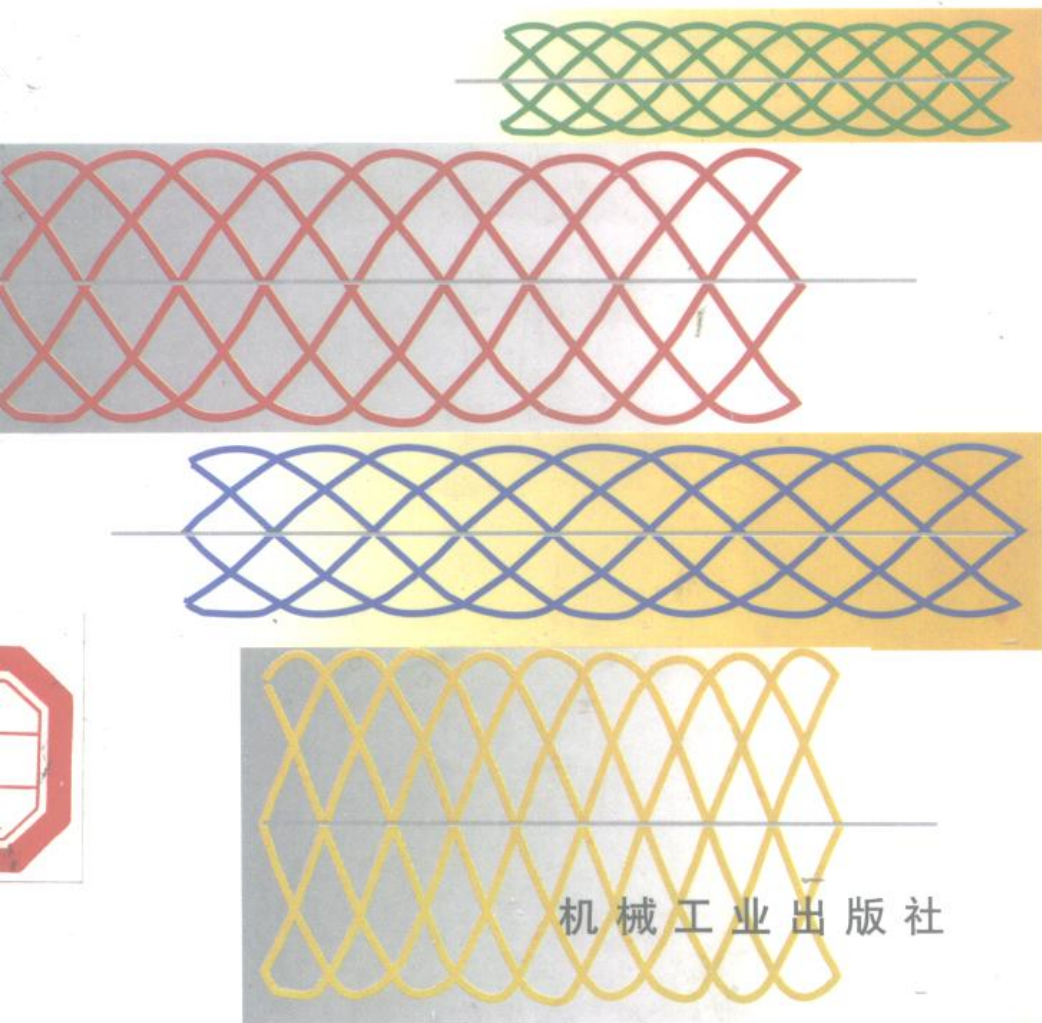


电子技术原理

吉健 编著



机械工业出版社

电子技术原理

吉健 编著



机械工业出版社

本书讨论电子技术中基本的和广泛应用的电子线路的工作原理、各元件的作用、电路的物理过程、基本参量、图解分析法、微变等效电路分析法、各项指标的推证、设计原理、设计公式、设计举例、调整测试与应用等内容。

本书分析严密，深入浅出，内容充实，系统性好。本书可供高等学校各有关专业（包括电类专业和信息类专业）阅读，亦可供从事电子技术（包括自动化技术与计算机科学等领域）和无线电工程以及通信工程等方面的有关人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

电子技术原理/吉健编著. —北京：机械工业出版社，1998.2
ISBN 7-111-05978-6

I. 电… I. 吉… III. 电子技术-高等学校-教学参考资料
N. TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 22729 号

出 版 人： 马九荣（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：刘思源 版式设计：冉晓华 责任校对：罗凤书

封面设计：方 芬 责任印制：路 琳

北京市密云县印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1998 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm^{1/32}·11.375 印张·1 插页·248 千字

0 001—3 000 册

定价：18.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

前 言

本书根据高等学校对于电子线路类课程（包括电子技术基础课、电子电路基础课与集成电路基础课程等）教学的基本要求，结合作者的教学与研究实践，编著完成。

本书对电子技术的基本线路进行了透彻的分析与讨论，对于应用广泛的电子线路，则从各个不同的方面进行了深入的探讨，既照顾到专业学习的需要，也兼顾到各个领域从事电子技术的有关人员阅读。在内容取舍上既保证了基本内容，又考虑了电子技术的新发展。

本书在电子线路的静态方面，首次提出并采用静态理想稳定方程分析和设计电子线路，得出了各种基本电路的系列最佳静态设计公式，将电路的偏置稳定性提高到新的水平；在电路的动态分析方面，提出并采用杂系本征系数分析和设计电子线路，得出了基本电路完善的系列的设计关系式，研究出基本电路全面的和更加深入的特性与指标（例如首次推证出功比和恒定律）。在电子技术的实践方面，本书在有关章节之后，撰写了诸如电子线路的调整与测试等内容，便于理论联系实际。

本书原稿由南京大学电子学与信息系统教研室主任沈振宇教授与国营七一四厂总工程师吴宏日教授审阅，均提出了许多宝贵意见，并推荐出版，作者谨致衷心谢忱。

因作者水平所限，书中欠缺与错误之处，尚请指正，不胜感激！

作者

1997.6

主要符号表

A	增益, 系数, 面积, 比值, 参量	S	信号, 源极, 下偏置电阻下标, 稳定系数
B	常数, 系数, 基极代号	T	温度, 绝对温度, 周期
C	电容, 集电极代号	t	温度, 时间
D	常数, 扩散系数	V, v	电压; 伏特
E	电场, 发射极代号	V_{NX}	N 极与 X 极间静态电压 ($N=B, C, D$ 等; $X=E, B, S$ 等)
F	反馈系数, 低频频率; f 频率, 比	v_{nx}	n 极与 x 极间交变电压($n=b, c, d$ 等; $x=e, b, s$ 等)
H, h	杂系参量, 常数	Y, y	导纳, 导纳参量
I, i	电流, 本征代号	Z	阻抗, 零点代号, 负载的一种代号
I_N, I_{NQ}	N 极静态电流 ($N=B, E, C, D, S, G$ 等)	α	共基极电流放大系数, 共基短路电流增益
i_N	N 极瞬时电流 (含直流成分), (N 同上)	β	共射极电流放大系数, 共射短路电流增益
i_n	n 极交变电流 (不含直流成分), ($n=b, e, c, d, s, g$)	γ	非线性失真系数, 常数
K, k	常数, 系数	δ	衰减系数
L	电感, 扩散长度	η	效率, 比值
M	互感, 最大; m 最小, 比, 温度系数	ρ	特性阻抗比, 电阻率
P	功率, 增益函数的极点	ξ	本征系数, 常数
Q	电荷量, 静态的符号, 品质因数, 常数	σ	相对失谐参量, 比
R, r	电阻, 参考电压代号		

目 录

前言

主要符号表

第1章 基本概念	1
1.1 半导体二极管特性	1
1.2 三极管原理	4
1.3 静态特性曲线	8
1.4 场效应晶体管	10
1.5 三极管主要参量	15
1.6 场效应管使用特性	17
1.7 半导体器件焊接与安装	18
附录 1. A 埃伯尔斯-莫尔方程	18
第2章 静态分析与设计	23
2.1 静态理想稳定方程	23
2.2 基本电路静态分析	27
2.3 静态工作点与失真	32
2.4 影响静态工作点的因素	34
2.5 电流镜恒流源	36
2.6 微电流源偏置电路	39
2.7 带增益电流镜	41
2.8 威尔逊电流源	42
2.9 直流电压负反馈偏置电路	43
2.10 直流电流负反馈偏置电路	45
2.11 分压式负反馈偏置电路	47
2.12 偏置电路设计	50
2.13 高输入阻抗分压式偏置电路	51

2.14	双反馈式偏置电路	52
2.15	反馈对静态分析与设计	54
2.16	补偿式偏置电路分析与设计	64
2.17	放大器热稳定性分析与设计	67
2.18	偏置电路调试	72
第3章	基本放大器分析	74
3.1	图解分析法	74
3.2	h 参量及其等效电路	79
3.3	微变等效电路分析法	83
3.4	晶体管跨导	92
3.5	阻抗匹配与功率增益	93
3.6	功比和恒定律	99
3.7	不同电路组态 h 参量之间的关系	103
3.8	共基极放大器分析	107
3.9	共集电极放大器分析	112
3.10	三种基本电路性能比较	118
3.11	其他参量及其等效电路	120
3.12	信号流图分析法	122
3.13	放大器调试	124
第4章	反馈放大器	127
4.1	反馈原理	127
4.2	电流串联负反馈放大器	134
4.3	电压串联负反馈放大器	140
4.4	电压并联负反馈放大器	144
4.5	电流并联负反馈放大器	151
4.6	负反馈对输入阻抗与输出阻抗的影响	157
4.7	负反馈放大器举例	163
4.8	负反馈放大器测试	165
第5章	放大器的频率响应	167

5.1 引言	167
5.2 低频响应	170
5.3 混合参量 Π 型等效电路	177
5.4 密勒定理	178
5.5 中频响应	180
5.6 高频响应	181
5.7 多级放大器的频响	183
5.8 频率响应与放大器稳定性分析	185
5.9 频率响应测试	189
第 6 章 集成运算放大器	191
6.1 集成运算放大器组成	191
6.2 直接耦合放大器	193
6.3 复合管放大器	194
6.4 互补对称式放大器	197
6.5 差动放大器原理	197
6.6 差动放大器电路与计算举例	203
6.7 集成运算放大器参量	209
6.8 集成运算放大器内部电路举例	210
6.9 集成运算放大器外特性分析	213
6.10 比例运算器、加法器与减法器	214
6.11 对数式运算器和指数式运算器	222
6.12 乘法器和除法器	223
6.13 积分器和微分器	226
6.14 有源滤波器	227
6.15 开关电容电路	229
6.16 集成运算放大器的其它应用	231
6.17 运算误差分析	235
6.18 集成运算放大器测试	237
第 7 章 功率放大器	238

7.1 引言	238
7.2 功率管的运用限制	239
7.3 乙类推挽功率放大器分析	239
7.4 乙类推挽功率放大器非线性失真	242
7.5 OCL 功率放大器	243
7.6 OTL 与 BTL 功率放大器	246
7.7 单边甲类功率放大器	248
7.8 功率放大器测试	250
附录 7.A 变压器耦合放大器	250
第 8 章 场效应管电路	253
8.1 场效应管偏置分析	253
8.2 场效应管微变等效电路	255
8.3 共源放大器一般分析	256
8.4 共源放大器的低频响应	258
8.5 共源放大器的高频响应	259
8.6 共漏放大器	261
8.7 共栅放大器	263
第 9 章 整流与稳压电路	265
9.1 桥式整流器	265
9.2 稳压原理	265
9.3 开关稳压器原理	268
9.4 晶闸管整流器	269
9.5 换流器	271
9.6 集成稳压器	272
9.7 可调集成稳压器	273
9.8 可调单结晶体管	276
9.9 稳压器调试	277
附录 9.A 晶闸管整流实践	278
第 10 章 高频管特性与应用电路	279

10.1	高频管特性	279
10.2	高频小信号放大器	281
10.3	正弦波自激振荡器	282
10.4	调幅器	290
10.5	调频器	291
10.6	混频器	293
10.7	检波器	294
10.8	自激振荡器调试	295
附录 10.A	阻容振荡器	296
第 11 章	脉冲与数字电子技术	298
11.1	概述	298
11.2	脉冲信号频谱	299
11.3	电路的瞬变特性	305
11.4	基本脉冲电路	307
11.5	逻辑代数	310
11.6	门电路	312
11.7	基本 RS 触发器	319
11.8	触发器电路	321
11.9	脉冲振荡器	326
11.10	基本逻辑电路	329
11.11	电子计算机概述	335
11.12	电子技术实践	340
附录 11.A	集成电路制造	345
参考文献		349

第1章 基本概念

1.1 半导体二极管特性

半导体二极管，简称为二极管，它结构的核心是PN结，另外加上电极引线 and 外壳构成。按照结构的不同，分为点接触型和面结合型两种，前者极间电容小，可在高频以至超高频范围工作；后者极间电容大，适用于工频与低频电路。如果按照所用材料分类，有锗二极管、硅二极管、砷化镓二极管与磷化镓二极管等，锗二极管在小信号时灵敏度较高，可用在接收机的检波电路中；硅二极管具有较高的工作温度与较高的耐压，适于整流和开关电路应用；砷化镓二极管和磷化镓二极管在通电流（数毫安至十毫安）的情况下具有发光性能（前者发红外光后者发绿光），称为发光二极管，用于显示电路。

二极管又可以分为普通二极管与专用二极管，前者即已提到的锗二极管与硅二极管，后者除前述的发光二极管外，还有稳压二极管（利用反向击穿后，二极管电压近于恒定的性能）、变容二极管（利用PN结反偏时，其结电容随外加电压变化的性能）、光电二极管（利用光照射到二极管的PN结上，二极管的电流随光强度变化的性能）与隧道二极管（利用重掺杂的PN结，在低的电压下具有负阻特性）等。

1.1.1 二极管的伏安特性

普通二极管的伏安特性如图 1.1-1 所示。该图符合 PN

结的伏安方程,

$$I = I_s(e^{V/V_T} - 1) \quad (1.1-1)$$

$$V_T = kT/q \quad (1.1-2)$$

式中, I_s 是和外施电压无关的系数, 叫做反向饱和电流; V 是 PN 结电压, 体电阻很小时近似于外加

电压; V_T 称为热电压; q 是电子的电荷量; T 是绝对温度; k 是玻耳兹曼常数, 室温下 $V_T \approx 26\text{mV}$ 。

在式 (1.1-1) 中, 如 $V \gg V_T$, 则 $I \approx I_s e^{V/V_T}$ (1.1-3)
由上式得到 $V \approx V_T \ln I/I_s$ (1.1-4)

观察伏安特性可知: 当正向电压大于 0.5V 时, 二极管电流开始显著增大, 当低于 0.5V 时正向电流很小, 为此把 0.5V 叫做阈值电压 (注意对于锗管为 0.1V); 当 $V = 0.7\text{V}$ 时, 二极管导电相当充分, 于是把 $V > 0.7\text{V}$ 作为硅二极管的导通条件 (对锗管, 此条件为 $V > 0.3\text{V}$); 把 $V < 0.5\text{V}$ (硅管) 称为截止 (或断路) 条件 (对锗管为 $< 0.1\text{V}$)。

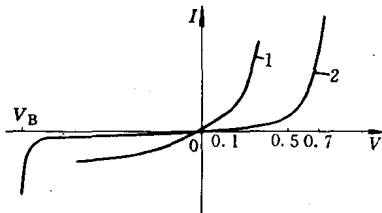
当二极管承受反向电压时, 反向电流很小 (硅管仅数十纳安), 但当反向电压升高到某一数值时, 反向电流剧增, 二极管击穿。

1.1.2 二极管电阻

二极管直流电阻定义为

$$R = V/I \quad (1.1-5)$$

式中, V 为加于二极管上的电压; I 为通过二极管的电流, 例如 $V = 0.7\text{V}$, $I = 10\text{mA}$ 时, $R = 70\Omega$ 。



1—锗二极管; 2—硅二极管

图 1.1-1 半导体二极管伏安特性

1—锗二极管 2—硅二极管

二极管交流电阻（动态电阻）定义为 $r = \frac{dV}{dI}$

根据式 (1.1-1)，得到

$$r = V_T / I \quad (1.1-6)$$

式中， I 为二极管工作点电流，当 $I = 1.5 \text{ mA}$ 时， $r = 26 / 1.5 \approx 17.3 \Omega$ 。

1.1.3 二极管电容

二极管电容由两部分组成，分述如下：

1. 势垒电容 C_T 在阻挡层内，空间电荷随外加电压变化所形成的电容即是 C_T ，根据泊松方程，对于突变结得到

$$C_T = K_1 / \sqrt{V} \quad (1.1-7)$$

$$K_1 = \{\epsilon q / [q(N_A^{-1} + N_D^{-1})]\}^{\frac{1}{2}} A,$$

式中， ϵ 为介电常数； N_A 和 N_D 分别是受主与施主杂质浓度； $V = V_r + V_j$ ，其中， V_j 为接触电势差； V_r 是反向电压数值； A 为 PN 结横截面积。

当外加电压 $V_r = 0$ 时， $C_T|_0 = K_1 / \sqrt{V_j} = C_0$ 。

由上列关系得到

$$C_T = C_0 / (1 + V_r / V_j)^{\frac{1}{2}} \quad (1.1-8)$$

按照同样的方法，可以求得对于缓变结有

$$C_T = C_0 / (1 + V_r / V_j)^{\frac{1}{3}} \quad (1.1-9)$$

将上列两式用统一式子表示如下：

$$C_T = C_0 / (1 + V_r / V_j)^n$$

式中， n 为常数，决定于 PN 结性质，对突变结 $n = 0.5$ ；对缓变结 $n = 0.33$ ；对于超突变结 ($P^{++}N^{+}$)； n 大于 1。

2. 扩散电容 C_D 在 PN 结两边，扩散来的少数载流子积累到大于原来浓度时，才继续扩散，此少数载流子电荷对于

电压变化量之比即 C_D ，根据半导体物理学分析得到

$$C_D = BI$$

式中， B 为常数，与材料性质与尺寸有关； I 为正向电流。

根据上面分析，二极管电容为 $C_d = C_D + C_T$ 。

1.2 三极管原理

半导体三极管简称三极管或晶体管，通常指的是双极型晶体管 BJT，它由两个相互联系的 PN 结组成，如图 1.2-1 所示。图中 e 为发射极；c 为集电极；b 为基极。图 a 是平面三极管管芯，接上引线，装入外壳，就成为通常看到的三极管；图 b 是集成电路中三极管的管芯；图 c 是 PNP 三极管的管芯。它们的共同特点是基区制造得薄并且杂质浓度低，而发射区则具有高的杂质浓度。在制造三极管的材料中，硅半导体用得最多，因为它有如下特点：制成的三极管工作温度高，反向截止电流小，在生产中可利用硅表面氧化得到的二氧化硅层，既防止芯片沾污，又掩盖住硅片表面，防止杂质扩散到硅片内部，影响器件的正常工作。

由发射极和基极所组成的 PN 结，叫做发射结，简称 EB 结，一般工作时加正向电压；由集电极和基极组成的 PN 结称为集电结，简称 CB 结，工作时接上反向电压，叫做反偏，与此对应，前者称为正偏。通常 CB 结具有较大的截面积，以提高正向电流放大系数。

三极管的电极联结有不同的形式，以发射极为公共端的接法，称为共射电路组态，简称为共射（极）电路或 CE（或 GE）电路；同样，共基（CB 或 GB）电路与共集电极电路（CC 或 GC）则分别以基极和集电极为公共端。图 1.2-2 给出共射电路的原理性联结图。

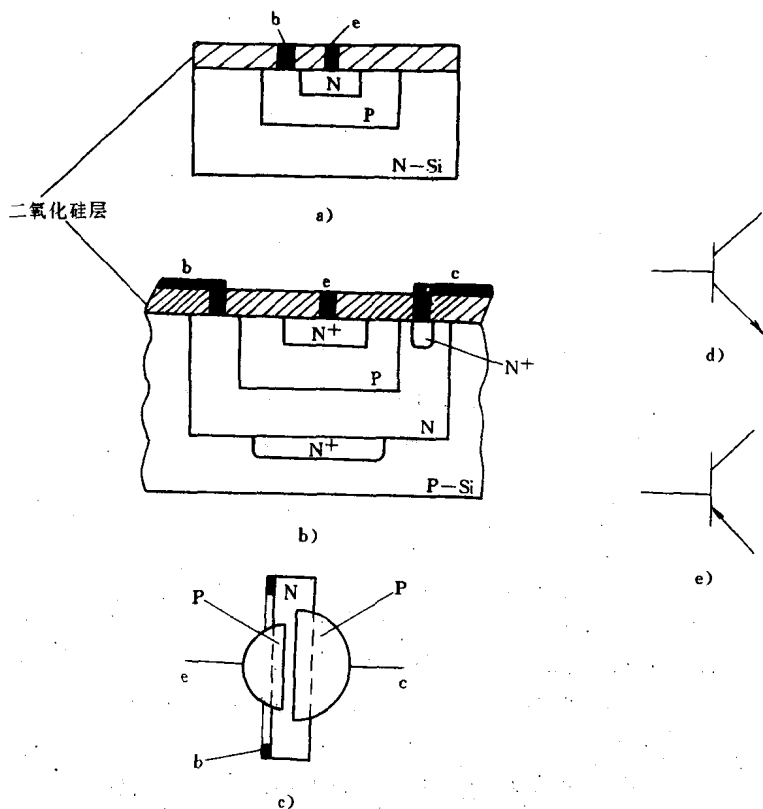


图 1.2-1 半导体三极管管芯结构

- a) 硅 NPN 平面管 b) 集成电路中 NPN 管 c) 锗 PNP 管
d) NPN 管符号 e) PNP 管符号

1.2.1 三极管各极电流组成

1. 发射极电流的组成 如前所述, 发射结正偏时, 发射极电流(用 I_E 表示)由两部分组成, 其一是发射区的电子

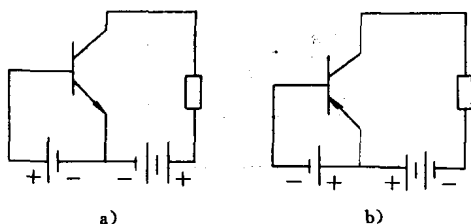


图 1.2-2 共发射极直流电源接法

a) NPN 管共射放大器 b) PNP 管共射放大器

(为了分析方便,除非特指,本书均以 NPN 型三极管作为讨论的基础)向基区扩散,所形成的电子扩散电流,叫注入电流,它构成 I_E 的一部分,其数值用 I_1 表示。扩散到基区的电子由于浓度的不同,电子将向集电极扩散,一旦扩散到 CB 结边界,就被 CB 结内的电场拉到集电极去,形成集电极电流 (I_C) 的一部分。其二是从基区向发射区扩散的空穴,形成空穴扩散电流 I_2 ,这一部分电流只在发射极回路内流通,不产生输出,是无用的部分。从上面讨论可以写出 $I_E = I_1 + I_2$,为了说明发射结的性能优劣,定义注入效率 $\eta_e = I_1 / I_E$,通常 η_e 达 99% 以上。

2. 集电极电流 I_C 的组成 集电极电流由两部分组成,如图 1.2-3 所示。其一是从发射极扩散过来的电子电流 I_{Cn} ,它占 I_1 的百分数用 η_b 表示,称为基极传输效率,即 $\eta_b = I_{Cn} / I_1$; 其二是集电结的反向饱和电流(又叫反向截止电流) I_{CBO} ,小功率锗管 I_{CBO} 在 $10\mu A$ 上下,小功率硅管的 I_{CBO} 只有数十纳安左右。

由于 I_{Cn} 是从输入端(对于共基极,发射极是输入端)流到输出端(共基极的输出端是集电极)的有用电流,定义为

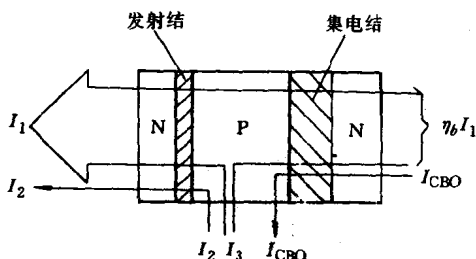


图 1.2-3 NPN 型晶体管各极电流组成示意图

共基极的电流放大系数

$$\alpha_0 = I_{Cn} / I_E$$

或改写为 $\alpha_0 = (I_{Cn} / I_1) (I_1 / I_E) = \eta_e \eta_b$

综合上述, $I_C = I_{Cn} + I_{CBO}$

即 $I_C = \alpha_0 I_E + I_{CBO}$ (1.2-1)

上式称为共基极直流电流传输方程。

3. 基极电流的组成 其一是从基区扩散到发射极的空穴 I_2 , 它在基极与发射极回路内流通, 组成基极电流 I_B 的一部分; 其二是从发射极扩散到基区的电子, 在基区扩散的过程中, 有一少部分电子和基区的空穴复合, 形成基极复合电流 I_3 ; 其三是集电极反向饱和电流, 仅在集基回路内流通, 是无用且有害的成分 (因它和信号的放大无关)。这样

$$I_B = I_2 + I_3 - I_{CBO}$$

式中, I_3 可以写成 $I_3 = I_1 - \alpha_0 I_E$, 代入上式, 整理后得到

$$I_B = (1 - \alpha_0) I_E - I_{CBO} \quad (1.2-2)$$

1.2.2 直流传输方程

按照式 (1.2-1) 求得 $I_E = (I_C - I_{CBO}) / \alpha_0$ 代入式 (1.2-2) 中得到