



模拟电子技术 与应用

主 编 © 朱 甦



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

模拟电子技术与应用

主 编 朱 甦
副主编 申继伟 王丽君



 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书是为了适应应用型人才培养的发展趋势而编写的,分为两个部分:器件篇和电路与应用篇。内容包括:半导体元器件、基本放大电路、负反馈放大电路、放大电路的频率响应、模拟集成放大器的应用、直流稳压电源等七大章节,篇幅适当。每章中以本章导读为基础,本章知识点归纳为精炼,本章小结为结束,并配有 Multisim 应用举例,引导读者具有清晰的理论知识框架;典型器件均配有真实图片,对于已过时的传统应用电路及复杂的理论推导作了适当的删除,增加了典型集成电路应用实例等;在引入专有名词时,均进行了双语注释。讲授课时数建议在 64~72 课时。

本书可作为电子类、电气类、自动控制类和其他相近专业的本科教材,也可作为高职高专相关专业的教材,还可供相关工程技术人员自学或参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术与应用/朱甦主编. —北京:北京理工大学出版社, 2017. 7

ISBN 978-7-5682-4244-8

I. ①模… II. ①朱… III. ①模拟电路-电子技术-高等学校-教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 151746 号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编/100081

电 话/(010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京泽宇印刷有限公司

开 本/787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张/16.5

字 数/388 千字

版 次/2017 年 7 月第 1 版 2017 年 7 月第 1 次印刷

定 价/54.00 元

责任编辑/陈莉华

文案编辑/张雪

责任校对/周瑞红

责任印制/李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前 言

“模拟电子技术与应用”是本科院校电子、电气、通信、计算机、光电专业及其他相关电类专业的重要专业基础课，是培养应用型人才的基本入门课程。课程十分强调理论联系实际，突出“理论知识框架”和“强化应用实践”两条主线，增强学生的自主学习和工程实践能力。

为了适应应用型人才培养的发展趋势，立足于应用型本科的人才培养目标，编者从教学内容体系、教材内容选择以及教材编写模式等方面进行探索和改革，从而编写了本书。

为了紧跟电子技术的发展趋势，尤其是模拟集成电路设计的快速发展，以及计算机仿真工具的不断完善，编者在编写本书时注重与“电路分析基础”课程的衔接。本书分两大部分：器件篇和电路与应用篇，主要特点如下。

(1) 由于“模拟电子技术与应用”是电子信息类专业的学科基础课，教学内容的改革要符合应用型本科教育培养的要求，旨在“保基础、重实践、少而精”的方针上能够较好地满足教学的需要。本书各个章节均配有本章导读、知识点归纳、本章小结及习题解答，方便学生能更有效地进行自主学习。

(2) 在现有电子技术的发展水平上，突出集成电路的介绍，适当地减少分立电路的内容，重点放在基本放大电路及其分析方法、放大电路的反馈、模拟集成电路设计及其应用等方面。

(3) 重视电子器件的外特性及各种集成电路的输入、输出电路和特性，对比“电路分析基础”的线性分析，突出“模拟电子技术与应用”的非线性特性，压缩电子器件内部的工作原理分析。注重电子电路的组成和机构设计，减少繁复的数学推导，突出定性分析。适当引入系统的概念，与后续课程有所衔接。

(4) 引入新概念、新器件、新技术的介绍，并配有专业术语的双语注释。每章均配有Multisim应用举例，以增加基本测试方法和仿真方法的应用。

本书是南京理工大学紫金学院电子信息与光电技术学院精品课程规划教材。本书由朱甦主编，并负责全书的规划和统稿。第1章到第3章由申继伟编写，第4章和第5章由王丽君编写，第6章和第7章由朱甦编写。郁玲燕、王彬彬协助完成图稿等部分的编写工作。在编写过程中也得到了南京理工大学许多老师、学生的建议。在此一并致以衷心的感谢！

由于时间和水平有限，书中错漏和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

第一部分 器件篇

第 1 章 半导体二极管及其应用	3
1.1 半导体基础知识	3
1.1.1 本征半导体	3
1.1.2 杂质半导体	4
1.1.3 PN 结	6
1.2 半导体二极管的基本特性	8
1.2.1 二极管的结构	8
1.2.2 二极管的类型	9
1.2.3 二极管的伏安特性	10
1.2.4 二极管参数	11
1.3 半导体二极管应用电路及分析方法	13
1.3.1 理想模型	13
1.3.2 恒压降模型	13
1.3.3 二极管电路的分析方法及应用举例	13
1.4 特殊二极管	18
1.4.1 稳压二极管	18
1.4.2 发光二极管	21
1.4.3 光电二极管	22
1.4.4 肖特基二极管	22
1.5 Multisim 仿真	23
1.5.1 二极管的仿真	23
1.5.2 稳压管的仿真	23
本章知识点归纳	25
本章小结	25
本章习题	26
第 2 章 半导体三极管及其应用	30
2.1 晶体管及其工作原理	30

2.1.1	晶体管的结构	30
2.1.2	晶体管的工作原理	31
2.1.3	晶体管的伏安特性及主要参数	34
2.1.4	复合管	37
2.2	晶体管基本电路及分析方法	38
2.2.1	晶体管放大电路的基本结构	38
2.2.2	晶体管放大电路的分析方法	40
2.2.3	晶体管放大电路的静态分析	41
2.2.4	晶体管放大电路的动态分析	43
2.2.5	晶体管放大电路的失真分析	50
2.3	场效应管的工作原理及其基本应用	52
2.3.1	MOS 管的结构与工作原理	52
2.3.2	结型场效应管的结构与工作原理	59
2.3.3	场效应管的主要参数	61
2.3.4	场效应管电路及其分析方法	61
2.4	Multisim 仿真	65
2.4.1	晶体管输出特性曲线的仿真	65
2.4.2	MOS 管转移特性曲线的仿真	66
	本章知识点归纳	67
	本章小结	67
	本章习题	68

第二部分 电路与应用篇

第3章	基本放大电路	75
3.1	放大电路的基本结构	75
3.2	基本组态放大电路	76
3.2.1	共发射极放大电路(CE)	76
3.2.2	共集电极放大电路(CC)	80
3.2.3	共基极放大电路(CE)	83
3.2.4	场效应管放大电路	84
3.3	差分放大电路	86
3.3.1	差放电路的结构及输入输出方式	86
3.3.2	差分放大电路的静态分析	88
3.3.3	差分放大电路的小信号分析	90
3.3.4	电流源	97
3.4	功率放大电路	98
3.4.1	功率放大电路的类型	99
3.4.2	OCL 功率放大电路	100

3.4.3	OTL 功率放大电路	104
3.4.4	集成功率放大电路	105
3.5	多级放大电路	107
3.5.1	多级放大电路的结构及耦合方式	107
3.5.2	多级放大电路的性能指标分析	108
3.5.3	阻容耦合多级放大电路	109
3.5.4	直接耦合多级放大电路	110
3.5.5	集成运算放大器	111
3.6	Multisim 仿真	113
3.6.1	共发射极放大电路的仿真	113
3.6.2	差分放大电路的仿真	116
3.6.3	功率放大电路的仿真	118
	本章知识点归纳	120
	本章小结	120
	本章习题	121
第 4 章	负反馈放大电路	129
4.1	反馈放大电路的组成及基本类型	129
4.1.1	反馈放大电路的组成及基本关系式	129
4.1.2	反馈的判断与分类	130
4.2	负反馈对放大电路性能的影响	135
4.2.1	稳定放大倍数	135
4.2.2	改变输入电阻和输出电阻	136
4.2.3	展宽频带	137
4.2.4	减小非线性失真	138
4.3	负反馈放大电路的应用及计算	138
4.3.1	放大电路引入负反馈的应用原则	138
4.3.2	深度负反馈放大电路的特点及性能估算	139
4.3.3	反馈放大电路的稳定性	142
4.4	Multisim 仿真	142
	本章知识点归纳	145
	本章小结	145
	本章习题	146
第 5 章	放大电路的频率响应	150
5.1	简单 RC 电路的频率响应	150
5.1.1	研究放大电路频率响应的必要性	150
5.1.2	一阶 RC 低通电路的频率响应	150
5.1.3	一阶 RC 高通电路的频率响应	152
5.2	晶体管放大电路的频率响应	154

5.2.1	晶体管的高频特性	154
5.2.2	单管共发射极放大电路的频率响应	156
5.2.3	多级放大电路的频率响应	161
5.3	负反馈放大电路的自激振荡与相位补偿	164
5.3.1	负反馈放大电路的自激振荡条件	164
5.3.2	负反馈放大电路稳定性的判断	164
5.3.3	负反馈放大电路的相位补偿	167
5.4	Multisim 仿真	167
5.4.1	一阶有源低通滤波器电路的仿真	167
5.4.2	一阶有源高通滤波器电路的仿真	169
	本章知识点归纳	171
	本章小结	171
	本章习题	171
第6章	模拟集成放大器的应用	176
6.1	基本运算电路	176
6.1.1	理想集成运放的分析依据	176
6.1.2	比例运算电路	177
6.1.3	加减运算电路	179
6.1.4	微分与积分运算电路	183
6.1.5	对数与反对数(指数)运算电路	186
6.1.6	乘法运算电路及应用	187
6.2	有源滤波电路	189
6.2.1	有源低通滤波电路	189
6.2.2	有源高通滤波电路	192
6.2.3	有源带通滤波电路	193
6.2.4	有源带阻滤波电路	194
6.3	电压比较器	194
6.3.1	单限电压比较器	195
6.3.2	迟滞电压比较器	196
6.4	正弦波振荡电路	197
6.4.1	振荡电路	198
6.4.2	LC 正弦波振荡电路	199
6.4.3	RC 振荡电路	204
6.4.4	晶体振荡电路	206
6.5	非正弦波振荡电路	207
6.5.1	方波振荡电路	208
6.5.2	三角波发生电路和锯齿波发生电路	209
6.6	Multisim 仿真	210

6.6.1 反相比例放大电路的仿真	210
6.6.2 反相迟滞比较器电路的仿真	212
6.6.3 RC 正弦波振荡电路的仿真	214
本章知识点归纳	217
本章小结	218
本章习题	218
第7章 直流稳压电源	225
7.1 直流稳压电源的组成框图	225
7.2 单相整流滤波电路	226
7.2.1 单相整流电路	226
7.2.2 滤波电路	229
7.3 线性集成稳压器	232
7.3.1 串联型稳压电路的工作原理	232
7.3.2 三端固定输出集成稳压器	233
7.3.3 三端可调输出集成稳压器	236
7.4 开关稳压电源	237
7.4.1 概述	237
7.4.2 开关稳压电源的基本工作原理	238
7.4.3 集成开关稳压器及其应用	240
本章知识点归纳	242
本章小结	243
本章习题	243
参考文献	247

第一部分 器件篇

第 1 章

半导体二极管及其应用

● 本章导读

“信号(Signal)”分非电物理量信号和电信号。非电物理量信号,如温度、压力、位移、速度等;电信号一般指随时间变化的电流或电压,可分为模拟信号(Analog signal)、数字信号(Digital signal)和采样数据信号(Sampled-data signal)。模拟信号是指时间和数值上都是连续变化的信号。处理模拟信号的电路称为模拟电路。在现代许多系统,包括复杂高性能的系统中,模拟电路几乎是必不可少的部分。对模拟电子技术的了解必须从半导体器件开始。

半导体二极管(Diode)简称为二极管,是一种结构简单的半导体元器件。二极管的特性主要体现为单向导电性,利用该特性,二极管可应用于限幅、检波、整流、稳压、开关、保护等。

本章首先介绍半导体材料的基础知识与基本名词术语,然后重点讨论二极管的伏安特性、主要参数及常用的模型,通过实例介绍二极管应用电路的结构及其分析方法,最后介绍常用特殊二极管的工作原理与用途。

1.1 半导体基础知识

自然界中的材料按照导电能力分为导体(Conductor)、半导体(Semiconductor)与绝缘体(Insulator)。半导体是指一种导电性可受控制,可从绝缘体过渡至导体的材料。今天大部分的电子产品都是利用半导体材料制作而成的,半导体的发展对经济发展起到重要作用。常见的半导体材料有硅(Si)、锗(Ge)、砷化镓(GaAs)等,而硅材料应用最为广泛。

1.1.1 本征半导体

完全纯净的、不含杂质的半导体称为本征半导体。常见代表有硅、锗这两种元素的单晶体结构。硅、锗在元素周期表中属于四族元素,其原子最外层有 4 个价电子。硅、锗晶体材料是由硅、锗原子按照特定结构在空间有序排列而形成的正四面体结构,其结构示意图如图 1.1.1 所示。每个原子的 4 个价电子和相邻原子的价电子形成 4 个共用电子对,这种电子对受到很强的原子束缚力,这种结构称为共价键。

在 0 K 时,价电子摆脱不了共价键的束缚,此时本征半导体不导电。当温度升高或受到光照时,少数价电子能获取足够多的能量从而摆脱共价键的束缚,称为自由电子,同时在共价键

中留下一个带正电的空穴,这种现象称为本征激发,如图 1.1.1 所示。空穴很容易吸引邻近的价电子使其发生移动,可见空穴也可以运动,只不过运动方式与电子不同。

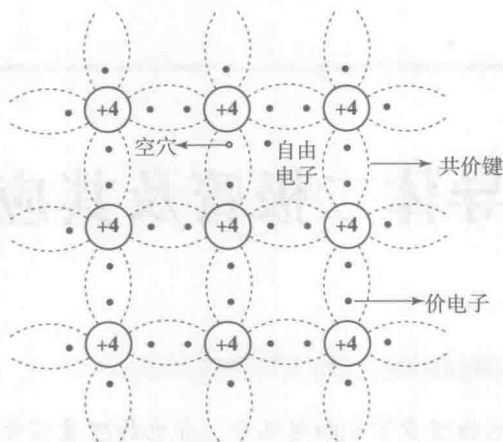


图 1.1.1 硅(锗)本征半导体的结构示意图

当然,自由电子和空穴在半导体中相遇时会重新结合然后消失,称之为复合。当外部条件一定时,本征激发和复合会达到动态平衡,此时,本征半导体中自由电子-空穴对的浓度保持一定。

自由移动的电荷称为载流子,只有载流子能参与导电。在电场作用下,载流子定向移动形成漂移电流。由此可见,半导体中有两种载流子参与导电,即自由电子(Free electron)和空穴(Hole),这种导电方式与导体只有一种载流子参与导电的方式不同。

室温下,本征激发产生的自由电子-空穴对的数目非常有限,因此本征半导体的载流子浓度很低、导电能力很弱。

1.1.2 杂质半导体

当本征半导体掺入杂质元素后,便称为杂质半导体,其导电能力大大提高。因此,半导体器件一般采用杂质半导体制作而成。

掺入的杂质元素主要是三价或五价元素。三价元素一般为硼、铝、镓;五价元素一般为磷、砷、锑。根据掺入杂质性质的不同,杂质半导体分为 N 型半导体和 P 型半导体两种。

1.1.2.1 N 型半导体

在本征半导体硅(或锗)中通过半导体工艺掺入微量的五价元素(如磷),则磷原子就取代了硅晶体中少量的硅原子,如图 1.1.2 所示。

磷原子最外层有 5 个价电子,其中 4 个价电子分别与邻近 4 个硅原子形成共价键结构,多余的 1 个价电子在共价键之外,只受到磷原子对它微弱的束缚,从而,在室温下,即可获得挣脱束缚所需要的能量而成为自由电子。因此,本征半导体中每掺入 1 个磷原子就可产生 1 个自由电子,而本征激发产生的空穴的数目很少。因此,将自由电子称为多数载流子(简称多子),空穴则称为少数载流子(简称少子)。由于电子带负(Negative)电,因此,这种杂质半导体称为 N 型半导体。磷原子由于为 N 型半导体提供电子而被成为施主(Donor)原子,施主原子由于失去电子而成为不能移动的正离子。

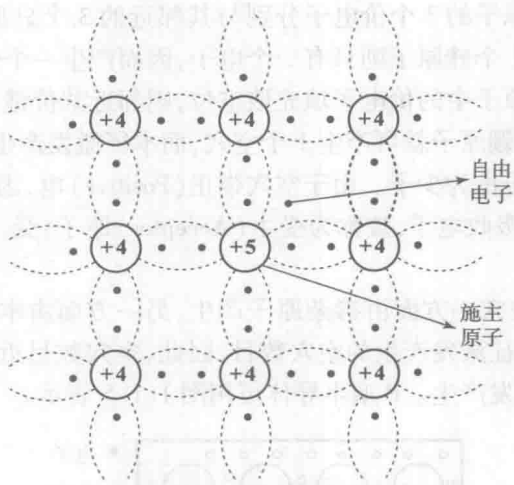


图 1.1.2 N 型半导体

注意:N 型半导体中自由电子一方面由掺杂原子提供,另一方面由本征激发产生,只不过掺杂产生的自由电子数目远多于本征激发产生的自由电子数目,因此,自由电子数目近似等于掺杂原子数目,而空穴数则只由本征激发产生。N 型半导体可用图 1.1.3 表示。

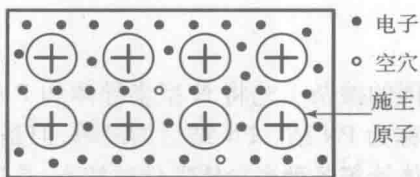


图 1.1.3 N 型半导体示意图

2. P 型半导体

在本征半导体硅(或锗)中,若掺入微量的三价元素(如硼),这时硼原子就取代了晶体中的少量硅原子,如图 1.1.4 所示。

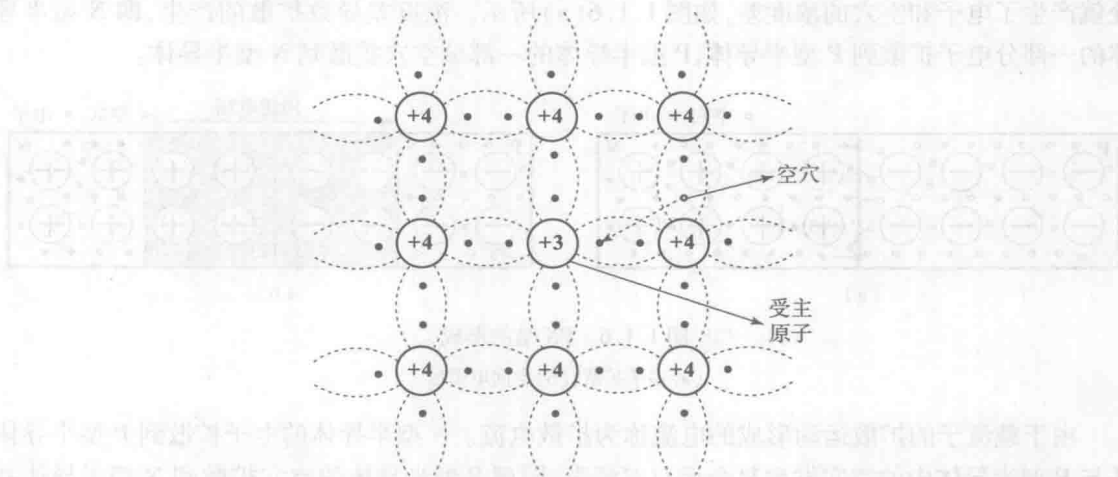


图 1.1.4 P 型半导体

由图 1.1.4 可知,硼原子的 3 个价电子分别与其邻近的 3 个硅原子中的 3 个价电子形成电子对,而与其相邻的另 1 个硅原子则只有一个电子,因而产生一个空位。这个空位对电子具有较强的吸引力,附近硅原子中的价电子填充该空位,则邻近共价键上出现 1 个空穴。这样在本征半导体中每掺入 1 个硼原子就可产生 1 个空穴,而本征激发产生的电子数目很少。因此,将空穴称为多子,自由电子称为少子。由于空穴带正(Positive)电,因此,这种杂质半导体称为 P 型半导体。硼原子由于吸收电子,被称为受主(Acceptor)原子,受主原子由于接收电子而成为不能移动的负离子。

注意:P 型半导体中空穴一方面由掺杂原子产生,另一方面由本征激发产生,只不过掺杂产生的空穴数目远多于本征激发产生的空穴数目,因此,空穴数目近似等于掺杂原子数目,而自由电子数则只由本征激发产生。P 型半导体可用图 1.1.5 表示。

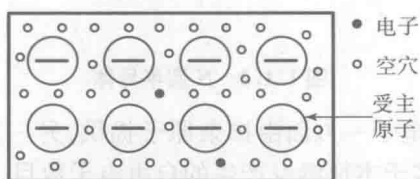


图 1.1.5 P 型半导体示意图

1.1.3 PN 结

在一块硅衬底上,采用不同的掺杂工艺将 N 型半导体和 P 型半导体结合在一起,在其界面附近会形成空间电荷区,称为 PN 结。PN 结结构简单,但是用途十分广泛,它是构成二极管、双极型晶体管和场效应晶体管等各种半导体器件的核心,是现代电子技术的基础。

1. PN 结的形成

1) P 区、N 区的多子浓度差引起载流子扩散

由于 N 型半导体的多子,即自由电子浓度比 P 型半导体的电子浓度高,同样 P 型半导体的多子,即空穴浓度比 N 型半导体的空穴浓度高,这样在 N 型半导体和 P 型半导体的界面处就产生了电子和空穴的浓度差,如图 1.1.6(a)所示。浓度差导致扩散的产生,即 N 型半导体的一部分电子扩散到 P 型半导体,P 型半导体的一部分空穴扩散到 N 型半导体。

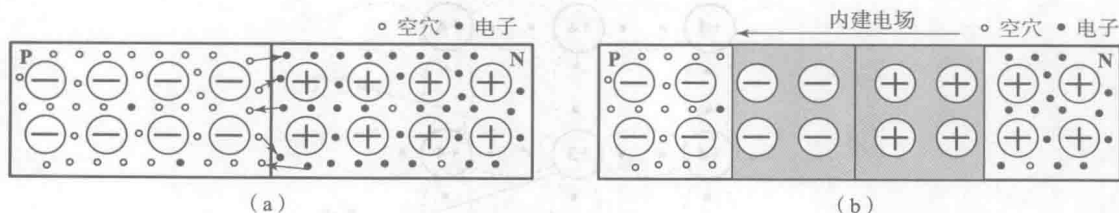


图 1.1.6 PN 结的形成

(a) 多子扩散;(b) 空间电荷区

由于载流子的扩散运动形成的电流称为扩散电流。N 型半导体的电子扩散到 P 型半导体并与 P 型半导体中的空穴发生复合后双双消失,同理 P 型半导体的空穴扩散到 N 型半导体并与 N 型半导体的电子发生复合后双双消失。这导致 P 区一边失去空穴,留下了带负电的杂质

离子, N区一边失去电子, 留下了带正电的杂质离子, 这些不能移动的带电粒子在 P区和 N区交界面附近, 形成了一个空间电荷区(或者称为耗尽区), 同时产生由 N区指向 P区的内建电场, 如图 1.1.6(b)所示。

2) 内建电场促使少子漂移

内建电场一方面阻碍多子扩散, 另一方面促进少子漂移。即: 内建电场将使 N区的少数载流子空穴向 P区漂移, 使 P区的少数载流子电子向 N区漂移, 漂移运动的方向正好与扩散运动的方向相反, 在内建电场作用下少子漂移形成的电流称为漂移电流。

3) 多子的扩散和少子的漂移达到动态平衡

最终在 P型半导体和 N型半导体的交界面两侧留下不能移动的离子, 这个离子层形成的空间电荷区称为 PN结。PN结的内电场方向由 N区指向 P区。

2. PN结的单向导电性

当 PN结外加电压方向不同时, PN结体现出不同的特性, 分为正向偏置和反向偏置。

1) 正向偏置(Forward bias)

正向偏置简称正偏。正偏时 PN结 P区加高电位, N区加低电位, 即 $V_P > V_N$, 电路如图 1.1.7(a)所示。电路中电阻 R 为限流电阻, 防止 PN结中因电流过大而烧坏。由于外电场方向和内建电场方向相反, 使 PN结中总电场减弱, 多子的扩散运动加强, 少子的漂移运动减弱。当正向偏置电压达到一定值时, 在 PN结中形成较大的正向电流, 方向由 P区指向 N区, PN结呈现低电阻, 此时称 PN结处于导通状态。PN结正偏时扩散电流远大于漂移电流, 可忽略漂移电流的影响。

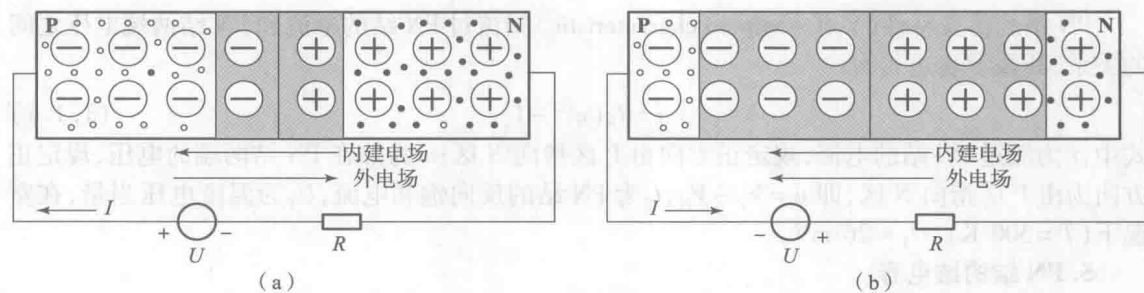


图 1.1.7 PN结的单向导电性

(a) PN结正偏; (b) PN结反偏

2) 反向偏置(Reverse bias)

反向偏置简称反偏。反偏时 PN结 P区加低电位, N区加高电位, 即 $V_P < V_N$, 电路如图 1.1.7(b)所示。由于外电场方向和内建电场方向相同, 使 PN结中总电场增强, 空间电荷区变宽, 多子的扩散运动减弱, 少子的漂移运动增强。此时, 通过 PN的电流主要为少子漂移形成的漂移电流, 方向由 N区指向 P区, 该反向漂移电流很小(微安级), 故 PN结呈现高电阻, 此时称 PN结处于截止状态。当反偏电压较小时, 几乎所有少子都参与导电, 因此, 即使反偏电压再增大, 流过 PN结的反向电流也不会继续增大, 因此, 反向电流又称为反向饱和(Saturation)电流, 用 I_s 表示。

由上可知, PN结的单向导电性为: 当 $V_P > V_N$ 时, PN结正向偏置, PN结导通, 呈现低电阻,

具有较大的正向电流;当 $V_p < V_N$ 时,PN 结反向偏置,PN 结截止,呈现高电阻,具有很小的反向饱和电流。

3. PN 结的反向击穿

当 PN 结的反向电压增大到一定程度时,反向电流会突然增大,反向电流突然增大时的电压称为击穿电压,用 $U_{(BR)}$ 表示。这种现象称为反向击穿(Reverse breakdown)。造成 PN 结击穿的机制有两种:雪崩击穿和齐纳击穿。

雪崩击穿通常发生在掺杂浓度较低的 PN 结中。当反向电压不断增大时,载流子漂移速度相应增大,当增大到一定程度后,其动能足以把束缚在共价键中的价电子碰撞出来,产生新的自由电子-空穴对,新产生的载流子在强电场作用下,再去碰撞其他中性原子,又会产生新的自由电子-空穴对,这样会引起一系列的连锁反应,像雪崩一样,导致 PN 结中载流子数量急剧增加,从而使反向电流急剧增大。

齐纳击穿通常发生在掺杂浓度很高的 PN 结内。由于掺杂浓度很高,空间电荷区很窄,即使外加较小的反向电压(5 V 以下),在 PN 结中就可产生很强的电场,强电场会强行将 PN 结内原子的价电子从共价键中拉出来,形成电子-空穴对,促使载流子数目急剧增多,形成很大的反向电流。

反向击穿后,若能控制反向电流和反向电压的大小,使其乘积不超过 PN 结的最大耗散功率,PN 结一般不会损坏,当外加电压下降到击穿电压以下后,PN 结能够恢复正常,这种击穿称为电击穿(可以制作稳压二极管)。若反向击穿后电流过大,则会导致 PN 结因发热严重温度过高而永久性损坏,这种击穿称为热击穿(应避免)。

4. PN 结的伏安特性

PN 结的伏安特性(Volt-ampere characteristic)指流过 PN 结的电流和 PN 结两端电压之间的关系,其数学表达式为:

$$i = I_S (e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \quad (1.1.1)$$

式中, i 为流过 PN 结的电流,规定正方向由 P 区指向 N 区; u 为加在 PN 结两端的电压,规定正方向为由 P 区指向 N 区,即 $u = V_p - V_N$; I_S 为 PN 结的反向饱和电流; U_T 为温度电压当量,在室温下 ($T = 300 \text{ K}$), $U_T \approx 26 \text{ mV}$ 。

5. PN 结的结电容

PN 结的结电容主要由势垒电容 C_B (Barrier capacitance) 和扩散电容 C_D (Diffusion capacitance) 组成。PN 结反偏时主要体现势垒电容,是由于外加反向电压的改变引起空间电荷区的变化产生电容效应,属于非线性电容,其值为 $0.5 \sim 100 \text{ pF}$; PN 结正偏时主要体现扩散电容,是由于非平衡载流子的浓度变化引起电容效应,其值随外加电压的改变而改变,属于非线性电容,其值为几十 pF 到 $0.01 \mu\text{F}$ 。

PN 结的结电容随反向电压的增加而减小,利用这种效应可制成变容二极管。

1.2 半导体二极管的基本特性

1.2.1 二极管的结构

二极管的结构非常简单,在 PN 结的 P 区和 N 区分别引出一个电极导线(即引线),将外壳