

第二章 放大器的基本原理

第一节 晶体二极管

第二节 晶体三极管

第三节 基本放大电路

第四节 射极输出器

第五节 场效应管及其放大电路

第一节 晶体二极管

一、半导体的导电特性

二、PN结及其单向导电性

三、晶体二极管及其特性

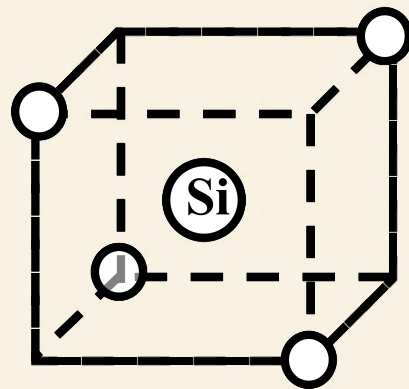
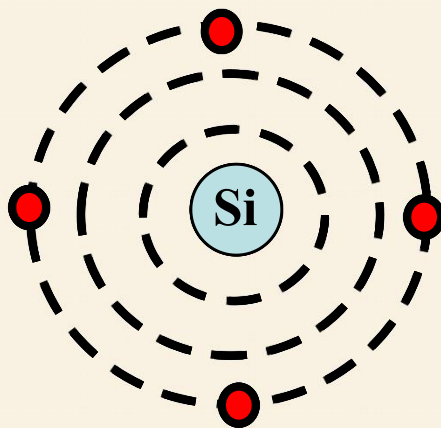
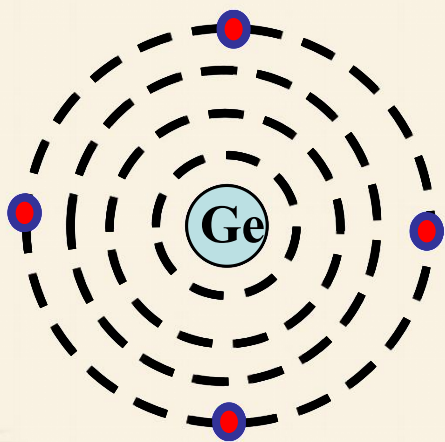
四、特殊二极管

一、半导体的导电特性

1. 本征半导体（intrinsic semiconductor）

现代电子学中，用的最多的半导体是硅和锗，它们的最外层电子（价电子）都是四个。

单晶硅（Si）和单晶锗（Ge）的原子结构：

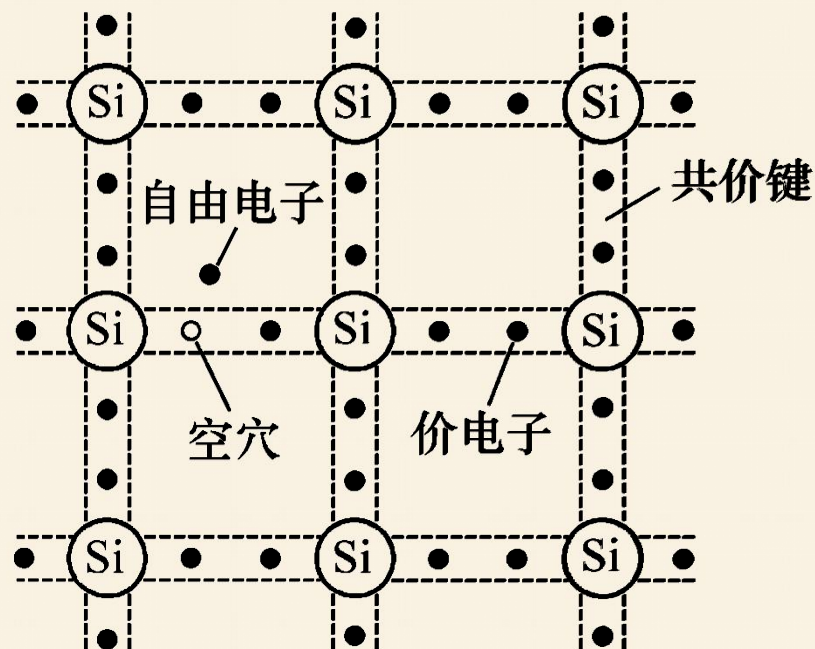


载流子 (carrier) :

热运动产生 { 自由电子
空穴

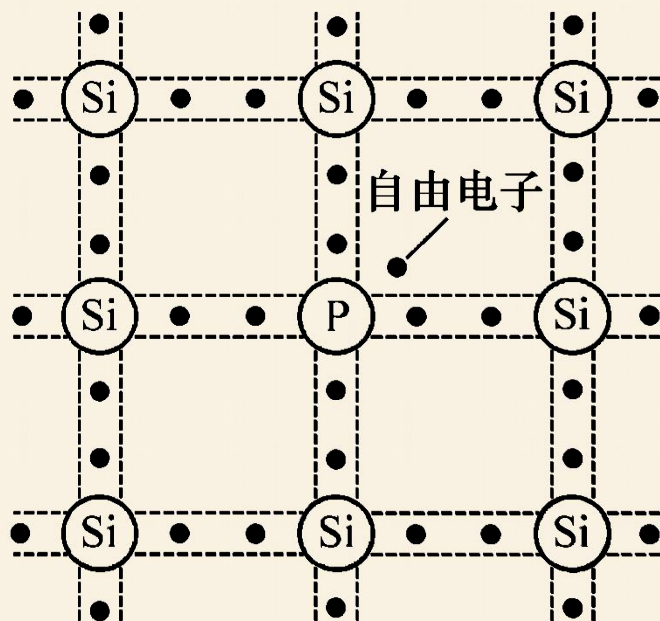
常温下都可以定向运动
形成电流。

本征半导体内的自由电子和空穴总是成对出现，两种载流子的浓度相同。



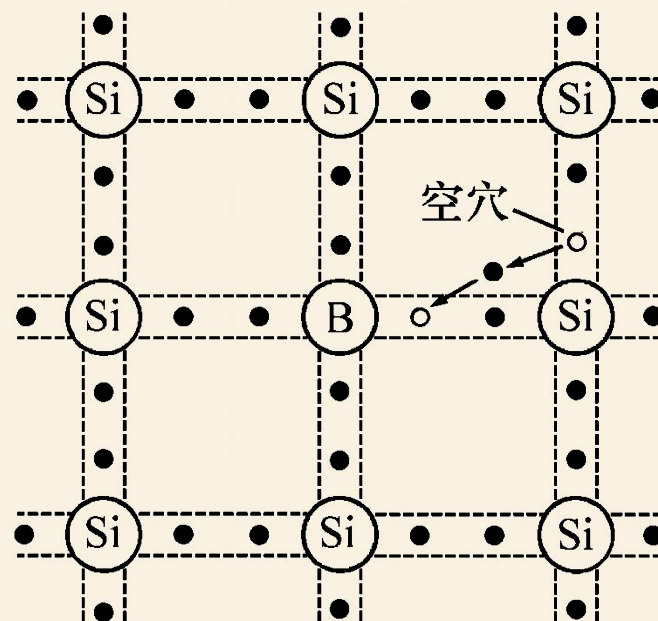
2. 杂质半导体 (extrinsic semiconductor)

掺入微量的5价元素



N型半导体

掺入微量的3价元素

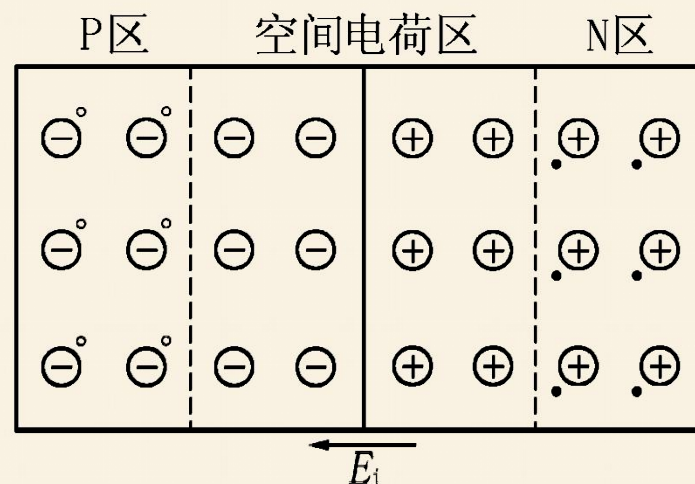
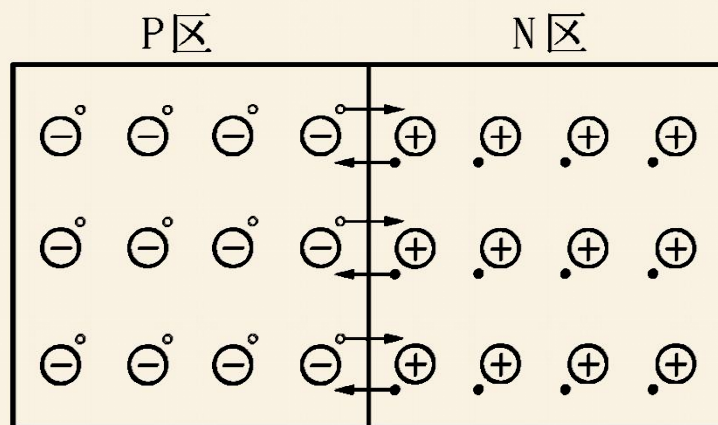


P型半导体

二、PN结的形成及其特性

扩散 → 复合 → 空间电荷区 → 内电场 → 阻止扩散
 └──────────┘ 少子漂移

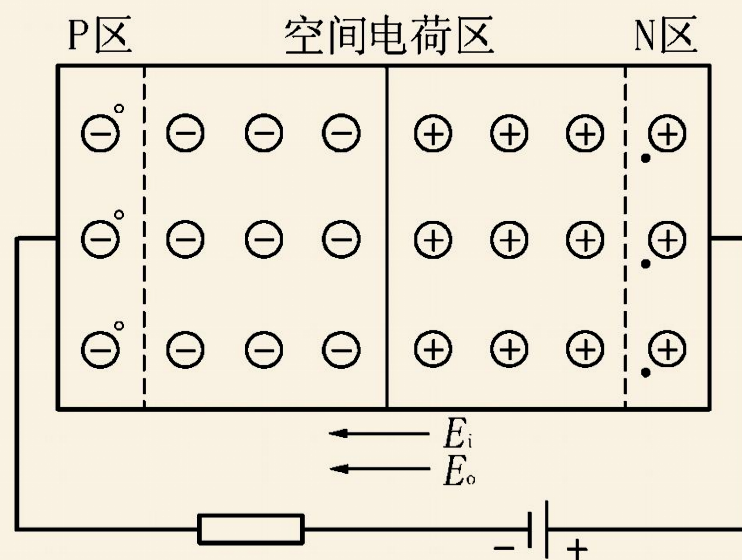
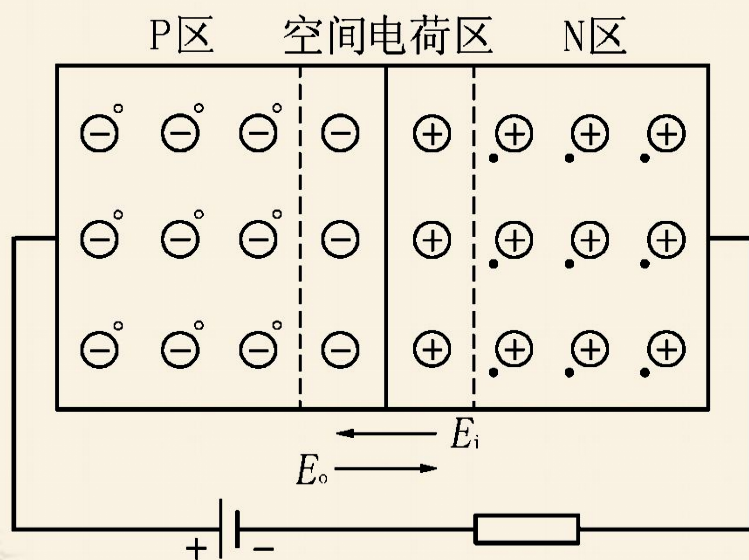
漂移=扩散→动态平衡→PN结形成



PN结的单向导电性:

加正向电压（正向偏置）： E_0 与 E_i 的方向相反
→空间电荷区变窄 → 扩散电流变大 → PN结导通

加反向偏置：空间电荷区变宽 → PN结截止



PN结的单向导电性:

* PN 结正向偏置

内电场被削弱，多子的扩散加强能够形成较大的扩散电流。

* PN 结反向偏置

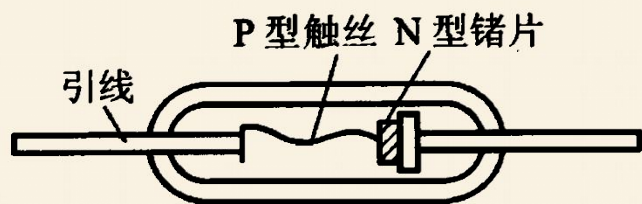
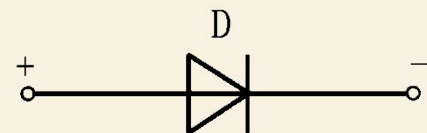
内电场被加强，多子的扩散受抑制。少子漂移加强，但少子数量有限，只能形成较小的反向电流。

三、晶体二极管及其特性

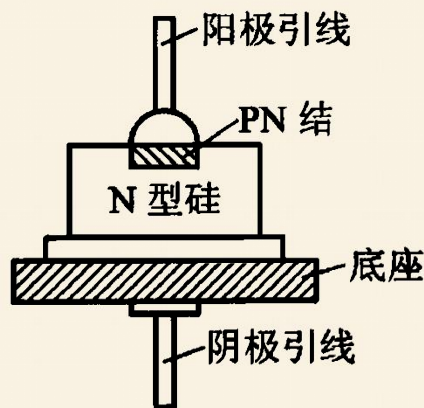
晶体二极管 $\rightarrow$ PN结两端引出电极

P区引出的电极是二极管的正极

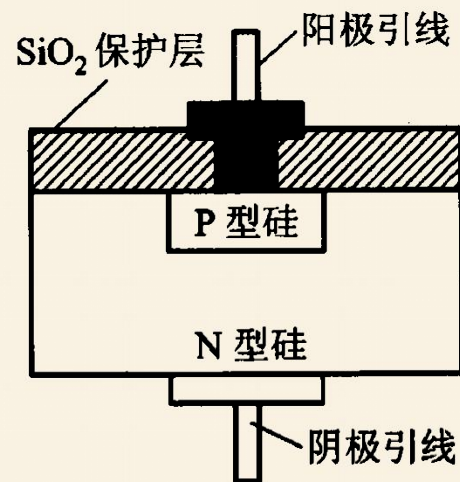
N区引出的电极是二极管的负极



点接触型



面接触型



平面型

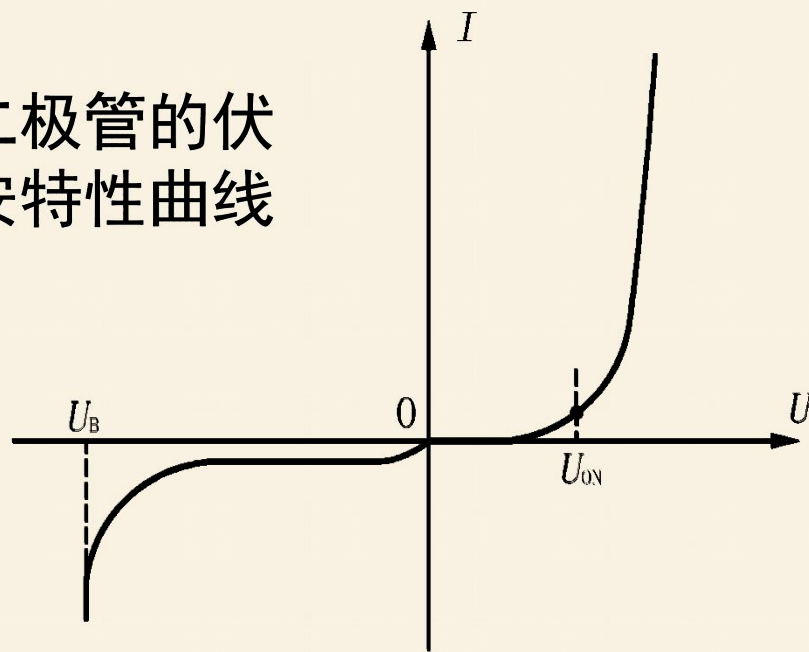
二极管的特性：

- ① 二极管具有单向导电性；
- ② 二极管的伏安特性具有非线性；
- ③ 二极管的伏安特性与温度有关。

死区电压 U_{on} ：一般硅管为0.5V、锗管略小于0.2V。

正常工作管压降：硅管通常为0.7V、锗管0.2—0.3V。

二极管的伏安特性曲线



二极管的主要参数：

(1) 最大整流电流：指二极管长时间工作时允许通过的最大正向平均电流，超过此值会损坏。

(2) 最大反向工作（峰值）电压：它是保证二极管能正常工作而设定的极限反向电压，一般定为反向击穿电压的一半或三分之二。

(3) 反向饱和电流：指二极管未被击穿前的最大反向电流，反映二极管的单向导电性能。

(4) 最高工作频率：指二极管正常工作的上限频率。

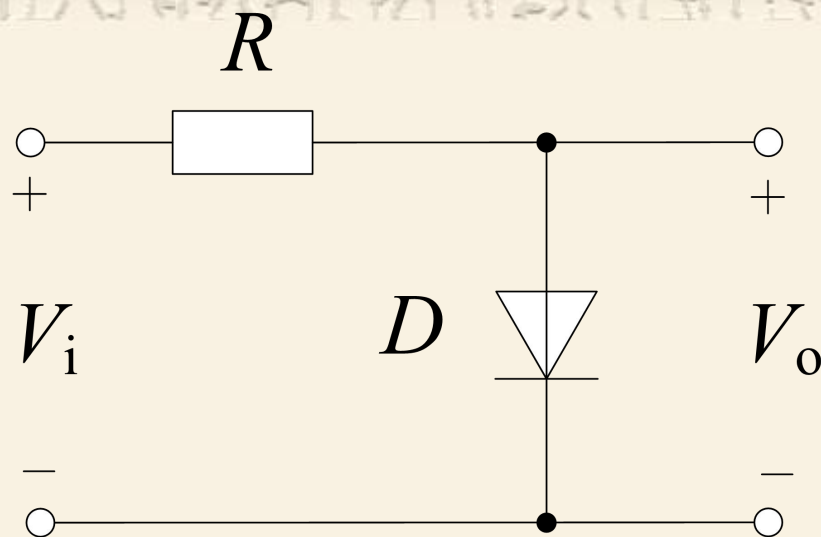
2.3 二极管的结构及特性

图中若二极管为硅管，
正向压降为 $0.7V$ ，

(1) 当 $V_i=0.4V$ 时，判断二极管D是导通还是截止，计算 V_o 的值；

(2) 当 $V_i=2V$ 时，重新计算(1)；

(3) 当 $v_i=10\sin \omega t V$ 时， V_o 的值。



判断方法：

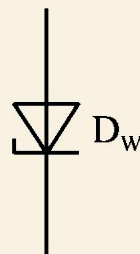
- (1) 假设二极管截止；
- (2) 计算阴极电位和阳极电位；
- (3) 判断电位高低；
- (4) 和假设相比较

四、特殊二极管

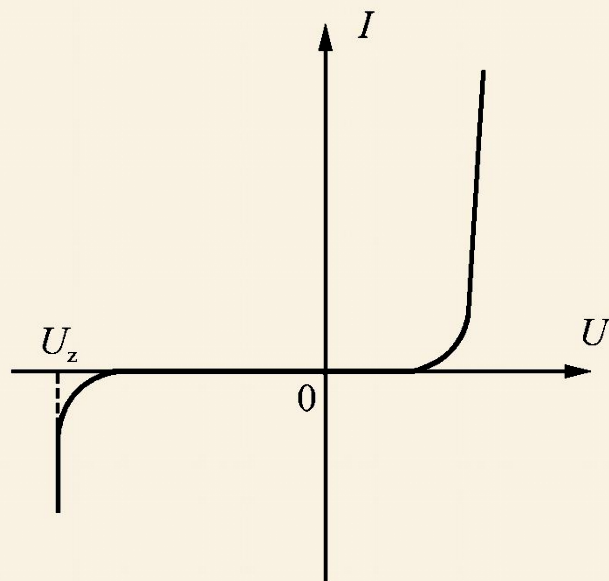
稳压二极管 (zener diode)

——工作在反向击穿区的特殊二极管

所加的反向电压小于击穿电压时，稳压管有极大的内阻；超过反向击穿电压时，电流急剧增大，电流能在很大范围内变化，但管子两端的电压基本不变。



(a) 电路符号



(b) 伏安特性曲线

使用稳压管时要注意三点：

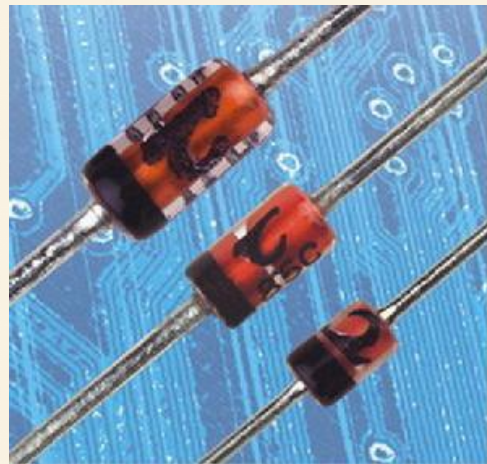
(1) 稳压管一般都是硅管；

(2) 连接电路时应反接；

(3) 稳压管需串入一电阻。

◇限流以保护稳压管；

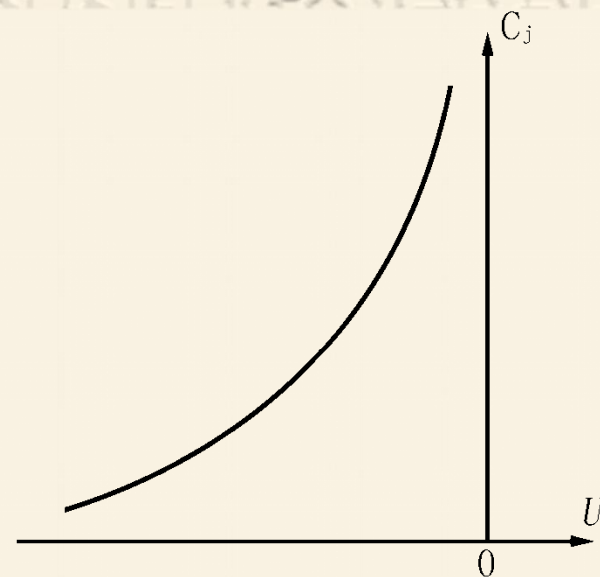
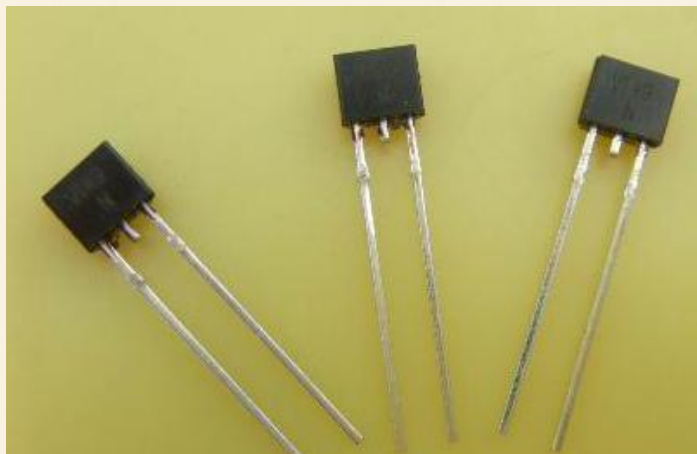
◇当输入电压或负载电流变化时，通过该电阻上电压降的变化，取出误差信号以调节稳压管的工作电流，从而起到稳压作用。



稳压管主要参数:

- (1) 稳定电压：正常工作时的稳定电压值。
- (2) 稳定电流：指稳压效果较好的工作电流。
- (3) 动态电阻：正常工作时的 $r = \Delta U / \Delta I$ ，它是衡量稳压管稳压性能好坏的指标，其值越小越好。
- (4) 最大允许耗散功率：管子不致发生热击穿的最大功率损耗。
- (5) 电压温度系数：指温度每增加 1°C 时，稳压值所变化的百分数。低于 6V 为负值
高于 6V 为正值
 6V 左右受温度的影响比较小

变容二极管 (capacitance diode)



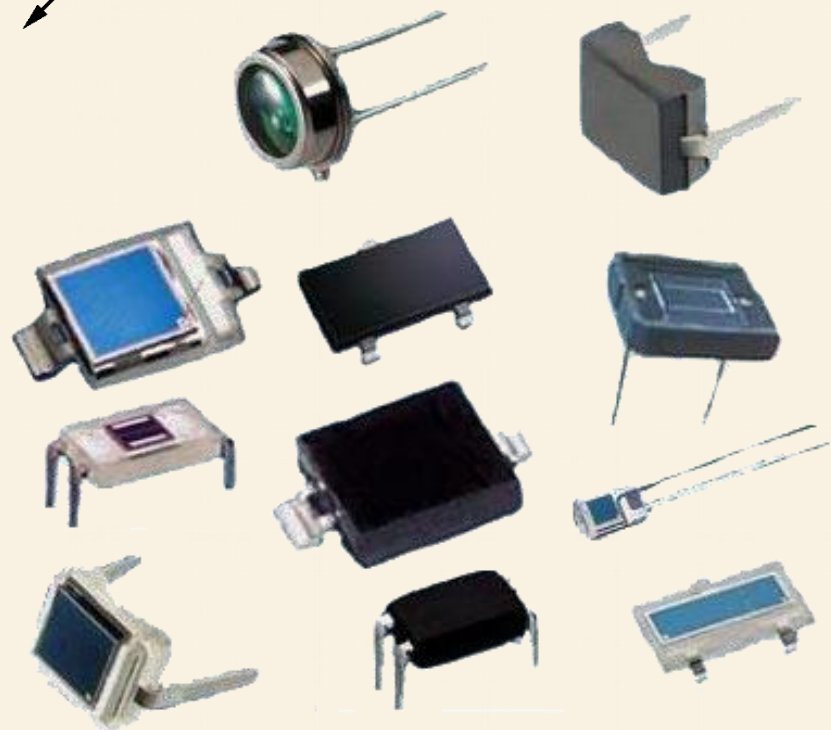
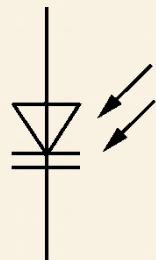
PN结电容效应:

结电容随外加电压变化而显著改变的二极管，反向运用。

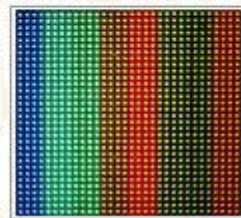
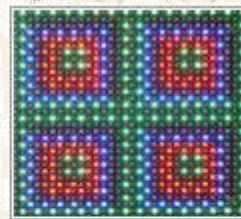
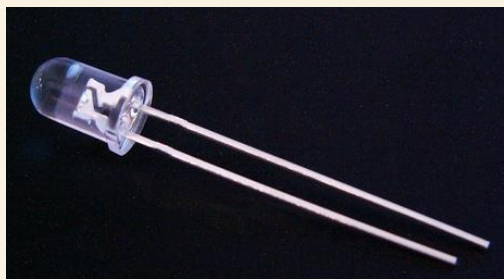
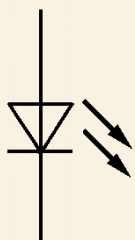
应用：电子调谐器

光电二极管 photo diode

反向偏置时，光照可使PN结产生新的载流子，虽然多子不能穿过PN结，但少子在内电场作用下可以漂移过结，反向饱和电流增加，形成光电流。



发光二极管 light emitting diode , LED



在正向导通时会发光

正向电压作用下，一部分在PN结内扩散的自由电子和空穴发生直接复合。复合过程产生原子的能级跃迁，即从高能级跃迁至低能级，能量差将以光子形式向外发射。

第二节 晶体三极管

- 一、晶体三极管的结构
- 二、晶体三极管的放大作用
- 三、晶体三极管的特性曲线
- 四、晶体三极管的主要参数

一、晶体三极管的结构

三区 三极 两结

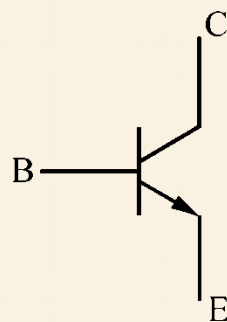
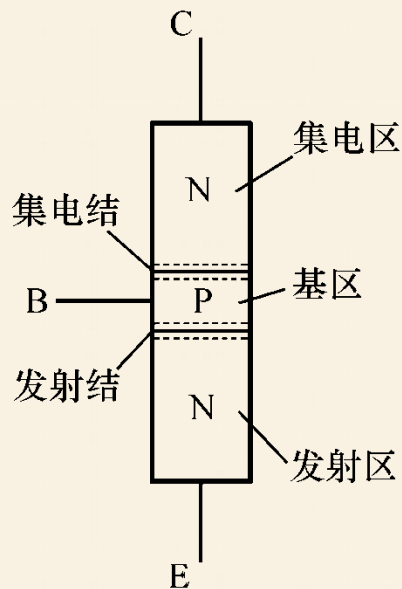
基区 发射区 集电区

基极B (base)

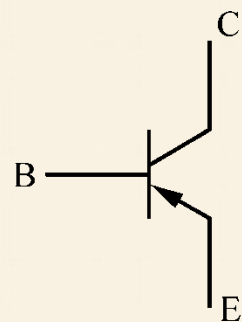
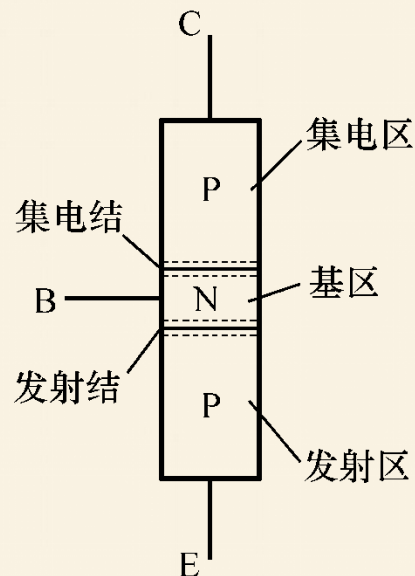
发射极E (emitter)

集电极C (collector)

发射结 集电结

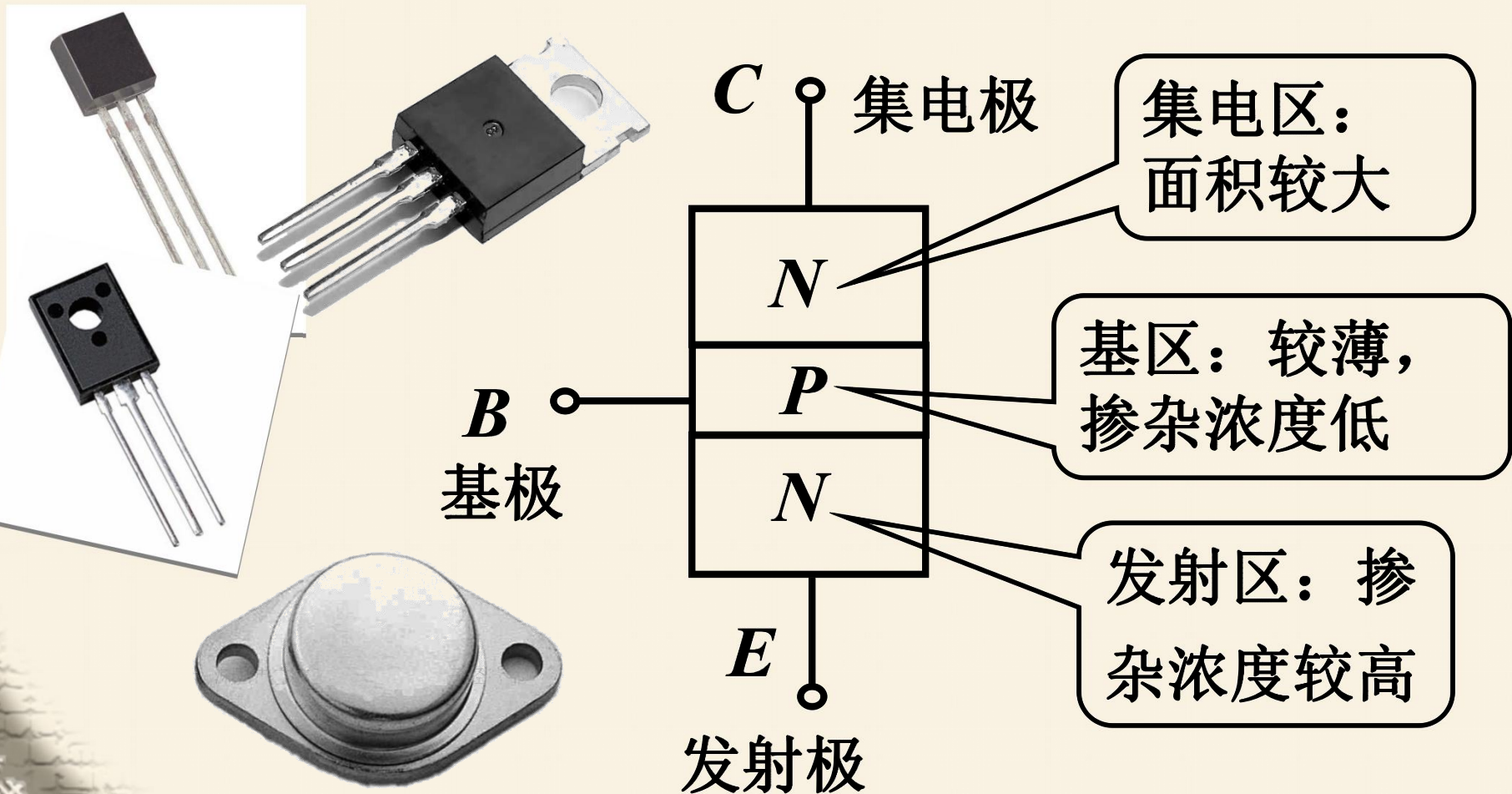


(a) NPN 型



(b) PNP 型

制造工艺要求:



二、晶体管三极的放大作用

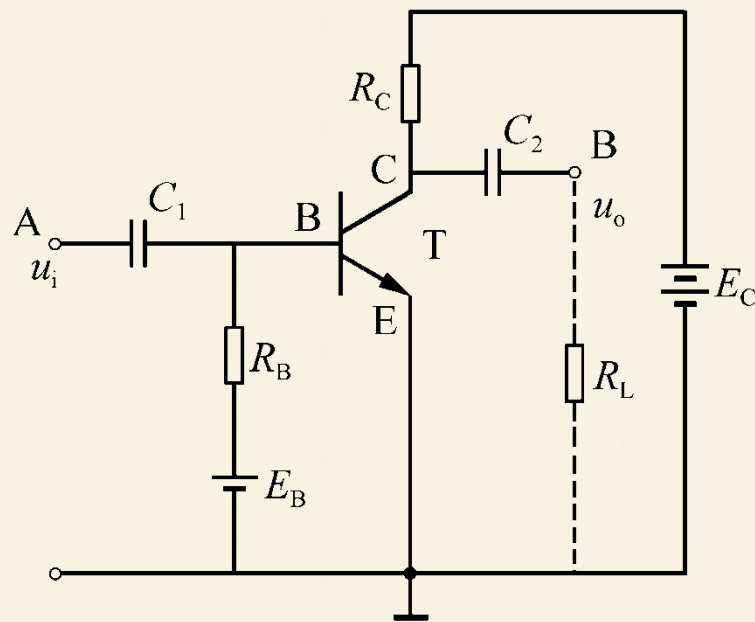
共发射极接法:

基极电位高于发射极

集电极电位高于基极

⇒ { 发射结-正向偏置
集电结-反向偏置

$$(U_C > U_B > U_E)$$



晶体管的发射极是输入回路和输出回路的公共端，所以称这种电路为共发射极放大电路。

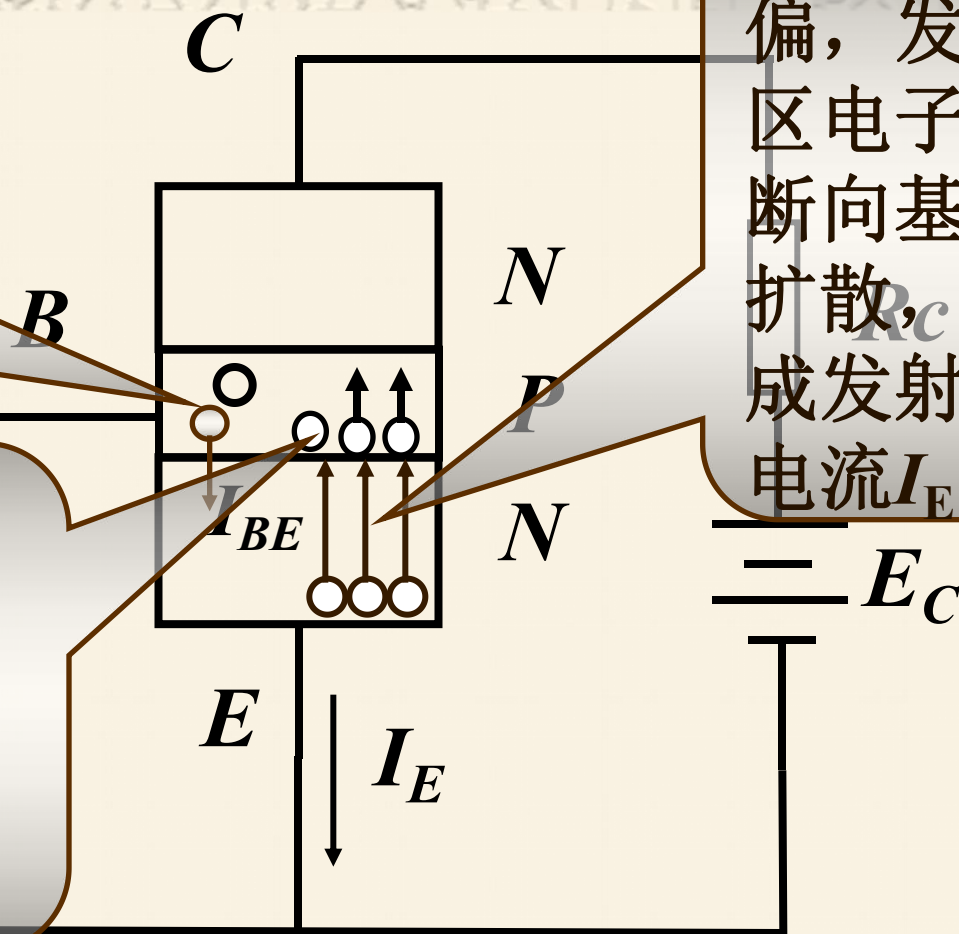
还可构成共基极放大电路和共集电极放大电路。

三极管放大原理：

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 。

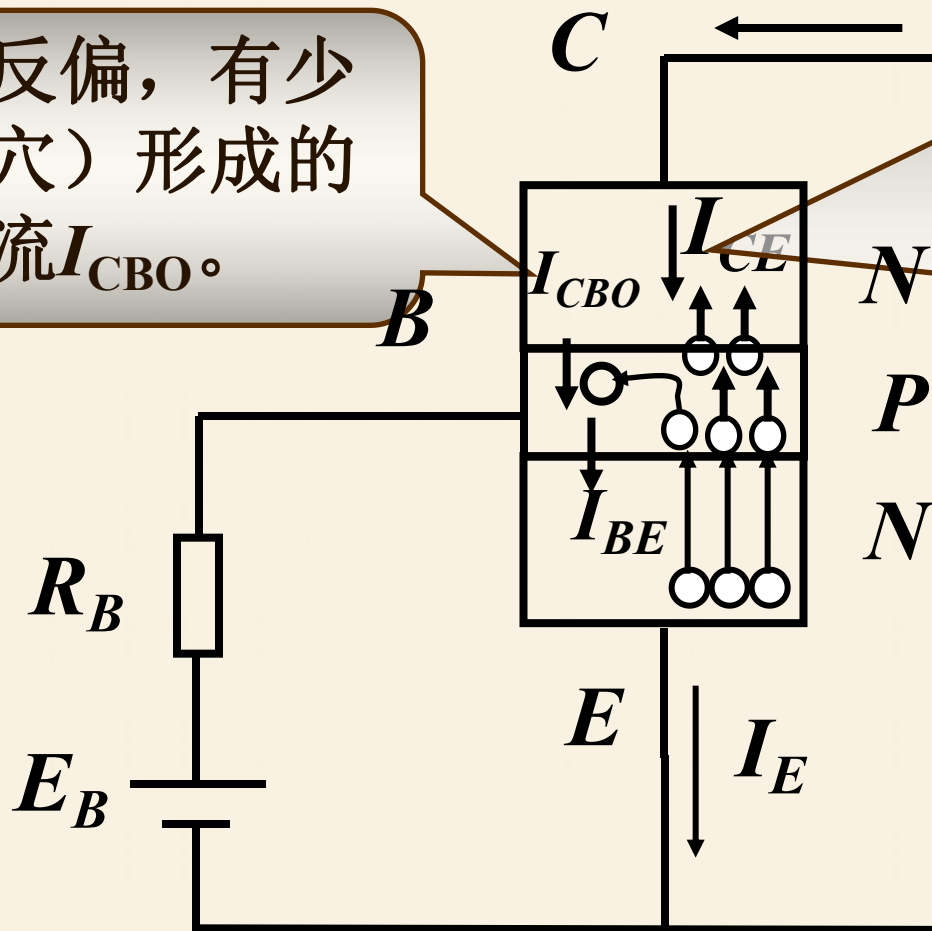


三极管放大原理：

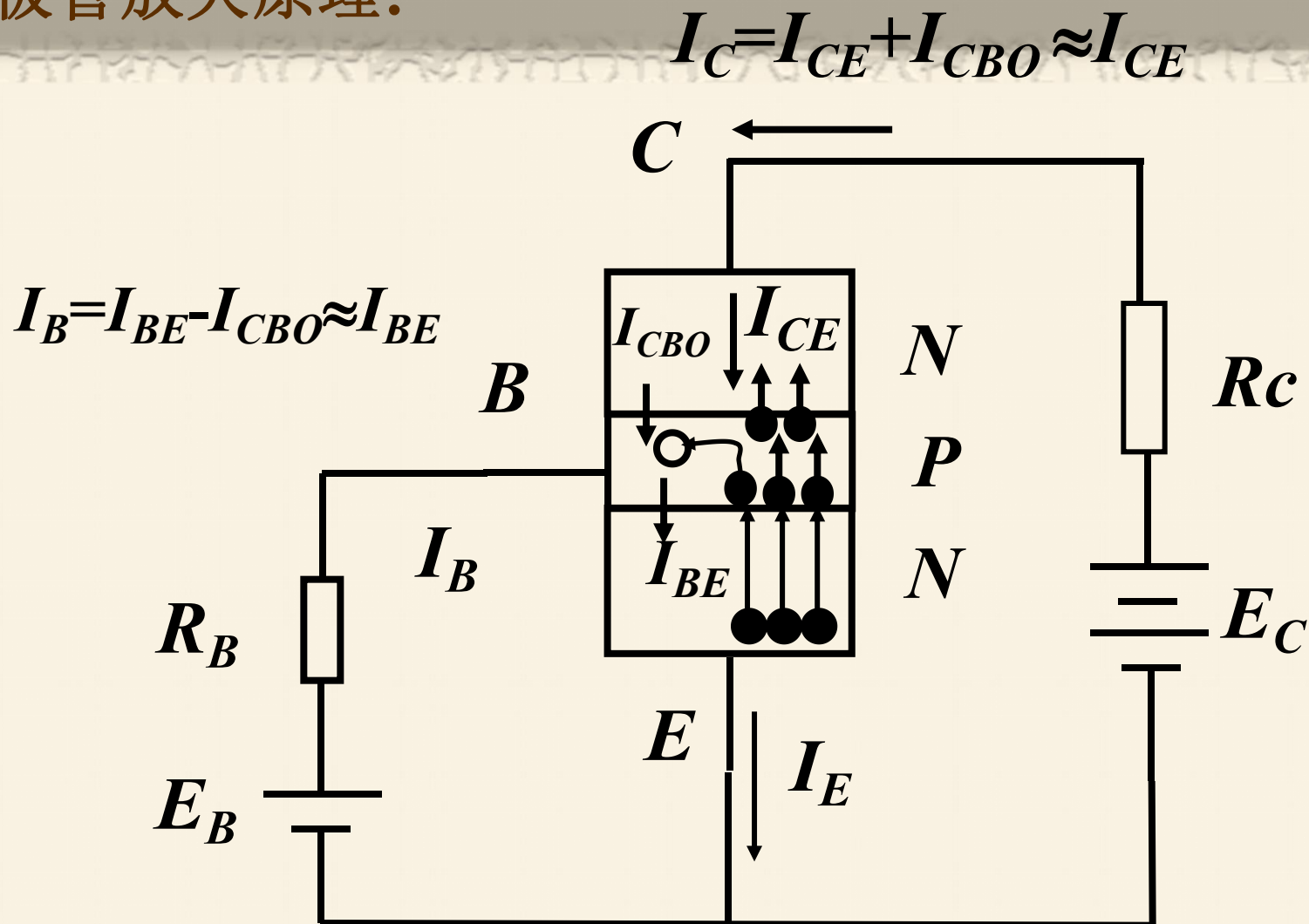
$$I_C = I_{CE} + I_{CBO} \approx I_{CE}$$

集电结反偏，有少子（空穴）形成的反向电流 I_{CBO} 。

从基区扩散来的电子作为基区的少子，漂移进入集电区而被收集，形成 I_{CE} 。



三极管放大原理：



三极管放大原理：

- (1) 发射区向基区发射电子：形成发射极电流 I_E
- (2) 电子在基区中扩散与复合：形成基极电流 I_B
- (3) 集电区收集电子：形成集电极电流 I_C

满足：基尔霍夫定律： $I_B + I_C = I_E$

$$I_C = \beta I_B \quad \Delta I_C = \beta \Delta I_B$$

直流电流
放大系数

交流电流
放大系数

基极电流一个很小的变化 ΔI_B ，可以引起集电极电流一个大的变化 ΔI_C 。



思考题

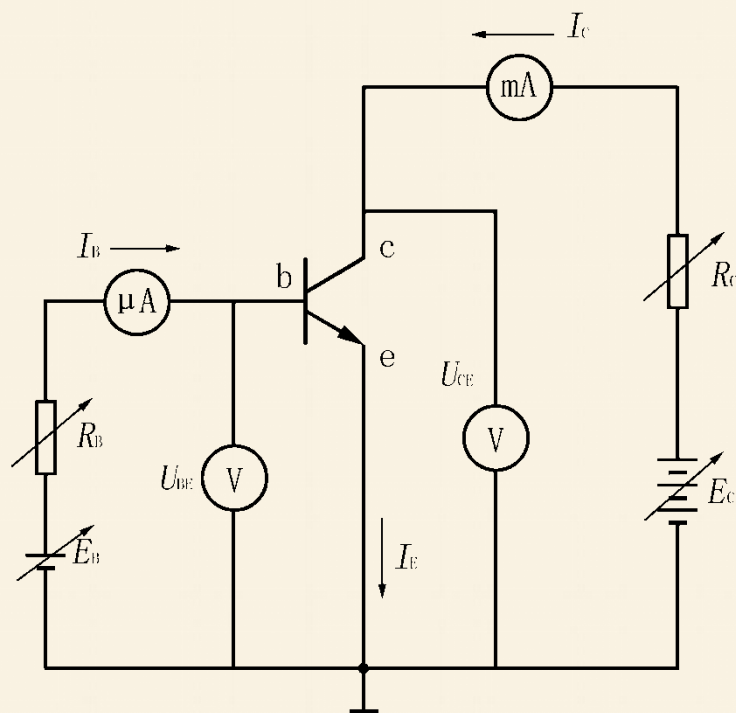


1. 既然BJT具有两个PN结，可否用两个二极管相联以构成一只BJT，试说明其理由。
2. 能否将BJT的e、c两个电极交换使用，为什么？
3. BJT是电流控制器件，还是电压控制器件？
4. 放大电路输出端增加的能量是从哪里来的？

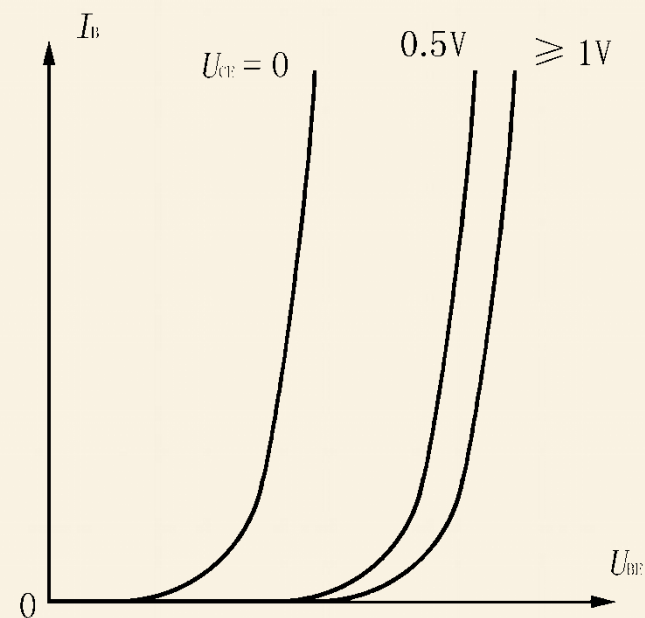
end

三、晶体三极管的特性曲线

实验电路：



输出特性曲线：

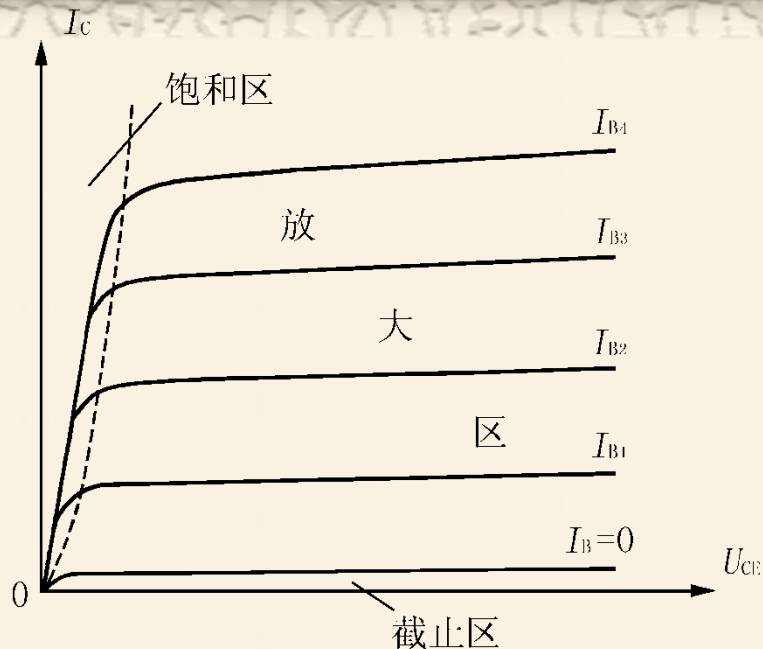


一般情况下均满足 $U_{CE} \geq 1V$ ，所以输入特性曲线通常只画出最右边那一条。

输出特性曲线:

I_B 为常数时, I_C 与 U_{CE} 之间函数关系曲线 $I_C = f(U_{CE})$

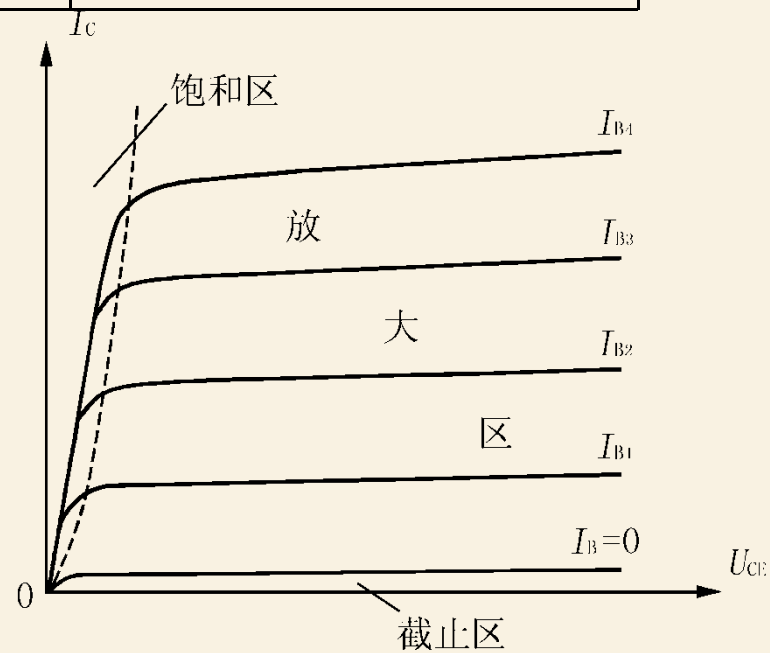
随着 U_{CE} 的增大, I_C 迅速增大。当 $U_{CE} > 1V$ 以后, U_{CE} 再增加, I_C 也几乎不再增大了。此时, I_C 主要由 I_B 决定。



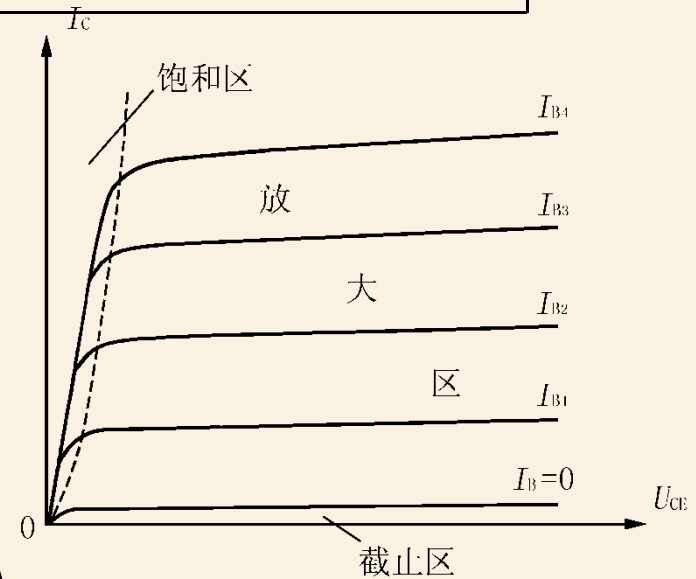
三个工作区 {

- 放大区: 发射结正偏、集电结反偏
满足 $\Delta I_C = \beta \Delta I_B$
- 截止区: 发射结和集电结均反偏
- 饱和区: 发射结和集电结均正偏

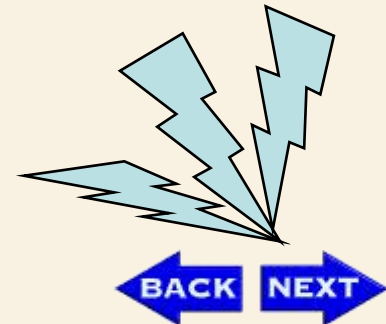
	I_C	V_{ce}	集电结	发射结	$I_C = \beta I_B$
饱和区		小	正偏	正偏	不满足 (I_C 有 I_{Cmax})
截止区	小			截止	$I_C \approx I_B \approx 0$
放大区	居中	居中	反偏	正偏	满足



	I_C	V_{ce}	集电结	发射结	$I_C = \beta I_B$
饱和区		小	正偏	正偏	不满足 (I_C 有 I_{Cmax})
截止区	小			截止	$I_C \approx I_B \approx 0$
放大区	居中	居中	反偏	正偏	满足



放大区： i_C 平行于 v_{CE} 轴的区域，曲线基本平行等距。此时，发射结正偏，集电结反偏。



四、晶体三极管的主要参数

1. 电流放大系数 β

$\beta = I_C / I_B \mid U_{CE} = \text{常数}$ — 直流电流放大系数

$\beta = \Delta I_C / \Delta I_B \mid U_{CE} = \text{常数}$ — 交流电流放大系数

2. 极间反向电流 I_{CB0} 和 I_{CE0}

I_{CB0} — 发射极开路、集电结加反向电压时，在基极回路中所测得的电流（反向饱和电流）。

I_{CE0} — 基极开路时，集电极和发射极间的反向电流（穿透电流）。

$$I_{CE0} = I_{CB0} + \beta I_{CB0} = (1 + \beta) I_{CB0}$$

I_{CB0} 越小越好， I_{CE0} 越大越好。他们都受温度影响。

3. 极限参数

- (1) 集电极最大允许电流 I_{CM} ： β 值下降到原来的2/3时的 I_C 。
- (2) 集-射极击穿电压 $B U_{CE0}$ ：集电极和发射极之间的最大允许电压。
- (3) 射-基极反向击穿电压 $B U_{EB0}$ ：集电极开路时，发射结允许的最大反向电压。
- (4) 集电极最大耗散功率 P_{CM} ：温度升到晶体管的最高允许温度时，在集电极上耗散的功率值被规定为集电极最大耗散功率。

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

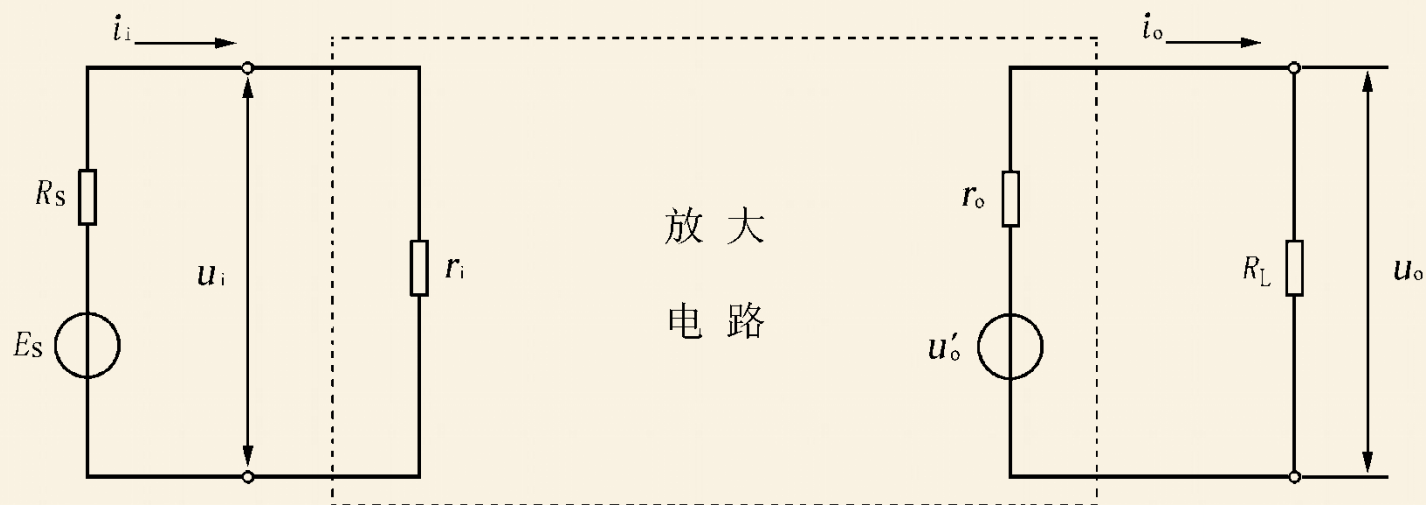
$P_{CM} > 1W$ 的管子——加散热片

第三节 基本放大电路

- 一、放大电路的基本概念
- 二、基本放大电路及其工作状态分析
- 三、放大电路性能指标的计算
- 四、静态工作点稳定电路
- 五、多级放大电路

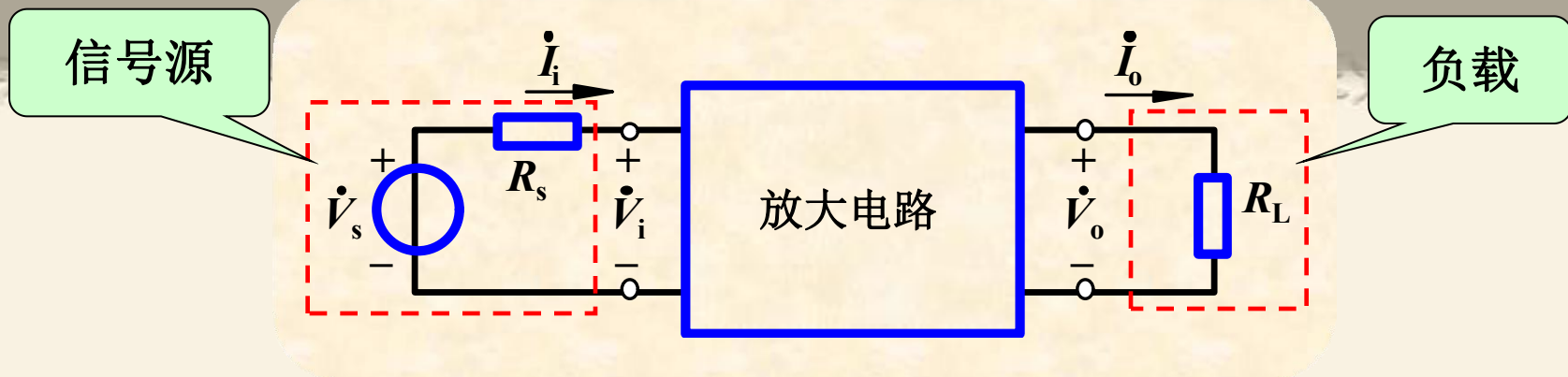
一、放大电路的基本概念

1. 信号的输入、输出和放大



基本作用:在输入信号幅度过低时, 将信号原样放大, 以便满足检测、传输或输出的需要。

放大电路模型



四种放大电路

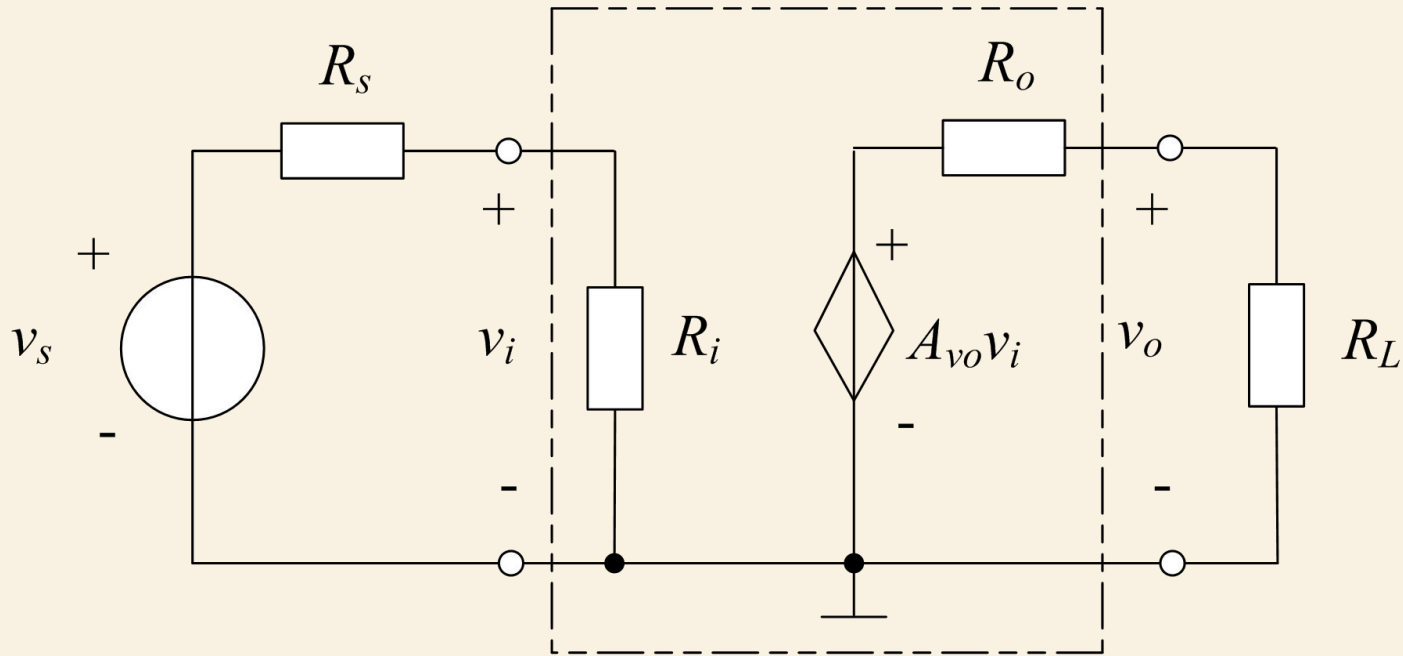
电压放大电路

电流放大电路

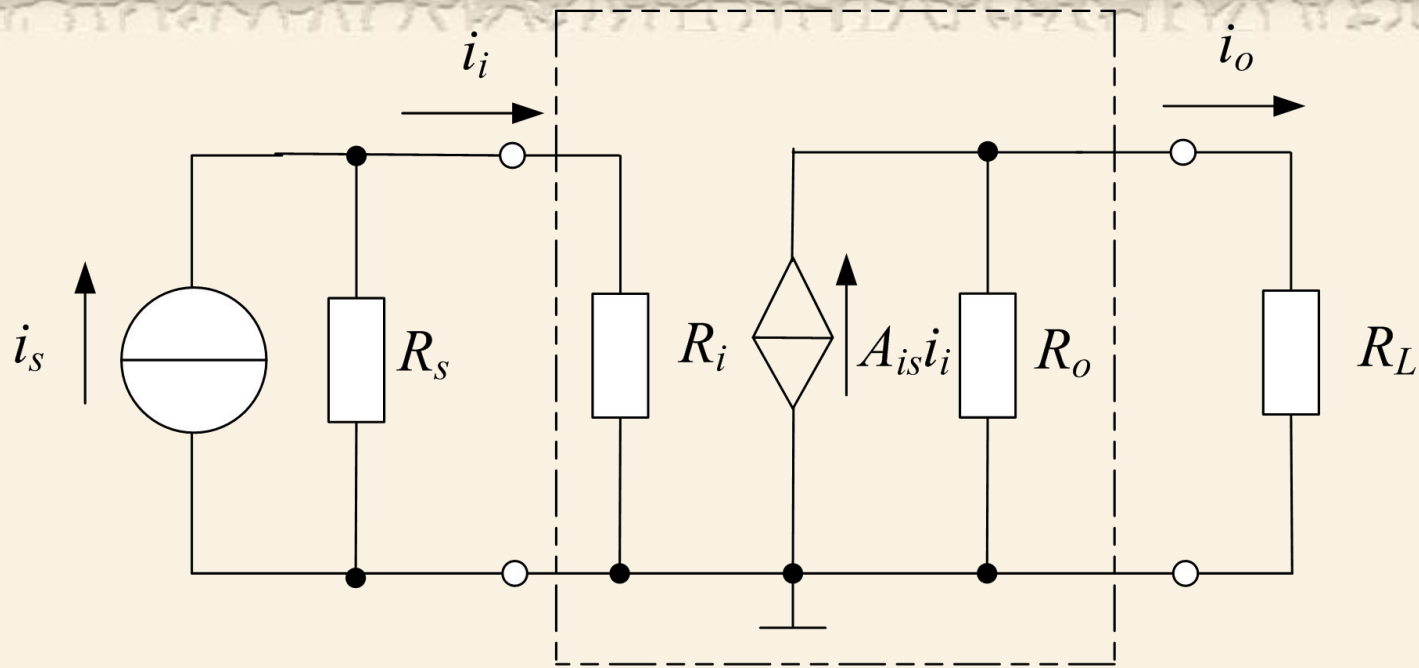
互阻放大电路

互导放大电路

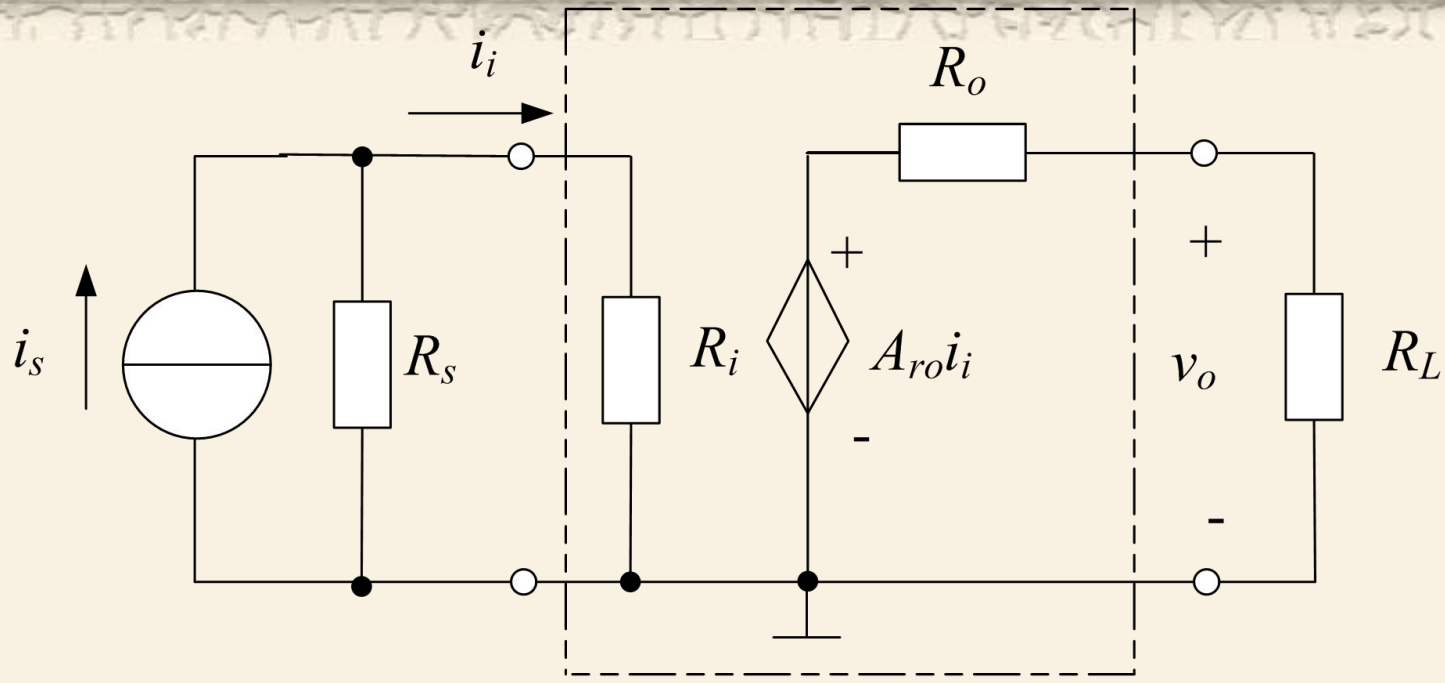
★ 放大电路模型——电压放大电路



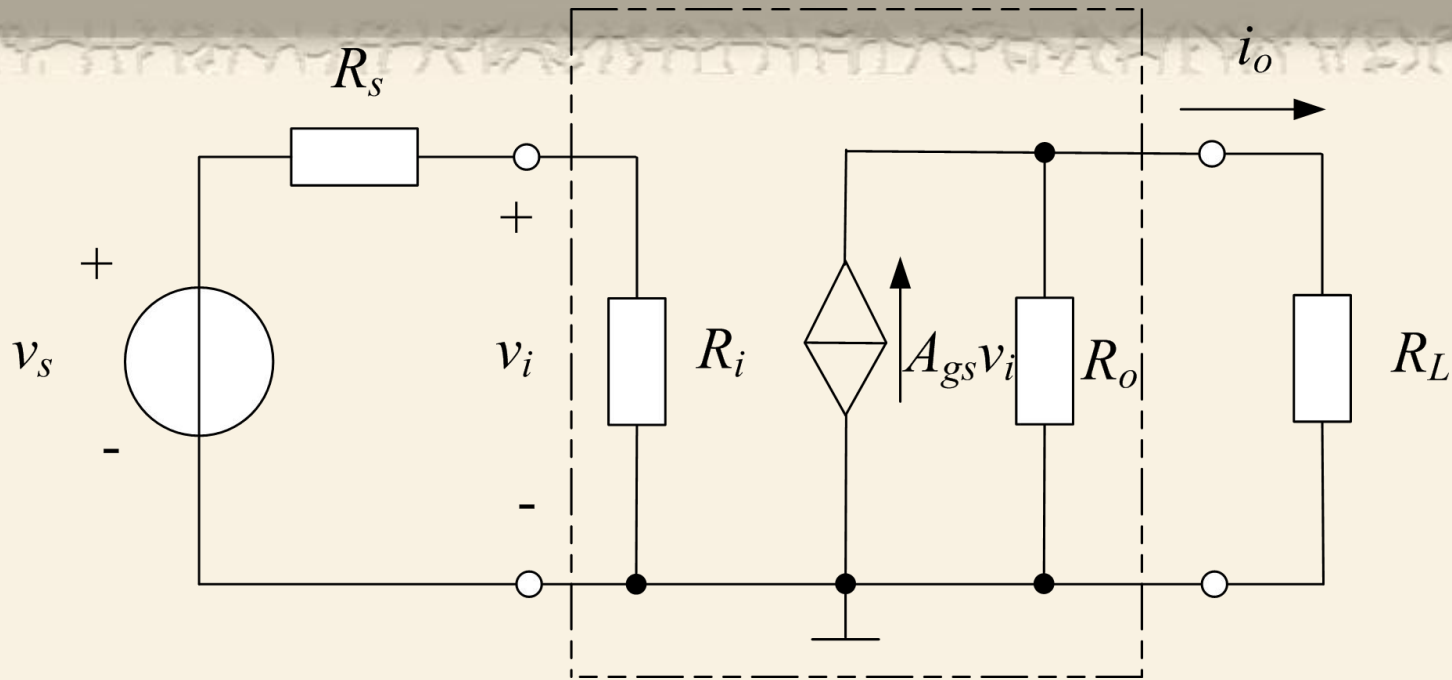
放大电路模型——电流放大电路



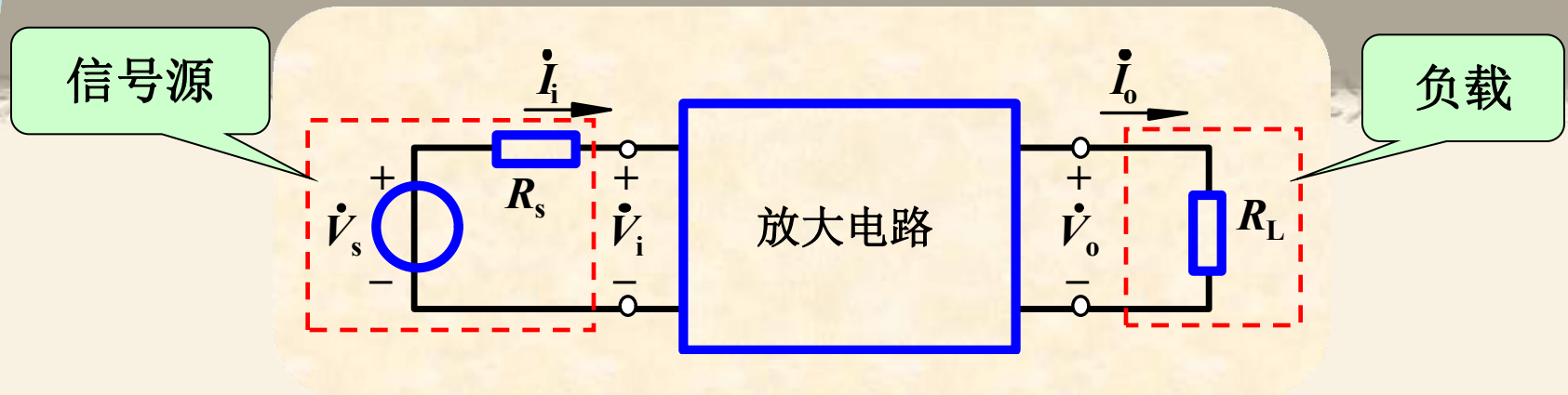
放大电路模型——互阻放大电路



放大电路模型——互导放大电路



模拟信号的放大

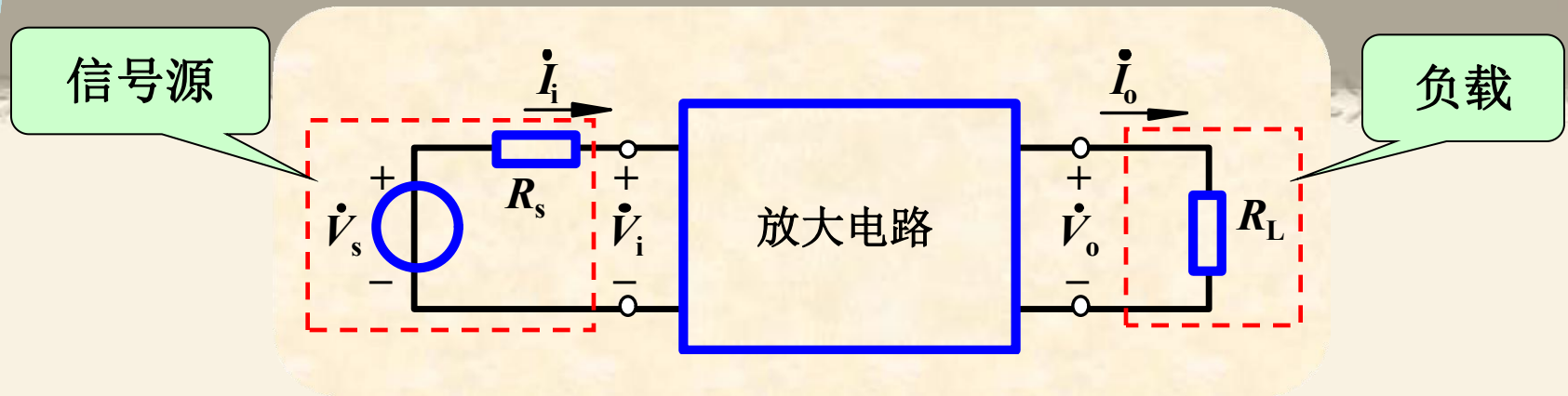


1. 输入电阻

输入电阻等于输入电压与输入电流的比值

$$R_i = \frac{v_i}{i_i}$$

模拟信号的放大



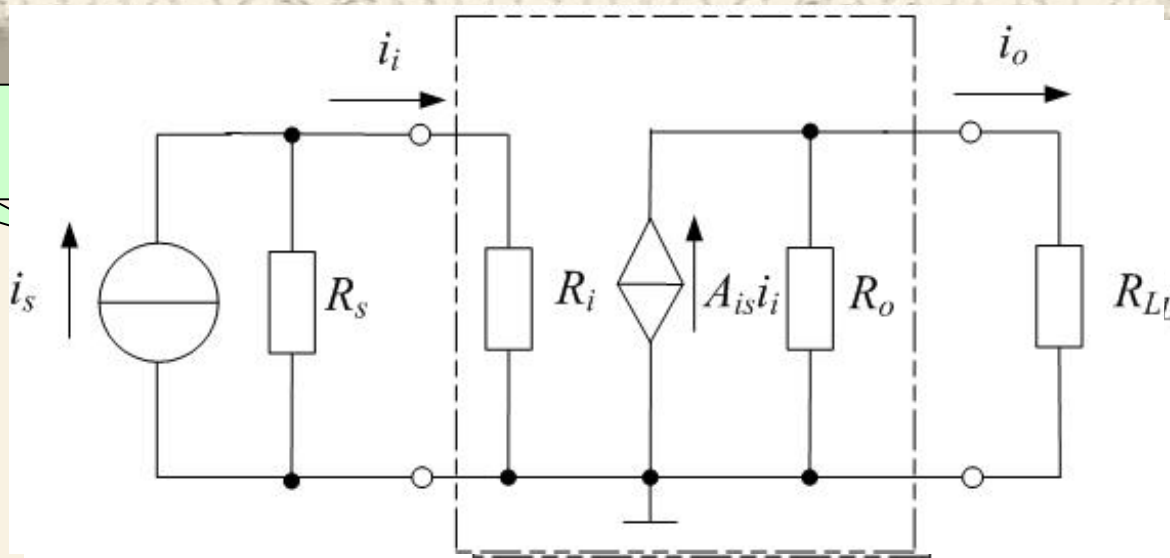
2. 输出电阻

输出电阻等于输出电压与输出电流的比值

$$R_o = \frac{v_o}{i_o}$$

模拟信号的放大

信号源



负载

3. 增益

反映放大电路在输入信号控制下，将供电电源能量转换成输出信号能量的能力

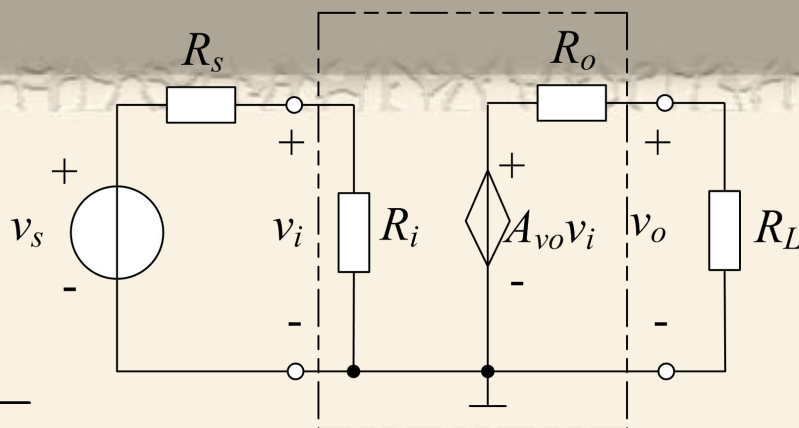
$$A_V = \frac{v_o}{v_i}$$

$$A_I = \frac{i_o}{i_i}$$



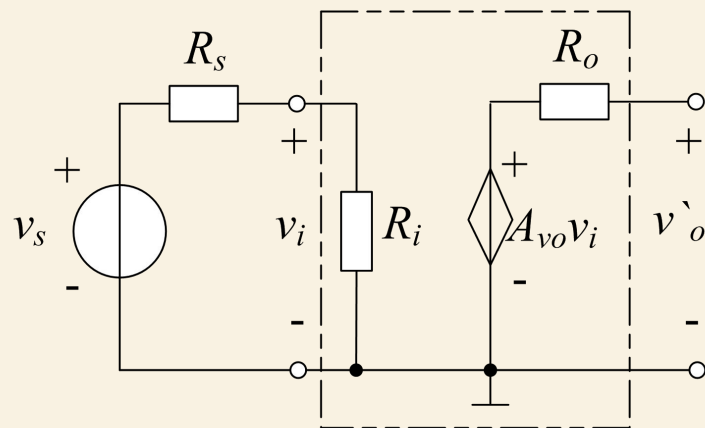
模拟信号的放大

例：设开路电压增益为 A_{vo} ，
已知 $R_i = 10R_s$ ， $R_L = 10R_o$ ，求
源电压增益 A_{vs}



$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{v_o'} \cdot \frac{v_o'}{v_i} = A_{vo} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

$$A_{vs} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{v_i} \cdot \frac{v_i}{v_s} = A_v \cdot \frac{R_i}{R_i + R_s}$$



2. 放大电路的主要性能指标

(1) 电压放大倍数: $A_u = \frac{u_o}{u_i}$

$A_u > 0$, u_o 与 u_i 同相位; $A_u < 0$, u_o 与 u_i 反相位。

(2) 输入电阻: $r_i = \frac{u_i}{i_i}$ $r_i \approx r_{be}$

如果信号源的电动势为 E_S 、内阻为 R_S

$$u_i = \frac{r_i}{R_S + r_i} E_S$$

r_i 越大, u_i 就越大

输入阻抗越大越好

2. 放大电路的主要性能指标

(3) 输出电阻：当输入信号不变而负载电阻改变时，输出电压与输出电流之比。

$$r_o = \frac{u_o}{i_o}$$

负载 R_L 实际获得的输出电压为

$$u_o = \frac{R_L}{r_o + R_L} u'_o$$

输出电阻越小越好： r_o 越小， u_o 就越大，电路带负载的能力强， R_L 的变化对输出电压的影响也越小。

2. 放大电路的主要性能指标

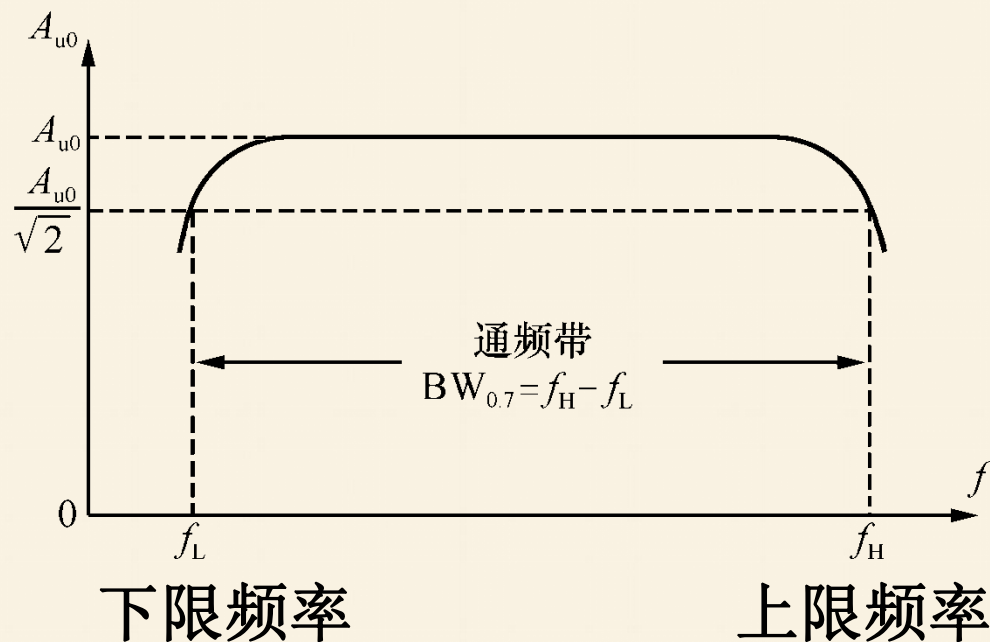
(4) 通频带:

放大电路在高频和低频端的放大倍数会明显下降。

通频带:

$$BW_{0.7} = f_H - f_L$$

通频带越宽放大器适应能力越强



2. 放大电路的主要性能指标

(5) 噪声系数

信噪比

$$SNR = \frac{P_S \text{ (有用信号功率)}}{P_N \text{ (噪声信号功率)}}$$

信噪比应越大越好

噪声系数

$$NF = \frac{\text{输入端信噪比}}{\text{输出端信噪比}} = \frac{SNR_i}{SNR_o}$$

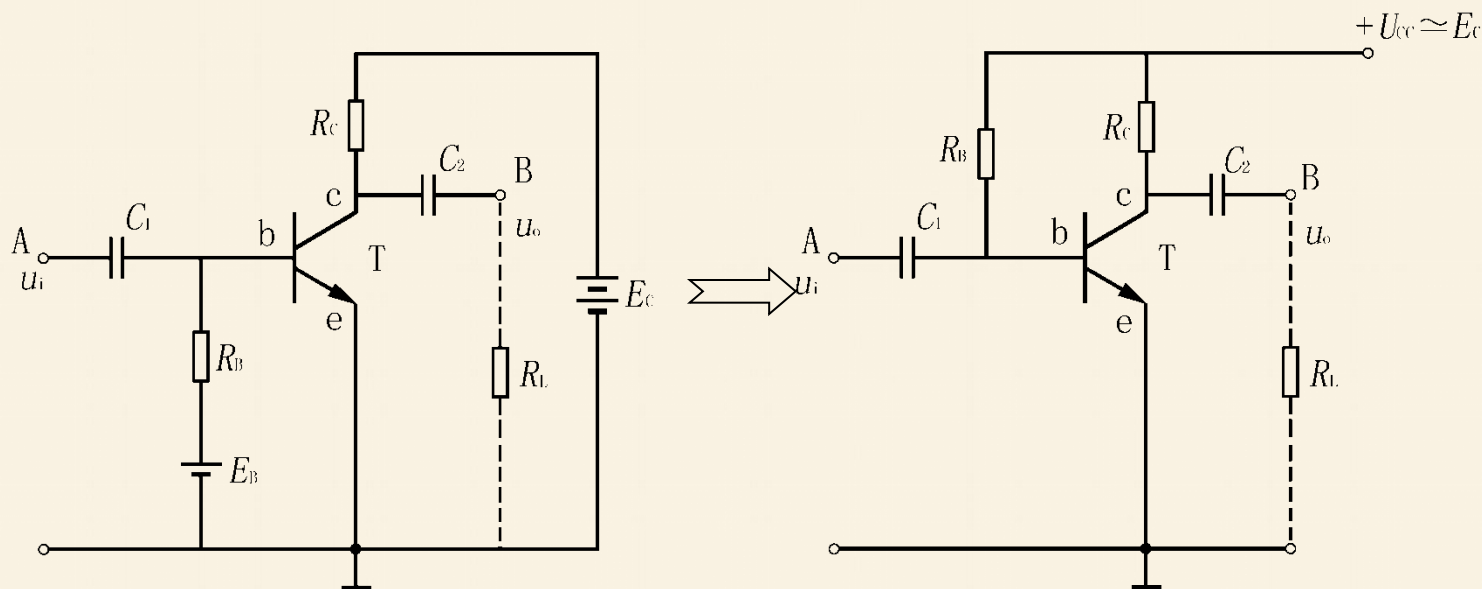
衡量放大电路抑制噪声的能力

二 基本放大电路及其工作状态分析

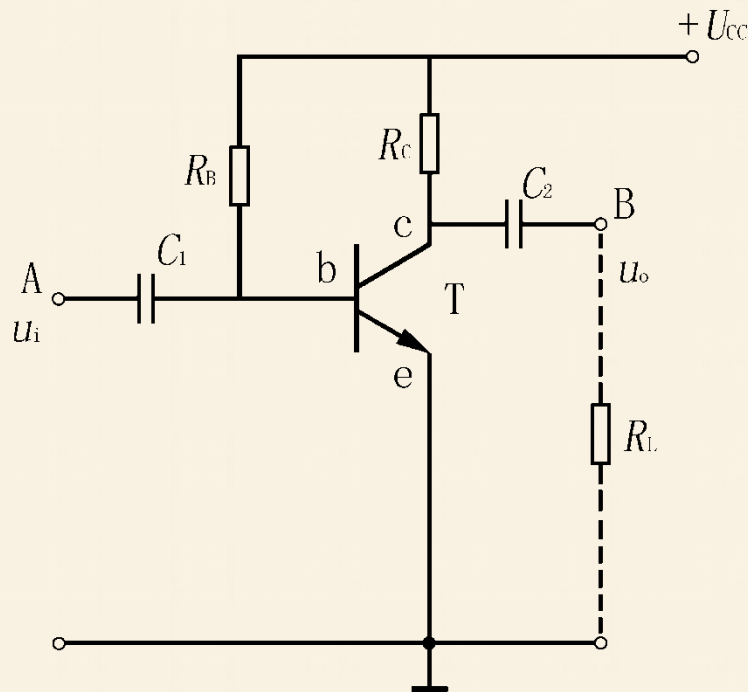
1. 基本放大电路

(1) 共发射极放大电路的组成:

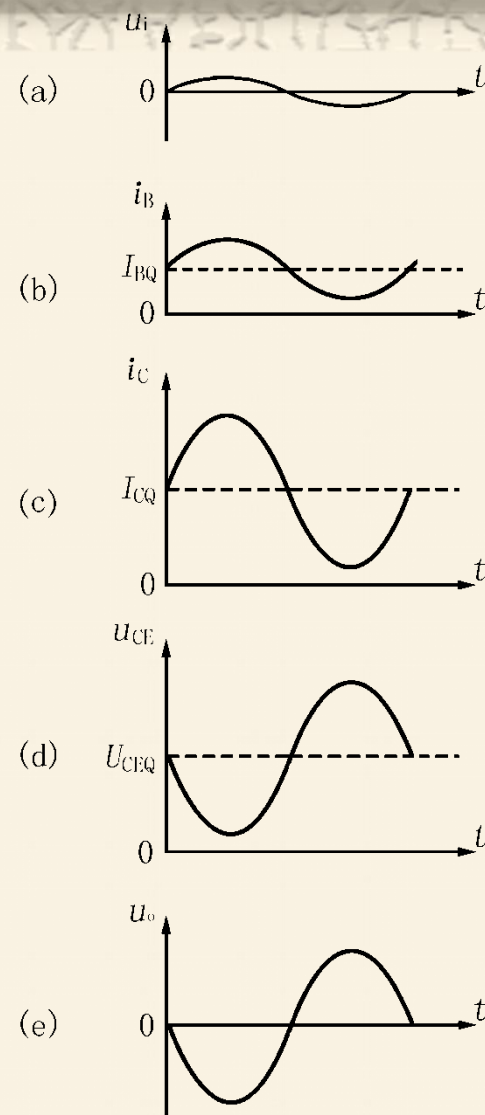
T: 电流放大; C_1 、 C_2 : 隔直、耦合; E_C : 满足偏置、提供输出能量; R_C : 实现电压放大。



(2) 共发射极基本放大电路的工作过程:



$u_i \uparrow (\downarrow) \rightarrow i_B \uparrow (\downarrow) \rightarrow i_C \uparrow (\downarrow)$
 $\rightarrow u_{CE} \downarrow (\uparrow) \rightarrow u_o \downarrow (\uparrow)$



2. 放大电路的静态工作点

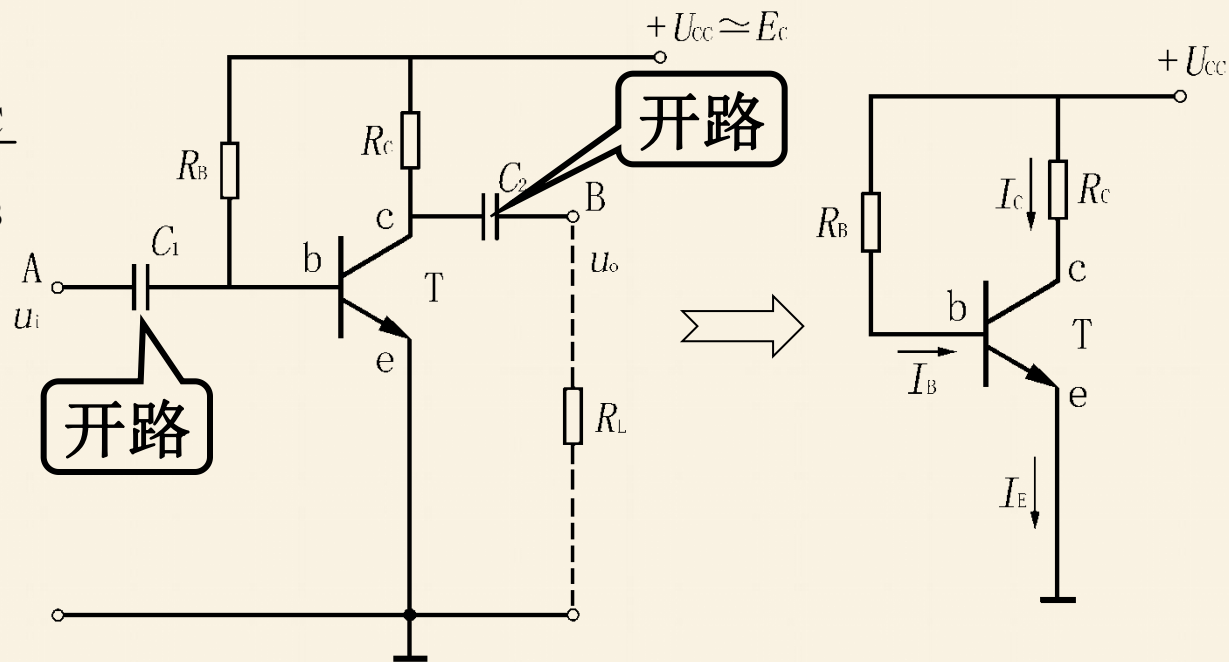
——放大电路没有输入信号时的工作状态。即确定放大电路的静态（即直流）值 I_B 、 I_C 和 U_{CE} 。

(1) 直流通路法

$$I_B = \frac{E_C - U_{BE}}{R_B} \approx \frac{E_C}{R_B}$$

$$I_C \approx \beta I_B$$

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



(2) 用图解法确定静态工作点:

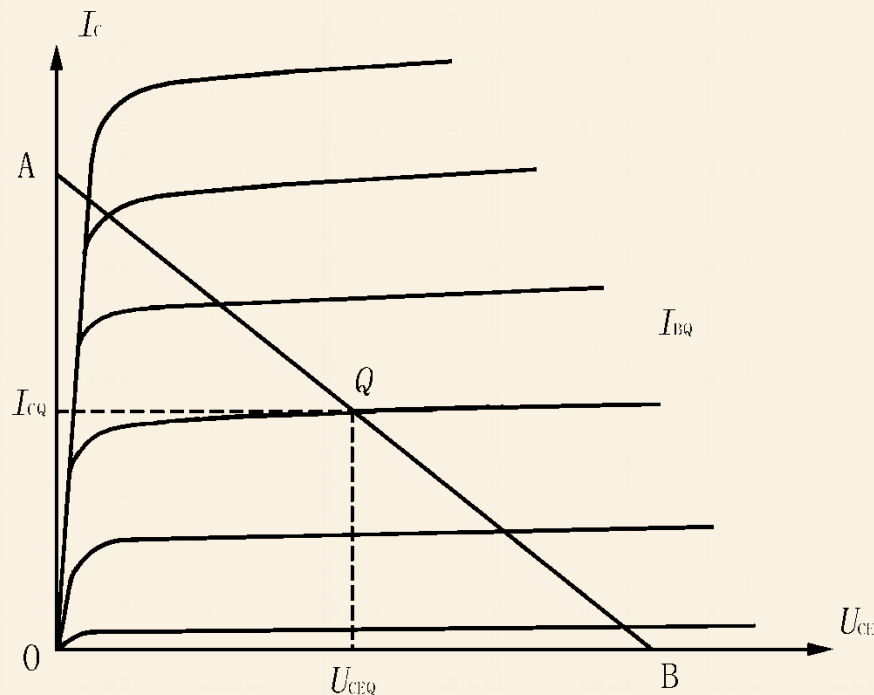
线性元件上的
电压与电
流的关系:

晶体管电
压与电流
的关系:

$U_{CE} = E_C - I_C R_C$
直流负载线

输出特
性曲线

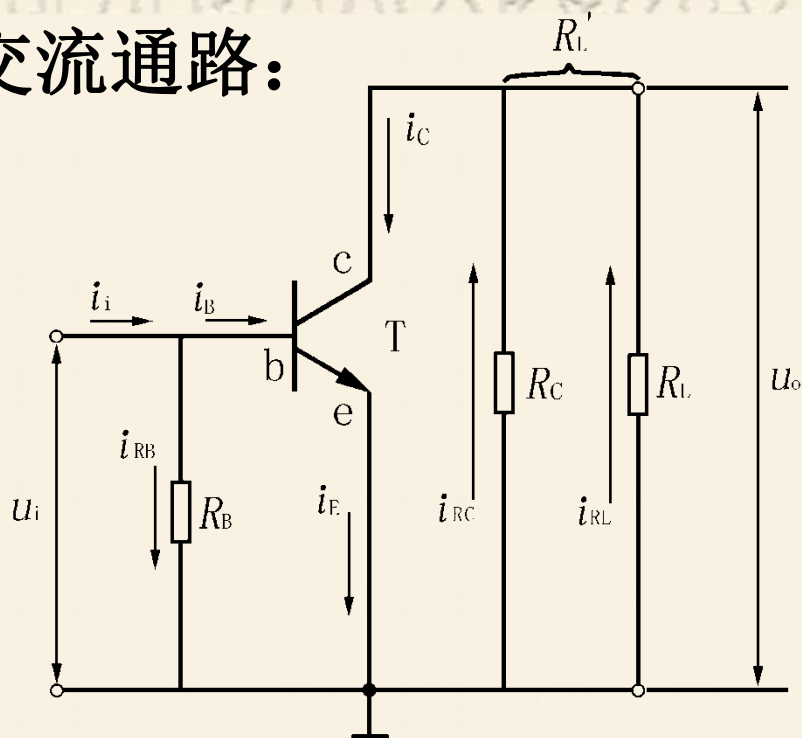
交点为静态工作点



- 步骤:
1. 作直流负载线: 直线方程 $U_{CE} = E_C - I_C R_C$
 2. 求 I_B : $I_B \approx E_C / R_B$
 3. 交点 Q 为放大器的静态工作点

3. 放大电路的动态分析

交流通路:



交流负载线:

$$R_L' = R_C // R_L$$

电路的输出电压

$$u_o = -i_c R_L'$$

通过输出特性曲线上的 Q 点做斜率为 $-1/R_L'$ 一条直线，即为交流负载线。

交流负载线的斜率为

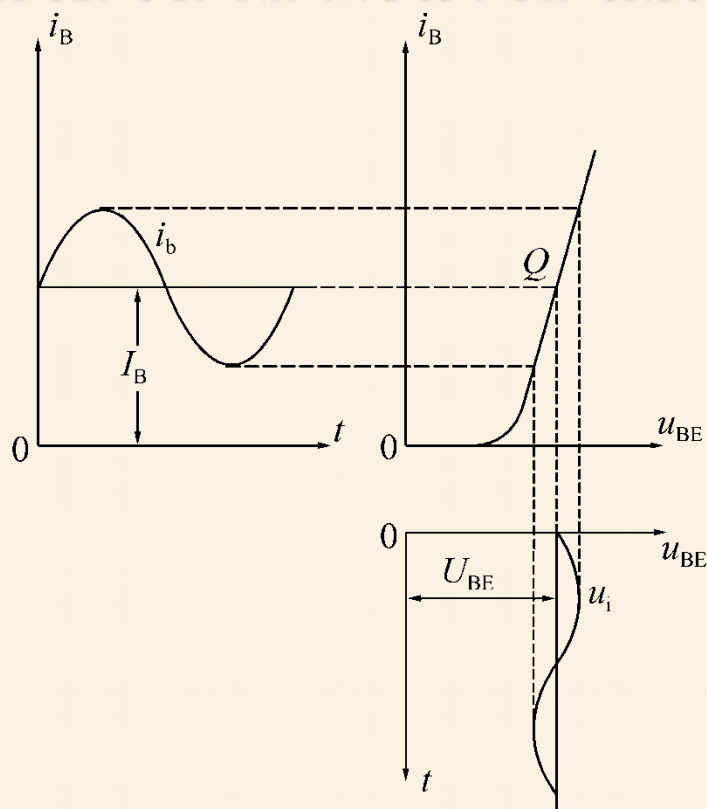
直流负载线的斜率为

$$-\frac{1}{R_L'}$$

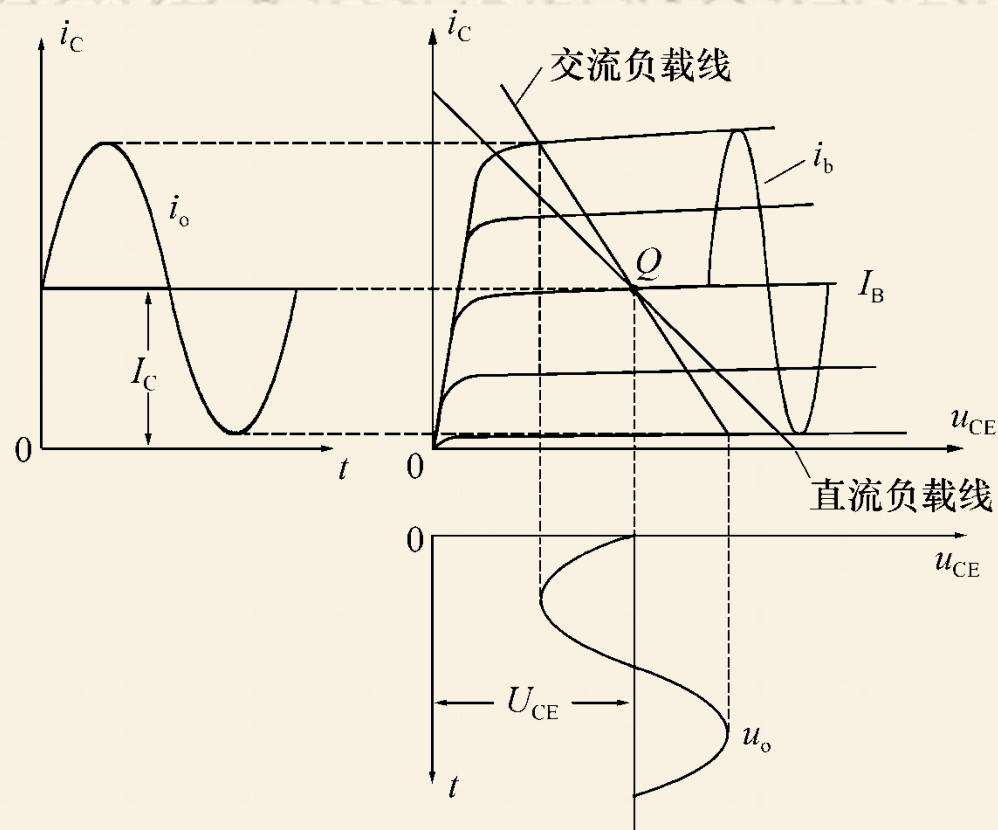
$$-\frac{1}{R_L}$$

交流负载线比直流负载线陡。

动态分析过程:



(a) 输入端动态分析



(b) 输出端动态分析

瞬时极性:

$$u_i \uparrow \rightarrow u_{be} \uparrow \rightarrow i_b \uparrow \rightarrow i_c \uparrow \rightarrow u_{ce} \downarrow \rightarrow u_o \downarrow$$

4. 放大电路的非线性失真 (non-linear distortion)

因 Q 点设置不当或信号幅度过大, 而使得放大电路超出晶体管线性工作范围所导致的输出信号失真。

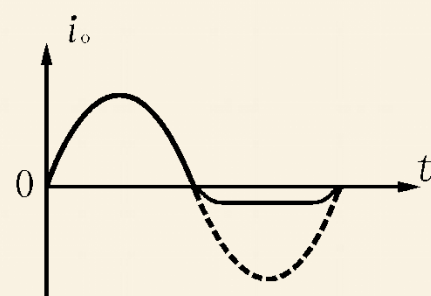
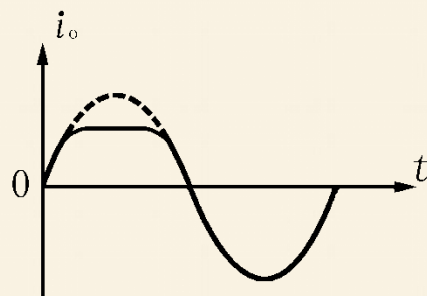
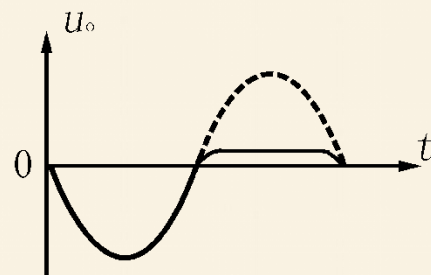
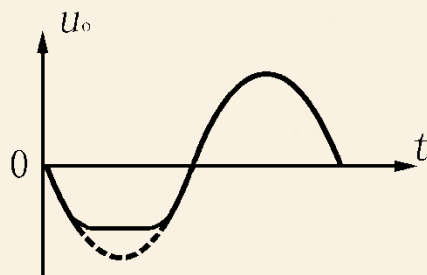
分两种:

饱和失真

Q 点靠近饱和区

截止失真

Q 点靠近截止区

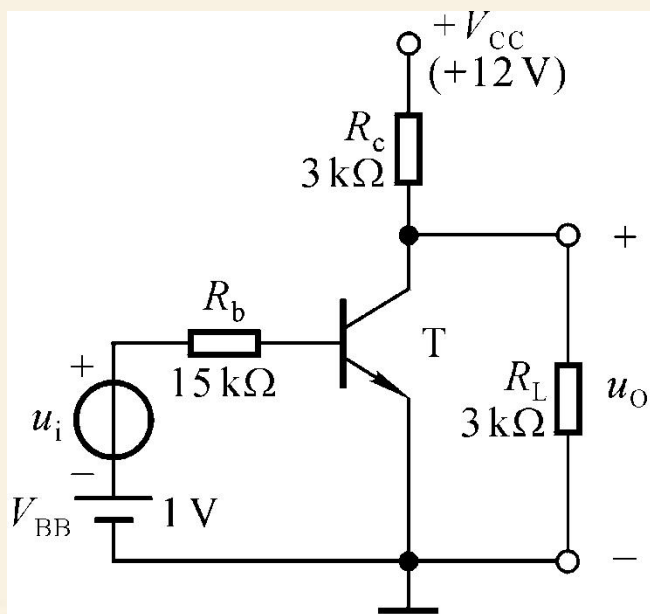


(a) 饱和失真

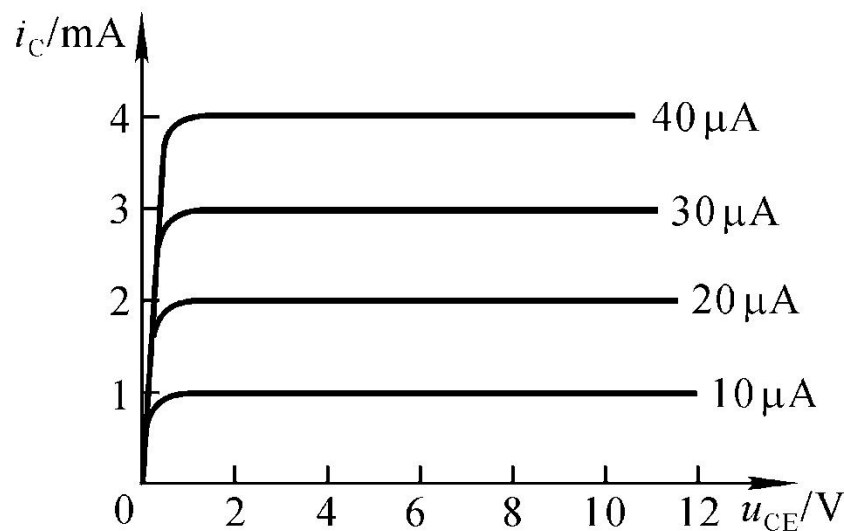
(b) 截止失真

例题

1 电路如图 (a) 所示, 图 (b) 是晶体管的输出特性, 静态时 $U_{BEQ} = 0.7V$ 。利用图解法分别求出 $R_L = \infty$ 和 $R_L = 3k\Omega$ 时的静态工作点和最大不失真输出电压 U_{om} (有效值)。



(a)

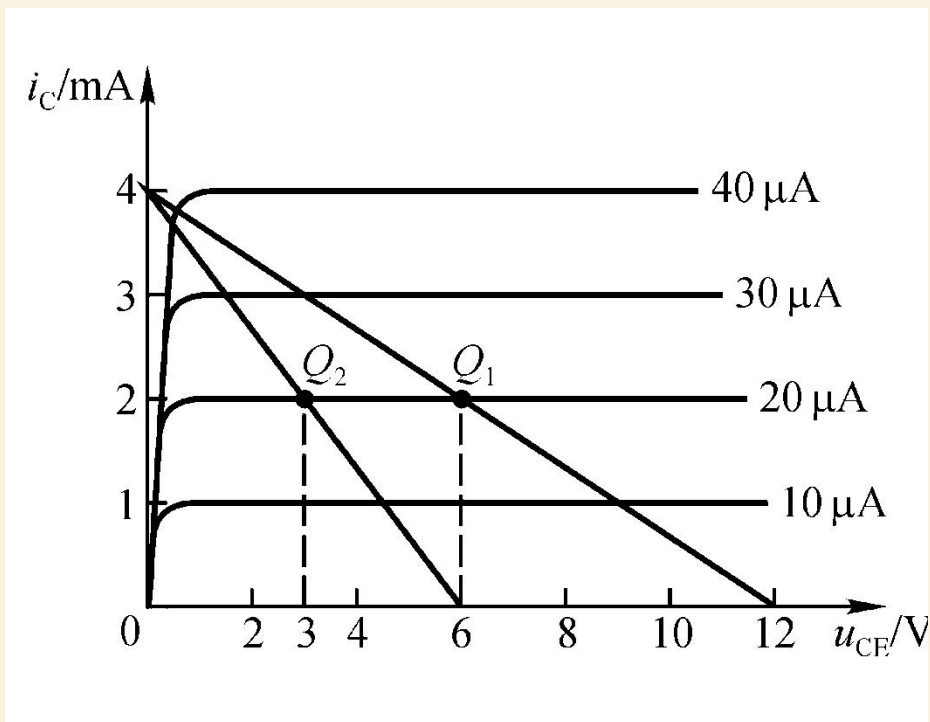


(b)

例题

1 解：空载时： $I_{BQ}=20\mu\text{A}$ ， $I_{CQ}=2\text{mA}$ ， $U_{CEQ}=6\text{V}$ ；最大不失真输出电压峰值约为**5.3V**，有效值约为**3.75V**。

带载时： $I_{BQ}=20\mu\text{A}$ ， $I_{CQ}=2\text{mA}$ ， $U_{CEQ}=3\text{V}$ ；最大不失真输出电压峰值约为**2.3V**，有效值约为**1.63V**。



三 放大电路性能指标的计算

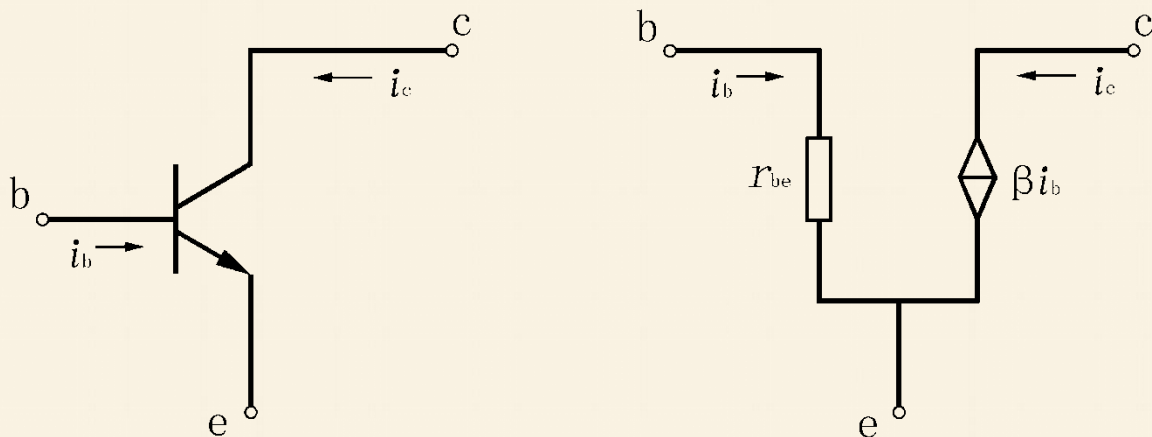
1. 微变等效电路

输入回路将三极管等效为一只电阻 r_{be} ，其定义为

$$r_{be} = \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_B}$$

输出回路可视为一只电流源，其大小被定义为

$$i_c = \beta i_b$$



只在低频小信号情况下适用

2. 用微变等效电路计算性能指标

NPN型共发射极放大电路的微变等效电路

电压放大倍数:

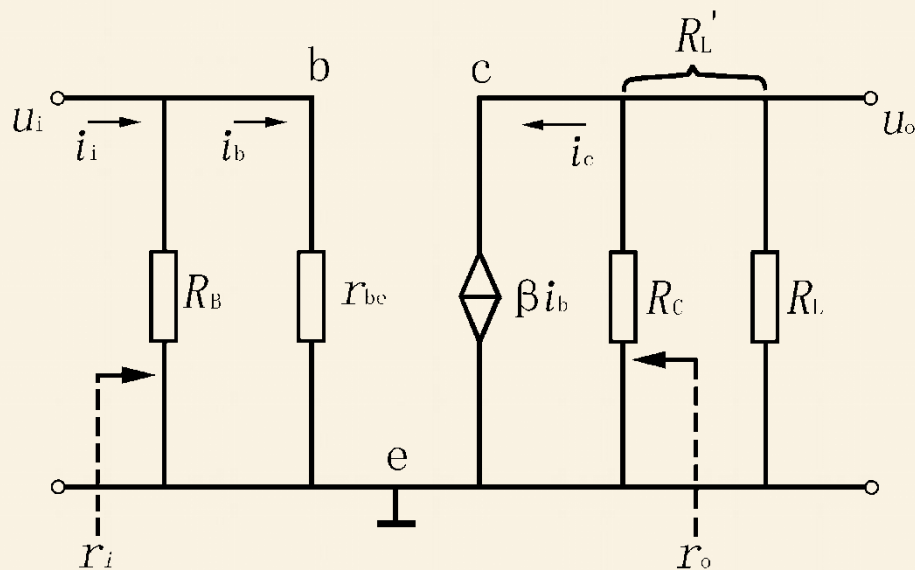
$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}}$$

输入阻抗:

$$r_i = \frac{u_i}{i_i} = R_B // r_{be}$$

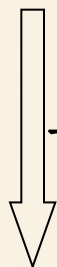
输出阻抗:

$$r_o = r_{CE} // R_C \approx R_C$$



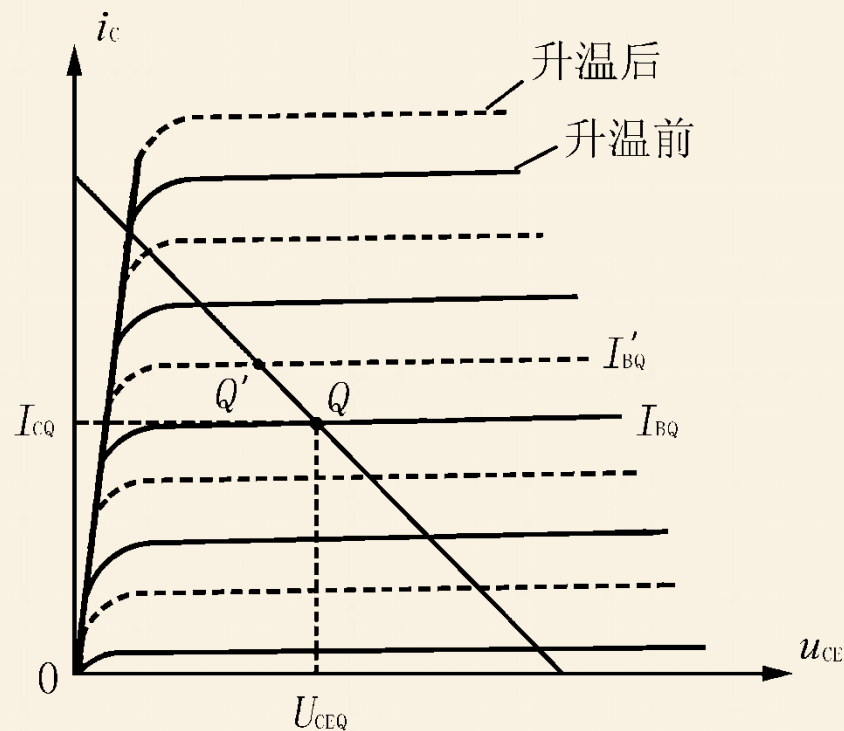
四、静态工作点的稳定电路

当温度升高时，反向饱和电流 I_{CBO} 和 I_{CEO} 都将增加，而且温度升高还会提高三极管的 β 值，从而引起 I_C 增大，使输出特性曲线整体上移。



导致

原来设置好的工作点发生偏移。



改进电路—分压式偏置放大电路

固定 U_B :

R_{B1} 、 R_{B2} 组成了电源 E_C 的分压电路。

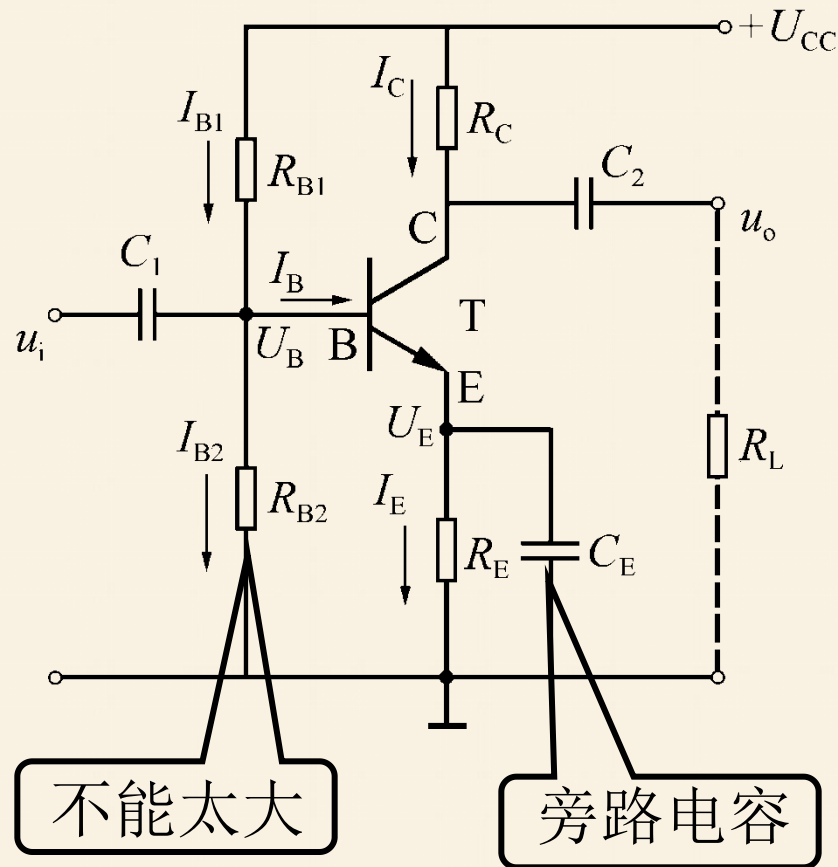
$$I_{B1} = I_{B2} + I_B \approx I_{B2}$$

三极管参数引起的 I_B 变化基本上不会影响 U_B 。

$$U_B \approx I_{B2} R_{B2} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} E_C$$

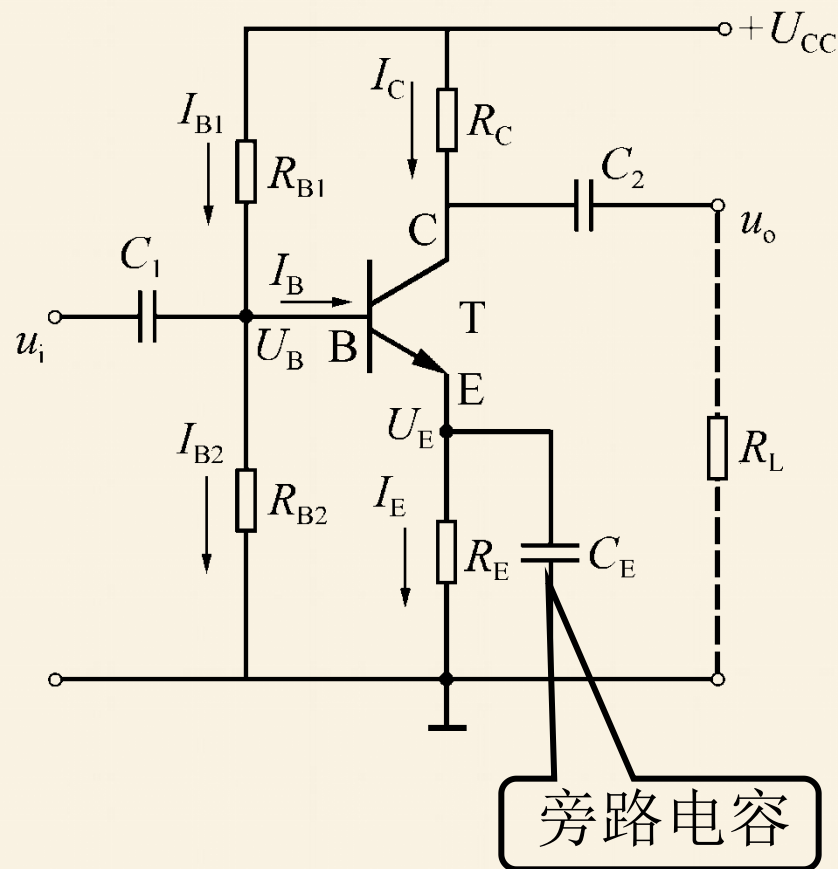
稳定过程(电流负反馈):

$$t^{\circ}\text{C} \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow I_E \uparrow \rightarrow I_E R_E \uparrow \rightarrow U_E \uparrow \rightarrow U_{BE} (U_B - U_E) \downarrow \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow I_C \downarrow$$

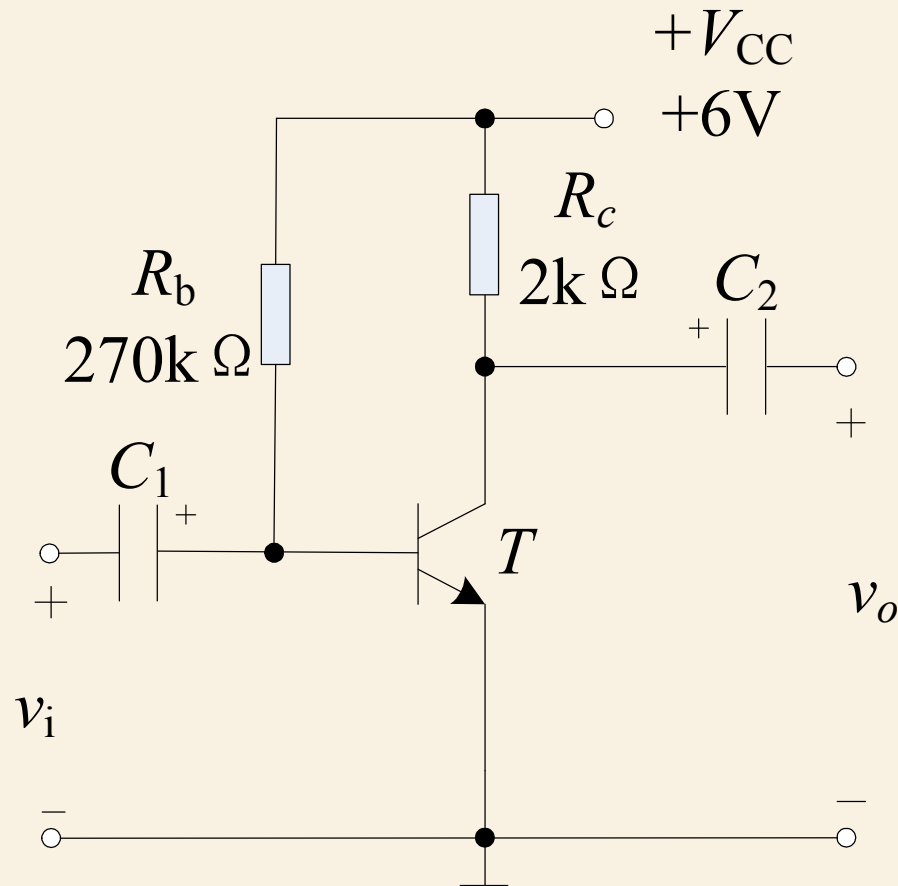


改进电路—分压式偏置放大电路

若电容 C_e 开路，则将引起电路的哪些动态参数发生变化？如何变化？

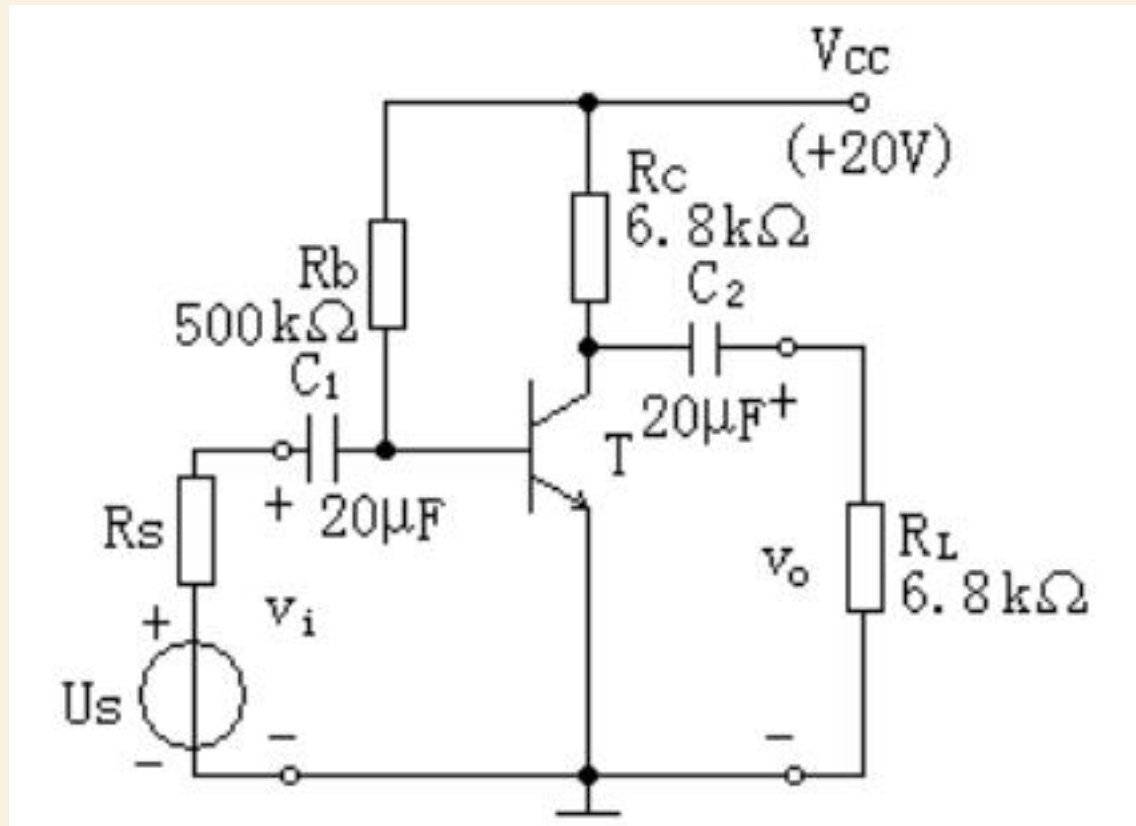


- 如图所示电路中，已知 T 的 $\beta = 100$ ，基区体电阻 $r_b = 200\Omega$ ， $V_{BE} = 0.7V$ 。
- (1) 估算放大电路的静态工作点；
 - (2) 画出小信号等效电路；
 - (3) 计算放大电路的电压放大倍数以及输入电阻 R_i 、输出电阻 R_o 。



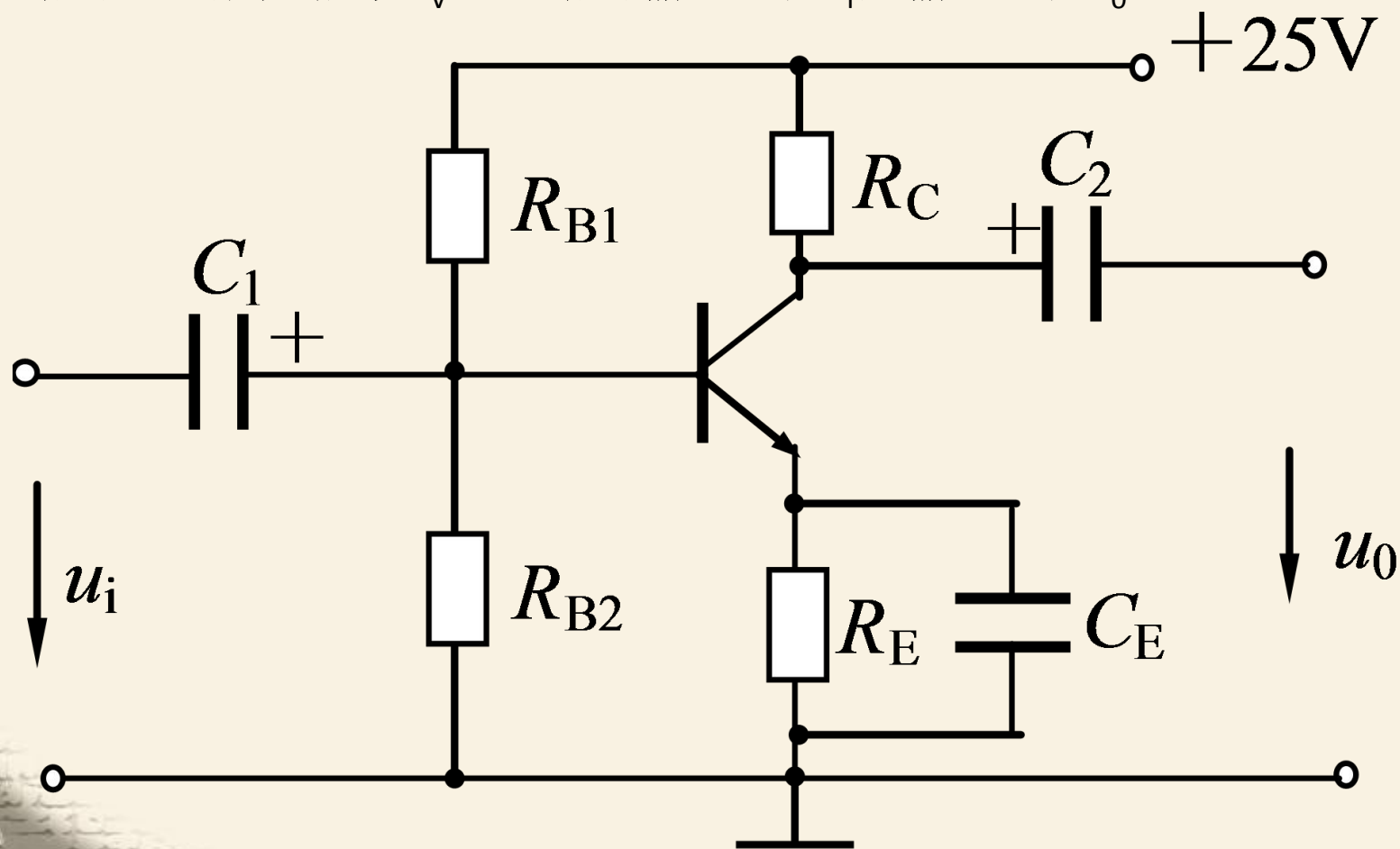
如图所示电路中， $\beta = 45$ ，正向压降 $0.7V$ ，解下列问题：

- (1) 估算放大电路的静态工作点；
- (2) 画出小信号等效电路；
- (3) 计算放大电路的电压放大倍数以及输入电阻 R_i 、输出电阻 R_o 。



如图所示分压式偏置放大电路中，已知 $R_C=3.3\text{K}\Omega$ ， $R_{B1}=40\text{K}\Omega$ ， $R_{B2}=10\text{K}\Omega$ ， $R_E=1.5\text{K}\Omega$ ， $\beta=70$ 。（图中晶体管为硅管）

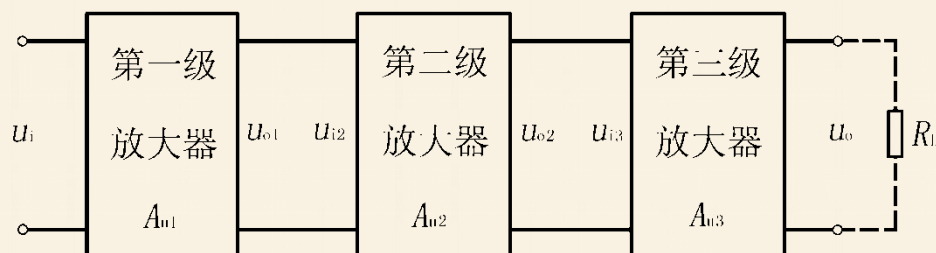
- (1) 求静态工作点 I_{BQ} 、 I_{CQ} 和 U_{CEQ} 。
- (2) 画出图中电路的微变等效电路，并对电路进行动态分析。要求解出电路的电压放大倍数 A_v ，电路的输入电阻 r_i 及输出电阻 r_o 。



五、多级放大器

耦合的方式 { 阻容耦合
变压器耦合
直接耦合

阻容耦合：



总放大倍数：

$$A_u = A_{u1} A_{u2} \dots A_{un}$$

输入电阻就是输入级的输入电阻，输出电阻就是输出级的输出电阻。

第四节 射极输出器

一、射极输出器的工作状态

二、射极输出器的应用

一、射极输出器的工作状态

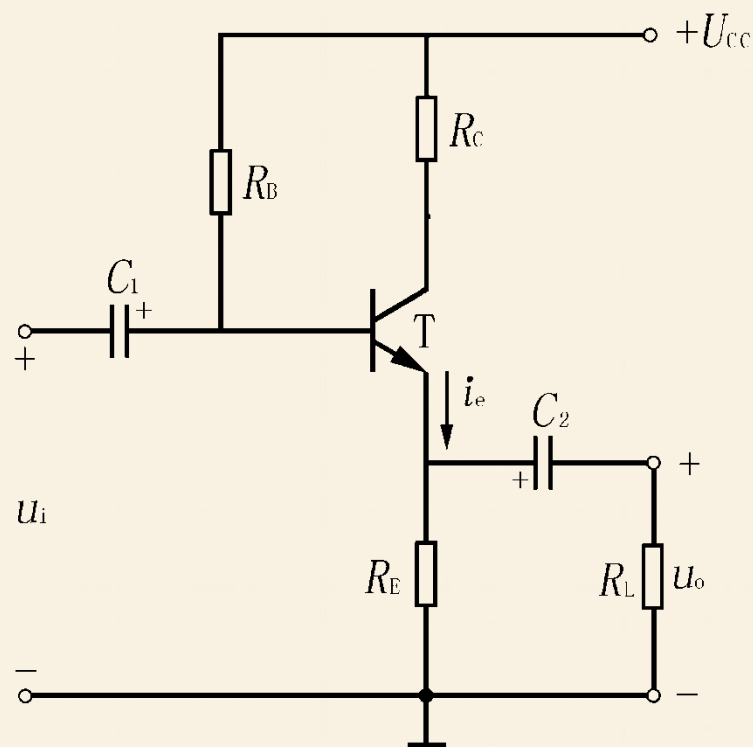
射极输出器

(emitter follower)

=射极跟随器

=共集电极放大器

输出信号是从发射极和集电极两端取出的。



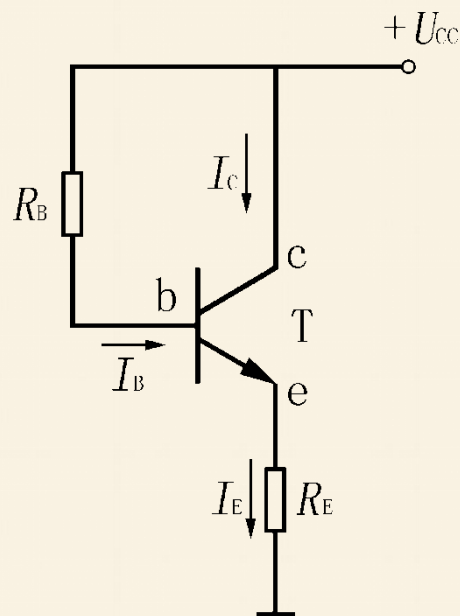
1. 静态分析

射极输出器直流通路

$$I_E = I_B + I_C = I_B + \beta I_B = (1 + \beta) I_B$$

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

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



2.动态分析

(1) 电压放大倍数:

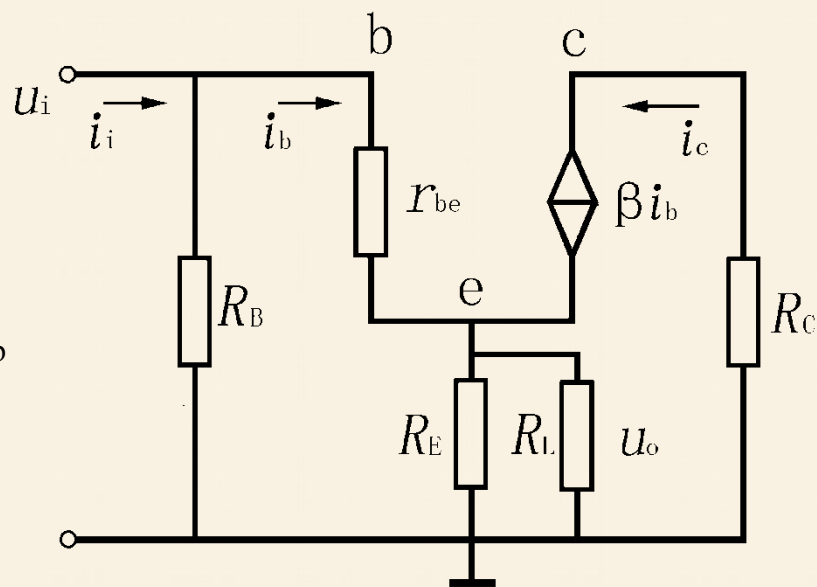
$$u_o = R'_L i_e = (1 + \beta) R'_L i_b$$

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

$$u_i = r_{be} i_b + R'_L i_e = r_{be} i_b + (1 + \beta) R'_L i_b$$

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

微变等效电路



①电压放大倍数接近1，且略小1。

②输出电压和输入电压同相位，具有跟随作用。

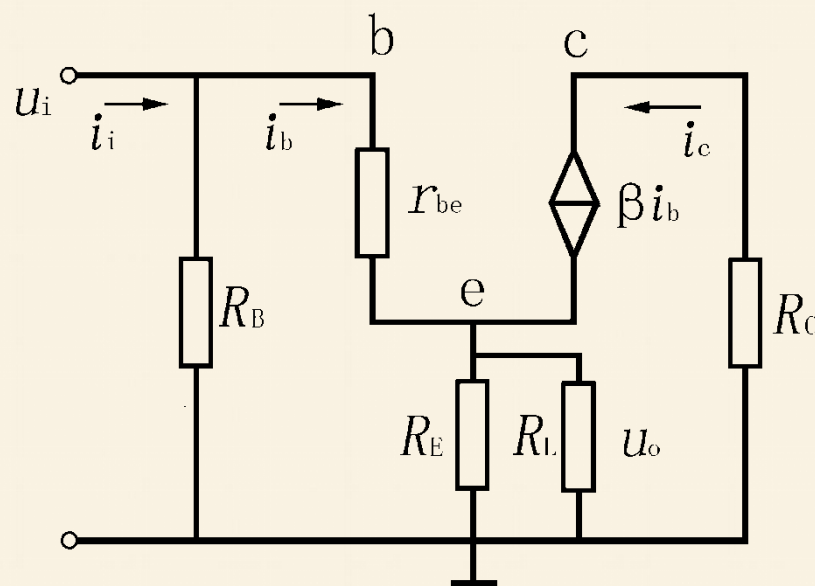
2.动态分析

(2) 输入电阻

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

和共发射极电路不同的是：

射极输出器大大提高了自身的输入电阻。



2. 动态分析

求输出电阻的等效电路

- 网络内独立源置零
- 负载开路

(3) 输出电阻

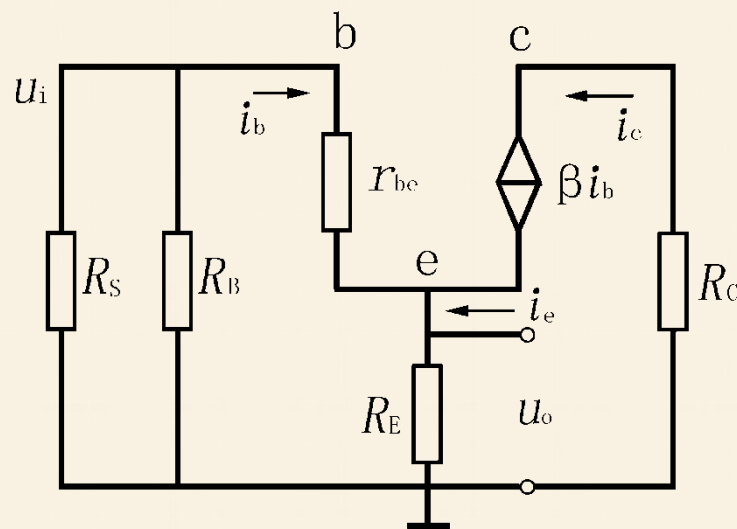
$$i_o = i_b + \beta i_b + i_e = \frac{u_o}{r_{be} + R'_S} + \beta \frac{u_o}{r_{be} + R'_S} + \frac{u_o}{R_E}$$

$$r_o = \frac{u_o}{i_o} = \frac{1}{\frac{(1+\beta)}{r_{be} + R'_S} + \frac{1}{R_E}} = \frac{R_E (r_{be} + R'_S)}{(1+\beta)R_E + (r_{be} + R'_S)}$$

$$(1+\beta)R_E \gg (r_{be} + R'_S) \quad r_o \approx \frac{r_{be} + R'_S}{\beta}$$

射极输出器的输出电阻很低，有很强的带负载能力。

——恒压源。



二、射极输出器的应用

特性

应用

效果

输入电阻高	→ 作输入级	→ 提高了放大倍数；减小了对信号源的影响
输出电阻低	→ 作输出级	→ 提高了驱动能力
输入电阻高 输出电阻低	→ 作中间级	→ 电阻转换

第五节 场效应管及其放大电路

一、绝缘栅型场效应管

二、绝缘栅场效应管的主要参数

三、场效应管基本放大电路

场效应管(field effect transistor)是一种较新型的半导体器件，其外形与普通晶体管相似，但它们的控制特性却截然不同。

普通晶体管是电流控制元件，通过控制基极电流控制集电极电流，信号源必须提供一定的电流才能工作，因此它的输入电阻较低，仅有 10^2 - $10^4 \Omega$ 。而场效应管则是电压控制元件，它的输出电流取决于输入端电压的大小，基本上不需要信号源提供电流，所以它的输入电阻可高达 10^9 - $10^{14} \Omega$ 。

这对我们是非常有意义的，因为在生物医学中，经常遇到高内阻的信号源，提供信号电流的能为非常微弱，而场效应管则可用来制作取用信号电流非常微小的前级放大器。它还具有其它优点，所以现已被广泛应用于放大电路中。

一、绝缘栅场效应管

(金属-氧化物-半导体场效应管)

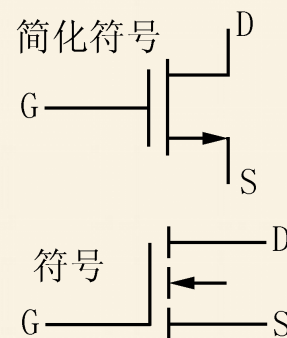
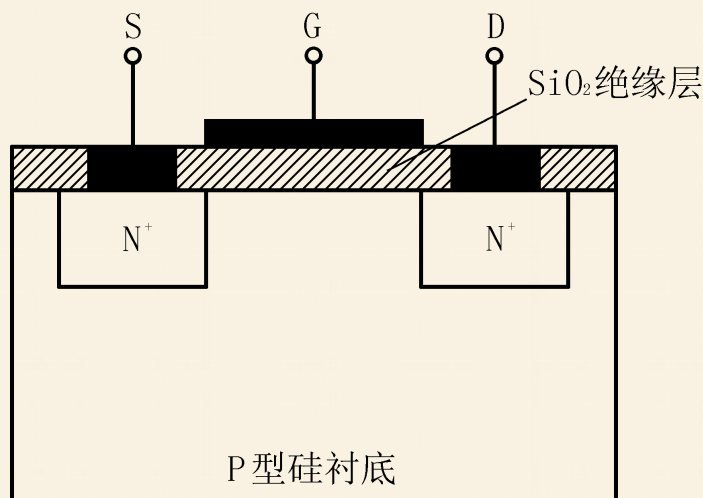
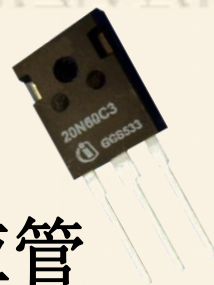
Metal-Oxide-Semiconductor, MOS

MOS场效应管:

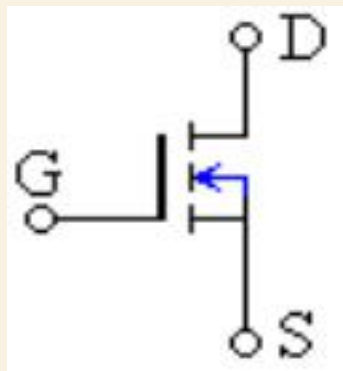
N沟道增强型绝缘栅场效应管

NMOS { 增强型
耗尽型

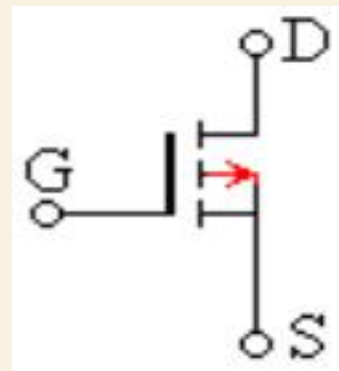
PMOS { 增强型
耗尽型



三个电极：栅极G、源极S和漏极D

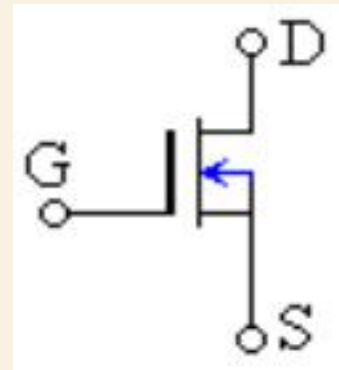


N沟道

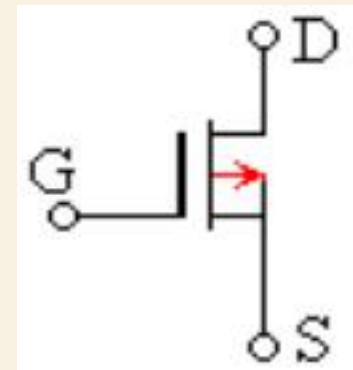


P沟道

增强型



N沟道

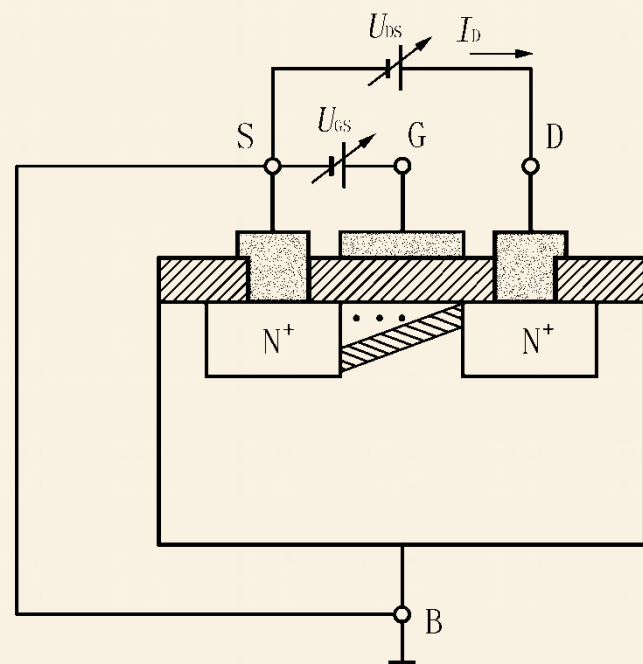
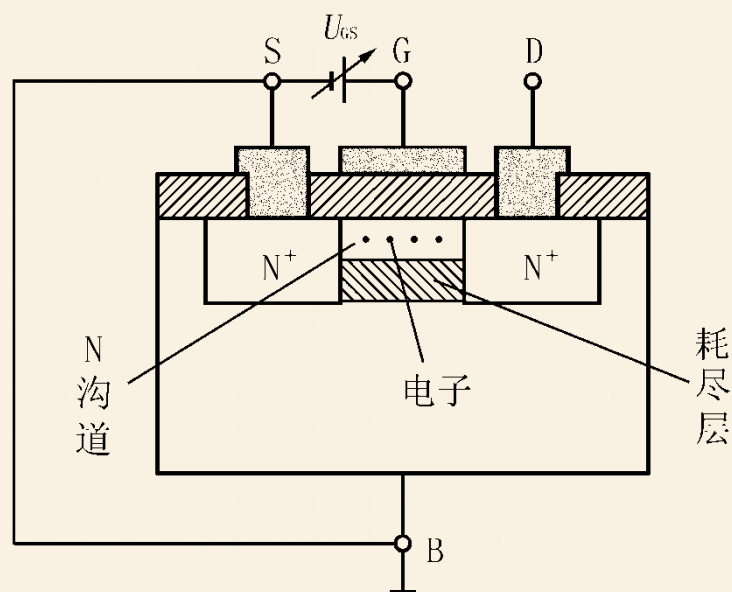


P沟道

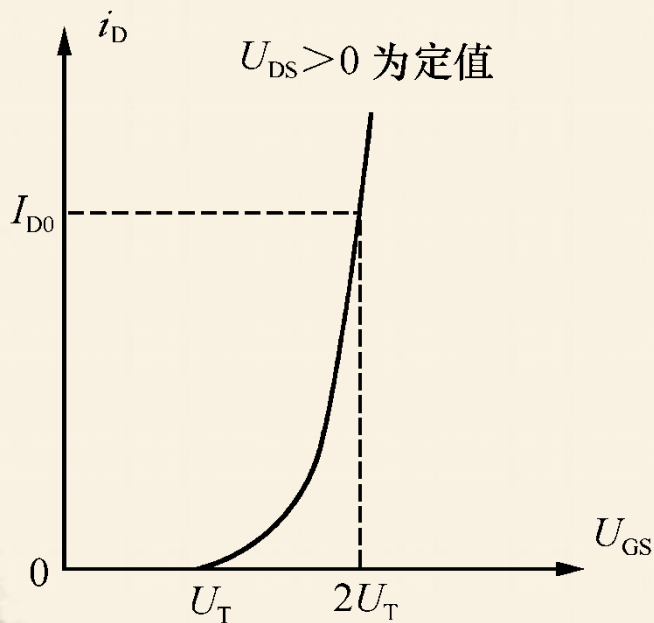
耗尽型

1. 增强型绝缘栅场效应管

在 $U_{GS}=0$ 时没有导电沟道，只在 U_{GS} 增加至电场达到一定强度后才能形成导电沟道。



增强型NMOS的特性——转移特性

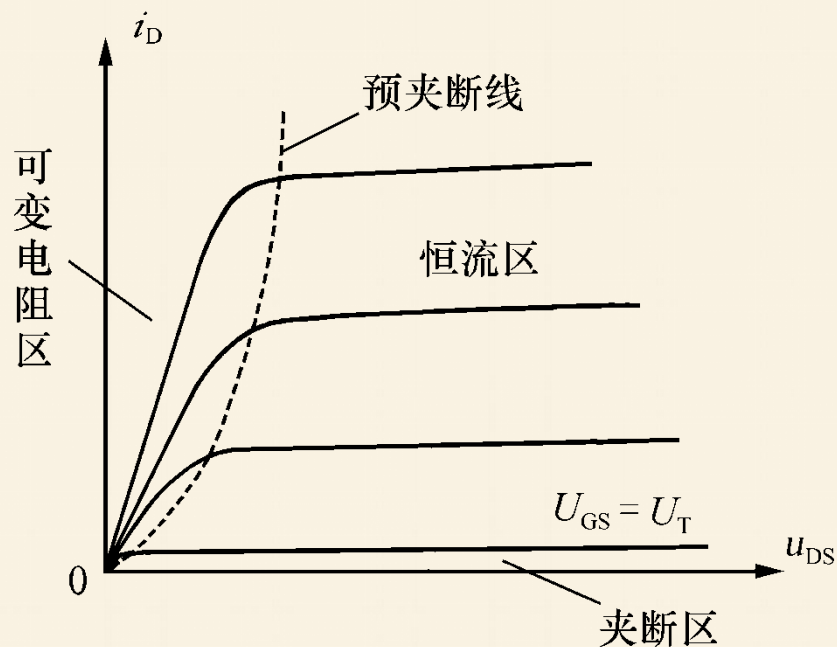


开启电压 U_T ：刚好能够形成导电沟道的栅源电压。

在MOS管的栅极和源极之间加输入信号，则通过输入电压 U_{GS} 的电场效应可改变沟道电阻，从而实现对输出电流 I_D 的控制。

$$I_D = I_{D0} \left(\frac{U_{GS}}{U_T} - 1 \right)^2$$

增强型NMOS的特性——输出特性



夹断区：当 $U_{GS} < U_T$ 时，导电沟道尚未形成， I_D 极小。

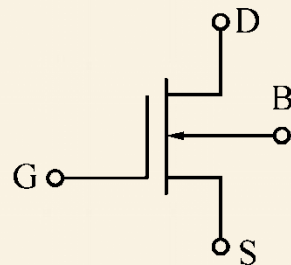
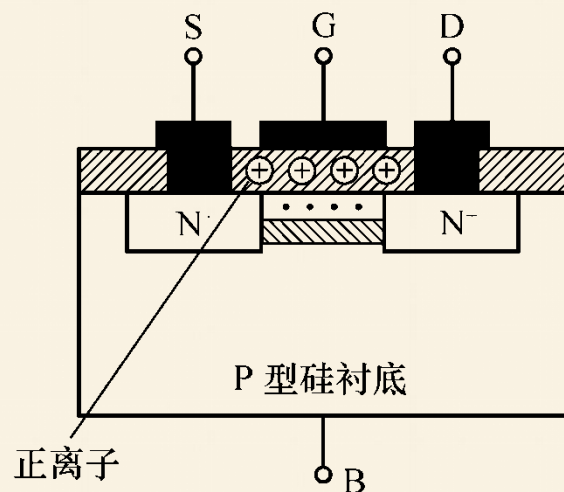
可变电阻区： U_{DS} 较小， I_D 随 U_{DS} 的增加而线性上升。

恒流区： U_{DS} 增至预夹断以后， I_D 基本不随 U_{DS} 变化，而主要由 U_{GS} 控制。

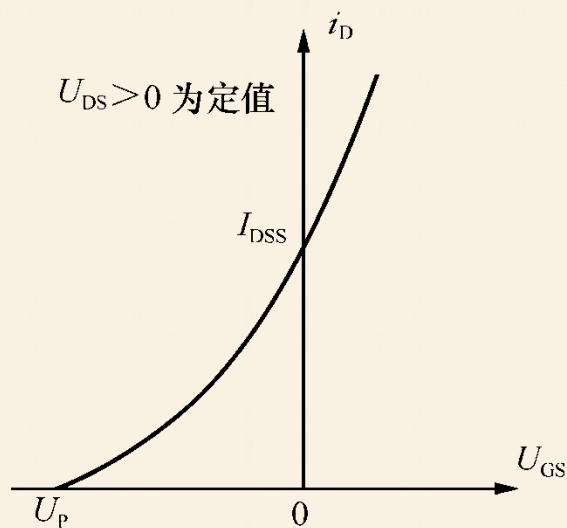
——MOS管的电压控制性质

2. 耗尽型绝缘栅场效应管

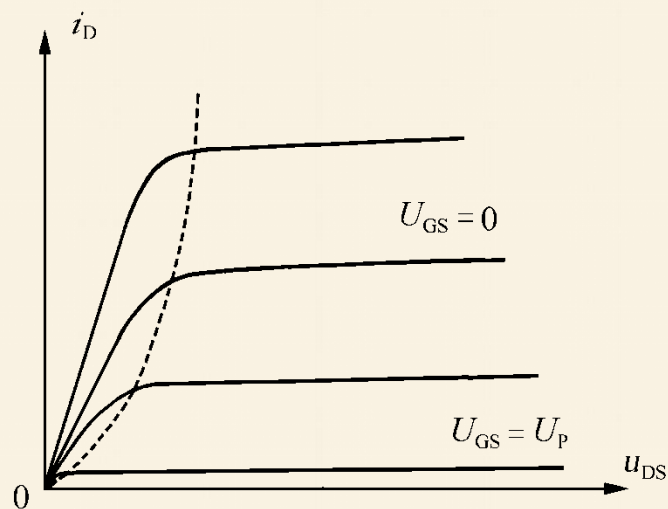
在 $U_{GS}=0$ 时也有导电沟道，但加反向栅源电压后，沟道中感应电子将减少。反向电压达到一定数值时，导电沟道消失。



耗尽型NMOS的转移特性曲线



(a) 转移特性



(b) 输出特性

当 U_{GS} 降至一定负值时，反型层消失，漏极电流 I_D 则降为零，这时的 U_{GS} 称为夹断电压（ U_P ）。

二、绝缘栅场效应管的主要参数

1. 开启电压 U_T 或夹断电压 U_P :

将MOS管漏—源极联接起来的最小 U_{GS} 为开启电压 U_T ;
使耗尽型管的漏极电流 I_D 为零时的 U_{GS} 为夹断电压 U_P 。

2. 直流输入电阻 R_{GS} : 即在栅、源极之间加的电压与栅极电流之比。——非常大

3. 低频跨导 g_m : 表示场效应管放大能力。

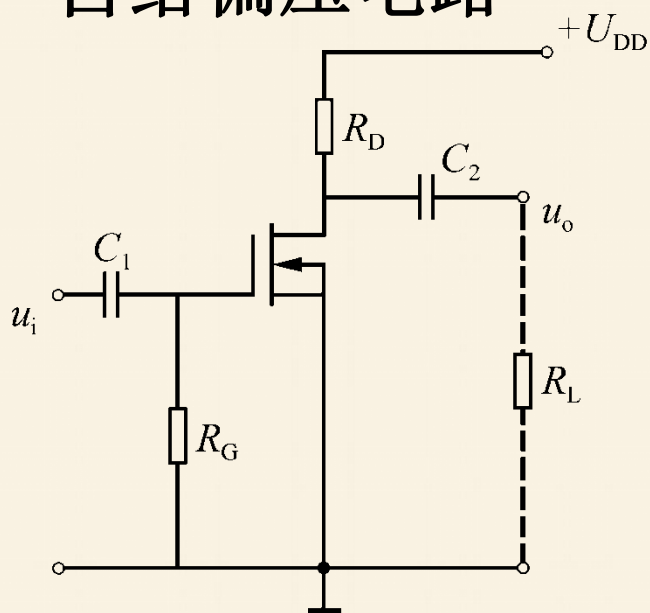
$$g_m = \Delta I_D / \Delta U_{GS} \mid U_{DS} = \text{常数}$$

4. 击穿电压

在保存时，必须将三个电极短接。

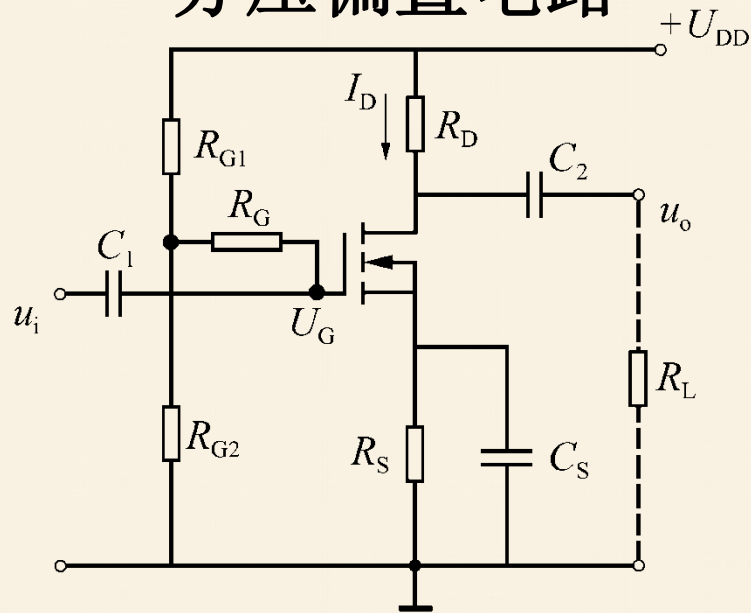
三、场效应管基本放大电路

耗尽型NMOS 自给偏压电路



$$U_{GS} = -i_D R$$

增强型NMOS 分压偏置电路



$$\begin{aligned}
 U_{GS} &= U_G - U_S \\
 &= \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} U_{DD} - I_D R
 \end{aligned}$$

NMOS共源级分压式偏置电路分析

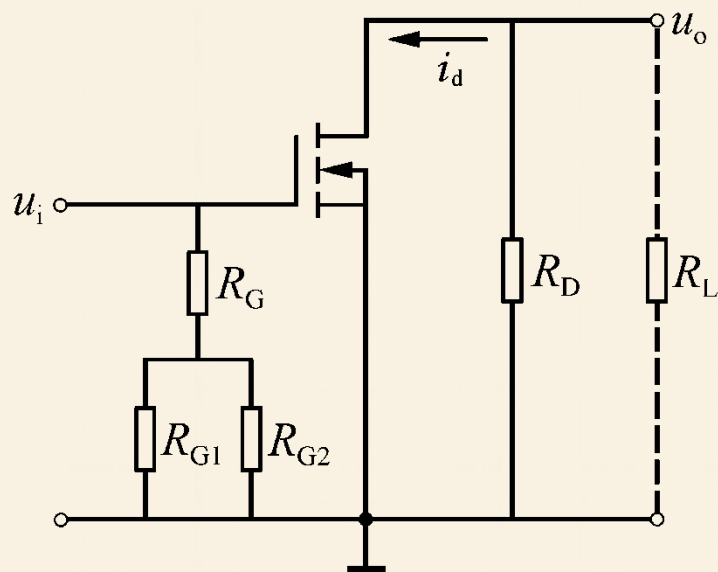
直流负载线: $U_{DS} = U_{DD} - I_D(R_D + R_S)$

电压放大倍数:

$$\left. \begin{aligned} R'_L &= R_D // R_L \\ u_o &= -i_d R'_L \\ u_i &\approx u_{GS} \\ i_d &= g_m u_{GS} \end{aligned} \right\} A_u = -g_m R'_L$$

输入电阻: $r_i = R_G + R_{G1} // R_{G2} \approx R_G$

输出电阻: $r_o = r_{ds} // R_D \approx R_D$



交流通路