

# 锡铅凸点一致性及其形貌控制对倒装焊的影响

陈桃桃<sup>1</sup> 刘俊夫<sup>1</sup> 王勇<sup>2</sup> 李林森<sup>1</sup>

1. 中国电子科技集团公司第四十三研究所 微系统安徽省重点实验室 安徽 合肥 230088

2. 中国电子科技集团公司第四十三研究所 安徽 合肥 230088

**摘要:** 采用热压倒装焊接的方法进行锡铅微球倒装焊接,以锡铅微球凸点尺寸为80\90\100um的锡铅凸点倒装芯片作为研究对象,确定热压倒装焊接中锡铅微球凸点一致性对倒装焊接质量影响。研究表明:控制焊接高度可以弥补一定量焊球的高度差,但下压高度不得超过焊球总高度的2/3,并且在焊接过程中控制焊接方式可以控制凸点形貌。

**关键词:** 热压倒装焊; 高度一致性; 凸点形貌控制

## 引言

倒装焊接(Flip Chip)技术是一种微电子封装技术,将原用于键合的芯片在工作面(有源面)上进行预置凸点处理,处理完毕后芯片工作面向下,与基板层直接键合或焊接,完成芯片与基板的电气互连,再使用底部填充胶填充芯片与基板间缝隙,完成结构的加固。芯片表面预制的凸点材质包括金凸点、钎料凸点、铜柱锡帽等,根据凸点材料的材质不同,采用的键合方式也不同,金凸点一般采用超声热压方式进行,该方式与键合机理相同,在加热加压的同时加入超声,达到低温下同质键合的目的;钎料凸点以及铜柱锡帽是将接触区域的钎料熔化,与基板上焊盘进行焊接,完成互连。

相比于传统的引线键合方式,倒装焊接具有以下明显的优势<sup>[1]</sup>:

(1) 尺寸更小,倒装焊的方式不仅在平面方向减少了封装尺寸,将原键合落点移至芯片底部,在高度方向也由于键合丝去除而降低;

(2) 封装密度更高,倒装焊改变了原芯片只能在四周分布键合区域,将键合区域分布在芯片的整个正面,大大增加了单位面积内的I/O数量。

(3) 提升产品的性能,相比于使用键合方式,倒装焊芯片于基板的互连通过表面凸点,大大缩短了连接距离,连接距离的减少可以有效减小电感、电阻、电容的影响,特别是在高频信号中,能够保持信号的完整性。

(4) 温度控制更加方便,虽然倒装芯片主要是信号控制类,但相较于焊接、粘接芯片,倒装芯片由于背面向上,可以直接接触冷板、热沉等,倒装芯片的散热方式更加直接,控温也更方便。

(5) 成本控制,成本控制主要分为两方面,一个是组装成本,倒装焊可以在芯片的晶圆阶段进行凸点预制,划片后可以直接进行倒装焊接,减少了组装工序,

增加了组装效率;另一个是材料成本,相较于单根引线的键合,降低了批量封装的成本。

本文主要研究内容为钎料凸点的倒装焊接,具体来说锡铅焊料预置的凸点作为芯片与基板间的连接介质,在倒装过程中采用热压倒装焊接方式,具体是先将基板预热,再将吸附在吸嘴上的芯片与基板进行对位,并在一定压力下进行接触,接触后进行升温,使钎料凸点熔化,与基板焊盘焊接在一起完成倒装焊。通过分析热压倒装焊接过程,影响倒装焊样品的工艺参数主要包括初始压力、焊接温度以及芯片移动距离等,初始压力决定了芯片于基板焊接前的初始位置,焊接温度曲线可以对焊接界面造成影响,芯片移动的距离可以调整凸点形貌、补偿凸点的高度差。

文中采用实验验证、建立模型及等体积计算的方式,以获得可靠热压倒装焊样品为目标,通过控制芯片移动距离补偿高度差,确定凸点间可接受高度差,以及确定凸点形貌变化极限。

## 1 试验方式

### 1.1 试验设计

为确定凸点可接受高度差,以及确定凸点形貌变化,在同一模拟芯片上预制不同尺寸的凸点,从而实现凸点高度的控制;将预制凸点的模拟芯片进行倒装焊接,在焊接过程中保持初始压力不变,控制芯片移动距离,实现高度确认以及凸点形貌变化确认的目的。

### 1.2 试验原理

在热压倒装焊接之前需要在芯片上进行植球处理,锡铅微球凸点采用激光植球的方法,基于焊接原理,在温度作用下形成焊接界面。具体过程为:位于送料器中的锡铅球通过落球盘控制,并在光敏传感器监测下逐颗落至喷嘴处,喷嘴尺寸略小于锡铅球,可保证锡铅球不掉落,当监测到锡铅球落至喷嘴口时,发射脉冲激光,将锡球融化,

同时惰性气体加压,将熔融的锡铅球喷落至芯片焊盘上,落在焊盘上熔融的锡铅由于不再受激光功率加热,以及芯片表面的散热,迅速固化,形成凸点。

在激光植球过程中,可以控制气压、激光电流、脉冲时间对球形貌进行控制,气压大小可以控制凸点平面尺寸,激光电流和脉冲时间共同决定了凸点的融化程度,激光电流和脉冲时间的可控窗口与凸点大小有关,凸点越小,窗口越窄。在激光植球过程中,对植球基板也有一定要求,导热率不能过高,以AlN为例,锡球落在基板上尚未与表面焊接层发生反应,凸点热量被基板导出,即焊接时的保温时间不够,无法实现有效地焊接。凸点材质允许的情况下,可以将样品进行回流,修正凸点位置和外形。

全部植球完毕的样品经检验合格后进行热压倒装焊接,焊接原理如下图所示,预置好球的芯片凸点向下,倒扣在载台预热过的基板上,通过热压头提供压力、热量,并传导至凸点,将凸点熔化,与基板焊接在一起,完成芯片与基板的互连。

在焊接过程中,可控变量包括初始压力、焊接温度曲线以及芯片位置控制,初始压力可以初步决定凸点形貌,焊接温度曲线主要是指升温、保温速率,可以对凸点的焊接进行调控,芯片的位置控制则可以调整凸点形貌、补偿凸点的高度差。

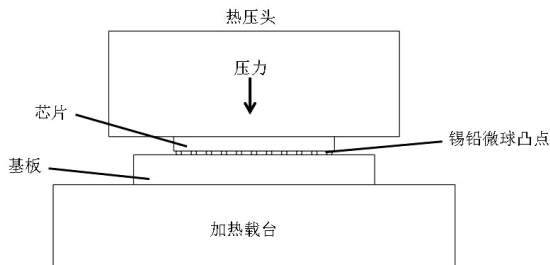


图1 热压倒装焊接示意图

### 1.3 试验材料

本实验采用Pb90Sn10微球,尺寸为80 $\mu\text{m}$ /90 $\mu\text{m}$ /100 $\mu\text{m}$ ,对应真圆度均 $\geq 90\%$ ,标准公差 $\pm 5\mu\text{m}$ 。为实现可设计性,芯片及基板采用模拟片制备。

基板材质为AlN,基于激光植球对植球基材的要求,模拟芯片使用Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,基板与芯片表面焊接膜层采用TiPtAu,其中,TiPt层厚度0.1 $\mu\text{m}$ ,Au层1 $\mu\text{m}$ ,正方形焊盘尺寸为100 $\times$ 100 $\mu\text{m}$ ,相邻焊盘中心间距(Pitch)为200 $\mu\text{m}$ 。

### 1.4 试验具体实施

#### 1.4.1 激光植球

在同一个芯片上通过调节气压、激光电流、脉冲时

间制备80 $\mu\text{m}$ 、90 $\mu\text{m}$ 、100 $\mu\text{m}$ Pb90Sn10微球,测量植球后球高,获得下图。

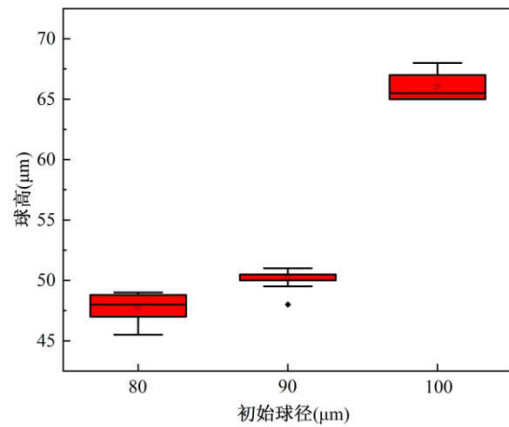


图2 不同球径植球高度箱线图

经过测量统计,80 $\mu\text{m}$ 、90 $\mu\text{m}$ 、100 $\mu\text{m}$ 球的平均高度为47.78 $\mu\text{m}$ 、50.15 $\mu\text{m}$ 、66.50 $\mu\text{m}$ 。

#### 1.4.2 热压倒装焊接

在热压倒装焊接过程中,芯片移动距离参照植球高度进行调整,预压后100 $\mu\text{m}$ 凸点的平均高度为60.50 $\mu\text{m}$ ,模拟芯片的凸点的平均值高度差为12.22 $\mu\text{m}$ ,设置10 $\mu\text{m}$ 、15 $\mu\text{m}$ 作为高度调节数值变量,确保在最大移动距离下所有凸点均可接触。在倒装焊接时,芯片的运动方式包括①只下压、②下压后等距离提拉、③下压后2倍距离提拉三种,实现凸点在高度和形貌的控制验证,在本实验中,具体按照表1的方式对倒装焊接进行控制<sup>[2]</sup>。

表1 倒装焊参数控制

组别	试验情况						
	压力	温度	保温时间	下压距离	保温时间	提拉距离	保温时间
1	20N	330 $^{\circ}\text{C}$	20s	0	0	0	0
2	20N	330 $^{\circ}\text{C}$	20s	10 $\mu\text{m}$	15s	0	10s
3	20N	330 $^{\circ}\text{C}$	20s	10 $\mu\text{m}$	15s	10 $\mu\text{m}$	10s
4	20N	330 $^{\circ}\text{C}$	20s	10 $\mu\text{m}$	15s	20 $\mu\text{m}$	10s
5	20N	330 $^{\circ}\text{C}$	20s	15 $\mu\text{m}$	15s	0	0
6	20N	330 $^{\circ}\text{C}$	20s	15 $\mu\text{m}$	15s	15 $\mu\text{m}$	10s
7	20N	330 $^{\circ}\text{C}$	20s	15 $\mu\text{m}$	15s	30 $\mu\text{m}$	10s

## 2 试验结果与分析

### 2.1 试验结果

根据试验实施方案进行植球、倒装焊,由于倒装焊样品凸点位于芯片与基板中间位置,无法进行常规目检,必须借助相应仪器设备进行分析,在本文中,对倒装焊接完成后的样品进行X射线测试、电性能测试、剖面分析进行综合分析,确定样品的通断情况、焊球形貌。

2.1.1 X射线:利用X射线成像原理,确定平面方向凸

点尺寸，可以确定凸点间是否发生短路，在平面方向定性描述倒装焊是否合格。

2.1.2 电性能测试：通过预先设计的测量点位对倒装焊样品进行测试，主要确认是否存在开路情况，结合X射线，可确认整个样品是否出现开路、短路情况，判定是否合格。

2.1.3 剖面分析：主要为焊点剖面方向，直观分析焊点形貌、焊接状态，剖面分析由于数量受限，无法实现每颗凸点的分析，只能选择有代表性的若干凸点进行定点分析。

通过上述分析，可综合判定倒装焊接情况，确定不同参数条件的控制对倒装焊中凸点形貌尺寸的影响，进而确定不同参数条件对倒装焊整体工艺过程的影响。

2.2 结果分析与讨论

对试验样品进行X射线分析，焊接对位准确，相邻焊盘间无短路现象，下图为芯片向下移动15μm后的X射线照片，在图3中，自上而下1、4、7行为100um球径凸点，2、6行为80um凸点，3、5行为90um凸点。从图中可以看出，80um的凸点尺寸并未发生明显变化，这是由于下压距离与平均高度差相差不大，凸点焊接后未发生明显形变；90um的凸点由于高度降低约5um，且凸点体积不变，整体直径有所增加，这在100um的凸点上更加明显，高度降低15um，凸点直径明显增大，但100um凸点虽然挤压形变量很大，相邻焊点仍未接触发生短路。

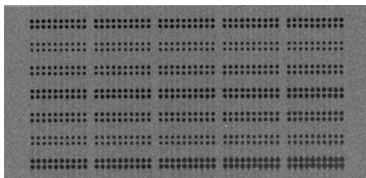


图3 15μm下压后X射线图

对倒装焊接完成后对器件的通断进行测试，测试时按照预先留出的测试点位，即为图3中的纵向组，包含100um凸点3组，80um、90um凸点各两组，整个模拟芯片共分为5组，通断及对应阻值情况如表2所示。

表2 电性能测试结果汇总表

测试点位 样品编号	通断情况 (Ω)				
	1	2	3	4	5
1	×	×	×	131.3	85
2	×	×	82.1	79.9	×
3	76.8	80.6	84.7	×	×
4	75.2	79.1	82.4	107	×
5	82.8	82.5	81.7	76.8	72.8
6	85.9	83.7	80.3	×	65.5
7	×	79.3	67.1	64.7	65.2

由表1和表2对比可知，(1)对比组1和组2，仅由预压完成倒装焊样品中存在开路、虚接情况严重，后测量预压后样品的高度，平均高度为60.50μm，与80μm锡铅球仍有12μm高度差，表明当样品存在较大高度差时，原位焊接无法实现芯片间的有效互连；(2)对比组3和组4，当提拉过大时会出现虚接现象，表明过度提拉会使原本接触的焊点出现虚接，导致开路；(3)组5、6、7结果表明当下移距离大于高度差时连通率明显提升，但提拉会将原本高度较低的锡铅球从焊点拉开，不能形成有效焊接，导致开路。

将试验的样片进行剖面分析，结果如图4所示

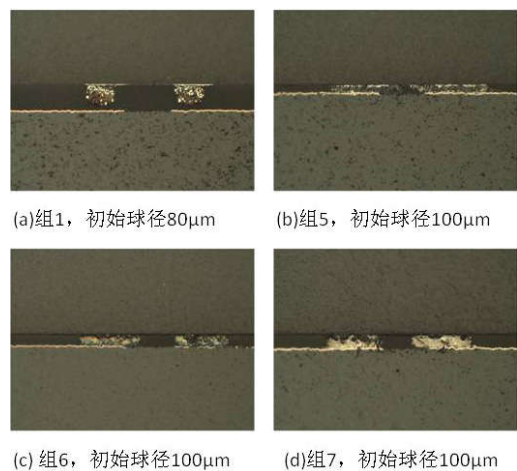


图4 倒装焊接样品剖面图

图4为500倍放大倍数下凸点形貌剖面图，在实际生产过程中，当凸点尺寸过低，无法与基板焊盘接触时，凸点在融化状态下会由于表面张力形成球形，等同于凸点重融，如图(a)所示，比较图(c)(d)(e)，表明可通过控制芯片位置控制锡球形貌，在图(b)中，由于下压距离过大，焊接完成后锡铅球的直径为150-170um，存在短路风险，并且由于形变量过大，原柱状/鼓形凸点变形为饼状，无法实现有效地缓冲由于热失配导致的应力。图(d)形成了较为标准的圆柱状凸点结构，具有良好的焊接形貌，可以有效地缓冲应力<sup>[3]</sup>。

在凸点尺寸控制上，以100um锡铅微球为例，按照等体积进行计算，忽略焊盘尺寸凸点形貌的影响，当下压距离超过凸点直径2/3时，凸点形变量为原尺寸的一倍，即200um，在实际下压过程中，由于焊盘尺寸一般为凸点直径的80%-100%，在下压时会出现纺锤形，如图(c)，因此，在实际生产中需要控制凸点形变量在凸点直径的1/2以内。

为研究凸点形貌变化，按照焊点接触建立相应模型进行研究，在进行焊点下压或提拉时，中间凸点为液



态，由于焊接表面张力，简化为柱状，且不考虑相应力学特性，参照实际焊接过程，将芯片进行提拉、下压，在边界条件设置时，设置基板侧为固定平面，基板侧为可移动平面，控制 ±10um 的上下移动。

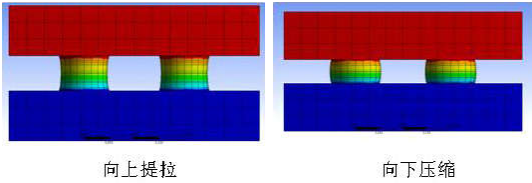


图5 焊点形貌控制

由仿真图可知，对凸点形貌进行控制时芯片位移控制可对凸点形貌造成细微影响<sup>[4]</sup>。

为精确计算凸点形变量，在锡铅凸点焊接过程中，可将凸点等效为柱状中间态，再在柱状状态的基础上进行芯片的提拉、下压，控制凸点形状，在变化过程中体积保持不变。

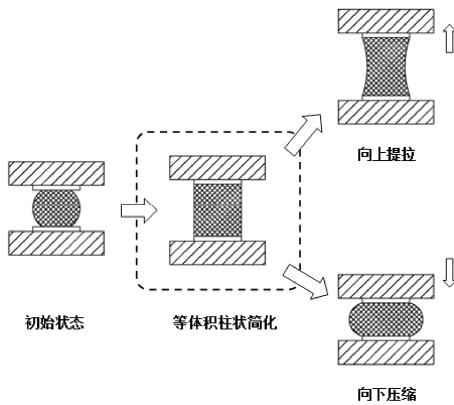


图6 等体积形状变化图

在由初始状态向柱状简化状态变化过程中，按照式(1)进行等体积计算，高度比为1: 1.33。

$$\frac{4}{3}\pi r^3 = \pi R^2 h \quad (1)$$

在向下压缩的状态下，可将凸点看做圆柱体堆叠而成，外部圆形边界满足式(2)，其中，a为外部圆形半径，b为原点到外部圆的圆心距离。

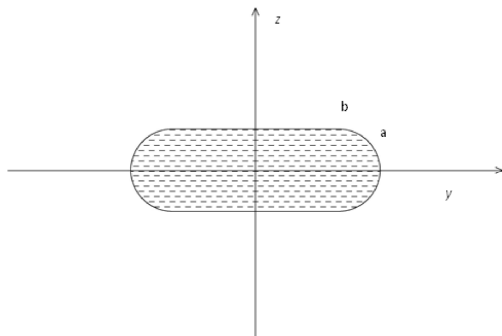


图7 凸点界面示意图

$$(y - b)^2 + z^2 = a^2 \quad (2)$$

$$V = \pi \int_{-a}^a (b + \sqrt{a^2 - z^2})^2 dz = 2\pi a \left(\frac{2}{3}a^2 + b^2\right) \quad (3)$$

由体积计算可知，下压后凸点的高度2a与凸点的最大半径(a+b)满足公式(3)。在实际设计时，凸点间中心距最小应为2倍球径，因此将凸点变形量达到2倍初始球径时带入体积相等的公式，即带入(a+b) = 2r计算求解可得a、b间关系，通过式(4)可确定焊盘尺寸固定时凸点高度下限，同理通过式(5)可反向由凸点高度确定最小焊盘尺寸。

$$a = \frac{\sqrt[3]{27\sqrt{41}|b|^3 - 3b^3} + \sqrt[3]{2 - 7\sqrt{41}|b|^3 - 3b^3} + b}{7} \quad (4)$$

$$b = \sqrt[3]{2\sqrt{41}|a|^3 + 26a^3} + \sqrt[3]{-2\sqrt{41}|b|^3 - 26a^3} + 3a \quad (5)$$

在上述试验基础上，使用100um凸点芯片制备12只样品，使用表中组3方法制备，预压后将凸点加热至熔融状态，芯片先向下移动10um，保证凸点与基板完全接触，再将芯片上移10um，对凸点形貌细微调整，冷却后可获得均一柱状凸点<sup>[5]</sup>。经测试，试验样品通断合格，对样品进行温度循环、机械冲击、高温烘烤等环境试验，重复测量，未发现开路样品，试验后样品形貌见下图。

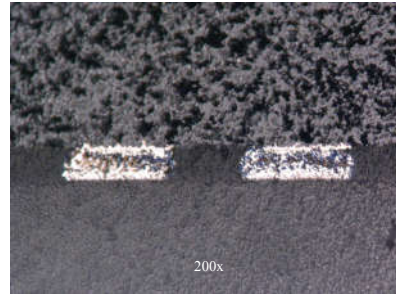


图8 环境试验后凸点形貌图

### 3 结论

本文通过对钎料凸点倒装焊进行试验验证、模拟仿真以及等体积计算确认，得出以下结论：

(1) 通过不同直径的凸点进行倒装焊接，确定了凸点高度差对倒装焊连通率的影响，并总结工程应对方案；

(2) 影响凸点焊接形貌的因素包括凸点尺寸、凸点高度差、芯片移动距离，其中，通过芯片移动可以在一定范围内弥补凸点高度差，本文确定了凸点形变量上限以及焊盘设计匹配方式；

(3) 采用优化后的倒装方式进行倒装焊，获得了凸点形貌均一可控的倒装焊样品。

除此之外，膜层组分、焊接温度曲线对锡铅形貌控制也具有一定影响，该类研究工作将陆续展开。

**参考文献:**

- [1] 任春岭, 鲁凯, 丁荣峰. 倒装焊技术应用[J]. 电子与封装, 2009, 9(3):15-20.
- [2] 杨彦锋, 徐达, 常青松, 张延青, 祁广峰. 金凸点超声热压倒装焊工艺参数优化研究[J]. 电子元件与材料, 2019, 38(9):105-109.
- [3] 姜学明, 林鹏荣, 练滨浩, 文惠东, 黄颖卓有铅和无铅倒装焊点研究[J]. 电子工艺技术, 2017, 38(1):26-28.
- [4] 张彩云, 任成平. 凸点芯片倒装焊接技术[J]. 电子与封装, 2005, 5(4):13-15.
- [5] 杨雪霞. 电子封装中金属间化合物力学性能的研究及焊点可靠性分析[D]. 太原:太原理工大学, 2013.