

电路与电子技术基础

第四章 半导体基础

宋雪萌

songxuемeng@sdu.edu.cn

目录

4.1 半导体的导电特性

4.2 半导体二极管

4.3 二极管电路的分析计算

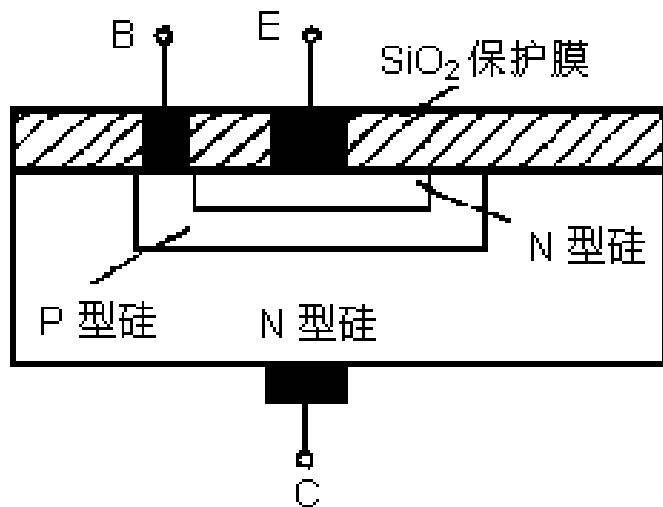
4.4 半导体三极管

4.5 晶体管三极管的工作状态分析

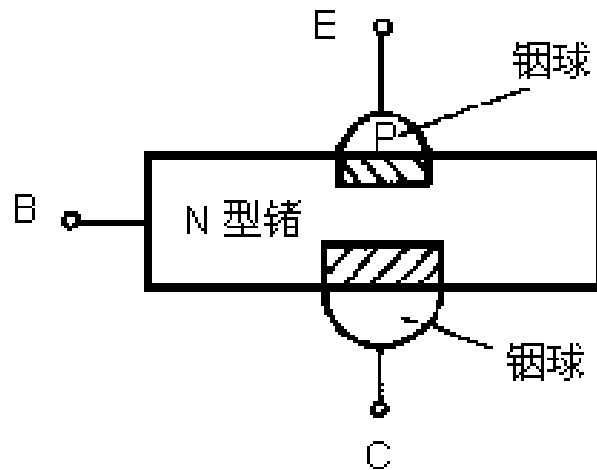
半导体三极管 (Bipolar Junction Transistor)

半导体三极管也叫“晶体三极管”，简称“晶体管”，是一种具有电流放大作用的半导体器件。

晶体三极管是由三层半导体构成的，其结构主要有平面型和合金型两类。硅管主要是平面型，锗管主要是合金型。



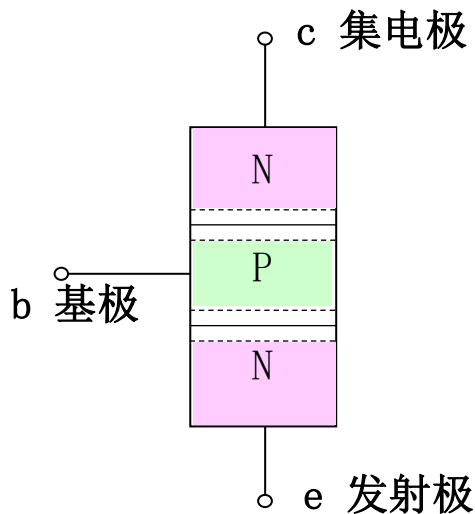
(a) 平面型



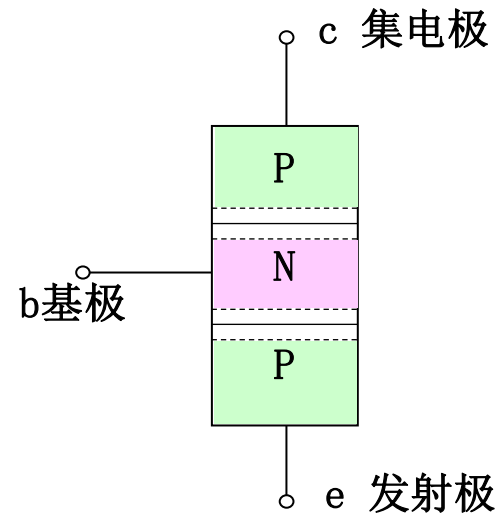
(b) 合金型

半导体三极管

晶体管的三层半导体是在同一块单晶硅或单晶锗基片上，通过扩散工艺生成的三层不同类型的半导体，如**N型-P型-N型**（**NPN型**），或**P型-N型-P型**（**PNP型**）。



(a) NPN型晶体管

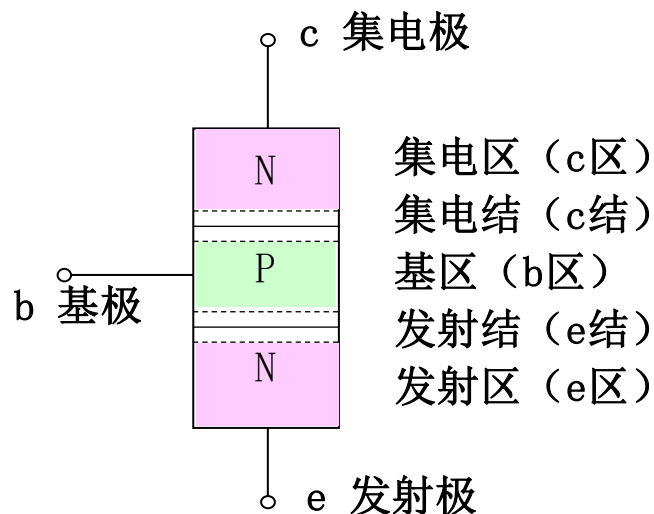


(b) PNP型晶体管

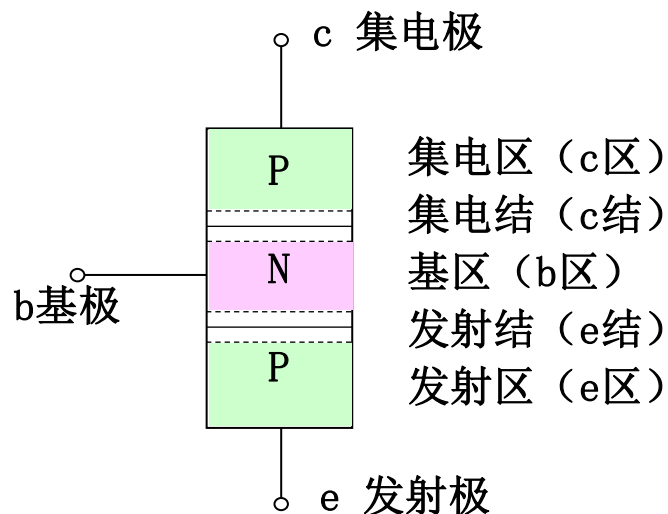
半导体三极管

- 无论是NPN还是PNP型, 内部均含有: 发射区、基区、集电区。
- 各引出一个金属电极: 发射极(e)、基极(b)和集电极(c)。
- 三区两个交界处形成两个PN结, 发射区与基区之间形成发射结, 集电区与基区之间形成集电结。

即: 三层半导体, 两个PN结, 3个电极。



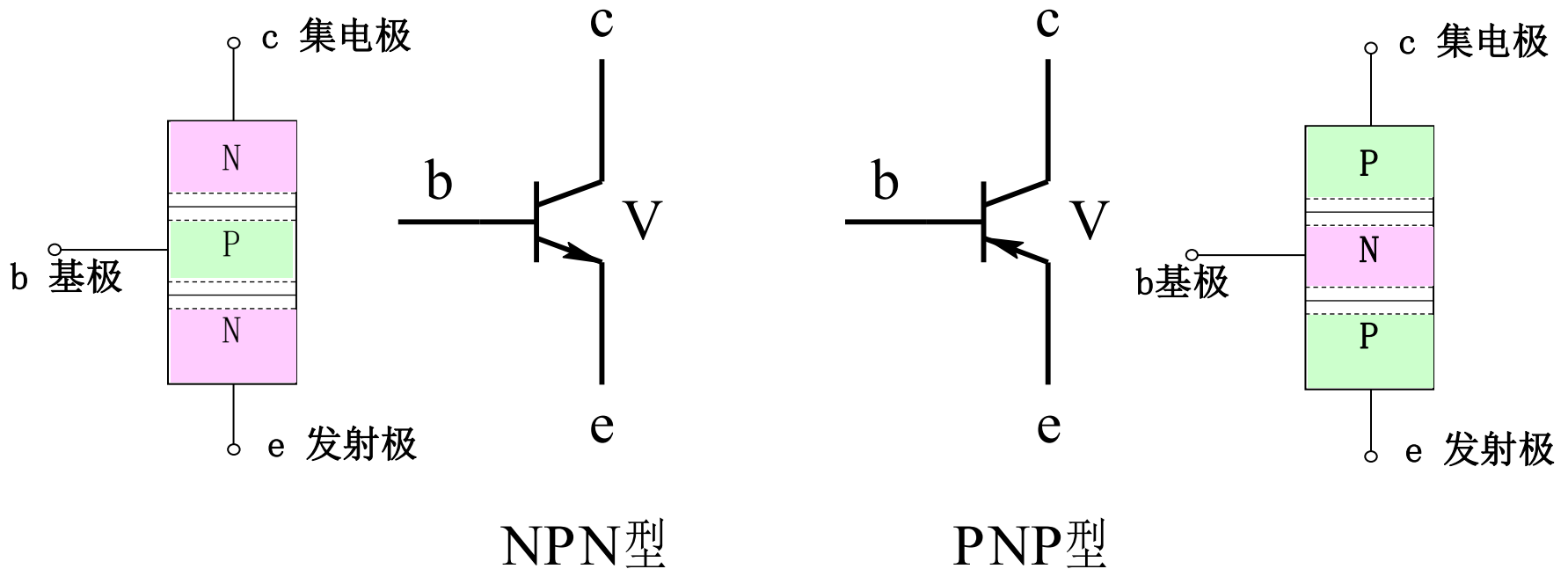
(a) NPN型晶体管



(b) PNP型晶体管

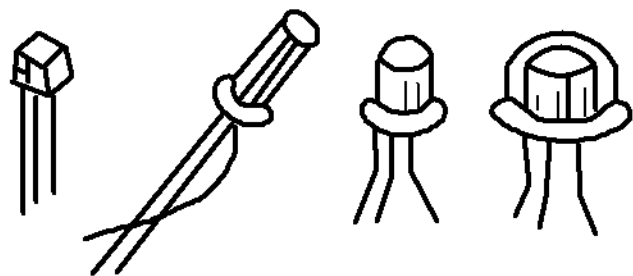
半导体三极管

三极管的电路符号如图所示, 符号中的箭头方向表示发射结正向偏置时的电流方向。

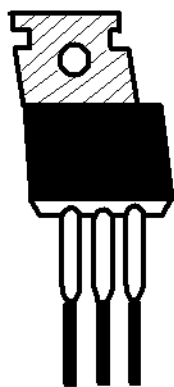


(b)

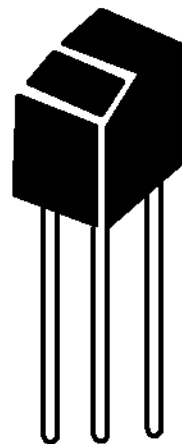
半导体三极管



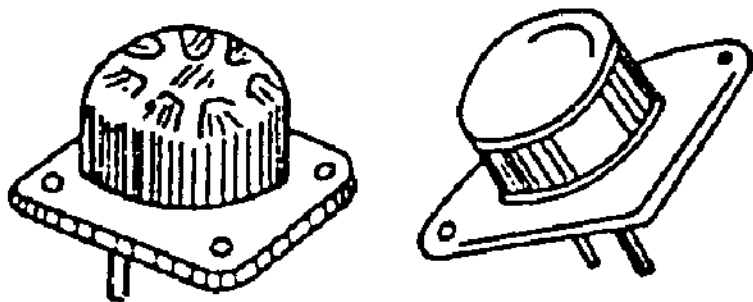
小功率管



塑封管



硅铜塑封三极管



低频大功率三极管

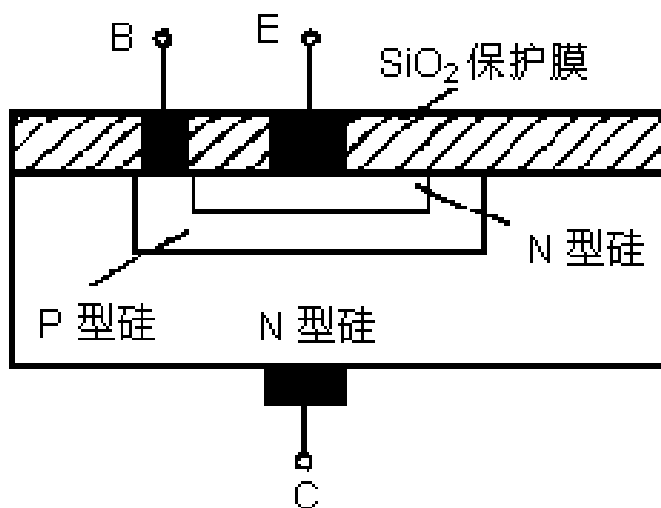
常见三极管的外形结构

半导体三极管

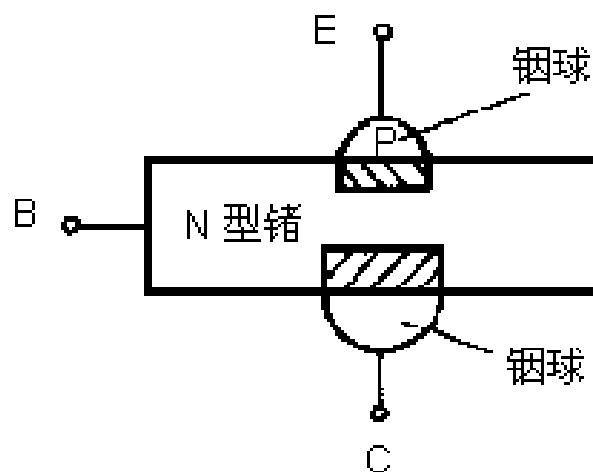
基区薄，低掺杂；集电结大

- (1) 基区很薄且掺杂浓度低；
- (2) 发射区掺杂浓度高；
- (3) 集电结面积远大于发射结。

电流放大的内部条件



(a) 平面型



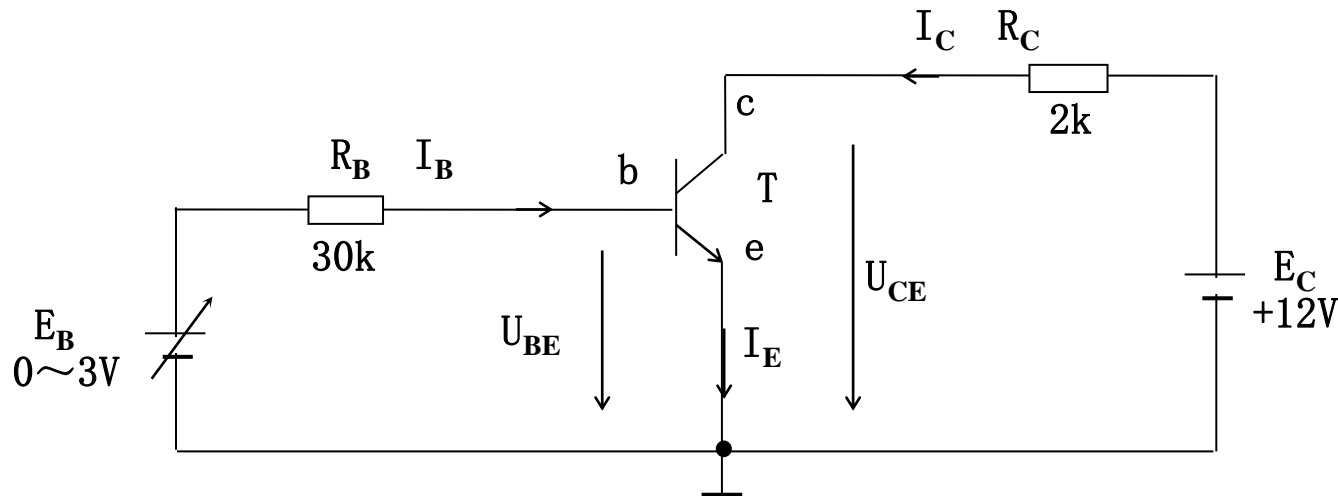
(b) 合金型

三极管的电流分配与放大作用原理

三极管实现放大作用的外部条件是发射结正向偏置，集电结反向偏置。

下图为NPN管的偏置电路（共发射极接法）：

基极（输入）回路，集电极（输出）回路，发射极是公共端。



NPN管的偏置电路

图中所加电压应使**e**结正偏，**c**结反偏（放大的外部必要条件）。

改变基极电源 E_B ，则基极电流 I_B 、集电极电流 I_C 和发射极电流 I_E 都会发生变化。按图示参考方向，测量各电极电流的数值，结果如下表。

三极管的电流分配与放大作用原理

表4-1晶体管电流测量数据

I_B (mA)	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1
I_C (mA)	<0.001	0.70	1.5	2.30	3.10	3.95
I_E (mA)	<0.001	0.72	1.54	2.36	3.18	4.05

由此实验及测量结果可得出如下结论：

- (1) 观察实验数据中的每一列，可得 $I_E = I_C + I_B$ 。这是基尔霍夫电流定律的体现。
- (2) I_C 及 I_E 都比 I_B 大得多。从第三列和第四列的数据可知， I_C 与 I_B 的比值分别为

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{1.5}{0.04} = 37.5, \quad \frac{I_C}{I_B} = \frac{2.3}{0.06} = 38.3$$

这就是晶体管的电流放大作用。常用一个系数 $\bar{\beta}$ 表示晶体管集电极电流和基极电流的比值，即 $I_C = \bar{\beta} I_B$ 。 $\bar{\beta}$ 表示了晶体管的电流放大能力，称为“电流放大系数”。晶体管的电流放大作用还体现在基极电流的少量变化 ΔI_B 可以引起集电极电流较大的变化 ΔI_C 。还是比较第三列和第四列的数据可得出

$$\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{2.3 - 1.5}{0.06 - 0.04} = \frac{0.8}{0.02} = 40$$

三极管的电流分配与放大作用原理

表4-1晶体管电流测量数据

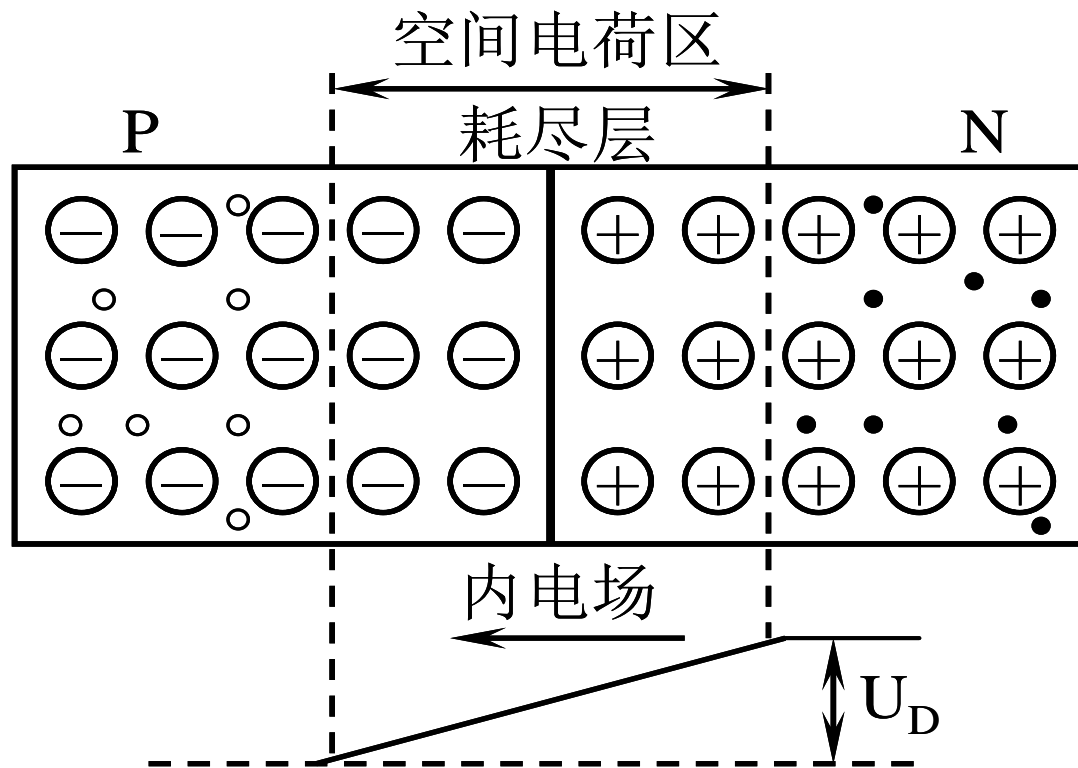
I_B (mA)	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1
I_C (mA)	<0.001	0.70	1.5	2.30	3.10	3.95
I_E (mA)	<0.001	0.72	1.54	2.36	3.18	4.05

由此实验及测量结果可得出如下结论：

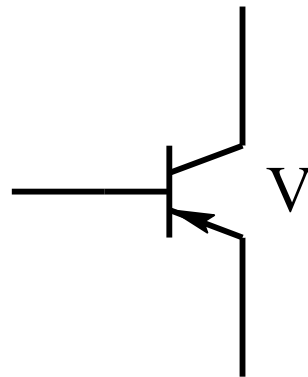
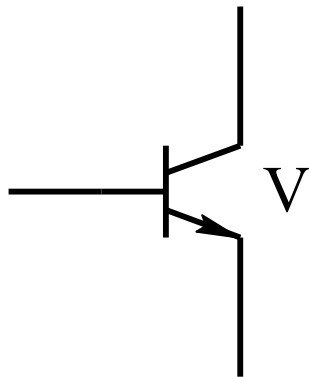
(3) 当 $I_B=0$ （将基极开路）时，集电极电流很小。表 4-1 所示小于 $0.001\text{mA}=1\text{ }\mu\text{A}$ 。这时的集电极电流称为“穿透电流”，用符号 I_{CEO} 表示。

下面用载流子在晶体管内部的运动规律来解释上述结论。

半导体二极管



半导体三极管



三极管内部载流子运动

- (1) 基区很薄且掺杂浓度低;
- (2) 发射区掺杂浓度高;
- (3) 集电结面积远大于发射结。

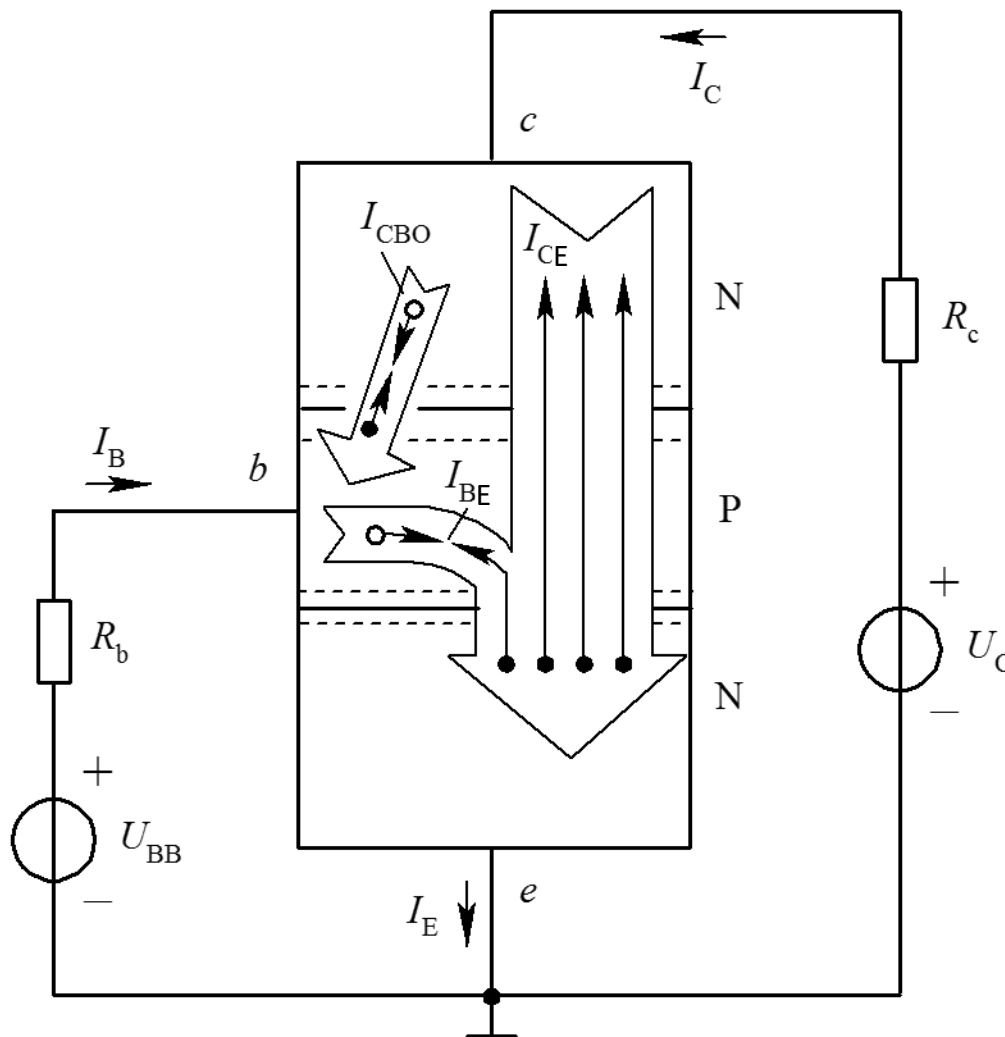
1) 发射区向基区发射电子

e结正偏，发射区向基区注入电子，形成 I_E

2) 电子一小部分在基区与空穴复合形成 I_B

3) 电子被集电区收集

c结反偏，对进入b区的电子有强吸引作用，使大部分进入c区，形成 I_C



三极管内部载流子的运动情况¹⁴

三极管内部载流子的运动

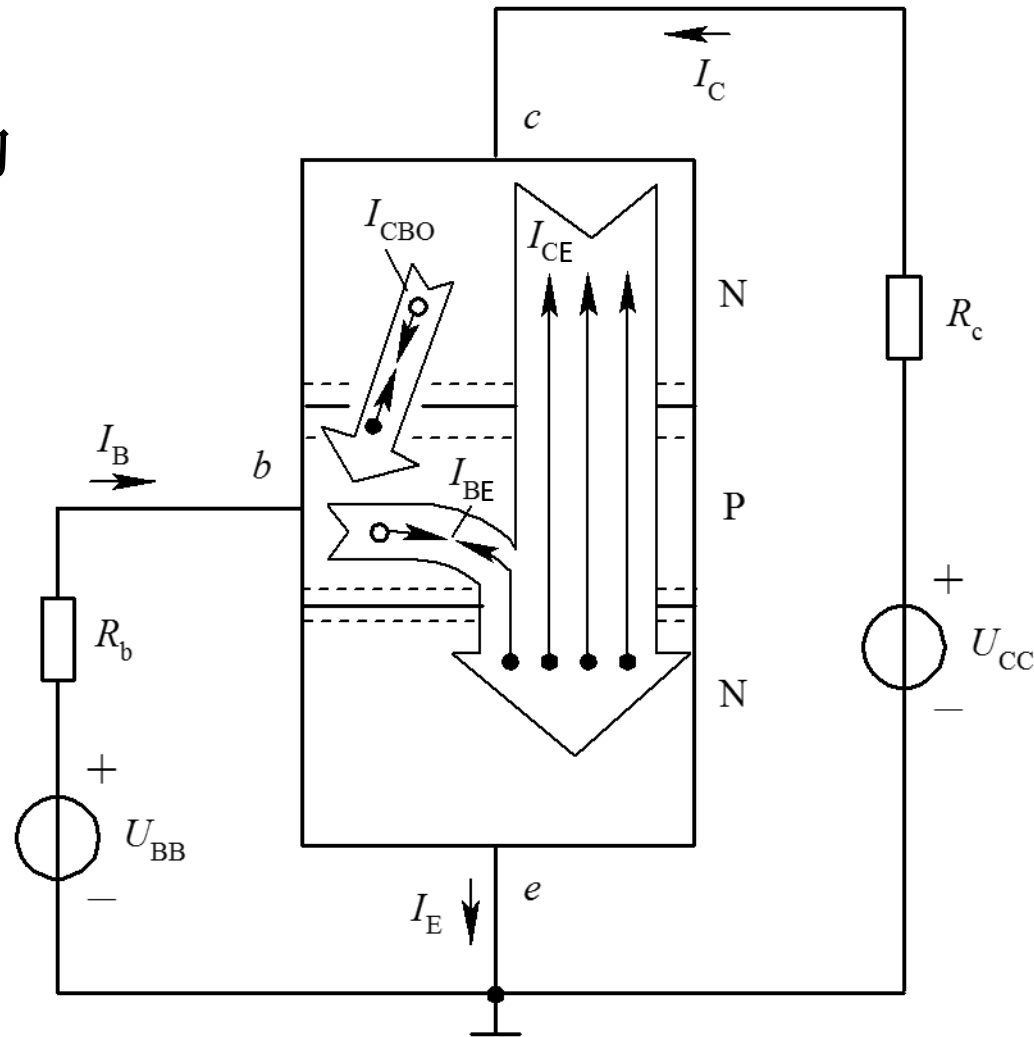
集电结反偏，有少子形成的反向电流 I_{CBO} 。

由图不难得出：

$$I_C = I_{CE} + I_{CBO}$$

$$I_B = I_{BE} - I_{CBO}$$

$$I_E = I_{CE} + I_{BE} = I_C + I_B$$

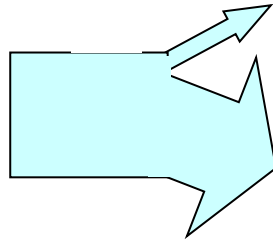


NPN和**PNP**内部电流相反。

三极管内部载流子的运动情况 15

电流分配关系

发射区注入到基区的电子
(I_E)



少部分在基区复合 (I_B)

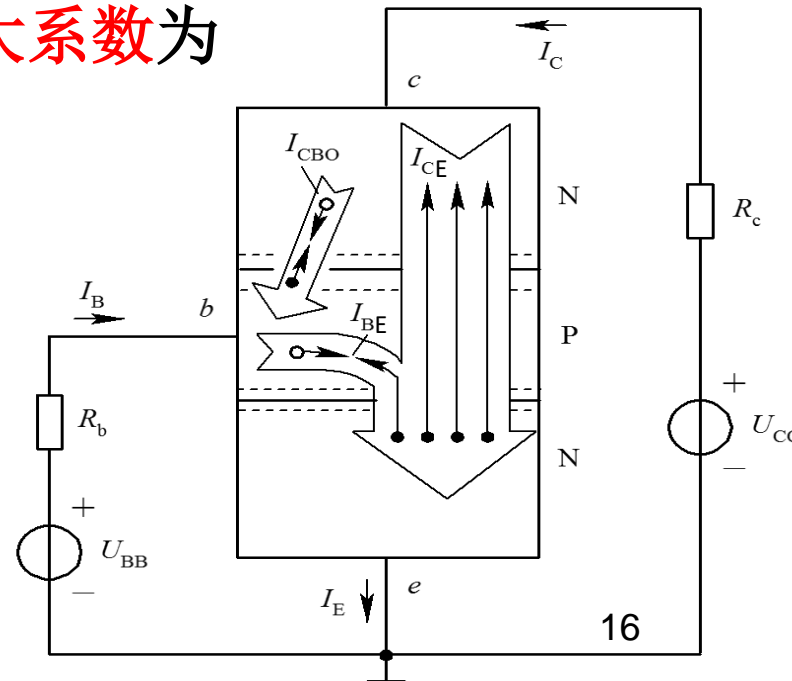
大部分被C区收集 (I_C)

为了反映扩散到集电区的电流 I_{CE} 与基区复合电流 I_{BE} 之间的比例关系，定义**共发射极直流电流放大系数**为

$$\bar{\beta} = \frac{I_{CE}}{I_{BE}} \quad \text{内部结构决定!}$$

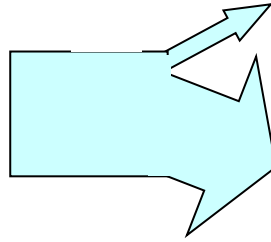
$$I_C = I_{CE} + I_{CBO}, \quad I_B = I_{BE} - I_{CBO}$$

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



电流分配关系

发射区注入到基区的电子
(I_E)



少部分在基区复合 (I_B)

大部分被C区收集 (I_C)

为了反映扩散到集电区的电流 I_{CE} 与基区复合电流 I_{BE} 之间的比例关系，定义**共发射极直流电流放大系数**为

$$\bar{\beta} = \frac{I_{CE}}{I_{BE}} \quad \text{内部结构决定!}$$

$$I_C = I_{CE} + I_{CBO}, \quad I_B = I_{BE} - I_{CBO}$$

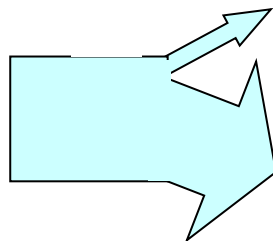
$$I_C = \bar{\beta} I_B + (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} = \bar{\beta} I_B + I_{CEO}$$

基区每复合一个电子，则有 $\bar{\beta}$ 个电子扩散到集电区去，其值一般在**20~200**之间。

$I_{CEO} = (1 + \bar{\beta}) I_{CBO}$ ，称为穿透电流。表示 $I_B=0$ 时， I_C 仍有电流为 I_{CEO} 。

电流分配关系

发射区注入到基区的电子
(I_E)



少部分在基区复合 (I_B)

大部分被C区收集 (I_C)

为了反映扩散到集电区的电流 I_{CE} 与基区复合电流 I_{BE} 之间的比例关系，定义**共发射极直流电流放大系数**为

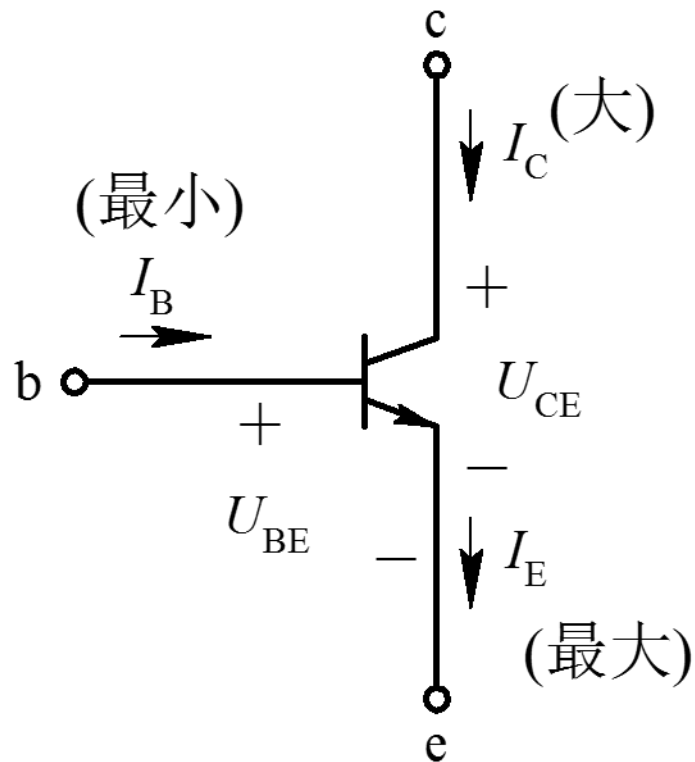
当 I_{CBO} 可以忽略时，

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

$$I_C = \bar{\beta} I_B$$

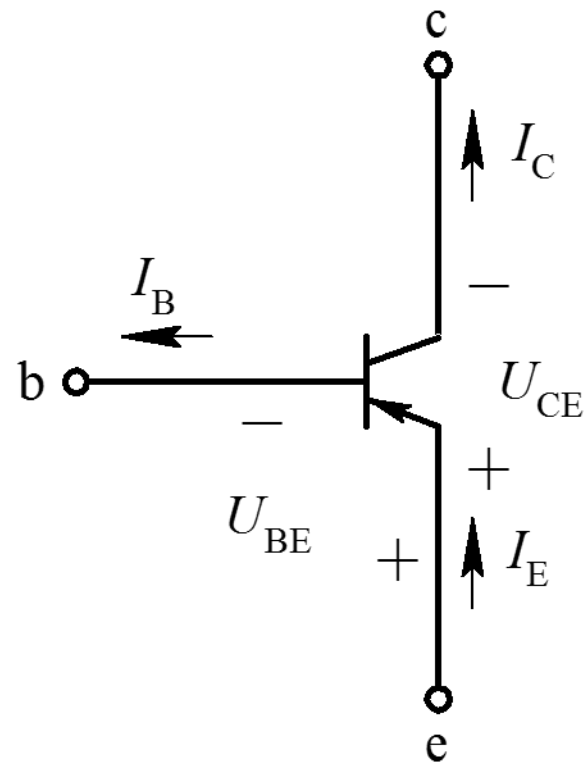
$$I_E = (1 + \bar{\beta}) I_B$$

三极管的电流分配关系



(a)

(a) NPN型三极管;



(b)

(b) PNP型三极管

三极管的主要参数

1) 直流(静态)电流放大系数 $\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B}$

交流(动态)电流放大系数 β (一般为几十至几百) $\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$

三极管的电流分配与放大作用原理

表4-1晶体管电流测量数据

I_B (mA)	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1
I_C (mA)	<0.001	0.70	1.5	2.30	3.10	3.95
I_E (mA)	<0.001	0.72	1.54	2.36	3.18	4.05

由此实验及测量结果可得出如下结论：

- (1) 观察实验数据中的每一列，可得 $I_E = I_C + I_B$ 。这是基尔霍夫电流定律的体现。
- (2) I_C 及 I_E 都比 I_B 大得多。从第三列和第四列的数据可知， I_C 与 I_B 的比值分别为

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{1.5}{0.04} = 37.5, \quad \frac{I_C}{I_B} = \frac{2.3}{0.06} = 38.3$$

这就是晶体管的电流放大作用。常用一个系数 $\bar{\beta}$ 表示晶体管集电极电流和基极电流的比值，即 $I_C = \bar{\beta} I_B$ 。 $\bar{\beta}$ 表示了晶体管的电流放大能力，称为“电流放大系数”。晶体管的电流放大作用还体现在基极电流的少量变化 ΔI_B 可以引起集电极电流较大的变化 ΔI_C 。还是比较第三列和第四列的数据可得出

$$\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{2.3 - 1.5}{0.06 - 0.04} = \frac{0.8}{0.02} = 40$$

三极管的主要参数

1) 直流(静态)电流放大系数 $\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B}$

交流(动态)电流放大系数 β (一般为几十至几百) $\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$

2) 发射级开路时, 集基极反向饱和(漏)电流 I_{CBO}

3) 基极开路时, 集射极穿透(反向饱和)电流 I_{CEO}

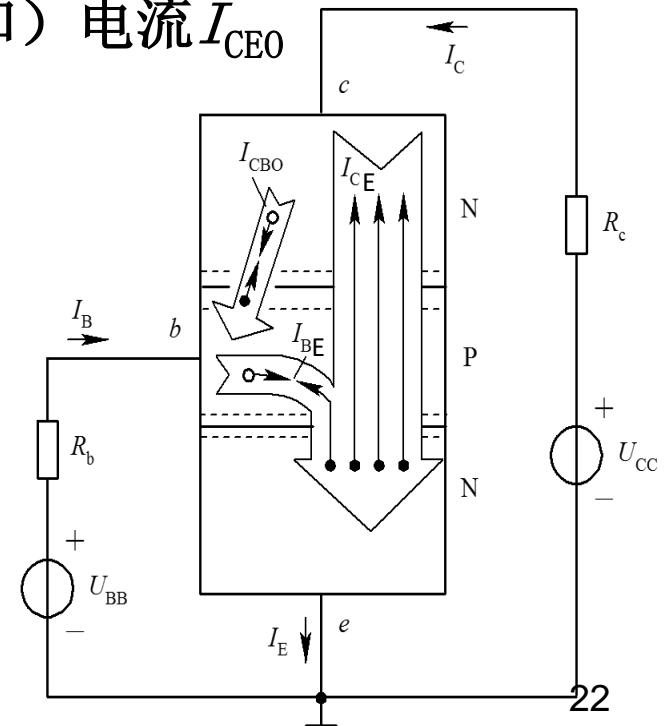
通常 $I_{CEO} > I_{CBO}$

$$\bar{\beta} = \frac{I_{CE}}{I_{BE}}$$

$$I_C = I_{CE} + I_{CBO}, \quad I_B = I_{BE} - I_{CBO}$$

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

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



三极管的主要参数

4) 集电极最大允许电流 I_{CM} (几十~数百毫安)

当集电极电流 I_C 过大时，三极管的 β 值下降(放大性能下降)，当下降到正常值的2/3时的集电极电流，称为集电极最大允许电流。

5) 集电极—发射极间的击穿电压 $U_{(BR)CE0}$ (几十~数百伏)

基极开路时，加在集电极和发射极之间的最大允许电压。

6) 集电极最大耗散功率 P_{CM} (数百毫瓦)

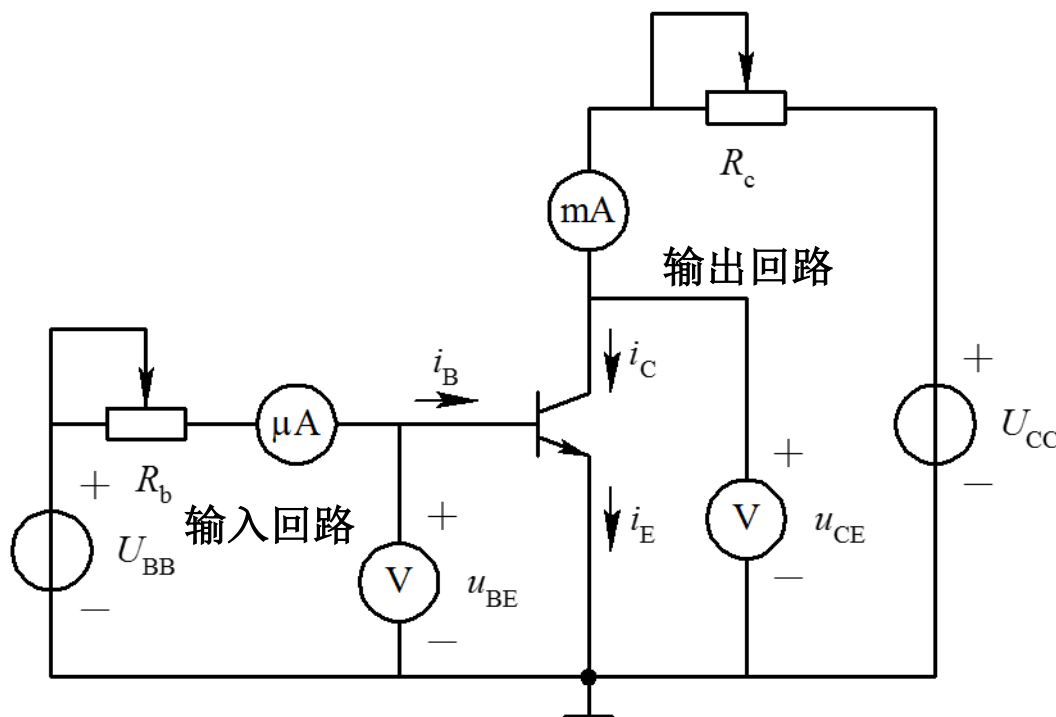
三极管工作时，集电极损耗的功率为 $P_C = I_C U_{CE}$ 。 P_C 转化为热能。 P_C 太大，温度过高，使管子特性变坏，甚至烧坏。 P_{CM} 是保证三极管正常工作允许集电极所消耗的最大功率。

三极管的特性曲线

三极管是非线性器件，各电极电流和电压之间的关系常用特性曲线来表示。

晶体管的特性曲线能反映出晶体管的性能，是分析放大电路的重要依据。

在低频电压放大电路中以共发射极的使用居多，故以共射接法来分析BJT的特性曲线。



三极管特性曲线的测试电路

三极管的特性曲线

1. **输入特性曲线 (B, E回路)** 如图 (a) 所示。

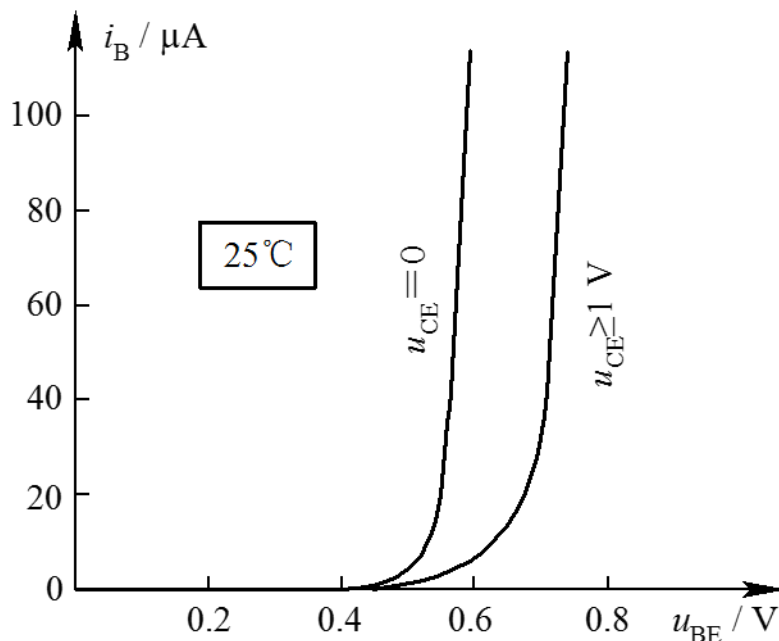
$$I_B = f(U_{BE}) | U_{CE} = \text{常数}$$

输入特性就是PN结的特性。 I_B 主要由 U_{BE} 决定，也受 U_{CE} 影响。

1) 当 $U_{CE} = 0V$ 时

从输入端看，相当于两个PN结并联且正向偏置，此时的特性曲线类似于二极管的正向伏安特性曲线。

2) 当 $U_{CE} > 0V$ 时，C结开始吸引基区电子，使 I_B 变小。



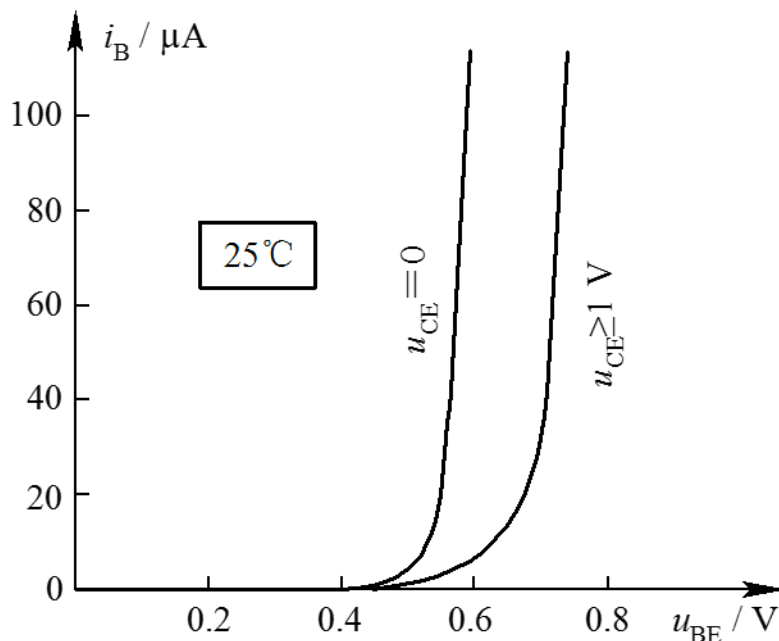
三极管的特性曲线

1. 输入特性曲线 (B, E回路) 如图 (a) 所示。

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

输入特性就是PN结的特性。 I_B 主要由 U_{BE} 决定，也受 U_{CE} 影响。

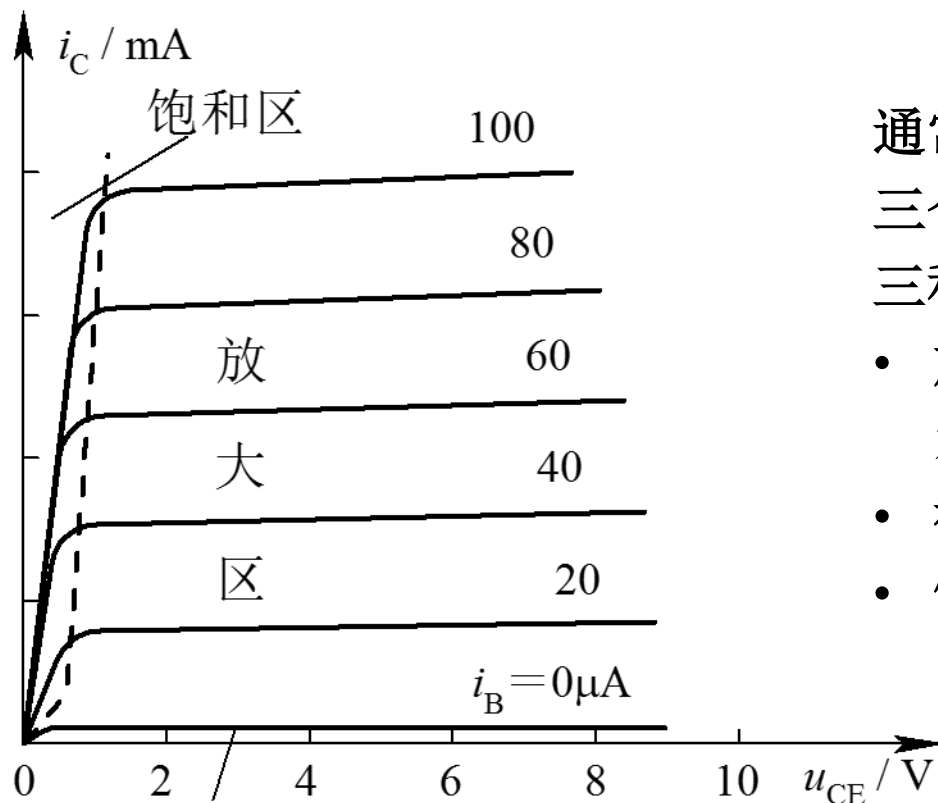
- 当 $U_{CE} \geq 1V$ 时，集电结反偏，对基区电子的吸引作用足够大。这时 I_B 基本不再随 U_{CE} 变化，曲线基本重合。
- 输入特性有一段死区，只有 $U_{BE} \geq V_\gamma$ 时，晶体管才会有基极电流 I_B 。
 - 小功率硅管的死区电压 V_γ 约为0.5伏，锗管的死区电压约为0.2V。
 - 小功率NPN型硅管的发射结导通压降约为0.6~0.8V。



三极管的特性曲线

2. 输出特性曲线 (C, E回路) 如图 (b) 所示。

该曲线是指当基极电流 I_B 为常数时，输出回路中的 I_C 与 U_{CE} 之间的关系曲线，用函数式可表示为 $I_C = f(U_{CE}) | I_B = \text{常数}$



通常把晶体管的输出特性曲线分成三个工作区，分别对应于晶体管的三种工作状态，

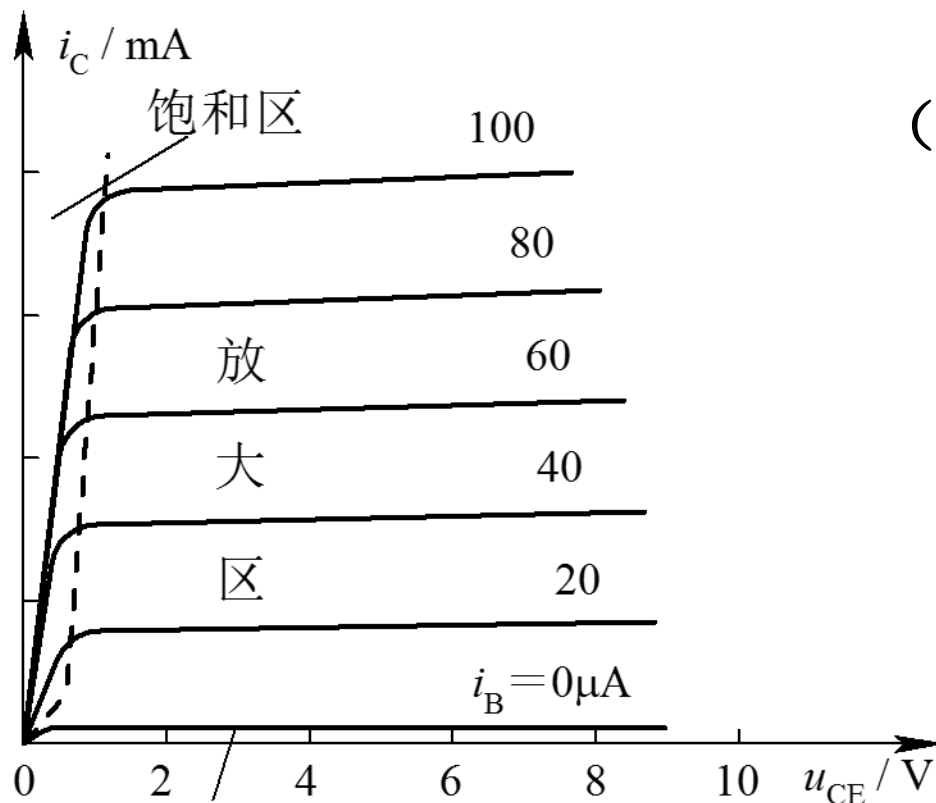
- 放大区：输出特性中，曲线近于水平的区域。
- 截止区： $I_B = 0$ 的曲线以下的区域。
- 饱和区：各条平行线重和的斜线的左边区域。

截止区 (b) 输出特性曲线

三极管的特性曲线

2. 输出特性曲线 (C, E回路) 如图 (b) 所示。

该曲线是指当基极电流 I_B 为常数时，输出回路中的 I_C 与 U_{CE} 之间的关系曲线，用函数式可表示为 $I_C = f(U_{CE}) | I_B = \text{常数}$



截止区 (b) 输出特性曲线

(1) 放大区

条件: e结正偏, c结反偏
($I_B > 0, U_{CE} \geq U_{BE}$)

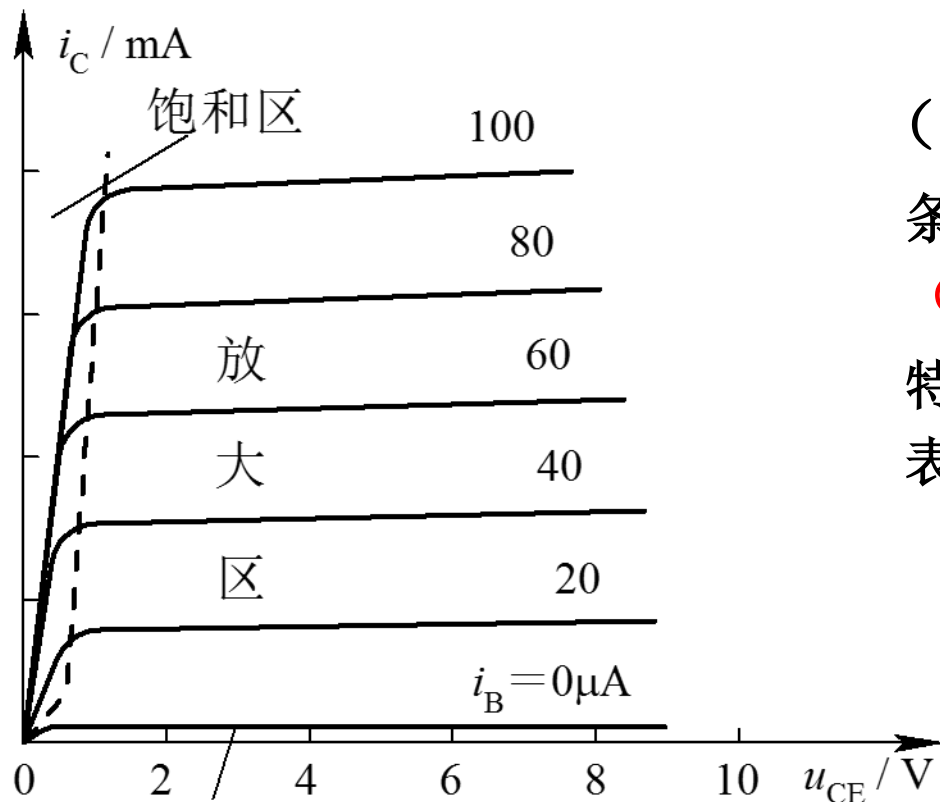
特点: $I_C = \beta I_B$

I_B 对 I_C 有很强的控制作用, 即 I_B 有很小的变化量 ΔI_B 时, I_C 就会有很大的变化量 ΔI_C 。几乎与 U_{CE} 无关。(线性区)

三极管的特性曲线

2. 输出特性曲线 (C, E回路) 如图 (b) 所示。

该曲线是指当基极电流 I_B 为常数时，输出回路中的 I_C 与 U_{CE} 之间的关系曲线，用函数式可表示为 $I_C = f(U_{CE}) | I_B = \text{常数}$



(1) 放大区

条件：e 结正偏，c 结反偏
($I_B > 0, U_{CE} \geq U_{BE}$)

特点：交流电流放大系数 β ，其表达式为

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

截止区 (b) 输出特性曲线

三极管的特性曲线

从下图所给出的晶体管的输出特性曲线上, (1) 计算 Q_1 点处的 $\bar{\beta}$; (2) 由 Q_1 和 Q_2 两点, 计算 β

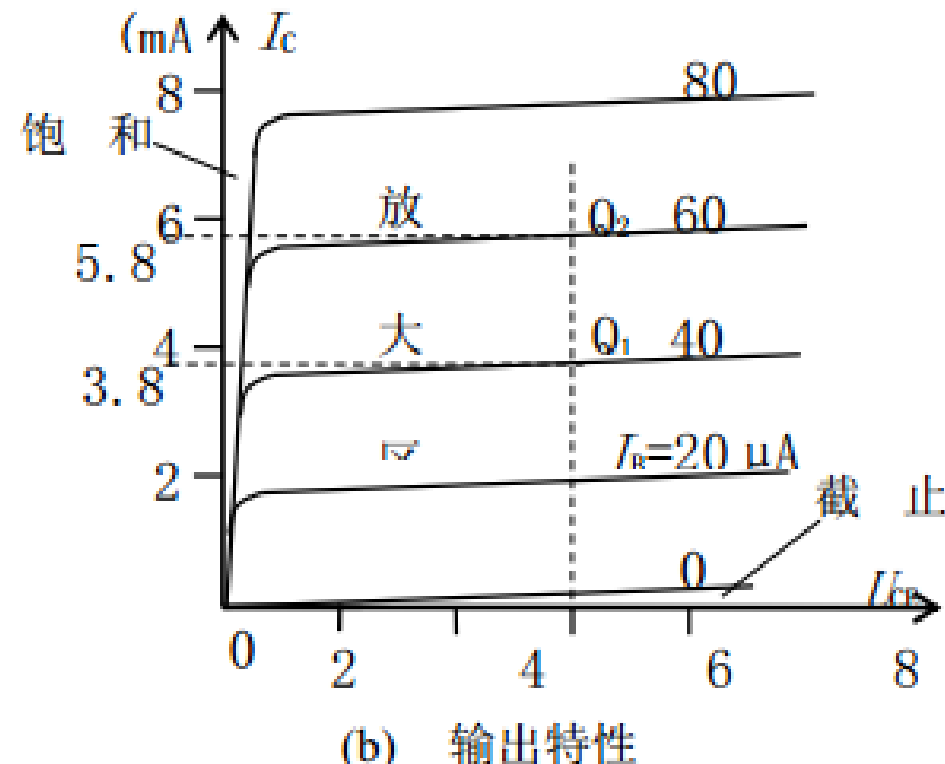
(1) 在 Q_1 点处

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{3.8}{0.04} = 95$$

(2) 由 Q_1 和 Q_2 两点,

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{5.8 - 3.8}{0.06 - 0.04} = \frac{2}{0.02} = 100$$

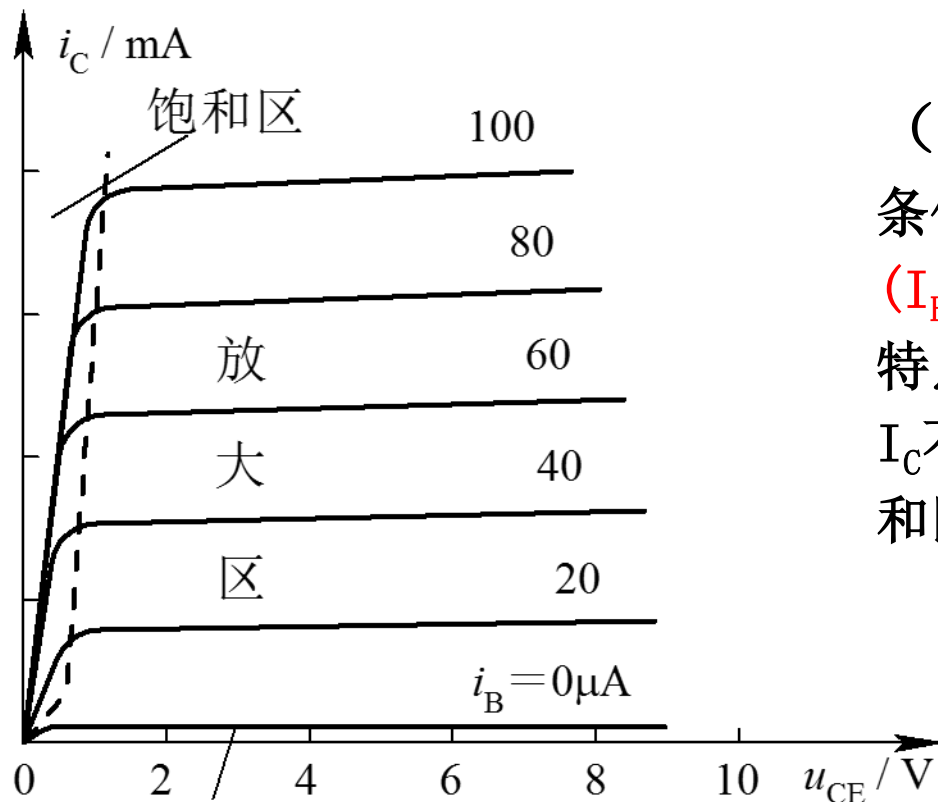
虽然 $\bar{\beta}$ 和 β 含义不同, 但是输出特性曲线近于平行等距, 二者数值较为接近。今后估算是, 常用 $\bar{\beta} \approx \beta$ 。



三极管的特性曲线

2. 输出特性曲线 (C, E回路) 如图 (b) 所示。

该曲线是指当基极电流 I_B 为常数时，输出回路中的 I_C 与 U_{CE} 之间的关系曲线，用函数式可表示为 $I_C = f(U_{CE}) | I_B = \text{常数}$



(2) 饱和区

条件: e结正偏, c结正偏

($I_B > 0$, $U_{CE} < U_{BE}$)

特点: $I_C < \beta I_B$

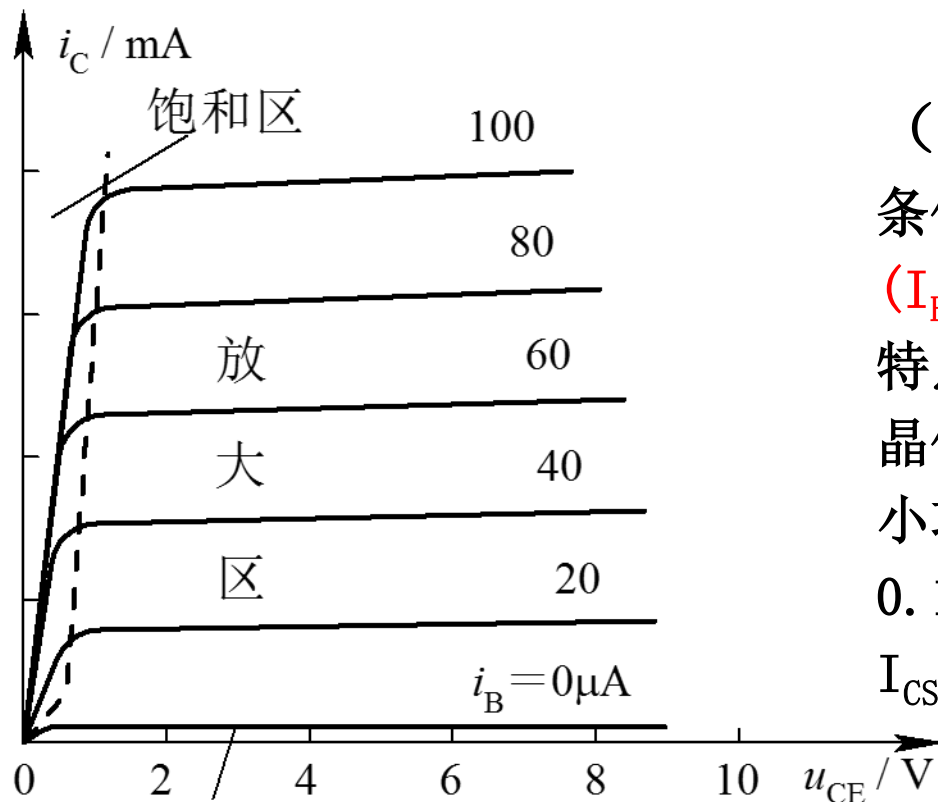
I_C 不受 I_B 控制, 不同 I_B 的曲线在饱和区汇集。

截止区 (b) 输出特性曲线

三极管的特性曲线

2. 输出特性曲线 (C, E回路) 如图 (b) 所示。

该曲线是指当基极电流 I_B 为常数时，输出回路中的 I_C 与 U_{CE} 之间的关系曲线，用函数式可表示为 $I_C = f(U_{CE}) | I_B = \text{常数}$



(2) 饱和区

条件: e结正偏, c结正偏

($I_B > 0$, $U_{CE} < U_{BE}$)

特点: $I_C < \beta I_B$

晶体管的管压降 U_{CES} 很小。

小功率硅管的饱和管压降约为 0.1~0.3 伏，分析时常取 $U_{CES} = 0$ 。

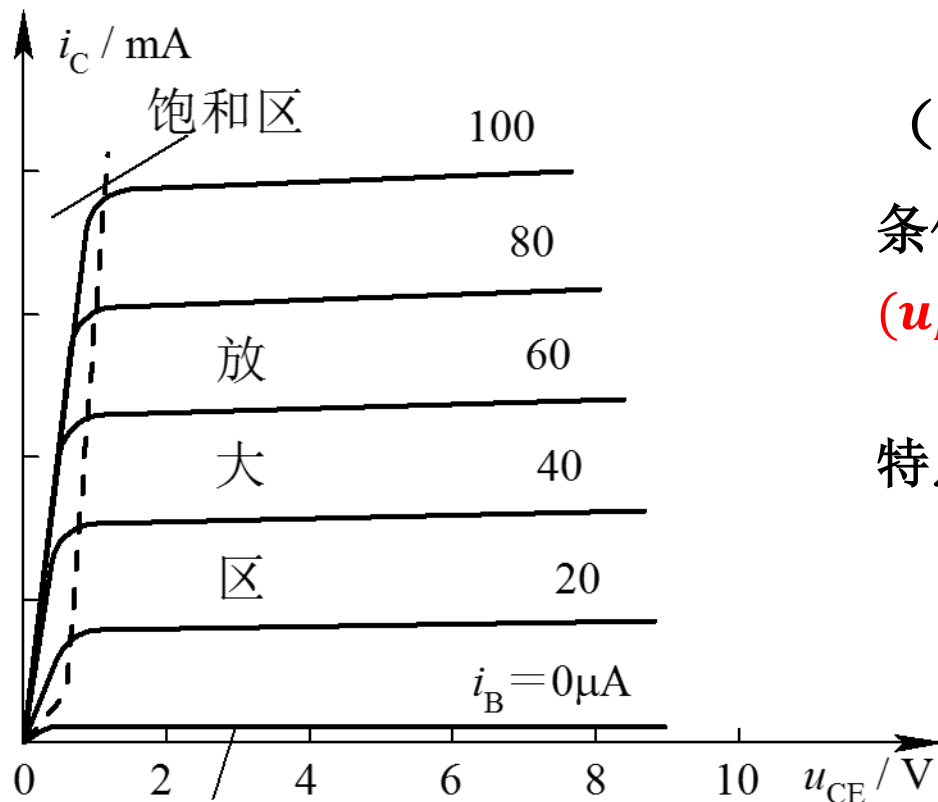
I_{CS} : 饱和时的集电极电流。

截止区 (b) 输出特性曲线

三极管的特性曲线

2. 输出特性曲线 (C, E回路) 如图 (b) 所示。

该曲线是指当基极电流 I_B 为常数时，输出回路中的 I_C 与 U_{CE} 之间的关系曲线，用函数式可表示为 $I_C = f(U_{CE}) | I_B = \text{常数}$



(3) 截止区

条件: e结和c结均处于反偏
($u_{BE} \leq V_\gamma$, $u_{CE} \geq u_{BE}$)

特点: $I_B = 0$, $I_C = I_{CEO} \approx 0$,

截止区 (b) 输出特性曲线

三极管的特性曲线

综上所述，晶体管是一种非线性导电器件，有三个工作区，对应三种不同的工作状态：

(1). 放大状态 ($i_B > 0$, $u_{CE} \geq u_{BE}$, 即e结正偏, c结反偏)

特点: ①. i_C 受 i_B 控制, 即 $I_C = \beta I_B$ 或 $\Delta I_C = \beta \Delta I_B$

②. I_B 一定时, i_C 具有恒流特性。

(2). 饱和状态 ($i_B > 0$, $u_{CE} < u_{BE}$, 即e结、c结均正偏)

特点: ①. i_C 不受 i_B 控制;

②. 三个电极间的电压很小, 相当短路, 各极电流主要由外电路决定。

(3). 截止状态 ($u_{BE} \leq V_\gamma$, $u_{CE} \geq u_{BE}$ 即e结、c结均反偏)

特点: ①. $i_C \approx i_B \approx i_E \approx 0$ 。

②. 三个电极间相当开路, 各极电位主要由外电路决定。

三极管的特性曲线

综上所述，晶体管是一种非线性导电器件，有三个工作区，对应三种不同的工作状态：

(1). 放大状态 ($i_B > 0$, $u_{CE} \geq u_{BE}$, 即e结正偏, c结反偏)

特点: ①. i_C 受 i_B 控制, 即 $I_C = \beta I_B$ 或 $\Delta I_C = \beta \Delta I_B$

②. I_B 一定时, i_C 具有恒流特性。

(2). 饱和状态 ($i_B > 0$, $u_{CE} < u_{BE}$, 即e结、c结均正偏)

特点: ①. i_C 不受 i_B 控制;

②. 三个电极间的电压很小, 相当短路, 各极电流主要由外电路决定。

(3). 截止状态 ($u_{BE} \leq V_\gamma$, $u_{CE} \geq u_{BE}$ 即e结、c结均反偏)

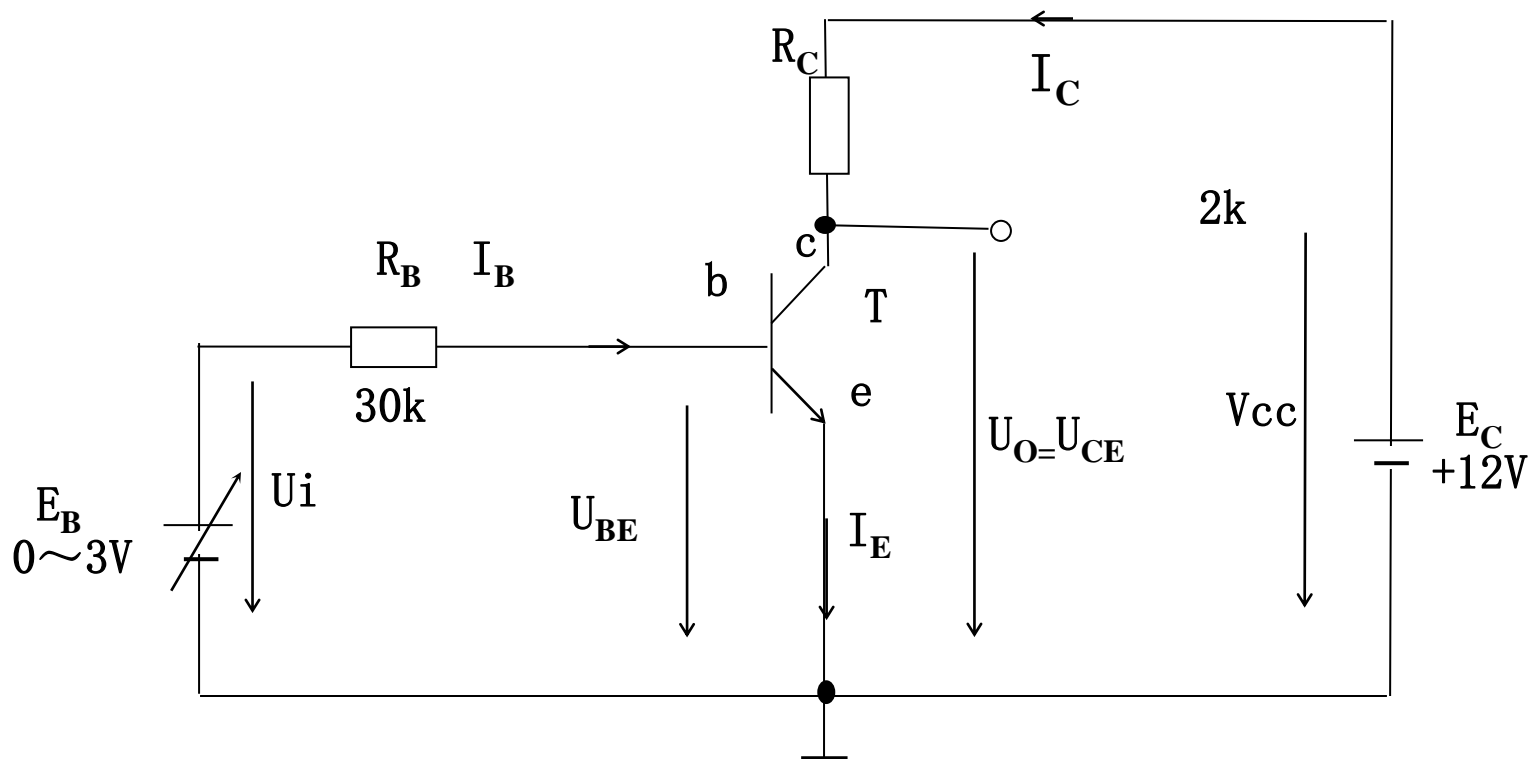
特点: ①. $i_C \approx i_B \approx i_E \approx 0$ 。

②. 三个电极间相当开路, 各极电位主要由外电路决定。

模拟电路中, 一般要求晶体管工作在放大状态,
数字电路中, 一般要求晶体管工作在开关状态。

开关状态

晶体管的工作状态及电路模型

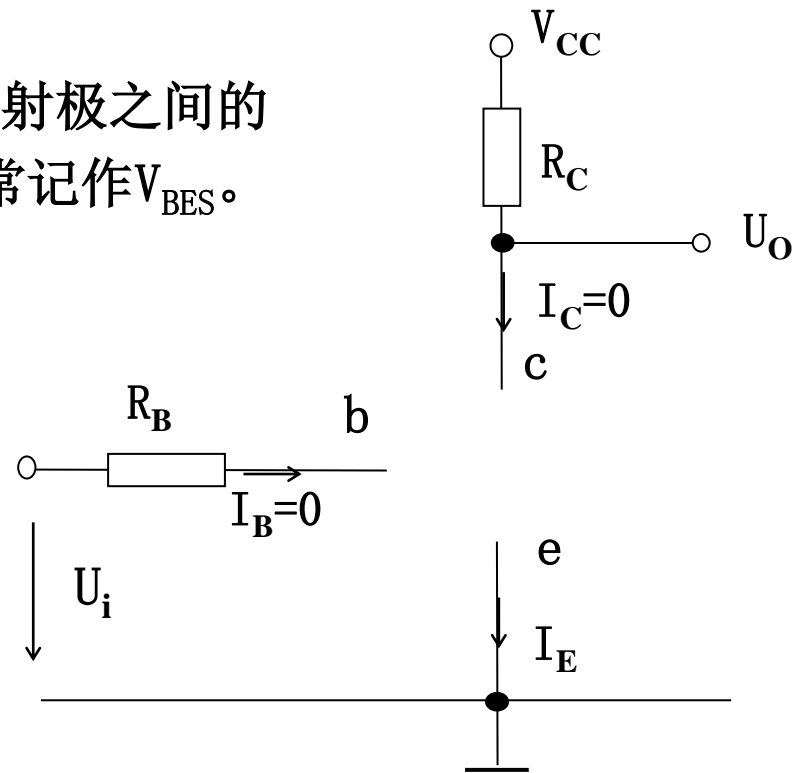


晶体管应用电路

晶体管的工作状态及电路模型

- **截止** (发射结与集电结均处于反偏)

- 条件 $U_{BE} < V_\gamma$
- 其中 U_{BE} 是发射结截止时基极和发射极之间的电压； V_γ 是发射结的阈值电压，常记作 V_{BES} 。
- 特点： $I_B=0$ ， $I_C=0$
- 电路模型：各电极之间断开
- 输出电压： $U_0=U_{CE}=V_{CC}$



截止状态

晶体管的工作状态及电路模型

- **放大** (发射结正偏, 集电结反偏)

- 条件 $U_{BE} \geq V_\gamma$, $U_{CE} > U_{BE}$

- 特点 $I_C = \beta I_B$

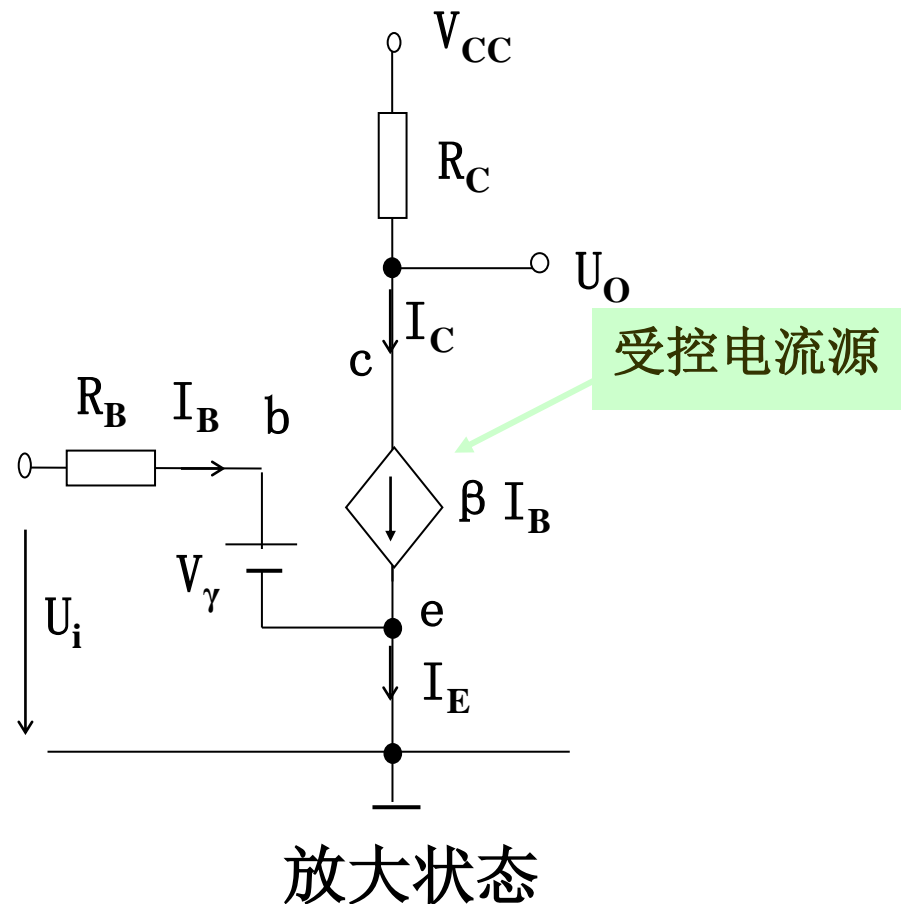
- 电路模型

发射结恒压 (导通) ,

集电结恒流 (受控)

- 输出电压

$$\begin{aligned} U_O &= U_{CE} = V_{CC} - R_C I_C \\ &= V_{CC} - \beta R_C I_B \end{aligned}$$



晶体管的工作状态及电路模型

- **饱和** (发射结与集电结均处于正偏)

$$U_{CE} = V_{CC} - \beta I_B R_C$$

- 条件 $U_{BE} > V_\gamma$, $U_{CE} \leq U_{BE}$ (常用条件 $I_B \geq I_{BS} \approx V_{CC} / \beta R_C$)

(I_{BS} 为临界饱和基极电流)

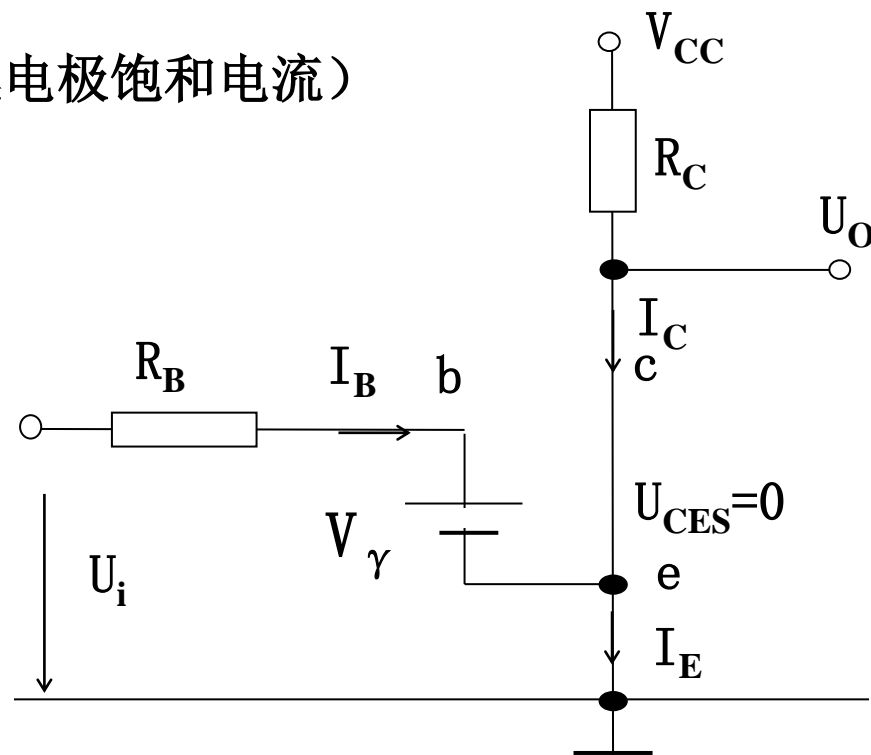
- 特点 $I_C = I_{CS} \approx V_{CC} / R_C$ (I_{CS} 为集电极饱和电流)

- 电路模型

发射结恒压 ($U_{BE} = V_\gamma$) ,

集电结恒压 ($U_{CE} \approx 0$) 。

- 输出电压 $U_0 = U_{CES} \approx 0$ 。



饱和状态 39

目录

4.1 半导体的导电特性

4.2 半导体二极管

4.3 二极管电路的分析计算

4.4 半导体三极管

4.5 晶体管三极管的工作状态分析

晶体管的工作状态分析

- 晶体三极管是一种非线性器件。在对晶体管电路进行分析计算时，要**先确定**晶体管的**工作状态**，再进行分析计算。
- 晶体管是一种受电流控制的器件。在集电极电源足够大的条件下，晶体管的工作状态**主要取决于基极电流 I_B** 。

三极管工作状态判定

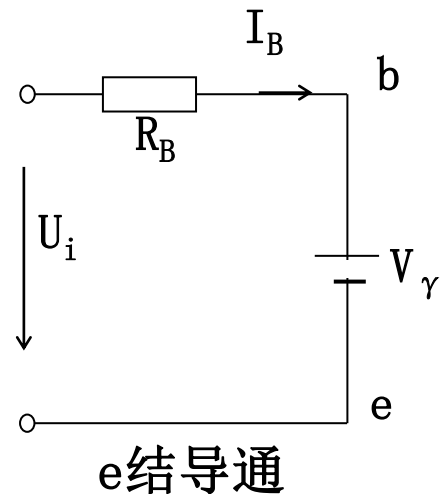
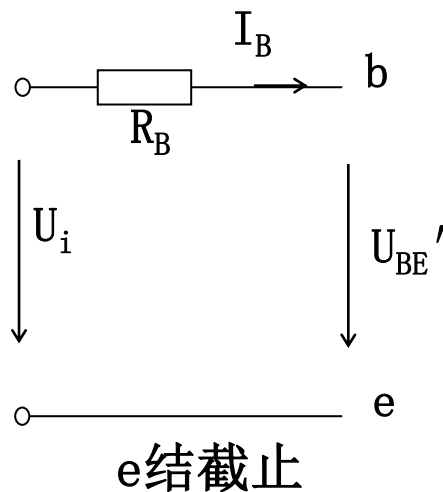
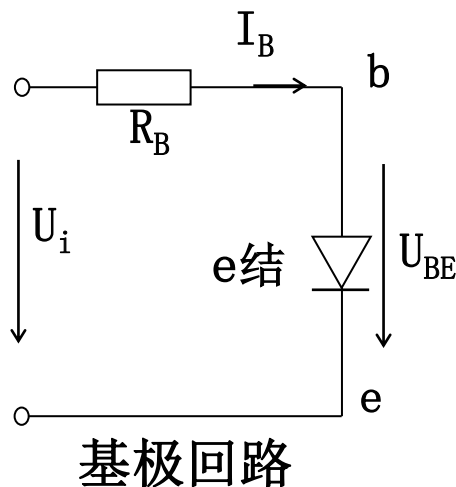
• 判定方法：先设截止，再查饱和，否则放大

• 先由基极回路判定是否截止

• 先假定e结截止，计算电路加在e结上的电压 U_{BE}'

• 若 $U_{BE}' < V_\gamma$ ，则e结截止，（ $I_b=0$ ， $U_{BE}=U_{BE}'$ ）

• 若 $U_{BE}' > V_\gamma$ ，则e结导通， $U_{BE}=V_\gamma$ ，由下图所示等效电路计算 I_B 。



三极管工作状态判定

- 若导通，检查是否饱和：

- 集电极饱和电流 $I_{CS} = \frac{V_{CC} - V_{CES}}{R_C} \approx \frac{V_{CC}}{R_C}$

- 临界饱和基极电流 $I_{BS} = \frac{I_{CS}}{\beta} = \frac{V_{CC}}{\beta R_C}$

- 若 $I_B \geq I_{BS}$ 则T饱和： $I_C = I_{CS}$ ， $U_o = U_{CES}$

- 若 $I_B < I_{BS}$ 则T放大： $I_C = \beta I_B$ ， $U_o = V_{CC} - R_C I_C$

例 4.5-1 已知图 4-28 所示电路中, $R_B=20\text{k}\Omega$, $R_C=3\text{k}\Omega$, $E_C=12\text{V}$, 晶体管的 $\beta=40$, $V_Y=0.7\text{V}$ 。分别计算 $E_B=0.3\text{V}$ 、 $E_B=1.7\text{V}$ 和 $E_B=3.6\text{V}$ 时晶体管的工作状态及输出电压 U_O 。

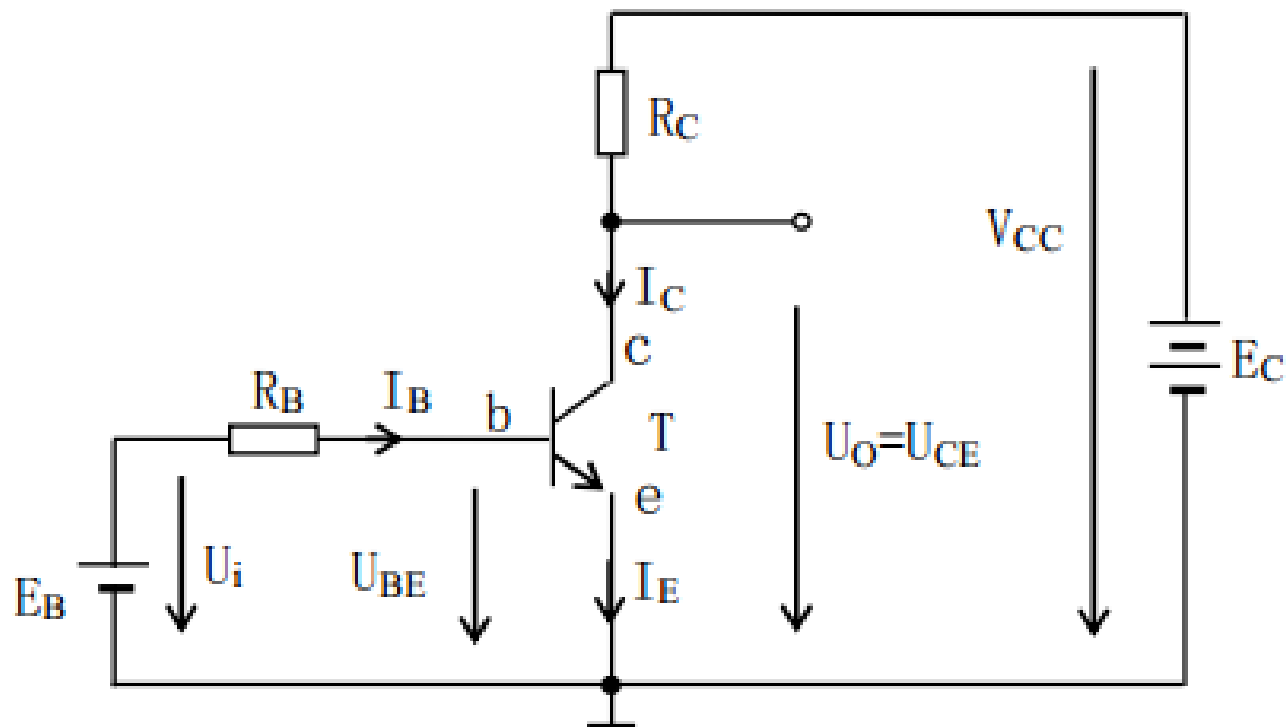


图 4-28 晶体管应用电路

例 4.5-1 已知图 4-28 所示电路中, $R_B=20\text{k}\Omega$, $R_C=3\text{k}\Omega$, $E_C=12\text{V}$, 晶体管的 $\beta=40$, $V_Y=0.7\text{V}$ 。分别计算 $E_B=0.3\text{V}$ 、 $E_B=1.7\text{V}$ 和 $E_B=3.6\text{V}$ 时晶体管的工作状态及输出电压 U_O 。

解: (1) 当 $E_B=0.3\text{V}$ 时

设 e 结截止, 显然有 $U_{BE}'=E_B=0.3\text{V}<V_Y=0.7\text{V}$, $I_B=0$; 所以晶体管处于截止状态, 有 $I_B=0$, $I_C=0$, $U_O=E_C=12\text{V}$ 。

(2) 当 $E_B=1.7\text{V}$ 时

设 e 结截止, 则有 $U_{BE}'=E_B=1.7\text{V}>V_Y=0.7\text{V}$, 所以 e 结应导通, 按恒压模型, 有 $I_B=(E_B-V_Y)/R_B=(1.7-0.7)/20=1/20=0.05\text{ (mA)}$

晶体管的临界饱和基极电流为 $I_{BS}=E_C/(\beta R_C)=12/(40\times 3)=0.1\text{ (mA)}$

由于 $I_B<I_{BS}$ 所以晶体管处于放大状态, 有 $I_B=0.05\text{ (mA)}$,

$I_C=\beta I_B=40\times 0.05=2\text{ (mA)}$, $U_O=E_C-I_C R_C=12-2\times 3=6\text{ (V)}$ 。

(3) 当 $E_B=3.6\text{V}$ 时

设 e 结截止, 则有 $U_{BE}'=E_B=3.6\text{V}>V_Y=0.7\text{V}$, 所以 e 结应导通, 按恒压模型, 有 $I_B=(E_B-V_Y)/R_B=(3.6-0.7)/20=2.9/20=0.145\text{ (mA)}$

由于 $I_B>I_{BS}=0.1\text{ (mA)}$ 所以晶体管处于饱和状态, 有 $I_B=0.145\text{ (mA)}$,

$I_C=I_{CS}=(E_C-U_{CES})/R_C\approx E_C/R_C=12/3=4\text{ (mA)}$, $U_O=U_{CES}\approx 0\text{ (V)}$ 。

例 4.5-2 图 4-31 所示电路中，设晶体管的 $\beta=50$ ， $V_{BES}=0.7V$ 。计算晶体管的工作状态。

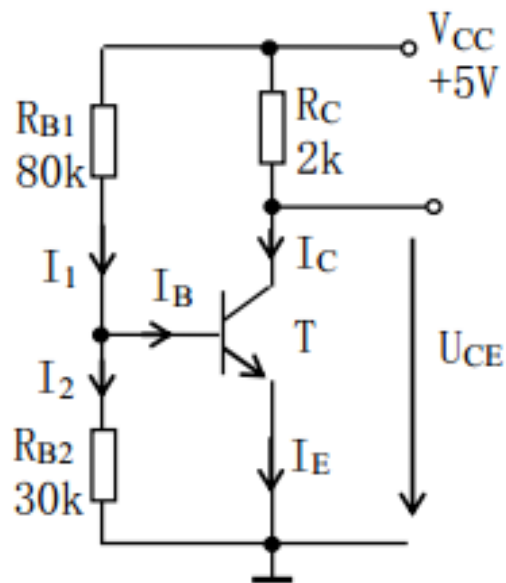


图 4-31 晶体管电路

解：设e结截止，则由基极回路可得

$$U_{BE}' = V_{CC} R_{B2} / (R_{B1} + R_{B2}) = 5 \times 30 / (80 + 30) = 1.36 \text{ (V)}$$

由于 $U_{BE}' > V_{BES} = 0.7V$ 所以e结应导通，

$$\begin{aligned} I_B &= I_1 - I_2 = (V_{CC} - V_{BES}) / R_{B1} - V_{BES} / R_{B2} \\ &= (5 - 0.7) / 80 - 0.7 / 30 = 0.030 \text{ (mA)} \end{aligned}$$

$$\text{而 } I_{BS} = E_C / (\beta R_C) = 5 / (50 \times 2) = 0.05 \text{ (mA)}$$

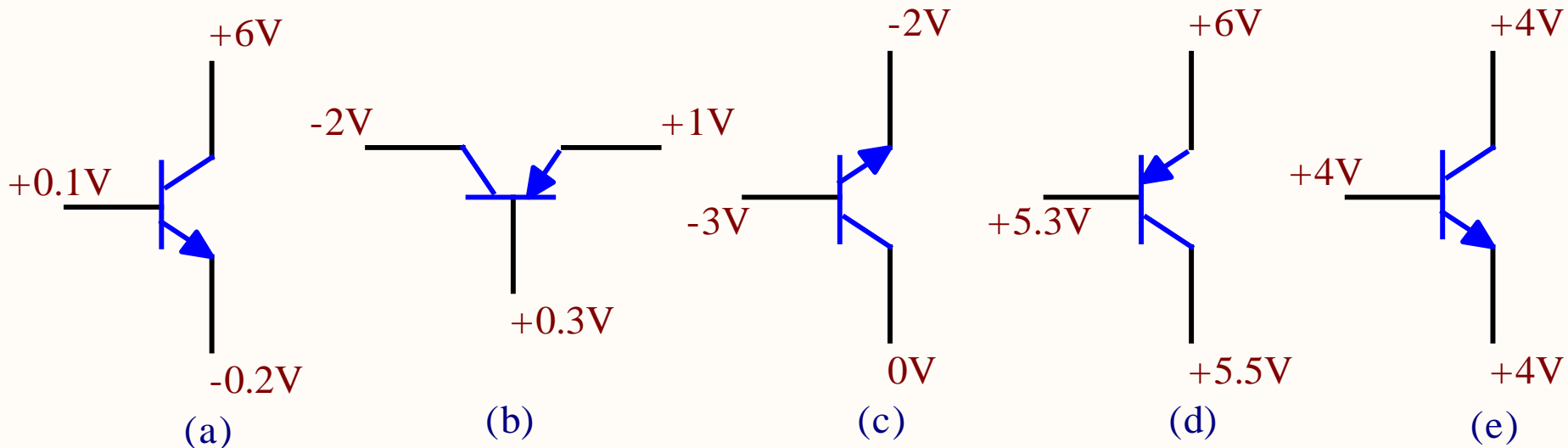
由于 $I_B < I_{BS}$ 所以晶体管处于放大状态，有

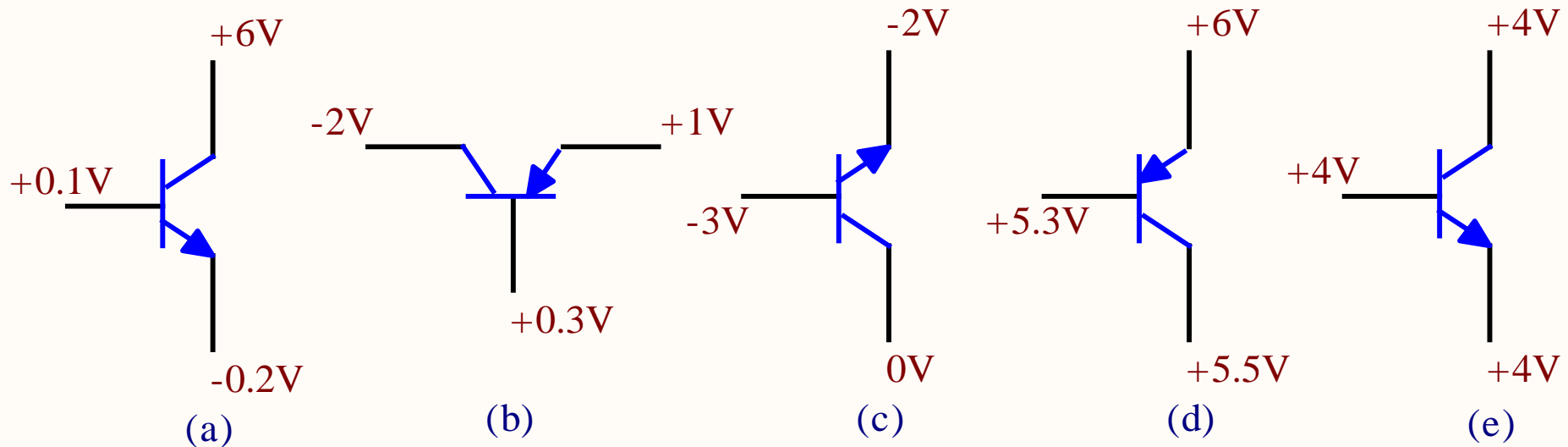
$$I_B = 0.030 \text{ (mA)}$$

$$I_C = \beta I_B = 50 \times 0.030 = 1.5 \text{ (mA)}$$

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 5 - 1.5 \times 2 = 2 \text{ (V)}$$

例:如图所示, 晶体管各极电位如图中标注, 试判断晶体管处于何种工作状态(饱和、放大、截止或已损坏), 若处于放大或饱和状态, 请判断是硅管还是锗管。

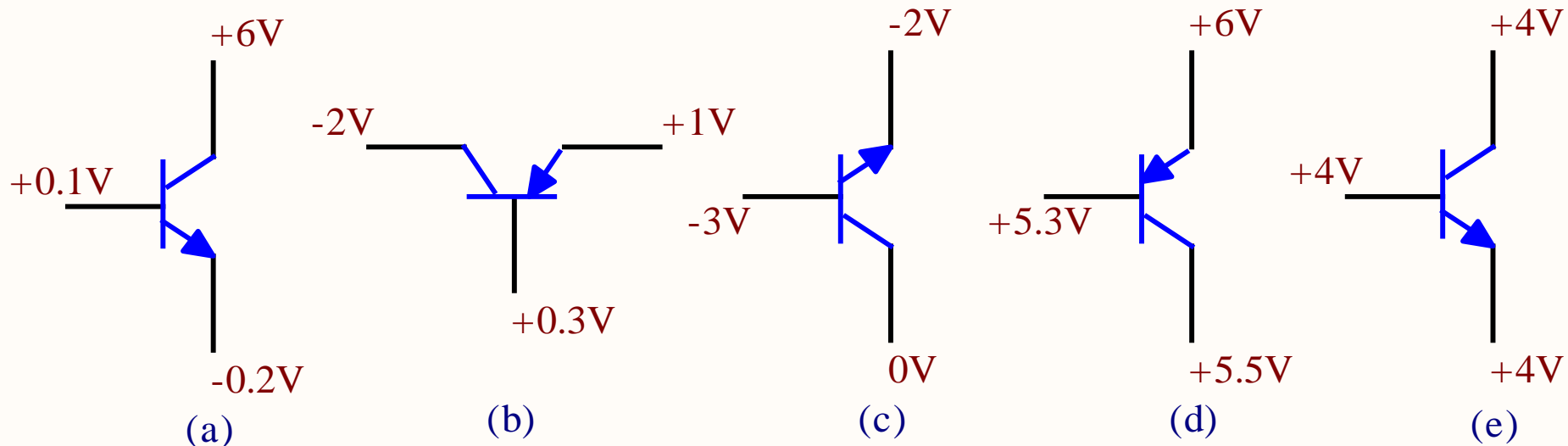




解：判断晶体管的工作状态主要是分析其两个PN结的偏置状态；而判断锗管或硅管主要是看其导通时发射结的压降，若 $|U_{BE}|=0.7V$ 左右则为硅管， $|U_{BE}|=0.2V$ 左右则为锗管。

(a) NPN型管， $U_{BE}=0.1-(-0.2)=0.3V$ ，锗管，发射结正偏； $U_{BC}=0.1-6=-5.9V$ ，集电结反偏；故该管在放大状态。

(b) PNP型管， $U_{EB}=1-0.3=0.7V$ ，硅管，发射结正偏； $U_{CB}=-2-0.3=-2.3V$ ，集电结反偏；故该管在放大状态。



(c) NPN型管， $U_{BE} = -3 - (-2) = -1V$ ，发射结反偏； $U_{BC} = -3 - 0 = -3V$ ，集电结反偏；故该管工作在截止状态。

(d) PNP型管， $U_{EB} = 6 - 5.3 = 0.7V$ ，硅管，发射结正偏； $U_{CB} = 5.5 - 5.3 = 0.2V$ ，集电结正偏；故该管工作在饱和状态。

(e) NPN型管， $U_{BE} = 4 - 4 = 0V$ ，发射结压降为0；

$U_{BC} = 4 - 4 = 0V$ ，集电结压降也为0；则该管可能因被击穿而损坏；也可能因电路连线问题而使之截止。

作业

- 计算题1, 2, 3, 4, 10, 12, 15, 16。