

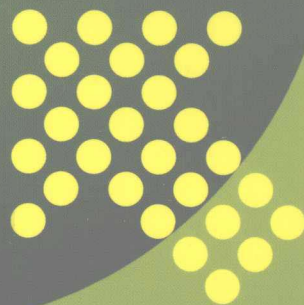
21世纪高等学校规划教材



DIANZI JISHU JICHU

电子技术基础

李月乔 主 编
刘春颖 副主编



中国电力出版社

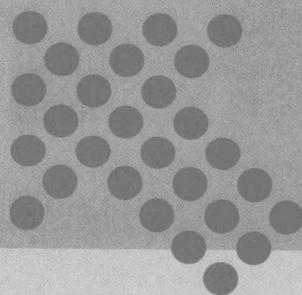
<http://jc.cepp.com.cn>

21世纪高等学校规划教材



DIANZI JISHU JICHU

电子技术基础



中国电力出版社 (www.cepp.com.cn)

北京市丰台区

地址: 北京市丰台区

ISBN 7-313-05000-0 定价: 20.00元

787mm×1092mm 1/16 印张: 13.5 字数: 320千字

2008.08 第1版

第1次印刷

本书可作为高等院校电子信息类、计算机类、自动化类、电气工程类、通信类、机械类、材料类、化工类、生物类、医学类、环境类、能源类、管理类、经济类、法学类、文学类、艺术类专业及相关专业的教材。

本书可作为从事电子技术工作的工程技术人员、管理人员、销售人员的培训教材。

责任编辑: 李静



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

本书共分十八章，主要包括：半导体二极管及其基本电路；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；集成运算放大器；反馈放大电路；集成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；数字逻辑基础；逻辑门电路基础；组合逻辑电路；触发器基础；时序逻辑电路；脉冲波形的产生与整形；半导体存储器、可编程逻辑器件和 VHDL 语言；数字系统设计；数模与模数转换电路。

本书可作为高等学校理工科少学时的电类专业或非电类专业的教材，也可作为高职高专和函授教材，同时可供工程技术人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

电子技术基础/李月乔主编. —北京：中国电力出版社, 2010

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 9949 - 2

I. ①电… II. ①李… III. ①电子技术—高等学校—教材 IV. ①TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 001566 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 2 月第一版 2010 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 30 印张 734 千字

定价 48.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

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

编 审 委 员 会

主任委员	王志功	东南大学			
副主任委员	张晓林	北京航空航天大学	胡敏强	东南大学	
	王泽忠	华北电力大学	戈宝军	哈尔滨理工大学	
	马西奎	西安交通大学	刘新元	北京大学	
	孟 桥	东南大学			
秘 书 长	李兆春	中国电力出版社			
委 员	(按姓氏笔画排列)				
	于守谦	北京航空航天大学	公茂法	山东科技大学	
	王 殊	华中科技大学	王万良	浙江工业大学	
	王小海	浙江大学	王建华	西安交通大学	
	王松林	西安电子科技大学	邓建国	西安交通大学	
	付家才	黑龙江科技学院	刘润华	中国石油大学 (华东)	
	刘耀年	东北电力大学	朱承高	上海交通大学	
	宋建成	太原理工大学	张正平	贵州大学	
	张彦斌	西安交通大学	李 承	华中科技大学	
	李 青	中国计量学院	李 琳	华北电力大学	
	李守成	北京交通大学	李国丽	合肥工业大学	
	李哲英	北京联合大学	李晓明	太原理工大学	
	李晶皎	东北大学	杨 平	上海电力学院	
	陈后金	北京交通大学	陈庆伟	南京理工大学	
	陈意军	湖南工程学院	陈新华	山东科技大学	
	宗 伟	华北电力大学	范蟠果	西北工业大学	
	段哲民	西北工业大学	段渝龙	贵州大学	
	胡虔生	东南大学	赵旦峰	哈尔滨工程大学	
	赵荣祥	浙江大学	唐庆玉	清华大学	
	徐淑华	青岛大学	袁建生	清华大学	
	郭陈江	西北工业大学	高会生	华北电力大学	
	崔 翔	华北电力大学	梁贵书	华北电力大学	
	曾孝平	重庆大学	曾建唐	北京石油化工学院	
	韩 璞	华北电力大学	韩学军	东北电力大学	
	雷银照	北京航空航天大学			

序

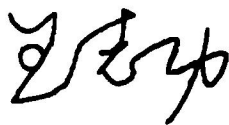
进入 21 世纪,“985 工程”和“221 工程”的实施,推动了高水平大学和重点学科的建设,在高校中汇聚了一大批高层次人才,产生了一批具有国际先进水平的学术和科学技术研究成果。然而高校规模的超高速增大,导致不少学校的专业设置、师资队伍、教材资源和教学实验条件不能迅速适应发展需要,教学质量问题日益突现。高校教材,作为教学改革成果和教学经验的结晶,其质量问题自然备受关注。

需要指出的是,很多高等学校教材经过多年的教学实践检验,已经成为广泛使用的精品教材。同时,我们也应该看到,现用的教材中有不少内容陈旧、未能反映当前科技发展的最新成果,不能满足按新的专业目录修订的教学计划和课程设置的需要。这就要求我们的高等教育教材建设必须与时俱进、开拓创新,在内容质量和出版质量上均有新的突破。

根据教育部教高司 2003 年 8 月 28 日发出的 [2003] 141 号文件,在教育部组织下,历经数年,2006~2010 年教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会按照教育部的要求,致力于制定专业规范或教学质量标准,组织师资培训、教学研讨和信息交流等工作,并且重视与出版社合作,编著、审核和推荐高水平电子电气基础课程教材。

电工学、电路、信号系统、电子线路、电磁场、自动控制原理、电机学等电子电气基础课程是许多理工院校的先修课程,也是电子科学与技术、电气工程及其自动化等专业学科的基石,在科学研究领域和产业应用中发挥着极其重要的作用。此类教材的编写,应提倡新颖的立意,“适用、先进”的编写原则和“通俗、精炼”的编写风格,以百花齐放的形式和较高的编写质量来满足不同学科、不同层次师生的教学要求。

本电子电气基础课程教材编审委员会即是基本此目的而设立的,希望能够鼓励更多的优秀教师参与其中,为高质量教材的编写和出版贡献出聪明才智和知识经验。



2009 年 10 月

前言

电子技术基础是高等学校理工科非电类各专业的技术基础课,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。本教材是为非电类各专业的本科生学习模拟电路和数字电路的基础知识而编写的,满足模拟电路和数字电路的教学基本要求。

在编写时,力求突出重点,使基本概念明确清晰,书中的例题讲解步骤详细,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。第十九章结合数据移位计算乘法器、彩灯控制器、抢答器等实际的数字系统设计来综合数字电路各部分的知识,并介绍数字系统设计流程是本书的特色,有利于培养学生的综合应用能力。

本书数字电路采用了国标逻辑符号,使读者对中规模集成电路的理解和灵活运用更加容易,弥补了原来框图符号的不足。

本书共分十八章,第一章讲述了半导体二极管及其基本电路,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;第六章讲述了反馈放大电路;第七章讲述了运算放大器的线性应用和非线性应用;第八章讲述了信号产生电路;第九章讲述了小功率直流稳压电源;第十章讲述了数字逻辑基础,概念解释详尽,重点突出,对于学生学习过程中容易出现问题的地方进行了重点强调;第十一章讲述了逻辑门电路基础;第十二章讲述了组合逻辑电路;第十三章的内容是触发器基础;第十四章讲述了时序逻辑电路,概念解释详尽,重点突出,对于学生学习过程中容易出现问题的地方进行了重点强调;第十五章讲述了脉冲波形的产生与整形;第十六章讲述了半导体存储器、可编程逻辑器件和 VHDL 语言,对 VHDL 语言的使用进行了总结;第十七章是数字系统设计,用四个具体设计实例详细解释了数字系统的设计方法,解释详尽,易于理解;第十八章是数模与模数转换电路。

本教材配备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。

参加本书编写的教师多年从事电子技术课程的教学,教材荟萃了教师多年的教学经验和体会。本书由李月乔任主编,刘春颖任副主编。刘春颖完成了第六章的编写工作,王赞完成了第七章的编写工作,樊冰完成了第四章和第九章的编写工作,李月乔完成了其余章节的编写工作。李月乔和刘春颖对全书进行了整理和统稿。本书在编写过程中得到了电工电子教研室刘向军、文亚凤的大力支持,在此表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,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我们,邮箱地址为 lyqiao@ncepu.edu.cn。

编者

2010 年 1 月

目 录

序

前言

第一章 半导体二极管及其基本电路	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	7
第四节 半导体二极管的模型及应用	10
第五节 特殊二极管	17
小结	18
习题	19
第二章 双极型三极管及其放大电路	23
第一节 双极型三极管	23
第二节 基本共射放大电路	30
第三节 基本共射放大电路的图解分析法	34
第四节 放大电路的小信号模型分析法	40
第五节 放大电路的静态工作点稳定问题	45
第六节 共集电极放大电路和共基极放大电路	49
第七节 放大电路的频率响应	55
小结	60
习题	61
第三章 场效应管及其放大电路	73
第一节 场效应管概述	73
第二节 JFET 的结构和工作原理	73
第三节 绝缘栅场效应管 (IGFET) 的结构和工作原理	78
第四节 场效应管放大电路	83
小结	86
习题	86
第四章 功率放大电路	90
第一节 功率放大电路与电压放大电路的比较	90
第二节 功率放大电路的特殊问题	90
第三节 乙类双电源功率放大电路	92
第四节 乙类单电源功率放大电路	97
第五节 甲乙类双电源功率放大电路	98
小结	100

习题	100
第五章 集成运算放大器	103
第一节 集成运算放大器概述	103
第二节 差动放大电路	104
第三节 集成运算放大器	113
小结	115
习题	115
第六章 反馈放大电路	118
第一节 四种类型的放大电路	118
第二节 反馈的定义与分类	118
第三节 反馈放大电路放大倍数的一般表达式	125
第四节 负反馈对放大电路性能的影响	126
第五节 深度负反馈放大电路的分析方法	127
第六节 负反馈放大电路的稳定问题	130
小结	131
习题	132
第七章 集成运算放大器的线性应用和非线性应用	136
第一节 集成运算放大器的线性应用	136
第二节 集成运算放大器的非线性应用	145
小结	151
习题	151
第八章 信号产生电路	155
第一节 产生正弦波振荡的条件	155
第二节 RC 串并联选频网络正弦波电压振荡电路	157
第三节 LC 正弦波电压振荡电路	160
第四节 非正弦波振荡电路	166
小结	169
习题	169
第九章 小功率直流稳压电源	172
第一节 桥式整流电路	172
第二节 滤波电路	174
第三节 稳压电路	175
小结	178
习题	178
第十章 数字逻辑基础	181
第一节 概述	181
第二节 数制	182
第三节 各种数制之间的转换	185
第四节 码制	189

第五节	逻辑问题的描述	192
第六节	逻辑代数基础	199
第七节	逻辑函数的五种描述方法	200
第八节	逻辑函数的化简	204
小结		212
习题		212
第十一章	逻辑门电路基础	215
第一节	二极管、三极管的开关特性	215
第二节	二极管逻辑门电路	220
第三节	TTL 逻辑门电路	222
第四节	CMOS 门电路	231
第五节	各种工艺的逻辑门之间的接口问题	234
小结		236
习题		236
第十二章	组合逻辑电路	238
第一节	组合逻辑电路的分析	238
第二节	用小规模集成电路 (SSI) 实现组合逻辑电路的设计	239
第三节	常用中规模集成组合逻辑模块之一——编码器	243
第四节	常用中规模集成组合逻辑模块之二——译码器	249
第五节	常用中规模集成组合逻辑模块之三——数据选择器	262
第六节	常用中规模集成组合逻辑模块之四——加法器	267
第七节	常用中规模集成组合逻辑模块之五——数值比较器	270
小结		273
习题		274
第十三章	触发器基础	278
第一节	触发器的电路结构	278
第二节	触发器逻辑功能的表示方法	292
小结		294
习题		294
第十四章	时序逻辑电路	298
第一节	概述	298
第二节	时序逻辑电路的分析	302
第三节	同步时序逻辑电路的设计	310
第四节	常用中规模计数器芯片及应用	328
第五节	数码寄存器与移位寄存器	358
小结		365
习题		365
第十五章	脉冲波形的产生与整形	374
第一节	概述	374

第二节	555 定时器	374
第三节	555 组成的脉冲波形产生电路	377
第四节	555 组成的脉冲波形整形电路	380
小结		385
习题		385
第十六章	半导体存储器、可编程逻辑器件和 VHDL 语言	391
第一节	存储器的基本概念和分类	391
第二节	半导体存储器	391
第三节	只读存储器 (ROM)	392
第四节	随机存取存储器 (RAM)	398
第五节	可编程逻辑器件概述	399
第六节	可编程逻辑器件	402
第七节	硬件描述语言 VHDL 的基本语法	404
第八节	基本的 VHDL 的并行语句和串行语句	411
小结		416
习题		417
第十七章	数字系统设计	422
第一节	概述	422
第二节	算法状态机	423
第三节	数字系统设计举例之一	424
第四节	数字系统设计举例之二	429
第五节	数字系统设计举例之三	433
第六节	数字系统设计举例之四	447
小结		453
习题		453
第十八章	数模与模数转换电路	456
第一节	概述	456
第二节	D/A 转换器	456
第三节	A/D 转换器	461
小结		466
习题		467
参考文献		468

第一章 半导体二极管及其基本电路

本章提要

本章介绍半导体的基本知识,讨论半导体器件的基本结构——PN结,重点介绍了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,并注意将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定律用于二极管应用电路的分析中。

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、半导体和绝缘体三大类。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(Si)、锗(Ge),它们是元素半导体,砷化镓(GaAs)是化合物半导体。

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——价电子决定。金属元素的价电子数少于4个,它们的最外层电子极易摆脱原子核的束缚成为自由电子,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,最外层电子受原子核束缚力很强,很难成为自由电子,所以导电性极差。半导体元素硅、锗的价电子数都是4个,它们的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,因而其导电性介于两者之间。完全纯净、结构完整的半导体晶体称为本征半导体。本征半导体的纯度为99.999 999 9%,在本征半导体的晶体结构中,每一个原子与相邻的四个原子相结合。每两个相邻原子之间共用一对价电子,通过共价键把相邻原子结合在一起,如图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,摆脱原子核的吸引,在晶体中可以自由移动。这种不受共价键影响的电子称为自由电子。当环境温度升高,例如为300K时,少量束缚电子吸收能量,摆脱了共价键的作用力而成为自由电子,如图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所示。

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

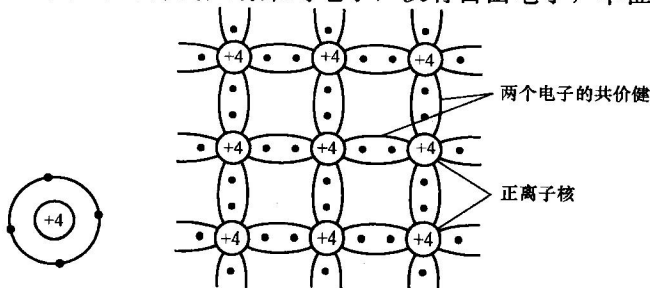


图1-1 没有自由电子的本征半导体结构示意图

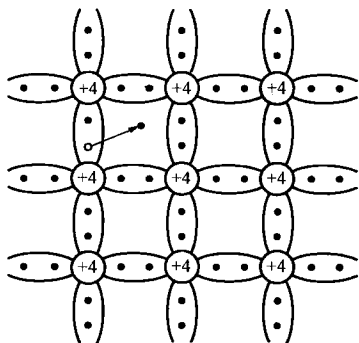


图 1-2 有自由电子的本征
半导体结构示意图

子只能在共价键中运动，但是它们对电流的形成都有贡献。与金属导电相比，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运动。因为金属没有共价键，而半导体有共价键，所以半导体导电有两个方面，而金属导电只有一个方面。运载电荷的粒子称为载流子，半导体中的载流子有自由电子和束缚电子两种。

三、空穴

半导体导电有两个方面，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，直接描述束缚电子的运动不太方便，所以我们假想的（自然界不存在的）、带正电的、与束缚电子反方向运动的那么一种

粒子来描述束缚电子的运动比较方便，这种粒子起名为“空穴”。有了空穴的概念后，以后就可以这么说，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这两种粒子成对出现。

四、半导体的特性

半导体具有热敏特性、光敏特性和掺杂特性。

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。与金属相比，金属的导电能力对温度的变化不敏感，金属没有热敏特性。

当光照射半导体时，共价键内的束缚电子获得能量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光照射之前有一个比较明显的增强，这就是光敏特性。与金属相比，金属的导电能力对光照射不敏感，金属没有光敏特性。

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。这样的半导体称为杂质半导体。在本征半导体中掺入五价元素，形成 N 型杂质半导体。在本征半导体中掺入三价元素，形成 P 型杂质半导体。

以上三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做导体来使用，因为与导体相比，导电能力还差得远。半导体有它独特的应用。

五、杂质半导体

（一）N 型半导体

在本征半导体中掺入五价元素，如磷元素，形成 N 型半导体，如图 1-3 所示。磷原子的四个价电子与硅或锗原子形成共价键，剩余的一个价电子很容易摆脱原子核的吸引而成为自由电子。所以每掺入一个磷原子，就产生一个自由电子，产生自由电子的同时不产生空穴。由于磷原子贡献一个自由电子，因此将其称为施主杂质。施主杂质因

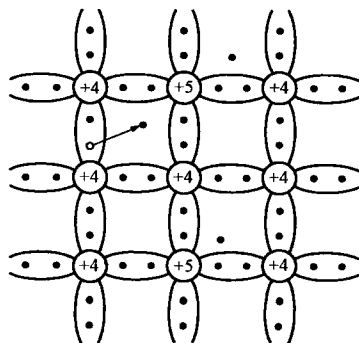


图 1-3 N 型半导体结构示意图

提供自由电子而带正电荷成为正离子。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，空穴数目较少，称为少子。

(二) P 型半导体

在本征半导体中掺入三价元素，如硼元素，形成 P 型半导体，如图 1-4 所示。硼原子的三个价电子与硅或锗原子形成共价键，因为缺少一个束缚电子而产生一个空穴。所以每掺入一个硼原子，就产生一个空穴，产生空穴的同时不产生自由电子。由于硼原子贡献一个空穴，很容易俘获电子，因此将其称为受主杂质。受主杂质因提供空穴而带负电荷成为负离子。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。

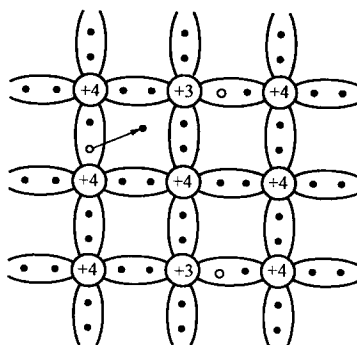


图 1-4 P 型半导体结构示意图

第二节 PN 结

杂质半导体虽然比本征半导体中的载流子数目要多得多，导电能力增强了，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。

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 1-5 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 区的多子是空穴，浓度高，P 区的少子是自由电子，浓度低。N 区的多子是自由电子，浓度高，N 区的少子是空穴，浓度低。载流子由于浓度的差别而产生的运动称为扩散运动。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 1-5 所示。在扩散的过程中，在交界面处自由电子和空穴复合，自由电子和空穴同时消失。在交界面处 P 区失去空穴，留下不能移动的硼离子，硼离子带负电。N 区失去自由电子，留下不能移动的磷离子，磷离子带正电，如图 1-6 所示。正离子和负离子相互作用，产生电场，因为位于半导体的内部，所以称为内电场。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 1-6 所示。

在图 1-6 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，内电场阻碍扩散运动的进行。

在图 1-6 中，在内电场的作用下，P 区的少子自由电子将受到一个向右的作用力，N 区的少子空穴将受到一个向左的作用力。载流子在电场的作用下的运动称为漂移运动。

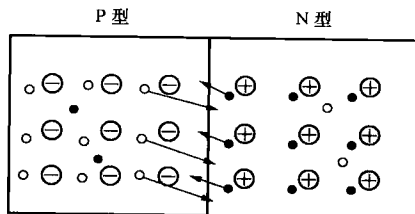


图 1-5 P 型半导体和 N 型半导体交界面示意图

在 P 区和 N 区的交界面刚形成的开始, 扩散运动强, 漂移运动还没有形成。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相等, 达到动态平衡, 即 P 区的多子空穴向 N 区扩散一个过去, 同时 N 区的少子空穴就向 P 区漂移一个回来; N 区的多子自由电子向 P 区扩散一个过去, 同时 P 区的少子自由电子就向 N 区漂移一个回来。在动态平衡时, P 区和 N 区的载流子处于运动状态, 但是数目维持不变, 因此是动态平衡, 不是静态平衡。

当到达动态平衡时, 硼离子和磷离子的区域宽度保持不变, 这个区域称为 PN 结。又称为耗尽层, 势垒区或空间电荷区。处于动态平衡时的 PN 结如图 1-7 所示。

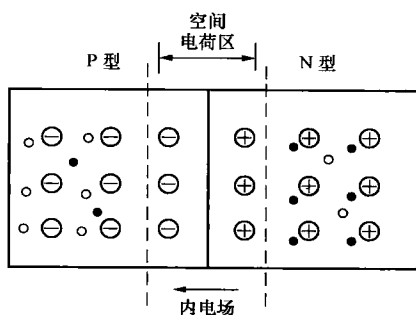


图 1-6 空间电荷区的形成

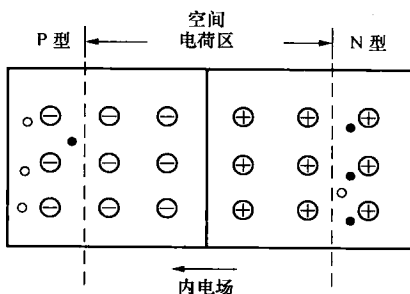


图 1-7 处于动态平衡时的 PN 结

扩散运动是针对多子而言的, 漂移运动是针对少子而言的。

由于扩散运动而形成的电流称为扩散电流。在图 1-6 中, P 区中带正电的空穴向 N 区扩散运动, 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 区扩散运动, 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为从 P 区指向 N 区的电流, 称为扩散电流。

由于漂移运动而形成的电流称为漂移电流。在图 1-6 中, 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, 称为漂移电流。

在动态平衡时, 扩散电流和漂移电流大小相等, 真实方向相反。

二、PN 结的单向导电性

(一) PN 结加正向电压时的导电情况

如图 1-8 所示, 外接电压源使 P 区的电位高于 N 区的电位, 称为加正向电压, 简称正偏。

外接电压源产生的电场称为外电场, 在正向电压作用下, 外电场的方向与 PN 结内电场方向相反, 削弱了内电场, 于是内电场对多子扩散运动的阻碍减弱, 动态平衡被打破, 扩散运动大于漂移运动, 扩散电流大于

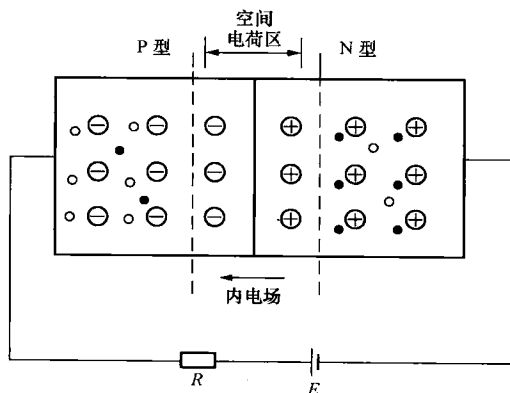


图 1-8 PN 结加正向电压

漂移电流，因为扩散电流是由多子扩散运动形成的，漂移电流是由少子的漂移运动形成的，所以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 区流向 N 区。

(二) PN 结加反向电压时的导电情况

如图 1-9 所示，外接电压源使 N 区的电位高于 P 区的电位，称为加反向电压，简称反偏。

外接反向电压产生的外电场的方向与 PN 结内电场方向相同，加强了内电场，于是内电场对多子扩散运动的阻碍加强，动态平衡被打破，漂移运动大于扩散运动，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要少得多，所以漂移电流很小，所以在回路中总电流的真实方向是从 N 区流向 P 区。

(三) PN 结的单向导电性

当 PN 结正偏时，如图 1-10 (a) 所示，从 P 区向 N 区有一个较大的电流，PN 结呈现低阻性。当 PN 结反偏时，如图 1-10 (b) 所示，从 N 区向 P 区有一个较小的电流，PN

结呈现高阻性。由此可以得出结论：PN 结具有单向导电性。在近似分析中，反向电流常忽略不计，因此可以认为电流只能从 P 区向 N 区流动，而不能从 N 区向 P 区流动。图 1-10 中电流的方向为电流的实际方向。

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一分析。如图 1-11 所示。图 1-11 中电流的方向为电流的实际方向。

在学习 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导电情况做比较，如图 1-10 和图 1-11 所示。线性电阻具有“双向导电性”，通过“单向”与“双向”这两个字眼的鲜明对比，对于 PN 结的单向导电性会有一个更深刻的理解和记忆。以前在电路理论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。PN 结内部具有内电场，而线性电阻的内部是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。

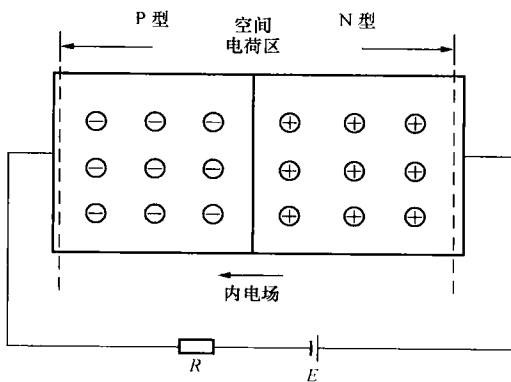


图 1-9 PN 结加反向电压

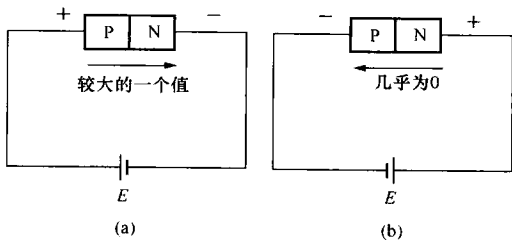


图 1-10 PN 结的单向导电特性示意图

(a) PN 结正偏；(b) PN 结反偏

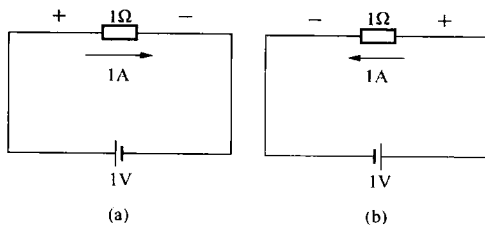


图 1-11 线性电阻的双向导电性示意图

(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

三、PN 结的伏安特性曲线

规定 PN 结的端电压 u_D 的参考方向和流过 PN 结的电流 i_D 的参考方向如图 1-12 所示。在这样的参考方向下, PN 结的端电压 u_D 和流过 PN 结的电流 i_D 的约束关系如图 1-13 所示, 这条曲线称为 PN 结的伏安特性曲线。在第一象限, u_D 为正值, i_D 也为正值, 表示当 PN 结正偏时 u_D 和 i_D 的关系类似指数曲线。在第三象限, u_D 为负值, i_D 也为负值, 在比较平缓的部分, 表示当 PN 结反偏时电流很小, 当反偏电压的值达到反向击穿电压 U_{BR} 后, 曲线陡峭变化, 这时 PN 结反向击穿, 击穿后反向电流数值急剧增加。端电压几乎不变, 而电流可以在一定的范围内变化。从伏安特性曲线来比较, 线性电阻的伏安特性曲线是过原点的一条直线, 而 PN 结的伏安特性曲线是过原点的一条曲线。

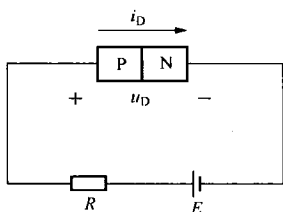


图 1-12 PN 结电压电流参考方向的规定

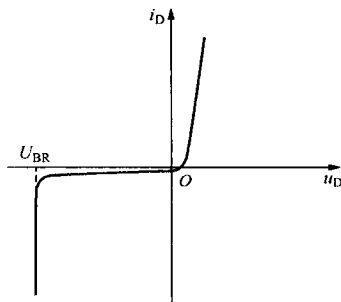


图 1-13 PN 结的伏安特性曲线

四、PN 结的反向击穿

PN 结上所加的反向电压达到某一数值时反向电流激增的现象称为 PN 结的反向击穿。有雪崩击穿和齐纳击穿两种形式。当反向电压增高时, 少数载流子获得能量高速运动, 在空间电荷区与原子发生碰撞, 产生碰撞电离, 形成连锁反应, 像雪崩一样, 使反向电流激增, 这就是雪崩击穿。当反向电压较大时, 强电场直接从共价键中将电子拉出来, 形成大量载流子, 使反向电流激增, 这就是齐纳击穿。当外加反向电压撤掉后 PN 结又恢复到原来的正常状态, PN 结的反向击穿是可逆的。如果 PN 结的电流或电压较大, 使 PN 结耗散功率超过极限值, 使结温升高, 导致 PN 结过热而烧毁, 这就是热击穿, 热击穿是不可逆的。

五、PN 结的电容效应 (非线性电容)

(一) 势垒电容 C_B

势垒电容是由空间电荷区的离子薄层形成的。当外加电压使 PN 结上压降发生变化时, 离子薄层的厚度也相应地随之改变, 这相当 PN 结中存储的电荷量也随之变化, 犹如电容的充放电。所以在 PN 结中存在着电容效应, 这种电容称为势垒电容, 势垒电容的大小与端电压的关系如图 1-14 所示。端电压的参考方向如前所示, 端电压 u_D 为正值, 表示 PN 结正偏, 端电压 u_D 为负值, 表示 PN 结反偏。 C_B 大小与 PN 结面积成正比, 与 PN 结厚度成反比。

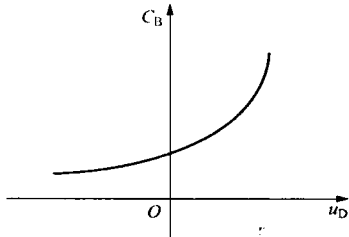


图 1-14 势垒电容 C_B 与端电压的关系

(二) 扩散电容 C_D

当 PN 结外加正向电压不同时, 扩散电流即外电路电流的大小也就不同。所以 PN 结两侧堆积的多子的浓度梯度分布也不同, 这就相当电容的充放电过程。所以在 PN 结中存在着电容效应, 这种电容称为扩散电容, 扩散电容的大小与端电压的关系如图 1-15 所示。

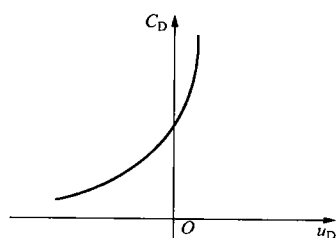


图 1-15 扩散电容 C_D 与端电压的关系

势垒电容和扩散电容均是非线性电容。与 C_B 相比, C_D 曲线更陡。

第三节 半 导 体 二 极 管

一、半导体二极管的结构

给 PN 结加上引线 and 封装, 就成为二极管。二极管按结构分为点接触型、面接触型和平面型三大类。

(一) 点接触型二极管

点接触型二极管的结构示意图如图 1-16 (a) 所示。点接触型二极管的 PN 结面积小, 结电容小, 用于检波和变频等高频电路。

(二) 面接触型二极管

面接触型二极管的结构示意图如图 1-16 (b) 所示。面接触型二极管的 PN 结面积大, 用于工频大电流整流电路。

(三) 平面型二极管

平面型二极管的结构示意图如图 1-16 (c) 所示。平面型二极管往往用于集成电路制造工艺中。PN 结面积可大可小, 用于高频整流和开关电路中。

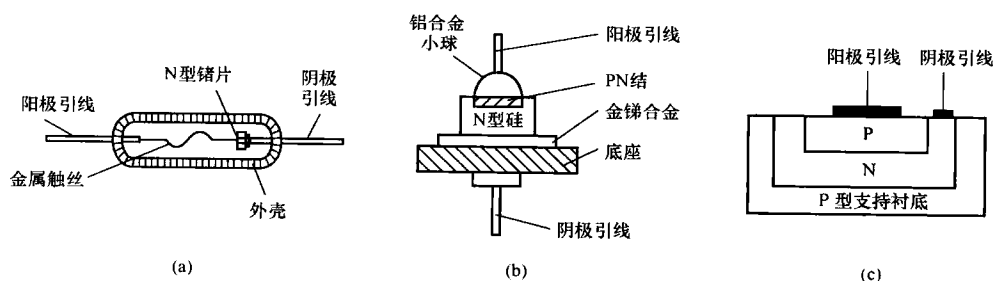


图 1-16 二极管的结构示意图

(a) 点接触型二极管; (b) 面接触型二极管; (c) 平面型二极管

(四) 二极管的符号

二极管的符号如图 1-17 所示, 标有字母 a 的一端是 PN 结的 P 端, 是二极管的阳极, 标有字母 k 的一端是 PN 结的 N 端, 是二极管的阴极。

二、二极管的伏安特性

规定二极管的端电压 u_D 的参考方向和二极管的电流 i_D 的参考方向如图 1-18 所示。二