

博士学位论文

超声键合界面微结构生成机理与规律研究

作者姓名：李军辉
学科专业：机械工程
(机械设计理论)
学 院：机电工程学院
指导教师：钟 掘 院士

中 南 大 学
2008年01月

分类号 VDC _____

密级 _____

博士学位论文

超声键合界面微结构生成机理与规律研究

Study on the Microcosmic Mechanism and Rule of
the Interfaces in Ultrasonic Bonding

作者姓名： 李军辉
学科专业： 机械工程
(机械设计及理论)
学 院： 机电工程学院
指导教师： 钟 掘 院士

论文答辩日期 _____ 答辩委员会主席 _____

中 南 大 学
2008 年 01 月

原创性声明

本人声明，所提交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了论文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中南大学或其他单位的学位或证书而使用过的材料。与我共同工作的同志对本研究所作的贡献均已在在论文中作了明确的说明。

作者签名：_____ 日期：_____

关于学位论文使用授权说明

本人了解中南大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以采用复印、缩印或其它手段保存学位论文；学校可根据国家或湖南省有关部门规定送交学位论文。

作者签名：_____ 导师签名_____ 日期：_____

摘 要

本论文以超声键合界面为对象,系统研究了引线键合和热声倒装键合界面的生成机理,解决了键合点纵截面透射电镜(TEM)样品制作的难题,观察到超声能作用下界面材料位错密度增加的现象,探讨了超声键合快速形成的微观机制,剖析了键合点微结构的空间构成;采集了超声驱动电压/电流信号,得到了键合过程实时的超声功率/阻抗特性;研究了热声倒装上/下界面的原子扩散状况,发现了上/下界面扩散的非均匀性,试验了多种模式的热声倒装新工艺,提出了二界面扩散层厚度一致的工艺路线,获得了热声倒装键合点界面超声能传递/转化的比率规律。

研究工作主要包括以下几个部分:

1. 超声键合界面快速形成机理:从键合界面的 TEM 测试观察到超声键合层位错密度剧烈增加的现象,证实超声键合界面间为位错扩散,位错引起晶格畸变,具有较低的扩散激活能,极易扩散,且,晶格位错是一种快速扩散的通道机制,位错密度的增加也表明键合过程中未发生高温回火而使位错消失,说明超声键合是在回火温度以下的原子扩散过程,阐明了基于表面扩散、位错扩散的超声快速键合机理。

2. 高分辨透射电镜(HRTEM)的扫描透射(STEM)模式下,测试到键合界面原子扩散层为 200-500nm,表征键合界面强度结构的生成;键合区在拉力作用下分离界面形如环带状,周边脊皱形成强的键合,并有明显的断裂韧窝,互扩散原子在对偶材料晶体中产生固溶(或合

金)强化, 引起晶体晶格常数改变, 其强度大于基体材料的强度, 微键合区是一种空间多元结构“引线材料—扩散层—基垫材料”。

3. 超声键合工艺参数与键合微结构的演变规律: 在其它条件不变的情况下, 随着超声功率的增加, 键合界面周边脊皱加剧; 随着压力增大, 键合椭圆环逐步延伸扩大, 脊皱键合区的面积增加; 随着键合时间的延长, 脊皱延伸为完整的圆环, 并向中央扩展。键合过程的实时功率特性反应了超声能量的传递/转化状态, 可为超声键合可靠性提供了监测思路。

4. 发现了 Al/Au/Ag 材料体系中常规的“芯片植球”模式热声倒装键合上界面扩散层厚是下界面的 2 倍多, 通过对界面扩散数据的统计分析, 获得了上、下界面超声能转化的比率关系, 即为:

$D_1 : D_2 = \left(\sum_{k=1}^{k=N} D_{1(k)} / N \right) : \left(\sum_{k=1}^{k=N} D_{2(k)} / N \right) \approx 2.28 : 1$, 且 EDS 测试上界面 (Al/Au) 扩散层为金属间化合物; 针对键合层的扩散状况, 根据超声能转化的比率关系, 提出并试验了“基板传能”和“基板植球”模式的热声倒装键合, 结果表明新模式倒装可使二界面扩散层厚基本一致, 且 Au/Al 金属间化合物减少一倍。

本论文的研究工作, 为超声键合装备与工艺设计、键合过程实时监测以及超声键合过程物理规律的技术实现提供理论参考, 期望对高密高性能微/光电子封装互连装备技术的发展有所裨益。

关键词: 键合界面; 微观机理; HRTEM; 热声倒装

ABSTRACT

Ultrasonic bonding interface is chief concern, in this paper, the interface mechanism of wire bonding and ultrasonic flip chip bonding is analyzed systemically. Sample of TEM of bonding joints is produced successfully, the growth of the dislocation density in bonded interface after ultrasonic treatment is observed, then microcosmic mechanism of ultrasonic fast bonding is discussed. Lift-off characteristic of bonding interface is researched by using SEM. Driving voltage and current signals of piezoceramic transducer are measured, the features of the input power and impedance are obtained. Atom diffusion of two interfaces of ultrasonic flip chip is studied, multi-pattern process of flip chip bonding are tested, then a innovated process is suggested in order to improve the performance of two interface, and an experiment-based mode of ultrasonic energy conversion is found.

The study is organized as follows:

Firstly, the mechanism of fast formation at bonding interface: the ultrasonic vibration in flip chip FC bonding results in the generation of dislocations, and the atomic diffusion can be activated more easily along the dislocation lines which perform the fast diffusion channels, thus the dislocation diffusion is probably more prominent than the body diffusion during ultrasonic bonding. The growth of the dislocation density proved also that atom diffusion was happened below the annealed temperature. Based on the dislocation diffusion, the mechanism of fast diffusion at bonding interface is formed at lower temperature.

Secondly, the depth of atomic diffusion was about 200-500 nm. Lift-off characteristic of interface shows that the peeling underdeveloped bonds simulate a torus (or doughnut) with an unbonded central region and ridged peripheral region is bonded hardly. The atomic diffusion at the bond interface enhances the micro-structural strength, which increases beyond that of the base materials. The fracture surfaces of bonded interfaces separated by pull-testing were characterized by dimpled rupture. The tensile fractures occurred not in the bond interface, despite the presence of an inter-metallic

compound, but in the weaker base material. So bonding strength consists of ‘wire material – diffusion layer – pad material’ .

Thirdly, microstructure evolutions of interface are associated with the normal bond parameters-load, power, and time. For constant other machine variables, with increasing load, the total area of bond pattern increases in size, and minor axis of torus extends major axis; with increasing time, the ridged periphery spreads a whole torus, and the ridged location of the bonded region moves closer to the bond center; the sliding trace and the ridge-like of the bond pattern strengthen when more power applied. Moreover, the machine variables have an optimal range for microstructure characteristics. Driving voltage and current signals of piezoceramic transducer were measured directly by using digital storage oscilloscope; the power curves of bonding have been calculated. Results show such a trend that power curves of badly bonding were much lower than that of hard bonding, and indicated a monitoring system of ultrasonic bonding reliability.

Fourthly, it is discovered that the depth of atom diffusion at up-interface is much thicker than that of down-interface, Furthermore, an experiment-based mode of ultrasonic energy conversion was found that the ratio of up interface to down interface in ultrasonic FC bonding was about, $D_1 : D_2 = (\sum_{k=1}^{k=N} D_{1(k)} / N) : (\sum_{k=1}^{k=N} D_{2(k)} / N) \approx 2.28 : 1$, and it may be an inter-metallic compound (e.g. Au₄Al is major) at up-interface. To minimize the inter-metallic compound layer, the effectiveness of a different bonding approach is confirmed.

The study done in this paper can provide reference for the ultrasonic bonding technology, the design of process, and on-time monitoring of ultrasonic bonding reliability. It is expected that the study can be benefit to the development of equipment and technology of high-density and high-performance microelectronics packaging.

Key Words: Ultrasonic bonding interface; Microcosmic mechanism; HRTEM; Ultrasonic flip chip

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	III
第一章 绪 论	1
1.1 课题的来源及研究目的	1
1.2 超声键合的研究现状	2
1.2.1 超声引线键合机理与规律研究现状	5
1.2.2 热声倒装键合及研究现状	9
1.3 本论文研究内容	14
第二章 超声键合界面快速形成机理	15
2.1 超声振动激活金属材料位错的观察	15
2.1.1 超声能激活金属材料晶格位错	15
2.1.2 高频超声振动加速度与位错	20
2.2 原子扩散体系的激活能及快速通道机制	23
2.2.1 原子扩散体系的激活能	23
2.2.2 位错管道快速扩散形成机制	27
2.2.3 位错的滑移特性分析	31
2.3 超声界面快速扩散通道机理	33
2.3.1 超声键合界面快速通道扩散机理	33
2.3.2 实时超声功率特性与扩散机理的相关表征	35
2.3.3 超声键合高速高可靠特性	36
2.4 本章小结	38
第三章 扩散键合界面强度构成与演变规律	39
3.1 界面原子扩散层厚与微结构强度构成	39
3.1.1 界面扩散层厚的 STEM 测试	39
3.1.2 界面的分离失效特性与界面强度的空间组成	40
3.2 超声键合过程多参数与键合界面微结构演变规律	47
3.2.1 微键合点一焊与二焊特性	47
3.2.2 键合界面环带结构与有限元仿真分析	49
3.2.3 界面微结构演变特性	53
3.3 超声键合系统阻抗/功率特性	56

3.3.1 超声驱动信号采集系统.....	57
3.3.2 实时超声阻抗/功率的计算与分析.....	60
3.3.3 键合过程的功率特性.....	63
3.3.4 高功率过键合失效分析.....	65
3.4 本章小结	67
第四章 热声倒装界面规律与键合工具设计	69
4.1 热声倒装实验平台的搭建.....	69
4.2 多点芯片热声倒装键合的实现.....	70
4.3 倒装凸点的热声植球工艺探索.....	74
4.4 倒装界面、键合工具、工艺的协同	76
4.5 本章小结	78
第五章 倒装多界面超声传递规律与新工艺	79
5.1 倒装二键合界面 TEM 特性与界面扩散.....	79
5.2 倒装二界面性能分析与工艺新构思	84
5.3 基板传能与基板植球倒装实现与传能规律	87
5.3.1 “基板传能”模式倒装工艺.....	87
5.3.2 “基板植球”模式倒装工艺.....	89
5.4 热声倒装二界面传能规律分析.....	90
5.4.1 二界面传能的量值差异.....	90
5.4.2 多界面运动传递与能量转化规律分析.....	91
5.5 热声倒装键合过程多参数影响规律	94
5.5.1 超声功率的键合窗口.....	94
5.5.2 键合时间的键合窗口.....	95
5.5.3 键合压力的键合窗口.....	96
5.6 本章小结	96
第六章 全文总结.....	98
参考文献	100
致 谢	110
博士期间发表的论文	111
研究项目与专利	116

第一章 绪 论

1.1 课题的来源及研究目的

为适应我国微电子领域的发展，国家 973 项目、863 项目、国家自然科学基金项目近年来先后启动多种微电子技术的研究计划。

本论文课题来源于此背景下中南大学机电工程学院微纳制造与装备中心承担的 973 项目高性能电子产品设计制造精微化数字化新原理新方法“复合能场作用下微互连界面的微结构演变规律”(No.2003CB716202)、国家自然科学基金重大项目先进电子制造中的重要科学技术问题研究“芯片封装界面制造过程多参数影响规律与控制”(No.50390064)、国家自然科学基金面上项目“芯片超声倒装多界面能量传递与强度结构演变规律研究”(No.50675227)等国家项目，通过对微电子封装领域的核心技术——互连键合的机理与技术的基础研究，研发互连封装装备技术与相应的工艺，形成我国具有自主知识产权的微电子封装新工艺、新技术、新装备。

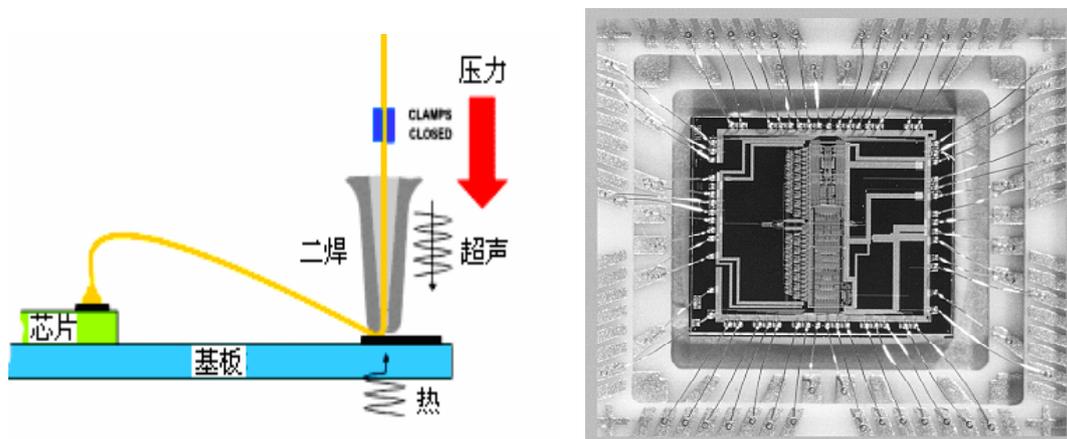


图 1-1 超声引线键合技术

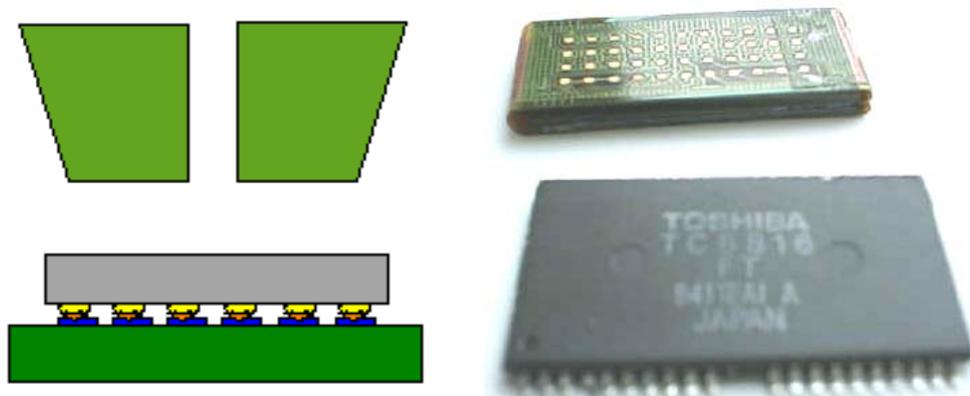


图 1-2 倒装键合技术

微电子芯片封装“核心”装备是芯片内引线与基板引脚的互连——引线键合，通过键合界面的制造实现芯片与引出部件 I/O 端点的互连，将微观电子行为转为宏观的器件功能，目前，引线键合(如图 1-1)以其灵活性、低成本等优点占领着微电子封装市场 90%[1-5]，芯片倒装键合(如图 1-2)能提高键合的可靠性和芯片的电性能，将是一种极具发展前景的技术[6-8]。

随着高效率、高密度、高可靠性的集成电路器件的发展，深入进行引线键合和倒装键合机理与技术的研究，旨在探索超声键合界面结构形成机理与微结构强度组成，运用固体物理、位错/扩散理论、超声物理建立键合界面快速扩散形成的物理模型，分析热声倒装键合过程多界面超声运动/能量的传递规律，检测键合过程超声输入功率信号的变化规律及其机理对应验证，探索热声倒装多界面的能量传递/转化的特殊规律，为发展高密高性能热声键合封装技术提供机理和模型依据。

1.2 超声键合的研究现状

微电子器件的组装必须经过若干层次的封装[9,10]。如图 1-3。首先要在半导体 LSI(Large Scale Integrated Circuit)芯片上进行选择扩散和布线，这是 0 级封装。其次，将半导体 LSI 新品封装好，类似于安装在电路基板上，这是 1 级封装，再次，将半导体 LSI 包括各种无源元件在内的电子元件安装在以印刷电路板为主的电子基板上，这是 2 级封装，将组装好的基板安装在机器中就组成了系统[11,12]。

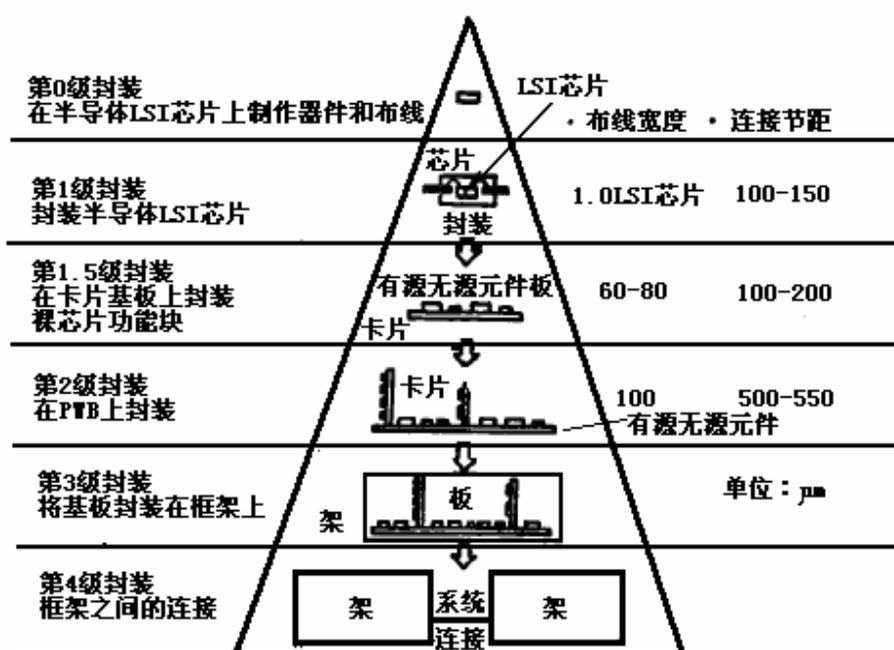


图 1-3 系统的封装层次结构

半导体封装主要包括封装的外部形式以及内部的连接方式。其中，芯片电极和外部管脚以及芯片之间的连接起着确立芯片和外部电气连接、确保芯片和外界之间的输入输出畅通的重要作用，是整个后段封装过程的关键[13]。因此内部互连方式的发展将直接影响着整个半导体封装业的动向。芯片封装的互连方式主要包括引线键合、倒装芯片和载带自动焊。目前，90%以上的芯片采用引线键合技术[5]，倒装芯片其互连的输入输出(I/O)密度高，更适应于高密度布线芯片的需要。载带自动焊主要应用于薄而轻的专用电子产品上[14]。

随着微电子芯片的集成度以每隔 3 年翻两番(增加 4 倍)，线宽尺寸缩小 1/3 的速度发展[15]。与之相应，芯片封装的引线间距和焊球直径同幅减小，引线密度急剧增加，封装速度加快，单引脚封装成本降低，迫使芯片封装技术不断突破、不断创造新的技术极限。预计到 2010 年封装的技术指标将进入一个新平台(见表 1-1)[15]。

表 1-1 预测 2010 年芯片封装的技术指标水平[15]

	目前	2010
特征线宽(μm)	0.1	0.05
芯片间距(μm)	45	30
焊球直径(μm)	40	25
定位精度(μm)	2~5	< 1
倒装芯片 I/O 数(个)	2500~3000	10000
引线键合速度(线/秒)	15	> 20
键合时间(ms)	15	10
能量密度($\text{J}/\text{ms} \cdot \text{m}^2$)	0.52×10^3	1.8×10^3

芯片倒装互连技术是在芯片焊盘上作凸点，然后将芯片倒扣于基板进行凸点与基板间的连接，凸点连接比引线键合连线短，传输速度快，其可靠性提高 30 ~ 50 倍[16,17]，芯片倒装将是主要互连形式。当前的回流焊倒装可靠性比较高，而且凸点数量多，采用 Sn/Pb 焊料，对环境及人体的健康不利，且回流焊凸点通过刻蚀形成，工艺复杂，成本高，回流焊凸点的电阻率达 22 微欧/cm(而，热超声键合凸点的电阻率只有 2.19 微欧/cm)[18-20]。

热超声倒装(图 1-4)工艺简单，可靠性好，并且是一种无铅的绿色焊接，成本低，是当前芯片封装领域中极具发展潜力的一种新型工艺。智能卡封装、通信领域中的 SAW Filter 元件、手机芯片、发光二极管(LED)等等微电子/光电子器件的封装已开始使用热声倒装键合技术，特别是 LED 做为新一代照明光源，倒装结构 LED 较之传统的正装结构(图 1-5)，可将 LED 的光效提高 70%，热阻低 $14^0/\text{W}$ ，是常规的 1/10[21-28]。且 Au 凸点的电阻只有回流焊凸点的 1/10[29]，高功率高亮度 LED 热声倒装具有独特优势和前景。

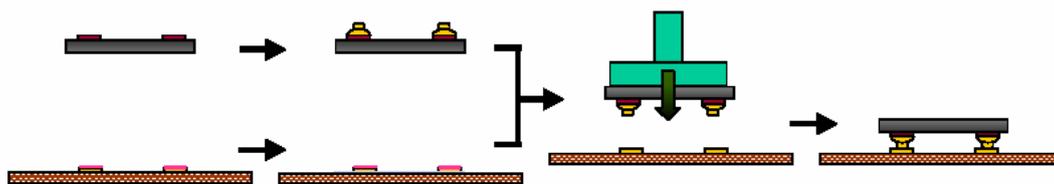


图 1-4 热声倒装的工艺流程

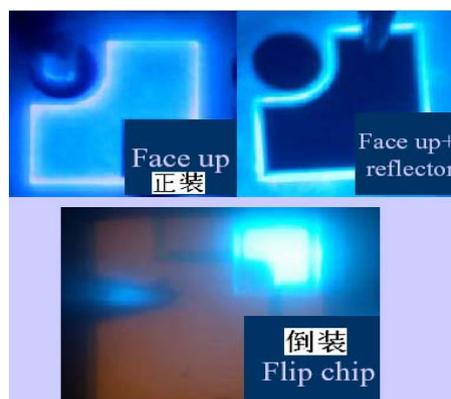


图 1-5 正装与倒装结构 LED 出光比较

面对下一代芯片封装技术指标，作为封装的核心装备——超声互连键合技术，有待进一步的突破发展。

超声互连键合是有别于传统机械制造的新的制造概念，热超声封装技术的发展需要融合机械学、材料学、表面物理化学等众多相关学科，在深层次发掘制造规律，促进制造科学这一新分支的发展。

超声键合是一种复杂的物理和力学行为，在微米和毫秒时空中形成界面键合，有众多的研究者对其超声键合机理从不同的学科方向进行过研究，获得了一些重要的结论和数据，但超声键合机理还有许多问题未能阐明，特别是热声倒装多界面规律的研究尚十分欠缺，主要体现在：

- 1) 超声能作用下的键合区微结构生成机理不十分清楚，缺乏深入的微观测试和真实的物理模型表征。
- 2) 超声能在键合过程中功率/振动运动的实时传递与转化特征缺乏深入的阐述。
- 3) 超声能、超声振动在热声倒装多界面的传递与转化规律，高分辨定量测试分析，以及定量的能量转化模型尚未形成。

由于这些问题缺乏基于物理机理的实验研究，已有的超声键合机理与规律多由宏观分析所得，难以为发展更完善的键合技术提供认识基础和创新思路。本研究针对宏观能量测试和微结构生成的微观测试，设计实验，发现现象，探索本质，结合超声物理、材料学、位错理论、扩散规律等的研究成果揭示超声键合的内在规律。

1.2.1 超声引线键合机理与规律研究现状

引线键合(Wire bonding, 缩写为 WB)以金属引线的两端分别与芯片和管脚键合而形成电气连接(见图 1-6)。引线键合(图 1-7 是引线键合工艺示意图)从最初应用到现在已经有几十年的历史,是最为成熟、应用最为广泛的芯片封装连接方式[30]。引线键合根据其键合特点分为超声键合、热压键合和热超声键合,几种键合方式各有特点,这也有各自适用的产品。



图 1-6 引线键合

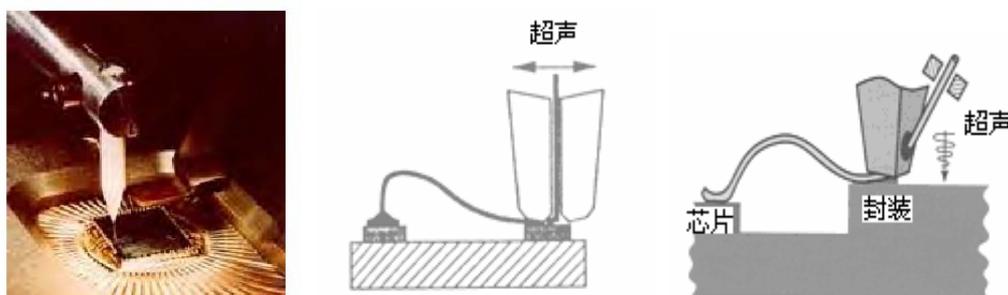


图 1-7 球形劈刀(中)和楔形劈刀(右)

热压键合,这是最早用于内引线键合的方法。热压键合是通过压力与加热,使接头区产生典型的塑性变形。热量与压力通过毛细管形或楔形加热工具直接或间接地以静载或脉冲方式施加到键合区,键合时承受压力的部位,在一定的时间、压力和温度的周期中,接触的表面就会发生塑性变形(Plastic Deformation)和扩散。该方法要求键合金属表面和键合环境的洁净度十分高。而且只有使用金丝才能保证键合可靠性,但对于Au-Al内引线键合系统,在焊点处又极易形成导致焊点机械强度减弱的“紫斑”缺陷[31-35],有一定的局限性,一般用于玻璃板上芯片COG(Chip on Glass)。

超声键合,利用超声波的能量,使金属丝与铝电极在常温下直接键合。由于键合工具头呈楔形,故又称楔压焊。其原理是:利用超声波发生器产生的高频驱动电压/电流,通过压电换能器转换为机械能——超声振动,经变幅杆传递至键合劈刀,同时在劈刀上施加一定的压力,使Al丝和Al膜表面产生塑性变形,从而形成焊接。主要焊接材料为铝(Al),线焊头一般为楔形。超声键合适应性较好,超声能对材料具有清洁作用,其外界环境要求不高,应用范围广泛[36-38]。

热超声键合,采用加热加压加超声的方式实现封装互连,其键合过程:在劈刀尖端用高压电火花使金属丝形成球形,然后将金属球焊在 IC 芯片上,称为球

焊,再将金属丝引线致基板上楔焊,故又称球楔键合。球焊在引线键合中是最具代表性的焊接技术,现在的半导体二、三极管封装、CMOS 封装都采用 Au 线球焊。由于通过加超声可降低热压温度,提高了引线键合效率和可靠性,强适应性,目前仍被广泛采用。热超声键合已逐步取代了热压键合[39]。如动态随机存取存储器(DRAM)芯片和大多数商业芯片一直都采用超声引线键合技术[40]。

超声键合技术是 50 年前德国人在实验室研究电流焊接时加超声进行界面清洁,在电流焊接突然无电流情况下,金属板仍然对焊上了,由此发明了超声金属焊接技术,最初,超声键合引入电子封装的微引线互连技术,其机理也不清楚,很多文献致力于键合机理研究,包括如下几个方面:

- a) 摩擦热键合。直观地认为截面超声振动摩擦导致急剧温升形成热键合[41,42]。Joshi 测定在最佳条件下引线和基板间无相对运动[43,44], Harman 的试验测定键合界面温升 $70^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ [45,46],超声键合中这样的温度太低不能形成热熔化焊接,证明摩擦键合的观点是不合理的。
- b) 超声软化。超声能作用下,Al 的杨氏模量减少[47],高频超声效应下,Al、Ca、Be、Zn、Cu、Au、Fe 等材料都发生金属软化作用[48-50],但软化机理在物理上还不十分清楚[51]。
- c) 振动。通过激光干涉仪测量高频运动,研究振动与能量的传递,功率、力、时间与振动运动的关系,超声键合的振动振幅控制在 $40\sim 200\mu\text{m}$ 范围较佳[52-55]。
- d) 键合区界面特性。在扫描电子显微镜下,可观察焊接区形貌,键合区像一个中央未键合的椭圆,通过对键合过程的力学分析,认为键合区的这种界面特性是超声动态应力和静压应力共同作用的结果[56-58]。

自上世纪 60 年代以来,引线键合技术一直在不断的发展。Harman GG, Horsting CW 等人于 70 年代曾详细研究过超声焊接技术[59-61]。1978 年,Winchell 和 Berg 出版了在超声焊接方面研究的新发现[62],至今仍是超声波焊接的指导性文件。简单总结他们的理论是[63-65]:

- a) 焊接中的发热对焊点的形成不起重要的作用;
- b) 超声使金属变软的效率极高;
- c) 焊丝变软是焊接过程中的关键因素;
- d) 超声焊接点周边结合强度大于中央强度。

作为键合机核心部件——超声振动系统,在超声键合设备中担负着实现电声转换,产生高频超声振动。国内外开展了较广泛的研究,如超声波的频率,振动轨迹,振幅的大小等与焊接性能的关系,普通超声焊的频率为 27kHz 到 40kHz[66,67],而在电子元件的超声波焊接中,常用超声波的频率为 60kHz-120 kHz,正在向更高频率的超声技术发展,日本 Kanagwa 大学 Tsjino 等人正研究

330kHz-600kHz 的焊接特性[68-72]，甚至有的达到了 980kHz[73]。频率提高，振幅减小，有利于减小焊点直径，低频时，易于产生和控制高能量级。超声焊接系统的不断改进，使引线键合焊点直径由 100 多微米以上减小到目前的 45 微米。

Tsjino 等人还在探索了多维超声键合技术[74,75]，研究双向或多向超声波作用方向和耦合作用轨迹对焊接结合面强度和焊接性能的影响。改变超声振动轨迹能提高焊接时间与质量[76,77]，超声波的振动轨迹有线性的，椭圆或圆、矩形或正方形三种，实验表明复杂振动(即椭圆或矩形)在更短的时间和更小的振幅也能焊接成功，并且多维同时传输超声能量的界面焊接强度比单向的要大得多，结点的质量更高，多维传能焊具存在非线性问题尚未得到有效的解决。

本课题组王福亮[78-80]等人研究热声键合工艺参数对键合强度的影响，获得了一些重要的结论，如超声功率的影响规律(图 1-8)：**a)**过小的超声功率不能为键合强度的形成提供足够的能量，而导致欠键合，表现为键合强度较小，在拉丝成拱过程中形成无连接和剥离；**b)**过大的超声功率一方面会破坏已经形成的键合区域导致键合强度下降，造成过键合，同样形成无连接和剥离的结果；其次使键合区域变形严重产生明显的裂缝，形成根断现象；**c)**在合适的超声功率区间内，平均键合强度较大且可靠性达 100%，即图中的超声功率为 1.0~1.6W 部分。

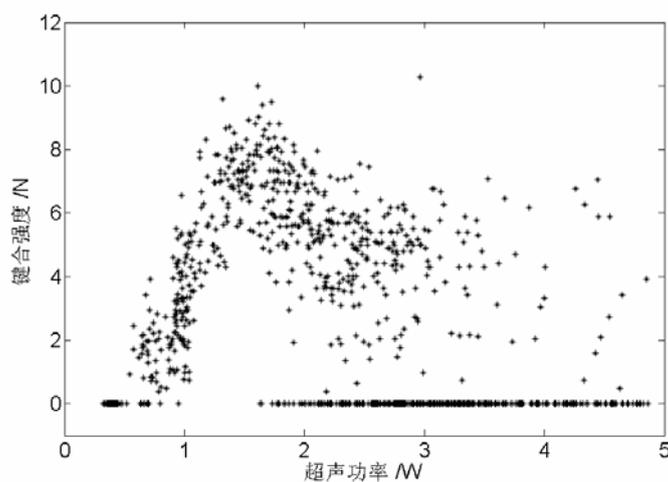


图 1-8 超声功率与键合强度关系

在引线键合中，压力的控制对键合的成功是至关重要的，特别由于芯片集成度进一步提高，引线直径进一步减小，引线的振动和生产速度的加快，不但会产生很大的接触应力，导致零件的损坏[81]，而且强度较低，易造成提前断线[82]，在引线键合中，温度的选取也是一个因素，由于温度不仅影响引线接触过程中的粘塑性，而且影响原子扩散过程中新相的形成，温度对键合过程中的孔洞消失和新相产生的影响机理尚在研究中，特别是温度对键合后键合界面产生的内应力的影响，严重制约着芯片的使用寿命和可靠性，一般现代超声键合温度在 100°C-150°C 之间[83-85]。本课题组隆志力[86-89]等人研究了键合温度对键合

强度的影响规律(图 1-9): 键合强度对温度依赖性较大, 在低温和高温条件下, 键合强度明显较低; 只有在合适键合温度范围内才可以获得较高的键合强度和可靠性, 即存在一个键合温度的最佳区间。温度过高将会影响到材料本身, 相反则有可能无法保证键合质量, 出于对芯片材料及键合设备的保护, 目前的芯片封装技术正向低温或室温条件发展。

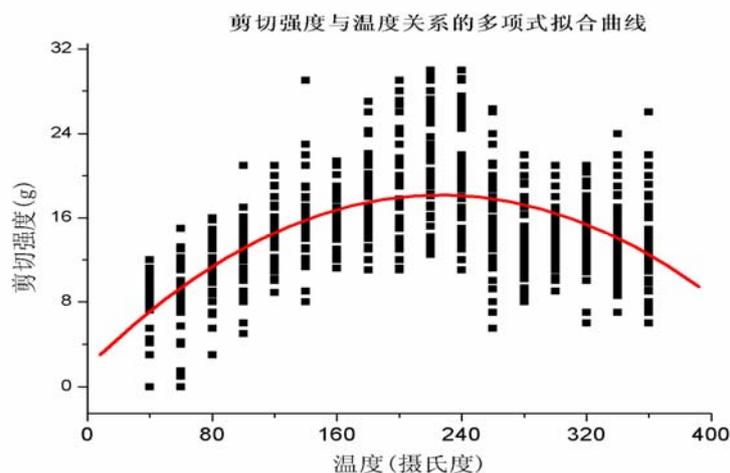


图 1-9 金丝球热超声引线键合实验剪切强度分布

对键合过程工艺参数的键合窗口的研究, 反应了键合点的宏观认识和多参数的匹配关系。键合参数的匹配相当重要, 因为键合参数直接影响到芯片与基板的连接强度及整个系统的能量传递。对于热超声键合工艺, 影响金球与基板的连接强度的因素多种多样, 除了超声、温度以及压力之外, 烧球质量、劈刀质量、金丝线的拱度、手动操作时的平稳性、以及运动机构的稳定性等因素都直接影响到键合的连接效果。

在热超声键合工艺中, 芯片金球凸点与基板键合过程的研究是提高芯片互连质量、优化键合参数匹配、以及充分利用能量的基础。当前, 对金球凸点与基板键合过程的研究方法不拘一格, 各有特色。L.K. Cheah 和 S. Murali 等人[90,91]利用扫描电镜(SEM)和 EDS 能谱方法分析键合界面表面形貌和微观结构, 以查明键合界面材料变化过程。M. Klein 等人[92,93]采用温度循环方法观测键合之后的芯片凸点的热匹配, 以此分析键合质量及界面的可靠性。Shivesh Suman 和 Jeng-Rong Ho 等人[94-96]分别设计了一种特种热电偶温度传感器, 并将这种传感器嵌入到芯片, 从而获得键合过程实时温度的变化规律。Michael Mayer 等人[97]制作了一种试验芯片, 这种芯片集成了温度传感器和压力传感器, 可以同时检测键合过程温度和压力的变化。C. W. Yuen 和 Paul Wing-Po Chu 等人[98-101]在换能器中嵌入一种压电传感器而构成“智能换能器”, 通过压电传感信号分析系统的超声能量传递特性以及金球与基板的键合过程。采用传感器方法可以实时在线地获得键合过程发生变化的丰富信息, 然而这些微传感器的设计、制作以及安

装都遇到很多困难。通过采集键合周期内 PZT 换能器的驱动电压和电流信号，并以 PZT 换能器阻抗和功率为分析手段，分析键合过程金球凸点和基板结合的动态变化以及键合效果，将是一种实用可靠的反映键合过程能量传递的研究思路。

纵观国内外引线键合的研究状况可知，超声键合界面机理研究未触及高分辨的微观测试手段，未深入微观层次探索超声键合的物理本质，瞬间超声能量密度的传递/转换与超声键合界面的快速形成机理问题还有待阐明，键合内在机理与规律是未来芯片封装突破必须回答的重要科学问题。

1.2.2 热声倒装键合及研究现状

倒装芯片键合(Flip-chip Bonding)，缩写为(FCB)在芯片表面预先放置焊球，翻转后面对面和封装焊接在一起(见图1-10)。倒装芯片代表着封装输入/输出数目不断增加，内部连接性能要求越来越高的形势下，电气连接由引线向焊球发展的趋势。这种趋势在封装以外的其它应用层次上(例如印刷线路板和芯片)也得到了充分的反映。

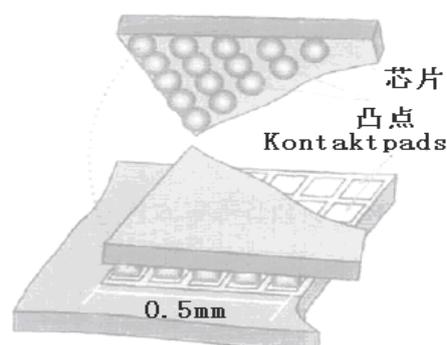


图 1-10 倒装芯片

倒装芯片键合技术最初是在60年代由IBM公司开发[102]，主要用于厚膜电路。这种方法在硅片上焊盘处预制钎料凸点，同时将钎料膏印刷到基板一侧的引线电极上，然后将硅片倒置，使硅片上的钎料凸点与之对位，经加热后使双方的钎料熔为一体，从而实现连接。这种方法适用于微电子器件小型化、高功能的要求，它甚至可以可靠地直接把芯片粘接到FR-4(环氧-玻璃纤维层压板)卡上[103-106]，从而使这种芯片变成了“最小封装”。但是钎料凸点制作复杂，焊后外观检查困难，并且需要焊前处理和严格控制钎焊规范，复杂的制造工艺和高昂的制造成本使得它的应用仅限于高档微电子产品的封装应用[107-110]。

成本、性能和尺寸是选择倒装键合作为首选IC互连技术的关键驱动力量。在移动电话和手持消费电子应用中，经常要求采用倒装芯片键合技术，以缩小产品尺寸、提高产品性能。

为满足电子封装的高密度高性能高效率要求,倒装芯片技术将是半导体封装的主要互连技术。当前的倒装键合工艺包括热超声键合、再回流焊(C4)、热压键合、环氧树脂导电胶键合等方式。再回流焊可靠性比较高,而且凸点数量多,但它采用的是 Sn/Pb 焊料,对环境及人体的保护极为不利。环氧树脂导电胶连接工艺简单,且在低温下键合,但存在可靠性不好,而且寄生电阻太大等不足[111]。热压连接工艺没有污染问题,效率高,也存在可靠性不好,且键合条件要求苛刻等缺点。在一级芯片封装领域中,热超声芯片键合工艺以过程简单、I/O 数量多、效率高、无污染等优点而被认为是满足下一代芯片封装要求的具有发展潜力的新工艺和新技术。

半导体照明发光二极管(Light-emitting diode, 简称为 LED)即将引发第四次“照明革命”,其标志是半导体 LED 灯将逐步替代白炽灯和荧光灯。LED 做为新型照明光源,具有节能、长寿命、免维护、环保等显著优点,同样亮度下其耗电仅为普通白炽灯的 1/10,而寿命却可达白炽灯的 100 倍[112-115]。

半导体照明的发展要求 LED 的功率由常规 LED 的小于 1 瓦提高到照明 LED 的数十瓦,封装的重要性突显,封装的散热能力成为决定新一次“照明革命”成败的关键问题之一[116]。常规的正装结构封装存在导热能力差的瓶颈问题,显然无法满足照明 LED 的使用要求[117]。

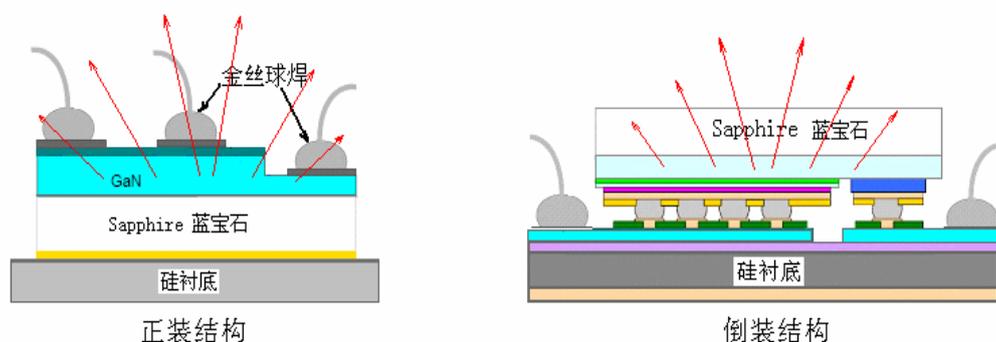


图 1-11 LED 的两种封装结构(左为正装结构、右为倒装结构)

倒装结构是适应大功率 LED 封装的一种新形式(图 1-11 (右)所示),它通过数十个金凸点将 LED 晶片连接到硅基板上(这些金凸点分别连接 LED 的阴极和阳极),发光层与基板间形成多点并联的高导热通道,并以硅作为芯片与散热片的过渡导热体,实现低热阻。倒装结构的热阻是常规正装结构封装的 1/10,可将 LED 的光效提高 70%,同时缓解热应力对器件可靠性的影响,因此倒装结构是大功率照明 LED 封装的必然选择[118]。

LED 的封装技术一定程度上是伴随着微电子芯片封装技术不断发展。最早的小功率 LED 多用于显示,其晶片电极与基脚采用引线键合技术焊接(如图 1-12 所示)[119-120],最先使用热压键合方法,但很快就被热超声引线键合方法取代

[121,122]。

随着 LED 功率的不断增大，引线键合封装方式越来越不能满足要求。受微电子芯片倒装的启发，倒装结构封装被运用于大功率 LED 的封装。微电子芯片倒装比较成熟的工艺是回流焊技术，因此大功率 LED 的倒装也首先采用回流焊(如图 1-13 所示)。由于回流焊的焊接温度限制，只能使用焊接温度较低的合金制作凸点，凸点的导电/导热性能不理想[123]。

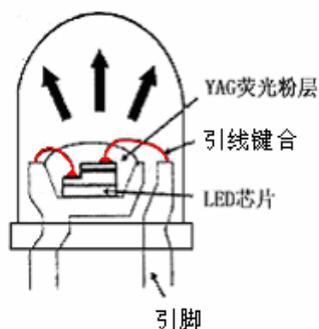


图 1-12 小功率 LED 的封装结构

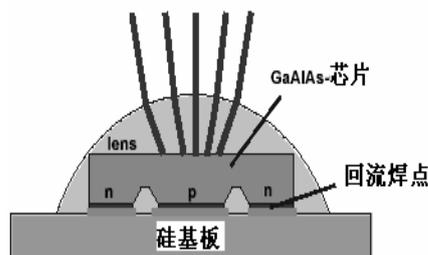


图 1-13 回流焊倒装的 LED

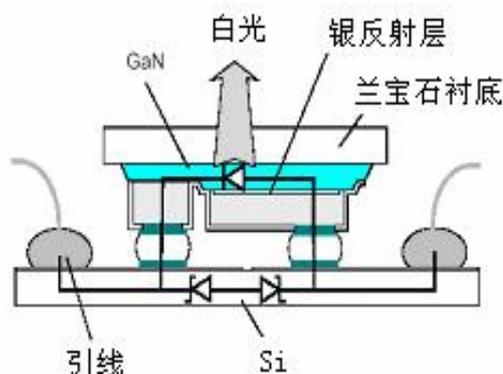


图 1-14 倒装 LED 的结构形式

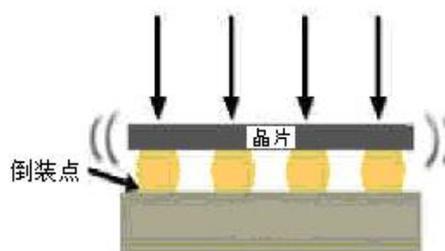


图 1-15 热超声倒装示意

由于超声能作用可以降低金属的焊接温度，可用纯金制作凸点进行封装从而将凸点的电阻降低至回流焊的 1/10，因此在照明 LED 的封装中具有很大技术优势和前景(图 1-14、1-15)。

国外，随着高密互连技术的发展，国际一流的微电子装备制造厂商 ASM，开展了热声倒装键合的研究，倒装凸点数为 8~50 个 I/O，凸点直径约 80 微米，对超声能变幅杆(或称为传能杆)采用自平衡结构，在微电子和 LED 热声倒装键合中，对解决键合过程的平行度问题取得了良好的效果[124-127]。日本 Fujikura 公司 H. Maruo, Y.Seki, Y. Unami 等人进行了高密热声倒装实验和可靠性研究[128-130]，芯片尺寸 1.5×1.5mm，650 个 I/O 凸点，直径为 35 微米。业界的研究主要是技术尝试和工艺参数的试造，其研究手段采用拉剪力键合强度测试和扫描电镜(SEM)分析，工业界在热声倒装微观层次机理和界面能量的传输和转化

方面的工作不多,但已引起了企业界的广泛兴趣,有待进行深层次的研究和高分辨高精度的微纳尺度测试和能量传递/转化的实时过程监测分析。

日本 Kanagwa 大学 Tsjino 等人正在研究多维超声传能模式高频的键合技术,并尝试高频多维超声传能焊具应用于热声倒装键合技术[131-134],但多维键合技术应用还存在相当的问题,如多维焊具与装备的协调、压电驱动相互削减等等,未应用于工业生产。

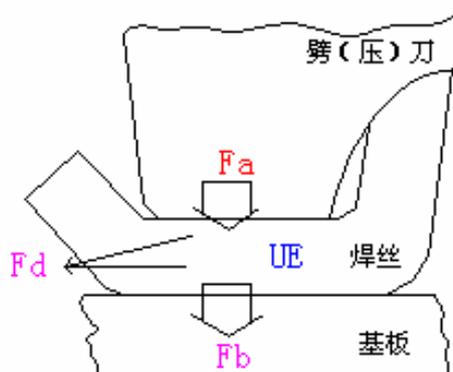


图 1-16 单点楔键合能量传递的定性模型

美国 Colorado 大学 Y.C.Lee, S.Y.Kang, P.M.Williams, L.K. Cheah 等通过试验测试研究了 8×8 I/O、 16×16 I/O、 32×32 I/O、 40×40 I/O 芯片的热超声倒装键合,进行了工艺参数的实验优化,主要研究键合工艺参数对键合剪切强度的影响[135-139],热超声倒装键合机压力加载系统也开展了研究,改变压力加载模式,有传统的杠杆式改为垂直加载,消除不平度的影响,取得了一定的效果[140]。对超声传能模式也开展了一些研究,针对倒装芯片与基板的不平行度,改变超声波的传能,由横向传振杆改用纵向的传能模式,预计可取得了一定的效果,但有待于研发一种传能高效聚合物[141],并且纵向的传能可能影响键合的可靠性。对能量传递模型的研究方面,有人进行了定性的分析(如图 1-16),其单点引线键合定性模型为 $\frac{dUE}{dt} = Fa - Fd - Fb$ [142],热声倒装点阵凸点能量规律、植球界面的双重超声作用特性、倒装界面凸点的不一致性等等,其模型远不能反应群点倒装的能量传递规律。倒装键合中,超声能激活界面材料微观特性/增进原子扩散机理、热声倒装两界面超声能传递和吸收/转化的规律和能量模型还缺乏研究,尚未形成技术的突破点。

本课题组王福亮[143]等人对热声倒装工艺参数的匹配规律研究,分别研究了超声功率、键合力、键合温度和键合时间对热超声倒装键合强度的影响规律。同时,在实验过程中采集了相关的数据,主要包括:超声功率、倒装芯片剪切强度、金凸点变形率、倒装工具末端/芯片振动过程。如图 1-17 所示:键合力、温度和时间分别为 240g、 163°C 和 100ms 条件下,随着输入超声功率的增加,倒装芯

片剪切力先增加, 达到最大值后又下降。即键合的输入超声功率存在一个区间, 也就是键合窗口, 在这个区间具有较大键合强度。键合力增加减小了输入功率, 但金凸点变形还是继续增加。键合强度先是随键合温度增加而下降, 到 123°C 是转折, 之后, 键合强度随键合温度增加而增加。键合强度先是随键合时间增加而增加, 达到最大值后又下降。即键合时间也存在键合窗口, 在这个区间的键合强度具有较大值。

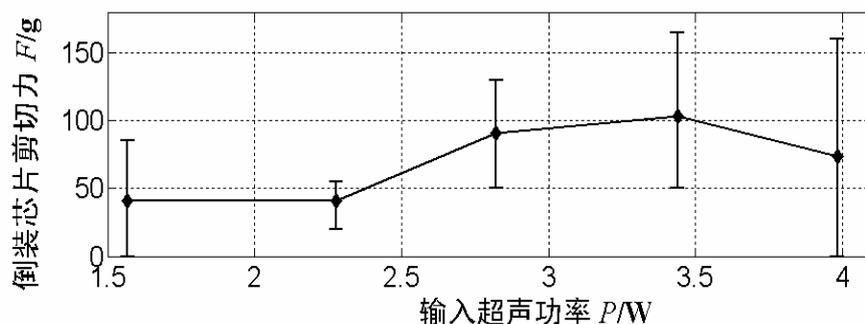


图 1-17 超声功率与倒装芯片剪切力的关系

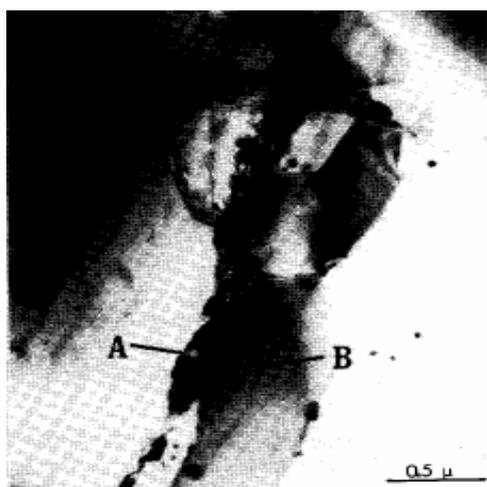


图 1-18 引线键合 Au/Al 界面微观特性

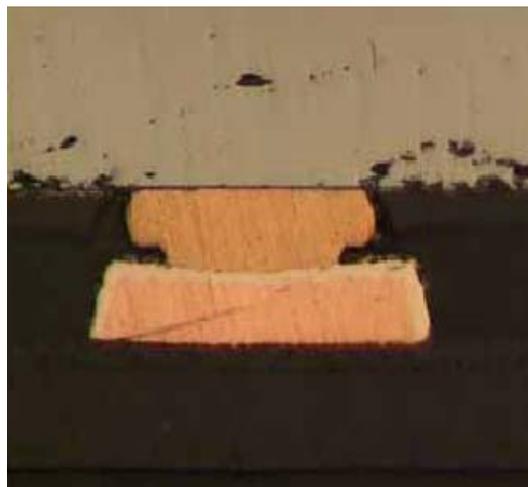


图 1-19 倒装界面的显微分析

Harman G.G.[144]等人对超声引线键合界面的扫描电镜(SEM)分析, 发现了一些重要的特性和规律, 如超声键合界面结构形如坚果状, 不同超声功率、压力、时间下引线键合界面结构的扩展规律, James E. Krzanowski [145]等人对铝线和金线超声键合界面进行过更深入的透射电镜(TEM)测试与分析, 如图 1-18 是引线键合 Au/Al 界面 TEM 微观特性。然而, 对热声倒装键合, Fujikura、ASM[146]等已研究过倒装界面 SEM 和金相显微镜特征, 能观测界面分离后的键合强度分布及其金球形变特性(如图 1-19)[147], 但, 还未利用 HRTEM 测试方法与分析手段研究热声倒装二界面行为, 显然其研究工作还需要向深度发展。

1.3 本论文研究内容

在引线键合和热声倒装键合的过程中,超声使得键合过程在极短的时间内完成键合,超声振动使键合界面发生的物理行为是实现键合的基础,认识热声倒装下超声能在“晶片-凸点”、“凸点-基板”二连接界面上传递与转化规律是解决热声倒装多界面问题的关键。国内外的微电子封装产业界和科技界对这两类基本问题的研究有许多疑点制约封装技术的发展,本论文针对这些形成主要研究内容:

1. 从微观层次深入研究超声键合界面强度生成机理与规律,探索超声作用下材料的微观缺陷的变化行为,进行界面扩散的高分辨透射电镜下的定量测试,形成超声键合强度产生机理模型。
2. 分析键合界面分离的 SEM 特性与界面强度的空间构成,并对其特性进行有限元仿真分析。
3. 采集超声驱动实时的信号,研究超声转化的功率/阻抗特性,分析超声功率曲线的各阶段特征,探索强度生成与超声实时功率/振动的相关性。
4. 建立热声倒装实验平台,研究热声倒装界面的微观结构现状与性能关系,寻找热声倒装二连接界面形成的特点与能量转化规律,揭示多界面超声能量传递/转化本质,并建立相关的数理模型。

通过键合界面的微观机理研究和高分辨微观测试分析,阐明超声键合快速形成的物理本质、键合过程超声能传递/转化的实时特性和热声倒装的多界面规律,为超声键合的微界面强度设计、新工艺思路、键合装备的参数设计与优化、键合过程的实时监测等提供理论基础。

第二章 超声键合界面快速形成机理

超声键合界面生成机理是一种非常复杂的物理行为,也是研究者们非常感兴趣的过程,已有的研究从不同的角度(高频摩擦、超声振动、超声软化、界面温升等)观察各种的现象,并建立其分析模型解释键合机理,还没有一种模型能获得满意的解释,对键合界面快速形成的微观物理本质还相当欠缺。实际上,微键合点连接界面的微观结构的改变涉及到超声能、热能、机械能联合作用下界面材料微观粒子行为从一种状态变化到另一种状态的启动过程与终结,本文拟通过观察界面的结构和生成微结构必须的条件,来认识外能场对界面物质的作用机制。在对超声键合界面微结构进行高分辨透射电镜(HRTEM)测试分析中,观察到材料位错密度增加,使用非接触式高频型激光多普勒测振仪(PSV-400-M2)测试高频(60KHz)超声振动位移、速度和加速度数据,和超声功率曲线在键合过程的变化特性,获得超声能的特性参数及其与键合材料耦合作用后的变化,运用扩散理论,分析键合温度下表面扩散、位错扩散行为,提出了超声键合过程的快速扩散形成机理,并建立其定性的机理模型。

2.1 超声振动激活金属材料位错的观察

2.1.1 超声能激活金属材料晶格位错

(1) 超声作用基本实验与分析

实验设计

在微电子芯片中,由于铝具有很好的台阶覆盖性和可刻蚀,铝被广泛应用于集成电路(IC)芯片的金属化内连接和外互连的焊盘。本文进行了对高温退火的铝在超声作用前后的晶体微观结构变化观察实验。

在 U3000 型粗铝线超声键合机上进行超声实验,键合机的主要工作过程是:超声功率源将普通工频电信号转换成主频约为 60kHz 的高频电信号,通过 PZT 的逆压电效应,电信号转变为高频振动,通过变幅杆传送到劈刀,当劈刀加超声功率时,呈垂直安装的劈刀在水平方向产生机械振动。同时劈刀对铝丝还作用有压力,金属丝吸收两种能量实现键合,产生塑性形变,同时去除铝表面的氧化膜,暴露出洁净的表面,使界面金属直接紧密接触,最终形成牢固的机械连接,其超声功率,时间,压力等影响键合强度的参数均可通过前面板旋钮进行调节,参数如下:

- ◆ 使用电源：220VAC \pm 10%、50Hz、可靠接地，最大消耗功率 200W
- ◆ 可焊铝丝线径：75~500 μ m
- ◆ 超声波：
 - 超声功率：小档 0~10W，中档 0~30W，大档 15~60W。2 通道(即一、二焊可分别调节)精密调节
 - 焊接时间：10~500ms，2 通道精密调节
 - 频率：55~65kHz，自动跟踪换能器谐振频率进行调节。
- ◆ 焊接压力：30~1200g，2 通道精密调节
- ◆ 一焊至二焊自动跨度：0~15mm
- ◆ 工作台移动范围： Φ 20mm
- ◆ 外形尺寸：620 \times 610 \times 560mm
- ◆ 重量：约 40kg

把预先经过高温退火(800 $^{\circ}$ C, 2 小时)的 0.5mm 厚的铝板，在键合机上按真实键合超声能参数进行实验, 超声功率 10W, 超声频率 60KHz, 作用时间 400ms, 压力 5.0N;

对高温退火的铝板与高频超声处理的铝板，分别进行了 TEM 样品的制作，先将铝板样品研磨致约 200 微米厚，采用电解溶液(盐酸+酒精)在液氮的保护下进行电解双喷减薄。



图 2-1 F30 型高分辨透射电镜(HRTEM)

分别对二种样品进行透射电镜(TEM)微观测试分析，透射电镜测试选用 F30 型高分辨透射电镜(HRTEM)(如图 2-1)：场发射高分辨透射电镜是目前国际一流的电子显微镜，代表了当今世界电子显微学的最高、最新水准，有以下独特优点：

- a) 场发射枪电子源的单色性好，相干性高，因此，①信息分辨率高，结合图象处理，可获得更高的空间分辨；②可实现相干会聚束衍射(CCBED)；③可进行电子全息研究 (Electron Holography)，允许对局域磁通的直接观察；

- b) 场发射枪亮度高，束流大，电子束斑小，直径最小 1 nm 的微小束斑可得到 1nA 的束流，其亮度是 LaB6 灯丝的 100 倍。它可以做纳米束电子衍射(NBED)和纳米区域的 X 射线成份分析(EDS)。
- c) 场发射枪电子源的能量发散度小，约为 LaB6 灯丝的 1/5，配备电子能量损失谱仪(EELS)后就能直接分析样品纳米区域内元素的价键状态、配位状态、电子结构、电荷分布，可得到清晰的能量过滤象和元素分布象。

另外，新的电镜还配备了慢扫描 CCD 探头，实现图象数字化，可进行图象存储、图象实时处理及模拟计算等，有利于开展定量电子晶体学研究，并与信息时代平台接轨，加快图象信息的传输与交流。

其主要技术参数：

- 点分辨率： 0.205 nm point at 300kV
- 线分辨率： 0.102 nm line at 300kV
- 信息分辨率： 0.15 nm information limit
- 带有 EDS 能谱扫描功能(STEM)。STEM 模式为本论文的超声键合界面互扩散(纳米级)的高分辨测试提供了重要可靠的测试手段。
 - STEM 模式： 0.20nm edge (BF/DF)
 - EDAX Mn Ka: 130.8 eV
 - EELS 零损失峰能量分辨率： 0.8 eV

结果分析

测试结果表明：未经超声能作用的铝板的位错分布如图 2-2，其位错是零散稀疏分布；超声能作用后的铝板位错如图 2-3，其位错密度明显增加，形成稠密位错网，图 2-3 还可见一些黑点，他们是位错线在表面的露头。

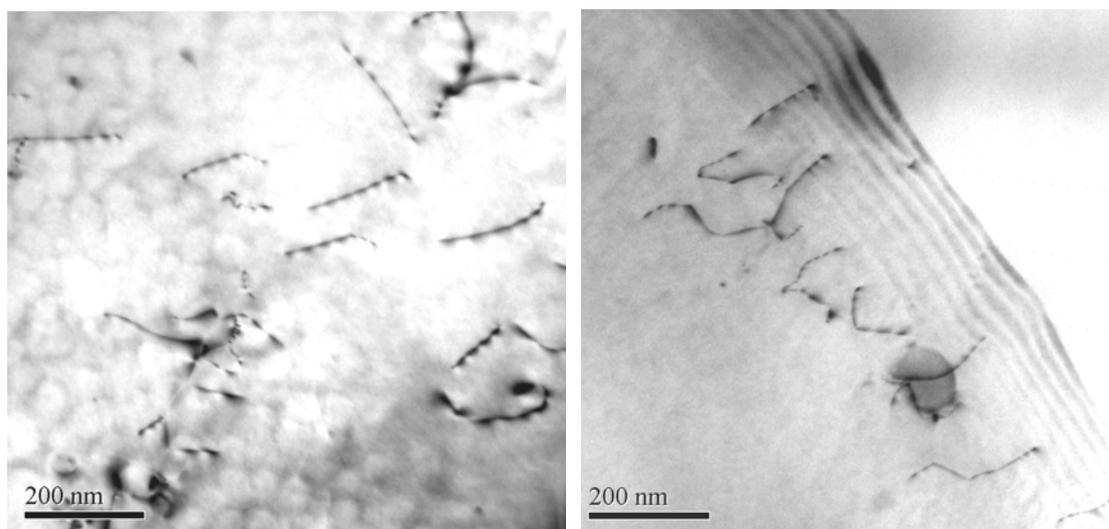


图2-2 未经超声作用的铝在TEM电镜下的位错状态

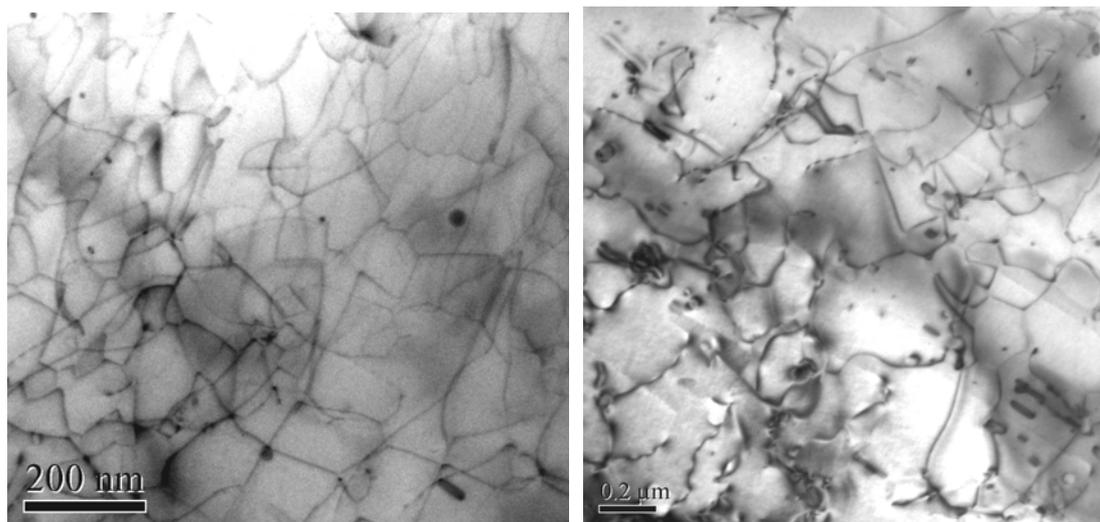


图2-3 超声作用后铝中生成的高密度位错网与位错露头

(2) 超声键合实验与分析

实验设计

微电子芯片的I/O连接点一般是铝焊盘，通过蒸发工艺淀积的铝膜，其铝层厚度为1—2μm，刻蚀后的焊盘大小为100×100μm(图2-4)，超声键合的材料体系如图2-5，超声键合台为T/S-2100金线键合机和U3000型铝线键合机集成的平台如图2-6，进行芯片的超声键合实验，实验中使用的超声键合的工艺条件为：超声频率60KHz，功率2W，压力50g，时间400ms。键合后的金球直径约80μm，如图2-4，芯片大小为1×1mm。

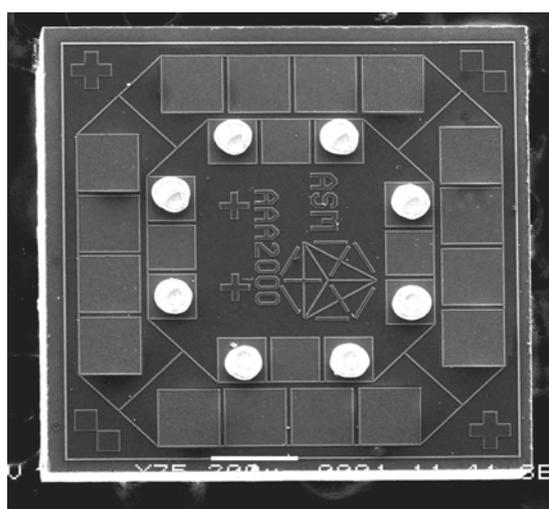


图2-4 金球超声键合的芯片

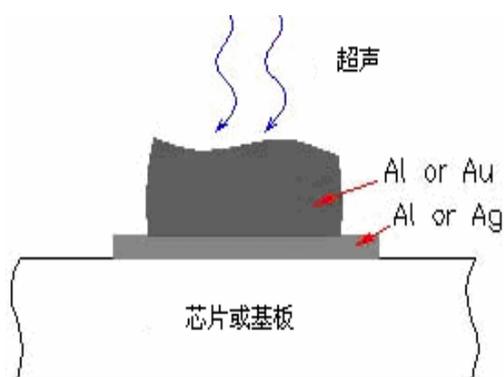


图2-5 超声键合的材料体系

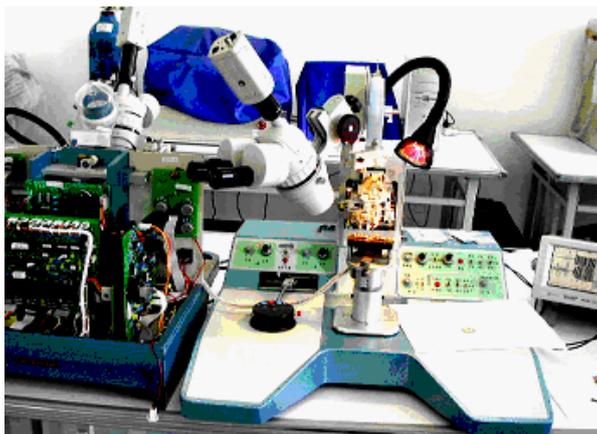


图2-6 超声键合实验台

约80 μm 超声键合点界面TEM样品的制作采用常规的研磨是无法得到需要分析的界面，本实验设计一种包埋法制作微小键合点的TEM观测样品，即：

由于透射电镜的标准样品要求直径为3.0mm，因此须对测样品加工处理使其符合要求。样品经一种环氧树脂胶(Epotech H20E)填充包埋处理后，胶充分干后打磨成约2.5mm直径的条状试件(要尽量使待观察区处于中心部位)，接着放入一外径为3.0mm，长约为8mm的铜管并灌满与前述同样的树脂胶，并使胶干透。用线切割(SBT 850)把铜管锯成约0.5mm厚的薄片。再把这些薄片小心的打磨至25~50 μm 厚。值得注意的是由于需要观察的是80 μm 的键合点区域，必须边磨边观察，在400X的显微镜下观察是否磨到了金凸点。最后是用Gatan 691型精密离子减薄仪减薄直到金凸点键合区有部分被减穿孔。到这时，该样品就可用透射电镜观察Au/Al界面了。

超声未作用的芯片样品也是同样的包埋法制作。

对芯片的铝层在超声键合前后分别进行F30型TEM测试。

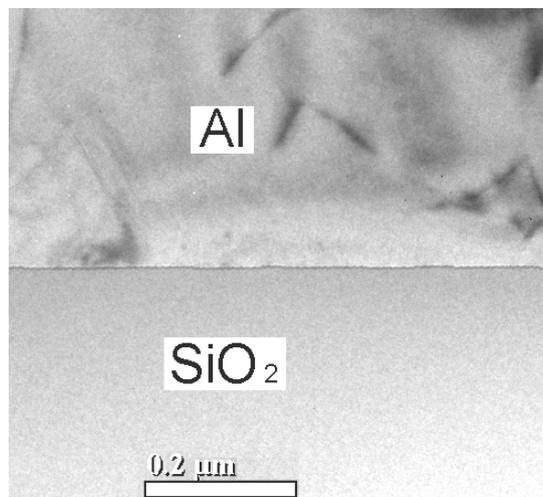


图2-7 没有超声作用的芯片铝膜的位错分布

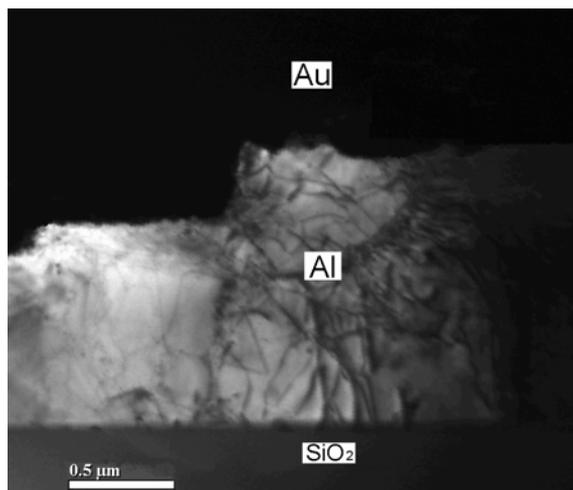


图2-8 超声键合后的芯片铝膜的稠密的位错网

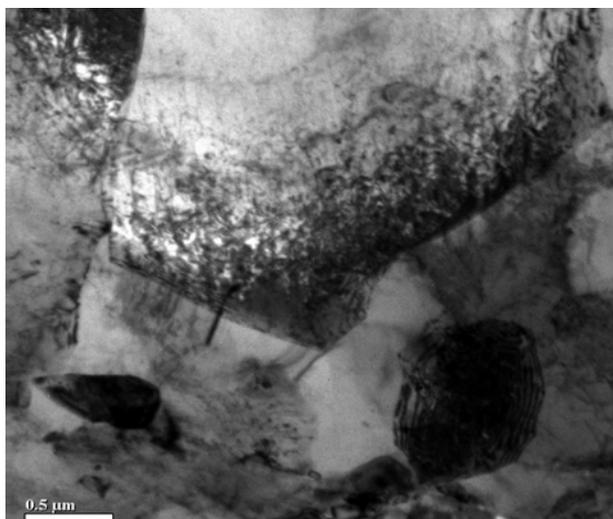


图2-9 超声键合后的Au晶格位错情况

结果分析

TEM测试结果分析：图2-7表明超声作用之前材料位错分布非常稀疏，图2-8表明超声作用之后材料位错分布致密，超声振动增加键合界面材料的位错密度，且在Au/Al连接界面形成稠密的位错网，图2-7、图2-8中的SiO₂层是一种疏松的海绵状物质没有观察到位错，图2-8中的Au的位错情况可在一些薄区显示，如图2-9是超声作用之后实验TEM样品薄区的Au的位错分布情况，位错沿着晶界稠密。

2.1.2 高频超声振动加速度与位错

利用 PSV-400-M2 高频(1.5M)型激光多普勒测振仪对超声键合劈刀的尖端进行测试，其高分辨率、高响应速度以及非接触式测量的特点能很好的满足实验

对速度的监控要求，可以测量超声振动的速度、加速度以及质点的位移。

PSV-400-M2 高频型(1.5MHz)扫描式多普勒测速仪测试参数具体如下：

- ◆ 摄像头：扫描角度分辨率<0.002 度，自动聚焦彩色摄像，72 显微放大倍数。扫描速度<100points/s。
- ◆ 控制卡：速度测试范围：5/25/125/1000mm/s/V，5kHz、20kHz、100kHz,以及 1.5MHz 量程的四通道模拟低通滤波器，远程序数据处理程序的 R232 接口。
- ◆ 数据处理系统：2 通道, 1 MHz 带宽。
- ◆ 数据采集系统：四通道同时数据采集，采集方式：FFT、zoom-FFT、fast scan、 multi frame、time mode。触发方式：内部、模拟、预触发、以及后触发。
- ◆ 数据对象：速度、位移、加速度等，以谱或时域信号形式显示或保存。
- ◆ 信号发生器：输出多种形式的信号，包括正弦、余弦、扫频等信号。
- ◆ 数据精度：速度 <1nm/s-30m/s，加速度 1,000,000g 以上，振幅 1-10m 以上。

本文多普勒测速系统见图 2-10。



图 2-10 PSV-400-M2 扫描式多普勒测试系统

振动测试采样频率设置为512KHz，每个振动周期采样8-9个点，当键合超声功率设定为2W时，其工具端点振动速度测试结果如图2-11，启振初期存在一个非线性的过渡阶段，其过渡时间大约8ms，对稳定阶段进行展开如图2-12，振动速度峰值为 $B=1.3\text{m/s}$ ，振动速度曲线是光滑的正弦曲线，可表示为：

$$v_{(t)} = B\sin(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}) \quad (2-1)$$

其中， B 为振速振幅， ω 为角频率， φ 为相位角。

对图2-11的快速傅立叶变换获得振动速度的频域特性如图2-13, 振动频率为62.73KHz, 所以

$$\omega = 2\pi f = 2 \times 3.14 \times 62.73 \times 10^3 \approx 3.94 \times 10^5 \quad (2-2)$$

根据正弦曲线振动速度与加速的关系, 振动加速度是振动速度的导数:

$$a_{(t)} = \frac{dv_{(t)}}{dt} = B\omega \cos(\omega t + \varphi) \quad (2-3)$$

∴ 高频振动加速度的峰值为

$$a = B\omega = 1.3 \times 3.94 \times 10^5 = 5.122 \times 10^5 (m/s^2) \quad (2-4)$$

振动加速度结果表明高频超声振动加速度是重力加速度的5万多倍, 高频高加速度产生强的机械效应, 一方面, 可使材料表面的脆性氧化物和污物去除, 清洁材料表面, 为界面原子扩散提供洁净的环境条件, 另一方面, 具有高加速超声效应激活晶体内部缺陷, 使得材料位错密度明显增加。

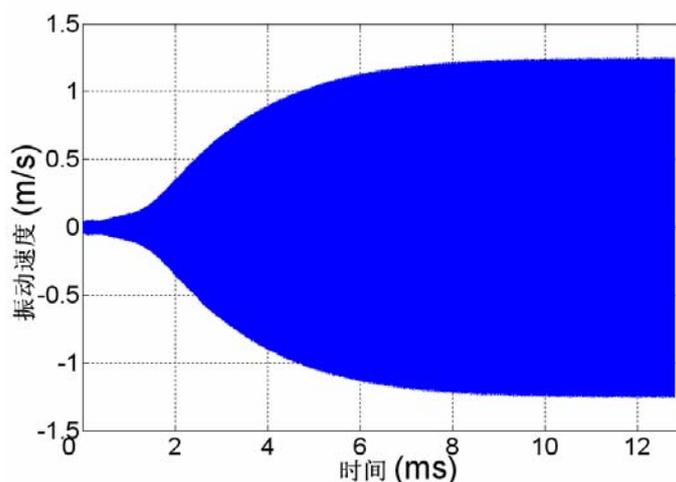


图2-11 键合工具末端高频振动测试结果

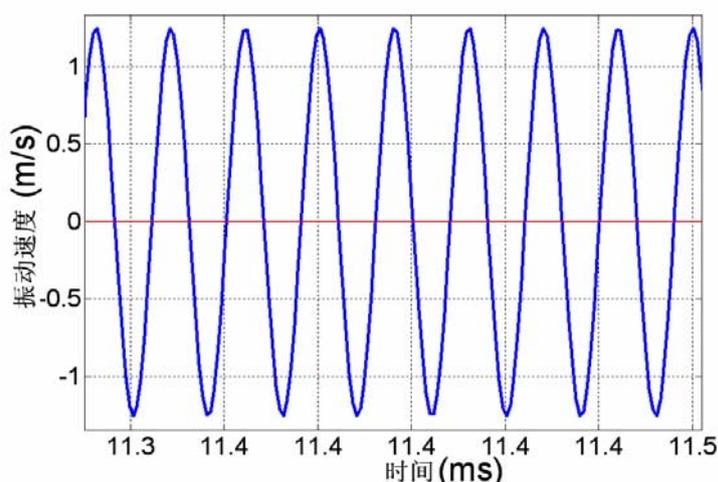


图2-12 从11.3~11.5ms振动速度曲线图形

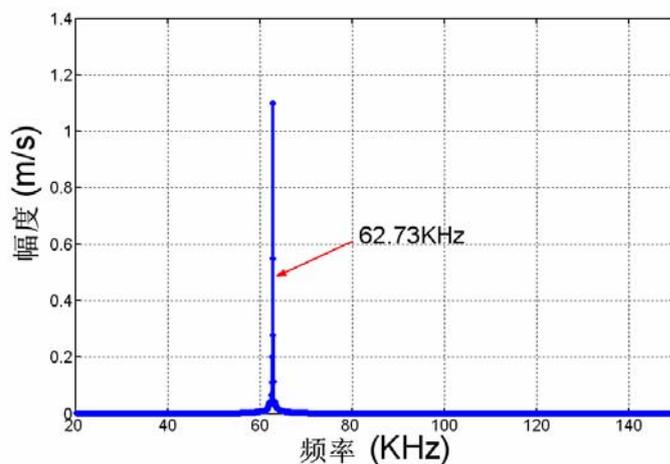


图2-13 振动速度的频域分析(FFT)

2.2 原子扩散体系的激活能及快速通道机制

2.2.1 原子扩散体系的激活能

根据扩散规律(图 2-14)[148]: 菲克第一定律 $J = -D \cdot \frac{dC}{dx}$ (2-5)

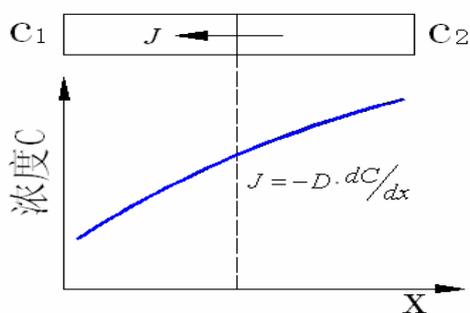


图 2-14 扩散定理

J 为扩散通量, 常用单位是 $g/(cm^2 \cdot s)$ 或 $mol/(cm^2 \cdot s)$, D 为扩散系数, $\frac{dC}{dx}$ 为浓度梯度。

扩散规律表明: 扩散速率取决于扩散体系的性质 D 和外界条件 $\frac{\partial C}{\partial x}$ 。

D 是一个很重要的参数: 单位浓度梯度、单位截面、单位时间通过的质点数, D 取决于质点本身的性质: 半径、电荷、极化性能等, 基质: 结构紧密程度, 晶格缺陷。

$$D = D_0 e^{(-Q/RT)} \quad (2-6)$$

其中, Q 为扩散的激活能, R 为气体常数。 $R=8.31J/mol \cdot K$, T 为温度。

Q 是原子跃迁时所需克服周围原子对其束缚的势垒。不同的扩散机制的 Q 相差较大。

原子扩散体系主要包括：体扩散(晶格扩散)、晶界扩散、位错扩散、表面扩散等形式。

对银扩散体系的扩散系数[149]:

- 银的体扩散系数:

$$D_L = D_{L0} e^{(-Q_L/RT)} = 0.895 e^{(-45950/RT)} \quad (2-7)$$

- 银的晶界扩散系数:

$$D_g = D_{g0} e^{(-Q_g/RT)} = 0.03 e^{(-20200/RT)} \quad (2-8)$$

- 银的位错扩散系数:

$$D_{dis} = D_{dis0} e^{(-Q_{dis}/RT)} = 0.14 e^{(-19700/RT)} \quad (2-9)$$

- 银的表面扩散系数:

$$D_{sur} = D_{sur0} e^{(-Q_{sur}/RT)} = 0.16 e^{(-10300/RT)} \quad (2-10)$$

其中，表面扩散、位错扩散、晶界扩散、体扩散的激活能分别为 10300cal/mol、19700cal/mol、20200cal/mol、45950cal/mol，所以，Ag 扩散体系中各种扩散的激活能之比约为：

$$Q_{sur} : Q_{dis} : Q_g : Q_L = 1 : 2 : 2 : 4.5 \quad (2-11)$$

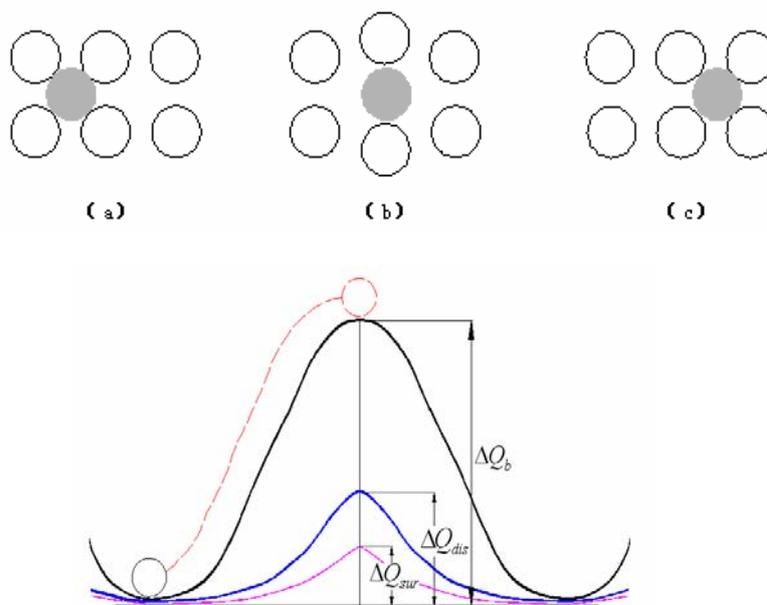


图 2-15 原子扩散体系粒子跳跃势垒示意图

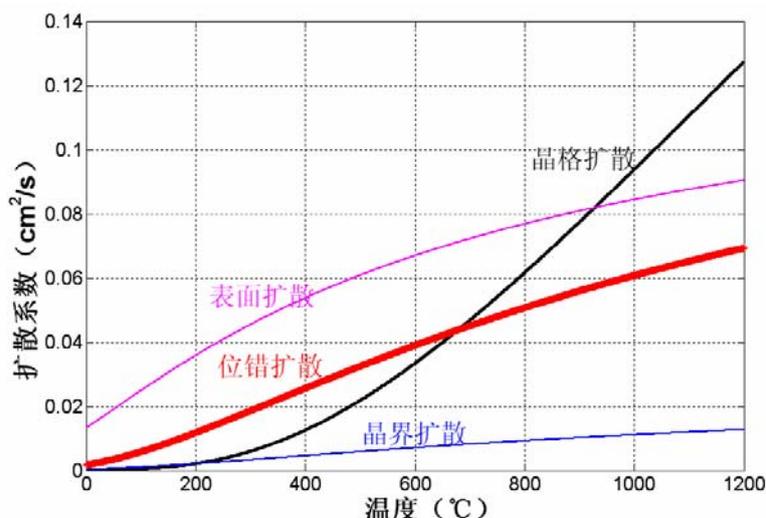


图 2-16 Ag 扩散体系扩散系数变化曲线

原子扩散体系粒子跳跃势垒因晶格结构畸变而不同如图 2-15，各种扩散所需的激活能有较大的差异，晶格扩散的激活能是位错扩散、晶界扩散的 2.5 倍，是表面扩散的 4.5 倍，根据扩散系数方程计算它们与激活能 Q 、温度 T 的关系曲线(如图 2-16)，图 2-16 表明：晶格扩散(体扩散)系数还强烈依靠温度，当温度较低时，体扩散相对困难，只有在高温下才产生较快的体扩散；在较低温条件下，位错扩散、表面扩散系数比晶格扩散系数大得多，起着重要作用。

扩散对微结构状态敏感，晶体中的缺陷使结构较疏松，构成原子易于扩散的通道。在高温下，原子沿着正常途径迁移，这时高导性的通道作用并不显著。但在低温时，热激活太弱，难于通过正常途径进行扩散，但是沿着晶体缺陷扩散所需的激活能较低，因而扩散主要沿着晶体缺陷进行。

测试发现超声作用界面材料位错密度剧增，表明界面键合过程的温度没有达到过退火温度，否则界面材料就会退火，位错缺陷减少，所以界面超声键合是在回火温度以下进行的扩散键合。

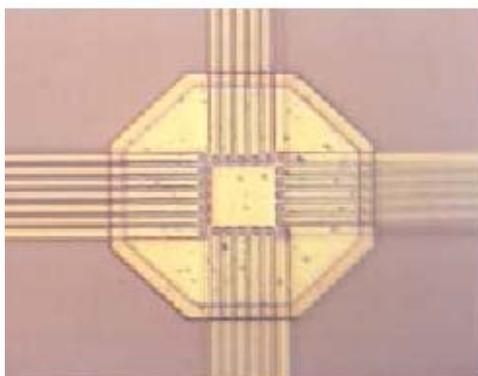


图 2-17 MENS 制造的 24 个 6 μ m 微传感器[150]

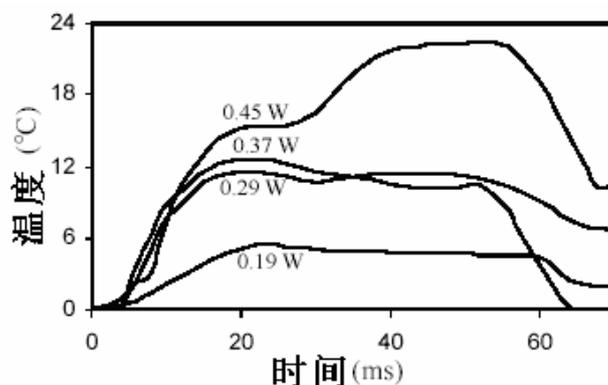


图 2-18 金线键合界面温升曲线[150]

从 G.G. Harman 对超声键合界面升温进行过微测试[150]，他为采集 80 μ m 键合点的温度信号，用 6 微米的微热电偶传感器通过 MENS 方法在微键合点设置 24 个传感器(图 2-17)，已测试过超声金线键合界面温升范围为 10-30 $^{\circ}$ C(图 2-18)，铝线键合界面温升范围 70-80 $^{\circ}$ C。此时不可能产生熔融焊接。

位错密度增加，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。材料表面原子晶格不完整如图2-19、图2-20，所以其激活能是最低的。

另一方面，超声能初始起振阶段，超声能去除材料表面的氧化物和污物[154]，使基体裸露出晶格不完整的原子扩散激活能低的表面。所以形成键合初期存在强烈的表面扩散，但随着键合过程的扩展，两表面面积逐渐结合而减小，随后界面发生的主要是位错扩散。

所以，超声键合过程位错/表面扩散起着重要的作用。

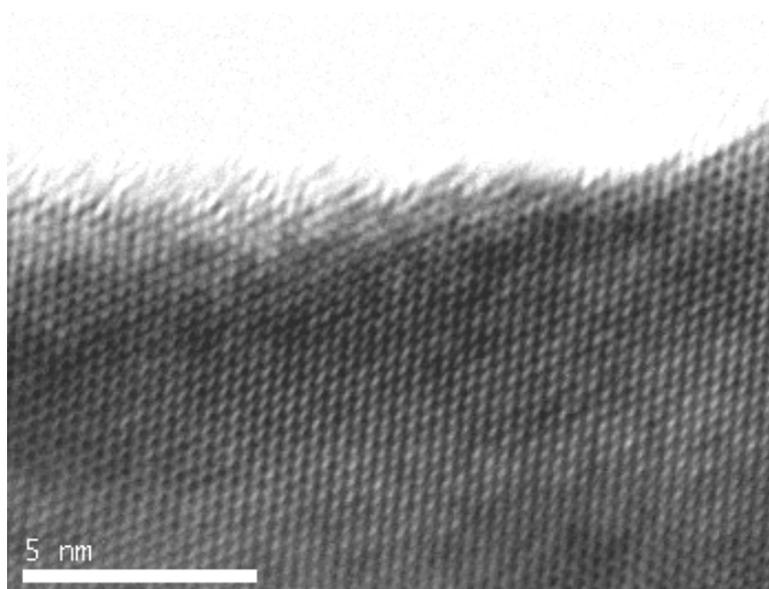


图2-19 金属材料表面的原子排列

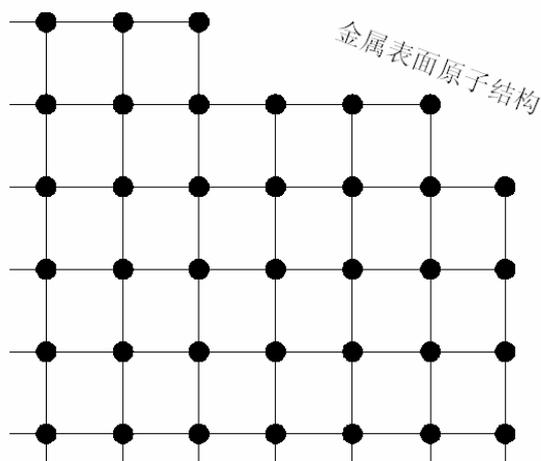


图2-20 表面的原子结构的描述图

2.2.2 位错管道快速扩散形成机制

根据扩散理论，在扩散体系中，位错扩散、表面扩散、晶界扩散，称为“短路扩散”，不仅它们的激活能比晶格扩散的激活能低，而且短路扩散比体扩散快得多。

体扩散的微观机制有间隙机制，换位机制和空位机制[151]。

间隙机制如图2-21所示。一些间隙原子通常以图2-21a的方式扩散。间隙机制首先需要原子脱离晶格正常位置，成为脱位原子(间隙原子)；然后处于间隙位置的脱位原子将邻近的结点上的原子挤到间隙位置，自己占据结点位置如图2-21b、c。

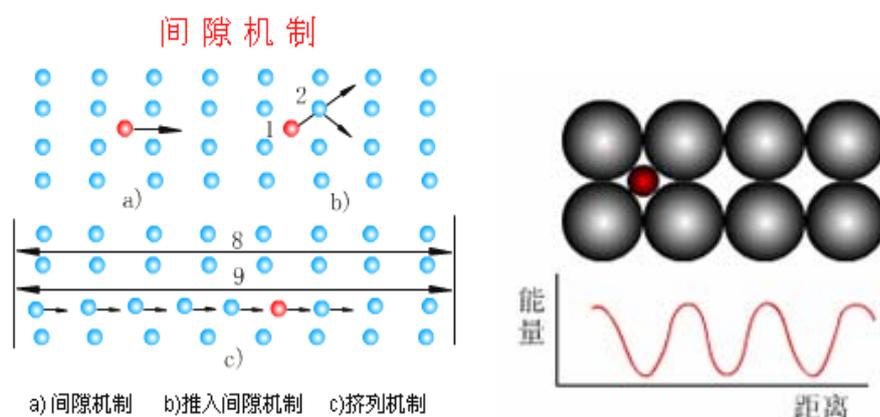


图2-21 间隙机制模型

换位机制如图 2-22 a、b 所示，可以是双原子换位，也可以是轮转换位。空位机制(图 2-22c)实际上可看成是换位机制中的一步。交换机制会引起交换原子附近晶格强烈畸变，扩散激活能大。

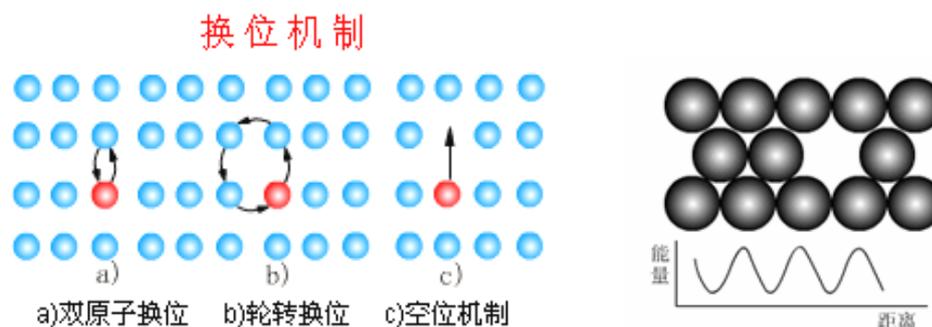


图2-22 换位机制和空位机制模型

上述三种机制下的体扩散的激活能高，对 **Ag** 而言，其激活能为 45950cal/mol ，扩散通过原子一个一个的传递，扩散速率也低。

位错是一种线型的晶体缺陷，根据位错理论，位错包括：刃位错、螺位错、混合位错。

刃位错，图2-23刃位错在高分辨透射电镜(HRTEM)下图片，示意描述为图2-24，“ \perp ”处为刃位错位置缺半个原子面，晶体中多余的半原子面好象一片刀刃切入晶体中，在多余半原子面这一边，原子间距缩小，受到压缩变形，在另一边原子间距增大，受到膨胀变形，位错两侧的晶面稍有倾斜，形成剪切变形，既有正应变，又有切应变，沿着半原子面的“刃边”，形成一条间隙较大的细长“管道”，该“管道”周围附近的原子偏离平衡位置，原子规则排列受破坏，造成晶格畸变，能量高，畸变在位错中心处最大，随着距离的增大逐渐减小，原子严重错排的区域约3-5个原子的间距，位错是沿位错线为中心的一个管道，位错的长度却有几百至几万个原子间距如图2-25，位错线不一定是直线，可以是折线或曲线，所以，刃型位错包括“管道”及其周围晶格发生畸变的范围。超声振动增加位错密度，一方面使得扩散的激活能降低，另一方面，形成了原子沿位错快速扩散通道。

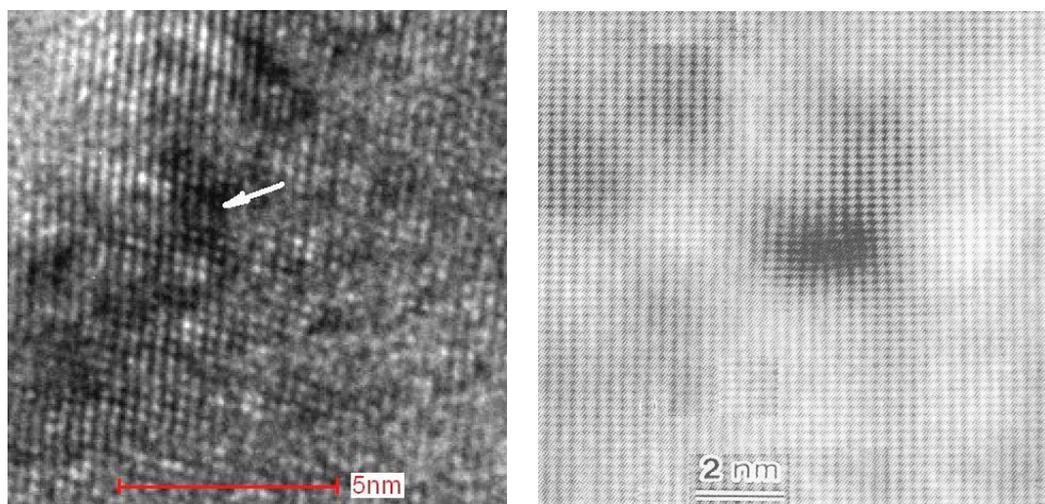


图2-23 刃位错的HRTEM图片

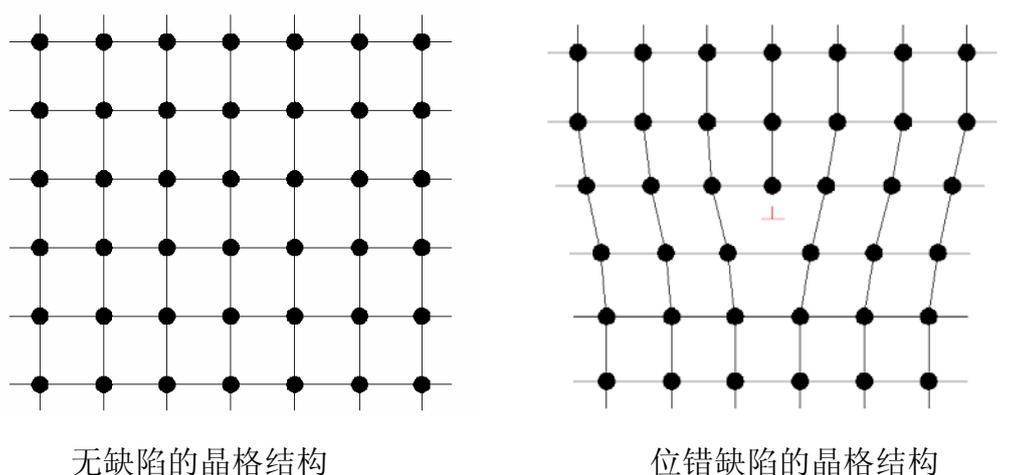


图 2-24 刃位错的描述图

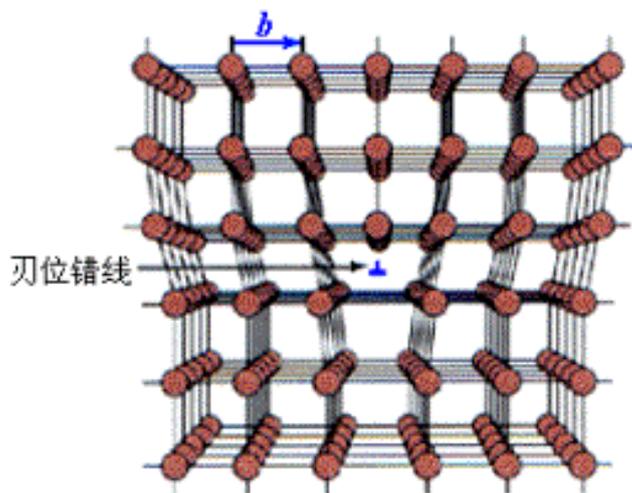


图 2-25 刃型位错的原子组态[152]

螺位错是上半部分晶体相对于它下面的晶体移动了一个原子间距，原子错排呈轴对称，在晶体已滑移和未滑移之间存在一个过渡区，在这个过渡区内的上下二层的原子相互移动的距离小于一个原子间距，因此它们都处于非平衡位置。这个过渡区就是螺型位错，也是晶体已滑移区和未滑移区的分界线，把过渡区的原子依次连接起来可以形成“螺旋线”，螺位错周围的点阵也发生了弹性畸变。

混合型位错是由刃型位错和螺型位错混合而成的(图 2-26、图 2-27)，其特点：原子排列介于螺型位错与刃型位错之间，由以上三种位错的原子排列示意图可以看出，位错区的原子处于从一个平衡位置向另一个平衡位置过渡的非平衡位置上，位错运动时，这些原子逐步到达新的平衡位置，而前方原来处于平衡位置的原子有些要偏离平衡位置。

位错除相互作用外，还可能发生分解或合成，即位错反应。

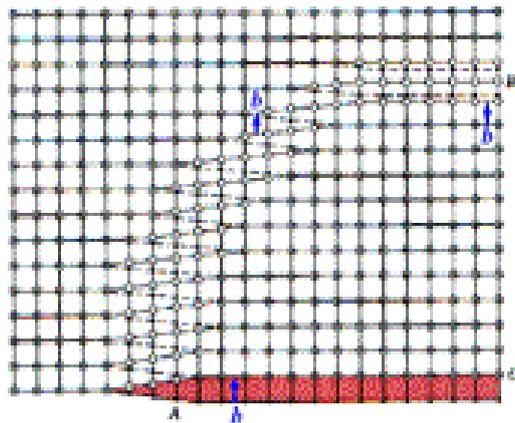


图 2-26 混合位错

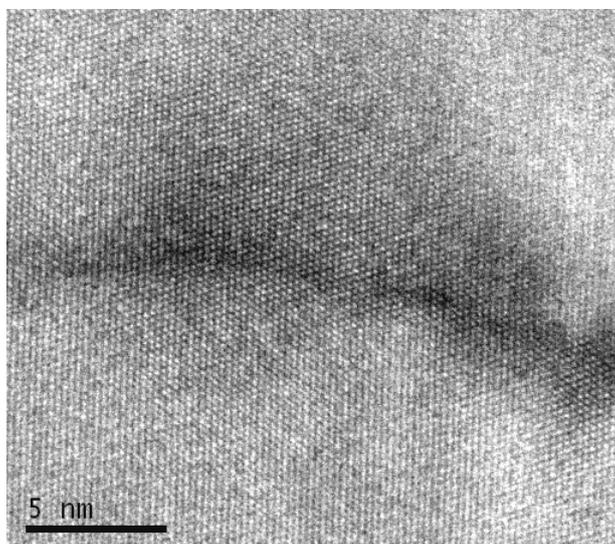


图 2-27 混合位错的 HRTEM 特性

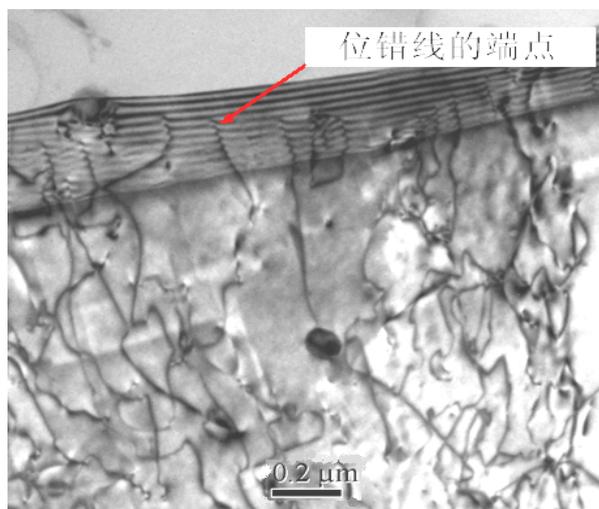


图 2-28 位错线在晶界和表面的露头

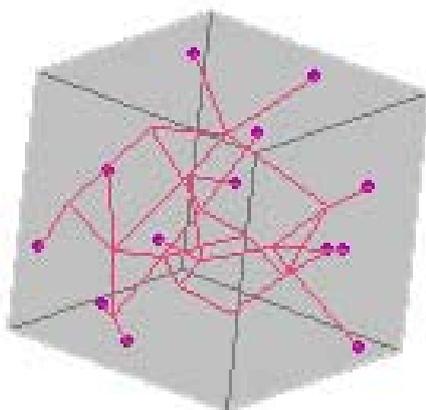


图 2-29 三维的位错网

位错另一特点：实际晶体中的位错线不能一段一段地孤立存在，也不能终止在晶体内部，而只能终止于晶体表面或晶界上如图 2-28。在晶体内部位错线一定是或者自身封闭成一个位错圈，或结成网状如图 2-28，图 2-29 是三维的位错网模型图。

位错缺陷，使位错区的原子都会因晶格畸变，而处于高能状态，对邻近可能产生跃迁的原子所施加的束缚作用较弱，也就是说原子跳动所需克服的阻力较小，易于扩散，一般而言，位错扩散的激活能只有晶格扩散激活能的一半，其二，原子沿着在位错管内扩散或沿着位错线扩散，形成原子扩散的快速通道，并且晶体内部位错通道与晶界和表面相通，超声键合过程中激活的原子通过位错通道迅速达到表面和晶界，并快速扩散到对方，渗入对方的高密晶格位错通道，形成界面快速键合。

2.2.3 位错的滑移特性分析

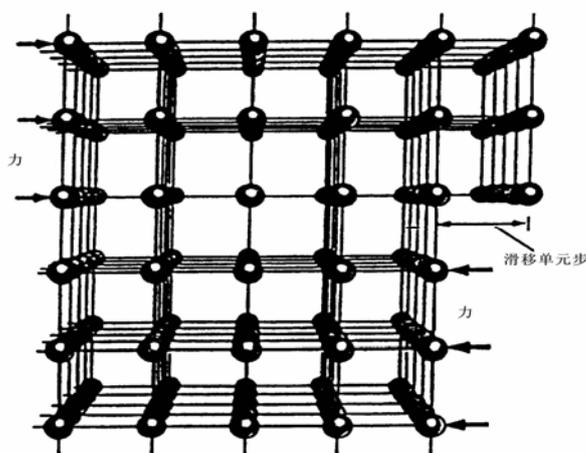


图 2-30 在剪切力作用下位错运动与在晶体表面滑移的形成[153]

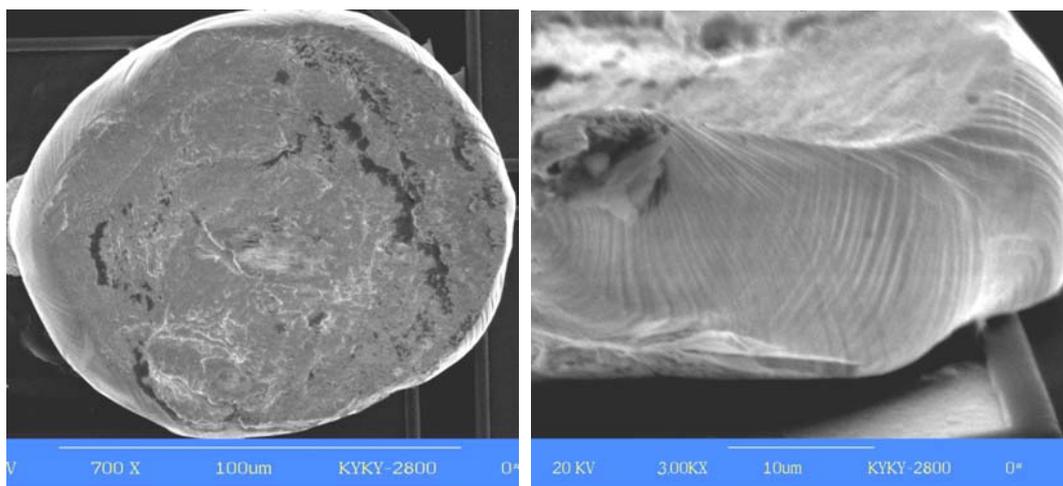


图 2-31 键合材料表面发生的滑移

滑移是位错运动的结果，如图 2-30，位错是晶体已滑移区与未滑移区的分界线，图 2-31 是超声键合金球的扫描电镜图片，可见超声键合点表面出现众多的滑移线，超声激活位错在材料表面表现为滑移线。

刃型位错的运动——两种方式：滑移、攀移。

位错的滑移，位错线在滑移面上的运动，位错处于低能量状态，位错必越过一势垒才能前进。位错移动受到一阻力——点阵阻力，又叫派-纳力 (Peirls-Nabarro)，此阻力来源于周期排列的晶体点阵。派-纳力 (τ_p) 实质上是周期点阵中移动单个位错所需的临界切应力，近似计算得：

$$\tau_p = \frac{2G}{(1-\nu)} \cdot \exp\left(-\frac{2\pi W}{b}\right) = \frac{2G}{(1-\nu)} \exp\left[-\frac{2\pi a}{(1-\nu)b}\right] \quad (2-12)$$

式中 b 为柏氏矢量的模， G ：切变模量， ν ：泊松比， W 为位错宽度， $W=a/1-\nu$ ， a 为面间距。通过位错滑动而使晶体滑移， τ_p 较小一般 $a \approx b$ ， ν 约为 0.3，则 τ_p 为 $(10^{-3} \sim 10^{-4})G$ ，仅为理想晶体的 $1/100 \sim 1/1000$ 。

表 2-1 材料滑移临界应力

材 料	滑移临界应力 MPa	滑移系
Ag	0.37	{111}<110>
Al	0.79	{111}<110>
Cu	0.49	{111}<110>
Ni	3.24-7.17	{111}<110>

一个滑移面和其面上的一个滑移方向组成一个滑移系，当外界应力达到某一临界值时，滑移系发生滑移，使晶体产生宏观的变形，将这个应力称为临界切应力，从图 2-32 可知，材料(Al)滑移的临界应力 $< 1\text{MPa}$ ，图 3-33 是在压力 30g，超声振幅 100nm 时界面材料内应力的有限元计算结果，剪切应力最大值为

9.74MPa，远超过了材料滑移的临界值。

从表面发生的滑移特性也可推测键合过程材料内部发生的位错行为，也是超声位错扩散成形机制的又一特性表征。

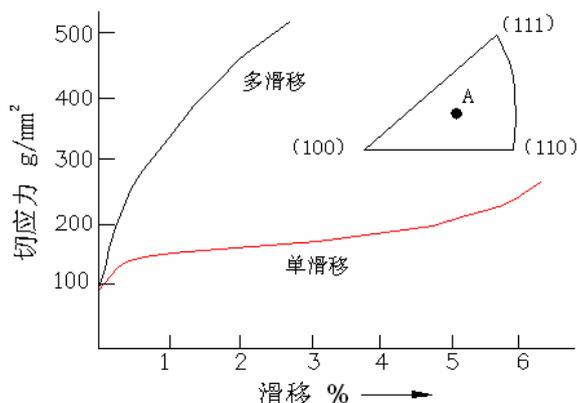


图 2-32 Al 滑移与应力的关系(100g/mm²=1MPa)

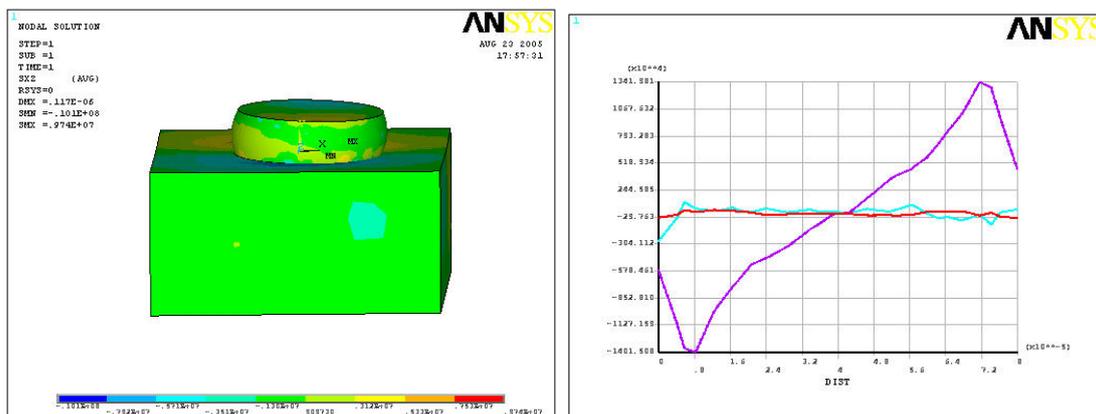


图 2-33 剪切应力的有限元计算结果

2.3 超声界面快速扩散通道机理

2.3.1 超声键合界面快速通道扩散机理

(1) 界面互扩散的驱动力

系统内部的物质在浓度梯度、化学位梯度、应力梯度的推动下，导致界面原子定向迁移，从宏观上表现为物质的定向输送，根据扩散定理： $J = -D \frac{\partial C}{\partial x}$ ，浓度梯度 $\frac{\partial C}{\partial x}$ 是主要的推动力，如图 2-34，成分最终趋于均匀，即 $\frac{\partial C}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial u}{\partial x} \rightarrow 0$ ， $\frac{\partial u}{\partial x}$ 为扩散速度。如图 2-35 是压力与超声作用下的应力场分布，图中是应力的向量方向，其方向是彼此指向对方，使得界面原子彼此扩散渗透到对方。

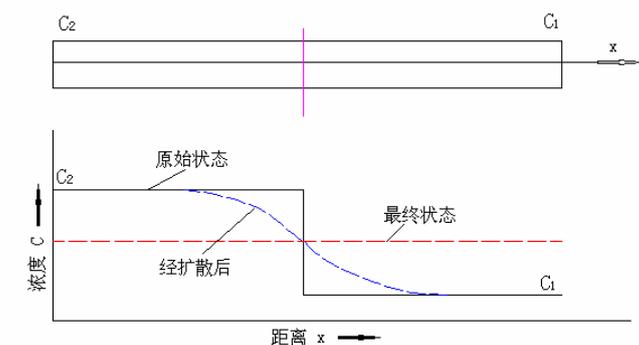


图 2-34 互扩散的浓度梯度驱动力

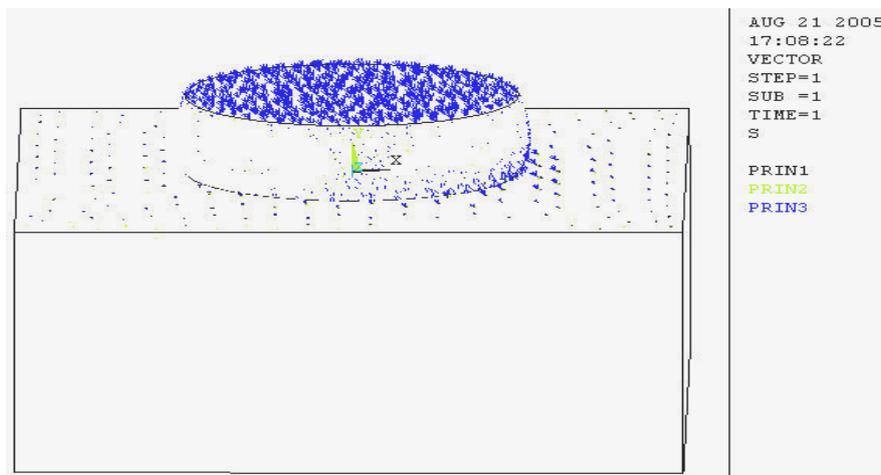


图 2-35 超声/力产生的应力梯度的驱动

(2) 快速通道扩散

通过扩散机制研究和应用扩散定理可总结为如图 2-36 超声键合机理：超声能清洁材料表面，为表面扩散提供洁净的环境，同时，超声能激活晶格位错，增加位错密度，并形成稠密的位错网，在较低温度下，键合材料原子的表面扩散和位错扩散被超声能激活，位错管成为快速扩散通道，并迅速渗透到对方高位错密度的晶格或晶界，以原子键键合，形成固溶结构(或金属间化合物)。

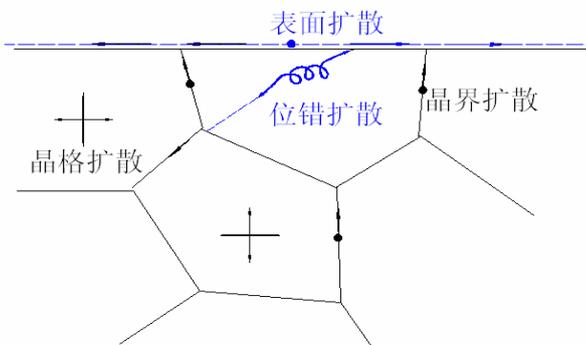


图 2-36 键合界面快速通道扩散

2.3.2 实时超声功率特性与扩散机理的相关表征

在实时的键合过程中，超声能的有效传递与转化直接影响键合的连接可靠性，键合过程超声能的动态特性可由超声发生器的电流电压的动态过程来表征和分析，用采集卡(5M)采集超声驱动电源的电压和电流(如图 2-37)，对采集数据进行均方根计算可得到换能系统的阻抗和功率曲线(如图 2-37)。

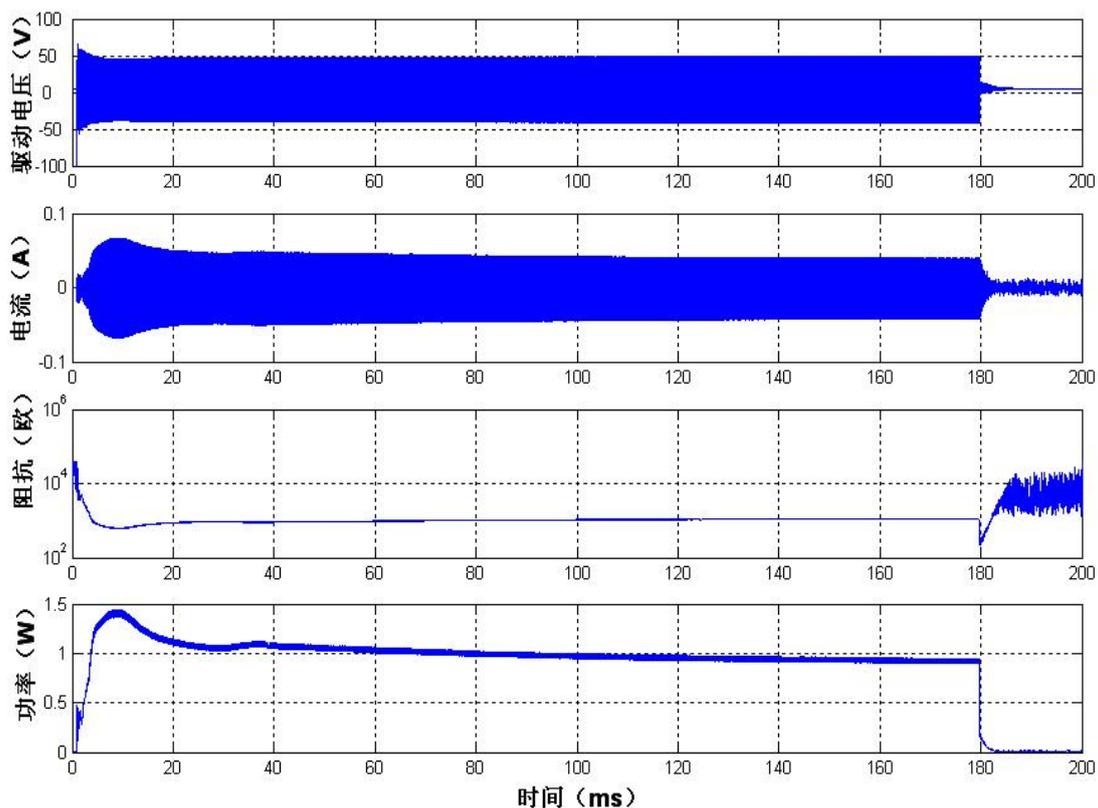


图 2-37 超声驱动电压/电流信号与计算的阻抗和功率曲线

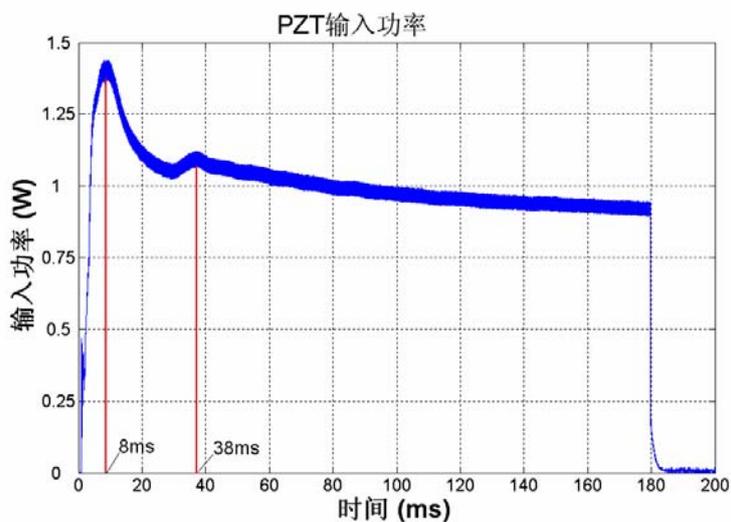


图 2-38 超声驱动功率曲线

对照超声能功率输入变化曲线图 2-38，超声过程功率变化的实时曲线可知，超声焊接过程中超声能在界面传递/转化，开始启动阶段(约 8ms)去除氧化物和污物，功率曲线的下降阶段(约 8-30ms)，这可能与表面扩散/位错扩散共存相关，随着界面流变扩展，界面接触表面逐渐越少，键合区表面扩散随之减少，其中存在一小段功率反弹(30-40ms)，然后位错扩散进一步加剧，位错扩散成为主要扩散方式。

在不同的工艺条件，功率或阻抗特性曲线显示同样的特性，功率变化的各段过渡时间不完全相同，略有差别。

2.3.3 超声键合高速高可靠特性

在毫秒级时间内形成扩散键合，通过高分辨扫描透射电镜下的 EDS 扫描曲线可知扩散层为几百纳米量计，如图 3-1。

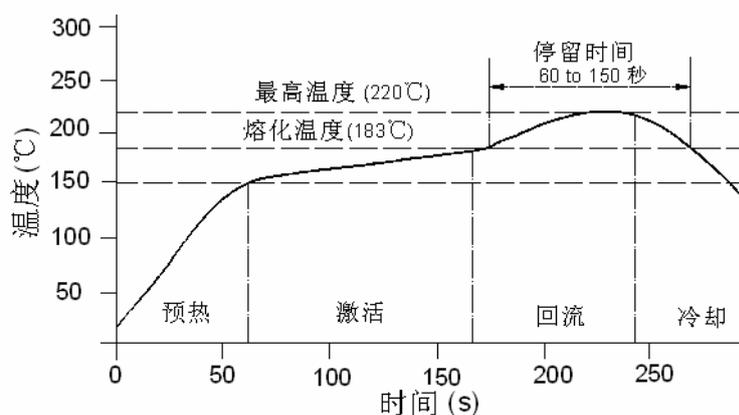


图 2-39 回流倒装键合典型的温度曲线



图 2-40 XD7600 型 X 射线测试仪

在这种模型下形成的结合界面，与回流倒装的热熔键合比较，回流倒装典型的温度曲线如图 2-39，一般回流焊时间 200 多秒，而超声快速位错扩散键合时间仅 10-500 毫秒(视芯片大小，凸点多少而不同)，键合过程时间减少了上千倍。

对两种键合的界面通过 XD7600 型 X 射线(如图 2-40)测试结果如图 2-41、图 2-42，比较二图可知：回流倒装中，图 2-42 表明界面存在气泡，回流倒装热熔键合形成的气泡影响界面的机械和电性能，降低连接的可靠性；而热声倒装是一种快速通道机制，不会形成气泡，形成强的界面键合，如图 2-41。热声倒装是一种高可靠的快速键合。

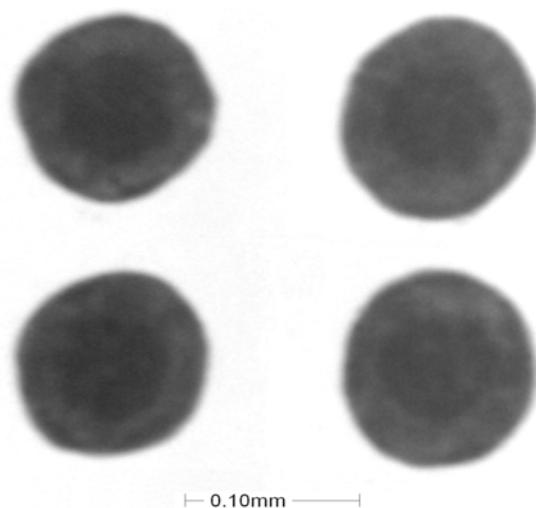


图2-41 热声键合界面的X射线照片

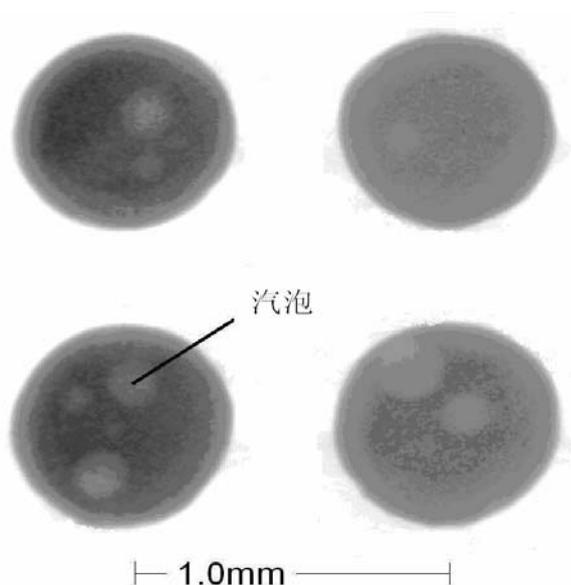


图2-42 回流键合界面的X射线照片

2.4 本章小结

本章从设计实验和对界面进行高分辨的 TEM 测试出发,对超声功率和超声振动的实时曲线进行了测试和计算,观测到超声作用后,键合界面位错密度剧增的现象,结合原子扩散理论、位错通道机制与相应的微观测试结果,探讨了超声键合界面快速生成机理及其与超声功率/振动曲线的关系,通过分析得到如下认识:

1. 超声键合初期表面扩散容易发生,随着键合界面流变的扩展,表面扩散随之减小,然后通过位错扩散方式,向内扩散,并形成一定深度的扩散层。
2. 高频超声振动激活界面材料位错,位错密度的增加也说明超声键合过程未发生过高温,否则就会高温回火位错缺陷减小,位错增加是形成界面扩散键合的主要原因,阐明了基于表面扩散、位错扩散的超声快速键合机理。
3. 发现键合材料的滑移特性,阐述位错运动与滑移的相关规律,通过有限元计算与仿真分析,键合过程复合能场作用下的剪应力达到并远超过材料滑移的临界应力值。
4. 界面的 X 射线测试表明超声快速扩散键合是一种高可靠的键合,形成的扩散层大约是百纳米量级(HRTEM 测试),其扩散层决定界面的机电性能。

作者已发表与本章内容相关的主要学术论文:

- ✚ Interface Mechanism of Ultrasonic Flip Chip Bonding, *Applied Physics Letters*, Vol.90, 2007: 242902. (影响因子 4.127, SCI 收录: 179QR, EI 收录: 072510666885)
- ✚ Interface Features of Ultrasonic Flip Chip Bonding and Reflow Soldering in Microelectronic Packaging, *Surface and Interface Analysis*, 2007, 39: 783-786. (影响因子 1.427, SCI 收录: 224BH, EI 收录: 074310890105)
- ✚ Atomic Diffusion Properties in Wire Bonding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006,16 (2): 463-466. (SCI 收录: 039WP, EI 收录: 06279980248)

第三章 扩散键合界面强度构成与演变规律

超声键合中原子的快速位错通道机制,在相当短的几十到几百毫秒时间内形成界面键合,这种键合的原子扩散层有一定的厚度,由于微米量级键合区的透射电镜样品制作困难,所以,未见研究者们进行超声键合点的纵向截面扩散的定量分析,本文通过包埋法制作微小键合点纵截面的透射电镜(TEM)测试样品,并采用了高分辨的透射电镜(HRTEM)对纵向截面进行定量测试分析,同时通过扫描电镜(SEM)分析了分离键合区的界面特性,分析键合界面的空间组成,及键合界面结构非均匀分布特性,利用 ANSYS 有限元软件对其特性进行了仿真分析,最后,实验研究超声键合工程多参数(超声功率、键合时间、压力)与键合界面微结构的演变规律。

3.1 界面原子扩散层厚与微结构强度构成

3.1.1 界面扩散层厚的 STEM 测试

超声快速扩散键合在键合界面形成一定的扩散层,其扩散层厚可通过包埋法制作 TEM 样品,使用带 EDS 扫描模式的高分辨透射电镜来测试,测试结果如图 3-1,图 3-1 是功率 2W、键合时间 400ms、压力 3.2N 条件下的 EDS 扫描测试曲线,Au-Al 扩散层大约是 200nm。

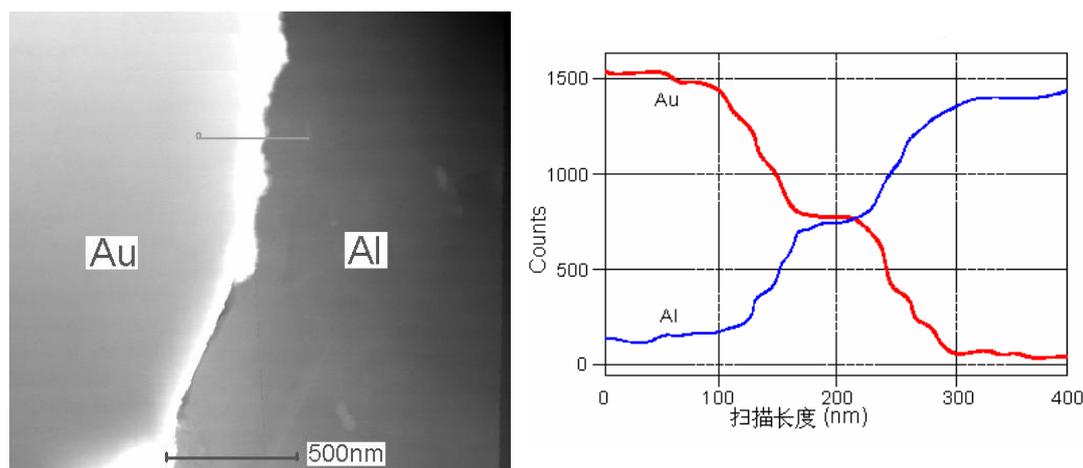


图 3-1 界面扩散的 STEM 特性与 EDS 扫描曲线

不同的工艺条件,形成的界面扩散厚度有差异,但超声键合的界面扩散层厚大约是几百纳米量级。

3.1.2 界面的分离失效特性与界面强度的空间组成

超声键合的几种类型：金球键合(Ball bonding)、楔键合(Wedge bonding)、热声倒装键合(Thermosonic Flip Chip bonding)。用同样的方法将键合界面进行破坏性分离，获得分离的界面，用扫描电镜(SEM)观测相应的界面微结构，分析其间的关联规律，形成了超声键合强度的新认识。

(1) Au/Al 球键合分离界面 SEM 形貌特性

采用 T/S-2100 金丝球焊机进行球键合实验，键合金线直径： $18\sim 50\mu\text{m}$ ；功耗： $0\sim 5\text{W}$ ；压力： $35\sim 180\text{g}$ ；时间： $5\sim 100\text{ms}$ ；频率： 62kHz ；温度： $0\sim 400^\circ\text{C}$ ；WT051A 陶瓷劈刀。

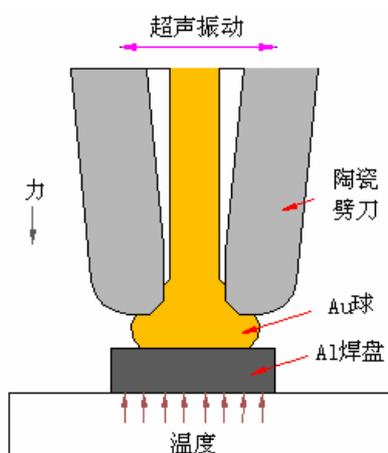


图 3-2 金球键合

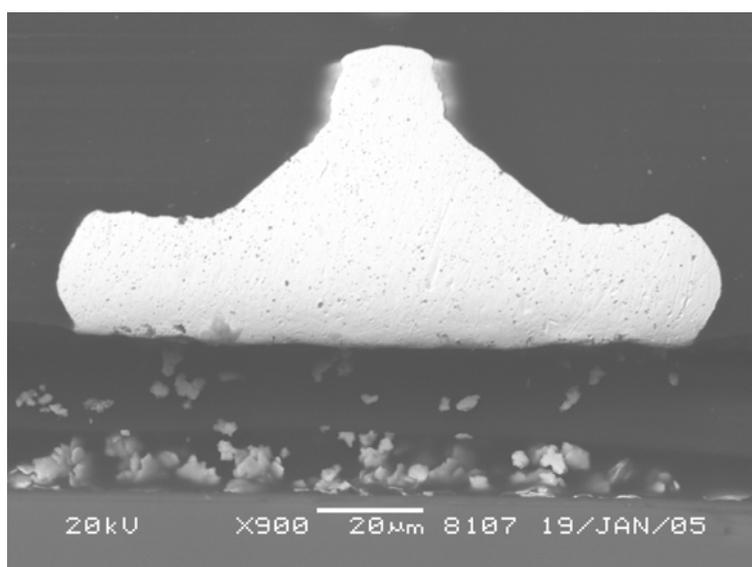


图 3-3 金球纵向截面的 SEM 特性

球键合劈刀如图 3-2 所示, 金丝从中心孔穿入, 劈刀圆环下压金球, 将通过劈刀的超声能传输到圆球, 使金球软化产生不均匀流变, 形成焊接键合, 图 3-3 是 Au/Al 球键合通过镶样研磨抛光获得的纵截面样品在 JSM-6360LV 型扫描电镜 (SEM) 下的结构特性, JSM-6360LV 型扫描电镜如图 3-4:

分辨率:

- 二次电子图像(SEI)分辨率 15kv,1.0nm/1kv,1.5nm;
- 背散射电子图像(BEI)分辨率 3.0nm;
- X 射线能谱仪(EDS)分辨率 128eV 分析范围 B5~U92 电子背散射衍射 (EBSP)空间分辨率: 0.5 μ m;
- 加速电压 100V-30kV;
- 放大倍数 $\times 25 \sim 10^6$ 。



图 3-4 扫描电镜

技术指标:

- 加速电压: 0.1 kV to 30 kV;
- 束流强度: 10^{-13} A to 2×10^{-9} A;
- 电子枪种类: 冷场发射电子枪;
- 探测器: 高位探头、低位探头;
- 马达控制: 3 axes (XYR);
- 实时图像分辨率: 1280×1024 ;
- 自动聚焦、曝光、消像散。

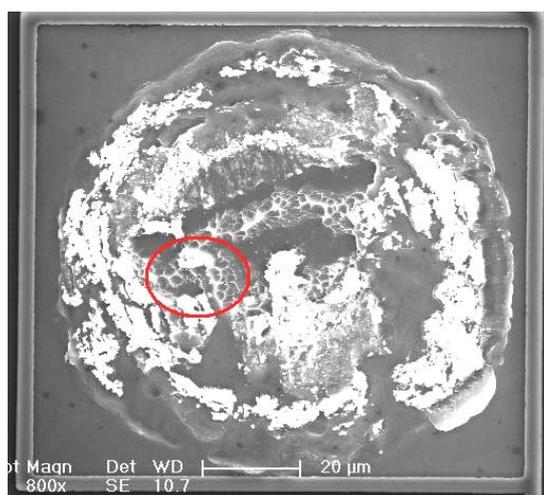
研究键合界面的连接强度, 图 3-5 所示用拉力测试仪分离球键合界面, 其拉力测试仪采用 DAGE-4000 高精度键合测试机, 其性能指标:

- 测力范围: 拉力 0-1Kg, 剪力 0-100Kg;
- 测试精度: 0.1g;
- 测试引线直径: 10-500 μ m。

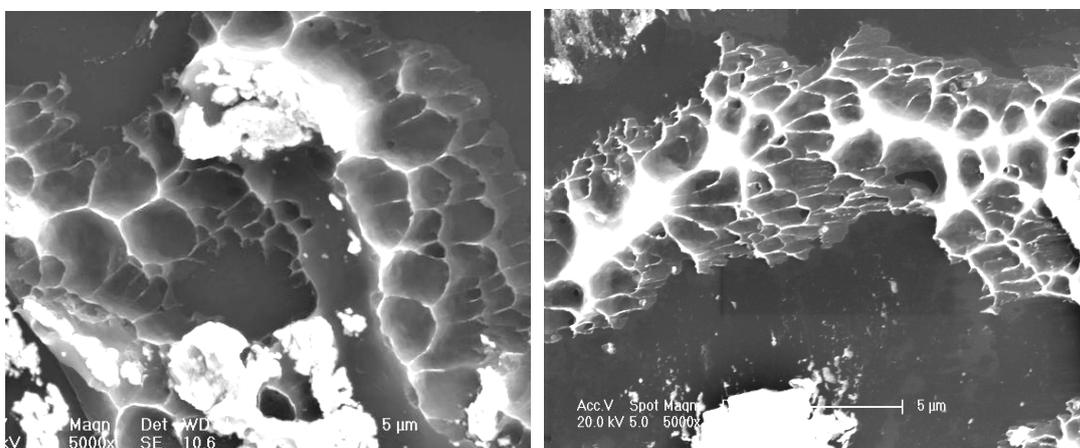
利用扫描电镜(SEM)可观察分离界面的微观特性,图 3-6 是其键合界面分离后界面形貌的 SEM 图片,图 3-6 中 b 图是 a 中局部放大。

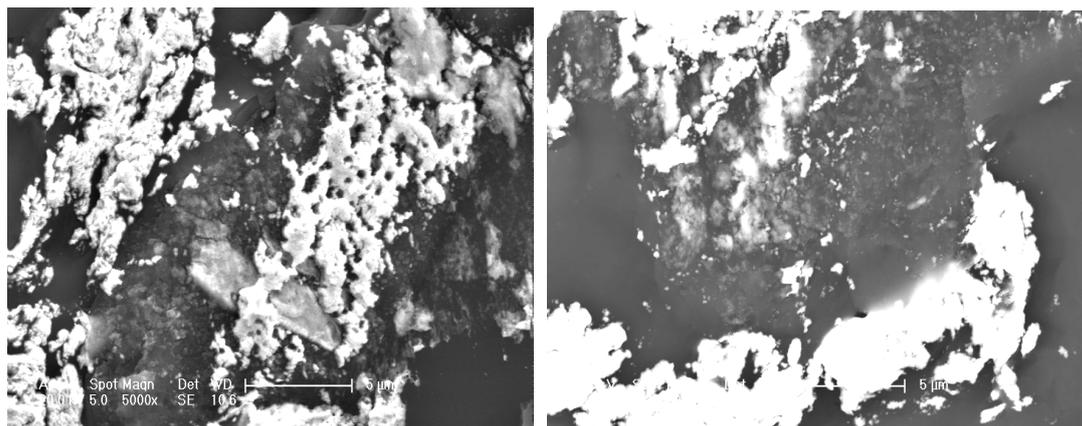


图 3-5 拉力计分离球键合界面



a





b

图 3-6 Au/Al 球键合分离界面 SEM 形貌特性

(b 是 a 中的圆圈部分的放大图)

图 3-6 表明断口形貌为韧窝状,图 3-6b 中上面的二图是 Al 分离的韧窝形状,下面的二图是 Au 分离的韧性断口,超声键合界面原子扩散层并未被分开,分离的是基体材料 Al 或 Au,键合界面形成了高强度的原子间金属键结合,界面扩散的原子在晶体中产生固溶(或合金)强化,原子扩散层的强度大于基体材料强度,真实的断裂失效发生在材料基体,而非超声键合界面。

(2) 楔键合分离界面 SEM 形貌特性

通过 U3000 超声波粗铝线压焊机进行楔键合实验如图 3-7,其工艺参数:键合直径为 100 μ m, 300 μ m, 500 μ m 纯铝丝;键合功率:最大 30W;键合时间:20-500ms;压力:30-1200g;频率:62KHZ;镀镍的铜材料基板和 LW500 楔刀进行 Al/Ni 楔键合。

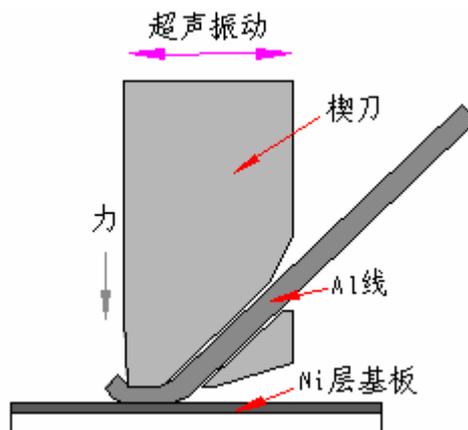


图 3-7 楔键合

对 Ni/Al 键合的纵界面采用牙托粉镶样固定样品,通过研磨和抛光方法获得

扫描电镜(SEM)观测样品, 图 3-8 是已抛光的样品, 在 SEM 下分别对 Al、Ni 进行 EDS 扫描观测如图 3-9 所示, 超声键合界面发生了 Ni/Al 原子的互扩散。



图 3-8 牙托粉镶样抛光后的 SEM 观测样品

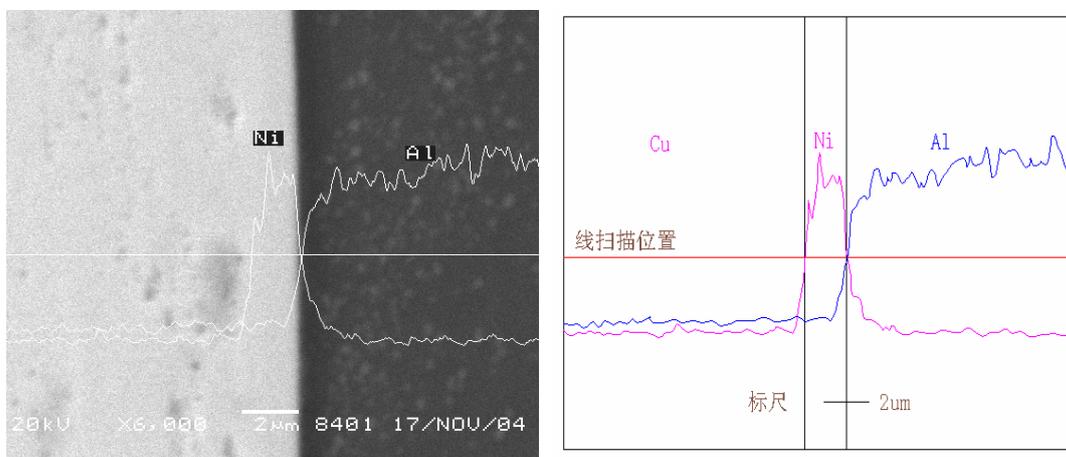


图 3-9 SEM 下的扫描曲线

通过 SEM 电镜对键合分离界面进行电镜分析, 图 3-10 是楔键合界面特性, 图 3-11 是图 3-10 的 a、b、c、d 四个位置的局部放大 SEM 图片。

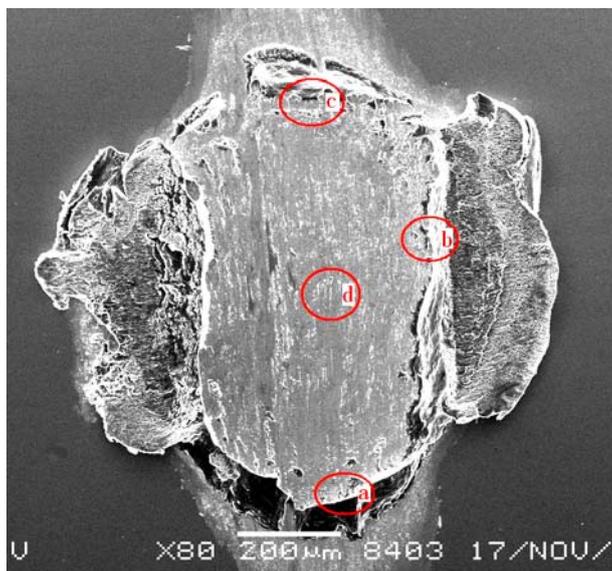


图 3-10 键合界面分离的 SEM 特性

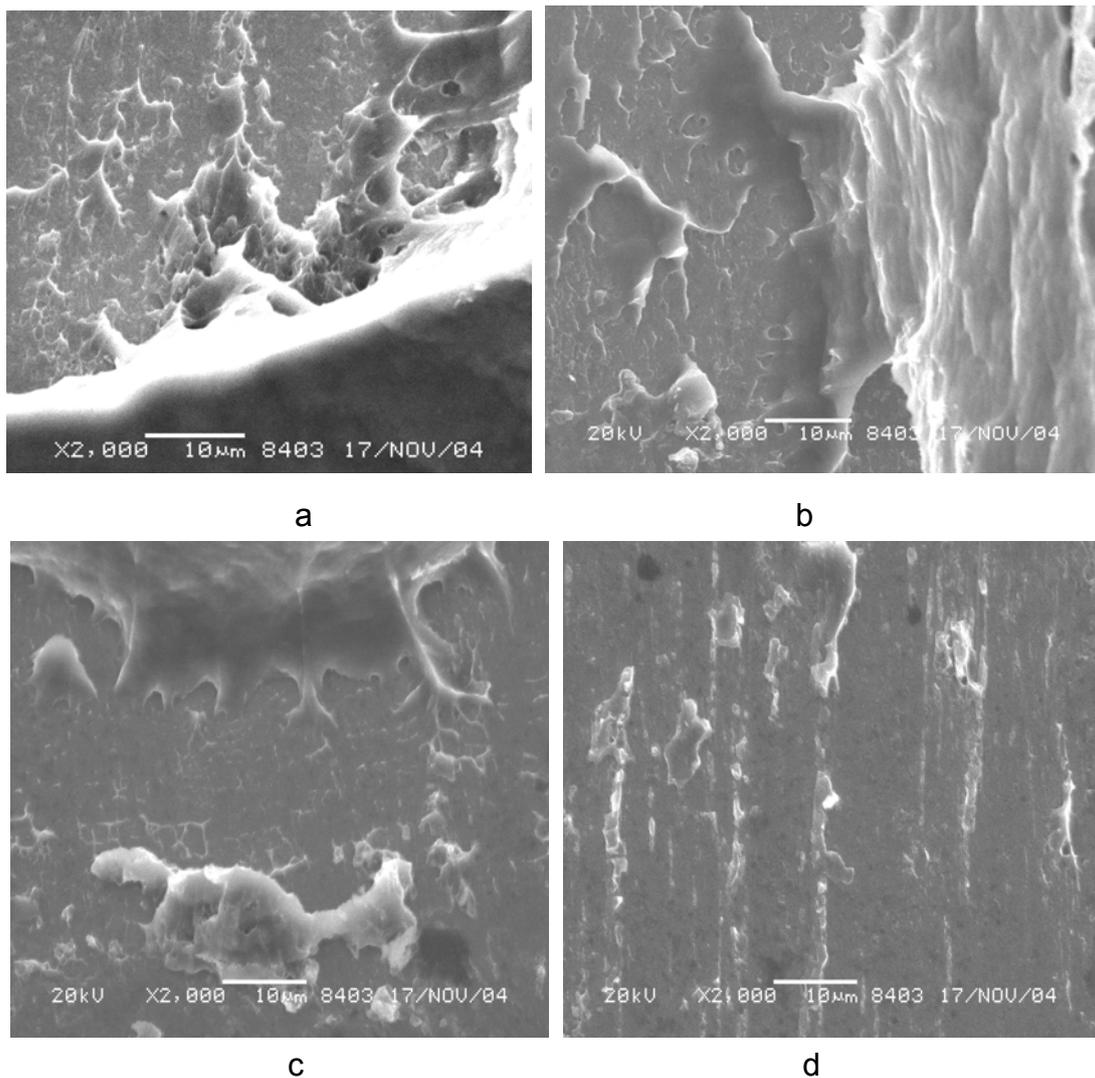


图 3-11 超声键合界面分离后的韧窝分布

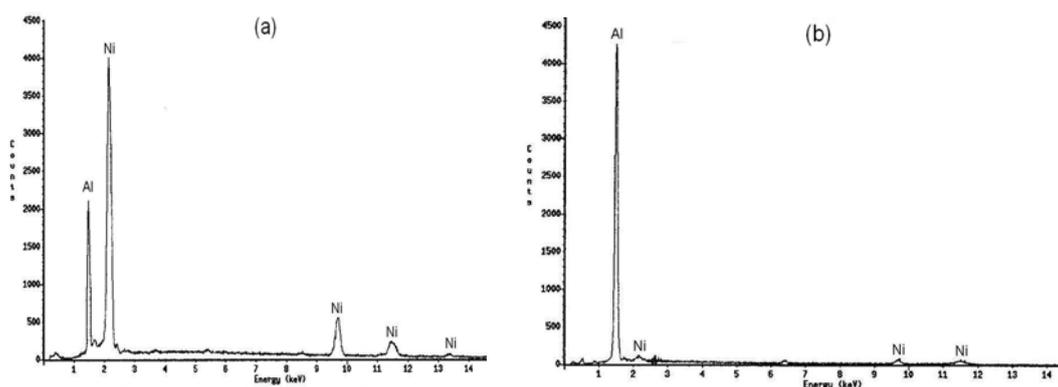


图 3-12 扫描电镜下 EDS 能谱测试结果

(a 为 Ni 基板上的能谱测试结果, b 为 Al 线上的能谱测试结果)

图 3-10 表明超声键合点的界面破坏后,在键合界面边缘有一明显脊皱环带,键合的中央未键合,只是微弱的摩擦痕迹。图 3-11 可发现:在脊皱环带的位置

上，密集分布着大大小小的表示韧性断裂特征的韧窝，其它位置基本没有，这些说明键合界面的实际结合不是在全部截面上，而主要是在脊皱环带部分。

在脊皱环带位置上，用 EDS 能谱测试到分离的键合界面的元素分布图如图 3-12。

图 3-12(a)是在 Ni 基板上的能谱测试结果，Al 原子所占成分约为 Ni 的 45.23%。

图 3-12(b)是在 Al 线上的能谱测试结果，Ni 原子所占成分约为 Al 的 2.11%。

说明分离是在 Al 焊材料中产生，基本上是 Ni 原子尚未扩散到的深度，同时说明，界面有原子扩散的厚度范围，因此可以得到对键合界面强度生成的本质认识：

键合界面的两种物质产生了原子互扩散，形成了牢固的原子结合，扩散的原子固溶于基体，强化了界面微结构强度，使得这种由原子扩散产生的键合界面强度大于 Al 和 Ni 基体强度，因此在破坏界面上只见到 Al 残留和象征韧性变形的韧窝状破坏结构，破坏失效并未发生在原子扩散层，而是在基体材料或缺陷处。

(3) 热声倒装键合分离界面 SEM 形貌特性

在集成的热声倒装实验平台上进行热声倒装键合实验如图 3-13，对分离界面进行同样的 SEM 测试如图 3-14，表明界面横向特性形如坚果截面，周边环带形成强键合，中央没有键合。

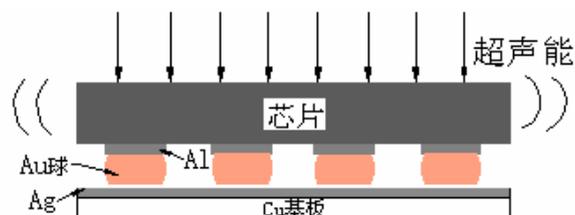


图 3-13 热声倒装键合

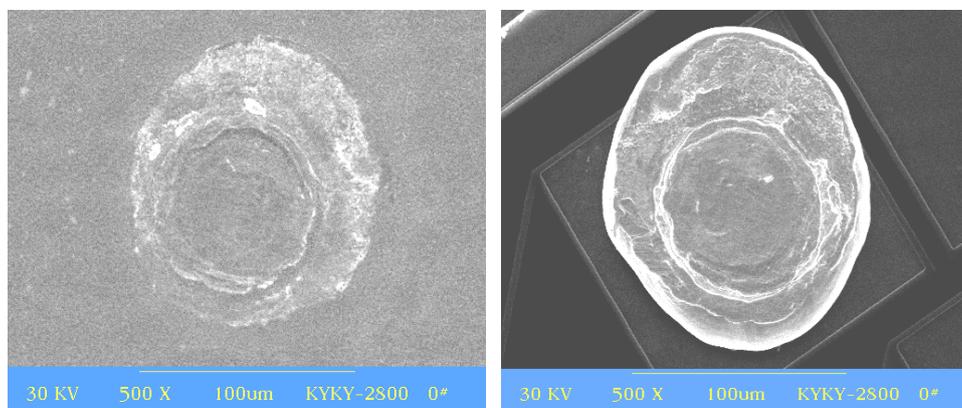


图 3-14 一对键合界面暴露的键合界面的 SEM 特性

总之，超声键合界面的分离特性及其韧窝分布状况，表明超声键合强度结构的微观组成：

- 1) 超声键合状态：键合强度在键合区上的分布不均匀，有原子扩散的键合界面的强度比键合基体的强度大；脊皱环带上的键合强度较其它位置大；
- 2) 超声键合连接的破坏规律：因扩散而产生的固溶结构，界面连接失效的部位不是原子扩散层，而是键合基体材料或键合连线材料的失效；
- 3) 键合强度的微观结构是由“引线材料—扩散层—基板材料”组成的空间结构，其扩散层为几百纳米量级。

3.2 超声键合过程多参数与键合界面微结构演变规律

在超声引线与倒装键合中，U3000 型粗铝线键合机具有更宽的参数范围，能在较宽的范围内调节工艺参数，较全面反应各键合参数对微键合界面的演变特性。

3.2.1 微键合点一焊与二焊特性

如图 3-15 所示，楔焊键合的一焊和二焊键合过程；对键合后的焊接点分离并在 SEM 下观察。

图 3-16 和图 3-17 是在键合工艺参数为功率 21W、时间 350ms、压力 9.6N 的条件进行的超声焊接实验，实验材料：基板为镀 Ni 铜基板、铝线直径为 500 μ m。图 3-16 为一焊分离界面电镜图，a 和 b 是脊皱局部放大视图；图 3-17 是二焊点分离界面的电镜图。对键合界面的非均匀分布特性，可通过 SEM 下的 EDS 能谱对键合区进行测试，图 3-18 是某一点的能谱测试结果，反映了 Al-Ni 的扩散程度，把从中央到周边的 18 个点的 EDS 测试数据绘制成图 3-19，图示表明圆环带由固溶成分形成键合，中间部分表面由轻微摩擦痕迹，但图 3-20 中对应的部分更少，说明摩擦不是主要的键合机制。

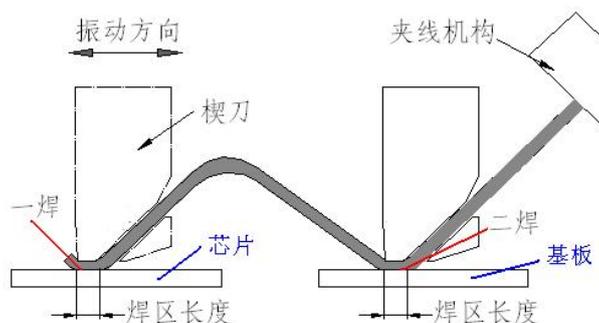


图 3-15 楔焊键合的一焊和二焊特性

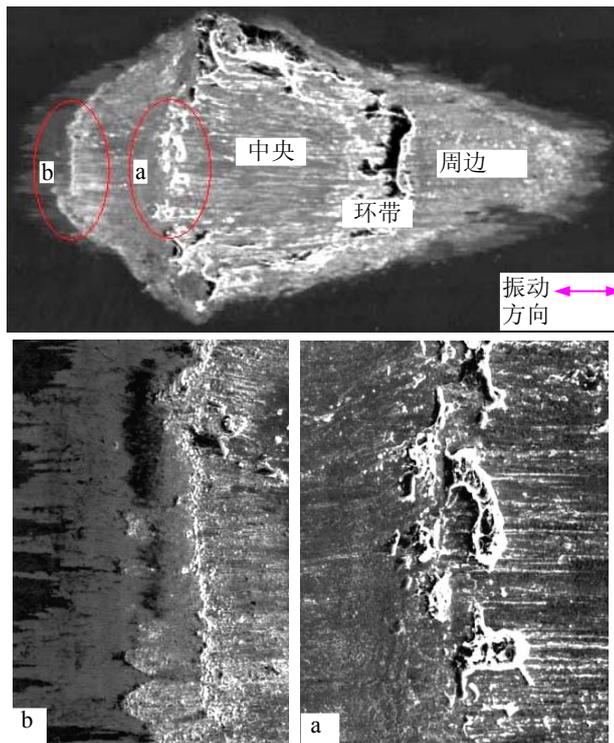


图 3-16 $\Phi 500\mu\text{m}$ 粗 Al 线与镀 Ni 基片的一焊键合界面电镜图。
a 和 b 是局部放大视图；

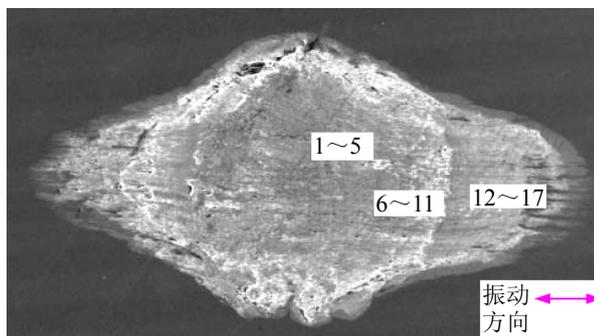


图 3-17 $\Phi 500\mu\text{m}$ 粗 Al 线与镀 Ni 基片的二焊键合界面电镜图。
1~17 是 EDS 能谱测试点。

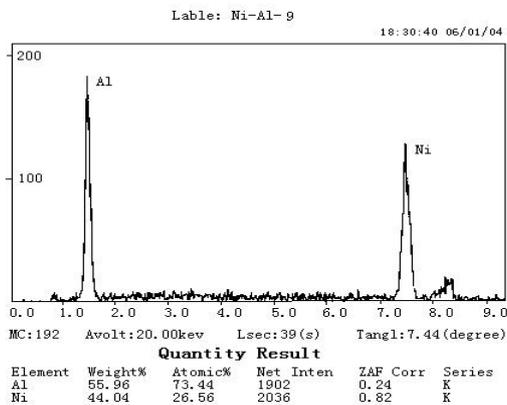


图 3-18 第 9 点(图 3-11)的 EDS 测试结果

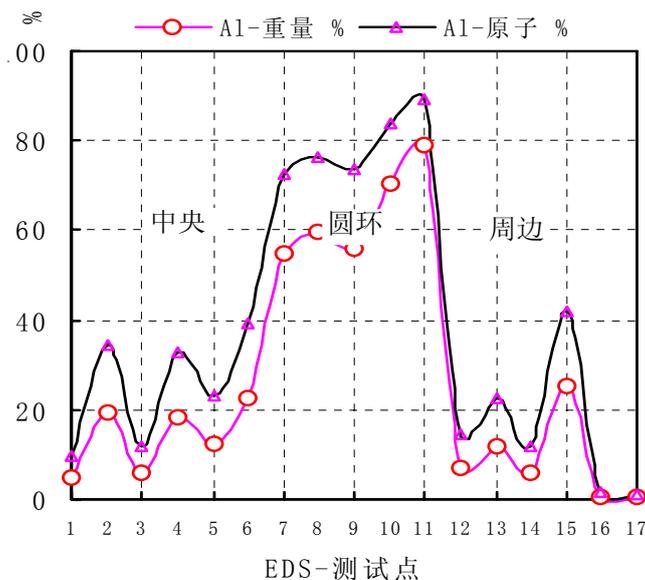


图 3-19 分离界面从中心到边缘(图 3-17 '1~17')的 EDS 测试的 Al 原子的重量和原子百分比变化曲线

比较图 3-16 和图 3-17，一焊、二焊微观结构差异，同样的键合参数形成的键合点，一焊强度大于二焊，在进行二焊键合时，存在从一焊点到二焊的弧线约束，而一焊没有此约束，可能是这种约束对二焊的非线性影响所致。所以，用拉力计或镊子拉开界面时，通常是二焊界面先被拉开。实际楔焊操作时，为了平衡两键合点的强度，适当调大二焊的键合参数。

3.2.2 键合界面环带结构与有限元仿真分析

(1)不同材料的超声键合界面特性

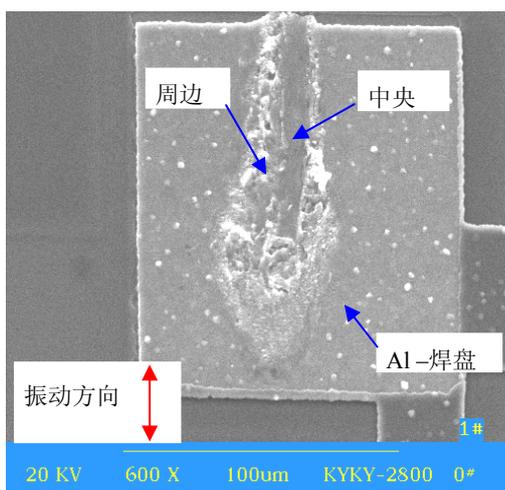


图 3-20 SEM 下 Al-Al 键合界面微观结构(600X)

通过 U3000 键合机设计多种材料间的超声键合实验，并进行界面分离的扫

描电镜分析, 图 3-20 是 Al-Al 键合的分离模式, 周边粗糙如脊形, 中央光滑未键合, 图 3-21、图 3-22 分别是 Al-Cu、Si-Al 键合特性模式, 图 3-23 是热声倒装 Au-Ag 键合特性, 对不同的材料体系, 超声键合都存在一个与材料无关的共性, 与 Ni-Al 键合特性相似, 即键合界面周边形成键合强度。

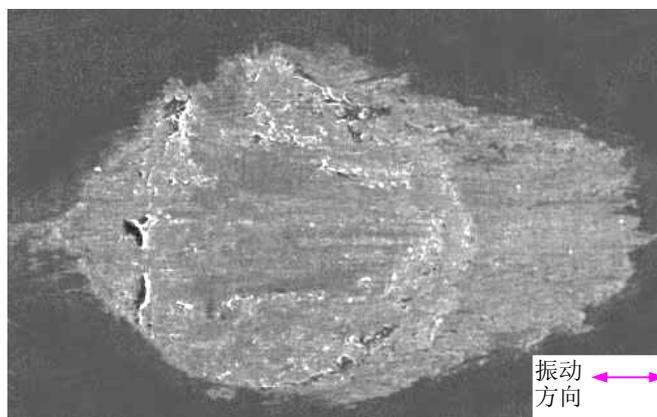


图 3-21 Al-Cu 板的分离界面模式电镜图(100X)

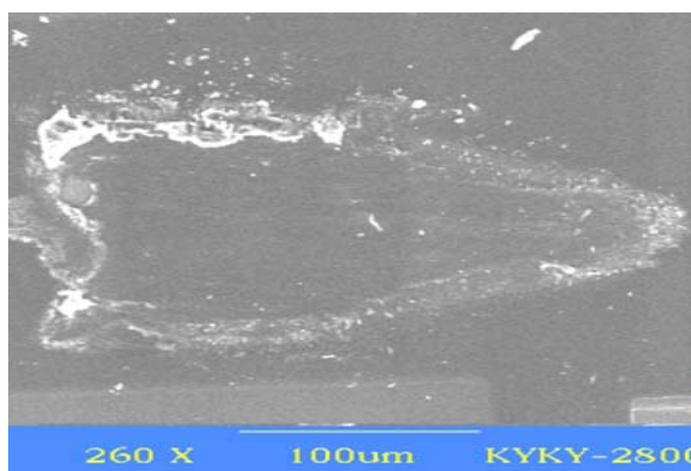


图 3-22 Al-Si 键合的分离特性

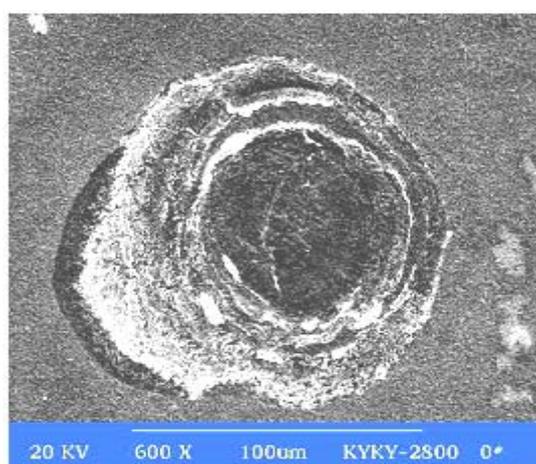


图 3-23 Au-Ag 热声倒装键合界面

总之，超声键合界面可以描述为如图 3-24 所示的周边环带形状，键合强度取决于激烈起皱的周边。以摩擦和滑动作用难以解释其微观性状，已有的以摩擦或滑动作用为机理形成的键合机理恰恰认为是中间键合质量最好。

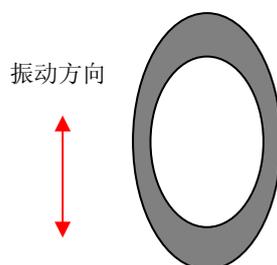


图 3-24 键合特性描述图

(2) 超声键合界面的有限元仿真

为分析超声键合界面强度生成规律，利用 ANSYS 有限元软件，研究超声振动和机械力共同作用在键合界面产生的内应力特性，分析界面环带结构生成的原因。

为全面分析应力分布特性，采用三维模型，键合界面的接触面积为金球凸点的表面积，载荷包括压力和超声振动，超声振动位移通过 PSV-400-M2 型激光多普勒测量系统获得。

模型的边界条件为：金凸点上表面有均布压应力 58.6MPa(每凸点 30gf)；基板固定在工作台上，故限制底部所有自由度，如图 3-25 所示。

目前，关于超声对材料作用机理，还缺乏系统的研究报告，因此无法获得准确的超声作用下的材料数据。在现有研究中一般采用常温无超声条件下的材料基础数据计算。本文模型所采用的材料数据为：银焊盘 E 常数为 $7.32e10\text{Pa}$ ，泊松比为 0.38；而金凸点的 E 常数为 $7.95e10\text{Pa}$ ，泊松比为 0.42。

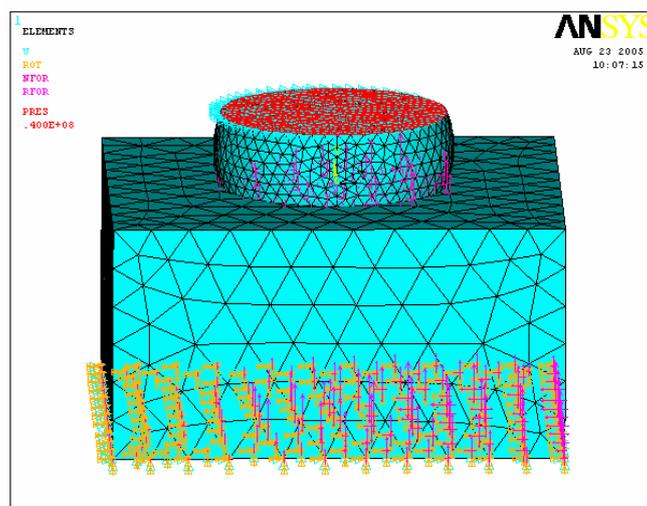


图 3-25 热声倒装的有限元模型与约束条件

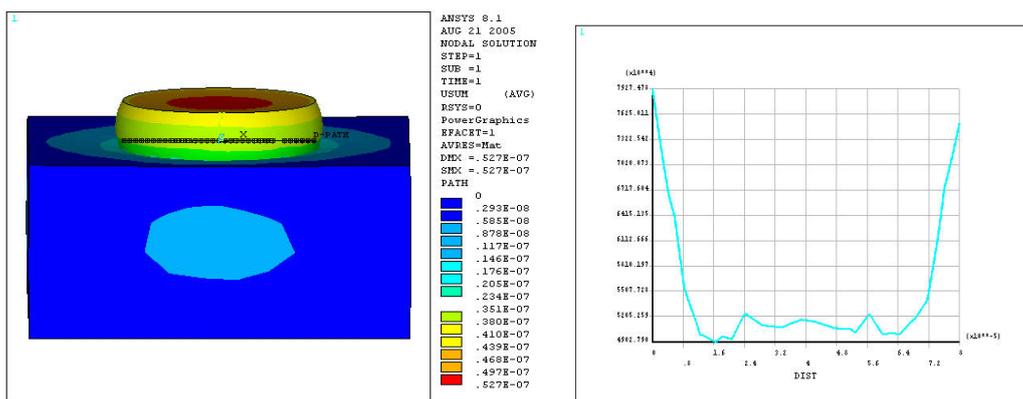


图 3-26 键合压力作用下的应力分布

如果仅考虑键合压力，采用 ANSYS 计算可获得界面正应力和切应力的分布如图 3-26，周边应力分布最大。

由于实验测量芯片的振动幅值大约为 100-1000nm。载有限元分析中，载荷的施加采用位移加载，取 500nm 位移载荷后，金凸点和焊盘的计算结果如图 3-27 左，沿中心线的应力分布曲线如图 3-27 右。

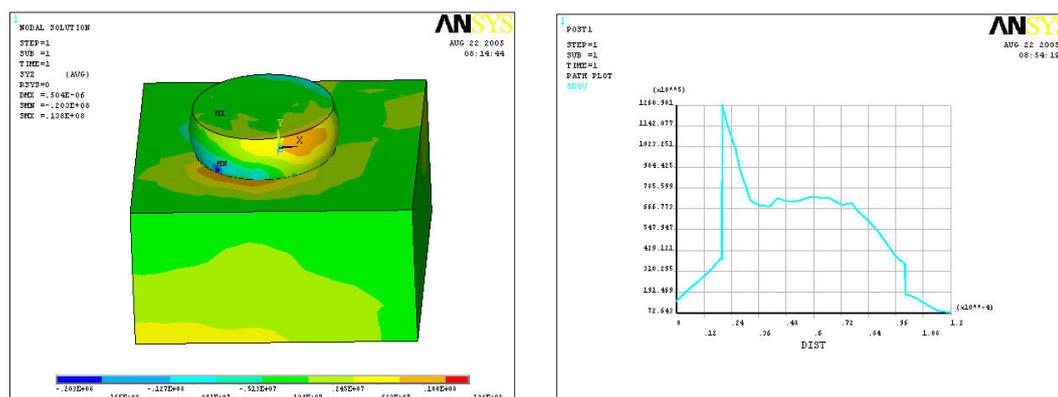


图 3-27 Mises 应力分布图(左)与沿中心线的 Mises 应力分布曲线(右)

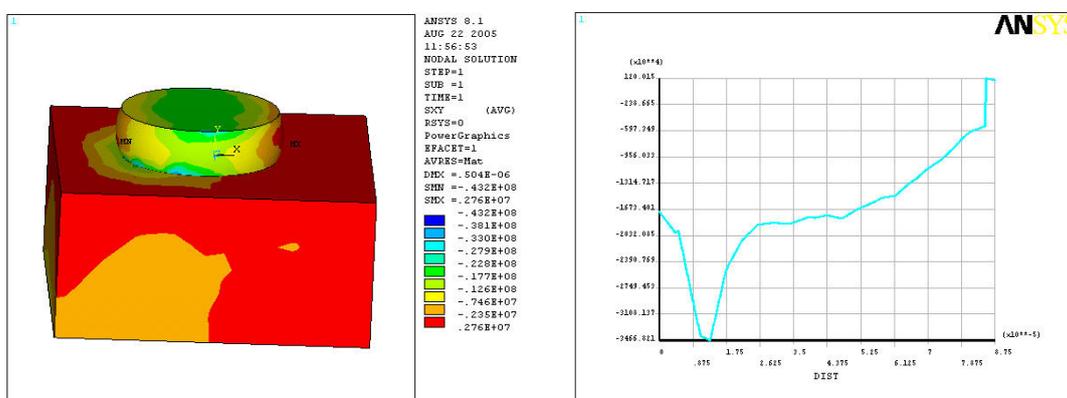


图 3-28 XY 方向剪切力分布图(左)与沿中心线的剪切力分布图(右)

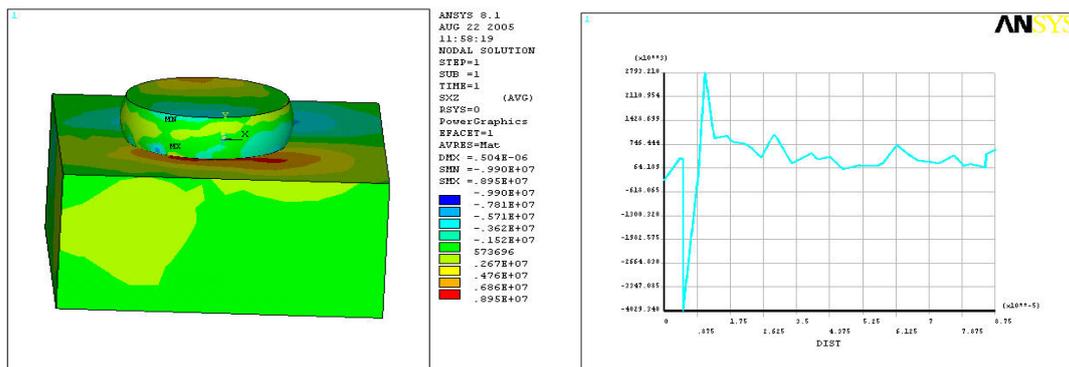


图 3-29 XZ 方向剪切力分布图(左)与沿中心线的剪切力分布图(右)

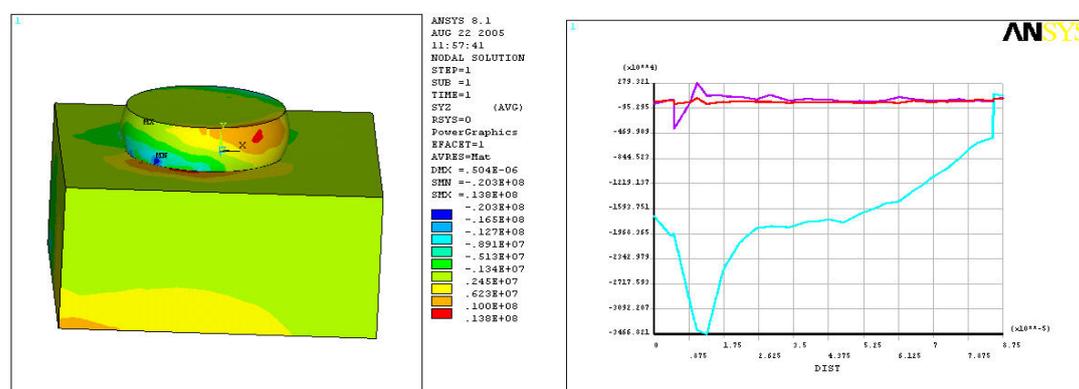


图 3-30 XYZ 方向剪切力分布图(左)与沿中心线的剪切力分布图(右)

由图 3-28、3-29、3-30 可知：振动达到在最大位移时，正应力和切应力在相应的一侧边缘分别达到最大值。在振动过程中，在与振动位移对应的键合界面边缘位置，应力和应力场进一步集中，促进了环状界面的形成。

在热超声倒装键合中，在压力的作用下，接触面的周围产生了应力集中，切向位移载荷的加入，导致了应力分布状态的改变，应力场沿一边的周缘为最大，但，超声的高频往复，应力场极值在周边轮换，超声能引起的周边应力分布是键合界面呈环带结构的内在原因。

3.2.3 界面微结构演变特性

研究超声键合主要工艺参数(即超声功率、键合时间、压力等)与界面结构变化的关系，分析键合界面微结构的生成规律。

(1) 压力与微观结构演变的关系

键合时间(350ms)和超声功率(24W)保持不变，在 0.3~12.0 N 范围调节压力进行实验测试。图 3-31 是界面微观结构与压力变化的关系图，表明：其它条

件不变的情况下，随着压力增大，键合椭圆环逐步延伸扩大，且椭圆环沿着振动方向的椭圆轴由短轴变为长轴；随着压力增大，接触摩擦区和脊皱键合区的面积增加。

用 AutoCAD 离线测量微结构各部分的面积(图 3-32)，方框是根据电镜图的标尺长绘制的，样条曲线包容的键合界面、圆环面和中心面的面积，二者比较计算出各部分的实际面积，各种压力下的界面面积数据组列入曲线图 3-33，结果表明：界面面积与压力近似正比关系，压力为 8.4 N 时，出现拐点，曲线接近水平，接触总面积和脊皱椭圆环基本上达到饱和值。

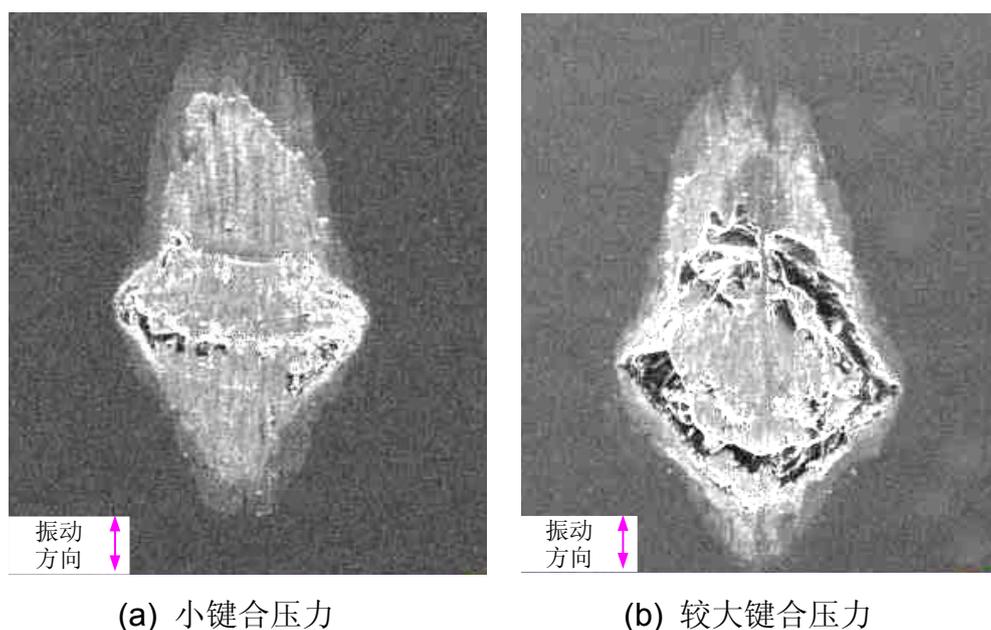


图 3-31 压力的增加导致键合面积和脊皱圆环增大模式 60X

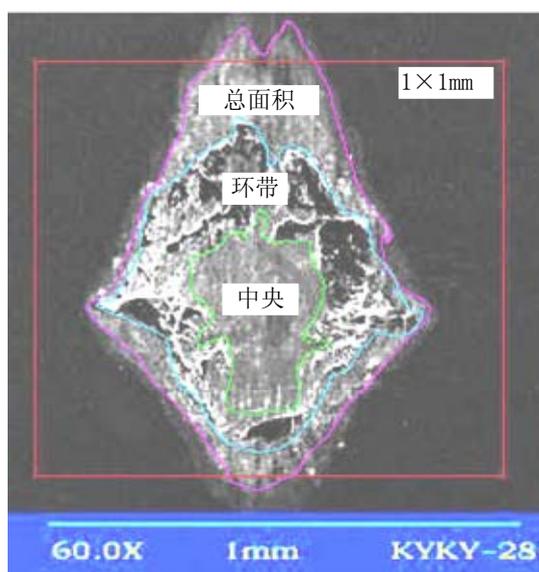


图 3-32 AutoCad 离线测量微界面面积 60X(8.4N)

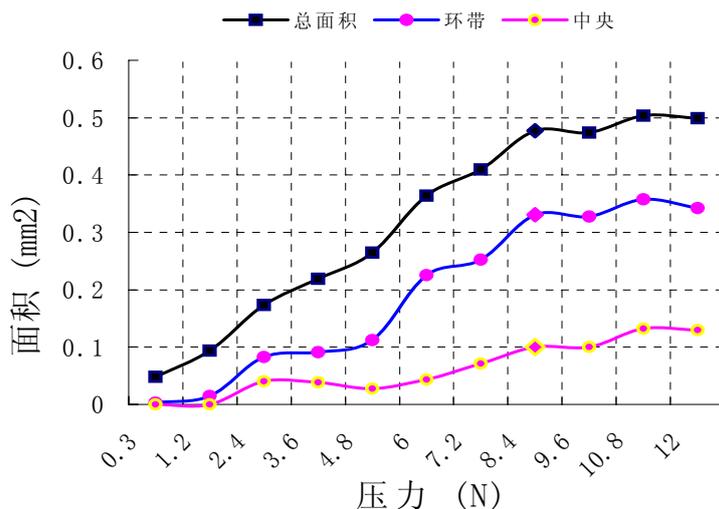
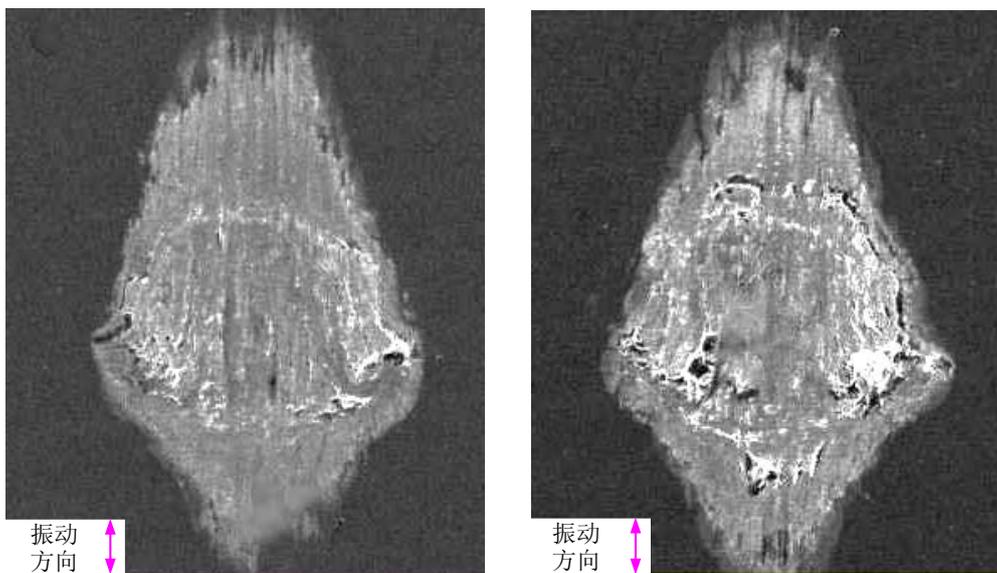


图 3-33 微结构界面面积与压力的关系曲线

如果键合过程中不施加压力，在键合界面上就观测不到任何脊皱痕迹。在超声能软化金属后，必须施加压力使之流变，脊皱区扩大，压力过小流变受着限制。

(2) 时间与微观结构演变的关系



(a) 短键合时间

(b) 较长键合时间

图 3-34 随时间的增加皱脊面延伸模式(60X)

超声功率(24W)和压力(9.6 N)保持不变，在 10~500ms 范围调节时间进行实验测试。图 3-34 是随时间的演变模式，图左是 200ms 的界面特性，图右是 250ms 的特性，测试表明：其它条件不变的情况下，随着键合时间的延长，引线形变的同时，脊皱延伸为完整的圆环，脊皱向中央扩展。

各种时间的微观测试表明：时间 $\geq 250\text{ms}$ 脊皱向中央扩展达到极限，时间 $\geq 500\text{ms}$ 时，键合界面的微观特性有所减弱，过多的超声振动能量使已形成的键合面产生裂纹或硬化，将降低键合强度，成为过焊接。

(3) 功率与微观结构演变的关系

压力(9.6 N)和键合时间(350ms)保持不变，在 3~30W 范围调节功率进行实验测试。图 3-35 是功率与微界面的演变模式，测试表明：其它条件不变的情况下，随着超声功率的增加，脊皱加剧。

各种功率的试验测试表明：超声功率太小，不能在界面激起键合痕迹，但超声功率过大，超声振幅大，过大的振幅影响已键合界面微观结构，降低键合强度和精度。

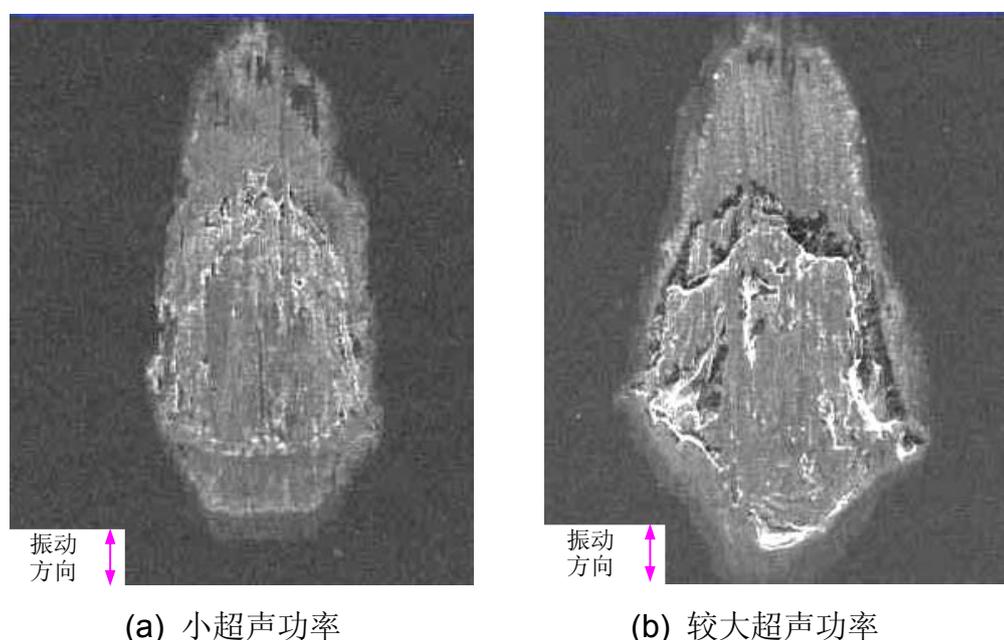


图 3-35 随功率的增加皱脊面变化模式(60X)

3.3 超声键合系统阻抗/功率特性

根据 PZT 阻抗和功率与驱动电信号直接关联，超声键合过程超声能的传递与转化特性反应于驱动信号的变化，通过数字存储示波器或采集卡，采集键合过程超声驱动系统的电压/电流实时曲线，采用 RMS(有效值均方根)方法计算获得键合过程实时阻抗/功率曲线，实时地反应键合过程的能量转化规律，并形成超声键合的可靠性在线监测。

3.3.1 超声驱动信号采集系统

换能器是引线键合机的核心部件之一，其结构如图 3-36 所示。它包括 PZT、变幅杆、劈刀几个部分。其工作原理是：超声发生电路发出超声频率的电信号驱动 PZT；PZT 将电信号转换成机械振动并将机械振动传递到变幅杆；振动经过变幅杆和劈刀传输后作用在工作界面上，将穿过劈刀中心的金线分别焊接在芯片和基板的引脚上，芯片和基板的电路通过金线连接起来，从而实现芯片信号外部传输。在键合过程中，由于金线、劈刀、芯片、基板所组成的界面工况不断改变，反映在换能器上则是驱动电流和电压不断变化。这种驱动信号的变化是研究键合机理研究的重要依据。

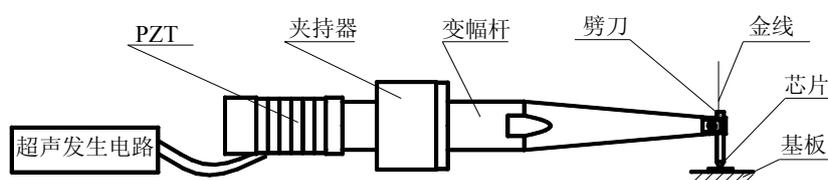


图 3-36 引线键合机换能器的组成

采集装置使用台湾固纬公司的 GDS-820 双通道数字存储示波器。示波器功能与参数如下：

- 150MHz/250MHz 频宽，彩色/黑白 LCD 显示器；
- 125k 深度记忆体以及水平画面 12 格超大显示；
- 25Gs/s 重复波形；
- 高阶触发功能：脉波宽度触发，电视扫描线触发，事件/时间延迟触发；
- 波形 GO-No Go 判断，自动学习模式以及自动设定操作顺序功能；
- 快速傅利叶转换 FFT 功能。

该示波器每通道最高采样率达 100MSa/s，可实现对超声主频约 60kHz 键合系统的监控。

为了实现示波器与上位机的高速通信，采用了一种数据拼装的方法进行数据传输，并根据该方法自行开发了数字存储示波器控制软件，采样长度达 150K，支持多种触发方式，满足了驱动信号数据提取的要求。采集系统如图 3-37 所示。



图 3-37 基于示波器与 PC 机通讯的数据采集系统

利用 GDS-820 数字存储示波器，采集超声键合过程 PZT 驱动的电、电压信号如图 3-38，电压直接采集，电流是通过在驱动电路中串联一个电阻 R ，采集串联电阻的电压除以 R 获得电流值。

超声发生电路输出的换能器驱动电压和电流信号经数字存储示波器采样后转换成数字信号存储下来，然后计算机通过串口将存储在示波器上的数据读取出来，供后续的分析研究用。

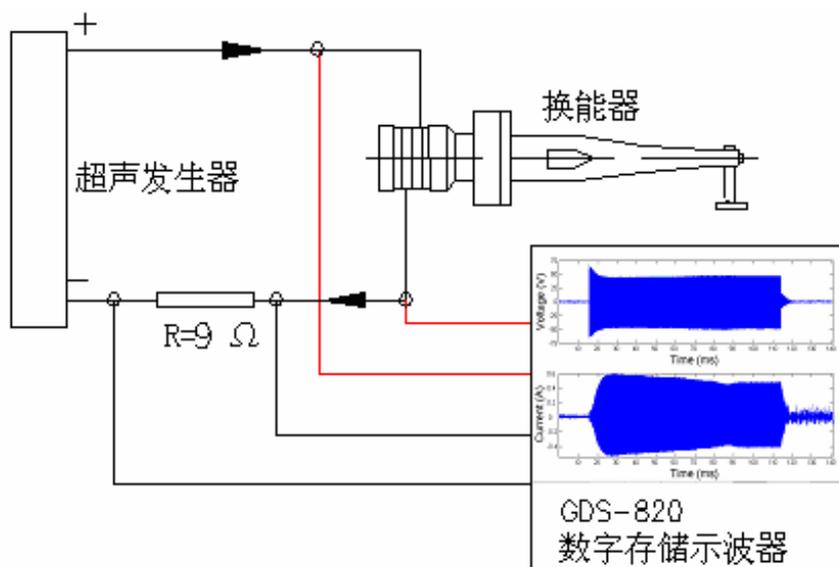


图 3-38 PZT 换能器驱动电信号检测的原理图

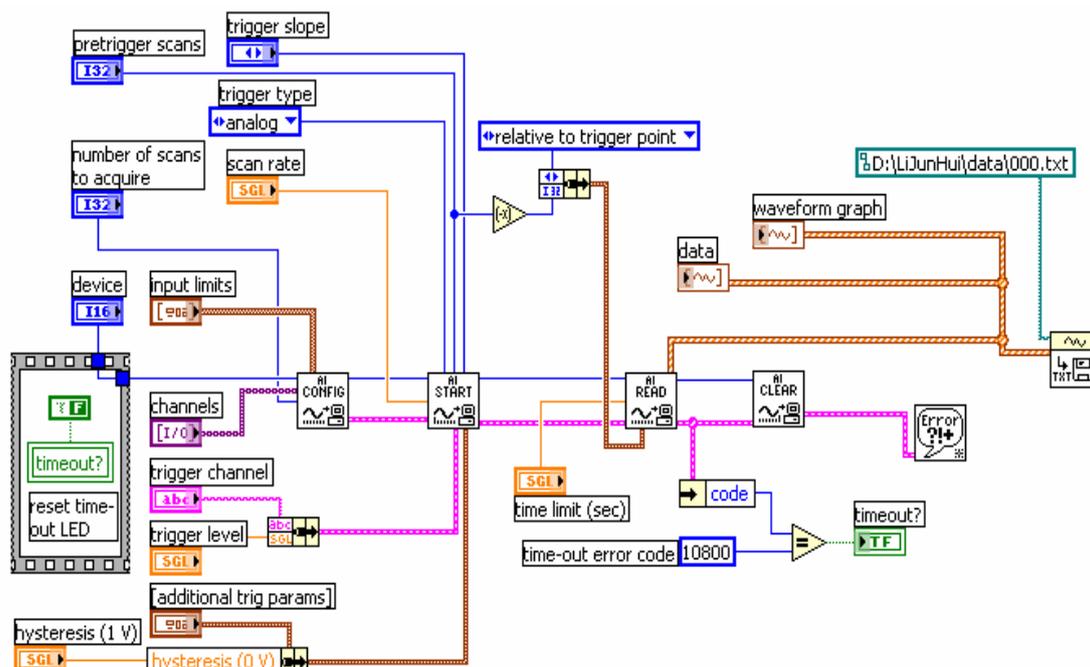


图 3-39 基于 Labview 的高速数据采集程序图

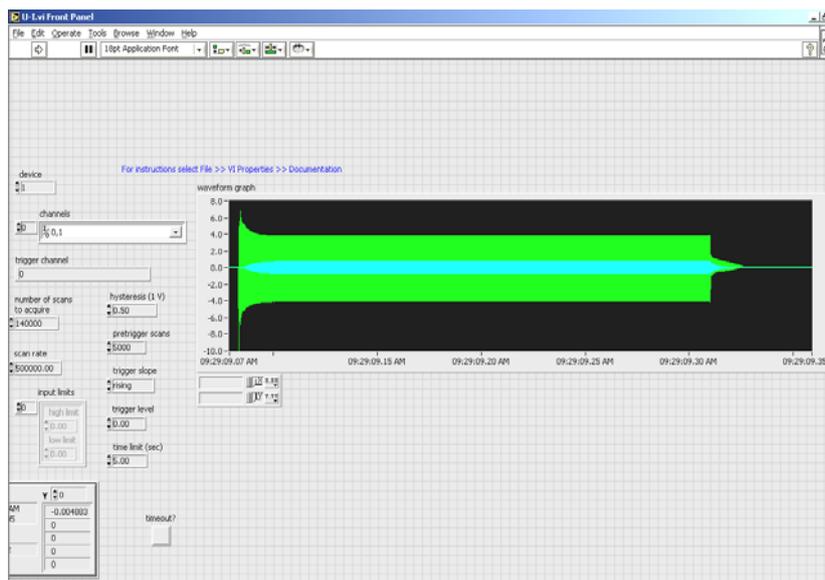


图 3-40 电压/电流采集介面

由于示波器存储算计的限制，对粗铝线键合/热声倒装键合的超声驱动信号通过双通道 5M 采集卡进行实时采集，图 3-39 是基于 Labview 的采集程序图，LabVIEW 是美国国家仪器公司(National Instruments)开发的一种图形化的编程环境。其名称含义为实验室虚拟仪器工作平台(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)。LabVIEW 的程序设计实质上就是设计一个个的“虚拟仪器”，即“VIs”。在计算机显示屏幕上利用函数库和开发工具产生一个前面版(Front Panel)，程序的前面板具有与传统仪器相类似的界面，可接受用户的鼠标和键盘指令。在后台则是利用图形化的编程语言编制用于控制前面板的框图程序，又称为流程图，流程图提供 VI 的图形化源程序。在流程图中对 VI 编程，以控制和操纵定义在前面板上的输入和输出功能。流程图中包括前面板控件的连线端，还有一些前面板上没有，但编程必须有的东西，例如函数、结构和连线等。

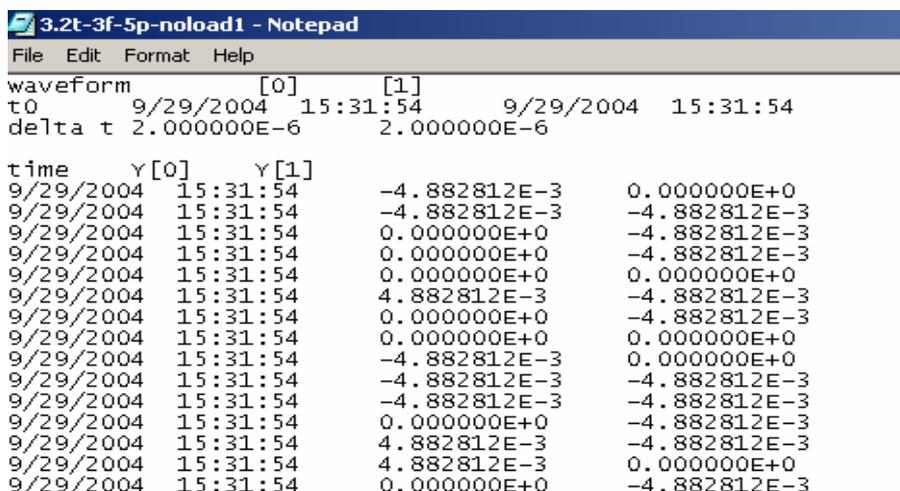


图 3-41 采集的电压和电流信号数据

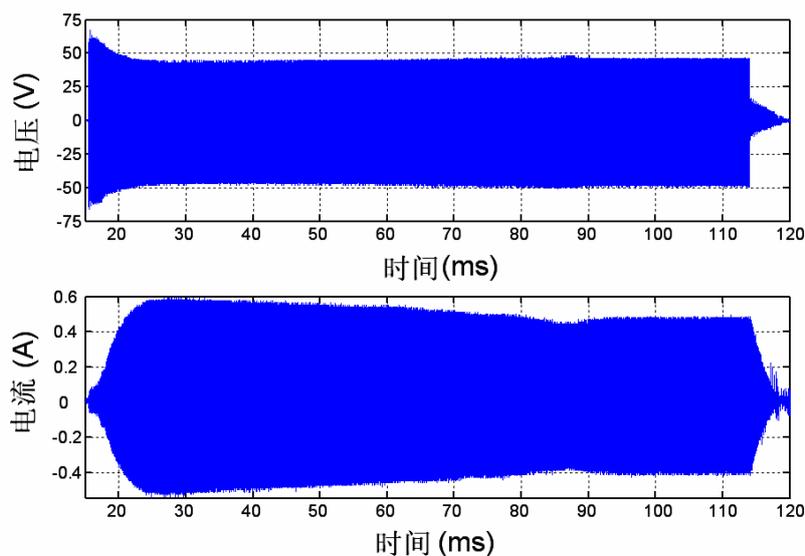


图 3-42 驱动电压和电流信号

采集系统主要有两部分构成，第一部分是数据采集部分，第二部分是数据处理部分。数据采集部分的软件用于采集实验数据，并将这些数据保存到内存；数据处理部分的软件用来处理所采集的实验数据，最后再将有关数据保存到硬盘。

图 3-40 是电压/电流采集介面。采集的数据可直接存储为 .text 文本(图 3-41)，Matlab 可方便的进行数据读取，有利于数据处理，如图 3-42 是通过 Matlab 程序处理的超声驱动电压和电流信号。

3.3.2 实时超声阻抗/功率的计算与分析

PZT 换能器的等效电路图(图 3-43)， C_e 和 R_e 分别为压电陶瓷片的电容和电阻， R_t 和 X_t 分别为变幅杆振动反映到电路中的力阻和力抗。在键合过程中，PZT 换能器输入阻抗并非一个纯阻，而是复阻抗，只有当 PZT 换能器处于谐振状态时刻，PZT 换能器输入阻抗为纯阻性，即此时 X_t 为 0。不工作时，其电特性表现为一个纯电容。在键合过程中，PZT 换能器输入阻抗是复阻抗。

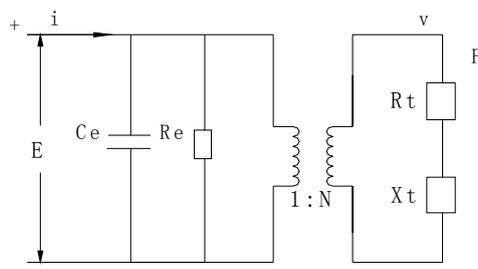


图 3-43 PZT 换能器的等效电路图

PZT 换能器输入阻抗表示:

$$\begin{aligned} Z(t) &= \frac{U(t)}{I(t)} = \frac{U_m e^{j(\omega t + \phi_1)}}{I_m e^{j(\omega t + \phi_2)}} = \frac{U_m}{I_m} e^{j(\phi_1 - \phi_2)} \\ &= Z_m (\cos(\phi_1 - \phi_2) + j \sin(\phi_1 - \phi_2)) \end{aligned} \quad (3-1)$$

一般而言,实际通过数字示波器采集得到的电压和电流信号为具有正负值的实部数据,由此不能直接采用获得的电压除以电流来表示换能器的输入阻抗。同样,如果通过一定时间内的电压和电流的平均值统计来计算 PZT 换能器的输入阻抗,即:

$$\bar{U}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad (3-2)$$

$$\bar{I}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \quad (3-3)$$

信号就会因为正负值而相互抵消,所以,这一方法也欠于妥当。

采用一定时间内的均方根统计值来计算 PZT 换能器的输入阻抗,即采用广义阻抗的概念来表征 PZT 换能器的输入阻抗变化:

$$Z_g = \frac{U_0}{I_0} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(x)^2 dt}}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(x)^2 dt}} \quad (3-4)$$

将 PZT 换能器驱动电压和电流信号离散化之后,可以得到:

$$Z_g = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{k=N} u(k)^2 / N}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{k=N} i(k)^2 / N}} \quad (3-5)$$

$u(k)$ 、 $i(k)$: 一时间段内采集的数据;

N : 一时间段内采集的数据点数。

其中 U_0, I_0 为数据有效值统计。 $u(k)$ 和 $i(k)$ 为一时间段内采集的数据, N 为一时间段内采集的数据点数, N 必须大于电压和电流信号的周期内的数据点数。并且, N 远小于整个键合周期内的数据个数,所以采用有效值统计来计算输入阻抗是可行的。当数据的采样频率为 **500Ksa/s** 时,电压和电流信号的周期内的数据点数为 **9**。

在实验中,在电路中串连 $R=9\Omega$ 的电阻,键合参数设置:时间为 **100ms**;功率为 **15W**;压力为 **360g(3.6N)**。示波器数据采集参数设置:采集频率为

500Ksa/s; 记录长度为 125K。

对信号进行处理的过程中, 主要使用目前国际上最流行、应用最广泛的科学与工程计算软件——Matlab, 它广泛应用于自动控制、数学运算、信号分析、图象处理等各行各业, 也是进行许多科学研究的重要工具。由于它具有强大的计算和绘图功能、大量稳定可靠的算法库和简洁高效的编程语言, 已成为数学计算工具方面事实上的标准。

图 3-41 中是示波器采集的一组 PZT 换能器驱动电压和电流数据经 Matlab 处理的电压和电流曲线。有效值均方根 PZT 换能器输入阻抗 Matlab 计算结果(如图 3-44)。

基于这种有效值均方根处理的 PZT 功率表达为

$$P_g = \sqrt{\sum_{k=1}^{k=N} u(k)^2 / N} \times \sqrt{\sum_{k=1}^{k=N} i(k)^2 / N} \quad (3-6)$$

通过 Matlab 计算结果(如图 3-45)。

图 3-44 PZT 换能器广义输入阻抗曲线表明:

1)同样的参数条件下, 负载阻抗比空载阻抗大, 超声键合时阻尼的变化, 导致负载阻抗的增大。

2)同样的参数条件下, 试验表明一焊阻抗小于二焊阻抗, 一焊比二焊键合过程少约束, 所以一焊阻抗小, 这与铝线键合的分离界面的 SEM 特性分析一致。

图 3-45 是 PZT 换能器广义输入功率曲线, 表明空载、一焊、二焊特性: 同样的参数条件下, 二焊时, 由于一焊后的铝引线约束, 制约超声能的传递/转化, 一焊和空载的功率差小于二焊和空载的功率差, 在一焊界面形成较好的粘合, 形成较好的结构特性和强度。

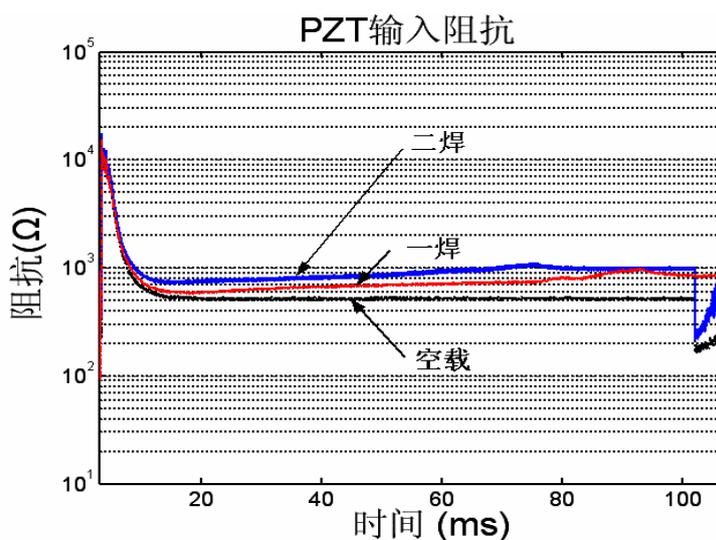


图 3-44 PZT 换能器广义输入阻抗(N=18)

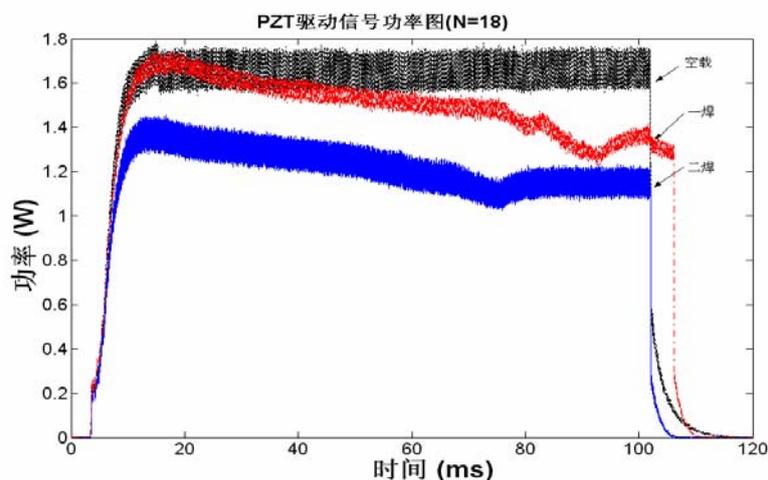
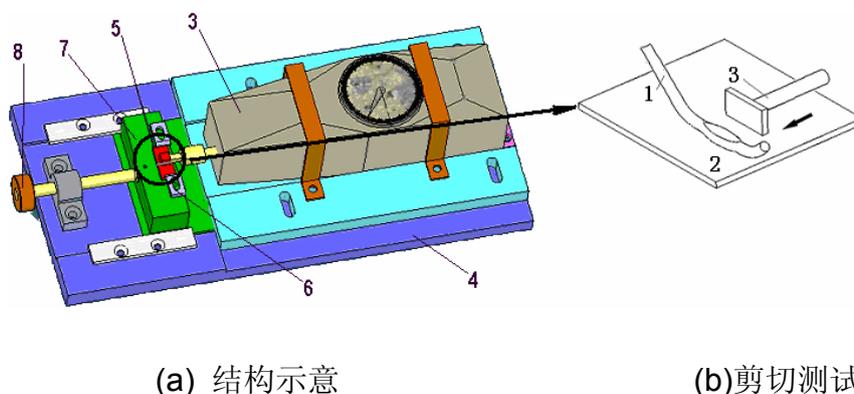


图 3-45 PZT 换能器驱动功率(N=18)

从一焊和二焊实时的阻抗与功率特性可显示键合过程的键合状态，最终反应于它们的键合界面特性差异。与一焊和二焊界面分离的 SEM 特性分析一致。

3.3.3 键合过程的功率特性

在 U3000 粗铝线键合机上，施加同样的参数条件下(功率 8 格、压力 9 格、时间 400ms、铝线直径 500 μ m)，重复进行键合实验，并实时采集每次键合的实时电压、电流信号，通过上述方法处理获得功率曲线，对键合后的焊点通过设计的剪切力测试仪进行剪切强度测试，如图 3-46 用自制测力计(由 SN-10 测力计改装,其测量范围为 ± 10 N，精度为 0.1N)用于铝线键合点剪切力测试。如结构示意图 2-46，将 SN-10 测力计 3 半永久固定于金属底板 4 上，引线框架 5(待测件已连接于其上)用螺栓 6 固定于可移动的滑台 7 上，然后，调整旋钮 8 驱动滑台 7 向测力计 3 方向移动。当测力计 3 测刀触及待测件时，测力计同时显示剪切力值。最后，待测件从引线框架 5 上脱离，测力计 3 上的表盘显示出芯片与引线框架间的实际最大剪切强度值。其剪切力测试范围 0-1200g，精度为 1g。



(a) 结构示意图

(b) 剪切测试

图 3-46 倒装键合强度测试计示意图

表 3-1 各键合点的剪切强度

序号	剪切力 (g)	低强度点 (×)	序号	剪切力 (g)	低强度点 (×)
1	818		26	985	
2	180	×	27	900	
3	600		28	790	
4	878		29	954	
5	921		30	810	
6	831		31	802	
7	840		32	929	
8	684		33	808	
9	850		34	900	
10	870		35	971	
11	830		36	916	
12	890		37	980	
13	0	×	38	960	
14	848		39	810	
15	992		40	900	
16	960		41	891	
17	950		42	915	
18	980		43	910	
19	940		44	915	
20	842		45	0	×
21	819		46	845	
22	973		47	872	
23	790		48	856	
24	0	×	49	890	
25	920		50	960	

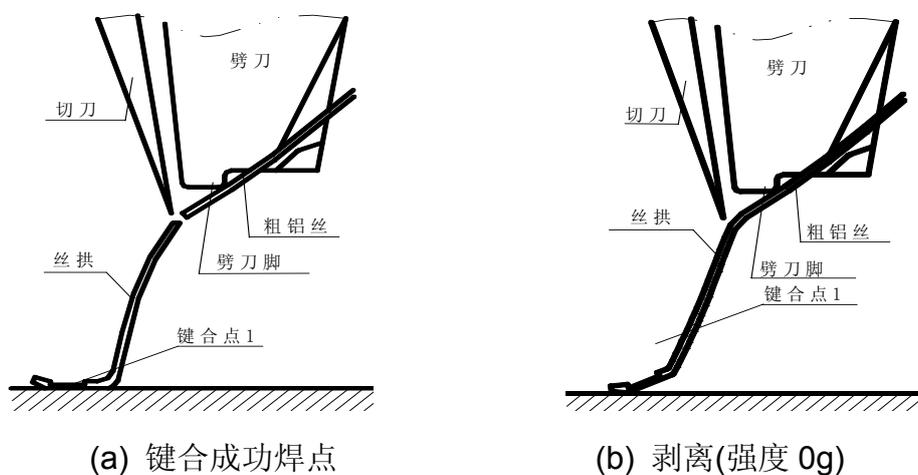


图 3-47 键合状态

50 次重复的实验, 剪切强度测试结果如表 3-1, 表 3-1 中有 4 个低强度键合点 < 200g, 0g 表明此点生产的键合强度非常小(图 3-47), 焊接中随着劈刀上升运动焊点被自动分离, 其它各点剪切强度范围大约是 800g—1000g, 图 3-48 是剪切强度分别为 818g、920g 对应的功率曲线, 图 3-49 是剪切强度分别为 180g、0g 对应的功率曲线。把剪切力值和相应的功率曲线比较, 结果表明: 低强度的超声键合的功率曲线明显偏低。

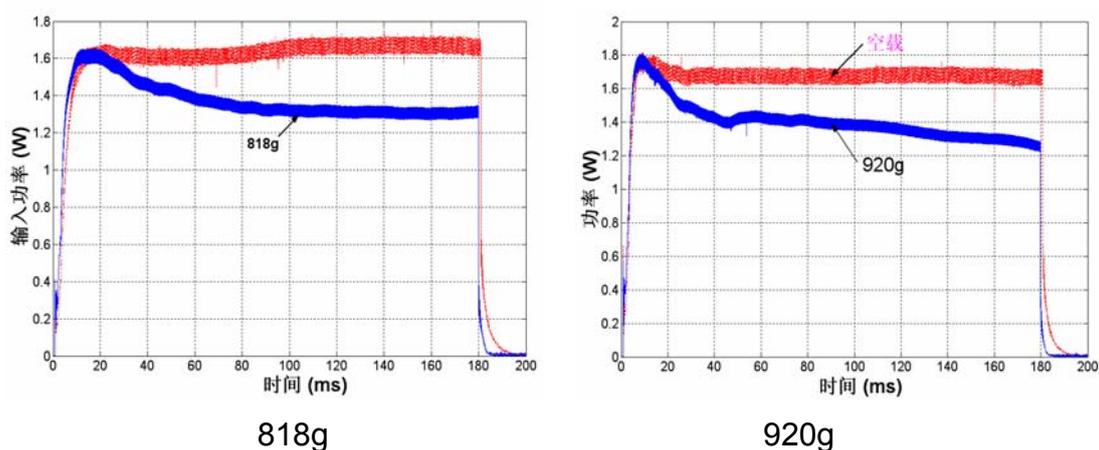


图 3-48 高强度键合点的功率曲线

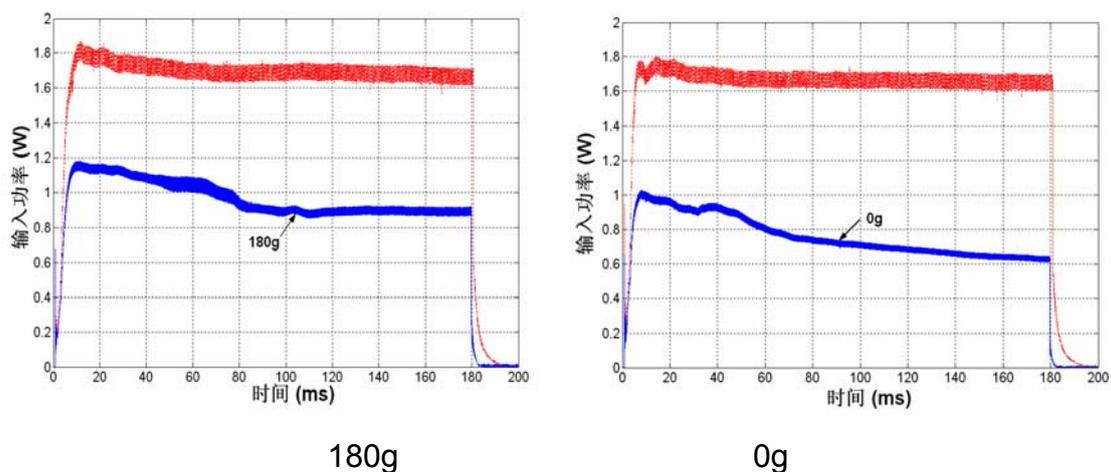


图 3-49 低强度键合点的功率曲线

所以, 可根据实时的功率曲线特征判断键合点的键合强度, 在一定的参数条件下, 比空载功率低很多的功率曲线为低强度的键合点。这种特性显示了键合过程超声能量的转化和键合强度的关系, 可为键合可靠性提供在线监测思路。

3.3.4 高功率过键合失效分析

利用 PSV-400-M2 高频(1.5M)型激光多普勒测振仪测试振动劈刀尖端的振动速度, 对 U3000 型粗铝线键合机的测试如图 3-50, 通过调节超声输入功率条件进行测试并记录振动速度幅值, 获得输入功率与振动速度的关系曲线如图

3-51, 表明超声振动速度与功率呈正比关系。

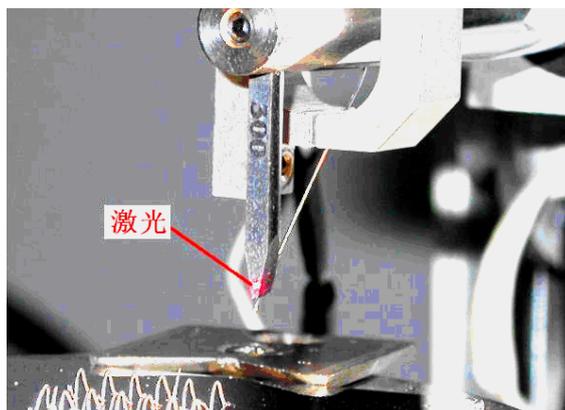


图 3-50 激光多普勒振动测试

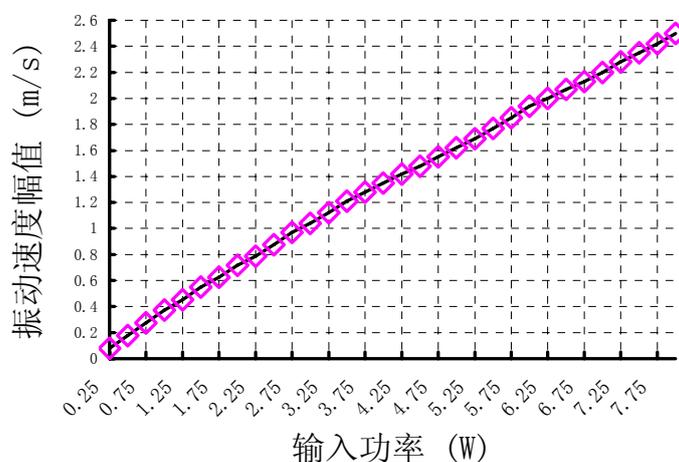


图 3-51 输入功率与振动速度的关系曲线

当功率为 8W, 超声振动速度为 2.50m/s, 根据振动速度和位移的关系计算振动位移峰值 A。

$$A = \frac{2.50\text{m/s}}{\omega} = \frac{2.50\text{m/s}}{2\pi f} = \frac{2.50 \times 10^6 \mu\text{m/s}}{2 \times 3.14 \times 62.73 \times 10^3 / \text{s}} \approx 6.35 \mu\text{m} \quad (3-7)$$

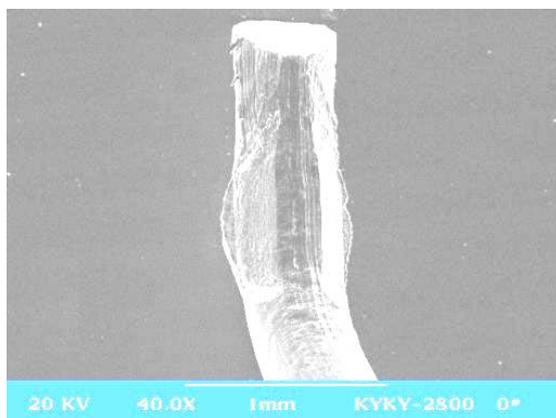


图 3-52 较低功率形成的键合

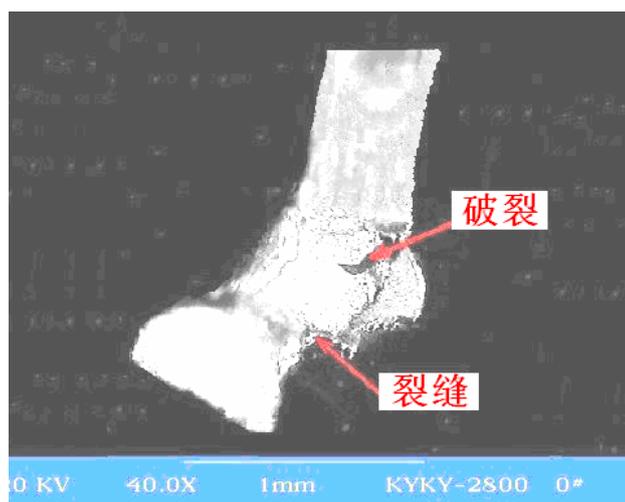


图 3-53 裂缝与破裂

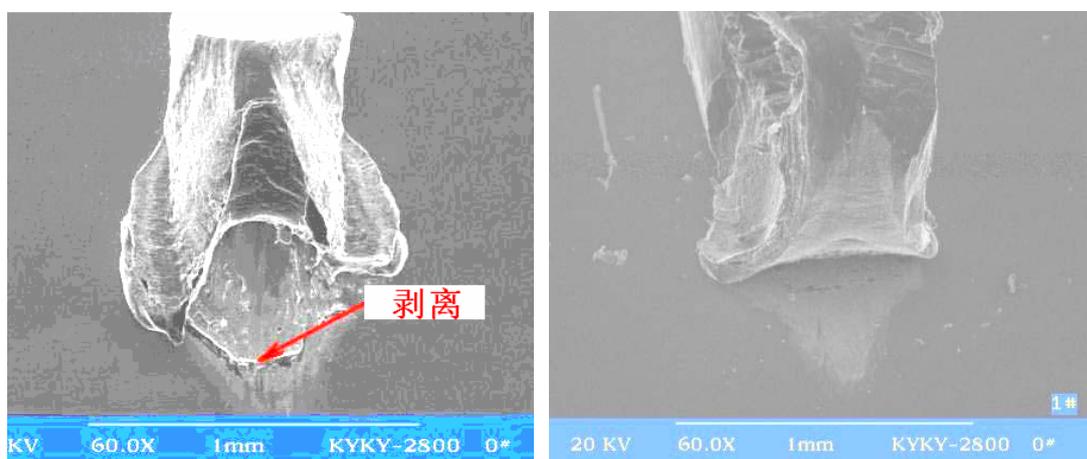


图 3-54 铝线与基板剥离

在较高的功率下，产生较大位移，大位移可能导致键合过程的失效或者发生过键合，对 $\Phi 300\mu\text{m}$ 的铝线键合，图 3-52 是低功率(3W)下形成的键合，具有良好的键合特性，图 3-53、3-54 高功率(8W)下的失效特性，从高功率的失效可知，大位移导致裂缝、破裂、界面分离。所以，超声键合使用较小的超声功率有利于提高键合的可靠性，避免大位移对键合点的损伤、破坏等失效发生，同时也可提高键合的精度。

3.4 本章小结

本章通过对分离后横向键合界面的 SEM 观察与纵向界面的 STEM 测试，观测热声键合点强度分布的非均匀性，对其特性进行了有限元仿真分析，深入探讨微键合点结构的组成，阐明键合强度的内涵，并研究工艺参数与微键合点结构的演变规律；通过设计超声驱动的信号采集电路，获得键合过程超声驱动的实时电压/电流信号，利用均方根法计算 PZT 的阻抗和功率特性，阻抗和功率特性反应键合过程的键合状态，且分析高功率的失效形式，得到如下认识：

1. 热声键合区分离界面形如环带结构, 周边环带脊皱形成强的键合, 中央未键合, 其有限元仿真分析可知, 超声键合点在复合能场作用下, 超声、力使得微键合界面应力、剪切力分布为周边最大, 这种应力状态导致键合微结构与强度也呈同样分布。
2. 键合区的纵向扩散层深度达百纳米量级, 键合界面分离后出现明显的韧窝状, 并且扩散层未被分离, 分离的是引线或基体材料, 这是因为原子互扩散层发生了固溶强化, 其强度大于基体材料的强度, 真实的键合界面未分离, 所以, 微键合区是一种空间结构“引线材料—扩散层—基体材料”。
3. 超声键合三要素超声功率、压力、时间的变化对键合区微结构的影响规律: 在其它条件不变的情况下, 随着超声功率的增加, 脊皱加剧; 随着压力增大, 键合椭圆环逐步延伸扩大, 且椭圆环沿着振动方向的椭圆轴由短轴变为长轴, 脊皱键合区的面积增加; 随着键合时间的延长, 脊皱发展为完整的圆环, 脊皱向中央扩展。
4. 铝键合一焊、二焊的输入阻抗和输入功率表现出不同的实时特性, 同样的工艺参数条件下, 一焊阻抗小, 功率大, 一焊具有良好的键合状态, 形成的键合界面特性比二焊好。
5. 从键合过程的功率曲线发现, 键合强度大的键合点, 其实时的输入功率大, 键合强度弱或为 0 的键合点, 其实时的输入功率曲线比空载时低得多, 键合过程的功率曲线可反应了超声键合状态, 以此可判断超声键合的可靠性, 为键合过程的在线监测提供思路。分析了高功率超声作用下的过键合行为, 如键合点的裂缝、破裂、界面剥离等, 超声功率选择必须适当。

作者已发表与本章内容相关的主要学术论文:

- ✚ Power and Interface Features of Thermosonic Flip Chip Bonding, *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, accepted, April, 2007 (影响因子 1.443, SCI, EI)
- ✚ Microstructural Characteristics of Au/Al Bonded Interface, *Materials Characterization*. 2007, 58: 103-107 (影响因子 0.982, SCI 收录: 138WB, EI 收录: 074310886989)
- ✚ Interface Structure of Ultrasonic Wedge Bonding Joints of Ni/Al, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 2005,15 (4): 846-850 (SCI 收录: 962GP, EI 收录: 05419405678)

第四章 热声倒装界面规律与键合工具设计

芯片倒装互连技术是在芯片焊盘上作凸点，然后将芯片倒扣于基板进行连接，凸点连接比引线键合连线短，传输速度快，可靠性高，热声倒装具有良好的应用前景。

热超声倒装键合是直接将芯片上的节点金球与基板上的焊盘键合，无须经过中间引线，因此可同时键合若干节点。相对回流焊倒装工艺具有工艺简单、连接效率高、可靠性好、无铅的绿色焊接等特点，是当前芯片封装领域中极具发展潜力的一种新型倒装工艺。

热声倒装与超声引线键合相比，存在一些共性规律特性，但热声倒装为群点键合，超声能在键合头的各界面传递表现不同的特性和规律，通过实验和对分离界面的 SEM 观察，本研究提出并研制了大断面的劈刀工具，实现了多点热声倒装。

4.1 热声倒装实验平台的搭建

利用 U3000 粗铝线键合机和 TS-2100 金丝键合机建立热声倒装实验台，如图 4-1 所示，其参数范围：键合芯片： $10\times 10\text{mm}^2$ ；键合功率：最大 30 瓦；键合时间：20 到 500ms；压力：30g 到 1200g；频率：62KHZ；温度：0-400°C。

如图 4-2 所示键合凸点材料：Au；基板材料：Ag；键合点数：8；键合点直径： $80\mu\text{m}$ ；键合球高度： $30\mu\text{m}$ ；图 4-2 右是芯片经热声倒装键合于基板上的实验样品。

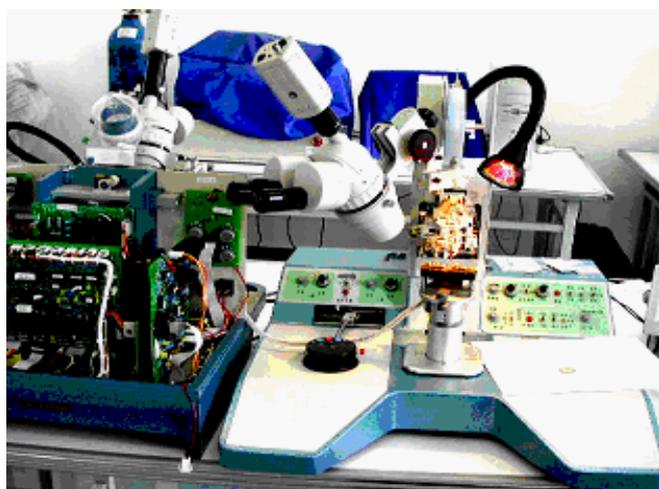


图 4-1 热声倒装实验台

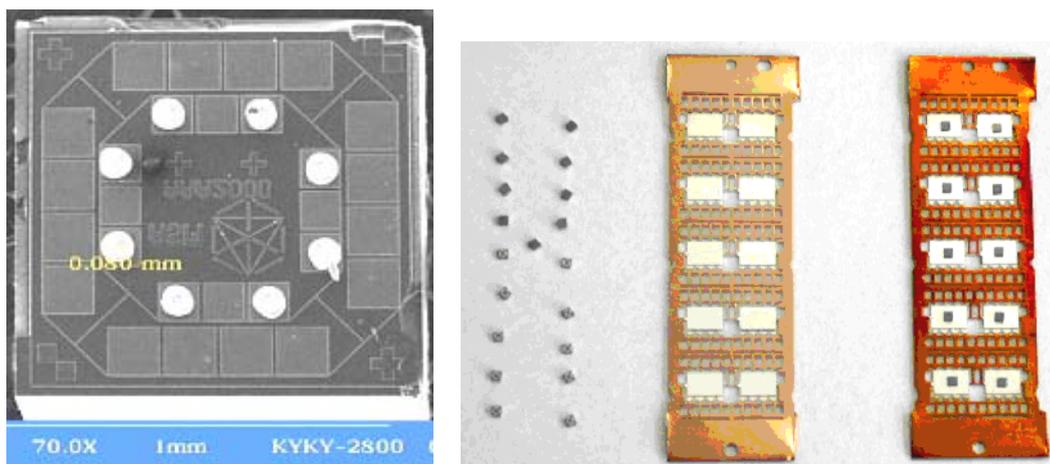


图 4-2 倒装芯片/基板框架

4.2 多点芯片热声倒装键合的实现

多点热声倒装键合分离界面存在类似的规律特性，键合界面间原子扩散产生键合强度，键合强度的分布是不均匀的，在键合界面的圆环带形成键合强度。

多点热超声倒装键合的原理如图 4-3 所示：在 $1 \times 1 \times 0.25\text{mm}$ 的芯片表面布满了各种电路并在其阵列排列的焊盘上植有直径约 $80\mu\text{m}$ 的金球；在基板的上表面同样布满了各种电路，也有与芯片焊盘同样布局的引脚；二者通过光学装置对准。之后，在工具压力、加热台加热和工具传递过来的超声能作用下，金球被键合在基板引脚上。

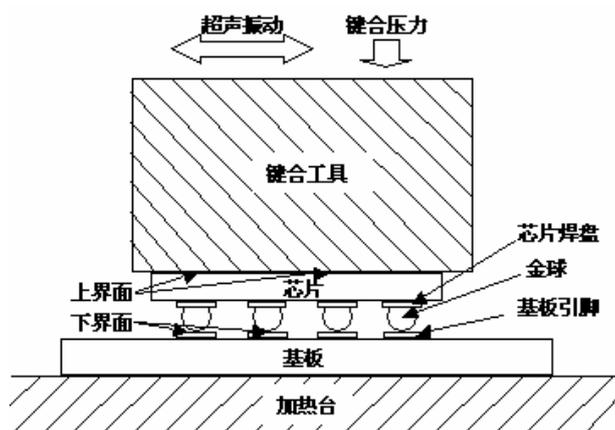


图 4-3 多点热超声倒装键合原理示意图

倒装芯片夹持方式是超声能量传递环节中的重要组成。在温度、压力、分别为 180°C 、 240gf 条件下研究了压力约束模式，如图 4-3 所示：芯片在工具压力作用下定位；超声能量通过芯片与工具间摩擦力传递。

图 4-4 工具的材料是陶瓷，可承受高频超声振动传递在劈刀/芯片界面上所产生的剪切力和与芯片接触所产生的摩擦力。实验研究发现：如果工具的端面积

较小(图 4-5)，在倒装键合过程中芯片受力不均，在超声振动作用下芯片滑动和转动严重，因此仅有极少数键合成功且键合强度低、芯片上的金球严重偏离键合位置。键合界面分离后如图 4-6 所示，出现界面滑动、凸点移位、旋转等现象，严重影响键合性能甚至倒装失效。如果增大劈刀与芯片的接触如图 4-7，上述现象会有所改善。

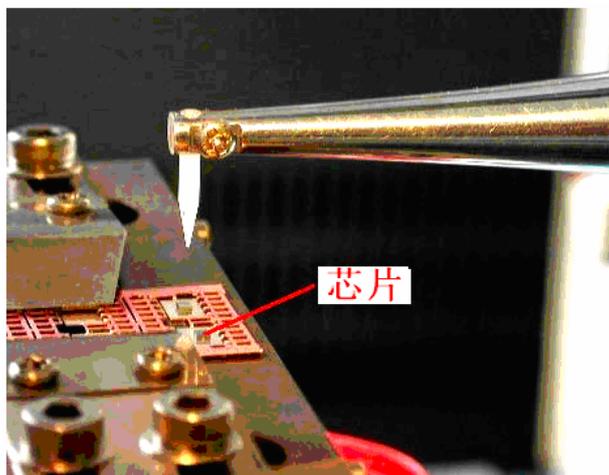


图 4-4 基于 TS-2100 键合机的陶瓷尖端劈刀的热声倒装

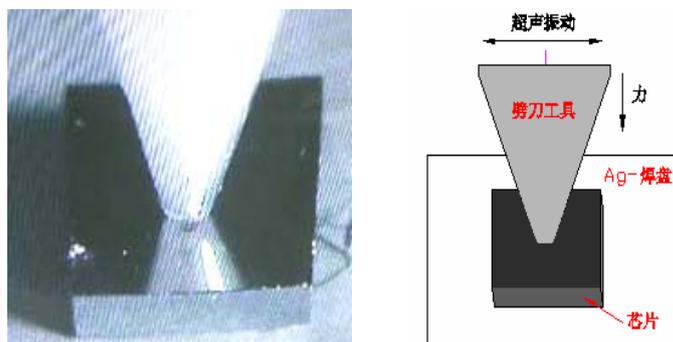


图 4-5 压力接触模式下的小接触面积

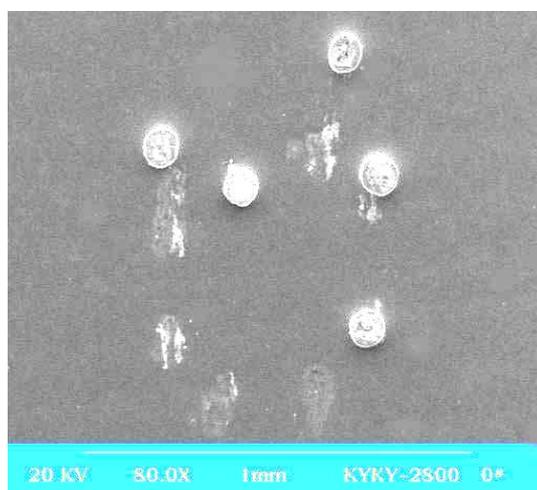


图 4-6 小接触面积倒装键合的破坏界面的 SEM 图片

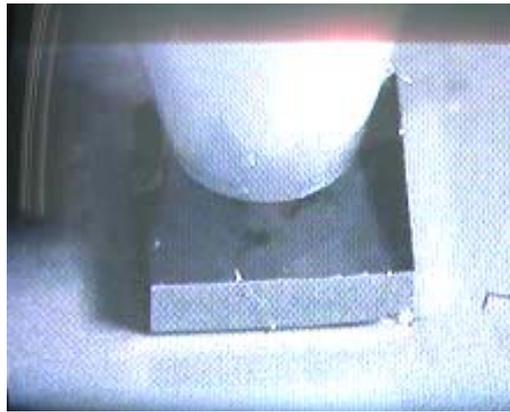


图 4-7 压力接触模式下的中等接触面积

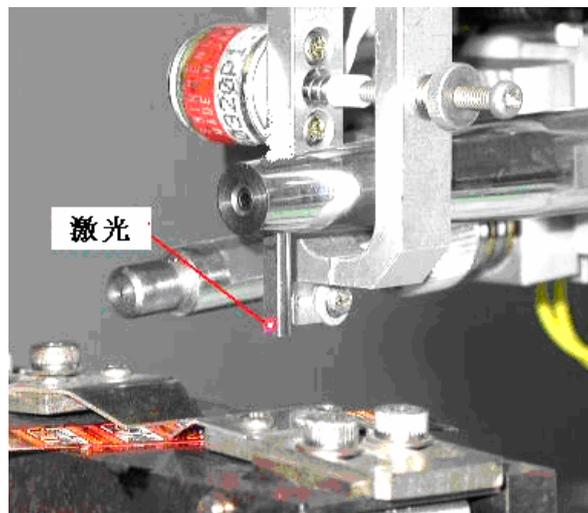


图 4-8 基于 U3000 粗铝线键合机的热声倒装

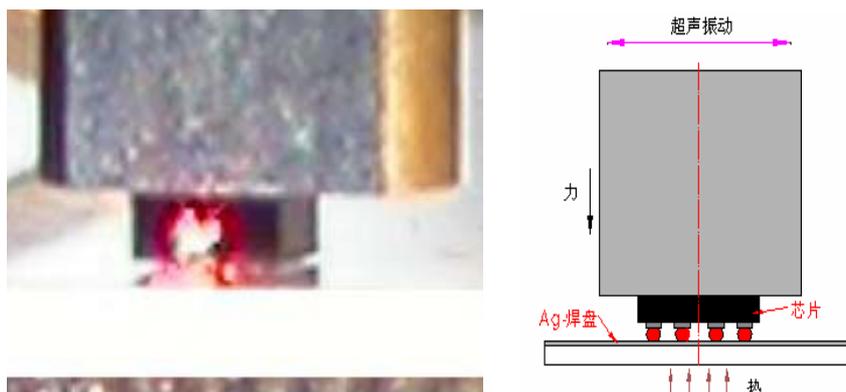


图 4-9 压力接触模式下的接触面积

通过 U3000 粗铝线键合机如图 4-8，进一步加大工具端面积后(如图 4-9)再进行倒装实验发现：芯片滑动和转动能很好地控制，芯片上的金球基本没有偏离键合位置，键合界面分离后如图 4-10 所示：

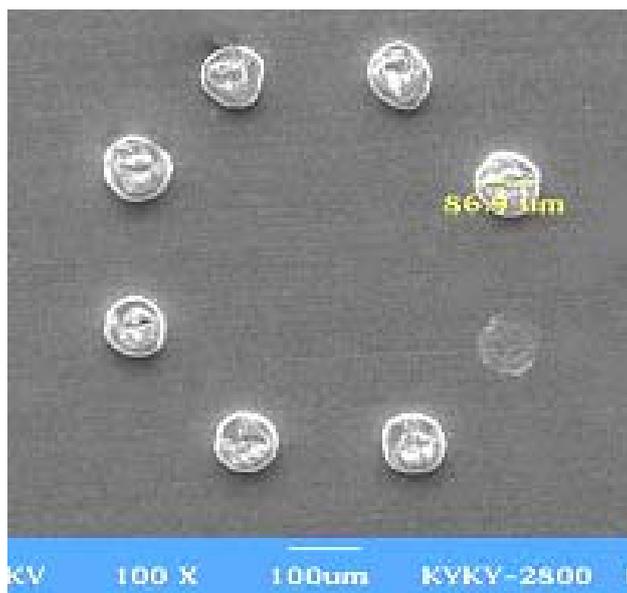


图 4-10 大接触面积倒装键合的分离界面 SEM 图片

基于上述结果，集成组装的热声倒装键合平台(图 4-11)，改进了倒装工具，成功地完成了 8 个 I/O 数芯片(1×1mm)的倒装键合，金球直径 80μm，在优化的参数条件下，图 4-10 表明把芯片分离后有 7 个凸点牢牢键合在基板上，只有一个凸点在基板上分离了(即一个在芯片上未分离)，说明其键合强度大于植球界面的键合强度，通过参数的调节优化，8 个 I/O 凸点键合工艺参数范围：超声能：1~1.5W，压力：300~350g，时间：300~400ms，温度：160~200°C。基于劈刀的传能特性考虑真空吸附的键合工具如图 4-12，多孔劈刀有利于平衡界面受力和能量传递。

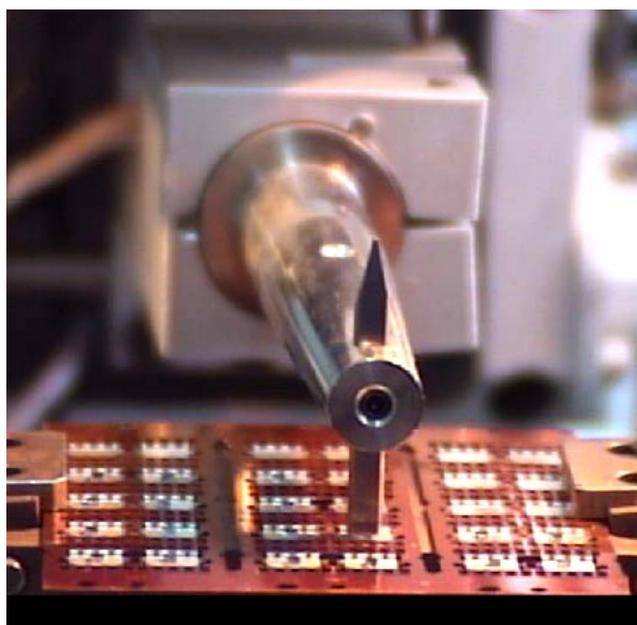


图 4-11 集成热声倒装键合平台

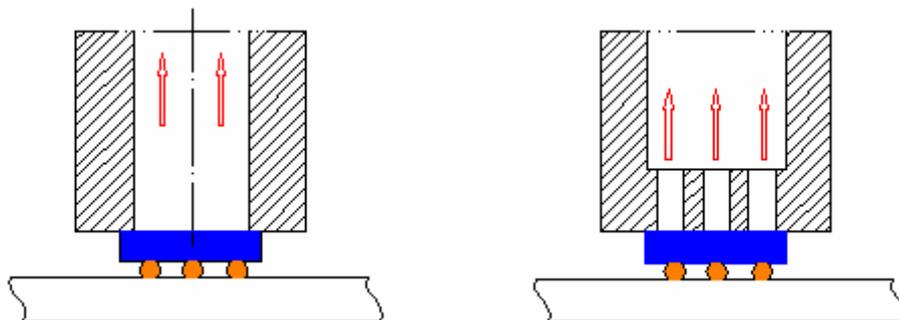


图 4-12 单孔真空吸附(左)与多孔真空吸附(右)

4.3 倒装凸点的热声植球工艺探索

大功率倒装结构LED解决LED走向照明的瓶颈问题，倒装LED正在推广应用，特别是热声倒装通过金凸点，金凸点具有良好的电热特性，通过对正装和倒装结构的有限元分析，设定输入功率为1W，芯片通过银浆粘结在热沉上，厚度为60um；内部热沉上底面直径为3mm，下底面直径为7mm；外部散热板的直径为25mm，周围环境温度假设为30°C，对流模式为空气自然对流，外部散热板底面与空气的对流系数为10 W/(m²·K)(空气自然对流系数最大值)。

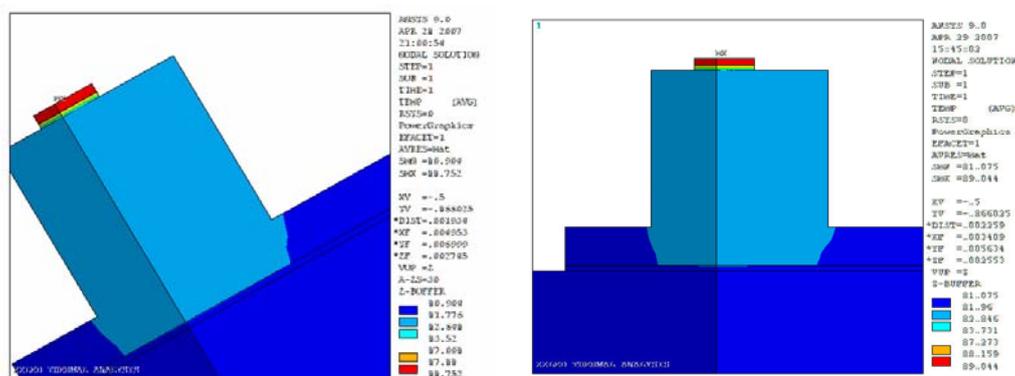


图 4-13 正装 LED 温度分布

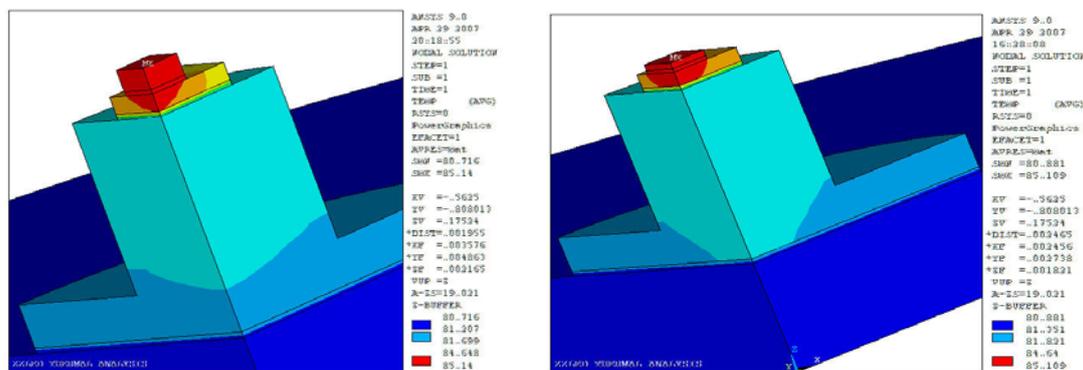


图 4-14 倒装 LED 温度分布

图4-13是正装LED的温度分布，图4-14是倒装结构LED温度分布，其结果列入表4-1。从模拟所得的温度分布图上，很容易看出，使用正装封装的LED，它的内部温度较高，各层之间的温度梯度较大，而使用倒装芯片的LED则与之相反，倒装凸点缩短了散热通道，温度梯度小，电流流通的距离缩短，电阻减低，所以热的产生也相对降低。

表 4-1 正装/倒装 LED 芯片温度计算结果

	正装	倒装
最高温度(°C)	89.044	85.109
最低温度(°C)	81.075	80.881

大功率倒装 LED 目前的凸点数通常设计为 12-20 个，将来的凸点数目可能达 20-50 个，在微电子的高密 IC 也在逐步运用热声倒装技术，如摩托罗拉和 ASM 正在开发 400 个凸点的热声倒装键合技术。

为研究较高密度的热声倒装键合规律与技术，本研究研发了高精度的金球植球工艺，通过改进 T/S-2100 金丝球键合机的工艺和控制成功的实现了金球植球技术，如图 4-15，双球植球适用于 LED 的芯片结构(图 4-16)，可通过植双球的方法解决刻蚀后正负极形成的几何台阶差值问题。图 4-17 是在 1×1mm 芯片焊盘植球，具有良好的一致性。

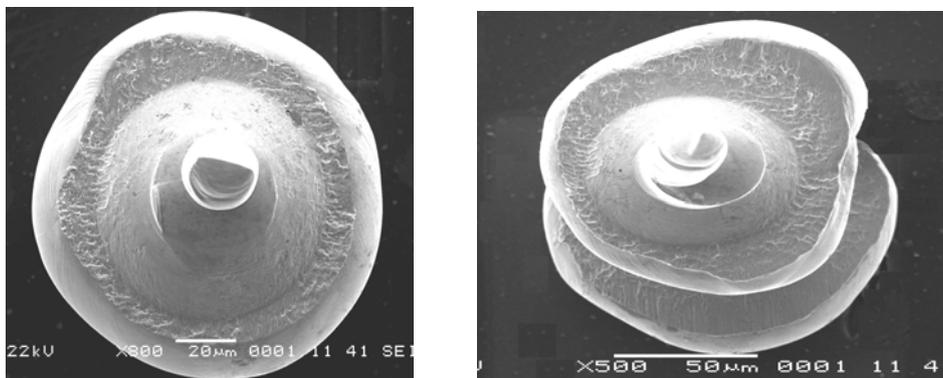


图 4-15 单球和双球植球形状

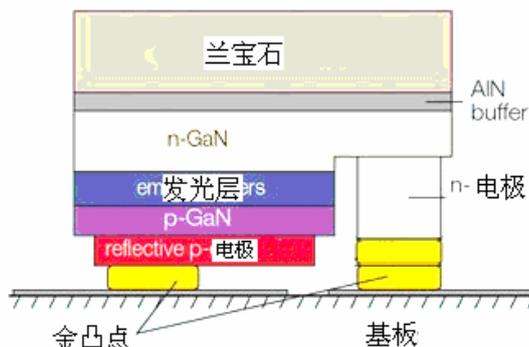


图 4-16 倒装结构发光二极管(LED)

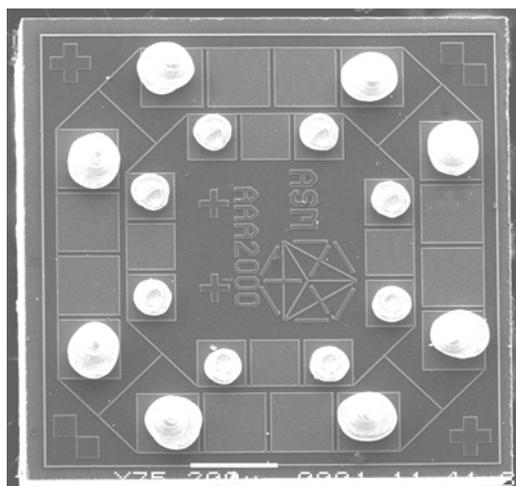
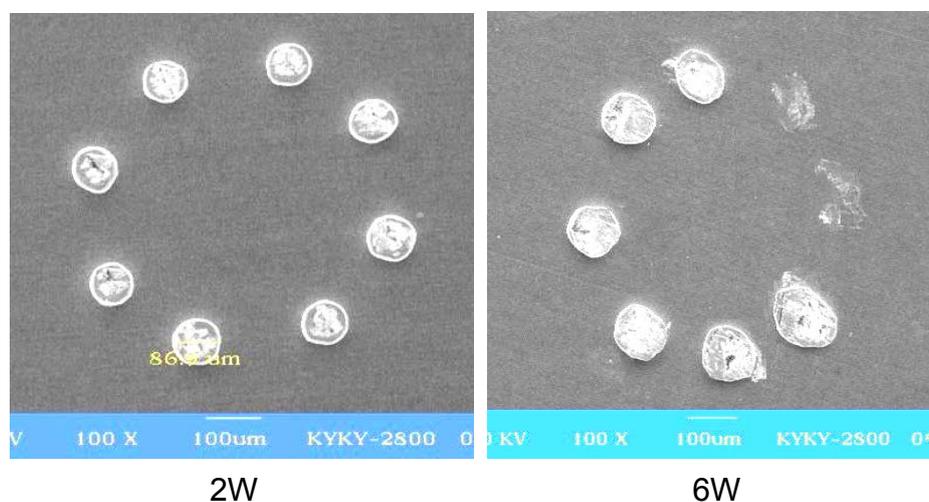


图 4-17 连续植球

通过金球植球工艺在芯片上制作 20 个凸点，基于集成的倒装平台，调节各键合参数，实现了 20 个 I/O 凸点的倒装键合，其工艺参数选择为：超声能：2W，压力：700g，时间：450ms，温度：200°C。部分倒装键合点互连强度超过植球界面强度。现有倒装平台的工艺参数能满足 8~20 个 I/O 数倒装芯片的热声键合，对发展更多 I/O 数的倒装键合还有可扩展的参数空间。

4.4 倒装界面、键合工具、工艺的协同

从前面分析可知，在超声引线键合中，高功率造成过键合失效，在热声倒装中，超声功率过大，产生较大的振动位移，同样会出现一些负面影响，如图 4-18，较小功率下键合良好，在较大功率下，金球凸点出现转动和滑动，金球变形大，金球间必要的间隙未保证，可能导致芯片 I/O 之间的短路。高功率使工具与芯片之间的摩擦造成芯片背面磨损，甚至破坏，如图 4-19 是高功率在芯片上激起凹坑。



2W

6W

图 4-18 不同功率下热声倒装分离界面

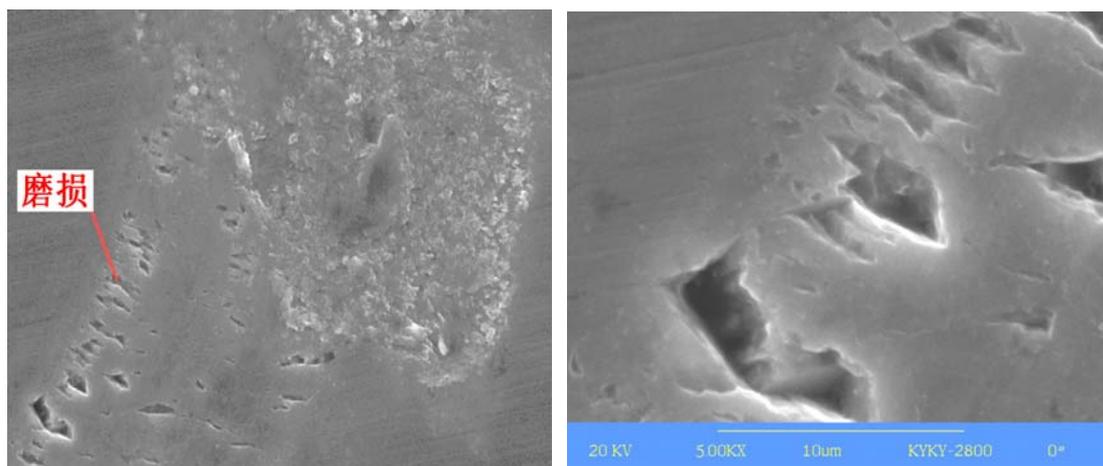


图 4-19 高功率对芯片损伤

热声倒装键合与引线键合，特别是楔焊键合，二者在设备及工艺上都具有很大的相似性，但热声倒装是新增一组界面的点阵键合，其能量传输路径与界面间的相对运动有新变化，工艺参数表现明显的差异：

a) 倒装单点转化超声功率比单点键合要低，倒装 n 个点功率 $< (n \text{ 个点}) \times (\text{一个点的功率})$ ，超声功率不能过大，功率过大振幅增大，过大的振幅影响键合精度，甚至导致芯片转动而使倒装失效，小功率热声倒装键合可靠性高、位置精度高等特点，目前的实践取值为 $1 \sim 3W$ ；

b) 键合时间比单点要长一个量级，金球的较长时间的流变可使点阵金凸点得到充分扩展键合，可使凸点高低不一致矛盾得到缓解，实验中当倒装 $8 \sim 20$ 个点时，键合时间取 $300 \sim 500ms$ ；

c) 每点平均压力比引线键合压力要小，过高过大影响能量传递与转化，试验中取 $30 \sim 50g/\text{点}$ ；

d) 施加热能，明显改变功率、时间、压力的匹配关系，实验中取 $150 \sim 200^\circ C$ 。针对不同点对数、不同材料体系优化选择与之匹配复合能场参数。

新增劈刀/芯片界面，界面能量的传输与速度分离，倒装工具与芯片小接触面积发生的芯片转动和滑动现象，传能环节的改变，相应改变了键合过程能量的传递规律和与之匹配的焊接工夹具系统，需要研制新的高效倒装超声系统。

研发高密高可靠的热声倒装系统，应具备倒装键合的在线监测系统，功率/阻抗采集与分析系统、压力/温度在线监测系统(FSG-15N 触力传感器分辨率： $1g$ ，快速响应： $1ms$ 等功能)、超声振动运动测试系统(高频 $1.5MHz$ 扫描激光多普勒测振系统)等。

4.5 本章小结

为研究热声倒装键合和发展高密高性能的微电子封装技术,搭建了热声倒装键合实验平台,并研究了热声倒装工具与键合性能的关系;通过改变金丝机的运动轨迹完成了引线键合植球工艺,探索了高密热声倒装。通过研究得到如下认识:

1. 集成研制的热声倒装实验台、大端面键合工具、芯片多孔吸附器等构成的热声倒装键合系统,该系统可进行较宽工艺范围的芯片热声倒装试验。
2. 多点热声倒装工艺参数与单点引线键合存在较大的差异,多点倒装使用的参数值并不是单点之和,使用较小的超声功率(1.5-2W),较长的键合时间(300-500ms),压力(30-50g),可使金球在较小变形情况下形成高强度的倒装键合,金球变形较大会导致倒装精度下降甚至金凸点间短路。
3. 利用金线键合改变劈刀的运动轨迹实现了在芯片上植金球,并进行了高密热声倒装实验,在倒装实验台上完成了 8-20 个凸点的热声倒装键合实验,为发展高密倒装技术提供了实验数据。

作者已发表与本章内容相关的主要学术论文:

- ✚ Features of machine variables in Thermosonic Flip Chip, **Key Engineering Materials**. 2007, 339: 257-262. (EI 收录: 071210498653, ISTEP 收录)
- ✚ Microstructure Characteristics at The Bond Interface, **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 2005,18(4): 555-558. (EI 收录: 06079701566)
- ✚ Characteristics of ultrasonic vibration transmission in bonding process. **Journal of Central South University of Technology**, 2005, 12 (5): 567-571. (SCI 收录: 981DG, EI 收录: 05519604612)

第五章 倒装多界面超声传递规律与新工艺

热声倒装正处发展阶段，倒装过程的内在规律并不十分明确，对倒装二键合界面的高分辨透射电镜测试与分析，发现倒装二键合界面不同的特性和不均匀的扩散层厚度，为控制界面扩散的非均匀性与减少金属间化合物厚度，提出了“基板传能”和“基板植球”模式的热声倒装新工艺，试验获得了超声能在二界面的转化规律，为热声倒装工艺设计提供重要的理论依据。

5.1 倒装二键合界面 TEM 特性与界面扩散

热声倒装键合从热声引线键合技术发展而来，业界在芯片上植 Au 球倒扣于基板上再进行热声倒装键合，现用热声倒装是利用超声、力、热作用于“芯片—凸点、凸点—基板”二个连接界面，实现芯片 I/O 端口之间的互连，形成连接强度和电热通道。如图 5-1 芯片焊盘是约 1 微米厚的铝(Al)膜，其金(Au)凸点是工艺简单的金球植球机完成，基板表面连接层约为 1 微米厚的银(Ag)或金层，如图 5-1，称此常规的热声倒装键合工艺为“芯片植球”模式。

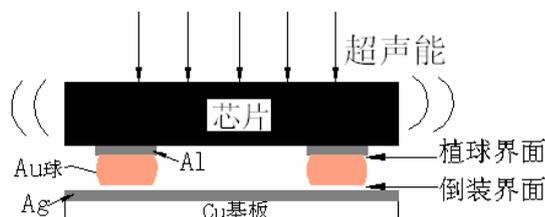


图 5-1 热声倒装示意图

对热声倒装80um微小键合点的样品制作与测试困难，用扫描电镜无法精确反应界面扩散数据，采用高分辨透射电镜方法进行精确的测试与分析，针对倒装点首次采用包埋方法并利用Gatan691高精密度点减薄仪成功的制作了微米级微小点TEM样品，在HRTEM的300kV电压进行EDS扫描测试，电子束大小聚焦10nm，测试表明HRTEM能很好的反应界面的扩散情况，本实验首次获得其定量的扩散结果。

在倒装参数为功率2W，工作时间400ms，工作温度150°C，及压力3.2N情况下，对TEM样品EDS扫描测试，其键合界面的原子扩散情况如图5-2所示。图5-2中的红线1是能谱扫描位置示意线。从图中可看出Au/Ag原子扩散区厚约为200纳米。

根据Au-Ag相图(见图5-3)，金银间相互扩散的固溶体为无限的，图5-4是

Au/Ag固溶的TEM特性，Au/Ag界面没有形成中间相。

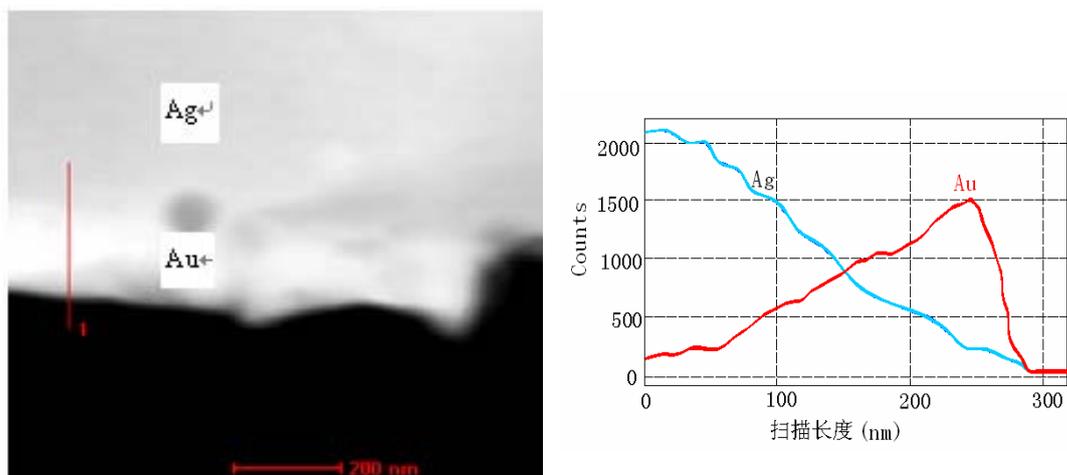


图5-2 Au/Ag倒装键合界面能谱扫描图

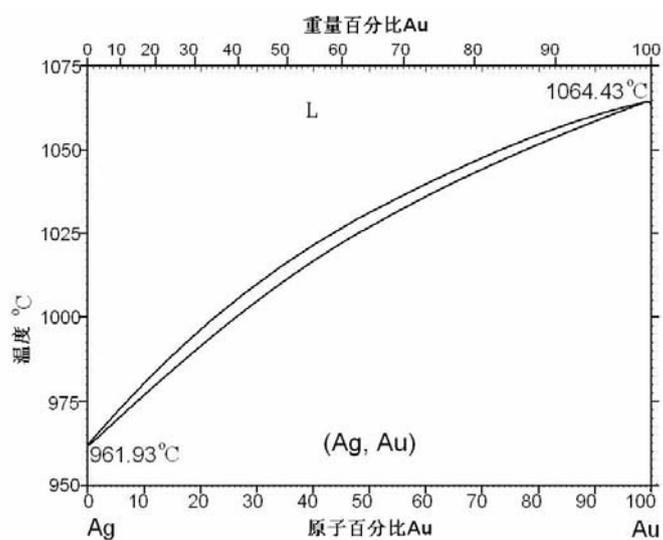


图5-3 Au-Ag相图

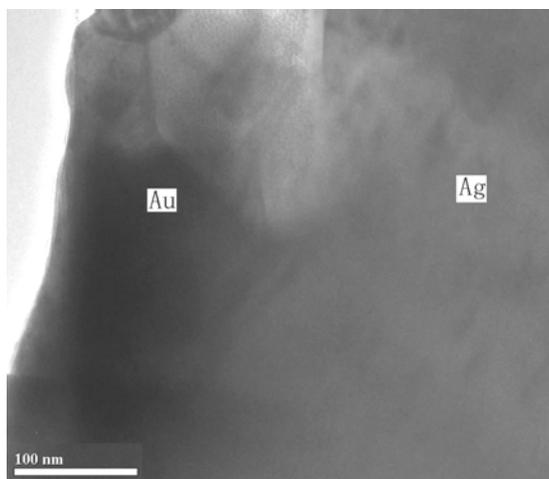


图5-4 Au-Ag倒装键合界面截面TEM特性图

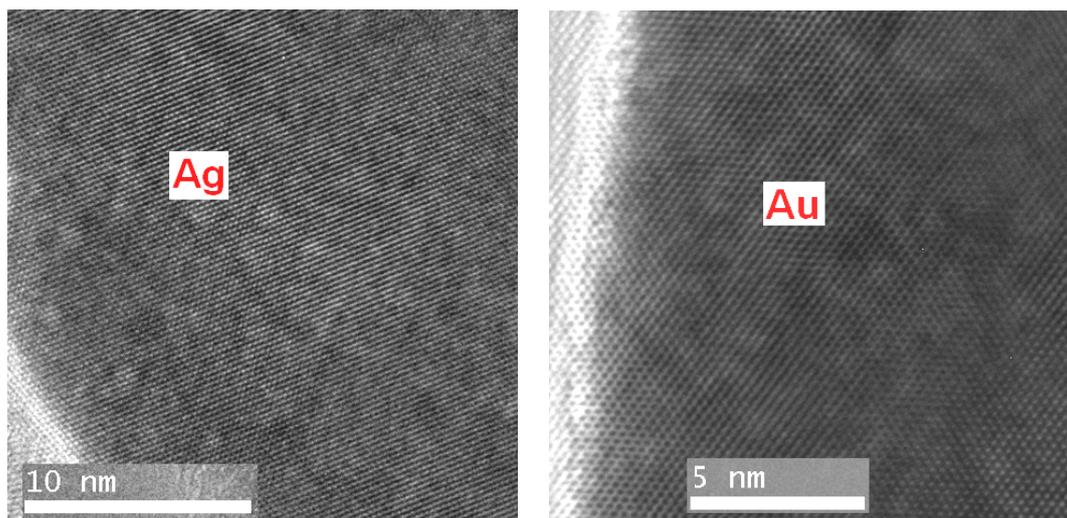


图5-5 非键合界面上的Ag（左）、Au（右）的HRTEM特性图

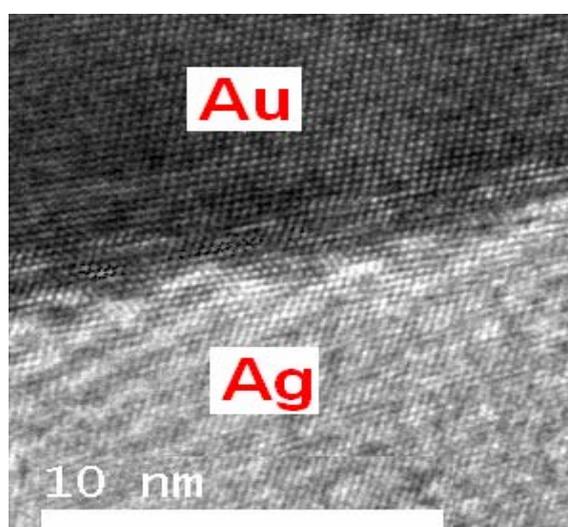


图5-6 Ag/Au键合界面上的的HRTEM特性图

图5-5、图5-6分别是非键合界面上Ag、Au的高分辨像和键合界面Au/Ag的高分辨像，在高分辨下可测试晶体的晶格常数，非键合界面Ag、Au的晶格常数分别为 2.4066\AA 、 2.358\AA ，键合界面上Ag、Au的晶格常数分别为 2.047\AA 、 2.3915\AA ，测试数据表明：键合界面上的Au、Ag晶格常数发生了改变，晶格常数的改变是界面互相扩散的原子引起了晶体晶格的变化所致，进一步表明界面的原子的扩散行为。

图5-7显示了Au/Al键合界面的STEM和原子扩散图。STEM下Au/Al界面上形成了过渡层，图中的红线‘1-1’同样是能谱扫描线。图中可看出Au/Al键合界面的原子扩散区厚度约为500纳米。由于该界面是先经过金丝球键合后又经过倒装键合，因此其原子扩散区厚度明显大于前面Au-Ag的。能谱测试数据请见表5-1。由图5-8的Au-Al相图分析在键合界面应该形成了金属间化合物(如 Au_4Al ， Au_2Al ， AuAl ， AuAl_2 ，或 Au_5Al_3)。由表5-1数据比例表明其成分是以 Au_4Al 为主的金属间

化合物。图5-9显示了Au-Al键合界面的中间相的一些特征，界面新相的晶粒大小，界面形成强的键合。图5-10、图5-11分别是非键合界面上的Al和键合界面上Al/Au的HRTEM特性，表明键合界面互扩散原子形成了牢固的晶体结构。

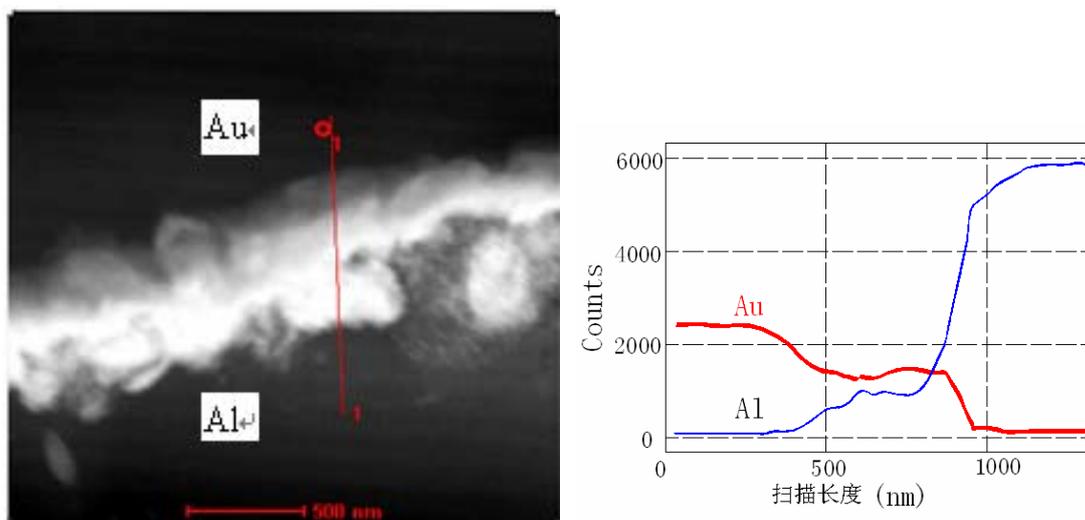


图5-7 Au/Al键合界面的能谱扫描图

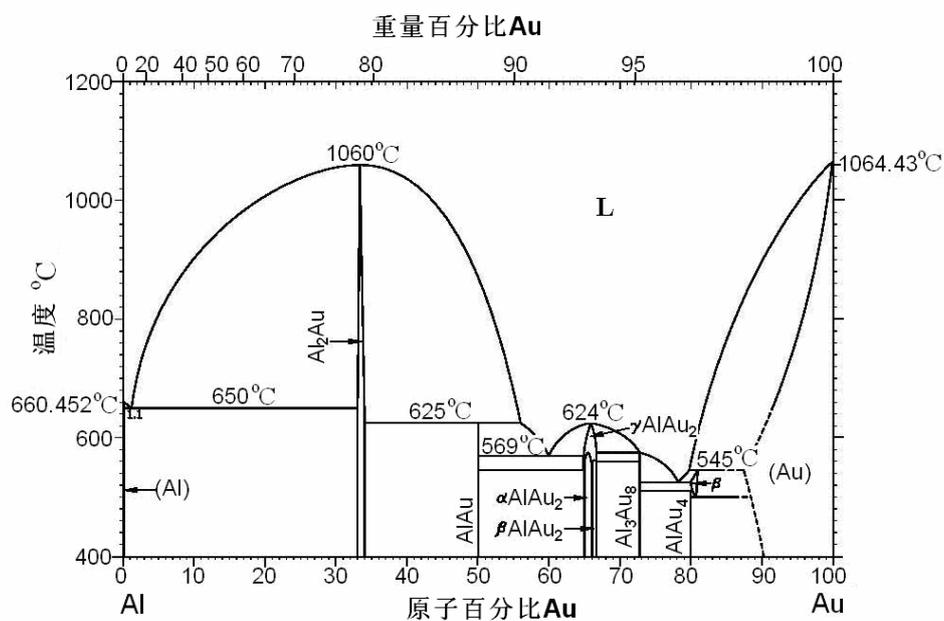


图5-8 Au-Al相图

表5-1 Au-Al界面扩散层能谱分析数据

元素	原子百分比%	重量百分比%
Al	20.23	4.42
Au	79.77	95.58

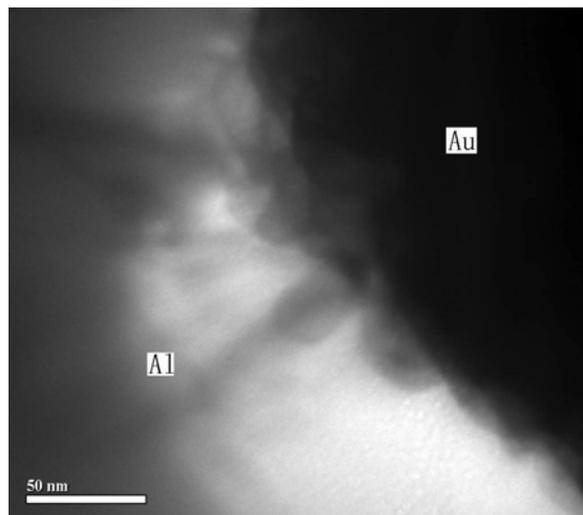


图5-9 Au-Al键合界面电镜图

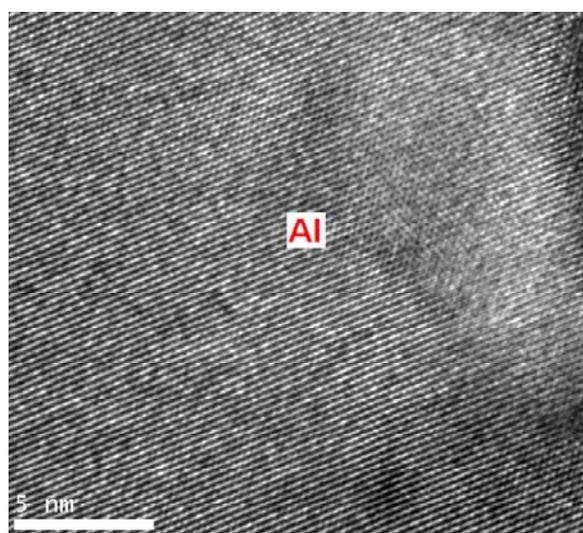


图5-10 非键合界面上的Al的HRTEM特性图

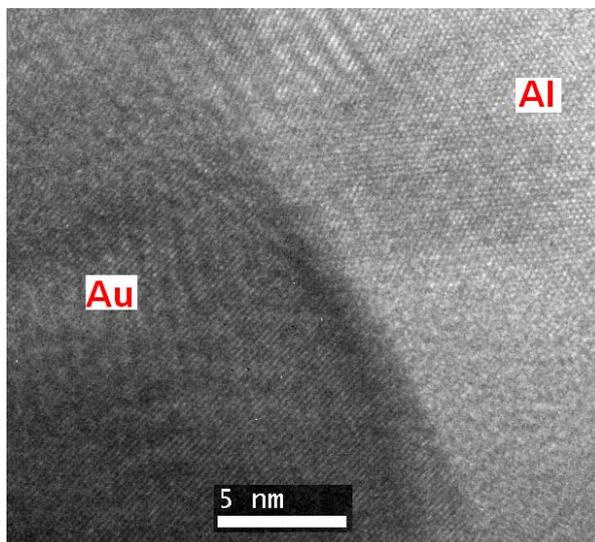


图5-11 Al/Au键合界面的HRTEM特性图

5.2 倒装二界面性能分析与工艺新构思

现有“芯片植球”模式的热声倒装键合点二界面的纵截面微观测试表明：

其一，图 5-7 是图 5-1 的植球界面经热声倒装后的高分辨透射电镜(HRTEM)测试与 STEM 模式下的 EDS 线扫描曲线，其 Au/Al 界面扩散层达 500 纳米(nm)，对 Au/Al 界面，金球凸点是通过引线键合植球形成的，存在一定的预扩散，植球键合超声作用时间非常短，约 10 毫秒(ms)，Au/Al 界面在热声倒装之前的扩散情况如图 5-12，图 5-12 显示 Au/Al 预扩散大约 50nm。所以，500nm 扩散层主要是倒装键合的第二次超声能长时间作用的结果(业界倒装键合超声作用时间约为 300~500ms)。

500nm 扩散层的能谱(EDS)成分测试主要为 Au_4Al ，是一种金属间化合物，其晶格常数，膨胀系数及形成过程中体积的变化都与 Au 或 Al 不同，呈明显脆性，导电率较低。

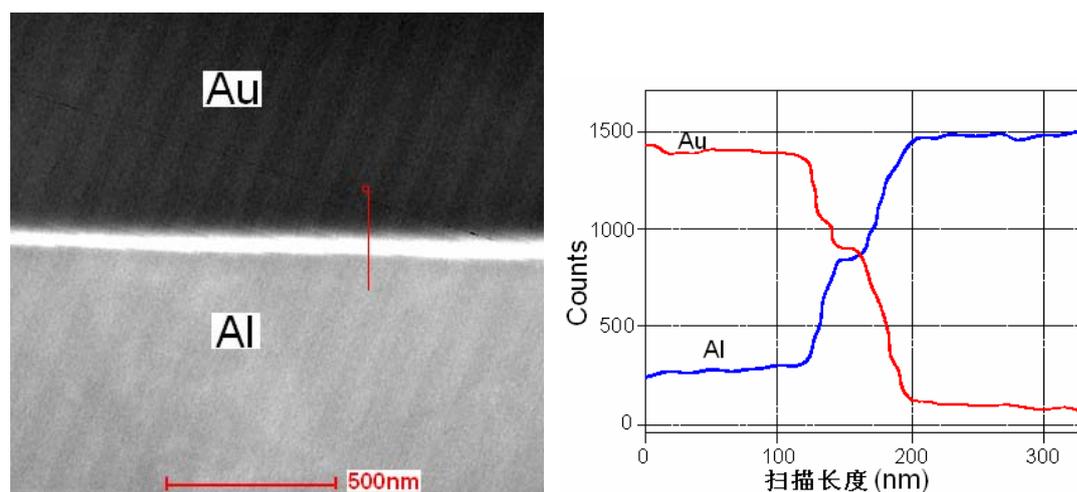


图5-12 Au/Al植球形成的预扩散

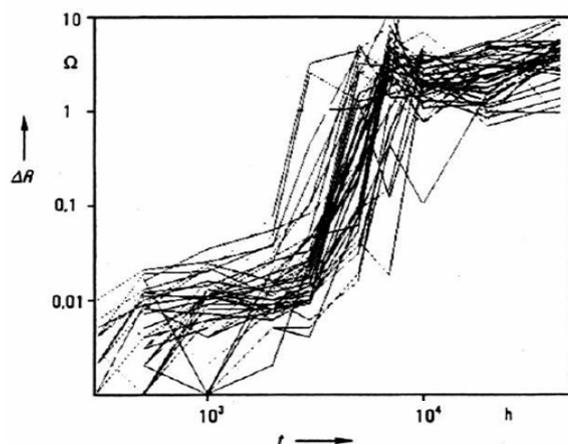


图 5-13 200°C 下老化的电阻测试[154]

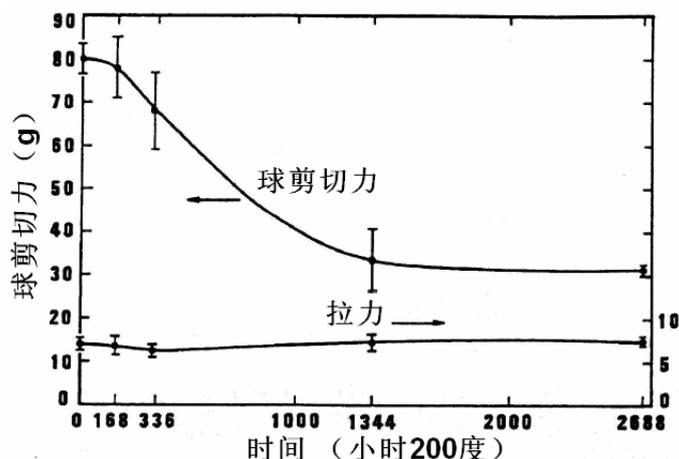


图 5-14 200°C 下老化的剪切力测试[154]

台湾国立成功大学王耀汉、张守进等人研究了金线键合 Au/Al 金属间化合物对芯片性能的影响[154]: 对 $\Phi 25$ 微米的金丝引线键合 IC 芯片, Au/Al 界面未形成金属间化合物时, 界面电阻为 0.01Ω 、剪切强度 80 克力; 对芯片在 200°C 下进行老化测试, 当界面生成了金属间化合物时, 界面性能显著下降, 其界面电阻高达 8.50Ω , 如图 5-13, 导电性降低 800 多倍, 剪切强度也明显下降为 30 克力 (图 5-14), 形成“寄生电阻”, 热导率也降低, 影响界面的机械和电热性能, 最终可导致器件开路或器件的电性能退化。

微尺度下界面传热的有限元模拟与仿真: 这里采用有限元模拟的方法, 研究键合界面可能形成的数百纳米厚金属间化合物层对微电子芯片、LED 器件散热性能的影响。图 5-15 是键合界面存在 500nm 金属间化合物(Au₄Al)时界面的温度分布, 其最高温度为 475K。键合界面未形成金属间化合物时界面的温度分布如图 5-16 所示, 其最高温度为 433K。500nm 厚金属间化合物使界面温升为 42K。

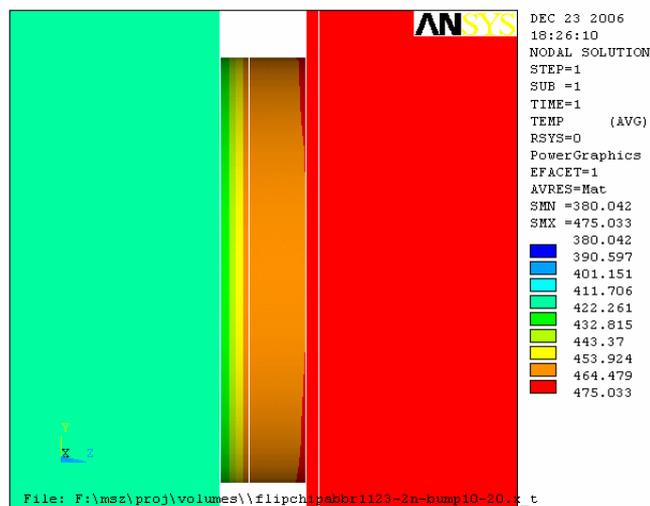


图5-15 键合界面500nm金属间化合物热分布结果图

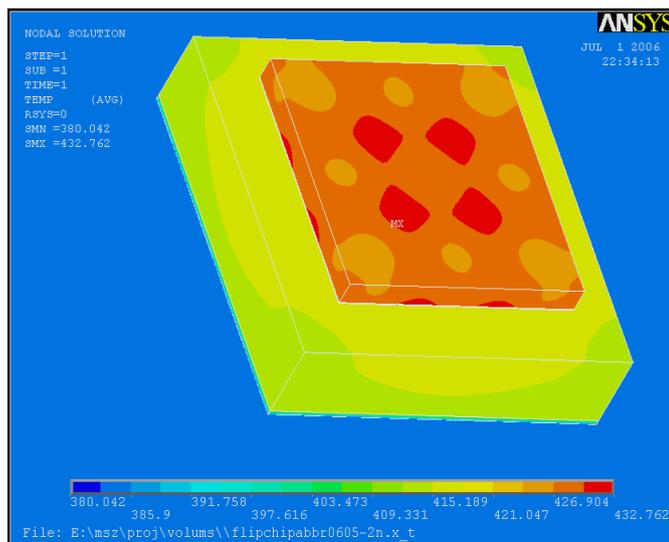


图5-16 界面无Au/Al金属间化合物的热场有限元仿真

随着芯片集成度的提高，芯片能流密度目前为 $0.52 \times 10^3 \text{J/ms} \cdot \text{m}^2$ ，预计 2010 年当特征线宽减小到 45nm 时，能流密度将增加到 $1.8 \times 10^3 \text{J/ms} \cdot \text{m}^2$ ，界面“寄生电阻”发热和散热问题在高集成芯片的使用中越来越突出，Au/Al 界面金属间化合物必须加以控制。

其二，图 5-2 是图 5-1 的倒装键合界面的 HRTEM 测试及 STEM 模式下能谱 EDS 线扫描，可测得 Au/Ag 界面扩散层约为 200nm，比较二个连接界面的扩散层厚，可发现植球界面扩散层是倒装键合界面的 2.5 倍，这可能与超声能经上植球界面再传递到倒装键合界面，已减小能量强度，处于高能量强度传能链节上的是 Au/Al 界面，导致二个界面的扩散厚度与组织结构相差甚大。

另，从热声倒装二个连接界面的材料体系，可知 Au/Al 是可能形成多种金属间化合物的，而 Au/Ag 是无限固溶的，其电热性能的变化没有金属间化合物显著，如 Au、Ag 的电阻率分别为 $2.35 \times 10^{-8} \Omega \text{m}$ 、 $1.6 \times 10^{-8} \Omega \text{m}$ ，其拉伸强度分别为 234MPa、345MPa，Au-14 at %Ag 固溶体的电阻率为 $2.763 \times 10^{-8} \Omega \text{m}$ ，且固溶强度提高为 585MPa。

根据以上分析可见，形成金属间化合物的键合界面是芯片导热通道中的一个重要热阻，对微电子、LED 器件的散热性能影响非常显著。

金属间化合物一般具脆性且较低的导电性，降低了键合界面的机-电性能。因此须通过控制键合参数或探索新工艺尽可能减少金属间化合物的形成。

针对上述分析，本论文形成的科学思路：

1) 倒装超声能改由基板输入，这种形式的倒装本文定义为“基板传能”模式，如图 5-17(左)，使 Au/Ag 界面处于高能量强度的传能链节上，Au/Al 界面处于能量传递链的末端，只有较弱的超声能第二次作用于此界面，故，其高能集中于必须键合的倒装键合界面，而较小能量消耗于对植球界面的强化，有利于

提供键合质量、均匀化两个界面的键合强度，同时可能减小超声作用时间，提高键合效率。



图 5-17 “基板传能”模式(左)和“基板植球”模式(右)的热声倒装

2) 特别是将金球植于基板上，超声能由芯片输入，本文定义为“基板植球”模式，如图 5-17(右)，Au/Al 界面只承受一次高能量强度的超声能作用，Au/Al 金属间化合物生成条件被弱化，承受倒装第二次超声作用的是(Au/Ag)植球界面，而 Au/Ag 是无限固溶的，高强度的超声能可直接控制 Au/Al 界面扩散与金属间化合物生成，其连接层厚度与强度满足要求，即可停止超声作用，有可能使两界面扩散及连接强度趋于均衡化，也可能大大缩减倒装超声作用时间，大幅度提高倒装效率，且此模式易于工业实现和推广。

5.3 基板传能与基板植球倒装实现与传能规律

5.3.1 “基板传能”模式倒装工艺

针对热声倒装键合二界面扩散的非均匀性，并 Au-Al 金属间化合物达 500 纳米(nm)的界面现状，设计如图 5-18 “基板传能”模式倒装键合，超声能通过基板先传致倒装必须的键合界面。

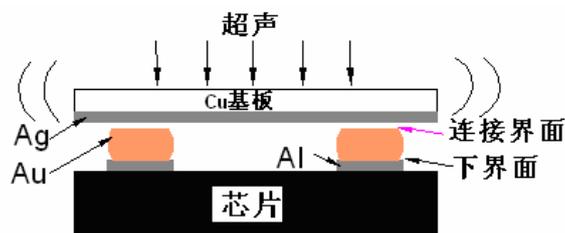


图 5-18 “基板传能”模式倒装键合

在“基板传能”模式下，热声倒装的工艺参数与“芯片植球”模式选择同样的参数，对“基板传能”倒装二界面的扩散进行 HRTEM 测试，如图 5-19 是 Au-Ag 界面扩散的 STEM 图片与 EDS 扫描结果，表明：Au-Ag 扩散层约 450nm，而图 5-20 是 Au-Al 界面情况，Au-Al 扩散只有 240nm，是“芯片植球”模式倒装的一半，这样使 Au/Al 金属间化合物得到了有利的控制。

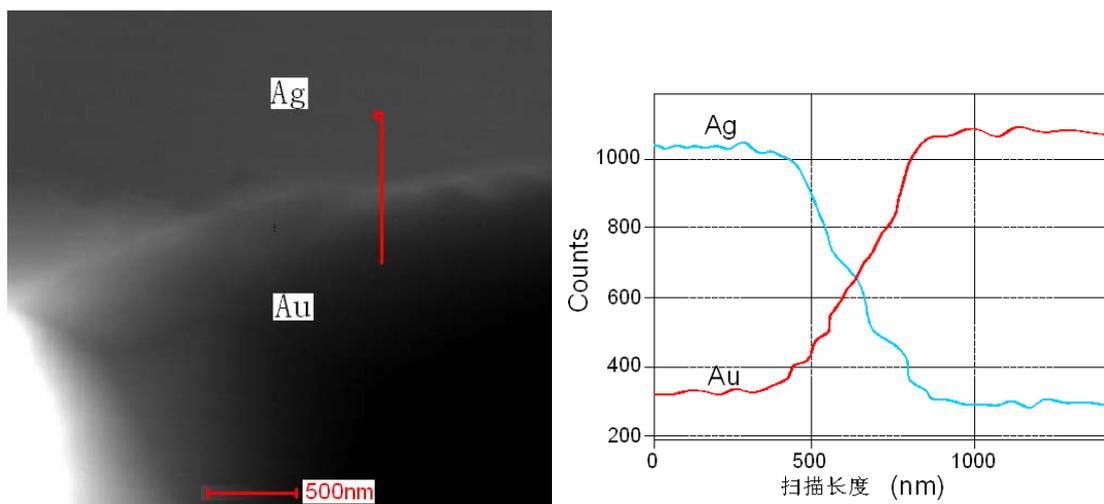


图 5-19 Au/Ag 界面 EDS 扫描结果

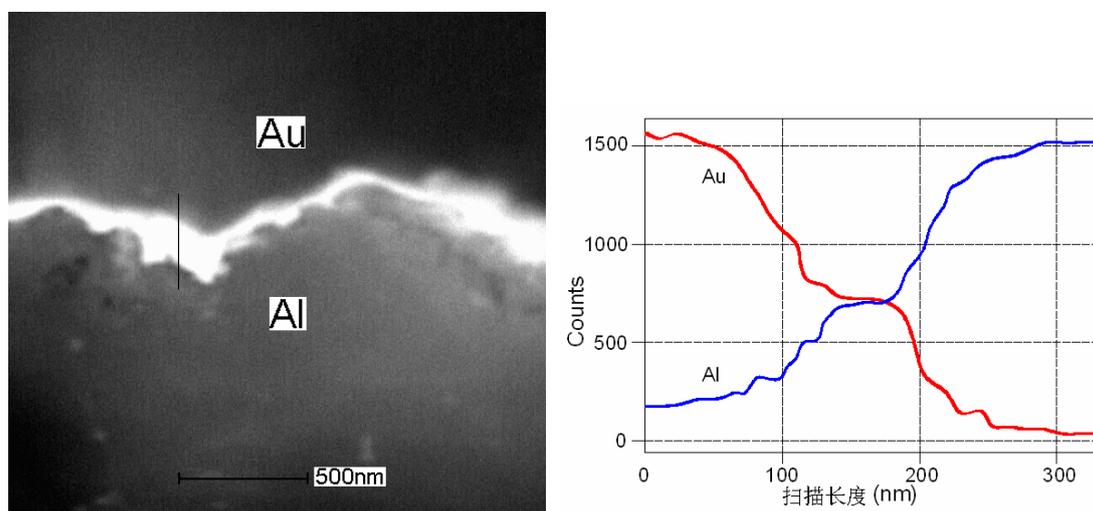


图 5-20 Au/Al 界面 EDS 扫描结果

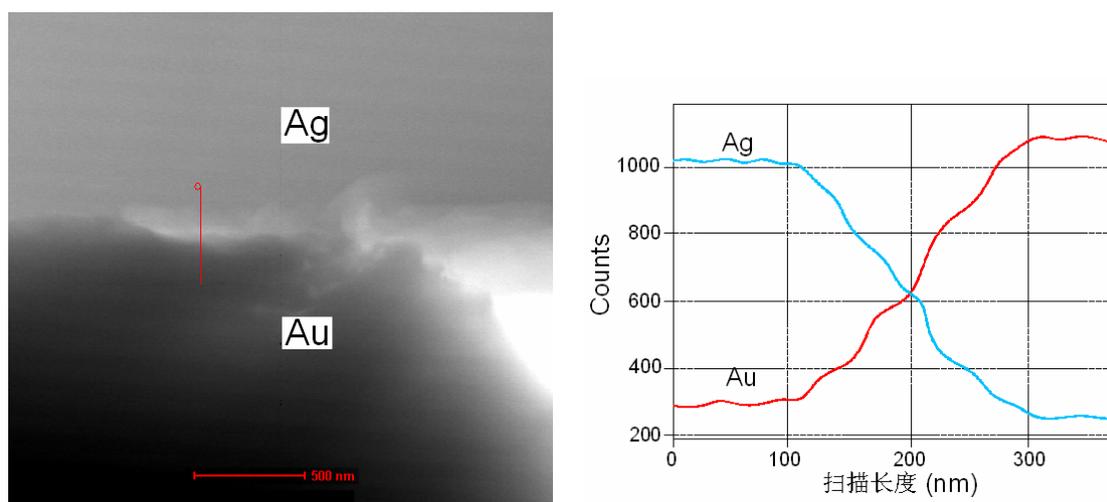


图 5-21 Au/Ag 界面 EDS 扫描结果(1.5W)

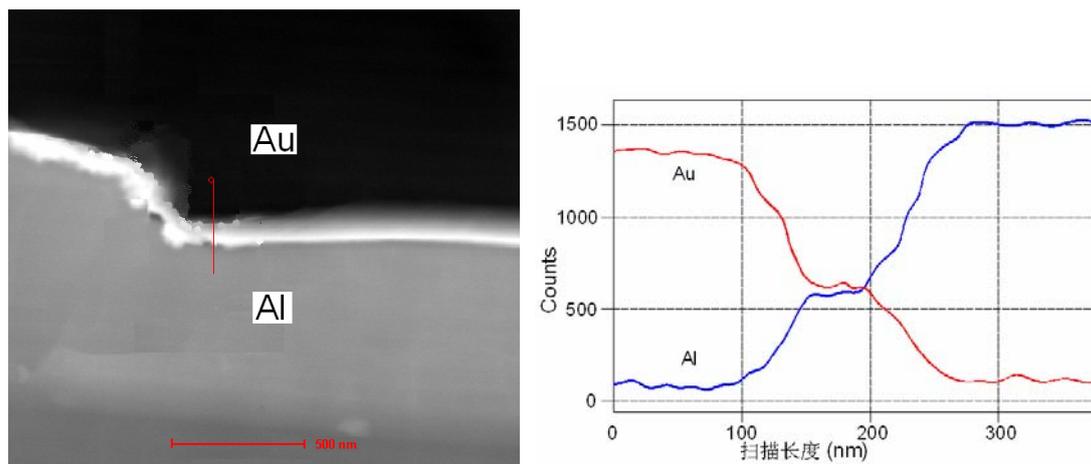


图 5-22 Au/Al 界面 EDS 扫描结果(1.5W)

在“基板传能”模式下，如果降低超声功率(降至 1.5W)，对二界面进行同样的 STEM 测试，如图 5-21、图 5-22 分别是 Au/Ag、Au/Al 的测试结果，比较二图可知：二界面的扩散层厚度非均匀性减小，趋向平衡，大约是 200nm，并且 Au/Al 金属间化合物也得到了控制。而“芯片植球”模式下，在倒装界面达到强度要求的情况下，Au/Al 金属间化合物的厚度与二界面扩散的均匀性是无法得到控制的。

5.3.2 “基板植球”模式倒装工艺

便于工艺实现，可把金球植于基板上，从芯片传递超声能，如图 5-23，为了避免材料对结果造成的影响，二界面都选用了 Al 膜，根据“基板传能”的一些结果，在本实验中的工艺参数中，选用“基板传能”模式下的使界面均衡化的超声功率是 1.5W，其它都不变。

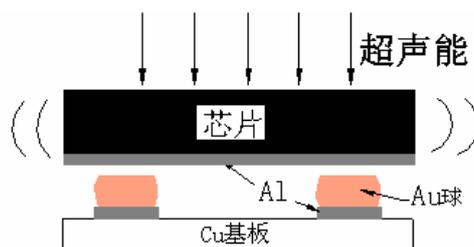


图 5-23 “基板植球”模式热声倒装键合

对二键合界面进行同样的 STEM 模式下 EDS 能谱测试，图 5-24、图 5-25 分别是上、下界面的测试结果，上界面(图 5-24)扩散层大约 260nm，下界面(图 5-25)扩散层大约 200nm，表明“基板植球”模式热声倒装键合能有效地实现倒装二界面的均衡化，并减小 Au/Al 金属间化合物的厚度。是一种性能优异的热声倒装工艺。

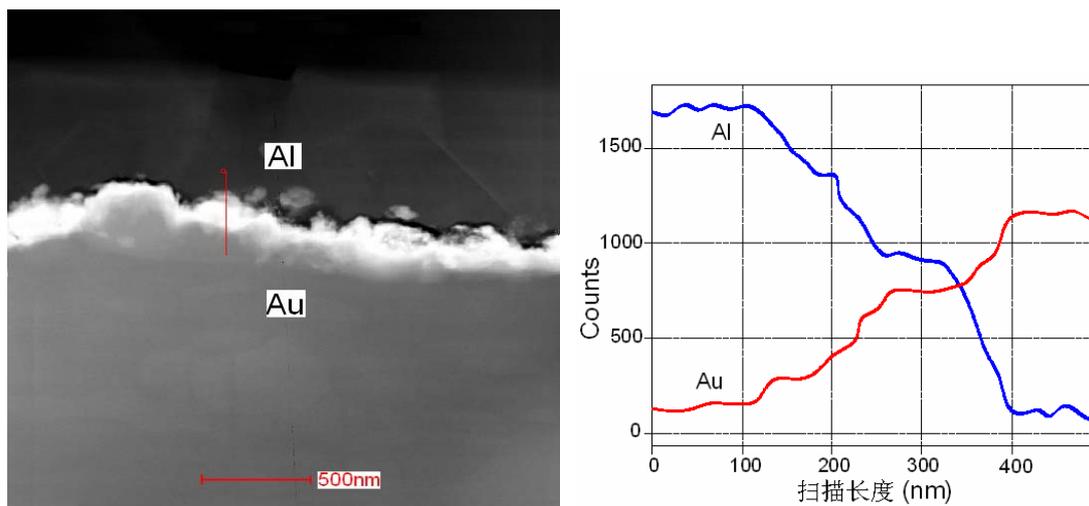


图 5-24 Au-Al 上界面 EDS 测试结果

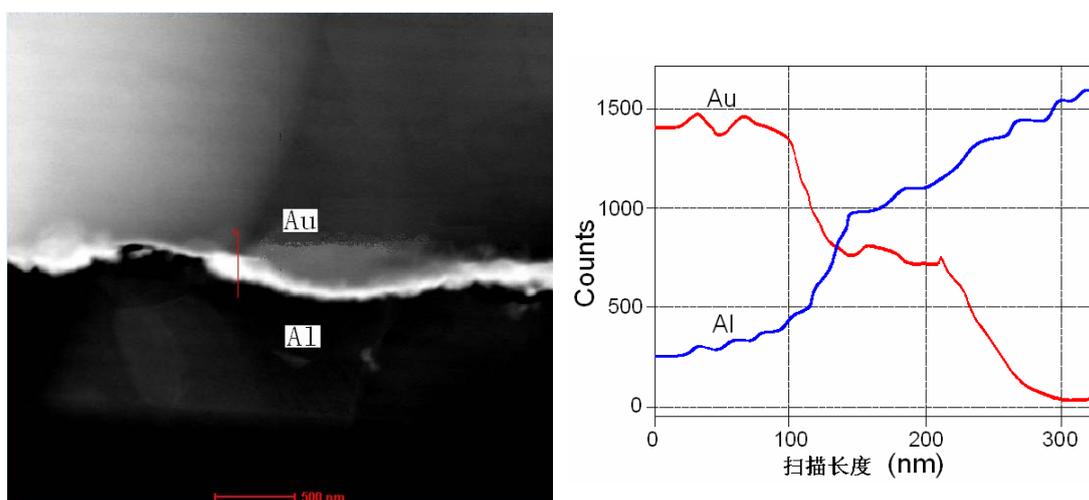


图 5-25 Au-Al 下界面 EDS 测试结果

5.4 热声倒装二界面传能规律分析

5.4.1 二界面传能的量值差异

对各种模式下的热声倒装键合二界面扩散厚度数据填入图 5-26，为精确表征热声倒装的扩散行为，图 5-26 中数据减去了引线键合植球形成的预扩散，比较二界面的扩散程度，在超声的传能链节上，超声能的转化不同的，超声能首先达到的界面，扩散层明显要厚，很明显图 5-26 中上界面的扩散深度比下界面大得多，对上、下界面的扩散厚度进行统计分析计算其比值为：

$$D_1 : D_2 = \left(\sum_{k=1}^{k=N} D_{1(k)} / N \right) : \left(\sum_{k=1}^{k=N} D_{2(k)} / N \right) \approx 2.28 : 1 \quad (6-1)$$

D_1 代表上界面的扩散深度的平均值, D_2 代表下界面的扩散深度的平均值。这个实验统计值, 是在一定的工艺参数条件和芯片、金球、基板等几何参数条件下得到的, 这些条件的变化, 上下界面的能量转化比率可能会有差异, 但趋势是相同的, 因上界面处于超声能传递的高能链节上, 上界面扩散厚度总会大于下界面的。

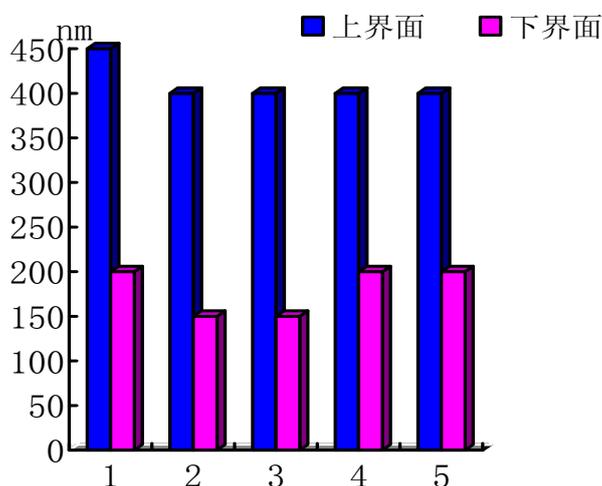


图 5-26 两界面的扩散厚度比较

5.4.2 多界面运动传递与能量转化规律分析

热声倒装各界面环节在超声振动传递的路径进行能量或运动的传递与转化, 本课题组对键合工具与芯片界面的运动传递分析可知:

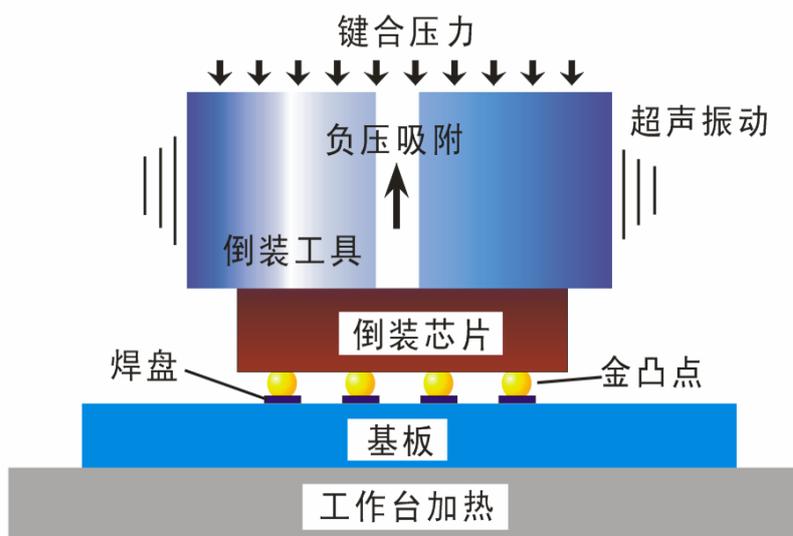


图 5-27 热超声倒装系统界面结构

倒装系统工具与芯片界面结构如图 5-27 所示, 键合工具末端在超声激励下的振动, 通过工具端面与芯片的摩擦将超声振动(或能量)传递到芯片, 采用了

PSV-400-M2 型激光多普勒测振系统来测量工具末端和芯片的振动，测量方法如图 5-28 所示。

首先，激光束精确地聚焦在倒装芯片 $1 \times 0.3\text{mm}$ 的侧面或工具末端的侧面；如图 5-29 所示，然后启动热超声倒装键合的过程，分别测量芯片和工具的振动过程。

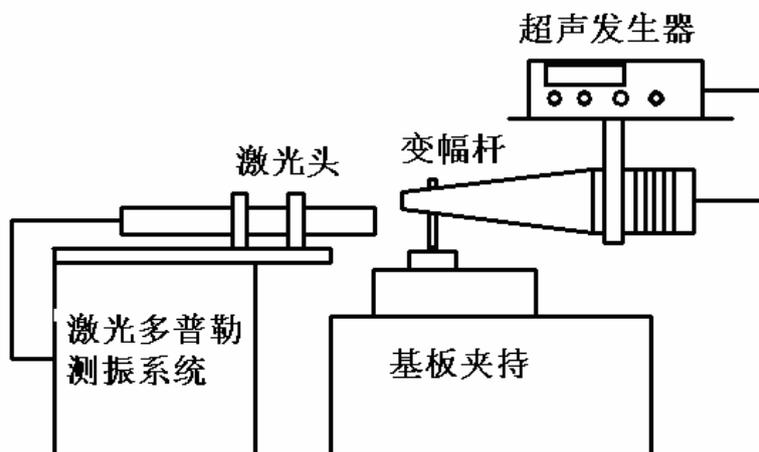
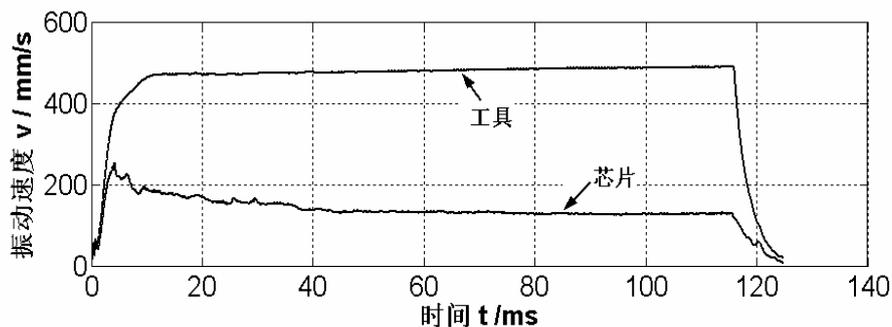


图 5-28 工具及芯片的振动测量

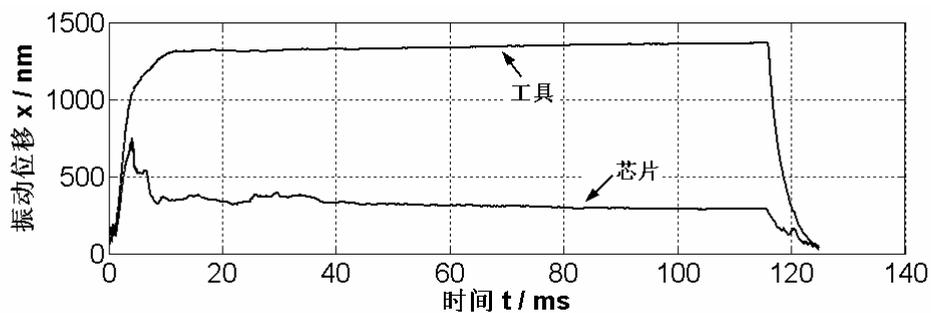


图 5-29 激光多普勒测量芯片和工具的振动

根据上述实验条件及方法，可获得芯片和工具末端振动速度曲线，如图 5-30 所示。

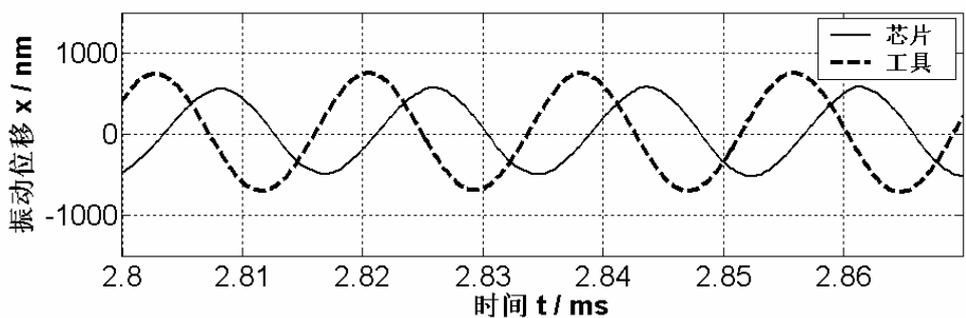


(a) 运动速度有效值曲线

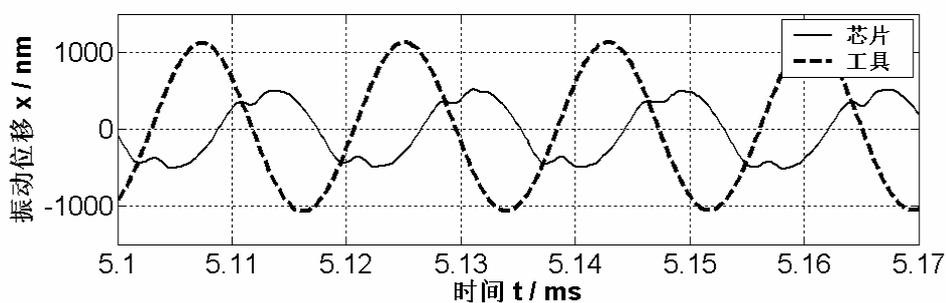


(b) 运动位移有效值曲线

图 5-30 芯片和工具末端超声振动运动有效值曲线



(a) 非线性阶段



(b) 过渡与平滑阶段

图 5-31 工具/芯片的超声振动动态特性细节

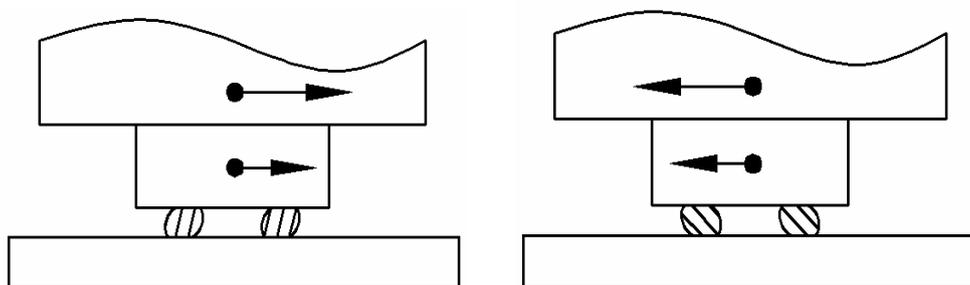


图 5-32 芯片的往复运动

图 5-30、图 5-31 表明超声振动从劈刀端面传递键合界面的过程中，发生了能量传递与转化，芯片响应特性中，芯片位移幅值减少，且位移峰值相对时滞，

刀具/芯片界面以及金球的塑性流变耗散能量，剩余的能量就是芯片运动传递至金球/基板界面处的键合能量，此能量已远小于刀具/芯片/金球界面传递的能量，这也就是金球/基板界面原子扩散层小于界面的主要原因，更何况芯片/金球界面在植球已形成了原子扩散层。从动力学特性(图 5-32)也可得知金球的上界面的超声运动大于下界面，致使上界面扩散大于下界面。

如果将金球植于基板上(即“基板植球”模式)，则需要连接的键合界面为芯片/金球直接界面处于能量传递链的前端，可用较充分的能量获得较厚的原子扩散层，而金球/基板在剩余能量作用下扩散层略有增加，这样使两键合界面结构趋于一致，且减小了过键合下金属间化合物的萌生，获得扩散深度均衡提高的效果。

5.5 热声倒装键合过程多参数影响规律

热声倒装键合过程的重要键合参数超声功率、时间、压力的施加，影响着键合强度，存在合理的键合窗口，为获得最佳的可键合窗口，实验设计了 16 个凸点的倒装芯片(如图 5-33)，金球直径 80 μm ，分别调整键合参数，通过 Dage4000 拉剪强度测试器评估键合强度，根据芯片工作的主要失效形式，本实验采用剪切力测试进行大量的统计分析，获得热声倒装键合的重要参数数据。

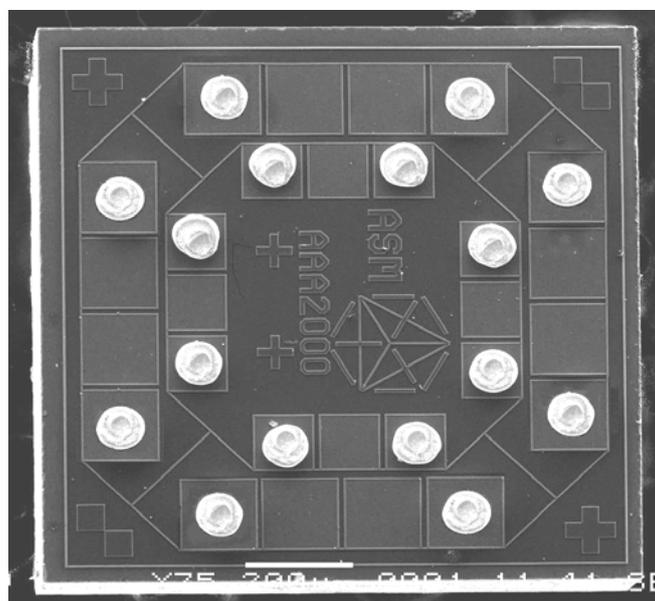


图 5-33 16 个金凸点的倒装芯片

5.5.1 超声功率的键合窗口

超声键合功率是超声键合过程的最敏感因素，在(键合时间 300ms，键合压力 70g/点，施加压力为 $70\text{g/点} \times 16 = 1120\text{g}$)不变的条件下，调整超声功率参数

50-250, 即为 0.4-2W, 每个参数重复实验次数 25, 获得如图 5-34 的统计结果, 图 5-34 表明, 在功率为 100 时, 键合强度最高, 功率过小强度太低, 功率过大键合强度下降。

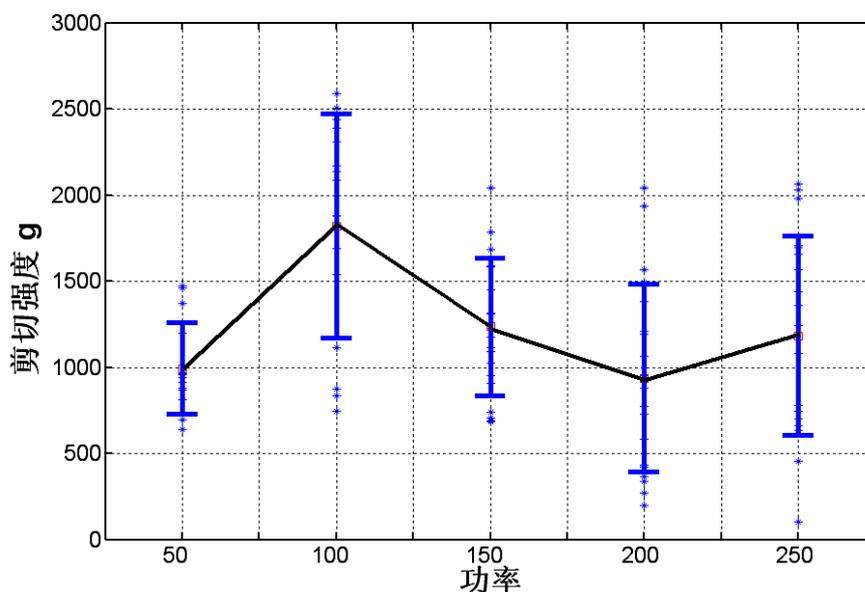


图 5-34 超声功率改变引起强度变化的趋势图

5.5.2 键合时间的键合窗口

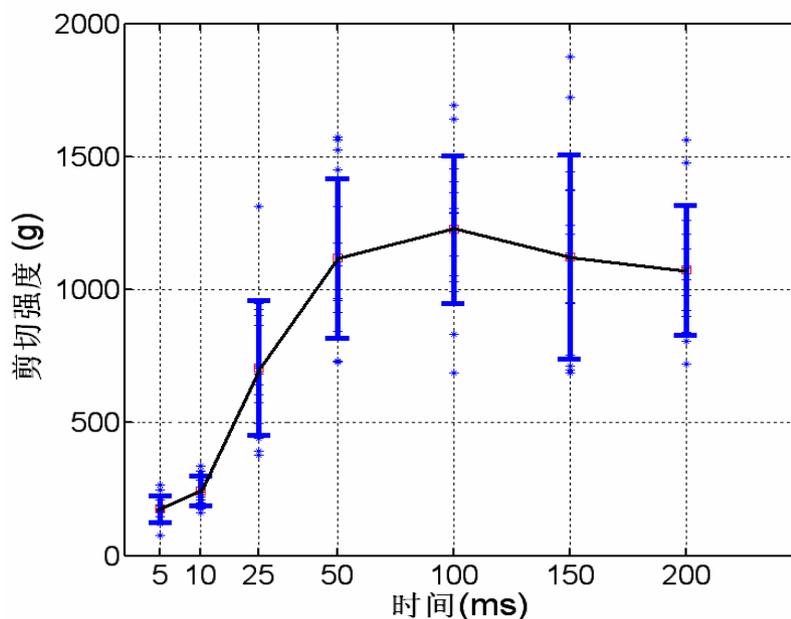


图 5-35 键合时间改变引起剪切强度变化的趋势图

键合时间不仅关系到键合强度, 而且直径影响生产效率, 在(超声功率 100, 键合压力 70g/点, 施加压力为 $70\text{g/点} \times 16 = 1120\text{g}$)不变的条件下, 调整键合时间 5-200ms, 每个参数重复实验次数 25, 获得如图 5-35 的时间变化的统计结果,

图 5-35 表明, 时间为 50ms 时, 键合强度就能满足强度要求, 即 $> 1000\text{g}$ (即 60g/点), 键合时间过长, 反而导致键合强度下降, 形成过键合, 此数据与生产数据(工艺生产上是 300—500ms)相比, 课题组研制的热声倒装键合机可使键合时间提高一个量级。

5.5.3 键合压力的键合窗口

在(超声功率 100, 键合时间 300ms)不变条件下, 调整键合压力 20-80g/点, 每个参数重复实验次数 25, 获得如图 5-36 的压力变化的统计结果, 图 5-36 表明, 键合压力为 70g/点时, 键合强度最佳。

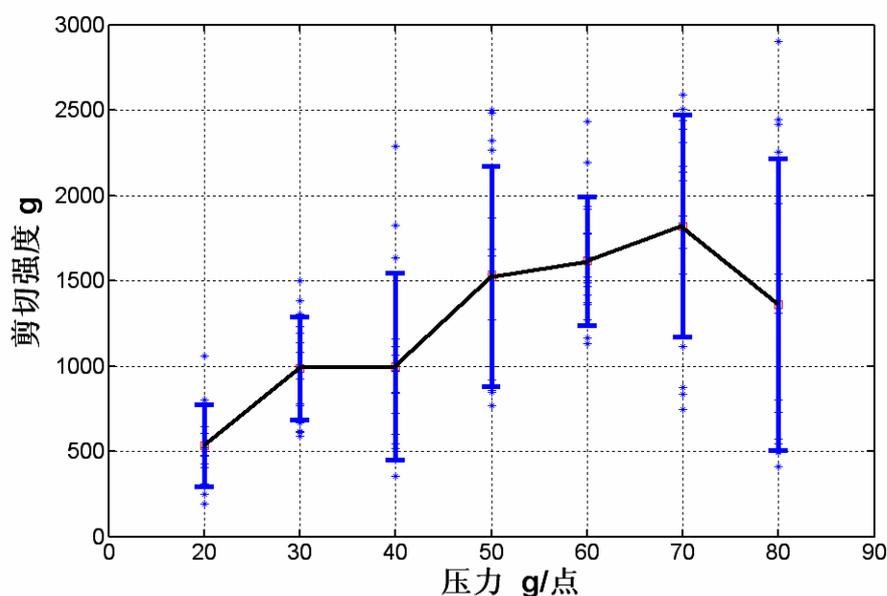


图 5-36 键合压力改变引起剪切强度变化的趋势图

5.6 本章小结

本章从常规的“芯片植球”模式热声倒装样品的 HRTEM 测试中发现热声倒装二键合界面原子扩散层不一致性, 并且两键合界面较厚的 Au/Al 扩散层为金属间化合物, 金属间化合物具有较低的机电性能, 为减小金属间化合物的厚度和均衡二界面的原子扩散, 设计了“基板传能”和“基板植球”模式的热声倒装键合实验, 获得了热超声倒装二界面的超声能传递与转化规律, 通过大量的实验和测试分析, 得到如下认识:

1. 满足热声倒装键合(Au/Ag)界面强度要求, 常规的“芯片植球”模式热声倒装不可避免的导致上界面(Au/Al)过扩散, 其扩散层厚度为下界面(Au/Ag)的 2 倍多, 并且 Au/Al 键合界面生成了金属间化合物, 影响倒装键合界面的机电

热性能，必须控制键合界面的扩散。

2. 通过对扩散层实验数据的统计分析，获得了现有材料体系和一定工艺条件下热声倒装上、下界面的能量传递/转化比率关系，约为 **2.28:1**，上界面的扩散大于下界面，此比率是热声倒装键合工艺与参数优化的依据。
3. 针对二键合界面的扩散现状，根据上/下界面的传能比率，提出“基板传能”和“基板植球”模式的热声倒装键合工艺，通过调整工艺参数，使二界面的原子扩散层基本达到一致，并有效控制了 Au/Al 金属间化合物，其 Au/Al 扩散厚度为“芯片植球”模式的一半以下，“基板传能”和“基板植球”模式的热声倒装提供了一种热声倒装的新工艺路线。
4. 通过对热声倒装键合参数与键合强度的统计分析，获得了超声功率、时间、压力对键合强度的影响规律及最佳键合窗口，键合时间为 **50ms** 时，键合强度达到 **60g/点** 以上，满足强度要求，键合时间比业界数据提高一个量级。

作者已发表与本章内容相关的主要学术论文：

- 🚩 Observations on HRTEM features of thermosonic flip chip bonding interface, *Materials Chemistry and Physics*, 2007, 106(2-3): 457-460. (影响因子 **1.657**, SCI 收录: 234ZI, EI 收录: 074310886989)
- 🚩 Short-Circuit Diffusion of Ultrasonic Bonding Interfaces in Microelectronic Packaging, *Surface and Interface Analysis*, accepted, Jan, 2008 (影响因子 **1.427**, SCI, EI)
- 🚩 Atomic Diffusion Features in Au/Al & Al/Ni Bonding Interface, *Diffusion and Defect Data*. Pt A Defect and Diffusion Forum, 2005, 247-248: 29-36. (EI 收录: 06129770322)

第六章 全文总结

本文围绕超声键合界面生成机理,进行了系统实验研究,制作 $\Phi 80\mu\text{m}$ 微键合点的纵向截面 TEM 样品,深入地进行高分辨透射电镜(HRTEM)微观分析与测试,观察超声作用界面位错密度明显增加,结合位错理论和扩散规律,系统分析了超声键合界面快速形成的微观机制;研究了超声键合点分离的 SEM 特性,结合纵向 STEM 测试,提出了键合点微结构强度空间组成的新概念,研究了工艺参数与微结构的演变规律;实时采集了超声驱动电压/电流信号,分析了键合过程的系统阻抗和功率特性,针对热声倒装的多界面扩散现状,分析了热声倒装多界面超声能量/运动的传递,为解决多界面扩散的均衡化和金属间化合物问题,探索了多种模式的热声倒装工艺,提出了优良界面的热声倒装新工艺,在此基础上总结了倒装多界面的传能规律。其认识和主要结论如下:

1. 超声键合快速形成机理

1) 超声作用界面位错密度增加,位错密度的增加也证实超声键合过程中未发生过高温,否则位错会因高温而回火消失,超声键合在回火温度以下的行为,位错扩散是主要的扩散形式。

2) 位错在晶体里形成位错网或位错环,其端点暴露于表面或晶界,位错通道使晶体内部沿着位错管扩散的原子与界面表面相通,在界面互渗透,超声键合过程中,键合初期超声振动清洁表面,为表面扩散提供洁净的环境,晶体表面存在晶格缺陷,表面扩散激活能最低,开始表面扩散是相当明显的,随着键合过程流变的扩展,表面减小并消失,随之,位错扩散是超声键合过程主要的扩散。

3) 超声能作用下材料内部位错运动在表面发生滑移,通过有限元计算复合能场作用下材料内部的切应力远超过材料滑移的临界应力值。

2. 键合强度结构的空间组成: 超声键合点的纵向扩散层为百纳米量级,键合区在拉力作用下分离的横向界面形如坚果,中央未键合,周边形成强的键合,呈明显的韧窝状,并且韧窝出现在引线或基体材料,原子互扩散层未被分离,互扩散的原子在晶体内发生了固溶强化,其强度大于基体材料的强度,真实的键合界面未分离,微键合点的强度组成是一种三维结构“引线材料—扩散层—基体材料”。

3. 超声键合工艺参数与键合微结构的演变规律: 在其它条件不变的情况下,随着超声功率的增加,摩擦痕和脊皱加剧;随着压力增大,键合椭圆环逐步延伸扩大,且椭圆环沿着振动方向的椭圆轴由短轴变为长轴,脊皱键合区的面积增加;随着键合时间的延长,脊皱延伸为完整的圆环,脊皱向中央扩展;且它们存在一

个最佳的键合区间。在热声倒装键合中，键合参数（超声功率、时间、压力）与界面的键合强度存在一个最优的键合窗口。

4. 通过设计采集电路，实时采集键合过程的电压/电流信号，获得超声驱动功率和阻抗曲线，分析了超声键合过程超声功率的实时特性，为键合过程的可靠性监测提供思路。

5. 热声倒装多界面传能规律

1) 常规的“芯片植球”模式热声倒装芯片的 HRTEM 测试发现热声倒装二界面扩散不均匀，上界面扩散层是下界面扩散的 2 倍多，且上界面是 Au/Al 界面，EDS 测试为金属间化合物，针对二界面的扩散现状，设计了“基板传能”和“基板植球”模式的热声倒装键合。

2) 创新的“基板传能”和“基板植球”倒装键合的研究表明：它们能使倒装二界面的原子扩散层基本达到一致，并满足倒装键合界面强度的要求，同时使 Au/Al 金属间化合物厚度减半。“基板植球”更具有较易实现技术工程化优点。

3) 通过对各种模式热声倒装下扩散层实验数据进行统计分析，在确定的工艺条件下热声倒装上、下界面的能量传递与吸收有一定量值关系，对实验采用的工艺参数和芯片金球几何参数条件下，上、下界面能量转化为：

$$D_1 : D_2 = \left(\sum_{k=1}^{k=N} D_{1(k)} / N \right) : \left(\sum_{k=1}^{k=N} D_{2(k)} / N \right) \approx 2.28 : 1$$

其差值主要由金球的流变、发热和原子扩散所吸收，所以当金球数、键合时间等参数改变时，此比率也会改变。

研究工作的主要创新：

1. 解决了 $\phi 80\mu\text{m}$ 微界面的 TEM 样品的制作难题，STEM 模式下观测了超声键合界面原子扩散深度，为界面微结构的定量分析提供有效的手段。
2. 观察超声能作用下界面材料位错密度的剧增的现象，阐明了基于表面扩散、位错扩散的超声快速键合机理。
3. 结合 TEM 和 SEM 的观测，提出了超声键合区强度的新概念，即键合点微区是一种多元结构“引线材料—扩散层—基体材料”。
4. 发现了热超声倒装二键合界面的原子扩散的非均匀性，提出了二界面扩散合理的新型高性能热声倒装键合的工艺思路。
5. 在给定的工艺条件下，通过统计分析，获得了热声倒装键合上/下界面超声能传递与转化的比率为 2.28:1。

参考文献

- [1] 葛励冲. 微电子封装中芯片焊接技术及其设备的发展. 电子工业专用设备, 2000, 29(4): 5-10
- [2] 马玉华, 卜瑞艳. 对影响内引线键合可靠性的因素的分析与对策. 半导体情报, 1999, 36(5): 53-56
- [3] Jiromaru T, Tsutomu S, Hayato O. Complex vibration ultrasonic welding systems with large area welding tips. *Ultrasonics*. 2002, 40: 361-364
- [4] Tsujino J. Ultrasonic wire bonding using high frequency 330, 600 kHz and complex vibration 190 kHz welding systems. *Ultrasonics*. 1996, 34: 223-228
- [5] Jiromaru T, Hiroyuki Y, Tsutomu S and Shigeru I. High-frequency ultrasonic wire bonding systems. *Ultrasonics*. 2000, 38: 77-80
- [6] Jiromaru T, Welding characteristics and temperature rise of high frequency and complex vibration ultrasonic wire bonding. *Ultrasonics*. 1998, 36: 59-65
- [7] Miyazaki N. Failure estimation during bonding process. *Journal of Electronic Packaging, Transactions of the ASME*. 1999, 121(2): 85-91
- [8] 马鑫, 何小琦. 集成电路内引线键合工艺材料失效机制及可靠性. 电子工艺技术, 2001, 22(5): 182-191
- [9] Kamath S M. Application of fracture mechanics in high performance packing. *American Society of Mechanical Engineers*. 1995, 11: 12-17
- [10] Frear H, Burchett S, lau J. The mechanics of solder alloy interconnects. Van Nostrand Reinhold, New York, 1994: 55-60
- [11] Frear D, Hnorgan. Damage mechanics of surface mount packaging interconnects. *Society of Mechanical Engineers*. 1997, 44: 16-21
- [12] Hword R T, Sobeck S W. A new package-related failure mechanism for leadless ceramic Chip Carriers (LC-3s). *Solid State Technol*. 1983, 26(2): 115-122
- [13] Tsukada Y. Surface lamilar circuit and flip chip attach packaging. *ECTC*. 1992, 19: 60-70
- [14] Han B, Thermal deformation analysis of various electron packaging products by microscope moiré interferometry. *J. Electron Packaging*. 1995, 117: 185-192
- [15] Chen A S, Nguyen T S. Wire bonding: Present and future trends. *IEEE/CHMT international electronics manufacturing technology symposium*. 1993: 45-51
- [16] Thomas F E. Automatic control in microelectronics manufacturing: Practices, Challenges, and possibilities. *Automation*. 2000, 36: 1567-1603

- [17] Michael S W. Tam N, Cheung C. A high speed, High precision linear drive system for manufacturing automation. IEEE. 2001: 440-444
- [18] Tsuneo Y. Force control of robot manipulators. 2000 IEEE Conference on Robotics and Automation. San Francisco, CA. April 2000: 550-558
- [19] Yin Y, Zhu J, Wei Z. Intelligent strategy of force & position parallel control for a robot. Annals of the CIRP. 1997, 46(1): 334-339
- [20] Lee Z X. ASM Force control project report. ASM Co. and The Hong Kong Uni. Of Science and Technology. 2000: 215-221
- [21] Kinnaird C, Khotanzad A. Adaptive fuzzy process control of integrated circuit wire bonding. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing. 1999, 22(3): 233-243
- [22] Pufall R. Automatic process control of wire bonding. Proceedings-Electronic Components and Technology Conference. Jun 1-4 1993: 159-162.
- [23] Lewin A. Laser diode based pseudo-heterodyne interferometer for on-line process control of wire bonders. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering. Jun 21-23 2000: 114-120
- [24] Chiba T. Double PWM method for high voltage discharge energy control. Proceedings of the IEEE/CPMT International Electronic Manufacturing Technology (IEMT) Symposium. Dec 4-6 1995: 296-299
- [25] 苏伟南. 发光二极管封装结构及技术. 国际 LED 技术, 2004, 9: 45-50
- [26] 张万生, 布良基. 功率型 LED 的进展. 国际 LED 技术, 2004, 10: 51-54
- [27] 王国宏. 半导体照明大功率 LED 进展. 产业透视, 2004, 127(6): 50-56
- [28] 葛劭冲. 微电子封装中芯片焊接技术及其设备的发展. 电子工业专用设备, 2000, 29(4): 5-10
- [29] LONG Z, WU Y. Measurement of driving electric signal and input impedance analysis of PZT transducer. HDP'04. June 30-July 3, 2004. 322-325
- [30] WANG F, HAN L, ZHONG J. Computer-based data acquisition for wire bonding studies. HDP'04. June 30-July 3, 2004: 227-230
- [31] 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. 中国机械工程. 2005, 16(10): 919-923
- [32] 隆志力, 韩 雷, 吴运新, 周宏权, 钟 掘. 不同温度对热超声键合工艺连接强度的影响. 焊接学报, 2005, 26(8): 23-26
- [33] Han L, Wang F, Xu W, Zhong J. Bondability window and power input for wire bonding. Microelectronics Reliability. 2006, 46: 610-615

- [34] Cheah L K, Tan Y M, Wei J and Wong C K. Gold to Gold Thermosonic Flip-Chip Bonding. Gintic Institute of Manufacturing Technology. 2004: 19-28
- [35] McLaren T S, Kang S Y, Zhang W and Lee Y C. Thermosonic bonding of an optical transceiver based on 8 x8 cavity surfaceemitting laser array. IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manuf. Technol.– Part B,1997,20 (2):152-160
- [36] Kang S Y, Williams P M, McLaren T S, Lee Y C. Modeling and experimental studies on Thermosonic Flip-Chip Bonding. IEEE Trans. Parts Hybrids Manuf. Technol. 1995, 18(4): 728-735
- [37] Karl J. Gold stud bump in Flip Chip application. Pamper Technology Inc. 2002, 5: 50-58
- [38] Lee T. Gold stud bump bonding for high frequency packaging: Impact of coining and other process variables on electrical properties. IMATPS Garden State Spring Packaging Symp. May 2002: 33-39
- [39] Gordon E, Rafael J, Maria V. Development of an low cost wafer level Flip Chip assembly process for high brightness LEDs using the AuSn metallurgy. Microsystem Technology. 2002, 7: 239-243
- [40] Bhat J C, Kim A, Collins D, Fletcher R, Khare R, Rudaz S. High efficiency monochromatic and white InGaNFlip-Chip dice. IEEE Trans. Parts Hybrids Manuf. Technol. 2004, 18(5): 29-35
- [41] 王春青, 田艳红, 李明雨. 电子封装和组装中的微连接技术之四. 现代表面贴装资讯, 2005, 4 (3):1-9
- [42] 丁汉, 朱利民, 林忠钦. 面向芯片封装的高加速度运动系统的精确定位和操作. 自然科学进展, 2003, 13(6):568-574
- [43] 刘文俊. 高密度高性能电子封装技术. 微电子技术, 1998, 26 (2): 1-14
- [44] 王毅. 高密度高性能电子封装技术的现状. 微电子技术, 1998, 26(4): 1-22
- [45] 王国宏. 半导体照明大功率 LED 进展. 产业透视, 2004, 127(6): 50-56
- [46] Maruo H, Seki Y and Unami Y. Development of ultrasonic Flip Chip bonding for flexible printed circuit. HDP'04. Shanghai, 2004: 307-310
- [47] Mayer M, Paul O, Bolliger D. Integrated temperature microsensors for characterization of thermosonic ball bonding process, Proceedings of the 1999 Electronic Components and Technology. San Diego, California,1999: 463-468
- [48] Harman G and leedy. An experimental model of the microelectronic wire bonding mechanism. Proceeding 10th Annual Reliability Physics Symposium. 1972, 4:49-56
- [49] Vern H, Winchel II and Howard M B. Enhancing ultrasonic bond development. IEEE Trans. Hybrids, and Manuf. Technol. 1978,CHMT-1 (3):211-220

- [50] James E, Krzanowski. A transmission electron microscopy study of wire bonding. IEEE T. on Components, Hybrids, and Manu. Tech. 1990, 13 (1): 178-181
- [51] Maruo H, Seki Y, Unami Y. Thermosonic Flip Chip on FPC. Fujikura Technical Review. 2002, 31: 18-21.
- [52] Inaba M. Flip Chip assembly on FPC for HDD. Fujikura Giho. 2002 ,103: 39-42
- [53] Wang Y. Study of significant factors to influence the Au-Al intermetallic of ball bonding in biconductors packaging, and improvement method. Taiwan, National Cheng Kung University, Thesis for Master of Science, 2002: 18-49
- [54] Wongpreedee K, Russell A M. Kinetic transformation of nanofilamentary Au Metal-Metal composites. Ames Laboratory, Iowa State University, 1990. 1-10
- [55] Uthe P M. Variables affecting weld quality in ultrasonic aluminum wire bonding. Solid State Tech. 1969, 8: 72-77
- [56] Joshi K C. The formation of ultrasonic bonds between metals. Welding Journal. 1971, 50: 840-848
- [57] Kang S Y, Williams P M, Lee Y C. Studies of thermosonic Bonding for Flip-chip assembly. Materials Chemistry and Physics. 1995, 42: 31-37
- [58] Zhou J, Wang B. Metal Physics. Space Navigation Publishers. 1992: 203-205
- [59] Harman G. Wire bonding in microelectronics. McGraw-Hill Publishers. second edition, Chapter 2, 1997: 18-23.
- [60] Schwizer J, Baltes H. Friction model based on integrated microsensor measurements. IEEE International Electronic Manufacturing Technology Symposium. Austin, Texas, October 18-19, 1999: 108-114.
- [61] Hongjun J, Li M, Wang C, Li D. The diffusion of Ni into Al wire at the interface of ultrasonic wire bond during high temperature storage. Equipment for Electronic Products Manufacturing. 2005, 131: 40-47
- [62] Klein M, Reichl H. Single chip bumping and reliability for Flip-chip processes. Microelectronics Reliability. 1999, 39: 1389-1397
- [63] Taizo T. Thermosonic flip chip bonding for low cost packaging. 2002 International Symposium on Microelectronics, Denver, CO, United States, Sep, 2002: 360-365
- [64] Philofsky E. Design limits when using Gold-Aluminum bonds. Proceedings 9th Annual IEEE Reliability Physics Symposium, 1970: 177-185
- [65] Antonevich J N, Monroe R E. Fundamental studies of ultrasonic welding. Welding Journal Research Supplement, August, 1960, 3: 125-136
- [66] Langenecker B. Ultrasonic softening effect. IEEE Trans. Sonics Ultrason., 1966, SU-13.

- 1-8
- [67] Chen G C. The role of micro-slip in ultrasonic bonding. International Hybrid Microelectronics Symposium, 1972, (5A). 111-119.
- [68] Harman G, Albers J. The Ultrasonic welding mechanism as applied to Aluminum- and Gold-Wire bonding in Microelectronics. IEEE Trans. on Parts, Hybrids, and Packaging, 1977, 13(4): 406-412
- [69] Tan C M, Gan Z. Failure mechanisms of aluminum bond pad peeling during thermosonic bonding. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. 2003, 3 (2): 44-50
- [70] Harman G and Christian E J. Wire bonding to advanced copper, Low-K integrated circuits, the Metal/Dielectric Stacks, and Materials Considerations. IEEE Trans.on Components,and Packaging Tech. 2002, 25 (4): 677-684
- [71] Tames E, Krzanowski. A transmission electron microscopy study of ultrasonic wire bonding. IEEE Trans.on Components, Hybrids,and Manuf. Technol. 1990, 13 (1): 176-183
- [72] Holonyak N, Bevaqua S F. Coherent (visible) light emission from GaAs_{1-x}P_x junctions. Appl. Phys. Lett., 1962, 1: 82-83
- [73] Jeff Y Tsao. Lighting research and development building technologies program office of energy efficiency and renewable energy U.S. Department of Energy. Solid-State Lighting Program Planning Workshop Report, February 3-4, 2005 San Diego, California. 2005: 1102-1109
- [74] Arik M, Pet R J, Weaver S. Thermal challenges in the future generation solid state lighting applications: light emitting diodes. ASME/ IEEE International Packaging Technical Conference. Hawaii, 2001: 12-28
- [75] Choi S H, Thermal boundary resistance at an epitaxially perfect interface of thin films. International Journal of Thermal Sciences. 2005, 44: 547-558
- [76] Cook J, Joshi Y and Doraiswami R. Interconnect Thermal Management of High Power Packaged Electronic Architectures. Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium-Proceedings 2004, 20: 30-37
- [77] 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. 中国机械工程, 2005, 16(10): 919-923
- [78] 王福亮, 韩雷, 钟掘. 超声引线键合 PZT 驱动信号采集分析系统, 焊接学报, 2006, 27(1): 1-5
- [79] 王福亮, 李军辉, 韩雷, 钟掘. 超声波在引线键合机变幅杆中的传递, 中南大学学报(自然科学版), 2005, 36(6): 1017-1021
- [80] Lee T S. Finite element modeling of three-dimensional solder joint geometry in SMT J. Electron. Pack. 1997: 19-25

- [81] Steele R V. High-brightness LED market overview. in Proc. SPIE, 2001: 1-4
- [82] Wierer J J, Steigerwald D A and Krames M R. High-power Al-GaN flip-chip light-emitting diodes. Appl. Phys. Lett. 2001, 78: 3379-3383
- [83] Yang S, Tao W. Heat transfer. 3E, Higher Education Press of China, 1998: 12-15
- [84] 隆志力, 韩雷, 吴运新, 周宏权, 温度因素对热超声键合强度的影响实验研究, 半导体技术, 2005, 6(30): 41-44
- [85] 隆志力, 吴运新, 韩雷, 以有效值计算的热超声键合 PZT 换能器阻抗分析, 应用声学, 2005, 4(24): 217-220
- [86] 隆志力, 韩雷, 吴运新, 周宏权, 钟掘, 不同温度对热超声键合工艺连接强度的影响, 焊接学报, 2005, 26 (8): 23-26
- [87] 韩雷, 钟掘, 热超声倒装键合过程中的非线性动力学行为, 半导体学报, 2006, 27(11): 2056-2063
- [88] Tekippe V J, Moore D R, Paul D K. Thomas A and Sen S. Production, performance, and reliability of fused couplers. SPIE, 1998, 3666: 56-61
- [89] Lamont R G, Johnson D C and Hill K O. Power transfer in fused biconical-taper single-mode fiber couplers. Applied Optics, 1985, 24: 327-332
- [90] Payne F P, Finegan T, and Hussey C D. Dependence of fused taper couplers on external refractive index. Electronics Letters, 1986, 22: 1207-1209
- [91] Zheng X H and Snyder A W. Fused couplers: condition for insensitivity to external refractive index. Electronics Letters, 1987, 23: 182-184
- [92] Hayshi K. New sensitivity-enhancing scheme for a fiber-optic interferometer utilizing two optical loops. Electron Lett, 1988, 24(16): 1000-1003
- [93] Williams D H. Single-mode optical fiber index of refraction dependence on product parameters. tensile stress and temperature. IWCS, 1990: 726-729
- [94] Nakamura S. GaN growth using GaN buffer layer. J. Appl. Phys, 1991, 30(10): L1705-1707
- [95] Sze S M. Physics of Semiconductor Devices. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1981. 245-249
- [96] Nakamura S, Mukai T, Seno M. High power GaN p-n junction blue LED. JPN J. Phys., 1991, 30: L1998-2003
- [97] Cook I J W, Schetsina J F. Blue-green LEDs promise full color displays. Laser Focus World, 1995, 31(3): 101-105
- [98] Tanida k. Micro Cu bump interconnection on 3d chip stacking technology. Jap. J. App. Phys., 2004, 43: 2264-2270

- [99] Young C C, Duh J G, Huang C S. Improved characteristics of electroless cu deposition on pt-ag metallized Al₂O₃ substrates in microelectronics packaging. *Surf. Coat. Tech.*, 2001, 145: 215-225
- [100] Liu D. A study on the electrical resistance of solder joint interconnection. *Microelectro. Eng.*, 2002, 63: 363-372
- [101] Pang J H L, Chong D Y R. Flip chip on board solder joint reliability analysis using 2-D and 3-D FEA models, *IEEE Trans. Adv. Pack.* 2001, 24: 499-506
- [102] Elger G, Hutter Oppermann M, Reichl H, Jäger E. Development of an Assembly Process and Reliability Investigations for Flip-chip LEDs Using the AuSn Soldering. *Microsystem Technology.* 2002, 7: 239-243
- [103] Kang S Y, Williams P M, Lee Y C. Modeling and experiment studies on thermosonic flip chip bonding. *IEEE Trans. On Components, Packaging, and Manufacturing Technology – Part B.* 1995, 18 (4): 728-733
- [104] McLaren T S, Zhang W. Thermosonic bonding of an optical transceiver based on 8 x8 cavity surface emitting laser array. *IEEE Trans. On Components, Packaging, and Manufacturing Technology – Part B.* 1997, 20 (2): 152-160
- [105] Baliga John. Flip-Chip packaging: Prepare for the Ramp-Up. *Semiconductor International*, 1998, 21(3): 87-94
- [106] Kleina M, Oppermann H, Reichl H. Single chip bumping and reliability for flip chip processes. *Microelectronics Reliability.* 1999, 39: 1389-1397
- [107] Jiromaru T, Welding characteristics and temperature rise of high frequency and complex vibration ultrasonic wire bonding. *Ultrasonics.* 1998, 36: 59-65.
- [108] Jiromaru T. Studies on ultrasonic wire bonding. WESTPACIII, Shanghai, China, Nov. 1988: 207-210.
- [109] Jiromaru T. Recent development of ultrasonic welding. *Proc. IEEE 1995 ultrasonics Symp.*, IEEE, New York, 1996: 1051-1060
- [110] Jiromaru T, Hasagawa K, Sone Y, Nozaki K. Frequency characteristics of ultrasonic wire bonding using high frequency vibration systems of 40kHz to 780kHz, *Proc. IEEE 1996 Ultrasonics Symp.*, IEEE, New York, 1997: 1021-1026
- [111] Jiromaru T, Ueoka T. Vibration characteristics of one-dimensional longitudinal-torsional converter with multiple slitted parts in: *Proceedings of the IEEE 1998 International Ultrasonics Symposium*, IEEE 1999: 273-279
- [112] 廖华丽, 刘任先. 功率超声变幅杆振动能量传输性能的研究. *机械设计与制造*, 1999, 5: 71-72.
- [113] Chen A S, Nguyen T S, Wire bonding: Present and future trends. *IEEE/CHMT*

- international electronics manufacturing technology symposium, 1993: 45-51.
- [114] Shivesh S, Yogendra J, Harman G. Wire bond temperature sensor. National Institute of Standards and Technology, 2002, 1: 5-14.
- [115] Toyozawa K, Fujita K, Minamide S. Development of copper wire bonding application technology. IEEE Transactions on components, hybrids, and manufacturing technology. 2000, 13(4): 667-674.
- [116] Khoury S, David J B, Thomas A S. A comparison of copper and Gold wire bonding on integrated circuit devices. IEEE Transactions on components, hybrids, and manufacturing technology. 2000, 13(4): 673-682.
- [117] Ainouz L, Switerland T. The use of copper wire as an alternative interconnect material in advanced semiconductor packaging, K&S, 2005, 10: 1-6
- [118] Larbi A, Feidraht A G, Switerland T. Copper wire bonding for power device and high-ends ICs, K&S, 2005, 9: 1-3
- [119] Murali S, Srikanth N, An analysis of intermetallics formation of gold and copper ball bonding. Materials Research Bulletin, 2003, 38: 637-646.
- [120] Kim H J, Lee J Y, Park Y J. Effects of Cu/Al intermetallic compound (IMC) on copper wire and aluminum pad bondability. IEEE Transactions on components, and packaging technology. 2003, 26(2): 367-375.
- [121] Luk C F, Chan Y C, Hung K C. Development of gold to gold interconnection flip chip bonding for chip on suspension assemblies. Microelectronics Reliability. 2002, 12: 381-389
- [122] Murali S, Srikanth N and Charles J V. An analysis of intermetallics formation of gold and copper ball bonding on thermal aging. Materials Research Bulletin, 2003, 38(4): 637-646
- [123] Klein M, Oppermann H, Kalicki R. Single chip bumping and reliability for flip chip processes. Microelectronics Reliability, 1999, 39(9): 1389-1397
- [124] Ho J R, Chen C C and Wang C H. Thin film thermal sensor for real time measurement of contact temperature during ultrasonic wire bonding process. Sensors and Actuators A: Physical, 2004, 111(2): 188-195
- [125] Mayer M, Bolliger D. Active test chips for in situ wire bonding process characterization. Technical Programme, Semicon Singapore 2001: 17-26.
- [126] Yuen C W, Chan H L W. Ultrasonic wire-bond quality monitoring using piezoelectric sensor. Sensors and Actuators A: Physical, 1998, 65(1): 69-75
- [127] Paul W P C, Li H L, Chan H L W. Smart ultrasonic transducer for wire-bonding applications. Materials Chemistry and Physics, 2002, 75(1): 95-100
- [128] Parrini L. New methodology for the design of advanced ultrasonic transducers for welding

- devices. Proceedings of the IEEE International Ultrasonics Symposium. 2000: 699-714
- [129] Ramminger S, Wachutka G. Reliability model for Al wire bonds subjected to Heel Crack Failures. *Microelectronics Reliability*, 2000, 40(8): 1521-1525
- [130] Hu S J, Lim G E, Lim T L. Study of temperature parameter on the thermosonic gold wire bonding of high-speed CMOS. *IEEE Transactions on components, hybrids, and manufacturing*. 1991, 4: 855-858
- [131] Medding J, Mayer M. In situ ball bond shear measurement using wire bonder head. *IEEE/CPMT/SEMI. 28th International Electronics Manufacturing Technology Symposium*. 2003: 59-63
- [132] Cristina L, Liang C, Aziz S, Vern S. Wire bonding characteristics of gold conductors for low temperature co-fired ceramic applications. *Microelectronics Reliability*. 2004, 44: 287-294.
- [133] Chiu S S, Chan H L W, Cheung Y M, Liu P C K. Effect of electrode pattern on the outputs of piezosensors for wire bonding process control. *Materials Science and Engineering*. 2003, 99:121-126
- [134] Chan H L W, Lo V C, Yuen C W. Ultrasonic wire-bond quality monitoring using piezoelectric sensor, *Sensors and Actuators*, 1998, 65: 69-75
- [135] Aguila M T and Edpan J B. Ball bond characterization: An intensive analysis on ball size and shear test results and applicability to existing standards. In *Proc. 1st Elect. Packag. Technol. Conf. EPTC'97*, 1997: 46-51.
- [136] Chen Y S and Fatemi H. Au wire bonding evaluation by fractional factorial designed experiment. *J. Hybrid Microelectron.*, 1987, 10(3): 1-7
- [137] Ramminger S, Wachutka G. Reliability model for Al wire bonds subjected to heel crack failures. *Microelectronics Reliability*. 2000, 40: 1521-1525
- [138] Chu P W, Li H L, Chan H L, Peter C K L. Smart ultrasonic transducer for wire-bonding applications. *Materials Chemistry and Physics*. 2002, 75: 95-100.
- [139] Chu P W, Chong C P, Chan H L, Peter C K L. Placement of piezoelectric ceramic sensors in ultrasonic wire-bonding transducers. *Microelectronic Engineering*, Issue: 1-4. 2003, 66: 750-759
- [140] 曹群,周兆英. 功率超声系统负载的检测及模糊控制. *光字精密工程*, 2002, 10(2): 135-138
- [141] 董震, 阎久春. 超声波塑料焊接过程声学系统电参数的检测. *哈尔滨工业大学学报*, 1999, 31: 5-8
- [142] 孙波, 季远, 李光军. 张德远. 声换能器导纳特性检测及电端匹配研究. *振动、测试与诊断*, 2002, 22(4): 287-322

- [143] Zhou Hongquan, Han Lei, Zhong Jue. Experimental studies of Frequency Characteristic on Transducer Power Supply and Vibration System in Ultrasonic Bonding System. HDP'05, 27-29th June, 2005: 426-429
- [144] HAN L, VOLOSHIN A. Reliability of Test Lands Targeting for Bed-of- Nails Style, Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2006,19(1): 151-155
- [145] Han L, Wang F, Xu W, Zhong J. Bondability window and power input for wire bonding. Microelectronics Reliability. 2006, 46: 610-615
- [146] WANG F, Han L, Zhong J. Effect of Ultrasonic Power on the Heavy Aluminum Wedge Bonding Strength. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2005, 18(4): 515-518
- [147] 李建平, 霍军亚, 王福亮. 热超声倒装键合同步触发系统的设计. 中南大学学报(自然科学版), 2005, 36(6): 1026-1033
- [148] Long Z, Han L, Wu Y, Zhong J. Experiment Study of Temperature Parameter Effect on Bonding Process. 6th International Conference on Electronics Packaging Technology, Shenzhen, China, 2005: 186-193
- [149] Jinde C, Han L. Novel results concerning global robust stability of networks Nonlinear Analysis: Real World Applications 7, 2006: 458-469
- [150] 隆志力, 吴运新, 王福亮. 芯片封装互连新工艺热超声倒装焊的发展现状. 电子工艺技术, 2004, 25(5): 185-188
- [151] Zhang J H, Wang C H and Zhong J. A low cost bumping method for flip chip assembly and MEMS integration. HDP'04, June 30-July 3, 2004: 177-18
- [152] Li F, Ding H, Lin Z. Parameters Sensitivity Analysis for Force Control in Gold Wire Bonding Process. Proceedings of the Sixth International Conference on Fluid Power Transmission and Control (ICTP2005), 2005: 748-753
- [153] Chen Z, Yin Y, Guo X, Ding H, Lin Z. Mechanical Design and Optimization of Flip Chip Bonder, International Conference on Asian Green Electronics Design for Manufacturability and Reliability (2005AGEC). 2005: 101-106
- [154] Han L, Arkady V, Ray P. Optical Measurements for Micro- and Opto-electronic Packages/Substrates, HDP05, 27-29th June, 2005: 385-389

致 谢

不忘师恩，我的导师钟掘院士，科学家的见解、严谨的科学思维、顽强的拼搏进取、积极创新的科研精神，时时浮现在我的脑海中，深深地影响着我，终生难忘，将终生受益。当今时代，是导师把我带入了世界前沿的、充满挑战的、前景光明的微电子领域，为我们年轻人开辟新道路，并在国家 973 项目、国家自然科学基金重大项目这样的高水平平台上做研究，深感幸运。几年来，精心地指导着我在该领域攻克一道又一道难关，使我的学业和工作一步一步的走向成熟，鼓励我参加各种国内国际会议，让我接触到国内外众多优秀的业界人士和科学家，给我带来的是无形的资产和宝贵的财富。在此向导师多年来对我的关心教诲表示衷心的感谢。

其次，感谢韩雷教授、邓圭玲教授、段吉安教授，在论文进展过程中，提出了中肯的意见和及时的帮助；感谢李涵雄教授、邓华教授对我发表外刊论文中给予指导和英文修改；感谢同事王福亮、隆志力，一道建设了试验平台，一起探讨问题，团结上进；感谢闵四宗、宋爱军同学，耐心地帮忙制作 TEM 测试样品。

最后，感谢我的爱人，在我攻读学位期间，给我大力的支持。

博士期间发表的论文

博士期间发表论文 41 篇, 其中第 1 作者 30 篇, 国际期刊 10 篇, SCI 检索 13 篇(第 1 作者的为 12 篇), EI 检索 37 篇(第 1 作者的为 28 篇), ISTP 检索 10 篇。具体如下:

1. **J. Li**, L. Han, J. Duan, J. Zhong, Interface Mechanism of Ultrasonic Flip Chip Bonding, *Applied Physics Letters*, Vol.90, 2007: 242902
(影响因子 **4.127**, SCI 收录: 179QR, EI 收录: 072510666885)
2. **Junhui Li**, Wang Fuliang, Lei Han and Jue Zhong, Theoretical and Experimental Analyses of Atom Diffusion Characteristics on Wire Bonding Interfaces, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, 41: 135303
(影响因子 **2.200**, SCI 收录:316DC, EI 收录:)
3. **Junhui Li**, Lei Han, Jue Zhong, Observations on HRTEM features of thermosonic flip chip bonding interface, *Materials Chemistry and Physics*, 2007, 106(2-3): 457-460
(影响因子 **1.871**, SCI 收录: 234ZI, EI 收录: 074310886989)
4. **Junhui Li**, Lei Han, Jue Zhong, Power and Interface Features of Thermosonic Flip Chip Bonding, *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, accepted, April, 2007
(影响因子 **1.443**, SCI 收录:, EI 收录:)
5. **Junhui Li**, Lei Han, Jue Zhong, Short-Circuit Diffusion of Ultrasonic Bonding Interfaces in Microelectronic Packaging, *Surface and Interface Analysis*, 2008, 40(5): 953-957
(影响因子 **1.427**, SCI 收录: 305KQ, EI 收录: 082211284550)
6. **Li Jun-Hui**, Duan Ji-an, Han Lei, Zhong Jue, Microstructural characteristics of Au/Al bonded interfaces, *Materials Characterization*. 2007, 58: 103-107
(影响因子 **0.932**, SCI 收录: 138WB, EI 收录: 074310886989)
7. Ji-an Duan, **Junhui Li***, Lei Han, Jue Zhong, Interface features of ultrasonic flip chip bonding and reflow soldering in microelectronic packaging, *Surface and Interface Analysis*, 2007, 39: 783-786

(影响因子 1.427, SCI 收录: 224BH, EI 收录: 074310890105)

8. Li Jun-Hui, Han Lei, Zhong Jue, Dynamics Characteristics and Atom Diffusion Law of the Up to Down Interfaces in Thermosonic Flip Chip Bonding, submitted, 5, 2008
9. Li Jun-Hui, Han Lei, Zhong Jue, Interface structure of ultrasonic wedge-bonding joints of Ni/Al, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 2005,15 (4): 846-850.
(SCI 收录: 962GP, EI 收录: 05419405678)
10. Li Jun-Hui, Wang Fu-liang, Han Lei, Zhong Jue, Atomic diffusion properties in wire bonding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006, 16 (2): 463-466.
(SCI 收录: 039WP, EI 收录: 06279980248)
11. Li Jun-Hui, Ming Si-zong, Han Lei, Zhong Jue, Characteristics of ultrasonic vibration transmission in bonding process. *Journal of Central South University of Technology*, 2005, 12 (5): 567-571.
(SCI 收录: 981DG, EI 收录: 05519604612)
12. Li Jun-Hui, Han Lei, Zhong Jue, Features of Ultrasonic Power of Wire Bonding and Thermosonic Flip Chip in Microelectronics Packaging, *Journal of Central South University of Technology*, accepted, April, 2008
(SCI 收录:, EI 收录:)
13. Junhui Li, Lei Han, Ji-an Duan, and Jue Zhong, Features of machine variables in Thermosonic Flip Chip, *Key Engineering Materials*. 2007, 339: 257-262. (EI 收录: 071210498653, ISTP 收录)
14. Li Jun-hui, Lei Han, Jue Zhong, Atomic Diffusion Features in Au/Al & Al/Ni Bonding Interface, *Diffusion and Defect Data*. Pt A Defect and Diffusion Forum, 2005, 247-248: 29-36. (EI 收录: 06129770322)
15. Li Jun-Hui, Han Lei, Zhong Jue, Microstructure Characteristics at The Bond Interface, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005,18(4): 555-558. (EI 收录: 06079701566)
16. Li Junhui, Tan Jianping, Han Lei, and Zhong Jue. The Characteristics of Ultrasonic Vibration Transmission and Coupling in Bonding Technology.

- IEEE, Proceeding of HDP'04, Session 10, 2004: 311-315. (EI 收录: 05129003314, ISTP 收录)
17. **LI Junhui**, HAN Lei, and ZHONG Jue. Studies of Microstructure Characteristics and evolutions at the Bond Interface in Bonding Technology. IEEE, Proceeding of HDP'04, Session 10, 2004: 316-321. (EI 收录: 05129003315, ISTP 收录)
18. **Li Jun-hui**, Han Lei, Zhong Jue, Atomic Diffusion at the Thermosonic Bond Interface in Aluminum and Gold & Aluminum and Nickel, The 7th IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design, Packaging and Failure Analysis (HDP'05), 27-29th June, 2005: 466-470. (EI 收录: 072610679661, ISTP 收录)
19. **Li Jun-hui**, Han Lei, Zhong Jue, Features of bonded interface and PZT transducer, The 7th IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design, Packaging and Failure Analysis (HDP'05), 27-29th June, 2005: 471-477. (EI 收录: 072610679662, ISTP 收录)
20. **Junhui Li**, Lei Han, Ji-an Duan, and Jue Zhong, Features of Thermosonic Flip Chip Bonding, 7th International Conference on Electronics Packaging Technology (ICEPT'06), China, August 26-29 2006: 725-728. (EI 收录: 074110861282, ISTP 收录)
21. **Li Junhui**, Han Lei, Zhong Jue, Diffusion on Two Interfaces of Ultrasonic Flip Chip Bonding, The 8th IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design, Packaging and Failure Analysis (HDP'07), 27-28th June, 2007: 140-144. (EI 收录: 081311176070, ISTP 收录)
22. **Li Junhui**, Han Lei, Zhong Jue, Characteristic Comparing between Thermosonic Flip Chip Bonding and Reflow Flip Chip, The 8th IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design, Packaging and Failure Analysis (HDP'07), 27-28th June, 2007: 291-293. (EI 收录: 081311176102, ISTP 收录)
23. **Junhui Li**, Lei Han, Jue Zhong, Ultrasonic Features in Wire Bonding and Thermosonic Flip Chip, Joint International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging (ICEPT-HDP 2008), Shanghai, China, 28 -31th July, 2008: (EI 收录: , ISTP 收录)

24. 李军辉, 韩雷, 钟掘, 超声键合界面的微观结构特性, 中国机械工程, 2005, 16(4): 341-344. (EI 收录: 05159039663)
25. 李军辉, 韩雷, 钟掘, Ni-Al 超声楔焊键合分离界面的结构特性及演变规律, 焊接学报, 2005, 26(4): 5-8. (EI 收录: 05229136922)
26. 李军辉, 韩雷, 钟掘, 楔焊键合分离界面特性及阻抗分析, 焊接学报, 2005, 26(6): 21-24. (EI 收录: 05329290232)
27. 李军辉, 拟薄水铝石气流干燥数值模拟及优化设计, 湖南科技大学学报, 2004, 19(4): 46-50. (EI 收录: 05058822829)
28. 李军辉, 韩雷, 钟掘, 引线键合的微观特性, 中南大学学报, 2005, 6(1):87-91. (EI 收录: 05169052158)
29. 李军辉等, 硬质合金可转位刀片槽形有限元分析及研究, 硬质合金, 2003, 20(1): 20-24
30. 李军辉等, 基于 ANSYS 的可转位刀片有限元分析, 机械设计与研究, 2003(2): 38-40
31. Wang Fu-liang; Li Jun-hui; Han Lei; Zhong Jue, Effect of ultrasonic power on wedge bonding strength and interface microstructure, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* (English Edition), 2007, 17(3): 606-611. (SCI 收录: 189NS, EI 收录: 072810699370)
32. Wang Fuliang; Li Junhui; Han Lei; Zhong Jue, Effect of bonding parameters on thermosonic flip chip bonding under pressure constraint pattern, The 7th IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design, Packaging and Failure Analysis (HDP'06), 2006: 87-89. (EI 收录: 072610680947, ISTP 收录)
33. 陈新, 李军辉等, Al-Ni 超声楔焊中输入功率与界面键合的特征分析, 材料科学与工艺, 2006, 14(4): 416-419. (EI 收录: 064510226212)
34. 陈新, 李军辉等, 芯片封装中铜线焊接性能分析, 电子机械工程, 2004, 5: 18-21
35. 陈新, 李军辉等, 引线键合机中复杂超声能量传递特性研究, 半导体技术, 2005, 30(3): 32-35. (EI 收录: 8453287)
36. 王福亮, 李军辉, 韩雷, 钟掘, 超声波在引线键合机变幅杆中的传递规律, 中南大学学报, 2005, 36(6): 1017-1020. (EI 收录: 06069687330)

37. 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, 焊接学报, 2006, 27(5): 47-51. (EI 收录: 063410082086)
38. 王福亮, 李军辉, 韩雷, 钟掘, 热超声倒装键合振动传递与键合强度形成研究, 中国机械工程, 2006, 17(22): 2350-2353. (EI 收录: 070510400941)
39. 王福亮, 李军辉, 韩雷, 钟掘, 压力约束模式下热超声倒装键合的试验, 中国机械工程, 2006, 17(18): 1944-1947. (EI 收录: 064710258921)
40. 熊勇刚, 李军辉等, 快速超薄铸轧机铸轧辊变形热力耦合模型, 中南工业大学学报, 2002, 33(4): 412-414. (EI 收录: 7476086)
41. 王福亮, 李军辉, 韩雷, 钟掘, 基于神经网络的基板图像识别软件设计与实现, 机床与液压, 2004, 10: 117-119
42. Min Si-zong, Li Junhui, Duan Ji-an, Deng Guiling, Bump thermal management analysis of LED with Flipchip package, 7th International Conference on Electronics Packaging Technology (ICEPT2006), ShangHai, China, August 26-29 2006: 554-560. (EI 收录: 074110861278, ISTP 收录)

研究项目与专利

1. 博士期间申请主持的研究项目: 3 项

- 1) 国家自然科学基金面上项目“芯片超声倒装多界面能量传递与强度结构演变规律研究”(No. 50675227);
- 2) 湖南省自然科学基金面上项目“热声倒装界面微结构生成机理与技术工艺规律研究”(No. 07JJ3091);
- 3) 华中科技大学“数字制造装备与技术”国家重点实验室开放课题“超声倒装键合界面能量传递与转化规律研究”(No. 2007001)。

2. 博士期间参加的研究项目: 4 项

- 1) 973 项目高性能电子产品设计制造精微化数字化新原理新方法“复合能场作用下微互连界面的微结构演变规律”(No. 2003CB716202);
- 2) 国家自然科学基金重大项目先进电子制造中的重要科学技术问题研究“芯片封装界面制造过程多参数影响规律与控制”(No. 50390064);
- 3) 国家自然科学基金面上项目“半导体照明发光二极管的热超声倒装键合机理与散热性能研究”(No. 50575229);
- 4) 国家自然科学基金面上项目“LEDs 照明器件连接制造中的非线性机理及其工艺监测研究”(No. 50575230)。

3. 申请的专利: 2 项

- 1) 热超声倒装自动键合机, 专利申请号: 200610031493.0;
- 2) 集成热声倒装试验平台, 专利申请号: 200610031729.0。

4. 获奖情况:

- 1) 湖南省第12届自然科学优秀学术论文一等奖, 排名第1;
- 2) 湖南省第10届自然科学优秀学术论文三等奖, 排名第1;
- 3) 湖南省普通高等学校2008届优秀毕业生;