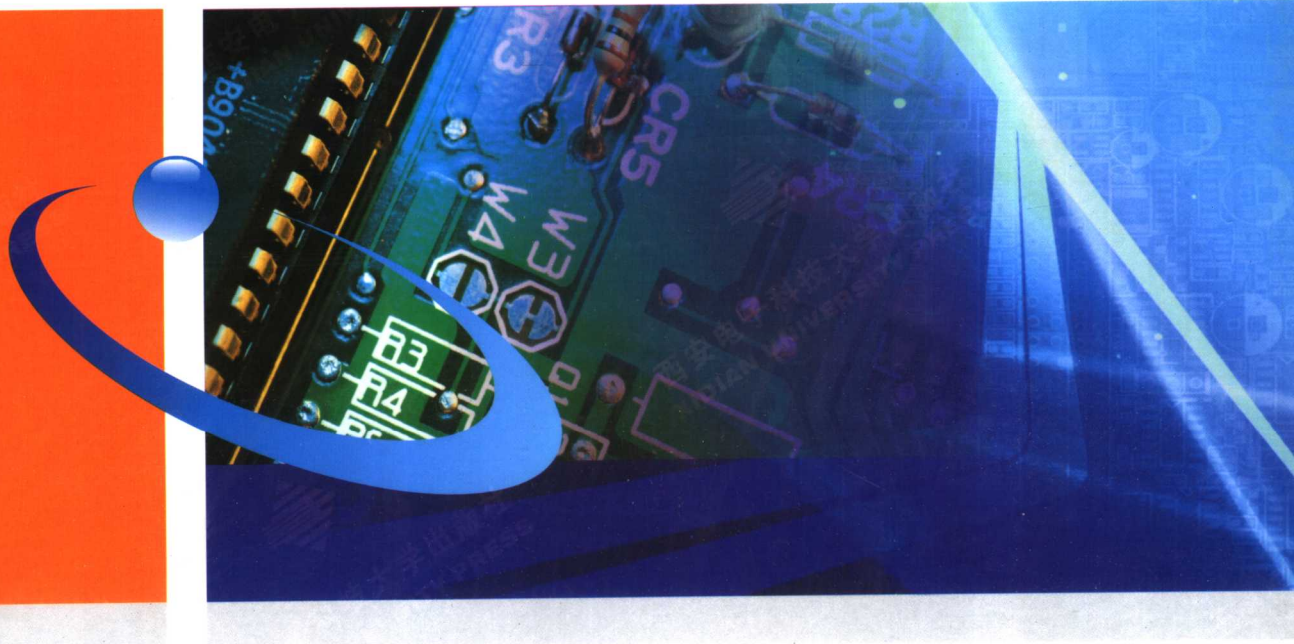




高 职 高 专 规 划 教 材



模拟电子技术

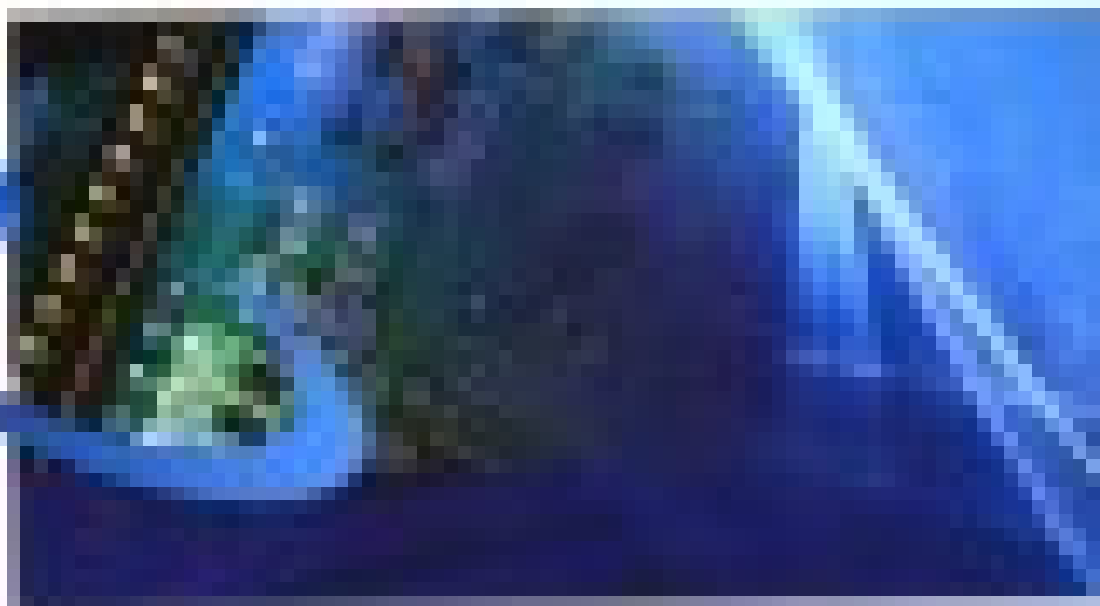
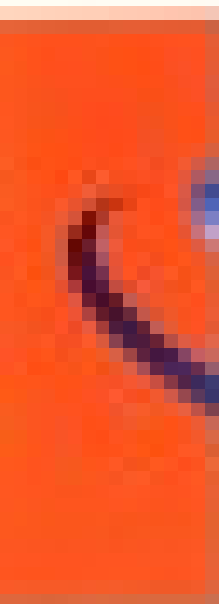
钱 聪 李迎春 吴 琼 张新卫 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>



第 一 章 概 论



模拟电子技术

第 一 章 概 论



第 一 章 概 论

面向 21 世纪高职高专规划教材

模 拟 电 子 技 术

钱 聪 李迎春 吴 琼 张新卫 编著

西安电子科技大学出版社

2007

内 容 简 介

本书是依据教育部《高职高专教育基础课程教学基本要求》编写的。本书较大幅度地删减了分立元件电路,在保证基础知识的前提下,突出了集成电路的特点和应用。

本书共7章:第1章为半导体器件的基础知识,第2章为放大电路,第3章为集成运算放大器,第4章为负反馈放大器,第5章为集成运算放大器的应用,第6章为低频功率放大器,第7章为直流稳压电源。

本书可作为高等职业教育和中等职业教育中通信、电子、计算机、自动控制等专业“电子电路基础”课程的教材和教学参考书,也可作为具有高中文化程度从事电子技术工作的工人的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/钱聪等编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2007.5

面向21世纪高职高专规划教材

ISBN 978-7-5606-1821-0

I. 模… II. 钱… 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(2007)第037700号

策 划 臧延新

责任编辑 杨 璠 臧延新

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2007年5月第1版 2007年5月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 10.5

字 数 242千字

印 数 1~4000册

定 价 13.00元

ISBN 978-7-5606-1821-0/TN·0367

XDUP 2113001-1

如有印装问题可调换

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

本书参照教育部高等教育司制定的《高职高专教育基础课程教学基本要求》，并汲取作者多年教学经验编写而成。

本书在编写过程中，根据高职高专学生以应用知识为主、理论分析为辅的原则，认真分析了现有模拟电子电路教材的内容，摒弃了部分相对繁琐的数学推导，尽可能用通俗易懂的语言来解释电路中所发生的物理过程，并辅以尽可能多的图片。本书在内容的取舍和层次安排上与现有的一些电子技术教材相比，具有以下特点：

1. 减少了对半导体器件内部载流子运动和内部电流的讨论，集中分析器件的外特性和功能，适当介绍参数，并在器件的讨论中贯穿了器件的简易测量，使教材从一开始就尽量突出电子电路的应用特点。

2. 删除了放大器的图解分析，改为以讨论的方式学习放大器放大信号的过程，从电路的原理结构上分析饱和失真和截止失真；以“必需够用”的原则为出发点，删除了放大器频率特性的理论推导，仅介绍频率特性的基本概念和描述频率的主要参数；弱化了分立元件多级放大器的计算，仅建立多级放大器的基本概念。

3. 为了突出应用，提高读者对实际应用电路的认知能力，本书中所分析的电路多数都用实物连接图引出，便于读者在学习过程中将理论分析与实际电子设备中的电路相结合。

4. 削减了部分分立元件电路，突出集成电路的应用。例如，负反馈这一章主要讨论集成运放构成的负反馈放大器。

5. 在运放、功放和稳压电源的分析中介绍了许多常用的集成芯片资料，以培养读者查阅资料的能力，同时便于读者在实验中查阅。

6. 本书中每一章都安排了 Multisim 仿真实验的内容，既强调了电子电路教学中实验的重要性，又注重了读者在学习过程中使用计算机不断线。

全书内容共分为 7 章，第 1 章为半导体器件的基础知识，第 2 章为放大电路，第 3 章为集成运算放大器，第 4 章为负反馈放大器，第 5 章为集成运算放大器的应用，第 6 章为功率放大器，第 7 章为直流稳压电源。本教材按照理论课教学 60 学时编写，建议教学学时数为：第 1 章 10 学时，第 2 章 12 学时，第 3 章 8 学时，第 4 章 8 学时，第 5 章 10 学时，第 6 章 6 学时，第 7 章 6 学时。每章后均有本章小结和习题，供读者思考和练习。

本书由钱聪编写第 1、2 章，李迎春编写第 3、5 章，吴琼编写第 4、7 章，张新卫编写第 6 章，钱聪负责全书的统稿。鉴于作者水平，书中难免存在疏漏，恳请读者批评指正。

作 者

2007 年 1 月

目 录

第 1 章 半导体器件的基础知识	1
1.1 半导体的基本知识	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	2
1.1.3 半导体中载流子的运动方式	4
1.2 半导体二极管	4
1.2.1 PN 结和半导体二极管	4
1.2.2 二极管的特性曲线和主要参数	7
1.2.3 二极管应用电路举例	9
1.2.4 特殊二极管	10
1.3 双极型三极管	11
1.3.1 三极管的结构	12
1.3.2 三极管的电流放大作用	12
1.3.3 三极管的特性曲线和参数	15
1.4 场效应晶体管介绍	18
本章小结	20
习题	21
第 2 章 放大电路	23
2.1 基本放大电路的组成和放大原理	23
2.1.1 基本放大电路的组成	23
2.1.2 放大电路的工作原理	25
2.1.3 静态 I_{BQ} 、 I_{CQ} 和 U_{CEQ} 的计算	27
2.2 放大电路的微变等效电路分析	28
2.2.1 放大电路的主要技术指标	28
2.2.2 放大电路的微变等效电路分析	30
2.2.3 三种基本组态放大电路比较	37
2.3 场效应管放大电路	38
2.3.1 场效应管放大器直流偏置电路介绍	38
2.3.2 场效应管的微变等效电路	39
2.3.3 共源极放大器分析	39
2.4 多级放大电路	40
2.4.1 多级放大电路的级间耦合方式	41
2.4.2 多级放大电路分析	41
2.5 放大电路频率特性介绍	43
2.5.1 振幅频率特性和相位频率特性的概念	43
2.5.2 描述放大电路频率特性的主要参数	44
2.6 基本放大电路的仿真实验	45

本章小结	46
习题	47
第3章 集成运算放大器	54
3.1 集成运算放大器概述	54
3.1.1 运算放大器的结构	54
3.1.2 运算放大器的主要指标	56
3.1.3 理想运算放大器	58
3.2 差分放大电路	58
3.2.1 概述	58
3.2.2 差分放大电路的组成	58
3.2.3 差分放大电路的分析	60
3.3 电流源电路	63
3.3.1 电流源概述	63
3.3.2 三极管基本电流源	64
3.3.3 集成电路中的电流源	64
3.4 运放中的其它单元电路	65
3.4.1 复合管电路	65
3.4.2 有源负载放大电路	66
3.5 常用集成运算放大器	66
3.6 集成运算放大器的仿真实验	71
本章小结	72
习题	73
第4章 负反馈放大器	76
4.1 反馈的基本概念	76
4.1.1 反馈的定义	76
4.1.2 负反馈放大器的分类与判断	77
4.2 负反馈对放大器性能指标的影响	81
4.2.1 负反馈对放大器性能的影响	81
4.2.2 负反馈对输入、输出电阻的影响	82
4.3 负反馈放大器的分析计算	83
4.3.1 深度负反馈放大器的分析	83
4.3.2 深度负反馈放大器的计算举例	84
* 4.4 负反馈放大器的自激及其消除	88
4.4.1 自激的概念	88
4.4.2 自激产生的原因和消振电路	88
4.5 负反馈放大器的仿真实验	89
本章小结	91
习题	91
第5章 集成运算放大器的应用	95
5.1 信号调理电路	95
5.1.1 放大电路	95
5.1.2 运算电路	97

5.1.3 变换电路	102
5.2 比较器	103
5.2.1 单门限比较器	104
5.2.2 滞回比较器	105
5.2.3 专用比较器介绍	105
5.3 模拟乘法器及其应用	107
5.3.1 模拟乘法器的基本原理	107
5.3.2 乘法器的应用电路	109
5.4 集成运放使用中的几个问题	109
5.4.1 选型	109
5.4.2 调零	110
5.4.3 保护	110
5.4.4 消振	112
5.5 运放应用电路的仿真实验	112
本章小结	113
习题	114
第 6 章 低频功率放大器	119
6.1 低频功率放大器的特点和分类	119
6.1.1 功率放大器的特点	119
6.1.2 低频功率放大器的分类	119
6.2 集成功放核心电路及其工作原理	120
6.2.1 OCL 电路	120
6.2.2 OTL 电路	122
6.2.3 功放的其他问题	123
6.3 常用集成功放及其应用	125
6.3.1 单通道集成功率放大器 TDA2030	125
6.3.2 单通道大功率集成电路 LM3886	126
6.3.3 双通道功放 LM1876	127
6.4 功率器件的散热	129
6.5 功率放大电路的计算机仿真实验	130
本章小结	132
习题	132
第 7 章 直流稳压电源	135
7.1 概述	135
7.2 整流和滤波电路	136
7.2.1 半波整流电路	136
7.2.2 全波整流电路	137
7.2.3 桥式整流电路	138
7.2.4 滤波电路及其工作分析	139
7.3 稳压电路	140
7.3.1 稳压电路常用技术指标	140
7.3.2 硅稳压管稳压电路	141
7.3.3 串联型直流稳压电路	142

7.3.4 线性集成稳压器及其应用	143
7.4 开关型稳压电源简介	147
7.5 稳压电源的仿真实验	149
本章小结	150
习题	151
部分习题答案	153
参考文献	159

第1章 半导体器件的基础知识

1.1 半导体的基本知识

自然界的物质按导电能力的不同可分为导体、半导体和绝缘体。半导体，顾名思义是一种导电能力介于导体和绝缘体之间的物质。常见的半导体材料有硅(Si)、锗(Ge)、砷化镓(GaAs)等等。半导体材料除了导电能力有别于导体和绝缘体外，它还有一些独特的性质：热敏特性——温度升高，导电性能提高；光敏特性——光照增强，导电性能提高；掺杂特性——掺入微量的杂质，导电性能会大幅度改善。正是利用了半导体材料的这些性质，人们制成了二极管、三极管、集成电路等各种各样的半导体器件。要理解这些特性产生的原因，就要从半导体材料的内部结构谈起。

1.1.1 本征半导体

1. 硅材料的晶体结构

本征半导体就是纯净的半导体。我们知道，世界上所有的物质都是由原子构成的，原子又由带正电的原子核和围绕原子核旋转的带负电的电子所组成。以半导体材料硅为例，围绕硅原子核旋转的电子共有14个，分为3层，如图1.1.1(a)所示。最外层的电子(称为价电子)是4个，硅材料的导电性能主要由它们来决定。

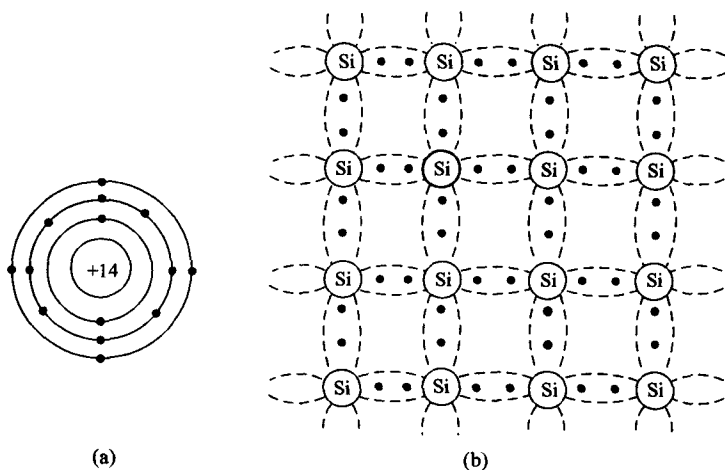


图 1.1.1 硅原子和硅材料的晶体结构
(a) 硅原子模型；(b) 硅材料晶体结构

当很多硅原子组合在一起构成硅晶体时,半导体材料内部的原子排列很整齐,原子与原子之间依靠共价键结合起来,图 1.1.1(b)为硅晶体平面结构示意图,图中原子与原子之间的虚线表示连接两个原子的共价键,共价键中的电子属于两个原子所共有,这样硅原子最外层的价电子都被共价键所束缚,而共价键中的电子不是自由的,不能自由运动。

2. 自由电子和空穴

根据前面的讨论,本征半导体中没有自由电子,因此本征半导体是不导电的,但这种情况只出现在温度为绝对零度(0 K , -273.15°C)的时候。当本征半导体的温度升高或受到光照时,有些共价键中的电子从外界获得能量,会挣脱共价键的束缚变成了自由电子,同时还产生相同数量的空穴;空穴的运动是自由的,而且带正电,因此空穴与自由电子一样可以参与导电。我们将自由电子和空穴统称为“传导电流的粒子”,简称为载流子。图 1.1.2 表明了产生自由电子和空穴的过程,这个过程叫做本征激发。

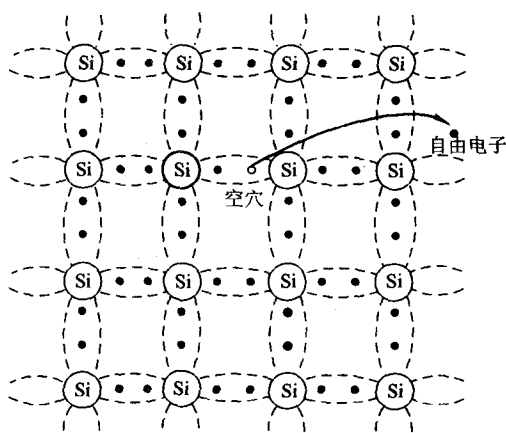


图 1.1.2 本征激发产生自由电子和空穴

由图 1.1.2 可见,本征激发在半导体中产生了带负电的自由电子和带正电的空穴这两种载流子,因此半导体的导电原理与金属导体中仅有自由电子的导电原理是不同的。

如果半导体中自由电子和空穴相遇,自由电子会回到空穴的位置上去,自由电子和空穴就成对地消失了,这个现象叫做复合。当温度或光照强度一定时,本征激发与复合会达到一个动态平衡,即激发等于复合,半导体内将维持一定数量的载流子。如果温度升高或光照变强,则激发加剧,半导体内载流子增多,半导体的导电性能就会提高。利用半导体的这一特性可以制成测量温度和光强的器件。

1.1.2 杂质半导体

本征半导体导电性能差,且对温度变化很敏感,因此,不宜直接用它来制造半导体器件。如果在本征半导体中掺入微量其它元素,会使半导体的导电能力发生显著变化,这样构成的半导体称为杂质半导体。实际上,二极管、三极管、集成电路等各种半导体器件都是由杂质半体制成的。根据掺入杂质的不同,杂质半导体可分为 N 型半导体和 P 型半导体。

1. N型半导体

在本征半导体中掺入少量五价元素，能够使半导体中自由电子的浓度大大增加，称这种杂质半导体为电子型半导体或N型半导体。如图1.1.3(a)所示，掺入的五价杂质原子取代了某些硅原子的位置，与相邻的四个硅原子组成共价键，但是多余一个不受共价键束缚的价电子，这个价电子很容易在常温下变成自由电子，而这种产生自由电子的过程不产生空穴。在N型半导体中自由电子占多数，称为“多数载流子”，简称为“多子”；空穴占少数，称为“少数载流子”，简称为“少子”。图1.1.3(b)所示为N型半导体的简化示意图。需要注意的是，杂质原子失去了一个电子后，成为一个带正电的离子，它与自由电子和空穴不同，不能自由移动，不能参与导电，不是载流子。

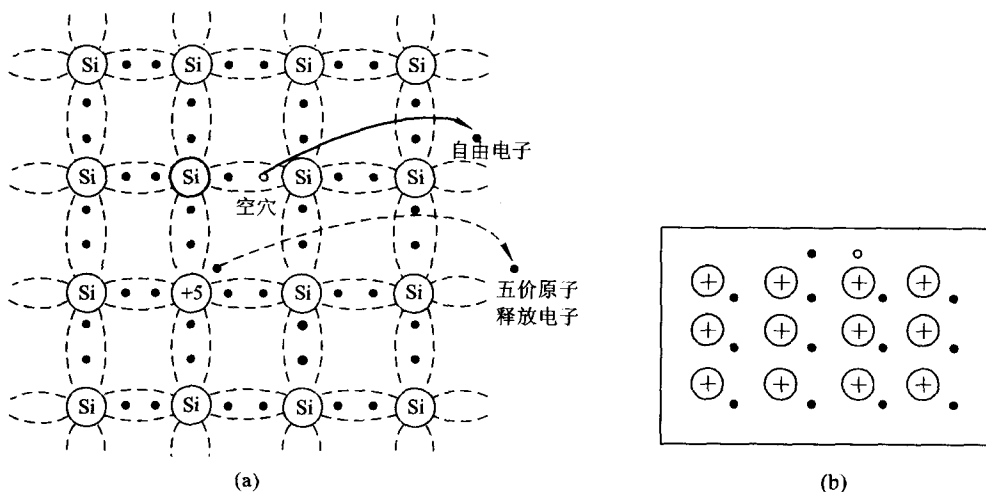


图 1.1.3 N型半导体结构示意图

(a) 共价键结构模型；(b) 简化示意图

尽管N型半导体中自由电子的数量远多于空穴，但半导体中正、负电荷数是相同的，故N型半导体不带电，我们称其是电中性的。

2. P型半导体

在本征半导体中掺入少量三价元素，能够使半导体中空穴的浓度大大增加，称这种杂质半导体为空穴型半导体或P型半导体。在P型半导体中，空穴占多数，称为多数载流子；自由电子占少数，称为少数载流子。图1.1.4所示为P型半导体的简化示意图，图中掺入的杂质原子夺取了一个电子后，成为一个带负电的离子，同理，它不能自由移动，不导电，所以半导体中正、负电荷数也是相同的，P型半导体是电中性的。

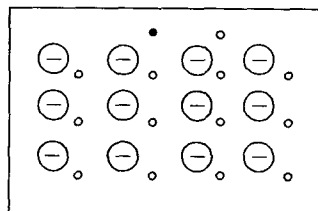


图 1.1.4 P型半导体简化示意图

1.1.3 半导体中载流子的运动方式

1. 漂移运动

如果在半导体两端加上电压，就会在半导体中建立起电场。自由电子和空穴在电场作用下做定向运动，这种运动叫做漂移运动，由此形成的电流叫漂移电流。

2. 扩散运动

如果有某种原因使半导体中一边载流子的浓度高于另一边，即使没有外加电压，载流子也会从高浓度区域向低浓度区域作定向运动，这种运动叫做扩散运动，由此形成的电流叫扩散电流。

1.2 半导体二极管

学习二极管之前，先来看下面的一个电路。在图 1.2.1(a) 中，电池两端的电压 U 为 3 V；元件 V_D 是二极管，有两个电极，一个为正电极，另一个为负电极； L 为灯泡。电路连接好后，灯泡发光，表明电路中有电流，电流由二极管的正极流向负极。不改变电路的结构，仅把二极管的两个电极调换方向，如图 1.2.1(b) 所示，灯泡不发光，说明电路里没有电流。二极管一个方向允许有电流通过，叫做正向运用，另一个方向不允许电流通过，叫做反向运用，这种现象称为二极管的单向导电性。

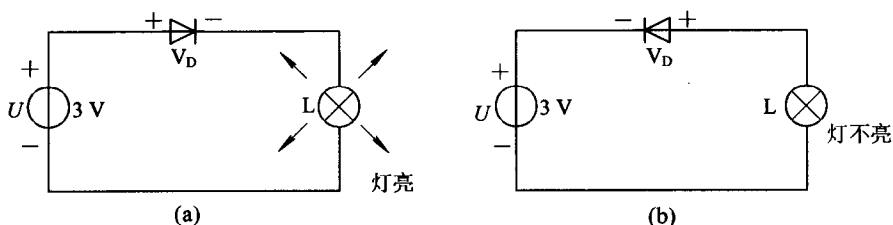


图 1.2.1 二极管单向导电性演示电路

(a) 正向运用电路；(b) 反向运用电路

1.2.1 PN 结和半导体二极管

1. PN 结的形成

将一块半导体的两边分别做成 P 型区域和 N 型区域，P 区和 N 区的界面处将形成一个具有特殊性能的电荷薄层，这个电荷薄层就叫做 PN 结。

如图 1.2.2 所示，在电荷薄层中靠近 P 区一边有不能移动的负电荷，而靠近 N 区一边有不能移动的正电荷，正、负电荷之间形成电场，叫做内建电场，电场两端存在着电位差，称为接触电位差。锗材料 PN 结的接触电位差为 0.2~0.3 V；硅材料 PN 结的接触电位差为 0.6~0.8 V。

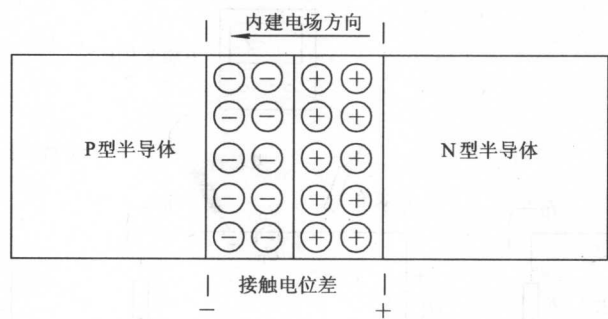


图 1.2.2 PN 结的形成

由于 PN 结对载流子的扩散具有阻止作用，因此有时也称 PN 结为“阻挡层”；因内建电场所占据的区域中存在不能移动的正、负电荷，故电场区域又叫做“空间电荷区”。

从 P 区引出一条电极(称为正极)，再从 N 区引出一条电极(称为负极)，然后将 PN 结封装好外壳，就构成了半导体二极管。常见的二极管外形如图 1.2.3(a)所示，图 1.2.3(b)所示为半导体二极管的电路符号。

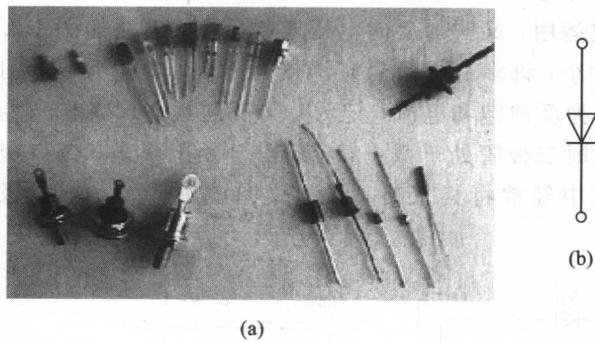


图 1.2.3 半导体二极管的外形和电路符号
(a) 各种二极管的外形；(b) 电路符号

2. 二极管的单向导电性

1) 二极管正向运用

二极管的正极接高电位，负极接低电位(即 PN 结的 P 区接高电位，N 区接低电位)，称为二极管处于正向运用，又叫加正向电压或叫正偏，电路如图 1.2.4(a)所示。此时流过二极管的电流比较大，电流的方向是由正极流向负极。用电压表测量二极管两端电压，则硅材料二极管的 U_D 约为 0.7 V，锗材料二极管的 U_D 约为 0.2 V，测量电路如图 1.2.4(b)所示。如果增大加在二极管两端的电压，流过二极管的正向电流会迅速上升，二极管两端电压与电流的关系曲线如图 1.2.4(c)所示，称此时二极管为导通状态。

因为二极管加正向电压时，外电压产生的电场方向与内建电场的方向相反，内建电场变弱，这样就破坏了原来的平衡，P 区的空穴和 N 区的电子源源不断地扩散到对方区域，在外电路上形成一个较大的多数载流子扩散电流(毫安数量级)，称其为正向电流 I_D 。

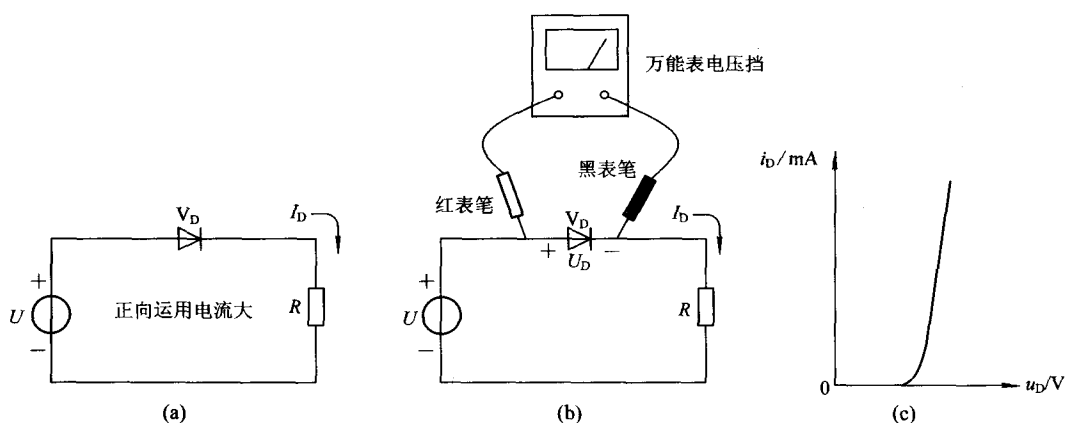


图 1.2.4 二极管加正向电压

(a) 正向电压电路连接; (b) 二极管两端电压测量; (c) 正向运用的 V—A 特性

2) 二极管反向运用

二极管的正极接低电位, 负极接高电位(即 PN 结的 P 区接低电位, N 区接高电位), 称为二极管处于反向运用, 又叫加反向电压或叫反偏, 电路如图 1.2.5(a)所示。此时流过二极管的电流非常小, 许多二极管仅有零点几微安, 而且反向电压增大时, 反向电流几乎不变, 该电流称为反向饱和电流, 记为 I_s , 反向运用时的电压与电流关系曲线如图 1.2.5(b)所示, 称此时二极管处于截止状态。由于处于截止状态二极管的反向电流 I_s 非常小, 因此实际应用中经常将其忽略, 认为反向电流为零, 把二极管看成开路, 如图 1.2.5(c)所示。

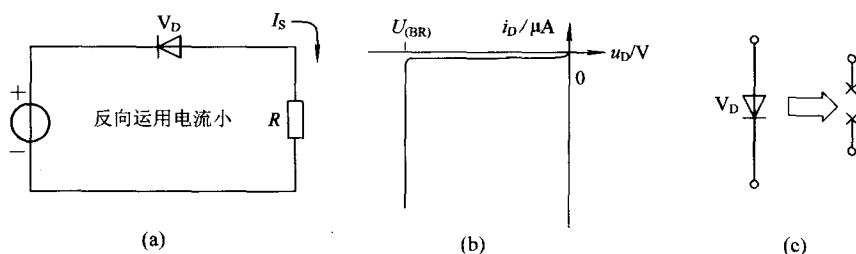


图 1.2.5 二极管加反向电压

(a) 反向电压电路连接; (b) 反向运用的 V—A 特性; (c) 反向运用等效电路

二极管加反向电压时, 外电压产生的电场方向与内建电场的方向相同, 内建电场变强, 扩散被阻止, 只剩下少数载流子漂移运动。由于少数载流子数量很少, 故形成的反向饱和电流就非常小, 但是二极管内的少数载流子数量与温度密切相关, 温度升高时, 少数载流子数量增多, 反向饱和电流将增大, 因此反向饱和电流 I_s 对温度非常敏感。

总之, 二极管加正向电压时处于导通状态, 电流比较大, 二极管两端可测出 0.7 V (0.2 V) 的电压, 这个电压也叫正向压降; 二极管加反向电压时处于截止状态, 电流极小, 二极管相当于开路。这就是二极管的单向导电性。

3. 二极管的其它电特性

1) 二极管的反向击穿特性

由图 1.2.5(b)可以看出,当反向电压超过某一数值后,反向电流会急剧增大,这种现象称为二极管发生了反向击穿,导致反向击穿的这个电压数值称为反向击穿电压,记为 $U_{(BR)}$ 。发生反向击穿时,二极管的单向导电作用被破坏,如果不加限流电阻,由于电流太大,会使二极管温度过高而烧坏。在实际应用中,除了稳压二极管以外的其它二极管一般不允许出现反向击穿。

2) 二极管的电容特性

在实际应用中,每个二极管两端都会呈现出几皮法到几百皮法的电容量,相当于有一个电容器并联在二极管两端,如图 1.2.6 所示,这是由 PN 结存储电荷所引起的,这个电容称为结电容,记为 C_j 。

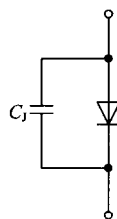


图 1.2.6 二极管结电容的等效图

由于结电容的存在,当工作频率较高时,即使二极管加反向电压处于截止状态,也有一定的电流流过二极管,并且频率越高,电流越大,这也会破坏二极管的单向导电性,所以在多数情况下,结电容是有害的。然而结电容也存在有利的一面,在调频电路、振荡电路、电调谐电路中广泛使用的变容二极管就是利用了二极管的电容特性。

3) 二极管的温度特性

半导体材料制成的二极管对温度是比较敏感的,温度对二极管的影响有:其一,反向饱和电流 I_s 随温度升高而增大,通常温度每升高 10°C ,反向饱和电流 I_s 增大一倍;其二,正向压降随温度升高而降低,温度每升高 1°C ,正向压降 U_D 下降 $1.9\sim 2.5\text{ mV}$ 。

1.2.2 二极管的特性曲线和主要参数

二极管有许多类型,按材料分有硅二极管、锗二极管、砷化镓二极管等,按制作工艺分有点接触型、面结型和平面型等等,如图 1.2.7 所示。

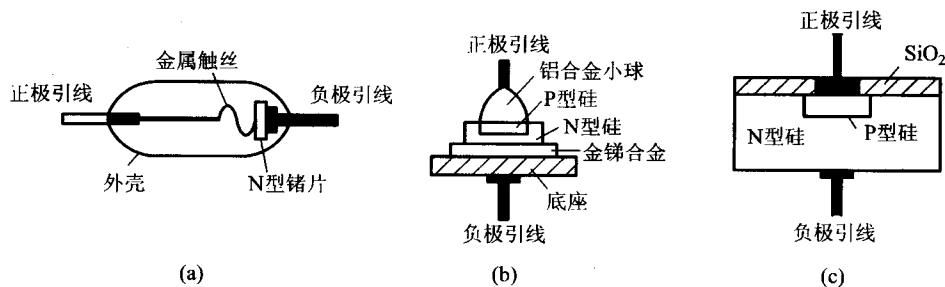


图 1.2.7 常用二极管的结构
(a) 点接触型; (b) 面结型; (c) 平面型

1. 二极管的特性曲线

由于二极管两端的电压与电流的关系是非线性的,因此用曲线来描述其电压电流关

系。在前面的讨论中已经分别画出了正向运用和反向运用时的曲线，将两个曲线合在一起，就构成完整的电压—电流曲线，称为二极管的 $V-A$ 特性曲线。硅二极管的伏安特性曲线如图 1.2.8 所示。

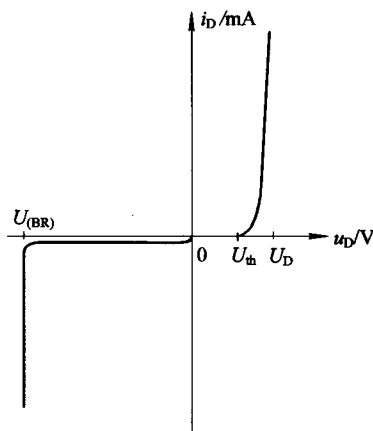


图 1.2.8 硅二极管伏安特性

正向特性：正向电压超过某一数值时，才有明显的正向电流，这个电压称为死区电压，记为 U_{th} ，通常硅管 U_{th} 约为 0.5 V，锗管 U_{th} 约为 0.1 V。当二极管完全导通后，其两端电压称为正向压降 U_D ，硅管 U_D 约为 0.6~0.7 V，锗管 U_D 约为 0.2~0.3 V。

反向特性：反向电流很小，硅管在 $1\ \mu A$ 以下，近似分析时，可以视为开路。

2. 二极管的主要参数

二极管的参数是正确选用二极管的依据，管子的参数由制造厂家给出。

1) 最大整流电流 I_F

最大整流电流指二极管长期工作时所允许通过的最大正向平均电流，例如 2AP1 为 16 mA，1N4001 为 1 A。

2) 反向击穿电压 $U_{(BR)}$

反向击穿电压指能引起二极管反向击穿的电压，例如 2AP1 为 40 V，1N4001 为 100 V。

3) 最大反向工作电压 U_{RM}

最大反向工作电压指实际使用时可加在二极管两端的最大反向电压。 U_{RM} 必须在数值上小于反向击穿电压 $U_{(BR)}$ 。

4) 反向电流 I_R

I_R 为二极管没有出现反向击穿时的反向电流。理论上 $I_R = I_S$ ，但在实际中，由于器件表面存在漏电流等因素， I_R 略大于 I_S 。

5) 最高工作频率 f_M

最高工作频率指保证二极管单向导电性的条件下所能达到的最大的工作频率。这是由 PN 结电容 C_j 决定的参数，当工作频率超过 f_M 时，由于 C_j 的旁路作用，使得二极管的单向导电性变坏。

6) 直流电阻 R_D

在电路中经常把正向运用的二极管看做一个等效电阻。如图 1.2.9 所示，二极管两端