

中等专业学校教学用书

电子技术基础

冶金工业出版社

前 言

本教材是根据冶金中等专业学校工业企业电气化专业教育计划和电子技术基础课教学大纲编写的。内容主要分晶体管电路和脉冲数字电路两大部分。

本教材突出了PN结的导电原理，电子电路的放大作用，输入和输出阻抗，反馈和振荡，晶体管的开关作用，基本逻辑电路，逻辑函数及其简化方法，静态和动态逻辑，线性集成和数字集成电路等基本概念和基本原理。

注意反映了大规模和超大规模集成电路和各种新型功能器件等方面的先进技术成就。

本教材由任雪竹、吕圭复、任和生、刘彬、王亚栋等同志集体编写，任雪竹主编。

在编写过程中，得到本溪钢校、北京钢校、长沙冶金工业学校、贵州省冶金工业学校等教师们的热情帮助，在此一并表示衷心的感谢。

由于编写时间仓促和限于编者的业务水平，许多欠妥之处，在所难免，我们恳切地希望使用本教材的教师和同学提出批评意见。

编 者

1978年9月于北京

目 录

绪 论	1
第一章 晶体管及其特性	5
第一节 半导体	5
第二节 晶体二极管	7
第三节 晶体三极管	12
习题思考题	28
实验一 晶体管的测试	29
附录一 晶体管命名方法	31
附录二 用万用表测试晶体管	31
附录三 SBE-20型二踪示波器的使用	33
附录四 QT-1型晶体管伏安特性图示仪的使用	36
第二章 基本放大电路及其分析方法	41
第一节 基本放大电路	41
第二节 放大电路的图解分析法	45
第三节 工作点的选择和稳定措施	54
第四节 放大电路的微变等效电路分析法	61
习题思考题	68
实验二 典型单级放大电路	70
附录五 GB-9B型电子管毫伏表使用方法	72
第三章 多级放大器	73
第一节 级间耦合	73
第二节 RC耦合放大器	74
第三节 放大器的频率特性	76
第四节 直流放大器	84
第五节 功率放大器	94
第六节 放大器的噪声与抗干扰措施	104
第七节 放大器的调整与测试	106
第八节 读图练习	110
习题思考题	111
实验三 具有恒流源的差动式放大电路	112
实验四 互补对称功率放大电路	114
第四章 反馈放大器和正弦振荡器	116
第一节 反馈的基本概念	116
第二节 射极输出器	125
第三节 负反馈的四种连接形式及性能分析	130
第四节 反馈放大器的分析方法	140
第五节 负反馈放大器的稳定性	146

第六节 正弦波振荡器	147
第七节 LC 振荡器	149
第八节 RC 振荡器	156
第九节 读图练习	164
习题思考题	169
实验五 LC 正弦振荡器	173
实验六 RC 文氏电桥振荡器	174
第五章 稳压电源	175
第一节 整流与滤波	175
第二节 硅稳压管稳压电源	185
第三节 串联型晶体管直流稳压电源	192
第四节 稳压电源的保护措施	206
第五节 串联型稳压电源的调试	211
第六节 读图练习	213
习题思考题	216
实验七 晶体管稳压电源	218
第六章 逻辑电路	220
第一节 概述	220
第二节 计数体制	221
第三节 二极管门电路	225
第四节 晶体管反(倒)相器(“非”门电路)	229
第五节 复合门电路	236
第六节 逻辑代数的基本定理和维恩图	237
第七节 逻辑函数的代数化简法	242
第八节 逻辑函数的图解化简法(卡诺图简化法)	245
第九节 简单逻辑线路设计举例	251
习题思考题	256
附录六 逻辑电路图形符号说明	257
第七章 脉冲单元电路	260
第一节 脉冲的基本知识	260
第二节 RC 微分、积分和分压电路	264
第三节 限幅电路	267
第四节 钳位电路	270
第五节 双稳态触发器	271
第六节 双稳态触发器应用举例	276
第七节 数字的显示	282
第八节 单稳态触发器	288
第九节 多谐振荡器	292
第十节 射极耦合(施密脱)触发器	294

第十一节 锯齿波发生器	297
第十二节 间歇振荡器	304
第十三节 读图训练 (钢材根数晶体管计数器)	309
习题思考题	311
实验八 方波信号源和RC回路认识	313
实验九 双稳态触发器电路	314
实验十 单稳态触发器调试	314
实验十一 施密脱电路	315
第八章 线性集成运算放大器	316
第一节 概述	316
第二节 线性集成运放的基本单元电路	319
第三节 常用的几种典型集成运放	327
第四节 集成运放的基本接法和基本功能	331
第五节 集成运放的误差分析和稳定性分析	337
第六节 集成运放的主要参数和测试方法	349
第七节 集成运放的典型应用	356
第八节 读图练习	380
习题思考题	383
实验十二 集成运放的参数测试	386
实验十三 集成运放的基本功能实验	387
第九章 数字集成电路	389
第一节 集成逻辑门电路	389
第二节 DTL 电路	389
第三节 TTL 电路	391
第四节 高阈值逻辑 (HTL) 电路	401
第五节 基本门电路的参数及其测试	403
第六节 集成电路触发器	406
第七节 集成电路功能部件	420
第八节 寄存器、串行运算器	436
第九节 用集成门电路组成的脉冲电路	442
第十节 双极型半导体存储器	450
第十一节 MOS 场效应数字集成电路	455
习题思考题	474
实验十四 TTL “与非”门电压传输特性的测试	475
实验十五 TTL基本门电路实验	475
实验十六 TTL “与或非”门实验	478
实验十七 半加器、全加器实验	479
实验十八 触发器单元电路实验	481
实验十九 二进制计数器实验	482

实验二十 十进制计数器实验	483
实验二十一 寄存器实验	484
实验二十二 串行运算器实验	485
实验二十三 用“与非”门组成的脉冲电路	486
附录七 数字集成电路使用常识	486
第十章 大规模、超大规模集成电路与功能器件简介	491
第一节 MOS大规模、超大规模集成电路简介	491
第二节 集成注入逻辑 I ² L 简介	500
第三节 新型功能器件简介	503
附录八 常用阻容元件的特点和标称值	509

绪 论

近三十多年来,电子科学技术发展很快,在生产上采用先进的电子技术和装备,已成为提高社会劳动生产率的重要途径,成为衡量一个国家经济实力和国防威力的重要标志。我国要在本世纪内实现社会主义的农业、工业、国防和科学技术现代化,就必须努力掌握现代电子科学技术,加速发展电子工业,广泛采用先进的电子技术和装备,把国民经济各部门和国防建设提高到电子化的水准上来。

现代电子科学技术的发展和应用,引起了人类从生产到生活各方面的巨大变革。现代化的大工业为了获得更高的劳动生产率,正不断地向高速化、大型化的方向发展。由于人的生理条件的限制,已不易直接操纵这种高速度、大规模的生产过程。在钢铁工业中,采用氧气转炉炼钢,每二十分钟就可以出一炉钢,其反应是十分迅速而复杂的。采用电子计算机和其它电子装置,就可以大大提高冶炼效率和产品质量。现代大型高炉,有效容积达四千立方米以上,可日产万吨铁,也只有采用电子计算机,才能对其生产过程进行最佳控制。在轧钢生产中,用电子计算机来控制热连轧机的生产过程,可以进一步提高轧制速度,减少板宽和板厚的偏差,提高产品的产量和质量,节约金属材料。过去精轧机的出口速度一般为10米/秒左右,现在可以把出口速度提高到30米/秒。由于采用电子计算机来控制热连轧机的厚度,因而使板厚偏差大大减小。如过去用人工操作时,板厚偏差为 ± 0.05 毫米的板卷,只占37%,而采用厚度自动控制系统(AGC系统)和电子计算机配合工作后,偏差达到 ± 0.05 毫米的板卷已增加到94%,甚至可以用负公差来进行轧制。由此可见,高度自动化的轧钢企业,没有完善的电子计算机系统加以控制,生产是难以进行的。

矿山工业在实现机械化的同时,其采掘、运输、提升、洗选,直到通信调度,都需要采用先进的电子装置。

现代的大工业为了提高劳动生产率,要求把多台机器联合起来加以操纵,或连续控制一条生产线,采用以通用电子计算机,或其他专用控制机构为主体的电子群控技术。大型的联合企业,则需要以电子计算机为中心,通过各类传感、检测、显示装置和自动化仪表,组成可靠的分级控制系统。

发展现代农业也离不开电子科学技术。电子测量技术用于农业生产,可以为干旱缺水的地区寻找地下水源,可以测量土壤的温度、含水量和肥分,测定种子的发芽率和农作物的光照,还可以鉴定农产品的品质。用高频微波、激光适当地处理种子,可以提高发芽率,增加根系数,使作物早熟和增产。高频和微波还可以用来烘干粮食,除草灭虫。随着农业机械化程度的提高,自动控制和遥测、遥控技术就将提到日程上来。例如,对大田作物的灌溉,可以通过放置在土壤中的湿度传感器发出信号,借助无线电遥测、遥控系统来控制水管和水沟放水。应用电子计算机可以更有效地进行农业规划和生产管理,及时地、准确地进行气象和病虫害的预测预报,灵活地控制和调节人工气候室里的植物生长条件,使蔬菜生长“工厂化”。在林、牧、副、渔各业,现代电子科学技术的应用也在不断地得到发展。

电子科学技术在军事上的应用更为广泛。军事电子装备不仅广泛用于通信联络、侦察警戒、武器制导，而且其本身可以作为重要的作战手段。采用先进电子科学技术的军用通信卫星，不仅可以完成远距离战略通信任务，而且可以与各种机载的、舰载的、车载的，甚至单兵背负的通信机进行战术通信。新近崛起的光缆通信，具有抗电磁干扰能力强、保密性高、通信容量大的优点，将成为国防通信的重要手段。先进的电子科学技术和其它科学技术相结合，使军事侦察和警戒的效能大大提高。在二万米高空拍摄的红外照片，可以分辨出地面汽车的牌号。超视距雷达可以探测出八千公里外刚刚发射的导弹。侦察卫星可以探知百米以下的深水潜艇。电子技术也是引导和控制导弹等战略武器以及某些常规武器的重要手段。为了赢得战争的主动权，就要综合采用计算机技术与通信技术，构成准确快速可靠的指挥、控制和通信系统。在现代战争中，由侦察与反侦察、干扰和反干扰组成的电个对抗，已成为一种不可缺少的作战手段。

一切自然科学与技术科学的发生和发展，都是为了认识自然和改造自然。科学技术工作者可以凭借电子技术认识以往难以认识的对象。射电天文望远镜可以帮助人们观察上百亿光年远的宇宙区域，成为研究宏观世界不可缺少的工具。电子显微镜可以使人们直接观察物质中的单个原子，帮助人们研究微观世界。利用高能加速器可以使人们发现原子核内部的秘密。电子计量仪器和质量分析仪器可以帮助人们进行精密的定量和定性分析。特别是电子计算机，可以为科学研究进行大量的、复杂的和人力难以胜任的数值运算，进行工程设计和模拟的科学实验，还可以把卷帙浩繁的情报资料变成信息储存起来，通过自动检索，向科学工作者及时提供所需要的资料。总之，一切现代科学技术，离开电子计算技术，就不可能高速度发展。

电子科学技术还应用到经济和文化领域，以及社会服务等各个方面。

这些都说明努力攀登电子科学技术高峰，是高速发展国民经济，加速实现四个现代化的重要物质技术基础。

电子器件是发展电子技术的重要物质基础，电子技术的每一个新的进展，几乎都是和电子器件新的突破分不开的。

自从1906年世界上第一个真空三极管问世以来，电子技术领域发生了一系列重大的变革。目前，这种变革正在以愈来愈快的步伐继续向前发展着。电子管的时代，一直持续了四十年之久，它曾经在电子技术的发展史上，起过极其重要的作用。

1948年，世界上第一个晶体三极管诞生。由于晶体管具有体积小、重量轻、功耗小和寿命长等一系列独特的优点，很快地取代了电子管，并在电子技术领域处于主导地位。但晶体管的时代，只维持了十三年。

到1960年，世界上第一次出现了把包含四个元件的单元电路，集中制作在一小块（几个平方毫米）硅片上的新型电子器件，这就是我们现在熟知的“集成电路”。集成电路的出现，打破了几十年来一直由分立元件组成电子电路的传统观念。这一新的突破，给电子技术带来了深刻的影响。从此以后，电子技术就由晶体管时代进入了集成电路的时代，它宣告了电子技术已经转入一个新的发展阶段。目前集成电路正在向大规模、高速度、多功能、低功耗等方面迅速发展。人们普遍认为，四十年代是电子管的时代，五十年代是晶体管的时代，六十年代是集成电路的时代，而七十年代则是大规模集成电路的时代，人们预测八十年代将是超大规模集成电路的时代。

大规模集成电路，特别是超大规模集成电路的出现，使电子技术发生了更加巨大的变化，回忆1946年世界上第一台电子管式大型通用电子计算机ENTAC，共用了18000个电子管，体积3000立方呎，重30吨，耗电140千瓦，而1976年与之同等功效的微型计算机F-8，体积仅17立方呎，重约1磅左右，耗电只有2.5瓦，相比之下，体积缩小了三十万倍，重量减轻了八万倍，功耗减少了五万六千倍，而可靠性却提高了一万倍，前后对比，三十年的变化是何等的巨大！

今天，超大规模的集成电路的集成度已经达到了每片集成十五万六千个元件的惊人数字，据称每片集成三十二万个元件的超大规模集成电路也已经试制成功，并且正在向更大规模发展。预计不久的将来，由单片集成电路组成的单片微型计算机，将会普及应用到各个领域中去。

与此同时，集成电路的品种正在不断增加，应用范围也在日益扩大。在数字集成电路方面，双极型集成电路(TTL、HTL、CML等)曾一度领先，金属-氧化物-半导体集成电路(MOS)后来居上，很快就超过了双极型集成电路跃居首位，而双极型集成电路以最近发展起来的集成注入逻辑电路(I²L)为代表，又大有赶超MOS电路的趋势，MOS电路则又以新品种CMOS，NMOS，DMOS，VMOS等与之竞争。与数字集成电路发展的同时，还有模拟集成电路。这种集成电路虽然起步较晚，但发展很快。特别是其中的线性集成运算放大器，以其灵活多变，应用广泛而获得“万能放大器”的称号。其它如广播、电视、雷达等专用的各种线性集成电路，也在不断的试制成功。现在，只要用六块线性集成电路，就可组成一台彩色电视。最近出现了把线性集成电路和数字集成电路共同集成在一块硅片上的复合集成电路。总之，集成电路正在高速度地继续向更高的水平发展。

除了常规的集成电路之外，其他一些特殊的电子器件和新型的功能器件也在沿着各自的道路迅速的发展。它们有的进入微波领域，有的进入强电领域，有的则以各种非电子的原理出色地完成电子器件所能完成的功能。有的甚至比电子器件更佳。在微波器件方面，除了分立元件的微波隧道二极管，肖特基势垒二极管，砷化镓体效应二极管，低噪声场效应管及参量放大器等等之外，值得一提的是近年来发展起来的微波集成电路。可以预见，在微波领域内，这种新型的微波集成电路终将代替各种微波分立元件而取得领先地位。在高电压大功率方面，具有代表性的是1957年诞生的硅可控整流器件(简称可控硅或晶闸管)。可控硅的出现，使五十年代曾经风行一时的大功率离子器件很快一扫而空，固体器件一举由弱电领域闯入强电禁区。目前，可控硅的耐压已超过一万伏，电流则高达28000安，并且产生了很多派生的可控硅器件，例如，可关断可控硅，双向可控硅，逆导可控硅，光导可控硅等等。近年来发展起来的特灵顿功率管也是一种很有发展前途的大功率电子器件。在新型的功能器件方面有电荷耦合器件，光电耦合器件，集成光电器件，分子功能器件，超导功能器件及仿生功能器件等等。这些新型的功能器件，尽管有的还处于研究阶段，但却显示了极大的生命力。它们将在未来的电子技术领域中放射出灿烂的光彩。让我们以顽强的毅力来攀登和攻克这些新的科学堡垒吧！

《电子技术基础》是工业企业电气化专业的主要技术基础课。内容包括晶体管电路和脉冲数字电路的基本原理。考虑到目前国内的一些数字仪表中仍有分立元件组成的部件，因此本书除重点介绍集成元件以外，还将提到用分立元件组成的逻辑部件的内容，它们组成各部件的原理和集成电路是基本相同的。

本书在内容上着重于阐明物理概念和电路的定性分析，也适当地进行一些必要的计算。

通过本课程的学习应达到如下的要求：

1. 掌握半导体器件的工作原理，并能正确地选择和使用。
2. 掌握基本单元电路的工作原理及各元件的作用，了解局部电路的计算，元件参数选择和调试方法。
3. 掌握数字集成电路和集成运算放大器的工作原理，逻辑功能，调试方法，为学习工业控制机、自动控制等专业课打下基础。

第一章 晶体管及其特性

第一节 半 导 体

一、导体、绝缘体和半导体

按照导电能力的大小，可以把物体分为三类，即导体、绝缘体和半导体。

容易导电的物体称为导体。金、银、铜、铝、铁等金属都属于导体一类。对于导电性能好的又称良导体，而不容易导电的物体称为绝缘体（也叫非导体）。橡皮、塑料、玻璃、陶瓷等都属于绝缘体一类。在对电能的使用中，就是利用这一类绝缘体将电流“隔离”，以防止电流传到不需要的地方而造成损失和危险。

半导体它的导电能力介于导体和绝缘体之间，如硅、锗、硒、一些金属的氧化物（如氧化亚铜）和硫化物（如硫化锌）等。

导体和绝缘体的导电能力可以相差几十万亿倍以上。应该说明，即使都是良导体（如银与铜）它们的导电能力也是不同的。为了区别各种物体的导电能力，通常用“电阻率”来衡量。电阻率的单位是欧姆·厘米，电阻率用字母 ρ 表示。

“电阻率”以长一厘米，截面积为一平方厘米的物体所具有的电阻值来衡量。显然电阻率愈小，导电能力愈强。反之，电阻率愈大，导电能力愈弱。导体的电阻率约 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ 欧姆·厘米，绝缘体电阻率在 $10^8 \sim 20^{20}$ 欧姆·厘米以上。电阻率在 $10^{-3} \sim 10^8$ 欧姆·厘米之间的则属于半导体范围（如纯硅电阻率为 2.14×10^5 欧姆·厘米）。按照这样的划分，半导体将包括十分广泛的材料，如大部分的矿石将属于这一类范围，但就目前人们所掌握的情况来看，最重要的算是硅、锗、硒等几种元素。

半导体所以能得到广泛的应用，并不是因为它的导电能力介于导体和绝缘体之间，而在于它具有一些独特的性质：

1. 半导体的导电能力随外界条件的变化有很大的不同。光和热都能引起半导体导电能力的显著变化。光照射在半导体上以后，其导电能力可以变得很强，人们利用这一特性制成了光敏元件（如光敏电阻、光敏二极管等）。当外界温度变化时，半导体导电能力也发生显著改变，利用这一特性又制成热敏元件（如热敏电阻）。这些元件常被用于自动控制系统。其他还有力敏、磁敏、气敏元件等等。

2. 在纯净的半导体中，适当的加入“杂质”，半导体的导电能力会有成百万倍的增加。应用这一特性，做成了各式各样的、不同性质、不同用途的晶体管。

二、本征半导体

1. 半导体中的空穴 多数的半导体是晶体，晶体通常有一定的外形。这是由于它内部的原子按一定规律排列的结果（因此也往往把半导体材料叫做晶体，晶体管的名称就是这样得来的）。图1-1是硅的晶体结构平面示意图。在纯净的单晶硅里，硅原子排列得很整齐。每个硅原子的最外层轨道上，都有四个价电子，每一个硅原子的价电子与相邻原子的价电子构成共价键，共价键上的电子不仅绕自身原子核旋转，也绕相邻的原子核旋转。

这时每个硅原子的最外层都形成具有 8 个电子的稳定结构，组成排列整齐的晶体点阵，这种纯净的晶体没有更多的自由电子。这种不含杂质的半导体叫做本征半导体。在通常的情况下，它的导电能力是很差的。这是因为硅原子中的电子被束缚着。但它不像绝缘体那样被束缚得很紧，只要电子得到足够的能量，它就可以摆脱原子核的束缚成为自由电子，其导电能力就变强了。价电子可以从热运动中得到能量。也可以因环境温度的增高或受光的照射得到能量，这些获得足够能量的电子，能冲破共价键的束缚成为自由电子。即一些共价键遭到破坏。当自由电子形成时，在原来共价键的位置上便留下了一个能拘留电子的空位。这个空位称为空穴，如图 1-2 所示。在本征半导体中出现一个自由电子必然留下一个空位，而形成了电子—空穴对。

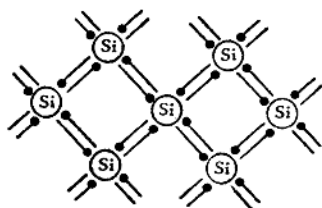


图 1-1 硅晶体结构平面示意图

与此同时，有的电子又落入空穴，电子—空穴对便消失，称此为复合。在温度作用下，电子—空穴对不断产生，也不断复合。当达到平衡时，单位时间内产生的和复合的电子—空穴对数量相等，此时电子和空穴的数量基本上保持不变。随着温度的升高，电子—空穴对形成的数量增加，导电能力增强。

原子是由带负电的电子和带正电的原子核组成。由于正负电荷带电量相等，所以就整个原子来说是不显电性的。当一个带负电的电子得到足够的能量而离开原子成为自由电子时，这个原子就显出多了一个未被中和的正电荷，而带正电，即电子留下的空穴所具有的。由于电子和空穴都载有电荷，所以又统称它们为载流子。一个电子和一个空穴所带的电量相等，符号相反。

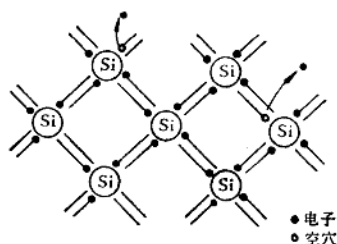


图 1-2 空穴的形成

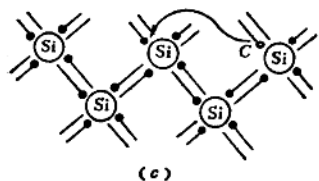
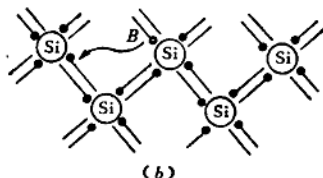
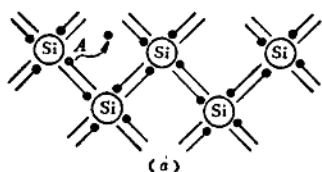


图 1-3 空穴的移动

2. 空穴的移动 图 1-3 为晶体内空穴的移动示意图。在“*A*”处形成空穴之后，邻近原子中的电子若填充此空穴，则“*A*”处的空穴便消失，而在邻近原子“*B*”处，见图 1-3(b)，出现了一个新空穴。此新空穴若又被邻近原子的电子所填充，在“*C*”处又出现一个空穴，见图 1-3(c)，如此继续下去，空穴便由 *A* 移到 *B*、*C*。这就是空穴的移动。不难看出，空穴的移动方向与电子移动方向是相反的。

在没有外加电场的作用下，空穴与电子的移动是没有规律的，因此不能形成电流。如果在晶体上加个电源，在有外加电场作用下，电子将移向电源正极，空穴将移向电源负极而形成电流。可见，在晶体内的电子与空穴同时参与导电，这是和金属导电不同的地方。

三、N型半导体和P型半导体

实际上，纯净的半导体仅仅是制作半导体器件的原材料，要制成半导体器件，必须在纯净半导体中加入一些杂质，这种半导体叫做杂质半导体。“杂质”是指在纯净的半导体中加入极微量的另一种元素。这些杂质加入后，使半导体的导电能力增加很多倍。当然根据选用杂质的不同，杂质半导体分为二种类型，一种叫做N型半导体，一种叫做P型半导体。

1. N型半导体 在半导体中加入少量的五价元素（如磷或砷、锑等），即构成N型半导体。当磷进入半导体之后，磷原子占据了一个原来由硅原子所占的位置，如图1-4。磷原子最外层有5个电子，它同周围的硅原子进行共价结合时，多出了一个电子。这个电子未被束缚在价键里面而成为“自由状态”。每多加一个磷原子就出现一个“自由状态”的电子。显然，这种杂质半导体中自由电子的数目比空穴多，参加导电的主要是自由电子。在N型半导体中，电子占多数，称它为多数载流子；空穴占少数，称它为少数载流子。

2. P型半导体 如果在半导体中，加入极少量的三价元素（如硼或铝、镓、铟等），就形成P型半导体。当硼加入半导体之后，硼原子也将替换一个硅原子而占据一个位置，如图1-5。由于硼是三价元素，原子外层只有三个电子，在与硅组成共价键的时候，结构

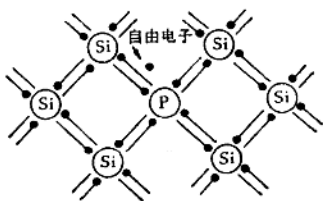


图 1-4 N型半导体示意图

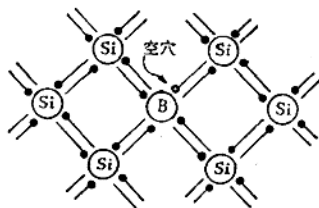


图 1-5 P型半导体示意图

是不完整的。因此，必然出现一个可以拘留电子的空位，形成一个空穴。每多加一个硼原子，半导体内便出现一个空穴。显然，在P型半导体中，空穴数量比自由电子数量要多。也就是说，P型半导体的多数载流子是空穴，而少数载流子是电子。

为了方便起见，常把多数载流子叫做“多子”，把少数载流子叫做“少子”。

用来制作N型半导体的杂质称为施主杂质。常用的施主杂质有砷、磷、锑等五价元素。用于制作P型半导体的杂质称为受主杂质。常用的受主杂质有硼、铝、镓、铟等三价元素。选用不同的杂质，就可以制成不同类型的半导体。往往在一块半导体内既含有受主杂质又含有施主杂质，如果施主杂质比受主杂质多，半导体是N型的。反之，受主杂质比施主杂质多，则半导体是P型的。根据这个道理，可以在一整块N型半导体的某一部分上，再加入适量的受主杂质制成一小块P型半导体，这样，在一块半导体上便可形成一边是P型，一边是N型的半导体。

第二节 晶体二极管

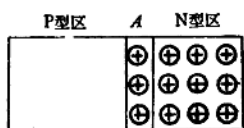
一、PN结及其单向导电性

按照一定工艺，可以使一块完整半导体的一部分是P型的，而另一部分是N型的，这

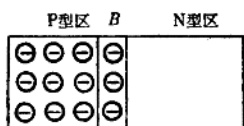
时在P型半导体与N型半导体的交界面上就形成一个特殊的薄层，称它为PN结（又叫阻挡层）。

PN结是晶体二极管、三极管、可控硅等半导体器件的基本组成环节。因此有必要对PN结的形成和特性做进一步的叙述。

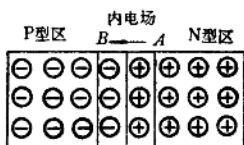
1. PN结的形成 如图1-6，在一块半导体上，左边是P型区，右边是N型区。在P



(a)



(b)



(c)

图 1-6 PN结的形成

型区内空穴是多子，而N型区内电子是多子。因此P型区的空穴浓度比N型区的空穴浓度大，而N型区电子的浓度又比P型区的电子浓度大。有了浓度差别之后，浓度大的要向浓度小的地方扩散。即在交界面上，P型区的空穴向N型区扩散，N型区的电子向P型区扩散。

在交界面附近，由于扩散运动，N型区的一部分带负电的电子向P区移去，结果薄层A因失去一部份电子而形成带正电荷的粒子区，如图1-6(a)。与此同时，P型区邻近交界面附近的空穴扩散到N型区，结果薄层B因失去部分带正电的空穴而形成带负电的粒子区，如图1-6(b)。这样，在交界面附近出现一个空间电荷区，形成一个电场。电场的方向由N区指向P区，如图1-6(c)所示。这个电场对多子即P区的空穴和N区的电子的扩散起着阻碍作用，而对P区的电子和N区的空穴即少子的运动却不起阻碍作用。这些少子由于热运动到达结区时，便在PN结内电场的作用下通过交界面。这种运动称为漂移运动。显然漂移运动和扩散运动的方向相反。随着扩散的进行，交界面两边（AB薄层）的电荷愈来愈多，电场愈来愈强，阻止扩散的能力也愈来愈大，扩散作用逐渐减弱，而漂移作用相对地加强，直到电子与空穴的扩散作用和漂移作用达到完全平衡时为止（这时由N区扩散到P区的电子数量，将与P区漂移到N区的电子数量相等，空穴也是如此）。此时，交界面处的薄层A、B中的电荷数量将保持不变，即达到动态平衡。这样，在P型区与N型区交界面处便形成了一个带电的薄层。叫PN结。

2. PN结的单向导电性 上面是PN结上没有外加电压的情况，下面是PN结有外加电压之后的特性。

当P型区接到电源正端，N型区接到电源负端时（这种接法称正向连接或者叫PN结正向偏置，简称正偏），如图1-7(a)所示。这时外加电场与PN结内电场方向相反，结果结内电场被削弱，破坏了原来扩散作用和漂移作用的平衡，使扩散作用占了优势，一部分电子便由N区向P区扩散，一部分空穴由P区向N区扩散，这些电子和空穴在外加电场作用下，分别奔向电源正极和负极，半导体内便有较大的电流通过。这个电流叫做正向电流。随着外加电压的增高，结内电场进一步被削弱，扩散作用更强，电流将迅速增长。

值得注意的是，外加正向电压削弱内部电场力的过程，也就是PN结空间电荷区变窄的过程。外加电场驱使P区的空穴向右移动，驱使N区电子向左移动，从而使原来空间电荷区的正负粒子得到中和，空间电荷数量减少即PN结变窄了，结内电场被削弱，使扩散作用加剧，同时外部电源不断地向半导体提供空穴与电子，使电流得以维持下去。

当P型区接电源负端，N型区接电源正端时（称此为反向连接，或叫PN结反偏），外加电场与结内电场方向一致，如图1-7(b)所示，它加强了结内电场（空间电荷区加宽），使扩散运动无法进行下去。但这时的漂移作用仍然存在，即N区中的空穴可以移向P区，同时P区中的电子可以移向N区，这虽然可以形成电流，但N区的空穴和P区的电子都是少数载流子，所以形成的电流很小，这个电流叫做反向电流。一般只有几十到一、二百微安。因而有时也可以认为加反向电压时不导电。这就是PN结的特性——单向导电性。

PN结的这一特性是构成晶体二极管、三极管、硅可控整流元件及其他半导体器件的基本原理的基础。

晶体二极管用于整流就是基于PN结的单向导电性。它可以把方向变化的交流电变为单一方向的电流，这一点将在第五章中详述。

二、晶体二极管的构造

晶体二极管有一个正极和一个负极，实质上它是把一个PN结封装在管壳里构成的。它由P型区的引出线做为正极，N型区的引出线做为负极。符号如图1-8所示。按照晶体二极管内部结构，可以把它分为点接触式和面接触式二种，如图1-9所示。其中(a)为点接触式，(b)为面接触式。

点接触式接触面积小，它的结电容小，适用于高频，常用在检波、脉冲技术中。面接触式PN结接触面积大，可以通过较大的电流，适于作整流用。但它的结电容较大，往往不适用于高频场合。

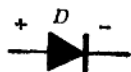
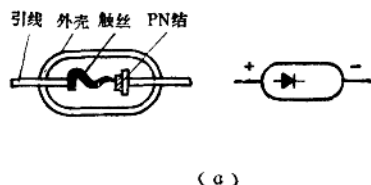
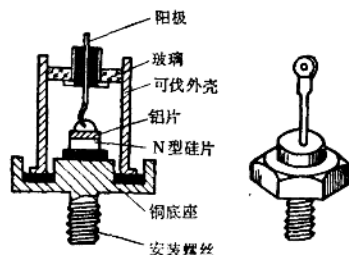


图 1-8 晶体二极管符号



(a)



(b)

图 1-9 晶体二极管

的关系曲线。图1-10是测绘伏安特性的电路，其中D是待测二极管，A是电流表，V是电压表，R是用来保护晶体二极管的限流电阻，E是可调电源，用以改变加在晶体二极管上的电压大小。

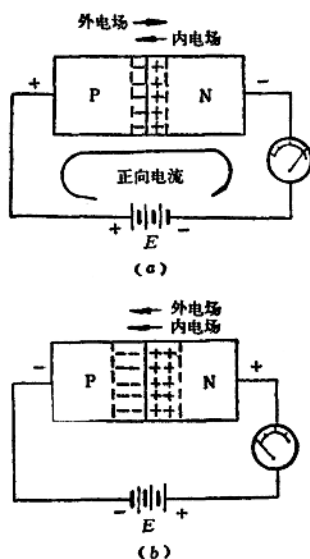


图 1-7 PN结的单向导电性

三、二极管的伏安特性曲线

二极管伏安特性曲线是表明二极管电流与二极管端电压之间

测量时调节 E 的大小, 便可得出不同电压下的电流值。根据所测数据就可以画出晶体二极管电流电压关系曲线 (伏安特性), 如图1-11所示。不同的二极管其伏安特性是有差

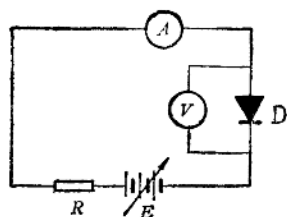


图 1-10 测绘晶体二极管伏安特性电路

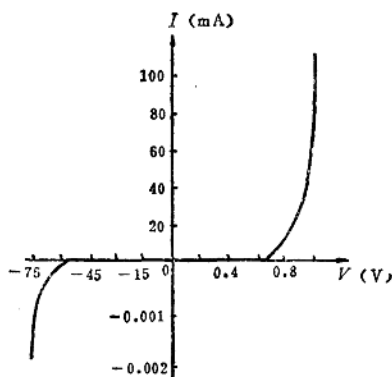
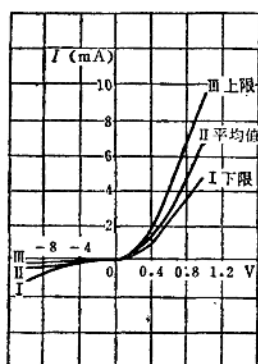


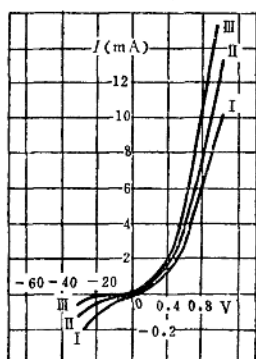
图 1-11 晶体二极管伏安特性

异的。即正向电流随正向电压上升的快慢程度以及反向电流的大小, 都各不相同, 但伏安特性曲线的形状是相似的。图1-12列出了几种晶体二极管的典型伏安特性。

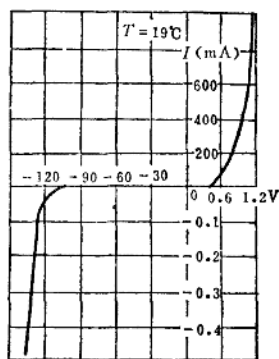
图1-11和图1-12中各曲线都表明二极管具有单向导电性 (即正向电流大, 反向电流很小)。比较硅二极管 (2CP 型) 和锗二极管 (2AP 型) 的特性曲线可以看出, 在正向区



(a)



(b)



(c)

图 1-12 几种晶体二极管的伏安特性

(a)、(b) 锗管; (c) 硅管

域, 锗管大约在 0.2 伏左右电流开始显著增加 (前一段称为“死区”), 而硅管要到 0.6 伏左右, 电流才开始显著增加 (前一段也称为“死区”)。在反向区域, 硅管反向电流要比锗管小得多, 一般很难测量出来。

如果把反向电压继续加大至某一数值之后, 反向电流会突然加大, 并急剧增长, 这个现象称为反向击穿。此时二极管已失去单向导电性, 大的反向电流流过 PN 结会产生大量

发热现象，二极管很容易被烧毁。达到击穿时的二极管两端所加的电压值称为反向击穿电压。不同材料，不同结构的二极管，其反向击穿电压不同，由一伏到数百伏乃至更高，其值可由晶体管手册中查出。在使用二极管时，应注意所加反向电压不得达到额定击穿电压值。

二极管反向击穿时，曲线较陡，它表明管中电流变化很大而管的压降变化很小。在一定制造工艺保证的条件下，管子不被烧毁，就可以利用反向击穿时的特性，制成“稳压管”。这种管子的特性和应用将在第五章中具体介绍。

四、晶体二极管的主要参数

晶体二极管的寿命很长（可达十万小时以上），但只有在正确使用时才能保证它的寿命。必须掌握晶体二极管的参数，以便合理选择管子，晶体二极管的主要参数有

1. 最大正向电流 是指长期运行时，晶体二极管所允许通过的最大正向电流值。电流通过二极管时，管子将发热，如果电流过大，超过允许值时，PN结会因温度过高而烧毁。因此，使用二极管时，正向电流不应超过管子所规定的最大正向电流值。

大功率晶体二极管整流电流较大，发热量也大，为了降低管子的温度，需要装散热片以帮助散热。有的还要采用风冷、水冷等办法冷却。

2. 反向击穿电压 指晶体二极管所承受的反向电压值。当反向电压超过此值时，管子将被反向击穿，二极管便失去整流作用。

手册上给出的最高反向工作电压，通常是击穿电压的二分之一。为了防止二极管因反向击穿而损坏，在选用二极管时必须注意这个极限值。

3. 反向电流 指二极管两端加上最高反向工作电压时的反向电流值。此值愈小愈好。反向电流大说明管子特性不好，一般硅管反向电流仅几微安到几十微安（个别大功率管也有达几十毫安的），而锗管可达到数百微安。环境温度升高后，由于少数载流子增多，反向电流将增大。

4. 最高使用温度 指晶体二极管在长期运行时，所允许的最高温度。

除以上几个外，二极管参数还有最高工作频率，最大瞬时电流等，表1-1列出几种常用晶体二极管的主要参数。

表 1-1 几种晶体二极管的主要参数

型 号	最大整流电流 (mA)	最高反向工作 电压(峰值) (V)	反 向 电 流 (μ A)	最高工作频率 (MHz)	极 间 电 容 (pF)	用 处
2AP1	16	20	≤ 250	150	≤ 1	检波和小功率 整流
2AP2	16	30	≤ 250	150	≤ 1	
2AP3	25	30	≤ 250	150	≤ 1	
2AP4	16	50	≤ 250	150	≤ 1	
2AP5	16	75	≤ 250	150	≤ 1	
2AP6	12	100	≤ 250	150	≤ 1	
2AP7	12	100	≤ 250	150	≤ 1	
2CP1	400	100	250	3		整 流
2CP2	400	200	250	3		
2CP3	400	300	250	3		
2CP4	400	400	250	3		