

普通高等教育“十二五”规划教材



MONI DIANZI JISHU JICHU

模拟电子技术基础

张凤凌 主编

- 知识够用，难度合理
- 注意衔接，循序渐进
- 重视实践，学以致用
- 配套齐全，易学易教



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材



MONI DIANZI JISHU JICHU

模拟电子技术基础

主 编 张凤凌
副主编 高 妙 张会莉
编 写 曲国明 岳永哲
主 审 高观望



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材,是针对应用技术型大学培养要求及学生认知规律编写的。主要包括:常用半导体器件、基本放大电路、放大电路的频率响应、集成运算放大电路及其应用、负反馈放大电路、信号发生电路、功率放大电路、直流稳压电源、Multisim 12 基本操作简介、模拟电子技术应用等。在模拟电子技术应用部分,列举了日常生活中模拟电子技术的应用实例,学以致用,提高学生的学习兴趣。每章章末附有习题,并在附录中给出部分习题的答案,可供学生练习与自我检验。

本书既可作为高等院校电类学生的专业基础课教材,也可作为从事电子技术工作的工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础/张凤凌主编. —北京:中国电力出版社, 2015. 8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-7912-1

I. ①模… II. ①张… 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 (2015) 第 136669 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

三河市百盛印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 8 月第一版 2015 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.5 印张 372 千字

定价 33.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

电类基础课教材编写小组

组 长 王培峰

成 员	马献果	王计花	王冀超	吕文哲
	曲国明	朱玉冉	任文霞	刘红伟
	刘 磊	安兵菊	许 海	孙玉杰
	李翠英	宋利军	张凤凌	张会莉
	张成怀	张 敏	岳永哲	孟 尚
	周芬萍	赵玲玲	段辉娟	高观望
	高 妙	焦 阳	蔡明伟	

(以姓氏笔画为序)



序

电工、电子技术为计算机、电子、通信、电气、自动化、测控等众多应用技术的理论基础,同时涉及机械、材料、化工、环境工程、生物工程等众多相关学科。对于这样一个庞大的体系,不可能在学校将所有的知识都教给学生。以应用技术型本科学生为主体的大学教育,必须对学科体系进行必要的梳理。本系列教材就是试图搭建一个电类基础知识体系平台。

2013年1月,教育部为加快发展现代职业教育,建设现代职业教育体系,部署了应用技术大学改革试点战略研究项目,成立了“应用技术大学(学院)联盟”,其目的是探索“产学研一体、教学做合一”的应用型人才培养模式,促进地方本科高校转型发展。河北科技大学作为河北省首批加入“应用技术大学(学院)联盟”的高校,对电类专业基础课进行了试点改革,并根据教育部高等学校教学指导委员会制定的“专业规划和基本要求、学科发展和人才培养目标”,编写了本套教材。本套教材特色如下:

(1)教材的编写以教育部高等学校教学指导委员会制定的“专业规划和基本要求”为依据,以培养服务于地方经济的应用型人才为目标,系统整合教学改革成果,使教材体系趋于完善,教材结构完整,内容准确,理论阐述严谨。

(2)教材的知识体系和内容结构具有较强的逻辑性,利于培养学生的科学思维能力;根据教学内容、学时、教学大纲的要求,优化知识结构,既加强理论基础,也强化实践内容;理论阐述、实验内容和习题的选取都紧密联系实际,培养学生分析问题和解决问题的能力。

(3)课程体系整体设计,各课程知识点合理划分,前后衔接,避免各课程内容之间交叉重复,使学生能够在规定的课时数内,掌握必要的知识和技术。

(4)以主教材为核心,配套学习指导、实验指导书、多媒体课件,提供全面的教学解决方案,实现多角度、多层面的人才培养模式。

本套教材由王培峰任编写小组组长。本套教材主要包括《电路》(上、下册,王培峰主编)、《模拟电子技术基础》(张凤凌主编)、《数字电子技术基础》(高观望主编)、《电路与电子技术基础》(马献果等编)、《电路学习指导书》(上册,朱玉冉主编;下册,孟尚主编)、《模拟电子技术学习指导书》(张会莉主编)、《数字电子技术学习指导书》(任文霞主编)、《电路与电子技术学习指导书》(马献果等编)、《电路实验教程》(李翠英主编)、《电子技术实验与课程设计》(安兵菊主编)、《电工与电子技术实验教程》(刘红伟等编)等。

提高教学质量,深化教学改革,始终是高等学校的工作重点,需要所有关心高等教育事业人士的热心支持。为此谨向所有参与本系列教材建设的同仁致以衷心的感谢!

本套教材可能会存在一些不当之处,欢迎广大读者提出批评和建议,以促进教材的进一步完善。

电类基础课教材编写小组

2014年10月

前言

为了适应当前教育改革的需要,培养具有坚实的电子技术理论功底,既懂电子技术理论分析又能强化动手实践的应用型人才,参照相关高等学校的教学大纲,结合多年的教学实践,组织编写了本书。在编写过程中,注重电子技术的基本概念和基本原理,合理控制教材的深度和广度,内容简明扼要,每章配有习题,书后附有习题答案以便于自学和复习。本书广泛参考国内外优秀教材,力求简明易懂、内容系统和实用,突出了应用性,大量利用例题分析,引导学生掌握各种分析方法;增加了利用仿真技术解决实际问题的内容,强化实践技能培养,提高适用性,增强学生解决、分析问题的能力。

从当前应用技术型大学教学的实际情况出发,本书在内容的组织上具有如下特点:

- (1) 知识的引入由浅入深,注重基本概念、基本理论和基本方法。
- (2) 内容简明扼要,尽量减少复杂的理论推导,主要从基本概念和实践应用方面入手,便于理解和掌握。
- (3) 保证基础,联系实际,使教材具有系统性、启发性和实用性。

全书共分10章:第1章常用半导体器件,主要介绍半导体的基本知识及其导电特性,PN结的形成原理及特性,半导体二极管、晶体管的结构、工作原理和外部特性;第2章基本放大电路,主要介绍放大电路组成和工作原理、放大电路的分析方法;第3章放大电路的频率响应,主要介绍放大电路的电压放大倍数随信号频率变化的原因和规律;第4章集成运算放大电路及其应用,主要介绍集成运算放大电路的特点、差动放大电路的工作原理及分析、集成运算放大电路的应用;第5章负反馈放大电路,主要介绍反馈的基本概念及其判断、深度负反馈放大电路的分析及负反馈对放大电路性能的影响;第6章信号发生电路,主要介绍正弦波振荡电路组成及工作原理、电压比较器的组成及分析方法,简单介绍方波发生器和三角波发生器;第7章功率放大电路,主要介绍功率放大电路的特点及分类、互补推挽功率放大电路主要性能指标的分析、计算方法;第8章直流稳压电源,主要介绍直流电源的组成,分析整流电路、滤波电路、稳压电路组成及工作原理;第9章 Multisim 12 基本操作简介,主要介绍 Multisim 12 的基本界面、仿真分析方法及在模拟电路设计中的应用;第10章模拟电子技术应用,主要介绍一些简单实用的电路,便于学生分析、设计,加强动手及分析问题能力,提高学生对所学知识的综合应用能力。

为了便于学生自学、复习以及对理论知识的理解和掌握,各章精选了部分习题,题型多样、联系实际,还有部分故障诊断和设计性题目,提出的问题更具启发性、灵活性和实践性。

本书由河北科技大学高观望主审,张凤凌主编、统编并编写第5、第6章,高妙编写第1、第2章,张会莉编写第3、第4章,曲国明编写第7、第8章,岳永哲编写第9、第10章及每章仿真电路,第1、第2章的部分电路图等。在本书的编写过程中,还得到高观望、王计花、任文霞、吕文哲、张敏等老师的大力支持和帮助,并提出了许多宝贵的改进意见和建议。在此一并表示衷心的感谢。

限于编者水平，加之时间紧迫，书中难免会有些疏漏、不妥和错误之处，恳请广大读者和各位同行批评指正。

编 者

2015 年 6 月

目 录

序

前言

1 常用半导体器件	1
1.1 半导体基础知识	1
1.2 半导体二极管	8
1.3 晶体管	13
1.4 绝缘栅型场效应晶体管	18
1.5 Multisim 应用举例	22
习题	24
2 基本放大电路	27
2.1 放大电路概述	27
2.2 基本共射放大电路的工作原理	30
2.3 放大电路的分析方法	34
2.4 静态工作点稳定电路	43
2.5 晶体管单管放大电路的三种基本接法	47
2.6 场效应晶体管放大电路	51
2.7 复合管	55
2.8 多级放大电路	56
2.9 Multisim 应用举例	60
习题	62
3 放大电路的频率响应	66
3.1 概述	66
3.2 晶体管的高频等效模型	70
3.3 单管共射放大电路的频率响应	71
3.4 多级放大电路的频率响应	76
3.5 Multisim 应用举例	77
习题	79
4 集成运算放大电路及其应用	81
4.1 集成运算放大电路概述	81
4.2 差分放大电路	82
4.3 集成运放的外部特性及理想运放的性能指标	92
4.4 集成运放的两个工作区	93
4.5 集成运放的线性应用电路	94
4.6 Multisim 应用举例	106

习题	109
5 负反馈放大电路	113
5.1 反馈的基本概念及其判断	113
5.2 深度负反馈放大电路放大倍数的分析	123
5.3 负反馈对放大电路性能的影响	127
5.4 负反馈放大电路的稳定性	132
5.5 Multisim 应用举例	133
习题	136
6 信号发生电路	139
6.1 正弦波振荡电路	139
6.2 非正弦波振荡电路	148
6.3 Multisim 应用举例	162
习题	164
7 功率放大电路	169
7.1 功率放大电路概述	169
7.2 功率放大电路分析	171
7.3 集成功率放大器简介	176
7.4 Multisim 应用举例	177
习题	178
8 直流稳压电源	181
8.1 直流稳压电源的组成和各部分作用	181
8.2 单相整流电路	181
8.3 滤波电路	185
8.4 稳压电路	187
8.5 Multisim 应用举例	195
习题	196
9 Multisim 12 基本操作简介	199
9.1 Multisim 12 基本界面及设置	199
9.2 常用虚拟仪器的使用	207
9.3 电路的搭建及仿真	213
10 模拟电子技术应用	220
10.1 简易声光双控照明电路	220
10.2 七彩手机万能充电器电路	221
10.3 声控电动玩具控制电路	224
附录 A 部分习题答案	226
附录 B 常用符号说明	232
参考文献	235

1 常用半导体器件

电子技术是一门研究电子器件及其应用的科学技术。按其产生、传输和处理信号的不同,电子技术分为模拟电子技术和数字电子技术。模拟电子技术中的信号是数值随时间连续变化的信号,即模拟信号;与之相对应,数字电子技术中的信号则是时间和数值上都离散的信号,即数字信号。

无论是模拟电路还是数字电路,半导体器件都是电路的基础元件,它们所用的材料是经过特殊加工且性能可控的半导体材料。本章首先介绍半导体材料的基本结构和导电特性,然后阐述 PN 结的形成及其单向导电性,并在此基础上介绍二极管、晶体管和场效应晶体管的基本结构、工作原理、特性曲线和主要参数。



教学目标

1. 了解半导体材料的基本结构和导电特性。
2. 掌握 PN 结的形成及其单向导电性。
3. 了解二极管、晶体管和场效应晶体管的基本结构,掌握其工作原理、特性曲线和主要参数。

1.1 半导体基础知识

自然界中的各种物质根据其导电特性大致可分为导体、半导体和绝缘体三类。导体中有大量的自由电子,加上电场后自由电子定向移动形成电流。因此,导体的电阻率很小,导电能力很强,如铜、铁、铝等金属物质都是导体。绝缘体中的自由电子很少,加上电场后几乎没有电流形成。因此,绝缘体的电阻率很大,导电能力很差,如玻璃、橡胶、塑料、陶瓷等都是绝缘体。半导体是导电能力介于导体和绝缘体之间的物质,如硅(Si)、锗(Ge)、砷化镓(GaAs)等。半导体具有一些特殊的物理特性,如光敏特性、热敏特性及杂敏特性,正是这些特性使得半导体在电子技术中发挥了巨大的作用。

1.1.1 本征半导体

完全纯净并具有晶体结构的半导体称为本征半导体。

1. 本征半导体的晶体结构

常用的本征半导体有硅和锗晶体,它们都是 4 价元素,最外层轨道上有 4 个电子,称为价电子。价电子受原子核的束缚力最小,元素的许多物理性质和化学性质都由这些价电子决定,其中导电性能更是与价电子有关。为了强调价电子的作用,研究半导体特性时,常用图 1-1 所示的简化模型表示半导体材料。图中 4 个点表示最外层的 4 个价电子,标有“+4”的圆圈表示除价电子外的正离子。

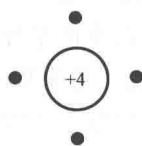


图 1-1 硅(锗)晶体的简化模型

本征半导体的原子排列有序,在空间形成排列整齐的点阵结构,称

为晶格。图 1-2 所示为本征半导体（硅或锗）的结构示意图。图中画出的是二维结构，实际上其晶体结构是三维的。在晶体结构中，相邻硅（或锗）原子之间的距离很小，每个原子的价电子不仅受自身原子核的吸引，而且还受到相邻原子核的吸引，使它们成为相邻两个原子所共有的共用电子对，称为共价键结构。每个硅原子的 4 个价电子都通过共价键与相邻 4 个原子发生作用，相互结合，形成整齐有序的晶体结构。

2. 本征半导体中的载流子

共价键中的电子相互束缚，在温度 $T=0\text{K}$ (-273.15°C) 时，价电子没有能力脱离共价键的束缚成为自由电子。但是，与绝缘体材料不同，半导体材料中的价电子受共价键的束缚力较小，只要得到较小的能量就可以摆脱共价键的束缚成为自由电子。因此，在室温下少量的价电子会受到热能的激发，成为自由电子。在外加电场的作用下，这些自由电子就会定向移动形成电子电流。像自由电子这种运载电荷的粒子，称为载流子。自由电子是本征半导体中带负电的载流子。

一个价电子成为自由电子后，就在其共价键的位置上留下了一个空位，这个空位称为空穴。由于空穴处失去一个电子，使得其所属原子带正电，或者说空穴带正电。当共价键中出现一个空穴时，如图 1-3 中的 A 处，与其相邻共价键中的价电子很容易受到正电荷的吸引来填补这个空穴，使该价电子原来的位置出现一个空穴，如图 1-3 中的 B 处。以此类推，空穴便可在整个晶体内自由移动。在外加电场作用下，价电子定向填补空穴，使空穴做相反方向的移动，形成空穴电流。因此，空穴是本征半导体材料中带正电的载流子。空穴的出现是半导体区别于导体导电的一个重要特点。

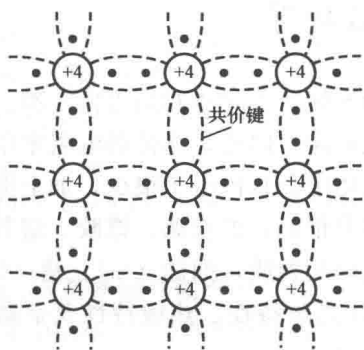


图 1-2 本征半导体结构示意图

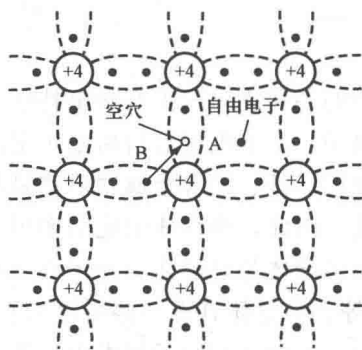


图 1-3 本征半导体中的自由电子和空穴

由以上分析可知，在本征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。

3. 本征半导体的导电性能

在本征半导体中，空穴与自由电子成对出现，称为电子空穴对。本征半导体受外界能量（热能、光能和电能等）激发，产生电子空穴对的过程称为本征激发。一方面，本征激发不断产生电子空穴对，使载流子浓度增加，导电能力增强；另一方面，正负电荷相互吸引，会使电子和空穴在运动过程中相遇，从而出现电子填充空穴，电子空穴成对消失，这个过程称为复合。显然，激发和复合是本征半导体材料中存在的一对相反的运动过程。在一定温度下，激发和复合速度最终相等，达到动态平衡使本征半导体材料中载流子的浓度一定。

应当指出,本征半导体的导电性能很差。在室温条件下,硅材料中只有约三万亿分之一价电子受激发产生电子空穴对,载流子浓度很低。此外,半导体的导电性能又具有热敏性和光敏性。当温度升高或光照增强时,本征半导体内被共价键束缚的价电子会获得更多的能量,本征激发所产生的电子空穴对会大大增加,从而使半导体的导电性能大大增强。利用半导体的热敏性和光敏性可以制成热敏元件(如热敏电阻)和光敏元件(如光敏电阻和光电管)。

1.1.2 杂质半导体

本征半导体材料的载流子浓度很低,导电能力很差,但通过扩散工艺在本征半导体中掺入微量的杂质元素,会使其导电性能发生明显改善。掺入杂质的半导体称为杂质半导体。按照掺入杂质元素的类型不同,可以分为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)中掺入少量5价元素,如磷、砷、锑等,就得到N型半导体。由于掺杂率很低,因此不会影响本征半导体原来的晶体结构,只是原来晶格中的有些硅(或锗)原子被杂质原子替代,如图1-4所示。杂质原子有5个价电子,它与周围的四个硅原子形成共价键时,就会多出一个电子,这个电子不受共价键束缚,在室温下受热运动即可成为自由电子。因此,室温下几乎每个杂质原子都能提供一个自由电子,N型半导体材料中的电子数量明显增加,这样就大大提高了半导体的导电性能。因为这种杂质原子能“施舍”出一个电子,所以称为施主原子。施主原子失去一个价电子后,便成为正离子,称为施主离子或杂质正离子。

在N型半导体材料中,不但有杂质原子提供的自由电子,而且还有本征激发产生的电子空穴对,由于掺杂浓度远大于本征激发的载流子浓度,因此自由电子的浓度远远高于空穴的浓度,成为N型半导体中的多数载流子(简称多子);空穴则称为少数载流子(简称少子)。

N型半导体主要依靠自由电子导电,也称为电子型半导体,并且掺入的杂质数量越多,自由电子的浓度越高,导电能力就越强。

2. P型半导体

在本征半导体硅(或锗)中掺入少量3价元素,如硼、铝、镓等,就得到P型半导体,如图1-5所示。杂质原子替代了晶格中的某些硅(或锗)原子,其三个价电子和相邻四个硅(或锗)原子形成共价键时,因缺少一个电子而在共价键中出现了一个空位,空位为电中性。由于空位的存在,相邻共价键中的价电子只需很小的热激发即可填补这个空位,使杂质

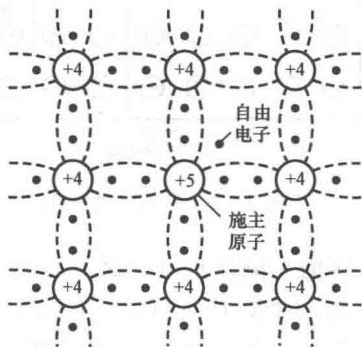


图1-4 N型半导体

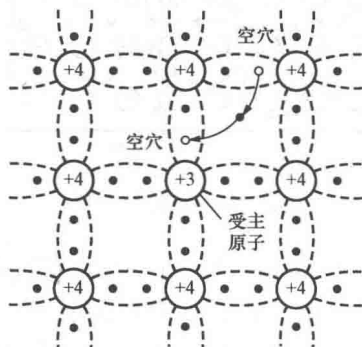


图1-5 P型半导体

原子因多出一个价电子而成为负离子，同时在失去价电子的共价键处出现一个空穴。因此，室温下，P 型半导体中的几乎所有杂质原子都会提供一个空穴。3 价杂质原子可以产生空穴，起到接受电子的作用，所以称为受主原子。杂质原子接受自由电子后带负电，也称为受主离子或杂质负离子。

在 P 型半导体材料中，空穴的浓度远高于自由电子的浓度，因此 P 型半导体材料中空穴为多数载流子，自由电子为少数载流子，正好与 N 型半导体相反。需要注意的是，不论是 N 型半导体还是 P 型半导体，虽然都是一种载流子占多数，但整个晶体中正负电荷数量相等，呈现电中性。

由以上分析可知，本征半导体通过掺杂，可以改变半导体内部的载流子浓度，并且使两种载流子的浓度不同。多子浓度主要由掺杂浓度决定，温度变化对其影响很小，大大提高了杂质半导体的导电性能；少子浓度与本征激发和复合有关，受温度影响很大，因此可对半导体器件的温度特性产生较大影响。

1.1.3 PN 结

通过掺杂工艺，将本征半导体材料硅（或锗）片的一边制作成 P 型半导体，另一边制作成 N 型半导体，在两种杂质半导体的交界面形成一个很薄的特殊物理层，称为 PN 结。PN 结是构造半导体器件的基本结构单元。

1. PN 结的形成

(1) 多子的扩散运动。当 P 型半导体和 N 型半导体制作在一起时，在它们交界面的两边，两种载流子的浓度差很大，N 区自由电子的浓度高，P 区空穴的浓度高。由于浓度差，P 区的空穴会向 N 区运动，N 区的电子会向 P 区运动。这种由于浓度差而引起的载流子运动称为扩散运动，扩散运动形成的电流称为扩散电流，如图 1-6 所示。P 区的空穴扩散到 N 区，在原来的位置留下了带负电的受主离子；N 区的自由电子扩散到 P 区，留下了带正电的施主离子。扩散到对方区域中的载流子变成少数载流子，在两个区域的交界面附近，它们将会与该区域中的多子复合。从而，在交界面两侧形成了具有等量正负离子的薄层，称为空间电荷区，如图 1-7 所示。由于这个区域的自由电子和空穴成对复合而消失，载流子已经耗尽，所以也称其为耗尽层。

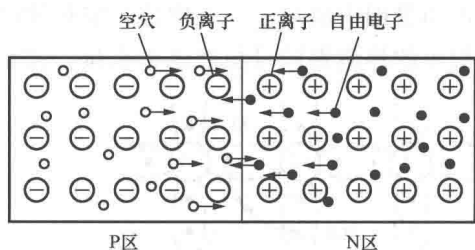


图 1-6 空穴和电子的扩散

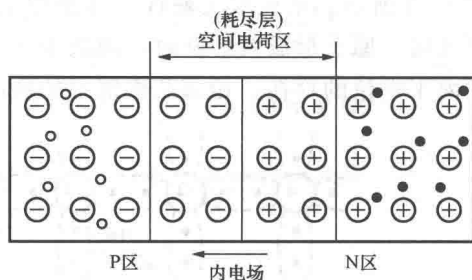


图 1-7 平衡状态下的 PN 结

(2) 少子的漂移运动。在空间电荷区内，靠 N 区的一侧带正电，靠 P 区的一侧带负电，因此产生了一个由 N 区指向 P 区的电场，称为内电场，如图 1-7 所示。在内电场的作用下，N 区的少子（空穴）向 P 区运动，P 区的少子（电子）向 N 区运动，这种载流子在内电场作用下的运动，称为漂移运动，所产生的电流称为漂移电流。漂移运动与扩散运动的方向相

反，其作用也相反。扩散运动的作用是使空间电荷区变宽，内电场增强；漂移运动的作用则是使空间电荷区变窄，内电场减弱。

由以上分析可知，在PN结的形成过程中，刚开始时以扩散运动为主，扩散运动形成了空间电荷区。随着扩散运动的进行，交界面两侧的正负离子逐渐增多，使得空间电荷区加宽，内电场加强。于是少子在内电场作用下的漂移运动逐渐增强，而扩散运动相对减弱。当扩散运动的速度和漂移运动的速度相等时，通过交界面的净载流子数为零，即流过PN结的总电流为零，PN结达到平衡状态。此时，空间电荷区的宽度保持不变，内电场的电势差也保持不变，该电势差决定了PN结的开启电压。

2. PN结的单向导电性

上述处于平衡状态的PN结，称为平衡PN结。如果在PN结两端加上电压，就会破坏原来的平衡状态，使扩散电流和漂移电流不再相等，PN结将有电流流过。当PN结外加电压极性不同时，PN结将表现出不同的导电性能，呈现出单向导电性。单向导电性是PN结非常重要的一个特性。

(1) PN结加正向电压时处于导通状态。若将PN结的P区接电源正极，N区接电源负极，则称为PN结的正向接法或PN结正向偏置，简称PN结正偏，如图1-8(a)所示。其中， R 为限流电阻。PN结正偏时，外电场与内电场方向相反，从而起到削弱内电场、使耗尽层变窄的作用，或者说外电场破坏了PN结原本的平衡状态，减弱了漂移运动，促进了扩散运动。因此PN结正偏时，扩散电流占主导地位，形成PN结正向电流，PN结正向导通。

(2) PN结加反向电压时处于截止状态。若将PN结的N区接电源正极，P区接电源负极，则称为PN结的反向接法或PN结反向偏置，简称PN结反偏，如图1-8(b)所示。PN结反偏时，外电场与内电场的方向相同。也就是说，外电场会增强内电场，使耗尽层变宽，增强了漂移运动，减弱了扩散运动。因此PN结反偏时，漂移电流形成了流过PN结的反向电流。由于漂移电流是少数载流子电流，少数载流子的数量极少，即使所有的少数载流子都参与漂移运动，漂移电流也非常小，所以在近似分析中常将它忽略不计，认为PN结加反向电压时处于截止状态。

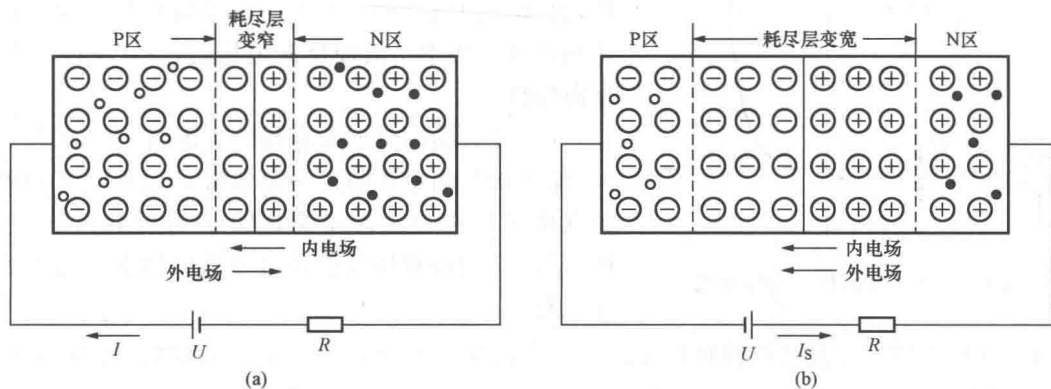


图 1-8 PN 结的单向导电性

(a) PN 结外加正向电压；(b) PN 结外加反向电压

PN 结反向偏置时，反向电流是少数载流子电流，而少数载流子由热激发产生，与反向电压的大小基本无关，但受温度影响较大。因此，在一定温度下，PN 结的反向电流基本不变，被称为反

向饱和电流 I_{RS} 。

3. PN 结的伏安特性

(1) PN 结的伏安特性方程。PN 结两端的外加电压与流过 PN 结的电流之间的关系称为 PN 结的伏安特性。通过理论分析, PN 结的伏安特性方程可表示为

$$i = I_{RS}(e^{u/U_T} - 1) \quad (1-1)$$

$$U_T = \frac{kT}{q} \quad (1-2)$$

式中 I_{RS} ——反向饱和电流, 其大小与 PN 结的材料、制作工艺、温度等因素有关;

U_T ——温度电压当量;

k ——玻尔兹曼常数;

q ——单位电子电荷量;

T ——热力学温度。

在常温 ($T=300\text{K}$) 下, $U_T \approx 26\text{mV}$ 。

(2) PN 结的伏安特性曲线。

1) PN 结的正向特性。由 PN 结的伏安特性方程可知: PN 结正偏时 ($u > 0$), 一般很容易满足 $u \gg U_T$, 此时 $e^{u/U_T} \gg 1$, 则有

$$i = I_{RS}e^{u/U_T}$$

即 PN 结正偏时, 流过 PN 结的电流 i 随其两端的电压 u 基本上以指数规律变化。

2) PN 结的反向特性。由 PN 结的伏安特性方程可知: PN 结反偏时 ($u < 0$), 一般很容易满足 $|u| \gg |U_T|$, 此时 $e^{u/U_T} \ll 1$, 则有

$$i = -I_{RS}$$

即 PN 结反偏时, 流过 PN 结的电流是它的反向饱和电流 I_{RS} , 其大小基本不变, 与反向电压 u 无关。

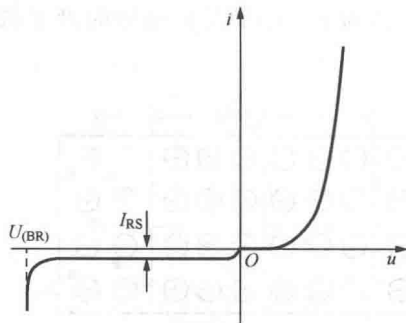


图 1-9 PN 结的伏安特性曲线

由以上分析可以画出 PN 结电流 i 与电压 u 之间的关系曲线, 即伏安特性曲线, 如图 1-9 所示。当 PN 结加正向电压时, i 随 u 按指数规律变化, 称为正向特性; 当 PN 结加反向电压时, $i = -I_{RS}$, 称为反向特性。

(3) PN 结的反向击穿特性。由图 1-9 可知, 当 PN 结外加反向电压超过一定数值 $U_{(BR)}$ 后, 反向电流急剧增加, 称为反向击穿, $U_{(BR)}$ 为反向击穿电压。PN 结的反向击穿按其机理可分为齐纳击穿和雪崩击穿两种。

1) 齐纳击穿。在高掺杂浓度的 PN 结中, 耗尽层宽度很窄, 不大的反向电压就可以在耗尽层形成很强的电场, 从而直接破坏共价键, 拉出价电子产生电子空穴对, 致使电流急剧增大, 这种击穿称为齐纳击穿, 其击穿电压比较低。

2) 雪崩击穿。在掺杂浓度较低时, PN 结中的耗尽层宽度较宽, 在低反向电压下不会产生齐纳击穿。但当反向电压的数值增大时, 耗尽层电场 (内电场) 会使少子加快漂移速度, 从而与共价键中的价电子相碰撞, 将价电子撞出共价键, 产生电子空穴对。新产生的电

子空穴对又会在电场作用下撞出新的价电子,使载流子雪崩似地倍增,致使电流急剧增加,这种击穿称为雪崩击穿。

一般对于硅材料来说, $U_{(BR)} < 5V$ 时为齐纳击穿; $U_{(BR)} = 5 \sim 7V$ 时,两种击穿都有; $U_{(BR)} > 7V$ 时为雪崩击穿。需要说明的是,齐纳击穿和雪崩击穿都是电击穿,只要对其电流加以限制,不使其因过热产生热击穿,PN 结就可以恢复到击穿前的状态。

4. PN 结的电容效应

在物理学中,电容表示了一个器件电荷量与电压之间的关系。当 PN 结的外加电压变化时,PN 结耗尽层内的空间电荷量和耗尽层外载流子的数量都会发生变化。这种 PN 结内电荷随外加电压变化的现象,称为 PN 结的电容效应。根据产生原因不同分为势垒电容和扩散电容。

(1) 势垒电容。PN 结的耗尽层内分布着不能移动的正负离子,当 PN 结外加电压(尤其是反向电压)发生变化时,空间电荷区的宽度会发生变化,即耗尽层内的电荷量发生变化,这种现象与电容器的充放电过程相同,如图 1-10 所示。这种耗尽层内电荷随外加电压变化所等效的电容称为势垒电容 C_b 。势垒电容主要是 PN 结反偏时起作用。

(2) 扩散电容。当 PN 结加正向电压时,P 区的多数载流子空穴和 N 区的多数载流子自由电子都要向对方区域扩散。从 P 区扩散到 N 区的空穴和从 N 区扩散到 P 区的自由电子均称为非平衡少数。由于扩散过程中这些非平衡少数不断与对方区域中的多数载流子复合,于是在 PN 结界面处载流子的浓度最高,距边界越远,浓度越低,呈一定浓度梯度分布。如图 1-11 所示,曲线①为扩散到 P 区的电子浓度曲线。若 PN 结的正向电压增大,则多数载流子扩散增强,扩散到 P 区的自由电子数量增加,使得浓度分布曲线梯度增大,如图 1-11 中曲线②所示。图中曲线与 $n_p = n_{p0}$ 所对应的水平线之间的面积代表了非平衡少数在扩散区域的数目,两条曲线之间的面积即为扩散区域内存储电荷的改变量 ΔQ 。这种由外加电压改变引起扩散区内存储电荷量变化的电容效应,称为扩散电容 C_d 。扩散电容主要是 PN 结正偏时起作用。

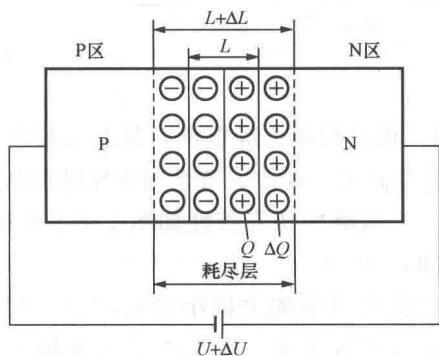


图 1-10 耗尽层电荷随外加电压变化

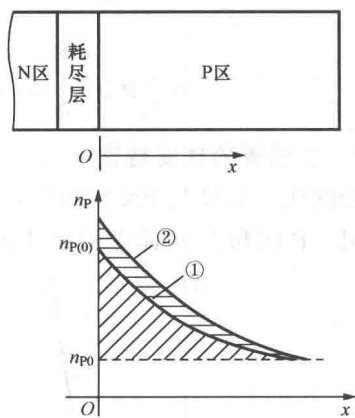


图 1-11 P 区少数浓度分布曲线

势垒电容和扩散电容都是随外加电压变化而变化的非线性电容,两者是并联关系。势垒电容和扩散电容之和为 PN 结的结电容。

1.2 半导体二极管

将 PN 结用外壳封装起来，并从 P 端和 N 端各引出一个电极，就构成了半导体二极管，又称为晶体二极管，通常简称二极管。二极管的种类很多，根据制造材料的不同主要有硅二极管和锗二极管两类。

1.2.1 二极管的常见结构与符号

二极管的常见结构如图 1-12 所示，根据结构不同二极管又分为点接触型二极管、面接触型二极管和平面型二极管。点接触型二极管的特点是 PN 结的面积小，二极管允许通过的电流较小，同时其结电容较小（1pF 以下），工作频率较高（100MHz 以上），适用于高频检波和小功率整流电路。面接触型和平面型二极管的 PN 结面积大，可承受较大电流，其结电容也大，因而工作频率低，可用于大电流整流电路。图 1-12（d）所示为二极管的符号。其中，由 P 区引出的电极为阳极，由 N 区引出的电极为阴极。

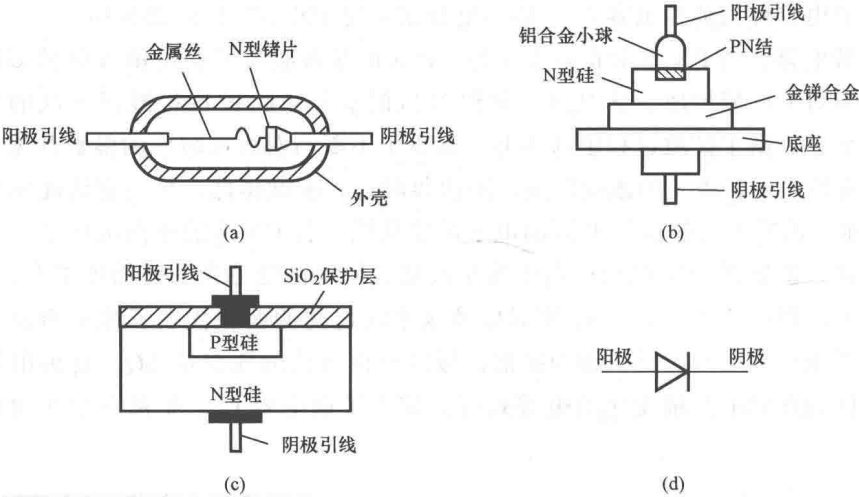


图 1-12 二极管的结构与符号
(a) 点接触型；(b) 面接触型；(c) 平面型；(d) 二极管符号

1.2.2 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性与 PN 结的伏安特性相似，也呈现单向导电性。只是二极管由于引线的接触电阻、P 区和 N 区体电阻以及表面漏电流等影响，其伏安特性与 PN 结的伏安特性略有差异。二极管的伏安特性如图 1-13 所示。

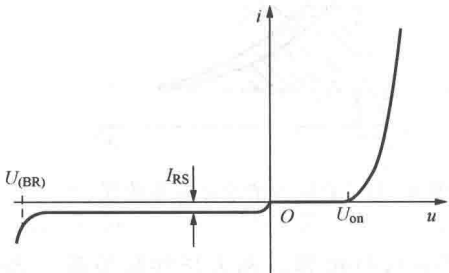


图 1-13 二极管的伏安特性曲线

1. 正向特性

当二极管两端加上较小的正向电压时，正向电流很小，几乎等于零。这是由于外电场还不足以克服 PN 结的内电场造成的，该区域称为死区。只有当外加正向电压超过一定数值时，才有电流出现。该电压称为二极管的阈值电压或死区电压，用 U_{on} 表示。一般硅二极管的阈值电压为 0.5V，锗二极管