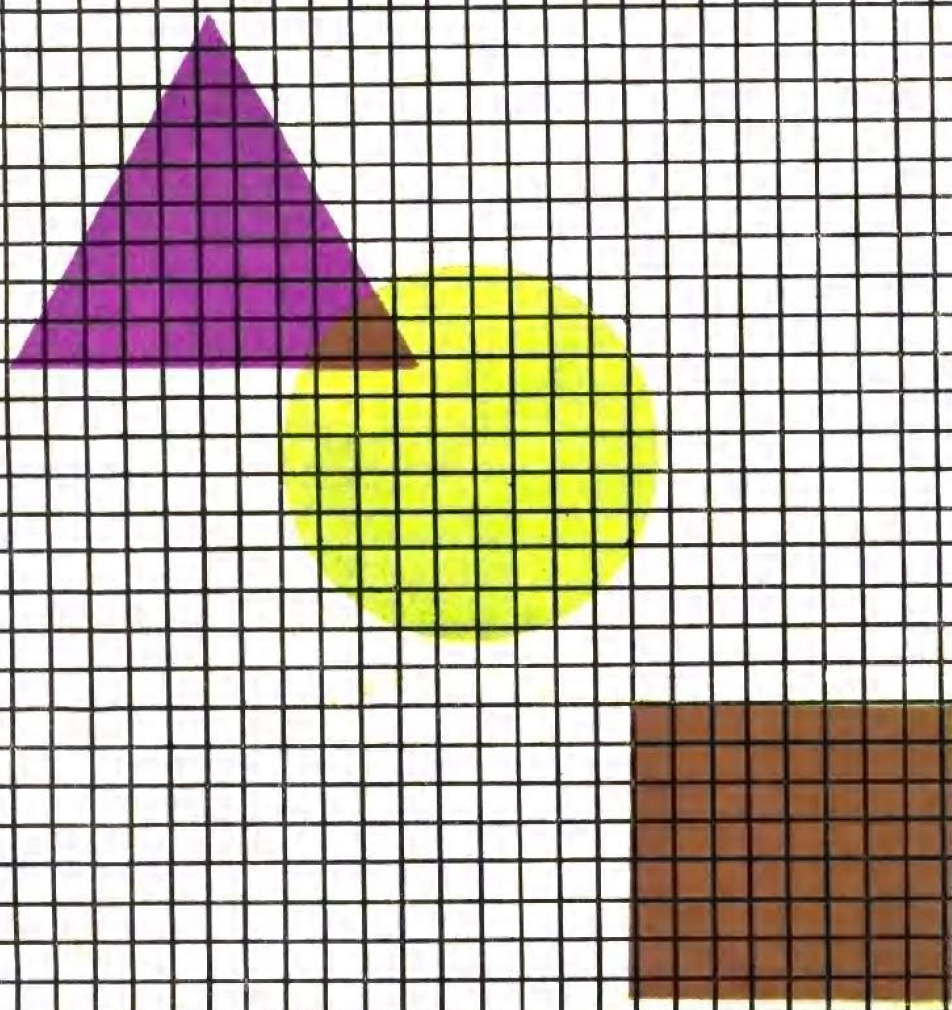


电子技术基础学习指导书

王至正 朱汉荣 肖福坤 赵继德 合编



高等教育出版社

本书是以原教育部召开的师范专科学校物理专业教学大纲审订会通过的《电子技术基础教学大纲》和原教育部审批的中学物理教师进修高等师范专科《电子线路基础教学大纲》为依据,为配合王至正等合编的《电子技术基础》和卫星电视教育教材的需要而编的自学指导书。

本书内容是按原教材顺序分章编写的。每章内容包括:内容概要、基本要求、学习内容指导、复习思考题、部分习题选解和自我检测题六个部分。“内容概要”重点阐明本章主要内容,说明本章在本书中的地位以及各部分内容之间的联系。“基本要求”是根据内容的重要性和前后联系,将教材分为“了解”、“基本掌握”和“掌握”等几个层次,对学习该章内容提出了具体要求。“学习内容指导”是本书的重点内容,着重对重点和难点加以分析讲解,对每一部分内容进行归纳总结。“复习思考题”紧密结合教材,选了部分带有启发性和巩固知识用的思考题和复习题。“部分习题选解”对原教材大部分习题做了解答,并注意分析讨论,说清题目的物理意义。每章或一个大单元后有一份“自我检测题”,用以自我检查,题目都是原教材中的一些重要内容。

本书除作为中学物理教师进修高等师范专科电子技术基础时必备辅助教材外,也可作为二、三年制师范专科学校师生和其他自学“电子技术基础”课程的读者的参考用书。

电子技术基础学习指导书

王至正 朱汉荣 肖福坤 赵继德 合编

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

商务印书馆上海印刷厂印装

开本 787×1092 1/16 印张 14.25 插页 1 字数 323,000

1990年8月第1版 1990年8月第1次印刷

印数 0001—9,910

ISBN 7-04-002767-4/TN·132

定价 3.10 元

前 言

本指导书是以原教育部师范专科学校物理专业教学大纲审订会通过的《电子技术基础教学大纲》和原教育部审批的中学教师进修高等师范专科《电子线路基础教学大纲》为依据,为配合将《电子技术基础》(王至正、朱汉荣、肖福坤、赵继德合编)兼作中学物理教师进修高等师范专科的函授教育、成人教育和卫星电视教育教材的需要而编写的。编写本书的目的,是使读者在本书帮助下,能够掌握本门课程的特点和学习方法,把握住教材的重点、难点和应注意的地方,加深对概念的理解,提高分析问题和解决问题的能力,能够独立地比较顺利地对教材进行学习,以求取得好的学习效果。

根据函授教育、成人教育和卫星电视教育的特点,本书在内容编排上,力求突出基本概念、基本原理和基本分析方法;引导学生抓住重点、突破难点,抓规律、抓思路、抓相互联系,抓理论联系实际;并注意培养分析问题和解决问题的能力。在处理学时少和内容多的矛盾时,根据中学教师进修高等师范专科的大纲要求,注意加强了基本内容,压缩了次要和陈旧的部分。

本书内容是按原教材顺序分章编写的。每章内容包括:内容概要、基本要求、学习内容指导、复习思考题、部分习题选解和自我检测题六个部分。“内容概要”重点阐述本章的主要内容,说明本章在全书中的地位以及各部分内容之间的关系。“基本要求”是根据内容的重要性和前后联系,将教材分为“了解”、“基本掌握”和“掌握”等几个层次,对学习该章内容提出了具体要求。“学习内容指导”是本书的重点内容,着重对重点和难点加以分析讲解,并对每一部分内容进行归纳总结。“复习思考题”紧密结合教材,选了部分带有启发性和巩固知识用的思考题和复习题,以供读者学习后复习之用。“部分习题选解”对原教材大部分习题做了解答,并注意分析讨论,说清题目的物理意义。“自我检测题”是为学完一章或一个大单元后进行自我检查用的,以了解本人的自学情况,题目都是原教材中一些重点内容。

本书编写过程中,采取集体讨论分工编写的原则。参加本书编写工作的有王至正(第一章和第二章第一、二、三部分)、朱汉荣(第五、六、七章)、肖福坤(第三、八章)、赵继德(第二章第四部分和第四章)等同志,王至正同志负责组织本书的编写工作和统稿。

本书由高等教育出版社组织的烟台审稿会进行了详细的审查讨论。参加审稿会的有:东北师范大学郝会新教授、袁永昇副教授,北京师范大学贾书圣副教授,聊城师范学院徐汉贵副教授,临沂师范专科学校汪指南副教授,烟台教育学院姜瑞芝副教授,烟台师范学院张福玲副教授和昌潍师范专科学校戴洪彩同志,他们对本书编写提出了许多有指导性和建设性的意见和建议。尹续铎同志为本书绘制了全部插图。编者在此一并表示衷心的感谢。

在编写过程中,参考了许多教材和自学指导书。限于我们的水平和经验,本书缺点和错误在所难免,恳切希望使用本书的同志给予批评指正。

编 者 1988.4

目 录

第一章 晶体管原理1

- 一、内容概要1
- 二、基本要求1
- 三、学习内容指导1
 - 1. 半导体的导电特性1
 - 2. PN 结及其单向导电性2
 - 3. 晶体二极管2
 - 4. 晶体三极管4
- 附录7
 - 1. 部分晶体二极管的参数7
 - 2. 部分晶体三极管的参数8
- 四、复习思考题9
- 五、部分习题解答10
- 六、自我检测题12

第二章 晶体管低频放大器15

第一部分 放大电路基础15

- 一、内容概要15
- 二、基本要求15
- 三、学习内容指导16
 - 1. 单管放大电路16
 - 2. 放大器的图解分析法17
 - 3. 放大器的等效电路分析法21
 - 4. 放大器工作点的稳定25
 - 5. 多级放大器27
 - 6. 阻容耦合放大器的频率特性30
- 四、复习思考题32
- 五、部分习题解答33
- 六、自我检测题39

第二部分 场效应管及场效应管放大 器41

- 一、内容概要41
- 二、基本要求41
- 三、学习内容指导41
 - 1. 结型场效应管的工作原理和特性41
 - 2. 绝缘栅场效应管的工作原理和特性43
 - 3. 场效应管的主要参数44
 - 4. 场效应管放大器45
- 四、复习思考题51
- 五、部分习题解答51
- 六、自我检测题52

第三部分 负反馈放大器53

- 一、内容概要53
- 二、基本要求54
- 三、学习内容指导54
 - 1. 反馈放大器的基本概念54
 - 2. 反馈放大器的基本类型56
 - 3. 负反馈对放大器性能的改善60
 - 4. 负反馈放大器的分析方法62
 - 5. 射极输出器64
- 四、复习思考题64
- 五、部分习题解答65
- 六、自我检测题70

第四部分 功率放大器72

- 一、内容概要72
- 二、基本要求73
- 三、学习内容指导73
 - 1. 功率放大器的特点及分类73
 - 2. 甲类单管功率放大器74
 - 3. 乙类推挽功率放大器74
 - 4. 互补对称功率放大器75
 - 5. 晶体管扩音机79
- 四、复习思考题80
- 五、部分习题解答80
- 六、自我检测题83

第三章 常用放大器85

第一部分 直流放大器85

- 一、内容概要85
- 二、基本要求85
- 三、学习内容指导85
 - 1. 直流放大器的特点86
 - 2. 差分放大电路的性能分析88
- 四、复习思考题92
- 五、部分习题解答92
- 六、自我检测题95

第二部分 集成运算放大器96

- 一、内容概要96
- 二、基本要求96
- 三、学习内容指导97
 - 1. 集成运算放大器的特点97

2. 集成运算放大器的组成	97
3. 集成运算放大器的性能指标	98
4. 运算放大器的基本电路	98
5. 运算放大器在信号运算方面的应用	100
6. 幅度比较器	100
*7. 运算放大器的使用方法	102
四、复习思考题	106
五、部分习题解答	107
六、自我检测题	110
第三部分 调谐放大器	111
一、内容概要	111
二、基本要求	111
三、学习内容指导	112
1. 串联和并联谐振回路的性能比较	112
2. 单调谐放大器的性能分析计算	113
四、复习思考题	115
五、部分习题解答	115
六、自我检测题	117
第四章 直流稳压电源	119
一、内容概要	119
二、基本要求	119
三、学习内容指导	119
1. 整流电路	119
2. 滤波电路	122
3. 稳压管稳压电路	123
4. 串联型稳压电路	125
5. 集成稳压电路	127
四、复习思考题	129
五、部分习题解答	130
六、自我检测题	133
第五章 正弦振荡器	135
一、内容概要	135
二、基本要求	135
三、学习内容指导	135
1. LC 回路中的自由振荡现象及其分析	136
2. 反馈振荡器的分析	137
3. LC 振荡器电路及其分析	140
4. 石英晶体振荡器	146
5. RC 振荡器	147
四、复习思考题	148
五、部分习题解答	149

六、自我检测题	150
第六章 无线电通信与收音机	152
一、内容概要	152
二、基本要求	152
三、学习内容指导	152
1. 无线电通信的基本问题	152
2. 调幅、检波和变频的基本原理	153
3. 实现调幅、检波和变频的电路	157
4. 调频与鉴频	160
5. 超外差式收音机	162
四、复习思考题	164
五、部分习题解答	164
六、自我检测题	166
第七章 脉冲与数字电路基础	167
一、内容概要	167
二、基本要求	167
三、学习内容指导	167
1. 脉冲电路的基本知识	167
2. 晶体管的开关特性	168
3. RC 电路的过渡过程	169
4. 脉冲波形变换电路	171
5. 触发器和脉冲信号发生器	174
6. 进位计数制	178
7. 逻辑门电路	181
8. 逻辑代数	184
9. 集成触发器	189
10. 基本数字部件	190
四、复习思考题	194
五、部分习题解答	194
六、自我检测题	199
第八章 电视	201
一、内容概要	201
二、基本要求	201
三、学习内容指导	202
1. 电视预备知识	202
2. 黑白电视机的整体分析	204
3. 电视机各电路的分析方法	208
4. 集成电路电视机	211
四、复习思考题	220
五、部分习题解答	221
六、自我检测题	221

第一章 晶体管原理

一、内 容 概 要

本章主要介绍 PN 结、晶体二极管、晶体三极管的基本知识,它们是学习以后各章的基础。内容概要如下:

① 本章首先从半导体导电特点出发,引出半导体具有两种载流子(电子和空穴)和两种导电类型(N 型半导体和 P 型半导体)。在此基础上介绍了 PN 结的形成和 PN 结的重要特性——单向导电性。

② 在掌握 PN 结的基础上,简单地介绍了晶体二极管的构造,重点放在对晶体二极管的伏安特性的理解及方程的阐述上,并简要地介绍了晶体二极管的几个主要参数。

③ 在学习 PN 结和晶体二极管基础上,首先简要地介绍了晶体三极管的构造特点,接着讲解了晶体三极管的电流分配关系和放大作用以及共射静态特性曲线和主要参数。晶体三极管的工作原理和特性是本章的重点内容,晶体三极管的电流分配关系及其放大作用原理是本章的难点内容。

二、基 本 要 求

- ① 了解 PN 结的形成过程,掌握 PN 结的单向导电特性;
- ② 简单了解晶体二极管、晶体三极管的结构。掌握晶体二极管、晶体三极管的伏安特性并理解其含义;
- ③ 掌握晶体三极管的电流分配关系及其放大原理;
- ④ 熟悉晶体二极管、晶体三极管主要参数的定义及选择,学会测试晶体三极管的方法。

三、学习内容指导

1. 半导体的导电特性

(1) 半导体

半导体是导电能力介于导体和绝缘体之间的一种物体。但半导体之所以得到广泛应用,是因为它的导电能力会随温度、光照或所掺杂质而显著变化。特别是掺杂可以改变半导体的导电能力和导电类型,这是能利用半导体制造各种管子及集成电路的基本依据。半导体的导电特点,由它内部导电机理所决定。

(2) 半导体的导电机理

半导体的导电性能之所以不同于其它物质,是由于它具有的共价键晶体结构,在受到热激发时能成对地产生自由电子和空穴两种极性不同的载流子。所谓载流子,就是能够携带电荷并参与导电过程的粒子。所谓空穴导电,是由相邻原子中价电子递补空穴而形成的。这种价

电子递补空穴的运动, 相当于空穴的反向运动。这种情况好比剧场中前座的观众走了出现了空位, 后座的观众移前递补空位, 这就好象空位在向后移动一样。电子是带负电荷的, 既然空穴的运动与电子的运动相反, 因此可以认为空穴的运动是正电荷的运动, 而空穴好象是正电荷。

(3) 本征半导体的特点

在本征半导体中, 受热激发时自由电子和空穴成对产生的同时, 又不断复合。复合就是自由电子返回共价键中的空位。在一定温度下, 电子空穴对的产生和复合达到动态平衡, 于是半导体中的载流子数目便维持一定。要注意两点: 一是这种受热激发产生的载流子数量是极少的, 所以本征半导体类似绝缘体, 导电率较低; 二是载流子的数目随着温度的升高而增多, 温度对半导体器件的导电性能有影响, 这是半导体器件工作不稳定的一个重要因素。

(4) 杂质半导体

本征半导体导电能力差, 并且不稳定(与温度有关), 所以不能用来制造晶体管。实际用来制造晶体管的半导体, 是人为掺入了一定杂质的“杂质半导体”。杂质半导体有 N 型和 P 型两种。在 N 型半导体中, 电子为多数载流子; 在 P 型半导体中, 空穴为多数载流子。杂质半导体中的多数载流子由杂质提供, 但同时存在着由于热激发而产生的少量电子空穴对, 其中之一就成为杂质半导体中的少数载流子。杂质半导体的特点是能产生大量载流子, 导电率高, 并对外呈现电中性。N 型和 P 型半导体材料是制作半导体器件的基本材料。

2. PN 结及其单向导电性

(1) PN 结的形成过程

在一块原来均匀的 P 型半导体的局部区域中掺入施主杂质, 形成一个 N 型区域; 或者在原来均匀的 N 型半导体的局部区域掺入受主杂质, 形成一个 P 型区域。这样, 使一块完整的半导体的一部分为 N 型, 一部分为 P 型, 在 P 型和 N 型的交界面处便形成了一个 PN 结。PN 结的形成是, 由于 P 型区域和 N 型区域空穴和电子的浓度不同, 即存在浓度差, 多数载流子空穴和电子做扩散运动。因空穴和电子都带电荷, 在交界面处要破坏原来 P 型区和 N 型区的电中性, 形成空间电荷区, 产生内电场。在内电场作用下, 要使 P 型区和 N 型区少数电子和空穴做漂移运动。开始时扩散运动大于漂移运动, 随着内电场的增强, 扩散运动和漂移运动达到动态平衡, 空间电荷区(又称耗尽层)的宽度就稳定下来, PN 结也就形成。

(2) PN 结的单向导电原理

在 PN 结外加正向电压时, 外电场削弱空间电荷区所建立的内电场, 耗尽层变窄, 扩散运动大于漂移运动, 形成较大的正向电流。外加电压对正向电流有很强的控制作用。

在 PN 结外加反向电压时, 外电场加强内电场, 耗尽层变宽, 扩散运动小于漂移运动, 主要由少数载流子运动形成很小的反向电流, 可认为 PN 结截止。反向电流基本上不随外加电压而变化, 但随温度变化较大。

3. 晶体二极管

(1) 晶体二极管的构造特点

晶体二极管由一个 PN 结加上欧姆接触电极、引出线和管壳构成。特点是单向导电。

(2) 晶体二极管的伏安特性及其方程

伏安特性是晶体二极管的重点内容。在伏安特性中要研究正向特性、反向特性及反向击穿特性。

当晶体二极管两端加正向电压时,就产生正向电流。正向电流是多数载流子的扩散电流,其值较大(毫安级),但正向电压只有零点几伏,这说明晶体二极管导通时其电阻较小。当正向电压未超过门限电压时,电流很小,电阻很大,可以认为晶体二极管尚未导通[门限电压的一种规定方法是:当正向电压低于此电压时,电流小于最大额定电流值的1%。硅管的门限电压约(0.5~0.7)V,锗管的门限电压约(0.15~0.3)V]。

当晶体二极管两端加反向电压时,产生反向电流。反向电流是少数载流子的漂移电流,其值很小(微安级)。在一定温度下,当反向电压不超过某一范围时,其值近于恒定,反向电阻很高。

当反向电压增高到击穿电压时,反向电流突然剧增,这种现象叫做PN结的击穿。击穿有雪崩击穿、齐纳击穿、热击穿三种。

晶体二极管的伏安特性也可用二极管方程式(1-1)来表达。

$$I = I_{R(\text{sat})} (e^{\frac{V}{V_T}} - 1) \quad (1-1)$$

图1-1是根据式(1-1)画出的晶体二极管的理论伏安特性曲线。由图可见,它较好地体现了晶体二极管的单向导电特性。

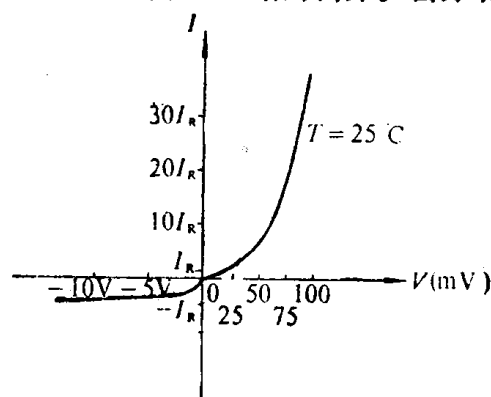


图1-1 PN结的理论伏安特性

(3) 晶体二极管的主要参数

晶体二极管的参数反映晶体二极管在各方面的电性能,它是合理选择和正确使用晶体二极管的依据,各种管子的参数由制造厂家给出。可根据晶体二极管的伏安特性来理解晶体二极管几个主要参数的意义,并要在实践中能够正确使用。

1) 正向-最大整流电流 I_{OM}

I_{OM} 是管子长期运行时允许通过的最大半波电流的平均值。使用时不得超过这个数值,否则将损坏二极管。

2) 反向-最高反向工作电压 V_{RM} 和反向电流 I_R

V_{RM} 一般规定为反向击穿电压的1/2或2/3,或者反向电流达到某个规定值时所对应的电压值。 I_R 通常是指最高反向工作电压下的反向电流值,它受温度影响很大。

3) 直流电阻 R_D 和交流电阻 r_a

在晶体二极管伏安特性上,任一点Q的电压与电流之比,称为晶体二极管等效直流电阻 R_D 。Q点 R_D 的大小,等于割线 $\overline{OQ}$ 斜率的倒数。晶体二极管伏安特性上Q点附近电压微变量 ΔV 与相应的电流微变量 ΔI 的比值,称为Q点的交流电阻,或称动态电阻,用 r_a 表示,它等于Q点切线斜率的倒数。 r_a 随工作电流增大而减小,当电流大到一定值后,各点切线斜率基本相同, r_a 基本不变。

(4) 电容效应

晶体二极管的电容效应,也就是PN结的电容效应,它由PN结特定结构确定。PN结除

单向导电特性外,还具有电容效应,工作频率越高,电容效应越明显。PN 结电容效应主要由两部分构成。

① 耗尽层电容 C_T 。它是由空间电荷区两边聚集带电离子引起的。

② 扩散电容 C_D 。它是由 N 区中的电子和 P 区中的空穴在相互扩散过程中的累积引起的。

耗尽层电容和扩散电容的充放电电流,在外电路中是叠加的,晶体二极管的总电容等于两者的并联,即 $C_i = C_T + C_D$ 。当晶体二极管加正向电压时,扩散电流大,积累载流子数量很多,扩散电容 C_D 起主要作用,可以认为 $C_i \approx C_D$ 。当晶体二极管加反向电压时,耗尽层空间电荷量大,耗尽层电容 C_T 起主要作用, $C_i \approx C_T$ 。利用外加电压,改变耗尽层电容 C_T 大小,可制成一种变容二极管。PN 结电容 C_i 大小与 PN 结面积有关,如结面积小的点触型晶体二极管,其 C_i 值为零点几至几个皮法;而结面积大的面结型晶体二极管的 C_i 值为几个至几百皮法。

(5) 等效电路

晶体二极管是非线性元件,电压和电流的比值不等于常数,不满足欧姆定律。当晶体二极管工作于某电路时,如果加一定的正向直流电压,并通过一定的直流电流,根据这个直流电压和直流电流,可在伏安特性上找到某个相应点 Q,这个相应点的坐标反映了非线性元件的直流工作状态,称为直流工作点。如果在此基础上加入交流小信号时,在工作点 Q 附近的曲线 S,取一小段 ΔS 时,可当成直线处理。这时晶体二极管的结电阻可以认为是一确定的数值,而与交流小信号无关。当晶体二极管加上较高频率的电压时,影响晶体二极管电流的不仅是晶体二极管的结电阻 r_j ,还有晶体二极管的结电容 C_j 。另外晶体二极管除结电阻 r_j 外,还有 N 区和 P 区的体电阻和引线电阻 r_s (称串联电阻)。所以晶体二极管的动态电阻(交流电阻) $r_d = r_s + r_j$,晶体二极管的等效电路如教材中图 1-12 所示。在小电流时,晶体二极管的动态电阻与结电阻

近似相等,可以用 $r_j(\Omega) = \frac{26(\text{mV})}{I(\text{mA})}$ 求出。当工作电流很大时,晶体二极管的动态电阻近似

等于串联电阻,因为这时耗尽层很薄,结电阻很小。

4. 晶体三极管

(1) 放大作用

1) 具有放大作用的条件

晶体三极管又称晶体管,它的基本功能是放大作用。要使晶体管能起放大作用,在结构上必须具有下面二个主要特点:① 发射区的掺杂浓度要远大于基区的掺杂浓度,因而发射区多数载流子的密度大大超过基区多数载流子的密度;② 基区必须很薄,它的厚度要比基区中少数载流子的扩散长度小得多,一般只有几微米。这种结构上的特点是晶体三极管放大作用的基础,也是决定晶体三极管放大作用的内部条件。

要使晶体三极管实现它的放大作用,还必须具备一定的外部条件,这就是要给晶体三极管的发射结加正向电压(P 区接电源正极、N 区接电源负极),又称正向偏置;集电结加反向电压(N 区接电源正极、P 区接电源负极),又称反向偏置。这一条件是设计放大电路的基本原则。在放大电路中 NPN 型或 PNP 型的晶体三极管外加电压的极性应相反。一定要注意电源极性和晶体

三极管的正确连接, 否则晶体三极管起不到放大作用, 甚至会被损坏。

2) 电流分配关系

以 NPN 型晶体三极管为例, 讨论晶体三极管内部载流子运动规律, 其电路图如教材中图 1-16 所示。从发射区扩散到基区的电子, 因基区做得很薄, 掺杂浓度又小, 故电子绝大部分到达集电区。从发射区扩散到基区的电子, 形成发射极电流 I_E (因由基区扩散到发射区空穴电流 I_{EP} 很小, 可忽略)。扩散到基区的部分电子与基区空穴复合, 形成基极复合电流 I_{BP} , 其他电子继续扩散到集电极, 形成集电极电子流 I_{CN} 。此外, 还有集电区和基区少数载流子的漂移运动, 形成集电极反向截止电流 I_{CBO} , 这一电流和基极复合电流一起形成基极电流 I_B , 而和集电极电子流 I_{CN} 一起形成集电极电流 I_C 。即

$$I_B = I_{BP} + I_{CBO}$$

$$I_C = I_{CN} + I_{CBO}$$

而发射极电流

$$I_E = I_{BP} + I_{CN} = I_B + I_C$$

这就是晶体三极管的电流分配关系。

3) 共射接法电流放大系数 $h_{FE}(\bar{\beta})$ 和 $h_{fe}(\beta)$

共射直流电流放大系数 $h_{FE}(\bar{\beta})$

$$h_{FE} = \frac{I_{CN}}{I_{BP}} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}} \approx \frac{I_C}{I_B} \quad (1-2)$$

对于一个特定的晶体三极管, 根据上面讲的电流分配关系, 它由扩散到集电区的电子流 I_{CN} 与在基区复合的电流 I_{BP} 的比例关系来确定。它反映基极电流和集电极电流的分配关系, 也就是控制关系, 即反映晶体三极管的放大能力。通常把这个比例关系称为晶体管共射电路直流电流放大系数, 用 h_{FE} 或 $\bar{\beta}$ 表示。

共射交流电流放大系数 $h_{fe}(\beta)$

$$h_{fe} = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right|_{V_{CE}=\text{常数}} \quad (1-3)$$

它表示集电极负载短路(即 V_{CE} 保持不变)的条件下, 集电极电流变化量与相应的基极电流变化量之比。

h_{fe} 值与工作电流 I_C 有关。 I_C 较小(例如几十微安)或很大时, 输出特性间隔比较小, h_{fe} 值都比较小。在 1 mA 以上的相当大范围内, 小功率管的 h_{fe} 值都比较大, 而且可以认为基本恒定。但是, 由于制造工艺和原材料的分散性, 即使同一型号的管子, 它的 h_{fe} 值也有相当大的差别, 通常在 20~150 之间。

h_{FE} 和 h_{fe} 两者含义不同。但在输出特性曲线基本平行等距并且忽略 I_{CEO} 的情况下, 两者相等。因为实际上晶体管(尤其是硅管)的 I_{CEO} 很小并且特性曲线基本平行等距, 所以, 实用中认为 h_{fe} 与 h_{FE} 近似相等, 以便对电路进行一些近似估算。但严格说来, 在讨论交流小信号时, 应采用 h_{fe} ; 在估算大幅度变化的电流或电压, 或者涉及到直流的关系时, 则采用 h_{FE} 。

4) 晶体三极管的放大作用

晶体三极管放大作用的本质是它的电流控制作用, 即 I_B 对 I_C 的控制作用, 就是利用这种

控制作用来实现其放大功能。

晶体三极管中基极电流 I_B 能够控制为其自身 h_{FE} 倍的集电极电流 I_C 。利用小电流控制大电流以实现放大。

电压放大是由电流放大转化来的,集电极电阻 R_c 起了这样的转化作用。以共射接法为例,当输入电路加有较小的信号电压 ΔV_I (输入电压) 时,就会引起基极电流 I_B 的变化,而集电极电流(受基极电流 I_B 控制)则有较大的变化,在集电极电阻 R_c 上形成了较大的信号电压 ΔV_o (输出电压)。 $\Delta V_o = \Delta I_C R_c$ 。一般情况下,输出电压 ΔV_o 比输入电压 ΔV_I 大得多,这就是电压放大。设 r_{be} 是晶体三极管由基极到发射极的等效电阻,则输入信号电压 $\Delta V_I = \Delta I_B r_{be}$, 负载 R_c 上电压变化量 $\Delta V_o = \Delta I_C R_c$ 。于是

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_I} = \frac{\Delta I_C R_c}{\Delta I_B r_{be}} = h_{fe} \frac{R_c}{r_{be}}$$

因为 $h_{fe} \gg 1$, r_{be} 较小(一般为 $1 \text{ k}\Omega$ 左右),所以,只要 R_c 值不太小,就会使负载上的信号电压 ΔV_o 大于输入信号电压 ΔV_I 。

(2) 共射特性曲线

1) 晶体三极管的三种连接方式

因为晶体三极管有三个电极,故有三种不同的连接方式:即共射(极)接法、共基(极)接法、共集(电极)接法。具体接法如教材中图 1-18 所示。

由于晶体三极管有 NPN 型和 PNP 型二类,每类又有三种不同的连接方式。而要保证晶体三极管能正常工作,则必须保证发射结正向偏置,集电结反向偏置。因此,在各类各种不同接法中,晶体三极管的电压和电流的实际方向不一定都相同。为了研究问题方便,规定流入晶体管的电流方向为参考正方向;电压正方向以公共端点作为零电位参考点,该点为负端,其他电极为正端。如实际方向与规定方向相反,则取负号。

2) 晶体三极管特性曲线

晶体三极管由内部物理过程反映到外部电路,就是晶体三极管各极电压和电流之间相互关系,可用特性曲线来表示。由于晶体三极管具有三个电极,要用两组特性曲线才能全面反映其性能。晶体三极管和晶体二极管都是非线性元件,但是晶体三极管的特性比晶体二极管要复杂得多。

① 输入特性曲线

对于共射接法,输入特性曲线是指 V_{CE} 一定时, I_B 与 V_{BE} 的关系曲线。输入特性曲线的特点是:当 $V_{CE} = 0$ 时,输入特性类似于 PN 结的正向特性;当 $V_{CE} > 0$ 时,输入特性曲线右移,并且 $V_{CE} > 1 \text{ V}$ 以后,特性曲线基本重合。通常取 $V_{CE} > 1 \text{ V}$ 的一条进行研究即行,其图如教材中图 1-20 所示。

② 输出特性曲线

对于共射接法,输出特性曲线是指基极电流 I_B 一定时, I_C 与 V_{CE} 的关系曲线。输出特性曲线的特点是:每条曲线均有上升和水平两部分。上升部分—— I_C 决定于 V_{CE} ,而与 I_B 关系不大。水平部分—— I_C 主要决定于 I_B ,而与 V_{CE} 关系不大(近似恒流)。当 V_{CE} 超过一定数

值时,会发生击穿。 I_C 主要决定于 I_B , 说明 I_C 受 I_B 的控制。因此,不能把晶体三极管 o-o 极之间看成不变的电阻,不能简单套用欧姆定律。这说明晶体三极管和晶体二极管都是非线性器件。

晶体三极管的输出特性曲线可以划分为三个区域。饱和区: 发射结和集电结都是正向偏置的工作状态,这时 I_C 受 V_{CE} 控制, I_B 的变化对 I_C 的影响很小。截止区: $I_B \leq 0$ 的区域是截止区,这时 $I_C \leq I_{CEO}$, 截止区中发射结和集电结都是反向偏置的工作状态。晶体三极管工作在饱和区和截止区时,基本上无放大作用。放大区: 在饱和区以右区域和截止区以上区域输出特性的平坦部分,这时,发射结处于正向偏置、集电结处于反向偏置的工作状态,晶体三极管内各极电流均能正常流动, I_B 有效地控制着 I_C , 而 V_{CE} 对 I_C 的影响很小。放大电路中的晶体三极管一般应工作在放大区。

晶体管除上述三种工作状态外,还有一种状态: 即晶体管发射结处于反向偏置,集电极处于正向偏置,这种倒置状态用于开关电路中。

(3) 晶体三极管的主要参数

1) 电流放大系数 h_{FE} 和 h_{fe}

它反映晶体三极管的电流放大能力,注意 h_{FE} 和 h_{fe} 在概念上的区别。

2) 反向截止电流 I_{CBO} 和 I_{CEO}

它反映晶体三极管的温度稳定性,要求 I_{CBO} 和 I_{CEO} 愈小愈好,注意硅管和锗管间 I_{CBO} 的差别。

3) 极限参数

集电极最大允许电流 I_{CM} ; 基极开路、集-射极间反 向击穿电压 $V_{(BR)CEO}$; 集电极最大允许耗散功率 P_{CM} 。这三个极限参数,关系到晶体管的安全运用问题,表明晶体管使用时不宜超过的限度。若超过这些参数所规定的范围使用,将会使管子性能下降甚至损坏。

晶体三极管的参数不是孤立的,它们互相联系、共同制约,确定了安全工作区。图 1-2 表明了晶体三极管主要参数的相互联系,借助于特性曲线来看参数的含义,就比较容易理解和记忆。

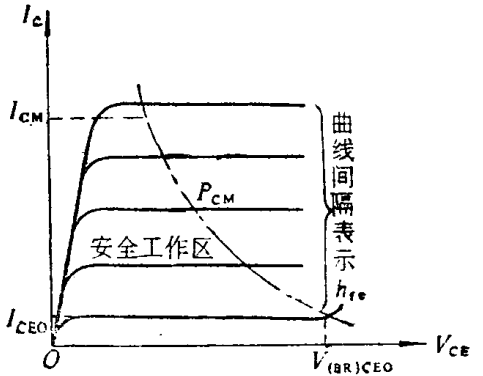


图 1-2 晶体三极管主要参数相互联系

附 录

1. 部分晶体二极管的参数

参 数		最大整流电流	最大整流电流时的正向电压	最高反向工作电压(峰值)	最高工作频率	用途及 使 用 说 明
符 号		I_{OM}	V_F	V_{RM}	f_M	
单 位		mA	V	V	kHz	
型 号	2AP1	16	≤ 1.2	20	150×10^3	用于频率 为 150×10^3 kHz 以下的检 波或整流 电路
	2AP2	16		30		
	2AP3	25		30		
	2AP4	16		50		
	2AP5	16		75		
	2AP6	12		100		
	2AP7	13		100		

(续表)

参 数		最大整流电流	最大整流电流时的正向电压	最高反向工作电压(峰值)	最高工作频率	用途及 使 用 说 明
符 号		I_{OM}	V_F	V_{RM}	f_M	
单 位		mA	V	V	kHz	
型 号	2CP1	400	≤ 1.2	100	3	用于频率 为 3 kHz 以下的整 流电路
	2CP2			200		
	2CP3			300		
	2CP4			400		
	2CP10	100	≤ 1.5	25	50	用于频率 为 50kHz 以下的整 流电路及 脉冲电路
	2CP11			50		
	2CP12			100		
	2CP13			150		
	2CP14			200		
	2CP15			250		
	2CP16			300		
	2CP17			350		
	2CP18			400		
	2CP19			500		
	2CP20			600		
	2CZ11A	1000	≤ 1	100	3	用于频率 为 3 kHz 以下的整 流电路
	2CZ11B			200		
	2CZ11C			300		
	2CZ11D			400		
	2CZ11E			500		
	2CY11F			600		
	2CZ11G			700		
	2CZ11H			800		

2. 部分晶体三极管的参数

(1) 3DG6 高频小功率三极管

参 数		单 位	测试条件	型 号			
				3 DG6A	3 DG6B	3 DG6C	3 DG6D
直 流 参 数	I_{CBO}	μA	$V_{CB}=10 V$	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01
	I_{EBO}	μA	$V_{EB}=1.5 V$	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01
	I_{CEO}	μA	$V_{CE}=10 V$	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01
	V_{BES}	V	$I_B=1 mA$ $I_C=10 mA$	≤ 1.1	≤ 1.1	≤ 1.1	≤ 1.1
	$h_{FE}(\beta)$		$V_{CB}=10 V$ $I_C=3 mA$	10~200	20~200	20~200	20~200
交 流 参 数	f_T	MHz	$V_{CE}=10 V$ $I_C=3 mA$ $f=30 MHz$	≥ 100	≥ 150	≥ 250	≥ 150
	G_P	dB	$V_{CB}=10 V$ $I_C=3 mA$ $f=100 MHz$	≥ 7	≥ 7	≥ 7	≥ 7
	C_{ob}	pF	$10 V=V_{CB}$ $I_C=3 mA$ $f=5 MHz$	≤ 4	≤ 3	≤ 3	≤ 3
极 限 参 数	$V_{(BR)CBO}$	V	$I_C=100 \mu A$	30	45	45	45
	$V_{(BR)CEO}$	V	$I_C=200 \mu A$	15	20	20	30
	$V_{(FR)EBO}$	V	$I_E=-100 \mu A$	4	4	4	4
	I_{OM}	mA		20	20	20	20
	P_{CM}	mW		100	100	100	100
	T_{JM}	$^{\circ}C$		150	150	150	150

(2) 3AD6 低频大功率管

参 数 符 号		单 位	测试条件	型 号		
				3AD6A	3AD6B	3AD6C
直 流 参 数	I_{CBO}	μA	$V_{CE} = -20 V$	≤ 400	≤ 300	≤ 300
	I_{EBO}	μA	$V_{EB} = -10 V$	≤ 500	≤ 500	≤ 500
	I_{CEO}	μA	$V_{CE} = -10 V$	≤ 2500	≤ 2500	≤ 2500
	V_{CES}	V	$I_B = -200 mA$ $I_C = -2 A$	≤ 0.8	≤ 0.8	≤ 0.8
	V_{BES}	V	$I_B = -200 mA$ $I_C = -2 A$	≤ 1.2	≤ 1.2	≤ 1.2
	h_{FE}		$V_{CE} = -2 V$ $I_C = -2 A$	≥ 12	≥ 12	≥ 12
交 流 参 数	f_{hfe}	kHz	$V_{CE} = -6 V$ $I_C = -200 mA$ $R_c = 5 \Omega$	≥ 2	≥ 4	≥ 4
极 限 参 数	$V_{(BR)CBO}$	V	$I_C = -5 mA$	50	60	70
	$V_{(BR)CEO}$	V	$I_C = -10 mA$	18	24	30
	$V_{(BR)EBO}$	V	$I_E = 5 mA$	20	20	20
	I_{CM}	A		2	2	2
	P_{CM}	W	加 $120 \times 120 \times 4 mm^3$ 散热板	10	10	10
	T_{JM}	$^{\circ}C$		90	90	90

四、复习思考题

- 1.1 什么是空穴? 空穴运动与电子运动有什么不同?
- 1.2 N 型半导体是怎样形成的? 其中电子浓度决定于什么? 空穴浓度为什么比同一温度下本征半导体中空穴浓度小?
- 1.3 PN 结空间电荷区是由什么构造成的? 是电子、空穴、中性施主、中性受主? 还是离子化施主、离子化受主?
- 1.4 怎样给 PN 结加正向电压或反向电压? 耗尽层在正、反向电压作用下宽度如何变化? 在正向电压作用下, 是多数载流子还是少数载流子参加导电?
- 1.5 已知一个晶体二极管的伏安特性可用 $I = 20 \times 10^{-12} (e^{\frac{V}{V_T}} - 1) A$ 来表示, 计算 $0.1 V, 0.3 V, 0.5 V, 0.7 V$ 时的电流各是多少 ($V_T = 26 mV$)?
- 1.6 试绘出晶体二极管的交流等效电路, 说明各量的意义。在室温下, 若直流电流为 $1 mA$, 则硅二极管的动态电阻大致是多少?
- 1.7 分别画出 NPN 型管和 PNP 型管的电路符号, 并标出电流的实际方向和电压极性。
- 1.8 说明晶体三极管放大作用的本质是电流控制作用。
- 1.9 看懂共射输入和输出特性曲线, 并能定性解释曲线形状的含义。
- 1.10 在教材中图 1-21 上标明放大、饱和、截止三个区域, 说明在各个区域内发射结和集电结上工作电

压极性。

- 1.11 说明 h_{FE} 和 h_{fe} 的物理意义。怎样在输出特性上求 h_{FE} 和 h_{fe} 。
- 1.12 硅管和锗管的 I_{OBO} 分别在什么数量级? I_{OBO} 和 I_{ORO} 有什么区别? 又有何关系?
- 1.13 说明共射接法晶体三极管的三个常用极限参数的意义。
- 1.14 在半导体器件手册(或本章附录)上查出晶体三极管 3DG6C 的直流参数和极限参数。

五、部分习题解答

题 1.5(教材 p.28)

解 假定晶体二极管正向电阻为零, 反向电阻为无限大。

(1) 图 1-30(a): D 导通, AO 两端电压为

$$V_{AO} = -12 + \frac{12-6}{3} \times 3 = -6 \text{ V}$$

(2) 图 1-30(b): D 截止, AO 两端电压为

$$V_{AO} = -12 \text{ V}$$

(3) 图 1-30(c): D_1 导通, D_2 截止, AO 两端电压为

$$V_{AO} = -12 + \frac{12}{3} \times 3 = 0 \text{ V}$$

(4) 图 1-30(d): D_1 截止, D_2 导通, AO 两端电压为

$$V_{AO} = 12 - \frac{12+6}{3} \times 3 = -6 \text{ V}$$

题 1.7(教材 p.28)

解 通过对本题的练习, 加深对晶体二极管动态电阻、结电阻和串联电阻的理解, 弄清楚它们之间的关系。

$$r_{d1} = r_s + r_{j1} = r_s + \frac{26}{0.5} = 75 \Omega$$

则

$$r_s = 75 - \frac{26}{0.5} = 23 \Omega$$

$$r_{d2} = r_s + r_{j2} = 23 + \frac{26}{2} = 36 \Omega$$

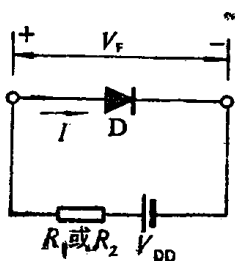
题 1.8(教材 p.28)

解 由于晶体二极管是非线性器件, 它的电压和电流不是正比关系, 所以, 当不同的电流流过晶体二极管时, 管子两端的电压和电流的比值(就是测出的电阻值)也不同。

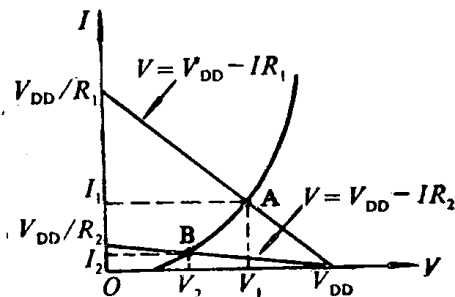
设万用表欧姆挡的电池电压为 V_{DD} (例如 1.5 V), $\Omega \times 1$ 挡的中值电阻为 R_1 (例如 15 Ω 左右), $R \times 100$ 挡的中值电阻为 $R_2 = 100 R_1$ (1500 Ω 左右), 则万用表测晶体二极管所构成的电路如图 1-3(a)所示。

从图中晶体二极管外电路可知, 管子的电压和电流应满足基尔霍夫定律, 即

$$\Omega \times 1 \text{ 挡} \quad V = V_{DD} - IR_1$$



(a) 二极管外电路



(b) 二极管的正向电阻图解

图 1-3

$$\Omega \times 100 \text{ 挡} \quad V = V_{DD} - IR_2 = V_{DD} - 100IR_1$$

这两个方程在 $I-V$ 坐标系中均为直线,如图 1-3(b)所示。

从晶体二极管本身特性来看,管子的电压和电流又应满足特性曲线所揭示的规律。

因此,同时受这两种关系约束的电压电流必定在特性与直线的交点上。用 $\Omega \times 1$ 挡测时,交于图中 A 点,万用表读数为 $\frac{V_1}{I_1}$; 用 $\Omega \times 100$ 挡测时,交于图中 B 点,万用表读数为 $\frac{V_2}{I_2}$ 。显然前者的阻值小而后者的阻值大。

题 1.9(教材 p. 28)

解 乙管性能最好。因为在正向电压相同的条件下正向电流最大,在反向电压相同的条件下反向电流最小,而且乙管的反向击穿电压又最高。

题 1.13(教材 p. 28)

解

$$\Delta I_B = \Delta I_E - \Delta I_C = 9 - 8.8 = 0.2 \text{ mA}$$

$$h_{fe} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{8.8}{0.2} = 44$$

题 1.15(教材 p. 28)

解 通过本题的练习,要求能够掌握利用晶体三极管的极间电压,会判别晶体三极管的工作状态。

(1) 三个硅 NPN 三极管各处于什么状态?

甲管: $V_{BE} = -6 \text{ V}$, $V_{BC} = V_{BE} + V_{EC} = -6 - 5 = -11 \text{ V}$, 甲管发射结和集电结均处于反向偏置,所以,处于截止状态。

乙管: $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$, $V_{BC} = V_{BE} + V_{EC} = 0.7 - 0.5 = 0.2 \text{ V}$, 乙管发射结和集电结均处于正向偏置,所以,处于饱和状态。

丙管: $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$, $V_{BC} = V_{BE} + V_{EC} = 0.7 - 5 = -4.3 \text{ V}$, 丙管发射结处于正向偏置,集电结处于反向偏置,所以处于放大状态。

(2) 三个锗 PNP 晶体三极管各处于什么状态?

甲管: $V_{BE} = -0.2 \text{ V}$, $V_{BC} = V_{BE} + V_{EC} = -0.2 + 3 = 2.8 \text{ V}$, 甲管发射结处于正向偏置,集电结处于反向偏置,所以,处于放大状态。

乙管: $V_{BE} = -0.2 \text{ V}$, $V_{BC} = V_{BE} + V_{EC} = -0.2 + 0.1 = -0.1 \text{ V}$, 乙管发射结和集电结均处于正向偏置,所以,处于饱和状态。

丙管: $V_{BE} = 5 \text{ V}$, $V_{BC} = V_{BE} + V_{EC} = 5 + 3 = 8 \text{ V}$, 丙管发射结和集电结均处于反向偏置,所以,处于截止状态。

题 1.17(教材 p. 29)

解 甲管 $h_{fe} = 240$ 太大, $I_{CEO} = 400 \mu\text{A}$ 也太大,并且集-射极间击穿电压 $V_{(BR)CEO} = 10 \text{ V}$ 太小。故该管工作不稳定,并且容易击穿,作放大管用效果不好。

乙管 $h_{fe} = 8$ 太小,虽然 $I_{CEO} = 2 \mu\text{A}$ 较小和 $V_{(BR)CEO} = 40 \text{ V}$ 较大,但放大倍数太小,故放大作用效果不理想。

丙管 $h_{fe} = 60$ 较大, $I_{CEO} = 5 \mu\text{A}$ 较小,并且 $V_{(BR)CEO} = 30 \text{ V}$ 也较大,故三只管子中,该管放大作用效果比较好。

题 1.18(教材 p. 29)

解 首先找出 V_{BE} , 因为硅管的 $V_{BE} = 0.6 \text{ V}$ 左右, 锗管的 $|V_{BE}| = 0.2 \text{ V}$ 左右。对于 NPN 型, $V_B > V_E$; 对于 PNP 型, $V_B < V_E$ 。现管脚 1 与 2 的电位相差 0.2 V , 可以断定被测管是锗管。再看 V_{CE} , 若 $V_C > V_E$ 则为 NPN 型; 若 $V_C < V_E$ 则为 PNP 型。现管脚 3 最负并且与管脚 1 和 2 两端的电位差在 3 V 左右, 故管脚 3 不能是 b 或 e, 只能是 PNP 型管的 c, 再由管脚 2 的电压大于管脚 1 的电压, 可进一步断定管脚 2 为管子的发射极, 管脚 1 为管子的基极。

题 1.19(教材 p. 29)

解 通过对本题的练习,掌握从输出特性上求 h_{FE} 和 h_{fe} 的方法。

参见教材中 p. 20 图 1-21(a), 由图上可知:

$$h_{FE} = \frac{6.6 \times 10^3}{40} = 165$$

$$h_{fe} = \frac{(9.2 - 3.1) \times 10^3}{60 - 20} = 152.5$$

题 1.20(教材 p. 29)

解 (1) 在 $|V_{OE}| = 4 \text{ V}$, $I_C = 2 \text{ mA}$ 范围内, 3AG25 的 h_{fe} 值是(见图 1-4(b))

$$h_{fe} = \frac{3.1 - 0.5}{0.06 - 0.02} = 65$$

3DG4 的 h_{fe} 值是(见图 1-4(a))

$$h_{fe} = \frac{17.5 - 6}{0.4 - 0.2} = 57.5$$

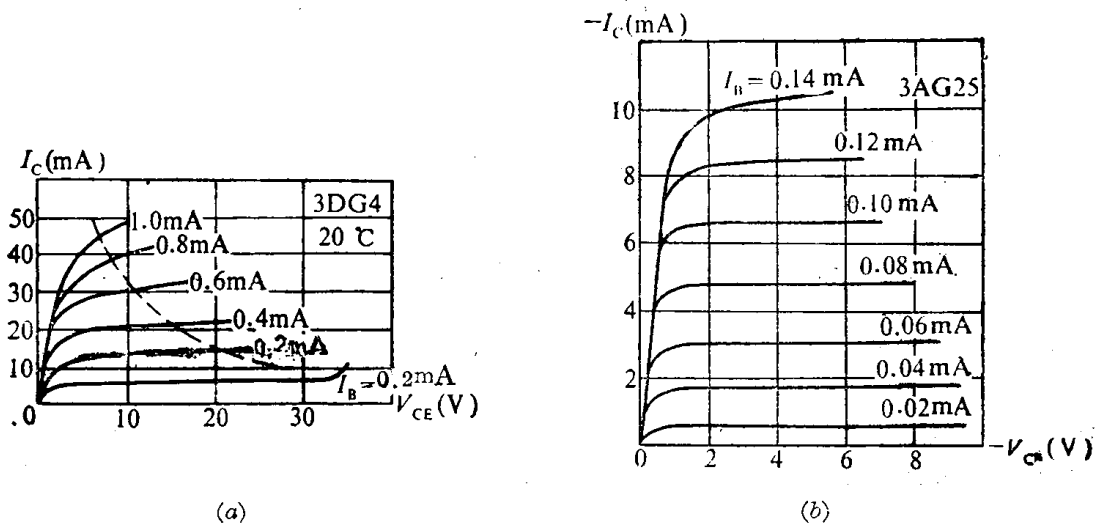


图 1-4

(2) 查手册, 3AG25 的 $I_{CBO} \leq 10 \mu\text{A}$, 3DG4 的 $I_{CBO} \leq 1 \mu\text{A}$, 故锗管 I_{CBO} 要比硅管的大。

(3) 查手册, 3AG25 的 $P_{OM} = 50 \text{ mW}$, 3DG4 的 $P_{OM} = 300 \text{ mW}$, 故 3DG4 的 P_{CM} 大。

(4) 查手册, 3AG25 的 $|V_{(BR)CEO}| = 10 \text{ V}$, 3DG4 的 $V_{(BR)CEO} = (15 \sim 50) \text{ V}$, 故 3DG4 的 $V_{(BR)CEO}$ 大。

六、自我检测题

(60 分钟内完成)

(一) 填空题(本题 30 分, 每空 1.5 分)

1. 半导体中载流子有_____和_____两种, 在本征半导体中掺入施主杂质, 可形成_____型半导体, P 型半导体中多数载流子是_____。
2. 晶体二极管的伏安特性方程是_____, 在室温 ($T = 300 \text{ K}$) 下 $V_T \approx$ _____。
3. 在选用整流二极管时, 主要应考虑参数_____, _____; 在选用检波二极管时, 主要应考虑的参数是_____。
4. 晶体三极管用作放大器时, 应使其发射结处于_____向偏置, 集电结处于_____向偏置。
5. 若已知晶体三极管的电流值: $I_B = 20 \mu\text{A}$ 时, $I_C = 1.18 \text{ mA}$; $I_B = 80 \mu\text{A}$ 时, $I_C = 4.72 \text{ mA}$, 这个晶体三极管的 $h_{fe} =$ _____, $h_{rb} =$ _____。
6. 已知晶体三极管的额定功耗 $P_{OM} = 120 \text{ mW}$, 当 $V_{OE} = 5 \text{ V}$ 时, 为了使晶体三极管安全工作, 其集电极