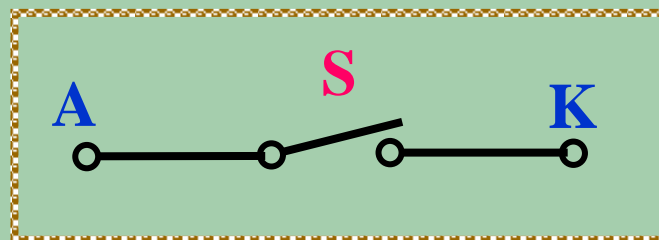




2.1 半导体二极管、三极管 和 MOS 管的开关特性

2.1.1 理想开关的开关特性

一、静态特性



① 断开

$$R_{\text{OFF}} = \infty, I_{\text{OFF}} = 0$$

② 闭合

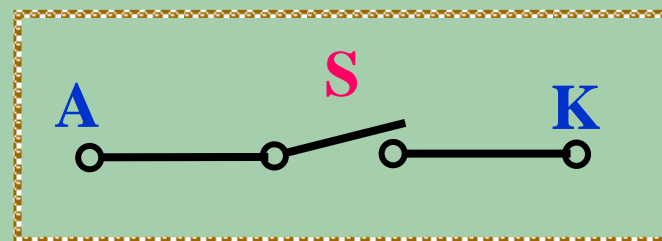
$$R_{\text{ON}} = 0, U_{\text{AK}} = 0$$



2.1 半导体二极管、三极管和 MOS 管的开关特性

2.1.1 理想开关的开关特性

二、动态特性



① 开通时间：（断开 \rightarrow 闭合） $t_{\text{on}} = 0$

② 关断时间：（闭合 \rightarrow 断开） $t_{\text{off}} = 0$

普通开关：静态特性好，动态特性差

半导体开关：静态特性较差，动态特性好

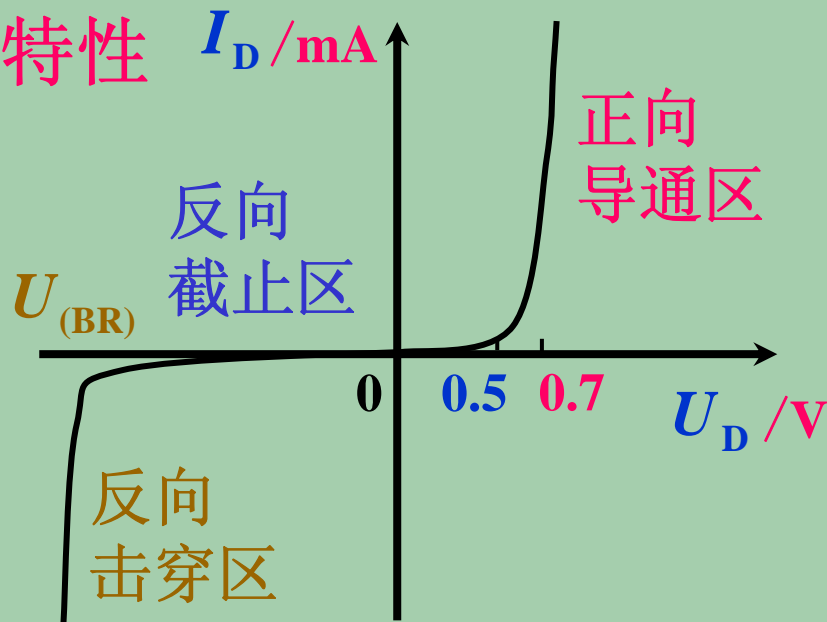
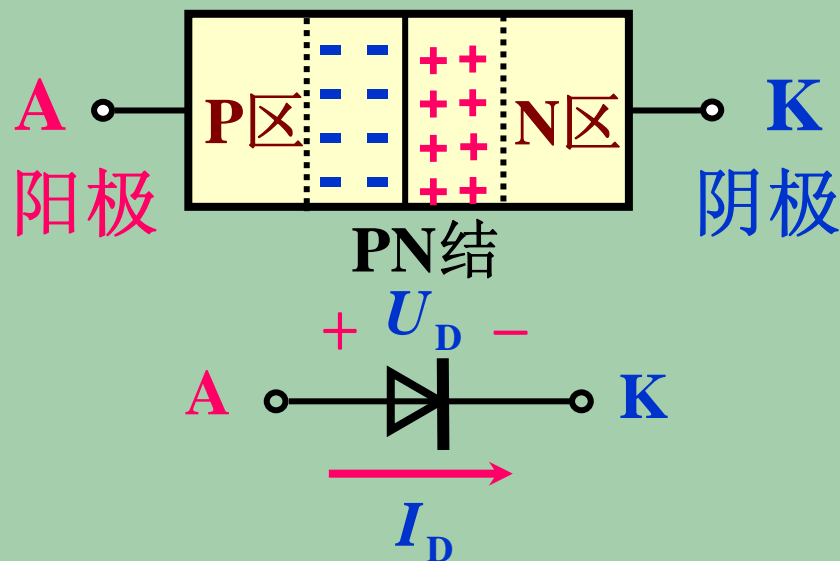
几百万/秒
几千万/秒



2.1.2 半导体二极管的开关特性

一、静态特性

1. 结构示意图、符号和伏安特性



① 外加正向电压(正偏)

硅二极管伏安特性

二极管导通(相当于开关闭合)

$$U_D \approx 0.7 \text{ V}$$

② 外加反向电压(反偏)

$$U_D < 0.5 \text{ V}$$

二极管截止(相当于开关断开)

$$I_D \approx 0$$

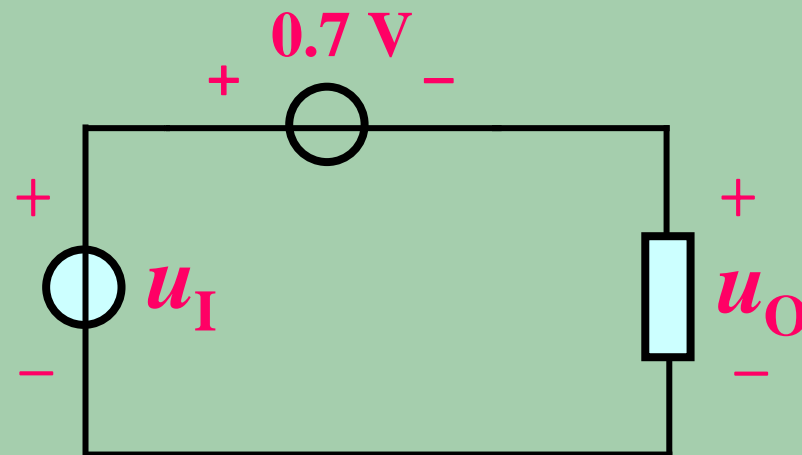


2. 二极管的开关作用:

[例] 电路如图所示,

$$u_I = -2\text{ V 或 } 3\text{ V}$$

试判别二极管的工作状态及输出电压。



[解] $u_I = U_{IL} = -2\text{ V}$ 二极管截止 $u_O = 0\text{ V}$

$u_I = U_{IH} = 3\text{ V}$ 二极管导通 $u_O = 2.3\text{ V}$



二、动态特性

1. 二极管的电容效应

$\left\{ \begin{array}{l} \text{结电容 } C_j \\ \text{扩散电容 } C_D \end{array} \right.$

电容效应使二极管的通断需要一段延迟时间才能完成

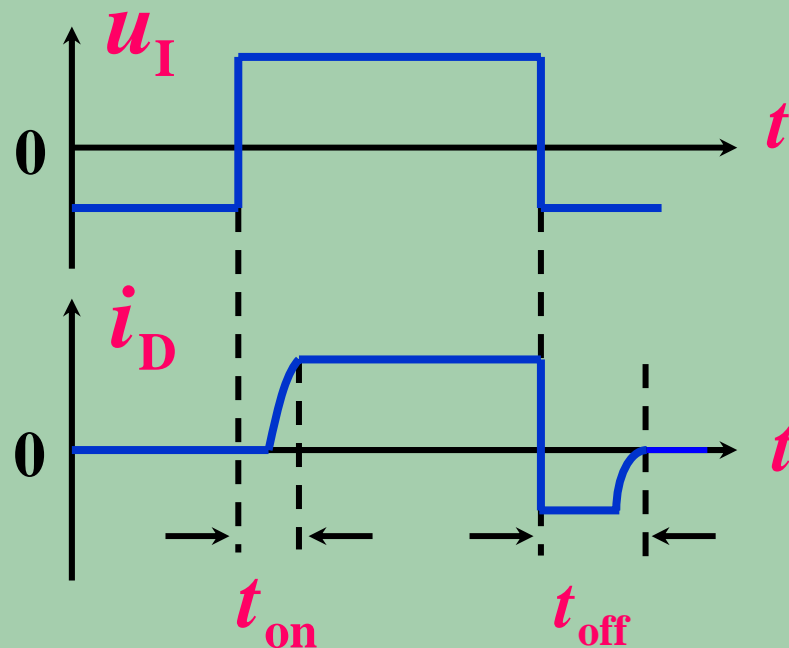
2. 二极管的开关时间

t_{on} — 开通时间

t_{off} — 关断时间

$$t_{\text{on}} \ll t_{\text{off}} (t_{\text{rr}}) \leq 5 \text{ ns}$$

(反向恢复时间)



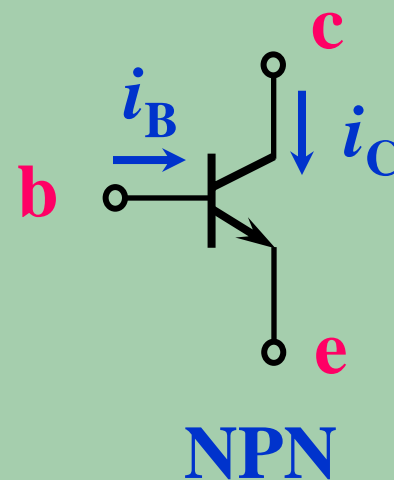
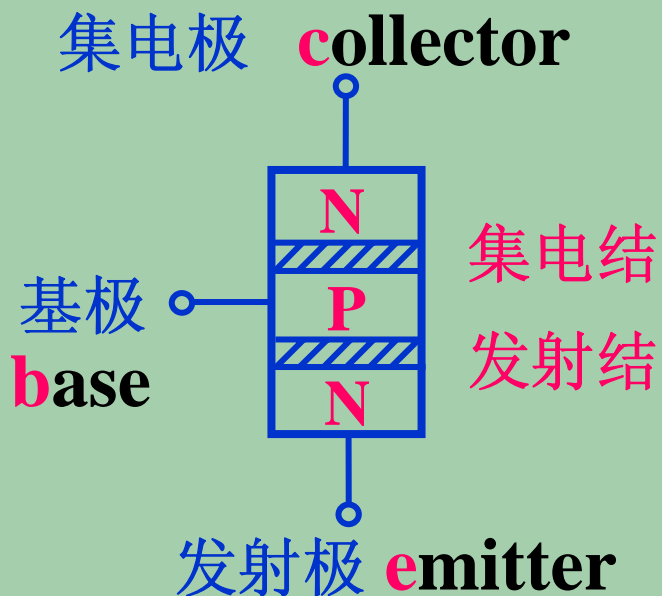


2.1.3 半导体三极管的开关特性

一、静态特性（电流控制型）

1. 结构、符号和输入、输出特性 (Transistor)

(1) 结构示意图和符号



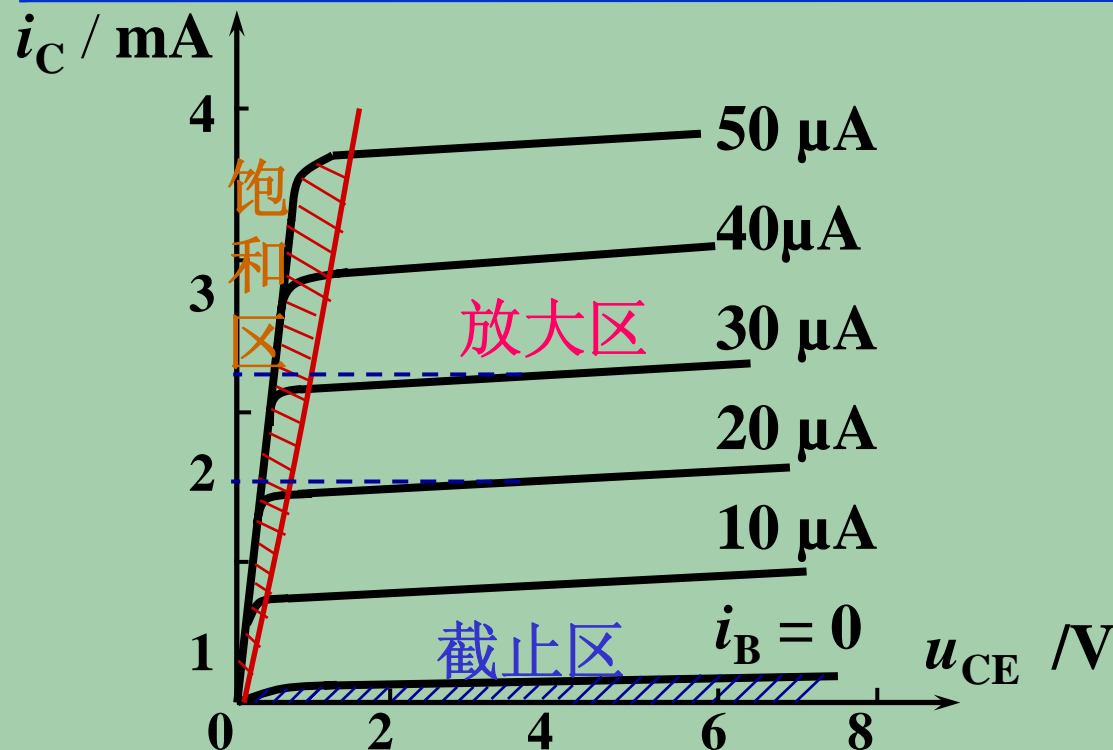
(2) 输入特性

$$i_B = f(u_{BE}) \Big|_{u_{CE}}$$

状态	电流关系	条 件
放大	$i_C = \beta i_B$	发射结正偏 集电结反偏
饱和 临界	$i_C < \beta i_B$ $I_{CS} = \beta I_{BS}$	两个结正偏
截止	$i_B \approx 0, i_C \approx 0$	两个结反偏

(3) 输出特性

$$i_C = f(u_{CE}) \Big|_{i_B}$$





2. 半导体三极管的开关应用

(1) $u_I = U_{IL} = -2\text{ V}$

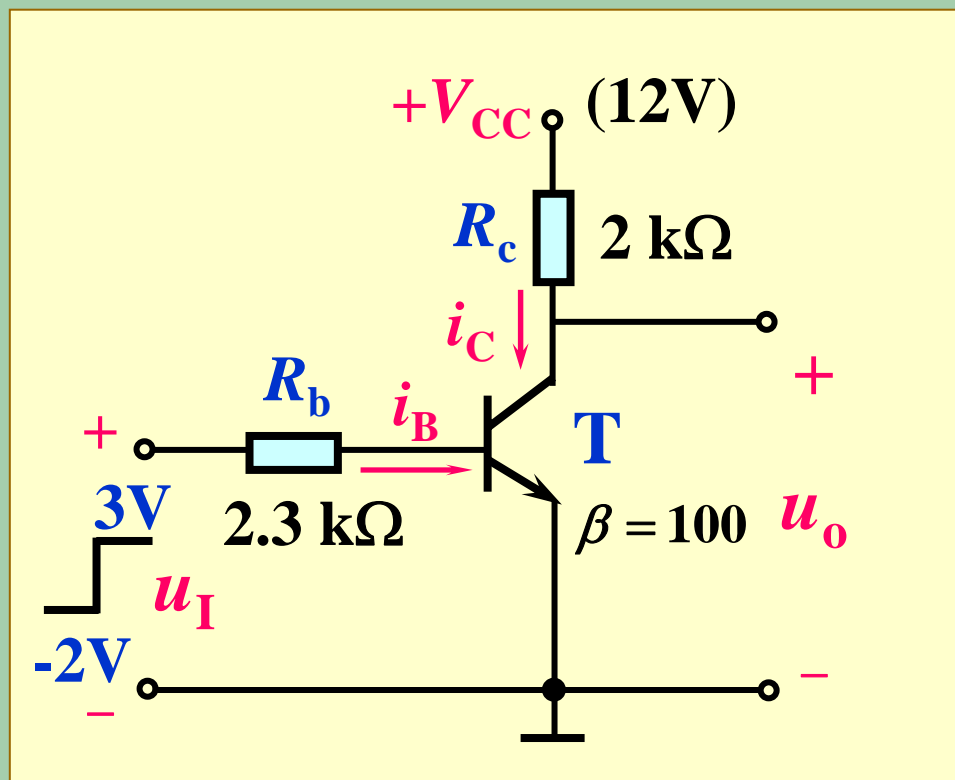
发射结反偏 **T 截止**

$$i_B \approx 0 \quad i_C \approx 0$$

$$u_O \approx V_{CC} = 12\text{ V}$$

(2) $u_I = U_{IH} = 3\text{ V}$

发射结正偏 **T 导通**



放大还是饱和？



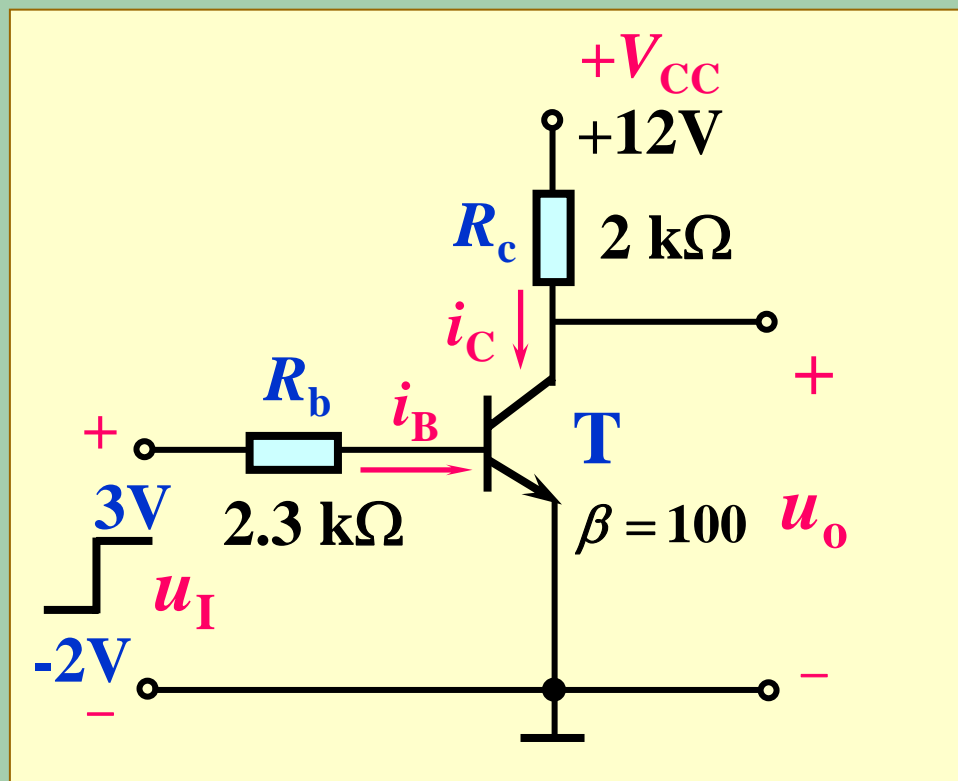
饱和导通条件:

$$i_B > I_{BS} \approx \frac{V_{CC}}{\beta R_c}$$

$$\begin{aligned} i_B &= \frac{u_I - u_{BE}}{R_b} \quad (u_{BE} \approx 0.7 \text{ V}) \\ &= \frac{3 - 0.7}{2.3} \text{ mA} = 1 \text{ mA} \end{aligned}$$

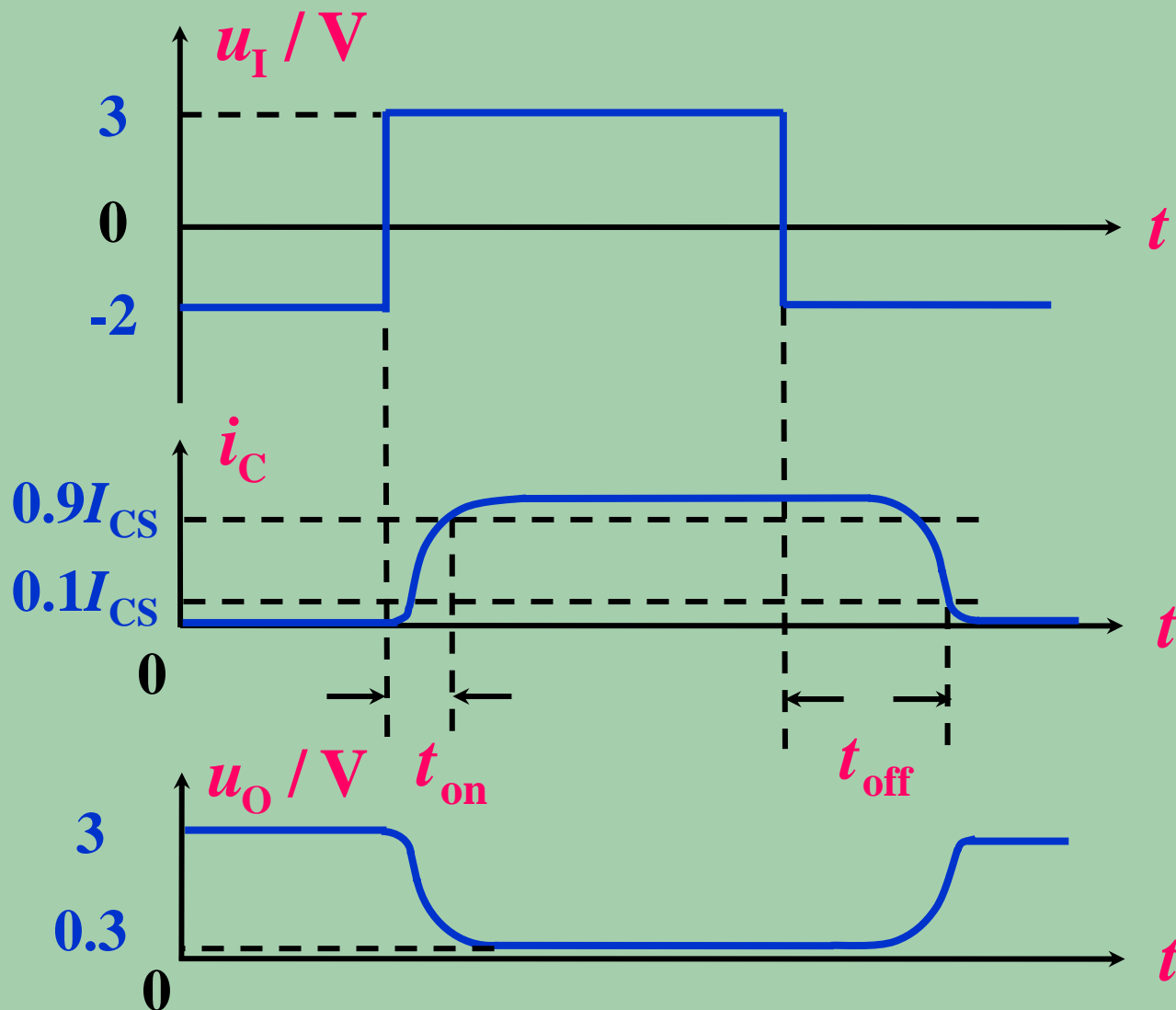
$$I_{BS} = \frac{I_{CS}}{\beta} = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{R_c \cdot \beta} \approx \frac{V_{CC}}{\beta R_c} = \frac{12}{100 \times 2} \text{ mA} = 0.06 \text{ mA}$$

因为 $i_B > I_{BS}$ 所以 **T 饱和** $u_O = U_{CES} \leq 0.3 \text{ V}$





二、动态特性

三极管饱和程度 $\uparrow \Rightarrow t_{\text{off}} \uparrow$ 

2.1.4 MOS 管的开关特性

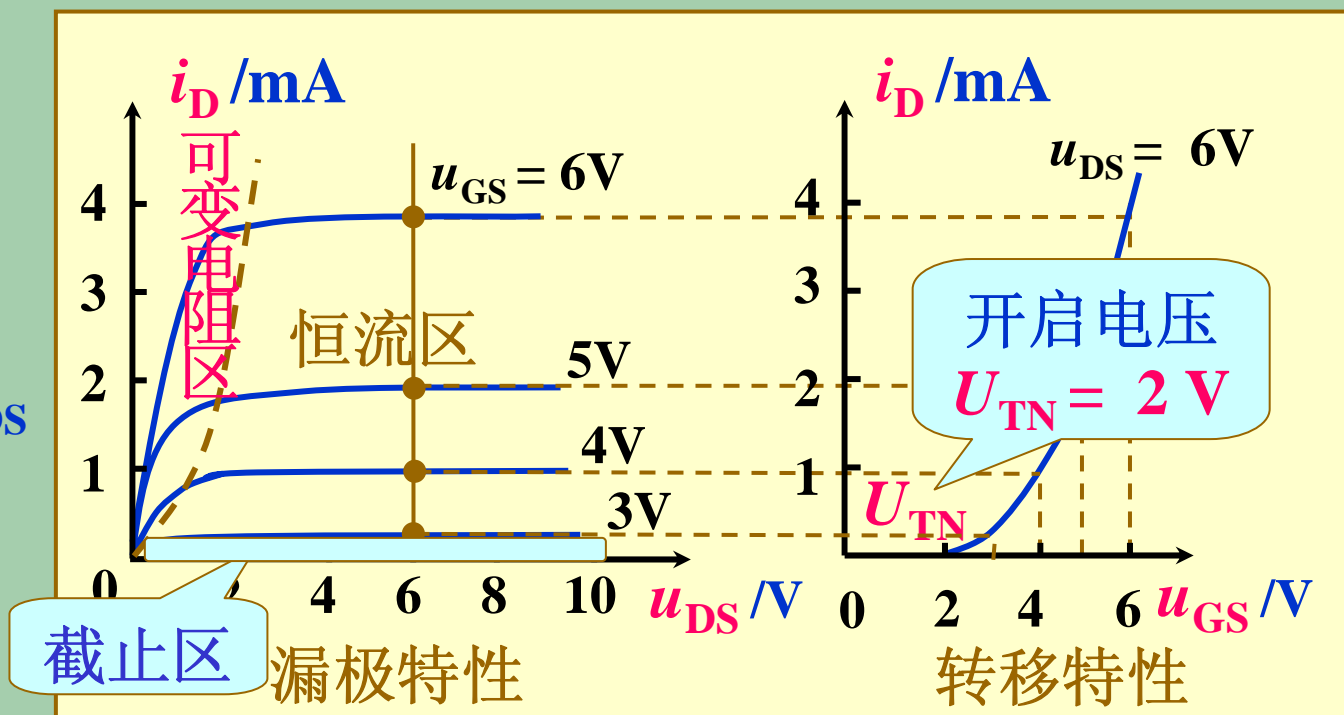
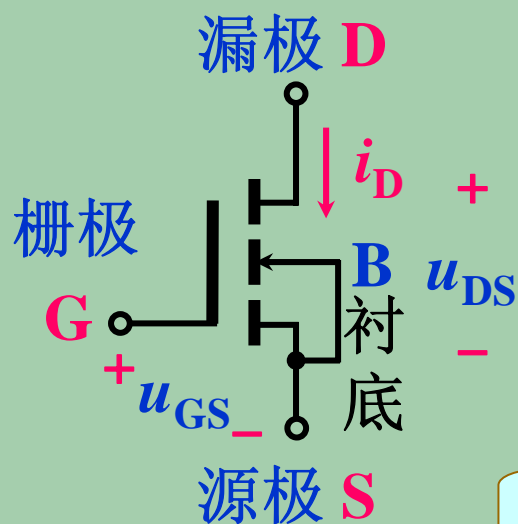
MOS (Mental – Oxide – Semiconductor)

金属 – 氧化物 – 半导体场效应管

一、静态特性 (电压控制型)

1. 结构和特性:

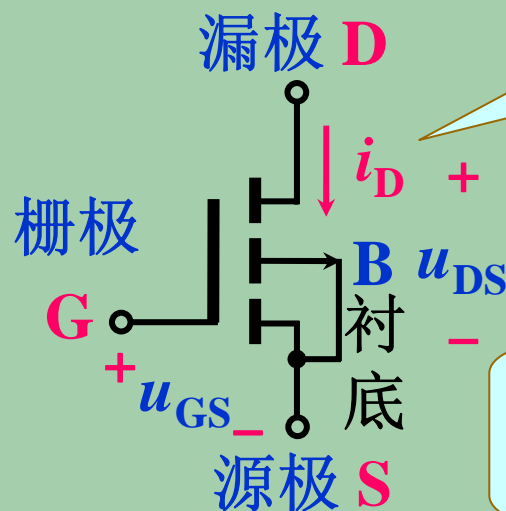
(1) N 沟道





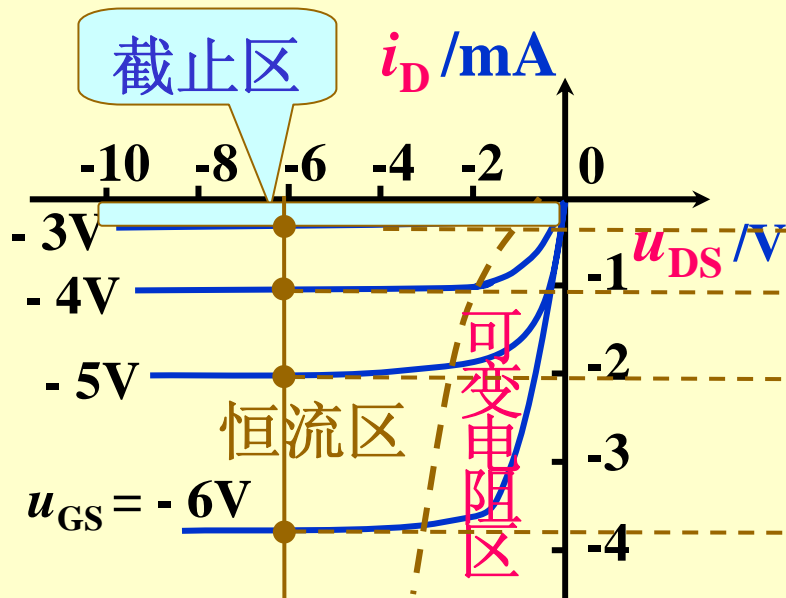
(2) P 沟道

P 沟道增强型 MOS 管
与 N 沟道有对偶关系。

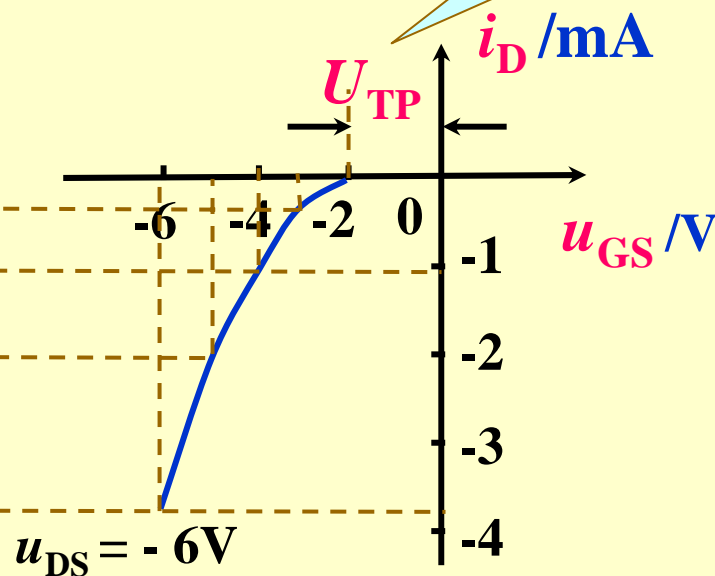


参考方向

开启电压
 $U_{TP} = -2\text{ V}$



漏极特性

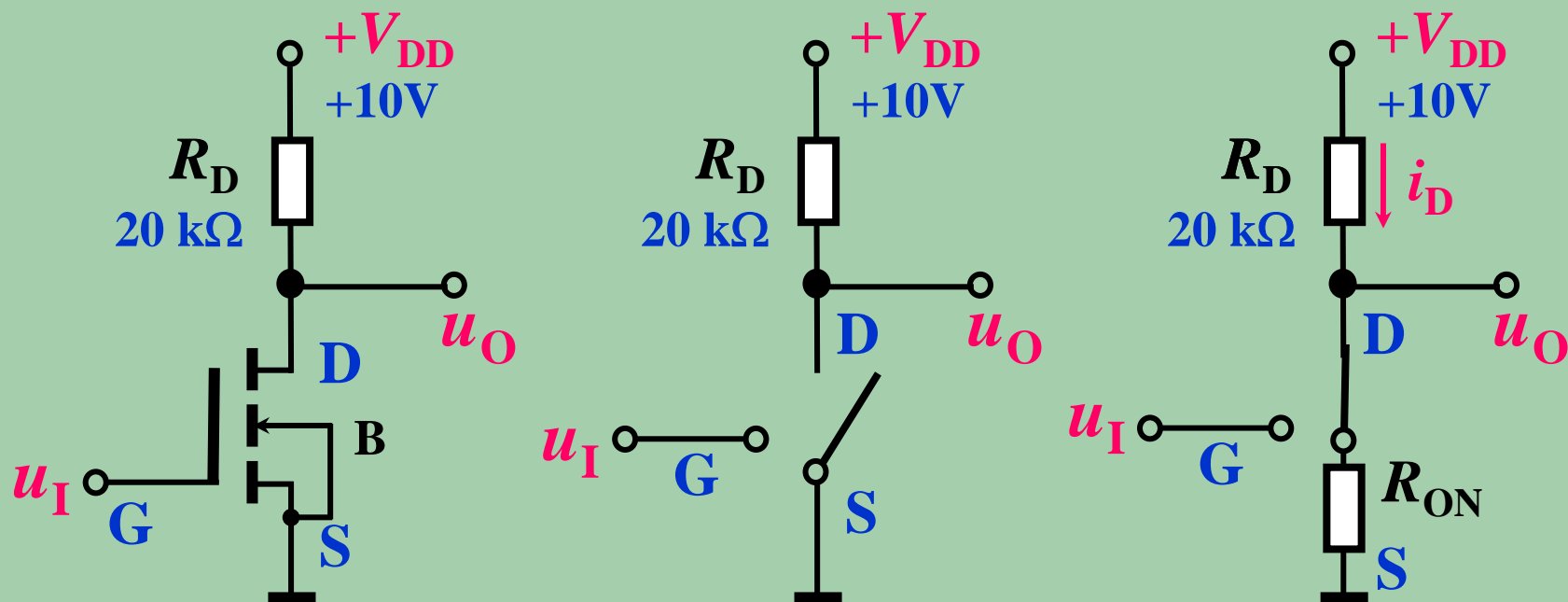


转移特性



2. MOS管的开关作用:

(1) N 沟道增强型 MOS 管



开启电压

$$u_I < U_{TN}$$

$$u_I > U_{TN}$$

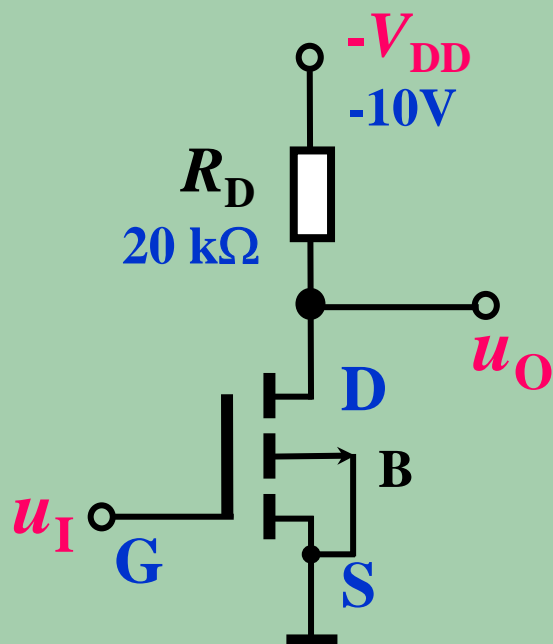
$$U_{TN} = 2\text{ V}$$

$$u_O = U_{OH} = V_{DD}$$

$$u_O = U_{OL} \approx 0\text{ V}$$

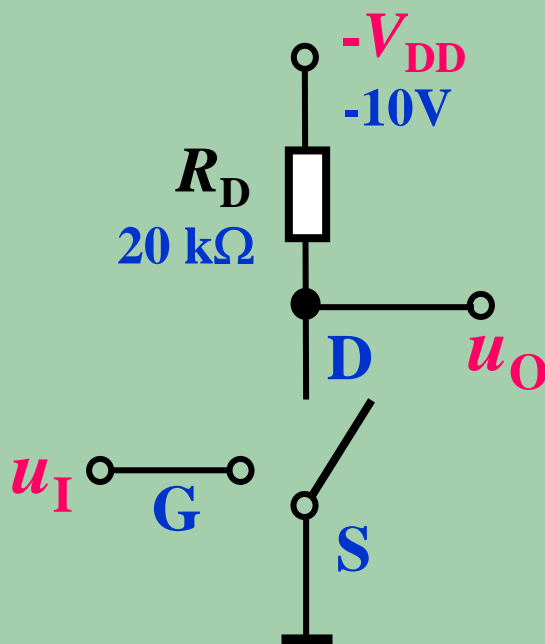


(2) P 沟道增强型 MOS 管



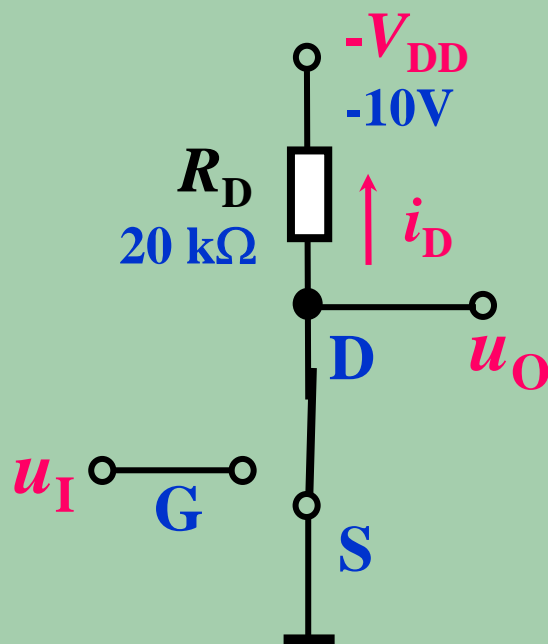
开启电压

$$U_{TP} = -2 \text{ V}$$



$$u_I > U_{TP}$$

$$u_O = U_{OL} = -V_{DD}$$



$$u_I < U_{TP}$$

$$u_O = U_{OL} \approx 0 \text{ V}$$



二、动态特性

1. MOS 管极间电容

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{栅源电容 } C_{\text{GS}} \\ \text{栅漏电容 } C_{\text{GD}} \end{array} \right\} \quad 1 \sim 3 \text{ pF}$$
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{漏源电容 } C_{\text{DS}} \end{array} \right\} \quad 0.1 \sim 1 \text{ pF}$$

在数字电路中，这些电容的充、放电过程会制约 MOS 管的动态特性，即开关速度。



2. 开关时间

