

微电子器件 封装

—封装材料与封装技术

周良知 编著



TN405.94
4

微电子器件 封装

—封装材料与封装技术

周良知 编著



化学工业出版社

·北京·

本书较详细地介绍了微电子器件封装用的高分子材料、陶瓷材料、金属焊接材料、密封材料及黏合剂等材料,阐述了半导体芯片、集成电路器件的封装制造工艺,讲述了微电子器件封装的电子学和热力学设计的基础理论。

本书可以作为从事微电子器件制造的工程技术人员、管理人员、研究和教育工作者的参考书,也可作为微电子专业教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

微电子器件封装——封装材料与封装技术/周良知
编著. —北京:化学工业出版社, 2006. 6
ISBN 7-5025-9037-4

I. 微… II. 周… III. ①微电子技术-电子材料
②微电子技术-封装工艺 IV. TN405.94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 071088 号

微电子器件封装 ——封装材料与封装技术

周良知 编著

责任编辑:王蔚霞

文字编辑:钱 诚

责任校对:王素芹

封面设计:张 辉

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询:(010)64982530

(010)64918013

购书传真:(010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷有限责任公司印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 11 字数 261 千字

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-9037-4

定 价:29.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

前 言

人类已经进入信息时代，而信息技术的基础就是微电子系统器件。

微电子器件是指微小型的集成电路器件，它是以微电子技术、光学技术、无线电技术、微电子机械系统技术为基础的。

微电子系统是我们生活中的重要组成部分。从个人电脑到移动电话、从传真机到微波炉都是微电子系统。此外，汽车、通信、空间飞行器、医药等工业，都离不开微电子系统。

微电子器件封装是微电子系统制造的重要步骤之一，是封装技术使微电子系统最终成为有功能的产品。在近二十几年中，微电子器件封装材料及封装技术的开发和研究越来越受到重视，很多学校增设了这一专业课程。

我国正处在微电子工业蓬勃发展的时代，对微电子系统封装材料及封装技术的研究也方兴未艾。社会上对有关封装材料及封装技术的出版物的需求日益增加。

本书是一本较系统地阐述封装材料及封装技术的读物。它是在参考当今有关封装材料及封装技术的出版物的基础上，结合作者在美多年从事微电子封装工作的经验而编写的。

本书可以作为从事微电子工作的工程技术人员、管理人员、研究和教育工作者的参考书。

周良知

2006年1月于大连

目 录

1 微电子器件封装概述	1
1.1 微电子封装的意义	1
1.1.1 微电子器件封装和互连接的等级	1
1.1.2 微电子产品	2
1.2 封装在微电子中的作用	4
1.2.1 微电子	4
1.2.2 半导体的性质	5
1.2.3 微电子元件	6
1.2.4 集成电路	7
1.2.5 集成电路 IC 封装的种类	8
1.3 微电子整机系统封装	11
1.3.1 通信工业	13
1.3.2 汽车系统当中的系统封装	13
1.3.3 医用电子系统的封装	14
1.3.4 日用电子产品	14
1.3.5 微电子机械系统产品	14
1.4 微电子封装设计	15
2 封装的电设计	16
2.1 电的基本概念	17
2.1.1 欧姆定律	17
2.1.2 趋肤效应	18
2.1.3 克西霍夫定律	18
2.1.4 噪声	18
2.1.5 时间延迟	18
2.1.6 传输线	18
2.1.7 线间干扰	19
2.1.8 电磁波干扰	19
2.1.9 SPICE 电路模拟计算机程序	19
2.2 封装的信号传送	20
2.2.1 信号传送性能指标	20
2.2.2 克西霍夫定律和转变时间延迟	24
2.3 互连接的传输线理论	25
2.3.1 一维波动方程	26

2.3.2	数字晶体管的传输线波	27
2.3.3	传输线终端的匹配	29
2.3.4	传输线效应的应用	31
2.4	互连接线间的干扰(串线)	32
2.5	电力分配的电感效应	35
2.5.1	电感效应	35
2.5.2	有效电感	36
2.5.3	芯片电路的电感和噪声的关系	36
2.5.4	输出激励器的电感和噪声的关系	37
2.5.5	供电的噪声	38
2.5.6	封装技术对感生电感的影响	40
2.5.7	设置去耦合电容	41
2.5.8	电磁干扰	43
2.5.9	封装的电设计小结	44
3	封装的热控制	46
3.1	电子器件热控制的重要性	46
3.2	热控制计算基础	48
3.2.1	一维传导	48
3.2.2	固体界面的热流通	49
3.2.3	对流	49
3.2.4	整体负载的加热和冷却	50
3.2.5	热阻	50
3.2.6	串联的热阻	51
3.2.7	并联的热阻	51
3.2.8	IC和印刷电路板(PWB)封装的热控制	52
3.2.9	自然通风的印刷电路板	53
3.2.10	单一印刷电路板	54
3.2.11	强制对流下的印刷电路板	54
3.3	电子器件冷却方法	55
3.3.1	散热器	55
3.3.2	热通道	56
3.3.3	热管道冷却	56
3.3.4	沉浸冷却	57
3.3.5	热电制冷	58
3.3.6	冷却方法的选择	58
3.4	热机械应力对封装的影响	59
3.4.1	芯片贴装的热机械应力	59
3.4.2	热疲劳	59
3.4.3	封装焊接点的热应力	60

3.4.4	印刷电路板的热应力	60
3.4.5	灌封树脂的热性质	60
4	陶瓷封装材料	61
4.1	传统的陶瓷芯片封装的基本类型	61
4.1.1	陶瓷双列直插封装	61
4.1.2	陶瓷扁平封装	62
4.2	多层共烧结陶瓷封装材料	62
4.2.1	多层陶瓷封装基座板的制造	63
4.2.2	陶瓷基板片坯体的成型	65
4.2.3	网版印刷电路技术	65
4.2.4	烧结过程	66
4.2.5	引线脚和引线插针的安装	67
4.3	针引脚栅阵列封装	67
4.4	陶瓷球阵列芯片封装技术	68
4.4.1	陶瓷球阵列芯片封装的特点	68
4.4.2	CBGA/CCGA 组件的装配	69
4.4.3	凸焊球和凸焊柱的安装	70
4.4.4	CBGA/CCGA 母板的装配	71
5	聚合物材料封装	73
5.1	模塑封装	74
5.1.1	引脚架	74
5.1.2	芯片的贴装	74
5.1.3	引线键合	75
5.1.4	传递模塑封装	75
5.1.5	模塑封装塑料固化剂	76
5.2	密封用聚合物	77
5.2.1	罐装密封用聚合物	77
5.2.2	印制板 (PWB) 上器件的密封	78
5.2.3	模塑密封复合材料	79
5.2.4	模塑复合材料塑料密封的主要问题	81
5.3	塑料球栅阵列芯片封装	84
5.3.1	塑料球焊阵列封装的优越性	86
5.3.2	PBGA 与 CBGA 比较	86
5.3.3	塑料球栅阵列芯片封装印制版	86
5.3.4	树脂基板 (层压板) 的制造工艺	89
5.3.5	塑料 PBGA 安装的母板设计	91
5.3.6	表面安装焊接工艺	92
5.3.7	塑料 BGA 封装结构和制造工艺	92

5.3.8	热力学分析	93
5.3.9	电的分析	94
5.3.10	可靠性研究	94
5.3.11	PBGA 封装技术趋势和进一步发展	95
6	引线框架材料	97
6.1	金属引线框架的功能	97
6.2	金属引线框架的装配	98
6.2.1	气密性密封的陶瓷封装	98
6.2.2	非气密性封装	98
6.3	金属引线框架的制造	99
6.4	引线框架材料的性质	101
6.5	可焊接性 (solderability)	102
7	金属焊接材料	104
7.1	焊料的组成	104
7.1.1	高铅焊料	105
7.1.2	锡铅银合金焊接料	105
7.1.3	锡铅铋合金	106
7.1.4	高锡焊料	107
7.2	焊接强度	107
7.3	助焊剂	108
7.3.1	焊剂的组成	108
7.3.2	松脂焊剂	108
7.3.3	树脂焊剂	109
7.3.4	水溶性有机焊剂	109
7.3.5	不清洗焊剂	109
7.3.6	印刷电路板上的焊剂涂抹方法	109
7.4	焊锡膏	109
7.4.1	焊锡膏的焊剂	110
7.4.2	焊膏的检验和使用	110
8	高分子环氧树脂	112
8.1	环氧树脂材料	112
8.1.1	环氧树脂的种类	113
8.1.2	固化剂的选择	115
8.1.3	双氰二胺 (dicyandiamide, DICY)	118
8.2	环氧树脂封装的基本制造工艺	118
8.2.1	铸塑	119
8.2.2	罐封	119

8.2.3	模塑	119
8.2.4	环氧树脂泡沫塑料封装	119
8.2.5	层压成型	120
8.2.6	胶黏黏结 (adhesive bonding)	120
8.3	刚性环氧树脂	120
8.3.1	刚性环氧树脂的特性	121
8.3.2	环氧树脂封装塑料的组成	122
8.3.3	封装工艺	124
8.4	柔性环氧树脂	125
8.4.1	柔性环氧树脂的性质	125
8.4.2	柔性材料的种类	125
8.4.3	柔性环氧树脂固化剂	125
8.4.4	特殊应用	126
8.5	硅有机树脂	127
8.5.1	溶剂硅树脂体系	128
8.5.2	室温下硫化的硅树脂涂覆材料	129
8.5.3	用紫外线固化的硅树脂涂覆料	129
9	IC 芯片贴装与引线键合	131
9.1	IC 芯片贴装的方法	131
9.1.1	金属共晶体芯片贴装	131
9.1.2	焊锡芯片贴装	132
9.1.3	玻璃芯片贴装法	133
9.1.4	聚合物芯片贴装	133
9.2	IC 芯片引线键合	134
9.2.1	引线丝球焊接	135
9.2.2	引线丝楔形焊	136
9.2.3	引线丝键合的电性能	137
9.2.4	引线丝键合的可靠性	137
9.3	载带自动焊技术	138
9.3.1	聚合物载带 (tape) 的制造	139
9.3.2	芯片凸焊接点的制造 (chip bumping)	140
9.3.3	内引线键合 (inner lead bonding)	141
9.3.4	芯片密封 (encapsulation)	142
9.3.5	外引线键合	142
9.4	芯片的倒装技术	143
9.4.1	芯片倒装互连接结构	143
9.4.2	IC 键合连接凸点下金属化 (UBM)	144
9.4.3	倒装芯片工艺过程	146
9.4.4	有机基板上的倒装芯片安装	148

9.4.5	倒装芯片下填充密封工艺	148
9.4.6	倒装芯片互连接成品装配工艺过程	150
9.4.7	倒装芯片互连接成品的电表现	151
9.4.8	倒装芯片互连接成品的可靠性与缺陷和失效模式	151
9.5	总结及未来趋势	152
10	可靠性设计	154
10.1	微电子器件失效机理	154
10.2	可靠性设计的基础	155
10.3	热机械性的失效	156
10.3.1	防止疲劳失效	156
10.3.2	疲劳断裂的定义	156
10.3.3	降低早期疲劳的设计方法	157
10.3.4	防止脆性疲劳	157
10.3.5	设计防止蠕变产生的失效	158
10.3.6	防止剥离引起的失效	158
10.3.7	防止塑性变形	159
10.4	电气方面引起的失效	159
10.4.1	防止静电放电	159
10.4.2	防止电迁移	160
10.5	化学导致的失效	160
10.5.1	防止腐蚀的方法	161
10.5.2	金属间的扩散	161
10.6	总结和未来趋势	161
	参考文献	163

1

微电子器件封装概述

1.1 微电子封装的意义

微电子封装 (microelectronics packaging) 是微电子技术和制造方面的新领域, 美国已有多所大学设有这门新专业。

微电子器件是指小型的集成器件。它以微电子技术、光学技术、无线电技术、微电子机械系统技术以及封装技术为基础。最具有广泛性和代表性的微电子封装器件就是半导体集成电路块。微电子器件是微电子系统的主要构成部分。

1.1.1 微电子器件封装和互连接的等级

一般地说, 微电子器件的封装和互连接可以分为五个等级, 如图 1-1 所示。

① 零级封装互连接是指半导体芯片内部的互连接, 主要是半导体芯片的制造。

② 一级封装是密闭封装, 对于半导体来说, 就是将芯片密封, 封装成为微电子集成电路块, 其中包括半导体芯片与封装之间的互连接, 如引线键合连接、载带自动焊接、焊料凸点键合等。封装可以是陶瓷密封、金属封装或者塑料 (聚合物) 封装。

③ 一级半封装是有关多芯片和晶圆级混合集成电路的装配。多半是大规模混合型封装、多器件一体封装等。

④ 二级封装是印刷电路板的封装和装配, 包括板上封装块和器件的互连接, 包括阻抗的控制、连线的精细程度和低介电常数的材料的应用。

⑤ 三级封装是关于插件接口、主板及组件之间的互连接。

⑥ 四级封装是关于微电子系统的布线和互连接, 包括在一个机壳内的各个主板之间的互连接。

本书将着重讨论一级到二级的微电子器件封装。也就是微电子芯片和多芯片的封装及主板的封装和装配。因为这几级是微电子器件封装的核心所在, 系统

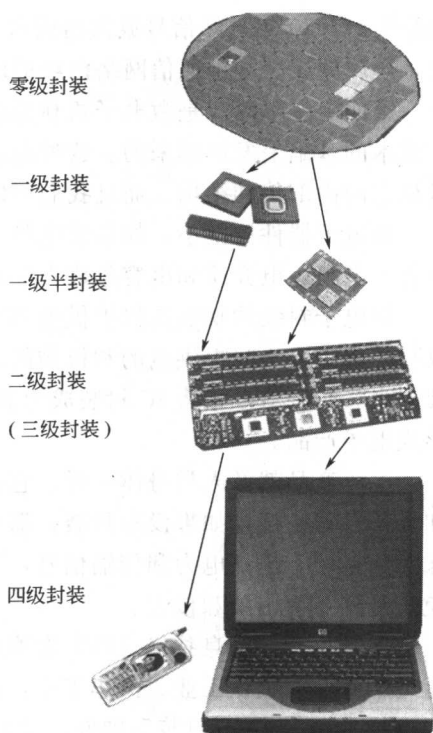


图 1-1 微电子器件的封装和互连接的等级

封装所牵扯到的封装材料和封装技术的方方面面都得以在这几级的封装中得到详细阐述。

1.1.2 微电子产品

微电子产品已经成为我们生活中不可缺少的重要组成部分。从个人电脑到手机电话、传真机、录像机、立体声系统、微波炉、计算器及其他产品。这些系统也包括了声控计算机、电子报纸、平面显示屏以及小的可移动 X 射线透视机和医用诊断仪器、电视电话、任何时间与任何地点都可以上网的无线互联网络接收系统等。此外，汽车、通信、计算机、空间飞行器、医药等工业都强烈地依赖微电子系统及微电子封装技术。

在所有的微电子技术产品当中，不管这个产品是个人电脑、DVD、手提电话或者是汽车安全气囊，都是在四种基本技术的基础上建立起来的，这四种技术是：微电子技术、无线电技术、光子学技术以及微电子机械系统 (MEMS) 技术。而现在第五个技术潮流，即微电子技术封装技术潮流已经形成，是封装技术使前述四种技术转化成为产品。

微电子技术潮流始于 20 世纪 50 年代。从 1949 年第一个晶体电子管问世，1959 年第一个平面晶体管问世，到 1959 年 Jack Kilby 做出了第一个集成电路 (IC)。自 1965 年起，硅晶片集成电路技术开始以惊人的速度发展，正如 Moore 定律所预言的，几乎每 18 个月，在一个硅晶芯片上的集成电路元件数量就增加一倍。

无线电技术起源于 1901 年，Marconi 成功地实现了 2900km 间距的无线信息传输，现在无线电技术的应用已经从 AM 和 FM 无线电扩展到了手提电话、卫星通信、微波通信等。全球卫星定位系统 (GPS) 的应用已经普及到了日常生活当中，从飞机导航到汽车导航都有它的应用。

光子学技术潮流开始于激光的发明。1970 年，康宁玻璃制造公司首先制出了光通信玻璃纤维。1980 年光纤信号放大器问世。1990 年光纤布拉格光栅应用到了光纤通信当中。现在，全球的光学纤维通信网络已经形成。

第四个技术潮流是微电子机械系统 (MEMS) 技术。MEMS 技术是在硅半导体芯片制造技术的基础上发展起来的。这种电动的机械系统的尺寸比小沙粒还小，人的肉眼几乎无法辨认它的内部传动结构。而且我们可以像生产芯片一样成批生产 MEMS。

微电子器件极微小，如集成电路 (IC)，它的制造尺寸是微米数量级的，是将无数的晶体管、电阻、电介质和电容集成在一起而成为具有完整功能的器件。

微电子封装的功能是保护供电和冷却微电子芯片或者是器件，并且在微电子器件之间以及与外部世界之间提供电的和机械的联系，无论是单一的电子管或者是集成电路，都必须封装起来。封装就是指将 IC 封装成为器件，并且将它们同其他元件连接在一个系统板上，以形成电子产品。

电子产品就像人类身体一样，它的大脑就是微处理器，而封装系统给它提供了神经系统和骨架。请注意，如果没有封装，那么这个电子系统就是没有用的废物。电子产品需要封装来互相衔接，提供电力和传输信号，通过热传导来实现系统的冷却，并且最终保护电子产品免于受到环境污染和侵害。

遍及全球的信息技术 (IT) 和微电子市场早在 2000 年就已经是个 12000 亿美元的市场，超过了农业、钢铁工业、汽车工业，而成为全球最大的工业。信息技术包括：微电子光学无线电技术和 MEMS 封装等硬件；计算机软件；硬件和软件的应用和包括电子广告在内的服务业。在这 12000 亿美元的市场当中，微电子和封装市场大概占有 2500 亿美元，大约是整

个信息技术市场的 25%。在这 2500 亿美元的市场中，微电子系统封装市场大约占 40%，即 1000 亿美元，它包括所有封装技术，例如：集成电路（IC）封装印刷电路板、连接器、电缆、光学器件、微电机系统、无线电器封装和散热器等。

现在微电子系统的封装技术，连同软件和系统应用已经成为前沿科学、技术及先进的制造业的推动力。它已经形成了一个大的工业产业。微电子系统 IT 产业已被认为是继农业和钢铁工业之后的第三次工业潮流。

微电子系统封装包括两个主要功能：一个是 IC 封装或者叫做元件封装；另一个是系统封装。元件封装包括：接联、供电、冷却和对集成电路本身的保护。元件封装起到了集成电路的载体的作用。元件的封装并不意味着一个特定系统的完成。因为一个系统往往是由很多有源和无源的器件组成的。系统级封装包括联结所有的器件，并将这些器件安装在系统级的电路板上。系统级印刷电路板也叫做主板，不仅仅载有这些器件，同时也提供了这些器件之间的接联，而使之成为有功能的产品。封装接联有两级：第一级接联是指集成电路芯片和封装载体间的引线接联，使载体具有与下一级封装接联的功能；而第二级接联是第一级封装的载体同第二级封装的载体之间的接联，特别是通过元件引线同印刷电路板上的接点之间的焊接来完成的。所以第二级封装接联也叫做电路板装配，进而完成整个系统。

微电子系统封装主要包含有三个方面的技术：即电学方面的、机械学方面的和材料科学与工程方面的技术。

电学方面的问题涉及到晶体管之间的信号传输，也牵扯到各个晶体管和各个元件之间的电力分配。电阻、电容、电感是引起信号延迟和信号失真的主要参数。信号衰减是线路电阻引起的，线路电阻引起电压的降低，从而增加传输的时间。千万个晶体管同步开关所引起的电路电流的骤然增大，会造成开关噪声。信号分配除了可能引起信号失真、反射和变形外，也会引起线路互相干扰。

材料科学与工程方面的问题涉及到在信号与电力分配方面正确地使用材料，例如：在电力分配时要求材料具有高电导率。器件的散热需要应用高导热材料。降低传输噪声需要低感性和高电容的电力分配线路。先进的电脑要求高速度的信号传输，从而需要采用具有最低介电系数的电介质。值得强调的是，粘接和密封材料在封装工艺当中起到非常重要的作用，它是保证器件通过环境测试的关键。

微电子封装的机械方面的问题主要是机械应力的产生与消除的问题。由于不同封装等级之间的电力分配以及在制造过程中不同性质的不同材料的使用必然会在界面中引起热机械应力。这个应力不单单产生于 IC 及系统的封装过程中，也会因气候的因素，产生在产品的运输和存储过程中。产品在使用过程中也会产生应力。因而，有效的散热、IC 器件和系统封装的冷却是解决热机械应力的关键。封装结构的稳定性是另一个机械问题。在制造过程中，良好的芯片焊接界面以及良好的印刷电路板焊接界面是保证器件结构稳定性的关键。热机械应力的产生主要是由于各种不同材料在界面处的热膨胀系数的不匹配而产生的。

微电子封装工程与技术囊括了几乎所有科学技术方面，除了信息技术和工业技术外，它还牵涉到物理学、化学、电子工程、计算机工程、机械工程、材料科学与工程、化学工程、加工制造工程、商学、经济学以及管理学，甚至环境工程学。

当步入 21 世纪的时候，信息网络使得我们对时空概念出现了空前的改变，信息网络也前所未有地改变了我们的社会。计算机和信息网络已经覆盖了整个地球，它打破了所有的地理上的界限，触及了全球各处的生活方式，它重新定义了通信方法，它改变了工作方式、学

习方式、教育方式、休闲方式、娱乐方式，也改变了交换和商业方式。

可以说，我们步入了信息时代，整个世界由上世纪的工业主导而变为信息知识为主导。工业时代转变为信息时代主要表现为以下几方面。

- ① 批量生产变成了按顾客要求的订做生产。
- ② 劳动力服务于工具变成了工具服务于劳动力。
- ③ 劳动力做重复的工作变成了劳动力应用知识。
- ④ 命令似的控制结构变成了共同控制的结构。
- ⑤ 资本密集型变成了知识密集型。
- ⑥ 资本家拥有生产手段变成了劳动者拥有生产。

⑦ 资本为基本动力变成了知识为基本动力。信息时代的主要推动力就是微电子技术和它的巨大商业市场。

通过对微电子器件封装材料与封装技术的学习和研究，将每秒十亿次速度的微电子、十亿赫兹的无线电、每秒万亿字符速度的光电子、微米级尺寸的电机、制动器、传感器、医学移植件等集合、封装，使之成为微电子产品，这就是这本书的宗旨。

1.2 封装在微电子中的作用

1.2.1 微电子

在讨论微电子封装技术之前，首先要了解微电子的概念。微电子当然不局限于半导体，但是，毕竟是半导体的发明开创了当今的微电子技术的新纪元。

自从1947年发明了半导体晶体管，半导体工业实现了革命化。在近半个世纪的微电子技术革命中，最重要的是硅（Si）基集成电路（IC）技术的发展。集成电路就是利用半导体加工技术，将各种电路元件集中制作在半导体基片上的电路形式。

由于硅在地壳中含量丰富、物质特性优良（例如能带的带隙适中）和工艺技术应用简单（例如可方便地形成绝缘介质——二氧化硅）等特点，硅基片就成了现在集成电路的主要构成，含有某一集成电路的硅基片称为芯片。半导体芯片完全取代了真空电子管在电子产品当中的应用。

半导体晶体管的尺寸是以微米来计量的，从而极大地缩小了电子产品的尺寸。到了20世纪60年代，半导体集成电路技术的发展大大地提高了电子产品的功能和性能。半导体芯片完全取代了真空电子管在电子产品当中的应用。集成电路技术一直在不断发展中，从早期的小规模，一个芯片中集成数百个半导体晶体管，发展到超大规模，一个芯片集成大于10万个半导体晶体管的集成电路。现在最先进的高性能逻辑电路，如Intel CPU P4集成了约4000万个MOS晶体管。

集成电路中集成度不断提高的技术基础，是内部集成晶体管尺寸的不断缩减。该尺寸的标志，是半导体晶圆制造技术中所能达到的最小线宽（也称为特征尺寸），目前特征尺寸已缩减到亚微米，即小于 $0.35\mu\text{m}$ 阶段，很多 $0.18\mu\text{m}$ 的集成电路生产线已经在运行。半导体晶圆的尺寸也已经达到300mm，其上面可加工的芯片的数量也就大大地增加了，一个晶圆片包含成千上万个芯片。集成度越高、运行速度越快，消耗的功也越低。

目前，半导体芯片已经发展到超大型集成电路（ULSI）和十亿级的集成电路（GSI），甚至出现了整个系统设在一个晶片上面（SOC）的芯片。例如：在现代的无线电手提电话

中，无数的单一器件，包括电容、电阻、功率晶体管、半导体芯片全都装配在一个印刷电路板（PWB）上。SOC 的概念是要将所有的这些器件集成到一个单一的晶片上，从而实现电子产品的极小型化和高性能。

如图 1-2 所示，上面是一个半导体晶圆片。晶圆片上的每一个方形块就是芯片，半导体晶圆片的厚度为 0.45~0.675mm，直径可以是 100mm、150mm、200mm 及 300mm，所以，在一个晶圆片上可以制造数百甚至数千个芯片。下面是一个芯片级的封装，四个芯片直接与印刷电路板封装在一起，成为一个完整的功能器件。

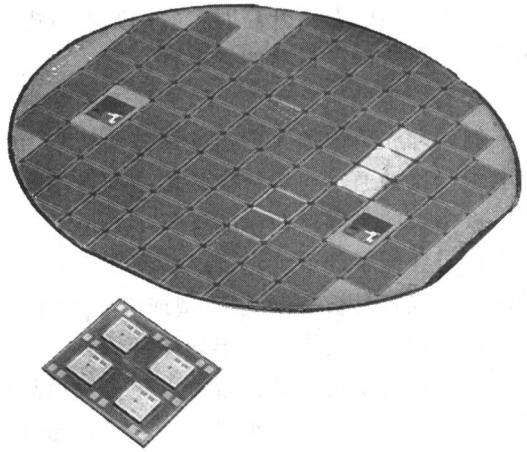


图 1-2 晶圆片和多芯片封装

1.2.2 半导体的性质

所有的材料可以分为：绝缘体、半导体和导体。

导体是指很容易传导电流的材料，大多数导体的原子具有一个到两个价电子，理想导体的价电子几乎不需要能量就可以移动。最好的导体是那些单元素材料，例如：铜、银、金和铝。它们具有一个价电子，与原子相联很松散，而这些价电子很容易脱离原子而变成自由电子，所以导体的特征就是具有丰富的自由电子。当自由电子向同一个方向移动时就形成了电流。

绝缘体是一种在一般条件下不传导电流的材料。在绝缘体的价电子上有八个电子，是最稳定的电子层结构，没有巨大的能量是不可能将这些电子从它的轨道上移开的。好的绝缘体大多是化合物，它们的价电子被紧紧地束缚在原子上，因而在绝缘体中几乎没有自由电子。

半导体材料在导电性方面介于导体和绝缘体之间，半导体原子具有四个价电子，它需要适当的外界能量来使其移动。半导体在它的固有状态下既不是好的导体也不是好的绝缘体。最普通的单元素半导体是硅和锗。在化合物半导体中，砷化镓是最常用的半导体。

为了解释半导体，下面简述一下能带。

一个原子的价电子层代表着一个能级带，而价电子被限制在这个能级带中。当一个电子得到足够的能量时，它就可以离开这个价电子层而变成一个自由电子，从而存在于被叫做导带的能带中。价带和导带之间的能量差就叫做禁带宽度或者带隙。带隙是价电子从价带跃升到导带所需的能量。电子一旦进入导带它就变成了自由电子，而不属于任何单一原子。

绝缘体具有很宽的带隙，因而，除非被超高电压击穿，价电子不能够跃升到导带。半导体具有较窄的带隙，它允许某些价电子跃升到导带从而变成自由电子。而导体的导带和价带是重叠的，没有带隙，也就是说总是有大量的自由电子存在。

半导体分为如下几种。

① 本征半导体，例如：纯硅 Si。

② 非本征半导体：N 型半导体，是硅掺杂了第 V 族的元素 P、As、Sb 等。

P 型半导体，是硅掺杂了第 III 族的元素 B、In 等。

③ 化合物半导体，例如：GaAs、InSb 等。

本征半导体是没有杂质也没有晶格缺陷的晶体，在低温下它没有自由电子，表现为绝缘

体，当半导体的温度升高时，它的某些价电子就会获得足够的能量而脱离它的原子，跃升到导带，从而增加了材料的导电性。

常见的半导体，例如：硅和锗在它的最外电子层有四个价电子，当具有五个价电子的元素，例如砷和磷被加入到这些个硅和锗当中时，就会具有一个多余的价电子，从而变成了自由电子。这种通过向本征半导体中加入不同元素或者引入杂质而制造自由电子的方法叫做掺杂。被掺杂的半导体叫做非本征半导体。

由于硅原子的最外电子层含有四个电子，需要与邻原子的另外四个电子结合组成稳定电子层。硅很容易被掺杂成 N 型或者 P 型半导体，从而提高其导电性。硅本身的材料特性，使得硅成为最广泛应用的半导体材料。

两个或者是更多的元素可以化合成单晶半导体材料，或叫做化合物半导体。例如：两元的 InSb、GaAs 等，三元的 GaAsP、AlGaAs 和四元的 AnGaAsPs。这些化合物半导体被广泛应用在高速度和光电子的微电子器件当中，随着新一代电子产品快速地转移到信息技术和无线电技术领域，化合物半导体技术，例如 SiGe 和 GaAs 在微电子技术当中的地位变得越来越重要了。

1.2.3 微电子元件

通过设计和加工，可以将半导体材料制成半导体元件。一般地说，是利用这些元件的可控特性来制造微电子产品。其中最基本的元件就是 PN 结二极管。

当 P 型和 N 型掺杂半导体材料连接在一起，它们就形成了 P-N 结。电流在这个元件当中的流动被施加在这个结上的电势所控制。当正电压施加到 P 型材料上，而负电压施加到 N 型材料上时，这个 P-N 结就有大电流流过，当施加的电压为 0V 的时候就没有电流通过。当对这个 P-N 结施加反向偏压时它就会阻挡电流的通过，因而，PN 结具有整流特性。这个整流器也叫做 PN 结二极管。

当半导体的 N 型区和 P 型区以 PNP 或者 NPN 的次序排列时，就构成了双极连接点三极管。由于电子和空穴同时起导电作用，所以它被叫做双极晶体管 (BJT)。在 PNP 三极管中，是空穴从发射极加速到集电极。而在 NPN 三极管中，是电子从发射极通过基极而达到集电极。如果正向的偏压加到基极-发射极结点上，那么在集电极和发射极之间就会有电流通过，这个电流往往比基极电流大几十倍甚至上百倍，也就是说，一个小的基极电流就会引起一个大的集电极电流，这个三极管就起到电流放大的作用。集电极电流对基极电流的比例就叫做三极管的电流增益。

下面讲一下最广泛应用的三极管，即金属氧化物半导体场效应三极管 (MOSFET)，简称 MOS。

MOS 晶体管基本结构和工作原理与双极性三极管不同，MOSFET 是由输入电压而不是由电流来控制的。

金属氧化物半导体场效应晶体管的典型结构示意图如图 1-3 所示。由图看出，除了四周的隔离区以外，MOS 晶体管一般是一个四终端元件，它的核心部分是一个金属—绝缘层—半导体组成的平板电容结构。半导体多为硅。绝缘氧化层上的金属电极称为栅极

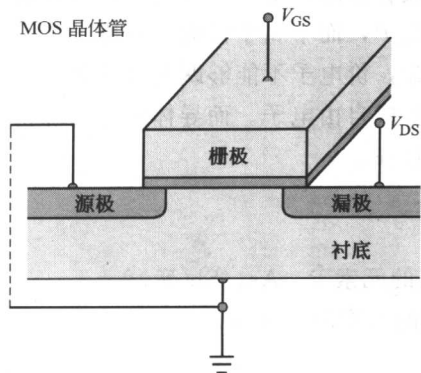


图 1-3 MOS 的典型结构示意图

(Gate), 是由多晶硅材料沉积到薄氧化层上而形成的。MOS 电容两侧的引出电极分别是源极 (Source) 和漏极 (Drain), 是由于第五族元素扩散到基质中去而形成的。源极和漏极在硅衬底上分别形成相同掺杂类型的 PN 结 (或 NP 结), 分别称为源区和漏区。漏极电流 I_D 是被加在栅集和源集之间的电势 V_{GS} 来控制的。当在栅极上施加电压 (V_{GS}) 时, 通过 MOS 电容作用改变硅衬底 (Sub) 上的电场分布, 从而在氧化层下的硅表面处形成一薄层的导电沟道 (Channel), 该沟道的导电类型与源区和漏区的导电类型相同, 与衬底的导电类型相反, 称为反型区。表面沟道导电能力的大小不同是由栅电压来决定的。

正常工作状态下, 源极和漏极之间加一驱动电压 (V_{DS}), 源极载流子 (半导体内部输送电流的载体) 流入沟道, 并由漏极流出, 形成电流。当控制电压, 即栅电压 V_{GS} 低于一定的临界值电压 V_T 时, 这里就不会有电流发生。另外 MOSFET 不同于双极器件, 通常只有一种载流子 (多数载流子) 参与导电, 所以它是单一载流子的压控器件。MOSFET 的第四个电极为衬底电极 (Substrate), 一般与源极相连。

最常见的 MOSFET 是互补型的金属氧化物半导体场效应三极管, 叫做 CMOS。

当封装 CMOS 晶片时, 晶片上的线焊接对于高频率的 CMOS 逻辑电路有很大的影响, 如果集成电路的输出端至下一个输入端的距离是短的, 那么焊接线的电阻就主导着这个连接, 这个电阻会限制下一个输入门极的电容充电电流, 从而会放慢输入电压的传输。无论是用铝或者是铜来作为焊接线, 都要求这个封装的焊接线提供一个稳定的低电阻的和机械上足够强的输入输出焊接点。

1.2.4 集成电路

半导体组成了元件, 而元件连接起来形成了电路, 把多个这种电路或者部件集成到一个单一的晶片上就叫做集成电路 (IC)。没有半导体集成电路的发明和发展就不可能有现代先进的和多功能的微电子器件, 在集成电路发明以前, 单一的元件例如晶体管、三极管、二极管、电容、电阻、电感器等都是安装在一个印刷电路板上, 形成一个电路单元, 然后它与其他电路单元相连组成完整的有功能的器件。集成电路 (IC) 使得人们能够集成所有的这些电路单元到单一的晶片上, 从而得到一个超小型的产品。这个产品成本低, 可靠性又高。

集成电路 (IC) 的尺寸可以小到 $1\sim 30\text{mm}$ 。从功能上讲, 一个集成电路 (IC) 就可以是一个单独的器件, 比如可以是一个功率放大器甚至可以是一个完整集成的用在个人电脑上的微处理器。理论上讲, 可以把任何多功能的电路集成到单一的晶片上, 例如可以把整个系统做在一个晶片上。集成到一个单一晶片上面的元件的数量, 即集成程度, 从 1960 年的十几个增加到现在的数百万个。正如 Moore 定律所预言的: 集成元件的数量几乎每一年半就增加一倍。现在, 集成电路的集成程度已经到了超大型集成电路 (ULSI), 可以预见, 在未来十年中, 集成在单一的晶片上的三极管可以达到上亿个。随着集成程度的增加, 集成电路的性能也在不断地改善, 成本不断地降低, 尺寸和重量不断地减小。在集成电路的发展中, 非常关键的技术之一就是光刻技术, 现在, 最小特征尺寸为 $0.13\mu\text{m}$ 的集成电路已经形成规模生产了。

一般地说, 集成电路是用铝 (Al) 作为金属化导体和二氧化硅 (SiO_2) 作为电介质。最近, 由于成功地用铜取代铝, 从而提高了导电性, 同时采用低介电常数的材料而降低了电容, 缩短了栅极的延迟时间, 与此同时降低了线间干扰, 降低了废品率, 并由于减少了工序步骤而降低了工艺成本。