



21世纪高职高专系列教材
21SHIJIGAOZHIGAOZHUANXILIEJIAOCAI

模拟电子技术基础

MONIDIANZIJISHUJICHU



张裕民 编著

西北工业大学出版社

21 世纪高职高专系列教材

模拟电子技术基础

张裕民 编著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书的内容包括半导体二极管及其基本电路、半导体三极管及其基本放大电路、场效应管及其基本放大电路、功率放大电路、模拟集成运算放大器、放大电路的频率特性、反馈放大电路、信号的运算和处理电路、正弦信号和非正弦信号产生电路、直流稳压电源。各章配有习题,并提供参考答案。

本书可作为高等学校仪器类、电子类、电气类和自动控制类等专业的“模拟电子技术基础”课的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础/张裕民编著. —西安:西北工业大学出版社,2003.10
ISBN 7-5612-1674-2

I. 模… II. 张… III. 模拟电路—电子技术—高等学校:技术学校—教材
IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 092396 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029) 8493844,8491757,8494375,8491147(兼传真)

网 址:www.nwpu.com

印 刷 者:兴平市印刷厂印装

开 本:787 mm×960 mm 1/16

印 张:19.75

字 数:349 千字

版 次:2003 年 10 月第 1 版 2003 年 10 月第 1 次印刷

印 数:1~5 000 册

定 价:25.00 元

序

高等职业教育是在我国高等教育大发展的浪潮中崛起的一个新的教育类型,是职业教育的高等阶段,是高等教育的重要组成部分。高等职业教育以培养适应生产、建设、管理、服务第一线需要的高等技术应用型专门人才为根本任务,以适应社会需要为目标,以培养技术应用能力为主线来设计教材的内容、结构和培养方案。高等职业教育由于其毕业生应具有基础理论适度、技术和应用能力强、知识面较宽、素质较高等特点,因而在我国高等教育事业中占有重要的地位,在我国社会主义现代化建设事业中发挥着重要的作用。随着社会的发展、科技的进步,我国的高等职业教育必将进一步发展、壮大。

教材建设是高等学校建设的一项基本内容,培养和造就适应生产、建设、管理、服务第一线需要的高等技术应用性专门人才,要求我们必须重视高等职业教育教材改革与建设,编写和出版一批具有高等职业教育自身特色的高质量教材。

目前,我国的高等职业教育正在蓬勃发展,部分学校已经取得了一些成功的经验,并逐渐形成了自己的办学特色,但高等职业教育的教材建设明显跟不上发展的要求。针对高等职业教育教材的现状,根据教育部提出的近5年内“编写出版一批有特色的基础课程和专业主干课程教材”的工作目标,西北工业大学金叶信息技术学院和西北工业大学出版社密切配合,共同策划,在深入调查、认真研究的基础上,大胆创新,推出了一系列针对性强、难易适中、具有高等职业教育特色的教材。该系列教材具有如下特点。

1. 内容新颖,体现先进性

在研究国内外同类教材的基础上,汲取了有用的养料,并根据专业实际,适当介绍相关科技领域的新进展、新方法、新技术。

2. 体系独特,体现新观念

本系列教材以能力培养为主,所涉及的基础理论深浅适度。教材重在加强学生的基本实践能力与操作技能、专业技术应用能力与专业技能、综合实践能力与综合技能的培养,书中介绍的基础理论,以“必需、够用”为度。

3. 品种多样,体现全面性

本系列教材将教科书、教学参考书、实验教材和视听教材配套,便于教师教学,也便于学生自学。

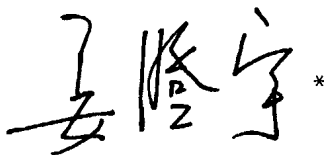
4. 作者实力强大,体现高水平

西北工业大学金叶信息技术学院一直注重培养与高职教育相适应的“双师型”的教师队伍。本系列教材的作者均具有多年的施教经验,现在仍活跃在教学第一线。

5. 编写形式多样,体现新思路

网络化、电子化、数字化是当今社会的特色,本系列教材倡导电子讲稿和多媒体课件的配套出版,以给作者和读者提供一个更加广阔的发展空间。

该系列教材首批推出 12 种,所有书稿几经修改,并经同行专家审定,内容选材新颖、实用,重在对基本概念的启发、理解和提高高职生分析问题、解决问题的能力,因而我热情地向大家推荐这一系列教材,希望它能对广大读者的学习有所帮助,更期望它能在强化素质教育、推动高等职业教育方面起到积极的作用。



2003 年 1 月

* 姜澄宇,西北工业大学校长,教授,博士生导师。

21 世纪高职高专系列教材

编 委 会

- 顾 问** 姚书志(陕西省教育厅高教处处长)
王润孝(西北工业大学党委副书记、副校长)
- 主任委员** 张 渤(西北工业大学金叶信息技术学院副院长)
- 副主任委员** 冯学廉
张近乐(西北工业大学出版社社长)
- 委 员** 宋金书 张水平 张会生 辛 柯
安德利 高光涛 褚泓阳 张 云
李 辉

前 言

编写本教材的目的主要是为了适应高职高专及成人高等教育的需要,当然也同样适用于普通高校学生。

编写本教材的主要参考书是:清华大学童诗白和华成英主编的《模拟电子技术基础》(第3版),华中理工大学康华光和陈大钦主编的《电子技术基础·模拟部分》(第4版)。

为了便于学生解读和自学,本书在编写时尽力做到精选内容、叙述简明、突出基本原理和方法,并多举典型例题以帮助学生巩固和加深对主要内容的理解和掌握,同时也有利于培养和训练学生分析问题和解决问题的能力。

对半导体器件和集成电路的内部结构不做重点仔细分析,而着重其外特性和应用。

在各章之后还选编了数量和难度适中的练习题,并在书后配有参考答案。

为了提高教学质量和加强实践性教学环节,应当安排若干个教学实验与之相配合。

由于时间紧迫,编者水平有限,因此缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正和提出改进意见。

编 者

2003年5月

目 录

第 1 章 半导体二极管和三极管	1
1.1 半导体的基本知识	1
1.1.1 半导体的共价键结构	1
1.1.2 本征半导体的导电形式	2
1.1.3 杂质半导体	3
1.1.4 PN 结	4
1.2 半导体二极管	8
1.2.1 半导体二极管的结构、外形和符号	8
1.2.2 半导体二极管的伏安特性	9
1.2.3 温度变化对二极管伏安特性的影响	9
1.2.4 二极管的主要参数	10
1.2.5 二极管电路的分析方法及计算举例	11
1.2.6 稳压二极管	15
1.3 半导体三极管(BJT)	18
1.3.1 半导体三极管的构成和符号	18
1.3.2 三极管的电流分配关系与放大作用	19
1.3.3 三极管的特性曲线	22
1.3.4 三极管的主要参数	25
1.3.5 温度对三极管参数的影响	27
1.4 半导体器件型号的命名方法	28
小结	29
习题一	29
第 2 章 基本放大电路及其分析方法	34
2.1 放大的概念和放大电路的主要性能指标	34
2.1.1 放大的概念	34
2.1.2 放大电路的主要性能指标	34

2.2 共射极交流放大电路的组成和放大原理	37
2.2.1 共射极交流放大电路的组成	37
2.2.2 放大电路的工作原理	38
2.3 放大电路的基本分析方法	40
2.3.1 静态工作点的估算	40
2.3.2 静态图解法	41
2.3.3 动态图解法	42
2.3.4 静态工作点的设置与调整	46
2.3.5 微变等效电路分析法	47
2.3.6 保证放大电路正常工作的条件	56
2.4 放大电路静态工作点的稳定问题	58
2.4.1 温度对静态工作点的影响	58
2.4.2 能稳定静态工作点的基本放大电路	59
2.4.3 放大电路计算举例	61
2.5 共集电极电路和共基极电路	63
2.5.1 共集电极电路	63
2.5.2 共基极电路	66
2.6 多级放大电路	68
2.6.1 多级放大电路的级间耦合方式	68
2.6.2 阻容耦合多级放大电路的计算举例	69
2.6.3 直接耦合放大电路	71
小结	75
习题二	76

第3章 场效应管放大电路 84

3.1 结型场效应晶体管(JFET)	84
3.1.1 N 沟道结型场效应管的结构和工作原理	84
3.1.2 P 沟道结型场效应晶体管	87
3.2 绝缘栅型场效应晶体管(MOSFET)	88
3.2.1 N 沟道增强型绝缘栅场效应管	88
3.2.2 P 沟道增强型绝缘栅场效应管	91
3.2.3 N 沟道和 P 沟道耗尽型绝缘栅场效应管	92
3.2.4 场效应管的主要参数、特点及使用时的注意事项	94
3.2.5 场效应管的低频微变等效电路	96
3.3 场效应管放大电路	97

3.3.1 场效应管放大电路的直流偏置与静态分析·····	97
3.3.2 场效应管放大电路的微变等效电路分析方法·····	100
小结·····	103
习题三·····	103
第4章 功率放大电路 ·····	107
4.1 功率放大电路的一般问题·····	107
4.1.1 功率放大电路的特点·····	107
4.1.2 功率放大电路提高效率的主要途径·····	108
4.2 直接耦合功率放大电路·····	109
4.2.1 乙类互补对称功率放大电路·····	109
4.2.2 甲乙类互补对称功率放大电路·····	114
4.2.3 单电源的甲乙类互补对称功率放大电路(OTL 功放)·····	116
4.2.4 集成功率放大器·····	118
4.3 变压器耦合功率放大电路·····	120
4.3.1 变压器耦合甲类功率放大电路·····	120
4.3.2 变压器耦合推挽功率放大电路·····	121
4.4 功率放大电路的一些其他问题·····	123
小结·····	126
习题四·····	126
第5章 模拟集成电路 ·····	130
5.1 差动式放大电路·····	131
5.1.1 基本差动放大电路·····	131
5.1.2 差动放大电路的几项主要技术指标·····	136
5.1.3 计算举例·····	137
5.2 集成运算放大器·····	140
5.2.1 集成电路中常用的恒流电路·····	140
5.2.2 普通型集成运算放大器 F007 的组成和工作原理·····	142
5.2.3 集成运算放大器的主要技术性能指标·····	146
5.2.4 专用型集成运算放大器简介·····	148
小结·····	149
习题五·····	149

第 6 章 放大电路的频率特性	153
6.1 频率响应的基本概念和分析方法	153
6.1.1 频率响应的基本概念及波特图	153
6.1.2 放大电路的幅度失真、相位失真和通频带	156
6.2 阻容耦合单级放大电路的低频特性	157
6.3 阻容耦合单级放大电路的高频特性	160
6.3.1 三极管的混合 π 型等效电路	160
6.3.2 H 参数与混合 π 型参数的关系	161
6.3.3 三极管的频率参数	161
6.3.4 阻容耦合单级共射放大电路的高频特性	164
6.3.5 共基极放大电路的高频特性	168
6.3.6 计算举例	168
6.4 多级放大电路的频率特性	170
小结	172
习题六	172
第 7 章 反馈放大电路	175
7.1 反馈的基本概念与分类	175
7.1.1 反馈的基本概念	175
7.1.2 反馈的类型	176
7.2 负反馈放大电路的框图、增益的一般表达式和估算	180
7.3 反馈放大电路反馈极性和组态的判别及电压放大倍数的估算 举例	182
7.4 负反馈对放大电路性能的影响	187
7.4.1 提高增益的稳定性	187
7.4.2 减小非线性失真	188
7.4.3 展宽放大电路的通频带(减小频率失真)	189
7.4.4 负反馈对放大电路输入电阻和输出电阻的影响	190
7.4.5 负反馈组态的选用	193
7.5 负反馈放大电路的稳定性问题	194
7.5.1 负反馈放大电路产生自激的原因、条件和判别方法	194
7.5.2 防止或消除自激的方法	195
小结	198
习题七	200

第 8 章 信号的运算与处理电路	206
8.1 基本运算电路	206
8.1.1 比例运算电路	206
8.1.2 加法运算电路	209
8.1.3 减法运算电路	209
8.1.4 运算电路分析举例	210
8.1.5 积分运算电路	215
8.1.6 微分运算电路	218
8.1.7 综合运算电路举例	219
8.2 对数、指数和乘法、除法运算电路	220
8.2.1 对数运算电路	220
8.2.2 指数运算电路	221
8.2.3 乘法和除法运算	221
8.3 有源滤波电路	223
8.3.1 有源滤波的基本概念	223
8.3.2 一阶有源 RC 滤波电路	224
8.3.3 二阶压控电压源有源 RC 滤波电路	226
8.3.4 二阶无限增益多路反馈有源 RC 滤波电路	230
8.3.5 带阻滤波电路	231
8.3.6 LC 带通滤波电路(选频放大电路)	233
小结	234
习题八	234
第 9 章 信号产生器	242
9.1 产生正弦波振荡的条件	242
9.2 RC 正弦波振荡电路	243
9.2.1 RC 串并网络选频特性	243
9.2.2 RC 振荡电路	244
9.3 LC 正弦波振荡电路	245
9.3.1 LC 并联谐振电路的选频特性	245
9.3.2 变压器反馈式 LC 振荡电路	248
9.3.3 电容反馈式 LC 振荡电路	248
9.3.4 电感反馈式 LC 振荡电路	250
9.3.5 正弦波振荡器的频率稳定性问题	251

9.3.6 石英晶体振荡电路	251
9.4 非正弦信号产生器	254
9.4.1 比较器	254
9.4.2 方波和矩形波产生器	257
9.4.3 锯齿波和三角波产生器	258
小结	261
习题九	261
第 10 章 直流电源	266
10.1 小功率整流滤波电路	266
10.1.1 单相桥式整流电路	266
10.1.2 滤波电路	268
10.2 稳压电路的质量指标	270
10.3 稳压管稳压电路	271
10.3.1 工作原理	271
10.3.2 计算举例	272
10.4 串联反馈式稳压电路	274
10.4.1 电路的组成及稳压原理	274
10.4.2 计算举例	275
10.5 三端集成稳压电路	277
10.5.1 电路及工作原理	277
10.5.2 三端稳压器应用举例	280
10.6 开关型稳压电路	282
10.6.1 串联开关型稳压电路的组成	283
10.6.2 串联开关型稳压电路的工作原理	283
小结	285
习题十	285
习题答案	291
参考文献	302

第 1 章 半导体二极管和三极管

1.1 半导体的基本知识

1.1.1 半导体的共价键结构

一切物质都是由原子构成的,而原子又是由带正电的原子核和带负电的电子所组成的。电子按一定规律分层围绕原子核运动着,最外层的电子称为价电子。物质的化学性质是由价电子所决定的。

物质的导电能力通常用电阻率 $\rho(\Omega \cdot \text{m})$ 来衡量,在工程上用长度为 1 m,截面积为 1 mm²,在温度为 0℃ 时的电阻值。

导体的电阻率为 $\rho < 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$,如铜的电阻率 $\rho = 1.6 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 。

半导体的电阻率为 $10^{-5} \Omega \cdot \text{m} < \rho < 10^6 \Omega \cdot \text{m}$ 。

绝缘体的电阻率为 $\rho > 10^6 \Omega \cdot \text{m}$,如石英玻璃的电阻率 $\rho = 10^{16} \Omega \cdot \text{m}$ 。

半导体在使用上是将它做成单晶体。构成物质的原子由于排列状态不同可将物质分成两类,如物质内部的原子杂乱无章地排列,这种物质叫非晶体。如物质内部原子按一定规律有序排列,这种物质叫晶体。

一块半导体的晶体又是由若干个小晶粒组成的,如果小晶粒之间取向不一致、排列无规章,这种晶体叫多晶体。当小晶粒之间取向一致、排列有序,这种晶体叫单晶体。半导体器件就是用单晶体制造出来的,晶体管的得名就是由此而来。

最常用的半导体硅(Si)和锗(Ge)均为四价元素,其原子最外层分布四个电子。

硅和锗晶体的原子排列构成一个空间正四面体,其平面示意图如图 1.1.1 所示。每个原子核带的正电荷与外层电子带的负电荷是平衡的,故对外呈电中性。在图 1.1.1 中可看到每两个相邻原子之间有一对共用电子,是每两个相邻原子各提供一个价电子所组成的电子对,这个电子对既各自围绕自己的核运

动,也出现在另一个原子所属的轨道上,这样的组合形式叫共价键结构。纯净的硅、锗单晶体就是这样的结构。

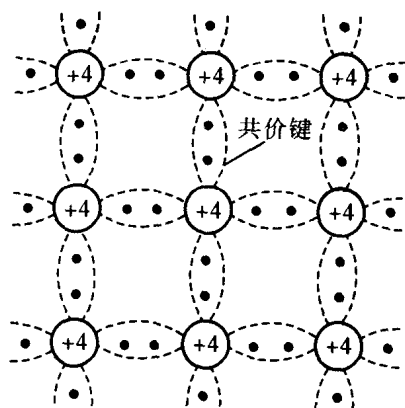


图 1.1.1 本征半导体结构示意图

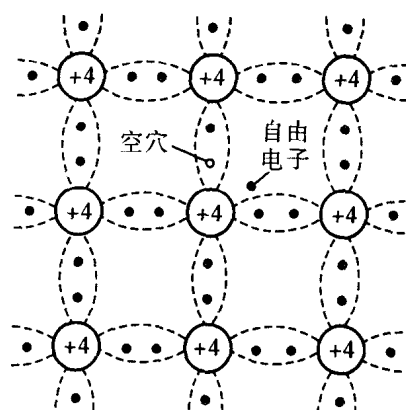


图 1.1.2 本征半导体中的自由电子和空穴

1.1.2 本征半导体的导电形式

共价键结构完整、纯净无杂质的单晶体半导体叫**本征半导体**。由于本征半导体有完整的共价键结构,价电子全部填满了价带(即最外层 8 个电子),则处于比较稳定的状态,特别是在低温更稳定,在绝对零度时就同绝缘体一样。常温下有少数共价键上的价电子受到热或光的激发变成自由电子,这种现象叫**本征激发**。如图 1.1.2 所示。一旦产生一个自由电子,则在该电子所在共价键的位置上便出现一个空位。本来原子呈电中性,由于受激发出走一个电子,则留下这个空位就带正电荷,就把带正电荷的空位叫**空穴**。可见自由电子与空穴是同时产生,成对出现。在本征半导体内,任何时候自由电子和空穴在数量上总是相等的。空穴又可容纳电子,在运动中的自由电子与空穴相遇,电子进入空穴放出能量,又形成共价键结构。自由电子与空穴又同时消失,称这种现象叫**复合**。在温度一定的条件下,激发与复合是处于动态平衡,如温度改变了,则又达到一个新的动态平衡。

在本征半导体两端加上外部电压,本征半导体中的自由电子在外电场作用下发生定向运动便形成电子电流 I_N 。另一方面,共价键上的电子在外电场的作用下,挣脱原子核的束缚走出来填补了邻近的空穴,而自己却又留下了一个空穴,它的邻近价电子又来同样填补,这样依次进行下去,就相当于空穴作定向运动。由于空穴带正电荷,空穴运动形成的电流叫空穴电流 I_P ,可见空穴也是一种载流子。本征半导体中的总电流 $I = I_N + I_P$ 。电子电流是自由电子直

接运动形成的,空穴电流是共价键中的电子传递运动形成的。

本征半导体导电时的电流与载流子的多少有关系,如果给本征半导体加热或用光照射,即使外加电压不变,其电流也会有明显的增加。根据这一特点,可用半导体做成光敏元件、热敏元件等。

1.1.3 杂质半导体

本征半导体的直接应用很有限,实践证明,在本征半导体中掺入微量杂质,其导电性能就会发生显著变化。因此,半导体的导电性能可以通过掺杂的种类和多少来控制。

1. N 型半导体

在本征半导体中掺入微量的五价元素,如磷(P)、砷(As)、锑(Sb)、铋(Bi)等杂质,则杂质原子也参与到半导体晶格共价键的结构之中,而又不破坏原来的晶格结构。因杂质原子是五价的,组成共价键之后,每一个杂质原子都结余一个电子,该电子受原子核的束缚力比共价键上的电子要小,因此,在常温下几乎全部被激发而成为自由电子,这种激发不会有空穴伴随产生。以掺磷为例,其共价键结构的平面示意图如图 1.1.3 所示。一个磷原子提供一个自由电子(磷原子叫施主原子),再加上本征激发产生的电子空穴对,在这块半导体中的载流子既有电子又有空穴,但电子居多数,我们就称电子是多数载流子,空穴是少数载流子,这种掺杂半导体叫电子型半导体,也叫 N 型半导体。

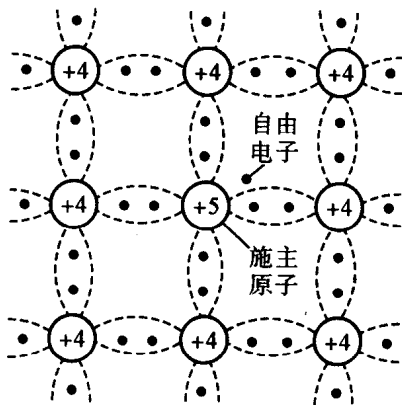


图 1.1.3 N 型半导体

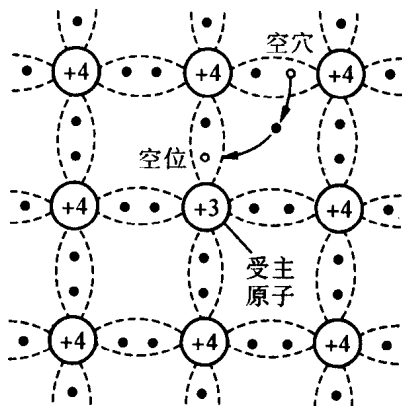


图 1.1.4 P 型半导体

2. P 型半导体

在本征半导体中掺入微量的三价元素,如硼(B)、铝(Al)、镓(Ga)、铟(In)等,以掺硼(B)为例(见图 1.1.4),杂质硼原子三个价电子参与共价键结构后,

还缺少一个价电子,因而在共价键中就留有一个空位,这个空位是不带电的,故不能叫空穴,但它有容纳电子的能力。硼原子也叫受主原子,如有本征激发产生的电子空穴对中的电子填补了空位,则就有空穴出现,这也就相当于掺三价元素而提供了空穴。在这种半导体中多数载流子是空穴,而电子是少数载流子,该半导体叫空穴型半导体,也叫 P 型半导体。

1.1.4 PN 结

杂质半导体与本征半导体相比较,只是导电性能发生了变化,使用价值有限。如果将 P 型和 N 型两块半导体结合起来组成 PN 结,这个 PN 结具有一种新的特性,它就是构成晶体管的基础。

1. PN 结的形成

将 P 型和 N 型两块半导体紧密结合,在交界处就自然形成一个 PN 结。P 型半导体中的空穴浓度比 N 型半导体中的空穴浓度大(浓度指的是单位体积内载流子的数量),而 N 型半导体中自由电子的浓度比 P 型半导体中自由电子的浓度大。在自然界中存在着这样的普遍现象,即任何一种物质微粒都有从浓度大的一方向浓度小的一方进行运动的现象,这种现象叫扩散运动。因此, P 型半导体中多数载流子空穴向 N 型半导体中扩散, N 型半导体中多数载流子电子向 P 型半导体中扩散(见图 1.1.5(a)),在扩散发生以前两块半导体均呈电中性,扩散运动的结果使 N 区失去电子而带正电, P 区得到电子(或失去空穴)而带负电。因此,在接触面的两侧便形成了带电区域(见图 1.1.5(b))。这个带电区所建立的内电场的方向恰好是阻止扩散运动的,这个内电场又会使电场内的少数载流子向扩散运动相反的方向运动,而把载流子在内电场作用下发生的运动叫漂移运动。漂移运动与扩散运动恰好相反。建立稳定的 PN 结之前,扩散运动强于漂移运动,扩散的结果使内电场不断加强,扩散运动逐渐减弱,而漂移运动不断加强,当两者达到动态平衡时,PN 结就稳定了。稳定后的电位分布如图 1.1.5(b) 所示,一般 U_{ho} 为零点几伏。两半导体交界面两侧的正负电荷量是相等的,这个带电区叫空间电荷区。这个区内的内电场是对扩散运动起阻止作用的,故又叫做阻挡层,也称势垒。这个区域内几乎没有可移动的带电粒子(载流子),又可叫做耗尽区。总之就是 PN 结。

当 P 型和 N 型两块半导体掺杂浓度不同时,则空间电荷区在交界面的两侧宽度也不同,掺杂浓度大的一侧空间电荷区要窄一些。

2. PN 结的单向导电特性

(1) PN 结加正向电压: P 型半导体一侧接电源的正极, N 型半导体接电源的负极,这种接外电压的方式叫 PN 结加正向电压,也叫正偏置,电路图如图 1.1.6(a) 所示。图中电阻 R 起到限流保护的作用。这种接外电压的方式就使