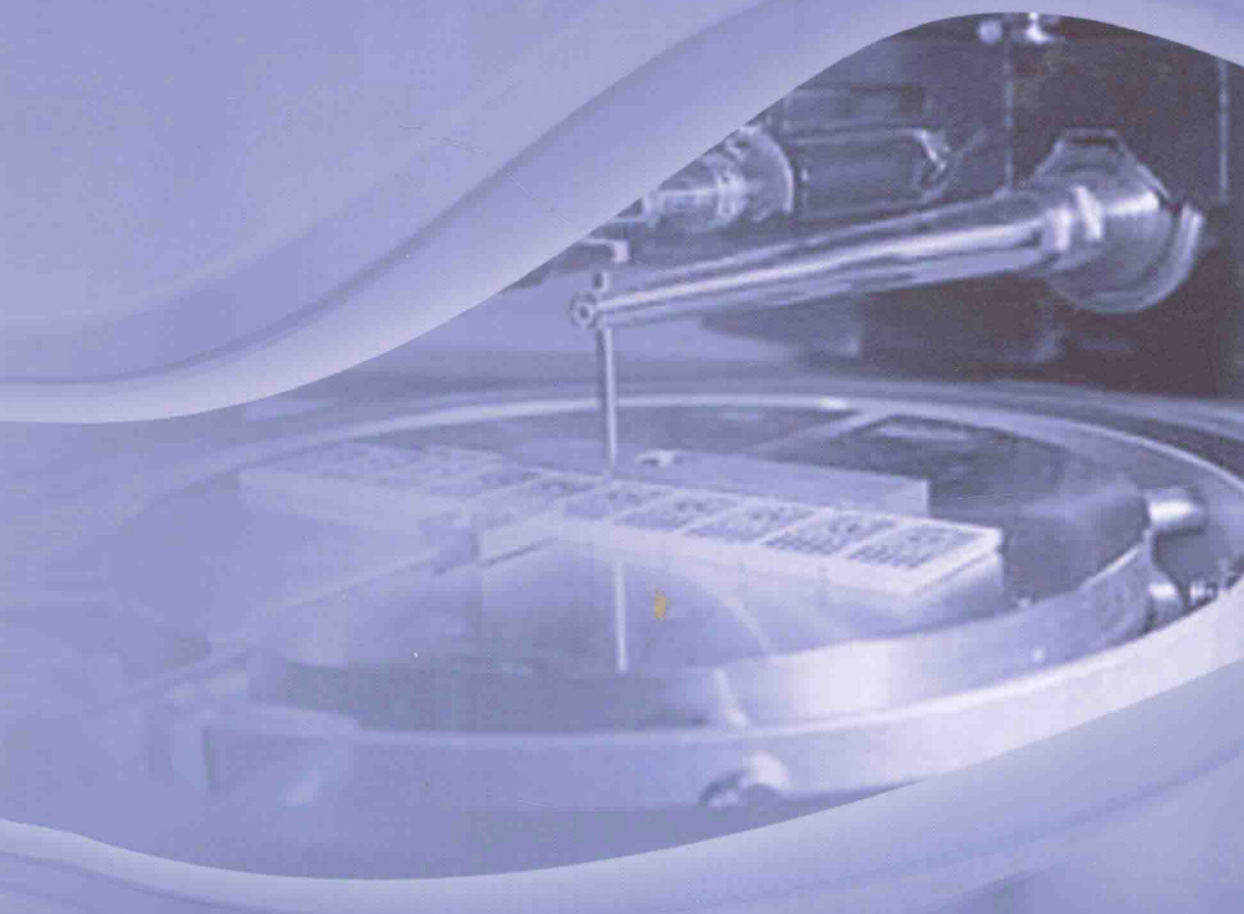


# 微电子封装超声键合 机理与技术

韩雷 王福亮 李军辉 隆志力 著



科学出版社

# 微电子封装超声键合 机理与技术

韩 雷 王福亮 李军辉 隆志力 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书是作者关于超声键合机理和技术研究的总结。主要内容包括:微电子制造的发展,超声键合在封装互连中的地位、研究现状、存在问题;换能系统的设计原则、仿真手段和实际使用中的特性测试;对超声键合微观实验现象以及机理的科学认识和推断;热超声倒装键合工艺的技术研究;键合过程和键合动力学的检测;叠层芯片互连;铜线键合、打火成球、引线成形、超声电源。

本书可作为高等院校微电子制造工程专业的研究生参考书,也可供机械、材料、测控技术等领域从事微电子制造研究的科研人员使用和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

微电子封装超声键合机理与技术 / 韩雷等著. —北京: 科学出版社, 2014. 6

ISBN 978-7-03-041214-0

I. 微… II. ①韩… III. 超声键合-研究 IV. TN405

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 126671 号

责任编辑:陈 婕 余 丁 / 责任校对:邹慧卿 赵桂芬  
责任印制:肖 兴 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2014 年 6 月第一次印刷 印张:40 1/4

字数:798 000

定价:150.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

微电子制造业是关系国家利益和安全的战略性产业,是当今世界上竞争最激烈、发展最迅速的领域之一。微电子封装对集成电路(IC)产品的体积、重量、成本、性能等均有重要影响,而且其成本在整个集成电路产品的成本中所占的比例越来越大,已由中小规模集成电路产品的10%增加到大规模集成电路产品的80%,因此封装已成为高性能电子系统的关键制造环节和影响成本的主要因素。全球微电子制造业对高密度、高可靠封装技术一直十分关注。

在微电子封装中,集成电路芯片和外部管脚的连接起着确保芯片和外界之间的输入输出畅通的重要作用,是整个封装过程的关键。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。而超声键合是实现芯片一级互连的关键技术,在产业发展和应用研究中占有不可替代的地位。

在钟掘院士的领导下,中南大学机电工程学院微纳制造技术与装备研究中心瞄准学科发展的前沿领域,自2003年以来开展了微电子封装互连的研究;通过科技部973项目的支持,在铝线键合、金丝热超声键合、热超声倒装键合实验研究平台上进行了大量实验,获得重要资料;通过机理分析、数值仿真、能量测试、实验技术研究,对超声键合过程有了较清晰的科学认识。

本书是作者关于超声键合机理和技术研究的总结。第1章介绍了微电子制造的发展,超声键合在封装互连中的地位、研究现状、存在问题;第2~5章讨论了换能系统的设计原则、仿真手段和实际使用中的特性测试;第6~8章介绍了超声键合微观实验现象以及机理的科学认识和推断;第10、11章介绍了热超声倒装键合工艺的技术研究;第12~14章讨论了键合过程和键合动力学的检测;第16、17章介绍了叠层芯片互连;第15、18、19章介绍了铜线键合、打火成球、引线成形、超声电源。

全书由韩雷负责统稿。具体章节撰写安排如下:韩雷负责前言、第1、5、12、13、14、16章的撰写;王福亮负责第10、11、15、18、19章初稿的撰写;李军辉负责第6~9、17章初稿的撰写;隆志力负责第2~4章初稿的撰写。研究生周宏权、许文虎、宋爱军、广明安、高容芝、程宝、姚钢、吕雷、张丽娜、马邦科、张亚楠、仇风神、王瑞山、严国政、向康、陈云、周洪军、李进军参与了大量的实验、数据处理和数值仿真工作,付出了辛勤劳动。他们获得的实验数据、仿真结果是本书的基础。在此,对他们表示真诚的感谢!

此外,本书的完成离不开高瞻远瞩的钟掘院士对课题组的关怀、领导和鼓励,

也离不开雒建斌院士、温诗铸院士、熊有伦院士、卢秉恒院士和清华大学、西安交通大学、华中科技大学、哈尔滨工业大学、中国科学院微电子研究所的学术同行的鼓励、支持和帮助,在此对他们表示诚挚的谢意!此外,在研究过程中,国际著名微电子制造设备公司 ASM 的 Peter Liu 博士,与课题组进行了数次详细讨论,并给出了有益指点;李涵雄、吴运新、段吉安教授也参与部分研究,并提出意见,在此,对他们也表示衷心的感谢。

至今,还有超声键合机理的许多问题未能阐明,通过装备实现过程优化,还有相当长的路要走,通过一本书建立完整体系是有难度的。因此,本书并不是完整叙述学术中的相关内容,而是集中介绍对设备、技术及工艺规律的最新认识和重要实验结论。对一个机理和作用尚不十分清晰、精确物理模型尚未建立的工艺过程,本书将在获得的实验资料基础上进行讨论和分析。如此,可避免过于抽象的阐述,有利于封装技术人员理解,但可能显得不够精炼。还需说明,各章内容仅代表作者对具体装备功能的理解和工艺过程的认识,整理时详略不一,提出改进不一定功能最优,更不意味着困扰的问题已完全解决。事如积薪,后来居上,只能将这些学术观点、技术方法和动力学认识,视为进一步研究的新起点。作者恳切希望本书能为建立完整技术体系作出贡献。

限于作者水平,书中难免存在不妥之处,衷心希望各领域的专家学者批评指正。

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 新技术革命浪潮下的微电子制造 .....	1
1.2 现代微电子制造业中的封装互连 .....	4
1.3 微电子封装测试和可靠性.....	10
1.4 微电子封装互连的发展趋势.....	12
1.5 超声键合机理与技术研究.....	16
参考文献 .....	24
<b>第 2 章 换能系统振动特性有限元分析</b> .....	25
2.1 压电材料结构的有限元方法.....	25
2.2 换能系统有限元模型.....	28
2.3 模态分析.....	30
2.4 谐响应分析.....	41
参考文献 .....	43
<b>第 3 章 换能系统多模态特性实验研究</b> .....	44
3.1 测试方法.....	44
3.2 测试结果.....	46
3.3 键合工具响应振型与运动轨迹分析.....	50
3.4 多模态特性对键合质量的影响.....	52
3.5 换能系统多模态产生原因及抑制建议.....	55
参考文献 .....	59
<b>第 4 章 换能系统优化与设计</b> .....	61
4.1 基本结构尺寸计算.....	61
4.2 基于频率灵敏度方法的系统结构优化.....	65
4.3 加工与装配.....	68
4.4 设计实例.....	69
参考文献 .....	74
<b>第 5 章 PZT 换能系统的特性和行为</b> .....	75
5.1 换能系统等效电路与电学导纳特性.....	75
5.2 阻抗分析仪测试换能系统的电学特性.....	82

5.3	加载电压对 PZT 压电换能器稳态电学特性的影响 .....	87
5.4	环境温度对 PZT 压电换能器稳态电学特性的影响 .....	90
5.5	连接松紧度对 PZT 压电换能器稳态电学特性的影响 .....	93
5.6	超声换能系统的稳态响应与速度导纳 .....	97
5.7	超声换能系统的实际加卸载过程 .....	100
5.8	超声换能系统的俯仰振动 .....	103
5.9	劈刀的振动模态 .....	110
5.10	换能系统电学输入的复数表示 .....	117
5.11	实际引线键合过程换能系统的能量输入 .....	122
	参考文献 .....	125
<b>第 6 章</b>	<b>超声键合界面快速形成机理 .....</b>	<b>128</b>
6.1	超声振动激活金属材料位错的观察 .....	128
6.2	原子扩散体系的激活能及快速通道机制 .....	134
6.3	超声界面快速扩散通道机理 .....	143
	参考文献 .....	146
<b>第 7 章</b>	<b>扩散键合界面强度构成与演变规律 .....</b>	<b>148</b>
7.1	界面原子扩散层厚与微结构强度构成 .....	148
7.2	超声键合过程多参数与键合界面微结构演变规律 .....	155
7.3	超声键合系统阻抗/功率特性 .....	164
	参考文献 .....	175
<b>第 8 章</b>	<b>热超声倒装键合界面规律与键合工具设计 .....</b>	<b>176</b>
8.1	热超声倒装实验平台的搭建 .....	176
8.2	多点芯片热超声倒装键合的实现 .....	177
8.3	倒装凸点的热超声植球工艺探索 .....	180
8.4	倒装界面、键合工具、工艺的协同 .....	181
	参考文献 .....	183
<b>第 9 章</b>	<b>倒装多界面超声传递规律与新工艺 .....</b>	<b>184</b>
9.1	倒装二键合界面 TEM 特性与界面扩散 .....	184
9.2	倒装二界面性能分析与工艺新构思 .....	188
9.3	基板传能与基板植球倒装实现与传能规律 .....	192
9.4	热超声倒装二界面传能规律分析 .....	195
9.5	热超声倒装键合过程多参数影响规律 .....	198
	参考文献 .....	200
<b>第 10 章</b>	<b>热超声倒装键合实验系统及其相关技术 .....</b>	<b>201</b>
10.1	热超声倒装键合试验台 .....	201

---

10.2	超声在变幅杆-工具中的传递 .....	208
10.3	超声在倒装界面间的传递过程 .....	215
10.4	热超声倒装键合过程监测系统 .....	229
10.5	键合过程监测系统数据采集和分析 .....	237
10.6	金凸点-焊盘界面的有限元模型及其求解 .....	244
10.7	键合力和超声振动对键合面应力分布的影响 .....	250
10.8	键合强度的形成机理 .....	255
	参考文献 .....	263
<b>第 11 章</b>	<b>热超声倒装键合工艺优化 .....</b>	<b>266</b>
11.1	超声功率对热超声倒装键合的影响 .....	266
11.2	键合力对热超声倒装键合的影响 .....	270
11.3	键合时间对热超声倒装键合的影响 .....	273
11.4	超声作用下金凸点的变形测量 .....	276
11.5	热超声倒装键合的典型失效形式 .....	279
11.6	新型热超声倒装键合工艺的提出 .....	282
11.7	阶梯式键合参数加载过程对倒装键合强度的影响 .....	283
	参考文献 .....	291
<b>第 12 章</b>	<b>引线键合过程的时频分析 .....</b>	<b>293</b>
12.1	新的解决方案——时频分解 .....	293
12.2	键合压力改变对键合强度的影响 .....	299
12.3	劈刀松紧度影响的时频特征 .....	321
12.4	换能系统俯仰振动的时频特征 .....	333
	参考文献 .....	337
<b>第 13 章</b>	<b>换能系统与键合动力学的非线性检测与分析 .....</b>	<b>340</b>
13.1	工艺窗口与非线性过程 .....	340
13.2	锁相非线性 .....	342
13.3	换能系统的非平稳加载 .....	345
13.4	动力学系统的实验建模与键合工具对换能系统的非线性作用 .....	346
13.5	加载边界条件以及滑移/黏滞现象 .....	351
13.6	相关分析及其应用 .....	354
13.7	关联维数分析及其应用 .....	359
13.8	键合动力学细节判断与认识 .....	368
13.9	Lyapunov 指数分析及其应用 .....	377
	参考文献 .....	381



<b>第 14 章 加热台温度引起对准误差的检测与消除</b> .....	383
14.1 热超声倒装键合机的视觉系统 .....	384
14.2 系列图像的预处理和基本评价 .....	387
14.3 图像整体抖动的 Weibull 模型 .....	391
14.4 图像的错位和畸变 .....	395
14.5 加热条件下系列图像的整体和局部运动 .....	405
14.6 吹气装置的实验研究 .....	411
参考文献 .....	418
<b>第 15 章 基于高速摄像的 EFO 打火成球实验研究</b> .....	421
15.1 研究背景 .....	421
15.2 打火成球过程研究实验系统 .....	423
15.3 球形成过程的分析 .....	429
15.4 高尔夫球形成规律实验研究 .....	438
15.5 打火成球过程的热能量利用估算 .....	447
参考文献 .....	459
<b>第 16 章 三维叠层芯片的互连</b> .....	461
16.1 摩尔定律与叠层芯片互连 .....	461
16.2 压电底座激振装置 .....	463
16.3 激励源与激振信号 .....	464
16.4 叠层芯片一阶固有频率的实验判别 .....	473
16.5 红外测温的可行性与加热台的升温 .....	479
16.6 加热升温的建模与芯片结构测温实验结果 .....	481
16.7 叠层芯片引线键合动力学条件的讨论 .....	489
参考文献 .....	491
<b>第 17 章 悬臂键合与铜线互连</b> .....	493
17.1 超声驱动电信号分析 .....	493
17.2 悬臂键合芯片挠度及键合点形貌特性 .....	495
17.3 悬臂键合强度与界面结构分析 .....	497
17.4 提高悬臂键合强度的工艺研究 .....	499
17.5 铜线悬臂键合特性与规律 .....	505
17.6 Cu 线键合界面的微区 X 衍射与 HRTEM 测试与分析 .....	509
17.7 界面 Cu-Al 金属化合物形成条件及其晶体结构特性 .....	511
17.8 铜线键合界面特性与键合强度的关系 .....	519
17.9 Cu 线和 Au 线键合界面微观特性与性能比较 .....	519

---

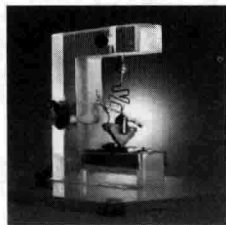
参考文献	524
<b>第 18 章 引线成形过程的研究</b>	<b>528</b>
18.1 引线成形过程的研究现状	528
18.2 基于高速摄像的引线成形过程实验研究	529
18.3 引线成形过程的有限元分析	558
参考文献	573
<b>第 19 章 基于 FPGA 的超声发生器设计与实现</b>	<b>575</b>
19.1 超声发生器的研究现状	575
19.2 超声发生器的建模与仿真	581
19.3 超声发生器的频率控制	594
19.4 基于 FPGA 的智能超声发生器设计	606
19.5 智能超声发生器的性能测试	621
参考文献	631

# 第 1 章 绪 论

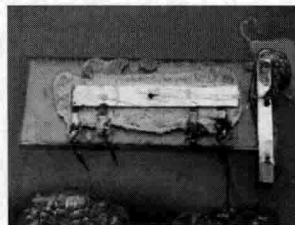
## 1.1 新技术革命浪潮下的微电子制造

制造业是将可用资源通过相应过程、转化为可供使用的工业品或生活消费品的产业。作为经济主要组成部分和财富主要来源的制造业,集成了人类的技术和工艺等多方面的努力进展。中国是世界最重要的制造业大国,随着世界制造业重心的转移,一批重要的制造业基地正在中国崛起。中国的制造业吸收了一半的城市就业人口、一半的农村剩余劳动力,财政收入的一半来自制造业。在未来 10~20 年,制造业将继续经历这一重大深刻改变,而制造者,尤其是中国的制造者,将面临更严峻的挑战。

1958 年,美国德州仪器公司(Texas Instruments)的 Kilby 将半导体晶体管集中在同一芯片(图 1.1),由此诞生了集成电路(integrate circuit, IC)芯片。之后,高分辨率的光致抗蚀剂(光刻胶,photo resist, PR)问世,光刻技术得到迅速发展,成为半导体器件和集成电路制造的关键工艺。



(a) 第一个晶体管  
(Bell Laboratories, 1947)



(b) 第一个集成电路  
(Texas Instruments, 1958)

图 1.1 第一个晶体管和第一块集成电路

自 20 世纪 60 年代中期至今,硅基集成电路相继经历了小规模集成(small scale integration, SSI)、中等规模集成(medium scale integration, MSI)、大规模集成(large scale integration, LSI)和超大规模集成(very large scale integration, VLSI)四个发展阶段。单个 IC 的集成度由数个发展到十亿个以上晶体管或门电路,输入输出(I/O)数也由几个发展到数百个甚至上千个。半导体微电子器件在原理和制造工艺上的不断突破,形成了具有强大生命力的信息技术产业,推动了以计算机(computer)、互联网(internet)为代表的信息技术的高速发展,为科学技术的许多领域注入了新的活力,彻底改变了人们的物质生活甚至精神生活方式。微

电子工业已是 21 世纪的全球头号产业,可称为现代制造业的基础之一。

目前,集成电路对国民经济的贡献率远高于其他门类的产品。例如,以单位质量钢筋对国内生产总值(GDP)的贡献为 1 计算,则小汽车为 5,彩电为 30,计算机为 1000,而集成电路的贡献率则高达 2000。国民经济总产值增长部分的 65%与微电子有关。2000 年,集成电路发明人 Kilby 获得诺贝尔物理学奖,以集成电路为基础的电子信息产业成为世界第一大产业。2001~2010 年这 10 年间,我国集成电路产量的年均增长率超过 25%,集成电路销售额的年均增长率达到 23%。2010 年国内集成电路产量达到 640 亿块,销售额超过 1430 亿元,分别是 2001 年的 10 倍和 8 倍。中国集成电路产业规模已经由 2001 年不足世界集成电路产业总规模的 2%提高到 2010 年的近 9%<sup>[1]</sup>。中国已是拥有全球最大的电子信息市场的制造大国。2012 年上半年,网络购物用户规模达到 2.1 亿,通过手机接入互联网的网民数量达到 3.88 亿,手机成为我国网民的第一大上网终端<sup>[2]</sup>。当前,以移动互联网(mobile internet)、物联网(internet of things)、云计算(cloud computing)为代表的战略性新兴产业快速发展,成为继计算机、网络通信、消费电子之后推动集成电路产业发展的新动力。

先进电子制造是关系国家利益和安全的战略性产业,也是当今世界竞争最激烈、发展最迅速的技术领域。与巨大且快速增长的国内市场相对照,中国集成电路产业虽发展迅速但仍难以满足内需。在先进电子制造中,中国的大型制造装备基本依赖进口,中国先进电子制造技术整体水平尚不能令人满意,在关键制造理论与技术方面距发达国家还有较大差距。中国目前仍处于集成电路消费大国的历史阶段,核心竞争力缺失。作为中国支柱产业的信息产业,很大程度上依赖于国外集成电路的支撑,信息社会的产业和技术基础并不十分牢固<sup>[3]</sup>。

1965 年, Fairchild 公司的 Moore 整理资料时发现,每个新芯片大体上包含其前任两倍的容量<sup>[4]</sup>,这就是现在所称的摩尔定律(Moore's law)。在摩尔定律提出后的 40 多年中,曾不断有专家认为芯片集成的速度已经达到极限。不过事实是,尽管翻一番的周期已经从最初的 12 个月增加到了如今的两年,摩尔定律跨越了 Moore 当时预计的 1975 年,但至今依然有效。芯片上的晶体管数目保持指数增长的趋势,引起了人们的惊异。惊异的是世界上还没有一个产业能以这样的速度持续发展,而且这一预测来自于年轻的研究人员。起源于物理和材料科学的发明,微电子制造在短短数十年发展成为全球头号产业,说明需求和市场的巨大作用,也说明在战略高技术方面缺乏基础研究,原创性技术的产业基础是薄弱的。摆在中国制造业和学术界面前的迫切任务,就是尽快在微电子制造领域赶上和超过世界先进水平。

微电子制造是指在微米、纳米尺度上将物理原理演变为物理现实,批量制造结构、器件和功能系统。微电子制造工艺和系统越来越精细复杂,是不可回避的

现实。

有别于制造工艺技术的堆砌,制造科学主要处理指导工艺选择、优化方向和预估可能极限。美国国家科学院院士冯元桢(Yuan-Cheng Fung)曾指出:“莱特兄弟的飞机飞上天时,并不懂得空气动力学。但如果没有空气动力学,就没有‘协和’飞机”。微制造科学和微电子制造工程的关系与此类似。形象地说,制造科学是“基因溯源”的探讨而非“症状处理”的技术综合。因此,除了对具体工艺过程的技术研究,除了在材料科学、半导体物理领域处理,还必须从基础做起,拓宽研究范围。

以超声键合装备为例。为实现每秒 15 对线以上速度的互连,键合系统(图 1.2)必须精密设计、调控到最佳状态。其中,超声功率源的启动和停止,压电元件的设计制作,换能系统、劈刀的材质和尺寸选择,动态键合力的施加,喂线、引线成形,均需要对键合工艺有深刻的理解、完整的设计和精密的控制。这是在毫米级的工具空间,通过微米级的操纵,在纳米尺度上产生强度,将工艺集成为一个设备可实现的自动化过程。

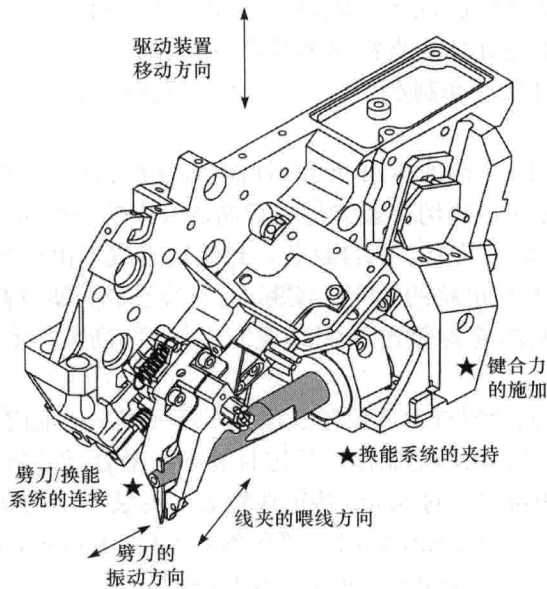


图 1.2 超声键合系统

人们已认识到,用自动化装备实现涉及规模、速度、可靠性的大批量制造(volume production),必须从机械、力学和测控的角度,深入把握制造装备进行的前道及后道工艺过程的细节。从这个角度上说,高性能电子产品制造装备的发展方向是:高精度(控制精度趋于纳米级、加工精度趋于亚纳米级)、超微细(线宽小于 100nm)、高加速度(引线键合运动系统加速度高达 10g)和高可靠性(千小时失效

率低于 $10^{-9}$ )。在上述四个方面领先,首先需要在关键制造技术上取得突破。它们的共性关键技术为:微结构制造技术、微间隙控制技术、微连接技术、高精度加工技术、高速度、高精度运动控制技术、数字化制造技术等。这些技术的实现,需要解决三个关键科学问题:制造表面和界面间的原子、分子和纳米粒子的行为与作用规律;极限制造过程中混合约束的统一表达;极限制造中超精密运动生成原理及控制策略。

## 1.2 现代微电子制造业中的封装互连

### 1.2.1 微电子封装和电气互连

微电子封装是 IC 芯片转变为功能产品的最后一个制造过程,封装为芯片进入工作状态提供信号与能量传输必需的电气连接,同时提供散热通道和可靠的物理支撑与保护。使用中的集成电路芯片必须与外界隔离,以防止空气中的杂质对芯片电路的腐蚀而造成电气性能下降。封装后的芯片也便于安装和运输。封装技术的好坏还直接影响到芯片自身性能的发挥和与之连接的印制电路板(PCB)的设计和制造。1947年,第一只晶体管的发明开创了微电子封装的历史。

微电子封装对 IC 产品的体积、重量、性能、可靠性、成本等都有重要影响,封装在整个 IC 的成本中所占比例越来越大。IC 制造成本的 40% 是用于封装的,而 IC 失效率中超过 25% 的失效因素源自封装。封装所占成本由中小规模集成电路的 10% 增加到大规模集成电路的 80%。实际上,封装已成为研发高性能电子系统的关键环节和制约因素,全球微电子制造业对高密度、高可靠封装技术一直十分关注<sup>[5]</sup>。

微电子封装已成为制造大规模集成电路的关键之一。随着芯片特征线宽减小,芯片不断变薄,芯片的前道制作与后道封装不断融合,许多先进的封装工艺与技术应运而生,其中可望应对 32nm 特征线宽芯片封装要求的新技术主要有晶圆级封装(wafer level packaging, WLP)、系统级封装(system in a package, SIP)、基板嵌入式封装(die embedded in substrate, DES)等。

20 世纪 70 年代流行的是双列直插封装(dual in-line package, DIP)。DIP 的结构形式有多种,如多层陶瓷双列直插式 DIP、单层陶瓷双列直插式 DIP、引线框架式 DIP(含玻璃陶瓷封接式、塑料包封结构式、陶瓷低熔玻璃封装式)等[图 1.3(b)]。DIP 封装结构适合 PCB 的通孔安装,比 TO 型封装易于 PCB 布线,操作方便。

扁平封装是大规模或超大规模集成电路采用的封装形式。塑料方型扁平封装(plastic quad flat package, PQFP)芯片的四周均有引脚,其引脚总数一般

都在 100 以上,而且引脚之间距离很小,管脚也很细[图 1.3(c)].用这种形式封装的芯片必须采用 SMT(表面安装技术)将芯片边上的引脚与主板焊接起来。采用 SMT 安装的芯片不必在主板上打孔,一般在主板表面上有设计好的相应管脚的焊点。将芯片各脚对准相应的焊点,即可实现与主板的焊接。PQFP 适用于表面安装技术在 PCB 上安装布线,适合高频使用,具有操作方便、可靠性高、工艺成熟、价格低廉等优点。

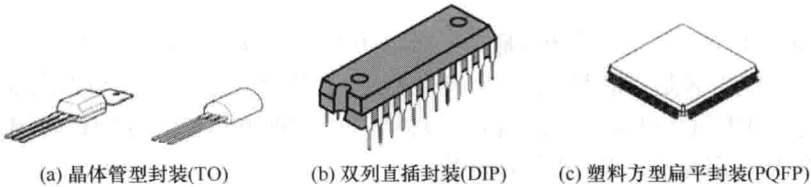


图 1.3 几种封装形式

20 世纪 90 年代后,随着集成技术的进步、设备的改进和深亚微米技术的使用,LSI、VLSI、ULSI 相继出现,芯片集成度不断提高,I/O 引脚数急剧增加,功耗也随之增大,对集成电路封装的要求更加严格。为满足发展的需要,在原有封装品种基础上,又增添了新品种——球栅阵列封装(ball grid array package, BGA)。它的 I/O 引脚以圆形或柱状焊点按阵列形式分布在封装下面,引线间距大,引线长度缩短,这样 BGA 消除了精细间距器件中由于引线而引起的共面度和翘曲问题(图 1.4)。BGA 技术的优点是可增加 I/O 数和间距,消除方形扁平封装(quad flat package, QFP)的高 I/O 数带来的生产成本和可靠性问题。例如,美国 LSI Logic 公司推出的 FPBGA-4L,共有四层有机材料的衬底,它的膨胀系数同线路板材料十分接近。硅芯片直接接触到铜的散热板上,所以具有很好的散热性能。每边的尺寸最大达 40mm,引出端最多可达 1157 个。

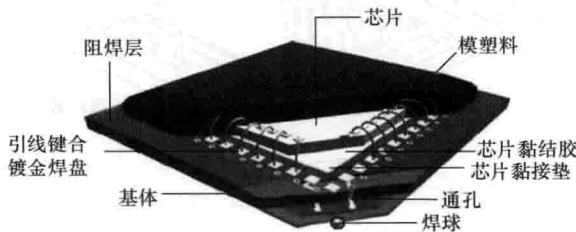


图 1.4 集成电路 BGA 的内部结构

总体说来,集成电路封装大致有三次重大革新:第一次是在 20 世纪 80 年代从引脚插入式封装到表面贴片技术(surface mount technology, SMT)封装,极大地提高了印刷电路板上的组装密度;第二次是在 1990 年 BGA 的出现,它不但满足

了市场高引脚的需求,而且大大地改善了半导体器件的性能;晶片级封装、系统级封装、芯片级封装是现在第三次革新的产物,其目的就是将封装尺度减到最小。

### 1.2.2 封装的层次

整个 IC 生产中的后道生产过程有晶圆减薄(磨片)、晶圆切割(划片)、上芯(黏片)、压焊(键合)、封装(包封)、前固化、电镀、打印、后固化、切筋、装管、封后测试等工序。

为研究微电子产品的散热,定义了微电子封装等级<sup>[6,7]</sup>,见图 1.5。

(1) 一级封装是指芯片(单芯片或多芯片)上的输入输出 I/O 与引线框架或基板的互连,即用封装外壳(金属、陶瓷、塑料等)封装成单芯片组件(SCM)和多芯片模块(MCM),常称为芯片(器件)级封装。

(2) 二级封装是指集成块(封装块)连入 PCB 或卡板(card)上,即将一级封装和其他元器件一同组装到基板(PCB 或其他基板),又称板级封装。

(3) 三级封装是指将电路板或者卡板连入整机母板上,即将二级封装组装到母板上,也称 motherboard 实装。

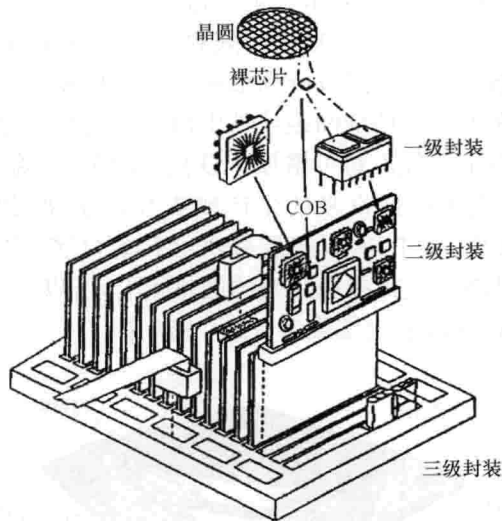


图 1.5 微电子产品的三级封装<sup>[7]</sup>

### 1.2.3 芯片互连级封装

半导体封装的外部形式以及内部的连接方式,与其工艺实现过程有密切联系。其中,内部芯片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,是整个封装过程的关键。局部互



连(local interconnect)是指在晶体管与钛硅化物接触之间形成金属连线。一级互连则指芯片上焊盘(pad)和引线框架或基板的电气连接。互连方式的发展将直接影响着整个半导体封装业的动向。封装的一级互连方式主要包括引线键合、倒装芯片键合和硅片键合。

### 1. 引线键合

引线键合(wire bonding, 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(图 1.6)。引线键合到现在已有 40 余年的历史,是应用最为广泛的封装内部连接方式。目前 95% 以上的芯片均采用这种技术进行封装。

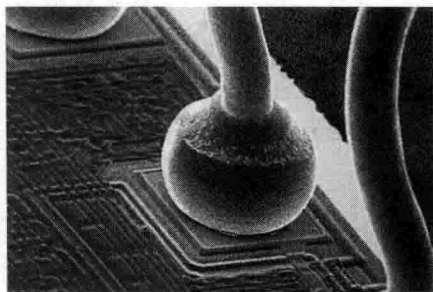


图 1.6 微互连引线键合

引线键合根据其键合特点分为热压键合、热超声键合和超声键合。这几种键合方式各有特点,也有各自适用的范围。

#### 1) 热压键合

热压键合(thermal compression bonding)是最早用于内引线键合的方法。热压键合不使用中间金属或熔化,而是使用由于热和压力导致的材料的塑性流动,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。典型规范:时间 20~80ms,压力 100gf<sup>①</sup>,平台温度 300~350℃,劈刀温度约 100℃。该方法对键合金属表面和键合环境的洁净度要求较高。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”(紫色的金属间化合物 AuAl<sub>2</sub>)、“白斑”(白色的金属间化合物 Au<sub>2</sub>Al)缺陷,有一定的局限性,一般用为玻璃板上芯片(chip on glass, COG)。

#### 2) 热超声键合

热超声键合(thermosonic bonding)是先用高压电火花使金属丝端部受热融化形成球形,然后在 IC 芯片上球焊,再在基板或引线框架上楔焊,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 CMOS 器件封装大都采用 Au 线球焊。加超声可降低热压温度,提高键合强度,有利于提高器件的成品率。热超声键合已逐步取代了热压键合,其时间、温度都比热压键合的小很多。热

<sup>①</sup> gf 表示克力,1000gf=9.8N,即 1N≈10<sup>2</sup>gf,下同。