

高等院校电子信息类专业规划教材

模拟电子技术基础

MONI DIANZI JISHU JICHU

主 编 吴 拓

副主编 易亚军 刘素梅



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

高等院校电子信息类专业规划教材

模拟电子技术基础

吴 拓 主编

易亚军 刘素梅 副主编



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是为适应应用型本科教育的人才培养目标而编写的。主要内容有：半导体二极管和三极管、基本放大电路、功率放大器、直流放大器和集成运算放大器、负反馈放大器、直流稳压电源、正弦振荡器、常用电子仪器的操作及使用、模拟电子电路综合设计，书中配有一定量的思考与练习题并附有部分思考与练习题答案。内容简明扼要，深入浅出，重点突出，实用性强。以能力培养为重点，理论分析与应用实例相配合，以提高学生分析问题和解决问题的能力。

本书可作为高等院校电子信息类、自动化类、计算机类及机电一体化类等专业的专业基础课教材，也可供其他从事电子技术工作的工程技术人员参考。

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。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础 / 吴拓主编. —北京：电子工业出版社，2016.11

ISBN 978-7-121-29024-4

I. ①模… II. ①吴… 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(2016)第 128740 号

策划编辑：朱怀永

责任编辑：郝黎明

印 刷：三河市兴达印务有限公司

装 订：三河市兴达印务有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编：100036

开 本：787×1 092 1/16 印张：16 字数：460.8 千字

版 次：2016 年 11 月第 1 版

印 次：2016 年 11 月第 1 次印刷

定 价：35.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：(010) 88254608。

前 言

模拟电子技术作为电子技术的基础,曾经改写了人类历史,推动了人类历史的进步,尽管现在进入了数字化、信息化时代,但模拟电子技术仍然在科学技术的各个领域发挥着无可替代的作用。《模拟电子技术基础》是电子信息类、机电一体化类、自动化类、计算机类等专业的专业基础课程,也是实践性很强的技术基础课程,该课程对于培养学生的专业技能和创新能力凸显出极为重要的作用。

本书的编写是为了适应电子信息产业发展的需要,培养应用型本科专业技术人才而编写的。本书具有以下特点。

1. 培养具有较强职业能力的应用型人才的目标明确

遵循教育部对“电子技术基础课程”的基本要求,本着“宽口径、厚基础、重实践,够用为度”的原则,本书围绕“培养有一定理论基础,有较强实操能力,有足够创新意识的应用型人才”这一目标,整合和优化教学内容。

2. 实施以能力培养为重点的“教-学-做”一体化教学模式

为了达到理论联系实际、增强实践教学环节的目的,本书实施“教-学-做”一体化教学模式,按照四大模块即清晰的教学导航、系统的理论知识、足够的实操训练、必要的应用示例来编写,知识目标和能力目标明确、重点和难点突出,以期达到以能力培养为重点的最佳效果。

3. 加强实操训练以满足岗位就业对专业技能的需要

为了满足许多岗位对就业人员的数字电子技术与技能提出的新要求,本书精心编录了12个模拟电子技术实操训练项目,特别介绍了常用电子仪器的操作及使用,期望通过实操训练项目调动和激发学生自主获取相关知识和技能的积极性、主动性。

4. 内容新、精、齐,理论分析与应用实例相配合

编者力求出精品、力求创新,力求内容系统、科学、全面,吸收科技最新成果,对重点内容尤其是与生产实际联系紧密的内容进行细致的推理解析,理论分析与应用实例相配合,以期提高学生分析问题和解决问题的能力。

本书的主要内容有:半导体二极管和三极管、基本放大电路、功率放大器、直流放大器和集成运算放大器、负反馈放大器、直流稳压电源、正弦振荡器、常用电子仪器的操作及使用、模拟电子电路综合设计。书中配有一定量的思考与练习题并附有部分思考与练习题答案。内容简明扼要,深入浅出,思路清晰,重点突出,实用性强。

本书由吴拓教授任主编,易亚军、刘素梅任副主编;第1、2章由刘素梅编写,第3、4、5章由易亚军编写,第6章由刘伟慈编写,第7章由吴拓编写,第8章由杨博编写,第9章由罗俊编写,各章的实操训练由杨博编写;全书由吴拓教授进行统稿和定稿。

本书的编写得到了各界同仁的大力支持,在此谨致深深的谢意!

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏之处,恳请广大读者不吝指正。

编 者

2016年3月于广州

目 录

第 1 章 半导体二极管和三极管	1
1.1 半导体的基础知识	1
1.1.1 导体、绝缘体和半导体	1
1.1.2 半导体的晶体结构	1
1.1.3 本征半导体的导电特性	2
1.1.4 杂质半导体	3
1.1.5 PN 结的形成及其特性	4
1.2 半导体二极管	6
1.2.1 半导体二极管的结构	6
1.2.2 二极管的伏安特性	7
1.2.3 二极管的主要参数	8
1.2.4 稳压二极管	8
1.3 半导体三极管	9
1.3.1 晶体管的结构及其内部物理过程	9
1.3.2 晶体管的电流分配关系和放大作用	11
1.3.3 晶体管的伏安特性曲线	13
1.3.4 晶体管的主要参数	15
1.3.5 温度对晶体管参数的影响	16
1.4 场效应管	16
1.4.1 结型场效应管	17
1.4.2 绝缘栅型场效应管	19
1.4.3 场效应管的参数及使用注意事项	19
1.5 应用实例	20
1.6 实操训练	21
实操训练一：半导体晶体管的特性研究	21
思考与练习题	24
第 2 章 基本放大电路	27
2.1 基本放大电路的组成及工作原理	27
2.1.1 半导体放大电路的三种接法	28
2.1.2 共射极放大电路的组成	28
2.1.3 共射极放大电路的工作原理	28
2.1.4 静态工作点的设置	30
2.1.5 主要性能指标	30
2.1.6 场效应管放大电路	33

2.2	放大电路的基本分析方法	38
2.2.1	直流通路和交流通路	38
2.2.2	图解分析法	39
2.2.3	微变等效电路法	43
2.3	放大电路的特性	48
2.3.1	温度对静态工作点的影响	48
2.3.2	频率特性和失真概念	48
2.3.3	单级阻容耦合放大电路频率特性分析	50
2.4	多级放大电路	55
2.4.1	级间耦合方式	55
2.4.2	多级放大电路电压放大倍数的计算	58
2.4.3	多级放大电路的频率特性	59
2.5	应用实例	60
2.6	实操训练	60
	实操训练二: 单级共射极放大电路	60
	实操训练三: 共集电极放大电路	62
	实操训练四: 多级放大电路	64
	实操训练五: JFET 共源极放大电路	66
	思考与练习题	68
第3章	功率放大器	73
3.1	概述	73
3.1.1	功率放大器的特点	73
3.1.2	功率放大器的分类	74
3.2	单管甲类功率放大器	74
3.2.1	单管甲类功率放大器电路组成与工作原理	74
3.2.2	单管甲类功率放大器的功率与效率	75
3.3	变压器耦合乙类推挽功率放大器	76
3.3.1	变压器耦合乙类推挽功率放大器工作原理	76
3.3.2	乙类推挽功率放大器的图解分析	76
3.4	无变压器耦合的功率放大器	77
3.4.1	概述	77
3.4.2	互补对称式 OTL 电路	78
3.4.3	准互补对称式 OTL 电路	78
3.4.4	互补对称式 OCL 电路	78
3.5	应用实例	81
3.6	实操训练	82
	实操训练六: 功率放大电路	82
	思考与练习题	84

第4章	直流放大器和集成运算放大器	88
4.1	直流放大器的特点	88
4.1.1	多级放大电路的耦合方式	88
4.1.2	多级放大电路性能指标的估算	90
4.2	差动放大器	92
4.2.1	简单的差动放大器	92
4.2.2	射极耦合差动放大器	95
4.2.3	差动放大器的改进	95
4.3	集成运放的基本单元电路和典型电路分析	96
4.3.1	集成电路工艺简介	96
4.3.2	集成运放的基本单元电路	96
4.3.3	集成运放的典型电路和主要参数	97
4.4	集成运放的应用	99
4.4.1	集成运放在基本运算方面的应用	100
4.4.2	集成运放在信号处理方面的应用	104
4.5	应用实例	108
4.6	实操训练	110
	实操训练七:基本运算放大电路(一)	110
	实操训练八:基本运算放大电路(二)	112
	实操训练九:差分放大电路	113
	思考与练习题	116
第5章	负反馈放大器	121
5.1	反馈的基本概念	122
5.1.1	什么是反馈	122
5.1.2	负反馈放大器的基本类型	124
5.1.3	负反馈放大器的基本关系	126
5.2	负反馈对放大器性能的影响	127
5.2.1	提高增益的稳定性	127
5.2.2	改变放大器的输入电阻和输出电阻	127
5.3	实操训练	130
	实操训练十:负反馈放大电路	130
	思考与练习题	132
第6章	直流稳压电源	135
6.1	整流电路	136
6.1.1	半波整流电路	136
6.1.2	全波整流电路	137
6.1.3	桥式整流电路	138
6.1.4	倍压整流电路	140
6.2	滤波电路	141

6.2.1	电容滤波电路	142
6.2.2	电感滤波电路	144
6.2.3	LC 滤波电路	145
6.2.4	π 型滤波电路	145
6.3	稳压电源	147
6.3.1	稳压管稳压电路	147
6.3.2	串联型晶体管稳压电路	148
6.3.3	集成稳压电路	149
6.3.4	开关型稳压电路	153
6.4	实操训练	154
	实操训练十一: 串联型稳压电源	154
	实操训练十二: 集成型稳压电源	156
	思考与练习题	158
第 7 章	正弦振荡器	161
7.1	正弦振荡器的基本原理	161
7.1.1	振荡器的基本组成	161
7.1.2	振荡器的自激条件	162
7.1.3	振荡频率和稳幅环节	163
7.2	RC 振荡器	164
7.2.1	RC 移相式振荡器	164
7.2.2	RC 桥式正弦振荡器	166
7.3	LC 振荡器	170
7.3.1	变压器耦合振荡器	171
7.3.2	电感三点式振荡器	176
7.3.3	电容三点式振荡器	178
7.4	振荡频率的稳定和晶体管振荡器	179
7.4.1	影响频率稳定的因素和稳频措施	179
7.4.2	三点式振荡器的改进型电路	180
7.4.3	石英晶体振荡器	181
7.5	应用实例	183
7.5.1	灵敏恒温器	183
7.5.2	调频无线话筒	184
	思考与练习题	186
第 8 章	常用电子仪器的操作及使用	188
8.1	万用表	188
8.1.1	万用表的功能简介	188
8.1.2	9808 数字万用表功能面板	189
8.1.3	9808 数字万用表的使用方法	189
8.2	直流稳压电源	192

8.2.1	直流稳压电源的功能简介	192
8.2.2	VICTOR 3003D 直流稳压电源功能面板	193
8.2.3	VICTOR 3003D 直流稳压电源的使用方法	194
8.3	函数信号发生器	194
8.3.1	函数信号发生器的功能简介	194
8.3.2	SP1641 函数信号发生器功能面板	194
8.3.3	SP1641 函数信号发生器的使用方法	196
8.4	示波器	197
8.4.1	示波器的功能简介	197
8.4.2	XJ-6620F 双踪示波器功能面板	197
8.4.3	XJ-6620F 双踪示波器的使用方法	199
8.5	交流毫伏表	202
8.5.1	交流毫伏表的功能简介	202
8.5.2	TH1912 型交流毫伏表功能面板	203
8.5.3	TH1912 交流毫伏表的使用方法	205
8.6	频率计	206
8.6.1	频率计的功能简介	206
8.6.2	VC2000 智能频率计功能面板	207
8.6.3	VC2000 频率计的使用方法	208
	思考与练习题	210
第 9 章	模拟电子电路综合设计	211
9.1	模拟电子电路设计方法	211
9.1.1	电路设计概述	211
9.1.2	电路综合设计的具体步骤	212
9.2	模拟电子电路设计举例	220
9.2.1	对讲机放大电路设计	220
9.2.2	直流稳压电源与充电电源	228
9.2.3	函数信号发生器	234
9.3	课程设计参考题目	238
	部分思考与练习题参考答案	240
	参考文献	246

第1章 半导体二极管和三极管

教学导航

知识目标

1. 掌握 PN 结的单向导电性和伏安特性、半导体二极管的模型及其伏安特性与主要参数、稳压二极管的稳压原理及稳压电路、三极管的工作状态及伏安特性与主要参数。
2. 熟悉 PN 结的特性、电流分配及放大作用。

能力目标

1. 通过学习半导体二极管基础知识，具备二极管的识别和检测能力。
2. 通过学习半导体三极管基础知识，具备三极管的识别和检测能力。

学习重点

1. 半导体二极管的模型及其伏安特性。
2. 三极管的工作状态、伏安特性及主要参数。

1.1 半导体的基础知识

1.1.1 导体、绝缘体和半导体

在自然界中，有的物质很容易导电，如铜、铝、金等，这些易于导电的物质被称为导体；有些物质不导电，如塑料、陶瓷、石英，称为绝缘体；此外，还有一类物质，其导电性能介于导体和绝缘体之间，称为半导体。常用的半导体材料有硅（Si）、锗（Ge）、砷化镓（GaAs）。

半导体材料具有与导体和绝缘体不同的导电特性，具体如下。

- （1）热敏特性：当环境温度升高时，半导体的导电能力显著增强。
- （2）光敏特性：当受到光照时，半导体的导电能力显著增强。利用这种特性可以制成各种光敏元件，如光敏电阻、光敏二极管、光敏三极管等。
- （3）掺杂特性：在纯净的半导体中掺入微量杂质，半导体的导电能力可以增加几十万至几百万倍。利用这种特性可以制成各种不同用途的半导体器件，如二极管、三极管和晶闸管等。

1.1.2 半导体的晶体结构

半导体中应用最广泛的是硅和锗。锗和硅均是晶体，它们是四价元素，原子的最外电子层均有 4 个电子。锗和硅原子结构模型如图 1-1 所示，最外层的电子，通常称为价电子。

完全纯净的、晶格结构完整的半导体称之为本征半导体。本征半导体具有晶体结构，原

子在空间形成排列整齐的晶格，由于相邻原子间的距离很小，因此原子最外层的价电子不仅受到自身原子核的束缚，还要受到相邻原子核的吸引，形成共价键，如图 1-2 所示。

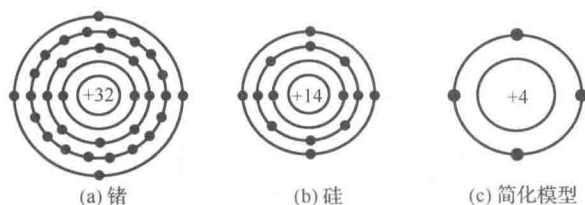


图 1-1 硅和锗原子的结构模型

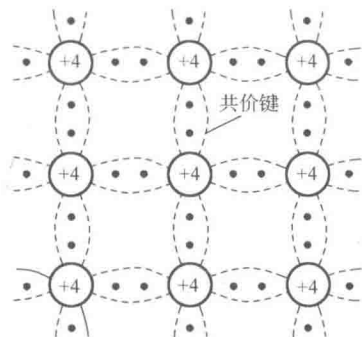


图 1-2 硅晶体共价键结构示意图

1.1.3 本征半导体的导电特性

本征半导体具有晶体结构，晶体中的共价键具有很强的结合力。因此，当半导体处于热力学温度 $T=0\text{K}$ 时，半导体所有的价电子紧紧束缚在共价键中，没有自由电子，不能导电。当温度升高或受到光照时，有些价电子就会获得足够的能量，挣脱共价键的束缚，参与导电，成为自由电子。自由电子产生的同时，会在原来的共价键中留下一个空位，称为空穴。在本征半导体中，自由电子和空穴总是成对出现的，称为电子-空穴对，如图 1-3 所示。半导体在外部能量激励下（主要为热激发），产生自由电子和空穴的现象称为本征激发。外加能量越高，产生的电子-空穴对就会越多。常温 300K 时，硅晶体中电子-空穴对的浓度大约为 $1.4 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ 。

原子失掉一个价电子后而带正电，所以可以把空穴看成带正电的粒子。当在本征半导体外加一电场时，自由电子能做定向运动而形成电子电流。与此同时，由于空穴的存在，价电子在外加电场作用下按一定的方向依次填补空穴，相当于带正电荷的空穴在做与价电子填补空穴运动方向相反的定向运动，形成空穴电流。

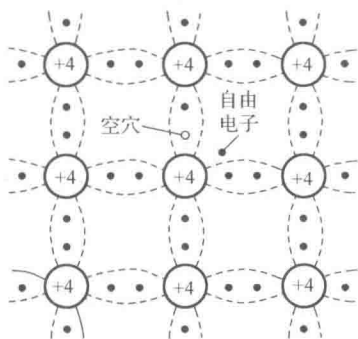


图 1-3 本征半导体中的电子和空穴

运载电荷的粒子称为载流子。而本征半导体中有两种载流子——带负电的自由电子和带正电的空穴，它们均参与导电。本征半导体中的电流是电子电流与空穴电流之和。

本征激发产生的载流子又称为本征载流子，在本征半导体中，自由电子和空穴的数目是相等的。单位体积内本征载流子的数量称为本征载流子浓度。本征激发使得自由电子和空穴成对出现。但同时，在本征半导体中，自由电子在运动的过程中可能与空穴相遇而填补空穴，从而使自由电子和空穴成对消失，这种现象称为复合。在一定的温度下，这两种运动达到动态平衡，从而使得本征半导体中载流子的浓度一定，并且自由电子和与空穴的浓度相等。当环境温度升高时，热运动加剧，将有更多的价电子挣脱共价键的束缚而成为自由电子，因而半导体中载流子的浓度升高，其导电能力加强；反之，若环境温度下降，则半导体载流子浓

度降低, 其导电性能变差。理论分析表明, 本征半导体载流子的浓度可用下式计算

$$n_i = p_i = A_0 T^{\frac{3}{2}} \exp\left(\frac{-E_{g0}}{2kT}\right) \quad (1-1)$$

式中, n_i 和 p_i 分别表示自由电子和空穴的浓度 (cm^{-3}); T 为热力学温度 (K); A_0 为与半导体有关的常数, 对于硅, $A_0 = 3.88 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \text{K}^{-\frac{3}{2}}$, 对于锗 $A_0 = 1.76 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \text{K}^{-\frac{3}{2}}$; E_{g0} 为热力学温度为 0K 时的禁带宽度 (即破坏共价键所需的能量) (eV), 硅的 $E_{g0} = 1.21 \text{eV}$, 锗的 $E_{g0} = 0.785 \text{eV}$, $k = 8.63 \times 10^{-5} \text{eV/K}$ 。

1.1.4 杂质半导体

在本征半导体中掺入某些微量元素作为杂质, 可使半导体的导电性能发生显著变化。掺入杂质的本征半导体称为杂质半导体。根据掺入杂质的性质不同, 杂质半导体可以分为电子 (N) 型半导体和空穴 (P) 型半导体两类。通过控制掺入杂质元素的浓度, 可以控制杂质半导体的导电性能。

1. N 型半导体

在本征半导体硅或锗中掺入适量五价元素, 就形成了 N 型半导体, 如图 1-4 所示。掺入的杂质原子数越多, 产生的自由电子数越多。由于五价元素杂质可以提供多余电子, 故称为施主杂质。

半导体中除施主杂质提供的大量自由电子外, 同时还存在本征激发产生的电子-空穴对, 但自由电子数量远大于空穴数量, 称为多数载流子, 简称多子。空穴则称为少数载流子, 简称少子。参与导电的主要是自由电子, 因此掺入五价元素杂质的半导体常称为电子型或 N 型半导体。

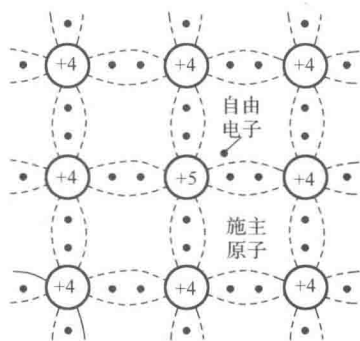


图 1-4 N 型半导体示意图

2. P 型半导体

在本征半导体硅或锗中掺入适量三价元素, 就形成了 P 型半导体, 如图 1-5 所示。由于三价原子中的空穴吸引电子, 起着接受电子的作用, 故称为受主原子, 或受主杂质。在本征半导体中, 每掺入一个三价原子就可以提供一个空穴。这样, 在掺入硼原子的半导体中, 空穴的数目远远大于本征激发所产生自由电子的数目, 空穴成为多数载流子, 而自由电子成为少数载流子。参与导电的主要是空穴, 故这种半导体被称为空穴型半导体。在室温条件下, P 型半导体中的受主杂质电离为带正电的空穴和带负电的受主离子, 同时还有少数本征激发产生的自由电子和空穴。

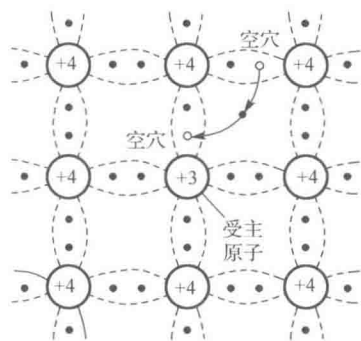


图 1-5 P 型半导体示意图

在 P 型半导体中多数载流子是空穴, 主要由掺杂的浓度决定, 尽管杂质原子含量很少, 但对半导体的导电能力却有很大影响; 自由电子是少数载流子, 由本征激发产生, 尽管其浓度很低, 但对温度非常敏感, 会影响半导体器件的性能。

1.1.5 PN 结的形成及其特性

1. PN 结的形成

利用特殊的掺杂工艺，可以在一块本征半导体晶片的两边分别生成 N 型和 P 型半导体，在两者的交界处形成 PN 结。如图 1-6(a)所示的 N 型和 P 型半导体，P 区的多子是空穴，N 区的多子是自由电子。

当两种半导体“结合”在一起时，交界面两侧有很大的载流子浓度差：N 型区中自由电子浓度高，空穴浓度低；P 型区中自由电子浓度低，空穴浓度高。N 型区的自由电子浓度远大于 P 型区，由于存在浓度差，因此 P 型区内空穴向 N 型区扩散，N 型区内自由电子向 P 型区扩散。这种由于存在浓度差引起的载流子从高浓度区域向低浓度区域的运动称为扩散运动，所形成的电流称为扩散电流。

P 区的空穴向 N 区扩散并与 N 区的自由电子复合，N 区的自由电子向 P 区扩散并与 P 区的空穴复合，P 区一边失去空穴，留下了带负电的受主杂质离子，N 区一边失去电子，留下了带正电的施主杂质离子。这些带电的杂质离子，由于物质结构的关系，它们不能随意移动，因此不参与导电。在交界面附近出现的带电离子集中的薄层，称为空间电荷区，又称耗尽层或阻挡层，如图 1-6(b)所示。

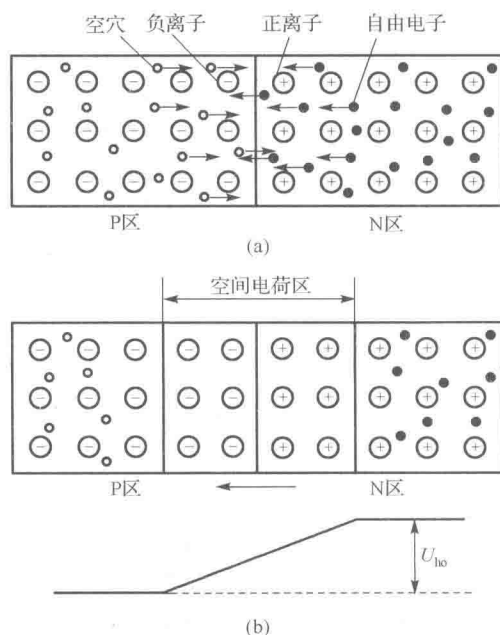


图 1-6 PN 结的形成

空间电荷区的左半部分是带负电的杂质离子，右半部分是带正电的杂质离子，从而在空间电荷区中就形成了一个由 N 区指向 P 区的内建电场，称为内电场。

在内电场的作用下，空穴向 P 区漂移，自由电子向 N 区漂移，载流子在电场作用下的这种运动称为漂移运动，所形成的电流称为漂移电流。漂移作用的结果是空间电荷区变窄，内建电场减弱。

扩散运动和漂移运动相互制约,最终,从P区扩散到N区的空穴数与从N区漂移到P区的空穴数相等,从N区扩散到P区的自由电子数与从P区漂移到N区的自由电子数相等,PN结达到动态平衡。

2. PN结的单向导电性

PN结外加正向电压时,处于导通状态,呈现低阻特性;PN结外加反向电压时,处于截止状态,呈现高阻特性,这就是PN结的单向导电性。

(1) PN结外加正向电压

将PN结的P区接电源正极,N区接电源负极,这种连接方式称为PN结外加正向电压,又称为PN结正向偏置,如图1-7所示。当PN结处于正向偏置时,外电场和内电场的方向相反。P区的空穴和N区的自由电子在外电场的作用下向空间电荷区移动,破坏了空间电荷区的平衡状态。使空间电荷区的电荷量减少,空间电荷区变窄,起到削弱内电场的作用。这种情况有利于多数载流子的扩散运动,不利于少数载流子的漂移运动。扩散电流起主导作用,漂移电流很小,此时外电场电流近似等于扩散电流,又称正向电流。

PN结正向偏置时,在一定范围内,正向电流随着外电场的增强而增大,正偏的PN结表现为一个阻值很小的电阻,呈现低阻特性,此时称PN结导通。PN结正向导通时压降很小,理想情况下,可认为PN结正向导通时的电阻为零,所以导通时的压降也为零。正向电流的大小主要由外加电压 V 和电阻 R 的大小来决定。电阻 R 可以限制回路电流,防止PN结因正向电流过大而损坏。

由于少数载流子形成的漂移电流,其方向与扩散电流相反,且数值很小。可以忽略不计。

(2) PN结外加反向电压

将PN结的P区接电源负极,N区接电源正极,这种连接方式称为PN结外加反向电压,又称PN结反向偏置,如图1-8所示。PN结加反向电压时,外电场和内电场方向相同,PN结内部扩散运动和漂移运动的平衡被破坏。P区的空穴和N区的自由电子由于受外电场作用将背离空间电荷区,使空间电荷量增加,空间电荷区变宽,内电场加强。此时多数载流子的扩散运动减弱,少数载流子的漂移运动增强。PN结中的电流主要由漂移电流决定。这种由少数载流子的漂移运动所形成的电流称为PN结的反向电流。

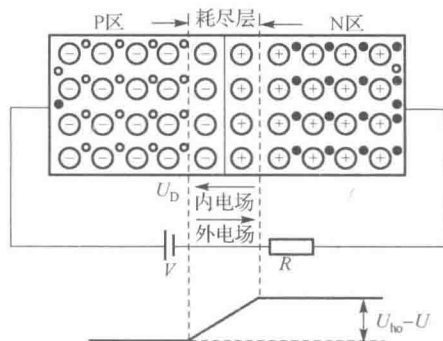


图 1-7 PN结外加正向电压

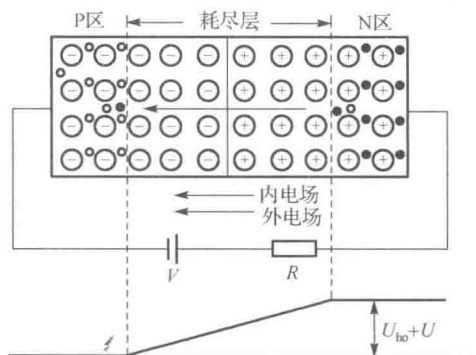


图 1-8 PN结外加反向电压

在一定温度下,少数载流子的数目是一定的,且数值很小。因此,在一定范围内,反向电流也极小,且近似一定值,不随外加反向电压的变化而变化,所以该电流称为反向饱和电

流, 用 I_S 表示, 当外界温度发生变化时, PN 结的反向饱和电流会随着温度的上升而增大。

PN 结反向偏置时, 呈现出一个阻值很大的电阻, 即高阻状态。理想情况下, 反向电阻为无穷大, 基本上不导电, 称 PN 结截止。

由以上分析可知, PN 结的导电能力与 PN 结所加电压的极性有关。当外加正向电压时, PN 结导通, 其电阻很小, 正向电流与外加电压和电阻有关; 当外加反向电压时, PN 结截止, 反向饱和电流很小, 可以忽略不计, PN 结的这种导电特性称为 PN 结的单向导电性。

(3) PN 结方程

根据理论分析可知, PN 结两端的外加电压 U 和流过 PN 结的电流 I 之间的关系为

$$I = I_S \cdot (e^{\frac{q \cdot U}{k \cdot T}} - 1) = I_S \cdot (e^{\frac{U}{U_T}} - 1) \quad (1-2)$$

式 (1-2) 即为 PN 结方程, 式中 I_S 为反向饱和电流, 由公式可知, 正向偏置且 U 大于 U_T 几倍以上时

$$I \approx I_S \cdot e^{\frac{U}{U_T}} \quad (1-3)$$

即 I 随 U 按指数规律变化。

反向偏置且 $|U|$ 大于 U_T 几倍以上时

$$I \approx -I_S \quad (1-4)$$

即是一个与反向电压无关的常数, 其中负号表示电流方向与设定方向相反。

(4) PN 结的反向击穿

当 PN 结外加反向电压增大到一定值时, 反向电流急剧增大, 这种现象称为 PN 结的反向击穿。发生击穿时的反向电压 U_{BR} 称为 PN 结的反向击穿电压。击穿现象分为齐纳击穿和雪崩击穿两种。

根据式 (1-2) 并考虑到 PN 结的反向击穿, 画出 PN 结的伏安特性曲线, 如图 1-9 所示。图中 $U > 0$ 的部分称为正向特性, I 随 U 近似按指数规律变化, 呈现小电阻的导通状态; $U < 0$ 的部分称为反向特性, 电流很小, 呈现大电阻的截止状态。这种单向导电性是 PN 结最重要的特性。

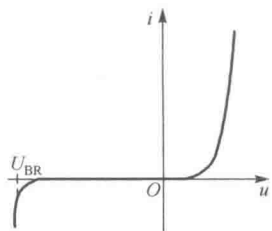


图 1-9 PN 结的伏安特性曲线

1.2 半导体二极管

1.2.1 半导体二极管的结构

利用 PN 结的单向导电性可以制造半导体二极管, 二极管是结构最简单且应用最广泛的半导体器件之一。二极管由管芯 (主要是 PN 结)、从 P 区和 N 区分别引出的两根电极 [阳极 (正极)、阴极 (负极)]、用塑料、玻璃和金属封装的外壳组成, 图 1-10 为一些常见的二极管外形。

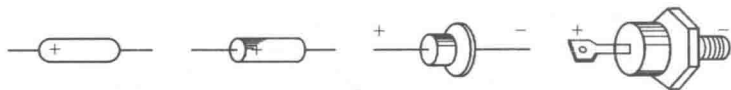


图 1-10 常见的二极管外形

按其结构不同，二极管分为点接触型二极管、面接触型二极管和平面型二极管。二极管的几种常见结构类型及电路符号如图 1-11 所示。

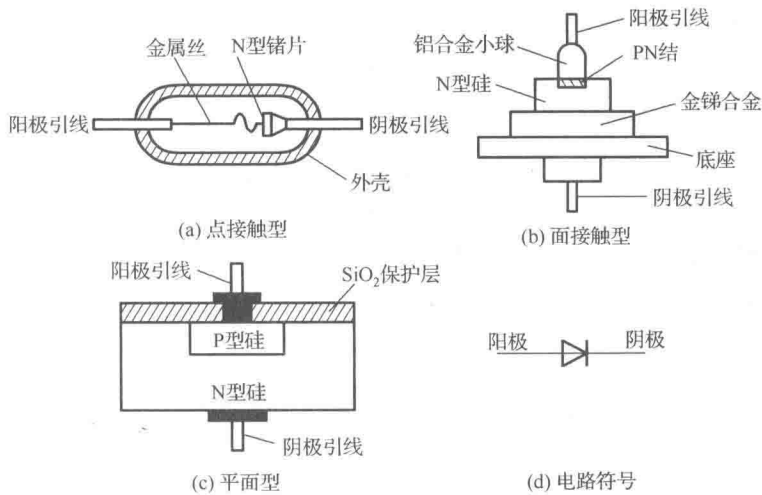


图 1-11 二极管的几种常见结构类型及电路符号

1.2.2 二极管的伏安特性

与 PN 结一样，二极管具有单向导电性，其特性曲线与 PN 结的伏安特性曲线相似，用实验的方法，在二极管阳极和阴极加上不同极性和不同数值的电压，同时测量流过二极管的电流值，就可以得到二极管的伏安特性曲线，如图 1-12 所示，该曲线是非线性的，可分为正向特性、反向特性和反向击穿特性三个部分。

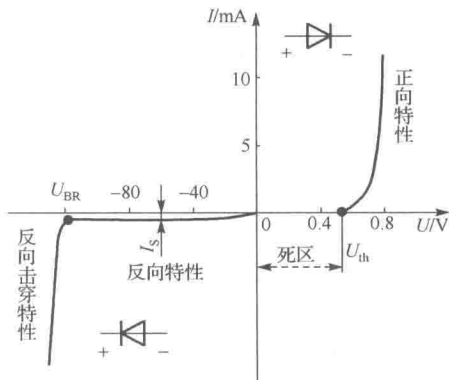


图 1-12 二极管的伏安特性曲线

1. 正向特性

当二极管所加正向电压比较小时 ($0 < U < U_{th}$)，二极管上流经的电流为 0，二极管截止，此区域称为死区， U_{th} 称为死区电压（门槛电压）。硅二极管的死区电压约为 0.5V，锗二极管的死区电压约为 0.1V。二极管所加正向电压大于死区电压时，正向电流增加，管子导通，电流随电压的增大而上升，二极管呈现电阻很小，二极管处于正向导通状态，其值几乎不变。常温下，硅二极管的正向导通压降约为 0.7V，锗二极管的正向导通压降约为 0.3V。

2. 反向特性

二极管外加反向电压时, 反向电流很小 ($I \approx -I_s$) 而且在相当宽的反向电压范围内, 反向电流几乎不变。因此, 称此电流为二极管的反向饱和电流 (室温下, 小功率硅管的反向饱和电流 I_s 小于 0.1 微安, 锗管为几十微安)。二极管呈现的电阻很大, 管子处于反向截止状态。

3. 反向击穿特性

当反向电压值增大到 U_{BR} 时, 反向电压的绝对值稍有增大, 反向电流便会急剧增大, 称此现象为反向击穿, U_{BR} 为反向击穿电压。因而使用时应在电路中采取适当的限压措施, 才能保证电击穿不会演变成热击穿, 以避免损坏二极管。

1.2.3 二极管的主要参数

二极管的参数是描述二极管电性能的指标, 是正确选用二极管的依据。半导体二极管的主要参数有最大整流电流 I_F 、最大反向工作电压 U_{RM} 、反向电流 I_R 和最高工作频率 f_M 。

(1) 最大整流电流 I_F : 最大整流电流 I_F 是二极管长期连续工作时, 允许通过二极管的最大正向平均电流。

(2) 最大反向工作电压 U_{RM} : 最大反向工作电压 U_{RM} 是指二极管安全工作时所能承受的最大反向电压。

(3) 反向电流 I_R : 反向电流 I_R 是指二极管未击穿时的反向电流。其值越小, 说明二极管的单向导电性越好。反向电流的大小对温度很敏感, 因此使用时要注意温度的影响。

(4) 最高工作频率 f_M : 最高工作频率 f_M 是指二极管工作的上限频率。工作频率超过 f_M 时, 二极管的单向导电性变差。

1.2.4 稳压二极管

稳压二极管又称齐纳二极管, 掺杂浓度比较高, 是一种硅材料制成的面接触型晶体二极管, 又称稳压管。稳压管反向击穿后, 在一定电流范围内, 端电压几乎不变, 表现出稳压特性, 广泛应用于稳压电路与限幅电路中, 其电路符号如图 1-13 所示。

稳压管的伏安特性如图 1-14 所示。正向特性为指数曲线, 但反向击穿区的曲线非常陡直, 几乎平行于纵轴, 表现出稳压特性。稳压管正常工作在反向击穿区。在这一区间, 电流增量很大, 但电压增量很小, 从而起到稳压的作用。反向击穿区的曲线越陡直, 稳压管动态电阻 r_z 越小, 稳压效果越好。由于半导体器件具有热敏特性, 因此温度也将影响稳定电压的数值。

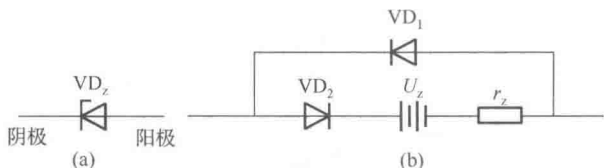


图 1-13 稳压管电路符号和等效电路

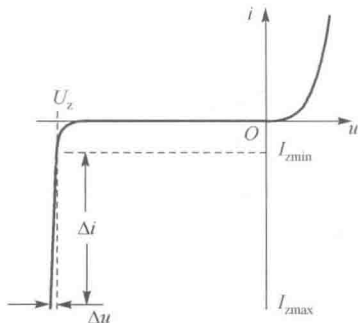


图 1-14 稳压管的伏安特性曲线