

电子技术

基础

DIANZI JISHU
JICHU

陈学昌 袁 燕◎主编



电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电子技术基础 / 陈学昌, 袁燕主编. —成都: 电子科技大学出版社, 2016.7
ISBN 978-7-5647-3759-7

I. ①电… II. ①陈… ②袁… III. ①电子技术
IV. ①TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 154569 号

电子技术基础

陈学昌 袁 燕 主编

出 版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 610051)

策划编辑: 罗 雅

责任编辑: 罗 雅

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 四川永先数码印刷有限公司

成品尺寸: 185mm×260mm 印张 11 字数 280 千字

版 次: 2016 年 7 月第 1 版

印 次: 2016 年 7 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5647-3759-7

定 价: 35.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83201495。
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

前 言

本书一改以往教材编写模式，在编写的过程中按照“保证基础知识，突出基本概念，注重技能训练，强调理论联系实际，加强实践性教学环节”的原则，力求避免复杂的数学推导和计算。

本书有如下特点。

(1) 在内容的安排上，为使学生用较短的时间、较快地掌握这门课程的基本原理和主要内容，本书在编写过程中力求便于学生自学，尽力做到精选内容，叙述简明，突出基本原理和方法，多举典型例题，以帮助学生巩固和加深对基本内容的理解和掌握，同时还能培养和训练学生分析问题和解决问题的能力。

(2) 在知识的讲解上，力求用简练的语言循序渐进，深入浅出地让学生理解并掌握基本概念，熟悉各种典型的单元电路。对电子器件着重介绍其外部特性和参数，重点放在使用方法和实际应用上；对典型电路进行分析时，不做过于繁杂的理论推导；对集成电路内部不做重点仔细分析，而着重其外部特性和逻辑功能以及它们的应用。

(3) 在实践性教学方面，选择一些基本特色实用电路作为例子介绍，以开拓学生的电路视野；安排一些具体的实例作为读图练习的内容，培养学生理论联系实际、电子电路读图的能力，为学生的学习和知识拓展提供了方便。

由于时间仓促，加之水平有限，书中错漏和不妥之处在所难免，敬请读者予以批评指正，以便今后不断改进。

编 者

目 录

第 1 章 半导体器件	(1)
1.1 半导体的基本知识与导电特性	(1)
1.2 半导体二极管	(3)
1.3 稳压管	(6)
1.4 晶体管	(7)
第 2 章 基本放大电路	(14)
2.1 发射极交流电压放大电路	(14)
2.2 共集电极放大电路	(24)
2.3 放大电路的静态分析	(27)
2.4 放大电路的动态分析	(29)
2.5 差动放大电路	(33)
第 3 章 集成运算放大器	(41)
3.1 集成运算放大器简介	(41)
3.2 集成运放中的负反馈	(45)
3.3 负反馈对运放电路性能的影响	(49)
3.4 运算放大器的输入方式	(50)
3.5 集成运算放大器的线性应用	(53)
第 4 章 功率放大电路	(64)
4.1 对功率放大电路的基本要求	(64)
4.2 互补对称式功率放大电路(OCL)	(65)
4.3 功率放大电路的输出功率和效率	(67)
4.4 集成功率放大器	(68)
第 5 章 负反馈放大电路	(71)
5.1 反馈的基本概念	(71)
5.2 反馈的类型及判别	(72)
5.3 负反馈对放大电路性能的影响	(75)

第 6 章 直流电路	(79)
6.1 电路	(79)
6.2 电路基本物理量	(80)
6.3 电路的基本定律	(85)
6.4 电路的几种状态和电气设备额定值	(89)
6.5 实际电源及其等效变换	(91)
6.6 电路中电位的分析	(96)
6.7 线性网络的分析方法	(98)
第 7 章 数字电路基础	(110)
7.1 概述	(110)
7.2 数制和码制	(111)
7.3 逻辑函数	(115)
第 8 章 组合逻辑电路	(121)
8.1 数字电路简介	(121)
8.2 组合逻辑电路分析与综合	(123)
8.3 常用组合逻辑电路	(125)
第 9 章 触发器	(138)
9.1 基本 RS 触发器	(138)
9.2 主从触发器	(140)
9.3 边沿触发器	(143)
9.4 各种类型触发器之间的相互转换	(146)
第 10 章 脉冲波形的产生与整形	(148)
10.1 多谐振荡器	(148)
10.2 施密特触发器	(151)
10.3 单稳态触发器	(153)
10.4 555 定时器及其应用	(156)
第 11 章 数模与模数转换电路	(160)
11.1 D/A 转换器	(160)
11.2 A/D 转换电路	(163)
参考文献	(168)

第 1 章 半导体器件

1.1 半导体的基本知识与导电特性

半导体是指导电能力介于导体和绝缘体之间的物质。如硅、锗、硒、砷化镓和一些金属氧化物及硫化物等。

半导体的导电能力在不同情况下有很大差别。例如半导体钴、锰、镍等的氧化物对温度反应特别灵敏，环境温度增高时，它的导电能力显著增强。利用其这种特性可做成各种热敏电阻；半导体镉、铅等的氧化物和硒化物受到光照时其导电能力显著增强，无光照时它完全不导电，利用其这种特性可做成各种光敏电阻。

更重要的是同一块半导体材料，在不同情况下它的导电能力有非常大的差别。例如在纯净的半导体硅中掺入百万分之一的硼后，它的电阻率从 $2 \times 10^3 \Omega \cdot \text{m}$ 减小到 $4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ 左右，其导电能力提高 50 多万倍。利用半导体的这种特性做成了各种不同用途的半导体器件，如二极管、三极管等。

杂质为什么对半导体会产生这么大的作用呢？这要从半导体内部去研究。常用的半导体材料是硅和锗，它们都是 4 价元素。不含杂质的半导体叫作本征半导体。在本征半导体的晶体结构中，每一个原子与相邻的 4 个原子结合，每一个原子的一个价电子与另一个原子的一个价电子组成一个电子对。这对价电子是每两个相邻原子共有的，它们把相邻的原子结合在一起构成共价键的结构。在热力学零度 ($T = -273^\circ\text{C}$) 时，由于共价键的束缚，价电子无法摆脱这种束缚，因此本征半导体中没有自由电子，此时半导体相当于绝缘体。但在高于热力学零度的温度下，由于共价键中的电子获得一定能量后挣脱原子核的束缚（即脱离共价键的束缚）成为自由电子，同时在原来共价键的位置上留下一个空位称为空穴。空穴由于失掉一个电子而带正电。在本征半导体中，有一个自由电子就必然有一个空穴。在一般情况下原子是呈中性的。当电子脱离共价键的束缚成为自由电子后，原子的中性受到破坏，而带正电。

在外加电压的作用下，自由电子将跑向正极，而空穴将跑向负极，于是在电路中就形成了电流，如图 1-1 所示。由图可见，电路中的电流由两部分组成，即自由电子的移动和空穴移动（实质是有空穴的原子吸引相邻原子中的价电子，填补这个空穴，同时在失去一个价电子的相邻原子的共价键中出现另一个空穴，它又吸引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，如此继续下去，就好像空穴在运动）。因此，在外加电压的作用下，半导体中一部分电流是自由电子定向移动所形成的电子电流，另一部分电

流是仍被原子核束缚的价电子（不是自由电子）递补空穴所形成的空穴电流。前者称为电子导电，后者称为空穴导电。这两种导电是同时存在的。这是半导体导电方式和金属导电方式的本质差别。

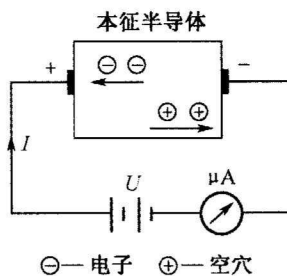


图 1-1 半导体导电

自由电子和空穴都称为载流子。本征半导体中的自由电子和空穴总是成对出现，同时又不断复合。在一定温度下达到动态平衡。当温度升高载流子数目增多，导电性能加强。

1. P 型半导体和 N 型半导体

本征半导体虽然有自由电子和空穴两种载流子，但由于数量很小，导电能力很低。如果在本征半导体硅中，掺入少量 5 价元素，如磷，由于磷原子同相邻 4 个硅原子结成共价键外，还多余一个电子，这个电子不受共价键束缚，很容易变成自由电子。这样，磷原子掺入硅晶体的结果，在常温硅晶体中就会有大量自由电子增加。自由电子导电成为这种半导体的主要导电方式，故称电子型半导体，简称 N 型半导体。

在 N 型半导体中，除掺入杂质产生自由电子外，还存在着本征激发所产生的电子—空穴对。因此，在 N 型半导体中，参与导电的除数量很多的电子外，还有少量空穴。为便于区别，在 N 型半导体中，把自由电子叫作多数载流子，而空穴叫作少数载流子。

另一类情况，若在硅晶体中掺入少量 3 价元素，如硼，由于一个 3 价的硼原子同相邻 4 个硅原子结成共价键，而其中一个键上缺少一个电子，周围共价键上的电子受到热或其他的激发获得能量移到这里来，于是形成一个空穴，每一个硼原子都能提供一个空穴，于是在半导体中就形成了大量空穴。这种半导体主要靠空穴导电，所以叫空穴型半导体，简称 P 型半导体。在 P 型半导体中也有本征激发而产生的电子—空穴对。所以在 P 型半导体中，空穴是多数载流子，而电子是少数载流子。

2. PN 结及其单向导电性

通常是在一块 N 型（或 P 型）半导体局部再掺入浓度较大的 3 价（或 5 价）杂质，使其变为 P 型（或 N 型）半导体。在 P 型半导体和 N 型半导体的交界面就形成一个特殊的薄层，称为 PN 结。

若给 PN 结加正向电压（或称正向偏置），即电源正极接 P 区，负极接 N 区，如图 1-2（a）所示。P 区的多数载流子空穴和 N 区的多数载流子自由电子在电场作用下通过 PN 结进入对方，两者形成较大的正向电流。此时 PN 结呈现低电阻，处于导通状态。

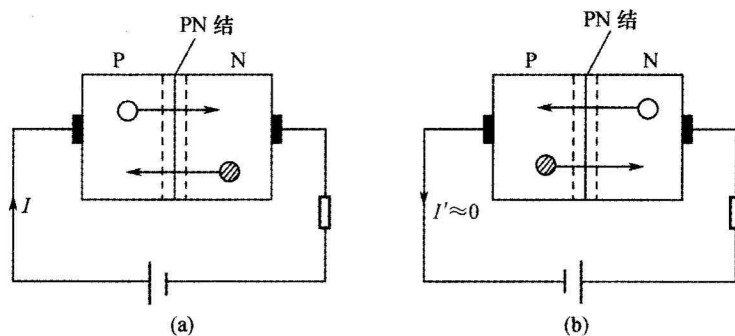


图 1-2 PN 结单向导电

若给 PN 结加反向电压（或称反向偏置），即电源正极接 N 区，负极接 P 区，如图 1-2 (b) 所示。P 区和 N 区的多数载流子受阻难于通过 PN 结。但 P 区的少数载流子自由电子和 N 区的少数载流子空穴在电场作用下却能通过 PN 结进入对方，形成反向电流。由于少数载流子数量很少，因此反向电流极小。此时 PN 结呈高电阻，处于截止状态。这就是 PN 结的单向导电性，PN 结是各种半导体器件的共同基础。

1.2 半导体二极管

1.2.1 基本结构

半导体二极管的结构十分简单，它是用一个 PN 结做成管心，在 P 型区和 N 型区两侧接上两根电极引线，再用金属或塑料管壳封装而成的。按其结构形式半导体二极管可分为点接触型和面接触型两大类。

二极管的外形如图 1-3 (a) 所示，二极管的结构如图 1-3 (b) 和 (c) 所示。前者为点接触型，PN 结面积很小，因而通过的电流小，但其高频性能好，多用于高频和小功率电路。后者为面接触型，PN 结面积较大，但其工作频率较低，一般用于整流电路。二极管的图形符号见图 1-3 (d)。

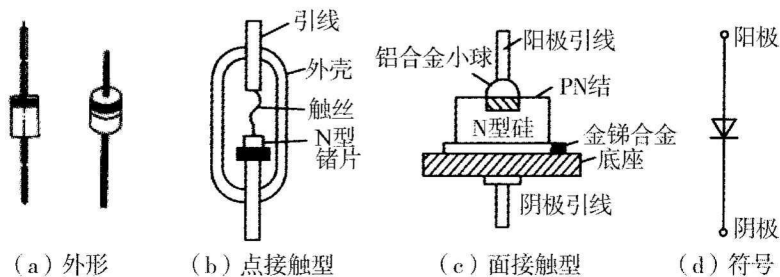


图 1-3 二极管结构及符号

1.2.2 伏安特性

半导体二极管本质上是一个 PN 结，因此，它具有单向导电性，这一单向导电性可用

伏安特性曲线表达出来。图 1-4 为二极管的伏安特性曲线，由图可见，当外加正向电压很低时，外电场还不能克服 PN 结内电场对多数载流子扩散运动的阻力，故正向电流很小，几乎为零。当正向电压超过一定数值时，内电场被大大削弱，电流增长很快。这个数值的正向电压称为死区电压，其大小与材料和环境温度有关。硅管的死区电压约为 0.5V，锗管约为 0.1V。

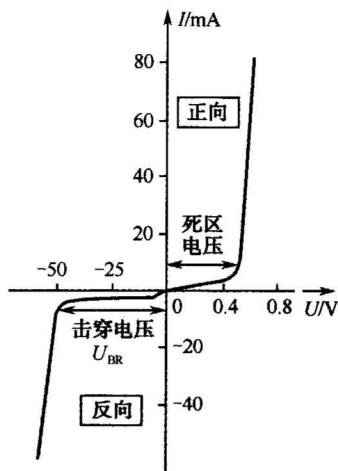


图 1-4 二极管的伏安特性曲线

由图 1-4 还可以看出，在正向特性区，二极管一旦导通，它两端的电压近似为一常数。对硅管，此值为 0.6~0.7V；对锗管，为 0.2~0.3V。此电压即为二极管正向工作时的管压降。在反向特性区，由于少数载流子的漂移运动，形成很小的反向电流，此反向电流有两个特点，一是它随温度的升高增长很快；二是在反向电压不超过某一范围时，反向电流的大小基本不变，而与反向电压的大小无关，故通常称它为反向饱和电流。当反向电压增加到某一值时，反向电流将突然增大，二极管的单向导电性被破坏，这种现象称为击穿，这一电压称为二极管的反向击穿电压 U_{BR} 。二极管被击穿后，一般不能恢复原来的性能，便失效了。二极管发生击穿的原因是外加强电场把原子最外层的价电子拉出来，使载流子数目增多，而处于强电场中的载流子又因获得强电场所供给的能量而加速，将其他电子撞击出来，两者形成连锁反应，反向电流愈来愈大，最后使得二极管反向击穿。

1.2.3 主要参数

为了正确使用二极管，除了理解其伏安特性之外，还要掌握其相应的参数。下面只介绍二极管的几个常用的参数。

1. 最大整流电流 I_{FM}

最大整流电流 I_{FM} 是指二极管长时间正向导通时，允许流过的最大正向平均电流。在使用时不能超过此值，否则将因二极管过热而损坏。

2. 反向峰值电压 U_{RM}

反向峰值电压 U_{RM} 是指二极管反向截止时允许外加的最高反向工作电压， U_{RM} 的数值大约等于二极管的反向击穿电压 U_{BR} 的一半，以确保管子安全工作。

3. 反向峰值电流 I_{RM}

反向峰值电流 I_{RM} 是指在常温下二极管加反向峰值电压 U_{RM} 时, 流经管子的电流。它说明了二极管质量的好坏, 反向电流大说明它的单向导电性差, 而且受温度影响大。硅管的反向电流较小, 一般在几个微安以下。锗管较大, 一般为硅管的几十到几百倍。

1.2.4 应用举例

由于半导体二极管具有单向导电性, 因而得到了广泛应用。在电路中, 常用来作为整流、检波、钳位、隔离、保护、开关等元件使用。

【例1-1】二极管电路如图1-5(a)和(b)所示, 试分析二极管的工作状态和它们所起的作用。设二极管为理想二极管。

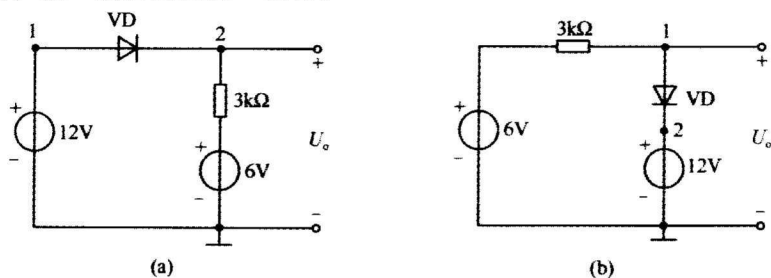


图1-5 例1-1的图

解: (1) 在图1-5(a)所示电路中, 二极管阳极电位为 $+12V$, 阴极通过电阻接在 $+6V$ 电源上, 所以二极管阳极电位高于阴极电位, 是正偏, 二极管处于导通状态。因为是理想二极管, 二极管两端的电压降为零, 所以点2的电位与点1的电位 ($+12V$) 相等, 即点2的电位被钳在点1的电位上, 这就是钳位作用。

(2) 在图1-5(b)所示电路中, 二极管阳极通过电阻接 $+6V$ 电源, 阴极电位为 $+12V$, 所以二极管阳极电位低于阴极电位, 是反偏, 二极管处于截止状态。因为是理想二极管, 管两端之间相当于断路, 即点1和点2被二极管隔离, 这就是隔离作用。

总之, 二极管阳极和阴极两边连接着两个点 (两个电路), 当二极管导通时, 两边电路被连在一起, 相关两点的电位相等 (钳位); 当二极管截止时, 两边电路被断开 (隔离), 相关两点电位不相等, 视具体电路而定。

【例1-2】在图1-6所示电路中, 试分析二极管 VD_1 和 VD_2 的工作状态, 并求输出电压之值。设二极管为理想二极管。

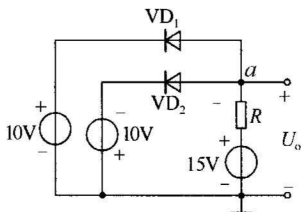


图1-6 例1-2图

解: (1) 本题有个特殊之处: 二极管 VD_1 和 VD_2 的阳极接在一起 (共阳极), 电位相同, 通过电阻 R 接在 $+15V$ 电源的高电位上; 而 VD_1 和 VD_2 的阴极电位分别为 $+10V$ 和 $-10V$ 。表面上看, VD_1 和 VD_2 均正偏, 都有导通的可能。实际上是如此吗?

在这种情况下,常采用以下分析方法:哪只二极管的阴极电位低(即PN结上外加电场强),哪只二极管就优先导通。

在图1-6中,VD₂阴极电位低(-10V),所以VD₂优先导通。VD₂导通后有钳位作用,它将a点电位钳在-10V的数值上,于是立即使VD₁反偏,截止,隔离了+10V电源。

(2) 因为a点电位是-10V,所以 $U_o = -10V$ 。

1.3 稳压管

稳压管是一种特殊工艺制成的面接触型硅二极管。稳压管的伏安特性和普通二极管的伏安特性相似,其差异是稳压二极管的反向特性曲线比较陡,如图1-7(a)所示。其符号如图1-7(b)所示。

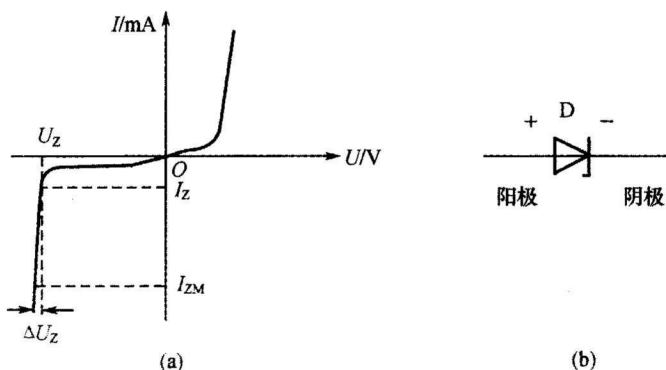


图1-7 稳压管的伏特性与普通二极管的伏特性

从稳压管的反向特性曲线上可以看出,当反向电压达到击穿电压 U_Z 时,反向电流突然增大,稳压管被击穿。在反向击穿状态下,反向电流虽然在很大范围内变化,但稳压二极管两端的电压变化很小。这就是稳压管的稳压特性。只要限制反向电流不超过允许值,当去掉反向电压之后,稳压二极管仍能恢复正常,否则管子会因反向电流过大而损坏。

稳压二极管主要参数有以下几项。

(1) 稳定电压 U_Z 。是稳压管反向击穿后稳定工作的电压值。

(2) 电压温度系数 α 。是指温度变化 1°C 稳定电压变化的百分数。它是表示稳压管温度稳定性的参数,电压温度系数越小,温度稳定性越好。一般来说,低于6V的稳压管,它的电压温度系数是负值;高于6V的稳压管,电压温度系数是正值;在6V左右的稳压管,稳压值受温度的影响较小。因此,在温度稳定性要求较高的工作场所选用6V的稳压管最合适。

(3) 动态电阻 r_Z 。是指稳压管在稳定工作范围内,管子两端电压变化量与相应电流变化量的比值,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,则稳压管的 r_Z 愈小,稳压性能愈好。

(4) 稳定电流 I_Z 。是指稳压管正常工作时的参考电流值。实际工作电流若小于稳定电流, 则 r_z 增大, 稳定性能差, 只有使工作电流远大于 I_Z 才能保证稳压管的稳压性较好。

(5) 最大允许耗散功率 P_{ZM} 。是指稳压管允许结温下的最大功率损耗, 即

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

稳压管在电路中主要起稳压和限幅作用, 或者与其他电路配合组成欠压或过压保护装置。

【例 1-3】已知图 1-8 所示电路中, 稳压管的 $U_Z = 10V$, $I_Z = 10mA$, $I_{ZM} = 25mA$, 负载电阻 $R_L = 2 \times 10^3 \Omega$, 若使输入电压 U_1 由正常值发生 $\pm 20\%$ 波动时, 输出电压 U_0 基本不变, 试求电阻 R 和电压 U_1 的正常值。

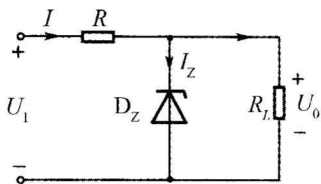


图 1-8 例 1-3 的图

解: 设输入电压达到上限时, 流过稳压管的电流为最大值 I_{ZM} , 因此有

$$I = I_{ZM} + \frac{U_Z}{R_L} = 25 \times 10^{-3} + \frac{10}{2 \times 10^3} = 30 \times 10^{-3} A$$

$$U_1 + 0.2U_1 = RI + U_Z = 30 \times 10^{-3}R + 10 \quad (1-3)$$

$$1.2U_1 = 30 \times 10^{-3}R + 10$$

当输入电压降到下限时, 流过稳压管的电流应为 I_Z , 于是有

$$I = I_Z + \frac{U_Z}{R_L} = 10 \times 10^{-3} + \frac{10}{2 \times 10^3} = 15 \times 10^{-3} A$$

$$U_1 - 0.2U_1 = RI + U_Z = 15 \times 10^{-3}R + 10 \quad (1-4)$$

$$0.8U_1 = 15 \times 10^{-3}R + 10$$

解式 (1-3)、式 (1-4) 联立方程得

$$U_1 = 25V, R = \frac{2}{3} \times 10^3 \Omega$$

1.4 晶 体 管

晶体管又称晶体三极管或三极管, 其基本结构是由两个 PN 结组成, 分 NPN 和 PNP 两种形式, 其结构示意图和表示符号如图 1-9 (a)、(b) 所示。

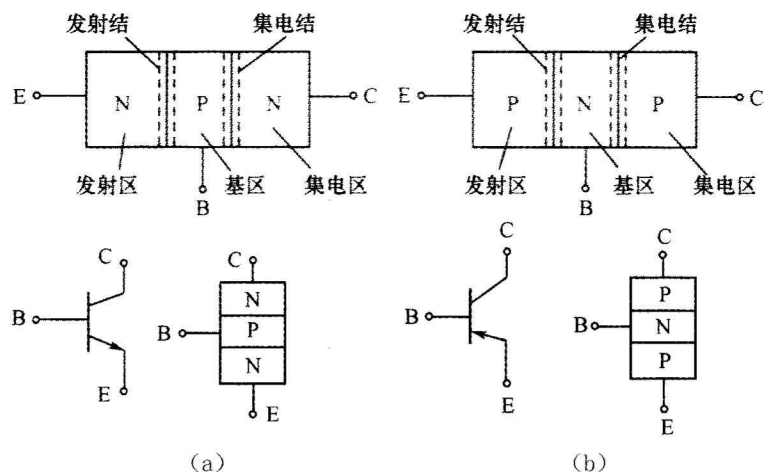


图 1-9 NPN 和 PNP 结构示意图

三极管内部有 3 个区：发射区、基区和集电区，其中基区比发射区和集电区薄得多。由这 3 个区分别引出 3 个电极，即发射极 E、基极 B 和集电极 C。两个结分别为发射区与基区间的发射结和集电区与基区间的集电结。集电结面积大于发射结面积。NPN 型三极管当发射结加正向电压时，其电流方向流出发射结，PNP 型三极管当发射结加正向电压时，其电流方向流入发射结。

NPN 型三极管和 PNP 型三极管工作原理相似，仅仅在使用时电源的极性连接不同。下面以 NPN 型三极管为例进行分析讨论。

1. 电流分配和电流放大原理

图 1-10 所示为 NPN 型晶体管电流放大实验电路。其中发射极为公共端，左边为基极电路，右边为集电极电路，又称晶体管共发射极接法。电源 E_B 使发射结加正向电压（正向偏置），由于电源 $E_C > E_B$ 使集电结加的是反向电压（反向偏置），这样晶体管才能起到电流放大作用。

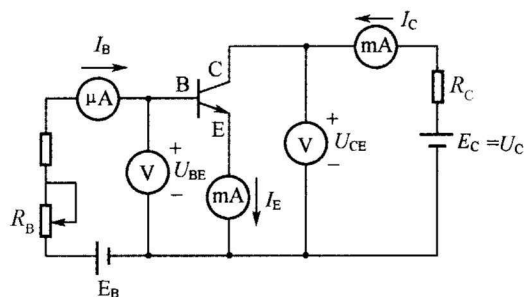


图 1-10 电流方向改变图

通过改变可变电阻 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，电流方向如图 1-10 所示，测量结果如表 1-1 所列。

表 1-1

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

由此实验结果可得如下结论：

(1) 观察表 1-1 中每列数据可得

$$I_E = I_C + I_B \quad (1-5)$$

此结果符合 KCL (基尔霍夫节点电流定律)。

(2) I_B 虽然小, 但对 I_C 有控制作用, I_C 随 I_B 的变化而变化, 两者在一定范围内保持如下关系 (代入表 1-1 中第 3 列和第 4 列数据) 得

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{2.30 - 1.50}{0.06 - 0.04} = 40$$

β 称为晶体管电流放大系数, 它表明基极电流的少量变化 ΔI_B , 可引起集电极电流的较大变化 ΔI_C 。

(3) 当 $I_B = 0$ (基极开路) 时, $I_C = I_{CE0}$, 表中 $I_{CE0} < 0.001 \text{ mA} = 1 \mu\text{A}$ 。

(4) 要使晶体管起放大作用, 发射结必须正向偏置, 而集电极必须反向偏置。

这是因为发射结正向偏置抵消了发射结内电场, 发射区的多数载流子 (自由电子) 不断向基区扩散, 形成发射极电流; 同时, 因基区很薄且 $E_C > E_B$, 在强大的外电场作用下, 扩散到基区的自由电子绝大部分穿过集电结流向集电极形成集电极电流 I_C , 只有极小部分电子与基区空穴复合形成基极电流 I_B 。由此可知, 三极管三个电极的电流分配关系和放大作用是由其内部特性所决定, 外部条件发射结正向偏置, 集电结反向偏置且 $|U_{CE}| > |U_{BE}|$ 是三极管能够放大的根本保证。

2. 特性曲线

三极管的特性曲线是用来表示三极管各极电压和电流之间相互关系的曲线, 是分析三极管各种电路的重要依据。最常用的是共发射极接法时的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三极管集、射极间所加电压 U_{CE} 为常数时, 其基极电流 I_B 与基、射极间电压 U_{BE} 之间的关系曲线, 即

$$I_B = f(U_{BE}) \quad \left| \begin{array}{l} U_{CE} = \text{常数} \end{array} \right.$$

3DG100 三极管的输入特性曲线如图 1-11 所示。对硅管而言, 当 $U_{CE} \geq 1\text{V}$ 时, 就能保证集电结处于反向偏置, 可以把发射区扩散到基区的电子中的绝大部分拉入集电区。此后再增加 U_{CE} 对 I_B 影响不再明显。也就是说 $U_{CE} > 1\text{V}$ 后的输入特性曲线基本上是重合的。所以半导体器件手册中通常只给出一条 $U_{CE} > 1\text{V}$ 的输入特性曲线。

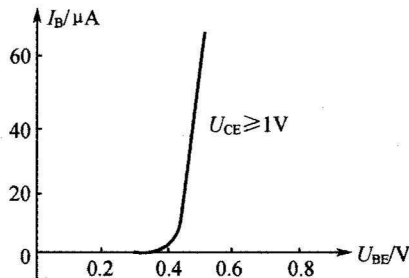


图 1-11 3DG100 三极管的输入特性曲线图

由图 1-11 可知,三极管的输入特性曲线与二极管的伏安特性一样,也有一段死区,硅管的死区电压约为 0.5V,锗管的死区电压约为 0.2V。在正常导通时,硅管的电压在 0.6V~0.7V 之间,而锗管在 0.3V 左右。

(2) 输出特性曲线。

输出特性曲线是指当三极管基极电流 I_B 为常数时,集电极电流 I_C 与集、射极间电压 U_{CE} 之间的关系曲线,即

$$I_C = f(U_{CE}) \quad \left| \quad I_B = \text{常数} \right.$$

3DG100 三极管的输出特性曲线如图 1-12 所示。由图 1-12 可见,在不同的 I_B 下,可得出不同的输出特性曲线,所以,三极管的输出特性曲线是一组曲线。

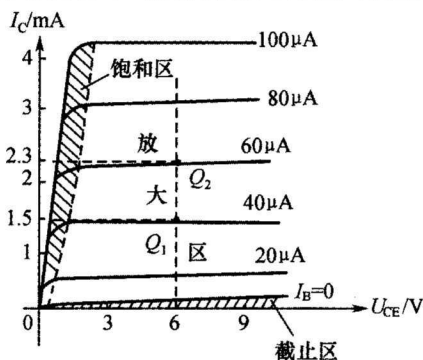


图 1-12 3DG100 三极管的输出特性曲线图

根据三极管工作状态不同,可将输出特性曲线分为 3 个区域:

(1) 放大区。是输出特性曲线中近于与横轴平行的曲线部分。在放大区, $I_C = \beta I_B$ 。放大区也称线性区,因为 I_C 与 I_B 成正比的关系。如前所述,三极管工作在放大状态下,发射结处于正向偏置、集电结处于反向偏置。

(2) 截止区。曲线 $I_B = 0$ 以下的区域称为截止区,在此区域内 $I_C = I_{CE0} \approx 0$,对于 NPN 型硅管而言,当 $U_{BE} < 0.5V$ 时已开始截止,但为了截止可靠,通常使发射结处于反向偏置 ($U_{BE} < 0$),此时 $I_C = 0$, $U_{CE} = U_C = E_C$ 。

(3) 饱和区。由 $U_{CE} = U_C - R_C I_C$,而 I_C 随 I_B 增大而增大, U_{CE} 则减小,当 I_C 增加到使 $R_C I_C$ 接近于 U_C 时,则 U_{CE} 近似于零,此后 I_B 再增大, I_C 也不再增大,也就是说当 $U_{CE} < U_{BE}$ 集电结处于正向偏置则三极管工作于饱和状态。这时的 I_C 称为集电极饱和电流,用 I_{CS} 表示,集、射极电压称为集、射极饱和电压,用 U_{CES} 表示,该值很小,一般认为 $U_{CES} \approx 0$ 。集、射间相当于短路状态,在饱和状态时 $U_{CE} \approx 0$,发射极与集电极之间如同一个开关接通,其间电阻很小,近似于短路;当三极管截止时, $I_C \approx 0$,发射极与集电极之间如同一个开关断开,其间电阻很大,近似于开路,这说明三极管除了放大作用外还有开关作用。

三极管 3 种工作状态时的电压和电流如图 1-13 所示。

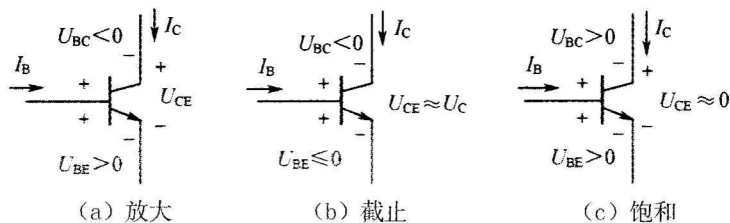


图 1-13 三极管 3 种工作状态电压和电流图

三极管 3 种工作状态时的结电压典型值如表 1-2 所列。

表 1-2

	工作状态				
	放大	截止		饱和	
	U_{BE}/V	U_{BE}/V		U_{BE}/V	U_{CE}/V
		开始截止	可靠截止		
硅管 (NPN)	0.6 ~ 0.7	0.5	≤ 0	0.7	0.3
锗管 (PNP)	-0.2 ~ -0.3	-0.1	0.1	-0.3	-0.1

3. 主要参数

(1) 电流放大系数 β 。

当三极管接成共发射极电路时，其动态（交流）电流放大系数 β 是指三极管工作在动态（有输入信号）时，在 U_{CE} 为定值时，集电极电流变化量 ΔI_C 与基极电流变化量 ΔI_B 的比值，即

$$\beta = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right|_{U_{CE}} = \text{常数} \quad (1-6)$$

静态（直流）电流放大系数 $\beta(-)$ 是三极管处于静态（无输入信号）时，集电极电流 I_{CE} 与基极电流 I_{BE} 之比值，即

$$\bar{\beta} = \frac{I_{CE}}{I_{BE}} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}} \approx \frac{I_C}{I_B} \quad (1-7)$$

β 与 $\beta(-)$ 虽然含义不同，但在输出特性较好（平行、等距）的情况下，两者数值差别很小，一般不作严格区分。即今后在估算时，常用 $\beta(-)$ 替代 β 。应该注意三极管的输出特性是非线性的，在 I_C 较大或较小时 β 值均会减小，只有在输出特性曲线近似于水平部分 β 值才会保持恒定。

常用的三极管的 β 值为 20 ~ 200。

(2) 集电极、基极反向截止电流 I_{CBO} 。

集电极与基极反向截止电流 I_{CBO} 是指发射极开路时，集电结在反向偏置作用下，集电区和基区中少数载流子向对方运动所形成的漏电流。 I_{CBO} 受温度影响较大，在实际温度下，小功率锗管的 I_{CBO} 为 10 μA 左右，小功率硅管的 I_{CBO} 小于 1 μA 。 I_{CBO} 越小越好，其测试电路如图 1-14 (a) 所示。

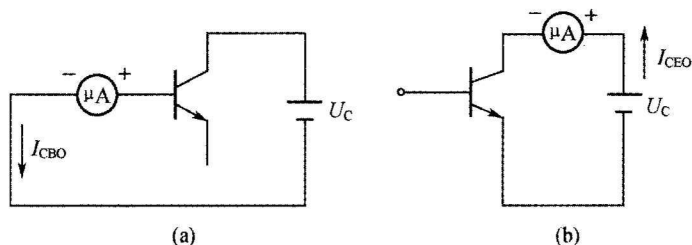


图 1-14 电流测试图

(3) 集电极、射极反向截止电流 I_{CEO} 。

集电极、射极反向截止电流 I_{CEO} 是指基极开路时，集电结处于反向偏置。发射结处于正向偏置情况下，集电极与射极的反向漏电流。又因为它好像是从集电极直接穿透三极管而到达发射极，所以又称为穿透电流。其测试电路如图 1-14 (b) 所示。 I_{CEO} 的大小是判别三极管质量好与差的重要参数， I_{CEO} 越小越好，锗管的 I_{CEO} 如约为几十微安，硅管的 I_{CEO} 约为几微安。

由式 (1-7) 知

$$I_C = \beta(-) I_B + (1 + \beta(-)) I_{CBO} = \beta(-) I_B + I_{CEO}$$

式中，

$$I_{CEO} = (1 + \beta(-)) I_{CBO}$$

在一般情况下， $\beta I_B \gg I_{CEO}$ ，所以

$$I_C \approx \beta(-) I_B$$

$$I_E = I_C + I_B \approx (1 + \beta(-)) I_B$$

(4) 集电极最大允许电流 I_{CM} 。

集电极最大允许电流 I_{CM} 是指三极管的集电极电流超过一定值时，其 β 值会下降，当 β 值下降到正常数值的 $2/3$ 时的集电极电流称为集电极最大允许电流，记为 I_{CM} 。由此可见，使用三极管时，如果 $I_C > I_{CM}$ ，虽然三极管不一定损坏，但其 β 值显著降低。

(5) 集电极、射极反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$ 。

集电极与射极反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$ 是指基极开路时，加在集电极和发射极之间的最大允许电压。当三极管的 $U_{CE} > U_{(BR)CEO}$ 时， I_{CEO} 突然大幅度上升，说明三极管已被反向击穿。手册中给出的 $U_{(BR)CEO}$ 一般是常温 (24°C) 时的值，在高温下 $U_{(BR)CEO}$ 值要比常温下低，使用时应根据环境温度并参照 $U_{(BR)CEO} \geq (2-3) U_C$ 条件选取 $U_{(BR)CEO}$ 。

(6) 集电极允许耗散功率 P_{CM} 。

集电极允许耗散功率 P_{CM} 是指集电极电流流经如集电结时产生热量，使结温升高，当结温超过一定数值后，将导致三极管性能下降甚至烧毁。为了使管子结温不超过允许值，规定集电极最大耗散功率 P_{CM} 为

$$P_{CM} = I_C \cdot U_{CE}$$

根据三极管的 P_{CM} 值，可在输出特性曲线作出一条 P_{CM} 曲线，它是一条双曲线。

由 P_{CM} 、 I_{CM} 和 $U_{(BR)CEO}$ 3 条曲线所包围的区域为三极管的安全工作区，如图 1-15 所示。