

高职高专机电类专业规划教材
国家示范建设院校课程改革成果

电子技术与实践

刘淑英◎主编

高职高专机电类专业规划教材
国家示范建设院校课程改革成果

电子技术与实践

主 编 刘淑英
副主编 仲 川
参 编 侯秉涛 王 静
主 审 孟祥忠



机械工业出版社

本书由6个学习情境组成：直流稳压电源的制作与调试、对讲机的制作与调试、信号发生器的制作与调试、报警器的制作与调试、编码电子锁电路的制作与调试、电子秒表的制作与调试。每个学习情境以一个典型工作任务为主线，组织教学内容。理论方面包含半导体二极管、晶体管、场效应晶体管、基本放大电路、多级放大电路、放大电路中的反馈、功率放大电路、集成运算放大器、正弦波振荡器、整流滤波电路、稳压电路、数字电路基础、逻辑门电路、组合逻辑电路、时序逻辑电路、触发器、脉冲波形的产生与整形、数/模和模/数转换、半导体存储器等内容；实践方面介绍了电子电路装配工艺流程、元器件检测方法、焊接方法、电路装配及调试方法等内容。本书始终贯穿“教、学、做”相结合的原则，以培养学生实际应用能力为目的，加强对学生分析问题和解决问题的能力培养，培养学生解决实际工程问题的能力、良好的职业道德和团队合作精神。每个学习情境后面均有小结和习题。

本书内容简明，通俗易懂，由浅入深，由易到难，理论联系实际，可作为高职高专院校应用电子技术、电气自动化技术、机电一体化技术等专业的教材或参考用书，也可供从事电子技术工作的技术人员参考。

为方便教学，本书备有免费电子课件，凡选用本书作为教材的老师均可来电索取。咨询电话：010-88379375。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术与实践/刘淑英主编. —北京：机械工业出版社，2010.1
高职高专机电类专业规划教材
ISBN 978-7-111-29459-7

I. 电… II. 刘… III. 电子技术—高等学校：技术学校—教材 IV. TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第001713号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
策划编辑：于宁 责任编辑：曹雪伟 版式设计：霍永明
责任校对：申春香 封面设计：陈沛 责任印制：李妍

北京诚信伟业印刷有限公司印刷

2010年2月第1版第1次印刷
184mm×260mm·12印张·293千字
0001—4000册
标准书号：ISBN 978-7-111-29459-7
定价：22.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010)88361066

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售一部：(010)68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售二部：(010)88379649

读者服务部：(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

4.3.2 电路的装配与焊接	122	6.1.1 工作任务书	145
4.3.3 电路调试	122	6.1.2 电路装配工艺要求	146
小结	122	6.1.3 清点元器件数量及规格	146
习题4	123	6.2 学习内容	146
学习情境5 编码电子锁电路的制作与调试	127	6.2.1 计数器	146
5.1 工作任务	127	6.2.2 寄存器	152
5.1.1 工作任务书	127	6.2.3 脉冲波形的产生与整形	155
5.1.2 电路装配的工艺要求	127	6.2.4 数/模和模/数转换器	163
5.1.3 清点元器件数量及规格	128	6.2.5 半导体存储器和可编程逻辑器件	167
5.2 学习内容	128	6.3 电子秒表的制作与调试	170
5.2.1 触发器	129	6.3.1 电子秒表的工作原理分析	170
5.2.2 CMOS 触发器	134	6.3.2 电路的装配与焊接	171
5.2.3 时序逻辑电路的分析	137	6.3.3 电路调试	171
5.3 编码电子锁电路的制作与调试	140	小结	172
5.3.1 编码电子锁电路的工作原理分析	140	习题6	173
5.3.2 电路的装配与焊接	141	附录	176
5.3.3 电路调试	141	附录A 半导体器件型号组成及意义	176
小结	142	附录B 我国集成电路命名方法	177
习题5	142	附录C 硅半导体整流二极管选录	178
学习情境6 电子秒表的制作与调试	145	附录D 高频小功率晶体管	179
6.1 工作任务	145	附录E 部分常用集成电路引脚图	180
		部分习题参考答案	182
		参考文献	185

4.3.2 电路的装配与焊接	122	6.1.1 工作任务书	145
4.3.3 电路调试	122	6.1.2 电路装配工艺要求	146
小结	122	6.1.3 清点元器件数量及规格	146
习题4	123	6.2 学习内容	146
学习情境5 编码电子锁电路的制作与调试	127	6.2.1 计数器	146
5.1 工作任务	127	6.2.2 寄存器	152
5.1.1 工作任务书	127	6.2.3 脉冲波形的产生与整形	155
5.1.2 电路装配的工艺要求	127	6.2.4 数/模和模/数转换器	163
5.1.3 清点元器件数量及规格	128	6.2.5 半导体存储器和可编程逻辑器件	167
5.2 学习内容	128	6.3 电子秒表的制作与调试	170
5.2.1 触发器	129	6.3.1 电子秒表的工作原理分析	170
5.2.2 CMOS 触发器	134	6.3.2 电路的装配与焊接	171
5.2.3 时序逻辑电路的分析	137	6.3.3 电路调试	171
5.3 编码电子锁电路的制作与调试	140	小结	172
5.3.1 编码电子锁电路的工作原理分析	140	习题6	173
5.3.2 电路的装配与焊接	141	附录	176
5.3.3 电路调试	141	附录A 半导体器件型号组成及意义	176
小结	142	附录B 我国集成电路命名方法	177
习题5	142	附录C 硅半导体整流二极管选录	178
学习情境6 电子秒表的制作与调试	145	附录D 高频小功率晶体管	179
6.1 工作任务	145	附录E 部分常用集成电路引脚图	180
		部分习题参考答案	182
		参考文献	185

学习情境 1 直流稳压电源的制作与调试

内容提要：在本学习情境中，主要通过直流稳压电源的制作与调试，介绍常用的半导体器件，整流、滤波、稳压电路的组成、工作原理及分析计算，实际电路装配的工艺要求及调试方法。

1.1 工作任务

1.1.1 工作任务书

本学习情境中要完成的工作任务是：直流稳压电源的制作与调试。要制作的直流稳压电源电路如图 1-1 所示。

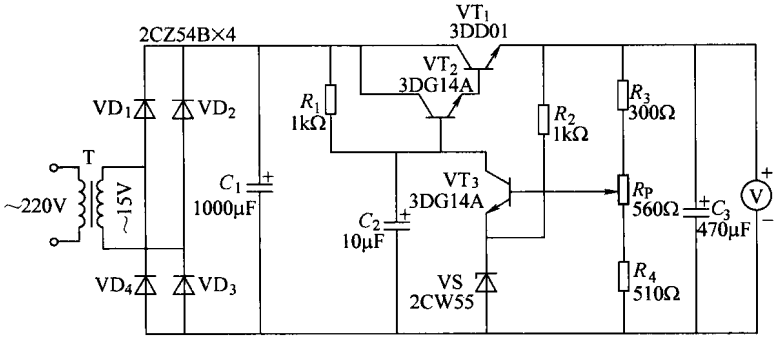


图 1-1 直流稳压电源电路图

要求：

1. 输出电压 $U_o = 8 \sim 18V$ ，连续可调；
2. 最大输出电流 $I_L = 500mA$ ；
3. 工作温度 $25 \sim 40^\circ C$ ；
4. 电网电压波动 $\pm 10\%$ ，电路正常工作。

1.1.2 电路装配工艺要求

1. 工艺流程

本学习情境中，完成工作任务时要遵循的工艺流程为：熟悉工艺要求→准备工作→绘制装备草图→核对元器件数量、规格、型号→元器件检测→元器件的预加工→电路装配、焊接→调试。

2. 工艺要求

(1) 电路板装配工艺要求

1) 电子元器件的标记和色码部位应朝上，色环电阻的色环标志顺序方向一致；电阻、二极管均采用水平安装方式，高度为元器件体离板面 4mm 左右。



- 2) 电容、晶体管必须采用垂直安装方式,高度为底部离板面3~7mm。
- 3) 元器件间的距离不能小于2mm,引线间距离要大于3mm。
- 4) 所有焊点均采用直角焊,焊接完成后剪去多余引脚,留头在焊面上0.5~1mm,且不能损伤焊接面。
- 5) 保证焊接可靠,无漏焊、短路现象。

(2) 总装加工工艺要求

1) 电源变压器用螺钉固定在电路板的元器件面,一次绕组的引出线向外,二次绕组的引出线向内。

2) 电源线从电路板焊接面穿孔后,要在元器件面打结,再与变压器一次绕组引出线焊接并完成绝缘恢复,变压器二次绕组引出线插入安装孔后焊接。

1.1.3 清点元器件数量及规格

1. 所需元器件

在本学习情境要完成的工作任务中,需要的元器件明细表见表1-1。

表 1-1 元器件明细表

标 号	名 称	规 格	标 号	名 称	规 格
R_1	电阻	1k Ω	VT ₁	晶体管	3DD01
R_2	电阻	1k Ω	VT ₂	晶体管	3DG14A
R_3	电阻	300 Ω	VT ₃	晶体管	3DG14A
R_4	电阻	510 Ω	VS	稳压管	2CW55(6V)
R_p	电位器	560 Ω	T	变压器	220V/15V
C_1	电解电容	1000 μ F/25V		电路板	
C_2	电解电容	10 μ F/25V		镀银铜丝	
C_3	电解电容	470 μ F/25V		焊料、助焊剂	
VD ₁	整流二极管	2CZ54B		电源线及插头	
VD ₂	整流二极管	2CZ54B		绝缘胶布	
VD ₃	整流二极管	2CZ54B		紧固件 M4×15(8套)	
VD ₄	整流二极管	2CZ54B			

2. 所需设备仪器

- 1) 示波器。
- 2) 万用表。
- 3) 常用电子组装工具一套(电烙铁,尖嘴钳等)。

1.2 学习内容

1.2.1 半导体的基础知识

在自然界中,所有物质按其导电能力的强弱,可以分为导体、绝缘体和半导体三大类。

导电能力特别强的物质,称为导体;导电能力非常差或者几乎不导电的物质,称为绝缘体;还有一些物质的导电能力介于导体和绝缘体之间,称为半导体。

1. 本征半导体

纯净的不含任何杂质的半导体称为本征半导体。目前最常用的半导体材料有硅(Si)、锗(Ge)。硅和锗都是四价元素,原子之间以共价键的形式结合,在没有外界因素影响时,最外层的电子被束缚在共价键内,没有自由移动的电子,所以不导电。当外界因素发生变化,如光照或温度变化,共价键中的少数价电子因受热而获得能量,摆脱原子核的束缚,从共价键中挣脱出来,成为自由电子。与此同时,失去价电子的硅(或锗)原子,在该共价键上留下了相同数量的空位,这个空位称为空穴,这种现象称为本征激发。在本征半导体中,自由电子与空穴总是成对出现,称其为自由电子—空穴对。自由电子带负电荷,空穴带正电荷。由于它们都是携带电荷的粒子,因此称为载流子。

在本征半导体中,如果自由电子和空穴相遇,则两种载流子一起消失,这个过程称为复合过程。

2. N型半导体和P型半导体

在本征半导体中,如果掺入某些微量有用元素,就形成杂质半导体,杂质半导体有P型半导体和N型半导体两种。

(1) P型(空穴型)半导体 在本征半导体硅(或锗)中掺入微量的三价元素硼,则掺入的硼原子取代了某处硅(或锗)原子的位置,硼原子有3个价电子,只能与相邻的3个硅(或锗)原子的价电子组成共价键,而相邻的第4个硅(或锗)原子的价电子就没有价电子与其“共有”,这个键因缺少一个自由电子而形成了一个空穴。这样,掺入硼杂质后,半导体中空穴数量多于自由电子,称空穴为多数载流子,简称多子;自由电子为少数载流子,简称少子。这种半导体主要靠空穴导电,所以称为空穴型半导体,简称为P型半导体。三价的硼原子接受一个价电子进入共价键后都带上一个负电荷,因此P型半导体呈电中性。

(2) N型(电子型)半导体 如果在本征硅(或锗)中掺入微量的五价元素磷,则掺入的磷原子取代了某处硅(或锗)原子的位置,磷原子有5个价电子,其中4个将分别与相邻硅(或锗)原子的价电子组成共价键,多余的一个价电子受磷原子核束缚力较弱,很容易挣脱磷原子核的束缚而成为自由电子,半导体中自由电子的数量相对较多,称为多数载流子,简称多子;空穴数量相对较少,称为少数载流子,简称少子。这种半导体主要靠自由电子导电,所以被称为电子型半导体,或称为N型半导体。五价的磷原子失去一个价电子后都带上一个正电荷,因此N型半导体呈电中性。

3. PN结的特性

(1) PN结的形成过程 当P型和N型半导体结合在一起后,两侧半导体之间载流子浓度存在着明显的差异,P区空穴多、自由电子少;N区自由电子多、空穴少。交界面两侧同类型载流子因浓度差而产生运动,这种由浓度差引起的载流子的运动称为扩散运动,随着扩散的进行,交界面留下不能移动的正负杂质离子,由此形成空间电荷区,空间电荷区将产生内电场。

内电场形成后,一方面其电场力会阻碍多数载流子的扩散运动,另一方面,其电场力将推动少数载流子运动,这种少数载流子在内电场作用下产生的运动称为漂移运动。

扩散运动和漂移运动是互相联系,又互相矛盾的。在开始形成空间电荷区时,多数载流



子的扩散运动占优势,随着扩散运动的进行,空间电荷区逐渐加宽,内电场逐步加强,多数载流子的扩散运动逐渐减弱,而少数载流子的漂移运动则逐渐增强,当漂移运动和扩散运动处于动态平衡状态时,空间电荷区不再发生变化,形成了具有一定宽度的空间电荷区,称为PN结。PN结又称为“阻挡层”或“耗尽层”。

(2) PN结的特性

1) 外加正向电压(PN结正向偏置)。在图1-2a中,P区接电源正极,N区接电源负极,称为正向偏置。此时在外电场作用下,内电场被削弱,耗尽层变窄,载流子的扩散大于漂移,多数载流子的扩散电流能顺利地通过PN结形成回路正向电流 I_F ,正向电流较大,PN结的正向电阻很小,PN结为正向导通状态。

2) 外加反向电压(PN结反向偏置)。在图1-2b中,P区接电源负极,N区接电源正极,称为反向偏置。此时在外电场的作用下,内电场增强,耗尽层变宽,载流子的扩散难以进行,造成漂移大于扩散,多数载流子受阻,两区的少数载流子在内电场作用下漂移过PN结形成反向电流 I_R 。由于在室温下,少数载流子的浓度很低,所以反向电流极小,PN结的反向电阻很大,PN结为反向截止状态。

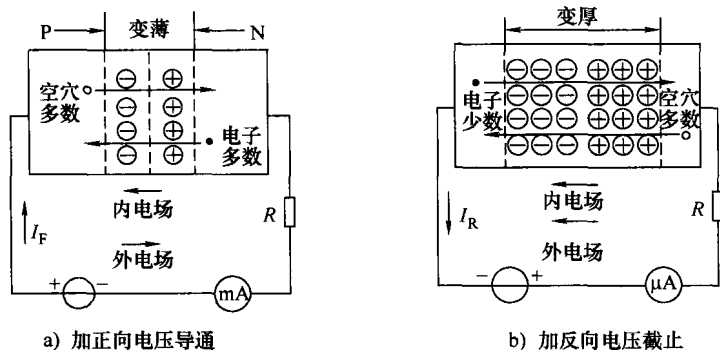


图1-2 PN结的单向导电性

1.2.2 半导体二极管

1. 二极管的结构及特性

(1) 二极管的结构和符号 从PN结的P区和N区分别引出引线,然后用塑料、玻璃或铁皮等材料做外壳封装就构成最简单的二极管。从二极管P区引出的外引线称为二极管的阳极或正极,将从二极管N区引出的外引线称为二极管的阴极或负极。二极管的结构和符号如图1-3a、b所示。

二极管有许多种类型。从工艺上分,有点接触型和面接触型;从材料上分,有硅二极管和锗二极管;从用途上分,有整流管、检波二极管、稳压二极管、光电二极管和开关二极管等。

(2) 二极管的伏安特性 流过电

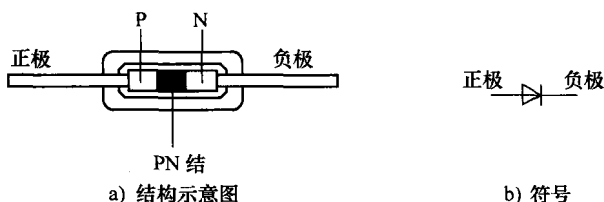


图1-3 二极管的结构和符号

子器件的电流 I 与其两端电压 U 之间关系的特性，叫伏安特性。

1) PN 结的伏安特性方程。PN 结两端的电压 U 与流过 PN 结的电流 I 之间的关系为

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

式中， I_s 称为 PN 结的反向饱和电流， U_T 称为温度的电压当量，常温下 $U_T \approx 26\text{mV}$ 。

由式(1-1)可见，当 $U=0$ 时， $I=0$ ；当 PN 结正偏，且 $U \gg U_T$ 时， I 随 U 按指数规律增大；当 PN 结反偏时，则 $I \approx -I_s$ ，其大小与外电压 U 无关。

2) 二极管的伏安特性。因为二极管的核心是 PN 结，所以二极管的伏安特性与式(1-1)基本相同。但是由于存在引线的接触电阻、半导体的体电阻和表面漏电流等因素，实际二极管特性与式(1-1)略有差异。实际二极管的伏安特性曲线如图 1-4 所示。为分析方便，通常将特性曲线分为三个部分：正向特性、反向特性和反向击穿特性。

① 正向特性。当外加正向电压小于某一数值（称为死区电压）时，二极管正向电流 I_F 很小，几乎为零，该段称为死区。死区电压的大小与二极管的材料有关，通常，硅材料二极管的死区电压约为 0.5V ，锗材料二极管的死区电压约为 0.1V 。

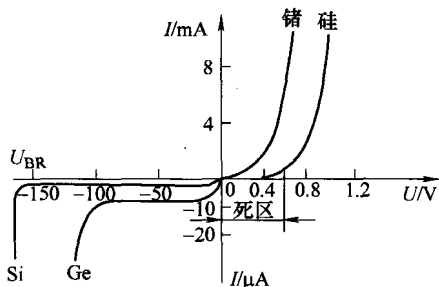


图 1-4 二极管的伏安特性曲线

当外加正向电压超过死区电压之后，随外加电压的增加正向电流按指数规律明显增大，当二极管完全导通后，正向电压基本维持不变，称为二极管正向导通压降 U_F 。一般硅管的 U_F 为 $0.6 \sim 0.7\text{V}$ ，通常取 0.7V ；锗管的 U_F 为 $0.2 \sim 0.3\text{V}$ ，通常取 0.3V 。

② 反向特性。当二极管承受反向电压时，外电场与内电场方向一致，扩散运动基本停止，只有少数载流子的漂移运动，形成极小的反向电流，称为反向饱和电流，这时二极管反向截止。但反向电流对温度的变化非常敏感，温度升高，反向电流明显增大，通常温度每升高 10°C ，其反向电流约增加一倍。

③ 反向击穿特性。当反向电压增大到某一数值时，反向电流将随反向电压的增加而急剧增大，这种现象称为二极管反向击穿。击穿时对应的电压称为反向击穿电压。

2. 二极管的主要参数

(1) 最大整流电流 I_F I_F 是指二极管长期工作时允许通过的最大正向平均电流值，用 I_F 表示。工作时，管子通过的电流不应超过这个数值，否则将导致管子过热而损坏。

(2) 最高反向工作电压 U_{RM} U_{RM} 是指允许加在二极管两端的反向电压最大值。通常 U_{RM} 为反向击穿电压的 $1/2 \sim 2/3$ ，以确保二极管安全工作。

除上述参数外，二极管的参数还有结电容、正向压降等，实际应用时，可查阅半导体器件手册。

3. 特殊二极管

(1) 稳压二极管 稳压二极管是用特殊工艺制造的面接触型硅二极管，它与电阻配合，在电路中能起到稳压作用。

1) 稳压管的伏安特性。稳压二极管的伏安特性曲线及符号如图 1-5 所示。从特性曲线



可以看到,稳压管正向偏压时,其特性与普通二极管相似;但反向击穿时,特性曲线很陡,稳压管通常工作在反向击穿区,反向击穿后,反向电流在很大范围内变化时,稳压管两端电压变化很小,因此具有稳压性能。

2) 稳压管的主要参数

① 稳定电压 U_{DZ} : 当稳压管通过规定的测试电流时管子两端的电压。由于制造工艺的原因,同一型号的管子稳定电压有一定的分散性。目前常见的稳压管稳压值分布在几伏至几百伏。

② 稳定电流 I_{DZ} : 稳压管正常工作时的参考电流值。稳压管的工作电流越大,稳压效果越好,实际应用时只要工作电流不超过最大工作电流 I_{DZmax} ,均可正常工作。

③ 动态电阻 R_{DZ} : 稳压管端电压的变化量 ΔU_{DZ} 与对应电流变化量 ΔI_{DZ} 之比,为动态电阻:

$$R_{DZ} = \frac{\Delta U_{DZ}}{\Delta I_{DZ}}$$

动态电阻越小,稳压效果越好。

(2) 发光二极管 发光二极管是一种将电能直接转换成光能的固体器件,简称 LED(Light Emitting Diode),符号如图 1-6 所示。其基本结构是一个 PN 结,采用砷化镓、磷化镓等化合物半导体材料制造而成,它的伏安特性与普通二极管的伏安特性相似,但由于材料特性,其正向导通电压较大,为 1~2V,当管子正向导通时会发光。

发光二极管由于工作电压低、工作电流小,且体积小、可靠性高、耗电低、寿命长,所以被广泛用于信号指示等电路中。

(3) 光敏二极管 光敏二极管又叫光电二极管,它是一种将光信号转换为电信号的器件。光敏二极管的基本结构也是一个 PN 结,但管壳上有一个窗口,使光线可以照射到 PN 结上。

光敏二极管工作在反向偏置状态下。无光照时,与普通二极管一样,反向电流很小,被称为暗电流。当有光照时,其反向电流随光照强度的增加而增加,称其为光电流。图 1-7 是光敏二极管的符号,图 1-8 是它的伏安特性曲线。

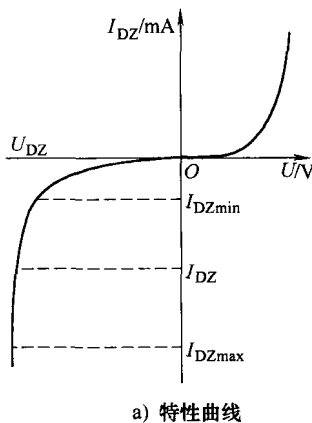


图 1-5 稳压二极管的伏安特性曲线及符号



图 1-6 发光二极管符号



图 1-7 光敏二极管符号

1.2.3 半导体三极管

半导体三极管,又称晶体三极管,简称晶体管。由于参与管子导电的有空穴和自由电子两种载流子,故又称为双极型晶体管。

1. 晶体管的结构

晶体管的内部结构是两个 PN 结，这两个 PN 结是由三个杂质半导体区域构成的。根据三个杂质半导体区域排列的方式不同，可分为 NPN 型和 PNP 型两种类型，其结构及符号分别如图 1-9 和图 1-10 所示，其中位于中间的一层半导体区称为基区，基区很薄，基区的一侧半导体区专门用来发射载流子，称为发射区；另一侧专门用来收集载流子，称为集电区。发射区与基区之间的 PN 结被称为发射结，集电区与基区之间的 PN 结被称为集电结。

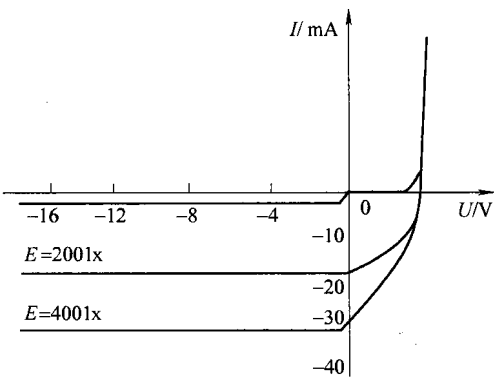


图 1-8 光敏二极管的伏安特性曲线

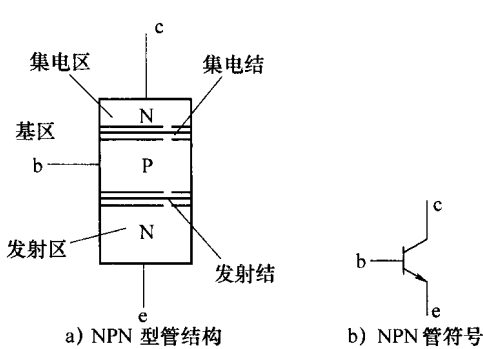


图 1-9 NPN 型晶体管结构及符号

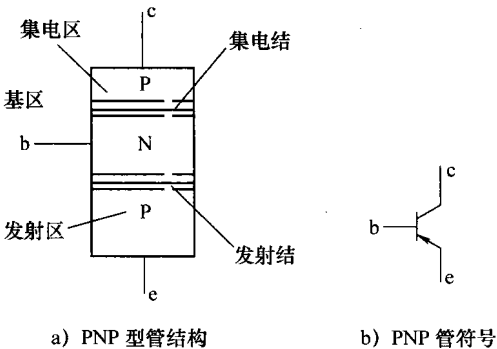


图 1-10 PNP 型晶体管结构及符号

从三个区引出三个电极：由基区引出的电极称为基极，用字母 b(B) 表示；由发射区引出的电极称为发射极，用字母 e(E) 表示；由集电区引出的电极称为集电极，用字母 c(C) 表示。晶体管具有放大作用的内部条件为：发射区掺杂浓度要高，基区做得很薄且掺杂浓度低，集电结的面积较宽。

2. 晶体管的电流分配和放大作用

晶体管具有放大作用的外部条件是：发射结正向偏置，集电结反向偏置。下面以 NPN 型晶体管为例加以讨论，所得结论对于 PNP 晶体管同样适用。

(1) 晶体管内部载流子的运动规律

1) 发射区向基区发射电子。由图 1-11 可知，电源 U_{BB} 经过电阻 R_B 加在发射结上，发射结正偏，发射区的多数载流子——自由电子不断地越过发射结而进入基区，形成发射极电流 I_E 。同时，基区多数载流子也向发射区扩散，但由于基区很薄，可以不考虑这个电流，因此，可以认为晶体管发射结电流主要是电子流。

2) 载流子在基区的扩散与复合。电子进入基区后，靠近发射结附近较密集，形成电子浓度差，在浓度差的作用

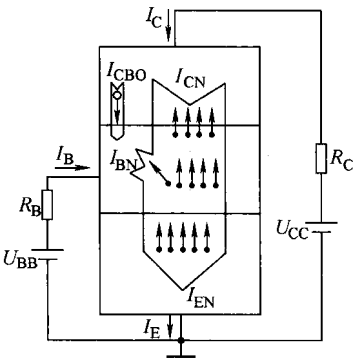


图 1-11 晶体管内部载流子运动规律



下,促使电子流向集电结扩散。在扩散过程中,有很小一部分电子与基区的空穴复合,形成复合电子流 I_{BN} 。

3) 集电区收集电子。由于集电结外加反向电压很大,这个反向电压产生的电场力将阻止集电区电子向基区扩散,同时将扩散到集电结附近的电子拉入集电区而形成集电结主电流 I_{CN} 。另外,集电区的少数载流子——空穴也会产生漂移运动,流向基区,形成反向饱和电流 I_{CBO} ,其数值很小,但对温度却非常敏感。

(2) 晶体管的电流分配关系 由于晶体管基区的杂质浓度很低,且厚度很薄,这就减小了电子和空穴复合的机会,所以从发射区注入到基区的电子只有很小一部分在基区复合掉,绝大部分到达集电区。即构成发射极电流 I_E 的两部分中, I_{BN} 很小, I_{CN} 较大,二者的比值用 $\bar{\beta}$ 表示,则有

$$\bar{\beta} = \frac{I_{CN}}{I_{BN}} \quad (1-2)$$

式中, $\bar{\beta}$ 表示晶体管的电流放大能力,称为直流电流放大系数。一旦管子制成后,这种比例关系也就确定了。

对照图 1-11,并结合式(1-2),各级电流满足下列分配关系:

$$\begin{aligned} I_B &= I_{BN} - I_{CBO} \\ I_C &= I_{CN} + I_{CBO} = \bar{\beta} I_{BN} + I_{CBO} = \bar{\beta} (I_B + I_{CBO}) + I_{CBO} \\ &= \bar{\beta} I_B + (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} = \bar{\beta} I_B + I_{CEO} \\ I_{CEO} &= (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} \\ I_E &= I_{CN} + I_{BN} = (I_C - I_{CBO}) + (I_B + I_{CBO}) = I_C + I_B \end{aligned} \quad (1-3)$$

(3) 晶体管的电流放大作用 在图 1-12 所示的放大电路中,若在基极输入端接入一个小的输入信号电压 ΔU_1 ,则 $u_1 = U_{BB} + \Delta U_1$,由于发射结两端电压的变化引起了基极电流的变化,集电极电流也会发生相应的变化,它们的变化量分别用 ΔI_B 和 ΔI_C 表示。 ΔI_C 和 ΔI_B 的比值称为共发射极交流电流放大系数,用 β 表示。

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

β 是表征晶体管电流放大能力的参数,一般为几十到几百,所以 $\Delta I_C \gg \Delta I_B$ 。这种以较小的输入电流变化控制较大的输出电流变化的作用,是晶体管的电流放大作用。

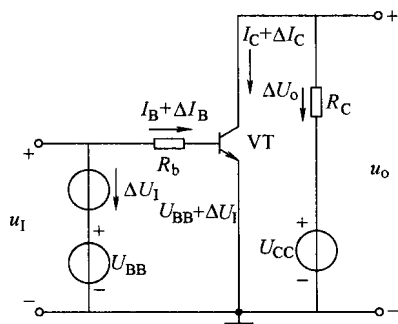


图 1-12 共发射极放大电路

3. 晶体管的特性曲线

晶体管各电极间电压与电流之间的关系曲线,称为晶体管的特性曲线。它们分为输入特性和输出特性曲线,下面以 NPN 型硅管为例,讨论共发射极电路的特性曲线。

(1) 输入特性曲线 输入特性是指当集电极与发射极之间电压 U_{CE} 为常数时,基极电流 I_B 与基极、发射极之间电压 U_{BE} 的关系,即

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

图 1-13 给出了某晶体管的输入特性曲线。下面分两种情况进行讨论。

1) 当 $U_{CE} = 0$ 时的输入特性(图中曲线①)。当 $U_{CE} = 0$ 时,相当于集电极和发射极之间

短路，晶体管等效成两个二极管并联，其特性类似于二极管的正向特性，也是非线性的，也有一段死区电压。

2) 当 $U_{CE} \geq 1V$ 时的输入特性(图中曲线②)。当 $U_{CE} > 0V$ 时，曲线向右平移，在 U_{CE} 从 $0V$ 增加到 $1V$ 区间，曲线右移明显；当 U_{CE} 大于 $1V$ 后，随着 U_{CE} 的增加，曲线右移很少(基本不变)，所以通常只画出 $U_{CE} \geq 1V$ 时对应的一条曲线。

(2) 输出特性曲线 输出特性曲线是指当晶体管基极电流 I_B 为常数时，集电极电流 I_C 与集电极、发射极之间电压 U_{CE} 的关系，即

$$I_C = f(U_{CE}) \mid I_B = \text{常数}$$

晶体管的输出特性曲线如图 1-14 所示，它是一个曲线簇，当 I_B 取值不同时，就有不同的输出。根据晶体管的工作状态不同，输出特性曲线分为三个区域：即截止区、放大区和饱和区。

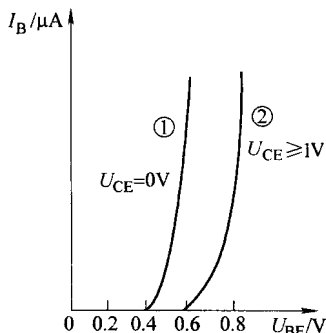


图 1-13 晶体管的输入特性曲线

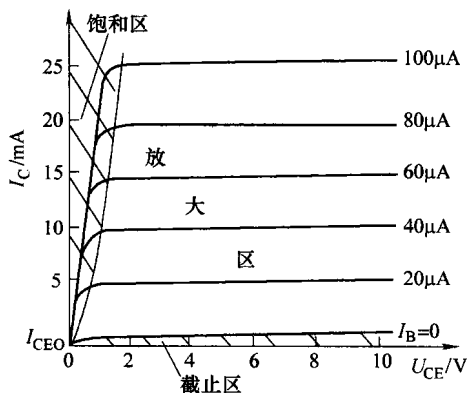


图 1-14 晶体管的输出特性曲线

1) 截止区：一般上把 $I_B = 0$ 对应的特性曲线以下的区域称为截止区。这时， $I_C = I_{CEO} \approx 0$ 。集电极到发射极只有微小的电流，称其为穿透电流。此时 U_{BE} 低于死区电压，发射结和集电结都处于反向偏置，晶体管呈截止状态。

2) 放大区：曲线平坦的区域为放大区。在该区域内 I_C 不随 U_{CE} 变化，呈现恒流特性，但 I_C 大小受 I_B 的控制，即 $I_C = \beta I_B$ 。此时发射结正向偏置，集电结反向偏置，晶体管呈放大状态。

3) 饱和区：输出特性曲线上升部分称为饱和区。此时， $U_{CE} \leq 1V$ ，晶体管饱和时的 U_{CE} 的值称为饱和压降，用 U_{CES} 表示。因为 U_{CES} 值很小，晶体管的 C、E 两极之间接近短路，所以此时发射结和集电结都正偏，晶体管呈饱和状态。

4. 晶体管的主要参数

晶体管的参数是用来表示晶体管的性能和极限使用条件的物理量，是正确选用和使用晶体管的依据。晶体管的参数很多，这里只介绍几个主要参数。

(1) 电流放大系数 它是表征晶体管电流放大能力的参数，包括交流电流放大系数 β 和直流放大系数 $\bar{\beta}$ ，前面已作过介绍，不再重复。 β 和 $\bar{\beta}$ 的含义不同，但通常在输出特性线性较好的情况下，两个数值差别很小，一般不作严格区分。

(2) 极间反向电流



1) 集电极—基极反向饱和电流 I_{CBO} 。 I_{CBO} 是当晶体管发射极开路而集电结处于反向偏置时的集电极电流值。它是由于集电结处于反向偏置, 集电区和基区中少数载流子的漂移所形成的电流, I_{CBO} 越小越好。

2) 集电极—发射极反向饱和电流 I_{CEO} 。 I_{CEO} 是当晶体管基极开路, 且 C、E 间加上一定电压时的集电极电流, 它是 I_{CBO} 的 $(1+\beta)$ 倍。由于 I_{CEO} 比 I_{CBO} 大得多, 容易测量, 所以通常把 I_{CEO} 作为判断管子质量的重要依据。

(3) 极限参数

1) 集电极最大允许电流 I_{CM} 。 I_{CM} 是指晶体管集电极允许的最大电流, 在使用中, 若 I_{C} 超过一定数值时, β 值下降, 将 β 下降到正常值的 $2/3$ 时所对应的 I_{C} 值, 记为 I_{CM} , 当 $I_{\text{C}} > I_{\text{CM}}$ 时, 管子性能将显著变差, 放大能力降低。

2) 集电极—发射极间反向击穿电压 $U_{(\text{BR})\text{CEO}}$ 。 $U_{(\text{BR})\text{CEO}}$ 是基极开路时, 集电极与发射极之间最大允许电压。使用时不能超过此值, 否则将使管子性能变差, 甚至损坏。

3) 集电极最大允许耗散功率 P_{CM} 。 P_{CM} 表示集电结上允许损耗功率的最大值。当集电极电流流过集电极时, 产生的功耗使结温升高, 结温太高时会使晶体管烧毁, 因此规定 $P_{\text{C}} < P_{\text{CM}}$ 。因为集电极损耗的功率 $P_{\text{CM}} = I_{\text{C}} U_{\text{CE}}$, 所以可以在输出特性曲线上画出管子的允许功率损耗线, 如图 1-15 所示, P_{CM} 线内便为晶体管的安全工作区。 P_{CM} 的大小与管子的散热方式及环境温度有关。

5. 复合管

将两个或两个以上的晶体管按一定连接方式组成的一个三端子器件, 叫复合管。连接方法如图 1-16 所示, 在形成复合管时要注意以下几点:

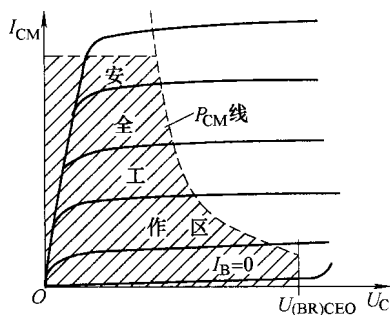


图 1-15 晶体管的安全工作区

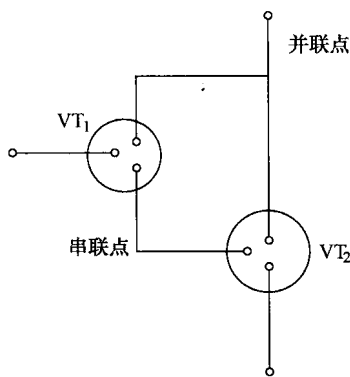


图 1-16 复合管的连接

1) 要保证复合管中的每个晶体管都工作在放大状态, 即复合管中的每个晶体管发射结正偏, 集电结反偏。

2) 在串联点处电流连续; 并联点处电流求和。

3) 复合管的类型由晶体管 VT_1 的类型决定, 图 1-17 是常见的四种复合管的连接图, 其中图 1-17a、b 是由两只相同类型的晶体管组成的复合管, 图 1-17c、d 由不同类型的晶体管组成的复合管。

复合管的电流放大系数近似为组成复合管的各晶体管 β 的乘积, 以图 1-17a 为例:

$$i_b = i_{b1}$$

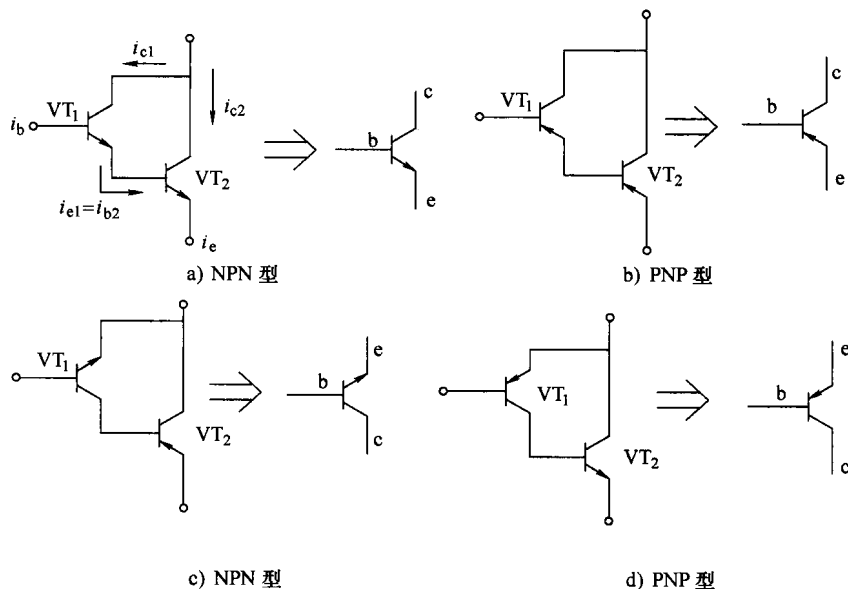


图 1-17 常见的四种复合管

$$\begin{aligned}
 i_e &= i_{e2} \\
 i_c &= i_{c1} + i_{c2} = \beta_1 i_{b1} + \beta_2 i_{b2} \\
 &= \beta_1 i_{b1} + (1 + \beta_1) i_{b1} \cdot \beta_2 \\
 &= i_{b1} [\beta_1 + (1 + \beta_1) \beta_2] \\
 \beta &= \frac{i_c}{i_b} = \frac{i_c}{i_{b1}} = \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \beta_2 \approx \beta_1 \beta_2
 \end{aligned} \tag{1-4}$$

1.2.4 场效应晶体管

场效应晶体管是另一种半导体器件，它是一种电压控制型器件，通过改变电场的强弱来控制半导体材料的导电能力。它的输入电阻非常高，一般可达 $10^7 \sim 10^{15} \Omega$ 。此外，它还具有热稳定性好、噪声低、抗辐射能力强等特点，并且制造工艺简单、便于大规模集成等，因此在电子电路中得到了广泛的应用。

场效应晶体管按结构不同，分为结型场效应晶体管（简称 JFET）和绝缘栅型场效应晶体管（简称 IGFET）两大类。结型场效应晶体管又分为 N 沟道和 P 沟道两种；绝缘栅型场效应晶体管也有 N 沟道和 P 沟道两种类型，每种类型又都可分为增强型和耗尽型。

1. 结型场效应晶体管

(1) 结型场效应晶体管的结构及符号 图 1-18a 给出了 N 沟道结型场效应晶体管的结构（平面）示意图。它是在一块 N 型半导体材料的两侧各制成一个高掺杂的 P 型区，形成两个 PN 结，即耗尽层。两个 P 型区连接在一起，引出一个电极为栅极 G；N 型区的两端各引出一个电极，为漏极 D 和源极 S。与晶体管不同的是，结型场效应晶体管的源极和漏极是完全对称的，因此漏极和源极可以互换。两个 PN 结之间的 N 区是载流子流过的通道，称为导电沟道。所以称为 N 沟道结型场效应晶体管，符号如图 1-18b 所示。

如果在一块 P 型半导体材料的二侧各制成一个高掺杂的 N 型区，则可构成 P 沟道结型



场效应晶体管，其符号如图 1-18c 所示。

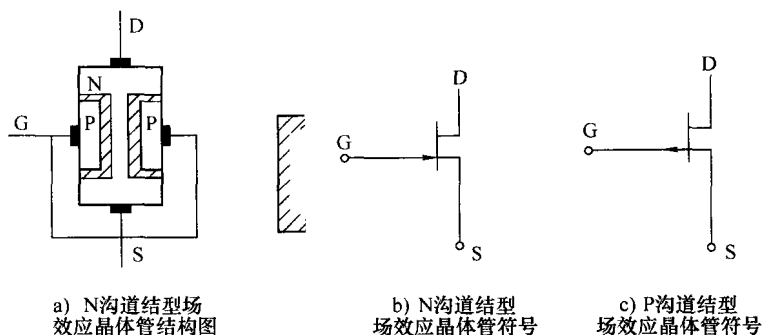


图 1-18 场效应晶体管结构图及符号

(2) 工作原理 下面以 N 沟道结型场效应晶体管为例，分析其工作原理。

管子正常工作时，栅极和源极之间所加电压称为栅源电压，简称栅偏压，用 U_{GS} 表示，该电压方向应使 PN 结反偏，所以栅极电流很小，因此场效应晶体管具有很高的输入电阻。源极和漏极之间所加电压，称为漏源电压，用 U_{DS} 表示，其方向应使漏极为正，源极为负。下面分析当 $U_{DS} \approx 0$ 时， U_{GS} 的变化对导电沟道的影响。

1) 当 $U_{GS} = 0$ 时，PN 结的耗尽层如图 1-19a 中阴影部分所示。耗尽层只占 N 型半导体体积的很小一部分，导电沟道比较宽，沟道电阻较小。

2) 当栅极和源极之间加上一个可变直流负电源 U_{GG} 时，此时栅源电压 U_{GS} 为负值，两个 PN 结都处于反向偏置，耗尽层加宽，导电沟道变窄，沟道电阻加大，如图 1-19b 所示。而且栅源电压 U_{GS} 愈负，导电沟道愈窄，沟道电阻愈大。

3) 当栅源电压 U_{GS} 达到某一负值时，两边的耗尽层近于碰上，仿佛沟道被夹断，沟道电阻趋于无穷大，如图 1-19c 所示。此时的栅源电压称为栅源截止电压（或夹断电压），用 $U_{GS(off)}$ 表示。

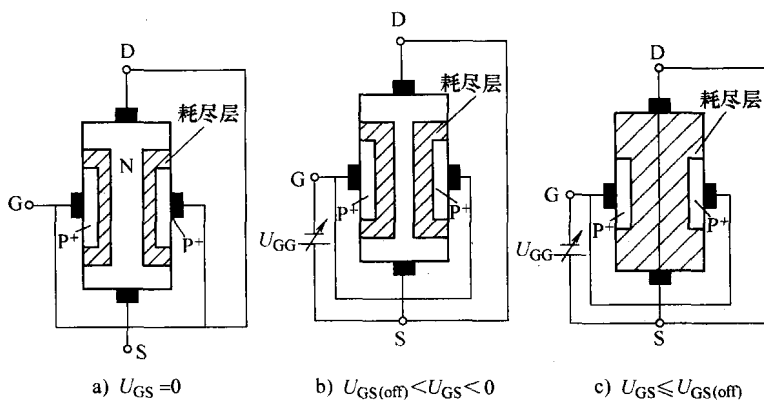


图 1-19 $U_{DS} \approx 0$ 时， U_{GS} 对导电沟道的影响

由上述分析可知，改变栅源电压 U_{GS} 的大小，就能改变导电沟道的宽窄，进而改变沟道电阻的大小。如果在漏极和源极之间接入一个正向电压 U_{DS} ，则由源极流向漏极的电流 I_D 将受电压 U_{GS} 的控制，所以结型场效应晶体管是一种电压控制型元件，利用外加电压 U_{GS} 来改变耗尽层的宽度，进而控制漏极电流 I_D 。