



全国高等师范专科学校教材

数字电路和微型计算机

(电子技术基础及实验 I)

李仲先 编

高等教育出版社

全国高等师范专科学校教材

数字电路和微型计算机

(电子技术基础及实验 I)

李仲先 编

高等教育出版社

内 容 提 要

本书为国家教委选定的师专配套教材之一，在1988年长春会议上被列为全国师专正式教材。

本教材是为师专电子技术课程编写的一套教学改革型教程，全教程按“先数字、后模拟”体系编写，包括《数字电路和微型计算机》、《模拟电路与无线电技术》两册，可分别在一、二年级讲授。本册为《数字电路和微型计算机》，内容包括二极管及其应用、三极管和反相器、数字集成电路、微型计算机等四章。讲授基本内容约需50学时，实验30学时。

本书的主要特点是理论与实践相结合，突出培养学生的动手能力。可供师专、教育学院、高师函授、中学师资培训班及中等技术学校作为教材，也可作为师范学院本科学生及中学物理教师的参考书。

全国高等师范专科学校教材
数字电路和微型计算机
(电子技术基础及实验 I)

李仲先 编

*

高等教育出版社出版
新华书店上海发行所发行
重庆印制一厂印装

*

开本787×1092 1/16 印张25 插页1 字数570 000

1989年4月第1版 1989年4月 第1次印刷

印数0001—2 720

ISBN 7-04-002080-7/TN·109

定价 5.25 元

前 言

本书是为高等师范专科学校电子技术课程编写的一套教学改革的教材。全书按“先数字、后模拟”的体系编写，包括《数字电路和微型计算机》、《模拟电路与无线电技术》，可分别在一、二年级讲授。

本教材突出电子技术在教育中的应用，以讲授集成电路器件为主，采用“数字-模拟-调制”的结构体系，力求体现八十年代对中学物理教师提出的新要求。书中内容重点介绍大、中、小规模数字与模拟集成电路的原理、特性，以及它们在中学教学仪器、计算机辅助教学、电化教学和教育手段现代化等方面的应用，并具体剖析了中学使用的中华学习计算机、数字计时器、信号发生器、示波器和稳压电源等仪器的构造原理和使用方法。本书内容较全，由浅入深，由定性到定量，以适应不同层次的学校选用。

本书坚持基础知识与实践相结合的教育原则，将实验作为讲授的基础，使理论与实践紧密结合，采用“学习—实验—总结—应用”的教学方法，让学生通过自己的实践获得知识与能力。当然，根据各校的情况，也可以将书中的实验内容独立出来，另作一门电子实验课开设。书中除编入较多的可供选择的实验以外，还为学生提供了数十个课外电子制作资料。

在有限的时间内讲授众多的内容是有困难的，为此，应加强实验，凡是能通过实验弄明白的问题就尽量在实验中去解决。其次，教师要抓住重点、难点进行讲授。至于没有讲到的内容，可让学生在自学中获得更广泛的知识。为了提高课堂的讲授效率，对于比较复杂的电路，建议教师在上课时采用投影仪，将复杂电路的图片直接投影在屏幕上进行讲解。

本书在课程安排上也做了重大改革。过去，师专电子技术课是安排在二年级开设，主要是由于采用“先模拟、后数字”的教学体系造成的（模拟电路的有关内容必须等到二年级开设电工课程以后才能讲解）。现在，由于本书先开设数字电路部分，一年级学生学数字电路和微型计算机，不须要先行课程（如电工学）作准备，因此可使本课程提前一年开课。将本课程分散在四个学期开设，有利于减轻教学负担，提高教学质量，有利于课程设置的调整改革及教师的合理使用。具体的教学建议如下表所示。

学 期	课 程 内 容	讲授学时	实验学时	主 要 章 节	说 明
1	数字电路和微型计算机	50	30	二极管、三极管、数字集成电路、微型计算机	必学
2	计算机算法语言				另一门课
3	模拟电子学	42	18	放大器、反馈、模拟集成电路、CRT显示器	必学
4	无线电技术	26	14	收音机、电视	选学

总计讲授学时：必学92学时，选学26学时。

本册为上册《数字电路和微型计算机》。内容包括二极管及其应用、三极管和反相器、数字集成电路、微型计算机第四章。前两章是全教程的器件基础，既介绍器件的模拟特性，

也介绍开关特性,使初学者对器件特性有一个较全面的认识。数字集成电路一章,既介绍它的一般构造原理,也介绍了一些常见的芯片,为数字集成电路的应用和微型计算机硬件电路的讲解做准备。本书对微型计算机一章采取一边动手安装一部最小系统的微型计算机,一边讲解微型计算机的构造原理,使初学者尽快掌握计算机的整机工作原理和应用,为将来到中学去使用计算机打下基础。

本教材由东北师范大学物理系郝会新教授、袁永昇和李庆禹副教授、张振明讲师主审。本书曾由华东师范大学翁默颖教授、陈康宏、王凯副教授及山东师范大学袁祖华副教授审阅,并先后得到潘懋德、吴文虎、陈树楷、王兴乃等同志的指导和帮助,在此深表感谢。

由于编者业务水平的限制,书中定有许多缺点和错误,恳请读者指正。

编 者

1988.3.于泰安师专

目 录

第1章 二极管及其应用

1.1 实验 二极管伏安特性的测量	1
1.2 二极管伏安特性的分析	5
一、半导体中的载流子	5
二、N型半导体和P型半导体	6
三、PN结	6
四、二极管的结构和特性方程	9
1.3 二极管的特性参数及其测量	10
一、二极管的开关特性	10
二、二极管的微变特性	13
三、二极管参数的简易测量	15
1.4 实验 二极管用于整流	17
1. 半波整流	18
2. 全波整流	19
3. 桥式整流	20
4. 滤波电路	21
5. 倍压整流	23
1.5 实验 二极管用于稳压	27
1.6 二极管用于脉冲整形	30
一、正弦信号和脉冲信号	30
二、RC电路	32
三、二极管限幅器	35
四、二极管钳位器	37
1.7 实验 整形电路测试	38
思考题和习题一	41
制作练习一	44
1. 用示波器演示二极管伏安特性	44
2. 节能烙铁架	44
3. 废日光灯管利用电路	44
4. 三极管测试器	45
5. 印刷电路板的制作方法	45

第2章 三极管和反相器

2.1 三极管的电流放大作用	46
一、三极管的结构	46
二、三极管电流分配关系的演示	48
三、三极管的三种连接方式及其电流放大系数	50
2.2 实验 三极管的伏安特性	51
1. 输入特性曲线	51
2. 输出特性曲线	52
3. 三极管管脚的判别方法	54
2.3 三极管的特性参数及其测量	57
一、三极管的特性参数	57
二、温度对三极管参数的影响	60
三、三极管参数的简易测量	61
2.4 三极管组成放大器	62
一、放大器的组成电路	62
二、静态分析	63
三、动态分析	65
四、非线性失真	69
五、稳定偏置电路	70
2.5 三极管组成反相器	72
一、三极管的开关特性	73
二、反相器的开关工作原理	76
三、反相器的开关性能	78
2.6 实验 放大器和反相器的性能测试	79
1. 固定偏置放大器	80
*2. 射极偏置放大器	80
3. 反相器	81
2.7 场效应管	83
一、结型场效应管	84
二、绝缘栅场效应管	87
三、场效应管的特性参数及其测量	90
2.8 实验 场效应管组成的放大	

器和反相器	92
1. 场效应管放大器	92
2. 场效应管反相器	93
思考题和习题二	96
制作练习二	100
1. 用示波器演示三极管的伏安特性	100
2. 路灯自动开关	101
3. 自动监视器	101
4. 耳聋助听器	101
5. 液位自动控制	103
6. 音乐彩灯	104
7. 循环彩灯	104

第3章 数字集成电路

3.1 概述	107
3.2 门电路	109
一、分立元件门电路	109
二、TTL 与非门	112
三、其它 TTL 门电路	116
四、CMOS 门电路	120
3.3 实验 门电路测试	122
1. TTL 门电路的特性参数及其测量	122
2. CMOS 门电路的特性参数及其测量	125
3. 集成电路使用注意事项	125
3.4 组合逻辑电路(一)	129
一、逻辑电路和逻辑代数	129
二、门电路的组合问题	130
三、加法器	132
3.5 实验 组合逻辑电路的测试与设计	136
1. 测试半加器和全加器的逻辑功能	136
2. 根据逻辑要求设计逻辑电路	137
3.6 组合逻辑电路(二)	138
一、编码器	138
二、译码器	144
3.7 实验 数码显示器	147
1. 半导体数码管显示电路	148
2. 荧光数码管显示电路	152
3.8 触发器	155
一、基本 RS 触发器	156
二、同步 RS 触发器	159

三、JK 触发器	159
四、D 触发器	164
五、CMOS 触发器	167
六、触发器的分类和转换	169
3.9 实验 触发器测试	170
3.10 时序逻辑电路	174
一、计数器	174
二、寄存器	178
3.11 脉冲波形的产生和整形	182
一、脉冲振荡器	182
二、单稳态触发器	185
三、施密特触发器	188
3.12 实验 脉冲电路的应用	191
1. 用环形振荡器组成的脉冲信号发生器	191
2. 单稳态触发器用于脉冲调宽	191
3. 用门电路组成的施密特触发器	192
3.13 阅读资料 数字计时器	194
3.14 实验 指令编码器	200
思考题和习题三	204
制作练习三	211
1. 变色装饰灯	211
2. 可编曲音乐门铃	211
3. IC 信号发生器	211
4. IC 电子琴	211
5. 收音助音两用机	215

第4章 微型计算机

4.1 概述	216
一、计算机的组成和存储程序原理	217
二、微处理器、微型计算机和微型计算机系统	219
三、微型计算机的一般结构和工作原理	219
四、程序和指令、程序设计语言	223
五、计算机的性能指标	226
4.2 实验 读写控制器	226
4.3 实验 5101 SRAM	233
1. 5101 SRAM 芯片简介	233
2. 存储器实验电路	234
4.4 存储器	239
1. 读写存储器 RAM	239

2. 只读存储器ROM.....	245	3. 使用说明.....	325
4.5 实验 6502 CPU.....	247	4.10 接口电路.....	331
1. 6502CPU的引脚.....	247	4.11 实验 最小微型计算机的 操作使用.....	332
2. 6502CPU的时序.....	249	4.12 微型计算机的外部设备.....	337
3. 实验电路.....	251	一、磁盘机.....	337
4.6 微处理器.....	258	二、打印机.....	343
一、微处理器的种类和发展概况.....	258	三、键盘.....	345
二、微处理器的中断工作方式.....	260	四、CRT显示器.....	348
三、6502微处理器.....	261	五、光笔.....	350
*四、Z80 微处理器.....	268	4.13 几种教学用微型计算机主机	351
4.7 6502 CPU 的寻址方式和指 令系统.....	273	一、Apple I 微型计算机.....	351
一、6502指令的寻址方式.....	275	二、IBM-PC微型计算机.....	361
二、6502指令系统.....	281	三、中华学习计算机.....	362
4.8 6502 汇编语言及程序设计.....	312	思考题和习题四.....	368
一、6502汇编语言的语句格式.....	312	制作练习四.....	370
二、伪指令.....	313	1. EPROM手动编程器.....	370
三、程序设计举例.....	315	2. 音乐集成电路.....	371
4.9 实验 6522 I/O接口.....	323	附录.....	373
1. 结构和引脚.....	323	参考文献.....	393
2. 实验电路.....	325		

第1章 二极管及其应用

本章首先从实验开始我们的课程——测出二极管的电压与电流之间的关系，即二极管的伏安特性，然后以此为中心，一方面用半导体物理知识对二极管的伏安特性进行解释，另一方面介绍二极管的伏安特性在整流电路和数字脉冲电路中的应用。

1.1 实验 二极管伏安特性的测量

本节利用逐点测量法实际测出二极管的伏安特性曲线，以建立关于二极管伏安特性的感性知识，为下一节的理论分析打下基础，并进一步熟悉万用表的使用方法。

一、实验原理

在中学物理课程中，我们已经学过二极管的基本原理和特性。大家已经知道，二极管具有单向导电性。图1.1-1为演示实验接线图。当给二极管外加正向电压[二极管正极接高电位，负极接低电位，如图1.1-1(a)所示]时，二极管导通，因而灯泡发亮；当外加反向电压[二极管正极接低电位，负极接高电位，如图1.1-1(b)所示]时，二极管截止，因而灯泡不亮。这就是说，二极管的导电特性与接在它两端的外加电压有关。我们将一个元件上的外加电压 V 和在 V 的作用下流过这个元件的电流 I 之间的关系，叫做这个元件的伏安特性。由此不

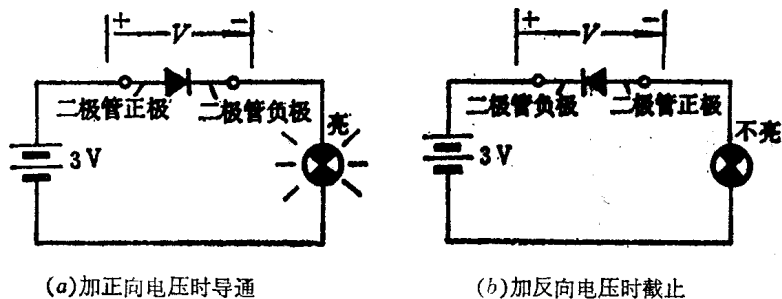


图1.1-1 二极管单向导电性的演示

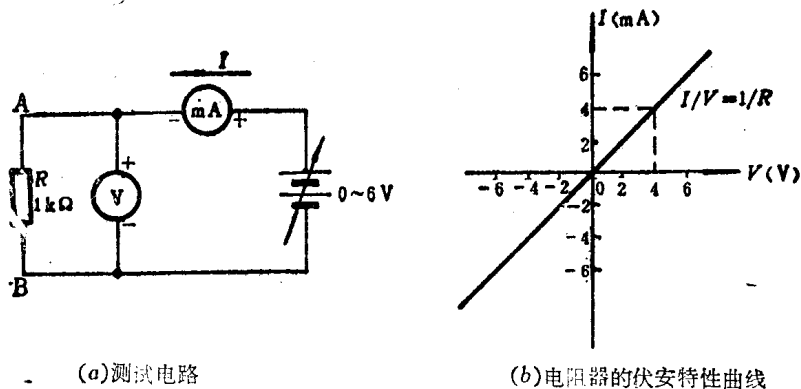


图1.1-2 电阻器的伏安特性的测量方法

难想到, 电阻器 R 的伏安特性就是欧姆定律 $I=V/R$ 所表示的关系。利用图1.1-2(a)所示电路可以测量电阻器 R 的伏安特性。将其测量结果一一标记在 $V \sim I$ 直角坐标系内, 就可以得到一条如图1.1-2(b)所示的直线, 它的斜率等于该电阻器的电阻值的倒数 $1/R$ 。由于电阻器的伏安特性曲线是一条直线, 因而电阻器被叫做线性元件。

而二极管是一种非线性元件, 它的伏安特性曲线不是一条直线, 而是如图1.1-3那样, 是一条曲线。

由图1.1-3可见, 当加在二极管上的正向电压 V 由零开始增大时, 流过二极管的电流 I 在一段时间内 (即曲线上的0A段) 几乎为零, 这时二极管相当于一个大的电阻, 这段曲线

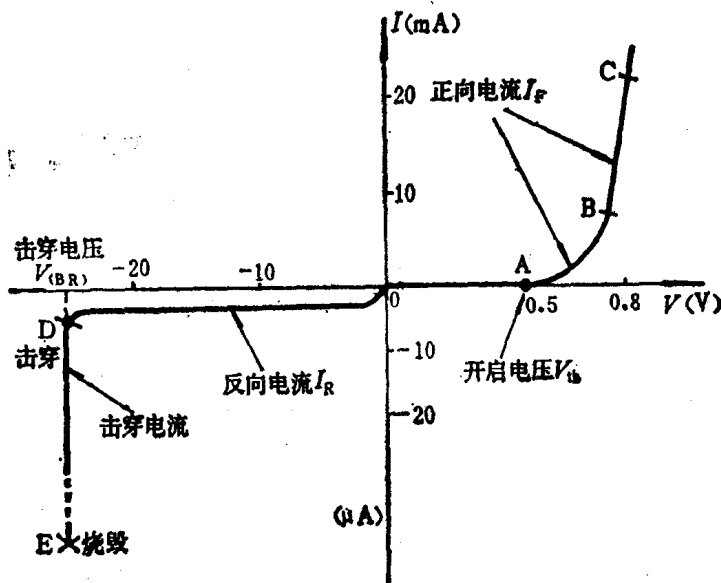


图1.1-3 二极管2CP10的伏安特性曲线
(图中为清楚起见, 向电流比例尺放大, 反向电压比例尺缩小)

0A 叫做未导通区 (或死区)。只有在 V 超过某值 V_{th} 后, I 才开始增长。 V_{th} 叫做二极管的开启电压 (或阈值电压、死区电压)。一般硅二极管 $V_{th} \approx 0.5V$, 锗二极管 $V_{th} \approx 0.1V$ 。当 $V > V_{th}$ 且继续增加时, I 随 V 的线性增加而呈非线性地增长, 曲线近似为指数曲线。这时二极管相当于一个可变电阻, 随着 V 的增加而阻值迅速变小, 这段曲线AB叫做非线性区。当 V 继续增加时, 曲线近似为直线, 这时二极管相当于一个小电阻, 其电压和电流的关系近似符合欧姆定律。这段曲线BC叫做线性区。二极管在正向电压作用下形成的电流叫做正向电流, 记作 I_F 。

当给二极管外加反向电压 V 时, 二极管几乎不导通, 相当于一个阻值非常大的电阻。这段曲线OD叫做反向截止区。这时流过二极管的微弱电流只有微安级, 叫做反向电流, 记作 I_R 。由于反向电流 I_R 在一定范围内不随外加电压变化, 因而又叫做反向饱和电流。当反向电压 V 增大到某一值 $V_{(BR)}$ 时, 二极管的电流 I_R 突然急剧增大, 这段曲线DE叫做反向击穿区。这时的反向电压 $V_{(BR)}$ 叫做击穿电压, 对应的电流 $I_{(BR)}$ 叫做击穿电流。当流过二极管的电流 I_R 超过E点时, 二极管被烧毁。

二极管的特性参数大都反映在它的伏安特性曲线上。这条曲线上的每一段都有不同的应用, 这将在以后逐步介绍。

二极管的伏安特性曲线可以用多种方法测量出来。例如，用JT-1型晶体管特性测试仪测量二极管2CP10，测得的正向特性和反向特性如图1.1-4所示。

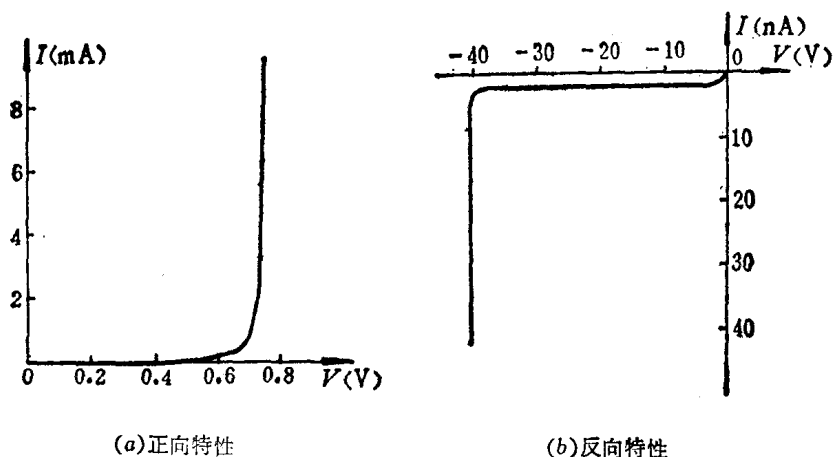


图1.1-4 2CP10伏安特性曲线

在本节，我们采用逐点测量法来测量二极管的伏安特性。实验电路如图1.1-5所示。图中，电位器 R_w 用来调节二极管上所加电压的大小， R (510Ω) 是用于保护二极管的限流电阻，避免流过二极管的电流过大而烧坏二极管，V表和mA表（或 μA 表）分别用来测量二极管的电压和电流值；D是被测二极管，可选取2CP10型管。

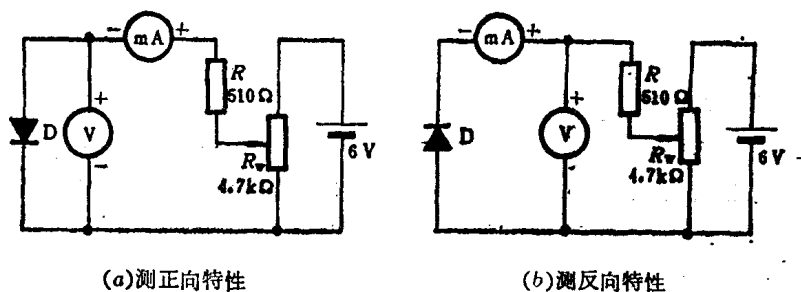


图1.1-5 测量二极管伏安特性的实验电路

二、实验内容

1. 测绘正向伏安特性曲线

按图1.1-5(a)所示接好实验电路。调节电位器 R_w ，使加在二极管D上的电压 V 由0V逐渐增加，因而流过二极管的电流 I 也由零逐渐增长。测出当 $I=0, 0.005\text{mA}, 0.01\text{mA}, \dots, 10\text{mA}$ 时对应的 V 值，填入表1.1-1中。

表1.1-1

$V(\text{V})$											
$I(\text{mA})$	0	0.005	0.01	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10

然后将表1.1-1中 V 和 I 的对应数值，分别用点标在图1.1-6所示的 $V \sim I$ 直角坐标系中，并将这些点用圆滑的曲线连接起来，就画成了二极管的正向伏安特性曲线。

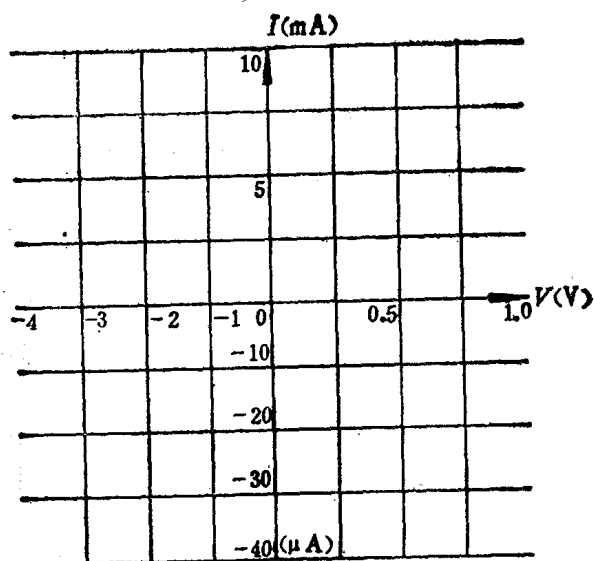


图1.1-6 二极管的伏安特性曲线测量记录图

2. 测绘反向伏安特性曲线

按图1.1-5(b)所示接好电路, 用同样的方法调节 R_w , 测出对应的 $V \sim I$ 值, 填在表1.1-2中, 并将表1.1-2中的对应数值标在图1.1-6中, 就可画出二极管的反向伏安特性曲线。

表1.1-2

$V(V)$	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6
$I(\mu A)$							

三、实验报告要求

1. 整理实验数据, 在方格纸上画出所测二极管的伏安特性曲线, 并简述其主要特点。
2. 在所测伏安特性曲线上, 标记出二极管的非导通区、非线性区、线性区、反向截止区和开启电压。

3. 思考题

(1) 为什么图1.1-5(b)中的电压表不能象图1.1-5(a)那样并接在被测二极管D的两端? 试通过实验加以说明。

(2) 表1.1-1中的测量点为什么取不均匀间隔? 为什么先给定电流 I 的值, 再测量对应的电压 V 值, 而不是先给定 V 的值再去测 I 的对应值?

(3) 如何判别二极管的正极和负极?

四、实验器材

1. 直流稳压电源1台或6V电池1组;
2. 万用表(MF-10型)2块;
3. 2CP10二极管1个, 电位器4.7k Ω 1个, 电阻510 Ω 1个。

1.2 二极管伏安特性的分析

二极管具有自己独特的伏安特性,是由其内部物质结构的特殊性所决定的。二极管由半导体材料做成,下面从半导体的导电机理谈起。

一、半导体中的载流子

导电能力介于金属导体和绝缘体之间的物质叫做半导体,其电阻率约在 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 之间。目前用于制作晶体管的材料主要有锗(Ge)、硅(Si)和砷化镓(GaAs)等。

硅、锗的晶体结构和碳(金刚石)的晶体结构是相同的,叫做**金刚石结构**,其立体模型如图1.2-1所示。

硅、锗都属于元素周期表中的第Ⅳ族,原子最外层轨道上的电子即**价电子**的个数是4。在金刚石结构中,每个原子都如图1.2-2那样和邻近的4个原子间组成**共价键**。同是在第Ⅳ族

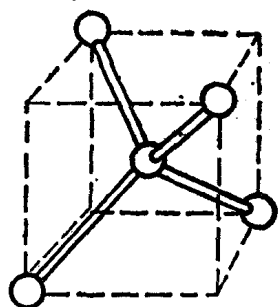


图1.2-1 硅和锗的晶体结构

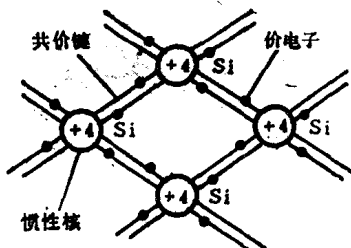


图1.2-2 硅晶体中的价电子

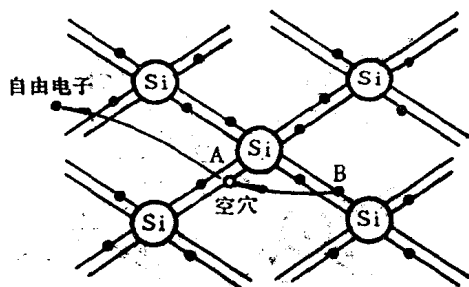


图1.2-3 电子-空穴对

中,原子量小的碳因其原子序数为6,电子分两层绕核旋转,外层电子受核的束缚力很大,因而共价键结合得非常紧,电子不能自由运动,当给它加上电压时,由于没有电子流动,因而不导电,所以是绝缘体;锡和铅,其原子量大,共价键结合得松,在给它加上电压时,自由电子在电压作用下产生定向运动而形成电流,因而是良导体;而硅和锗,由于其原子序数介于碳和锡、铅之间(硅的原子序数为14,锗为32),因而表现出下述的半导体性质。

在硅、锗晶体的温度接近热力学温度零度(-273°C)时,原子之间的价电子被共价键束缚,不能自由移动,因此晶体不导电。但是,当温度升高到室温(20°C)时,由于热运动而使共价键中的某些价电子获得能量,摆脱共价键的束缚变为自由电子而参与导电。另一方面,电子跑出后留下的空位如同自由电子那样也是不稳定的,有夺取邻近价电子形成新空位的倾向。这个新空位再去夺取邻近价电子,重新形成新的空位。这样继续下去,从外观上看来,这种空位就象带正电荷的粒子那样在晶体内部到处流动,如图1.2-3所示。我们把这种空位叫做**空穴**,并且把电子和空穴统称为**载流子**。

在一定的温度下,硅和锗晶体中由热激发而产生的自由电子的浓度和相应产生的空穴的浓度是一定的,因而呈现出一定的电阻率。当温度升高时,电子和空穴的浓度都要增大,因而电阻率变小,这就呈现出半导体对温度的敏感特性。常温下,锗晶体的电阻率约为 $50 \Omega \cdot \text{cm}$,硅的电阻率约为 $100 \text{k}\Omega \cdot \text{cm}$ 。这是由于硅的价电子在第三层绕核旋转,受核的引力较大;而锗的价电子在第四层绕核旋转,离核较远,受核的引力较小,受热激发后,更易于脱离共

价键，因而呈现的电阻率较硅为小。

在外加电压时，晶体内的载流子受到外加电场的作用而产生定向运动，电子将沿着与电场相反的方向作定向移动而形成电子电流，空穴将沿着电场方向移动而形成空穴电流。这两股电流的合成，就是流过半导体晶体的电流。

二、N型半导体和P型半导体

上面分析的是纯单晶半导体。在这种半导体中虽然具有电子和空穴两种载流子，但它们的总数很少，导电能力较差，其用处不大。人们发现，如果在纯单晶半导体中掺入少量有用的杂质，将会大大改变半导体的导电特性，并能用它做成各种有重要应用的半导体器件。

1. N型半导体

如果在硅单晶中掺入磷、锑等五价元素，由于磷原子的数目比硅原子少得多，因此整个晶体结构基本不变，只是少量的磷原子取代了晶体中部分的硅原子，如图1.2-4所示。磷原子和硅原子组成共价键后，磷原子外层的五个电子中，四个电子组成了共价键，多出的一个电

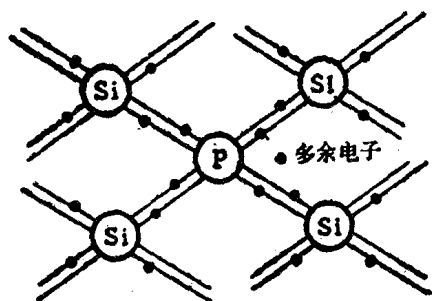


图1.2-4 N型半导体

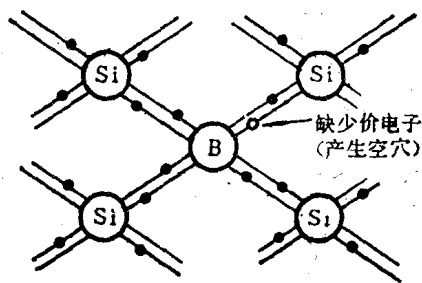


图1.2-5 P型半导体

子受原子核的束缚力很小，因而很容易成为自由电子。每个磷原子都能提供一个自由电子，因而使硅单晶中自由电子的数量大大增加。在这种半导体中，自由电子的浓度比起由于热运动产生的空穴的浓度大得多，因此外加电场时，主要靠电子导电，所以叫做电子型半导体，简称为N型半导体。N型半导体中电子是多数载流子，空穴是少数载流子。

2. P型半导体

如果在硅单晶中掺入三价的硼原子，则硼原子取代了硅单晶中的硅原子，如图1.2-5所示。硼原子只有三个价电子，它只能和相邻硅原子组成三个共价键，而在第四个共价键上留下了一个空位，即空穴。由此而使硅晶体中的空穴浓度大大增加，它比起由于热运动产生的电子的浓度大得多，因此外加电场时，主要靠空穴导电，所以叫做空穴型半导体，简称P型半导体。P型半导体中空穴是多数载流子，而电子是少数载流子。

应该指出，无论是P型还是N型半导体，从整体来说都是中性不带电的。因为我们 是把中性的杂质掺到了中性的纯净半导体中去的，在这个过程中，既没有产生任何电荷，也没有消失任何电荷。

三、PN结

1. 漂移电流和扩散电流

在半导体内，使载流子产生定向运动因而形成电流的原因有两种。

半导体外加电场时,载流子在电场作用下产生定向运动而形成电流,我们将这种电流叫做**漂移电流**。空穴漂移电流与电场同方向,电子漂移电流与电场反方向。

如果半导体内载流子的浓度分布不均匀,则浓度大的地方的载流子会自动向浓度小的地方移动,因而形成电流,以趋向于浓度的均匀分布。我们将载流子由于浓度差而产生的电流叫做**扩散电流**。扩散电流的方向是由高浓度指向低浓度。

2. PN结的形成

如果将一块半导体的一边做成P型的,而将另一边做成N型的,则在P型和N型半导体的交界处产生了一系列物理变化。

(1) 由于载流子的扩散运动而产生了结电场 E 。

我们知道,P型半导体内的空穴浓度大,而N型半导体内的电子浓度大,于是,P区内靠近交界面的空穴就会渗过交界面而向N区扩散,而N区内靠近交界面的电子也会渗过交界面而向P区扩散,如图1.2-6(a)所示。

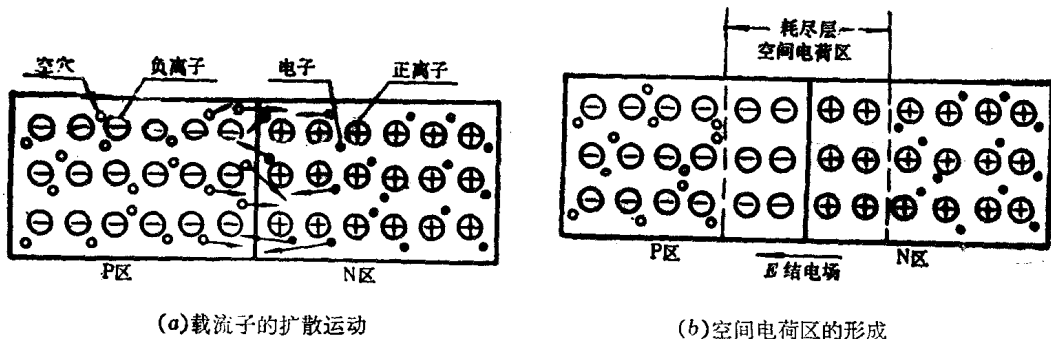


图1.2-6 扩散形成结电场

本来,在扩散前,P型和N型半导体都是中性不带电的。当P区内靠近交界面处的空穴向N区扩散后,将留下不能移动的负离子;同样,N区内的电子向P区扩散后,将留下不能移动的正离子,如图1.2-6(b)所示。正、负离子在交界面两边各形成了一个带电薄层,靠P区一侧的薄层带负电,靠N区一侧的薄层带正电。我们将这两个带电的薄层形成的空间电荷区叫做**PN结**,或称作**阻挡层**(也称为**耗尽层**,因为在该层内载流子都消耗殆尽)。耗尽层是很薄的,约数十微米。我们还将空间电荷区的两个带电薄层所形成的电场叫做**结电场**,记作 E 。它的方向是由N区指向P区,如图1.2-6(b)所示。

(2) 在结电场 E 的作用下又产生了漂移运动。

由于结电场的方向是由N区指向P区,因此它正好与载流子扩散的方向相反。这样,结电场 E 除了具有阻止扩散运动继续进行的作用以外,它还会引起PN结内部新的运动:它将P区的少数载流子即电子和由N区扩散过来的一部分电子驱到N区去,同时,它又将N区的少数载流子即空穴和由P区扩散过来的一部分空穴驱到P区去。这就是说,在结电场 E 的作用下又产生了漂移运动。

(3) 扩散和漂移在一定条件下达到一定的动态平衡,PN结处于相对稳定状态。

PN结刚产生时,扩散运动占优势。但随着扩散的进行,PN结越来越厚,结电场 E 也越来越强,漂移运动也越来越强。当扩散和漂移两种运动达到动态平衡时,PN结不再变厚,进入相对稳定状态。

当然,这种相对稳定状态是在一定的条件下形成的,一旦外界条件(例如温度、光照、

外加电压等) 发生变化, 则PN结的动态平衡也会发生变化。

3. PN结加正向电压

将电源正极接P, 负极接N, 这种接法叫做正向接法, 如图1.2-7所示。这时外加电压在PN结上产生一个外加电场 E' , 它与结电场 E 方向相反, 因而 E 被削弱, 使耗尽层(空间电荷区)的宽度减小, 结电场 E 对扩散运动的阻碍作用减小。N区中的电子和P区中的空穴都能够形成更大的扩散电流。总之, 正向接法时使PN结导通, 导通时的正向电流 I_F 较大, 体现为结电阻较小。

下面对正向电流的形成过程稍作解释:

当 E 被 E' 削弱以后, N区多子(电子)向P区的扩散加强, 在外电源作用下, 导线上将产生电子电流, 电源负极不断提供电子向N区补充。电子扩散进入P区后, 逐渐向P区左边的纵深地区继续扩散, 如图1.2-8所示, 因而形成电子扩散电流; 同时, 电子在P区的扩

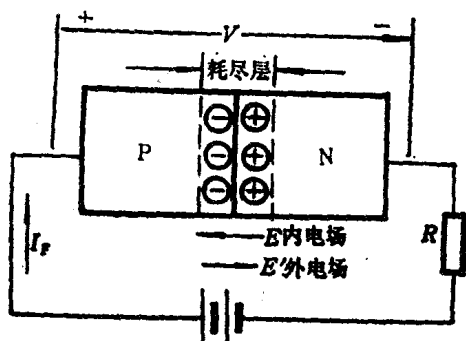


图1.2-7 外加正向电压

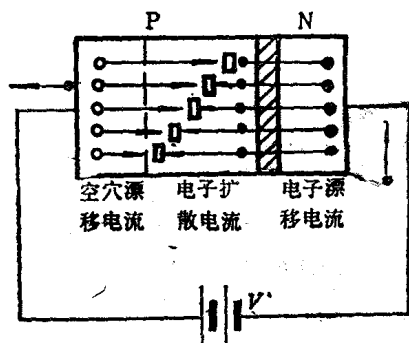


图1.2-8 I_F 的流通过程

散过程中又不断与P区内的多子(空穴)复合。越向左扩散, 电子的浓度越小, 在P区某一深度处, 电子浓度达到原来平衡状态时的浓度。可见由N区注入P区的电子浓度的分布是不均匀的。由于外来电子在P区中的积累, 就要吸引附近的空穴进行复合, 被吸走的空穴又从左边得到补充, 这样依次向左边索取空穴, 在P区内形成空穴漂移电流, 而且最后使得P区左边的边缘出现负离子, 它与外电源正极形成电场, 使左边缘区域内的原子激发产生电子-空穴对, 空穴即补充了原来移走的空穴, 而电子在外电场的作用下, 以自由电子的形式进入外导线, 形成了导线中的电子电流。同样, 还有P区向N区注入空穴的过程而产生空穴扩散电流。 I_F 就是在正向电压作用下所产生的电子扩散电流和空穴扩散电流的合成。

4. PN结加反向电压

当电源正极接N、负极接P时, 这种接法叫做反向接法, 如图1.2-9所示。这时外电场 E' 与结电场 E 方向相同, 耗尽层(空间电荷区)加厚, 使扩散更难进行, 而漂移电流基本不变, 但很小, 只有微安级。由于温度不变时少数载流子的浓度不变, 因而漂移电流在一定范围内不随外加电压而变化, 叫做反向饱和电流, 记作 I_R 。由于 I_R 很小, 可以认为PN结不导电。总之, 反向接法时使PN结截止。

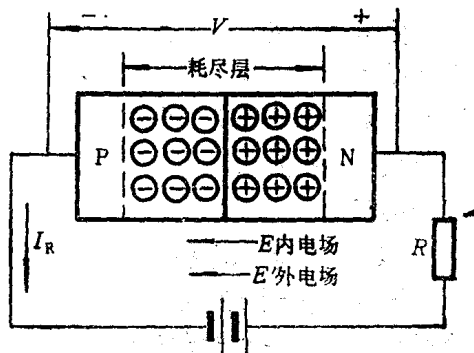


图1.2-9 外加反向电压

四、二极管的结构和特性方程

二极管按制造方法可分为点触型、面结型和平面型等几种，如图1.2-10所示。

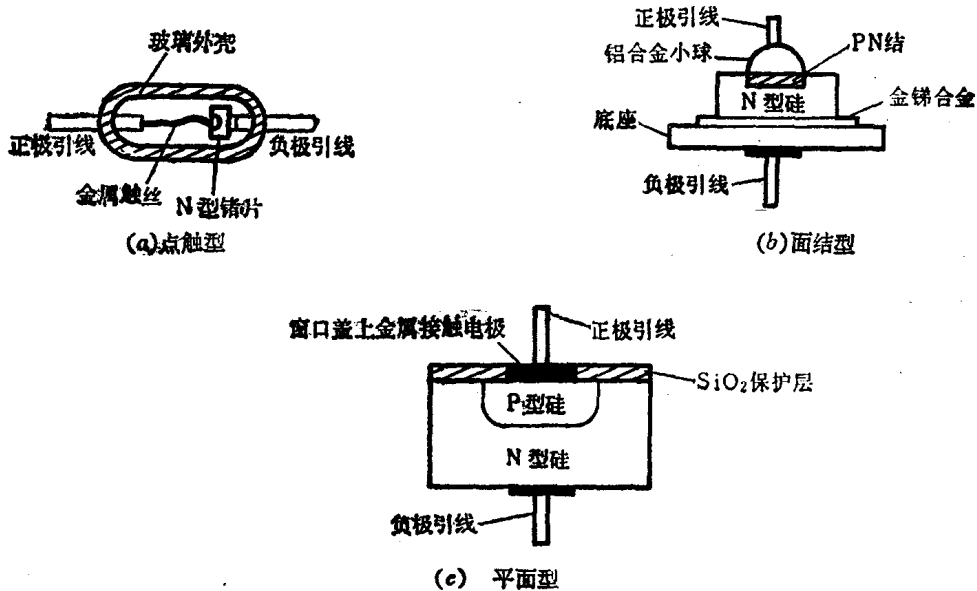


图1.2-10 二极管的结构

点触型是用三价的金属触丝与N型锗片接触时高压放电，三价金属原子掺入锗片形成P型区，作成PN结。它的特点是结面积小，因而结电容小，适用于高频（几百兆赫）工作。

面结型是在高温下让铝合金小球在N型硅表面上熔化，渗入硅片内形成P型区，作成PN结。它的结面积大，允许通过较大电流，常作整流管用，但它的结电容大，只适用于低频。

平面型二极管是先在N型硅片上高温形成二氧化硅保护层，再在保护层上开一个窗口，在高温下通过窗口对内进行硼的气态扩散形成P型区，作成二极管。其结面积可以控制：当结面积做得较大时，可通过较大电流，适用于大功率整流；当结面积做得较小时，结电容小，常在脉冲数字电路中作开关管用。

根据理论分析^①，流过PN结的电流 I 与其端电压 V 的关系可由下式表示

$$I = I_R (e^{\frac{V}{V_T}} - 1) = I_R (e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (1.2-1)$$

式中， I_R 是反向饱和电流， $V_T = kT/q$ 是温度的电压当量，其中波耳兹曼常数 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ，电子的电荷量 $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ ，则 $V_T = T/11600$ ，在常温（ $T = 300 \text{K}$ ）时 $V_T \approx 26 \text{mV}$ 。

式(1.2-1)是理想二极管的伏安特性，叫做二极管的特性方程。它可以综合二极管伏安特性曲线上的各种情况。例如，当PN结加正向电压，且 V 大于开启电压 V_{th} 时，显然有 $V \gg V_T = 26 \text{mV}$ ，则式中的 $e^{V/V_T} \gg 1$ ，第二项可以略去，因而 I 与 V 成指数关系： $I = I_R e^{V/V_T}$ 。这就反映了图1.1-3中的AC段曲线。其中，OA段是因正向电压比较小（ $V < V_{th} \approx 0.5 \text{V}$ ），它所形成的外电场 E' 不足以克服结电场 E 对载流子扩散运动的阻碍作用，因而正向电流很

① 见参考文献[1]上册，201页。