



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

MONI DIANZI
JISHU JICHU

模拟电子技术基础

(第二版)

郑晓峰 主编



中国电力出版社

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

Electric Power Technology

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

全书共分八章，主要内容包括半导体二极管及其应用，半导体三极管及其共射极基本放大器，基本放大电路及其分析方法，多级放大电路及其在工程中的应用，集成运算放大器及其应用，信号发生器，直流稳压电源，晶闸管及其应用。每章后有“知识能力检验”、“实践与技能操作训练”与理论教学配合使用，并插入电子仿真“EWB技能训练”内容，使要求较高的专业可学到目前电子技术新的工程应用方法和计算机仿真实验手段。

本书可作为高职高专电力技术类、自动化类、机电类等工科专业的教材，也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术基础 / 郑晓峰主编. —2 版. —北京: 中国电力出版社, 2008

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高职高专教育
ISBN 978-7-5083-7785-8

I. 模… II. 郑… III. 模拟电路—电子技术—高等学校: 技术学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 128777 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2005 年 8 月第一版

2008 年 9 月第二版 2008 年 9 月北京第三次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 22.75 印张 553 千字

定价 36.00 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

前 言

本书出版至今已使用三年了，三年来模拟电子技术基础课程教学方法、手段在不断进行改革，不少教师和读者对本书也提出了许多很好的意见和建议，适逢 2007 年末本书被教育部纳入普通高等教育“十一五”国家级规划教材，为适应新的形势，我们对该书重新进行了修订，出版了第二版。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标；符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求；具有思想性、科学性、符合国情的先进性和教学适应性；符合职业教育的特点和规律，具有明显的职业教育特色；符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可以作为学历教育教学用书，也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

《模拟电子技术基础》是电类及部分非电类专业的一门重要的技术基础课，是一门理论性、实践性和实用性均很强的课程，无论是“教”还是“学”，历来都是不太容易掌握。本书根据本课程的教学大纲及教学基本要求，并结合编者在职业院校的教学实践编写而成。

本书在重新修订时更加注重应用能力和实践技能的培养，力求继续保持并强化以下特点：

- (1) 突出应用性，跟踪电子技术的新知识、新器件、新工艺和新技术的应用方向。
- (2) 注重高职特点，加强实践能力的培养。书中工程应用等实践内容占了较大篇幅，每章后有“知识能力检验”、“实践与技能操作训练”与理论教学配合使用。
- (3) 充实了 EWB 仿真内容。电子仿真 EWB 既可作为教学辅助手段，同时也可以培养学生的实践技能和创新能能力。为适应不同层次的教学需要，书中各章末插入电子仿真“EWB 技能训练”的内容，对教学要求较高的专业可学到目前电子技术新的工程应用方法和计算机仿真实验手段。
- (4) 各章节层次安排上，考虑到模拟电子技术课程内容较抽象、入门不容易等因素，本着先易后难、循序渐进、分散难点的原则重新进行了调整，例如：第一章和第二章采用“管、路、用”紧密结合的方式，用尽量少的篇幅使学生快速入门，为后续内容的学习打基础。
- (5) 在内容叙述上，力求语言流畅、图文并茂、通俗易懂。

考虑到不同教学对象、不同教学要求需要对教学内容进行取舍，本书列出了课时分配方案供各校选择时参考。

教学课时分配表（供参考）

章	内 容	课时数	小 计
第一章 半导体二极管及其应用	第一节 半导体的导电特性	1	5
	第二节 半导体二极管	1.5	
	第三节 半导体二极管的应用	2.5	

续表

章	内 容	课时数	小 计
第二章 半导体三极管及其共射极基本放大电路	第一节 半导体三极管	2	3.5
	第二节 共射极基本放大电路	1	
	第三节 半导体三极管在工程中的应用	0.5	
第三章 基本放大电路及其分析方法	第一节 放大电路概述	1	14.5
	第二节 放大电路的分析方法	4	
	第三节 静态工作点对放大性能的影响	1	
	第四节 静态工作点稳定的放大电路	2	
	第五节 共集电极放大器	1	
	第六节 共基极放大器	1	
	第七节 场效应管 (FET) 及其放大电路	3	
	第八节 基本放大电路在工程中的应用	1.5	
第四章 多级放大电路及其在工程中的应用	第一节 多级放大器的电路结构和分析方法	2	16
	第二节 放大器的频率特性	1	
	第三节 放大器中的负反馈	6	
	第四节 多级放大器的功率输出级	6	
	第五节 多级放大器在工程中的应用	1	
第五章 集成运算放大器及其应用	第一节 直流放大器概述	1.5	12.5
	第二节 集成运放的基本构成	0.5	
	第三节 集成运放的基本分析方法	0.5	
	第四节 集成运放的基本运算功能	6	
	第五节 集成运放在工程中的应用	4	
第六章 信号发生器	第一节 概述	0.5	10.5
	第二节 RC 正弦波振荡器及其应用	2	
	第三节 LC 正弦波振荡器及其应用	2.5	
	第四节 石英晶体振荡器	1.5	
	第五节 压控振荡器	2	
	第六节 非正弦波振荡器	2	
第七章 直流稳压电源	第一节 直流稳压电源概述	0.5	14
	第二节 整流与滤波电路	4	
	第三节 直流稳压电路	7	
	第四节 直流稳压电源实例	2.5	
第八章 晶闸管及其应用	第一节 单向晶闸管及其应用	6	12
	第二节 双向晶闸管及其应用	4	
	第三节 特殊晶闸管及其应用	2	
合 计		88	88

本书由福建电力职业技术学院郑晓峰担任主编，梁湖辉和黄阿娜参编。具体编写分工如下：黄阿娜编写各章末的“实践与技能操作训练”、“EWB 技能训练”；梁湖辉编写了第五章到第八章内容及相应的“知识能力检验”部分；郑晓峰编写了“绪论”、“附录”、第一章到第四章内容及对应的“知识能力检验”部分，并负责全书的统稿。

在本书的编写过程中，得到了编者学院的领导和同行、兄弟学校的老师极大的关怀、帮助和鼓励；本书由李保平、王俊伟教授主审，两位教授提出了许多宝贵的意见和建议；另外，教材的编写参考了一些相关著作和资料，在此一并表示衷心感谢。

由于电子技术日新月异，加之编者水平有限，故书中难免有不足之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2008 年 8 月

常用符号说明

类 别	符 号	意 义
下 标	i	输入量
	o	输出量
	s	信号源量
	f	反馈量
	L	负载
	REF	基准量
电 流、电 压	i 、 u	电流、电压瞬时值通用符号
	I 、 U	直流电流、直流电压通用符号
	U_{CC} 、 U_{BB} 、 U_{DD} 、 U_{SS}	直流电源电压
	i 大写下标、 u 大写下标	总瞬时值（直流+交流）
	i 小写下标、 u 小写下标	交流瞬时值
	I 大写下标、 U 大写下标	直流量
	I 小写下标、 U 小写下标	有效值
放大倍数（增益）	A	放大倍数或增益通用符号
	A_u	电压放大倍数、增益
	A_{of}	闭环电压放大倍数、增益
	A_{us}	源电压放大倍数、增益
	A_{ud}	差模电压放大倍数、增益
电 阻、电 感、电 容	R	固定电阻通用符号
	r	交流电阻或动态电阻
	R_p	电位器通用符号
	R_i	输入电阻
	R_o	输出电阻
	R_L	等效负载电阻
	R_S	信号源内阻
	R_f	反馈电阻
	C	电容通用符号
	L	电感通用符号

续表

类 别	符 号	意 义
器 件	V	半导体器件通用符号
	VT	半导体三极管、场效应管和晶闸管
	VD	半导体二极管通用符号
	VZ	稳压二极管通用符号
	G	门
	F	触发器
	TG	传输门
	X	石英晶体
频率、通频带	f	频率通用符号
	Ω 、 ω	角频率通用符号
	B_w	频带宽度
	f_H	上限频率
	f_L	下限频率
	f_T	特征频率
功率、效率	P	功率通用符号
	P_o	输出功率
	P_{CC}	直流电源提供的功率
	P_c	集电极耗散功率
	η	效率
其 它	Q	静态工作点
	F	反馈系数通用符号
	T, t	周期、温度、时间
	φ	相位差、相角
	τ	时间常数
	CP	时钟脉冲
	EN	允许
	OE	输出允许

目 录

前言	
常用符号说明	
绪论	1
第一章 半导体二极管及其应用	4
第一节 半导体的导电特性	4
第二节 半导体二极管	8
第三节 半导体二极管的应用	14
本章小结	23
知识能力检验(一)	24
实践与技能操作训练一 二极管的识别与特性测试	27
第二章 半导体三极管及其共射极基本放大电路	29
第一节 半导体三极管	29
第二节 共射极基本放大电路	40
第三节 半导体三极管在工程中的应用	43
本章小结	44
知识能力检验(二)	46
实践与技能操作训练二 三极管的识别与特性测试	50
EWB技能训练一 EWB的使用	53
第三章 基本放大电路及其分析方法	63
第一节 放大电路概述	63
第二节 放大电路的分析方法	67
第三节 静态工作点对放大性能的影响	74
第四节 静态工作点稳定的放大电路	76
第五节 共集电极放大器	81
第六节 共基极放大器	84
第七节 场效应管(FET)及其放大电路	86
第八节 基本放大电路在工程中的应用	96
本章小结	98
知识能力检验(三)	100
实践与技能操作训练三 单级放大电路	106
EWB技能训练二 单管放大电路	109
第四章 多级放大电路及其在工程中的应用	113
第一节 多级放大器的电路结构和分析方法	113
第二节 放大器的频率特性	118

第三节 放大器中的负反馈·····	121
第四节 多级放大器的功率输出级·····	137
第五节 多级放大器在工程中的应用·····	151
本章小结·····	153
知识能力检验（四）·····	155
实践与技能操作训练四 负反馈放大电路·····	163
EWB 技能训练三 多级放大电路·····	166
EWB 技能训练四 OTL 功率放大电路·····	170
第五章 集成运算放大器及其应用 ·····	173
第一节 直流放大器概述·····	173
第二节 集成运放的基本构成·····	181
第三节 集成运放的基本分析方法·····	184
第四节 集成运放的基本运算功能·····	185
第五节 集成运放在工程中的应用·····	193
本章小结·····	203
知识能力检验（五）·····	205
实践与技能操作训练五 集成运算放大器的应用·····	211
EWB 技能训练五 集成运算放大电路·····	214
第六章 信号发生器 ·····	217
第一节 概述·····	217
第二节 RC 正弦波振荡器及其应用·····	219
第三节 LC 正弦波振荡器及其应用·····	222
第四节 石英晶体振荡器·····	226
第五节 压控振荡器·····	230
第六节 非正弦波振荡器·····	234
本章小结·····	238
知识能力检验（六）·····	240
实践与技能操作训练六 RC 正弦波振荡电路·····	243
EWB 技能训练六 RC 桥式正弦波振荡电路·····	245
第七章 直流稳压电源 ·····	247
第一节 直流稳压电源概述·····	247
第二节 整流与滤波电路·····	248
第三节 直流稳压电路·····	260
第四节 直流稳压电源实例·····	276
本章小结·····	282
知识能力检验（七）·····	284
实践与技能操作训练七 直流稳压电源电路·····	291
实践与技能操作训练八 直流稳压电源故障分析与排除·····	293
EWB 技能训练七 三极管串联稳压电路·····	295

第八章 晶闸管及其应用..... 297

 第一节 单向晶闸管及其应用..... 297

 第二节 双向晶闸管及其应用..... 323

 第三节 特殊晶闸管及其应用..... 332

 本章小结..... 336

 知识能力检验（八）..... 338

 实践与技能操作训练九 晶闸管及其应用..... 341

 EWB 技能训练八 晶闸管及其应用 344

附录..... 346

参考文献..... 350

绪 论

一、什么是电子技术

电子技术是研究电子器件、电子电路和电子系统及其应用的科学技术。现代电子技术的应用概括为通信、控制、计算机和文化生活等方面,运用领域极其广泛。在科学研究中,先进的仪器设备离不开电子技术;在传统的机械行业,先进的数控机床、自动化生产线离不开电子技术;在通信、广播、电视、医疗设备、新型武器、交通、电力、航空、航天等领域离不开电子技术;人们日常生活不可缺少的家用电器也离不开电子技术。以电子技术为基础发展起来的电子计算机及信息技术,对当今世界的发展起到了极大的推动作用,计算机及信息技术的迅速发展和广泛应用,正深刻地改变着整个世界。由于物理学的重大突破,电子技术在20世纪取得了惊人的进步,特别是近40年来,微电子技术和其他高新技术的飞速发展,使工业、农业、科技和国防等领域以及人们的日常生活发生了巨大的变革。世界进入21世纪信息时代,作为其发展基础之一的电子技术正在以更快的步伐前进。

二、什么是模拟电子技术

电子技术分为模拟电子技术和数字电子技术两大部分。模拟电子技术主要研究模拟信号的产生、传送和处理;数字电子技术主要讨论数字信号的产生、传送和处理。什么是信号?什么是模拟信号呢?一般地讲,信号是信息的载体。例如,声音信号可以传达语言、音乐或其他信息,图像信号可以传达人类视觉系统能够接受的图像信息。模拟信号是指在时间上和幅值上均具有连续性的信号。从宏观上看,我们周围的世界中大多数物理量都是时间连续、数值连续的变量,如压力、温度及转速等。这些变量通过相应的传感器都可转换为模拟信号输入到电子系统中去。处理模拟信号电子电路称为模拟电路,如放大电路、滤波电路、电压/电流变换电路等。本书讨论各种模拟电子电路的基本概念、基本原理、基本分析方法及基本应用。

三、模拟电子技术课程的任务、特点

1. 课程的任务

本课程的任务是在介绍常用半导体器件的基础上,重点介绍常用功能电路的基本概念、基本原理和基本分析方法,并着力培养分析问题、解决问题的发展性能力和创造性能力,为学习后续课程或直接从事社会创业活动打下必要的基础。

2. 课程特点

首先,模拟电子技术是一门应用很广、实践性很强的技术科学,与先修课相比,数理、电工基础等课程的理论性很强,而模拟电子技术更强调理论与实践的结合。在教学中,采用以定性分析为主,配合必要的简略估算,加强实验调整和技能训练分析的方法。

其次,本课程具有不同于电路基础等学科的一些特有概念。例如,电路课中基本上只讨论线性元件和电路,而模拟电子技术则主要与非线性器件打交道。如果不加分析地搬用某些电路原理(如欧姆定律)就会引起错误。又如,电路课中对直流电路和交流电路是分开研究的,而模拟电子电路却几乎是交、直流共存于同一电路之中,既有直流通路,又有交流通

路，它们既互相联系，又互相区别。这就带来了分析上的复杂性。再如，电路课中研究网络输出对于输入的依赖关系时，不涉及输出对于输入的反作用，而实际的电子电路却几乎都带有这样或那样的反馈，从而构成了学习中的又一个难点。

最后，由于电子技术发展迅速，应用广泛，因而内容庞杂繁多，具体表现为器件种类多，电路花样多，概念方法多。初学者普遍感到所学零散又千变万化，理不出头绪，学了没底。

四、模拟电子技术课程的基本要求

本课程通过各个教学环节，要求学生达到以下四个方面的要求。

1. 器件

(1) 掌握常用半导体器件的基本工作原理、特性和主要参数，并能合理选择和正确使用。

(2) 了解线性集成电路的电路结构和工作原理，掌握其主要性能和使用方法。

2. 电路

(1) 熟练掌握共射与共集放大器、基本运算放大器的电路结构、工作原理和性能，能够进行定性和简单的定量分析。

(2) 掌握功率放大器、振荡器、整流器、稳压器以及由集成运算放大器组成的某些功能电路的工作原理、性能和工程应用。

(3) 掌握放大器中的负反馈、振荡器中的正反馈，会判别负反馈的组态并定性分析它对放大器性能的影响，能定量估算深度负反馈放大器的放大倍数等性能。

(4) 了解阻容耦合放大器的频率响应。

3. 分析方法

(1) 掌握放大电路的近似计算法，能估算静态工作点。

(2) 掌握微变等效电路分析法，能求放大倍数、输入电阻和输出电阻。

(3) 理解放大电路的图解分析法，能用图解分析法确定静态工作点、分析波形失真，估算放大器的最大不失真输出幅值。

4. 基本技能

通过实践与技能操作训练能达到：①熟悉一般实验中常用的电子仪器，如示波器、信号发生器、交流毫伏表、直流稳压电源等的正确使用方法；②了解常用半导体器件和电路的主要参数和技术指标的测量调试方法；③具有查阅电子器件和集成电路手册的初步能力；④初步掌握阅读和分析电子电路原理图的方法。

五、如何学好模拟电子技术

针对电子技术的课程特点，要学好模拟电子技术，应改进学习方法，注意把握以下几个环节：

(1) 弄清基本概念。弄清基本概念是进行定性分析、简略估算和实验实训的前提，是学好本课程的关键。要重点学会定性分析，切忌用繁杂的数学推导掩盖问题的物理本质。

(2) 弄清规律、思路，抓住相互联系。电子技术内容繁多，归纳总结十分重要。对于每个章节，都要紧抓“问题是怎样提出的”，“有哪些矛盾”，“如何解决”，“如何改进和发展”四个方面不放松，在头脑中形成一条清晰的线索，掌握解决问题的一般方法和彼此的内在联系，而不是各种电路的简单罗列。唯此，才能举一反三，触类旁通，灵活运用。

(3) 掌握模拟电子电路的基本分析方法。这些方法包括图解法、估算法、微变等效电路法，它们的利用率很高，必须重点学习，熟练运用。

(4) 加强实验和技能实训。电子技术实践是本课程必不可少的重要环节，在适量验证性实验的基础上，一定要加强技能实训，自己动手搭接电路、调整参数、测试性能和改进电路，努力提高解决实际问题的能力和创新能力。

(5) 做好课外练习。做习题对于巩固概念、启发思考、熟练分析、暴露学习中的问题和不足，是不可缺少的重要环节。切忌抱着任务观点，为做习题而做习题，做完了事，因为这是达不到预期效果的。

以上只是原则性的学习方法。各人应根据各自的基础和条件，不断探索适合自己的学习方法。

第一章 半导体二极管及其应用

半导体器件是电子线路的核心元件，主要包括半导体二极管、半导体三极管、半导体场效应管和各种集成电路，正是由于各种半导体器件广泛而深入的应用支撑着现代电子技术的飞速发展，而组成这些器件的材料是半导体，故本章首先介绍半导体的基础知识，接着讨论由半导体材料构成的普通二极管、特殊二极管，最后介绍一些简单应用。

第一节 半导体的导电特性

一、本征半导体

自然界的物质若按导电能力划分，可分为导体、半导体和绝缘体三种。导体导电能力好，如电缆线用的铜、铝等金属材料。绝缘体几乎不导电，如陶瓷、电缆线的外皮所用的橡胶、塑料等。而半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间，电阻率通常为 $10^{-9} \sim 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

半导体之所以能得到广泛应用，并不在于它的“半导电”特性，而在于它的导电能力的“可控”特性。例如，掺杂、加热或光照射时导电性能显著改变，利用这些特性可以制成各种半导体器件，实现诸如路灯、温度自动控制，火灾报警，产品自动计数等各种功能。为什么

半导体具有这些独特的导电性能呢？这要从半导体特殊的原子结构说起。

（一）半导体的原子结构

常用的半导体材料有硅（Si）、锗（Ge）和砷化镓（GaAs）等。硅和锗是四价元素，在原子最外层轨道上的四个电子称为价电子，其原子结构示意图如图 1-1 所示。

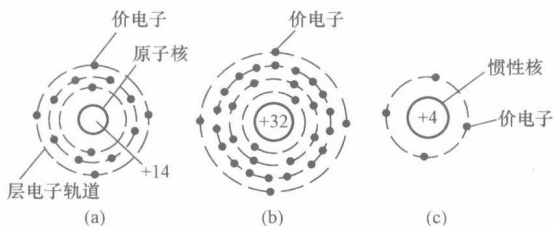


图 1-1 硅和锗原子结构示意图

(a) 硅原子结构；(b) 锗原子结构；(c) 简化模型

（二）本征半导体

每个原子的价电子分别与相邻的四个原子的价电子组成共价键。共价键中的价电子为这些原子所共有，并为它们所束缚，在空间形成排列有序的单晶体结构，如图 1-2 所示。

把上述这种纯净的单晶半导体称为本征半导体。在热力学温度为零度（ $0\text{K} = -273^\circ\text{C}$ ）时本征半导体中没有自由电子，但在常温下有的价电子受本征热激发就可以获得较高能量而挣脱原子核的束缚，成为自由电子。带负电的自由电子产生的同时，在原来的共价键中就出现了一个空位，原子的电中性被破坏，呈现出正电性，其正电量与电子的负电量相等，称呈现正电性的这个空位为空穴。由于电子和空穴是同时成对出现的，称为自由电子空穴对。游离的部分自由电子也可能回到空穴中去，称为复合。本征半导体结构如图 1-3 所示。本征热激发和复合在一定温度下会达到动态平衡，如温度改变后，则又会达到新的动态平衡。

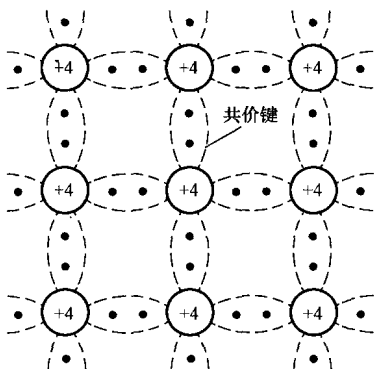


图 1-2 单晶体的共价键结构

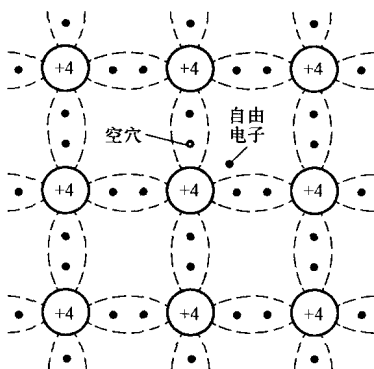


图 1-3 本征半导体结构

二、杂质半导体

由于本征半导体中的载流子（自由电子空穴对）在常温下数量少、导电能力差，不适宜制造半导体器件，通常要掺入一些杂质来提高导电能力。在本征半导体中掺入微量有用元素后形成的半导体称为杂质半导体。根据掺入杂质的不同可分为 P 型半导体和 N 型半导体两种。

（一）N 型半导体

在本征半导体中掺入五价杂质原子，如掺入磷原子，可形成 N 型半导体。因五价杂质原子中只有四个价电子能与周围四个半导体原子中的价电子形成共价键，而多余的一个价电子因无共价键束缚而很容易形成自由电子。由于杂质原子掺入后提供的自由电子数量远多于空穴，故在 N 型半导体中自由电子是多数载流子，而由本征热激发产生的空穴是少数载流子。

N 型半导体的结构示意图如图 1-4 (a) 所示。图 1-4 (b) 所示为 N 型半导体简化画法。

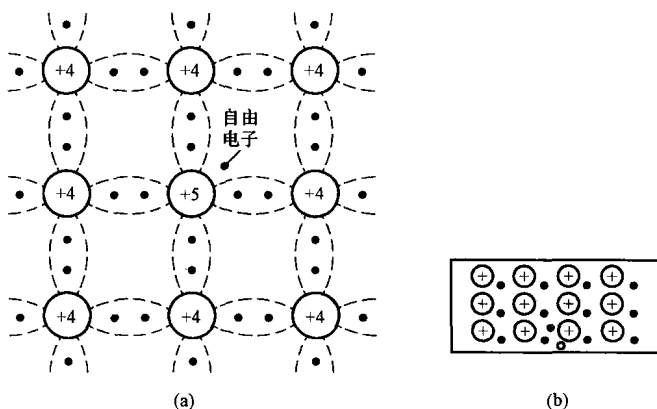


图 1-4 N 型半导体的结构

(a) 结构示意图；(b) 简化画法

（二）P 型半导体

在本征半导体中掺入三价杂质原子，如硼、镓等形成了 P 型半导体。因三价杂质原子

在与硅原子形成共价键时, 缺少一个价电子而在共价键中留下一个空穴。由于三价杂质原子掺入后产生的空穴数量远多于自由电子, P 型半导体中空穴成为多数载流子, 主要由掺杂形成; 而由本征热激发产生的自由电子是少数载流子。

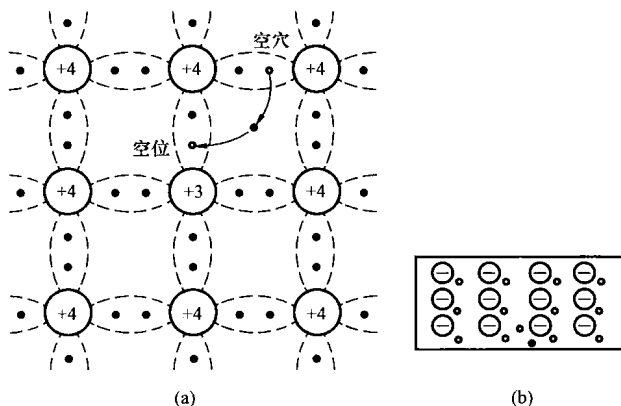


图 1-5 P 型半导体的结构
(a) 结构示意图; (b) 简化图

P 型半导体的结构示意图如图 1-5 (a) 所示, 图 1-5 (b) 所示为 P 型半导体简化画法。

由上述分析可以得出: 杂质半导体内部有两种载流子 (自由电子、空穴) 参与导电。当杂质半导体加上电场时, 两种载流子产生定向运动共同形成半导体中的电流。主要靠自由电子导电的杂质半导体是 N 型半导体, 主要靠空穴导电的杂质半导体是 P 型半导体。

三、PN 结及其单向导电性

(一) PN 结的形成

在同一块本征半导体晶片上, 采用特殊的掺杂工艺, 在两侧分别掺入三价元素和五价元素, 一侧形成 P 型半导体, 另一侧形成 N 型半导体, 则在这两种半导体交界面的两侧分别留下了不能移动的正负离子, 形成一个具有特殊导电性能的空间电荷区, 称为 PN 结。PN 结的形成过程如图 1-6 所示。

在 P 区与 N 区的交界面处, 由于 P 区中的空穴浓度大于 N 区中的空穴浓度, 则 P 区中的空穴要向 N 区扩散; 同理, N 区中的自由电子浓度大于 P 区中的自由电子浓度, 所以 N 区中的自由电子也要向 P 区扩散, 即多数载流子因浓度差形成扩散运动。在交界面两

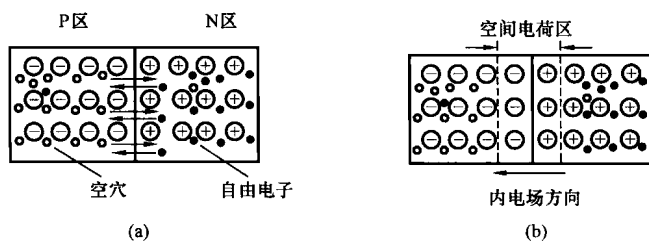


图 1-6 PN 结的形成过程
(a) 载流子的运动过程; (b) PN 结

侧, 相互扩散的自由电子和空穴相遇而复合, 复合消耗了自由电子和空穴, 形成空间电荷区 (耗尽层), 其中 N 区一侧是正离子区, P 区一侧是负离子区, 故在耗尽层, 形成了 N 区指向 P 区的内电场。内电场阻碍了多数载流子扩散, 同时促使 N 区中的空穴 (少数载流子) 进入 P 区、P 区中的自由电子 (少数载流子) 进入 N 区, 即内电场促进了少数载流子漂移运动。在一定温度下扩散运动和漂移运动达到动态平衡, 形成稳定的耗尽层即 PN 结。

(二) PN 结的单向导电性

PN 结的导电特性决定了半导体器件的工作特性, 是研究二极管、三极管等半导体器件的基础。

1. PN 结加正向电压

P 区接外加电源正极，N 区接负极时称 PN 结加正向电压（也称正向偏置），导电情况如图 1-7 (a) 所示，外加的正向电压有一部分降落在 PN 结区，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，扩散电流加大。扩散电流远大于漂移电流，可忽略漂移电流的影响，故 PN 结呈现低阻性。因此称 PN 结加正向电压时导通。

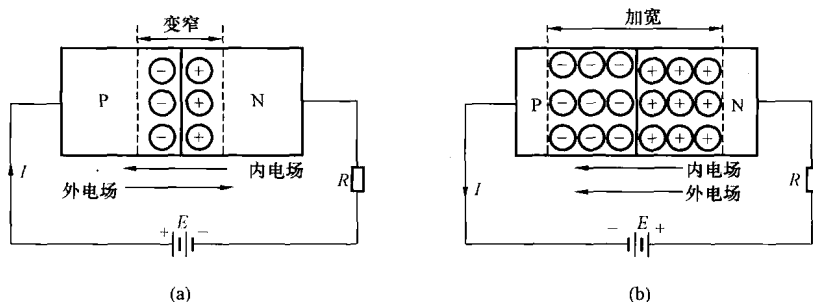


图 1-7 PN 结的单向导电性

(a) PN 结加正向电压；(b) PN 结加反向电压

2. PN 结加反向电压

P 区接外加电源负极，N 区接正极时称 PN 结加反向电压（也称反向偏置），导电情况如图 1-7 (b) 所示，外加的反向电压有一部分降落在 PN 结区，方向与 PN 结内电场方向相同，加强了内电场。内电场对多子扩散运动的阻碍增强，扩散几乎无法进行。此时 PN 结区的少子在内电场作用下形成的漂移电流大于扩散电流，在一定的温度条件下，由本征激发决定的少子浓度是一定的，故少子形成的漂移电流是恒定的，基本上与所加反向电压的大小无关，这个电流也称为反向饱和电流。由于反向饱和电流很小可忽略，故 PN 结呈现高阻性，因此称 PN 结加反向电压时截止。

可以形象地把 PN 结看成是一堵厚度可以改变的墙，加正向电压时墙变薄，PN 结电阻变小，电流自然容易穿过；加反向电压时墙变厚，PN 结电阻变很大，电流几乎穿不过去。

由此可以得出结论：PN 结具有单向导电性，加正向电压时导通，加反向电压时截止。

复习与思考

1. 半导体有哪些主要特性？
2. 在温度升高时，本征半导体的导电能力为什么会增强？
3. 什么是 P 型半导体？什么是 N 型半导体？
4. 空穴导电和自由电子导电有什么区别？
5. N 型半导体本身是带负电、还是电中性的？为什么？
6. 如需使 PN 结处于反向偏置，外接电压的极性如何确定？
7. PN 结在未被反向击穿条件下，为什么具有单向导电性？