



“十三五”普通高等教育本科规划教材

MONI DIANZI JISHU JICHU

模拟电子技术基础

李月乔 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

模拟电子技术基础

李月乔 编
朱承高 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 简 介

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。

本书注重对细节的刻画,强调解决问题的方法,从基本概念入手,强调与电路课程的紧密联系,注重训练学生应用电路理论方法解决电子技术问题的能力,是一本符合认识规律、富有启发性、便于教学、适合学生自学的教材。本书共分九章,主要内容包括半导体二极管及其应用电路、双极型三极管及其放大电路、场效应管及其放大电路、功率放大电路、差动放大电路、集成运算放大器、反馈放大电路、运算放大器的线性应用和非线性应用、信号产生电路、小功率直流稳压电源。

本书可作为普通高等院校电气类、自动化类相关专业电子技术课程本科生教材,也可作为相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础/李月乔编. —北京:中国电力出版社, 2015.6

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5123-7924-4

I. ①模… II. ①李… 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 139793 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>)

北京雁林吉兆印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

※

2015 年 6 月第一版 2015 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 26 印张 636 千字

定价 52.00 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

前言

“模拟电子技术基础”是高等学校理工科电类各专业的基础课，处于各专业教学的中间环节，是学生基本素质形成的关键课程。本书是为电类专业本科生学习模拟电子技术的基础知识而编写的，满足模拟电子技术的教学基本要求，符合课程教学大纲要求。本书为李月乔主编的《数字电子技术基础》的配套教材。

本书注重理论联系实际，取材合适，深度适宜，全面系统地阐述了课程要求掌握的基本理论与知识，书中内容组织由浅入深、循序渐进，结构严谨，突出知识的先进性、相互关联性。本书与电路理论课程的衔接符合学生的认知水平，便于学生自学，在例题中引导学生将电路中的参考方向、三大定律、电位参考点的概念应用其中。基本概念和术语的定义明确而清晰，强调对“非线性”、“某个工作点的直流电阻”、“某个工作点的交流电阻”、直流通路、交流通路、直流负载线、交流负载线、虚短、虚断等基本概念的记忆和理解；强调图解法对理解放大电路的重要性，以便于学生深刻理解“小信号”的定义。本书凝结了作者多年的教学体会，对场效应管、反馈的编写有独到之处，从导电沟道的状态来解释场效应管的可变电阻区、放大区、截止区，从而抓住问题的核心，提纲挈领，使学生对于种类众多的场效应管也可以在短时间内理解透彻。反馈是一个非常重要的概念，本书从设计反馈的角度来讲解反馈，与大多数教材从分析反馈的讲解角度不同，学生非常易于接受。本书在注重文字叙述解释的基础上，强调电路模型，训练学生掌握分析问题的一般方法，应用电路定律去列方程求解。比如差动放大电路，强调直流通路、差模信号的交流通路、共模信号的交流通路的画法，注重应用电路定律列方程求解。

本书中的例题讲解步骤详细，具有代表性，力求突出重点，通过例题使读者加深对基本概念的理解。以集成音频功放芯片 LM386 为例，在第四章、第五章和第六章分别对其进行相应计算，将相关知识点有机地联系在一起，例题有一定的深度和广度，引导读者将所学分析方法运用于解决实际应用问题的能力。每章后都附有一定数量的习题，帮助学生加深对课程内容的理解；部分习题有一定的深度，以使学生在深入掌握课程内容的基础上扩展知识；部分习题综合了多个章节的内容，以锻炼学生综合运用知识的能力。

本书注重对细节的刻画，强调解决问题的方法，从基本概念入手，强调与“电路理论”课程的紧密联系，注重训练学生应用电路理论的方法解决电子技术的问题，是一本符合认识规律、富有启发性、便于教学、适合学生自学的教材。

本书共分九章，第一章讲述了半导体二极管及其应用电路，概念解释详尽，重点突出；第二章讲述了双极型三极管及其放大电路，强调与电路知识的联系，教会读者学习的方法，而不是死记硬背公式；第三章讲述了场效应管及其放大电路，从与双极型三极管对比的角度讲述了二者的相同点和不同点，便于读者理解；第四章讲述了功率放大电路；第五章讲述了集成运算放大器的基础，讲解差动放大电路的概念和计算；第六章讲述了反馈放大电路，从设计的角度讲解反馈的概念和应用；第七章讲述了运算放大器的线性应用和非线性应用，包

括各种运算电路、有源滤波器、电压比较器；第八章讲述了信号产生电路，包括 RC、LC、晶体振荡器等作为选频环节的正弦信号产生电路和矩形波、三角波等非正弦信号产生电路；第九章讲述了小功率直流稳压电源，介绍整流、滤波、稳压的工作原理，稳压电路包括线性稳压电路和开关稳压电路。

本书配有教师授课使用的电子教案，授课教师可以对授课内容任意组织，以适应学生对知识的理解。

本书由李月乔编写，由朱承高教授级高级工程师主审。

限于编者水平，书中难免存在错误和不妥之处，殷切希望读者批评指正，并将意见和建议反馈给编者，邮箱地址：lyqiao@ncepu.edu.cn。

编 者

2015 年 5 月

目 录

前言	
第一章 半导体二极管及其应用电路	1
第一节 半导体的基本知识	1
第二节 PN 结	3
第三节 半导体二极管	11
第四节 半导体二极管的模型及应用	15
第五节 特殊二极管	30
小结	31
习题	31
第二章 双极型三极管及其放大电路	36
第一节 双极型三极管	36
第二节 基本共射放大电路	51
第三节 基本共射放大电路的图解分析法	59
第四节 基本共射放大电路的小信号等效电路分析法	66
第五节 放大电路的静态工作点稳定问题	74
第六节 共集电极放大电路	82
第七节 共基极放大电路	87
第八节 两级放大电路的计算	89
第九节 放大电路的频率响应	94
小结	113
习题	113
第三章 场效应管及其放大电路	126
第一节 场效应管概述	126
第二节 结型场效应管的结构和工作原理	126
第三节 绝缘栅场效应管的结构和工作原理	140
第四节 场效应管放大电路	167
第五节 场效应管放大电路的小信号等效电路分析法	170
小结	178
习题	178
第四章 功率放大电路	186
第一节 功率放大电路与电压放大电路的比较	186
第二节 功率放大电路的特殊问题	186

第三节	乙类双电源互补对称功率放大电路	189
第四节	乙类单电源互补对称功率放大电路	198
第五节	甲乙类互补对称功率放大电路	202
第六节	集成功率放大器芯片 LM386	205
小结		207
习题		207
第五章	集成运算放大器	212
第一节	集成运算放大器概述	212
第二节	长尾式差动放大电路	213
第三节	恒流源式差动放大电路	228
第四节	集成运算放大器中的直流电流源(恒流源)电路	236
第五节	集成运算放大器简介	241
小结		252
习题		253
第六章	反馈放大电路	260
第一节	放大电路的 4 种类型	260
第二节	反馈的定义与分类	261
第三节	反馈放大电路闭环放大倍数的一般表达式	271
第四节	负反馈对放大电路性能的影响	273
第五节	深度负反馈放大电路的计算	277
第六节	负反馈放大电路的稳定问题	286
小结		295
习题		295
第七章	集成运算放大器的线性应用和非线性应用	302
第一节	集成运算放大器的线性应用之一	302
第二节	集成运算放大器的线性应用之二	319
第三节	集成运算放大器的非线性应用	332
小结		338
习题		338
第八章	信号产生电路	348
第一节	产生正弦波振荡的条件	348
第二节	RC 正弦波电压振荡电路	351
第三节	LC 正弦波电压振荡电路	355
第四节	非正弦波振荡电路	370
小结		377
习题		378
第九章	单相小功率直流稳压电源	386
第一节	概述	386
第二节	整流电路	386

第三节 滤波电路.....	389
第四节 线性稳压电路.....	393
第五节 开关稳压电路.....	398
小结.....	401
习题.....	401
参考文献.....	406

第一章 半导体二极管及其应用电路

本章提要

本章介绍半导体的基本知识,学习半导体器件的基本结构——PN结,重点介绍二极管的直流模型和交流模型,以及二极管应用电路的分析方法。读者在学习过程中应重点理解二极管端电压和电流的非线性关系,并注意复习电路课程中的基本概念和定律,如参考方向、欧姆定律、KCL定律、KVL定律,并将电路理论中的电路分析方法自觉应用于二极管电路的分析中。

第一节 半导体的基本知识

自然界的物质按导电能力可分为导体(conductor)、半导体(semiconductor)和绝缘体(insulator)三大类。导体的导电能力最强,电解液、碳、金属等都是导体。绝缘体的导电能力最弱,橡胶、石英等是绝缘体。半导体的导电能力介于两者之间,导电能力比绝缘体强,比导体弱。常用的半导体材料有硅(silicon, Si)、锗(germanium, Ge),它们是元素半导体(elemental semiconductor);砷化镓(gallium arsenide, GaAs)是化合物半导体(compound semiconductor)。

一、半导体硅、锗的原子结构与共价键

元素的化学性质由其最外层电子,即价电子(valence electron)决定。金属元素的价电子数少于4个,其最外层电子极易摆脱原子核(nucleus)的束缚成为自由电子(free electron),在外电场的作用下产生定向移动形成电流,因此导电能力最强。绝缘体的价电子数是8个,其最外层电子受原子核束缚力很强,很难成为自由电子,所以导电能力极差。半导体元素硅、锗的价电子数都是4个,其最外层电子既不像导体那样容易摆脱原子核的束缚,也不像绝缘体那样被原子核束缚得那么紧,因而其导电能力介于两者之间。材料纯净、结构完整的半导体晶体称为本征半导体(intrinsic semiconductor)。本征半导体的纯度为99.9999999%。在本征半导体的晶体结构中,每一个原子与相邻的4个原子相结合,构成四面体结构。每两个相邻原子之间共用一对价电子,通过共价键(covalent bond)把相邻原子结合在一起,如图1-1-1所示。共价键中的电子称为束缚电子。

若束缚电子获得能量,可摆脱原子核的吸引,在晶体中自由移动,这种不受共价键影响的电子称为自由电子。例如,当环境温度升高为300K时,少量束缚电子吸收能量,可摆脱共价键的作用力而成为自由电子,如图1-1-2所示。

当环境温度为0K且无外界激发时,本征半导体内只有束缚电子,没有自由电子,本征半导体相当于绝缘体,如图1-1-1所示。

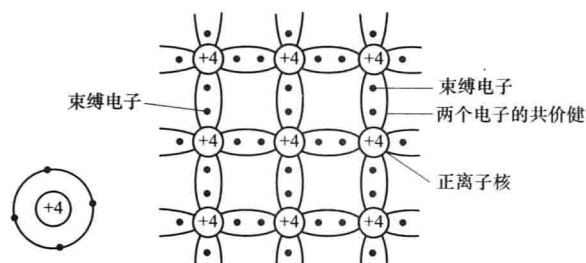


图 1-1-1 没有自由电子的本征半导体结构

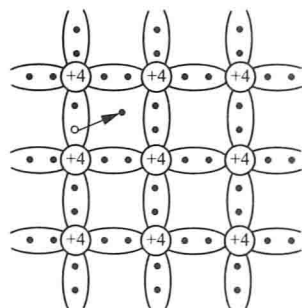


图 1-1-2 有自由电子的本征半导体结构

二、半导体导电的两个方面

在外电场的作用下，半导体内有自由电子的定向运动和束缚电子的定向运动。因为自由电子和束缚电子都带负电，所以它们的运动方向都与外电场的方向相反，只不过自由电子可以自由移动，而束缚电子只能在共价键中运动，但是它们对电流的形成都有贡献。与半导体相比，金属导电只有自由电子的运动，而没有束缚电子在共价键中的运动。因为金属没有共价键，而半导体有共价键。运载电荷的粒子称为载流子 (carrier)，半导体中的载流子有自由电子和束缚电子两种。

三、空穴

半导体导电体现在两个方面：一是自由电子的定向运动，二是束缚电子的定向运动。在半导体导电过程中，因为直接描述束缚电子的运动不太方便，所以用假想的（自然界不存在的）、带正电的、与束缚电子运动方向相反的一种粒子来描述束缚电子的运动，这种粒子称为“空穴 (hole)”。这样就可以说半导体中的载流子有自由电子和空穴两种。本征半导体中的自由电子和空穴成对出现。

四、本征半导体的特性

本征半导体具有热敏特性、光敏特性和掺杂 (dope) 特性。

1. 热敏特性

当环境温度升高时，共价键内的束缚电子因热激发而获得能量，其中获得能量较大的一部分价电子能够挣脱共价键的束缚而成为自由电子，半导体内的载流子数目迅速增加，半导体的导电能力比环境温度升高之前有一个比较明显的增强，这就是热敏特性。金属的导电能力对温度的变化不敏感，金属没有热敏特性。

2. 光敏特性

当光照射半导体时，共价键内的束缚电子获得能量挣脱共价键的束缚而成为自由电子，半导体内的载流子数目迅速增加，半导体的导电能力比光照射之前有一个比较明显的增强，这就是光敏特性。金属的导电能力对光照射不敏感，金属没有光敏特性。

3. 掺杂特性

当在本征半导体中掺入三价元素或五价元素时，半导体的导电能力有一个非常明显的增强，这就是掺杂特性。在本征半导体中掺入的少量三价元素或五价元素，因为其数量较少，所以称为杂质 (impurity)。这样的半导体称为杂质半导体 (extrinsic semiconductor, doped semiconductor)。在本征半导体中掺入五价元素，形成 N 型 (杂质) 半导体 (N-type semiconductor)；掺入三价元素，形成 P 型 (杂质) 半导体 (P-type semiconductor)。

以上3种方式都可使本征半导体中的载流子数目增加,导电能力增强,但是这样做并不是要把半导体当作导体来使用。因为与导体比其导电能力相差较多,半导体有其独特的应用方向。

五、杂质半导体

1. N型半导体

在本征半导体中掺入五价元素,如磷(phosphorus)元素,形成N型半导体,如图1-1-3所示。磷原子的4个价电子与硅或锗原子形成共价键,剩余的1个价电子很容易摆脱原子核的吸引而成为自由电子。所以每掺入1个磷原子,就产生1个自由电子,产生自由电子的同时不产生空穴。由于磷原子贡献1个自由电子,因此将其称为施主杂质(donor impurity)。施主杂质因提供自由电子而带正电成为正离子。同时,半导体内还有硅或锗本身产生的自由电子-空穴对。所以自由电子数目较多,称为多子(majority carrier);空穴数目较少,称为少子(minority carrier)。

2. P型半导体

在本征半导体中掺入三价元素,如硼(boron)元素,形成P型半导体,如图1-1-4所示。硼原子的3个价电子与硅或锗原子形成共价键,因为缺少1个束缚电子而产生1个空穴。所以每掺入1个硼原子,就产生1个空穴,产生空穴的同时不产生自由电子。由于硼原子贡献1个空穴,很容易俘获电子,因此将其称为受主杂质(acceptor impurity)。受主杂质因提供空穴而带负电成为负离子。同时,半导体内还有硅或锗本身产生的自由电子-空穴对。所以空穴数目较多,称为多子;自由电子数目较少,称为少子。图中的空心小圆圈表示空穴。

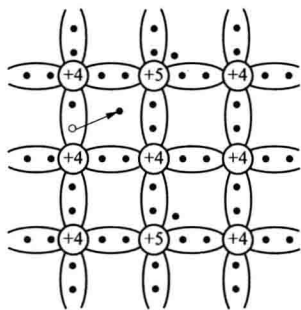


图 1-1-3 N型半导体结构

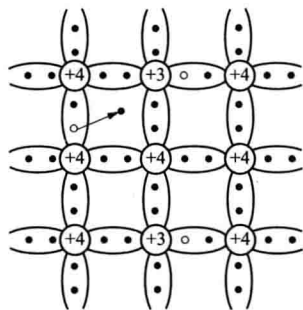


图 1-1-4 P型半导体结构

第二节 PN 结

在本征半导体中掺入杂质可以提高半导体中载流子的数目,杂质半导体虽然比本征半导体中的载流子数目要多得多,导电能力增强,但是并不能像导体那样被用来传导电能,而是用来形成PN结。PN结是现代电子器件最基本的结构,下面将介绍PN结的形成过程。

一、PN结的形成过程

在半导体两个不同的区域分别掺入三价和五价元素,便形成P区和N区,如图1-2-1所示。这样,在它们的交界面处就出现了自由电子和空穴的浓度差别,P区的空穴是多子,浓度比N区的空穴高;P区的自由电子是少子,浓度比N区的自由电子低。而N区情况与P区相反。

1. P 区的多子向 N 区扩散，同时 N 区的多子向 P 区扩散

载流子由于浓度的差别而产生的运动称为扩散（diffusion）运动。自由电子和空穴都要从浓度高的区域向浓度低的区域扩散，即 P 区的空穴要向 N 区扩散，同时 N 区的自由电子要向 P 区扩散，如图 1-2-1 所示。

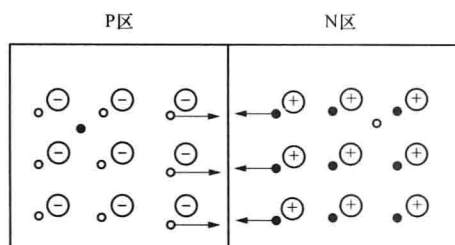


图 1-2-1 P 型半导体和 N 型半导体界面

由于扩散运动而形成的电流称为扩散电流。在

图 1-2-1 中，空穴用空心小圆圈表示，自由电子用实心小黑点表示。P 区中带正电的空穴向 N 区扩散，形成的电流的真实方向是从 P 区指向 N 区的；N 区中带负电的自由电子向 P 区扩散，形成的电流的真实方向是从 P 区指向 N 区的。上述两个方面共同形成一个真实方向从 P 区指向 N 区的电流，即扩散电流。

2. 扩散过程中自由电子和空穴的复合产生电场

在扩散过程中，在界面处自由电子和空穴复合，自由电子和空穴同时消失，如图 1-2-2 所示。在界面处 P 区失去空穴，留下不能移动的硼离子，硼离子带负电，称为负离子。由于物质结构的原因，硼离子的空间位置不能改变，因此又称为空间电荷（space charge）。在界面处 N 区失去自由电子，留下不能移动的磷离子，磷离子带正电，称为正离子。由于物质结构的原因，磷离子的空间位置不能改变，因此也被称为空间电荷。在界面处正离子和负离子相互作用，产生电场，因为这个电场位于半导体的内部，所以称为内电场，这是为了与外加电压产生的外电场相区别。内电场的方向从正离子指向负离子，即从 N 区指向 P 区，如图 1-2-2 所示。

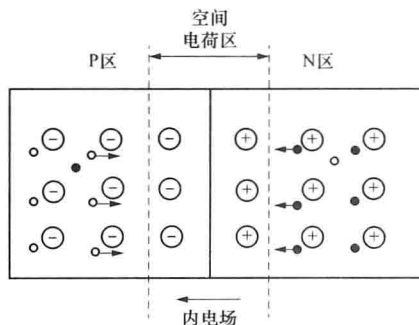


图 1-2-2 空间电荷区的形成

载流子在电场力作用下的运动称为漂移（drift）

运动，由于漂移运动而形成的电流称为漂移电流。在图 1-2-2 中，在内电场的作用下 P 区中带负电的自由电子（少子）向 N 区漂移运动，形成的电流的真实方向是从 N 区指向 P 区的；N 区中带正电的空穴（少子）向 P 区漂移运动，形成的电流的真实方向是从 N 区指向 P 区的。上述两个方面共同形成一个真实方向从 N 区指向 P 区的电流，即漂移电流。

扩散运动是针对多子而言的，漂移运动是针对少子而言的。

3. 内电场阻碍多子的扩散、加强少子的漂移

在图 1-2-2 中，内电场对从 P 区向 N 区扩散的空穴有一个向左的作用力，而 P 区的多子（空穴）向 N 区扩散移动的方向是向右的，所以内电场对 P 区空穴向 N 区的扩散有一个阻碍作用。同理，内电场对从 N 区向 P 区扩散的自由电子有一个向右的作用力，而 N 区的多子（自由电子）向 P 区扩散移动的方向是向左的，所以内电场对 N 区自由电子向 P 区的扩散有一个阻碍作用。综合以上两个方面考虑，内电场阻碍多子扩散运动的进行。

4. 扩散运动逐渐减弱，漂移运动逐渐增强，最后达到动态平衡

在 P 区和 N 区的界面刚形成的开始，扩散运动强，漂移运动还没有出现。随着扩散运动的进行，形成了内电场，内电场使扩散运动越来越弱，漂移运动越来越强。在某个时

刻, 扩散运动和漂移运动达到动态平衡, P 区的多子 (空穴) 向 N 区扩散 1 个过去, 同时 N 区的少子 (空穴) 就向 P 区漂移 1 个回来; N 区的多子 (自由电子) 向 P 区扩散 1 个过去, 同时 P 区的少子 (自由电子) 就向 N 区漂移 1 个回来。在动态平衡时, P 区和 N 区的载流子处于运动状态, 但是各自的数目维持不变, 因此这种平衡是动态的, 而不是静态的。处于动态平衡时的 PN 结如图 1-2-3 所示。

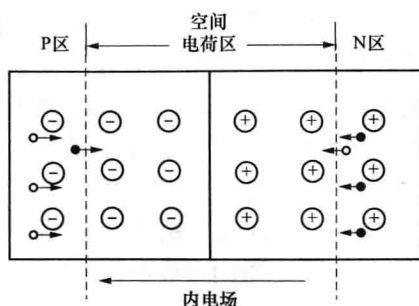


图 1-2-3 处于动态平衡时的 PN 结

当达到动态平衡时, 硼离子和磷离子的区域称为 PN 结。因为硼离子和磷离子称为空间电荷, 所以 PN 结又称为空间电荷区 (space charge region)。空间电荷区只有不能移动的空间电荷, 没有自由电子和空穴, 所以 PN 结又称为耗尽层 (depletion region)。当达到动态平衡时, PN 结的宽度保持不变。为了方便解释后面 PN 结的单向导电性, 此处用一个形象化的表示方法, 说处于动态平衡时 PN 结的宽度是 2 列正离子和 2 列负离子的宽度, 如图 1-2-3 中两条虚线之间的区域所示。

当 PN 结处于动态平衡时, 扩散电流和漂移电流是存在的, 它们大小相等、真实方向相反, 总体表现为没有电流存在。

二、PN 结正偏和反偏的定义及其单向导电性

处于动态平衡的 PN 结必须要外加电源才有使用价值, 所以经常称 PN 结构成的各种器件为有源器件。有源器件中的“源”就是电源的意思。电阻、电感、电容为无源元件, 电阻、电感、电容不需要外加电源就可以在电路中直接使用, 而 PN 结构成的各种器件需要外加电源后才能发挥其功能。PN 结外加电源的情况共有两种可能, 即正偏和反偏。下面将给出 PN 结正偏和反偏的定义。这两个定义很重要, 读者要注意理解。

1. PN 结正偏的定义

如图 1-2-4 所示, 给 PN 结外加一个直流电压源 E , PN 结的 P 端接电源的正极, N 端接电源的负极。在图 1-2-4 中, 外接电压源 E 使 P 区和 N 区之间的外加电压的真实方向为 P 区为正, N 区为负。这种情况称为给 PN 结外加正向电压 (forward-bias voltage), 或者称 PN 结处于正向偏置 (forward-bias) 状态, 又可简称为 PN 结“正偏”。

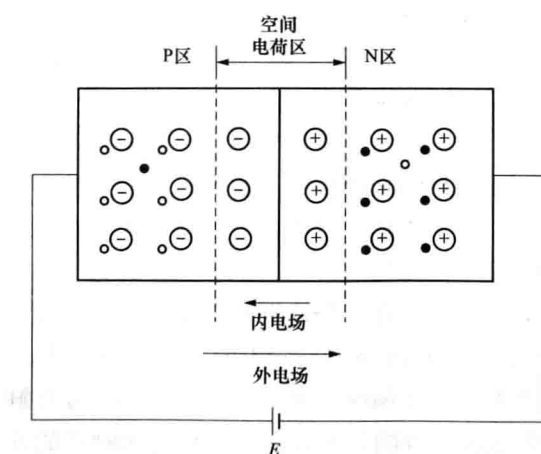


图 1-2-4 PN 结外加正向电压

(正偏) 时的内部结构

有所削弱, PN 结的宽度变窄, 变为 1 列正离子和 1 列负离子的宽度, 如图 1-2-4 中两条虚线之间的区域所示。

外接电压源会产生一个电场, 作用在 PN 结上, 这个电场称为外电场。当 PN 结正偏时, 外电场的方向与内电场方向相反, 外电场对内电场有削弱作用。前面提到, 处于动态平衡时, 内电场的大小可形象地用 2 列正离子和 2 列负离子的宽度表示, 那么当 PN 结正偏 (外加正向电压) 时, 内电场被外电场

当 PN 结正偏时, 内电场对多子扩散运动的阻碍作用减弱, 动态平衡被打破, 扩散运动大于漂移运动, 因此扩散电流大于漂移电流。因为扩散电流是由多子扩散运动形成的, 漂移电流是由少子漂移运动形成的, 多子的数目比少子的数目多很多, 因此扩散电流远远大于漂移电流, 所以在回路中总电流的真实方向是从 P 区指向 N 区。

2. PN 结反偏的定义

如图 1-2-5 所示, 给 PN 结外加一个直流电压源 E , PN 结的 N 端接电源的正极, P 端接电源的负极。在图 1-2-5 中, 外接电压源 E 使 P 区和 N 区之间的外加电压的真实方向为 N 区为正, P 区为负。这种情况称为给 PN 结外加反向电压 (reverse-bias voltage), 或者称 PN 结处于反向偏置 (reverse-bias) 状态, 又可简称为 PN 结“反偏”。

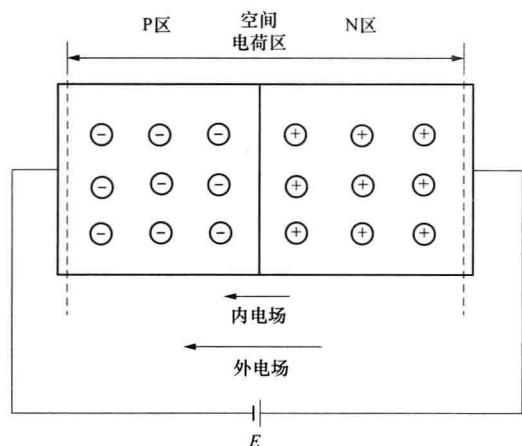


图 1-2-5 PN 结外加反向电压 (反偏) 时的内部结构

当 PN 结反偏时, 外接电压源所产生的外电场的方向与 PN 结内电场的方向相同, 外电场对内电场有加强作用, 与动态平衡 (没有外加电源) 时相比, PN 结的宽度变宽, 即 3 列正离子和 3 列负离子的宽度, 如图 1-2-5 中两条虚线之间的区域所示。

当 PN 结反偏时, 内电场对多子扩散运动的阻碍作用加强, 动态平衡被打破, 漂移运动大于扩散运动, 所以漂移电流大于扩散电流。因为漂移电流是由少子的漂移运动形成的, 少子的数目相对于多子的数目要少得多, 因此漂移电流很小, 所以在回路中总电流的真实方向与漂移电流的真实方向一致, 即从 N 区指向 P 区。

PN 结反偏时的电流虽然很小, 但是这个电流与少子的数目有很强的关联性。前面提到, 半导体具有热敏特性、光敏特性, 当温度升高或者光照强度增加时, 少子的数目有非常明显的增加, 所以 PN 结反偏时电流的大小与温度、光照的强度有关系, 而且近似呈线性关系。利用这种特性可以制作成热敏电阻、光敏器件等半导体器件。

3. PN 结的单向导电性

图 1-2-6 示出了 PN 结正偏、反偏时端电压和电流的真实方向。

如图 1-2-6 (a) 所示, 当 PN 结正偏时, 从 P 区向 N 区有一个较大的电流, 这个电流常称为正向电流。当 PN 结正偏时 PN 结呈现低阻性。

如图 1-2-6 (b) 所示, 当 PN 结反偏时, 从 N 区向 P 区有一个较小的电流, 这个电流常称为反向电流。当 PN 结反偏时 PN 结呈现高阻性。理想情况下, 反向电流可以忽略不计。

综上所述, 当 PN 结正偏时, 有电流流过; 当 PN 结反偏时, 电流为零。PN 结与有触点的开关电器作用类似, 可以将其看作是一个无明显接触点的开关电器, 常称为无触点的开关。PN 结与有触点的开关的作用还有点不同, 当 PN 结这个无触点的开关闭合时, 其电流的真实方向只能从 P 到 N; 而有触点的开关的电流的真实方向, 既可以从这个触点到另一个触点, 也可以相反, 没有限制。

当 PN 结外加电源时, 电流的真实方向只能从 P 区指向 N 区, 而不能从 N 区指向 P 区,

即 PN 结只能向一个方向导电, 称 PN 结具有“单向导电性”。

在“电路理论”课程中讲解线性电阻的特性时, 一般不会从“双向导电性”这个角度进行讲解。为了更好地理解 PN 结的单向导电特性, 下面对线性电阻的“双向导电性”做简单分析。

在图 1-2-7 (a) 所示的线性电阻电路中, 电流的方向为电流的真实方向, +、- 号表示线性电阻端电压的真实方向。根据电压源的工作原理, 很容易判断出回路中电流的真实方向。在电源的内部电流的真实方向从电源的

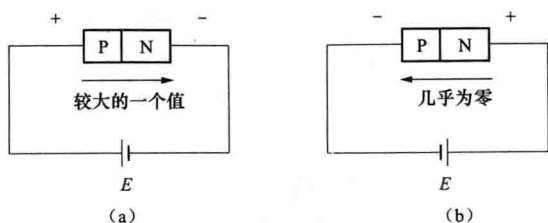


图 1-2-6 PN 结的单向导电性示意图

(a) PN 结正偏; (b) PN 结反偏

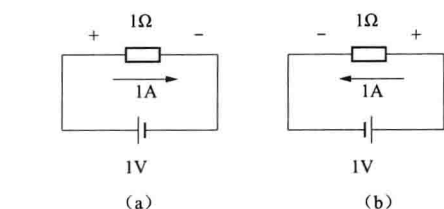


图 1-2-7 线性电阻的双向导电性示意图

(a) 线性电阻导电的一种接法; (b) 线性电阻导电的另一种接法

负极流到正极, 电流的数值为 1A。同理, 在图 1-2-7 (b) 中, 很容易判断出回路中电压源的内部电流的真实方向, 电流的数值还是 1A, 与图 1-2-7 (a) 中电流的数值一样。综上所述, 线性电阻具有“双向导电性”。

PN 结内部具有内电场, 而线性电阻的内部由均匀一致的材料构成, 内部不具有内电场, 这是造成两者区别的根本原因。

理解 PN 结的单向导电性时, 采用对比学习法, 将 PN 结的导电情况与线性电阻的双向导电性做比较, 通过“单向”与“双向”的鲜明对比, 对于 PN 结的单向导电性会有一个更深刻的理解和记忆。

三、PN 结的伏安特性曲线

前面所叙述的 PN 结的单向导电性只是笼统地给出了 PN 结的基本特性, 即 PN 结正偏时电流较大, 反偏时电流较小, 而没有给出 PN 结的外加电压和电流的具体数量关系, 有时研究这种具体的数量关系非常有必要。PN 结的端电压和流过 PN 结的电流的约束关系称为 PN 结的伏安特性。特别强调一下, 在 PN 结正偏时, 端电压与电流是一种非线性的关系, PN 结可以看作一个非线性电阻。研究 PN 结的非线性特性是电子技术基础课程一个非常重要的内容。

下面复习电路理论中关于参考方向和真实方向的概念。电压真实方向的定义是: 电位降的方向。电流真实方向的定义是: 正电荷移动的方向。

求解电路的目的是得到电路中任意元件的端电压和流过此元件电流的大小和真实方向。但对于直流电阻电路, 无法直接观察出电路中任意元件的端电压和流过此元件的电流的真实方向; 而且, 对于交流电路, 电路中任意元件的端电压的真实方向和流过此元件电流的真实方向也一直在变化。基于上述情况, 在电路理论中引入了参考方向的概念。

元件的端电压和电流的参考方向可以任意指定, 分别都有两种可能。

PN 结的端电压 u 的参考方向和流过 PN 结的电流 i 的参考方向的约定共有 4 种组合, 本书采用其中的一种来进行对 PN 结的讨论, 其他的 3 种组合在后面简单介绍。

约定 PN 结的端电压 u 和流过 PN 结的电流 i 的参考方向, 如图 1-2-8 所示。此时, PN 结的端电压 u 和流过 PN 结的电流 i 的约束关系如图 1-2-9 所示, 这条曲线称为 PN 结的伏安特性曲线。



下面详细解释图 1-2-9 所示的伏安特性曲线。

在第一象限， u 为正值， i 也为正值。 u 为正值表示 PN 结的端电压的真实方向与图 1-2-8 所规定的参考方向一致，所以 PN 结处于正偏状态。当 PN 结的端电压的值比较小时，电流为零，没有电流流过 PN 结，在图 1-2-9 中为一段位于横轴上的线段，称这个区域为“死区” (dead zone)。当 PN 结的端电压的值增大到死区电压 (dead voltage, threshold voltage) U_{th} 时，开始有电流出现。当正偏电压的值大于死区电压 U_{th} 后，称 PN 结处于正向导通状态。此时 u 和 i 的关系可以用一条指数 (exponential) 曲线来描述。

在第三象限， u 为负值， i 也为负值。 u 为负值表示 PN 结的端电压的真实方向与图 1-2-8 所规定的电压参考方向相反，所以 PN 结处于反偏状态。在曲线比较平缓的部分，表示当 PN 结反偏时电流很小，称 PN 结处于截止状态。当反偏电压的值达到反向击穿电压 U_{BR} 后，反向电流急剧增加，而端电压几乎不变，曲线陡峭变化，近似为一条垂直的线，这时称 PN 结为处于反向击穿状态。

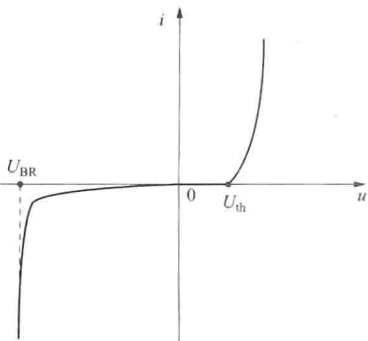


图 1-2-9 PN 结的伏安特性曲线

用来描述图 1-2-9 所示的 PN 结伏安特性曲线的数学表达式，称为 PN 结的电流方程，即

$$i = I_S(e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \tag{1-2-1}$$
$$U_T = kT/q$$

式中： I_S 是 PN 结反偏时流过 PN 结的电流，主要由少数载流子漂移形成，常称为反向饱和电流 (reverse-saturation current)； U_T 是温度的电压当量 (thermal voltage)； k 为玻耳兹曼常数； T 是热力学温度； q 是电子的电量。

当 $T=300K$ 时，计算得出 $U_T=26mV$ 。

当给 PN 结外加正向电压 (正偏)，且电压值远远大于 U_T 时，即 $u \gg U_T$ ，式 (1-2-1) 可以简化为

$$i = I_S e^{\frac{u}{U_T}} \tag{1-2-2}$$

当给 PN 结外加反向电压 (反偏)，且电压值还没有达到反向击穿电压时，式 (1-2-1) 可以简化为

$$i = -I_S \tag{1-2-3}$$

当 PN 结的端电压 u 和流过 PN 结的电流 i 的参考方向有不同的约定时，PN 结的伏安特性曲线将有所变化，如图 1-2-10 所示。

四、非线性电阻的直流电阻和交流电阻的定义

观察图 1-2-9 所示的 PN 结的伏安特性曲线

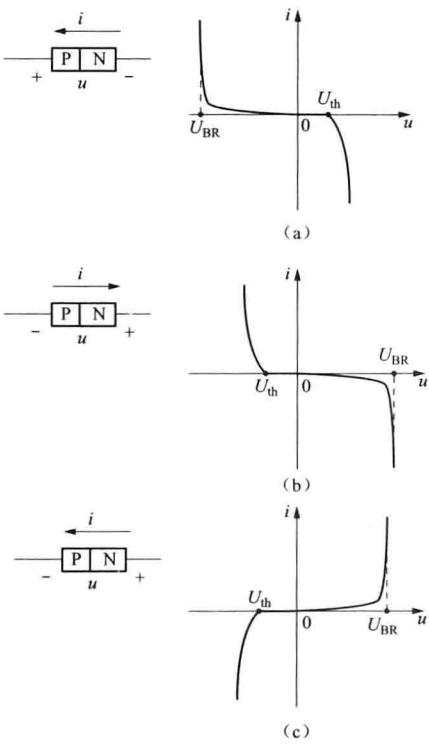


图 1-2-10 在不同电压和
电流参考方向下的 PN 结伏安特性曲线

可知, 当 PN 结正偏时, 流过 PN 结的电流与 PN 结端电压之间的关系, 不是通过原点的一条直线, 而是一条曲线, 这就表明流过 PN 结的电流与 PN 结端电压之间不是固定的比例关系。随着 PN 结端电压的数值的增加, 流过 PN 结的电流的数值也在增加, 但不是成比例地增加, 可以认为, 当 PN 结正偏时, PN 结是一个非线性的电阻。在电路理论中, 线性电阻的端电压与流过其中的电流呈固定的比例关系, 可以描述为过原点的一条直线, 这个比例就是电阻值。

对于线性电阻而言, 一个电阻值就可以说明其特性; 但对于非线性电阻而言, 为了全面描述其特性, 需要对电阻的定义进行扩展。下面给出非线性电阻的直流电阻和交流电阻的定义。

1. 非线性电阻的直流电阻的定义

在图 1-2-11 所示的 PN 结的正向伏安特性曲线中, 对于某一个点如 Q 点, PN 结的端电压为一个直流电压 U , 流过 PN 结的电流为一个直流电流 I , 这个直流电压 U 与直流电流 I 之比, 定义为非线性电阻的直流电阻 r_D , 其表达式为

$$r_D = \frac{U}{I} \quad (1-2-4)$$

观察图 1-2-11 可以看出, 直流电阻值等于连接 Q 点与坐标原点 0 的直线的斜率的倒数。且不同点的直流电阻的值是不同的。Q 点常被称为静态工作点, Q 点位置越高, 对应的直流电阻的值就越小。

2. 非线性电阻的交流电阻的定义

在图 1-2-12 所示的 PN 结的正向伏安特性曲线中, 对于某一个点, 如 Q 点, PN 结端电压在 Q 点附近有一个微小的变化量 Δu , 引起流过 PN 结的电流也有一个微小的变化量 Δi , 这个微小的电压变化量 Δu 与微小的电流变化量 Δi 之比, 定义为非线性电阻的交流电阻 r_d , 其表达式为

$$r_d = \frac{\Delta u}{\Delta i} \quad (1-2-5)$$

观察图 1-2-12 可以看出, 交流电阻是 Q 点的切线的斜率的倒数, 曲线上不同点的交流电阻的值是不同的。Q 点位置越高, 对应的交流电阻的值就越小。

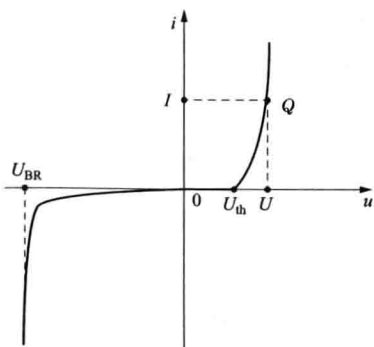


图 1-2-11 非线性电阻的直流电阻的定义

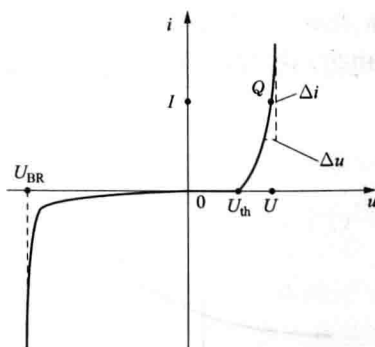


图 1-2-12 非线性电阻的交流电阻的定义

对于线性电阻, 没有必要区分直流电阻和交流电阻。但是对于非线性电阻, 就有必要