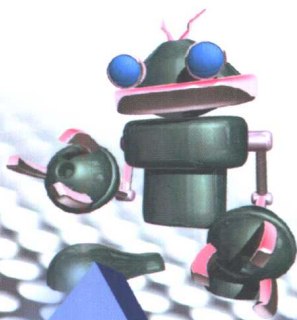
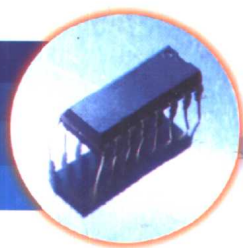


///

高等学校电工电子系列教材



模拟

电子技术基础

王济浩 编著

TN710

21

模 拟 电子技术基础

王济浩 编著

山东科学技术出版社

模拟电子技术基础

王济浩 编著

出版者: 山东科学技术出版社

地址: 济南市玉函路 16 号

邮编: 250002 电话: (0531)2065109

网址: www.lkj.com.cn

电子邮件: sdkj@jn-public.sd.cninfo.net

发行者: 山东科学技术出版社

地址: 济南市玉函路 16 号

邮编: 250002 电话: (0531)2020432

印刷者: 山东新华印刷厂

地址: 济南市胜利大街 56 号

邮编: 250001 电话: (0531)2059512

开本: 787mm × 1092mm 1/16

印张: 19.75

字数: 438 千

版次: 2002 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

印数: 1 - 3000

ISBN 7 - 5331 - 3091 - X TP·101

定价: 28.00 元

前 言

随着信息时代的到来和不断深入,电子技术正以前所未有的速度向前发展,并且日益广泛地渗透到科学技术和工业生产的各个领域,为国民经济的发展带来了新的生机与活力。

近些年来,新的电子器件不断涌现,电子电路的集成度越来越高,系统的规模越来越大。特别是计算机技术的发展,推动了电子设计自动化(EDA)技术的进步。电流模电路、电子电路的计算机仿真、可编程逻辑器件和新近出现的可编程模拟器件等新的器件和新的电路理论及分析方法的出现,为电子技术的发展提供了新的热点,也为电子技术的教学提出了新的课题。

“电子技术基础”是工科院校电气信息类专业的一门重要的技术基础课,是研究各种电子器件、电路及其应用的学科,该课程对于学习微机类、测量类、电力电子类及控制类的课程有着重要的影响。

正是为了适应21世纪信息时代的要求,为了达到提高学生创新能力和实践能力的目的,我们结合多年的教学经验,编写了《模拟电子技术基础》和《数字电子技术基础》两本教材。这两本教材具有以下特点:

1. 在保证电子技术传统内容的基础上,增加了许多新的电子器件的内容。如:新型的电流型运算放大器、跨导型运算放大器、VMOS器件、ispPLD器件及ispPAC器件等内容,以反映电子技术的最新发展,使读者能够尽快接触新的东西。

2. 为了便于学习“电子电路的计算仿真技术”的内容,在本书中加强了各种半导体器件和集成运算放大器的模型的内容,以便读者能够从更高的层次上去把握电子电路的分析方法。

3. 对于电路问题的分析,力求简化推导过程,突出物理概念的讲述,为培养学生分析问题和解决问题的能力创造条件。使读者不但能够学会定量计算的方法,而且能够掌握定性分析的技巧,为以后学习专业课程打下基础。

4. 以集成电路为主,适当介绍分立元件的内容。对于集成电路的介绍,采用了“淡化中频,加强周边”的原则,即,简化集成电路内部结构及工作原理的分析,着重介绍集成电路的应用方法以及与应用有关的内部电路问题。

本书是在总结山东大学控制科学与工程学院电子新技术应用研究所多年教学经验的基础上完成的,编写过程中得到了研究所全体同志的大力支持。特别是周常森、范爱平和高宁三位老师审阅并提出了许多宝贵意见,研究生郭强作了大量的绘图和文字录入工作,在此一并表示衷心的感谢。

本书可作为高等院校电气、电子、计算机及自动化类专业的教材,也可供与从事电子技术工作的工程技术人员参考。

由于作者水平所限,书中难免存在许多缺点错误,恳请广大读者批评指正。

编者

目 录

第一章 半导体器件基础.....	1
1.1 半导体的基础知识.....	1
1.1.1 本征半导体.....	1
1.1.2 杂质半导体.....	3
1.1.3 PN结及其单向导电性.....	4
1.1.4 PN结的击穿特性.....	7
1.1.5 PN结的电容效应.....	8
1.2 半导体二极管.....	9
1.2.1 半导体二极管的特性曲线.....	9
1.2.2 二极管的主要参数.....	10
1.2.3 半导体二极管的模型.....	11
1.2.4 稳压二极管.....	14
1.3 半导体三极管.....	15
1.3.1 BJT的结构.....	15
1.3.2 BJT的内部工作原理.....	16
1.3.3 BJT的特性曲线.....	19
1.3.4 BJT的主要参数.....	22
1.4 BJT模型.....	25
1.4.1 埃伯斯-摩尔 (Ebers-Moll) 模型.....	25
1.4.2 共射低频h参数模型.....	27
1.5 场效应管.....	29
1.5.1 绝缘栅型场效应管.....	29
1.5.2 结型场效应管.....	34
1.5.3 FET的主要参数.....	37
1.5.4 FET的特点及使用注意事项.....	38
1.5.5 FET模型.....	39
本章小结.....	40
习 题.....	41
第二章 基本放大电路.....	45
2.1 放大电路的一般表示方法及其性能指标.....	45
2.1.1 放大电路的一般表示方法.....	45
2.1.2 放大电路的性能指标.....	47
2.2 单管共射放大电路的工作原理.....	50
2.2.1 单管共射放大电路的结构及各元件的作用.....	50
2.2.2 单管放大电路的工作原理.....	52

2.2.3	放大电路中常用物理量的表示方法	54
2.3	放大电路的图解分析法	54
2.3.1	放大电路的静态分析	54
2.3.2	放大电路的动态分析	56
2.4	放大电路的模型分析法	58
2.4.1	BJT的直流模型和放大电路的静态分析	58
2.4.2	BJT的交流小信号模型及放大电路的交流小信号等效电路	59
2.4.3	电路的动态分析	60
2.4.4	静态工作点的稳定	62
2.5	共集和共基放大电路及BJT电流源电路	64
2.5.1	共集电极放大电路	65
2.5.2	共基极放大电路	68
2.5.3	BJT电流源电路	70
2.6	场效应管放大电路	71
2.6.1	场效应管放大电路的静态偏置	71
2.6.2	场效应管的交流小信号模型	73
2.6.3	场效应管放大电路	74
2.7	多级放大电路	77
2.7.1	多级放大电路的耦合方式	78
2.7.2	多级放大电路的分析方法	79
2.8	BJT放大电路的频率响应	81
2.8.1	无源RC网络的频率响应	82
2.8.2	BJT的混合 π 模型	87
2.8.3	电容耦合共射放大电路的频率响应	91
本章小结		99
习 题		100
第三章	集成运算放大器	106
3.1	差动放大电路	106
3.1.1	集成电路的工艺特点	106
3.1.2	直流放大器的零点漂移问题	107
3.1.3	差动放大电路的工作原理	107
3.1.4	差动放大电路的输入输出方式	111
3.1.5	差动放大电路的改进	113
3.2	集成运算放大器中的单元电路	114
3.2.1	电流源电路	114
3.2.2	差动输入级	117
3.2.3	输出级	119
3.3	集成运放简介	120
3.3.1	集成运放的总体结构	120

3.3.2	BJT集成运放F007.....	121
3.3.3	BiCMOS集成运放F3130.....	123
3.4	集成运算放大器的主要参数.....	124
3.4.1	输入失调参数.....	124
3.4.2	差模特性参数.....	125
3.4.3	共模特性参数.....	126
3.4.4	动态参数.....	126
3.4.5	电源特性参数.....	126
3.5	特殊集成运算放大器.....	127
3.6	集成运算放大器的模型.....	131
3.6.1	集成运算放大器的电压传输特性.....	131
3.6.2	理想运放模型.....	132
3.6.3	实际集成运放的模型.....	133
3.7	电流模电路与电流型运放.....	134
3.7.1	跨导线性(Translinear TL)的基本概念.....	134
3.7.2	跨导线性(TL)回路原理.....	134
3.7.3	电流放大器及电流模电路.....	136
3.7.4	电流型集成运放.....	137
本 章 小 结		139
习 题		139
第四章	反馈放大电路.....	143
4.1	反馈的基本概念.....	143
4.1.1	反馈的概念.....	143
4.1.2	负反馈放大器的方框图.....	144
4.1.3	负反馈放大器的类型及判别.....	145
4.2	负反馈放大器的四种类型.....	147
4.2.1	电压串联负反馈.....	147
4.2.2	电压并联负反馈.....	148
4.2.3	电流并联负反馈.....	149
4.2.4	电流串联负反馈.....	151
4.3	负反馈对放大器性能的影响.....	152
4.3.1	提高放大倍数的稳定性.....	152
4.3.2	改善放大器的非线性失真.....	152
4.3.3	扩展放大器的通频带.....	153
4.3.4	负反馈对输入电阻和输出电阻的影响.....	154
4.4	负反馈放大器的计算.....	155
4.4.1	估算的依据.....	156
4.4.2	深负反馈放大电路的近似估算.....	156
4.5	负反馈放大器的自激振荡及消除方法.....	163

4.5.1	产生自激振荡的原因及条件	163
4.5.2	稳定判据及稳定裕度	165
4.5.3	放大器的稳定性分析	165
4.5.3	自激振荡的消除方法	167
本章小结		170
习 题		170
第五章	信号的运算与处理电路	177
5.1	比例电路	177
5.1.1	集成运放的两个工作区域	177
5.1.2	反相比例电路	178
5.1.3	同相比例电路	179
5.1.4	实际运放比例电路的误差	180
5.2	基本运算电路	184
5.2.1	加法运算电路	184
5.2.2	减法运算电路	185
5.2.3	积分和微分运算电路	187
5.3	对数和反对数运算电路	191
5.3.1	对数运算电路	191
5.3.2	反对数运算电路	192
5.3.3	对数反对数型模拟乘法器	192
5.4	集成模拟乘法器	193
5.4.1	变跨导模拟乘法器	193
5.4.2	双平衡模拟乘法器	195
5.4.3	模拟乘法器的应用	196
5.5	有源滤波器	198
5.5.1	低通有源滤波器	200
5.5.2	高通有源滤波器	203
5.5.3	有源带通滤波器	204
5.5.4	有源带阻滤波器	206
5.6	开关电容滤波器	207
5.6.1	开关电容等效电阻	208
5.6.2	开关电容积分器	209
5.6.3	开关电容滤波器	209
本章小结		210
习 题		211
第六章	波形的产生与变换电路	219
6.1	正弦波振荡器的基本原理	219
6.1.1	产生正弦波自激振荡的条件	219
6.1.2	一般正弦波振荡器的工作原理	221

6.1.3 正弦波振荡电路的分析步骤.....	221
6.2 RC振荡电路	222
6.2.1 RC串并联网络的选频特性.....	222
6.2.2 RC桥式振荡电路的工作原理.....	224
6.2.3 RC移相式振荡电路.....	226
6.3 LC振荡电路.....	227
6.3.1 LC并联谐振回路的选频特性.....	227
6.3.2 变压器反馈式LC振荡电路	229
6.3.3 三点式LC振荡电路.....	230
6.4 石英晶体振荡电路.....	233
6.4.1 石英晶体.....	234
6.4.2 石英晶体振荡电路	236
6.5 比较器	237
6.5.1 单门限比较器	237
6.5.2 迟滞比较器.....	238
6.6 方波发生器.....	239
6.7 三角波及锯齿波信号发生器	241
本章小结	243
习 题	244
第七章 功率电子电路	250
7.1 概 述	250
7.1.1 功率放大器的特点	250
7.1.2 甲类功率放大器的静态功耗.....	251
7.1.3 甲类功率放大器的动态功耗.....	251
7.1.4 甲类功率放大器的效率	252
7.1.5 BJT的工作状态.....	253
7.2 乙类功率放大器.....	253
7.2.1 乙类功率放大器的工作原理.....	254
7.2.2 乙类功率放大器的功率计算.....	254
7.2.3 乙类功率放大器的最大管耗.....	255
7.3 甲乙类功率放大器.....	255
7.3.1 甲乙类功率放大器	256
7.3.2 带前置放大级的功率放大器.....	256
7.3.3 BTL电路	259
7.4 集成功率放大器.....	260
7.5 VMOS管功率放大器	261
本章小结	263
习 题	264
第八章 直流稳压电源	269

8.1 整流与滤波电路	269
8.1.1 单相桥式整流电路	269
8.1.2 电容滤波电路	271
8.1.3 其他滤波电路	273
8.2 串联式稳压电路	274
8.2.1 串联式稳压电路的总体结构	274
8.2.2 稳压电路的性能指标	275
8.2.3 基准电压电路	275
8.3 集成串联式稳压电路	277
8.3.1 三端固定式集成稳压器	277
8.3.2 三端固定式稳压器的使用	280
8.3.3 三端可调式稳压器	281
8.4 集成开关式稳压电路	283
本章小结	285
习 题	285
第九章 在线可编程模拟电路	290
9.1 在系统可编程模拟电路的结构	290
9.1.1 在系统可编程模拟电路概述	290
9.1.2 ispPAC10的结构	291
9.1.3 ispPAC20的结构	292
9.1.4 ispPAC80	294
9.2 PAC块的工作原理	294
9.2.1 PAC块的内部结构	295
9.2.2 PAC块的工作原理	295
9.3 PAC的接口电路	297
9.3.1 接口电路	297
9.3.2 输出接口电路	298
9.3.3 VREFout 缓冲电路	298
9.4 ispPAC的增益调整方法	298
9.4.1 通用增益设置	299
9.4.2 分数增益的设置法	301
9.5 ispPAC应用举例	302
9.5.1 ispPAC温度监控电路	302
9.5.2 ispPAC器件的滤波器设计	303
本章小结	305
习 题	305
参 考 文 献	306

第一章 半导体器件基础

电子技术是当代发展最为迅速的学科之一。它的应用已经广泛深入地渗透到各个领域，成为科学技术的一个重要组成部分。电子技术的发展，得益于半导体技术的不断进步。半导体器件，特别是集成电路的更新换代，使得电子设备在功能、性能、品种、价格等方面不断发生新的变化，推动了多个领域的技术发展。

本章将简要地介绍有关半导体的基本知识。在此基础上，进一步讨论半导体二极管、半导体三极管以及场效应管的结构和工作原理。

1.1 半导体的基础知识

在物理学中，按照材料导电的能力，可以将它们分为导体和绝缘体两大类。导体中有大量的自由电子，加上电场后，自由电子运动，形成电流。因此，导体的电阻率很小，导电能力很强。绝缘体中自由电子很少，加上电场后，几乎没有电流形成。因此，它的电阻率很大，导电能力很差。还有少数材料的导电能力介于导体和绝缘体之间，被称为半导体。半导体具有一些独特的物理特性。正是这些特性使得半导体在电子技术中大放异彩，发挥了极其巨大的作用。

1.1.1 本征半导体

常用的半导体材料有硅（Si）和锗（Ge），以及化合物砷化钾（GaAs）。硅是其中最常用的一种半导体材料。半导体工业中使用的材料，必须是纯净单一，不含杂质的半导体材料，称为**本征半导体**。这种硅称为本征硅。由于纯净的硅呈现一种晶体结构，所以又称为单晶硅。

本征硅原子的最外层轨道上有四个电子，它们受原子核的束缚力最小，称为**价电子**。元素的许多物理和化学性质都是由这些价电子决定的，其导电能力也与价电子有关。我们在研究半导体的特性时，经常用图 1-1 所示的模型表示半导体材料。其中，写着+4的圆圈表示硅原子核和除价电子之外的其余内层电子，称为**惯性核**。大圆圈表示外层轨道。上面的四个点表示四个价电子。

本征硅的原子排列有序，呈晶体结构。图 1-2 所示是其晶体结构的示意图。图中画的是二维结构，实际上其晶体结构是三维的。在晶体结构中，硅原子之间靠得很近，每个硅原子的价电子不仅受到自身原子核的吸引，而且还受到相邻原子的吸引，使得它们为相邻两个原子所共有，形成了**共有电子对**，称为**共价键结构**。每个硅原子的四个价电子都通过共价键与周围的四个原子发生作用，相互结合，形成整齐有序的晶体结构。



图 1-1 硅原子的简化模型

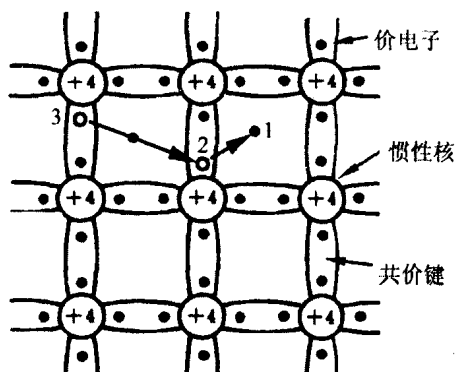


图 1-2 本征硅的共价键结构

在温度 $T=0\text{K}$ 时, 如果没有外界激发, 硅原子的所有价电子都被共价键所束缚, 不会形成自由电子。因此, 称为**束缚电子**。这时, 在硅中是不会形成传导电流的。但是, 与绝缘体材料相比, 半导体材料中的价电子受共价键的束缚力较小, 只要得到较小的能量, 价电子就会摆脱共价键的束缚, 成为自由电子。例如, 在温度 $T=0\text{K}$ 时, 硅原子中的价电子只要获得 1.21eV 的能量, 就会变成自由电子。因此, 在室温条件下, 相当多的价电子都会受到热能激发, 变为自由电子。这种物理现象称为**本征激发**。

一个价电子变为自由电子后, 在共价键上留下了一个空位。这个空位被称为**空穴**。空穴是由自由电子本征激发形成的, 两者总是成对出现, 因此, 叫做**电子空穴对**。硅原子中, 其正负电荷的数量是平衡的。失去一个带负电荷的电子后, 它将多一个正电荷, 因此, 可以说, 空穴是带正电荷的。在半导体材料中, 自由电子和空穴的数量是相等的, 从宏观上看, 它仍然是电中性的。

由于共价键中出现了空穴, 当外电场作用时, 就会有其他相邻共价键的价电子被吸引来填补这个空位, 而在其原有的位置上留下一个空位。如图 1-2 中, 2 处的电子受到本征激发跑到 1 处, 变成自由电子, 在 2 处留下空位。出于同样的原因, 3 处的价电子又跑来填补 2 处的空位, 而在 3 处形成新的空位。这样, 无论从形式上看, 还是从实际效果看, 都好像是空穴在运动一样。空穴运动形成的电流, 实际上是束缚电子运动而形成的电流。

在导体中, 只有自由电子的运动形成传导电流。而在半导体中, 既有带负电荷的自由电子的运动, 又有带正电荷的空穴的运动。两者都可以形成传导电流。这是导体和半导体的一大区别。我们把自由电子和空穴都叫做**载流子**。

在半导体材料中, 不但存在着本征激发, 而且存在着自由电子受原子核的吸引, 重新回到共价键中去的现象。这就好像自由电子和空穴相互结合, 正负电荷彼此抵消了。这种现象称为**复合**。在一定温度下, 半导体材料中的本征激发和复合现象不断发生, 达到动态平衡。在室温条件下, 硅材料中电子空穴对的密度仅为三万亿分之一。当温度升高时, 电子空穴对的数量将会增加。温度每升高 10°C , 电子空穴对的数量就会增加一倍。因此, 温度对半导体材料的导电性能影响很大。

1.1.2 杂质半导体

本征半导体材料本身的载流子浓度很低，导电能力很差。在本征半导体材料中掺入微量的杂质元素，可以使它的导电性能发生明显的变化。掺入杂质元素后的半导体称为**杂质半导体**。按照掺入杂质元素类型的不同，可以分为**N型半导体**和**P型半导体**。

1. N型半导体

图 1-3 所示为 N 型半导体的内部结构示意图。在四价的硅元素中采用扩散工艺，掺入五价的元素磷（或砷、锑等），则磷原子将会代替原来晶格位置上的硅原子。磷原子最外层有五个价电子，其中的四个价电子与周围的四个硅原子的价电子组成共价键。另外还有一个价电子无法组成共价键。这个价电子受到的束缚力很小，只要得到 0.05eV 左右的能量就会变成自由电子。而一般硅原子的价电子变成自由电子则需要得到 1.21eV 的能量，上述过程被称为**杂质电离**。失去一个价电子的磷原子带有一个正电荷，变为正离子。在室温下，N 型半导体中所有的磷原子都会发生杂质电离，使一个价电子变为自由电子。由于杂质元素磷可以提供自由电子，因而称为**施主杂质**。

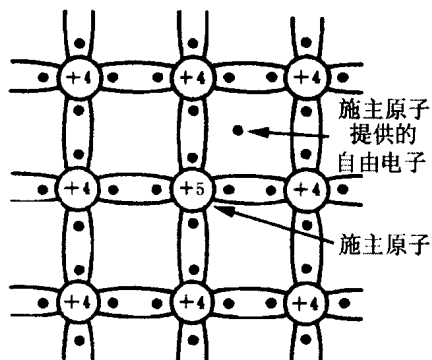


图 1-3 N 型半导体

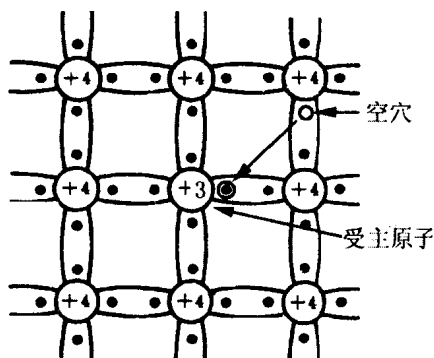


图 1-4 P 型半导体

在这种杂质半导体中，不但有杂质电离产生的自由电子，而且还有本征激发产生的电子空穴对。前者比后者的数量要大的多。因此，在这种杂质半导体中既有自由电子，又有空穴，两种载流子都有。自由电子是由杂质电离和本征激发产生的；而空穴只是由本征激发产生。由于自由电子的数量比空穴大得多，因此，这种半导体被称为**N型半导体**。其中的自由电子被称为**多数载流子**，空穴被称为**少数载流子**。整个半导体材料是电中性的。

2. P型半导体

图 1-4 所示为 P 型半导体的内部结构示意图。在四价的硅元素中掺入三价的元素硼（或镓、铟等），则硼原子将会代替原来晶格位置上的硅原子。硼原子最外层有三个价电子，与周围的四个硅原子组成共价键时，缺少一个价电子，出现了一个空位。相邻共价

键上的价电子受激发就会来填补这个空位。这样，硼原子多了一个电子，变成带负电荷的负离子。而失去价电子的硅原子形成了一个空穴。这也是一个杂质电离的过程。在室温下，P 型半导体中的所有硼原子都会发生杂质电离，产生空穴。由于杂质元素硼可以接收自由电子，因而称为受主杂质。

在这种杂质半导体中，同样既有自由电子，又有空穴。空穴是由杂质电离和本征激发产生的；而自由电子只是由本征激发产生。空穴的数量比自由电子大得多，因此，这种半导体被称为 P 型半导体。其中的空穴被称为多数载流子，自由电子被称为少数载流子。整个半导体材料同样也是电中性的。

在半导体中，少数载流子的浓度与本征激发和复合有关，受温度的影响很大。所以，它对半导体器件的温度特性产生很大影响。

在同一块半导体材料中，既掺入施主杂质，又掺入受主杂质，它到底会成为哪种半导体材料呢？这要由施主杂质和受主杂质的密度决定。哪一种密度高，就成为哪种半导体。由此可见，采用适当的掺杂密度，可以使 P 型和 N 型半导体相互转换。

1.1.3 PN 结及其单向导电性

在本征半导体材料中掺入杂质后，使其载流子浓度大大提高，导电能力大大增强。然而，提高导电能力并不是目的。如果使 P 型半导体和 N 型半导体结合在一起，在其交界处就会形成 PN 结。PN 结的出现包含了一系列极其重要的物理现象，它为现代半导体工业和电子技术的革命性发展奠定了有力的基础。

1. PN 结的形成

采用一定的半导体制造工艺，将一块半导体材料一边做成 P 型半导体，一边做成 N 型半导体，两者之间有一个交界面。在交界面的两边，载流子的浓度是不一样的。在 P 区一边，空穴的浓度很大；在 N 区一边，自由电子的浓度很大。由于两种载流子存在很大的浓度差，它们就要向对方的区域扩散，如图 1-5 所示。

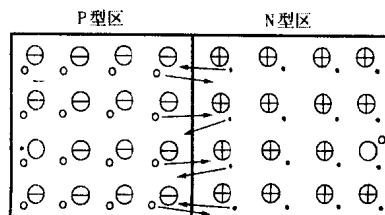


图 1-5 载流子的扩散

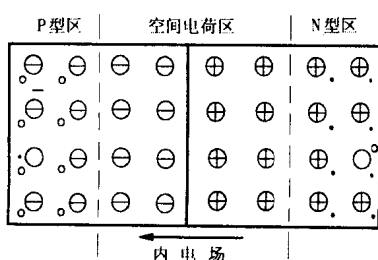


图 1-6 PN 结的形成

这种多数载流子的运动叫做扩散运动。P 区中的空穴扩散到对方区域后，在原来的位置留下了负离子；N 区中的自由电子扩散到对方区域后，也会在原来的位置留下了正离子。扩散到对方区域当中的载流子都变成了少数载流子，它们将会与该区域中的多数载流子复合掉。这样，在两个区域的交界面附近就形成了只有正负离子，没有任何种类

载流子的区域。这个区域被称为**空间电荷区**，又叫做**PN 结**。如图 1-6 所示。

在这个区域中，载流子消耗已尽，所以还叫做**耗尽区**。在耗尽区中，既没有电子，也没有空穴。正负离子本身质量大，而且相互吸引，它们是不能运动的。所以，耗尽区本身的电阻很大。而在耗尽区以外的其他区域中，载流子较多，导电能量较强，电阻较低。

在空间电荷区的 P 区一边，只有负离子；N 区一边，只有正离子。其电荷量相等。这个正负离子区域形成了一个**内电场 E** ，内电场的方向由 N 区指向 P 区。这说明 N 区的电位比 P 区高，一般高零点几伏左右。这个电位差被称为**接触电位差**。电子要从 N 区到 P 区，必须增加足够的能量才行。这相当于上了一个能量高坡，称为**势垒**。因此，空间电荷区又称为**势垒区**。

内电场是由多数载流子的扩散运动形成的。内电场建立后，对载流子的运动产生了两种不同影响。对于两个区域中多数载流子的扩散运动，内电场起到阻碍作用。两个区域还有少数载流子向对方区域运动，这种运动叫做**漂移运动**。内电场对少数载流子的漂移运动起到促进作用。

多数载流子的扩散运动使得空间电荷区的正负离子数量增加，内电场加大。内电场加大的结果阻碍了多数载流子扩散运动的进一步增强。同时，内电场的加大促进了少数载流子的漂移运动。少数载流子漂移时，N 区的少数载流子空穴到达 P 区后，会使 P 区的负离子减少；P 区的少数载流子自由电子到达 N 区后，会使 P 区的正离子减少。正负离子数量的减少使得内电场减弱。内电场的减弱又反过来促进了多数载流子的扩散。由此可见，载流子的扩散运动和漂移运动对内电场及其自身的影响是相互矛盾的，运动到一定程度就会达到动态平衡。这时，空间电荷的数量达到稳定，内电场的大小也稳定下来。从微观上看，虽然仍有载流子流过 PN 结。但其正负电荷的数量是相等的。因此，从宏观上看，没有电流流过 PN 结。

在空间电荷区中，正负离子的数量是相等的。如果 N 区和 P 区的杂质浓度相等，耗尽区在两个区域内的宽度是相等的。这种 PN 结称为**对称 PN 结**。如果杂质浓度不相等，耗尽区在两个区域内的宽度是不相等的。这种 PN 结称为**不对称 PN 结**。

2. PN 结的单向导电性

上述讨论是 PN 结没有外接电场的情况。如果 PN 结外接电压后，将会呈现出单向导电性。这是 PN 结的一个非常重要的特性。

(1) PN 结加正向电压

如图 1-7 所示，当外加直流电压 E_w 的正极接 P 区，负极接 N 区时，我们说 PN 结加了正向电压，也称为**正向偏置**，或**正偏**。这时，外加电场 E_w 与内电场 E 的极性相反。在外加电场 E_w 的作用下，N 区中的多数载流子电子和 P 区中的多数载流子空穴将向对方区域运动。进入空间电荷区后，N 区中的部分多数载流子电子要与正离子中和；P 区中的部分多数载流子空穴要与负离子中和。这会使空间电荷区中正负离子的数量减少，

PN 结变薄, 内电场减弱。内电场减弱后, 原来的动态平衡被打破了。使得多数载流子的扩散运动大大增强, 扩散电流大大增加。

加正向电压后, 少数载流子漂移形成的漂移电流很小。与扩散电流相比是微不足道的。因此。在加正向电压的情况下, 主要是扩散电流流过 PN 结, 称为正向电流 I_F 。正向电流 I_F 的大小主要取决于外加电压 E_W 和电路中的限流电阻 R 。

(2) N 结加反向电压

当外加直流电压 E_W 的正极接 N 区, 负极接 P 区时, 我们说 PN 结外加反向电压, 也称为反向偏置, 或反偏。这时, 外加电场 E_W 与内电场 E 的极性相同, 如图 1-8 所示。在外加电场 E_W 的吸引下, N 区中的多数载流子电子和 P 区中的多数载流子空穴都将远离 PN 结, 使 PN 结中正负离子的数量增加。PN 结变厚, 内电场增强。这时, 多数载流子的扩散运动大为减弱, 扩散电流大大减小。少数载流子的漂移运动有所增强, 漂移电流占了主导地位。漂移电流又称反向电流 I_R , 其方向是与扩散电流相反的。少数载流子是由热激发而产生的, 数量很少, 而且与反向电压的大小基本无关。因此, 在一定温度下, 这个漂移电流基本不变, 被称为反向饱和电流 I_S 。

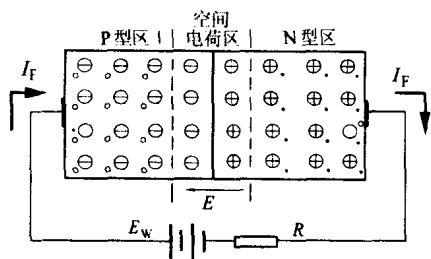


图 1-7 PN 结外加正向电压

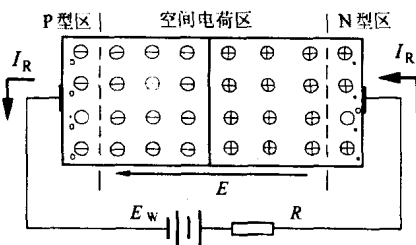


图 1-8 PN 结外加反向电压

综上所述, PN 结正向偏置时, 将会通过较大的正向电流 I_F , 电流的方向是从 P 区流向 N 区, PN 结的等效电阻较小; PN 结反向偏置时, 只有很小的反向电流 I_R , 电流的方向是从 N 区流向 P 区, PN 结的等效电阻很大。PN 结正向电流 I_F 远大于反向电流 I_R , 这就是 PN 结的单向导电性。

3. PN 结的伏安特性

PN 结两端的外加电压与流过 PN 结的电流之间的关系称为 PN 结的伏安特性。通过理论分析, PN 结伏安特性的可用下式表示:

$$i = I_S(e^{u/U_T} - 1) \quad (1.1.1)$$

式中, i 是流过 PN 结的电流, u 是 PN 结两端的电压, I_S 是 PN 结的反向饱和电流, U_T 是 PN 结的温度电压当量。

$$U_T = \frac{kT}{q} = \frac{1.381 \times 10^{-23} (\text{J/K}) \times T}{1.6 \times 10^{-19} (\text{C})} = \frac{T}{11600} \quad (1.1.2)$$

这里, $k = 1.381 \times 10^{-23} (\text{J/K})$, 是玻耳兹曼常数。 $q = 1.6 \times 10^{-19} (\text{C})$, 是一个电子的电荷量。一般在室温 ($T = 300\text{K}$) 下, $U_T \approx 26\text{mV}$ 。

当 PN 结正偏时,一般很容易满足 $u \gg U_T$ 。例如,当 $u=0.1\text{V}$ 时, $e^{u/U_T} \approx e^4 \approx 55 \gg 1$ 。此时,式 (1.1.1) 可以变为:

$$i \approx I_S e^{u/U_T} \quad (1.1.3)$$

上式说明,在 PN 结正偏时,其伏安特性近似为指数关系。如图 1-9 第一象限所示。

当 PN 结反偏时,一般很容易满足 $u \ll U_T$ 。例如,当 $u=0.1\text{V}$ 时, $e^{u/U_T} \approx e^{-4} \ll 1$ 。此时,式 (1.1.1) 又可以变为:

$$i \approx -I_S \quad (1.1.4)$$

从上式可以看出,在 PN 结反偏时,其反向电流是一个很小的电流。对于硅 PN 结来说,一般为纳安数量级,锗 PN 结一般为微安数量级。在一定电压范围内其大小基本不变的。如图 1-9 第三象限所示。

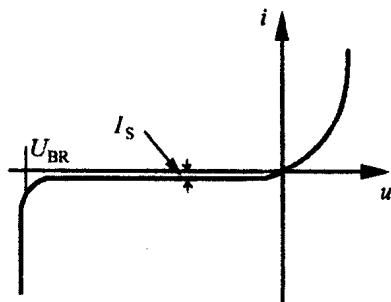


图 1-9 PN 结的伏安特性曲线

1.1.4 PN 结的击穿特性

如上所述,PN 结的反向电流 I_R 与所加的反向电压无关。如果反向电压一直继续增大,电流是否还会跟着增大?经过实际测试,我们发现,情况不是这样。当反向电压达到一定程度时,反向电流将会突然大幅度增加,这个现象被称为 PN 结的反向击穿。如图 1-9 中第三象限左边所示。反向击穿时的电压称为反向击穿电压 U_{BR} 。

这种击穿是一种电击穿,其物理过程仍然是可逆的。如果外加反向电压及时减小的话,反向击穿现象就会消失,PN 结不会遭到破坏。然而,在发生了电击穿后,如果反向电压不能及时减小的话,PN 结承受的反向电压很大,流过 PN 结的反向电流也很大,消耗在 PN 结上的功耗是很大的。这样,很快就会使 PN 结发热,超过其功耗限制,造成热击穿。一旦发生了热击穿,PN 结的反向电流增加和温度升高出现恶性循环,它们都会迅速增大,PN 结很快就被烧坏了。

PN 结产生反向击穿有两个原因:

1. 雪崩击穿

当 PN 结两端加的反向电压足够大时,内电场也随之增强。电子和空穴通过空间电荷区时,在内电场的作用下,获得的能量显著增加,运动速度大大加快。这些载流子在