

半 导 体 线 路

(放大、振荡、电源部分)

复 旦 大 学 物 理 系 编

上 海 人 民 出 版 社

内 容 提 要

本书主要介绍半导体线路的原理、设计和应用。对放大器、振荡器和电源设备作了较为详细、具体的叙述,有关脉冲技术部分则由半导体线路(脉冲技术部分)介绍。

本书阅读的主要对象是有中等文化程度的工人、技术人员,亦可供大专院校有关专业的同志参考。

本书力求避免过深的数学分析,加强了物理概念的叙述,并介绍了—定数量的实用电路,以供参考。

半 导 体 线 路

(放大、振荡、电源部分)

复旦大学物理系编

上海人民出版社出版

(上海绍兴路5号)

新华书店上海发行所发行 上海中华印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 20 插页 3 字数 531,000

1972年9月第1版 1972年9月第1次印刷

书号: 15·4·224 定价: 1.37 元

目 录

第一章 半导体二极管和三极管

第一节 二极管的单向导电性	1
第二节 二极管的工作原理	1
第三节 二极管的特性曲线和参数	3
一、二极管电流随外加电压变化的规律——伏安特性曲线	3
二、二极管的参数及其等效电路	5
第四节 三极管的电流分配关系	7
一、三极管的内部结构	8
二、三极管的电流分配关系	10
第五节 晶体三极管的连结方法和特性曲线	12
一、晶体三极管的三种连结方法	12
二、晶体三极管的特性曲线	17
三、晶体三极管的参数	22
第六节 晶体三极管的交流小讯号等效电路和 H 参数	26
一、“T”型等效电路	26
二、 H 参数等效电路	28

第二章 放大器基础

第一节 单管放大器	31
一、单管放大器的分析	31
二、偏置及其稳定性	38
三、单级放大器的设计	48
第二节 阻容耦合放大器	49
一、阻容耦合放大器的频率和相位特性	51
二、放大器的输入阻抗和输出阻抗	56
三、放大器的动态范围	59
四、阻容耦合放大器的设计	63
第三节 放大器中的负反馈	68
一、负反馈的分类	68
二、负反馈对放大器性能的影响	72

三、单级负反馈放大器	78
四、射极输出器	84
五、两级负反馈放大器	99
六、放大器中的寄生反馈	103
七、负反馈放大器的稳定性	108

第三章 常用放大电路

第一节 直流放大器	111
一、直流放大器的特点	111
二、分差放大器的工作原理	117
三、分差放大器的改进	127
四、分差放大器的设计	131
五、分差放大器的实用电路	138
附录 3-1-1 共发射极电路中发射极接有负反馈电阻 R_e 时, 电路 各参数的计算	143
附录 3-1-2 分差放大器电路参数的计算	145
第二节 调制型直流放大器	149
一、调制型直流放大器的工作原理	149
二、调制器	151
三、各种调制器的工作原理	153
四、调制型直流放大器的实用电路	162
第三节 运算放大器	166
一、运算放大器概述	166
二、模拟运算与数学运算的误差	172
三、运算放大器中的漂移	178
四、运算放大器的稳定性	186
五、运算放大器的实用电路	189
附录 3-3-1 运算放大器的输入、输出阻抗及输出电压的计算	202
第四节 宽带放大器	204
一、宽带放大器的指标	205
二、影响放大器高频特性的因素	207
三、三种连接电路的增益和通频带	213
四、扩展通频带的一般方法	221
五、多级放大器	232
六、宽带放大器的设计	234
七、宽带放大器的实用电路	241
附录 3-4-1 脉冲波形的频谱分析	249

第五节 LC 调谐放大器	255
一、调谐放大器概述	255
二、对调谐放大器的要求	259
三、晶体管的高频等效电路	262
四、单回路调谐放大器	265
五、双回路调谐放大器	282
六、调谐放大器的实用电路	290
第六节 RC 选频放大器	298
一、 RC 选频网络	299
二、双 T 电桥和放大器的连接	322
三、 RC 选频放大器的频率特性	325
四、双 T 电桥选频放大器的设计	331
五、双 T 电桥选频放大器的调整	336
六、 RC 选频放大器的实用电路	339
第七节 功率放大器	343
一、常用功率放大器的工作原理	344
二、晶体管的大功率运用	364
三、功率放大器的设计	368
四、功率放大器的实用电路	380
附录 3-7-1 音频变压器设计的经验公式	382
第八节 场效应管放大器	384
一、场效应管的工作原理	384
二、场效应管主要参数的测量	393
三、场效应管放大单元	397
四、场效应管放大器的实用电路	404
第九节 相敏放大器	409
一、相敏检波	410
二、相敏放大器	420
三、相敏放大器的实用电路	426
第十节 放大器的噪声	432
一、放大电路的噪声	432
二、放大器中噪声的来源	433
三、低噪声放大器的制作要点	439
四、低噪声放大器的实用电路	443

第四章 正弦振荡器

第一节 电感、电容 (LC) 振荡器	445
------------------------------	-----

一、基本原理	445
二、变压器耦合振荡器	447
三、电感三点式振荡器	455
四、电容三点式振荡器	457
五、LC 振荡器的设计与调整	458
六、LC 振荡器的实用电路	467
第二节 电阻、电容(RC)振荡器	471
一、文氏电桥振荡器	471
二、RC 移相振荡器	482
三、RC 振荡器的实用电路	485
第三节 超高频振荡器	492
一、晶体管超高频振荡器	494
二、体效应振荡器	496
三、雪崩二极管振荡器	502
第四节 振荡器幅度的稳定	504
第五节 振荡器频率的稳定	508
一、引起频率不稳定的因素	508
二、提高频率稳定度的方法	510
三、石英晶体振荡器	514
四、超高频振荡的频率稳定	521
第六节 频率合成技术	523
一、直接合成法	524
二、环路系统法	526

第五章 电源设备

第一节 整流电路	532
一、电阻性负载的整流电路	532
二、电抗性负载的整流电路	541
第二节 平滑滤波器	546
一、电感型滤波器	547
二、电容型滤波器	549
三、 Γ 型滤波器	550
四、 π 型滤波器	553
五、有源滤波器	555
第三节 晶体管稳压电源	556
一、稳压电源的工作原理	556

二、稳压电源的主要参数·····	559
三、稳压电源主要环节的分析·····	564
四、稳压电源的设计·····	573
五、稳压电源的实用电路·····	580
第四节 直流变换器·····	590
一、晶体管直流变换器的工作原理·····	591
二、电源变换器的改进·····	598
三、电源变换器的设计·····	600
四、电源变换器的实用电路·····	608
附 录 电源变压器的设计·····	612

第一章 半导体二极管和三极管

半导体线路中最关键的元件是半导体二极管和三极管。要掌握半导体线路技术,就应该对半导体器件的基本特性有所了解。

第一节 二极管的单向导电性

半导体二极管(简称二极管)有二个电极,一个是正极,一个是负极。在电路中,二极管用如图(1-1-1)所示的符号表示。

当加在二极管二端的电压是正向电压时(正极接正电压,负极接负电压),流过二极管的电流是正向电

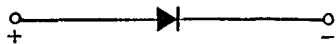


图 (1-1-1)

流;当加在二极管二端的电压是反向电压时,则流过二极管的电流很小很小,称为反向漏电流。二极管具有单向导电性,就是指的只有在其二端加上正向电压时,才有电流通过,而加上反向电压则没有电流通过。

二极管的单向导电性有很多用途,整流、检波等都离不开单向导电性。

第二节 二极管的工作原理

二极管具有单向导电性,但是它为什么会有这个特点呢?毛主席教导我们:“唯物辩证法认为外因是变化的条件,内因是变化的根据,外因通过内因而起作用。”

我们知道,半导体的导电机理有二类:一类是自由电子,一类是空穴。在纯净的半导体硅或锗单晶中,电子和空穴总是成对出现的,而且电子空穴对的数目与温度、光照、辐射等有密切的关系,因而半导体的导电性能也和这些因素有关。

利用掺杂的方法,可以人为地将半导体分为二类:一类半导体中含有大量的电子,而空穴很少,称为 N 型半导体;另一类半导体

中含有大量的空穴,而电子很少,称为 P 型半导体。

半导体二极管就是由一块 P 型半导体和一块 N 型半导体“结合”而成的。当二种具有不同导电特性的半导体“结合”在一起时,

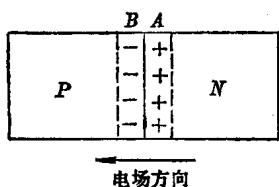


图 (1-2-1)

在交界处, P 型区的空穴就要向 N 型区扩散, N 型区的电子也要向 P 型区扩散, 即空穴和电子都要从浓度大的地方向浓度小的地方扩散。扩散的结果, 在交界处 N 型区附近的薄层 A 中[如图(1-2-1)], 由于失去电子,

便带正电; 同样的道理, 在交界处 P 型区附近的薄层 B 中带负电。由于电子和空穴的扩散是同时进行的, 所以薄层 A 和 B 也是同时形成的。

于是, 在 A 、 B 之间就产生了一个电场, 它的方向是由 A 指向 B 的(即由 N 型区指向 P 型区)。这个电场一方面阻止电子继续从 N 型区向 P 型区扩散, 空穴从 P 型区向 N 型区扩散; 另一方面还将使 P 型区 B 层内的电子向 N 型区运动, N 型区 A 层内的空穴向 P 型区运动, 这种电子和空穴在电场作用下的有规则的运动, 称为漂移运动。显然, 漂移运动和扩散运动的方向是相反的。

这样, 在交界处附近形成了一个特殊的区域, 称为 PN 结, 或称为阻挡层。

由于 PN 结内部矛盾着的二个方面(扩散运动和漂移运动)互相依存又互相斗争, 就构成了 PN 结内部的矛盾运动。开始时, 矛盾的一方——扩散运动占优势, 但是随着电子和空穴的不断扩散, 使 N 型区失去的电子和 P 型区失去的空穴不断增多, 薄层 A 和薄层 B 越来越厚, 电场的作用越来越强, 于是矛盾的另一方面——漂移运动也愈来愈强, 直到漂移运动与扩散运动达到动态平衡时, N 型区的电子和 P 型区的空穴将不再减少, 薄层的厚度也不再增加。当然, 这时漂移运动和扩散运动仍在进行, 但二者作用互相抵消, 二极管的总电流为零, 这就是在没有外加电压作用时的情况。

当外加电压作用时, PN 结内部的运动将起显著的变动。

1. 二极管两端加正向电压, 如图 (1-2-2) (a) 所示。这个外加电压的方向和阻挡层内部的电场方向相反, 因此, 它将削弱阻挡层内部的电场, 这就使漂移运动大大减弱, 扩散成了矛盾的主要方面, 这时, 二极管中的电流便由起支配地位的扩散电流所决定, 而且随着外加电压的增加, 扩散电流越来越大。这就是前面讲的二极管加正向电压的情况 (注意: 电子和空穴的扩散方向是相反的, 但由于带电极性也是相反的, 因此, 形成的电流方向却是一致的)。

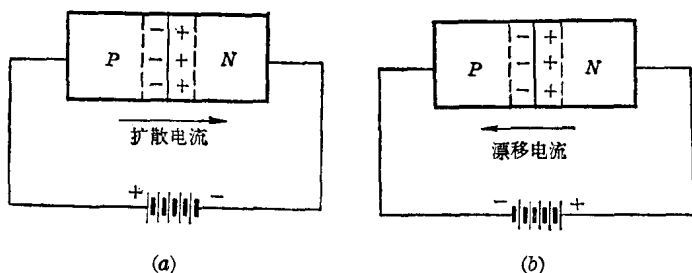


图 (1-2-2)

2. 二极管二端加反向电压, 如图 (1-2-2) (b) 所示。这个外加电压的方向和阻挡层内部的电场方向是一致的, 它将加强阻挡层内部电场的作用, 这就使漂移运动大大加强, 漂移成了矛盾的主要方面, 这时, 二极管中的电流便由起支配地位的漂移电流所决定, 它的方向与扩散电流的方向相反。由于漂移电流是由阻挡层内扩散来的非平衡载流子形成的, 它的数量较少, 所以反向电流很小, 即使反向电压增大, 反向电流也不会有很大的增加。

第三节 二极管的特性曲线和参数

一、二极管电流随外加电压变化的规律——伏安特性曲线

二极管电流随外加电压变化的规律, 可用实验方法测绘。先按图 (1-3-1) 连结起来。图中, BG 是待测二极管 (2AP14 锗二极管); V 是电压表; mA 是毫安表; R 是保护电阻 (以免电流太大

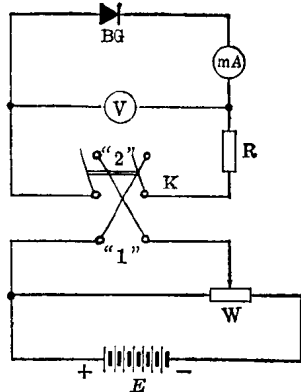


图 (1-3-1)

烧坏管子); W 是电位器; K 是双刀双向开关, 打向“1”时二极管外加正向电压, 打向“2”时则为反向电压。

先将 K 打向“1”, 调节电位器 W , 逐渐改变外加电压大小并分别记录电压表和毫安表读数, 如表 (1-3-1) 所示。再将 K 打向“2”, 同样, 测出电压和电流值, 也记在表 (1-3-1) 上。根据测得的数据即可描绘出二极管的伏安特性曲线, 如图 (1-3-2) 所示。

同样, 硅二极管 (2CP14) 的特性曲线, 也可根据图 (1-3-1) 所示的线路测绘, 测量的结果列为表 (1-3-2), 其对应的伏安特性曲线如图 (1-3-3) 所示。

表 (1-3-1)

正向电压 V_F (V)	0	0.2	0.4	0.6	0.8
正向电流 I_F (mA)	0	1	5	12	24
反向电压 V_R (V)	0	-5	-10	-15	-20
反向电流 I_R (mA)	0	-0.01	-0.05	-0.075	-0.12

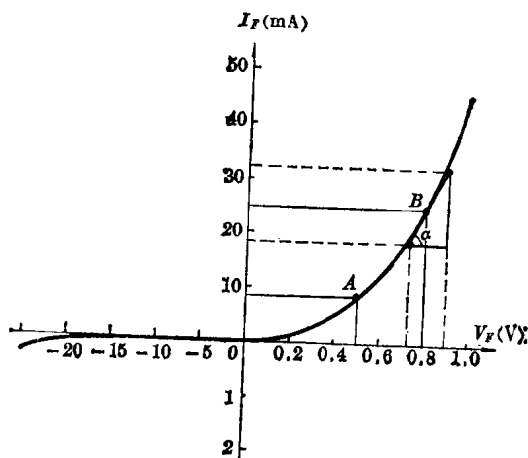


图 (1-3-2)

表 (1-3-2)

正向电压 V_F (V)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9
正向电流 I_F (mA)	0	0	0	1	10	24
反向电压 V_R (V)	0	-15	-30	-45	-60	-75
反向电流 I_R (mA)	0	0	0	0	0	0.001

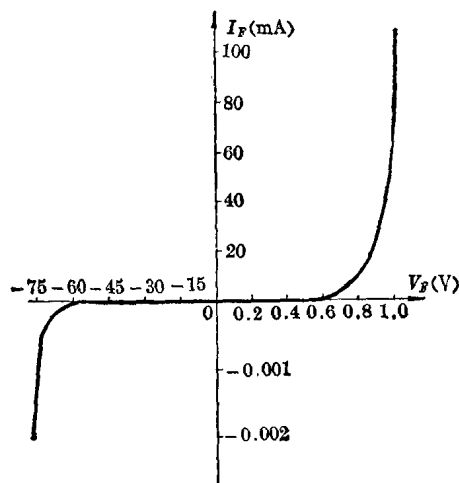


图 (1-3-3)

比较图(1-3-2)和(1-3-3)可知,硅二极管和锗二极管一样,均具有单向导电性。但是,它们却有区别。在正向区域,锗管大约在 $0.2 \sim 0.4$ V左右,电流开始显著增长,而硅管则要到 $0.6 \sim 0.8$ V左右,电流才开始显著增长;锗管电流上升的曲线比较斜而硅管电流上升的曲线相当陡,这说明硅管一经导通,电流便迅速增加。

在反向区域,硅管反向电流要比锗管小得多,一般较难测量。

二、二极管的参数及其等效电路

利用测绘出的二极管的伏安特性曲线,可以计算出表征二极管特性的某些参数。

1. 直流电阻(正、反向电阻) $R_{\text{直}}$: 二极管两端所加的电压与

流过的直流电流之比。

$$R_{\text{直}} = \frac{\text{二极管两端所加电压(正、反)}}{\text{电流(正、反)}}$$

如图(1-3-2), 若二极管工作在 A 点(对应的 $V_{FA}=0.5\text{V}$, $I_{FA}=9\text{mA}$), 则相应的 $R_{\text{直}}$ 为:

$$R_{\text{直}} = \frac{V_{FA}}{I_{FA}} = \frac{0.5\text{V}}{9\text{mA}} \doteq 55\Omega$$

若二极管工作在 B 点(对应的 $V_{FB}=0.8\text{V}$, $I_{FB}=24\text{mA}$), 则相应的 $R_{\text{直}}$ 为:

$$R_{\text{直}} = \frac{V_{FB}}{I_{FB}} = \frac{0.8\text{V}}{24\text{mA}} \doteq 33\Omega$$

由此可见, 二极管上流过的电流越大, 则直流电阻越小。这说明直流电阻是随着二极管工作状态的不同而变化的。通常, 用万用表测出的二极管电阻即为直流电阻。

2. 交流电阻 $R_{\text{交}}$: 二极管在工作点附近的电压变化值和相应的电流变化值之比。

$$R_{\text{交}} = \frac{\text{工作点附近电压的变化 } \Delta V}{\text{相应的电流的变化 } \Delta I}$$

从特性曲线上也很容易求出交流电阻。如欲求 B 点的交流电阻, 通常是在该点作一直线, 与特性曲线相切, 计算出该切线的斜率即可。由图(1-3-2):

$$R_{\text{交}} = \frac{1}{\text{tg } \alpha} = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{0.9-0.75}{32-18} = \frac{0.15\text{V}}{14\text{mA}} \doteq 11\Omega$$

在正向区域, 二极管的交流电阻很小(通常约几到几十欧姆), 这说明正向电压增加一点, 电流将增加很多。但反向交流电阻却极大(几百千欧姆以上), 这说明即使反向电压增加很多, 电流则几乎不变。硅管和锗管比较, 前者正向交流电阻要更小一些, 反向交流电阻则更大一些。

必须指出: 交流电阻的大小与工作点有关, 当电流很小时, $R_{\text{交}}$ 较大, 而随电流的加大, $R_{\text{交}}$ 逐渐减小, 当电流较大以后, $R_{\text{交}}$ 则基本维持不变。

3. PN 结电流额定值 I_M : I_M 也就是二极管的最大正向电

流。随着正向电压的增加,正向电流亦不断加大,但电流太大则会烧毁 PN 结。因此,每个二极管都有一个额定电流值 I_M ,工作电流只能在额定值以下。二极管额定电流的大小,决定于 PN 结的大小、材料和散热情况,可由半导体器件手册中查出。

4. 反向击穿电压 V_B : 当二极管所加的反向电压太高时,它的反向电流会突然剧增,对应于电流突变的这一点电压,称为二极管的反向击穿电压 V_B 。

当反向电压太高时,载流子在阻挡层中将受到强烈的电场加速作用,获得了巨大的能量,使它有可能碰撞其他原子,而产生新的电子空穴对,它们在高电压的作用下又可能再去撞碰别的原子,如此链锁反应,一下子便产生出大量的电子空穴对,致使反向电流剧增,这个现象称为雪崩击穿。击穿时,二极管上功耗将大大增加, PN 结很容易烧坏。因此,使用时所加的反向电压应不超过 V_B (最好不超过 V_B 的一半)。

5. 二极管极间电容: 翻开半导体器件手册还可以看到一个参数,二极管极间电容。这个电容实际上分两部分:一部分是 PN 结电容 C_{PN} ,它反映了在外加电场作用下阻挡层内部电荷的变化;另一部分是扩散电容 C_D ,它反映了在外加电场作用下,由于扩散作用在 N 型区内空穴(同样在 P 型区内电子)集聚的情况。

在低频时,二极管极间电容表现出的容抗很大,其作用可以忽略。高频时便不能忽略。

二极管的交流等效电路如图(1-3-4)所示。它等效成一个交

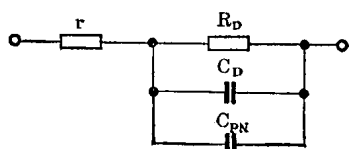


图 (1-3-4)

流电阻和二极管极间电容并联。图中, r 为二极管电极的引线电阻。高频使用时,则还要考虑引线电感。

第四节 三极管的电流分配关系

许多同志都知道三极管具有放大作用。但是,“感觉到了的东西,我们不能立刻理解它,只有理解了的东西才更深刻地感觉它。”

要了解三极管的放大作用，也必须从三极管的内部结构来讨论。

一、三极管的内部结构

三极管有三个电极：一个是发射极，用“ e ”表示；一个是集电极，用“ c ”表示；一个是基极，用“ b ”表示，如图(1-4-1)所示。基极 b 是从一块 P 型半导体上引出的，而发射极 e 和集电极 c 是分别接在二块 N 型半导体材料上的。这三块半导体“结合”在一道(P 型在中间， N 型在两旁)，在相互的交界面上就形成了二个 PN 结。处于发射极和基极之间的称为发射结；处于集电极和基极之间的则称为集电结，如图(1-4-2)所示。这种 NPN 结构便构成了半导体三极管。

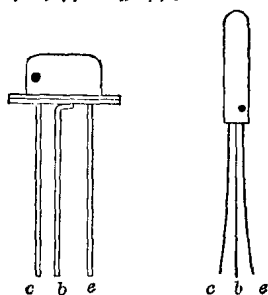


图 (1-4-1)

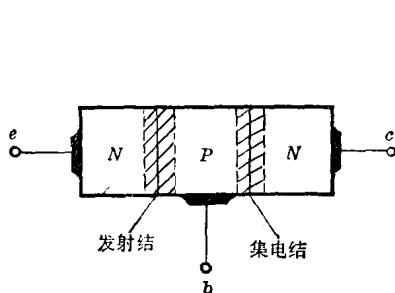


图 (1-4-2)

除了 NPN 结构外，还有一类 PNP 型三极管，它的基区是 N 型材料，而两旁是 P 型材料。为了区别起见，在半导体线路图中， NPN 型管和 PNP 型管分别用图(1-4-3)(a)和(1-4-3)(b)表示。这二种晶体管的作用原理是完全相似的，下面仅以 NPN 型管来分析。

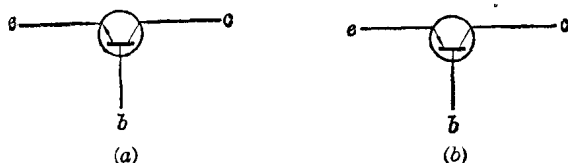


图 (1-4-3)

三极管有二个 PN 结，每个 PN 结都具有单向导电的作用。在使用时，往往将“ $e-b$ ”结(发射结)接成正向工作状态；而将“ $c-b$ ”结(集电结)接成反向工作状态，如图(1-4-4)所示。由于发射结处于正向，因此，发射区便有大量的电子扩散到基区，形成了发射极电流 I_e 。(N 型区电子扩散时，电源 E_b 便源源不断地补充其扩散掉的电子)。当

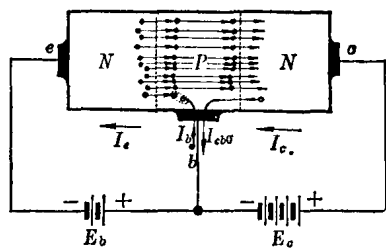


图 (1-4-4)

然，基区的空穴也会扩散到发射区，但是由于在制造工艺中，总是使发射区的电子浓度比基区的空穴浓度高得多，因此，穿越阻挡层的电流主要是由发射区的电子流所形成的。当大量电子注入基区后，一部分电子与基区的空穴“复合”，形成基极电流 I_b ；另一部分电子则通过基区，被“传送”到集电极的边缘(这种“传送”过程在半导体中称为“输运”过程)，由于集电极处于反向，因此，被“输运”到集电极边缘的电子(相当于基区的非平衡载流子)将被反向电压 E_c 吸引过去，进入集电区，最后达到电源 E_c 的正极端，形成集电极电流 I_c 。

在 NPN 结中， I_e 、 I_b 、 I_c 之间的关系是：

$$I_e = I_b + I_c \quad (1-4-1)$$

如前所述，处于反向状态的集电结也会有一定的反向电流，其大小决定于集电结的漂移电流，在三极管中称为反向饱和电流，以符号 I_{cbo} 表示。它是 I_c 和 I_b 中的一部分，但对 I_e 却没有影响，因此，对(1-4-1)式也没有影响。

从以上的分析，我们可以看到，在三极管的工作过程中，情况是比较复杂的。首先，在发射结存在着电子从发射区向基区的扩散和空穴从基区向发射区的扩散；其次，到达基区的电子又有与基区空穴的“复合”和向集电极的“输运”；最后，在集电结还存在吸收基区“输运”来的电子和集电极的反向漂移运动。毛主席教导我们：“研究任何过程，如果是存在着两个以上矛盾的复杂过程的话，

就要用全力找出它的主要矛盾。”在 NPN 结中,第一种情形只局限于发射结内,其扩散运动是通过制造工艺人为地控制的。第三种情形也只是局限于集电结,而且通常反向饱和电流(漂移电流)很小。只有第二种情况,它既联系于发射结又影响到集电结,贯穿三极管整体。在三极管中,正是由于这一矛盾——“输运”与“复合”,决定了三极管的放大作用。

二、三极管的电流分配关系

在制造三极管时,人们总是将基区做得极薄,以致电子进入基区后,往往来不及“复合”,便已经达到了集电极的边缘。因此,电子在基区“复合”的数目很少,一般只占从发射极扩散来的电子的百分之一、二、三,其大部分电子被“输运”到集电极边缘并且被吸收到集电区,形成集电极电流。这就是说,“输运”过程是矛盾的主要方面,“复合”是次要的。集电极电流 I_c 大大超过基极电流 I_b ,而且,由于基区厚度等因素已固定,这就使得“输运”和“复合”过程的比例关系亦随之固定,亦即晶体管的 I_c 和 I_b 之间总维持一个固定的比例关系。

三极管各电极之间的电流,一方面要维持(1-4-1)式;另一方面,又要维持 I_c 和 I_b 之间的一定的比例关系。这二条,就完全决定了晶体管内部的电流分配规律。图(1-4-5)所示的示意图中,从发射极出发的大箭头表示电子流,而从集电极到基极的小箭头是

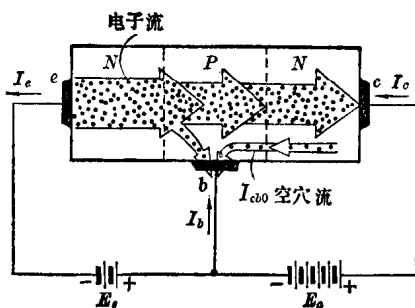


图 (1-4-5)

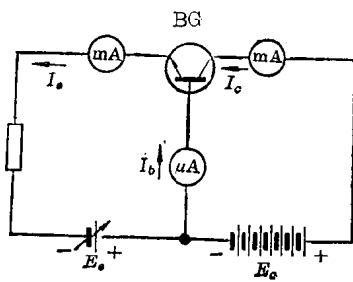


图 (1-4-6)