

# 基于振镜扫描的光纤激光无铅钎焊 QFP 器件的技术研究

袁建文 陈继民 黄超

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要** 采用光纤激光以振镜扫描的方式对四方扁平封装(QFP)器件进行了焊接实验研究,得到了激光钎焊参数配合 SnAg3.0Cu0.5 钎料的焊点抗拉强度的变化规律。基于振镜扫描的激光钎焊(11 W, 20 mm/s 或 8 W, 10 mm/s)不仅能够获得力学性能优良的无铅焊点,而且焊接速度大大提高。通过比较连续光纤激光钎焊、脉冲光纤激光钎焊和红外再流焊 SnAg3.0Cu0.5 钎料焊点的抗拉强度,表明连续光纤激光钎焊能明显地提高焊点的力学性能。同时对比研究了两种钎料 SnAg3.0Cu0.5 和 Sn63Pb37 在连续光纤激光焊的抗拉强度,表明 SnAg3.0Cu0.5 焊点的力学性能更加突出。焊点的拉伸断面显微形貌显示为塑性断裂,焊缝金相组织细密,界面过度平缓,生成了金属间化合物  $Cu_6Sn_5$ 。

**关键词** 激光技术;振镜;光纤激光;无铅钎料;四方扁平封装器件;焊点质量

**中图分类号** TN249; TG454 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.091406

## Research on Fiber Laser Lead-Free Soldering QFP Device Based on Scanning Galvanometers

Yuan Jianwen Chen Jimin Huang Chao

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** Soldering technology for quad flat pack (QFP) devices is studied using a fiber laser based on scanning galvanometer with SnAg3.0Cu0.5 solder and the relationships between tensile strength of micro-joints and laser soldering parameters are obtained. Excellent lead-free solder joints are achieved at the laser soldering parameters of 11 W, 20 mm/s or 8 W, 10 mm/s. The speed of laser soldering is improved dramatically based on scanning galvanometers. The mechanical properties of micro-joints are compared for different soldering methods, including continuous-wave (CW) fiber laser soldering, pulsed fiber laser soldering and infrared reflow soldering. The results indicate that CW fiber laser soldering can obviously improve the tensile strength of the joints with SnAg3.0Cu0.5 solder. In addition, the tensile strengths of SnAg3.0Cu0.5 solder and Sn63Pb37 solder soldered by CW fiber laser are compared. The mechanical property of SnAg3.0Cu0.5 is observed to be outstanding. The microstructure of fracture surfaces indicates that the fracture mechanism is ductility fracture. The metallographic structure of the solder joints is also investigated. It is found that the structure of soldering seam is fine and the interface is flat. The generated intermetallic compounds layer is  $Cu_6Sn_5$ .

**Key words** laser technique; galvanometer; fiber laser; lead-free solder; quad flat pack device; solder joint quality

**OCIS codes** 140.3390; 140.3510; 350.3850

## 1 引言

近年来,随着环保意识的增强,在世界范围内电子产品无铅化的呼声日益高涨,很多国家相继制定法规,强制企业遵守无铅化进程。目前比较成熟的无铅钎料<sup>[1]</sup>有 Sn-Ag、Sn-Cu、Sn-Ag-Cu、Sn-Zn 等,无论哪一种

**收稿日期**: 2013-03-11; **收到修改稿日期**: 2013-05-16; **网络出版日期**: 2013-08-14

**基金项目**: 北京市教委重点项目(KZ200910005006)

**作者简介**: 袁建文(1987—),男,硕士研究生,主要从事激光技术应用方面的研究。

E-mail: yuanjianwen@emails.bjut.edu.cn

**导师简介**: 陈继民(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事激光加工技术方面的研究。E-mail: jimin@bjut.edu.cn

无铅钎料,其接头的力学特性几乎都优于 Sn-Pb 钎料,但是与含 Pb 钎料(Sn-Pb)的工艺性相比则又差之甚远,还没有能和 Sn-Pb 合金相媲美的无铅钎料,企业只好调整产品生产工艺,艰难地改变工艺流程来与这些无铅钎料进行配合。

激光软钎焊具有局部快速加热和快速冷却的特点,可以有效地避免“无铅化”带来的许多问题,因而受到了人们广泛的关注。自从 1974 年首次提出激光软钎焊方法以来,激光软钎焊技术在发达国家不断发展<sup>[2-10]</sup>,并且研究者指出:激光软钎焊为微电子工业微型化、高质量、低成本提供了一条新道路,激光软钎焊技术有望成为微电子封装和互联技术的标准制造工艺<sup>[11-14]</sup>。在我国,南京航空航天大学采用半导体激光软钎焊系统使用 Sn-Ag-Cu 无铅焊膏焊接四方扁平封装(QFP)器件和超精密电阻(RN)元器件,发现 QFP 元器件的抗拉强度比红外(IR)再流焊提高了约 50%,RN 元器件的抗剪强度提高了约 80%<sup>[15-16]</sup>。华南理工大学师文庆等<sup>[17]</sup>研究了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,提出在直线扫描方式下,在高于超声波频率的 500 kHz 脉冲激光束作用下,能很好地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。目前,有关文献报道的激光钎焊采用移动平台导致激光钎焊速度(小于等于 10 mm/s)较小<sup>[18]</sup>,限制了其大范围的应用。

本文采用光纤激光以振镜扫描的方式进行无铅软钎焊实验,以提高激光钎焊速度,并着重分析无铅钎料焊点的抗拉强度、断面形貌及焊缝组织。

## 2 实验材料与方法

QFP 型封装器件是目前表面贴片技术(SMT)中应用最多的元器件,本研究选用型号为 HT48R50A-1 的 QFP-100 和 HT16512 的 QFP-44 器件,引脚宽度均为 0.3 mm,中心间距分别为 0.65 mm 和 0.8 mm。钎料采用应用广泛的无铅焊锡膏 SnAg3.0Cu0.5,同时选用含 Pb 钎料 Sn63Pb37 做对比实验,焊盘为 Cu/Sn。

实验步骤遵循 SMT 标准工艺流程,如图 1 所示。采用丝网印刷技术将焊锡膏精确地印刷到相应的焊盘上,再利用贴片机把 QFP 器件贴到印刷电路板(PCB)对应的焊锡膏的焊盘上。

光纤激光软钎焊系统结构如图 2 所示。采用连续(CW)和脉冲两种光纤激光( $\lambda=1064\text{ nm}$ )以振镜扫描的方式进行 QFP 器件的钎焊实验,其功率变化范围为 4~16 W,扫描速度变化范围为 3~34 mm/s。同时采用红外再流焊系统进行钎焊对比实验,对应 SnAg3.0Cu0.5 钎料的峰值温度为 235 °C。

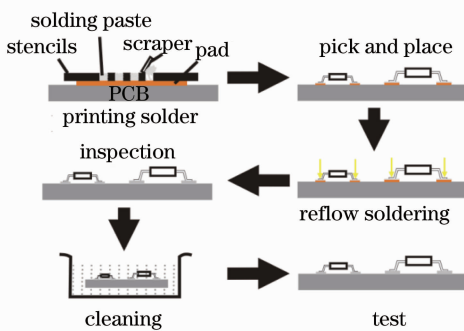


图 1 SMT 工艺流程

Fig.1 Process of SMT

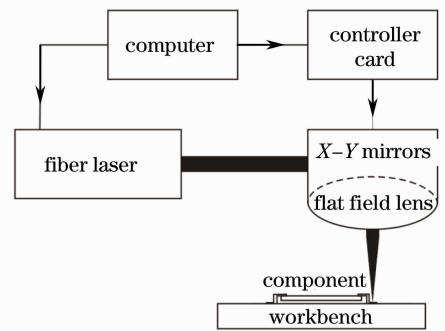


图 2 设备结构示意图

Fig.2 Schematic of the arrangement

钎焊完成后,对 QFP 微焊点进行力学分析、断面分析及焊缝分析。所有焊点拉伸方法采用日本工业标准 JIS Z 3198 无铅钎料试验方法(Test methods for lead-free solders)第六部分的 QFP 引线焊点的 45°角拉脱试验方法<sup>[19]</sup>。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 激光钎焊后 QFP 器件外观检查

图 3 是 SnAg3.0Cu0.5 钎料连续激光钎焊后 QFP-100 器件的外观照片。可以看出,在一定的激光工艺参数条件下钎焊 QFP 器件,可以得到无桥连、无钎料球等外观无缺陷的良好焊点。此外,实验中还可以明显

观察到,如果激光功率太小,钎料不能完全熔化,焊点表面粗糙;若激光功率过高或者入射位置不准确,引脚表层镀锡气化露出铜基板,或导致引脚周围烧黑等外观缺陷,如图4所示。

### 3.2 焊点抗拉强度

影响激光软钎焊焊点的抗拉强度的因素非常多,如器件引脚参数、焊锡膏成分、焊盘类型、激光功率、焊接速度等。当PCB基板、焊盘、钎料成份及元器件确定后,焊点的性能主要受焊接工艺参数的影响。在光纤激光焊接过程中,主要通过控制激光输出功率和焊接速度等参数保证焊点的性能。



图3 SnAg3.0Cu0.5钎料连续激光软钎焊后的QFP-100器件外观

Fig. 3 Appearance of QFP-100 after laser soldering with SnAg3.0Cu0.5 solder

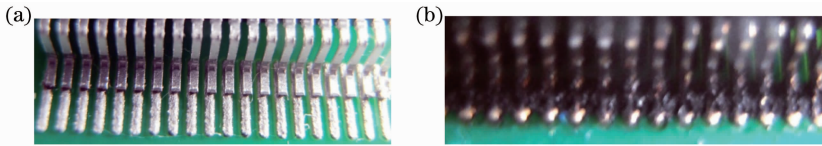


图4 无效的QFP焊点。(a)激光功率过低;(b)激光功率过高

Fig. 4 Invalid QFP solder joints. (a) The laser power is too low; (b) the laser power is too high

#### 3.2.1 激光功率对微焊点抗拉强度的影响规律

图5为扫描速度不变(20 mm/s)的条件下,SnAg3.0Cu0.5无铅微焊点抗拉强度随激光功率变化的曲线。由图可知,不同的激光功率焊接QFP器件,其焊点的力学性能具有非常大的差别,且激光功率较小时焊点的抗拉能力随着输出功率的增大而增大,当激光输出功率增大到一定值时,焊点的抗拉力达到最大值,而后则随着激光功率继续增大反而迅速减小。在焊接速度为20 mm/s的条件下,激光功率在8~12 W的范围内焊点得到了较好的抗拉强度,在激光功率为11 W时,焊点的抗拉伸力达到最大值;功率低于8 W时,钎料未能完全熔化,润湿性差,引脚与焊盘结合面积小,焊点的抗拉力小;当激光输出功率大于13 W时,钎料表面形成大量氧化渣,界面金属间化合物过度生长,导致焊点抗拉力快速减小;而激光功率大于14 W时,已使焊点结构遭到损坏。(注:本文中抗拉力以克力为单位,1 gf $\approx$ 0.0098 N)。

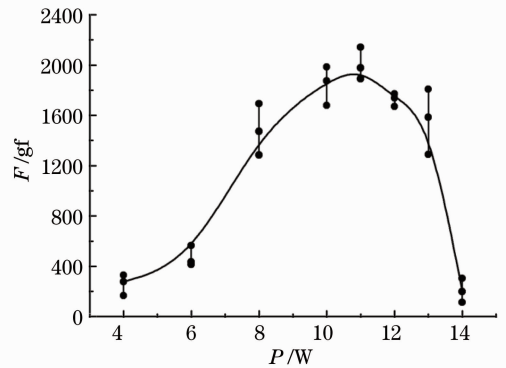


图5 焊接速度保持20 mm/s不变时QFP焊点抗拉力与激光输出功率之间的关系

Fig. 5 Relationship between tensile strength and laser power when the laser scanning speed is kept constant at 20 mm/s

#### 3.2.2 扫描速度对对微焊点抗拉强度的影响规律

图6为激光功率一定(8W)时,QFP无铅微焊点抗拉力与扫描速度之间的变化曲线。可以看出当扫描速度较小时,焊点的抗拉力随着速度增大快速增大;随后扫描速度继续增大反而使焊点抗拉力减小;当扫描速度大于一定值时,微焊点抗拉力直线减小。在激光输出功率为8 W时,焊接速度10 mm/s使焊点抗拉力达到最大,这是由于在此条件下QFP微焊点的钎焊时间(0.37s)最佳;当扫描速度大于28 mm/s时,由于焊接时间太短,已经不能形成良好的焊点,焊点抗拉力迅速降低;而焊接速度低于5 mm/s,热积累非常严重,过高的温度已使焊点周围PCB板烧坏。

实验中,钎焊速度和激光输出功率并不是单独影响QFP微焊点抗拉强度的,而是相互影响、相互匹配,也就是说对应某个功率有最佳的焊接速度,这与在相应的温度下有最佳的钎焊时间是一致的。可以通过适

当地提高激光功率来提高焊接速度,也可以通过降低焊接速度来降低激光功率。但是当激光功率低于 4 W 时,无论怎样降低焊接速度也不能形成良好的焊接接头;当激光功率高于 17 W 时,无论怎样提高速度也无法得到良好的焊点。这是由于激光功率过低,钎焊区达不到钎料的熔化温度,而激光功率过高,将使引脚表面的镀层直接气化掉,破坏了焊点的结构。

此外,对于不同的器件、钎料的激光钎焊,激光功率与焊接速度对其抗拉强度的影响趋势是相似的,只是最佳钎焊参数会稍有差别。在相同的钎焊速度下,Sn-Pb 钎料相比于 SnAg<sub>3.0</sub>Cu<sub>0.5</sub> 钎料所需要的激光功率更低一些,这与 Sn-Pb 钎料的熔点比 SnAg<sub>3.0</sub>Cu<sub>0.5</sub> 钎料的熔点低是一致的。当钎料类型确定后,不同 QFP 器件的激光钎焊参数也相差不大,这主要是由它们的引脚参数决定的,引脚越小越薄所需要的激光功率越小,而引脚之间的间距越小则应采用的焊接速度越快。

### 3.2.3 不同焊接方式对微焊点抗拉强度的影响

表 1 列出了 SnAg<sub>3.0</sub>Cu<sub>0.5</sub> 钎料在红外再流焊和脉冲光纤激光焊接条件下两种器件微焊点抗拉强度的实验结果。根据表 1 可得到三种焊接方式下不同器件无铅焊点抗拉强度的对比,如图 7 所示。

表 1 SnAg<sub>3.0</sub>Cu<sub>0.5</sub> 钎料不同钎焊方式下微焊点抗拉强度实验结果

Table 1 Tensile strength test results of different soldering methods with SnAg<sub>3.0</sub>Cu<sub>0.5</sub> solder

Component	Method	F / gf							Area /mm <sup>2</sup>	Strength /MPa
		1	2	3	4	5	6	Average		
QFP-100	IR	1878	2003	1946	1858	2083	1772	1923.3	0.3	64.1
	CW	2205	2054	2055	1990	2135	2347	2131.0		
	Pulse	2096	1975	1702	2053	1740	1822	1895.0		
QFP-44	IR	1893	1768	2043	2188	1904	1876	1945.3	0.24	81.1
	CW	1894	1789	2020	2566	1734	1998	2000.2		
	Pulse	1703	1646	1695	1579	1600	1438	1610.2		

图 7 显示了 SnAg<sub>3.0</sub>Cu<sub>0.5</sub> 钎料在红外再流焊、连续光纤激光钎焊及脉冲光纤激光钎焊条件下 QFP 器件焊点的抗拉强度。连续激光钎焊微焊点的力学性能比红外再流焊普遍提高。这主要是因为连续光纤激光钎焊快速加热和快速冷却的特性改善了无铅钎料的钎焊性能并优化了焊点的显微组织。

然而采用脉冲激光钎焊得到的焊点的力学性能并没有比红外再流焊提高,更是低于连续激光钎焊所得到的结果。在采用脉冲激光焊接时,尽管设置的激光平均功率(18 W)要比连续激光高,速度(10 mm/s)也更慢,但是焊接中难以快速完全熔化所有的钎料,不但没有改善钎料的钎焊性能,甚至降低了其润湿性。这主要是由于脉冲激光间歇性加热特性导致的。与脉冲激光的加热特性相比,连续激光加热速度要快得多,在相同时间内、同等输出功率情况下,连续激光提供的能量也会多很多。在焊缝区添加的钎料熔化需要连续吸收较多的能量,而脉冲激光断续的能量提供,使钎料的特性受到了影响而不能完全发挥。

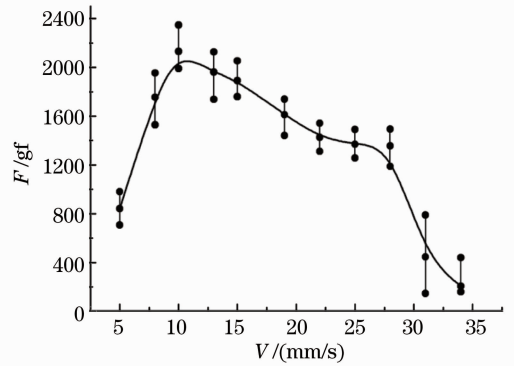


图 6 激光功率保持 8 W 不变时 QFP 焊点抗拉力与激光扫描速度之间的关系

Fig. 6 Relationship between laser scanning speed and tensile strength when the laser power is kept constant at 8 W

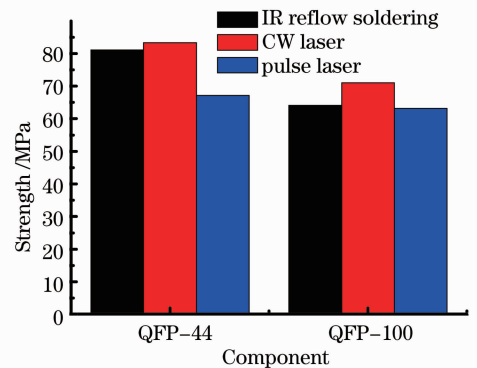


图 7 SnAg<sub>3.0</sub>Cu<sub>0.5</sub> 钎料三种焊接方式焊点抗拉强度对比

Fig. 7 Comparison of tensile strength for three soldering methods



### 3.2.4 钎料类型对抗拉强度的影响

表 2 是不同器件分别使用 SnAg3.0Cu0.5 钎料和 Sn63Pb37 钎料在各自优化后的激光钎焊参数条件下,测得的微焊点的抗拉强度实验结果。

表 2 两种钎料的连续激光钎焊微焊点抗拉强度实验结果

Table 2 Tensile strength test results of laser soldering with different solders

Component	Soldering paste	F / gf						Area / mm <sup>2</sup>	Strength / MPa
		1	2	3	4	5	6		
QFP-100	SnAg3.0Cu0.5	2205	2054	2055	1990	2135	2347	0.3	71.0
	Sn63Pb37	1939	1634	2035	1866	1832	1608		
QFP-44	SnAg3.0Cu0.5	1894	1789	2020	2566	1734	1998	0.24	83.3
	Sn63Pb37	1876	1683	1714	1685	1740	1966		

图 8 直观地显示了采用连续光纤激光钎焊, SnAg3.0Cu0.5 钎料焊点的抗拉强度明显高于 Sn63Pb37 钎料。这是由于 Sn-Ag-Cu 钎料比 Sn-Pb 钎料更容易与 PCB 基板铜焊盘形成金属间化合物,使焊点力学性能提高。尽管 Sn-Ag-Cu 钎料与 Sn-Pb 钎料相比熔点较高、润湿性较差且价格较贵,但是其焊点的力学性能更好、可靠性更高,对于未来“绿色化”、高质量的电子市场有更大的潜力。

### 3.3 拉伸断口显微形貌分析

焊点拉伸断裂的位置主要在焊缝处,也有部分焊盘剥离了 PCB 基板,没有引脚断裂的情况。焊盘剥离说明焊点的机械强度比焊盘与 PCB 基板之间的结合强度要高。

图 9 显示了 QFP 器件在连续光纤激光(11 W, 20 mm/s)钎焊条件下 SnAg3.0Cu0.5 焊点拉伸断裂后典型的扫描电镜(SEM)显微形貌。焊盘和引脚的断口都具有明显的等轴韧窝形貌,表明此断裂方式应属于塑性断裂。这说明此参数条件下钎料得到充分的加热,钎料完全熔化充满整个引脚,焊点实现了良好的冶金结合,与之前测得的优良的力学性能是一致的。

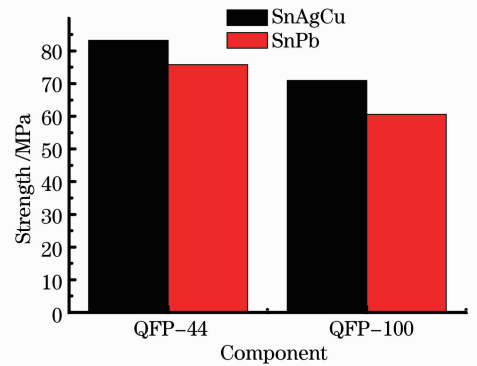


图 8 不同钎料的连续光纤激光钎焊微焊点抗拉强度对比

Fig. 8 Comparison of tensile strength between different solders by laser soldering

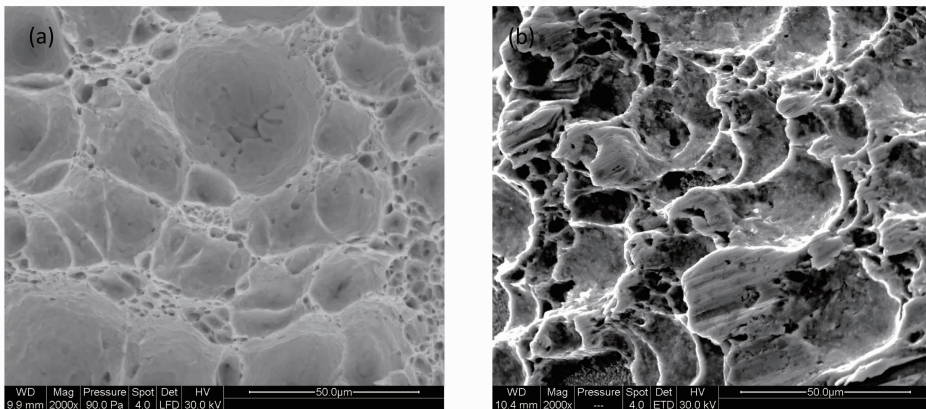


图 9 焊点拉伸断面显微形貌。(a)焊盘断面;(b)引脚断面

Fig. 9 Microscopic morphology of solder joints fracture surface. (a) Pad; (b) lead

### 3.4 焊缝金相组织分析

选取焊接的 QFP 器件,将焊点部分连同器件以适当的尺寸从 PCB 板切割下来,采用水晶胶配合一定比例的固化剂和催化剂进行冷镶样,经过打磨、抛光,将抛光好的试样用体积比为 4% HNO<sub>3</sub> + 2% HCl + 94% C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 的溶液腐蚀数秒,再进行显微组织观察。

图 10 显示了 QFP 器件在连续光纤激光钎焊(11 W, 20 mm/s)条件下 SnAg3.0Cu0.5 焊点的截面图。经抛光而未腐蚀的样品在金相显微镜下观察得到焊点的全貌,如图 10(a)所示。可以看出焊缝平直饱满,宽度在 50~80  $\mu\text{m}$  之间,焊点内无气泡、微裂纹等缺陷,能够满足表面组装的要求。经腐蚀液腐蚀后,通过 SEM 观察得到其微观组织结构,如图 10(b)所示。图中白色的枝晶为因快速冷却而先析出的富 Sn 固溶体相,深色区域为金属间化合物和富 Sn 固溶体所组成的共晶组织,焊点内部晶粒细小、组织均匀。在焊盘/钎料和钎料/引脚之间都出现了细小、平缓的金属间化合物层,经能谱分析(EDS)应为  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ 。这一金属间化合物层属于焊点中的强化相,确保焊点具有良好的冶金结合,从而使焊点的力学性能得到改善和提升。

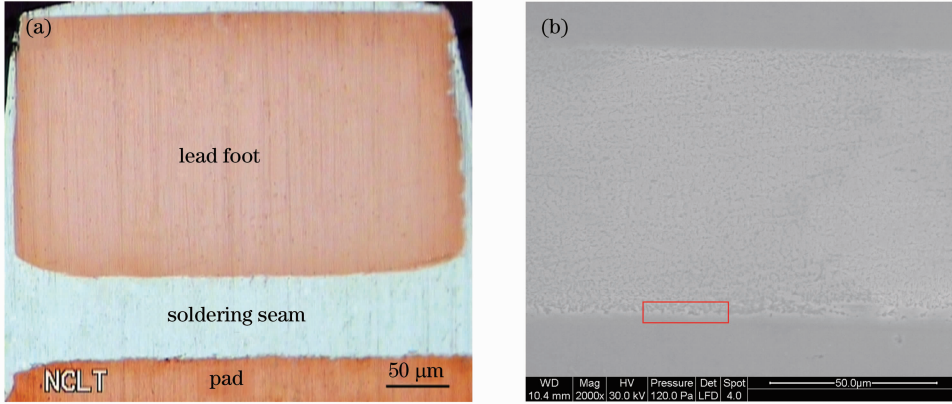


图 10 (a)焊点截面;(b)显微组织

Fig. 10 (a) Solder joint section; (b) microscopic structure

## 4 结 论

主要研究了以 SnAg3.0Cu0.5 为钎料、基于振镜扫描的 QFP 器件连续光纤激光钎焊工艺,获得了其对应的最佳激光钎焊工艺参数,并对焊点的力学性能及其剪切断面形貌和焊缝显微组织形态进行了深入的研究,主要结论如下:

1) 激光功率和振镜扫描速度(钎焊速度)对焊点性能的影响是相关联的,即某一功率对应最佳的钎焊速度,反之亦然。通过适当地提高激光功率可以提高钎焊速度,但是过高的激光功率(大于 17 W)会直接破坏掉焊点。在激光钎焊参数 11 W, 20 mm/s 时能获得力学性能优良的无铅焊点。焊接速度达到 20 mm/s,极大地提高了激光软钎焊速度。

2) 采用连续光纤激光钎焊获得 QFP 器件焊点的力学性能要比红外再流焊更加优异,而采用脉冲光纤激光钎焊获得的焊点性能与其相当。实验所用元器件激光钎焊 SnAg3.0Cu0.5 钎料焊点的抗拉强度要比传统含 Pb 钎料 Sn63Pb37 提高 10% 以上。

3) 在合适的钎焊参数条件下,光纤激光钎焊得到的 QFP 器件焊点的断面具有明显的等轴韧窝形貌,断裂方式属于塑性断裂;观察焊点横截面的宏观形貌及微观组织,焊缝平直饱满,焊点内部晶粒细小、组织均匀,在焊盘/钎料和钎料/引脚之间都有细小、平缓的金属间化合物层( $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ )。

## 参 考 文 献

- 1 Guo Fu. Lead-Free Soldering Technology and Application [M]. Beijing: Science Press, 2005. 86-161.  
郭 福. 无铅钎焊技术与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005. 86-161.
- 2 Y Xun, M J Tan, K M Liew. Laser soldering and applications for automation for fiber optic packaging [C]. Proceedings of the 1st International Conference on New Forming Technology, 2004. 545-548.
- 3 M N Islam, Y C Chan. Interfacial reactions of Cu-containing lead-free solders with Au/NiP metallization [J]. J Electron Mater, 2005, 34(5): 662-669.
- 4 F Malek Ghaini, M J Hamed, M J Torkamany, et al.. Weld metal micro-structural characteristics in pulsed Nd:YAG laser welding [J]. Scripta Materialia, 2007, 56(11): 955-958.
- 5 Lizheng Zhang, I C Ume, J Gamalski, et al.. Study of flip chip solder joint cracks under temperature cycling using a laser

- ultrasound inspection system [J]. *Components and Packaging Technologies*, 2009, 32(1): 120–126.
- 6 Xiao Rongshi, Dong Peng, Zhao Xudong. Progress in laser fusion welding brazing of dissimilar alloys [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(6): 0601004.  
肖荣诗, 董鹏, 赵旭东. 异种合金激光熔钎焊研究进展[J]. *中国激光*, 2011, 38(6): 0601004.
- 7 Zhang Dongyun, Gao Shuangxin, Gao Haiyun, *et al.*. Wire feeding laser brazing and fusion for Al-Fe dissimilar metal [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(6): 061403.  
张冬云, 高双欣, 高海芸, 等. 铝/钢异种金属激光填丝熔-钎焊连接工艺研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(6): 061403.
- 8 Soon-Min Hong, Won-Choi, Ja-Myeng Koo, *et al.*. High speed and low cost FOB (film-on-board) direct bonding using laser soldering technology [C]. *Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2011. 537–540.
- 9 I Gabay, A Abergel, T Vasilyev, *et al.*. Temperature-controlled two-wavelength laser soldering of tissues [J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2011, 43(9): 907–913.
- 10 Zhao Xudong, Xiao Rongshi. Fluxless joining between aluminium alloy and galvanized steel by fiber laser fusion welding-brazing with filler powder [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0403004.  
赵旭东, 肖荣诗. 铝/钢异种金属无钎剂激光填粉熔钎焊接[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0403004.
- 11 J Lee, Y Lee, Y Kim. Fluxless laser reflow bumping of Sn-Pb eutectic solder [J]. *Scripta Materialia*, 2000, 42(8): 789–793.
- 12 L Stauffer, A Würsch, B Gächter, *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.
- 13 K Kordás, A E Pap, G Tóth, *et al.*. Laser soldering of flip-chips [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 44(2): 112–121.
- 14 L Bosse, A Boglea, R Poprawe. Production cell for laser joining of microsystems with modular ‘pick and join’ tools [J]. *Microsystem Technologies*, 2006, 12(7): 604–610.
- 15 Han Zongjie, Ju Jinlong, Xue Songbai, *et al.*. Microstructures of Sn-Ag-Cu lead-free soldered joints with diode-laser soldering [J]. *J Central South University (Science and Technology)*, 2006, 37(2): 229–234.  
韩宗杰, 鞠金龙, 薛松柏, 等. 半导体激光软钎焊 Sn-Ag-Cu 焊点微观组织[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2006, 37(2): 229–234.
- 16 Huang Xiang. Research on Effects of Diode Laser on Mechanical Properties of Soldered Joints of SOP and CR [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.  
黄翔. 半导体激光对 SOP 与 CR 焊点力学性能影响的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- 17 Shi Wenqing, Yang Yongqiang, Guo Wei, *et al.*. Effects of laser pulse frequency and scanning mode on welding quality in soldering by fiber laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(2): 494–497.  
师文庆, 杨永强, 郭炜, 等. 脉冲频率及扫描方式对光纤激光软钎焊的影响[J]. *中国激光*, 2009, 36(2): 494–497.
- 18 Xue Songbai, Huang Xiang, Wu Yuxiu, *et al.*. Effects of laser soldering speed on mechanical properties of SOP micro-joints [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, 28(5): 21–15.  
薛松柏, 黄翔, 吴玉秀, 等. 激光再流焊接速度对 SOP 器件焊点力学性能的影响[J]. *焊接学报*, 2007, 28(5): 21–25.
- 19 Wang Chunqing, Li Mingyu, Tian Yanhong, *et al.*. Review of JIS Z 3198: test method for lead-free solders [J]. *Electronics Process Technology*, 2004, 25(2): 47–54.  
王春青, 李明雨, 田艳红, 等. JIS Z 3198 无铅钎料试验方法简介与评述[J]. *电子工艺技术*, 2004, 25(2): 47–54.