



第五章

BJT三极管及放大

电路基础

梁福田 ftliang@ustc.edu.cn

2025. 3. 28



前情提要

因浓度差

多子的扩散运动 → 由

扩散 V.S. 漂移

空间电荷区

Diffusion vs Drift

↓
内电场促使少子漂

↓
减小空间电荷区

最后,多子的扩散和少

1. 驱动力的本质不同

特性	扩散 (Diffusion)	漂移 (Drift)
驱动力	载流子浓度梯度 (浓度差)	电场力 (内建电场或外加电场)
方向	从高浓度区域向低浓度区域移动	载流子沿电场方向 (空穴) 或逆电场方向 (电子) 移动
是否需要电场	不需要 (仅由浓度差驱动)	必须依赖电场

示例:

- 扩散: PN结形成初期, P区的空穴 (多子) 向N区扩散, N区的电子 (多子) 向P区扩散。
- 漂移: 内建电场建立后, N区的少数载流子 (空穴) 被电场拉向P区, P区的少数载流子 (电子) 被拉向N区。

2. 作用对象不同

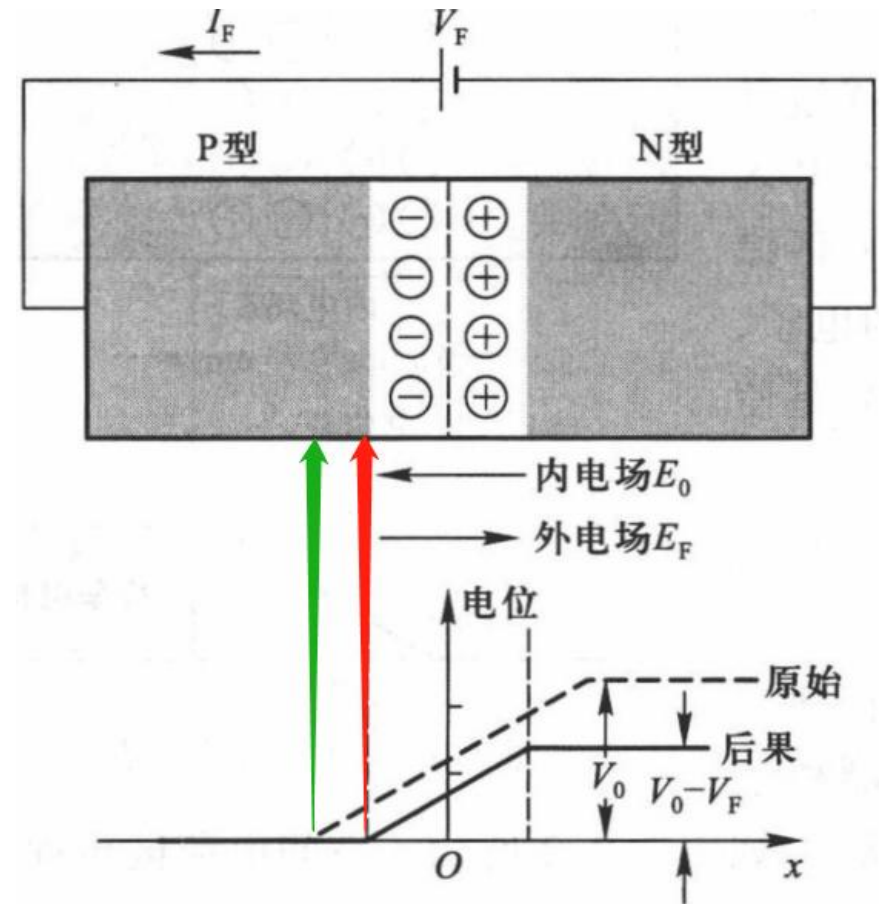
机制	主导的载流子类型	作用阶段
扩散	多数载流子 (多子)	PN结形成初期, 未达到平衡时
漂移	少数载流子 (少子)	内建电场形成后, 平衡或外加偏压时

说明:

- 扩散电流: 由多子 (P区空穴、N区电子) 的浓度梯度引起, 形成初始的载流子流动。
- 漂移电流: 由少子 (P区电子、N区空穴) 在内建电场下的运动产生, 方向与扩散电流相反。

前情提要

- 二极管模型
 - 理想模型 $V_{th}=0$
 - 恒压降模型 $V_{th}=0.7$
 - 折线模型 $r_D=200\ \Omega$ ($V_{th}=0.5$, $V=0.7$, $I=1\text{mA}$)
 - 小信号模型 $r_d=I_D/V_T$, $V_T=26\text{mV}$





一、发明背景与技术积累

1. 真空管的局限性驱动创新

在晶体管发明前，电子设备依赖真空管（电子管）实现信号放大和开关功能。然而，真空管存在体积大、功耗高（需加热阴极）、寿命短（约1万小时）等缺陷^{4 5}。这些缺点促使科学家寻找固态替代方案。

2. 半导体研究的早期探索

- **20世纪初的半导体理论**：科学家已发现某些半导体材料（如氧化锌、硫化铜）的整流特性，并尝试将其用于无线电检波器⁹。
- **场效应理论的萌芽**：1925年，Julius Lilienfeld申请了首个类似场效应晶体管（FET）的专利，但未能实际制造^{6 9}。
- **苏联科学家的先驱性工作**：Oleg Losev在1920年代发现某些半导体材料可放大信号，但研究成果因二战而中断⁹。

3. 二战加速半导体研究

美国政府因战争需求资助半导体材料研究，特别是硅和锗的提纯技术。例如，普渡大学在1942年发现锗单晶具有优异的整流性能，为后续实验奠定基础^{3 5}。



二、贝尔实验室的突破性发现

1. 研究团队的组成与目标

1945年，贝尔实验室成立“半导体小组”，由威廉·肖克利（William Shockley）领导，成员包括理论物理学家约翰·巴丁（John Bardeen）和实验专家沃尔特·布拉顿（Walter Brattain）。他们的初始目标是开发基于半导体的固态放大器 [5](#) [10](#)。

2. 实验中的偶然发现

- **表面态的困扰**：1947年11月，巴丁和布拉顿发现锗表面存在电子层，阻碍电场穿透半导体，导致放大实验失败 [6](#) [10](#)。
- **点接触式结构的灵感**：通过调整实验设计，他们将两片金箔电极（间距仅50微米）按压在锗表面，发现当微弱电流通过一个电极（发射极）时，另一个电极（集电极）能输出放大后的电流，增益达4.5倍 [4](#) [5](#) [10](#)。
- **关键日期**：1947年12月16日（或23日，不同记录存在差异），首个锗基点接触晶体管诞生，并于次年6月正式公布 [1](#) [2](#) [5](#)。

3. 工作原理的初步解释

尽管当时未能完全理解机理，但巴丁提出：

- 锗表面的空穴（正电荷）被金箔电极的电场调制，形成导电通道。
- 发射极的少量电流变化可控制集电极的大电流，实现放大效应 [6](#) [8](#)。



三、从实验室到商业化

1. 肖克利的后续贡献

因未参与点接触晶体管的专利署名，肖克利在1948年独立提出**双极结型晶体管 (BJT)**，通过PN结构实现更稳定的电流控制，并于1951年成功制造。这一设计成为后续晶体管发展的主流 [8](#) [10](#)。

2. 技术应用的快速扩展

- **早期应用**：1953年首款商用晶体管助听器上市；1954年晶体管收音机（如Regency TR1）普及 [2](#) [5](#)。
- **集成电路的基石**：1960年代，晶体管微型化推动集成电路（IC）发展，最终催生现代计算机 [2](#) [7](#)。

四、历史意义与争议

1. 诺贝尔奖与团队分歧

1956年，肖克利、巴丁和布拉顿因晶体管发明获诺贝尔物理学奖。然而，布拉顿和巴丁因与肖克利关系破裂而离开贝尔实验室 [10](#)。

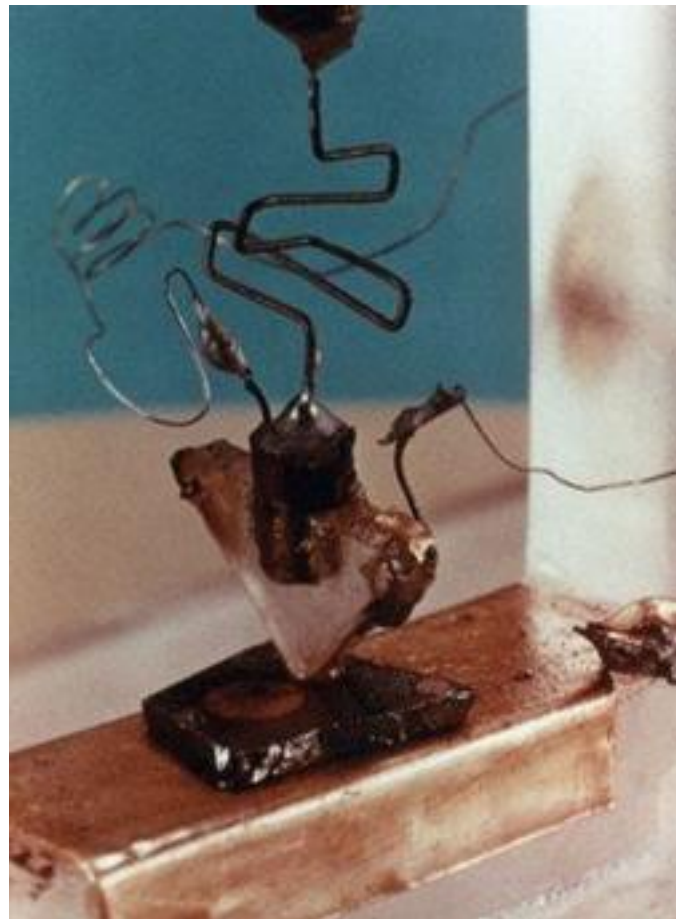
2. 技术路线的更迭

点接触晶体管虽具开创性，但因制造难度高、稳定性差，很快被肖克利的BJT取代。BJT的结构原理（PN结与掺杂控制）成为半导体工业的核心基础 [8](#) [10](#)。

3. 对现代社会的深远影响

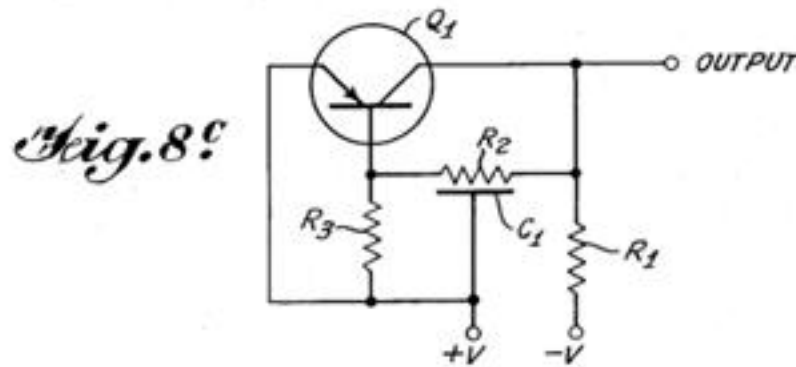
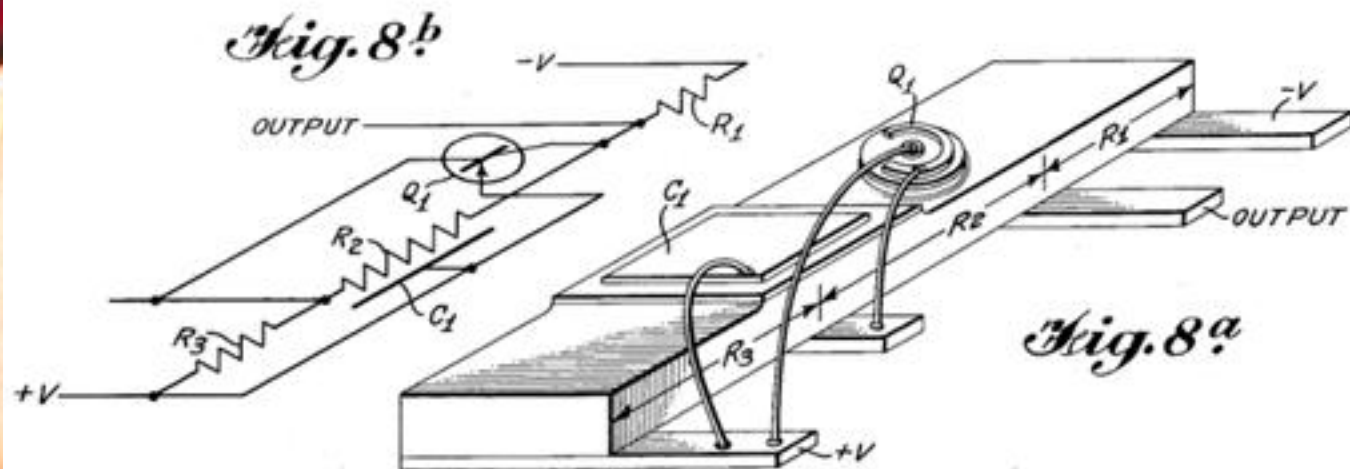
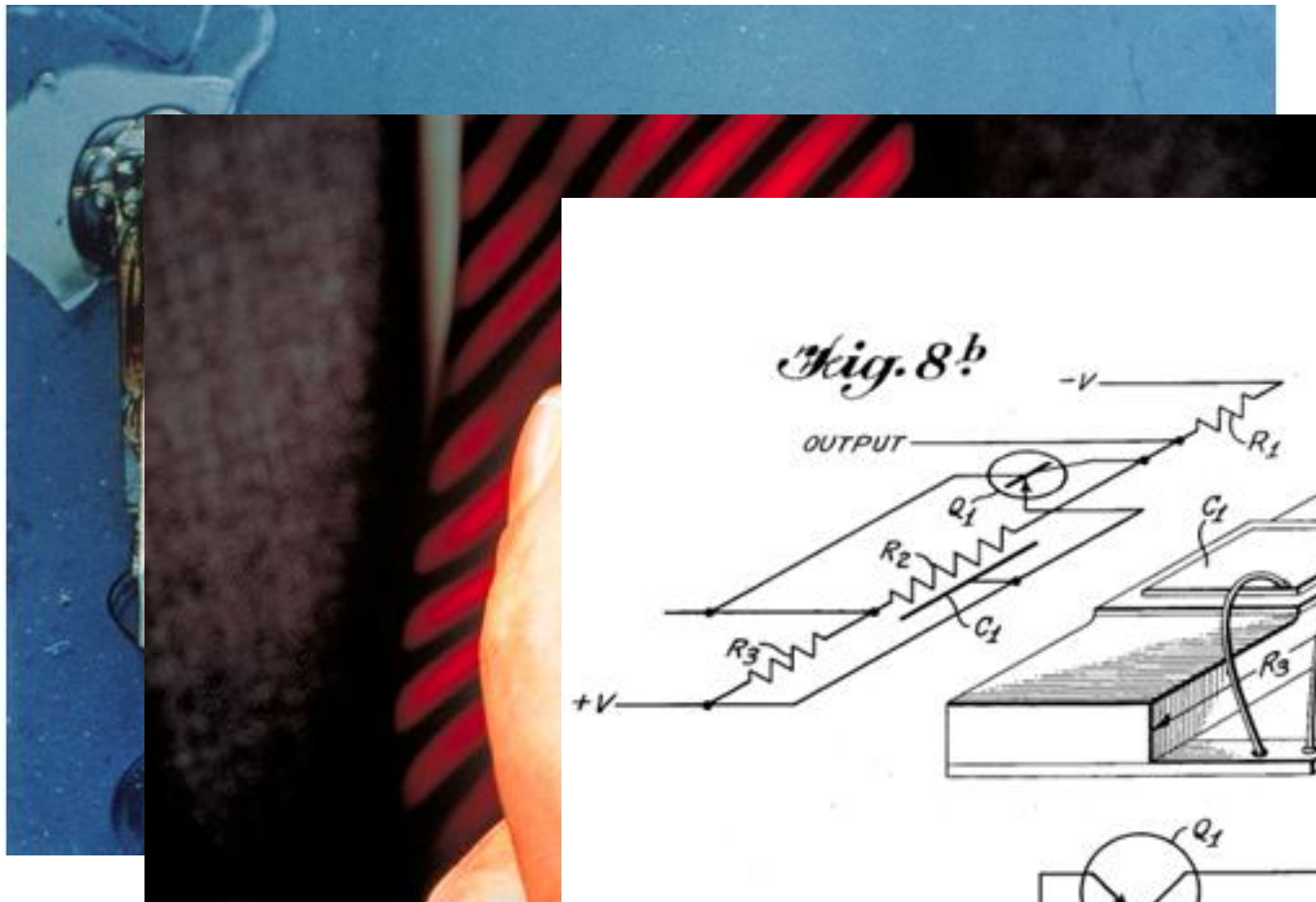
晶体管不仅终结了真空管时代，更通过微型化和集成化，推动了信息技术革命。例如，2023年苹果M1 Ultra芯片已集成1140亿个晶体管，远超1947年原型的简单结构 [7](#) [10](#)。

第一个晶体管 (transistor)

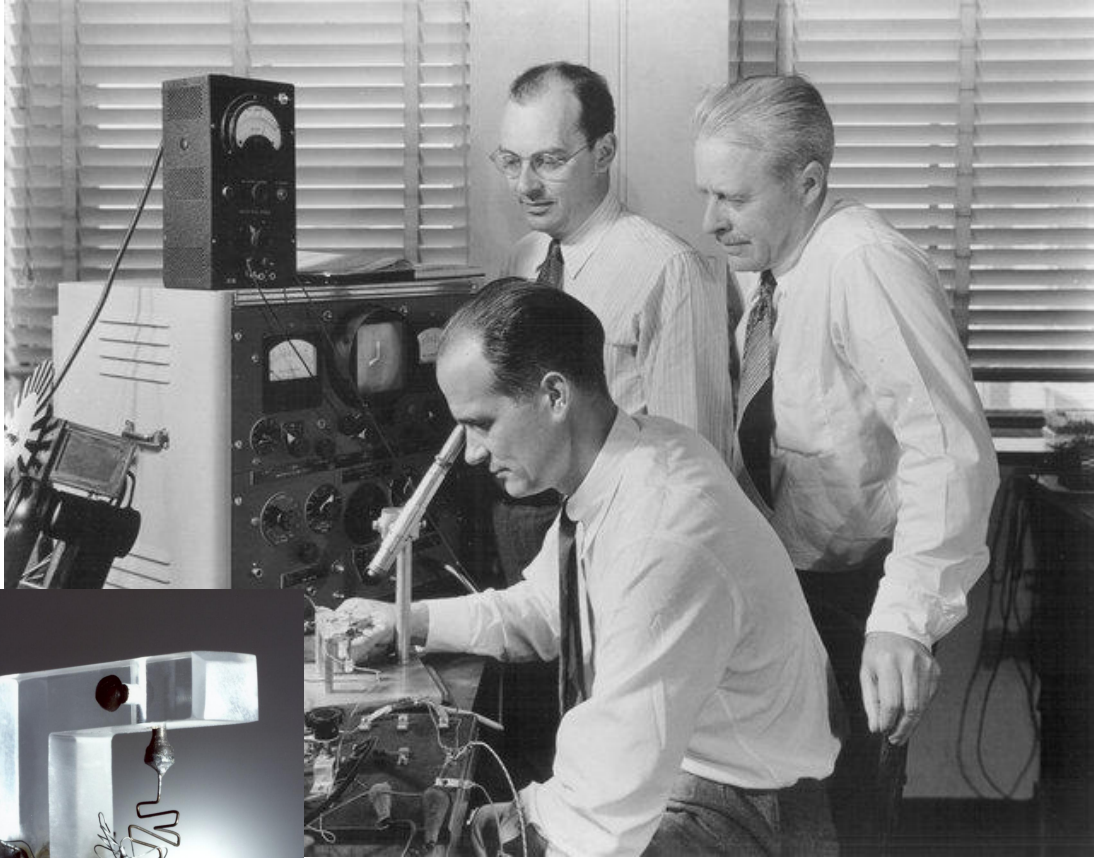


Modern-day electronics began with the invention in **1947** of the bi-polar transistor by **Bardeen (约翰·巴丁)** et.al at **Bell Laboratories**

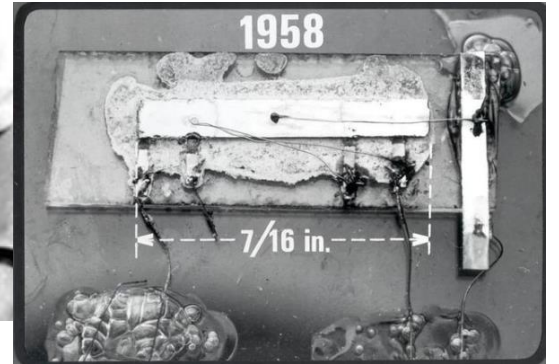
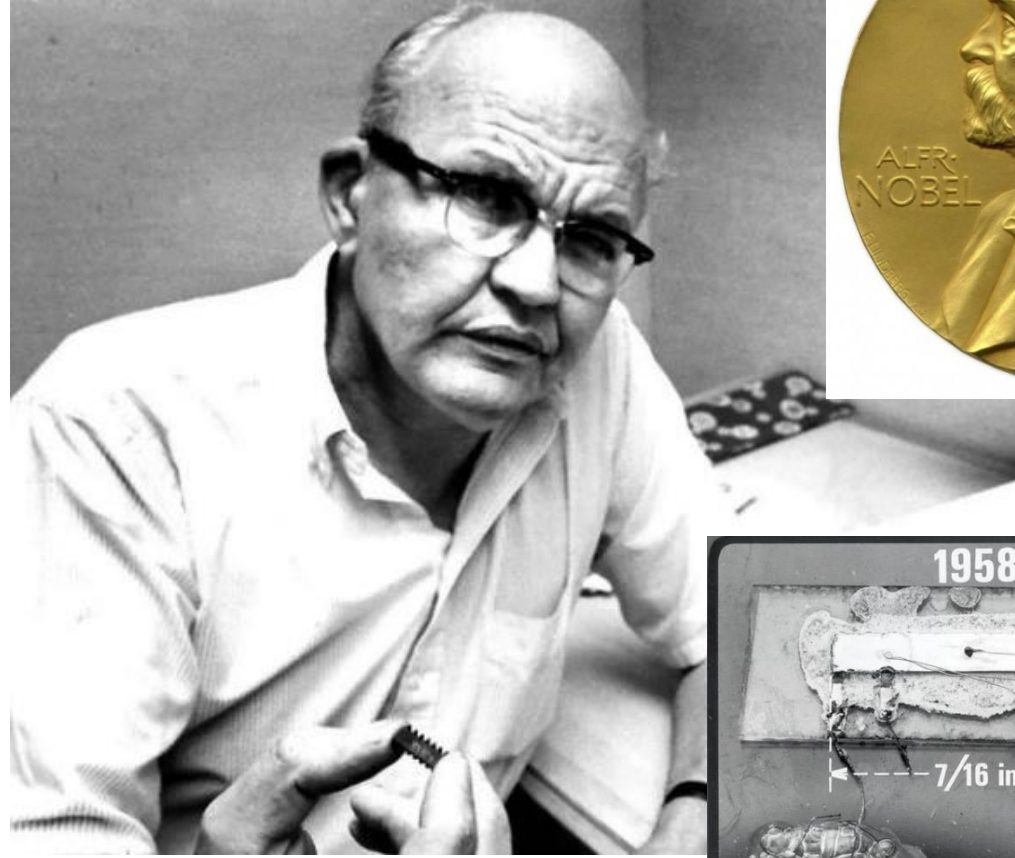
第一个集成电路 (integrated circuit)



In **1958** the integrated circuit was born at **Texas Instruments** successfully integrating transistors, resistors and capacitors. Nobel Prize in Physics on December



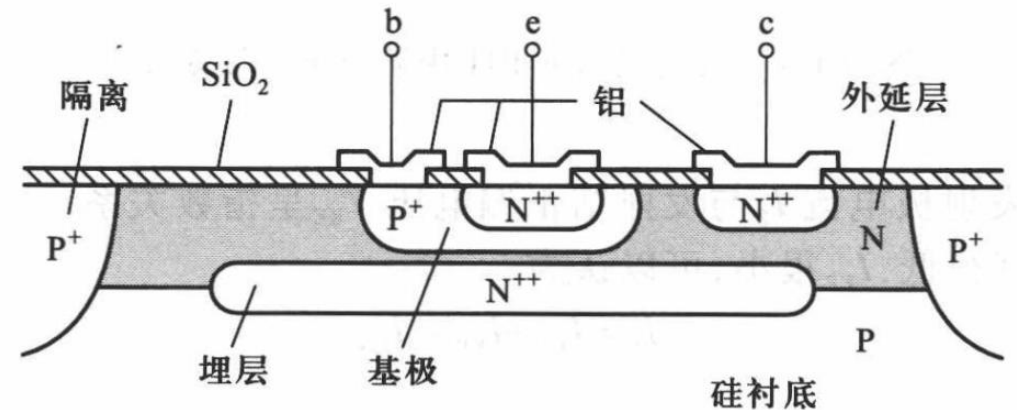
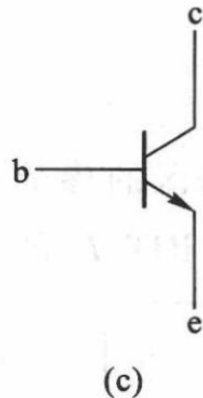
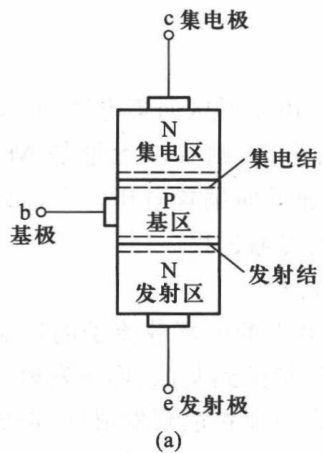
1956年, 奖励 威廉·肖克利, 约翰·巴丁, 沃尔特·豪泽·布喇顿, 对半导体的研究和发现晶体管效应

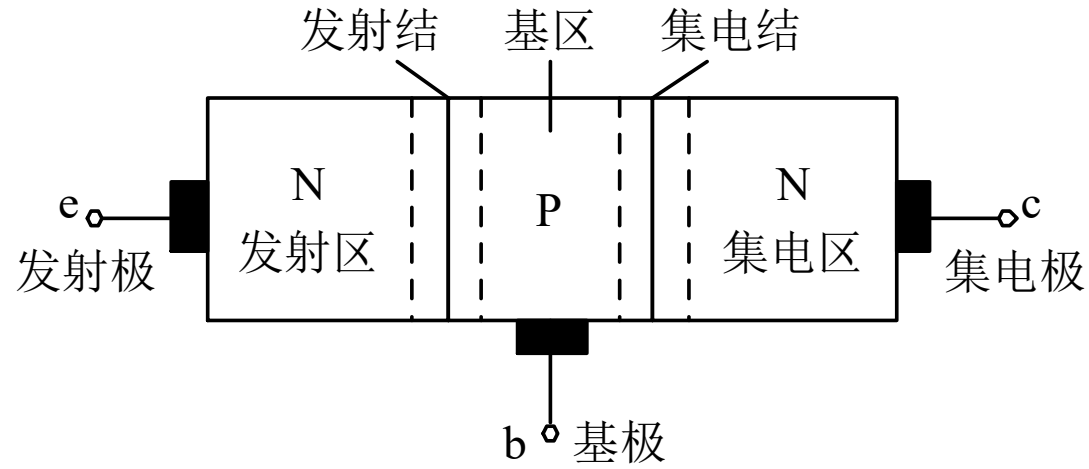


2000年, 1/3奖励 杰克·基尔比 对发明集成电路中所做的贡献

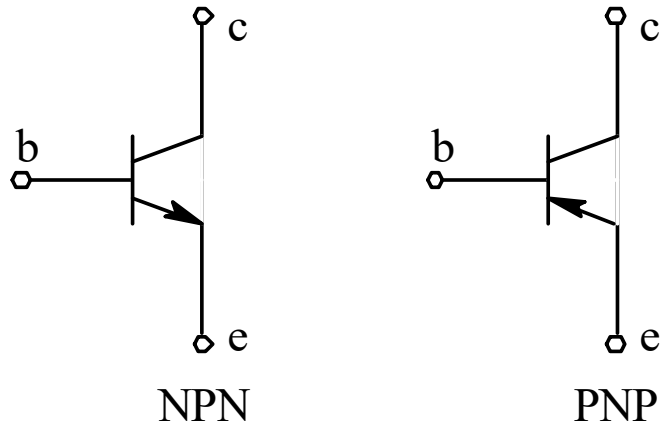
NPN型BJT结构

- NPN型BJT是由两个PN结，中间是一块很薄的P型半导体（几微米-几十微米），两边各为一块N型半导体。
- 从三块半导体上接出一根引线作为三个电极，分别叫做**发射极e**、**基极b**和**集电极c**，对应的每块半导体称为发射区、基区和集电区。
- 发射区比集电区掺的杂质多，集电区的面积比发射区的大，因此它们不是对称的。

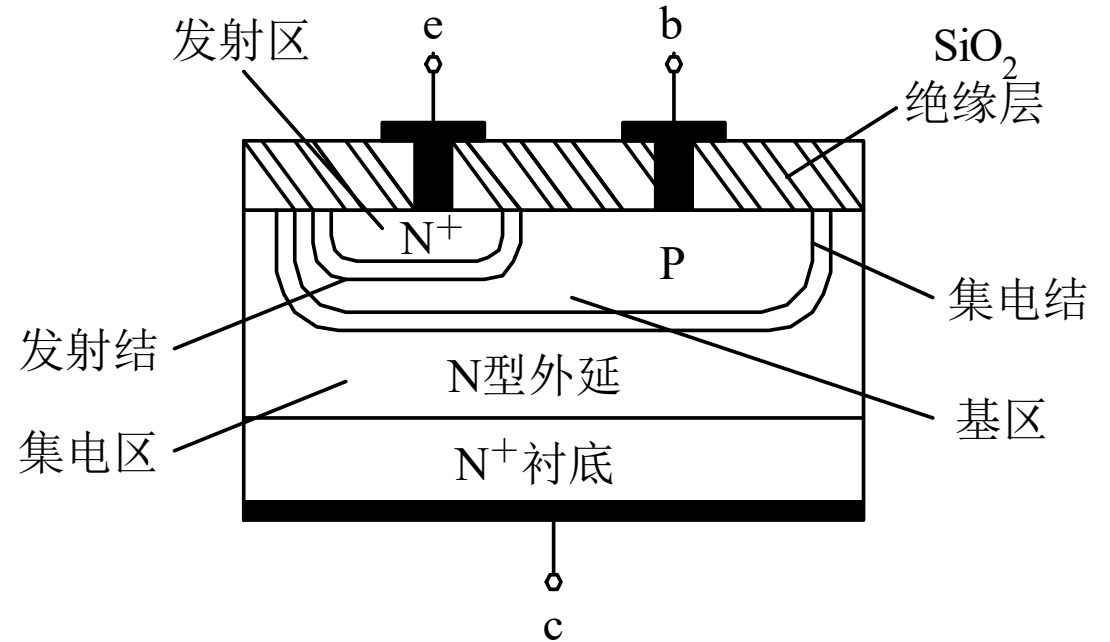




(a)



(b)



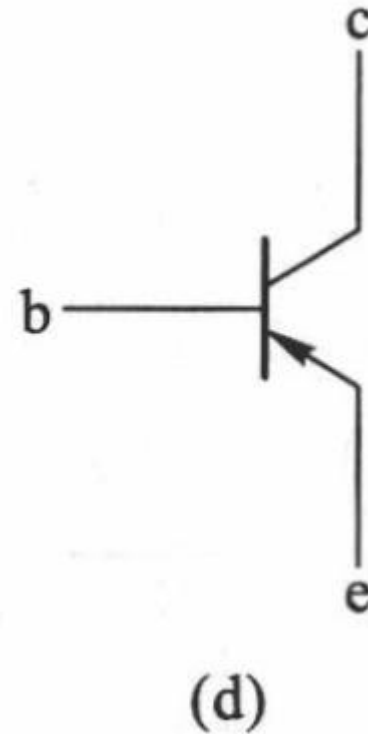
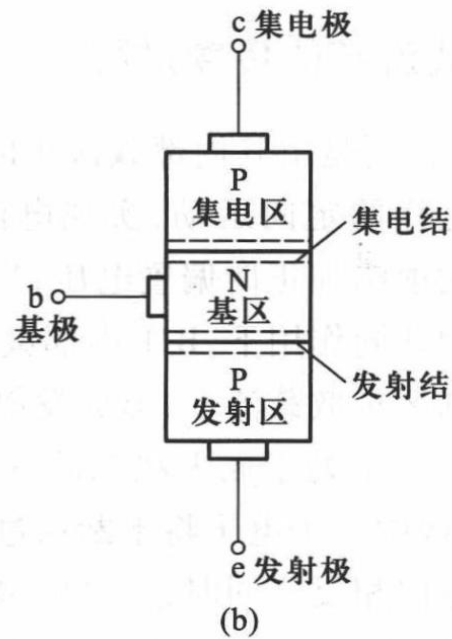
(c)

NPN型BJT结构

- 当两块不同类型的半导体结合在一起时，交界处就会形成PN结。BJT有两个PN结：发射区与基区交界处的PN结称为**发射结**，集电区与基区交界处的PN结称为**集电结**，两个PN结通过很薄的基区联系。
- 在N型硅片氧化膜上光刻一个窗口，进行硼杂质扩散，获得P型基区，再在P型半导体上光刻一窗口，进行高浓度的磷扩散，获得N型发射区，表面是一层二氧化硅保护层，N型衬底用作集电极。
- 大部分NPN型硅BJT都属于这种结构。

PNP型BJT结构

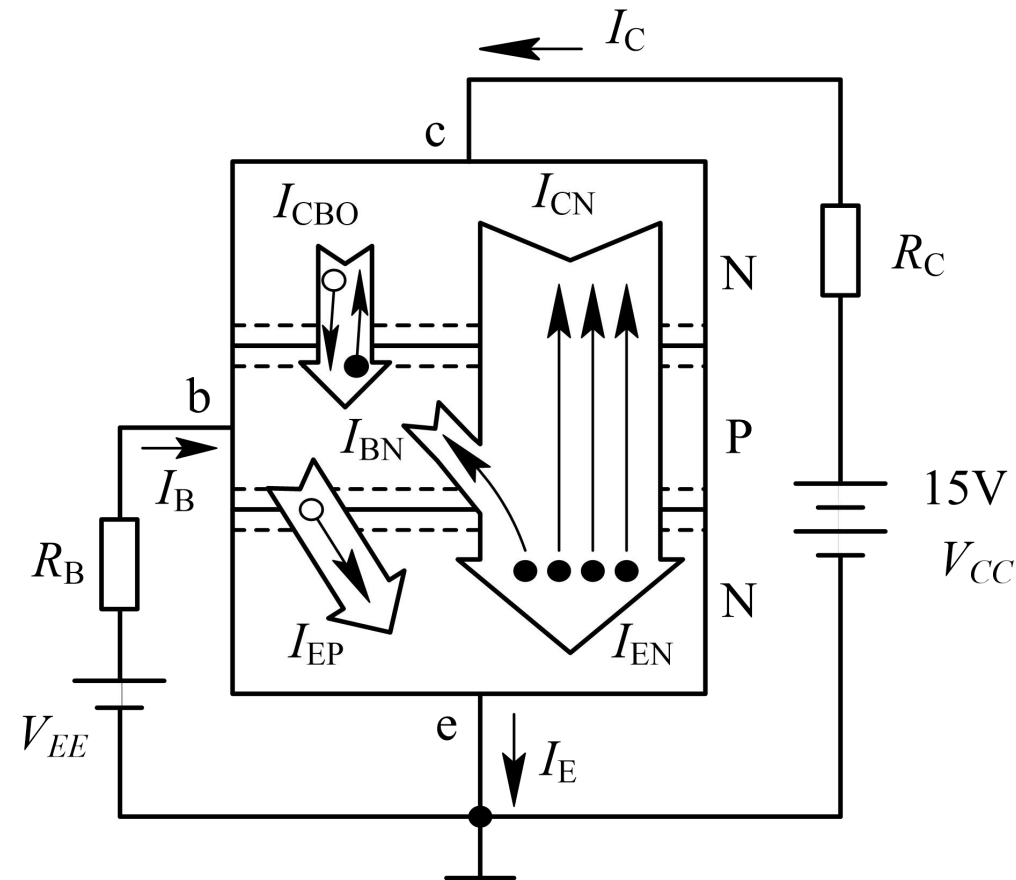
- PNP型BJT是由两个PN结的三层半导体制成的，不过PNP的中间是N型半导体，两边是P型半导体。
- NPN和PNP型BJT具有几乎等同的特性，只不过各电极端的电压极性和电流流向不同。





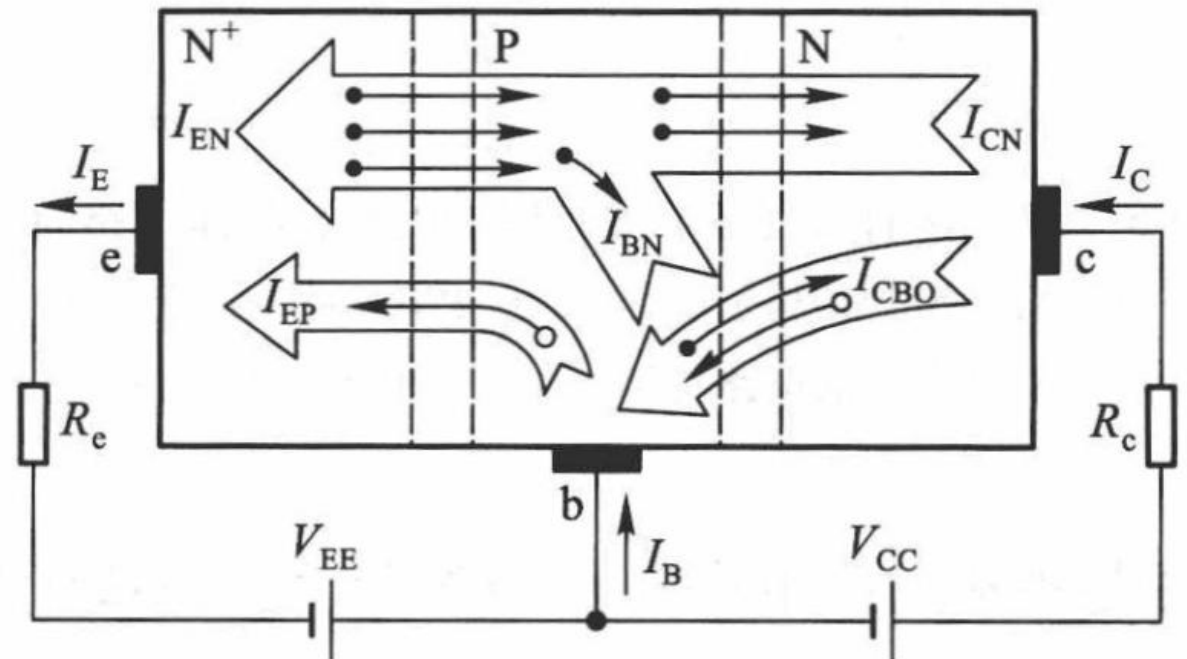
BJT的电流分配与放大作用

- 为了能使发射区发射电子、集电区收集电子，必须具备的条件是：发射结加正向电压(正向偏置)，集电结加反向电压(反向偏置)，在这些外加电压的条件下，管内载流子的传输将发生下列过程。



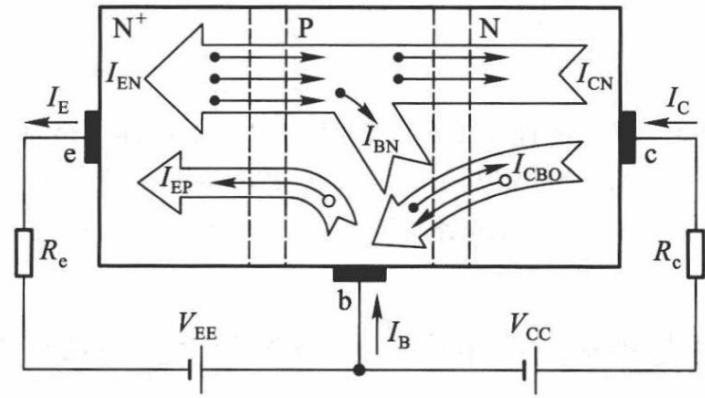
发射区向基区注入电子

- 由于发射结外加正向电压，因此发射结势垒由 V_0 减小到 $V_0 - V_{EE}$ ，发射区的多数载流子电子不断通过发射结扩散到基区，形成发射极电流 I_E ，其方向与电子流动方向相反。
- 基区空穴也扩散到发射区，但由于发射区杂质浓度比基区高得多(一般高几百倍)，与电子流相比，这部分空穴流可忽略不计。



集电区收集扩散过来的电子

- 集电结所加的是反向电压，集电结势垒由 V_0 增加到 $V_0 + V_{CE}$ 。集电结势垒很高，使集电区的空穴很难通过集电结，但电子却有很强的吸引力，收集形成集电极电流 I_C 。
- 另一方面，根据反向PN结的特性，当集电结集成流时，少数载流子这向饱和电流 I_{CBO} ，它的数值很大，对管子容量影响很大。所以，在制造过程中，要设法减小 I_{CBO} 。



电流分配关系

- 发射极的总电流与发射结的电压 v_{BE} 成指数关系

$$i_E = I_{ES} (e^{v_{BE}/V_T} - 1)$$

- 式中 V_T 为温度的等效电压 kT/q （室温时 $\sim 26\text{mV}$ ）， I_{ES} 为发射结的反向饱和电流，它与发射区和基区的掺杂浓度、温度等因素有关，也与发射结的面积成比例。
- 集电结收集的电子流是发射结发射的总电子流的一部分，常用一系数 α 来表示，即

$$i_C = \alpha i_E$$

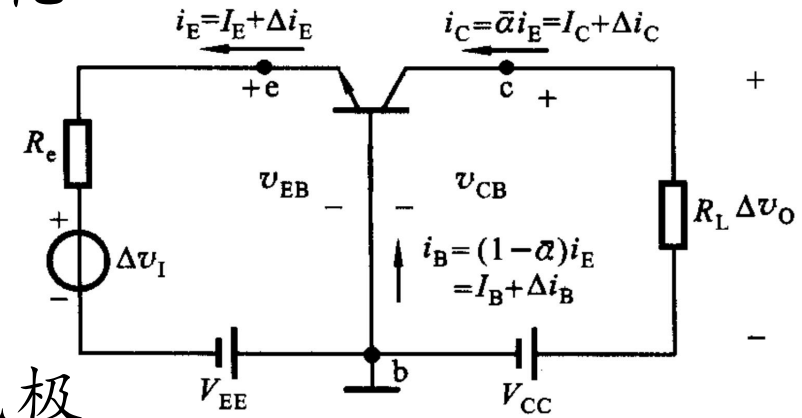
$$i_E = i_C + i_B$$

$$\frac{i_C}{i_B} = \frac{\alpha i_E}{(1 - \alpha) i_E} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \beta$$

放大作用

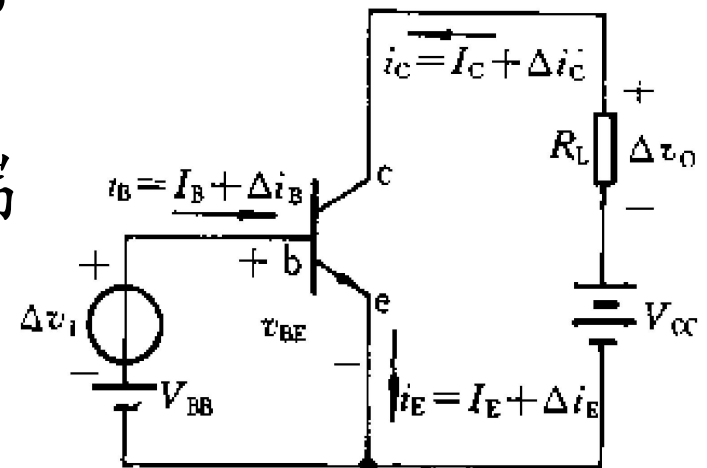
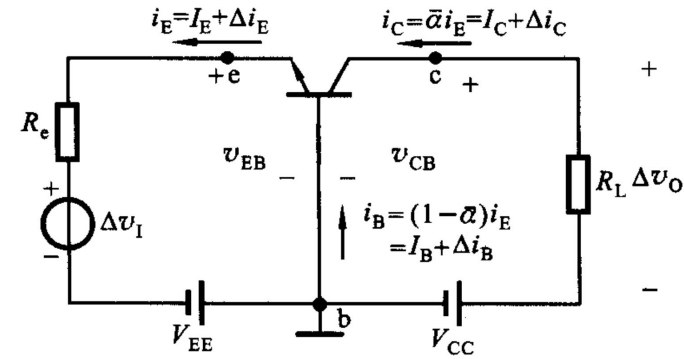
- 在发射极和基极之间的回路上加入一待放大的输入信号 Δv_I ，这样发射结的外加电压 v_{EB} 将等于 $v_{EE} + \Delta v_I$ 。
- 由于外加电压的变化，将使发射极电流 I_E 相应地变化 Δi_E ，信号电压 Δv_I 控制 I_E 。

- Δv_I 的微小变化可以引起 I_E 的变化 Δi_E
- 又因 $I_C = \alpha I_E$ ，相应引起 I_C 的变化， Δi_C 通过接在集电极上的负载电阻 R_L 上产生一个变化的电压 Δv_O ，则从 R_L 取出来的变化电压 Δv_O 随时间的变化规律和 Δv_I 相同，但幅度却大了许多倍。所增大的倍数称为**电压增益**。



放大电路连接方式

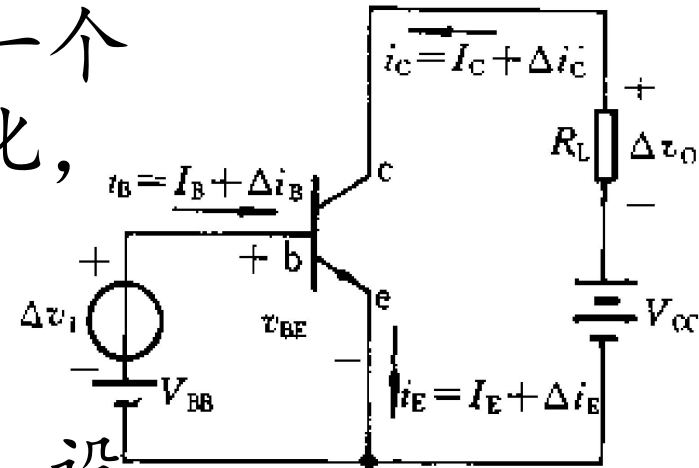
- 利用BJT组成的放大电路，其中一个电极作为信号输入端，一个电极作为输出端，另一个电极作为输入、输出回路的共同端。
- 根据共同端的不同，有三种连接方式：**共基极**、**共发射极**和**共集电极**电路。
- 上图为共基极电路，发射极为输入端，集电极为输出端，基极为输入、输出回路的共同端。
- 下图为共发射极电路，以发射极作为共同端，以基极为输入端，集电极为输出端。





共发射极电路放大原理

- 如在基极输入端加入一个待放大的信号 Δv_i ，发射结电压 v_{BE} 就在原来 V_{BB} 的基础上叠加了一个 Δv_i ，于是发射极电流 Δi_E 将按 Δv_i 的规律变化，所以相应的 Δi_B 和 Δi_C 也将按 Δi_E 的规律变化。



- 当 Δi_B 按 Δv_i 的规律改变时， Δi_C 将随之而变。设 $\alpha=0.98$ ，当 Δv_i 变化 20mV 时，能引起基极电流的变化 $\Delta i_B=20\mu\text{A}$ ，则发射极电流变量为

$$\Delta i_E = \frac{\Delta i_B}{1 - \alpha} = \frac{20\mu\text{A}}{1 - 0.98} = 1\text{mA}$$

$$\Delta i_C = \alpha \Delta i_E = 0.98 \times 1\text{mA} = 0.98\text{mA}$$

电压增益

- 在 R_L 所得的电压变化

$$\begin{aligned} A_V &= \frac{\Delta v_o}{\Delta v_I} = \frac{-\Delta i_C R_L}{\Delta v_I} \\ &= -\frac{0.98mA \times 1k\Omega}{20mV} = -49 \end{aligned}$$

共射极和共基极电路的特点

- (1) 共射极电路以基极电流 i_B 作为输入控制电流，而共基极电路则是以发射极电流 i_E 作为输入控制电流。用 i_B 作为输入控制电流的好处是信号源消耗的功率很小。
- (2) 研究共射极电路的放大过程主要是分析集电极电流(输出电流)与基极电流(输入电流)之间的关系。
- (3) 共基极电路的电流放大系数为 α ，共射极电路的电流放大系数为 β 。 α 的值小于1，但接近于1，而 β 的值则远大于1，所以 $i_C > i_B$ 。共射极电路不但能得到电压放大，而且还可得到电流放大，共射极电路是应用最广泛的一种组态。



第五章

BJT三极管及放大

电路基础

梁福田 ftliang@ustc.edu.cn

2025.3.31



前情提要

- 二极管基本电路及分析方法
 - 理想模型、恒压降模型、折线模型、小信号模型

• BJT

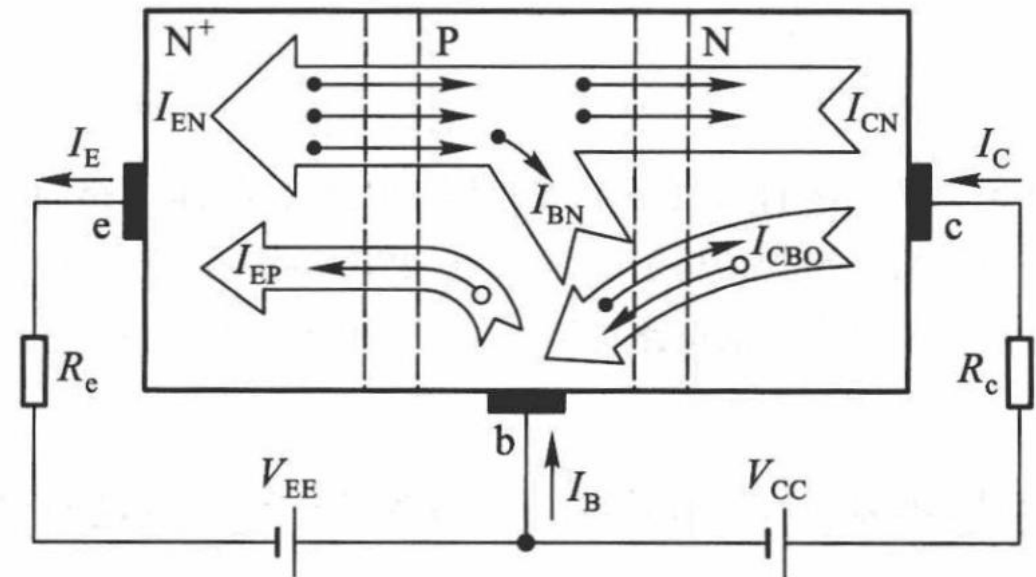
- (共)基极、射级、集电极
- 发射结加正向电压(正向偏置)
- 集电结加反向电压(反向偏置)

- $i_e = i_c + i_b$
- $i_c = \beta i_b$
- $i_c = \alpha i_e$

$$i_C = \alpha i_E$$

$$i_E = i_C + i_B$$

$$\frac{i_C}{i_B} = \frac{\alpha i_E}{(1 - \alpha) i_E} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \beta$$



BJT的特性曲线

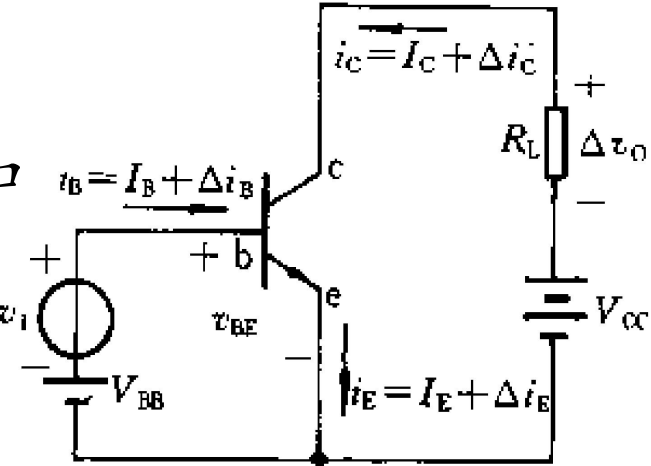
- BJT的特性曲线是
 - 指各电极电压与电流之间的关系曲线，是BJT内部载流子运动的外部表现。
- 从使用BJT的角度来说
 - 了解它的特性比了解它的内部载流子的运动显得更为重要。
- 由于BJT有三个电极
 - V-I特性就不像二极管那样简单
 - 工程上最常用到的是它的输入特性和输出特性曲线。

共射极电路的输入特性曲线

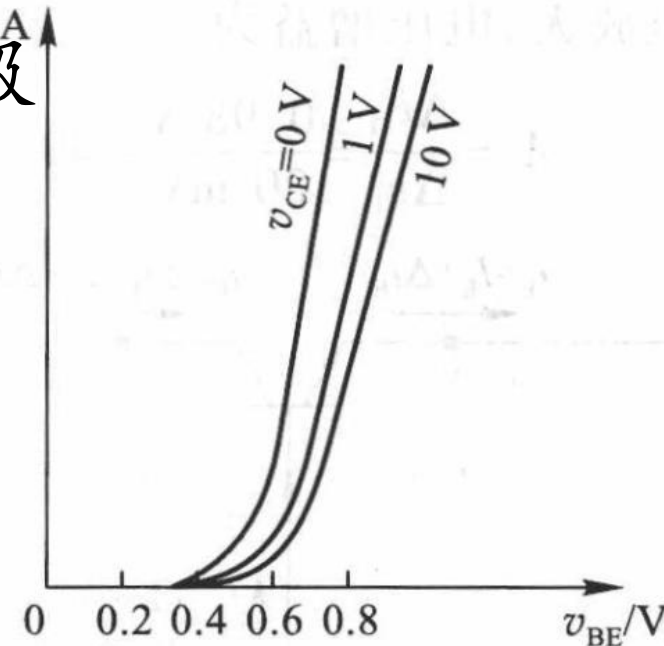
- 输入特性是

- 指当集电极与发射极之间的电压 v_{CE} 为常数时，加在BJT基极与发射极之间的电压 v_{BE} 与基极电流 i_B 之间的关系曲线，用函数关系表示为

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



- 当 $v_{CE}=1V$ 时，集电结加了反向电压，集电结吸引电子的能力加强，使得从发射区进入基区的电子更多地流向集电区，因此对应于相同的 v_{BE} ，流向基极的电流 i_B 比原来 $v_{CE}=0$ 时减小了，特性曲线也就相应地向右移动了。





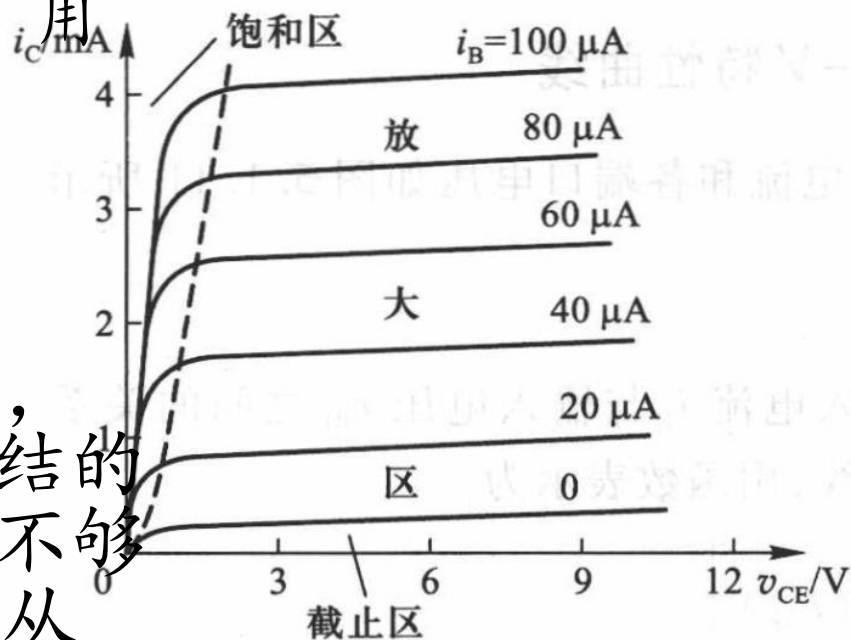
共射极电路的输出特性

- 输出特性是

- 在基极电流 i_B 一定的情况下，集电极与发射极之间的电压 v_{CE} 与集电极电流 i_C 之间的关系曲线，用函数表示为

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

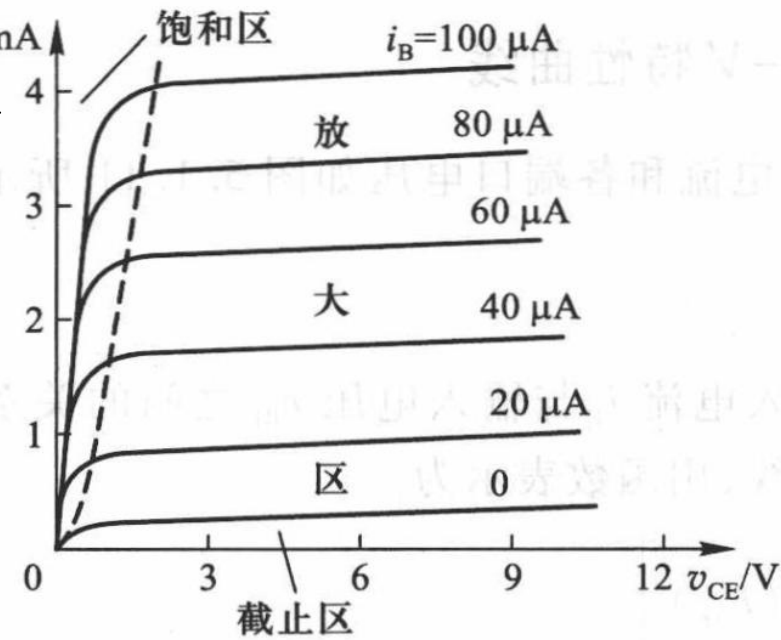
- 输出特性的起始部分很陡， v_{CE} 略有增加时， i_C 增加很快，这是由于在 v_{CE} 很小时，集电结的反向电压很小，对到达基区的电子吸引力不够，这时 i_C 受 v_{CE} 的影响很大。 v_{CE} 稍有增加，从基区到集电区的电子也增加。故 i_C 随 v_{CE} 的增加而增加。





输出特性曲线

- 当 v_{CE} 超过某一数值 (约 1V) 后, 特性曲线变得比较平坦。这是由于 v_{CE} 大于 1V 以后, 集电结的电场已足够强, 能使发射区扩散到基区的电子绝大部分都到达集电区, 故 v_{CE} 再增加, i_C 就增加不多了。



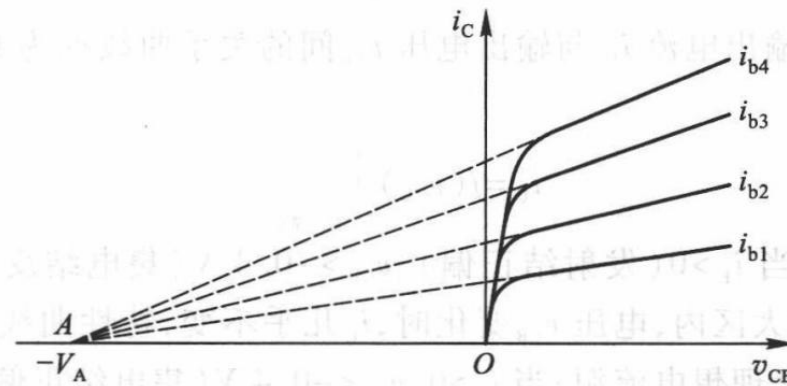
- 改变 i_B 的值, 即可得到一组输出特性曲线。由 $i_C = \beta i_B$ 可知, 在 v_{CE} 大于零点几伏以后, 输出特性是一组间隔基本均匀, 比较平坦的平行直线。



基区宽度调制效应

- 由共射极电路可知， $V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$ ，当 V_{CE} 增加时，由于 V_{BE} 变化较少(例如硅管的 V_{BE} 为0.7V左右)，故 V_{CB} (集电结反向偏压)随之增加。
- V_{CB} 的增加使集电结的空间电荷区的宽度增加，致使基区有效宽度减小，这样在基区内载流子的复合机会减少，使电流放大系数 β 增大，在 i_B 不变的情况下， i_C 将随 V_{CE} 增大，特性曲线向上倾斜，这种现象称为**基区宽度调制效应**。

V_A 表示,称为 Early 电压,其典型值约为 10 ~ 100 V。 V_A 的大小反映了输出特性曲线上翘的程度,也即反映了 v_{CE} 对 i_C 的影响程度。 V_A 值越大, v_{CE} 对 i_C 的影响就越小。

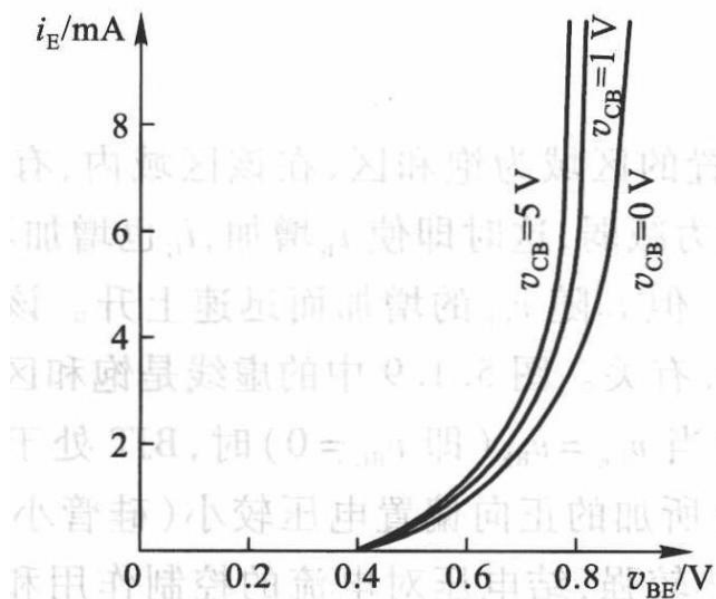
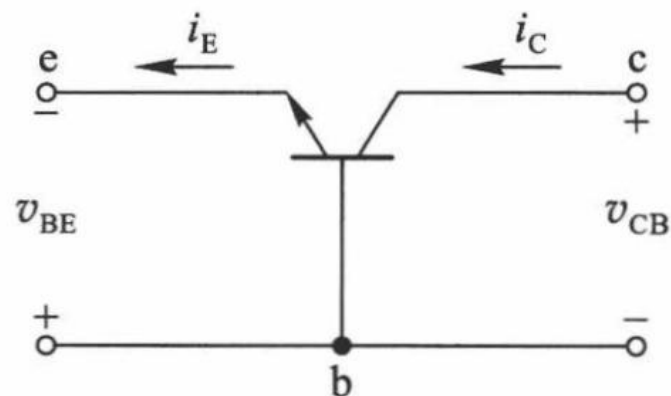


共基极电路的特性曲线

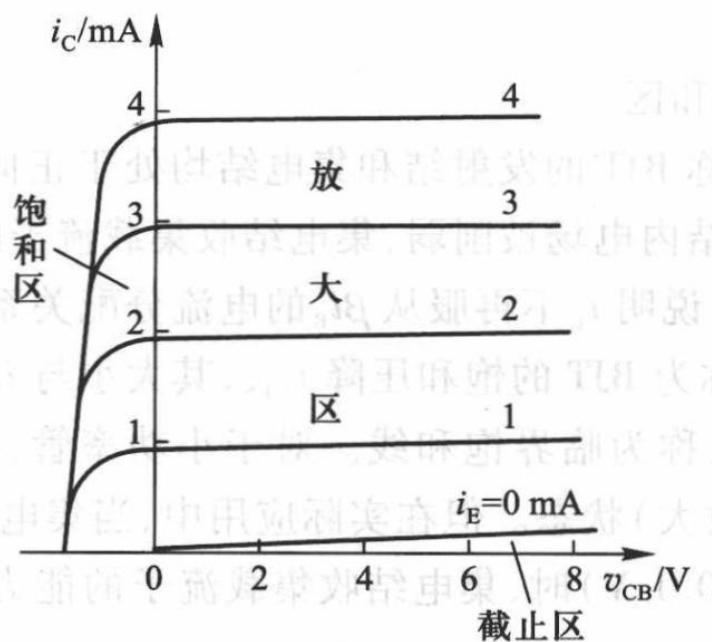
- NPN型BJT共基极接法的输入特性和输出特性

$$i_E = f(v_{EB}) \Big|_{v_{CB}=\text{常数}}$$

$$i_C = f(v_{CB}) \Big|_{i_E=\text{常数}}$$



(a)



(b)

BJT的主要参数-电流放大系数

- BJT在**共射极接法**的电流放大系数，根据工作状态的不同，在直流和交流两种情况下分别用符号 $\bar{\beta}$ 和 β 表示：

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \quad \beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}$$

- BJT集电极的直流电流 I_C 与基极的直流电流 I_B 的比值为共射极电路的**直流电流放大系数** $\bar{\beta}$ ，或 h_{FE} 来代表。
- 在有信号输入时，基极电流产生一个变化量 Δi_B ，相应的集电极电流变化量为 Δi_C ，则 Δi_C 与 Δi_B 之比称为BJT的**交流电流放大系数** β ，记作 h_{fe} 。

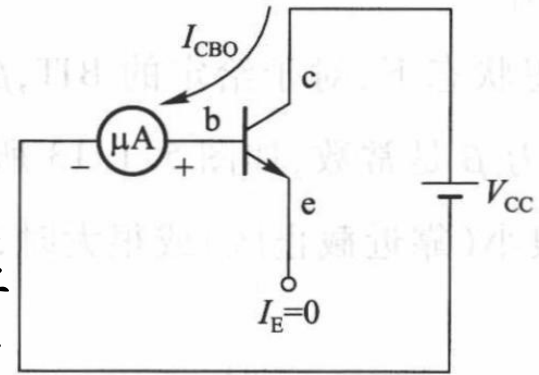
BJT的主要参数-电流放大系数

- 对**共基极接法**的电流放大系数，直流放大系数 $\bar{\alpha}$ 和交流放大系数 α 的定义与共发射极接法时相似。
- 在直流工作状态下， $i_C = I_C$ ， $i_E = I_E$ ，故有

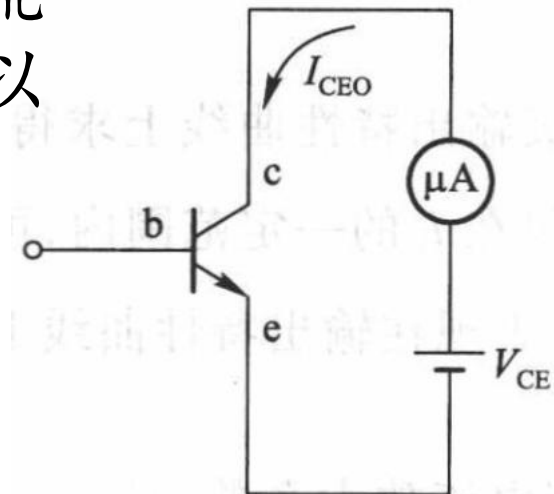
$$\bar{\alpha} = \frac{I_C}{I_E} \quad \alpha = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E}$$
$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad \alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

BJT的主要参数-极间反向电流

- (1) 集电极-基极反向饱和电流 I_{CBO} ，表示发射极开路，c、b间加上一定反向电压时的反向电流，它只决定于温度和少数载流子的浓度。在一定温度下，这个反向电流基本上是个常数，所以称为反向饱和电流。



- (2) 集电极-发射极反向饱和电流 I_{CEO} ，表示基极开路，c、e间加上一定反向电压时的集电极电流。这个电流从集电区穿过基区流至发射区，所以又叫穿透电流。

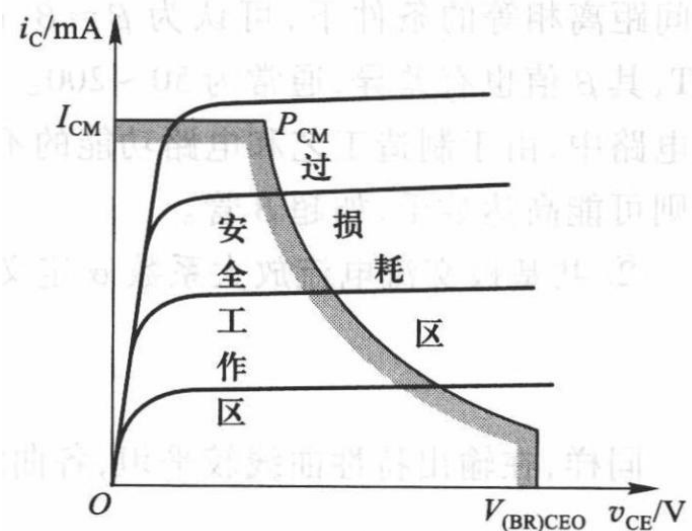


$$I_{CEO} = I_{CBO} + \beta I_{CBO} = (1 + \beta) I_{CBO}$$



BJT的主要参数-极限参数

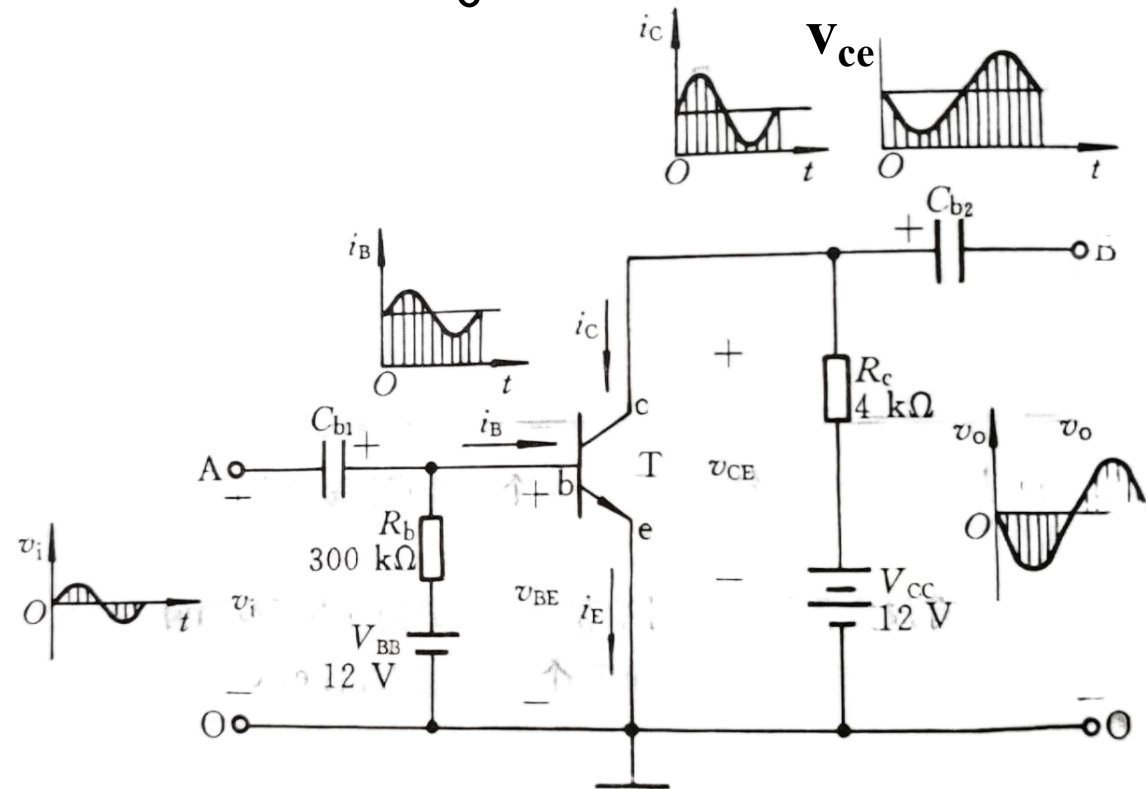
- (1) 集电极最大允许电流 I_{CM} ，参数变化不超过允许值时集电极允许的最大电流。
- (2) 集电极最大允许功率损耗 P_{CM} ，集电结上允许损耗功率的最大值。 $P_{CM} = i_C V_{CE}$
- (3) 反向击穿电压，BJT的两个PN结，如反向电压超过规定值将会发生击穿。
 - V_{EBO} 集电极开路时，发射极-基极间的反向击穿电压。
 - V_{CBO} 发射极开路时，集电极-基极间的反向击穿电压。
 - V_{CEO} 基极开路时，集电极-发射极间的反向击穿电压。





§ 5-2 共射极放大电路

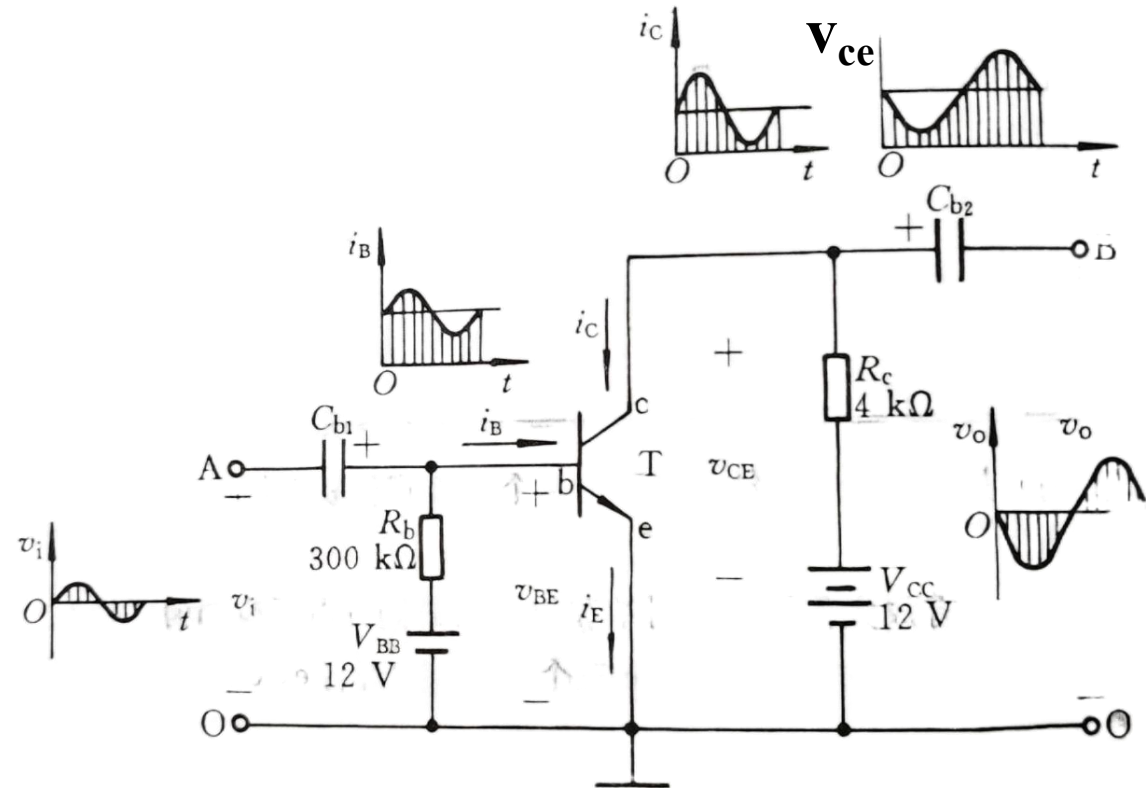
- 单管放大电路中，采用NPN型硅BJT， V_{CC} 是集电极回路的直流电源，它的负端接发射极，正端通过电阻 R_c 接集电极，以保证集电结为反向偏置。
- 集电极电阻 R_c 将BJT的集电极电流 i_c 的变化转变为集电极电压 v_{CE} 的变化。





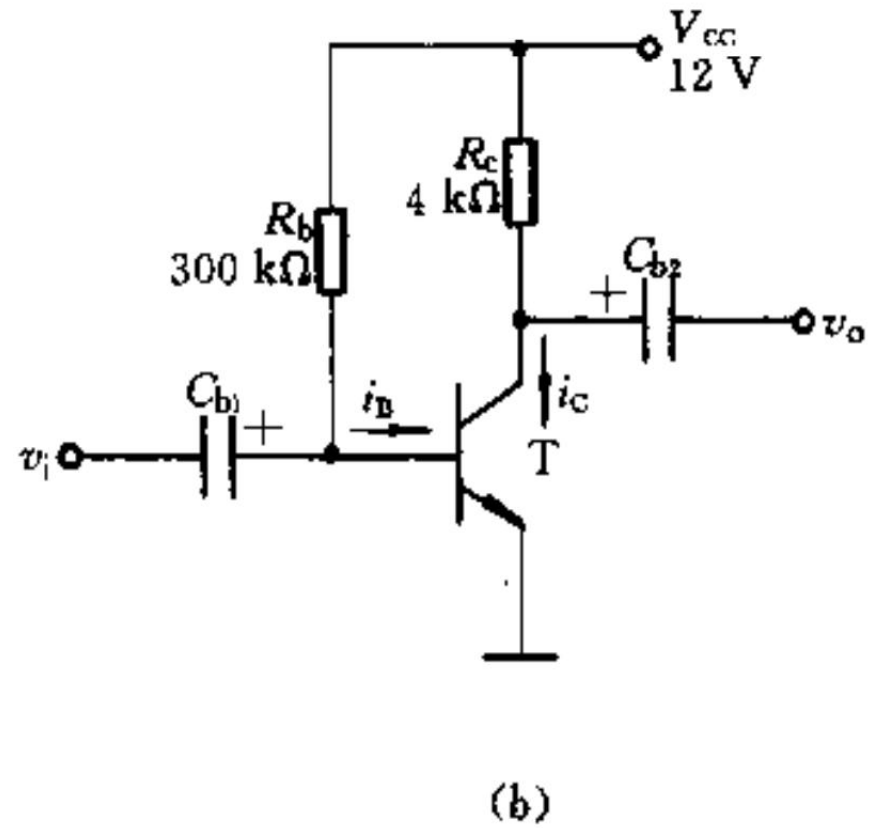
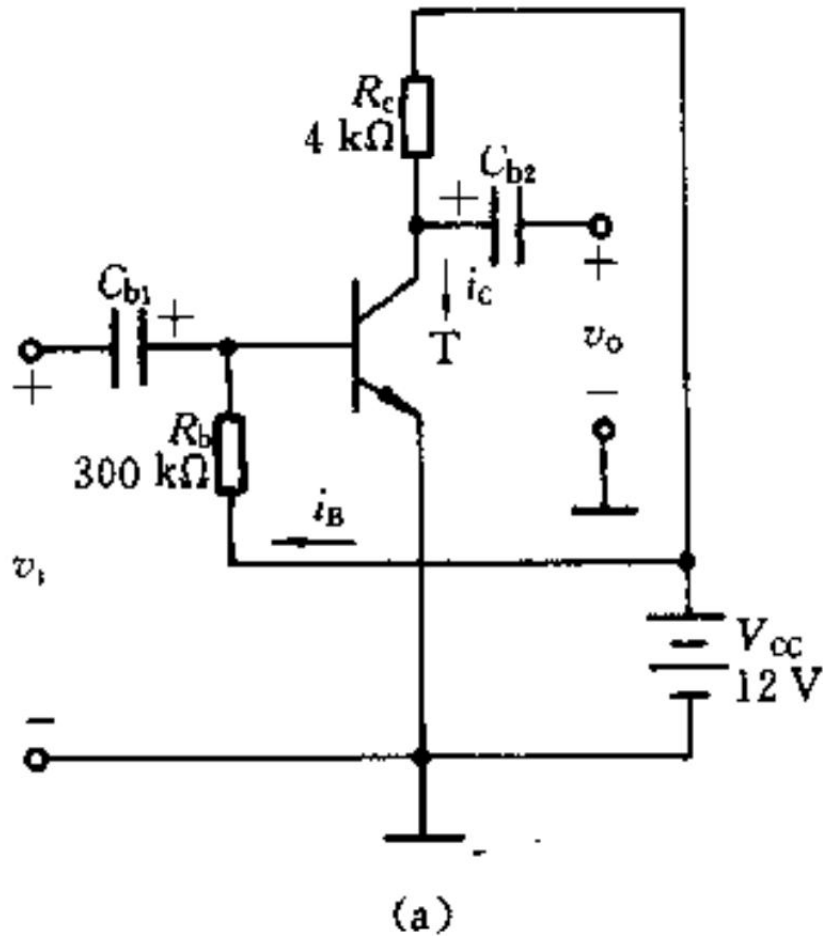
共射极放大电路

- V_{BB} 是基极回路的直流电源，它的负端接发射极，正端通过基极电阻 R_b 接基极，使发射结为正向偏置，并通过基极电阻 R_b ，供给基极一个合适的基极电流 I_B 。
- 电容 C_{b1} 和 C_{b2} 称为隔直电容或耦合电容作用是“传送交流，隔离直流”。



共射极基本放大电路的简化

- 为了简化电路，一般选取 $V_{BB} = V_{CC}$



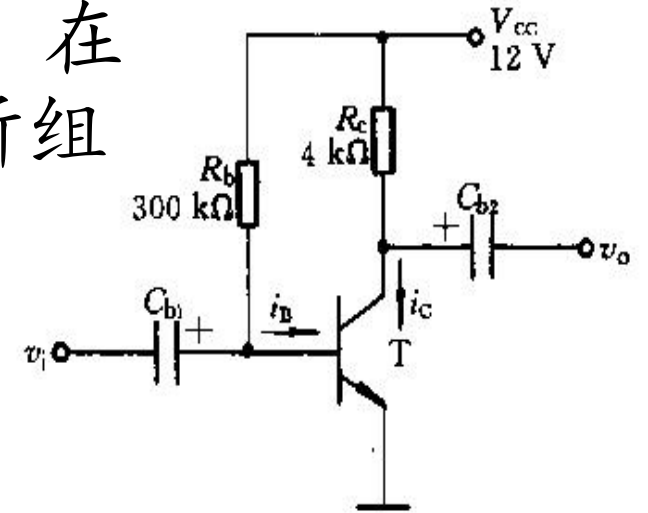


§ 5-3 图解分析法

- 静态工作情况分析
- 当放大电路没有输入信号 ($v_i=0$) 时，电路中各处的电压、电流都是不变的直流，称为直流工作状态或静止状态，简称**静态**。
- 在静态工作情况下，BJT各电极的直流电压和直流电流的数值，将在管子的特性曲线上确定一点，这点常称为**Q点**。
- 当放大电路输入信号后，电路中各处的电压、电流便处于变动状态，这时电路处于动态工作情况，简称**动态**。

近似估算Q点

- 由于电容 C_{b1} 和 C_{b2} 的隔直作用，对于静态下的直流电路来说，它们相当于开路一样。所以，在计算Q点时，只需考虑由 V_{CC} 、 R_b 、 R_c 及BJT所组成的直流通路就可以了。



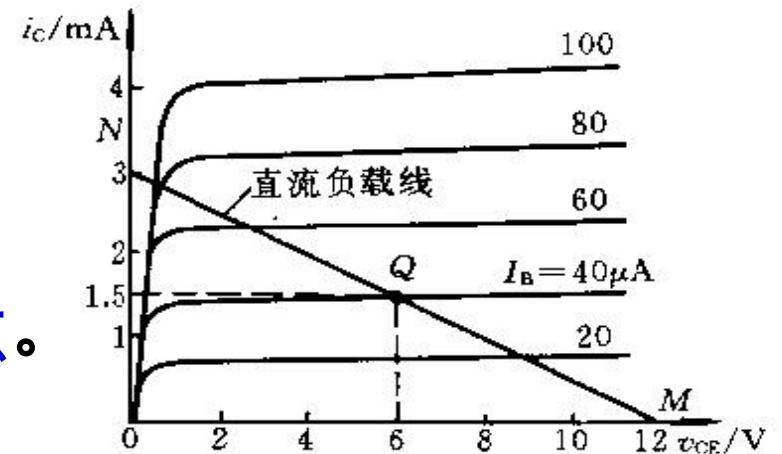
$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b} \approx \frac{V_{CC}}{R_b}$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_c$$

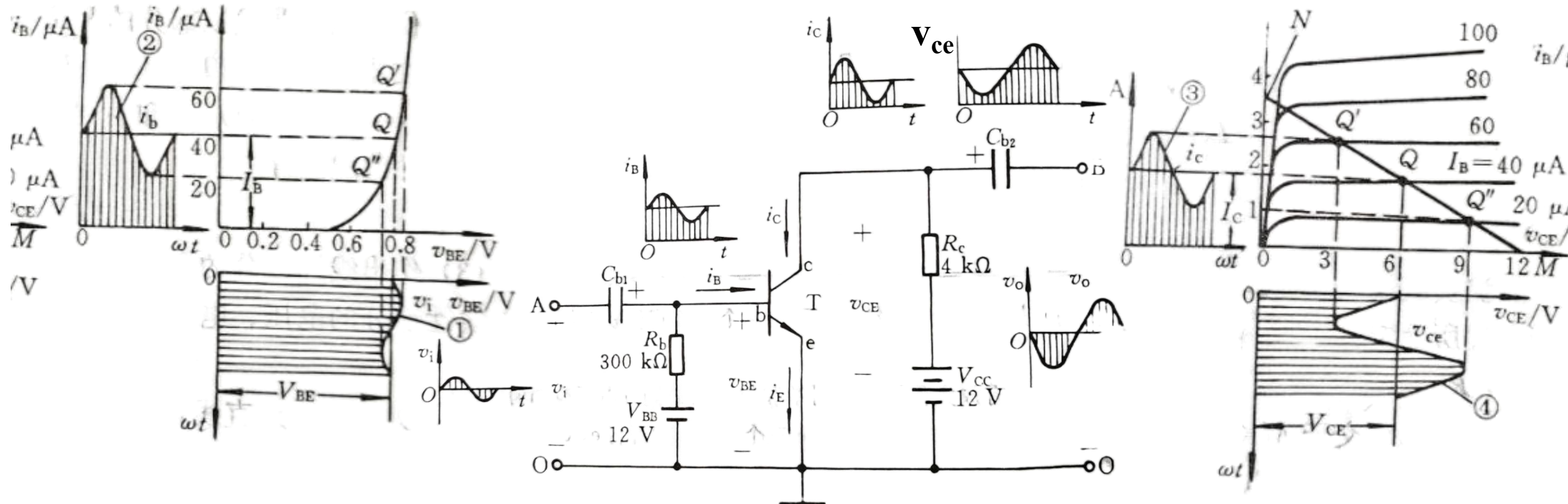
直流负载线

选取适当的 I_B ，Q点为静态工作点。



动态工作情况分析

- 当接入正弦信号时、电路将处在动态工作情况，可以根据输入信号电压 v_i 通过图解确定输出电压 v_o ，从而可以得出 v_i 与 v_o 之间的相位关系和动态范围。



说明

- 没有输入信号电压时，BJT各电极都是恒定的电流和电压 (I_B 、 I_C 、 V_{CE})，当在放大电路输入端加上输入信号电压后， i_B 、 i_C 、 v_{CE} 都在原来静态直流量的基础上叠加了一个交流量。即

$$i_B = I_B + i_b$$

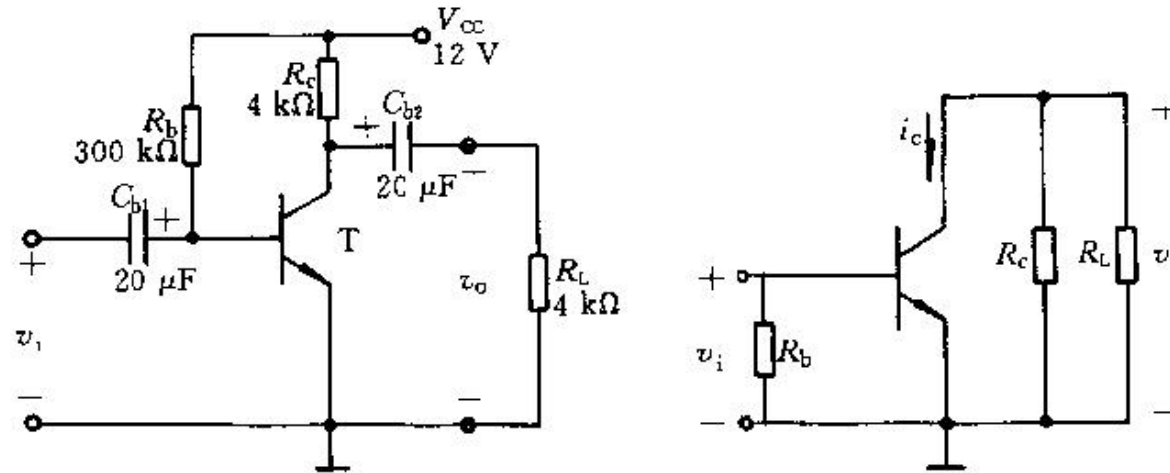
$$i_C = I_C + i_c$$

$$v_{CE} = V_{CE} + v_{ce}$$

- v_{CE} 中的交流分量 v_{ce} 的幅度远比 v_i 大，且同为正弦波电压，体现了放大作用。
- v_o (v_{ce}) 与 v_i 相位相反，称为放大电路的反相作用，共射极放大电路又叫做反相电压放大器。

交流负载线

- 放大电路在工作时，输出端总要接上一定的负载 R_L ，放大电路的工作情况会因为 R_L 的接入而受到影响。



- 动态工作时，隔直电容 C_{b1} 和 C_{b2} 在一定频率的信号作用下，其容抗可以忽略；
- 同时考虑到电源 V_{CC} 的内阻很小，无交流压降，对交流信号可视为短路。

交流负载线

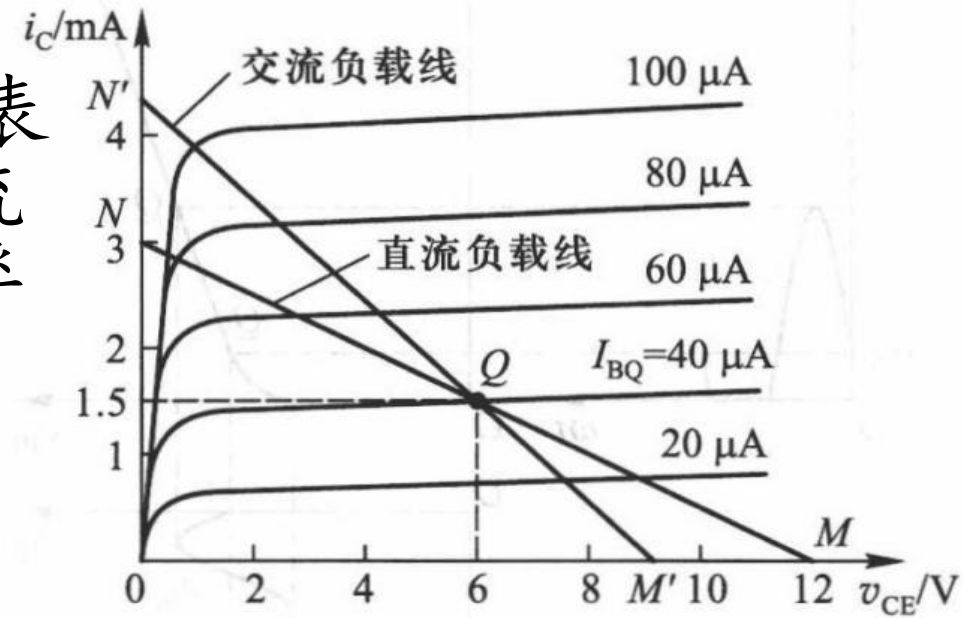
- 放大电路的交流负载电阻为 R_L' 。即

$$R_L' = R_c \parallel R_L = \frac{R_c R_L}{R_c + R_L}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_L'$$

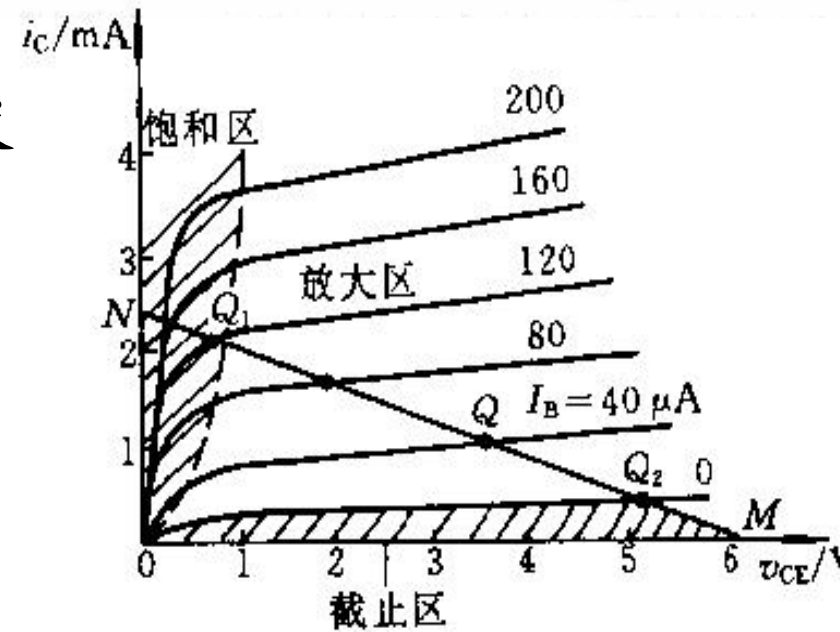
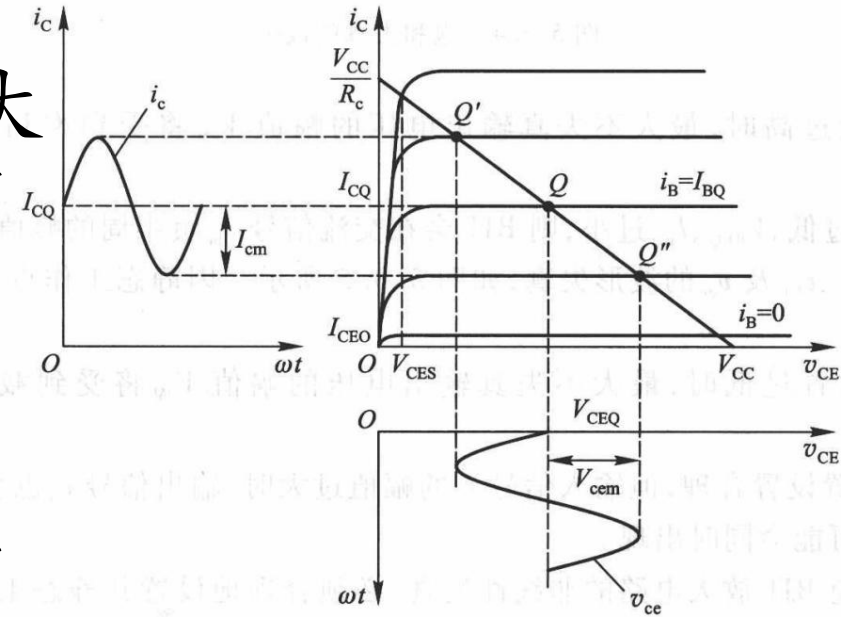
- 对于交流分量来说，应当用 R_L' 来表示电流、电压之间的关系，表示交流分量电压、电流关系的负载线的斜率应该是 $-1/R_L'$ 。

- 注意工作点还是要过 Q 的。



BJT的三个工作区域

- BJT的基本特点是通过电流控制实现放大作用，但是这种放大作用并不是在任何情况下都能实现的。
- Q点过高，BJT就会从放大转化为饱和。
- Q点过低时，BJT又会从放大转化为截止。
- 饱和、放大、截止称为BJT的三种工作状态，输出特性分成三个不同区域，即：**饱和区**、**放大区**和**截止区**。



BJT的三个工作区域

- 饱和区：饱和现象的产生是由于工作点上移，使 V_{CE} 减小到一定的程度后，集电结收集载流子的能力被减弱，发射极发射有余，而集电极收集不足。这时即使 I_B 增加， I_C 也不能增加，即不再服从 $I_C = \beta I_B$ 。BJT工作在饱和状态时的管压降称为饱和压降，对硅管可取0.3V，对锗管取0.1V。
- 放大区：输出特性的平坦部分，接近于恒流特性，符合 $I_C = \beta I_B$ 的规律，这是放大电路的工作区域。
- 截止区：当 I_B 减小，则Q点就会沿直流负载线向下移动，当 $I_B = 0$ 时， $I_C = I_{CEO} = 0$ ， $V_{CE} = V_{CC}$ ，BJT如同工作在断开状态。

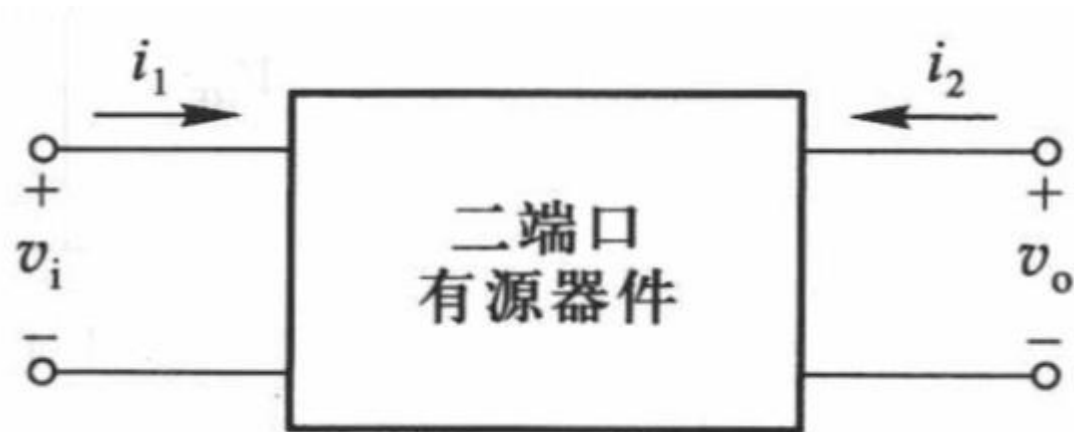


§ 5-4 小信号模型分析法

- 如果放大电路的输入信号电压很小，就可以设想把BJT小范围内的特性曲线近似地用直线来代替，从而可以把BJT这个非线性器件所组成的电路当作线性电路来处理。
- 关于BJT的小信号建模，通常有两种方法：一种是已知网络的特性方程，按此方程画出小信号模型；另一种则是从网络所代表的BJT的物理结构出发加以分析，再用电阻、电容、电感等电路元件来模拟其物理过程，从而得出模型。

BJT小信号建模

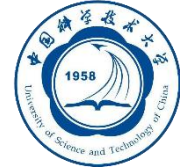
- BJT小信号建模采用一个由双口有源器件组成的网络建模，网络有输入端和输出端两个端口，通常可以通过电压 v_i 、 v_o 及电流 i_1 、 i_2 来研究网络的特性。
- 选择这四个参数中的其中两个作为自变量，其余两个作为因变量，就可得到不同的网络参数，如Z参数(开路阻抗参数)，Y参数(短路导纳参数)和H参数(混合参数)等。
- H参数在低频时用得较广泛。



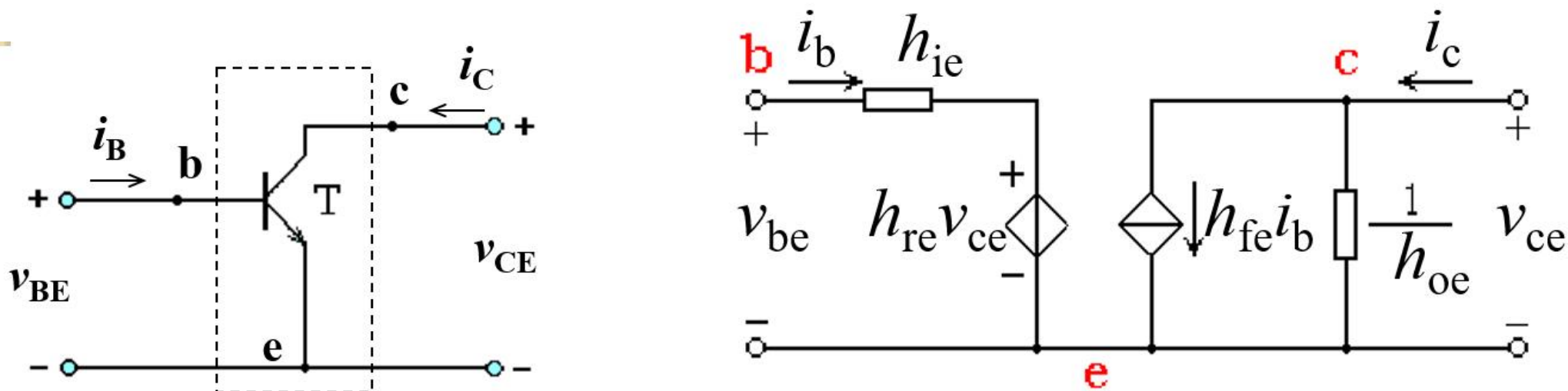


BJT H参数

第一个下标: i输入, r反向传输, f正向传输, o输出
第二个下标: e为共射级接法



- BJT在共射极接法时, 可表示为一个双口网络。
- BJT的特性曲线用图形描述了管子内部电压、电流的关系
- BJT的H参数, 则是用数学形式表示管子内部电压、电流微变量的关系。
- 两种方法都是表征管子性能、反映管内物理过程的, 因而两者之间必然具有密切的内在联系。



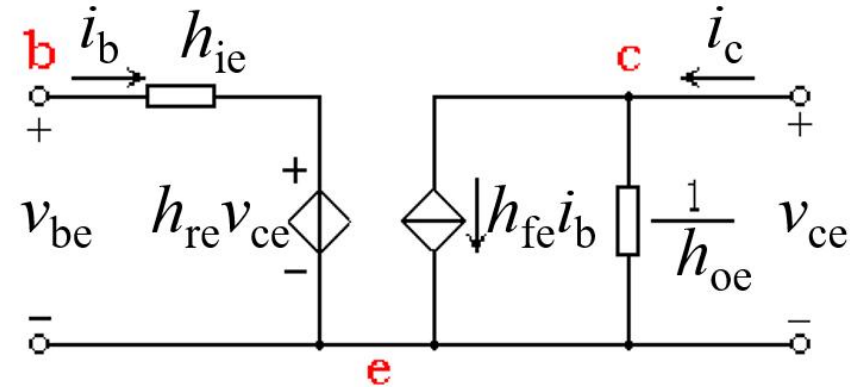
共射极接法下的H参数

- 输入回路和输出回路电压、电流的关系可分别表示为

$$v_{BE} = f_1(i_B, v_{CE})$$

$$i_C = f_2(i_B, v_{CE})$$

- 在小信号作用下，当电压、电流的变化没有超过特性曲线的线性范围时，无限小的信号增量就可以用有限的增量来代替，也就是可以用电压、电流的交流分量来代替。



$$dv_{BE} = \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B} \right|_{V_{CE}} \bullet di_B + \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial v_{CE}} \right|_{I_B} \bullet dv_{CE}$$

$$di_C = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{V_{CE}} \bullet di_B + \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right|_{I_B} \bullet dv_{CE}$$

$$v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce}$$

$$i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce}$$

共射极接法下的H参数

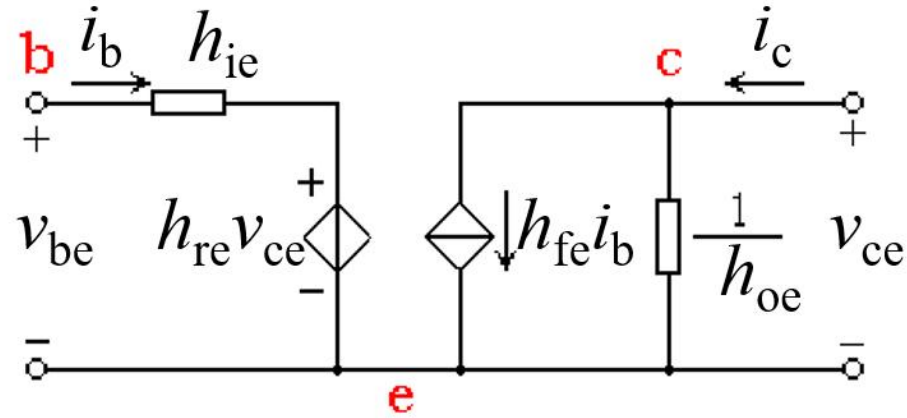
第一个下标: i输入, r反向传输, f正向传输, o输出
 第二个下标: e为共射级接法

$h_{ie} = \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B} \right|_{V_{CE}}$ 输出端交流短路时的输入电阻, 单位为欧姆

$h_{fe} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{V_{CE}}$ 输出端交流短路时的正向电流传输比或电流放大系数(无量纲);

$h_{re} = \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial v_{CE}} \right|_{I_B}$ 输入端交流开路时的反向电压传输比(无量纲);

$h_{oe} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right|_{I_B}$ 输入端交流开路时的输出电导, 单位为西门子。



这四个参数的量纲各不相同, 因此这种参数系统是不同量纲的混合, 故称为混合参数。

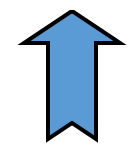
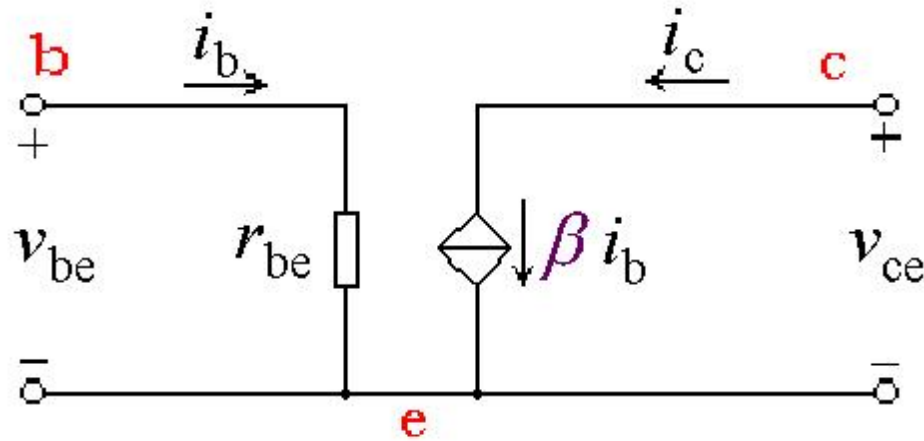


模型的简化

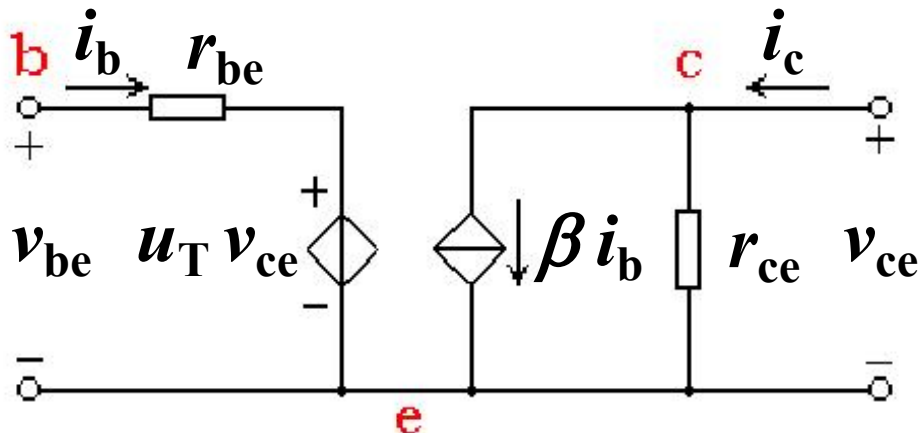


$$h_e = \begin{bmatrix} h_{ie} & h_{re} \\ h_{fe} & h_{oe} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^3 \Omega & 10^{-3} \sim 10^{-4} \\ 10^2 & 10^{-5} \text{ S} \end{bmatrix}$$

- βi_b 是受控源，且为电流控制电流源(CCCS)。
- 电流方向与 i_b 的方向是关联的。



- u_T 很小，一般为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ ，
- r_{ce} 很大，约为 $100 \text{ k}\Omega$ 。故一般可忽略它们的影响，得到简化电路



H参数的确定

- β 一般用测试仪测出；
- r_{be} 与 Q 点有关，可用图示仪测出。

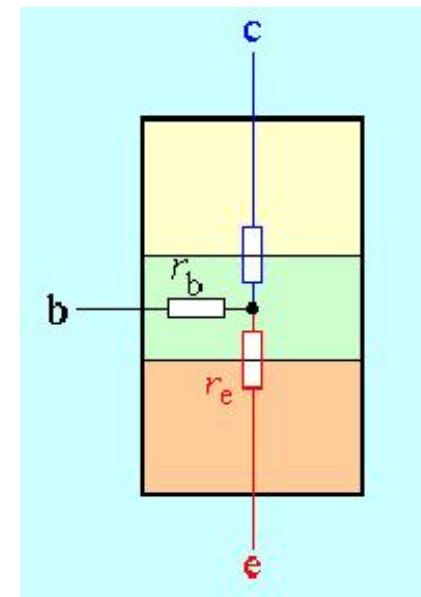
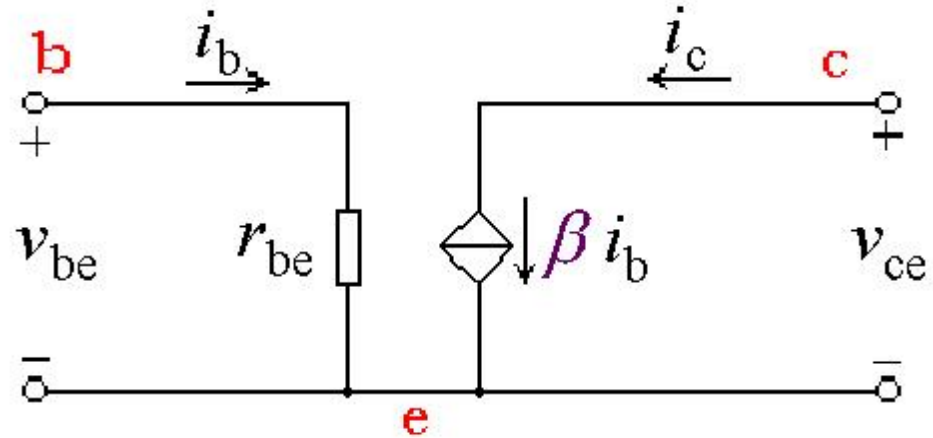
一般也用公式估算 r_{be}

$$r_{be} = r_b + (1 + \beta) r_e$$

其中对于低频小功率管 $r_b \approx 200\Omega$

而
$$r_e = \frac{V_T (\text{mV})}{I_{EQ} (\text{mA})} = \frac{26 (\text{mV})}{I_{EQ} (\text{mA})} \quad (T=300\text{K})$$

则
$$r_{be} \approx 200\Omega + (1 + \beta) \frac{26 (\text{mV})}{I_{EQ} (\text{mA})}$$





第五章

BJT三极管及放大

电路基础

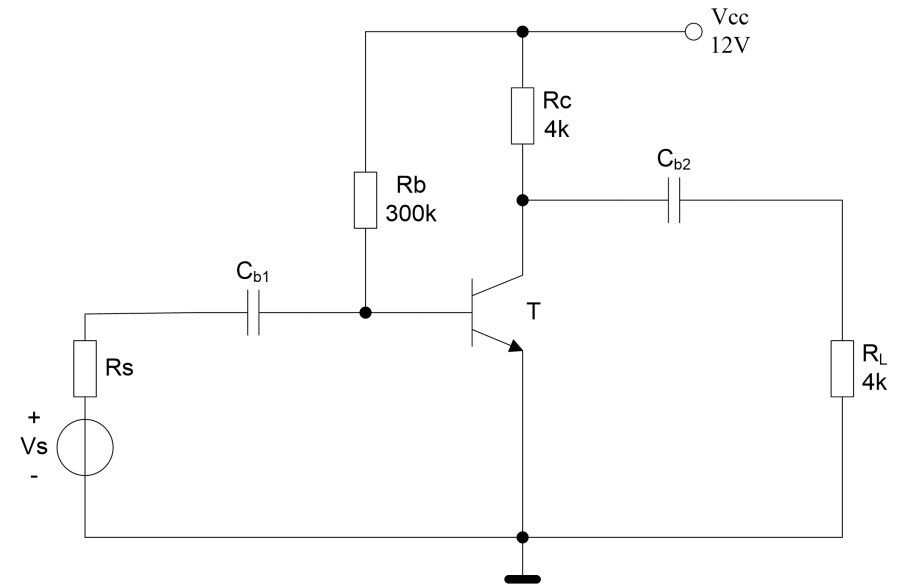
梁福田 ftliang@ustc.edu.cn

2025.4.11



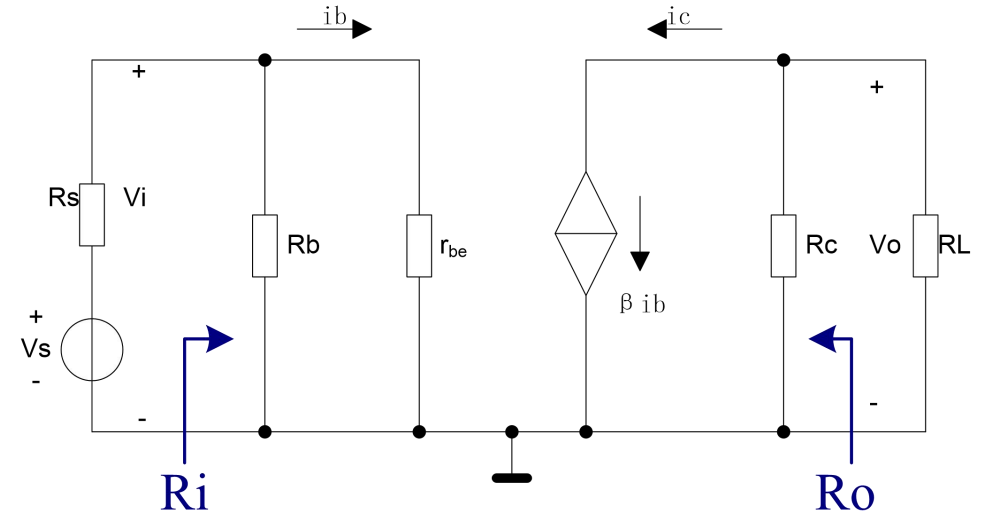
例5.4.1 用H参数分析电路

- 设图中BJT的 $\beta = 40$, $r_b = 200 \Omega$, $V_{BEQ} = 0.7V$, 其它元件参数如图。求该电路的 A_v 、 R_i 、 R_o 。



解

- 1) 画出小信号等效电路
- 2) 求 I_{EQ} 及 r_{be}
- 3) 求 A_v 、 R_i 、 R_o



$$I_{EQ} = \beta I_{BQ} = \beta \frac{V_{CC} - V_{BEQ}}{R_b} \approx \beta \frac{V_{CC}}{R_b} = 40 \times \frac{12V}{300k\Omega} = 1.6mA$$

$$r_{be} = r_b + (1 + \beta) \frac{V_T}{I_{EQ}} = 200\Omega + (1 + 40) \times \frac{26mV}{1.6mA} \approx 866\Omega$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-\beta i_b (R_c // R_L)}{i_b r_{be}} = \frac{-\beta R'_L}{r_{be}} \approx -92.4$$

$$R_i = R_b // r_{be} \approx 866\Omega$$

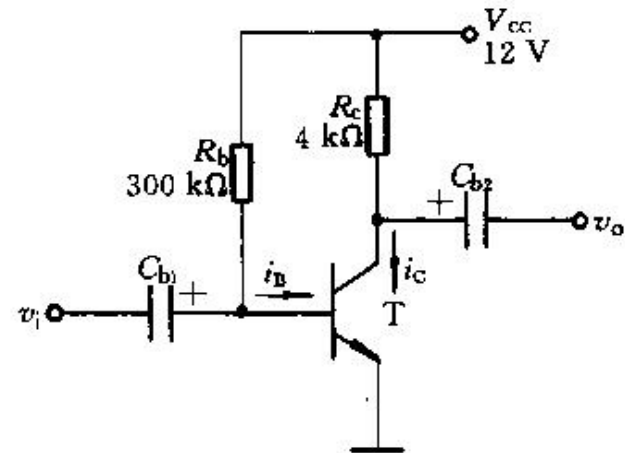
$$R_o \approx R_c = 4k\Omega$$



§ 5-5 放大电路的工作点稳定问题

- 在放大电路中，Q点不仅关系到波形失真，而且对电压增益有很大影响，所以对放大电路，为获得较好的性能，必须首先设置一个合适的Q点。
- 在固定偏流电路中，当 V_{CC} 和集电极电阻 R_c 确定后，放大电路的Q点就由基极电流 I_B 来决定，这个电流就叫做偏流，而获得偏流的电路叫做偏置电路。

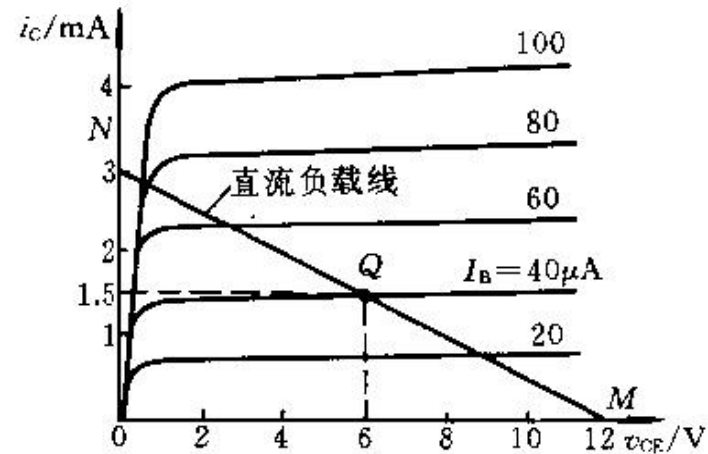
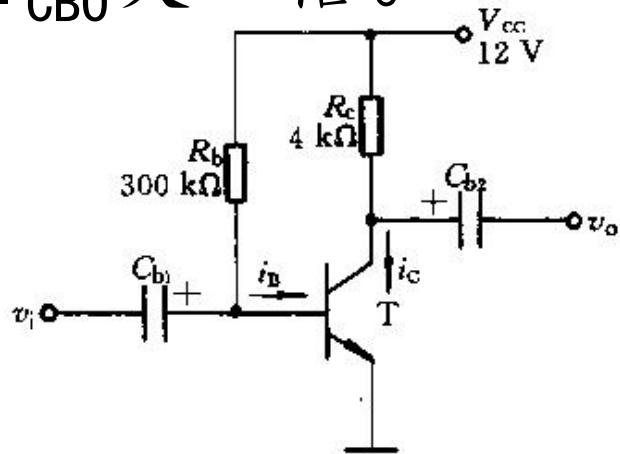
- 由于这种电路偏流是“固定”的($I_B = V_{CC}/R_b$)，当更换管子或是环境温度变化引起管子参数变化时，电路的工作点往往会移动，甚至移到不合适的位置而使放大电路无法正常工作。





温度对工作点的影响

- I_{CBO} 、 β 、 V_{BE} 随温度升高的结果，都集中表现在Q点电流 I_C 的增大。
- 硅管的 I_{CBO} 小，受温度的影响可以忽略，因此， β 和 V_{BE} 的温度影响，对硅管是主要的，温度每升高 1°C ， β 要增加 $0.5\% - 1.0\%$ ， V_{BE} 降低 $2.2\text{mV}/^\circ\text{C}$ 左右。
- 锗管的 I_{CBO} 大， I_{CBO} 的温度影响对锗管是主要的，温度每升高 10°C ， I_{CBO} 大一倍。

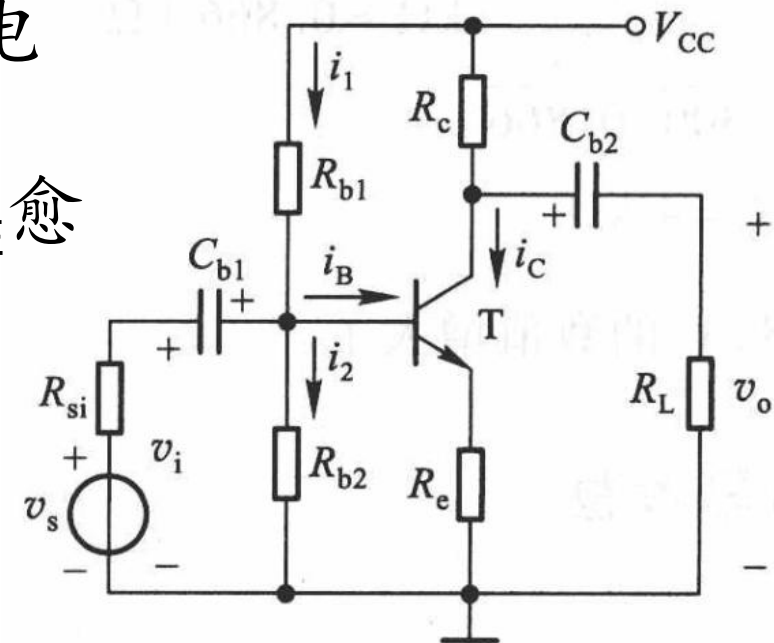


射极偏置电路

- BJT参数 I_{CBO} 、 β 、 V_{BE} 随温度变化对Q点的影响，最终都表现在使Q点电流 I_c 增加。在温度变化时，如果能设法使 I_c 近似维持恒定，问题就可得到解决。
- (1) 针对 I_{CBO} 的影响，可设法使 I_b 随温度的升高而自动减小。
- (2) 针对 V_{BE} 的影响，可设法使发射结的外加电压随着温度的增加而自动减小。
- 为要使Q点稳定， I_1 愈大于 I_b 以及 V_B 愈大于 V_{BE} 愈好
- 对于硅管，一般可选取

$$I_1 = (5 - 10) I_B$$

$$V_B = (3 - 5) V_{BE}$$



例5.5.1

试近似估算电路的 Q 点，并计算它的电压增益、输入电阻和输出电阻。

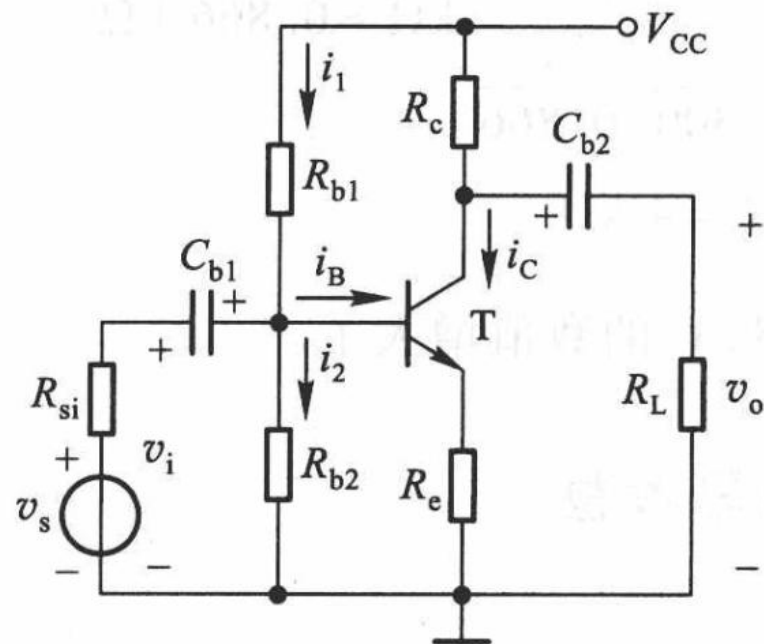
解；(1)确定 Q 点 (V_{CE} , I_C , I_B)

$$V_B = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC}$$

$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - V_{BE}}{R_e} \approx \frac{V_B}{R_e}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_c - I_E R_e \approx V_{CC} - I_C (R_c + R_e)$$

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





解答



(2) 求电压增益

画出小信号等效电路图。
由此电路可得

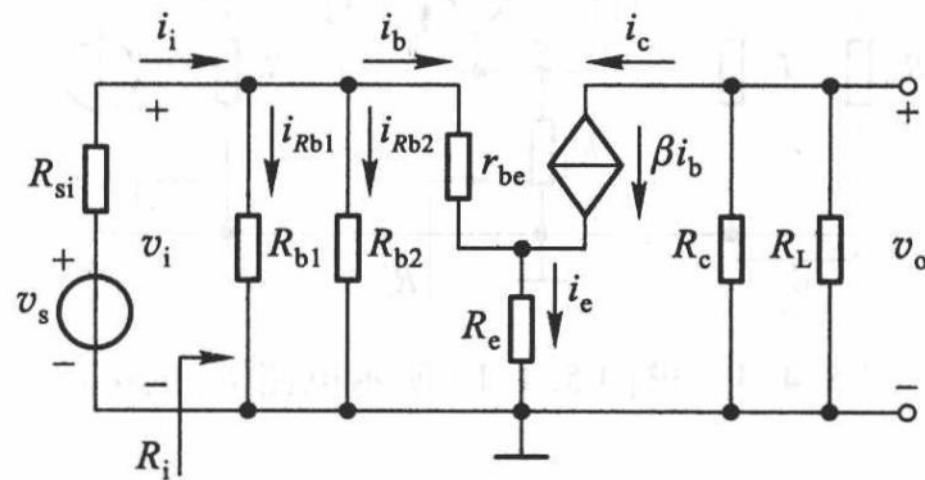
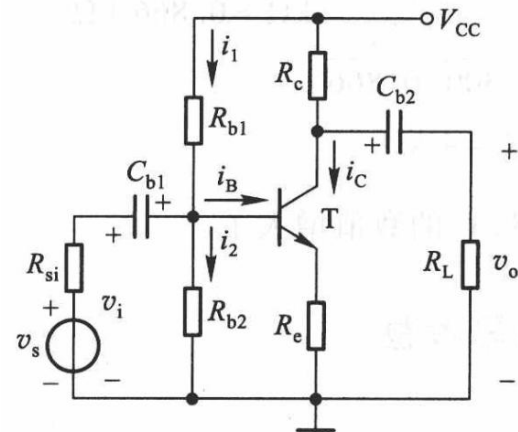
$$\dot{V}_o = -\beta \dot{I}_b (R_c \parallel R_L)$$

$$= -\beta \dot{I}_b R'_L$$

$$\dot{V}_i = \dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R_e$$

$$= \dot{I}_b r_{be} + (1 + \beta) \dot{I}_b R_e = \dot{I}_b [r_{be} + (1 + \beta) R_e]$$

$$\dot{A}_V = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{-\beta \dot{I}_b R'_L}{\dot{I}_b [r_{be} + (1 + \beta) R_e]} = \frac{-\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R_e}$$





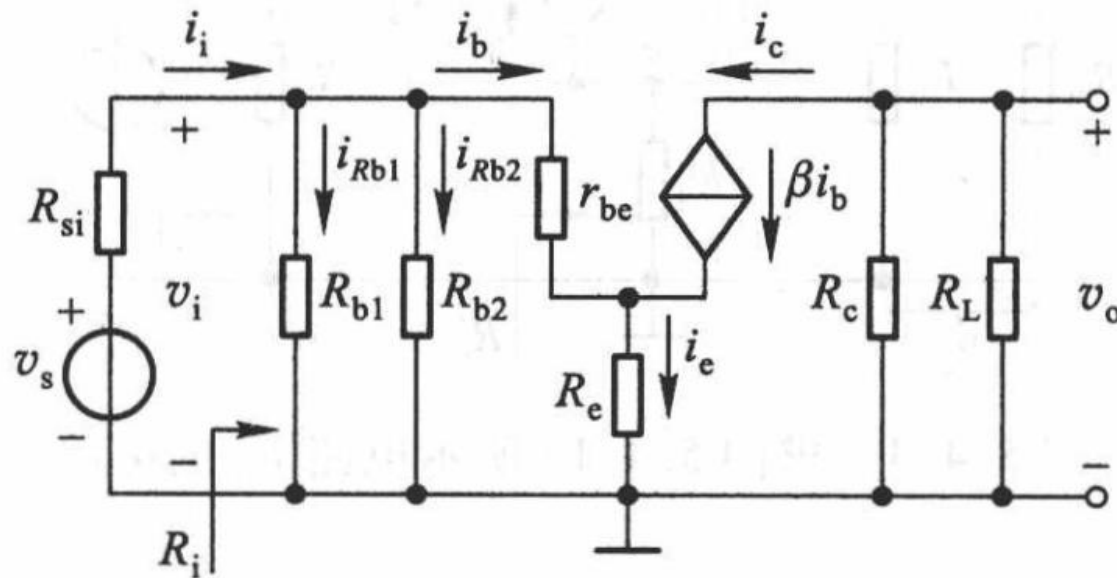
解答



(3) 求输入电阻

电路输入端在外加测试电压的作用下，求相应的测试电流。

(外施电压求电流法)



$$\dot{V}_T = \dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_b (1 + \beta) R_e = \dot{I}_b [r_{be} + (1 + \beta) R_e]$$

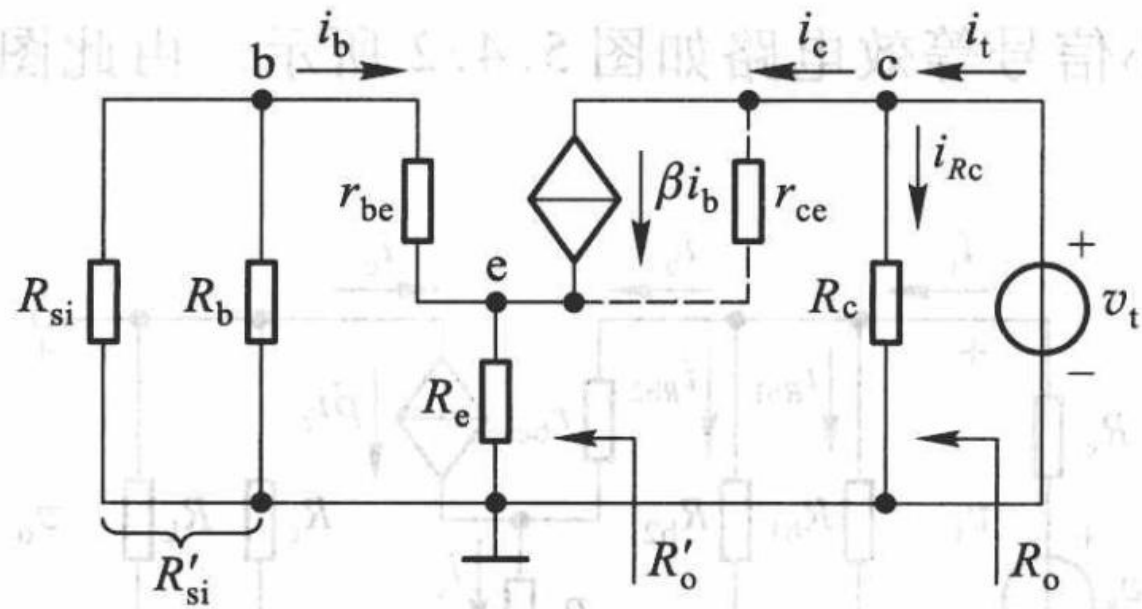
$$\dot{I}_T = \dot{I}_{Rb} + \dot{I}_b = \dot{V}_T \left(\frac{1}{R_b} + \frac{1}{r_{be} + (1 + \beta) R_e} \right)$$

$$R_i = \frac{\dot{V}_T}{\dot{I}_T} = R_b // [r_{be} + (1 + \beta) R_e]$$



(4) 输出电阻

如把BJT的输出电阻 r_{ce} 考虑进去，按照输出电阻的定义可画出求输出电阻时的等效电路。先求出 R'_o ，然后再与 R_c 并联，即可求得放大电路的输出电阻 R_o 。



$$\dot{I}_b(r_{be} + R'_s) + (\dot{I}_b + \dot{I}_c)R_e = 0 \quad (R'_s = R_s // R_b) \quad \dot{I}_b = -\frac{R_e}{r_{be} + R'_s + R_e} \dot{I}_c$$

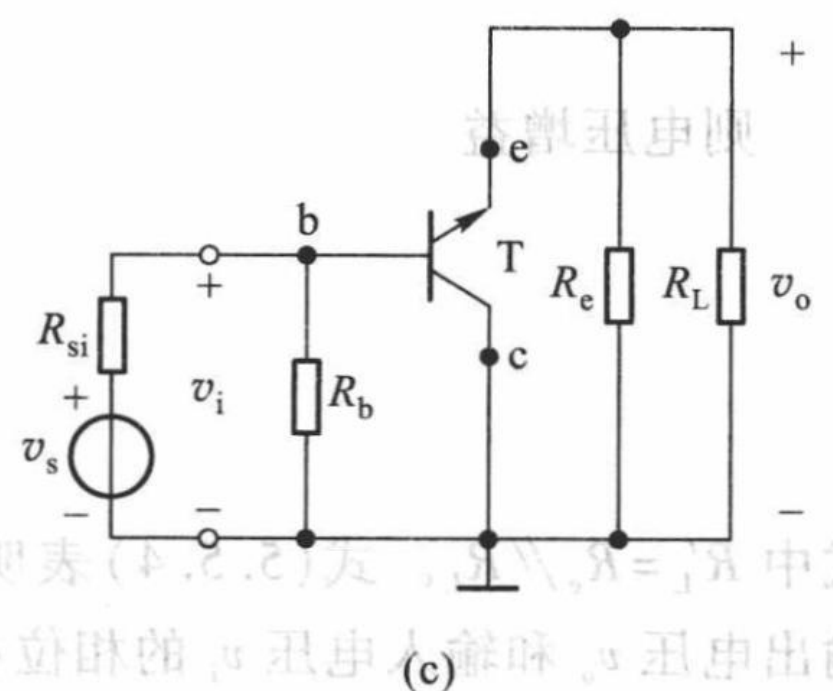
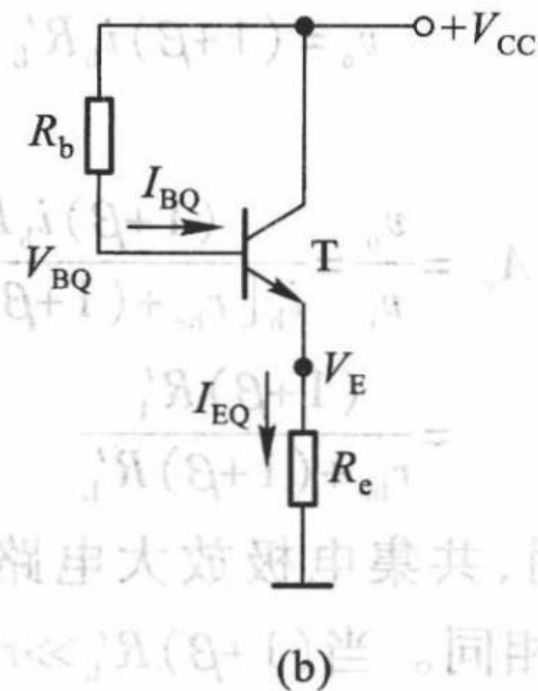
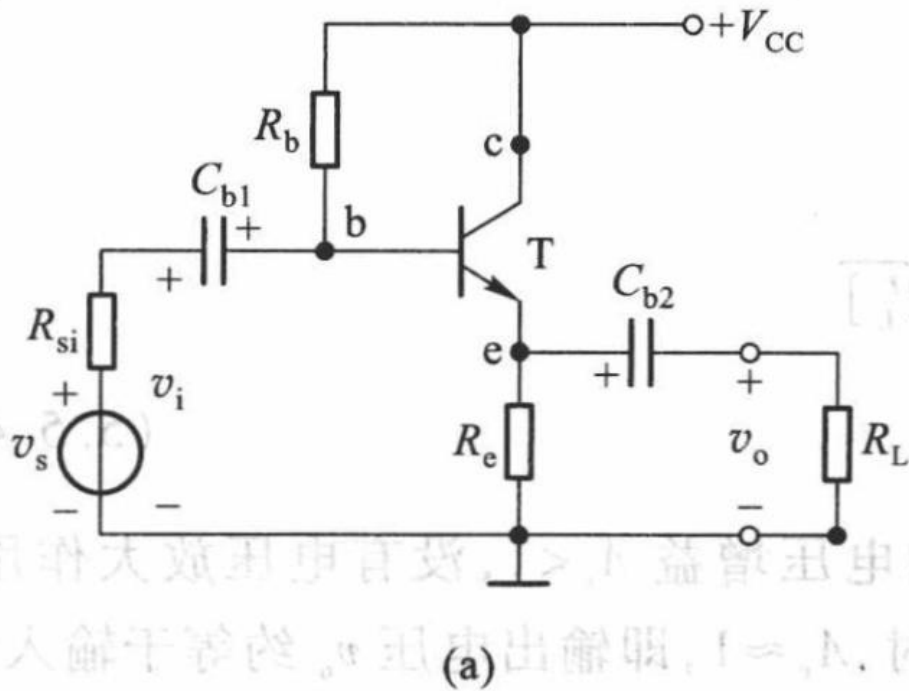
$$\dot{V}_T - (\dot{I}_c - \beta \dot{I}_b)r_{ce} - (\dot{I}_b + \dot{I}_c)R_e = 0 \quad \dot{V}_T = \dot{I}_c \left[r_{ce} + R_e + \frac{R_e}{r_{be} + R'_s + R_e} (\beta r_{ce} - R_e) \right]$$

$$R'_o = \frac{\dot{V}_T}{\dot{I}_c} = r_{ce} \left[1 + \frac{\beta R_e}{r_{be} + R'_s + R_e} \right] \quad r_{ce} \gg R_e \quad R_o = \frac{\dot{V}_T}{\dot{I}_T} = R'_o // R_c$$



§ 5-6 共集电极电路和共基极电路

- 共集电极电路中，BJT的负载电阻是接在发射极上，输入电压 v_i 加在基极和集电极之间，输出电压 v_o 从发射极和集电极两端取出，所以集电极是输入、输出电路的共同端点。因为是从发射极把信号输出出去，所以共集电极电路又称为**射极输出器**。



射极输出器分析

- (1) 求Q点
- 在基极回路中，按照KVL可得

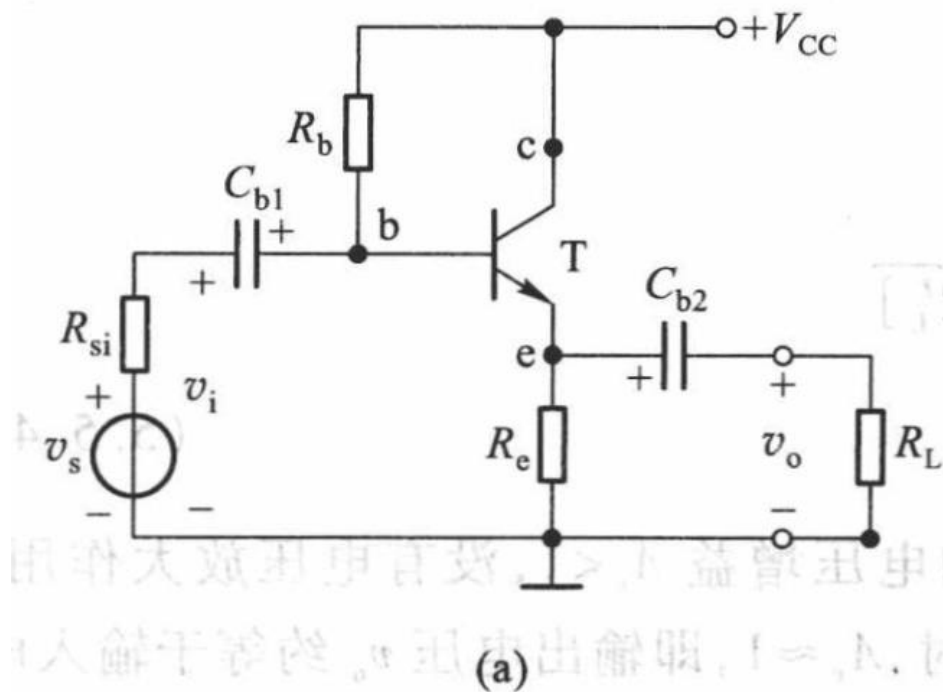
$$V_{CC} = I_B R_b + V_{BE} + V_E$$

$$V_E = I_E R_e = (1 + \beta) I_B R_e$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b + (1 + \beta) R_e} \approx \frac{V_{CC}}{R_b + (1 + \beta) R_e}$$

$$I_C = \beta I_B = \frac{\beta V_{CC}}{R_b + (1 + \beta) R_e}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_e$$



射极输出器分析

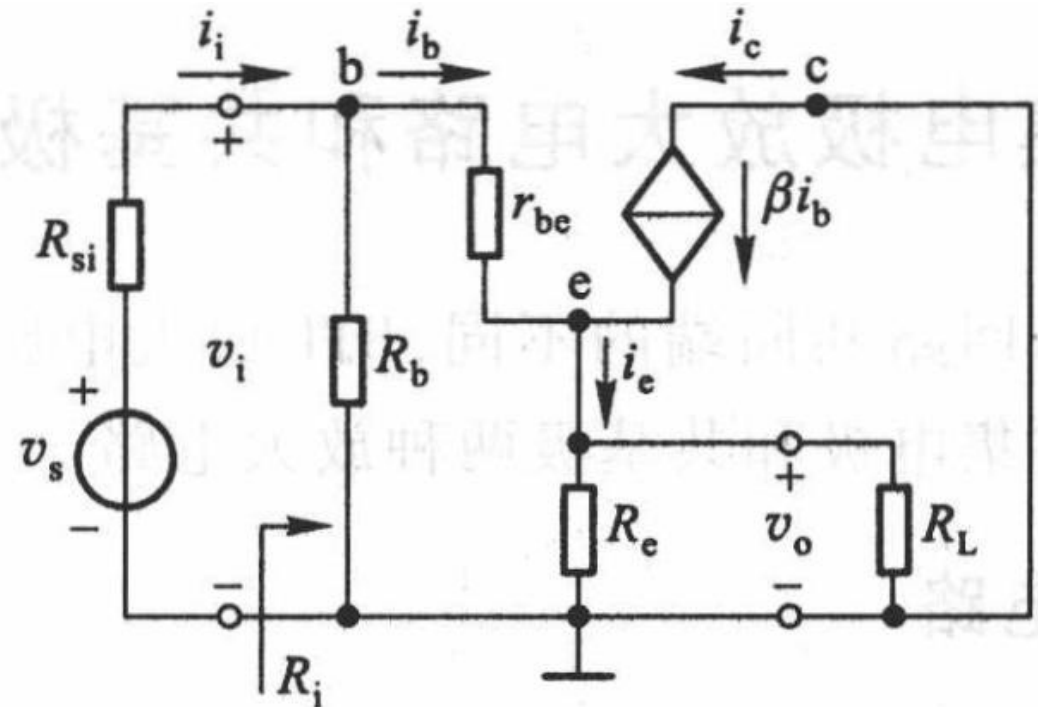
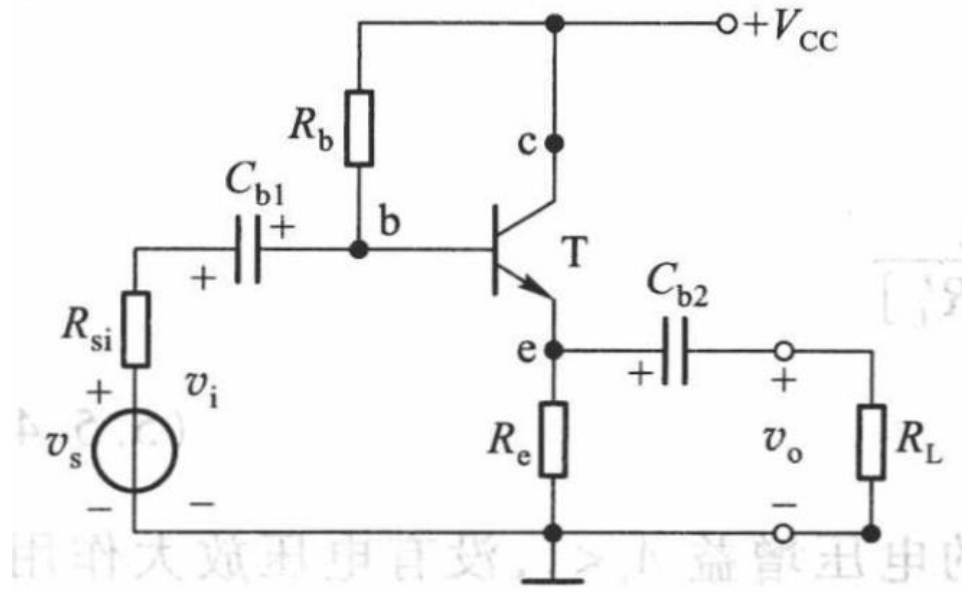
- (2) 电压增益
- 根据KVL，输入回路的方程为

$$\dot{V}_i = \dot{I}_b r_{be} + R'_L (\dot{I}_b + \beta \dot{I}_b)$$

$$R'_L = R_e // R_L \quad \dot{I}_b = \frac{\dot{V}_i}{r_{be} + R'_L (1 + \beta)}$$

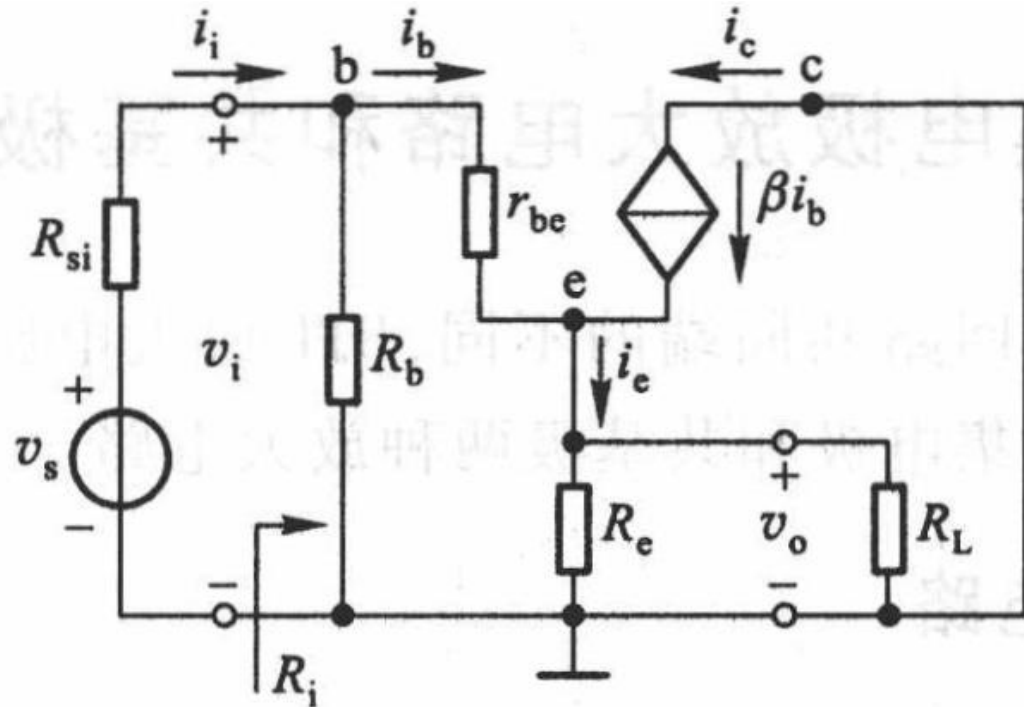
$$\dot{V}_o = R'_L (\dot{I}_b + \beta \dot{I}_b) = R'_L (1 + \beta) \dot{I}_b = \frac{R'_L (1 + \beta) \dot{V}_i}{r_{be} + R'_L (1 + \beta)}$$

$$\dot{A}_V = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{R'_L (1 + \beta)}{r_{be} + R'_L (1 + \beta)} \approx \frac{\beta R'_L}{r_{be} + \beta R'_L} < 1$$



射极输出器分析

- (3) 输入电阻



$$R_i = \frac{\dot{V}_T}{\dot{I}_T}$$

$$R'_L = R_e \parallel R_L$$

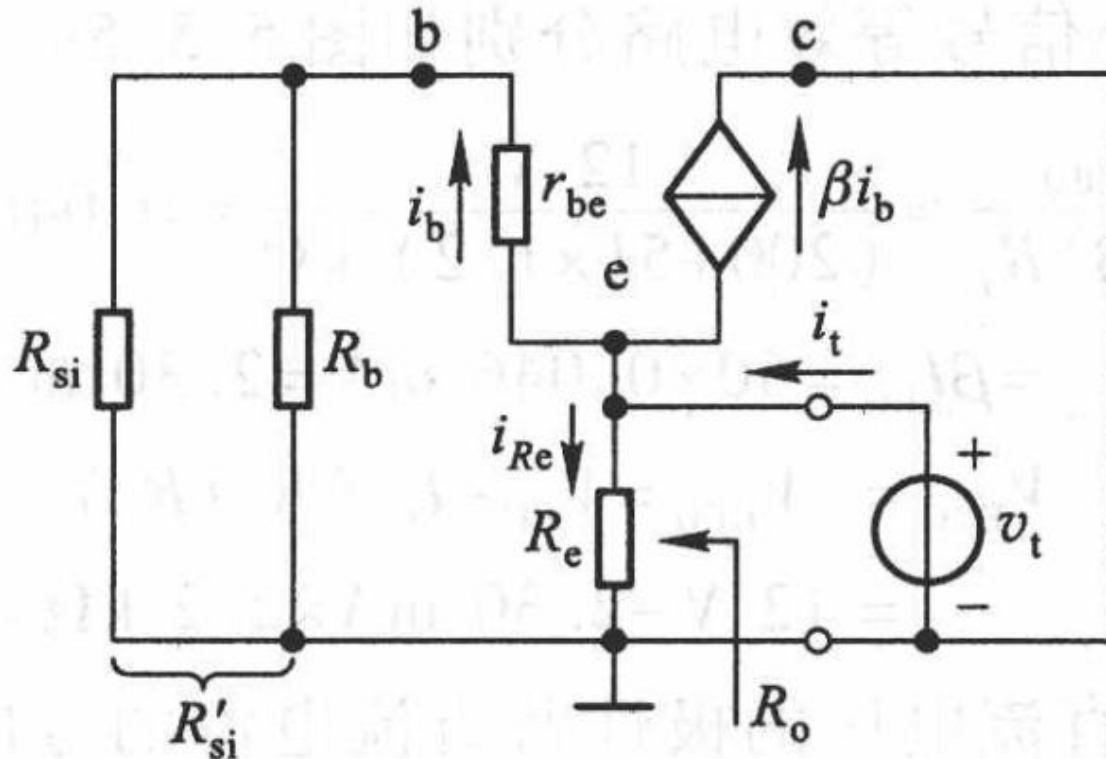
$$\dot{I}_T = \dot{I}_{R_b} + \dot{I}_b = \dot{V}_T \left[\frac{1}{R_b} + \frac{1}{r_{be} + (1 + \beta)R'_L} \right]$$

当 $\beta \gg 1$ $\beta R'_L \gg r_{be}$

$$R_i = \frac{\dot{V}_T}{\dot{I}_T} = R_b \parallel \beta R'_L$$

射极输出器分析

- (4) 输出电阻
- 输出电阻按定义表示为



$$R_o = \left. \frac{\dot{V}_T}{\dot{I}_T} \right|_{\dot{V}_s=0}$$

$$R'_s = R_s // R_b$$

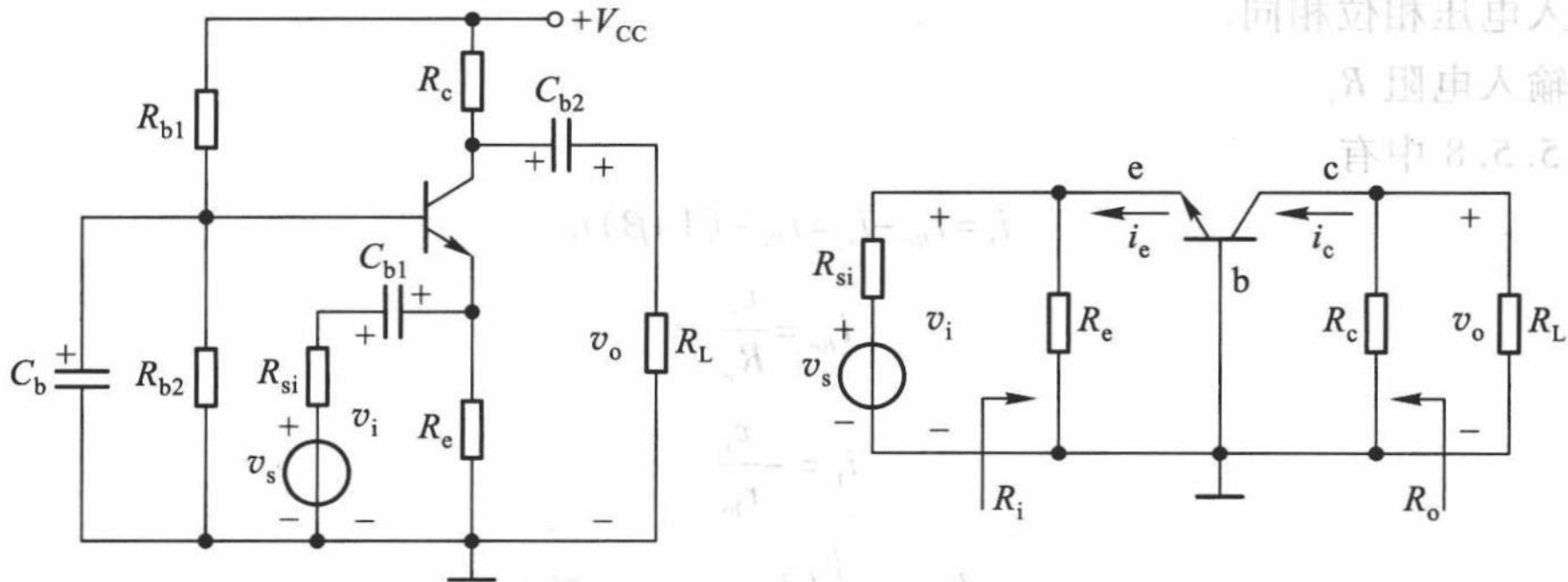
$$\dot{I}_T = \dot{I}_{R_e} + \dot{I}_b + \beta \dot{I}_b = \dot{V}_T \left[\frac{1}{R_e} + \frac{1}{r_{be} + R'_s} + \beta \frac{1}{r_{be} + R'_s} \right]$$

$$R_o = \frac{\dot{V}_T}{\dot{I}_T} = R_e // \frac{r_{be} + R'_s}{1 + \beta}$$

$$R_e \gg \frac{r_{be} + R'_s}{1 + \beta} \quad \beta \gg 1 \quad \Rightarrow \quad R_o \approx \frac{r_{be} + R'_s}{\beta}$$

共基极电路

- 共基极放大电路中， R_c 为集电极电阻， R_e 为发射极电阻， R_{b1} 和 R_{b2} 为基极偏置电阻，用来保证BJT有合适的Q点。
- 由交流通路可见，输入电压 v_i 是加在发射极和基极之间，而输出电压 v_o 从集电极和基极两端取出，故基极是输入、输出电路的共同端点。





例



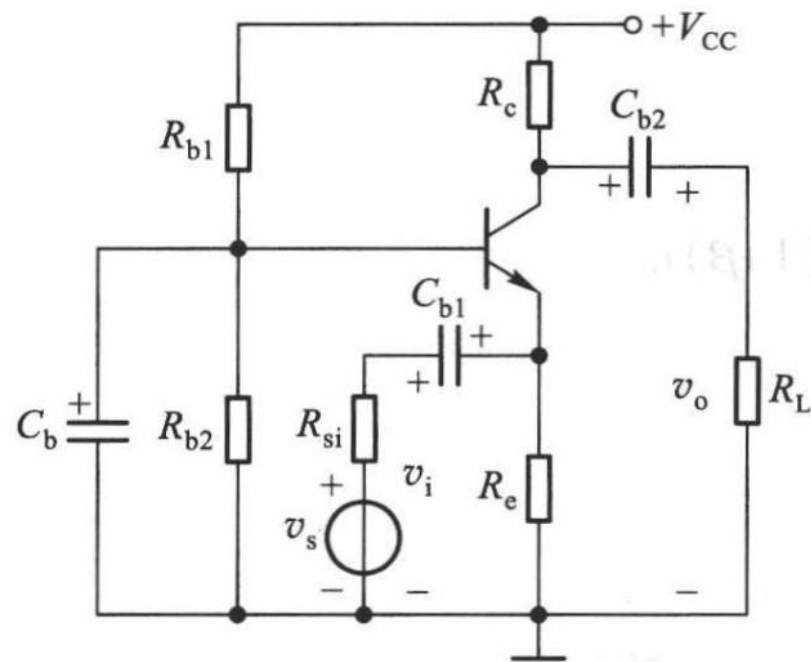
- 试分析电路的静态工作情况，并求出它的电压增益、输入电阻和输出电阻。

- 解：(1) 求Q点

$$V_B = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC}$$

$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - V_{BE}}{R_e} \approx \frac{V_B}{R_e}$$

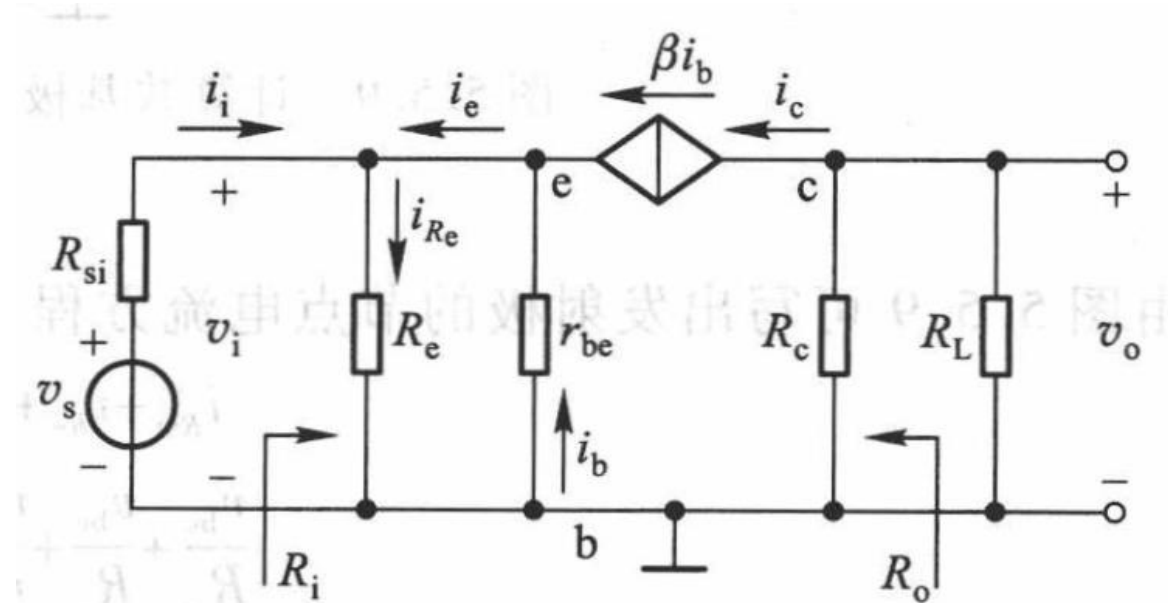
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_c - I_E R_e \approx V_{CC} - I_C (R_c + R_e)$$



解答

- (2) 电压增益
- 利用小信号等效电路计算电压增益

$$\begin{aligned} \dot{V}_o &= -\dot{I}_c R'_L \\ R'_L &= R_c // R_L \\ \dot{A}_V &= \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{-\dot{I}_c R'_L}{-\dot{I}_b r_{be}} = \frac{\beta \dot{I}_b R'_L}{\dot{I}_b r_{be}} = \frac{\beta R'_L}{r_{be}} \end{aligned}$$



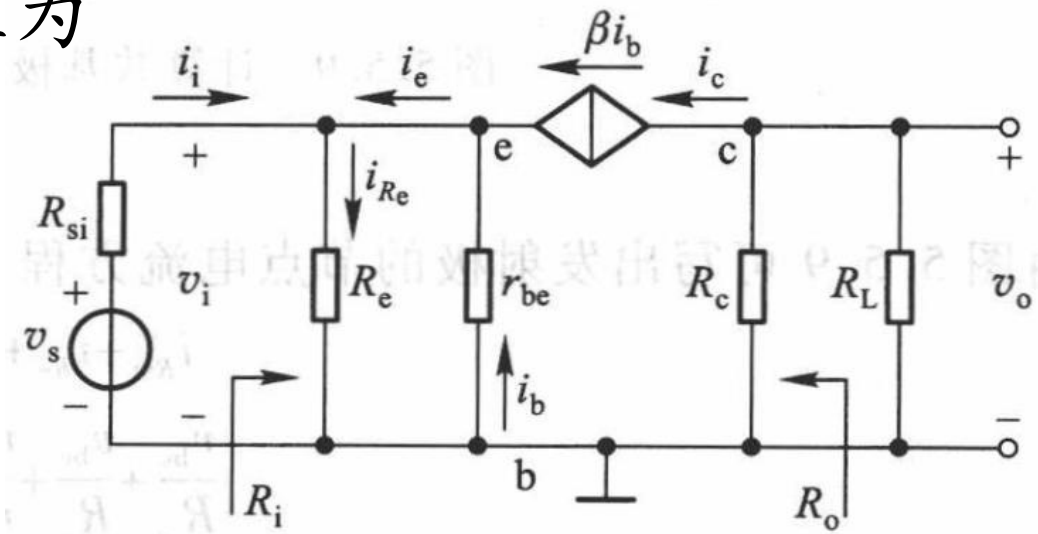


解答

- (3) 输入电阻和输出电阻
- 在共基极接法时，BJT的输入电阻为

$$R_i' = \frac{\dot{V}_i}{-\dot{I}_e} = \frac{-\dot{I}_b r_{be}}{-(1+\beta)\dot{I}_b} = \frac{r_{be}}{(1+\beta)}$$

$$R_i = R_e // R_i' \approx \frac{r_{be}}{(1+\beta)}$$



BJT的共基极输出特性十分平坦，其斜率要比共射极接法小。因此BJT本身的输出电阻 r_{cb} 比共射极接法时的 r_{cb} 为大。共基极放大电路的输出电阻为

$$R_o = r_{cb} // R_c \approx R_c$$



三种基本组态的比较

	共射极电路	共集电极电路	共基极电路
电路图			
电压增益 A_v	$A_v = -\frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1+\beta) R_e}$ $(R'_L = R_c // R_L)$	$A_v = \frac{(1+\beta) R'_L}{r_{be} + (1+\beta) R'_L}$ $(R'_L = R_e // R_L)$	$A_v = \frac{\beta R'_L}{r_{be}}$ $(R'_L = R_c // R_L)$
v_o 与 v_i 的相位关系	反相	同相	同相
最大电流增益 A_i	$A_i \approx \beta$	$A_i \approx 1+\beta$	$A_i \approx \alpha$
输入电阻	$R_i = R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1+\beta) R_e]$	$R_i = R_b // [r_{be} + (1+\beta) R'_L]$	$R_i = R_e // \frac{r_{be}}{1+\beta}$
输出电阻	$R_o \approx R_c$	$R_o = \frac{r_{be} + R'_{si}}{1+\beta} // R_e$ $(R'_{si} = R_{si} // R_b)$	$R_o \approx R_c$
用途	多级放大电路的中间级	输入级、中间级、输出级	高频或宽频带电路



作业

- 第七版 习题五

- 5.2.1, 5.2.7, 5.2.13, 5.4.1

- 预习第四章