

电子科学与技术



国防
科技
工委
『十五』
规划
教材

微电子技术应用基础

● 谢君堂 曲秀杰 陈禾 李卫 编著

北京理工大学出版社

北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划教材·电子科学与技术

微电子技术应用基础

谢君堂 曲秀杰 编著
陈 禾 李 卫

北京理工大学出版社

北京航空航天大学出版社 西北工业大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书为微电子技术的入门教材。主要内容包括半导体器件物理基础、PN 结、双极型晶体管和单极型晶体管、集成电路制造工艺、集成电路的设计基础、集成电路 CAD 以及其他半导体器件简介。本书内容全面、系统。学习本教材的起点为工科普通物理和高等数学。本教材适用于工科信息类、电子类各专业在校大学生以及微电子技术专业人员。

图书在版编目(CIP)数据

微电子技术应用基础/谢君堂等编著. —北京:北京理工大学出版社, 2006. 2

国防科工委“十五”规划教材. 电子科学与技术

ISBN 7-5640-0489-4

I. 微… II. 谢… III. 微电子技术-高等学校-教材 IV. TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 150582 号

微电子技术应用基础

谢君堂 曲秀杰 陈禾 李卫 编著

责任编辑 孙金芳

责任校对 张 宏

北京理工大学出版社出版发行

北京市海淀区中关村南大街 5 号(100081)

电话: 010-68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

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

E-mail: chiefeditor@bitpress.com.cn

北京圣瑞伦印刷厂印制 各地新华书店经销

开本: 787×960 1/16

印张: 19 字数: 392 千字

2006 年 2 月第 1 版 2006 年 2 月第 1 次印刷

印数: 3000 册.

ISBN 7-5640-0489-4 定价: 29.80 元

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编 委：	王 祁	王文生	王泽山	田 蔚	史仪凯
	乔少杰	仲顺安	张华祝	张近乐	张耀春
	杨志宏	肖锦清	苏秀华	辛玖林	陈光福
	陈国平	陈懋章	庞思勤	武博祎	金鸿章
	贺安之	夏人伟	徐德民	聂 宏	贾宝山
	郭黎利	屠森林	崔锐捷	黄文良	葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当



今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的100多位专家、学者,对经各单位精选的近550种教材和专著进行了严格的评审,评选出近200种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、中北大学、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入21世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化新的阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前言

本教材由北京理工大学谢君堂、曲秀杰、陈禾、李卫合作编写。

本教材由北京工业大学亢宝位教授,中国科学院微电子研究所廖太仪研究员担任主审。

本课程的参考学时为 32~40 学时。

全书共分 8 章,第 1 章简单记述了微电子技术发展的历史;第 2 章介绍了集成电路制造工艺;第 3 章详细讨论了半导体器件的物理基础,主要介绍半导体共价模型及能带模型、PN 结的电流-电压关系、金属半导体接触的整流特性、双极型和单极型晶体管的基本工作原理、特性曲线和参数;第 4 章主要介绍大规模集成电路基础,包括双极型集成电路和 MOS 集成电路,并简要介绍集成电路的电路设计和版图设计;第 5 章介绍集成电路设计原理和方法;第 6 章首先概述了集成电路 CAD 的发展,对目前的 CAD 工具进行了分类并做简要介绍,接下来几节则对部分 CAD 软件做较详细的介绍,主要包括系统描述及模拟、综合、逻辑模拟、电路模拟、时序分析和形式验证、版图设计的 CAD 工具、计算机辅助测试技术等,并对相关的器件模拟和工艺模拟给予了介绍;第 7 章介绍除晶体管之外的几种类型——功率、微波、光电、敏感半导体器件和 CCD 及真空微电子器件;第 8 章简单介绍了微电子机械系统技术的一些基本概念。最后两章的目的是拓宽学生视野。本教材是为工科信息、电子类各专业本科生编写的,起点是工科普通物理和高等数学,宜在大学二年级时开设本课程。对微电子技术专业可以作为专业入门教材。

本教材编写框架由编者集体拟定,谢君堂编写了第 1、2、3、7、8 章,曲秀杰编写了第 4 章的 4.1 节及第 5 章,陈禾编写了第 4 章的 4.2 节及第 6 章,全书由李卫整理。由于编者水平有限,书中难免存在一些缺点甚至错误,恳切希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 概 论	1
1.1 什么是半导体	4
1.2 常见的半导体材料及其主要用途	5
1.3 认识和应用半导体的历史	6
1.4 从晶体管到集成电路	10
1.5 集成电路的优点	11
1.6 集成电路的分类	12
1.7 ASIC 技术	15
1.8 半导体材料的提纯与单晶生长	16
第 2 章 集成电路的制造工艺	20
2.1 双极型集成电路的工艺流程	20
2.2 MOS 集成电路的工艺流程	23
2.3 外延工艺	30
2.4 氧化工艺	32
2.5 化学汽相淀积(CVD)方法	35
2.6 掺杂技术	37
2.7 光刻工艺	44
2.8 刻蚀技术	49
2.9 淀积工艺	51
2.10 表面钝化技术	52
2.11 隔离技术	53
2.12 微电子技术的加工工艺环境	61
2.13 衬底材料	63
第 3 章 半导体器件物理基础	65
3.1 半导体的模型	65
3.2 半导体中载流子的浓度与运动	77
3.3 PN 结	89
3.4 结型晶体管	114
3.5 场效应晶体管	130
第 4 章 集成电路基础	149
4.1 双极型集成电路	150



4.2	MOS 集成电路	180
第 5 章	集成电路的设计	197
5.1	集成电路的层级设计	197
5.2	集成电路设计流程	198
5.3	集成电路设计方法分类	200
5.4	全定制法(Full-Custom Design Approach)	200
5.5	定制法	201
5.6	半定制法	204
第 6 章	集成电路 CAD 技术	221
6.1	概述	221
6.2	VHDL 的建模	226
6.3	逻辑综合	228
6.4	逻辑模拟	231
6.5	电路模拟	233
6.6	版图设计与验证	236
6.7	静态时序分析和形式验证	238
6.8	集成电路计算机辅助测试技术	241
6.9	器件模拟和工艺模拟	246
第 7 章	其他固态电子器件简介	250
7.1	功率半导体器件	250
7.2	微波器件	259
7.3	光电器件	266
7.4	敏感器件	271
7.5	电荷耦合器件(CCD)	273
7.6	真空微电子器件	276
第 8 章	微电子机械系统简介	277
8.1	MEMS 的基本概念	277
8.2	MEMS 的加工工艺	280
8.3	MEMS 器件实例	284
8.4	MEMS 技术展望	287
思考题与习题		289
参考文献		293

第 1 章 概 论

众所周知,人类近代发展史上经历了三次大的科学技术革命,第一次是英国的瓦特发明蒸汽机技术,导致了第一次工业革命,产生了机械制造工业,使人类由手工劳动步入机械化操作,大大地降低了劳动强度并提高了生产效率。第二次技术革命始于法拉第发电机的问世,从而迎来了人类电力技术革命的第一道曙光,随着发电机的诞生,人类找到了一种新能源,引发了一场电气化技术革命,使世界发生了翻天覆地的变化。

第三次技术革命则是以电子技术、信息技术为先导,引发了以计算机和通信技术相结合的信息产业革命。1947 年美国贝尔(Bell)实验室发明了半导体点接触晶体管,从而开创了人类的半导体文明时代,特别是 1958 年美国的仙童公司和得克萨斯仪器公司各自研制发明了世界上第一块半导体集成电路之后,集成电路发展迅猛,集成度不断提高。集成电路的发展从 20 世纪 60 年代以来,一直遵循 1965 年 Intel 公司的创始人之一 Gordon E. Moore 预言的发展规律:即集成电路的集成度每三年增长 4 倍,特征尺寸(主要指光刻线条宽度)每三年缩小 $\sqrt{2}$ 倍。这是著名的 Moore 定律。

电子计算机和通信的核心技术就是微电子技术。以半导体集成电路为核心的微电子技术,点燃了信息技术革命的火炬,促进了计算机更新换代。微电子技术不论是其自身的发展速度还是对人类生产和生活的方方面面的影响,可以说在迄今为止的科学技术史上是空前的,是其他任何产业无法与之相比拟的。微电子技术和微电子产品,对人类社会的发展已经或正在发挥着巨大的作用,正在迅速地把人类带入高度信息化的社会。

正如有人说的那样,微电子技术和微电子产品的应用如落地的水银——无孔不入。的确如此,下面仅从微电子产品的千千万万个运用领域中,列举熟悉的几例。

没有微电子技术就没有微型计算机。1946 年 2 月美国宾夕法尼亚大学制造了世界上第一台叫做电子数值积分器和计算机(Electronic Numerical Integrator and Computer, ENIAC)的计算机,它用了 18 800 只真空电子管,1 500 多个继电器,它占地面积为 150 m²,质量达 30 多吨,耗电量达 150 kW,如此惊人的耗电量足以发动一辆火车。在今天看来,那庞然大物与现代微型计算机、笔记本式计算机及质量不到 1 kg 的掌上计算机相比,是根本无法想像的。引起这个巨大变革的技术基础,那就是以半导体集成电路为核心的微电子技术。

电子计算机经历了电子管、晶体管、中小规模集成电路、大规模和超大规模集成电路、特大规模和巨大规模集成电路的发展时期。在计算机飞速发展过程中,20 世纪 70 年代出现了微型计算机,即实现了计算机在体积、质量方面的微型化。集成电路的诞生和日新月异地发展是微型计算机出现和发展的物质和技术基础。每一代微型机都与新一代集成电路相伴而生。微型计算机开发的先驱是美国 Intel 公司的霍夫(Hoff)和意大利的弗金(Fagin)两位年轻



的工程师,霍夫提出把计算机的全部电路制作在四个集成电路芯片上,弗金首先实现了这个设想。弗金在 $4.2\text{ mm} \times 3.2\text{ mm}$ 的硅片上集成了 2 250 个晶体管,构成了世界上第一块微处理器芯片 4004,再加上一片随机存取存储器、一片只读存储器和一片寄存器芯片,通过总线连接,在 1971 年 11 月 15 日构成了世界上第一台 4 位微型计算机。1972 年 3 月,Intel 公司采用 PMOS 工艺、 $10\text{ }\mu\text{m}$ 光刻技术又研制出世界上第一块通用的 8 位微处理器 8008。从此以后微型计算机的发展几乎是三年一换代而与集成电路技术同步前进,表 1-1 为 Intel 公司的微处理器代表产品。

表 1-1 Intel 微处理器代表产品

型 号	始出年	位 数	集成度/(个元器件/片)	特征尺寸/ μm
4004	1971	4	22 250	10
8008	1972	8	5 000	10
8080	1973	8	5 400	6
8085	1976	8	10 000	—
8086/8086	1978	16	30 000	3
80286	1982	16	13.4 万	—
80386	1985	32	27.5 万	1.2
80486	1989	32	120 万	—
80586	1993	32/64	320 万	0.6
P55C	1995	64	450 万	0.35
P6	1995	64	550 万	0.35
Pentium	1997	64	750 万	—
P7	1997	64	1 亿	0.25
Pentium II	1998	—	900 万/ 128 mm^2	0.25
Pentium III	1999	—	2 800 万/ 106 mm^2	0.18

从表 1-1 中可以清晰地看出,微电子技术的设计和加工技术的发展推动着微处理器的更新换代,进入 20 世纪 90 年代以后,微处理器芯片无论在集成度、微加工特征尺寸、功耗和综合性能方面都有惊人的进展。尤其是微电子精细加工技术向亚微米和深亚微米的领域进军,不断地促使大型机、巨型机、阵列计算机大跨度地向前迈进。

IC(Integrated Circuit, 集成电路)卡又称为智能卡,卡上面的嵌有一带金属光泽的方块就是微电子芯片。如果芯片中有存储器因而具有记忆功能的叫存储 IC 卡或叫记忆卡;如果卡中



有半导体微处理器、存储器,还有暂时或永久存储、读取、处理数据的能力和其他逻辑功能的集成电路的叫智能 IC 卡。还有超级智能 IC 卡,这是一种比掌上计算机还小的卡式微型计算机。

IC 卡具有存储量大,安全可靠和保密性好,使用寿命长,操作简便等优点。目前 IC 卡被广泛应用于金融、商贸、保健、安全、通信及管理等方面。卡式和名称多样,如付费电视卡、移动电话卡、公交卡、银行卡、识别卡、购物卡、健康卡及门禁控制卡等。

多功能的移动电话——手持式移动电话机(简称手机)。手机通过电磁波传送你和对方想要交换的信息,就是依靠手机内的一种叫射频集成电路或单片微波集成电路进行工作的。如果发送的信息经过通信卫星的转发,那么,你就可以在地球上的任何一个地方与地球上的任何一个拥有手机的人进行信息交流。由于无线电电波的传播速度是每秒 30 万 km,所以双方的通话是即时的。由于微电子技术和通信技术的飞速发展,现今的手机已经集通话、上网、炒股、发送彩色图片等功能于一身。手机的功能在不断增加,手机的体积和质量在不断减小,这完全得益于机内集成电路芯片的集成度的提高和功能的增强。

微电子技术的飞速发展,改变了当今的战争模式,兵器发展正进入信息兵器时代。信息兵器时代的特点是兵器信息化和信息兵器化。其核心是大量使用微电子技术。由于有先进的微电子技术作为武器信息化设计的坚强后盾,使得军用卫星、电子战设备、军事通信、雷达、智能导弹、作战飞机、战术武器、灵巧弹药、逻辑战弹、微型侦察机、微型机器人士兵、军事仿真和作战模拟等都在不断地创新、升级和换代。

在兵器快速信息化阶段,美国在 20 世纪 80 年代就制定了超高速硅集成电路计划和微波、毫米波单片集成电路计划,其目的是首先解决高性能智能武器的“大脑”和“眼睛”的微电子关键技术问题。

将微电子技术应用于兵器的效果已经在 1991 年的海湾战争中初露锋芒。武器长“眼”,不伤平民,只摧毁军事目标。海湾战争作为一个成功的战例在世人面前已证明了智能精确制导武器的价值。因此,1991 年的海湾战争被称为是硅片战胜钢铁的战争。

有人说,IC 生产线是印钞机,微电子技术已广泛应用于工业、农业、军事以及日常生活中的方方面面。微电子产业对国民经济的贡献已经或即将超过钢铁工业。因为集成电路是微电子技术的核心,而微电子技术是当代高新技术群中的核心技术。在美国和日本,微电子产业产值在国民经济总产值(GNP)中分别占第一位和第二位,成为国民经济的支柱产业。据相关资料测算,微电子产业对国民经济的贡献率远远高于其他行业,有人以单位质量钢对 GNP 的贡献为 1 个单位计算,则小汽车对 GNP 的贡献为 5,彩电为 30,计算机为 1000,而集成电路对 GNP 的贡献则高达 2000。集成电路发展到现在已经成为影响世界各国经济发展和国家安全的重要因素。国际上把现代的集成电路技术称之为掌握世界的钥匙,谁掌握了钥匙,谁就掌握了世界。

微电子技术的发展,推动了计算机、通信机的不断更新换代,计算机、通信机以及计算机软件和通信技术的有机结合,使得网络信息技术的发展突飞猛进。有人统计,现在每 0.4 s 增加



一个因特网用户,每 4 min 产生一个网站。1996 年联网计算机数大于 10 万,联网主机数多于 1 千万,用户数大于 7 千万,预计现今的用户数已多于 2 亿,PC 总量已超过 5 亿。网络技术的飞速发展,也加快了微电子技术和产业的发展步伐。1997 年,上海浦东开发奠基的华虹电子工程投资 100 亿人民币,硅片直径现已达到 20 cm、特征尺寸 0.3 μm 及更先进的技术水平。近年来我国集成电路市场快速增长,2004 年我国集成电路产量为 96.3 亿块,产值达 1470 亿元。我国集成电路市场已成为仅次于美国、日本的第三大市场。微电子芯片业的巨大市场,正在吸引跨行业的生产部门进入半导体集成电路产业。专家测算,要建一条完整的集成电路生产线需要 1 千亿元人民币,这是因为生产线上的设备要求是当代最新的工业水平。不仅设备、仪器十分昂贵,加工所用的材料的价格也非同一般。加工所用的环境必须是超净的工作环境,录用的从业人员则必须受过良好的高等教育和严格的技术训练。可见微电子产业既是“产金”工业,又是“吞金”工业。

目前,微电子技术的发展步入巨大规模集成电路和系统集成的时代,微电子技术已经是信息产业的核心及基础。现在各种各样的电子信息系统的核心部件都是集成电路和集成系统芯片,这就要求除了从事微电子技术的专业人员之外,其他如计算机、电子学、自动控制、通信等相关专业的人员也需要了解微电子学领域的知识及其相关的应用。我们编写本书,即为满足这一需要所做的尝试。

由于单个的晶体管及集成电路所占有的空间体积相对于老式的电子器件和电路来说要小得多。因此,在这个研究领域形成一门新的学科,即微电子学。目前,微电子学的领域正在扩大。例如,真空微电子器件的研究,也在此领域占一席之地。不过在这里,微电子技术专指从事半导体集成电路的设计和制造的工作。微电子技术领域中的空间尺度一般是以微米(μm , $1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$)和纳米(nm , $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$)为单位的。由于制造半导体集成电路的原材料主要采用的是硅(Si),砷化镓(GaAs)等,而它们的导电行为既不属于导体,也不属于绝缘体,而是半导体,因此,又常称为半导体集成电路;由于半导体集成电路在制作的过程中,采用的是一系列的平面工艺,整个电路在薄如纸张的一层硅片内完成,且占用面积小,因此,有人又称半导体集成电路为芯片或半导体芯片。为什么要采用半导体材料制造集成电路,半导体又有哪些独特的重要性质,作为本课程的入门,下面先介绍以下几点内容。

1.1 什么是半导体

从半导体这个名称中的“半”字就可以想到,这种物质的导电能力介于导体与绝缘体之间。的确,在室温下,金属导体的电阻率的数量级约为 $10^{-6}\Omega\cdot\text{cm}$,好的绝缘材料的电阻率可以大于 $10^{12}\Omega\cdot\text{cm}$,半导体的电阻率则在 $10^{-3}\sim 10^6\Omega\cdot\text{cm}$ 之间。然而,只凭电阻率的大小不足以说明何以半导体现在有那样广泛的应用,何以对微电子技术的发展起那样如此大的作用。所以,应当再进一步考查半导体有哪些独特的性质,这样才能对什么是半导体,有一个比较全



面的回答。

归纳起来,半导体大致有以下一些独特的性质,它们的应用无不与这些性质有关。

① 一般说来,半导体的电阻值具有负的温度系数。半导体的电阻值随温度上升而下降,这是与金属相反的。金属的电阻值具有正的温度系数——随温度升高阻值加大(也有正温度系数的半导体)。

② 金属中输运电流的载流子是电子,而半导体中承担输运电流的载流子却有两种——电子和空穴。电子带负电,电量为 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$,用符号 $-q$ 表示;空穴则带正电,电量与电子所带电量大小一样,用 $+q$ 代表(有时为省事,十号常略去不写)。

电子和空穴是半导体体内参与导电的两种带电粒子,它们的数量有相同的情况,也有不相同的情况。如果半导体单位体积中的电子与空穴的数量(称为电子与空穴的浓度)是相同的,则称之为本征半导体。如果电子的浓度大于空穴的浓度,导电以电子为主,则称之为 N 型半导体;如果空穴的浓度大于电子的浓度,导电以空穴为主,则称之为 P 型半导体。造成这种情况的原因,是由于在半导体内掺入了不同种类的杂质。以常见的半导体硅为例,如掺入 III 族元素硼(B)、铝(Al)、镓(Ga)等,则形成 P 型半导体;如掺入 V 族元素磷(P)、砷(As)等,则形成 N 型半导体。

③ 半导体材料的电阻率对杂质极其敏感。某些杂质,不仅如上面所述,会改变半导体的导电类型,而且只要含极少量的杂质,就能显著地改变其电阻率。例如:半导体材料锗(Ge)的纯度已经达到每 10^9 个锗原子中的杂质原子数少于 1 个,这时其室温下的电阻率可以达到 $45 \Omega \cdot \text{cm}$ (或 $0.45 \Omega \cdot \text{m}$),即达到所谓本征状态。如果在这样纯的锗中掺入 V 族元素锑,掺到每 2×10^6 个锗原子中有 1 个锑原子的程度,则室温下的电阻率将下降到约 $0.09 \Omega \cdot \text{cm}$,如换算为质量,这样的掺杂程度相当于每 1 kg 锗中含约有 0.77 mg 的锑。这就是说,1 kg 纯锗中掺入不到 1 mg 的锑,却使电阻率下降为本征状态下数值的 1/500。

④ 半导体有比金属大得多的温差电效应。

⑤ 半导体具有光敏特性。半导体经适当波长的光照射时,其电阻率显著下降,这种现象常称为“光电导”。

⑥ 半导体与金属的接触,同种半导体的 N 型材料与 P 型材料形成的接触(PN 结),以及异种半导体材料所形成的接触(异质结),所具有的非对称的导电特性(整流特性)和非线性的电流-电压关系(非欧姆性的导电特性);电场对半导体表面薄层内的电特性的明显影响等,这些现象正是构成绝大部分半导体器件所依靠的基础。实际上,对 PN 结的讨论就是理解多种半导体器件的工作原理的关键。

1.2 常见的半导体材料及其主要用途

半导体材料的种类很多,用途也很广泛,为了简单明了,列表 1-2 来说明。



表 1-2 半导体材料的种类及用途

分 类	材 料	主 要 用 途
元素半导体	锗(Ge)	二极管、晶体管
	硅(Si)	二极管、晶体管、集成电路、太阳能电池
Ⅲ-V族化合物 半导体	砷化镓(GaAs)	微波、光电器件、集成电路
	锑化铟(InSb)	红外接收器件、霍尔器件
	磷化镓(GaP)	发光二极管
		
Ⅱ-VI族化合物 半导体	硫化镉(CdS)	光敏电阻、太阳能电池
	硫化锌(ZnS)	荧光材料
		
Ⅳ-Ⅳ族化合物 半导体	碳化硅(SiC)	高温器件
		
Ⅳ-VI族化合物 半导体	硫化铅(PbS)	光敏电阻
		
Se·Te化合物 半导体	碲化铋(Bi_2Te_3)	温差电材料
	硒化铋(Bi_2Se_3)	温差电材料
		

实际使用的半导体材料,当然不止表 1-2 中所列的几种。表 1-2 中只写出一些二元化合物,现在有些三元以至四元的化合物半导体,也受到极大的重视,且已进入实用的阶段,如用于发光器件的镓砷磷($\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$)、用于红外探测的碲镉汞($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$)、用于激光器的镓铟砷磷($\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y$)。

从材料的结构形式来看,固体材料可分单晶、多晶、非晶三种形式,现用于制造二极管、晶体管及集成电路的材料主要是单晶。

1.3 认识和应用半导体的历史

现在大概不会再有人怀疑,通过微型化、计算机化和机器人化,社会的各个方面都会受到强烈的冲击,最终将改变我们生活的面貌。然而,这一切没有微电子学的充分发展是不可能实



现的。前面已经说过,微电子学是这样一门科学,它专门研究极小尺寸的电子元器件,特别是集成电路的设计、制造与使用。而没有对半导体的深入了解,发展微电子学事实上是不可想像的。回顾一下历史就会看到,从最早认识到半导体的某些特性开始,到今天认识到半导体所处的重要地位,已经过去 100 多年了。

1837 年,法拉第(M. Faraday)发表了他观察到硫化银的电阻随温度上升而下降的现象。这大概是第一次公开发表的,有关半导体具有负的电阻温度系数这一性质的记录,然而,那时人们只知有电的导体和绝缘体,还没有半导体这个概念。所以说,法拉第观察到的这个现象,是用后人的眼光看他的工作而得出的结论。

此后,1873 年、1874 年和 1877 年诸年间,有几项有关半导体的重要发现。一是英国人史密斯(Willoughby Smith)发现晶体硒在光照下电阻减少的光电导效应(或称“内光电效应”)。不久,亚当斯(W. G. Adams)和戴(R. E. Day)证实了硒的光生伏打效应,其时与发现硒元素的 1818 年,已相隔 50 多年了。

1874 年布劳恩(F. Braun)首先发现了硫化铅矿石(方铅矿)和硫化铁矿石(黄铁矿)的整流作用。在一块矿石晶体上做一个金属电极,再在另一处用细金属丝与矿石形成“点”接触电极,这样一个结构便能表现出两电极之间导电的不对称性(这个“点”必须经过耐心的试验寻找),即电流向一个方向流通,较之相反方向流通来得容易。这样一个装置后来发展成在早期的无线电接收机中,用于高频电流的检波,即是所谓的晶体检波器。利用这种检波器做成的“矿石收音机”,由于它不需要电源,拆装容易,直到 20 世纪三四十年代,仍为许多业余无线电爱好者所欢迎。实际上,布劳恩系统地研究了很多物质的整流效应,据说硒的整流作用也是他首先发现的,但这一发现当时并未被人接受,原因是别人重复不了他所观察到的现象,从今天的眼光来看,早期的半导体研究,得不到重复性的结果,是毫不奇怪的。我们现在理解到半导体的各种性质,对晶体结构、纯度(而且,这种纯度绝非一般化学意义上的纯度)和表面处理等都是极其敏感的。

在 20 世纪 30 年代,付诸实用的半导体器件为数不多,计有氧化亚铜整流器、硒整流器,以及用这两种材料制造的光电池等,当然还有晶体检波器。不过当时半导体晶体检波器,已基本被真空二极管所代替,其原因一是由于真空二极管已能大量生产,价格越来越便宜,而更主要的是晶体检波器性能不够稳定(这用今天的眼光来看,也是容易理解的)。然而到了第二次世界大战前夕,出现了转机,由于雷达的发明,需要有能够在比广播波段频率高得多的频率下工作的检波器。真空二极管因为极间电容太大,不符合要求,因而晶体检波器又重新受到人们的重视。那时使用的半导体材料主要是硅,二极管是厚度和直径均约为 1 mm 的硅片(系由多晶硅锭切出),表面经抛光,然后用一直径约 10^{-2} mm 的钨丝尖端压于硅片表面(灵敏点仍依靠人工寻找)制成,硅片的另一面及钨丝的另一端,即为二极管的两端。当时,人们已经懂得了对硅进行提纯,掺入微量元素(如硼),以及对硅片仔细地抛光、腐蚀等,可以使器件性能得到改善。尽管这些都是经验性质,但确实为第二次世界大战后对半导体的研究发展奠定了基础。



量子理论诞生于1900年,1925—1926年量子力学体系已基本建立。由此可使人们比较深入地和正确地描述固体内部微观粒子的运动,如晶格的振动、自由电子的运动等。1928年,德国人索末菲(A. Sommerfeld)提出金属的自由电子模型。1931年英国人威尔逊(H. A. Wilson)提出半导体的能带模型,在第二次世界大战前夕,用来解释半导体诸多性质的模型已经建立起来了。在同一时期,还有一项有关半导体的理论工作随之发展起来,这就是1938年及随后几年,由英国的莫特(N. F. Mott)、德国的肖特基(W. Schottky)和前苏联的达维多夫(Б. Давидов)分别提出的半导体接触整流理论,在这些理论中,已经应用了半导体的能带模型。

对半导体研究和应用的大发展是在第二次世界大战之后。晶体管发明前,电子管在电子线路中占绝对统治地位,但是它的一系列缺点已经暴露,例如:各种电子管都需要灯丝,灯丝会产生大量的热,其寿命有限,因而影响了电路

工作的可靠性。为此,1945年美国贝尔实验室开展了一项计划,其中最重要的一个目标,就是研制一种固体放大器以代替电子管。1947年12月布拉顿(W. H. Brattain)和巴丁(J. Bardeen)发现在一片锗晶体表面上,压上两个非常靠近的细金属丝(探针),使之成为与点接触式晶体检波器一样的两个点接触,当把这样一个装置的两个探针与锗之间,分别加上适当的直流偏置电压,即可构成一个放大装置,其示意图如图1-1所示。可以观察到集电极C的输出信号电压,大于发射极E的输入

信号电压(此处慎勿将信号电压与偏置电压相混淆,偏置电压即为EB、CB间的直流电压)。这正是计划中所要寻找的东西,他们发明了第一支点接触式晶体管。虽然这种结构的晶体管已成为商品,但由于噪音大、稳定性差等缺点,不久即被性能比它优越的所谓结型晶体管所代替。

肖克莱(W. Shockley)于1949年发表了一篇著名文章《半导体PN结及PN结晶体管的理论》。他第一次提出,用一种含有两个PN结的结构,代替两个点接触的结构。其中包括的一个极其重要的概念是:正向偏置下的PN结(一块完整的半导体单晶的两部分,分别为P型和N型,二者的交界面即称为PN结)的少子注入。这是一篇理论性文章,从实验上证实肖克莱的设想是在1951年,即结型晶体管的问世。当时是在锗单晶的生长过程中,改变掺入的杂质形成的P型锗与N型锗相间的结构,从这样的单晶锗中切出一块(如图1-2所示的棒状物),分别加上电极,即构成结型晶体管。后来又发展了合金法、合金扩散法等制作晶体管的方法,最终形成的结构要求在同一块单晶材料中,形成PNP或NPN相间的三个区,其中包括两个PN结,且要求两个结靠得极近。由于这一项发明,布拉顿、巴丁和肖克莱三人分享了1956年

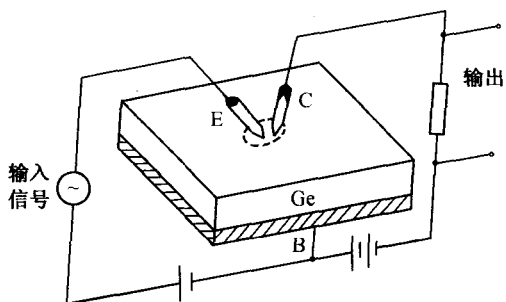


图1-1 放大装置示意图

E—发射极探针;C—收集极(或集电极)探针;B—锗片下金属电极基极;C、E—探针间的虚线表示两探针之间的相互作用范围