

中等职业技术学校计算机专业系列教材

电子线路

DIAN ZI

XIAN LU

ZHONG DENG ZHI YE
JI SHU XUE XIAO
JI SUAN JI ZHUAN YE
XI LIE JIAO CAI

孙俊逸 刘子泉 罗益辉 / 编

中国财政经济出版社



中等职业技术学校计算机专业系列教材

胡金柱 李邦徽 李晓燕 杨发明 主编

电 子 线 路

孙俊逸 刘子泉 副主编

中国铁道出版社

内 容 简 介

全书共分六章。在介绍半导体基本知识的基础上,全面翔实地介绍了低频放大电路、负反馈放大电路、正弦波振荡电路、集成运算放大电路、直流电源等内容。

该书既注重基本知识的全面性,突出重点,化解难点,又注意将电子技术的发展与计算机的应用相结合,在语言表达上力求准确、简明;书中列举了一定数量的例题,便于学生自学;每章附有相当数量的习题,以帮助读者巩固所学的知识;每章还有内容小结,提示各章的内容、重点、难点及学习方法,便于读者全面了解本章的内容及相关章节内容间的关系;每章均安排实验,以加深对有关内容的理解和记忆,提高学习效率。

图书在版编目(CIP)数据

电子线路/孙俊逸编著. —北京:中国财政经济出版社,1998. 12

中等职业技术学校计算机专业系列教材

ISBN 7-5005-3968-1

I. 电… II. 孙… III. 电子电路-技工学校-教材 IV. TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第25128号

中国财政经济出版社出版

URL: <http://www.cfeph.com>

e-mail: cfeph@dr.cgo.cn.net

(版权所有 翻印必究)

社址:北京东城大佛寺东街8号 邮政编码:100010

发行处电话:64033095 财经书店电话:64033436

北京新丰印刷厂印刷 各地新华书店经销

787×1092毫米 16开 9.75印张 229 000字

1998年10月第1版 1998年10月北京第1次印刷

印数:1—15 055 定价:12.00元

ISBN 7-5005-3968-1/TP·0033

(图书出现印装问题,本社负责调换)

编写与使用说明

为适应我国当前中等专业学校和中等职业技术学校有关计算机教学的需要,我们组织编写了这套实用系列教材。本套教材针对中专和中等职业学校学生的基础和接受能力,根据计算机课程教学的实际规律和需要,对本套书中的内容作了较周密地安排。不仅体系合理,而且深入浅出、文字流畅、概念清晰、通俗易懂、例题丰富。全套书共有24册,它们是:(1)微型计算机组成原理;(2)微型计算机操作;(3)BASIC语言程序设计;(4)C语言程序设计;(5)数据结构初步;(6)FOXBASE⁺关系数据库;(7)关系数据库FOXPRO;(8)微型计算机系统的安装与维护;(9)计算机网络基础;(10)计算机软件开发技术;(11)Windows基础教程;(12)计算机专业英语;(13)宏汇编语言;(14)计算机操作系统原理;(15)电子线路;(16)数字逻辑;(17)计算机多媒体基础教程;(18)可视化编程与Visual Basic语言;(19)计算机网络教程;(20)计算机辅助设计;(21)中文Word for Windows;(22)中文Excel for Windows教程;(23)微机常用工具软件;(24)工具软件PCTOOLS和NORTON。

以上24本教材中,(1)、(2)、(4)、(5)、(7)、(10)、(11)、(12)、(13)、(14)、(15)、(16)等十二本可以作为中专和中等职业技术学校计算机专业学生的必修课教材;另外十二本可作为选修课教材,各学校可根据本校的实际情况灵活掌握、选择使用。其中的(2)、(4)、(6)、(7)、(8)、(9)、(11)、(17)、(18)、(19)、(20)、(21)、(22)、(23)、(24)等书还可以作为非计算机专业的公共课教材或自学参考书,或者作为等级考试培训班、普及培训班的培训教材。

对于计算机专业,本套教材可以安排使用5个或6个学期,每个学期可酌情安排2~5门课程。每门课程的总教学时数为60~90学时为宜,不宜太多或太少,其中包括计划内安排的实验或上机实习的学时数。本套教材的实用性较强,除计算机英语之外,一般都应安排实验或上机实习。每门课的实验或上机实习时数不得少于总课时的1/3,有些应占1/2以上。而《微型计算机操作》、《微型计算机系统的安装与维护》、《微机常用工具软件》、《工具软件PCTOOLS和NORTON》、《Windows基础教程》、《中文Word for Windows》、《中文Excel for Windows教程》等,还应以上机操作为主,讲授为辅,而且最好是在大屏幕投影教室或者多媒体计算机教室讲课,否则很难达到预期的教学效果。

本套教材每本书自成体系,可以独立使用。书中凡打星号(*)的章节可作为选讲内容,不作要求。FOXBASE⁺与FOXPRO的许多命令相同,可酌情选择其中一本作教材,学生会其中任何一种,另一种则很容易自学掌握,所以另一本可作为学生自学教材。五笔字型和自然码不要求学生都学,可选其中一种组织教学。

组织这样一套较完善的系列教材难度相当大,加之我们每位作者的教学、科研任务都很繁忙,书中肯定有许多不尽人意的错误和不妥之处。我们真诚地欢迎广大读者随时批评、指正,以便我们及时修订。

计算机系列教材编写组

1998年4月

前 言

《电子线路》是中等职业技术学校计算机专业的一门必修课,其任务是讲授常用电子器件的工作原理、特性,基本线路的组成、功能及分析方法,使学生熟练掌握电子线路的基本理论和基本技能,从而培养学生分析和解决实际问题的能力。

我们针对中等专业学校学生的知识水平和理解能力,参考各类中等专业学校《电子线路》课程教学大纲,确定了本书的基本内容。全书共分六章,第一章半导体基本知识,介绍半导体二极管、半导体三极管及场效应管的工作原理、特性,主要参数及测试方法。第二章低频放大电路,介绍放大电路的组成和分析方法、静态工作点的稳定和多级放大电路的组成。第三章负反馈放大电路,介绍负反馈的判别及负反馈对放大电路性能的改善。第四章正弦波振荡电路,讲述振荡条件及LC振荡电路的结构和工作原理。第五章集成运算放大电路,介绍直接耦合方式和差式放大电路、集成放大电路及应用。第六章直流电源,介绍整流、滤波、串联直流稳压电源电路组成、作用及工作原理。讲授全部内容约为60学时,其中课堂教学46学时,实验14学时。

在本书的编写过程中,我们既考虑基本知识的全面性,突出重点,化解难点,又注意将电子技术的发展和计算机的应用相结合,为此,在删减或简化部分内容时,也适当增添了少量新的知识,在语言表述上力求准确、简明。书中列举了一定数量的例题,便于学生思考、理解相关内容。每章附有相当数量的习题,对于读者巩固所学知识是很有帮助的。每章还有内容小结,提示各章的内容、重点、难点及学习方法,便于读者全面了解本章的内容及相关章节内容间的关系。

《电子线路》是一门实践性很强的课程,必须重视和加强实践环节的教学,每章均应安排实验,以加深对有关内容的理解和记忆,提高学习效率。

本书由孙俊逸、刘子泉、罗益辉编写。在编写过程中,胡金柱教授给予了大力支持和帮助,在此表示谢意。

由于作者水平所限,书中的不妥之处,敬请同行及广大读者指正。

编 者

1997年12月于湖北大学

目 录

第一章 半导体基本知识.....	(1)
§ 1.1 半导体基本知识	(1)
§ 1.2 半导体二极管	(3)
§ 1.3 半导体三极管.....	(33)
§ 1.4 场效应管.....	(18)
习题一	(25)
第二章 低频放大电路	(27)
§ 2.1 基本放大电路.....	(27)
§ 2.2 放大电路的分析方法.....	(30)
§ 2.3 放大电路静态工作点的稳定.....	(38)
§ 2.4 共集放大电路和共基放大电路.....	(42)
§ 2.5 场效应管放大电路.....	(46)
§ 2.6 多级放大电路.....	(50)
§ 2.7 放大电路的频率响应.....	(52)
习题二	(63)
第三章 负反馈放大电路	(67)
§ 3.1 反馈的基本概念和分类.....	(67)
§ 3.2 负反馈对放大电路性能的改善.....	(72)
§ 3.3 负反馈放大电路的方框图分析法.....	(76)
习题三	(79)
第四章 正弦波振荡电路	(81)
§ 4.1 正弦波振荡原理.....	(81)
§ 4.2 LC 振荡电路	(83)
§ 4.3 石英晶体振荡电路.....	(92)
习题四	(94)
第五章 集成运算放大路	(97)
§ 5.1 零点漂移.....	(97)
§ 5.2 差动式放大电路.....	(98)
§ 5.3 集成运算放大电路	(106)
习题五.....	(111)
第六章 直流电源.....	(114)
§ 6.1 直流电源的组成	(114)
§ 6.2 整流电路	(114)
§ 6.3 滤波电路	(118)
§ 6.4 硅稳压管稳压电路	(122)
§ 6.5 串联型稳压电路	(123)
§ 6.6 计算机电源简介	(128)
习题六.....	(130)
附录一 国产半导体器件命名方法.....	(132)
附录二 实验题.....	(133)

第一章 半导体基本知识

电子线路主要讨论各种电路的组成和功能,并结合实例介绍电子电路的分析方法。本章介绍半导体的基础知识,以及构成电子电路的基本元件——半导体二极管和半导体三极管的结构、工作原理、特性曲线和主要参数。

§ 1.1 半导体基本知识

1.1.1 本征半导体

一、半导体的晶体结构和共价键

半导体是导电能力介于导体和绝缘体之间的物质。在半导体器件中常用的是硅和锗两种材料,它们都是四价元素,在原子的最外层轨道上有四个价电子,半导体的导电性能主要由价电子决定。为分析问题方便,我们采用如图 1-1 所示的简化原子模型,图中 $\oplus$ 代表原子核和内层电子所具有的电

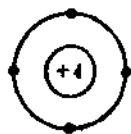


图 1-1 硅和锗原子的简化模型

纯净的半导体称为本征半导体。在由本征半导体硅和锗构成的单晶体结构中,原子在空间按四角形排列成有规律的空间点阵,每个原子处于四面体中心,其周围有四个原子位于四面体的顶角(图 1-2)。晶体中原子间距很小,价电子不仅受所属原子核作用,还受到相邻原子核作用,使得一对价电子为相邻原子所共有,形成共价键。

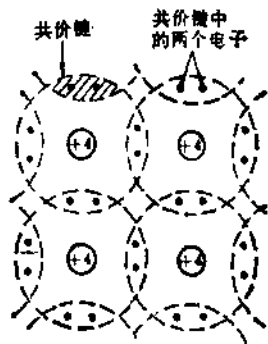


图 1-2 硅和锗晶体共价键结构

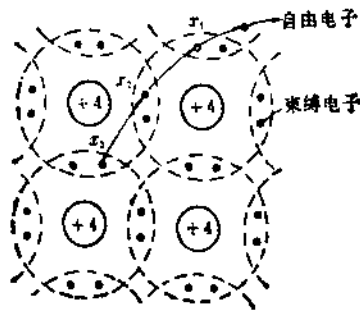


图 1-3 电子和空穴的运动

二、半导体中的载流子

晶体中的共价键对价电子的束缚力较强,一般地,在绝对零度(-273.16°C)时,价电子稳定地处于共价键的束缚之中,但在室温(27°C 左右)下,价电子由于热运动而获得一定的能量,其中少数能够摆脱共价键的束缚而成为自由电子。同时,共价键中由于价电子的丢失而留下一个“空位”,称为空穴。由于原来原子处于电中性,当其失去一个价电子成为正离子,相当于“空

穴”带有与电子电荷量相同的正电荷。

失去价电子的原子(正离子)不能自由运动,只能在晶体中的平衡位置附近振动。但是,正离子对电子有吸引力,能把邻近原子的价电子吸引过来填补空穴,使相邻原子出现一新空穴。如图 1-3 所示,圆圈表示空穴,在 x_1 处出现一个电子的空位(空穴), x_2 处的电子便来填补这个空位,从而使空位由 x_1 移到 x_2 。如果 x_3 处的电子又来填补 x_2 处空位,空位又由 x_2 移到 x_3 。在这个过程中,价电子由 $x_3 \rightarrow x_2 \rightarrow x_1$,但仍处于束缚状态,而空位由 $x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_3$,就是说空穴的移动方向与束缚电子的移动方向相反,因而可以用空穴移动代表束缚电荷的移动。

自由电子和空穴都是带电电荷,能够运动,它们是半导体中的基本导电粒子,统称为载流子。在无外电场作用时,所有载流子——自由电子和空穴都处于无规则热运动,不能形成电流。在个电场作用下,自由电子将逆着电场方向移动形成电子电流,而空穴则沿着电场方向移动形成空穴电流(代表束缚电荷价电子形成的电流)。

半导体在热作用下产生电子空穴对的现象称为本征激发。在电子空穴对不断产生的同时,运动中的自由电子可能被正离子吸引而落入空穴,自由电子和空穴便同时消失,这种现象称为复合。在一定条件下,电子空穴对的产生和复合都在不停地进行,最终处于动态平衡,即有多少个电子空穴对产生则有多少个电子空穴对消失,也就是说在半导体中载流子的浓度是一定的。

在本征半导体内,自由电子和空穴总是成对出现的。因此,任何时候本征半导体中的自由电子和空穴的浓度总相等。可以证明:

$$n_i = p_i = K_i \cdot T^{3/2} \cdot e^{-E_G/2kT} \quad (1-1)$$

式(1-1)中 n_i 、 p_i 分别表示自由电子和空穴的浓度(单位立方厘米中粒子数), T 为绝对温度, k 为玻尔兹曼常数($8.63 \times 10^{-5} \text{eV/K}$), E_G 为绝对零度时破坏共价键所需的能量,称为禁带宽度(硅为 1.21eV ,锗为 0.785eV), K_i 是与半导体有关的常数(硅为 $3.87 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \text{K}^{-3/2}$,锗为 $1.76 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \text{K}^{-3/2}$)。在室温($T=300\text{K}$)下,可以算出硅和锗的浓度分别为 $1.43 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ 和 $2.38 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 。式(1-1)说明,本征半导体的载流子浓度随温度升高按指数规律增大,因而其导电能力随温度升高而显著增加。

1.1.2 杂质半导体

本征半导体中载流子很少,因而导电能力很差。在本征半导体中掺入微量的其它元素就会使半导体的导电性能发生显著的变化。这些被掺入的微量元素的原子称为杂质,而掺入杂质的半导体称为杂质半导体。根据掺入的杂质不同,半导体可分为电子型(N型)半导体和空穴型(P型)半导体两类。

一、N型半导体

在硅(或锗)中掺入少量五价元素磷(或砷),晶体中某些位置的硅原子被磷原子取代,磷原子的五个价电子中的四个与周围硅原子的价电子形成共价键,多余的一个电子受原子核的束缚力较小,成为自由电子,同时磷原子因失去一个电子而成为正离子,如图 1-4 所示。由于杂质原子可以提供自由电子,故称为施主杂质,或 N 型杂质。这种杂质半导体中自由电子的浓度比同温下本征半导体的自由电子的浓度大得多,使得其导电能力显著提高。尽管杂质半导体由于本征激发也产生少量的电子空穴对,但由于杂质的掺入而增加了许多额外的自由电子,使自由电子的浓度远大于空穴的浓度,故电子为多数载流子(简称为多子),空穴为少数载流子(简

称为少子)。这类以电子为多子的半导体称为电子型半导体或N型半导体。

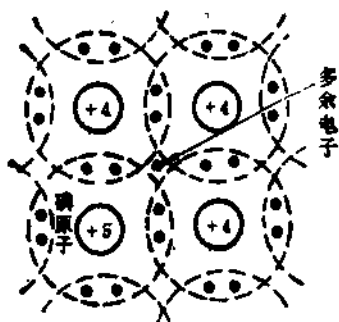


图 1-4 N 型半导体的共价键结构

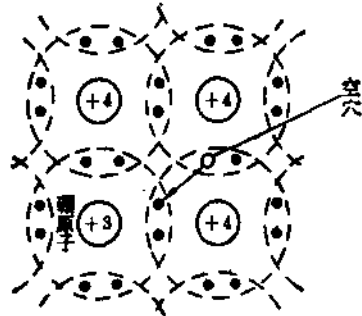


图 1-5 P 型半导体的共价键结构

二、P 型半导体

在半导体硅(或锗)中掺入微量的三价元素硼(或镓),三价的杂质原子将取代半导体中的某些位置的硅原子,硼原子的价电子在与周围的硅原子的价电子形成共价键时,因缺少一个电子而产生一个空位,相邻共价键上的电子受热振动或在其它激发条件下获得能量,就可能来填补这个空位,使得硼原子成为带一个单位负电荷的离子,同时产生一个空穴,如图 1-5 所示。这类杂质原子因能吸收电子被称为受主杂质。尽管半导体由于本征激发而产生电子空穴对,但因受主杂质产生了许多空穴,这种半导体中空穴浓度远大于自由电子浓度,故空穴为多数载流子(简称多子),电子为少数载流子(简称少子)。这类半导体中以空穴为主要载流子,称为空穴型半导体或 P 型半导体。

§ 1.2 半导体二极管

1.2.1 PN 结及其特性

在一块完整的硅片上,采用特殊工艺掺入杂质,使其一边形成 N 型半导体,另一边形成 P 型半导体,那么在这两类半导体的交界面附近就形成了 PN 结。

一、PN 结内部载流子的运动

P 型半导体和 N 型半导体结合在一起,在它们的交界处出现了电子和空穴的浓度差别,N 型区内电子多而空穴少,P 型区内电子少而空穴多。电子和空穴都由浓度高的地方向浓度低的地方扩散,这种现象称为扩散运动。这样,P 区的多子空穴向 N 区扩散,N 区的多子自由电子向 P 区扩散。扩散过程中,部分电子与空穴复合而消失,使得 P 区与 N 区的界面附近出现因电子空穴复合而剩余的不能移动的正负离子组成的空间电荷区即 PN 结。如图 1-6 所示,P 区因空穴的复合剩下负离子,N 区因电子消失而剩下正离子,这些正负离子组成的电荷区形成一个由 N 区指向 P 区的内电场。显然,内电场阻碍多子的扩散运动,从这个意义上看,空间电荷区又可看作阻挡层,它对多子的扩散有阻挡作用。

另一方面,根据内电场的方向和电子空穴的带电性质可知,电场将使 P 区的少子(电子)向 N 区漂移,N 区的少子(空穴)向 P 区漂移,这种现象称漂移运动。漂移运动的方向与扩散运动方向相反。N 区的少子(空穴)漂移到 P 区补充了交界面失去的空穴,P 区的少子(电子)漂移

到 N 区补充其交界面失去的电子,这样使空间电荷区变窄,其作用正好与扩散运动相反。

由此可见,扩散运动和漂移运动是互相联系又互相矛盾的两种过程。多子的扩散使空间电荷区变宽,电场增强,对多子的扩散的阻碍作用加强,但使少子的漂移也加强;少子的漂移使空间电荷区变窄,使得漂移减弱,而扩散又容易进行。扩散运动和漂移运动相互作用的最终效果是两者达到动态平衡。

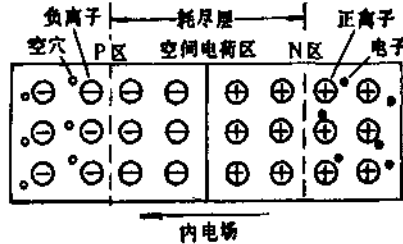


图 1-6 平衡状态的 PN 结

二、PN 结的单向导电性

由前面分析可知,PN 结在无外加电压时处于动态平衡。当 PN 结加上外电压时,内部载流子的运动平衡状态被破坏,在外部表现出其单向导电性。下面分两种情况讨论。

1. 外加正向电压。

如图 1-7 所示,给 PN 结的 P 区一侧接上电源正极,N 区一侧接上电源负极,称为 PN 结外加正向电压。外加的正向电压产生一个与 PN 结内电场方向相反的外电场。外电场使得 P 区的空穴和 N 区的电子向 PN 结靠近,空间电荷区变窄,内电场减弱,PN 结动态平衡被破坏,扩散运动超过漂移运动。同时,外电源不断向 P 区补充空穴,向 N 区补充自由电子,使得扩散运动能持续进行下去,形成正向电流。当外加电压升高时,内电场进一步削弱,扩散电流随着增强,在正常工作范围内,只要 PN 结正向电压稍有变化,正向电流就急剧上升。这样,正向的 PN 结表现为一个很小的电阻。

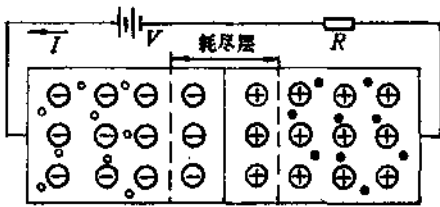


图 1-7 PN 结正向连接

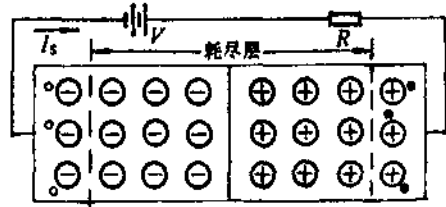


图 1-8 PN 结反向连接

2. 外加反向电压。

把外电源的正极接到 PN 结的 N 区,负极接到其 P 区的连接方式称为反向连接。如图 1-8 所示,PN 结外加反向电压,产生与内电场方向一致的外电场,PN 结的总电场加强,动态平衡被破坏。在电场的作用下,P 区空穴远离 PN 结,N 区的自由电子也远离 PN 结,使得 P 区负离子和 N 区正离子增多,阻挡层变宽,漂移运动超过扩散运动,形成漂移电流。漂移电流是外加反向电压时的回路电流,称为反向电流。反向电流是少子的漂移运动形成的,其数值很小,故反向电阻很大。

3. PN 结的伏安特性。

理论和实践证明,PN 结的伏安特性可表示为

$$I = I_s(e^{\frac{U}{U_T}} - 1) = I_s(e^{\frac{qU}{kT}} - 1) \quad (1-2)$$

式中 I 为 PN 结的电流(安), U 为 PN 结的端电压(伏), I_s 表示反向饱和电流, $U_T = kT/q$, 为温度的电压当量。例如, $T = 300\text{K}$ 时, $U_T = 0.026\text{V}$ 。

由式(1-2)可知:当 PN 结加正向电压 $U > 0$, 一般有 $U \gg U_T$, $e^{U/U_T} \gg 1$, 故 $I \approx I_s e^{U/U_T}$, I 随 U 按指数规律变化(图 1-9 中 OA 部分);当 PN 结加反向电压, $U < 0$, 一般有 $|U| \gg U_T$, $I \approx -I_s$, 反向电流很快趋于饱和电流(图 1-9 中 OB 部分)。

三、PN 结的击穿特性

PN 结反向偏置时,反向电流很小,且在一定范围内增大反向电压,反向电流趋于恒定(反向饱和电流 I_s)。但当反向电压增大到某一数值时,反向电流突然增大,这种现象称为反向击穿。出现击穿时的电压称为反向击穿电压(图 1-9 中 U_{BR})。PN 结的击穿有雪崩击穿和齐纳击穿两种。

雪崩击穿 当 PN 结的反向电压足够大时,空间电荷区变宽,电场增强,通过空间电荷区的载流子在电场作用下获得足够的动能,在漂移过程中与原子碰撞,使该原子的价电子变成自由电子,同时产生一个空穴。被撞出的载流子与原有的载流子一起在获得足够的能量后又与原子碰撞产生电子和空穴,象

雪崩一样,载流子产生倍增效应,从而使反向电流剧增,PN 结被击穿。雪崩击穿电压随温度的升高而升高。

齐纳击穿 齐纳击穿是当 PN 结中反向电场足够强时,价电子在足够强的电场力作用下直接被拉出共价键,产生大量的电子空穴对,使反向电流剧增,造成 PN 结击穿。齐纳击穿电压 U_{BR} 随温度的升高而减小。

上述两种击穿可以根据击穿电压大小来区别。一般地,齐纳击穿所需电压较小,雪崩击穿所需电压较大。值得注意的是,这两种击穿都是可逆的,称为电击穿。当 PN 结的功耗大于其所允许的最大功耗时,引起 PN 结被烧毁而产生的击穿叫热击穿,热击穿是不可逆的。

四、PN 结的电容效应

如果在 PN 结两端加上交流电压,PN 结还表现出电容的特性。PN 结的电容有势垒电容和扩散电容两种。

势垒电容 势垒电容是由空间电荷的积累引起的(如图 1-10 所示),在 PN 结加反向电压 U 时,空间电荷层的宽度为 L ,当反向电压增加为 $U + \Delta U$ 时,空间电荷层的宽度为 $L + \Delta L$,也就是积累电荷增加;反之,当反向电压减小时,积累的电荷也就减小。PN 结空间电荷随电压变化而变化的现象就象电容的充放电一样,这时 PN 结相当于一个电容,称为势垒电容,用 C_b 表示。理论分析可知: C_b 不是常量,它与 PN 结的结面积、空间电荷层宽度、半导体材料及反向电压有关。

扩散电容 扩散电容是当 PN 结加正向电压时,由于多数载流子在扩散过程中积累而形成的(如图 1-11 所示),当 PN 结加正向电压时,P 区的空穴扩散到 N 区,由于空穴在 N 区与多子电子复合,形成一定的浓度梯度,而电源的负极又源源不断地给 N 区补充电子,也形成一

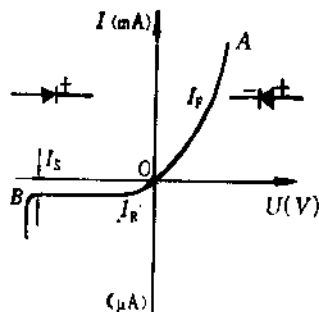


图 1-9 PN 结的特性

定的浓度梯度,就象电容的两极积累正负电荷一样,当PN结的端电压变化时,积累的电荷也随着变化,这种现象等效为电容的充放电,这种等效电容称为扩散电容,用 C_D 表示。同理P区也存在类似的扩散电容,实际的扩散电容是两者之和。

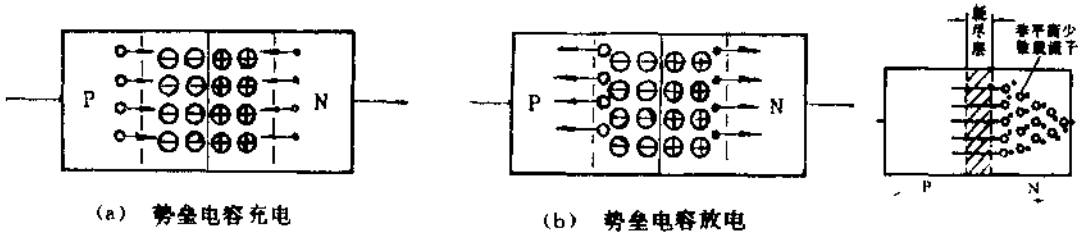


图 1-10 势垒电容

1-11 扩散电容

上面只讨论PN结正向连接时的扩散电容和反向连接时的势垒电容。实际上这两种电容在正反两种连接时都存在。一般在正向连接时因正向电阻很小而忽略其势垒电容,反向连接时以漂移运动为主而忽略其扩散内容。

1.2.2 半导体二极管

一、半导体二极管的结构

在PN结的P区和N区各加一个欧姆接触电极,装好引线并封装在金属或其它外壳内便构成了二极管。通常的二极管有下述几种类型。

点接触型(如图1-12(a)) 其结面积小,结电容也小,适用于在高频(几百兆赫)电路中工作,但不能承受较大的电流和反向电压,多用于检波电路、脉冲电路等。

面接触型(如图1-12(b)) 其特点是结面积大,能通过较大电流,但因结电容大,只能在较低的频率下工作,多用于整流电路。

硅平面型(如图1-12(c)) 结面积较大的,可通过较大电流,适用于大功率整流;结面积小的,结电容较小,多用于开关电路。

二极管的符号如图1-12(d)所示。

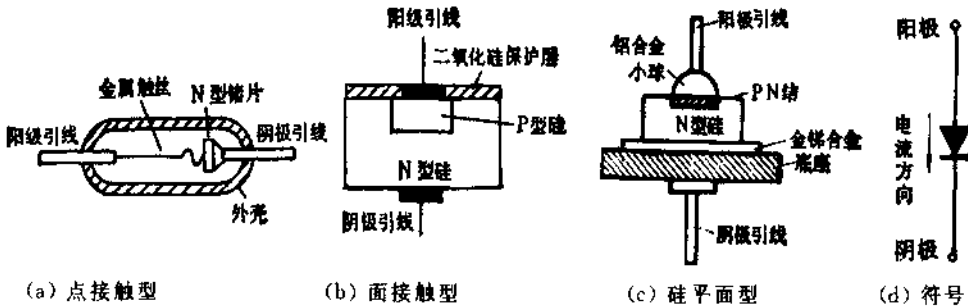
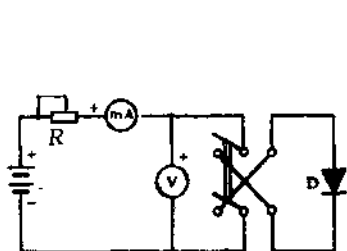


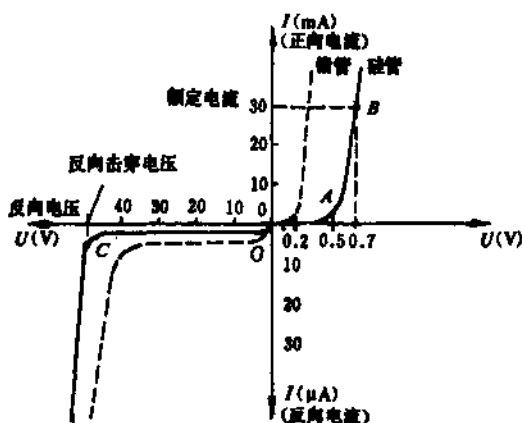
图 1-12 二极管的结构和符号

二、半导体二极管的伏安特性

实际工作中,二极管的伏安特性可以采用如图1-13(a)所示电路绘出,也可以通过晶体管特性图示仪直接显示出来。典型的二极管伏安特性如图1-13(b)所示。



(a) 测试电路



(b) 伏安特性

图 1-13 二极管的伏安特性

下面分三个部分对二极管的伏安特性(图 1-13(b))进行讨论。

1. 正向特性。

正向特性如图 1-13(b)中 OA 段。当正向电压超过一定电压 U_{on} (导通电压)后,二极管电流才有明显的变化。这个电压值称为门坎电压,又称为死区电压或门限电压。一般地,硅管 $U_{on} \approx 0.6V \sim 0.8V$,锗管 $U_{on} \approx 0.1V \sim 0.3V$ 。通常认为当外加正向电压 $U > U_{on}$ 时,二极管导通, $U < U_{on}$ 时,二极管截止。

2. 反向特性。

二极管的反向特性如图 1-13(b)中 OC 段。二极管反向偏置时,只有少数参与导电,随着反向电压升高,反向电流极易达到最大值(饱和值 I_s)。通常硅管 $I_s < 0.1$ 微安,锗管 I_s 约为几十微安。

3. 反向击穿特性。

当反向电压达到反向击穿电压时,引起二极管电击穿,这时电压有微小增大,其电流增大极快。普通二极管的反向击穿电压约为几十伏,而高压二极管反向击穿电压可达几千伏。

三、二极管的主要参数

二极管的主要参数有直流电阻、交流电阻、最大整流电流、反向饱和电流、反向击穿电压以及最高工作频率等。

1. 直流电阻。二极管两端电压与流过二极管的直流电流的比值称为直流电阻,即

$$R_D = \frac{U}{I} \quad (1-3)$$

二极管的工作电压和电流不同,其直流电阻也不相等。如图 1-14, $R_{DQ_1} = \frac{0.7V}{10mA} = 70\Omega$, $R_{DQ_2} = \frac{0.9V}{25mA} = 36\Omega$,可见其直流电阻随工作点的不同而不同。

二极管的直流电阻可用万用电表估测。一般地,二极管正向电阻约为几十欧至几百欧,反向电阻为几十千欧至几百千欧。并且其正反向电阻相差越大,其单向导通性越好。

2. 交流电阻。二极管在工作点附近的电压微变量 ΔU 与电流微量变量 ΔI 之比称为交流

电阻,即

$$r_d = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (1-4)$$

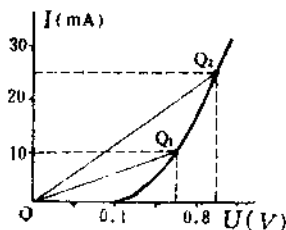


图 1-14 二极管直流电阻

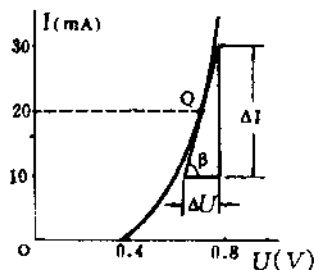


图 1-15 二极管交流电阻

由图 1-15 可知,交流电阻为特性曲线上工作点 Q 的切线斜率的倒数,它随工作点的变化而变化,且与直流电阻不等。可以证明,在室温时交流电阻的表达式为:

$$r_d = \frac{26(\text{mV})}{I} \quad (1-5)$$

例如, $I = 10\text{mA}$, $r_d = \frac{26\text{mV}}{10\text{mA}} = 2.6\Omega$ 。

3. 最大整流电流 I_F 。指二极管正常工作时所允许通过的最大正向平均直流电流。最大整流电流是其正向电流的极限,当正向电流超过它时,二极管会过热而烧毁。所以正向工作电流不应大于最大整流电流。

4. 反向击穿电压。指二极管反向偏置时电击穿所对应的电压值。击穿时,反向电流剧增,二极管的单向导电性被破坏。如果反向电流过大会导致二极管过热而烧毁。二极管的反向工作电压一般取反向击穿电压的一半。

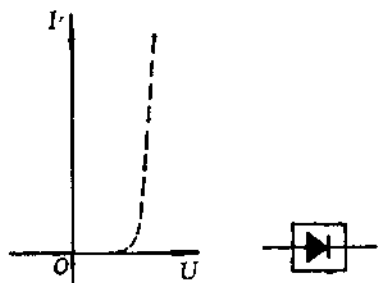
5. 反向工作电流。指二极管未被电击穿时的反向电流,也称反向饱和电流。反向饱和电流越小,二极管的单向导电性越好。值得注意的是,反向饱和电流的大小受温度影响极大。

6. 最高工作频率。由于 PN 结结电容的存在,当信号的频率超过一定值时,二极管的单向导电性就被破坏,这个极限值称为最高工作频率。结电容愈大,允许的最高工作频率愈低。

四、二极管的等效电路

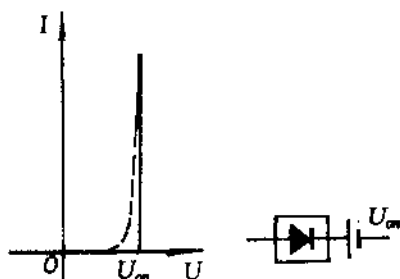
二极管的最基本特性是单向导电性,根据不同的要求可以采取不同的近似,将其等效为不同的模型。

1. 理想二极管。实际二极管的正向电阻远远小于其反向电阻;因此,在粗略的计算中,可以将二极管视为理想化模型——理想二极管,即其正向电阻为零,反向电阻无穷大。其特性曲线和符号如图 1-16 所示。



(a) 特性图 (b) 符号

图 1-16 理想二极管

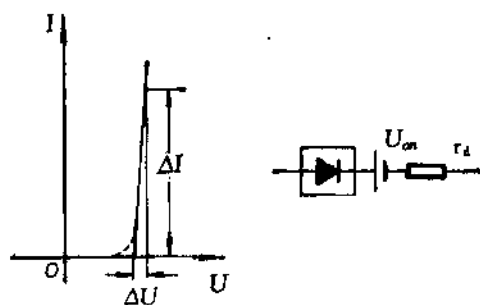


(a) 特性图 (b) 等效图

图 1-17 开关等效电路

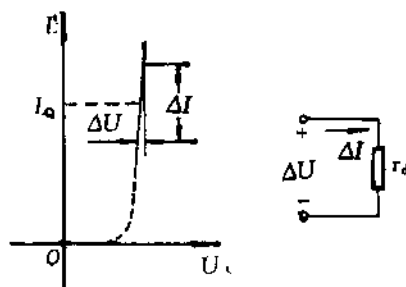
2. 开关等效电路。理想二极管等电路只考虑二极管的单向导通性,实际二极管正向导通需要一定的电压(即导通电压)才能导通。考虑到导通电压,二极管可用图 1-17 所示的特性曲线和等效电路来等效实际二极管。由图 1-17 特性曲线可知:当二极管的正向电压大于导通电压 U_{on} 时,二极管导通,电阻为零;否则二极管截止,电阻为无限大。

3. 折线等效电路。实际二极管的正向电阻总是存在的,为了更精确地等效二极管,可以采用图 1-18 所示电路来等效。从图中可以看出,当电压小于导通电压 U_{on} 时,电流为零;当电压超过导通电压,二极管导通,电流与电压的关系可用一条斜线表示,斜线的斜率相当于交流电阻的倒数。



(a) 特性曲线 (b) 等效电路

图 1-18 折线等效电路



(a) 特性曲线 (b) 等效电路

图 1-19 微变等效电路

4. 微变等效电路。如果只考虑交流分量,即考虑二极管的端电压在工作点附近的微小变化所引起的电流变化,可用图 1-19(a)中工作点的切线表示其特性,这时二极管可用图 1-19(b)所示电路等效,其中 r_d 为交流电阻。

上述各种等效电路是根据不同的近似条件得到的,使用时要根据具体条件选择合适的等效电路。

五、二极管应用举例

二极管具有单向导通性、电容特性、电阻非线性以及反向击穿特性,其不同的特性可在不同的电路中得到应用。下面介绍几种简单的应用电路。

1. 限幅电路。利用二极管的单向导通性可以组成限幅电路。图 1-20 即为简单的限幅电路,图中,当输入电压 U_i 小于二极管的导通电压时, $U_o = U_i$; 当 U_i 超过导通电压 U_{on} 时,二极管导通,输出电压即为导通电压 U_{on} 。这样,输出电压就被限制在 $0 \sim U_{on}$ 之间。由于二极管的导通电压较小,要将输出电压限制在较大范围内,可以在二极管上串联一个电压源来实现。

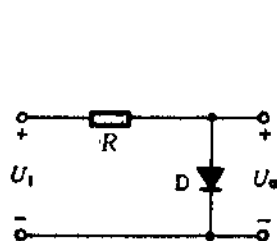
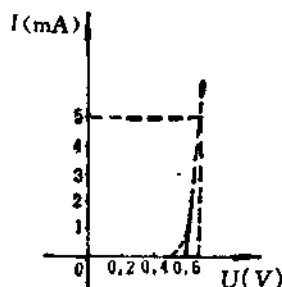
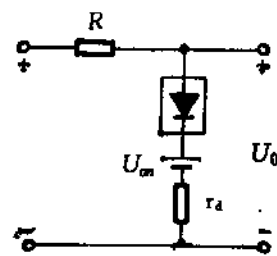


图 1-20 简单限幅电路



(a) 特性曲线



(b) 等效电路

图 1-21 例 1.1 示意图

例 1.1 在图 1-20 中, $R=1\text{k}\Omega$, 二极管的特性如图 1-21(a) 所示。试计算 U_1 为 0V、5V、10V 时 U_o 的数值。

解 由图 1-21(a) 可知, 导通电压 U_{on} 约为 0.6V, 交流电阻为: $r_d = \frac{0.67-0.6}{5 \times 10^{-3}} = 14\Omega$ 。可用图 1-21(b) 所示折线等效电路来等效图 1-20。

$U_1=0\text{V}$ 时, 二极管截止, $U_o=0\text{V}$;

$U_1=5\text{V}$ 时, $U_o=U_{on}+(U_1-U_{on})r_d/(R+r_d)=0.6+(5-0.6) \times 14/(10^3+14) \approx 0.63\text{V}$;

$U_1=10\text{V}$ 时, 同理有 $U_o \approx 0.665\text{V}$ 。

由此例可见, 当二极管导通后, 尽管输入电压变化很大, 但输出电压变化却很小, 达到了限幅的目的。

例 1.2 在图 1-22(a) 所示电路中, 已知 $u_i=30\sin 100\pi t(\text{V})$, 二极管的正向压降和反向电流均可忽略。试画出输出电压 u_o 波形图以及传输特性曲线 $u_o=f(u_i)$ 。

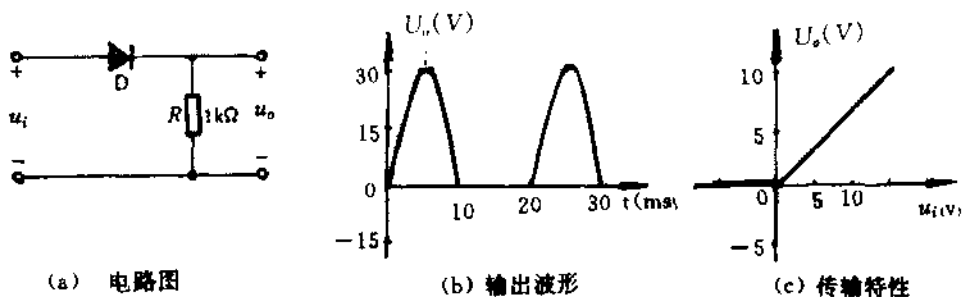


图 1-22 例 1.2 示意图

解 由于二极管具有单向导电性, 故有: $u_i > 0$, D 导通, $u_o = u_i$; $u_i < 0$, D 截止, $u_o = 0$ 。所以, 输出电压 u_o 的波形图及传输特性分别如图 1-22(b)、(c) 所示。

2. 二极管门电路。

在某些情况下, 二极管的作用很象开关, 当其两端电压低于导通电压时, 二极管截止, 相当于开关断开; 当其两端电压超过导通电压时, 二极管导通, 相当于开关接通。与开关不同的是, 导通时二极管的压降不为零, 而约为 U_{on} , 利用二极管的这种特性可组成二极管门电路, 用来实现一定的逻辑关系。图 1-23 所示电路即是二极管“与”门电路。

例 1.3 分析图 1-23(a) 所示电路中 U_A 、 U_B 分别为 0V 和 3V 的不同组合时, 二极管 D_1 、 D_2 的状态, 并求出相应的输出电压 u_o (设二极管为硅管)。

解 采用开关等效电路来代替二极管, 其等效电路如图 1-23(b), 其中 $U_{on}=0.7\text{V}$, 故有:

(1) $U_A=U_B=0\text{V}$, D_1 、 D_2 都导通, $U_o=U_{on}=0.7\text{V}$;

(2) $U_A=U_B=3\text{V}$, D_1 、 D_2 都截止, $U_o=3\text{V}$;

(3) $U_A=0\text{V}$, $U_B=3\text{V}$, D_1 导通, D_2 截止, $U_o=0.7\text{V}$;

(4) $U_A=3\text{V}$, $U_B=0\text{V}$, D_1 截止, D_2 导通, $U_o=0.7\text{V}$;

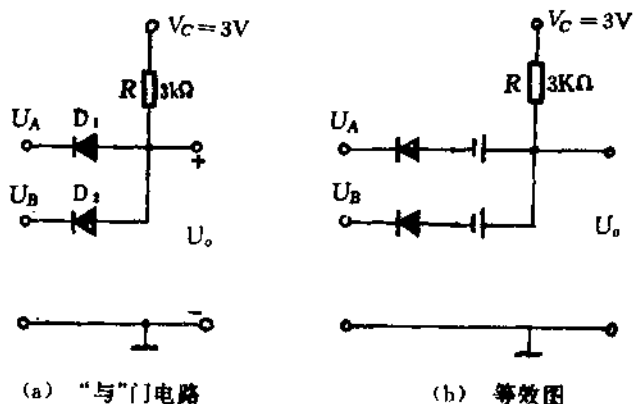


图 1-23

3. 稳压管。

稳压管是一种特殊的二极管,它是利用二极管反向电击穿时电压基本恒定这一特性来实现“稳压”的。稳压管正常工作时是反向偏置的。图 1-24 分别为稳压管符号和实际的稳压电路。

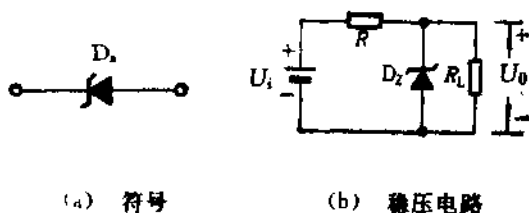


图 1-24 稳压管及其应用

§ 1.3 半导体三极管

半导体三极管是通过一定的工艺,将两个 PN 结结合在一起形成的。由于两个 PN 结之间的相互作用,使得三极管表现出不同于单个 PN 结的特性而具有电流放大功能。本节围绕三极管的电流放大作用,讨论其结构、特性曲线和参数。

1.3.1 半导体三极管的类型和结构

半导体三极管又称双极型晶体管或晶体管。根据其结构不同可分为 NPN 型和 PNP 型两大类。下面讨论其结构。

图 1-25(a)是 NPN 型半导体三极管的示意图。它是由两个不同 PN 结组成的三层半导体区,中间是一块很薄的 P 型半导体区(约几微米至几十微米),称为基区,两边为两个不对称的 N 区,其中一个为杂质浓度高的 N 区,称为发射区,另一个为杂质浓度低但表面积大的 N 区(如图 1-25(b)),称为集电区。从三块半导体上各自接一根引线便构成三极管的三个电极:发射极 e,基极 b 和集电极 c。