

文章编号: 0258-7025(2008)10-1637-07

355 nm 和 1064 nm 全固态激光器 刻蚀印刷电路板

张 菲 曾晓雁 李祥友 段 军

(华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 采用输出功率 8 W 的 355 nm Nd:YVO₄ 紫外激光器和 50 W 的 1064 nm Nd:YAG 激光器对覆铜板(CCL)和柔性线路板(FPC)进行了刻蚀实验,研究了激光功率密度、重复频率、扫描速度和单脉冲能量等加工工艺参数对刻蚀质量的影响。实验结果表明,由于铜和聚合物材料对紫外激光有更高的吸收率,紫外波段的激光只需要较低的能量就可以将表面铜层刻蚀完全,并且引起的热作用也较小。相反,红外激光加工最大的优势就是对环氧树脂和聚酰亚胺基板的破坏较小,从而适合于表面铜层的去除加工。与此同时,355 nm 紫外激光器由于能快速轻易地将厚聚合物基板分离,更适合于印刷电路板(PCB)的切割成型加工。

关键词 激光技术;激光加工;全固态激光器;激光刻蚀;印刷电路板;紫外激光

中图分类号 TN 249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083510.1637

Laser Etching and Cutting Printed Circuit Board by 355 nm and 1064 nm Diode Pumped Solid State Lasers

Zhang Fei Zeng Xiaoyan Li Xiangyou Duan Jun

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract A 355 nm Nd:YVO₄ laser with output power of 8 W and a 1064 nm Nd:YAG laser with output power of 50 W are used for etching the copper clad laminate (CCL) and flexible printed circuit (FPC). The effects of laser process parameters, such as laser power density, repetition rate, laser scanning speed and single pulse energy, on the etching quality of microstructure are studied in detail. The experimental results demonstrate that the lasers within ultraviolet (UV) range needs less power to etch the copper layer entirely and causes less thermal effect, as copper and polymer have higher absorptivity to UV. On the other hand, the infrared laser is suitable for the ablation of copper layer due to its little damage on polymer. The 355 nm UV laser is suitable for the cutting process of the printed circuit board (PCB) because it can make the facile separation of thick polymer substrates quickly.

Key words laser technique; laser processing; diode pumped solid state laser; laser etching; printed circuit board; ultraviolet laser

1 引 言

印刷电路板(PCB)从单面发展到双面、多层、挠性以及刚挠结合,并仍保持各自的发展趋势,而且不断地向高精度、高密度和高可靠性方向发展,不断缩小体积、降低成本、提高性能。作为 PCB 制造中的

主要基板材料,覆铜板(CCL)起着导电、绝缘和支撑三个主要功能,其中玻璃布增强环氧树脂制得的覆铜板,如 FR4 和 FR5 等品种已成为用于电子计算机、通讯设备、仪器仪表等电子产品中印刷电路板的主流。挠性线路板,简称软板或柔性线路板(FPC),

收稿日期:2007-09-25;收到修改稿日期:2008-01-10

基金项目:国家 863 计划重点项目(SQ2007AA03XK140983)资助课题。

作者简介:张 菲(1983—),男,武汉人,博士研究生,主要从事全固态紫外激光加工设备和加工技术的研究。

E-mail:hustlaserzf@smail.hust.edu.cn

导师简介:曾晓雁(1962—),男,主要从事激光材料加工技术与装备、激光微纳制造技术与装备和激光与物质相互作用方面的研究。E-mail:xyzeng@mail.hust.edu.cn

具有配线密度高、重量轻、厚度薄的特点。这种电路板散热性好,既可弯曲、折叠、卷绕,又可在三维空间随意移动和伸缩,已经广泛应用于电子计算机、通信、航天及家电等行业。FPC作为芯片载体,其优点是薄及光滑的表面,无增强材料的介质适合激光制作微孔,较薄的铜层有利于用减成法来制作精细线路^[1,2]。

传统的印制电路工艺技术包括照相制板、图像转移、蚀刻、钻孔、孔金属化、表面金属涂敷以及有机材料涂敷等工序,技术工艺复杂、设备精度要求高,容易产生导线凹陷,且制作周期较长、柔性化程度差,不适合中小批量生产。本实验室长期研究的微熔覆制造厚膜电路技术柔性化程度高,但工艺相对较复杂,一般需要后续热处理^[3,4]。采用激光直接刻蚀技术则可以大大简化图像转移、蚀刻、钻孔等工艺,摆脱传统掩模的束缚,通过将激光束作用于基板上的铜层表面,直接去除不同厚度的铜层,从而制作出所需的电路图形^[5,6]。为了进一步提高加工精度和质量,需要使用更短波长的激光,例如紫外激光来进行微细加工。紫外激光因其波长短、材料吸收率高、加工速度快、热影响区小、可聚焦光斑尺寸小等特点,微加工时容易获得较高的加工精度和质量,特别是近十年来迅速发展起来的高功率全固态紫外激光器,电光转换效率高、重复频率高、性能可靠、体积小、光束质量好、功率稳定,在电子制造工业精密加工和微细加工领域中占有重要地位。

迄今为止,国内全固态紫外激光器的发展还处于实验室研制阶段,没有形成光束模式好、性能稳定的工业化产品^[7~11]。受设备条件限制,全固态紫外激光微加工技术的研究报道较少。阳建华等^[12]利用三倍频紫外激光制作出高质量铜质薄膜器件,凌磊等^[13]对紫外激光刻蚀多层线路板进行了初步研究。国外该技术虽然已经实用化并且有不少相关文献报道^[14~18],但对于紫外激光和红外激光微加工特性的比较研究很少有报道。为此,作者利用355 nm和1064 nm全固态激光器对CCL和FPC进行了刻蚀工艺研究,探讨了紫外激光器与红外激光器的加工特性及性能对比,获得了线路板刻蚀的一些基本规律。

2 实验方法与设备

加工试样选用印制电路板中应用广泛的CCL和双面FPC,其中CCL厚度为1.6 mm,表面铜层厚约37 μm ,双面FPC上下表面为40 μm 厚的铜箔层,中间聚酰亚胺(PI)绝缘基板和胶厚共为40 μm 。

355 nm全固态紫外激光器是由美国Photonics Industries公司提供的DS20H-355型三倍频Q开关Nd:YVO₄激光器,20 kHz时最大输出功率8 W,重复频率1 Hz~100 kHz可调,脉冲宽度为25 ns, $M^2 < 1.2$ 。红外激光器采用深圳大族激光公司生产的Nd:YAG固体脉冲激光器,波长为1064 nm,最大功率50 W,重复频率1 Hz~50 kHz可调。实验采用激光直写的方法,在样品表面直接刻蚀8 mm长的凹槽。采用Nikon Epiphot300光学显微镜观察刻槽的宏观形貌并进行宽度和深度的测量,采用FEI Quanta200扫描电子显微镜观察微观形貌。

3 实验结果

3.1 紫外激光和1064 nm激光刻蚀CCL

3.1.1 激光功率密度和扫描速度对刻蚀质量的影响

图1和图2所示分别为355 nm紫外激光和

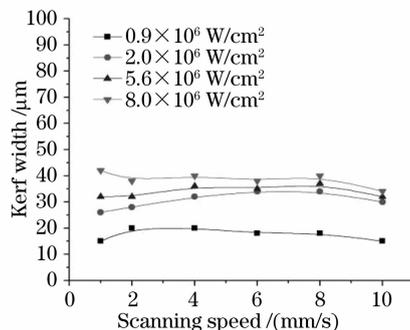


图1 紫外激光刻蚀CCL缝宽随功率密度和扫描速度的变化(频率:20 kHz)

Fig. 1 Effects of power density and scanning speed on kerf width of UV laser etching CCL with frequency of 20 kHz

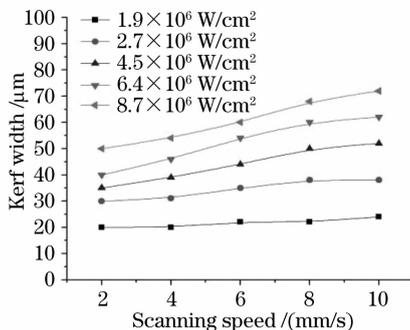


图2 1064 nm激光刻蚀CCL缝宽随功率密度和扫描速度的变化(频率:2 kHz)

Fig. 2 Effects of power density and scanning speed on kerf width of 1064 nm laser etching CCL with frequency of 2 kHz

1064 nm 激光刻蚀缝宽随激光功率密度和扫描速度的变化规律。可以看出,加工结果具有相似性。随着功率密度的提高,切缝宽度显著加大。当扫描速度较低时,由于脉冲重复频率较高使得能量密度较大,刻蚀深度较大,产生的熔渣使得刻缝宽度有所减小。此外,通过实验得到,频率越高,能实现完全刻蚀的极限速度越大,对于 1064 nm 激光器 2 kHz, 5 kHz, 10 kHz 时的极限速度分别为 15 mm/s, 30 mm/s, 40 mm/s。

3.1.2 重复频率对刻蚀质量的影响

图 3 给出了紫外激光刻蚀缝宽随重复频率的变化规律。可以看出,随着重复频率的提高,刻蚀缝宽先呈现一个上升趋势,在 20 kHz 附近达到峰值,开始下降,与紫外激光器频率与输出功率的对应曲线相近。当重复频率由 100 Hz~20 kHz 逐渐增大时,激光输出功率逐渐增大,刻蚀过程由不完全刻蚀转变为完全刻蚀,缝宽明显增大。随着频率的继续提高,激光器输出功率下降,单脉冲能量迅速降低,使得缝宽减小得很快。图 4 所示为 1064 nm 激光的实验结果,刻蚀缝宽在 2 kHz 附近也存在一个峰值。与紫外激光器在 20 kHz 时输出功率存在峰值不同

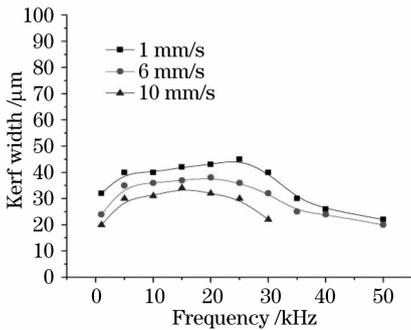


图 3 不同频率紫外激光刻蚀 CCL 缝宽比较

Fig. 3 Comparison of kerf widths of UV laser etching CCL under various frequencies

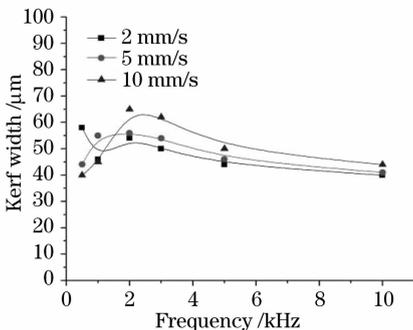


图 4 不同频率 1064 nm 激光刻蚀 CCL 缝宽比较

Fig. 4 Comparison of kerf widths of 1064 nm laser etching CCL under various frequencies

的是,1064 nm 激光器的输出功率与重复频率是线性关系,在由 2 kHz 增加到 10 kHz 时,虽然平均功率由 7.8 W 增加到 13.6 W (通过 5 mm 光阑后测得),但是单脉冲能量由 3.9 mJ 降低到 1.36 mJ,造成刻蚀缝宽减小,15 kHz 时单脉冲能量降到 0.9 mJ,不能完全刻蚀铜层。此外,当脉冲频率较高(大于 10 kHz),扫描速度较低(小于 5 mm/s)时,由于能量密度过大而造成刻蚀缝边缘质量较差,在相同条件下将速度提高到 30 mm/s 时,质量有明显改善。

3.1.3 功率密度和单脉冲能量对刻蚀缝宽和深度的影响

图 5 和图 6 所示分别为 1064 nm 激光固定功率密度为 $17.8 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 和单脉冲能量为 3.5 mJ 时刻蚀 CCL 缝宽和深度随重复频率的变化。由图可知,刻蚀缝宽与单脉冲能量的变化趋势相同,单脉冲能量是影响刻蚀缝宽的主要因素。当固定功率密度不变时,刻蚀深度随着单脉冲能量的降低而下降,在 3.5 mJ 时能刚好完全刻蚀铜并且对基板的损伤很

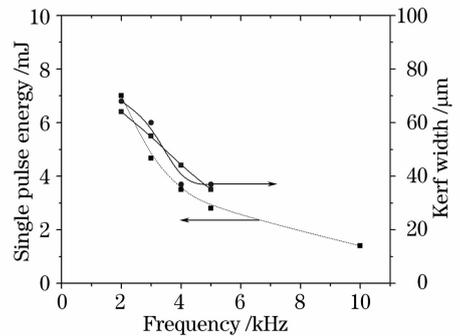


图 5 固定功率密度为 $17.8 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 时刻蚀 CCL 缝宽和深度(扫描速度:10 mm/s)

Fig. 5 Etching kerf width and depth at fixed power density of $17.8 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ with scanning speed of 10 mm/s

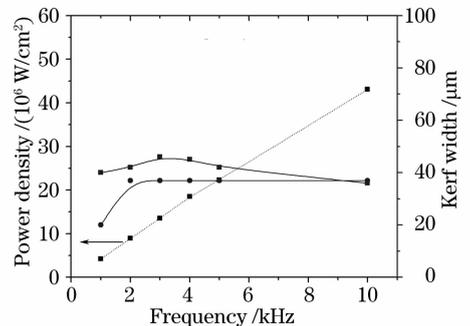


图 6 固定单脉冲能量为 3.5 mJ 时刻蚀 CCL 缝宽和深度(扫描速度:10 mm/s)

Fig. 6 Etching kerf width and depth at fixed single pulse energy of 3.5 mJ with scanning speed of 10 mm/s

小。当单脉冲能量低于2.8 mJ时,表面铜层不能完全刻蚀,继续减小到低于1.4 mJ时,激光对铜表面的作用很小,只能形成几微米的浅坑。若将单脉冲能量固定在3.5 mJ,通过调节重复频率来提升功率密度,则当平均功率较低(小于 $8.9 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$)未达到完全刻蚀铜层阈值时,刻蚀深度随功率密度的增大而增加,当到达完全刻蚀阈值后,在一定范围内继续提高功率密度,刻蚀深度也将保持在 $37 \mu\text{m}$ 不再变化。产生这一结果的原因是,深度随平均功率增大而增加是刻蚀铜的过程,当去除掉铜层后,由于大部分能量已经被吸收掉,并且环氧树脂基板对红外激光的吸收率较小,在较小的单脉冲能量条件下作用效果不明显。

3.2 紫外激光和 1064nm 激光刻蚀 FPC

图7和图8分别为紫外激光和1064nm激光刻蚀FPC缝宽随功率密度和速度的变化,图9和图10为刻蚀缝宽随重复频率的变化。由于实验所用到的

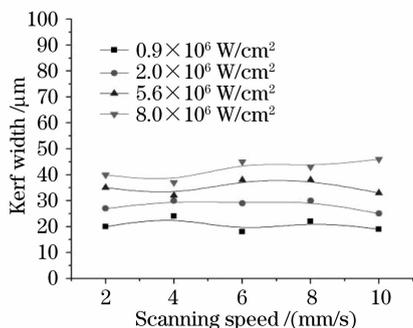


图7 紫外激光刻蚀FPC缝宽随功率密度和扫描速度的变化(频率:20 kHz)

Fig.7 Effects of power density and scanning speed on kerf width of UV laser etching FPC with frequency of 20 kHz

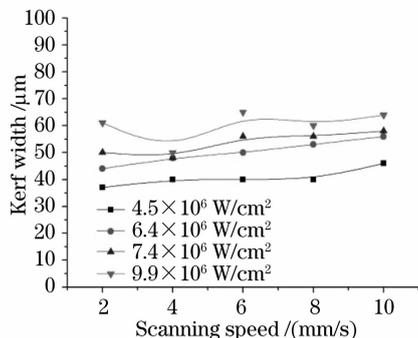


图8 1064 nm激光刻蚀FPC缝宽随功率密度和扫描速度的变化(频率:2 kHz)

Fig.8 Effects of power density and scanning speed on kerf width of 1064 nm laser etching FPC with frequency of 2 kHz

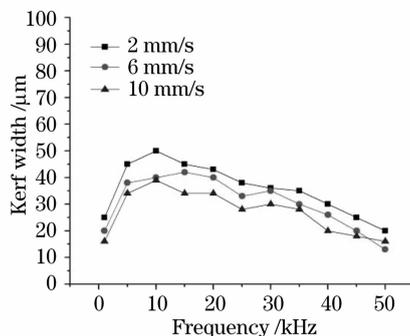


图9 紫外激光刻蚀FPC缝宽随重复频率的变化
Fig.9 Effect of frequency on kerf width of UV laser etching FPC

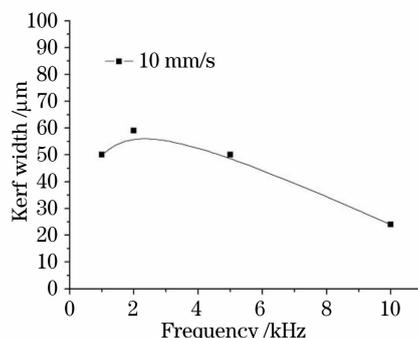


图10 1064 nm激光刻蚀FPC缝宽随重复频率的变化
Fig.10 Effect of frequency on kerf width of 1064 nm laser etching FPC

CCL和FPC加工表面铜层厚度接近,因此实验结果具有一定的相似性。

3.3 紫外激光和 1064nm 激光刻蚀 CCL 和 FPC 质量对比

铜在激光加工中属于难加工材料,对355 nm紫外激光的吸收率较高(70%左右),而对于1064 nm的红外光吸收率要低得多(10%左右)^[12]。激光作用于铜表面使铜在空气中发生复杂的反应,由于氧气和水蒸气的影响,刻槽和影响区的化学成分包含有Cu, Cu₂O, CuO和Cu(OH)₂^[19]。355 nm紫外激光器和1064 nm激光器完全刻蚀铜层时缝宽分别约为30 μm和45 μm,表面形貌如图11所示,可见紫外激光具有更高的加工精度和质量。

紫外激光器在速度小于2 mm/s,功率密度大于 $5.6 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$,脉冲频率在15~30 kHz之间时,可以直接切割1.6 mm厚的覆铜板,图12所示为加工得到的正方形和圆形样品。可以看到切割精密、光滑,侧壁陡直。采用红外激光器时,由于环氧树脂基板对红外激光的吸收率较小,不能实现覆铜板的切割。但是,也正因为如此,在利用红外激光加工

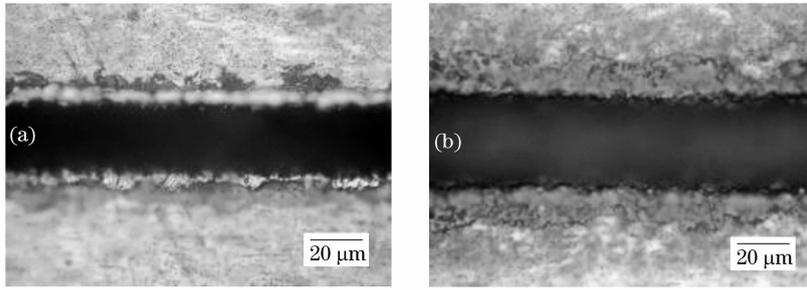


图 11 激光加工 CCL 质量对比。(a) 355 nm 紫外激光;(b) 1064 nm Nd:YAG 激光

Fig. 11 Comparison of CCL processing qualities. (a) 355 nm UV laser; (b) 1064 nm Nd:YAG laser

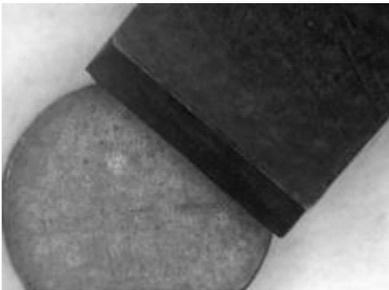


图12 紫外激光切割 CCL 样品。功率密度:

$8 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, 频率:20 kHz, 扫描速度:1 mm/s

Fig. 12 CCL samples cut by 355 nm UV laser with power density of $8 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, frequency of 20 kHz, and scanning speed of 1 mm/s

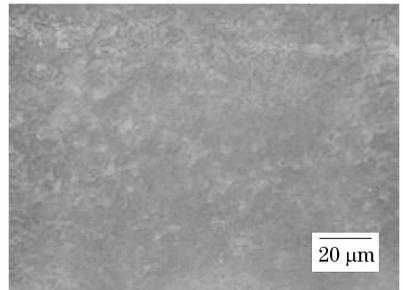


图 13 1064 nm激光器加工盲槽底部表面形貌。功率密度:

$4.5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, 频率: 2 kHz, 扫描速度:

10 mm/s,扫描间距:30 μm

Fig. 13 Surface of blind-slot' bottom process by 1064 nm laser with power density of $4.5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, frequency of 2 kHz, scanning speed of 10 mm/s, and scanning spacing of 30 μm

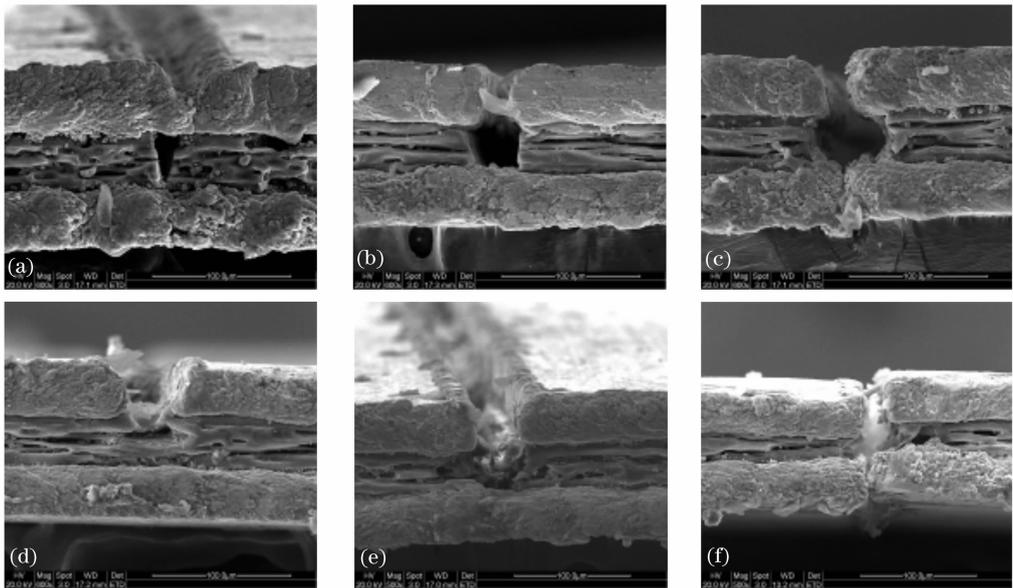


图 14 激光刻蚀 FPC 刻槽侧视扫描电镜照片。(a)~(c) 355 nm 紫外激光;(d)~(f) 1064 nm Nd:YAG 激光

Fig. 14 SEM photos of grooves' side view etched by laser etching FPC. (a)~(c) 355 nm UV laser; (d)~(f) 1064 nm Nd:YAG laser

PCB 时,选择适当的工艺参数,可以将激光对基板的损伤降到最低,图 13 所示为利用1064 nm激光器

加工盲槽的底部表面形貌,可以看到激光对基板的破坏较小,表面较平整。

在不同工艺参数下,紫外激光和1064 nm激光刻蚀 FPC 刻槽的剖面侧视扫描电镜照片如图 14 所示。通过选择适当的激光功率密度、重复频率和扫描速度,可以控制刻蚀深度。由于 PI 基板对 355 nm 波长的激光吸收率比 1064 nm 的激光高得多,因此在完全刻蚀铜层后,不可避免地会刻蚀一部分 PI 基板,形成 V 形刻槽,如图 14(a)所示。在刻蚀两层和完全切断情况下,如图 14(b)和(c)所示,中间 PI 层的缝宽明显大于表面铜层的缝宽。使用

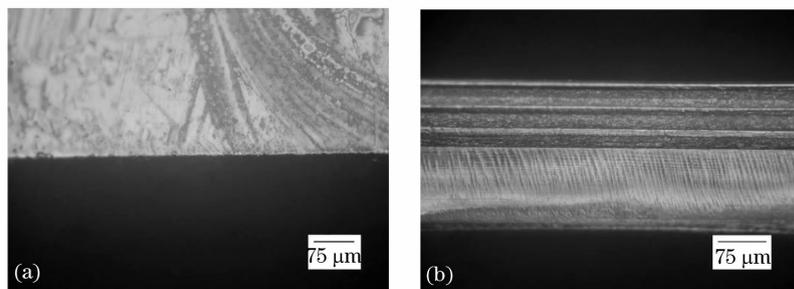


图 15 紫外激光切割 FPC 样品表面(a)和剖面形貌(b)

Fig. 15 Surface (a) and cross section (b) of a FPC sample cut by UV laser

4 结 论

采用输出功率 8 W 的 355 nm Nd:YVO₄ 激光器和 50 W 的 1064 nm Nd:YAG 激光器对覆铜板和双面柔性线路板进行了刻蚀实验。

1) 由于实验所用的 CCL 和 FPC 表面加工铜层厚度接近,实验结果具有一定的相似性。单脉冲能量是影响刻蚀宽度和深度的主要因素。随着功率密度的提高,刻缝宽度显著加大。随着重复频率的提高,刻蚀缝宽存在一个峰值,与激光器单脉冲能量的峰值点接近。

2) 在一定的工艺参数下,采用紫外激光可以实现 1.6 mm 厚 CCL 的切割,切割精密、光滑,侧壁陡直。采用 1064 nm 激光时,由于环氧树脂基板对红外激光的吸收率较小,不能实现覆铜板的切割。但也正因为如此,在利用红外激光加工 PCB 时,选择适当的工艺参数,可以将激光对基板的损伤降到最低。

3) 紫外激光在完全刻蚀 FPC 表面铜层时,不可避免地会刻蚀一部分 PI 基板形成 V 形刻槽,在切割 FPC 时,中间 PI 层的缝宽明显大于表面铜层的缝宽。使用 1064 nm 激光器加工对基板的损伤则要小得多。

4) 紫外激光加工精度高,刻蚀缝宽及热影响区较小,刻蚀深度较大,但是对基板的损伤难以避免;

1064 nm 激光对基板的损伤要小得多,这对实现激光在 PCB 加工领域的工业应用非常重要。

虽然紫外激光加工对基板有一定影响,但由于具有更高的加工精度、质量和效率,以及较强的穿透能力,使得紫外激光在 PCB 材料钻孔、切割和开窗口等方面的应用仍具有广阔的前景。图 15 所示为紫外激光切割多层 FPC 的表面和剖面形貌,可以看到,切割边缘平整,PI 层向内凹的深度约 10 μm,对于切割线路板轮廓可以忽略。

红外激光加工最大的优势就是对环氧树脂和聚酰亚胺基板的破坏较小,这一点在 PCB 板的微加工中非常重要。因此,1064 nm 激光较适合于表面铜层的去除加工,而 355 nm 紫外激光更适合于 PCB 板的切割成型加工。

参 考 文 献

- Zhang Huaiwu. The Principle and Technology of Modern Printed Circuit Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2006
张怀武. 现代印制电路原理与工艺[M]. 北京:机械工业出版社, 2006
- Chen Bing, Chai Zhiqiang. Flexible Printed Circuit Technology [M]. Beijing: Science Press, 2005
陈兵,柴志强. 挠性印制电路技术[M]. 北京:科学出版社, 2005
- Wang Shaofei, Cao Yu, Wang Xiaobao *et al.*. Microheater array fabrication by laser micro-cladding method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11):1567~1570
王少飞,曹宇,王小宝等. 激光微细熔覆快速制造微加热器阵列[J]. 中国激光, 2007, **34**(11):1567~1570
- Li Huiling, Zeng Xiaoyan. Effect of subsequently sintered processing on properties of thick-film resistor directly fabricated by laser micro-cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 570~576
李慧玲,曾晓雁. 后续烧结工艺对激光微细熔覆制备厚膜电阻性能的影响[J]. 中国激光, 2006, **33**(4):570~576
- Lei Junpeng. A study of direct writing conductive lines by laser etching [D]. Master's dissertation, Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2004
雷俊鹏. 激光刻蚀直接布线技术的研究[D]. 武汉:华中科技大学硕士学位论文, 2004

- 6 Wang Hongjie, Guo Wengang, Dong Zhaohui *et al.*. Application of laser etching technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(5):469~472
王宏杰,郭文刚,董兆辉等. 激光刻蚀技术的应用[J]. 红外与激光工程, 2004, **33**(5):469~472
- 7 Shi Zhaohui, Fan Zhongwei, Zhang Ying *et al.*. High efficiency and high power all-solid-state ultraviolet laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):27~30
石朝辉,樊仲维,张 瑛等. 高效率高功率全固态紫外激光器[J]. 中国激光, 2007, **34**(1):27~30
- 8 Wan Yunfang, Han Kezhen, Zuo Chunhua *et al.*. An efficient diode-pumped Nd:YAG/LBO triple-frequency UV laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12):2182~2186
万云芳,韩克祯,左春华等. 高效三倍频全固态 Nd:YAG/LBO 紫外激光器[J]. 光子学报, 2007, **36**(12):2182~2186
- 9 Lü Yanfei, Zhang Xihe, Yao Zhihai *et al.*. Laser-diode pumped all-solid-state continuous-wave ultraviolet laser at 355 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8):1048~1050
吕彦飞,张喜和,姚治海等. 激光二极管抽运全固态 355 nm 连续波紫外激光器[J]. 中国激光, 2007, **34**(8):1048~1050
- 10 Yutong Feng, Junqing Meng, Weibiao Chen. High repetition rate, compact micro-pulse all-solid-state laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(11):648~650
- 11 Tao Li, Zhuang Zhuo, Xiaomin Li *et al.*. Study on optical characteristics of Nd:YVO₄/YVO₄ composite crystal laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(3):175~177
- 12 Yang Jianhua, Zhang Shuai, Chen Jimin. Experimental research on high power UV laser cutting Cu membrane [J]. *Applied Laser*, 2005, **25**(5):289~292
阳建华,张 帅,陈继民. 高功率紫外激光切割铜薄膜的实验研究[J]. 应用激光, 2005, **25**(5):289~292
- 13 Ling Lei, Lou Qihong, Ye Zhenghuan *et al.*. Ablation of circuit board by pulsed UV laser [J]. *Chinese J. 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
- 14 J. G. Kim, W. S. Chang, K. K. Yoon *et al.*. Micro-drilling of PCB substrate using DPSS 3rd harmonic laser [C]. *SPIE*, 2003, **4830**:105~109
- 15 Norman Hodgson, Mingwei Li, Andrew Held *et al.*. Diode-pumped TEM₀₀ mode solid state lasers and their micromachining applications [C]. *SPIE*, 2003, **4977**:281~294
- 16 Weisheng Lei, John Davignon. Solid state UV laser technology for electronic packaging applications [C]. *SPIE*, 2005, **5629**:314~326
- 17 Rajesh S. Patel, James Bovatsek. Processing benefits of high repetition rate and high average power 355 nm laser for micromachining of microelectronics packaging materials [C]. *SPIE*, 2007, **6459**:64590H
- 18 Bin Zhang, K. C. Yung. Frequency-tripled Nd:YAG laser ablation in laser structuring process [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, **44**:815~825
- 19 D. W. Zeng, K. C. Yung, C. S. Xie. UV Nd:YAG laser ablation of copper: chemical states in both crater and halo studied by XPS [J]. *Applied Surface Science*, 2003, **217**:170~180