



21st CENTURY

实用规划教材

21世纪全国高职高专
电子信息系列实用规划教材

模拟电子技术 及应用

主 编 刁修睦 杜保强
副主编 高金玉 钟绵章



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国高职高专电子信息系列实用规划教材

模拟电子技术及应用

主 编 刁修睦 杜保强
副主编 高金玉 钟绵章
参 编 左绪宗 陈金艳 马梅娟



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书是为了适应当前模拟电子技术基础课程的教学改革而编写的,全书分为2篇,共10章。第1篇为理论篇,主要内容包括半导体二极管及应用、半导体三极管及应用、常见实用单元电路、多级放大电路、放大电路中的反馈、信号产生与变换电路、直流稳压电源、电子设计与仿真技术简介;第2篇为实训篇,内容包括电子实训和模拟电子技术仿真实训。

本书可作为高职高专院校、成人高校、本科院校主办的二级学院和民办高校的电气、自动化、电子、通信、机电一体化、计算机等专业的教材,也可作为相关专业的自考教材,还可供从事电子技术方面工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术及应用/刁修睦,杜保强主编. —北京:北京大学出版社,2008.6

(21世纪全国高职高专电子信息系列实用规划教材)

ISBN 978-7-301-13572-3

I. 模… II. ①刁…②杜… 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045117号

书 名: 模拟电子技术及应用

著作责任者: 刁修睦 杜保强 主编

策划编辑: 赖 青

责任编辑: 李娉婷

标准书号: ISBN 978-7-301-13572-3/TM·0021

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路205号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电 子 邮 箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 北京飞达印刷有限责任公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 17.75印张 405千字

2008年6月第1版 2008年6月第1次印刷

定 价: 28.00元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

本书按照电气信息类教学大纲的要求，并考虑到目前高职高专的教学实际，由长期担任电子技术课程理论教学、实验和实训的一线教师参与编写而成。

1. 总体方案

本书分两篇，第1篇为理论部分，第2篇为实训部分，以突出简明性、实用性、可行性和可操作性。

2. 具体思路

对于高职教材的编写原则及高职教育的培养目标，大家是有共识的，如何将其落到实处是广大教育工作者都感到头疼的事，真可谓说起来容易，做起来难。在本书编写中，我们力图做到以下3个方面。

1) 简明

所谓简明，就是要用有限的篇幅，讲清楚规定的内容。在讲述电路原理时，一方面尽可能用初等方法，避免用较高深的数学知识，避免繁琐的推导；另一方面又要讲清楚具体电路的结构、功能及主要参数，为实验实训提供理论依据，以方便学生应用，使理论部分同时具备参考资料的特点。

2) 实用

实用性是高职教学最应突出的特点之一。实训内容分为两部分：第一部分为以实用为主的实际操作部分，即以基本理论为依据，精选生产、生活中的实例，进行实际制作，抛砖引玉，旨在培养动手能力；第二部分为以验证理论为主的仿真部分，该部分以仿真软件Multisim为主要工具，借助计算机平台，对基本原理进行仿真验证，一方面加深学生对理论部分的理解，另一方面使学生对EDA技术有个初步的了解，为进一步学习打下基础。

3) 抓住联系，明确重点

放大电路是贯穿整个课程始终的核心内容，各种放大电路之间并不是孤立的，找出它们之间的联系，使之成为统一的整体，也是编写本书的一点尝试。本书首先精讲基本放大器的结构和原理，然后由基本电路引出一系列实用电路。对基本电路，在明确电路结构的基础上，重点介绍分析的方法；对实用电路，主要讲明其特点和具体应用，对工作原理和分析方法只作一般介绍。讲原理以分立元件为主，讲应用以集成电路为主。练习题尽量做到少而精，并着力突出实际应用。

理论要应用于实践，不一定要太大的深度，以够用为度，但需要有必要的广度。为此，在编写理论部分的内容时，还坚持了以下原则：以低频为主，同时兼顾高频，如在放大电路中增加调谐放大部分；以弱电为主，同时兼顾强电，如在晶体管原理中增加了晶闸管部分的内容；以线性电路为主，同时兼顾非线性电路，如对三极管部分增加开关驱动电路应用部分，对运放电路应用增加了比较电路的应用部分；循序渐进，由简单到复杂，由

分离到集成,由开环到闭环,由仿真到实训。

为了增强实用性,在附录部分给出常见元件的标识方法、主要参数及封装形式。书中标“*”的内容为选学内容,教师可根据情况取舍。

电子技术是电路分析的后续课程,读者对电路分析的有关知识要熟悉,具体包括欧姆定律、基尔霍夫定律、叠加原理、受控源电路、正弦交流电路的相量分析等内容。

本书由山东潍坊学院刁修睦和河南职业技术学院杜保强主编,参加编写的人员有杜保强(第6章、第9章)、山东信息职业技术学院高金玉(第4章4.1~4.2、第7章、附录)、山东经贸职业学院钟绵章(第5章)、武汉工交职业技术学院左绪宗(第1章、第2章2.1)、潍坊教育学院陈金艳(第2章2.2~2.6)、潍坊学院马梅娟(第10章)和刁修睦(第3章、第4章4.3、第8章)。全书由刁修睦统稿。本书的编写得到了山东信息职业技术学院巩志强院长及潍坊学院信息与控制工程学院王玉梅院长的大力支持,潍坊学院的夏克祖、郑兆聚、张振龙、王瑞兰和潍坊教育学院于学厚等教授对本书的编写提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢!

模拟电子技术是理论与实践并重的学科,在加强理论教学的同时,必须充分注重实验和实训,并有意识地引导学生关注相关学科发展的前沿,培养良好的专业科学素养。

本书建议授课学时为90学时,其中基础理论授课50学时,仿真及实训40学时。如果课时紧张,可考虑将实训部分内容放到下一学期开设。各章的参考教学时数如下表所示。

章 次	建议学时	章 次	建议学时
第1章 半导体二极管及应用	4	第6章 信号产生与变换电路	6
第2章 半导体三极管及应用	8	第7章 直流稳压电源	6
第3章 常见实用单元电路	12	第8章 电子设计与仿真技术简介	4
第4章 多级放大电路	6	第9章 电子实训	24
第5章 放大电路中的反馈	8	第10章 模拟电子技术仿真实训	12

由于编者水平有限,书中疏漏之处在所难免,恳请各位读者批评指正。

编 者

2008年4月

模拟电子技术基础符号说明

1. 字母含义

A 、 \dot{A} 放大倍数或增益的通用符号（不带点表示只考虑大小，不考虑极性；带点表示考虑极性）

\dot{A}_{uu} 电压放大倍数或增益（第一个下标为输出量，第二个下标为输入量， \dot{A}_{ui} 、 \dot{A}_{ii} 、 \dot{A}_{iu} 依次类推）

B 晶体管的基极

C 晶体管的集电极；电容

D 二极管；场效应管漏极

E 晶体管发射极

F 反馈系数通用符号

\dot{F}_{uu} 反馈系数符号（第一个下标为反馈量，第二个下标为输出量， \dot{F}_{ui} 、 \dot{F}_{ii} 、 \dot{F}_{iu} 依次类推）

f 频率

G 电导；场效应管栅极

g 微变电导

I 、 i 电流

K_{CMR} 共模抑制比

L 电感；自感系数

M 互感系数；乘法器

N 绕组匝数；电子型半导体

n 变压比；取样比

P 功率；空穴型半导体

Q 静态工作点；谐振电路品质因数

R 电阻

r 微变电阻

S 场效应管源极；脉动系数

T 周期；温度；晶体管

t 时间

T_r 变压器

U 、 u 电压

V_{CC} 直流电源

\dot{X} 、 X 反馈电路中的信号量

Y 导纳

Z 阻抗

α 共基极电流放大系数

β 共集电极电流放大系数

τ 时间常数

η 效率

φ 相角

ω 角频率

2. 下标含义

当一个物理量有更明确的含义时，通常用下标进行区分。如 U 表示电压， U_i 表示输入电压， U_o 表示输出电压。通常，不同下标代表的含义如下。

b 表示基极；c 表示集电极或共模信号；d 表示漏极或差模信号；e 表示发射极；f 表示反馈；g 表示栅极；H 表示高；i 表示输入；L 表示低或负载；m 表示最大或中间；N 表示运放反相端；o 表示输出；P 表示运放同相端；s 表示信号源；u 表示电压；w 表示可调(如可调电阻 R_w)；z 表示稳压(如稳压二极管 VD_z)。

3. 电压电流信号字母代号及下标大小写不同组合的含义(以晶体管基极电流为例)

I_B 大写字母、大写下标表示基极直流电流

I_b 大写字母、小写下标表示基极正弦电流均方根值(有效值)

i_B 小写字母、大写下标表示包含直流分量的基极电流瞬时值

i_b 小写字母、小写下标表示基极电流交流分量的瞬时值

\dot{I}_b 表示基极正弦电流复数量

I_{BQ} 表示基极静态工作点电流

I_{bm} 表示基极正弦电流最大值

$I_{b(av)}$ 表示基极交变电流平均值

ΔI_B 表示基极直流电流变化量

Δi_B 表示基极瞬时电流变化量

目 录

第 1 篇 模拟电子技术理论	1	2.4.1 共集电极电路	35
第 1 章 半导体二极管及应用	1	2.4.2 共基极电路	37
1.1 半导体的基本知识	1	2.4.3 3 种组态的性能比较	38
1.1.1 本征半导体	1	2.5 场效应管及放大电路	38
1.1.2 杂质半导体	2	2.5.1 绝缘栅场效应管	39
1.1.3 PN 结的形成及特性	3	2.5.2 场效应管放大电路	42
1.2 半导体二极管	4	* 2.6 晶闸管及应用	44
1.2.1 二极管的结构与分类	4	2.6.1 晶闸管的结构及	
1.2.2 二极管的伏安特性	5	工作原理	44
1.2.3 二极管的主要参数	6	2.6.2 晶闸管的触发电路	48
1.2.4 二极管的等效电路	7	小结	51
1.2.5 特殊二极管	10	习题	52
1.3 二极管的应用	12	第 3 章 常见实用单元电路	56
1.3.1 整流与稳压	12	3.1 分压式射极偏置放大电路	56
1.3.2 其他应用	13	3.1.1 静态工作点稳定的	
小结	14	必要性	56
习题	14	3.1.2 分压式射极偏置	
第 2 章 半导体三极管及应用	17	放大电路	57
2.1 半导体三极管	17	3.2 差动放大电路	59
2.1.1 半导体三极管的结构及		3.2.1 差动放大电路的结构及	
工作原理	17	工作原理	59
2.1.2 半导体三极管的伏安		3.2.2 长尾式差动放大电路	62
特性曲线	20	3.3 功率放大电路	66
2.1.3 常用三极管	22	3.3.1 功率放大电路概述	66
2.2 基本共射放大电路的组成及		3.3.2 常见功率放大电路	67
工作原理	25	3.4 调谐放大电路	76
2.2.1 基本共射放大电路		3.4.1 LC 并联谐振回路的	
的组成	25	选频特性	76
2.2.2 基本共射放大电路的		3.4.2 单调谐放大电路	80
工作原理	26	3.5 电流源电路	81
2.3 放大电路的分析方法	29	小结	84
2.3.1 等效电路法	29	习题	85
2.3.2 图解法	31	第 4 章 多级放大电路	88
2.4 共集电极电路和共基极电路	34	4.1 分离元件多级放大电路	88
		4.1.1 多级放大电路的	

耦合方式	88	6.1.2 RC 正弦波振荡电路	137
4.1.2 多级放大电路的分析	91	6.1.3 LC 正弦波振荡电路	141
4.2 集成多级放大电路	93	6.1.4 石英晶体正弦波 振荡电路	144
4.2.1 集成运算放大电路	93	6.2 非正弦波振荡电路	146
4.2.2 集成功率放大电路	96	6.2.1 信号比较电路	146
4.3 放大电路的频率响应	100	6.2.2 非正弦波振荡电路	151
4.3.1 频率响应概述	100	小结	152
4.3.2 单管放大电路的 频率响应	104	习题	153
4.3.3 调谐放大电路的 频率特性	108	第 7 章 直流稳压电源	156
4.3.4 多级放大电路的 频率特性	109	7.1 概述	156
小结	110	7.1.1 稳压电源的组成	156
习题	111	7.1.2 稳压电源的主要 技术指标	157
第 5 章 放大电路中的反馈	113	7.2 整流电路	158
5.1 反馈的基本概念及分类	113	7.2.1 单相半波整流电路	158
5.1.1 反馈的概念及分类	113	7.2.2 单相桥式整流电路	159
5.1.2 反馈的判别方法	115	7.2.3 单相全波整流电路	160
5.2 负反馈放大电路	118	7.3 滤波电路	160
5.2.1 负反馈对放大电路性能 的影响	118	7.3.1 电容滤波电路	161
5.2.2 负反馈放大电路的 分析计算	121	7.3.2 倍压整流电路	161
5.3 负反馈在集成运放中的应用	125	7.3.3 其他形式滤波电路	162
5.3.1 比例运算电路	125	7.4 线性稳压电路	162
5.3.2 加减运算电路	127	7.4.1 串联型稳压电路	163
5.3.3 微分与积分电路	129	7.4.2 集成稳压器	165
* 5.4 负反馈电路的稳定问题	130	7.5 开关式稳压电路	168
5.4.1 负反馈放大电路产生自激 振荡的原因及条件	130	7.5.1 概述	168
5.4.2 负反馈放大电路稳定性的 定性分析	131	7.5.2 串联开关电源	170
5.4.3 负反馈放大电路稳定性 的判断	131	7.5.3 并联开关电源	171
小结	132	* 7.6 电源的保护	173
习题	133	7.6.1 过流保护	173
第 6 章 信号产生与变换电路	136	7.6.2 过压保护	174
6.1 正弦波振荡电路	136	7.6.3 其他保护电路	174
6.1.1 产生正弦波振荡 的条件	136	小结	174
		习题	175
		第 8 章 电子设计与仿真技术简介	180
		8.1 电子设计方法及应用	180
		8.1.1 电子设计的发展历程	180
		8.1.2 常用电子设计 工具(软件)	181

8.1.3 EDA 的应用	182	9.8 逻辑测试器的制作	229
8.2 Multisim 9.0 简介	183	9.9 电风扇温控开关的制作	231
8.2.1 Multisim 9.0 的 主要特点	183	9.10 声光控延时照明电路的制作 ...	234
8.2.2 Multisim 9.0 的 主窗口	184	9.11 直流稳压电源的装配	237
8.3 用 Multisim 9.0 对放大电路 进行仿真分析	191	第 10 章 模拟电子技术仿真实训	242
小结	202	10.1 分压式负反馈偏置共射 基本电路	242
习题	203	10.2 差动放大电路	244
第 2 篇 模拟电子技术实训	205	10.3 负反馈放大电路	246
第 9 章 电子实训	205	10.4 基本运算电路	248
9.1 常用电子仪器的使用与操作	205	10.5 功率放大电路	250
9.2 焊接基本操作	213	10.6 RC 桥式振荡器	252
9.3 半导体器件的检测	217	10.7 直流稳压电源	253
9.4 台灯调光电路的制作	221	附录 A 半导体器件型号与符号 的意义	256
9.5 光控音乐门铃的制作	223	附录 B 集成电路的型号命名方法 ...	261
9.6 高保真双声道音频功率放大 电路的制作	225	附录 C 常见半导体器件的 主要参数	265
9.7 熄火报警电路的制作	227	附录 D 常见晶体管外形及封装	268
		参考文献	270

第 1 篇 模拟电子技术理论

第 1 章 半导体二极管及应用

半导体器件具有体积小、重量轻、使用寿命长、能量转换效率高等优点，是现代电子技术中广泛应用的器件。本章在阐述半导体基本知识的基础上，主要介绍半导体二极管的结构、特性曲线、主要参数，特殊二极管以及二极管在电子技术中的应用。

1.1 半导体的基本知识

自然界的物体按其导电能力的强弱可分为导体、半导体和绝缘体 3 大类。导体如金、银、铜、铝等，其内部存在大量摆脱了原子核束缚的自由电子，在外电场的作用下，这些自由电子将作定向运动而形成较大的电流，因此导体的导电能力很强。绝缘体如云母、塑料、工业橡胶等，其原子核对最外层电子的束缚力很大，常温下自由电子很少，因此导电能力很差。

半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间，常用的半导体材料有硅(Si)、锗(Ge)、硒(Se)、砷化镓(CaAs)以及一些金属氧化物和硫化物等。半导体一般呈晶体结构，其原子核对价电子的束缚较弱，当半导体受到外界光和热的刺激时，它便释放价电子，从而使导电能力发生变化。例如纯净的锗从 20℃ 升高到 30℃ 时，它的电阻率几乎减小为原来的 1/2。又如一种硫化镉薄膜，在暗处其电阻为几十兆欧姆，受光照后，电阻可以下降到几十千欧姆，只有原来的百分之一。利用半导体的这些敏感性可制成各种光敏元件和热敏元件。若在纯净的半导体中加入微量的杂质，则半导体的导电能力会有更显著的增加，例如在半导体硅中，只要掺入亿分之一的硼，电阻率就会下降到原来的几万分之一，这是半导体最显著的导电特征。利用这个特性可制造出各种半导体器件。

半导体具有上述特性，其根本原因在于其特殊的原子结构和导电机理。

1.1.1 本征半导体

纯净的、晶体结构排列整齐的半导体叫做本征半导体。例如，硅、锗最外层都是 4 个价电子，原子的价电子不仅受到自身原子核的束缚，而且还受到相邻原子核的吸引，即一个价电子为相邻的两个原子核所共有。这种按四角形组成的晶体点阵，称为“共价键”结构。硅或锗简化的原子结构模型如图 1.1 所示。共价键中的电子受到共价键的束缚，但是在一定的温度下，其中一部分电子会因为受热而得到足够的能量以摆脱共价键的束缚成为自由电子，结果在原来的共价键中便留下了一个空位，称这种空位为空穴。这种现象叫做热激发，也叫本征激发。在本征半导体中，由于热激发作用，每出来一个电子，就会留下一个空穴。在外电场或其他能源的作用下，相邻的价电子可以填补到这个空穴上，而在这个电子的位置上又留下新的空穴，新的空穴又会被其相邻的其他价电子填补，由此可见，自由电子和空穴总是

成对地产生或成对地消失，故在半导体中存在两种载流子：带负电的自由电子和带正电的空穴，自由电子和空穴运动的方向正好相反，这是半导体导电方式的最大特点，也是半导体与金属导体在导电机理上的本质差别^①。本征激发产生的电子空穴对如图 1.2 所示。

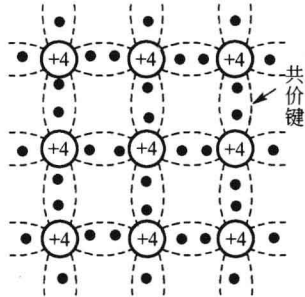


图 1.1 共价键结构

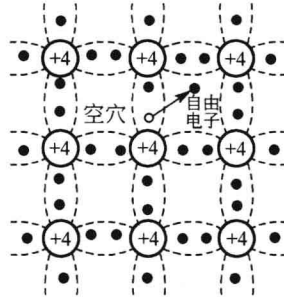


图 1.2 本征激发

一般在室温下，纯硅中的自由电子浓度 n 和空穴浓度 p 约为 $n = p \approx 1.5 \times 10^{10}$ 个/cm³，纯锗中的自由电子浓度 n 和空穴浓度 p 约为 $n = p \approx 2.5 \times 10^{13}$ 个/cm³，而金属导体中的自由电子浓度约为 10^{22} 个/cm³。由此可知，本征半导体的导电能力是很差的。

1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中掺入某种微量元素(杂质)后，导电能力可增加几十万倍甚至几百万倍。根据掺入杂质的不同，可分为 P 型(空穴型)半导体和 N 型(电子型)半导体，控制掺入杂质元素的浓度，就可以控制杂质半导体的导电性能。

1. P 型半导体

在纯净的硅(或锗)中掺入微量硼(或其他三价元素)，由于硼原子数量较少，不能改变硅的共价键结构。掺入的硼原子会占据一个硅原子原来的位置，并与相邻硅原子形成共价键，硼因缺少一个电子而成为不稳定结构，它很容易捕获一个电子而成为具有稳定结构的负离子。当硼捕获的这个电子是相邻某个硅原子的价电子时，必然产生一个空穴，这样每掺入一个三价元素，在杂质半导体中便产生一个空穴和一个杂质负离子，如图 1.3(a)所示。杂质负离子不能移动所以不能参与导电，空穴导电为这种杂质半导体主要的导电方式，故称这种杂质半导体为空穴型半导体，即 P 型半导体。在这种杂质半导体中，空穴为多数载流子，由掺杂和热激发产生。自由电子为少数载流子，仅由热激发产生。P 型半导体结构示意图

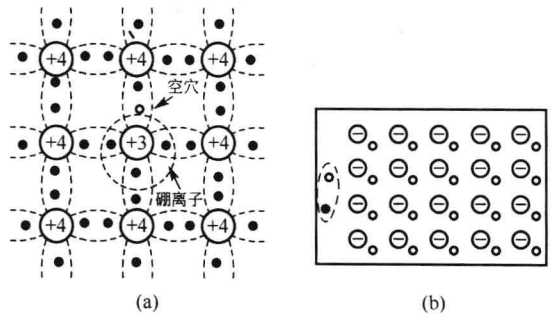


图 1.3 P 型半导体的结构 (a) 形成过程；(b) 结构示意图

^① 事实上，空穴只是为了解决问题的方便假想出来的一种载流子，空穴导电的实质是部分价电子参与导电的逆运动。

如图 1.3(b)所示。图中白色小圆点代表空穴，黑色小圆点代表自由电子，中间带负号的大圆点代表杂质负离子。

2. N 型半导体

在本征硅(或锗)中掺入微量磷(或其他五价元素), 掺杂的结果是每掺入一个五价元素, 就会产生一个不导电的杂质正离子和一个自由电子, 如图 1.4(a)所示。这样在杂质半导体中自由电子数目大大增加, 自由电子导电为这种杂质半导体主要的导电方式, 故也称这种杂质半导体为电子型半导体, 即 N 型半导体。在 N 型半导体自由电子为多数载流子, 而空穴为少数载流子, 其结构示意图如图 1.4(b)所示。中间带正号的大圆点代表杂质正离子。

无论是 P 型半导体还是 N 型半导体, 虽然它们都有一种载流子占多数, 但总体上仍然保持电中性。在外电场的作用下, 杂质半导体的导电能力有了较大的增强, 但是只有将两种杂质半导体做成 PN 结之后才能成为半导体器件。

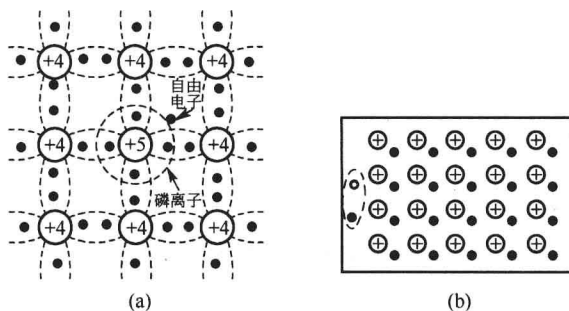


图 1.4 N 型半导体的结构
(a) 形成过程; (b) 结构示意图

1.1.3 PN 结的形成及特性

1. PN 结的形成

当 P 型半导体和 N 型半导体结合在一起时, 由于交界面两侧多数载流子浓度的差别, N 区的多数载流子电子向 P 区扩散, P 区的多数载流子空穴也要向 N 区扩散, 于是电子与空穴复合, 在交界面附近 P 区一侧因复合失去空穴而形成负离子区, N 区一侧也因复合失去电子而形成正离子区。这些不能移动的带电离子形成了空间电荷区, 称为 PN 结。显然, PN 结内存在一个由 N 区指向 P 区的内电场。内电场的形成将阻止多数载流子的继续扩散, 另一方面又会促进少数载流子的漂移, 即 N 区的少数载流子空穴向 P 区移动, P 区的少数载流子电子向 N 区移动。因此, 在交界面两侧存在两种对立的运动, 漂移运动欲使 PN 结变窄, 扩散运动欲使 PN 结变宽。当扩散运动产生的扩散电流和漂移运动产生的漂移电流大小相等, 两种运动达到动态平衡时, PN 结宽度不再变化, 即 PN 结维持一定的宽度(其宽度为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ cm)。PN 结的形成如图 1.5 所示。由于内电场的存在, 使载流子几乎不能在 PN 结内部停留, 所以 PN 结也称为耗尽层。

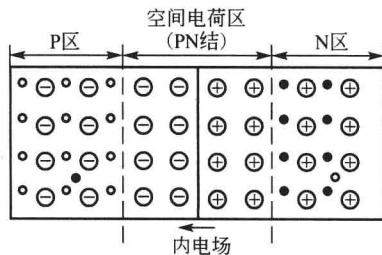


图 1.5 PN 结的形成

2. PN 结的单向导电性

无外加电压时, PN 结处于平衡状态, 流过 PN 结的总电流为零。当 PN 结外加电压时, PN 结呈现单向导电性, 这是 PN 结最基本的特性。

1) 加正向电压时导通

PN 结的 P 区接高电位，N 区接低电位，称为正向接法或正向偏置(简称正偏)。正偏时，外电场与内电场方向相反，因此削弱了内电场，PN 结原有平衡状态被打破，空间电荷区变窄，结果是有利于多数载流子的扩散，而不利于少数载流子的漂移。PN 结中多数载流子的扩散电流通过回路形成正向电流 I_F 。其方向是从 P 区到 N 区。当外加电压增加到一定数值之后，正向电流将呈指数式上升，此时 PN 结对外电路呈现很小的电阻，称为导通。加正向电压时的 PN 结如图 1.6 所示。

2) 加反向电压时截止

将 PN 结的 P 区接低电位，N 区接高电位，称为反向接法或反向偏置(简称反偏)。反偏时，内电场被加强，空间电荷区变宽，结果是有利于少数载流子的漂移，而不利于多数载流子的扩散。PN 结中的电流主要是漂移电流(称为反向电流 I_R)，其方向是从 N 区到 P 区。由于少数载流子的浓度很低，所以反向电流很小，一般为微安数量级。反向电流几乎不随外加反向电压而变化，故又称为反向饱和电流 I_S 。反偏时，PN 结对外电路呈现很大的电阻，此时称为截止。少数载流子的浓度由温度决定，因此，PN 结反向电流的大小受温度的影响明显。加反向电压时的 PN 结如图 1.7 所示。

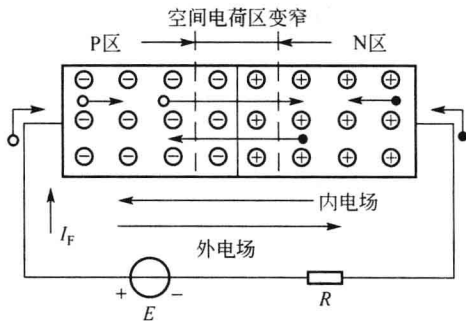


图 1.6 加正向电压时 PN 结导通

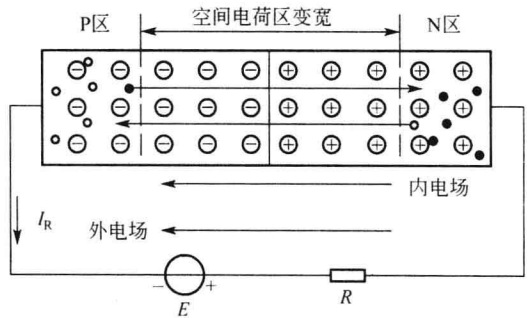


图 1.7 加反向电压时 PN 结截止

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的结构与分类

1. 二极管的结构

以 PN 结为管芯，在 PN 结的两侧接上电极引线，并以外壳(金属、塑料或玻璃)封装，就制成了半导体二极管。由 P 区引出的电极称正极(或阳极)，由 N 区引出的电极称负极(或阴极)。电路符号中的箭头方向表示正向电流的方向。其结构示意和电路符号如图 1.8 所示。

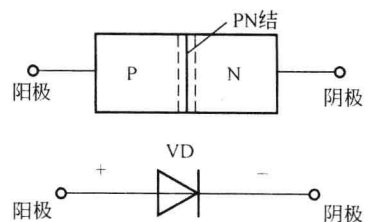


图 1.8 二极管的结构及电路符号

2. 二极管的分类

半导体二极管类型很多，按结构分，有点接触型和面

接触型两类。点接触型二极管的结构如图 1.9 所示。由于点接触型二极管 PN 结的结面积很小，所以不能承受高的反向电压和通过较大的电流，一般在几十毫安以下。但点接触型二极管高频特性好，适用于高频电路，也用作数字电路中的开关元件。面接触型二极管结构如图 1.10 所示。面接触型二极管结面积比较大，允许通过的电流大，可达几百毫安至 1kA，适用于整流，但由于其极间电容大，故只宜用于低频电路。

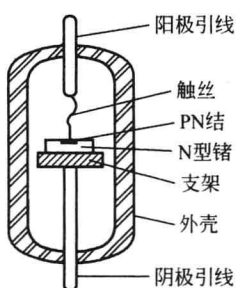


图 1.9 点接触型二极管

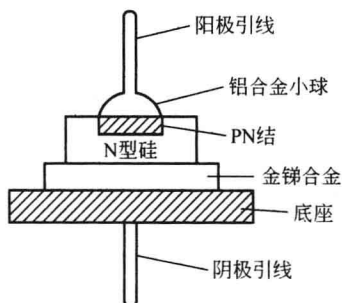


图 1.10 面接触型二极管

二极管按制作材料的不同，分为硅二极管和锗二极管。锗二极管一般为小功率管，大功率的整流元件一般采用硅材料，为了有利于散热和安装方便，采用螺栓结构。一般来说，外形越大，功率也越大。

按用途分，二极管又有整流管、检波管、开关管、稳压管等。二极管根据其外形、结构、材料、功率和用途分成各种类型。国产的不同类型的管子都按国家标准来命名(参见附录 A)。

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。二极管两端的电压 u_d 和流过它的电流 i_d 之间的关系曲线，称为伏安特性曲线。伏安特性曲线可由晶体管测量仪直接显示出来，也可用实验逐点测绘而得。采用伏安特性来分析通常比较方便。图 1.11 是由实验测得的某硅二极管的伏安特性曲线。

1. 正向特性

当外加正向电压很低时，由于外电场还不足以克服 PN 结内电场对多数载流子扩散运动的阻力，故正向电流几乎为零，这一段对应着曲线的起始部分 OA。在二极管伏安特性曲线上，电流基本为零的区域叫做“死区”，对应的电压叫做“死区电压” U_{th} ，二极管呈现为一个电阻，好像有一个门槛，因此电压 U_{th} 也称为门槛电压。硅管的死区电压为 $0 \sim 0.5V$ ；锗管的死区电压为 $0 \sim 0.1V$ 。当外加正向电压超过一定数值后，内电场被削弱，这一段对应着曲线的弯曲部分 AB。此后，正向电压只要有微小的增加，内建电场被大大削弱，电流增加很快，它对应着正向特性曲线的陡直部分 BC。通常所说的二极管正向导通，即指这种状态，这段区域叫做“导通区”，二极管正常导

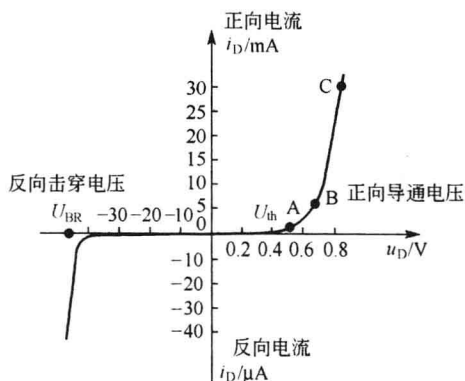


图 1.11 某硅二极管的伏安特性曲线

通时,小功率硅管正向压降为 $0.6\sim 0.7\text{V}$,锗管正向压降为 $0.2\sim 0.3\text{V}$,上述经验数据常作为小功率二极管正向工作时两端压降的估算值,用 $U_{\text{D(ON)}}$ 表示。由于二极管的正向压降只有零点几伏,相对来说流过管子的电流却很大,因此管子的正向电阻很小,处于导通状态。

2. 反向特性

当二极管加反向电压,且满足 $U_{\text{BR}} < U < 0$ 时,有微小反向电流通过。当反向电压在某一范围内增加时,反向电流的大小基本不变,通常称它为反向饱和电流。这是因为反向电压达到一定值后,几乎所有的少子都参与了漂移,反向电压再增加,也不能再增加少子的浓度。这时,二极管呈现很大的反向电阻,处于截止状态。在二极管伏安特性曲线上,把这段区域叫做“反向截止区”。

3. 反向击穿特性

当外加反向电压过高, $U \geq U_{\text{BR}}$ 时,反向电流将急剧增加,二极管失去单向导电性,这种现象称为“反向击穿”。对应的这段区域叫做“反向击穿区”。 U_{BR} 称为反向击穿电压,二极管反向击穿后,反向电流很大,电压又很高,因而消耗在PN结上的功率很大,使PN结温度升高,从而使反向电流更加增大,很容易造成PN结过热而烧坏。

发生击穿的原因,一种是外加的强电场使PN结中的少数载流子获得足够的动能,去碰撞晶格,从而将价电子碰撞出来,产生电子空穴对,新产生的载流子在电场作用下又通过碰撞,产生更多的电子空穴对。这种作用如同雪崩一样,反向电流越来越大,最后使二极管反向击穿,这种击穿称为雪崩击穿。另一种原因是,强电场直接将共价键中的价电子拉出来,产生电子空穴对,形成较大的反向电流,此种击穿称为齐纳击穿。各类二极管的反向击穿电压大小不同,通常为几十伏到几百伏。上述两种电击穿过程在一定前提下是可逆的,即当反向电压降低后,管子仍可恢复到原来的状态,这个前提条件就是反向电流和反向电压的乘积不超过PN结容许的耗散功率。二极管反向击穿后,通过的电流可以有很大的变化,但其两端电压几乎不变,具有稳压性。稳压二极管正是利用此特点工作的。

4. 二极管的温度特性

半导体具有热敏性,温度变化容易造成半导体器件工作不稳定,温度对半导体器件的影响是不可小视的。

在图1.12所示的正向特性中,对于同一电流,温度每升高 1°C ,二极管的正向压降将减小 $2\sim 2.5\text{mV}$ 。即二极管的正向特性曲线将随温度的升高而左移。反向特性中,当温度每升高 10°C ,反向饱和电流 I_{S} 将增加一倍。二极管的反向击穿电压也受温度的影响。

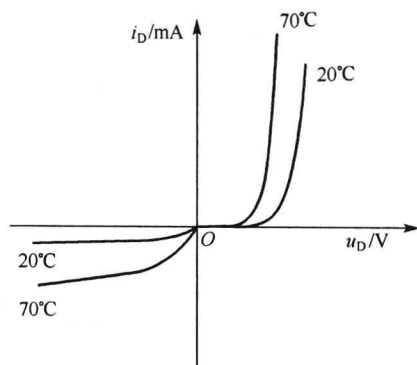


图 1.12 二极管的温度特性曲线

1.2.3 二极管的主要参数

1. 最大整流电流 I_{F}

最大整流电流 I_{F} 是指二极管在一定温度下,长期允许通过的最大正向平均电流,使

用时若超过此值,有可能使二极管因过热而损坏。点接触型二极管的最大整流电流在几十毫安以下,如2AP1, $I_F=16\text{mA}$ 。面接触型二极管的最大整流电流较大,如2CP10硅二极管的最大整流电流为100mA。对于大功率二极管,必须加装散热装置。

2. 最高反向工作电压 U_{RM}

最高反向工作电压 U_{RM} 约为反向击穿电压 U_{BR} 的一半,以保证二极管正常工作的余量。如2CP10硅二极管的 U_{RM} 为25V,其 U_{BR} 为50V。点接触型二极管的 U_{RM} 一般是数十伏,面接触型可达数百伏。

3. 反向电流(反向饱和电流) I_R

反向电流(反向饱和电流) I_R 是指在室温和规定的反向工作电压下(管子未击穿时)的反向电流。此值越小,管子的单向导电性就越好。

4. 最高工作频率 f_M

最高工作频率 f_M 是指保证二极管具有单向导电作用时允许的最高工作频率。当工作频率超过 f_M 时,二极管的单向导电性能就会变差,甚至失去单向导电特性。这是由于PN结具有电容效应的原因, f_M 主要决定于PN结电容的大小,PN结越小, f_M 越大,点接触型锗管PN结面积比较小,其最高工作频率可达数百兆赫[兹],而面接触型硅整流二极管的PN结等效电容大,其最高工作频率只有3kHz。

综上所述,二极管元件的伏安特性可用公式法、参数法、特性曲线法3种方法来表示。公式法的特点是便于定量分析计算;参数法描述元件的特性简单、明了,但是只能描述简单的静态特性,无法反映两个变量之间的关系;特性曲线法则可以比较全面而直观地反映元件的特性,特别是变量之间的关系,信息量最大。

1.2.4 二极管的等效电路

二极管的伏安特性具有非线性,这给二极管应用电路的分析带来一定的困难。为了简化分析,降低计算难度,常在一定条件下用线性元件代替二极管。能在一定条件下模拟二极管特性的电路称为二极管的等效电路(或等效模型)。

1. 理想模型

将二极管的单向导电特性理想化,忽略其导通电压,认为正偏二极管的管压降为0V,视导通的二极管为闭合的开关;而当二极管处于反偏状态时,忽略其反向电流,认为二极管的等效电阻为无穷大,反向电流为0V,视截止的二极管为断开的开关,如图1.13所示。在分析电路时,理想二极管可用开关S来等效,正偏时S闭合,反偏时S断开,这一特性称为理想二极管的开关特性。一般在电源电压远大于二极管的导通压降时,利用理想模型来分析,不会产生较大的误差。

2. 恒压降模型

恒压降模型如图1.14所示。其反偏模型还是理想模型,但认为二极管正偏导通后的管压降是一个恒定值,对于硅管和锗管来说,分别取0.7V和0.3V的典型值。这个模型比理想模型更接近实际情况,因此应用比较广泛,一般在二极管电流大于1mA时,恒压降模型的近似精度是相当高的。