

激光与光电子学进展

LCP 挠性覆铜板紫外激光去膜工艺分析

程立, 吴超*, 陈燕, 熊政军

中南民族大学激光与智能制造研究院, 湖北 武汉 430074

摘要 液晶聚合物(LCP)是一种液晶聚合物,作为基板材料在微波/毫米波电路中表现优良,在5G封装中获得了广泛的关注。采用紫外纳秒激光对LCP挠性覆铜板进行去膜加工试验,在200 kHz重复频率下,采用控制变量的方法,研究了不同激光功率、扫描速度和扫描层数对LCP材料去膜深度的影响。为了减小热影响对电子器件和柔性电路板的影响,结合LCP的特性和实际加工结果,进一步分析LCP基板边框处热影响区范围随激光参数的变化规律。试验结果表明,以低热影响加工为目标,当扫描层数为5,扫描速度为600 mm/s,激光平均功率为2.1 W时,均匀性较好,加工深度可达49.84 μm ,边框处热影响区较小,可达28.43 μm 。该试验结果为LCP基板在柔性电路封装中提供了理论基础。

关键词 激光技术; 紫外激光加工; 液晶聚合物挠性覆铜板; 去膜; 低热影响

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1714007

Removal of Liquid Crystal Polymer Flexible Copper-Clad Laminates Using Ultraviolet Laser

Cheng Li, Wu Chao*, Chen Yan, Xiong Zhengjun

*Institute of Laser and Intelligent Manufacturing Technology, South-Central Minzu University,
Wuhan 430074, Hubei, China*

Abstract Liquid crystal polymer (LCP) has gained attention in 5G packaging because of its excellent performance as a substrate material in microwave/millimeter-wave circuits. In this study, ultraviolet nanosecond laser was used to conduct the film removal experiment on LCP flexible copper plate. At the repetition frequency of 200 kHz, the effect of different scanning layers, scanning speed, and average power on the film removal depth of LCP material was studied using the control-variable method. To reduce the effect of heat on electronic devices and flexible circuit boards, the variation law of heat-influence zone at the frame of LCP substrate with laser parameters was analyzed based on the LCP characteristics and actual processing results. The experimental results show that when the scanning layer number is five, the scanning speed is 600 mm/s, and the average power of excitation light is 2.1 W, the machining depth can reach 49.84 μm , the uniformity is good, and the heat affected zone at the frame is small, reaching 28.43 μm . The experimental results may provide a theoretical basis for LCP substrate in flexible circuit packaging.

Key words laser technique; ultraviolet laser processing; liquid crystal polymer flexible copper-clad plate; film removal; low thermal impact

1 引言

凭借低吸湿性、良好的热稳定性、耐腐蚀性、耐辐射性能、低介电常数与介质损耗等优点^[1-3],液晶聚合物(LCP)挠性覆铜板(FCCL)在电子器件封装、通信等领域有着广阔的前景^[4-6]。因此,以LCP为基底的挠性覆铜板在柔性毫米波器件^[7-8]和5G天线制备^[9]方面

得到了广泛的关注。

由于LCP材料对于热应力较为敏感,采用基于热效应的传统激光加工方法容易引起LCP材料的塑性形变使得其分子模量发生改变,从而降低LCP基板的机械强度^[10],影响电子器件的性能。LCP不同于一般的高分子聚合物,由于取向、缠解LCP分散相的存在,LCP的熔体黏度非常低,熔体具有高流动性,容易回流

收稿日期: 2021-07-28; 修回日期: 2021-08-18; 录用日期: 2021-09-01

基金项目: 湖北省科技重大专项(2020AAA003)、中南民族大学院科研基金(YZZ17005)、中南民族大学基本科研业务费专项资金(CZP20009)

通信作者: *wind0101880@126.com

形成自增强结构^[11]。紫外单光子能量高,紫外激光通过直接破坏连接物质原子组分的化学键,使得激光烧蚀区域的材料直接形成气态粒子或微粒并发生光化学剥离过程^[12],产生的热影响区(HAZ)较小。因此,紫外激光用于加工塑料制品等聚合物较为合适^[13]。

Rowlands 等^[14]利用 LCP 基板形成多层的复合结构,以 LCP 基板形成的 PCB 工艺需要对 LCP 挠性覆铜板进行去膜工艺,去膜效果可能影响到多层结构的性能。目前,LCP 基板平行耦合滤波器采用的是化学蚀刻等平面半导体工艺^[15]来去膜,激光去膜的工艺为平行耦合器的制作提供了全新的思路。激光加工产生较大的热影响区会对电子器件封装的性能产生影响^[16],如产生电磁干扰等。如何选择激光参数,降低损耗、减小去膜边框处的热影响区成为了需要解决的问题。

因此,本文采用紫外激光加工 LCP 挠性覆铜板上

选择性去除,研究紫外激光参数(激光功率、扫描速度、扫描层数)对 LCP 基板去膜加工的影响,通过激光共聚焦显微镜观察从而分析加工参数对加工质量的影响规律,选定最优参数。在此基础上,通过对 LCP 基板去膜后边框处热影响区分析,进一步探讨如何减小热影响区宽度。基于紫外激光的高性能、高效率、低成本等^[17-19]加工特性,以及以此为基础的工艺参数为 LCP 封装的电子器件加工提供了可靠的理论和试验基础。

2 试验设置与方案

试验样品采用的是 LCP 薄膜与铜箔直接热压复合制成的单面 LCP 挠性覆铜板,如图 1(a)所示。原材料为 LCP 薄膜、铜箔,LCP 薄膜厚度为 50 μm ,压延铜箔厚度为 12 μm ,如图 1(b)所示,图 1(c)为 PHB-PPI 共聚 LCP 分子及结构式。样品尺寸为 2 cm \times 2 cm。试验前保持样品表面清洁。

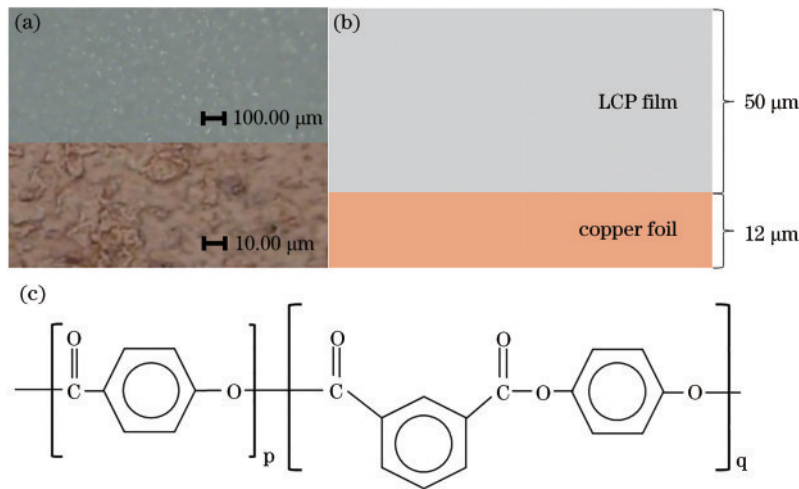


图 1 试验材料。(a) LCP 挠性覆铜板微观形貌图;(b) LCP 挠性覆铜板尺寸图;(c) PHB-PPI 共聚 LCP 分子结构

Fig. 1 Experimental material. (a) Micromorphology of LCP flexible copper-clad laminates; (b) size of LCP flexible copper-clad laminates; (c) molecular structure of PHB-PPI copolymer LCP

试验样材 LCP 的物理性质如表 1 所示。

试验中,紫外加工系统设备结构如图 2 所示,激光光束经反射镜 M1 后入射到扩束镜(扩束比例为 1:4)中,由于该激光器在控制电流占空比为 80% 时达到稳定最大输出功率,为实现脉冲能量精确控制,本试验通

过衰减器对功率进行二次衰减,每次试验前通过功率计对实际输出功率进行校验控制。衰减后的激光光束经过反射镜 M2 和 M3 进入扫描振镜,通过场镜聚焦,垂直入射到固定于多轴精密运动平台(XYZ 轴运动精度为 $\pm 2.5 \mu\text{m}$,重复定位精度为 $\pm 1 \mu\text{m}$)上的样品表

表 1 试验样品物化参数

Table 1 Physicochemical properties of experimental sample

Test method	Technical parameter	Value
Differential scanning calorimetry	Melting point / $^{\circ}\text{C}$	330–350
UL 94ZU	Flammability	VTM-0
Legion method (50% relative humidity)	Moisture absorption /%	0.03
IEC62631-3-1/2	Surface resistivity / Ω	$>5 \times 10^{16}$
IEC62631-3-1/2	Volume resistivity /($\Omega \cdot \text{cm}$)	$>2 \times 10^{16}$
Fabry-Perot method	Dielectric dissipation factor	0.002–0.003
Thermomechanical analysis	Coefficient thermal expansion /($10^{-6} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)	16

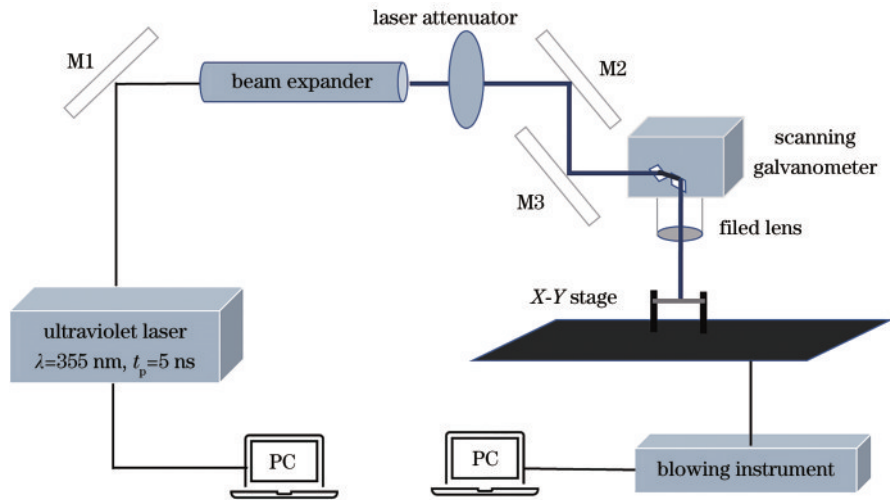


图 2 紫外加工系统试验装置示意图

Fig. 2 Schematic of the experimental setup of ultraviolet processing system

面。通过高速扫描振镜控制加工路径对 LCP 样品进行 LCP 薄膜蚀除。

试验激光器采用的是 Spectra-Physics 公司生产的半导体泵浦固体激光器, 波长为 355 nm, 其主要技术参数如表 2 所示。试验过程中激光聚焦于 LCP 基板上表面自上而下的方式加工, 每个试验重复 5 次, 测量结果取平均值来减小误差。

表 2 激光器主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of laser

Technical parameter	Value
Wavelength / nm	355
Average power / W	0~45
Pulse energy / μJ	0~62
Pulse width / ns	5
Repetition frequency / kHz	0~1000

3 试验结果与讨论

随着技术的发展, 柔性电路板也向小型化、高密度、多层化方向发展。因此, LCP 基板激光微加工成为了重要研究方向。激光去膜是 LCP 挠性覆铜板封装加工过程中重要的工艺之一。激光去膜受扫描层数、光斑重叠率、激光平均功率(即脉冲能量)变化的影响, 实际加工去膜效果以去膜深度、热影响区、均匀性等为判断依据。为了获得良好的加工效果, 在紫外波长 355 nm 和重复频率 200 kHz 下, 采用分离变量法对样品进行去膜试验, 通过激光共聚焦显微镜(基恩士 VK-X250K, 测量最高分辨率为 12 nm), 对加工后的样品进行表征。

激光作用在 LCP 薄膜材料上会产生等离子区、液态区和热影响区^[20-22]。在边框处, LCP 激光去膜产生的热影响区示意图如图 3(a)所示, 当激光阵列作用在 LCP 表面时, 材料表面的热能会随着激光加工不断向

内部扩散, 产生熔融 LCP, 由于 LCP 物化特性在熔融态容易回流, 使得材料表面改性重凝形成复杂的结构。因此, 试验热影响区的测量范围为未加工 LCP 边沿处至加工后暴露出铜层边沿。图 3(b)为激光加工 LCP 测量的实物图。

3.1 激光功率对 LCP 基板去膜的影响

激光平均功率对去膜深度的影响如图 4 所示。从图 4 可以看到, 随着激光功率的增加, 去膜的深度也增加。当平均功率小于 2.1 W 时, 受扫描速度的影响, 加工深度出现明显波动, 在 37.74~50.24 μm 之间。当平均功率在 2.1~2.7 W 之间且速度小于 700 mm/s 时, 可以看出曲线变得平缓, 去膜深度增加缓慢, 此时, 从实物图中可以看到膜层残留较小。当平均功率大于 2.7 W 时, 可以看到膜层虽然完全被去除, 但铜表面变黑了, 说明此时铜箔烧蚀严重。当扫描速度大于 700 mm/s 时, 可以看到随着激光功率的增加, 去膜深度近似线性增长, 说明此时熔融区的 LCP 在紫外光强不断增加的情况下等离子区也在增加, 等离子区在高温作用下不断去除 LCP 膜层, 从而使得去膜深度不断增加。平均功率的提高对激光加工的直接影响是脉冲能量的提升, 即作用于材料表面的光强得到提升^[23-24]。

图 5 为边框处热影响区宽度与激光功率的关系。从图 5 可以看出: 当功率小于 2.1 W 时, 热影响区宽度呈线性增加的趋势, 这是因为能量增大, 材料表面热量扩散的范围将变大, 使得液态区 LCP 增加, 热影响区宽度也增加; 当激光功率在 2.1~2.7 W 之间时, 功率增加到一定范围后, 产生的等离子区范围变大, 气化液态区的 LCP, 热影响区宽度变化范围较小; 当功率大于 2.7 W 时, 能量增大, 使得周围熔融 LCP 增加, 热影响区宽度范围增大。

如图 6(a)所示, 本试验采用的激光器近似为高斯光束能量密度分布^[25]。如图 6(b)所示: 当功率较小

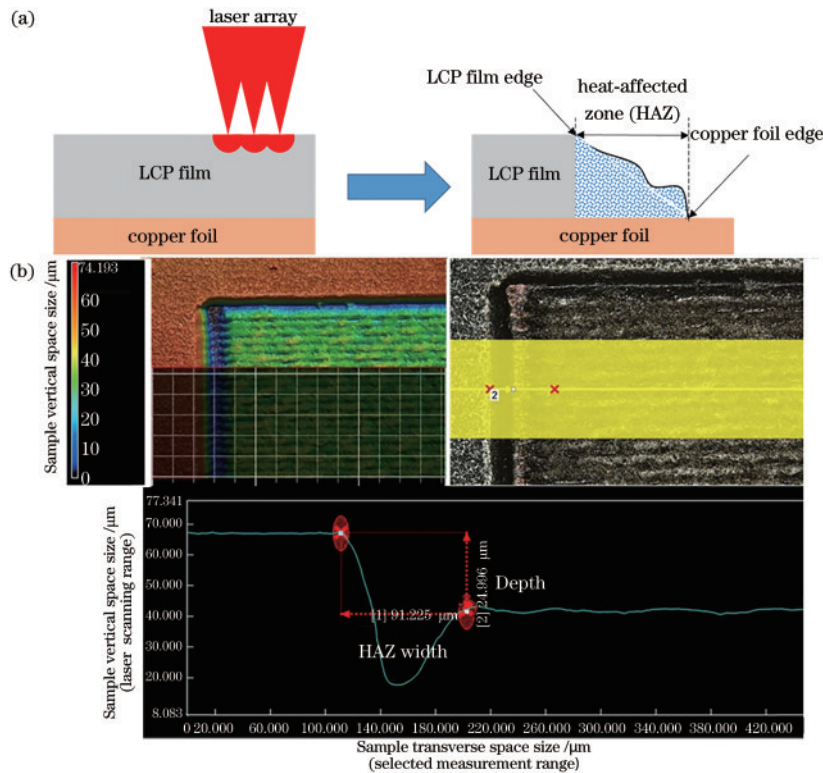


图3 试验结果。(a)热影响区示意图;(b)共聚焦显微镜LCP的HAZ测量图

Fig. 3 Experimental results. (a) Schematic of heat-affected zone; (b) HAZ measurement chart of LCP under a confocal microscope

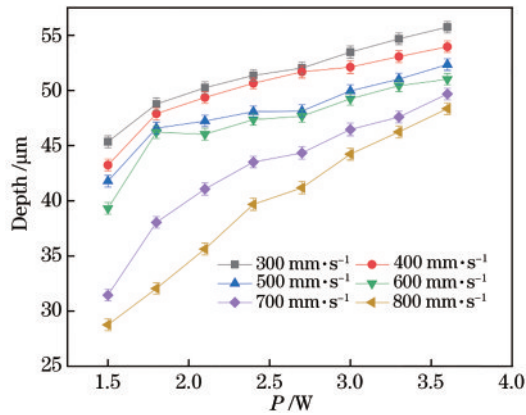


图4 去膜深度与平均功率关系

Fig. 4 Removal depth versus average power

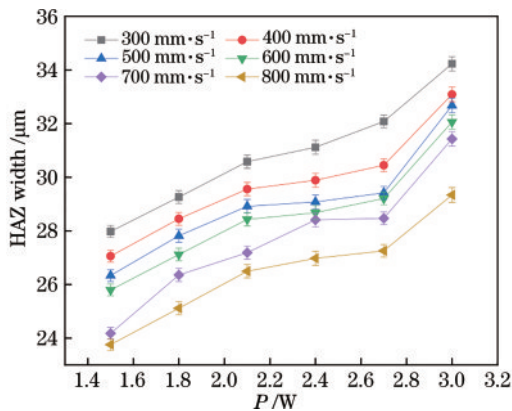


图5 热影响区宽度与平均功率关系

Fig. 5 HAZ width versus average power

($P < 2.1 \text{ W}$)时,LCP激光加工产生的液态区较大,等离子区较小,从而导致LCP回流,阻碍激光进一步加工;当功率增加($P > 2.1 \text{ W}$)时,功率增大,中心场强增大,作用于材料中心的激光引发更强的电离和气化作用,从而形成更大的等离子区,由于等离子区增大,气化作用导致液态区的面积减小,进而热影响区也减小。对于紫外波长 $\lambda = 355 \text{ nm}$,由于紫外波长较短,单光子能量高,气化液态区的气体如 CO_2 和 H_2O 等,容易在激光作用下形成较大的等离子区,在高温下气化去除LCP膜层,使得去膜深度增加。

图7以扫描速度 $v = 600 \text{ mm/s}$ 为例给出了三种不同激光功率下LCP基板的去膜形貌图比照。从图7(a)可以看到,在功率较小时,去膜均匀性较差,边框处去膜更深而中间则深度较浅,LCP膜层仍有大量未被去除,并且表面伴随着LCP的重凝结构。当激光功率上升到 2.4 W 时,从图7(b)可以看出,边框清晰,表面无LCP残留;当激光功率为 3.6 W 时,从图7(c)可以看到,铜层有所损伤,且边框处有热变形,处于过加工状态。

综合图4~6可以看出:当激光功率为 $1.5 \sim 2.1 \text{ W}$ 时,加工深度在不同扫描速度下变化剧烈;当激光功率为 $2.1 \sim 2.7 \text{ W}$ 时,铜层清晰,热影响区较小;当激光功率为 $2.7 \sim 3.6 \text{ W}$ 时,铜层色泽变暗,热影响区增大,试验效果变差。因此,选择激光功率为 $2.1 \sim 2.7 \text{ W}$ 来去除LCP薄膜较为合适。

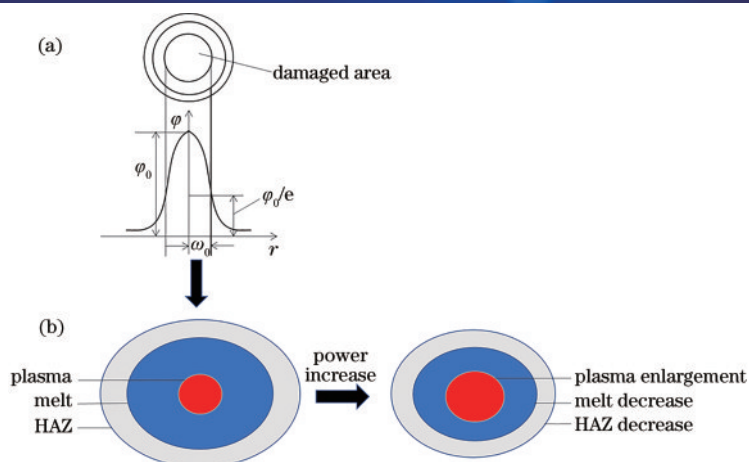


图 6 试验结果。(a) 高斯光束能量密度分布；(b) 激光功率对等离子区的影响

Fig. 6 Experimental results. (a) Energy density distribution of a Gaussian beam; (b) effect of laser power on plasma zone

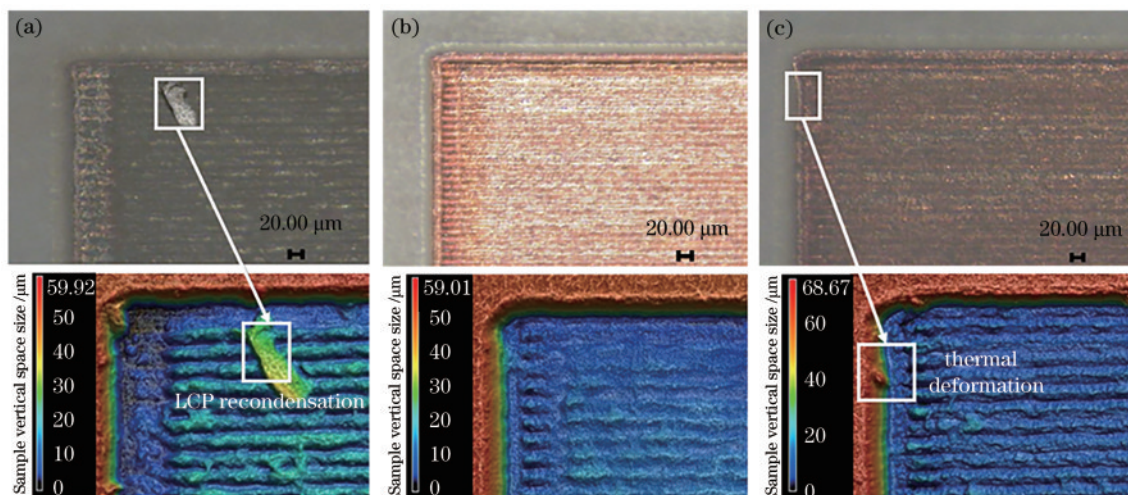


图 7 不同激光功率下得到的 LCP 基板去膜的微观形貌。(a) $P=1.5\text{ W}$; (b) $P=2.7\text{ W}$; (c) $P=3.6\text{ W}$

Fig. 7 Micromorphology of LCP substrate film removal obtained under different laser powers. (a) $P=1.5\text{ W}$; (b) $P=2.7\text{ W}$; (c) $P=3.6\text{ W}$

3.2 扫描速度对 LCP 基板去膜的影响

激光扫描速度对 LCP 挠性覆铜板去膜深度的影响如图 8 所示。从图 8 可以看出,在不同脉冲能量下,去膜深度随着扫描速度的增加而有所下降。值得注意的是,当扫描速度为 600 mm/s 和 700 mm/s 时,去膜深度曲线出现明显的拐点。

图 9 为边框处热影响区宽度与扫描速度的关系。可以看到,随着扫描速度的增加,热影响区宽度逐渐减小。从图 9 可以清晰地看到:当扫描速度为 500~600 mm/s 时,热影响区变化范围较小;当扫描速度超过 600 mm/s 时,虽然边框处的热影响区较小,但表面仍有 LCP 残留,此时由于光斑重叠率较小,能量密度不足以完全去膜,使得 LCP 表面重凝热影响严重。

在功率不变的条件下,扫描速度对去膜加工的影响最直接体现在光斑重叠率上。当扫描速度较小($v < 500\text{ mm/s}$)时,不同脉冲能量下,去膜深度在 41.78~

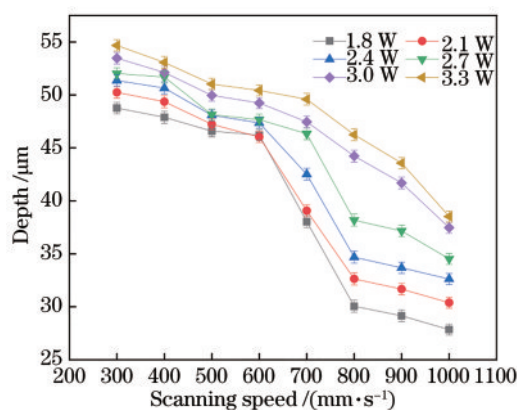


图 8 去膜深度与扫描速度关系

Fig. 8 Removal depth versus scanning speed

55.74 μm 之间变化,这主要是由于去膜速度较低时,根据公式计算出光斑重叠率大约为 77.5%,如图 10(a) 所示。此时由于光斑重叠率较大,使得线能量密度较大,在去膜过程中气化后的材料在高重叠率

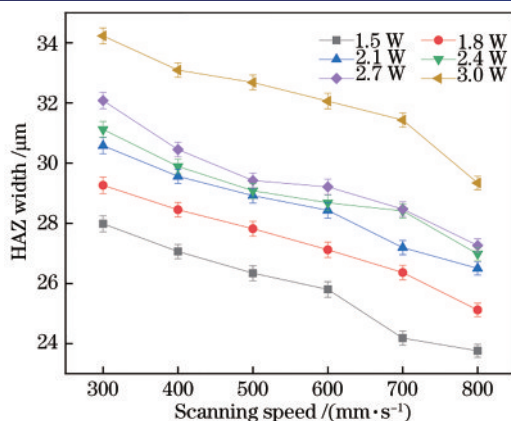


图9 热影响区宽度与扫描速度关系

Fig. 9 HAZ width versus scanning speed

的光斑能量作用下形成了较大的等离子区,导致加工深度变大。但蚀刻过程中熔体气化、重凝、参与二次加工等因素的影响增加了加工不确定性,同时可以看到铜层损伤明显,不利于精密加工量化控制。当扫描速度在 500~600 mm/s 之间时,从图 8 可以看到,去膜深度在一个较小的范围内波动,激光加工产生大量等离子区使得 LCP 膜层被气化蚀除。如图 10(b) 所示,当扫描速度大于 700 mm/s 时,由于光斑重叠率降低(约为 52.4%),能量密度降低,形成的等离子区较小,处于熔融态的 LCP 回流,阻碍激光进一步加工,去膜深度呈线性下降的趋势,在 26.57~51.35 μm 之间波动。

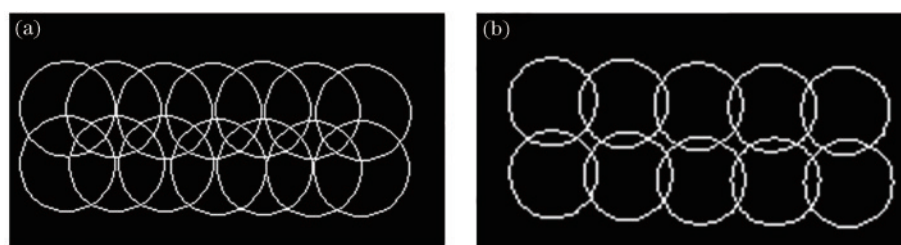
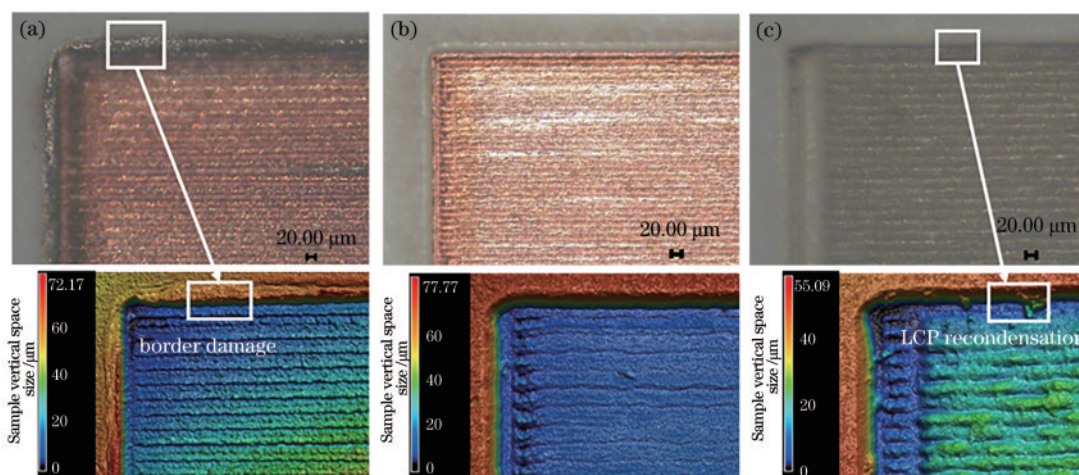
图 10 光斑重叠率对去膜的影响。(a) $v < 500$ mm/s; (b) $v > 700$ mm/sFig. 10 Effect of spot overlap rate on film removal. (a) $v < 500$ mm/s; (b) $v > 700$ mm/s

图 11 以平均功率 $P=2.4$ W 为例给出了三种不同扫描速度下 LCP 基板的去膜形貌图比照图,用于分析热影响区、均匀性随扫描速度的变化规律,以及激光扫描共聚焦显微镜(KEYENCE VK-X250K)三维(3D)测量结果。

从图 11(a) 中去膜 3D 图像可以看到,当扫描速度

为 300 mm/s 时,左上角处明显碳化,由于光轴中心能量密度较高,铜层表面烧蚀严重,边框变黑。如图 11(b) 所示,当扫描速度增加至 600 mm/s 时,铜层表面无残留,边框清晰,热影响区较小。如图 11(c) 所示,当扫描速度增至 1000 mm/s 时,铜层表面有大量 LCP 薄膜残留,LCP 表面重凝,试验效果不佳。

图 11 不同扫描速度下得到的 LCP 基板去膜的微观形貌。(a) $v = 300$ mm/s; (b) $v = 600$ mm/s; (c) $v = 1000$ mm/sFig. 11 Micromorphology of the LCP substrate film removal obtained at different scanning speeds. (a) $v = 300$ mm/s; (b) $v = 600$ mm/s; (c) $v = 1000$ mm/s

对于 LCP 材料而言,加工时应尽量避免较大热影响区和表面重凝对材料的物化特性的改变,从图 11 可以看出,在扫描速度小于 500 mm/s 和大于 700 mm/s

时,去膜的热影响区较大,不利于低碳化加工。因此,扫描速度在 500~600 mm/s 之间时,可以获得较小的热影响区和较好的去膜深度。

3.3 扫描层数对去膜的影响

在前面分析的基础上,固定激光功率 $P=2.4\text{ W}$ 、 $v=600\text{ mm/s}$,分析激光扫描层数对 LCP 挠性覆铜板去膜深度的影响,如图 12 所示。从图 12 可以看出,激光扫描层数随去膜深度的变化呈线性增加的趋势,随着层数到达 5 层后,可以看到去膜的深度变化明显减弱。当扫描层数为 1~5 层时,去膜的深度为 $11.78\sim 48.54\text{ }\mu\text{m}$,这主要是因为随着加工的层数增加,激光作用的次数也在增加,能量积累得较多,因此深度增加明显。当激光扫描层数为 5 层时,从图 12 可以看到明显的拐点,此时可以清晰地看到铜层。当激光扫描层数超过 5 层,即 5~8 层时,其去膜的深度为 $49.76\sim 53.28\text{ }\mu\text{m}$,增加的趋势大幅减弱,从宏观上可以看到,此时已经明显去膜完成了,并且激光已经烧蚀到一部分铜箔,这都是需要避免出现的情况。

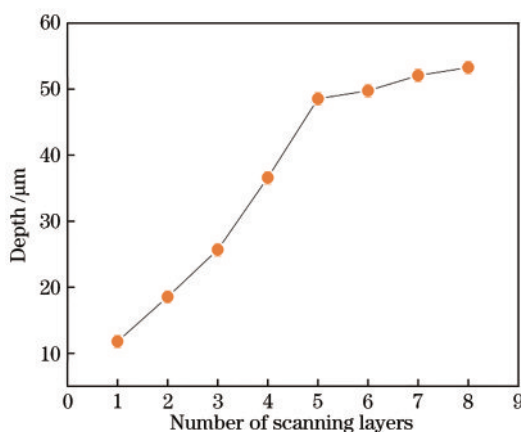


图 12 去膜深度与扫描层数关系

Fig. 12 Removal depth versus number of scanning layers

图 13 为边框处的热影响区宽度与扫描层数之间的关系,可以看出随着扫描层数的增加,边框处热影响区宽度也增大。当层数为 1~3 层时,随着扫描层

数的增加,热影响区宽度明显增加,可以看到铜层表面上依然有一些 LCP 薄膜的残留,残留的 LCP 有些变黑出现明显的碳化,这是由于当层数较少时,由于积累的能量较少,处于液态区的 LCP 回流,使得热影响区较大。当层数为 4~6 层时,LCP 膜层基本得到去除,从图 13 可以看到,此时热影响区略微增大,这是由于能量积累变大,处于熔融态的 LCP 回流减少,使得热影响区增大的趋势减弱。当层数超过 6 层时,能量积累更多,可以看到边框及表面处铜层明显损伤,热影响区宽度增大,这是因为去膜完成后继续增加层数会使周围热扩散产生更多的熔融 LCP,从而增大液态区,造成热影响区增大,此时已伤到铜层,处于过加工状态。

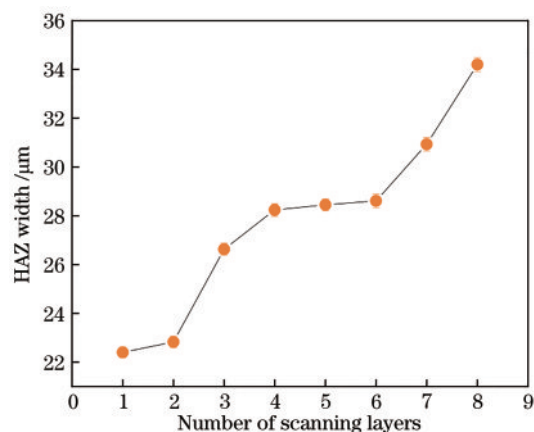


图 13 热影响区宽度与扫描层数关系

Fig. 13 HAZ width versus number of scanning layers

以扫描速度 600 mm/s 和平均功率 $P=2.7\text{ W}$ 为例,图 14 给出了通过激光共聚焦显微镜来对加工试验结果进行微观形貌的测量以及不同层数之间的对比参照,用于分析热影响区、划线均匀性随扫描层数的变化规律。

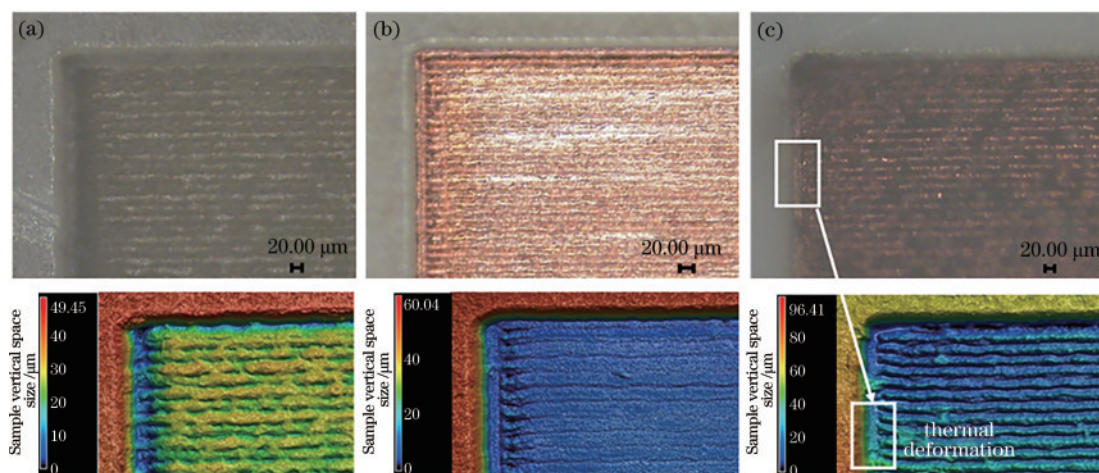


图 14 不同层数下得到的 LCP 基板去膜的微观形貌。(a) 层数为 1; (b) 层数为 4; (c) 层数为 8

Fig. 14 Micromorphology of the LCP substrate film removal obtained with different number of layers. (a) Number of layers is 1; (b) number of layers is 4; (c) number of layers is 8

如图 14(a)所示,当层数为 1 时,边框清晰,但由于能量累积较小,去膜深度较小,大量 LCP 薄膜未去除;如图 14(b)所示,当层数为 5 时,边框清晰,LCP 表面去除均匀性好;如图 14(c)所示,当层数为 8 时,可以明显看到 LCP 去除完毕,以及铜箔表面有所损伤,边框处产生形变。

因此,结合图 12、图 13 可以看出:层数小于 4 会出现 LCP 膜层无法去除干净导致表面结构改性;层数大于 6 则会出现边框处热影响效果明显较大。故选择层数为 5~6 的试验效果较好。

4 结 论

本文采用紫外激光对 LCP 挠性覆铜板进行了去膜试验,研究了不同的激光功率、扫描速度和扫描层数对 LCP 基板去膜的影响,优选激光参数,减少 LCP 液晶重凝,降低 LCP 加工产生的热影响,获得了较好的试验结果。试验发现,激光功率和扫描速度对 LCP 材料去膜加工影响较大。当激光功率在 2.1~2.7 W 时,容易产生较大等离子区,在高温下去除表面的 LCP 薄膜以及热影响区在一个较小的范围内波动,避免能量过高而发生热形变;当扫描速度在 500~600 mm/s 时,可以减小 LCP 表面液晶重凝对材料改性,并且边框处热影响区范围较小,最小可达 28.43 μm ,得到清晰的铜层;当扫描层数为 5~6 时,去膜均匀性好。最后,在激光平均功率为 2.1 W,扫描速度为 600 mm/s,扫描层数为 5 时,获得了较好的试验结果,加工深度可达 49.84 μm ,边框处热影响区较小,可达 28.43 μm 。本文为 LCP 基板表面多层结构的工艺制备提供了量化参考,为 LCP 基板制作毫米波滤波器提供了全新的技术思路,以及 LCP 基板应用于电子器件封装领域提供了理论支撑。

参 考 文 献

- [1] Wang G A, Thompson D, Tentzeris E M, et al. Low cost RF MEMS switches using LCP substrate[C]//34 th European Microwave Conference, 2004, October 12-14, 2004, Amsterdam, Netherlands. New York: IEEE Press, 2004: 1441-1444.
- [2] Thompson D, Kingsley N, Wang G A, et al. RF characteristics of thin film liquid crystal polymer (LCP) packages for RF MEMS and MMIC integration[C]//IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2005, June 17-17, 2005, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2005: 857-860.
- [3] Chen M, Evers N, Kapusta C, et al. Development of a hermetically sealed enclosure for MEMS in chip-on-flex modules using liquid crystalline polymer (LCP) [C]//Proceedings of ASME 2005 Pacific Rim Technical Conference and Exhibition on Integration and Packaging of MEMS, NEMS, and Electronic Systems Collocated With the ASME 2005 Heat Transfer Summer

- Conference, July 17-22, 2005, San Francisco, California, USA. New York: ASME, 2009: 2057-2060.
- [4] 邹嘉佳,程明生. LCP 基板在系统封装中应用的研究进展[J]. 科技展望, 2015, 25(35): 124-125.
Zou J J, Cheng M S. Research progress on the application of LCP substrate in system packaging[J]. Science and Technology, 2015, 25(35): 124-125.
- [5] 陶永亮. 液晶聚合物 LCP 在 5G 产品中的应用[J]. 橡塑技术与装备, 2020, 46(12): 32-35.
Tao Y L. Application of LCP in 5G products[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2020, 46 (12): 32-35.
- [6] 刘昊,杨海峰,贺海东,等. 电子铜箔和液晶聚合物的激光复合焊接[J]. 中国激光, 2022, 49(2): 0202011.
Liu H, Yang H F, He H D, et al. Laser hybrid welding of electronic copper foil and liquid crystal polymer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(2): 0202011.
- [7] Kingsley N. Liquid crystal polymer: enabling next generation conformal and multilayer electronics[J]. Microwave Journal, 2005, 51(5): 188-200.
- [8] 曾策,高能武,林玉敏. LCP 基板在微波/毫米波系统封装的应用[J]. 电子与封装, 2010, 10(10): 5-8.
Zeng C, Gao N W, Lin Y M. The application of LCP substrate for microwave/millimeter-wave system packaging [J]. Electronics & Packaging, 2010, 10(10): 5-8.
- [9] 马天驰,杜成珠,李晓笛,等. 基于 LCP 的双频柔性 MIMO 天线[C]//2019 年全国天线年会论文集(上册). 北京: 中国电子学会, 2019.
Ma T C, Du C Z, Li X D, et al. Dual frequency flexible MIMO antenna based on LCP material[C]//Proceedings of the 2019 National Antenna Conference (Volume 1). Beijing: Chinese Institute of Electronics, 2019.
- [10] Nanbu K, Ozawa S, Yoshida K, et al. Low temperature bonded Cu/LCP materials for FPCs and their characteristics[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2005, 28(4): 760-764.
- [11] 郑惠文,李逸文,杨明军,等. 液晶聚酯增强双酚 A 型聚碳酸酯复合材料的研究进展[J]. 高分子通报, 2019 (6): 1-9.
Zheng H W, Li Y W, Yang M J, et al. Liquid-crystalline polyester reinforced poly(bisphenol-a carbonate) composites: a state-of-the-art review[J]. Polymer Bulletin, 2019(6): 1-9.
- [12] 聂世琳,管迎春. 紫外激光器及其在微加工中的应用[J]. 光电工程, 2017, 44(12): 1169-1179, 1251.
Nie S L, Guan Y C. Review of UV laser and its applications in micromachining[J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(12): 1169-1179, 1251.
- [13] Delmdahl R, Pätz R. Pulsed laser deposition: UV laser sources and applications[J]. Applied Physics A, 2008, 93 (3): 611-615.
- [14] Rowlands M J, Das R N. Manufacture and ultra-high frequency performance of an LCP-based, Z-interconnect, flip-chip package[C]//2008 58th Electronic Components and Technology Conference, May 27-30, 2008, Lake Buena Vista, FL, USA. New York: IEEE Press, 2008: 1362-1367.
- [15] 张霞. 微波无源器件在液晶聚合物基板上的设计、制作

- 和表征[D]. 上海: 上海大学, 2010: 66-70.
- Zhang X. Design, fabrication and characterization of microwave passive devices on liquid crystal polymer substrates[D]. Shanghai: Shanghai University, 2010: 66-70.
- [16] Han L, Gao X F. Modeling of bending characteristics on micromachined RF MEMS switch based on LCP substrate[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2016, 63(9): 3707-3712.
- [17] 高海瑞. 紫外激光器的发展及应用[J]. 中国新技术新产品, 2010(8): 13.
- Gao H R. Development and application of ultraviolet laser [J]. China New Technologies and Products, 2010(8): 13.
- [18] 唐娟, 廖健宏, 蒙红云, 等. 紫外激光器及其在激光加工中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(8): 52-56.
- Tang J, Liao J H, Meng H Y, et al. Ultraviolet laser and its application in laser processing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(8): 52-56.
- [19] 赵鹏飞, 苏静, 徐敏志, 等. 全固态高稳定 355 nm 紫外脉冲激光器[J]. 量子光学学报, 2020, 26(2): 202-209.
- Zhao P F, Su J, Xu M Z, et al. All-solid-state high stability 355 nm ultraviolet pulsed laser[J]. Journal of Quantum Optics, 2020, 26(2): 202-209.
- [20] 刘晓东, 陈亮, 王曦照, 等. 紫外激光微铣削 Al_2O_3 陶瓷盲孔的工艺研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0514005.
- Liu X D, Chen L, Wang X Z, et al. Micromilling blind holes in Al_2O_3 ceramics using UV laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0514005.
- [21] 李纪楷. 基于紫外纳秒激光脉冲的薄膜微结构加工技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2018: 9-14.
- Li J K. Study on fabricating technology for film microstructure based on ultraviolet nanosecond laser pulse [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018: 9-14.
- [22] 张琛, 朱洁, 章裕, 等. 激光高分子聚合物纳米制造技术及应用进展(特邀)[J]. 光子学报, 2020, 49(11): 130-147.
- Zhang C, Zhu J, Zhang Y, et al. Advances in laser nanofabrication technology of high-molecular polymer and its application(invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(11): 130-147.
- [23] 吴雪峰, 尹海亮, 李强. 飞秒激光加工碳纳米管薄膜试验研究[J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0902002.
- Wu X F, Yin H L, Li Q. Femtosecond laser processing of carbon nanotubes film[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0902002.
- [24] 陈燕, 陈亮, 程立, 等. 飞秒激光刻蚀透射式石英玻璃光栅的工艺研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(7): 0714006.
- Chen Y, Chen L, Cheng L, et al. Study on the preparation of transmission quartz glass grating via femtosecond laser etching[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(7): 0714006.
- [25] 陈亮, 刘晓东, 刘静, 等. 飞秒激光在石英玻璃表面刻蚀微槽的研究[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2314001.
- Chen L, Liu X D, Liu J, et al. Microgroove etching with femtosecond laser on quartz glass surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 2314001.