

倒装焊中复合 SnPb 焊点形态模拟

朱奇农, 王国忠, 罗 乐

(中科院上海冶金研究所, 上海 200050)

摘 要: 本文给出了倒装焊 (flip-chip) 焊点形态的能量控制方程, 采用 Surface Evolver 软件模拟了倒装焊复合 SnPb 焊点 (高 Pb 焊料凸点, 共晶 SnPb 焊料焊点) 的三维形态. 利用焊点形态模拟的数据, 分析了芯片和基板之间 SnPb 焊点的高度与焊点设计和焊接工艺参数的关系. 研究表明: 共晶 SnPb 焊料量存在临界值, 当共晶 SnPb 焊料量小于临界值时, 焊点的高度等于芯片上高 Pb 焊料凸点的半径值; 当共晶 SnPb 焊料量大于临界值时, 焊点的高度随共晶 SnPb 焊料量的增加而增加. 另外, 采用无量纲的形式给出了焊点高度与共晶焊料量、焊盘尺寸、芯片凸点的尺寸、芯片重量之间的关系模型, 研究结果对倒装焊焊点形态的控制、工艺参数的优化和提高焊点可靠性具有指导意义.

关键词: 倒装焊; 焊点形态; 模拟

中图分类号: TN305.93

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2000) 05-0055-04

Simulation of Duplex Solder Joints Geometry in Flip-Chip Technology

ZHU Qi-nong, WANG Guo-zhong, LUO Le

(Shanghai Institute of Metallurgy, Chinese Academy of Science, Shanghai 200050, China)

Abstract: Energy controlling equation for solder joint geometry in flip-chip technology was presented and three-dimensioned duplex solder joints (with high Pb-base solder bump and eutectic SnPb solder fillet) geometry was predicted by using surface evolver program. The relationship of the stand-off height between chip and substrate vs. the design parameters and process parameters of solder joints were investigated. It was found there existed a critical eutectic solder volume $V_{critical}$. When the volume of eutectic solder was smaller than $V_{critical}$, the stand-off height of solder joint was equal to the radius of solder bump on chip; when the volume is greater than $V_{critical}$, the stand-off height was greater than the radius of solder bump and increased with the increase of eutectic solder volume. Besides, the regression model was presented for stand-off height of solder joints vs. eutectic solder volume, substrate pad size, solder bump size and chip weight in dimensionless form. All the results could be used to control the solder joint geometry, optimize the process parameters and improve the reliability of solder joint in production.

Key words: flip-chip technology; solder joint geometry; simulation

1 引言

半导体集成技术和微细加工技术的迅速发展, 推动了电子器件的封装技术向高密度、高可靠性方向发展. 在高密度电子封装中, 焊接工艺及焊点可靠性是技术前沿和热点问题. 研究表明^[1,2], 焊点形态的 (指再流焊时, 熔融的合金焊料在焊点部位的金属表面润湿铺展, 冷却后所形成的表面形态和尺寸) 对焊点的可靠性有重要影响. 因此, 焊点形态的设计和控制在提高焊点可靠性的有效途径之一, 受到了人们的关注. 早在 1969 年, IBM 公司的 L. S. Goldman^[3] 采用球截面模型模拟了通孔组装 (THT) 焊点的几何形状, 并以此优化焊点的力学性能与可靠性. 近年来, 在一些新型封装: 如焊球阵列 (BGA)、芯片尺寸封装 (CSP)、凸点倒装焊等的设计和工艺优化中, 利用数值分析方法来模拟和预测有关焊点形态的研究获得了广泛的成功, 为进一步提高器件的可靠性创造了条件^[2~6].

为了满足日益增多的 I/O 端口数, 改善器件的高频性能、导热性能, 提高封装密度, 以倒装焊工艺为基础的芯片直接互连技术 COB (chip on board) 和 DCA (direct chip attachment) 等受到广泛的关注^[7]. 在这类互连技术中, 经常采用复合焊料结构的焊点 (如图 1 所示), 即在芯片上用高熔点焊料 (通常为高铅焊料, 如 97Pb3Sn, 95Pb5Sn, 90Pb10Sn 等) 做成焊料凸点, 然后利用再流焊工艺形成共晶焊料 (Sn60Pb40) 焊点, 从而实现芯片和基板之间的电、热和机械连接. 目前这类焊点形态研究方面的报导尚不多见.

焊点高度是焊点形态的重要参数, 有限元分析和实验研究均表明^[1,2], 焊点高度对焊点的可靠性有重要影响, 焊点高度增大能有效提高焊点的热循环寿命. 因此, 焊点高度的分析和计算是焊点形态研究的重要内容. 本文通过建立焊点形态的能量控制方程, 利用 Surface Evolver 软件^[8] 对倒装焊复合焊

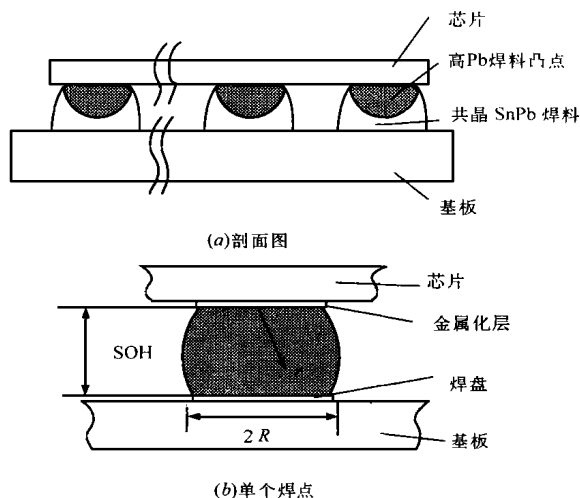


图1 倒装焊复合 SnPb 焊点结构示意图(SOH (solder joint height) 为焊点高度; r 为焊料凸点半径; R 为焊盘半径)

点的形态进行了模拟。基于焊点形态模拟的数据,着重研究了倒装焊工艺、设计因素对焊点高度的影响,并以无量纲的形式给出了预测复合焊点高度的关系模型。

2 焊点形态的数学模型

2.1 基本假设

为使问题简化,并在合理的精度内有效模拟倒装焊复合焊点的形态,作如下基本假设:

(1) 焊点形态为再流焊时熔融 SnPb 焊料达到的准平衡静态形状,忽略冷凝过程对焊点形态的影响。(2) 焊点高度为再流后所得到的高度,即在再流焊时,芯片的重量完全由熔融的焊料支撑。(3) 在再流焊过程中,焊点处不存在温度梯度,焊料的密度、表面张力是处处相同的。(4) 焊料凸点呈理想的半球型,在再流焊时,焊料凸点不熔化,并忽略高 Pb 焊料与共晶 SnPb 焊料之间的互熔、扩散作用。

根据以上假设,基于能量最小原理,可认为焊点形态是熔融焊料以及与焊料接触的固相、气相所组成的系统处于势能最小时的准静平衡状态。

2.2 能量控制方程

如前所述,焊点形态是熔融焊料在焊点部位金属表面润湿铺展达到的准静平衡形态,并由焊点的热能最小所确定。焊点体系的势能(E)为界面势能(E_s)和重力势能(E_G)之和,即

$$E = E_s + E_G \quad (1)$$

式中, $E_s = \iint \gamma \cdot dA$; $E_G = \iiint \rho g z \cdot dV$ 。为界面张力; γ 为共晶 SnPb 焊料密度; z 为高度坐标; g 为重力加速度; A , V 分别为面积和体积。

在熔融焊料的润湿铺展未达到可润湿金属表面边界尺寸时,固-液两相的界面势能和与熔融焊料在金属表面的浸润角有关,根据 Laplace-Young 方程,固-液两相界面的表面势能可描述为:

$$E_s = \iint_{A_0} \gamma \cdot dA + \iint_{A_1} \gamma \cos \theta_1 \cdot dA + \iint_{A_2} \gamma \cos \theta_2 \cdot dA \quad (2)$$

式中, γ 为熔融共晶 SnPb 焊料的表面张力; A_0 , A_1 和 A_2 分别

为熔融共晶 SnPb 焊料与空气、基板焊盘(如 Cu、Ni 金属化层)及高 Pb 焊料凸点的界面面积; θ_1 、 θ_2 相应为共晶 SnPb 焊料在基板焊盘和焊料凸点的润湿角。对焊点系统的总势能求最小值,即:

$$\min E = \min \left[\iint_{A_0} \gamma \cdot dA + \iint_{A_1} \gamma \cos \theta_1 \cdot dA + \iint_{A_2} \gamma \cos \theta_2 \cdot dA + \iiint \rho g z \cdot dV \right] \quad (3)$$

考虑到给定焊点钎料量(V_0)的等周条件:

$$\iiint 1 \cdot dV - V_0 = 0 \quad (4)$$

使焊点势能量小,可描述成泛函的形式,即:

$$I = \iint_{A_0} \gamma \cdot dA + \iint_{A_1} \gamma \cos \theta_1 \cdot dA + \iint_{A_2} \gamma \cos \theta_2 \cdot dA + \iiint \rho g z \cdot dV + \iiint \lambda \cdot dV - V_0 \quad (5)$$

式中, λ 是 Lagrange 乘数。利用变分问题的数值方法可以求出熔融共晶 SnPb 焊料的平衡状态,从而对焊点形态进行模拟。

本文应用 Surface Evolver 软件来模拟焊点的形态。基于能量控制方程描述的势能积分形式,给出相应的边值条件,合理定义焊点的初始形状,利用该软件可迭代求解出势能量小时的焊点形态。

3 模拟结果与分析

3.1 输入参数的确定

模拟焊点形态时,需要确定的输入参数有:熔融共晶 SnPb 焊料的密度,表面张力,熔融焊料在焊盘金属表面的润湿角 θ_1 和在焊料凸点金属表面的润湿角 θ_2 。本文选用 $\rho = 0.00834 \text{ g/cm}^3$, $\gamma = 490 \text{ dyne/mm}$, $\theta_1 = 12^\circ$ ^[9]。由于实际上熔融共晶 PbSn 焊料与高 Pb 焊料有一定的互熔,不存在稳定的浸润角^[10],因此在本文的计算中取 $\theta_2 = 10^\circ$ 。

3.2 焊点高度的确定

如图1所示,焊点高度指芯片上焊料凸点下的金属化层和基板焊盘金属化层之间的距离。在给定的焊点高度(SOH)时,利用 Surface Evolver 软件计算得到不包括芯片重力势能的单个焊点的能量 E ,由于能量常值部分可以不计,考虑芯片重力势能时,单个焊点的总能量 E_{total} 可描述为:

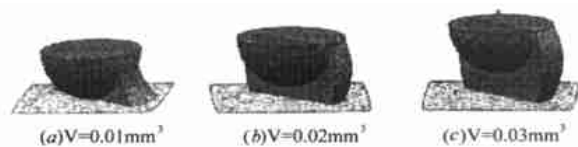
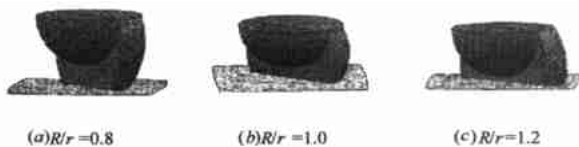
$$E_{\text{total}} = E + mg \cdot \text{SOH} / n \quad (6)$$

式中, m 是芯片的重量, n 是芯片上焊料凸点个数。当焊点高度发生变化时,式中的各项能量也相应变化,于是可得到单个焊点的总能量 E_{total} 与给定的焊点高度 SOH 的关系式 $\text{SOH} = f(E_{\text{total}})$,则实际焊点的高度(SOH_p)可以通过求解下式来确定:

$$\text{SOH}_p = f(\min E_{\text{total}}) \quad (7)$$

3.3 模拟结果

复合焊点形态的模拟结果如图2、图3所示。在图中半球是高 Pb 焊料凸点,为了直观起见,共晶 SnPb 焊料的左半部分被通过焊盘直径的垂直平面切开。从图2可见,随着共晶焊料量的增加,焊点的形状由凸形变为凸形,同时焊点高度随共晶

图 2 共晶焊料量对焊点形态的影响($R=0.2\text{mm}$, $r=0.2\text{mm}$)图 3 焊料凸点和焊盘尺寸匹配(R/r)对焊点形态的影响
(R :焊盘半径, r :焊料凸点半径)

焊料量的增多而增大。图 3 是不同的焊料凸点和焊盘尺寸匹配(R/r)时的焊点形态。可见焊点高度随着 R/r 比值的增大而减小。

图 4 是不同共晶焊料体积时($R=0.2\text{mm}$, $r=0.2\text{mm}$)焊点的总能量 E_{total} 和给定的焊点高度 SOH 之间的关系。结果表明,给定的焊点高度增加,焊点的总能量 E_{total} 呈抛物形变化,存在最低点, E_{total} 最低时的 SOH 即为实际焊点高度(SOH_p)。

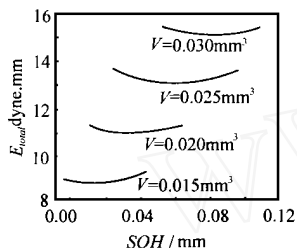
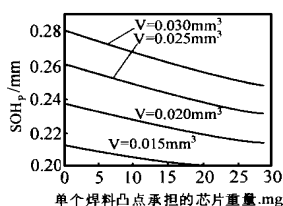
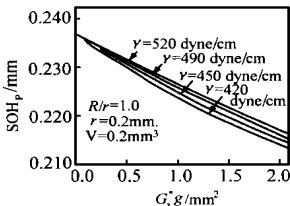
图 4 单个焊点的总能量和 图 5 SOH_p 和 V 、 R/r 的关系(不
给定焊点高度的关系 考虑芯片重量, $r=0.2\text{mm}$)

图 5 是焊点高度和共晶焊料量、焊料凸点与焊盘尺寸匹配的关系。从图中可看出,共晶 SnPb 焊料量存在临界值(V_{critical}),当共晶 SnPb 焊料量 $V \leq V_{\text{critical}}$ 时,焊点高度等于芯片上焊料凸点的半径,即芯片焊料凸点和基板直接接触;当共晶 SnPb 焊料量 $V > V_{\text{critical}}$ 时,焊点高度大于芯片上焊料凸点的半径,并随共晶 SnPb 焊料量增大而增大。由于在倒装焊技术中,芯片的重量(G)一般完全由焊点来支撑,因此芯片的重量和单位芯片上的焊料凸点数(即凸点密度)的变化将影响再流焊后的焊点形态。图 6 是凸点密度和芯片重量对焊点高度的影响,在凸点密度和共晶 SnPb 焊料量不变的情况下,随着

图 6 单个凸点承担的芯片
重量对焊点高度的影响
($R/r=1.0$, $r=0.2\text{mm}$)图 7 表面张力变化对焊点
高度的影响($R/r=1.0$,
 $r=0.2\text{mm}$, $V=0.02\text{mm}^3$)

芯片重量的增加,再流焊后焊点高度减小。此外,在倒装焊工艺中,再流温度是一个影响焊点质量的重要因素,回流温度升高,熔融 SnPb 共晶焊料的表面张力减小,焊点体系的能量将发生变化,从而最终影响焊点的形态。图 7 是熔融 SnPb 共晶焊料的表面张力对焊点高度的影响,由图可见表面张力变化对焊点高度的影响不大,只是在芯片重量较大时,使焊点高度略有下降。

3.4 焊点高度的回归模型

为了综合考虑再流焊温度(T)、共晶 SnPb 焊料量(V)、芯片焊料凸点尺寸(r)与焊盘尺寸(R)、芯片的重量(G)和芯片上的凸点密度(n)等对焊点高度的影响,对计算结果进行回归分析,从而建立焊点高度 SOH_p 与 T 、 V 、 R 、 r 、 G 、 n 的关系模型。

$$SOH_p = f(T, V, R, r, G, n) \quad (8)$$

文献[1]指在再流焊的温度范围内($200 \sim 230^\circ\text{C}$)熔融共晶 SnPb 焊料的表面张力大约在 $460 \sim 480\text{dyne/cm}$ 之间。由上所述,在此范围内表面张力的变化对焊点高度的影响不大,因此,再流焊温度的影响可忽略。同时,为便于应用,采用无量纲形式对变量进行变换,定义相对焊点高度 $H^* = SOH_p/r$,单个焊点单位面积上承担的芯片重量 $G^* = G/n \cdot r^2$,相对焊料量 $V^* = V/r^3$,焊点尺寸因子 $K = R/r$,于是式(8)可改写为:

$$H^* = f(G^*, V^*, K) \quad (9)$$

回归处理的过程如下:

(a) 假定 H^* 与共晶 SnPb 焊料量(V^*)之间存在线性关系,即

$$H^* = a_0 + a_1 V^* \quad (10)$$

(b) 参数 a_0 , a_1 和单个凸点所承受的重量(G^*)有关,采用二次多项式回归,即

$$\begin{aligned} a_0 &= b_{00} + b_{01} G^* + b_{02} G^{*2} \\ a_1 &= b_{10} + b_{11} G^* + b_{12} G^{*2} \end{aligned} \quad (11)$$

(c) 参数 b_{ij} ($i=0,1; j=0,1,2$)和焊点尺寸因子 K 有关,同样采用二次多项式回归,即

$$b_{ij} = c_{ij0} + c_{ij1} K + c_{ij2} K^2 \quad (12)$$

用上述关系进行回归处理,可得到参数 c_{ijk} ($i=0,1; j=0,1,2; k=0,1,2$),如表 1。

利用回归模型式(9)可以分析设计、工艺等参数对焊点高度的影响。在实际倒装焊工艺中,可以利用上述回归模型来设计和控制焊点高度,从而提高焊点可靠性。

表 1 焊点高度回归模型系数的求解结果

| | $i=0$ | | | $i=1$ | | |
|-------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|----------|
| | $k=0$ | $k=1$ | $k=2$ | $k=0$ | $k=1$ | $k=2$ |
| $j=0$ | 1.12652 | -0.344875 | 0.32952 | 0.28335 | -0.1166 | 0.015 |
| $j=1$ | 0.00427 | -0.1178 | 0.10225 | -0.16605 | 0.25825 | -0.1135 |
| $j=2$ | -0.01837 | 0.043975 | -0.023625 | 0.04087 | -0.071275 | 0.032125 |

4 结论

本文基于能量最小原理,采用 Surface Evolver 软件,计算

了具有复合 SnPb 焊料结构的倒装焊焊点的三维形态. 结果表明:当共晶焊料的体积小于临界值时,焊点形态为凹形,焊点高度等于芯片凸点的半径,芯片凸点和基板焊盘直接接触;当共晶焊料体积大于临界值时,焊点的形态变为凸形,焊点高度大于芯片凸点的半径,并随共晶焊料量的增加而增加在共晶焊料的体积不变时,焊点高度随着 R/r 的增加而减小,随着芯片的张力增加而减小. 另外,本文提出了计算焊点高度的无量纲回归模型.

参考文献

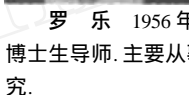
- [1] 王国忠. SMT 焊点三维形态预测及对焊点可靠性的影响. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1996
- [2] J. H. Lau. in Proc NEPCON 'west (Anaheim). 1986, 2(2): 726 ~ 731
- [3] L. S. Goldmann, IBM. J. Res. Develop. 1969, 13(2): 251 ~ 265
- [4] Wei Lin, S. K. Patra and Y. C. Lee. IEEE-CHMT, 1995, 18(3): 543 ~ 552
- [5] T. J. Single, J. M. Pitarresi, I. R. Holub and H. Lin. . Advance in Electronics Packaging, 2, ASME EEP-10-2, 1995, 1155 ~ 1166
- [6] S. M. Heinrich, S. Shaky, Y. Wang, P. S. Lee and S. A. Schroeder. IEEE-CPMT part B, 1996, 19(2): 310 ~ 319
- [7] P. A. Totta and T. C. Reiley. Chip-to-package Interconnections, Microelectronics Packaging Handbook, part 2: Semiconductor Packaging, edited by R. R. Tummala, New York 1996, -136 ~ -167
- [8] K. A. Brakke, <http://www.susqu.edu/facstaff/b/brakke/evolver>
- [9] S. M. Heinrich, A. F. Elkouh, N. J. Nigro, P. S. Lee. ASME J. Electron. Packg. , 1990, 112(3): 210 ~ 218
- [10] H. Conrad, Z. Guo and D. Y. Jung. Mat. Res. Symp. Proc. 390, 1995: 189 ~ 199



朱奇农 1969 年生, 1991 年毕业于清华大学材料科学与工程系, 现为中科院上海冶金研究所博士生, 研究方向为集成电路的封装与可靠性



王国忠 1968 年生, 1996 年获哈尔滨工业大学博士学位, 现为中科院上海冶金研究所副研究员, 主要从事电子器件封装可靠性.



罗乐 1956 年生, 博士, 现为中科院上海冶金研究所研究员, 博士生导师. 主要从事材料物理和集成电路的封装和可靠性方面的研究.