

热超声倒装键合换能系统 多模态振动与有限元分析

隆志力, 吴运新, 韩 雷, 钟 掘

(中南大学机电工程学院, 湖南长沙 410083)

摘 要: 研究了热超声倒装键合设备的核心执行机构——换能系统的动力学特性. 利用激光多谱勒测振仪测试系统末端各方向的振动速度, 发现系统以轴向振动为主, 但受到其他非轴向振动的干扰. 非轴向振动对芯片造成芯片倾斜、键合强度降低等负面影响. 采用有限元方法对换能系统建模, 仿真计算发现换能系统振动是各方向振动的耦合结果, 且工作模态附近存在多种干扰模态. 最后分析了系统多模态产生的根源并提出抑制方法.

关键词: 多模态振动; 换能系统; 有限元分析; 热超声倒装键合工艺

中图分类号: TN14 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372 2112 (2008) 02 0255 06

Multiple Modal Vibration and FEM Analysis of Ultrasonic Transducer for Thermosonic Flip Chip Bonding

LONG Zhi li, WU Yunn xin, HAN Lei, ZHONG Jue

(Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: The dynamics of ultrasonic transducer for thermosonic flip chip bonding is investigated. Velocities of mark points on transducer and bonding tool, which represent different modal vibrations, are sampled by a laser Doppler vibrometer. The results show the axial vibration is dominant while it is disturbed by other non axial components. It means that the ultrasonic transducer system vibrates complicatedly, which couples the axial and non axial components simultaneously. The effect of non axial vibration influences significantly the bonding quality such as chip tilting and poor bonding strength. The multiple vibrations of ultrasonic transducer is analyzed by finite element model. It is found that ultrasonic transducer vibrates in coupling resultant of all allowable modes being excited. The origin and corresponding control method for multiple vibrations is brought forward.

Key words: multiple modal vibrations; ultrasonic transducer; FEM analysis; thermosonic flip chip bonding

1 引言

在一级 IC 微电子封装领域, 引线键合和倒装键合工艺是实现信息器件制造后半工序的主要封装方式. 目前采用引线键合的芯片占据 90% 的市场份额, 但是在面临未来超微细与高集成芯片需求的发展趋势, 引线键合工艺将面临巨大的困难. 倒装键合工艺是满足未来高密高集成芯片的理想封装方式^[1-3]. 倒装键合工艺包括 C4 回流焊、热超声倒装、热压, 以及导电胶连接. 与同类封装工艺相比, 热超声倒装键合工艺 (Thermosonic Flip Chip Bonding) 具有独特的优点: 工艺过程简单、多点、低温、无铅绿色等. 目前热超声倒装键合封装方式已经应用在 IC 制造领域, 如 MEMS 器件、LED 芯片、SAW 滤波器芯片等, 成为具有发展潜力的一种封装方式.

换能系统是热超声键合中提供超声能量的核心执

行机构, 其工作原理为利用压电逆效应将工频电信号转换为高频超声振动, 并将超声能量传输并聚集在芯片凸点界面. 作为超声能量传播的载体, 换能系统动力学特性, 包括谐振频率、振动模态都直接影响芯片凸点与基板互连界面的微观结构、连接强度和键合效率. 为保证最佳连接强度和键合效率, 需要精确控制系统超声能量传播与运动模式. 美国 Colorado 大学 Kang 等人^[4]建立了振动模态模型并分析系统的动力学特性, 该模型提供了键合工具长度与质量选择的依据. Qing 和 Brian^[5]在键合工具与芯片之间加入聚合物以控制芯片的平行度, 结合测试与 FEM 方法分析了聚合物对芯片运动的影响. Thomas^[6]采用单边接触模拟系统安装方式, 并将变幅杆简化为连续体对超声换能器的振动特性进行建模. Li 和 Marchy^[7]采用有限元方法比较了水平与垂直换能器的振动特性与对芯片键合质量的影响. 目前, 人们

收稿日期: 2006-08-10; 修回日期: 2007-09-10

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 50390064, No. 50605064); 国家 973 重点基础研究发展规划 (No. 2003CB716202); 教育部博士点基金 (No. 20060533068); 长江学者创新团队发展计划 (No. IRT0549); 湖南省科技计划 (No. 2007FB098)

对倒装键合换能系统的认识大多局限于引线键合的换能系统^[8-10], 很少深入研究倒装键合过程中换能系统出现的奇异特性及其对键合质量的影响, 业界对超声倒装键合换能系统动力学的理论与测试仍然缺乏深入研究.

本文利用非接触式激光多谱测振仪提取不同负载条件下变幅杆和键合工具末端不同方向的速度, 发现换能系统的多模态响应, 利用有限元方法剖析多模态产生的原因, 并提出抑制方法. 研究结果对换能系统的设计与控制、键合工艺参数的选择有着指导意义.

2 系统组成

超声换能系统主要由超声发生器、压电晶片、变幅杆、键合工具以及安装环等部分组成, 图1为热超声倒装键合换能系统. 实验芯片为包含8个金球凸点的1mm×1mm芯片, 基板为表面镀Ag的铝材料, 表1列出相应的键合参数.

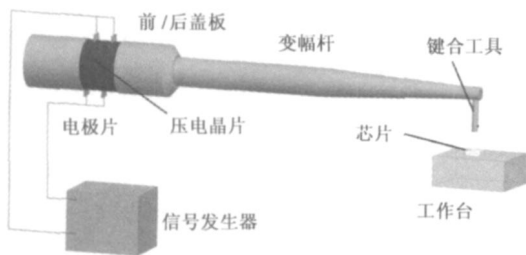


图1 热超声芯片换能系统
表1 键合参数

超声功率 P/watt	时间 t/ms	压力 F/N	超声频率 f/kHz
0~2.26	200	0.3	60

3 实验

利用德国Polytec公司OFV-5000型控制器的激光多谱测试仪提取变幅杆与键合工具末端各个特征点的振动信号, 图2为激光多谱测试平台. 测试参数为: 采集频率: 512kHz, 带通滤波范围: 20kHz到200kHz, 采用参考信号预触发方式.

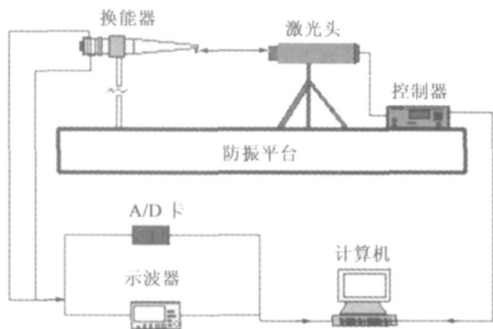


图2 激光多谱测试平台

在常规超声功率0.2到2.26瓦范围内, 提取变幅

杆末端‘C’, ‘F’与‘E’特征点以及键合工具末端‘A’与‘K’特征点的振动速度(RMS均方值), 如图3所示. 其中, u_x, u_y, u_z, u_x, u_y 及 u_z 代表不同方向的振动速度.

对于键合换能系统的运动, 轴向振动模式使得键合工具末端保持与芯片平行的运动状态, 是键合过程最为理想的振动模式. u_x 和 u_y 代表轴向模式振动速度, u_z, u_x 及 u_y 代表非轴向振动速度. 采用比值 $\sigma_{EC} = u_z/u_x, \sigma_{FC} = u_x/u_x$ 及 $\sigma_{KA} = u_z/u_x$ 表示非轴向振动对工作振动的干扰程度.

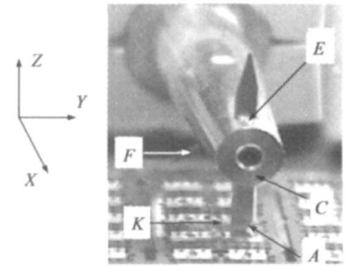


图3 测试的特征点

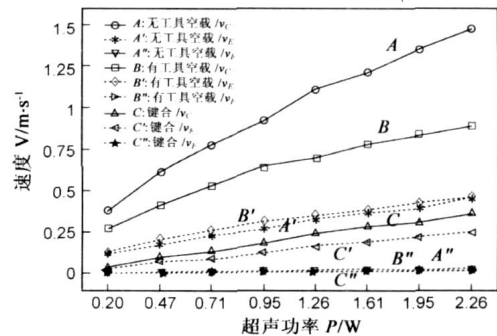
以下对无键合工具, 有键合工具, 以及实际键合等条件下的系统多模态振动特性进行测试.

3.1 无键合工具时

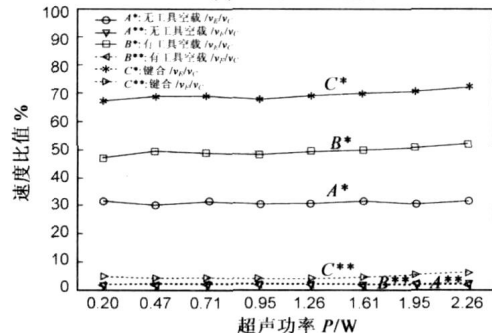
当换能系统没有键合工具时, 测得变幅杆末端的速度, 如图4(a)中的A, A', A''线及图4(b)中的A*, A**线. 可得: 系统以轴向(x方向)振动为主, 但受到垂直(z方向)与水平(y方向)振动的干扰, 垂直(z方向)对轴向振动的干扰程度(即 $\sigma_{EC} = u_z/u_x$)为30%, 水平方向对轴向振动的干扰程度(即 $\sigma_{FC} = u_y/u_x$)为4%. 可得系统的干扰振动主要表现为垂直方向的振动.

3.2 有键合工具但空载时

当加入键合工具但系统处于空载(即工具与芯片



(a) 各特征点的速度



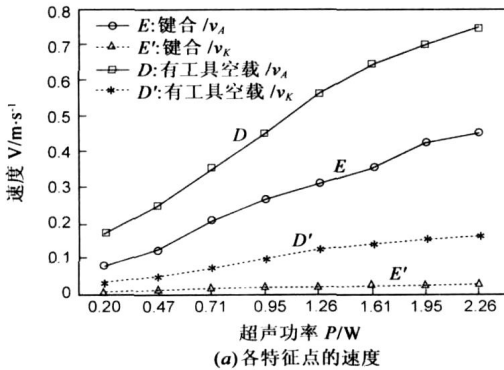
(b) 干扰模式与工作模式的速度比值

图4 不同负载条件下变幅杆末端特征点的速度

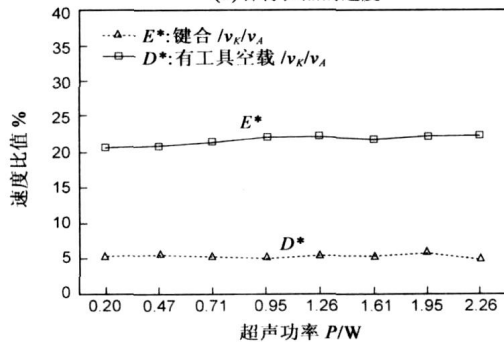
没有接触)时, 测试结果为图 4(a) 中的 B 、 B' 、 B'' 线、图 4(b) 中的 B^* 、 B^{**} 线, 以及图 5(a) 中的 D 、 D' 线、图 5(b) 中的 D^* 线. 可得, 由于键合工具的加入, 导致系统质量分布的不对称, 变幅杆末端垂直方向 z 振动对轴向振动的干扰程度上升到 45%.

3.3 工作状态时

图 4(a) 中的 C 、 C' 、 C'' 线、4(b) 中的 C^* 、 C^{**} 线以及 5(a) 中的 E 线、5(b) 中的 E^* 线为实际键合时变幅杆和工具末端的速度信号. 可得, 垂直方向速度对轴向速度的比值上升到 70%.

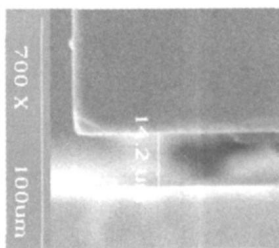


(a) 各特征点的速度

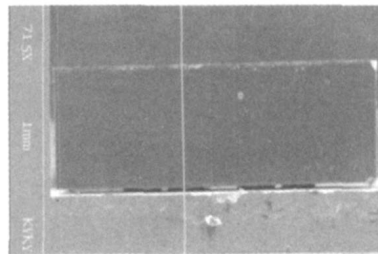


(b) 干扰模态与工作模态的速度比值

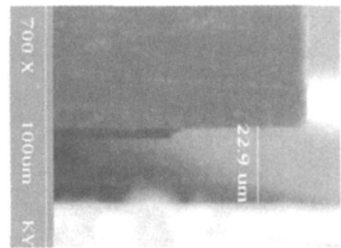
图 5 不同负载条件下键合工具末端特征点的速度



(a) 芯片左侧



(b) 芯片整体图



(c) 芯片右侧

图 7 垂直振动对芯片平行度的影响

可见, 芯片与基板两侧的间隙不一致, 即芯片与基板的平行度出现偏差. 可得, 垂直方向振动是影响芯片平行度的重要因素之一.

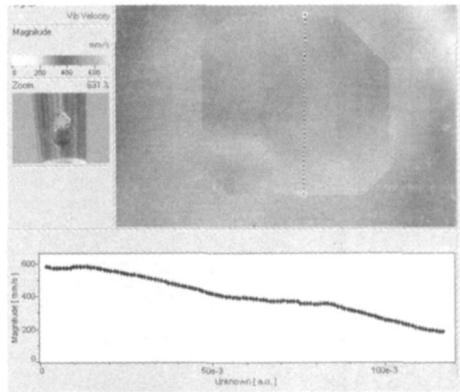
4.2 对键合强度的影响

图 8 和图 9 为键合工具长度发生改变时引起的多模态效应对键合强度的影响. 当工具长度比较小(小于

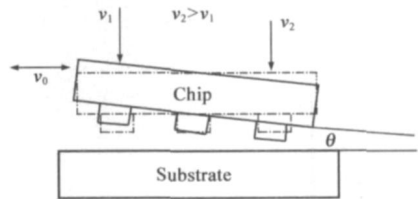
4 多模态对键合质量的影响

4.1 对芯片与基板平行度的影响

在保证芯片与基板平面度一致的条件下键合, 提取的键合工具底面速度梯度示意图, 如图 6(a) 所示. 从速度梯度图可得, 由于键合过程中换能系统受到垂直方向振动的影响, 键合工具底面的速度呈非一致性, 作用在芯片的惯性力呈非均匀分布, 导致芯片与基板之间出现倾角, 如图 6(b) 所示, 其中 V_0 为轴向振动速度, V_1 与 V_2 为变幅杆作用在芯片上的速度, 由于弯曲振动的原因为, $V_1 < V_2$.



(a) 实测的工具底面速度梯度示意图



(b) 速度不一致对芯片的影响

图 6 垂直方向振动对芯片平行度的影响

图 7 为键合后的一组芯片与基板连接图, 可得: $D_1 = 14.2 \mu\text{m}$; $D_2 = 22.9 \mu\text{m}$; $V_d = 8.7 \mu\text{m}$; $\theta = 0.4985^\circ$

9.18mm) 时, 垂直振动对轴向振动的干扰程度比较小, 此时键合强度比较大(约 270gf). 当工具长度增加时, 垂直振动对轴向振动的干扰程度增大, 此时键合强度降低(约 200gf). 由此可得, 非轴向振动影响程度的增加导致键合强度下降, 非轴向模态对轴向工作模态的干扰程度是影响键合强度的重要因素.

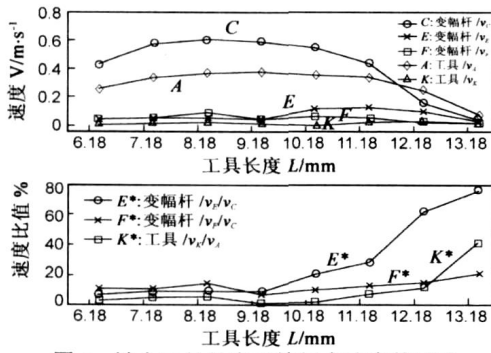


图 8 键合工具长度对特征点速度的影响

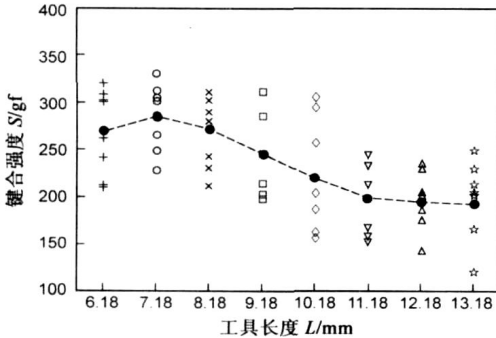


图 9 键合工具长度对键合强度的影响

5 有限元仿真分析

利用 ANSYS 9.0 平台建立换能系统有限元模型, 采用 Block Lanczos 方法计算系统振动模式. 结果发现, 系统在 100kHz 频率范围包含 54 种振动模式, 其中包括轴向、弯曲、扭转等类型的振动模式.

5.1 工作频率与模式

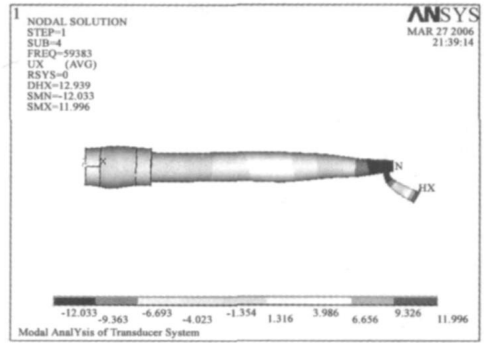
仿真计算得到, 在 100kHz 范围内, 换能系统包含 4 阶轴向模式, 其固有频率分别为 24.149kHz, 44.291kHz, 59.383kHz 以及 81.157kHz. 而第 3 阶轴向模式, 即谐振频率为 59.383kHz 与设计的 58.0~61.0kHz 吻合, 可得第 3 阶轴向固有频率是实际键合过程中的工作频率.

表 2 轴向谐振频率的 FEM 与阻抗测试结果对比

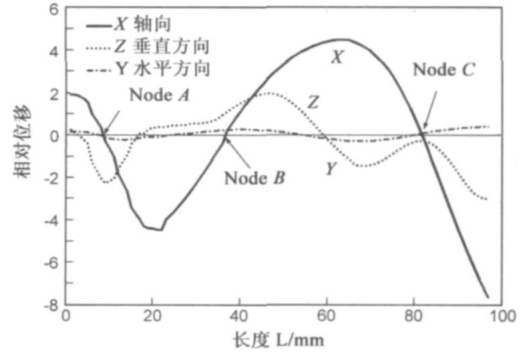
序号	FEM 计算频率 f/kHz	实测频率 f/kHz	误差
6	24.149	23.604	2.3%
14	44.291	45.770	3.2%
26	59.383	60.289	1.5%
39	81.157	79.360	2.3%

图 10 是系统第 3 阶轴向模式及其相应的位移振型. 可得, 变幅杆包含 3 个节点(即 A, B, C 节点), 即整个换能系统为 1.5 个波长. 轴向位移为 0 的节点 B 被作为系统安装位置, 以最大限度地减少超声能量的浪费. 通过换能系统放大作用, 键合工具末端的位移都得到明显放大. 计算发现, 换能系统的 Y 与 Z 方向的振动位移并非为 0, 意味着系统轴向振动受到非轴向振动的干扰. 因此, FEM 仿真计算表明, 系统工作模式是不同方

向振动的耦合结果.



(a) 工作模式

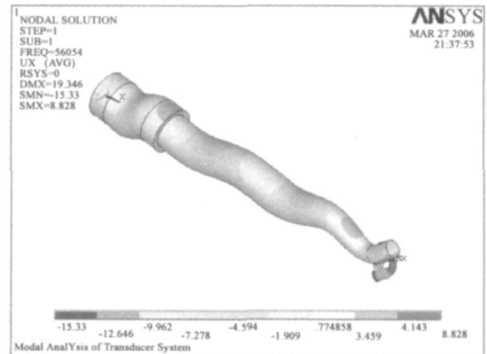


(b) 工作模式

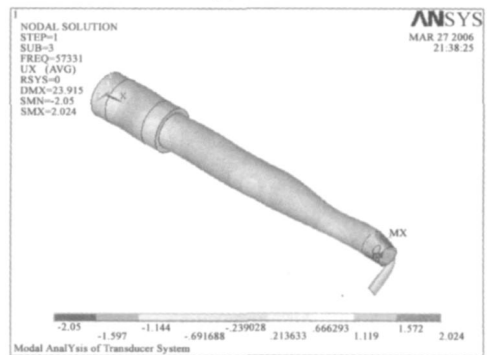
图 10 工作模式及其振型

5.2 工作频率附近的振动模式

FEM 仿真计算发现, 换能系统工作频率 59.383kHz 附近包含多种振动模式. 图 11 为从 56kHz 至 63kHz 范



(a) 弯曲



(b) 扭转

图 11 工作模式附近的非轴向模式

围内系统的振动模态. 可得, 在工作频率附近, 除了轴向振动之外, 系统包含弯曲 (56.054kHz)、扭转 (57.331kHz) 等模态. 由于这些谐振频率都没有远离工作频率, 以及超声发生器自动频率跟踪精度的限制, 在键合过程非轴向模态都有可能被激发. 一旦被激发, 将导致键合工具出现混乱的振动轨迹, 破坏芯片与基板之间正常键合.

5.3 换能系统多模态产生原因及抑制方法

换能系统振动模态与压电陶瓷本身的材料特性、系统结构与安装位置、键合工具的长度、以及各部分的耦合方式等多因素有关. 由实验测试与有限元计算可得, 系统多模态响应来源以下几方面:

(1) 压电陶瓷材料特性

作为系统的振源, 压电陶瓷材料决定系统振动模式与超声传播方式. 换能系统产生多方向运动的原因是由压电陶瓷本身的材料特性造成, 即在电压激励下, 压电陶瓷材料以轴向振动的同时, 其兼做径向振动和切向振动^[10-12]. 图 12 为 FEM 模型计算得到的纵向机电耦合系数 K_t , 径向机电耦合系数 K_p 对变幅杆末端位移的影响.

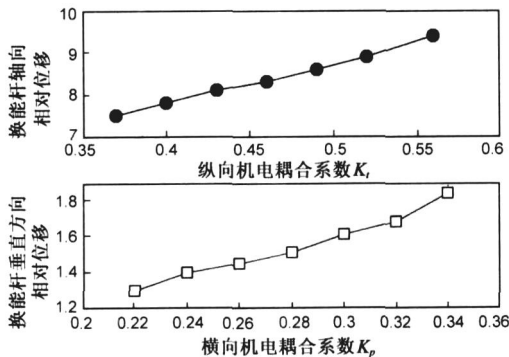


图 12 K_t 与 K_p 对变幅杆末端相对位移的影响

(2) 键合工具与键合压力

从实验测试发现, 当系统加入键合工具之后, 垂直方向振动速度对轴向速度的干扰程度从无键合工具的 30% 上升到 45%, 当系统处于实际键合压力加载时, 二者比值上升为 70%. 键合工具与键合压力的加入破坏了系统的轴向振动, 使得系统发生垂直方向的形变. 可得, 键合工具与键合压力是加剧垂直振动干扰程度的重要因素.

(3) 超声发生器频率自动跟踪精度的不足

从 FEM 计算以及阻抗测试可得, 系统工作频率附近存在多种非轴向模态. 在实际键合过程由于金球的不断变形等原因, 系统频率是一个非线性过程. 由于超声发生器频率自动跟踪模块精度上的不足, 而干扰模态的频率与工作频率非常接近, 由此在键合过程干扰模态都有可能被激发, 导致系统产生多种振动模态.

对于热超声倒装键合, 非轴向模态的干扰对键合效果极为不利, 必须得到合理的控制. 抑制多模态出现的方法包括^[13-15]:

(a) 提高压电陶瓷材料特性, 增加纵向机电转换效率, 降低径向和切向机电转换效率, 比如采用 1~3 型复合压电陶瓷材料可以有效控制压电晶片的寄生横向振动的干扰.

(b) 优化换能系统结构设计, 抑制工作频率附近的振动模态, 或者使其远离工作主模态.

(c) 抑制超声发生器谐波成分的生成, 提高频率自动跟踪的精度, 以防止换能系统其他频率的模态被激发.

6 结论

(1) 激光多谱勒测振仪测试发现, 换能系统的运动是不同方向运动的耦合结果. 系统做轴向振动为主, 受到其他非轴向振动的干扰, 非轴向振动对芯片封装带来负面影响, 如芯片倾斜、键合强度下降.

(2) 换能系统有限元仿真分析得到, 换能系统以第 3 阶轴向模态作为系统工作模态. 工作模态做轴向振动的同时, 受到垂直和水平方向振动的干扰. 此外, 工作模态附近存在多种干扰模态, 如弯曲、扭转等振动模态, 实际键合过程这些模态都会被激发.

(3) 压电陶瓷材料特性本身、键合工具、键合压力等因素是导致系统产生多模态响应的因素. 抑制多模态产生的方法包括: 提高压电陶瓷材料特性; 优化换能系统结构设计; 抑制超声发生器谐波成分的生成, 提高频率自动跟踪的精度.

参考文献:

- [1] RAO R T. Microelectronics Packaging Handbook [M]. New York: McGraw-Hill Publisher, 2001.
- [2] G G Harman. Wire Bonding in Microelectronics: Materials, Processes Reliability and Yield [M]. 2nd Edition, New York: McGraw-Hill Publisher, 1997.
- [3] H K Charles Jr, K J Mach, S J Lehtonen. Wire bonding at higher ultrasonic frequencies: reliability and process implications [J]. Microelectronics Reliability; 43 (2003) : 141-153.
- [4] Kang, Sa Yoon. Experimental and modeling studies for thermosonic flip chip bonding [D]. USA, Boulder: University of Colorado, 1995.
- [5] Qing Tan, Brian Schaible, Leonard J, et al. Thermosonic flip chip bonding system with a self planarization feature using polymer [J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 1999, 22(3): 468-475.
- [6] Sattel T, Brokelmann. A simple transducer model for longitudinal flip chip bonding [A]. IEEE Ultrasonics Symposium. Proc

- ceedings[C]. Munich, Germany, 2002. 695- 698.
- [7] Li Hing Leung, Marchy, Chan Lai Wah, et al. Comparison of bonding defects for longitudinal and transverse thermosonic flip chip[A]. Proceedings of the 5th Electronics Packaging Technology Conference[C]. Singapore, 2003. 350- 355.
- [8] Lorenzo Parrini. New techniques for the design of advanced ultrasonic transducer for wire bonding[J]. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 2003, 26(1) : 37- 45.
- [9] Long zhili, Han Lei, Zhou Hongquan, Wu Yunxin, Zhong Jue. Vibration simulation of transducer system in thermosonic wire bonding[A]. The 7th IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design, Packaging and Failure Analysis (HDP05) [C]. Shanghai, China, 27- 29th June, 2005: 419- 425.
- [10] WANG Fu liang, HAN Lei, ZHONG Jue. Study of ultrasonic power parameter on the large aluminum wedge bonding strength[A]. The 7th IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design, Packaging and Failure Analysis (HDP05) [C]. Shanghai, China, 27- 29th June, 2005: 42- 45.
- [11] 张福学. 现代压电学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [12] 应崇福. 超声学[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [13] 林书玉, 张福成. 压电陶瓷圆片振子的多模耦合振动[J]. 电子学报, 1994, 22(12) : 64- 70.
Lin Shuyu, Zhang Fucheng. Multimode coupling vibration in disk plates of piezoelectric ceramics[J]. Acta Electronica Sinica, 1994, 22(12) : 64- 70. (in Chinese)
- [14] 王光灿, 田文杰, 林国广, 等. Cymbal 换能器的机电性能[J]. 声学学报, 2005, 30(3) : 279- 288.
Wang Guangcan, Tian Wenjie, Lin Guoguang, et al. Mechanical and electrical characteristics of cymbal transducer[J]. Acta Acustica, 2005, 30(3) : 279- 288. (in Chinese)
- [15] 杨永德, 张云电. 高效率压电陶瓷超声推挤加工装置研究[J]. 电子学报, 2005, 33(11) : 1989- 1991.
Yang Yongde, Zhang Yundian. Investigation of high efficient piezoceramics ultrasonic broaching equipment[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(11) : 1989- 1991. (in Chinese)

作者简介:

隆志力 男, 1976 年 7 月生于广西隆安县, 分别于 2000 年和 2007 年中南大学获得学士与博士学位, 目前主持 1 项国家青年基金面上项目, 参加 1 项目国家重大项目、1 项国家 973 项目等. 发表论文 20 余篇. 主要研究方向为微电子封装工艺及换能系统研制技术.
E-mail: longzhili@mail. csu. edu. cn

吴运新 男, 1963 年生于广东兴宁市, 1999 年获得比利时蒙斯理工大学应用科学博士学位, 现为中南大学教授, 博士生导师, 机电学院院长, 中国金属学会冶金设备专业委员会机械工程教学研究学术委员会副主任委员. 从事结构动力学测试、建模及控制的教学与科研工作. 承担多项国家与企业项目, 获得多项国家与部署奖项.