

江苏省高等学校精品教材

新世纪电子信息与电气类系列规划教材

**XINSHIJI**

DIANZI XINXI YU DIANQILEI XILIE GUIHUA JIAOCAI

# 模拟电子 技术基础

主 编◎封维忠

副主编◎吴海青 宋 军 蒋 玲

.....



东南大学出版社  
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

# 模拟电子技术基础

主 编 封维忠

副主编 吴海青 宋 军 蒋 玲



东南大学出版社  
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

· 南京 ·

## 内 容 摘 要

本书参照《高等工业学校电子技术基础课程教学基本要求》(模拟电子技术部分),在分析和参考了1990年以来若干国外同类教材和国内重点大学的改革教材的基础上,结合编者多年来在该门课程教学中的体会及经验,编写了本教材。

主要内容包括半导体基础知识、放大电路基础、集成电路运算放大器、放大电路的频率响应、反馈和运算放大器、模拟信号的运算和处理电路、功率放大电路、信号产生电路、直流稳压电源等。

本教材可作为高等学校电子信息工程、计算机科学与技术、自动化、汽车电子、测控技术与仪器等专业的本科或专科电子技术基础课程的教学用书,也可作为工程技术人员的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础/封维忠主编. —南京:东南大学出版社,2015.7

ISBN 978-7-5641-5923-8

I. ①模… II. ①封… III. ①模拟电路-电子技术-高等学校-教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 165683 号

### 模拟电子技术基础

---

出版发行 东南大学出版社

出版人 江建中

社 址 南京市四牌楼 2 号

邮 编 210096

---

经 销 全国各地新华书店

印 刷 丹阳兴华印刷厂

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 19

字 数 320 千字

版 次 2015 年 7 月第 1 版

印 次 2015 年 7 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5641-5923-8

定 价 38.00 元

---

(本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话:025-83791830)

# 前 言

电子技术基础是一门工程性、实践性和应用性很强的课程,它对于培养学生的工程实践能力和创新意识具有重要意义。进入 21 世纪以来,数字化是技术转移的重点之一,但是我们面临的自然界中大多数物理量是模拟量,如温度、压力、位移、速度、流速、液位等。因此,在电子技术方面要处理的大量信息首先是模拟量,模拟电子技术的重要性仍然不可动摇。作者从工科电子技术教育特点出发,在总结多年来电子技术基础教学经验和校精品课程建设成果的基础上编写了此教材。

本书参照《高等工业学校电子技术基础课程教学基本要求》(模拟电子技术部分),在分析和参考了 1990 年以来若干国外同类教材和国内重点大学的改革教材的基础上,编者结合多年来在该门课程教学中的体会及经验,力求在教材编写中体现出以下的思路和特色:

(1) 教材在对半导体器件内部载流子传输过程微观阐述的物理基础上,讲述器件外部伏安特性和参数等宏观量,讲述条理清晰,通俗易懂。

(2) 随着电子技术的发展,集成电路的使用已相当普及,但基本电子器件与基本单元电路的原理目前还是电子技术的基础,教材始终以“讲透概念原理,打好电路基础”为宗旨,在保证讲解原有基本概念、基本定律和基本方法的基础上,适当介绍常用的集成电路的原理及应用,对于电子技术方面的最新技术和器件读者可借助网络等途径进行学习。

(3) 简化公式的数学分析推导过程,强化公式的物理意义,重在应用。面对初学者,在章节顺序的安排上服从由浅入深,从个别到一般的认识规律。放大电路的分析也按照先基础电路后应用电路来编排。体现以分立元件为基础,以集成电路为重点的原则。

(4) 加强了电路模型的概念。电路中的电子器件一旦模型化以后,剩下分

析计算的工作依靠电路理论课程的知识来完成,使学生掌握研究电路的统一方法,所学的知识得到从具体到抽象的升华。

(5) 教材对放在各章之后的习题给予足够的重视。习题是对学生是否掌握本章基本知识的全面检查,并能起到纠正模糊认识,巩固基础知识,以及提高分析实用电路能力的作用。编者根据多年的教学实践,精选题目,使之对学生有最大的帮助。

(6) 教材各章之后附有小结,以帮助学生归纳重点知识和重要结论。

注意到各专业、各层次学生的需要,教材的实际内容如超过了学校计划教学学时,教师在讲授时可根据专业需要、学时多少和学生实际水平来决定取舍。

本教材可作为高等学校电子信息工程、计算机科学与技术、自动化、汽车电子、测控技术与仪器等专业的本科或专科电子技术基础课程的教学用书。

本教材由封维忠任主编,吴海青、宋军、蒋玲任副主编。本教材在编写过程中得到了有关专家和电子工程系同行的指导和帮助,刘云飞教授审阅了全文并提出了宝贵意见,研究生申斌、韩晨燕、施山箐、曹莹等同学为本书绘制了大量插图,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中难免存在疏漏和不足,恳请各位读者批评指正。

编者

2014.10

# 目 录

第一章 半导体器件 .....	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 结的形成 .....	5
1.1.4 PN 结的单向导电性 .....	6
1.1.5 PN 结的击穿 .....	8
1.1.6 PN 结的电容效应 .....	8
1.2 半导体二极管 .....	9
1.2.1 半导体二极管的几种常见结构 .....	9
1.2.2 二极管的伏安特性 .....	10
1.2.3 二极管的主要参数 .....	11
1.2.4 二极管的电路模型 .....	11
1.2.5 二极管的应用 .....	15
1.2.6 特殊二极管 .....	16
1.3 双极结型三极管 .....	21
1.3.1 BJT 的结构简介 .....	21
1.3.2 BJT 的工作原理与电流分配关系 .....	22
1.3.3 BJT 的 $V-I$ 特性曲线 .....	26
1.3.4 BJT 的主要参数 .....	28
1.4 场效应管 .....	31
1.4.1 结型场效应管 .....	31
1.4.2 MOS 场效应管 .....	35
1.4.3 场效应管的主要参数 .....	40
小结 .....	41
思考题与习题 .....	42
第二章 放大电路基础 .....	46
2.1 放大的基本概念和放大电路的主要性能指标 .....	46
2.1.1 放大的基本概念 .....	46
2.1.2 放大电路的性能指标 .....	46

2.2 基本共射极放大电路 .....	51
2.2.1 基本共射极放大电路的组成 .....	51
2.2.2 基本共射极放大电路的工作原理 .....	52
2.3 放大电路的分析方法 .....	54
2.3.1 图解分析法 .....	54
2.3.2 小信号模型分析法 .....	60
2.4 放大电路静态工作点的稳定问题 .....	67
2.4.1 温度对静态工作点的影响 .....	67
2.4.2 静态工作点稳定电路的措施 .....	67
2.4.3 射极偏置电路 .....	67
2.5 单管共集电极电路和共基极放大电路 .....	71
2.5.1 单管共集电极放大电路 .....	71
2.5.2 共基极放大电路 .....	74
2.5.3 BJT 放大电路三种组态的比较 .....	76
2.6 场效应管放大电路 .....	77
2.6.1 场效应管的特点 .....	77
2.6.2 场效应管的直流偏置电路与静态分析 .....	78
2.6.3 场效应管放大电路的动态分析 .....	81
2.7 组合放大电路 .....	86
2.7.1 复合管及其放大电路 .....	86
2.7.2 共射-共基放大电路 .....	89
2.8 多级放大电路分析 .....	91
2.8.1 多级放大电路的耦合方式 .....	91
2.8.2 多级放大电路的分析 .....	94
小结 .....	96
习题 .....	97
<b>第三章 集成电路运算放大器 .....</b>	<b>101</b>
3.1 概述 .....	101
3.1.1 集成运算放大器的电路组成 .....	101
3.1.2 集成运算放大器的电路特点 .....	101
3.2 电流源电路 .....	102
3.2.1 基本电流源 .....	102
3.2.2 镜像电流源 .....	102
3.2.3 比例电流源 .....	103
3.2.4 微电流源 .....	103

3.2.5 改进型电流源 .....	104
3.2.6 多路恒流源 .....	105
3.2.7 FET 电流源 .....	105
3.2.8 以电流源为有源负载的放大电路 .....	107
3.3 差分放大电路 .....	108
3.3.1 差分式放大电路的组成及工作原理 .....	108
3.3.2 长尾式差分放大电路 .....	111
3.3.3 差分放大电路的四种接法 .....	114
3.3.4 改进型差分放大电路 .....	117
3.4 集成运放电路的组成及其各部分的作用 .....	118
3.5 通用型集成电路运算放大器简介 .....	120
3.5.1 基于晶体管的双极型集成运放 $\mu\text{A}741$ .....	121
3.5.2 基于场效应管的单极型集成运放 MC14573 .....	123
3.6 集成电路运算放大器的主要参数 .....	124
小结 .....	126
习题 .....	127
<b>第四章 放大电路的频率响应</b> .....	<b>129</b>
4.1 频率响应的一般概念 .....	129
4.1.1 研究频率响应的必要性 .....	129
4.1.2 单时间常数 RC 电路的频率响应 .....	129
4.2 单级放大电路的高频响应 .....	132
4.2.1 晶体管的混合 $\pi$ 模型 .....	132
4.2.2 三极管的频率参数 .....	134
4.2.3 场效应管的高频等效模型 .....	136
4.3 单管共发射极放大电路的频率响应 .....	137
4.4 单管共基极和共集电极放大电路的频率响应 .....	144
4.5 多级放大电路的频率响应 .....	147
小结 .....	148
习题 .....	148
<b>第五章 反馈和运算放大器</b> .....	<b>150</b>
5.1 概述 .....	150
5.1.1 反馈的基本概念 .....	150
5.1.2 反馈类型及其判定 .....	151
5.2 负反馈放大电路的四种组态 .....	156



5.2.1	电压串联负反馈放大电路	156
5.2.2	电压并联负反馈放大电路	156
5.2.3	电流串联负反馈放大电路	157
5.2.4	电流并联负反馈放大电路	158
5.3	负反馈放大电路的方框图及增益的一般表达式	159
5.3.1	负反馈放大电路的方框图	159
5.3.2	负反馈放大电路增益的一般表达式	159
5.4	负反馈对放大电路性能的改善	161
5.4.1	提高放大电路的稳定性	161
5.4.2	减小非线性失真	162
5.4.3	扩展通频带	163
5.4.4	抑制反馈环内噪声	165
5.4.5	对输入电阻和输出电阻的影响	165
5.5	深度负反馈条件下的计算	168
5.6	负反馈放大电路的稳定性分析	171
5.6.1	产生自激振荡的原因	171
5.6.2	常用的校正措施	174
	小结	176
	习题	178
<b>第六章 模拟信号的运算和处理电路</b>		<b>181</b>
6.1	基本运算电路	181
6.1.1	比例运算电路	181
6.1.2	加减运算电路	185
6.1.3	仪用放大器	187
6.1.4	求和电路	187
6.1.5	积分运算电路和微分运算电路	188
6.2	有源滤波电路	191
6.2.1	有源滤波电路的基本概念与分类	191
6.2.2	低通滤波电路(LPF)	193
6.2.3	高通滤波器(HPF)	197
6.2.4	带通滤波电路(BPF)	198
6.2.5	带阻滤波器(BEF)	199
	小结	201
	习题	202

<b>第七章 功率放大电路</b> .....	205
7.1 功率放大电路概述 .....	205
7.1.1 功率放大电路的特点 .....	205
7.1.2 功率放大电路提高效率的主要途径 .....	206
7.2 互补对称功率放大电路 .....	207
7.2.1 乙类双电源互补对称电路 .....	207
7.2.2 甲乙类双电源互补对称电路 .....	211
7.2.3 甲乙类单电源互补对称电路 .....	212
7.3 集成功率放大器 .....	213
7.3.1 通用型集成功率放大器 LM386 .....	214
7.3.2 双声道集成功率放大电路 .....	216
小结 .....	216
习题 .....	217
<b>第八章 信号产生电路</b> .....	219
8.1 正弦波振荡电路及基本原理 .....	219
8.2 RC 桥式正弦波振荡电路 .....	221
8.3 LC 正弦波振荡电路 .....	225
8.3.1 LC 并联谐振回路的选频特性 .....	225
8.3.2 变压器反馈式 LC 正弦波振荡器 .....	227
8.3.3 电感反馈式振荡电路 .....	228
8.3.4 电容反馈式振荡电路 .....	229
8.3.5 三点式振荡电路的组成法则 .....	230
8.4 石英晶体振荡电路 .....	231
8.4.1 石英晶体谐振器的特性 .....	231
8.4.2 石英晶体振荡电路 .....	232
8.5 电压比较器 .....	233
8.5.1 单门限电压比较器 .....	233
8.5.2 迟滞比较器 .....	235
8.5.3 集成电压比较器 .....	238
8.5.4 矩形波产生电路 .....	239
8.5.5 三角波产生电路 .....	242
8.5.6 锯齿波产生电路 .....	244
8.6 函数发生器 .....	245
小结 .....	248
习题 .....	249

---

第九章 直流稳压电源 .....	253
9.1 小功率整流滤波电路 .....	253
9.1.1 单相桥式整流电路 .....	253
9.1.2 滤波电路 .....	255
9.1.3 倍压整流电路 .....	259
9.2 串联反馈式稳压电路 .....	260
9.2.1 稳压电源的主要指标 .....	260
9.2.2 串联型稳压电路的工作原理 .....	261
9.2.3 集成稳压器电路 .....	266
9.3 开关型稳压电路 .....	271
9.3.1 开关型稳压电路的特点和分类 .....	272
9.3.2 开关型稳压电路的组成和工作原理 .....	273
小结 .....	274
习题 .....	275
附录 A 电路分析理论复习 .....	279
附录 B 电阻器的主要性能参数 .....	285
参考文献 .....	288
习题解答 .....	289

# 第一章 半导体器件

## 1.1 半导体的基础知识

根据导电能力的不同,物质可分为导体、半导体和绝缘体。导体就是容易导电的物质,其原子最外层的价电子很容易摆脱原子核的束缚而成为自由电子,在外加电场力的作用下,这些自由电子就会定向运动形成电流。绝缘体就是在正常情况下不会导电的物质,大部分绝缘体都属于化合物,其价电子被原子核紧紧地束缚在一起,自由电子非常少,导电能力很差。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。常见的半导体材料有:元素半导体,如硅(Si)、锗(Ge)等;化合物半导体,如砷化镓(GaAs)等。

半导体材料具有与导体和绝缘体不同的导电特性,具体如下:

(1) 热敏特性:当环境温度升高时,半导体的导电能力显著增强。利用这种特性可以制成温度敏感元件,如热敏电阻。

(2) 光敏特性:当受到光照时,半导体的导电能力显著增强。利用这种特性可以制成各种光敏元件,如光敏电阻、光敏二极管、光敏三极管等。

(3) 掺杂特性:在纯净的半导体中掺入微量杂质,半导体的导电能力可以增加几十万乃至几百万倍。利用这种特性可以制成各种不同用途的半导体器件,如二极管、三极管和晶闸管等。

为什么半导体的导电能力有如此大的差别呢?这就需要研究半导体材料的内部结构和导电机理。

### 1.1.1 本征半导体

本征半导体是完全纯净的、晶格结构完整的半导体。常用的半导体材料硅(Si)和锗(Ge)的原子序数分别为14和32,它们的共同特点是原子最外层轨道上有4个电子,称为价电子。硅和锗原子呈电中性,通常用带有4个正电荷的正离子以及它周围的4个价电子来表示,其原子结构模型如图1.1.1所示。

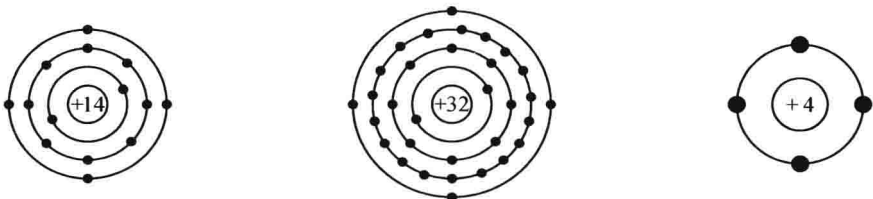


图 1.1.1 硅原子和锗原子的结构模型

(a) 硅原子结构示意图;(b) 锗原子结构示意图;(c) 硅原子和锗原子结构简化模型

### 1) 本征半导体中的共价键结构

本征半导体具有晶体结构,原子在空间形成排列整齐的晶格,单个硅原子的空间结构如图 1.1.2(a)所示。由于相邻原子间的距离很小,因此原子最外层的价电子不仅受到自身原子核的束缚,还要受到相邻原子核的吸引,形成共价键结构,如图 1.1.2(b)所示。

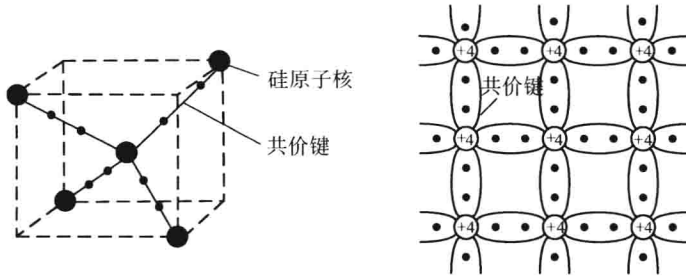


图 1.1.2 本征半导体的共价键结构

(a) 硅晶体的空间排列;(b) 硅晶体共价键结构平面示意图

### 2) 本征半导体中的两种载流子

晶体中的共价键具有很强的结合力,因此,当半导体处于热力学温度  $T=0\text{ K}$  时,半导体中所有的价电子紧紧束缚在共价键中,没有自由电子,不能导电。当温度升高或受到光照时,有些价电子就会获得足够的能量,挣脱共价键的束缚,参与导电,成为自由电子。自由电子产生的同时,会在原来共价键中留下一个空位,称为空穴。在本征半导体中,自由电子和空穴总是成对出现的,称为电子-空穴对,如图 1.1.3 所示。半导体在外部能量激励下(主要是热激发),产生自由电子-空穴对的现象称为本征激发。外加能量越高(例如温度越高),产生的电子-空穴对就会越多。常温(约  $300\text{ K}$ )时,硅晶体中电子-空穴对的浓度大约为  $1.43 \times 10^{10}\text{ cm}^{-3}$ ;锗晶体中电子-空穴对的浓度大约为  $2.38 \times 10^{13}\text{ cm}^{-3}$ 。原子失掉一个价电子后而带正电,也就是说,我们可以把空穴看成是带正电的粒子,它所带的电量与自由电子相等,但符号相反。在外加电场力的作用下,邻近共价键中的价电子很容易填补这个空穴,从而在这个价电子原来的位置上留下一个新的空位,就好像空穴在移动。因此,在电场力的作用下,一方面本征半导体中的自由电子可以定向移动,形成电子电流;另一方面空穴也会产生定向移动,形成空穴电流,只不过空穴的移动是靠相邻共价键中的价电子按一定方向依次填充来实现的。运载电荷的粒子称为载流子。导体中只有一种载流子——自由电子参与导电;而本征半导体中有两种载流子——带负电的自由电子和带正电的空穴,它们均参与导电。这是半导体导电区别于导体导电的一个重要特点。自由电子和空穴所带电荷极性不同,它们的运动方向相反,因此本征半导体中的电流是自由电子电流和空穴电流之和,如图 1.1.4 所示。

另外,当自由电子在运动过程中与空穴相遇时就会填补空穴,这种现象称为复合。在一定温度下,本征半导体中所产生的自由电子-空穴对,与复合的自由电子-空穴对数目相等,达到动态平衡。即当环境温度相同时,本征半导体中自由电子和空穴两种载流子的浓度不变且相等。本征激发产生的载流子浓度和温度有关,当环境温度升高时,热运动加剧,挣脱共价键束缚的自由电子增多,空穴也随之增多,载流子的浓度升高,晶体的导电能力增强;反之,当环境温度降低时,载流子的浓度降低,晶体的导电能力就会变差。总的来说,常温下本

征激发所产生的载流子的浓度很低,且与环境温度密切相关,因此本征半导体的导电能力和热稳定性较差,一般不能直接用来制造半导体器件。

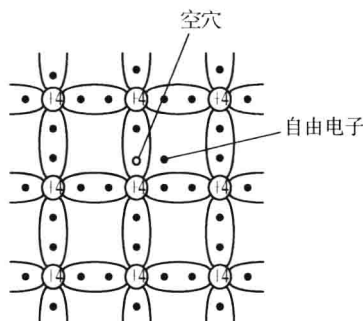


图 1.1.3 电子-空穴对图

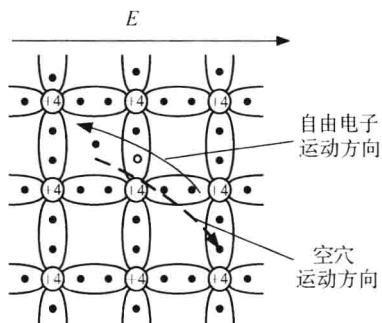


图 1.1.4 载流子在电场力作用下的运动

### 1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中掺入某些微量元素作为杂质,可使半导体的导电性发生显著变化。掺入杂质的本征半导体称为杂质半导体。根据掺入杂质的性质不同,杂质半导体可分为电子(N)型半导体和空穴(P)型半导体两大类。通过控制掺入杂质元素的浓度,可以控制杂质半导体的导电性能。制备杂质半导体时,一般按百万分之一数量级的比例在本征半导体中掺入三价或五价元素。

#### 1) N型半导体

在本征半导体硅(或锗)中掺入适量五价元素,例如磷(P)、砷(As),就形成了N型半导体。用磷原子取代硅晶体中少量硅原子,占据晶格上的某些位置。由于磷原子最外层有五个价电子,其中四个价电子分别与邻近的四个硅原子形成共价键结构,多余的一个价电子在共价键之外,不受共价键的束缚,只受到磷原子对它微弱的吸引,如图1.1.5(a)所示。因此,它只要获得很少的能量(例如在常温下)就能挣脱原子核的束缚,成为自由电子,游离于晶格之间。失去自由电子的磷原子在晶格上不能移动,成为带正电的正离子,半导体整体仍保持中性。磷原子可以提供自由电子,称为施主原子或施主杂质。在本征半导体中,每掺入一个磷原子就可以产生一个自由电子。同时,N型半导体中也存在本征激发产生的自由电子和空穴对。这样在掺入磷原子的半导体中,自由电子的数目就远远超过了空穴的数目,称为多数载流子,简称多子。空穴则称为少数载流子,简称少子。显然,参与导电的主要是自由电子,故这种半导体又称为电子型半导体。在常温条件下,N型半导体中的施主杂质电离为带负电的自由电子和带正电的施主离子,同时还有少数本征激发产生的自由电子和空穴,其结构示意图如图1.1.5(b)所示。一般来说,掺杂产生的载流子比本征激发产生的载流子要多得多。

总之,在N型半导体中多数载流子是自由电子,主要由掺入杂质的浓度决定,掺入的杂质越多,其导电能力就会越强,可实现半导体导电性能的可控性;少数载流子是空穴,其浓度由本征激发决定,和环境温度有关。

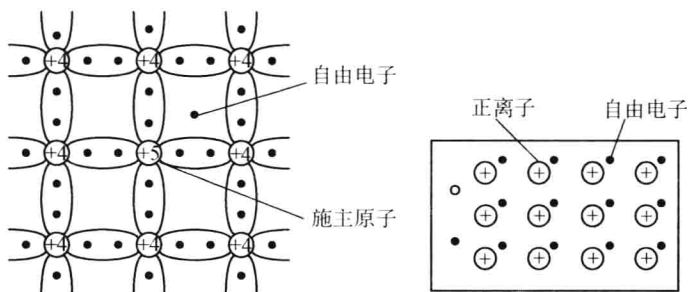


图 1.1.5 N 型半导体

(a) N 型半导体共价键结构图; (b) N 型半导体的简化表示法

### 2) P 型半导体

在本征半导体硅(或锗)中掺入适量三价元素,如硼(B)、镓(Ga)、铟(In)等,就形成了 P 型半导体。例如,用硼原子取代硅晶体中的少量硅原子,占据晶格上的某些位置。由于硼原子最外层有三个价电子,其中三个价电子分别与邻近的三个硅原子组成完整的共价键,而与其相邻的另一个硅原子的共价键中则缺少一个价电子,出现了一个空穴。其他共价键中的价电子很容易填充这个空穴,使三价的硼原子获得一个电子,而变成带负电的负离子,同时,在邻近共价键中产生一个空穴,如图 1.1.6(a)所示。由于三价硼原子中的空穴吸引电子,起着接受电子的作用,故称为受主原子或受主杂质。在本征半导体中,每掺入一个硼原子就可以提供一个空穴。这样,在掺入硼原子的半导体中,空穴的数目远远大于本征激发所产生电子的数目,空穴成为多数载流子,而电子则成为少数载流子。同样,参与导电的主要是空穴,故这种半导体称为空穴型半导体。在常温条件下, P 型半导体中的受主杂质电离为带正电的空穴和带负电的受主离子,同时还有少数本征激发产生的自由电子和空穴,其结构示意图如图 1.1.6(b)所示。

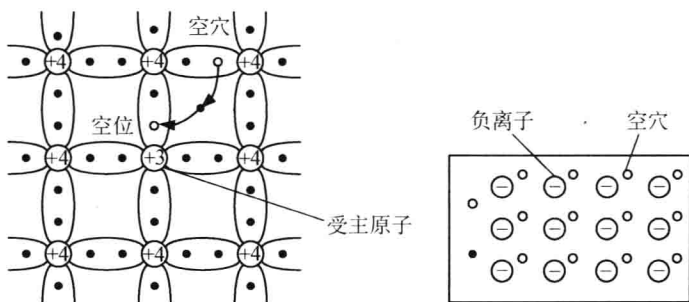


图 1.1.6 P 型半导体

(a) P 型半导体共价键结构图; (b) P 型半导体的简化表示法

总之,在 P 型半导体中多数载流子是空穴,主要由掺杂的浓度决定,尽管杂质原子含量很少,但对半导体的导电能力却有很大的影响;自由电子是少数载流子,由本征激发产生,尽管其浓度很低,但对温度非常敏感,会影响半导体器件的性能。

不论是 N 型半导体还是 P 型半导体,其整体对外仍保持电中性。

### 1.1.3 PN 结的形成

采用不同的掺杂工艺,通过扩散作用,将 P 型半导体与 N 型半导体制作在同一块半导体(通常是硅或锗)基片上,在它们的交界面所形成的空间电荷区称为 PN 结。PN 结具有单向导电性。

#### 1) 载流子的扩散运动和漂移运动

半导体受到本征激发时,载流子将作随机的无定向移动,在任意方向的平均速度都为零。但由于制造工艺等原因,致使在半导体某一特定区域内载流子的浓度产生差异,载流子就会由浓度高的区域向浓度低的区域运动,这种运动称为扩散运动。载流子的扩散运动可以形成扩散电流,如果没有外来载流子的注入或电场的作用,晶体内的载流子浓度趋于均匀,直至扩散电流为零。如果在晶体两端加上外加电场,半导体内部载流子无规律的热运动被破坏,载流子将在电场力的作用下作定向移动,这种由于电场作用而导致的载流子的运动称为漂移运动。空穴的运动方向和外加电场方向相同;而电子的运动方向则和外加电场方向相反。载流子的漂移速度与电场强度  $\vec{E}$  成正比,分别用  $\vec{V}_N$  和  $\vec{V}_P$  表示电子和空穴的漂移速度,则有

$$\vec{V}_N = -\mu_N \vec{E} \quad (1.1.1)$$

式中: $\mu_N$ ——比例系数,称为自由电子迁移率,负号表明电子漂移运动的方向与电场方向相反。

同理,空穴的漂移速度为

$$\vec{V}_P = \mu_P \vec{E} \quad (1.1.2)$$

在常温 300 K 情况下,硅半导体中的电子迁移率约为  $1500 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ,空穴迁移率约为  $475 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。也就是说,在相同电场力作用下,硅半导体中电子的漂移速度约是空穴漂移速度的 3 倍,因此在数字电路或高频模拟电路中,电子导电器件优于空穴导电器件。

#### 2) PN 结的形成过程

同一块半导体硅片中,通过掺杂工艺把 P 型半导体和 N 型半导体制作在一起。这样,在 P 型半导体和 N 型半导体的交界面,两种载流子的浓度相差很大。P 型区内空穴的浓度高,而 N 型区内自由电子的浓度高。于是,多数载流子作扩散运动,形成扩散电流,如图 1.1.7 所示。同时,在两种杂质半导体的交界面自由电子与空穴复合,因此在交界面附近多数载流子的浓度迅速降低,P 区出现带负电的杂质离子,N 区出现带正电的杂质离子,由于物质结构的关系,这些杂质离子被固定在晶格上不能移动,就形成了空间电荷区,也就是 PN 结。在空间电荷区内,载流子浓度很低,因此又称为耗尽层。耗尽层的电阻率极高。P 区一侧带负电,而 N 区一侧带正电,就形成了一个由 N 区指向 P 区的内电场,如图 1.1.8 所示。扩散运动越剧烈,空间电荷区越宽,内电场也就越强。

内电场的存在阻碍了多数载流子的扩散运动,促进了少数载流子的漂移运动,形成漂移电流,如图 1.1.8 所示。由于漂移运动和扩散运动的方向相反,它补充了原来交界面上复合的载流子,使空间电荷量减少,耗尽层变窄。在无外电场和其他激发作用下,参与扩散运动



的多子数目和参与漂移运动的少数数目相等,最终达到动态平衡,形成PN结。空间电荷区的宽度不再发生变化,电流为零,空间电荷区也称为势垒区。

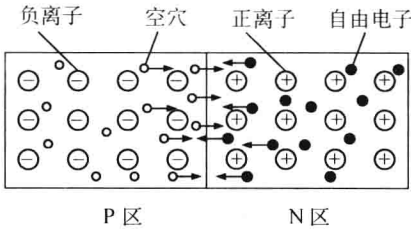


图 1.1.7 由载流子浓度差产生的扩散运动图

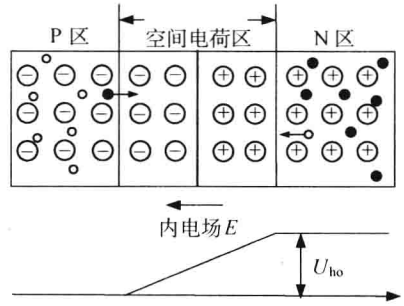


图 1.1.8 在内电场的作用下产生的漂移运动

### 1.1.4 PN结的单向导电性

PN结外加正向电压时,处于导通状态,呈现低阻特性;PN结外加反向电压时,处于截止状态,呈现高阻特性。这就是PN结的单向导电性。

#### 1) PN结外加正向电压

将PN结的P区接电源正极,N区接电源负极,这种连接方式称为PN结外加正向电压,又称PN结正向偏置,如图1.1.9所示。当PN结处于正向偏置时,外电场和内电场的方向相反。P区的空穴和N区的自由电子在外电场的作用下向空间电荷区移动,破坏了空间电荷区的平衡状态,使空间电荷区的电荷量减少,空间电荷区变窄,起到削弱内电场的作用。这种情况有利于多数载流子的扩散运动,不利于少数载流子的漂移运动。扩散电流起主导作用,漂移电流很小,此时外电路电流近似等于扩散电流,又称正向电流。PN结正向偏置时,在一定范围内,正向电流随着外电场的增强而增大,正偏的PN结表现为一个阻值很小的电阻,呈现低阻特性,此时称PN结导通。PN结正向导通时压降很小,理想情况下,可认为PN结正向导通时的电阻为零,所以导通时的压降也为零。正向电流的大小主要由外加电压 $V_F$ 和电阻 $R$ 的大小来决定。电阻 $R$ 可以限制回路电流,防止PN结因正向电流过大而损坏。由少数载流子形成的漂移电流,其方向与扩散电流相反,且数值很小,可以忽略不计。

#### 2) PN结外加反向电压

将PN结的P区接电源负极,N区接电源正极,这种连接方式称为PN结外加反向电压,又称PN结反向偏置,如图1.1.10所示。PN结加反向电压时,外电场与内电场方向相同,PN结内部扩散和漂移运动的平衡被破坏。P区的空穴和N区的自由电子由于受外电场作用将背离空间电荷区,使空间电荷量增加,空间电荷区变宽,内电场加强。此时,多数载流子的扩散运动减弱,少数载流子的漂移运动增强。PN结中的电流主要由漂移电流决定。这种由少数载流子的漂移运动所形成的电流称为PN结的反向电流。在一定温度下,少数载流子的数目是一定的,且数值很小。因此在一定范围内,反向电流也极小,且近似为一定值,不随外加反向电压的变化而变化,所以该电流称为反向饱和电流,用 $I_S$ 表示。当外界温度发生变化时,PN结的反向饱和电流会随着温度的上升而增大。