



银领工程系列

模拟电子技术

林春方 杨建平 主编



高等教育出版社
Higher Education Press

银领工程系列

模拟电子技术

林春方 杨建平 主编

高等教育出版社

内容提要

本书内容简明、文字精练,重点突出,便于自学。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地结合在一起;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。主要内容包括常用半导体器件、双极型晶体管放大电路、负反馈放大电路、集成运算放大器、波形发生器、直流稳压电源等。每章都有电路调整与测试的技能训练项目。技能训练内容丰富、实用,并引入计算机仿真工具 EWB。

本书可作为高等职业院校、高等专科院校、成人高校、民办高校及本科院校举办的二级职业技术学院电子信息类、通信类及相关专业的教学用书,也适用于五年制高职、中职相关专业,并可作为社会从业人士的业务参考书及培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术 / 林春方, 杨建平主编. —北京: 高等教育出版社, 2006. 5

ISBN 7-04-019226-8

I. 模... II. ①林...②杨... 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(2006)第 027529 号

策划编辑 孙 杰
版式设计 胡志萍

责任编辑 欧阳舟
责任校对 朱惠芳

封面设计 王凌波
责任印制 韩 刚

责任绘图 朱 静

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京鑫丰华彩印有限公司

网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 787×1092 1/16
印 张 12.75
字 数 300 000

版 次 2006 年 5 月第 1 版
印 次 2006 年 5 月第 1 次印刷
定 价 15.20 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

物料号 19226-00

前言

“模拟电子技术”是电子信息类和通信类专业入门性质的重要技术基础课程,也是一门实践性很强的课程,本课程的学习目标是使学生掌握电子技术方面的基本理论、基础知识和基本技能,培养学生分析问题和解决问题的能力,并为学习后续课程和今后在实际工作中应用电子技术打好基础。

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地结合在一起,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。每章都有电路调整与测试的技能训练项目。技能训练内容丰富、实用,并引入计算机仿真工具 EWB。在编写过程中,按高职教材在理论上“必需”、“够用”的原则,着重讲清物理概念,避免繁琐的理论计算和推导,着重介绍比较实用的工程计算和近似估算方法,使教材在内容上做到清楚、准确、简洁,通俗易懂,可读性好。

通过本课程的教学,应使学生达到如下基本要求:

1. 熟悉常用电子元器件的特性和主要参数,具有识别元器件和检测器件的能力,具有查阅器件手册和正确选用器件的能力。
2. 掌握常用基本单元电路和典型电路的结构、工作原理和功能,熟练掌握分析电子电路的基本方法,能对电子电路进行定性分析和工程估算,具有根据需要提供选择适用电路和使用集成电路的能力。
3. 具有识读整机电路图的能力。
4. 掌握电子技术的基本技能,具有实际操作的能力。

本书由安徽电子信息职业技术学院林春方,无锡职业技术学院杨建平担任主编,林春方负责全书的统稿工作,并编写了第五章、第六章;曹光跃编写了第三章、第四章和附录 B;方庆山编写了附录 C;杨建平编写了第一章、第二章。北京理工大学刘蕴陶老师认真审阅了本书的全部书稿,并提出了宝贵的建议和修改意见。在编写过程中,还得到安徽电子信息职业技术学院的领导和老师们的大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2005 年 10 月

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 信号源电阻
 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

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 3 dB 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} 集电极最大允许耗散功率

η 效率

6. 其它

F 反馈系数

F_u 电压反馈系数

H 双端口网络混合参数

K 乘法器增益系数

K_{CMR} 共模抑制比

Q 静态工作点、品质因数

V 二极管、双极型晶体管和场效晶体管

T, t 时间、周期、温度

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)的总瞬时值, 例如, u_{BE} 表示基极与发射极之间电压的瞬时值。

4. 小写 $u(i)$ 小写下标, 表示交流电压(电流)的瞬时值, 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. 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。

注: 物理量用斜体。

目 录

第一章 常用半导体器件 1	第三节 集成运算放大器的典型运用 94
第一节 半导体的基础知识 1	第四节 集成运算放大器的主要参数和
第二节 二极管 5	使用注意事项 103
第三节 双极型晶体管 14	技能训练 5 集成运算放大器的调整
第四节 场效晶体管(FET) 20	与测试 105
第五节 晶闸管 27	本章小结 108
技能训练 1 元器件的识别与检测 30	习题 109
本章小结 40	第五章 波形发生器 112
习题 40	第一节 正弦波发生器 112
第二章 双极型晶体管放大电路 43	第二节 非正弦波发生器 125
第一节 放大电路的基本概念 43	技能训练 6 正弦波信号发生器的调整
第二节 单管共射极放大电路 46	与测试 132
第三节 共集电极电路和共基极电路 55	本章小结 134
第四节 场效晶体管放大电路 58	习题 135
第五节 差分放大电路 60	第六章 直流稳压电源 137
第六节 功率放大电路 63	第一节 单相整流滤波电路 137
技能训练 2 基本放大电路的调整与测试 69	第二节 串联型稳压电路 143
技能训练 3 功率放大电路的调整与测试 70	第三节 三端集成稳压器 145
本章小结 72	第四节 开关稳压电源 149
习题 73	技能训练 7 直流稳压电源的调整
第三章 负反馈放大电路 77	与测试 152
第一节 反馈放大电路的基本概念 77	本章小结 155
第二节 反馈的分类与判断 78	习题 155
第三节 负反馈对放大电路性能的影响 82	附录 A 半导体器件型号命名
第四节 放大电路引入负反馈的一般原则 86	方法 157
技能训练 4 负反馈放大电路的调整	附录 B 常用电子元器件的
与测试 86	使用知识 160
本章小结 89	附录 C 模拟电子技术 EWB
习题 89	仿真实验 168
第四章 集成运算放大器 91	参考文献 193
第一节 集成电路与集成运算放大器简介 91	
第二节 理想集成运放及其特点 93	

第一章

常用半导体器件

学习目标

- 了解本征半导体、杂质半导体及 PN 结的导电机理
- 掌握二极管、稳压管的伏安特性曲线、基本参数
- 掌握双极型晶体管、场效晶体管的特性曲线、基本参数及它们之间的差别
- 掌握半导体器件的认知和基本参数的测试,以提高实践应用能力

第一节 半导体的基础知识

自然界中的物质根据导电能力的不同分为导体、绝缘体和半导体。常用的导体一般为银、铜、铝等物体;绝缘体为橡胶、塑料、胶木等;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,由于硅的温度特性较好,因而应用得最为广泛。

将上述的半导体材料进行特殊加工,使其性能可控,即可用来制造构成电子电路的基本元件——半导体器件。

一、本征半导体

完全纯净的具有晶体结构的半导体称为本征半导体。

用于制造半导体器件的四价元素硅和锗,其最外层原子轨道上有 4 个电子(称为价电子)。经过单晶化后,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 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而成为自由电子,同时在共价键中留下一个空穴,即产生电子-空穴对。这种现象称为本征激发或热激发。

自由电子可以自由运动,而空穴本身虽不能移动,但空穴很容易吸引邻近共价键中的价电子去填补,使空穴发生转移,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动方向相反,因而可以认为空穴也是带一个单位正电荷且可以自由运动。此外自由电子

和空穴在运动中相遇时会重新结合而成为对消失,这种现象称为复合。当温度一定时,自由电子和空穴的产生与复合将达到动态平衡,这时电子-空穴对的浓度基本一定。

在电场作用下,自由电子和空穴将作定向运动,这种运动称为漂移运动,所形成的电流称为漂移电流。自由电子称电子载流子,空穴称空穴载流子。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。

在常温下本征半导体载流子浓度很低,因此导电能力很弱。本征半导体的导电能力与环境温度、光照强度密切相关,可以利用它来制作热敏和光敏器件,同时此特性又是半导体器件温度稳定性差的原因。

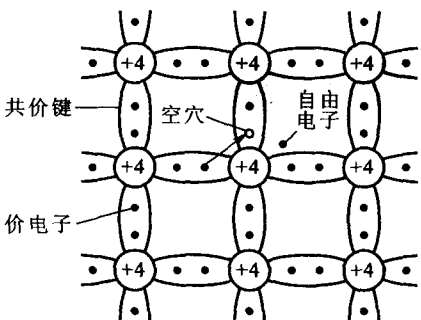


图 1-1 本征半导体的原子结构及本征激发示意图

二、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。按掺入杂质的不同可分为 N 型半导体和 P 型半导体。

(一) N 型半导体

在纯净的硅(或锗)中掺入微量五价元素(如磷 P、砷 As、锑 Sb 等)杂质后,杂质原子替代了晶格中某些四价元素原子的位置,就形成了 N 型半导体,如图 1-2(a)所示。

由于杂质原子最外层有 5 个电子,它与周围的四价元素原子结合成共价键时多余 1 个价电子,该价电子在常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不能移动的离子,称这类杂质原子为施主原子。杂质的掺入使自由电子的浓度大大增加,同时也使本征激发产生的空穴被复合的机会增多,使空穴浓度大大减少。所以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)。

N 型(或电子型)半导体主要靠自由电子导电,掺入杂质的浓度越高,自由电子(多子)的浓度就越高,导电能力也就越强。

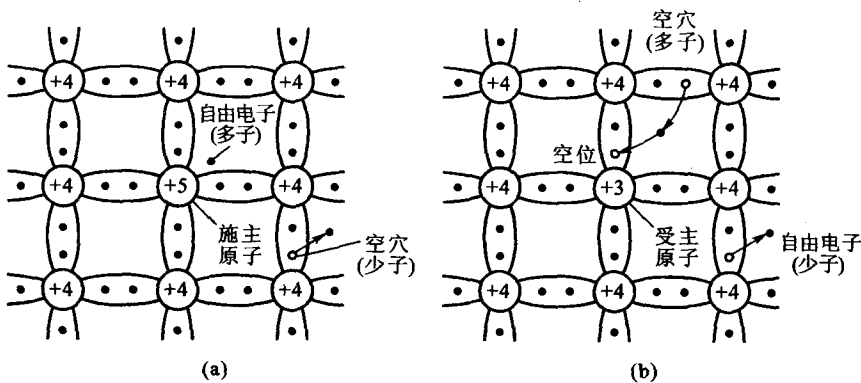


图 1-2 杂质半导体结构示意图
(a) N 型半导体 (b) P 型半导体

(二) P 型半导体

在纯净的硅(或锗)中掺入三价微量元素(如硼 B、铝 Al、镓 In 等)杂质后,杂质原子与周围的四价元素原子形成共价键时因缺少 1 个价电子而产生 1 个空位,常温下这个空位极易被邻近共价键中的价电子所填补,使杂质原子变成不能够移动的负离子,称这类杂质原子为受主原子,如图 1-2(b)所示,这种掺杂使空穴的浓度大大增加,而使空穴成为多子,自由电子为少子。称多数载流子为空穴的半导体为 P 型(或空穴型)半导体。导电时主要以空穴为主。

必须指出:杂质半导体中载流子(电子和空穴)虽有多少之分,但除此之外,还有不能移动的杂质离子,因而整个半导体仍呈电中性。

三、PN 结

(一) PN 结的形成

如果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,则在它们的交界面就形成了 PN 结。下面介绍 PN 结形成的物理过程。

由于在 P 型半导体和 N 型半导体交界面两侧存在着空穴和自由电子两种载流子浓度差,即 P 区的空穴浓度远大于 N 区空穴浓度, N 区的电子浓度远大于 P 区的电子浓度,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 1-3(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。结果交界面附近的 P 区因失去空穴而留下不能移动的负离子,同样 N 区因失去电子而留下不能移动的正离子,这样在交界面两侧就出现了数量相等的正、负离子组成的空间电荷

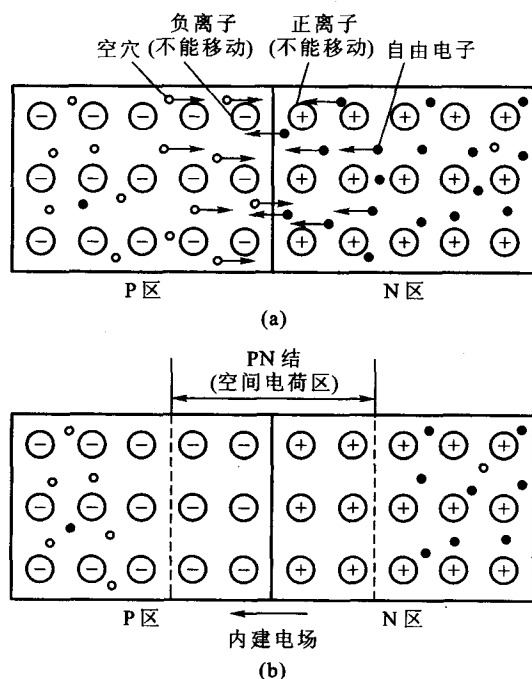


图 1-3 PN 结的形成

(a)载流子的扩散 (b)动态平衡时的 PN 结

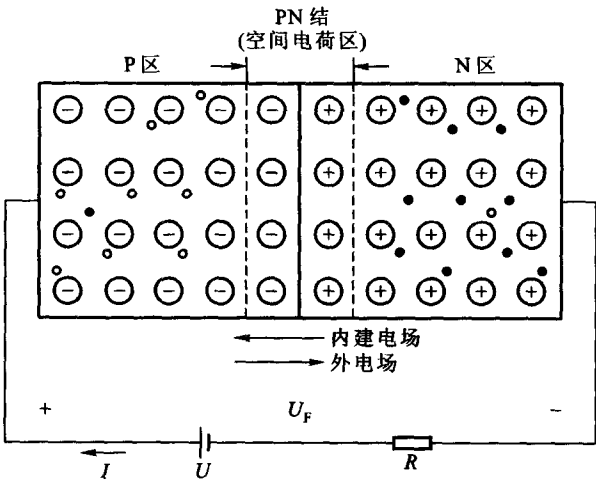
区。在这个区域内载流子被扩散了,因而也称此区为耗尽层。

在空间电荷区内带正电的 N 区和带负电的 P 区产生了一个由 N 区指向 P 区的内建电场。该电场一方面阻碍多子的扩散运动,使空间电荷区变窄,从这个角度上又可称 PN 结为阻挡层;另一方面促使两个区靠近交界面处的少子产生漂移运动,又使空间电荷区变窄。当外部条件一定时,扩散运动和漂移运动最终达到动态平衡,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。

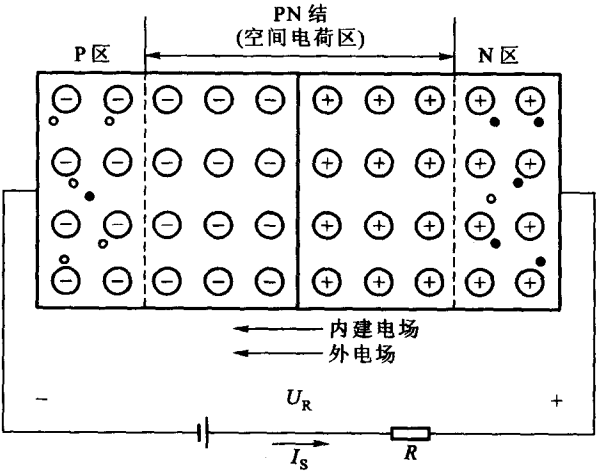
(二) PN 结的单向导电特性

1. 外加正向电压(又称正向偏置,简称正偏)

正向偏置即外加电压的正极接 P 区一侧、负极接 N 区一侧,如图 1-4(a) 所示。此时 PN 结经历了以下过程:



(a)



(b)

图 1-4 PN 结的单向导电性

(a) 正向偏置 - 导通 (b) 反向偏置 - 截止

PN 结正偏电压达到一定值时,外电场和内建电场方向相反,因而削弱内建电场,空间电荷减少,PN 结变窄,有利于多子的扩散运动而不利于少子的漂移运动,多子的扩散运动形成较大的扩散电流(即正向电流),即 PN 结呈现出低阻抗。

外加正向电压有微小的变化,便能使正向电流发生显著变化。一般为了限制正向电流值,通常在回路中串入限流电阻 R 。

2. 外加反向电压(又称反向偏置,简称反偏)

反向偏置即外加电压的正极接 N 区一侧、负极接 P 区一侧,如图 1-4(b)所示。它形成了以下过程。

PN 结反偏电压时外电场和内建电场方向相同,因而增强内建电场,空间电荷增多,PN 结变宽,因而不利于多子的扩散运动而有利于少子的漂移运动,少子的漂移运动形成极小的漂移电流(即反向电流),即 PN 结呈现高阻抗。

由于少数载流子由本征激发产生,温度一定时,少数浓度将基本不变,因而反向电流几乎不随外加电压变化,故又称此反向电流为反向饱和电流。反向电流很小,一般为微安级,一般情况下相对于正向电流可以忽略不计。

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

需要指出的是,反向电压超过一定数值后,反向电流将急剧增加,发生反向击穿现象,单向导电性被破坏。

第二节 二 极 管

一、二极管的结构

将 PN 结用外壳封装起来,并加上电极引线就构成了二极管,电路符号如图 1-5(a)所示。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为 P 区指向 N 区,也表示正向电流的流动方向。

二极管按材料不同可分为锗二极管、硅二极管、砷化镓二极管等。按结构不同可分为点接触型二极管、面接触型二极管和平面型二极管。按用途分有整流二极管、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。

点接触型二极管:PN 结由细金属铝丝和 N 型半导体烧结而成,结构如图 1-5(b)所示。它的特点是 PN 结面积很小,因而结电容(一般在 1 pF 以下)小,适用于高频(几百兆赫)电路。但它不能通过很大的电流,也不能承受高的反向电压。主要用于小电流整流和高频检波,也适用于开关电路。例如 2AP1 是点接触型锗二极管,其最大整流电流为 16 mA ,最高工作频率为 150 MHz ,但最高反向工作电压只有 20 V 。

面接触型二极管:PN 结是用合金法工艺做成的,其结构如图 1-5(c)所示。它的特点是 PN 结面积大,可通过较大的电流,但结电容也大,主要用于整流电路,但工作频率较低。例如 2CZ53C 为面接触型硅二极管,其最大整流电流为 300 mA ,最大反向工作电压为 100 V ,而最高工作频率只有 3 kHz 。

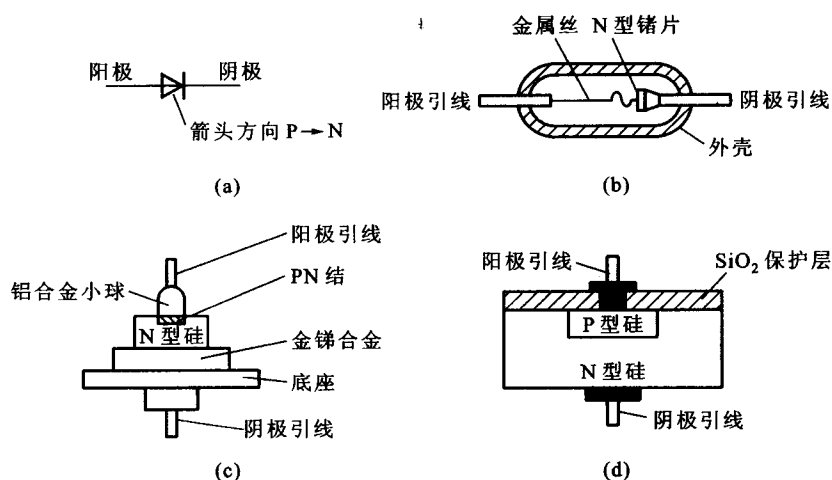


图 1-5 二极管的符号和几种结构

(a) 电路符号 (b) 点接触型 (c) 面接触型 (d) 平面型

平面型二极管: PN 结是用扩散法工艺做成的,如图 1-5(d)所示。它的特点是,结面积较大时,能通过较大的电流,适用于大功率整流;结面积较小时,工作频率较高,适用于开关电路。

常见二极管的外形如图 1-6 所示。

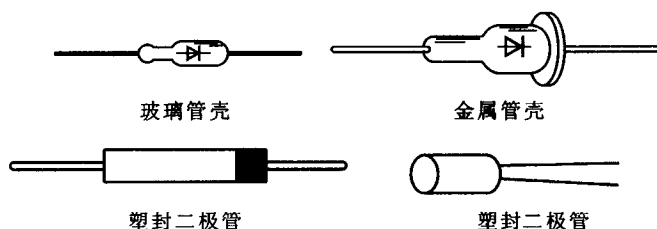


图 1-6 常见二极管的外形

二、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。其两端电压 u_D 和通过的电流 i 可以用伏安特性曲线表示,如图 1-7 所示就是硅和锗两种二极管的伏安特性曲线,它们可以分成三部分来讨论。

1. 正向特性

当二极管两端外加正向电压时,应该产生正向电流。但从伏安特性曲线上看到,当外加的正向电压小于阈值电压 U_{th} (锗管的 U_{th} 约为 0.1 V,硅管的 U_{th} 约为 0.5 V) 时,由于外电场还不足以克服内电场对多数载流子扩散运动的阻力,因此,这时的正向电流几乎为零,二极管呈现的电阻较大(如图 1-7(a)、(b)中的 0A 段),这个区域通常称为截止区。而当二极管两端的正向电压超过 U_{th} 以后,内电场被削弱,二极管电阻变得很小,正向电流按指数规律增长。导通以后硅二极管的正向压降(U_{on})约为 0.6 ~ 0.8 V,典型值一般取 0.7 V,锗二极管的正向压降(U_{on})约为 0.2 ~ 0.3 V,典型值一般取 0.2 V。

2. 反向特性

在反向电压作用下,由本征激发(热激发)产生的少数载流子产生漂移运动,形成很小的反向饱和电流,其大小与反向电压几乎无关。如图 1-7(a)、(b)中的 0B 段。在常温下,硅管的反向饱和电流比锗管小得多,小功率硅管的反向饱和电流在 nA 数量级,小功率锗管的反向饱和电流在 μA 数量级。由正向及反向特性可知,二极管具有单向导电特性。

3. 反向击穿特性

反向电压在一定范围内时,反向电流很小,而且基本不随反向电压变化而变化,但当反向电压达到一定数值 U_{BR} 时,反向电流会突然急剧增加,这种现象叫做二极管的反向击穿,如图 1-7(a)、(b)中的 BC 段。 U_{BR} 称为二极管的反向击穿电压。

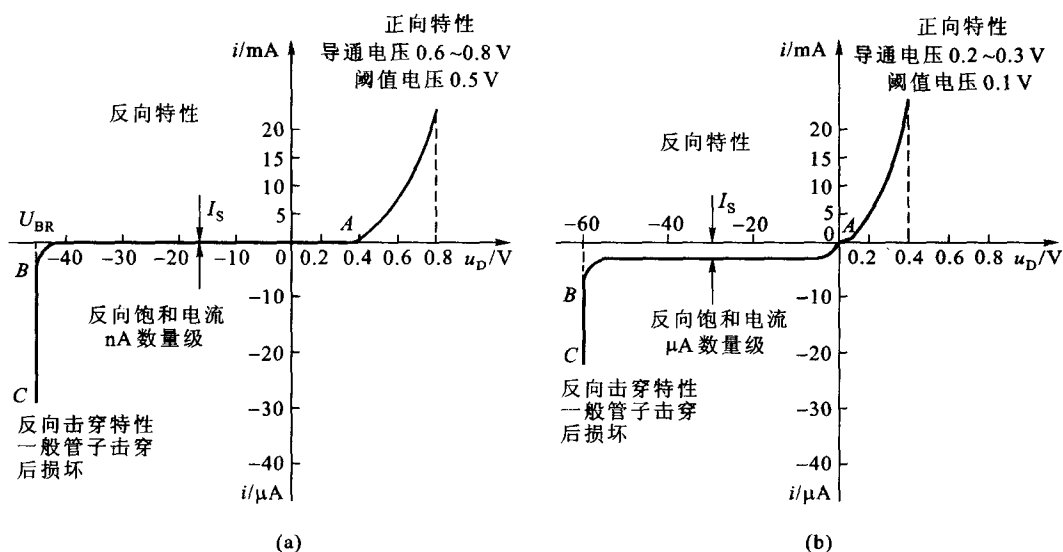


图 1-7 二极管的伏安特性曲线

(a) 硅二极管的伏安特性曲线 (b) 锗二极管的伏安特性曲线

反向击穿后,只要反向电流和反向电压的乘积(即二极管的耗散功率)不超过二极管允许的耗散功率,二极管一般不会被烧毁,反向电压撤销后,二极管仍能正常工作,这种击穿称为电击穿;若二极管的耗散功率超过二极管允许的耗散功率,则会导致 PN 结结温过高而烧坏,这种击穿是不可逆的,称为热击穿。因而通常二极管工作时,不允许工作在反向击穿状态,且为了保证二极管可靠地工作,一般取 U_{BR} 的 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ 作为其反向工作电压。

特别注意,温度对二极管的特性有显著影响,如图 1-8 所示。当温度升高时,正向特性曲线向左移,反向特性曲线向下移。变化规律是:在室温附近,温度每升高 1°C ,正向压降约减小 $2 \sim 2.5 \text{ mV}$,温度每升高 10°C ,反向电流约增大一倍。

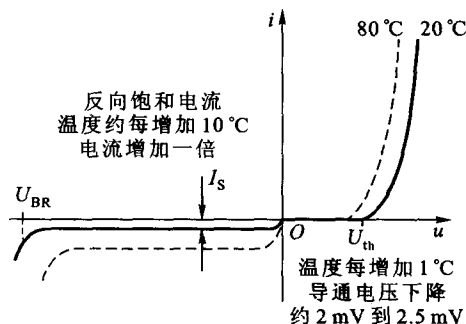


图 1-8 温度对二极管的伏安特性曲线的影响

三、二极管的主要参数

器件的参数是器件特性的定量描述,是合理选择和正确使用器件的依据。二极管有以下一些主要参数。

1. 最大整流电流 I_F

指管子长期工作时,允许通过的最大正向平均电流,由 PN 结的面积和散热条件所决定。例如 2AP1 型二极管的最大整流电流为 16 mA。实际应用时,流过二极管的平均电流不能超过 I_F ,否则会因电流太大,发热量超过限度而烧坏管子。

2. 最高反向工作电压 U_{RM}

指管子工作时所允许加的最高反向电压,超过此值二极管就有被反向击穿的危险。通常器件手册上给出的最高反向工作电压约为击穿电压 U_{BR} 的一半。例如 2AP1 型二极管的 U_{RM} 规定为 20 V,而 $U_{BR} > 40$ V。

3. 反向电流 I_R

指二极管未被击穿时的反向电流值。 I_R 越小,说明二极管的单向导电性能越好。 I_R 值会随温度的升高而急剧增加,使用时要特别注意温度的影响。

4. 二极管的结电容

二极管除具有单向导电性外,还具有一定的电容效应。二极管的结电容包括势垒电容 C_B 和扩散电容 C_D 两部分。

(1) 势垒电容 C_B

势垒电容是由耗尽层(空间电荷区)引起的。其大小与 PN 结上偏置电压的大小有关,所以它是一种非线性电容。一般情况下, C_B 为几皮法至一二百皮法。

(2) 扩散电容 C_D

扩散电容是由多数载流子在扩散过程中的积累引起的。 C_D 的大小随外加电压变化,也是一种非线性电容。一般情况下,势垒电容和扩散电容都很小,对低频特性影响不大,但工作频率很高时,就必须考虑二极管结电容的作用。

5. 最高工作频率 f_M

指保证二极管具有单向导电特性的最高工作频率。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。 f_M 主要由 PN 结电容的大小决定。结电容越小,最高工作频率 f_M 越高。

器件的各主要参数可以从器件的手册上查到。但要说明的是,手册上所给的参数是在一定测试条件下测得的,应用时要注意这些条件。若条件改变,相应的参数值也会发生变化。

四、二极管电路的分析方法

由二极管的伏安特性曲线可见,二极管是一种非线性元件。要全面地、精确地描述一个实际的非线性元器件的特性是很复杂的。在实际工作中,往往根据不同的工作条件和要求,在分析精度允许的条件下,采用不同的模型来描述非线性元器件的电特性。

(一) 二极管模型

1. 理想模型

二极管理想模型如图 1-9 所示。正向偏置时,二极管导通,且其压降为零,相当于开关闭合;反向偏置时,二极管截止,流过它的电流为零,相当于开关断开。

当电路中的二极管正向压降远小于和它串联的电压时,常利用理想二极管模型代替实际二极管进行电路的分析计算。

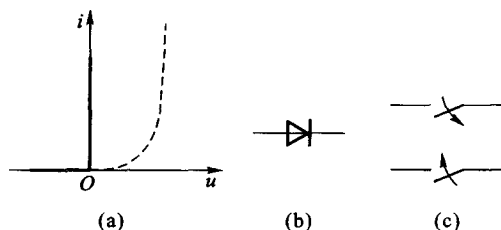


图 1-9 理想二极管模型

(a) 理想伏安特性曲线 (b) 代表符号 (c) 等效电路

2. 恒压降模型

当电路中的二极管正向压降可以和它串联的电压相比较时,可以采用图 1-10 所示的二极管恒压降模型来近似表示实际二极管。图(a)中的实线是恒压降模型的伏安特性曲线,图(b)为等效电路,其中正向压降取导通电压(通常硅二极管取 0.7 V,锗二极管取 0.2 V)。

显然,恒压降模型比理想模型更接近实际二极管的特性。要说明的是,只有当二极管的工作电流 $I \geq 1 \text{ mA}$ 时,才能用恒压降模型代替实际二极管。

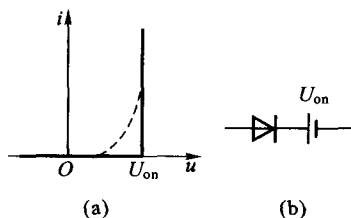


图 1-10 二极管恒压降模型

(a) 恒压降伏安特性曲线 (b) 等效电路

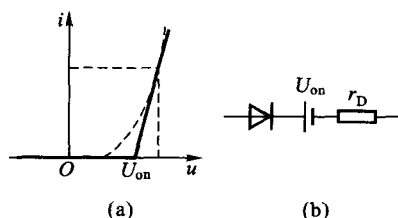


图 1-11 二极管折线模型

(a) 折线伏安特性曲线 (b) 等效电路

3. 折线模型

实际二极管的正向压降并不等于导通电压,而且正向压降也不是恒定不变的,它随二极管电流的增加而增加。为了进一步提高精度,可以采用图 1-11(a)所示的折线模型来近似表示实际的二极管。图 1-11(a)中为两段折线近似模拟二极管的伏安特性曲线,两段折线的交点处的电压值近似等于二极管导通电压,折线斜率的倒数为电阻 r_D 。图 1-11(b)是折线模型的等效电路。

(二) 应用举例

【例 1-1】二极管电路如图 1-12(a)所示,其输入电压 $u_1(t)$ 的波形如图 1-12(b)所示。

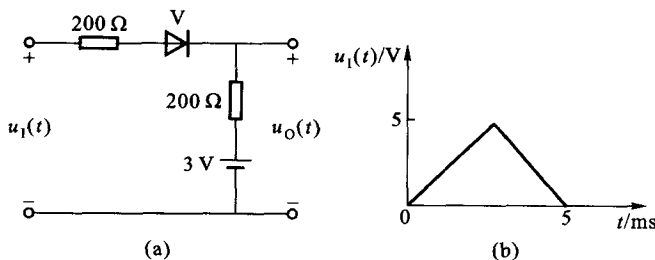


图 1-12 例 1-1 的电路图

(a) 电路图 (b) 输入电压 $u_1(t)$ 波形图

(1) 当考虑二极管为理想模型时,试绘出 $u_o(t)$ 的波形。

(2) 当考虑二极管为恒压模型时 ($U_{on} = 0.7 \text{ V}$),试绘出 $u_o(t)$ 的波形。

(3) 当考虑二极管为折线模型时 ($U_{on} = 0.7 \text{ V}, r_D = 25 \Omega$),试绘出 $u_o(t)$ 的波形。

解:(1) 当考虑二极管为理想模型时,根据二极管的单向导电性可知,当 $u_1(t) < 3 \text{ V}$ 时,二极管 V 截止, $u_o(t) = 3 \text{ V}$ 。当 $u_1(t) \geq 3 \text{ V}$ 时, V 导通, $u_o(t) = \frac{u_1(t) - 3 \text{ V}}{(200 + 200) \Omega} \times 200 \Omega + 3 \text{ V} = \frac{1}{2} u_1(t) + 1.5 \text{ V}$, 当 $u_1(t) = 5 \text{ V}$ 时, $u_o(t) = 4 \text{ V}$ 。由以上分析可绘出该电路输出电压 $u_o(t)$ 的波形如图 1-13 所示。

(2) 当考虑二极管为恒压模型时,其等效电路如图 1-14(a) 所示。

当 $u_1(t) < 3.7 \text{ V}$ 时,二极管 V 截止, $u_o(t) = 3 \text{ V}$ 。当 $u_1(t) \geq 3.7 \text{ V}$ 时, V 导通, $u_o(t) = \frac{u_1(t) - 3 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{(200 + 200) \Omega} \times 200 \Omega + 3 \text{ V} = \frac{1}{2} u_1(t) + 1.15 \text{ V}$, 当 $u_1(t) = 5 \text{ V}$ 时, $u_o(t) = 3.65 \text{ V}$ 。由以上分析可绘出该电路输出电压 $u_o(t)$ 的波形如图 1-14(b) 所示。

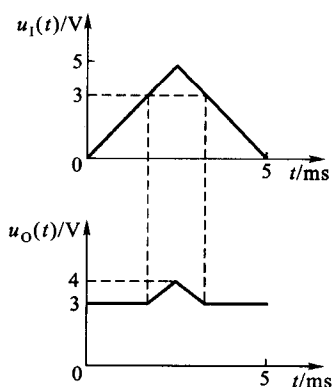


图 1-13 例 1-1(1) 的输出波形

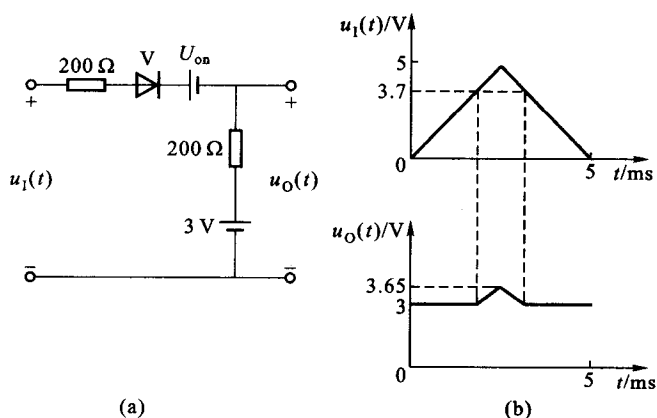


图 1-14 例 1-1 电路的恒压降等效电路及其输出波形

(a) 恒压降等效电路 (b) 输出波形 $u_o(t)$

(3) 当考虑二极管为折线模型时,其等效电路如图 1-15(a) 所示。

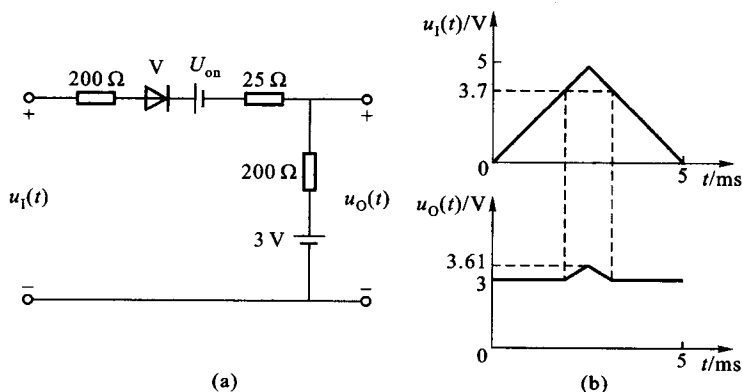


图 1-15 例 1-1 电路的折线等效电路及其输出波形

(a) 折线等效电路 (b) 输出波形 $u_o(t)$