



普通高校“十一五”规划教材

张虹 杜德 主编

李耀明 纪官燊 盖君清 副主编

模拟电子技术



北京航空航天大学出版社



普通高校“十一五”规划教材

模拟电子技术

张虹 杜德 主编

李耀明 纪官焱 盖君清 副主编



北京航空航天大学出版社

内容简介

本书是为适应电子信息时代的新形式和应用型本科院校培养应用型人才的迫切需要,并经过教学改革与实践后编写的。本书知识全面,深入浅出,通俗易懂。在保证理论知识够用的同时,注重理论联系实际,培养学生的各方面能力。

全书共分 11 章:半导体器件基础,放大电路基础,放大电路的频率响应,集成运算放大电路,放大电路中的反馈,集成运算放大器的应用,波形发生电路,功率放大电路,直流稳压电源,模拟电路应用举例,可编程模拟器件 ispPAC 及 EDA 软件设计。各章均配有经典例题和习题,书后附有习题答案。

本书适于作为高等院校计算机、电子、通信、机电一体化等专业本科和专科的教科书,也可作为自学考试和从事电子技术工程的工作人员自学用书。本科总学时为 54~72(不含实验),专科可在此基础上适当增加学时。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/张虹,杜德主编. —北京:北京航空航天大学出版社,2007.6

ISBN 978-7-81124-024-5

I. 模… II. ①张…②杜… III. 模拟电路—电子技术—高等学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 030497 号

模拟电子技术

张 虹 杜 德 主 编

李耀明 纪官燊 盖君清 副主编

责任编辑 王媛媛

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhp@263.net

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:21.75 字数:487 千字

2007 年 6 月第 1 版 2007 年 6 月第 1 次印刷 印数:4 000 册

ISBN 978-7-81124-024-5 定价:32.00 元

前 言

在我国高等教育由精英阶段向大众化阶段的历史性转变过程中,高等教育系统也在重新构建,新老本科高校都在重新审视和调整自己的办学定位,确定新的发展目标和战略。在新的历史条件下,新建本科院校的出路不能是“再版”传统本科模式,而是要在能够满足社会发展需求的“大众化”、“应用型”领域寻求发展空间。近年来成立的本科院校大都以应用型为办学定位,形成了一批占全国本科高校总数近30%的与传统本科院校不同的应用型本科院校。

应用型本科院校就是培养本科层次应用型人才的高等学校,重点应落在人才培养上,即主要是对这类学校的人才培养目标、规格以及人才类型、层次作出规定。这些院校把人才培养目标定位在科研生产一线或实际岗位群,使其具有适应高新技术发展及自我学习、提高的能力。所以,应用型本科教育既非宽泛的工程科学教育,亦非狭窄的职业技能培训,而是培养适应工业、工程生产第一线现实和发展需要的工程应用型、技术应用型人才,是既保证本科人才的基本素质,又具有现代职业技术教育特征的高等教育。

为此,应用型本科教材的编写就要体现和满足其自身的人才培养模式和培养目标,要充分体现“应用、实用、适用”的特色,适应高等院校培养高层次应用型人才的实际需要,致力于培养应用型人才的创新精神和实践能力。

本书即是围绕以上宗旨进行编写的。参编人员大都是双师型教师,有着丰富的工程实践经验,能够从实用角度出发对问题进行论证和阐述,例题、习题的选取也具有这个特点。总之,本书注重了以下几方面的问题:

(1) 保证基础,加强概念,培养思路。

(2) 精选内容,主次分明,详略得当。

(3) 面向更新,联系实际,理论与实践并重,知识与技能并重。

(4) 问题分析深入浅出,文字叙述通俗易懂,图文并茂,例题精选,便于自学。

(5) 理论知识以够用为目的,重点加强实际应用。例如,考虑到集成电路的发展及应用,本书大幅度压缩分立元件电路的设计和其他次要的内容,加强以集成运放为主的模拟集成电路的功能和应用。

(6) 随着EDA技术的广泛应用,本书在第11章编写了可编程模拟器件ispPAC及EDA软件设计。

参加本书编写的有:张虹(前言,第2、3、5、8章),杜德(第11章),高寒(第1、4章),于钦庆(第6、7章),刘贞德(第9、10章)。本书由张虹、杜德担任主编,并统编全稿。此外,参加本书编写的还有:李耀明、纪官燊、盖君清、张建华、王立梅、刘晓亮、陈光军、李厚荣、张元国、周



金玲。

此外,为了保证内容的系统性和连续性,我们还编写了另外两本规划教材:《数字电路与数字逻辑》和《电路分析》。连同本书《模拟电子技术》一起,将成为应用型本科院校计算机、电子、通信、机电一体化等专业非常实用的教学与学习用书。

编写过程中,由于时间仓促,加之水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,敬请各方面的读者予以批评指正,以便今后不断改进。

编 者

2006 年 12 月

目 录

第 1 章 半导体器件基础	1
1.1 半导体基础知识	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	2
1.1.3 PN 结	3
1.2 半导体二极管	5
1.2.1 二极管的结构和符号	5
1.2.2 二极管的伏安特性	6
1.2.3 二极管的主要参数	7
1.2.4 二极管的应用电路	8
1.2.5 特殊二极管	11
1.2.6 二极管的简易测试	15
1.2.7 二极管使用注意事项	16
1.3 晶体三极管	16
1.3.1 三极管的结构和符号	16
1.3.2 三极管的电流放大原理	17
1.3.3 三极管的共射特性曲线	19
1.3.4 三极管的主要参数	22
1.3.5 三极管的判别及手册的查阅方法	24
1.4 场效应管	26
1.4.1 结型场效应管	26
1.4.2 绝缘栅型场效应管	29
1.4.3 场效应管的主要参数	32
1.4.4 场效应管的检测及使用注意事项	32
1.4.5 各种场效应管比较	33
1.4.6 场效应管和三极管比较	35
本章小结	35
习题 1	35



第2章 放大电路基础	42
2.1 基本放大电路的方框图及性能指标	42
2.1.1 基本放大电路的方框图	42
2.1.2 放大电路的性能指标	43
2.2 基本放大电路的组成及工作原理	46
2.2.1 放大电路的组成	46
2.2.2 放大电路的工作原理	48
2.3 放大电路的基本分析方法	49
2.3.1 直流通路与交流通路	49
2.3.2 静态工作点的近似估算	50
2.3.3 图解法	51
2.3.4 微变等效电路法	56
2.4 放大电路静态工作点的稳定	62
2.4.1 温度对静态工作点的影响	62
2.4.2 静态工作点稳定电路	63
2.5 放大电路的三种组态及其比较	66
2.5.1 共集电极放大电路	66
2.5.2 共基极放大电路	69
2.5.3 基本放大电路三种组态的性能比较	72
2.6 场效应管放大电路	72
2.6.1 静态分析	72
2.6.2 动态分析	75
2.6.3 共源极放大电路的动态分析	75
2.6.4 共漏极放大电路的动态分析	77
2.7 多级放大电路	78
2.7.1 多级放大电路的耦合方式	78
2.7.2 多级放大电路的动态分析	81
本章小结	84
习题2	84
第3章 放大电路的频率响应	93
3.1 基本概念	93
3.1.1 频率响应	93
3.1.2 幅频特性和相频特性	93
3.1.3 频率失真	93

3.1.4 频率特性曲线	94
3.2 三极管的频率参数	98
3.2.1 共射截止频率 f_{β}	99
3.2.2 特征频率 f_T	99
3.2.3 共基截止频率 f_{α}	99
3.3 单管共射放大电路的频率响应	100
3.3.1 混合 π 型等效电路	100
3.3.2 阻容耦合单管共射放大电路的频率响应	102
3.3.3 直接耦合单管共射放大电路的频率响应	109
3.4 多级放大电路的频率响应	109
本章小结	110
习题 3	111
第 4 章 集成运算放大器	114
4.1 集成电路概述	114
4.1.1 集成电路及其发展	114
4.1.2 集成电路的特点	114
4.1.3 分 类	115
4.1.4 集成电路制造工艺简介	117
4.2 集成运放的基本组成及功能	121
4.2.1 偏置电路	121
4.2.2 差动放大输入级	122
4.3 集成运放的典型电路	131
4.3.1 集成运算放大器件的识读	131
4.3.2 集成运放的典型电路	131
4.4 集成运放的主要参数及其选择	133
4.4.1 集成运放的主要参数	133
4.4.2 集成运放的选择	136
4.5 集成运放的使用	136
4.5.1 集成运放使用中注意的问题	136
4.5.2 集成运放的保护	137
4.6 理想运算放大器	138
4.6.1 理想运放的技术指标	138
4.6.2 理想运放的两种工作状态	138
本章小结	140



习题 4	141
第 5 章 放大电路中的反馈	146
5.1 反馈的基本概念及判别方法	146
5.1.1 反馈的基本概念	146
5.1.2 反馈的分类	147
5.1.3 反馈类型的判断方法	148
5.1.4 负反馈的 4 种组态	150
5.2 反馈的一般表达式和近似估算法	155
5.2.1 反馈的一般表达式	155
5.2.2 深度负反馈放大电路电压放大倍数的估算	156
5.3 负反馈对放大电路性能的影响	159
5.3.1 稳定放大倍数	159
5.3.2 改变输入电阻和输出电阻	160
5.3.3 展宽频带	161
5.3.4 减小非线性失真	162
5.4 负反馈放大电路的自激振荡及消除方法	163
5.4.1 产生自激振荡的原因及条件	163
5.4.2 自激振荡的判断方法	163
5.4.3 消除自激振荡的方法	164
本章小结	165
习题 5	166
第 6 章 集成运算放大器的应用	171
6.1 运算电路	171
6.1.1 比例运算电路	171
6.1.2 加减运算电路	176
6.1.3 积分和微分运算电路	179
6.1.4 模拟乘法器及其应用	181
6.2 有源滤波器	185
6.3 电压比较器	190
6.3.1 电压比较器概述	190
6.3.2 单限比较器	192
6.3.3 滞回电压比较器	193
6.3.4 双限电压比较器	195
本章小结	195

习题 6	196
第 7 章 波形发生电路	203
7.1 正弦波振荡电路	203
7.1.1 正弦波振荡电路的基础知识	203
7.1.2 RC 正弦波振荡电路	205
7.1.3 LC 正弦波振荡电路	208
7.1.4 石英晶体正弦波振荡电路	212
7.2 非正弦波振荡电路	213
7.2.1 矩形波发生电路	213
7.2.2 三角波发生电路	214
7.2.3 锯齿波发生电路	215
7.3 波形变换电路	216
7.3.1 三角波变锯齿波电路	216
7.3.2 三角波变正弦波电路	218
7.3.3 压控振荡电路	218
7.4 集成函数发生器 8038 简介	219
本章小结	221
习题 7	222
第 8 章 功率放大电路	225
8.1 功率放大电路的特点和分类	225
8.1.1 功率放大电路的特点	225
8.1.2 功率放大电路的分类	226
8.2 乙类双电源互补对称功率放大电路	227
8.2.1 电路组成及工作原理	227
8.2.2 功率和效率的估算	228
8.3 OCL 甲乙类互补对称功率放大电路	230
8.3.1 交越失真及其消除	230
8.3.2 由复合管组成的 OCL 互补对称功率放大电路	231
8.4 单电源互补对称功率放大电路	233
8.4.1 电路组成及工作原理	233
8.4.2 功率和效率的估算	233
8.5 实用功率放大电路举例	234
8.5.1 OCL 高保真功率放大电路	234
8.5.2 OTL 音频功率放大电路	235



8.6 集成功率放大器介绍	236
8.6.1 TDA2030A 音频集成功率放大器简介	236
8.6.2 TDA2030A 集成功放的典型应用	238
本章小结	239
习题 8	239
第 9 章 直流稳压电源	242
9.1 直流稳压电源的组成	242
9.2 整流电路	243
9.2.1 单相半波整流电路	243
9.2.2 单相全波整流电路	244
9.2.3 单相桥式整流电路	245
9.2.4 整流电路的主要参数	246
9.3 滤波电路	249
9.3.1 电容滤波电路	249
9.3.2 Π 形 RC 滤波电路	250
9.3.3 电感滤波电路和 LC 滤波电路	251
9.4 稳压管稳压电路	252
9.4.1 电路组成及稳压原理	252
9.4.2 主要稳压指标	253
9.4.3 限流电阻的选择	254
9.5 串联型直流稳压电路	256
9.5.1 电路组成及工作原理	256
9.5.2 稳压电路的保护电路	257
9.6 集成稳压电路	259
9.6.1 集成稳压电路概述	259
9.6.2 三端集成稳压器简介	259
9.7 开关型稳压电源	264
9.7.1 开关型稳压电源的特点和分类	264
9.7.2 串联开关型稳压电源	265
9.7.3 隔离式开关型稳压电源	268
本章小结	269
习题 9	270
第 10 章 模拟电路应用举例	274
10.1 模拟电路的读图	274

10.1.1 模拟电路读图的思路和步骤·····	274
10.1.2 集成运放应用电路的识别方法·····	275
10.2 电路举例·····	276
10.2.1 低频功率放大电路·····	276
10.2.2 小型温度控制电路·····	278
10.2.4 多种波形发生电路·····	282
10.2.5 自动增益控制电路·····	285
10.2.6 电压-频率转换电路(压控振荡器)·····	287
本章小结·····	290
习题 10·····	290
第 11 章 可编程模拟器件 ispPAC 及其 EDA 软件设计 ·····	293
11.1 ispPAC 简介·····	293
11.1.1 可编程模拟器件概述·····	293
11.1.2 在系统可编程模拟器件 ispPAC 简介·····	293
11.2 在系统可编程模拟电路的结构·····	294
11.2.1 ispPAC10 器件结构·····	294
11.2.2 ispPAC20 器件结构·····	296
11.2.3 ispPAC30 器件结构·····	300
11.2.4 ispPAC80 器件结构·····	303
11.3 PAC 的接口电路·····	305
11.4 ispPAC 的增益调整方法·····	306
11.4.1 通用增益设置·····	306
11.4.2 分数增益的设置法·····	309
11.4.3 整数比增益设置法·····	309
11.5 滤波器设计·····	310
11.6 PAC-Designer 软件的使用方法·····	313
11.6.1 PAC-Designer 软件的安装·····	313
11.6.2 PAC-Designer 软件的使用方法·····	313
本章小结·····	320
习题 11·····	320
习题参考答案 ·····	321
参考文献	

第 1 章 半导体器件基础

1.1 半导体基础知识

1.1.1 本征半导体

导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体。一般来说,半导体的电阻率在 $(10^{-4} \sim 10^9) \Omega \cdot \text{m}$ 的范围内。半导体是构成电子元器件的重要材料,最常用的半导体材料是硅(Si)和锗(Ge)两种元素。纯净的晶体结构的半导体称为本征半导体。

本征半导体是通过一定的工艺过程形成的单晶体,其中每个硅或锗原子最外层的 4 个价电子,均与它们相邻的 4 个原子的价电子共用,从而形成共价键,如图 1.1(a)所示。

本征半导体中原子间的共价键具有较强的束缚力,每个原子都趋于稳定,它们是否有足够的能量挣脱共价键的束缚,与热运动、即温度紧密相关。在热力学温度 0 K(约 -273°C)时,价电子基本不能移动,因而在外电场作用下半导体中电流为零,此时它相当于绝缘体。但在常温下,由于热运动价电子被激活,有些获得足够能量的价电子会挣脱共价键成为自由电子,与此同时共价键中就流下一个空位,称为空穴。这种现象称为本征激发,如图 1.1(b)所示。由于电子带负电荷,所以空穴表示缺少一个负电荷,即空穴具有正电荷粒子的特性。

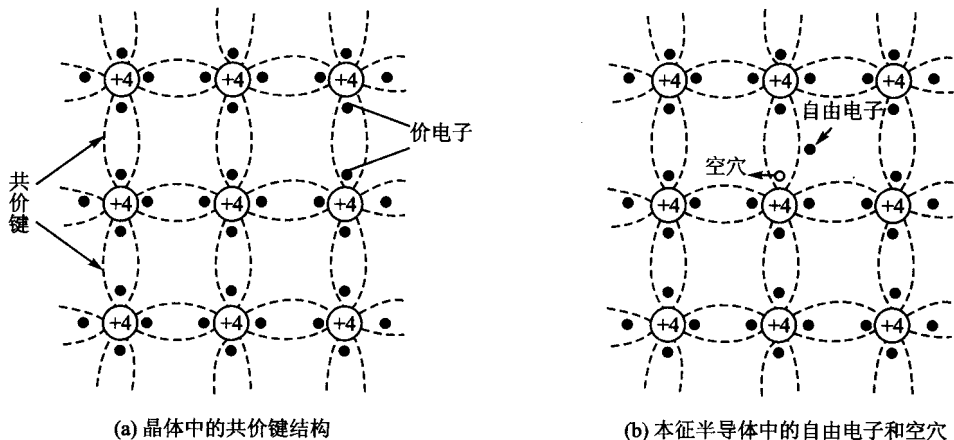


图 1.1 本征半导体

在电子-空穴对产生的同时,运动中的自由电子也有可能去填补空穴,使电子和空穴成对消失,这种现象称为复合。在外电场作用下,一方面带负电荷的自由电子做定向移动,形成电子电流;另一方面价电子会按电场方向依次填补空穴,产生空穴的定向移动,形成空穴电流。能够运动的、可以参与导电的带点粒子称为载流子,因而自由电子和空穴是半导体中的两种载流子。由于它们所带电荷极性相反,所以电子电流和空穴电流的方向相反。

在一定温度下,电子-空穴对的产生和复合都在不停地进行,最终处于动态平衡状态,使半导体中载流子的浓度一定。当温度升高时,本征半导体中载流子浓度将增大。由于导电能力决定于载流子数目,因此半导体的导电能力将随温度升高而增强。温度是影响半导体器件性能的一个重要的外部因素,半导体材料的这种特性称为热敏性。此外,还有光敏性和掺杂性。

1.1.2 杂质半导体

在常温下,本征半导体中载流子浓度很低,因而导电能力很弱。为了改善导电性能并使其具有可控性,需在本征半导体中掺入微量的其他元素(称为杂质)。这种掺入杂质的半导体称为杂质半导体。因掺入杂质的性质不同,可分为 N 型半导体和 P 型半导体。

1. N 型半导体

在本征半导体硅(或锗,此处以硅为例)中掺入微量的 5 价元素磷(P),就形成 N 型半导体。由于磷原子最外层的 5 个价电子中有 4 个与相邻硅原子组成共价键,如图 1.2(a)所示,多余一个价电子受磷原子核的束缚力很小,很容易成为自由电子,而磷原子本身因失去电子成为不能移动的杂质正离子。

N 型半导体的特点:它是以电子导电为主的杂质型半导体,因为电子带负电(negative electricity),所以称为 N 型半导体。其中自由电子是多数载流子(简称多子),空穴是少数载流子(简称少子)。杂质离子带正电。

2. P 型半导体

在本征硅中掺入 3 价元素硼(B),就形成 P 型半导体。硼有 3 个价电子,每个硼原子与相邻的 4 个硅原子组成共价键时,因缺少一个电子而产生一个空位(不是空穴,因为硼原子仍呈中性),如图 1.2(b)所示。在室温或其他能量激发下,与硼原子相邻的硅原子共价键上的电子就可能填补这些空位,从而在电子原来所处的位置上形成带正电的空穴,硼原子本身则因获得电子而成为不能移动的杂质负离子。

P 型半导体的特点:它是以空穴导电为主的杂质型半导体,因为空穴带正电(positive electricity),所以称为 P 型半导体。其中空穴是多数载流子(多子),自由电子是少数载流子(少子)。杂质离子带负电。

今后,为简单起见,通常只画出正离子和等量的自由电子来表示 N 型半导体;同样地,只画出负离子和等量的空穴来表示 P 型半导体,分别如图 1.3(a)和图 1.3(b)所示。

综上所述,掺入杂质后,由于载流子的浓度提高,因而杂质半导体的导电性能将增强,而且

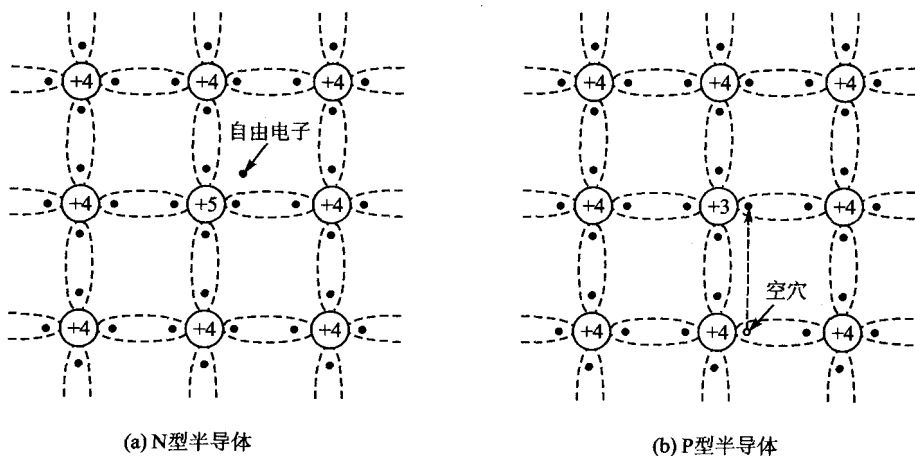


图 1.2 杂质半导体结构示意图

掺入的杂质越多,多子浓度越高,导电性能也就越强,实现了导电性能的可控性。例如,在4价的硅中掺入1%的3价杂质硼后,在室温时的电阻率与本征半导体相比,将下降到 $\frac{1}{5 \times 10^5}$,可见导电能力大大提高。

当然,仅仅提高导电能力不是最终目的,因为导体的导电能力更强。杂质半导体的奇妙之处在于,

掺入不同性质、不同浓度的杂质,并使P型半导体和N型半导体采用不同的方式组合,可以制造出形形色色、品种繁多、用途各异的半导体器件。

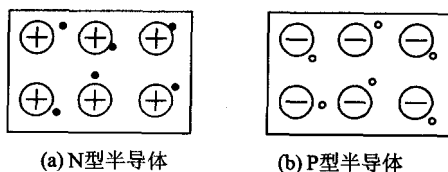


图 1.3 杂质半导体的简化画法

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特殊的薄层,此即PN结。

1. PN结的形成

(1) 多子的扩散运动

将P型半导体和N型半导体制作在一起,在两种半导体的交界面就出现了电子和空穴的浓度差。物质总是从浓度高的地方向浓度低的地方扩散,自由电子和空穴也不例外。因此,P区中的多子(即空穴)将向N区扩散,而N区中的多子(即自由电子)将向P区扩散。扩散运动的结果就使两种半导体交界面附近出现了不能移动的带电离子区,P区出现负离子区,N区出现正离子区,如图1.4所示。这些带电离子形成了一个很薄的空间电荷区,产生了内电场。

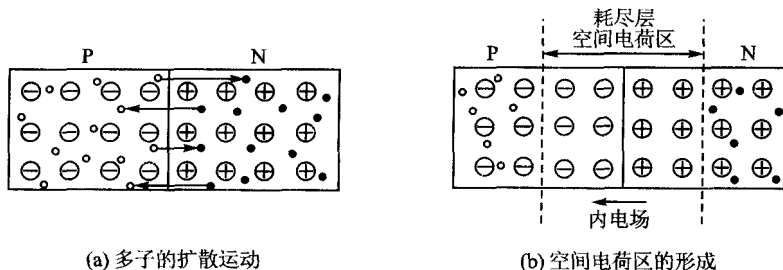


图 1.4 PN 结的形成

(2) 少子的漂移运动

一方面,随着扩散运动的进行,空间电荷区加宽使内电场增强;另一方面,内电场又将阻止多子的扩散运动,而使 P 区中的少子电子向 N 区运动,N 区中的少子空穴向 P 区运动,这种在电场作用下少子的运动称为漂移运动。少子漂移运动的方向正好与多子扩散运动的方向相反,因而漂移运动的结果是使空间电荷区变窄,使内电场减弱。当参与扩散运动的多子与参与少子漂移运动的少子数目相等时,即达到了动态平衡,此时,空间电荷区的宽度不再变化,PN 结处于相对稳定状态。空间电荷区又称耗尽层。若无外加电压或其他激发因素作用时,流过 PN 结的电流为零。

2. PN 结的单向导电性

在 PN 结两端外加电压,称为给 PN 结加上偏置。当 P 区电位高于 N 区时称为正向偏置,简称正偏;反之,当 N 区电位高于 P 区时称为反向偏置,简称反偏。PN 结最重要的特性就是单向导电性。

(1) PN 结正向偏置

给 PN 结加正向偏置电压,如图 1.5 所示。这时外电场与内电场方向相反,外电场削弱了内电场,空间电荷区变窄,正向电流 I 较大,PN 结在正向偏置时呈现较小电阻,PN 结变为导通状态。正向偏置电压稍有增加,PN 结的正向电流 I 急剧增加,为了防止大的正向电流把 PN 结烧毁,实际电路都要串接限流电阻 R 。

(2) PN 结反向偏置

给 PN 结加反向偏置电压,如图 1.6 所示。这时外电场与内电场方向相同,空间电荷区变宽,内电场增强,因而有利于少子的漂移而不利于多子的扩散。由于电源的作用,少子的漂移形成了反向电流 I_s 。但是,少子的浓度非常低,使得反向电流很小,一般为 μA (微安)数量级。所以可以认为 PN 结反向偏置时基本不导电。

综上所述,PN 结正向偏置时导通,表现出的正向电阻很小,正向电流 I 较大;反向偏置时截止,表现出的反向电阻很大,此时正向电流为零,只有很小的反向饱和电流 I_s 。

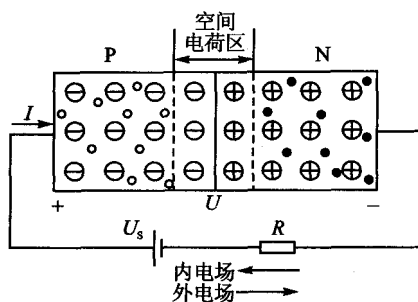


图 1.5 PN 结正向偏置

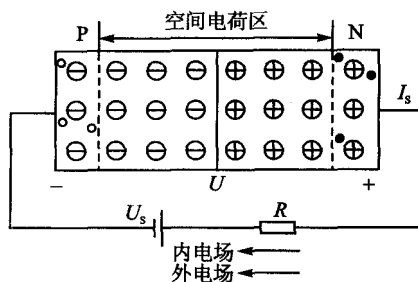


图 1.6 PN 结反向偏置

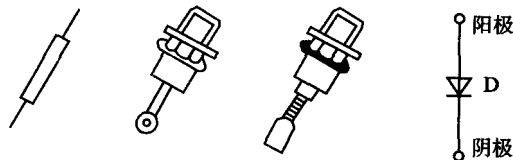
1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的结构和符号

在 PN 结的两端引出两个电极并将其封装在金属或塑料管壳内,就构成二极管。二极管通常由管芯、管壳和电极三部分组成,管壳起保护管芯的作用,如图 1.7 所示。从 P 区引出的电极称为正极或阳极,从 N 区引出的电极称为负极或阴极。二极管的外形图和图形符号如图 1.8 所示。二极管一般用字母 D 表示。



图 1.7 二极管结构示意图



(a) 二极管的外形图

(b) 二极管的图形符号

图 1.8 二极管的外形和图形符号

二极管的种类很多,分类方法也不同。按制造所用材料分类,主要有硅二极管和锗二极管;按其结构分类,有点接触型和面接触型二极管。

点接触型二极管的结面积小,极间电容小,不能承受高的反向电压和大的正向电流。这种类型的二极管适于作高频检波和脉冲数字电路里的开关元件。

面接触型二极管的结面积大,可承受较大的电流,但极间电容也大,适合于低频整流。

小电流二极管常用玻璃壳或塑料壳封装,为便于散热,大电流二极管一般使用金属外壳。通过电流在 1 A 以上的二极管常加散热片以帮助散热。