

Electric Power Technology

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



DIANZI JISHU JICHU

电子技术基础

王 锦 主 编
钟西炎 马 娟 副主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

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



DIANZI JISHU JICHU

电子技术基础

主 编 王 锦
副主编 钟西炎 马 娟
编 写 李小燕 胡荣华
主 审 郑晓峰



中国电力出版社

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

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材（高职高专教育）。

全书共分为十章，主要内容有半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器和负反馈放大电路、正弦波振荡电路、直流稳压电路、数字电路基础、集成逻辑门电路和组合逻辑电路、集成触发器与时序逻辑电路、DAC 和 ADC、存储器和可编程逻辑器件。本书各章均配有大量的例题和习题，便于学生正确理解课程内容，也便于自学。

本书主要作为高职高专非电类相关专业的教材和函授培训教材，亦供从事电工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

电子技术基础/王锦主编. —北京：中国电力出版社，2009
普通高等教育“十一五”规划教材·高职高专教育
ISBN 978-7-5083-8360-6

I. 电… II. 王… III. 电子技术—高等学校：技术学校—教材 IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2009）第 005227 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

*

2009 年 2 月第一版 2009 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.5 印张 375 千字

定价 24.80 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

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

本书是按照最新的高职高专教学要求来编写的。旨在培养具有一定理论水平、有较强实际技能的高素质应用型人才。

为突出高职高专教学要求,本书有以下特点:

(1) 保证基础性—基础知识以够用为度,强调方法应用,培养学生分析、解决问题的能力;突出应用性—培养学生将电子技术应用于本专业并促进本专业发展的能力。

(2) 每章以“内容提要”开始,以“本章小结”结束,前呼后应。对于电子电路的基本概念、基本方法和基本电路进行了提炼,叙述清晰、精练,体现了够用为度,但还在一定程度上保持了知识的连贯性,力求深入浅出、重点突出。

(3) 各章节配有思考题,以利于理解和掌握基本概念、基本方法和基本电路。例题、自测题和习题题型多样,使学生能正确理解课程内容,也便于学生自学。

(4) 以集成电路为主、分立电路为辅,对分立电路的分析,以建立基本概念为目的,重点突出集成电路的应用,注重学生应用能力的培养。

全书共分十章,由王锦任主编,第1、2章由西安电力高等专科学校马娟编写,第6章、第7章、第8章的8.3节由西安电力高等专科学校钟西炎编写,第10章、第8章的8.5节由西安电子高等专科学校胡荣华编写,第9章、第8章的8.1、8.2、8.4节由西安电力高等专科学校李小燕编写,其余各章节由王锦编写并统编全书。

由于编者水平和实践经验有限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

编者

2009年1月

目 录

前言

第1章 半导体器件	1
1.1 半导体的基础知识	1
1.2 半导体二极管	5
1.3 半导体三极管	11
1.4* 场效应管	16
自测题1	22
习题1	24
第2章 放大电路基础	26
2.1 放大电路的组成	26
2.2 放大电路的分析方法	27
2.3 放大电路静态工作点的稳定	33
2.4 共集电极和共基极放大电路	37
2.5* 场效应管放大电路	40
2.6 多级放大电路	43
2.7 差动放大电路	46
2.8 功率放大电路	53
自测题2	61
习题2	62
第3章 集成运算放大器和负反馈放大电路	66
3.1 集成运算放大器应用基础	66
3.2 放大电路中的负反馈	72
3.3 集成运算放大器的线性应用	80
3.4 集成运算放大器的非线性应用	88
自测题3	94
习题3	96
第4章 正弦波振荡电路	99
4.1 自激振荡原理	99
4.2 RC 振荡电路	100
4.3 LC 振荡电路	102
4.4 石英晶体振荡电路	105
自测题4	107
习题4	108
第5章 直流稳压电源	110
5.1 概述	110
5.2 整流滤波电路	110
5.3 直流稳压电路	114

5.4* 晶闸管及单相可控整流电路	118
自测题 5	128
习题 5	129
第 6 章 数字电路基础知识	132
6.1 数字电路概述	132
6.2 数制与编码	133
6.3 逻辑代数基础	136
自测题 6	147
习题 6	148
第 7 章 集成逻辑门电路与组合逻辑电路	150
7.1 概述	150
7.2 TTL 集成逻辑门电路	154
7.3 CMOS 集成电路	161
7.4 组合逻辑电路	163
7.5 组合逻辑器件	166
自测题 7	178
习题 7	179
第 8 章 集成触发器和时序逻辑电路	183
8.1 概述	183
8.2 集成触发器	183
8.3 时序逻辑电路	189
8.4 寄存器及其应用	200
8.5 555 定时器及其应用	203
自测题 8	208
习题 8	209
第 9 章 D/A 和 A/D 转换器	212
9.1 概述	212
9.2 D/A 转换器 (DAC)	212
9.3 A/D 转换器 (ADC)	216
自测题 9	220
习题 9	221
第 10 章 存储器和可编程逻辑器件	222
10.1 概述	222
10.2 存储器	222
10.3 可编程逻辑器件	229
10.4 在系统可编程逻辑器件 (ISP-PLD)	232
自测题 10	239
习题 10	239
参考文献	240

第1章 半导体器件

内 容 提 要

本章主要介绍半导体的基本知识,讨论半导体二极管、三极管、场效应管的结构、工作原理、特性曲线和主要参数。

1.1 半导体的基础知识

自然界中的材料按导电能力的不同可分为导体、绝缘体和半导体三大类。导体多指人们所熟悉的各类金属材料,电阻率很小,导电能力很强。绝缘体的电阻率大,基本不导电,如塑料、橡胶、陶瓷等。半导体是导电能力介于导体和绝缘体之间的一大类物质的总称。常用的半导体材料有硅(Si)、锗(Ge)和化合物砷化镓(GaAs)等。

用半导体材料制作电子元器件,并不在于它的导电能力介于导体和绝缘体之间,而是它具有下列的重要特性:

(1) 热敏性:半导体的导电能力随温度的升高显著增强。例如,纯净的硅,当温度从 30°C 升高到 40°C 时,电阻率减小一半;而金属导体铜,当温度从 30°C 升高到 100°C 时,电阻率的增加还不到1倍。利用这种特性可制成各种热敏元器件,如热敏电阻、温度传感器等。

(2) 光敏性:半导体的电阻率随着光照(包括各种射线)的增强而明显地下降。利用这种特性可以做成各种光敏元器件,如光敏电阻和光电管等。

(3) 掺杂性:在半导体中掺入其他微量元素(杂质),其导电能力会显著增加。例如,纯净的硅在室温时的电阻率为 $2.14 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$,如果在其中掺入百万分之一浓度的杂质磷,此时硅的纯度仍可高达99.9999%,但它的电阻率却下降到 $0.2 \Omega \cdot \text{cm}$,因此导电能力提高了百万倍。利用这种性质可以制成各种各样的半导体二极管和三极管。

半导体为何具有如此导电特性,而导体和绝缘体不具有呢?主要是半导体的导电机理与导体、绝缘体不同。

1.1.1 本征半导体

本征半导体是指纯净的、晶格完整的半导体。最常用的本征半导体是硅晶体和锗晶体,它们的原子序数分别为14和32,并且最外层轨道上都有四个价电子,同属于四价元素。硅和锗原子结构示意图和简化模型如图1.1(a)、(b)和(c)所示。

大量的硅原子或锗原子形成晶体结构时,相邻原子之间价电子共用,构成共价键。每一个硅原子与周围四个相邻原子由于共价键而紧密结合起来,形成一个三维的空间立体结构。硅晶体结构平面示意图如图1.2所示。

在热力学温度零度(即 $T=0\text{K}$,约为 -273°C)时,价电子无法挣脱共价键的束缚,没有自由电子,此时半导体相当于绝缘体,不能导电。

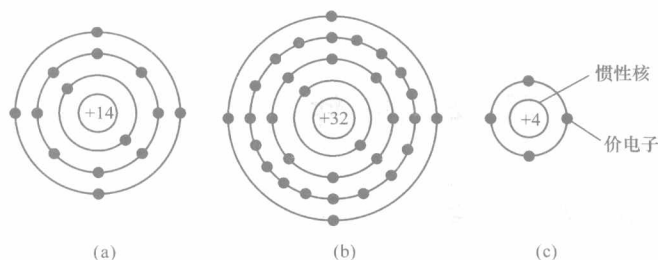


图 1.1 硅原子、锗原子结构示意图和简化模型

(a) 硅原子; (b) 锗原子; (c) 简化模型

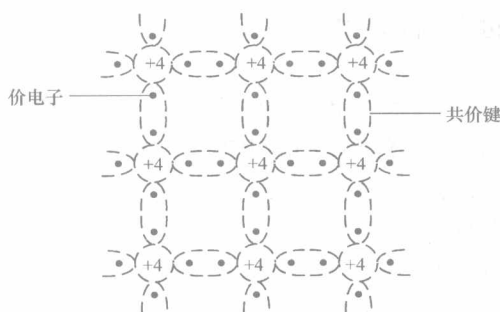


图 1.2 硅晶体结构平面示意图

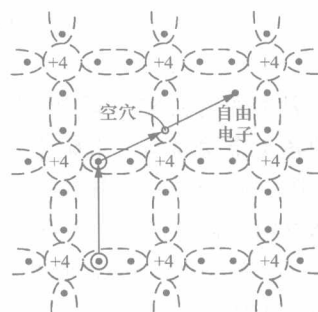


图 1.3 本征半导体中的热激发

在外加电场或其他能源的作用下,邻近价电子就可填补到这个空位上,而在这个电子原来的位置上又留下新的空位,以后其他电子又可转移到新空位上,空穴是由于失去一个电子而形成的,空穴可以看成带正电的导电粒子,因此空穴能参与导电。

可见,在本征半导体中存在自由电子和空穴两种参与导电载流子。在外电场的作用下,半导体中有两种形式的电流:自由电子做定向移动所形成的电子电流和仍被原子核束缚的价电子递补空穴形成的空穴电流。在半导体中同时存在电子导电和空穴导电,这是半导体导电的最大特点,也是半导体与金属在导电原理上的本质区别。

热激发产生的自由电子,也会释放能量返回到附近的空穴,这种现象称为复合。在本征半导体中不断地进行着激发与复合两种相反的过程,当温度一定时,两种状态达到动态平衡,即本征激发产生的电子—空穴对,与复合的电子—空穴对数目相等,这种状态称为热平衡状态。

常温下由热激发产生的电子—空穴对的数量是很少的,因此本征半导体的导电能力很差。当温度升高或光照增强时,电子—空穴对的数量将大大增加,导电能力将大大提高,这就是半导体具有热敏性和光敏性的基本原理。更为突出的是,在本征半导体中掺入杂质,半导体的导电性能会显著增加。

1.1.2 杂质半导体

本征半导体导电能力很差,但如果在本征半导体内掺入微量的其他元素的原子,就会使其导电能力大大提高,掺入杂质后形成的半导体称为杂质半导体。根据掺入杂质的不同,杂质半导体有 N 型和 P 型两种。

一、N 型半导体

在本征半导体中,掺入微量的五价杂质元素,如磷、砷、锑等,使原来晶格中的某些硅

当温度升高,价电子获得能量使热运动加剧。在常温下,少量价电子受热激发获得足够的能量,挣脱了共价键的束缚成为自由电子,同时,在原来共价键的位置上留下一个空位,称为空穴。如图 1.3 所示,这种由于本征半导体受热而产生电子—空穴对的现象称为本征激发,也称为热激发。

原子被杂质原子所取代,便构成 N 型半导体。由于杂质原子有五个价电子,其中四个价电子与相邻的四个硅原子的价电子形成共价键,还剩一个价电子,这个价电子不受共价键的束缚,只受原子核的吸引,在室温下,该价电子所获得的热能使它摆脱原子核的吸引而成为自由电子,则杂质原子因失去一个价电子而成为不能移动的杂质正离子,如图 1.4 所示。

在 N 型半导体中,由于杂质原子产生自由电子的同时并不产生空穴,因此自由电子的浓度远大于空穴的浓度,故称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)。由于五价杂质原子能释放出电子,因此这类杂质原子称为施主原子。

二、P 型半导体

在本征半导体中,掺入微量的三价杂质元素,如硼、镓、铟等,便构成 P 型半导体。由于杂质原子只有三个价电子,当杂质原子替代硅原子的位置后,杂质原子的三个价电子仅与相邻的三个硅原子的价电子形成共价键,与第四个相邻的硅原子不能构成完整的共价键而出现一个空位。这个空位极易接受其他硅原子共价键中的价电子,使杂质原子成为带负电的杂质负离子,同时硅原子的共价键中因缺少一个价电子而产生一个空穴,如图 1.5 所示。

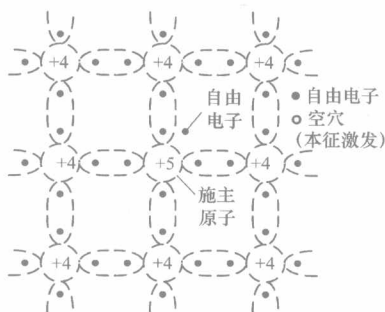


图 1.4 N 型半导体

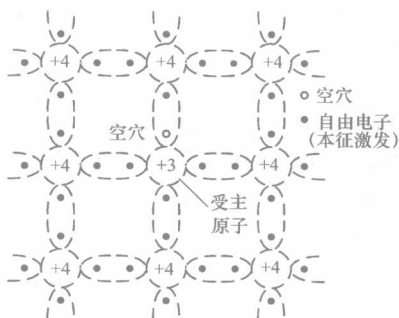


图 1.5 P 型半导体

由于三价杂质原子所产生的空位起着接受电子的作用,因此称之为受主原子。在 P 型半导体中,由于掺入的是三价杂质元素,使空穴浓度远大于自由电子浓度,因此空穴为多数载流子,自由电子是少数载流子。

必须指出的是,不论是 N 型半导体还是 P 型半导体,虽然都是一种载流子占多数,但整个晶体中正负电荷数量相等,呈现电中性。

1.1.3 PN 结

在本征半导体两侧,利用不同的掺杂工艺,分别制成 N 型半导体和 P 型半导体,在它们的交界处便形成 PN 结。

一、PN 结的形成

在 P 型半导体和 N 型半导体的交界处,由于载流子浓度的差异,载流子会从浓度高的区域向浓度低的区域产生扩散运动。N 型半导体的多子(自由电子)向 P 区扩散, P 型半导体的多子(空穴)向 N 区扩散,如图 1.6 (a) 所示。扩散后,在 N 区一侧由于失去电子而留下了不能移动的杂质正离子,在 P 区一侧由于失去空穴而留下了不能移动的杂质负离子。扩散到对方的载流子成为异型半导体中的少子而与该区的多子复合。这样,在交界面两侧就出现了由不能移动的杂质正负离子构成的空间电荷区,也就是 PN 结,如图 1.6 (b) 所示。

由于空间电荷区中的载流子已经复合或者说消耗尽了，因此空间电荷区又称为耗尽层。

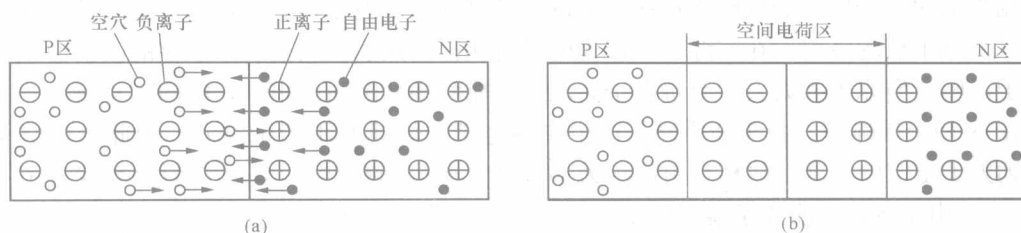


图 1.6 PN 结的形成

(a) 载流子的扩散运动；(b) 空间电荷区

在空间电荷区里，由于内部载流子扩散运动而形成内电场，内电场方向由 N 区指向 P 区。在内电场的作用下，少数载流子产生漂移运动，即 N 区的少子（空穴）漂移到 P 区，P 区的少子（自由电子）漂移到 N 区。漂移运动的结果是使空间电荷区变窄。显然，漂移运动的方向与扩散运动的方向相反。由于内电场阻止多子的扩散运动、增强少子的漂移运动，因此又将这个空间电荷区称为阻挡层。

当多子的扩散运动和少子的漂移运动达到动态平衡时，由多子扩散运动所形成的扩散电流和少子的漂移运动所形成的漂移电流相等，且两者方向相反。此时，空间电荷区的宽度一定，PN 结电流为零，PN 结处于动态的稳定状态。

二、PN 结的单向导电性

(一) 正向特性

若 PN 结外加正向电压，即 P 区接电源正极，N 区接电源负极，则称 PN 结处于正向偏置（简称正偏），如图 1.7 所示。此时，在 PN 结处外电场方向与内电场方向相反，削弱了内电场对扩散运动的阻碍作用，空间电荷区变窄，多子的扩散运动大大地超过少子的漂移运动；与此同时，电源负极不断补充 N 区由于扩散所减少的电子，电源正极不断拉走电子以保持扩散后 P 区的空穴浓度。因此当外加电压增大到一定值以后，PN 结上流过较大的电流，称 PN 结处于正向导通状态。

可见，PN 结正偏时，PN 结中的电流主要是由扩散运动所形成的扩散电流，它是两种多数载流子的电流之和，称为正向电流。为了防止 PN 结因电流过大而损坏，通常在回路中串联一个电阻 R ，起限流作用。

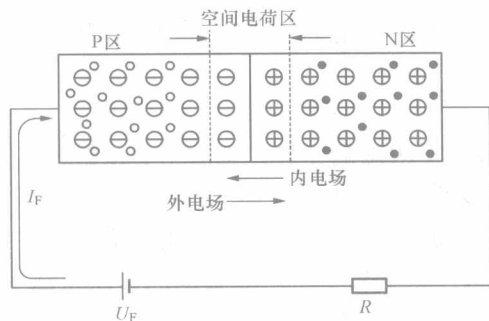


图 1.7 PN 结处于正向偏置

(二) 反向特性

若 PN 结外加反向电压，即 P 区接电源的负极，N 区接电源的正极，则称 PN 结处于反向偏置（简称反偏），如图 1.8 所示。此时，外电场增强了内电场对扩散运动的阻碍作用，空间电荷区变宽，促进少子的漂移运动，阻止多子的扩散运动。此时，流过 PN 结的电流主要是少子的漂移电流，但由于少子是由本征激发产生的，其浓度很低，因此反向电流数值很小，称 PN 结处于几乎不导电的截止状态。

在一定的温度下,当外加反向电压超过某个数值(约为零点几伏)后,反向电流将不再随着外加反向电压的增加而增大,故称为反向饱和电流,用 I_S 表示。

综上所述,PN 结正偏时,处于导通状态,回路中有较大的正向电流,其等效电阻很小;PN 结反偏时,回路中的反向电流很小,等效电阻很大,PN 结呈截止状态。这就是 PN 结的单向导电性。

三、PN 结的电容特性

实践证明,PN 结的单向导电性仅在直流或外加电压变化非常缓慢的情况下才是正确的。当外加电压变化很快时,PN 结的单向导电性就不完全成立,其主要原因是 PN 结的电容效应。在 PN 结内部由于载流子运动所产生的电容效应主要有势垒电容和扩散电容,PN 结的结电容为两者之和。

当 PN 结正向偏置时,PN 结结电容以扩散电容为主,其值为几十皮法到几百皮法;当 PN 结反向偏置时,PN 结结电容以势垒电容为主,其值为几皮法到几十皮法。

结电容的容抗与工作频率有关,结电容的大小限制了 PN 结的最高工作频率。

思 考 题

1.1.1 什么是 N 型半导体?什么是 P 型半导体?它们在导电性能上各有何特点?当两种半导体制作在一起时会产生什么现象?

1.1.2 什么是 PN 结的正向偏置和反向偏置?为什么 PN 结具有单向导电性?

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的结构

半导体二极管(简称二极管)是以 PN 结为管芯,加管壳封装构成。由 P 区引出的电极称为阳极或正极,由 N 区引出的电极称为阴极或负极。二极管具有单向导电性。其结构及电路符号如图 1.9 所示。

二极管种类很多。按材料分为锗二极管、硅二极管等。按管芯结构不同,二极管可分为点接触型和面接触型两种,如图 1.10 所示。点接触型二极管的 PN 结面积小,结电容小,适用于高频小电流电路中;面接触型二极管适用于低频大电流电路中。按用途不同分为整流二极管、检波二极管、变容二极管、稳压二极管、开关二极管、发光二极管等。

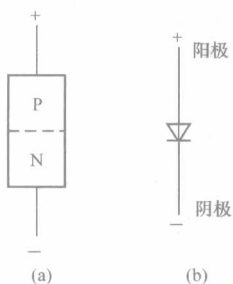


图 1.9 二极管的结构及符号
(a) 结构; (b) 符号

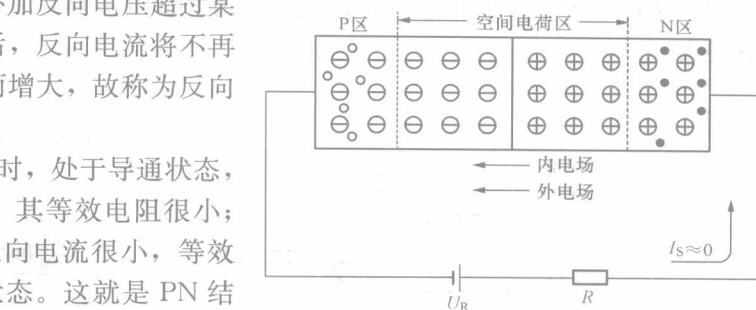


图 1.8 PN 结处于反向偏置

1.2.2 二极管的伏安特性

把二极管上所加电压与流过二极管的电流之间的关系称为二极管的伏安特性,可通过实验测出。图 1.11 所示的是小功率

的硅管和锗管的伏安特性曲线。可以看出，二极管的伏安特性是非线性的，正反向导电性能差异很大。

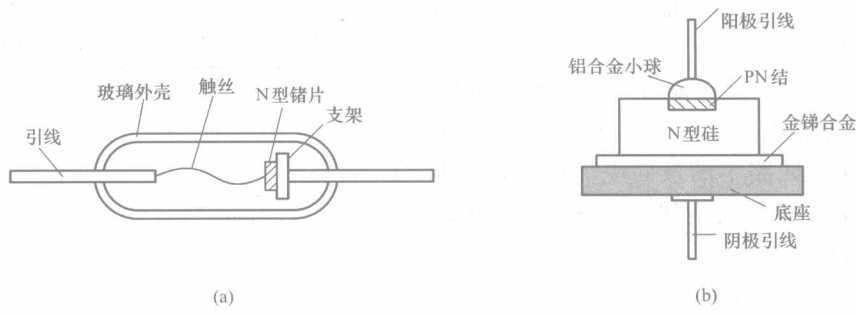


图 1.10 点接触型和面接触型二极管
(a) 点接触型；(b) 面接触型

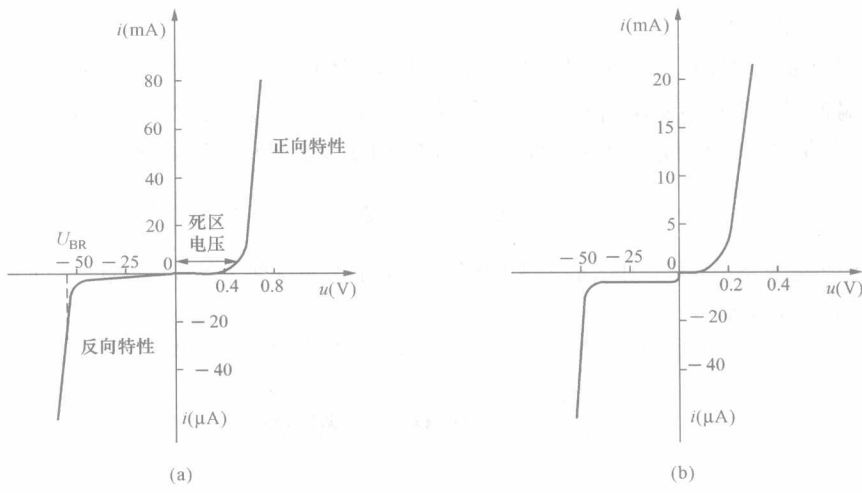


图 1.11 二极管的伏安特性曲线
(a) 2CP10 硅二极管；(b) 2AP2 锗二极管

一、正向特性

当二极管所加正向电压很小时，正向电流几乎为零。只有在正向电压足够大时，正向电流将增长很快，称为正向导通。使二极管开始导通的临界电压称为“死区电压”或“门坎电压”。死区电压的大小与材料和温度有关，通常，硅管的死区电压约为 0.5V、锗管约为 0.1V。正向导通时，硅管的压降约为 0.6~0.8V，锗管的压降约为 0.2~0.3V。

二、反向特性

当二极管加反向电压时，由于少子的漂移运动，形成很小的反向电流。当二极管所加反向电压的数值足够大时，反向电流为 I_s 。小功率硅管的反向饱和电流 I_s 小于 $0.1\mu A$ ，锗管约为几十微安。温度升高时，由于少数载流子增加，反向电流将随之增大。

三、反向击穿特性

当反向电压增大到某一电压值 U_{BR} 时，反向电流会突然急剧增加，二极管失去单向导电性，这种现象称为反向击穿。 U_{BR} 为二极管的反向击穿电压。反向击穿后，反向电流可以变

化很大,而二极管两端的反向电压几乎不变。

反向击穿有电击穿(含雪崩击穿、齐纳击穿)和热击穿两种形式。发生电击穿时,只要反向电流和反向电压的乘积不超过二极管的允许耗散功率,二极管一般不会烧毁。反向电压撤销后,二极管仍能正常工作。热击穿则是破坏性击穿,当反向电压过高,反向电流过大时,二极管耗散功率超过允许值,将引起恶性循环,将很快导致二极管因过热而损坏。

四、温度对二极管的影响

当温度升高时,二极管的正向特性曲线向左移动,死区电压减小,反向特性曲线向下移动。实验证明,在室温下,温度每升高 1°C ,正向压降减小 $2\sim 2.5\text{mV}$;温度每升高 10°C ,反向饱和电流 I_S 大约增加 1 倍。

1.2.3 二极管的主要参数

一、最大整流电流 I_F

它是指二极管长时间使用时,允许流过二极管的最大正向平均电流值。当电流超过此值,会因 PN 结过热使二极管损坏。

二、反向电流 I_R

它是二极管未击穿时的反向电流值。反向电流大,说明二极管的单向导电性差,并受温度影响大。

三、最高反向工作电压 U_{RM}

工作时加在二极管两端的反向电压不得超过此值。为确保管子安全运行,一般手册中的 U_{RM} 值是击穿电压 U_{BR} 值的 $\frac{1}{2}$ 或 $\frac{2}{3}$ 。

四、最高工作频率

二极管两端电压变化的频率不能超过最高工作频率值。当频率过高时,PN 结的电容效应将使二极管的单向导电性变差。结电容小的二极管,最高工作频率较高。

1.2.4 二极管应用电路

从二极管的伏安特性曲线可以看出,二极管是非线性器件,在实际计算中,常将伏安特性曲线简化,从而得到对应的简化曲线及其等效电路,如图 1.12 所示。

图 1.12 (a) 所示为理想二极管,即二极管正偏时正向压降为零、正向电阻为零,反偏时反向电流为零、反向电阻为无穷大。图 1.12 (b) 所示为开关等效电路,当正偏电压大于 U_D 时二极管才导通。一般小功率硅管的 U_D 约为 $0.6\sim 0.7\text{V}$,锗管的 U_D 约为 $0.2\sim 0.3\text{V}$ 。

究竟采用哪一种等效电路进行计算,则要看二极管的 U_D 和 I_S 在电路中能否忽略,以及对计算精度的要求来决定。

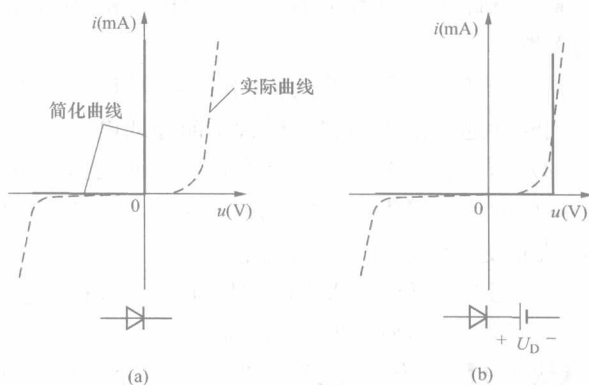


图 1.12 二极管伏安特性曲线简化和等效电路

(a) 理想二极管; (b) 开关等效电路

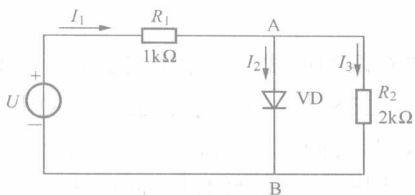


图 1.13 [例 1.1] 图

【例 1.1】 图 1.13 中, VD 为硅二极管, 试求当 U 为 12V 和 2V 时电路中的电流 I_1 、 I_2 、 I_3 和电压 U_{AB} 值 (要求二极管用两种等效电路计算)。

解 电压和电流的参考极性和方向如图 1.13 所示。当 $U=12\text{V}$ 时, 二极管正向导通。

(1) 理想等效电路计算: $U_D=0$, 则

$$I_1 = \frac{U - U_{AB}}{R_1} = \frac{U - U_D}{R_1} = \frac{12 - 0}{1} = 12(\text{mA})$$

$$I_2 = 12\text{mA}; I_3 = 0; U_{AB} = 0\text{V}$$

(2) 开关等效电路计算: $U_D=0.7\text{V}$, 则

$$I_1 = \frac{U - U_{AB}}{R_1} = \frac{U - U_D}{R_1} = \frac{12 - 0.7}{1} = 11.3(\text{mA})$$

$$I_3 = \frac{U_{AB}}{R_2} = \frac{U_D}{R_2} = \frac{0.7}{2} = 0.35(\text{mA})$$

$$I_2 = I_1 - I_3 = 11.3 - 0.35 \approx 11(\text{mA})$$

$$U_{AB} = 0.7\text{V}$$

(1)、(2) 两种等效电路计算结果, 电流误差小于 10%, 在电子电路计算中是允许的。当 $U=2\text{V}$ 时, 二极管也正向导通。

(3) 理想等效电路计算: 方法同 (1), 可得

$$I_1 = 2\text{mA}; I_2 = 2\text{mA}; I_3 = 0; U_{AB} = 0\text{V}$$

(4) 开关等效电路计算: 方法同 (2), 可得

$$I_1 = 1.3\text{mA}, I_3 = 0.35\text{mA}, I_2 \approx 1\text{mA}, U_{AB} = 0.7\text{V}$$

由于电源电压较低, 第 (3) 种计算结果误差太大, 第 (4) 种计算较为准确。

【例 1.2】 由二极管组成的开关电路如图 1.14 所示, 当 A、B 两端电位为

(1) $U_A=U_B=0\text{V}$;

(2) $U_A=3\text{V}, U_B=0\text{V}$;

(3) $U_A=U_B=3\text{V}$ 。

判断图中二极管是导通还是截止, 并求电路的输出电压 u_o 。(设二极管是理想二极管)。

解 从图中可以看出 A、B 两点电位的相对高低影响了 VDA 和 VDB 两个二极管的导通与关断。

(1) 当 A、B 两点的电位同时为 0V 时, VDA 和 VDB 两个二极管均加相同的正向电压, 同时导通。由于理想二极管正向导通电压为 0, 所以 $u_o=0\text{V}$ 。

(2) 当 $U_A=3\text{V}, U_B=0\text{V}$ 时, VDB 的阳极电位约为 +5V, 阴极电位为 0V, VDB 承受正压而导通, 一旦 VDB 导通, 则 $u_o=0\text{V}$, 从而使 VDA 承受反压截止。

(3) 当 $U_A=U_B=3\text{V}$ 时, 即 VDA 和 VDB 均承受相同的正向电压, 所以两二极管同时导通, $u_o=3\text{V}$ 。

【例 1.3】 二极管电路如图 1.15 所示, 试判断图中的二极管是导通还是截止, 并求出 AO 两端电压 U_{AO} 。设二极管是理想的。

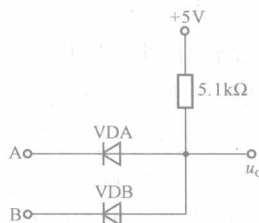


图 1.14 [例 1.2] 图

解 图 1.15 (a) 中, 将 VD 断开, 以 O 点为电位参考点, VD 的阳极电位为 -6V , 阴极电位为 -12V , 故 VD 处于正向偏置而导通, $U_{AO} = -6\text{V}$ 。

图 1.15 (b) 中, 对 VD1 的阳极电位为 0V , 阴极电位约为 -12V , 故 VD1 导通; 由于 VD1 导通后, 使 VD2 的阴极电位为 0V , 而其阳极为 -15V , 故 VD2 反偏截止, $U_{AO} = 0\text{V}$ 。

【例 1.4】 在图 1.16 (a)、(b) 所示电路中, 设 VD 为理想二极管, 已知输入电压 $u_i = 10\sin\omega t$ (V), 试画出输出电压 u_{AO} 的波形图。

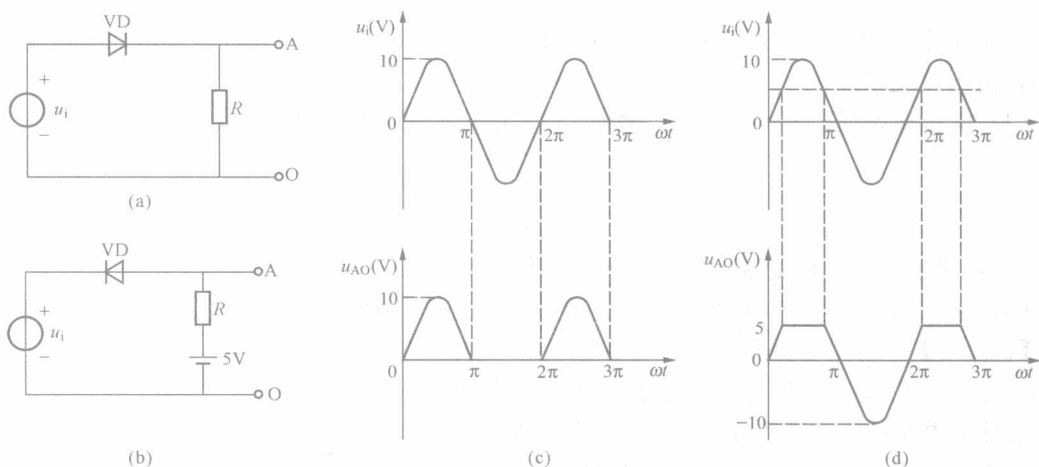


图 1.16 [例 1.4] 图

解 图 1.16 (a) 中, 当二极管 VD 导通时, 电阻为零, 所以 $u_{AO} = u_i$; 当 VD 截止时, 电阻为无穷大, 相当于断路, 因此 $u_{AO} = 0\text{V}$, 其波形如图 1.16 (c) 所示。

图 1.16 (b) 中, 当 $u_i < 5\text{V}$ 时, 二极管 VD 承受正向电压导通, 所以 $u_{AO} = u_i$; 当 $u_i > 5\text{V}$ 时, VD 截止, 因此 $u_{AO} = 5\text{V}$, 其波形如图 1.16 (d) 所示。

1.2.5 特殊二极管

一、稳压二极管

稳压二极管 (简称稳压管) 是一种特殊的面接触型硅二极管, 稳压管的符号及伏安特性曲线如图 1.17 所示。

稳压管的伏安特性与普通二极管相似, 两者正向特性相同, 正偏时的正向压降在 $0.6 \sim 0.8\text{V}$ 之间, 不同之处是稳压二极管的反向击穿特性曲线很陡。

稳压二极管正常工作在反向击穿区。由于曲线很陡, 反向电流有较大的变化量时, 相应的电压变化量却很小, 利用这一特性可实现稳压作用。只要反向电流不超过其最大稳定电

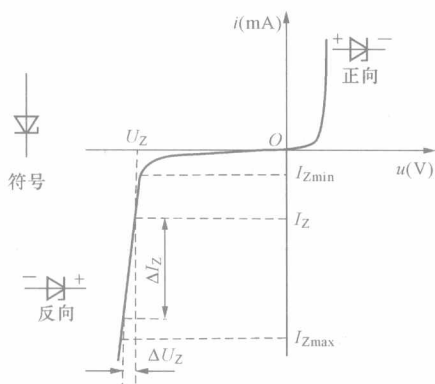


图 1.17 稳压二极管的符号与伏安特性

流, 就不会引起破坏性的击穿, 因此, 在电路中常与稳压二极管串联一个适当阻值的限流电阻。

稳压管的主要参数如下:

(1) 稳定电压 U_Z : 稳定电压是指稳压管在正常工作时管子两端的电压, PN 结的反向击穿电压, 它随工作电流和温度的不同而略有变化。对于同一型号的稳压管来说, 稳压值有一定的离散性。

(2) 稳定电流 I_Z : 是工作电压等于稳定电压时的工作电流, 是稳压管工作时的参考电流值。

(3) 动态电阻 r_Z : 是稳压管两端电压变化与电流变化的比值, 即

$$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} \quad (1.1)$$

r_Z 值很小, 约为几欧到几十欧, 且随工作电流的不同而改变。反向击穿区曲线越陡, r_Z 越小, 稳压性能越好。

(4) 电压温度系数 C_{TV} : 温度每增加 1°C , 稳定电压的相对变化量, 即

$$C_{TV} = \frac{\Delta U_Z}{U_Z} \times 100\% \quad (1.2)$$

C_{TV} 用来说明稳压值受温度变化影响的系数。

(5) 最大耗散功耗 P_{ZM} : 是指管子允许温升限定的最大功率耗散, $P_{ZM} = I_{Zmax} U_Z$ 。

【例 1.5】 利用稳压管组成的简单应用电路如图

1.18 所示, 图中输入电压是待稳定的直流电源电压 (例如整流滤波电路提供的不稳定电压), R 为限流电阻, 稳压管 VZ 并接在负载 R_L 两端。试分析输出电压的稳定原理。

解 由图 1.18 可知

$$U_o = U_Z = U_S - (I_Z + I_L)R$$

$$I_R = I_Z + I_L$$

当 U_S 或 R_L 发生变化时, VZ 两端电压的微小变化会引起 I_Z 的较大变化, 这种电流变化会改变限流电阻 R 上的压降, 达到维持输出电压基本稳定的目的。

例如, 当 R_L 固定, U_S 增大时, 将有下列的自动调节过程:

$$U_S \uparrow \rightarrow U_o \uparrow \rightarrow I_Z \uparrow \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow I_R R \uparrow$$

$$U_o \downarrow \leftarrow$$

其结果是通过稳压管的调节作用, 输出电压基本维持恒定。同理当 U_S 减小或 R_L 变化时, 也会有一个自动调节过程, 以维持输出电压基本不变。

选择稳压管时应注意: 流过稳压管的电流 I_Z 不能过大, 应使 $I_Z \leq I_{Zmax}$, 否则会超过稳压管的允许功耗; I_Z 也不能太小, 应使 $I_Z \geq I_{Zmin}$, 否则不能稳定输出电压, 这样使输入电压和负载电流的变化范围都受到一定限制。

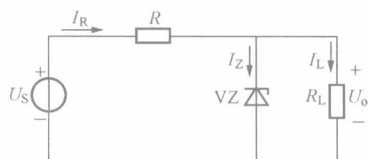


图 1.18 稳压二极管稳压电路

二、发光二极管

发光二极管 (LED) 是一种把电能直接转换成光能的固体发光器件。通常用化学元素周期表中Ⅲ、Ⅴ族元素的化合物, 如砷化镓 (GaAs)、磷化镓 (GaP) 等制成, 内部仍是一个 PN 结。发光二极管的波长由所使用的基本材料而定。发光二极管的符号见图 1.19。



图 1.19 LED 符号

发光二极管的正向工作电压一般在 $1.5 \sim 3\text{V}$, 允许通过的电流为 $2 \sim 20\text{mA}$, 电流的大小决定发光的亮度。

发光二极管主要用来作为显示器件, 除单独使用外, 还可制成数码管或阵列显示器。利用发光二极管和光电器件可以实现两个相互绝缘隔离的电路系统之间的电—光—电信号的转换。光电耦合器就是这一类器件。

思考题

- 1.2.1 二极管的正向特性有何特点?
- 1.2.2 为什么二极管的反向饱和电流与外加反向电压基本无关, 而当环境温度升高时又明显增大?
- 1.2.3 用万用表测量二极管的正向电阻时, 用 $R \times 100$ 档测出的电阻值小, 而用 $R \times 1\text{k}\Omega$ 档测出的阻值大, 为什么?
- 1.2.4 怎样用万用表判断二极管的正极和负极及管子的好坏?
- 1.2.5 稳压二极管有何特点?

1.3 半导体三极管

1.3.1 三极管的结构和类型

半导体三极管又称为晶体三极管、双极型三极管, 简称三极管。其基本结构是由两个 PN 结组成。三极管有 NPN 和 PNP 两种类型, 其结构示意图和符号如图 1.20 所示。

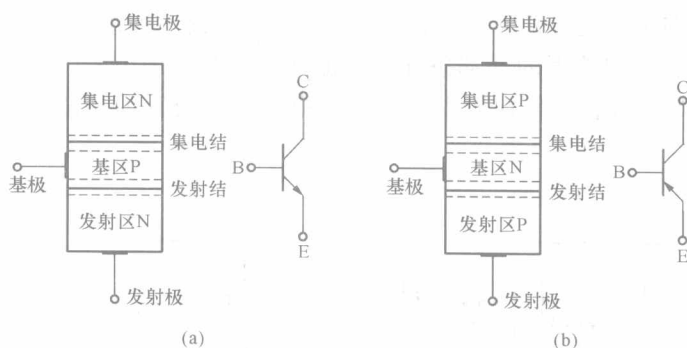


图 1.20 三极管的结构示意图与符号

(a) NPN 型; (b) PNP 型

图 1.20 (a) 中, 在一块晶片 (硅片或锗片) 上用不同的掺杂方式制造出三个掺杂区, 依次称为发射区、基区和集电区, 发射区和基区之间的 PN 结称为发射结, 基区和集电区之间的 PN 结称为集电结。相对于三个区域分别引出三个电极, 即发射极 E (Emitter)、基极