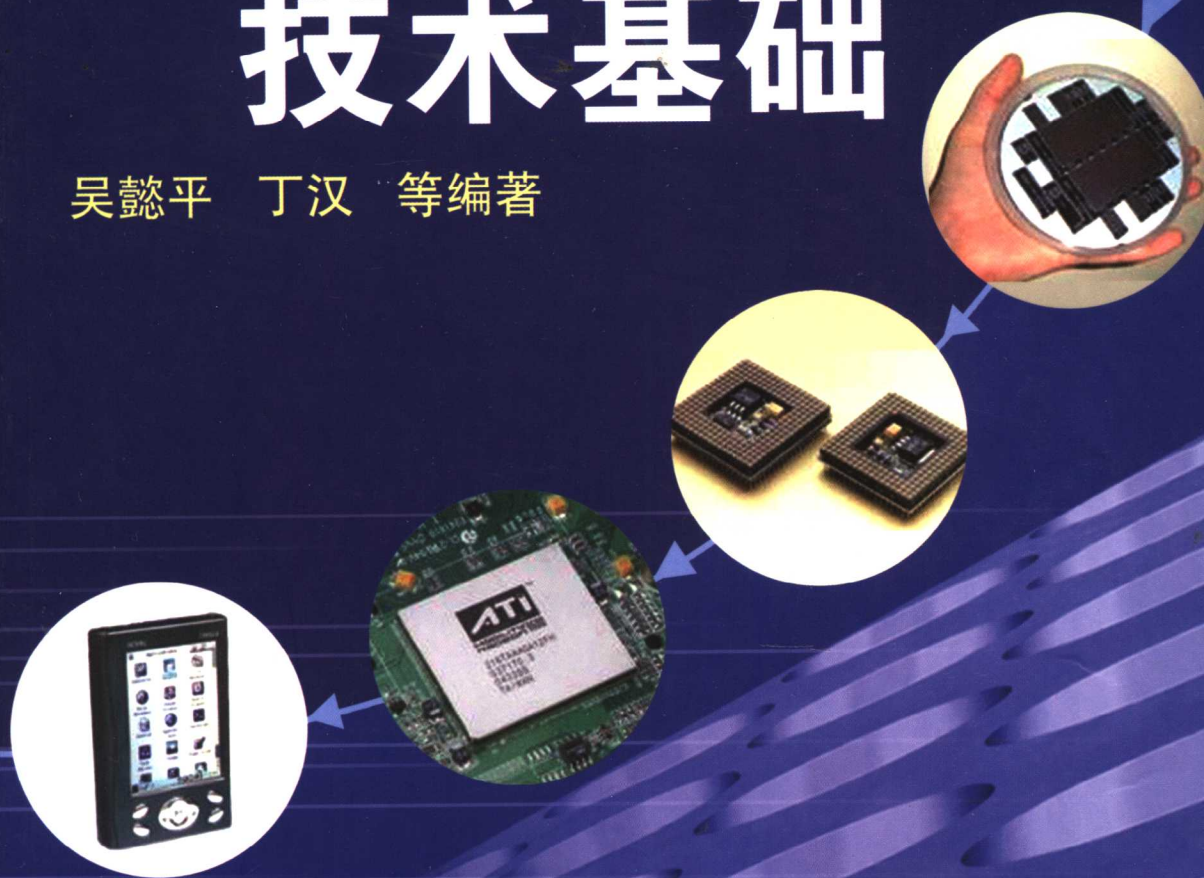


21世纪普通高等教育规划教材

电子制造 技术基础

吴懿平 丁汉 等编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪普通高等教育规划教材

电子制造技术基础

吴懿平 丁 汉 吴丰顺 编著
熊振华 安 兵 徐 勇



机械工业出版社

本书介绍了电子产品的主要制造技术,内容包括电子制造概述、芯片设计与制造技术、元器件的互连封装技术、无源元件制造技术、光电子封装技术、微机电系统工艺技术、封装基板技术、电子组装技术、封装材料以及微电子制造设备。书中简要介绍了晶圆制造,重点介绍了电子封装与组装技术,系统介绍了制造工艺、相关材料及应用。

本书可作为机械、材料与材料加工、微电子、半导体、计算机与通信、化工等相关专业本科生、研究生的教材,也可作为广大科技工作者、工程技术人员了解电子制造技术的入门参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电子制造技术基础/吴懿平等编著. —北京:机械工业出版社,2005.5

21 世纪普通高等教育规划教材

ISBN 7-111-16343-5

I. 电... II. 吴... III. 电子产品—生产工艺—高等学校—教材 IV. TN05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 023087 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:王保家 责任印制:陶 湛

北京诚信伟业印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 7 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·11.25 印张·435 千字

定价:29.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68326294

封面无防伪标均为盗版

序

电子制造技术发展日新月异,在我国电子信息产业中所发挥的作用越来越突出,地位越来越重要。中国改革开放以来,正值国际电子制造技术的几次革命,世界范围内的电子产品迅速普及形成了强大的市场,这些因素的互动,使得我国的电子制造业有了飞速的发展,电子制造已经形成了非常庞大的体系,带动和促进了材料、微电子、先进制造、材料加工、装备等一大批基础产业。我国已经成为世界电子产品的制造基地。

应该看到,一方面电子制造业的发展非常迅速,需要大量的具有从事电子制造的专门人才;另一方面,国内的高校基本上没有直接面对这一领域去培养高级人才。由于电子制造技术属于交叉学科,涉及到许多全新的领域,很多院校都在调整相应的教学内容,迫切希望能够有一本介绍电子产品主要制造技术的教材。

本书的主要作者吴懿平教授和丁汉教授各自在华中科技大学材料学院和上海交通大学机械学院从事电子封装工艺与设备的研究,并讲授“电子制造工艺基础”课程。本书就是在他们讲稿的基础上形成的。这是一本内容新颖详实、深入浅出地介绍电子制造技术的教材,反映了电子制造的最新技术,内容包括电子制造概述、芯片设计与制造技术、元器件的互连封装技术、无源元件制造技术、光电子封装技术、微机电系统工艺技术、封装基板技术、电子组装技术、封装材料以及微电子制造设备。因此建议有志于在电子制造领域发展的机械、材料、微电子、物理、力学、高分子等专业的学生和工程技术人员能够阅读这本书,将大有裨益。



中国工程院院士

崔崑

2005年5月

前 言

微电子产业(电子信息产业)已经成为当今世界第一大产业,也是我国国民经济的支柱产业。电子制造是微电子产业的基础。广义地讲,电子制造就是电子产品与电子系统的物理实现过程,包括集成电路与器件的制造、电子封装与组装两大生产制造过程。

微电子制造业作为一项战略性基础产业,对于促进我国国民经济持续发展和保证我国国家安全具有举足轻重的地位。随着民用电子产品的广泛普及,电子制造已经形成了非常庞大的体系,带动和促进了材料、微电子、先进制造、材料加工、装备等一大批基础产业。

高等院校的机械、材料、微电子、高分子等专业的毕业生很多都在从事与电子制造相关的工作。由于电子制造技术属于交叉学科,涉及到许多全新的领域,参考书籍较少。很多院校都在调整相应的教学内容,迫切希望能够有一本内容新颖翔实、深入浅出地介绍电子制造技术的教材。为此,我们编写了《电子制造技术基础》。

本书是作者在上海交通大学、华中科技大学等高校讲授同类课程讲稿的基础上编写完成的。本书的主线是系统地介绍电子产品从硅片到成品的物理实现过程中的各种制造技术,力求反应本领域的最新技术。

本书全面介绍了现代电子制造技术的基本概念、主要过程、相关工艺、材料及应用等。全书共分为十章。其中第一、二、三、四章和第六章由吴懿平和丁汉共同撰写;第五章由徐勇撰写;第七章和第九章由吴丰顺撰写;第八章由安兵撰写;第十章由熊振华撰写。全书由吴懿平和丁汉统稿。

本书可作为高等院校机械、材料、微电子、高分子、物理等专业的本科生、研究生教材,也可供相关专业的师生和工程技术人员参考。

本书部分工作得到了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”(No. 50390060)和上海市科委项目的资助。

在编写过程中,参考了大量专著和文献,限于篇幅未能一一列出,在此表示感谢。

编 者
于上海交通大学



目 录

序

前 言

第一章 电子制造概述	1
第一节 电子制造的基本概念	1
一、制造与电子制造	1
二、电子产品总成结构的分级	4
第二节 电子制造技术回顾	6
一、晶体管的发明	7
二、集成电路的诞生	7
三、MOS 管的出现	8
四、集成电路的发展	9
五、电子封装技术的发展	11
第二章 芯片设计与制造技术	14
第一节 集成电路物理基础	14
一、半导体的导电性	14
二、PN 结	17
三、晶体管的工作原理	18
第二节 集成电路设计原理	24
一、集成电路的设计流程	24
二、集成电路版图设计基础	25
三、制版和光刻工艺	27
四、MOS 集成电路的版图设计	28
五、双极型集成电路的版图设计	30
第三节 微电子系统设计	31
一、设计方法分类	32
二、专用集成电路与设计方法	33



三、门阵列设计方法	34
四、可编程阵列逻辑	35
五、通用阵列逻辑	35
六、现场可编程门阵列	37
第四节 芯片制造工艺	38
一、硅材料	39
二、洁净室分类	41
三、氧化工艺	41
四、化学气相沉积	43
五、光刻	44
六、光刻掩模(MASK)的制作	48
七、扩散	50
八、离子注入	53
九、电极与多层布线	54
十、CMOS 集成电路制作过程	54

第三章 元器件的互连封装技术

第一节 引线键合技术

一、键合原理	57
二、键合工艺	58

第二节 载带自动焊技术

一、TAB 技术的特点与分类	62
二、TAB 基带材料	63
三、芯片凸点制作	63
四、TAB 互连封装工艺	64
五、带凸点的载带制作	66

第三节 倒装芯片技术

一、倒装芯片技术特点	67
二、凸点技术	68
三、倒装焊工艺方法	74

第四节 芯片级互连的比较

第五节 元器件的封装

一、塑料封装和陶瓷封装的特点	77
二、插装 IC 的标准封装形式	78
三、表面贴装器件的标准封装	79



四、球栅阵列封装	80
五、芯片级封装技术	84
六、多芯片组件技术	85
七、混合电路组件	89
八、其他封装形式	91
九、光电子器件封装	92
第六节 元器件的包装	93
一、引脚端金属化、可焊性及可靠性	93
二、元件的包装	95
 第四章 无源元件制造技术	 97
第一节 概述	97
一、什么是无源元件	97
二、无源元件在电子产品中的地位	97
第二节 制造无源元件的成膜技术	98
一、薄膜成膜技术	99
二、厚膜成膜技术	101
第三节 制造无源元件的微调技术	103
一、电阻微调	103
二、电容微调	104
第四节 无源元件的制造	104
一、无源元件的物理分类	104
二、分立式电阻器的制造	105
三、分立式电容器的制造	110
四、分立式电感器的制造	113
五、集成式无源元件	115
六、嵌入式无源元件	119
七、电容嵌入技术	122
八、电感嵌入技术	122
 第五章 光电子封装技术	 123
第一节 光电子封装的特点与结构	123
一、光电子技术概述	123
二、光电子封装的特点	124
三、光电子封装的发展趋势	125



第二节 光电子器件封装技术	125
一、光电子器件和模块的封装形式	125
二、光电子器件和模块的封装工艺	126
第三节 光模块封装技术	127
一、半导体发射光器件管芯封装	127
二、半导体接收光器件管芯封装	131
三、光模块封装中主要的工艺技术介绍	133
 第六章 微机电系统工艺技术	139
第一节 微机电系统概述	139
一、什么是微机电系统	139
二、微机电系统的特点	140
第二节 MEMS 加工工艺	141
一、体微加工技术	142
二、表面微加工技术	143
三、牺牲层技术	144
四、LIGA 技术	145
第三节 微机电系统封装	145
一、封装概述	145
二、主要工艺	148
三、MEMS 封装注意事项	148
四、倒装芯片技术在 MEMS 中的应用	149
五、MEMS 机构的失效分析	151
第四节 常见的 MEMS 器件	151
 第七章 封装基板技术	156
第一节 典型的印制电路板技术	156
一、对常用基板材料性能要求	156
二、常用的印制板材料	158
三、PCB 板的制作工艺	160
四、激光柔性布线技术	168
第二节 挠性基板与玻璃基板	172
一、挠性基板	173
二、玻璃基板	187
第三节 微过孔技术	198



一、印制电路板中的孔连接技术的发展	198
二、微过孔的制作工艺	200
三、选用原则	206
第八章 电子组装技术	207
第一节 电子组装技术概述	207
一、表面贴装技术和通孔插装技术的比较	207
二、表面贴装技术的组成	208
三、表面贴装技术的特点	208
四、电子组装方式及其工艺流程	210
第二节 印刷技术	212
一、模板	212
二、焊膏印刷	216
第三节 点胶技术	219
一、贴片胶的性能	219
二、贴片胶的类型	220
三、贴片胶涂布方法	220
第四节 贴片技术	221
第五节 回流技术	222
一、回流曲线	222
二、加热因子	224
第六节 波峰焊技术	225
一、助焊剂的涂布	226
二、预热	228
三、焊接	229
四、波峰焊工艺参数	230
第七节 清洗技术	232
一、清洗原理	233
二、清洗类型	234
第八节 返修技术	236
一、返修概念	236
二、返修过程	237
第九节 其他组装技术	239
一、无铅焊接技术	239
二、COB、COF、COG 技术	243



三、封闭式印刷技术	244
四、选择性焊接技术	245
五、通孔回流焊接技术	247

第九章 封装材料

249

第一节 封装材料简介

249

一、电子封装对封装材料的要求	249
二、封装材料的类型	250

第二节 金属材料

254

一、引线键合用金属材料	254
二、合金焊料	260
三、IC 封装用引线框架及材料	265

第三节 高分子材料

270

一、半导体封装对高分子材料的要求	271
二、环氧树脂	272
三、先进电子封装中的聚酰亚胺树脂	281
四、合成胶粘剂	285

第四节 陶瓷封装材料

288

一、常用陶瓷封装材料	288
二、陶瓷封装材料的制备	290

第五节 复合材料

290

一、电子制造中的金属基复合材料	290
二、聚酰亚胺(PI)树脂/氮化铝(AlN)陶瓷复合材料	297
三、导电胶	298
四、焊膏	300

第六节 封装新材料展望

308

第十章 微电子制造设备

309

第一节 半导体工艺设备

309

一、外延设备	310
二、化学气相淀积设备(CVD)	310
三、光刻机	311

第二节 IC 封装设备

313

一、芯片粘接机	313
二、引线键合机	315



三、倒装焊机	316
第三节 组装工艺设备	317
一、丝网印刷机	318
二、贴片机	320
三、波峰焊机	332
四、回(再)流焊炉	333
第四节 辅助生产与测试设备	337
一、在线测试仪(ICT)	337
二、功能测试	337
三、自动光学检查(AOI)	338
四、自动 X 射线检查(AXI)	340
五、返工(修)(Rework)设备	341
六、微分析设备	343
参考文献	345



第一章 电子制造概述

第一节 电子制造的基本概念

一、制造与电子制造

人们一般将“制造”理解为产品的加工工艺过程。例如著名的 Longman 词典对“制造”(Manufacture)的解释为“通过机器进行(产品)制作或生产,特别是适用于大规模、大批量的方式运作”。

随着人类生产力的发展,“制造”的概念和内涵在“对象”和“范围”两个方面得到了极大的拓展。对象方面,制造涉及的领域远非局限于机械制造,它包括了机械、电子、化工、轻工、食品和军工等行业;过程方面,制造不是仅指具体的工艺过程,而是包括市场分析、产品设计、生产工艺过程、装配检验和销售服务等在内的产品的整个生命周期过程。国际生产工程学会 1990 年给“制造”下的定义是:制造是一个涉及制造工业中产品设计、物料选择、生产计划、生产过程、质量保证、经营管理、市场销售和服务的一系列相关活动和工作的总称。这是一个“大制造”的概念,是对“制造”的广义的理解。

和广义的制造相比,我们有时将制造及制造过程理解为从原材料或半成品经过加工和装配后形成最终产品的过程。这是一个“小制造”的概念,是对“制造”的狭义的理解。

与大、小制造概念相对应,对制造技术的理解也有广义和狭义之分。广义的制造技术涉及生产活动的各个方面和全过程,是从产品概念到最终产品的集成活动和系统。狭义理解的制造技术主要涉及产品的加工和装配工艺及过程。以机械制造为例,狭义的机械制造被理解为经过加工和装配形成机械产品的过程,包括毛坯制作、零件加工、检验、装配等,其重点是机械加工和装配工艺。广义的机械制造应该包括机械产品从市场分析、经营决策、工程设计、加工装配、质量控制、销售运输直至售后服务的全过程。

在当今信息时代,社会和经济对信息资源、信息技术和信息产业的依赖程度越来越大,信息化程度已成为衡量一个国家现代化水平的重要标志。而信息化程度与先进电子制造业的代表产品——计算机和微电子产品的普及与发展密切相关,也是当今世界竞争最激烈、发展最迅速的领域。据统计,当今发达国家国民生产总值增长部分的 65% 与电子有关。电子工业增长速率一般为 GDP 增长速



率的3倍,目前已经发展成为全球第一大产业,是一个国家繁荣的核心工业。

现有的各类电子产品,可分为航空航天电子产品、军用电子产品、工业控制电子产品与通信设备、消费类电子产品等。航空航天电子产品是一类需要工作10~20年而不修理的设备,在高性能、高可靠、轻重量、小尺寸以及低能耗方面有着极其苛刻的要求,有非常高的开发和制造成本;军用电子产品必须能够承受非常恶劣的环境以及高可靠性;工业控制电子产品与通信设备(包括计算机产品)的需求非常广,最优的性能、最快的市场反应是至关重要的;而消费类电子产品(如移动电话、个人娱乐电子产品、计算器和手表等)市场巨大、价格竞争压力大,轻便且低能耗的要求突出,其使用期一般为几年,而无需替换和修理。尽管生产制造这些电子产品的具体要求不尽相同,但大致的制造过程基本是一样的,如图1-1所示。

和机械制造一样,“电子制造”(Electronic Manufacture)也有广义和狭义之分。广义的电子制造也包括电子产品从市场分析、经营决策、工程设计、加工装配、质量控制、销售运输直至售后服务的全过程。本书讲述的主要内容则属于狭义的电子制造,是指电子产品从硅片开始到产品系统的物理实现过程。由于篇幅限制和本书的内容和性质等原因,其他的一些重要技术,如VLSI电路设计、PCB板设计、资源管理、销售运输等不在本书介绍。

图1-1中被椭圆框包含的部分又称为电子封装(Electronic Packaging),而晶片的制造则称为半导体制造(Semiconductor Manufacture)。

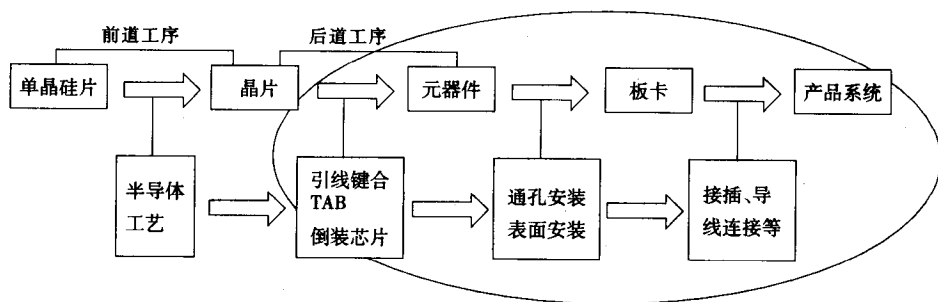


图1-1 电子产品的物理实现过程

电子封装指的是从电路设计的完成开始,根据电路图,将裸芯片、陶瓷、金属、有机物等物质制造成芯片、元件、板卡、电路板,最终组装成电子产品的整个过程。

半导体制造指的是利用微细加工技术将各单元元器件按一定的规律制作在一块微小的半导体片上进而形成半导体芯片的过程,也称为集成电路制造。

在半导体元器件制作过程中,有前道工序和后道工序之分。二者以硅圆片(Wafer)切分成晶片(Chip)为界,在此之前为前道工序,在此之后为后道工序。



所谓前道工序是从整块硅圆片入手,经过多次重复的制膜、氧化、扩散,包括照相制版和光刻等工序,制成三极管、集成电路等半导体元件及电极等,开发材料的电子功能,以实现所要求的元器件特性。

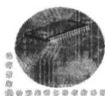
所谓后道工序是从由硅圆片切分好的一个一个的小晶片入手,进行装片、固定、键合连接、塑料灌封、引出接线端子、检查、打标等工序,制作成器件、部件的封装体,以确保元器件的可靠性并便于与外电路连接。电子封装主要是在后道工序中完成。

电子制造也可视为是广义的“机械制造”:芯片制造对应于二维零部件成形,芯片封装对应于结构联结(装配),只是前者的精度要远远高于后者,在芯片和元器件层面上分别具有纳米级和微米级的制造精度,为此采用具有分子尺度加工单位的薄膜生长、刻蚀等成形工艺和焊接、粘结等直接互连工艺。实际上 IC 制造工艺,无论是前道中的光刻还是后道中的键合,均已成为典型的微机械制造工艺,并和传统的超精密加工工艺、特种加工工艺、以及 LIGA 工艺、STM 表面加工工艺等一些有发展前景的新工艺一道构成了完整的微制造工艺体系。另一方面微电子制造装备作为一种自动化装备与传统的机械制造装备有很多共性之处,但亦有其特殊之处,主要表现在以下两个方面:

(1)具备高性能的运动控制系统,如光刻机可实现运动平台和掩模平台的十二轴联动,定位精度 $<10\text{nm}$;引线键合机的运动加速度达 $12\sim 15g$,频率 $10\sim 15\text{Hz}$,定位精度 $2\sim 5\mu\text{m}$ 。

(2)广泛采用光学元器件实现显微缩放或传感检测,如光刻机中采用曝光显影技术实现图形转移、采用激光干涉仪作为位置反馈元件;引线键合机中采用机器视觉技术实现芯片定位。此外在封装设备中一般还要求在实现精密运动定位的同时能精确控制温度、压力和流量等过程参数。微电子制造装备已成为典型的复杂光机电一体化设备。

近 30 年来,微电子技术的发展一直遵循摩尔定律和按比例缩小原理,即每隔 3 年芯片的集成度翻两番(增加 4 倍),特征尺寸缩小 $1/3$,发展如此迅速的一个重要原因是由于电子制造的原理探索和技术创新的高度融合和渗透,目前电子制造已成为一项集当今世界最先进科技成果于一体的综合和多学科交叉,其技术进步远不像所表征的多少线宽和多大规模那么简单,而是一个及其庞大和复杂的系统工程和综合技术,其内容包括:材料制备、微细制造工艺、高密度集成元器件可靠性设计、高速高精度复杂光机电系统集成方法、系统测试技术、质量控制和生产自动化等。每一次缩小线宽和增大规模都要求突破已有制造工艺和装备的工作极限,综合应用材料、力学、光学、机械、信息和自动化等多学科的最新成果,解决大量的科学技术难题,同时也对这些学科理论的发展产生积极的促进作用。



二、电子产品总成结构的分级

图 1-2 给出了一个电子产品系统的总成结构。可以看到,由半导体材料(硅片)制作出一个个的有特定功能的晶片并不是一个孤立的东西,它必须同其他元件通过输入输出(I/O)进行互连才能发挥其功能。封装技术(Packaging)就是如何将一个或多个晶片有效和可靠地封装和组装起来。电子封装的主要功能如下:①提供给晶片电流通路;②引入或引出晶片上的信号;③导出晶片工作时产生的热量;④保护和支撑晶片,防止恶劣环境对它的影响。

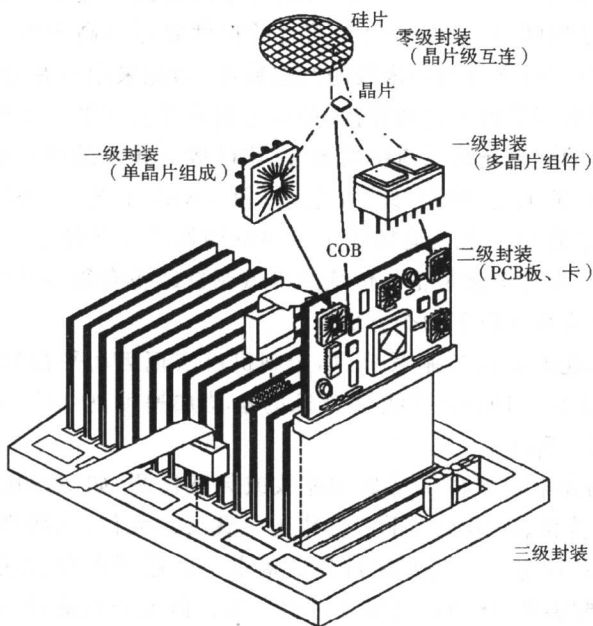


图 1-2 三级电子封装与组装总成示意图

封装与组装可分为零级封装(晶片级的连接)、一级封装(单晶片或多个晶片组件或元件)、二级封装(印制电路板级的封装)和三级封装(整机的组装)。通常把零级和一级封装称为电子封装(技术),而把二级和三级封装称为电子组装(技术)。由于导线和导电带与晶片间键合焊接技术的大量应用,一级和二级封装技术之间的界限已经模糊了。

1. 零级封装

零级封装就是晶片级的连接。通常晶片级的连接方法有引线键合(Wire Bonding)、载带自动键合(TAB, Tape Automated Bonding)和焊球植入(Solder Bumping)。这三种技术中以焊球植入技术(倒装芯片)提供的封装密度最高。



2. 一级封装

一级封装就是集成电路(IC)元件的封装。它是电子封装中最活跃、变化最快的领域。一级封装的种类繁多、结构多样。图 1-3 列出了部分一级封装的结构与外形。

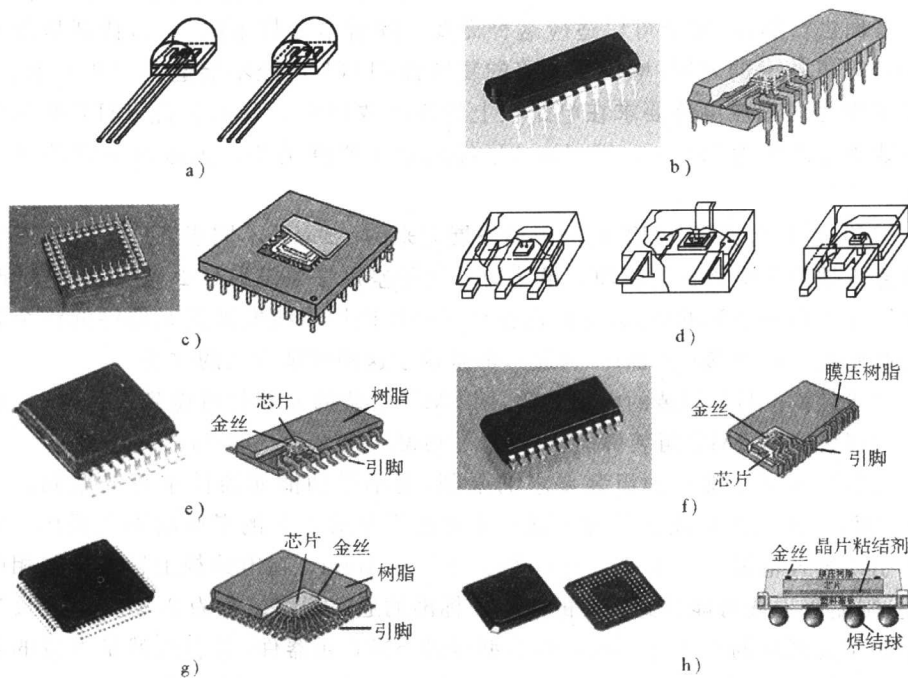


图 1-3 几种集成电路元件封装形式的结构示意图

- a) 晶体管 b) DIP 外观和内部结构 c) PGA 外观和内部结构
d) 贴装晶体管的内部结构 e) SOP 的外观和内部结构 f) SOJ 外观与内部结构
g) QFP 封装外观与内部结构 h) BGA 封装外观和内部结构

随着集成度的提高和密度的增加,要求在一个晶片上引出的脚越来越多,由于引线对信号的延迟,极大地影响了工作频率。计算机的发展已经要求有超过 1 000 个引脚和工作在 4GHz 频率下的集成电路。目前的封装技术还不能完全适应这些要求,因此封装一直是微电子工业的最主要的瓶颈。这也迫切地要求封装技术不断适应微电子的发展。近年来封装技术有了很大的突破,特别是 BGA 封装技术的出现,标志着高密度、多 I/O 引脚的 IC 成功应用于微电子工业产品中。

3. 二级和三级封装

二级和三级封装就是将 IC、阻容元件、接插件以及其他的元器件安装在印制电路板上,并组成为整机的技术。二级封装主要有两大技术:通孔组装技术