

计 算 机 系 列 教 材

线性电子线路

主 编 王春波

副主编 杨汉昌 张志雄 韩沂宁

毛炳文 刘素清 李 欣



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



计 算 机 系 列 教 材

线 性 电 子 线 路

主 编 王春波

副主编 杨汉昌 张志雄 韩沂宁

毛炳文 刘素清 李 欣



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

线性电子线路/王春波主编. —武汉: 武汉大学出版社, 2006. 8

(计算机系列教材)

ISBN 7-307-05027-7

I. 线… I. 王… II. 线性电路—高等学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 052167 号

责任编辑: 黄金文 徐 方

责任校对: 黄添生

版式设计: 支 笛

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: wdp4@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷: 湖北省通山县九宫印务有限公司

开本: 787×980 1/16 印张: 18.625 字数: 378 千字

版次: 2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 7-307-05027-7/TN · 21 定价: 24.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

内 容 简 介

本书内容包括:电子线路元器件基础,线性电路的基本单元电路,集成运算放大器,放大电路的频率特性,反馈放大电路,集成运算放大应用电路以及小功率直流稳压电源等。

本书注重基础理论,着重概念叙述,突出应用知识,力求文字通俗、简明,避免较深的数学分析。各章均有习题。

本书可作为电子与信息类专业独立学院教材,也可用做高职高专教材,以及电大、职大相关专业作教材用。

序

近五年来,我国的教育事业快速发展,特别是民办高校、二级分校和高职高专发展之快、规模之大是前所未有的。在这种形势下,针对这类学校的专业培养目标和特点,探索新的教学方法,编写合适的教材成了当前刻不容缓的任务。

民办高校、二级分校和高职高专的目标是面向企业和社会培养多层次的应用型、实用型和技能型的人才,对于计算机专业来说,就要使培养的学生掌握实用技能,具有很强的动手能力以及从事开发和应用的能力。

为了满足这种需要,我们组织多所高校有丰富教学经验的教师联合编写了面向民办高校、二级分校和高职高专学生的计算机系列教材,分本科和专科两个层次。本系列教材的特点是:

1. 兼顾了系统性和先进性。教材既注重了知识的系统性,以便学生能够较系统地掌握一门课程,同时对于专业课,瞄准当前技术发展的动向,力求介绍当前最新的技术,以提高学生所学知识的可用性,在毕业后能够适应最新的开发环境。

2. 理论与实践结合。在阐明基本理论的基础上,注重了训练和实践,使学生学而能用。大部分教材编写了配套的上机和实训教程,阐述了实训方法、步骤,给出了大量的实例和习题,以保证实训和教学的效果,提高学生综合利用所学知识解决实际问题的能力和开发应用的能力。

3. 大部分教材制作了配套的多媒体课件,为教师教学提供了方便。

4. 教材结构合理,内容翔实,力求通俗易懂,重点突出,便于讲解和学习。

诚恳希望读者对本系列教材缺点和不足提出宝贵的意见。

编委会

2005年8月8日



前言

电子技术是研究电子器件、电子电路及其应用的科学技术。现在,由于电子技术的影响面广、渗透力强、发展速度快和富于生命力,使得它的应用日益广泛。电子线路是电子技术的重要组成部分,通常可分为模拟电路和数字电路两大部分。模拟电路又可分为线性电路和非线性电路。线性电子电路是电子技术专业最重要的技术基础。

电子技术的发展极大地推动了信息时代的发展。为了培养电子技术人才,培养学生的创造能力,本书突出基本概念、基本电路的工作原理和基本分析方法的思想。同时,考虑到集成电子技术的发展及广泛应用,本书将基本单元电路与集成运放内部电路相关内容融为一体,以便于组织教学和有助于读者对集成运放的理解。

本书共七章,1~5章为基础部分,分别对半导体器件的工作原理、基本单元电路的工作原理及分析方法、集成运放的特性、电子电路的频率特性及反馈放大电路进行了详细地介绍。6~7章为基本应用部分,以应用电路为对象,介绍常用电子电路的工作原理与分析方法。

本书可作为高等院校、高职高专电子技术专业和非电子技术专业及各类培训班的线性电子线路课程教材,也可作为工程技术人员的参考书。

本书第一章由湖北大学知行学院李欣编写,第二章由解放军通信指挥学院毛炳文编写,第三、第四章由武汉市仪表电子学校张志雄编写,第五章由湖北大学知行学院王春波编写,第六章由解放军通信指挥学院韩沂宁编写,第七章由解放军通信指挥学院杨汉昌、刘素清编写,全书由王春波修改定稿。本书在编写过程中得到了武汉大学出版社的大力支持与帮助,我们在此表示衷心感谢!

本书肯定存在一些不足之处,竭诚希望得到广大读者的批评指正。

作 者

2006年4月

目 录

第一章 集成电路元器件基础	1
1.1 半导体的导电特性	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	3
1.2 PN 结	5
1.2.1 PN 结的形成	5
1.2.2 PN 结的单向导电性	6
1.2.3 PN 结电容效应	7
1.3 半导体二极管	8
1.3.1 半导体二极管的结构	8
1.3.2 半导体二极管的伏安特性	8
1.3.3 温度对二极管特性的影响	10
1.3.4 二极管的参数	10
1.3.5 二极管模型	11
1.3.6 特殊二极管	11
1.4 双极型晶体管	14
1.4.1 BJT 结构及放大作用	15
1.4.2 三极管的特性曲线	18
1.4.3 三极管的主要参数	20
1.4.4 共射 BJT 的等效模型与参数	23
1.5 场效应晶体管	23
1.5.1 结型场效应管	23
1.5.2 绝缘栅型场效应管	26
第二章 线性集成电路的基本单元电路	33
2.1 放大电路的性能指标	33
2.1.1 放大的概念	33
2.1.2 放大电路的性能指标	34
2.2 放大电路的基本分析方法	37



2.2.1 共射极放大电路	37
2.2.2 图解法	38
2.2.3 等效电路法	41
2.3 稳定工作点的偏置电路和电流源电路	45
2.3.1 温度对静态工作点的影响	45
2.3.2 射极偏置电路	46
2.3.3 补偿式工作点稳定偏置电路	49
2.3.4 电流源电路	50
2.3.5 有源负载共射放大电路	53
2.4 共集电极电路与共基极电路	53
2.4.1 共集放大电路	54
2.4.2 共基放大电路	58
2.5 差分放大电路	63
2.5.1 差分放大电路的组成及基本概念	63
2.5.2 差分放大电路的低频小信号特性	65
2.5.3 差分放大电路大信号的直流传输特性	71
2.6 多级放大电路	73
2.6.1 计算原则	73
2.6.2 共射—共基组合放大电路	74
2.6.3 共集—共基组合放大电路	77
2.7 输出级电路	80
2.7.1 概述	80
2.7.2 乙类互补对称输出级电路	81
2.7.3 甲乙类互补对称输出级电路	85
2.7.4 单电源互补对称输出级电路	87
2.8 场效应管放大电路	88
2.8.1 FET放大电路的直流偏置及静态分析	88
2.8.2 共源极放大电路	89
2.8.3 共漏极放大电路	91
2.8.4 差分放大电路	93

第三章 集成运算放大器	105
3.1 集成运算放大器简介	105
3.1.1 双极型通用单片集成运算放大器 CF741	105
3.1.2 CMOS 运算放大器	108
3.2 集成运放电路的基本特性和参数	109



3.2.1 集成运放电路的符号与电压传输特性	109
3.2.2 集成运放的主要参数	110
3.3 集成运放的选用原则和使用要点	112
3.3.1 集成运放的选用原则	112
3.3.2 集成运放使用中的几个问题	112
3.4 集成运放的等效模型	115
3.4.1 理想集成运放的等效模型	115
3.4.2 理想集成运放的运算特性	116
3.4.3 实际集成运放的运算特性	120
第四章 放大电路的频率特性	132
4.1 放大电路频率特性的基本概念	132
4.1.1 频率特性和通频带	132
4.1.2 波特图	133
4.1.3 幅度失真和相位失真	133
4.1.4 增益带宽积	134
4.2 频率特性的分析方法	134
4.2.1 传输函数及零极点	134
4.2.2 频率响应的波特图	135
4.3 放大电路的频率特性	138
4.3.1 BJT 电流放大系数的频率特性	138
4.3.2 单级差分放大电路的频率特性	145
4.3.3 共基极放大电路的高频特性	145
4.3.4 共射放大电路的低频响应	148
4.3.5 多级放大电路的频率特性	150
第五章 负反馈放大电路	155
5.1 反馈的基本概念及增益一般表达式	155
5.1.1 反馈的基本概念	155
5.1.2 负反馈放大电路的方框图	156
5.1.3 负反馈放大电路增益的一般表达式	157
5.2 反馈放大电路的分类及基本特点	158
5.2.1 电压并联负反馈	158
5.2.2 电流串联负反馈	159
5.2.3 电压串联负反馈	161
5.2.4 电流并联负反馈	162



5.3	深度负反馈放大电路增益的近似计算	164
5.3.1	深度负反馈放大电路增益的近似表达式	164
5.3.2	深度负反馈放大电路增益的近似计算	165
5.4	负反馈对放大电路性能的改善	167
5.4.1	提高增益的稳定性	167
5.4.2	扩展通频带	169
5.4.3	减小非线性失真	170
5.4.4	抑制放大电路内部的噪声	170
5.4.5	对输入和输出电阻的影响	172
5.5	负反馈放大电路工作的稳定性	173
5.5.1	自激振荡产生的原因及条件	173
5.5.2	稳定工作条件	174
5.5.3	负反馈放大电路稳定性分析	176
5.5.4	频率补偿技术	177
第六章	集成运算放大器应用电路	185
6.1	线性运算电路	185
6.1.1	比例运算电路	185
6.1.2	加减法运算电路	186
6.1.3	积分运算电路	190
6.1.4	微分运算电路	191
6.1.5	对数、反对数及乘除法运算电路	193
6.2	集成运放的高性能组合放大电路	198
6.2.1	精密整流电路	198
6.2.2	仪表用放大电路	201
6.2.3	数控增益放大电路	205
6.3	有源滤波电路	206
6.3.1	基本概念	206
6.3.2	一阶有源滤波电路	208
6.3.3	二阶有源滤波电路	211
6.4	非正弦波发生电路	221
6.4.1	比较器	221
6.4.2	方波发生电路	227
6.4.3	锯齿波发生电路	229
6.5	LC 小信号调谐放大电路	232
6.5.1	LC 并联谐振回路的选频作用	232



6.5.2 LC 调谐放大电路	233
6.5.3 BJT 的 Y 参数等效模型及应用	235
第七章 直流稳压电源	251
7.1 单相整流滤波电路	251
7.1.1 整流电路	252
7.1.2 滤波电路	257
7.2 串联反馈式稳压电路	263
7.2.1 稳压电路的质量指标	263
7.2.2 串联反馈式稳压电路	263
7.2.3 三端集成稳压电路	268
7.3 串联开关式稳压电路	274
参考文献	283



第一章 集成电路元器件基础

通过本章的学习要求了解半导体的基本知识,重点掌握 PN 结的形成及其单向导电性、双极型晶体管、场效应晶体管、半导体光电器件的结构、工作原理、主要特性及主要参数。

1.1 半导体的导电特性

半导体器件是现代电子技术的重要组成部分,由于它具有体积小、重量轻、使用寿命长、输入功率小和功率转换效率高等优点而得到广泛的应用。集成电路特别是大规模和超大规模集成电路不断更新换代,致使电子设备在微型化、可靠性和电子系统设计的灵活性等方面有了重大的进步,因而电子技术成为当代高新技术的龙头。

半导体是现代电子技术最重要的电子材料,小到二极管、三极管、场效应管,大到大规模、超大规模集成电路,其核心材料都是半导体。所谓半导体,就是导电能力介于导体和绝缘体之间的物质。常用的半导体材料有:元素半导体,如硅(Si)、锗(Ge)等;化合物半导体,如砷化镓(GaAs)等;以及掺杂或制成其他化合物半导体的材料,如硼(B)、磷(P)、铟(In)和锑(Sb)等。其中硅是目前最常用的一种半导体材料。半导体除了在导电能力方面与导体和绝缘体不同外,它还具有不同于其他物质的特点,例如:当半导体受到外界光和热的刺激时,其导电能力将发生显著的变化;又如在纯净的半导体中加入微量的杂质,其导电能力也会有显著的增加。这些特点说明,半导体的导电机构必然不同于其他物质。为了理解这些特点,必须了解半导体的结构。

1.1.1 本征半导体

1. 本征半导体的结构

在电子器件中,用得最多的半导体材料是硅(Si)和锗(Ge)。这是因为硅和锗都是四价元素,最外层原子轨道上具有四个价电子。将硅和锗提纯并形成单晶体后,其所有原子整齐地排列。因为硅、锗外围有 4 个电子,它既可以得到 4 个电子而达到稳定状态,也可以失去 4 个电子而达到稳定状态,故其导电性能介于导体与绝缘体之间,称之为半导体。

本征半导体是一种完全纯净的、结构完整的半导体晶体。本征半导体中的四价



元素是靠共价键结合成分子的,图 1-1 为本征半导体硅和锗晶体的原子结构示意图。

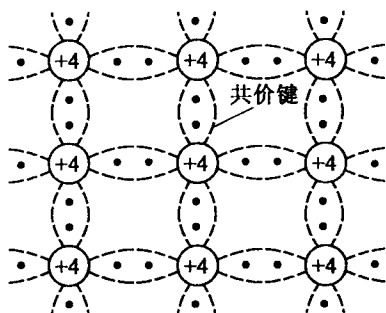


图 1-1 半导体原子结构示意图

2. 本征激发和两种载流子

(1) 本征激发

我们称运载电流的粒子为载流子。半导体的重要物理特性是它的电导率,电导率与材料内单位体积中所含的电荷载流子的数目有关。电荷载流子的浓度愈高,其电导率愈高。半导体内载流子的浓度取决于许多因素,包括材料的基本性质、温度值以及杂质的存在。由于半导体共价键中的价电子并不像绝缘体中束缚得那样紧,在室温下,价电子就会获得足够的随机热振动能量而挣脱共价键的束缚,成为自由电子,如图 1-2 所示,这种现象称为本征激发。

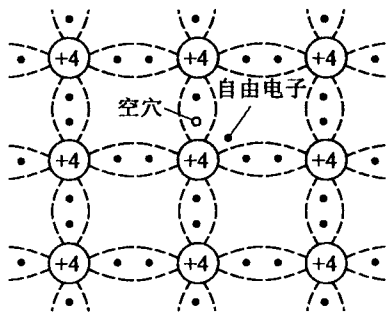


图 1-2 本征激发示意图

(2) 空穴

当电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后,共价键中就留下一个空位,这个空位叫做空穴。空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特点。由于共价键中出现了空穴,在外加电场或其他能源的作用下,邻近价电子就可填补到这个空位上,而在这



个电子原来的位置上又留下新的空位,以后其他电子又可转移到这个新的空位。这样就使共价键中出现一定的电荷迁移。如图 1-2 所示,图中用圆圈表示空穴。所以空穴的移动方向和电子移动的方向是相反的,因而可用空穴移动产生的电流来代表束缚电子移动产生的电流。

由上可见,共价键中空穴或束缚电子移动产生电流的根本原因是由于共价键中出现空穴引起的。只有当共价键中出现了空穴以后,它才开始导电。而且空穴又是失去电子以后留下的空位,因此在分析时,用空穴的运动来代替共价键中电子的运动就更加方便。在这里可把空穴看成是一个带正电的粒子,它所带的电量与电子相等,符号相反,在外加电场作用下,可以自由地在晶体中运动,从而和自由电子一样可以参加导电。因此空穴也是一种载流子,不过这种载流子的运动,是人们根据共价键中出现空位的移动而虚拟出来的,它实际上是共价键中束缚电子移动形成的。空位越多,半导体中的载流子数目就越多,因此形成的电流就愈大。

在本征半导体内,自由电子和空穴总是成对出现的。也就是说,有一个自由电子就必定有一个空穴,因此在任何时候,本征半导体中的自由电子和空穴数总是相等的。

1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中掺入微量的杂质,就会使半导体的导电性能发生显著的改变。因掺入杂质性质不同,杂质半导体可分为空穴(P)型半导体和电子(N)型半导体两大类。

1. P 型半导体

在本征半导体硅(或锗)中,掺入少量三价元素杂质,如硼(或镓)等,因硼原子只有三个价电子,它与周围硅原子组成共价键时,因缺少一个电子,在晶体中便产生一个空位,当相邻共价键上的电子受到热振动或在其他激发条件下获得能量时,就有可能填补这个空位,使硼原子成为不能移动的负离子,而原来硅原子的共价键则因缺少一个电子,形成了空穴,半导体呈中性,如图 1-3 所示。

因为硼原子在硅晶体中能接受电子,故称硼为受主杂质或 P 型杂质。值得注意的是,在产生空穴的同时,并不产生新的自由电子,只是原来的晶体本身仍会产生少量的电子-空穴对。控制掺入杂质的多少,便可控制空穴数量。在 P 型半导体中,空穴数远大于自由电子数,在这种半导体中,以空穴导电为主,因而空穴为多数载流子,自由电子为少数载流子。

2. N 型半导体

在本征半导体硅(或锗)中,掺入少量五价元素,如磷(P)。由于杂质在半导体内产生多余的电子,将之称为施主杂质或 N 型杂质。施主原子在掺杂半导体的共价键

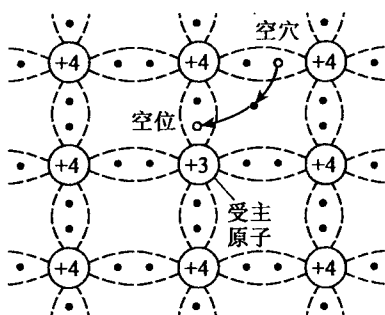


图 1-3 P 型半导体

结构中多余一个电子。当一个施主原子加入半导体后,其多余的电子易于受热激发而挣脱共价键的束缚而成为自由电子,如图 1-4 所示。自由电子参与传导电流,但它移动后,在施主原子的位置上留下一个固定的、不能移动的正离子,致使半导体仍保持中性。值得指出的是,在产生自由电子的同时,并不产生相应的空穴。正因为掺入施主原子的半导体而会有多余的自由电子,故称之为电子型半导体或 N 型半导体。在 N 型半导体中,电子为多数载流子,空穴为少数载流子。

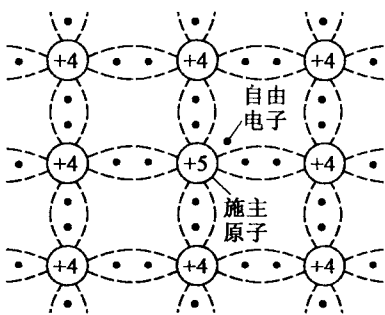


图 1-4 N 型半导体

综上所述,在掺入杂质后,载流子的数目都有相当程度的增加。若每个受主杂质都能产生一个空穴,或者每个施主杂质都能产生一个自由电子,则尽管杂质含量很微小,但它们对半导体的导电能力却有很大的影响。因而对半导体掺杂是提高半导体导电能力的最有效的方法。

应该指出的是,无论 N 型还是 P 型半导体,它们虽都有一种载流子占多数,但是就整块半导体而言,它既没有失去电子,也没有获得电子,掺杂并没有破坏整块半导体内正、负电荷的平衡状态,故杂质半导体是呈电中性的,即对外是不带电的。



1.2 PN 结

1.2.1 PN 结的形成

P 型半导体中含有受主杂质,在室温下,受主杂质电离为带正电的空穴和带负电的受主离子。N 型半导体中含有施主杂质,在室温下,施主杂质电离为带负电的电子和带正电的施主离子。此外,P 型和 N 型半导体中还有少数受本征激发产生的电子和空穴,通常本征激发产生的载流子要比掺杂产生的少得多。应该注意到,半导体中的正负电荷数是相等的,它们的作用互相抵消,因此保持电中性。在 P 型半导体和 N 型半导体结合后,在它们的交界处就出现了电子和空穴的浓度差别,N 型区内电子很多而空穴很少,P 型区内则相反,空穴很多而电子很少。这样,电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散。因此,有一些电子要从 N 型区向 P 型区扩散,也有一些空穴要从 P 型区向 N 型区扩散,如图 1-5 所示。但是,电子和空穴都是带电的,它们扩散的结果就使 P 型区和 N 型区中原来保持的电中性被破坏了。P 型区一边失去空穴,留下了带负电的杂质离子(图 1-6 中用 $\ominus$ 表示);N 型区一边失去电子,留下了带正电的杂质离子(图中用 $\oplus$ 表示)。半导体中的离子虽然也带电,但由于物质结构的关系,它们不能任意移动,因此并不参与导电。这些不能移动的带电粒子通常称为空间电荷,它们集中在 P 型区和 N 型区交界面附近,形成了一个很薄的空间电荷区,这就是所谓的 PN 结。在这个区域内,多数载流子已扩散到对方并复合掉了,或者说消耗尽了,因此空间电荷区有时又称为耗尽区。它的电阻率很高。扩散越强,空间电荷区越宽。在出现了空间电荷区以后,由于正负电荷之间的相互作用,在空间电荷区中就形成了一个电场,其方向是从带正电的 N 型区指向带负电的 P 型区。由于这个电场是由载流子扩散运动即由内部形成的,而不是外加电压形成的,故称为内电场。显然,这个内电场的方向是阻止扩散的,因为这个电场的方向与载流子扩散运动的方向相反。

另一方面,根据电场的方向和电子、空穴的带电极性还可以看出,这个电场将使 N 型区的少数载流子空穴向 P 型区漂移,使 P 型区的少数载流子电子向 N 型区漂移,漂移运动的方向正好与扩散运动的方向相反。从 N 型区漂移到 P 型区的空穴补充了原来交界面上 P 型区失去的空穴,而从 P 型区漂移到 N 型区的电子补充了原来交界面上 N 型区所失去的电子,这就使空间电荷减少。因此,漂移运动的结果是使空间电荷区变窄,其作用正好与扩散运动相反。

由此可见,扩散运动和漂移运动是互相联系又互相矛盾的,扩散使空间电荷区加宽,电场增强,对多数载流子扩散的阻力增大,但使少数载流子的漂移增强;而漂移使空间电荷区变窄,电场减弱,又使扩散容易进行。当漂移运动达到和扩散运动相等时,便处于动态平衡状态。

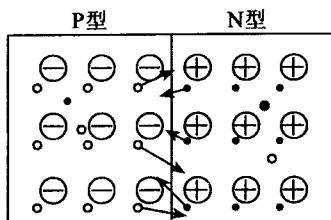


图 1-5 载流子的扩散

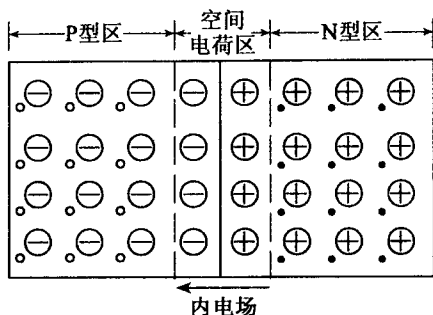


图 1-6 PN 结的形成

1.2.2 PN 结的单向导电性

上面介绍的是 PN 结在没有外加电压时的情况,这时半导体中的扩散和漂移处于动态平衡。PN 结的基本特性——单向导电性,只有在外加电压时才显示出来。

1. 外加正向电压

当 PN 结上外加正向电压时的电路如图 1-7 所示,处在这种连接方式下的 PN 结称为正向偏置(简称正偏)。由图 1-7 可见,当 PN 结处在正向偏置时,电源的正端接 P 型区,负端接 N 型区,外加电场与 PN 结内电场方向相反。在这个外加电场作用下,PN 结的平衡状态被打破,P 型区中的多数载流子空穴和 N 型区中的多数载流子电子都要向 PN 结移动。当 P 型区空穴进入 PN 结后,就要和原来的一部分负离子中和,使 P 型区的空间电荷量减少。同样,当 N 型区电子进入 PN 结时,中和了部分正离子,使 N 型区的空间电荷量减少,结果使 PN 结变窄,内电场被削弱。即耗尽区厚度变薄,这样,正向偏置的 PN 结表现为一个很小的电阻。

2. 外加反向电压

若给 PN 结加反向电压,如图 1-8 所示,外加电场方向与 PN 结内电场方向相同,在这种外电场作用下,P 型区中的空穴和 N 型区中的电子都将进一步离开 PN 结,使耗尽层厚度加宽,这时 PN 结处于反向偏置。这样 P 型区和 N 型区中的多数载流子就很难越过势垒,因此扩散电流趋近于零。但是,由于结电场的增加,使 N 型区和 P 型区中的少数载流子更容易产生漂移运动,因此在这种情况下,PN 结内的电流由起支配地位的漂移电流所决定。漂移电流的方向与扩散电流相反,表现在外电路上有一个流入 N 型区的反向电流 I ,它是由少数载流子的漂移运动形成的。由于少数载