

激光锡球软钎焊工艺参数对微焊点形态及润湿性的影响

刘 标, 李先芬, 柴旭东, 蔡 楷, 蒙永民, 华 鹏, 徐 政
(合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009)

摘 要: 为了探索激光锡球焊工艺参数对微焊点形貌的影响, 采用激光锡球焊将直径0.25 mm的SAC305锡球在沉镍金焊盘上制备微焊点, 并分析了微焊点的形貌及SAC305/焊盘界面的润湿性。结果表明, 激光功率27 W、加热时间8 ms为最佳工艺参数, 采用此工艺参数制备的微焊点均匀铺展在焊盘上, 无缺陷; 微焊点高度与激光功率、加热时间均呈负相关, 微焊点铺展直径与激光功率、加热时间均呈正相关; SAC305/焊盘界面平整, 喷出的SAC305锡球/镀Ni的Cu焊盘界面润湿性良好。

关键词: 激光锡球焊; SAC305锡球; 激光功率; 加热时间; 焊点形态

中图分类号: TG456.7

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2024.06.004

Effect of Laser Solder Ball Soft Brazing Process Parameters on the Morphology and Wettability of Micro Solder Joints

LIU Biao, LI Xianfen, CHAI Xudong, CAI Kai, MENG Yongmin, HUA Peng, XU Zheng
(School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to explore the effect of laser solder ball soldering process parameters on the morphology of micro solder joints, laser solder ball soldering was used to prepare micro solder joints on electroless nickel/immersion goldpads with 0.25 mm diameter SAC305 solder balls, and the micro solder joint morphology and SAC305/pad interface wettability were analyzed. The results show that the laser power of 27 W and heating time of 8 ms are the best process parameters, and the micro solder joints prepared by this process parameters are evenly spread on the pads without defects. The height of micro solder joints is negatively correlated with laser power and heating time, and the spread diameter of micro solder joints is positively correlated with laser power and heating time. SAC305/pad interface is flat, and good wettability is at the interface of sprayed SAC305 solder balls/Ni plated Cu pads.

Key words: laser solder ball soldering; SAC305 solder ball; laser power; heating time; solder joint morphology

0 前 言

随着电子信息技术的快速发展, 电子器件正在向小型化与集成化方向发展, 内部焊点越来越密集, 对焊点质量提出了更高的要求^[1]。回流焊在电子封装与组装工艺中应用广泛。然而, 小型化的趋势限制了回流焊的应用^[2-3]。激光焊接技术具有局部加热、非接触加热、快速升温 and 降

温、良好的可控性和对各种材料体系的高度适应性等优点, 可作为适用于小型化电子器件的焊接方法, 备受研究人员的关注^[4-6]。在该技术中, 激光被用作热源来局部加热焊料, 以熔化并润湿基板上的焊料。许多研究已经证明了激光焊接在电子封装中的多功能性^[7-8]。

随着无铅化电子封装技术的发展, 无铅焊料的应用已成为必然趋势。Sn-Ag-Cu焊料熔点较

低, 并且接近共晶, 被认为是 Sn-Pb 焊料的合适替代品^[9-10]。为了充分发挥激光焊接的优势, 研究人员开始对无铅焊料/铜界面金属间化合物的生成机理与焊点的力学性能进行系列研究。Nishikawa 等^[11]对 Cu 焊盘上 Sn-Ag-Cu 焊料进行激光焊接, 发现相较于热空气回流, 激光回流可以抑制 Sn-Ag-Cu/Cu 界面处金属间化合物的生长以确保焊点的力学性能。Liu 等^[12]研究了激光回流和热空气回流形成的 AuSn_x 金属间化合物之间的差异, 发现激光回流焊的 IMC 呈针状或树枝状。与上述激光焊接有所区别, 激光锡球焊是通过激光加热熔化喷嘴中的锡球使其完整地喷射到焊盘上实现焊接。Jeromen 等^[13]从理论上研究了钎焊液滴与喷嘴的分离, 为激光锡球焊气体超压等工艺参数的选择提供指导。Lima 等^[14]提出一种分步加热方式, 防止锡球在喷嘴中气化。李通等^[15]利用激光锡球焊机将直径 0.6 mm 的 Sn-Ag-Cu 焊球焊接在镀金板上, 探索激光功率对焊点形态的影响。

目前, 关于激光锡球焊工艺参数对焊点形态与焊点性能的研究较少。本研究利用激光锡球焊在 PCB 沉镍金焊盘上制备微焊点, 探索激光功率、加热时间对微焊点的宏观形貌、焊点形态与力学性能的影响, 以确定最佳的工艺参数。

1 激光锡球焊工艺试验

1.1 试验材料与设备

试验材料为 SAC305 焊料, 其中 $w(\text{Sn})=96.5\%$ 、 $w(\text{Ag})=3\%$ 、 $w(\text{Cu})=0.5\%$ 。焊球直径为 0.25 ± 0.015 mm; 基板为 PCB 焊盘, 尺寸为 $0.25\text{ mm}\times 0.25\text{ mm}\times 0.05\text{ mm}$; 焊盘表面采用沉镍金工艺 (ENIG), 使焊盘具有耐氧化、可焊性高、可多次焊接等优点, Ni(P) 层成分为: $w(\text{Ni})=$

93% 、 $w(\text{P})=7\%$ 。使用无水乙醇对焊盘表面进行擦拭, 清除表面污染物; 焊接过程采用 N_2 作为保护气, 焊盘温度为常温。

本研究采用 YDX-XQ-01-DZ-3303N 激光锡球焊机, 激光器总功率为 75 W, 试验激光器波长为 1 064 nm, 焦距 60 mm, 光斑直径 0.3 mm。

1.2 试验步骤与方案

焊接前将 Cu 焊盘与锡球放在无水乙醇中进行超声清洗; 将焊料球放入到激光锡球焊机中, 焊接过程无需钎剂; 打开激光锡焊设备, 利用视觉控制系统将喷嘴对准焊盘, 在设备控制软件中输入试验所需的工艺参数, 进行激光锡球焊接。激光锡球焊原理如图 1 所示。

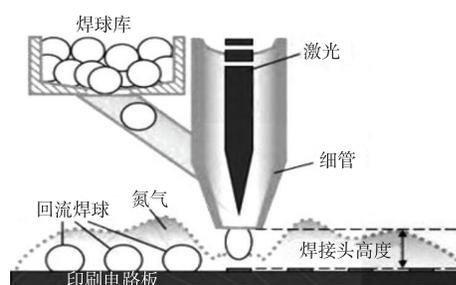


图 1 激光锡球焊原理图

本研究所设计的试验参数变量为: 激光功率 24 W、27 W、30 W、33 W、36 W, 激光加热时间 6 ms、7 ms、8 ms、9 ms、10 ms、11 ms。具体试验参数见表 1, 不同工艺参数下锡球与焊盘接触角见表 2。

焊接完成后, 将样品放在无水乙醇中超声清洗。采用蔡司 Stemi-305 体视镜观察微焊点的宏观形貌, 切割出微焊点的横截面后抛光, 采用江南 MR5000 金相显微镜对试样截面进行显微观察, 使用能谱仪分析界面的化学成分, 采用 VTD401 数显显微维氏硬度计测量微焊点硬度, 载荷为 25 g, 加载时间为 10 s, 采用 Nano Indenter G200X 纳米压痕仪测量界面的力学性能。

表 1 激光锡球焊接工艺参数

序号	激光功率/W	激光加热时间/ms									
a	24	8	e	27	6	i	27	10	m	30	8
b	24	9	f	27	7	j	27	11	n	33	6
c	24	10	g	27	8	k	30	6	o	33	7
d	24	11	h	27	9	l	30	7	p	36	6

表2 不同工艺参数锡球与焊盘的接触角

激光功率/W	加热时间/ms	接触角/(°)
24	8	125
24	9	103
24	11	88
27	7	64
27	9	86

2 结果与分析

2.1 宏观形貌

不同激光锡球焊接工艺参数下微焊点宏观

形貌如图2所示。当激光功率为24 W、加热时间为7 ms时，锡球没有完全熔化，无法从喷嘴上下滴落下来；激光加热时间为8~9 ms时，出现锡球偏移现象，这是由于激光功率较低时峰值温度较低，且加热时间过低使其保温时间不足，由表2可知，此时锡球与焊盘的接触角分别为125°与103°，锡球与焊盘润湿性欠佳，从而使得激光植球时的定位误差被放大从而形成了锡球偏移现象；当加热时间为10 ms时，微焊点表面圆润且铺满整个平面，呈现良好的外观；而当加热时间继续增加至11 ms时，微焊点表面出现明显的不良塌陷。

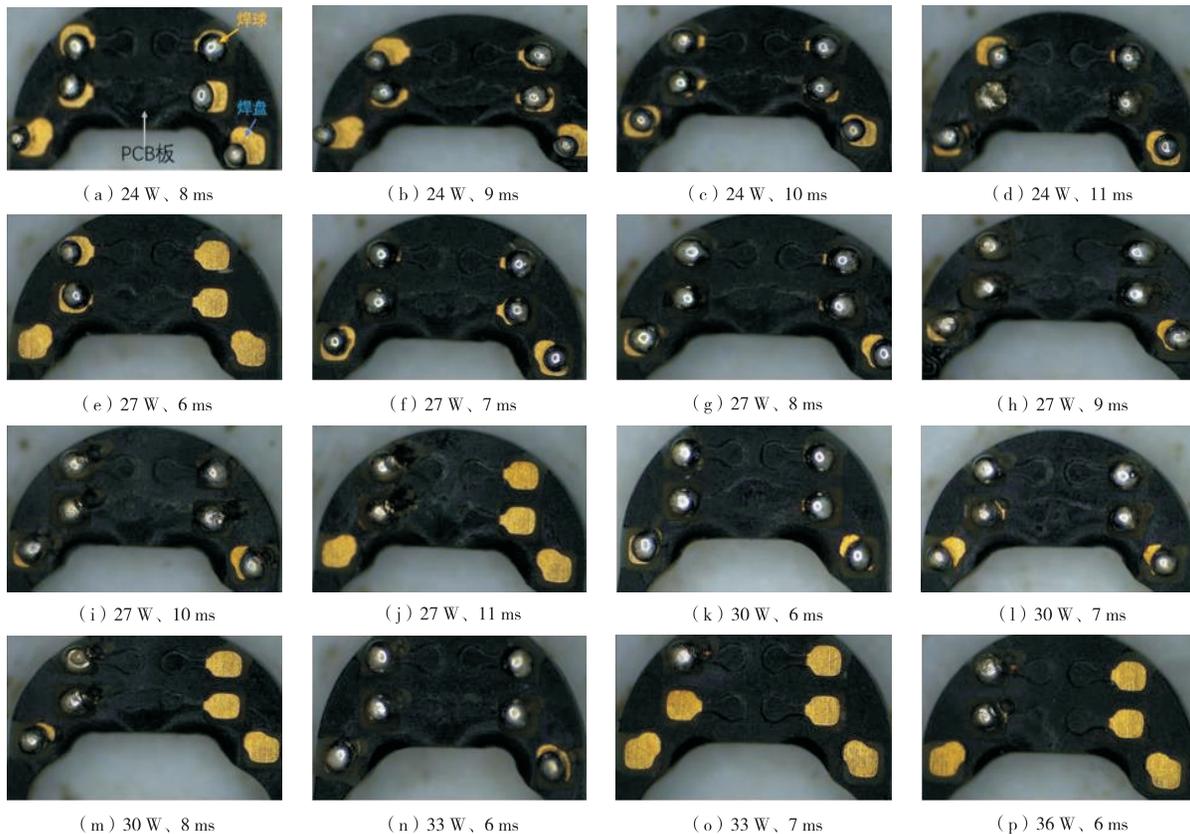


图2 不同参数下微焊点的宏观形貌

激光功率为27 W、激光加热时间为7~9 ms时，微焊点均表现出良好的成形外观，这是由于功率增大导致预加热阶段的峰值温度升高，降低锡球与焊盘之间的表面张力，锡球与焊盘的接触角减小，改善了激光功率为24 W时出现的锡球偏移现象。接触角越小，表明材料间的润湿性越好。由表2可知，激光功率为27 W时，接触角为60°~90°，接触角没有变得更小，原因是锡球铺展到焊盘边缘接触PCB板阻焊层而停止铺展。

加热时间的延长使得热输入增大，表面出现成形不良的问题。进一步提高激光功率，由于其升温速率的增加，锡球迅速被加热到熔融态，预加热阶段的峰值温度过高，有焊盘灼伤的风险。激光锡球焊过程中的激光光斑区域能量比较集中，会产生金属蒸汽和光致等离子体^[6]。当激光停止加热时，熔池中心处的熔融态焊料在金属蒸汽及光致等离子体的反冲作用力作用下向周边流动，形成微焊点顶部凹坑^[17]。激光功率及加热时间的增加，都会使凹坑

中心处的温度增加，使得微焊点顶部凹坑变大。

2.2 横截面形貌

不同激光工艺参数下微焊点的截面微观形貌如图3所示，微焊点的高度如图4所示。从图3可以看出，在不同的参数条件下，得到的微焊点高度有所不同。当激光功率为24 W、加热时间为8 ms时，微焊点的平均高度为183 μm；当加热时间为11 ms时，微焊点的平均高度为133.84 μm。由此可得出随着加热时间的增加，微焊点高度随之减少。此外，随着激光功率的增加，微焊点高度也随之减少。当加热时间为8 ms、激光功率增加至27 W时，微焊点的平均高度为132 μm。由此可知，微焊点高度与激光功率和加热时间呈负相关。由于锡球体积不变，随着微焊点高度的增加，微焊点铺展直径减小，微焊点铺展直径与高

度呈负相关，从而得出微焊点铺展直径与激光功率和加热时间呈正相关。

当热输入增加时，锡球溢出焊盘，有可能造成焊盘短路。而随着热输入的减少，锡球出现偏移和未充分铺展的缺陷。当激光功率为27 W、加热时间为8 ms时，锡球正好均匀铺展在焊盘上，微焊点光滑无缺陷。此外，如图3(a)和图3(b)所示，激光能量较低时，锡球未在焊盘铺展就完成凝固，微焊点与焊盘界面处存在细小气泡未及时溢出，从而形成气孔缺陷。而当激光功率增加时，微焊点内部出现气孔，顶部出现凹坑，如图3(g)和图3(h)所示。可能是由于高温停留时间较长，保护气被卷入微焊点内部形成气孔，而金属蒸汽及光致等离子体作用在微焊点顶部形成凹坑。

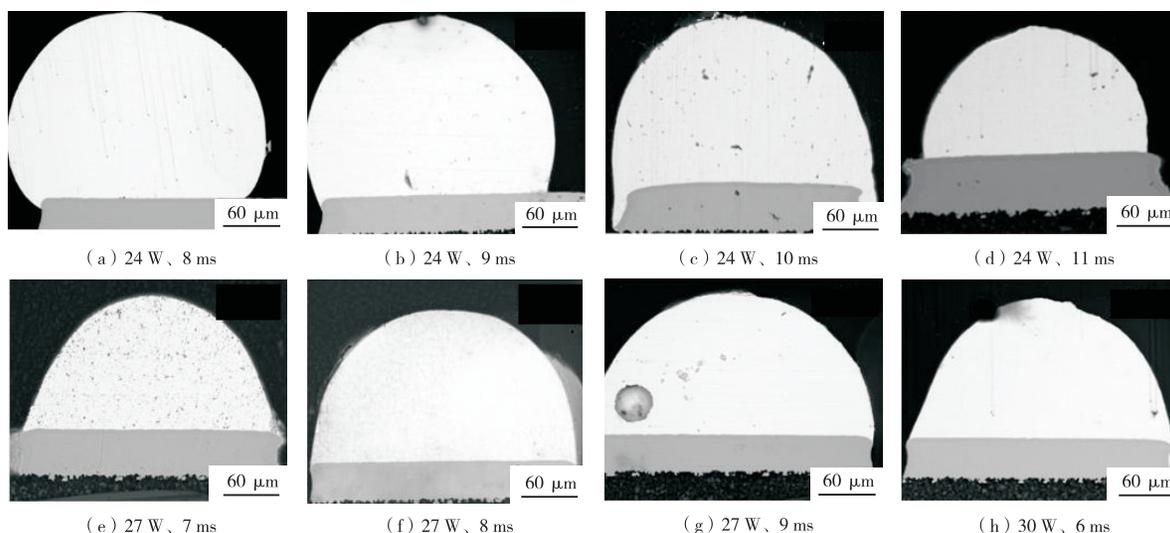


图3 不同参数下微焊点截面形貌

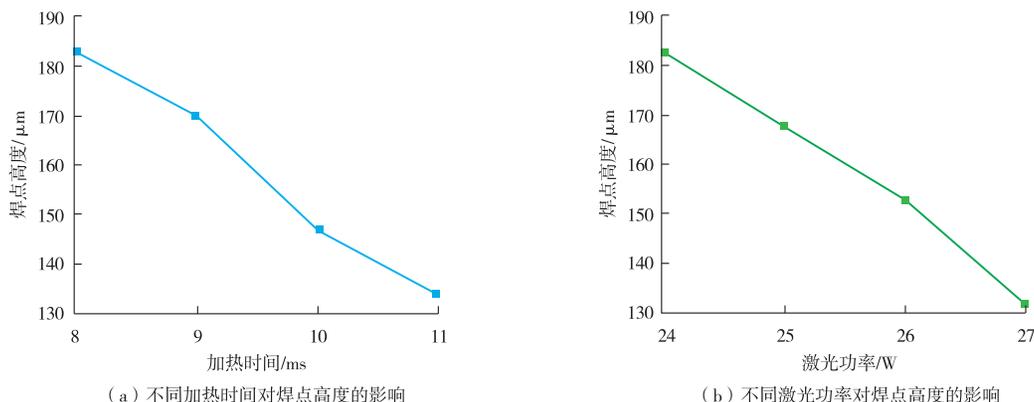


图4 不同参数对焊点高度的影响

2.3 EDS 测试

对于在激光功率27 W、加热时间8 ms参数下

得到的微焊点进行了EDS分析。微焊点界面处的EDS扫描结果如图5所示。与SMT焊接的Ni (P)

层的不规则消耗对比,从图中可以看出其Ni(P)层界面平整,界面处的形貌更为良好。微焊点界面处主要弥漫分布Sn、Ag元素,根据Sn-Ag二元合金相图可知,当Ag元素含量在3%时,Ag和Sn元素形成Ag₃Sn弥散分布在β-Sn晶粒附近,Au层具有改善锡球与PCB焊盘之间的润湿性作用,在反应的初期熔入液态锡球的上方。Ni(P)层与熔

融的焊料反应在界面形成(Cu,Ni)₆Sn₅,随着Ni(P)层中Ni的消耗,剩余的Ni(P)层中P含量增加在界面处形成Ni₃P^[18]。Ni(P)层作为扩散阻挡层,能有效的抑制界面处Cu元素的扩散,从而降低界面金属间化合物的生长速率。其中镀Ni层中含有Cu元素,主要是因为Cu在Ni中的固溶度较高,基板中的Cu元素向镀层扩散。

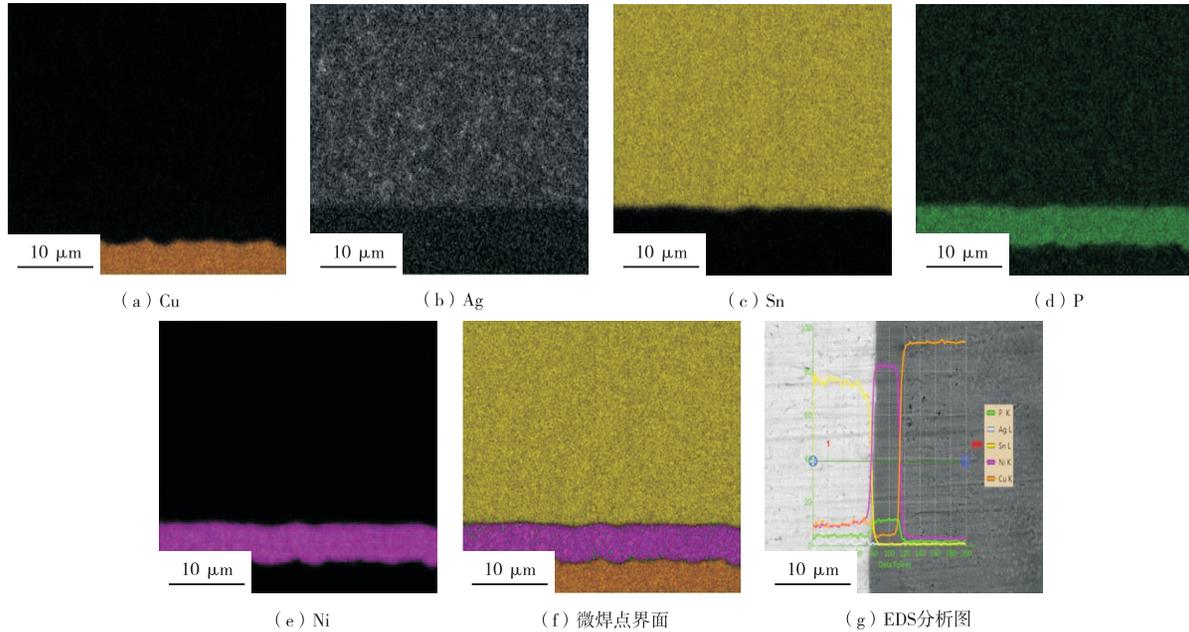


图5 微焊点界面处EDS分析

2.4 微焊点显微硬度测试

不同激光锡球焊参数下SAC305微焊点的硬度见表3,测量点为微焊点的顶部和微焊点底部。从表3可知,微焊点顶部的硬度略低于底部,这是由于微焊点底部生成了硬度较高的IMC脆化物。此外,在熔融锡球掉落低温PCB焊盘上时的速冷使得底部的晶粒存在细化现象,使得硬度略高于微焊点顶部。同时,

表3 不同工艺参数下微焊点硬度

试样序号	底部硬度(HV _{0.025})	顶部硬度(HV _{0.025})
a	20.5	18.4
b	19.4	17.8
c	18.6	17.4
d	18.0	17.5
f	18.1	13.7
g	14.6	13.3
h	12.0	17.1
k	13.3	12.8

随着激光功率的增加,微焊点的硬度随之快速下降,而随着加热时间的增加,硬度缓慢下降。这是由于激光功率的增加使得熔融锡球接触焊盘时的温度显著增加,影响晶粒形态导致硬度减小,而随着加热时间的延长,其峰值温度基本不变,只延长了熔融锡球高温停留时间。

2.5 纳米压痕测试

对在激光功率27 W、加热时间8 ms参数下得到的微焊点进行纳米压痕测试。自PCB焊盘沿垂直方向上取点,材料的硬度与弹性模量见表4。

点1处组织是金属间化合物,具有硬而脆的特点,因此1点表现出弹性模量较低而硬度值稍高的特点。点2硬度和弹性模量比点3高,一是由于熔融锡球接触焊盘使2点组织晶粒细化;二是由于在Ni(P)层中的Ni元素扩散到钎料中,Ni能提高强度,而又保持良好的塑性和韧性使得其硬度和弹性模量较点3有所提升。

表4 纳米压痕点的硬度与弹性模量

纳米压痕点	硬度(HV _{0.025})	弹性模量/GPa
1	37.73	38.5
2	37.73	48.8
3	31.61	47.2

3 结 论

(1) 采用直径为0.25 mm的SAC305锡球进行激光锡球焊, 研究激光功率和加热时间对微焊点形态及润湿性的影响, 发现当激光功率为27 W、加热时间为8 ms时, 微焊点均匀铺展在焊盘上, 表面光滑、无缺陷。

(2) 微焊点高度与激光功率、加热时间均呈负相关, 锡球铺展直径与激光功率、加热时间均呈正相关。

(3) SAC305/焊盘界面平整, 喷出的SAC305锡球/镀Ni的Cu焊盘界面润湿性良好。

参考文献:

- [1] MU D K, MCDONALD S D, READ J, et al. Critical properties of Cu₆Sn₅ in electronic devices: Recent progress and a review [J]. Current Opinion in Solid State & Materials Science, 2015 (20): 55-76.
- [2] LAU C S, KHOR C Y, SOARES D, et al. Thermo-mechanical challenges of reflowed lead-free solder joints in surface mount components: a review [J]. Soldering & Surface Mount Technology, 2016, 28(2): 41-62.
- [3] FENG J, XU D E, TIAN Y, et al. SAC305 solder reflow: identification of melting and solidification using in-process resistance monitoring [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2019, 9(8): 1623-1631.
- [4] HUANG Y J, ZHANG Y X, GAO X D, et al. Laser joining technology of polymer-metal hybrid structures - a review [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022(79): 934-961.
- [5] GILLNER A, HOLTKAMP J, HARTMANN C, et al. Laser applications in microtechnology [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167(2-3): 494-498.
- [6] RAHIM K, MIAN A. A review on laser processing in electronic and MEMS packaging [J]. Journal of Electronic Packaging, 2017, 139: 030801.
- [7] SEMERAD E, MUSJEJOVSKY L, NICPLICS J. Laser soldering of surface-mounted devices for high-reliability applications [J]. Journal of Materials Science, 1993, 28(18): 5065-5069.
- [8] KORDAS K, PAP A E, TOTH G, et al. Laser soldering of flip-chips [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2006, 44 (2): 112-121.
- [9] PAL M K, GERGELY G, HORVATH D K, et al. Microstructural investigations and mechanical properties of pure lead-free (Sn-3.0Ag-0.5Cu and Sn-4.0Ag-0.5Cu) solder alloy [J]. Metallurgical & Materials Engineering, 2018, 24(1): 27-36.
- [10] PAL M K, GERGELY G, HORVATH D K, et al. Characterization of the interface between ceramics reinforcement and lead-free solder matrix, surfaces and interfaces [J]. Surfaces and Interfaces, 2020, 20: 100576.
- [11] NISHIKAWA H, IWATA N. Formation and growth of intermetallic compound layers at the interface during laser soldering using Sn-Ag-Cu solder on a Cu Pad [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 215: 6-11.
- [12] LIU W, TIAN Y H, WANG C Q, et al. Formation of AuSn_x IMCs in Sn_{3.5}Ag_{0.75}Cu micro-solder joints fabricated by laser and hot air reflow processes [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2013, 24(1): 217-223.
- [13] JEROMEN A, HELD C, GOVEKAR E, et al. Modelling of droplet detachment in the laser droplet brazing process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214 (4): 737-749.
- [14] LIMA M S F, RIVA R, DESTRO M G, et al. Characterization of a laser-soldered avionic component using lead-free paste [J]. Optics and Laser Technology, 2009, 41(2): 159-164.
- [15] 李通, 潘开林, 李鹏, 等. 基于SAC305焊料的红外激光植球功率和时间对焊点形态的影响 [J]. 半导体技术, 2023, 48(3): 247-254.
- [16] 王宁, 严红燕, 李慧, 等. 金属陶瓷润湿性影响因素的研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(12): 1315-1319.
- [17] 付瑜, 韩绍华, 薛丁琪. 基于金属蒸汽和外加磁场的MIG电弧模拟 [J]. 兵器材料科学与工程, 2021, 44(4): 94-98.
- [18] LIU W, WANG C H, TIAN Y H, et al. TEM observation of interfacial compounds of SnAgCu/ENIG solder bump after laser soldering and subsequent hot air reflows [J]. Materials Letters, 2016, 163(15): 254-257.

作者简介: 刘 标 (1999—), 男, 硕士研究生, 材料加工工程专业, 主要从事PCB板的激光软钎焊工艺研究。

收稿日期: 2023-07-10

修改返回日期: 2024-02-08

编辑: 罗 刚