

模拟电子技术基础

(电 类)

主 编 罗桂娥
副主编 张静秋 罗 群

中 南 大 学 出 版 社

21 世纪电工电子学课程系列教材

模拟电子技术基础

(电类)

主 编 罗桂娥

副主编 张静秋 罗 群

中南大学出版社

21 世纪电工电子学课程系列教材编委会

主 任 陈明义 宋学瑞

成员(以姓氏笔划为序):

文援朝 王英健 李义府 肖梓高 陈明义

宋学瑞 李 飞 罗桂娥 赖旭芝

21 世纪电工电子学课程系列教材

模拟电子技术基础

(电 类)

主编 罗桂娥

☐责任编辑 肖梓高

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路 邮编:410083

发行科电话:0731-8876770

传真:0731-8710482

☐印 装 长沙国防科技大学印刷厂

☐开 本 730×960 1/16 ☐印张 30 ☐字数 551 千字

☐版 次 2005 年 2 月第 1 版 ☐2005 年 2 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 7-81105-009-9/TM·002

☐定 价 34.00 元

图书出现印装问题,请与出版社调换

前 言

“模拟电子技术基础”是工科院校电气电子信息类专业的一门重要的技术基础课。为了适应电子科学技术的飞速发展和 21 世纪的教材结构和教学内容改革要求,我们结合多年的教学实践经验,编写了《模拟电子技术基础》。本书具有以下特点:

(1) 力求少而精,在“精练”上取胜。要精选内容,优选讲法,以符合教学基本要求为准。

(2) 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。

(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,为学生分析问题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,简化其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和应用有关的内部电路知识。

(5) 为了解决各专业的基本要求与不同专业的特殊专业内容要求的矛盾,本书每一章的编有自学材料,供各位教师自行取舍。

编写一本既能在有限的学时内较好地达到本门课程的基本要求,又具有一定特色的教材是我们很久以来的愿望。我们在反复讨论基本要求的基础上,对教材内容作了精选安排,突出基本概念、基本原理和基本分析方法,并注重从教材体系上进行探索,正确处理传统和选进内容、理论与实际、深度与广度、分立元件与集成电路之间的关系。本书以“讲清基本原理,打好电路基础,面向集成电路,好教好学”为宗旨,强调物理概念的描述,避免复杂的数学推导。在若干知识点的阐述上,具有一定的个性特色,并在内容取舍、编排以及文字表达等方面都期望解决初学者的入门难问题。

本书主要内容包括常用半导体器件,基本放大电路,放大电路的频率响

应, 功率放大电路, 模拟集成电路基础, 放大电路中的反馈, 信号运算与处理电路, 波形发生与信号转换电路, 直流电源等。书中通过对半导体器件及电路的分析, 阐述了模拟电子技术中的基本概念、基本原理和基本分析方法。书中附有适量习题。

本书罗桂娥任主编, 张静秋、罗群任副主编。其中, 罗桂娥负责第3章、第4章、第5章、第6章以及第8章的自学材料和附录的编写; 张静秋负责第1章、第2章的编写; 罗群负责第7章、第8章、第9章的编写。最后, 由罗桂娥统稿定稿。本书编写过程中得到了全体同仁的大力支持。在统稿过程中, 李义府、宋学瑞两位老师提出许多宝贵意见, 在此一并表示衷心的感谢。

编者深知, 模拟电子电路范围广, 新知识多, 尽管在编写过程中做了很大努力, 但由于水平和视野的限制, 加之时间仓促, 书中难免存在许多缺点错误, 恳请广大读者批评指正。

编 者

2004 年 12 月

目 录

第1章 常用半导体器件	(1)
1.1 概述	(1)
1.1.1 半导体的导电特性	(1)
1.1.2 杂质半导体	(3)
1.1.3 PN结	(4)
1.2 半导体二极管	(9)
1.2.1 二极管的结构类型	(10)
1.2.2 二极管的伏安特性	(11)
1.2.3 二极管的常用电路模型	(11)
1.2.4 二极管的主要参数	(14)
1.2.5 稳压二极管	(15)
1.2.6 二极管的应用举例	(18)
1.3 双极型晶体三极管	(20)
1.3.1 BJT的结构及类型	(20)
1.3.2 三极管的电流放大作用	(21)
1.3.3 三极管的特性曲线	(23)
1.3.4 三极管的主要参数	(26)
1.3.5 温度对BJT特性及其参数的影响	(29)
1.3.6 BJT的电路模型	(30)
1.4 场效应管	(37)
1.4.1 结型场效应管	(38)
1.4.2 绝缘栅型场效应管	(41)
1.4.3 场效应管的低频小信号模型	(48)
1.4.4 场效应管的主要参数	(49)
1.4.5 场效应管与三极管的比较及使用方法介绍	(50)
1.5 自学材料	(53)
1.5.1 特殊二极管	(53)
1.5.2 特殊三极管	(56)

本章小结	(59)
习 题	(60)
第2章 基本放大电路	(66)
2.1 概述	(66)
2.1.1 放大的概念	(66)
2.1.2 放大电路的性能指标	(67)
2.1.3 基本共射极放大电路的组成原理	(71)
2.1.4 放大电路的组成原则	(75)
2.2 放大电路的基本分析方法	(76)
2.2.1 直流通路和交流通路	(76)
2.2.2 图解分析法	(77)
2.2.3 等效电路分析法	(84)
2.3 放大电路静态工作点的稳定	(88)
2.3.1 温度对静态工作点的影响	(88)
2.3.2 稳定静态工作点的措施	(88)
2.4 共集放大电路和共基放大电路	(92)
2.4.1 共集电极基本放大电路	(92)
2.4.2 共基极基本放大电路	(94)
2.4.3 3种基本组态放大电路的比较	(96)
2.5 场效应管放大电路	(97)
2.5.1 场效应管的直流偏置及其放大电路的静态分析	(97)
2.5.2 3种接法 FET 放大电路分析及其性能比较	(101)
2.6 多级放大电路	(105)
2.6.1 多级放大电路的耦合方式及其电路组成	(105)
2.6.2 多级放大电路的分析	(109)
2.7 自学材料	(111)
2.7.1 变压器耦合放大电路	(111)
2.7.2 光耦合放大电路	(112)
本章小结	(115)
习 题	(116)
第3章 放大电路的频率响应	(125)
3.1 概述	(125)

3.2 RC 电路的频率响应	(126)
3.2.1 RC 低通电路的频率响应	(126)
3.2.2 RC 高通电路的频率响应	(129)
3.3 晶体管的高频等效模型	(131)
3.3.1 晶体管混合 π 模型的建立	(132)
3.3.2 简化的混合 π 模型	(133)
3.3.3 混合 π 模型的主要参数	(134)
3.4 共射极放大电路的频率响应	(135)
3.5 放大电路频率响应的改善与增益带宽积	(144)
3.6 自学材料	(145)
3.6.1 多级放大电路的频率响应	(145)
本章小结	(148)
习 题	(148)
第 4 章 功率放大电路	(152)
4.1 概述	(152)
4.1.1 功率放大电路的特点及主要性能指标	(152)
4.1.2 功率放大电路的分类	(153)
4.2 互补对称功率放大电路	(154)
4.2.1 互补对称功率放大器的引出	(155)
4.2.2 OCL 电路的组成与工作原理	(157)
4.2.3 OCL 电路的输出功率与效率	(158)
4.2.4 OCL 电路中晶体管的选择	(159)
4.3 改进型 OCL 电路	(162)
4.3.1 甲乙类互补对称功率放大电路	(162)
4.3.2 准互补对称功率放大电路	(164)
4.3.3 输出电流的保护	(166)
4.4 自学材料	(168)
4.4.1 其他类型互补对称功率放大电路	(168)
4.4.2 集成功率放大电路	(172)
本章小结	(177)
习 题	(178)

第5章 模拟集成电路基础	(183)
5.1 概述	(183)
5.1.1 集成电路中的元器件特点	(183)
5.1.2 集成电路结构形式上的特点	(184)
5.2 晶体管电流源电路及有源负载放大电路	(185)
5.2.1 电流源电路	(185)
5.2.2 有源负载共射放大电路	(191)
5.3 差动放大电路	(192)
5.3.1 工作原理	(192)
5.3.2 基本性能分析	(195)
5.3.3 差动放大电路的4种接法	(198)
5.3.4 差动放大电路的改进	(201)
5.4 集成运算放大电路	(205)
5.4.1 集成运放电路的组成及各部分的作用	(205)
5.4.2 F007通用集成运放电路简介	(205)
5.4.3 集成运放的主要性能指标	(209)
5.4.4 集成运放电路的低频等效电路	(211)
5.4.5 集成运放的电压传输特性	(213)
5.5 自学材料	(215)
5.5.1 其他几种集成运算放大器简介	(215)
5.5.2 集成运放使用注意事项	(216)
5.5.3 输出电压与输出电流的扩展	(219)
本章小结	(220)
习 题	(221)
第6章 放大电路的反馈	(224)
6.1 概述	(224)
6.1.1 反馈的基本概念	(224)
6.1.2 反馈的判断	(225)
6.2 负反馈放大电路的方框图	(232)
6.2.1 负反馈放大电路的方框图及一般表达式	(232)
6.2.2 4种组态的方框图	(234)
6.3 深度负反馈放大电路放大倍数的估算	(235)

6.3.1 深度负反馈的实质	(235)
6.3.2 放大倍数的分析	(238)
6.4 负反馈对放大电路的影响	(244)
6.4.1 提高闭环放大倍数的稳定性	(244)
6.4.2 改善输入电阻和输出电阻	(245)
6.4.3 展宽通频带	(248)
6.4.4 减小非线性失真	(250)
6.4.5 负反馈对噪声、干扰和温漂的影响	(251)
6.4.6 放大电路中引入负反馈的一般原则	(252)
6.5 自学材料	(254)
6.5.1 负反馈放大电路的稳定性	(254)
6.5.2 电流反馈型运算放大电路	(259)
本章小结	(263)
习 题	(265)
第7章 信号的运算与处理电路	(271)
7.1 概述	(271)
7.2 基本运算电路	(271)
7.2.1 比例运算电路	(272)
7.2.2 加减运算电路	(277)
7.2.3 积分运算电路与微分运算电路	(282)
7.2.4 对数运算电路和指数运算电路	(287)
7.3 模拟乘法器及其应用	(292)
7.3.1 模拟乘法器简介	(292)
7.3.2 模拟乘法器的工作原理	(294)
7.3.3 模拟乘法器的应用	(297)
7.4 有源滤波电路	(302)
7.4.1 滤波电路的基础知识	(303)
7.4.2 低通滤波器	(306)
7.4.3 高通滤波器	(311)
7.4.4 带通滤波器	(313)
7.4.5 带阻滤波器	(315)
7.5 自学材料	(318)
7.5.1 预处理放大器	(318)

7.5.2 开关电容滤波器	(324)
7.5.3 其他形式滤波电路	(326)
本章小结	(330)
习 题	(331)
第8章 波形发生与信号转换电路	(337)
8.1 概述	(337)
8.2 正弦波振荡电路	(337)
8.2.1 正弦波振荡的条件	(337)
8.2.2 RC 正弦波振荡电路	(341)
8.2.3 LC 正弦波振荡电路	(347)
8.2.4 石英晶体正弦波振荡电路	(357)
8.3 电压比较器	(360)
8.3.1 简单比较器	(361)
8.3.2 滞回比较器	(365)
8.3.3 窗口比较器	(371)
8.4 非正弦波发生电路	(373)
8.4.1 矩形波发生电路	(373)
8.4.2 三角波发生电路	(376)
8.4.3 锯齿波发生电路	(379)
8.5 利用集成运放实现信号的转换	(381)
8.5.1 电压-电流转换电路	(381)
8.5.2 电压-频率转换电路	(382)
8.5.3 精密整流电路	(384)
8.6 自学材料	(388)
8.6.1 单片集成函数发生器	(388)
8.6.2 集成锁相环及其应用	(391)
8.6.3 集成电压比较器	(398)
本章小结	(401)
习 题	(401)
第9章 直流电源	(407)
9.1 概述	(407)
9.2 单相整流电路	(408)

9.2.1 单相半波整流电路	(408)
9.2.2 单相桥式全波整流电路	(410)
9.3 滤波电路	(414)
9.3.1 电容滤波电路	(414)
9.3.2 其他形式的滤波电路	(418)
9.4 稳压二极管稳压电路	(421)
9.4.1 稳压电路的组成与工作原理	(421)
9.4.2 稳压电路的性能指标与参数选择	(423)
9.5 串联型稳压电路	(427)
9.5.1 稳压电路的组成与工作原理	(427)
9.5.2 集成三端稳压器的应用	(432)
9.6 自学材料	(440)
9.6.1 倍压整流	(440)
9.6.2 开关型稳压电路	(441)
9.6.3 稳压电路的保护	(447)
本章小结	(450)
习 题	(451)
 附录 在系统可编程模拟器件	 (457)
 参考文献	 (458)

第1章 常用半导体器件

1.1 概述

半导体器件主要有半导体二极管、半导体三极管、场效应管及集成电路等，它们是组成各种电子电路的核心器件。半导体器件都是由半导体材料经过特殊工艺制成的所谓 PN 结构成的。本章从半导体材料的导电特性和 PN 结的单向导电性入手，介绍基本的半导体器件二极管、三极管的结构原理、伏安特性、主要参数和应用。

1.1.1 半导体的导电特性

材料按导电性能大致可以分为 3 种：导体、半导体和绝缘体。半导体的导电性能介于导体和绝缘体之间，其电阻率约 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 。表一给出了几种常用的导体、半导体和绝缘体的电阻率。纯净的半导体常温下几乎不导电，当掺入某些类型的特殊杂质或受到光照、环境温度升高等影响时，其导电性能会发生显著的变化，这些特性是制作电子器件的基础。

表 1.1 温度为 300K 时几种材料的电阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)

导体		半导体		绝缘体	
银 Ag	铜 Cu	纯净锗 Ge	纯净硅 Si	橡胶	陶瓷
1.62×10^{-8}	1.72×10^{-8}	600	0.6	$10^{13} \sim 10^{14}$	5×10^{12}

1. 本征半导体的晶体结构

纯净的具有晶体结构的半导体称为本征半导体。半导体通常为四价元素(如硅或锗)。以元素周期表中的 14 号元素硅为例，其原子结构的最外层有 4 个价电子，如图 1.1 所示。虚线上 4 个圆点代表最外层的 4 个价电子，中心标有 +4 的圆圈代表除价电子外的正离子。

在硅晶体中每个原子都与周围的 4 个原子通过共价

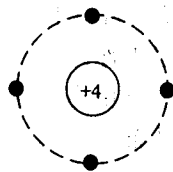


图 1.1 硅和锗的原子结构简图

键形式紧密地连接在一起,并在空间排列成规则的晶格,如图 1.2 所示。由于晶体中共价键的结合力很强,在热力学温度 $T = 0\text{K}$ (相当于 -273°C) 时,价电子的能量不足以挣脱共价键的束缚,因此晶体中没有自由电子。此时硅半导体近似为绝缘体。

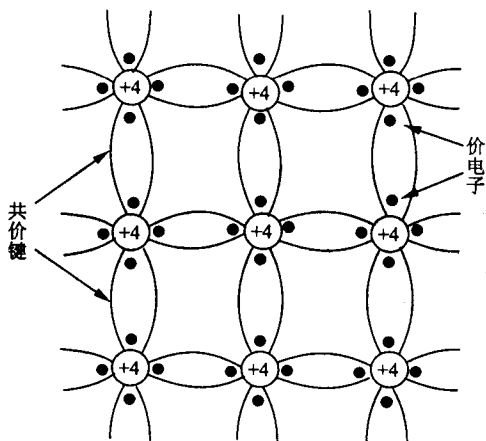


图 1.2 本征半导体结构示意图

2. 本征半导体中的电子 - 空穴对

在常温下,极少数的价电子由于热运动获得足够的能量,从而挣脱共价键的束缚成为自由电子,这个过程称为热激发(或本征激发)。当一部分价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子时,就会在原来的共价键中留下一个空位,这种空位称为空穴。原子失去一个价电子后带正电,因此可以认为空穴带正电。由于空穴的存在,自由电子也可以进来填补空穴,使得自由电子和空穴成对消失,这个过程称为复合。显然,在本征半导体中自由电子和空穴是成对出现的,因而称为电子 - 空穴对。如图 1.3 所示。

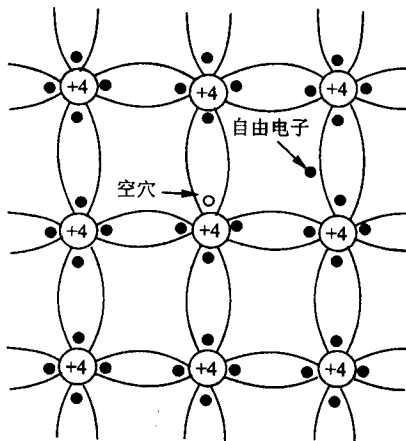


图 1.3 本征半导体中的电子 - 空穴对

在本征半导体两端外加一个电场时,则自由电子将逆着电场方向定向移动形成电子电流;另一方面由于空穴的存在,价电子也可能逆电场方向依次填补

空穴,就好像空穴顺着电场方向移动,从而形成了空穴电流。可以认为,导体中只有自由电子参与导电,而半导体中自由电子和空穴都参与导电,即有两种承载电荷的粒子(载流子),这是半导体导电的特殊之处。

本征半导体的导电能力非常有限,以常温下的硅材料为例:硅的原子浓度为 $5 \times 10^{22}/\text{cm}^3$,而本征载流子的浓度为 $1.5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ 。

3. 温度对本征半导体中载流子浓度的影响

在一定温度下,热激发和复合过程将不断地进行下去并达到动态平衡,使电子-空穴对的浓度一定。在平衡状态下,每立方厘米体积内自由电子和空穴的数量分别用 n_0 和 p_0 来表示,则有 $n_0 = p_0$ 。

本征半导体中载流子的浓度是环境温度的函数,而且随着环境温度的升高近似按指数规律增加。因此,半导体的导电性能对温度很敏感,这一特性可以用来制作热敏器件,但这也是造成半导体器件温度稳定性差的原因。

1.1.2 杂质半导体

通过扩散工艺掺入某些特殊的微量元素后的半导体称为杂质半导体。在纯净的半导体中掺入三价元素可以构成P型(空穴型)半导体,掺入五价元素可以构成N型(电子型)半导体。控制掺入的微量元素的浓度,就可以控制杂质半导体的导电性能。

1. P型半导体

在四价的半导体晶体(如硅)中,掺入微量的三价元素(如硼、镓或铟)就构成了P(Positive)型半导体。由于杂质原子最外层有3个价电子,它们会取代晶格中硅原子的位置而与周围的硅原子形成共价键结构,杂质原子因为缺一个价电子而同时产生一个空位。在常温下,当共价键中硅原子的价电子由于热运动而填补此空位时,杂质原子因为获得了一个电子而成为负离子,同时硅原子的共价键因为缺了一个价电子而产生了一个空穴。杂质负离子处于晶格的位置上而不能自由移动。如图1.4所示。在P型半导体中,空穴来自两个方面:一部分由本征激发产生(数量极少);另一部分与杂质负离子同时产

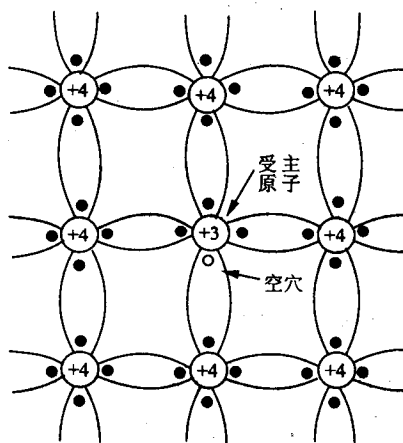


图 1.4 P型半导体结构示意图

生(数量取决于杂质浓度,且与负离子数量相等)。所以,在P型半导体中,空穴的数量等于负离子数加自由电子数,空穴成为多数载流子(简称多子),而自由电子成为少数载流子(简称少子)。杂质原子因为其中的空位吸收电子,而称为受主杂质。

2. N型半导体

同样道理,在四价的半导体晶体(如硅)中,掺入微量的五价元素(如磷、砷或锑)就构成了N(Negative)型半导体。由于杂质原子最外层有5个价电子,当它们取代晶格中硅原子的位置而与周围的硅原子形成共价键时,还会多出一个不受共价键束缚的电子,在常温下,由于热激发就可以使它们成为自由电子。杂质原子由于处于晶格的位置上,且释放了一个电子而成为不能移动的正离子。如图1.5所示。在N型半导体中,自由电子来自两个方面:一部分由本征激发产生(数量极少);另一部分与杂质正离子同时产生(数量取决于杂质浓度,且与正离子数量相等)。所以在N型半导体中,自由电子的数量等于正离子数加空穴数,自由电子成为多数载流子(简称多子),而空穴成为少数载流子(简称少子)。杂质原子可以提供电子,故称为施主杂质。

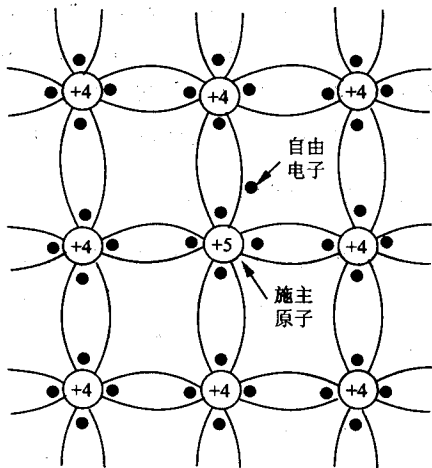


图 1.5 N型半导体结构示意图

3. 杂质半导体中载流子的浓度

由于掺入杂质,杂质半导体中多子与少子复合的机会也增多,使多子的数量大大高于少子。可以认为,多子的浓度近似等于杂质的浓度。由于少子是本征激发产生的,尽管数量极少,却对温度非常敏感,所以它对半导体器件的温度特性影响很大。

1.1.3 PN结

如果将一块半导体的一侧掺杂成为P型半导体,而另一侧掺杂成为N型半导体,则在二者的交界处将形成一个PN结。

1. PN结的形成

在P型和N型半导体的交界面两侧,由于自由电子和空穴的浓度相差悬

殊,所以N区中的多数载流子自由电子要向P区扩散,同时P区中的多数载流子空穴也要向N区扩散,并且当电子和空穴相遇时,将发生复合而消失。如图1.6所示。于是,在交界面两侧将分别形成不能移动的正、负离子区,正、负离子处于晶格位置而不能移动,所以称为空间电荷区(亦称为势垒区)。由于空间电荷区内的载流子数量极少,近似分析时可忽略不计,所以也称其为耗尽层。

空间电荷区一侧带正电,另一侧带负电,所以形成了内电场 E_{in} ,其方向由N区指向P区。在内电场 E_{in} 的作用下,P区和N区中的少子会向对方漂移,同时,内电场将阻止多子向对方扩散,当扩散运动的多子数量与漂移运动的少子数量相等,两种运动达到动态平衡的时候,空间电荷区的宽度一定,PN结就形成了。

一般,空间电荷区的宽度很薄,约为几微米~几十微米;由于空间电荷区内几乎没有载流子,其电阻率很高。

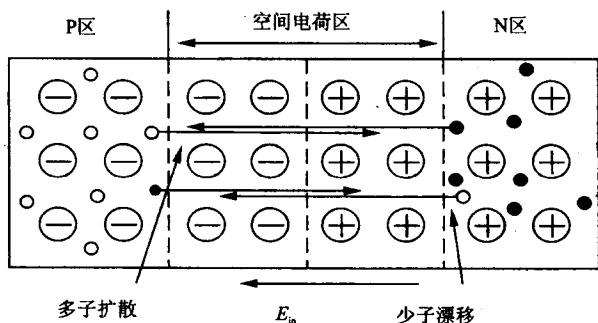


图 1.6 PN 结的形成

2. PN 结的单向导电性

在PN结的两端引出电极,P区的一端称为阳极,N区的一端称为阴极。在PN结的两端外加不同极性的电压时,PN结表现出截然不同的导电性能,称为PN结的单向导电性。

(1) 在外加正向电压时 PN 结处于导通状态

当外加电压使PN结的阳极电位高于阴极时,称PN结外加正向电压或PN结正向偏置(简称正偏)。如图1.7所示。图中实心点代表电子,空心圈代表空穴。此时,外加电场 E_{out} 与内电场 E_{in} 的方向相反,其作用是增强扩散运动而削弱漂移运动。所以,外电场驱使P区的多子进入空间电荷区抵消一部分负空间电荷,也使N区的多子电子进入空间电荷区抵消一部分正空间电荷,其结果是使空间电荷区变窄,PN结呈现低电阻(一般为几百欧姆);同时由于扩散运动