

文章编号: 0258-7025(2009)02-0494-04

脉冲频率及扫描方式对光纤激光软钎焊的影响

师文庆^{1,2} 杨永强¹ 郭 炜¹ 卫国强¹ 黄延禄¹

(¹ 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)
(² 广东海洋大学理学院, 广东 湛江 524088)

摘要 为了研究光纤激光软钎焊中激光脉冲频率和扫描方式对焊接质量的影响,通过用 12 W 的 100% 功率的 SP-12P 型脉冲式光纤激光扫描软钎焊系统在覆铜板上对 Sn-Ag-Cu 无铅钎料进行软钎焊实验,并对不同脉冲频率、不同扫描方式下的激光软钎焊技术进行实验研究。结果表明,在直线扫描方式下,高于超声波频率的 500 kHz 脉冲激光束作用于焊点时,会在钎料与焊盘之间的界面处发生空化作用,破碎氧化膜,使钎料在焊盘上润湿铺展,实现脉冲激光对无铅钎料 Sn-Ag-Cu 在覆铜板上的扫描软钎焊。

关键词 激光技术;激光软钎焊;光纤激光器;激光脉冲频率;扫描方式

中图分类号 TG454;TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093602.0494

Effects of Laser Pulse Frequency and Scanning Mode on Welding Quality in Soldering by Fiber Laser

Shi Wenqing^{1,2} Yang Yongqiang¹ Guo Wei¹ Wei Guoqiang¹ Huang Yanlu¹

¹ School of Mechanical & Automotive Engineering,
South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China
² College of Science, Guangdong Ocean University, Zhanjiang, Guangdong 524088, China

Abstract The welding quality is strongly affected by laser pulse frequency and scanning mode in laser soldering. Laser soldering was experimented on copper clad laminate with Sn-Ag-Cu lead-free solder with 100% 12 W power SP-12P fiber pulse laser soldering system, and laser soldering experiment was carried out with different pulse frequency and scanning mode. The results show that cavitations occur and oxide film is crushed on the interface between solder and bonding pad under linear scanning mode by 500 kHz laser. The solder is wet and spreads on the bonding pad, and then laser soldering comes true on the copper clad laminate with Sn-Ag-Cu lead-free solder by pulse laser scanning.

Key words laser technique; laser soldering; fiber laser; laser pulse frequency; scanning mode

1 引 言

激光软钎焊技术具有热影响区小、加热和冷却速度快等普通钎焊方法不可比拟的优点,因此,这一技术在微电子封装领域具有广阔的应用前景^[1]。已有多项研究^[2~5]表明,采用激光软钎焊的方法可以提高焊点强度,降低缺陷的产生率,提高生产效率,减少环境污染。激光软钎焊技术是以激光作为加热源,辐射加热引线(或无引线器件的连接焊盘),通过焊膏(或者预制焊料片)向基板传热,当温度达到钎

料熔点温度时,焊膏熔化,基板、引线润湿,形成焊点^[6,7]。激光软钎焊技术随着激光技术的发展也在不断地发展。可用于激光软钎焊技术的激光器种类很多。但是,随着电子产品小型化、微型化发展的要求,其越来越细的引线间距使得传统的微电子封装技术暴露出很多问题和缺陷,普通的激光焊接设备已不能满足小间距高速点焊的要求,如何解决这一问题已成为国内外相关工作者关注的重点。近年来,随着激光技术的发展,尤其是高性能、高质量的

收稿日期:2008-09-22;收到修改稿日期:2008-10-14

作者简介:师文庆(1971—),男,博士研究生,主要从事物理电子及激光技术的教学与研究。E-mail:swqafj@163.com

导师简介:杨永强(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事激光加工和焊接技术领域的教学与科研工作。

E-mail:meyqyang@scut.edu.cn

光纤激光器的出现并被广泛应用于焊接技术,光纤激光器优越的性能为高速小型化甚至微型化电子器件的封装提供了可能。所以,研究基于光纤激光器的激光软钎焊技术是很有必要的。

激光软钎焊技术按照所使用激光器的不同,可分为连续激光软钎焊和脉冲激光软钎焊两种^[8]。连续激光软钎焊可以进行狭缝的对接焊、两板的搭接焊等;脉冲激光软钎焊可以用于两薄板间的粘接焊、集成电路芯片引线的连接等。在脉冲激光软钎焊技术中,影响焊接效果的因素很多,如脉冲激光功率、单脉冲激光的能量、激光光斑的大小、脉冲宽度、脉冲频率、扫描方式等等^[9]。本文研究激光软钎焊中脉冲频率和扫描方式对焊接质量的影响。

2 实验方法

材料为单面覆铜板:铜箔厚度约为 $35\ \mu\text{m}$,尺寸为 $100\ \text{mm}\times 100\ \text{mm}$,在室温下用体积分数为 38% 的稀盐酸清洗后,再用无水乙醇脱水处理后待用。

借鉴丝网印刷的原理进行焊膏的涂覆,通过一个厚度为 $0.15\ \text{mm}$,中心留有 $10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$ 镂空的模板,用刮刀将熔点为 $217\ ^\circ\text{C}$ (固相线)的 Sn-Ag-Cu(质量分数为:Ag 3.5% ,Cu 0.7% ,余 Sn)无铅焊膏涂覆在紧贴于覆铜板的模板镂空区域,以形成在覆铜板上焊膏的均匀涂覆。

用 $12\ \text{W}$ 的 100% 功率的 SP-12P 型脉冲式光纤激光扫描软钎焊系统进行扫描点焊实验。所用激光器的光斑直径小于 $30\ \mu\text{m}$,光束质量因子 $M^2 < 2$ 。激光扫描软钎焊系统中所用聚焦透镜的焦距 $f = 160\ \text{mm}$ 。焊接时激光束的扫描速度为 $1\ \text{mm/s}$,跳空时的速度为 $3000\ \text{mm/s}$,脉冲激光器的脉冲频率为 $100\sim 500\ \text{kHz}$,占空比为 50% ,焊接时正离焦 $3\ \text{mm}$,作用在材料表面的激光光斑直径为 $45\ \mu\text{m}$,在覆铜板上一次扫描 10×10 排列的 100 个“短线段”,扫描每个“短线段”时激光束移动的距离为 $30\ \mu\text{m}$,如图 1 所示。

由于激光光斑直径大于激光束扫描每个“短线段”时移动的距离,而每个“短线段”实际上就是要焊接的一个“焊点”,所以不妨将这一“短线段”叫作一个焊接区域,扫描完这 100 个焊接区域共用了 $3.92\ \text{s}$ 。扫描的 100 个焊接区域整体上看好像“短划线”。

在扫描点焊时,对同一焊接区域采用多个激光脉冲作用的方法。多个激光脉冲作用于同一焊接区域时采用了十字交叉线扫描方式和直线扫描方式两种,如图 2 所示。

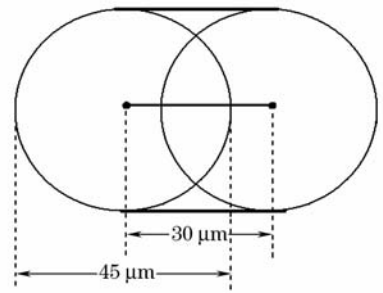


图 1 一个焊接区域的示意图

Fig. 1 Schematic diagram in a welding zone

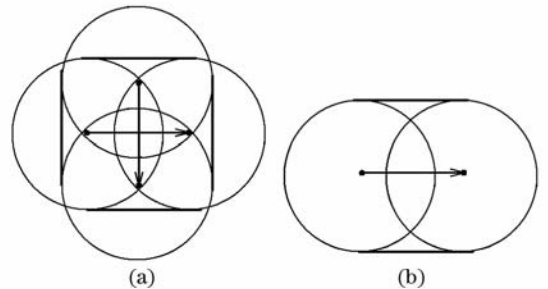


图 2 焊接过程中的两种不同扫描方式

(a) 十字交叉线扫描方式; (b) 直线扫描方式

Fig. 2 Two scanning modes in soldering

(a) decussate scanning mode; (b) linear scanning mode

3 实验结果与分析

激光束作用于涂有 Sn-Ag-Cu 焊膏的覆铜板表面,其作用过程可以看作是由一些断续的扫描构成,每一个焊接区域的焊接由多个扫描脉冲完成。在每一个脉冲的作用时间内,激光加热一个脉冲持续时间到温度 T_i ,然后冷却一个脉冲间隙时间到温度 T'_i 。之后再从 T'_i 温度开始又加热一个脉冲持续时间到温度 T_{i+1} ,然后又冷却一个脉冲间隙时间到温度 T'_{i+1} 。如此往复地对这一焊接区域进行多脉冲加热,同时也在不断地冷却,由于脉冲频率高,热量补充及时,所以其温度总体上呈上升趋势。

3.1 扫描频率对焊接质量的影响

扫描完 100 个焊接区域共用了 $3.92\ \text{s}$,共跳空约 $200\ \text{mm}$,跳空时间约 $0.067\ \text{s}$ (跳空速度: $3000\ \text{mm/s}$),在每个焊接区域上停留的时间约为 $38.5\ \text{ms}$ 。若扫描频率为 $500\ \text{kHz}$,则在每个焊接区域上共有约 19250 个激光脉冲,考虑到激光光斑直径为 $45\ \mu\text{m}$,扫描完每个焊接区域总体移动的距离为 $30\ \mu\text{m}$,如图 1 所示,所以相邻两个激光脉冲移动的距离可以忽略不计,可以认为激光扫描点焊同一焊接区域时的作用位置不变。

当用不同频率的脉冲激光进行焊接时,焊点处温度变化的大体趋势如图 3 所示。从图中可以看

出,在激光输出功率等其他条件一定的情况下,当脉冲激光的频率较高时,则单个脉冲激光的周期短、能量低,由单脉冲作用的焊接区域处的温度上升得不够高,到温度 T_1 。两激光脉冲间隙停留的时间短,冷却时间短,焊接区域的温度还来不及下降很多时,下一个脉冲激光又到来了,如图 3 中实线所示,其温度下降到 T'_1 。下一个脉冲激光作用后其温度是在 T'_1 的基础上上升,然后再冷却使温度下降……,这样反复多次,就会使温度上升到使钎料熔化并与基体很好结合的合适温度。相反,若脉冲激光频率较低时,则单个脉冲激光的周期长、能量多,由单脉冲作用的焊接区域的温度上升较多,到温度 T_2 。两激光脉冲间隙停留的时间长,冷却时间长,焊接区域的温度下降较多,下一个脉冲激光来得慢一些,如图 3 中虚线所示,其温度下降到 T'_2 。下一个脉冲激光作用后其温度是在 T'_2 的基础上上升,然后再冷却使温度下降……,这样多次反复。说明,在用频率高的多个脉冲激光焊接时,焊接区域处温度的上升趋势快一些;频率较低时,焊接区域处温度上升的趋势平缓一些。

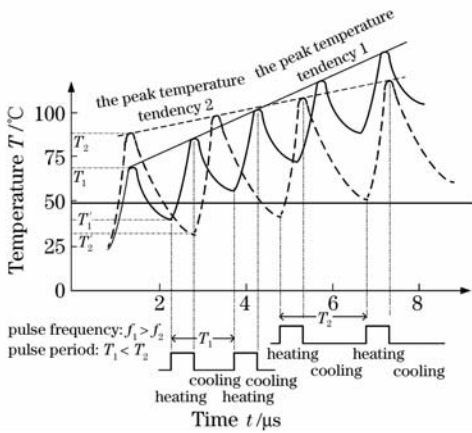


图 3 焊接区域处的温度变化示意图

Fig. 3 Schematic diagram of temperature variation in the welding zone

当激光频率在超声波频率以上时,在液态钎料内部就会激发出超声波,超声波传播到钎料与焊盘的界面,产生空化作用,破碎氧化膜,使钎料在焊盘上润湿铺展,实现无钎剂的钎焊^[10]。所以,应采用在超声波频率以上的脉冲激光进行软钎焊的研究。

在实验中,选用不同频率的脉冲激光进行激光软钎焊实验。当激光频率为 500 kHz 时,能得到较好的焊接效果。当将脉冲激光的频率调整为低于 500 kHz 时(设备所能提供的其他频率,如 50 kHz, 100 kHz, 200 kHz, 250 kHz 等),在同等条件下,焊

接实验失败。这说明在以上其他参数一定的情况下,脉冲激光的频率选择为 500 kHz 时,经过多次累积后,其温度上升到刚好能使一定量的钎料熔化,并与铜基板形成很好的冶金结合。

实际上影响这一问题的因素很多,如在温度升高过程中材料对一定波长激光能量的吸收系数、比热容等参数都在变化,不妨可以粗略地作如下解释。在激光功率和激光脉冲的占空比等其他条件都相同的情况下,每一个焊接区域的加热时间和散热冷却时间都相同,对每一个焊接区域,激光注入的能量也是相同的。当改变激光束的频率时,由图 3 可以看出,在频率低、周期长的激光脉冲作用时,每个单脉冲加热后的温度和冷却后的温度差别大,根据梯度散热理论,其他情况相同时温度梯度大的能量散失多,即频率低、周期长的激光脉冲作用时能量散失掉多一些,频率高、周期短的激光脉冲作用时能量散失掉少一些。所以,在其他参数一定的情况下,脉冲激光频率高的激光束会使焊接区域处温度上升的趋势快一些。

以上说明,在激光功率、光斑直径等参数一定的情况下,脉冲激光的频率在一定程度上影响焊接的最终效果。当其他参数变化时,激光脉冲的频率也相应地要作调整。在激光扫描软钎焊时,应该根据具体情况合理地匹配激光的功率、光斑大小、频率等因素。

3.2 扫描方式对焊接质量的影响

3.2.1 十字交叉线扫描

图 4(a) 为十字交叉线扫描方式扫描点焊的宏观效果。可以看出,采用十字交叉线的扫描方式,使得焊接区域中间部分的激光能量明显偏多,以致使中间部分的钎料“飞溅”掉。波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 激光束照射在纯铜表面时,由于其反射率较高,所以在光纤激光束的作用下,就会在焊接区域的中间部分形成一个凹坑;但若降低总体的激光能量,焊接区域的四周又不能很好地熔化。图 4(a) 表明,这种十字交叉线的扫描方式不利于形成很好的点焊效果。

3.2.2 直线扫描

图 4(b) 为直线扫描方式扫描点焊的宏观照片。可以看出,这种扫描方式焊接的宏观效果较好。采用扫描电镜(SEM)(图 5 所示)进一步观察发现,焊接后的润湿角大约为 30° , 润湿效果较好。图 5(b) 为焊点内部的微观显微组织,图中白色部分为 $\beta\text{-Sn}$ 基体,黑色部分为 Ag_3Sn 与 Cu_6Sn_5 金属间化合物混合组织;图 5(c) 为钎料与铜基板界面的 SEM 照

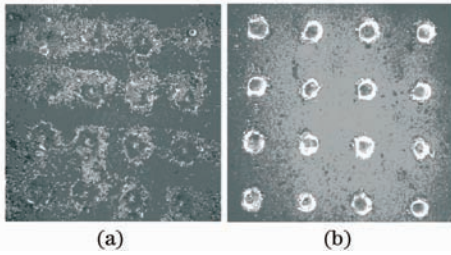


图4 不同扫描方式下焊点的外观照片
(a) 十字交叉线扫描; (b) 直线扫描

Fig. 4 Macrophotograph of different scanning soldering modes. (a) decussate scanning mode; (b) linear scanning mode

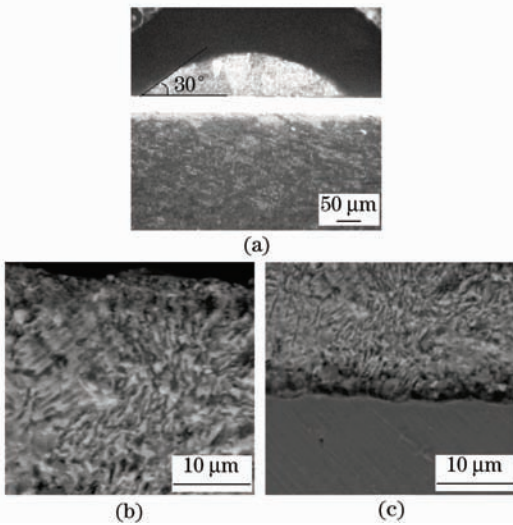


图5 激光脉冲频率为 500 kHz 时直线扫描焊接后的微观效果。(a) 钎焊后接触角示意图; (b) 焊点内部显微组织; (c) 钎料与 Cu 基板界面

Fig. 5 Microphotograph of laser solder on copper clad laminate at 500 kHz laser pulse frequency in linear scanning mode. (a) schematic diagram of contact angle; (b) microstructure in solder joint; (c) interface of solder and Cu substrate

片,上部分为钎料部分,下面为 Cu 基板,中间为 Cu_6Sn_5 金属间化合物,可以明显看出界面结合处无杂质和气孔等缺陷,焊接效果好,焊接质量高。

图5表明,在对同一焊接区域进行多脉冲的扫描点焊时,在扫描方式上,宜采用直线扫描的方式,这样在焊接区域能形成较为合理的能量分布,能焊接出较好质量的焊点。

4 结 论

在激光功率、光斑直径等参数一定的情况下,脉冲激光的频率在一定程度上影响着焊接的最终效果。通过实验得知,用12 W的100%功率的 SP-12P

型脉冲式光纤激光扫描软钎焊系统,在正离焦3 mm,光斑直径 $45 \mu\text{m}$,脉冲占空比 50%,频率 500 kHz时能用 Sn-Ag-Cu 无铅钎料成功地进行激光软钎焊。

在脉冲激光扫描点焊时,扫描方式也会影响最终的焊接质量。十字交叉线扫描方式不能保证焊接质量,激光能量选得小些,焊点边缘部分的焊接质量不能保证;激光能量选得大些,又会使焊点中间部分由于能量过多而造成钎料“飞溅”。直线扫描方式能较好地钎料与被焊材料有机地结合在一起并形成良好的焊点。

参 考 文 献

- Han Zongjie, Xue Songbai, Wang Jianxin *et al.*. Effects of Sn-Cu-Ni-Ce solder on mechanical properties of micro-joints soldered with diode-laser soldering system [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, **28**(1):33~37
韩宗杰,薛松柏,王俭辛等. Sn-Cu-Ni-Ce 钎料对激光钎焊焊点力学性能的影响[J]. *焊接学报*, 2007, **28**(1):33~37
- Han Zongjie, Xue Songbai, Wang Jianxin *et al.*. Mechanical properties and microstructures of QFP micro-joints soldered with diode-laser soldering system [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, **27**(10):41~44
韩宗杰,薛松柏,王俭辛等. QFP 器件半导体激光钎焊焊点力学性能和显微组织[J]. *焊接学报*, 2006, **27**(10):41~44
- L. Stauffera, A. W. Urscha, B. G. Achtera *et al.*. A surface-mounted device assembly technique for small optics based on laser reflow soldering [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, **43**(3-5):365~372
- Yao Lihua, Xue Songbai, Wang Peng *et al.*. Effect of diode-laser parameters on tensile strength of QFP micro-joints [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, **26**(10):90~92
姚立华,薛松柏,王鹏等. 半导体激光软钎焊工艺参数对 QFP 器件微焊点强度的影响[J]. *焊接学报*, 2005, **26**(10):90~92
- Ruisheng Huang, Liming Liu, Fan Zhang. Influences of laser in low power YAG laser-MAG hybrid welding process [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(1):47~50
- Yao Lihua, Xue Songbai, Liu Lin. Characteristic of diode-laser soldering system and its application in lead-free soldering [J]. *Welding & Joining*, 2005, (8):40~44
姚立华,薛松柏,刘琳. 半导体激光焊接系统的特点及其在无铅软钎焊中的应用[J]. *焊接*, 2005, (8):40~44
- Liao Jianhong, Meng Hongyuan, Wang Hongwei *et al.*. Investigation and applications of fiber laser precision cutting system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):135~138
廖健宏,蒙红云,王红卫等. 光纤激光精密切割系统的研制及其应用[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1):135~138
- Tang Chun, Wu Deyong, Gao Songxin *et al.*. Package technique for CW 40 W 808 nm quantum-well linear array diode laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(6):513~516
唐淳,武德勇,高松信等. 连续 40 W 808 nm 量子阱线阵二极管激光封装技术[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(6):513~516
- Zhang Guoshun. Modern Laser Manufacturing Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. 108~116
张国顺. 现代激光制造技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2006. 108~116
- Tian Yanhong, Wang Chunqing. Research status of reflow soldering technology in microelectronic packaging and assembly [J]. *Welding & Joining*, 2002, (6):5~9
田艳红,王春青. 微电子封装与组装中的再流焊技术研究进展[J]. *焊接*, 2002, (6):5~9