



清华大学电子与信息技术系列教材

集成电路导论

杨之廉 主编

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

清华大学电子与信息技术系列教材

集成电路导论

杨之廉 主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书在简述集成电路的诞生、发展和未来后,首先介绍了半导体特性与晶体管工作原理,集成电路芯片制造技术的基本概念和步骤;然后重点讨论了基本门电路、存储器、微处理器、专用集成电路和可编程集成电路;最后介绍了芯片的设计流程、有关的设计工具以及集成电路的测试和封装。

本书说理清楚,内容深入浅出,与实际联系紧密,易于自学。可作为大专院校微电子学和半导体专业学生的概论课教材,也可作为各类理工科专业和部分文商科专业本科生的普及性教材,还可作为各类高级技术和管理人士学习集成电路知识的入门参考书。

版权所有,翻印必究。

图书在版编目(CIP)数据

集成电路导论/杨之廉主编. —北京:清华大学出版社,2003

(清华大学电子与信息技术系列教材)

ISBN 7-302-06262-5

I. 集… II. 杨… III. 集成电路—高等学校—教材 IV. TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 004182 号

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

责任编辑: 邹开颜

印 刷 者: 清华大学印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×1092 1/16 印张: 12.75 字数: 294 千字

版 次: 2003 年 3 月第 1 版 2003 年 3 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-06262-5/TN·136

印 数: 0001~5000

定 价: 18.00 元

前言

集成电路导论

集成电路已广泛应用于国民经济的各个领域以及人们日常的工作和生活设施中。比如卫星、导弹的控制系统,以及汽车、船舶的电子装置,乃至人们用的电脑、看的电视、打的手机、听的音响,其核心部件(或称心脏部件)无一不采用集成电路块。集成电路已成为信息产业和高新技术的核心和未来经济发展的基石。

从整体上看,目前我国国内对集成电路了解和熟悉的人们还不多。要发展集成电路产业,不仅需要成千上万的设计、制造、封装和测试集成电路的技术人员和管理人员,而且需要在各行各业中有一大批应用集成电路的骨干。有了应用的推动,有了集成电路专业与其他专业的结合,一个知识创新和技术创新的蓬勃局面就会到来。

我们希望全国理工科专业的大专学生,包括部分文商科专业(如工商管理、国际贸易等)的大专学生都能掌握集成电路的基本知识。对于政府部门的各级领导干部和各类企事业单位的高级管理人员,我们认为学习一些集成电路的有关知识,对掌握科技新动向、拓宽发展新思路也是有益的。基于这样的想法,笔者尝试着编写了本书,希望它的出版对我国集成电路知识的普及有所推动,对我国集成电路事业的发展有所帮助。

本书共分4部分。第1部分(第1章~第3章)是基础性知识,主要简述集成电路的诞生、发展和未来,介绍半导体基本特性与晶体管的工作原理,以及在集成电路中所实现的器件结构。第2部分(第4章)介绍集成电路芯片的制造技术,使读者对制造过程有一大致的了解。第3部分(第5章~第8章)除介绍基本的门电路外,集中讨论了两类重要的集成电路,即存储器和微处理器,还用一定的篇幅讨论了专用集成电路(ASIC)和可编程集成电路。第4部分(第9章与第10章)讨论集成电路的设计、测试和封装,在设计部分还有一个设计实例供读者参考。

本书第1、2、3、5、6、7、8章由杨之廉教授执笔,第4章由许军副教授执笔,第9、10章由吴行军副教授和杨之廉教授合写。在本书大纲的制订及编写过程中,作者与贺祥庆教授进行了多次讨论。李瑞伟教授审阅了全书并提出了宝贵的意见。本书的出版得到了清华大学微电子学研究所领导和CAD研究室全体成员的关心,特别是周润德教授、田立林教授和陈天鑫教授的鼓励。图表的制作,得到了张文俊副教授和宋文忠同志、郭新民同志以及多位同学的帮助。我的妻子田淑清教授对书稿的整理和修改也花了不少精力。在此一并表示衷心的感谢。

如何组织合适的内容,进行深入浅出的表述并引起读者的兴趣,对笔者来讲也是一个新的课题。希望在出版后能够聆听到各方面的批评和建议,以便作进一步的改进。

作 者

2002 年 12 月于清华大学

目 录

集成电路导论

第 1 章 绪论	1
1.1 什么是集成电路和微电子学	1
1.2 集成电路的诞生	2
1.3 集成电路的发展	7
1.3.1 应用的驱动	7
1.3.2 集成度的提高	9
1.3.3 摩尔定律	11
1.3.4 专用集成电路和专用标准产品	13
1.3.5 集成电路分类	14
1.4 集成电路的未来	15
1.5 微电子技术与其他学科相结合	17
第 2 章 半导体基本特性与晶体管工作原理	19
2.1 半导体的特性	19
2.1.1 什么是半导体	19
2.1.2 能级与能带	20
2.1.3 电子与空穴	21
2.1.4 N 型半导体和 P 型半导体	23
2.2 PN 结	26
2.2.1 平衡状态下的 PN 结	26
2.2.2 正向状态下的 PN 结	27
2.2.3 反向状态下的 PN 结	28
2.2.4 PN 结电容(空间电荷区电容)	29
2.3 二极管	29
2.3.1 二极管的电流与电压特性	29
2.3.2 二极管工作时管内少数载流子的分布情况	31
2.3.3 扩散电容	32
2.4 双极型晶体管	32
2.4.1 双极型晶体管的基本结构	33
2.4.2 共基极接地方式	34

2.4.3	共发射极接地方式	35
2.4.4	三极管的简化大信号模型	38
2.4.5	三极管的小信号放大效应	38
2.5	金属-氧化物-半导体(MOS)场效应晶体管	39
2.5.1	MOS 场效应晶体管的基本结构	39
2.5.2	反型层的形成与阈值电压	40
2.5.3	MOS 管中的电流与电压关系	41
2.5.4	衬底偏置调制效应	44
2.5.5	MOS 管的简单模型	44
2.5.6	MOS 管的几种类型	45
第 3 章	集成电路中的器件结构	47
3.1	电学隔离的必要性和方法	47
3.2	二极管的结构	48
3.3	双极型晶体管的结构	49
3.4	MOS 场效应晶体管的结构	51
3.4.1	场氧化层的作用	51
3.4.2	CMOS 电路的结构	51
3.5	电阻的结构	52
3.6	电容的结构	53
3.7	接触孔、通孔和互连线	54
第 4 章	集成电路芯片制造技术	55
4.1	工艺制造中的核心步骤	55
4.2	窗口、图形的确定与掩模版的作用	56
4.3	各主要工艺技术	58
4.3.1	热氧化	58
4.3.2	热扩散掺杂	59
4.3.3	快速热处理	62
4.3.4	离子注入	63
4.3.5	化学气相淀积	66
4.3.6	光刻	67
4.3.7	刻蚀	69
4.3.8	选择性氧化	70
4.3.9	金属化	71
4.4	CMOS 电路制造的主要工艺流程	72
4.5	缺陷与成品率	73

第 5 章 基本的门电路	75
5.1 数字信号的特性	75
5.2 电路的主要性能	77
5.3 双极型晶体管的开关特性	77
5.4 饱和型与非饱和型双极型数字集成电路	78
5.5 晶体管-晶体管逻辑(TTL)门	79
5.5.1 TTL 与非门	79
5.5.2 TTL 或非门	80
5.5.3 TTL 与或非门	81
5.6 肖特基晶体管-晶体管逻辑门	81
5.7 发射极耦合逻辑(ECL)门	82
5.7.1 双极型差分放大电路	82
5.7.2 ECL 或非门	83
5.8 NMOS 门电路	84
5.8.1 NMOS 反相器	84
5.8.2 NMOS 与非门	86
5.8.3 NMOS 或非门	87
5.8.4 NMOS 通导管	88
5.8.5 NMOS 触发器	89
5.9 CMOS 门电路	91
5.9.1 CMOS 反相器	91
5.9.2 CMOS 与非门	95
5.9.3 CMOS 或非门	96
5.9.4 CMOS 与或非门及或与或非门	96
5.9.5 CMOS 三态反相门	97
5.9.6 CMOS 多路开关	97
5.9.7 CMOS 传输门	98
5.9.8 CMOS 异或门	99
5.9.9 CMOS RS 触发器	99
5.9.10 CMOS D 型锁存器	100
5.10 双极型电路与 MOS 电路的比较	101
5.11 BiCMOS 电路	102
第 6 章 存储器类集成电路	104
6.1 存储器的功能和分类	104
6.2 存储器的容量	106
6.3 存储器的结构	106
6.4 只读存储器	108

6.4.1	只读存储器的存储单元·····	108
6.4.2	行译码器和缓冲器·····	110
6.4.3	列译码器和列选择器·····	112
6.4.4	读取时间·····	113
6.5	不挥发性读写存储器·····	114
6.5.1	可擦除型可编程读写存储器(EPROM)·····	114
6.5.2	电可擦除型可编程读写存储器(EEPROM 或 E ² PROM)·····	116
6.5.3	闪烁型电可擦除可编程读写存储器(Flash EEPROM)·····	117
6.6	随机存取存储器·····	117
6.6.1	静态随机存取存储器(SRAM)·····	117
6.6.2	动态随机存取存储器(DRAM)·····	121
第 7 章	微处理器·····	127
7.1	微处理器的定义·····	127
7.2	微型计算机与微处理器·····	127
7.2.1	微型计算机的硬件框架·····	127
7.2.2	微型计算机的机器指令·····	128
7.2.3	微型计算机中的信息流·····	129
7.3	微处理器的工作原理·····	129
7.3.1	微处理器的硬件结构·····	129
7.3.2	微处理器指令的类型、格式和长度·····	131
7.3.3	微处理器指令的执行过程·····	132
7.4	微处理器中的各个模块·····	132
7.4.1	算术逻辑单元的加法器·····	132
7.4.2	寄存器、寄存器堆和移位寄存器·····	135
7.5	微控制器·····	137
第 8 章	专用集成电路和可编程集成电路·····	139
8.1	专用集成电路的作用与特点·····	139
8.2	门阵列集成电路·····	139
8.2.1	有通道门阵列·····	139
8.2.2	无通道门阵列(门海)·····	142
8.3	标准单元集成电路·····	144
8.4	多设计项目硅圆片方法·····	147
8.5	可编程逻辑器件·····	147
8.6	逻辑单元阵列·····	151
8.7	门阵列、标准单元与可编程集成电路的比较·····	153

第 9 章 设计流程和设计工具	155
9.1 设计要求	155
9.2 层次化设计方法	155
9.3 设计流程	157
9.3.1 全定制设计流程.....	157
9.3.2 定制和半定制电路的设计流程.....	160
9.4 版图设计规则	161
9.5 设计系统简介	162
9.6 常用的设计工具	163
9.7 设计实例——交通路口信号灯控制器	168
第 10 章 集成电路的测试与封装	178
10.1 集成电路测试	178
10.1.1 设计错误测试	178
10.1.2 功能测试	179
10.2 故障模型	179
10.3 故障模拟与分析	180
10.4 可测性设计	180
10.5 集成电路的可靠性	182
10.6 典型的测试和检查过程	183
10.7 封装的作用	185
10.8 封装类型和封装技术	186
10.9 封装时的热设计	190
10.10 如何选择封装形式.....	191
参考文献	193

第 1 章 绪 论

1.1 什么是集成电路和微电子学

集成电路是指半导体集成电路,即以半导体晶体材料为基片,经加工制造,将元件、有源器件和互连线集成在基片内部、表面或基片之上,执行某种电子功能的微型化电路。

微型化电路有集成电路、厚膜电路、薄膜电路和混合微型电路等多种形式。微型化电路简称微电路。

单片集成电路是用一块半导体单晶片为基片,通常是硅(Si)或化合物半导体如砷化镓(GaAs)制成的集成电路。

本书所讨论的集成电路实际是专指单片集成电路,以后在集成电路一词之前不再加单片两字。

集成电路的发明开创了集有源器件与某些元件于一体的新阶段,使传统的电子器件的概念发生了质的变化。这种新型的封装好的器件不仅具有体积很小、功耗很低的特点,且具有独立的电路功能,甚至可具有某种系统的功能。

集成电路的发明使电子学进入了微电子学时期,这是电子学发展史上的一次重大飞跃。

微电子学是研究电子在半导体和集成电路中的物理现象、物理规律,并致力于这些物理现象、物理规律的应用,包括器件物理、器件结构、材料制备、集成工艺、电路与系统设计、自动测试以及封装、组装等一系列的理论和和技术问题。微电子学研究的对象除了集成电路以外,还包括集成光电子器件、集成超导器件等。

也许有一部分读者还没有见过集成电路,那么可以打开 PC 机的机盒,主机板上有各种各样的集成电路块,包括 CPU、存储器、各种接口电路等,这些都是已经封装好了的集成电路。如果打开它们的封盖,可以看到在管壳内有一小小的硅片,称之为芯片(die 或 chip),但人们通常把已封装好的集成电路块也叫做芯片。

要看清芯片上的图形几乎是不可能的,只有在高倍显微镜下才能观察到它们的细节。芯片上这些线条和图形的集合,被称之为版图(layout)。这些线条和图形就是为了实现器件、元件和互连线而专门设计和制作的。

现以 1 兆位(1 Mb)只读存储器芯片为例,它采用 $1.5\ \mu\text{m}$ 的工艺技术,集成了 106 万个晶体管,芯片面积为 $5\ \text{mm} \times 5.6\ \text{mm}$ 。1 Mb 只读存储器有 2^{20} 位,即 1 048 576 位。如果一个汉字用 16×16 点阵(即 256 位)来实现的话,一块 1 Mb 只读存储器就可以存储 4 000 多个汉字。用两块这样的电路除可存储我国标准二级汉字库所规定的 7 000 个汉字之外,还有多余的存储单元可用来存储一些阿拉伯字母和其他符号。

1.2 集成电路的诞生

集成电路的发明人是美国的杰克·基尔比(Jack Kilby),1958年9月他发明了第一个锗集成电路(Germanium integrated circuit),见图1-1。1960年3月基尔比所在的美国德州仪器公司(Texas Instrument Inc.)制造出了第一个商用的集成电路。这一发明具有划时代的意义,它掀开了半导体科学与技术史上全新的篇章。为此基尔比在2000年获得了诺贝尔物理奖的殊荣。



杰克·基尔比

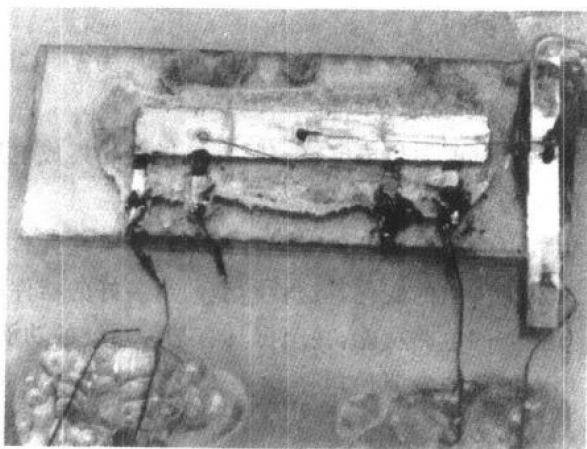


图 1-1 第一个锗集成电路

从半导体效应的发现到集成电路的诞生经历了80多年的时间。1875年科学家第一次发现硒(selenium)具有整流和光电导效应;1906年提出了用硅(silicon)作无线电波的检波。1935年硒整流器和光探测器以及硅点接触二极管已相继在市场上出现。二次世界大战期间,由于雷达技术的发展,使硅和锗的研究被放到了一个重要的位置,因为它们最适合于用来制造雷达检测电路中的混频器和检波二极管。工业界开始致力于高纯硅和锗的开发。

绝对纯的硅晶体(常称其为本征硅)在室温下基本是绝缘体,其电阻率约为 $250\,000\,\Omega\cdot\text{cm}$ 。但当硅中掺入元素表中的V族元素如磷、砷、锑时,硅中就产生了能在晶体中自由运动的电子,在没有外加电场时这些自由电子因热能而随机运动,当外加电压后就会产生电流。这些V族元素被称为施主元素(donor),被掺有V族元素的硅就成为N型硅。而当硅掺入III族元素(通常称为受主元素(acceptor))例如镓、硼时,它将吸引硅原子中的一个电子,而硅原子中留下的空位也可以在晶体中自由移动,其行为非常像一个自由电子,只是它带的是正电荷。这一移动的空位常称为正空穴(positive hole),简称空穴。当外加电压后它们同样会产生电流,只是其电流的方向与电子电流方向相反。这种被掺有III族元素的硅称为P型硅。N型硅、P型硅中电子、空穴的运动

方向见图 1-2。

当硅中形成了一个 PN 结(junction)时就出现了奇妙的现象,在 P 型上加正电压而 N 型上加负电压时,该 PN 结上可以流过很大的电流,如毫安量级(称正向电流),但只有很小的正向压降(约为 0.65 V)。当极性相反时流过的电流就非常小,常为微安量级(称反向电流),而反向电压可以加得很大,譬如达几十或几百伏。PN 结结构与特性分别见图 1-3(a)、(b)。

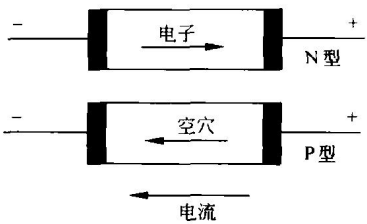


图 1-2 P 型硅、N 型硅及电流方向

集成电路的诞生首先要归功于晶体管放大效应的发现。1947 年 12 月美国贝尔实验室(Bell lab)的约翰·巴丁(John Bardeen)和沃尔特·布拉顿(Walter Brattain)发明了第一个点接触结构的晶体管,见图 1-4。

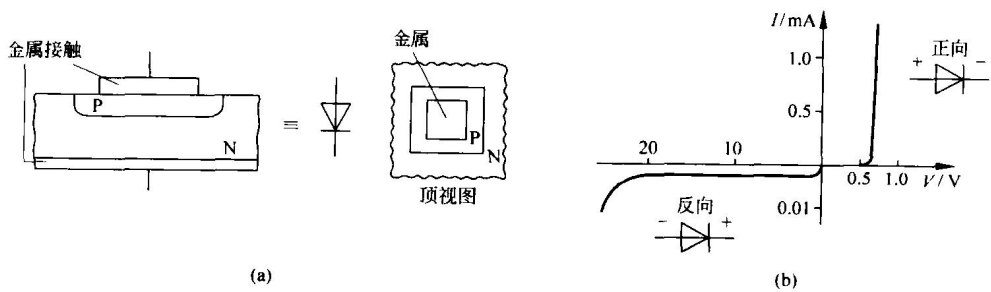


图 1-3 PN 结及其电流

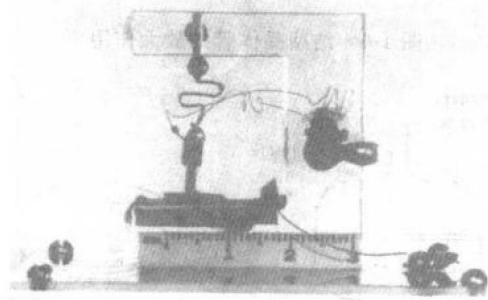


图 1-4 第一个点接触晶体管

1948 年 1 月威廉·肖克莱(William Shockley)提出了结型晶体管理论,结型是为了区别于点接触结构而言的。当把两个 PN 结相背并使它们共有一个很窄的 N 区(称为基区)时,就形成 PNP 结构的晶体管,其三个端口分别称为发射极、基极和收集极,见图 1-5。当把晶体管连接成图 1-6(a)所示的电路图时,若在基极与发射极之间加一信号,在收集极与发射极之间就会产生一被放大的信号,见图 1-6(b)。肖克莱详细地分析了结型晶体管的内在机理,可以说现代固体电子学就建立在这一重要特性的基础上。

由于他们 3 人的杰出贡献,因而共同获得了 1956 年度的诺贝尔物理学奖。

1952 年肖克莱发明了生长型晶体管,其特点是在晶体生长过程中形成 NPN 晶体管。生长型晶体管生长时的示意图见图 1-7。同年萨拜(Saby)提出了合金结型晶体管,其原

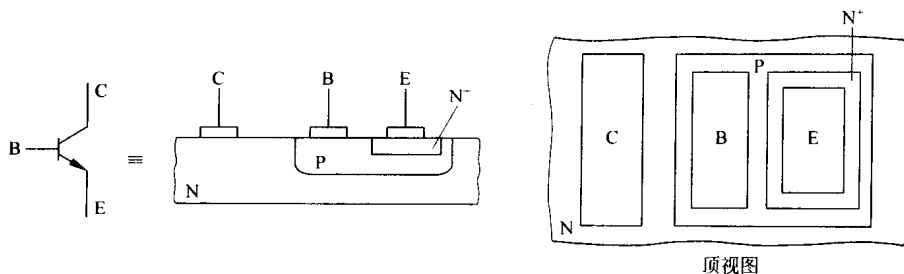


图 1-5 结型晶体管及其表示法

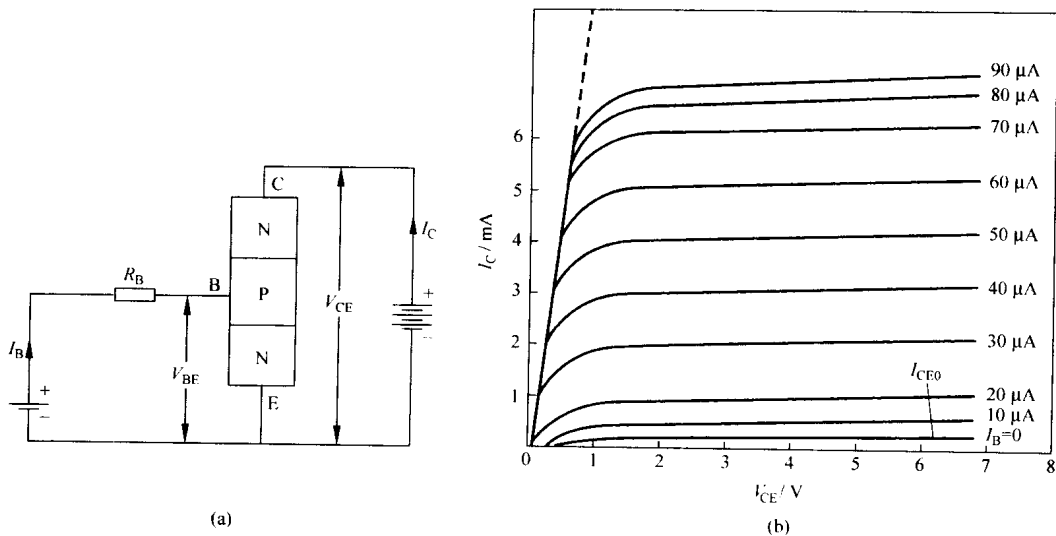


图 1-6 结型晶体管的放大作用

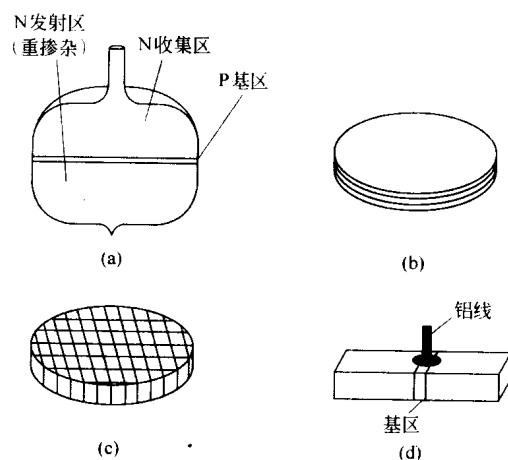


图 1-7 生长型晶体管示意图

- (a) 晶体被切为一半用于检测；(b) 从晶体中部切割成薄片，它含有发射区、基区以及收集区；
 (c) 将薄片再切割成条状(典型尺寸为 $0.76 \text{ mm} \times 0.76 \text{ mm} \times 3.8 \text{ mm}$)；
 (d) 基区接触是把铝丝熔在硅上而形成与基区的欧姆接触

理是将钢球放置在锗片的两边,在高温下溶解锗而形成两个 PN 结。具体过程见图 1-8。1954 年贝尔实验室提出了采用气相扩散方法形成台面型结型晶体管,如图 1-9 所示。

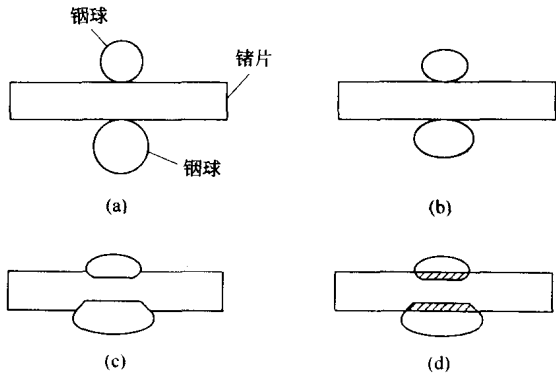


图 1-8 合金结型晶体管示意图

(a) 在室温时的状态; (b) 在 156℃, 钢开始熔化; (c) 在 550℃时钢熔入锗内; (d) 在冷却时, 掺有钢的锗再生长, 因而形成收集极-基区结和发射极-基区结

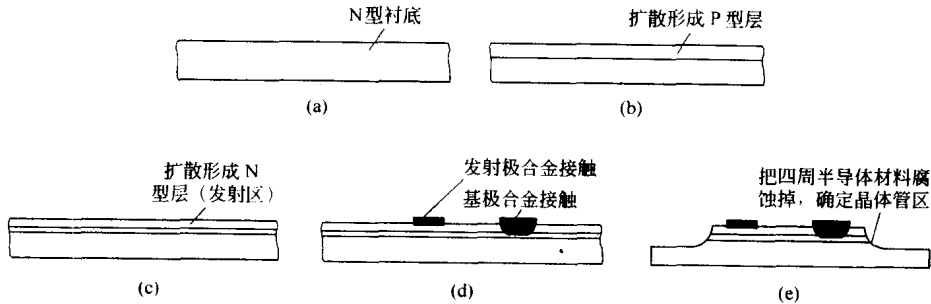


图 1-9 台面型结型晶体管示意图

但是这 3 种工艺所制造出来的晶体管都有一个严重的缺陷,即它们的 PN 结都暴露在半导体的表面,因而造成结的漏电。虽然采用各种不同的涂敷物来减少漏电,但效果都不理想。

对当代集成电路制造技术起着关键性贡献的是 1960 年 10 月硅平面型结型晶体管的发明,它有效地解决了结的保护问题。它是设法在硅的表面“就地”生长出一层二氧化硅层,结被掩藏在热生长出的二氧化硅层的下面,见图 1-10。引入平面工艺后,晶体管的可靠性得到了提高,成品率也明显有了改进,再加上硅材料具有本征的高温特性,而锗器件难以获得这些优点,因而锗器件的生产开始衰退,这就是为什么当代集成电路不再采用锗材料的主要原因之一。

在集成电路发明以前,所有的电子线路都是将晶体管、二极管、电阻、电容、电感等分立元件按一定要求用导线连接而成的。虽然经过多方的改进,如设法简化制造,增加封装密度,增多印刷电路板的层数,但基本思路仍是先制造分立的元器件,再把分立的、各自封装而成的元器件连接在一起。

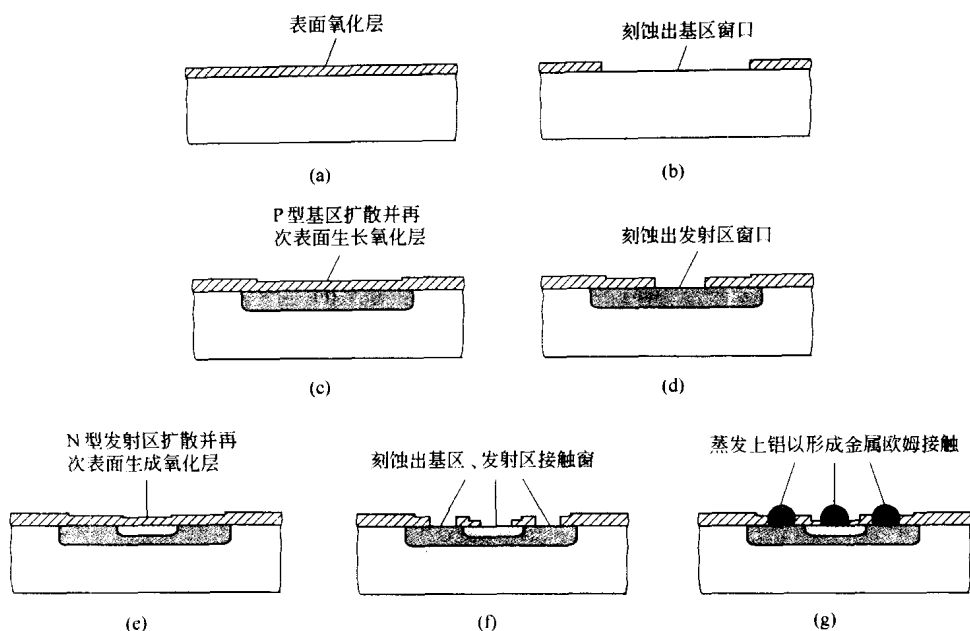


图 1-10 硅平面型结型晶体管示意图

从图 1-7 可以看出,众多的晶体管原本就是同时制造在一个大的硅晶圆片上,通过对硅晶圆片的切割而得到各个晶体管。那么能不能按电子线路的要求将需要的有源器件和无源元件同时做在一个半导体晶圆片上,而且在制造这些元器件的同时也完成它们之间的连接呢?基尔比在 1959 年 2 月的专利申请书中创造性地提出了这种概念。这样就首先要将做在同一硅晶圆片上的各个晶体管在电学上隔离,再采用某种方案将它们连接;此外要设法在同样的制造步骤中获得性能不同的晶体管,并制造那些无源元件。为此基尔比进行了不懈的尝试并取得了成功。

与此同时,另两位科学家对集成电路诞生也做出了杰出的贡献。一位是库尔特·莱霍维克(Kurt Lehovec),1959 年 4 月他提出了用 PN 结来隔离集成电路中的各个晶体管和其他元件,从而解决了集成电路制造中的一个关键问题。另一位是美国仙童公司(Fairchild Semiconductor)的罗伯特·诺意斯(Robert Noyce),1959 年 7 月他提出了用平面工艺来制作硅集成电路,并在氧化膜上制作互连线的方法。他们的方案奠定了当今半导体集成电路的技术基础。有了硅平面工艺技术并采用 PN 结作为隔离,单片集成电路才在工业上得以真正地实现。

另一在集成电路发展史上有重要影响的是,1960 年宣布发明了能实际应用的金属-氧化物-半导体场效应晶体管(metal-oxide-semiconductor field effect transistor, MOSFET)。它的结构与结型晶体管不同,有漏极、源极和栅极,见图 1-11,其中图(a)为 NPN 型,图(b)为 PNP 型。其栅极的尺寸常被称为 MOS 集成电路的特征尺寸(feature size)。它的工作原理也与结型晶体管不同,在结型晶体管中有两种载流子(即电子与空穴)同时起作用,而在 MOS 晶体管中只有一种载流子(电子或空穴)对电流传输起主要作用。因而人们将结型晶体管称为双极晶体管(bipolar junction transistor, BJT),而把

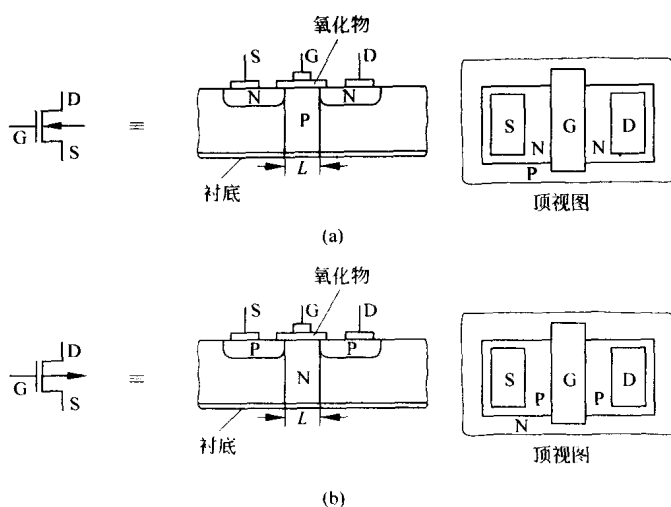


图 1-11 MOS 晶体管及其表示法

MOS 晶体管称为单极晶体管。

1960 年 3 月德州仪器公司宣布了第一个集成电路产品(TI Type 502),即多谐振荡器的诞生,它可用作二进制计数器、移位寄存器。它包括 2 个晶体管、4 个二极管、6 个电阻和 4 个电容,封装在 0.25 英寸×0.12 英寸的管壳内,厚度为 0.03 英寸。

1962 年制造出了第一块 MOS 集成电路,它包含 16 个 N 沟硅 MOS 晶体管。

1.3 集成电路的发展

1.3.1 应用的驱动

基尔比曾谈到:“集成电路产业一向是通过寻找新的应用领域而发展起来的,如应用于计算器、数字手表、个人计算机、手机,而每一种产品的销售额都比前一种的高出一个数量级。”

自 1960 年出现第一个逻辑电路后,1962 年成功开发出了晶体管-晶体管逻辑(TTL)系列的集成电路,1972 年开发出了低功耗的集成注入逻辑(IIL)系列集成电路,1972 年又出现了高速的发射极耦合逻辑(ECL)系列集成电路。它们已被广泛应用于各种电子设备和系统。各种标准的系列产品举例见表 1-1。

20 世纪 60 年代大量采用集成电路的最突出例子是计算器和数字手表。1959 年 IBM 公司用晶体管制造的 1401 型大型计算机,其体积有一个房间那么大,售价为 7 万美元,而 TI 公司用集成电路制造的 TI-59 便携式计算器,售价仅 300 美元,其计算能力与 1401 型相当。在其初期,一个典型的计算器内包含有 90 个至 150 个双极型集成电路,在 1969 年只要用 4 个 MOS 集成电路,而其售价降到原来的 1/50。它们立刻就风靡全世界,几乎成了人手一“器”。采用集成电路芯片的数字式手表几乎完全代替了机械式手表,表内不再需要几十个机械零件,而只要一块芯片和一块电池就行了。