



国家级电工电子教学基地“十一五”规划教材

电子技术

席志红 主编



哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press



国家级电工电子教学基地“十一五”规划教材

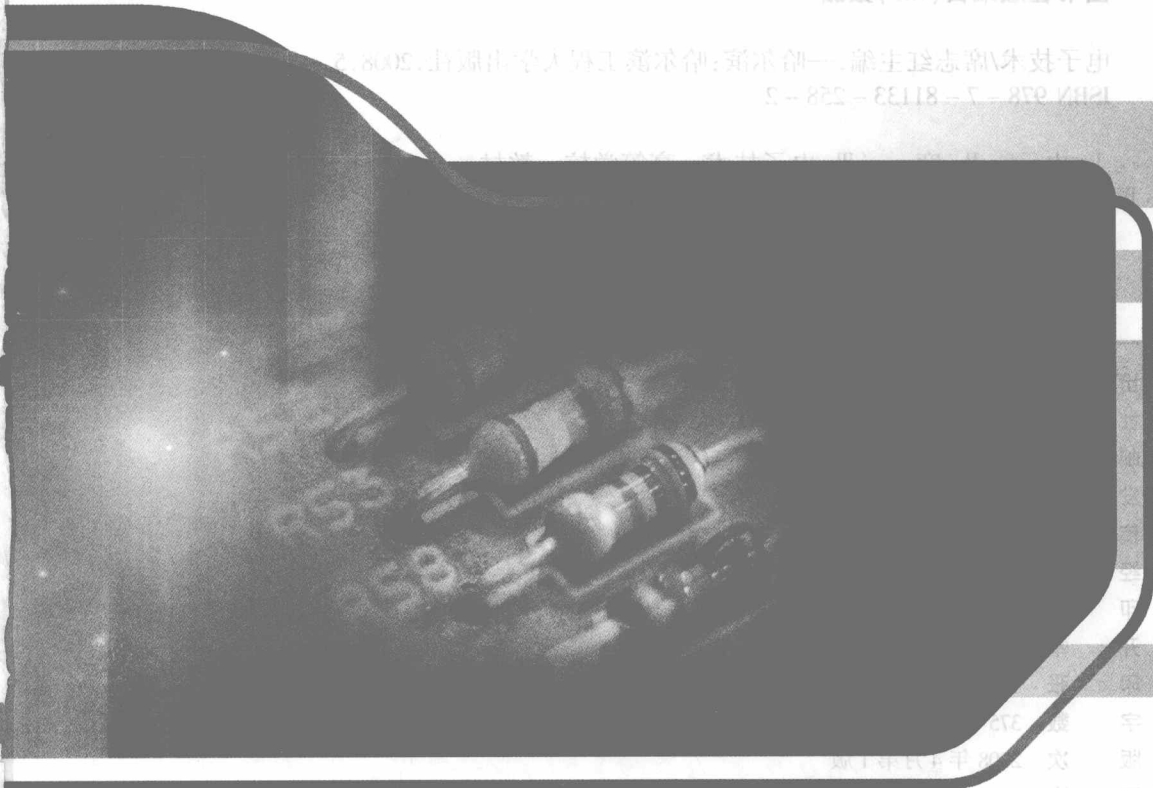
内容简介

本书可作为高等院校工科专业及非工科专业电工电子技术课程的教学用书，也可供从事电工电子技术工作的工程技术人员参考。本书共分5章，主要内容包括：绪论、直流电路、交流电路、磁路和变压器、电动机、继电接触器控制线路、电子电路等。本书可作为高等院校工科专业及非工科专业电工电子技术课程的教学用书，也可供从事电工电子技术工作的工程技术人员参考。

电子技术

席志红 主编 路艳杰 陈 凯 李鸿林 徐 伟 张忠民 汤春明 参编 王淑钧 主审

微震(913)目録編容註圖



哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

内 容 简 介

本书是根据国家教委高等工程院校电工学课程指导小组审定的“电子技术课程教学基本要求”编写的。编写过程中编者根据2004年出版的原教材的使用意见,对原教材中的部分章节进行了修改和补充。其内容仍分为上、下两篇,上篇为模拟电子技术基础知识,主要包括:半导体分立元件介绍、信号放大电路、功率放大电路、正弦波振荡电路介绍、运算放大器原理及应用、直流稳压电源的构成;下篇为数字电子技术基础知识,主要包括:数字电路的基本组成、典型组合逻辑电路的分析与介绍、时序逻辑电路的组成与常规电路分析、数—模和模—数转换、脉冲波形的产生与整形电路。

本书可以作为高等工科院校非电专业学生电子技术课程教材,也可以供其他有关方面工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术/席志红主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2008.5
ISBN 978-7-81133-258-2

I. 电… II. 席… III. 电子技术-高等学校-教材
IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 044199 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 肇东粮食印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 16.25
字 数 375 千字
版 次 2008 年 4 月第 1 版
印 次 2008 年 4 月第 1 次印刷
定 价 29.00 元

<http://press.hrbeu.edu.cn>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前言

本书是在哈尔滨工程大学出版社 2004 年出版的原教材的基础上,结合我们多年的教学经验以及对原教材的使用意见,并参照教育部高等学校电子信息科学与工程电气信息类基础课程教学指导分委员会于 2004 年 8 月颁布的“电子信息科学与工程电气信息类基础课程教学基本要求”重新整理出版的。此次出版的教材仍然作为我校国家工科基础课程教学基地电工电子类系列教材之一使用。新教材保留了原教材内容全面、阐述细致的特点,并对其中部分章节进行了补充和修改。

在编写过程中,我们注重保持理论联系实际、内容丰富、知识面广、阐述细腻、通俗易懂的特点,将电子技术教学要求内容分为上、下两篇。上篇为模拟电子技术基础,共四章;下篇为数字电子技术基础,共五章。章节分布基本与原教材相同,在内容上又对原教材中不足之处予以补充,部分不妥之处也予以改正。相信新教材会比原教材有进步和提高。

为了方便广大读者学习,本书还配有哈尔滨工程大学出版社出版的《电子技术学习指导与习题解答》及《电工与电子技术实验教程》。

由于作者水平有限,书中难免有不足之处,恳请各位读者批评指正。

编 者

2008 年 4 月

目 录

上篇 模拟电子技术基础

1 半导体器件	3
1.1 PN 结及其单向导电性	3
1.2 半导体二极管	5
1.3 特殊二极管	8
1.4 半导体三极管	10
1.5 场效应管	14
习题	18
2 放大电路	21
2.1 基本放大电路	21
2.2 基本放大电路的图解分析法	24
2.3 微变等效电路分析法	32
2.4 静态工作点稳定电路	38
2.5 共集电极放大电路	42
2.6 放大电路的通频带及多级放大电路	45
2.7 放大电路中的负反馈	50
2.8 差动放大电路	57
2.9 功率放大电路	64
2.10 正弦波振荡电路	68
2.11 场效应管放大电路	74
习题	77
3 集成运算放大器	84
3.1 集成运算放大器简介	84
3.2 信号运算电路	89
3.3 信号处理电路	96
3.4 集成运算放大器的应用	102
3.5 集成运算放大器的一般使用方法	105
习题	107
4 直流电源	113
4.1 整流、滤波电路	113
4.2 稳压电路	119
* 4.3 开关型稳压电源	124
4.4 可控整流电路	125
习题	132

下篇 数字电子技术基础

5 数字电路基础	137
5.1 数字电路概述	137
5.2 半导体器件的开关特性	138
5.3 进位计数制	141
习题	145
6 组合逻辑电路基础	146
6.1 基本逻辑门电路	146
6.2 逻辑代数基本知识	151
6.3 组合逻辑电路功能分析	158
6.4 集成逻辑门电路	172
习题	178
7 时序逻辑电路	183
7.1 时序逻辑电路的特征	183
7.2 触发器	183
7.3 计数器	191
7.4 寄存器	199
习题	202
8 模—数转换器和数—模转换器	207
8.1 D/A 转换器(DAC)	207
8.2 A/D 转换器(ADC)	211
* 8.3 计算机控制系统中的标准化 D/A、A/D 模板介绍	217
习题	218
9 脉冲波形的产生与整形电路	220
9.1 单稳态触发器	220
9.2 多谐振荡器	223
9.3 施密特触发器	230
9.4 555 集成时基电路及其应用	233
习题	238

附录

附录 1 半导体分立器件型号命名方法	240
附录 2 常用半导体器件参数	240
附录 3 半导体集成电路(器件)型号命名方法	247
附录 4 国产 TTL 集成电路和国外 TTL 集成电路型号对照的说明	248
附录 5 部分常用的 TTL 数字集成电路型号及引脚图	249
参考文献	253

上篇

模拟电子技术基础

根据电子电路工作信号随时间变化的差别,将连续变化的信号称为模拟信号,将相对时间是离散的信号称为数字信号。依据这两种类型的工作信号,把电子电路划分为模拟电路与数字电路两大类。

本篇介绍半导体器件、模拟信号下的放大电路、运算放大器及直流电源等内容。

1 半导体器件

半导体器件是组成电子电路的核心部件,它们的基本结构、工作原理、特性及参数是学习电子技术和分析电子电路的基础。本章主要介绍 PN 结、二极管、晶体三极管及场效应管。这些器件都是由半导体材料构成的。

所谓半导体,顾名思义,就是它的导电能力介于导体和绝缘体之间。由于半导体器件具有质量少、体积小、耗电少、寿命长、工作可靠等突出优点,因此在现代农业、现代工业、现代科学技术和现代国防中获得了广泛的应用。

1.1 PN 结及其单向导电性

1.1.1 P 型半导体和 N 型半导体

目前常用的半导体材料是硅和锗。将锗或硅材料提纯(去掉杂质)制成单晶体,所有原子便基本上整齐排列(半导体一般都具有这种晶体结构,所以半导体又称为晶体)。每个硅(或锗)原子的四个价电子分别为相邻的四个原子所共有,组成所谓共价键结构,如图 1-1 所示。由于这些价电子受到自身原子核和共价键的束缚,因而不能自由运动。在绝对零度时,单晶体实际上是一个绝缘体。但在

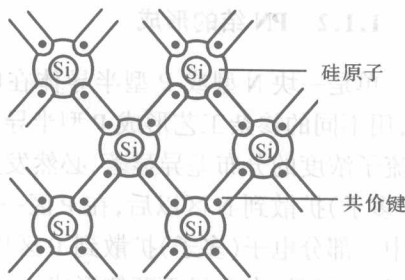


图 1-1 硅单晶中的共价键结构

一定温度下,一小部分价电子由于热激发而获得足够能量,摆脱束缚,成为可以在单晶体中自由运动的电子,这种电子称为自由电子。与此同时,在原子的外层电子轨道上留下一个“空位”,这种空位就称为空穴。在外电场的作用下,有空穴的原子可以吸引相邻原子中的价电子来填补这个空穴。同时,在失去了一个价电子的相邻原子的共价键中又出现另一个空穴,它也可以由相邻原子中的价电子来递补,而在该原子中又出现一个空穴。这种现象就好像空穴在单晶体中移动一样。空穴相当于一个带正电荷的粒子,因此空穴运动相当于正电荷的运动,空穴的运动方向与价电子运动的方向相反。

在纯净的半导体(或称本征半导体)中,由热激发所产生的自由电子和空穴总是成对出现的。这种现象称为本征激发,相应的电子和空穴叫做电子空穴对。为区别于自由电子导电,我们把空穴移动叫做空穴导电。自由电子与空穴是半导体中参与导电的两种载流子。

本征激发所产生载流子的数量是有限的,形成的电流很小。若在本征半导体中掺入一定杂质,如在硅中掺入少量的五价元素磷,由于每一个磷原子与相邻的四个硅原子组成共价键时,多出一个电子,则自由电子的浓度将大大增加,其数量远多于空穴的数量。这种以自由电子导电为主的掺杂半导体,称为 N 型半导体。在 N 型半导体中,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。

若在硅中掺入三价元素(如硼),由于每一个硼原子在组成共价键时,产生一个空穴,则空穴的浓度大大增加,其数量远多于自由电子的数量。这种以空穴导电为主的半导体称为P型半导体。在P型半导体中空穴为多子,自由电子为少子。

综上所述,由于掺入不同的杂质,因而产生了两种不同类型的半导体——P型半导体和N型半导体,如图1-2(a)所示,它们统称为杂质半导体。图中 $\ominus$ 代表得到一个电子的三价杂质(例如硼)的负离子, $\oplus$ 代表失去一个电子的五价杂质(例如磷)的正离子。

在杂质半导体中,载流子的浓度要比本征半导体中载流子的浓度大得多。但是,无论是N型半导体还是P型半导体,都不带电而是呈现电中性。

在外电场作用下,N型半导体中的电流,主要是由电子定向移动形成的,而P型半导体中的电流则主要是由空穴定向移动所形成的。半导体的导电方式与导体导电有所不同。

1.1.2 PN结的形成

单是一块N型或P型半导体在电路中的作用,如同一个电阻。若在一片半导体材料上,用不同的掺杂工艺形成P型半导体和N型半导体,那么由于P型和N型半导体交界处载流子浓度的分布差异显著,必然发生两部分多数载流子的扩散运动。即P区中一部分空穴(多子)扩散到N区以后,在P区一侧留下一些带负电的杂质离子(因失去空穴);同时,N区中一部分电子(多子)扩散到P区以后,在N区一侧留下一些带正电的杂质离子(因失去电子)。于是,在交界面两侧形成了一个很薄的正负离子层。这些正负离子,因为其载流子消耗殆尽,在空间不能移动,所以也就不能参与导电。一般常把这些不能移动的带电离子叫做空间电荷,相应的这个区域称为空间电荷区或载流子耗尽区,如图1-2(c)所示。

正负空间电荷在交界面两侧形成一个电场,这个电场称为内电场,其方向是从带正电的N区指向带负电的P区,这个电场是由半导体内部载流子的扩散所形成的。因为它对多子的扩散运动起阻挡作用,所以空间电荷区又称为阻挡层。

空间电荷区的内电场对多数载流子的扩散运动起阻挡作用,这是一个方面。但另一方面,内电场却有助于空间电荷区两边的少数载流子通过这一区域。少子在电场作用下产生的定向运动称为漂移运动,其方向正好与扩散运动的方向相反。

可见,在交界面发生着两种相反的运动。开始时,扩散运动占优势。随着电子和空穴的扩散,空间电荷区所形成的内电场随之增强,对多子扩散的阻力增大,多子扩散逐渐得到抑制,但却使少子的漂移运动增强。不断受到削弱的扩散运动和不断得到增强的漂移运动,最终必然达到动态平衡,即P区的多子——空穴向N区扩散的数量与N区的少子——空穴向P区漂移的数量相等;同理,电子的扩散也必然为电子的漂移所抵消。因此,交界面上正负离子数不再变化时,空间电荷区就形成了一个相对稳定的状态,其宽度也就不变。这个区域就称为PN结。

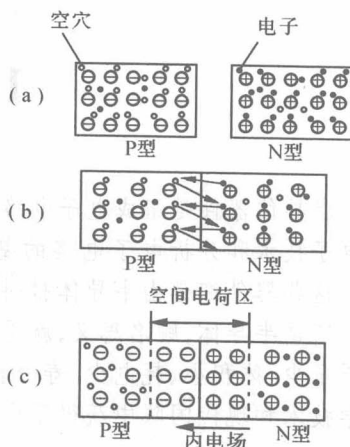


图 1-2

- (a) P型和N型半导体;
- (b) PN结载流子的扩散运动;
- (c) 平衡状态的PN结

1.1.3 PN 结的单向导电性

在 PN 结两端加上正向电压,即 P 区接电源正极,N 区接电源负极,简称正向偏置或正向运用,如图 1-3(a)所示。此时,外加电源产生外电场的方向与内电场的方向相反。在外电场的作用下,P 区中的多子(空穴)和 N 区中的多子(电子)都要向 PN 结移动。结果,使界面处的正负离子大为减少,空间电荷区变窄,内电场被削弱。于是扩散运动超过漂移运动,PN 结两侧的多子能通畅地越过 PN 结而形成较大的正向电流,PN 结呈现低阻导电状态。

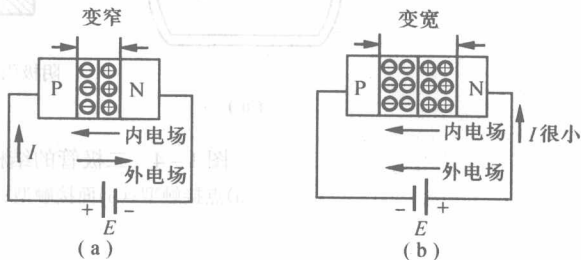


图 1-3

(a)PN 结加正向电压;(b)PN 结加反向电压

正向电流随外加电压的增加按指数规律上升。正向电流包括空穴流和电子流两部分,它们的运动方向相反,但由于空穴和电子带有不同极性的电荷,其电流方向仍然一致,即由 P 区指向 N 区。

在 PN 结上加反向电压,即 P 区接电源负极,N 区接正极,简称反向偏置或反向运用,如图 1-3(b)所示。此时,外电场的方向和内电场的方向相同。这就导致阻挡层变厚,使多子扩散运动更加难以进行,而只有少数载流子可以穿越 PN 结形成由 N 区流向 P 区的反向电流。由于少数载流子浓度很低,因此这个电流很小。可见,在反向电压作用下,PN 结呈现高阻、近似于不导电状态。因为正向电流远大于反向电流,所以说 PN 结具有单向导电性。

综上所述,PN 结加正向电压时导电(称导通);加反向电压时不导电(称截止)。即 PN 结具有单向导电性,导电方向从 P 到 N。

1.2 半导体二极管

在一个 PN 结的两端加上电极引线并用外壳封装起来,就构成了半导体二极管。由 P 型半导体引出的电极,叫做正极(或阳极),由 N 型半导体引出的电极,叫做负极(或阴极),通常用图 1-4(c)所示的符号表示。

按照结构工艺的不同,二极管有点接触型和面接触型两类。它们的管芯结构和符号如图 1-4 所示。

点接触型二极管(一般为锗管)的 PN 结结面积很小(结电容小),工作频率高,适用于高频电路和开关电路;面接触型二极管(一般为硅管)的 PN 结结面积大(结电容大),工作频率较低,适用于大功率整流等低频电路中。

半导体二极管的种类和型号很多,可用不同的符号来代表它们。例如 2AP9,其中“2”表示二极管,“A”表示采用 N 型锗材料为基片,“P”表示普通用途管(P 为汉语拼音字头),“9”为产品性能序号;又如 2CZ8,其中“C”表示由 N 型硅材料作为基片,“Z”表示整流管。关于二极管型号的命名方法可参见附录 1 的有关内容。

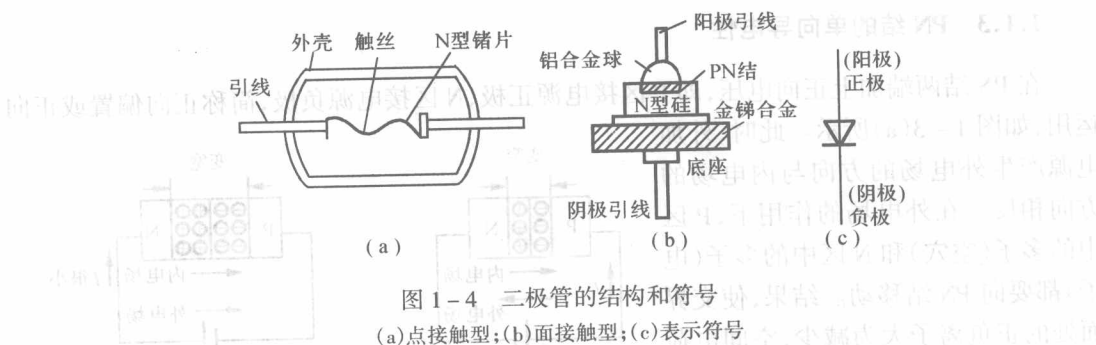


图 1-4 二极管的结构和符号

(a)点接触型;(b)面接触型;(c)表示符号

1.2.1 伏安特性

既然二极管是一个 PN 结,那么它必然具有单向导电性,其伏安特性曲线如图 1-5 所示。所谓伏安特性,就是指加到二极管两端的电压与流过二极管的电流的关系曲线,这个特性曲线可分为正向特性和反向特性两部分。

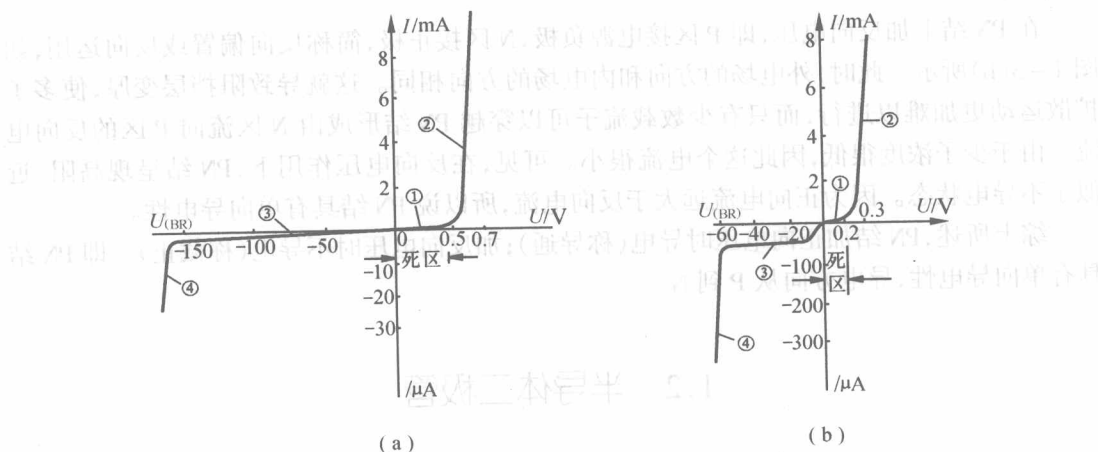


图 1-5 二极管伏安特性

(a)硅二极管 2CP11;(b)锗二极管 2AP15

(1) 正向特性

当二极管加上很低的正向电压时(如图 1-5 中①所指部分),外电场还不能克服 PN 结内电场对多数载流子扩散运动所形成的阻力,故正向电流很小,二极管呈现很大的电阻。当正向电压超过一定数值即死区电压后(如图 1-5 中②所指部分),内电场被大大削弱,电流增长很快,二极管电阻变得很小。死区电压又称阈值电压,硅管约为 0.5 V,锗管约为 0.1 V。二极管正向导通时,硅管的压降一般为(0.5~0.7) V,锗管则为(0.1~0.3) V。

(2) 反向特性

二极管加上反向电压时(如图 1-5 中③所指部分),由于少数载流子的漂移运动,因而形成很小的反向电流。反向电流有两个特性,一是它随温度的上升增长很快;二是在反向电压不超过某一数值时,反向电流不随反向电压改变而达到饱和,因此这个电流称为反向饱和

电流。

当外加反向电压过高时,反向电流将突然增大(如图1-5中④所指部分),二极管失去单向导电性,这种现象称为电击穿。发生击穿的原因,一种是处于强电场中的载流子获得足够大的能量碰撞晶格而将价电子碰撞出来,产生电子空穴对,新产生的载流子在电场作用下获得足够能量后又通过碰撞产生电子空穴对。如此形成连锁反应,反向电流愈来愈大,最后使得二极管反向击穿。另一种原因是强电场直接将共价键的价电子拉出来,产生电子空穴对,形成较大的反向电流。

二极管被击穿后,一般不能恢复原来的性能。产生击穿时加在二极管上的反向电压称为反向击穿电压 $U_{(BR)}$ 。

1.2.2 主要参数

二极管的特性除用伏安特性曲线表示外,还可用一些数据来说明,这些数据就是二极管的参数。各种参数都可从半导体器件手册中查出,下面只介绍几个常用的主要参数。

(1) 最大整流电流 I_{OM}

最大整流电流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。当电流超过这个允许值时,二极管会因过热而烧坏,使用时务必注意。

(2) 反向工作峰值电压 U_{RWM}

它是保证二极管不被击穿而得出的反向峰值电压,一般是反向击穿电压的一半或三分之二。

(3) 反向峰值电流 I_{RM}

它是指在二极管上加反向峰值电压时的反向电流值。反向电流大,说明二极管的单向导电性能差,并且受温度的影响大。

此外,二极管还有最高工作频率、结电容值、工作温度等参数。

二极管应用范围很广,都是利用它的单向导电性。它可用于整流、检波、元件保护以及在脉冲与数字电路中作为开关元件。

例1-1 在图1-6(a)电路中,已知 $E_1 = 5\text{ V}$, $E_2 = 3\text{ V}$ 。输入电压 $u_i = 5\sin\omega t\text{ V}$,其波形如图1-6(b)所示,D为理想二极管,即正向导通电压和反向电流均可忽略不计。试画出输出电压 u_o 的波形图。

解 由于二极管D的单向导电性,图1-6(a)电路有两种可能的工作状态。

一种情况是D正向导通,即电流 $i \geq 0$,并且 $u_{ab} \approx 0$ 。由KVL定律有

$$u_i + E_1 = iR + E_2$$

$$iR = u_i + E_1 - E_2 \geq 0$$

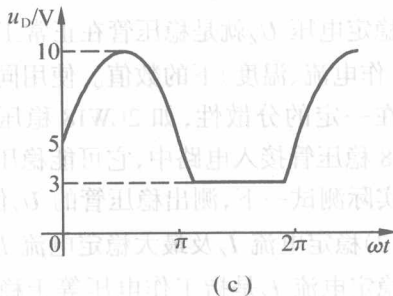
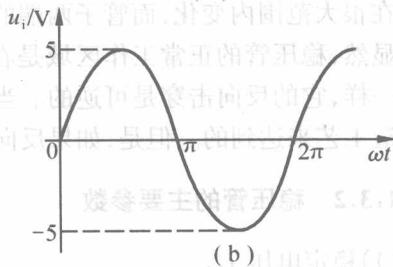
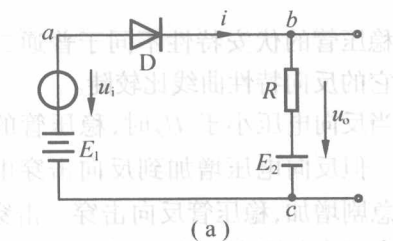


图1-6

即当 $u_i + E_1 \geq E_2$ 时 D 正向导通, 此时

$$u_o = u_i + E_1$$

另一种情况是 D 截止不通, 这时 $i = 0$, a 、 b 两点间近似于开路, 于是

$$u_o = E_2$$

绘出 u_o 波形如图 1-6(c) 所示。

1.3 特殊二极管

除了上节讨论的普通二极管外, 还有几种常用的特殊二极管, 如稳压管、发光二极管等。在这一节中, 我们分别予以介绍。

1.3.1 稳压二极管

它是一种特殊的面接触型半导体硅二极管。因它在电路中与适当数值的电阻配合后能起稳定电压的作用, 故称稳压管(也称齐纳二极管)。其表示符号如图 1-7(b) 所示, 其伏安特性曲线如图 1-7(a) 所示。

稳压管的伏安特性不同于普通二极管的原因就在于它的反向特性曲线比较陡。

当反向电压小于 U_z 时, 稳压管的反向电流几乎为零。但反向电压增加到反向击穿电压 U_z 后, 反向电流急剧增加, 稳压管反向击穿。击穿后通过管子的电流在很大范围内变化, 而管子两端的电压却变化很小, 我们就是利用这段特性来进行稳压的。显然, 稳压管的正常工作区域是在 PN 结特性曲线的反向击穿区。稳压管与一般二极管不一样, 它的反向击穿是可逆的。当去掉反向电压之后, 稳压管又恢复正常。这一特性是由制造工艺来达到的。但是, 如果反向电流超过允许范围, 稳压管将因发生热击穿而损坏。

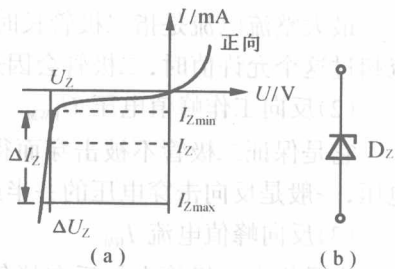


图 1-7 稳压管
(a) 特性曲线; (b) 图形符号

1.3.2 稳压管的主要参数

(1) 稳定电压 U_z

稳定电压 U_z 就是稳压管在正常工作下管子两端的电压。手册中所列的都是在一定条件(工作电流、温度)下的数值。使用同一型号的稳压管时, 由于工艺方面和其他原因, 稳压值存在一定的分散性, 如 2CW18 稳压管的稳压值为 $(10 \sim 12)$ V。这就是说, 如果把一个 2CW18 稳压管接入电路中, 它可能稳压在 10.5 V, 而另一个则可能稳压在 11.8 V。因此使用前应实际测试一下, 测出稳压管的 U_z 值。

(2) 稳定电流 I_z 及最大稳定电流 I_{zmax}

稳定电流 I_z 是指工作电压等于稳定电压时, 管子正常工作的电流值。最大工作电流 I_{zmax} 是指稳压管允许通过的最大反向电流。

(3) 动态电阻 r_z

动态电阻是指稳压管端电压的变化量与相应的电流变化量的比值,即

$$r_z = \frac{\Delta U_z}{\Delta I_z} \quad (1-1)$$

稳压管的反向伏安特性曲线愈陡,则动态电阻愈小,稳压性能愈好。

(4)耗散功率 P_{ZM}

管子不致发生热击穿的最大功率损耗

$$P_{ZM} = U_z \cdot I_{Zmax} \quad (1-2)$$

例 1-2 图 1-8 电路中,两只硅稳压管 2CW14 反接串联后,经过限流电阻 R 接在电源 E 上。已知 2CW14 的稳定电压 $U_z = 6.2 \text{ V}$,稳定电流 $I_z = 10 \text{ mA}$,最大稳定电流 $I_{Zmax} = 33 \text{ mA}$,正向导通管压降 $U_D = 0.6 \text{ V}$ 。试分析:(1)当 $E = 5 \text{ V}$ 时, U_o 为多少伏?(2)当 $E = 20 \text{ V}$ 时,为使稳压管正常稳压,限流电阻 R 取何值? 此时 U_o 为多少?

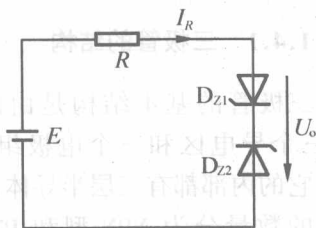


图 1-8

解 (1)当 $E = 5 \text{ V}$ 时,电源电压不足以使 D_{Z2} 击穿, D_{Z2} 处于截止状态,电流 $I_R = 0$,因此输出电压 $U_o = E = 5 \text{ V}$ 。

(2)当 $E = 20 \text{ V}$ 时,稳压管 D_{Z1} 正向导通, D_{Z2} 稳压,因此输出电压 $U_o = U_D + U_{Z2} = 6.8 \text{ V}$ 。此时限流电阻 R 的电流 I_R 为

$$I_R = \frac{E - U_o}{R} = \frac{20 - 6.8}{R} = \frac{13.2}{R}$$

为使稳压管正常稳压,电流 I_R 的范围为

$$I_z \leq I_R \leq I_{Zmax}$$

因此 $10 \leq \frac{13.2}{R} \leq 33$,解得 $0.4 \text{ k}\Omega \leq R \leq 1.32 \text{ k}\Omega$ 。

1.3.3 光电二极管

光电二极管也称为光敏二极管,其符号如图 1-9 所示。它工作于反向偏置状态,反向电流随光照强度增加而上升。无光照时,电路中电流很小;有光照时,电流会迅速上升。

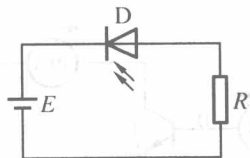


图 1-9 光电二极管电路

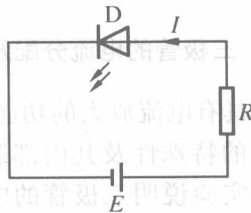


图 1-10 发光二极管电路

1.3.4 发光二极管

发光二极管工作于正偏状态,正向电流通过发光二极管时,它会发光,光的颜色视发光

二极管材料而定。其符号如图 1-10 所示。正向工作电压一般不超过 2 V,正向电流为 10 mA 左右。

1.4 半导体三极管

半导体三极管简称三极管或晶体管。

1.4.1 三极管的结构

三极管的基本结构是由两个 PN 结、三个导电区和三个电极组合而成的。它的内部都有三层半导体,按 P 或 N 层的数量分为 NPN 型和 PNP 型两类,其结构示意图如图 1-11 所示。

每一类都分成基区、发射区和集电区。发射区和基区之间的 PN 结称为发射结;集电区和基区之间的 PN 结称为集电结。由发射区、基区和集电区引出的电极分别称为发射极 E、基极 B 和集电极 C。在制造工艺中,三层半导体材料的几何尺寸、掺杂程度都有很大的差异。夹在中间的基区比两侧的发射区和集电区要薄得多,约为一微米至几十微米,而且杂质浓度很低,因而多数载流子很少;而发射区的半导体材料掺杂的杂质比集电区的多一些,载流子的浓度也大一些。这些都是三极管内部结构的特殊性。

三极管的表示符号如图 1-11 所示,其中发射极的箭头表示发射结加正向电压时的电流方向。若箭头的方向是指向发射极的为 PNP 型管;若箭头的方向是背离发射极的则为 NPN 型管。常见的三极管外形如图 1-12 所示。

目前,国内生产的硅三极管多为 NPN 型(3D 系列),锗三极管多为 PNP 型(3A 系列)。

1.4.2 三极管的电流分配及放大作用

三极管具有电流放大的功能,完全取决于其内部结构的特殊性及其内部载流子的运动规律。通过实验说明三极管的电流分配及放大作用,实验电路如图 1-13 所示。

直流电源 E_B , E_C 为三极管的两个 PN 结提供偏置电压,由于 $E_C > E_B$,使 C, B, E 极电位 $V_C > V_B > V_E$,从而使集电结反向偏置,发射结正向偏置。

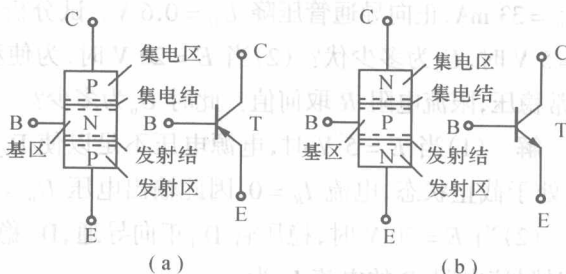


图 1-11 三极管的结构形式和图形符号

(a) PNP 型; (b) NPN 型

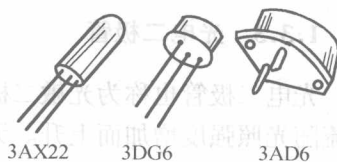


图 1-12 三极管的外形

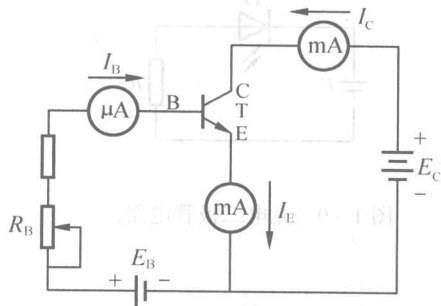


图 1-13 三极管电流放大实验电路

改变可变电阻 R_B , 则基极电流 I_B 、集电极电流 I_C 和发射极电流 I_E 都发生变化。测量结果列于表 1-1 中。

表 1-1 三极管电流测量数据

I_B/mA	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
I_C/mA	< 0.001	0.70	1.50	2.30	3.10	3.95
I_E/mA	< 0.001	0.72	1.54	2.36	3.18	4.05
I_C/I_B		35	37.5	38.3	38.7	39.5
$\Delta I_C/\Delta I_B$		40	41	41	41	43

观察测量结果, 可得出如下结论。

①观察每一列实验数据, 可得知 $I_E = I_C + I_B$, 这与基尔霍夫电流定律相符合。

② I_C , I_E 比 I_B 大得多。从第二列以后的数据可以看到这点。从第二列以后的数据可知, I_C 与 I_B 的比值分别为 35, 37.5, 38.3, 38.7 和 39.5。

这就是三极管的电流放大作用。电流放大作用还体现在基极电流的少量变化 ΔI_B 可以引起集电极电流较大的变化 ΔI_C 。如第二列以后 $\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$ 的数值分别为 40, 41, 41, 43。由此可以看到, $\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$ 比值基本一致, 体现了基极电流对集电极电流具有小量控制大量的作用, 即体现了晶体管的电流放大或控制作用。

③当 $I_B = 0$ (将基极开路时), $I_C = I_{CEO}$, 表中 $I_{CEO} < 0.001 \text{ mA} = 1 \mu\text{A}$ 。

下面用载流子在三极管内部的运动规律来解释上述结论。

①发射区向基区注入电子, 从而形成发射极电流 I_E 。

由于发射结处于正向偏置, 多数载流子的扩散运动加强, 发射区的自由电子 (多数载流子) 不断扩散到基区, 并不断从电源补充进电子, 形成发射极电流 I_E 。基区的多数载流子 (空穴) 也要向发射区扩散, 但由于基区的空穴浓度比发射区的自由电子的浓度小得多, 因此空穴电流很小, 可以忽略不计 (在图 1-14 中未画出)。

②电子在基区中的扩散与复合, 形成了基极电流 I_B 。

由发射区进入基区的大量电子, 在发射结附近积累起来, 浓度很大, 而靠近集电结的自由电子很少, 形成了浓度上的区别, 因而自由电子将向集电结方向继续扩散。电子在扩散过程中不断与基区中的空穴复合, 复合掉的空穴由基极电源来补充。这样, 电子与空穴不断复合就形成了基极电流 I_B 。因为基区的厚度只有几个微米, 电子扩散所经过的路程极短, 加之基区掺杂质很少, 空穴的浓度很低, 所以绝大部分电子都能扩散到集电结附近, 而与空穴复合的电子数极少, 因此基极电流 I_B 也就很小。

③集电区收集电子, 形成集电极电流 I_C 。由于集电结反向偏置, 即集电区的电位高于基区的电位, 从而外电场加强了内电场, 有利于少子的漂移。从基区扩散到集电结边缘的电

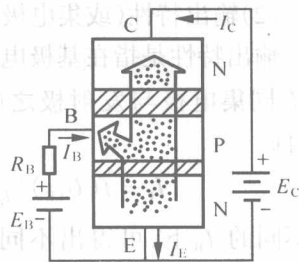


图 1-14 内部载流子运动规律