



# 模拟电路基础（下）

## 三极管与其放大电路



### ➤ 教学要求

- 1 掌握三极管及其放大电路工作原理
- 2 掌握三极管小信号分析模型
- 3 掌握三极管放大电路的分析方法
- 4 掌握三极管放大电路的频率响应

### ➤ 教学重点

- 1 三极管的工作状态与电流分配关系
- 2 三极管小信号分析模型
- 3 三极管放大电路的分析方法
- 4 三极管高频小信号模型

### 第3章 三极管与其放大电路

3



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

#### ➤ 教学难点

- 1 三极管小信号分析模型
- 2 交流等效电路与小信号等效电路
- 3 三极管高频小信号模型

#### ➤ 教学学时

- 1 理论学时12学时
- 2 实践学时4学时

### 第3章 三极管与其放大电路

4



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

#### ➤ 教学内容与书本对应关系

教学顺序：

- 3.1 晶体三极管
- 4.2放大器的基本分析方法和基本放大电路
  - 3.3.1 晶体三极管的小信号电路模型
- 4.3多级小信号放大器
- 4.4放大器的频率响应
  - 3.3.2晶体三极管频率特性

保留内容：

- 3.2 场效应三极管
- 3.3.3场效应管三极管的小信号电路模型
- 3.3.4 场效应管与三极管的比较
- 4.2.4场效应管放大电路

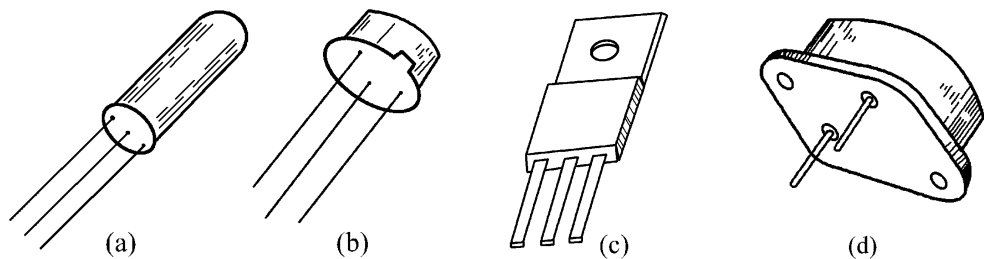
### 3.1 晶体三极管

5



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

#### ➤ 晶体三极管的结构及符号



(a) 小功率管

(b) 小功率管

(c) 中功率管

(d) 大功率管

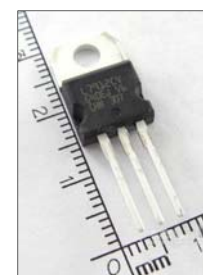
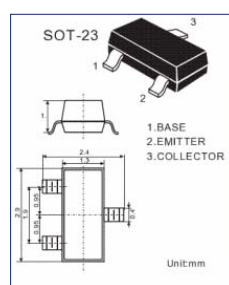
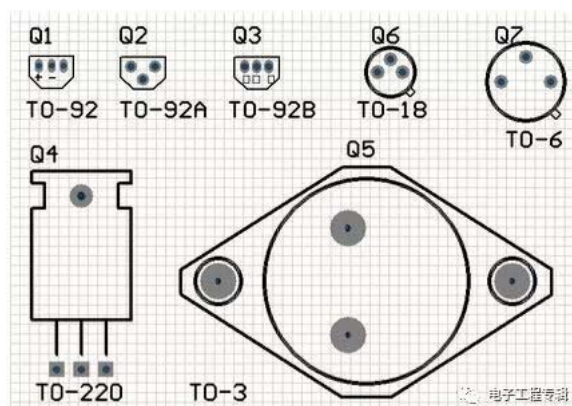
### 3.1 晶体三极管

6



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

#### ➤ 晶体三极管的结构及符号



### 3.1 晶体三极管

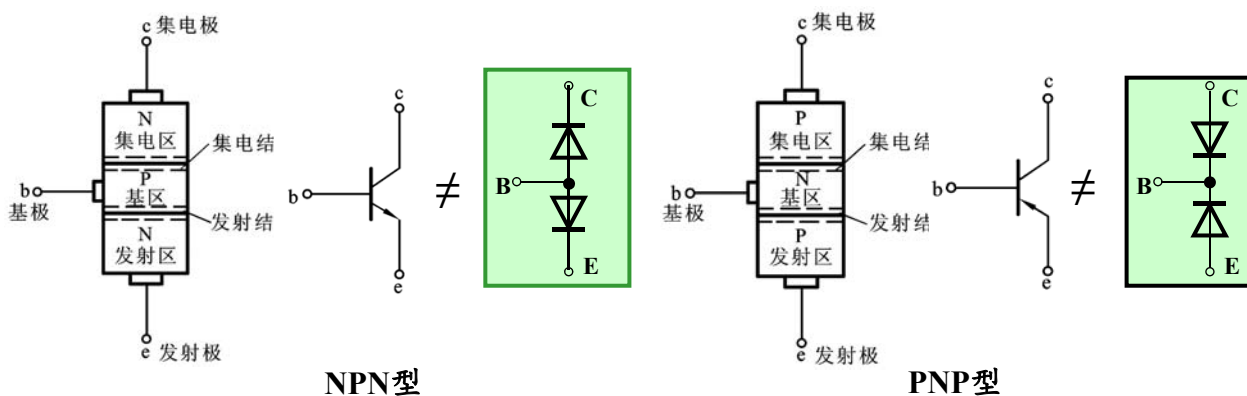
7



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

#### ► 晶体三极管的结构及符号

半导体三极管的结构示意图如图所示。它有两种类型：**NPN**型和**PNP**型。



### 3.1 晶体三极管

8

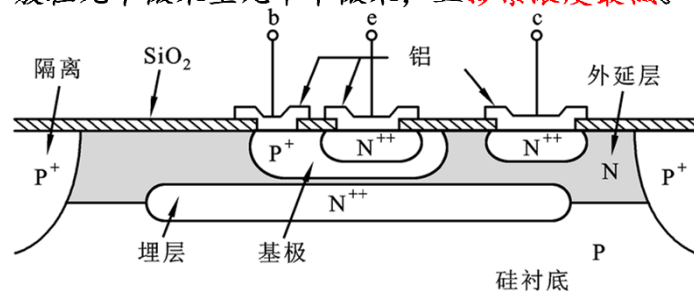


武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

#### ► 晶体三极管的结构及符号

##### 结构特点：

- 发射区的**掺杂浓度最高**；
- 集电区掺杂浓度低于发射区，且**面积大**；
- 基区**很薄**，一般在几个微米至几十个微米，且**掺杂浓度最低**。



集成电路中典型NPN型BJT的截面图

### 3.1 晶体三极管

9



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

#### ➤ 电流分配和放大作用

三极管的放大作用是在一定的外部条件控制下，通过载流子传输体现出来的。

外部条件：**发射结正偏**  
**集电结反偏**

由于三极管内有两种载流子(自由电子和空穴)参与导电，故称为双极型三极管或**BJT** (Bipolar Junction Transistor)。

#### 1. 内部载流子的传输过程

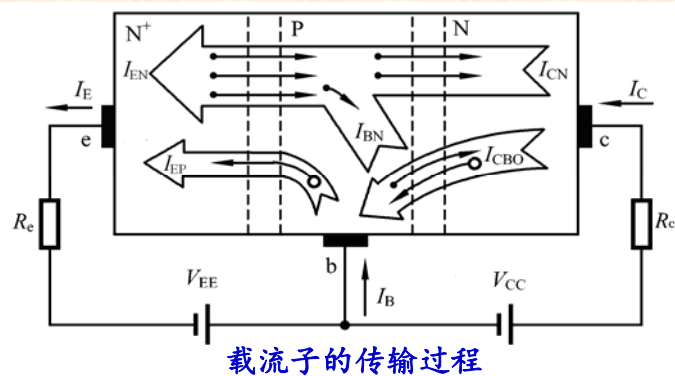
发射区：发射载流子

集电区：收集载流子

基区：传送和控制载流子

$$I_E = I_B + I_C$$

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



### 3.1 晶体三极管

10



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

#### ➤ 电流分配和放大作用

#### 1. 内部载流子的传输过程

发射区：发射载流子

集电区：收集载流子

基区：传送和控制载流子

$$I_E = I_B + I_C$$

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

### 3.1 晶体三极管

11



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

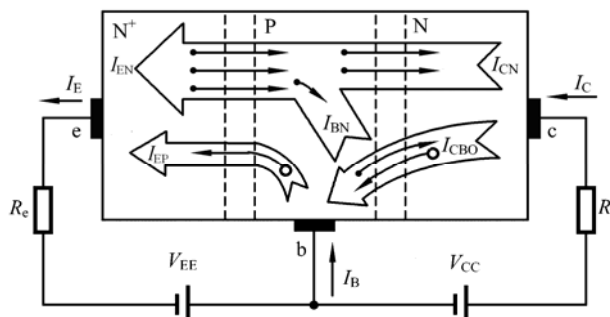
#### ➤ 电流分配和放大作用

设  $\alpha = \frac{\text{传输到集电极的电流}}{\text{发射极注入电流}}$

$$\text{即 } \alpha = \frac{I_{CN}}{I_E}$$

通常  $I_C \gg I_{CBO}$

$$\text{则有 } \alpha \approx \frac{I_C}{I_E}$$



载流子的传输过程

$\alpha$  为电流放大系数。它只与管子的结构尺寸和掺杂浓度有关，与外加电压无关。一般  $\alpha = 0.9 \sim 0.99$ 。

### 3.1 晶体三极管

12



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

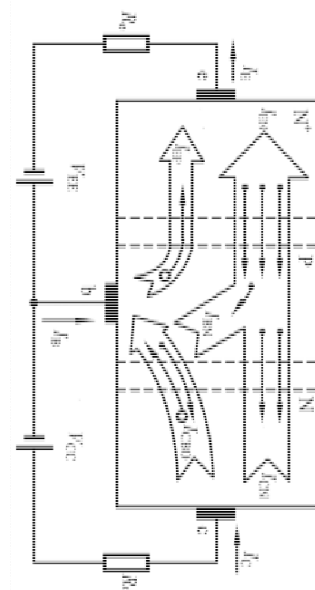
#### ➤ 电流分配和放大作用

$$\text{令 } \beta = \frac{I_C - I_{CEO}}{I_B} \approx \frac{I_C}{I_B}$$

$$\text{因 } \alpha \approx \frac{I_C}{I_E} \quad I_E = I_B + I_C$$

$$\text{则 } \beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_C}{I_E - I_C} = \frac{I_C / I_E}{1 - I_C / I_E} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

$\beta$  是另一个电流放大系数。同样，它也只与管子的结构尺寸和掺杂浓度有关，与外加电压无关。一般  $\beta \gg 1$ 。



### 3.1 晶体三极管

13



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

#### ➤ 电流分配和放大作用

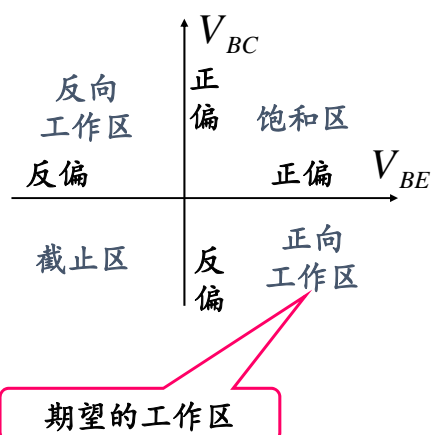
四种工作状态：

放大状态：发射结正偏，集电结反偏

饱和状态：发射结正偏，集电结正偏

截止状态：发射结反偏，集电结反偏

反向状态：发射结反偏，集电结正偏



### 3.1 晶体三极管

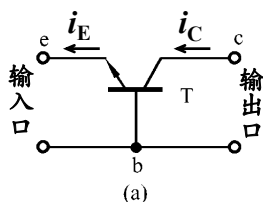
14



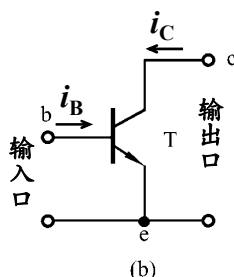
武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

#### ➤ 电流分配和放大作用

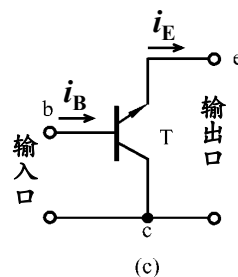
三种组态：



$$i_C = \alpha i_E$$



$$i_C = \beta i_B$$



$$i_E = (1 + \beta) i_B$$

共发射极接法，发射极作为公共电极，简称**CE**；

共基极接法，基极作为公共电极，简称**CB**；

共集电极接法，集电极作为公共电极，简称**CC**。

### 3.1 晶体三极管

15



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

#### ➤ 电流分配和放大作用

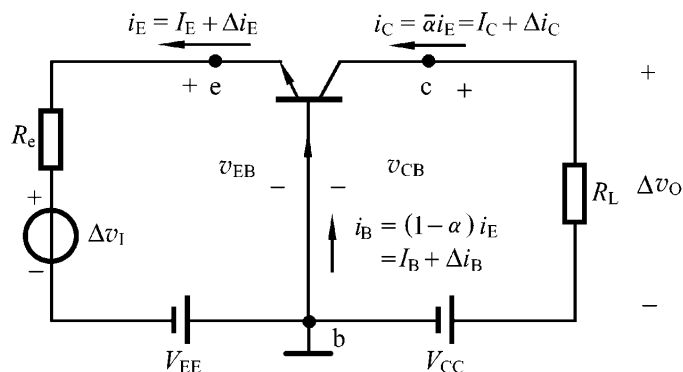
若  $\Delta v_i = 20\text{mV}$  使  $\Delta i_E = -1\text{mA}$ ,

当  $\alpha = 0.98$  时,

则  $\Delta i_C = \alpha \Delta i_E = -0.98\text{mA}$ ,

$\Delta v_O = -\Delta i_C \cdot R_L = 0.98\text{V}$ ,

电压放大倍数  $A_v = \frac{\Delta v_O}{\Delta v_i} = \frac{0.98\text{V}}{20\text{mV}} = 49$



共基极放大电路

### 3.1 晶体三极管

16



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

#### ➤ 电流分配和放大作用

综上所述，晶体三极管的放大作用，主要是依靠它的发射极电流能够通过基区传输，然后到达集电极而实现的。

实现这一传输过程的两个条件是：

- (1) **内部条件**：发射区杂质浓度远大于基区杂质浓度，且基区很薄，集电区面积大。
- (2) **外部条件**：发射结正向偏置，集电结反向偏置。



### 3.1 晶体三极管

17



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

#### ► 伏安特性

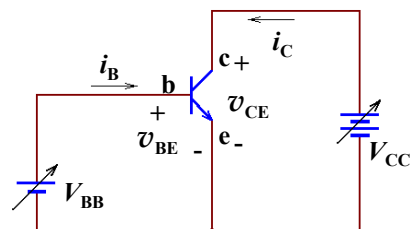
##### 1. 输入特性曲线 (以共射极放大电路为例)

$$i_B = f(v_{BE}) |_{v_{CE}=\text{const}}$$

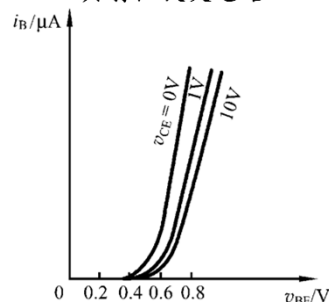
(1) 当  $v_{CE}=0V$  时, BJT 相当于两个并联的 PN 结。相当于发射结的正向伏安特性曲线。

(2)  $v_{CE}$  较小时, 集电结收集电子的能力很弱, 而电子在基区的复合作用较强。

(3) 当  $v_{CE} \geq 1V$  时,  $v_{CB} = v_{CE} - v_{BE} > 0$ , 集电结已进入反偏状态, 收集载流子能力增强, 基区复合减少, 同样的  $v_{BE}$  下  $I_B$  减小, 特性曲线右移。



共射极放大电路



### 3.1 晶体三极管

18



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

#### ► 伏安特性

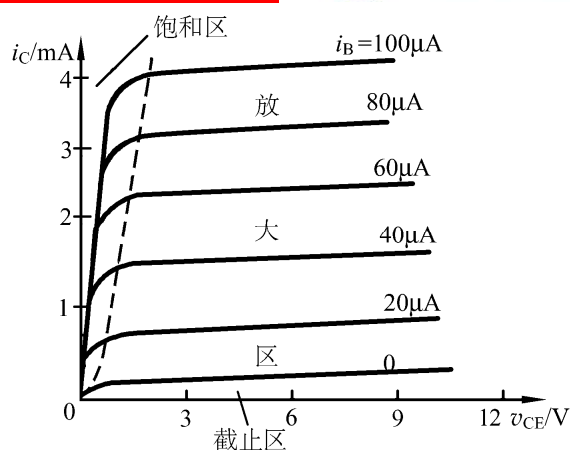
##### 2. 输出特性曲线

$$i_C = f(v_{CE}) |_{i_B=\text{const}}$$

输出特性曲线的三个区域:

**饱和区:**  $i_C$  明显受  $v_{CE}$  控制的区域, 该区域内, 一般  $v_{CE} < 0.7V$  (硅管)。此时, 发射结正偏, 集电结正偏或反偏电压很小。

**截止区:**  $i_C$  接近零的区域, 相当  $i_B=0$  的曲线的下方。此时,  $v_{BE}$  小于死区电压。



**放大区:**  $i_C$  平行于  $v_{CE}$  轴的区域, 曲线基本平行等距。此时, 发射结正偏, 集电结反偏。  $i_C$  与  $i_B$  满足  $\beta$  倍的关系。

### 3.1 晶体三极管

19



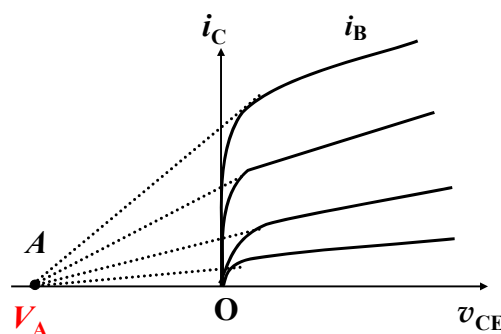
武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

#### ➤ 伏安特性

#### 2. 输出特性曲线

将不同 $i_B$ 的各条输出特性曲线向负轴方向延伸，它们将近似相交于公共点A上，对应的电压用 $V_A$ 表示，称为厄尔利电压。其值大小用来表示共发射极输出特性曲线上翘程度。 $|V_A|$ 越大，上翘程度就越小。

从内部物理过程来说，其值与基区宽度有关，基区宽度越小，基区宽度调制效应对 $i_C$ 的影响就越大， $|V_A|$ 也就相应越小



### 3.1 晶体三极管

20



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

#### ➤ 主要参数

(1) 共发射极直流电流放大系数  $\bar{\beta}$

$$\bar{\beta} = \frac{I_C - I_{CEO}}{I_B} \approx \frac{I_C}{I_B} \Big|_{v_{CE}=\text{const}}$$

(3) 共基极直流电流放大系数  $\bar{\alpha}$

$$\bar{\alpha} = (I_C - I_{CBO}) / I_E \approx I_C / I_E$$

(2) 共发射极交流电流放大系数  $\beta$

$$\beta = \Delta I_C / \Delta I_B \Big|_{v_{CE}=\text{const}}$$

(4) 共基极交流电流放大系数  $\alpha$

$$\alpha = \Delta I_C / \Delta I_E \Big|_{v_{CB}=\text{const}}$$

当 $I_{CBO}$ 和 $I_{CEO}$ 很小时， $\bar{\alpha} \approx \alpha$ 、 $\bar{\beta} \approx \beta$ ，可以不加区分。

### 3.1 晶体三极管

21



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

#### ➤ 主要参数

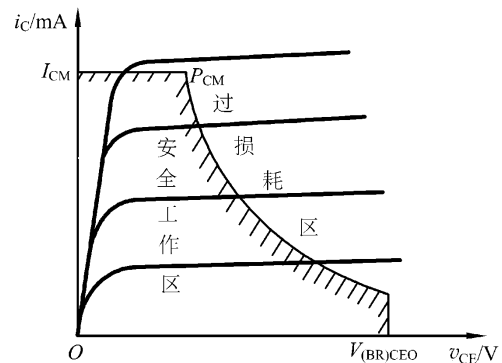
(1) 集电极最大允许电流  $I_{CM}$

(2) 集电极最大允许功率损耗  $P_{CM}$

$$P_{CM} = I_C V_{CE}$$

(3) 反向击穿电压

- $V_{(BR)CBO}$ ——发射极开路时的集电结反向击穿电压。
- $V_{(BR)EBO}$ ——集电极开路时发射结的反向击穿电压。
- $V_{(BR)CEO}$ ——基极开路时集电极和发射极间的击穿电压。



由  $P_{CM}$ 、 $I_{CM}$  和  $V_{(BR)CEO}$  在输出特性曲线上可以确定过损耗区、过电流区和击穿区。

$$V_{(BR)EBO} < V_{(BR)CEO} < V_{(BR)CBO}$$