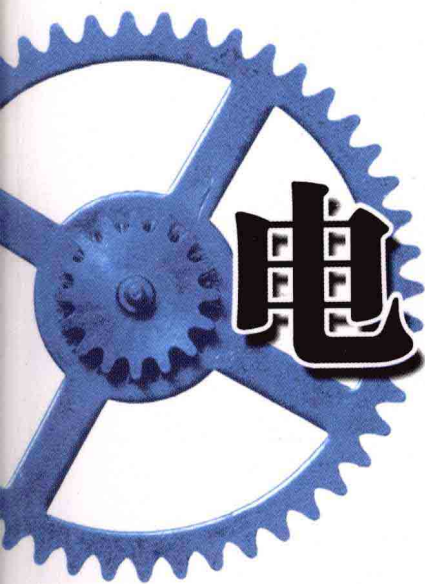




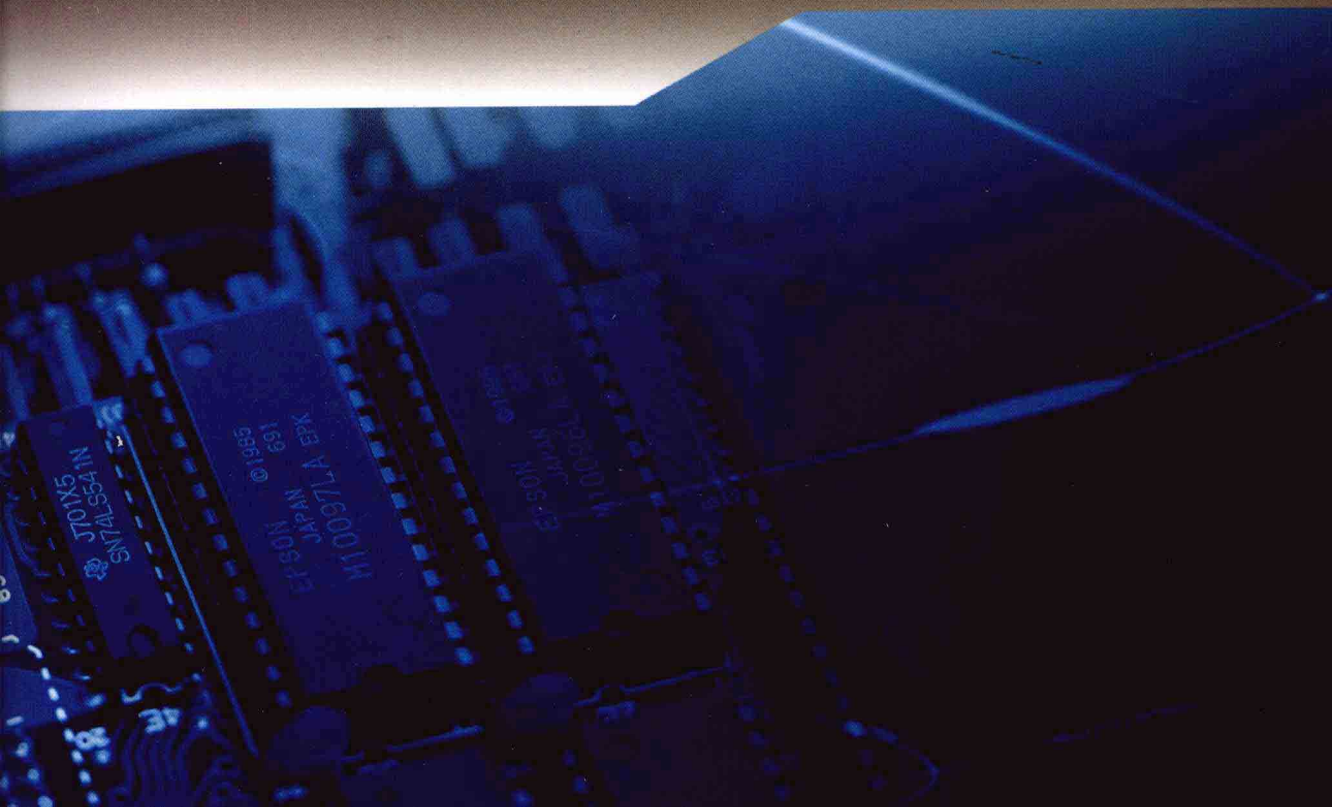
高职高专“十一五”规划教材

机械电子类



电子技术

李加升 冯和平 主编



高职高专“十一五”规划教材·机电类

电子技术

主 编 李加升 冯和平
副主编 邓剑锋 王 盟



北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2008

内 容 简 介

本书为高职高专“十一五”规划教材,是编者在多年教学改革与实际的基础上,根据教育部最新制定的“高职高专教育电子技术基础课程教学基本要求”,在“必需、够用”的前提下编写而成。

本书内容包括:常用半导体器件、基本放大电路、负反馈与集成运算放大电路、正弦波振荡器、直流稳压电源、数字电路基础、组合逻辑电路、时序逻辑电路、模数与数模转换、存储器和可编程逻辑器件简介等。

本书内容新,覆盖面广,淡化理论、注重应用,各章均有习题和技能训练。

本书可作为高等职业院校、高等专科学校、成人高校、民办高校的电气自动化、电子信息、机电一体化等专业的教材,也可供从事电子技术工作的工程人员、中职学校相关专业教师参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术/李加升,冯和平主编. —北京:冶金工业出版社, 2008.6

ISBN 978-7-5024-4598-0

I.电… II.①李…②冯… III.①电子技术—高等学校②技术学校—教材 IV.TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 093903 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 刘 源

ISBN 978-7-5024-4598-0

北京天正元印务有限公司印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2008 年 6 月第 1 版,2008 年 6 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 13.25 印张; 295 千字; 204 页; 1-3000 册

28.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话: (010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

本书从 21 世纪高素质劳动者和高等专门人才培养的目标出发,依据教育部最新制定的《高职高专教育电子技术基础课程教学基本要求》编写而成。高职高专教学改革要求注重素质教育、注重应用型人才能力的培养,把立足点放在工程技术应用上,课程内容应删繁就简,突出主线、突出重点,做到既为后续课程服务,又能强化工程技术应用能力的培养。

本书在结构、内容安排等方面吸收了编者多年来在教学改革、教材建设等方面取得的经验,力求全面体现高等职业教育的特点,满足当前教学的需要。

本书的主要特点有:

(1) 全书以电子技术的基本知识、基本技能及其相应的基础理论为主,模拟电路以集成运放、集成稳压器等为主,数字电路以中规模集成电路为主,压缩小规模集成电路的篇幅,适当介绍大规模集成电路,少量介绍分立元件,帮助读者理解基本电路的工作原理。

(2) 大幅度减少集成电路内部电路分析的内容,把重点放在外部特性和应用上。主要讲清基本原理,大幅度压缩半导体基本知识的内容,主要讲清物理概念,尽量减少理论推导和计算,只保留必不可少的工程估算。

(3) 突出应用,注重综合能力的培养。本书在每章后面都增加了一些实验实训的内容,集理论与实训于一体。

(4) 努力反映现代电子技术的新技术、新成果,使教材尽可能跟上电子技术的新发展。

(5) 有利于教学。全书在内容的安排顺序上,充分考虑了组织课堂教学的需要。

《电子技术》是一门实际性较强的课程。本书在各章都对实际教学安排了具体内容,各校可以根据实验室仪器设备配置的实际情况配套编写实验实习指导书。

本书由李加升、冯和平任主编,邓剑锋、王盟任副主编,门保全、朱红梅、曾树华参加编写。

由于编者水平所限,书中如有不足之处敬请使用本书的师生与读者批评指正,以便修订时改进。如读者在使用本书的过程中有其他意见或建议,恳请向编者(bjzhangxf@126.com)踊跃提出宝贵意见。

编 者

目 录

第 1 章 常用半导体器件	1	5.2 数制与码制	95
1.1 半导体基本知识	1	5.3 基本逻辑门	97
1.2 半导体二极管	4	5.4 逻辑运算法则	103
1.3 特殊二极管	6	5.5 集成与非门电路	106
1.4 半导体三极管	8	习题	110
1.5 场效应管	15	第 6 章 组合逻辑电路	113
1.6 实训	18	6.1 组合逻辑电路的分析	113
习题	21	6.2 组合逻辑电路的设计	115
第 2 章 基本放大电路	24	6.3 常用的组合逻辑电路	118
2.1 共射放大电路	24	6.4 实训	128
2.2 放大电路的微变等效电路分析法	28	习题	130
2.3 静态工作点稳定电路	30	第 7 章 时序逻辑电路	132
2.4 共集放大电路和共基放大电路	32	7.1 基本 RS 触发器	132
2.5 多级放大电路	35	7.2 同步触发器	135
2.6 差动放大电路	36	7.3 计数器	141
2.7 场效应管放大电路	38	7.4 寄存器	146
2.8 功率放大电路	39	7.5 施密特触发器	149
2.9 实训	44	7.6 单稳态触发器	151
习题	48	7.7 多谐振荡器	154
第 3 章 负反馈与集成运算放大电路	51	7.8 实训	157
3.1 负反馈	51	习题	159
3.2 负反馈对放大电路性能的影响	55	第 8 章 数/模与模/数转换	165
3.3 深度负反馈放大电路的计算	56	8.1 数/模转换	165
3.4 集成运算放大器	58	8.2 模/数转换	171
3.5 有源滤波电路和电压比较器	67	习题	178
3.6 实训	71	第 9 章 电力电子技术	179
习题	76	9.1 晶闸管的工作原理	179
第 4 章 正弦波振荡器	80	9.2 晶闸管触发电路	182
4.1 自激振荡	80	9.3 其他类型的晶闸管	183
4.2 RC 正弦波振荡器	82	9.4 晶闸管的应用	185
4.3 LC 正弦波振荡器	85	9.5 元件的保护	194
4.4 石英晶体振荡器	89	9.6 直流稳压电源	196
4.5 实训	91	9.7 实训	202
习题	93	习题	203
第 5 章 数字电路基础	95		
5.1 数字电路概述	95		

第 1 章 常用半导体器件

半导体器件是组成各种电子电路的基础，半导体器件包括二极管、三极管、场效应管、集成电路等，是电子线路的核心器件。本章在简单介绍了半导体的基本知识后，重点讨论了半导体二极管、三极管、场效应管的结构、特性和主要参数。

1.1 半导体基本知识

1.1.1 半导体的特点

根据物体导电能力(电阻率)的不同，自然界的物质可划分为导体、绝缘体和半导体。导体是容易导电的物体，如铁、铜等。绝缘体是几乎不导电的物体，如橡胶等。半导体是导电性能介于导体和半导体之间的物体，在一定条件下可导电，半导体的电阻率为 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 。典型的半导体有硅和锗以及砷化镓等。半导体具有如下特点。

(1) 在外界能源的作用下，导电性能显著变化。半导体的电阻率随温度的上升而明显下降，呈负温度系数的作用。半导体的电阻率也随光照的不同而改变。光敏元件、热敏元件属于此类。

(2) 在纯净半导体内掺入杂质，导电性能显著增加。半导体的电阻率与所含微量杂质的浓度呈正比例关系。二极管、三极管属于此类。

1.1.1.1 本征半导体

纯净晶体结构的半导体称之为本征半导体。常用的半导体材料有硅和锗。它们都是四价元素，原子结构的最外层轨道上有 4 个价电子，本征晶体中各原子之间靠得很近，使原分属于各原子的 4 个价电子同时受到相邻原子的吸引，分别与周围的 4 个原子的价电子形成共价键，如图 1-1 所示。当把硅或锗制成晶体时，它们是靠共价键的作用而紧密联系在一起的。共价键中的一些价电子由于热运动获得一些能量，从而摆脱共价键的约束成为自由电子，同时在共价键上留下空位，我们称这些空位为空穴，它带正电。在外电场作用下，自由电子产生定向移动，形成电子电流；同时价电子也按一定的方向一次填补空穴，从而使空穴产生定向移动，形成空穴电流。因此，在晶体中存在两种载流子，即带负电自由电子和带正电空穴，它们是成对出现的，如图 1-2 所示。

1.1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中两种载流子的浓度很低，因此导电性很差。可以向晶体中有控制地掺入特定的杂质来改变它的导电性，掺入的杂质主要是三价或五价元素。这种掺入杂质的半导体被称为杂质半导体。杂质半导体主要包括 N 型半导体和 P 型半导体。任何半导体都是电中性，对外部不显电性。

(1) N 型半导体。在本征半导体中掺入五价杂质元素，如磷等元素，可形成 N 型半导体，也称电子型半导体。在本征半导体中掺入 5 价元素，使晶体中某些原子被杂质原子代替，因为杂质原子最外层有 5 个价电子，它与周围原子形成 4 个共价键后，还多余一个自

由电子，因此，其中空穴的浓度远小于自由电子的浓度。但是，电子的浓度与空穴的浓度的乘积是一个常数，与掺杂浓度无关。在 N 型半导体中，自由电子是多数载流子，空穴是少数载流子。

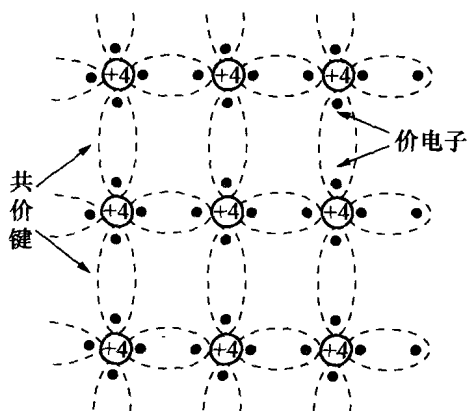


图 1-1 晶体中的共价键结构

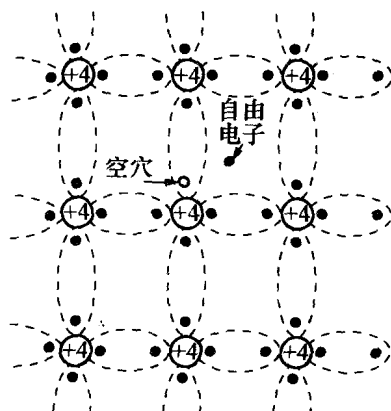


图 1-2 本征半导体中的自由电子和空穴

(2) P 型半导体。在本征半导体中掺入三价杂质元素，如硼、镓、铟等元素，形成了 P 型半导体，也称为空穴型半导体。在本征半导体中，掺入三价元素，晶体中的某些原子被杂质原子代替，但是杂质原子的最外层只有 3 个价电子，它与周围的原子形成共价键后，还多余一个空穴，因此，其中空穴的浓度远大于自由电子的浓度。在 P 型半导体中，自由电子是少数载流子，空穴是多数载流子。

1.1.2 PN 结

通过现代工艺，把一块本征半导体的一边形成 P 型半导体，另一边形成 N 型半导体，于是这两种半导体的交界处就形成了一个 PN 结，它是构成其他半导体的基础。

1.1.2.1 PN 结的形成

当 P 型半导体和 N 型半导体接触后，由于两侧的半导体的类型不同，电子和空穴的浓度相差很大，因此它们会产生扩散运动：电子从 N 区向 P 区扩散；空穴从 P 区向 N 区扩散。因为它们都是带电粒子，它们向另一侧扩散的同时在 N 区留下了带正电的空穴，在 P 区留下了带负电的杂质离子，这样就形成了空间电荷区，也就是形成了电场。通常这个空间电荷区称为 PN 结。它们的形成过程如图 1-3 所示。

在电场的作用下，载流子将作漂移运动，它的运动方向与扩散运动的方向相反，阻止扩散运动。电场的强弱与扩散的程度有关，扩散的越多，电场越强，同时对扩散运动的阻力也越大，当扩散运动与漂移运动相等时，通过界面的载流子为零。此时，PN 结的交界区就形成一个缺少载流子的高阻区，又把它称为阻挡层或耗尽层。

1.1.2.2 PN 结的单向导电性

PN 结具有单向导电性，这是半导体二极管的一个重要特性，但其只有在外加电压时才显示出来。在 PN 结两端施加不同方向的电压，可以破坏它原来的平衡，从而使它呈现出单向导电性。

1. PN 结外加正向电压

PN 结外加正向电压的接法是 P 区接电源的正极, N 区接电源的负极。这时外加电压形成电场的方向与自建场的方向相反, 从而使阻挡层变窄, 扩散作用大于漂移作用, 多数载流子向对方区域扩散形成正向电流, 方向是从 P 区指向 N 区, 如图 1-4 所示。

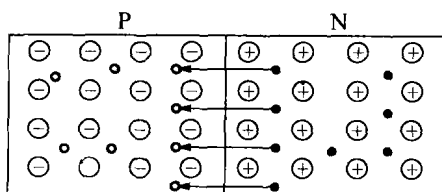


图 1-3 多数载流子的扩散运动

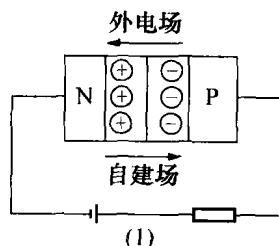


图 1-4 PN 结正向导通电路图

这时的 PN 结处于导通状态, 它所呈现的电阻为正向电阻, 正向电压越大, 电流也越大。它们的关系是指数关系

$$I_D = I_s (e^{\frac{U}{U_T}} - 1) \quad (1-1)$$

式中 I_D ——流过 PN 结的电流;

U ——PN 结两端的电压;

I_s ——反向饱和电流;

U_T ——温度电压当量, $U_T = kT/q$;

k ——玻耳兹曼常数;

T ——热力学温度, 在室温下(300 K)时, $U_T = 26\text{mV}$;

q ——电子电量。

2. PN 结外加反向电压

它的接法与正向相反, 即 P 区接电源的负极, N 区接电源的正极。此时的外加电压形成电场的方向与自建场的方向相同, 从而使阻挡层变宽, 漂移作用大于扩散作用, 少数载流子在电场的作用下, 形成漂移电流, 它的方向与正向电压的方向相反, 所以又称为反向电流。因反向电流是少数载流子形成, 故反向电流很小, 即使反向电压再增加, 少数载流子也不会增加, 反向电流也不会增加, 因此它又被称为反向饱和电流, 即 $I_D = -I_s$ 。此时, PN 结处于截止状态, 呈现的电阻为反向电阻, 而且阻值很高。

以上可以看出: PN 结在正向电压作用下, 处于导通状态; 在反向电压的作用下, 处于截止状态。因此, PN 结具有单向导电性。它的电流和电压的关系通式为 $I_D = I_s (e^{\frac{U}{U_T}} - 1)$ 。

它被称为 PN 结的伏安特性方程, 如图 1-5 所示为 PN 结的伏安特性曲线。

1.1.2.3 PN 结的击穿

PN 结处于反向偏置时, 在一定的电压范围内, 流过 PN 结的电流很小, 但电压超过某一数值时, 反向电流急剧增加, 这种现象就称为反向击穿。击穿形式分为雪崩击穿和齐纳击穿两种。对于硅材料的 PN 结来说, 击穿电压大于 7V 时为雪崩击穿, 击穿电压小于

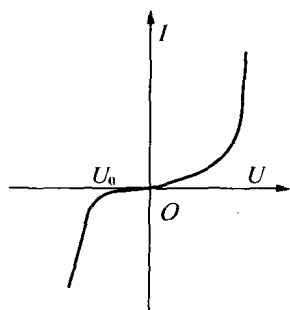


图 1-5 PN 结的伏安特性曲线

4V 时为齐纳击穿。在 4~7V 之间, 两种击穿都有。这种现象破坏了 PN 结的单向导电性, 在使用时要避免。击穿并不意味着 PN 结烧坏, 特别是齐纳击穿现象。

1.1.2.4 PN 结的电容效应

由于电压的变化将引起电荷的变化, 从而出现电容效应, PN 结内部有电荷的变化, 因此它具有电容效应。它的电容效应有势垒电容和扩散电容两种。势垒电容是由阻挡层内的空间电荷引起的; 扩散电容是 PN 结在正向电压的作用下, 多数载流子在扩散过程中引起电荷的积累而产生的。PN 结正偏时, 扩散电容起主要作用; PN 结反偏时, 势垒电容起主要作用。

1.2 半导体二极管

1.2.1 半导体二极管的结构类型

半导体二极管又称晶体二极管, 简称二极管。半导体二极管是由 PN 结加上引线 and 管壳构成的。它的类型很多, 按制造材料分为硅二极管和锗二极管; 按管子的结构来分为点接触型、面接触型和平面型三大类。常用二极管的逻辑符号和外形结构如图 1-6 所示, 其具体结构如下。

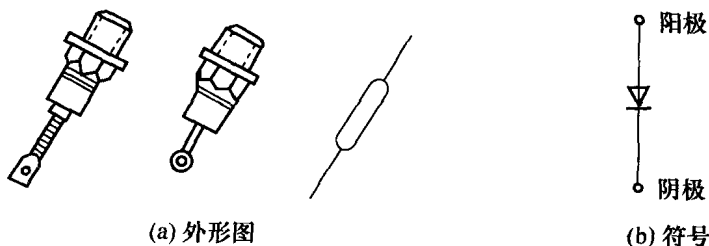


图 1-6 半导体二极管图形符号及外形

点接触型二极管的 PN 结面积小, 结电容小, 用于检波和变频等高频电路。面接触型二极管的 PN 结面积大, 用于工频大电流整流电路。平面型二极管往往用于集成电路制造工艺中。PN 结面积可大可小, 用于高频整流和开关电路中。

1.2.2 半导体二极管的特性及参数

1.2.2.1 二极管的特性

半导体二极管的伏安特性曲线如图 1-7 所示。处于第一象限的是正向伏安特性曲线, 处于第三象限的是反向伏安特性曲线。根据理论推导, 二极管的伏安特性可从如下几个方面分析。

(1) 从二极管的伏安特性曲线可知, 当二极管两端加较小的正向电压时, 二极管还不能导

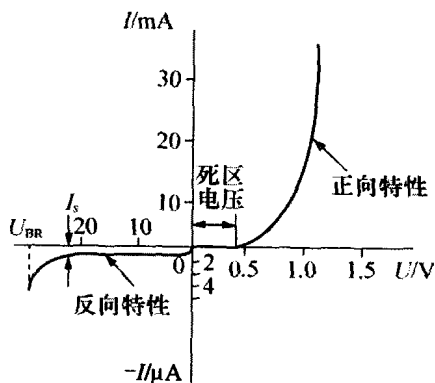


图 1-7 二极管的伏安特性曲线

通,这一段称为死区电压(硅管死区电压小于 0.5V,锗管死区电压小于 0.1V)。超过死区电压后,二极管中电流开始增大,这时只要电压略有增加,电流便急剧增大,这时二极管称为导通。这个电压被称为导通电压,也可称它为门限电压或死区电压,一般用 U_{ON} 表示。在室温下,硅管的 U_{ON} 约为 0.6~0.8V,锗管的 U_{ON} 约为 0.1~0.3V,一般硅管的导通电压取 0.7V,锗管取 0.3V。一般认为,当正向电压大于 U_{ON} 时,二极管才导通,否则截止。导通时,二极管在电路中相当于一个开关的接通状态。以上为二极管伏安特性曲线中正向特性的特点。

(2) 当二极管两端加反向电压(小于某一数值)时,二极管并不是理想的截止状态,它会有很小的反向电流,而且反向电流在一定范围内基本不随反向电压变化而变化,称为反向饱和电流。一般硅管约为几到几十微安,锗管约为几十到几百微安,此时二极管在电路中相当于一个开关的断开状态。由于半导体具有热敏特性,因此反向饱和电流将随温度升高而增大。通常温度每升高 10℃,其反向饱和电流约增大一倍。当反向电压增大至某一数值后,反向电流开始急剧增大,二极管将被击穿,有可能把二极管烧坏。以上为二极管伏安特性曲线中的反向特性的特点。

二极管对温度很敏感,在室温附近,温度每升高 1℃,正向电压将减小 2~2.5mV;温度每升高 10℃,反向电流约增加一倍。

1.2.2.2 二极管的主要参数

(1) 最大整流电流 I_F 。它是指二极管长期运行时,允许通过管子的最大正向平均电流,由二极管允许的温升所限定。使用时,管子的平均电流不得超过此值。否则,使二极管过热而损坏。工作电流较大的大功率管必须按规定安装散热装置。

(2) 最大反向工作电压 U_R 。它是二极管允许的最大反向工作电压,工作时加在二极管两端的反向电压不得超过此值,否则二极管可能被击穿。为了留有余地,一般取击穿电压的 1/2~1/3 作为 U_R 。

(3) 二极管的直流电阻 R_D 。加在管子两端的直流电压与直流电流之比,就称为直流电阻,可表示为 $R_D = U_F / I_F$ 。它是非线性的,正反向阻值相差越大,二极管的性能越好。

(4) 二极管的交流电阻 r_D 。这是指在二极管工作点附近电压的微变化与相应的电流微变化值之比,就称为该点的交流电阻。

(5) 最大反向电流 I_R 。最大反向电流是指在室温条件下,在二极管两端加上规定的最大反向电压时,流过管子的反向电流。通常,值愈小愈好。反向电流愈小,说明二极管的单向导电性愈好。此外,由于反向电流是由少数载流子形成的,所以,受温度的影响很大。

(6) 最高工作频率 f_M 。最高工作频率值主要取决于结电容的大小。结电容愈大,则二极管允许的最高工作频率愈低。

1.2.3 普通二极管的应用

二极管主要是利用它的单向导电性。导通时,电路中相当于短路;截止时,可认为它断路。普通二极管主要用于整流、检波、钳位、限幅、开关及元件保护等工作。

1.2.3.1 限幅电路

当输入信号电压在一定范围内变化时,输出电压也随着输入电压相应的变化;当输入电压高于某一个数值时,输出电压保持不变,这就是限幅电路。把开始不变的电压称为限

幅电平, 它分为上限幅和下限幅。

【例 1-1】试分析图 1-8(a)所示的限幅电路, 输入电压的波形为图 1-8(b), 画出它的限幅电路的波形。

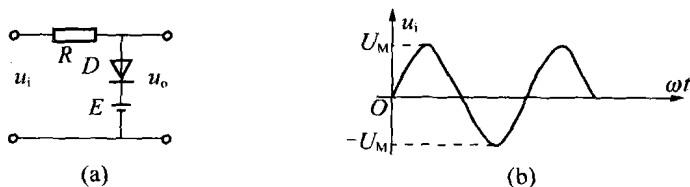


图 1-8 限幅电路和输入电压的波形图

解: (1) $E=0$ 时, 限幅电平为 $0V$ 。 $u_i>0$ 时, 二极管导通, $u_o=0$; $u_i<0$ 时, 二极管截止, $u_o=u_i$, 它的波形图如图 1-9 所示。

(2) 当 $0<E<U_M$ 时, 限幅电平为 $+E$ 。 $u_i<+E$ 时, 二极管截止, $u_o=u_i$; $u_i>+E$ 时, 二极管导通, $u_o=E$, 它的波形图如图 1-10 所示。

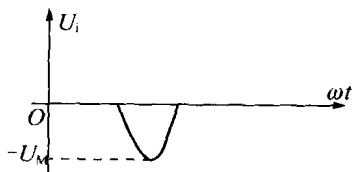


图 1-9 $u_o=u_i$ 波形图

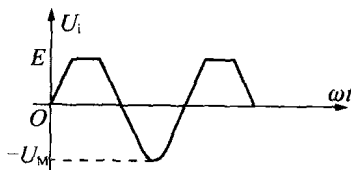


图 1-10 $u_o=E$ 波形图

(3) 当 $-U_M<E<0$ 时, 限幅电平为负数, 它的波形图如图 1-11 所示。

1.2.3.2 二极管门电路

二极管组成的门电路, 可实现逻辑运算。如图 1-12 所示的电路, 只要有一条电路输入为低电平时, 输出即为低电平; 当且仅当全部输入为高电平时, 输出才为高电平。实现逻辑“与”运算。

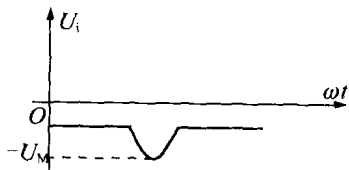


图 1-11 限幅电平为负数时的波形图

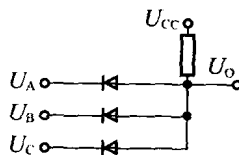


图 1-12 二极管组成的门电路

1.3 特殊二极管

二极管种类很多, 除普通二极管外, 人们还根据 PN 结的其他特点制造出了一些具有特殊用途的二极管。常用的还有稳压二极管、发光二极管和光敏二极管等, 现简要介绍如下。

1.3.1 稳压二极管

1.3.1.1 稳压管的特性曲线

由二极管的特性曲线可知, 如果工作在反向击穿区, 则当反向电流的变化量较大时, 二极管两端相应的电压变化量却很小, 说明其具有稳压特性。利用这种特性可以做成稳压

管。所以,稳压管实质上就是一个二极管,但它通常工作在反向击穿区。稳压管的符号及伏安特性分别如图 1-13 所示。稳压二极管是利用二极管的击穿特性。它是因为二极管工作在反向击穿区,反向电流变化很大的情况下,反向电压变化则很小,从而表现出很好的稳压特性,只要反向电流不低于最大稳压电流 I_{Zmax} 。或小于最小稳压电流 I_{Zmin} 时,也不能稳压。

1.3.1.2 稳压管的主要参数

(1) 稳定电压 U_Z 。稳定电压 U_Z 是稳压管工作在反向击穿区时的稳定工作电压。稳定电压 U_Z 是根据要求挑选稳压管的主要依据之一。不同型号的稳压管,其稳定电压 U_Z 的值不同。对于同一型号的稳压管,由于制造工艺的分散性,各个不同管子的 U_Z 值也有些差别。

(2) 稳定电流 I_Z 。稳定电流 I_Z 是使稳压管正常工作时的参考电流。若工作电流低于 I_Z ,则稳压管的稳压性能变差;若工作电流高于 I_Z ,只要不超过额定功耗,稳压管可以正常工作。一般工作电流较大时稳压性能较好。

(3) 动态电阻 r_z 。动态电阻是指稳压管两端电压和电流的变化量之比,稳压管的动态电阻值愈小愈好。对于同一个稳压管,工作电流愈大动态电阻愈小。通常情况下,手册上给出的动态电阻值是在规定的稳定电流之下得到的。

(4) 额定功率 P_Z 。由于稳压管两端加有电压,而管子中又流过一定的电流,因此要消耗一定功率。这部分功耗转化为热能,使稳压管发热。额定功耗取决于稳压管允许的温升。

(5) 温度系数 C_{IV} 。温度系数表示当稳压管的电流保持不变时,环境温度每变化 1°C 所引起的稳定电压变化的百分比。一般来说,稳定电压大于 7V 的稳压管,其温度系数为正值。稳定电压小于 4V 的稳压管,其温度系数为负值。而稳定电压在 $4\sim 7\text{V}$ 之间的稳压管的温度系数值比较小,说明其稳定电压受温度的影响较小,性能比较稳定。

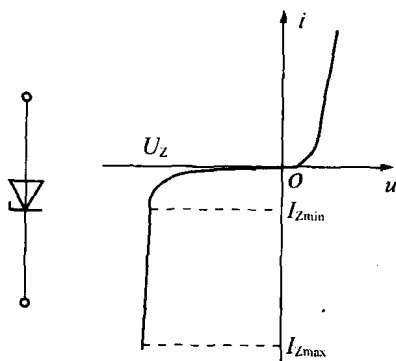


图 1-13 稳压二极管及其特性曲线

1.3.2 光电二极管

光电子系统的优点是抗干扰能力强,可大量传输信息,传输功耗小,工作可靠,而光信号与电信号之间的接口需要由一些特殊的光电子器件来完成。发光二极管和光敏二极管属于光电二极管,具有这一功能。

1.3.2.1 发光二极管

发光二极管的 PN 结是工作在正向偏置状态的,其发光效率高,亮度高,是绿色环保的冷光源。可分为普通发光二极管和大功率发光二极管。发光二极管是用特殊的半导体材料,如砷化镓等制成的,砷化镓半导体辐射红光,磷化镓半导体辐射绿光或黄光等。发光二极管的 PN 结正向特性比较特殊,当工作电流为 $10\sim 30\text{mA}$ 时,正向电压降约为 $1.5\sim 3\text{V}$,这一点在使用中要注意,不要与一般二极管的正向导通电压相混淆。它具有体积小、响应快、光度强、寿命长等特点。发光二极管常用作电子设备中的显示器。发光二极管正在向照明领域发展,大功率发光二极管是专为照明功用开发的,由于其价格高,因此没有大规模推广使用,多用于广告装饰领域,但其终将取代普通光源。

1.3.2.2 光敏二极管

光敏二极管 PN 与普通 PN 结二极管类似，但在其 PN 结处，有玻璃窗口能接收外部的光照，PN 结在反向偏置下工作，它的反向电流随光照强度的增加而上升。其主要特点是反向电流与光照强度成正比。无光照时，反向电流很小，称其为暗电流；有光照时，反向电流很大，称其为光电流。

1.4 半导体三极管

三极管是组成各种电子电路的核心器件，它有 3 个电极，称为半导体三极管或双极型三极管，简称为三极管。它们的外形如图 1-14 所示。三极管可以利用半导体材料硅或锗制成。无论采用何种材料，从三极管的结构来看，都有 PNP 型和 NPN 型两种类型。它们的工作原理是类似的，下面主要以 NPN 型为例进行讨论。

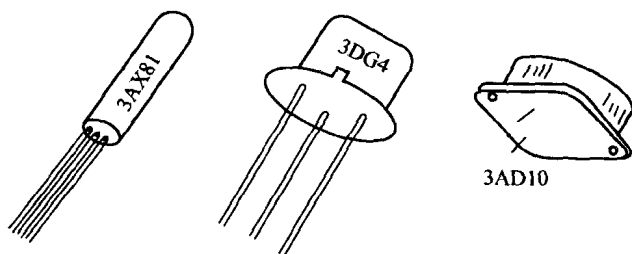


图 1-14 半导体三极管的外形

1.4.1 三极管的结构及类型

半导体三极管是应用在电子电路中的很普遍的一种半导体器件。三极管的基本结构是在一块半导体基片上，用一定的工艺方法形成两个 PN 结和 3 个导电区，连接起来组成了三极管。按 PN 结的组合方式有 PNP 型和 NPN 型，如果两边是 N 区中间为 P 区，就称为 NPN 型三极管；如果两边是 P 区而中间是 N 区，就称为 PNP 型三极管。三极管有 3 个导电区，分别引出 3 个电极。中间的一个导电区称为基区，由此引出的电极为基极 B(Base)。两边分别是发射区和集电区，分别引出的电极为发射极 E(Emitter)和集电极 C(Collector)。发射区用来发射载流子，集电区用来收集载流子。三极管的图形及符号如图 1-15 所示，其中发射极箭头方向表示发射结正向偏置时的电流方向，因此，从它的方向即能判断管子是 NPN 型还是 PNP 型。

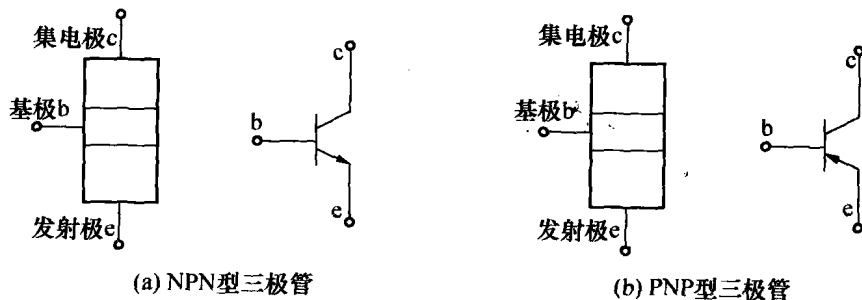


图 1-15 三极管的图形及符号

不管什么样的三极管,均包含3个区,即发射区、基区、集电区,相应的引出3个电极,分别为发射极、基极、集电极。同时又在两两交界区形成PN结,分别是发射结和集电结。从外表上看两个N区(或两个P区)是对称的,实际上发射区的掺杂浓度高,集电区掺杂浓度低,且集电结面积大。基区要制造得很薄,其厚度一般在几微米至几十微米。

三极管根据基片材料的不同,分为锗管和硅管两大类,目前国内生产的硅管多为NPN型,锗管多为PNP型;从功率大小可分为大功率管、中功率管和小功率管;从频率特性分为高频管和低频管。实际应用中多采用NPN型管。

1.4.2 三极管的放大作用

三极管的主要特点就是具有电流放大功能。所谓电流放大,是指当基极有一个较小的电流变化时,集电极随之会出现一个较大的电流变化。

要使三极管具有放大作用,必须使发射区中杂质浓度要远大于基区杂质浓度,基区很薄,集电结的面积很大。工作时,发射结应正向偏置,集电结应反向偏置,即必须由三极管的内部结构和外部所加电源的极性两方面的条件来保证。从三极管的内部结构来看,主要有两个特点。第一,发射区进行高掺杂,因而其中的多数载流子浓度很高。NPN型三极管的发射区为N型,其中的多数载流子是电子,所以电子的浓度很高。第二,基区做得很薄,通常只有几微米到几十微米,而且掺杂比较少,则基区中多数载流子的浓度很低。NPN型三极管的基区为P型,故其中的多数载流子空穴的浓度很低。另外,集电结的面积比较大,且集电区多数载流子浓度远没有发射区多数载流子浓度高。从外部条件来看,外加电源的极性应使发射结处于正向偏置状态,而集电结处于反向偏置状态。

为了说明三极管的放大作用以及三极管3个电极间的电流分配关系,我们做一个实验。

为使三极管发射区的电子发射到基区,要给发射结加一个正向偏压,即给NPN型三极管的B和E之间加一正向偏压。为把发射极发射到基区的电子吸收到集电区,要给双极三极管加上适当的直流偏置电压。

若在放大工作状态,发射结加正向电压,集电结加反向电压,如图1-16所示。

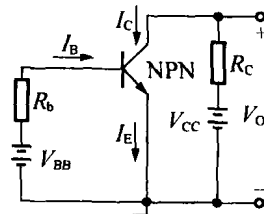


图 1-16 半导体三极管正向偏置电路

在实验时,改变 R_b ,则 I_B 发生变化, I_C 与 I_E 也随之变化,且 I_C 与 I_E 的变化值较大。实验所测得的一组数据见表1-1。

表 1-1 三极管各级电流的分配

数据 \ 次数	1	2	3	4	5	6
基极电流 I_B/mA	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
集电极电流 I_C/mA	< 0.001	0.43	0.88	1.33	1.78	2.22
发射极电流 I_E/mA	< 0.001	0.44	0.9	1.36	1.82	2.27

从表中的实验数据可以得出如下结论。

(1) 三极管各极电流的分配关系为发射极电流等于集电极电流与基极电流之和, 即

$$I_E = I_C + I_B \text{ 且 } I_B \ll I_C \text{ 故 } I_E \approx I_C \quad (1-3)$$

(2) I_B 增加时, I_C 按比例相应的增加, 集电极电流与基极电流的比值称为三极管直流电流放大系数, 用 $\bar{\beta}$ 表示, 有

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \quad (1-4)$$

(3) 当基极电流发生微小变化时, 集电极电流将发生较大的变化。集电极电流变化量与基极电流变化量的比值, 称为三极管交流放大系数, 用 β 表示, 有

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (1-5)$$

(4) 当 $I_B = 0$ 时, $I_C = I_{CBO}$, 该电流很小, 是由少数载流子的漂移运动产生的, 电路计算中可忽略不计。从表还可看出, $\bar{\beta}$ 与 β 的数值很接近, 因此, 工程上不需作严格区分, 统称为电流放大系数。

以上实验充分说明, 三极管具有电流放大作用, 即基极电流的一个微小变化就会引起集电极电流一个较大的变化。

下面从理论上对上述结论进行解释。

在发射结正偏, 集电结反偏条件下, 三极管中载流子进行如下运动。

(1) 在 U_{BB} 作用下, 发射区向基区注入电子形成 I_{EN} , 基区空穴向发射区扩散形成 I_{EP} 。

(2) 电子在基区复合和扩散, 由发射区注入基区的电子继续向集电结扩散, 扩散过程中少部分电子与基区空穴复合形成电流 I_{BN} 。由于基区薄且浓度低, 所以 I_{BN} 较小。

(3) 集电结收集电子, 由于集电结反偏, 所以基区中扩散到集电结边缘的电子在电场作用下漂移过集电结, 到达集电区, 形成电流 I_{CN} 。

(4) 集电极的反向电流, 集电结收集到的电子包括两部分, 即发射区扩散到基区的电子 I_{CN} 和基区的少数载流子 I_{CBO} 。

三极管在放大作用时, 因为发射结正向偏置, 且发射区进行重掺杂, 所以发射区的多数载流子扩散注入至基区, 又由于集电结的反向作用, 故注入至基区的载流子在基区形成浓度差, 因此, 这些载流子从基区扩散至集电结, 被电场拉至集电区形成集电极电流。因为基区做得很薄, 所以留在基区的很少。图 1-17 所示为三极管三个极上的电流分配关系。

由于载流子的运动, 从而产生相应电流。电流分配的关系总结如下。

$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} \quad (1-6)$$

$$I_C = \beta I_B + I_{CBO}$$

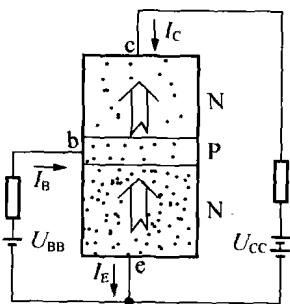


图 1-17 三极管三个极上的电流分配关系

式中 I_{CEO} ——发射结少数载流子形成的反向饱和电流;
 I_{CBO} —— $I_{\text{B}}=0$ 时, 集电极和发射极之间的穿透电流;
 α ——共基极电流的放大系数;
 β ——共发射极电流的放大系数。

它们可定义为

$$\alpha = \frac{I_{\text{C}}}{I_{\text{E}}}, \quad \beta = \frac{I_{\text{C}}}{I_{\text{B}}} \quad (1-7)$$

综上所述, 由于 I_{CBO} 很小, 可忽略, 在忽略 I_{CBO} 情况下, 三极管的三极电流分配关系有

$$\begin{cases} I_{\text{C}} = \bar{\beta} I_{\text{B}} \\ I_{\text{E}} = (1 + \bar{\beta}) I_{\text{B}} \\ I_{\text{E}} = I_{\text{C}} + I_{\text{B}} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_{\text{C}} = \beta I_{\text{B}} \\ I_{\text{E}} = (1 + \beta) I_{\text{B}} \\ I_{\text{E}} = I_{\text{C}} + I_{\text{B}} \end{cases} \quad (1-8)$$

定义 $\beta = \frac{\Delta I_{\text{C}}}{\Delta I_{\text{B}}}$, 当 I_{CEO} 很小时, $\bar{\beta} = \frac{I_{\text{C}}}{I_{\text{B}}} = \beta$

这就说明了, 共射放大电路电流放大关系。

1.4.3 三极管的特性曲线

双极型三极管有 3 个电极, 其中, 两个可以作为输入, 两个可以作为输出, 这样必然有一个电极是公共电极, 这样 3 个电极具有 3 种接法。这 3 种接法也称 3 种组态, 如图 1-18 所示。

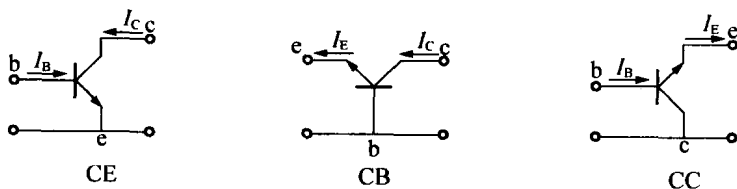


图 1-18 双极型三极管组态图

共发射极接法, 发射极作为公共电极, 用 CE 表示;

共集电极接法, 集电极作为公共电极, 用 CC 表示;

共基极接法, 基极作为公共电极, 用 CB 表示。

由于共发射极电路在电子电路中应用最为广泛, 下面以 NPN 管共发射极为例, 分析讨论三极管共发射极接法时的特性曲线。

1.4.3.1 输入特性

三极管共发射极接法时的输入特性方程为

$$I_{\text{B}} = f(U_{\text{BE}}) \Big|_{U_{\text{CE}} = \text{常数}} \quad (1-9)$$

它与 PN 结的正向特性相似, 三极管的两个 PN 结相互影响, 因此, 输出电压 U_{CE} 对

输入特性有影响, 且 $U_{CE} > 1V$ 时, 这两个 PN 结的输入特性基本重合。我们用 $U_{CE}=0V$ 和 $U_{CE}=2V$ 两条曲线表示, 如图 1-19(a)所示。

1.4.3.2 输出特性

三极管共发射极接法时的输出特性方程为

$$I_C = f(U_{CE})|_{I_B = \text{常数}} \quad (1-10)$$

它的输出特性可分为 3 个区, 如图 1-19(b)所示为输出特性曲线。

(1) 截止区。 $I_B \leq 0$ 时, 此时的集电极电流近似为零, 管子的集电极电压等于电源电压, 两个结均反偏, 一般将满足 $I_B \leq 0$ 时的区域称为截止区。此时, I_B 近似为零, 由于管子的各极电流都基本上等于零, 所以三极管处于截止状态, 没有放大作用。其实此时, 集电极回路的电流并不真正为零, 而是有一个较小的穿透电流。一般硅三极管的穿透电流较小, 所以在输出特性曲线上无法表示出来。锗三极管的穿透电流较大, 约为几十微安到几百微安, 可以认为当发射结反向偏置时, 发射区不再向基区注入电子, 则三极管处于截止状态。所以, 在截止区, 三极管的发射结和集电结都处于反向偏置状态。对于 NPN 三极管来说, 此时, $U_{BE} < 0$, $U_{BC} < 0$ 。

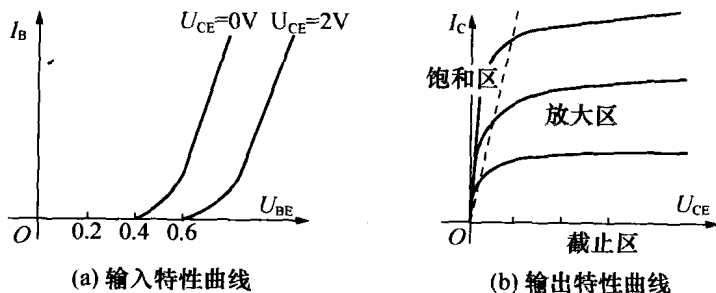


图 1-19 三极管的特性曲线图

(2) 饱和区。此时, 两个结均处于正向偏置, $U_{CE} = 0.3V$, 图 1-19(b)中靠近纵坐标的附近各条输出特性曲线的上升部分属于三极管的饱和区。如图 1-19(b)中纵坐标附近虚线以左的部分。在这个区域, 不同值的 I_B 各条特性曲线几乎重叠在一起, 十分密集。也就是说当 U_{CE} 较小时, 管子的集电极电流 I_C 基本上不随基极电流 I_B 而变化, 这种现象称为饱和。在饱和区三极管失去了放大作用, 此时不能用放大区中的关系来描述。对于 NPN 三极管来说, 此时, $U_{BE} > 0$, $U_{BC} > 0$ 。

(3) 放大区。此时, $I_C = \beta I_B$, I_C 基本不随 U_{CE} 变化而变化, 此时发射结正偏, 集电结反偏。在放大区内各条输出特性曲线比较平坦, 近似为水平的直线, 表示当 I_B 一定时, I_C 的值基本上不随 U_{CE} 而变化, 同时也说明在放大区的 I_C 值基本上与集电极电压 U_{CE} 无关。而当基极电流有一个微小的变化量 ΔI_B 时, 相应地集电极电流将产生较大的变化量 ΔI_C , 比 ΔI_B 放大 β 倍, 即 $\Delta I_C = \beta \Delta I_B$ 。对于 NPN 三极管来说, 此时, $U_{BE} > 0$, $U_{BC} < 0$ 。

以上介绍了三极管的输入特性和输出特性, 管子的特性曲线和参数是根据需要选用三极管的主要依据, 各种型号三极管的特性曲线可从半导体器件手册查得, 如欲测试某个三极管的特性曲线除了逐点测试以外, 还可利用专用的晶体管特性图示仪, 它能够在荧光屏上完整地显示三极管的特性曲线族。