



高职高专通用教材

模拟电子技术基础

杨碧石 何其贵 主编



北京航空航天大学出版社



高职高专通用教材

模拟电子技术基础

杨碧石 何其贵 主编



北京航空航天大学出版社

内 容 提 要

本书介绍了模拟电子技术中,半导体的基本知识、放大电路的基本概念和分析计算方法。全书共8章。第1章介绍半导体的基本知识;第2~5章系统地介绍了基本放大电路和集成运算放大电路的分析与计算,是本书的重点、难点;第6章介绍波形发生电路;第7章介绍低频功率放大器;第8章介绍直流稳压电源。在每章后面配有本章小结、思考题和习题,便于读者巩固所学理论知识,提高分析问题和解决问题的能力。

本书可作为高职高专院校电子、电气、自动化和计算机等有关专业的教材或参考书,也可供模拟电子技术的自学者和科技人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础/杨碧石等主编. —北京:北京航空航天大学出版社,2006.1
ISBN 7-81077-685-1

I. 模… II. 杨… III. 模拟电路—电子技术
IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 070570 号

模拟电子技术基础

杨碧石 何其贵 主编

责任编辑:蔡 喆

*

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:bhpress@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:12.75 字数:286 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月第 1 次印刷 印数:4 000 册

ISBN 7-81077-685-1 定价:17.00 元

前 言

电子技术是不断迅速发展的学科之一。随着科学技术的发展,许多专业的教学中相继开设了电子技术课程。电子技术课程主要分为模拟电子技术和数字电子技术,是学习其他相关课程的基础。本书主要讨论模拟电子技术。

本书在编写过程中,注意精选内容,突出重点,加强基本概念、基本原理、基本分析方法、基本单元电路的训练和培养。由于本课程的工程性较强,因此在分析、计算时突出主要矛盾和主要问题,而忽略其次要因素,不追求数学上的严密性,而强调实用性及物理概念的清晰。

本教材是根据《高职高专教育专业人才培养目标及规格》要求,结合作者多年的教学改革和实践经验,以培养高素质、具备综合工作能力的人才为出发点编写而成的。

全书共8章。第1章主要讲述半导体器件的基本知识,为学习以后各章打下必要的理论基础。第2章主要讨论基本放大电路的组成原理、工作状态的分析以及放大电路的指标计算。这是本课程的重要基础。第3章介绍集成运算放大电路。第4章介绍负反馈放大电路,负反馈是改善放大电路性能的重要措施。第5章介绍集成运算放大电路的应用。第6章介绍波形发生电路。第7章介绍低频功率放大电路。第8章介绍直流稳压电源。

本教材由江苏省南通职业大学杨碧石老师和江西信息应用职业技术学院何其贵老师担任主编,戴春风、赵青老师参与编写。其中第1,4,6章由杨碧石编写;第2章由赵青编写;第3,5章由戴春风编写;第7,8章由何其贵编写。全书由杨碧石统稿。

在本书编写与整理过程中,得到了许多专家及同行的大力支持和帮助,并提出了一些宝贵意见,在此,向他们表示衷心的感谢。

由于笔者水平所限,书中难免会有错误和不妥之处,敬请广大读者批评指正,建议和意见可通过 E-mail 发至:ntybs@mail.ntvc.edu.cn。

编 者

2005 年 12 月

目 录

第 1 章 半导体器件

1.1 半导体的特性	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	2
1.2 半导体二极管	4
1.2.1 PN 结的形成	4
1.2.2 PN 结的单向导电性	5
1.2.3 二极管的伏安特性	6
1.2.4 二极管的主要参数	7
1.2.5 特殊二极管简介	8
1.3 半导体三极管	9
1.3.1 晶体三极管的结构和符号	10
1.3.2 三极管的电流放大工作原理	10
1.3.3 三极管的特性曲线和主要参数	12
1.4 场效应三极管	15
1.4.1 N 沟道增强型场效应管	15
1.4.2 场效应管主要参数	17
本章小结	18
思考题与习题	19

第 2 章 基本放大电路

2.1 放大的概念	21
2.2 单管共发射极放大电路	22
2.2.1 单管共发射极放大电路的组成	22
2.2.2 单管共发射极放大电路的放大原理	22
2.3 放大电路的主要技术指标	24
2.4 放大电路的基本分析方法	26
2.4.1 直流通路与交流通路	27
2.4.2 静态工作点的近似估算	28
2.4.3 图解法	28

2.4.4 微变等效电路法	34
2.5 静态工作点稳定电路	40
2.5.1 温度对静态工作点的影响	40
2.5.2 静态工作点稳定电路	41
2.6 放大电路的三种基本组态	43
2.6.1 共集电极放大电路	44
2.6.2 共基极放大电路	46
2.6.3 三种基本组态的比较	48
2.7 场效应管放大电路	48
2.7.1 共源极放大电路	48
2.7.2 共漏极放大电路	52
2.8 多级放大电路	54
2.8.1 多级放大电路的耦合方式	54
2.8.2 多级放大电路的性能指标分析计算	57
2.9 放大电路的频率特性	58
2.9.1 频率响应的一般概念	58
2.9.2 单管共发射极放大电路的频率响应	62
2.9.3 多级放大电路的频率响应	67
本章小结	67
思考题与习题	68

第3章 集成运算放大电路

3.1 集成运算放大电路的特点及基本组成	75
3.1.1 集成运算放大电路的特点	75
3.1.2 集成运算放大电路的基本组成	75
3.2 集成运算放大电路中的偏置电路	76
3.2.1 镜像电流源	76
3.2.2 比例电流源	77
3.2.3 微电流源	77
3.3 差动放大电路	78
3.3.1 长尾式差动放大电路	79
3.3.2 恒流源式差动放大电路	84
3.4 集成运算放大电路的技术指标	86
3.5 理想运算放大电路	88

3.5.1 理想运算放大电路技术指标	88
3.5.2 理想运算放大电路的工作状态	88
本章小结	89
思考题与习题	90

第4章 反馈放大电路

4.1 反馈的概念与分类	93
4.1.1 反馈的基本概念	93
4.1.2 反馈的分类	94
4.1.3 反馈的基本类型	95
4.1.4 反馈的一般表达式	97
4.2 负反馈对放大电路工作性能的影响	98
4.2.1 提高放大倍数的稳定性	98
4.2.2 减小非线性失真	98
4.2.3 拓宽频带	99
4.2.4 改变输入电阻和输出电阻	100
4.3 深度负反馈放大电路的分析计算	101
4.3.1 利用关系式 $A_f \approx 1/F$ 估算闭环电压放大倍数	101
4.3.2 利用关系式 $X_i \approx X_i$ 估算闭环电压放大倍数	102
4.3.3 深度负反馈放大电路计算举例	102
4.4 负反馈放大电路的自激振荡和消除方法	103
4.4.1 产生自激振荡的条件和原因	104
4.4.2 消除自激振荡的方法	104
本章小结	106
思考题与习题	107

第5章 集成运算放大电路的应用

5.1 基本运算电路	111
5.1.1 反相比例运算电路	111
5.1.2 同相输入比例运算电路	113
5.1.3 差动比例运算电路(减法电路)	114
5.1.4 求和电路	115
5.1.5 积分与微分电路	118
5.2 有源滤波器	122

5.2.1 滤波电路的作用和分类	122
5.2.2 低通滤波器(LPF)	123
5.2.3 高通滤波器(HPF)	125
5.2.4 带通滤波器(BPF)	125
5.2.5 带阻滤波器	126
5.3 电压比较器	126
5.3.1 过零比较器	127
5.3.2 单限比较器	128
5.3.3 滞回比较器(施密特触发器)	129
本章小结	131
思考题与习题	132

第6章 波形发生电路

6.1 正弦波振荡电路分析方法	137
6.1.1 产生正弦波振荡的条件	137
6.1.2 正弦波振荡电路的组成和分析方法	138
6.2 RC正弦波振荡电路	138
6.2.1 RC振荡电路组成	139
6.2.2 RC串、并联网络的频率特性	139
6.2.3 电路的振荡频率和起振条件	141
6.2.4 常用的稳幅措施	141
6.3 LC正弦波振荡电路	141
6.3.1 LC并联电路的特性	142
6.3.2 变压器反馈式振荡电路	144
6.3.3 电感三点式振荡电路(Hartley 哈特莱振荡电路)	144
6.3.4 电容三点式振荡电路(Colpitts 考毕兹振荡电路)	145
6.3.5 电容三点式改进型电路(克莱普振荡电路)	146
6.4 石英晶体振荡电路	146
6.4.1 石英晶体的基本特性和等效电路	146
6.4.2 石英晶体振荡电路	147
6.5 非正弦波振荡电路	149
6.5.1 矩形波发生电路	149
6.5.2 三角波发生电路	151
6.5.3 锯齿波发生电路	152

本章小结·····	153
思考题与习题·····	154

第 7 章 低频功率放大电路

7.1 低频功率放大电路的概述·····	158
7.1.1 低频功率放大电路的基本要求·····	158
7.1.2 低频功率放大电路的分类·····	159
7.1.3 低频功率放大电路的分析方法·····	160
7.2 互补对称式功率放大器·····	162
7.2.1 OTL 互补对称电路·····	162
7.2.2 OCL 互补对称电路·····	165
7.3 集成功率放大电路·····	166
7.3.1 集成功率放大器 LM386 简介·····	166
7.3.2 集成功率放大器 LM386 的应用·····	167
本章小结·····	168
思考题与习题·····	169

第 8 章 直流稳压电源

8.1 直流稳压电源的基本组成·····	171
8.2 整流滤波电路·····	171
8.2.1 单相桥式整流电路·····	171
8.2.2 滤波电路·····	174
8.3 硅稳压管稳压电路·····	176
8.3.1 稳压电路的主要性能指标·····	176
8.3.2 硅稳压管稳压电路·····	177
8.4 串联型直流稳压电路·····	178
8.4.1 电路组成与工作原理·····	179
8.4.2 输出电压的调节范围·····	180
8.4.3 调整管的选择·····	181
8.4.4 串联反馈型稳压电源保护电路·····	182
8.5 集成稳压电路·····	183
8.5.1 三端集成稳压器的组成·····	183
8.5.2 三端集成稳压器的主要参数·····	184
8.5.3 三端集成稳压器的应用·····	184

8.6 开关型稳压电路	187
8.6.1 开关型稳压电路的特点和分类	187
8.6.2 开关型稳压电路的组成和工作原理	188
本章小结	188
思考题与习题	189

参考文献

第 1 章 半导体器件

半导体器件是组成各种电子电路包括模拟和数字电路、集成和分立元件电路的基础。本章讨论半导体的特性,PN 结的单向导电性,二极管、三极管和场效应管的结构、工作原理、特性曲线和主要参数。

1.1 半导体的特性

自然界的各种物质,根据其导电能力的差别,可分为导体、绝缘体和半导体三大类。通常电阻率小于 $10^{-2} \Omega \cdot \text{m}$ 的物质称为导体,例如铜、银和铝等金属材料都是良好的导体。电阻率大于 $10^{11} \Omega \cdot \text{m}$ 的物质称为绝缘体,例如橡胶和塑料等。而半导体其导电能力介于导体和绝缘体之间,一般为 4 价元素的物质,例如硅和锗。硅、锗的原子序数分别为 14,32。但它们有一个共同点,即原子最外层的轨道上均有 4 个价电子,所以称它们为 4 价元素。简化模型如图 1.1 所示。

在硅(锗)的晶体中,原子在空间排列成规则的晶格,为晶体结构。其最外层的价电子之间以共价键的形式结合起来,如图 1.2 所示。



图 1.1 原子结构的简化模型

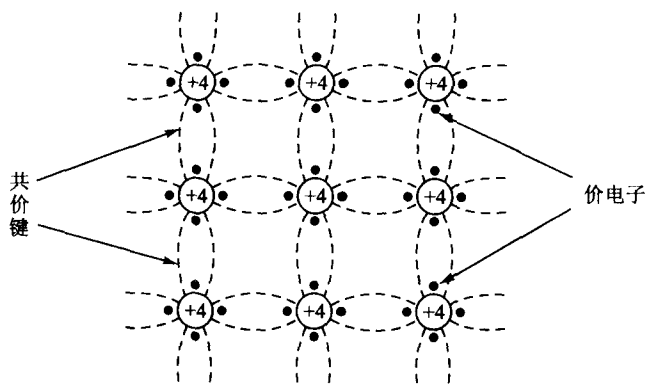


图 1.2 晶体中的共价键结构

1.1.1 本征半导体

纯净的、不含其他杂质的半导体称为本征半导体。本征半导体在 $T=0 \text{ K}$ (相当于 -273°C) 时半导体不导电,如同绝缘体一样。如果温度升高,将有少数价电子获得足够的能

量,以克服共价键的束缚而成为自由电子。此时,本征半导体具有一定的导电能力。但因其自由电子的数量很少,所以导电能力很弱。

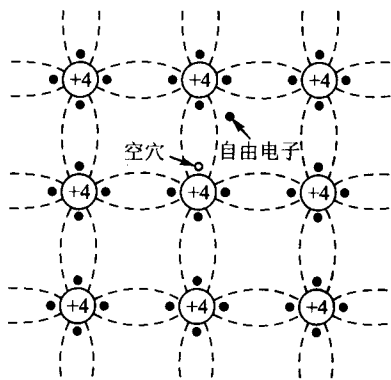


图 1.3 本征半导体中的自由电子和空穴

当一部分价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子时,在原来的共价键中留下一个空位,这种空位称之为空穴,如图 1.3 所示。由于存在这样的空位,附近共价键中的电子就比较容易进来填补,而在附近的共价键中留下新的空位,其他地方的电子又有可能来填补后一个空位。从效果上看,这种共有电子的填补运动,相当于带正电荷的空穴在运动一样。为了与自由电子的运动区别开来,这种填补运动被称为空穴运动,并将空穴看成为带正电的载流子。

由此可见,半导体中存在着两种载流子:带负电的自由电子和带正电的空穴。在本征半导体中,自由电子与空穴总是成对出现的,成为电子-空穴对。

由于物质的运动,半导体中的电子-空穴对不断地产生;同时,当电子与空穴相遇时又因为复合而使电子-空穴对消失。在一定的温度下,产生与复合两种运动达到动态平衡,使电子-空穴对的浓度一定。

本征半导体中载流子的浓度与温度有关。硅材料大约每升高 8°C ,本征载流子的浓度增加一倍;锗材料大约每升高 12°C ,浓度增加一倍。

1.1.2 杂质半导体

本征半导体中虽然存在着两种载流子,但因本征半导体载流子的浓度很低,所以总的来说导电能力很差。但是在本征半导体中掺入某种特定的杂质,成为杂质半导体后,其导电性能将发生质的变化。

1. N 型半导体

在 4 价硅或锗的晶体中掺入少量的 5 价杂质元素,如磷、锑和砷等,则原来晶格中的某些硅原子将被杂质原子代替。由于杂质原子的最外层有 5 个价电子,因此,它与周围 4 个硅原子组成共价键时多余 1 个电子。这个电子不受共价键束缚,而只受自身原子核的吸引。这种束缚力比较微弱,在室温下即可成为自由电子,如图 1.4 所示。在这种杂质半导体中,电子的浓度将大大高于空穴的浓度。因主要依靠电子导电,故称为电子型半导体或 N 型半导体。其中的 5 价杂质原子可以提供电子,所以称为施主原子。N 型半导体中的电子称为多数载流子(简称多子),而其中的空穴称为少数载流子(简称少子)。

2. P型半导体

在4价硅或锗的晶体中掺入少量的3价杂质元素,如硼、锡和钢等。此时杂质原子的最外层有3个价电子,因此,它与周围4个硅原子组成共价键时,由于缺少一个电子而形成空穴,如图1.5所示。在这种杂质半导体中,空穴的浓度将大大高于电子的浓度。因主要依靠空穴导电,故称为空穴型半导体或P型半导体。其中的3价杂质原子可以提供空穴,所以称为受主原子。P型半导体中的空穴称为多数载流子(简称多子),而其中的电子称为少数载流子(简称少子)。

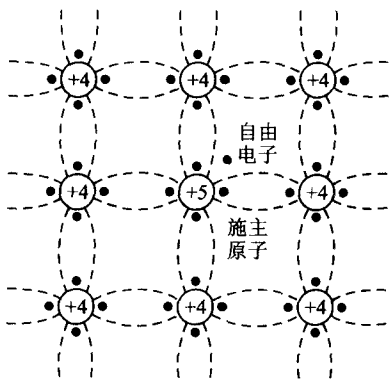


图 1.4 N型半导体的晶体结构

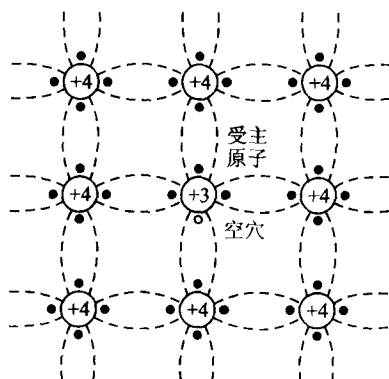
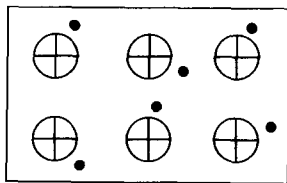


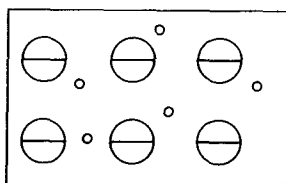
图 1.5 P型半导体的晶体结构

在杂质半导体中,多数载流子的浓度主要取决于掺入的杂质浓度;而少数载流子的浓度主要取决于温度。

对于杂质半导体来说,无论是N型或P型半导体,从总体上看,仍然保持着电中性。以后,为简单起见,通常只画出其中的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。杂质半导体(N型、P型)的简化表示方法分别如图1.6(a)和(b)所示。



(a) 简化表示的N型半导体



(b) 简化表示的P型半导体

图 1.6 杂质半导体的简化表示法

总之,在纯净的半导体中掺入杂质以后,导电性能将大大改善。例如,在4价的硅中掺入百万分之一的3价杂质硼后,在室温时的电阻率与本征半导体相比,将下降到五十万分之一,

可见导电能力大大提高了。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。另外,半导体还可以通过光照来改变其导电能力。综上所述,半导体具有掺杂性、热敏性和光敏性的特性。

1.2 半导体二极管

1.2.1 PN结的形成

将P型半导体与N型半导体在保证晶格连续的情况下结合在一起,在其交界面形成一个具有特殊导电性能的区域PN结。PN结是构造半导体器件的基本单元。

在P型和N型半导体界面两侧,电子和空穴的浓度截然不同。P型区内空穴浓度远远大于N型区,N型区内电子浓度远远大于P型区;由于存在浓度差,所以P型区内空穴向N型区扩散,N型区内电子向P型区扩散。这种由于存在浓度差引起的载流子从高浓度区域向低浓度区域的运动称为扩散运动,所形成的电流称为扩散电流。

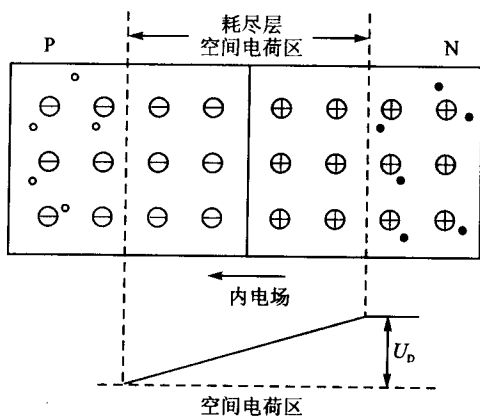


图 1.7 PN 结的形成

P区的空穴向N区扩散并与N区的电子复合,N区的电子向P区扩散并与P区的空穴复合。P区一边失去空穴,留下了带负电的受主杂质离子;N区一边失去电子,留下了带正电的施主杂质离子。这些带电的杂质离子,由于物质结构的关系,不能随意移动,因此不参与导电。在界面附近出现的带电离子集中的薄层,称为空间电荷区,又称耗尽层或阻挡层,如图1.7所示。

图中空间电荷区的左半部是带负电的杂质离子,右半部是带正电的杂质离子,因此在空间电荷区中就形成了一个由N区指向P区的内建电场,称为内电场。在内电场的作用

下,空穴向P区漂移,电子向N区漂移。载流子在电场作用下的这种运动称为漂移运动,所形成的电流称为漂移电流。

综上所述,可知PN结中进行着两种载流子运动:多数载流子的扩散运动和少数载流子的漂移运动。扩散运动和漂移运动相互制约,最终使两种载流子运动达到动态平衡。达到动态平衡后的PN结,内建电场的方向由N区指向P区,说明N区的电位比P区高,这个电位差称为电位势垒 U_D 。电位势垒与材料有关,硅材料约为0.6~0.8V,锗材料约为0.2~0.3V。

1.2.2 PN 结的单向导电性

假设在 PN 结上加一个正向电压 U_F , 即电源的正极接 P 区, 电源的负极通过电阻 R 接 N 区。PN 结的这种接法称为正向接法或称正向偏置(简称正偏)。

正向接法时, 外电场的方向与 PN 结中内电场的方向相反, 因而削弱了内电场。此时, 在外电场的作用下, P 区中的空穴向右移动, 与空间电荷区内的一部分负离子中和; N 区中的电子向左移动, 与空间电荷区内的一部分正离子中和。结果, 由于多子移向了耗尽层, 使空间电荷区的宽度变窄, 于是电位势垒也随之降低, 这将有利于多数载流子的扩散运动, 而不利于少数载流子的漂移运动。因此, 回路中的电流将大大超过漂移电流, 最后形成一个较大的正向电流 I_F , 其方向在 PN 结中是从 P 区流向 N 区, 如图 1.8 所示。

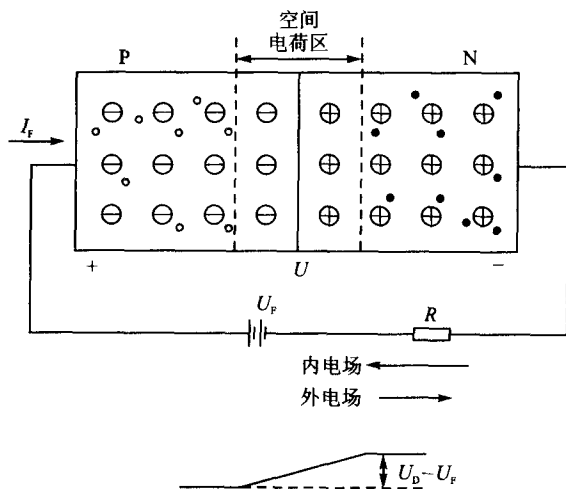


图 1.8 正向偏置的 PN 结

正向偏置时, 只要在 PN 结两端加上一个很小的正向电压, 即可得到较大的正向电流。为了防止回路中电流过大, 一般可接入一个电阻 R 。

假设在 PN 结上加一个反向电压, 即电源的正极接 N 区, 而电源的负极接 P 区, 这种接法称为反向接法或反向偏置(简称反偏)。

反向接法时, 外电场(电压 U_R)的方向与 PN 结中内电场的方向一致, 因而增强了内电场的作用。此时, 外电场使 P 区中的空穴和 N 区中的电子各自向着远离耗尽层的方向移动, 从而使空间电荷区变宽, 同时电位势垒也随之增高, 其结果将不利于多子的扩散运动, 而有利于少子的漂移运动。因此, 漂移电流将超过扩散电流, 于是在回路中形成一个基本上由少数载流子运动产生的反向电流 I_R , 方向见图 1.9。因为少子的浓度很低, 所以反向电流的数值非常小。在一定温度下, 当外加反向电压超过某个值(大约零点几伏)后, 反向电流将不再随着外加反向电压的增加而增大, 所以又称为反向饱和电流, 通常用符号 I_S 表示。正因为反向饱和电流是由少子产生的, 所以对温度十分敏感。随着温度的升高, I_S 将急剧增大。

综上所述, 当 PN 结正向偏置时, 回路中将产生一个较大的正向电流, PN 结处于导通状态; 当 PN 结反向偏置时, 回路中的反向电流非常小, 几乎等于零, PN 结处于截止状态。可见, PN 结具有单向导电性。

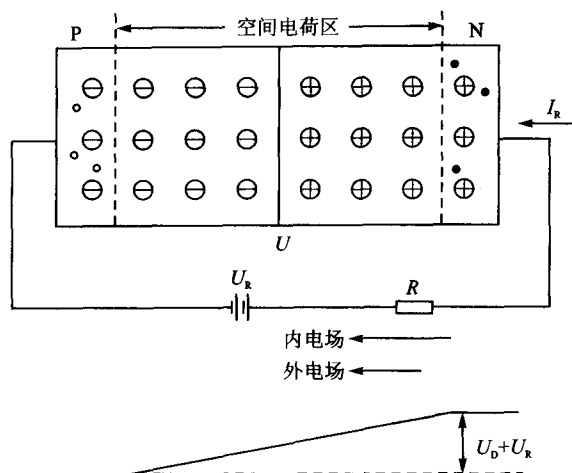


图 1.9 反向偏置的 PN 结

1.2.3 二极管的伏安特性

在 PN 结的外面装上管壳,再引出两个电极,就可以制成半导体二极管。图 1.10 是二极管的图形符号,其中正极(阳极)从 P 区引出,负极(阴极)从 N 区引出。

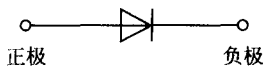


图 1.10 二极管的图形符号

二极管的类型很多,从制造二极管的材料来分,有硅二极管和锗二极管。从管子的结构来分,主要有点接触型和面接触型。点接触型二极管的特点是 PN 结的面积小,因而,管子中不允许通过较大的电流,但是因为它们的结电容也小,可以在高频下工作,适用于检波和小功率整流电路。面接触型二极管则相反,由于 PN 结的面积大,故允许流过较大的电流,但只能在较低频率下工作,可用于整流电路。此外还有一种开关型二极管,适用于在脉冲数字电路中作为开关管。

二极管的性能可用其伏安特性来描述。为了测得二极管的伏安特性,可在二极管的两端加上一个电压 U ,然后测出流过二极管的电流 I ,其电流与电压之间的关系曲线 $I=f(U)$ 即是二极管的伏安特性。

一个典型的二极管的伏安特性如图 1.11 所示。

特性曲线分为两部分:加正向电压时的特性称为正向特性(图中纵轴右半部分);加反向电压时的特性称为反向特性(图中纵轴左半部分)。

1. 正向特性

当加在二极管上的正向电压比较小时,由于外电场不足以克服内电场对载流子扩散运动造成的阻力,所以正向电流很小,几乎等于零。只有当加在二极管两端的正向电压超过某一数

值时,正向电流才明显地增大。正向特性上的这一数值通常称为“导通电压”或称“死区电压”,见图 1.11。导通电压的大小与二极管的材料以及温度等因素有关。一般,硅二极管的导通电压为 $0.6\sim 0.8\text{ V}$,锗二极管为 $0.1\sim 0.3\text{ V}$ 。

当正向电压超过导通电压以后,随着电压的升高,正向电流将迅速增大。电流与电压的关系基本上是一条指数曲线。

2. 反向特性

由图 1.11 可见,当在二极管上加反向电压时,反向电流的值很小。而且当反向电压超过零点几伏以后,反向电流不再随着反向电压而增大,即达到了饱和,这个电流称为反向饱和电流,用符号 I_s 表示。如果使反向电压继续升高,当超过 U_{BR} 以后,反向电流将急剧增大,这种现象称为击穿, U_{BR} 称为反向击穿电压。

二极管击穿以后,不再具有单向导电性。必须说明一点,发生击穿并不意味着二极管被损坏。实际上,当反向击穿时,只要注意控制反向电流的数值,不使其过大,以免因过热而烧坏二极管,则当反向电压降低时,二极管的性能可能恢复正常。

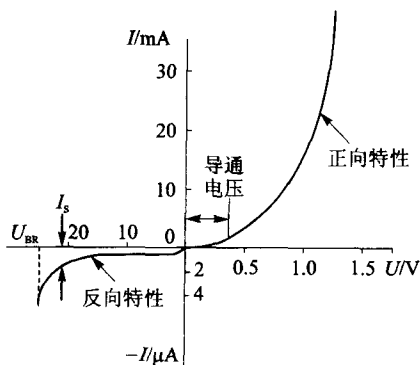


图 1.11 二极管的伏安特性

1.2.4 二极管的主要参数

半导体器件的参数是其特性的定量描述,也是实际工作中根据要求选用器件的主要依据。各种器件的参数可由手册查得。半导体二极管的主要参数有以下几个。

1. 最大整流电流 I_F

I_F 指二极管长期运行时,允许通过管子的最大正向平均电流。 I_F 的数值是由二极管允许的温升所限定。使用时,管子的平均电流不得超过此值,否则可能使二极管过热而损坏。

2. 最高反向工作电压 U_R

工作时加在二极管两端的反向电压不得超过此值,否则二极管可能被击穿。为了留有余地,通常将击穿电压 U_{BR} 的一半定为 U_R 。

3. 反向电流 I_R

I_R 指在室温条件下,在二极管两端加上规定的反向电压时,流过管子的反向电流。通常希望 I_R 值愈小愈好。反向电流愈小,说明二极管的单向导电性愈好。此外,由于反向电流是由少数载流子形成,所以 I_R 受温度的影响很大。

4. 最高工作频率 f_M

f_M 值主要决定于 PN 结的结电容大小。结电容愈大,则二极管允许的最高工作频率愈低。