

引线键合的动力相图和等效受载模型

韩 雷, 吕 雷

(中南大学机电工程学院, 湖南长沙 410083)

摘 要: 使用常规、微观电镜、动力相图和统计时频分析等方法, 进行了引线键合机理的实验研究. 通过对换能系统和劈刀振速的高频分量、键合压力的测试, 以及键合界面微观结构的观察, 建立了键合区域宏观受载等效模型, 和对键合机理的框架认识. 可作为键合过程优化的指导, 和键合动力学建模的依据.

关键词: 引线键合; 非线性动力学; 多普勒测速; 小波时频分解; 动力相图

中图分类号: TG156 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 11-2697-07

Phase Portraits and Equivalent Model for Wire Bonding Dynamics

HAN Lei, LÜ Lei

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

Abstract: Wire bonding experiments were performed in a lab test-bed. Vibration behavior of bonder transducer and bonding pressure were monitored by Laser Doppler Vibrometer. For assessing wire bond quality, the bond lift-off microstructures were observed by scanning electron microscope as a post-effect evaluating for bonding process. Wavelet decomposing, combined with statistics-based data processing, was utilized to explore the details of bonding process. A macroscopical equivalent model for bonding area is developed based on the velocity vs. pressure phase portraits. The basic understanding on wire bonding can be used for identifying wire bonding dynamics and optimizing the machine set-ups.

Key words: wire bonding; nonlinear dynamics; LDV sensing; wavelet time-frequency decomposing; dynamical phase portrait

1 引言

微电子制造后道工序中, 引线键合是应用最广泛的封装互连方式^[1,2], 影响着集成电路 (IC) 器件的使用可靠性^[3]. 使金属丝与金属焊盘直接键合的原理是: 超声波发生器产生能量驱动换能器使工具 (劈刀) 振动, 同时在劈刀上施加适当压力. 在这两种力的共同作用下, 劈刀带动金属丝在焊区金属表面摩擦, 使金属丝和金属表层产生塑性变形, 使两个纯净金属表面紧密接触达到原子间的结合. 引线键合工艺简单、成本低、适用多种封装形式, 目前 90% 以上 IC 器件采用引线键合封装, 微电子制造业每年要键合超过数万亿的引线. 事实表明, 引线键合从上世纪 60 年代^[4]到可预见未来仍将是半导体封装的主流方式.

对于引线键合过程, 把参数和动作设置协调到最佳, 需经大量工艺探索和长期经验积累. 许多国际著名微电子制造公司一直在研究引线键合技术, 包括换能系统设计^[4,5]、高频换能系统^[6,7]、纵向换能系统^[8,9]、变幅杆与劈刀的超声振动^[10~13]、引线材料、劈刀及夹持机

构、键合参数组优化^[14~17]等方面. 微电子制造业的困惑和努力方向为: (1) 建立科学准则找到最佳设置, 避免盲目摸索或陷入“局部最优”; (2) 如何改进换能系统; (3) 键合质量实时监控系统的的设计构建. 这些, 只有键合机理的深入研究才能解决.

对这一极其重要的制造过程, 进行整体定量描述和建模十分困难. 1970 年代的研究者认为, 键合与金属软化、原子扩散、固溶粒子形成互锁织构等机制有关^[18~20]. 文献^[20]认为, 预变形之后, 超声加载作用于键合区域分为三个阶段, 即表面层去除 (Cleaning)、混合 (Mixing)、扩散 (Diffusion). 然而, 这类表述至今没有详尽实验数据支持和定量理论依据.

提取键合动力学信息的难度, 首先是由于过程、对象的时空尺度特性. 高度局部化区域内的实时测试困难. 微小键合区域在数十毫秒瞬间形成, 难以了解此区域内动态应力、应变、温升, 以及金属界面微观结构等细节. 其次, 键合区域远小于超声波换能系统体积, 非正常加载施加的能量, 大部分分布在拟共振态的换能系统中, 而且键合工具做功会影响系统拟共振态及加载过程

本身. 键合点接受能量并生成键合强度, 实际上是一个非线性动力学过程的结果, 有相当的非确定性. 单元细节研究对过程的总体了解, 帮助相当有限.

封装实践说明, 简单改动工艺参数组难以优化装备性能, 是由于统计相关并不等价于动力学因果关系. 键合强度除了与金属材料性质、超声输入功率、键合温度、键合时间等有关, 还取决于复杂振动状态下的换能系统和键合点变形模式. 分析键合动力学细节, 要求正确理解每次实验产生的结果, 并揭示无法直接测得的键合动力学信息.

2 常规分析

实验平台构成见图 1. 空间直角坐标系原点位于换能系统输出端, x 、 z 方向与换能杆、劈刀主轴重合.

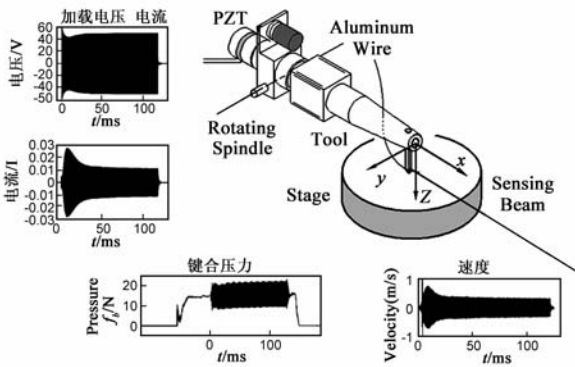


图1 引线键合实验

微讯公司的 U3000 型粗铝丝键合机, 换能系统在 x 方向振动, 工作频率约 60kHz, 超声功率、键合时间、压力等均可预置. 使用楔形劈刀, 进行 300 μ m 铝丝在基板上的键合实验. 存储示波器记录驱动电压和电流信号, 处理后可获得输入功率. PCB 公司 200B01 压力传感器作为键合力监测元件. 键合过程中换能系统和劈刀振动的非接触检测, 选用德国 Polytec 公司多普勒测速仪, 其速度测试范围、灵敏度以及带宽能很好地满足实验要求(图 1).

在最佳工况附近, 调整输入功率、键合时间、键合温度、键合压力、键合劈刀安装长度、劈刀安装松紧度等, 完成第一焊点键合, 然后对键合强度进行检测, 是掌握工艺规律、探索键合强度与各键合参数间关系的直接方法. 实验^[21~25]证实: 可以在一定范围内发现单峰状“工艺窗口”, 即最大键合强度对应的工况设置; 其次, 输入功率过低、键合时间过短, 产生“欠键合”甚至无法键合, 反之产生“过键合”, 说明输入能量有两种作用(启动键合过程和造成已键合区域强度下降); 还有, 所有的工艺“窗口”均随换能系统和劈刀的材料性质、几何尺寸、安装长度、安装松紧度的改变而变.

理解能量传递链中“输入”和“键合强度”间的“键

合动力学”环节, 前提是正确模型化换能系统. 我们工作证实, 换能系统稳态电学和力学共振峰基本重合, 系统电学和力学特性之间有极强相关性^[26]. 但是, 换能系统呈 Γ 型“蟹脚”结构是三维振动体; 阻抗分析仪采取小幅扫频激励, 不能完整反映(具有电压非线性和滞后性的)换能系统特性; 实际作用于键合点的换能系统处于非稳态.

对空载下换能系统超声启动过程的系统负载端 x 方向速度实测表明, 系统机械能饱和值、衰减速率均与功率源的输出设置有关^[27,28]. 空载下测试还表明, 劈刀安装引起了换能系统俯仰不平衡, 造成空载下系统速度导纳的剧变(图 2), 有理由推断在加载条件下, 负载端也有可观的 z 方向俯仰振动. 劈刀造成系统工作频率附近实际是双峰结构, 其切换, 可能造成键合过程的失稳^[26,27]. 这样一个换能系统作用于键合区域, 不仅功率源启/停不等同于换能系统启/停, 而且存在多种动力学演化可能.

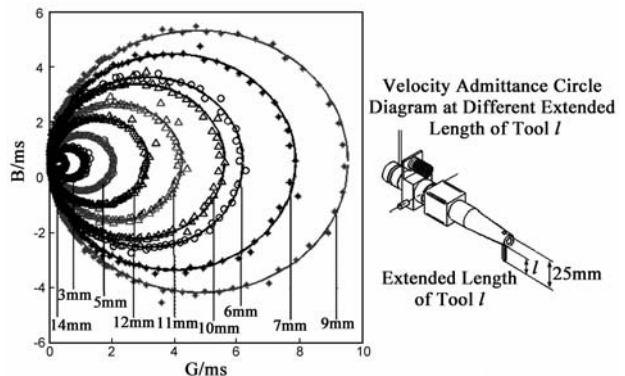


图2 不同安装长度下铝线键合换能系统的速度导纳圆

键合过程实验表明: 即使设置与键合负载不变, 每次测得的输入功率(有效值)、键合强度均呈现相当波动^[23](图 3); 换能系统和劈刀速度也呈现相当波动^[29,30]. 另外, 很难实现“单因素”实验, 各因子间交互效应显著. 如果对这些高度相关的变量或和无关的变量直接处理, 会造成过拟合, 分类或预测的准确性和可靠性无法保证. 比如, 文献^[28]通过数百次实验, 得到键合压力 16.1N 时, 平均键合强度 625g; 而文献^[31]也通

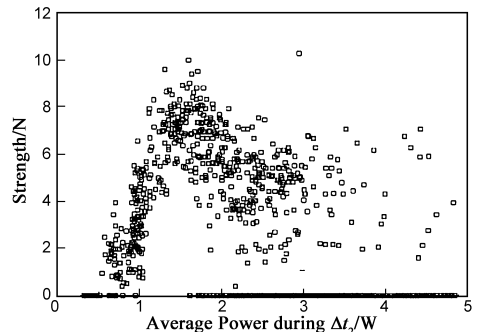


图3 引线键合强度与主加载段的超声输入功率

过数百次实验,得到键合压力 17.0N 时,平均键合强度 636g. 两组同种铝线的大批量实验^[28,31],因换能系统和劈刀安装松紧度有差异,长度不同,实验者不同,很难判定所测平均键合强度差别是由于键合压力改变所致,无法就此现象讨论其物理意义并指导工艺优化.

同一换能系统在不同键合压力下,既然输入功率曲线不同(图 4),键合压力的增大,可理解为使得劈刀振动受限,引起劈刀速度和输入功率下降. 但从图 4,最佳键合(压力 13.8N)过程 50ms 后的瞬时功率,比过键合(压力 17N)过程 50ms 后的功率还要低,可见过键合引起的输入功率上升,已抵消原来(因压力增大导致的)输入功率下降趋势.

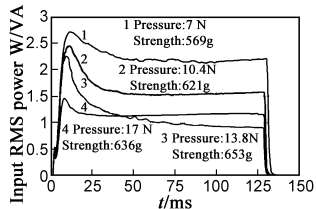


图4 不同键合压力下的全程超声输入功率比较

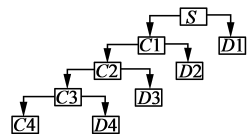


图5 小波多分辨率分解树

3 时频分析和小波分解

键合实验研究中,仅在频域^[27,31]或时域里讨论难以奏效,需同时兼顾信号的时频域进行分析. 小波变换是一种理想的非平稳多频信号处理方法. 处理时,为将约 60kHz 主频分解到一个频段内,使用了 4 层 db30 小波分解. 小波分解树如图 5,其中 S 为原始信号, C_j 为低频信号, D_j 为高频信号,分解关系 $S = C4 + D4 + D3 + D2 + D1$. 对应频段范围分别为: $D1: 256 - 512\text{kHz}$; $D2: 128 - 256\text{kHz}$; $D3: 64 - 128\text{kHz}$; $D4: 32 - 64\text{kHz}$; $C4: 0 - 32\text{kHz}$.

在同样工况下 100 ~ 200 次重复,对每次实验信号经分解重构后得到分量,然后取局部有效值,再对 100 ~ 200 次实验的有效值进行平均,以消除统计误差/单次测试不确定性的影响.

在铝线键合实验中,压力设置为 12.2N、16.1N、18.8N 时,实测劈刀末端速度有效均值为 0.15、0.095、0.010m/s,键合强度均值为 517g、625g、545g,对应于欠键合、最佳键合和过键合状况^[26,28,29,32]. 得到劈刀沿基板 x 方向振动速度的统计时频图(图 6).

如图 6,劈刀振动能量主要分布在换能系统约 60Hz 主频范围,幅值上升至 10 ~ 20ms 后趋于饱和. 在键合压力为 12.2N 时,5 ~ 10ms 时段内,各频段出现尖峰,高频分量跃幅最大. 键合压力增大至 16.1N 和 18.8N,5 ~ 10ms 时段未出现明显信号波动,0 ~ 5ms 的时段内信号小幅振荡,10ms 以后信号变化趋于平缓. 由图 6,在键合压力较低时,劈刀末端不能与基板密切接触,铝丝表面

层强度较高,铝丝尚未软化,加载初期存在较高切向阻力,直至氧化层去除铝丝软化(15ms 以后),纯金属表面间产生塑性滑动. 键合压力加大时,劈刀压力使铝丝与基板有效接触,似乎金属软化及氧化层去除较为“彻底”,劈刀振幅明显变小.

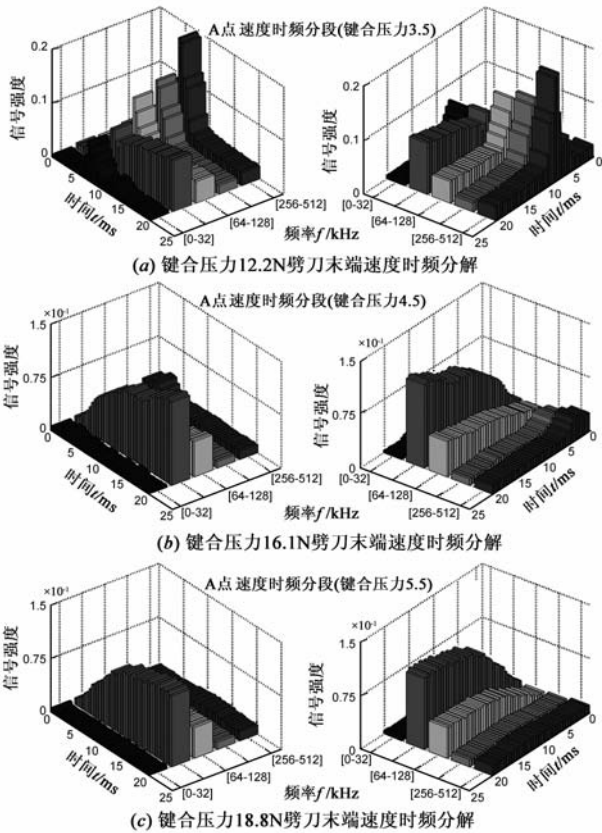


图6 劈刀末端 x 方向速度 V_a 三维时频图

由键合压力设置为 8.5N、12.2N、16.1N、18.8N,劈刀 x 振动的高频分量(128 ~ 256kHz)统计平均的时程图,键合压力设置 16.1N、18.8N 的较佳键合工况(图 7 中曲线 III、IV)初始数 ms 内出现表示高频分量的波动,对应于整个键合过程的开始.

在键合压力较低时,最初 6.3ms 出现切向阻力的跳跃尖峰,而且全程切向阻力也较高(图 7). 也就是说,启动需要“阈值”,顺利启动之后仅需要克服较小切向阻

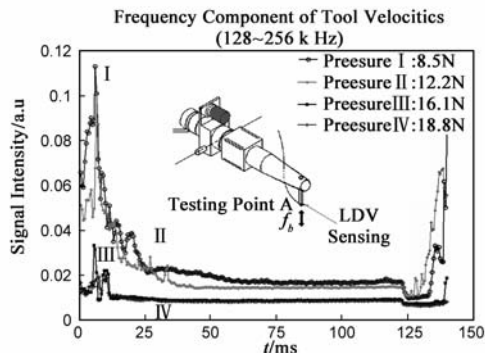


图7 不同键合压力下劈刀末端沿 x 方向振动的高频分量

力.当键合压力不足,使铝线“软化”门槛不够,即初始阶段影响整个键合过程.输入功率超过启动“阈值”,键合点才会“软化”.结合图 4,键合点“软化”需要数十毫秒时间.

对引线键合过程中换能系统输出端 z 方向俯仰振动进行测试(图 8),得到输出端俯仰振动信号的统计时频图(图 9).换能杆劈刀端俯仰振动的变化规律为:最初 2~3ms 内,是结构 0.5~0.7kHz 低频“啮合”过程,其后才是 60kHz 主频纵向振动.“啮合”,是指劈刀与键合点由碰撞到紧密接触.图 6、7 中的切向阻力跳跃尖峰(加载后 6.3ms),表示“啮合”或键合点的预变形已完成.

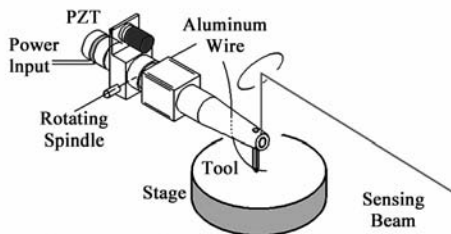


图 8 引线键合过程中换能系统输出端 z 方向俯仰振动测试

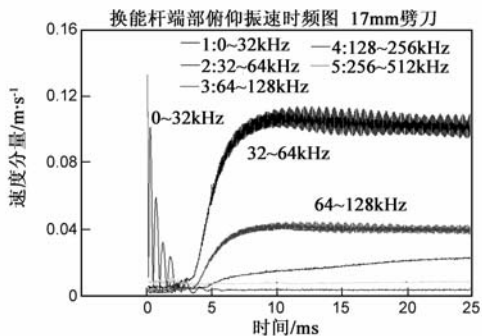


图 9 引线键合换能系统输出端 z 方向俯仰振动的时频分解

与图 6、7 相比,图 9 中没有出现类似的阻力突跃,说明键合区域产生动态变形,是在克服切向“阻力”峰值之后进行.如果认为切向“阻力”来自键合金属表面层,时序上这一“阻力”是在劈刀“啮合”时达到最大值.改变换能系统输出端工具的安装松紧度,也得到同样结果^[33,34].

铝线和基板金属表面在微观上是粗糙的.实验中,当键合压力变化(如图 7 实验中的 12.2N、16.1N),劈刀运动方向和微观接触面积差别不会太大.引起劈刀切向抖动剧增的原因,只能是材料表面层特性对压力的敏感性.

此外,图 6、7、9 还表明,“啮合”后的平缓键合过程中,实际上同时以主频 x 和 z 方向组合振动形式加载.键合区域切向“软化”后形成键合强度,需时数十毫秒以上($10^3 \sim 10^4$ 个载荷循环).图 4 的 50ms 左右,与 300 μ m 铝线可靠键合所需时间有关.

在键合压力设置为 8.5N~18.8N 所有实验中,较高强度(600~900g)的实验 145 次,较低强度(0~300g)的

实验 59 次.按键合强度进分类,作出劈刀横向振动高频分量(128~256kHz)统计平均的时程图(图 10).显然,键合区域“软化”后二十毫秒内,切向“阻力”仍有起伏波动.类似“锯齿形屈服”.

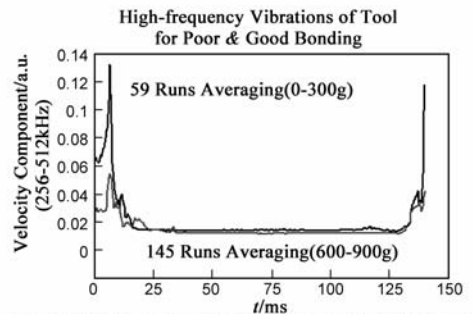


图 10 不同键合过程中劈刀末端 x 方向振动的高频分量对比

4 动力相图与键合区域三维动载模式

键合过程中换能系统输出端 x 和 z 方向振动均存在,可推测劈刀对键合区域,也是三维动力加载.以某个时段 200B01 传感器监测得到的键合压力和劈刀末端 x 方向振速为横纵坐标,合成为键合动力相图.300 μ m 铝线键合实验(实测强度 826g 的较佳键合)相图的典型特征如下:预变形阶段(0~3ms),劈刀切向振速极小,相轨线杂乱;输入功率曲线下降阶段(3~23ms),劈刀切向振速逐渐增大数十倍,至 0.2m/s,相轨线逐渐扩大;切向“软化成熟”阶段(23~43ms),相轨线变得规则,劈刀切向振速保持在 0.2m/s(对应于 0.5 μ m 左右的劈刀切向位移),轨线形成环带状;“成熟”后阶段(43~123ms)环带状相轨线一直保持.见图 11.

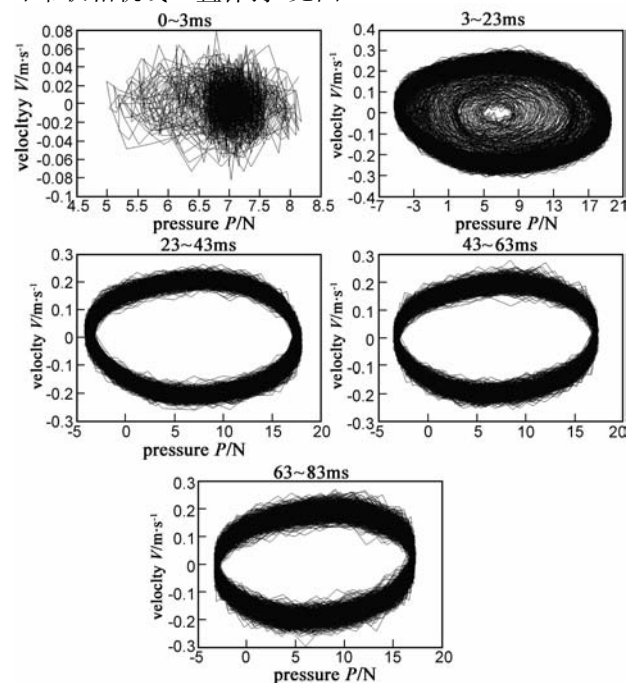


图 11 铝线键合实验的动力相图

受压劈刀切向加载过程“成熟”后阶段的环带状相轨线表示,相邻周期内,键合点微结构的变形抗力几乎重复循环,“成熟”后阶段键合点性质变得稳定.这时压力有效值不变,劈刀运动至两“端点”,时序上对应于动态键合压力的极值.这样,每一个循环,可分成加压/切向加载的前半时段,和减压/切向逆加载的后半时段.如此,形成如图 12

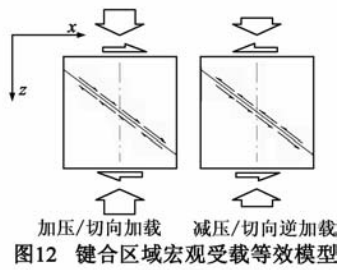


图12 键合区域宏观受载等效模型

所示的键合区域宏观受载等效模型。

在最早期阶段(0~3ms)每一个循环,相轨线不规则,是由于劈刀切向振速逐渐增高、受载点性质“不稳定”共同决定的.在“成熟”后,来自键合金属内部的切向“阻力”才变得相对稳定。

由图 11,劈刀切向位移约为 $0.5\mu\text{m}$ 左右,再考虑 $300\mu\text{m}$ 铝线软化后“略扁”,键合铝线的总体剪应变约为 0.001 量级.劈刀以 60kHz 频率振动,宏观平均剪应变率达 60/s,已在中应变率范围.高应变率提高了金属的形变储能,提供了启动位错所需能量,使得键合铝线尤其是某些局部首先产生动态塑性滑移。

键合常用金、银、铝、铜、镍等面心立方金属,位错运动阻力 Peierls-Nabarro 力值最小.外载作用下,各晶粒的滑移系上的剪应力分量值相差很大,只有哪些位向有利的晶粒,取向因子最大的滑移系,外载增大时其滑移方向上的剪应力分量首先达到临界值,开始塑性变形.而这时周围位向处于不利条件的晶粒,尚未开始塑性变形.所以,键合点的塑性变形,是一个从局部开始逐渐扩展到全局的过程.实际上劈刀作用下键合金属内部初始和后来的剪应力场并非均匀,最大剪应力必然在边界处,因此必在边界最早出现多晶体材料的晶界间滑移现象。

键合金属的动态位错滑移,会产生塑性流动、应力场重新分布、铝线和基板金属之间的原子扩散.目前尚无法用宏观层次实验定量确定.输入能量的两种作用(启动键合过程和造成已键合区域强度下降),实际上是通过压剪动载起作用.键合点性质在“成熟”后变得稳定,对应于宏观受载等效模型中倾斜滑移面被“锁死”,物理上就是铝线和基板金属之间形成了焊接。

5 微观分析

我们发现^[35],超声作用界面材料位错密度剧增.位错密度增加(图 13),位错附近晶格畸变,材料晶格结构的不稳定性增强,降低材料原子扩散的激活能。

将成功键合的铝线/基板剥离,用扫描电镜微观测

试.图 14 表明,键合点界面拉开后,在键合界面边缘有一明显脊皱环带,键合的中央未键合.我们的发现^[34]说明键合界面的实际结合不是在全截面上,而主要是在脊皱环带部分.这符合上节所说,边界区域最大剪应力开始出现材料的晶界间滑移现象.我们还观察到(如图 14 中细节 B),微键合点一旦产生,易于在附近逐步“融合”扩大^[26].这是由于位错塞积群会在附近造成的应力集中与外载共同作用,会使附近晶粒的某些滑移系上的剪应力分量达到临界值,于是位错源开动,开始附近新的塑性变形。

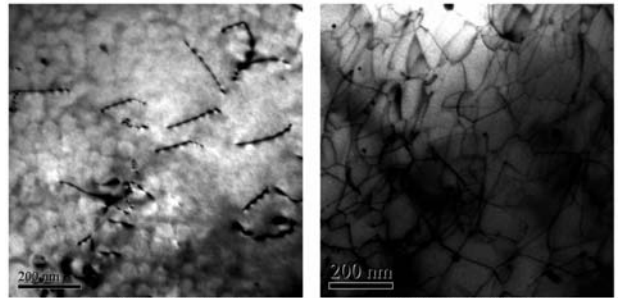
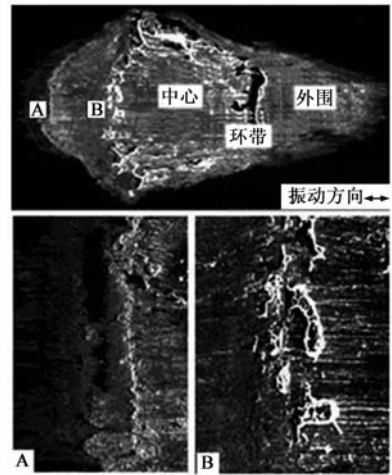


图13 超声作用后铝板材料位错密度剧增
未加超声,位错稀疏(刃位错,螺旋位错) 加超声后,位错稠密(多重滑移,数十nm胞格)

图13 超声作用后铝板材料位错密度剧增



铝线与镀镍基板的键合界面

图14 300μm铝线/基板的环带状键合界面

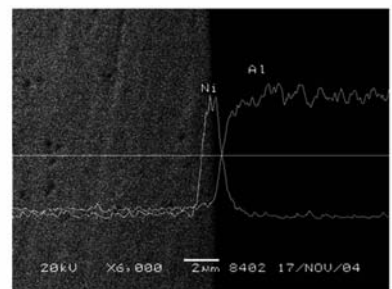


图15 300μm铝线和基板表面镀镍层之间的互扩散

对键合区域纵剖面的电镜观测^[36]说明,铝丝和基

板表面镀镍层之间出现了互扩散(图 15),显然是包括“锯齿形屈服”在内的整个键合过程中实现的.更高分辨率的透射电镜观测证实,对于直径 $300\mu\text{m}$ 铝丝在镀镍基板上的约 5×10^3 个载荷循环的键合,这一互扩散深度大致为 $300 \sim 600\text{nm}$.互扩散的速率,估算大约是每个压剪载荷循环 $1 \sim 2$ 个原子间距.

6 结论

使用常规、微观、动力相图和统计时频分析方法的引线键合系统实验说明,面心立方金属 Peierls-Nabarro 力与温度、剪应力、应变速率的强相关性,滑移过程的开动速率,界面原子互扩散形成溶质对位错运动的“钉扎”等,是金属键合的物理机制.

(1)宏观上键合点处于二维的加压/切向加载和减压/切向逆加载模式.早期阶段劈刀切向振速逐渐增高,和键合点性质逐渐变化,导致切向“阻力”不稳定;在“成熟”后,键合金属内部的位错和互扩散处于“饱和”,切向“阻力”才变得稳定;过高能量输入导致压剪动载过大,促使微裂纹的萌生与扩展.

(2)键合过程启动后,总体剪应变约为 0.001 量级,相应的宏观平均剪应变率达 $60/\text{s}$.高局部应变率提高了形变存储能,提供了启动位错所需能量,降低了动态塑性变形的阈值.

(3)键合区域承受压剪微幅动载产生动态变形,在克服切向“阻力”峰值之后进行.键合点“软化”后,开始键合金属的互扩散.互扩散的速度,大约是每个载荷循环 $1 \sim 2$ 个原子间距.

(4)微观上已有塑性变形的键合区域内部的扩散导致固溶强化.键合强度结构,与局部剪应力、剪应变率相关并与之耦合.

关于引线键合加载模式的框架认识,得到了动力学关联维数的实验验证^[37].该认识解释了所有实验现象,提供了高频换能系统^[6,7]、纵向换能系统^[8,9]等设计思路的概念依据.

实际上,粗铝丝引线键合主要用于大功率器件的封装.但为了表述统一和便于定量比较,这里以 $300\mu\text{m}$ 铝丝的键合实验数据为例,说明研究的思路、方法和部分结论.所得认识,可用于三维叠层封装数十微米金热超声键合互连工艺的优化.

致谢 王福亮、李军辉、许文虎、高荣芝、姚钢等同志进行了大量前期实验,在此表示感谢.

参考文献:

[1] Harman G G, Wire Bonding in Microelectronics[M]. McGraw-Hill, New-York, 1997.
[2] International Technology Roadmap For Semiconductors[Z].

2003. <http://www.itrs.net/links/2003ITRS/Interconnect2003.pdf>.
[3] 李征帆.大规模集成电路中的互连问题和微波技术[J].电子学报,1992,20(5):67-73.
Li Zhengfan. The interconnection problem of LSI and microwave technology[J]. Acta Electronica Sinica, 1992, 20(5): 67-73. (in Chinese)
[4] Dushkes S Z. A design study of ultrasonic bonding tips[J]. IBM J. RES. DEVELOP, 1971, 15(3):230-235.
[5] 隆志力,吴运新,韩雷,钟掘.热超声倒装键合换能系统多模态振动与有限元分析[J].电子学报,2008,36(2):255-260.
LONG Zhi-li, WU Yun-xin et al. Multiple modal vibration and FEM analysis of ultrasonic transducer for thermosonic flip chip bonding[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(2):255-260. (in Chinese)
[6] Tsujino, Jiromaru, Hasegawa, Koichi. Ultrasonic wire bonding using high frequency 330,600 kHz and complex vibration 190 kHz welding systems[J]. Ultrasonics, 1996, 6(34):223-228.
[7] Charles H K Jr., Mach K J, et al. Wirebonding at higher ultrasonic frequencies: reliability and process implications[J]. Microelectronics Reliability, 2003, 43(1):141-153.
[8] Tan Q, Schaible B, Bond L J. Thermosonic flip-chip bonding using longitudinal ultrasonic vibration[J]. IEEE Trans Compon, Packag, Manuf Technol B, 1998, 21(1):53-58.
[9] Sattel T, Brokelmann M. A simple transducer model for longitudinal flip-chip bonding[C]. IEEE Ultrasonics Symposium, 2002, Munich:1(8-11):695-698.
[10] Or S W, Chan H L W, Yuen C W. Dynamics of an ultrasonic transducer used for wire bonding[J]. IEEE Trans Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1998, 45(6):1453-1460.
[11] Kang S-Y, Chuang K, Lee Y C. Random change of vibration modes in thermosonic bonding[J]. ASME Journal of Electronic Packaging, 1998, 120(3):253-258.
[12] Tsujino J, Sano T, Ogata H, et al. Complex vibration ultrasonic welding system with large area welding tops[J]. Ultrasonics, 2002, 40(1-8):361-364.
[13] Zhong Z W, Goh K S. Investigation of ultrasonic vibrations of wire-bonding capillaries[J]. Microelectron J, 2006, 37(2):107-113.
[14] Hu S J, Lim R K S, Sow G Y. Gold wire weakening in the thermosonic bonding of the first bond[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A, 1995, 18(1):230-234
[15] Liang Z N, Kuper F G, Chen M S, A concept to relate wire bonding parameters to bondability and ball bond reliability[J]. Microelectronics and Reliability, 1998, 6(38):1287-1291.

- [16] Murali, Sarangapani; Srikanth, Narasimalu; Vath, Charles J. Effect of wire diameter on the thermosonic bond reliability [J]. *Microelectronics Reliability*, 2006, 2(46): 467 - 475.
- [17] Goh K S, Zhong Z. W. Two capillary solutions for ultra-fine-pitch wire bonding and insulated wire bonding [J]. *Microelectronic Engineering*, 2007, 84(2): 362 - 367.
- [18] Joshi K C. The formation of ultrasonic bonds between metals [J]. *Welding Journal*, 1971, 50(12): 840 - 848.
- [19] Harman G G, John A. The ultrasonic welding mechanism as applied to aluminum-and gold-wire bonding in microelectronics [J]. *IEEE Trans. Parts, Hybrids, Pack*, 1977, Pp-13(4): 406 - 412.
- [20] Farasat F. Bond Process Control. http://www.fkdelvotec.com/pdf/produkt/BPC_E4.pdf, 23-Jul-2008.
- [21] 王福亮, 韩雷, 钟掘. 超声功率对粗铝丝超声引线键合强度的影响 [J]. *中国机械工程*, 2005, 10(16): 919 - 923.
- [22] 隆志力, 韩雷, 吴运新, 钟掘. 热超声键合过程的温度因素影响规律研究 [J]. *焊接学报*, 2005, 2(68): 23 - 38.
- [23] Lei Han, Fuliang Wang, et al. Bondability window and power input for wire bonding [J]. *Microelectronics Reliability*, 2006, 46(2-4): 610 - 615.
- [24] 王福亮, 李军辉, 韩雷, 钟掘. 键合时间对粗铝丝超声引线键合强度的影响 [J]. *焊接学报*. 2006, 27(5): 47 - 51.
- [25] 高荣芝, 韩雷. 键合压力对粗铝丝引线键合强度的实验研究 [J]. *压电与声光*. 2007, 29(3): 366 - 369.
GAO Rong-zhi, HAN Lei. Experimental studies of bonding pressure on heavy aluminum wire bonding strength [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*. 2007, 29(3): 366 - 369. (in Chinese)
- [26] Lei Han, Rongzhi Gao, et al. Wire bonding dynamics monitoring by wavelet analysis [J]. *Sensors and Actuators A*, 2007, 137(1): 41 - 50.
- [27] 韩雷, 钟掘. 热超声倒装键合过程中的非线性动力学行为 [J]. *半导体学报*. 2006, 27(11): 2056 - 2063.
Han Lei, Zhong Jue. Nonlinear dynamical behaviors in flip-chip thermosonic bonding [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, 27(11): 2056 - 2063. (in Chinese)
- [28] 高荣芝. 引线键合换能系统振动的小波分析 [D]. 长沙: 中南大学硕士论文. 2007.
- [29] 广明安, 韩雷. 超声键合过程中键合压力特性的实验研究 [J]. *半导体技术*, 2006, 31(8): 607 - 611.
- [30] 高荣芝, 韩雷. 键合力对超声键合换能系统振动影响的时频分析 [J]. *中国机械工程*, 2007, 18(15): 1825 - 1829.
- [31] 姚钢. 引线键合换能系统俯仰振动的时频分析 [D]. 长沙: 中南大学硕士论文, 2008.
- [32] Lei Han, Jue Zhong. Experimental observations on nonlinear phenomena in transducer assembly for thermosonic flip-chip bonding [J]. *Microelectronic Engineering*, 2008, 85(7): 1568 - 1576.
- [33] Lei Han, Jue Zhong, Rongzhi Gao. Effect of tightening torque on transducer dynamics and bond strength in wire bonding [J]. *Sensors and Actuators A*, 2008, 141(2): 695 - 702.
- [34] Jun-hui Li, Lei Han, et al. Microstructural characteristics of Au/Al bonded interfaces [J]. *Materials Characterization*, 2007, 58(2): 103 - 107.
- [35] Li Jun-hui, Wang Fu-liang et al. Atomic diffusion properties in wire bonding [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006, 16(2): 463 - 466.
- [36] Li Jun-hui, Han Lei, et al. Atomic Diffusion Properties in Al/Ni & Au/Al Bond Interface [A]. *The 7th IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis (HDP'05)* [C]. June 2005, Shanghai, 466 - 470.
- [37] 吕雷. 键合过程中换能系统振动的关联维数和 Lyapunov 指数实验研究 [D]. 长沙: 中南大学硕士论文. 2009.

作者简介:



韩 雷 男, 1989 年获博士学位, 现为中南大学教授, 博士生导师. 1991-1995 年和 2000-2003 年留学美国. 曾负责参加中美数十项重大科研项目. 在国内外学术期刊上共发表论文 160 余篇 (100 余篇被 SCI/EI 收录). 研究领域: 实验力学, 激光超声, 图像处理, 小波分析, 微机电系统测试, 微器件封装机理及可靠性.
E-mail: leihanxyz@yahoo.com.cn