

二极管

PN结

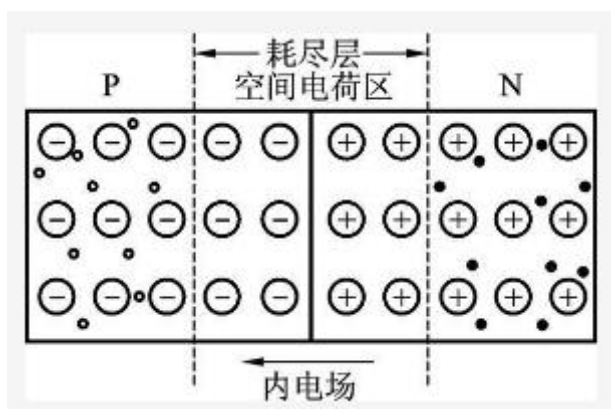
多子少子

P 型半导体多子是空穴， N 型半导体多子是电子

多子浓度取决于参杂浓度，少子浓度取决于温度

形成过程

漂移运动是由电位差产生的载流子定向运动，扩散运动是由浓度差产生的载流子定向运动



多子扩散 → 形成内建电场 → 少子漂移 → 扩散漂移动态平衡

内建电场从 N 区指向 P 区，阻挡层任意一侧的宽度与该侧的参杂浓度成反比

正向特性

外电源正极接 P 极，负极接 N 极，正向电场削弱内建电场，少子漂移减少，主要由多子扩散产生电流，方向为 $P \rightarrow N$

温度升高，多子扩散加剧，正向电流增大，在相同的电流下，电压减小，所以导通电压减小， $V_{D(on)}$ 减小。

反向特性

外电源正极接 N 极，负极接 P 极，外加电场增强内建电场，少子漂移增强，主要由少子漂移产生电流，方向为 $N \rightarrow P$ ，少子浓度远小于多子浓度，此时漂移电流是非常微小的，如果继续增大反向电压，忽略多子通过阻挡层，反向电流几乎全由少子漂移产生，因为少子浓度很小，此电流与外电压大小无关，称为反向饱和电流 I_s 。

温度升高，激发出的少子浓度增加，反向饱和电流增加， I_s 增大。

- 硅管的 $V_{D(on)}$ 比锗管大，反向饱和电流比锗管小

击穿特性

反向电流急剧增大的现象称为PN结的击穿

- **雪崩击穿**：参杂浓度较低， E 较大，少子将共价键中的电子碰撞出来，温度升高，雪崩击穿所需电压升高，参杂浓度降低，击穿电压增大
- **齐纳击穿**：参杂浓度高， E 比较小，内建电场将价电子从共价键中拉出来，温度升高，齐纳击穿所需电压降低，参杂浓度升高，击穿电压降低

稳压特性

PN结击穿后，电流变化很大，电压几乎不变，可以利用此特性制作稳压二极管。用 V_Z 表示稳压值， I_Z 表示稳压时的电流。

但要注意使 $I_{Zmin} < I_Z < I_{Zmax}$ ，前者使二极管被击穿，后者防止PN结不被烧坏。

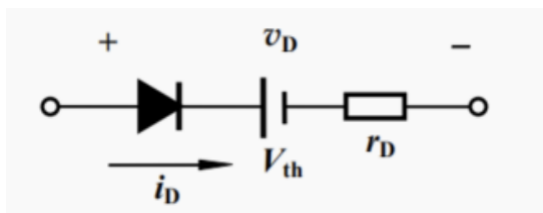
电路分析方法

理想二极管

$V > 0$ 导通， $V < 0$ 断路

大信号模型

将导通后的二极管作为电压源，电压源的大小为开启电压 V_{on} （又叫导通电压）， R_D 是二极管的体电阻，一般忽略

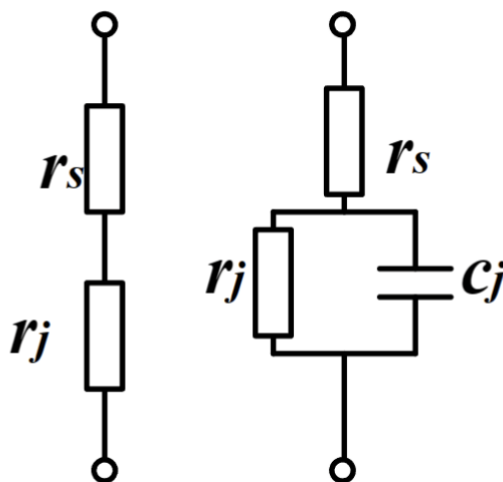


硅PN结： $V_{on} = 0.6 \sim 0.8V$

锗PN结： $V_{on} = 0.2 \sim 0.3V$

小信号模型

r_j 是肖特基电阻，只在正向导通时有。 r_s 是中性区电阻，与PN结材质有关



r_j 的大小为：

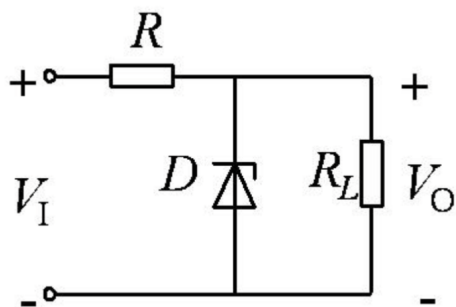
$$r_j = \frac{V_T}{I_Q} = \frac{26}{I_Q}(\Omega)$$

其中, $V_T = 26mV$, I_Q 的单位为 mA , r_s 比 r_j 小很多, 一般不考虑

需要注意的是, R_D 和 r_s 不是同一个电阻, 即使直流计算需要考虑了 R_D , 交流计算也需要考虑 r_s

可以参考教材 P_{42} 1 – 19题

稳压电路



R 的作用是限流, 输出电压 $V_O = V_Z$, 稳压管的稳压值。

为保证稳压管的电流小于 I_{Zmax} , 求 R 的最小值:

先求稳压管支路可能通过的最大电流, 让 $R_L \rightarrow \infty$, 电流全部通过稳压管, 再让 V_I 取最大值

$$R_{min} = \frac{V_{I_{max}} - V_Z}{I_{Zmax}}$$

为保证二极管可靠击穿, 求 R_L 最小值 (R 取最小值) :

R_L 取最小, 一部分电流会通过 R_L , 通过 R 的电流:

$$I = \frac{V_I - V_O}{R}$$

通过 R_L 的电流

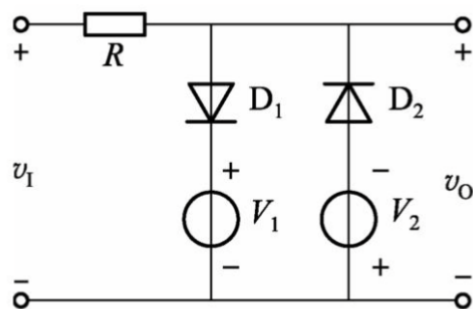
$$I_L = I - I_{Zmin} = \frac{V_O}{R_L}$$

可以得到

$$R_L = \frac{V_O}{\frac{V_I - V_O}{R} - I_{Zmin}}$$

要使 R_L 最小, 可以使 V_I 最小。

限幅电路



双向限幅电路

D_1 导通, D_2 截止

$$\begin{cases} V_I - V_1 > 0 \\ -V_2 - V_I < 0 \end{cases}$$

得到 $V_I > V_1$, 此时 $V_D = V_I - V_1$

D_1 截止, D_2 导通

$$\begin{cases} V_I - V_1 < 0 \\ -V_2 - V_I > 0 \end{cases}$$

得到 $V_I < -V_2$, 此时 $V_D = -V_2 - V_I$

D_1 截止, D_2 截止

$$\begin{cases} V_I - V_1 < 0 \\ -V_2 - V_I < 0 \end{cases}$$

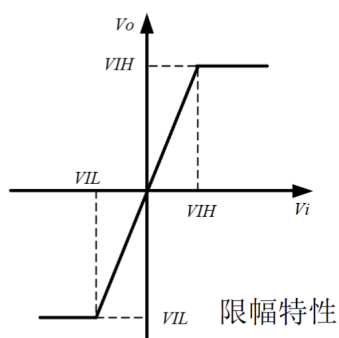
得到 $-V_2 < V_I < V_1$

D_1 导通, D_2 导通

$$\begin{cases} V_I - V_1 < 0 \\ -V_2 - V_I < 0 \end{cases}$$

V_I 不存在

画出 V_o 关于 V_I 的图像



判断二极管是否导通

- 先假设所有二极管断开
- 再计算所有二极管两端电位
- 正向电位差最大的最先导通

- 再由上面的条件计算其他二极管是否导通

三极管工作原理

三极管有NPN和PNP型，两个类型的符号箭头指向不同。

箭头有下面两个含义

- 指向N型半导体
- 电流的方向

从发射极发射出去的载流子在集电极被收集。

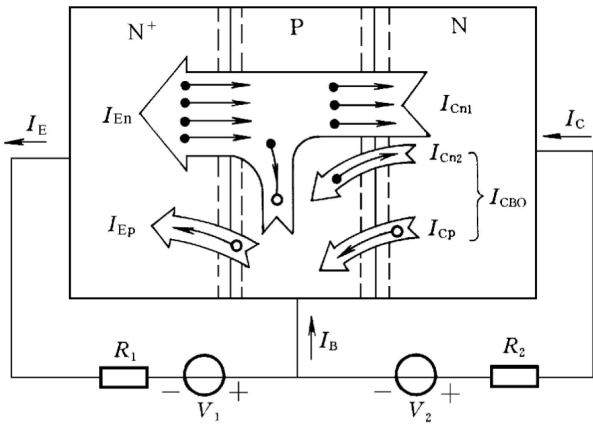
$$I_E = I_B + I_C$$

可以根据这个等式和箭头方向推断出另外两个电流的方向

一般给发射结加正偏，集电结加反偏，三极管具有正向受控作用，改变正偏电压，三个电流都会变化，而反偏电压变化，电流几乎不会变化

三极管工作原理

载流子传输过程



N^+ 表示参杂重

给发射结加上正偏，阻挡层宽度减小，扩散起主导作用，N型半导体的多子（电子）向P型扩散，P型半导体的多子（空穴）向N型扩散，发射结上形成扩散电流，外电路给它补充电子，外电路电流就是两个扩散电流的和

$$I_E = I_{En} + I_{Ep}$$

扩散的电子到了基区，会和基区的空穴复合掉一些，剩下的继续向集电结运动。

集电结加反偏，阻挡层宽度增加，电子在电场的作用下漂移到集电区。因为集电结加反偏，集电区的少子（空穴）会漂移到基区，基区的少子（电子）会漂移到集电区，两个电流形成集电结反向饱和电流 I_{CBO} ，O表示发射结开路时集电结的反向饱和电流。

$$I_C = I_{Cn1} + I_{Cn2} = I_{Cn1} + I_{CBO}$$

在 I_C 电流里，只有 I_{Cn1} 与发射结有关， I_{CBO} 是不受控的。

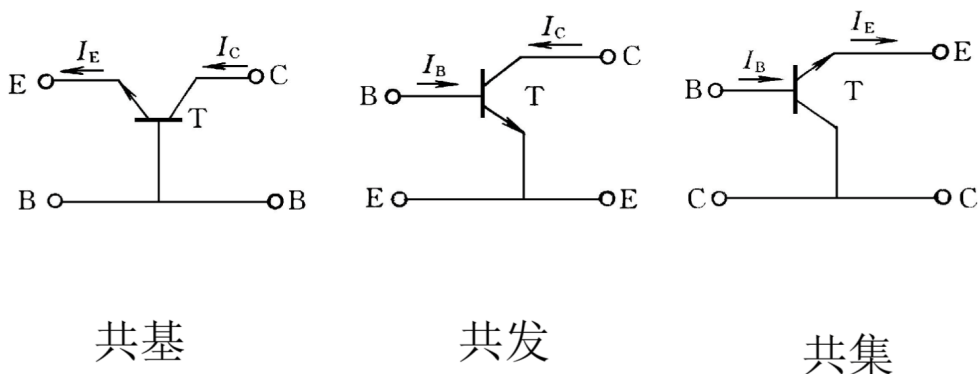
基区

$$I_B = I_{Ep} + (I_{En} - I_{Cn1}) - I_{CBO}$$

其中 $I_{En} - I_{Cn1} = I_{BB}$ 为复合电流

电流传输方程

三种连接方式



三种不同连接方式构成三种不同组态，具有不同特性，公共端是交流接地端，输入一般是基极或发射极，一般不用集电极作为输入端，输出可以从发射极或集电极输出，没有从基极输出

传输方程

共基极

输入为 I_E ，输出为 I_C

$\bar{\alpha}$ 为共基极电流传输系数，表示 I_E 转化为受控集电极电流 I_{cn1} 的能力

$$\bar{\alpha} = \frac{I_{cn1}}{I_e} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_E}$$

可以推出

$$I_C = \bar{\alpha} I_E + I_{CBO}$$

因为 I_{CBO} 远小于 I_E ，所以

$$I_C \approx \bar{\alpha} I_E$$

如果将集电极当作发射极，因为集电极是轻掺杂，而且三极管在制作时，集电极面积较大，如果发射电子，发射极收集到的电子会很少，性能 ($\bar{\alpha}$) 会大大降低。

共发射极

输入时 I_B ，输出为 I_C

由 $I_E = I_B + I_C$ 和 $I_C = \bar{\alpha} I_E + I_{CBO}$ ，并定义 $\bar{\beta} = \frac{\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}}$ 可得

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

其中

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

I_{CEO} 为穿透电流，表示基极开路（ $I_B = 0$ ）时（下表没有 B ），集电极到发射极的直通电流（很小，即使乘上 $(1 + \bar{\beta})$ 也很小），所以

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

共集电极

输入时基极电流，输出是发射极电流

$$I_E = (1 + \bar{\beta}) I_B$$

I_{CEO} 忽略

晶体三极管模型

埃伯斯-摩尔模型

不怎么用

等效电路模型

大信号等效电路

三种组态：

- 共基组态：只有 B 接高电压， E 接低电压，才能工作。共基极放大电路只有电压放大作用，没有电流放大作用。
- 共发组态： B 端为输入， C 端为输出， $I_B + I_C = I_E$ ，主要用于电路放大，是最常用的组态。共射放大电路既有电压放大作用又有电流放大作用。
- 共集电极：只有电流放大作用，没有电压放大作用，输入电阻最高，输出电阻最小。

判断组态方法：分析交流小信号，谁接地就是什么组态

三种工作模式

工作模式与三极管的组态没有关联，只与在三极管上加的电压有关。

- **放大模式**：只有在放大模式下才有：

$$I_C = \beta I_B$$

- **饱和模式**：两个结均正偏，失去正向受控作用，将两个结等效为两个导通电压，且

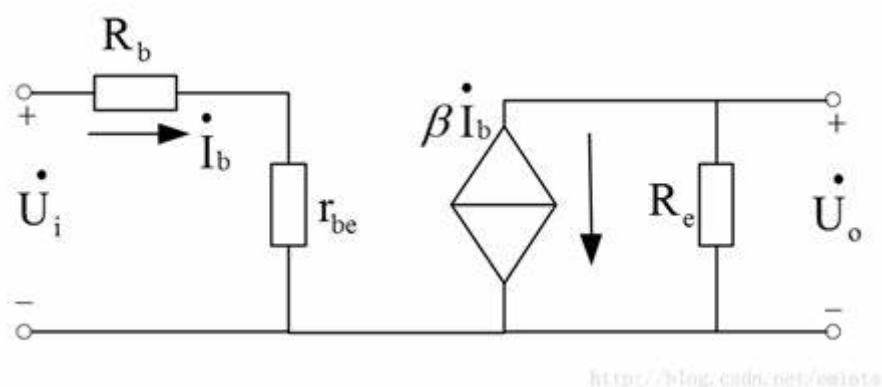
$$V_{BE(sat)} = 0.7V \quad V_{CE(sat)} = 0.3V$$

判断电路处于饱和区最简便的方法是测量 $V_{CE} < 0.3V$

- **截止模式**： be 和 ce 都开路， $I_B = 0$ ， $I_C = 0$

小信号等效电路

分析小信号要把 V_{CC} 接地，电容短路



三极管基极和发射极之间是一只等效二极管，根据二极管小信号等效模型，可以等效为一只线性电阻，记为 r_{be} ，由二极管计算肖特基电阻的公式可得：

$$r_{be} = (1 + \beta) \frac{V_T}{I_{EQ}} = (1 + \beta) r_e = \beta \frac{V_T}{I_{CQ}}$$

这就是三极管的输入电阻。其中， I_{CQ} 的单位为 mA ， $r_e = \frac{V_T}{I_{EQ}}$ 为基极和发射极之间真实存在的肖特基电阻。

同时，对于小信号，

$$i_c = \beta i_b$$

考虑基区的体电阻，将 r_{be} 写成 $r_{b'e}$ ，从基极到发射极就应该有两个电阻，基区体电阻 $r_{bb'}$ 和肖特基电阻 $r_{b'e}$ ，基区体电阻较小，约几十欧，通常不考虑，如果要考虑， $r_{bb'}$ 是已知的，因为它与工艺有关。

$i_c = g_m v_{b'e}$ ，其中， $v_{b'e}$ 是输入端的电压（ $r_{bb'}$ 右边点）， g_m 称为跨导

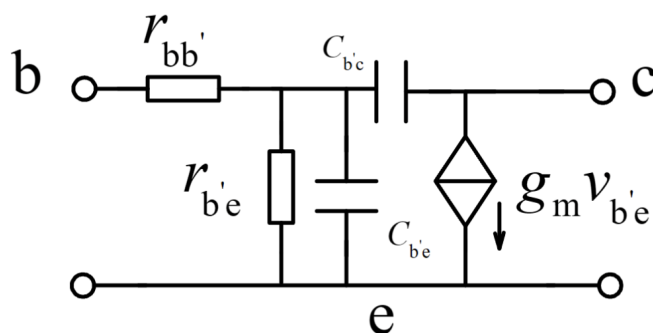
$$g_m = \frac{\beta}{r_{b'e}} = \frac{\alpha}{r_e} = \frac{I_{CQ}}{V_T} = 38.5 I_{CQ}$$

其中 I_{CQ} 的单位为 A

三极管有两种控制形式，电流控制电流，电压控制电流，本质是电压控制。

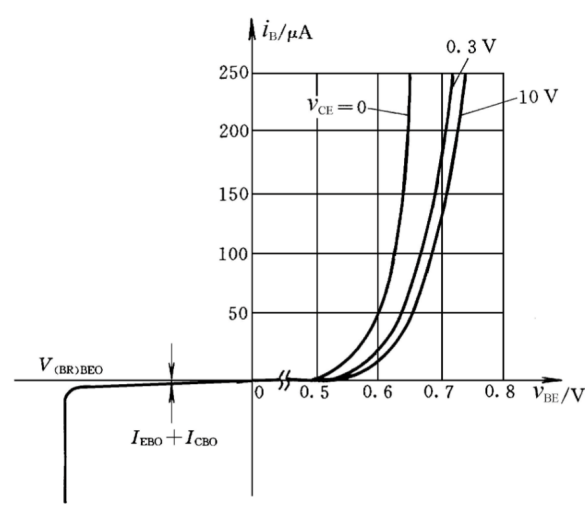
高频小信号等效电路

基极和发射极之间是扩散电容，基极和集电极之间是势垒电容，扩散电容要大于势垒电容



曲线模型

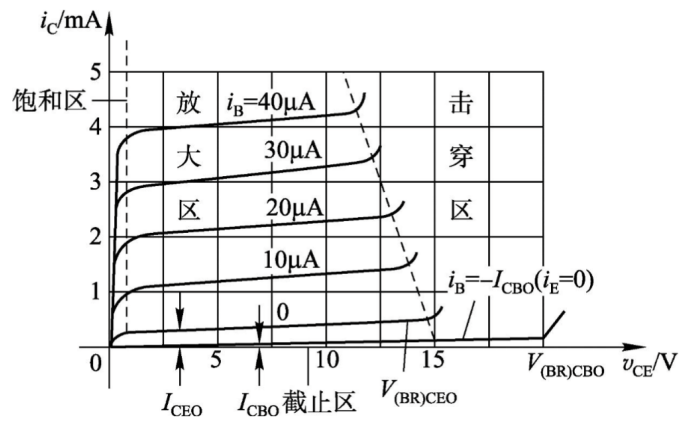
输入特性



V_{CE} 增大，曲线向右移动， $0 \sim 3V$ 之间变化较大，因为这时三极管工作在饱和模式， V_{CE} 越小，饱和越深，发射区漂移到集电区的电子越少，在基区复合的机会越大， i_B 越大， $V_{CE} > 0.3V$ 之后曲线变化很小，三极管工作在放大模式， i_B 不随 V_{CE} 变化。但是当 V_B 一定时， V_{CE} 增大， V_{CB} 增大，基区宽度减小，发射区扩散来的电子复合机会减小， I_B 减小，曲线右移（基区宽度调制效应）。

输出特性

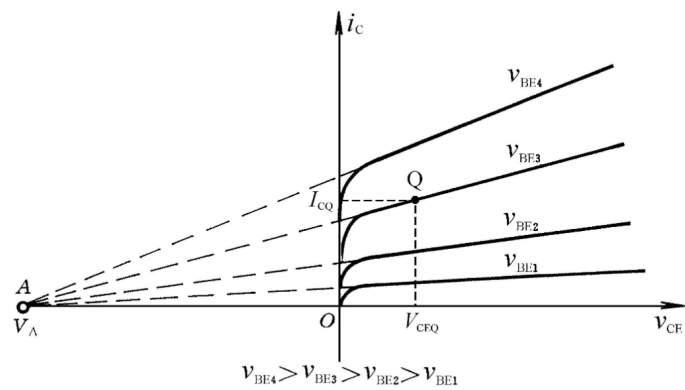
输出特性曲线可分为四个区域：饱和、放大、截止、击穿



| 区域 | 条件 | 特点 |
|-----|--|---|
| 饱和区 | $V_{BE} > 0.7V$, $V_{CE} < 0.3V$ 发射结正偏，集电结正偏 | I_C 不受 I_B 控制，而受 V_{CE} 影响， I_E 略增， I_C 显著增加 |
| 放大区 | $V_{BE} \geq 0.7V$, $V_{CE} \geq 0.3V$ 发射结正偏，集电结反偏 | 具有正向受控作用，满足 $I_C = \beta I_B$, V_{CE} 增大，曲线略上翘 |
| 截止区 | $V_{BE} \leq 0.7V$, $V_{CE} \geq 0.3V$ 发射结反偏，集电结反偏 | $I_C \approx 0$, $I_B \approx 0$ 由 $I_B \approx 0$ 定义 |
| 击穿区 | V_{CE} 非常大，集电结反向击穿 | I_C 急剧增大，雪崩击穿 |

判断电路处于饱和区最简便的方法是测量 $V_{CE} < 0.3V$

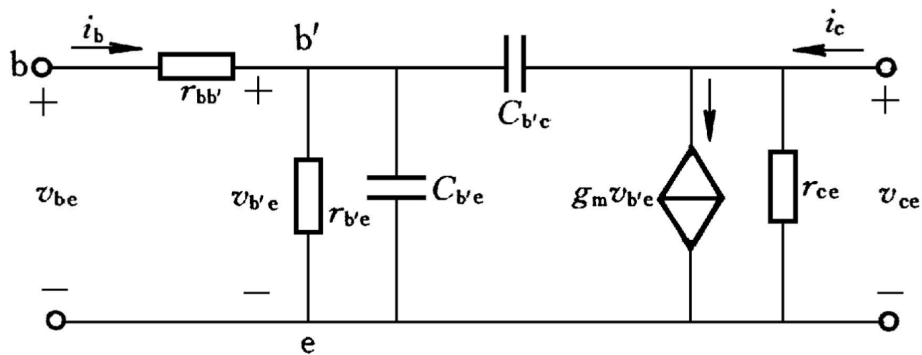
将不同 V_{BE} 对应的输出特性曲线反向延长，将近似交于一点 A 上， A 点对应的电压用 V_A 表示，称为厄利电压， $|V_A|$ 越大，曲线上翘程度越小。



由于基区宽度调制效应，可以引入一个电阻 r_{ce}

$$r_{ce} = \frac{|V_A|}{I_{CQ}}$$

混合 π 型等效电路将做出相应修正



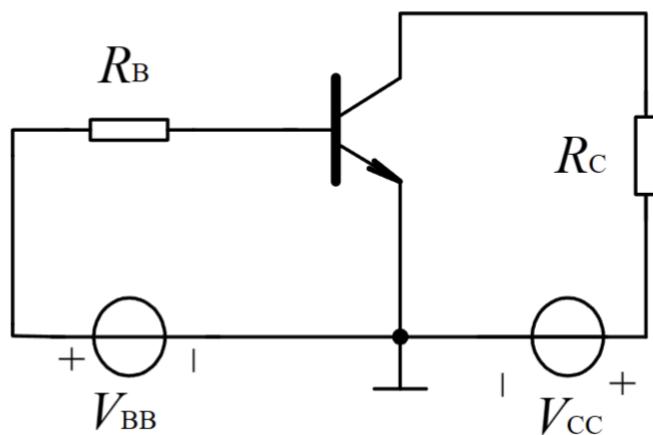
等效电路分析法

直流

用大信号等效模型，算出 I_{CQ} 、 V_{CEQ} （检查是否到饱和区）

$$\begin{cases} I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE(on)}}{R_B} \\ I_C = \beta I_B \\ V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \end{cases}$$

R_D 可以忽略不计

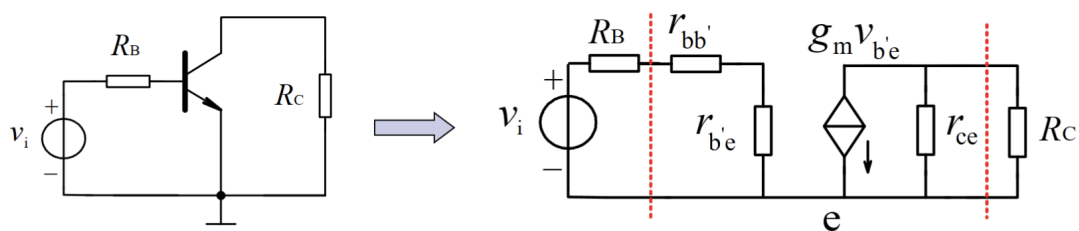


交流

用小信号等效电路

在 b, e, b 处将管子断开，带入混合 π 型等效电路

$r_{b'e}$, g_m , r_{ce} 这些都和工作点电压有关



放大电路

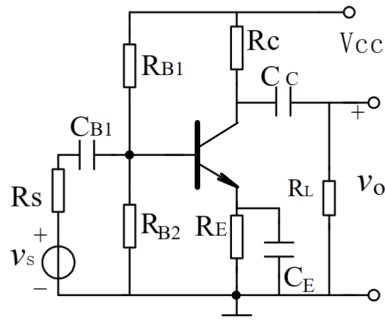
电路组成

- 四个部分：偏置电路、信号源、负载、晶体管
- 负载：在负载上得到放大后的信号
- 偏置： V_{CC} , R_{b1} , R_{b2} , R_E 构成分压式偏置电阻
- 耦合电容：信号可以通过，直流不能通过。
- 旁路电容： C_E ，容抗比 R_E 小得多

分析方法

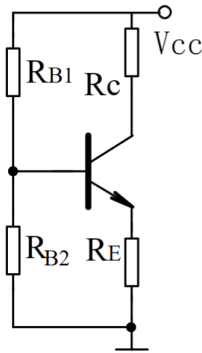
先算直流再算交流

直流分析



1.画出直流通路

所有电容开路，电感短路



2.计算工作点电流

在b处和e处将电路断开，使用戴维南定理，求开路电压

$$V_{BB} = \frac{R_{B2}}{R_{B2} + R_{B1}} V_{cc}$$

短路内阻， V_{cc} 短路到地：

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

在将得到的简化电路连接到三极管上，可以写出方程

$$V_{BB} = I_B R_B + V_{BE(on)} + I_E R_E$$

又由 $I_E = (1 + \beta)I_B$ ，可以求出

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE(on)}}{R_B + (1 + \beta)R_E}, \quad I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE(on)}}{\frac{R_B}{1 + \beta} + R_E}$$

大电流上的电阻转换到小电流上，乘上电流倍数；小电流上的电阻转换到大电流上，除以电流倍数

β 足够大时， $I_C = I_B$

$(1 + \beta)R_E \gg R_B$ 时， R_B 可忽略

最终目的是算出工作点电流 I_{CQ}

交流分析

1.画出交流通路

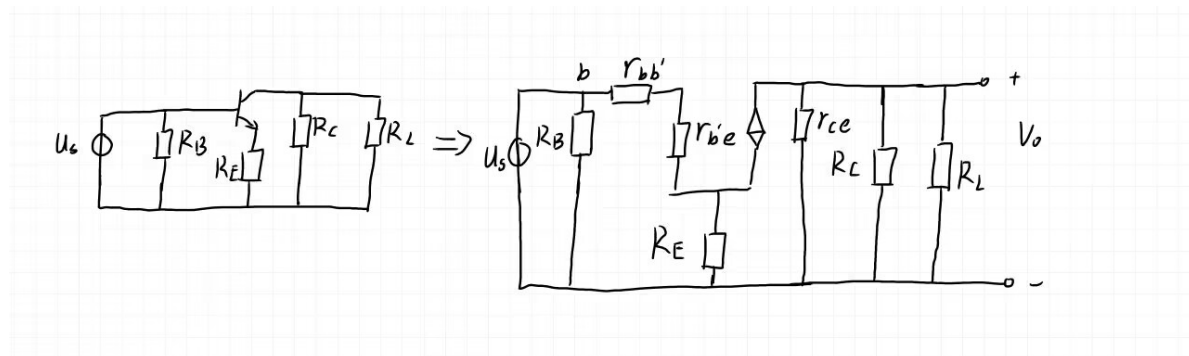
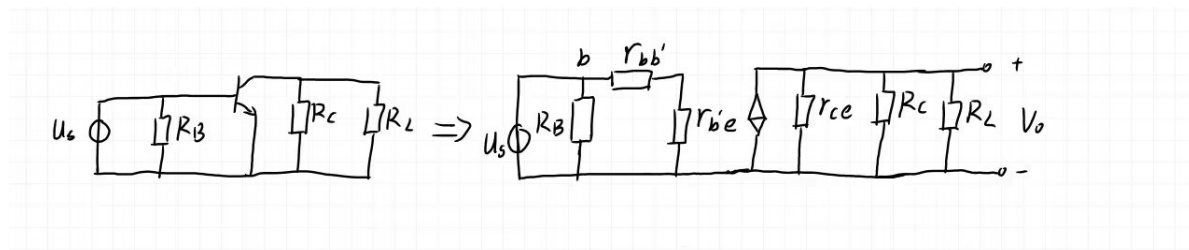
大电容短路，直流电源短路到地

因为 V_{cc} 短路到地，所以 R_{B1} 和 R_{B2} 两个电阻并联， R_C 一端连接到地，发射极直接接地， R_L 连接到集电极

$$\text{令 } R'_L = R_C // R_L$$

2.代入小信号等效电路

在 b, e, c 三点，把三极管拿掉，代入小信号模型（注意 V_{ce} 基区宽度调制）



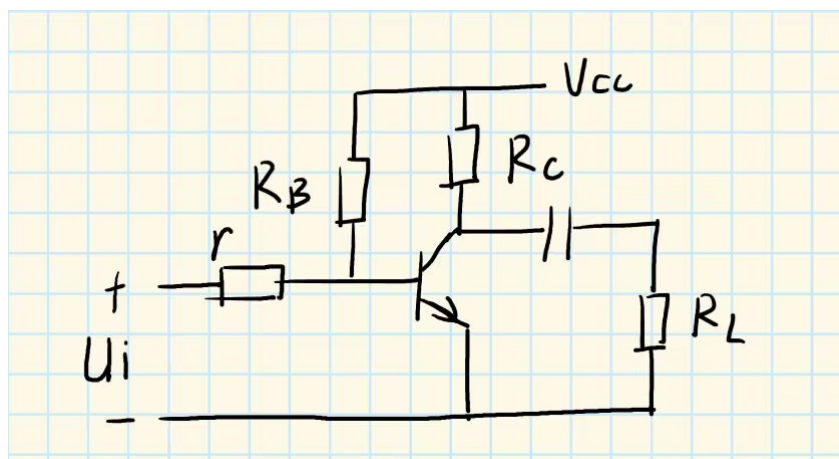
可以将 R_B , R_S , V_B 这个回路用戴维南化简，但要注意用戴维南化简后得到的电压并不是 R_B 两端实际的电压

题目没说的话， $r_{bb'}$ 忽略， r_{ce} 当断路

波形失真

线性失真：波形中不产生其他频率的分量

对于下面的电路



| 类型 | 现象 | 解决办法 |
|------|------|--------------------|
| 饱和失真 | 底部削平 | 增大 R_B 或减小 R_C |
| 截止失真 | 顶部削平 | 减小 R_B 或增大 R_C |

改善失真的基本原则：

调大 R_C 使得 U_{CE} 减小，更容易发生饱和失真，反之更容易发生截止失真。

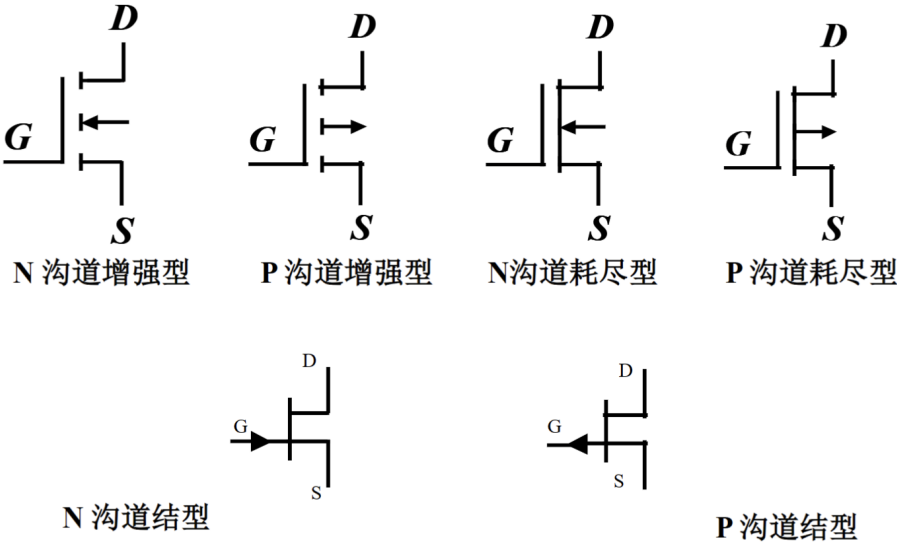
调大 R_B 使得 I_B 减小， I_C 也减小， U_{CE} 增大，更容易发生截止失真，反之更容易发生饱和失真。

具体原理可以看[这篇文章](#)

场效应管

场效应管工作仅取决于多子，是单极性器件（载流子只有一种），输入电阻 \gg 三极管输入电阻

电路符号

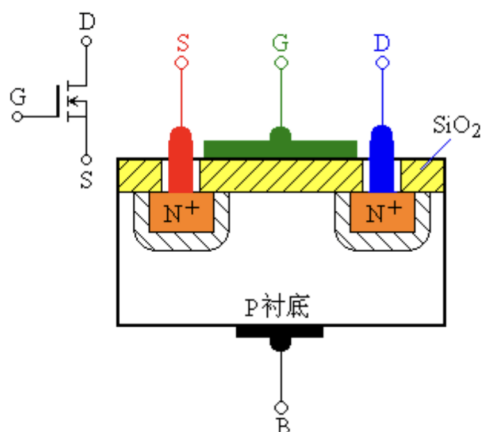


栅极对应基极，源极对应发射极，漏极对应集电极，电路符号上，栅极 G 偏向源极 S

箭头有两层含义：

- 指向 N 型半导体
- 表示电子流动方向

工作原理



以 N 沟道增强型为例。为了使 PN^+ 结反偏，衬底接在最低电位，源极接衬底。在 S 和 G 之间加上电压 V_{GS} ，随着 V_{GS} 增大，两个 N^+ 区和衬底的电子会吸向衬底表面，填充 P 区的空穴，在表面形成负离子，并与两个 PN^+ 结的阻挡层相连通，再增大 V_{GS} ，直到负离子区自由电子浓度大于空穴，使源极和漏极之间形成导电沟道（电子导电），称为反型层。此时外加正值 V_{DS} 时，源区的电子会通过导电沟道漂移到漏极区。

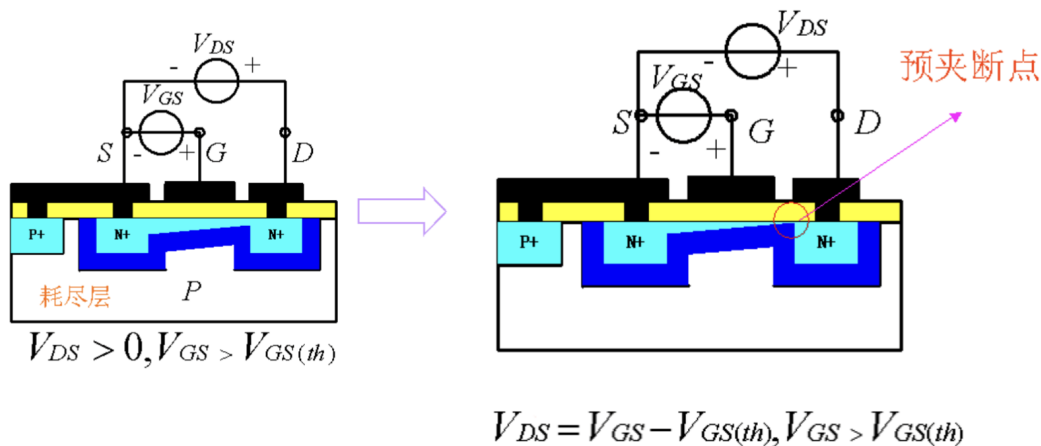
将开始形成反型层所需的电压 V_{GS} 称为开启电压，用 $V_{GS(th)}$ 表示。当 V_{GS} 小于 $V_{GS(th)}$ 时， i_D 并不会突变到0，而是与 $V(GS)$ 之间服从指数关系，这个区域称为弱反型层区。

在 V_{DS} 很小且不变时，当 V_{GS} 增大， V_{GS} 沟道加深，电阻减小（压控电阻）。场效应管输出曲线原点附近的曲线为线性的。

控制 V_{GS} 不变，沟道可以看成一个个电阻串联起来，所以栅极到漏极的压降

$$V_{GD} = V_{GS} - V_{DS}$$

增大 V_{DS} ， V_{GD} 减小。当 V_{GD} 减小到 $V_{GS(th)}$ ，在近漏端就会产生夹断，电阻增大。这种夹断与前面的全部夹断不同，前面的导电，但是这种夹断可以导电，称为预夹断。



再增加 V_{GD} ，多出来的电压都会加在夹端点上，沟道中的电流基本不变，这个电流称为饱和电流。

实际上当 V_{DS} 增大时，夹断点会向源极移动，源极一侧沟道加深，电阻减小，电流增大。称为沟道长度调制效应。

EMOS场效应管的特性

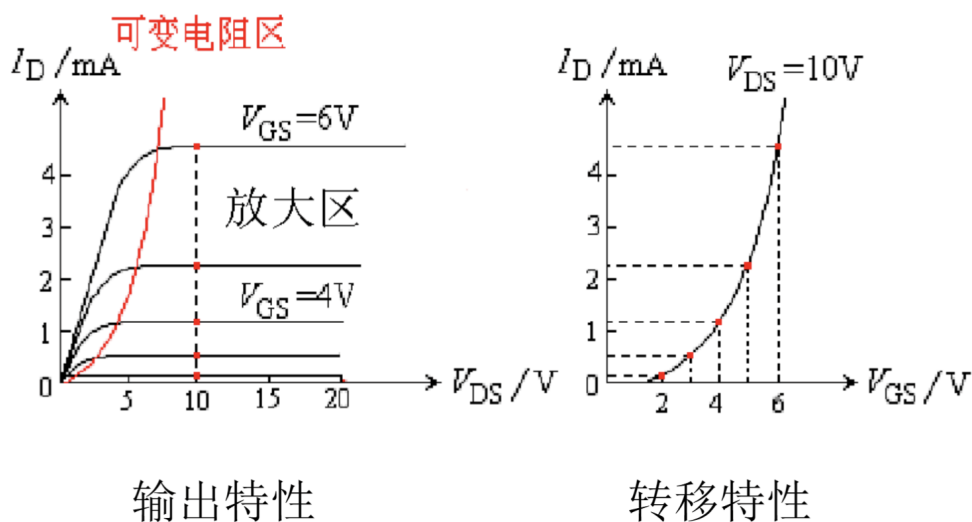
场效应管也有三种连接方式：共源、共栅、共漏，分别对应三极管的共发、共基、共集。 MOS 管的伏安特性也可以用输入曲线和输出曲线来表示，但是 MOS 管的输入电流是栅极电容板的充放电电流，静态时基近似为0，因此再共源连接时不考虑输入特性，而研究输出特性和转移特性。

输出特性

输出特性曲线分为四个区非饱和区、饱和区、截止区和击穿区。

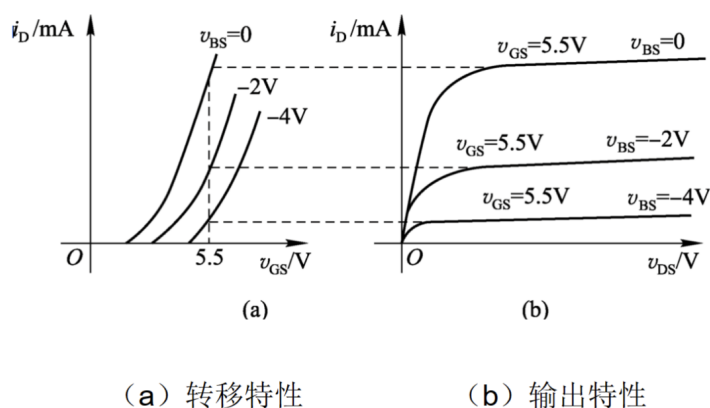
- $V_{GS} < V_{GS(th)}$ 并且 $V_{DS} < V_{GS} - V_{GS(th)}$ 时处在非饱和区。
- $V_{GS} > V_{GS(th)}$ 并且 $V_{DS} > V_{GS} - V_{GS(th)}$ 时, 产生预夹断, 进入饱和区。
- $V_{GS} < V_{GS(th)}$ 时, 导电沟道未形成, 不管 V_{DS} 如何变化, 都有 $i_D = 0$, 截止区。

当 V_{DS} 过大时, 预夹断点移动到源区, 直接将电子拉到漏区, 或者是因为 V_{GS} 过大, 引发 SiO_2 绝缘层击穿, 击穿区。



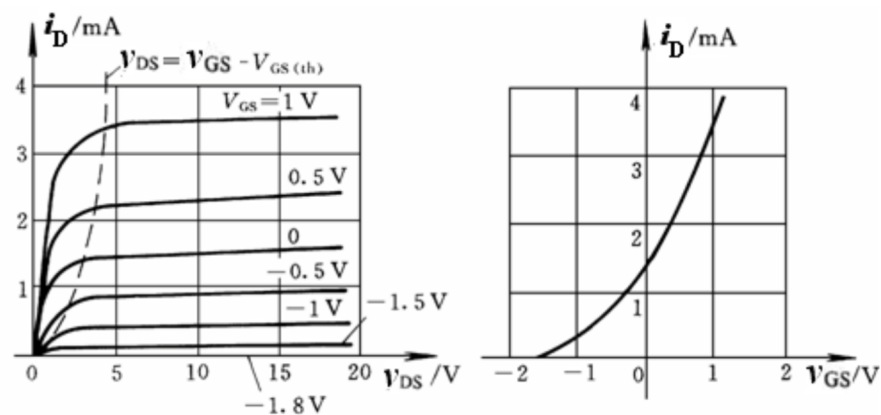
衬底效应

当源极没有与栅极相连时, 会产生负值电压 V_{BS} , 相当于在 PN^+ 结上加上反偏电压, 阻挡层宽度增加, 使得 $V_{GS(th)}$ 增大, 当 V_{GS} 不变时, V_{BS} 增大, i_D 减小。所以 V_{BS} 对 i_D 也有控制作用, 但是比 V_{GS} 的作用小的多, 又称衬底为背栅极。



DMOS

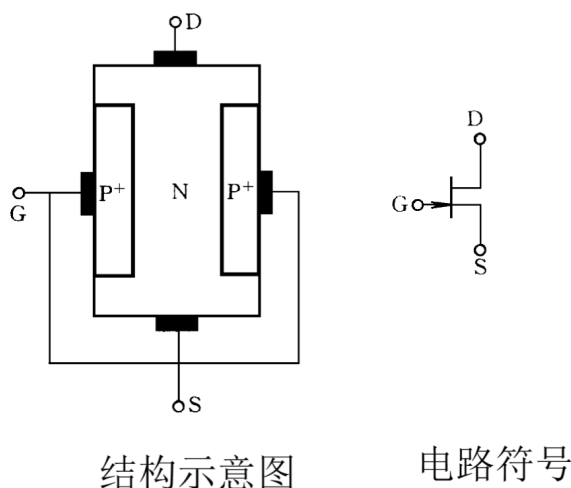
在制作时就有沟道, 电路符号与 $EMOS$ 不同的是, 虚线用实线代替。增大 V_{GS} 时, 沟道加深, V_{GS} 减小, 沟道变浅, $V_{GS} < V_{GS(th)}$ 时, 沟道消失, 此时 V_{GS} 为负值。



PMOS的输入输出特性曲线图像与NMOS是关于原点对称的，上半部分是N型，下半部分是P型，所以只需要记住N沟道的图像就可以了

结型管

结构



结构示意图

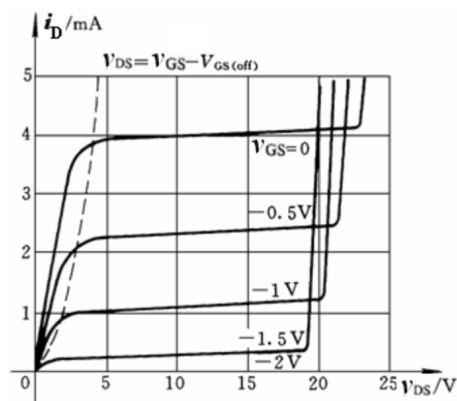
电路符号

两个 P^+ 区连在一起作为栅极。 PN 结需要反偏，反偏电压增加，阻挡层宽度增加，增加到一定大小时，两边空间电荷区靠在一起，沟道夹断，这个电压称为 $V_{GS(off)}$ 。

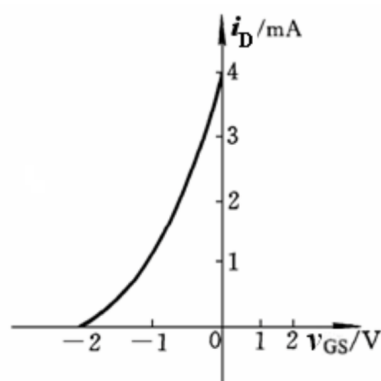
如果给管子加上 V_{DS} ，和EMOS类似， $V_{GD} = V_{GS} - V_{DS}$ ， V_{GS} 本身就是负的，当 V_{DS} 增加时， V_{GD} 增加，阻挡层宽度增加，靠近 D 处的阻挡层变窄，当 $V_{GD} = V_{GS(off)}$ ，近漏端夹断。结型场效应管同样也有沟道长度调制效应。

特性

虚线左边是非饱和区，虚线右边是饱和区，又叫放大区， $i_D = 0$ 对应 $V_{GS(off)}$ ，当 V_{DS} 达到某一值时，管子会击穿， $|V_{GS}|$ 越大，击穿所需 V_{DS} 的值越小。



输出特性



转移特性

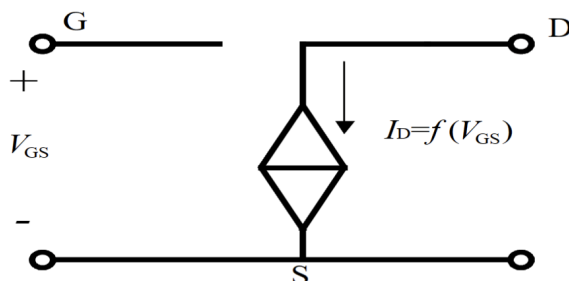
从上面的图像可以发现， V_{DS} 与 V_{GS} 符号是相反的，从这一点可以判断一个管子是否是 $JEFT$ ， $JEFT$ 工作在可变电阻区（非饱和区）或者恒流区（饱和区、放大区），前提是 $|V_{GS}| < |V_{GS(th)}|$ ，即 P 型管应有 $0 < V_{GS} < V_{GS(th)}$ ， N 型管应有 $V_{GS(th)} < V_{GS} < 0$

P 沟道的输入输出特性曲线图像与 N 沟道的是关于原点对称的，上半部分是 N 型，下半部分是 P 型，所以只需要记住 N 沟道的图像就可以了

另外 P 沟道 V_{GS} 需大于零，保证 PN 结反偏

等效电路

大信号等效电路



$$I_D = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2l} (V_{GS} - V_{GS(th)})^2$$

$$I_g = 0$$

若考虑沟道长度调制效应（做题一般不考虑），上式修正为

$$I_D = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2l} (V_{GS} - V_{GS(th)})^2 \left(1 - \frac{V_{DS}}{V_A}\right) = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2l} (V_{GS} - V_{GS(th)})^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

其中 $\lambda = -\frac{1}{V_A}$ ，称为沟道长度调制系数， V_A 由工艺决定。

小信号等效电路

$$i_d = g_m v_{gs} + \frac{v_{ds}}{r_{ds}}$$
$$g_m = 2 \frac{\mu_n G_{ox} W}{2l} (V_{GS} - V_{GS(th)}) = 2 \sqrt{\frac{\mu_n G_{ox} W}{2l} I_{DQ}}$$

其中 $V_{GS} = V_{GSAQ}$

六种场效应管比较

| 类型 | 电路符号 | 转移特性 |
|---------|---------------------------|-----------------------------------|
| $NEMOS$ | 箭头向内，中间虚线 | $V_{GS} > 0$ ，曲线上升 |
| $NDMOS$ | 箭头向内，中间实线 | V_{GS} 可以小于0，曲线上升 |
| $PEMOS$ | 箭头向外，中间虚线 | V_{GS} 小于0，曲线下降 |
| $PDMOS$ | 箭头向外，中间实线 | V_{GS} 可以大于0，曲线下降 |
| $NJEFT$ | 箭头向内，中间实线， G 与 S 直接相连 | $V_{GS} < 0$, $V_{GS} > 0$ ，曲线上升 |
| $PJEFT$ | 箭头向外，中间实线， G 与 S 直接相连 | $V_{GS} > 0$, $V_{GD} < 0$ ，曲线上升 |

判断工作区域

| 区域 | 条件 |
|-------------|--|
| 临界饱和和工作条件 | V_{GS} 使沟道开启, $ V_{DS} = V_{GS} - V_{GS(th)} $ |
| 饱和区（放大区）条件 | V_{GS} 使沟道开启, $ V_{DS} > V_{GS} - V_{GS(th)} $ |
| 非饱和区（可变电阻区） | V_{GS} 使沟道开启, $ V_{DS} < V_{GS} - V_{GS(th)} $ |

不管是 N 型还是 P 型，增强型还是耗尽型，上式都成立

放大器基础

放大器基本概念

放大的原理和实质

符号

直流用大写字母，交流用小写字母

下标

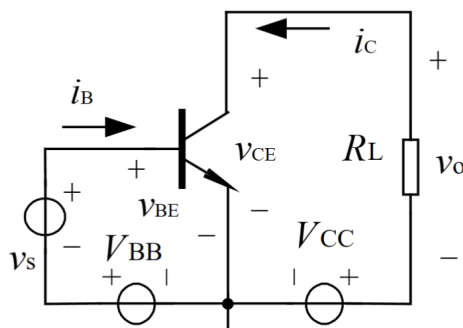
下表的两个字母代表两个点，有顺序，例如

$$V_{BE} = -V_{EB}$$

直流用大写，交流用小写，瞬时信号符号大写下标小写

$$v_{BE} = V_{BE} + v_{be}$$

原理



$$v_{BE} = V_{BE} + v_{be}$$

$$i_B = I_{BQ} + i_{bm}$$

由此可以写出

$$i_C = \beta i_b = \beta I_{BQ} + \beta i_b = I_{CQ} + I_{cm} \sin \omega t$$

$$v_{CE} = V_{CC} - i_C R_L = V_{CC} - I_{CQ} R_L - I_{cm} R_L \sin \omega t$$

其中 $-I_{CQ} - I_{cm} R_L \sin \omega t = -V_{om} \sin \omega t = v_o$ 是交流信号 v_s 在放大器作用后输出的信号。只要 R_L 足够大，输出信号振幅 V_{om} 就有可能大于输入信号振幅 V_{sm}

下面进行功率分析：

发射结消耗功率：

$$P_I = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_{BE} i_B d\omega t = V_{BE} I_{BQ} + \frac{1}{2} V_{sm} I_{bm}$$

电源 V_{CC} 提供功率：

$$P_D = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{CC} i_C d\omega t = V_{CC} I_{CQ}$$

负载 R_L 上得到的功率：

$$P_L = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_C^2 R_L d\omega t = v_o i_C = I_{CQ}^2 R_L + \frac{1}{2} I_{cm}^2 R_L$$

其中 $v_o = -i_C R_L$

加到三极管上的电压：

$$P_C = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_C v_{CE} d\omega t = V_{CC} I_{CQ} - I_{CQ}^2 R_L - \frac{1}{2} I_{cm}^2 R_L$$

根据上面的式子，可以得到：

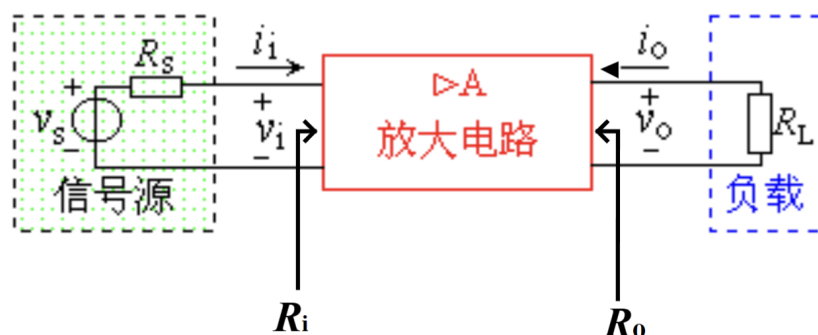
$$P_D = P_L + P_C$$

上面分析表明, V_{CC} 保证了三极管工作在放大区, 而且也是提供能量的电源, 小信号放大所需的能量来自 V_{CC} 。三极管起到能量转换器的作用, 即将 V_{CC} 提供的部分功率转换为输出信号的功率。

放大器的性能指标

一、输入电阻、输出电阻

放大器可以看作有源四端网络



输入电阻 R_i

对于输入信号, 放大器可以看作负载。用等效电阻 R_i 表示

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

R_i 越大, 放大器输入端口得到的电压信号越大。 R_i 越小输入端口得到的电流信号越小。若此放大器的前面是另一极放大器, R_i 是前一极的负载。

输出电阻 R_o

从放大器的输出端向放大器看去, 考虑到信号源的内阻, 将输出电阻定义修正为, 在独立电压源开路 $v_s = 0$ 或独立电流源开路 $i_s = 0$ 时, 保留信号源内阻, 由 R_L 两端向放大器看进去的等效电阻。可以用戴维南定理将电路简化

$$R_o = -\frac{v_{ot}}{i_{on}}$$

其中, v_{ot} 是 R_L 断路, v_i 或 i_i 在放大器输出端产生的开路电压, i_{on} 是将 R_L 短接, v_i 或 i_i 在输出端产生的短路电流。

二、增益

增益又被称为放大倍数, 用 A 表示, 定义为放大器输出量与输入量的比值

四种增益

电压增益:

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

电流增益:

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

互导增益:

$$A_g = \frac{i_o}{v_i}$$

互阻增益：

$$A_r = \frac{v_o}{i_i}$$

其中， v_i 是三极管基极到地的电压

负载开路 and 短路时的增益

为了表明 R_L 对增益的影响，引入负载开路或短路时的增益。

R_L 开路时的电压增益

$$A_{vt} = \frac{v_{ot}}{v_i}$$

R_L 趋近于无穷时， $A_v = A_{vt}$

利用关系式

$$v_o = v_{ot} \frac{R_L}{R_o + R_L}$$

可以得到

$$A_v = A_{vt} \frac{R_L}{R_o + R_L}$$

R_o 越小， A_v 越大， R_L 对 A_v 影响也越小，当 $R_o \ll R_L$ 时， A_v 达到最大，与 R_L 几乎无关。

R_L 短路时的电流增益定义为

$$A_{in} = \frac{i_{on}}{i_i}$$

利用关系式

$$i_o = i_{on} \frac{R_o}{R_o + R_L}$$

可以得到

$$A_i = A_{in} \frac{R_o}{R_o + R_L}$$

R_o 越大， A_i 越大， R_L 对 A_i 的影响越小，当 $R_o \gg R_L$ 时， $A_i \approx A_{in}$ ， A_i 达到最大，与 R_L 几乎无关。

源增益

当输入电压源激励时， v_i 是 v_s 在 R_i 上的分压值，即

$$v_i = v_s \frac{R_i}{R_s + R_i}$$

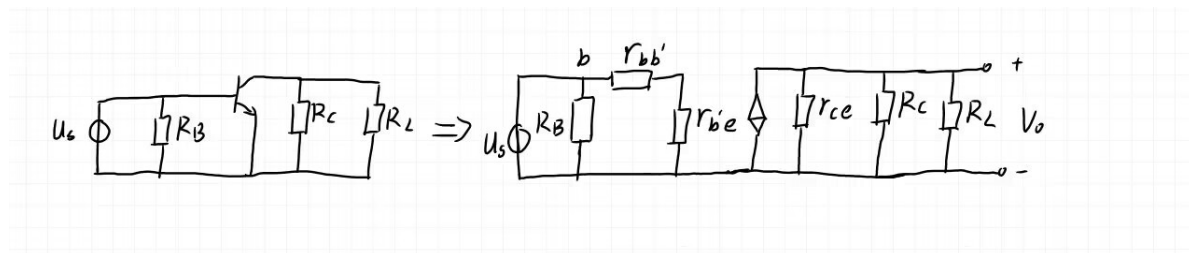
相应的源电压增益为

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

R_i 越大， A_{vs} 就越大。当 $R_i \gg R_s$ 时， $A_{vs} \approx A_v$ ，达到最大，且与 R_s 无关

放大电路的输入输出电阻与增益

对于下面的等效电路



输入输出电阻

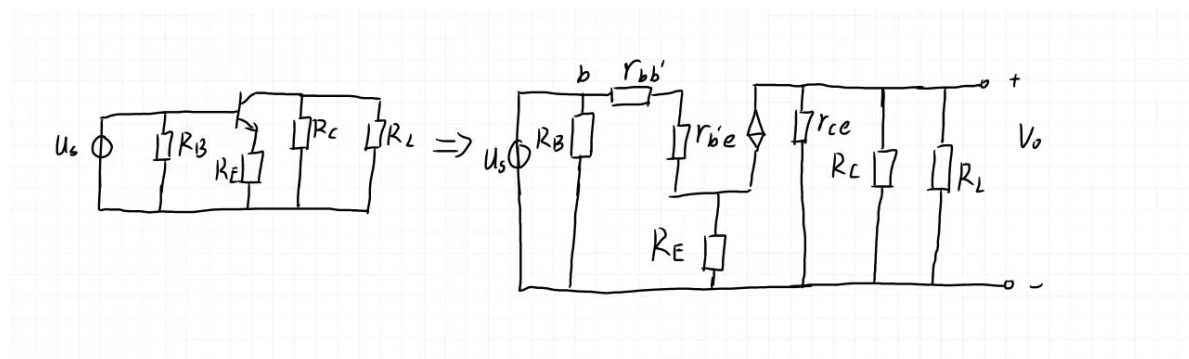
$$\begin{cases} R_i = R_B // (r_{bb'} + r_{be}) \\ R_o = r_{ce} // R_C \end{cases}$$

增益

$$\begin{cases} A_u = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be}} \\ A_s = \frac{R_i}{R_s + R_i} A_u \end{cases}$$

其中 $r_{bb'} = 0$, R_L 为负载, 不算在输出电阻内

如果连接了 R_E



输入电阻变为

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

增益

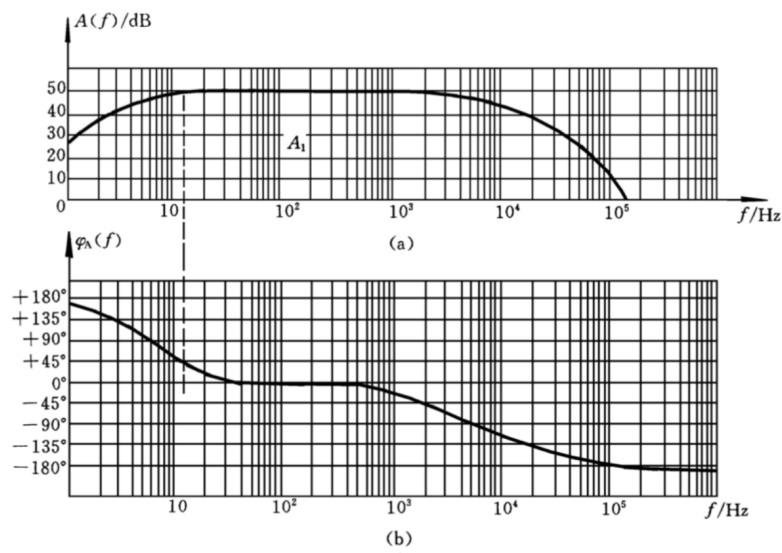
$$\begin{cases} A_u = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)R_E} \\ A_s = \frac{R_i}{R_s + R_i} A_u \end{cases}$$

四种放大器

放大器有四种增益表达式, 对应就有四种功能的放大器, 它们的区别表现在对 R_s 和 R_i 的要求上, 对应的功能也不同。

| 类型 | 增益 | 对 R_i 要求 | 对 R_o 要求 | 功能 |
|-------|---------------|---------------|---------------|---------|
| 电压放大器 | A_v, A_{vs} | $R_i \gg R_s$ | $R_o \ll R_L$ | 小电压变大电压 |
| 电流放大器 | A_i, A_{is} | $R_i \ll R_s$ | $R_o \gg R_L$ | 小电流变大电流 |
| 互导放大器 | A_g, A_{gs} | $R_i \gg R_s$ | $R_o \gg R_L$ | 小电压变大电流 |
| 互阻放大器 | A_r, A_{rs} | $R_i \ll R_s$ | $R_o \ll R_L$ | 小电流变大电压 |

频率响应



规定 $A(\omega)$ 自 A_i 下降到 $\frac{\sqrt{2}}{2}$ 倍所对应的频率分别为上限频率 f_H 和下限频率 f_L ，通频带

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

失真

基本放大器