

# 基于正交设计的 WLCSP 柔性无铅焊点随机激励应力应变分析

梁 颖<sup>1</sup>, 黄春跃<sup>2</sup>, 黄 伟<sup>2</sup>, 邵良兵<sup>2</sup>, 李天明<sup>3</sup>

(1. 成都航空职业技术学院 电子工程系, 成都 610021; 2. 桂林电子科技大学 机电工程学院, 桂林 541004;  
3. 桂林航天工业学院 汽车与动力工程系, 桂林 541004)

**摘要:** 对晶圆级芯片尺寸封装(wafer level chip scale package, WLCSP)柔性无铅焊点进行了随机振动应力应变有限元分析。以1号柔性层厚度、2号柔性层厚度、上焊盘直径和下焊盘直径4个结构参数作为关键因素,采用正交表设计了16种不同结构参数组合的柔性焊点,获取了16组应力数据并进行了方差分析。结果表明,焊点内最大应力应变随1号柔性层厚度和2号柔性层厚度的增加而减小;在置信度99%时,下焊盘直径和上焊盘直径对应力具有高度显著影响,在置信度95%时,1号柔性层厚度和2号柔性层厚度对应力具有显著影响;各因素对应力影响排序为:下焊盘直径影响最大,其次是上焊盘直径,再次是1号柔性层厚度,最后是2号柔性层厚度。

**关键词:** 晶圆级芯片尺寸封装; 柔性无铅焊点; 随机振动; 有限元分析; 方差分析

中图分类号: TG 454 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2016)02-0013-04

## 0 序 言

为确保集成电路芯片在恶劣环境或特定条件下的持续稳定工作能力,需要可靠性更为突出的各种新型焊点来满足实际需求。作为新型焊点之一的柔性焊点是在焊点上由聚酰亚胺制作出柔性层<sup>[1]</sup>,通过柔性层以减小芯片和基板之间的热膨胀失配,提高焊点热疲劳寿命。采用柔性结构设计一方面提高了芯片互连的可靠性,另一方面,由于柔性焊点微小、处于器件底部且影响其可靠性因素(包括焊盘尺寸及材料参数等)众多,这对确保其在实际恶劣工作环境中的可靠应用带来了诸多难处。目前对柔性焊点热疲劳可靠性的研究较多<sup>[2-6]</sup>,证实了柔性焊点具有较高的热疲劳寿命,而对柔性焊点在振动冲击条件下的可靠性研究工作尚未开展。实际上,随着电子设备服役环境日益恶劣,当电子设备处于严重的振动、冲击环境中时柔性焊点的可靠性将受到很大的影响。研究表明,在某种情况下振动冲击所引起的疲劳失效甚至会成为焊点主要失效原因<sup>[7]</sup>。为保障柔性焊点在各种实际工作条件下的可靠应用,

研究其在振动冲击加载条件下的可靠性以及各种因素对其可靠性的影响极为必要。因此,文中以WLCSP柔性无铅焊点为研究对象,对其进行随机振动加载条件下的应力应变有限元分析,考察柔性层厚度和焊盘尺寸参数对柔性焊点振动可靠性的影晌,从而为提高柔性焊点振动条件下的可靠性提供理论指导。

## 1 WLCSP 柔性无铅焊点应力应变有限元分析

### 1.1 柔性无铅焊点三维有限元分析模型

文中所建立的柔性无铅焊点三维有限元模型如图1所示。该模型为1/4有限元分析模型,包括芯片、焊球、两层柔性层、焊盘和印制电路板(PCB)5部分,其中焊球直径0.45 mm、高度0.32 mm,基板尺寸30 mm×30 mm×1.2 mm,芯片尺寸10 mm×10 mm×0.65 mm,焊点材料为无铅焊料SAC387(95.5Sn3.8Ag0.7Cu)。有限元模型采用SOLID45单元,划分为47 625个单元、11 973个节点。对模型施加的边界条件为:对称面施加对称边界条件,约束PCB最外边下角点的x,y和z三个方向自由度。有限元分析中采用的材料性能参数见表1所示。

文中采用的随机激励的形式为加速度功率谱密度(power spectral density, PSD),来源于美国军用标

收稿日期: 2014-12-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51465012); 广西壮族自治区自然科学基金资助项目(2015GXNSFCA139006、2013GXNSFAA019322) 四川省教育厅科研资助项目(13ZB0052)

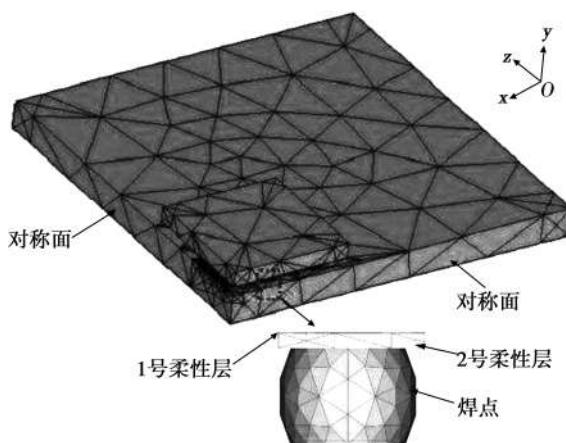


图1 WLCSP 整体有限元模型

Fig. 1 Finite element model of WLCSP

表1 材料参数  
Table 1 Material properties of WLCSP

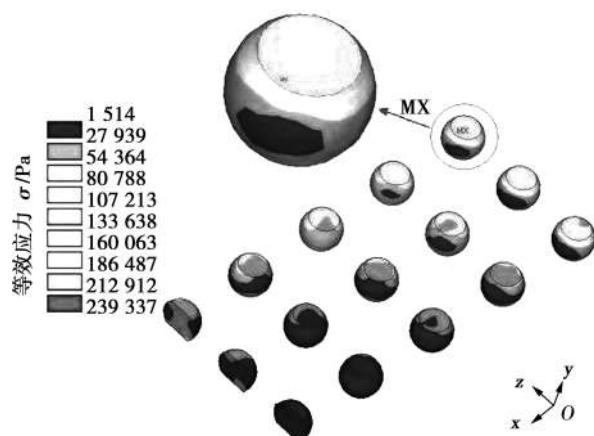
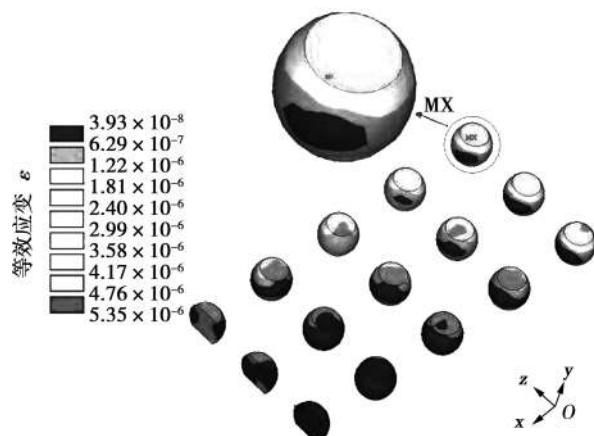
材料	弹性模量 $E/\text{GPa}$	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比 $\mu$
芯片	112.4	2300	0.28
1号柔性层	3.5	1420	0.30
2号柔性层	0.90	1420	0.30
焊盘	130	8942	0.34
焊点(SAC387)	38	7600	0.38
PCB	22	1900	0.25

准 MIL-STD NAVMAT P-9492《海军生产筛选试验大纲》:当随机振动频率在 20~80 Hz 时,曲线上升斜率为 +3 dB/oct,对应的加速度功率谱密度幅值范围为 0.01~0.04 g<sup>2</sup>/Hz,80 Hz 时为 0.04 g<sup>2</sup>/Hz;当随机振动频率在 80~350 Hz 时,对应的加速度功率谱密度幅值为 0.04 g<sup>2</sup>/Hz,当随机振动频率在 350~2 000 Hz 时,曲线以 -3 dB/oct 的斜率下降,对应的加速度功率谱密度幅值范围为 0.04~0.01 g<sup>2</sup>/Hz.

## 1.2 柔性无铅焊点随机振动分析结果

采用范米塞斯等效应力应变(以下简称应力应变)描述柔性无铅焊点内部的应力应变分布状态,晶圆级芯片尺寸封装柔性无铅焊点随机振动应力应变有限元分析结果如图 2 和图 3 所示,图 2 和图 3 中所示为芯片中间部分工作焊点阵列的焊点。图 2 所示为焊点等效应力分布,图 3 所示为焊点应变分布。从图 2 和图 3 中可见,柔性无铅焊点阵列焊点内的等效应力应变分布是不均匀的,外围柔性无铅焊点受到的应力应变要比位于中间部分的焊点的大,最大应力、应变区域出现于距离焊点阵列中心最远处的柔性无铅焊点上,最大应力和最大应变分别是 239 337 Pa 和  $5.35 \times 10^{-6}$ ,并且该最大应力、应变区

域是位于柔性无铅焊点顶端面与芯片接触一侧的边缘,焊点顶端处的应力应变大于底端,并且从焊点顶端到底端(即从焊点与芯片接触面到焊点与 PCB 接触面)应力应变逐渐减小。因此,在随机振动条件下柔性无铅焊点的疲劳裂纹将优先在焊点顶端区域产生和扩展,然后沿焊点与柔性层接合面发展,最终扩展到整个接合面,导致焊点失效,该柔性无铅焊点即为关键焊点(最易失效)。

图2 WLCSP 柔性无铅焊点随机振动应力分布云图  
Fig. 2 Equivalent stress distribution of WLCSP solder joints with compliant layer图3 WLCSP 柔性无铅焊点随机振动应变分布云图  
Fig. 3 Equivalent strain distribution of WLCSP solder joints with compliant layer

## 1.3 与无柔性层结构的无铅焊点应力应变对比

为了对比分析有柔性层和无柔性层的焊点在随机振动条件下的应力应变,文中建立了无柔性层焊点的有限元模型,该模型中除了无柔性层结构外其他参数均与图 1 所示有柔性层的焊点模型相同。在对无柔性层焊点模型施加相同随机振动加载后所得焊点内应力应变结果如表 2 所示。

表2 有、无柔性层时焊点应力应变对比

Table 2 Comparison of stress and strain of solder joint with and without compliant layer

结构方式	焊点内最大应力 $\sigma_m/\text{Pa}$	焊点内最大应变 $\varepsilon_m(10^{-6})$
无柔性层	317 023	7.07
有柔性层	239 337	5.35

从表2可知,无柔性层的无铅焊点的最大应力和最大应变分别是317 023 Pa和 $7.07 \times 10^{-6}$ ,对比有柔性层和无柔性层的无铅焊点的最大应力应变数值可知,无柔性层结构的无铅焊点承受的随机振动应力应变比有柔性层结构的无铅焊点要大,因此,采用柔性层结构后,在同等随机振动加载条件下焊点内的最大应力和最大应变分别比无柔性层的焊点降低了24.5%和24.3%,柔性层结构可以有效的降低随机振动载荷作用下焊点内的应力应变,从而提高了焊点的振动疲劳寿命。

#### 1.4 柔性层厚度对无铅焊点应力应变影响

将晶圆级芯片尺寸封装中除了柔性层厚度以外的其他结构参数固定不变,而只依次分别改变1号柔性层厚度和2号柔性层厚度,建立相应的有限元分析模型,研究随机振动加载条件下柔性层厚度变化对焊点内应力应变的影响。将1号柔性层厚度依次取为0.003,0.006,0.008和0.01 mm,2号柔性层厚度依次取为0.01,0.03,0.05和0.075 mm,其它结构参数与文中1.1节所述柔性无铅焊点三维有限元分析模型相同,依次建立8个与上述柔性层厚度相对应的有限元法分析模型,进行随机振动加载后所得应力应变结果如表3和表4所示。

表3 1号柔性层厚度变化对焊点应力应变影响

Table 3 Effect of 1st compliant layer thickness on solder joint stress and strain

1号柔性层厚度 $H_1/\text{mm}$	应力 $\sigma/\text{Pa}$	应变 $\varepsilon(10^{-6})$
0.003	259 296	5.71
0.006	248 539	5.47
0.008	239 337	5.35
0.01	233 172	5.13

表4 2号柔性层厚度变化对焊点应力应变影响

Table 4 Effect of 2nd compliant layer thickness on solder joint stress and strain

2号柔性层厚度 $H_2/\text{mm}$	应力 $\sigma/\text{Pa}$	应变 $\varepsilon(10^{-6})$
0.01	239 337	5.35
0.03	172 759	3.45
0.05	158 486	3.17
0.075	153 896	3.06

从表3和表4中所示随机振动加载条件下无铅焊点内的最大应力应变数据结果可知,在其它结构参数不变的情况下,随着1号柔性层厚度和2号柔性层厚度的增加,焊点内随机振动最大应力应变均减小,由此可见,在一定条件下增大柔性层的厚度对减小随机振动条件下焊点内的应力应变是有利的。

## 2 柔性焊点随机振动应力方差分析

### 2.1 柔性焊点结构参数组合正交设计

选取影响随机振动条件下柔性无铅焊点可靠性的4个关键因素为:1号柔性层厚度( $H_1$ )、2号柔性层厚度( $H_2$ )、上焊盘直径( $D_1$ )和下焊盘直径( $D_2$ ),4个因素均选取4个水平,如表5所示。采用L<sub>16</sub>(4<sup>5</sup>)正交表<sup>[8]</sup>安排4因素4水平的正交试验,得出柔性无铅焊点结构参数因素水平正交矩阵如表6所示。在表6中总共有16组不同的柔性无铅焊点结构参数组合,分别根据这16组结构参数建立16个柔

表5 柔性无铅焊点结构参数水平表

Table 5 Factors and levels of WLCSP solder joint configuration parameters

因素	水平			
	1	2	3	4
1号柔性层厚度 $H_1/\text{mm}$	0.003	0.006	0.008	0.01
2号柔性层厚度 $H_2/\text{mm}$	0.01	0.03	0.05	0.075
上焊盘直径 $D_1/\text{mm}$	0.30	0.34	0.38	0.42
下焊盘直径 $D_2/\text{mm}$	0.30	0.33	0.38	0.42

表6 L<sub>16</sub>(4<sup>5</sup>)参数组合正交矩阵及应力分析结果

Table 6 L<sub>16</sub>(4<sup>5</sup>) orthogonal array and results

组合号	1号柔性层 $H_1$	2号柔性层 $H_2$	上焊盘直径 $D_1$	下焊盘直径 $D_2$	等效应力 $\sigma/\text{Pa}$
1	1	1	1	1	287 420
2	1	2	2	2	190 372
3	1	3	3	3	207 644
4	1	4	4	4	216 273
5	2	1	2	3	224 532
6	2	2	1	4	149 889
7	2	3	4	1	265 882
8	2	4	3	2	157 345
9	3	1	3	4	239 337
10	3	2	4	3	220 491
11	3	3	1	2	142 134
12	3	4	2	1	345 324
13	4	1	4	2	193 363
14	4	2	3	1	281 105
15	4	3	2	4	223 979
16	4	4	1	3	171 817

性无铅焊点随机振动有限元分析模型,并进行相应的有限元随机振动分析后得到焊点内最大等效应力数据如表6中最后一列所示。

## 2.2 柔性焊点随机振动应力方差分析

据正交试验方差分析理论<sup>[9]</sup>及表6中随机振动应力数据,可计算出各因素的自由度、方差估计值和方差比(即F值)如表7所示。由表7可知,下焊盘直径和上焊盘直径所对应的F值分别为176.8和36.5,这两个F值均大于相应的临界值 $F_{0.01}(3,12)$ (即29.50),因此在显著性水平 $\alpha$ 为0.01(即置信度99%)的情况下,下焊盘直径和上焊盘直径对柔性无铅焊点随机振动应力均有高度显著影响;因素1号柔性层厚度和2号柔性层厚度所对应的F值分别为15.6和9.7,这两个F值均大于相应的临界值 $F_{0.05}(3,12)$ (即9.28)而小于 $F_{0.01}(3,12)$ (即29.5),因此,在置信度95%的情况下,这两个因素对柔性无铅焊点随机振动应力有显著影响。

表7 随机振动应力方差分析计算表

Table 7 Results of variance analysis on stress

方差来源	自由度	方差估计值	F值	显著性
1号柔性层厚度( $H_1$ )	3	989 411 367.9	15.6	显著
2号柔性层厚度( $H_2$ )	3	614 762 024.4	9.7	显著
上焊盘直径( $D_1$ )	3	2 309 706 552.5	36.5	高度显著
下焊盘直径( $D_2$ )	3	11 182 959 102.9	176.8	高度显著
误差	12		$F_{0.01} = 29.5$ $F_{0.05} = 9.28$	

由表7中所列各因素F值的大小,还可得出因素显著性排序为: $F_{D_2} > F_{D_1} > F_{H_1} > F_{H_2}$ ,即4个因素对柔性无铅焊点随机振动应力产生影响的大小排列顺序为:下焊盘直径影响最大,其次是上焊盘直径,再次是1号柔性层厚度,最后是2号柔性层厚度。从以上分析可知,在所考察的影响柔性无铅焊点随机振动应力的4个因素中,所有因素均会对柔性无铅焊点应力产生显著影响,因此在实际设计柔性无铅焊点的结构参数时,需要对这些参数进行严格控制,以提高焊点在随机振动环境下的可靠性。

## 3 结论

(1) 对比有、无柔性层的焊点内的最大应力应变数值可知,无柔性层结构的焊点承受的应力应变比有柔性层结构的无铅焊点要大,采用柔性层结构

可以有效的降低随机振动载荷作用下焊点内的应力应变,从而可以提高焊点的振动疲劳寿命。

(2) 在其它结构参数不变的情况下,随着1号和2号柔性层厚度的增加,焊点内的随机振动最大应力应变均减小,因此,在一定条件下增大柔性层厚度对减小焊点内随机振动应力应变是有利的。

(3) 方差分析表明:在置信度为99%的情况下,下焊盘直径和上焊盘直径对柔性无铅焊点随机振动应力具有高度显著影响,在置信度95%的情况下,1号柔性层厚度和2号柔性层厚度对柔性无铅焊点随机振动应力具有显著影响;因素显著性排序为:下焊盘直径影响最大,其次是上焊盘直径,再次是1号柔性层厚度,最后是2号柔性层厚度。

## 参考文献:

- [1] Lee C C, Chang S M, Chiang K N. Sensitivity design of DL-WLCSP using DOE with factorial analysis technology [J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2007, 30(1): 44–55.
- [2] Watanabe N, Asano T. Characteristics of a novel compliant bump for 3-D stacking with high-density inter-chip connections [J]. IEEE Transactions on Packaging and Manufacturing Technology, 2011, 1(1): 83–91.
- [3] Tanaka S, Mohri M, Ogashiwa T, et al. Electrical interconnection in anodic bonding of silicon wafer to LTCC wafer using highly compliant porous bumps made from submicron gold particles [C] // Sensors and Actuators A: Physical, 2012: 1–5.
- [4] Naoya W, Tanemasa A. A large number of I/O connections using compliant bump[J]. Electronic Components and Technology Conference, 2006, 6: 125–130.
- [5] Fan X J, Varia B, Han Q. Design and optimization of thermo-mechanical reliability in wafer level packaging [J]. Microelectronics Reliability, 2010, 50(4): 536–546.
- [6] Lu S T, Lin Y M, Chuang C C, et al. Development of a novel compliant-bump structure for ACA-bonded chip-on-flex (COF) interconnects with ultra-fine pitch [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2011, 1(1): 33–42.
- [7] 郭强, 赵玫, 孟光. 随机振动条件下SMT焊点半经验疲劳寿命累积模型[J]. 振动与冲击, 2005, 24(2): 24–26.  
Guo Qiang, Zhao Mei, Meng Guang. Random fatigue semi-empirical model of SMT solder joint[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(2): 24–26.
- [8] 杨德. 试验设计与分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [9] 何少华, 文竹青, 娄涛. 试验设计与数据处理[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002.

**作者简介:**梁颖,女,1974年出生,硕士,副教授。主要从事微电子封装与组装可靠性方面的研究工作。发表论文10余篇。Email: al-maliang@sina.com