第8章 二极管、 晶体管和单管放大电路

第8章 二极管、 晶体管和单管放大电路

1 半导体的导电特性

2 PN结及单向导电性

3 二极管

4 晶体管

5 光电器件

6 共发射极放大电路

7 共集电极放大电路

8 多级放大电路

8.1 半导体的导电特性

半导体的导电特性：

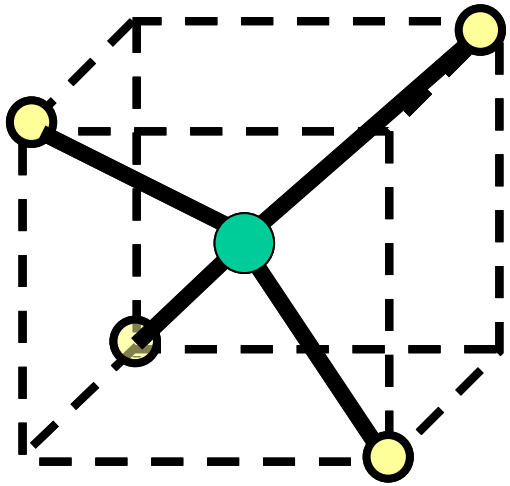
热敏性：当环境温度升高时，导电能力显著增强(可做成温度敏感元件，如热敏电阻)。

光敏性：当受到光照时，导电能力明显变化（可做成各种光敏元件，如光敏电阻、光敏二极管、光敏三极管等)。

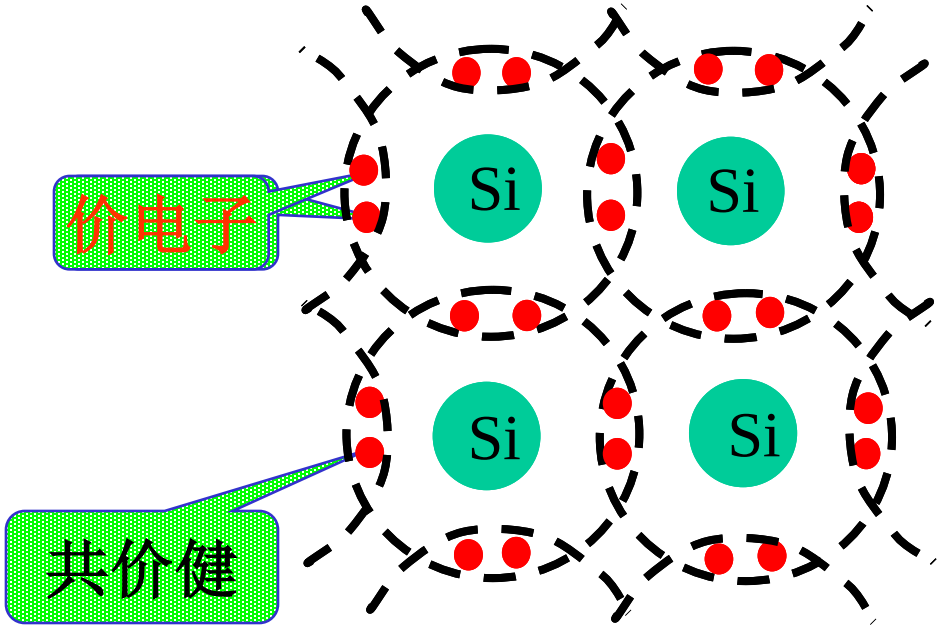
掺杂性：往纯净的半导体中掺入某些杂质，导电能力明显改变(可做成各种不同用途的半导体器件，如二极管、三极管和晶闸管等）。

1.1 本征半导体

完全纯净的、具有晶体结构的半导体，称为本征半导体。

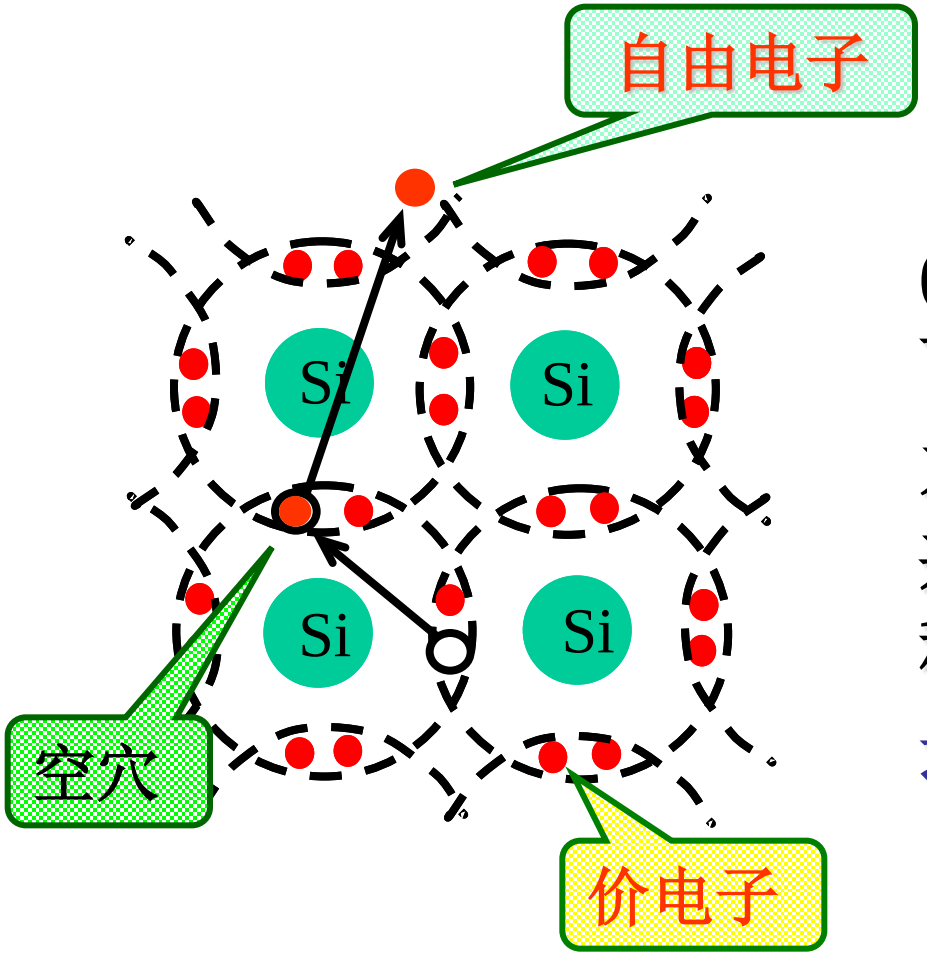


晶体中原子的排列方式



硅单晶中的共价健结构

共价键中的两个电子，称为价电子。



本征半导体的导电机理

价电子在获得一定能量(温度升高或受光照)后，即可挣脱原子核的束缚，成为自由电子(带负电)，同时共价键中留下一个空位，称为空穴（带正电）。

这一现象称为本征激发。

温度愈高，晶体中产生的自由电子便愈多。

在外电场的作用下，空穴吸引相邻原子的价电子来填补，而在该原子中出现一个空穴，其结果相当于空穴的运动(相当于正电荷的移动)。

本征半导体的导电机理

当半导体两端加上外电压时，在半导体中将出现两部分电流

(1) 自由电子作定向运动 →电子电流

(2) 价电子递补空穴 →空穴电流

自由电子和空穴都称为载流子。

自由电子和空穴成对地产生的同时, 又不断复合。在一定温度下，载流子的产生和复合达到动态平衡，半导体中载流子便维持一定的数目。

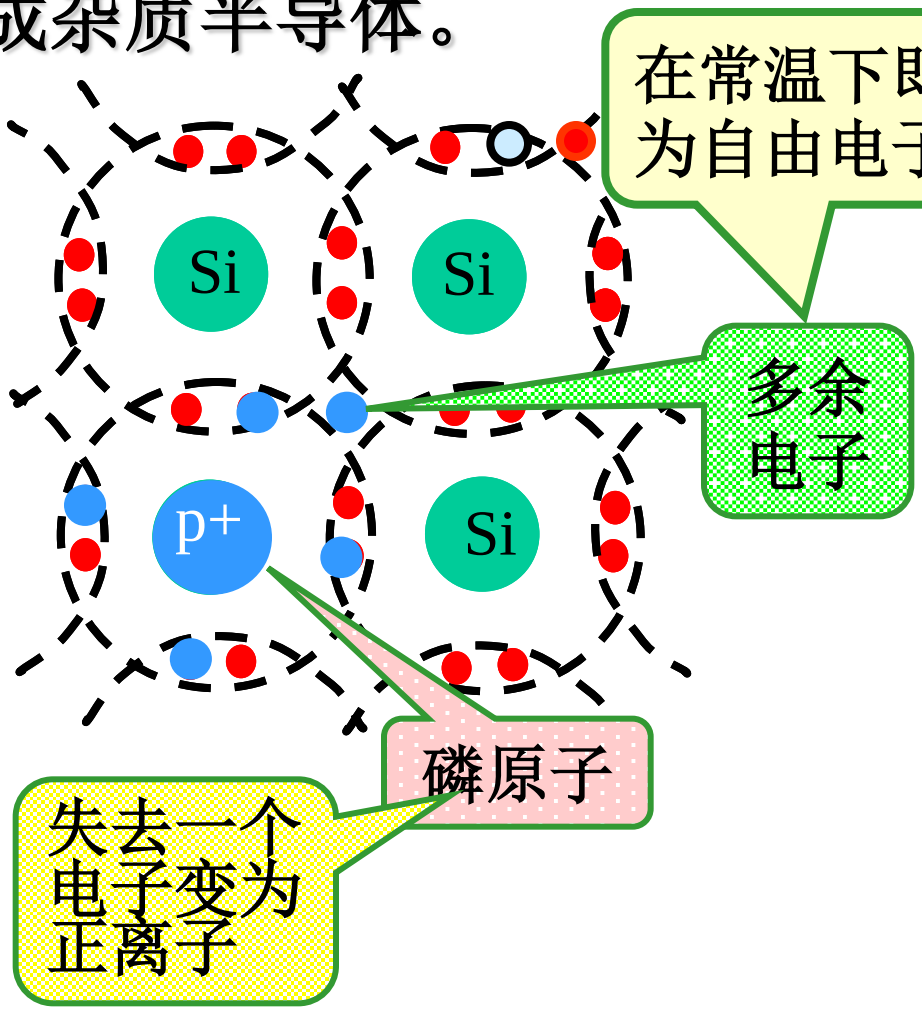
注意：

(1) 本征半导体中载流子数目极少, 其导电性能很差；

(2) 温度愈高， 载流子的数目愈多,半导体的导电性能也就愈好。所以，温度对半导体器件性能影响很大。

1.2 N型半导体和 P 型半导体

在本征半导体中掺入微量的杂质 (某种元素) , 形成杂质半导体。

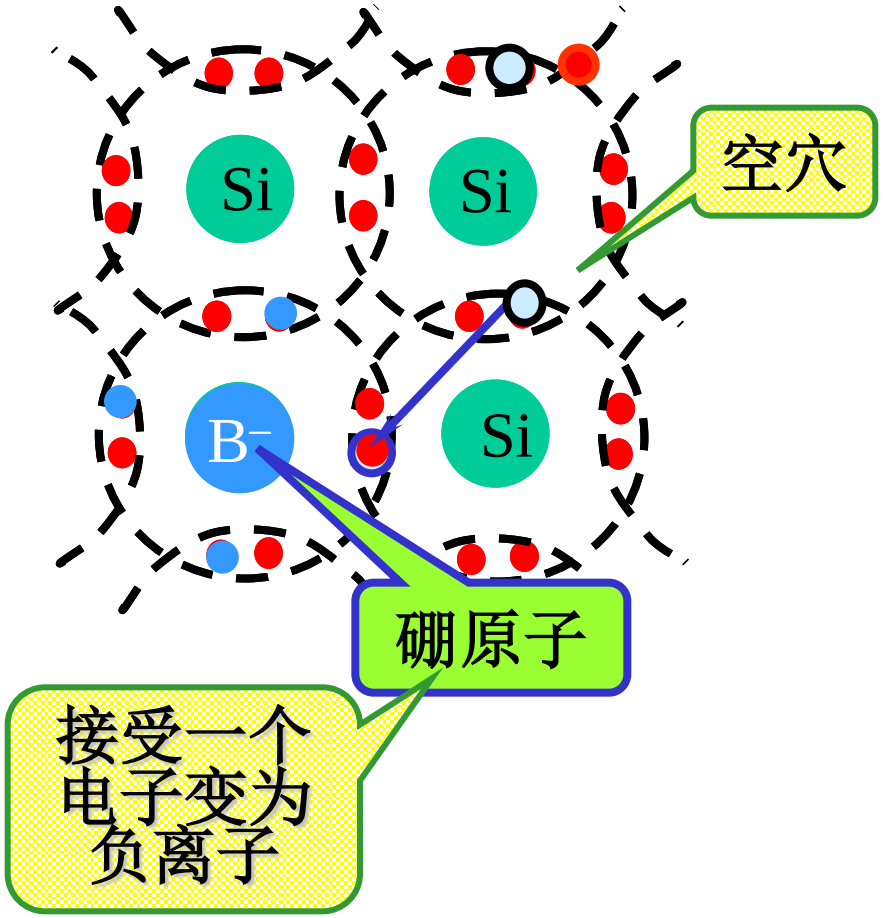


掺入五价元素

掺杂后自由电子数目大量增加，自由电子导电成为这种半导体的主要导电方式，称为电子半导体或N型半导体。

在N 型半导体中自由电子是多数载流子，空穴是少数载流子。

1.2 N型半导体和 P 型半导体



掺入三价元素

掺杂后空穴数目大量增加，空穴导电成为这种半导体的主要导电方式，称为空穴半导体或 P 型半导体。

在P 型半导体中空穴是多数载流子, 自由电子是少数载流子。

无论N型或P型半导体都是中性的，对外不显电性。

8.2 PN结及其单向导电性

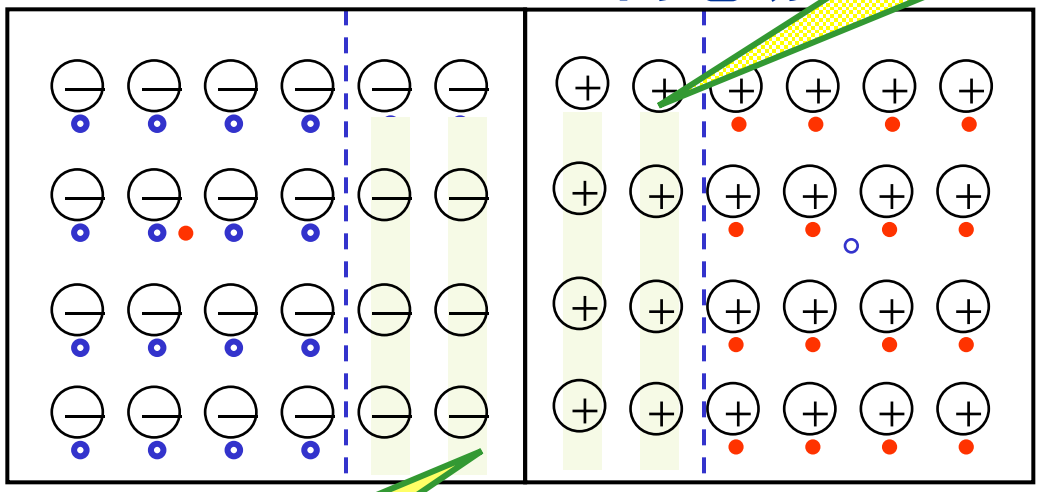
2.1 PN结的形成

空间电荷区也称 PN 结

少子的漂移运动

内电场越强，漂移运动越强，而漂移使空间电荷区变薄。

P 型半导体 内电场 N 型半导体



扩散和漂移这一对相反的运动最终达到动态平衡，空间电荷区的厚度固定不变。

浓度差 多子的扩散运动

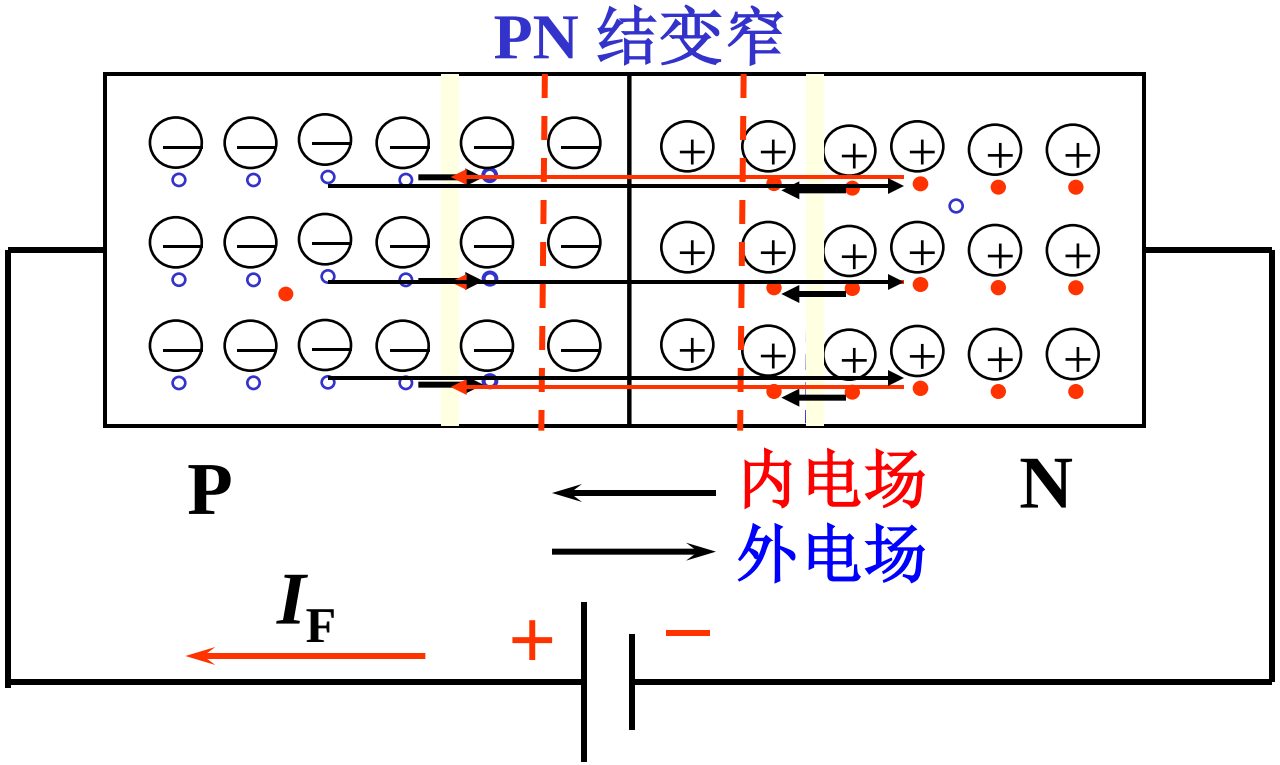
形成空间电荷区

扩散的结果使空间电荷区变宽。

2.2 PN结的单向导电性

1. PN 结加正向电压 (正向偏置)

P接正、N接负

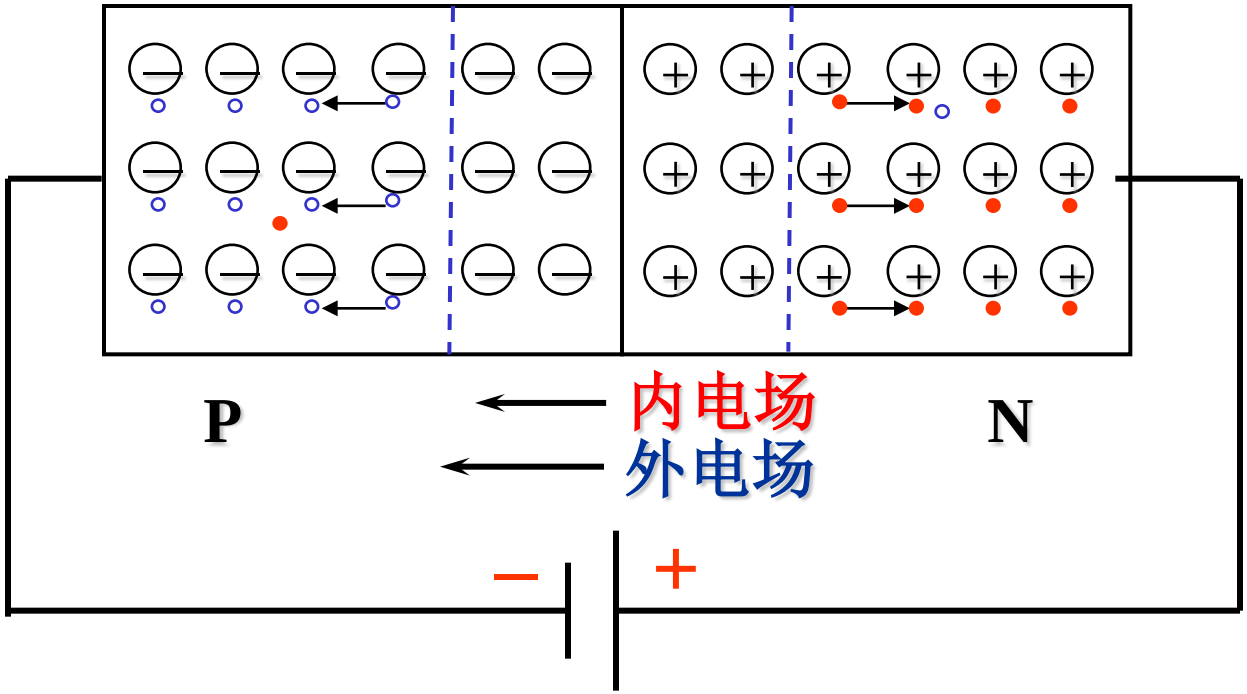


内电场被削弱，多子的扩散加强，形成较大的扩散电流。

PN 结加正向电压时，PN结变窄，正向电流较大，正向电阻较小，PN结处于导通状态。

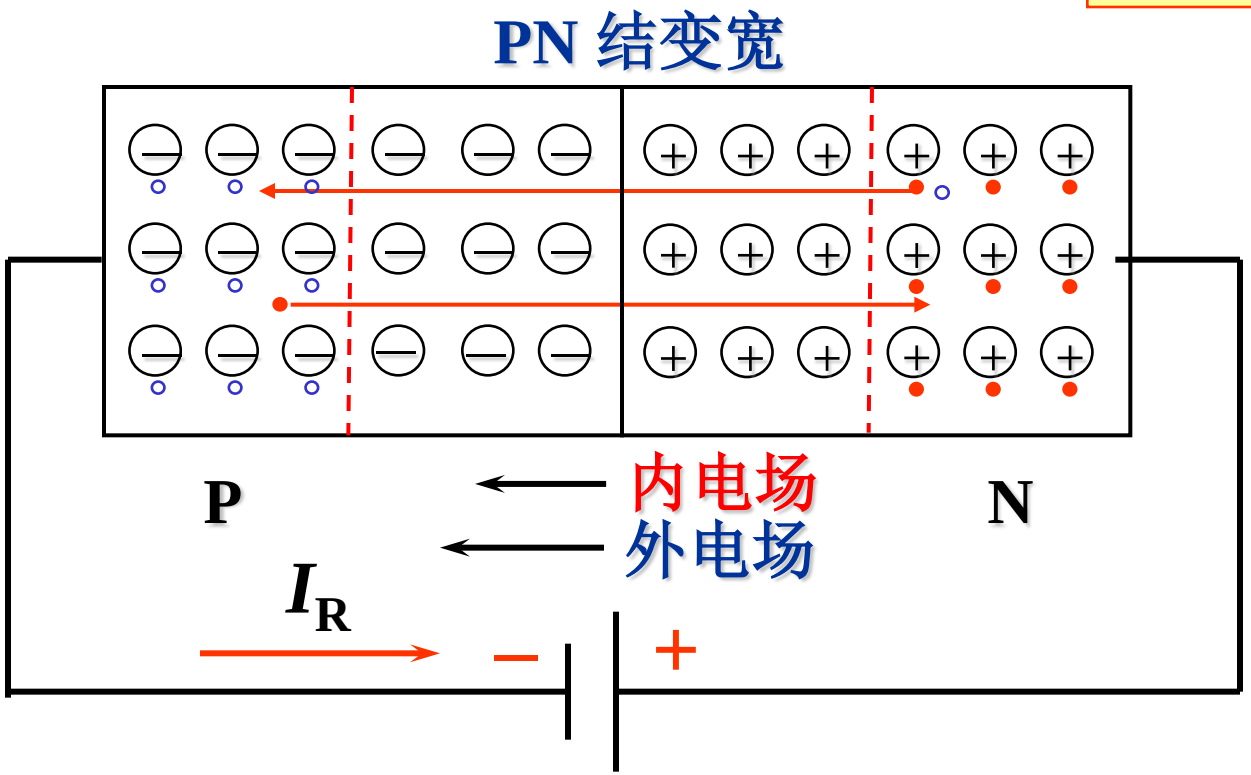
2. PN 结加反向电压 (反向偏置)

P接负、N接正



2. PN 结加反向电压 (反向偏置)

P接负、N接正



内电场被加强，少子的漂移加强，由于少子数量很少，形成很小的反向电流。

PN 结加反向电压时，PN结变宽，反向电流较小，反向电阻较大，PN结处于截止状态。

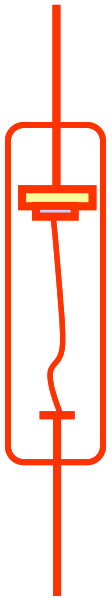
温度越高少子的数目越多，反向电流将随温度增加。

8.3 二极管

3.1 基本结构

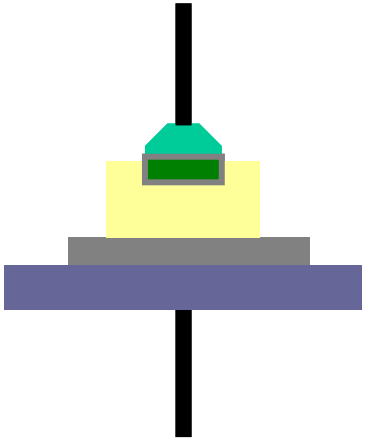
(a) 点接触型

结面积小、结电容小、正向电流小。用于检波和变频等高频电路。



(b)面接触型

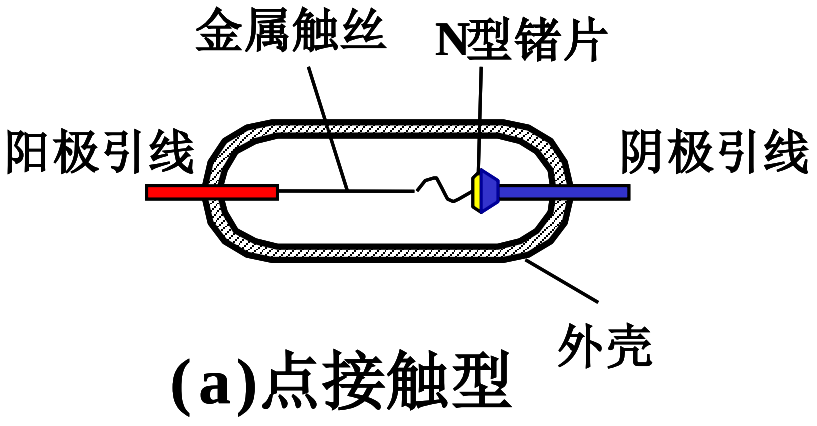
结面积大、正向电流大、结电容大，用于工频大电流整流电路。



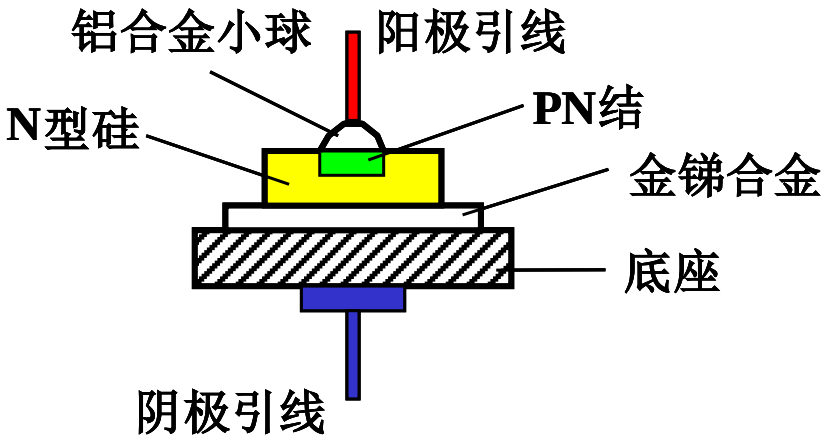
(c) 平面型

用于集成电路制作工艺中。PN结结面积可大可小，用于高频整流和开关电路中。

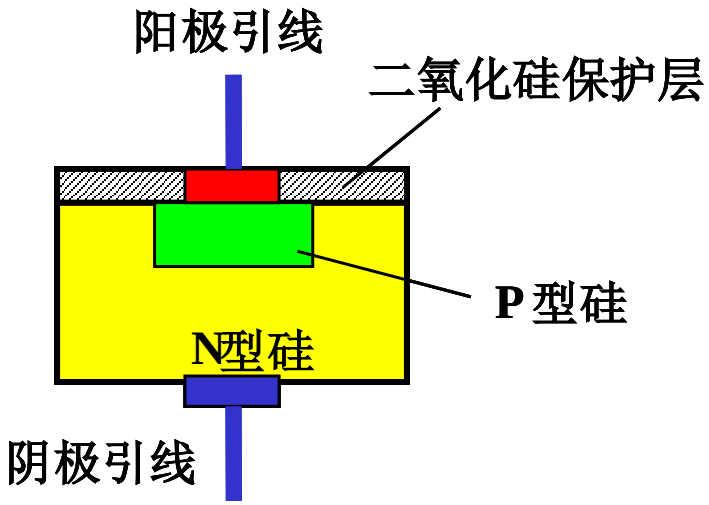
二极管的结构示意图



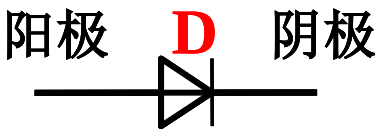
(a)点接触型



(b) 面接触型

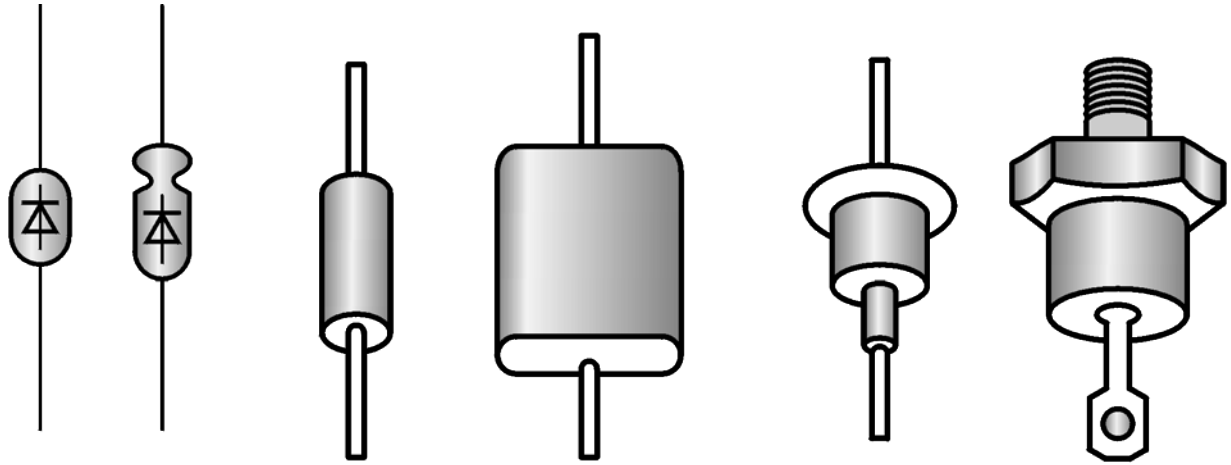


(c) 平面型



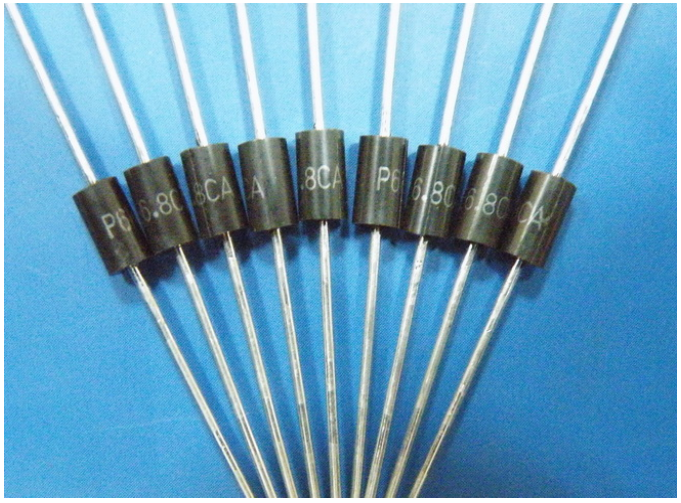
(d)符号

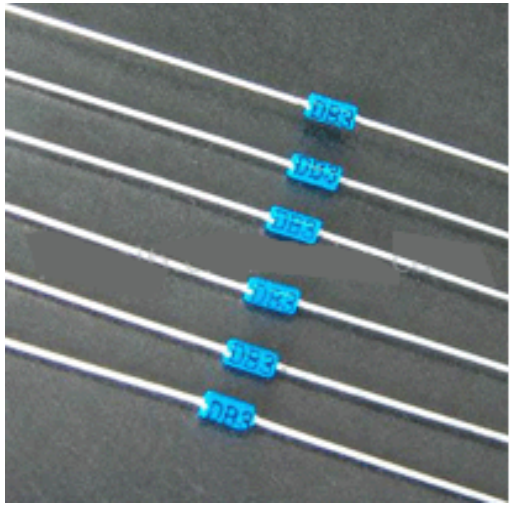
半导体二极管的结构和符号



常见二极管外形图

(a) 玻璃封装 (b) 塑料封装 (c) 金属封装中大功率二极管

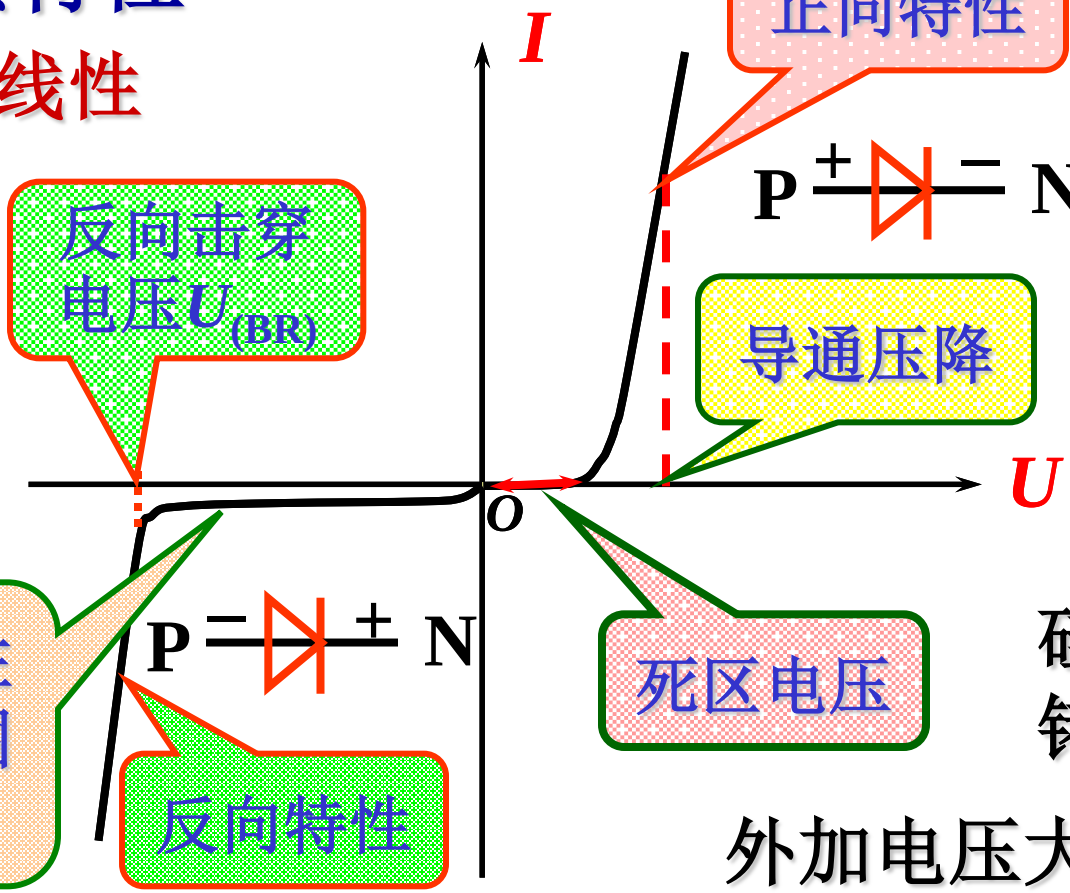




二极管

3.2 伏安特性

特点：非线性



外加电压大于死区电压二极管才能导通。

外加电压大于反向击穿电压二极管被击穿，失去单向导电性。

3.3 主要参数

1. 最大整流电流 I_{OM}

二极管长期使用时，允许流过二极管的最大正向平均电流。

2. 反向工作峰值电压U_{RWM}

是保证二极管不被击穿而给出的反向峰值电压，一般是二极管反向击穿电压U_{BR}的一半或三分之二。二极管击穿后单向导电性被破坏，甚至过热而烧坏。

3. 反向峰值电流I_{RM}

指二极管加最高反向工作电压时的反向电流。反向电流大，说明管子的单向导电性差，I_{RM}受温度的影响，温度越高反向电流越大。硅管的反向电流较小，锗管的反向电流较大，为硅管的几十到几百倍。

二极管的单向导电性

1. 二极管加正向电压(正向偏置，阳极接正、阴极接负)时，二极管处于正向导通状态，二极管正向电阻较小，正向电流较大。

2. 二极管加反向电压(反向偏置，阳极接负、阴极接正)时，二极管处于反向截止状态，二极管反向电阻较大，反向电流很小。

3. 外加电压大于反向击穿电压二极管被击穿，失去单向导电性。

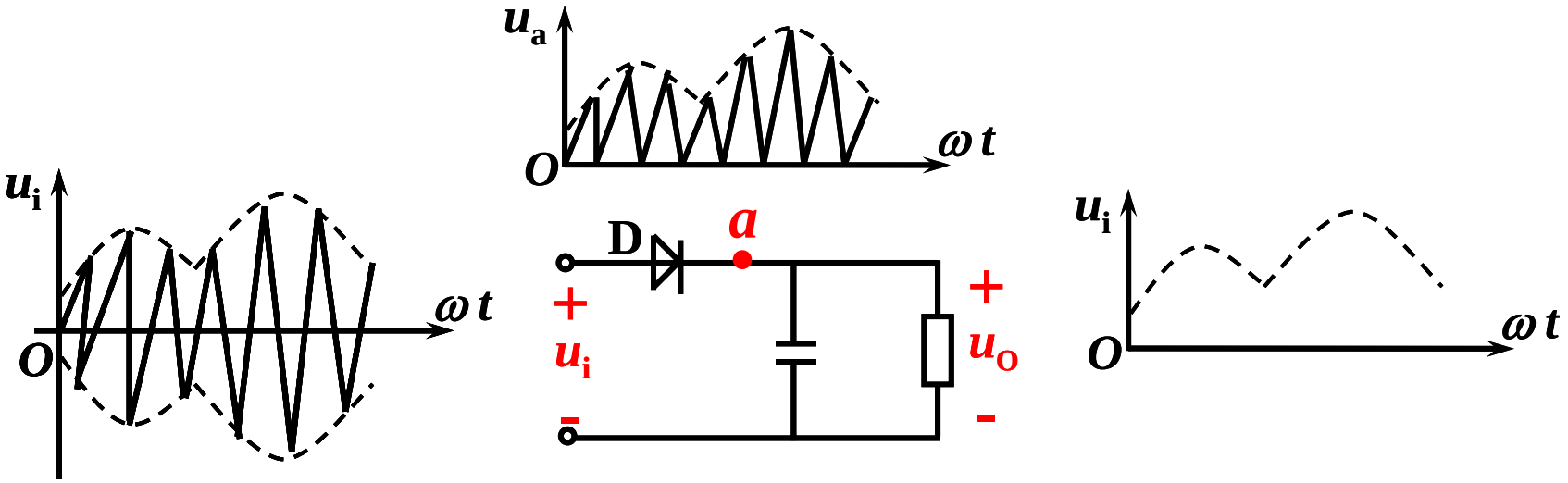
4. 二极管的反向电流受温度的影响，温度愈高反向电流愈大。

应用举例

1. 二极管检波电路

在电视、广播及通信中，为使图像、声音能远距离传送，需要将这一低频电信号驮载在高频信号上，这个过程叫调制。

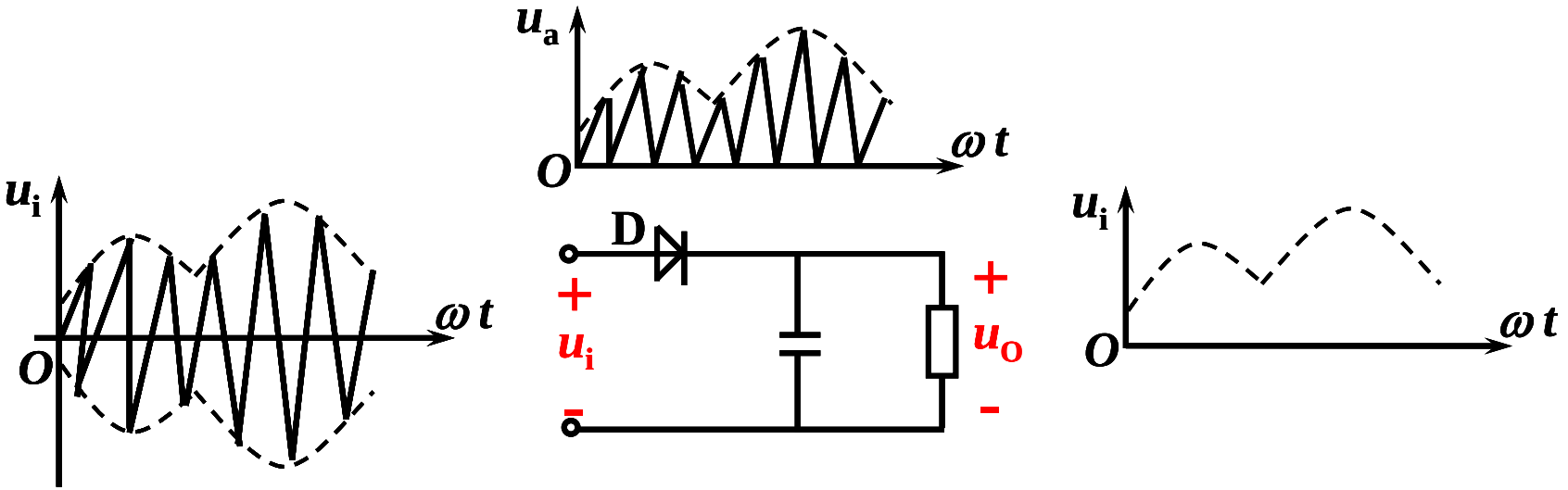
检波就是将低频信号从已调制信号(高频信号)中取出。电路及信号波形如图所示。



应用举例

1. 二极管检波电路

检波就是将低频信号从已调制信号(高频信号)中取出。电路及信号波形如图所示。



输入信号为已调制信号，由电视机、收音机接收后，由检波二极管 D 将已调制信号的负半周去掉，然后利用电容将高频信号滤去，留下低频信号，再经放大电路放大，送给负载显像管或扬声器，还原成图像或声音。

2. 二极管限幅电路

限幅是指限制电路的输出幅值。输入信号的波形经限幅后，只有其中一部分传到输出，其余部分则被限制而消失。

模拟电子技术中，常用限幅电路来减小和限制某些信号的幅值，以适应电路的不同要求，或作为保护措施。在数字电路中, 常用限幅电路来处理信号波形。

限幅电路是用具有非线性特性的器件来实现的，二极管可用来组成简单的限幅电路。限幅电路中的二极管一般都工作在大电流范围，所以可采用二极管的恒压模型来分析电路的工作原理。

二极管电路分析原则：

定性分析：判断二极管的工作状态 { 导通 / 截止

设二极管是理想的，

正向导通时二极管相当于短路，

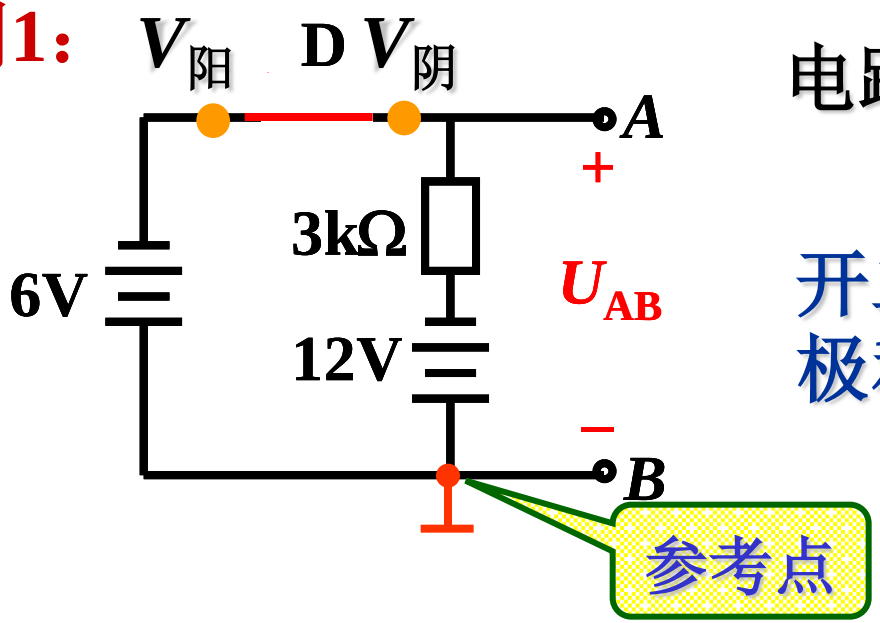
反向截止时二极管相当于断开。

分析方法：将二极管断开，分析二极管两端电位的高低或所加电压U_D的正负。

若 $V_{阳} > V_{阴}$ 或 U_D 为正(正向偏置)，二极管导通

若 $V_{阳} < V_{阴}$ 或 U_D 为负(反向偏置)，二极管截止

例1：



电路如图，求：U_{AB}

取 B 点作参考点，断开二极管，分析二极管阳极和阴极的电位。

$V_{阳} = -6\ V$　$V_{阴} = -12\ V$

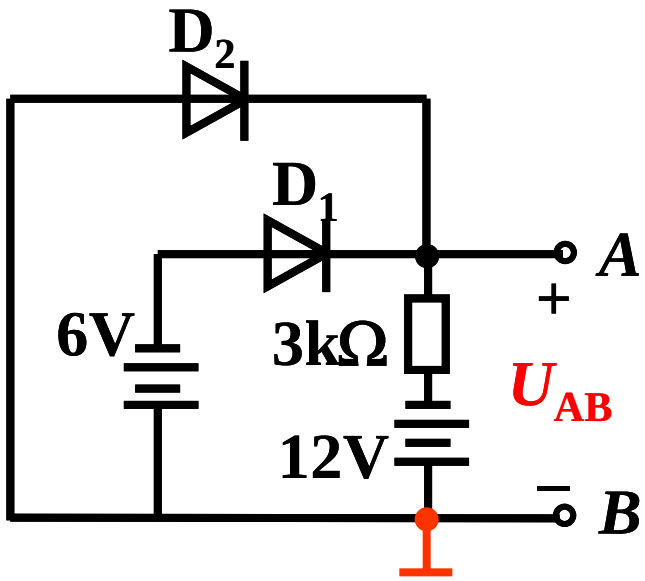
$V_{阳} > V_{阴}$ 二极管导通

若忽略管压降，二极管可看作短路，$U_{AB} = -6V$

否则，U_{AB}低于−6V一个管压降,为−6.3 V或−6.7V

在这里，二极管起钳位作用。

例2:



求：U_{AB}

两个二极管的阴极接在一起取 B 点作参考点，断开二极管，分析二极管阳极和阴极的电位。

$V_{1阳} = -6\ V$，$V_{2阳} = 0\ V$，$V_{1阴} = V_{2阴} = -12\ V$

$U_{D1} = 6V$，$U_{D2} = 12V$

∵ $U_{D2} > U_{D1}$ ∴ D_2 优先导通， D_1截止。

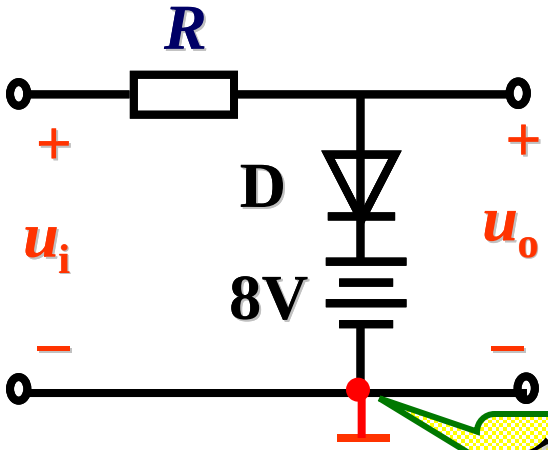
若忽略管压降，二极管可看作短路，$U_{AB} = 0\ V$

流过 D_2 的电流为 $I_{D2} = \dfrac{12}{3} = 4mA$

D_2 起钳位作用，D_1起隔离作用。

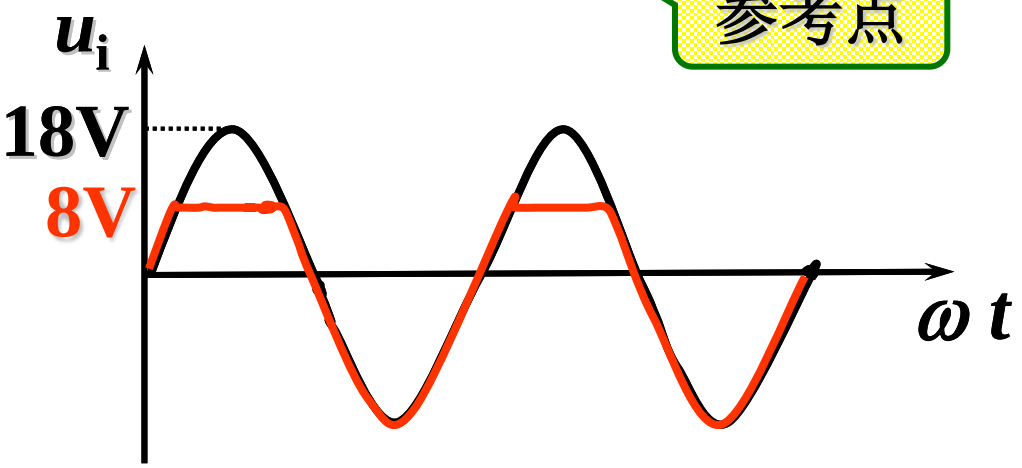
D_1承受反向电压为$-6\ V$

例3：



已知：$u_i = 18\sin\omega t$ V

二极管是理想的，试画出 u_o 波形。



二极管的用途：

整流、检波、限幅、钳位、开关、元件保护、温度补偿等。

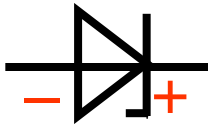
二极管阴极电位为 8 V

$u_i > 8$V，二极管导通，可看作短路，$u_o = 8$V

$u_i < 8$V，二极管截止，可看作开路，$u_o = u_i$

稳压二极管

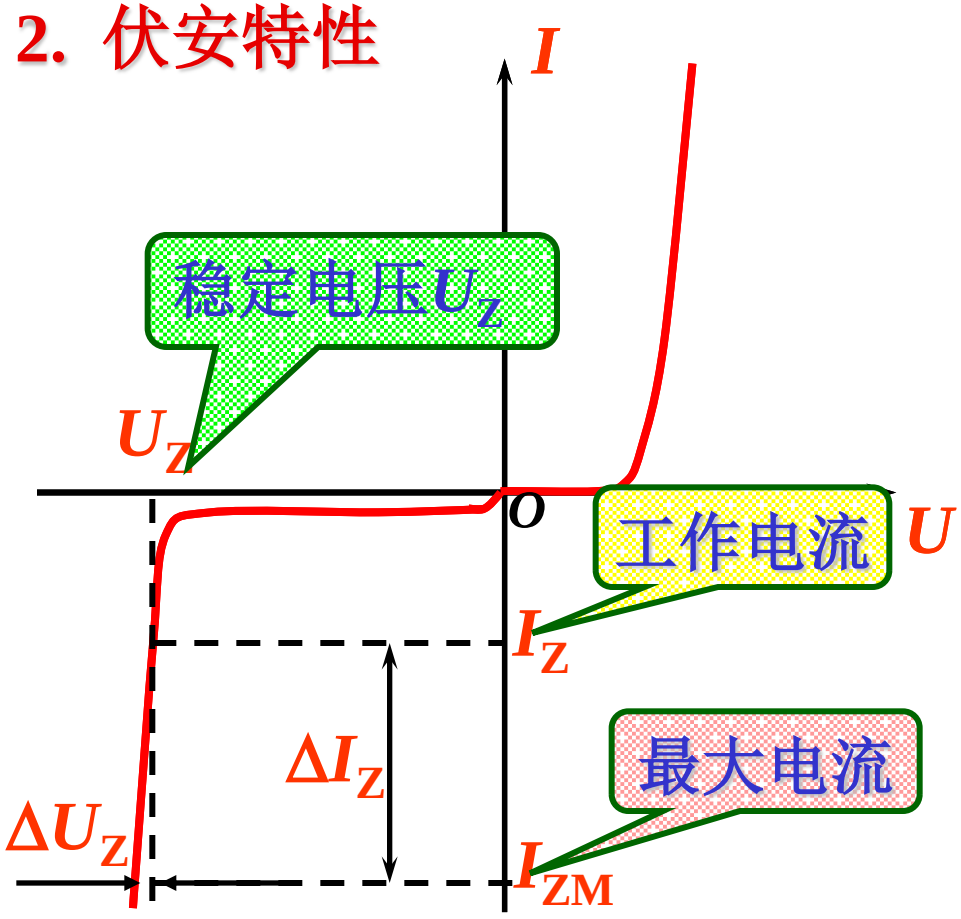
1. 符号和外形图



稳压管正常工作时加反向电压

稳压管反向击穿后，电流变化很大，但其两端电压变化很小，利用此特性，稳压管在电路中可起稳压作用。

2. 伏安特性

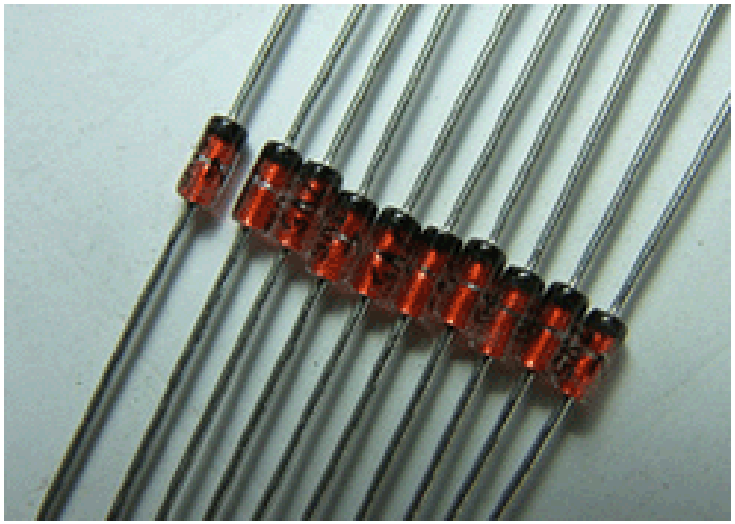


使用时要加限流电阻









稳压二极管

3. 主要参数

(1) 稳定电压U_Z

稳压管正常工作 (反向击穿) 时管子两端的电压。

(2) 电压温度系数α_u

环境温度每变化1°C引起稳压值变化的百分数。

(3) 动态电阻 $r_Z = \dfrac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$

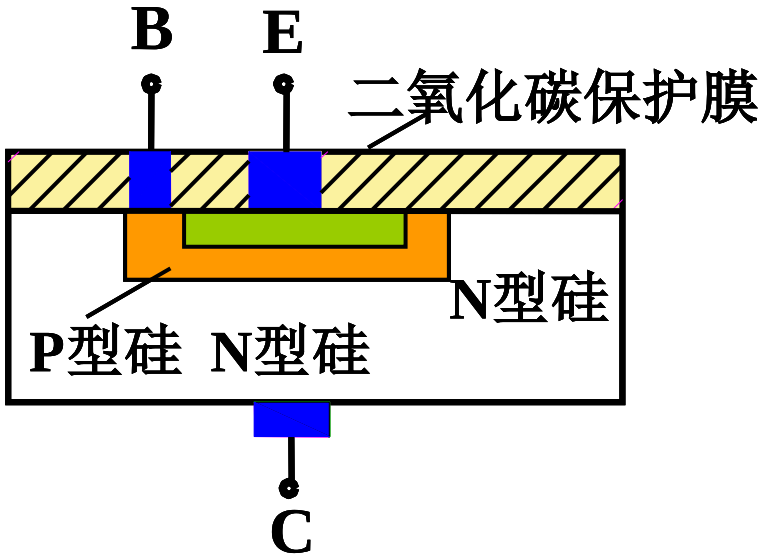
r_Z愈小，曲线愈陡，稳压性能愈好。

(4) 稳定电流 I_Z、最大稳定电流 I_{ZM}

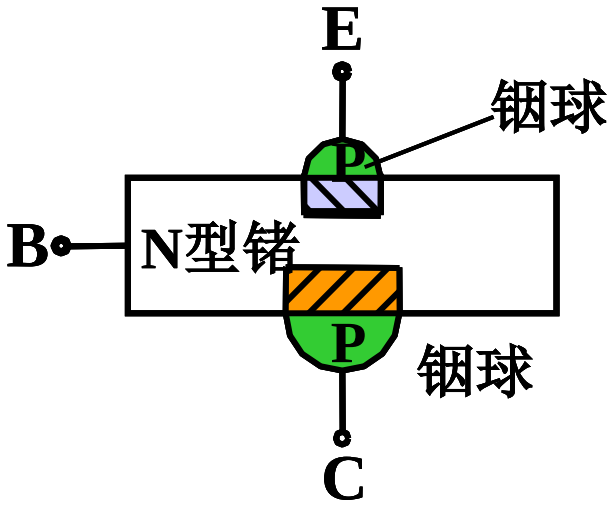
(5) 最大允许耗散功率 $P_{ZM} = U_Z I_{ZM}$

8.4 晶体管

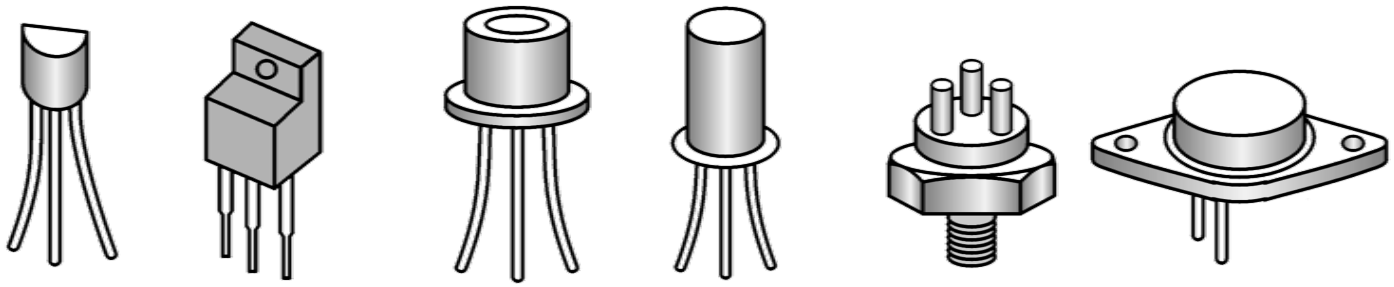
4.1 基本结构



(a) 平面型



(b) 合金型

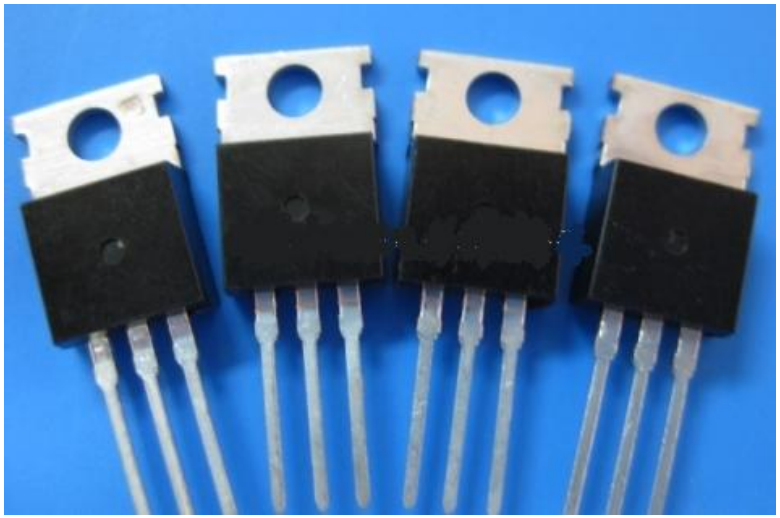


常见晶体管的外形图

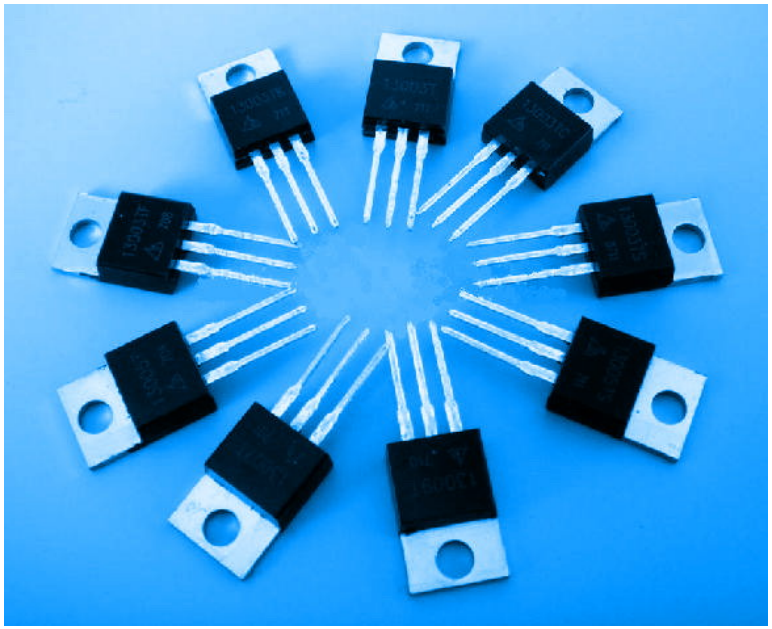


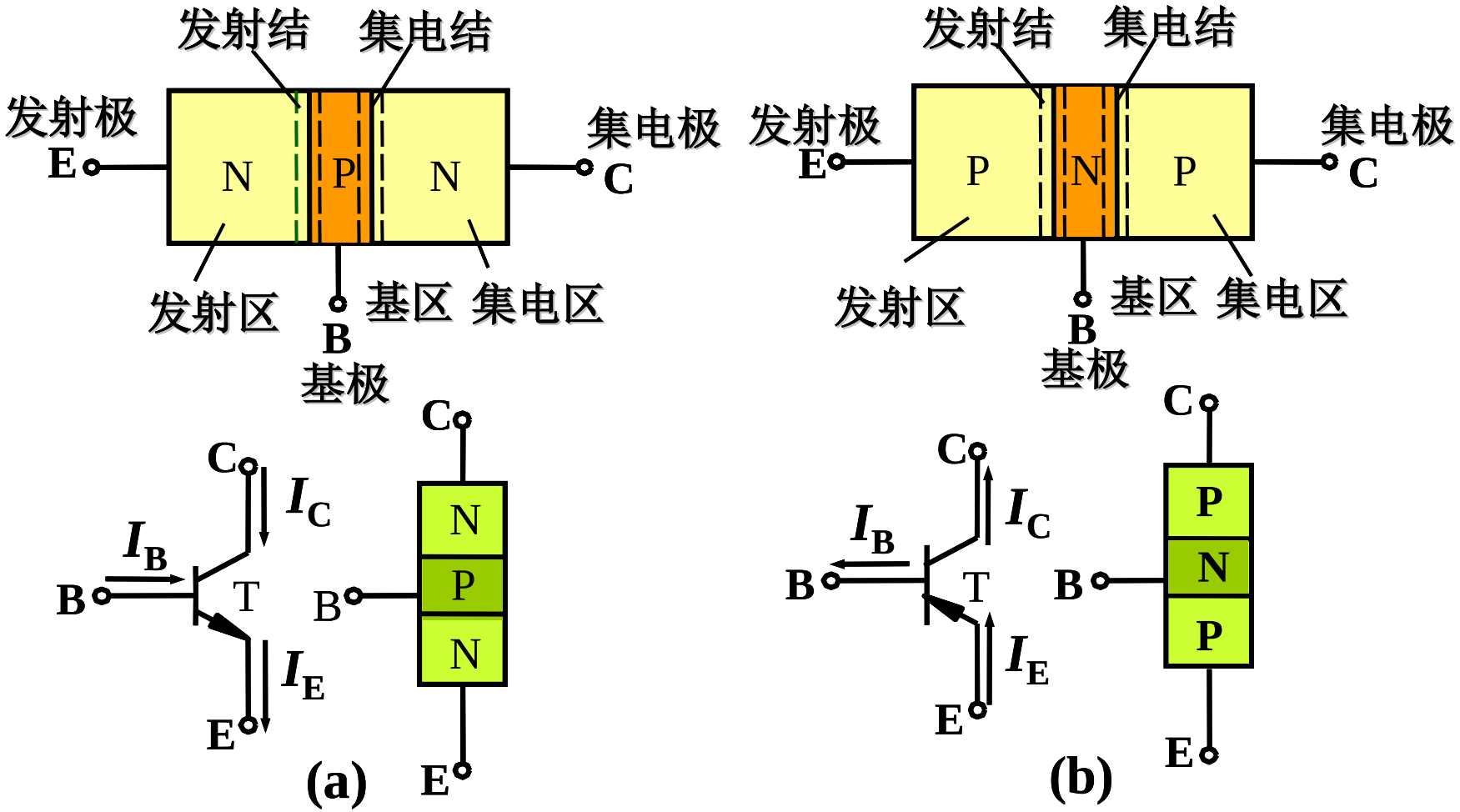






双极型晶体管

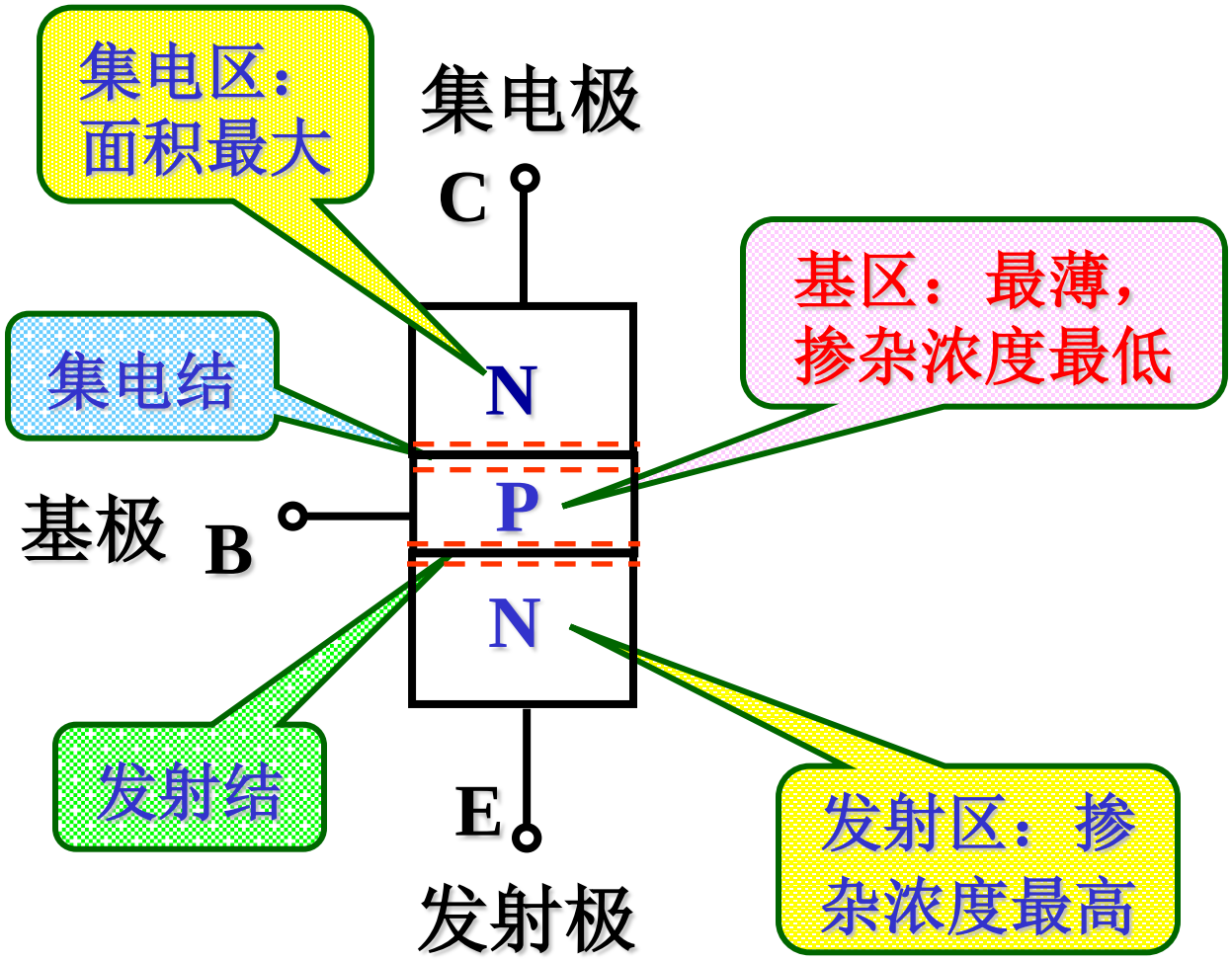




晶体管的结构示意图和表示符号

(a)NPN型晶体管； (b)PNP型晶体管

结构特点：



4.2 电流分配和放大原理

1. 三极管放大的外部条件

发射结正偏、集电结反偏

从电位的角度看：

NPN

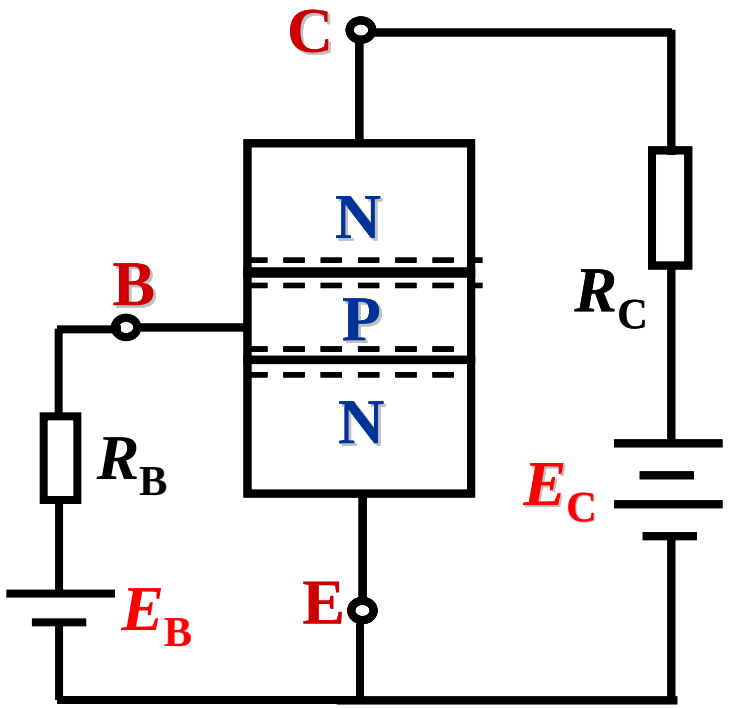
发射结正偏 $V_B > V_E$

集电结反偏 $V_C > V_B$

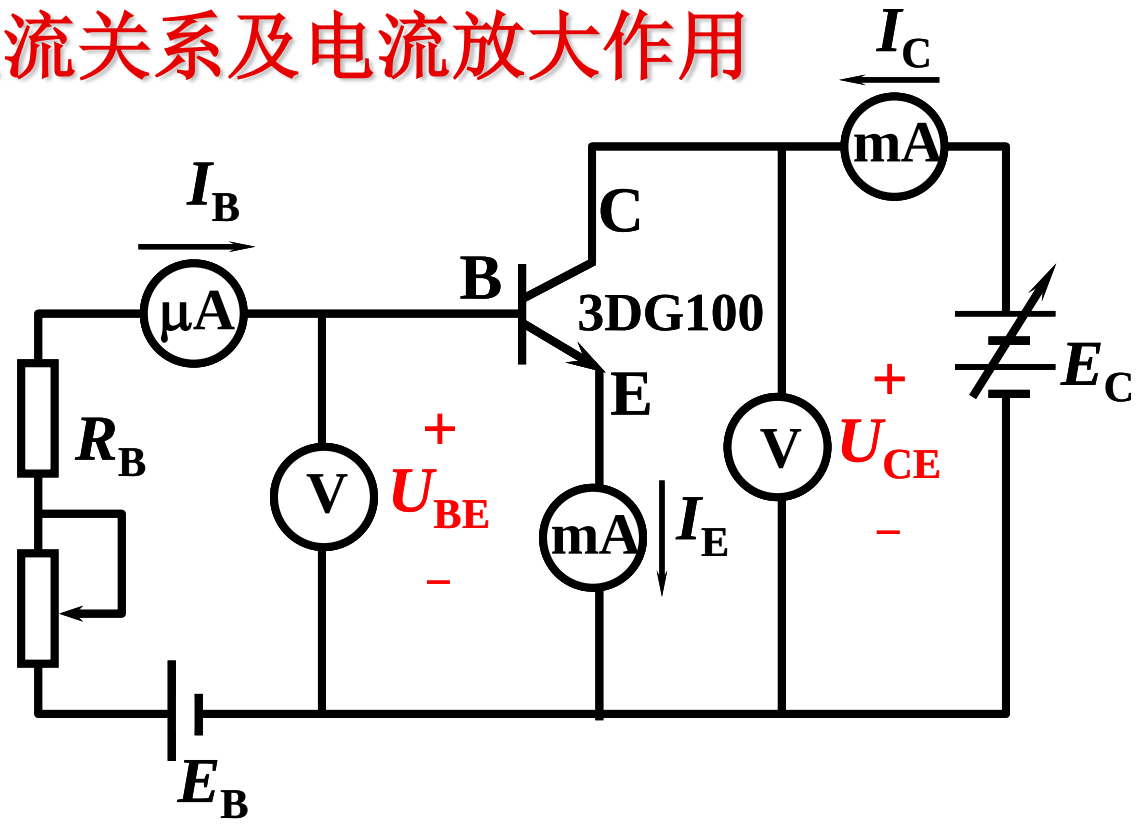
PNP

发射结正偏 $V_B < V_E$

集电结反偏 $V_C < V_B$



2. 各电极电流关系及电流放大作用



晶体管电流放大的实验电路

设 $E_C = 6$ V，改变可变电阻 R_B，则基极电流 I_B、集电极电流 I_C 和发射极电流 I_E 都发生变化，测量结果如下表：

晶体管电流测量数据

I_B(mA)	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
I_C(mA)	<0.001	0.70	1.50	2.30	3.10	3.95
I_E(mA)	<0.001	0.72	1.54	2.36	3.18	4.05

结论：

(1) $I_E = I_B + I_C$ 符合基尔霍夫定律

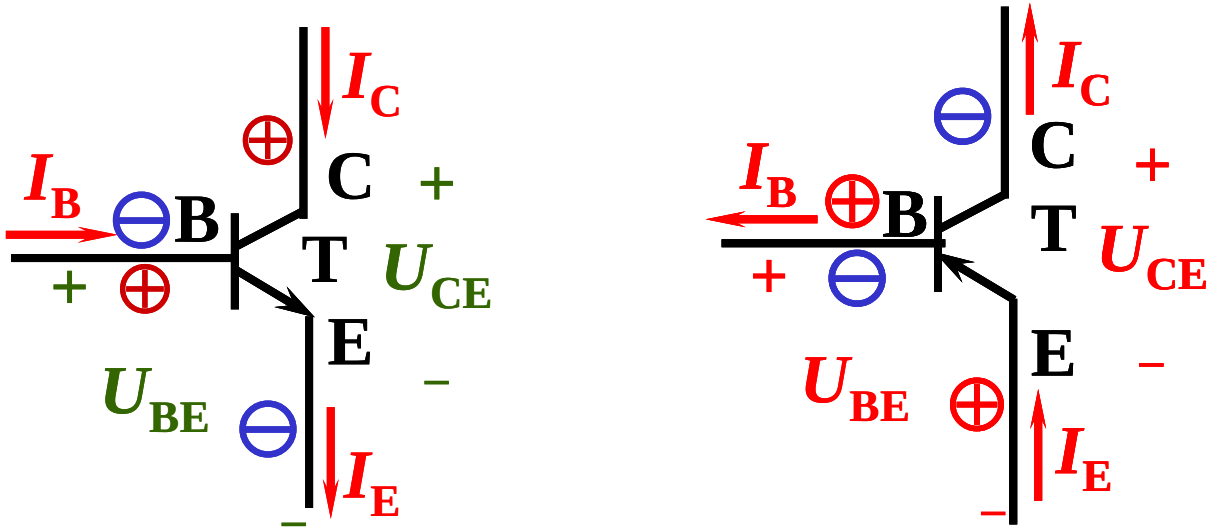
(2) $I_C >> I_B$， $I_C \approx I_E$

(3) $\Delta I_C >> \Delta I_B$

把基极电流的微小变化能够引起集电极电流较大变化的特性称为晶体管的电流放大作用。

实质：用一个微小电流的变化去控制一个较大电流的变化，是CCCS器件。

(4) 要使晶体管起放大作用，发射结必须正向偏置，集电结必须反向偏置。



电流方向和发射结与集电结的极性

(a) NPN 型晶体管；　(b) PNP 型晶体管

3. 三极管内部载流子的运动规律

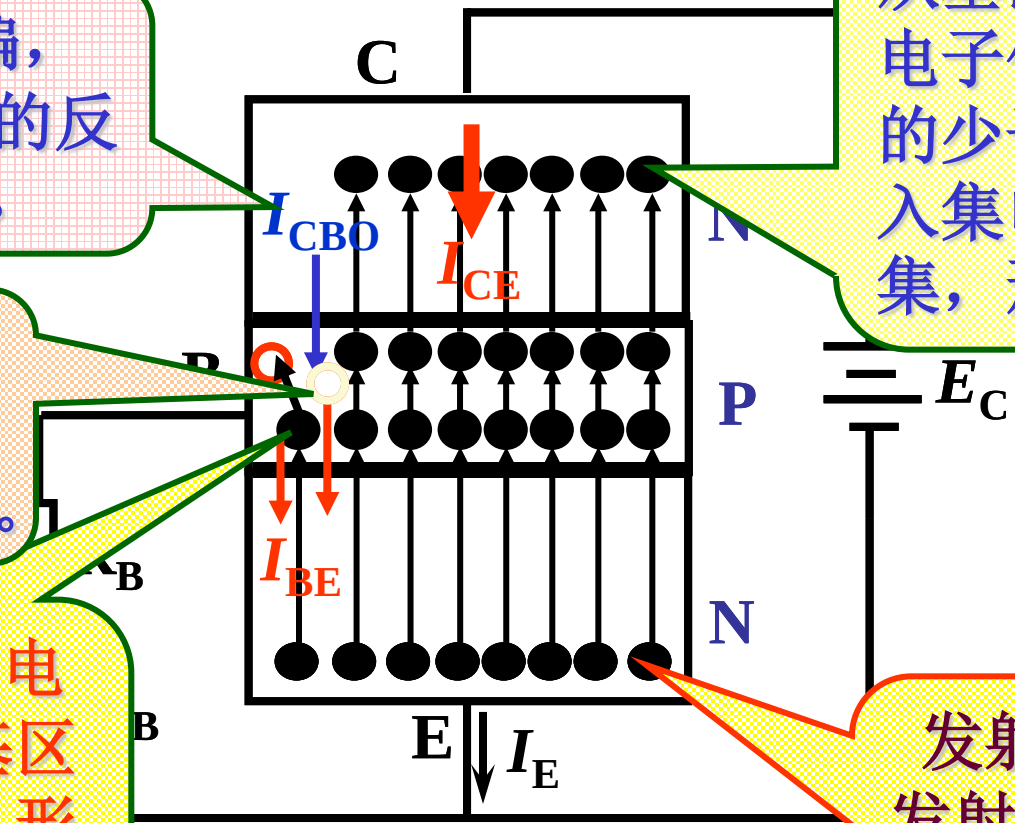
集电结反偏，有少子形成的反向电流I_{CBO}。

从基区扩散来的电子作为集电结的少子，漂移进入集电结而被收集，形成I_{CE}。

基区空穴向发射区的扩散可忽略。

进入P 区的电子少部分与基区的空穴复合，形成电流I_{BE}，多数扩散到集电结。

发射结正偏，发射区电子不断向基区扩散，形成发射极电流I_E。



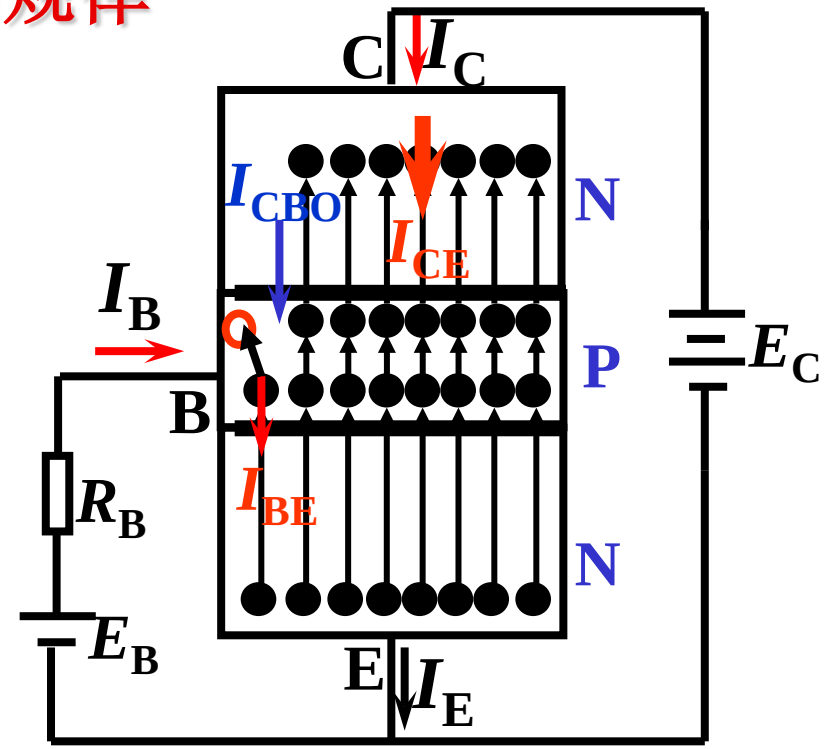
3. 三极管内部载流子的运动规律

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

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

I_{CE}与I_{BE}之比称为共发射极电流放大倍数

$$\bar{\beta} = \frac{I_{CE}}{I_{BE}} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}} \approx \frac{I_C}{I_B}$$



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

若$I_B = 0$, 则$I_C \approx I_{CE0}$ 集—射极穿透电流, 温度↑→I_{CEO}↑

忽略I_{CEO}，有 $I_C \approx \bar{\beta} I_B$ (常用公式)

4.3 特性曲线

即晶体管各电极电压与电流的关系曲线，是晶体管内部载流子运动的外部表现，反映了晶体管的性能, 是分析放大电路的依据。

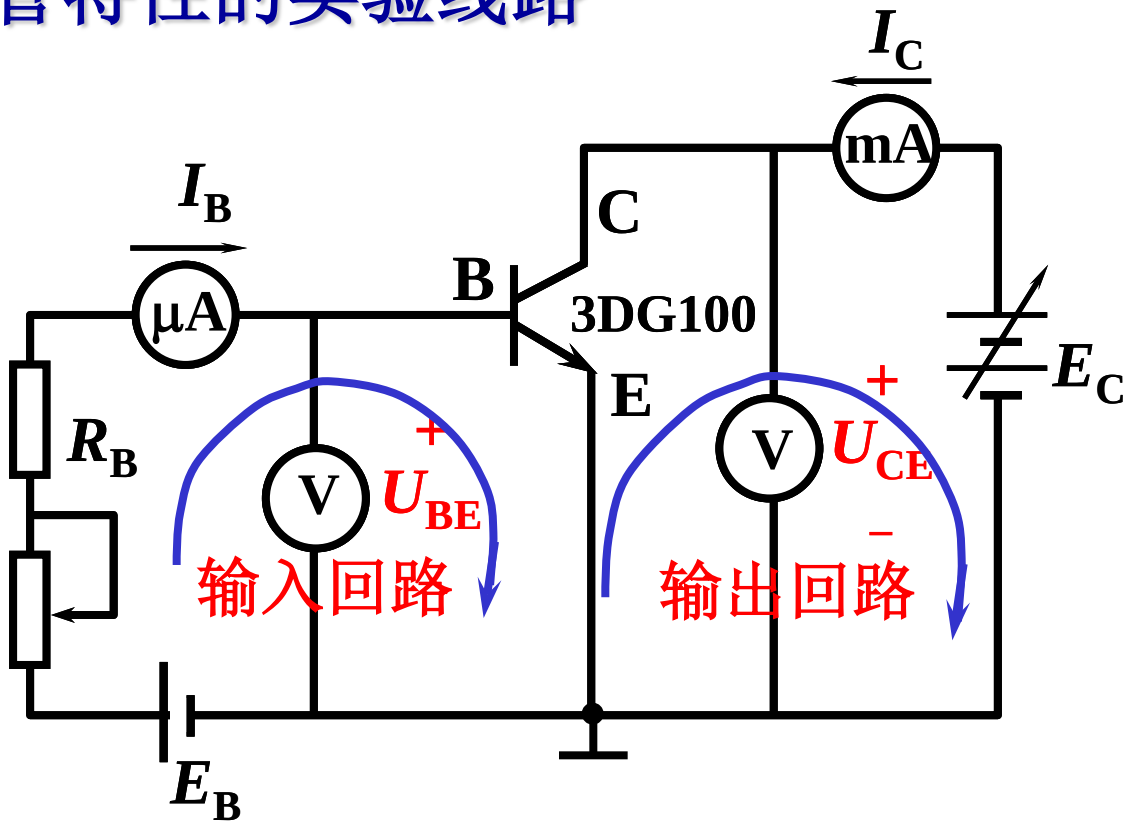
研究特性曲线目的：

(1) 直观地分析管子的工作状态

(2) 合理地选择偏置电路的参数, 设计性能良好的电路

重点讨论应用最广泛的共发射极接法的特性曲线

测量晶体管特性的实验线路

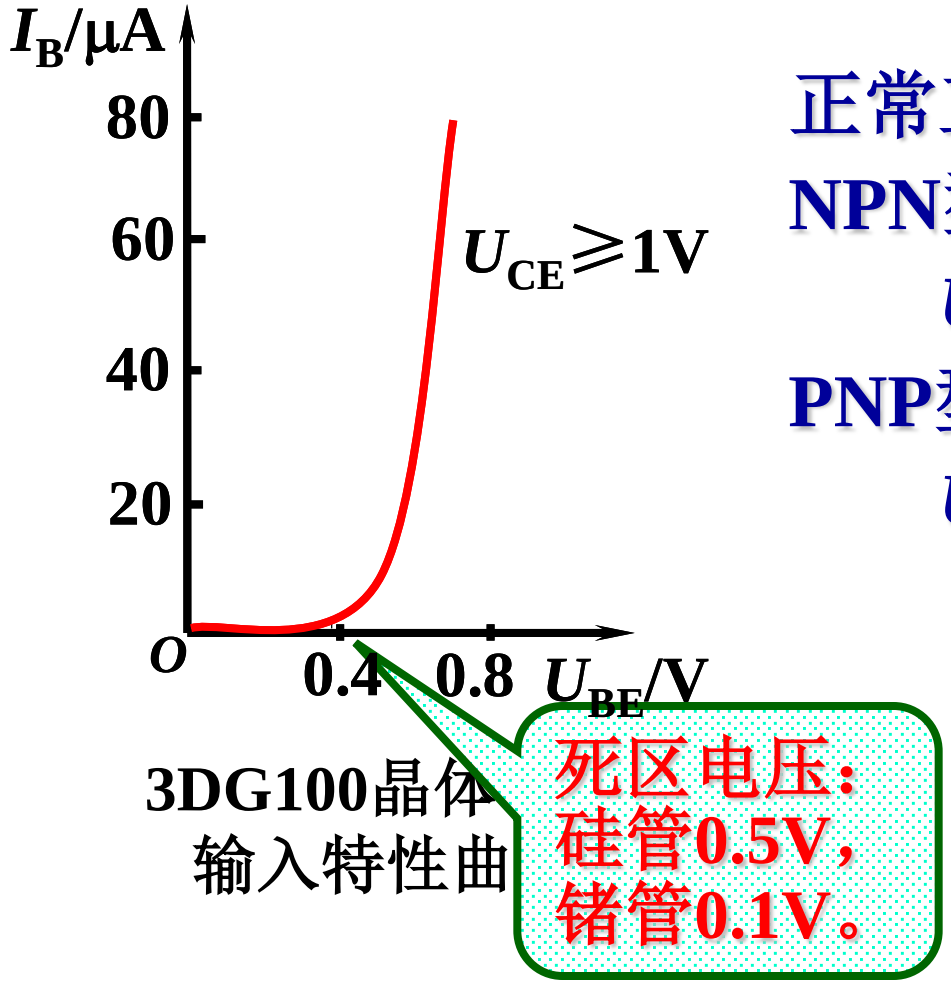


共发射极电路

发射极是输入回路、输出回路的公共端

1. 输入特性 $I_B = f(U_{BE})\big|_{U_{CE}=常数}$

特点:非线性



正常工作时发射结电压:

NPN型硅管

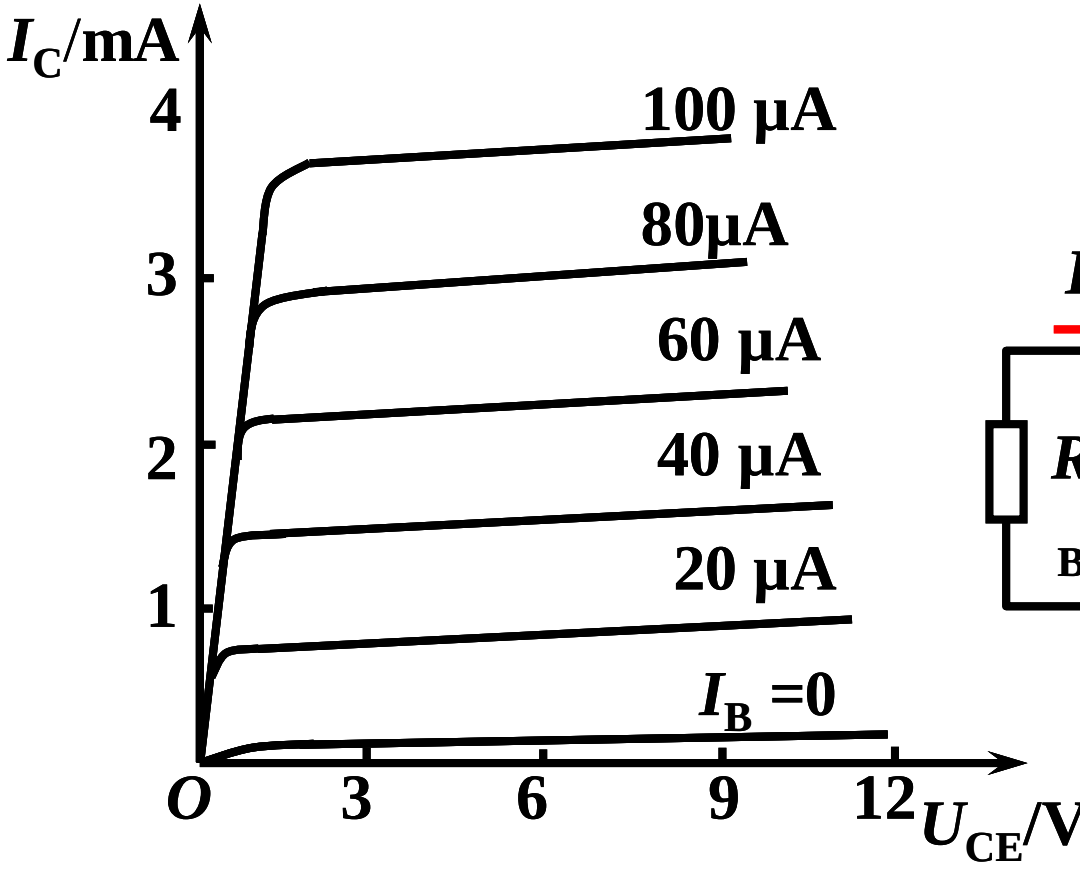
$U_{BE} \approx 0.6 \sim 0.7V$

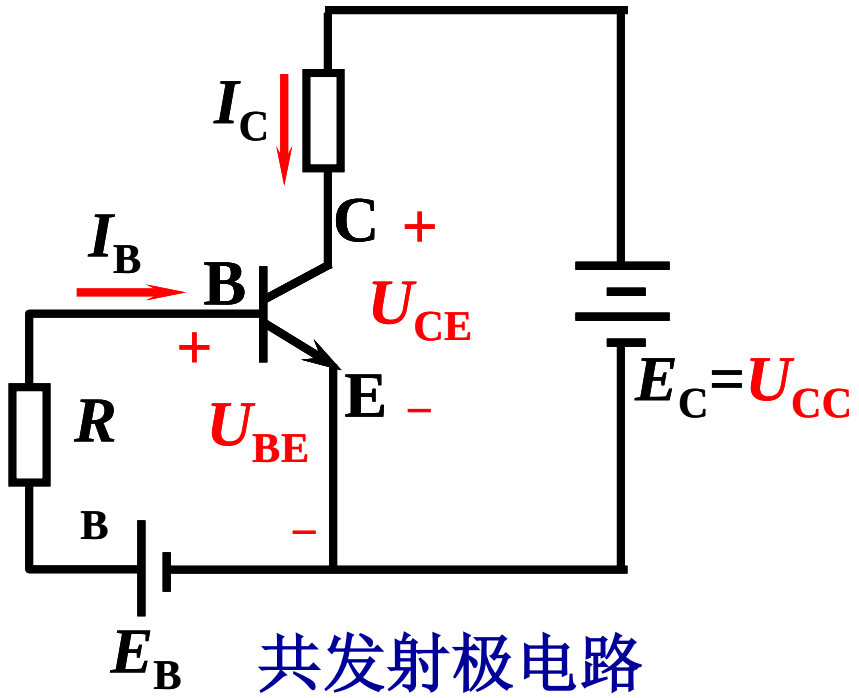
PNP型锗管

$U_{BE} \approx -0.2 \sim -0.3V$

2. 输出特性 $I_C = f(U_{CE})\big|_{I_B=常数}$

在不同的 I_B 下，可得出不同的曲线，所以晶体管的输出特性曲线是一组曲线。

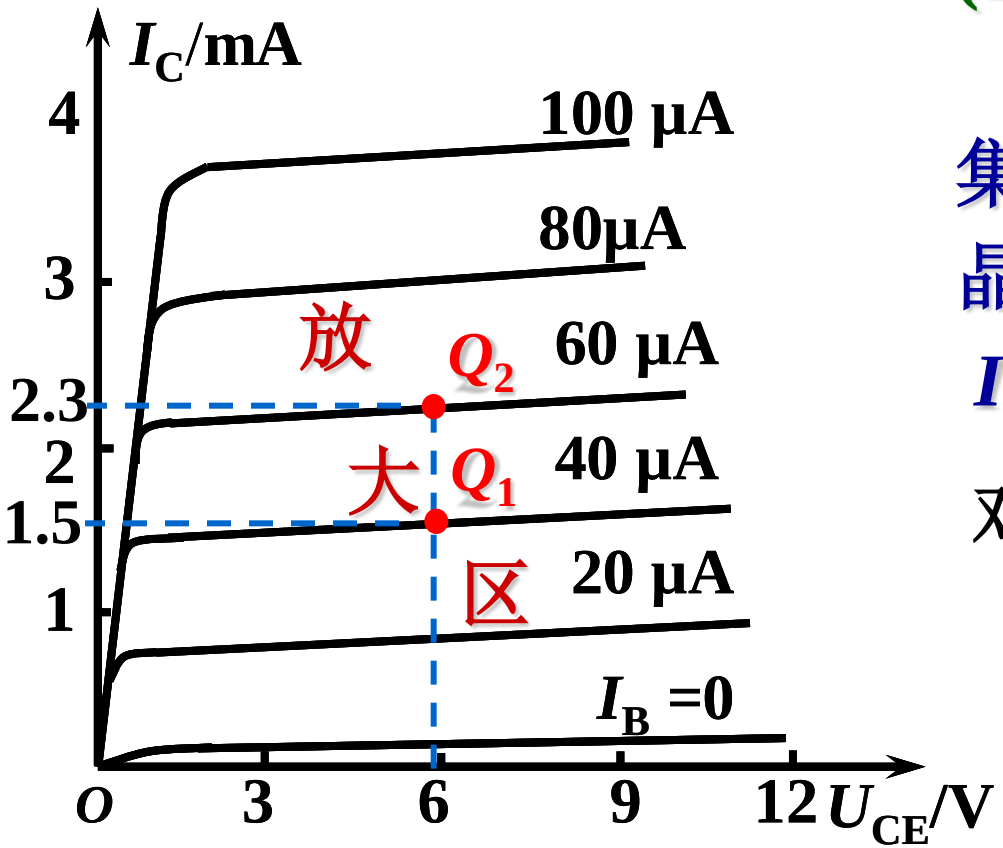




3DG100晶体管的输出特性曲线

2. 输出特性 $I_C = f(U_{CE})\big|_{I_B=常数}$

晶体管有三种工作状态，因而输出特性曲线分为三个工作区



3DG100晶体管的输出特性曲线

(1) 放大区

发射结处于正向偏置、集电结处于反向偏置，晶体管工作于放大状态。

$I_C = \beta I_B$,具有恒流特性。

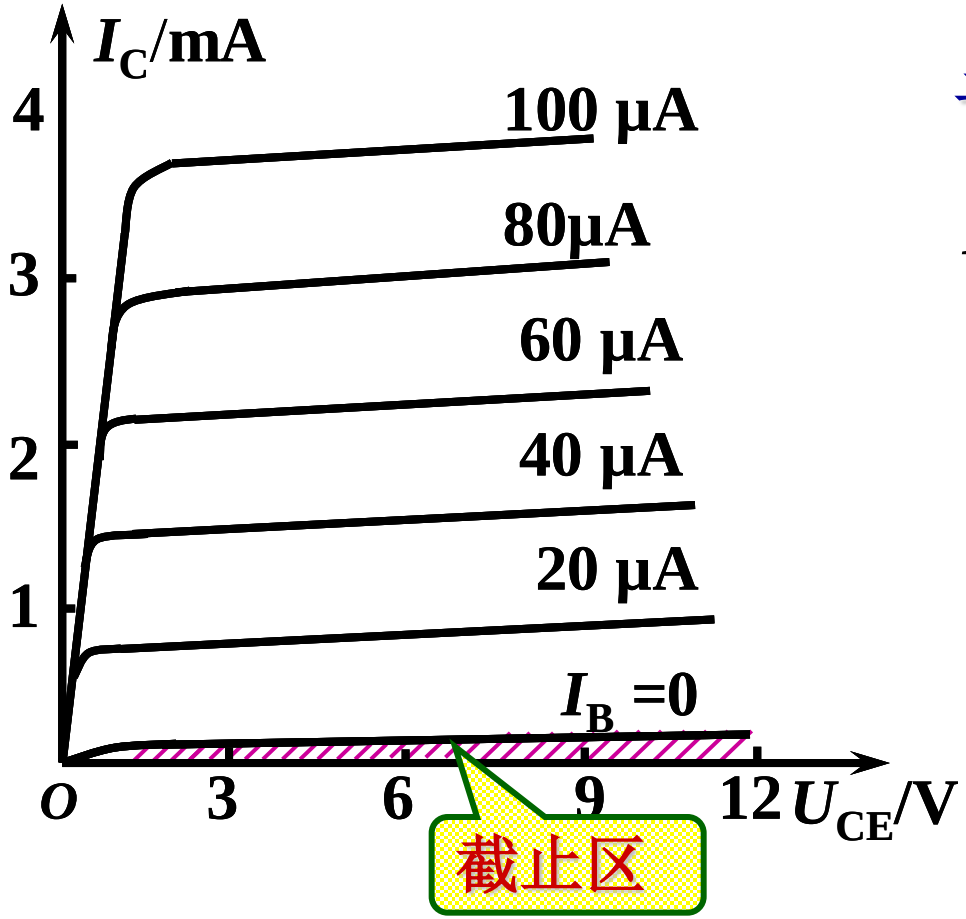
对 NPN 型管：

U_{BE} 约为 0.7V左右，

$U_{CE} > U_{BE}$。

(2) 截止区

$I_B = 0$ 的曲线以下的区域称为截止区。



发射结和集电结均处于反向偏置。

$I_B = 0$ 时, $I_C = I_{CEO}$ (很小)

对于硅管, $I_{CEO} < 1\mu A$

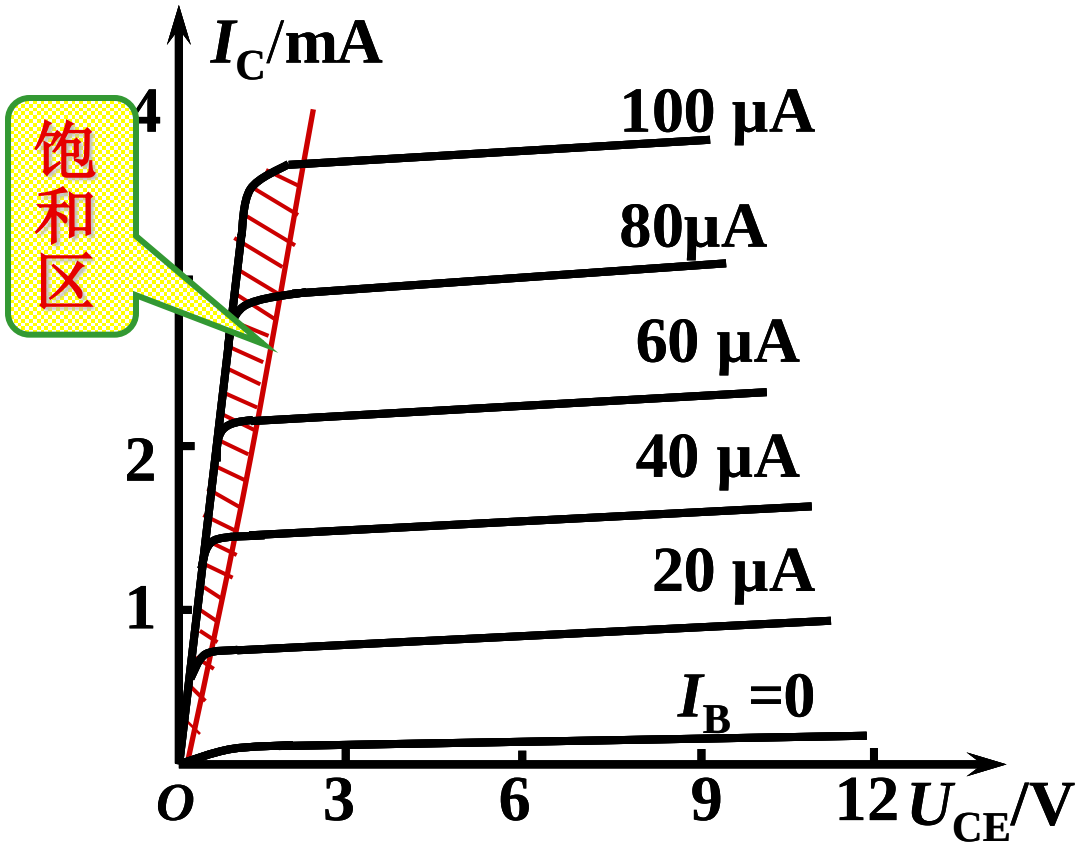
对于锗管, I_{CEO} 约为几十1μA~几百μA

若忽略I_{CEO}:

$I_C \approx 0, U_{CE} \approx U_{CC}$

(3) 饱和区

发射结和集电结均处于正向偏置，晶体管工作于饱和状态。



在饱和区，$\beta I_B \geq I_C$，

深度饱和时，

硅管$U_{CES} \approx 0.3V$，

锗管$U_{CES} \approx 0.1V$。

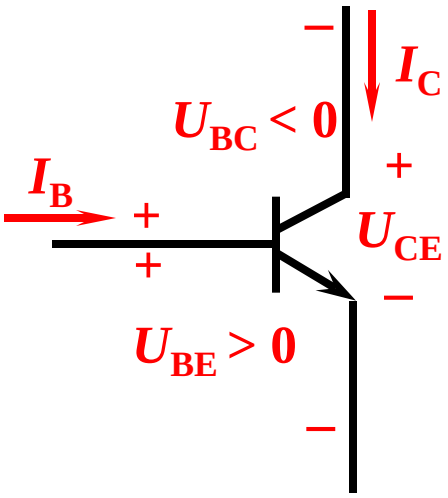
$I_C \approx U_{CC}/R_C$。

在模拟放大电路中，晶体管工作在放大状态。在数字电路中，晶体管工作在截止或饱和状态。

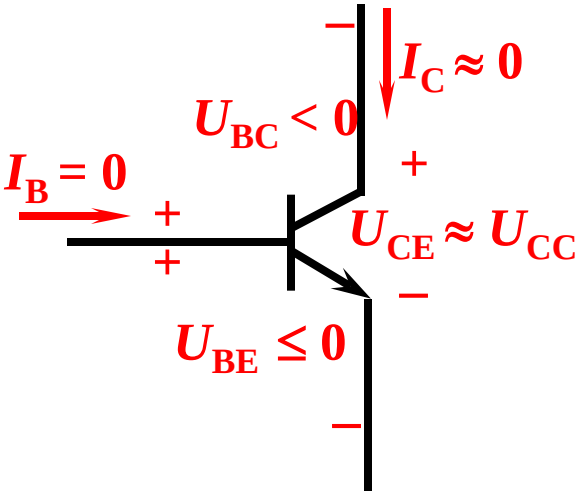
跳转

当晶体管饱和时，$U_{CE} \approx 0$，发射极与集电极之间如同一个开关的接通，其间电阻很小；当晶体管截止时，$I_C \approx 0$，发射极与集电极之间如同一个开关的断开，其间电阻很大，可见，晶体管除了有放大作用外，还有开关作用。

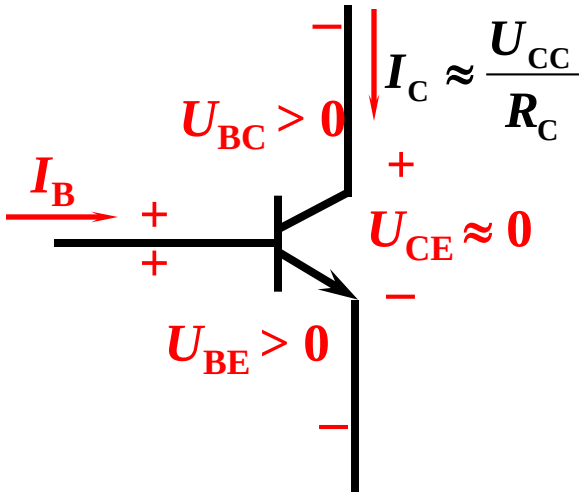
晶体管三种工作状态的电压和电流



(a)放大



(b)截止



(c)饱和

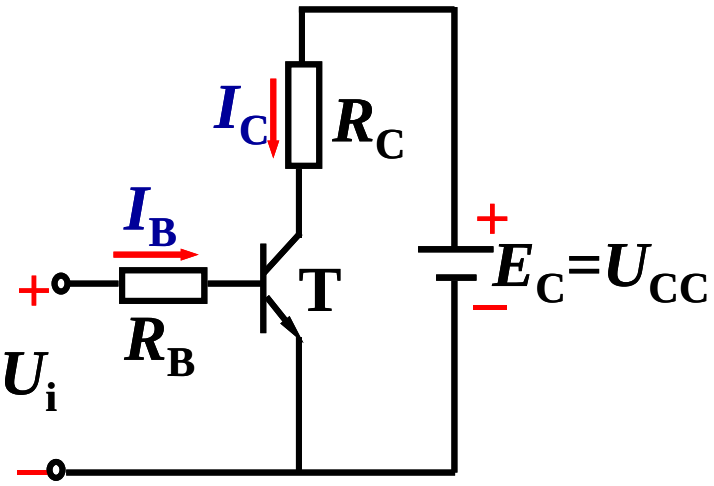
晶体管结电压的典型值

管　型	工　作　状　态				
	饱和		放大	截 止	
	U_{BE}/V	U_{CE}/V	U_{BE}/V	U_{BE}/V	
				开始截止	可靠截止
硅管(NPN)	0.7	0.3	0.6 ~ 0.7	0.5	≤0
锗管(PNP)	–0.3	–0.1	–0.2 ~ –0.3	–0.1	0.1

例1: 在下图电路中，$U_{CC}=6\text{V}$，$R_C=3\text{k}\Omega$，$R_C=10\text{k}\Omega$，$\beta=25$，当输入电压 U_i 分别为 3V，1V和 –1V时，试问晶体管处于何种工作状态？

解: 晶体管饱和时的集电极电流近似为

$$I_C \approx \frac{U_{CC}}{R_C}=\frac{6}{3\times10^3}\text{A}=2\,\text{mA}$$



晶体管刚饱和时的基极电流为

$$I'_B \approx \frac{I_C}{\beta}=\frac{2}{25}\text{mA}=0.08\,\text{mA}$$

(1) 当$U_i=3\text{V}$时，

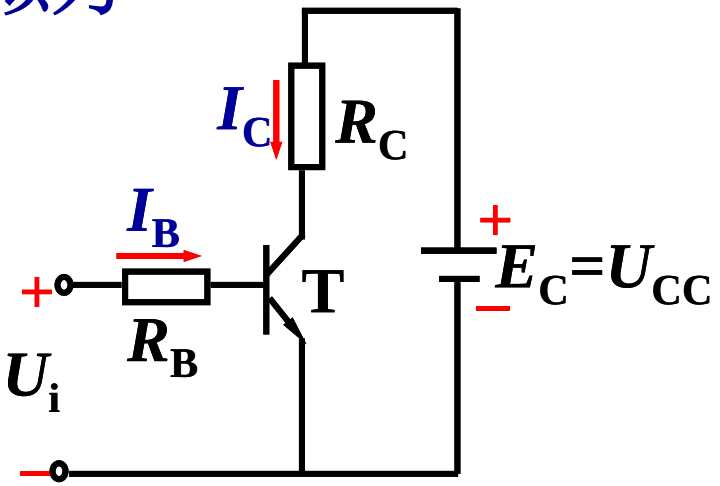
$$I_B=\frac{U_i-U_{BE}}{R_B}=\frac{3-0.7}{10\times10^3}\text{A}=0.23\,\text{mA}>I'_B$$

晶体管已处于深度饱和状态。

例1: 在下图电路中，$U_{CC}=6\text{V}$，$R_C=3\text{k}\Omega$，$R_C=10\text{k}\Omega$，$\beta=25$，当输入电压 U_i 分别为 3V，1V和 –1V时，试问晶体管处于何种工作状态？

解: 晶体管饱和时的集电极电流近似为

$$I_C \approx \frac{U_{CC}}{R_C}=\frac{6}{3\times10^3}\text{A}=2\,\text{mA}$$



晶体管刚饱和时的基极电流为

$$I'_B \approx \frac{I_C}{\beta}=\frac{2}{25}\text{mA}=0.08\,\text{mA}$$

(2) 当$U_i=1\text{V}$时，

$$I_B=\frac{U_i-U_{BE}}{R_B}=\frac{1-0.7}{10\times10^3}\text{A}=0.03\,\text{mA}<I'_B$$

晶体管处于放大状态。

(3) 当$U_i=-1\text{V}$时，晶体管可靠截止。

4.4 主要参数

表示晶体管特性的数据称为晶体管的参数，晶体管的参数也是设计电路、选用晶体管的依据。

1. 电流放大系数 $\bar{\beta}$，β

当晶体管接成发射极电路时，

直流电流放大系数 $\bar{\beta} = \dfrac{I_C}{I_B}$

交流电流放大系数 $\beta = \dfrac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$

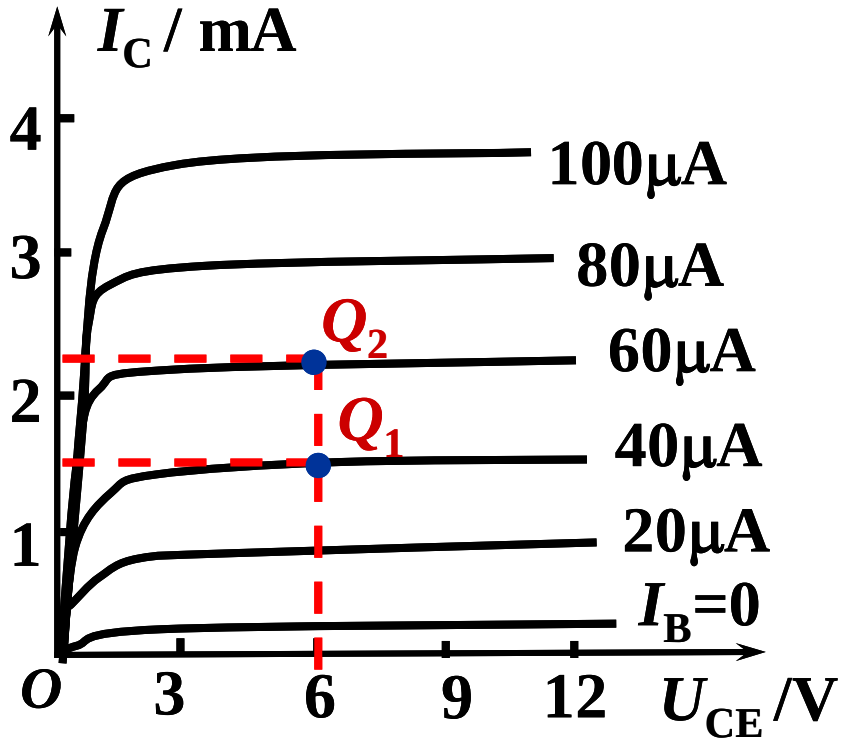
注意：

$\bar{\beta}$和β的含义不同，但在特性曲线近于平行等距并且I_{CE0}较小的情况下，两者数值接近。

由于晶体管的输出特性曲线是非线性的，只有在特性曲线的近于水平部分，I_C随I_B成正比变化，β值才可认为是基本恒定的。

常用晶体管的β值在20 ~ 200之间。

例： 在U_{CE}= 6 V时，在 Q_1 点 I_B = 40μA, I_C = 1.5mA;
在 Q_2 点 I_B = 60 μA, I_C = 2.3mA。



在 Q_1 点，有

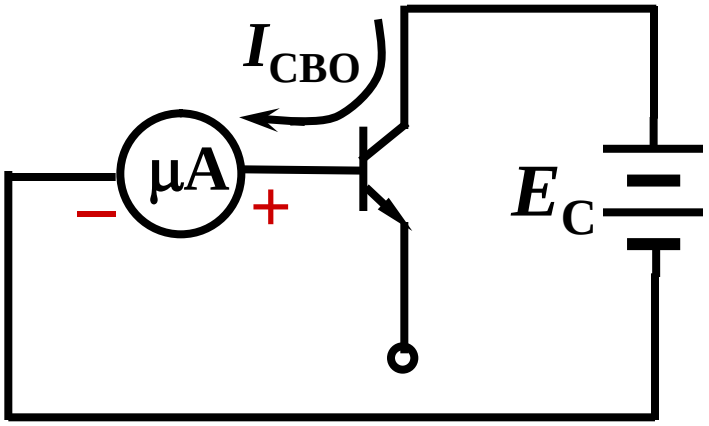
$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{1.5}{0.04} = 37.5$$

由 Q_1 和Q_2点，得

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

在以后的计算中，一般作近似处理：$\beta = \bar{\beta}$。

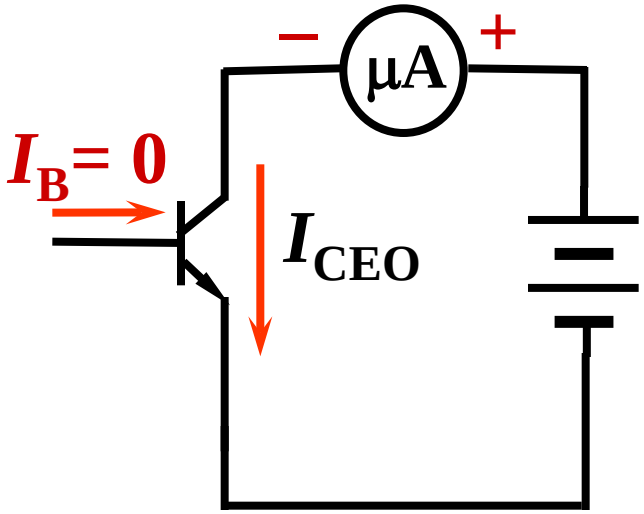
2. 集-基极反向截止电流 I_{CBO}



I_{CBO}是由少数载流子的漂移运动所形成的电流，受温度的影响大。

温度↑→I_{CBO}↑

3. 集-射极反向截止电流(穿透电流)I_{CEO}



I_{CEO}受温度的影响大。温度↑→I_{CEO}↑，所以I_C也相应增加。三极管的温度特性较差。

4. 集电极最大允许电流 I_{CM}

集电极电流I_C上升会导致三极管的β值的下降，当β 值下降到正常值的三分之二时的集电极电流即为 I_{CM}。

5. 集-射极反向击穿电压$U_{(BR)CEO}$

当集—射极之间的电压U_{CE} 超过一定的数值时，三极管就会被击穿。手册上给出的数值是25°C、基极开路时的击穿电压$U_{(BR)\ CEO}$。

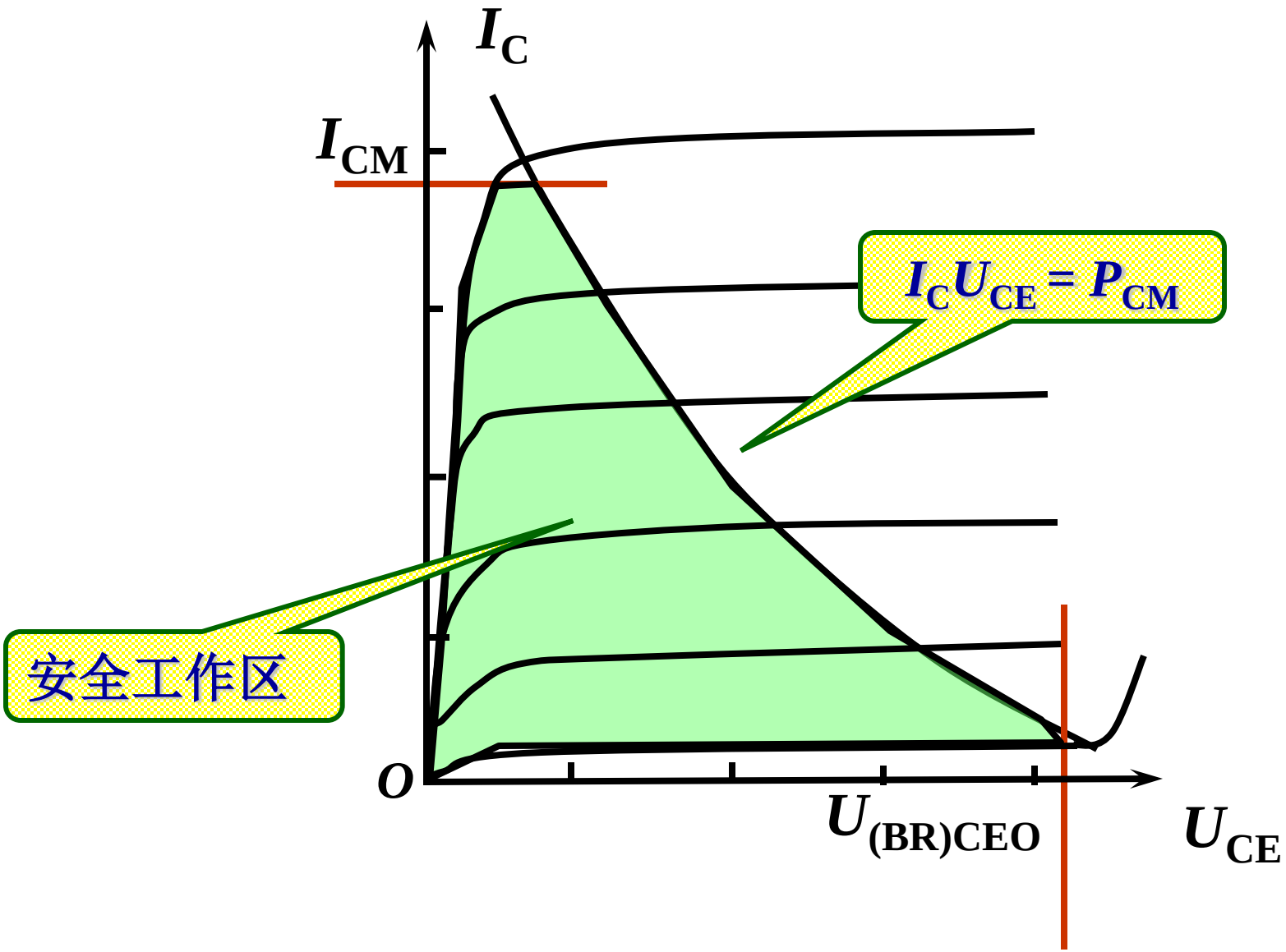
6. 集电极最大允许耗散功耗P_{CM}

P_{CM}取决于三极管允许的温升，消耗功率过大，温升过高会烧坏三极管。

$$P_C \le P_{CM} = I_C U_{CE}$$

硅管允许结温约为150°C，锗管约为70~90°C。

由三个极限参数可画出三极管的安全工作区



晶体管参数与温度的关系

1. 温度每增加10°C，I_{CBO}增大一倍。硅管优于锗管。

2. 温度每升高1°C，U_{BE}将减小–(2~2.5)mV，即晶体管具有负温度系数。

3. 温度每升高 1°C，β 增加 0.5%~1.0%。

8.5 光电器件

5.1 发光二极管(LED)

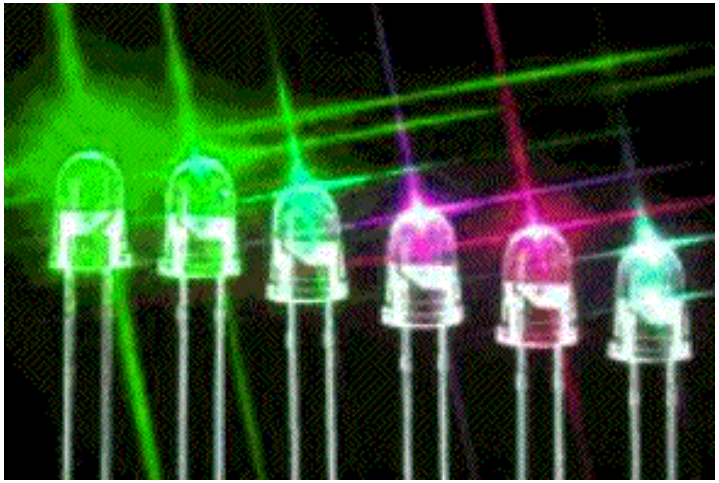
当发光二极管加上正向电压并有足够大的正向电流时，就能发出一定波长范围的光。

目前的发光管可以发出从红外到可见波段的光，它的电特性与一般二极管类似。

发光二极管的工作电压为1.5 ~ 3V, 工作电流为几 ~十几mA。

符号 

发光二极管主要用于显示电路, 常用的有2EF等系列。







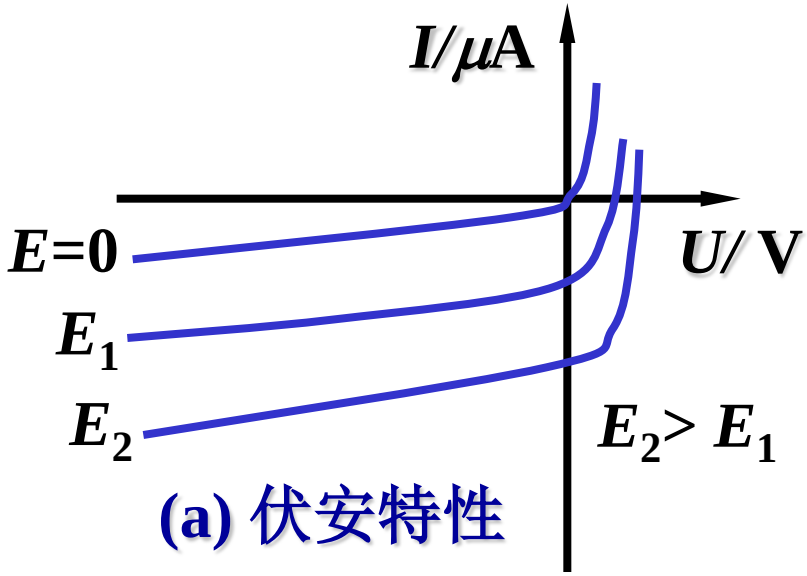


发光二极管 (LED)

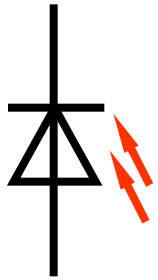
5.2 光电二极管

光电二极管在反向电压作用下工作。当无光照时，和普通二极管一样，其反向电流很小，称为暗电流。当有光照时，产生的反向电流称为光电流。照度 E越强，光电流也越大。

常用的光电二极管有2AU，2CU等系列。光电流很小， 一般只有几十微安， 应用时必须放大。

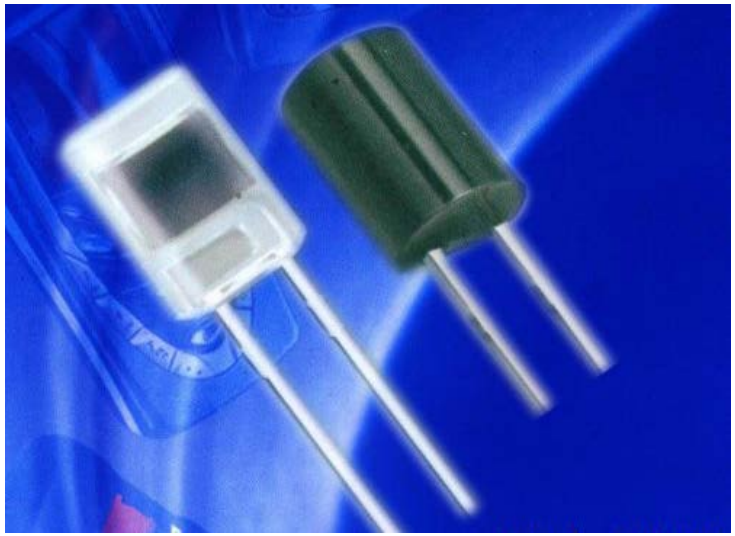


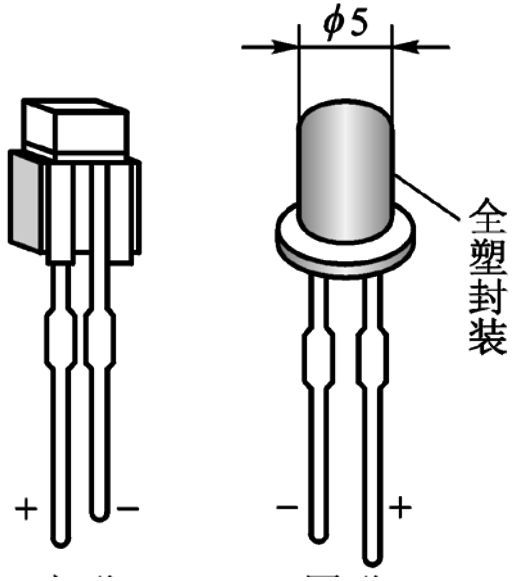
(a) 伏安特性



(b) 符号

通过光电二极管可将光信号转换成电信号





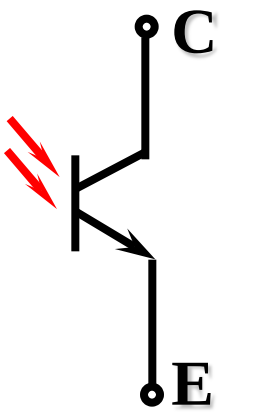


光电二极管

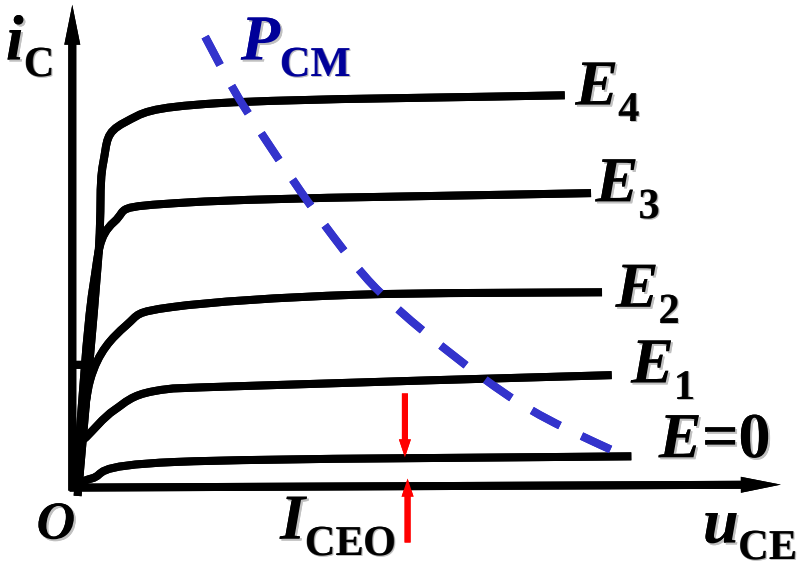
5.3 光电晶体管

光电晶体管用入射光照度E的强弱来控制集电极电流。当无光照时，集电极电流 I_{CEO}很小，称为暗电流。当有光照时，集电极电流称为光电流。一般约为零点几毫安到几毫安。

常用的光电晶体管有3AU，3DU等系列。



(a) 符号



(b) 输出特性曲线

在一般的检测电能和光电转换中作为转换元件。

第 8 章 二极管、 晶体管和单管放大电路

8.6 共发射极放大电路

放大的概念:

放大的目的是将微弱的变化信号放大成较大的信号。

放大的实质:

用小能量的信号通过晶体管的电流控制作用，将放大电路中直流电源的能量转化成交流能量输出。

对放大电路的基本要求 :

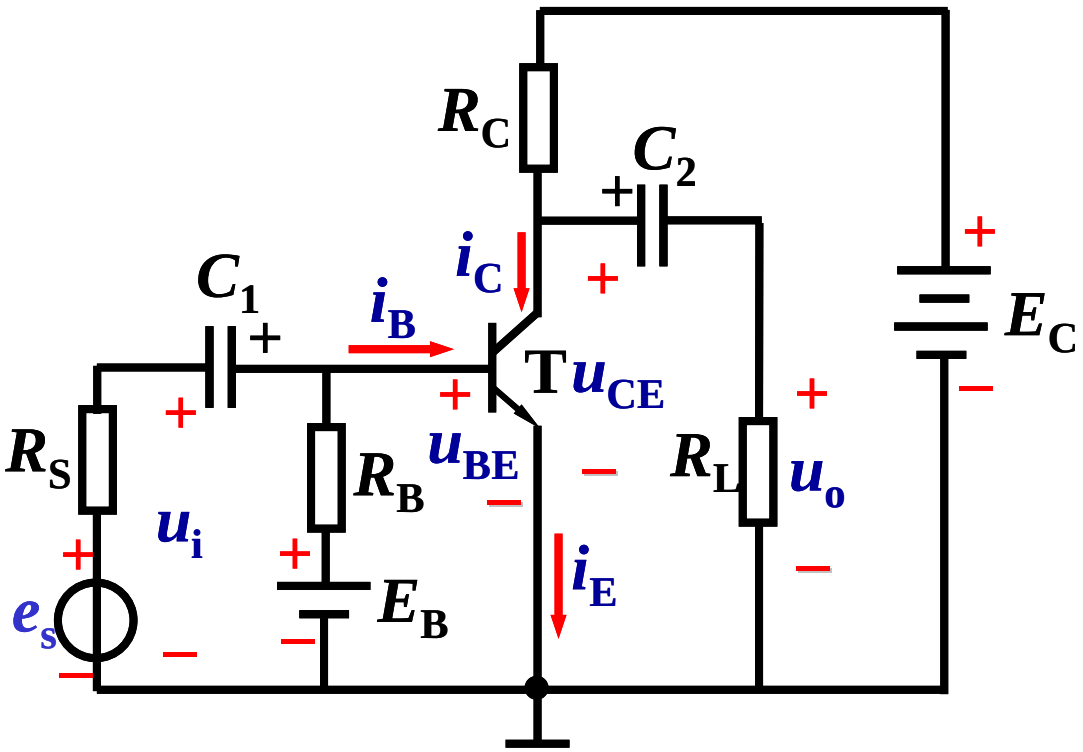
1. 要有足够的放大倍数(电压、电流、功率)。
2. 尽可能小的波形失真。

另外还有输入电阻、输出电阻、通频带等其它技术指标。

本章主要讨论电压放大电路，同时介绍功率放大电路。

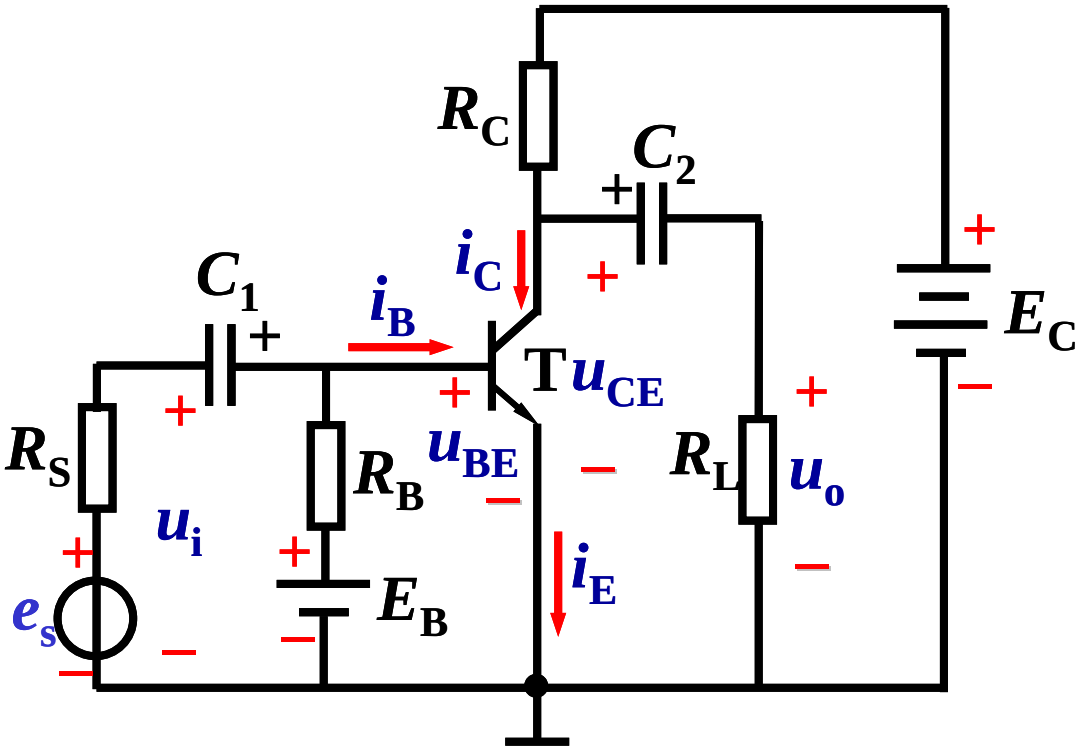
基本放大电路的组成

1 共发射极基本放大电路组成



共发射极基本电路

2 基本放大电路各元件作用

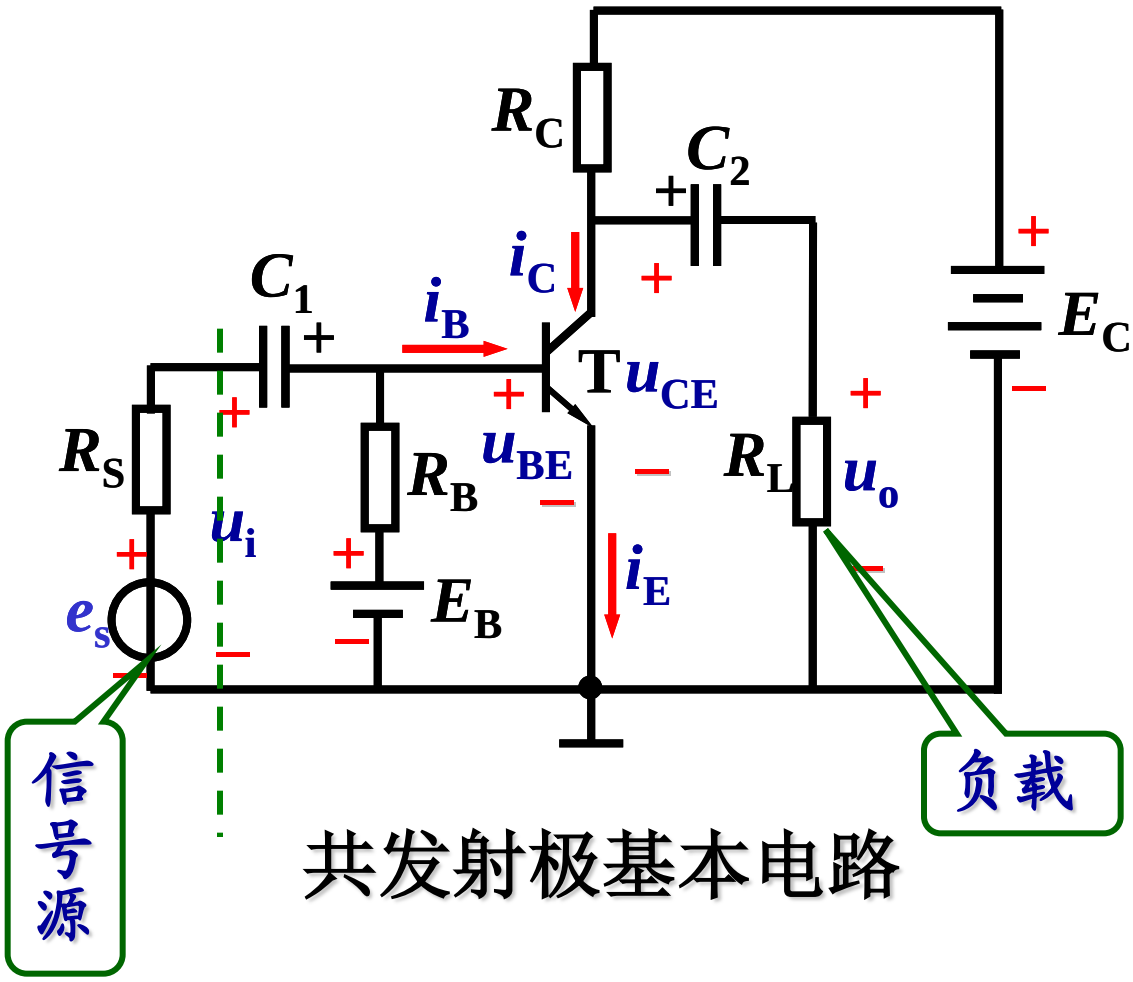


共发射极基本电路

晶体管T--放大元件，$i_C=\beta i_B$。要保证集电结反偏，发射结正偏，使晶体管工作在放大区 。

基极电源E_B与基极电阻R_B--使发射结处于正偏，并提供大小适当的基极电流。

2 基本放大电路各元件作用

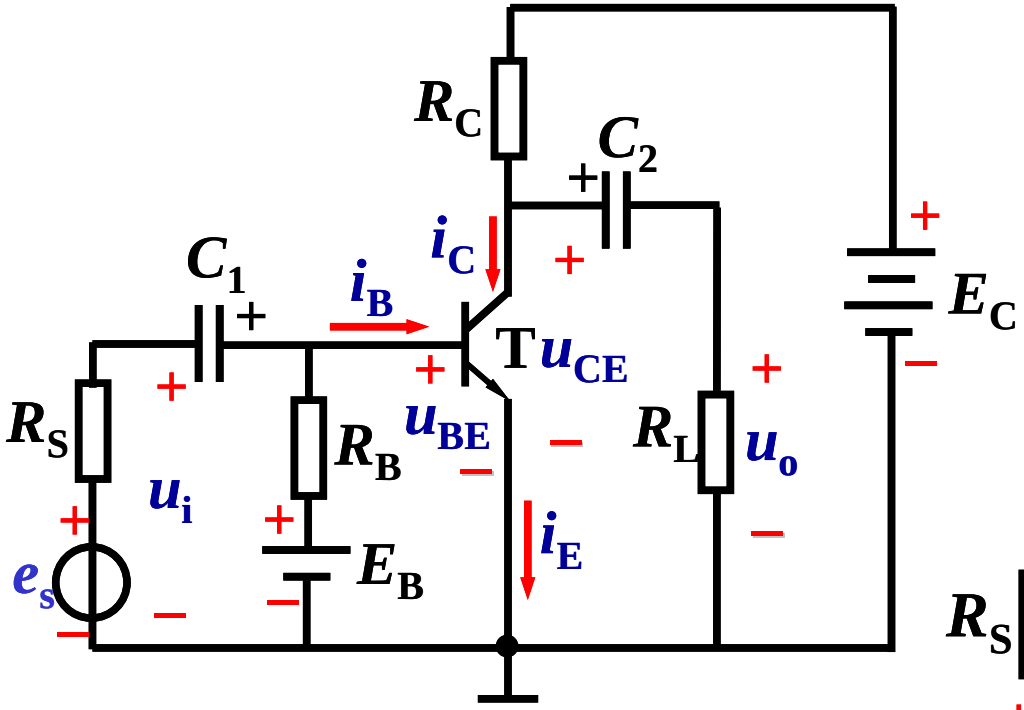


共发射极基本电路

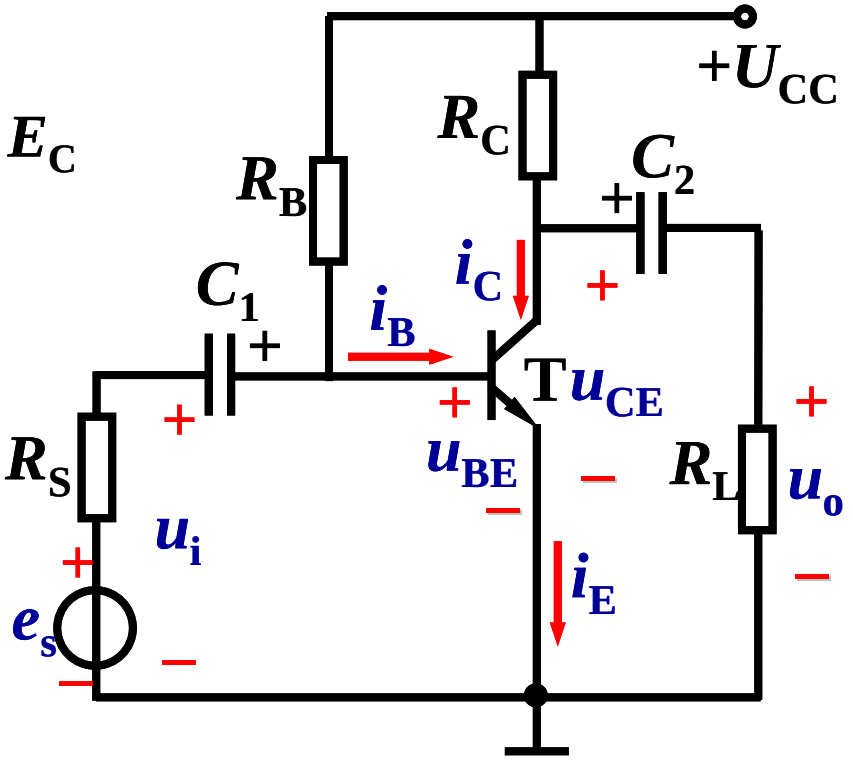
集电极电源E_C——为电路提供能量。并保证集电结反偏。

集电极电阻R_C——将变化的电流转变为变化的电压。

耦合电容C_1、C_2——隔离输入、输出与放大电路直流的联系，同时使信号顺利输入、输出。

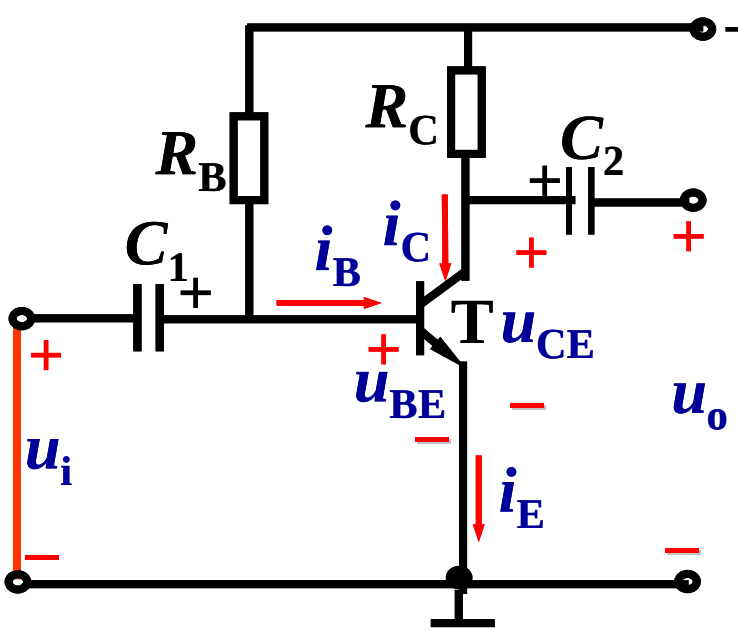


共发射极基本电路



单电源供电时常用的画法

3 共发射极放大电路的电压放大作用

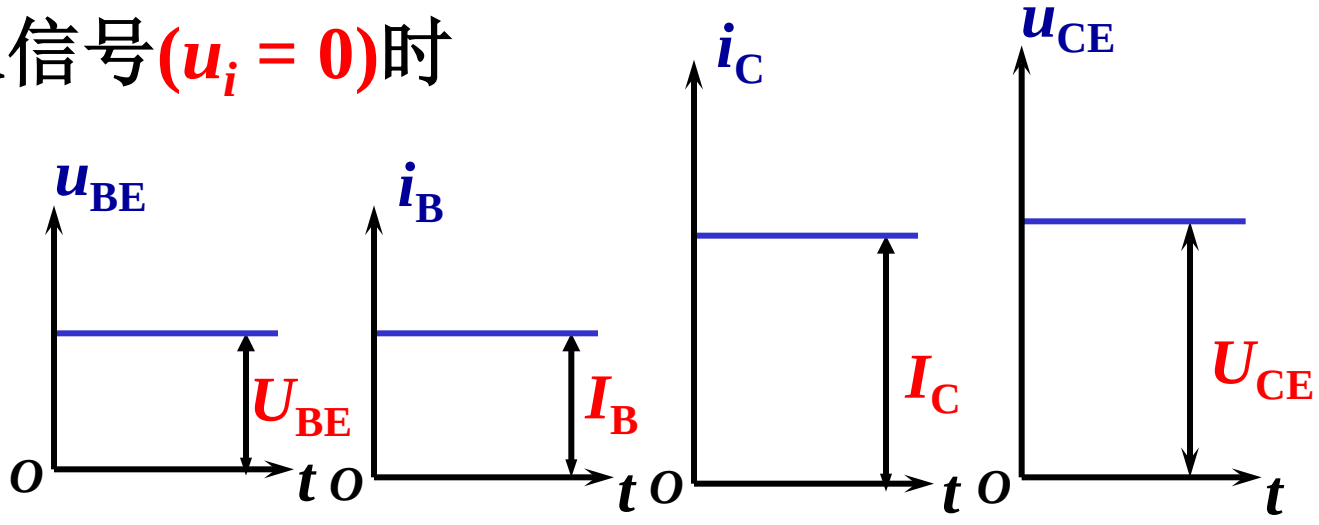


$u_o = 0$

$u_{BE} = U_{BE}$

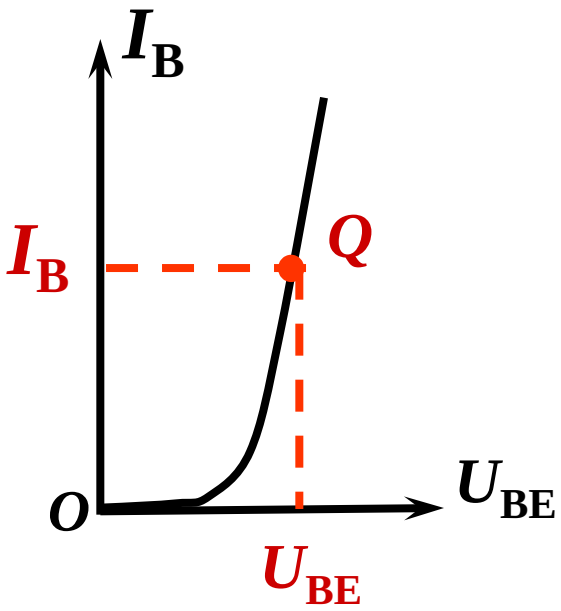
$u_{CE} = U_{CE}$

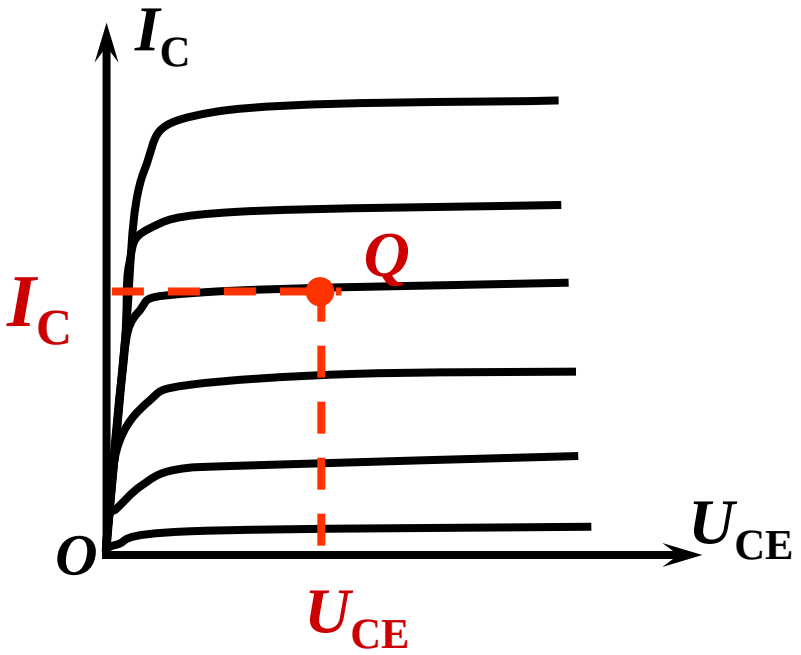
无输入信号($u_i = 0$)时



结论:

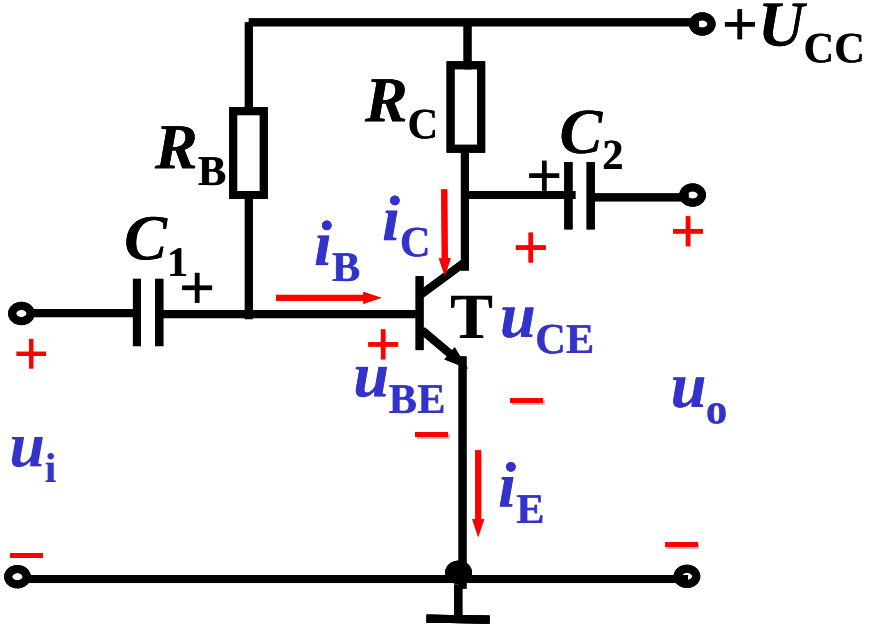
(1) 无输入信号电压时，晶体管各电极都是恒定的电压和电流:I_B、U_{BE}和 I_C、U_{CE}。





（I_B、U_{BE}）和（I_C、U_{CE}）分别对应于输入、输出特性曲线上的一个点，称为静态工作点。

3 共发射极放大电路的电压放大作用

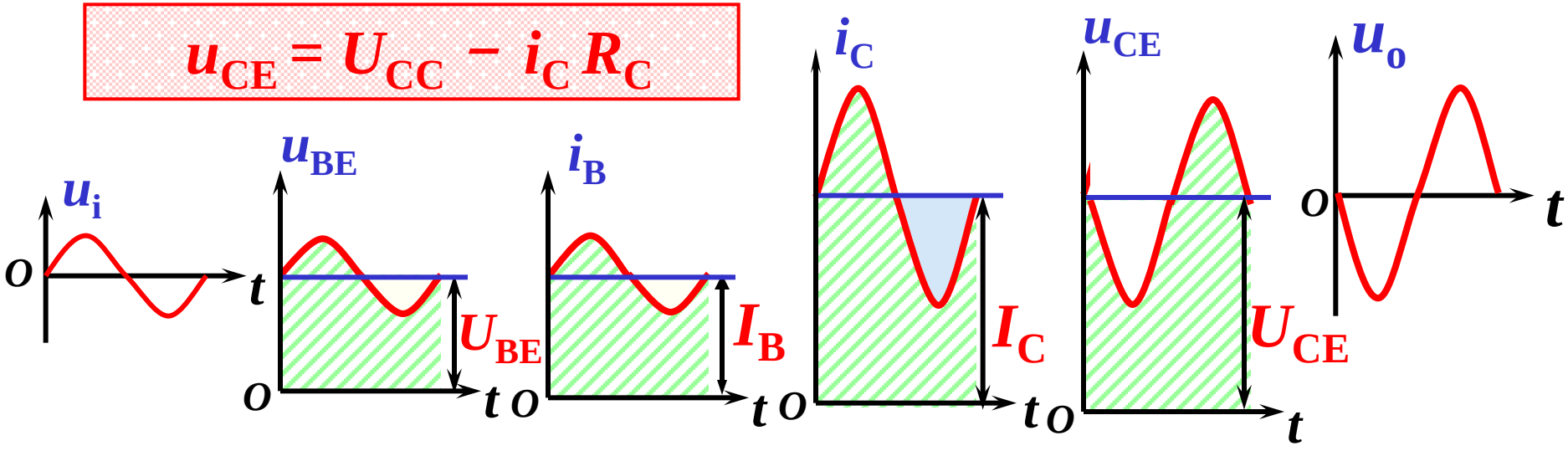


$u_o \neq 0$

$u_{BE} = U_{BE} + u_i$

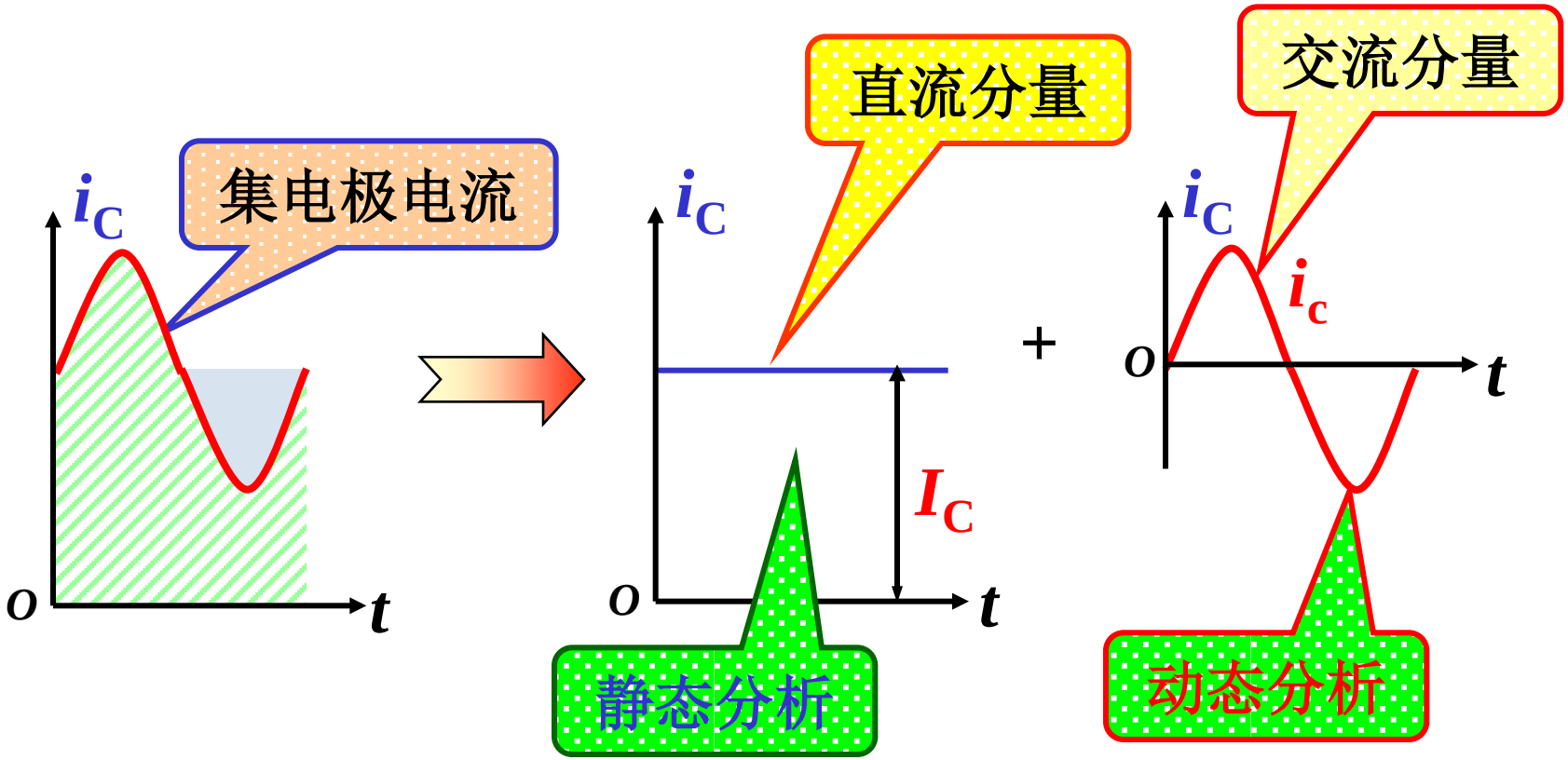
$u_{CE} = U_{CE} + u_o$

$$u_{CE} = U_{CC} - i_C R_C$$



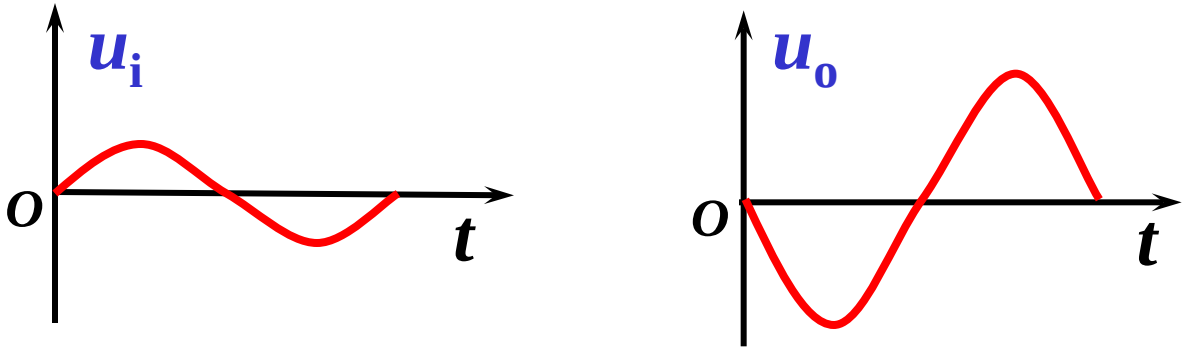
结论：

(2) 加上输入信号电压后，各电极电流和电压的大小均发生了变化，都在直流量的基础上叠加了一个交流量，但方向始终不变。



结论：

(3) 若参数选取得当，输出电压可比输入电压大，即电路具有电压放大作用。



(4) 输出电压与输入电压在相位上相差180°，即共发射极电路具有反相作用。

1. 实现放大的条件

(1) 晶体管必须工作在放大区。发射结正偏，集电结反偏。

(2) 正确设置静态工作点，使晶体管工作于放大区。

(3) 输入回路将变化的电压转化成变化的基极电流。

(4) 输出回路将变化的集电极电流转化成变化的集电极电压，经电容耦合只输出交流信号。

2. 直流通路和交流通路

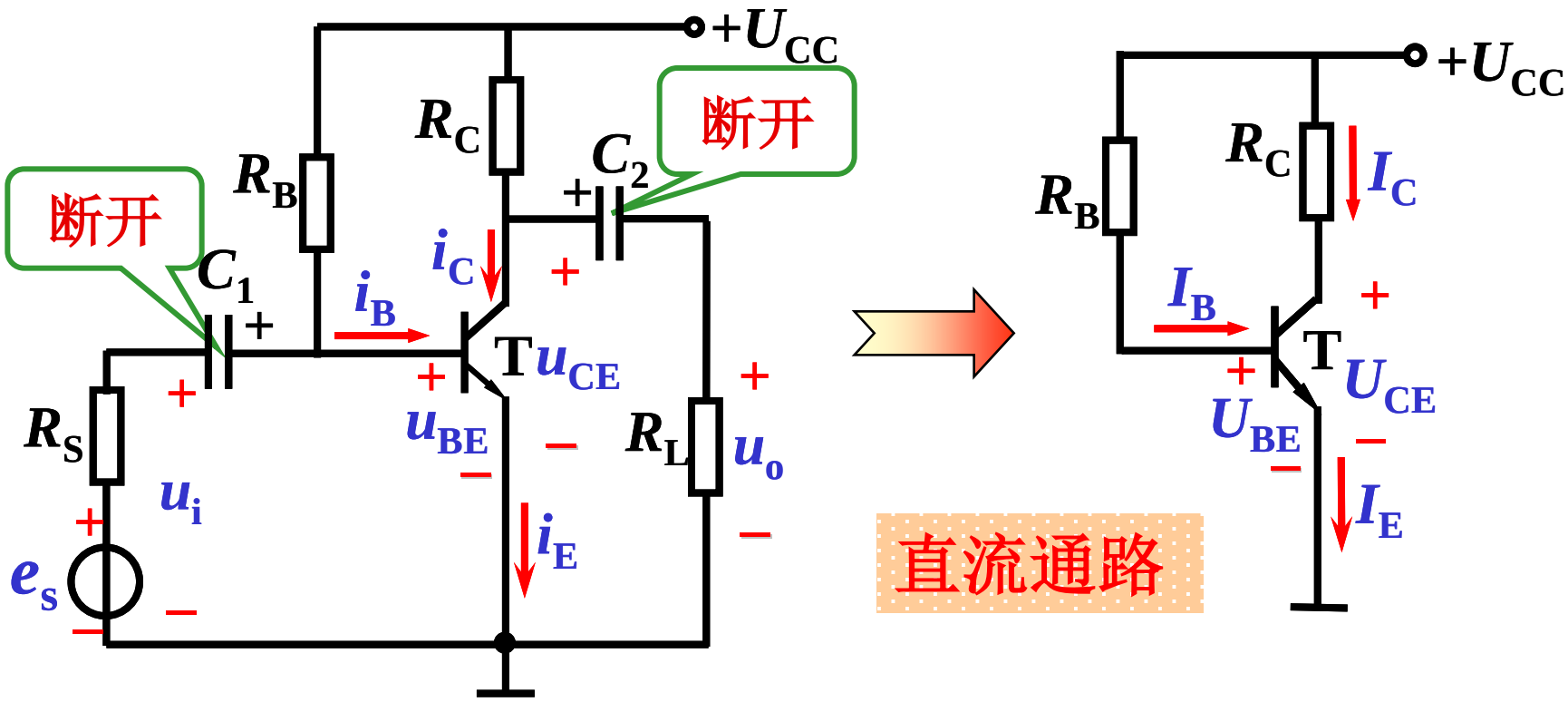
因电容对交、直流的作用不同。在放大电路中如果电容的容量足够大，可以认为它对交流分量不起作用，即对交流短路。而对直流可以看成开路。这样，交、直流所走的通路是不同的。

直流通路： 无信号时电流（直流电流）的通路，用来计算静态工作点。

交流通路： 有信号时交流分量（变化量）的通路，用来计算电压放大倍数、输入电阻、输出电阻等动态参数。

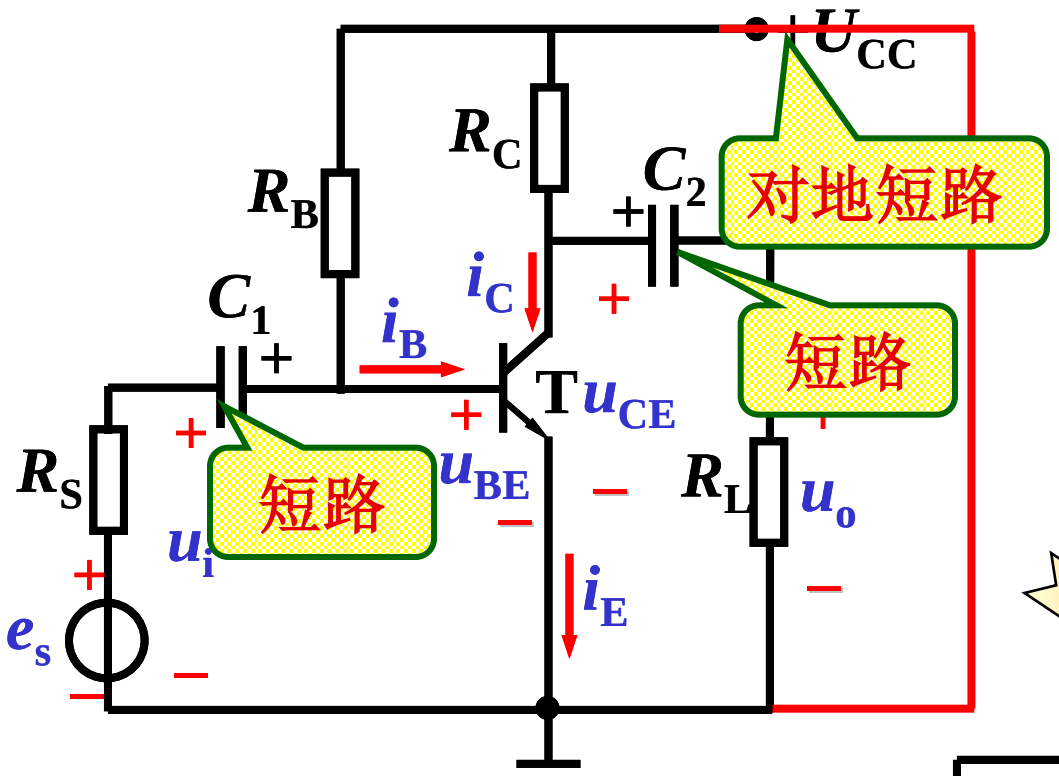
例：画出下图放大电路的直流通路

对直流信号电容 C 可看作开路（即将电容断开）



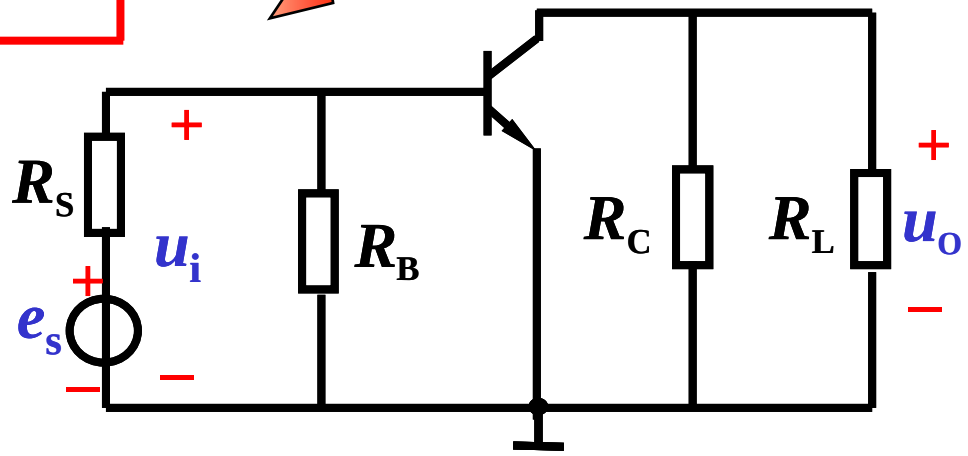
直流通路用来计算静态工作点 Q（I_B、I_C、U_{CE}）

对交流信号(有输入信号 u_i 时的交流分量)



$X_C \approx 0$, C 可看作短路。忽略电源的内阻，电源的端电压恒定，直流电源对交流可看作短路。

交流通路



用来计算电压放大倍数、输入电阻、输出电阻等动态参数。

放大电路的静态分析

静态： 放大电路无信号输入（$u_i = 0$）时的工作状态。

静态分析： 确定放大电路的静态值。

— 静态工作点Q：I_B、I_C、U_{CE}

分析方法： 估算法、图解法。

分析对象： 各极电压电流的直流分量。

所用电路： 放大电路的直流通路。

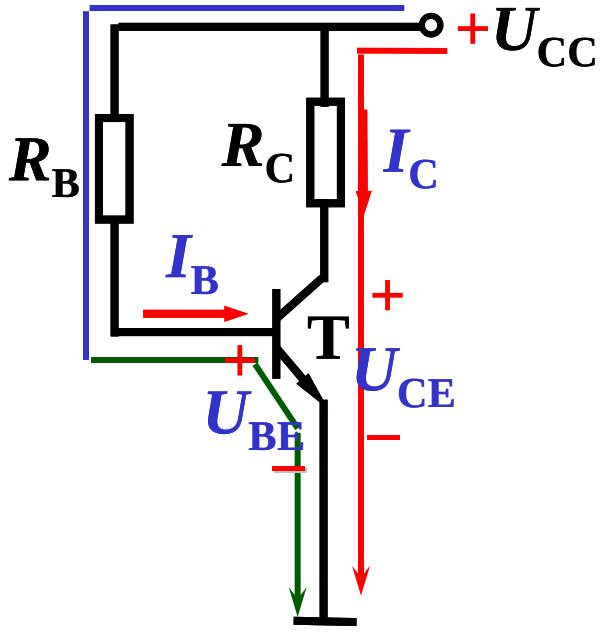
设置 Q 点的目的：

(1) 使放大电路的放大信号不失真；

(2) 使放大电路工作在较佳的工作状态，静态是动态的基础。

1 用估算法确定静态值

1. 直流通路估算 I_B



$$U_{CC} = I_B R_B + U_{BE}$$

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B}$$

当$U_{BE} << U_{CC}$时，

$$I_B \approx \frac{U_{CC}}{R_B}$$

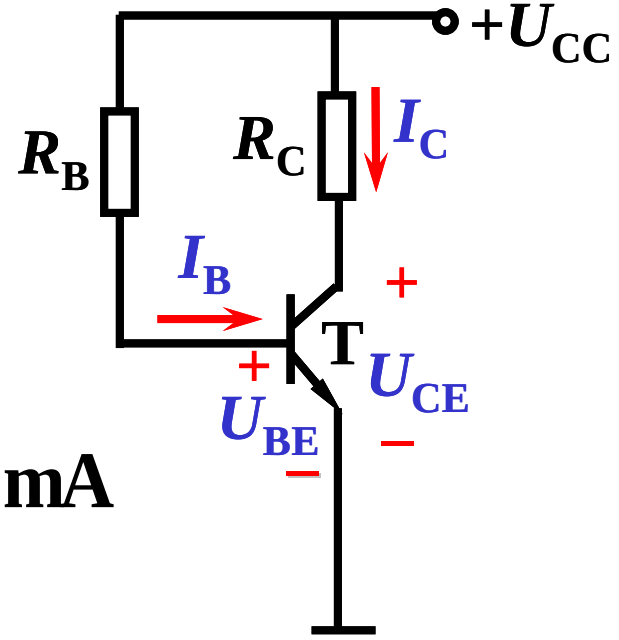
2. 由直流通路估算U_{CE}、I_C

根据电流放大作用 $I_C = \bar{\beta} I_B + I_{CEO} \approx \bar{\beta} I_B \approx \beta I_B$

由KVL: $U_{CC} = I_C R_C + U_{CE}$ 所以 $U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C$

例1：用估算法计算静态工作点。

已知：U_{CC}=12V，R_C= 4kΩ，R_B = 300kΩ，β = 37.5 。



解：$$I_B \approx \frac{U_{CC}}{R_B} = \frac{12}{300}\text{mA} = 0.04\,\text{mA}$$

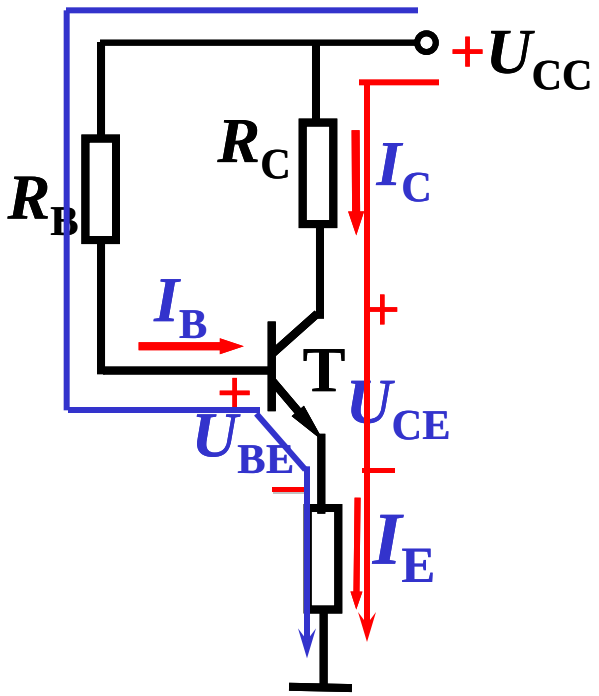
$$I_C \approx \overline{\beta} I_B = 37.5 \times 0.04\text{mA} = 1.5\,\text{mA}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C$$

$$= 12 - 1.5 \times 4\text{V} = 6\text{V}$$

注意：电路中 I_B 和 I_C 的数量级不同

例2：用估算法计算图示电路的静态工作点。



由KVL可得出

$$U_{CC}=I_B R_B+U_{BE}+I_E R_E$$

$$=I_B R_B+U_{BE}+(1+\beta)I_B R_E$$

$$I_B=\frac{U_{CC}-U_{BE}}{R_B+(1+\beta)R_E}$$

$$I_C\approx\overline{\beta}\,I_B$$

由KVL可得：

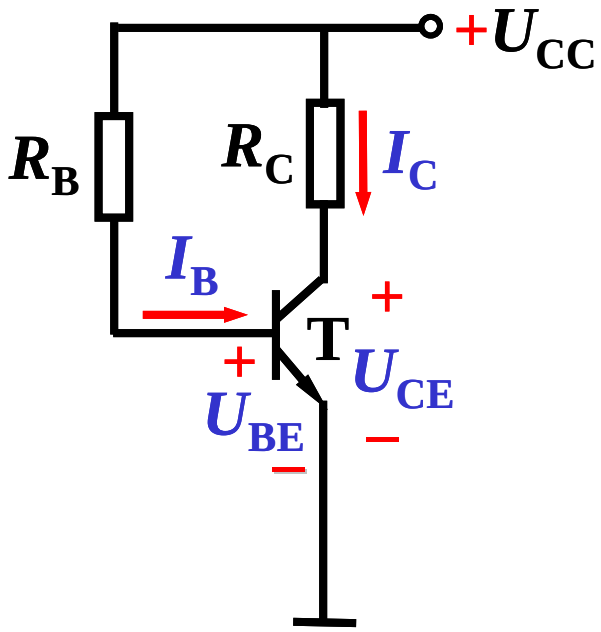
$$U_{CE}=U_{CC}-I_C R_C-I_E R_E$$

$$=U_{CC}-I_C(R_C+R_E)$$

由例1、例2可知，当电路不同时，计算静态值的公式也不同。

2 用图解法确定静态值

用作图的方法确定静态值



优点：

能直观地分析和了解静态值的变化对放大电路的影响。

步骤：

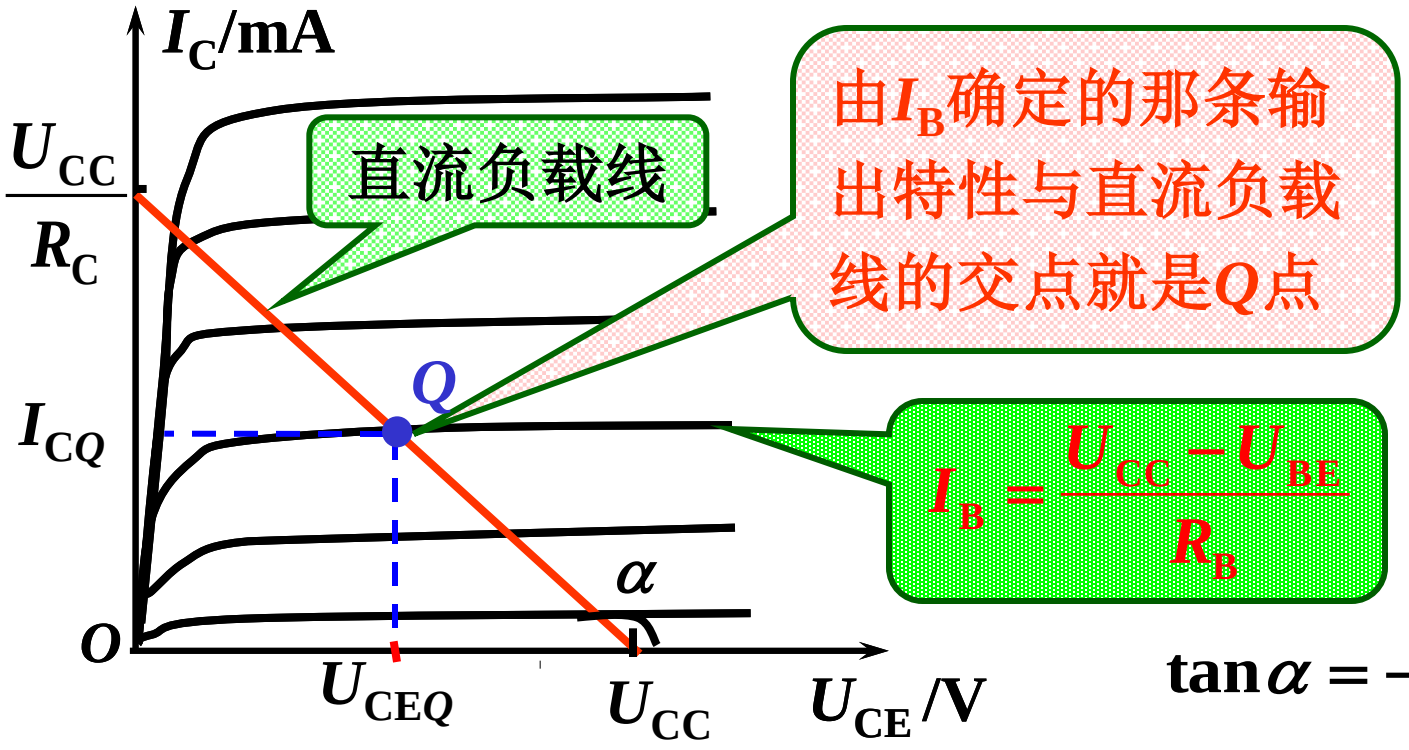
1. 用估算法确定I_B
2. 由输出特性确定I_C和U_{CC}

$$\begin{cases} U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C \\ I_C = f(U_{CE})\big|_{I_B=\text{常数}} \end{cases}$$

直流负载线方程

2 用图解法确定静态值

$$\begin{cases} U_{CE}=U_{CC}-I_C R_C \\ I_C = f(U_{CE})\big|_{I_B=\text{常数}} \end{cases}$$



由I_B确定的那条输出特性与直流负载线的交点就是Q点

$$I_B = \frac{U_{CC}-U_{BE}}{R_B}$$

$$\tan\alpha = -\frac{1}{R_C}$$

直流负载线斜率

放大电路的动态分析

动态： 放大电路有信号输入($u_i \neq 0$)时的工作状态。

动态分析：

计算电压放大倍数A_u、输入电阻r_i、输出电阻r_o等。

分析对象：

各极电压和电流的交流分量。

分析方法：

微变等效电路法，图解法。

所用电路：

放大电路的交流通路。

目的： 找出A_u、r_i、r_o与电路参数的关系，为设计打基础。

1 微变等效电路法

微变等效电路：

把非线性元件晶体管所组成的放大电路等效为一个线性电路。即把非线性的晶体管线性化，等效为一个线性元件。

线性化的条件：

晶体管在小信号（微变量）情况下工作。因此，在静态工作点附近小范围内的特性曲线可用直线近似代替。

微变等效电路法：

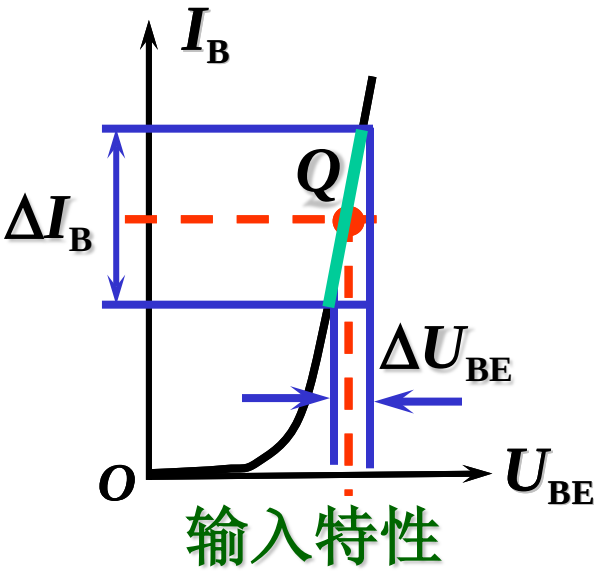
利用放大电路的微变等效电路分析计算放大电路电压放大倍数 A_u、输入电阻 r_i、输出电阻 r_o等。

1 微变等效电路法

1. 晶体管的微变等效电路

晶体管的微变等效电路可从晶体管特性曲线求出。

(1) 输入回路



输入特性

当信号很小时，在静态工作点附近的输入特性在小范围内可近似线性化。

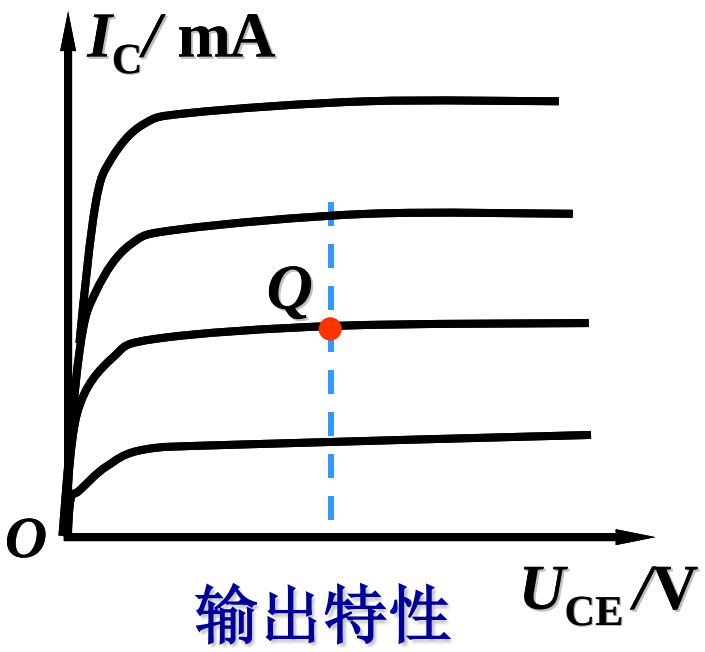
晶体管的输入电阻 $r_{be}=\left.\dfrac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}\right|_{U_{CE}}=\left.\dfrac{u_{be}}{i_b}\right|_{U_{CE}}$

晶体管的输入回路 (B、E 之间) 可用r_{be}等效代替, 即由r_{be}来确定u_{be}和 i_b之间的关系。

对于小功率晶体管：

$r_{be}\approx 200(\Omega)+(1+\beta)\dfrac{26(\text{mV})}{I_E(\text{mA})}$ r_{be}一般为几百欧到几千欧。

(2) 输出回路



输出特性

输出特性在线性工作区是一组近似等距的平行直线。

晶体管的电流放大系数

$$\beta = \left.\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}\right|_{U_{CE}} = \left.\frac{i_c}{i_b}\right|_{U_{CE}}$$

晶体管的输出回路(C、E 之间)可用一受控电流源 $i_c = \beta i_b$ 等效代替，即由 β 来确定 i_c 和 i_b 之间的关系。

β一般在20～200之间，在手册中常用 h_{fe} 表示。

晶体管的输出电阻

$$r_{ce} = \left.\frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C}\right|_{I_B} = \left.\frac{u_{ce}}{i_c}\right|_{I_B}$$

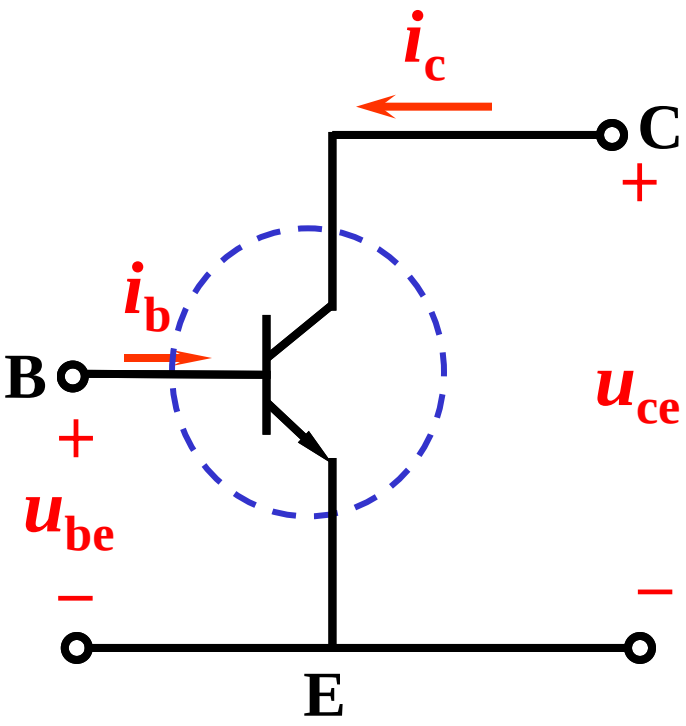
r_{ce}愈大，恒流特性愈好

因r_{ce}阻值很高，一般忽略不计。

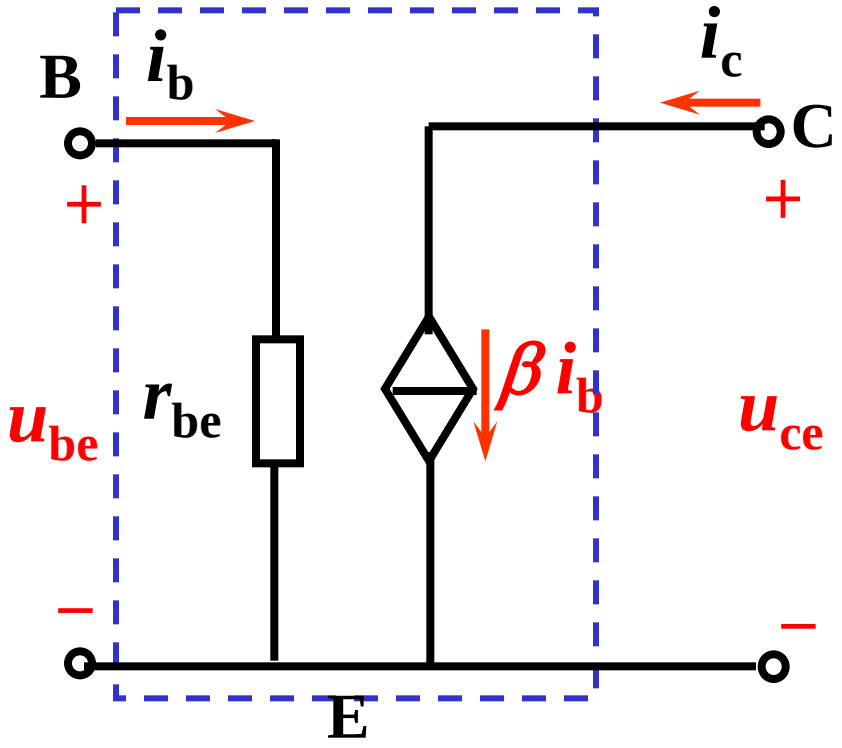
1. 晶体管的微变等效电路

晶体晶体管

微变等效电路



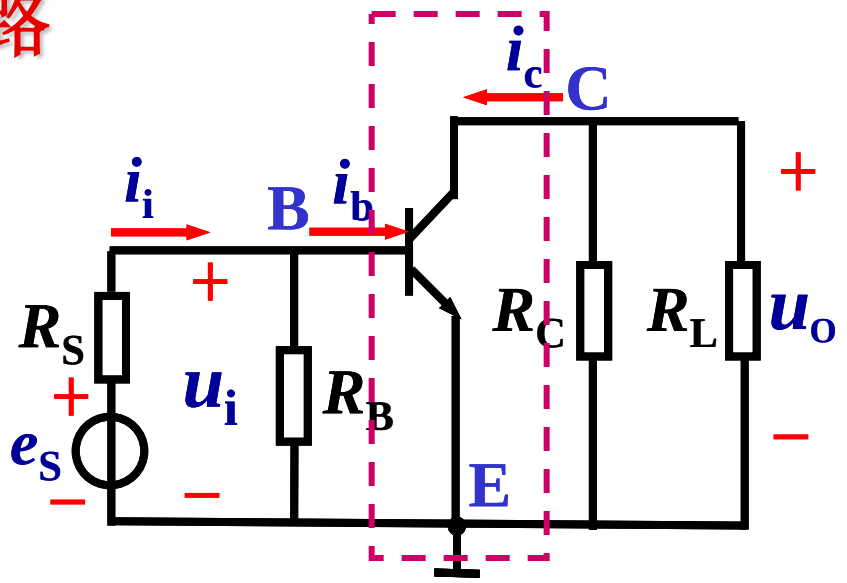
晶体管的B、E之间可用 r_{be} 等效代替。



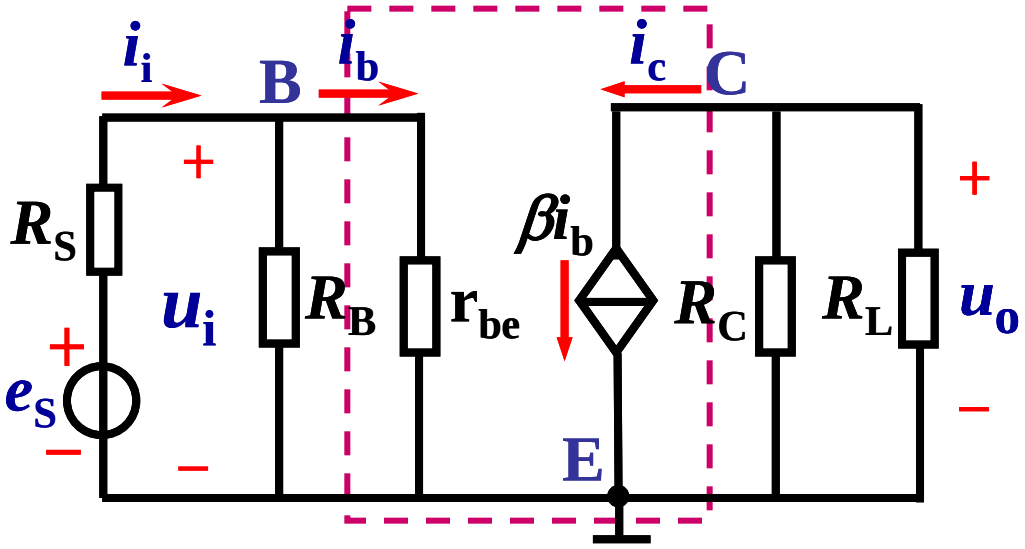
晶体管的C、E之间可用一受控电流源 $i_c=\beta i_b$ 等效代替。

2. 放大电路的微变等效电路

将交流通路中的晶体管用晶体管微变等效电路代替即可得放大电路的微变等效电路。



交流通路

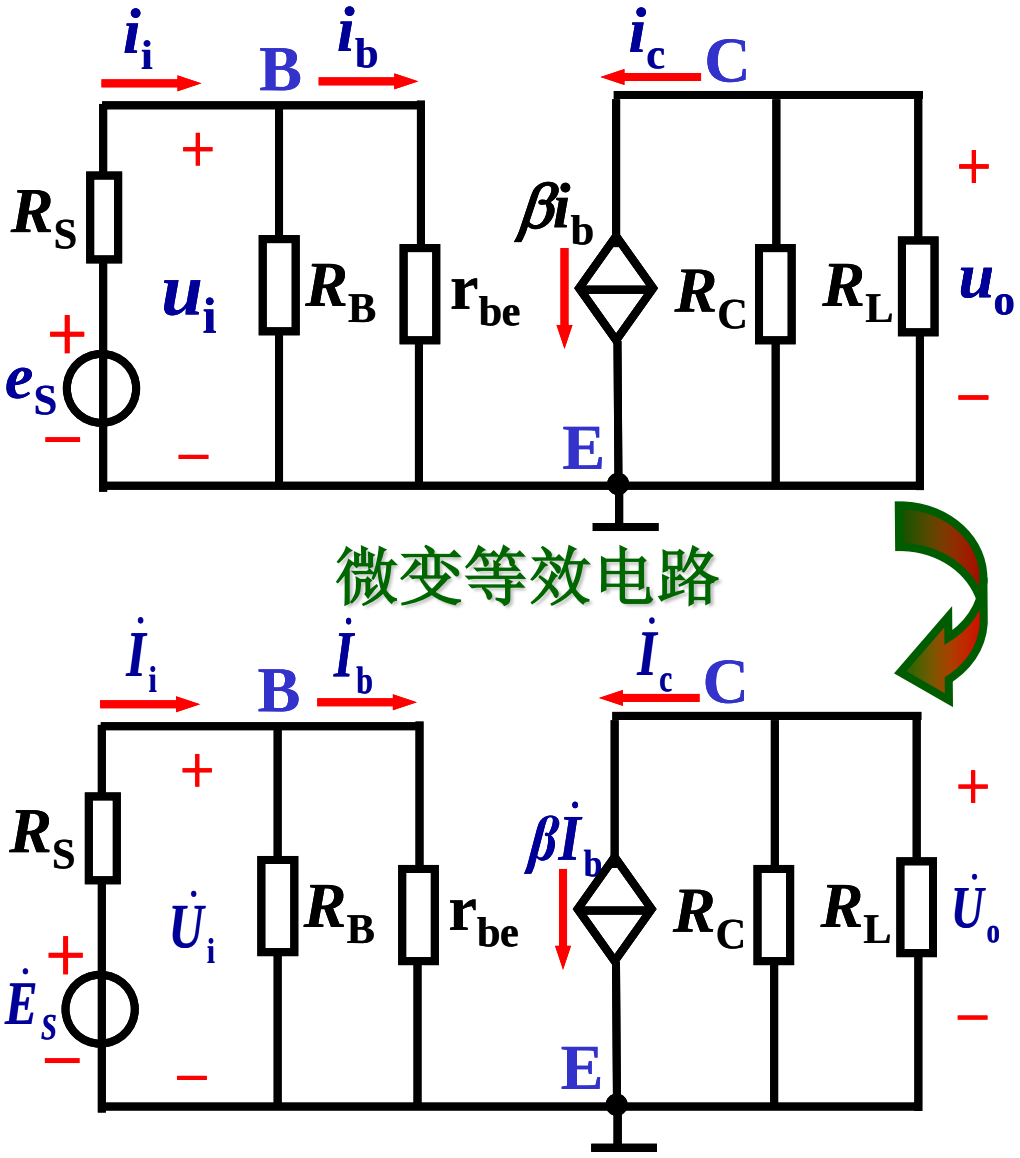


微变等效电路

2. 放大电路的微变等效电路

将交流通路中的晶体管用晶体管微变等效电路代替即可得放大电路的微变等效电路。

分析时假设输入为正弦交流，所以等效电路中的电压与电流可用相量表示。



3. 电压放大倍数的计算

定义：$A_u = \dfrac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$

例1：$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be}$

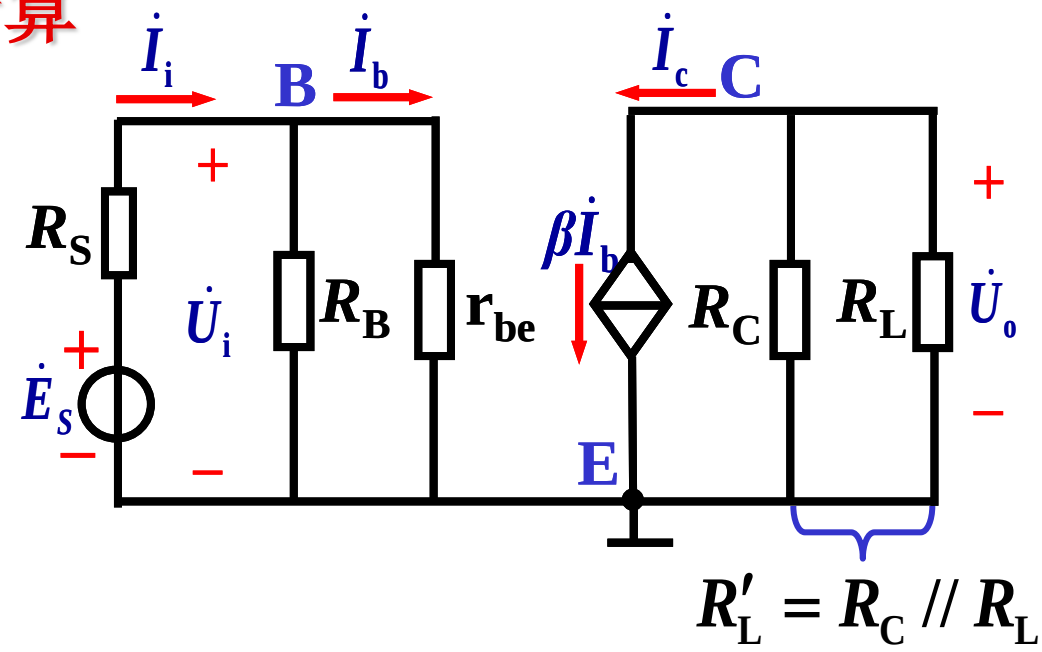
$\dot{U}_o = -\dot{I}_c R'_L$

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

$A_u = -\beta \dfrac{R'_L}{r_{be}}$

输出端开路时

$A_u = -\beta \dfrac{R_C}{r_{be}}$



式中的负号表示输出电压的相位与输入相反。

负载电阻愈小，放大倍数愈小。

因 r_{be} 与 I_E 有关，故放大倍数与静态 I_E 有关。

3. 电压放大倍数的计算

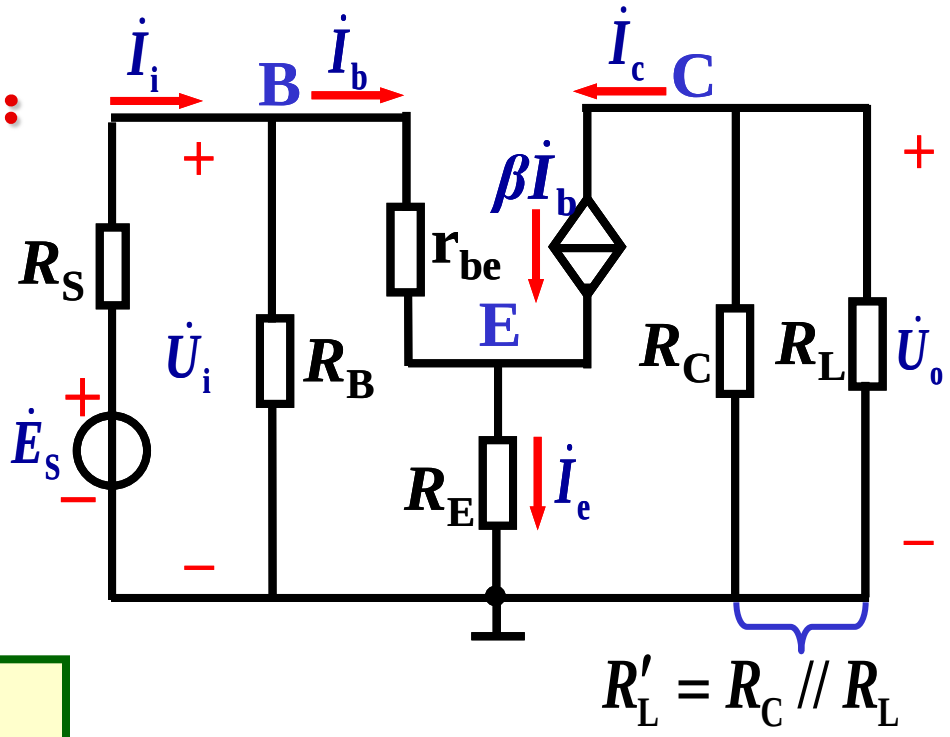
定义：$A_u = \dfrac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$

$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R_E$$
$$= \dot{I}_b r_{be} + (1+\beta)\dot{I}_b R_E$$

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

$$A_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1+\beta)R_E}$$

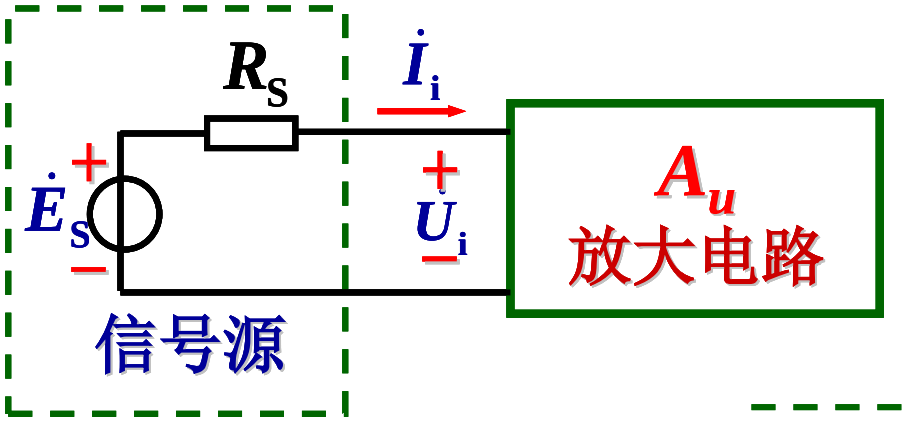
例2：



由例 1、例 2 可知，当电路不同时，计算电压放大倍数 A_u 的公式也不同。要根据微变等效电路找出 u_i 与 i_b 的关系、 u_o 与 i_c 的关系。

4. 放大电路输入电阻的计算

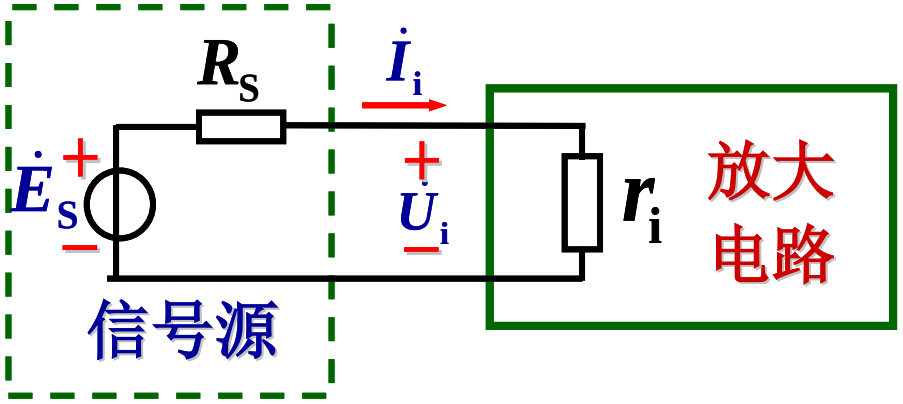
放大电路对信号源(或对前级放大电路)来说，是一个负载，可用一个电阻来等效代替。这个电阻是信号源的负载电阻, 也就是放大电路的输入电阻。

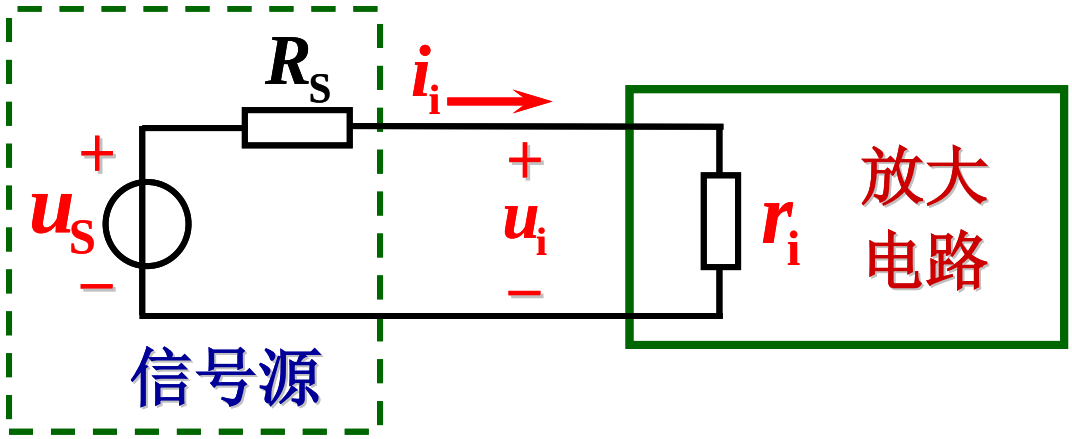


输入电阻是对交流信号而言的，是动态电阻。

定义：

输入电阻 $r_i = \dfrac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i}$

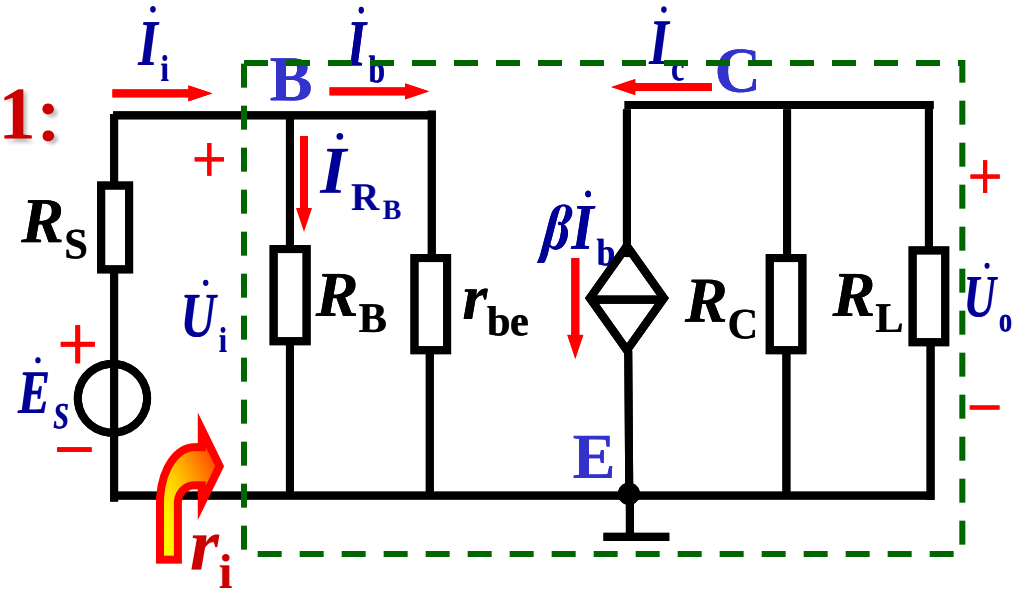




$$i_i \downarrow = \frac{u_i}{r_i \uparrow} \qquad u_i \uparrow = \frac{r_i}{R_S + r_i} u_S = \frac{1}{\frac{R_S}{r_i \uparrow} + 1} u_S$$

输入电阻是表明放大电路从信号源吸取电流大小的参数。电路的输入电阻愈大，从信号源取得的电流愈小，因此一般总是希望得到较大的输入电阻。

例1:

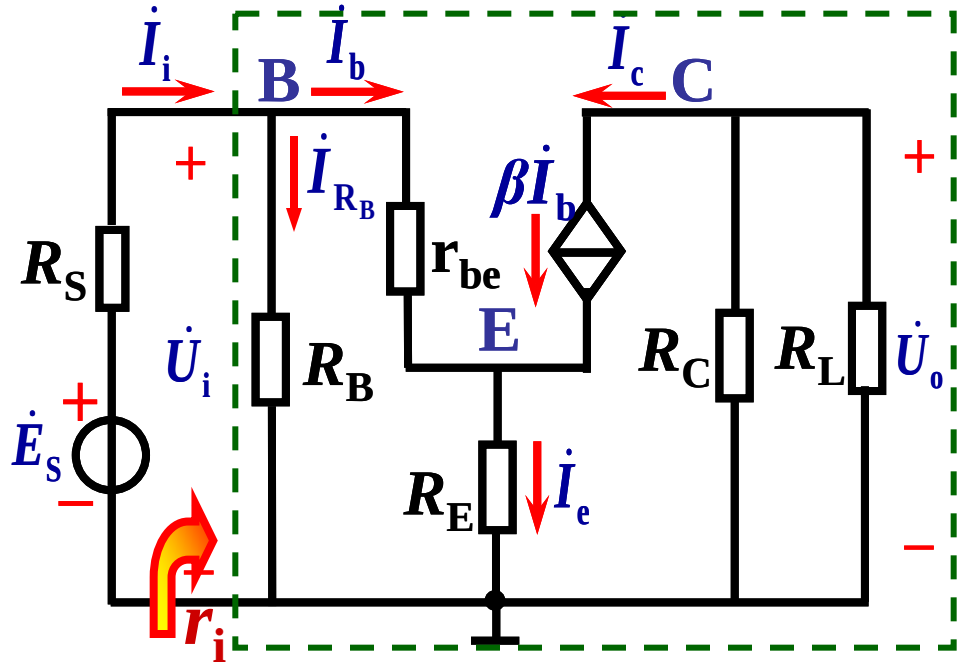


$$r_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_{R_B} + \dot{I}_b}$$

$$= R_B // r_{be}$$

当$R_B >> r_{be}$时，

$$r_i \approx r_{be}$$



$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R_E$$

$$= \dot{I}_b r_{be} + (1+\beta)\dot{I}_b R_E$$

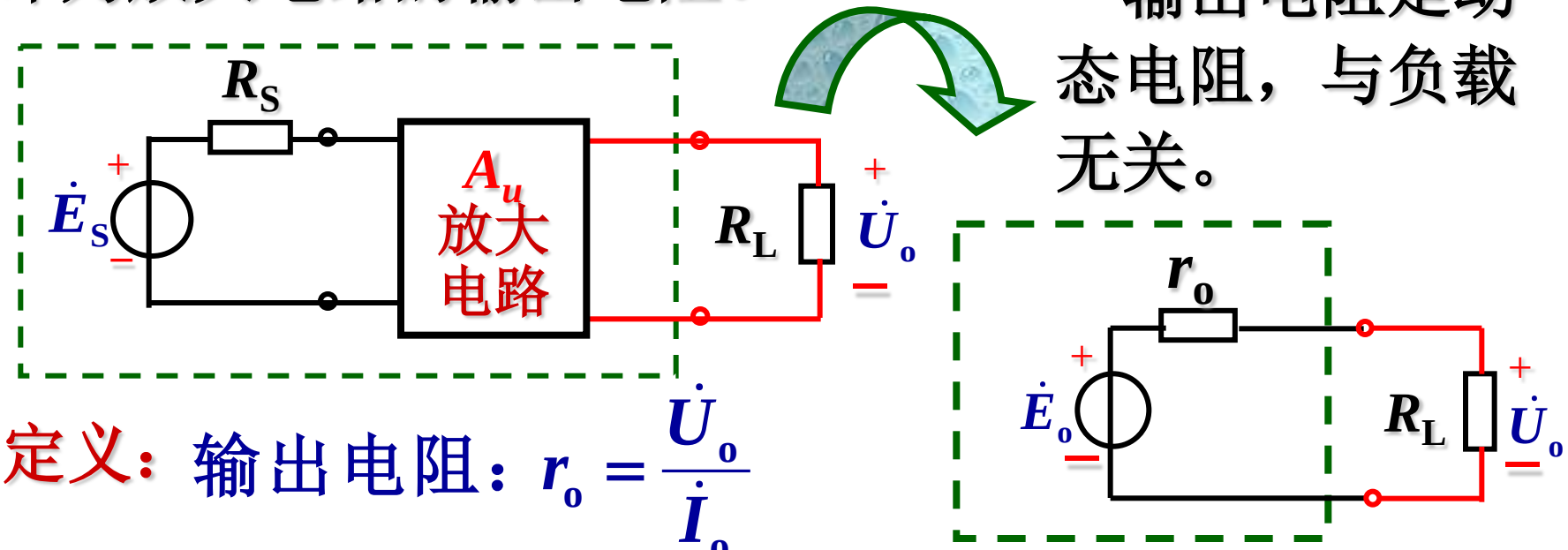
$$\dot{I}_b = \frac{\dot{U}_i}{r_{be} + (1+\beta)R_E}$$

$$r_i = R_B // \left[r_{be} + (1+\beta)R_E\right]$$

5. 放大电路输出电阻的计算

放大电路对负载(或对后级放大电路)来说，是一个信号源，可以将它进行戴维宁等效，等效电源的内阻即为放大电路的输出电阻。

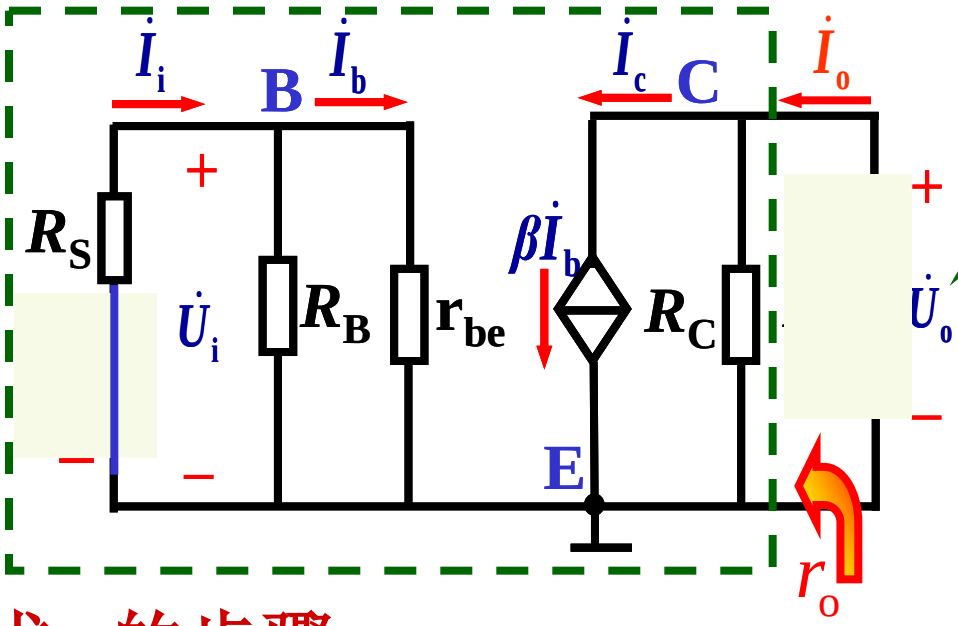
输出电阻是动态电阻，与负载无关。



定义：输出电阻：$r_o = \dfrac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o}$

输出电阻是表明放大电路带负载能力的参数。电路的输出电阻愈小，负载变化时输出电压的变化愈小，因此一般总是希望得到较小的输出电阻。

例3:



共发射极极放大电路

特点:

1. 放大倍数高;
2. 输入电阻低;
3. 输出电阻高。

求r_o的步骤:

(1) 断开负载R_L

(2) 令$\dot{U}_i = 0$ 或$\dot{E}_S = 0$

(3) 外加电压$\dot{U}_o$

(4) 求$\dot{I}_o$

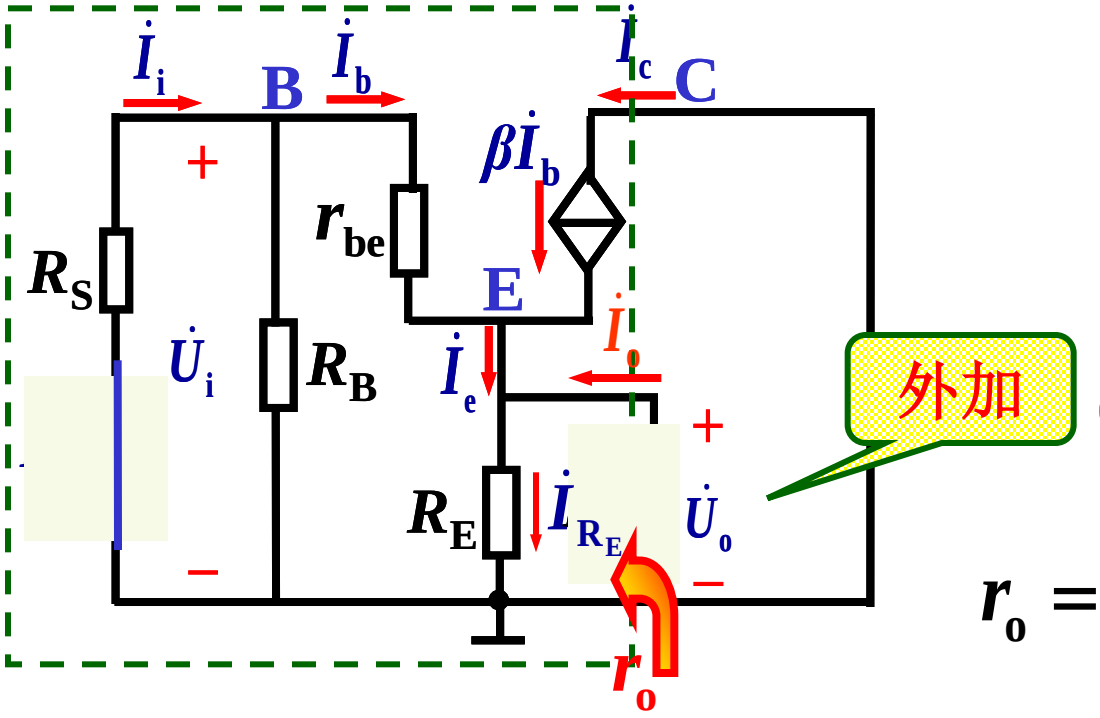
$$\dot{I}_o = \dot{I}_c + \dot{I}_{R_C}$$

$$\dot{I}_c = \beta\,\dot{I}_b \qquad \dot{I}_b = 0 \text{ 所以 } \dot{I}_c = 0$$

$$\dot{I}_{R_C} = \frac{\dot{U}_o}{R_C}$$

$$r_o = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} \approx R_C$$

例4:



求 r_o 的步骤:

(1) 断开负载R_L

(2) 令$\dot{U}_i = 0$ 或 $\dot{E}_S = 0$

(3) 外加电压 $\dot{U}_o$

(4) 求$\dot{I}_o$

$$r_o = \frac{1}{\dfrac{1+\beta}{r_{be} + R_B /\!/ R_S} + \dfrac{1}{R_E}}$$

$$\dot{I}_o = -\dot{I}_b - \beta\,\dot{I}_b + \dot{I}_{R_E}$$

$$= -\frac{-\dot{U}_o}{r_{be} + R_B /\!/ R_S} - \frac{-\beta\,\dot{U}_o}{r_{be} + R_B /\!/ R_S} + \frac{\dot{U}_o}{R_E}$$

2 图解法

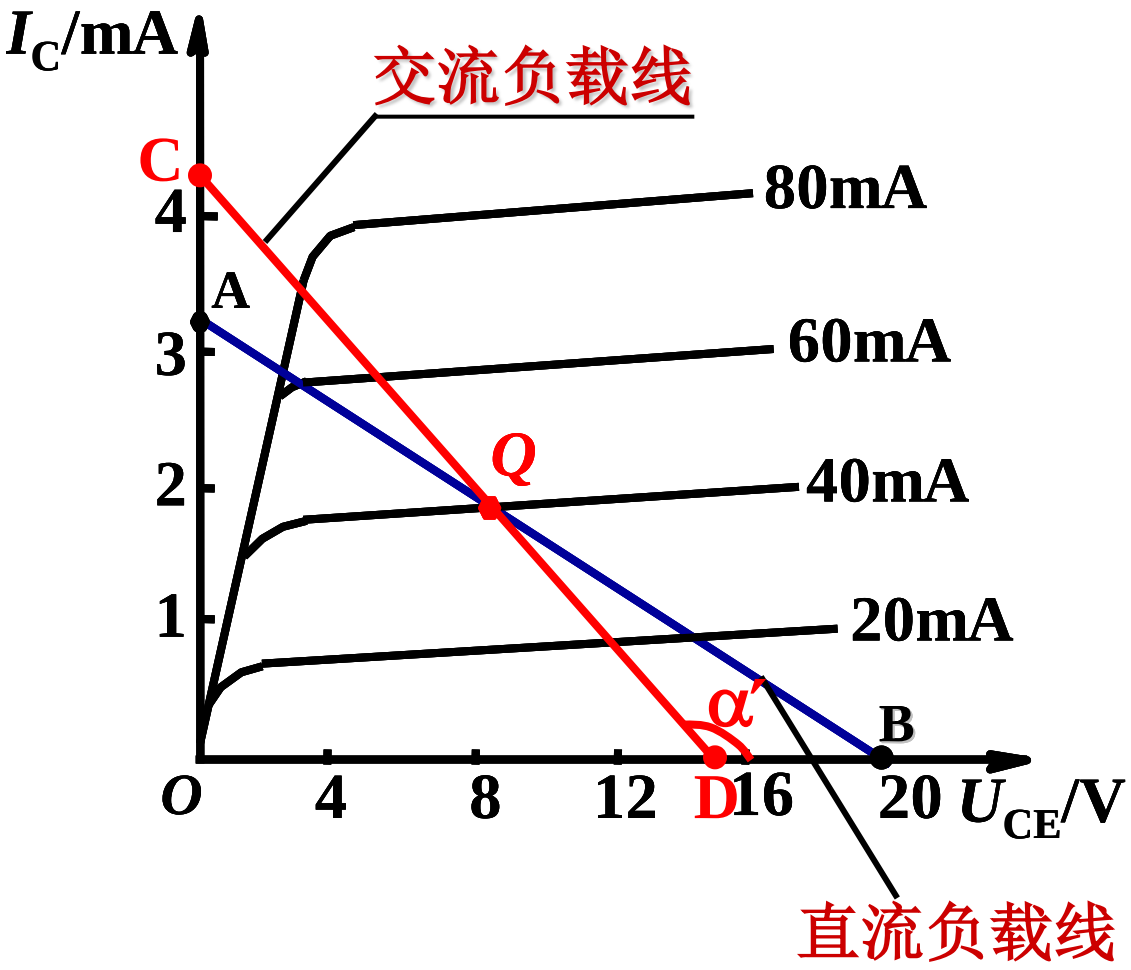
1. 交流负载线

交流负载线反映动态时电流 i_C和电压u_{CE}的变化关系。

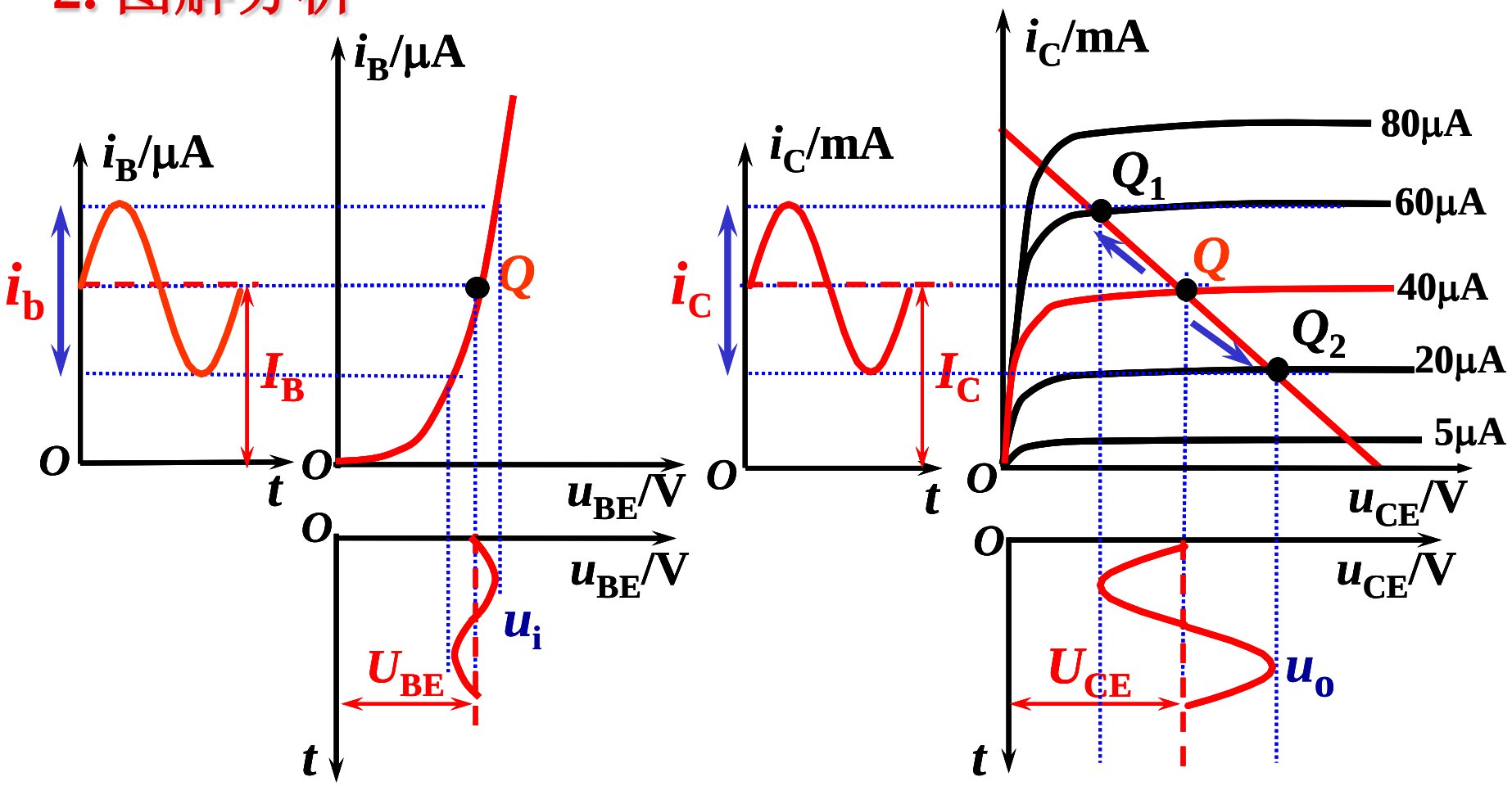
交流负载线斜率

$$\tan\alpha' = -\frac{1}{R'_L}$$

因为$R'_L < R'_C$，所以交流负载线比直流负载线更陡。



2. 图解分析

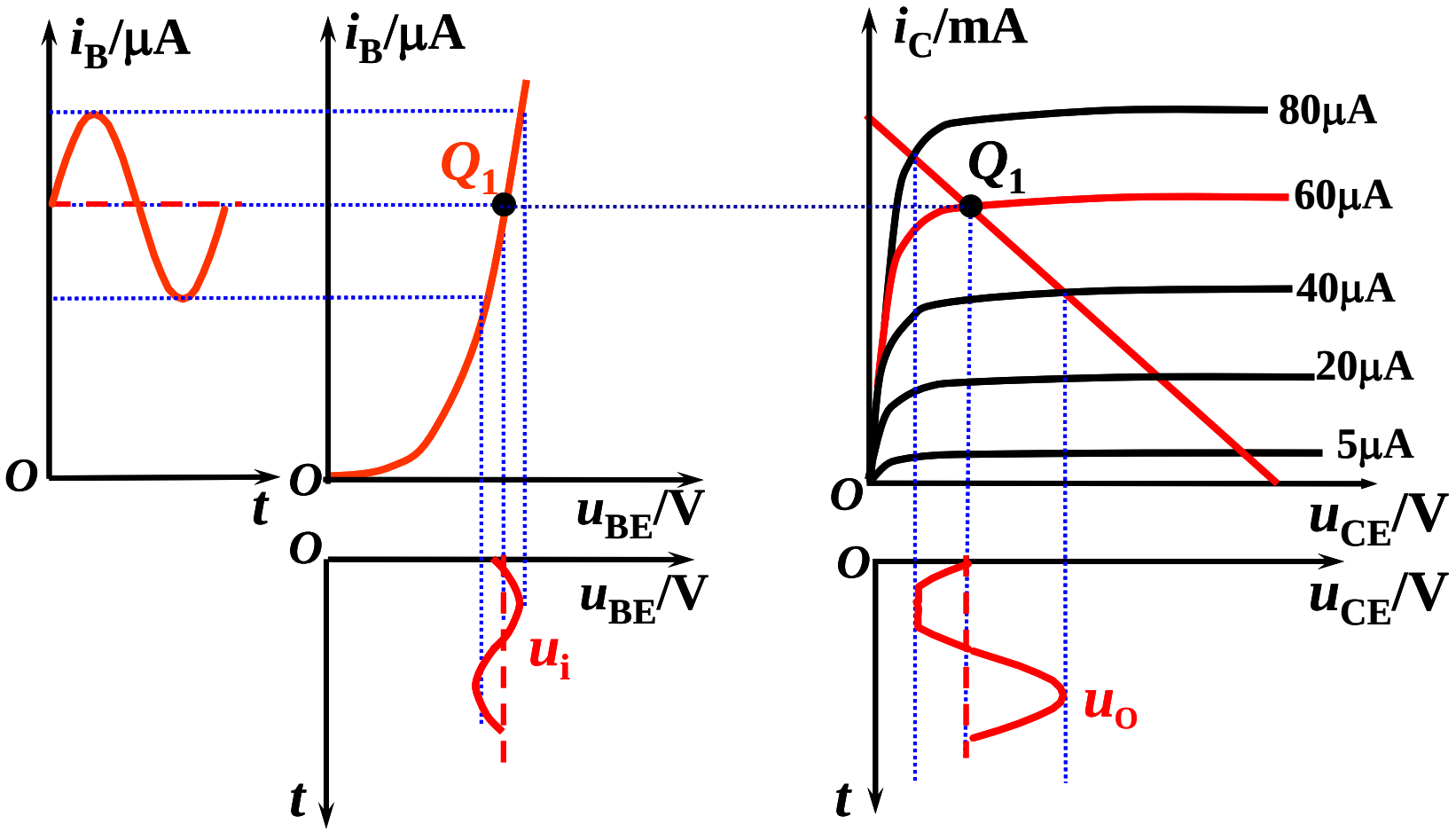


由u_o和u_i的峰值(或峰峰值)之比可得放大电路的电压放大倍数。

3. 非线性失真

若Q设置过高, 晶体管进入饱和区工作, 造成饱和失真。

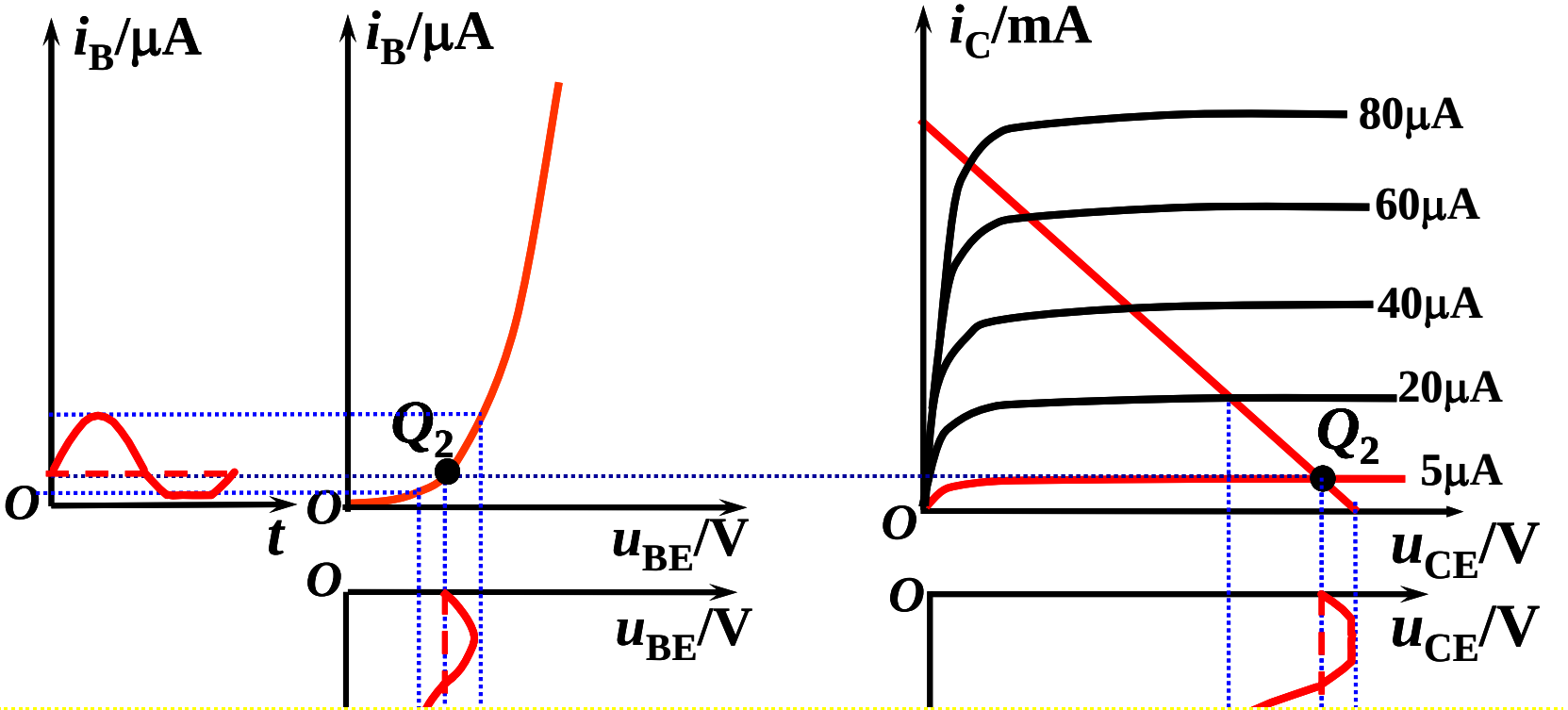
解决办法：适当减小基极电流可消除失真。



3. 非线性失真

若Q设置过低, 晶体管进入截止区工作, 造成截止失真。

解决办法：适当增加基极电流可消除失真。



如果 Q 设置合适，信号幅值过大也可产生失真，减小信号幅值可消除失真。

静态工作点的稳定

合理设置静态工作点是保证放大电路正常工作的先决条件。但是放大电路的静态工作点常因外界条件的变化而发生变动。

前述的固定偏置放大电路，简单、容易调整，但在温度变化、晶体管老化、电源电压波动等外部因素的影响下，将引起静态工作点的变动，严重时将使放大电路不能正常工作，其中影响最大的是温度的变化。

1 温度变化对静态工作点的影响

在固定偏置放大电路中，当温度升高时，

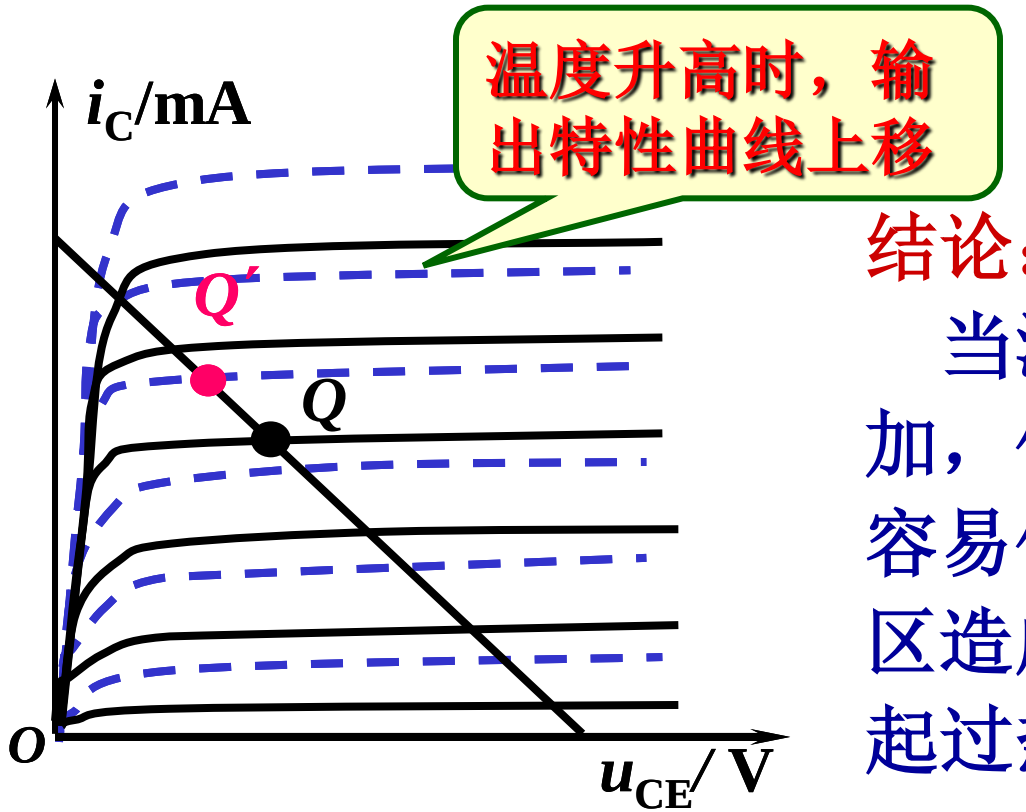
$U_{BE}\downarrow$、$\beta\uparrow$、$I_{CBO}\uparrow$。

$$I_C\uparrow = \bar{\beta} I_B + I_{CEO}$$

$$= \bar{\beta}\uparrow \frac{U_{CC} - U_{BE}\downarrow}{R_B} + (1+\bar{\beta}\uparrow) I_{CBO}\uparrow$$

上式表明，当U_{CC}和 R_B一定时， I_C与 U_{BE}、β以及 I_{CEO}有关，而这三个参数随温度而变化。

温度升高时， I_C将增加，使Q点沿负载线上移。



结论：

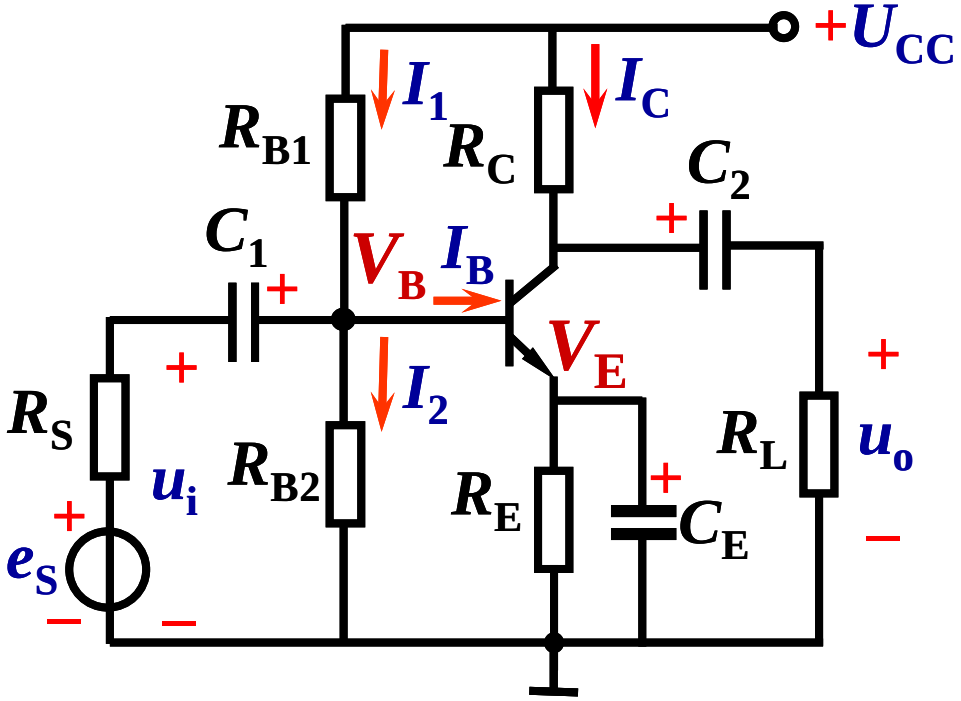
当温度升高时， I_C将增加，使Q点沿负载线上移，容易使晶体管T 进入饱和区造成饱和失真，甚至引起过热烧坏晶体管。

固定偏置电路的工作点

Q 点是不稳定的，为此需要改进偏置电路。当温度升高使 I_C 增加时，能够自动减少 I_B，从而抑制 Q 点的变化，保持 Q 点基本稳定。

分压式偏置电路

1. 稳定Q点的原理



若满足：$I_2 >> I_B$

$$I_1 \approx I_2 \approx \frac{U_{CC}}{R_{B1}+R_{B2}}$$

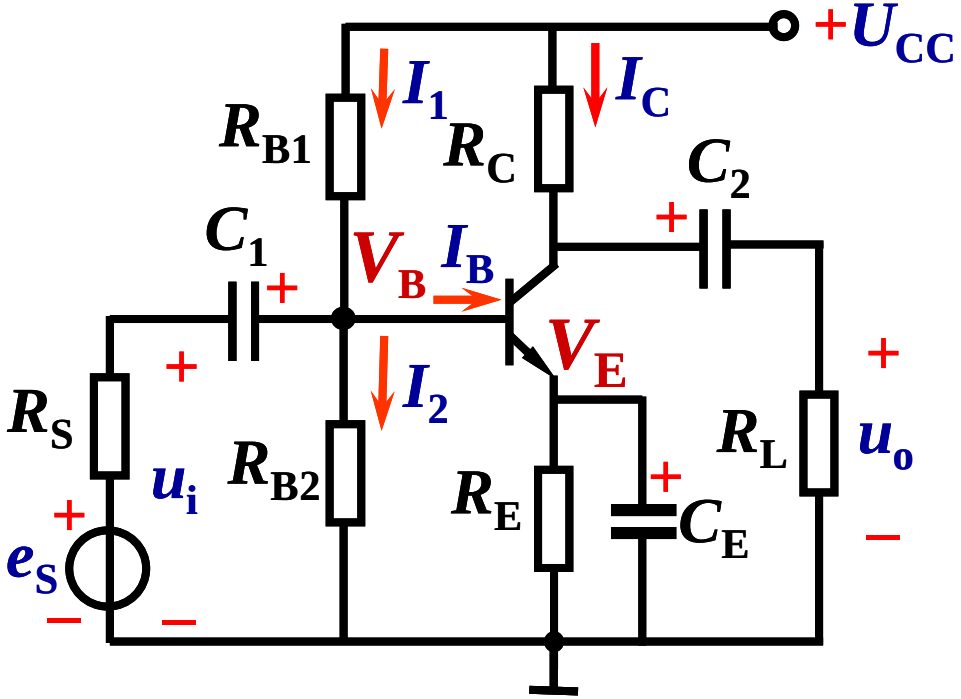
$$V_B = I_2 R_{B2}$$

$$V_B \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}} U_{CC}$$

基极电位V_B与晶体管的参数无关，不受温度的影响。

分压式偏置电路

1. 稳定Q点的原理



$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_E}$$

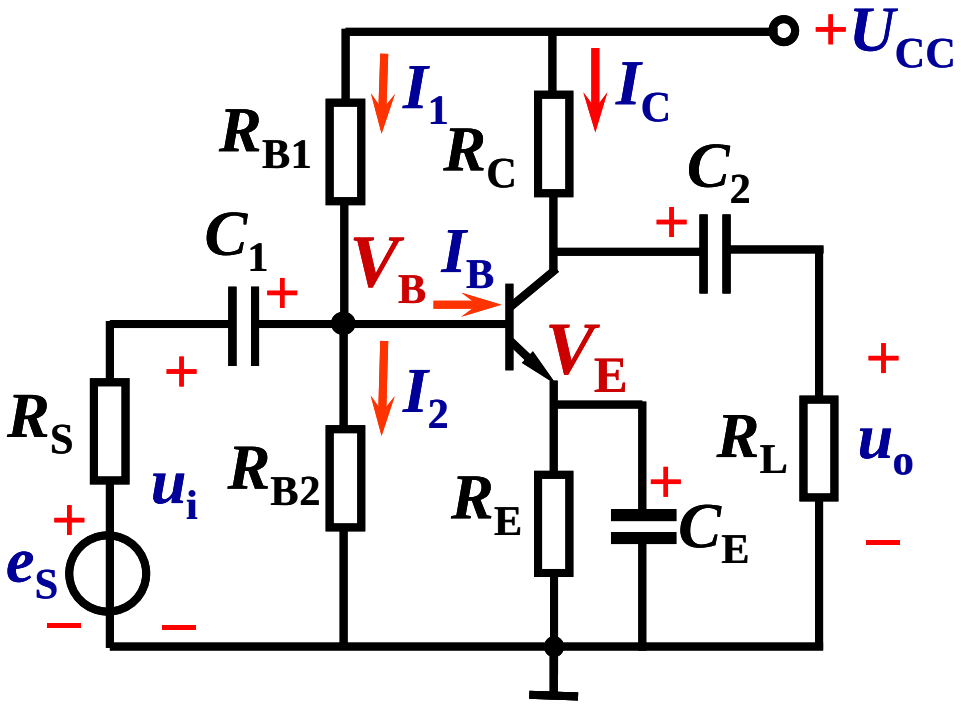
若满足：$V_B >> U_{BE}$

$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_E}$$

$$\approx \frac{V_B}{R_E}$$

集电极电流基本恒定，不随温度变化。

参数的选择



从Q点稳定的角度来看似乎I_2、V_B越大越好。

但 I_2越大，R_{B1}、R_{B2}必须取得较小，将增加损耗，降低输入电阻。

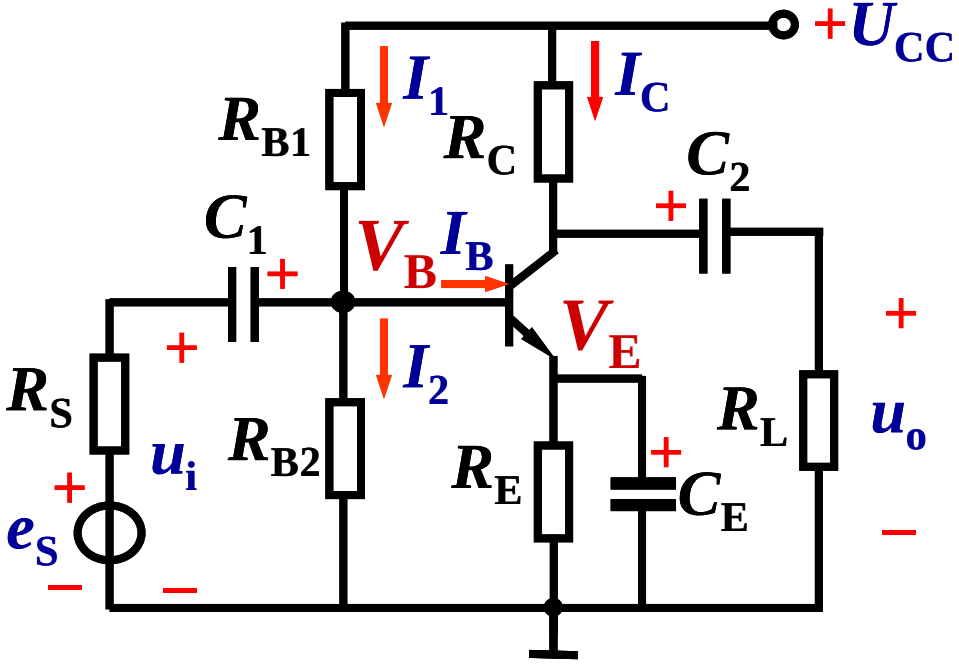
而V_B过高必使 V_E也增高，在 U_{CC}一定时，势必使 U_{CE}减小，从而减小放大电路输出电压的动态范围。

在估算时一般选取：

I_2= (5 ~10) I_B，V_B= (5 ~10) U_{BE}

R_{B1}、R_{B2}的阻值一般为几十千欧

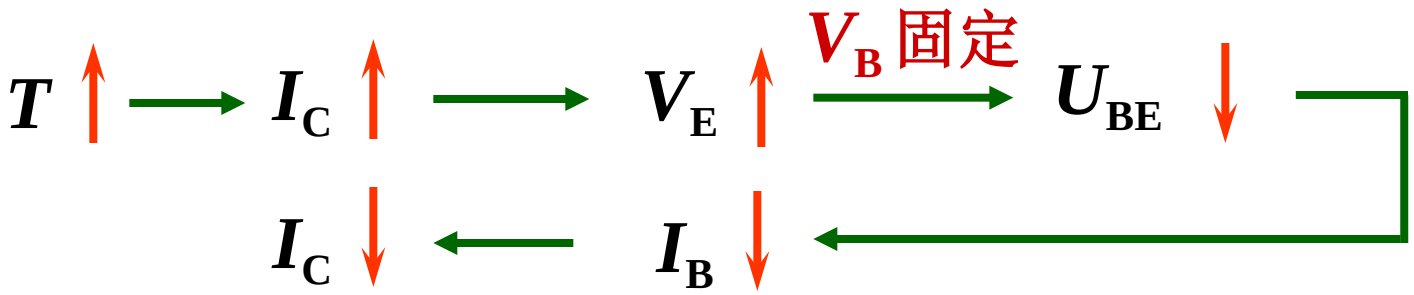
Q 点稳定的过程



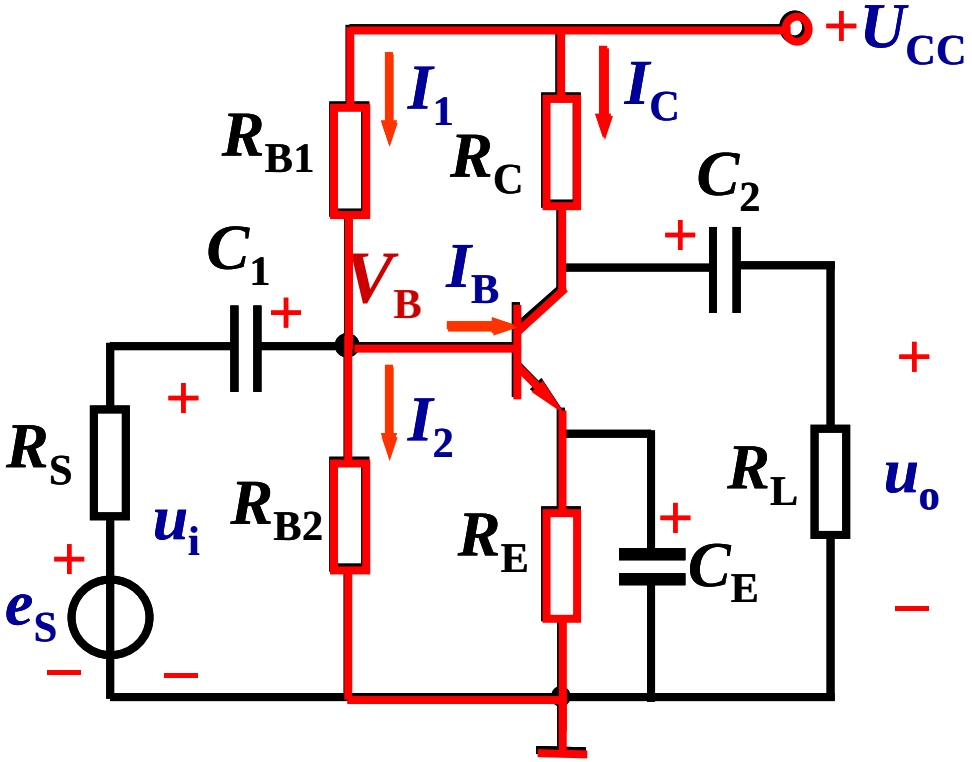
R_E：温度补偿电阻

对直流：R_E 越大，稳定 Q 点效果越好；

对交流：R_E 越大，交流损失越大，为避免交流损失加旁路电容 C_E。



2. 静态工作点的计算



估算法：

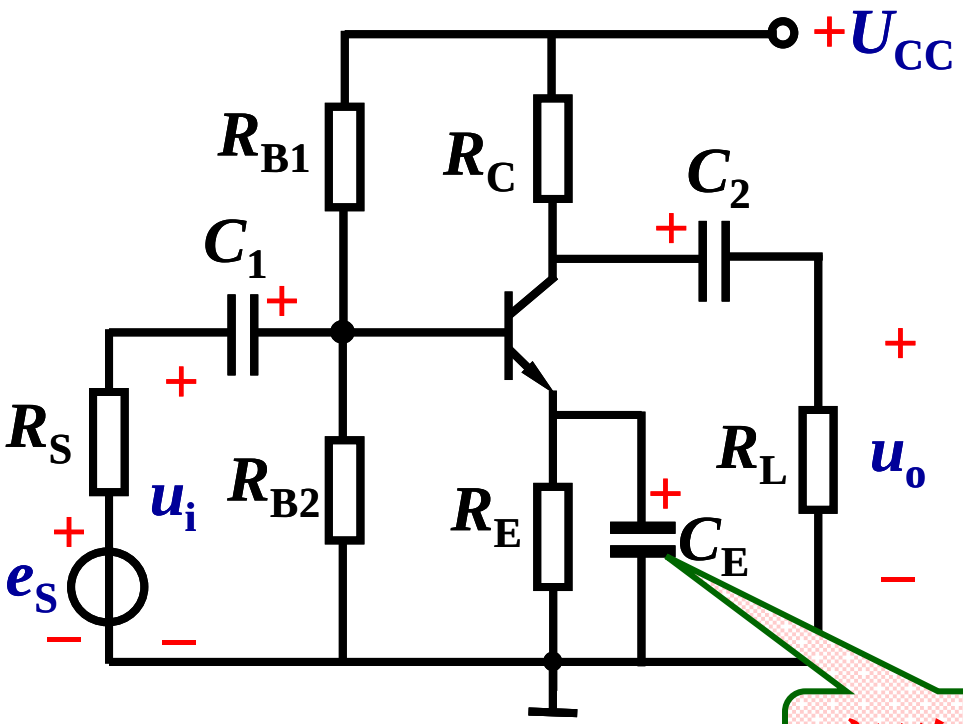
$$V_B \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}}U_{CC}$$

$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_E}$$

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

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C - I_E R_E$$
$$= U_{CC} - I_C(R_C + R_E)$$

3. 动态分析

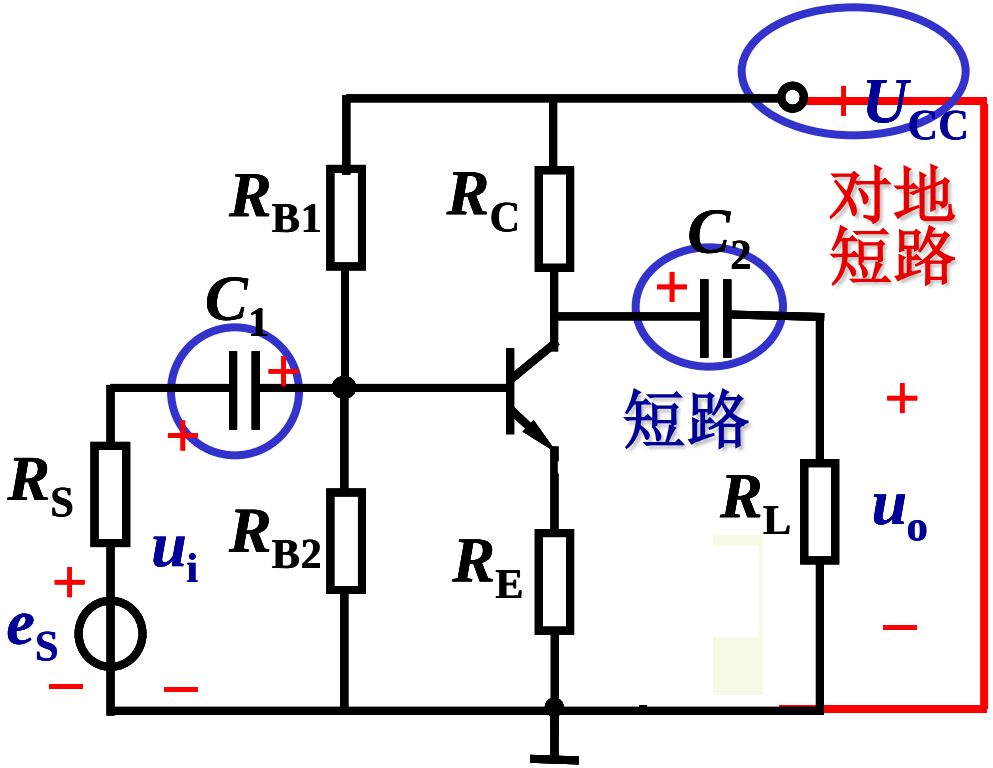




如果去掉C_E，

A_u，r_i，r_o ？

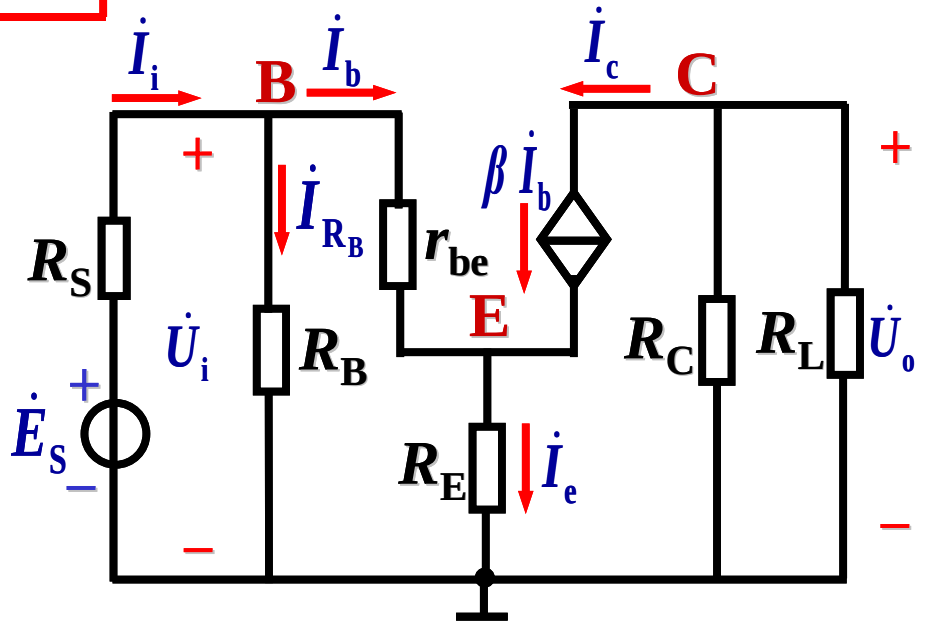
对交流：旁路电容 C_E 将R_E 短路， R_E不起作用，A_u，r_i，r_o与固定偏置电路相同。





去掉C_E后的
微变等效电路

$$R_B = R_{B1} // R_{B2}$$



分压式偏置电路

有旁路电容C_E

$$A_u = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}}$$

$$r_i = R_B // r_{be}$$

$$r_o = R_C$$

无旁路电容C_E

$$A_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1+\beta) R_E}$$

A_u减小

$$r_i = R_{B1} // R_{B2} // [r_{be} + (1+\beta) R_E]$$

r_i提高

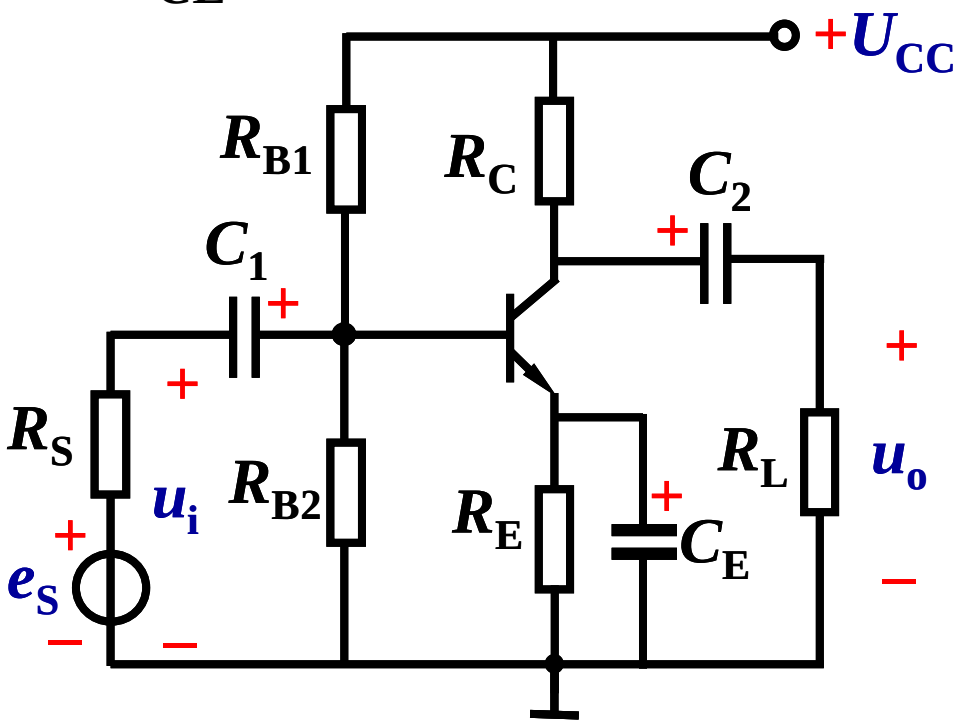
$$r_o = R_C$$

r_o不变

例1： 在分压式偏置电路中，已知：V_{CC} = 2V，R_{B1}= 30 kΩ,R_{B2} = 10 kΩ，R_C = 4kΩ，R_E = 2.2kΩ，R_L = 4 kΩ，C_E = 100 μF，C_1 = C_2 = 20 μF，晶体管的β = 50。试求：

(1) 计算静态值 I_B、I_C 和 U_{CE}；

(2) 计算A_u、r_i和 r_o。



解：(1) 可用估算法求静态值

$$V_B = V_{CC}\frac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}} = 12\times\frac{10}{30+10} = 3\text{V}$$

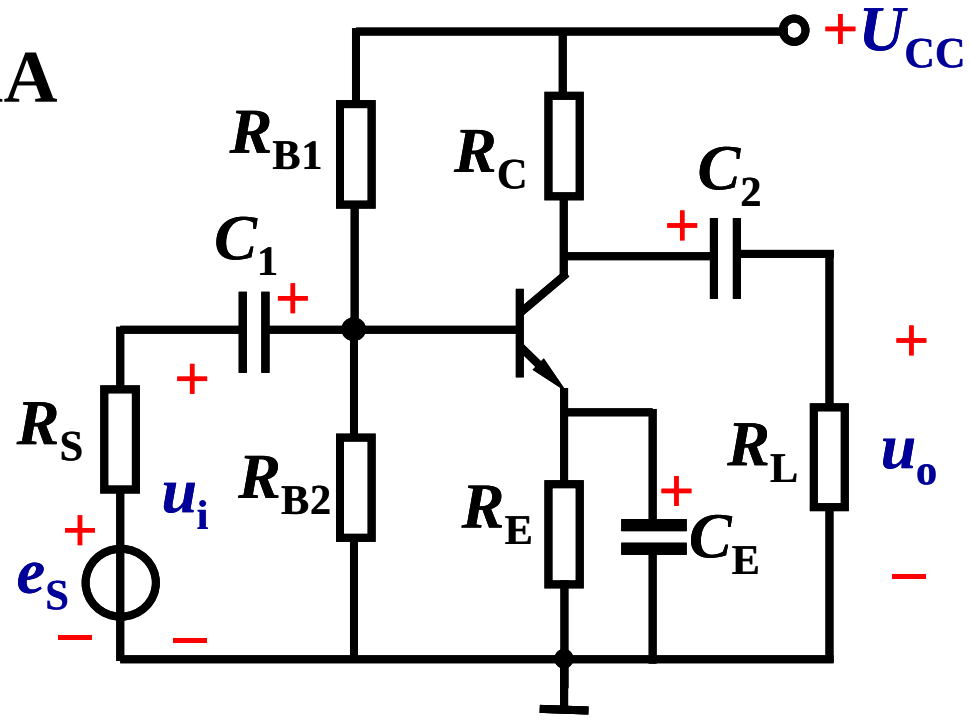
$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_E} = \frac{3-0.6}{2.2} = 1.09\ \text{mA}$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{1.09}{50} = 21.8\ \mu\text{A}$$

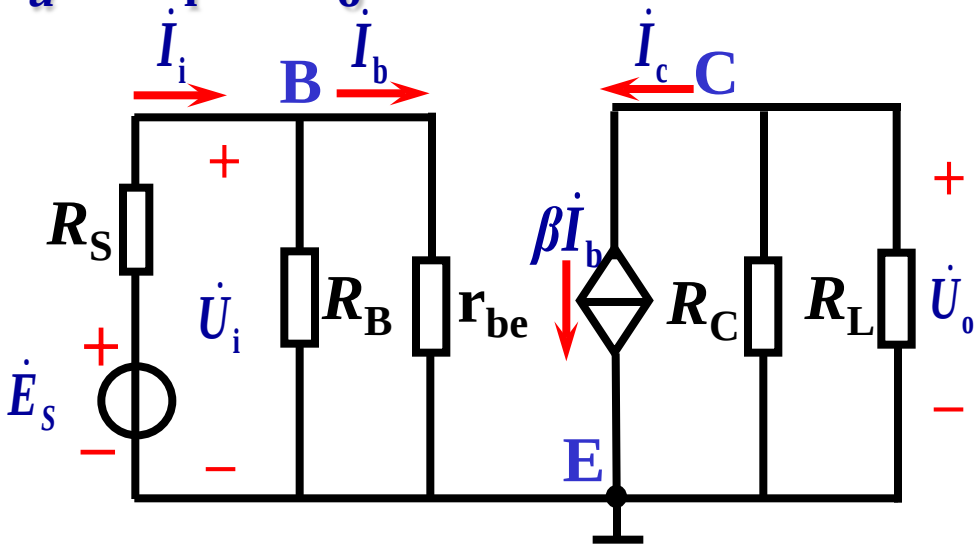
$$U_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C+R_E)$$

$$= 12 - 1.09(4+2.2)$$

$$= 5.24\text{V}$$



(2) 由微变等效电路求A_u、 r_i、 r_o。



$$r_{be} = 300 + (1+\beta)\frac{26}{I_E} = 300 + 51 \times \frac{26}{1.09} = 1.52\text{k}\Omega$$

$$A_u = -\beta \frac{R_C // R_L}{r_{be}} = -50 \times \frac{4//4}{1.52\text{k}\Omega} = -65.8$$

$$r_i = R_{B1} // R_{B2} // r_{be} = 30//10//1.42 = 1.12\ \text{k}\Omega$$

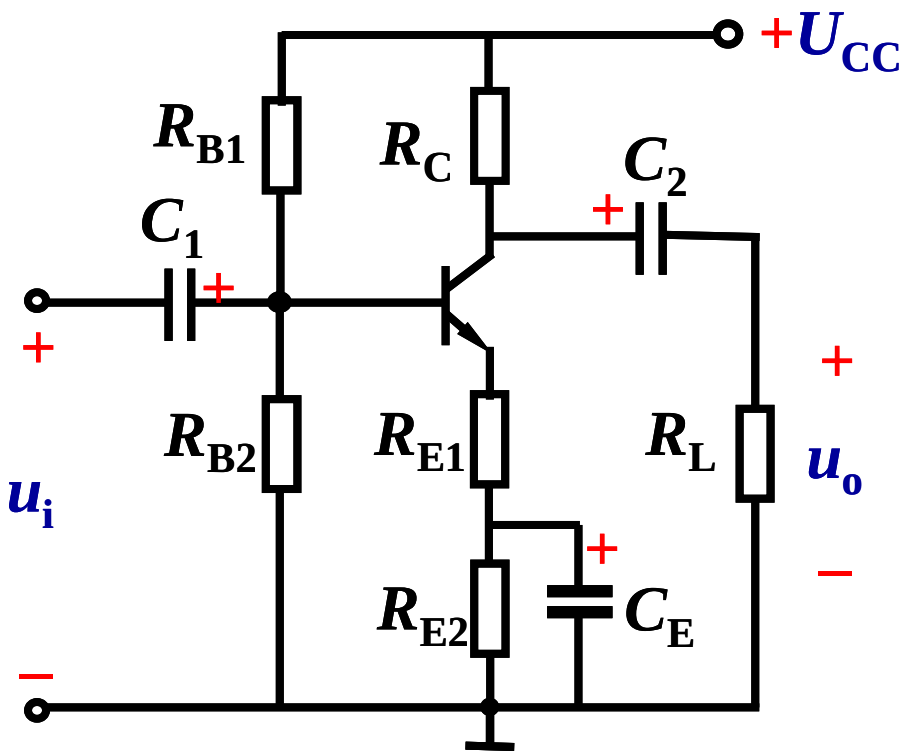
$$r_o = R_C = 4\ \text{k}\Omega$$

例2: 在图示放大电路中， 已知U_{CC}=12V, R_C= 6k Ω, R_{E1}= 300 Ω, R_{E2}= 2.7k Ω, R_{B1}= 60k Ω , R_{B2}= 20k Ω , R_L= 6k Ω ， 晶体管 β = 50， U_{BE}= 0.6V, 试求:

(1) 静态工作点 I_B、I_C 及 U_{CE};

(2) 画出微变等效电路;

(3) 输入电阻r_i、r_o及 A_u。



解：(1)由直流通路求静态工作点。

$$V_B \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}}U_{CC} = \frac{20}{60+20}\times 12V = 3V$$

$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_{E1}+R_{E2}} = \frac{3-0.6}{3}mA$$

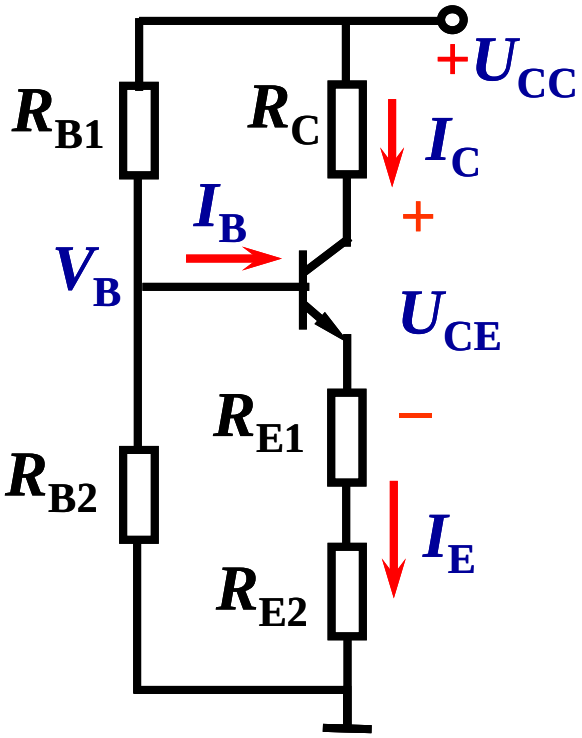
$$= 0.8\,mA$$

$$I_B \approx \frac{I_C}{\beta} = \frac{0.8}{50}\mu A = 16\,\mu A$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C - I_E(R_{E1}+R_{E2})$$

$$= 12 - 0.8\times 6 - 0.8\times 3V$$

$$= 4.8\,V$$



直流通路

(2) 由微变等效电路求A_u、r_i、r_o。

其中 $R_B = R_{B1} // R_{B2} = 15\,k\Omega$

$$r_{be} = 200 + (1+\beta)\frac{26}{I_E} = 200 + 51 \times \frac{26}{0.8}\Omega = 1.86\,k\Omega$$

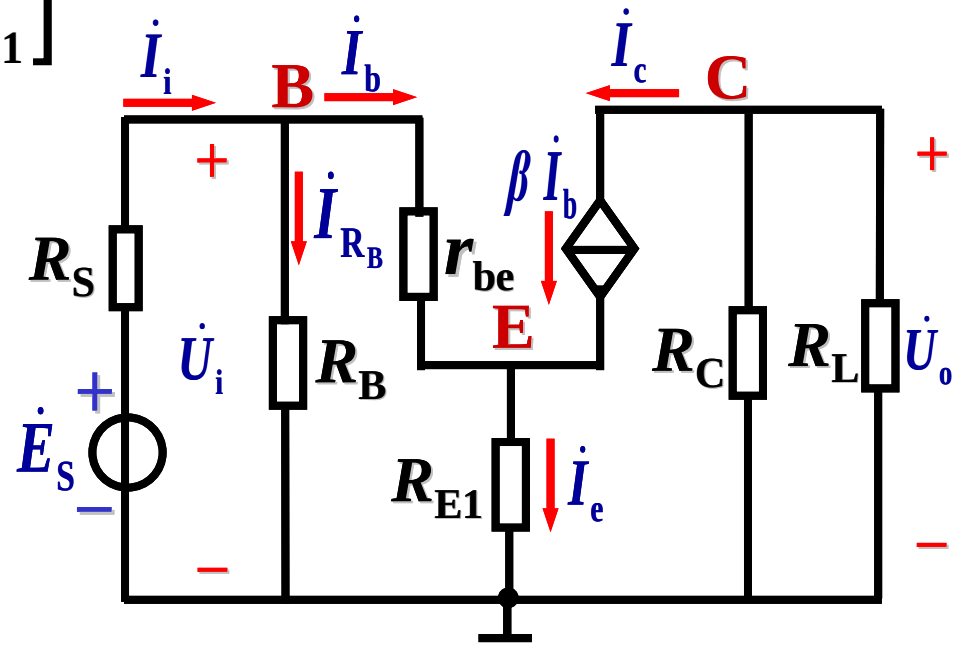
$$r_i = R_B // \left[r_{be} + (1+\beta)R_{E1}\right]$$

$$\approx 8.03\,k\Omega$$

$$r_o = R_C \approx 6\ k\Omega$$

$$A_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1+\beta)R_{E1}}$$

$$= -8.69$$

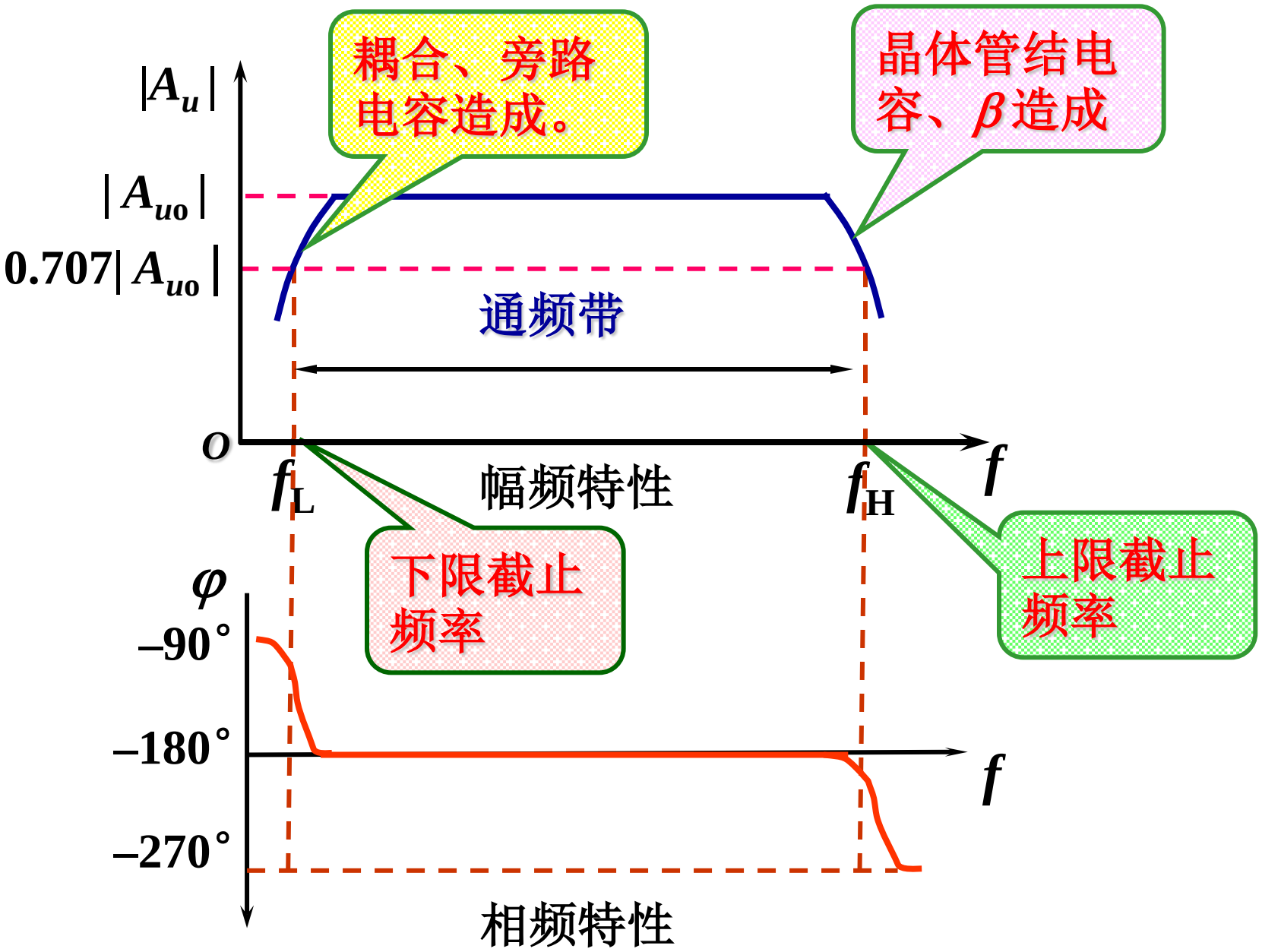


微变等效电路

放大电路的频率特性

阻容耦合放大电路由于存在级间耦合电容、发射极旁路电容及晶体管的结电容等，它们的容抗随频率变化，故当信号频率不同时，放大电路的输出电压相对于输入电压的幅值和相位都将发生变化。

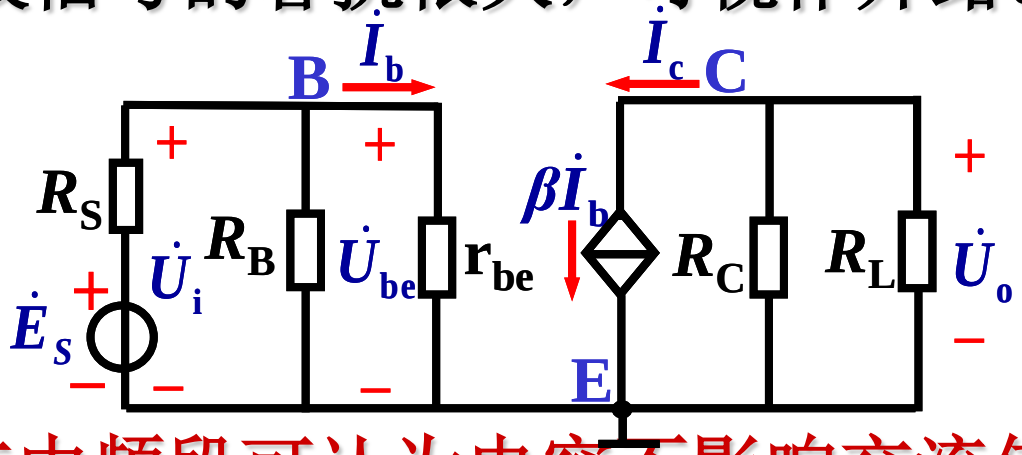
频率特性
- 幅频特性：电压放大倍数的模$|A_u|$与频率 f 的关系
- 相频特性：输出电压相对于输入电压的相位移 φ 与频率 f 的关系


耦合、旁路电容造成。
晶体管结电容、β造成
$|A_u|$
$|A_{uo}|$
$0.707|A_{uo}|$
通频带
O
f_L
幅频特性
f_H
f
下限截止频率
上限截止频率
φ
–90°
–180°
–270°
f
相频特性

在中频段

由于耦合电容和发射极旁路电容的容量较大，故对中频段信号的容抗很小，可视作短路。

晶体管的极间电容和导线的分布电容很小，可认为它们的等效电容C_o与负载并联。由于C_o的电容量很小，它对中频段信号的容抗很大，可视作开路。



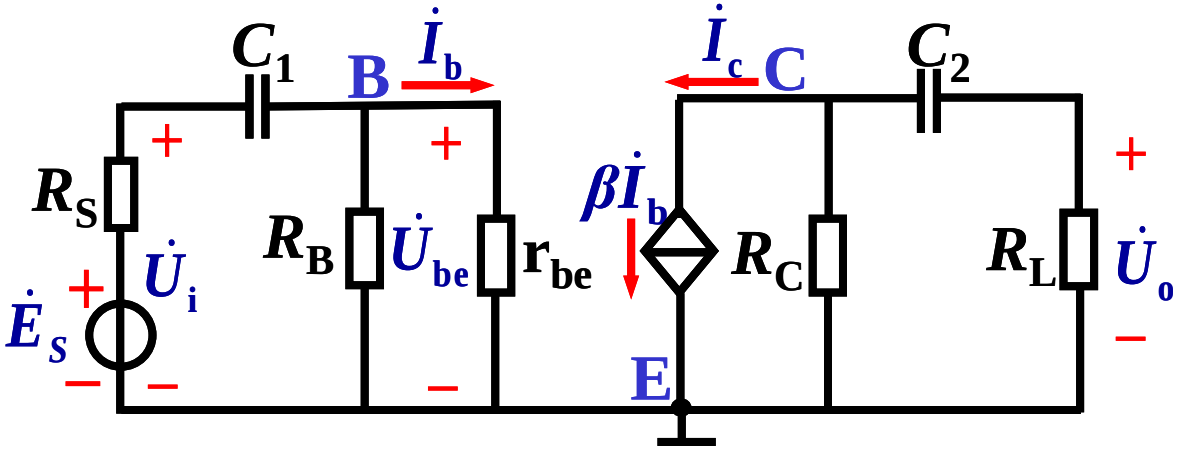
所以，在中频段可认为电容不影响交流信号的传送，放大电路的放大倍数与信号频率无关。

(前面所讨论的放大倍数及输出电压相对于输入电压的相位移均是指中频段的)

在低频段：

由于信号的频率较低，耦合电容和发射极旁路电容的容抗较大，其分压作用不能忽略。以至实际送到晶体管输入端的电压 $\dot{U}_{be}$ 比输入信号 $\dot{U}_i$ 要小，故放大倍数降低，并使 $\dot{U}_o$ 产生越前的相位移(相对于中频段)。

C_O的容抗比中频段还大，仍可视作开路。

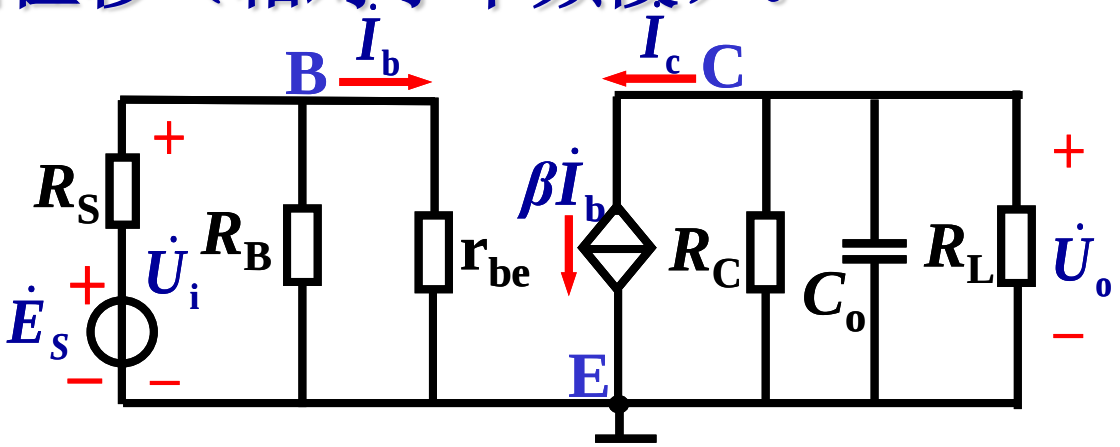


所以，在低频段放大倍数降低和相位移越前的主要原因是耦合电容和发射极旁路电容的影响。

在高频段：

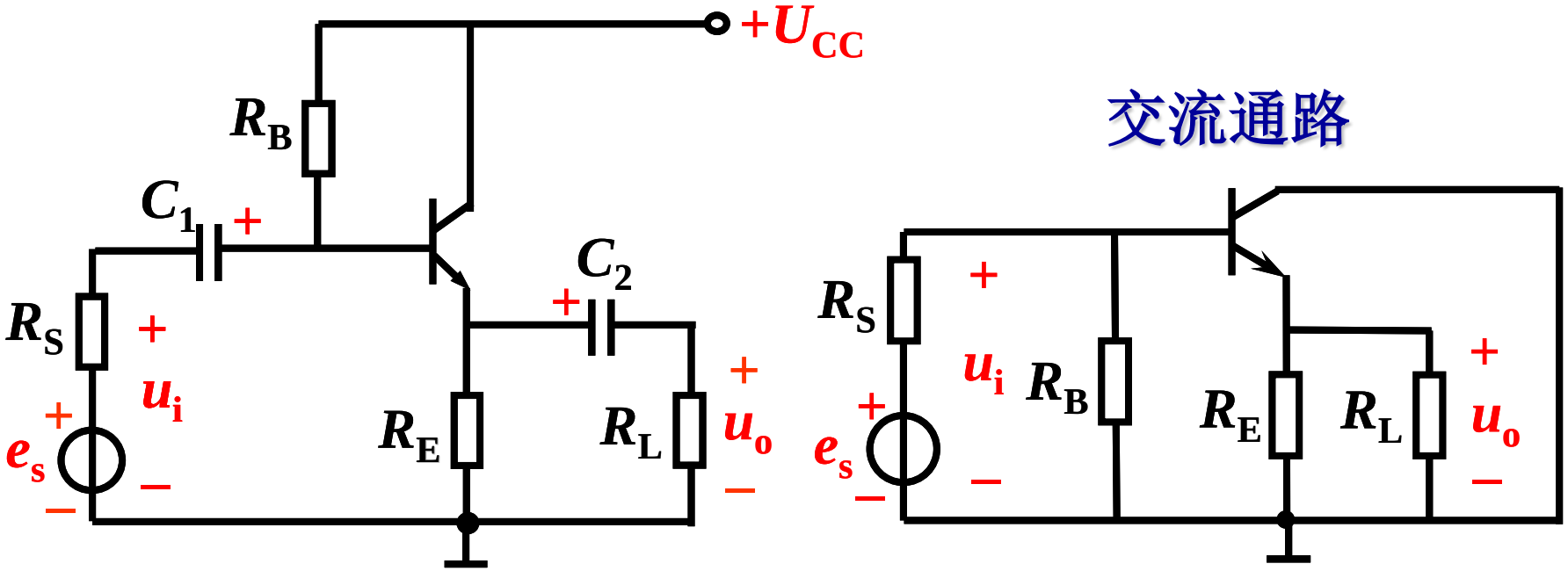
由于信号的频率较高，耦合电容和发射极旁路电容的容抗比中频段还小，仍可视作短路。

C_o的容抗将减小，它与负载并联，使总负载阻抗减小，在高频时晶体管的电流放大系数 β 也下降，因而使输出电压减小，电压放大倍数降低，并使 $\dot{U}_o$ 产生滞后的相位移（相对于中频段）。



高频段放大倍数降低和相位移滞后的主要原因是晶体管电流放大系数、极间电容和导线分布电容的影响。

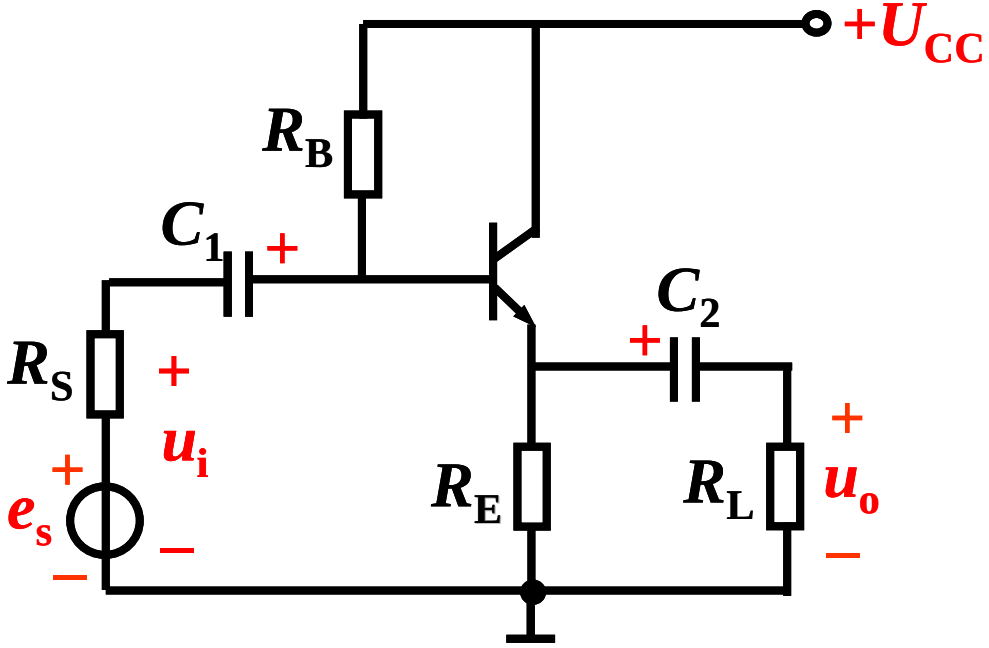
8.7 共集电极放大电路



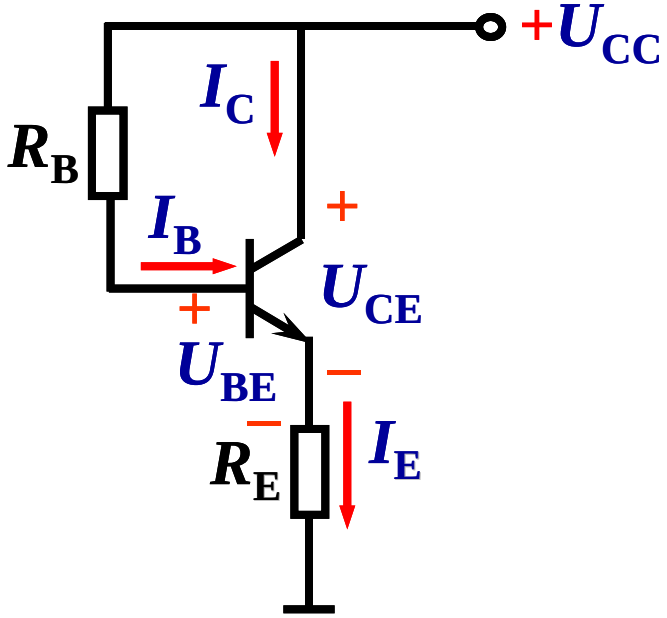
因对交流信号而言，集电极是输入与输出回路的公共端，所以是共集电极放大电路。

因从发射极输出，所以称射极输出器。

1 静态分析



直流通路

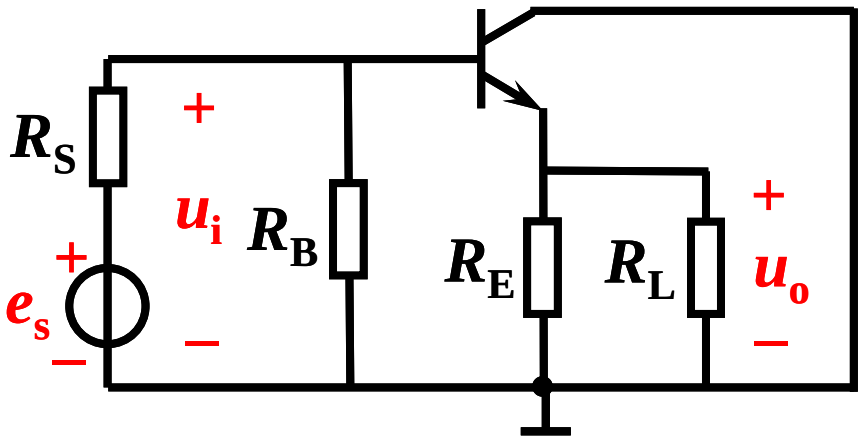


求 Q 点：

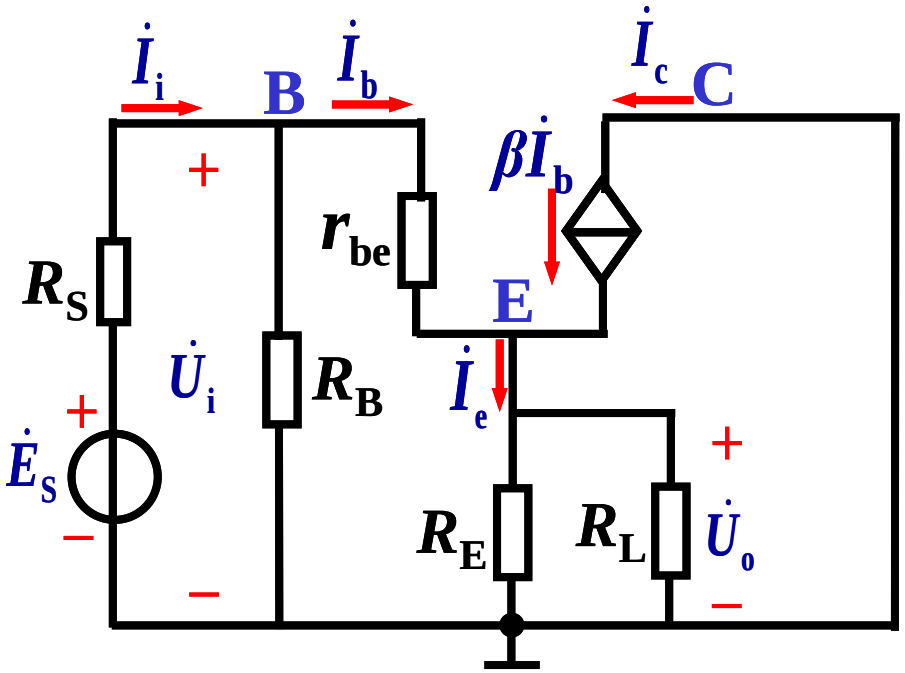
$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B + (1+\beta)R_E}$$

$$I_E = (1+\beta)I_B \qquad U_{CE} = U_{CC} - I_E R_E$$

2 动态分析



交流通路



微变等效电路

(1) 电压放大倍数

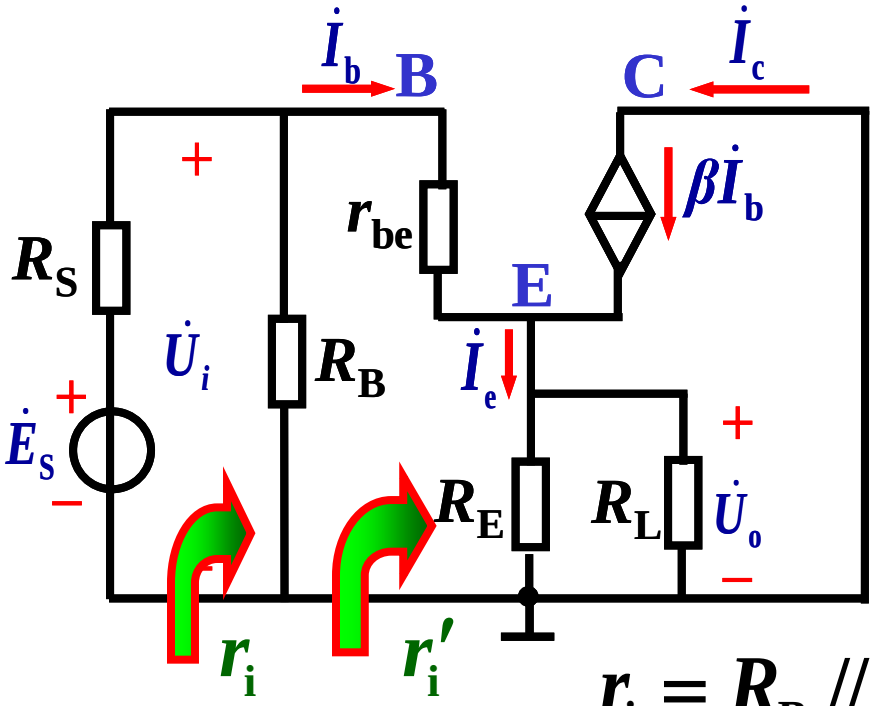
$$R'_L = R_E \,//\, R_L$$

$$\dot{U}_o = \dot{I}_e R'_L = (1+\beta)\ \dot{I}_b R'_L$$

$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R'_L = \dot{I}_b r_{be} + (1+\beta)\dot{I}_b R'_L$$

电压放大倍数$A_u \approx 1$且输入输出同相，输出电压跟随输入电压，故称电压跟随器。

2. 输入电阻



射极输出器的输入电阻高，对前级有利。

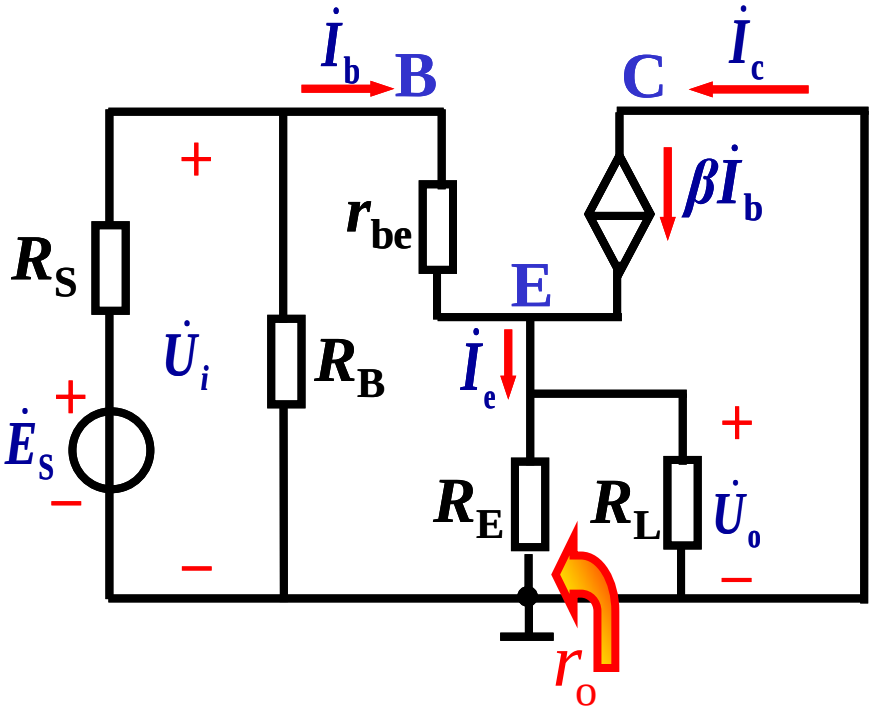
r_i 与负载有关

$$r_i = R_B // r_i'$$

$$r_i' = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_b} = \frac{\dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R_E // R_L}{\dot{I}_b} = r_{be} + (1+\beta)R_L'$$

$$r_i = R_B // \left[r_{be} + (1+\beta)R_L'\right] \qquad R_L' = R_E // R_L$$

3. 输出电阻



$$r_o = R_E \,//\, \frac{r_{be} + R'_s}{1+\beta}$$

$$R'_S = R_B \,//\, R_S$$

通常：$(1+\beta)R_E >> r_{be} + R'_s$

$$r_o \approx \frac{r_{be} + R'_s}{1+\beta}$$

射极输出器的输出电阻很小，带负载能力强。

共集电极放大电路(射极输出器)的特点：

$$A_u = \frac{(1+\beta)R'_L}{r_{be}+(1+\beta)R'_L}$$

$$r_i = R_B // \left[r_{be}+(1+\beta)R'_L\right]$$

$$r_o \approx \frac{r_{be}+R'_s}{1+\beta}$$

1. 电压放大倍数小于1，约等于1;
2. 输入电阻高;
3. 输出电阻低;
4. 输出与输入同相。

射极输出器的应用

主要利用它具有输入电阻高和输出电阻低的特点。

1. 因输入电阻高，它常被用在多级放大电路的第一级，可以提高输入电阻，减轻信号源负担。

2. 因输出电阻低，它常被用在多级放大电路的末级，可以降低输出电阻，提高带负载能力。

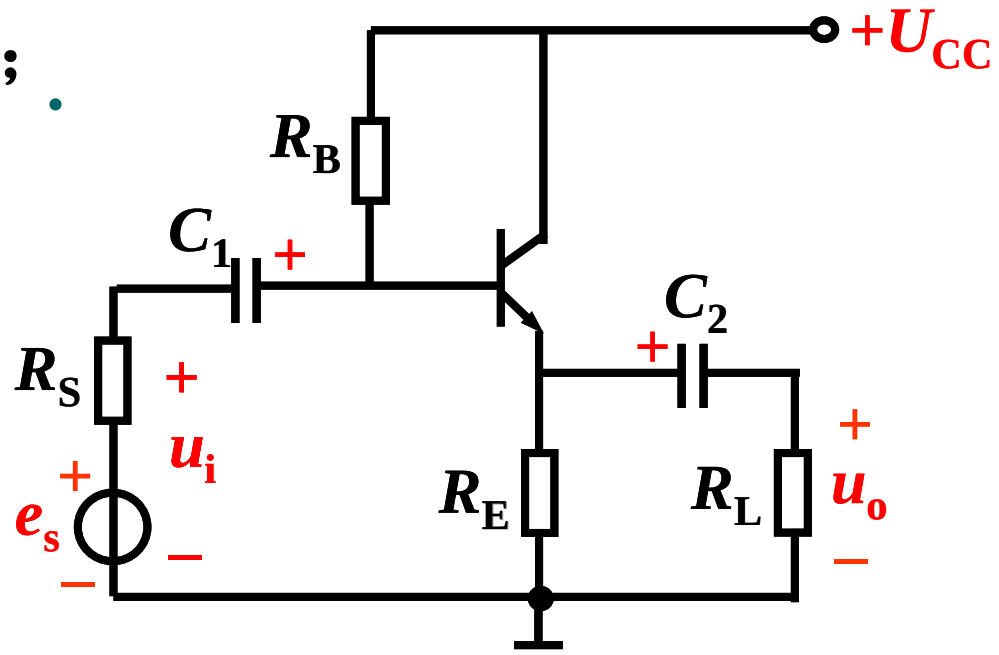
3. 利用 r_i 大、 r_o 小以及 $A_u \approx 1$ 的特点，也可将射极输出器放在放大电路的两级之间，起到阻抗匹配作用，这一级射极输出器称为缓冲级或中间隔离级。

例1: 在图示放大电路中，已知U_{CC}=12V, R_E= 2kΩ, R_B= 200kΩ，R_L= 2kΩ，晶体管 β = 60，U_{BE}= 0.6V, 信号源内阻R_S= 100Ω，试求:

(1) 静态工作点 I_B、I_E 及 U_{CE};

(2) 画出微变等效电路;

(3) A_u、r_i 和 r_o。

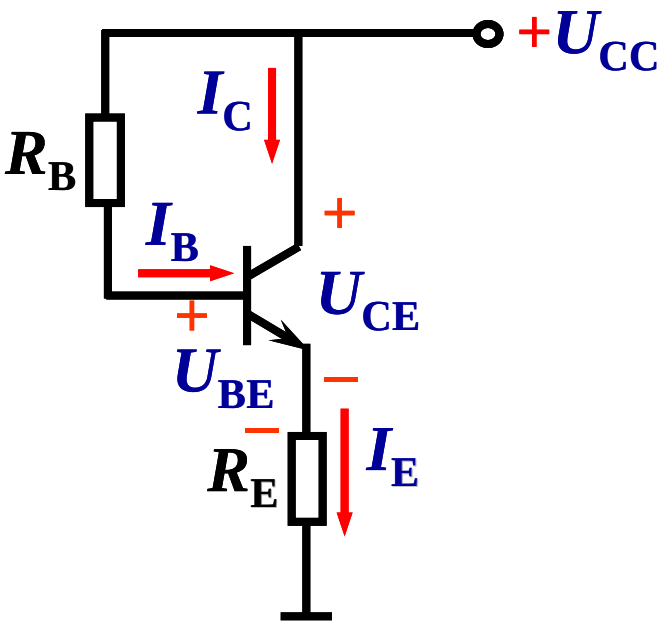


解：(1)由直流通路求静态工作点。

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B + (1+\beta)R_E} = \frac{12 - 0.6}{200 + (1+60)\times 2}\text{mA} = 0.035\text{mA}$$

$$I_E = (1+\beta)I_B$$
$$= (1+60)\times 0.035\text{mA}$$
$$= 2.14\text{mA}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_E R_E$$
$$= 12 - 2\times 2.14\text{V}$$
$$= 7.72\text{V}$$



直流通路

(2) 由微变等效电路求A_u、 r_i、 r_o。

$$r_{be} \approx 200 + (1+\beta)\frac{26}{I_E} = 200 + 61 \times \frac{26}{1.24}\Omega = 0.94\,\text{k}\Omega$$

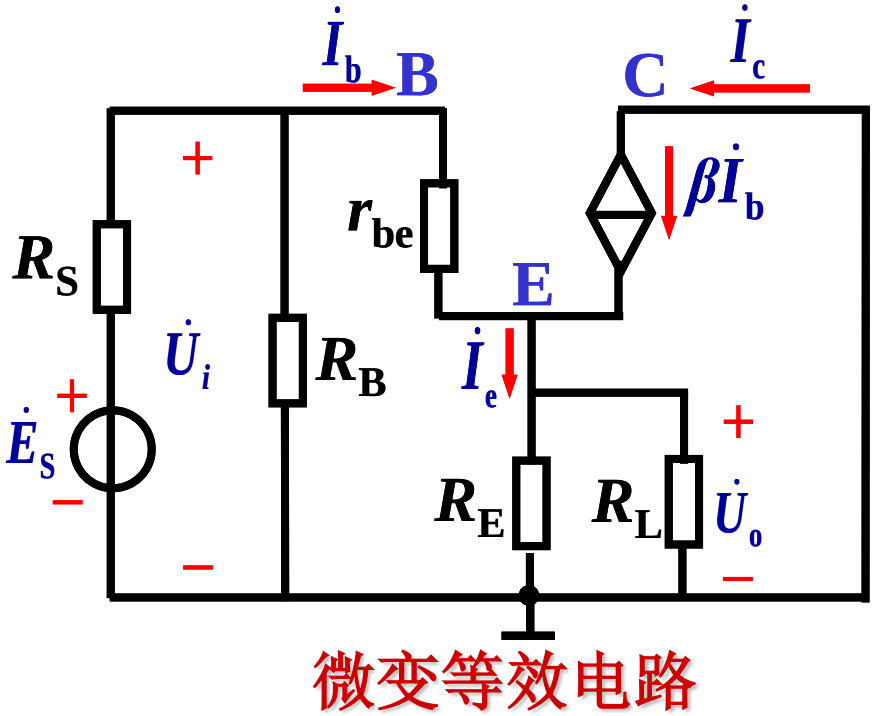
$$A_u = \frac{(1+\beta)R'_L}{r_{be} + (1+\beta)R'_L}$$

$$= 0.98$$

$$r_i = R_B // \left[r_{be} + (1+\beta)R'_L\right]$$

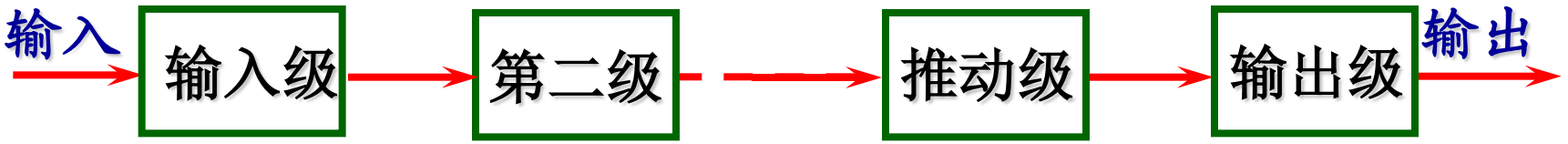
$$= 41.7\text{k}\Omega$$

$$r_o \approx \frac{r_{be} + R'_S}{\beta} = \frac{0.94 + 100}{60}\Omega = 17.3\Omega$$



微变等效电路

8.8 多级放大电路及其级间耦合方式



多级放大电路的框图

1. 耦合方式

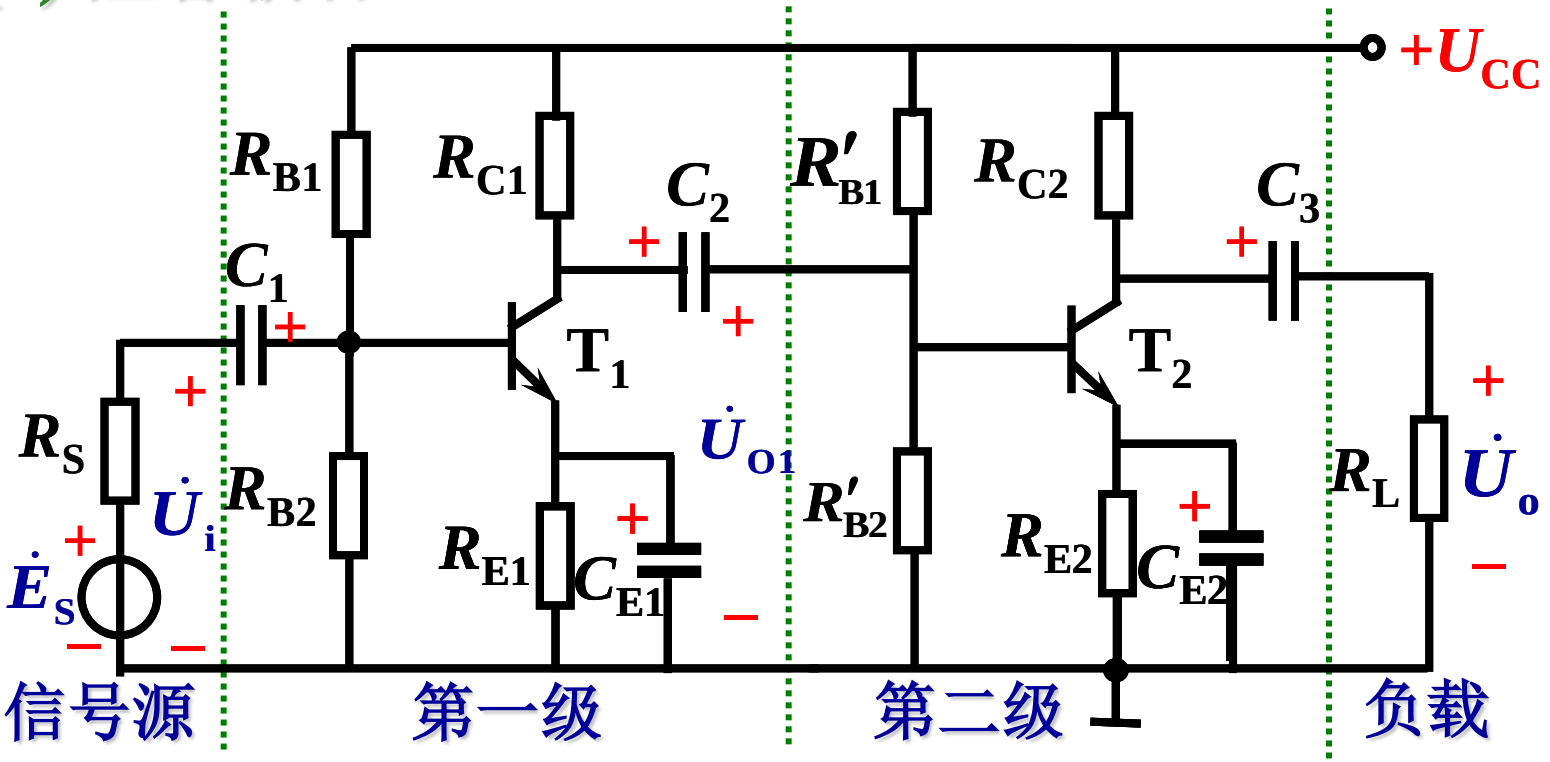
信号源与放大电路之间、两级放大电路之间、放大器与负载之间的连接方式。

常用耦合方式：直接耦合、阻容耦合和变压器耦合。

对耦合电路的要求：

- 静态：保证各级有合适的Q点
- 动态：传送信号
  - 波形不失真
  - 减少压降损失

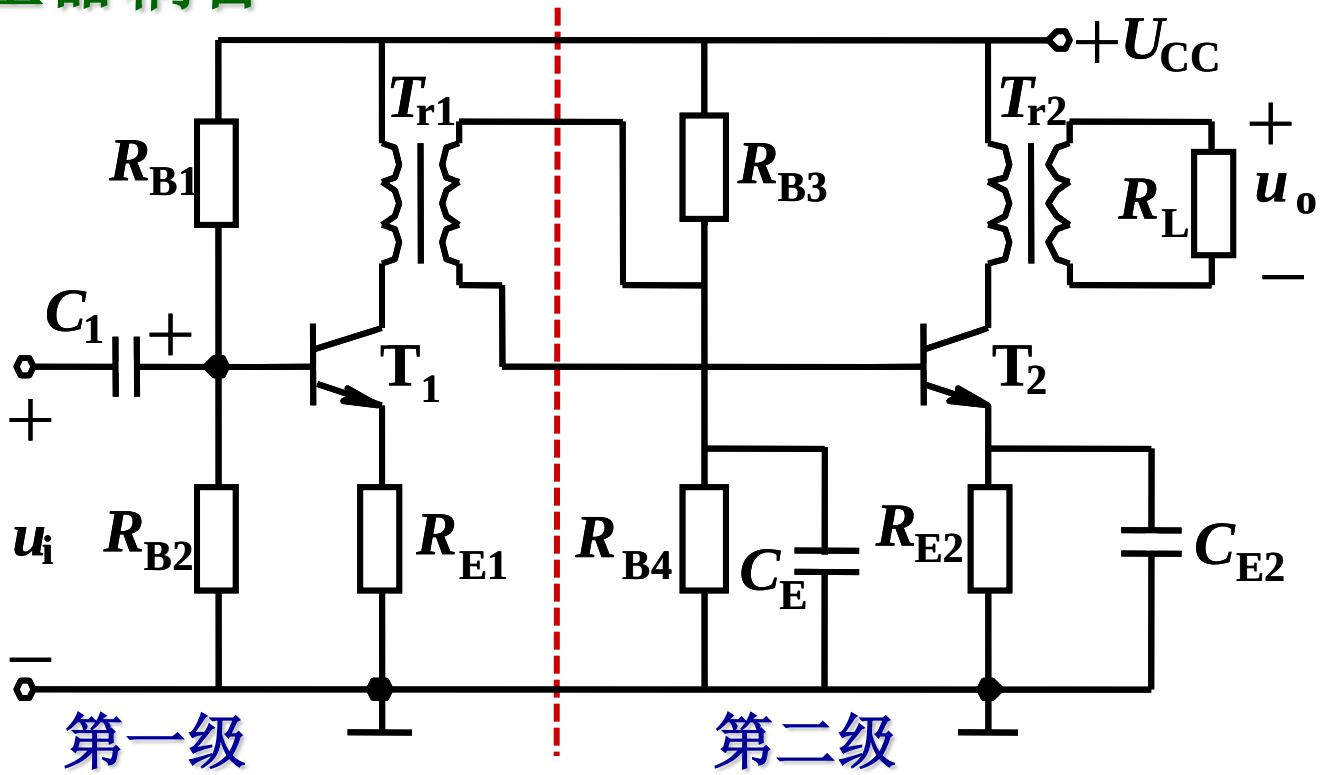
(1) 阻容耦合



特点：每级的静态工作点互相独立，互不影响，便于静态值的分析、设计和调试。

缺点：不利于传递缓慢变化的信号。在集成电路中由于难以制造大容量的电容器，因而受到很大限制。

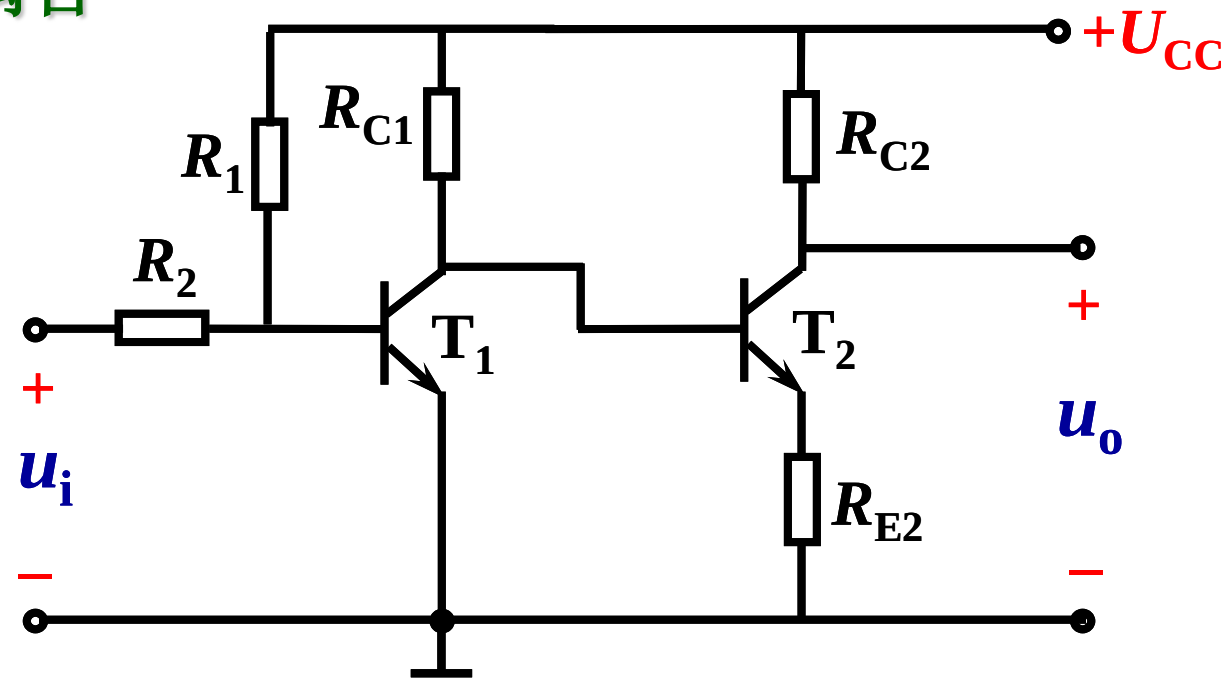
(2) 变压器耦合



特点：隔离直流，在传递交流信号的同时实现阻抗变换。

缺点：变压器比较笨重，无法实现集成，而且也不能传递缓慢变化的信号，目前很少采用。

(3) 直接耦合



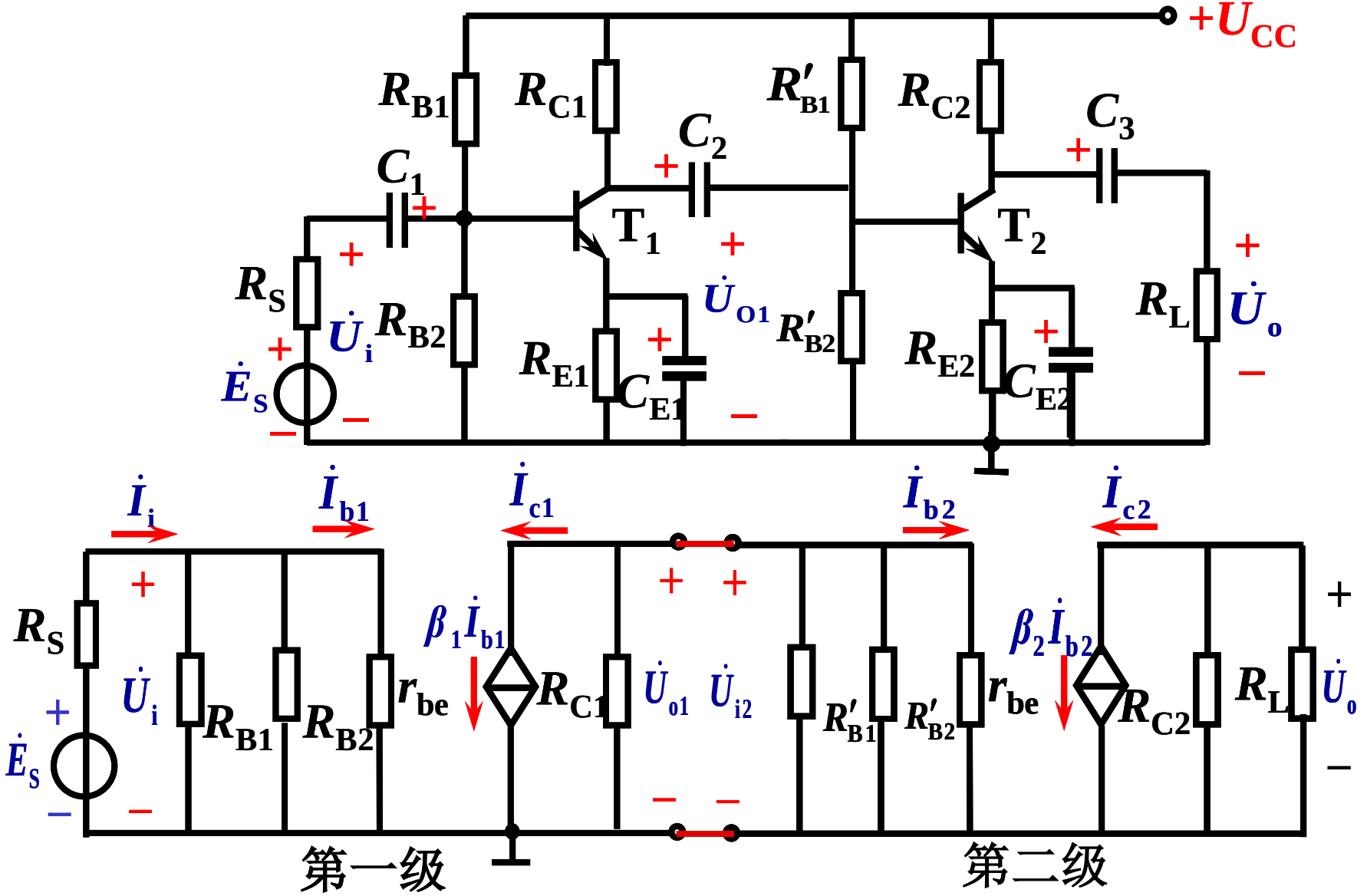
优点：既能放大交流信号，也能放大缓慢变化的信号和直流信号。

存在问题：

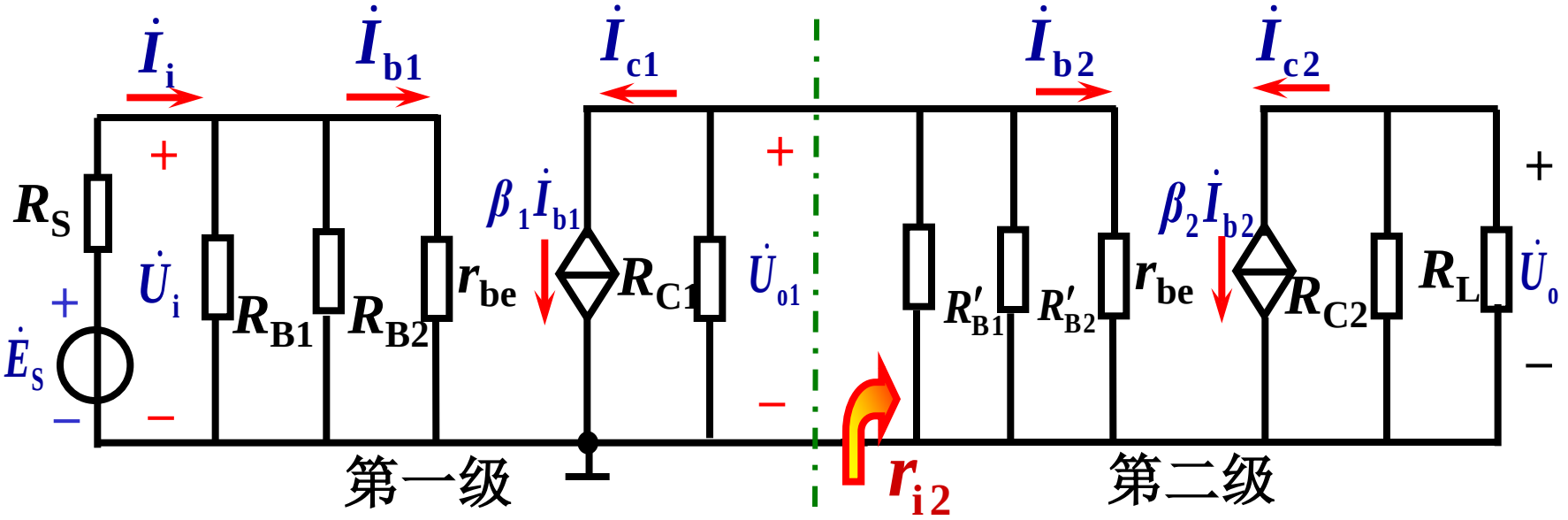
① 前后级静态工作点相互影响。

② 零点漂移。

2. 多级放大电路的分析


+UCC
RB1
RC1
C2
R′B1
RC2
C3
C1
T1
T2
RS
RB2
RE1
CE1
R′B2
RE2
CE2
RL
Ui
Uo1
Uo
ES
İi
İb1
İc1
İb2
İc2
β1İb1
β2İb2
rbe
Uo1
Ui2
第一级
第二级

2. 多级放大电路的分析 (动态分析)



电压放大倍数 $\dot{A}_u = \dfrac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \dfrac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_i}\dfrac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{i2}} = \dot{A}_{u1}\dot{A}_{u2}$

$$\dot{A}_{u1} = \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_i} = -\beta_1\frac{R'_{L1}}{r_{be1}} \qquad \dot{A}_{u2} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{i2}} = -\beta_2\frac{R'_{L2}}{r_{be2}}$$

$$r_i = r_{i1}$$

$$R'_{L1} = R_{C1} \,//\, r_{i2} \qquad R'_{L2} = R_{C2} \,//\, R_L$$

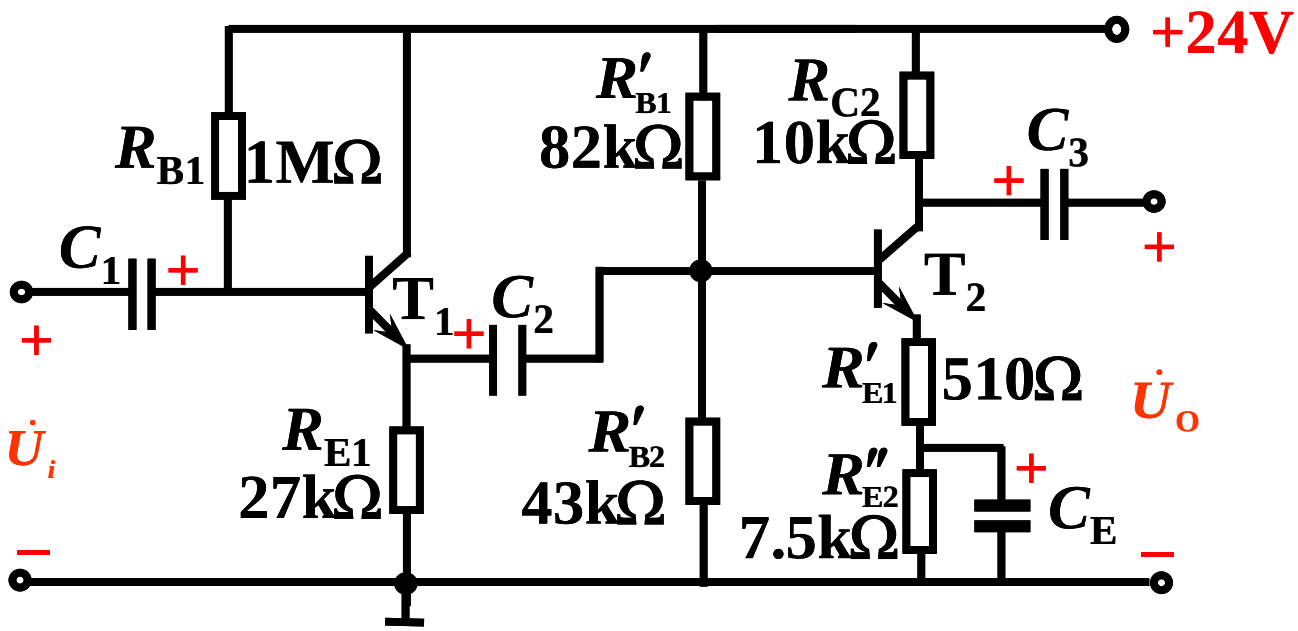
$$r_o = r_{o2}$$

例1: 如图所示的两级电压放大电路, 已知 $\beta_1=\beta_2=50$, T_1 和 T_2 均为 3DG8D。

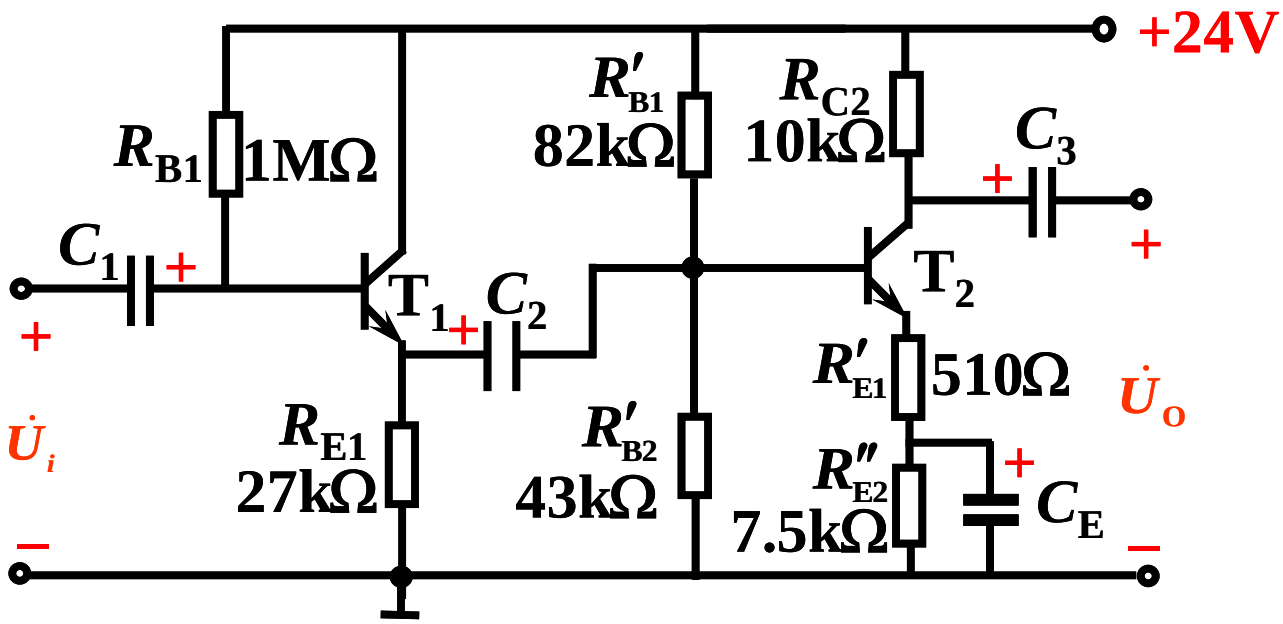
(1) 计算前、后级放大电路的静态值($U_{BE}=0.6V$);

(2) 求放大电路的输入电阻和输出电阻;

(3) 求各级电压的放大倍数及总电压放大倍数。



解: (1) 两级放大电路的静态值可分别计算。



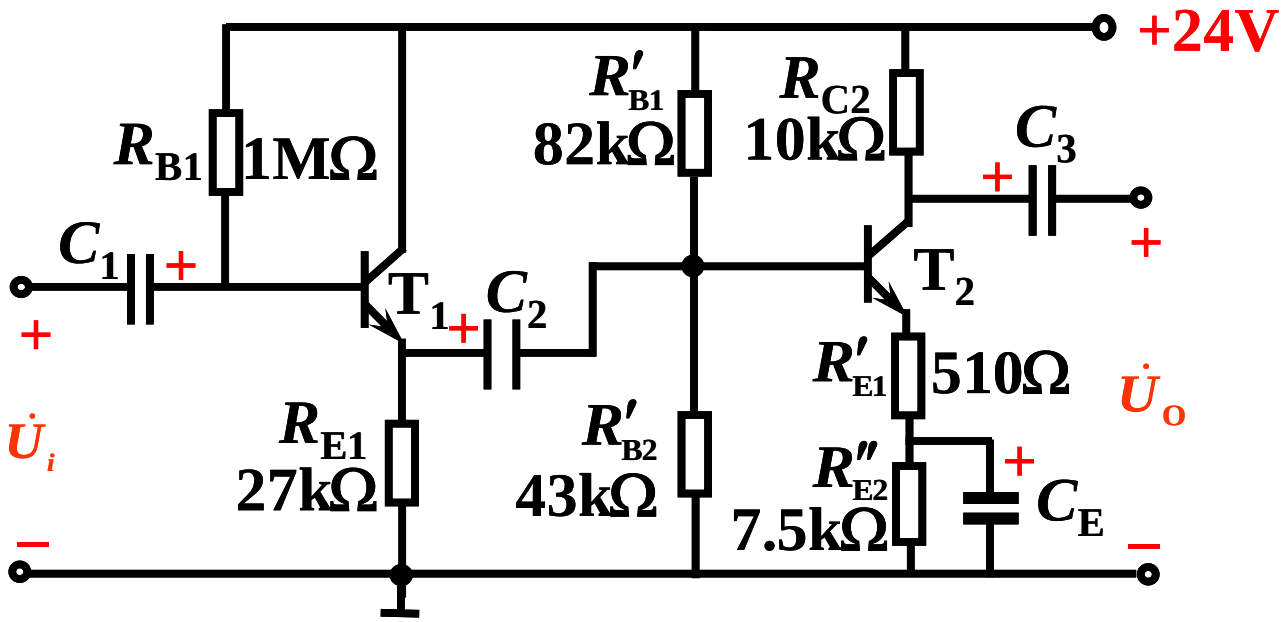
第一级是射极输出器

$$I_{B1}=\frac{U_{CC}-U_{BE}}{R_{B1}+(1+\beta)R_{E1}}=\frac{24-0.6}{1000+(1+50)\times 27}\text{mA}=9.8\mu\text{A}$$

$$I_{E1}=(1+\beta)I_{B1}=(1+50)\times 0.0098\,\text{mA}=0.49\,\text{mA}$$

$$U_{CE}=U_{CC}-I_{E1}R_{E1}=24-0.49\times 27\text{V}=10.77\text{V}$$

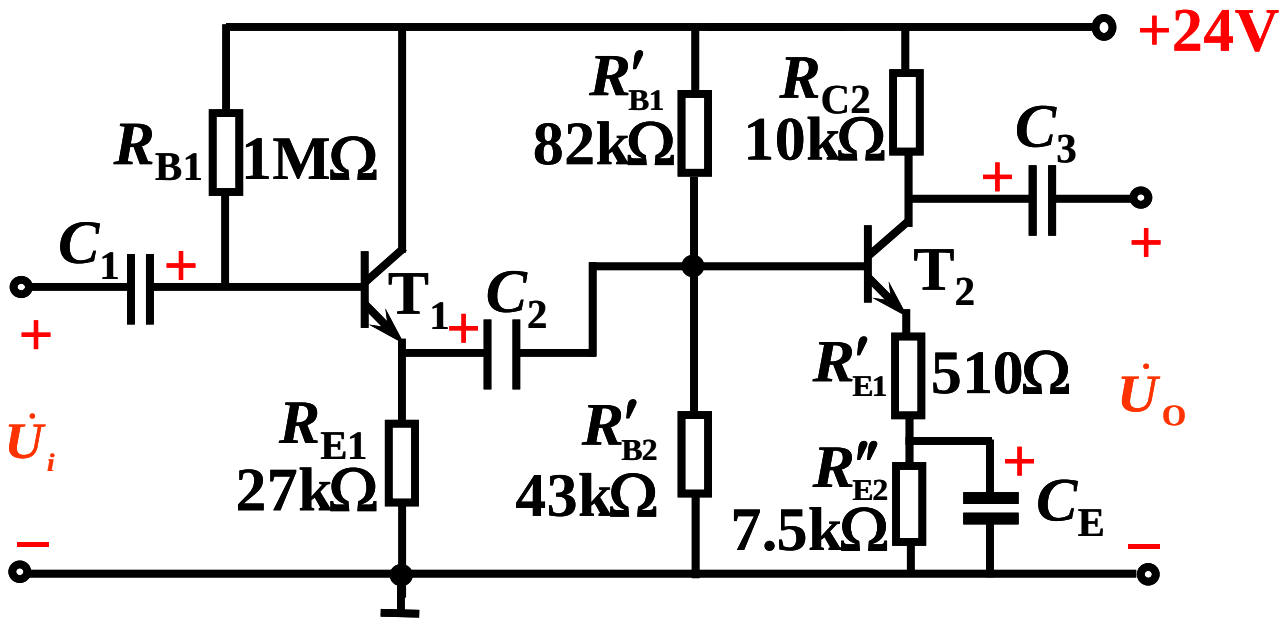
解：第二级是分压式偏置电路



$$V_{B2}=\frac{U_{CC}}{R'_{B1}+R'_{B2}}R'_{B2}=\frac{24}{82+43}\times 43\text{V}=8.26\text{V}$$

$$I_{C2}=\frac{U_{B2}-U_{BE2}}{R''_{E2}+R'_{E2}}=\frac{8.26-0.6}{0.51+7.5}\text{mA}=0.96\text{mA}$$

解：第二级是分压式偏置电路

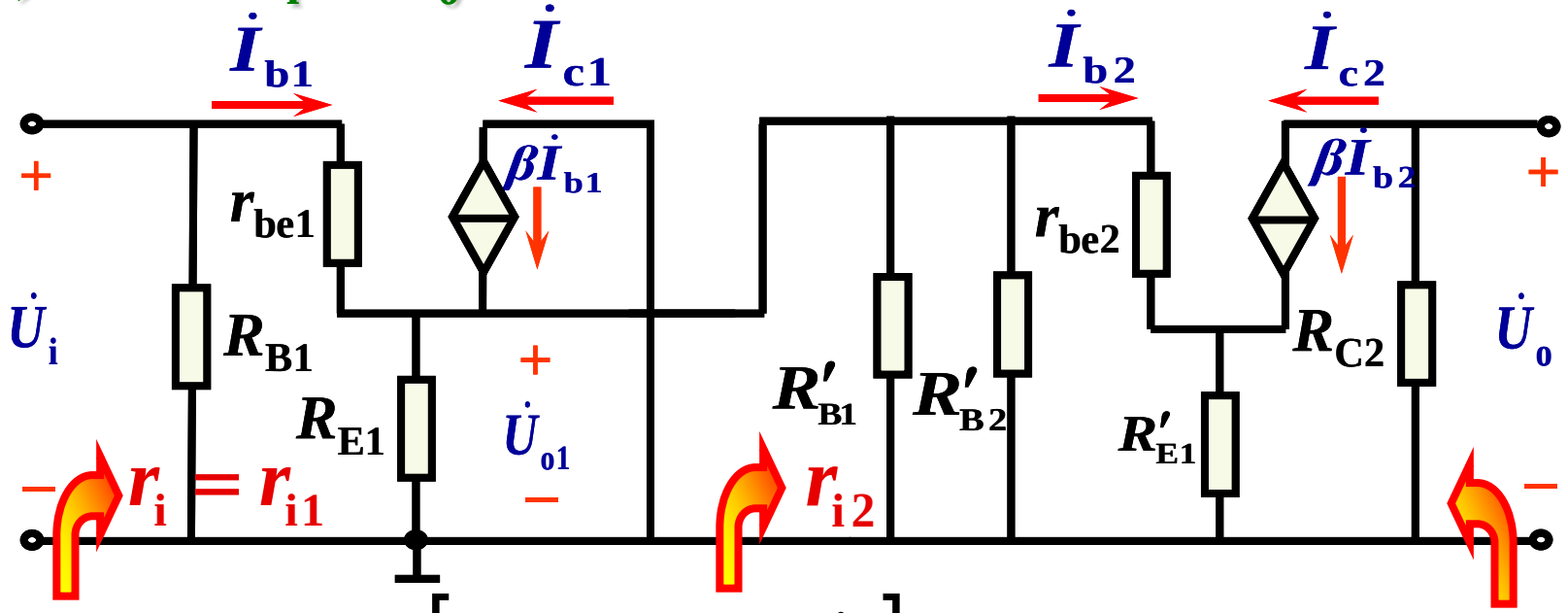


$$I_{B2}=\frac{I_{C2}}{\beta_2}=\frac{0.96}{50}\text{mA}=19.2\ \mu\text{A}$$

$$U_{CE2}=U_{CC}-I_{C2}(R_{C2}+R'_{E2}+R'_{E2})$$

$$=24-0.96(10+0.51+7.5)\text{V}=6.71\text{V}$$

(2) 计算 r_i 和 r_0



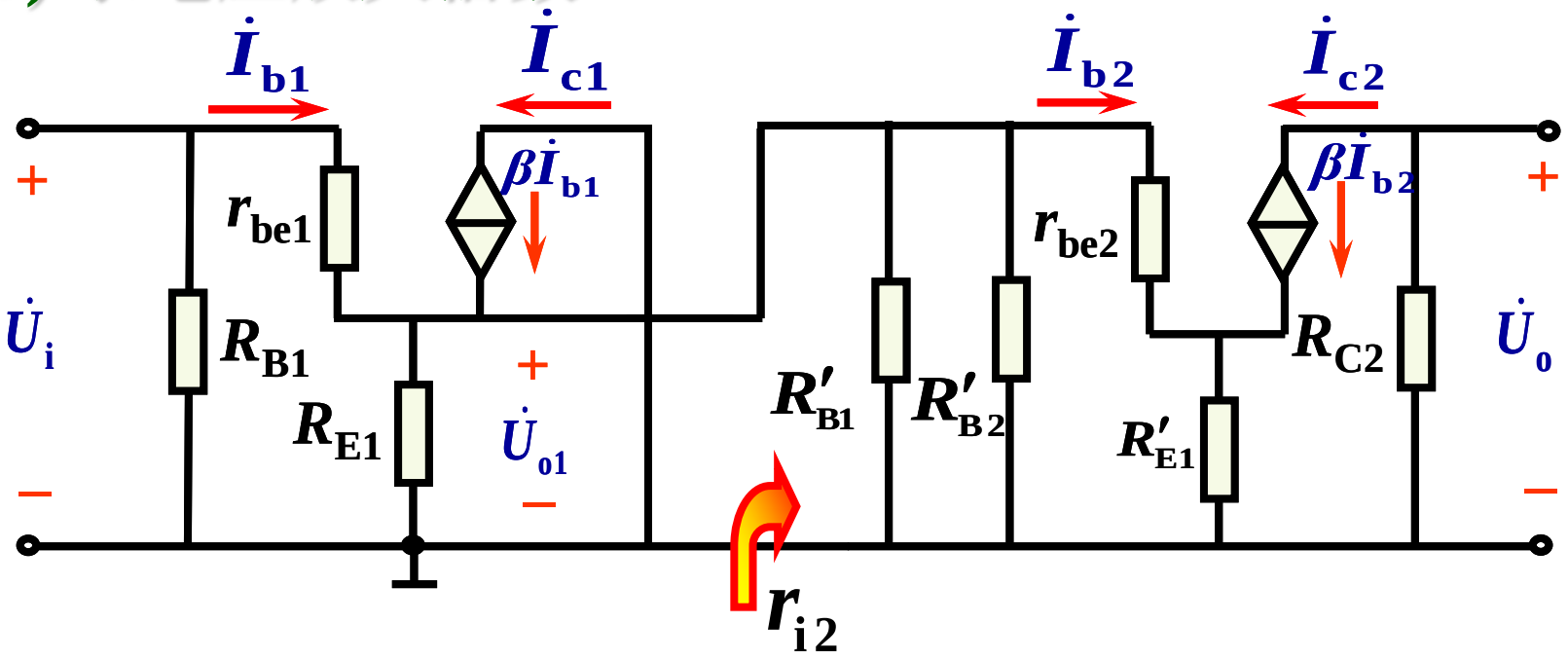
$$r_i = r_{i1} = R_{B1} // \left[r_{be1} + (1+\beta)R'_{L1}\right] = 320\,\text{k}\Omega \qquad r_o = r_{o2} = R_{C2}$$

$$R'_{L1} = R_{E1} // r_{i2} = \frac{27\times 14}{27+14}\,\text{k}\Omega = 9.22\,\text{k}\Omega$$

$$r_{be2} = 200 + (1+\beta)\frac{26}{I_E} = 1.58\text{k}\Omega$$

$$r_{i2} = R'_{B1} // R'_{B2} // \left[r_{be2} + (1+\beta)R'_{E1}\right] = 14\,\text{k}\Omega$$

(3) 求电压放大倍数

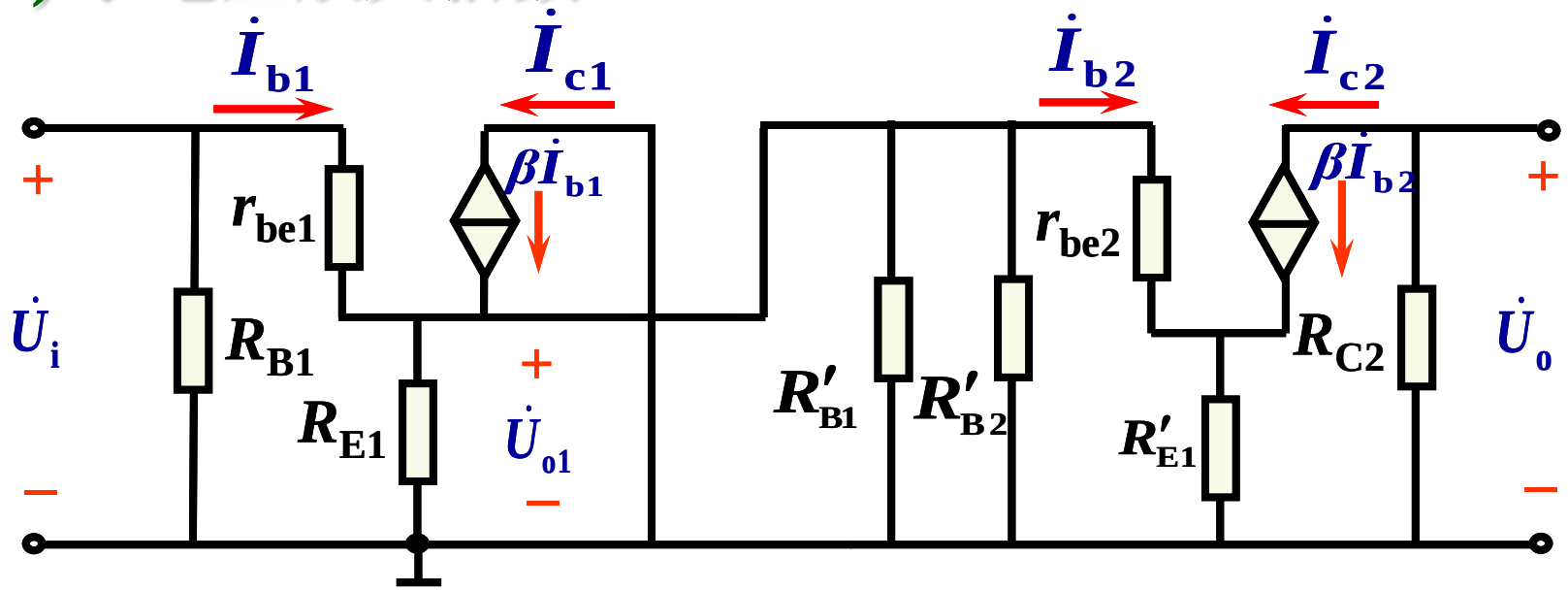


第一级放大电路为射极输出器

$$R'_{L1} = R_{E1} // r_{i2} = 9.22\,\text{k}\Omega$$

$$A_{u1} = \frac{(1+\beta_1)R'_{L1}}{r_{be1}+(1+\beta_1)R'_{L1}} = \frac{(1+50)\times 9.22}{3+(1+50)\times 9.22} = 0.994$$

(3) 求电压放大倍数



第二级放大电路为共发射极放大电路

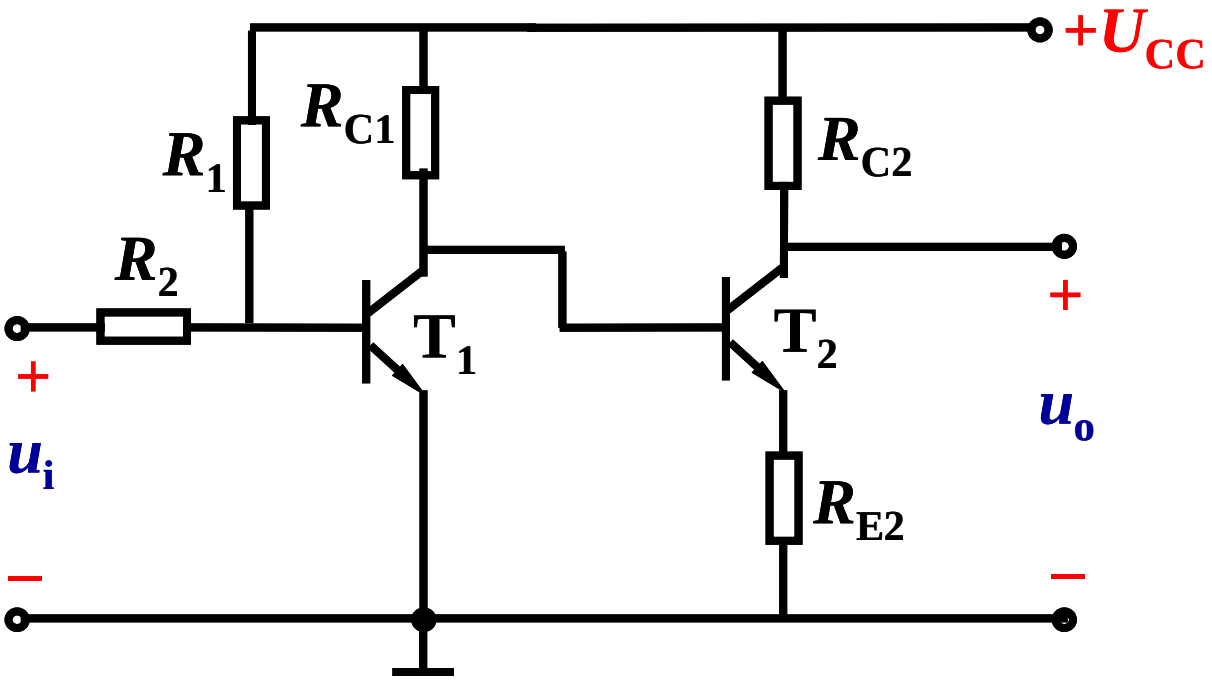
$$A_{u2} = -\beta \frac{R_{C2}}{r_{be2} + (1+\beta_2) R'_{E1}} = -50 \times \frac{10}{1.79 + (1+50) \times 0.51} = -18$$

总电压放大倍数

$$A_u = A_{u1} \times A_{u2} = 0.994 \times (-18) = -17.9$$

差分放大电路

直接耦合：将前级的输出端直接接后级的输入端。可用来放大缓慢变化的信号或直流量变化的信号。

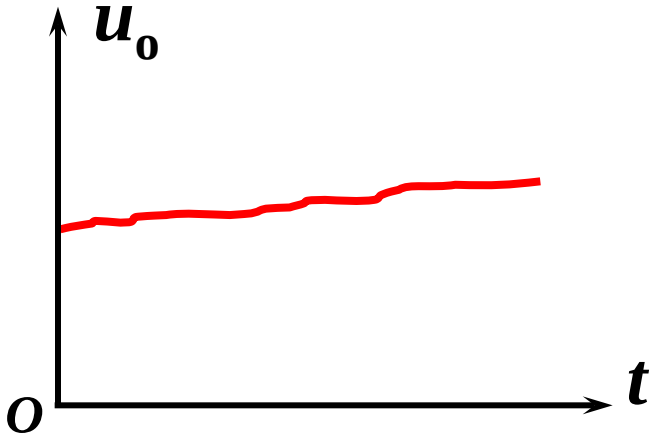


直接耦合存在的两个问题：

(1) 前后级静态工作点相互影响

(2) 零点漂移

零点漂移：指输入信号电压为零时，输出电压发生缓慢地、无规则地变化的现象。



产生的原因：晶体管参数随温度变化、电源电压波动、电路元件参数的变化。

零点漂移的危害：

直接影响对输入信号测量的准确程度和分辨能力。

严重时，可能淹没有效信号电压，无法分辨是有效信号电压还是漂移电压。

一般用输出漂移电压折合到输入端的等效漂移电压作为衡量零点漂移的指标。

$$u_{id} = \frac{u_{od}}{A_u}$$

u_{od}：输出端漂移电压

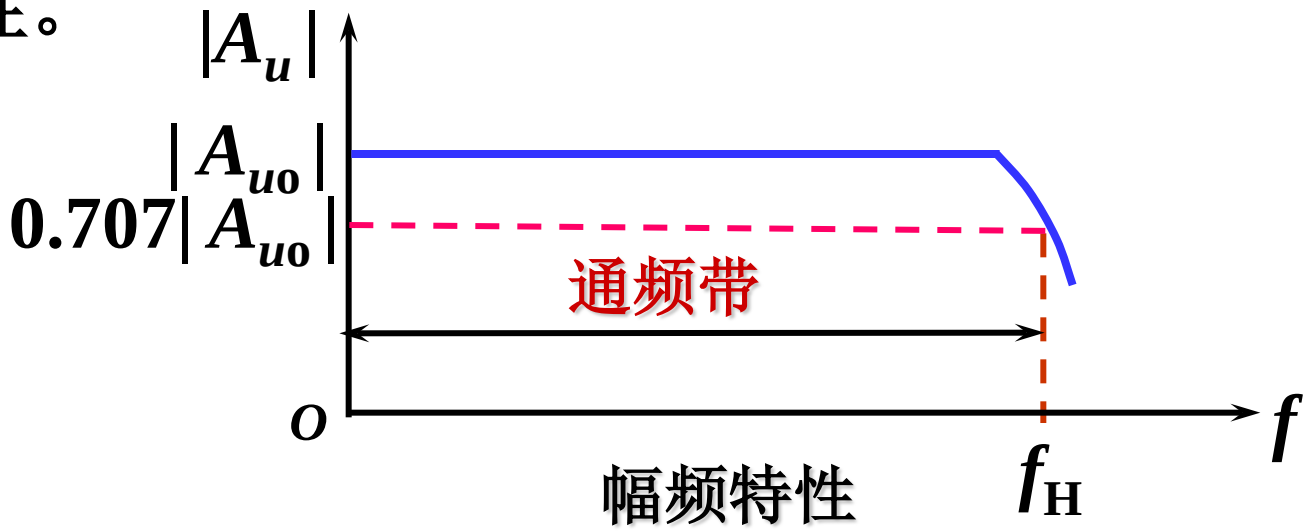
u_{id}：输入端等效漂移电压

A_u：电压放大倍数

只有输入端的等效漂移电压比输入信号小许多时，放大后的有用信号才能被很好地区分出来。

抑制零点漂移是制作高质量直接耦合放大电路的一个重要的问题。

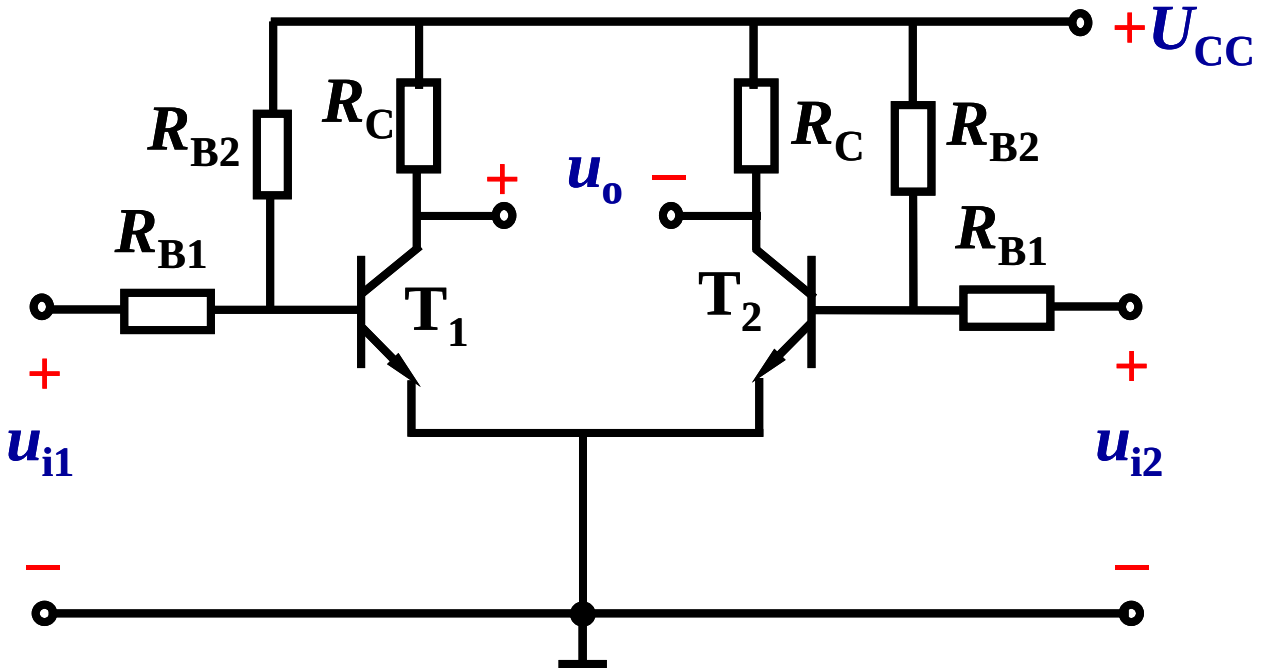
由于不采用电容，所以直接耦合放大电路具有良好的低频特性。



适合于集成化的要求，在集成运放的内部，级间都是直接耦合。

差分放大电路是抑制零点漂移最有效的电路结构。

1 静态分析

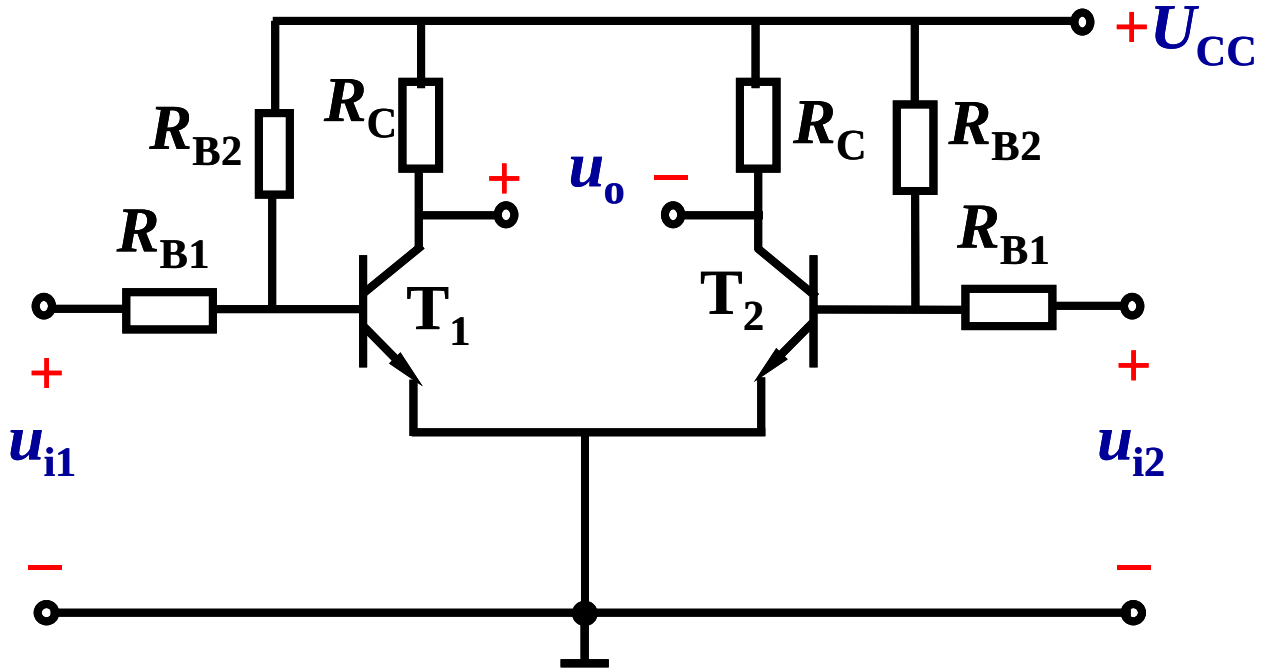


差分放大原理电路

两个输入、两个输出；两管静态工作点相同。

电路结构对称，在理想的情况下，两管的特性及对应电阻元件的参数值都相等。

1. 零点漂移的抑制



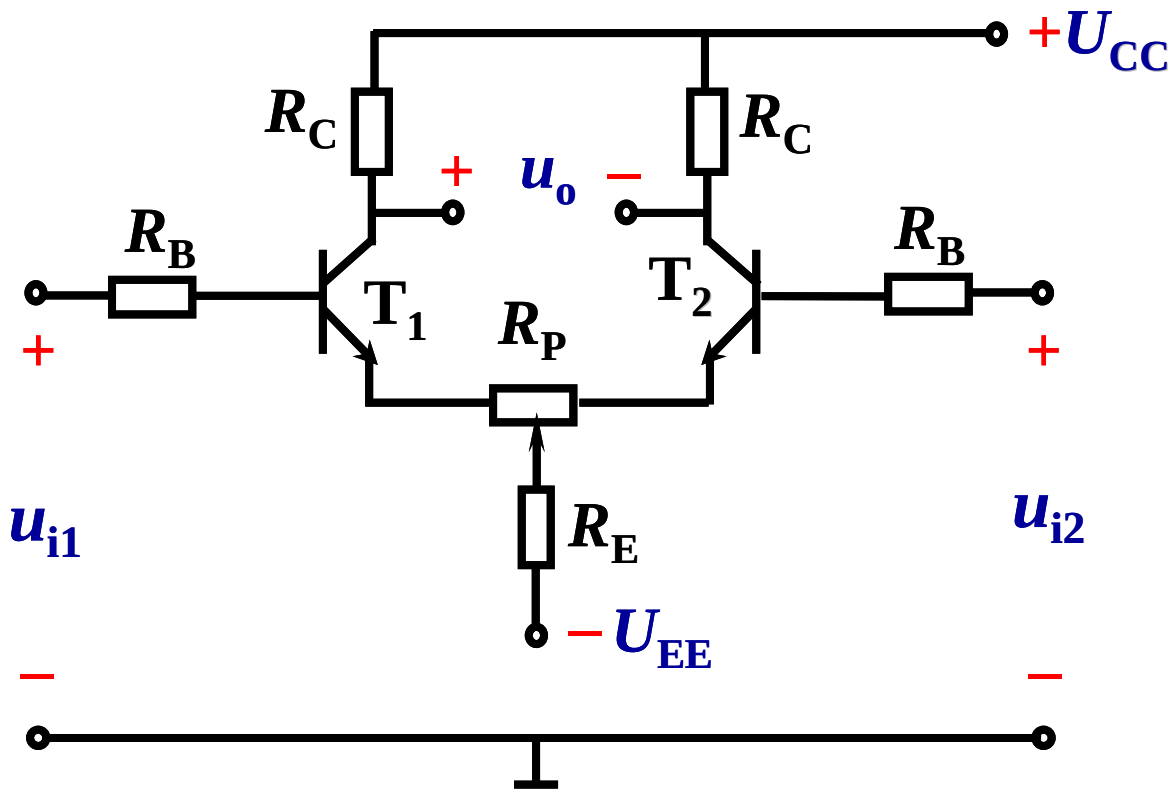
静态时，$u_{i1} = u_{i2} = 0$　　$u_o = V_{C1} - V_{C2} = 0$

当温度升高时$\rightarrow I_C\uparrow \rightarrow V_C\downarrow$ (两管变化量相等)

$u_o = (V_{C1} + \Delta V_{C1}) - (V_{C2} + \Delta V_{C2}) = 0$

对称差分放大电路对两管所产生的同向漂移都有抑制作用。若采用单端输出，无法抑制零点漂移。

典型差分放大电路



R_E的作用：稳定静态工作点，限制每个管子的漂移。

E_E：用于补偿R_E上的压降，以获得合适的工作点。

电位器 R_P：起调零作用。

2. 静态分析

在静态时，设 $I_{B1} = I_{B2} = I_B$， $I_{C1} = I_{C2} = I_C$，忽略阻值很小的 R_P 可列出

$$R_{B1}I_B + U_{BE} + 2R_E I_E = E_E$$

上式中前两项较第三项小得多略去，则每管的集电极电流

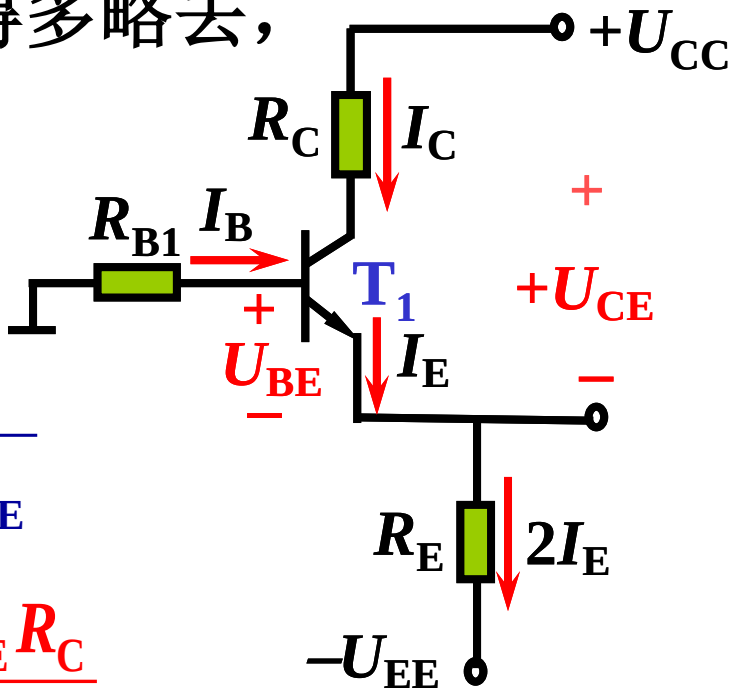
$$I_C \approx I_E \approx \frac{E_E}{2R_E}$$

发射极电位 $V_E \approx 0$

每管的基极电流 $I_B = \dfrac{I_C}{\beta} \approx \dfrac{E_E}{2\beta R_E}$

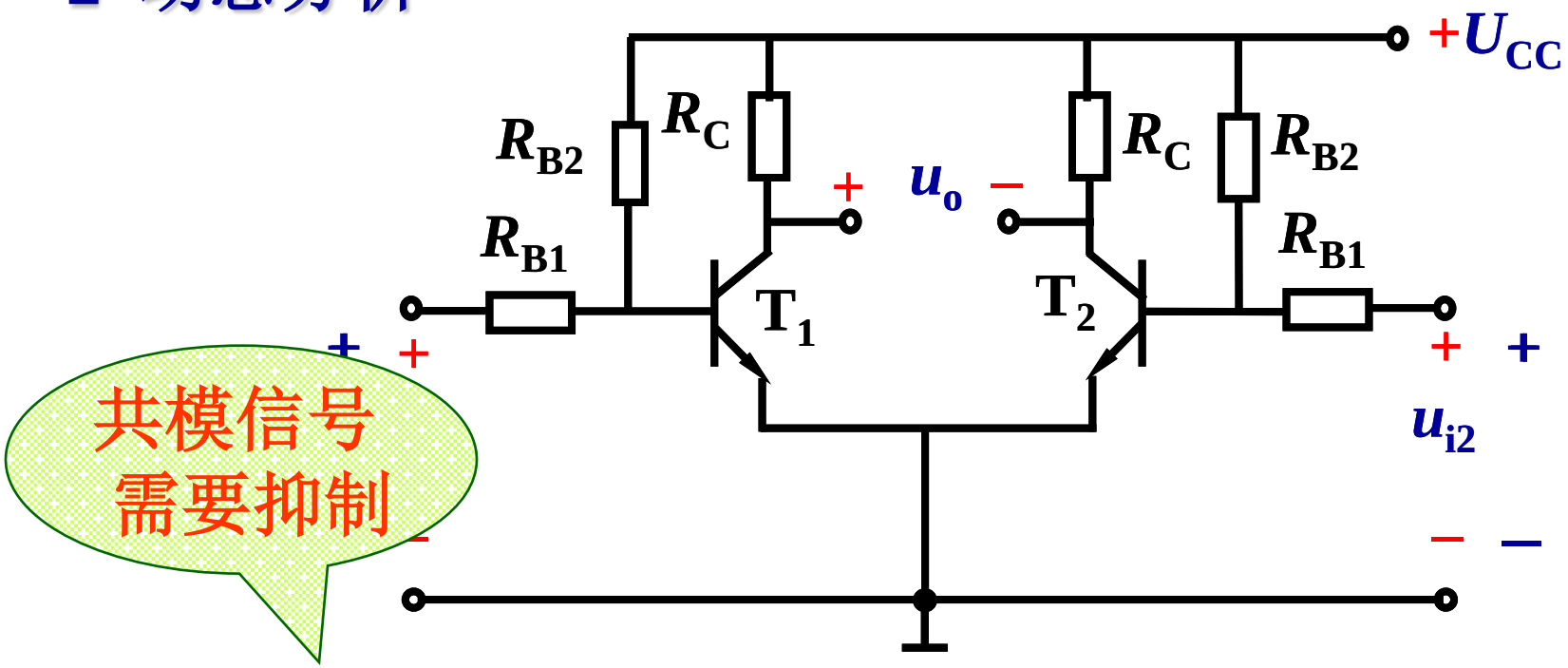
每管的集 — 射极电压

$$U_{CE} = U_{CC} - R_C I_C \approx U_{CC} - \frac{E_E R_C}{2R_E}$$



单管直流通路

2 动态分析

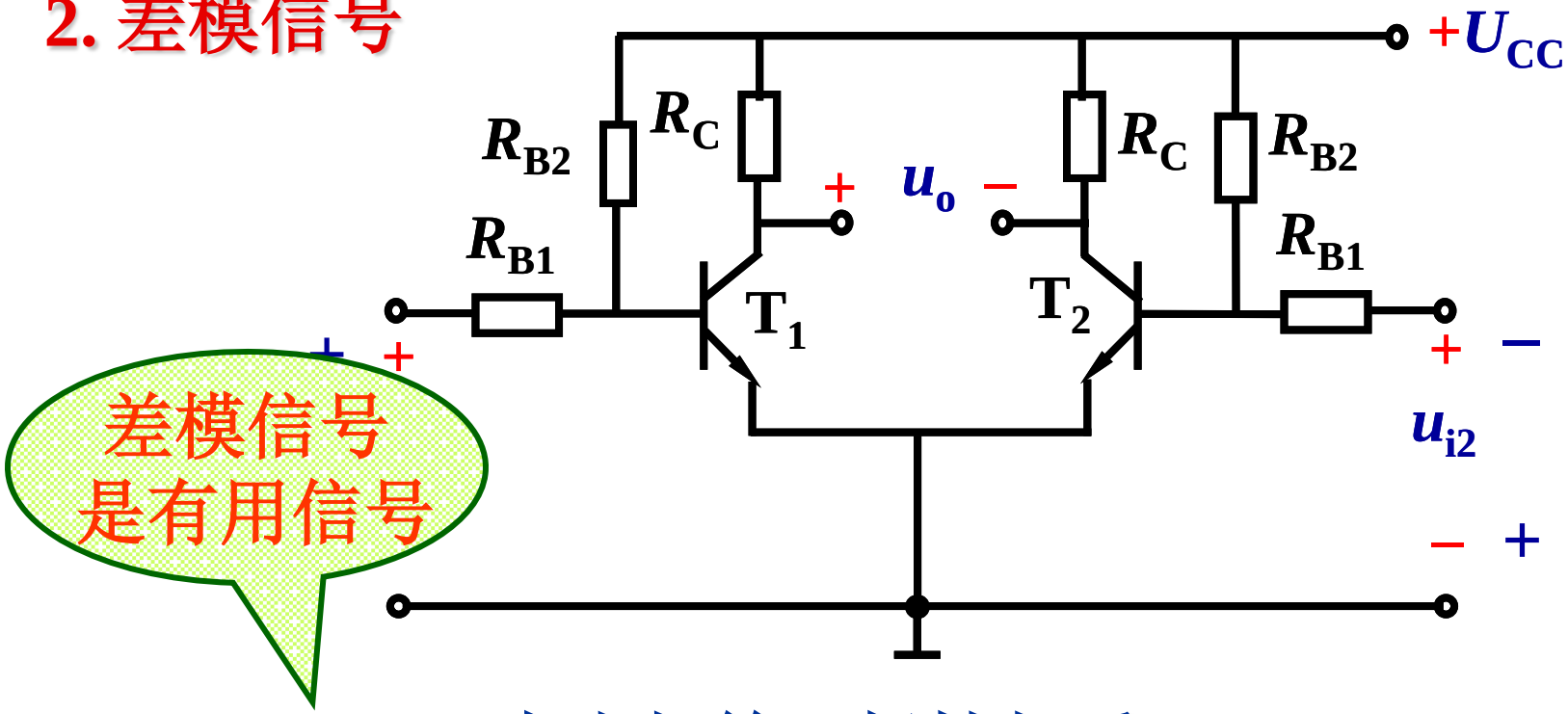


1. 共模信号 $u_{i1} = u_{i2}$ 大小相等、极性相同

两管集电极电位呈等量同向变化，所以输出电压为零，即对共模信号没有放大能力。

差分电路抑制共模信号能力的大小，反映了它对零点漂移的抑制水平。

2. 差模信号



$u_{i1} = -u_{i2}$ 大小相等、极性相反

两管集电极电位一减一增，呈等量异向变化，

$u_o = (V_{C1} - \Delta V_{C1}) - (V_{C2} + \Delta V_{C1}) = -2\Delta V_{C1}$

即对差模信号有放大能力。

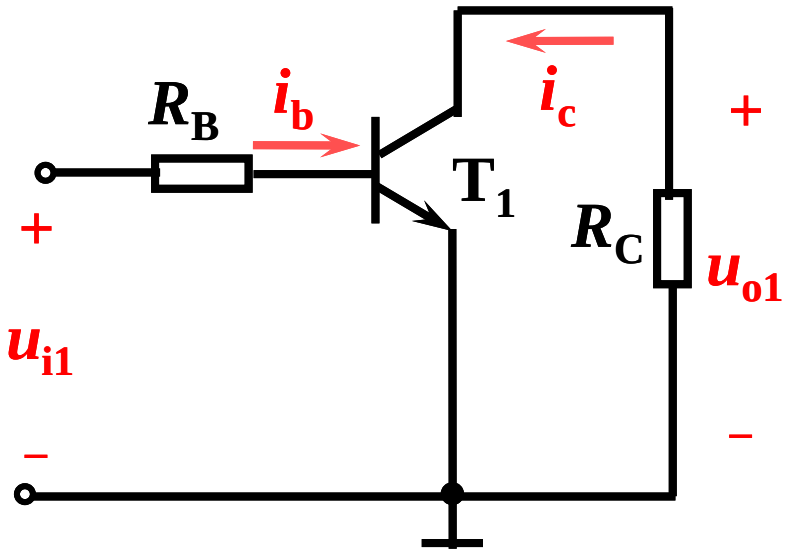
由于差模信号使两管的集电极电流一增一减，其变化量相等，通过 R_E 的电流近于不变，R_E 上没有差模信号压降，故 R_E 对差模信号不起作用，可得出下图所示的单管差模信号通路。

单管差模电压放大倍数

$$A_{d1}=\frac{u_{o1}}{u_{i1}}=\frac{-\beta i_b R_C}{i_b(R_B+r_{be})}=-\frac{\beta R_C}{R_B+r_{be}}$$

同理可得

$$A_{d2}=\frac{u_{o2}}{u_{i2}}=-\frac{\beta R_C}{R_B+r_{be}}=A_{d1}$$



单管差模信号通路

双端输入—双端输出差分电路的差模电压放大倍数为

$$A_d = \frac{u_o}{u_{i1} - u_{i2}} = A_{d1} = -\frac{\beta R_C}{R_B + r_{be}}$$

当在两管的集电极之间接入负载电阻时

$$A_d = -\frac{\beta R'_L}{R_B + r_{be}}$$

式中 $R'_L = R_C // \frac{1}{2} R_L$

两输入端之间的差模输入电阻为

$$r_i = 2(R_B + r_{be})$$

两集电极之间的差模输出电阻为

$$r_o \approx 2R_C$$

例1:在前图所示的差分放大电路中,已知U_{CC}=12V，E_E = 12V, β = 50, R_C = 10 kΩ, R_E =10 kΩ, R_B = 20 kΩ, R_P =100 Ω, 并在输出端接负载电阻R_L = 20kΩ, 试求电路的静态值和差模电压放大倍数。

解：$$I_C \approx \frac{E_E}{2R_E} = \frac{12}{2\times 10\times 10^3}\,\text{A} = 0.6\,\text{mA}$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{0.6}{50}\,\text{mA} = 0.012\,\text{mA}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - R_C I_C = (12 - 10\times 10^3 \times 0.6\times 10^{-3})\,\text{V} = 6\,\text{V}$$

$$A_d = -\frac{\beta R'_L}{R_B + r_{be}} = -\frac{50\times 5}{20 + 2.41} = -11$$

式中 $$R'_L = R_C \,//\, \frac{1}{2} R_L = 5\,\text{k}\Omega$$

$$r_{be} \approx 200(\Omega) + (1+\beta)\frac{26}{I_E} = (200 + \frac{26}{0.6})\,\Omega = 2.41\,\text{k}\Omega$$

单端输出时差分电路的差模电压放大倍数为

$$A_d = \frac{u_{o1}}{u_{i1} - u_{i2}} = \frac{u_{o1}}{2u_{i1}} = -\frac{1}{2}\frac{\beta R_C}{R_B + r_{be}}$$ (反相输出)

$$A_d = \frac{u_{o2}}{u_{i1} - u_{i2}} = -\frac{u_{o2}}{2u_{i2}} = \frac{1}{2}\frac{\beta R_C}{R_B + r_{be}}$$ (同相输出)

即：单端输出差分电路的电压放大倍数只有双端输出差分电路的一半。

双端输入分双端输出和单端输出两种。此外，还有单端输入的, 即将T_1输入端或T_2输入端接“地”, 而另

一端接输入信号u_i。同样单端输入也分为双端输出和单端输出两种。四种差分放大电路的比较见表15.7.1。

3. 比较输入

u_{i1}、u_{i2} 大小和极性是任意的。

例1: u_{i1} = 10 mV, u_{i2} = 6 mV

可分解成: u_{i1} = 8 mV + 2 mV

u_{i2} = 8 mV − 2 mV

例2: u_{i1} =20 mV, u_{i2} = 16 mV

可分解成: u_{i1} = 18 mV + 2 mV

u_{i2} = 18 mV − 2 mV

共模信号　差模信号

放大器只放大两个输入信号的差值信号—差分放大电路。

这种输入常作为比较放大来应用，在自动控制系统中是常见的。

3 共模抑制比 (Common Mode Rejection Ratio)

全面衡量差分放大电路放大差模信号和抑制共模信号的能力。

共模抑制比

差模放大倍数

$$K_{CMRR}=\frac{A_d}{A_C}$$

$$K_{CMR}(\text{dB})=20\lg\frac{A_d}{A_C}(\square\ \square)$$

共模放大倍数

K_{CMR}越大，说明差放分辨差模信号的能力越强，而抑制共模信号的能力越强。

对于双端输出差分放大电路，若电路完全对称，理想情况下共模放大倍数

$$A_c = 0,\ K_{CMRR} \to \infty$$

输出电压 $u_o = A_d (u_{i1} - u_{i2}) = A_d u_{id}$

若电路不完全对称，则 $A_c \neq 0$，

实际输出电压 $u_o = A_c u_{ic} + A_d u_{id}$

即共模信号对输出有影响 。

互补对称功率放大电路

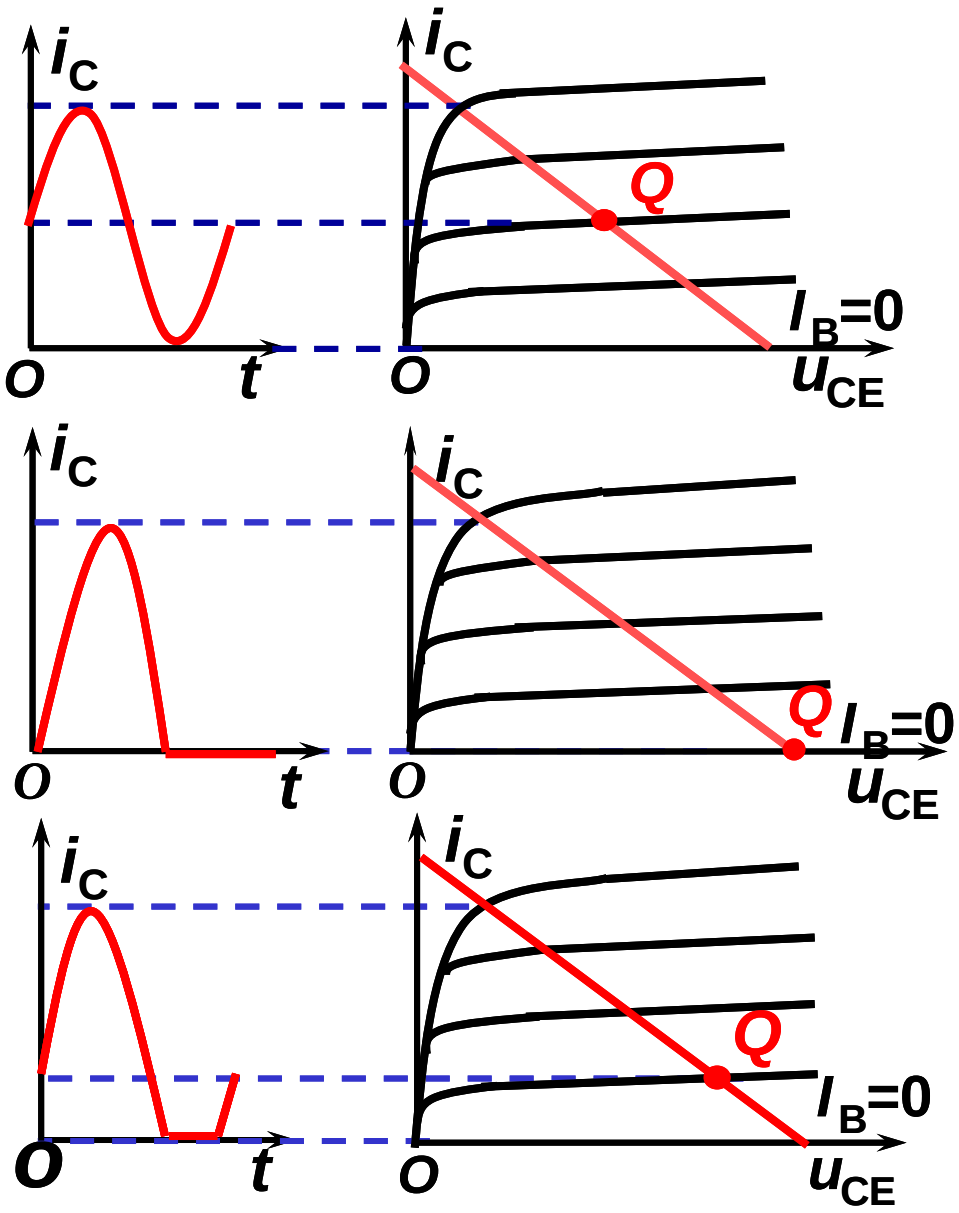
功率放大电路的作用：是放大电路的输出级，去推动负载工作。例如使扬声器发声、继电器动作、仪表指针偏转、电动机旋转等。

1 对功率放大电路的基本要求

(1) 在不失真的情况下能输出尽可能大的功率。

(2) 由于功率较大，要求提高效率。

$$\eta \uparrow = \frac{\text{负载得到的交流信号功率}}{\text{电源供给的直流功率} \downarrow}$$



放大电路的工作状态

甲类工作状态

晶体管在输入信号的整个周期都导通，静态I_C较大，波形好，管耗大效率低。

乙类工作状态

晶体管只在输入信号的半个周期内导通，静态$I_C = 0$，波形严重失真，管耗小效率高。

甲乙类工作状态

晶体管导通的时间大于半个周期，静态$I_C \approx 0$，一般功放常采用。

2 互补对称放大电路

互补对称电路是集成功率放大电路输出级的基本形式。当它通过容量较大的电容与负载耦合时，由于省去了变压器而被称为无输出变压器(Output Trans–formerless)电路，简称OTL电路。若互补对称电路直接与负载相连，输出电容也省去，就成为无输出电容(Output Capacitorless)电路，简称OCL电路。

OTL电路采用单电源供电， OCL电路采用双电源供电。

1. OTL电路

(1) 特点

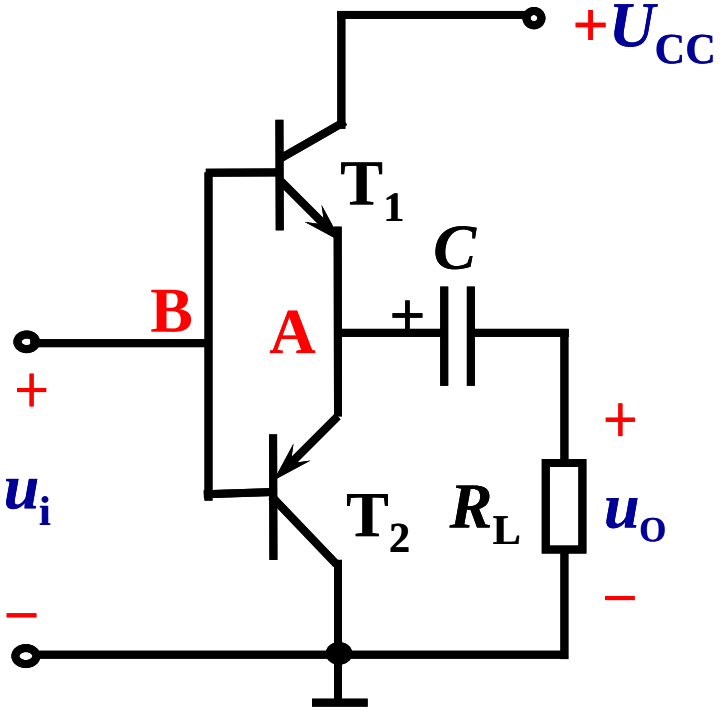
T_1、T_2的特性一致；

一个NPN型、一个PNP型

两管均接成射极输出器；

输出端有大电容；

单电源供电。



OTL原理电路

(2) 静态时（u_i= 0）

调整输入的直流电位使 $V_B = \dfrac{U_{CC}}{2}$

由于T_1、T_2对称使 $u_A = \dfrac{U_{CC}}{2}$

于是电容量端电压 $u_C = \dfrac{U_{CC}}{2}$ ，$I_{C1} \approx 0$，$I_{C2} \approx 0$

(3) 动态时

设输入端在$U_{CC}/2$ 直流基础上加入正弦信号。

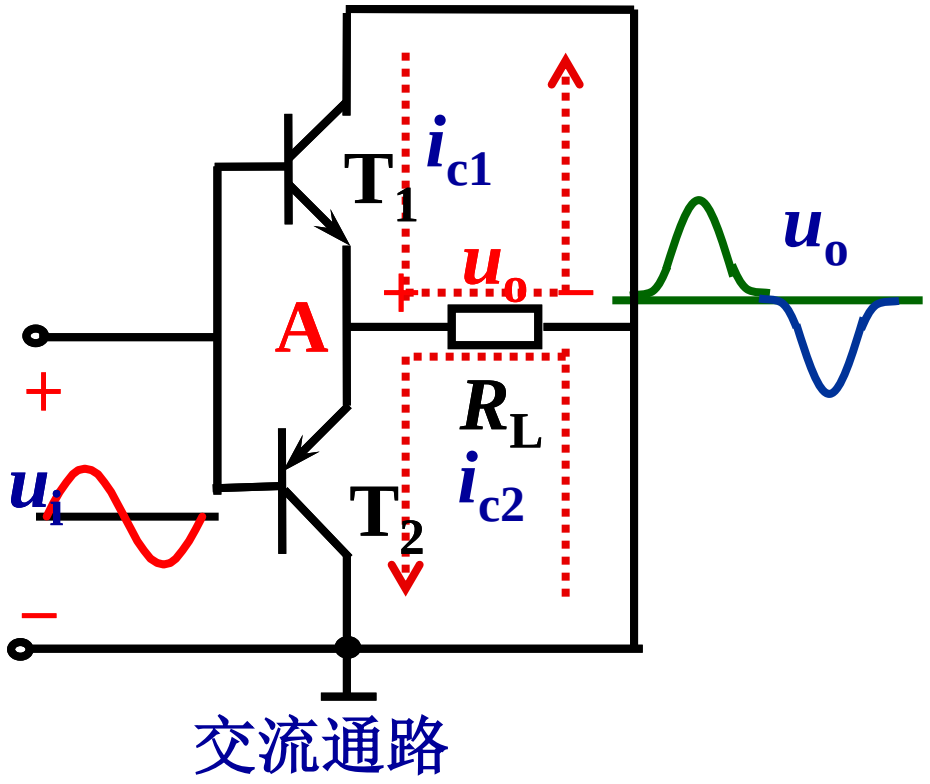
输入交流信号u_i正半周

$$V_B > \frac{U_{CC}}{2}$$

T_1导通、T_2截止；i_{c1}流过负载，并向电容充电

输入交流信号u_i负半周

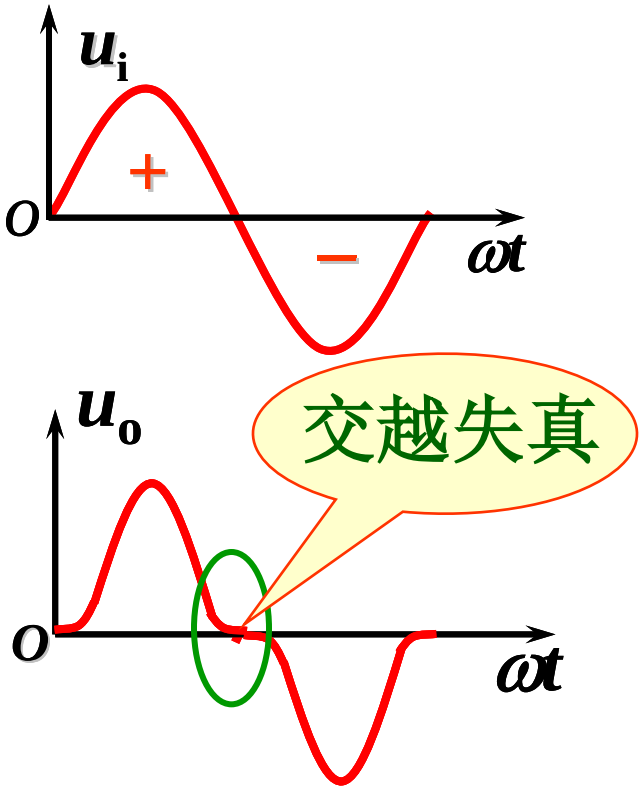
$$V_B < \frac{U_{CC}}{2}$$



若输出电容足够大，其上电压基本保持不变，则负载上得到的交流信号正负半周对称。

(4) 交越失真

当输入信号u_i为正弦波时，输出信号在过零前后出现的失真称为交越失真。



交越失真产生的原因

由于晶体管特性存在非线性，

u_i < 死区电压晶体管导通不好。

克服交越失真的措施

采用各种电路以产生有不大的偏流，使静态工作点稍高于截止点，即工作于甲乙类状态。

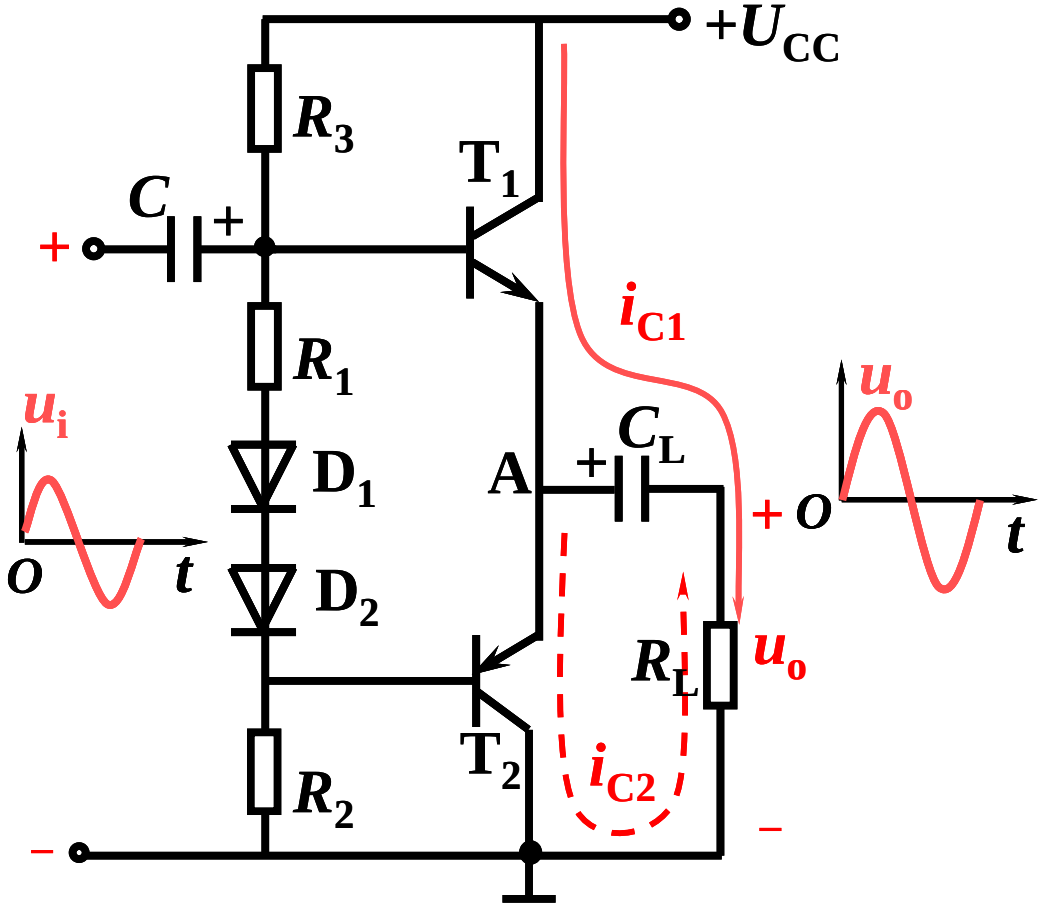
(5) 克服交越失真的OTL互补对称放大电路

两个晶体管 T_1 (NPN型)和T_2(PNP型)的特性基本相同。

静态时, 调节 R_3 ,使 A 点的电位为 $\frac{1}{2}U_{CC}$;

输出电容C_L上的电压也等于$\frac{1}{2}U_{CC}$;

R_1 和 D_1、D_2 上的压降使两管获得合适的偏压，工作在甲乙类状态。

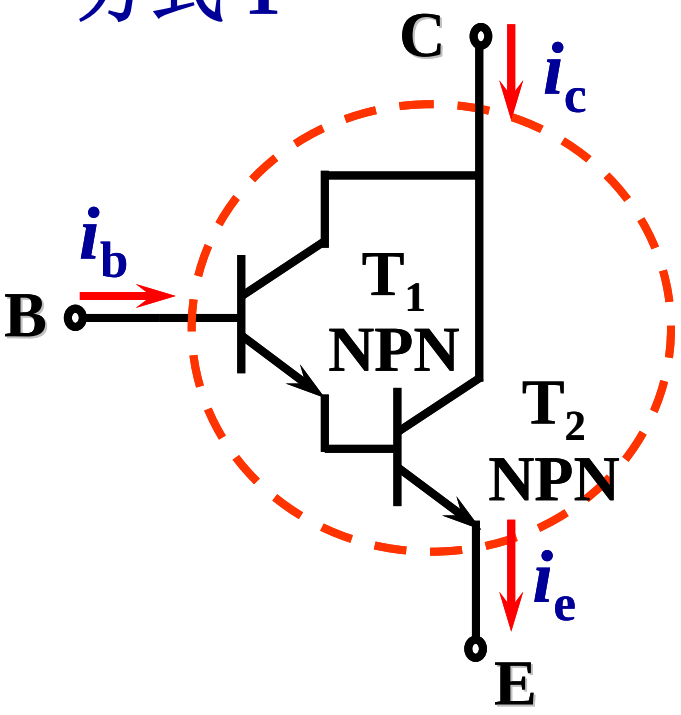


OTL互补对称放大电路

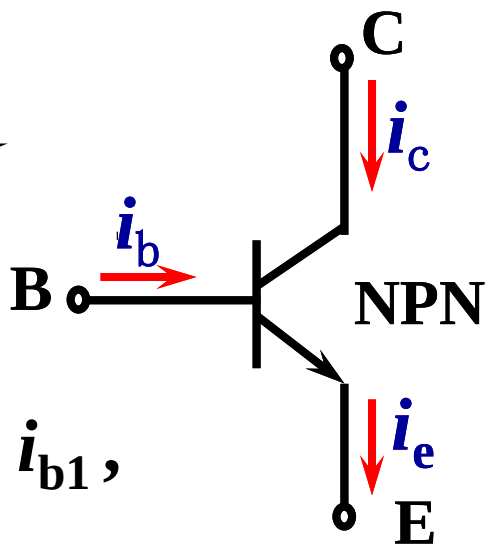
在输出功率较大时常采用复合管

复合管的构成

方式 1







$i_b = i_{b1}$,

$i_{b2} = i_{e1} = (1+\beta_1)\, i_{b1}$,

$i_{c1} = \beta_1\, i_{b1}$,

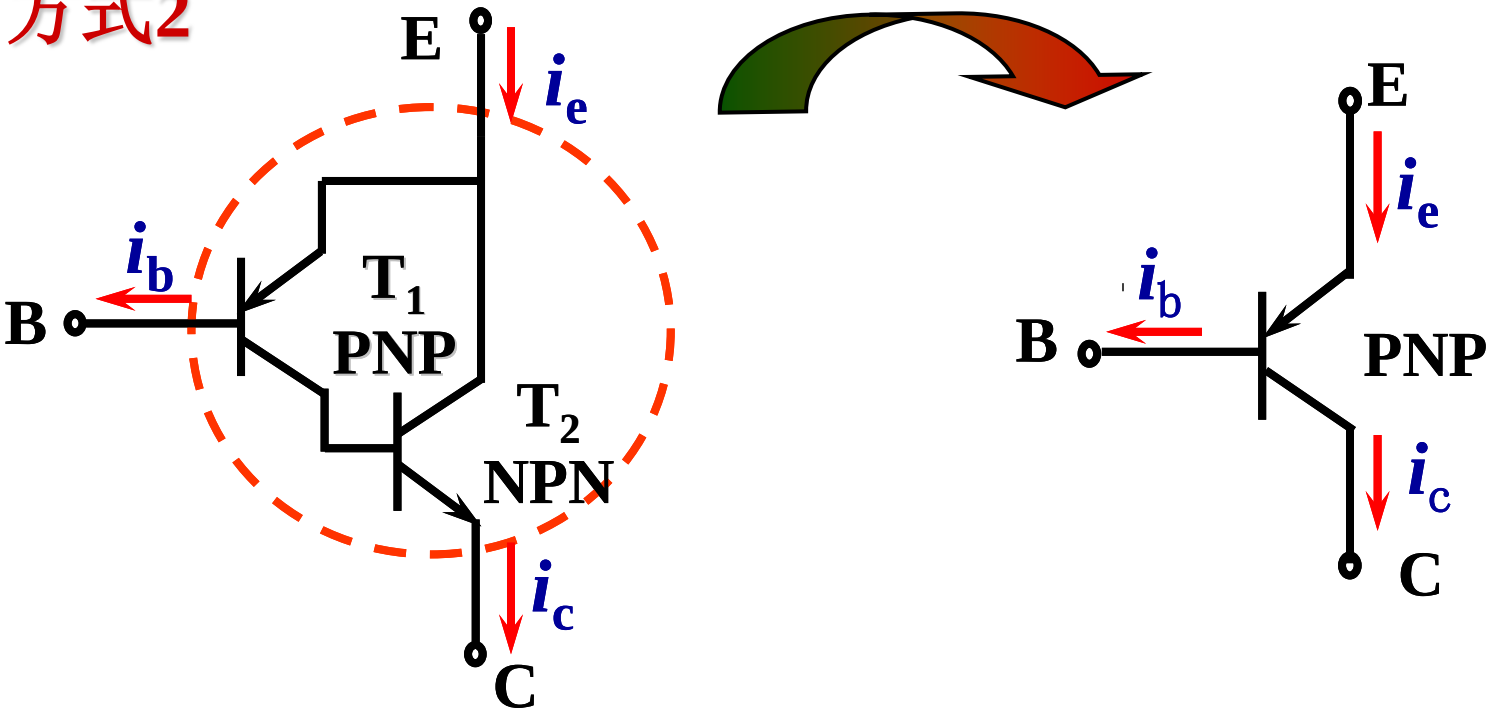
$i_{c2} = \beta_2\, i_{b2} = \beta_2 (1+\beta_1)\, i_{b1}$,

$i_c = i_{c1} + i_{c2}$

$= [\beta_1 + \beta_2 (1+\beta_1)]\, i_{b1}$

$\approx \beta_1 \beta_2\, i_{b1}$

方式2



- 复合管的类型与复合管中第一只管子的类型相同
- 复合管的电流放大系数 $\beta \approx \beta_1 \ \beta_2$

产品手册中常把复合管称为“达林顿”晶体管

用复合管组成的互补对称放大电路常称为准互补对称放大电路

思考

OTL准互补对称放大电路

(1) R_4、D_1、D_2的作用？

避免产生交越失真

(2) T_1和T_3、T_2 和T_4 构成什么工作方式？

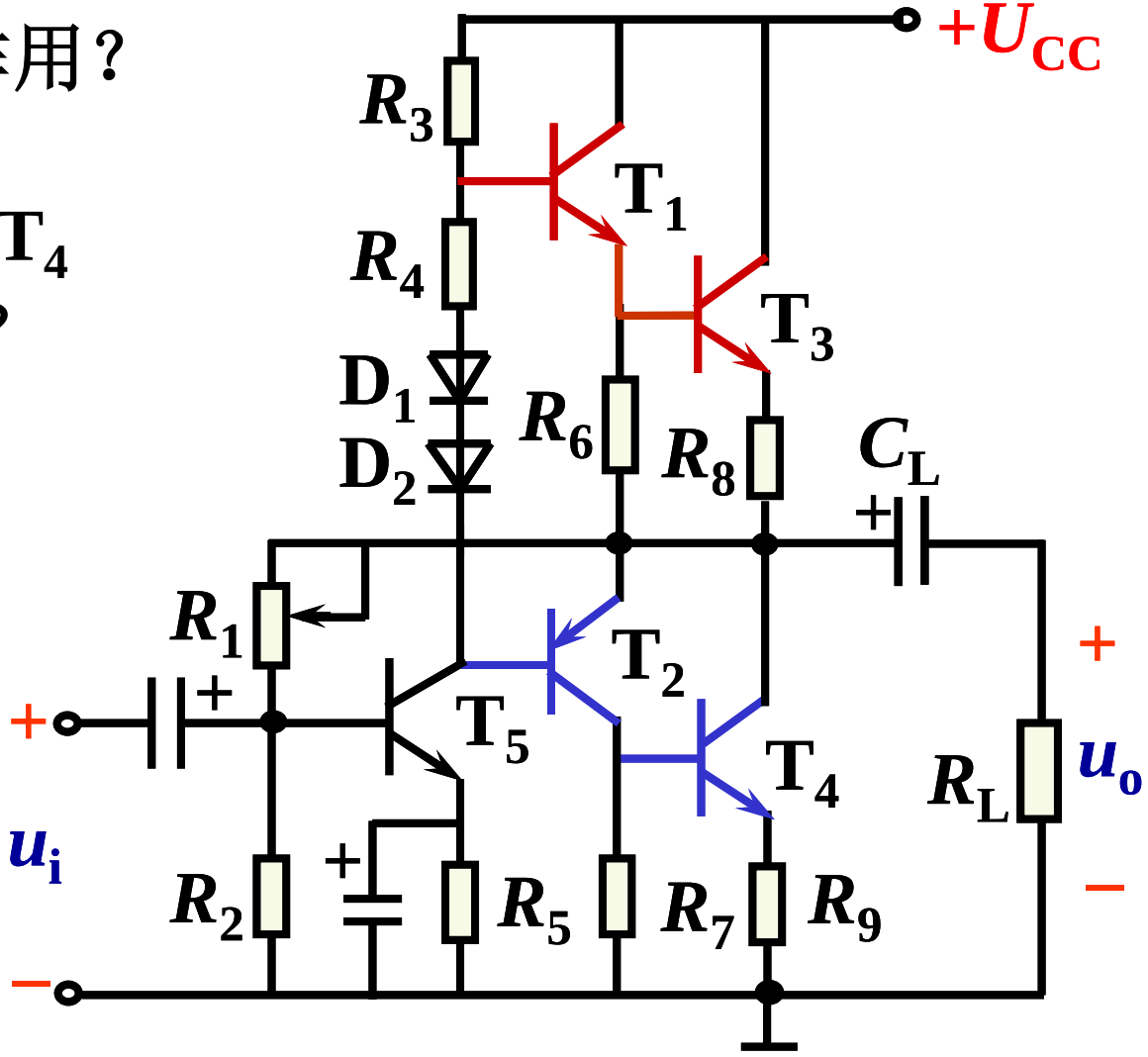
构成复合管

(3) R_8和R_9的作用？

引入电流负反馈，使电路工作稳定。

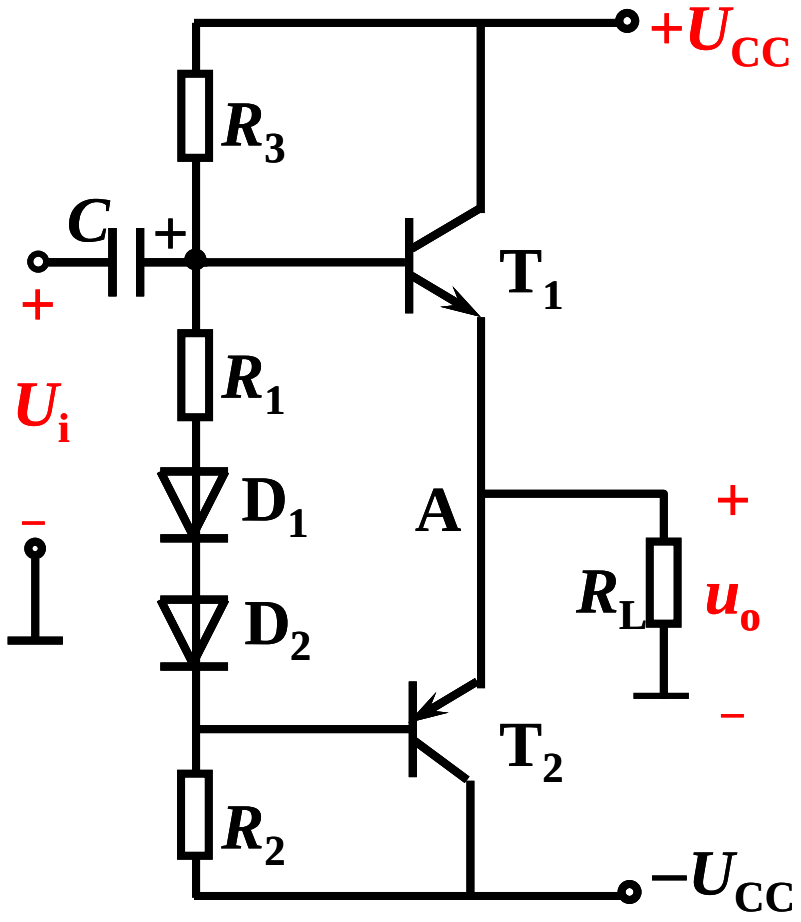
(4) R_6和R_7的作用？

分流T_1、T_2的I_{CEO}，提高温度稳定性。



2. 无输出电容(OCL)的互补对称放大电路

OCL电路需用正负两路电源。其工作原理与OTL电路基本相同。



OCL互补对称放大电路

3 集成功率放大器

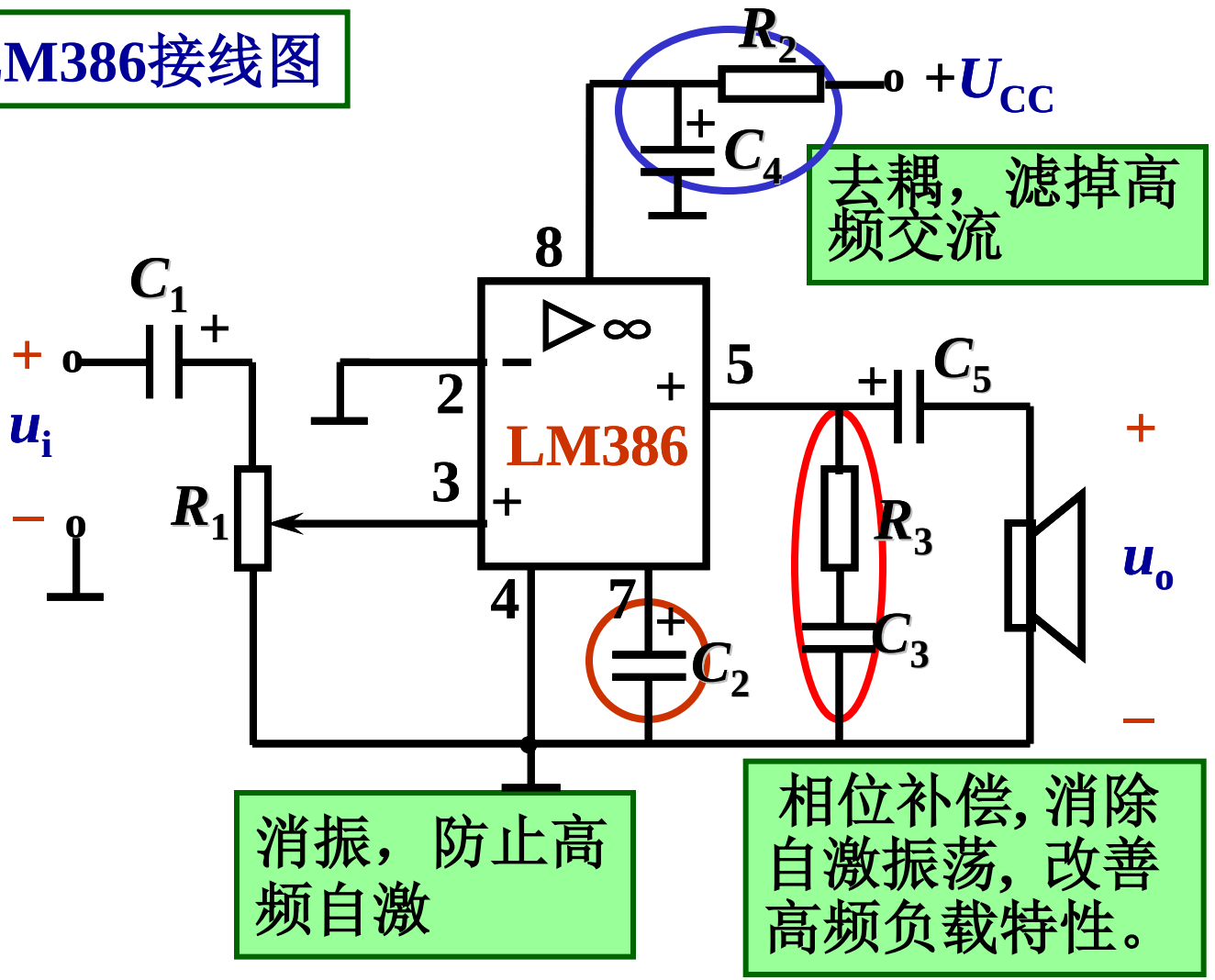
目前集成功放电路获得了广泛的应用，其内部电路一般均为OTL或OCL电路，集成功放除了具有分立元件OTL或OCL电路的优点外，还具有体积小、工作稳定可靠、使用方便等优点。

低频集成功放的种类很多，下面以LM386为例作一简单介绍。

LM386是一种低电压通用型低频集成功放。该电路功耗低、允许的电源电压范围宽、通频带宽、外接元件少，广泛用于收录机、 对讲机、 电视伴音等系统中。

3 集成功率放大器

集成功放LM386接线图



特点：

工作可靠、使用方便。只需在器件外部适当连线，即可向负载提供一定的功率。

场效晶体管及其放大电路

场效应晶体管是利用电场效应来控制电流的一种半导体器件，即是电压控制元件。它的输出电流决定于输入电压的大小，基本上不需要信号源提供电流，所以它的输入电阻高，且温度稳定性好。

按结构不同场效晶体管有两种：

- 结型场效晶体管
- 绝缘栅型场效晶体管

由于绝缘栅型场效晶体管制作工艺简单, 便于集成化，且性能优于结型场效晶体管，因此得到广泛应用。

本节仅介绍绝缘栅型场效晶体管

1 绝缘栅场效晶体管

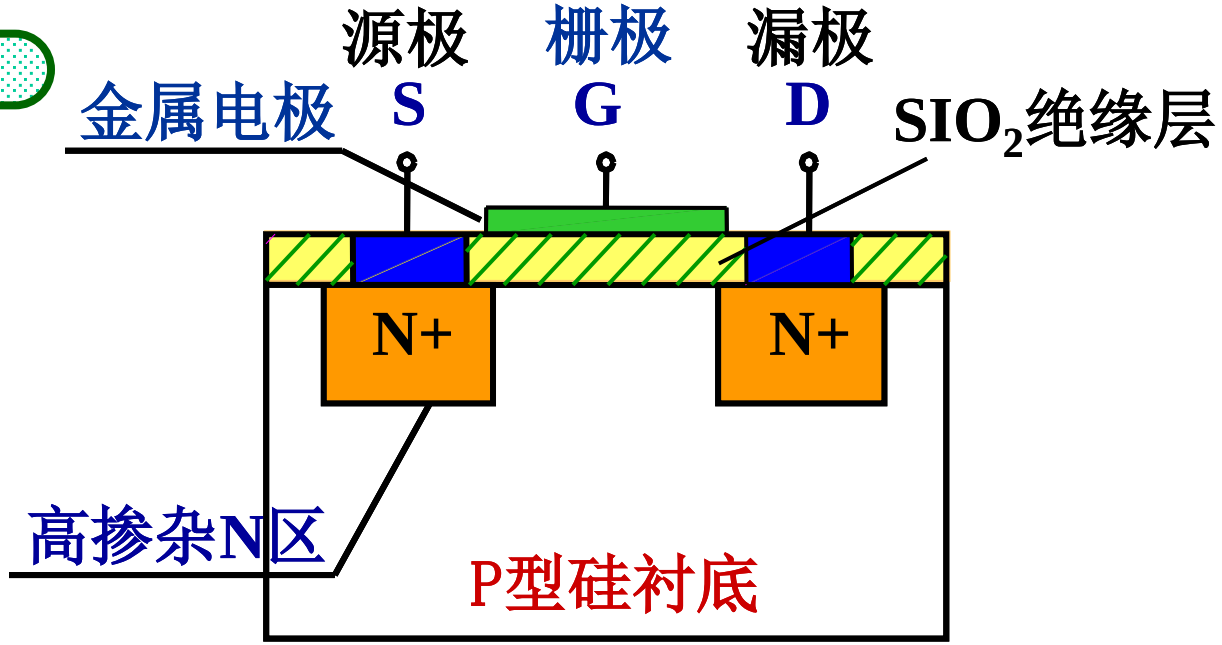
按工作状态可分为：增强型和耗尽型两类

每类又有N沟道和P沟道之分

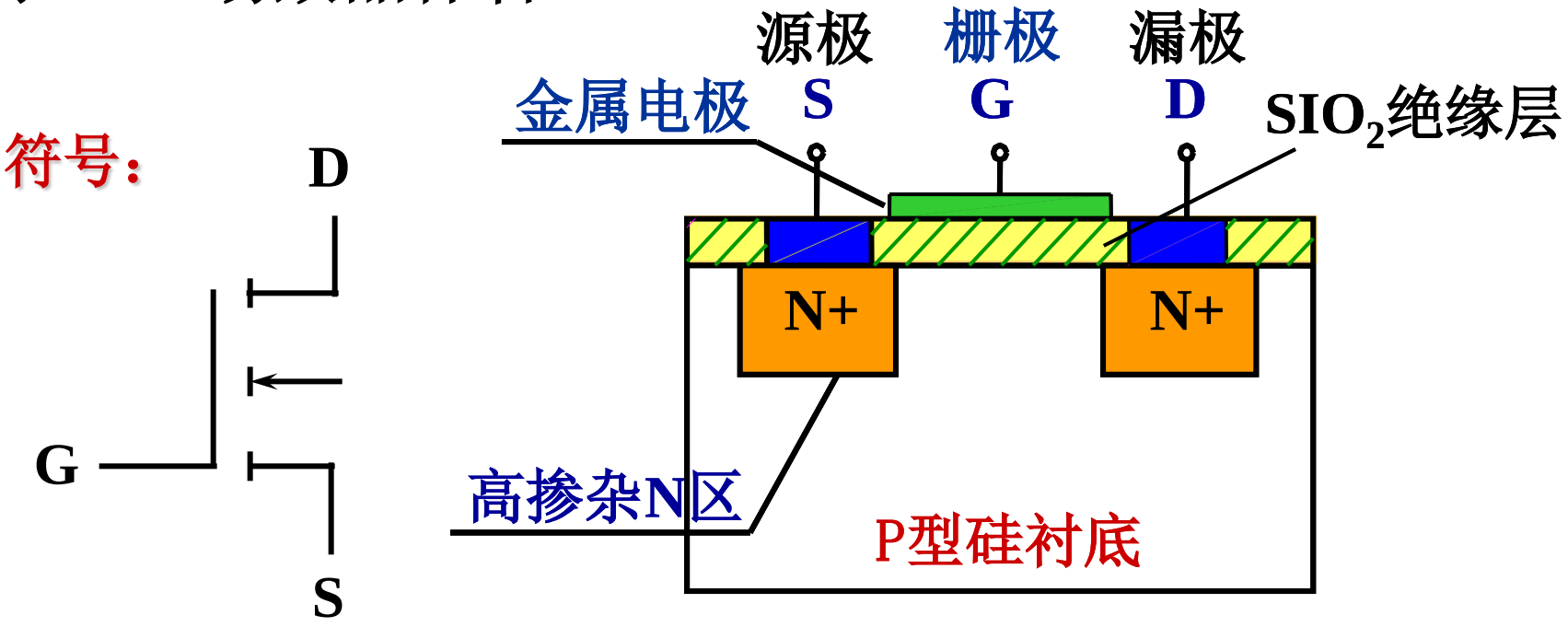
1. 增强型绝缘栅场效晶体管

(1) N沟道增强型管的结构

栅极和其它电极及硅片之间是绝缘的，称绝缘栅型场效晶体管。



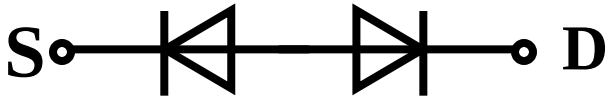
由于金属栅极和半导体之间的绝缘层目前常用二氧化硅，故又称金属-氧化物-半导体场效晶体管，简称MOS场效晶体管。



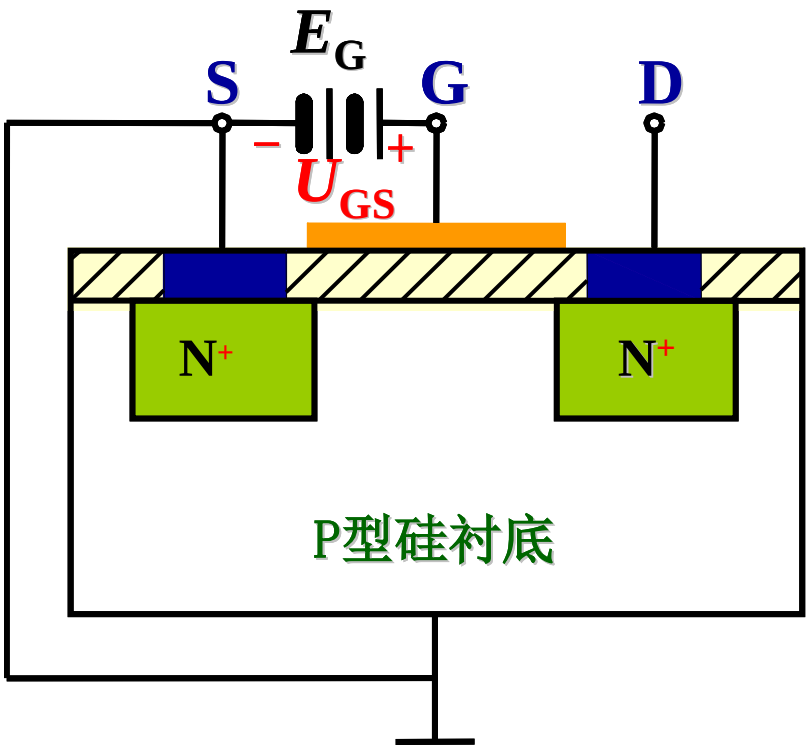
由于栅极是绝缘的，栅极电流几乎为零，输入电阻很高，最高可达$10^{14}\Omega$ 。

(2) N沟道增强型管的工作原理

由结构图可见，N^+型漏区和N^+型源区之间被P型衬底隔开，漏极和源极之间是两个背靠背的PN结。



当栅源电压$U_{GS}=0$ 时，不管漏极和源极之间所加电压的极性如何，其中总有一个PN结是反向偏置的，反向电阻很高，漏极电流近似为零。

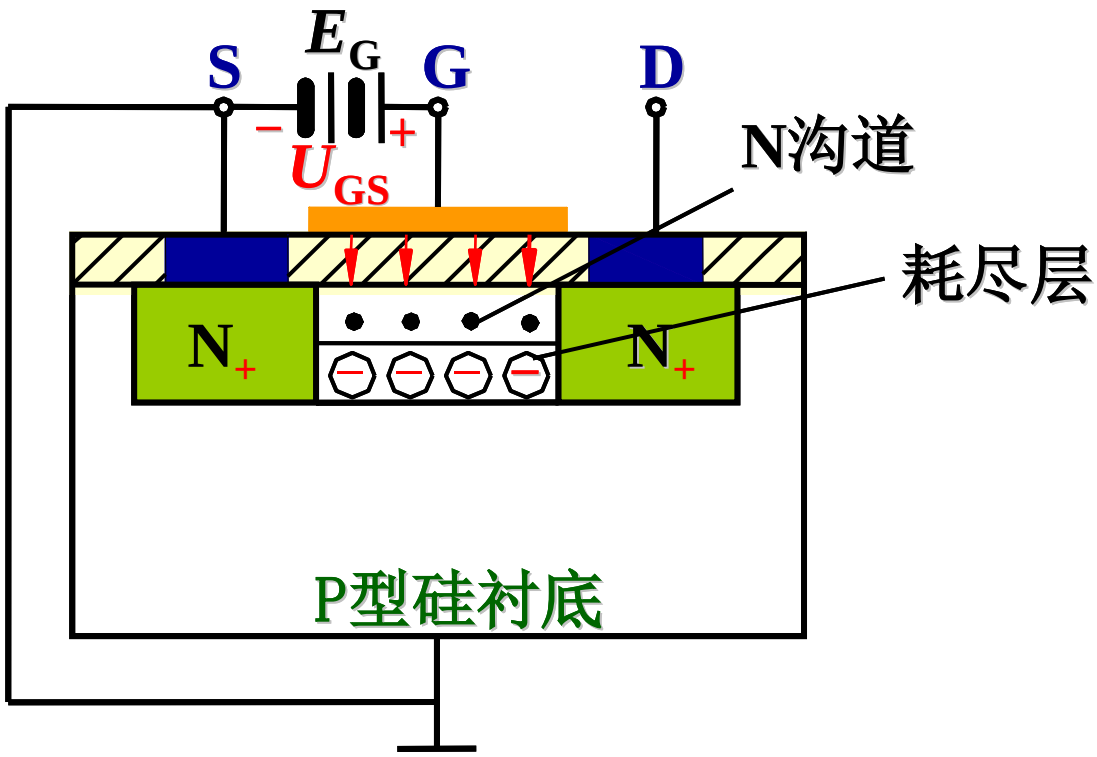


跳转

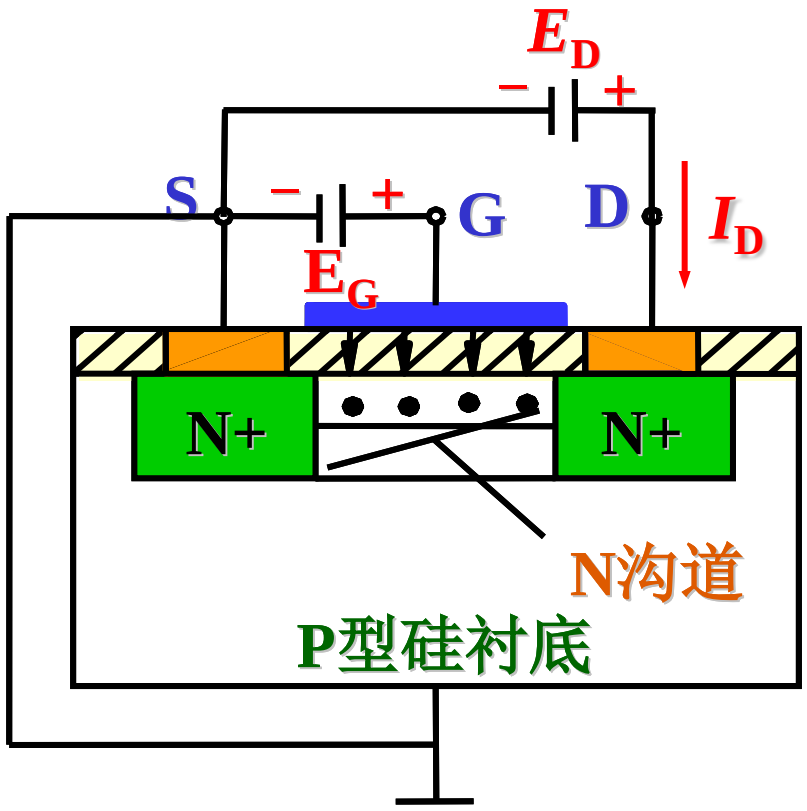
(2) N沟道增强型管的工作原理

当$U_{GS} > 0$ 时，P型衬底中的电子受到电场力的吸引到达表层，填补空穴形成负离子的耗尽层；当$U_{GS} > U_{GS(th)}$时，还在表面形成一个N型层，称反型层，即勾通源区和漏区的N型导电沟道，将D-S连接起来。

U_{GS}愈高，导电沟道愈宽。



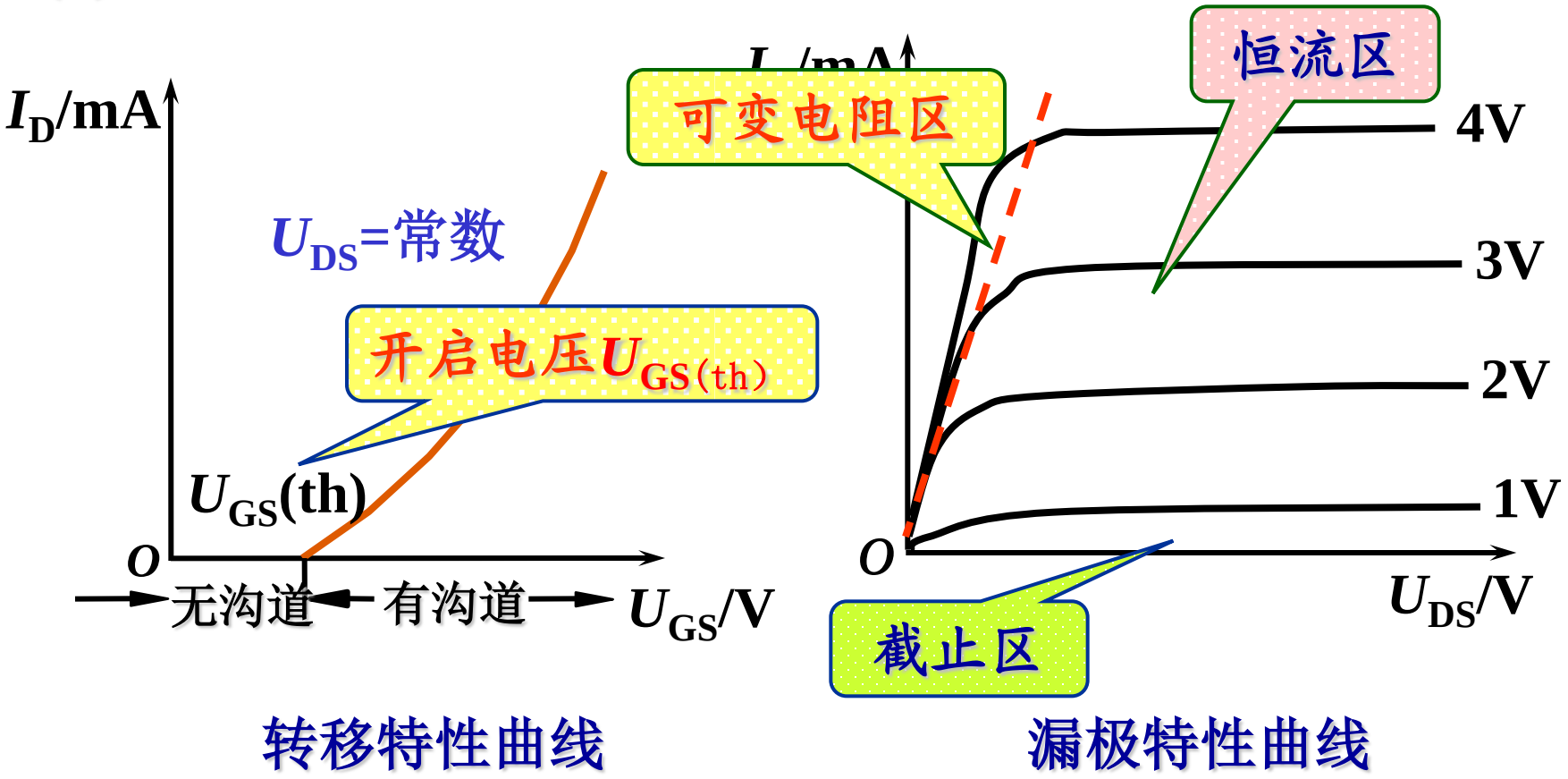
当 $U_{GS} > U_{GS(th)}$ 后，场效晶体管才形成导电沟道, 开始导通，若漏–源之间加上一定的电压U_{DS}, 则有漏极电流I_D产生。在一定的 U_{DS} 下漏极电流I_D的大小与栅源电压U_{GS}有关。所以，**场效应管是一种电压控制电流的器件。**



N型沟道增强型绝缘栅场效应管的导通

在一定的漏–源电压U_{DS}下, 使管子由不导通变为导通的临界栅源电压称为开启电压$U_{GS(th)}$。

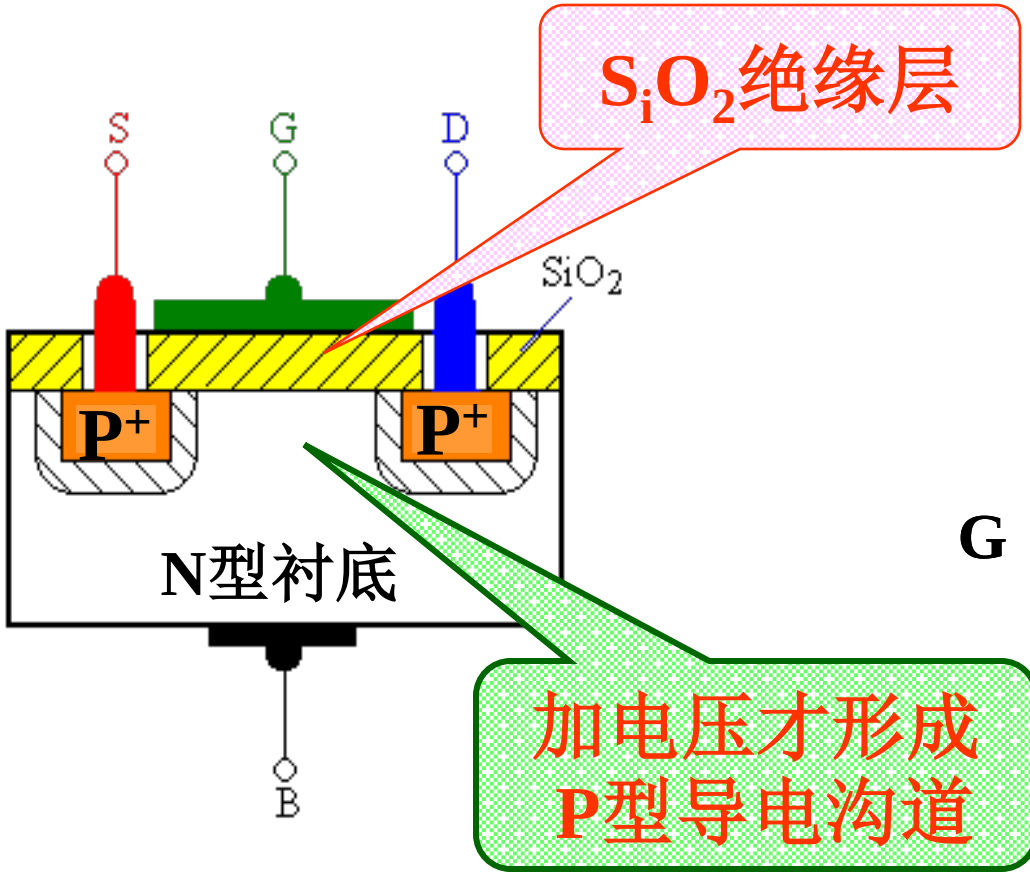
(3) 特性曲线



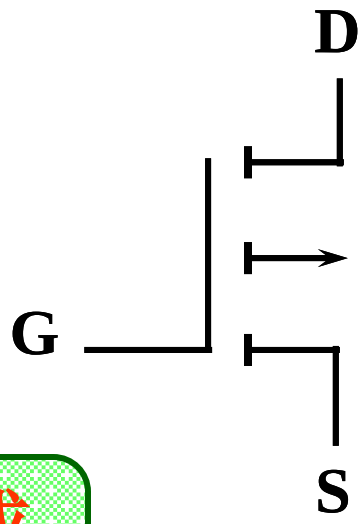
转移特性曲线　　漏极特性曲线

(4) P沟道增强型

结构



符号：



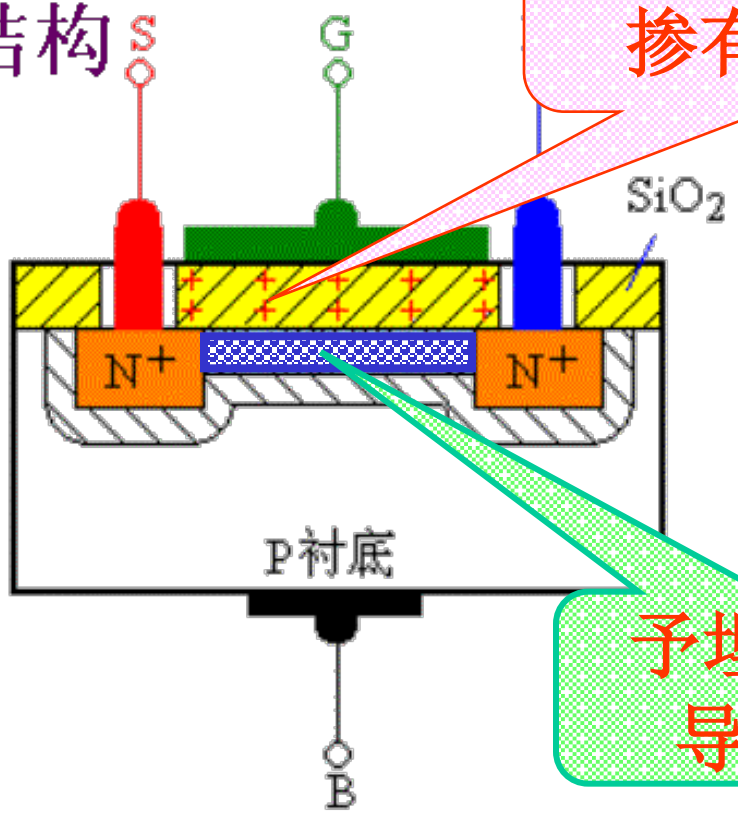
增强型场效晶体管只有当$U_{GS} > U_{GS(th)}$ 时才形成导电沟道。

2. 耗尽型绝缘栅场效晶体管

如果MOS管在制造时导电沟道就已形成，称为耗尽型场效晶体管。

(1) N沟道耗尽型管

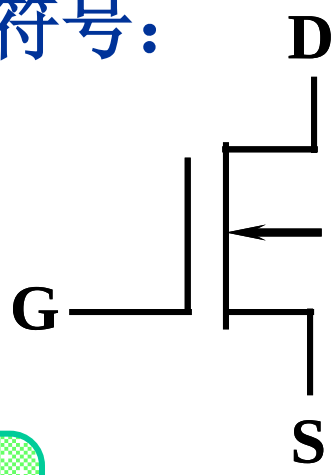
结构



S_iO_2绝缘层中掺有正离子

子埋了N型导电沟道

符号：



2. 耗尽型绝缘栅场效晶体管

由于耗尽型场效晶体管预埋了导电沟道，所以在U_{GS}= 0时，若漏–源之间加上一定的电压U_{DS}，也会有漏极电流 I_D 产生。这时的漏极电流用 I_{DSS}表示，称为饱和漏极电流。

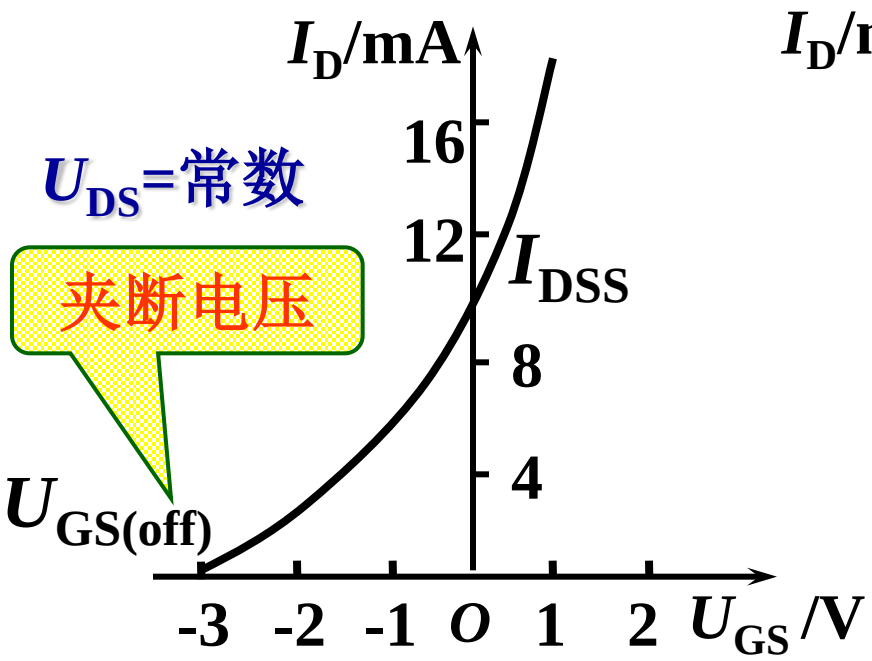
当U_{GS} > 0时，使导电沟道变宽， I_D 增大；

当U_{GS} < 0时，使导电沟道变窄， I_D 减小； U_{GS} 负值愈高，沟道愈窄， I_D就愈小。

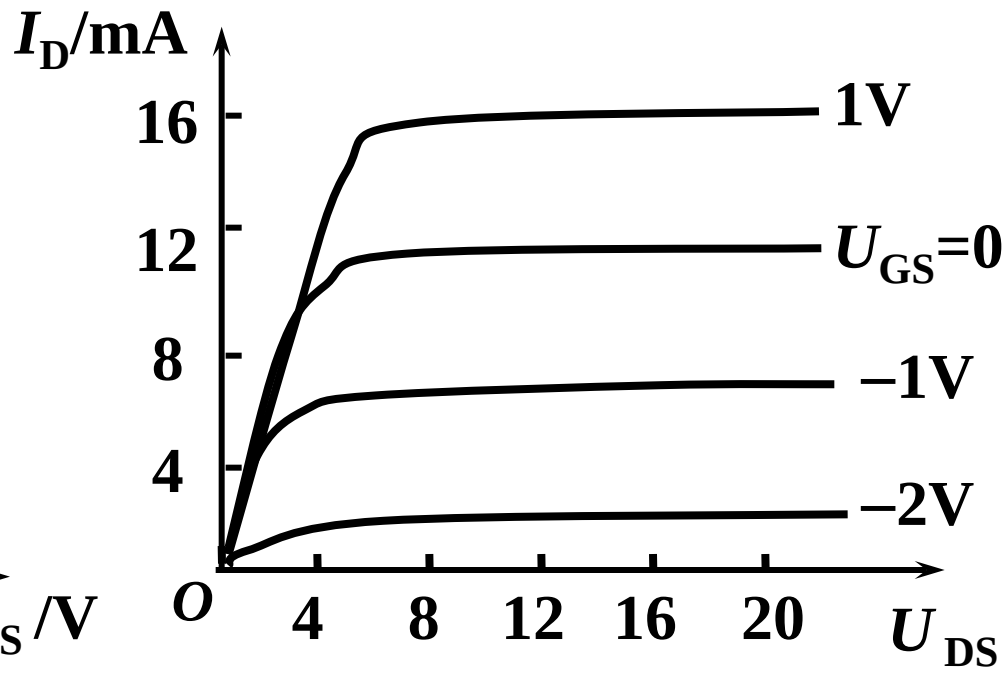
当U_{GS}达到一定负值时，N型导电沟道消失，I_D= 0，称为场效晶体管处于夹断状态（即截止）。这时的U_{GS}称为夹断电压，用$U_{GS(off)}$ 表示。

(2) 耗尽型N沟道MOS管的特性曲线

耗尽型的MOS管U_{GS}= 0时就有导电沟道，加反向电压到一定值时才能夹断。



转移特性曲线

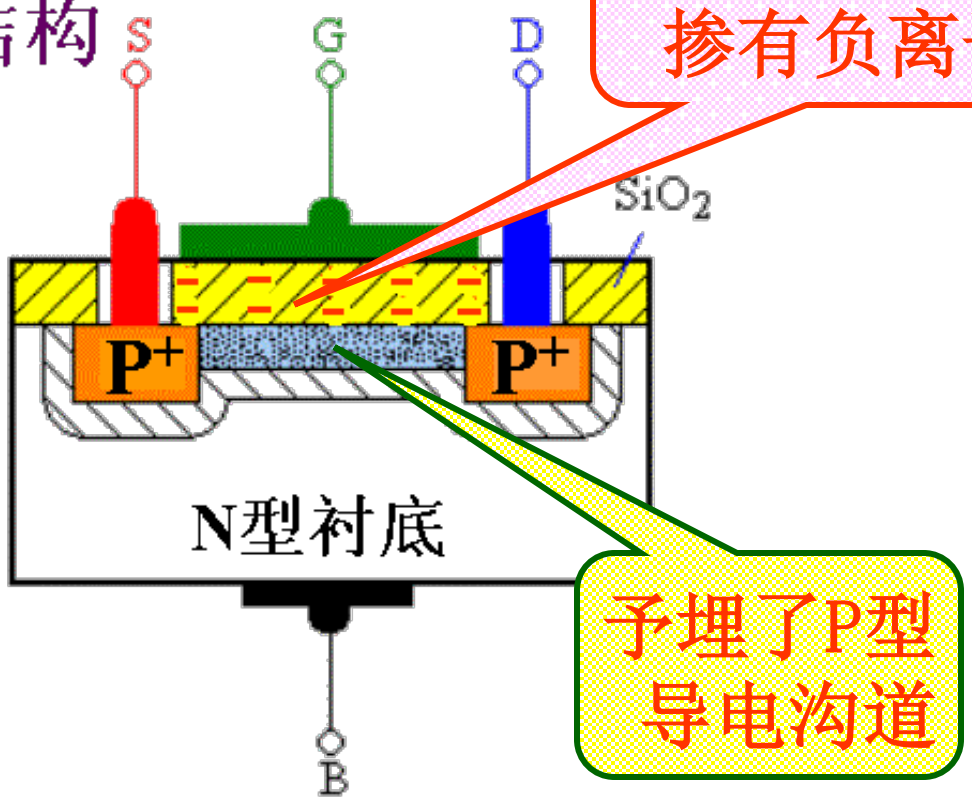


漏极特性曲线

2. 耗尽型绝缘栅场效晶体管

(3) P 沟道耗尽型管

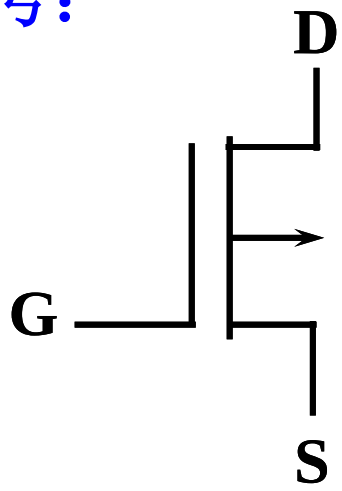
结构



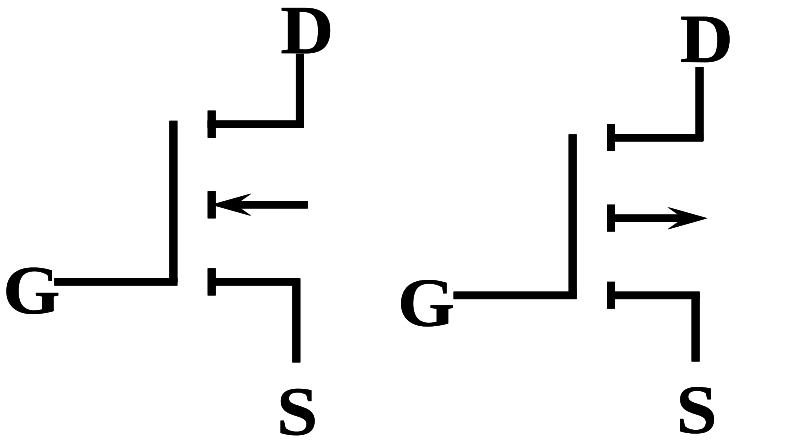
S_iO_2绝缘层中
掺有负离子

予埋了P型
导电沟道

符号：



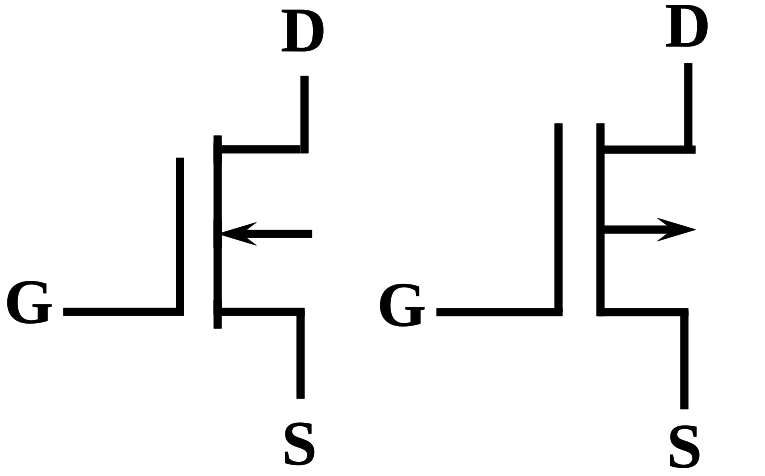
增强型



N沟道　　P沟道

G、S之间加一定电压才形成导电沟道

耗尽型



N沟道　　P沟道

在制造时就具有原始导电沟道

3. 场效晶体管的主要参数

(1) 开启电压 $U_{GS(th)}$：是增强型MOS管的参数

(2) 夹断电压 $U_{GS(off)}$：

(3) 饱和漏电流 I_{DSS}：

} 是结型和耗尽型MOS管的参数

(4) 低频跨导 g_m：表示栅源电压对漏极电流的控制能力

$$g_m = \left.\frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}}\right|_{U_{DS}}$$

极限参数：最大漏极电流、耗散功率、击穿电压。

场效晶体管与晶体管的比较

	双极型晶体管	单极型场效晶体管
载流子	电子和空穴两种载流子同时参与导电	电子或空穴中一种载流子参与导电
控制方式	电流控制	电压控制
类　型	NPN和PNP	N沟道和P沟道
放大参数	$\beta = 20 \sim 200$	$g_m = 1 \sim 5\text{mA/V}$
输入电阻	$10^2 \sim 10^4\,\Omega$ 较低	$10^7 \sim 10^{14}\,\Omega$ 较高
输出电阻	r_{ce}很高	r_{ds}很高
热稳定性	差	好
制造工艺	较复杂	简单，成本低
对应电极	B—E—C	G—S—D

3 场效晶体管放大电路

场效应晶体管具有输入电阻高、噪声低等优点，常用于多级放大电路的输入级以及要求噪声低的放大电路。

场效晶体管的源极、漏极、栅极相当于双极型晶体管的发射极、集电极、基极。

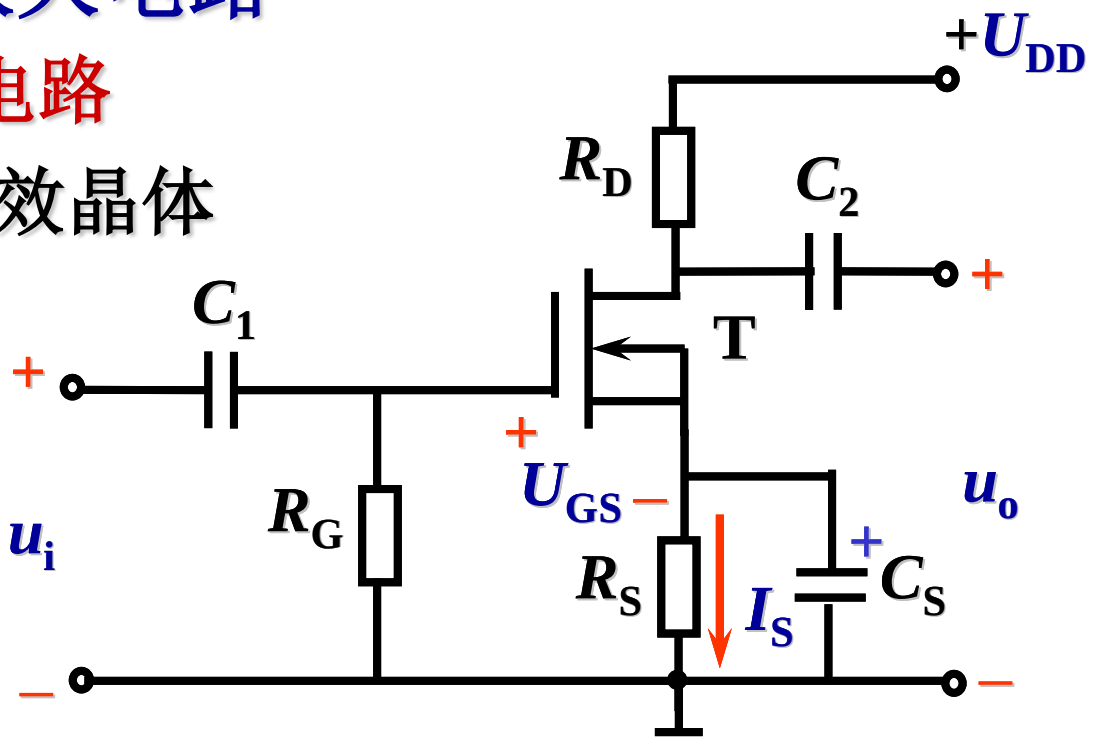
场效晶体管的共源极放大电路和源极输出器与双极型晶体管的共发射极放大电路和射极输出器在结构上也相类似。

场效晶体管放大电路的分析与双极型晶体管放大电路一样，包括静态分析和动态分析。

3 场效晶体管放大电路

1. 自给偏压式偏置电路

T为N沟道耗尽型场效晶体管



$$U_{GS} = -R_S I_S$$
$$= -R_S I_D$$

栅源电压U_{GS}是由场效晶体管自身的电流提供的, 故称自给偏压。

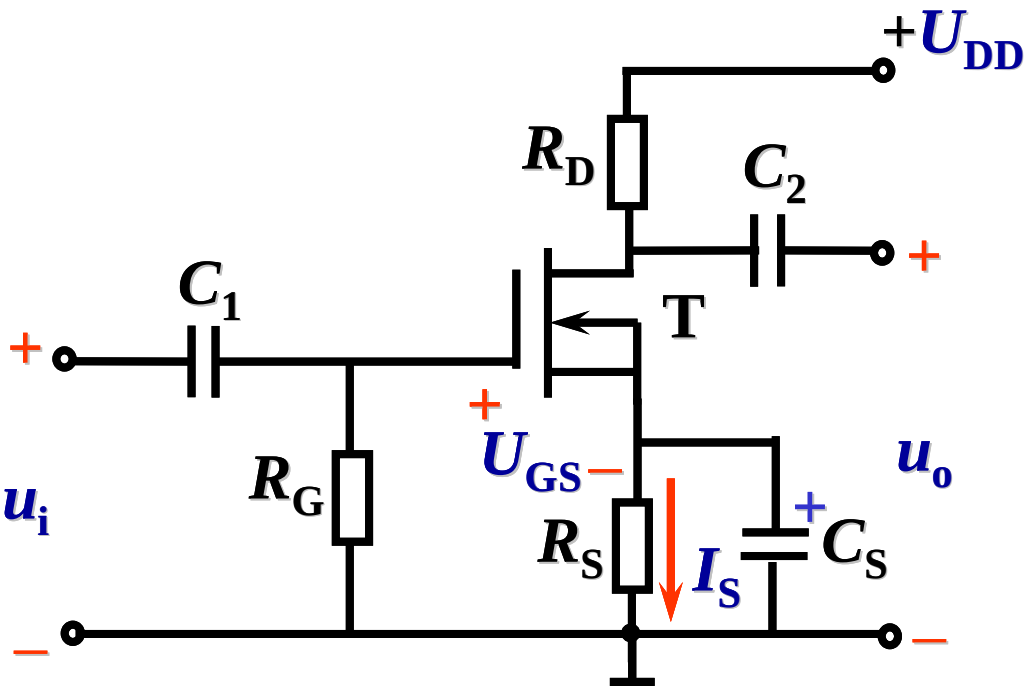
增强型MOS管因$U_{GS} = 0$时， $I_D \approx 0$，故不能采用自给偏压式电路。

静态分析可以用估算法或图解法(略)

估算法:

列出静态时的关系式

$$\begin{cases} U_{GS} = -R_S I_D \\ I_D = I_{DSS}\left(1 - \dfrac{U_{GS}}{U_{GS(OFF)}}\right)^2 \end{cases}$$

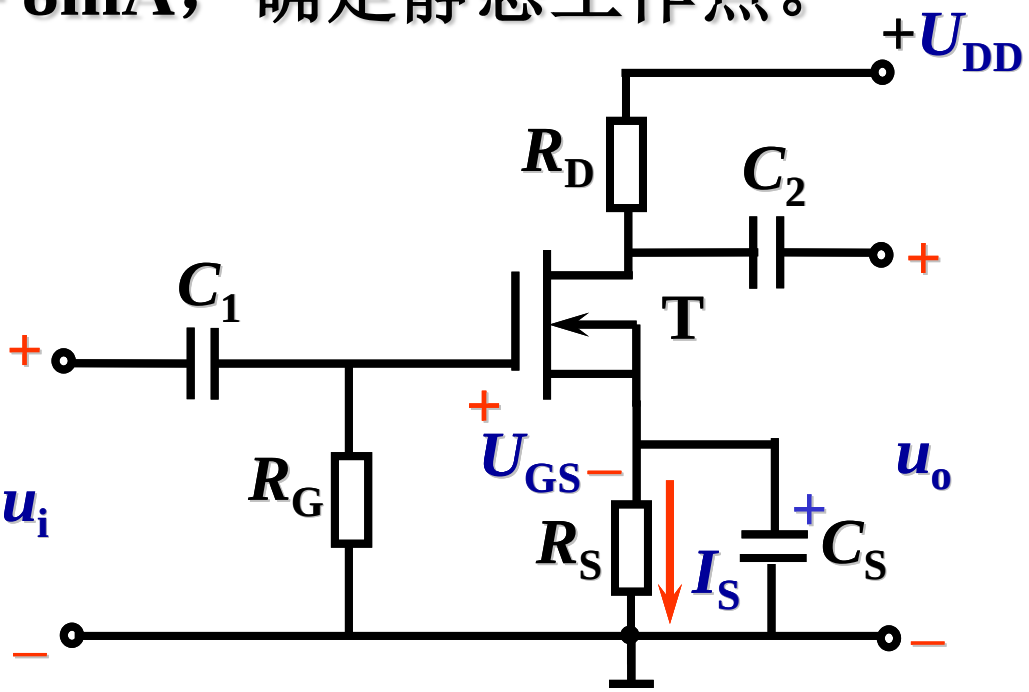


将已知的$U_{GS(off)}$、I_{DSS}代入上两式, 解出U_{GS}、I_D;

由 $U_{DS} = U_{DD} - I_D(R_D + R_S)$ 解出U_{DS}

对增强型MOS管构成的放大电路需用图解法来确定静态值。

例：已知U_{DD}=20V、R_D=3kΩ、R_S=1kΩ、R_G=500kΩ、$U_{GS(off)}$ = –4 V、I_{DSS}= 8mA，确定静态工作点。



解：用估算法

列出关系式

$$\begin{cases} U_{GS} = -1 \times I_D \\ I_D = 8\left(1 - \dfrac{U_{GS}}{-4}\right)^2 \end{cases}$$

解出 U_{GS1} = –2V、U_{GS2} = –8V、I_{D1}=2mA、I_{D2}=8mA

因$U_{GS2} < U_{GS(off)}$ 故舍去，

所求静态解为U_{GS} = –2V I_D=2mA、

U_{DS}= 20 – 2（ 3 + 1 ）= 12 V

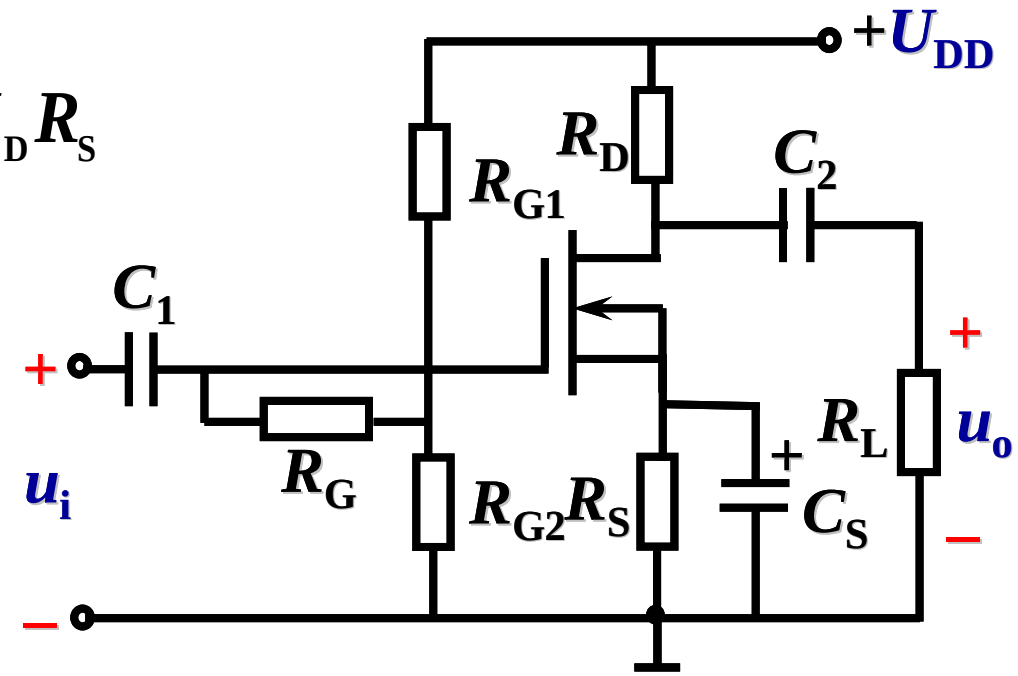
2. 分压式偏置电路

(1) 静态分析

估算法： 列出静态时的关系式

流过 R_G 的电流为零

$$\begin{cases} U_{GS} = \dfrac{R_{G2}}{R_{G1}+R_{G2}}U_{DD} - I_D R_S \\ I_D = I_{DSS}\left(1-\dfrac{U_{GS}}{U_{GS(OFF)}}\right)^2 \end{cases}$$



将已知的$U_{GS(off)}$、I_{DSS}代入上两式，解出U_{GS}、I_D；

由 $U_{DS}= U_{DD} - I_D(R_D+ R_S)$ 解出U_{DS}

(2) 动态分析

电压放大倍数

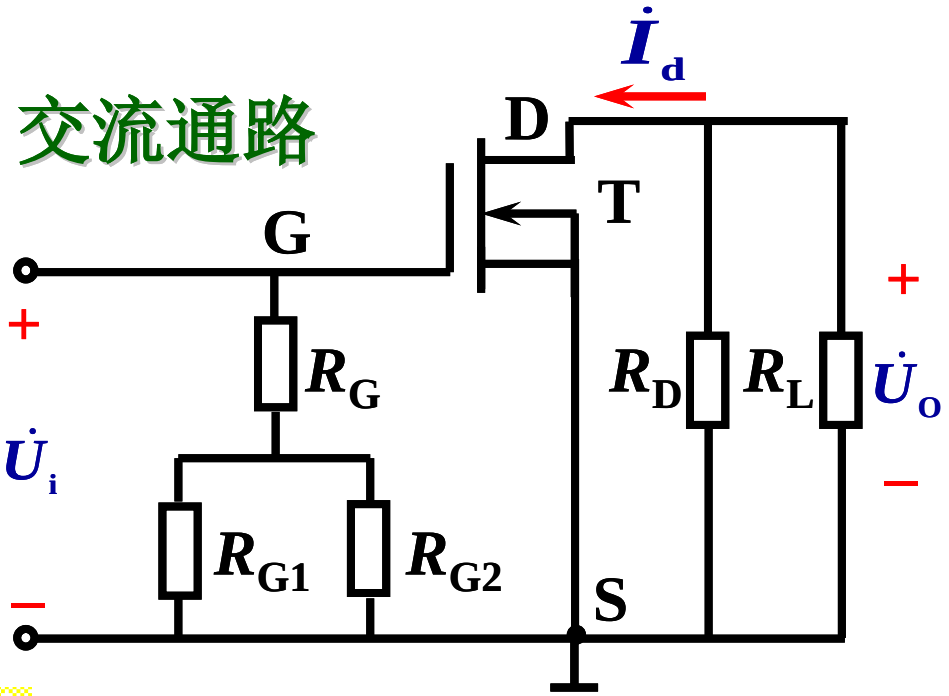
$$\dot{U}_o = -\dot{I}_d (R_D // R_L)$$

$$= -g_m \dot{U}_{gs} (R_D // R_L)$$

$$\dot{U}_i = \dot{U}_{gs}$$

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -g_m (R_D // R_L)$$

交流通路



输入电阻

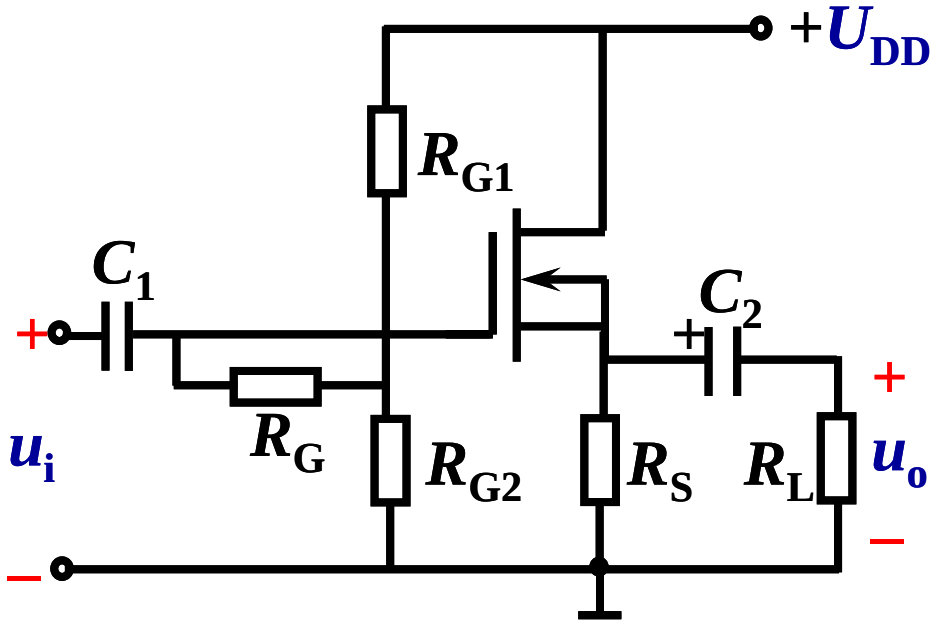
$$r_i = R_G + (R_{G1} // R_{G2})$$

输出电阻

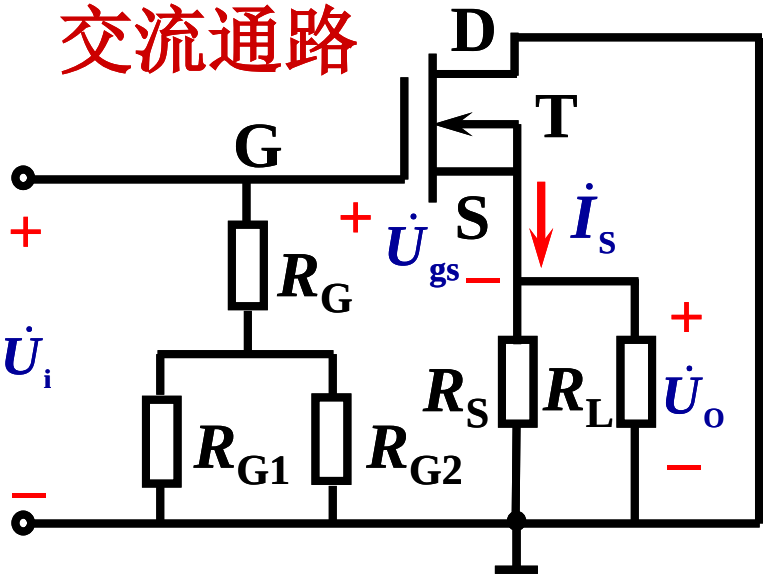
$$r_o = R_D$$

R_G是为了提高输入电阻 r_i 而设置的。

3. 源极输出器



交流通路



电压放大倍数

$$\dot{U}_o = \dot{I}_S (R_S // R_L)$$

$$= g_m \dot{U}_{gs} (R_S // R_L)$$

$$\dot{U}_i = \dot{U}_{gs} + \dot{U}_o = \dot{U}_{gs} + g_m \dot{U}_{gs} (R_S // R_L)$$

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{g_m (R_S // R_L)}{1 + g_m (R_S // R_L)} \approx 1$$

特点与晶体管的射极输出器一样。