

表面组装与贴片式元器件技术

半导体器件新工艺

梁瑞林 编著



科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

本书为“表面组装与贴片式元器件技术”丛书之一。本书主要介绍了单晶硅圆片的加工技术,大规模集成电路的设计制版、芯片加工与封装检验技术,多种类型的半导体材料与器件的应用,及其未来的展望等内容。本书在内容上,力图尽可能地向读者传递国际上先进的半导体制造技术方面的前沿知识,避免冗长的理论探讨,体现了本书的实用性。

本书可以作为电子电路、微电子、半导体材料与器件、电子科学与技术等领域的工程技术人员以及科研单位研究人员的参考资料,也可以作为工科院校相关专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

半导体器件新工艺/梁瑞林编著. —北京:科学出版社,2008
(表面组装与贴片式元器件技术)

ISBN 978-7-03-021253-5

I. 半… II. 梁… III. 半导体器件-生产工艺 IV. TN303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 027619 号

责任编辑:孙力维 杨 凯/责任制作:魏 谨

责任印制:赵德静/封面制作:李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

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

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>

深海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年4月第 一 版 开本:A5(890×1240)

2008年4月第一次印刷 印张:6 1/2

印数:1—5 000 字数:175 000

定 价:23.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<明辉>)

前 言

1800 年左右开始的以蒸汽机为代表的第一次工业革命,给人类社会的发展带来了机械动力。1900 年左右开始的以电气化为代表的第二次工业革命,给人类带来了优裕的生活环境,人们的生活中出现了通信、广播、电视、电脑、卫星遥感、手机、汽车电子、机器人、游戏机等许多新词汇,同时也孕育了 2000 年左右开始的以信息技术(IT)为代表的第三次工业革命。21 世纪飞速发展的信息技术要求各种电子产品具有更小的体积、更轻的重量、更多更好的功能、更高的可靠性、更小的能耗、更低的成本。于是,用于实现上述目标的集成电路(IC)、大规模集成电路(LSI)、贴片式电子元器件与多层印制电路以及表面组装(SMT)技术应运而生。

集成电路或大规模集成电路是电子产品的核心。贴片式电子元器件与多层印制电路以及表面组装(SMT)技术,都是以适应集成电路或大规模集成电路的发展为动力,在不停地发展着。集成电路(大规模集成电路)的集成度在以每 18 个月翻一番的速度高速发展着,而我国在这方面与世界先进水平还有一定的距离,我们组织编写这套丛书的目的就是为了缩短这一差距贡献自己的些微之力。分析我国在大规模集成电路以及表面组装与贴片式电子元器件技术领域落后于先进国家的原因,主要不在所谓的理论上,而是在材料与工艺上,因此本丛书主要着眼于介绍材料与工艺。例如,随着单晶硅圆片的直径增大到 8in 和 12in,集成电路的集成度大为提高,这种量的变化促成了半导体工艺在某些方面质的飞跃,对于类似于这类情况的部分,本丛书将尽可能地增加讲解力度。

国内已有的相关书籍,多以文字叙述为主,在没有条件体验实物的场合下,纵有洋洋千言,也容易使读者感觉不知言为何物。本丛书

前 言

采用图文并茂的图解方式,其目的就是要让读者在没有条件——目睹和体验各类表面组装实物以及各种贴片式电子元器件的情况下,通过图(有些是照片)文对照的方式,更好地理解与应用本丛书传递的知识与信息。

目 录

第1章 概 述

1.1 半导体器件的发展史	2
1.2 半导体的基础知识	4
1.2.1 本征半导体的电阻率较高	4
1.2.2 利用掺杂的方法降低半导体的电阻率	5
1.2.3 半导体的电阻率随着温度升高而迅速下降	5
1.2.4 半导体的电阻率随着光照度的增加而下降	5
1.2.5 半导体材料的光生伏特效应	6
1.2.6 半导体材料具有场致发光效应	6
1.2.7 不同类型半导体材料之间的帕尔帖效应	7
1.2.8 半导体材料其他可供利用的效应	7
1.2.9 半导体材料可以制作成集成电路	7
1.3 大规模集成电路技术的发展现状	8

第2章 单晶硅圆片

2.1 高纯度硅材料的制备	10
2.2 单晶硅锭的加工	12
2.2.1 单晶硅圆片的工艺流程及制作方法	12
2.2.2 用提拉法制作单晶硅锭的过程	13
2.3 单晶硅圆片的加工	15
2.3.1 单晶硅的切片工艺	15

2.3.2 单晶硅片的倒角加工	16
2.3.3 单晶硅片的机械研磨	17
2.3.4 单晶硅片的化学研磨	17
2.3.5 单晶硅片的退火	17
2.3.6 单晶硅片的镜面研磨	17
2.3.7 单晶硅片的清洗	18
2.3.8 单晶硅片的检查与包装	19
2.3.9 单晶硅片的外延生长	19
2.3.10 绝缘层上的单晶硅圆片 SOI	20



大规模集成电路的设计与制版

3.1 大规模集成电路的一般知识	23
3.1.1 集成电路的发明	23
3.1.2 集成电路的集成度分类法	24
3.1.3 大规模集成电路的功能分类法	25
3.1.4 大规模集成电路的工作原理分类法	26
3.1.5 大规模集成电路的主要制造工艺	26
3.2 大规模集成电路的设计	27
3.2.1 大规模集成电路的设计综述	27
3.2.2 电子电路设计	29
3.2.3 图版设计与原图工艺	31
3.3 大规模集成电路的制版工艺	33
3.3.1 制版工艺综述	33
3.3.2 玻璃基板的选择与加工处理	35
3.3.3 镀 膜	37
3.3.4 涂布感光胶	38
3.3.5 描图曝光	40
3.3.6 坚 膜	41
3.3.7 显 影	42

3.3.8 腐 蚀.....	42
3.3.9 图版检查、修正与覆盖保护膜	46
3.3.10 相位移光掩模与光学仿真矫正光掩模	46



大规模集成电路的芯片加工

4.1 芯片加工工艺流程	48
4.1.1 芯片加工工艺综述	48
4.1.2 芯片加工的主要工艺	49
4.1.3 大规模集成电路的芯片加工工艺流程	50
4.1.4 超净工作室	52
4.2 不同性质的加工工艺	54
4.2.1 清 洗	54
4.2.2 氧 化	56
4.2.3 化学气相沉积	57
4.2.4 光 刻	60
4.2.5 干式腐蚀	62
4.2.6 离子注入	65
4.2.7 退 火	67
4.2.8 溅 射	68
4.2.9 化学机械研磨	69
4.2.10 阶段性工艺检查	72
4.3 不同加工对象的加工工艺	73
4.3.1 不同加工对象的加工工艺概述	73
4.3.2 形成隔离区	75
4.3.3 形成阱	77
4.3.4 形成晶体管	78
4.3.5 形成位线	79
4.3.6 形成电容器	84
4.3.7 形成互连线	87



大规模集成电路的封装与检验

5.1	集成电路封装概述	90
5.1.1	集成电路封装形式的发展	90
5.1.2	双列直插封装 DIP	90
5.1.3	方形扁平封装 QFP	92
5.1.4	球栅阵列封装 BGA	93
5.1.5	芯片尺寸封装 CSP	94
5.1.6	多芯片封装模块 MCM	95
5.2	大规模集成电路的封装工艺	95
5.2.1	大规模集成电路封装工艺的流程	95
5.2.2	单晶硅圆片背面研磨	95
5.2.3	划片	98
5.2.4	将芯片固定在基座上	100
5.2.5	焊接引线	101
5.2.6	塑料封装	103
5.2.7	引脚表面镀层处理	103
5.2.8	引脚切断、成型、打印标志	105
5.3	大规模集成电路封装的检验	105
5.3.1	电子元器件的失效曲线	105
5.3.2	老化	106
5.3.3	条件循环试验	106



多种类型的半导体材料

6.1	元素半导体	108
6.2	化合物半导体	110
6.2.1	化合物半导体的分类	110
6.2.2	砷化镓	111

6.2.3	其他Ⅲ-V族化合物半导体	120
6.2.4	Ⅱ-VI族化合物半导体	123
6.2.5	Ⅳ-Ⅳ族与Ⅳ-VI族化合物半导体	128
6.3	非晶半导体	131
6.3.1	非晶半导体是原子排列不规则的半导体	131
6.3.2	发展初期的非晶半导体	132
6.3.3	非晶半导体研究中的难题	132
6.3.4	新的学科门类——固体化学	133
6.3.5	非晶半导体的种类	134
6.3.6	非晶半导体的特点	134
6.3.7	非晶半导体的应用	135
6.4	固溶体半导体	138
6.4.1	含砷镓的固溶体半导体	138
6.4.2	含碲的固溶体半导体	140
6.4.3	含碲铋的固溶体半导体	141
6.4.4	多元化固溶体半导体的研究方向	142
6.5	半导体陶瓷	149
6.5.1	半导体陶瓷的共性	149
6.5.2	高温还原气氛造成的陶瓷半导体化	158
6.5.3	不同化合价的元素置换造成陶瓷半导体化	158
6.5.4	正温度系数热敏电阻陶瓷	158
6.5.5	负温度系数热敏电阻陶瓷	163
6.5.6	临界值热敏电阻陶瓷	165
6.5.7	压敏电阻陶瓷	165
6.5.8	气敏电阻陶瓷	167
6.5.9	湿敏电阻陶瓷	168
6.5.10	多功能半导体陶瓷	170
6.6	有机半导体	170
6.6.1	有机半导体的现状与分类	170
6.6.2	共轭双键有机化合物半导体	172

6.6.3 电荷转移络合物	173
6.6.4 高分子有机化合物	176
6.7 超晶格半导体	180

半导体材料与器件的未来展望

7.1 摩尔定律	183
7.1.1 硅集成电路发展过程中所遵循的摩尔定律	183
7.1.2 摩尔定律将会失灵	184
7.1.3 掺杂均匀性对摩尔定律的限制	184
7.1.4 集成电路的功耗密度对摩尔定律的限制	185
7.1.5 光刻技术对摩尔定律的限制	185
7.1.6 互连线对摩尔定律的限制	185
7.2 半导体器件的深入发展	186
7.2.1 发展砷化镓和磷化铟单晶材料	186
7.2.2 开发宽带隙半导体材料	187
7.2.3 开发低维半导体材料	187
7.2.4 未来展望	188
参考文献	191

第1章 概述

半导体的发现晚于导体与绝缘体,其导电性能介于导体与绝缘体之间,因而将其称之为半导体,也曾经有人将其称之为半绝缘体。目前对半导体最常见的理解是,半导体是指导电性能介于导体与绝缘体之间的非离子性导电物质,这类物质一般为固体。从电学的角度来看,世界上的任何物质都可以按超导体、导体、半导体和绝缘体进行区分,如果进一步地将它们进行量化区分,则如图 1.1 所示。

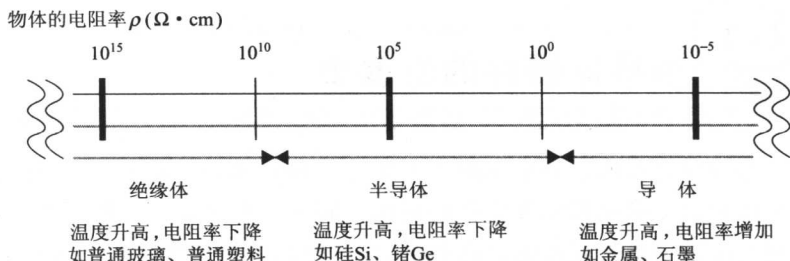


图 1.1 物质的电阻率及物质的电学分类

① 体电阻率为零或者几乎为零的物质叫做超导体。在目前已经发现的物质中,只有在很低的温度下才能够见到这种体电阻率为零或者几乎为零的超导体物质;而在常温下体电阻率为零或者几乎为零的超导体物质,目前还没有被发现,或者说还没有研制出来。

② 体电阻率为 $10^{-6} \sim 10^{-3} (\Omega \cdot \text{cm})$ 的物质叫做导体,或者叫导电体。金属与合金、石墨都属于导体。导体具有很强的导电能力,如果将其两端接上电源就会有很大的电流流过(请不要直接做这种实验,以免损坏电源)。

③ 体电阻率为 $10^{-3} \sim 10^{-9} (\Omega \cdot \text{cm})$ 的物质叫做半导体。常见的半导体有硅(Si)、锗(Ge)、砷化镓(GaAs)等;除此之外,还有一些陶瓷半导体(或者称为半导体陶瓷)和有机半导体等,它们的导电能力都不

如普通金属。

④ 体电阻率为 $10^9 (\Omega \cdot \text{cm})$ 以上的物质叫做绝缘体。常见的绝缘体有普通陶瓷、玻璃、橡胶、塑料等。如果将绝缘体的两端接上电源则几乎没有电流流过。

从广义上讲,凡是利用半导体材料制作的器件,都应当叫做半导体器件。但是实际上人们常说的半导体器件,往往指的只是整流器、半导体二极管、晶体管和半导体集成电路。而其他半导体材料制作的器件,都按照其功能进行命名。例如,有红外器件、热敏电阻器、光敏电阻器、压敏电阻器、湿敏电阻器、磁敏电阻器、应力片、气敏传感器等等。



1.1 半导体器件的发展史

半导体器件的发展史如图 1.2 所示。1833 年,英国的巴拉迪最先发现硫化银电阻率随温度变化的规律不同于一般金属。一般情况下,金属的电阻率随着温度的升高而增加,但巴拉迪发现硫化银的电阻率却随着温度的上升而减小。这是首次发现的半导体现象。1839 年,法国的贝克莱尔发现半导体和电解质接触形成的结,在光照下会产生一个电压,这就是后来人们熟知的光生伏特效应,这是被发现的半导体的第二个特征。1874 年,德国的布劳恩观察到某些硫化物的电阻率与所加电场的方向有关,即它们的导电性能带有方向性,当在它两端加的是一个正向电压时,它是导通的;如果把电压极性反过来,它就不导电,这就是半导体的整流效应,也是半导体所特有的第三种特性。同年,舒斯特又发现了铜与氧化铜的整流效应。1873 年,英国的史密斯发现硒晶体材料在光照下电阻率减小,这就是半导体的光电导效应,它是半导体的第四个特性。虽然半导体的发展看似顺利,但从 1833 年半导体现象被发现后的一百多年的时间里,半导体在电子学领域里却几乎是默默无闻的。

半导体在电子学领域中地位的转折点出现在 20 世纪中叶。1947

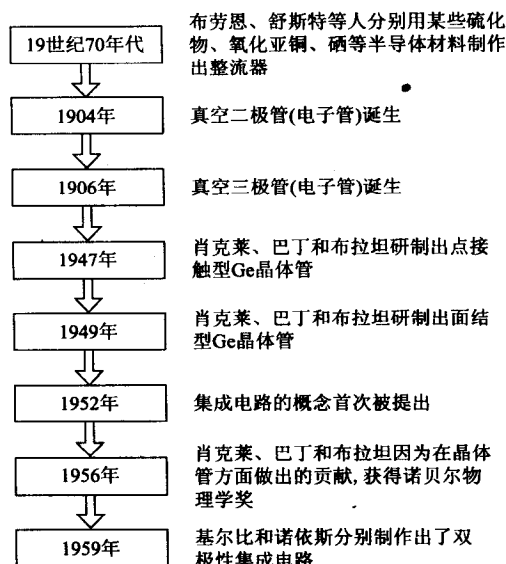


图 1.2 半导体器件的发展史

年,美国贝尔实验室的肖克莱、巴丁和布拉坦组成的研究小组,研制出一种点接触型的锗(Ge)晶体管。他们在锗片的底面接上电极,在另一面插上细针并通上电流,然后让另一根细针尽量靠近它,并通上微弱的电流,这样就会使原来的电流产生很大的变化。一个微弱电流少量的变化,会对另外一个电流产生很大影响的现象,就是所谓的“放大”现象。他们还分析了这种半导体器件的工作原理,以解释这种现象,这种半导体器件的放大倍数约为 50 左右。在此之后不久,他们利用两个靠得很近(相距 0.05mm)的触须接点来代替金箔接点,制造了“点接触型晶体管”。1947 年 12 月,在此基础上制作的世界上最早的实用半导体器件终于问世了,在首次试验时,它把音频信号放大了 100 倍,其外形比火柴棍短,但要更粗一些。在为这种器件命名时,布拉坦想到它的电阻变换特性,是靠一种从“低电阻输入”到“高电阻输出”的转移电流来工作的,于是取名为“trans-resistor”(转换电阻器),后来缩写为“transistor”,中文则将其译为了晶体管。1949 年他们又用锗(Ge)制作出了第一只面结型晶体管。面结型晶体管的性能与肖克莱

制作前设想的完全一致。今天的晶体管,包括集成电路中的晶体管,大部分都仍是这种面结型晶体管结构。

晶体管的问世,是20世纪的一项重大发明,是微电子革命的先声。正因为这两次开创性的发明,1956年诺贝尔物理学奖授予了这三位半导体器件技术的先驱,以此来表彰他们在半导体研究和晶体管效应发现方面做出的贡献。获奖时他们中有的已经离开了原来的工作室:肖克莱(William Shockley,1910—1989)服务于美国加利福尼亚州景山(Mountain View)贝克曼仪器公司半导体实验室;巴丁(John Bardeen,1908—1991)服务于美国伊利诺斯州乌尔班那伊利诺斯大学;布拉坦(Walter Brattain,1902—1987)服务于美国纽约州谬勒海尔(Murray Hill)贝尔电话实验室。晶体管与电子管相比,具有体积小、重量轻、耗电少、寿命长、易固化等优点,它的诞生使电子学发生了根本性的变革,加快了自动化和信息化的步伐,从而对人类社会的经济、科技、文化、生活产生了不可估量的影响。此后,1952年又有人首次提出了集成电路的概念,1959年制作出了第一块双极性集成电路。

时至今日,半导体器件已经发展到了大规模集成电路甚至系统集成的阶段。综观当今世界的尖端科技以及我们的日常生活,无论把它称之为信息时代,还是把它称之为数字化时代,其实质都可以说是大规模集成电路的时代,半导体技术的发展对人类做出的贡献俯拾皆是。



1.2 半导体的基础知识

1.2.1 本征半导体的电阻率较高

纯粹的半导体或者含杂质质量极少的高纯半导体称为本征半导体。本征半导体的导电机制,主要依靠原子最外层电子的有限热激发而产生的极少量电子,因此具有较高的电阻率。电阻率的倒数叫做电导率,单位采用电阻单位的倒数姆欧(Ω^{-1}),又称西[门子]每米(S/m),因此也有人说本征半导体具有较低的电导率。

1.2.2 利用掺杂的方法降低半导体的电阻率

通过掺入杂质的方法,可以大幅度降低本征半导体的电阻率。例如,在化合价为4价(即在原子结构的最外层电子数为4)的硅(Si)中掺入5价元素磷(P),那么在P进入Si的晶格后,其附近就多出—个电子,这种半导体叫做n型半导体,这种提供多余电子的杂质叫做施主杂质;如果在Si中掺入的不是5价元素,而是3价的元素硼(B),那么在B进入Si的晶格后,其附近就会出现—个电子的空穴,这种半导体叫做p型半导体,这种产生空穴的杂质叫做受主杂质,如图1.3所示。掺杂浓度大的半导体叫做重掺杂半导体,分别用 n^+ 和 p^+ 来表示;掺杂浓度小的半导体叫做轻掺杂半导体,分别用 n^- 和 p^- 来表示。

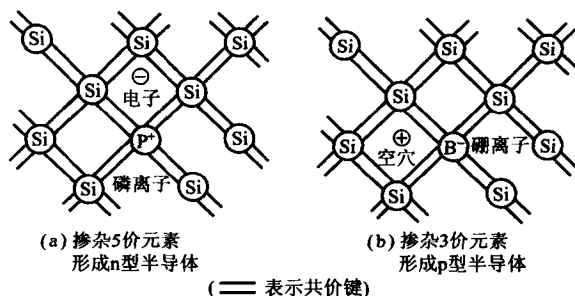


图 1.3 两种不同掺杂类型的硅半导体晶格结构模型

1.2.3 半导体的电阻率随着温度升高而迅速下降

一般的半导体材料,无论是本征半导体,还是含有杂质的半导体,当温度升高时其电阻率都会迅速下降。这是因为温度的升高,有助于原子最外层电子的热激发,能够参与导电的载流子增加,因此电阻率下降。半导体的电阻率随温度升高而迅速下降的性质,有时候会对半导体器件产生不良影响。不过,也可以利用半导体的电阻率随温度迅速变化的特点,开发出具有广泛用途的各种热敏电阻器。这些热敏电阻器作为测温计或热敏传感器,具有灵敏度高、体积小、响应速度快以及能够非接触测量等优点。

1.2.4 半导体的电阻率随着光照度的增加而下降

一些半导体材料,当受到光线照射时其电阻率会下降。这是因为

当照射到半导体材料上的光线达到某个频率后,原子最外层的电子就会被激发,使参与导电的载流子数目增加,电阻率明显下降,这种现象叫做光电导现象。利用光电导现象,可以将半导体制作成光敏电阻器,这种光敏电阻器能够作为光电自动控制器的光学探头。

1.2.5 半导体材料的光生伏特效应

光生伏特效应,有时也被称为光生伏打效应,是指当物体受到光照时,物体内的电荷分布状态发生变化而产生电动势和电流的一种效应。1839年,法国物理学家 A. E. 贝克勒尔意外地发现了用两片金属浸入溶液构成的伏打电池,受到阳光照射时会产生额外的伏打电势,他把这种现象称为光生伏特效应。1883年,有人在半导体硒和金属的接触处发现了固体光生伏特效应。后来就把这种能够产生光生伏特效应的器件称为光伏器件。

人们发现,半导体 pn 结器件在太阳光照射下的光电转换效率较高,因此通常就把这类光伏器件称为太阳能电池,也称为光电池或太阳电池。当前,太阳能电池的开发应用已逐步走向商业化、产业化,小功率小面积的太阳能电池在一些国家已实现大批量生产,并得到广泛应用。目前太阳能电池的缺点是光电转换率低和成本高。可以预见,随着太阳能电池光电转换率的提高和成本的降低,很有可能成为替代煤和石油的重要能源之一,在人们的生产、生活中发挥越来越重要的作用。

1.2.6 半导体材料具有场致发光效应

半导体场致发光,又称半导体电致发光,是利用直流或交流电场能量来激发发光。场致发光实际上包括几种不同类型的电子过程,一种是物质中的电子从外电场吸收能量,使固体物质中的晶格离化,产生电子-空穴对,复合时产生辐射;也可以是外电场使发光中心激发,回到基态时发光,这种发光称为本征场致发光。另一种类型是在半导体的 pn 结上加正向电压, p 区中的空穴和 n 区中的电子分别向对方区域注入后成为少数载流子,复合时产生光辐射,这种现象称为载流子注入发光,亦称为结型场致发光。用电磁辐射调制场致发光称为光控场致发光。把硫化锌(ZnS)、锰(Mn)、氯(Cl)等发光材料制成薄膜,

加直流或交流电场,再用紫外线或 X 射线照射时可产生显著的光放大。利用场致发光现象可提供特殊照明、制造发光管、实现光放大和储存影像等。

1.2.7 不同类型半导体材料之间的帕尔帖效应

帕尔帖效应是由法国人帕尔帖在 1834 年发现的,其现象是当电流流经两种不同金属的接点时,接点处会产生吸热或者放热现象,吸热或放热的多少取决于电流的大小。而在一些半导体材料中,这种帕尔帖效应比在金属中表现得更为强烈。当一块 n 型半导体与一块 p 型半导体连接在一起时,如果直流电流由 n 型端流向 p 型端时,其接点就会吸热,成为致冷源;反过来,当直流电流由 p 型端流向 n 型端时,其接点就会发热,成为热源。利用帕尔帖效应可以制成半导体致冷器,其特点是没有活动部件,主要用于空间大小受限制、可靠性要求高、无制冷剂污染的场所。

1.2.8 半导体材料其他可供利用的效应

半导体材料本身的固体物理性质决定了它可以产生许多物理效应,例如晶体管效应、场效应、隧道效应、雪崩效应、负阻效应、压电效应、压阻效应、可变电抗效应、电致发光效应、激光效应以及电磁场效应等,从而可以开发出多种多样的用途。

1.2.9 半导体材料可以制作成集成电路

随着半导体材料、半导体器件制造技术及其设备制造技术的发展,人们更多地掌握了 Si 器件制造工艺以及 GaAs 器件制造工艺,尤其是在 Si 平面工艺与薄膜工艺的基础上,可以将二极管、晶体管、电阻器、电容器等电子元器件全部制作在同一块芯片上,它们不再是单个的元器件、单个的电路,而是一个不可分割的整体,完成整个电路的功能,这就是集成电路(IC:integrated circuit)。目前,集成电路的集成度越来越高,规模越来越大,功能越来越复杂,逐渐发展为大规模集成电路(LSI:large scale integration)。有的大规模集成电路将整个电子系统都集成在了一块半导体芯片上,这就是系统集成。本书将重点介绍大规模集成电路,有关系统集成的内容则放在了本丛书的《表面组装技术与系统集成》一书中。