

文章编号: 0258-7025(2009)12-3143-06

355 nm 紫外激光加工柔性线路板盲孔的研究

张 菲 段 军 曾晓雁 李祥友

(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 10 W 的 355 nm 紫外激光器对 4 层柔性线路板(FPC)进行了盲孔加工实验。分析了紫外激光与铜箔和聚酰亚胺(PI)相互作用的过程和机理,并模拟出在一定条件下紫外激光与聚酰亚胺和铜箔相互作用时的单脉冲刻蚀深度。研究了不同加工方式对加工质量的影响,得到优化工艺参数为:第一次采用加工功率 3.9 W,频率 80 kHz,第二次将加工功率降到 1.4 W,其他参数不变,此时加工盲孔的效果最为理想,重铸层粗糙度为 0.88966 μm ,孔底粗糙度为 1.063 μm 。给出了孔底表面的扫描电镜(SEM)图和针式台阶仪测量的盲孔底面三维轮廓及切面二维轮廓图。

关键词 激光技术;激光钻孔;355 nm 紫外激光;柔性线路板;盲孔;刻蚀率

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093612.3143

Study of Blind Holes Drilling on Flexible Circuit Board Using 355 nm UV Laser

Zhang Fei Duan Jun Zeng Xiaoyan Li Xiangyou

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract A 10 W and 355 nm Nd:YAG laser is used for the blind hole drilling experiment of a 4 layer flexible circuit board (FPC). The interaction mechanism with UV laser and copper and polyimide (PI) is analysed, and the etching depth of single pulse under certain conditions on polyimide and copper is simulated. The effects of the processing methods on the micro-drilling quality are investigated and analyzed. Finally, the optimization of process parameters are obtained, that firstly using the power of 3.9 W, the frequency of 80 kHz, then secondly using the power down to 1.4 W with other parameters unchanged. The recast layer roughness and the bottom surface roughness are 0.88966 μm and 1.063 μm respectively. The scanning electron microscope (SEM) photograph, the 3D profile of bottom surface and the 2D profile of section of the blind hole measured by surface profile measuring system are given.

Key words laser technique; laser drilling; 355 nm UV laser; flexible circuit board; blind hole; etching rate

1 引 言

近年来,随着半导体电子产品朝着便携式、小型化的方向发展,传统的微孔加工方式已不能满足微孔加工深径比的要求。由于激光钻孔具有效率高、成本低等优点,使得这项技术在工业应用和科学研究中占有越来越重要的地位,并已经在电子等工业

上得到了广泛应用^[1,2]。

采用 CO₂ 激光钻孔速度快,但是在处理表面为铜层的线路板材料时工序复杂。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

收稿日期: 2009-10-14; 收到修改稿日期: 2009-11-06

基金项目: 国家 863 计划(SQ2007AA03xk140983)资助课题。

作者简介: 张 菲(1983—),男,博士研究生,主要从事全固态紫外激光加工设备与技术等方面的研究。

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

导师简介: 段 军(1956—),男,教授,博士,主要从事激光先进制造技术方面的研究。

E-mail: duans@mail.hust.edu.cn

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 10 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,在电子制造业精密加工和微细加工领域中得到广泛应用。

紫外激光加工机理目前普遍认为有两种方式,即热加工方式和冷加工方式。紫外激光热钻孔的基本原理为,当激光束照射到金属表面时,其中的一部分能量被材料表面很薄的一层吸收,首先引起材料中的带电粒子振动,转化为自由电子动能,这些激发能通过一定的步骤转化为热量。吸收的热量将使材料加热、熔化、气化和形成等离子体,产生气化喷射并抛出材料形成小孔。蒸发时必须有足够的功率密度,其范围在 $10^7 \sim 10^{10} \text{ W/cm}^2$ 。激光冷加工直到 1982 年才由 Srinivasan 和 Mayne-Banton^[3] 在一份研究聚合物激光剥离的文章中提出。在整个光化学剥离过程中,由于紫外激光的波长短,激光束中单光子能量大于某些材料(如高分子聚合物)的分子束缚能量,因而可利用激光的光子能量直接破坏材料的化学键^[4],使材料以小颗粒或者气态的方式排出,形成小孔。波长为 355 nm 的紫外光源,其单光子能量为 3.47 eV,大于常态下聚酰亚胺(PI)结构中 C—C 键和 C—N 键的键能,所以,当波长为 355 nm 的紫外激光入射到聚酰亚胺表面时,可以直接将 C—C 和 C—N 键打断^[5],当加工参数满足一定条件时,可以使微钻孔基本不产生光热作用。

对紫外激光加工微盲孔技术的研究,国外企业和科研机构起步较早^[6]。国内研究重点目前还在研制光束模式好、性能稳定的工业化全固态紫外激光器阶段^[7~11]。受设备条件的制约,紫外激光微加工技术的研究和相关报道较少^[12~14]。本文利用自主研发的紫外激光微加工设备对此技术进行了深入研究。

2 实验设备与材料

2.1 实验设备

实验所用设备为自主研发的紫外激光微加工设备,如图 1 所示。系统采用振镜扫描和直线电机工作台联动的方式,可以大大提高加工精度和效率。激光器的主要参数如表 1 所示,良好的光束质量可以提高激光钻孔的精度,减小激光钻孔的锥度,提高激光钻孔的重复性,测得平均功率和单脉冲能量的波动不大于 2%,保证了激光加工盲孔具有较高的可靠性。



图 1 紫外激光微加工设备

Fig. 1 UV laser micro-processing equipment

表 1 激光器主要参数

Table 1 Main parameters of the laser

Laser parameters	Parameter range
Wavelength /nm	355
Power /W	0~10
Repetition frequency /kHz	10~100
Pulse energy /J	0~0.36
Pulse width /ns	10~60
Energy density /(J/cm^2)	0~208
Far-field divergence angle /mrad	<1.2
Horizontal polarized ratio	>100:1
Export spot /mm	0.9
Laser ellipseness	>90%
Quality factor	<1.1

2.2 实验材料

实验选取的材料是某公司生产的 4 层柔性线路板(FPC),其剖面结构如图 2 所示,包含压延铜层、聚酰亚胺(PI)层和胶层。FPC 板上表面压延铜厚度为 $18 \mu\text{m}$,其基本特性参数如表 2 所示。PI 层厚度为 $12.5 \mu\text{m}$,其基本特性如表 3 所示。

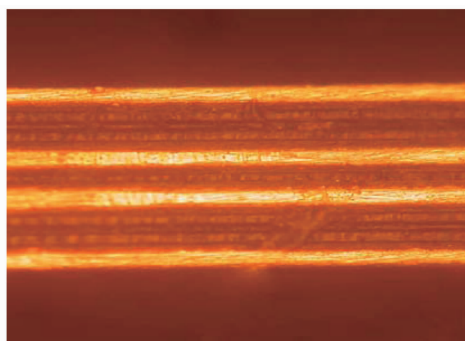


图 2 FPC 板剖面结构

Fig. 2 Profile structure of the FPC board

表 2 压延铜基本参数

Table 2 Basic parameters of the rolling copper

Parameters	Value
Substance Cu	
Specific heat C_p / [J/(kg·°C)]	471
Thermal conduction k / [W/(m·T)]	401
Density ρ / (kg/m ³)	8.9×10^3
Absorption coefficient α_{eff} / m ⁻¹	7.31×10^7
Reflectance(355 nm) R	0.415

表 3 PI 基本参数

Table 3 Basic parameters of PI

Parameters	Value
Substance PI	
Specific heat C_p / [J/(kg·°C)]	2000
Thermal conduction k / [W/(m·T)]	0.385
Density ρ / (kg/m ³)	1.42×10^3
Absorption coefficient α_{eff} / m ⁻¹	0.2×10^7

3 紫外激光加工 FPC 盲孔模型和优化实验研究

3.1 355 nm 紫外激光单脉冲刻蚀率的模拟

3.1.1 PI 的单脉冲刻蚀模拟

紫外激光作用于 PI 时,具有光化学作用。根据 Beer law 可以得出由光化学作用而形成的钻孔深度 L_C 为^[15]

$$L_C = \frac{1}{\alpha_{\text{eff}}} \cdot \ln \frac{F}{F_{\text{th}}}, \quad (1)$$

式中 $\alpha_{\text{eff}} = 0.2 \times 10^7$ 为有效吸收系数,由 B. S. Shin 等^[15] 在 2007 年测得; $F_{\text{th}} = 352 \text{ mJ/cm}^2$, 为紫外与聚合物作用时的钻孔阈值, F 为激光能量密度。将相关参数代入(1)式,可获得能量密度与单脉冲光化学钻孔深度之间的关系,如图 3 所示。

而在激光加工聚合物时,光热作用也是不可避免的一个方面,其单脉冲钻孔深度用 L_T 表示,由准

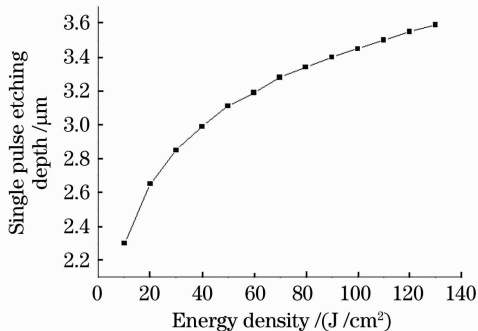


图 3 PI 钻孔光化学作用单脉冲刻蚀深度
Fig. 3 Photochemical etching depth of PI single-pulse drilling

零级速率法,即 PZOR 法则^[16]

$$V = -\frac{dc}{dt} = kt \Rightarrow -\int_{C_0}^C \frac{dc}{c} = k \int_0^t dt, \quad (2)$$

由(2)式可得

$$L_T = k_0 \cdot \exp(-E/RT), \quad (3)$$

式中 k_0 为一曝光常数, R 是气体常数, T 为温度, E 为剥离单位体积材料所需的能量。加工材料的温度,采用平均温度来近似处理,根据 Cain 给出的温度模型^[17]

$$T(x) = \frac{\alpha_{\text{eff}} F}{C_p} \exp(-\alpha_{\text{eff}} x), \quad (4)$$

式中 C_p 为比热容, x 为刻蚀深度。计算从 $x=0$ 到 $x=dp$ 的平均温度 T_{avg}

$$T_{\text{avg}} = \frac{\int_0^{dp} T(x) dx}{dp} \Rightarrow T_{\text{avg}} = \frac{\alpha_{\text{eff}} F}{C_p dp} \int_0^{dp} \exp(-\alpha_{\text{eff}} x) dx \quad (5)$$

$$= \frac{\alpha_{\text{eff}} F}{C_p dp} \frac{1}{\alpha_{\text{eff}}} [\exp(-\alpha_{\text{eff}} dp) - 1], \quad (6)$$

近似取

$$dp = \frac{1}{\alpha_{\text{eff}}} \ln \frac{F}{F_{\text{th}}} \Rightarrow dp \cdot \alpha_{\text{eff}} = \ln \frac{F}{F_{\text{th}}}, \quad (7)$$

将(7)式代入(6)式,得

$$T_{\text{avg}} = \frac{\alpha_{\text{eff}}}{C_p \cdot \ln \frac{F}{F_{\text{th}}}} (F - F_{\text{th}}), \quad (8)$$

将(8)式代入(3)式,得

$$L_T = k_0 \exp\left\{\left(-E \cdot \ln \frac{F}{F_{\text{th}}} \cdot C_p\right) / [R \alpha_{\text{eff}} (F - F_{\text{th}})]\right\}. \quad (9)$$

那么,可以得到光热剥离时单脉冲剥离深度与能量密度的关系曲线,如图 4 所示。

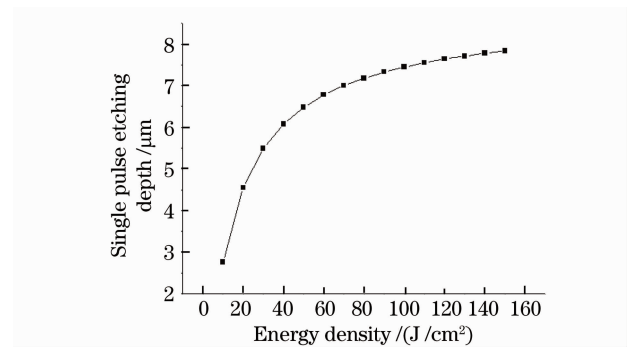


图 4 PI 钻孔光热作用单脉冲刻蚀深度
Fig. 4 Photothermolysis etching depth of PI single-pulse drilling

令

$$E^* = \frac{E \cdot C_p}{R}, \quad (10)$$

则由(1)式与(9)式可得总钻孔深度 L 为

$$L = k_0 \exp \left\{ \left(-E^* \cdot \ln \frac{F}{F_{th}} \right) / [\alpha_{eff} (F - F_{th})] \right\} + \frac{1}{\alpha_{eff}} \cdot \ln \frac{F}{F_{th}}. \quad (11)$$

将相关参数代入(11)式,得到 PI 钻孔时单脉冲总钻孔深度与输入能量密度的关系,如图 5 所示。

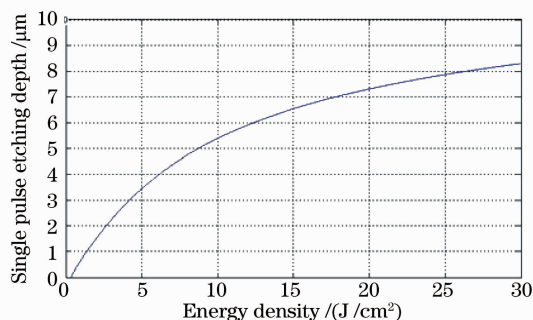


图 5 PI 钻孔总的单脉冲刻蚀深度

Fig. 5 Total etching depth of PI single-pulse drilling

3.1.2 铜的单脉冲刻蚀模拟

铜箔的物理特性参数与实验所得的经验参数取值如表 4 所示。

表 4 铜箔经验参数

Table 4 Empirical parameters of copper

Parameters	Value
Substance Cu	
Absorption coefficient α_{eff}/m^{-1}	7.31×10^7
Energy threshold $F_{th}/(J/m^2)$	0.5×10^7
Effective activation energy $E/(J/m^3)$	8.82×10^{11}
Experimental parameters $A/(m/pulse)$	1.24×10^{-6}

表 4 中, α_{eff} 和 F_{th} 由相关文献中查得^[18], E 和 A 根据实验数据代入 SBB 模型^[11] 计算得出。355 nm 紫外激光与铜箔相互作用时,发生的是光热反应。将铜箔的物理特性参数与经验参数代入

(9)式,可以得出能量密度与单脉冲刻蚀深度的关系曲线,如图 6 所示。

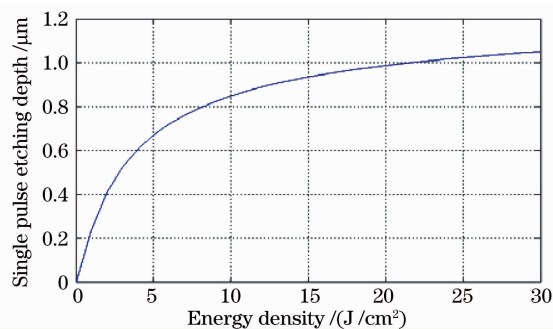


图 6 铜箔钻孔时单脉冲刻蚀深度

Fig. 6 Etching depth of copper single-pulse drilling

3.2 FPC 板盲孔加工优化实验研究

加工一阶盲孔结构示意图如图 7 所示,其中 Cu 表示铜层,PI 表示聚酰亚胺层,AD 表示胶。加工要求一阶盲孔直径 200 μm ,孔底面粗糙度小于 2 μm 。

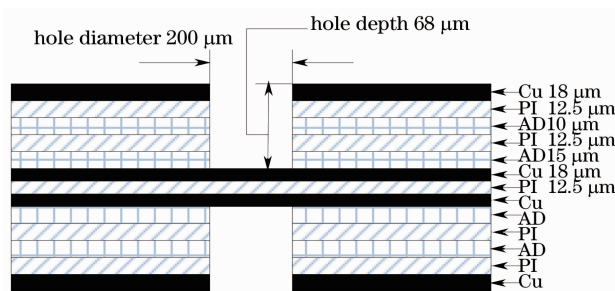


图 7 FPC 板盲孔加工结构示意图

Fig. 7 Structure schematic of FPC blind hole

3.2.1 扫描方式的影响

目前在加工 100~200 μm 盲孔时普遍采用的是同心圆填充和螺旋线扫描法,这两种方法都存在中心部位钻孔较深的问题,如图 8(a),(b)所示。这是因为靠近圆心的位置作用范围小,单位面积吸收的能量大,刻蚀深度比周围大,很可能将第二层铜刻穿到达下一个铜层,这样在做后续沉铜工艺时可能将下一层铜连通,导致整块线路板失效。

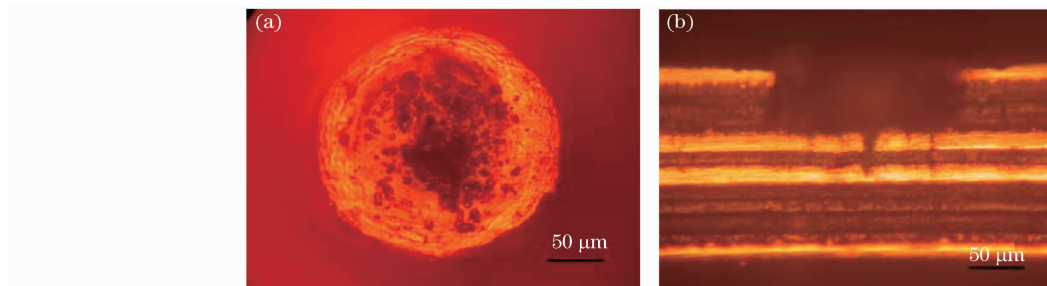


图 8 采用同心圆扫描方式加工结果。(a)孔底形貌;(b)盲孔剖面形貌

Fig. 8 Results of using concentric circles scanning method. (a) Bottom surface morphology of the blind hole; (b) section morphology of the blind hole

采用特殊的优化钻孔方法,可以解决上述问题,如图 9 所示。微孔中心没有发黑区域,孔底中心区域光泽平整,加工效果明显好于前者。

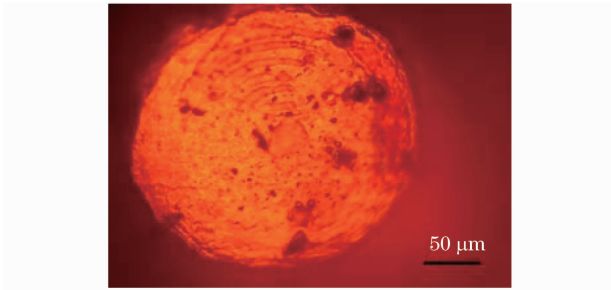


图 9 优化钻孔方式加工结果

Fig. 9 Results of using optimized drilling method

3.2.2 加工层数的影响

在实际加工微孔的过程中,如果仅采用单次加

工,由于材料吸收率的不同很难精确地控制刻蚀深度,从而造成聚合物材料的残留或是第二次铜层的过蚀。可根据不同的绝缘材料选用不同的加工层数和加工能量,同时考虑到生产效率问题,通常采用二层法进行加工。第一层设定较高的激光能量,将铜图形层去除。第二层可将激光能量设定得小一些,加工绝缘层,较小的激光能量可以减小对内层铜图形层的损伤。第二次扫描时的功率需要精确控制,如图 10(a)所示,若第二次扫描时的能量稍大,激光束不仅仅将孔底的聚合物加工排出,还使孔底的铜层受热膨胀,受热膨胀后的铜重新凝固,使微孔中部的厚度高于周边。若能量设置过大,如图 10(b)所示,此时无膨胀现象发生,而是直接将第二层铜层刻蚀掉一部分,并排出微孔。

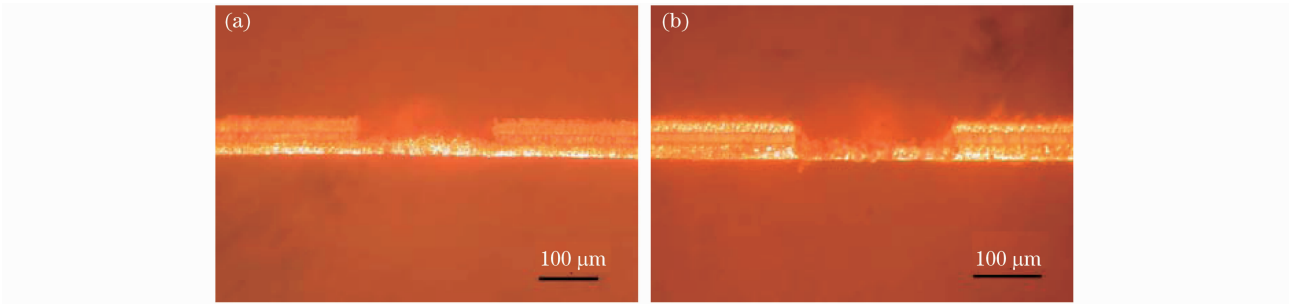


图 10 第二次加工能量过大的情况。(a)能量稍大的情况;(b)能量过大的情况

Fig. 10 Results of excessive energy for second process. (a) Result of using slightly high energy; (b) result of using exceedingly high energy

通过大量工艺实验,得到加工一阶盲孔时的最优工艺参数为第一次加工时功率 3.9 W,频率 80 kHz,第二次加工时其他参数不变,只改变功率到 1.4 W。图 11 所示为一阶盲孔的扫描电镜(SEM)图。观察图中可以发现,中心没有加工过深的问题且也没有明显的扫描刻槽和发绿区域,底部整洁光泽,锥度小,结构理想。图 12 和 13 分别为用针式台阶仪对一阶盲孔的孔底和切面轮廓检测的结

果。可以看到,盲孔底面中心部位最高,与最低处的高度差为 7.16 μm。由于实验所采用的 FPC 板单层铜箔的厚度为 18 μm,所以本工艺在孔底产生的误差在允许的范围内。图 13 中 A 区域为孔底粗糙度检测区域,其值为 1.063 μm,B 区域为重铸层粗糙度检测区域,其值为 0.88966 μm,两者都满足加工要求。

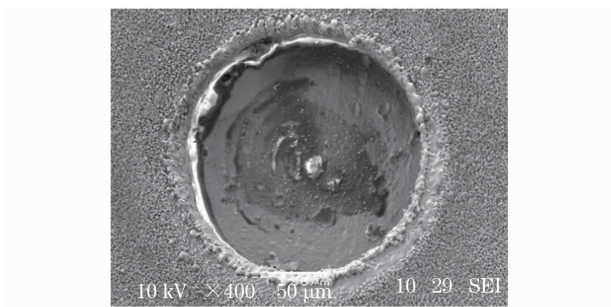


图 11 盲孔 SEM 照片

Fig. 11 SEM photograph of blind hole

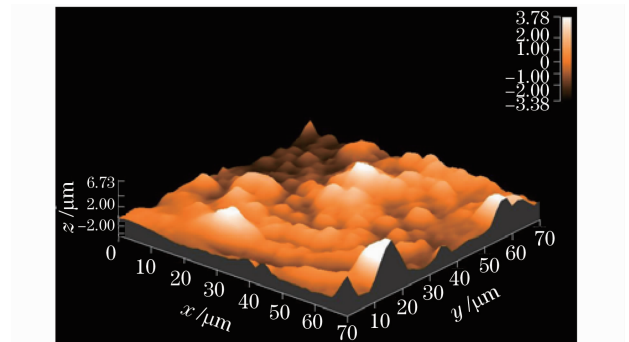


图 12 盲孔底面三维轮廓

Fig. 12 3D profile of bottom of blind hole

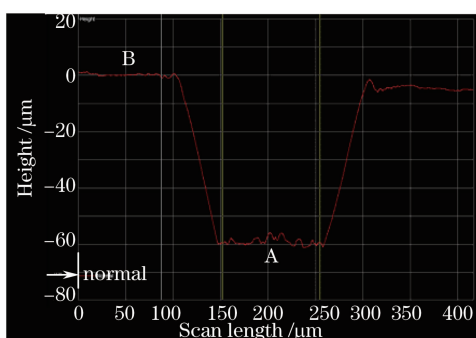


图 13 盲孔切面二维轮廓

Fig. 13 2D profile of section of blind hole

图 14 为整板 FPC 板加工情况,可以看到,FPC 板表面质量良好,(b)图为圆圈区域的放大图。做切片分析,可以发现微孔锥度小,底面平整,可以满足工业应用的要求。

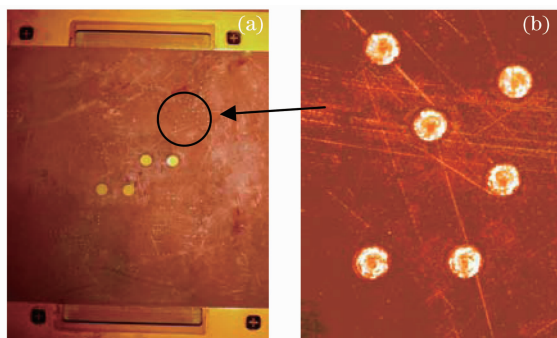
图 14 整板 FPC 加工照片。(a)一个单元照片;
(b)局部区域放大照片

Fig. 14 Photo of the entire FPC board processing.

(a) Photo of one piece; (b) enlarge photo of local area

4 结 论

分析了紫外激光与铜箔和聚酰亚胺相互作用的过程和机理,模拟了在一定的条件下紫外激光分别与聚酰亚胺和铜箔相互作用时的单脉冲刻蚀深度。FPC 板加工微型盲孔时,采用优化的加工方法,可以解决传统同心圆扫描或螺旋线扫描钻孔法中。微孔中心处过深的问题。利用这种方法,可以加工的最小孔径为 $75 \mu\text{m}$ 。当采用第一次加工功率 3.9 W ,频率 80 kHz ,第二次加工只将功率降到 1.4 W 的工艺参数时,加工盲孔的效果最为理想,重铸层粗糙度为 $0.88966 \mu\text{m}$,孔底粗糙度为 $1.063 \mu\text{m}$ 。

参 考 文 献

1 Weisheng Lei, John Davignon. Solid state UV laser technology for electronic packaging applications[C]. *SPIE*, 2005, **5629**: 314~326
2 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
3 R. Srinivasan, V. Mayne-Banton. Self-developing photoetching of poly films by far-ultraviolet excimer laser radiation[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **41**(6): 576~578
4 W. J. Lee, Y. S. Lee, S. K. Rha *et al.*. Adhesion and interface chemical reactions of Cu/polyimide and Cu/TiN by XPS[J]. *Applied Surface Science*, 2003, **205**(1-4): 128~136
5 K. C. Yung, D. W. Zeng, T. M. Yue. XPS investigation of upilex-S polyimide ablated by 355 nm Nd:YAG laser irradiation [J]. *Applied Surface Science*, 2001, **173**(3-4): 193~202
6 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
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): 29~32
石朝辉, 樊仲维, 张 瑛等. 高效率大功率全固态紫外激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 29~32
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 Zhenhuan *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 Zhang Fei, Zeng Xiaoyan, Li Xiangyou *et al.*. Laser etching and cutting printed circuit board by 355 nm and 1064 nm diode pumped solid state lasers[J]. *Chinese J. 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
15 B. S. Shin, J. Y. Oh, H. Sohn. Theoretical and experimental investigation into laser ablation of polyimide and copper films with 355-nm Nd:YVO₄ laser[J]. *Materials Processing Technology*, 2007, **187-188**: 260~263
16 G. C. D Couto, S. V. Badu. Excimer laser ablation of polyimide-doped poly (tetrafluoroethylene) at 240 and 308 nm [J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**(10): 5972~5980
17 X. L. Zhou, W. Wen, J. S. Zhang. A mathematical model of the removal of gold thin film on polymer surface by laser ablation [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2005, **190** (2-3): 260~263
18 S. Y. Bang. Effect of beam parameters on excimer laser ablation [C]. *KSPE*, 2005, **22**(7): 38~46