

十二五

新技术研究与应用系列

电子封装、微机电与微系统

田文超 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

新技术研究与应用系列

电子封装、微机电与微系统

田文超 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书分三篇,共13章。第一篇详细地介绍了电子封装技术的概念,封装的主要形式、材料、主要工艺、可靠性、电气连接以及封装面临的挑战,从机械振动冲击、热力膨胀、电压电流过冲、信号完整性、电源完整性、电磁辐射、化学腐蚀等方面,重点阐述了封装失效机理和失效模式,同时介绍了MCM、硅穿孔技术、叠层技术、无铅焊技术的发展。第二篇系统地介绍了微机电技术的概念和应用领域、封装特点、封装形式,从气体运动的压膜、滑膜模型出发,重点分析了影响微机电特性的气膜阻尼问题,同时阐述了压力传感器、加速度计、射频开关、风传感器等典型微机电器件的封装方法。第三篇基于前两篇的基础,系统地讲述了电子封装技术的发展趋势——SOC、SIP和微系统,利用大量图片、实例,阐述了电子封装的发展及其面临的问题,介绍了多功能芯片、多类型芯片集成时采用的低功耗、可测性等技术。

本书可供高年级本科生和研究生使用,也可作为相关工程技术人员及科技管理人员的参考书。

★ 本书配有电子教案,需要者可登录出版社网站,免费下载。

图书在版编目(CIP)数据

电子封装、微机电与微系统 / 田文超编著. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2012.1

新技术研究与应用系列

ISBN 978-7-5606-2700-7

I. ① 电… II. ① 田… III. ① 微电子技术—封装工艺—高等学校—教材 IV. ① TN405.94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 239332 号

策 划 李惠萍

责任编辑 马晓娟 李惠萍

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安文化彩印厂

版 次 2012年1月第1版 2012年1月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 12

字 数 280千字

印 数 1~3000册

定 价 20.00元

ISBN 978-7-5606-2700-7/TN·0632

XDUP 2992001-1

如有印装问题可调换

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

当今世界已经进入信息化时代，信息化程度的高低已成为衡量一个国家综合国力的重要标志。微电子技术是发展电子信息产业和各项高新技术的基础。微电子工业领域的两大关键性技术分别是芯片制造和电子封装。微电子技术的发展与电子封装技术的进步是分不开的，芯片需依靠封装来实现与外界的连接和信号交换，因此封装技术是芯片功能得以实现的重要技术。

电子封装技术是在保证可靠性的前提下，以提高传输速度、有效扩散热量、增加IO端口数、减少器件尺寸和降低生产成本为目的的综合技术。电子封装技术除涉及芯片设计、芯片制造等半导体器件领域外，还包括芯片载体、电子元器件组装、互连等技术，是一门由电路、工艺、结构、元件、材料紧密结合的多学科交叉的工程学科，涉及微电子、物理、化学、机械、材料、可靠性等多个研究领域。

按照摩尔定律的预测，在不断追求电子元器件的高集成度、高密度的同时，带来了新的问题，即高功率、高热量、超多传输线、寄生效应、高热应力、强辐射、串扰过冲等机、电、热、磁及其相互耦合问题。尤其是无铅焊料的要求，对封装提出了新的挑战。随着电子元器件集成度的提高，封装成本所占总成本的比例快速增长。

微机电(Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS)是以微细加工技术为基础，将微传感器、微执行器和电子线路、微能源等有机组合在一起的微机电器件、装置或系统。微机电既可以根据电路信号的指令控制执行元件，实现机械驱动，也可以利用传感器探测或接收外部信号。传感器将转换后的信号经电路处理后，再由执行器转换为机械信号，完成命令的执行。可以说，微机电技术是一种获取、处理和执行操作的集成技术。

尽管微机电产品市场不断增长，前景令人鼓舞，但是微机电的产业化却没有如人们所期待的那样迅速到来，大量的微机电产品还只是美好的设想，或者停留在实验室研究阶段。微机电产品构想陷入了困境，甚至以失败告终，主要原因之一是没有找到有效且合适的封装方法。

随着半导体工艺技术的发展，集成电路设计者能够将愈来愈复杂的功能集成到单晶硅片上，SOC(System-On-Chip)正是在集成电路向集成系统转变的大趋势下产生的。相对于SOC封装技术，SIP(System-In-Package)系统包括有源器件、无源器件和分离器件，它利用封装工艺将多芯片集成在一起，以实现多种功能。微系统技术将微电子器件、光电子器件和微机电器件集成在一起，并且利用异类器件，通过三维封装技术，形成具有更高集成度、更强功能芯片级的微小型电子系统。异类器件的三维封装对封装技术提出了新的挑战，它是多功能元器件微型化发展的必然结果，同时又是下一场电子封装革命所必须面临的问题。

截至目前为止，市面上很少有综合描述电子封装中的机、电、热、磁及其相互耦合的书籍，鉴于此，作者编著了本书。

本书从封装概念出发，由浅入深，分别介绍电子封装技术、MEMS封装和微系统技术三大内容。全书共三篇13章。

第一篇为电子封装技术，共7章。

第一章首先介绍封装的定义，其次介绍封装的内容、层次和功能，最后介绍封装技术的历史和发展趋势。

第二章首先介绍封装的主要形式，包括 DIP(双列直插式封装)、SOP(小外形封装)、PGA(针栅阵列插入式封装)、QFP(四边引线扁平封装)、BGA(球栅阵列封装)、CSP(芯片级封装)、3D 封装和 MCM 封装，最后介绍了封装的发展趋势。

第三章介绍封装的主要材料，包括陶瓷、金属、塑料、复合材料、焊接材料和基板材料。

第四章介绍封装工艺，包括薄膜技术、厚膜技术、基板技术、钎焊技术、薄膜覆盖封装技术、金属柱互连技术、通孔互连技术、倒装芯片技术、压接封装技术、引线键合技术、载带自动焊技术、倒装芯片键合技术和电连接技术。

第五章介绍封装的可靠性，包括可靠性概念、封装失效机理、电迁移、失效分析的简单流程、焊点的可靠性、水气失效和加速试验。

第六章介绍封装电气连接，包括信号完整性(SI)、电源完整性(PI)、反射噪声、串扰噪声、电源-地噪声和无源器件。

第七章介绍电子封装面临的主要挑战，包括无铅焊接、信号完整性、高效冷却技术、高密度集成化、电磁干扰、封装结构、键合焊接和高密度多层基板。

第二篇为 MEMS 封装，共3章。

第八章介绍 MEMS 的概念、特点、应用以及 MEMS 技术与 IC 技术的差别。

第九章介绍 MEMS 的封装技术，包括 MEMS 封装的基本类型、特点、功能、形式、方法、工艺、层次、气密性和真空度以及阻尼特性，最后介绍了 MEMS 封装面临的挑战。

第十章介绍几种典型 MEMS 器件的封装，包括压力传感器封装，加速度计的单芯片封装、圆片级封装、BCB 圆片级封装，RF MEMS 开关封装和风传感器封装。

第三篇为微系统，共3章。

第十一章介绍 SOC 技术，包括 SOC 技术的基本概念和特点、优缺点、关键技术以及国内外 SOC 现状、发展策略，最后阐述 SOC 技术面临的挑战和发展方向。

第十二章介绍 SIP 技术，包括 SIP 的概念、技术特性、SOC 技术与 SIP 技术的关系、SIP 技术现状、SIP 工艺、技术进展，最后阐述 SIP 技术的应用。

第十三章在 SIP 和 SOC 技术的基础上，介绍微系统，包括微系统的概念、特点以及关键技术。

在编写本书的过程中，得到了杨银堂教授和贾建援教授的指导和帮助，在此对两位教授在百忙之中给予的支持和帮助表示衷心的感谢！同时还感谢山磊硕士和王文龙硕士在本书图片处理、校对等工作中给予的帮助。最后感谢西安电子科技大学出版社的大力支持。

由于作者水平有限，且微机电封装技术和微系统技术的研究尚处于发展阶段，理论和工艺等仍欠成熟，书中不足之处在所难免，恳请广大读者不吝指正。

编著者
2011年9月

目 录

第一篇 电子封装技术

| | |
|---------------------------|----|
| 第一章 电子封装技术概述 | 3 |
| 1.1 封装的定义 | 3 |
| 1.2 封装的内容 | 3 |
| 1.3 封装的层次 | 5 |
| 1.4 封装的功能 | 9 |
| 1.5 封装技术的历史和发展趋势 | 10 |
| 第二章 封装形式 | 12 |
| 2.1 DIP(双列直插式封装) | 12 |
| 2.2 SOP(小外形封装) | 13 |
| 2.3 PGA(针栅阵列插入式封装) | 13 |
| 2.4 QFP(四边引线扁平封装) | 13 |
| 2.5 BGA(球栅阵列封装) | 14 |
| 2.6 CSP(芯片级封装) | 16 |
| 2.7 3D 封装 | 18 |
| 2.8 MCM 封装 | 20 |
| 2.9 发展趋势 | 21 |
| 第三章 封装材料 | 22 |
| 3.1 陶瓷 | 22 |
| 3.2 金属 | 23 |
| 3.3 塑料 | 23 |
| 3.4 复合材料 | 24 |
| 3.5 焊接材料 | 24 |
| 3.6 基板材料 | 26 |
| 第四章 封装工艺 | 28 |
| 4.1 薄膜技术 | 28 |
| 4.2 厚膜技术 | 28 |
| 4.3 基板技术 | 28 |
| 4.4 钎焊技术 | 29 |
| 4.4.1 波峰焊 | 29 |

| | |
|------------------------------|-----------|
| 4.4.2 回流焊 | 30 |
| 4.5 薄膜覆盖封装技术 | 34 |
| 4.6 金属柱互连技术 | 35 |
| 4.7 通孔互连技术 | 36 |
| 4.8 倒装芯片技术 | 37 |
| 4.9 压接封装技术 | 39 |
| 4.10 引线键合技术 | 39 |
| 4.11 载带自动焊(TAB)技术 | 45 |
| 4.12 倒装芯片键合(FCB)技术 | 46 |
| 4.13 电连接技术 | 49 |
| 4.14 焊接中的常见问题 | 50 |
| 第五章 封装可靠性 | 59 |
| 5.1 可靠性概念 | 59 |
| 5.2 封装失效机理 | 59 |
| 5.3 电迁移 | 61 |
| 5.4 失效分析的简单流程 | 62 |
| 5.5 焊点的可靠性 | 63 |
| 5.6 水气失效 | 66 |
| 5.7 加速试验 | 66 |
| 第六章 电气连接 | 69 |
| 6.1 信号完整性(SI) | 69 |
| 6.2 电源完整性(PI) | 70 |
| 6.3 反射噪声 | 72 |
| 6.4 串扰噪声 | 72 |
| 6.5 电源—地噪声 | 73 |
| 6.6 无源器件 | 73 |
| 第七章 电子封装面临的主要挑战 | 78 |
| 7.1 无铅焊接 | 78 |
| 7.2 信号完整性 | 81 |
| 7.3 高效冷却技术 | 82 |
| 7.4 高密度集成化 | 83 |
| 7.5 电磁干扰 | 83 |
| 7.6 封装结构 | 83 |
| 7.7 键合焊接 | 84 |
| 7.8 高密度多层基板 | 84 |

第二篇 MEMS 封装

| | |
|------------------------------|-----|
| 第八章 MEMS 概述 | 87 |
| 8.1 MEMS 的概念 | 87 |
| 8.2 MEMS 的特点 | 88 |
| 8.3 MEMS 的应用 | 90 |
| 8.4 MEMS 技术与 IC 技术的差别 | 95 |
| 第九章 MEMS 封装 | 96 |
| 9.1 MEMS 封装的基本类型 | 96 |
| 9.2 MEMS 封装的特点 | 96 |
| 9.3 MEMS 封装的功能 | 99 |
| 9.4 MEMS 封装的形式 | 100 |
| 9.5 MEMS 封装的方法 | 101 |
| 9.6 MEMS 封装的工艺 | 101 |
| 9.7 MEMS 封装的层次 | 107 |
| 9.7.1 裸片级封装 | 107 |
| 9.7.2 圆片级封装 | 108 |
| 9.7.3 真空键合封装 | 108 |
| 9.7.4 有机粘接 | 110 |
| 9.8 MEMS 封装的气密性和真空度 | 112 |
| 9.9 MEMS 封装的阻尼特性 | 113 |
| 9.10 MEMS 封装面临的挑战 | 116 |
| 第十章 典型 MEMS 器件封装 | 120 |
| 10.1 压力传感器 | 120 |
| 10.1.1 压力传感器的工作原理 | 121 |
| 10.1.2 压力传感器的封装形式 | 123 |
| 10.2 加速度计 | 126 |
| 10.2.1 加速度计的工作原理 | 127 |
| 10.2.2 单芯片封装结构 | 127 |
| 10.2.3 圆片级封装结构 | 130 |
| 10.2.4 BCB 圆片级封装结构 | 132 |
| 10.3 RF MEMS 开关 | 133 |
| 10.3.1 RF MEMS 开关概述 | 133 |
| 10.3.2 RF MEMS 开关的封装要求 | 135 |
| 10.3.3 RF MEMS 开关的封装过程 | 136 |
| 10.3.4 RF MEMS 开关的封帽 | 139 |
| 10.3.5 RF MEMS 开关的电连接 | 139 |

| | |
|----------------|-----|
| 10.4 风传感器..... | 140 |
|----------------|-----|

第三篇 微系统技术

| | |
|-----------------------------|-----|
| 第十一章 SOC 技术 | 145 |
| 11.1 SOC 技术的基本概念和特点..... | 146 |
| 11.2 SOC 技术的优缺点..... | 147 |
| 11.3 SOC 的关键技术..... | 148 |
| 11.3.1 IP 模块复用设计..... | 148 |
| 11.3.2 系统建模与软硬件协同设计..... | 149 |
| 11.3.3 低功耗设计..... | 149 |
| 11.3.4 可测性设计技术..... | 150 |
| 11.3.5 深亚微米 SOC 物理综合设计..... | 151 |
| 11.4 SOC 现状..... | 151 |
| 11.4.1 国外 SOC 现状..... | 152 |
| 11.4.2 我国 SOC 研究现状..... | 154 |
| 11.5 我国 SOC 发展策略..... | 155 |
| 11.6 SOC 技术面临的问题..... | 157 |
| 11.7 SOC 技术的新发展..... | 158 |
| 第十二章 SIP 技术 | 160 |
| 12.1 SIP 技术的概念..... | 160 |
| 12.2 SIP 技术的特性..... | 161 |
| 12.3 SOC 技术与 SIP 技术的关系..... | 161 |
| 12.4 SIP 技术的现状..... | 162 |
| 12.5 SIP 技术的工艺..... | 163 |
| 12.6 SIP 技术的进展..... | 165 |
| 12.6.1 新型互连技术..... | 165 |
| 12.6.2 堆叠技术的发展..... | 166 |
| 12.6.3 埋置技术..... | 168 |
| 12.6.4 新型基板..... | 169 |
| 12.7 SIP 技术的应用..... | 170 |
| 第十三章 微系统 | 173 |
| 13.1 微系统的概念..... | 173 |
| 13.2 微系统的特点..... | 175 |
| 13.3 微系统的关键技术..... | 179 |
| 参考文献 | 182 |

第一篇

电子封装技术

第一章 电子封装技术概述

在真空电子管时代，还没有“封装”这一概念，只是将电子管等器件安装在管座上，构成电路设备，一般称为“组装或装配”。50多年前的三极管、30多年前的IC等半导体元件的出现，改写了电子工程的历史，封装的概念在此基础上形成。

“封装”在电子工程领域的出现并不久远，它是伴随着三极管和芯片的出现而出现的。IC器件材料多为硅或砷化镓等，利用薄膜工艺在晶圆上加工，其尺寸极其微小，结构也极其脆弱。为防止在加工与输送过程中，因外力或环境因素造成芯片损坏而导致芯片功能丧失，必须想办法把它们隔离“包装”起来；同时由于半导体元件高性能、多功能和多规格的要求，为了充分发挥其各项功能，实现与外电路可靠的电气连接，必须对这些元器件进行有效的密封，随之出现了“封装”这一概念。

1.1 封装的定义

电子封装可定义为：将集成电路设计和微电子制造的裸芯片组装为电子器件、电路模块和电子整机的制造过程，或将微元件再加工及组合构成满足工作环境要求的整机系统的制造技术。

美国乔治亚理工大学编写的《微电子封装手册》中对封装的描述为：将具有特定功能的器件芯片放置在一个与其相容的外部容器中，给芯片提供一个稳定可靠的工作环境。

封装是芯片功率输入、输出同外界的连接途径，同时也是器件工作时产生的热量向外扩散的媒介；芯片封装后形成了一个完整的整体，保护器件不受或少受外界环境的影响；通过一些性能测试、筛选及各种环境、条件及机械的实验，确保器件的可靠性，使之具有稳定的、正常的功能。

IC与封装的关系，就像人体大脑与躯体之间的关系一样，封装起着骨骼支撑、皮肤毛发保护、触摸感受的功能。

1.2 封装的内容

封装所涉及的内容主要包括：

- 工艺，包括热加工、薄膜技术、真空技术、表面处理技术、等离子技术、熔点焊接、

微连接技术等。

- 材料，包括金属材料、无机非金属材料、聚合物材料、复合材料、组合材料、高分子材料等。
- 机械，包括振动、高速驱动、高精度擦拭、光机电耦合、热应力膨胀、热控制技术、伺服自控技术等。
- 电磁，包括高频电路、数字电路、射频电路、信号传输完整性、电源完整性、信号串扰、寄生效应、耦合、电磁兼容等问题。

从工艺上讲，电子封装包括薄/厚膜技术、基板技术、微细连接技术、封接及焊接技术等四大基础技术，并由此派生出各种各样的工艺问题。

从材料上讲，电子封装涉及各种类型的材料，如焊丝框架、焊剂焊料、金属超细粉、陶瓷粉料、表面活性剂、有机粘接剂、有机溶剂、金属浆料导电材料、感光性树脂、衬底等。图 1-1 所示为各种封装材料。

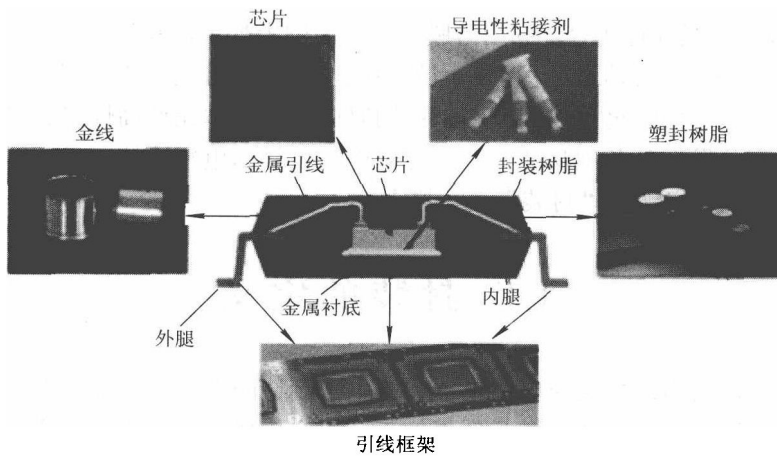


图 1-1 封装材料

从设计、评价、解析技术讲，封装涉及薄膜性、电气特性、热特性、结构特性及可靠性等方面的分析、评价与检测，如图 1-2 所示。

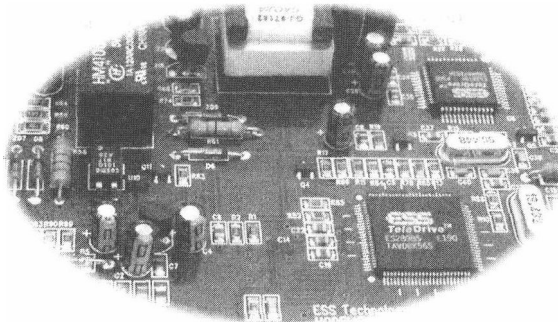


图 1-2 封装构成

1.3 封装的层次

如图 1-3 所示,从电子制造过程可以看出,封装的整个过程可以分为以下 6 个层次:

- 层次 1: 芯片以及半导体集成电路元件的连接。
- 层次 2: 单芯片封装以及多芯片组装。单芯片封装是对单个芯片进行封装;多芯片组装是将多个裸芯片装载在陶瓷等多层基板上,进行气密性封装。
- 层次 3: 板或卡的装配。将多层次单芯片或多芯片实装在 PCB 板等多层基板上,基板周边设有插接端子,用于与母板和其它板或卡的电气连接。
- 层次 4: 单元组装。将经过层次 3 装配的板或卡,通过其上的插接端子,搭载在大型 PCB 板(母板)上,构成单元组件。
- 层次 5: 多个单元搭载成架,单元与单元间经布线或电缆相连接。
- 层次 6: 总装。将多个架排列,架与架之间经布线或电缆相连接,构成大规模电子设备。

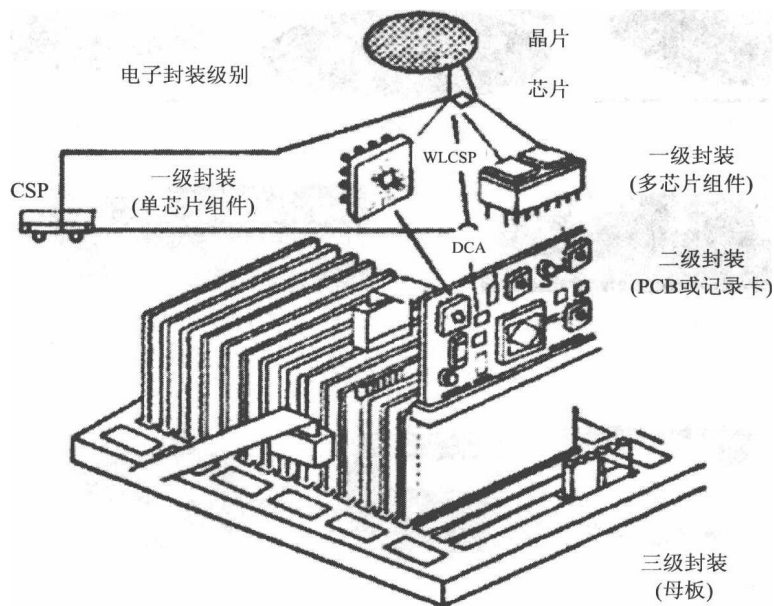


图 1-3 封装划分

从电子封装工程的角度看,按习惯,一般称层次 1 为零级封装,层次 2 为一级封装,层次 3 为二级封装,层次 4、5、6 为三级封装。

图 1-4 所示为一、二、三级封装。一级封装利用引线键合将芯片在基板上固定,并进行隔离保护;二级封装为经一级封装后的各器件在基板上的固定和连接;三级封装为将电路板装入系统中组成电子整机系统。

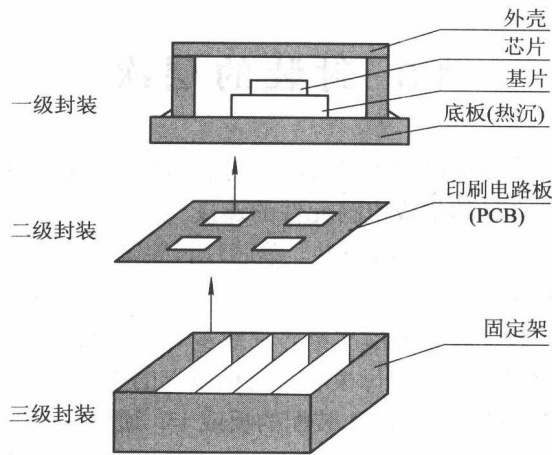


图 1-4 一、二、三级封装划分

图 1-5、图 1-6 所示分别为手机和笔记本电脑的封装过程。

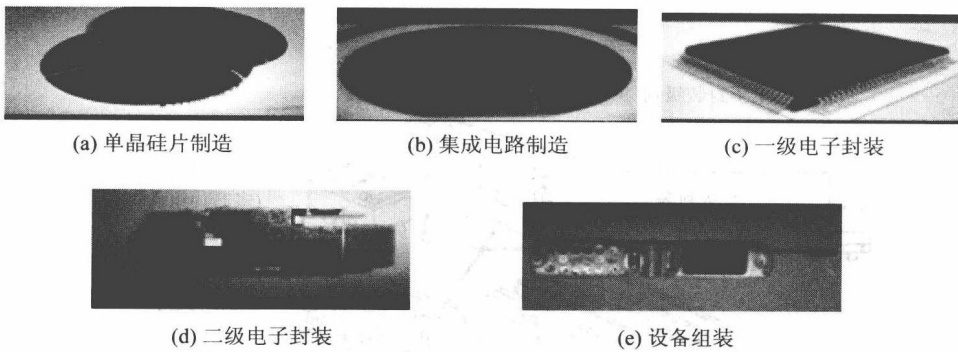


图 1-5 手机封装过程

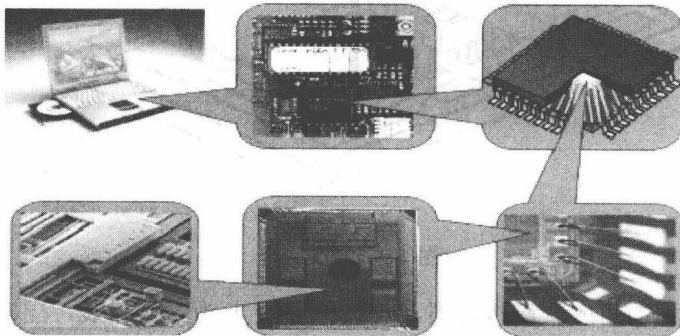


图 1-6 笔记本电脑封装过程

图 1-7~图 1-15 为零级封装过程，主要工艺步骤为晶圆、磨片、装片、划片、贴片、引线键合、塑封、切筋和电镀。图 1-7 为晶圆(Wafer)，上面布满了矩形的芯片，有切割槽的痕迹。由于晶圆出厂时厚度比芯片封装所需厚度厚，因此芯片通常要磨片(Back Grinding)。

磨片完成后，接下来装片(Wafer Mount)、划片(Die Sawing)、贴片(Die Attach)。贴片是将芯片粘贴到涂好环氧树脂的引线框架上。最后是引线键合(Wire Bonding)、塑封(Molding)、切筋(Trim)、电镀(Plating)。电镀的作用是增强导电性。

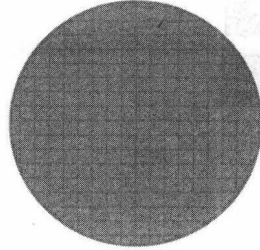


图 1-7 晶圆

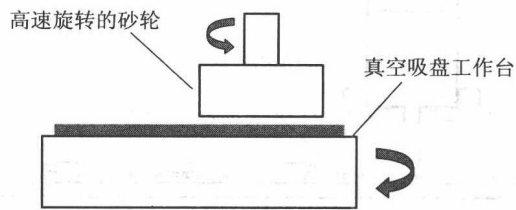


图 1-8 磨片

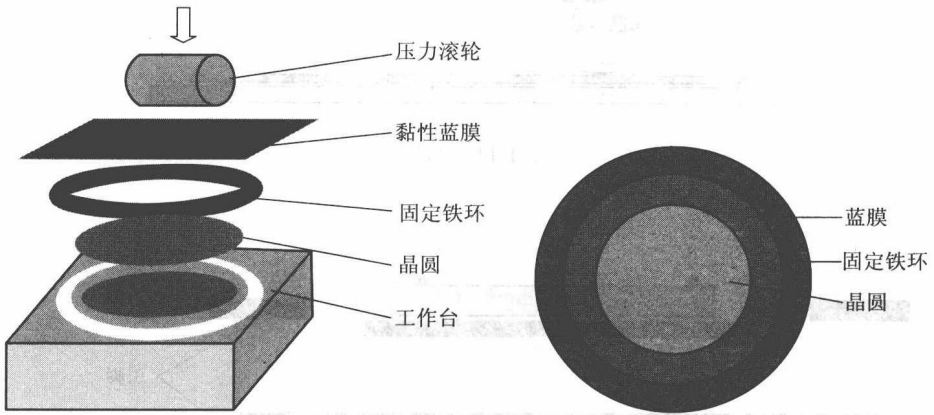


图 1-9 装片

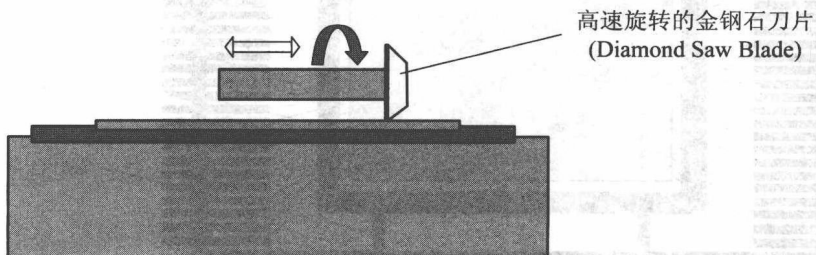


图 1-10 划片

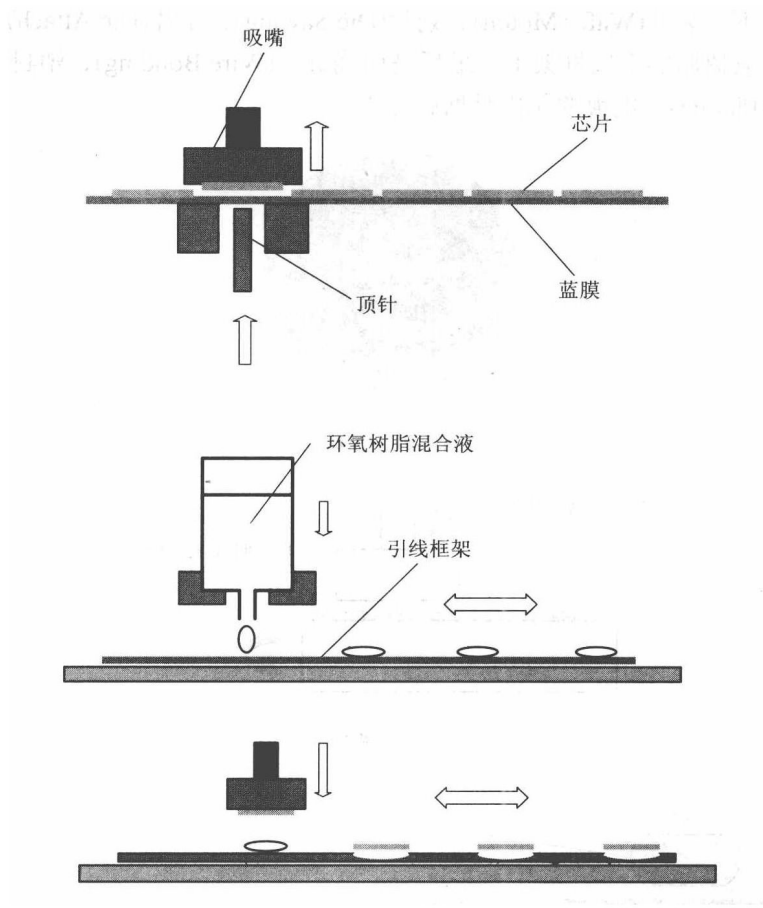


图 1-11 贴片

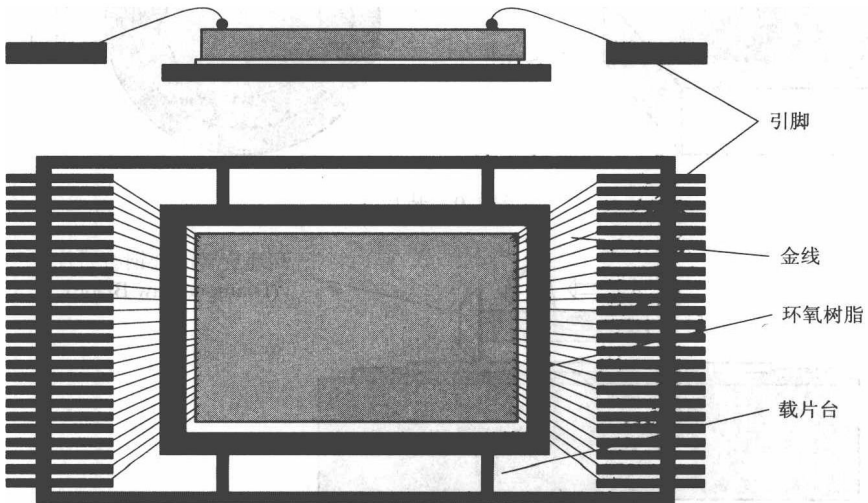


图 1-12 引线键合