



核心专业课
B3I493220

微电子器件实验

彭守仲

北京航空航天大学 微电子学院

第一馆203办公室 shouzhong.peng@buaa.edu.cn

2020年11月16日

回顾



■ 直流特性实验内容

- 1、二极管的直流特性测量与分析
- 2、双极型晶体管的直流特性测量与分析
- 3、场效应晶体管的直流特性测量与分析

■ 频率特性实验内容

- 1、双极型晶体管的频率特性测量与分析
- 2、场效应晶体管的频率特性测量与分析

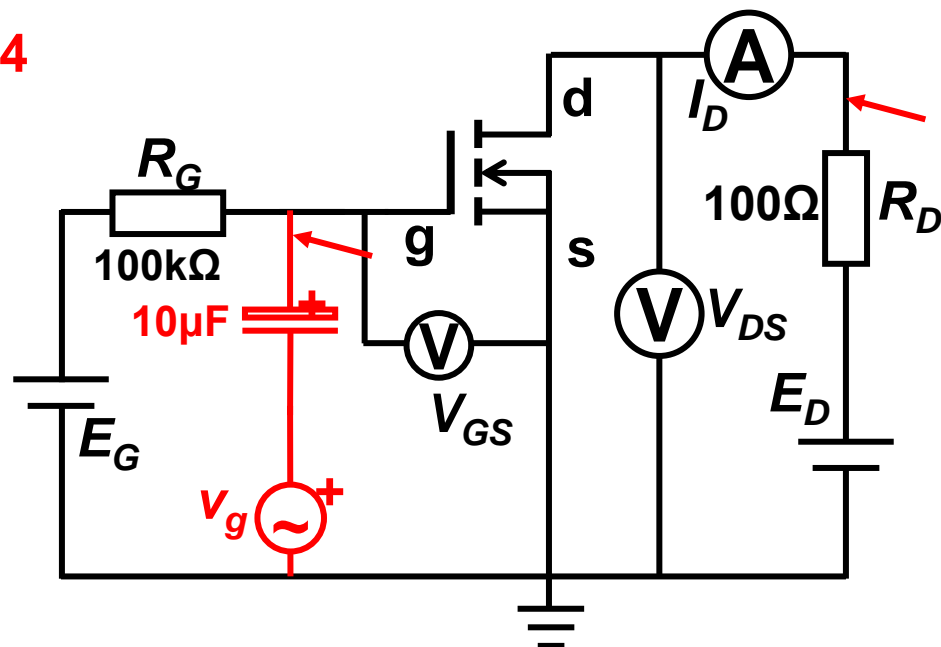
回顾



频率特性测量

1. 使 $E_D=10V$ 左右,
 $E_G=3.9, 4.0, 4.1, 4.2, 4.3V$,
 v_g 峰峰值100mV (输出不失真)
2. 改变 v_g 的频率 (1kHz, 10kHz, 100kHz, 500kHz, 1MHz, 2MHz, 5MHz, 10MHz) 测量电容和 R_D 上方的交流波形和电压有效值
3. 计算 v_{ds}/v_{gs} 和跨导 g_m
4. 画幅频特性曲线图和跨导图
5. V_{ds}/V_{gs} 下降0.7时为截止频率 f_β
6. 特征频率 $f_T = \text{电压增益} \times f_\beta$

IRFU214



任意波形发生器
产生交流信号 v_g

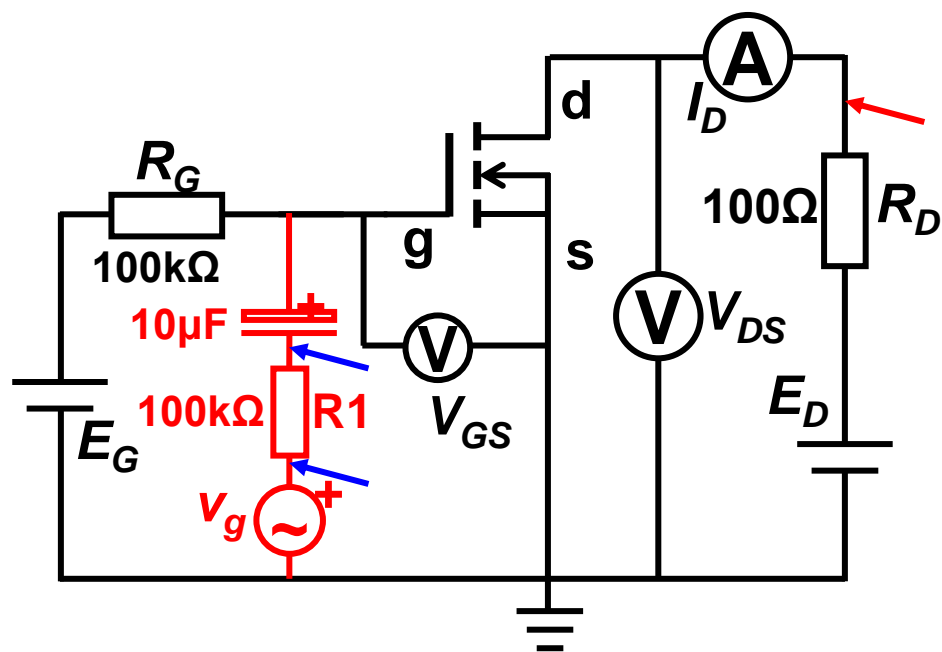


数字示波器
测量 v_{gs} 和 R_D 电压波形

回顾



- 示波器地线夹如何接？
- 示波器耦合交流
- 工频干扰（50Hz）



回顾



■ 示波器测量小信号：

- 旋转Scale按钮，采用有效值而不是峰峰值
- 峰峰值与有效值转换关系



双极型晶体管的输出特性

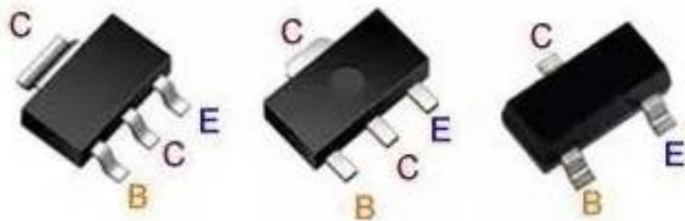


输出特性曲线

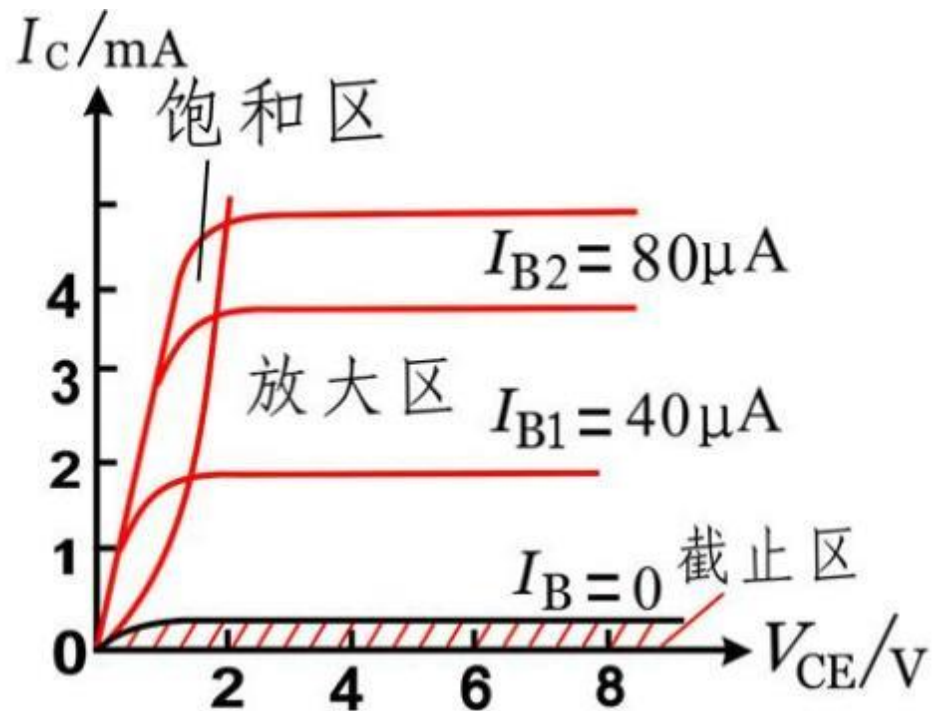
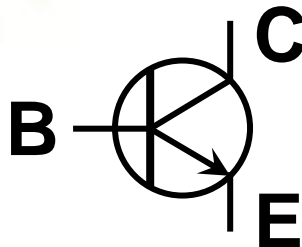
TO封装 (Transistor Outline)



SOT封装 (Small Outline Transistor)



测试器件



输出特性曲线

双极型晶体管的输出特性

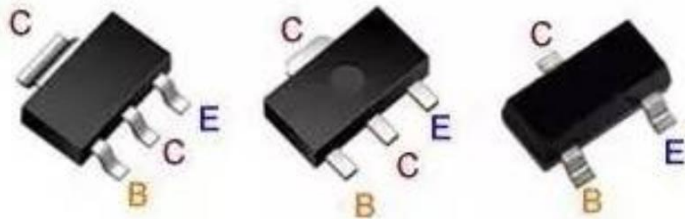


■ 输出特性曲线

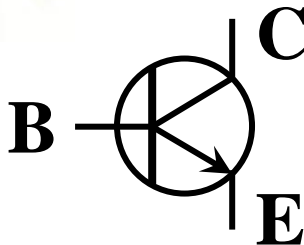
TO封装 (Transistor Outline)



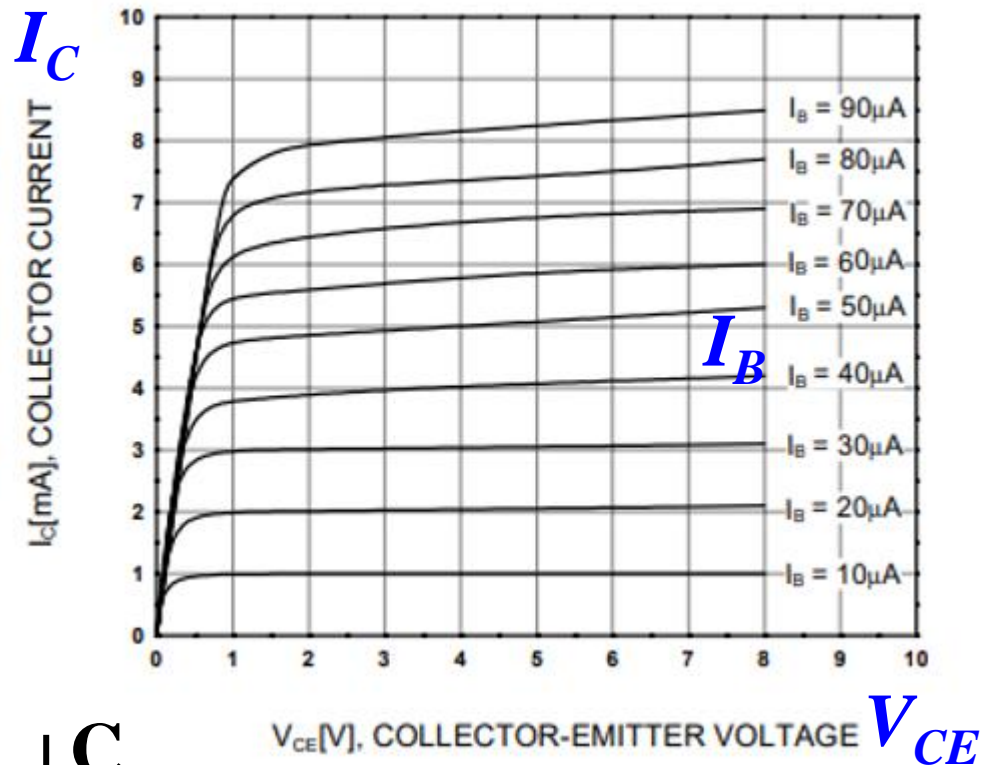
SOT封装 (Small Outline Transistor)



测试器件



C9018 NPN型晶体管



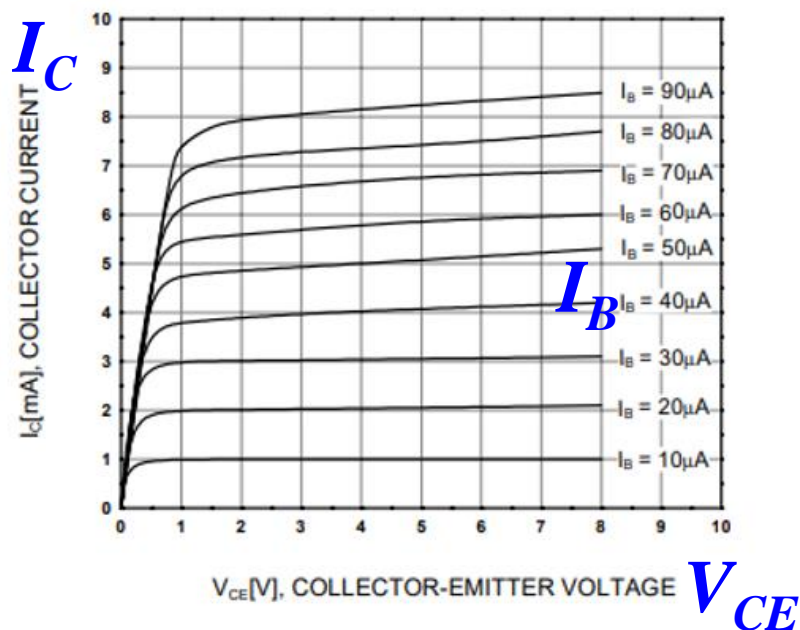
输出特性曲线

双极型晶体管的输出特性

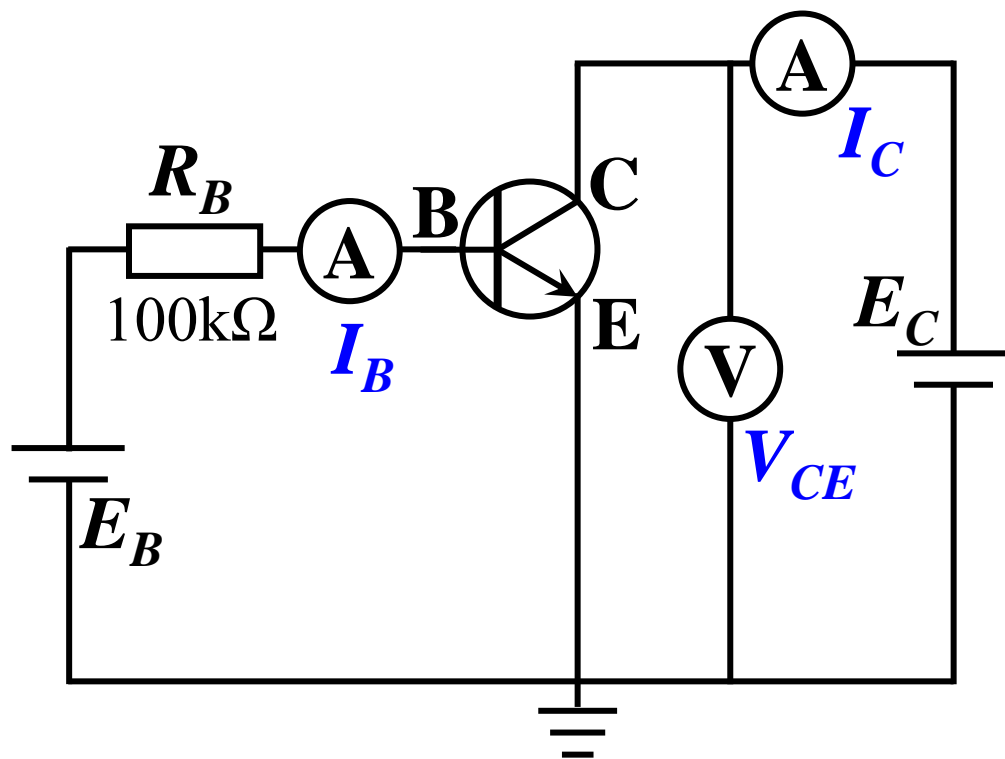


■ 输出特性曲线

□ 基本测试原理电路如右图所示，测试时用逐点测试的方法把一条条曲线描绘出来。



输出特性曲线

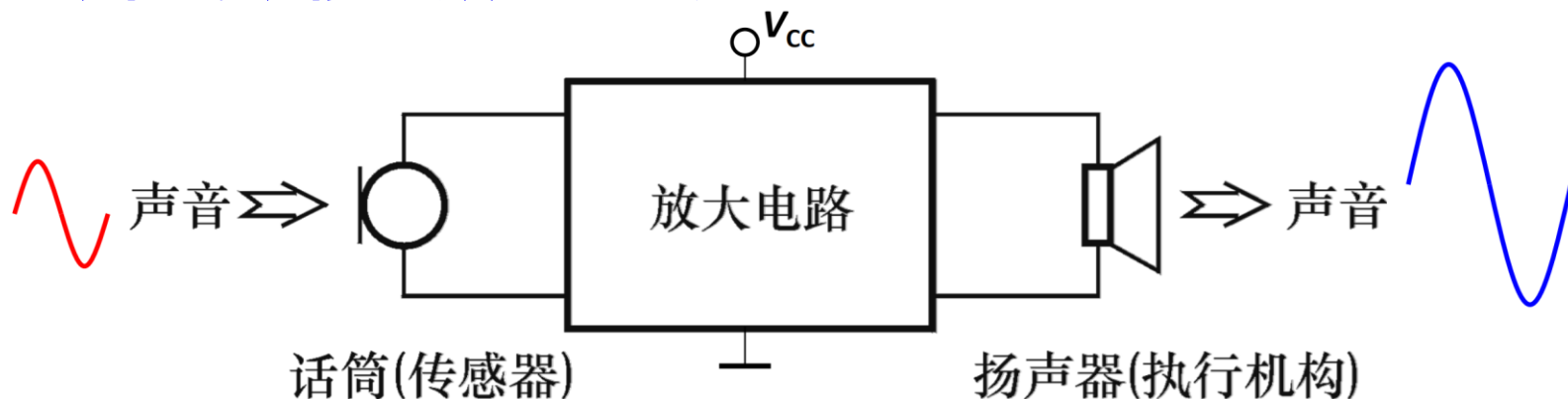


测试电路图

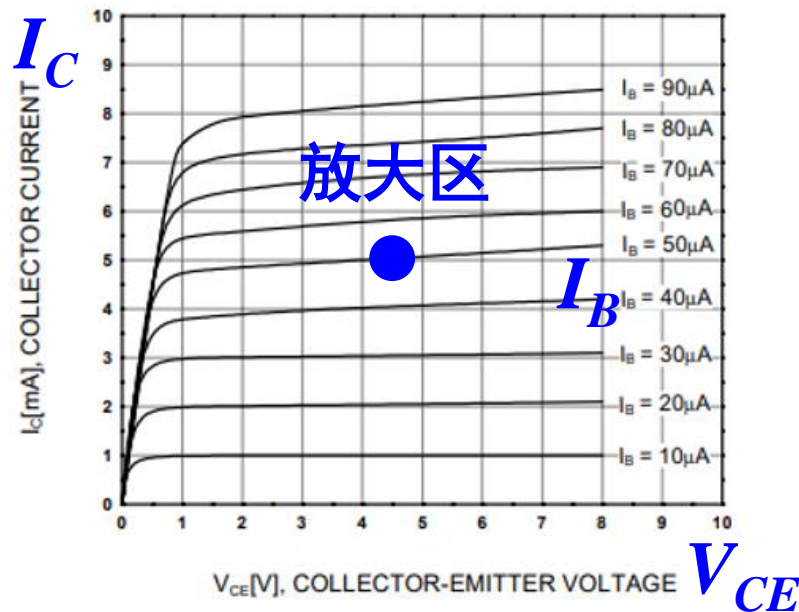
双极型晶体管的放大特性



■ 三极管的功能：放大和开关



- 三极管是一种控制电流的半导体器件，其作用是把微弱信号放大成幅度值较大的电信号，也用作无触点开关。
- 工作在直流工作点（Q），将“交流小信号”放大



双极型晶体管的放大特性



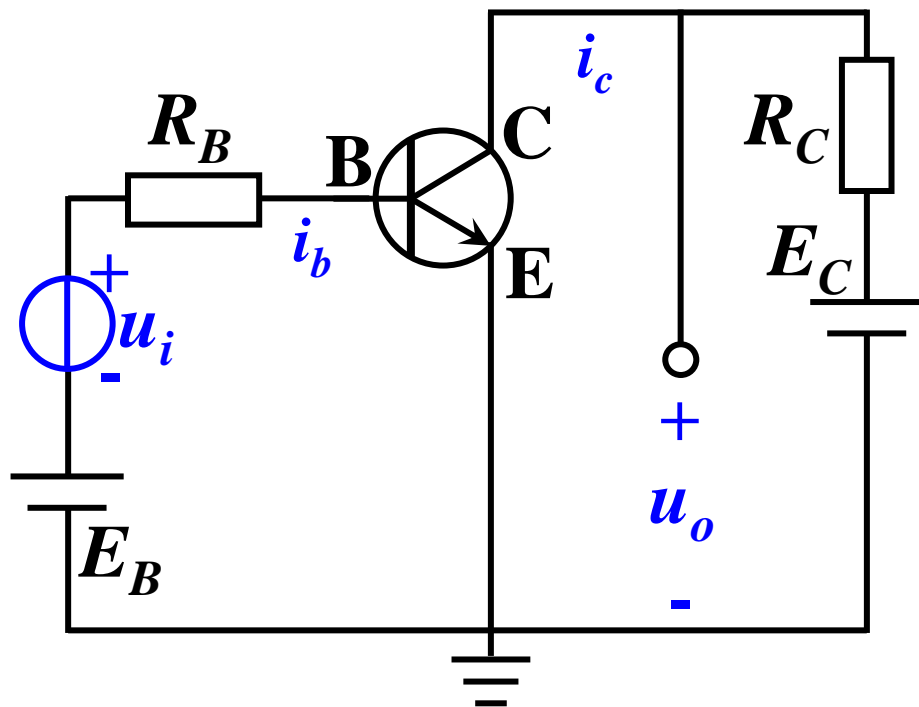
■ 共射放大电路各部件作用

- E_B 、 R_B ：使发射结正偏，同时调节基极电流
- E_C ：使集电结反偏，同时为负载供电
- R_C ：将集电极电流转换为电压

(注意 R_{CE} 及CE分压变化)

小信号放大原理：

$$i_b \Rightarrow i_c$$



双极型晶体管的放大特性



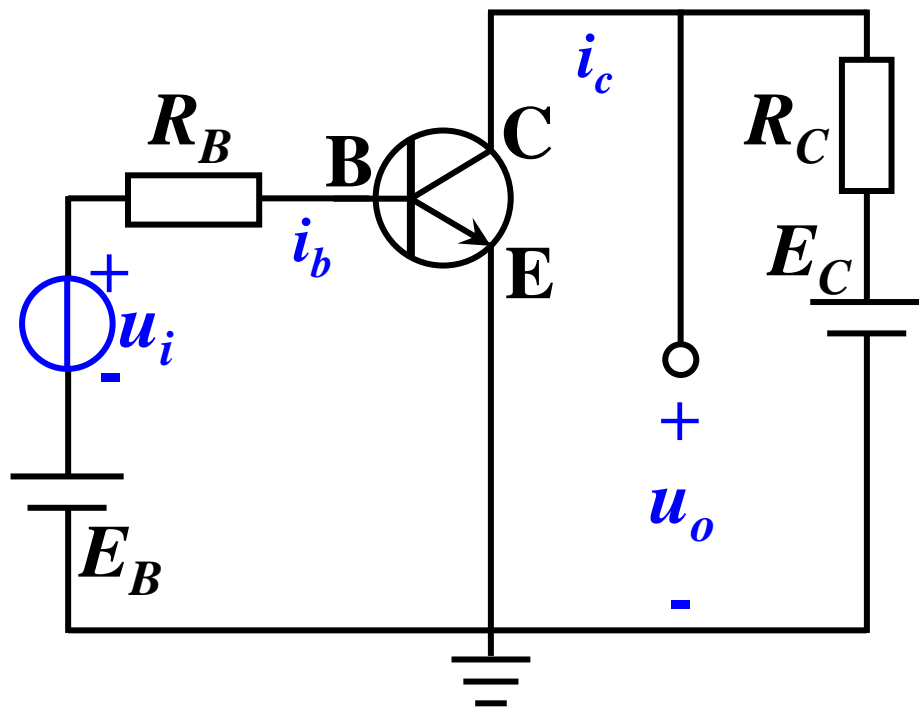
■ 共射放大电路各部件作用

- E_B 、 R_B ：使发射结正偏，同时调节基极电流
- E_C ：使集电结反偏，同时为负载供电
- R_C ：将集电极电流转换为电压

(注意 R_{CE} 及CE分压变化)

小信号放大原理：

$$u_i \Rightarrow i_b \Rightarrow i_c$$



双极型晶体管的放大特性



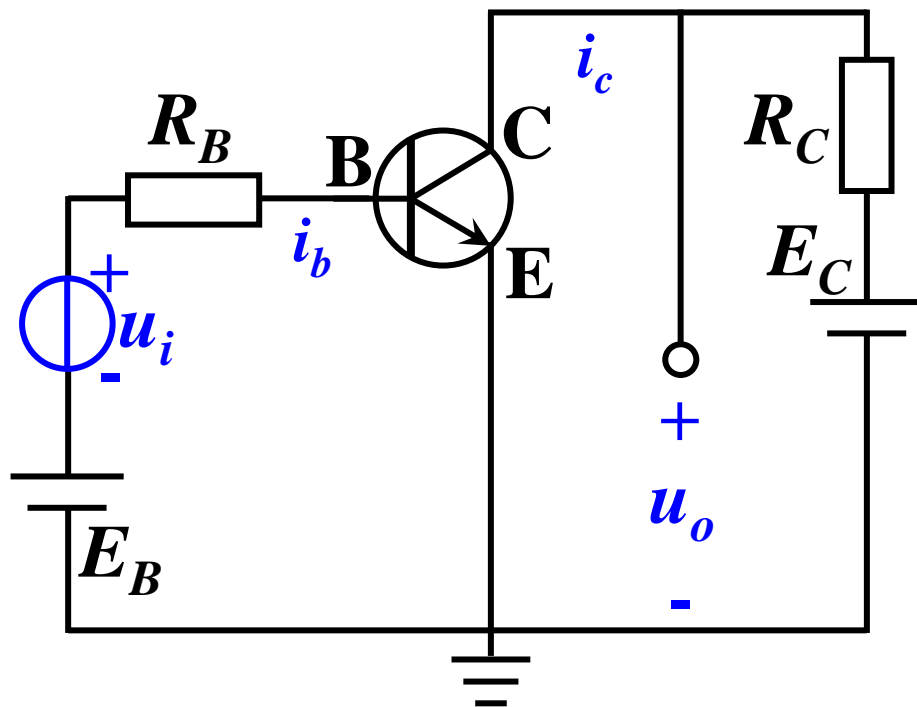
■ 共射放大电路各部件作用

- E_B 、 R_B ：使发射结正偏，同时调节基极电流
- E_C ：使集电结反偏，同时为负载供电
- R_C ：将集电极电流转换为电压

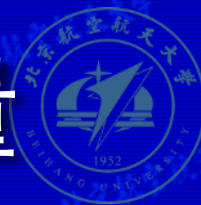
(注意 R_{CE} 及CE分压变化)

小信号放大原理：

$$u_i \Rightarrow i_b \Rightarrow i_c \Rightarrow u_{Rc} \Rightarrow u_{ce}(u_o)$$

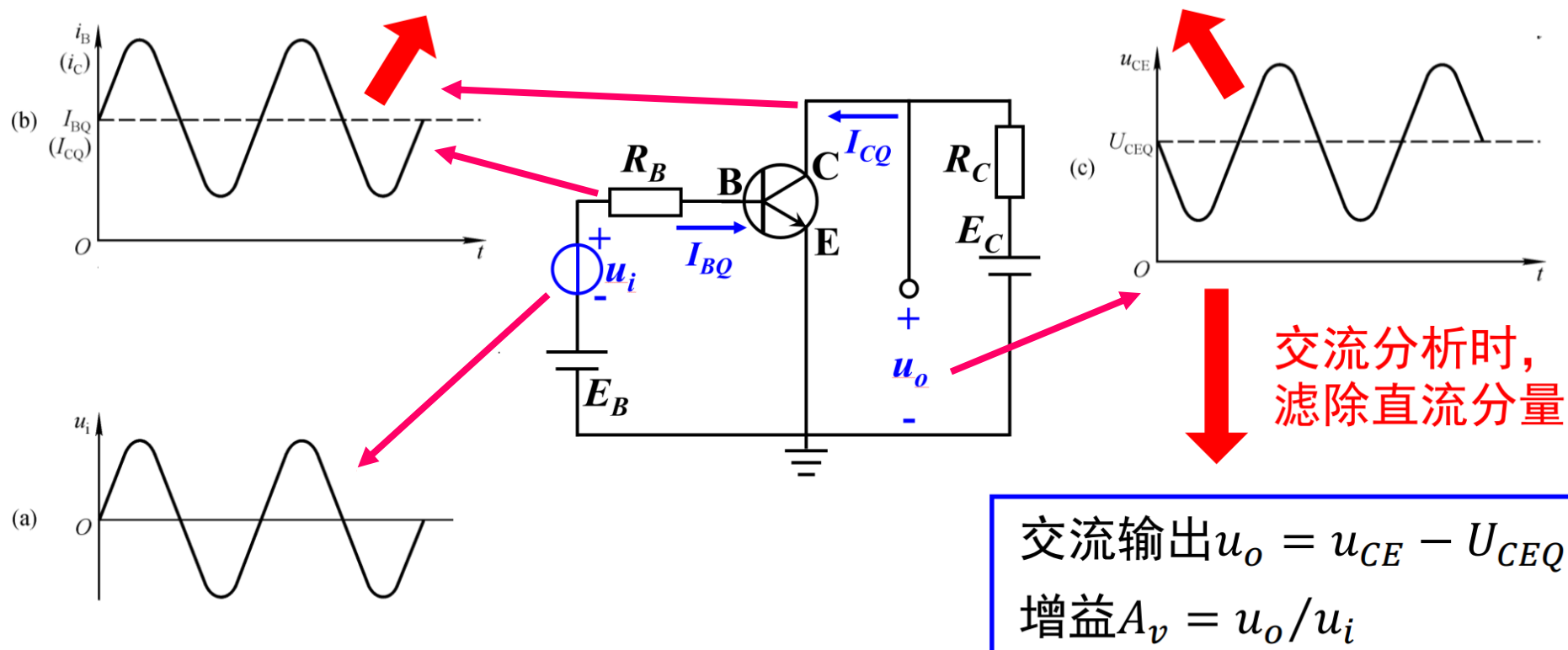


双极型晶体管的模型参数测量

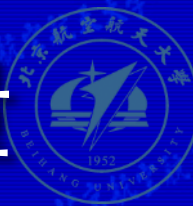


■ 共射放大电路的直流信号和交流信号分析

交流小信号被“驮载”在直流信号上。



双极型晶体管的模型参数测量



■ 直流通路分析

电容：视为开路。

- 原因：容抗为 $1/j\omega C$ ，直流信号的角频率 $\omega = 0$ ，容抗无穷大。

电感：视为短路。线圈电阻另外考虑。

- 原因：感抗为 $j\omega L$ ，直流信号的角频率 $\omega = 0$ ，感抗为零。

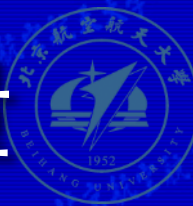
理想交流电压源：视为短路。

- 原因：根据叠加原理，在分析直流通路时，交流激励信号置零，即交流电压 $u_i = 0$ ，只有将其短路才能使该处压降为零。

理想交流电流源：视为开路。

- 原因：根据叠加原理，在分析直流通路时，交流激励信号置零，即交流电流 $i_i = 0$ ，只有将其开路才能使该处无电流。

双极型晶体管的模型参数测量



■ 交流通路分析

电容：如果容值极大，视为短路。如果频率极高，视为短路。

• 原因：容抗为 $1/j\omega C$ ，如果 $C \rightarrow \infty$ 或 $\omega \rightarrow \infty$ ，容抗接近零。

电感：如果感值极大，视为开路。如果频率极高，视为开路。

• 原因：感抗为 $j\omega L$ ，如果 $L \rightarrow \infty$ 或 $\omega \rightarrow \infty$ ，感抗接近无穷大

理想直流电压源：视为短路。

• 原因：根据叠加原理，在分析交流通路时，直流激励信号置零，即直流电压 $V_{DD} = 0$ ，只有将其短路才能使该处压降为零。

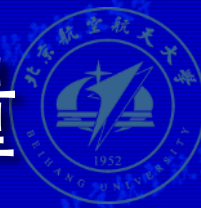
• 从小信号模型的角度理解：交流通路里，所分析的电学量都是变化量 Δu 、 Δi ，而直流电压源的电压恒定，变化量 $\Delta u = 0$ 。

理想直流电流源：视为开路。

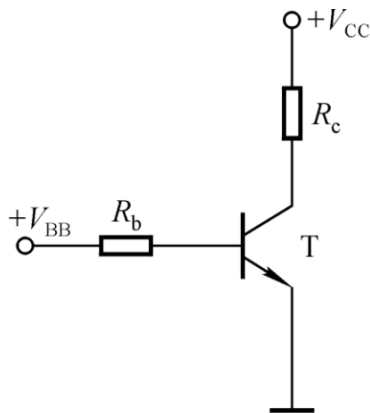
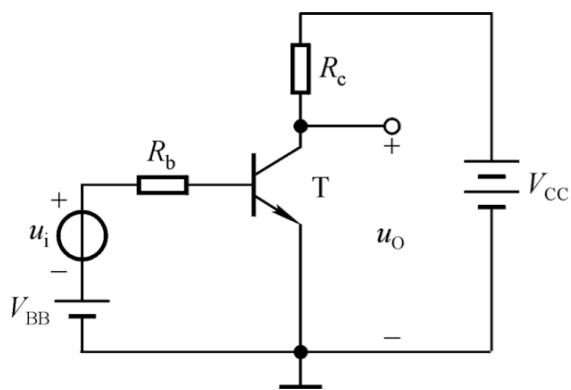
• 原因：根据叠加原理，在分析交流通路时，直流激励信号置零，即直流电流 $I_{SS} = 0$ ，只有将其开路才能使该处无电流。

• 从小信号模型的角度理解：交流通路里，所分析的电学量都是变化量 Δu 、 Δi ，而直流电流源的电流恒定，变化量 $\Delta i = 0$ 。

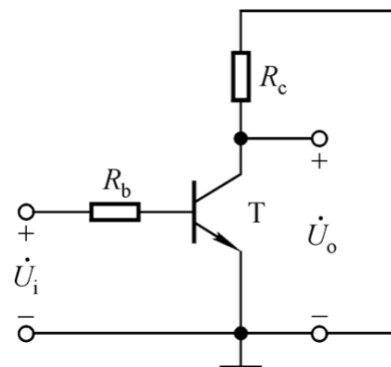
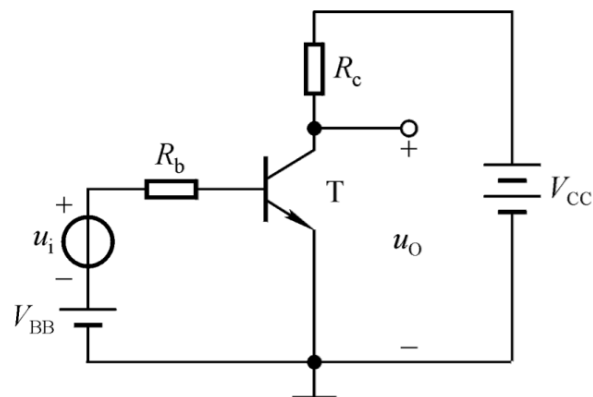
双极型晶体管的模型参数测量



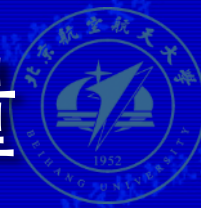
直流通路



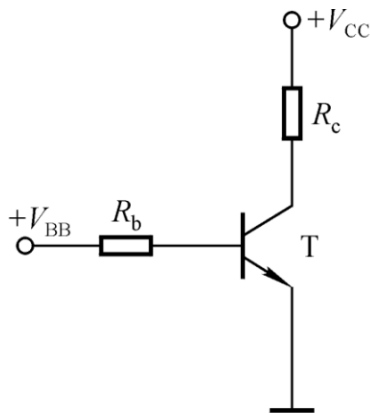
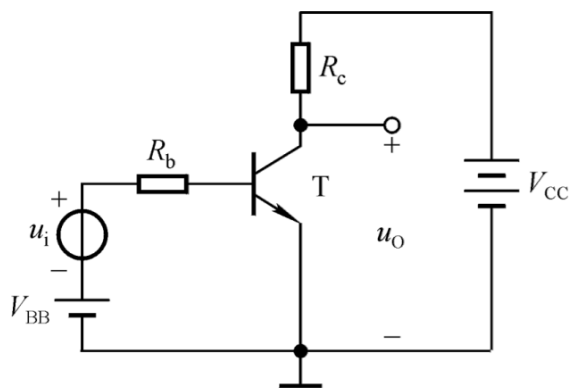
交流通路



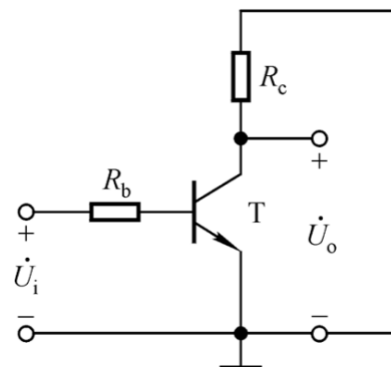
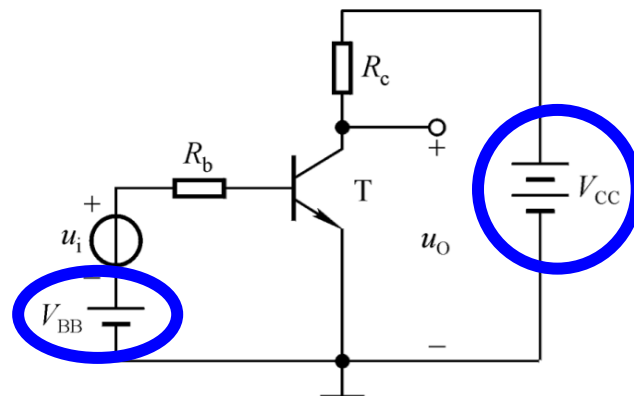
双极型晶体管的模型参数测量



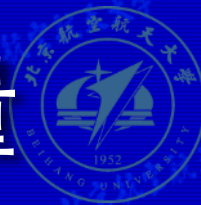
直流通路



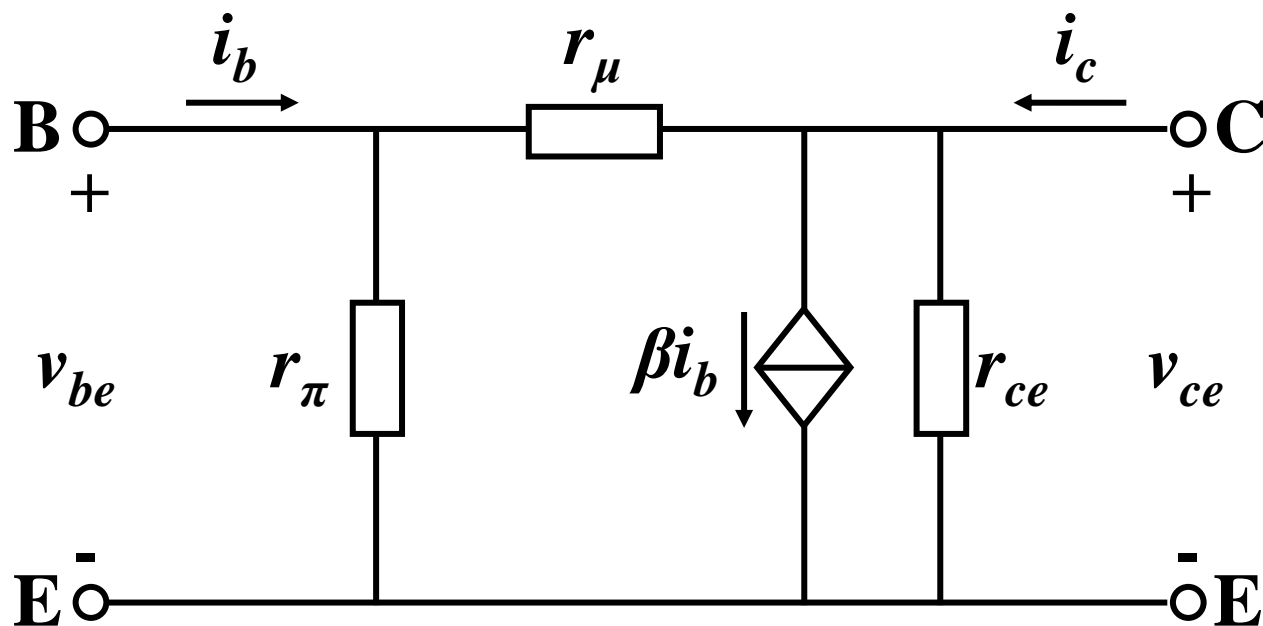
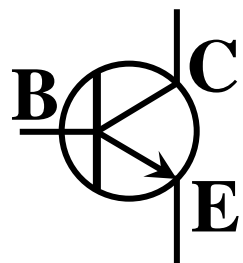
交流通路



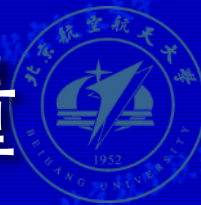
双极型晶体管的模型参数测量



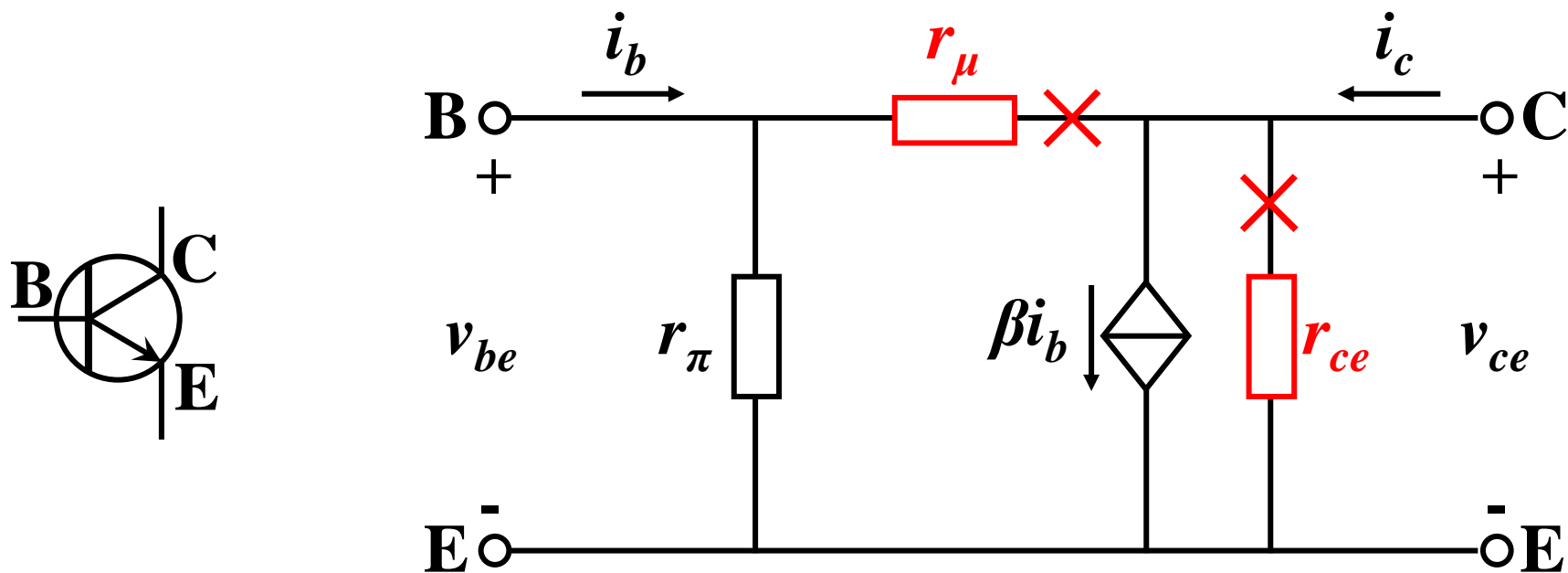
■ 三极管的基本小信号等效电路



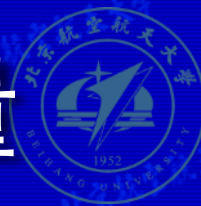
双极型晶体管的模型参数测量



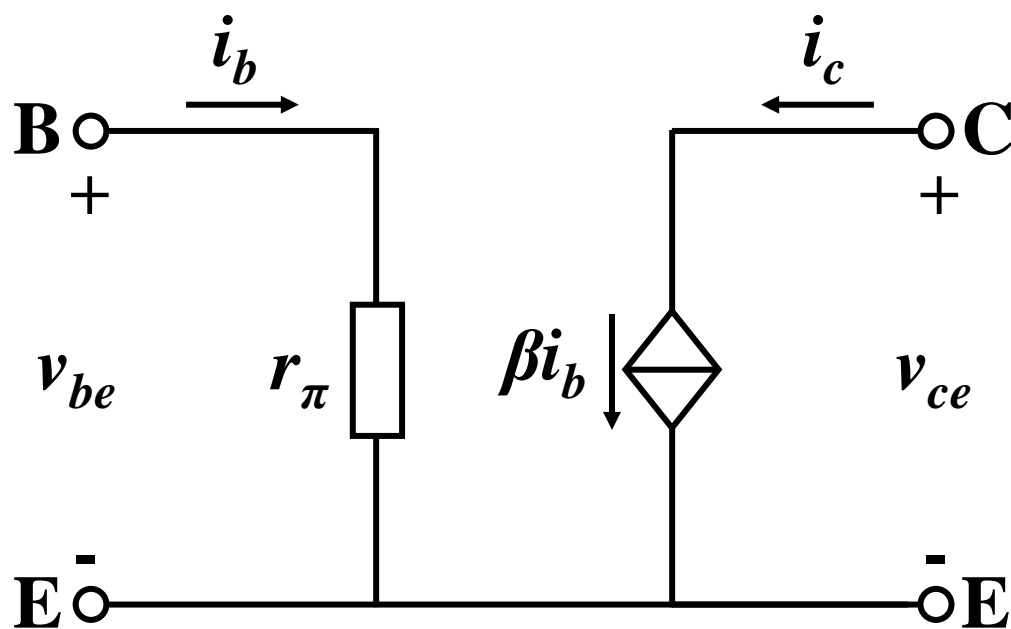
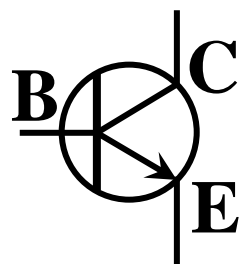
■ 三极管的基本小信号等效电路



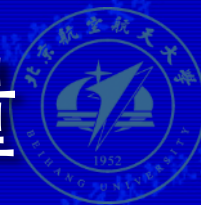
双极型晶体管的模型参数测量



■ 三极管的基本小信号等效电路



双极型晶体管的模型参数测量



■ 三极管的小信号模型参数

➤ 1. 电流增益:

$$\beta = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_Q = \frac{i_c}{i_b}$$

➤ 2. 低频跨导:

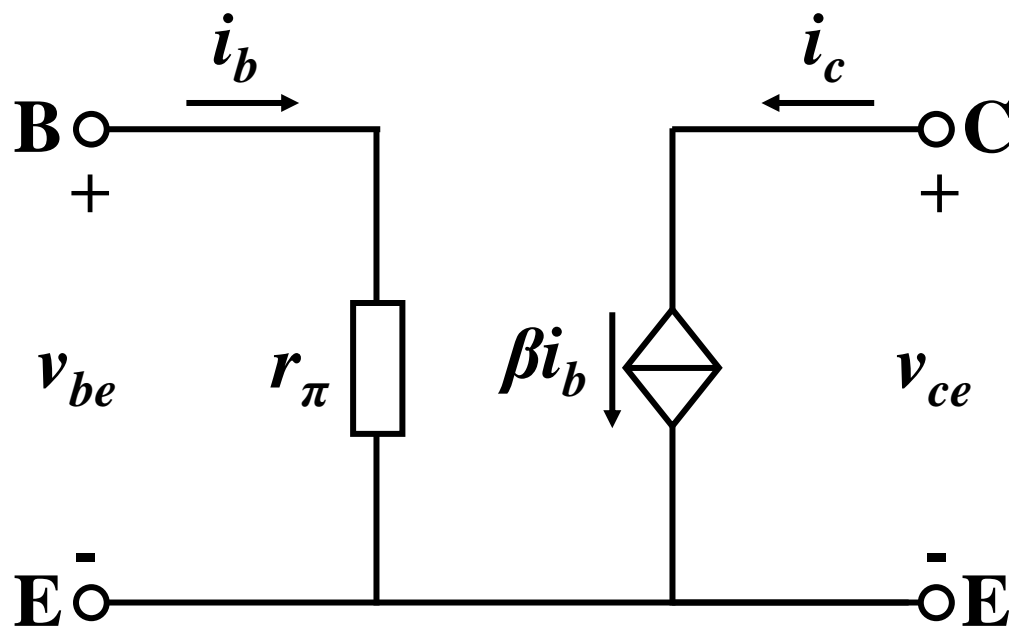
$$g_m = \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{BE}} \right|_Q = \frac{i_c}{v_{be}}$$

➤ 3. 输入电阻:

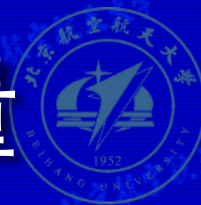
$$r_\pi = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{\beta}{g_m}$$

➤ 4. 电路的电压增益:

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}}$$



双极型晶体管的模型参数测量



■ 模型参数测量

1. 画出低频小信号电路

并写出 β 、 g_m 、 r_π 、 A_v

计算公式（课堂测试）

2. 使 $I_B=60\mu\text{A}$, $E_C=15\text{V}$

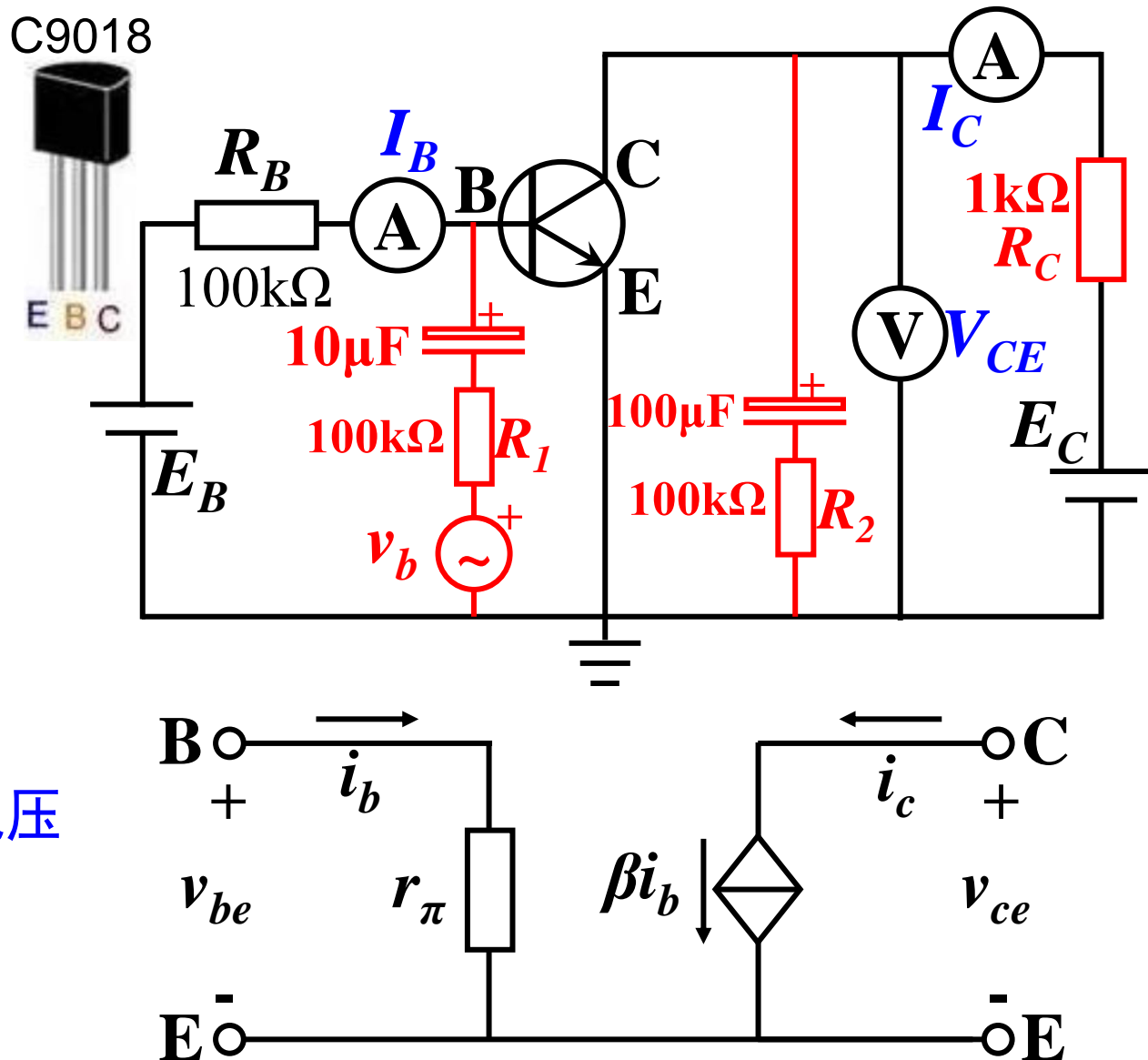
3. 任意波形发生器输出

1KHz、7.5V信号 v_b

4. 用示波器测量交流电压

并计算 β 、 g_m 、 r_π 、 A_v

（输出波形不失真）

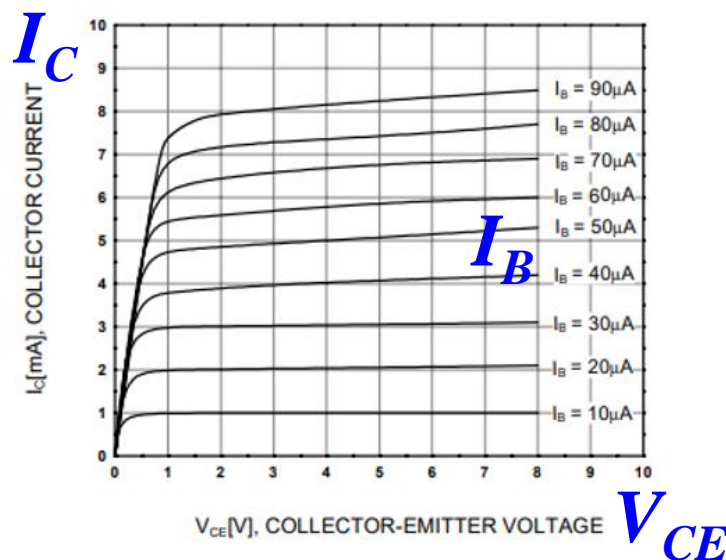


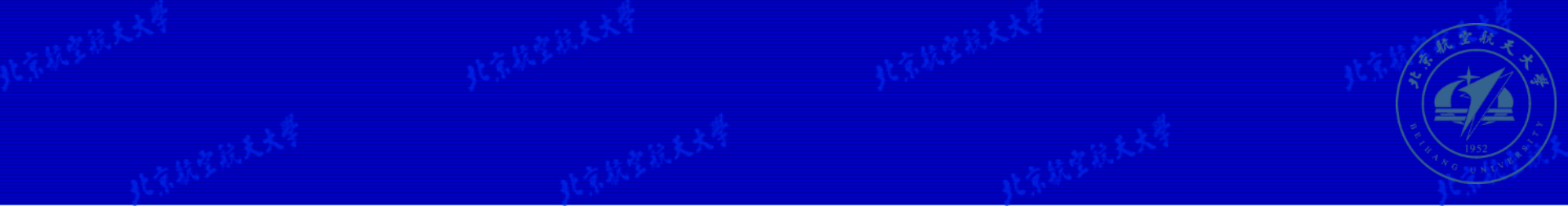
思考题



■思考题：

1. 双极型三极管的直流电阻 R_{BE} 和 R_{CE} 如何变化？
2. 如何测量双极型晶体管小信号模型中的电阻 r_{ce} ？
根据之前测量的输出特性曲线计算 r_{ce} 的大小。





谢谢！