



教育部高职高专规划教材
Jiaoyubu Gaozhi Gaozhuan Guihua Jiaocai

模拟电子技术

胡宴如 主编
胡宴如 耿苏燕 编

高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS



教育部高职高专规划教材

模拟电子技术

胡宴如 主编

胡宴如 耿苏燕 编

高等教育出版社

内容提要

本书是教育部高职高专规划教材,是在多年教学改革与实践的基础上,依据教育部最新制定的《高职高专教育模拟电子技术基础课程教学基本要求》编写而成。

全书由半导体二极管、半导体三极管、放大电路基础、负反馈放大电路与基本运算电路、线性集成电路的应用、集成模拟乘法器及其应用、信号产生电路、集成直流稳压电源等八章组成。

根据高职高专培养目标的要求以及现代科学技术发展的需要,本书以现代电子技术的基本知识,基本理论为主线,使电子技术的基本理论与各种新技术有机结合在一起;以应用为目的,在保证科学性的前提下,从工程观点考虑,删繁就简,突出重点。在内容安排上,将理论知识的讲授、课内讨论、作业与技能训练有机结合融为一体,书中每节都有思考题,每章都有电路调整测试及技能训练项目,而且技能训练内容丰富、实用,并引入计算机仿真技术 EWB。每章还编有小结、习题、自学、选做等内容,便于组织课内讨论及技能训练,可进行边讲边练,以充分调动学生学习本课程的主动性和积极性。

本书可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校的电气、电子、通信、自动化、计算机等专业“模拟电子技术”、“电子电路基础”、“低频电子线路”等课程的教材,也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/胡宴如主编. —北京:高等教育出版社, 2000

教育部高职高专规划教材

ISBN 7-04-008730-8

I. 模… II. 胡… III. 模拟电路-电子技术-高等学校:技术学校-教材 IV. TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 28991 号

模拟电子技术

胡宴如 主编

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 北京地质印刷厂

开 本 787×1092 1/16

版 次 2000 年 8 月第 1 版

印 张 19.25

印 次 2000 年 8 月第 1 次印刷

字 数 460 000

定 价 16.50 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

出版说明

教材建设工作是整个高职高专教育教学工作中的重要组成部分。改革开放以来,在各级教育行政部门、学校和有关出版社的共同努力下,各地已出版了一批高职高专教育教材。但从整体上看,具有高职高专教育特色的教材极其匮乏,不少院校尚在借用本科或中专教材,教材建设仍落后于高职高专教育的发展需要。为此,1999年教育部组织制定了《高职高专教育基础课程教学基本要求》(以下简称《基本要求》)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(以下简称《培养规格》),通过推荐、招标及遴选,组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师,成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍,并在有关出版社的积极配合下,推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种,用5年左右时间完成。出版后的教材将覆盖高职高专教育的基础课程和主干专业课程。计划先用2~3年的时间,在继承原有高职、高专和成人高等学校教材建设成果的基础上,充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验,解决好新形势下高职高专教育教材的有无问题;然后再用2~3年的时间,在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,通过研究、改革和建设,推出一大批教育部高职高专教育教材,从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

“教育部高职高专规划教材”是按照《基本要求》和《培养规格》的要求,充分汲取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的,适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

2000年4月3日

前 言

本书是教育部高职高专规划教材,是在多年教学改革与实践的基础上,依据教育部最新制定的《高职高专教育模拟电子技术基础课程教学基本要求》编写而成的,可作为高职高专电气、电子、通信、自动化、计算机等专业模拟电子技术课程的教材,也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

根据高职高专培养目标的要求以及现代科学技术发展的需要,本书在内容取舍上以现代电子技术的基本知识、基本理论为主线,使电子技术的基本理论与各种新技术有机结合在一起;以应用为目的,在保证科学性的前提下,从工程观点考虑,删繁就简,使理论分析重点突出、概念清楚、实用性强。

本书在内容安排上,以培养学生的工作能力为目的,将理论知识的讲授、课内讨论、作业与技能训练有机结合、融为一体,使能力培养贯穿于整个教学过程。每章都有电路调整测试及技能训练项目。技能训练内容丰富、实用,并引入计算机仿真技术 EWB。每章还编有小结、复习思考题、自学、选做等内容,便于组织课内讨论及技能训练,可边讲边练。在精讲与多练、辅导与自学相结合的原则下,使学生逐步提高获取知识的能力,逐步学会解决工程问题的思维方法和工作方法。

本书共八章,第1章为半导体二极管、第2章为半导体三极管、第3章为放大电路基础、第4章为负反馈放大电路与基本运算电路,这是本课程的基本内容,通过这一部分的教学使学生建立模拟电子技术的基本概念,掌握其基本理论、基本分析方法及电子电路调整测试的基本方法。第5章为线性集成电路的应用,重点介绍了线性集成电路的具体应用,根据专业不同可适当取舍。通过必要的讲解及学生自学,完成有关的技能训练项目,使学生熟悉常用线性集成电路的使用及其应用电路中元器件的选择、组装、调测方法。第6章为集成模拟乘法器及其应用,为选学内容,用以扩大知识面。第7章为信号产生电路,主要介绍正弦波和非正弦波振荡电路的工作原理及调整测试方法,并对锁相频率合成技术作简要介绍。第8章集成直流稳压电源主要介绍集成稳压器的应用,本章也可通过讲解及自学、学生独立完成技能训练项目来进行教学。本书每节复习思考题可作课堂讨论题,每章所编的电路调整与测试内容在教学中只作适当讲解,大部分内容可作为技能训练参考及自学内容,技能训练项目可根据具体情况适当选用,时间可多可少。

本书由胡宴如任主编,第1、2、4章及附录B由耿苏燕编写,其余部分均由胡宴如编写。

本书承蒙北京联合大学沈明山副教授仔细审阅,他提出了许多十分宝贵的意见,在此谨表示衷心的感谢。

书中错漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2000年2月

责任编辑	刘素馨
封面设计	杨立新
责任绘图	李维平
版式设计	周顺银
责任校对	王效珍
责任印制	宋克学

12-4

本书常用符号说明

一、下标符号意义

i、o 分别表示输入和输出量
s、f 分别表示信号源量和反馈量
L 负载
REF 基准值

二、常用符号意义

1. 放大倍数与增益

A 放大倍数、增益通用符号
 A_u 电压放大倍数、增益
 A_{ud} 差模电压放大倍数、增益
 A_{us} 源电压放大倍数、增益

2. 电阻

R 直流电阻或静态电阻
r 交流电阻或动态电阻
 R_P 电位器
 R_i 输入电阻
 R_o 输出电阻
 R_S 信号源内阻
 R_L 负载电阻
 R_f 反馈电阻

3. 电容、电感

C 电容通用符号
 C_B 、 C_E 分别为基极、发射极旁路电容
 C_S 源极旁路电容
 C_j PN 结结电容
L 电感、自感系数

4. 频率与通频带

F, f 频率通用符号
 Ω, ω 角频率通用符号
 f_H 电路高频截止频率(上限频率)
 f_L 电路低频截止频率(下限频率)
 f_T 特征频率

$BW_{0.7}$ 3dB 通频带

BW_G 单位增益带宽

5. 功率与效率

P_o 输出功率

P_{DC} 直流电源供给功率

P_C 集电极耗散功率

P_{CM} 集电极最大允许功耗

η 效率

6. 其他

F 反馈系数

F_u 电压反馈系数

H 双口网络混合参数

K 乘法器增益系数

K_{CMR} 共模抑制比

Q 静态工作点

V 半导体二极管和三极管

T, t 时间、周期、温度

τ 时间常数

φ 相角

三、 $U(I)$ 不同书写体电压(电流)符号的规定

1. 大写 $U(I)$ 大写下标, 表示直流电压(电流)值, 例如 U_{BE} 表示基极与发射极之间的直流电压。

2. 大写 $U(I)$ 小写下标表示交流电压(电流)的有效值, 例如 U_{be} 表示基极与发射极之间的交流电压的有效值。

3. 小写 $u(i)$ 大写下标, 表示含有直流电压(电流)的瞬时值, 例如, u_{BE} 表示基极与发射极之间含有直流电压的瞬时值。

4. 小写 $u(i)$ 小写下标, 表示交流电压(电流)瞬时值, 例如, u_{be} 表示基极与发射极之间交流电压的瞬时值。

5. 大写 $U(I)$ 小写 m 下标, 表示交流电压(电流)的最大值, 例如, I_{cm} 表示集电极交流电流的最大值。

6. $\dot{U}(\dot{I})$ 为正弦交流电压(电流)的相量表示。

7. 大写 V 大写双字母下标表示直流供电电源电压, 例如, V_{CC} 表示集电极直流供电电源电压。

目 录

第 1 章 半导体二极管	1
1.1 半导体的基础知识	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	2
1.1.3 PN 结	3
1.2 半导体二极管的特性及主要参数	5
1.2.1 二极管的结构	5
1.2.2 二极管的伏安特性	6
1.2.3 二极管的击穿特性	7
1.2.4 二极管的主要参数	7
1.3 二极管电路的分析方法	8
1.3.1 理想二极管及二极管特 性的折线近似	8
1.3.2 图解分析法和微变等效 电路分析法	13
1.4 特殊二极管	15
1.4.1 稳压二极管	16
1.4.2 光电二极管	17
1.5 半导体二极管特性的测试与应用	18
1.5.1 半导体器件型号命名方法(摘自 国家标准 GB249—74)	18
1.5.2 半导体二极管参数选录	19
1.5.3 技能训练项目	20
本章小结	24
习题	24
第 2 章 半导体三极管	28
2.1 双极型半导体三极管	28
2.1.1 晶体三极管的工作原理	28
2.1.2 晶体三极管的特性曲线	30
2.1.3 晶体三极管的主要参数	32
2.2 单极型半导体三极管	34
2.2.1 MOS 场效应管	35
2.2.2 结型场效应管	39
2.2.3 场效应管的主要参数	44
2.3 半导体三极管电路的基本 分析方法	45
2.3.1 直流分析	45
2.3.2 交流分析	48
2.4 半导体三极管的测试与应用	54
2.4.1 半导体三极管使用基本知识	54
2.4.2 技能训练项目	56
本章小结	58
习题	58
第 3 章 放大电路基础	63
3.1 放大电路的基本知识	63
3.1.1 放大电路的组成	63
3.1.2 放大电路的主要性能指标	64
3.2 三种基本组态放大电路	67
3.2.1 共发射极放大电路	68
3.2.2 共集电极放大电路	72
3.2.3 共基极放大电路	74
3.2.4 场效应管放大电路	76
3.3 差分放大电路	78
3.3.1 差分放大电路的工作原理	78
3.3.2 具有电流源的差分放大电路	83
3.3.3 差分放大电路的输入、输出 方式	87
3.4 互补对称功率放大电路	90
3.4.1 乙类双电源互补对称功率 放大电路	91
3.4.2 甲乙类互补对称功率放大 电路	94
3.5 多级放大电路	98
3.5.1 多级放大电路的组成及性能	

指标的估算	98
3.5.2 通用型集成运算放大器的组成及其基本特性	100
3.6 放大电路的调整与测试	103
3.6.1 放大电路调整与测试的基本方法	103
3.6.2 技能训练项目	107
本章小结	111
习题	112
第4章 负反馈放大电路与基本运算电路	118
4.1 负反馈放大电路的组成及基本类型	118
4.1.1 反馈放大电路的组成及基本关系式	118
4.1.2 负反馈放大电路的基本类型	120
4.1.3 负反馈放大电路分析	121
4.2 负反馈对放大电路性能的影响	124
4.2.1 提高增益的稳定性	125
4.2.2 减小失真和扩展通频带	125
4.2.3 改变放大电路的输入和输出电阻	126
4.3 负反馈放大电路应用中的几个问题	128
4.3.1 放大电路引入负反馈的一般原则	128
4.3.2 深度负反馈放大电路的特点及性能估算	129
4.3.3 负反馈放大电路的稳定性	131
4.4 基本运算电路	133
4.4.1 比例运算	133
4.4.2 加法与减法运算	135
4.4.3 微分与积分运算	136
4.4.4 基本运算电路应用举例	137
4.5 集成运算放大器应用电路的测试	139
4.5.1 集成运算放大器使用基本知识	139
4.5.2 集成运放基本应用电路的调测	142
4.5.3 技能训练项目	143
本章小结	147

习题	148
第5章 线性集成电路的应用	153
5.1 放大电路的频率特性	153
5.1.1 简单 RC 低通和高通电路的频率特性	153
5.1.2 晶体管及其单级放大电路的高频特性	156
5.1.3 集成运算放大器高频参数及其影响	159
5.2 集成运算放大器小信号交流放大电路	160
5.2.1 反相交流放大电路	160
5.2.2 同相交流放大电路	162
5.2.3 交流电压跟随器与汇集放大电路	163
5.3 有源滤波电路	164
5.3.1 有源低通滤波电路	164
5.3.2 有源高通滤波电路	166
5.3.3 有源带通滤波电路	167
5.4 集成功率放大器及其应用	168
5.4.1 LM386 集成功率放大器及其应用	169
5.4.2 DG810 集成功率放大器及其应用	170
5.4.3 TDA2040 集成功率放大器及其应用	170
5.5 线性集成电路应用电路的调整与测试	172
5.5.1 集成运算放大器应用电路元器件的选择	172
5.5.2 线性集成电路应用电路的调整与测试	174
5.5.3 技能训练项目	174
本章小结	178
习题	178
第6章 集成模拟乘法器及其应用	182
6.1 集成模拟乘法器	182
6.1.1 集成模拟乘法器的基本	

工作原理	182	本章小结	222
6.1.2 单片集成模拟乘法器	183	习题	224
6.2 集成模拟乘法器的应用电路	185		
6.2.1 基本运算电路	185	第 8 章 集成直流稳压电源	228
6.2.2 倍频、混频与鉴相	186	8.1 单相整流滤波电路	228
6.2.3 调幅与解调	187	8.1.1 单相整流电路	228
6.3 模拟乘法器调幅与解调电路的 调整与测试	190	8.1.2 滤波电路	230
6.3.1 MC1496 模拟乘法器调幅 与解调电路	190	8.2 线性集成稳压器	232
6.3.2 技能训练项目	192	8.2.1 串联型稳压电路的工作原理	233
本章小结	193	8.2.2 三端固定输出集成稳压器	233
习题	194	8.2.3 三端可调输出集成稳压器	235
		8.3 开关集成稳压电源	237
第 7 章 信号产生电路	196	8.3.1 开关稳压电源的基本工作原理	237
7.1 正弦波振荡电路	196	8.3.2 集成开关稳压器及其应用	239
7.1.1 正弦波振荡电路的工作原理	196	8.4 集成直流稳压电源的调整与测试	243
7.1.2 RC 振荡电路	198	8.4.1 集成直流稳压电源的主要 技术指标	243
7.1.3 LC 振荡电路	201	8.4.2 直流稳压电源的调整测试 方法	244
7.2 非正弦波信号产生电路	207	8.4.3 技能训练项目	246
7.2.1 电压比较器	207	本章小结	250
7.2.2 方波产生电路	209	习题	250
7.2.3 555 集成定时器矩形波 产生电路	210		
7.2.4 压控方波产生电路	210	附录 A 电阻器、电容器使用知识	252
7.3 锁相频率合成电路	214	A1 电阻器	252
7.3.1 锁相环路	214	A2 电容器	257
7.3.2 锁相频率合成器	215		
7.4 信号产生电路的调整与测试	217	附录 B 电子设计自动化软件 EWB 的应用	262
7.4.1 正弦波振荡电路的调整与 测试	217	B1 EWB 的基本使用方法	262
7.4.2 非正弦波产生电路的调整 与测试	219	B2 模拟电子电路的仿真实验与分析	274
7.4.3 技能训练项目	219		
		参考文献	293
		部分习题答案	294

第 1 章

半导体二极管

引言 由于半导体器件具有体积小、重量轻、使用寿命长、输入功率小和转换效率高等优点,因而在现代电子技术中得到广泛的应用。半导体二极管是最简单的半导体器件,它用半导体材料制成,其主要特性是单向导电性。本章主要讨论 PN 结的单向导电性、普通二极管的主要特性以及二极管电路的分析方法,最后列出技能训练项目及要求,通过技能训练以提高实践能力。

1.1 半导体的基础知识

导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体。在自然界中属于半导体的物质很多,用来制造半导体器件的材料主要是硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等,其中硅用得最广泛。

1.1.1 本征半导体

纯净的半导体称为本征半导体。用于制造半导体器件的纯硅和锗都是四价元素,其最外层原子轨道上有四个电子(称为价电子)。在单晶结构中,由于原子排列的有序性,价电子为相邻的原子所共有,形成图 1.1.1 所示的共价键结构,图中+4 代表四价元素原子核和内层电子所具有的净电荷。共价键中的价电子,将受共价键的束缚。在室温或光照下,少数价电子可以获得足够的能量摆脱共价键的束缚成为自由电子,同时在共价键中留下一个空位,如图 1.1.1 所示,这种现象称为本征激发,这个空位称为空穴,可见本征激发产生的自由电子和空穴是成对的。原子失去价电子后带正电,可等效地看成是因为有了带正电的空穴。空穴很容易吸引邻近共价键中的价电子去填补,使空位发生转移,这种价电子填补空位的运动可以看成空穴在运动,但其运动方向与价电子运

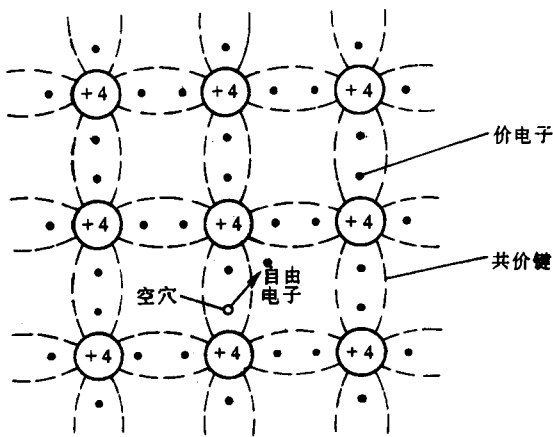


图 1.1.1 硅和锗的原子结构及本征激发示意图

动方向相反。自由电子和空穴在运动中相遇时会重新结合而成对消失,这种现象称为复合。温度一定时,自由电子和空穴的产生与复合将达到动态平衡,这时自由电子和空穴的浓度一定。

在电场作用下,自由电子和空穴将作定向运动,这种运动称为漂移,所形成的电流叫做漂移电流。自由电子又叫电子载流子,空穴又叫空穴载流子。因此,半导体中有自由电子和空穴两种载流子参与导电,分别形成电子电流和空穴电流,这一点与金属导体的导电机理不同。在常温下本征半导体载流子浓度很低,因此导电能力很弱。

1.1.2 杂质半导体

为了提高半导体的导电能力,可在本征半导体中掺入微量杂质元素,掺杂后的半导体称为杂质半导体。按掺入杂质的不同有N型半导体和P型半导体之分。

在四价的硅(或锗)中掺入五价元素(如磷、砷、锑等)后,杂质原子替代了晶格中某些四价元素原子的位置,如图1.1.2(a)所示。杂质原子与周围的四价元素原子结合成共价键时多余一个价电子,这个多余的价电子在室温下就能挣脱共价键的束缚成为自由电子,杂质原子则变成带正电荷的离子,称施主离子。掺入多少杂质原子就能电离产生多少个自由电子,因此自由电子的浓度大大增加。这时由本征激发产生的空穴被复合的机会增多,使空穴浓度反而减少。这种以电子导电为主的半导体称为N型(或电子型)半导体,其中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)。

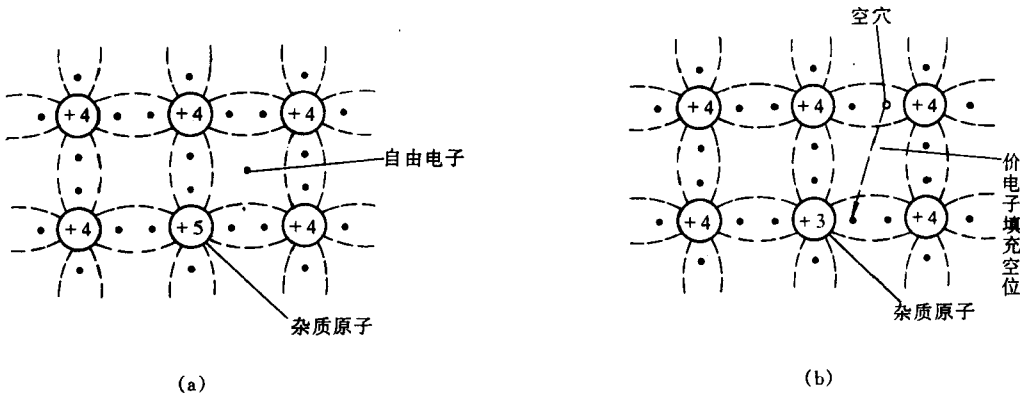


图 1.1.2 杂质半导体结构示意图

(a) N型半导体 (b) P型半导体

在四价的硅(或锗)中掺入三价元素(如硼、铝、镓等)后,杂质原子与周围的四价元素原子形成共价键时因缺少一个价电子而产生一个空位,室温下这个空位极易被邻近共价键中的价电子所填补,使杂质原子变成负离子,称为受主离子,如图1.1.2(b)所示,这种掺杂使空穴的浓度大大增加,这是以空穴导电为主的半导体,称为P型(或空穴型)半导体,其中空穴为多子,自由电子为少子。

图1.1.3所示为杂质半导体中载流子和杂质离子的示意图。必须指出:杂质离子虽然带电荷,但不能移动,因此它不是载流子;杂质半导体中虽然有一种载流子占多数,但整个半导体仍呈电中性。

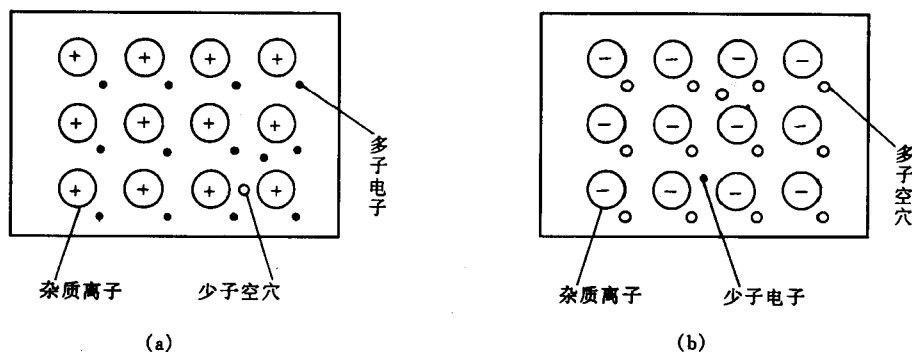


图 1.1.3 杂质半导体中的载流子和离子

(a) N 型半导体 (b) P 型半导体

杂质半导体的导电性能主要取决于多子浓度,多子浓度主要取决于掺杂浓度,其值较大并且稳定,因此导电性能得到显著改善。少子浓度主要与本征激发有关,因此对温度敏感,其大小随温度的升高而增大。

1.1.3 PN 结

一、PN 结的形成

采用特定的制造工艺,在同一块半导体基片的两边分别形成 N 型和 P 型半导体。由于 P 型和 N 型半导体交界面两侧的两种载流子浓度有很大的差异,因此会产生载流子从高浓度区向低浓度区的运动,这种运动称为扩散,如图 1.1.4(a)所示。P 区中的多子空穴扩散到 N 区,与 N 区中的自由电子复合而消失;N 区中的多子电子向 P 区扩散并与 P 区中的空穴复合而消失。结果使交界面附近载流子浓度骤减,形成了由不能移动的杂质离子构成的空间电荷区,同时建立了内建电场(简称内电场),内电场方向由 N 区指向 P 区,如图 1.1.4(b)所示。

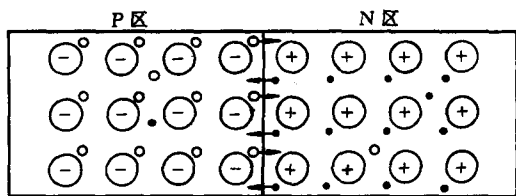
内电场将产生两个作用:一方面阻碍多子的扩散运动,另一方面促使两个区靠近交界面处的少子产生漂移运动。起始时内电场较小,扩散运动较强,漂移运动较弱,随着扩散的进行,空间电荷区增宽,内电场增大,扩散运动逐渐困难,漂移运动逐渐加强。外部条件一定时,扩散运动和漂移运动最终达到动态平衡,即扩散过去多少载流子必然漂移过来同样多的同类载流子,因此扩散电流等于漂移电流,如图 1.1.4(c)所示。这时空间电荷区的宽度一定,内电场一定,形成了所谓的 PN 结。PN 结内电场的电位称为内建电位差,又叫接触电位 U_B ^①,其数值一般为零点几伏,室温时,硅材料 PN 结的内建电位差为 0.5~0.7V,锗材料 PN 结的内建电位差为 0.2~0.3V。

由于空间电荷区中载流子极少,都被消耗殆尽,所以空间电荷区又称为耗尽区。另外,从 PN 结内电场阻止多子继续扩散这个角度来说,空间电荷区也可称为阻挡层或势垒区。

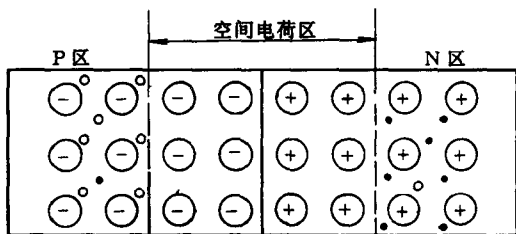
二、PN 结的单向导电特性

加在 PN 结上的电压称为偏置电压,若 P 区接电源正极、N 区接电源负极,则称 PN 结外接正向电压或 PN 结正向偏置,简称正偏;反之,称 PN 结外接反向电压或反向偏置,简称反偏。如

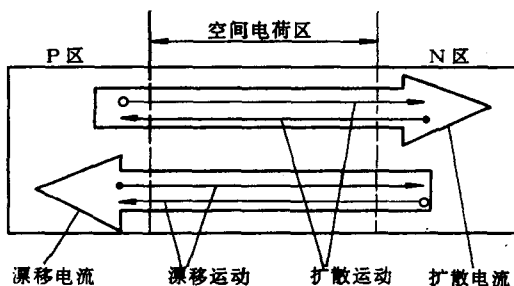
① 参阅参考文献[2]第 12 页。



(a)



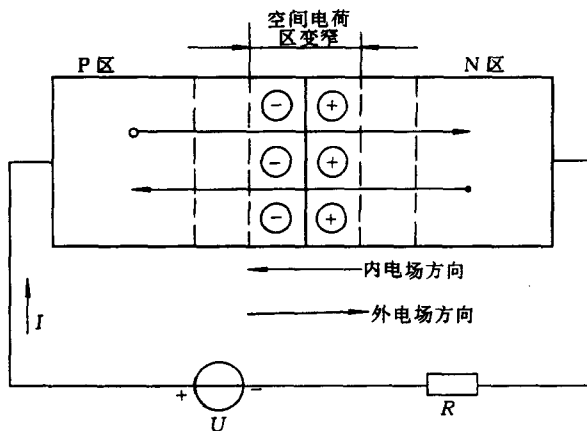
(b)



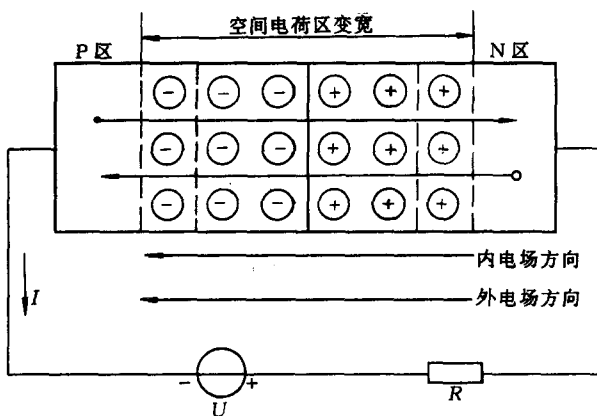
(c)

图 1.1.4 PN 结的形成

(a) 载流子的扩散运动 (b) 动态平衡时的 PN 结及其内电场 (c) 动态平衡时 PN 结中的载流子运动及电流



(a)



(b)

图 1.1.5 PN 结的单向导电特性

(a) 正向偏置, 导通 (b) 反向偏置, 截止

图 1.1.5 所示。

PN 结正偏时, 外电场使 P 区的多子空穴向 PN 结移动, 并进入空间电荷区和部分负离子中和; 同样, N 区的多子电子也向 PN 结移动, 并进入空间电荷区和部分正离子中和。因此空间电荷量减少, PN 结变窄, 如图 1.1.5(a) 所示, 这时内电场减弱, 扩散运动将大于漂移运动, 多子的扩散电流通过回路形成正向电流。当外加正向电压增加到一定值后, 正向电流将显著增加, 此时, PN 结呈现很小的电阻, 称为导通。为了限制正向电流值, 通常在回路中串接限流电阻 R 。

PN 结反偏时, 外电场使 P 区的空穴和 N 区的电子向离开 PN 结的方向移动, 空间电荷区变宽, 如图 1.1.5(b) 所示。因此, 内电场增强, 多子的扩散运动受阻, 而少子的漂移运动加强, 这时

通过 PN 结的电流(称为反向电流)由少子的漂移电流决定。由于少子浓度很低,所以反向电流很小,一般为微安级,相对于正向电流可以忽略不计。反向电流几乎不随外加电压而变化,故又称为反向饱和电流。此时,PN 结呈现很大的电阻,称为截止。

综上所述,PN 结正偏时导通,形成较大的正向电流,呈现很小的电阻;反偏时截止,反向电流近似为零。因此,PN 结具有单向导电特性。

复习思考题

1.1.1 何谓本征半导体、P 型半导体和 N 型半导体? 它们在导电性能上各有何特点?

1.1.2 空间电荷区是由电子、空穴还是由施主离子、受主离子构成? 空间电荷区又称耗尽区、阻挡层,为什么?

1.1.3 何谓 PN 结的正向偏置和反向偏置? 何谓 PN 结的单向导电性?

1.2 半导体二极管的特性及主要参数

1.2.1 二极管的结构

在 PN 结的两端各引出一根电极引线,然后用外壳封装起来就构成了半导体二极管,如图 1.2.1(a)所示,其电路符号如图 1.2.1(b)所示。由 P 区引出的电极称正极(或阳极),由 N 区引

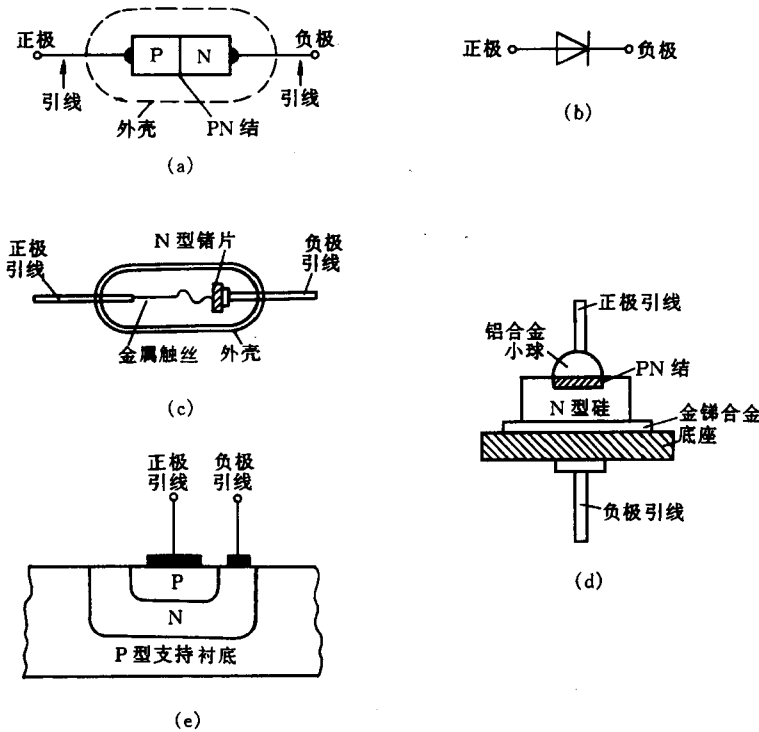


图 1.2.1 半导体二极管的结构和符号

(a) 结构示意图 (b) 电路符号 (c) 点接触型 (d) 面接触型 (e) 集成电路中的平面型

出的电极称负极(或阴极),电路符号中的箭头方向表示正向电流的流通方向。

按 PN 结面积的大小,半导体二极管可分为点接触型和面接触型两类。点接触型二极管是由一根很细的金属触丝(如三价元素铝)和一块 N 型半导体(如锗)的表面接触,然后在正方向通过很大的瞬时电流,使触丝和半导体牢固地熔接在一起,三价金属与锗结合构成 PN 结,如图 1.2.1(c)所示。由于点接触型二极管金属丝很细,形成的 PN 结面积很小,所以它不能承受大的电流和高的反向电压,由于极间电容很小,所以这类管子适用于高频电路,例如 2AP1 是点接触型锗二极管,其最大整流电流为 16mA,最高工作频率为 150MHz,但最高反向工作电压只有 20V。

面接触型或称面结型二极管的 PN 结是用合金法或扩散法做成的,其结构如图 1.2.1(d)所示。由于这种二极管的 PN 结面积大,可承受较大的电流,但极间电容较大,这类器件适用于低频电路,主要用于整流电路。例如 2CZ53C 为面接触型硅二极管,其最大整流电流为 300mA,最大反向工作电压为 100V,而最高工作频率只有 3kHz。

图 1.2.1(e)所示是硅工艺平面型二极管的结构图,它是集成电路中常见的一种形式。

1.2.2 二极管的伏安特性

二极管由一个 PN 结构成,因此,它同样具有单向导电特性。在外加电压 u_D 的作用下,二极管电流 i_D 的变化规律如图 1.2.2 所示,它称为二极管的伏安特性曲线。其数学表达式近似为

$$i_D = I_S(e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1) \quad (1.2.1)$$

$$U_T = kT/q \quad (1.2.2)$$

式中, I_S 为二极管的反向饱和电流,单位为 A; $k = 1.380 \times 10^{-23}$ J/K, 为玻耳兹曼常数; T 为热力学温度,单位为 K; $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C, 为电子电量; U_T 称为温度电压当量,在常温 ($T = 300$ K) 下, $U_T \approx 26$ mV。

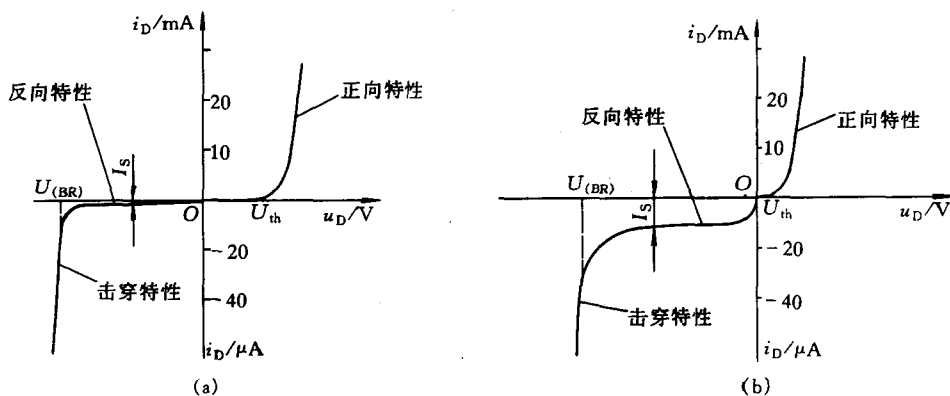


图 1.2.2 二极管的伏安特性曲线

(a) 硅二极管 (b) 锗二极管

当外加正向电压小于 U_{th} 时,外电场不足以克服 PN 结的内电场对多子扩散运动造成的阻力,正向电流几乎为零,二极管呈现为一个大电阻,好像有一个门坎,因此将电压 U_{th} 称为门坎电压(又称死区电压)。在室温下硅管 $U_{th} \approx 0.5$ V,锗管 $U_{th} \approx 0.1$ V。当外加正向电压大于 U_{th} 后,