



#PN结

- 半导体

- 本征半导体
- 杂质半导体 (多子决定是N是P)

• N型半导体 (+)

(+4) • (+5) • (+4)

(+4)

• P型半导体 (-)

(+4)

(+4) • (+3) • (+4)

(+4)

多子浓度由杂质含量决定
少子浓度由温度(main)决定

• 半导体载流子运动

- 漂移运动 (电场作用)

$$I = I_p + I_n$$

- 扩散运动 (浓度差)

- 爱因斯坦方程

$$V_T = \frac{kT}{q} = 26\text{mV} \text{ (常温)}$$

近似

- PN结

1. 记忆: PN结典型厚度为 $0.5\mu\text{m}$
2. 过程: (PN结可不对称)

交界面两侧有浓度差

↓
多子打散

↓
复合

↓
形成空间电荷层/阻挡层/耗尽/高阻区

↓
内建电场

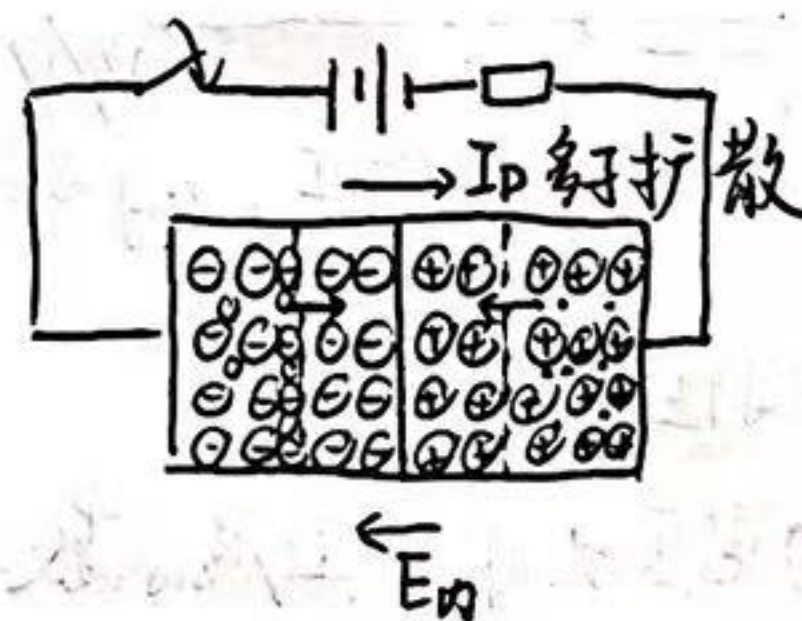
阻碍多子扩散

加速少子漂移

↓
动态平衡, 净电流=0

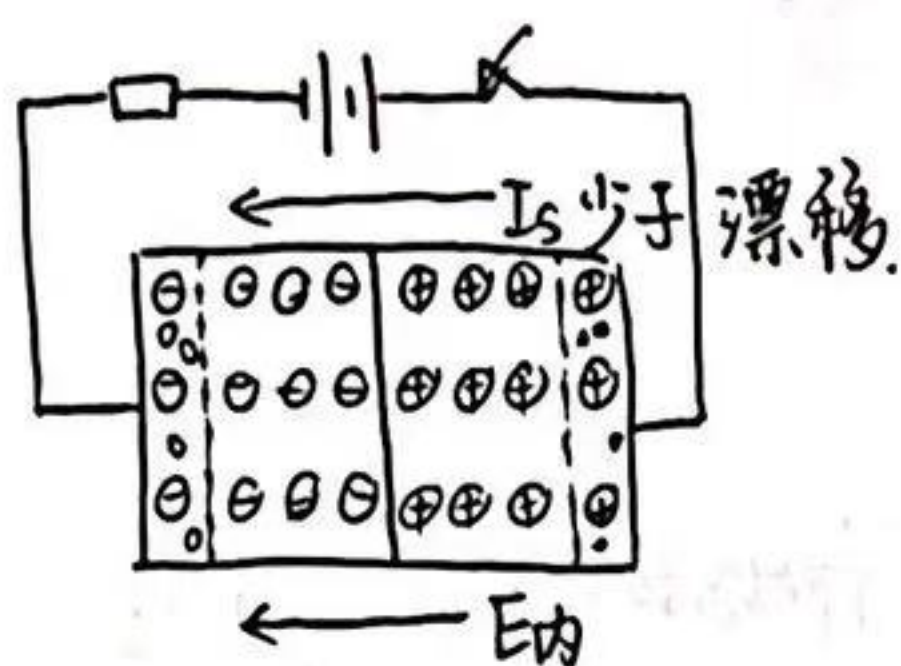
3. 偏置PN结

- 正偏: PN结变薄



- 外加电场与 E_n 相反
- 多子扩散 ↑ 少子漂移 ↓
- 电流近似为多子扩散电流

• 反偏: PN结变厚

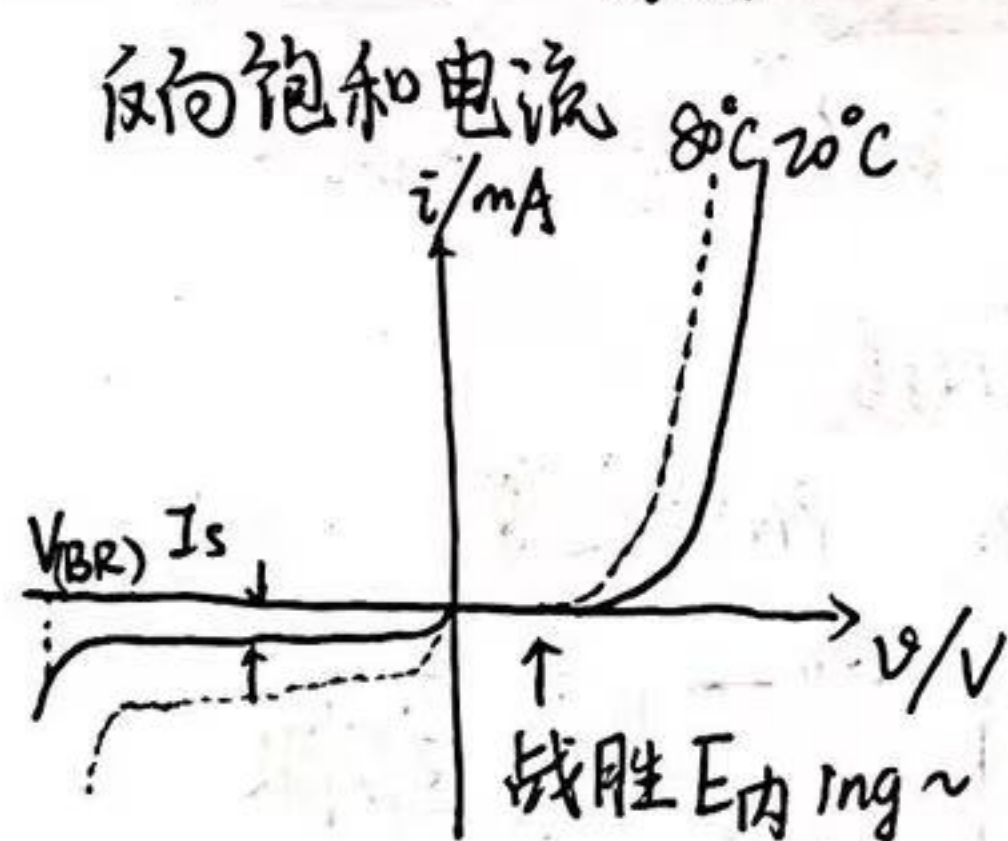


- 外加电场与 $E_{内}$ 同向
- 少子漂移 \uparrow 多子扩散 \downarrow
- 反向电流近似为少子漂移电流
- 少子浓度少, 故反向电流很小
- 少子浓度与 T 有关, 与外加电压无关
- 反向饱和电流与 T 有关

4. PN结的单向导电性与 $V-I$ 特性

$$I = I_s (e^{V/V_T} - 1)$$

\uparrow $\quad \quad \quad \uparrow$
反向饱和电流 $\quad \quad \quad 26mV$



• 温度特性 --- 80°C

PN结正向电压具有负温度系数 (U 左移)

• 击穿特性

• 雪崩击穿 $T \uparrow U_Z \uparrow \alpha > 0$

加速的漂移运动撞击价电子
低掺杂

• 齐纳击穿 $T \uparrow U_Z \downarrow \alpha < 0$

外加电场破坏共价键
高掺杂

$T \uparrow$ 耗尽层 $d \downarrow U_Z \downarrow \alpha < 0$

• 说明:

- 反向击穿电压 $\begin{cases} 4V \text{以下} & \text{齐纳} \\ 4V \sim 7V & \text{都有} \\ 7V \text{以上} & \text{雪崩} \end{cases}$

- 击穿 $\begin{cases} \text{反向击穿: 可逆} \\ \text{热击穿: 反向} I \cdot \text{反向} V > \text{允许耗散} P \end{cases}$

5. PN结电容

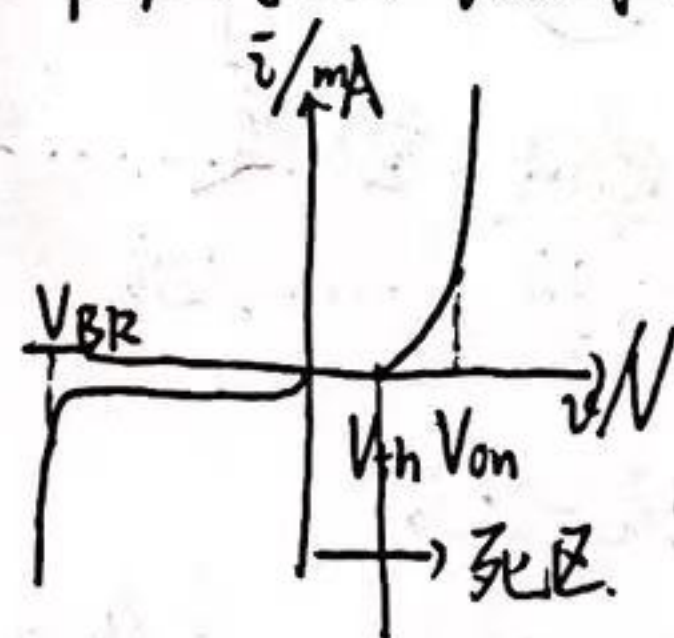
- 正偏 main: 扩散电容
- 反偏 main: 势垒电容
- 非线性, 几十 pF

二极管

1. 二极管分类

2. 二极管伏安特性与参数

- 死区: 开启电压 V_{th} (不是截止!)
- 指数规律
- 恒压等效 V_{on} 导通电压



3. Si 管, Ge 管比较

	Si	Ge
V_{th}	0.5V	0.1V
V_{on}	0.7V	0.3V
I_R 反向电流	较小 (nA)	较大 (μA)
V_{BR} 击穿电压	较大	较小

4. 二极管的主要参数

最大整流电流 I_F
反向击穿电压 V_{BR}
反向电流 I_R



5. 含二极管电路的分析

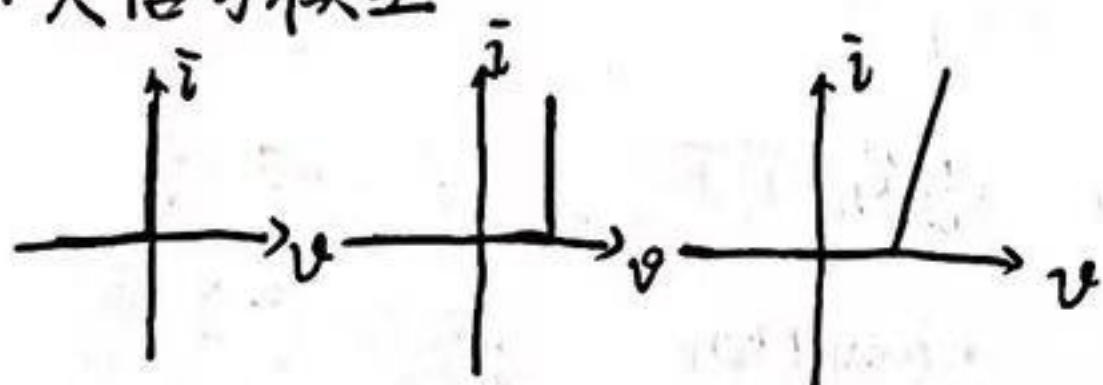
① 图解法

② 模型法

小信号模型

$$r_d = \frac{dv_e}{di} \approx \frac{V_T}{i} = \frac{26 \text{ (mV)}}{I_{DQ} \text{ (mA)}}$$

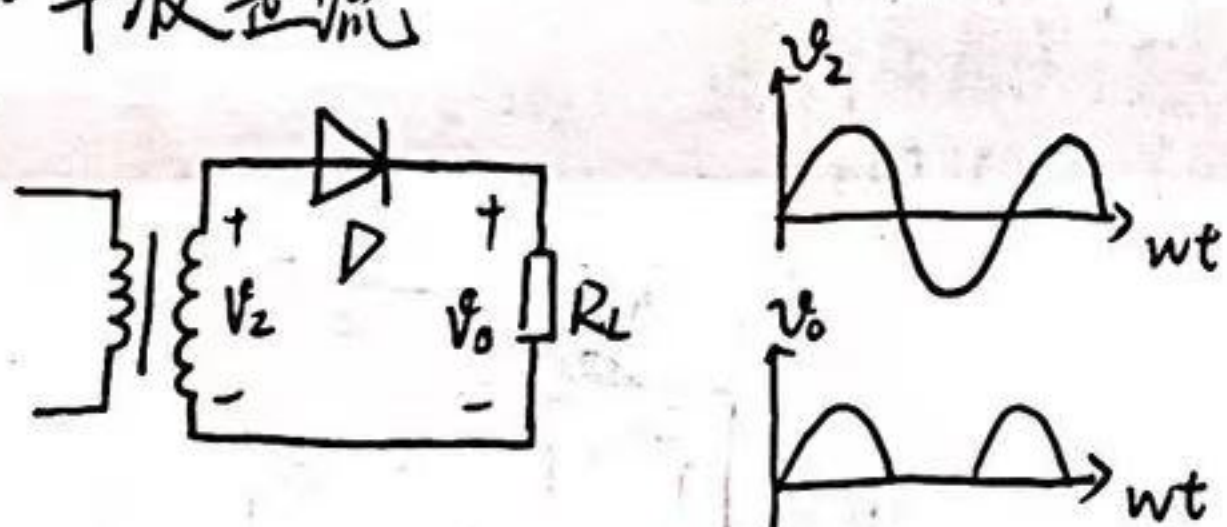
大信号模型



二极管基本应用电路分析

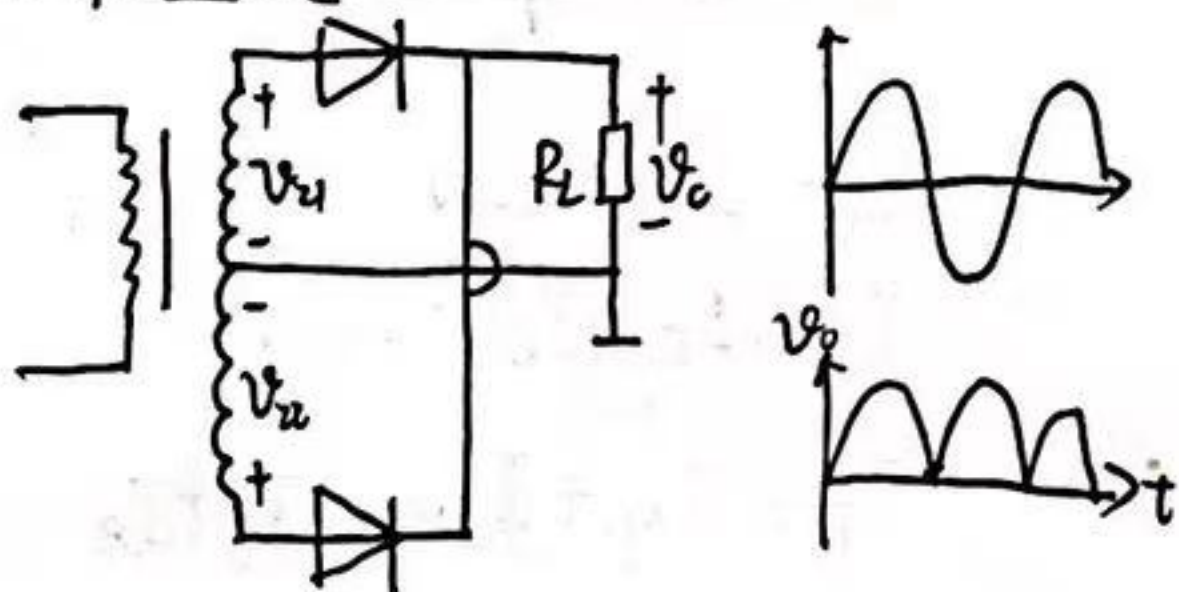
1. 整流电路

• 半波整流



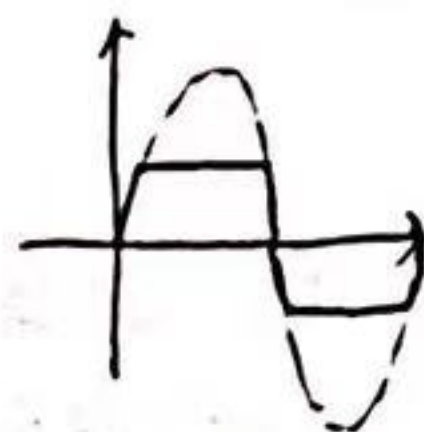
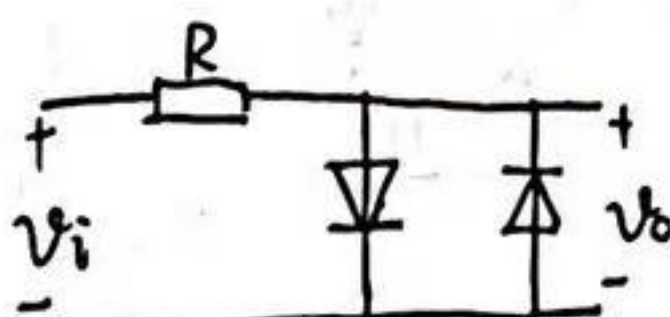
$$V_o(\text{AV}) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi v_2 = \frac{2\sqrt{2} V_2}{2\pi} = 0.45 V_2$$

• 全波整流

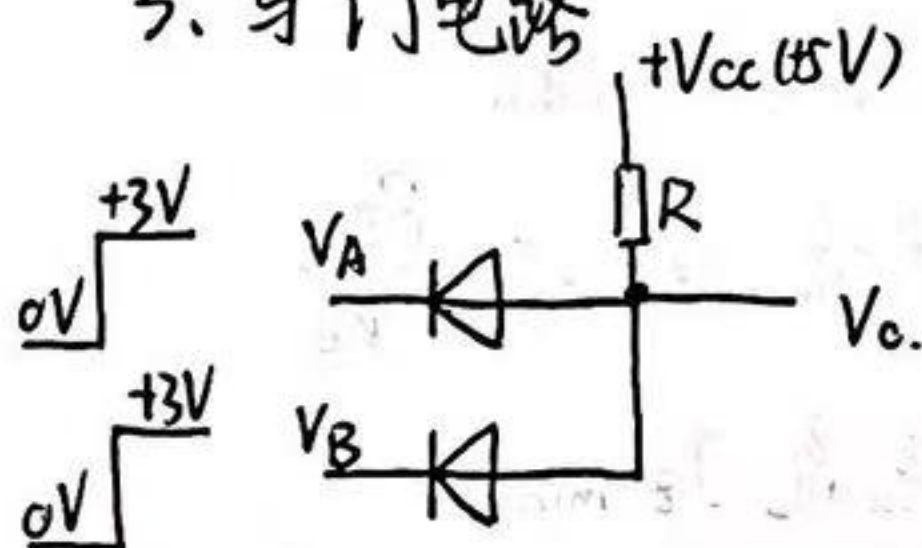


$$V_o(\text{AV}) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \sqrt{2} \sin \omega t d\omega t = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_2 \approx 0.9 V_2$$

2. 限幅电路

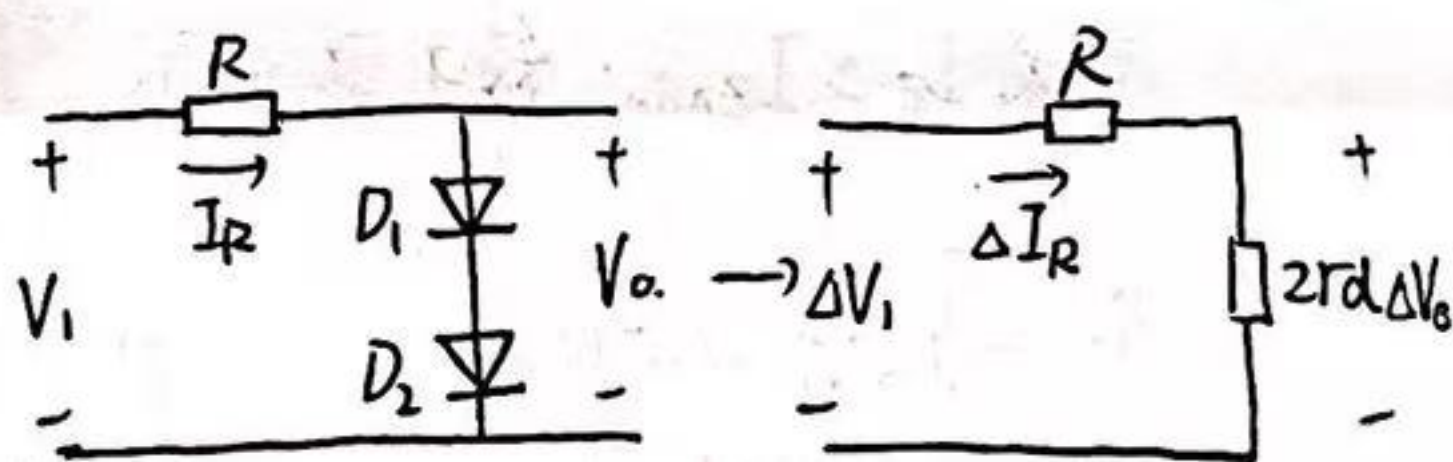


3. "与"门电路



$$V_o = V_A \times V_B$$

4. 低压稳压电路



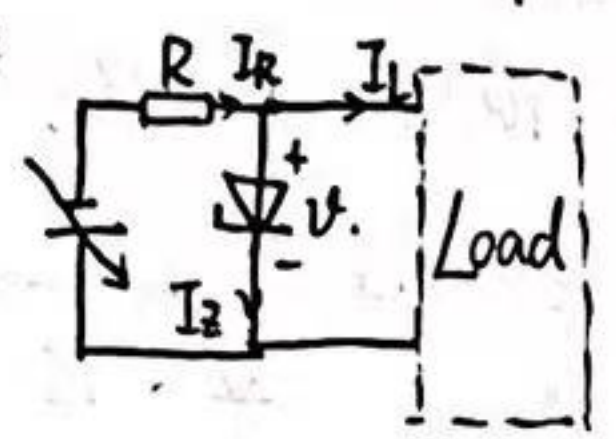
小信号分析:

$$\Delta V_o = \frac{2r_d}{R+2r_d} \Delta V_1 \approx \frac{2r_d}{R} \Delta V_1$$

$$\text{其中 } r_d \approx \frac{V_T}{i} = \frac{26 \text{ (mV)}}{I_{DQ} \text{ (mA)}}$$

各种二极管 (不管怎样先判工作状态)

1. 稳压二极管



• 稳定电压 V_Z

• 动态电阻 $r_Z = \frac{\Delta V_Z}{\Delta I_Z}$

* 最大允许耗散功率 P_{ZM}

* 最大稳定电流 $I_{Zmax} = \frac{P_{ZM}}{V_Z}$

* 最小稳定电流 $I_{Z(min)}$

- 接入负载

$$\frac{V_i - V_Z}{R} = I_L + I_Z$$

要求 $I_Z \geq I_{Zmin}$ 故 I_L 需较小

2. 发光二极管 (LED)

• 正偏时发光

• V_{th} 、 V_{on} 比普通大

1.3V ~ 2.4V mA 电流

• $I \uparrow$ 亮 \uparrow



3. 光电二极管

• 反偏

• 正向: 小反向饱和电流, 暗电流

• 反向: 光电流



4. 变容二极管

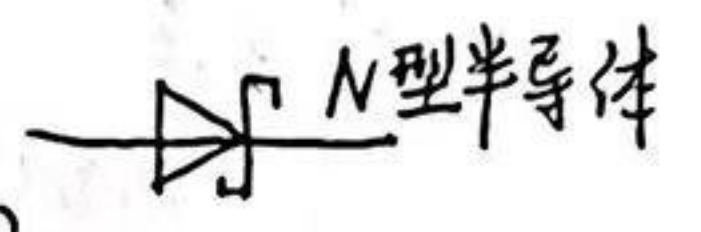
• 反向偏置工作

• 如 5-300 pF 高频



5. 肖特基二极管

关断时间短
导通电压低 (0.4V)



BJT

1. 结构类型与工作原理

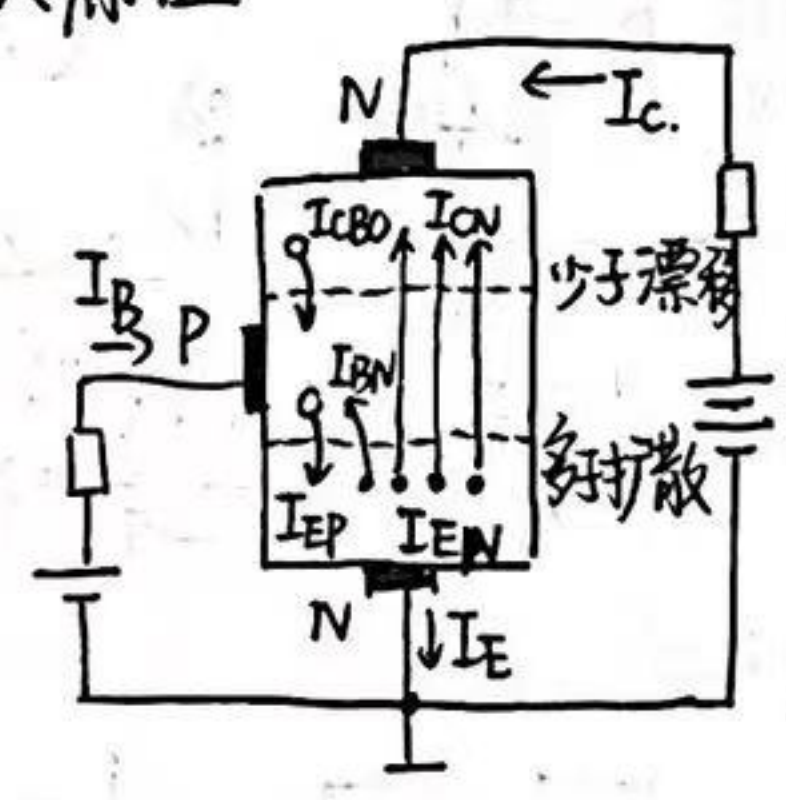
• emitter: 掺杂浓度高

base: 薄, 掺杂浓度低

collector: 结面积大

• PNP, NPN

• 放大原理



$$I_C = I_{CBO} + I_{CN}$$

$$I_B = I_{EP} + I_{BN} - I_{CBO}$$

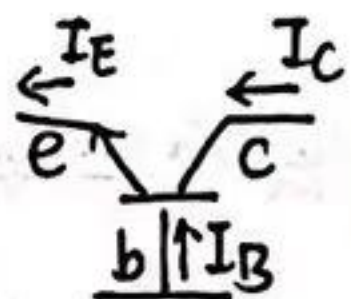
$$I_E = I_{EP} + I_{EN} = I_C + I_B$$



2. 交流信号下三种基本组态 (e.b input)

• 共基 CB

$$\alpha = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_E} = \frac{I_{CN}}{I_E}$$



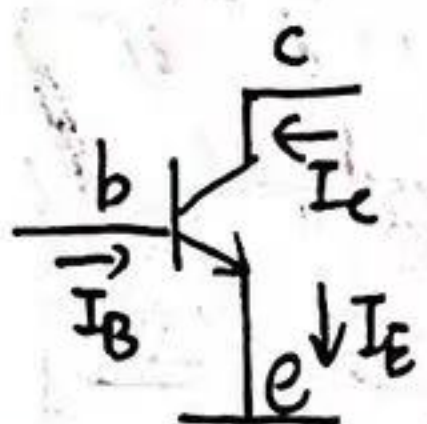
$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} \approx \alpha I_E$$

共基极直流电流放大系数

$$\alpha = 0.98 \sim 0.998$$

• 共射 CE

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$



$$I_C \approx \beta I_B$$

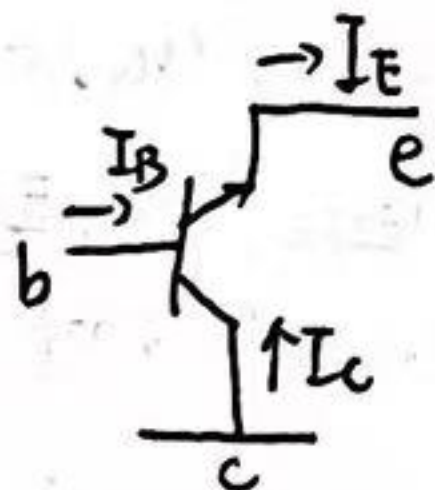
$$\beta = 49 \sim 499$$

共射极直流放大系数

这2个有放大, 输入都是 I_B

• 共集 CC

$$I_E \approx (1+\beta) I_B$$



• 条件

发射结正偏 $V_{BE} > 0$
集电结反偏

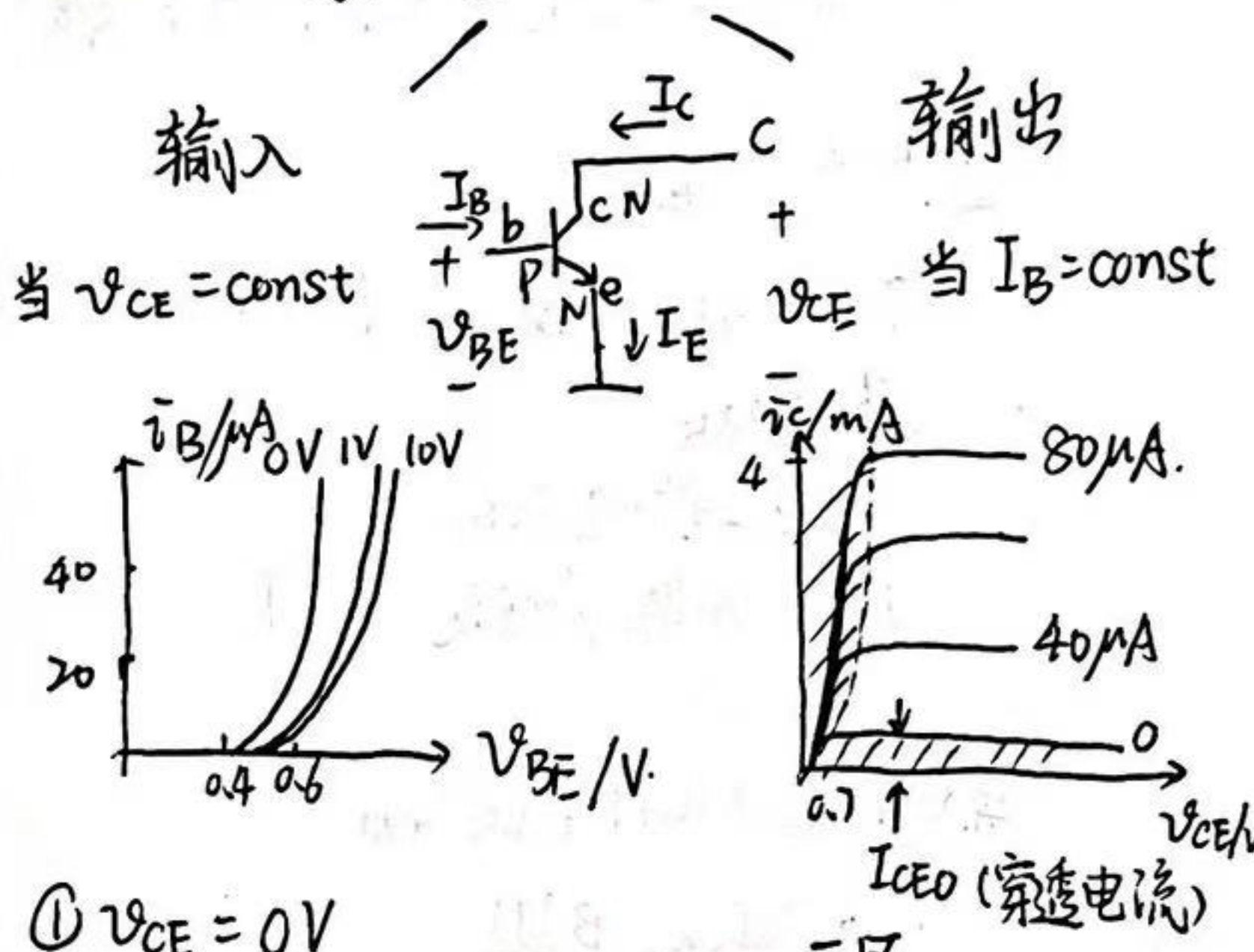
放大的基础

+ 保护 ($-U, R$)

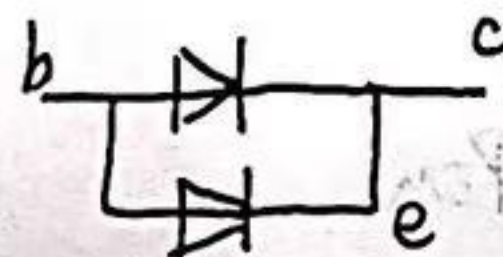
交流下传递 直流下分压/保护 (防止接地)

3. 三极管的伏安特性曲线 (共射)

三端, 2条组曲线族



① $V_{CE} = 0V$



② $V_{CE} = 1V$ (中偏)

此时 $V_{CB} = 0.3V$ 开始反偏, 复合, $i_B \downarrow$

③ $V_{CE} > 1V$

绝大部分被拉到 collector

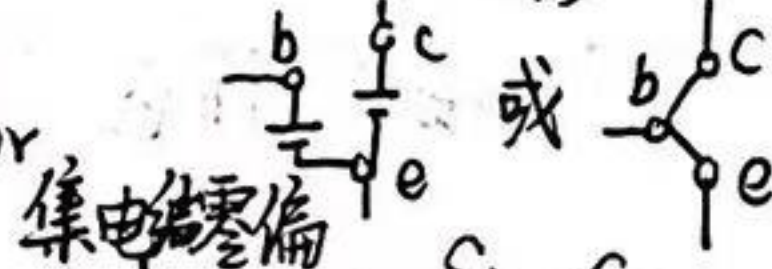
① 截止区

开关断开

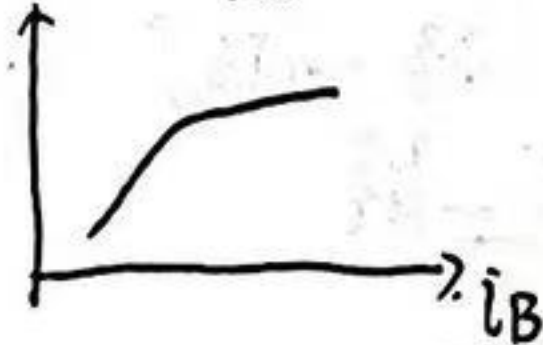
② 放大饱和区

两结正偏

开关闭合



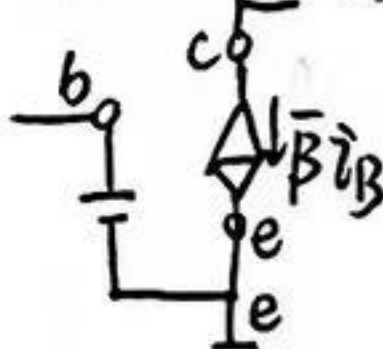
$$i_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} \text{ 大, 放大区}$$



③ 放大区

i_C 受 i_B 控制

与 V_{CE} 无关



PNP 就 $-V_{BE}, -V_{CE}$

4. 三极管相关参数

- 集电结反向饱和电流 I_{CBO}

$$I_c = \alpha I_E + I_{CBO}$$

发射极开路

C与b之间加反向电压的 i (nA)

(单个PN结反向电流, T与少子浓度)

- 穿透电流 I_{CEO}

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

基极开路

c与e之间加电压的 i

$I_{CEO} \downarrow$ 性能 \uparrow 稳定 T

- 集电极最大允许电流 I_{cm}

$i_c > I_{cm}$, $\beta \downarrow$

- 集电极最大允许功耗 P_{cm}

$P > P_{cm}$ 烧

- 反向击穿电压 3个电压

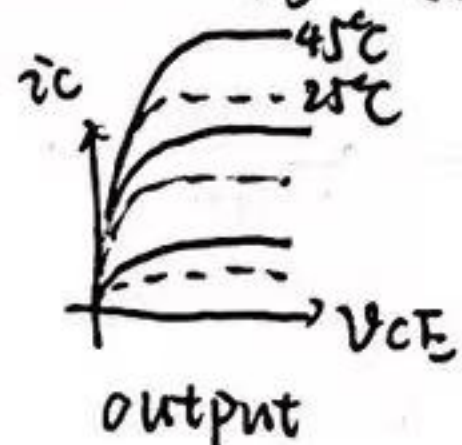
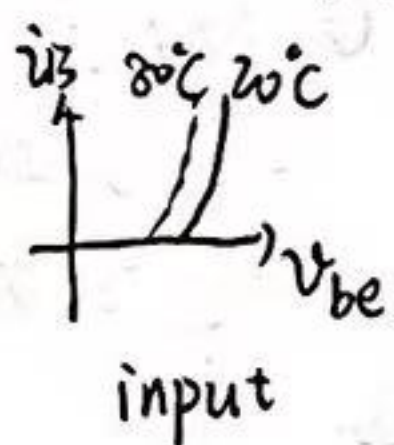
$V_{(BR)CBO}$ $V_{(BR)CEO}$ $V_{(BR)CER}$ \downarrow BE外接R

- 安全工作区

- 温度稳定性

input: $T \uparrow$ $U_{be} \downarrow$ (负温度系数)

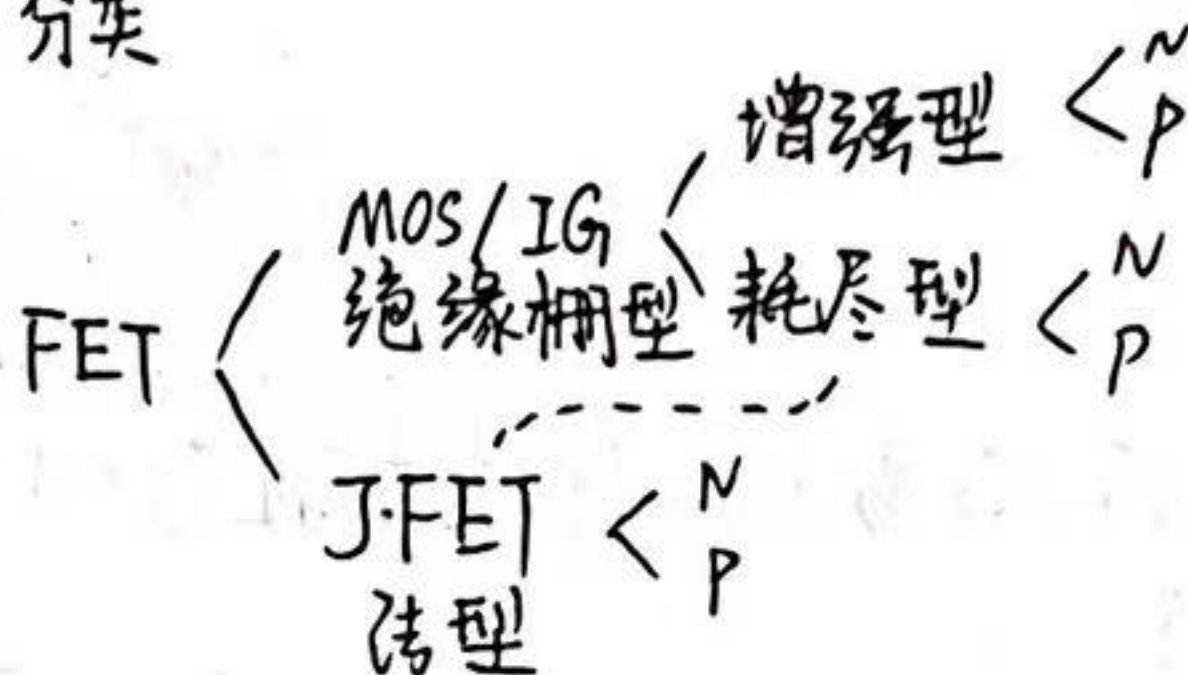
output: $T \uparrow$ 曲线上移 间距 \uparrow



FET (BJT#P过大)

⑥

- 分类

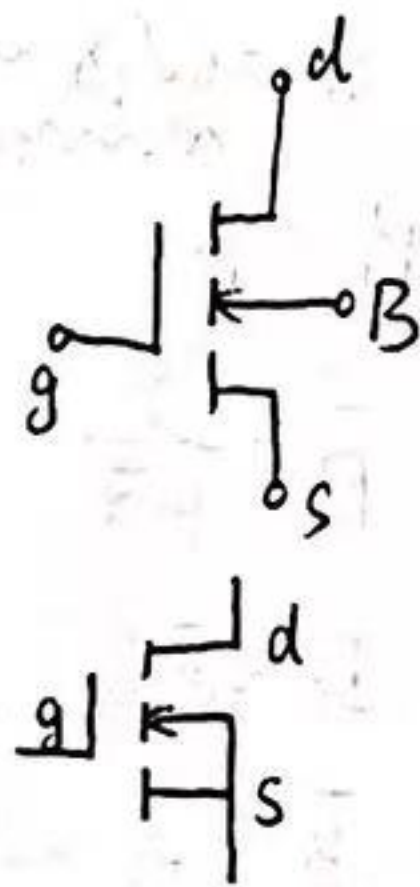
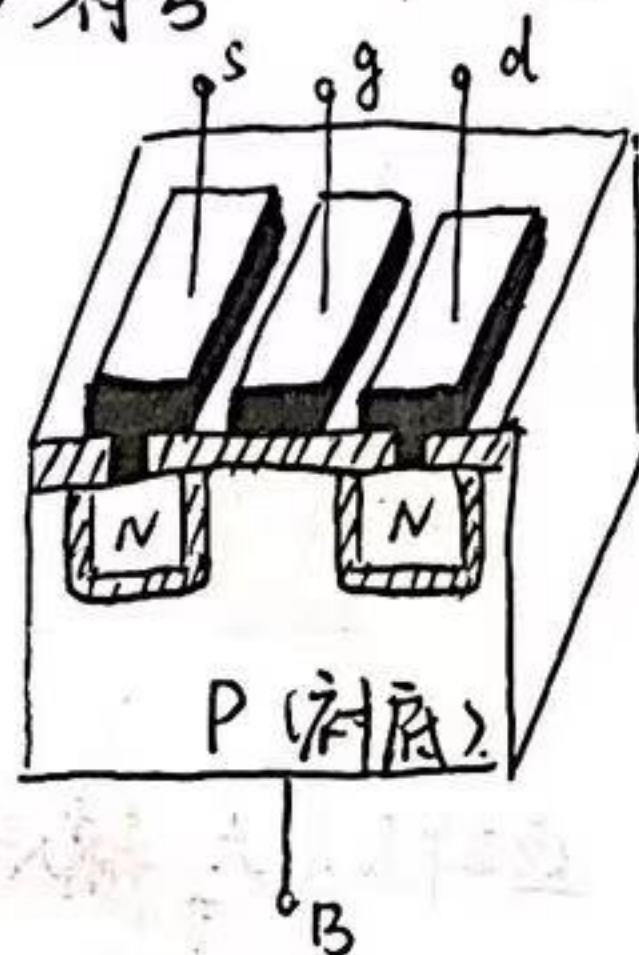


2. 原理 MOS

- N沟道 ~~耗尽型~~ ^{增强型} MOS

- ① 结构 g s d 栅源漏

- ② 符号



- ③ 工作原理

- 1) $U_{DS} = 0, U_{GS} \neq 0$

结论: 电压控制型可变电阻 ($U_{GS} > U_{GS(th)}$)

$U_{GS} \uparrow$ 沟道宽度 \uparrow $R \downarrow$

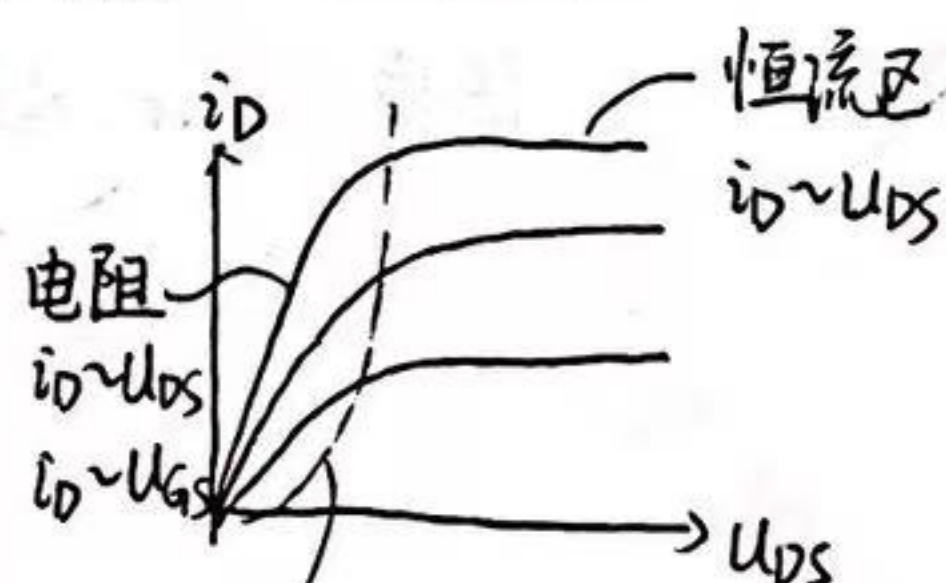
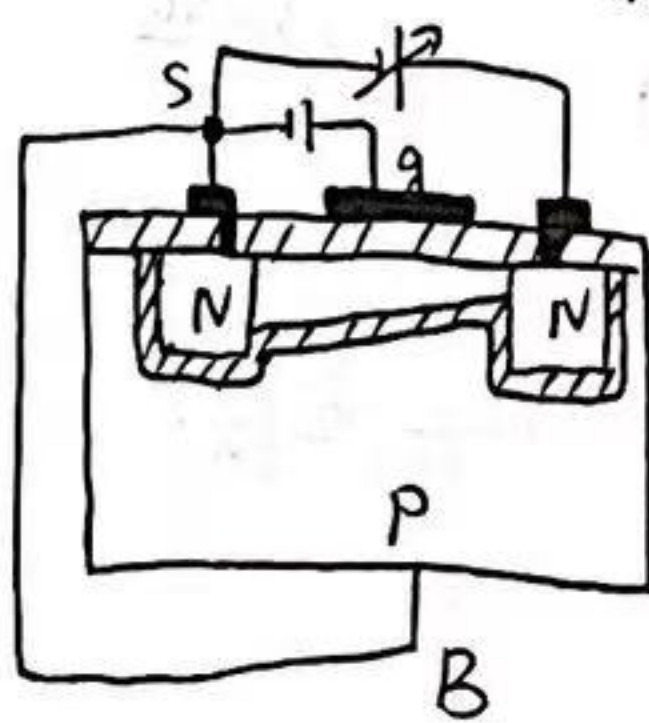
(截止区)

过程: 先有耗尽层, 当 U_{GS} 大于开启电压, 开始出现反型层

- 2) $U_{GS} > U_{GS(th)}$ 不变, $U_{DS} \neq 0$

结论: U_{GS} 控制 i_D , i_D 与 U_{DS} 基本无关

$$(U_{GD} = U_{GS} - U_{DS} \leq U_{GS(th)})$$



预夹断

(不会完全闭合)

③ 技术路线

目标控制路线: U_{GS} 控制 i_D

1) 产生沟道

$$U_{GS} > U_{GS(th)}$$

2) 恒流区工作

大的 U_{DS}

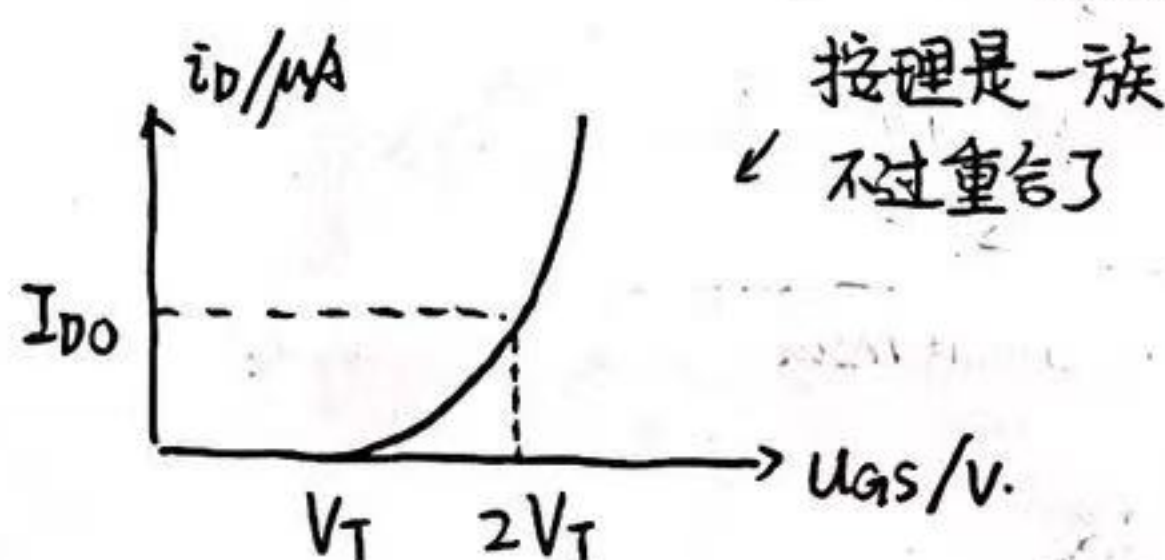
$$U_{GS} - U_{DS} \leq U_{GS(th)}$$

④ 特性曲线

1) 输入曲线? I_g 绝缘

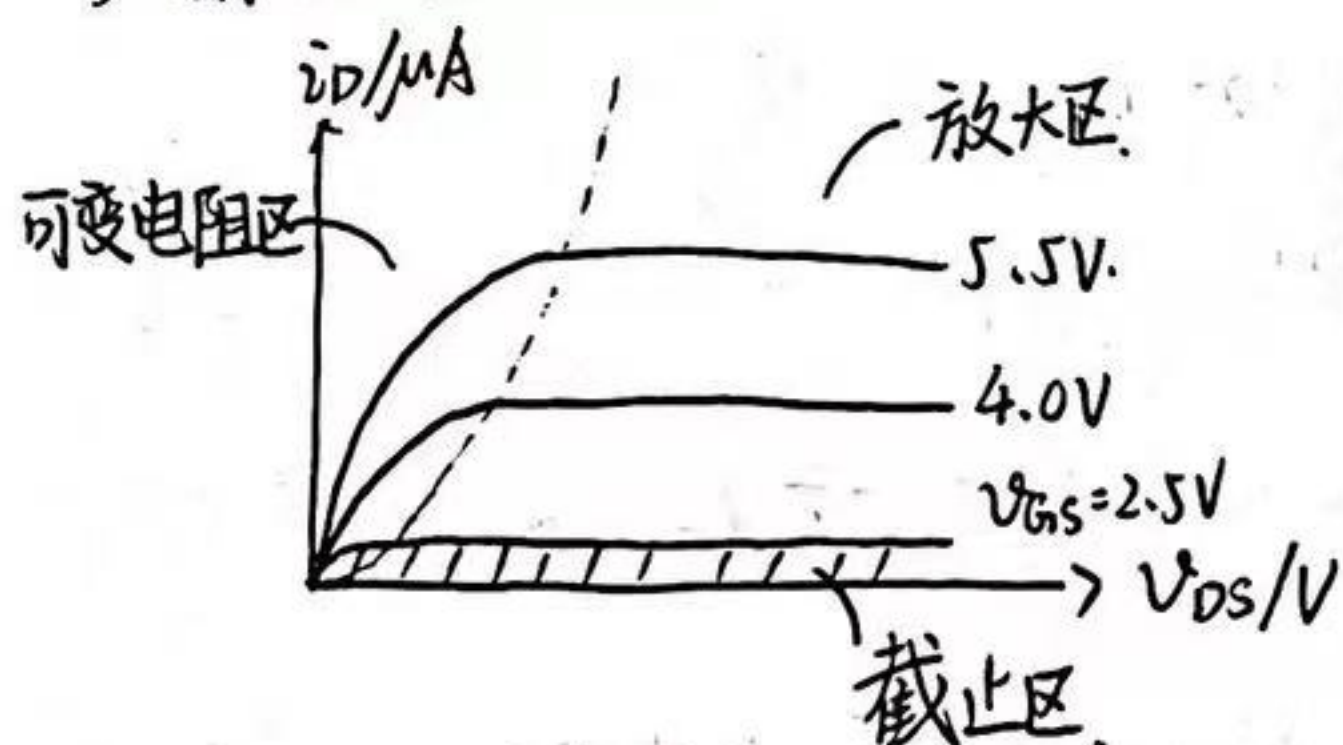
转移特性曲线: 表现 U_{GS} 对 i_D 控制

★ 恒流区 $i_D = f(U_{GS}) | U_{DS} = \text{const}$



$$i_D = I_{D0} \left(\frac{U_{GS}}{V_T} - 1 \right)^2 \quad (\text{都适用})$$

2) 输出曲线



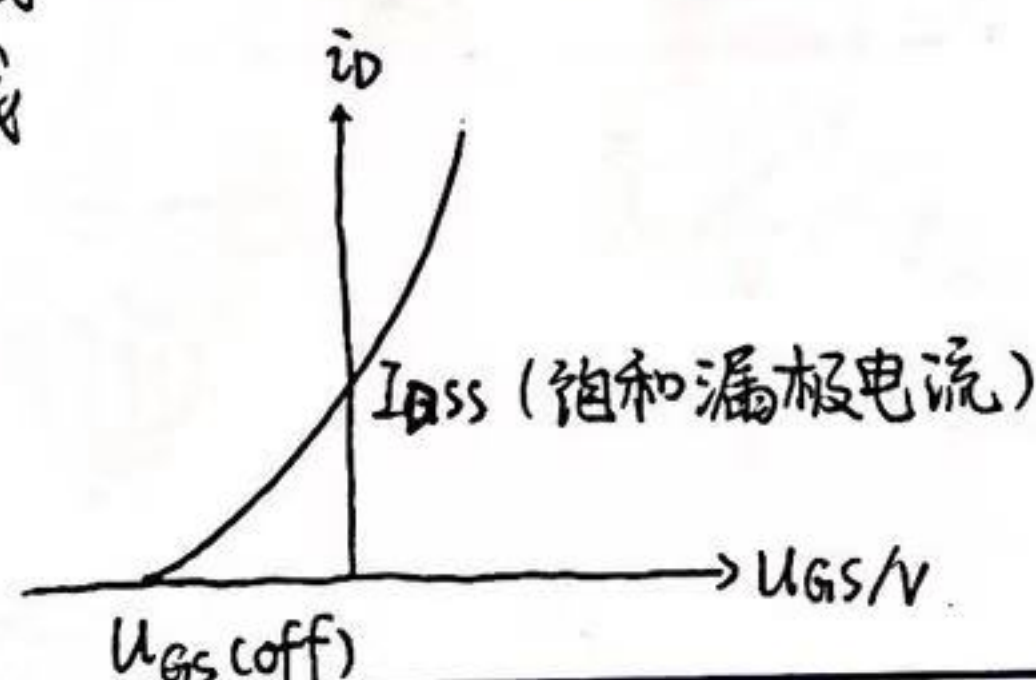
3. N沟道耗尽型 MOS. (SiO₂ 注入正离子)

① 符号

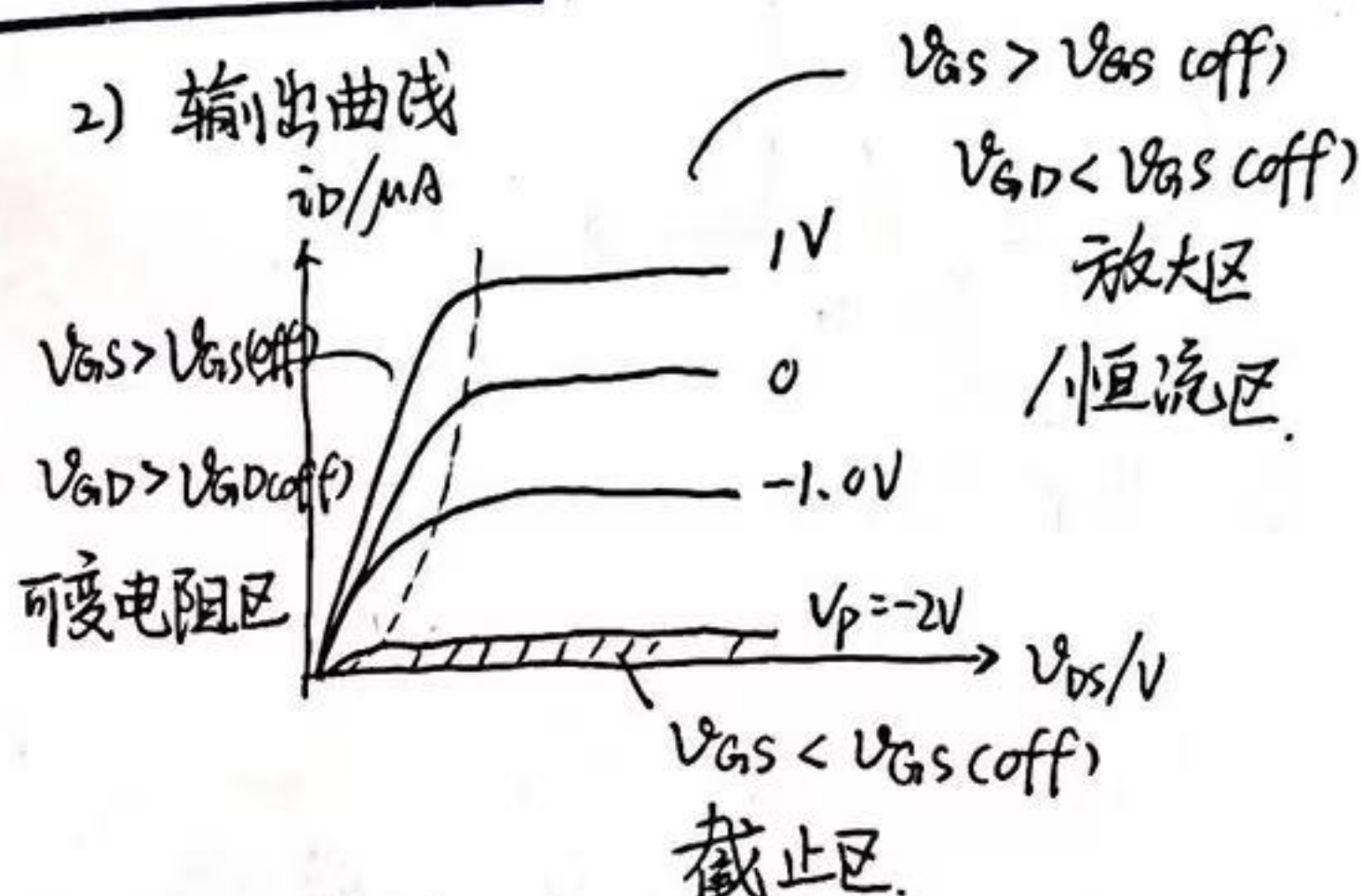


② 特性曲线

1) 转移曲线



2) 输出曲线

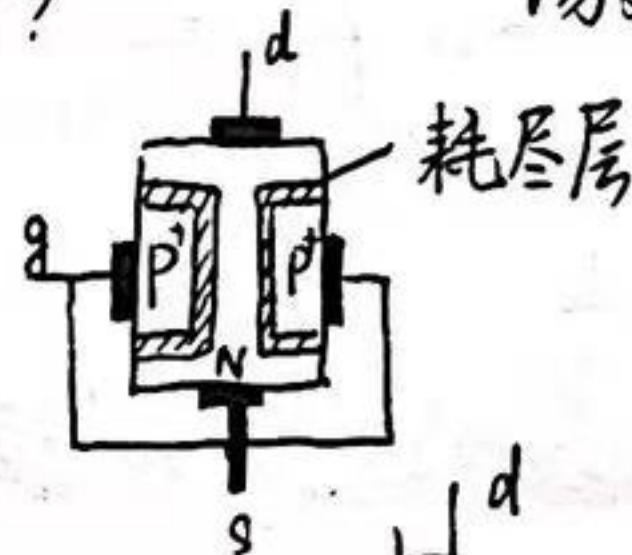


4. JFET管 (N沟道为例)

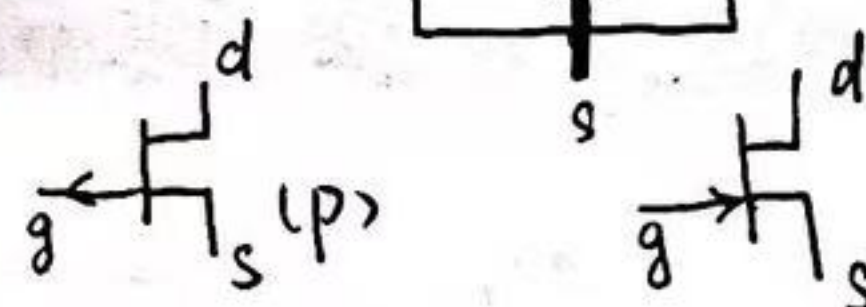
输入 R : MOS > JFET

[说明] JFET 与 耗尽型 MOS 的区别? 体内、体外场效应
为什么要有 JFET?

① 结构



② 符号



③ 工作原理

[说明] 与 MOS 家族类似, 绝缘性, g 无电流 (功耗考虑), 故 $g-s$ 间电压应使之反偏

$$1) U_{DS} = 0, U_{GS} \neq 0 \quad (U_{GS} < 0)$$

$$|U_{GS}| \uparrow (U_{GS} \downarrow) \rightarrow \text{沟道宽度} \downarrow \rightarrow R \uparrow$$

$$U_{GS} < U_{off} \text{ (夹断电压) 恒流区}$$

U_{GS} 控制 i_D

(2) $U_{GD} \leftarrow U_{GS}$ 三种情况下 U_{GS} 对 i_D 的影响

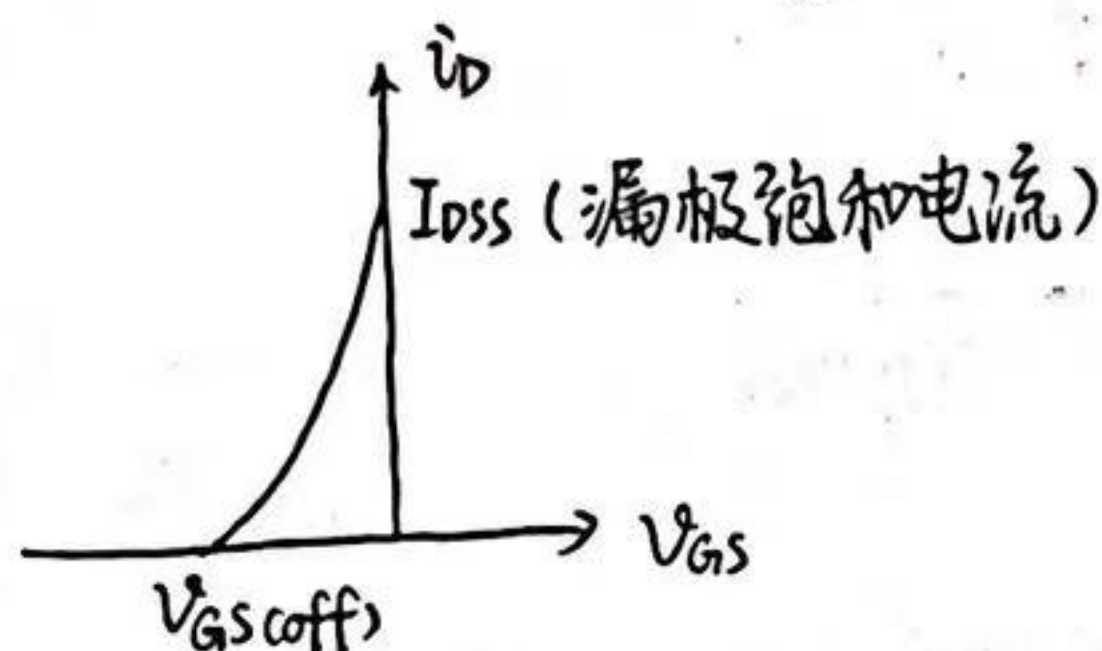
$$0 > U_{GD} > U_{GS(off)} \quad U_{DS} \uparrow \quad i_D \uparrow \quad \text{可变电阻区}$$

$$U_{GD} = U_{GS(off)} \quad \text{预夹断}$$

$$U_{GD} < U_{GS(off)} < 0 \quad i_D \text{ 基本不受 } U_{GS} \text{ 控制} \quad \text{恒流区}$$

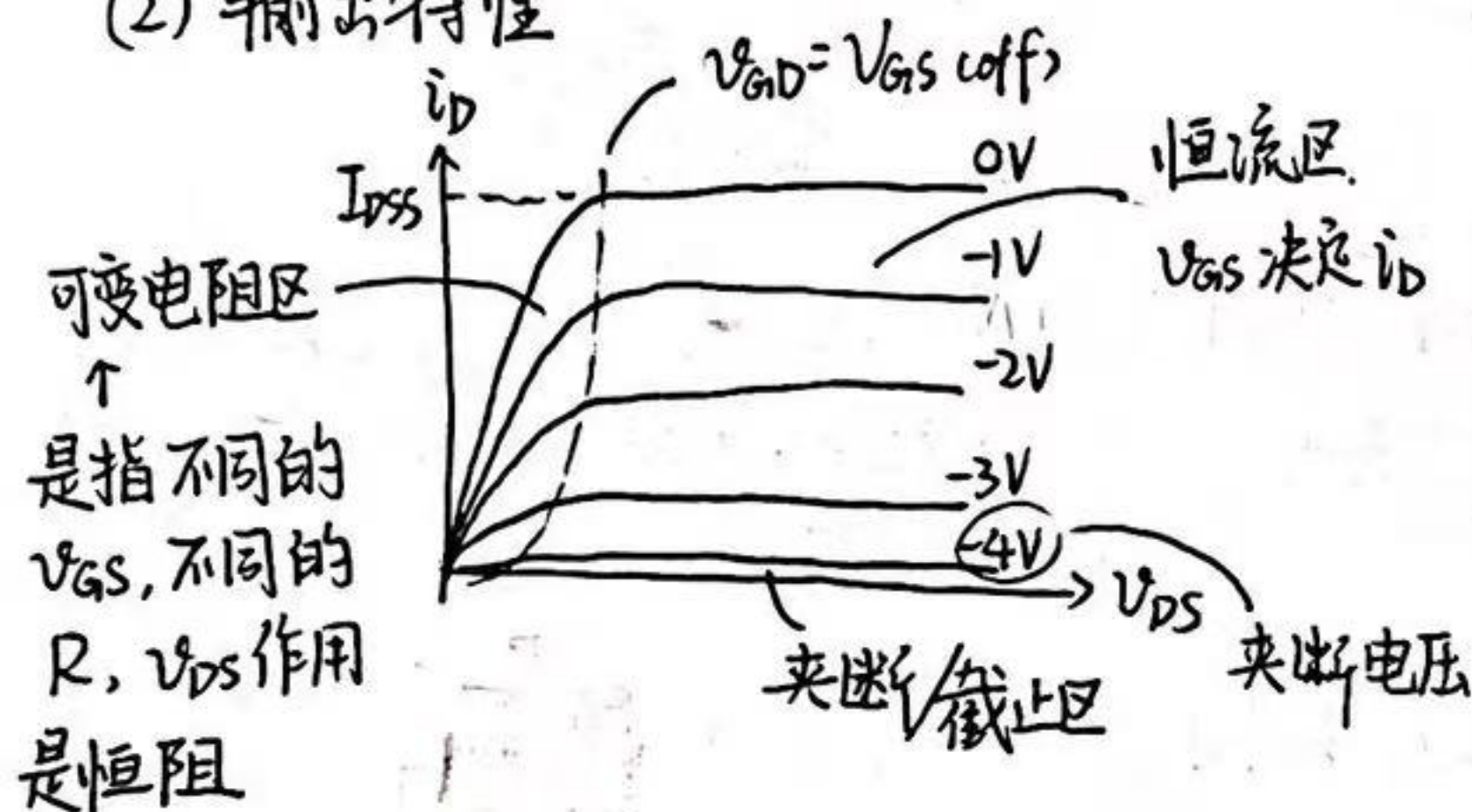
④ 特性曲线

(1) 转移特性 $i_D = f(V_{GS}) | V_{DS} = \text{const}$



$V_{DS} > V_{GS} - V_{GS(off)}$
(注: 在恒流区, 仅D2象限)

(2) 输出特性

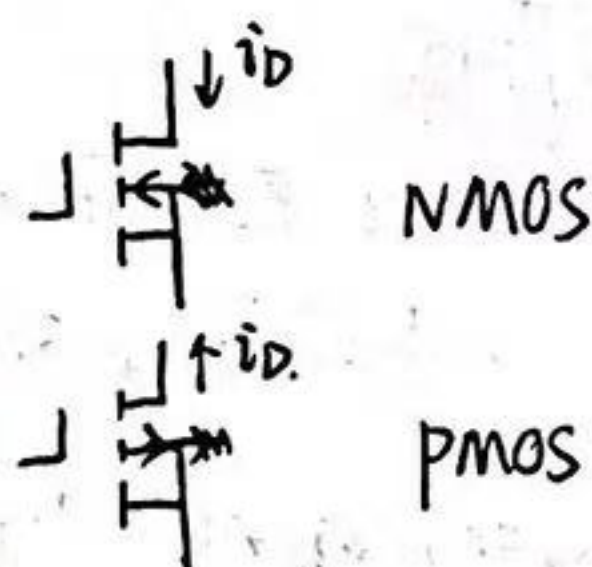


在比较大小的时候, 注意 $V_{GS} < 0$

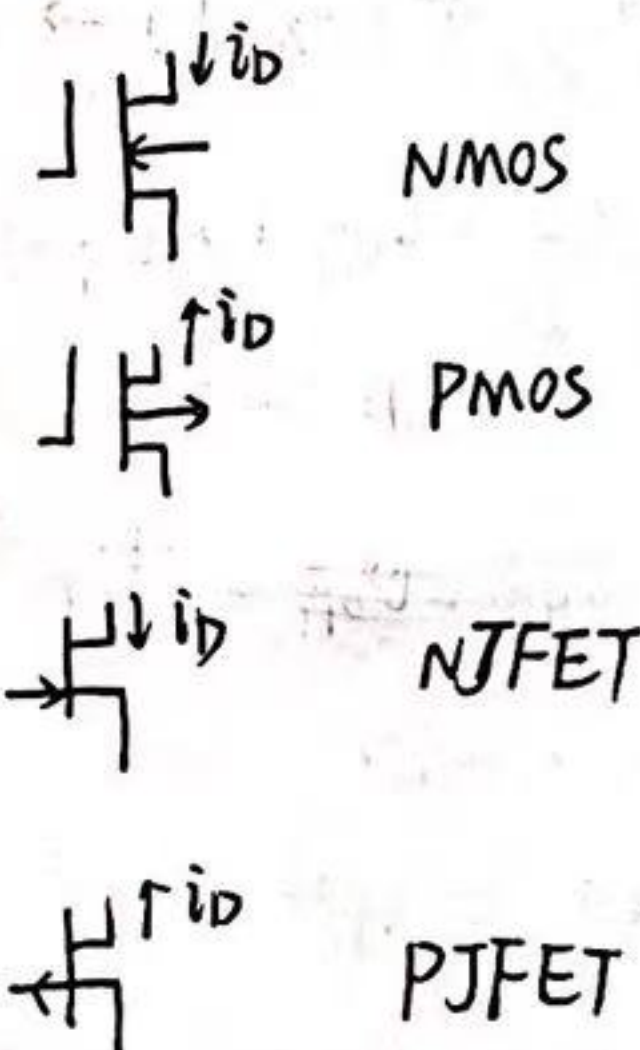
六管比较

① 符号

增强型



耗尽型



都往里 都往外

② 电压极性要求 (PPT 35)

(1) N与P极性要求反-反

e.g. 增强型

	NMOS	PMOS
V_{GS}	+	-
V_{DS}	+	-

(2) (N) 增强, 耗尽的JFET 都是 V_{GS} 单极性

③ 转移特性与输出曲线 (PPT 36)

V_{GS} 反-反, V_{DS} 反-反

5. 场效应管主要参数

V_T	V_P	I_{DSS}	I_{D0}	R_{GS}	$\begin{cases} \text{JFET} > 10^7 \\ \text{MOS} > 10^{12} \end{cases}$
enhancement Mode		Depletion Mode			

6. 交流参数

① 低频跨导 (互导, 控制另一端, 转移特性)

$$g_m = \frac{\Delta i_D}{\Delta V_{GS}} | V_{DS} = \text{const}$$

$$\text{而 } i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 \quad (V_P < 0)$$

$$\text{求得 } g_m = -\frac{2}{V_P} \sqrt{I_{D0} I_{DSS}} \quad (\text{耗尽型})$$

$$g_m = \frac{2}{V_T} \sqrt{I_{D0} I_{D0}} \quad (\text{增强型})$$

② 交流输出电阻 (输出曲线)

$$r_{ds} = \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta i_D} | V_{GS} = \text{const}$$

7. 极限参数

$$V_{(BR)DS} \quad V_{(BR)GS} \quad P_{DM}$$