

半导体电路原理及应用

华中工学院《半导体电路》编写小组编

(第三版)



机械工业出版社

本书内容主要包括：半导体的基本知识、交流放大器、直流放大器、直流稳压电源、相敏整流-放大器、正弦波振荡器、脉冲电路、可控硅电路及以上这些电路在工业中的应用。

本书是1971年出版的。1974年重版时仅对部分内容作了修改。这次再版，由于时间仓促，也未作全面修订。但是，为了适应当前电子技术的飞速发展，增加了附录一《集成电路及其应用》，包括数字集成电路（双极型电路和MOS电路）和线性集成电路及其应用等两部分。

本书可供从事工业电气自动化工作的技术人员自学或参考。

半导体电路原理及应用

第三版

华中工学院《半导体电路》编写小组编

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

浙江新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $21^{1/2}$ ·插页2·字数526千字

1971年北京第一版

1979年8月北京第三版·1979年8月浙江第四次印刷

印数 147,001—227,000·定价1.80元

统一书号，15033·4786

目 录

第一章 半导体的基本知识	1
1-1 半导体的导电性能 n 型和 p 型半导体	1
1-2 pn 结的单向导电性	3
1-3 半导体二极管的结构和伏安特性	5
1-4 半导体二极管的使用定额和简单测试方法	8
1-5 半导体三极管的结构及放大原理	9
1-6 半导体三极管的特性曲线	13
1-7 半导体三极管的参数和使用注意点	14
1-8 半导体三极管的简易测试方法	17
第二章 交流放大器	20
2-1 固定偏流放大电路的分析	20
2-2 半导体三极管的三种基本放大电路	26
2-3 放大器工作点的稳定	28
2-4 阻容耦合多级放大器	29
2-5 在自动控制系统中半导体前置放大器的工作特点	33
2-6 交流功率放大器	34
2-7 放大器中的反馈	41
2-8 放大器中的干扰噪声和自激	46
2-9 交流放大器的应用	50
第三章 直流放大器	57
3-1 问题的提出	57
3-2 级间耦合的方法	57
3-3 零点漂移的克服	60
3-4 平衡差动式直流放大电路	64
3-5 半导体直流放大器控制电磁调速异步电动机	66
3-6 自动控制系统中常用的直流放大器	69
第四章 直流稳压电源	74
4-1 概述	74
4-2 单相整流电路	75
4-3 滤波电路	77
4-4 稳压管及简单稳压电路	81
4-5 串联式稳压电源	84
4-6 稳压电源的保护电路	88
4-7 直流稳压电源的实际电路	89
第五章 相敏整流放大器	93
5-1 相敏整流器	94
5-2 单管相敏放大器	95

IV

5-3	半波差动式相敏放大器	95
5-4	全波差动式相敏放大器	97
5-5	相敏放大器的实际应用	98
第六章 正弦波振荡器		103
6-1	LC 振荡器的工作原理	103
6-2	LC 振荡器的应用	106
6-3	RC 振荡器的工作原理	109
6-4	RC 振荡器的应用	113
第七章 脉冲电路		116
7-1	脉冲电路的基本概念	116
7-2	半导体三极管的开关特性	117
7-3	脉冲波形的变换	118
7-4	多谐振荡器	123
7-5	锯齿波产生器	127
7-6	间歇振荡器	130
7-7	双稳态触发器	132
7-8	单稳态触发器	142
第八章 逻辑电路与脉冲电路的应用		148
8-1	门电路	148
8-2	逻辑元件	151
8-3	半导体延时继电器	155
8-4	钢轨长度自动定尺器	158
8-5	环形计数器	160
8-6	步进电机控制器	162
8-7	半导体转速表	165
第九章 可控硅及其主电路		168
9-1	概述	168
9-2	可控硅的结构及工作原理	169
9-3	可控硅的伏安特性、参数及使用注意点	172
9-4	单相可控整流电路	176
9-5	三相半波可控整流电路	179
9-6	三相桥式可控整流电路	181
9-7	感性负载时的整流电路	183
9-8	各种整流电路的比较	184
9-9	可逆输出的可控整流电路	185
9-10	可控硅无源逆变器	188
9-11	可控硅元件的选择	193
9-12	可控硅的保护和串并联	195
第十章 可控硅的触发控制电路		201
10-1	对触发控制电路的基本要求	201
10-2	阻容移相桥触发电路	202

10-3 单结晶体管触发电路	207
10-4 同步电压为正弦波的半导体管触发电路	212
10-5 同步电压为锯齿波的半导体管触发电路	215
第十一章 可控硅的应用	219
11-1 可控硅在直流电动机调速系统中的应用	219
11-2 可控硅在交流电磁调速系统中的应用	226
11-3 可控硅无触点开关	228
11-4 DZ 632-24 型可控硅自动稳压稳流电源	232
11-5 汽轮发电机可控硅励磁系统	237
第十二章 特殊半导体器件及其应用	244
12-1 光电元件的工作原理	244
12-2 光电元件的应用电路	249
12-3 场效应管的工作原理	252
12-4 场效应管的应用电路	258
12-5 特殊可控硅及其应用	264
12-6 霍尔元件及其应用	269
附录一、集成电路及其应用	274
I. 数字集成电路及其应用	275
一、双极型集成电路及其应用	275
(一) 与非门电路	275
(二) 利用与非门组成的基本逻辑电路	286
(三) 集成电路触发器	287
(四) 应用举例	293
二、金属-氧化物-半导体场效应管集成电路 (MOS电路) 及其应用	300
(一) MOS 集成电路的基本组成部分-反相器	300
(二) 基本逻辑元件简介	302
(三) 使用注意事项	307
(四) 应用举例——KSJ-10M 顺序控制器	308
II. 线性集成电路及其应用	312
一、对管	312
二、集成直流运算放大器	313
三、集成稳压电路	316
附录二、常用半导体电路图符号	318
附录三、本书常用符号说明	319
附录四、国产半导体器件型号命名法	322
附录五、常用半导体元件参数表	323

第一章 半导体的基本知识

1-1 半导体的导电性能 n 型和 p 型半导体

人们在生产实践中，掌握了导体、半导体、绝缘体的性能，并按照它们的性质作不同的用途。特别是半导体的普遍应用，为电子工业的发展开辟了新的途径。

大家知道，电线都是由铜或铝做成的，因电能通过铜线或铝线传导到需要的地方去，而在铜线和铝线外面常包着一层橡皮或塑料，与外面隔开，电就不能通过橡皮或塑料传出去。我们把能导电的物体，如银、铜、铝等都称为导体；反之，不容易导电的物体，如橡皮、塑料、玻璃等都称为绝缘体。

在自然界，除了上面所说的导体和绝缘体外，还存在着导电性能介于导体和绝缘体之间的许多物体，这就是半导体。半导体是一种晶体，它的种类很多，目前用得最广的是锗、硅、硒等。

我们知道，导体的导电机构（简称载流子）是自由电子，由于导体中有大量的自由电子，因此它的导电能力很强。而半导体和导体不同，它有两种载流子——电子和空穴（如图1-1所示）。电子是带负电荷的载流子，而空穴相当于带正电荷的载流子。纯净的（不含杂质）半导体（称本征半导体）中有一个电子就必然有一个空穴，即电子和空穴的数量是相等的。由于在本征半导体中的电子和空穴的数量很少，所以它的导电能力远比导体的导电能力差。

温度对半导体的导电性能有很大的影响，例如当温度升高 1°C 时，它的电导率就要增加百分之几到百分之几十，这是由于半导体中的本征载流子随温度升高而增加的缘故。而导体和绝缘体的电导率随温度的变化却很小。

导体中含少量杂质对导体的导电能力影响极小，但是杂质对半导体的性能却影响很大。如果在纯净的半导体中适当掺入极少的杂质（如锑或砷），半导体的导电能力就可以急剧地增加。这就是半导体区别于导体和绝缘体的特殊的本质。正因为半导体有这样独特的本质，人们就利用掺杂质的方法，制造出不同性质、不同用途的半导体材料，使半导体的性能按照我们的需要而变化。根据掺入的杂质不同，可以得到两种类型的半导体。

如果我们在纯净的本征半导体锗中掺入少量杂质锑（或磷、砷之类），那么在这块半导体中就产生了许多新的电子，这些新产生的电子数量远远超过原来未掺入杂质前电子或空穴的数量，因此在全部载流子中现在占压倒多数的是电子，而空穴数目很少。在这种半导体中起支配地位的载流子是电子，导电作用主要由电子来决定，所以称电子为“多数载流子”，而空穴是“少数载流子”。这种类型的半导体叫电子型半导体，简称 n 型半导体，如图 1-2 所示。

相反，如果我们在纯净的本征半导体锗中掺入少量杂质镉（或铝、硼之类），那么在这块半导体中就会产生许多新的空穴，这些空穴的数量大大超过未掺杂质前原有电子和空穴的

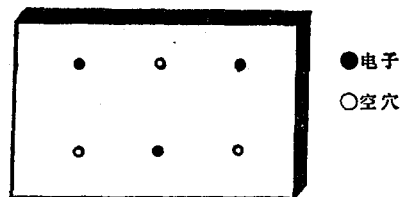


图1-1 本征半导体示意图

数量，因此在全部载流子中，占压倒多数的是空穴，而电子的数量很少。所以这种半导体中对导电起支配作用的载流子是空穴。空穴是多数载流子，而电子是少数载流子。这种类型的半导体叫做空穴型半导体，简称 p 型半导体，如图 1-3 所示。

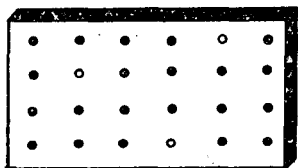


图1-2 n 型半导体示意图

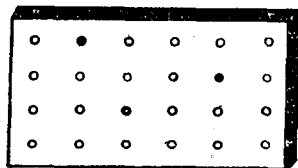


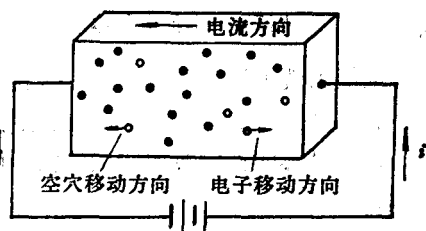
图1-3 p 型半导体示意图

由于在本征半导体中掺入的杂质不同，两种类型的半导体中多数载流子和少数载流子也就有所不同。在 p 型半导体中空穴是多数载流子，电子是少数载流子；而在 n 型半导体中则恰好相反。此外，掺入杂质的数量愈多，多数载流子的数目也就愈多，半导体的导电能力也愈强。因此掺入的杂质对半导体的性质有着特别重要的影响。

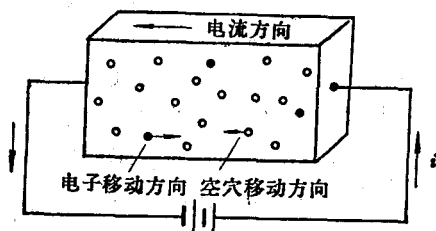
必须指出，不论是 n 型半导体还是 p 型半导体，它们虽然都有一种载流子是占多数，但是它们本身仍是不带电的，正如导体中有大量的自由电子，但导体本身并不带电一样。

由于 n 型和 p 型半导体中都有带电的载流子（带正电的空穴和带负电的电子），这些载流子在电场作用下就要作定向运动，可以想象，如果接上外加电压，外电路上就会有电流流通。

在一块 n 型半导体二端加上一个电压，则在半导体内就会产生一个电场，如图 1-4 (a) 所示。 n 型半导体中的多数载流子——电子在电场作用下向外加电压的“正端”移动，而 n 型半导体中的少数载流子——空穴在电场作用下向外加电压的“负端”移动，在半导体内就构成电流。由于在 n 型半导体中电子是多数载流子，电流主要是由电子的移动构成的。电流的方向与带负电的电子运动方向相反，如图中箭头所示。



(a) n 型半导体



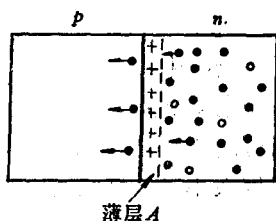
(b) p 型半导体

图1-4 半导体中电流的流通

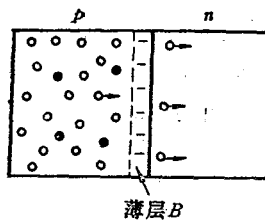
如果是 p 型半导体，情况是相似的（图 1-4 (b)），所不同的是现在多数载流子是空穴，而少数载流子是电子。当然这时半导体中的电流主要由空穴的移动构成的，电流的方向与带正电的空穴运动方向相同。

1-2 pn 结的单向导电性

如果把一块 n 型半导体和一块 p 型半导体合在一起，由于在 n 型半导体中，电子数远远超过空穴数，而在 p 型半导体中，空穴数却远远超过电子数，因此两边的电子和空穴的分布是不均匀的。由于这种不均匀的分布， n 型区域内的电子就向 p 型区逐渐扩散，结果是 n 型区域中邻近 p 型区一边的薄层 A 中就有一部分电子扩散到 p 区去了。由于薄层 A 失去了一些电子，因此便带有正电，如图1-5(a)。同样， p 型区中邻近 n 型区一边的薄层 B 中就有一部分空穴扩散到 n 型区，由于薄层 B 失去了一些空穴，因此便带有负电，如图1-5(b)。



(a) 电子由 n 区扩散到 p 区



(b) 空穴由 p 区扩散到 n 区

图1-5 载流子在半导体中的扩散

由于电子和空穴的扩散是同时进行的，所以上面所说的带电的薄层 A 和 B 同时产生于 n 型和 p 型界面的两侧。

问题是 n 区中的电子和 p 区中的空穴会不会不断地向对方扩散呢？由上面可知，电子和空穴是带电载流子，由于空穴和电子的扩散，使薄层 A 带正电，而薄层 B 带负电，因此在薄层 A 、 B 间产生一个电场，如图1-6。这个电场的方向是由 n 区指向 p 区，这个电场企图把进入薄层 B 向 p 区扩散的电子拉回 n 区，又把进入薄层 A 向 n 区扩散的空穴拉回 p 区，就是说这个电场阻止电子继续往 p 区扩散也阻止空穴继续往 n 区扩散。

刚开始时，电子和空穴的扩散占优势，但是随着电子和空穴的不断扩散， n 区和 p 区失去的电子和空穴越来越多，薄层 A 和 B 越来越厚，形成的电场的作用越来越强。最后，电场的作用完全抵消了扩散，这时便达到了动态平衡状态。

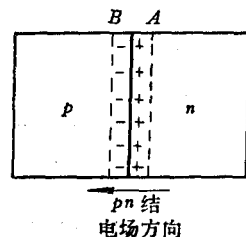
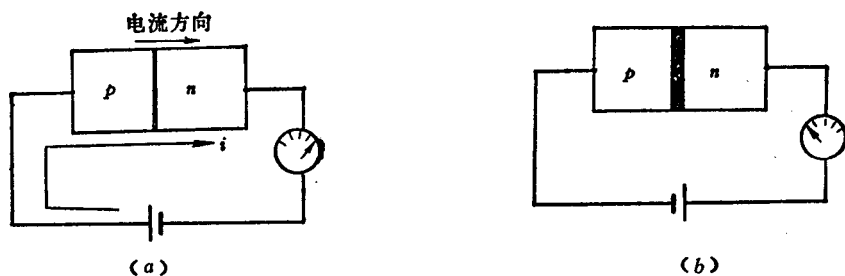


图1-6 电子和空穴扩散在 pn 交界处产生的电场

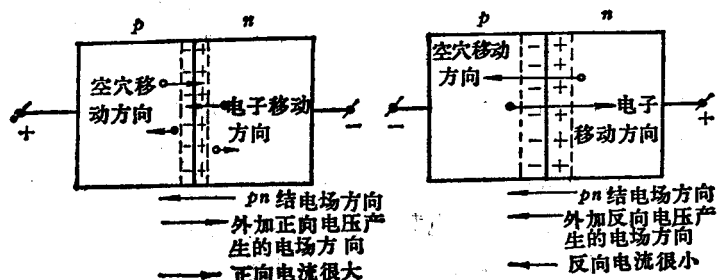
上面所说的薄层 A 和 B ，称为“ pn 结”，又称“阻挡层”（意思是这个薄层阻挡电子和空穴的继续扩散）。这个薄层的厚度大约为 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 厘米左右。 pn 结是半导体二极管最基本的结构，是各种半导体管的基本组成环节，也是学习半导体管入门的向导和基础。下面进一步分析 pn 结的特性。

如果我们在 pn 结两端接上电池，而且电池正极接 p 型半导体，电池负极接 n 型半导体，如图1-7(a)，这时我们发现电路上有很大电流流通，电流表有读数。如果换一个方向，即电池正极接 n 型半导体，电池负极接 p 型半导体，如图1-7(b)，这时电路上的电流很小。电流表的读数接近零。

图1-7 pn 结加压的实验

研究问题需要从实际的现象出发，透过现象，来研究隐藏在现象后面的本质问题。电路有无电流流通是人们看得见的现象，但问题的实质还在于 pn 结具有只让电流从一个方向通过的单向导电特性，也即是 pn 结正反两个方向的导电能力是不一样的。

当 pn 结正向连接时，即 p 区接电池正极， n 区接电池负极，这时，外加电压在 pn 结中产生的电场方向是由 p 区指向 n 区的，恰好与 pn 结原来形成的电场方向相反，如图 1-8(a)。因此， pn 结中原来的电场被削弱了，阻挡层的厚度减小了。 p 区的空穴和 n 区的



(a) 外加正向电压时阻挡层变薄

(b) 外加反向电压时阻挡层变厚

图1-8 外加电场方向对 pn 结的影响

电子在这个外加电场作用下不断走向交界处。空穴由左方流向右方和电子由右方流向左方都相当于电流由左方流向右方。由于 p 区空穴很多， n 区电子很多，这股电流很大，这就是正向连接时出现大电流的原因。外加正向电压越大，在 pn 结中外加电场的作用就越强，更进一步削弱原来 pn 结的电场，所以电流更要增加。

当 pn 结反向连接时，即 p 区接电池负极， n 区接电池正极，这时外加电压在 pn 结中产生的电场方向是由 n 区指向 p 区，与 pn 结原来形成的电场方向一致，使阻挡层的厚度增加了， n 区中的多数载流子——电子和 p 区中的多数载流子——空穴很难通过 pn 结向对方移动，这就是反向连接时电流极小的原因。但是，这时 p 区中的少数载流子——电子和 n 区中的少数载流子——空穴在反向电场帮助下向交界处移动，电子由左方流向右方和空穴由右方流向左方形成反向电流，但由于少数载流子数目很少，反向电流是很小的。

因此，我们可以把 pn 结看成是电流通道上的一道开关，接上正向电压时（即 p 型半导体接电池正极， n 型半导体接电池负极），开关打开让电流通过，我们称此时 pn 结“导通”；接上反向电压时开关关上，阻止电流通过，我们称此时 pn 结“截止”。 pn 结这种只让电流单

方向通过的性能称 pn 结的单向导电性。

pn 结的“导通”和“截止”是互相矛盾的两个方面，双方斗争而又互相依存着，共处于一个统一体中，这两个对立的双方在一定外加电压的条件下互相转化。当外加电压极性改变时矛盾双方各转化到相反的方面。

1-3 半导体二极管的结构和伏安特性

一、结构

在 pn 结两端接上电极就构成半导体二极管，常见的几种半导体二极管外形如图 1-9 所示。它的两个电极分别称为阳极（又称正极，即 p 型半导体引出线）和阴极（又称负极，即 n 型半导体引出线）。由于它具有只让电流单方向通过的性能，故常用图 1-10 所示的符号表示，箭头表示电流的方向。

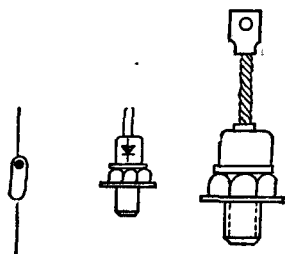


图1-9 半导体二极管的外形图



图1-10 半导体二极管的符号

按半导体二极管结构的不同（ p 型和 n 型半导体的接触方式），可分为点接触式和面接触式二种，如图1-11。点接触式的接触点小，不能通过很大电流，但由于接触点小，极间电容小，故多用于高频检波或小电流的整流。面接触式的接触面大，可通过较大的电流，但极间电容大，故多用于低频大电流的整流（二极管型号命名法请参阅附录）。

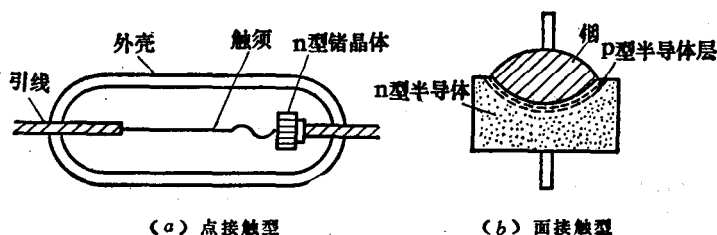
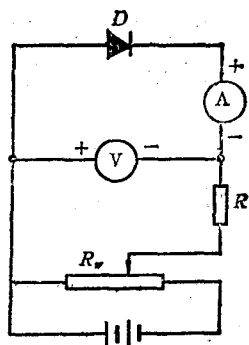


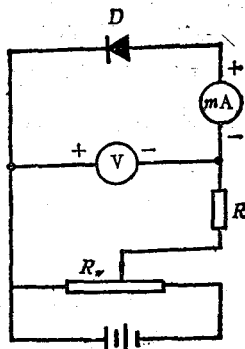
图1-11 二极管的构造

二、伏安特性曲线

二极管的伏安特性曲线表示加在二极管两端的电压同流过二极管的电流间的关系，可按图 1-12 的电路测量得到。如我们用一只硅二极管 2CZ11B 来测试，按图 1-12(a) 所示电路可测量正向伏安特性，此时加在二极管两端的电压为正向电压，移动 R_v ，逐渐升高电压，可看到电流表有较大读数，如 0.5 或 1 安等。



(a) 测量正向伏安特性



(b) 测量反向伏安特性

图1-12 测试伏安特性的电路

按图1-12(b)可测量反向伏安特性,此时二极管加上了反向电压,电流很小,只有不到1毫安的小电流,当反向电压升到350伏左右电流突增。

通过逐点测量可得2CZ11B硅二极管伏安特性,如图1-13所示。从伏安特性曲线可知:

1. 二极管接正向电压时(即阳极接电源正极,阴极接电源负极),电流很容易通过,这时二极管“导通”,在导通时,二极管两端电压很低,当电流增加时,电压稍增,一般二极管正向压降小于1.5伏,对于2CZ11B是0.5伏左右。在实用中希望正向压降小一些好。

2. 二极管接反向电压时,电流基本上不能通过,即二极管“截止”,这时只有很小的电流,称为“反向电流”,当电压增大时反向电流值几乎不变。各种规格的二极管反向电流不同,对2CZ11B是小于0.5毫安。当然在实用中希望反向电流小一点好,因这就表示二极管反向截止性能好,单向导电性能越能保证。

3. 当二极管反向电压上升到一定数值,

二极管的反向电流就会突然剧增,这叫做二极管的“反向击穿”,这个电压称为“反向击穿电压”,这时二极管的正常工作被破坏,因为它不再是单向导电了。

这个现象说明,二极管和其他事物一样,都有一个决定事物数量的数量界限,不超过这个界限,能保证一定的质量,超越了这个界限,就会起质变,走向了反面。

对于不同的二极管,其反向击穿电压是不同的,2CZ11B是350伏左右。在实际应用中,要根据具体情况选择不同反向击穿电压的二极管。

对于用不同半导体材料、不同结构和不同工艺制成的半导体二极管,它们的伏安特性都

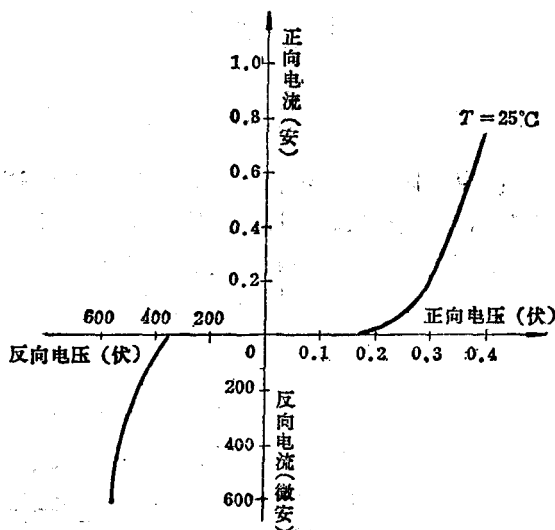


图1-13 2CZ11B的伏安特性

有差异,正向电流随正向电压上升的速度有时差别较大,反向电流的大小差别更大,但伏安特性的形状是相似的。

对目前常用的锗二极管和硅二极管而言,锗二极管正向电流上升很快,正向压降要比硅二极管来得小,但是锗二极管的反向电流比硅二极管要大得多(几十倍甚至几百倍)。

半导体二极管的特性还要受到温度的影响,当温度升高时,二极管正向电流和反向电流都增加了,而且随温度升高二极管反向击穿电压也要下降,这就限制了二极管的使用定额,图1-14画出了在不同温度下二极管的特性曲线。硅二极管所允许的工作温度比锗高,可达到 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ (锗管只能在 100°C 以下范围内使用)。因此在同样的 pn 结面积的条件,允许通过硅二极管的最大电流就比锗二极管大。硅二极管允许通过的最大电流密度要比锗二极管大一倍左右,这是硅管的优点之一。因此大功率二极管几乎都是用硅制造的。

半导体二极管由于具有单向导电的性能,在生产实际中应用是十分广泛的。例如我们常常遇到要把交流电变为直流的问题,就可以用二极管整流电路来解决。

如图1-15(a)所示,把半导体二极管和负载 R_{Lz} 串联起来接到交流电源上,在 e_2 的正半周($0\sim\pi$),二极管 D 受正向电压作用而导通,电路上有电流流过,输出电压的波形和 e_2 相同;在 e_2 的负半周($\pi\sim 2\pi$), D 受反向电压作用而截止,电路上没有电流通过,输出电压为零。于是在输出端便可得到一个单向脉动的直流(其数值虽随时间改变,但方向不变),其波形如图1-15(b)所示。

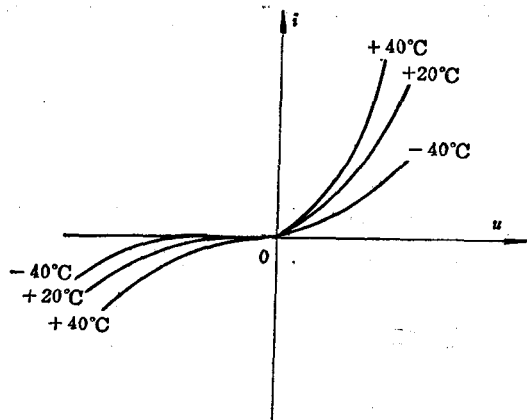
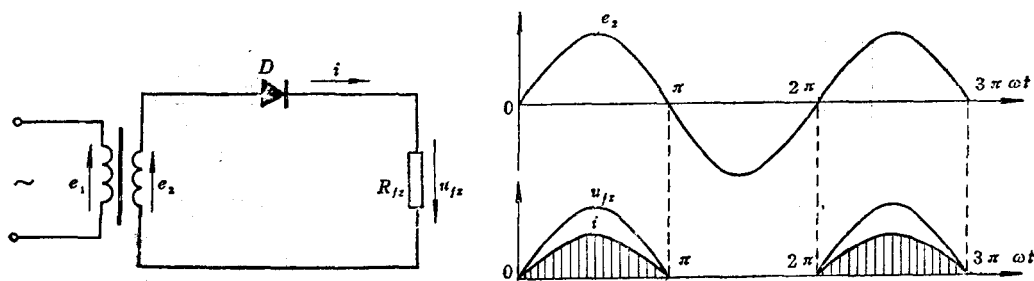


图1-14 温度对二极管特性的影响



(a) 电路图

(b) 波形图

图1-15 二极管整流电路

在实际中,半导体二极管不单用于整流,还可以作其他多种用途,如用作保护元件、检波、波形变换……等,但它们的工作都是基于 pn 结的“单向导电性”,在分析二极管在电路中的作用的时候,必须抓住这个主要矛盾。二极管的其他应用将在后面各章介绍。

1-4 半导体二极管的使用定额和简单测试方法

围绕着二极管的单向导电性,半导体二极管的参数和伏安特性都是用来表示性能的指标,作为选用二极管的依据。在使用二极管的时候,一定不能超过二极管本身的定额,否则就会损坏二极管。

二极管常用的定额参数有二个:

1. 额定工作电流 I ,

是指长期运行时允许通过的最大正向平均电流,因为电流通过要发热,发热量超过限度就会把 pn 结烧坏。为了降低温度,大功率二极管还要装散热片。在实用上要选取额定工作电流大于实际工作电流的管子,如 2CZ11B 容许的额定工作电流是 1 安,在实际工作时就不能大于此值。

2. 反向击穿电压 U ,

由图 1-13 的伏安特性可知,当反向电压高到一定值,二极管就会反向击穿,二极管的单向导电性就被破坏,因此必须保证使用时二极管承受的最大反向电压不超过反向击穿电压,例如 2CZ11B 在工作时的反向电压(峰值)不能超过 350 伏。

除了这二个定额外,还有使用工作温度,最高工作频率等二参数,在半导体管手册上都可查到。

根据二极管的单向导电性,利用普通的万用电表可以粗略测量半导体二极管,确定那一端是阳极或阴极,并大致可看出二极管正反向电阻的大小(二极管正向容易导电,所以电阻小,反向不容易导电,所以电阻大),我们希望这二个电阻值相差越大越好,若两者相差不远,则表明这个二极管性能不好或完全损坏。

测量时只要把万用表拨到“欧姆档”,用两个测试棒分别正反向测量二极管的两端,即可读出两个阻值,一个大,一个小,大的是反向电阻,小的是正向电阻(一般小功率半导体二极管的正向电阻约几百欧,反向电阻约几百千欧,大功率管的电阻相应小得多)。

图 1-16 表示测量过程:

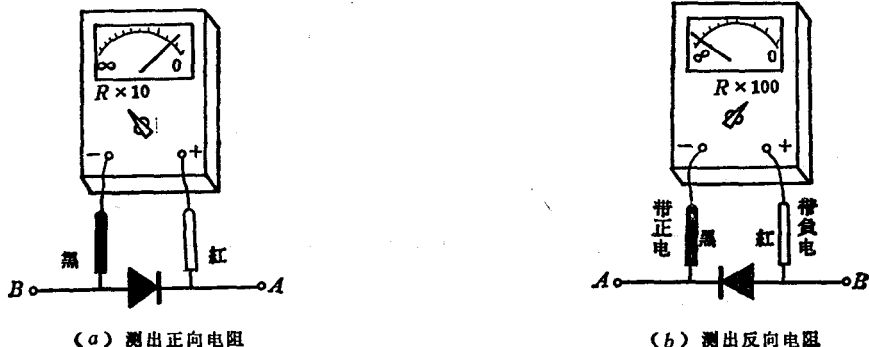


图1-16 二极管的测试

我们知道普通万用电表在电阻档时黑的测试棒带正电,红的测试棒带负电,所以由图1-16可判断出二极管 A 端为阴极, B 端为阳极。

1-5 半导体三极管的结构及放大原理

半导体三极管和二极管一样，它的工作也是基于 pn 结的单向导电性，所不同的是半导体三极管是由三块半导体组成的，按组合的方式不同，分为 pnp 型和 nnp 型两种，图 1-17 是它们的示意图。

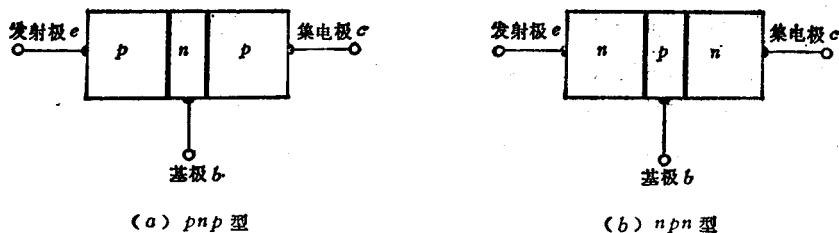


图1-17 半导体三极管简单结构示意图

从每块半导体分别引出三个电极就是管脚。当中一块半导体称为基极，用符号 b 表示，两端的半导体一个是发射极，用符号 e 表示，一个是集电极，用符号 c 表示。要注意的是，虽然发射极和集电极都是 p 型或 n 型半导体，但是发射极的半导体所掺入的杂质比集电极要多，也就是说，它们不是对称的，所以不能互换。

发射极 e 是用来发出电荷以形成管内电流，集电极 c 是用来收集发射极发出的电荷的，而基极 b 在中间则起着控制电荷流动的作用。

在实际应用中，为了保证从发射极出来的电荷绝大部分能到达集电极，基极总是做得很薄（约几微米到几十微米），因此电荷从发射极到达集电极的时间是很短的。

半导体三极管在两块半导体交界处是一个 pn 结，因此三极管就有二个 pn 结，发射极与基极交界处的 pn 结称为发射结（ e 结），集电极与基极交界处的 pn 结称为集电结（ c 结）。

pnp 型和 nnp 型三极管的表示符号如图 1-18 所示。

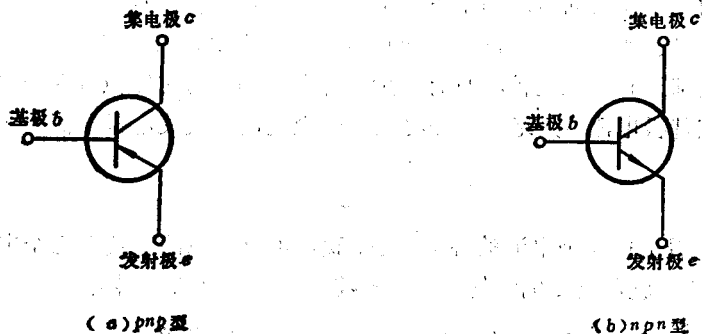


图1-18 半导体三极管的表示符号

图中发射极箭头方向表示管内电流流动方向， pnp 型和 nnp 型的电流方向是相反的。从上一章我们知道，利用 pn 结的单向导电性可以达到整流的目的，而当两个 pn 结结合

在一起时，它们的工作情况就发生了变化。我们就是利用两个 $p-n$ 结之间的互相联系和互相影响而达到控制管内电流的目的，从而使半导体三极管具有和半导体二极管完全不同的特性。

半导体三极管的特性是由它本身的结构决定的。我们要使半导体三极管正常工作，还必须在半导体三极管上接上适当的电压。

以 pnp 型半导体三极管为例，我们在集电结上加上一个较大的反向电压（正端接基极 b ，负端接集电极 c ，约几伏到十几伏），而在发射结上加上一个较小的正向电压（正端接发射极 e ，负端接基极 b ，约为零点几伏），如图 1-19 所示。

由于我们在左边发射结上加有正向电压，它产生的电场方向帮助发射区的空穴越过发射结而进入基区，同时也帮助基区中的电子越过发射结进入发射区，如图 1-20 所示。

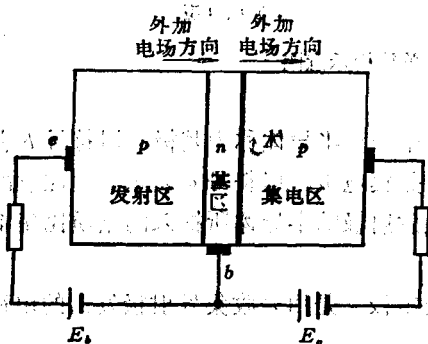


图1-19 三个电极上电源的接法

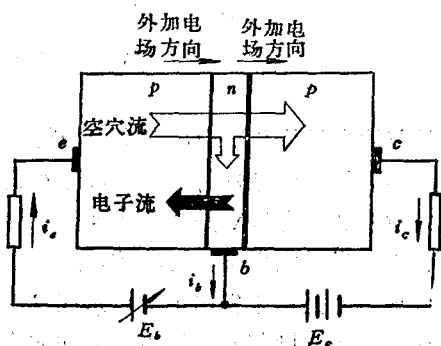


图1-20 三极管内电流的流通情况

由于加入基区的杂质少，而发射区的杂质多，则基区中电子（基区中多数载流子）的数目比发射区中空穴数（发射区的多数载流子）要少得多，因此流经发射结的总电流 i_e 主要是由空穴电流所构成的。 i_e 称为发射极电流。

下面再看看右边集电结的电流流通情况，由于集电结上加了较大的反向电压，因此集电区的空穴和基区的电子在反向电场作用下很难越过集电结。但是这个反向电场对由发射区到达基区的空穴却有吸引作用，它帮助空穴向集电区方向流动。加上基极很薄，所以到达基区的空穴很容易穿过基区到达集电极，只有很少一部分（约百分之零点几到百分之几）才经基极引线流出来构成基极电流 i_b ，绝大部分将从集电极流出构成集电极电流 i_c 。如图 1-20 中箭头所示。显然有

$$i_e = i_c + i_b \quad (1-1)$$

为了从数量上看出这几个电流的分配关系，我们可以在电路上接入三个电流表把 i_e, i_b, i_c 测量出来。改变 E_b ，就可改变电流的大小，现将对某一三极管测得的一组结果，列于表1-1。

表1-1 半导体三极管中近似的电流分配关系

i_e (mA)	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
i_c (mA)	0.96	1.91	2.86	3.81	4.76
i_b (mA)	0.04	0.09	0.14	0.19	0.24

表中电流数值说明 $i_e = i_c + i_b$ 的关系, 发射极电流 i_e 的大部分到达集电极形成集电极电流 i_c , 而只有很少部分流向基极形成基极电流 i_b 。

上述管内的电流分配关系与外加电压的大小和负载电阻的大小关系不大, 而只由半导体管本身的结构所决定。对外加条件而言, 我们只要保证集电结加上一个较大的反向电压, 在发射结加上一个较小的正向电压, 就能保证管内这个电流的分配关系。

根据半导体三极管内部这个几乎是不变的电流分配关系, 假定有 1 微安的基极电流出现, 就必然同时有几十甚至几百微安以上的集电极电流出现, 于是我们就可以利用微小的基极电流 (它是由基极电压引起的) 来控制比它大几十倍甚至几百倍的集电极电流。如在表 1-1 中我们取二组邻近数字进行比较, 例如 i_b 从 0.04 变到 0.09mA, 增加了 0.05mA, 集电极电流则从 0.96 增到 1.91mA, 增加了 0.95mA, 就是说基极电流的微小变动 (即 0.05mA) 引起了集电极电流的较大变动 (0.95mA), 从这里可看到 i_c 的变动比 i_b 的变动要大 19 倍。

如果将电路的连接方式稍微改变一下, 将三极管的发射极作为二个电源的公共连接点, 如图 1-21 所示。这时加在发射结上的电压仍为正向电压 u_{be} , 集电结仍为反向电压 u_{bc} (因集电结上的反向电压 $u_{bc} = u_{ce} - u_{be}$, 只要使集电极发射极间的电压 u_{ce} 的数值大于 u_{be} 就可保证集电结处于反向连接, 通常 u_{ce} 比 u_{be} 大得多)。这种连接方式是常用的, 称为共射极连接法。这时, 对应于图 1-21 左边从基极 $b \rightarrow$ 电阻 $R_b \rightarrow$ 电源 $E_b \rightarrow$ 发射极 e 的回路称为基极回路, 对应于右边从集电极 $c \rightarrow$ 电阻 $R_c \rightarrow$ 电源 $E_c \rightarrow$ 发射极 e 的回路称为集电极回路。

为了分析方便, 我们规定了电压电流的正方向, 电压的正方向以共同端为负端, 其他电极为正端, 电流则以流入各电极为电流的正方向。如图 1-22 所标的箭头的方向就是电压电流的正方向。其中电压箭头所示为电压降的方向。

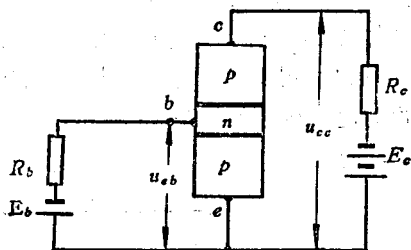


图1-21 共射极连接法

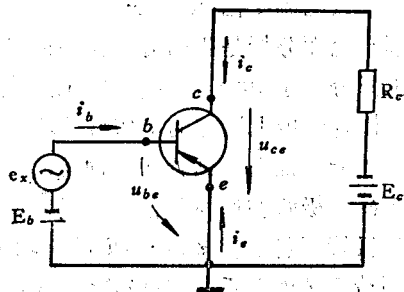


图1-22 放大原理图

如果我们在基极回路接上一个交变信号源 e_x , 如图 1-22 所示。这时基极是交变信号的输入端, 集电极是输出端, 而发射极是输入输出的共同端。由 pn 结的特性可知, 正向电压的微小变动, 就可以引起正向电流较大的变动, 这时加于发射结上的正向电压是变化的, 因此, 流过结面的电流也是随之而变化的, 交变信号源 e_x 引起基极电流 i_b 随之而变, i_b 的变化又引起 i_c 相应改变, 当然 i_c 的变化比 i_b 的变化要大得多, 这是电流放大作用。 i_c 的变量在负载电阻 R_c 上产生一个交变电压, 这个电压比起信号源 e_x 来说要大得多, 这就实现了电压放大作用。这个过程是这样的:

$$e_x \rightarrow \Delta i_b \rightarrow \Delta i_c \rightarrow \Delta i_c R_c$$

$$\Delta i_c R_c \gg e_x$$

因为是利用信号源提供的很小的基极电流变量去控制集电极电流的变量，基极电流经过信号源要消耗功率，所以说半导体三极管是一个电流控制元件。

综合上述分析，可得到以下结论：

1. 半导体三极管的基极电流对集电极电流有控制作用。
2. 半导体三极管有放大作用。

这是半导体三极管与二极管相比的质的区别。由上面的分析可知，要达到这个性能，必须采取两个措施：一方面基极要作得很薄，以使从发射极来的电荷绝大部分被集电极收集，只有极少部分形成基极电流；另一方面发射结必须采用正向接法，使发射结较小的电压变化引起较大的发射极电流的变化，而集电结必须采用反向接法，以使发射极电流绝大部分到达集电极。前者是内因，后者是外因。满足了这两个条件后，只要在集电极回路上接入合适的负载电阻，就能使发射极与基极间微小的电流、电压变化引起负载电阻上较大的电流、电压变化，从而实现放大的目的。

三极管这一宝贵性质，使它获得广泛的用途，例如自动控制和调节系统中的放大、开关、脉冲、振荡、……等。

为了衡量半导体三极管的放大能力，我们常用集电极电流变量与基极电流变量之比 β 来表示电流放大作用：

$$\beta = \frac{\Delta i_c}{\Delta i_b} \quad (1-2)$$

β 是衡量半导体三极管性能的重要参数之一，称共射极电流放大系数。它表示如基极电流变化 Δi_b 时，集电极电流的变化就是 $\beta \Delta i_b$ ，一般大约 $\beta = 10 \sim$ 几百。如 $\beta = 100$ 时，信号源只要引起基极电流变化 10 微安，就能使 i_c 变化 1 毫安。图 1-20 为共基极放大电路，它的放大原理与上面分析是相同的。此外还有共集电极放大电路，它们的特点将在 2-2 节介绍。

以上只分析了 *pnp* 型半导体三极管的情况，其原理也适用于 *npn* 型半导体三极管，所不同的是三极管电极上所加的电压极性不同，*npn* 型管的电源接法如图 1-23 所示。在这样的接法下，才能保证发射结处于正向接法，集电结处于反向接法。

由于硅三极管在原材料性质上的不同，它比锗三极管要稳定得多，受温度的影响小。目前因制造工艺的关系，硅三极管多是 *npn* 型的。同时硅管的工作温度可达 $150 \sim 200^\circ\text{C}$ ，锗管的工作温度不超过 100°C ，因此在相同的结构尺寸下，硅管的工作电流要大得多。由于有这些优点，硅管的使用就越来越广泛。若采用硅管代替锗管可以大大提高电路工作的稳定性，特别可以工作在较高的环境温度下。随着我国电子工业的发展，硅管已有大量生产，目前许多设备都大量采用硅管。但是，由

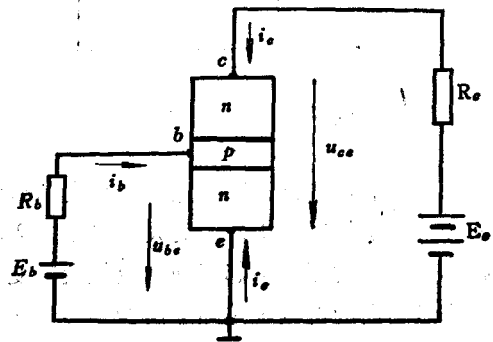


图1-23 *npn* 型管电源接法

于锗管的生产工艺比较成熟，特别是作为杂质材料的钢具有良好的物理化学和机械性能，它