

# 热超声倒装键合过程中的非线性动力学行为<sup>\*</sup>

韩 雷<sup>†</sup> 钟 掘

(中南大学机电学院, 长沙 410083)

**摘要:** 在作为微器件电气互连主要手段的热超声键合工艺中, 微细键合区域内金属变形/变性/互连所需的能量, 来自于超声波功率源通过换能系统所施加的微幅压剪动载. 对热超声倒装键合过程的研究说明, PZT 换能系统在热超声倒装键合工艺过程中的非线性动力学行为, 如换能系统启动后的初值敏感性和不确定性, 键合工具与换能杆之间的不稳定动力耦合, 倒装芯片运动的奇异相轨线等, 是深入研究键合机理以及提高工艺可靠性的重要关键.

**关键词:** 热超声键合; PZT 换能系统; 非线性动力学; 倒装芯片; 封装互连

EEACC: 2860; 7310; 7810C

中图分类号: TN205

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)11-2056-08

## 1 前言

要实现我国本世纪成为世界微电子制造强国的目标, 必须能自主地提供微电子产业的先进制造工艺、技术和装备. 热超声键合(thermosonic bonding)用于倒装(flip-chip)芯片互连, 所需封装高度显著降低, 封装空间减少为原有的 10%, 相应倒装芯片的重量可减少到传统封装形式(如引线键合、载带自动键合)芯片的 10%. 其工艺适应不同设计芯片、连接可靠、不损伤芯片以及无铅, 是具有极大潜力的新一代高密度、高效率、高可靠性的绿色封装互连工艺.

长期以来, 工业界认为微细键合区域接受的是时间上平稳、区域内均匀的动载. 在微电子制造业中, 采用平均超声功率、键合压力等表征工艺参数组, 并寻求获得最佳质量的工艺参数匹配. 在封装互连工艺实践中, 当速度、节距、可靠性要求越来越高时, 上述做法遇到了明显困难, 缩短键合时间至 10~20ms 以内, 将导致键合工艺可靠性急剧下降.

简化的工艺模型已不能满足需要, 超声键合的可靠应用, 是对其互连机理的深刻认识. 但所有的数值仿真, 均难以证实或证伪. 任何为屏蔽次要干扰、突出主要因素进行的研究实验, 都会得到一些似乎矛盾的结论. 对这一微电子制造业熟悉的物理/力学过程进行整体甚至局部的定量描述, 就会面临困难.

静载下金属键合需要的时间极长, 微细键合区域内金属变形/变性/互连所需的能量, 来自于超声波功率源通过换能系统所施加的微幅压剪动载, 该

过程本质上是率相关的, 不可能用静态单元实验模拟, 了解该过程的动力学细节十分必要. 然而, 有助于裸露的金属之间形成键合的表层氧化膜去除阶段, 需要能量和时间, 没有确定说法; 环境温度与键合效果有关, 但在液氮中仍可实现键合, 也无法定量解释; 剪切流动和“过键合”以何种模式进行, 亦无明确结论. 关于促使金属间形成键合的相互作用及其定量, 均停留在猜测阶段.

近来, 已有美国、德国、瑞士、日本、新加坡的学者, 开始实验研究键合过程<sup>[1~6]</sup>. 由于实际支承/实际加载工况下换能系统工作相当复杂, 使用的换能系统特性各异, 投入量有限的实验很难获得全貌. 实验研究显得零散, 甚至难以比较. 只是探讨了换能杆共振模态畸变、界面平行度、键合界面纵向刚度对键合质量的影响等局部效应, 以及处理机理不清楚“灰箱”过程的模糊控制模型, 没有从根本上找到这一困惑工业界的解决途径. 提出的纵向超声波加载和横向多维超声波加载的设想, 也因实用效果不明显, 未被微电子工业界所接受.

键合区域远小于超声波换能系统体积, 非定常加载过程中大部分能量, 实际上分布在拟共振态的换能系统中, 而且键合工具做功, 会反过来影响系统拟共振态及加载过程本身. 我们在研究温度对金丝引线键合强度影响<sup>[7]</sup>时发现, 即使键合负载不变, 在超声波功率源输出确定电压时, 输出电流呈现相当的波动; 超声波功率源向换能系统提供的空载功率, 反而高于换能系统劈刀在键合界面做功状态的负载功率. 这说明, 功率源向换能系统提供的功率, 以何种形式施加于键合区域, 是了解键合界面强度生成

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号:50575230, 50429501, 50390064)和国家重点基础研究发展规划(批准号:2003CB716202)资助项目

<sup>†</sup> 通信作者. Email: leihanxyz@yahoo.com.cn

2006-03-22 收到, 2006-05-31 定稿

的关键.已有的工艺设计,都是基于稳态线性过程的.非线性工艺的效果,强烈地依赖于时变非线性动力学过程,工艺窗口狭窄,单凭工艺试凑,很难解释许多现象.

为此,我们进行了超声换能系统非线性工作机理的系统实验研究,即将功率源-PZT-换能杆-键合工具-键合点组成的系统,作为一个复杂动力学系统,考虑其处于拟共振工作态的非平稳性和非线性.发现了 PZT 换能系统在热超声键合过程中丰富的非线性动力学行为及其对键合质量的影响.

## 2 锁相非线性

用于热超声键合的振动系统设计为,当 PZT 加载端和键合工具(劈刀)负载端间距为半波长的整数倍时,负载端位于稳定共振态对应的质点位移/速度腹点;系统的质点位移/速度节点,对应于安装肋环位置,如图 1 所示.劈刀的弯曲振动,提供了键合区域所需的剪切动载.安装肋环的抗弯特性使键合工具作用时产生所需的键合力.

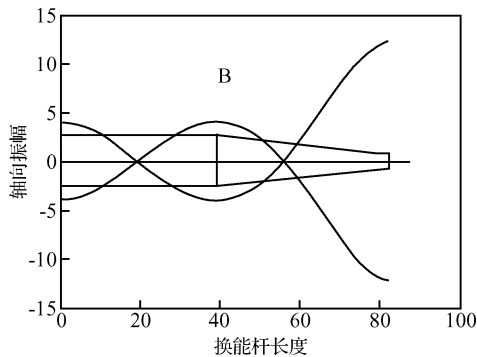


图 1 换能杆的设计轴向共振模式  
Fig.1 Axial mode of vibration

换能器驱动电压和环境温度的变化,会引起谐振点的漂移.实测金丝键合机换能杆在 63kHz 工作频率附近空载下电学导纳(图 2,3)可知,其特性曲线幅值形状类似,但换能杆固有频率随电压或温度的上升而降低<sup>[8]</sup>.

为保证换能器始终有稳定的振幅输出,功率源使用锁相环进行频率自动调谐,经相位比较后,获得相位误差,控制压控振荡器输出,使超声功率源保持与振动系统谐振频率一致.加载初始捕捉状态(acquisition mode)段,铝丝键合机换能系统负载端速度相当小(<5mm/s),但易受干扰.图 4 是对该换能系统 0~1.3ms 初始振荡段加载电压(有效值)和负载端速度(有效值)实测.其中速度曲线包络 3~5kHz 的波动,来自于两个不同频率(施加于 PZT 的

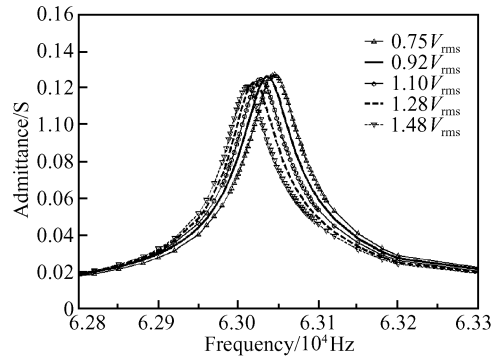


图 2 不同电压下金丝键合机换能系统幅-频曲线

Fig.2 Bode plot of the frequency response of the Au wire bonder transducer under different loading voltages

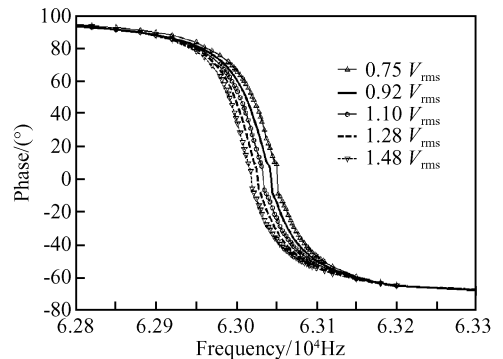


图 3 不同电压下金丝键合机换能系统相-频曲线

Fig.3 Phase-frequency characteristics of the Au wire bonder transducer under different loading voltages

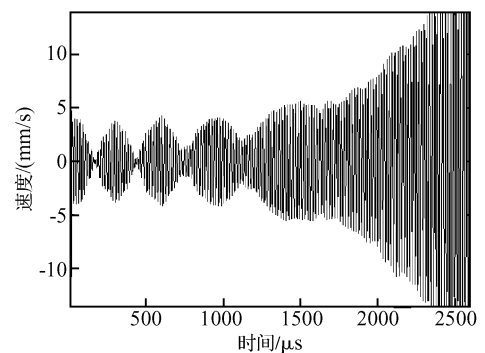


图 4 铝线键合机换能系统初始段速度曲线

Fig.4 Initial velocity “beat” of the Al wire bonder transducer due to a natural frequency difference of VCO and transducer

初始驱动频率和换能系统初始固有频率)的差拍.在 0~1.3ms 初始段,换能系统的加载电压实际上在抖动下降,再考虑 0.2~0.4ms 差拍摆动周期,捕捉时间不能过短;但固定的捕捉时间,使得相位锁定后,被驱动的系统所处状态并不完全相同,如图 5 所示.

显然,锁相混沌影响其动力学演化,导致了换能系统状态的初值敏感性和捕捉态结束时的不确定性。

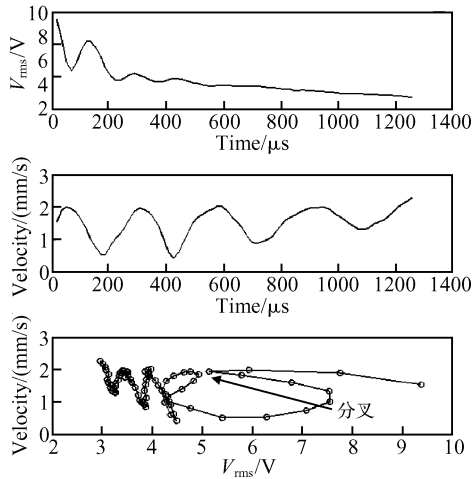


图 5 铝线键合机换能系统初始段动力学演化

Fig.5 Initial dynamics evolution of the Al wire bonder transducer

### 3 换能系统非平稳加载过程

换能动力系统主加载段的非平稳性,由锁相捕捉态结束后系统的振速变化体现,见图 6. 系统拟稳态振动时,其平均动能与平均势能相等. 当系统机械能量相对缓变,任一质点速度平方的时间平均,将正比于系统机械能量的时间平均. 这样,系统具有的机械能量  $E_{\text{sys}}(t)$  与特定测点(如振动系统负载端)速度的时间均方值  $\langle v^2 \rangle$  近似成正比. 由能量的累积/饱和效应,可设  $E_{\text{in}}$  为输入能量(由驱动电压电流测得),系统能量  $E_{\text{sys}}(t)$  为

$$E_{\text{sys}} = a[1 - \exp(-bE_{\text{in}})]$$

与实测换能系统的能量变化趋势十分吻合(见图 6, 7). 式中  $a$  与系统机械能最大容量有关,但因系统的能量耗散率,较大输入功率设置对应  $a$  值较高.  $b$  量纲为能量的倒数,其值与功率源/系统间的能量转换率有关.  $b$  越小,达到特定的系统能量状态所需输入能量越大. 在较大输入功率下对应的  $b$  较小<sup>[9]</sup>.

显然,功率源启/停并不等价于换能系统启/停. 锁相/系统惯性/系统稳定性要求冲突,使加载时间缩短存在下限:非稳态上升段后,才利于锁相稳定;过短加载时间,将使加载以非稳态上升段为主,造成加载时振幅不可控,且残余振动不能忽略. 减小系统等效质量,虽可缩短非稳态上升段,但同时降低了在键合界面做功的系统的稳定性. 综上所述,这就是可靠性要求较高的工艺中,总键合时间无法任意缩短的原因.

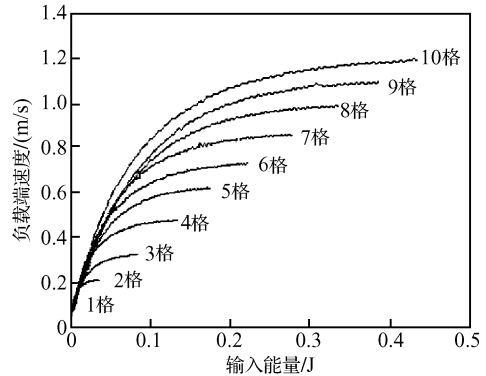


图 6 铝线键合机换能系统主工作段输入能量-速度曲线

Fig.6 Velocity responses versus input energy of a wire bonder at main loading segment

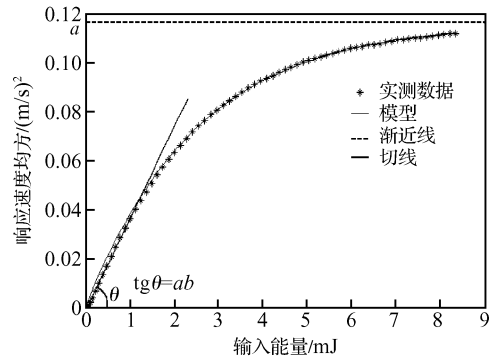


图 7 铝线键合机换能系统主工作段输入-响应实验建模

Fig.7 Experimental data modeling for transducer energy status during main loading segment

### 4 动力学系统的实验建模与键合工具对换能系统的非线性作用

研究换能动力系统平稳工作段的非线性,是通过分离后各子系统动力学行为的实验观察入手. 实测表明,有阻尼 Duffing 振子(oscillator)可较好描述各共振峰附近的实验现象<sup>[8,9]</sup>. 换能系统阻尼主要来自结构内部,介质阻尼是次要的,滞后阻尼假设比粘性阻尼假设合理. 模型中描述位移立方非线性项系数为负,可实测振子明显的“软化”特性. 同样,键合界面的实际非线性恢复力,也表现了类似效应.

由于陶瓷或硬质合金键合工具(劈刀)相对质量较小且刚度较大,易低估其在换能系统整体结构动力学中的地位. 对于实际工作频段的金丝键合机换能系统,劈刀有无情况下系统电学导纳的实测说明:劈刀引起:(1)系统电学导纳降为原来的 1/2 左右;(2)原单峰分裂为代表换能杆/劈刀同向(in-phase oscillations)或反向(out-of-phase oscillations)振动

模式的双峰,并分布于原共振频率两侧;(3)双峰表现出明显“软”特性.劈刀实际上改变了系统的设计模态和输入能量在换能系统中的分布.仅在劈刀对称安装下,静态电容、电阻,动态电感、电容、电阻,机械品质因数、机电耦合系数等参数与未安装劈刀时的值比较接近.可见,劈刀非对称安装导致的换能系统俯仰方向动力不平衡,是造成系统特性改变的主要原因.

由图 8,9 中频谱形状可知,在较低频率处的峰,与换能杆主振动的频谱模式类似.从劈刀的附加质量效应考虑频率略低这一事实,图 8,9 中较低频率处的峰,应该代表的是换能杆/劈刀的同向振动(IPO)模式.

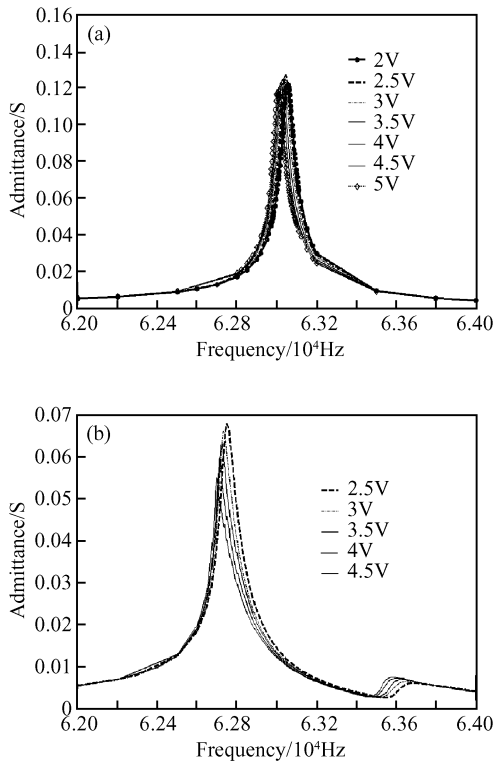


图 8 金丝键合机换能系统幅-频曲线 (a)无劈刀;(b)有劈刀  
Fig.8 Amplitude-frequency characteristics (a) No tool;(b) With tool

换能杆/劈刀同向和反向振动模式 IPO 和 OPO 对应频率间距过大,会导致换能杆与劈刀两振子间能量传递效率下降.原设计从能量传递的动力学稳定的思路考虑,必然希望换能杆/劈刀的反向振动模式 OPO,作为理想的工作模式.键合机的工作稳定性,在 OPO 模式假设下,将体现于实际换能系统的反向导纳环特性.

但是,双峰 IPO 和 OPO 对应的频率处,系统电

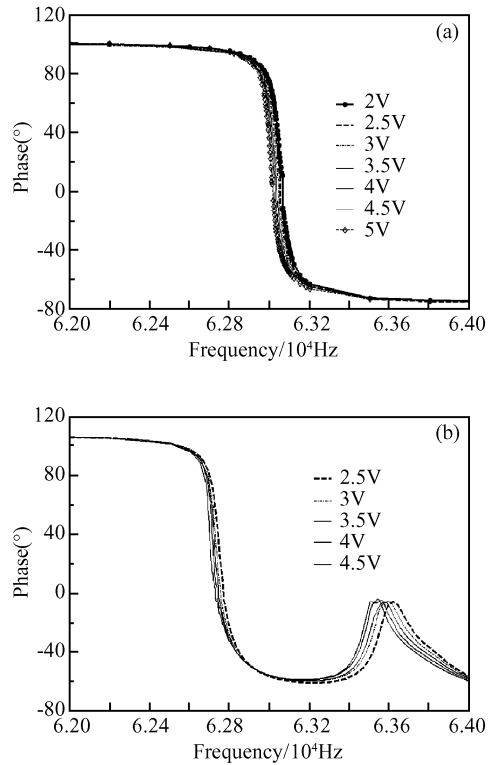


图 9 金丝键合机换能系统相-频曲线 (a)无劈刀;(b)有劈刀  
Fig.9 Phase-frequency characteristics (a) No tool;(b) With tool

学导纳位相均为 0,如图 9 所示.这样,事实上锁相环无法分辨系统相距只有数百 Hz(或更小)频差的两种振动模式.还有,如图 8 所示,换能杆/劈刀同向模式 IPO 对应的阻抗值,只有反向模式 OPO 对应阻抗值的 20%,金丝键合机功率源产生的实际加载电压,在换能系统工作频率附近,因负载阻抗突降产生的波动如图 10 所示.

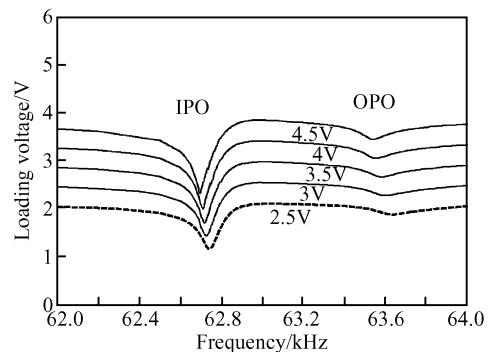


图 10 实际加载电压在金丝键合机换能系统主导共振频段的波动  
Fig.10 Loading voltages for the transducer/tool system of Au wire bonder

换能系统的同向振动模式(IPO)比反向模式(OPO)易于吸收外加能量,对应的振幅也更大.诚然,可通过调整劈刀参数,使得代表换能杆/劈刀同向和反向振动模式 IPO 和 OPO 对应的双峰频率尽可能接近.当反向导纳环远离原点, IPO 和 OPO 的模态重合,其切换的影响可以忽略,键合过程失稳也可以避免.

通过对于超声键合换能系统的实测,反向导纳环一般在接近原点处出现. TS2100 金丝键合机劈刀经反复调整后,曾使反向导纳环不在接近原点处出现,但调整后,不仅反向导纳环直径变大,最大导纳和最小导纳值相差一倍有余,而且其轨迹中,不仅存在与非主导频率共振的导纳轨迹的重合点,而且出现了动力学分叉点,两个非常接近的频率对应于负载特性的同一点,如图 11 所示.换言之,当负载处于该点,对任何微小扰动,将会产生多种动力学演化可能.这说明,原设计所期望建立的换能杆/劈刀反向振动模式 OPO,是可行但不稳定的动力学设计.加载后一旦受到微小干扰,易于跳变为代表换能杆/劈刀同向振动模式 IPO. 类似于耦合摆行为,实际机械能可能以拍频形式从一个模态到另一个模态之间来回“流动”,相邻 IPO 和 OPO 模态受扰形成的随机切换,将导致键合过程失稳.

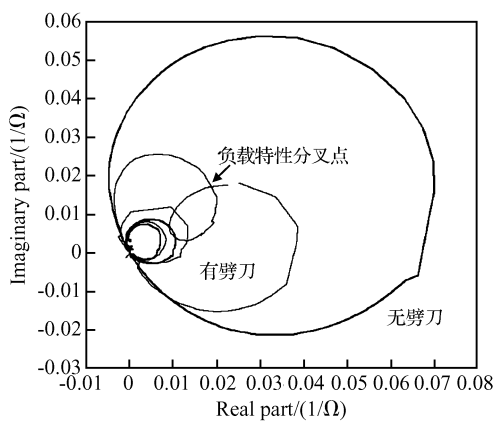


图 11 金丝键合机劈刀对换能系统电学导纳的效应

Fig. 11 Admittance circle of the Au wire bonder transducer with and without the tool

工业封装实践中发现,实际换能系统在谐激励下,确实产生主共振以外的非轴向寄生振动.寄生振动使键合点扩大,自然不利于细节距键合.我们使用 PSV-400-M2 多普勒测速仪,研究了铝线键合机换能系统在不同加载电压下负载端的稳态响应(图 12).实验表明,无论空载和实际加载条件下,系统负载端俯仰振动相当可观.加上键合工具后,俯仰振动增加数倍,上升至轴向振动振速的同量级,远大于侧

向振动的幅值.上节所讨论同向振动模式,实际上是与轴向振动强耦合的换能杆弯曲振动所致.

由结构耦合动力学按存储能量划分子系统的原则可知,换能杆的轴向振动和弯曲振动可视为两个子系统.其间的强耦合,将造成激励其中之一,另一子系统也产生振动.稳定状态以后,其间的功率流为零,两子系统能量近似相等.劈刀引起系统电学阻抗加倍,正说明了这点.

键合工具紧固螺栓的松紧程度,亦改变换能系统工作可靠性.起初认为与等效连接刚度的改变有关.力学上一维平动质量或转动惯量的等效实体,实际上对应的是键合工具.为此,卸去键合工具,仅在工具安装孔内保留一金属柱体,调整螺栓松紧程度,分离后研究其对系统特性的影响.实验<sup>[10]</sup>表明,紧固螺栓过松,将导致电学加载不稳定;加紧后谐振频率略增高,电学导纳上升(见图 13).结论是,由于原设计要求负载端位于零应力点,紧固应力引起的应力波速变化虽有限,但足以引起原线性设计模态相当大的畸变.即使将紧固方式由侧向改为轴向,当安装键合工具后投入工作时,换能系统负载端仍将出现严重的上下应力振荡,并导致动力加载不稳.

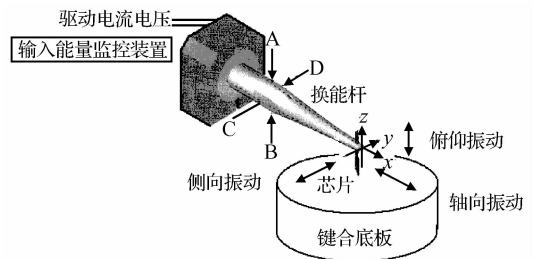


图 12 换能系统负载端的实际振动

Fig. 12 Actual vibration modes at the loading end of the transducer

换能系统动力学非线性来源为:(1)加载电压、环境温度、材料阻尼对系统的影响;(2)超谐与亚谐激励;(3)PZT 器件非线性及使用中的横向振动;(4)键合工具及其紧固应力.注意,除了来源(1)外,均无法用仅考虑换能杆的轴向振动和仅考虑换能杆轴向谐振频率漂移的锁相环加以补偿.局限在线性范围内考虑,才无法解释用于细节距键合时的工艺不稳定性.我们系统实验研究的数据说明,键合工具是直接作用于键合界面的子系统,是理解换能系统动力学特性的关键.键合工具与本体的动力耦合,导致了拟共振区域的细微结构和多模态;空载功率高于负载功率现象,反映的是键合工具运动的受阻;键合工具的安装和紧固方式,是换能系统最主要的动力学非线性的来源.

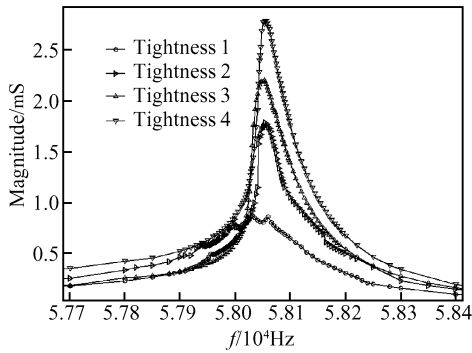


图 13 铝线键合机换能系统紧固螺栓松紧程度不同对应的幅-频曲线  
Fig. 13 Amplitude-frequency characteristics of Al bonder transducer

显然,在此基础上,对键合工具动力学非线性开展深入研究,是探索键合机理与可靠性的重要环节.

### 5 加载边界条件以及滑移/粘滞现象

对于热超声倒装键合,存在键合工具底端/芯片与金凸点(bump)/镀银焊盘(pad)两个界面.高精度测试其相对运动的困难,是倒装键合机理实验研究的最重要障碍.

将多普勒测速仪的探测激光束聚焦至键合工具底端侧面和倒装键合芯片 0.25mm × 1mm 尺寸倒装键合芯片的侧面,观察到如图 14 所示的超声启动数 ms 即发生的“失速”现象,证实 25μm 金凸点与镀银焊盘之间已开始产生键合强度<sup>[11]</sup>.进一步分析得知,芯片速度 3 倍频分量的出现,是“速度分离”即凸点/焊盘界面由滑动转为粘着状态,这可以作为键合过程表层去除和键合强度生成的重要实验判据.

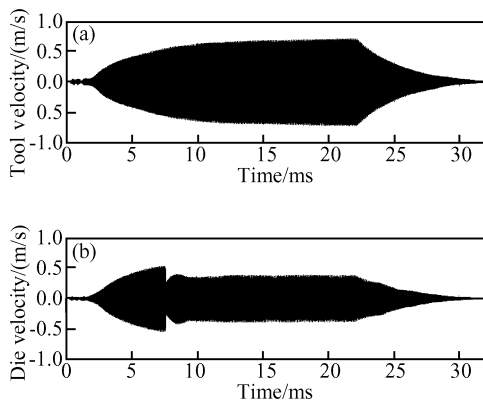


图 14 倒装键合过程键合工具(a)和芯片(b)的失速现象  
Fig. 14 Abrupt velocity change of die movement in flip-chip bonding Velocities of bonding tool (a) and die (b)

而且,滑移/粘滞现象也主导着其后的键合形成过程.非线性方程难以解析求解时,常用数值方法定性描绘其系统行为的相轨道(phase portrait),实测速度经积分后获得位移,亦可获得一段时间内的相轨线图.较高键合强度对应的倒装键合芯片相轨线图比较规则,芯片在过中点后接近两端时运动受阻而减速,如图 15 所示.大量实验证实,这一动态行为,是热超声倒装键合工艺过程中的特征现象.

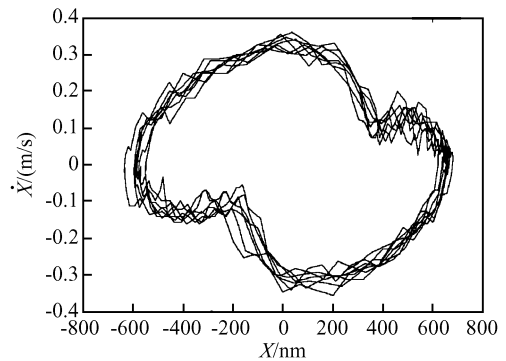


图 15 较佳倒装键合过程中芯片的早期(9ms)相轨线图  
Fig. 15 Regular “stick-choke” movement of die at 9ms(good bonding quality)

由于换能系统在轴向/俯仰组合模态下工作,实际键合界面高频压剪超声载荷呈“交替挤压”模式,见图 16 所示的数值仿真.实验观察到存在使金属表层氧化膜破裂的应力极小值,低于此值则无位错运动和键合强度生成,表现为低功率输入时的欠键合;压剪应力足够但该模式遭到扰动从而破坏键合点的逐层传播,就会表现为过键合(over bonding)等键合质量下降现象.

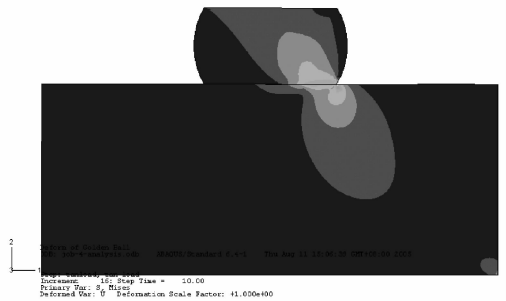


图 16 倒装键合过程中凸点与焊盘动态应力分布的数值模拟  
Fig. 16 FE simulation under a dynamical loading during flip-chip thermosonic bonding

已有学者注意到键合工具缓冲垫可使键合质量提高.确实,在倒装键合实验中发现,较低键合质量对应的倒装键合芯片相轨线图多不规则,如出现早期滑滞或滑逆,如图 17 所示.

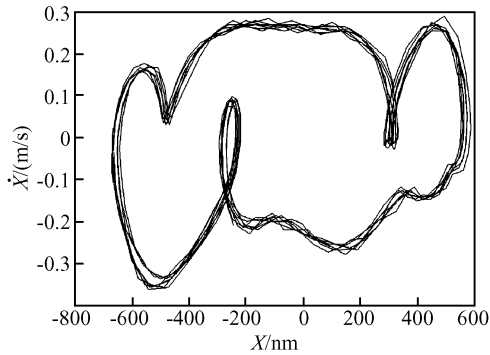


图 17 较差倒装键合过程中芯片的早期(9ms)相轨线图  
Fig.17 Retro-slip of the die movement at 9ms (poor bonding quality)

这用简单纯剪模式不能解释,只有考虑实际换能系统对键合点形成的多频复合压剪模式才能进一步分析.系统的模态具有适当的耦合关系会产生多重共振,将使模态之间发生能量交换,出现代表调幅与调相运动的“拍”现象.

若从金属变形的微观理论来理解键合金属的塑性变形,塑性变形总会伴随有滑移带的出现.压剪模式超声加载下,剪切使得滑移发生,从而裸露新鲜原子;微秒级瞬态过程中,随之施加的压力使得裸露原子间距离接近,形成键合.键合区域边界处剪切应力最大,因此键合从边界处开始,形成环状结构;压剪应力的递减,使得键合逐层形成.匹配不佳的动态压剪应力,会造成键合质量的下降.

以上认识,不仅可以解释已有的实验现象,还为热超声倒装键合工艺的优化和倒装键合过程能量传递/耦合链(见图 18)的监控提供了新的思路.

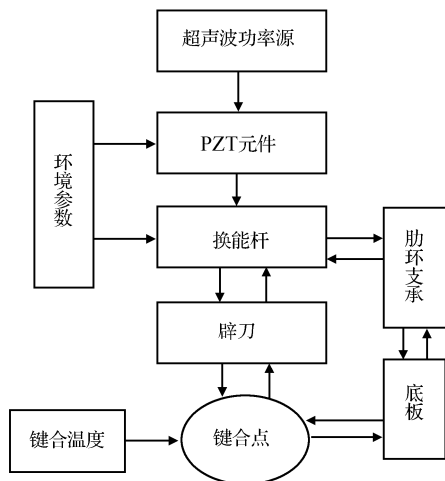


图 18 热超声键合过程中的能量传递与耦合  
Fig.18 Transmission and coupling of energy during thermosonic bonding

## 6 结语

研究说明,PZT 换能系统在热超声倒装键合工艺过程中的非线性动力学行为,是深入研究键合机理,突破现有封装设备工艺水平的重要关键之一.由键合工具对界面“交替挤压”使键合金属逐层互相扩散,是热超声键合加载的主要动力学模式.由此,键合必然从边界处开始生成,且最后生成具有一定厚度的互相扩散区.

换能系统非线性动力学行为的产生,主要通过其键合界面动力学作用、子系统内部阻尼、应力状态和子系统结构之间的动态耦合产生.作为复杂系统的热超声系统,生成了金属间的键合强度;但作为非线性系统,又表现出较强的初值敏感性和不确定性.动力学演化的控制,宏微相互作用的量级和出现时刻,可望由系统非线性动力学现象的时-频监测得到.

微电子制造业关注的互连工艺问题,实际与换能系统非线性工作机理有关.这一研究,还将同时为复杂系统动力学、非线性系统分岔与混沌动力学、时滞非线性系统/变结构系统动力学以及微机电系统动力学的探索和完善各种先进实验手段,促进近代科学在高科技领域和工程实际中的进一步应用打下基础.

**致谢** 王福亮、周宏权、许文虎、隆志力和李军辉等同志进行的大量实验研究和数值仿真,是建立本文认识的基础.与国际微电子设备制造商 ASM 公司首席技术官 Peter Liu 博士等 ASM 公司研发部专家就热超声倒装键合工艺进行了多次深入研讨,在此一并致谢.

## 参考文献

- [1] Kang S Y, Williams P M, Lee Y C. Modeling and experimental studies on thermosonic flip-chip bonding. IEEE Trans Compon, Packag, Manuf Technol B, 1995, 18(4): 728
- [2] Or S W, Chan H L W, Yuen C W. Dynamics of an ultrasonic transducer used for wire bonding. IEEE Trans Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1998, 45(6): 1453
- [3] Tan Q, Schaible B, Bond L J. Thermosonic flip-chip bonding using longitudinal ultrasonic vibration. IEEE Trans Compon, Packag, Manuf Technol B, 1998, 21(1): 53
- [4] Sattel T, Brokelmann M. A simple transducer model for longitudinal flip-chip bonding. IEEE Ultrasonics Symposium, 2002: 695
- [5] Tsujino J, Sano T, Ogata H, et al. Complex vibration ultrasonic welding system with large area welding tops. Ultrasonics, 2002, 40(2): 362
- [6] Zhong Z W, Goh K S. Investigation of ultrasonic vibrations

- of wire-bonding capillaries. *Microelectron J.* 2006, 37:107
- [7] Long Zhili, Han Lei, Wu Yunxin, et al. Effect of different temperature on strength of thermosonic bonding. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, 26(8):23 (in Chinese)[隆志力, 韩雷, 吴运新, 等. 热超声键合过程的温度因素影响规律研究. *焊接学报*, 2005, 26(8):23]
- [8] Zhou Hongquan, Han Lei, Zhong Jue. Experimental studies of frequency characteristic on transducer power supply and vibration system in ultrasonic bonding system. 7th IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis. 2005:426
- [9] Xu Wenhui. Dynamical characteristics study of ultrasonic bonding transducer by using laser Doppler vibrometer. Master Thesis, Central South University, 2006 (in Chinese)[许文虎. 基于激光 Doppler 测试超声换能系统动态特性研究. 中南大学硕士学位论文, 2006]
- [10] Zhou Hongquan. Experimental studies of power amplifier and transducer of ultrasonic bonder. Master Thesis, Central South University, 2006 (in Chinese)[周宏权. 热超声键合机功放与换能系统电学特性的实验研究. 中南大学硕士学位论文, 2006]
- [11] Wang Fuliang, Han Lei, Zhong Jue. Experiments on the bonding interface vibration of thermosonic flip-chip. The 7th IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design, Packaging and Failure Analysis. 2005:33
- [12] Wang Fuliang, Han Lei, Zhong Jue. Effect of ultrasonic power on the heavy aluminum wedge bonding strength. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 18(4):515
- [13] Han Lei, Wang Fuliang, Xu Wenhui, et al. Bondability window and power input for wire bonding. *Microelectron Reliab.* 2006, 46:610

## Nonlinear Dynamical Behaviors in Flip-Chip Thermosonic Bonding\*

Han Lei<sup>†</sup> and Zhong Jue

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Dynamical characteristics of transducer systems are the key to the basic understanding of metal interconnection and reliable fine pitch flip-chip bonding. Systematic experimental analysis clearly shows that rich phenomena and effects such as a Duffing resonator, dynamical coupling between the transducer and bonding tool, and strange phase portraits of die movement may be explained by the nonlinear features of a real world transducer system. It is possible to explore their mechanisms and effects on bonding quality by identifying and decoding them from experimental data.

**Key words:** thermosonic bonding; PZT transducer system; nonlinear dynamics, flip-chip die; interconnection packaging

**EEACC:** 2860; 7310; 7810C

**Article ID:** 0253-4177(2006)11-2056-08

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 50575230, 50429501, 50390064) and the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2003CB716202)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: leihanxyz@yahoo.com.cn

Received 22 March 2006, revised manuscript received 31 May 2006