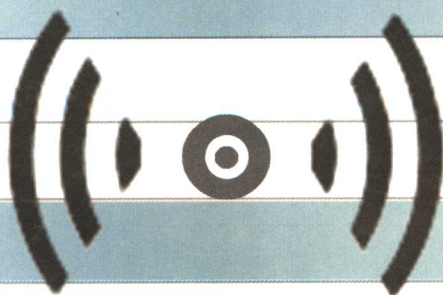


模拟电子技术

主编 张永生

“十一五” 高职高专教材



安徽大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/张永生主编. —合肥:安徽大学出版社,2006.6

“十一五”高职高专教材

ISBN 7-81110-137-8

I. 模... II. 张... III. 模拟电路—电子技术
IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 055341 号

内容简介

本书根据高等职业院校电气、电子、自动化、计算机等专业和其他相近专业的教学基本要求,并结合长期教学实践经验编写而成。全书共分 9 章,内容包括常用半导体器件、基本放大电路、放大电路中的负反馈、集成运算放大器及其应用、功率放大电路、信号产生电路、电源电路、调制解调与变频、晶闸管及其应用,以及模拟电路仿真等。每章节均安排有与理论教学紧密联系的相应实验及复习思考题,以方便实践教学和练习,并且大部分习题都附有答案。

本书内容丰富,覆盖面广;叙述简明扼要,分析由浅入深;物理概念清楚。重在对电路的认知及模拟电子技术的应用。

本书既可作为高等职业技术教育的电子、电气、信息、自动化等专业及其他相近专业的教材,也可供相关工程技术人员或自学者学习参考之用。

“十一五”高职高专教材

模 拟 电 子 技 术

张永生 主编

出版发行 安徽大学出版社
(合肥市肥西路 3 号 邮编 230039)

联系电话 编辑室 0551-5108498
发行部 0551-5107784

E-mail zlqemail@tom.com

责任编辑 朱丽琴 朱夜明

封面设计 张 桦

印 刷 合肥现代印务有限公司

开 本 787×1092 1/16

印 张 16.75

字 数 417 千

版 次 2006 年 6 月第 1 版

印 次 2006 年 6 月第 1 次印刷

ISBN7-81110-137-8 / T · 94

定价 25.00 元

如有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换



编写说明

本书是为高等职业院校电气、电子、自动化、计算机等专业和其他相近专业而编著的教材,也可供相关工程人员或自学者参考。

全书分为 9 章。第 1 章主要介绍半导体的特性、半导体二极管单向导电的机理、伏安特性主要参数。介绍了稳压管、变容二极管、双极型三极管和场效应管的结构、工作原理、伏安特性、主要参数及测试方法;第 2 章主要介绍晶体三极管(或场效应管)共射、共集极(或共源、共漏极)电路的组成、工作原理和基本分析方法,并对工作点的稳定问题进行讨论。最后对多级放大电路进行简单介绍,主要介绍了频率响应的一般概念、三极管的频率参数和单管共射放大电路的频率响应;第 3 章主要介绍了反馈的概念和一般表达式、负反馈放大电路的 4 种组态、深度负反馈放大电路的计算,以及负反馈对放大电路性能的影响。最后介绍了实用信号产生电路的原理及应用;第 4 章主要介绍了基本差分放大电路、集成电路的特点、主要参数及基本电路结构、电流源电路、差分放大电路以及输出电路。最后介绍了加法运算与减法运算、积分运算与微分运算等运算电路、有源滤波电路的结构、工作原理及应用;第 5 章主要介绍了互补对称式功率放大电路和集成功率放大电路的原理、特点及应用;第 6 章主要介绍直流电源的组成、小功率整流滤波电路、硅稳压管稳压电路、串联型直流稳压电路、集成稳压器以及开关型稳压电路;第 7 章介绍了调制、解调与变频的基本概念、调幅、调频波信号分析、常用调制、解调及信号放大电路;第 8 章主要介绍晶闸管的结构、特性、参数及其应用;第 9 章主要介绍最新一代的电子线路设计系统 Protel99 和 EWB 电路设计软件的仿真条件、步骤与实际仿真举例。其中加“*”号的部分为本书的选学内容,各校可根据具体情况选用。各章后面均安排有与理论教学紧密联系的相应实验,以方便实践教学。书中的大部分习题,我们都给出了答案,学习者据此可以自检解答的正确与否。

根据高等职业技术教育“淡化理论,够用为度”的特点,我们编写的原则是



“确保基础、精选内容、加强概念、推陈出新、联系实际、侧重技能”。目的在于保证学生在学好基本内容的基础上,培养学生分析、处理实际问题的能力,力争使编写的该教材在科学性、合理性和实用性等方面有一定的特色。

本书由安徽电子信息职业技术学院张永生担任主编并编写第9章,安徽电子信息职业技术学院黄凤娟、孟祥元、张仁林分别编写第3章及第5章、第6章和第7章,安徽交通职业技术学院王俊编写第1章,安徽水利水电职业技术学院曾献芳编写第2章,阜阳职业技术学院陈子国编写第4章,新华学院纪利琴编写第8章,全书由张永生统稿。

由于时间仓促和编者学识水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2006年6月



目 录

第 1 章 常用半导体器件	1
1.1 半导体基础知识	1
1.2 半导体二极管	4
1.3 半导体三极管	7
1.4 场效应管	12
本章小结	17
习题 1	18
实验 I	19
第 2 章 基本放大电路	21
2.1 放大电路的工作原理	21
2.2 共射极放大电路的分析方法	25
2.3 常见的放大电路	35
2.4 多级放大电路	40
* 2.5 放大器的频率响应	43
本章小结	48
习题 2	49
实验 II	51
第 3 章 放大电路中的反馈与振荡	53
3.1 反馈的基本概念	53
3.2 负反馈对放大器性能的影响	56
3.3 信号产生电路	64
3.4 振荡电路应用	78
本章小结	81



习题 3	82
实验 III	84
第 4 章 集成运算放大器及其应用	87
4.1 差分放大电路	87
4.2 集成运算放大器基础	91
4.3 集成运算放大器的基本应用	93
4.4 有源滤波电路	97
本章小结	100
习题 4	101
实验 IV	104
第 5 章 功率放大电路	106
5.1 功率放大电路的特点与类型	106
5.2 乙类功率放大电路基本原理	108
5.3 甲乙类功率放大电路分析	114
5.4 功率放大电路应用	121
本章小结	127
习题 5	128
实验 V	131
第 6 章 直流电源电路	133
6.1 整流滤波电路	133
6.2 线性稳压电路	139
6.3 开关电源电路	146
本章小结	151
习题 6	152
实验 VI	154
* 第 7 章 调制、解调与变频	156
7.1 概述	156
7.2 调幅与检波	157



7.3 调频与鉴频	163
7.4 变频器	169
7.5 调制信号放大电路	172
本章小结	177
习题 7	178
实验 VII	180
* 第 8 章 晶闸管及其应用	181
8.1 晶闸管的结构、特性与参数	181
8.2 晶闸管的应用	186
8.3 双向晶闸管及其应用	203
本章小结	205
习题 8	206
实验 VIII	208
* 第 9 章 模拟电路仿真技术	212
9.1 PROTEL 99 电路设计仿真软件简介	212
9.2 EWB 电路设计仿真软件简介	230
9.3 电子电路仿真举例	241
本章小结	248
习题 9	248
实验 IX	249
参考文献	252
部分习题答案	253



第1章 常用半导体器件

□学习目标

本章介绍半导体的基本知识、半导体二极管、三极管和场效应管的基本结构、工作原理、伏安特性及主要参数等。

1.1 半导体基础知识

1.1.1 半导体特性

1. 半导体

自然界中不同的物质,由于其原子结构不同,它们的导电能力也各不相同。根据它们的导电能力,一般分为导体、半导体和绝缘体三类。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间,具有热敏性、光敏性和掺杂性。利用光敏性可制成光电二极管和光电三极管及光敏电阻;利用热敏性可制成各种热敏电阻;利用掺杂性可制成各种不同性能、不同用途的半导体器件,例如二极管、三极管、场效应管等。

2. 本征半导体

本征半导体指完全纯净的具有晶体结构的半导体。比较典型的半导体材料有硅(Si)和锗(Ge),它们都是四价元素,即每个原子的最外层有四个价电子,相邻的两个原子的一对最外层电子成为共用电子,这样的组合称为共价键结构,见图1-1。在一定的温度下,由于热运动,有少量的电子挣脱原子的束缚成为自由电子,同时在原来的位置留下了一个空穴。所以在本征半导体中,自由电子和空穴成对产生,称为电子空穴对,见图1-2。当温度或光照强度增加时,自由电子和空穴的数目增加。

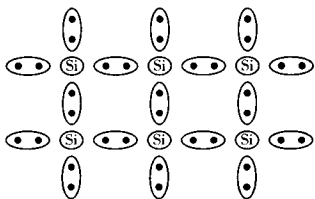


图1-1 共价键结构

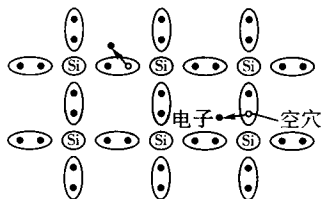


图1-2 热运动产生的自由电子和空穴

在外电场的作用下,自由电子将沿与外电场相反的方向作定向运动,称为电子电流。同时,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,则此邻近原子又将



留下一个新的空穴,这样,在外电场的作用下,还会形成价电子递补空穴形成的空穴电流。综上所述,在半导体中载流子有两种:自由电子和空穴。在常温下,本征半导体中的载流子数目很少,因此其导电性能很差。

1.1.2 N型、P型半导体

为了提高半导体的导电能力,可在半导体中掺入微量的有用杂质,制成掺杂半导体。掺杂半导体有N型和P型两类。

1. N型半导体

在本征半导体硅(或锗)中掺入微量的五价元素(如磷P),则由于每个磷原子的最外层有五个电子,其中的四个分别与邻近的四个硅原子相结合,组成四对共有原子形成共价键以外,还多出一个受原子核束缚很弱的电子,它很容易被激励而成为自由电子,见图1-3。由于自由电子数目的大量增加,所以这种半导体的导电能力大为增强。

在这种半导体中,自由电子的数量远大于空穴的数量,所以自由电子为多数载流子,空穴为少数载流子。由于在这种半导体中主要依靠自由电子导电,故称为电子型半导体或N型半导体。

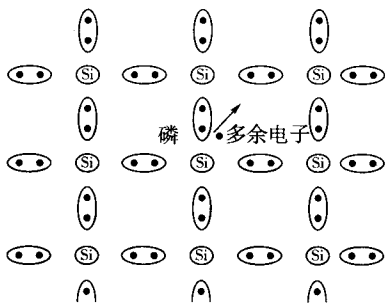


图1-3 硅中掺磷形成N形

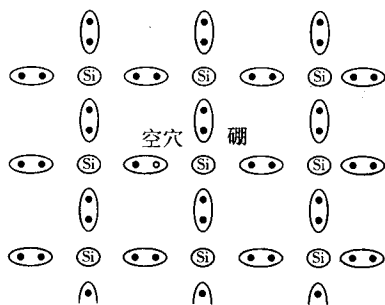


图1-4 硅中掺硼形成P形

2. P型半导体

在本征半导体硅(或锗)中掺入微量的三价元素(如硼B),则由于每个硼原子的最外层只有三个电子,当它与邻近的四个硅原子相结合而形成共价键时,就自然提供了一个空穴,见图1-4。在这种半导体中,空穴的数量远大于自由电子的数量,所以空穴为多数载流子,自由电子为少数载流子。由于在这种半导体中主要依靠空穴导电,故称为空穴型半导体或P型半导体。

需要注意,N型半导体或P型半导体仍然是电中性的。

1.1.3 PN结的形成及单向导电性

通常是在一块晶片上,采取一定的掺杂工艺措施,在两边分别形成P型半导体和N型半导体,在两者的交界处就形成一层特殊的薄层,这种薄层就称为PN结。PN结是构成各种半导体器件的基础,PN结具有单向导电的特性。

1. PN结的形成

如图1-5所示,一块晶片的两边分别形成P型和N型半导体,在两种半导体的交



界面处,两侧的载流子在浓度上形成很大的差别, P 区有大量的空穴和少量的自由电子,而 N 区有大量的自由电子和少量的空穴,这样就会在交界面附近产生所谓的扩散运动——载流子由浓度高的地方向浓度低的地方运动,即 P 区的空穴向 N 区扩散,同时 N 区的自由电子向 P 区扩散。随着扩散运动的进行,交界面 P 区一侧就会出现一层带负电的粒子区,而在 N 区一侧就会出现一层带正电的粒子区。于是,在交界面附近就形成了一个空间电荷区。

空间电荷区的电荷一侧为正,另一侧为负,产生了一个内电场,方向由 N 区指向 P 区。显然,这个内电场对多数载流子的扩散运动起阻碍作用,但对少数载流子则推动它们越过空间电荷区,少数载流子在内电场作用下的这种运动称为漂移运动,如图1-6所示。

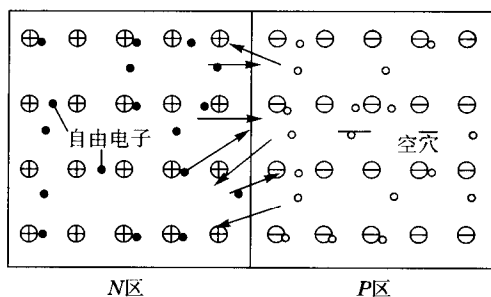


图1-5 多子的扩散

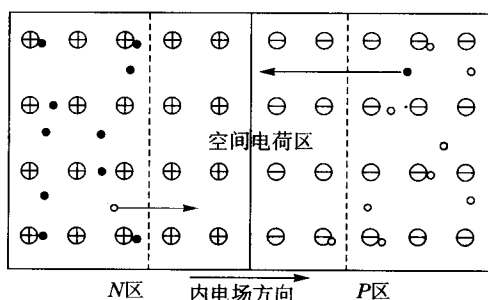


图1-6 内电场与少子的漂移

开始时扩散运动占优势,随着扩散运动的进行,内电场逐步增强。随着内电场的增强,扩散运动逐步减弱,而漂移运动逐渐加强。最后,扩散运动和漂移运动达到暂时的、相对的动态平衡,这样建立了一定宽度的空间电荷区,这个空间电荷区就称为 PN 结。

2. PN 结的单向导电性

在 PN 结两端加上不同极性的外加电压时, PN 结呈现不同的导电性。如果将 PN 结的 P 区接在电源的正极上, N 区接在电源的负极上,称为给 PN 结加上正向电压(或称正向偏置),见图1-7。此时,外电场的方向与内电场的方向相反,削弱了内电场,使空间电荷区变窄,扩散运动加强,漂移运动减弱。这样形成了从电源正极出发,经过 PN 结返回到电源负极的正向电流。因为 PN 结的正向电流是由多数载流子形成的,所以比较大, PN 结呈低电阻状态。

如果将 PN 结的 N 区接在电源的正极上, P 区接在电源的负极上,称为给 PN 结加上反向电压(或称反向偏置),见图1-8。此时,外电场的方向与内电场的方向一致,加强了内电场,使空间电荷区变宽,扩散运动减弱,而少数载流子的漂移运动得到加强,这样就形成了反向电流。因为 PN 结的反向电流是由少数载流子形成的,而少数载流子的数目很少,所以反向电流非常小, PN 结呈高电阻状态。

综上所述, PN 结具有单向导电性——正向导通,反向截止。

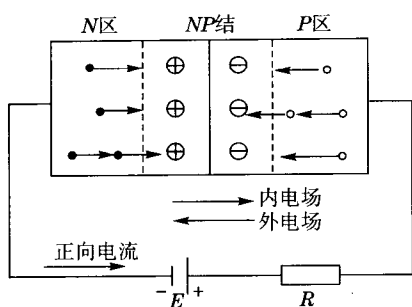


图 1-7 PN 结加正向电压

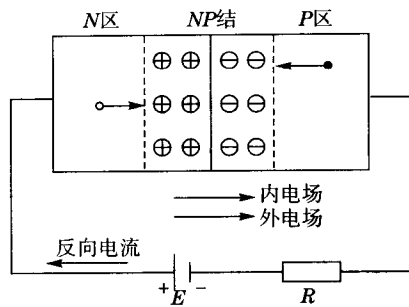


图 1-8 PN 结加反向电压

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的结构、符号及类型

半导体二极管是在一个 PN 结做成的管心两侧各接上电极引线,并以管壳封装加固而成。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。

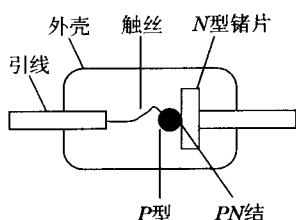


图 1-9 点接触型

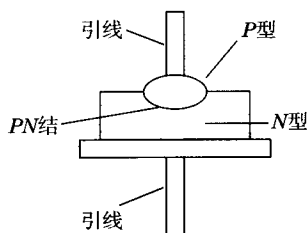


图 1-10 面接触型

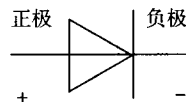


图 1-11 二极管的图形

根据内部结构的不同,半导体二极管有点接触型(图 1-9)和面结合型(图 1-10)两种。根据所用半导体材料的不同,又分为锗管和硅管两类。锗管一般为点接触型,它的 PN 结面积很小,故允许通过的电流较小,但其高频性能好,一般应用于高频检波及小功率整流电路中,也用作数字电路的开关元件。硅管一般为面结合型,它的 PN 结面积很大,可通过较大的电流,但工作频率较低,常用于低频整流电路。

二极管的文字符号用 D 表示,二极管的图形符号如图 1-11 所示。

1.2.2 二极管的伏安特性

为了正确使用半导体二极管,需要了解它的电压—电流关系曲线,习惯上又称为伏安特性(曲线)。这些曲线一般可以通过实验方法测出,也可以在产品说明书和有关手册中查到。

由图 1-12 可知,二极管的伏安特性有如下特点:

(1) 当外加正向电压很小时,外加电压不足以克服内电场对多数载流子扩散运动的阻力,正向电流很小,近似为零。当外加正向电压超过一定数值后,内电场被大为削弱,多数载流子的扩散运动增强,电流随电压增加而迅速上升,二极管才导通。这个一定数



值的正向电压称为死区电压,其大小与管子材料与环境温度有关。在室温条件下,硅管的死区电压约为 0.5V,锗管的约为 0.1V;

(2)当外加电压超过死区电压时,电流随电压的增加才有明显的上升。二极管导通后,它两端的电压变化极小,硅管约为 0.6~0.7V,锗管约为 0.2~0.3V。为了讨论与计算的方便,统一取硅管的导通电压为 0.6V,锗管的导通电压为 0.2V;

(3)当外加反向电压时,反向电流极小,可以认为二极管基本上是不导通的,即截止;

(4)当反向电压增加到一定数值时,反向电流会突然剧增,二极管失去了单向导电性,这种现象称为反向击穿,此时的反向电压称为反向击穿电压。一般的二极管正常工作时,是不允许出现这种情况的。

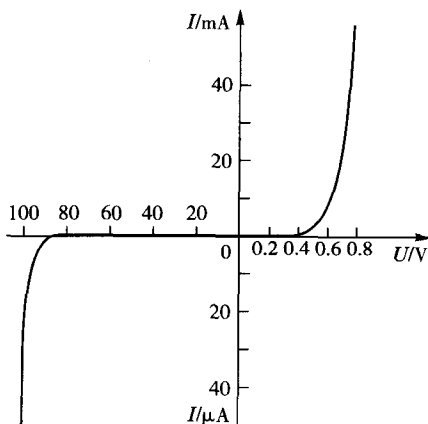


图 1-12 硅二极管的伏安特性曲线

1.2.3 二极管的主要参数

半导体二极管的特性除用伏安特性曲线表示外,还可以用一些数据来表示,这些数据称为二极管的参数,它们是合理地选择和使用二极管的依据。二极管的主要参数有:

最大整流电流 I_{OM}

最大整流电流是指二极管长期工作时允许通过的最大正向平均电流值。如果电流过大,发热情况严重,就会把 PN 结烧毁。在选用二极管时,工作电流不能超过它的最大整流电流。一般点接触型二极管的最大整流电流在几十毫安以下,面结合型二极管的最大整流电流可达数百安培以上。

最高反向工作电压 U_{RM}

最高反向工作电压是指为确保二极管安全使用所允许施加的最大反向电压,一般给出的最高反向工作电压为击穿电压的一半或三分之二。在选用二极管时,加在二极管上的反向电压峰值不允许超过最高反向工作电压值。一般点接触型二极管的最高反向工作电压是数十伏,而面结合型二极管的最高反向工作电压可达数百伏。

反向饱和电流 I_{RM}

反向饱和电流是指给二极管加最高反向工作电压时的反向电流。此值越小,则二极管的单向导电性就越好。此值受温度的影响大。硅管的反向电流一般在几个微安以下,



锗管的反向电流较大,为硅管的几十到几百倍。

二极管是电子电路中最常用的半导体器件。利用其单向导电性及导通时正向压降很小的特点,可用来进行整流、检波、钳位、限幅、开关及元件保护等各项工作,在以后的章节中将会作进一步介绍。

1.2.4 其他特殊二极管

1. 稳压管

稳压管是一种特殊的半导体二极管,专为在电路中稳定电压设计,其符号如图 1-13 所示。稳压二极管的伏安特性与普通二极管基本相似,其主要区别是稳压管的反向特性曲线比普通二极管更陡。

稳压管通过专门设计,与一般二极管有两个方面不相同,一是稳压管的工作区间就是反向击穿区。稳压管的反向击穿电压一般比较低,当反向电压增高到击穿电压时,反向电流突然剧增,稳压管反向击穿,但稳压管两端的电压变化很小,故它的反向击穿电压就是稳压值。二是稳压二极管的反向击穿是可逆的。当外加电压去掉后,稳压管又恢复常态,故它可长时间工作在反向击穿区而不致损坏。

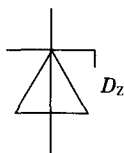


图 1-13 稳压二极管

稳压二极管的主要参数:

稳定电压 U_Z

稳定电压就是稳压管在正常工作时管子两端的电压。电子器件手册上给出的稳定电压值是在规定的工作电流和温度下测试出来的,由于制造工艺的分散性,同一型号的稳压管其稳压值可能有所不同,但每一个管子的稳压值是一定的。

稳定电流 I_Z

稳定电流是指当稳压管两端的电压等于稳定电压时,稳压管中通过的反向电流。通常要求稳压管的工作电流要大于或等于 I_Z ,从而使电路有较好的稳压效果。

最大稳定电流 I_{ZM}

最大稳定电流是指稳压管的最大允许工作电流,若超过此电流,管子可能会因电流过大造成热击穿而被损坏。

动态电阻 r_Z

动态电阻是指稳压管正常工作时,其电压的变化量与相应的电流的变化量的比值,即

$$r_Z = \Delta U_Z / \Delta I_Z$$

动态电阻越小,说明反向特性曲线越陡,稳压管的稳压性能越好。

最大耗散功率 P_{ZM}

最大耗散功率是指稳压管不致因过热而损坏的最大功率损耗,有

$$P_{ZM} = U_Z I_{ZM}$$

2. 发光二极管

发光二极管(Light Emitting Diode,简称 LED)是一种把电能直接转化成光能的固体发光元件,其符号如图 1-14 所示。



发光二极管和普通二极管一样,管心由 PN 结组成,具有单向导电性。所不同的是,当发光二极管加上正向电压时能发出一定波长的光。

发光二极管可用作电子设备的通断指示灯、数字电路的数码及图形显示,也可作为光源器件将电信号变为光信号,广泛应用于光电检测领域中。

3. 光电二极管

光电二极管和普通二极管一样,管心由 PN 结组成,具有单向导电性,其符号如图 1-15 所示。但光电二极管的管壳上有一个能射入光线的“窗口”,入射光透过“窗口”正好射在管心上。

光电二极管工作在反向偏置状态,当在 PN 结上加反向电压,再用光照射 PN 结时,能形成反向的光电流,光电流的大小与光照射强度成正比。

光电二极管用途很广,一般常用作传感器的光敏元件、光的测量。当制成大面积的光电二极管时,可用作一种能源,称为光电池。

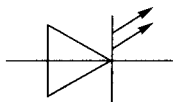


图 1-14 发光二极管符号

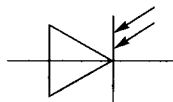


图 1-15 光电二极管符号

1.3 半导体三极管

1.3.1 三极管的结构、符号及类型

半导体三极管又称晶体管,是最重要的一种半导体器件。半导体三极管是在一块很小的半导体基片上,用一定的工艺制作出两个反向的 PN 结,这两个 PN 结将基片分成三个区,从三个区分别引出三根电极引线,再用管壳封装而成。

半导体三极管根据三层半导体的组合方式,分为 PNP 型和 NPN 型。根据基片材料的不同,又可分为锗管和硅管。根据不同的制作工艺、用途等还可分为合金管和平面管、小功率管和大功率管、高频管和低频管。

半导体三极管的三个区分别称为发射区、基区和集电区。由它们引出的三根引线分别称为发射极 E 、基极 B 和集电极 C 。发射区与基区间的 PN 结称为发射结,集电区与基区间的 PN 结称为集电结。

发射区用来发射载流子,故其杂质浓度较大;集电区用来收集从发射区发射过来的载流子,故其截面积较大;基区位于发射区与集电区之间,用来控制载流子通过,以实现电流放大作用,其厚度很薄(几个微米),且杂质浓度很低,目的是减小基极电流,增强基极的控制作用。其结构示意图和电路符号分别如图 1-16、1-17、1-18 所示。

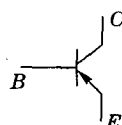
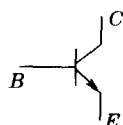
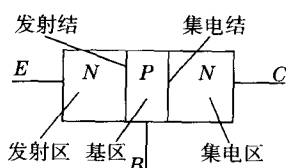


图 1-16 NPN 三极管结构示意图

图 1-17 NPN 三极管符号

图 1-18 PNP 三极管符号

1.3.2 三极管的电流放大作用

1. 实验电路

为了了解晶体管的电流分配和电流放大作用,先做一个实验,实验电路如图 1-19 所示。基极电源 E_B 、基极电阻 R_B 、基极 B 和发射极 E 构成输入回路,集电极电源 E_C 、集电极电阻 R_C 、集电极 C 和发射极 E 构成输出回路。发射极是公共电极,故这种电路称作共发射极电路。

电路中 $E_B < E_C$,这样保证了发射结加的是正向电压(正向偏置),集电结加的是反向电压(反向偏置),这是晶体管实现电流放大作用的外部条件。改变可调电阻 R_B ,使基极电流 I_B 为不同数值,测出相应的集电极电流 I_C 和发射极电流 I_E ,将结果列于表 1-1 中。

表 1-1 集电极电流 I_C 和发射极电流 I_E 的相关数据

I_B/mA	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
I_C/mA	≈ 0.001	0.50	1.00	1.60	2.20	2.90
I_E/mA	≈ 0.001	0.51	1.02	1.63	2.24	2.95
I_C/I_B		50	50	53	55	58
$I_C/\cdot I_B$		50	60	60	70	

将表中数据进行比较分析,可得出如下结论:

- (1) $I_E = I_B + I_C$,此结果符合基尔霍夫定律;
- (2) 通常可认为发射极电流 I_E 约等于集电极电流 I_C ,而基极电流 I_B 比 I_C 和 I_E 小很多;
- (3) 很小的 I_B 变化可以引起很大的 I_C 变化,也就是说基极电流对集电极电流具有小量控制大量的作用,这由表中的 $I_C/\cdot I_B$ 值可以看出,这就是晶体管的电流放大作用(实质是控制作用,晶体管是电流控制元件)。

2. 理论解释

以 NPN 型三极管为例,图 1-20 是晶体管内部载流子运动的示意图。

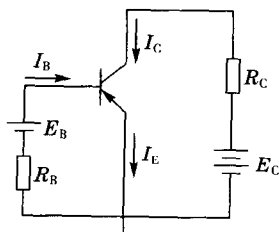


图 1-19 实验电路图

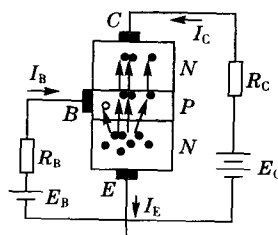


图 1-20 NPN 型晶体管中的电子运动



(1) 发射区向基区发射电子

由于发射结正偏(正向电压),发射区的多数载流子——自由电子在外电场作用下源源不断地越过发射结进入基区,形成发射极电流 I_E 。与此同时,基区的多数载流子——空穴也会向发射区扩散。但由于基区杂质浓度很低,空穴很少,因此,可以认为晶体管的射极电流主要是电子流。

(2) 基区中电子的扩散与复合

电子进入基区后,由于靠近发射结附近的电子浓度高于集电结附近的电子浓度,形成电子浓度差。在浓度差的作用下,促使电子在基区中继续向集电结扩散,当扩散到集电结附近时,被集电结电场拉入集电区,形成集电极电流 I_C 。同时,在扩散过程中,电子中的很小一部分将与基区的空穴相遇而复合。基区中因复合而失去的空穴将由基区电源 E_B 来不断补充,形成基极电流 I_B 。

在基区中,扩散到集电区的电子数与复合的电子数的比例决定了晶体管的放大能力。因此,为了提高晶体管的放大能力,要将基区做得很薄,同时要减小其掺杂浓度。

(3) 集电区收集电子

由于集电结加有较大的反向电压,这个反向电压产生的电场将阻止集电区的多数载流子——自由电子向基区扩散,同时将基区中扩散到集电结附近的电子拉入集电区而形成较大的集电极电流 I_C 。显然,集电区的少数载流子——空穴也会产生漂移运动,流向基区而形成反向饱和电流 I_{CBO} ,其数值很小,但对温度却非常敏感。

对于 PNP 型三极管,其工作原理相同,只是晶体管各极所接电源极性相反,发射区发射的载流子是空穴而不是电子。

3. 小结

由上述可知,晶体管在发射结正偏集电结反偏的条件下才具有电流放大作用。晶体管的电流放大作用,其实质是基极电流 I_B 对集电极电流 I_C 的控制作用。

1.3.3 三极管的共发射极特性曲线

晶体管的伏安特性曲线用来表示各电极的电流和电压的关系,是分析放大电路的重要依据。我们这里讨论的是共发射极接法时晶体管的伏安特性曲线,简称共射特性。图 1-19 是测试晶体管共射特性的电路图。

由于晶体管有三个电极和输入、输出两个回路,故需要用两组特性曲线来表示,即输入特性曲线和输出特性曲线。

1. 输入特性曲线

输入特性曲线是指当集电极—发射极间的电压 U_{CE} 一定时,输入回路中基极电流 I_B 与基极—发射极电压 U_{BE} 之间的关系曲线。其表达式为

$$I_B = f(U_{BE})/U_{CE} = \text{常数}$$

对硅管而言,当 $U_{CE} > 1\text{V}$ 时,集电结已反向偏置,且内电场已足够大,可以把从发射区扩散到基区的电子中的绝大多数拉入集电区。如果此时再增大 U_{CE} (保持 U_{BE} 不变), I_B 也就不再明显地减小。也就是说, $U_{CE} > 1\text{V}$ 后的输入特性曲线基本上是重合的。所以,通常只画出一条输入特性即可,见图 1-21。

从输入特性可以看出:



- (1) 输入特性是非线性的,与二极管正向伏安特性相似;
- (2) 输入特性也有一段死区,锗管约为 0.1V ,硅管约为 0.5V ;
- (3) 晶体管正常工作时,锗管的 $U_{BE}=0.2\sim 0.3\text{V}$,硅管的 $U_{BE}=0.6\sim 0.7\text{V}$ 。

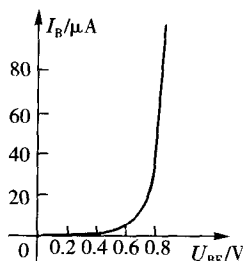


图 1-21 晶体管的输入特性

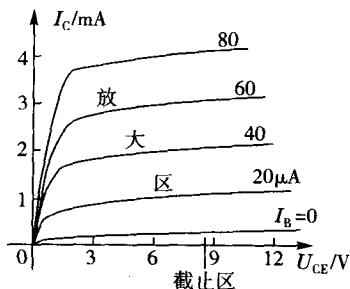


图 1-22 晶体管的输出特性

2. 输出特性曲线

输出特性是指晶体管基极电流 I_B 是常数时,输出回路中集电极电流 I_C 与集电极——发射极电压 U_{CE} 之间的关系曲线。其表达式为

$$I_C = f(U_{CE})/I_B = \text{常数}$$

给定一个基极电流 I_B ,就对应一条特性曲线,所以输出特性是个曲线族,见图 1-22。

从输出特性可以看出,曲线的起始部分较陡,这是因为在 U_{CE} 很小时, $U_{CE} < U_{BE}$,集电结正偏,限制基区电子向集电区扩散,故 I_C 很小,但随 U_{CE} 增加而直线上升。当 U_{CE} 略大于 U_{BE} 时,集电结反偏,随着 U_{CE} 增加,基区电子被吸往集电区的数目越来越多, I_C 继续增大。而当 $U_{CE} > 1\text{V}$ 时,已基本能把注入基区的电子全部拉入集电区,形成较大的 I_C , U_{CE} 再增加,对 I_C 的影响已不大。因此,这时的输出特性曲线几乎近似水平线。

通常把晶体管的输出特性曲线分为三个工作区:

(1) 放大区

输出特性曲线的近乎水平部分是放大区。当发射结正偏、集电结反偏时(对 NPN 型管子来说,就是硅管 $U_{BE} > 0.6\text{V}$,锗管 $U_{BE} > 0.2\text{V}$, $I_B > 0$,且 $U_{CE} > 1\text{V}$ 时),三极管工作于放大状态。放大区也称线性区,在该区, I_C 与 I_B 成简单的线性关系。

(2) 截止区

$I_B = 0$ 以下的区域称为截止区。 $I_B = 0$ 时, $I_C = I_{CEO}$ (I_{CEO} 称作穿透电流)。对 NPN 型硅管而言,当 $U_{BE} < 0.5\text{V}$ 时就开始截止,但是为了可靠截止,常使得 $U_{BE} < 0$ 。故晶体管处于截止状态时,其发射结和集电结都是反偏。

(3) 饱和区

当 $U_{CE} < U_{BE}$ 时,集电结处于正偏,晶体管工作于饱和状态。此时, I_B 的变化对 I_C 的影响较小,两者不成正比关系。晶体管饱和时,其发射结和集电结均为正偏。

综上所述,晶体管工作在放大区,具有电流放大作用,常用来构成各种放大电路。晶体管工作在截止区和饱和区,相当于开关的断开和接通,具有开关作用,常用于开关控制和数字电路。