



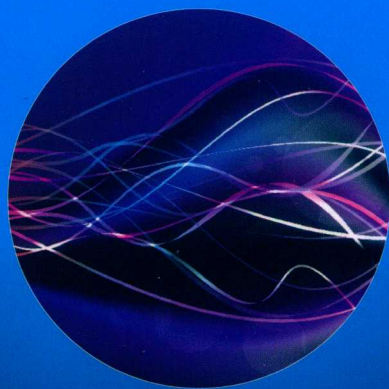
普通高等院校电子信息与电气工程类专业教材

主编 蔡红娟

模拟电子技术

(第二版)

Moni Dianzi Jishu



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

普通高等院校电子信息与电气工程类专业教材

模拟电子技术(第二版)

主 编 蔡红娟

副主编 周 斌 蔡 苗

华中科技大学出版社

中国·武汉

内 容 简 介

本书是根据近年来电子技术的发展和多年的教学改革与实践,针对“模拟电子技术”课程的教学基本要求编写而成的。

本书共分8章,主要内容包括半导体器件、基本放大电路、放大电路的频率响应、集成运算放大电路、信号的基本运算与滤波处理、负反馈放大电路、波形的产生与变换、直流电源。

本书可作为高等院校电气信息类各个专业和部分非电类专业的教材,也可作为工程技术人员的业务参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/蔡红娟主编.—2版.—武汉:华中科技大学出版社,2019.1
ISBN 978-7-5680-4833-0

I. ①模… II. ①蔡… III. ①模拟电路-电子技术-高等学校-教材 IV. ①TN710.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第005369号

模拟电子技术(第二版)

蔡红娟 主编

Moni Dianzi Jishu

策划编辑:谢燕群

责任编辑:谢燕群

封面设计:原色设计

责任校对:刘 竣

责任监印:赵 月

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:武汉市籍缘印刷厂

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:15.5

字 数:373千字

版 次:2019年1月第2版第1次印刷

定 价:35.80元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

第二版前言

为了适应新工科发展需要,培养高素质综合性应用型人才,经过教学改革与实践,我们在第一版基础上修订了本教材。立足于“讲清基本概念、基本电路的工作原理和基本分析方法”,面向工程应用,做了以下几个方面的工作。

(1) 增加新技术的介绍与应用电路分析。如增加了肖特基二极管的介绍,增加了 MOS 管的应用电路分析等。

(2) 重新改编了例题和习题,增加了具有工程背景的例题和习题,并赋予了相应的应用情景,旨在帮助读者提高工程应用能力。

(3) 增加了模拟电子技术专业术语的汉英对照,帮助读者提高相关外文文献的查阅能力。

参加本版修订工作的有蔡红娟(第 1、2、5、6、7 章),周斌(第 4 章和习题),蔡苗(第 3、8 章)。蔡红娟任主编,并负责全书统稿;周斌和蔡苗任副主编。在编写本书过程中,翟晟、陈艳等也做了大量工作,在此表示深深的谢意。此外,本书得到了殷小贡、李海、徐安静老师的审阅,并提出了许多宝贵的意见,在此对他们以及在编写过程中给予热情帮助和支持的其他同志们一并表示衷心的感谢。

本书引用了许多专家、学者的著作和论文中的研究成果,在此特向他们表示衷心的感谢。

由于编者的能力和水平有限,书中定有疏漏、欠妥之处,恳请广大读者批评指正。

作 者

2018 年 9 月于武汉

前 言

为了适应电子科学技术的发展和应用技术型高校的转型需要,我们以“夯实理论基础,强化工程应用能力”为原则,根据教学基本要求,针对“模拟电子技术”课程学习的特点,编写了这本教材。在编写本书过程中,力求在内容取舍、编写体例、内容叙述方面有所突破,做到概念清楚、内容深入浅出、易于自学,并注重实用性、适度性和专业性。本书具有以下几个特点:

(1) 内容选取以工程应用为背景,结合各相关专业的工程实际,合理删减工程实践中用得少或不符合电子技术发展方面的内容,对集成电路的讨论强化“外部”、淡化“内部”,并注重新器件、新技术的应用。本书中的应用实例大多来自作者科研工作及教学实践,注重与工程实践应用的结合,有利于激发读者的学习兴趣,帮助读者树立工程意识。

(2) 本书在结构编排上遵循“先器件后电路,先基础后应用”的原则,由浅入深。前2章阐述了半导体器件及其基本应用电路,既强调基础知识又注重知识的应用,体现了“管为路用”的思想;之后分析了各类单元电路,并将集成运放作为基本电子器件来阐述各类单元电路的工作原理和工程应用,解决了“入门难”的问题。

(3) 为了进一步明确教学基本要求,各章的开头均给出了本章的基本概念、重点与难点、基本分析方法,各章又以“本章小结”结束,前后呼应,有利于帮助读者理清基本概念、明确学习目的,易于入门。

(4) 本书配备了足够数量的例题和习题,题型多样又具有代表性,其具有启发性和实践性的提问有利于读者自学并提高工程实践中分析问题和解决问题的能力。

本书第1、2、5、6、7章由蔡红娟编写,第3、8章和习题由蔡苗编写,第4章由翟晟编写。蔡红娟任主编,并负责全书统稿,蔡苗和翟晟任副主编。在本书编写过程中,周斌、陈艳等也做了大量工作,在此对他们表示深深的谢意。此外,殷小贡、李海、徐安静老师对本书进行了审阅,并提出了许多宝贵的意见,在此对他们以及在编写、出版过程中给予热情帮助和支持的其他同志们一并表示衷心的感谢。

本书引用了许多专家、学者著作和论文中的研究成果,在此特向他们表示衷心的感谢。

由于编者的能力和水平有限,书中定有疏漏、欠妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2015年9月于武汉

目 录

第 1 章 半导体器件	(1)
1.1 半导体器件的基础知识	(1)
1.1.1 半导体材料	(1)
1.1.2 本征半导体	(1)
1.1.3 杂质半导体	(3)
1.1.4 PN 结	(4)
1.2 半导体二极管	(6)
1.2.1 半导体二极管的结构及类型	(6)
1.2.2 半导体二极管的伏安特性	(7)
1.2.3 半导体二极管的主要电参数	(8)
1.2.4 二极管应用电路举例	(8)
1.2.5 特殊二极管	(11)
1.3 半导体三极管	(14)
1.3.1 半导体三极管的结构及类型	(14)
1.3.2 半导体三极管的电流放大作用	(15)
1.3.3 半导体三极管的特性曲线	(17)
1.3.4 半导体三极管的主要电参数	(19)
1.3.5 温度对三极管特性及参数的影响	(20)
1.4 场效应管	(21)
1.4.1 结型场效应管	(21)
1.4.2 绝缘栅型场效应管	(24)
1.4.3 场效应管的主要参数	(29)
1.4.4 场效应管与三极管的比较	(30)
本章小结	(31)
习题	(32)
第 2 章 基本放大电路	(37)
2.1 基本放大电路概述	(37)
2.1.1 放大的概念	(37)
2.1.2 放大电路的基本性能指标	(37)
2.2 放大电路的分析方法	(39)
2.2.1 基本共射极放大电路的工作原理	(39)
2.2.2 直流通路和交流通路	(40)
2.2.3 静态工作点的设置	(40)

2.2.4	微变等效电路法	(42)
2.2.5	图解法	(45)
2.3	放大电路静态工作点的稳定	(51)
2.3.1	射极偏置放大电路	(51)
2.3.2	稳定静态工作点的措施	(53)
2.4	共集电极放大电路和共基极放大电路	(54)
2.4.1	共集电极放大电路	(54)
2.4.2	共基极放大电路	(56)
2.4.3	三极管基本放大电路三种接法的比较	(57)
2.5	场效应管放大电路	(57)
2.5.1	场效应管放大电路的三种接法	(57)
2.5.2	场效应管的静态分析	(58)
2.5.3	场效应管放大电路的动态分析	(59)
2.6	多级放大电路	(61)
2.6.1	多级放大电路的耦合方式	(61)
2.6.2	多级放大电路的动态分析	(63)
2.6.3	多级放大电路的构成	(64)
	本章小结	(65)
	习题	(66)
第3章	放大电路的频率响应	(74)
3.1	频率响应概述	(74)
3.1.1	无源RC电路的频率响应	(74)
3.1.2	波特图	(76)
3.2	三极管基本放大电路的频率响应	(78)
3.2.1	三极管的高频等效模型	(78)
3.2.2	单管共发射极放大电路的频率响应	(82)
3.3	场效应管基本放大电路的频率响应	(88)
3.3.1	场效应管的高频等效电路	(88)
3.3.2	场效应管基本放大电路的频率响应	(88)
3.4	多级放大电路的频率响应	(89)
3.4.1	多级放大电路频率响应的分析	(89)
3.4.2	截止频率的估算	(90)
	本章小结	(92)
	习题	(92)
第4章	集成运算放大电路	(96)
4.1	集成运放电路	(97)
4.2	电流源电路	(97)
4.2.1	镜像电流源	(97)

4.2.2	比例电流源	(98)
4.2.3	微电流源	(98)
4.2.4	多路电流源	(99)
4.2.5	作为有源负载的电流源	(99)
4.3	差动放大电路	(99)
4.3.1	基本差动放大电路	(100)
4.3.2	长尾式差动放大电路	(101)
4.3.3	四种接法	(103)
4.3.4	具有电流源的差动放大电路	(106)
4.4	低频功率放大电路	(108)
4.4.1	功放电路概述	(108)
4.4.2	甲类功放电路	(109)
4.4.3	乙类互补对称功放电路	(110)
4.4.4	甲乙类互补对称功放电路	(114)
4.4.5	甲乙类单电源互补对称功放电路	(117)
4.5	集成运放电路的典型电路分析	(118)
4.5.1	基本电路	(118)
4.5.2	集成运放电路的性能指标	(120)
4.5.3	集成运放的种类	(121)
4.5.4	使用集成运放的注意事项	(123)
本章小结		(123)
习题		(124)
第5章 信号的基本运算与滤波处理		(129)
5.1	集成运放的电路模型	(129)
5.1.1	集成运放电路的符号表示	(129)
5.1.2	理想集成运放的性能指标	(129)
5.1.3	集成运放的电压传输特性	(130)
5.2	基本运算电路	(131)
5.2.1	比例运算电路	(131)
5.2.2	加减运算电路	(134)
5.2.3	积分和微分运算电路	(138)
5.2.4	对数运算和指数运算电路	(140)
5.3	模拟乘法器及其在运算电路中的应用	(142)
5.3.1	模拟乘法器简介	(142)
5.3.2	变跨导型模拟乘法器的工作原理	(143)
5.3.3	模拟乘法器在运算电路中的应用	(144)
5.4	有源滤波电路	(146)
5.4.1	滤波电路的基本知识	(146)

5.4.2	有源低通滤波电路	(147)
5.4.3	有源高通滤波电路	(149)
5.4.4	有源带通滤波电路	(149)
5.4.5	有源带阻滤波电路	(149)
本章小结		(150)
习题		(151)
第6章 负反馈放大电路		(156)
6.1	反馈的基础知识	(156)
6.1.1	反馈的概念	(156)
6.1.2	反馈的分类及其判别方法	(157)
6.1.3	负反馈放大电路的四种基本组态	(160)
6.2	负反馈对放大电路性能的影响	(165)
6.2.1	提高放大倍数的稳定性	(165)
6.2.2	稳定被取样的输出信号	(166)
6.2.3	对输入电阻的影响	(166)
6.2.4	对输出电阻的影响	(167)
6.2.5	减小非线性失真和抑制干扰、噪声	(168)
6.2.6	展宽通频带	(169)
6.3	深度负反馈放大电路的指标估算	(170)
6.3.1	估算依据	(170)
6.3.2	计算举例	(171)
6.4	负反馈放大电路的自激振荡	(174)
6.4.1	产生自激振荡的原因及条件	(175)
6.4.2	自激振荡的判别方法	(175)
6.4.3	常用的消除自激振荡的方法	(176)
本章小结		(177)
习题		(178)
第7章 波形的产生与变换		(184)
7.1	正弦波产生电路	(184)
7.1.1	概述	(184)
7.1.2	RC正弦波振荡电路	(185)
7.1.3	LC正弦波振荡电路	(187)
7.1.4	石英晶体振荡电路	(190)
7.2	电压比较器	(192)
7.2.1	单限电压比较器	(193)
7.2.2	滞回电压比较器	(195)
7.2.3	窗口电压比较器	(197)
7.3	非正弦波产生电路	(197)

7.3.1 矩形波产生电路	(198)
7.3.2 三角波产生电路	(199)
7.3.3 锯齿波产生电路	(201)
本章小结	(202)
习题	(203)
第8章 直流电源	(210)
8.1 直流电源的组成	(210)
8.2 整流电路	(211)
8.2.1 单相半波整流电路	(211)
8.2.2 单相桥式整流电路	(213)
8.3 滤波电路	(215)
8.3.1 电容滤波电路	(215)
8.3.2 其他形式的滤波电路	(217)
8.4 稳压电路	(218)
8.4.1 稳压电路的主要指标	(218)
8.4.2 稳压管稳压电路	(219)
8.4.3 串联型稳压电路	(220)
8.4.4 集成线性稳压器	(222)
8.5 开关型稳压电路	(226)
8.5.1 串联开关型稳压电路	(226)
8.5.2 并联开关型稳压电路	(228)
本章小结	(228)
习题	(229)
专业术语汉英对照	(233)
参考文献	(236)

第 1 章 半导体器件

【基本概念】

本征半导体,空穴和自由电子,载流子,N型半导体和P型半导体,PN结,扩散运动和漂移运动,导通、截止和击穿,二极管,稳压管,三极管,场效应管。

【重点与难点】

- (1) PN结的单向导电性;
- (2) 二极管、三极管的伏安特性;
- (3) 场效应管的工作原理。

【基本分析方法】

- (1) 如何判断二极管和稳压管的工作状态;二极管的建模及基本应用电路分析。
- (2) 如何判断三极管、场效应管的类型及其在电路中的工作状态。

1.1 半导体器件的基础知识

1.1.1 半导体材料

大自然的物质按其导电能力可以分为导体、半导体和绝缘体。导体的导电能力最强,常见的导体有铜、铁、铝等;绝缘体几乎不导电,如木头、橡胶等;半导体的导电性能介于导体和绝缘体之间。

在电子器件中,常用的半导体材料有:四价元素,如硅(Si)、锗(Ge)等;化合物半导体,如砷化镓(GaAs)。其中硅是目前最常用的一种半导体材料,其最外层轨道上有四个电子,简化的原子结构模型如图 1-1 所示。砷化镓及其化合物一般用在比较特殊的场合,如超高速器件和光电子器件中。在形成晶体结构的半导体中,人为掺入特定的杂质元素时,导电性能具有可控性;另外,在光照和热辐射条件下,其导电性还有明显的变化,这些特殊的性质决定了半导体可以制成各种电子器件。

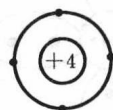


图 1-1 四价元素原子结构图

1.1.2 本征半导体

在半导体的晶体结构中,原子按一定的规则整齐排列,由于原子间的距离很近,故价电子不仅受到所属原子核的吸引,还受到相邻原子核的吸引。这样,每一个原子的每个价电子都与相邻原子的一个价电子组成一个电子对,即形成共价键结构,如图 1-2 所示。共价键结构使原子最外层处在较为稳定的状态。本征半导体就是这样一种纯净的具有晶体结构的半导体,在热力学温度 $T = 0 \text{ K} (-273 \text{ }^{\circ}\text{C})$ 且无外部激发能量时,每个价电子都处于最低能态,

价电子没有能力脱离共价键的束缚,没有能够自由移动的带电粒子,这时的本征半导体被认为是绝缘体。

本征半导体,在温度升高或受到光照射时,其共价键中的少数价电子因获得能量而挣脱共价键束缚成为自由电子,这种现象称为激发。如图 1-3 所示,价电子挣脱共价键束缚成为自由电子之后,在共价键中留下一个空位子,称之为空穴(图中用圆圈表示)。每形成一个自由电子,就留下一个空穴。所以,在本征半导体中,自由电子和空穴总是成对出现、数目相等。原子是中性的,而自由电子带负电,所以认为空穴带正电。

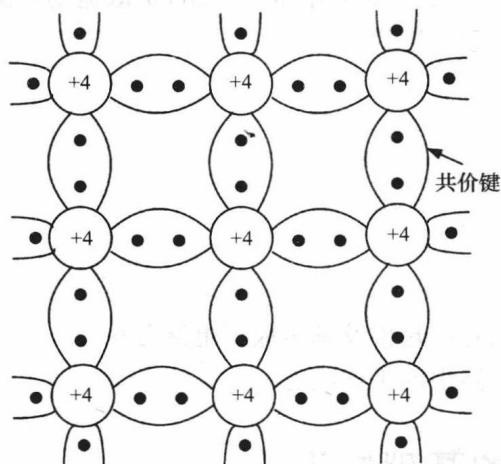


图 1-2 硅晶体共价键结构

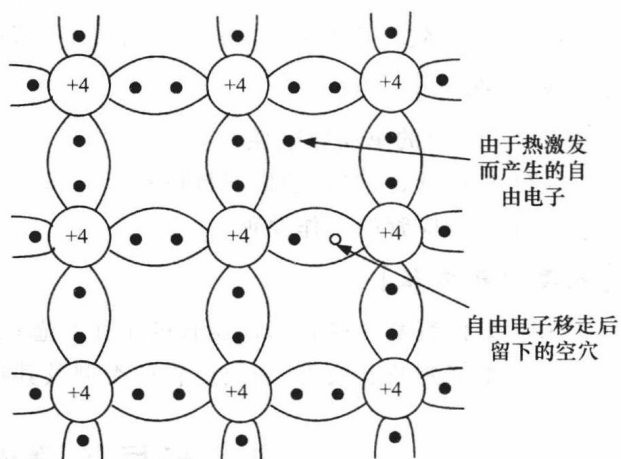


图 1-3 热激发产生的自由电子-空穴对

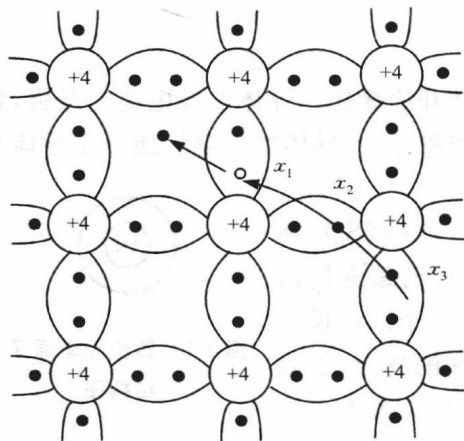


图 1-4 电子和空穴的移动

在外电场力的作用下,一方面自由电子作定向运动形成电子电流,另一方面空穴出现后,会吸引相邻原子中的价电子来填补空穴,同时出现另一个空穴,如图 1-4 所示。若 x_1 处出现空穴,而 x_2 处的价电子就可以填补到这个空穴,从而使空穴由 x_1 移到 x_2 ;若接着 x_3 处的价电子又填补到 x_2 处的空穴,即使空穴又由 x_2 移到 x_3 处。这样空穴就产生定向移动, $x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_3$,形成空穴电流。由于自由电子和空穴所带电荷极性不同,因此它们的运动方向相反,本征半导体中的电流是两个电流之和。

运载电荷的粒子称为载流子。导体导电只有一种载流子,即自由电子;而半导体有两种载流子,即

自由电子和空穴,这是半导体导电的特殊性。

在本征半导体中,一方面,由于热激发,自由电子-空穴对不断产生;另一方面,自由电子在运动过程中又会不断地填补空穴,从而使自由电子-空穴对消失,这一过程称为复合。在一定温度下,自由电子-空穴对的产生和复合达到动态平衡,则半导体载流子的浓度维持在一定水平。理论证明,本征半导体的载流子浓度随着温度的升高近似按指数规律增加。因此,温度对半导体的导电性能影响很大。

1.1.3 杂质半导体

本征半导体中,由于热激发而产生的自由电子和空穴的数目是很少的,因此其导电性能很差。如果在本征半导体中掺入少量合适的杂质元素,便可使半导体的自由电子或空穴的数目大大增加,这种半导体称为杂质半导体。控制掺入杂质的浓度,便可控制杂质半导体的导电性能。

杂质半导体有以下两种:电子型半导体和空穴型半导体。载流子以电子为主的半导体称为电子型半导体。因为电子带负电,取英文单词“负”(negative)第一个字母的大写“N”,所以电子型半导体又称N型半导体。载流子以空穴为主的半导体称为空穴型半导体。取英文单词“正”(positive)第一个字母的大写“P”,所以空穴型半导体又称P型半导体。下面以硅材料为例进行讨论。

1. N型半导体

在本征半导体中掺入五价元素(如磷),使每一个五价元素取代一个四价元素在晶体中的位置,可以形成N型半导体。由于杂质原子的最外层是五个价电子,因此除了与周围四价原子形成共价键外,还多出一个电子,如图1-5所示。多出的电子不受共价键的束缚,只需获得较小的能量便可成为自由电子。由于掺入的杂质原子可以提供电子,故称为施主原子。N型半导体中,自由电子的浓度大于空穴的浓度,所以称自由电子为多数载流子(简称多子),空穴为少数载流子(简称少子)。N型半导体主要靠自由电子导电,掺入杂质越多,多子(自由电子)的浓度就越高,导电性能就越强。

2. P型半导体

在本征半导体中掺入三价杂质元素(如硼),使每一个三价元素取代一个四价元素在晶体中的位置,可以形成P型半导体。由于杂质原子的最外层是三个价电子,因此只能与周围四价原子形成三对共价键,同时形成一个空穴,如图1-6所示。由于掺入的杂质原子可以形成空穴从而吸引价电子,故称为受主原子。P型半导体中,空穴为多子,自由电子为少子,主要靠空穴导电。掺入杂质越多,多子(空穴)的浓度就越高,导电性能就越强。

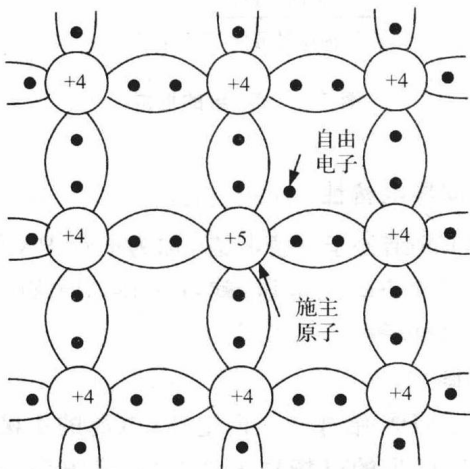


图 1-5 N型半导体结构示意图

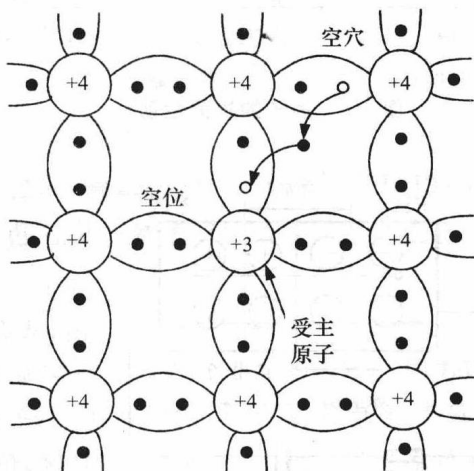


图 1-6 P型半导体结构示意图

从以上分析可知,掺入杂质的浓度决定了多子的浓度,也就控制了杂质半导体的导电性能,因此多子受温度的影响很小;少子是本征激发形成的,尽管其浓度很低,但对温度非常敏感,这一特性既可以让用其制作光敏器件和热敏器件,又是造成半导体器件温度稳定性差的原因。

1.1.4 PN 结

1. PN 结的形成

对同一块半导体,两端分别掺入不同的杂质,使之分别形成 P 型半导体和 N 型半导体,这两种杂质半导体的接触面会形成一个 PN 结。

由于交界面两侧载流子(空穴和自由电子)的浓度差很大,因此载流子将从浓度较高的区域向浓度较低的区域运动,即形成多子的扩散运动。如图 1-7 所示,P 区的多子空穴向 N 区扩散,而 N 区的多子自由电子向 P 区扩散。

当载流子通过两种半导体的交界面后,在交界面附近的区域里空穴与自由电子复合。这样,在 P 区一侧由于失去空穴,留下了不能移动的负离子层;在 N 区一侧由于失去自由电子,留下了不能移动的正离子层,从而形成空间电荷区。由此产生的电场称为内电场,方向由 N 区指向 P 区,如图 1-8 所示。空间电荷区越宽,内电场就越强。显然,内电场的存在阻挡多子的扩散运动而加强少子向对方区域的漂移,这样又形成少子的漂移运动。刚开始,扩散运动较强,漂移运动较弱,随着扩散运动的进行,空间电荷区加宽、内电场加强,阻碍扩散运动、增强漂移运动,最后扩散运动和漂移运动达到动态平衡,形成稳定的空间电荷区,即 PN 结。

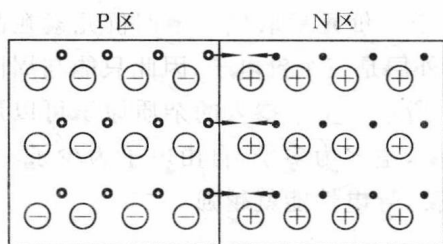


图 1-7 多子的扩散运动

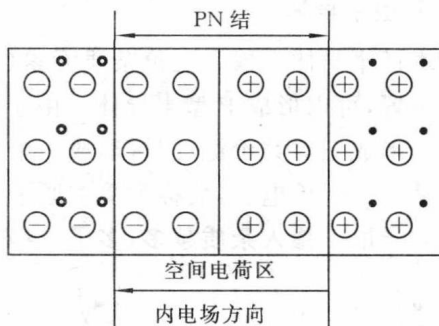


图 1-8 PN 结的形成

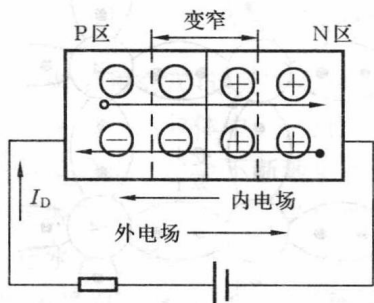


图 1-9 加正向电压,PN 结导通

2. PN 结的单向导电特性

以上所讨论的 PN 结处于平衡状态,称为平衡 PN 结。在 PN 结两端外加不同方向的电压,就可以破坏原来的平衡,从而呈现出单向导电性。

1) 外加正向电压

如图 1-9 所示,给 PN 结外加正向电压(电源的正极接 P 区,负极接 N 区),产生的电场称为外电场,其方向与内电场的相反,则内电场被削弱,空间电荷区变窄,有利于扩

散运动,但削弱漂移运动。大量的多子通过PN结形成较大的正向电流,呈现低电阻特性,PN结处于导通状态。这种情况称为PN结处于正向偏置。

2) 外加反向电压

如图1-10所示,给PN结外加反向电压(电源的负极接P区,正极接N区),此时产生的外电场方向与内电场的一致,则空间电荷区变宽,内电场被加强,加强漂移运动,但阻碍扩散运动,随着外加电压的增大,漂移运动占优势,形成反向电流。由于少数子浓度很低,反向电流很小,并且少数子在一定温度下浓度不变,因此此时即使增加外加电压的幅度,其电流也会保持不变,故称为反向饱和电流。此时呈现高电阻特性,PN结处于反向截止状态。这种情况称为PN结处于反向偏置。

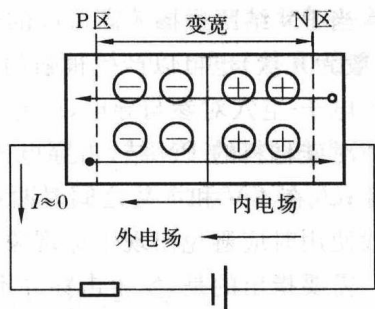


图1-10 加反向电压,PN结截止

综上所述:PN结加正向电压,处于导通状态;加反向电压,处于截止状态,即PN结具有单向导电特性。

3. PN结的伏安特性

PN结的伏安特性是指PN结两端的外加电压 u_D 与流过PN结的电流 i_D 之间的关系曲线。从理论上分析,PN结的伏安特性可用下式表示:

$$i_D = I_S (e^{u_D/U_T} - 1)$$

式中: I_S 为反向饱和电流; $U_T = KT/q$ 称为温度电压当量,其中 K 为玻尔兹曼常数, T 为热力学温度, q 为电子的电荷量。

在室温($T = 300\text{ K}$)下, $U_T \approx 26\text{ mV}$ 。PN结的伏安特性曲线如图1-11所示。

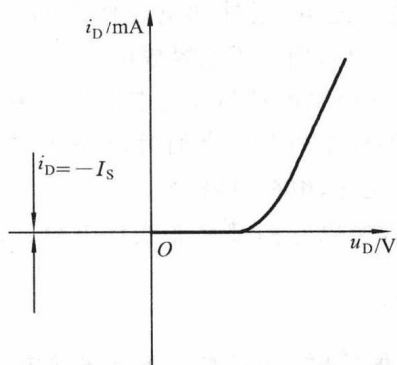


图1-11 PN结的伏安特性曲线

PN结正向偏置时,外加电压 $u_D \gg U_T$,则 $u_D/U_T \gg 1$,PN结的正向电流 i_D 随正向电压 u_D 按指数规律变化。PN结的伏安特性表达式可以简化为

$$i_D \approx I_S e^{u_D/U_T}$$

PN结反向偏置时,外加电压 $|u_D| \gg U_T$,则 $e^{u_D/U_T} \approx 0$,PN结的伏安特性表达式可以简化为 $i_D \approx -I_S$ 。可见反向饱和电流 I_S 是个常数,不随外加反向电压的大小而变动。

4. PN结的击穿特性

PN结处于反向偏置时,在一定电压范围内,流过PN结的电流是很小的反向饱和电流。当反向电压超过某一数值(U_B)后,反向电流急剧增加,这种现象称为反向击穿。 U_B 称为击穿电压。

PN结的击穿分为雪崩击穿和齐纳击穿。

当反向电压足够高时,内电场很强,少数载流子在漂移过程中受更大的电场作用力产生加速运动,在运动中与共价键碰撞时可能将价电子“打”出共价键,形成新的电子-空穴对。这些新的电子-空穴对又可能“打”出更多的电子-空穴对,如此连锁反应,使反向电流急剧增大。这种击穿称为雪崩击穿。

当PN结两边掺入高浓度的杂质时,其空间电荷区宽度很小,即使不大的外加反向电压(一般为几伏)也可以产生很强的电场(可达 2×10^6 V/cm),将其价键的价电子直接拉出来,产生电子-空穴对参与导电,引起反向电流急剧增加,这种现象称为齐纳击穿。

对硅材料的PN结,击穿电压 U_B 大于7 V时通常是雪崩击穿,小于4 V时通常是齐纳击穿; U_B 在4 V和7 V之间时两种击穿均有。由于击穿破坏了PN结的单向导电特性,因而一般使用时应避免出现击穿现象。

需要指出的是,发生击穿并不意味着PN结被损坏。当PN结反向击穿时,只要注意控制反向电流的数值(一般通过串接电阻 R 实现),不使其过大产生过热而烧坏PN结,反向击穿和反向截止两种状态是可逆的。当反向电压(绝对值)降低时,PN结的性能就可以恢复到反向截止的状态。稳压二极管正是利用了PN结的反向击穿特性来实现稳压的。

5. PN结的电容特性

根据电容的定义,有

$$C = \frac{Q}{U} \quad \text{或} \quad C = \frac{dQ}{dU}$$

表明电压变化将引起电荷变化,从而反映出电容效应。而PN结两端加上电压,PN结内就有电荷的变化,说明PN结具有电容效应。按产生的原因,PN结的结电容包括势垒(barrier)电容 C_B 和扩散(diffusion)电容 C_D 两种。

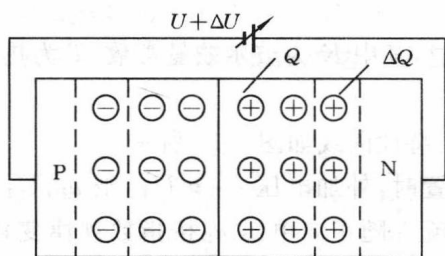


图 1-12 空间电荷区电量随外加电压变化而变化

势垒电容 C_B 是由空间电荷区引起的。空间电荷区由不能移动的正、负离子组成,它们都有一定的电量,这种结构与平板电容器的很相似。如图1-12所示,当外加电压使空间电荷区变宽时,电荷量增加,相当于电容充电;当外加电压使空间电荷区变窄时,电荷量减小,相当于电容放电。

扩散电容 C_D 是由多数载流子在扩散过程中的积累引起的。当外加正向电压增加时,扩散区内积累的电荷量增加,反之,电荷量减少。

势垒电容 C_B 和扩散电容 C_D 都与PN结的结面积有关,所以它们都是非线性电容。PN结的结电容 C_j 为势垒电容 C_B 和扩散电容 C_D 之和,即

$$C_j = C_B + C_D$$

PN结正向偏置时,结电容一般以扩散电容为主;反向偏置时,则基本上等于势垒电容。结电容 C_j 一般很小,结面积小的为1 pF左右,结面积大的为几十至几百皮法。当工作频率很高时才考虑结电容的存在。

1.2 半导体二极管

1.2.1 半导体二极管的结构及类型

半导体二极管是以PN结为核心,在PN结的两端各引出一个电极并加管壳封装而成

的。PN 结的 P 型半导体一端引出的电极为阳极(或称为正极),PN 结的 N 型半导体一端引出的电极为阴极(或称为负极)。半导体二极管按使用的半导体材料,可分为硅管和锗管;按结构形式,又可分为点接触型、面接触型和平面型三类。

图 1-13(a)所示的点接触型二极管,其特点是 PN 结面积很小,只能通过较小的电流(几十毫安以下),结电容很小,适用于高频(可达 100 MHz 以上)电路。因此,点接触型二极管多用于高频检波以及小电流整流电路中。

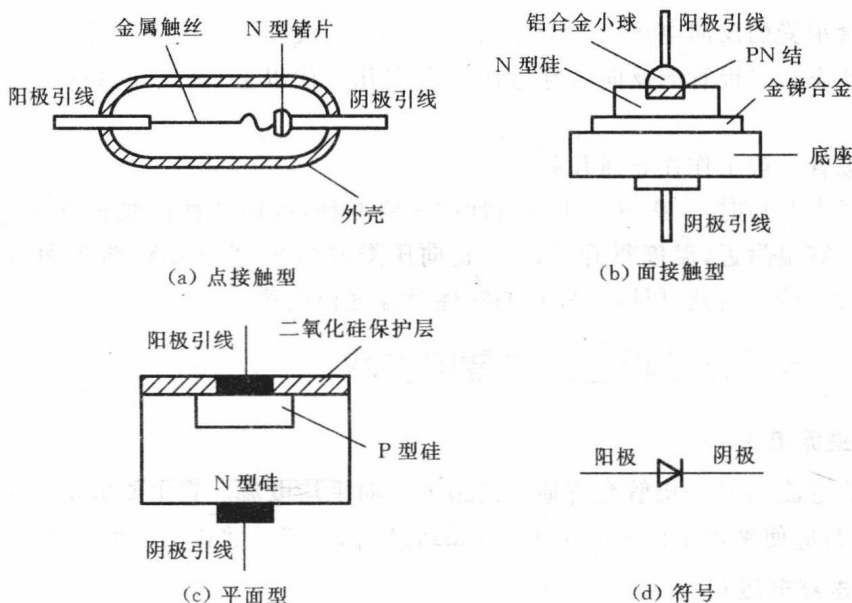


图 1-13 半导体二极管的结构和符号

图 1-13(b)所示的面接触型二极管,其特点是 PN 结面积大,允许通过较大的电流(几百毫安至几安),结电容也大,只能用于低频整流电路中。

图 1-13(c)所示的平面型二极管,PN 结面积较小的常用在脉冲电路中作为开关管,结面积较大的常用于大功率整流电路中。

图 1-13(d)所示的是二极管的符号。

1.2.2 半导体二极管的伏安特性

伏安特性是用来描述电压与电流之间关系的。以硅二极管为例,半导体二极管的伏安特性曲线如图 1-14 所示。

1. 正向特性

当二极管加正向电压较小时,由于外电场还不足以克服内电场对多子扩散运动的阻碍作用,因此二极管的正向电流为零,这一区域称为死区。当正向电压大于一定数值后,内电场被削弱,正向电流明显增长,二极管进入导通状态,该电压值称为阈值电压,记作 U_{th} 。在室温下,硅管 $U_{th} \approx 0.5 \text{ V}$,锗管 $U_{th} \approx 0.1 \text{ V}$ 。二极管正向导通时,硅管的管压降为

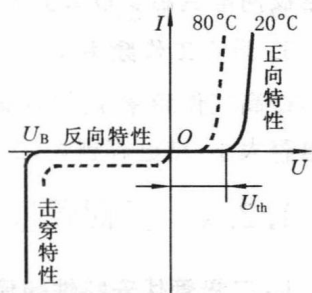


图 1-14 硅二极管的伏安特性曲线