扫描速度 $v=550\ \text{mm/s}$ 、扫描次数 $n=2$ 的条件下,分别利用金相显微镜和激光共聚焦显微镜观测的图像。获得了开窗直径 $D=122.24\ \mu\text{m}$ 、偏差值 $2.24\ \mu\text{m}$ 的窗口,刻蚀深度

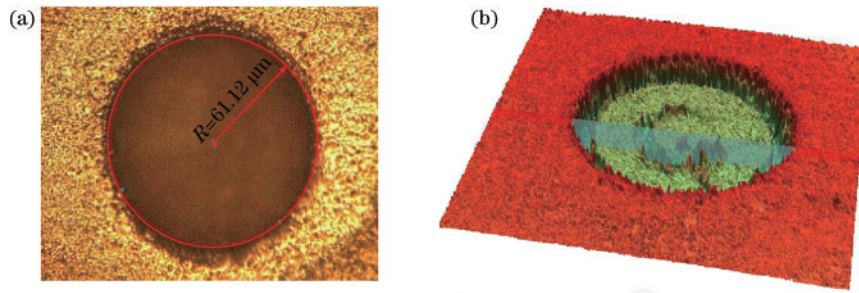


图 4 激光刻蚀铜层样貌图。(a)光学显微镜下半径测量图;(b)激光共聚焦显微镜下的三维高度图

Fig. 4 Laser etched copper layer morphology. (a) Radius measurement chart under optical microscope; (b) three-dimensional height map under laser confocal microscope

约为 $14.28 \mu\text{m}$,对聚合物层的过蚀量较小,实现了对铜层的完全去除。从图 4(b)可以看出,微孔表面边缘存在明显的喷射重积物和刺状物,测得表面粗糙度为 $2.13 \mu\text{m}$ 。

4.2 正交试验结果分析

4.2.1 纳秒激光正交试验结果分析

在开窗基础上继续进行刻蚀,依据大量试验数据,初步确定纳秒激光刻蚀聚合物层各加工参数的数值范围,基于激光功率(A)、重复频率(B)、扫描次数(C)和扫描速度(D)四因素,各因素取四水平因子设计正交试验,表 2 为因素水平表。

表 2 因素水平表

Table 2 Factor level table

Level	Power / W	Repetition frequency / kHz	Scanning times	Scanning speed / ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	3.0	80	1	700
2	3.5	90	2	800
3	4.0	100	3	900
4	4.5	110	4	1000

根据表 2 各因素和水平因子设计 $L_{16}(4^4)$ 正交试验,表 3 给出了正交试验因素设计及试验结果。由表 3 可知,不同加工参数组合对应的盲孔深度和粗糙度不同,在分析数据找出最佳加工组合时,评判指标中加工深度的权重大于粗糙度。

表 4 给出正交试验数据的极差分析结果,其中 k 值表征某因素在不同水平下刻蚀深度和粗糙度对应的均值。对于刻蚀深度,以达到刻蚀深度为优先,在每一因素中, k 值越接近 $37.00 \mu\text{m}$,则说明所在的水平因子即为刻蚀深度指标下此因素的最佳参数,如表 4 中在刻蚀深度因素下,扫描次数水平中 k_2 相比于 k_3 更接近 $37.00 \mu\text{m}$,但 k_2 水平下并未达到刻蚀要求深度,所以应选择 k_3 对应的水平因子。对于粗糙度,在某一因素下, k 值越小,则对应水平因子为该因素在粗糙度指标下的最佳参数。Range(R 值)为某因素下 k 值的极差,反映了各因素对试验结果的影响程度(R 值与关联性成正比)。由表 4 可知,各因素对刻蚀深度的影响权重为

表 3 正交试验因素设计及结果

Table 3 Orthogonal experimental factor design and results

Serial number	Level				Depth / μm	Roughness of hole bottom / μm
	A	B	C	D		
1	1	1	1	1	34.42	1.78
2	1	2	2	2	34.06	1.67
3	1	3	3	3	33.87	1.12
4	1	4	4	4	33.02	1.05
5	2	1	2	3	37.45	0.76
6	2	2	1	4	35.86	1.20
7	2	3	4	1	38.43	0.87
8	2	4	3	2	37.86	0.78
9	3	1	3	4	39.04	0.98
10	3	2	4	3	39.84	1.03
11	3	3	1	2	35.66	1.20
12	3	4	2	1	37.64	0.87
13	4	1	4	2	40.76	1.20
14	4	2	3	1	39.78	1.23
15	4	3	2	4	38.24	0.88
16	4	4	1	3	35.02	1.02

$A > C > B > D$,其中平均功率影响最显著。通过比较各因素 k 值,可选 $A_2B_2C_3D_2$ 。各因素对粗糙度影响大小为 $A > B > C > D$,平均功率影响最显著,以 k 值最小为原则,可选组合 $A_2B_4C_2D_3$ 。

采用综合平衡法^[21]对筛选出的两参数组合进行优选:

1)功率。两组参数中第一因素的最佳水平因子均为 A_2 ,故选择 A_2 。

2)重复频率。两组参数中重复频率最佳水平因子分别为 B_2 和 B_4 , B_2 虽然已实现对聚合物层的完全去除,但出现了过蚀现象,且对应的粗糙度最大, B_4 粗糙度最小,但存在明显的刻蚀深度不足问题,故选 B_3 。

同理,可得加工次数和速度对应的优化参数。则纳秒激光在此工序的最佳参数组合为 $A_2B_3C_3D_2$,即功率 $P = 3.5 \text{ W}$,重复频率 $f = 100 \text{ kHz}$,加工次数 $n = 3$,扫描速度 $V = 800 \text{ mm/s}$ 。

表 4 极差分析
Table 4 Range analysis

Item	Level	Power /W	Repetition frequency /kHz	Scanning times	Scanning speed / (mm·s ⁻¹)
Depth	k ₁	33.84	37.92	35.24	37.57
	k ₂	37.40	37.39	36.85	37.09
	k ₃	38.05	36.55	37.64	36.55
	k ₄	38.45	35.89	38.01	36.54
	R	4.61	2.03	2.77	1.03
Roughness	k ₁	1.44	1.18	1.35	1.19
	k ₂	0.90	1.30	1.04	1.21
	k ₃	1.03	1.05	1.06	0.99
	k ₄	1.08	0.93	1.05	1.03
	R	0.54	0.37	0.31	0.23

4.2.2 皮秒激光正交试验结果分析

采用皮秒激光同步刻蚀PI层和清洗盲孔,评价指标及原则与4.2.1节一致。基于上述四个加工因素,各因素取四水平,利用在线数据分析统计软件SPSSAU设计正交试验和数据分析处理。表5为因素水平表。

表 5 因素水平表
Table 5 Factor level table

Level	Power /W	Repetition frequency /kHz	Scanning times	Scanning speed / (mm·s ⁻¹)
1	3	100	4	800
2	4	120	5	900
3	5	140	6	1000
4	6	160	7	1100

基于表5各因素和水平因子设计L₁₆(4⁴)正交试验,表6给出正交试验设计及试验结果。

从表6可以看出,不同的参数组合的刻蚀深度在34.35~38.24 μm之间波动,同时存在未完全刻蚀和过蚀现象。孔底粗糙度波动范围在0.23~0.75 μm之间,粗糙度总体变化不大,可知皮秒激光加工时存在可忽略或不存在热效应。

由表7可知,对于刻蚀深度,各因素对刻蚀深度影响权重为A>B>C>D,其中输出功率影响权重最大。由各因素最佳水平可知,参数组合可选A₃B₁C₄D₁。同理,对于粗糙度,各因素影响权重为A>D>C>B,由最佳水平可选参数组合为A₄B₂C₂D₁。经综合平衡,选取的参数组合为A₃B₁C₄D₁,即功率P=5 W,重复频率f=80 kHz,加工次数n=7,扫描速度V=800 mm/s。

4.3 试验验证与对比分析

基于上述纳秒与皮秒激光所选最佳参数组合,分别对覆铜板进行刻蚀。由表8可知,在优化参数下,两种激光的加工精度和质量都得到了显著的提高,其中皮秒激光作用下刻蚀深度、孔底和表面粗糙度均优于

表 6 正交试验因素设计及结果

Table 6 Orthogonal experimental factor design and results

Serial number	Level				Depth / μm	Roughness of hole bottom / μm
	A	B	C	D		
1	1	1	1	1	35.85	0.57
2	1	2	2	2	34.76	0.60
3	1	3	3	3	34.52	0.65
4	1	4	4	4	34.35	0.75
5	2	1	2	3	36.87	0.47
6	2	2	1	4	36.65	0.58
7	2	3	4	1	36.48	0.44
8	2	4	3	2	36.20	0.62
9	3	1	3	4	37.67	0.23
10	3	2	4	3	37.35	0.25
11	3	3	1	2	36.75	0.29
12	3	4	2	1	36.02	0.28
13	4	1	4	2	38.24	0.28
14	4	2	3	1	37.90	0.31
15	4	3	2	4	36.26	0.31
16	4	4	1	3	35.24	0.48

纳秒激光。纳秒激光作用下的孔底:从图5(a)可以看出,底部亮度较暗,且存在零散黑点(为未去除的聚合物熔融物和铜碳混合物);从图5(c)可以看出,底部出现了较为明显的波状现象(相较于皮秒激光,纳秒激光作用时间更长,剩余热量通过热效应向作用区域周围扩散,导致刻蚀形成的沟壑起伏增大,最终使得粗糙度变大及铜层出现损伤)。皮秒激光作用下的孔底:图5(b)的亮度高(铜层对光的反射,可用以反映洁净度)且均匀性好,几乎没出现暗点与遮挡物;由图5(c)、图6(b)和(d)可知,底部平整度和洁净度极高,凸起量可忽略不计,即实现了聚合物与残留物的完

表 7 极差分析
Table 7 Range analysis

Item	Level	Power /W	Repetition frequency /kHz	Scanning times	Scanning speed /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)
Depth	k_1	34.87	37.16	36.56	36.56
	k_2	36.55	36.67	35.98	36.49
	k_3	36.95	36.00	36.57	36.00
	k_4	36.91	35.45	36.61	36.23
	R	2.08	1.71	0.63	0.56
	Optimal level	A_3	B_1	C_4	D_1
Roughness	k_1	0.64	0.39	0.48	0.4
	k_2	0.53	0.44	0.42	0.45
	k_3	0.26	0.42	0.45	0.46
	k_4	0.35	0.53	0.43	0.47
	R	0.38	0.14	0.06	0.07
	Optimal level	A_4	B_2	C_2	D_1

表 8 优化工艺蚀刻结果
Table 8 Optimization process etching results

Item	Depth / μm	Roughness of hole bottom / μm	Surface roughness / μm
Nanosecond laser	37.25	0.65	0.57
Picosecond laser	37.02	0.16	0.25

全去除,同时保护了基层形貌的完好。表面清洗区:由图 5(a)可知,在微孔边缘存在明显的环形清洗区,纳

秒激光作用下清洗范围和刻蚀划痕均大于皮秒激光,虽然重积物得到清洗,但对铜层造成了损伤;从图 5(b)和图 6(a)所示的盲孔表面可知,皮秒激光作用下,无明显烧蚀现象,表面飞溅物得到了有效地去除,且刻蚀痕迹较浅,有效地保护了铜层的形貌,激光清洗后表面粗糙度从 $2.13 \mu\text{m}$ 下降到 $0.25 \mu\text{m}$,获得了极大的改善。侧壁:图 6(b)和(d)展示了盲孔的剖切图,由图可知侧壁均匀性良好,没有出现悬挂物、无明显的缩胶和齿状刻蚀划痕现象。

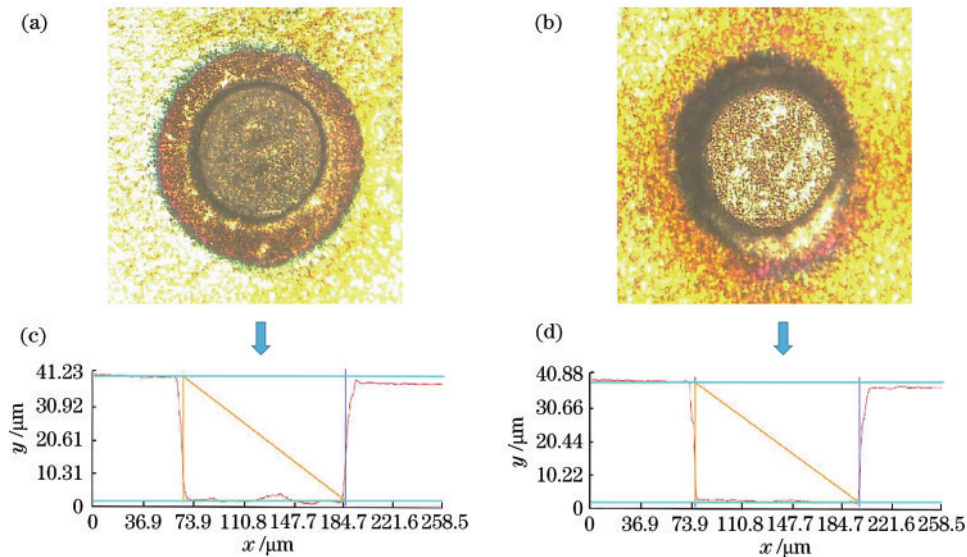


图 5 激光刻蚀与清洗盲孔观测图。(a)光学显微镜下纳秒激光刻蚀与清洗形貌图;(b)光学显微镜下皮秒激光刻蚀与清洗形貌图;(c)纳秒激光加工盲孔二维轮廓图;(d)皮秒激光加工盲孔二维轮廓图

Fig. 5 Observation diagram of laser etching and cleaning blind hole. (a) Nanosecond laser etching and cleaning morphology under optical microscope; (b) picosecond laser etching and cleaning morphology under optical microscope; (c) nanosecond laser processing blind hole two-dimensional profile; (d) picosecond laser processing blind hole two-dimensional contour diagram

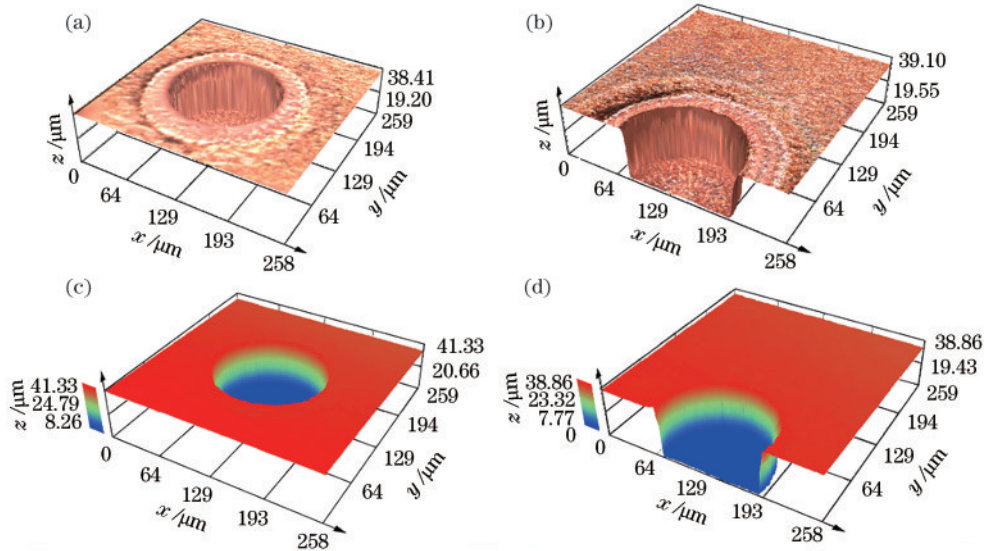


图6 优化参数下皮秒激光刻蚀与清洗盲孔图。(a) 激光共聚焦显微镜下三维彩色图;(b) 剖面彩色图;(c) 三维高度图;(d) 剖面高度图

Fig. 6 Optimized parameters for picosecond laser etching and cleaning of blind hole. (a) Three-dimensional color map under laser confocal microscope; (b) profile color map; (c) three-dimensional height map; (d) profile height map

5 结 论

本文采用双激光对覆铜板进行一阶盲孔刻蚀与清洗试验,综合对比加工结果得到以下结论:1)利用正交试验法对试验进行优化,通过极差分析结合综合平衡法获得了最佳参数组合,极大地提高了试验的效率、加工效果和准确度。2)在优化参数加工下,对 FCCL 进行刻蚀清洗,获得了孔径为 $122.24\ \mu\text{m}$ 、深度为 $37.02\ \mu\text{m}$ 、孔底面粗糙度为 $0.16\ \mu\text{m}$ 、表面粗糙度为 $0.25\ \mu\text{m}$ 的高品质盲孔,经对比分析可知,皮秒激光在各项加工指标中更具优势。3)采用激光对盲孔进行清洗,大大简化加工流程,全面提高了盲孔的洁净度,对表面的清洗,不仅实现了对重积物的去除(表面粗糙度由 $2.13\ \mu\text{m}$ 下降到 $0.25\ \mu\text{m}$),且对铜箔的损伤极小,最大程度保护了铜层的良好形貌。

此项研究对提高盲孔加工精度和质量,特别是解决当前激光微孔加工领域普遍存在的残留物堵孔而导致电路无法导通的问题与开发相关设备具有重要的参考和指导意义。

参 考 文 献

- [1] MacLeod P, Partnership P F. A review of flexible circuit technology and its applications[M]. Loughborough: PRIME Faraday Partnership, 2002.
- [2] Edqvist E, Snis N, Mohr R C, et al. Evaluation of building technology for mass producible millimetre-sized robots using flexible printed circuit boards[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009, 19(7): 075011.
- [3] Song R G, Zhao X, Wang Z, et al. Sandwiched graphene clad laminate: a binder-free flexible printed circuit board for 5G antenna application[J]. Advanced Engineering Materials, 2020, 22(10): 2000451.
- [4] Phung T H, Jeong J, Gafurov A N, et al. Hybrid fabrication of LED matrix display on multilayer flexible printed circuit board[J]. Flexible and Printed Electronics, 2021, 6(2): 024001.
- [5] 张骆. 飞秒激光并行加工方法及在 FPC 微孔加工中的应用研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2018: 10-21. Zhang L. Femtosecond parallel processing method and its application in FPC micro-hole processing[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2018: 10-21.
- [6] 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. Zhang F, Duan J, Zeng X Y, et al. Study of blind holes drilling on flexible circuit board using 355 nm UV laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(12): 3143-3148.
- [7] 傅茜, 张菲, 蒋明, 等. 1064 nm 和 355 nm 激光扫描刻蚀覆铜板工艺及质量研究[J]. 激光技术, 2014, 38(4): 435-440. Fu X, Zhang F, Jiang M, et al. Study on technology and quality of etching copper clad laminate with 1064 nm and 355 nm laser[J]. Laser Technology, 2014, 38(4): 435-440.
- [8] 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. 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.
- [9] 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. 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.
- [10] 张晓, 刘凯, 王明娣, 等. 基于飞秒激光的覆铜板刻蚀

- 工艺[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1214003.
- Zhang X, Liu K, Wang M D, et al. Etching technology for copper-clad laminates based on femtosecond laser[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1214003.
- [11] Shin B S, Oh J Y, Sohn H. Theoretical and experimental investigations into laser ablation of polyimide and copper films with 355-nm Nd: YVO₄ laser [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187/188: 260-263.
- [12] Bäuerle D. Laser processing and chemistry[M]. Berlin: Springer, 2000: 291-292.
- [13] Shah J. Coherent spectroscopy of semiconductors[M]// Ultrafast spectroscopy of semiconductors and semiconductor nanostructures. Springer series in solid-state sciences. Heidelberg: Springer, 1999, 115: 27-131.
- [14] 阿占文, 吴影, 肖宇, 等. 超快激光微孔加工工艺研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(8): 0802013.
- A Z W, Wu Y, Xiao Y, et al. Research progresses of process technology in ultrafast laser micro-hole drilling [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(8): 0802013.
- [15] 熊厚. 纳秒激光薄铝板精密打孔研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2016: 6-11.
- Xiong H. Nanosecond laser drilling of thin aluminum sheets[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2016: 6-11.
- [16] Yung K C, Zeng D W, Yue T M. XPS investigation of Upilex-S polyimide ablated by 355 nm Nd: YAG laser irradiation[J]. Applied Surface Science, 2001, 173(3/4): 193-202.
- [17] von der Linde D, Sokolowski-Tinten K, Bialkowski J. Laser-solid interaction in the femtosecond time regime[J]. Applied Surface Science, 1997, 109/110: 1-10.
- [18] Chichkov B N, Momma C, Nolte S, et al. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids[J]. Applied Physics A, 1996, 63(2): 109-115.
- [19] 李佳群, 闫剑锋, 李欣, 等. 透明介质材料的超快激光微纳加工研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(2): 0202019.
- Li J Q, Yan J F, Li X, et al. Research advancement on ultrafast laser microprocessing of transparent dielectrics [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(2): 0202019.
- [20] 曹嘉冀, 修思羽, 许金凯, 等. 飞秒激光制备仿生功能微纳结构及其应用[J]. 中国激光, 2022, 49(10): 1002702.
- Cao J J, Xiu S Y, Xu J K, et al. Fabrication of bioinspired functional micro-nano structures by femtosecond laser and their applications[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(10): 1002702.
- [21] 王洪建, 李永亮, 李平. 激光切割 AZ31B 镁铝合金正交试验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(10): 101405.
- Wang H J, Li Y L, Li P. Orthogonal experimental research on laser cutting AZ31B magnesium-aluminum alloys[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10): 101405.