第8章　场效应晶体管（FETs）

场效应晶体管基础

场效应晶体管放大电路的构成及其分析

8.1 场效应晶体管基础

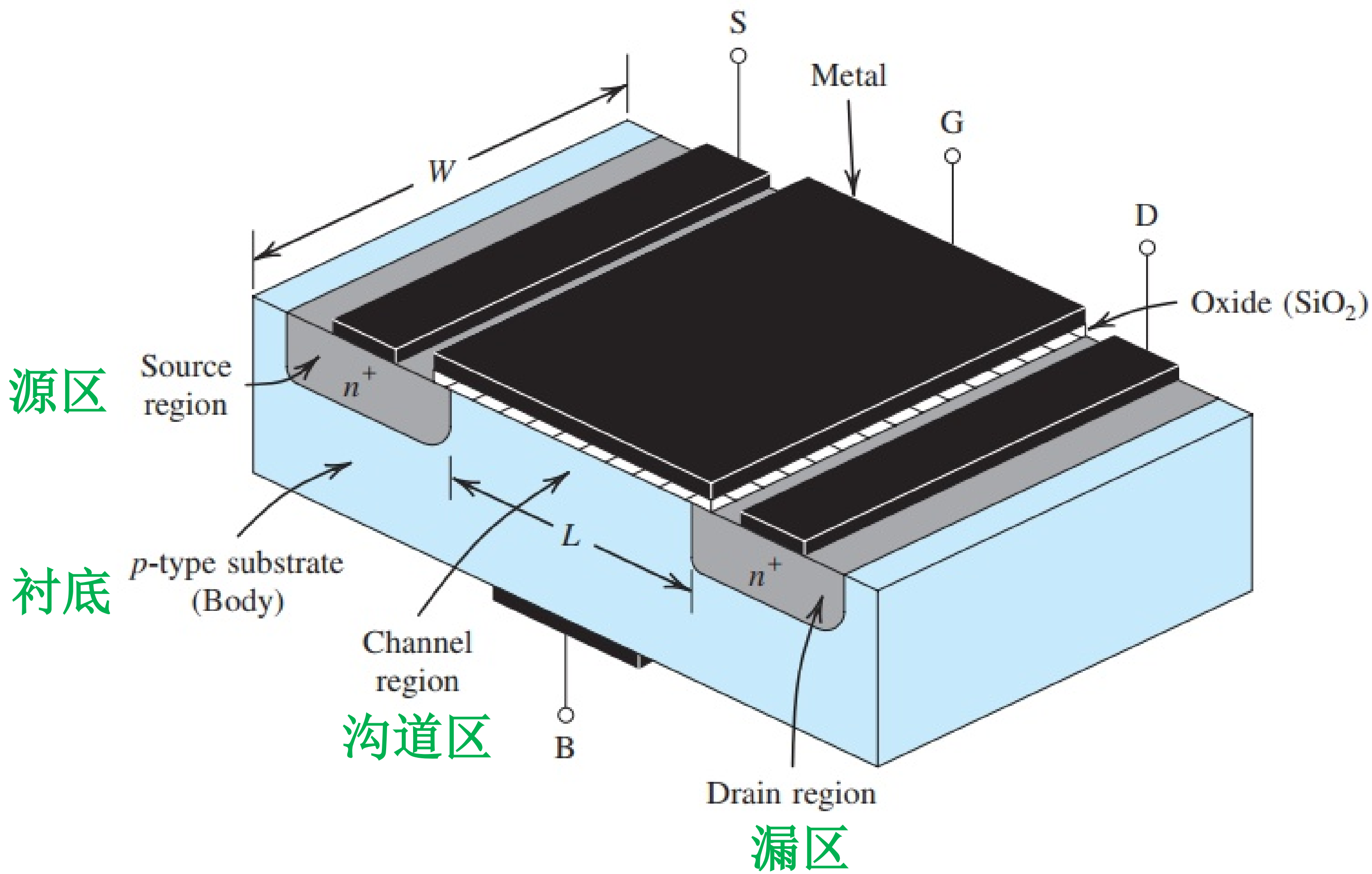
8.1.1 场效应晶体管的结构、工作原理及其电路符号

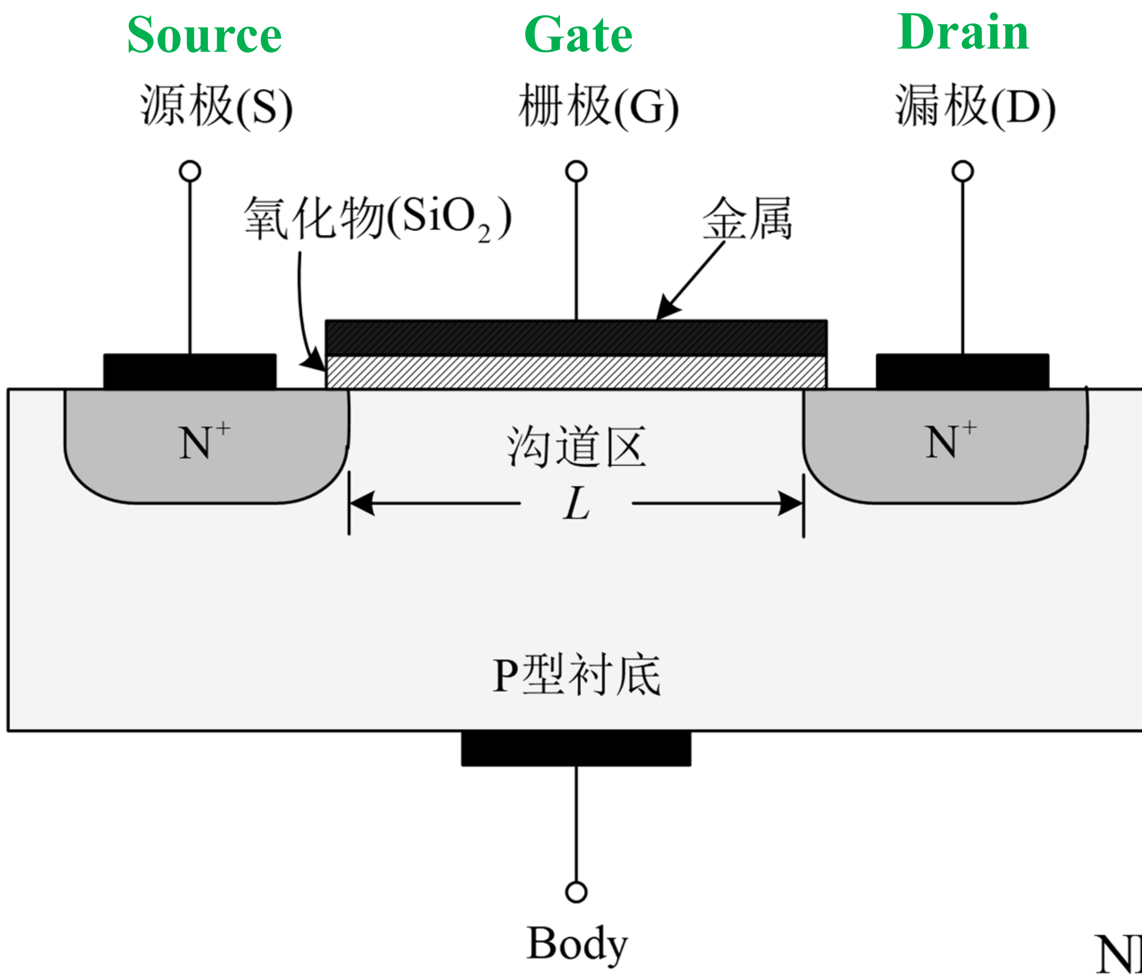
单极型管：噪声小、抗辐射能力强、低电压工作

- FET (Field Effect Transistor)
  - 结型FET (J-FET)
    - P沟道 (P-Channel)
    - N沟道 (N-Channel)
  - (MOS) 绝缘栅型FET (IG-FET) (Insulated Gate)
    - 增强型 (Enhancement-Type)
      - P沟道 (P-Channel)
      - N沟道 (N-Channel)
    - 耗尽型 (Depletion-Type)
      - P沟道 (P-Channel)
      - N沟道 (N-Channel)

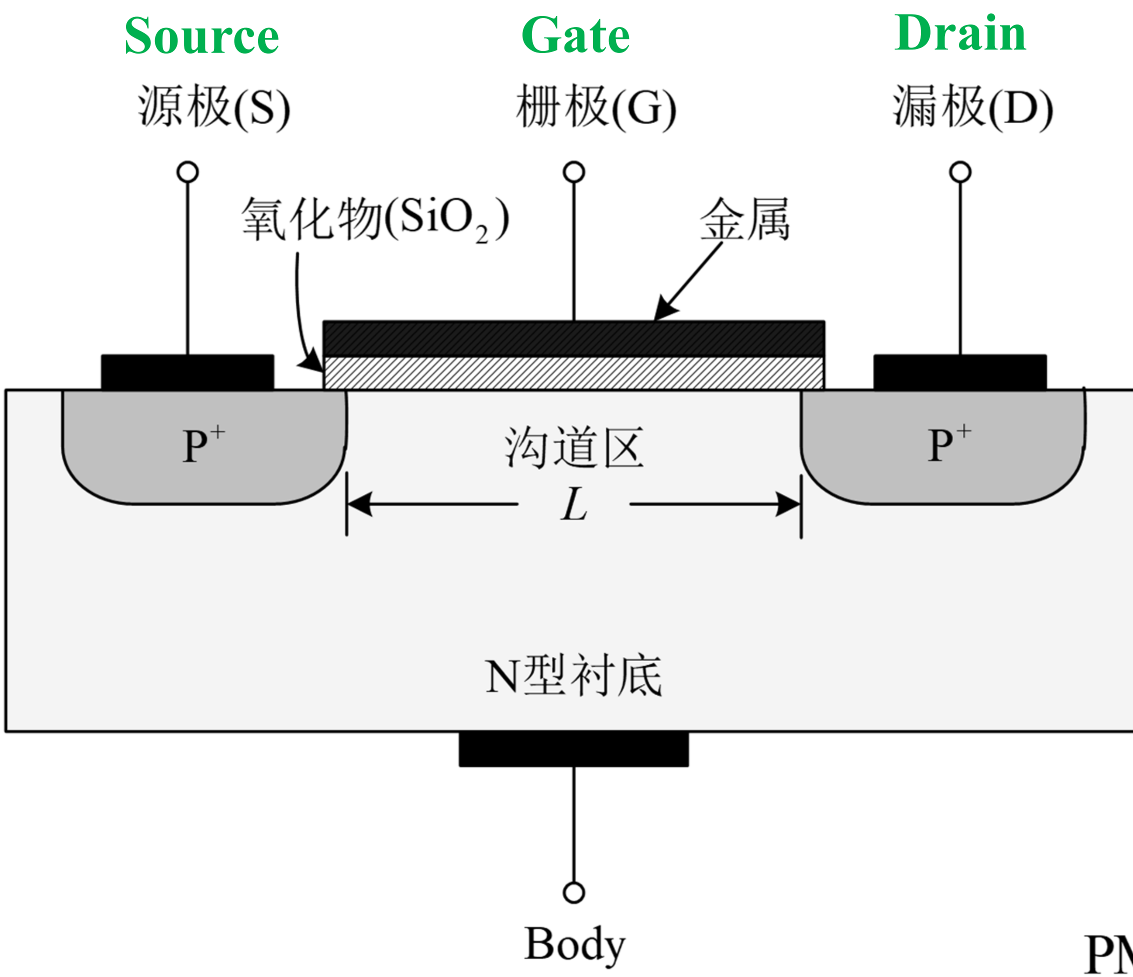
一、场效应晶体管的结构

1、绝缘栅型场效应晶体管的结构



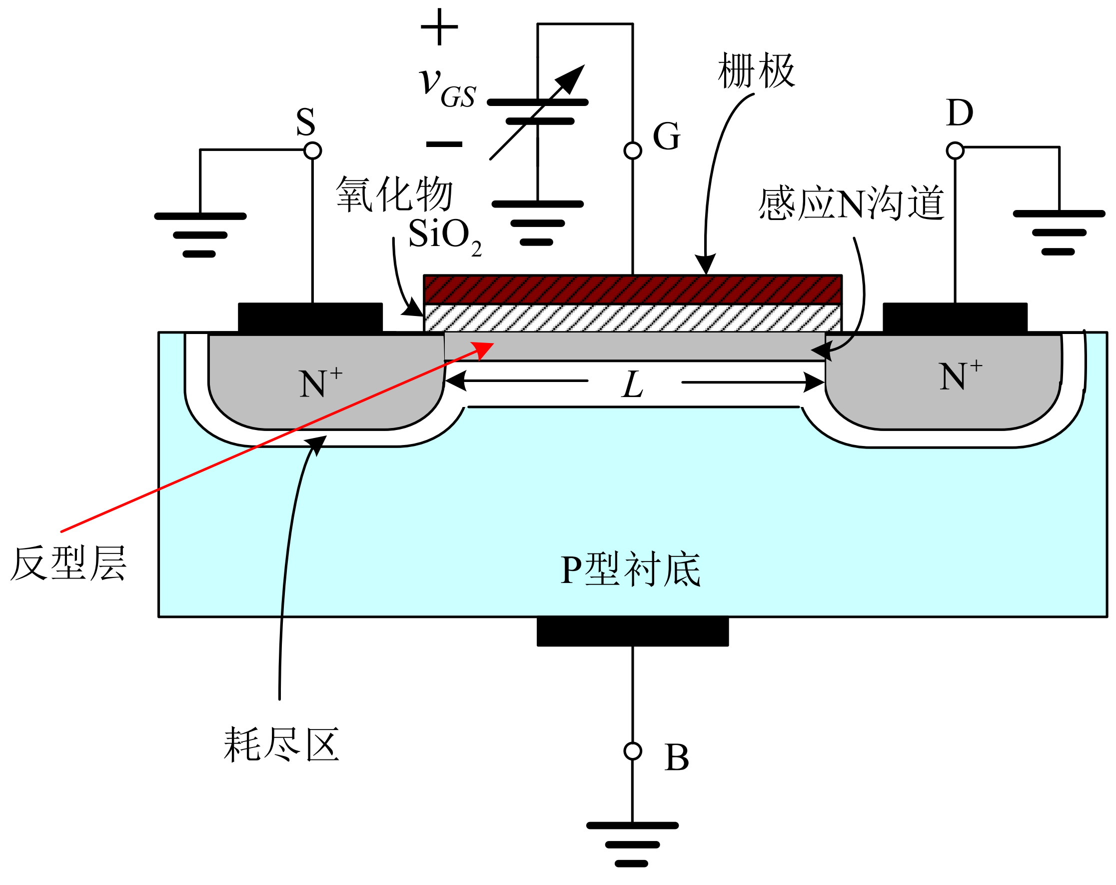


NMOS

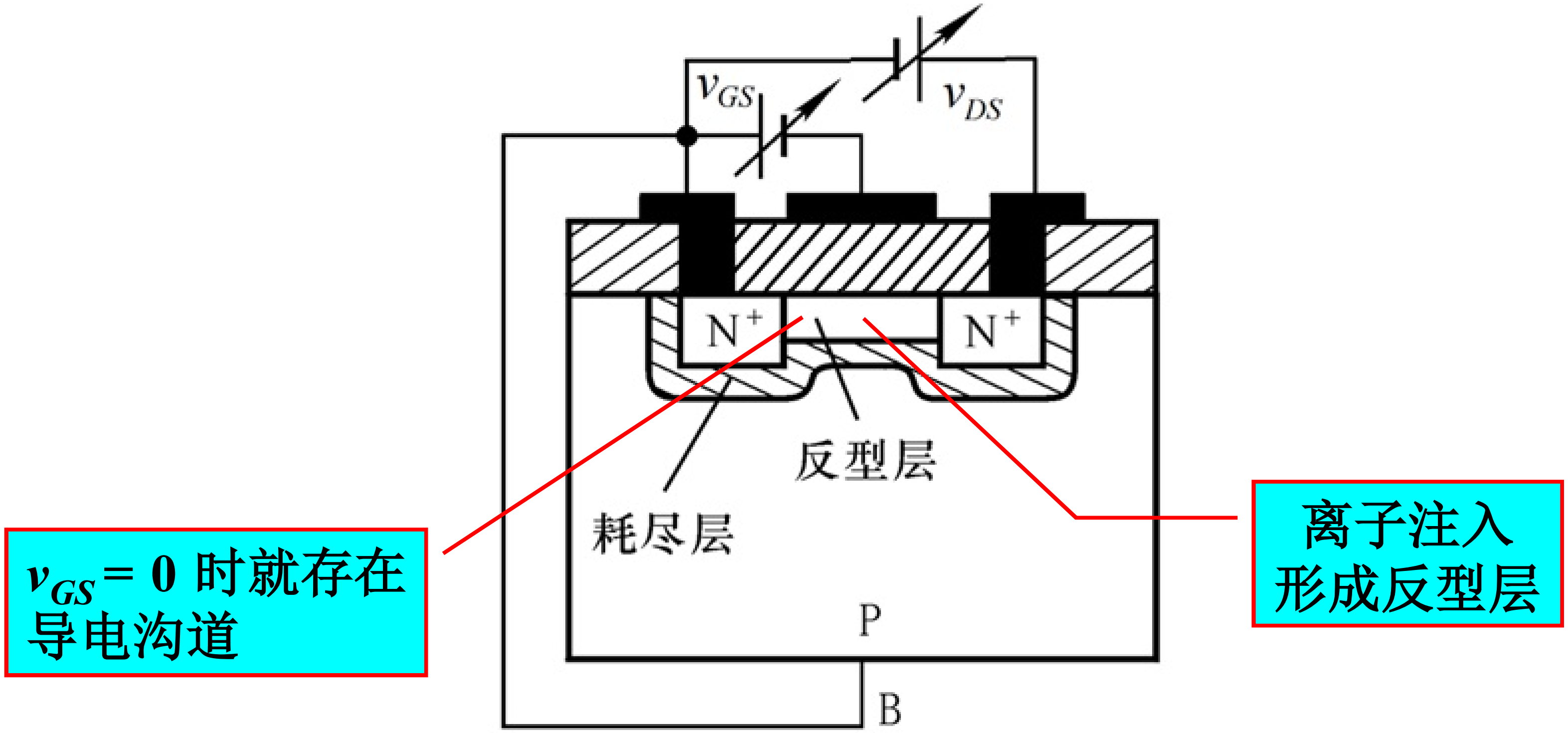


PMOS

(a) N沟道增强型



(b) N沟道耗尽型

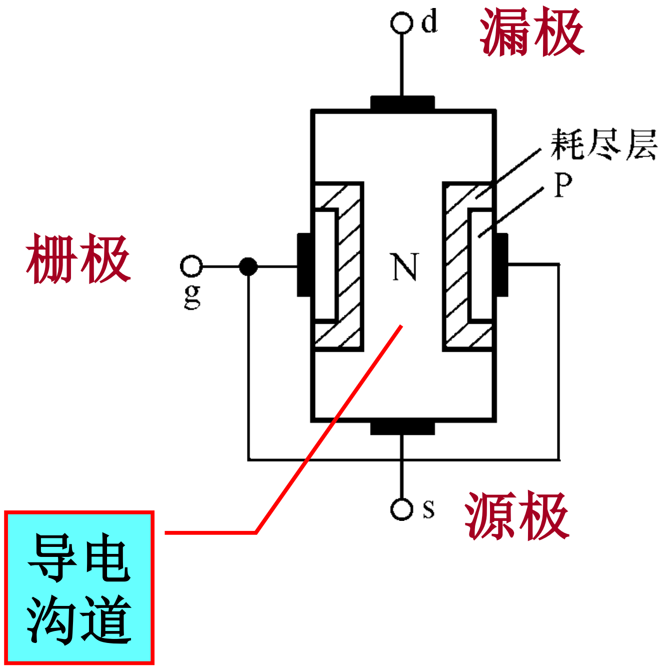


耗尽型NMOS管在 $v_{GS}>0$、 $v_{GS}<0$、 $v_{GS}=0$ 时均可存在导电沟道。

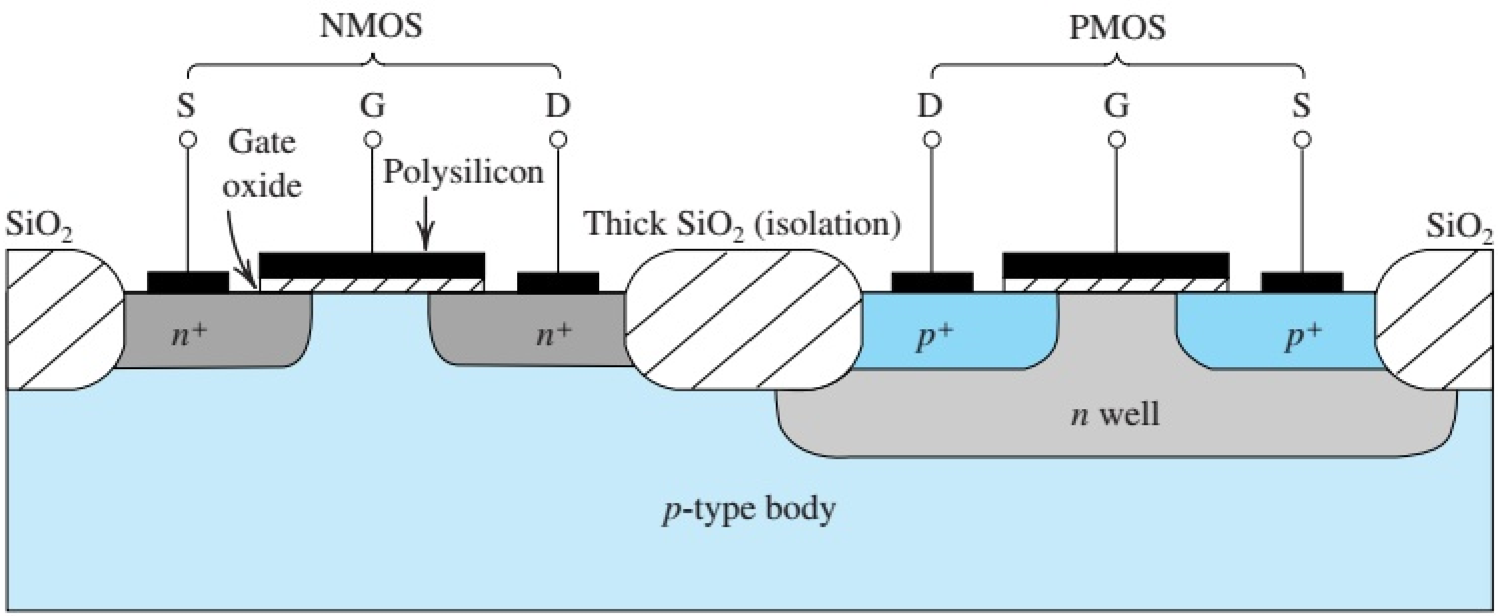
2、结型（Junciton-FET）场效应管的结构

N沟道结型

场效应晶体管



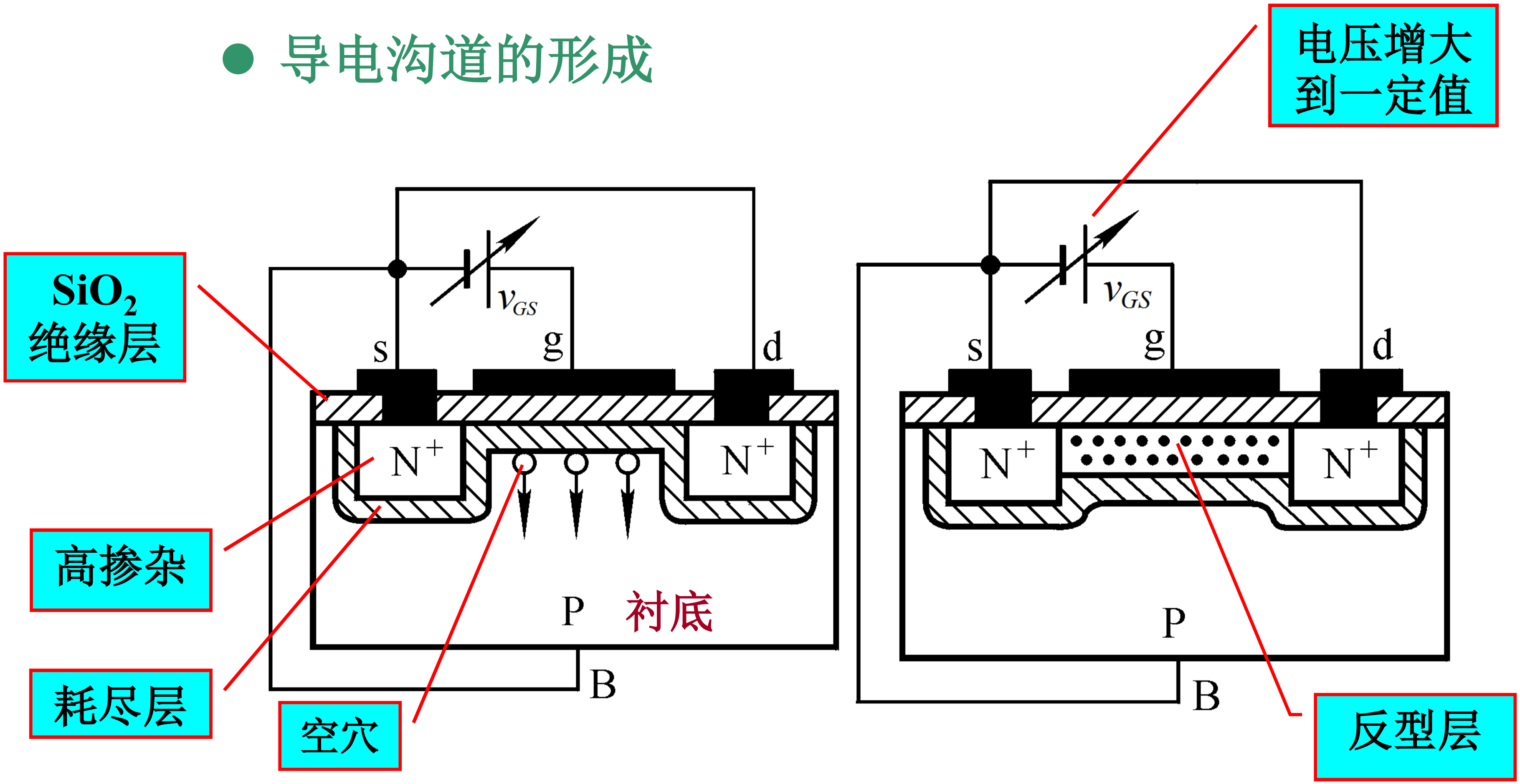
3、 Complementary MOS（CMOS）的结构



二、场效应晶体管的工作原理

1、N沟道增强型MOSFET的工作原理

- 导电沟道的形成



v_{GS}增大，N型反型层将变厚变长。当反型层将两个N区相接时，形成N型导电沟道（简称**N沟道**）。

特点：

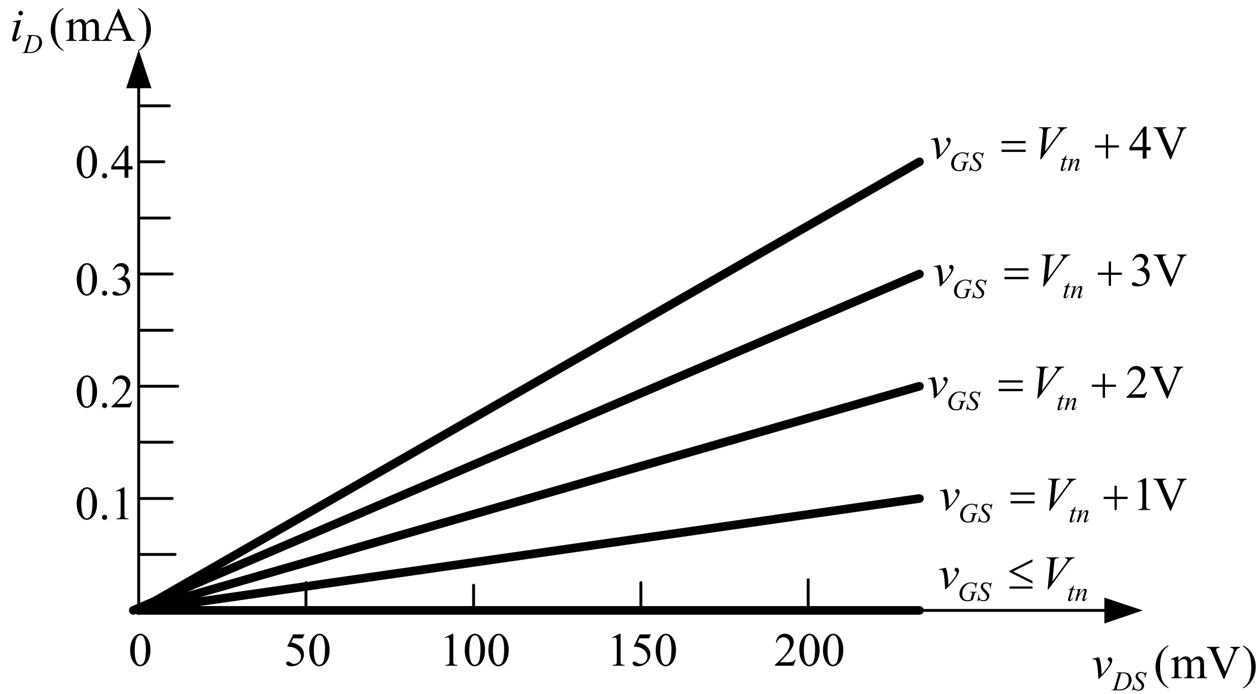
(1) 由电子形成的反型层称N沟道，对应为NMOS；由空穴构成的反型层称P沟道，对应为PMOS。

(2) 对于NMOS，反型层形成的先决条件是 $v_{GS} > V_{tn}$（开启电压，阈值电压，threshold voltage）。V_{tn} 的大小取决于场效应管的工艺参数。SiO_2绝缘层越薄，两N^+区的掺杂浓度越高，衬底掺杂浓度越低，V_{tn} 就越小。

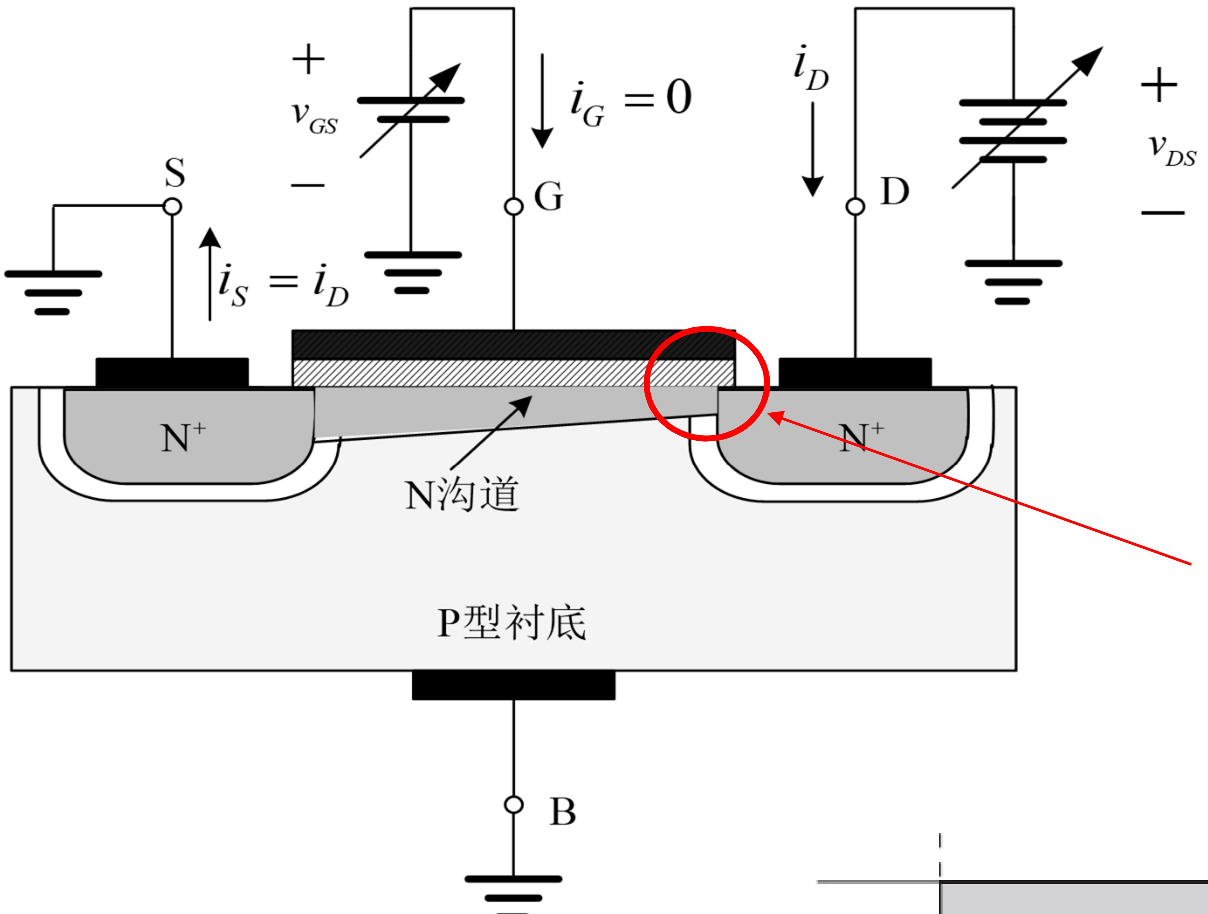
(3) 对于NMOS，v_{GS} 越大，反型层的电子浓度就越大，沟道的导电能力也就越强，在同样的 v_{DS} 作用下，漏极与源极之间的电流相应也越大。

(4) 如果在源漏间加上一个小电压（如100 ~ 200 mV），沟道呈电阻特性。

增强型NMOS管在很小的 v_{DS} 作用下的伏安特性



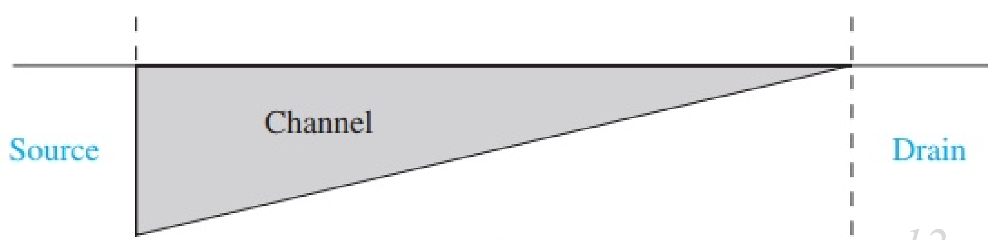
● 沟道夹断（channel pinch-off）



当该点电压减小到

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

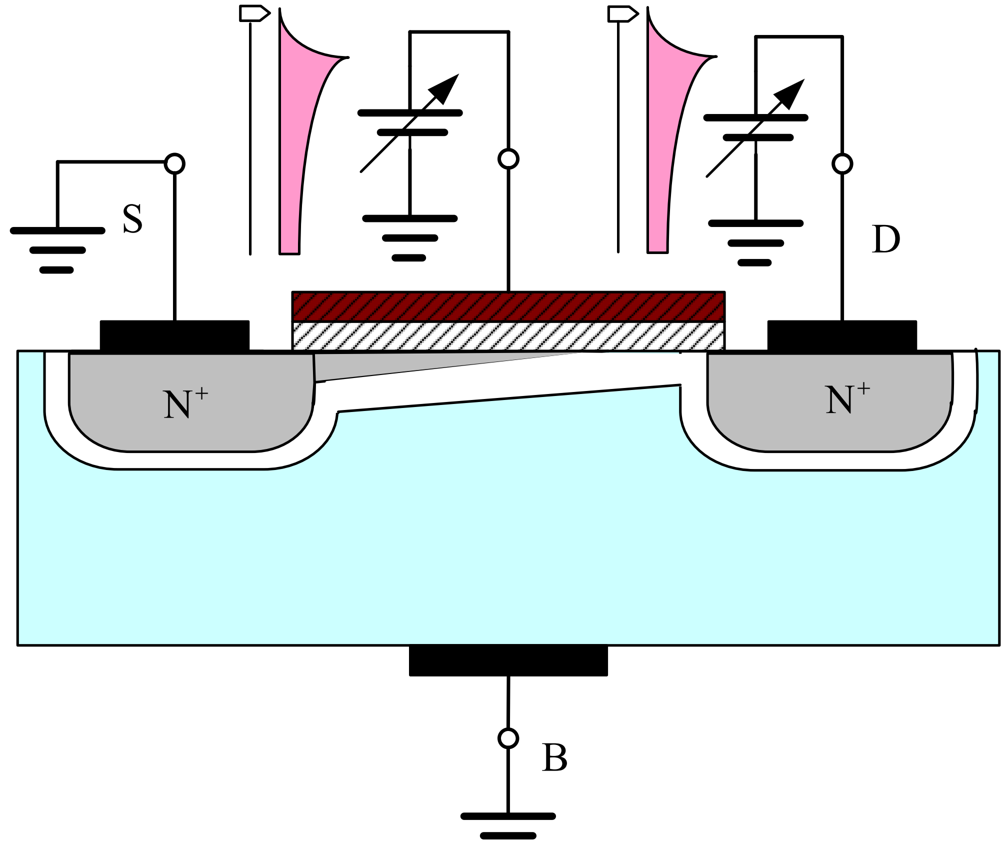
发生沟道夹断



当 $v_{DS} \geq v_{GS} - V_{tn}$ 时，如果继续升高漏极电压，漏极电流达到饱和，不再随漏极电压的升高而增大。

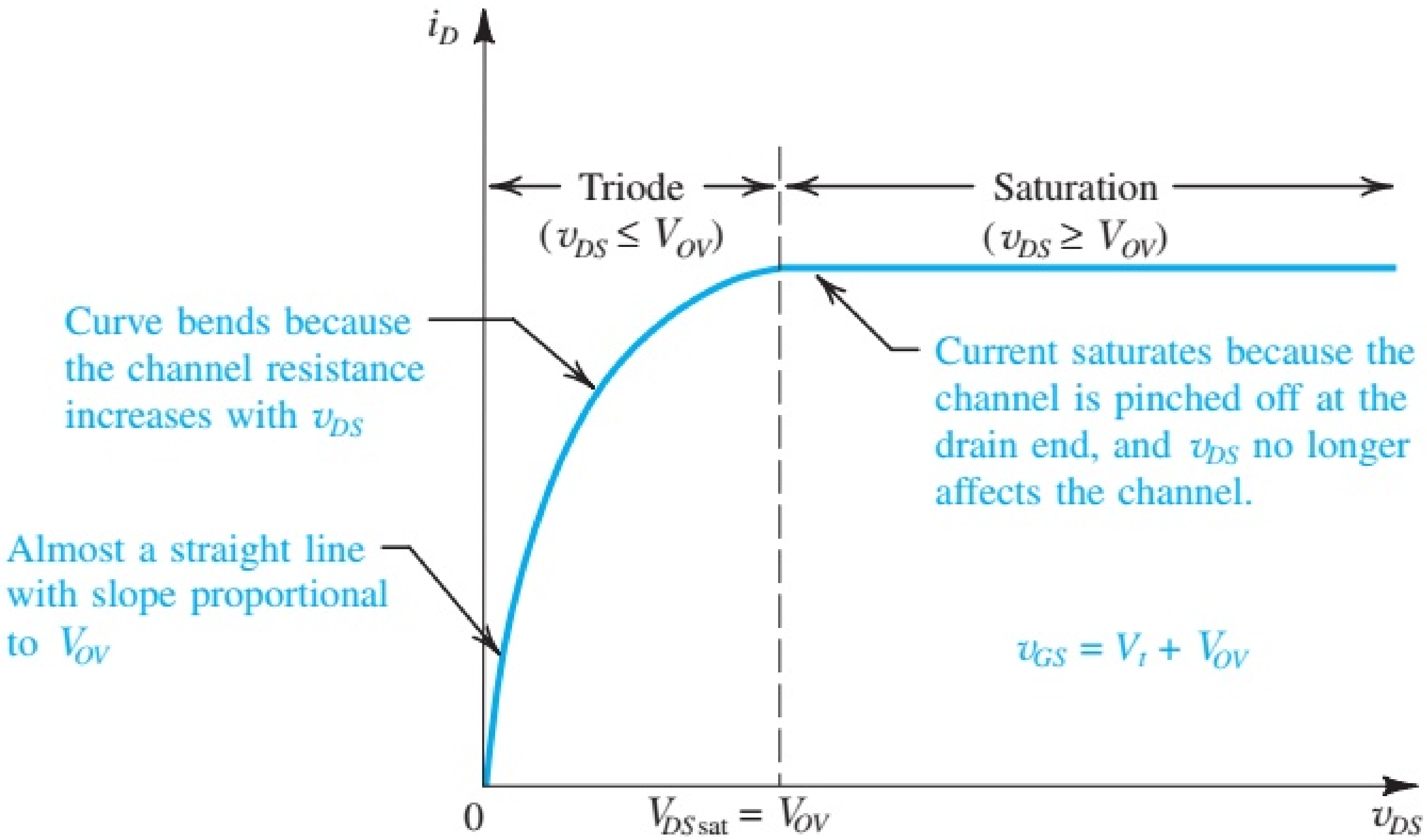
$$v_{OV} = v_{GS} - V_{tn}$$

Effective voltage
Overdrive voltage



随着 v_{DS} 继续升高，沟道夹断的长度增加，沟道长度进一步变短，沟道呈现的阻抗进一步加大，增加的电压基本与沟道增加的阻抗相匹配，漏极电流达到饱和。

● 漏极电流的分析



i_D
Triode
$(v_{DS} \leq V_{OV})$
Saturation
$(v_{DS} \geq V_{OV})$
Curve bends because the channel resistance increases with v_{DS}
Current saturates because the channel is pinched off at the drain end, and v_{DS} no longer affects the channel.
Almost a straight line with slope proportional to V_{OV}
$v_{GS} = V_t + V_{OV}$
0
$V_{DS\,\mathrm{sat}} = V_{OV}$
v_{DS}

漏极电流（以NMOS为例）

变阻区（triode region） $v_{DS} < v_{GS} - V_{tn}$ 或 $v_{GD} > V_{tn}$

$$i_D = k_n' \frac{W}{L}\left[\left(v_{GS} - V_{tn}\right)v_{DS} - \frac{1}{2}v_{DS}^2\right]$$

饱和区（saturation region） $v_{DS} \geq v_{GS} - V_{tn}$ 或 $v_{GD} \leq V_{tn}$

$$i_D = \frac{1}{2}k_n' \frac{W}{L}\left(v_{GS} - V_{tn}\right)^2$$

$$k_n' = \mu_n C_{ox} \qquad k_n = k_n' \frac{W}{L}$$

k_n' ： **the process transconductance parameter**

k_n ： **the transconductance parameter**

μ_n ： **the electron mobility**

C_{ox} ： **the oxide capacitance**

W、L ： 沟道的宽度和长度

注意

对于增强型PMOS管，$V_{tp} < 0 \qquad v_{GS} < 0 \qquad v_{DS} < 0$

变阻区（triode region） $v_{DS} > v_{GS} - V_{tp}$ 或 $v_{GD} < V_{tp}$

$|v_{DS}| < |v_{GS}| - |V_{tp}|$ 或 $|v_{GD}| > |V_{tp}|$

$$i_D = k_p{}' \frac{W}{L}\left[\left(v_{GS} - V_{tp}\right)v_{DS} - \frac{1}{2}v_{DS}^2\right]$$

饱和区（saturation region） $v_{DS} \le v_{GS} - V_{tp}$ 或 $v_{GD} \ge V_{tp}$

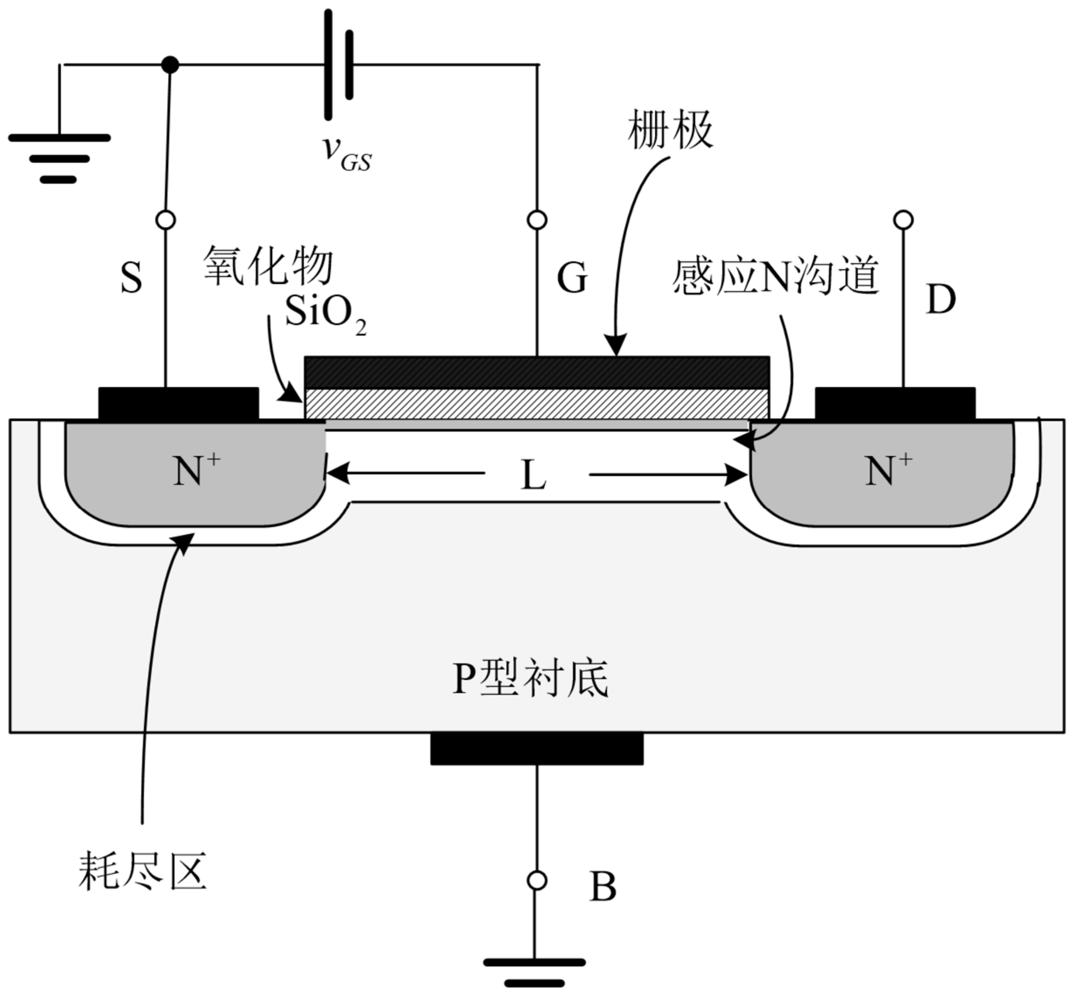
$|v_{DS}| \ge |v_{GS}| - |V_{tp}|$ 或 $|v_{GD}| \le |V_{tp}|$

$$i_D = \frac{1}{2}k_p{}' \frac{W}{L}\left(v_{GS} - V_{tp}\right)^2$$

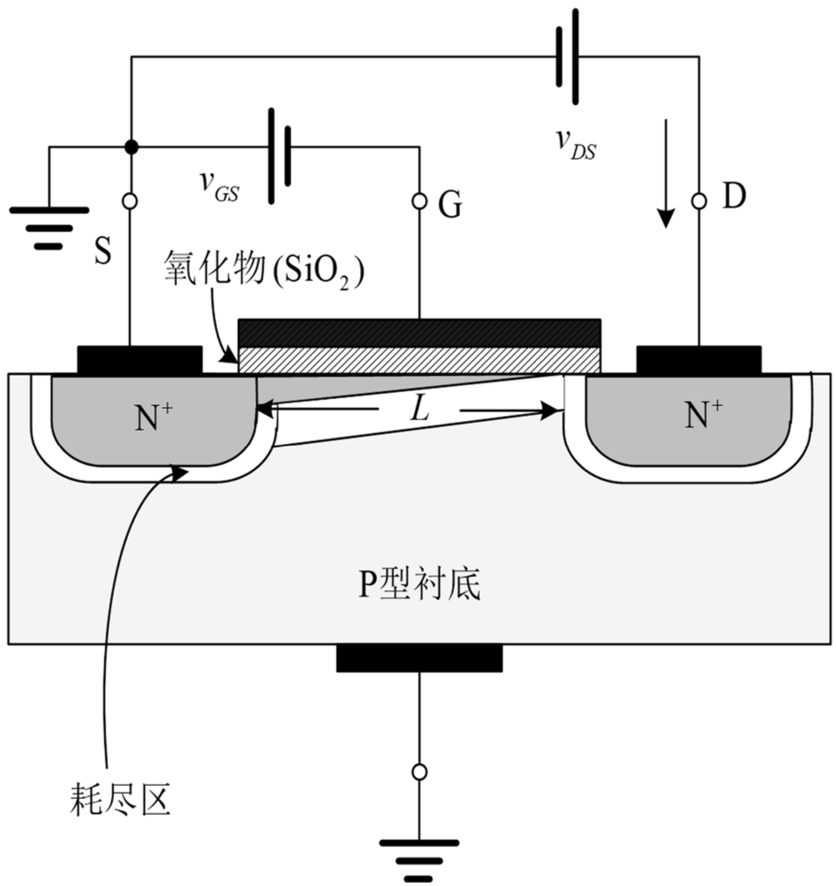
2、 N沟道耗尽型MOSFET的工作原理

- 通道夹断（沟道消失）（进入截止区）

夹断电压 $V_{GS}(\text{off})$



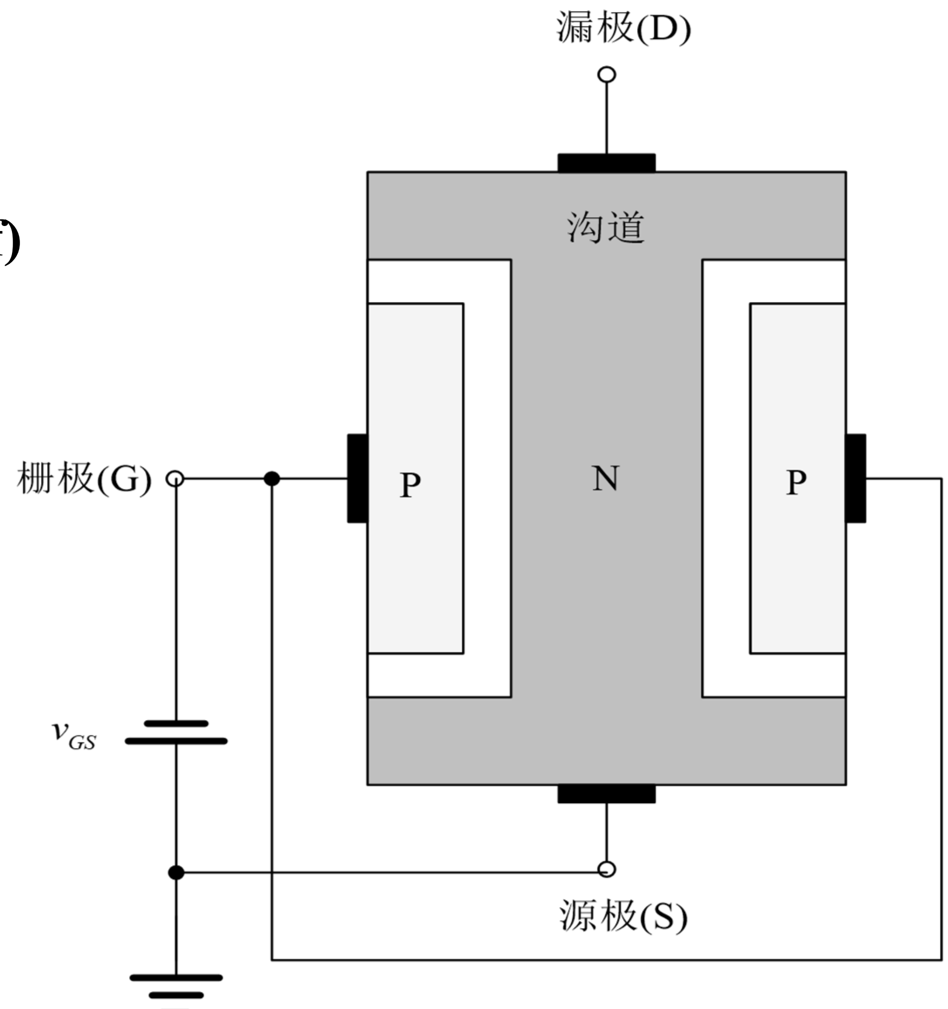
● 预夹断（进入饱和区）



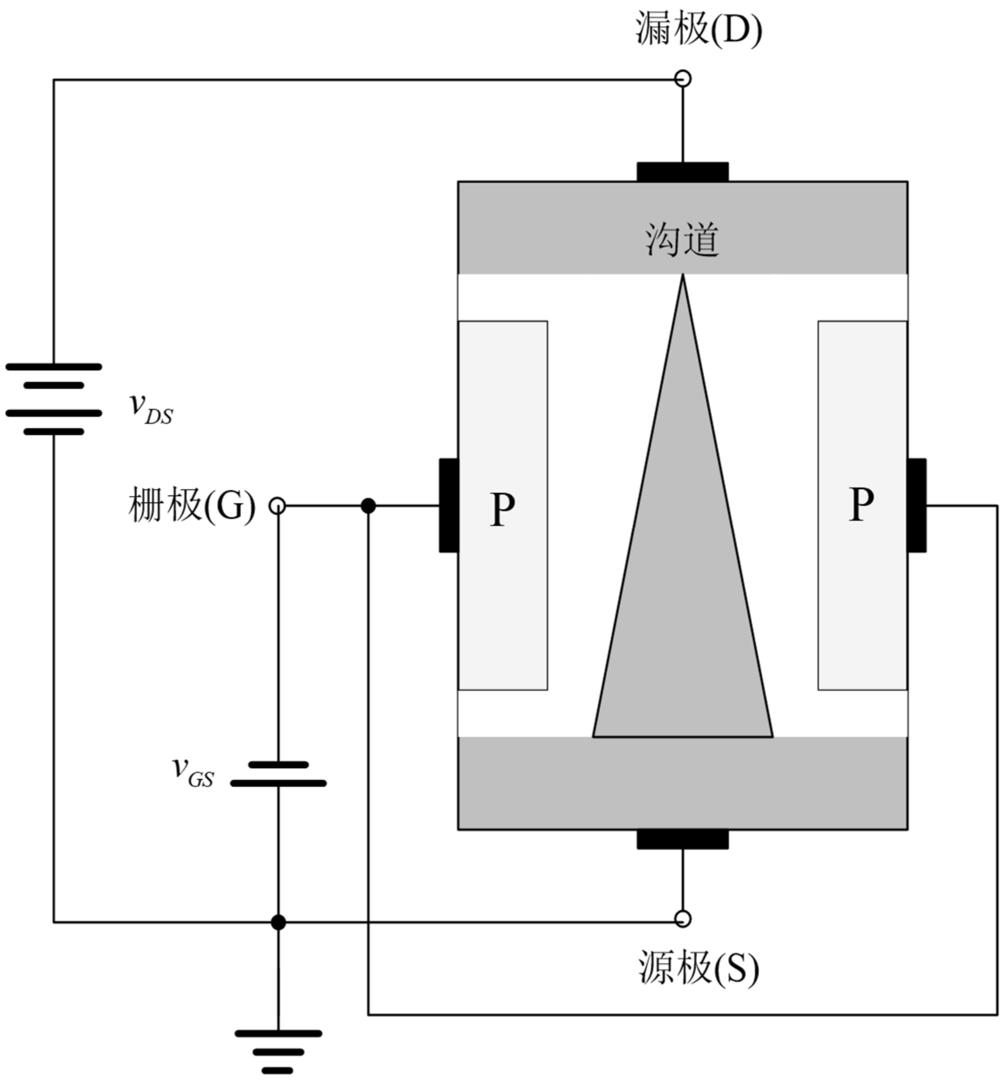
3、结型场效应管的工作原理

- 通道夹断（沟道消失）（进入截止区）

夹断电压 $V_{GS}(\mathbf{off})$

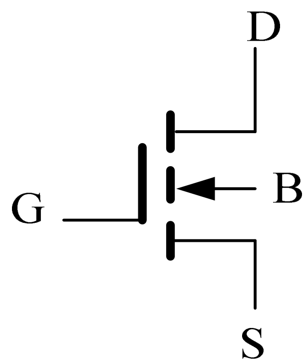


- 预夹断（进入饱和区）

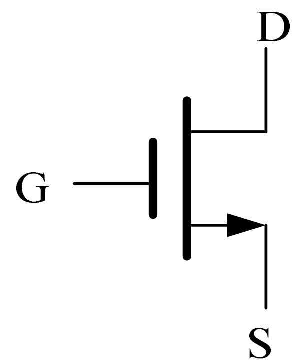


三、场效应晶体管的符号

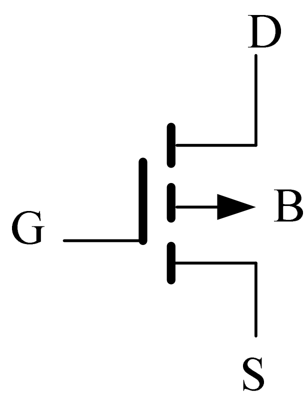
1、增强型（MOSFET）



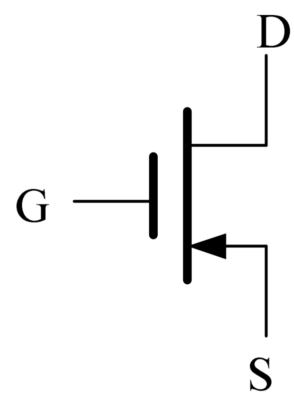
N沟道



简化符号

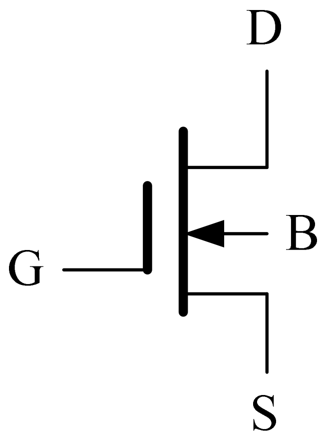


P沟道

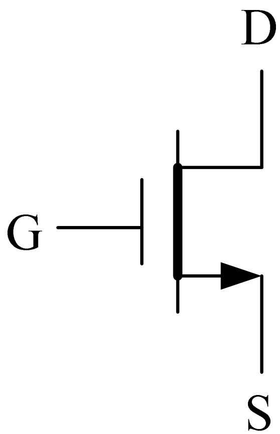


简化符号

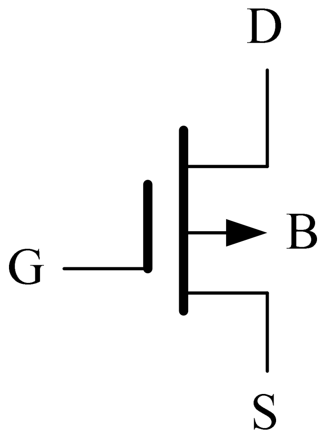
2、耗尽型（MOSFET）



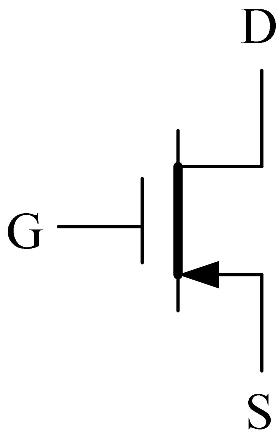
N沟道



简化模型

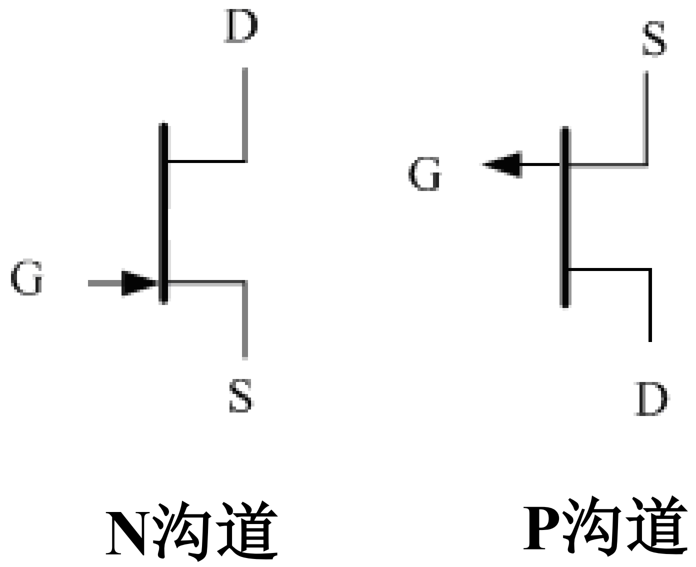


P沟道



简化模型

3、结型场效应晶体管（J-FET）

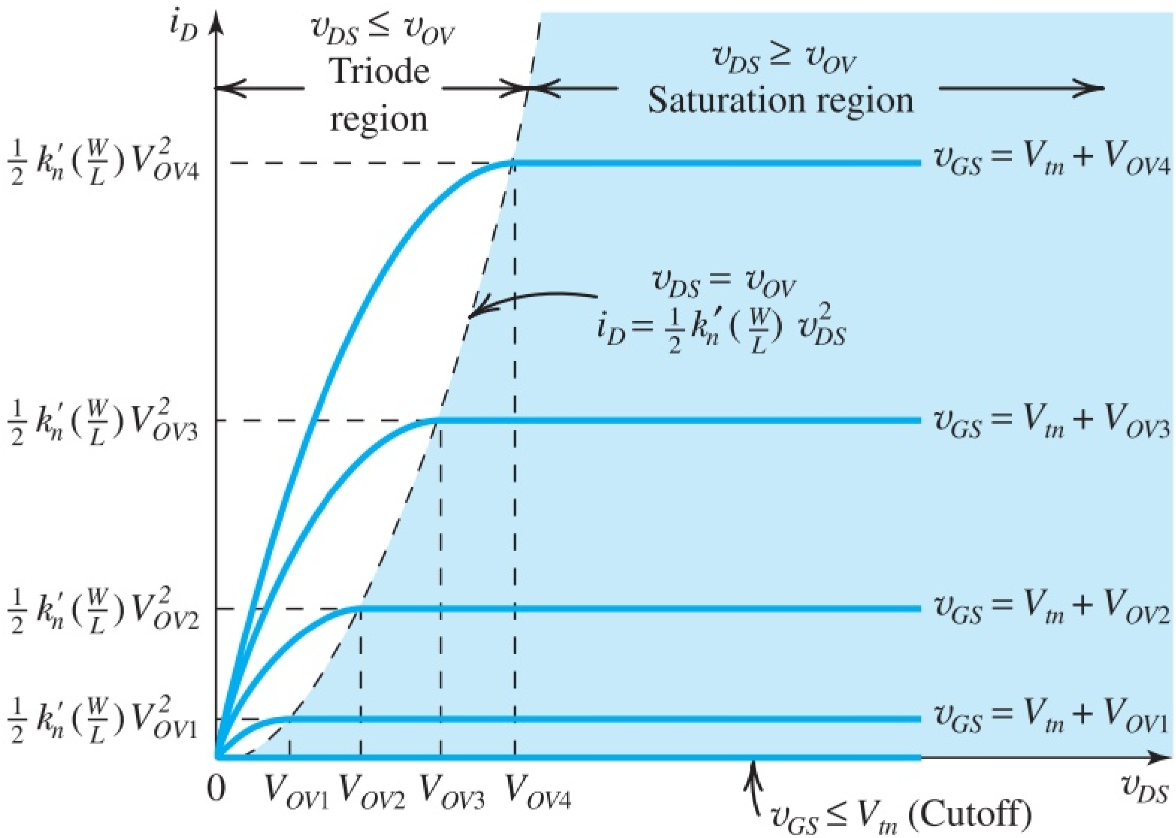


8.1.2 场效应晶体管的电路特性

一、输出特性

增强型NMOS管

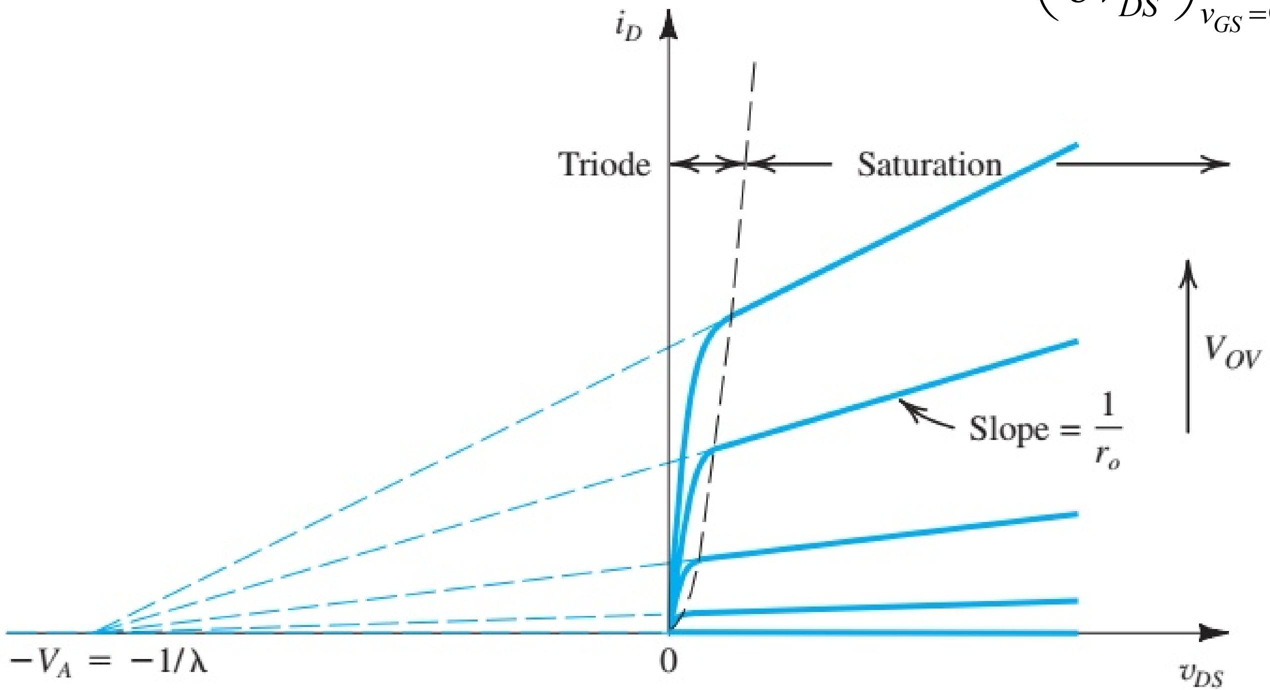
输出特性曲线



若考虑沟道长度调制效应

（channel-length modulation）

$$r_o \equiv \left(\frac{\partial i_D}{\partial v_{DS}}\right)^{-1}_{v_{GS}=\text{Const}} = \frac{V_A}{I_D}$$



NMOS管 $$i_D = \frac{1}{2}k_n'\frac{W}{L}\left(v_{GS}-V_{tn}\right)^2\left(1+\lambda v_{DS}\right) \qquad \lambda = \frac{1}{V_A} > 0$$

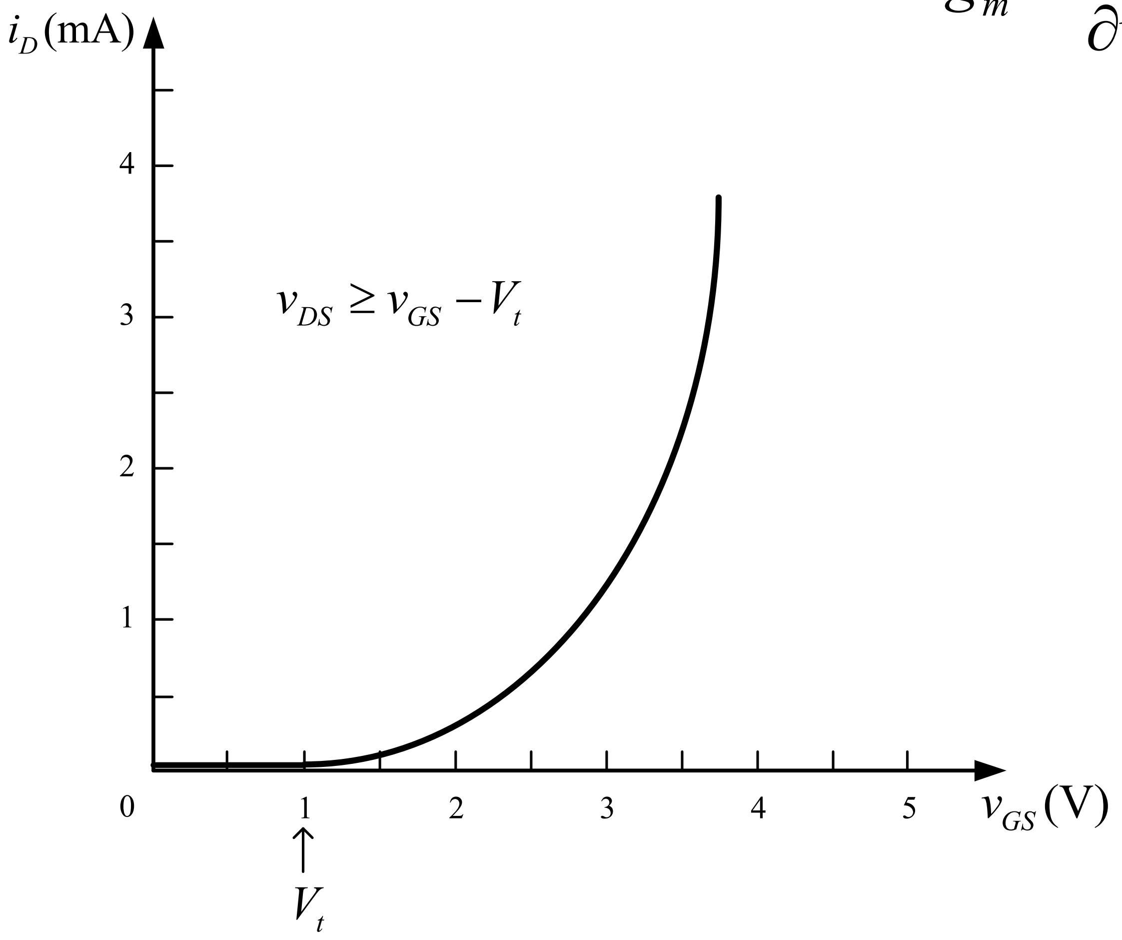
PMOS管 $$i_D = \frac{1}{2}k_p'\frac{W}{L}\left(v_{GS}-V_{tp}\right)^2\left(1+\lambda v_{DS}\right) \qquad \lambda = \frac{1}{V_A} < 0$$

二、转移特性

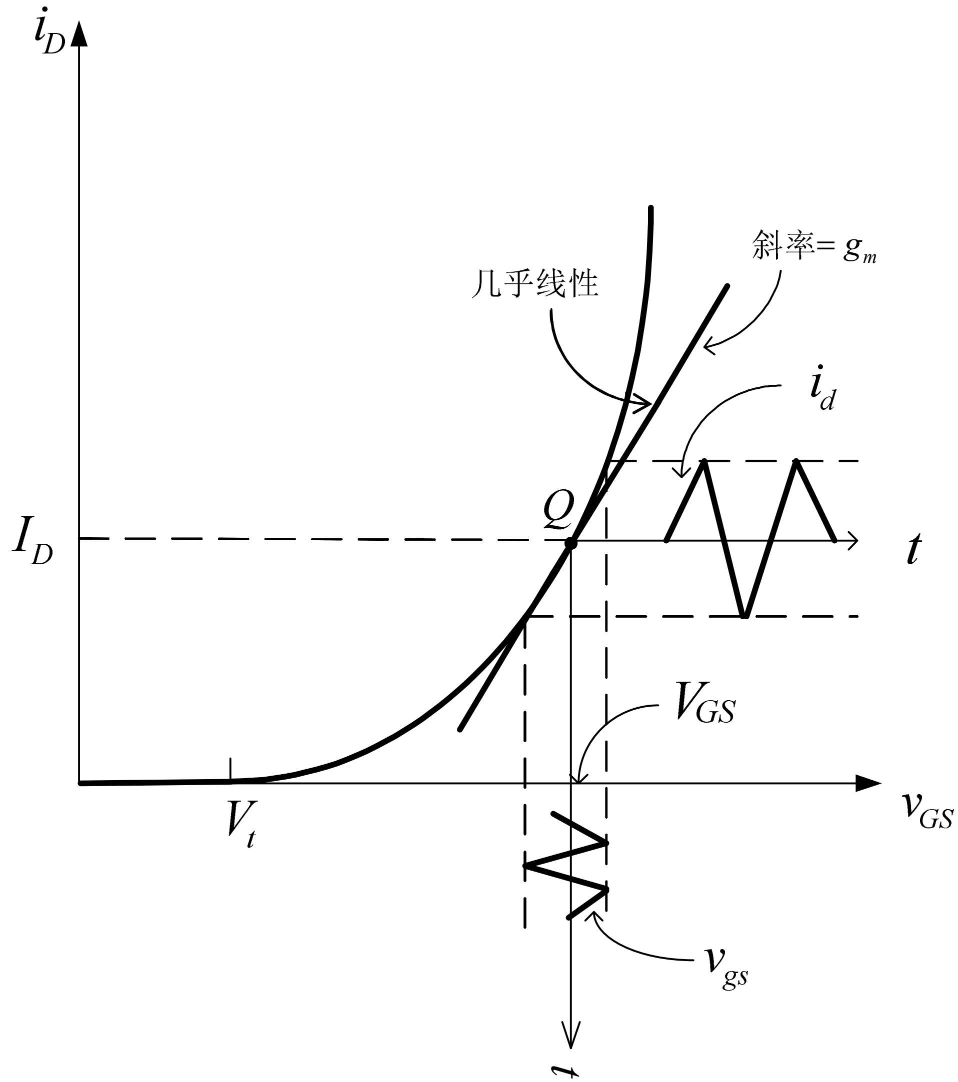
$$g_m = \left.\frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}}\right|_{i_D = I_D}$$

增强型NMOS管

转移特性曲线



场效应管工作点的确定



三、场效应管（FET）的参数

- **直流参数：**

V_{GS}(th) / V_t：开启电压（增强型MOSFET特有的参数），当V_{DS}为一固定值时，能够产生漏极电流I_D所需的$|V_{GS}|$最小值。

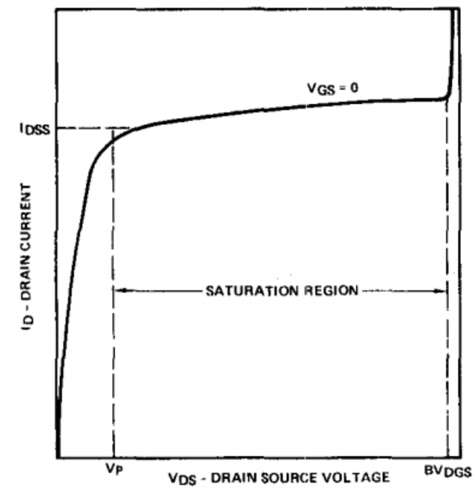
V_{GS}(off)：夹断电压（耗尽型MOSFET特有的参数），当V_{DS}为一固定值时，使I_D减小到一个微小值时所需的V_{GS}值。

I_{DSS}：饱和漏极电流，当$V_{GS}=0$，场效应管发生预夹断时的漏极电流。

R_{GS}：直流输入电阻，$V_{DS}=0$时，V_{GS}与I_G的比值。

$V_{(BR)DS}$：漏源击穿电压

$V_{(BR)GS}$：栅源击穿电压



FET Characteristic at VGS = 0

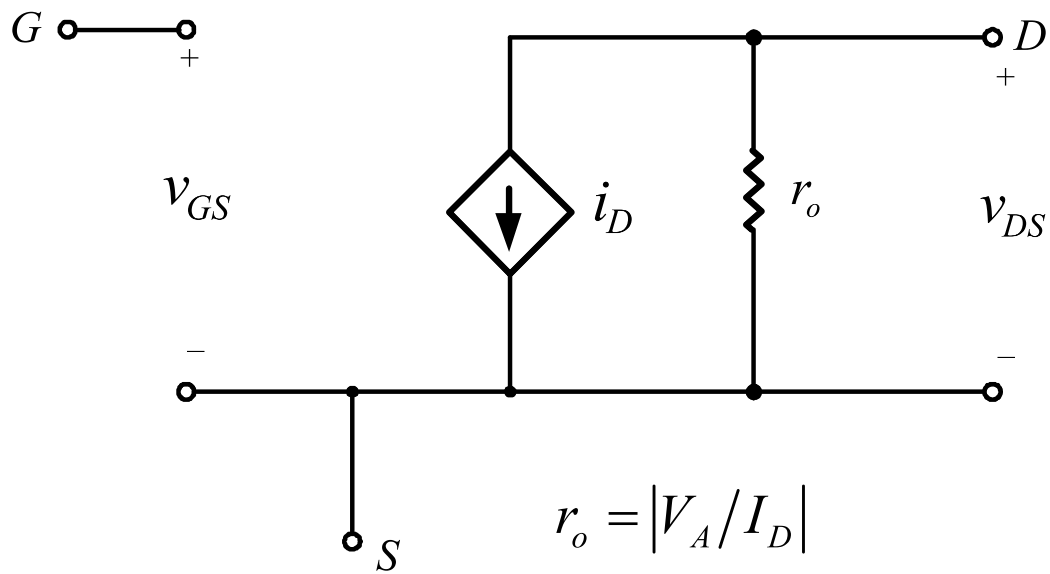
- **交流参数：**

g_m、r_o、C_{GS}、C_{GD}、C_{DS}

8.1.3 中频等效电路模型

一、大信号模型

$$i_D = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (v_{GS} - V_{tn})^2$$



也可写为

$$i_D = I_{DSS}\left(1 - \frac{v_{GS}}{V_{tn}}\right)^2$$

$$r_o = \left| V_A / I_D \right|$$

其中 $I_{DSS} = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} V_{tn}^{\ 2}$

二、小信号模型

$$v_{GS} = V_{GS} + v_{gs}$$

$$i_D = \frac{1}{2}k_n{'}\frac{W}{L}\left(v_{GS} - V_t\right)^2 = \frac{1}{2}k_n{'}\frac{W}{L}\left(V_{GS} + v_{gs} - V_{tn}\right)^2$$

$$= \frac{1}{2}k_n{'}\frac{W}{L}\left(V_{GS} - V_{tn}\right)^2 + k_n{'}\frac{W}{L}\left(V_{GS} - V_{tn}\right)v_{gs} + \frac{1}{2}k_n{'}\frac{W}{L}v_{gs}{}^2$$

若 $\frac{1}{2}k_n{'}\frac{W}{L}v_{gs}{}^2 << k_n{'}\frac{W}{L}\left(V_{GS} - V_{tn}\right)v_{gs}$　即 $v_{gs} << 2\left(V_{GS} - V_{tn}\right)$

$$\Rightarrow \quad i_D \approx \frac{1}{2}k_n{'}\frac{W}{L}\left(V_{GS} - V_{tn}\right)^2 + k_n{'}\frac{W}{L}\left(V_{GS} - V_{tn}\right)v_{gs} = I_D + i_d$$

$$I_D = \frac{1}{2}k_n{'}\frac{W}{L}\left(V_{GS} - V_{tn}\right)^2$$

$$i_d = k_n{'}\frac{W}{L}\left(V_{GS} - V_{tn}\right)v_{gs}$$

1、π型等效电路

$$i_d = k_n' \frac{W}{L}(V_{GS} - V_{tn})v_{gs}$$

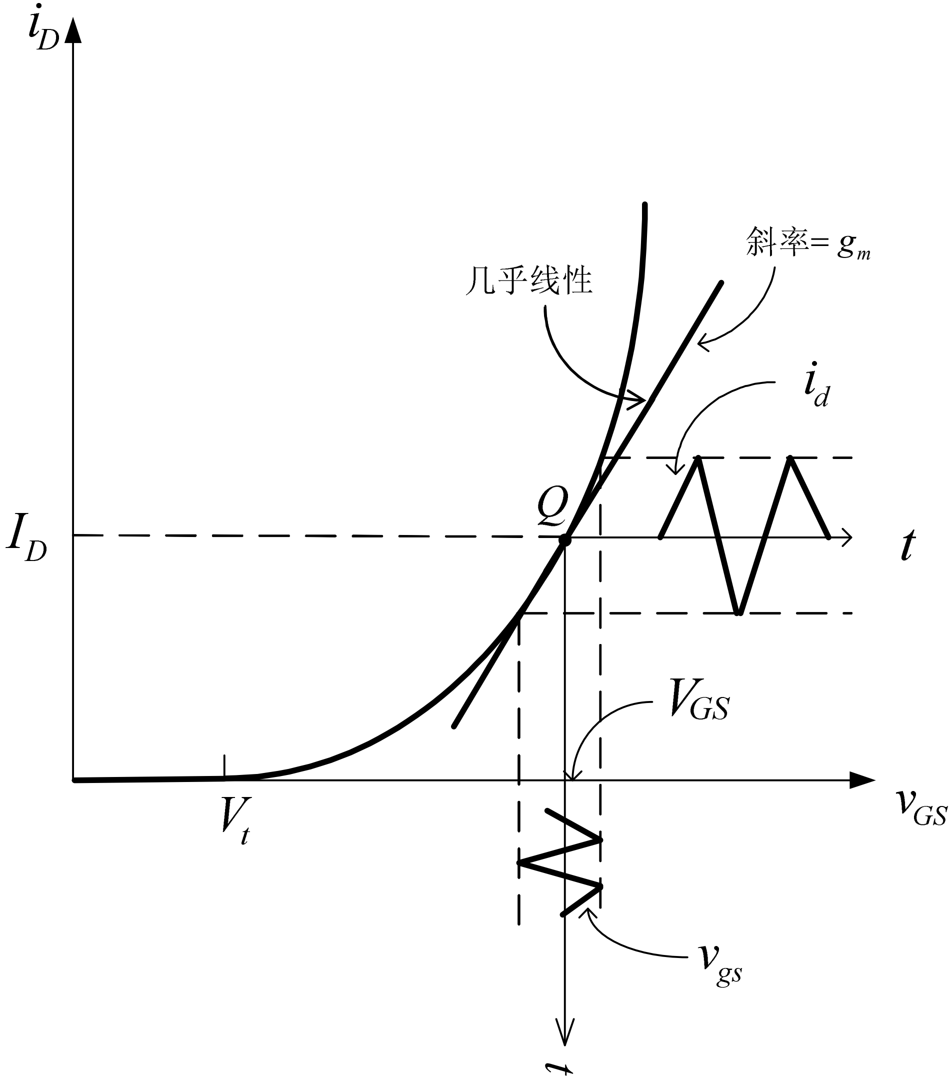
$$g_m = \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}}\bigg|_{i_D = I_D} = \frac{i_d}{v_{gs}} = k_n' \frac{W}{L}(V_{GS} - V_{tn}) = k_n V_{OV}$$

其中 $k_n = k_n' \frac{W}{L}$, $V_{OV} = V_{GS} - V_{tn}$

代入 $I_D = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L}(V_{GS} - V_{tn})^2$

又可得 $g_m = \dfrac{I_D}{(V_{GS} - V_{tn})/2}$

对照三极管 $g_m = \dfrac{I_C}{V_T}$



g_m 是转移特性曲线的斜率，因此：

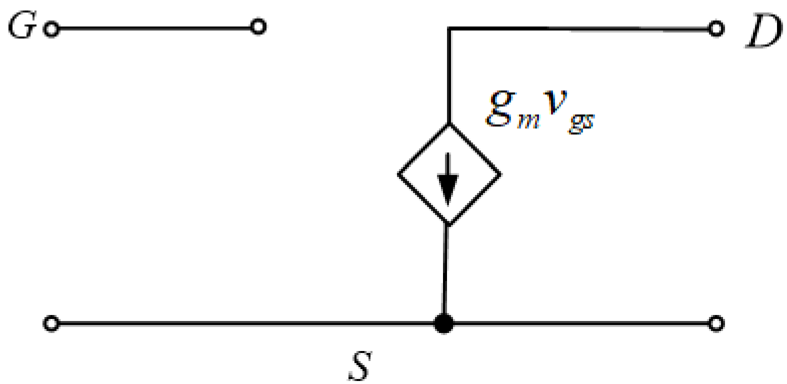
对于NMOS管， $g_m > 0$

对于PMOS管， $g_m < 0$

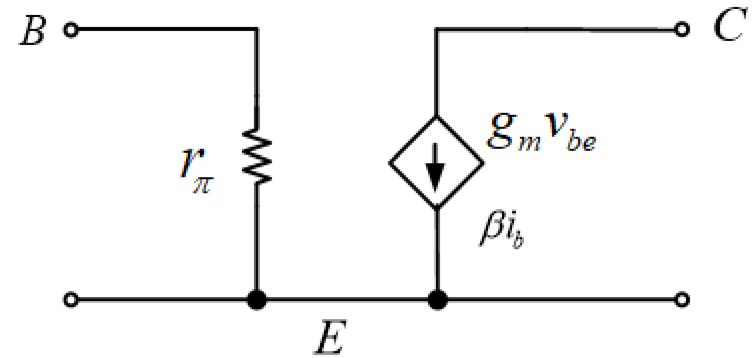
$$i_d = k_n' \frac{W}{L}(V_{GS} - V_{tn}) v_{gs} = g_m v_{gs}$$

对比

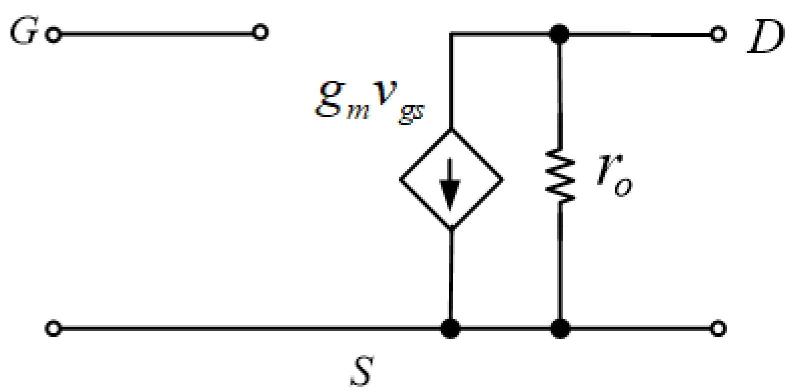
FET



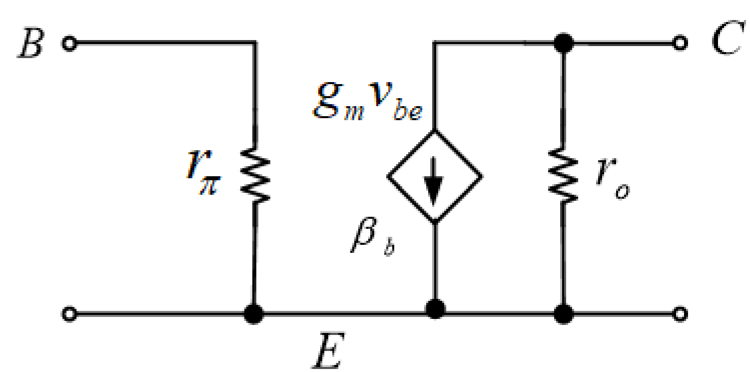
BJT



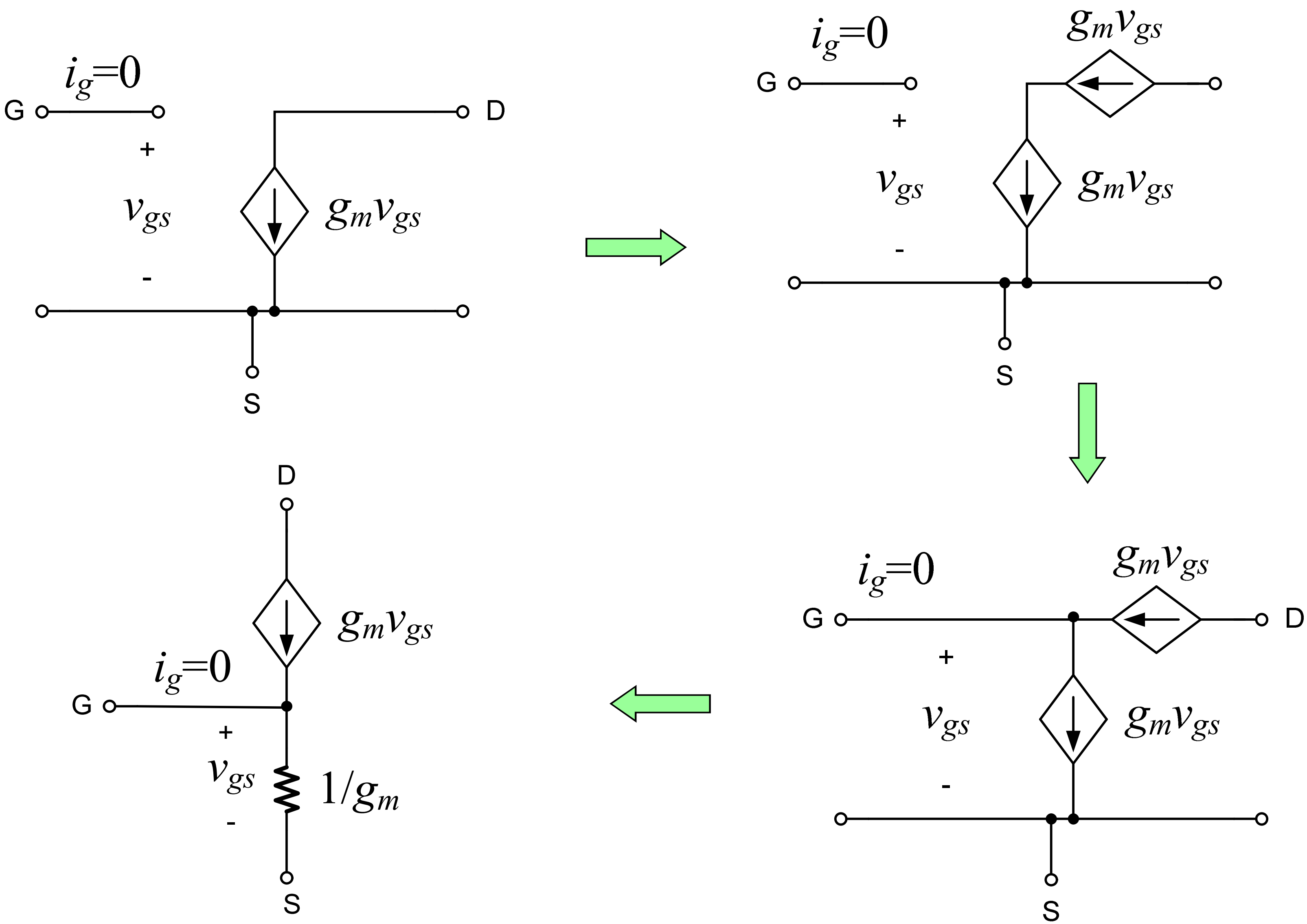
考虑沟道长度调制效应



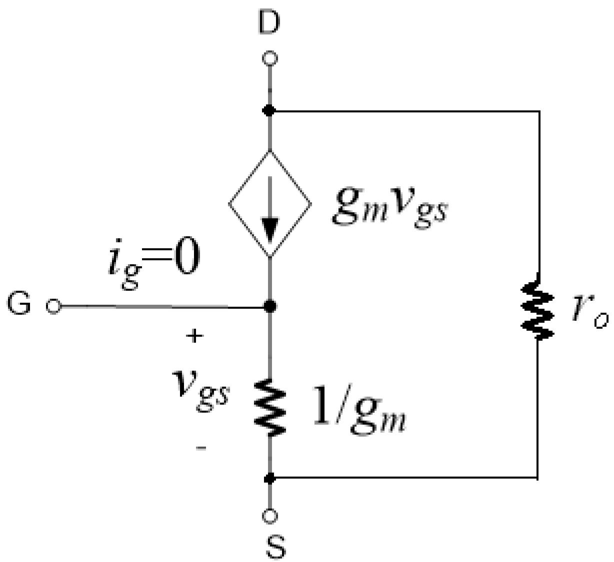
考虑厄利效应



2、T型等效电路



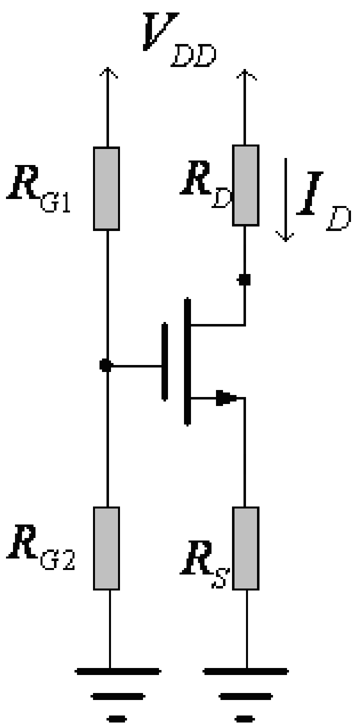
考虑输出电阻的T型等效电路



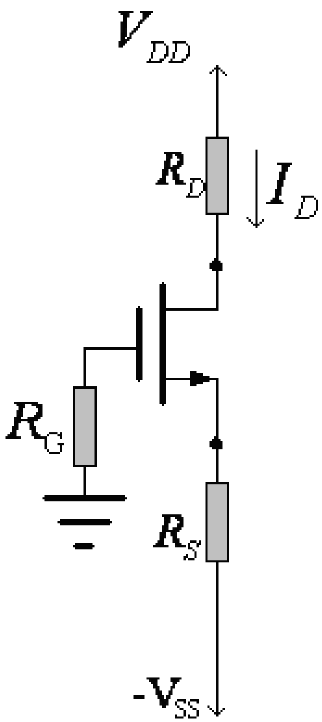
8.2 场效应晶体管放大电路的构成及其分析

8.2.1 直流偏置电路及其分析

一、自给偏置电路

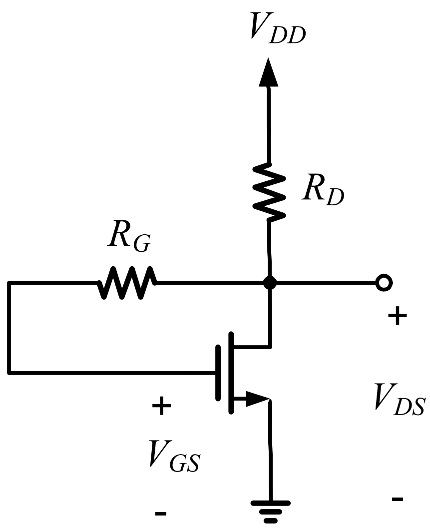


单电源



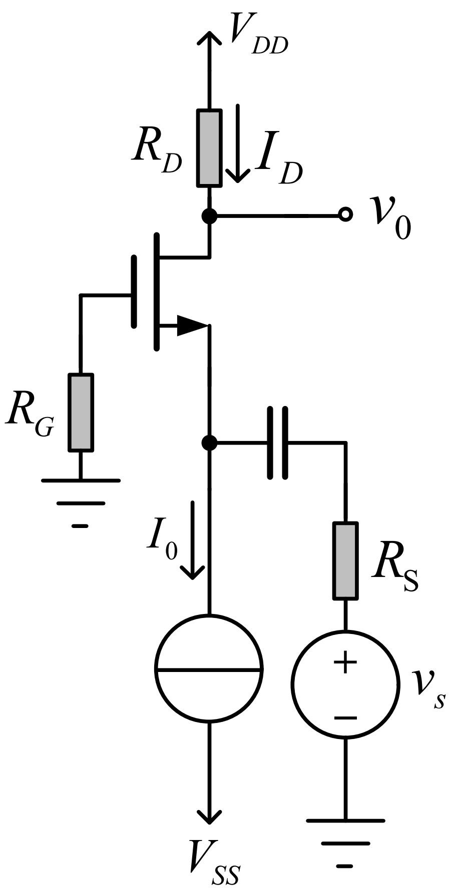
双电源

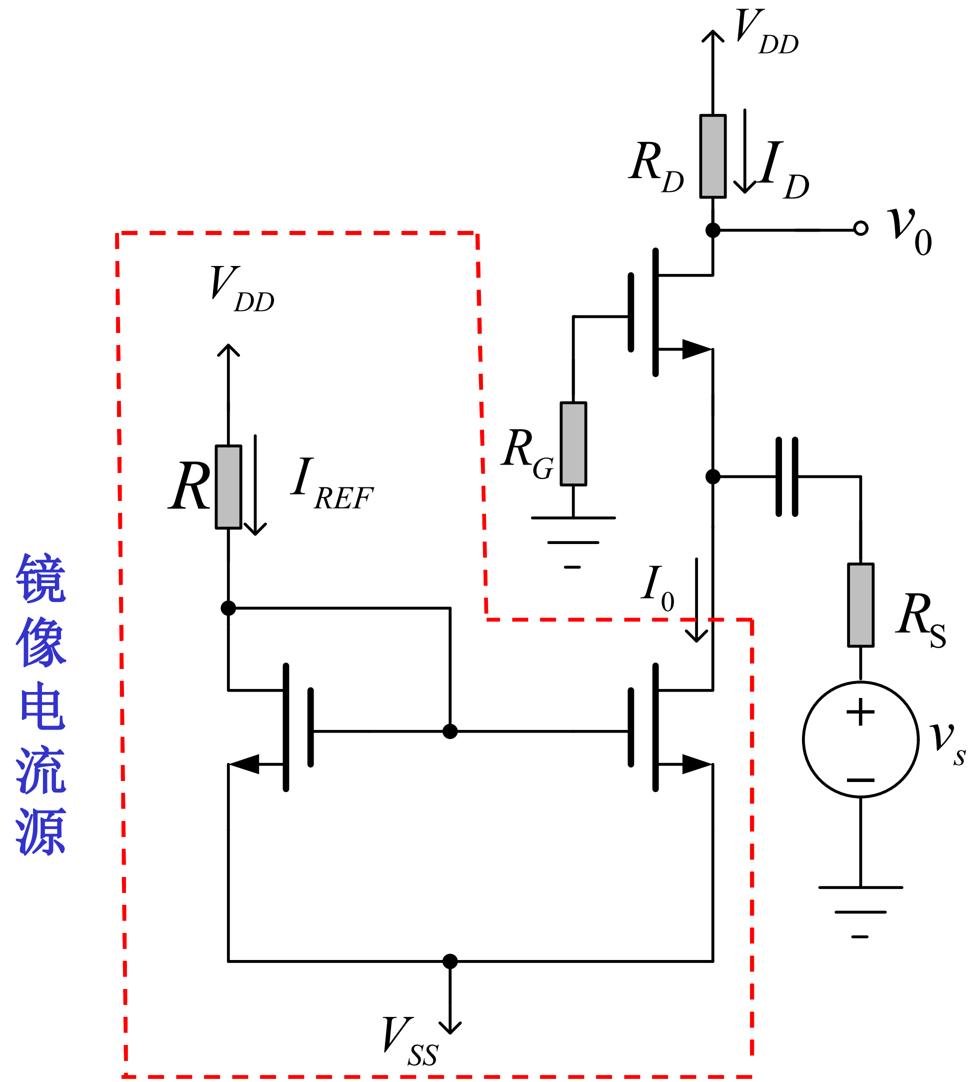
二、栅源间接反馈电阻的偏置电路



$$V_{DD} = V_{GS} + R_D I_D$$

三、恒流源偏置电路





$$I_{REF}=\frac{1}{2}k_n'\frac{W}{L}(V_{GS}-V_t)^2$$

$$I_{REF}=\frac{V_{DD}-V_{GS}-V_{SS}}{R}$$

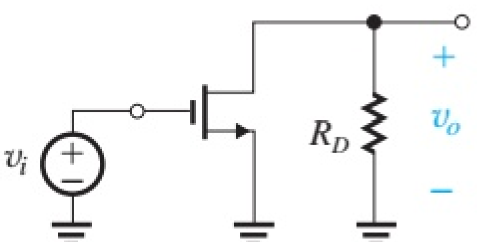
8.2.2 三种接法放大电路的分析计算

一、三种接法

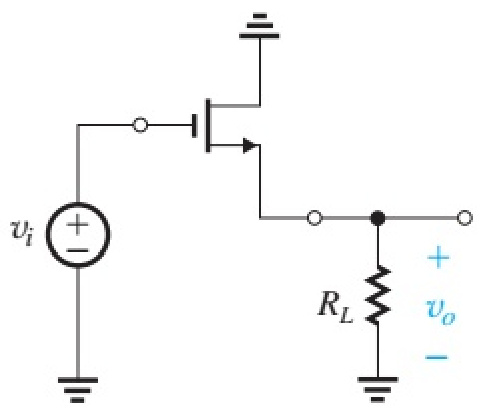
1、共源接法 Common-Source（CS)

2、共漏接法 Common-Drain（CD)

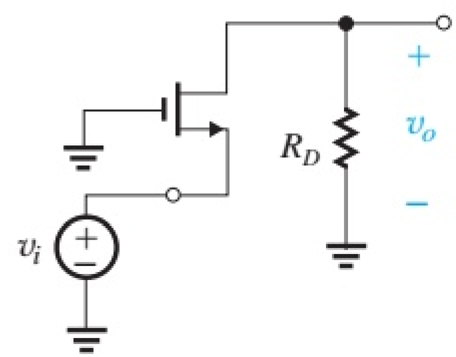
3、共栅接法 Common-Gate（CG)



(a) Common Source (CS)



(c) Common Drain (CD)
or Source Follower



(b) Common Gate (CG)

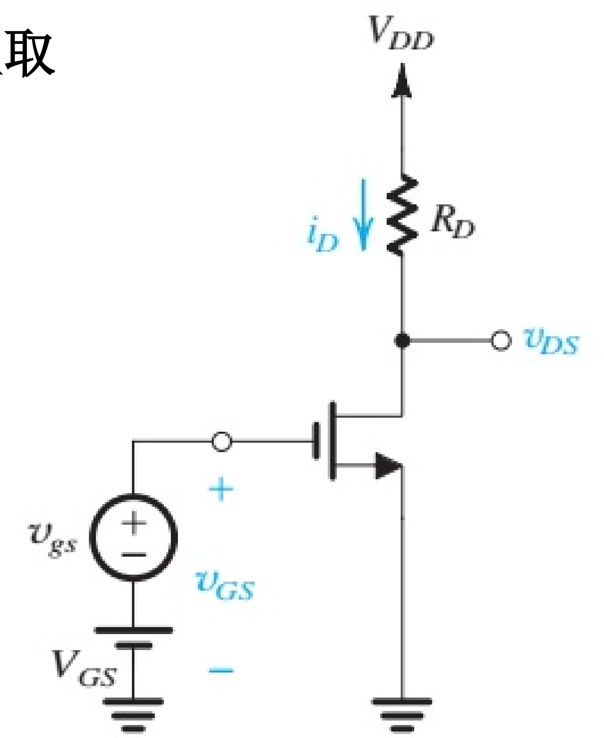
二、 直流偏置通路的计算

注意

- 首先，判断MOS管的工作状态，正确选择公式。
- 其次，求解二次方程得到双解，合理取舍。

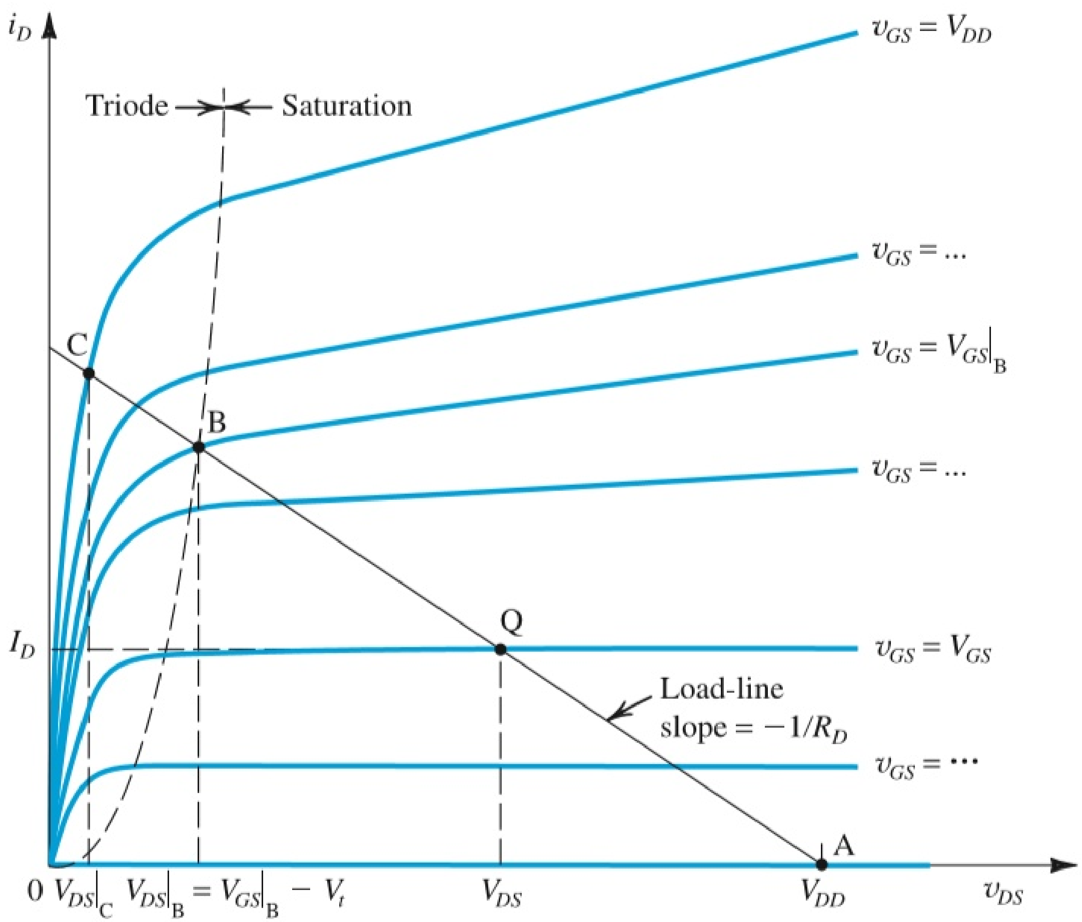
$$I_D = k_n'\frac{W}{L}\left[(V_{GS}-v_{tn})V_{DS}-\frac{1}{2}V_{DS}{}^2\right]$$

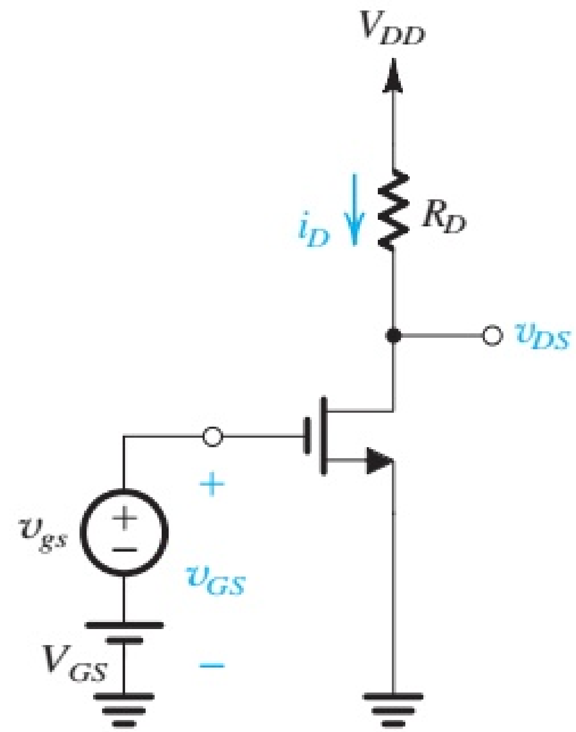
$$I_D = \frac{1}{2}k_n'\frac{W}{L}(V_{GS}-V_{tn})^2$$



三、 交流通路的计算

1、图解法





2、小信号等效电路法

a、确定跨导 g_m

$$g_m = \frac{i_d}{v_{gs}} = k_n'\frac{W}{L}(V_{GS} - V_{tn})$$

$$g_m = \frac{I_D}{(V_{GS} - V_{tn})/2}$$

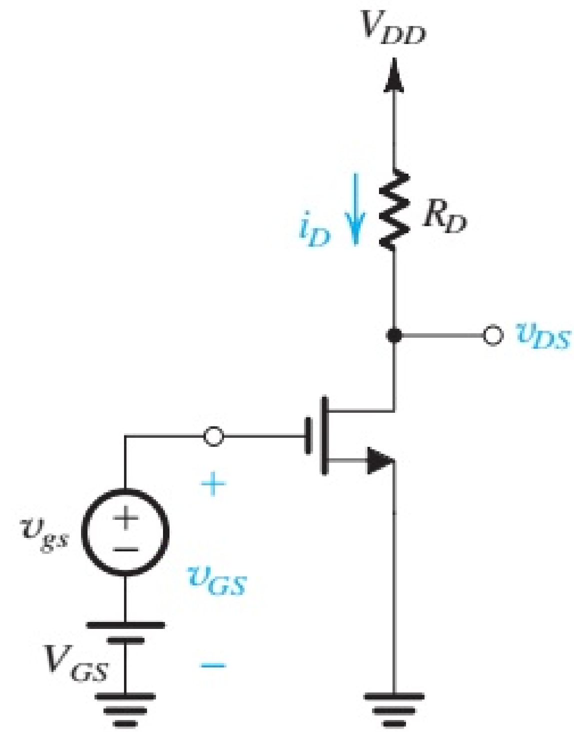
b、电压增益

$$v_{DS} = V_{DD} - R_D i_D = V_{DD} - R_D(I_D + i_d)$$

$$v_{DS} = V_{DD} - R_D I_D - R_D i_d = V_{DS} - R_D i_d$$

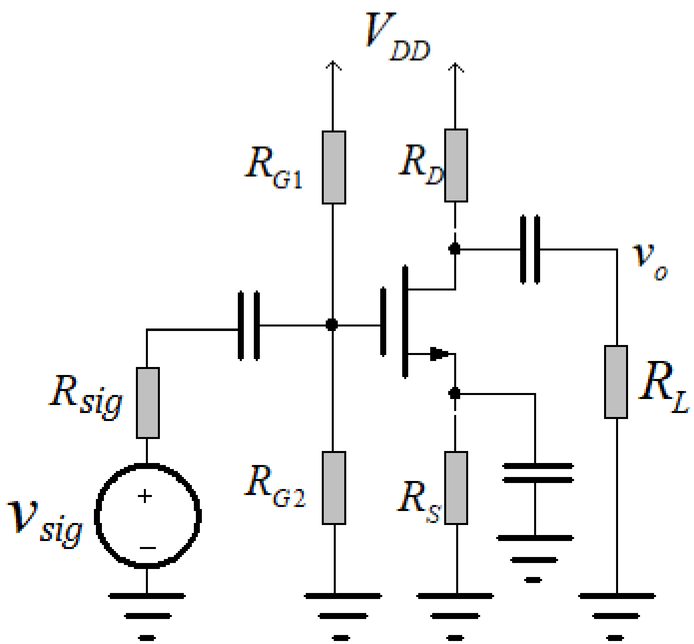
$$v_{ds} = -R_D i_d = -g_m v_{gs} R_D$$

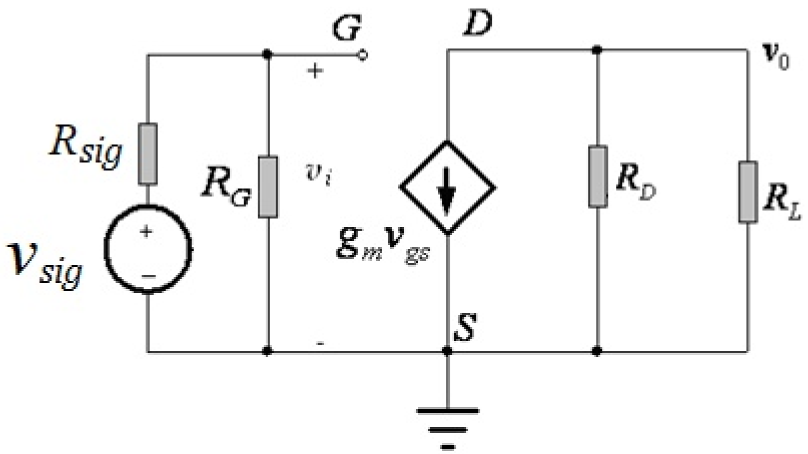
$$A_v = \frac{v_{ds}}{v_{gs}} = -g_m R_D$$



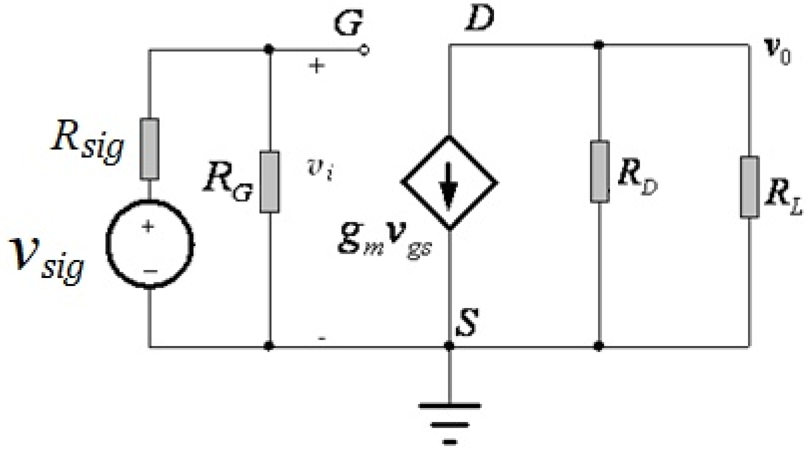
四、三种接法放大电路的计算

1、共源放大器





$$R_G = R_{G1} // R_{G2}$$



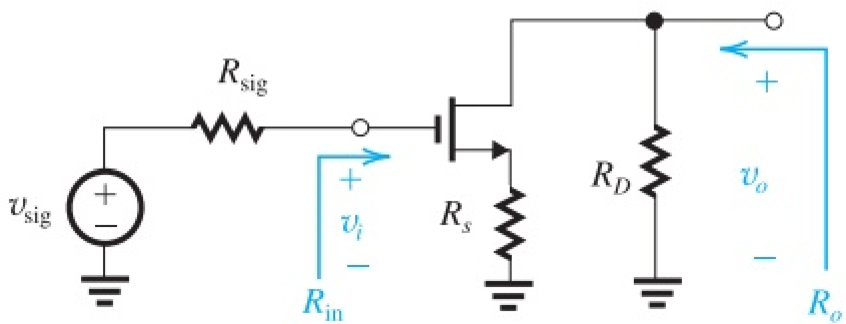
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -g_m\left(R_D // R_L\right)$$

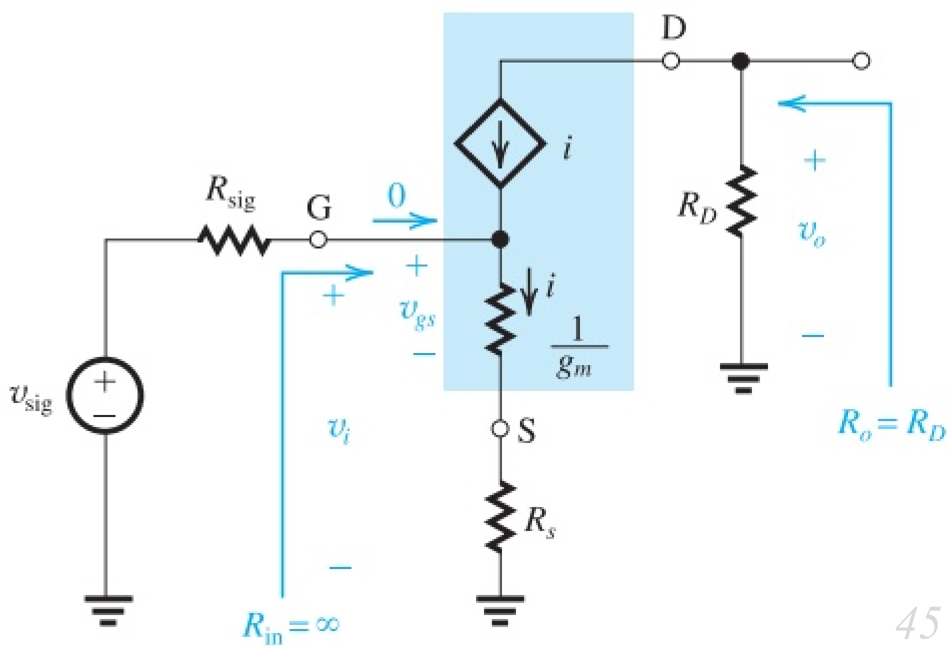
$$A_{vs} = \frac{v_o}{v_{sig}} = \frac{v_i}{v_{sig}}\frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_G}{R_{sig} + R_G} g_m\left(R_D // R_L\right)$$

$$R_i = R_G$$

$$R_o = R_D$$

➢ 带源极电阻的共源放大器



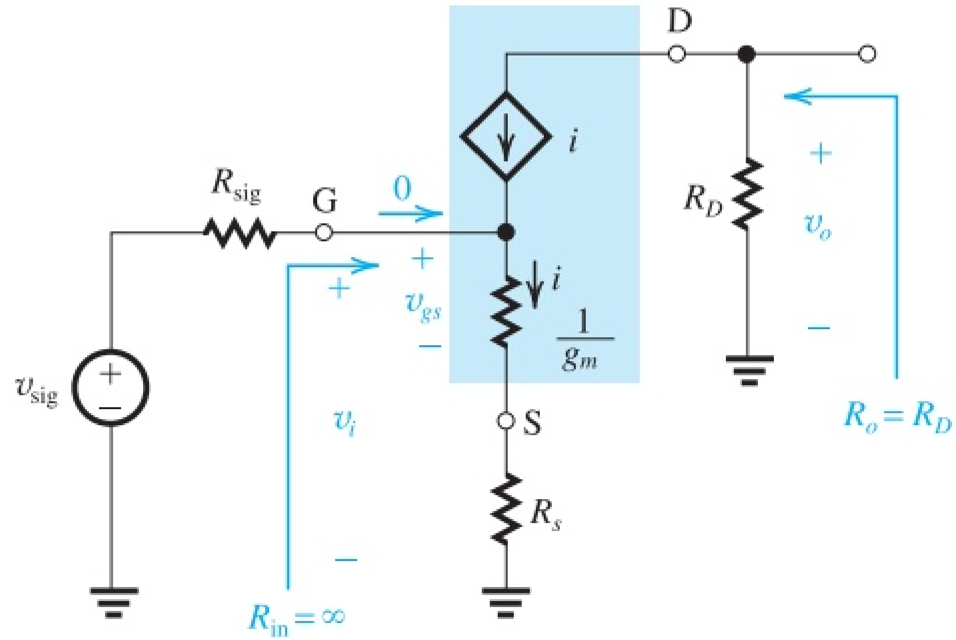


$$A_v=\frac{v_o}{v_i}=\frac{-g_m v_{gs} R_D}{g_m v_{gs}\left(1/g_m+R_S\right)}=-\frac{R_D}{1/g_m+R_S}$$

$$A_{vs}=\frac{v_o}{v_{sig}}=\frac{v_o}{v_i}=A_v$$

$$R_i=\infty$$

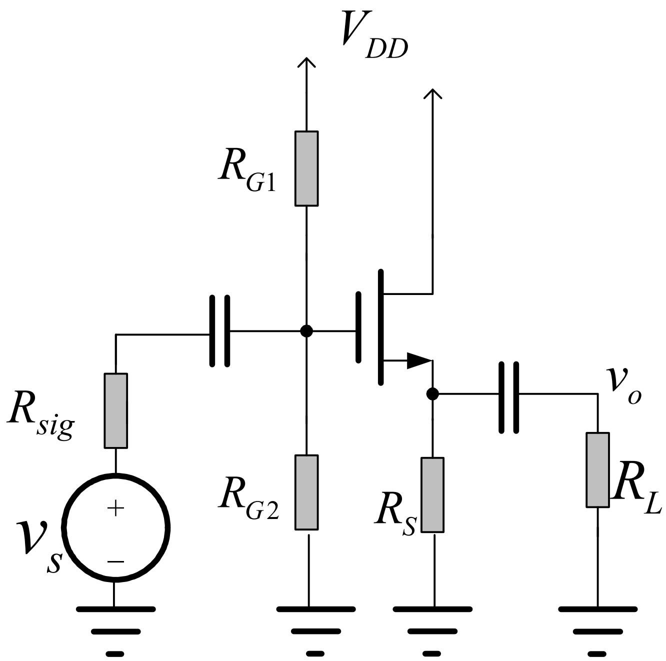
$$R_o=R_D$$



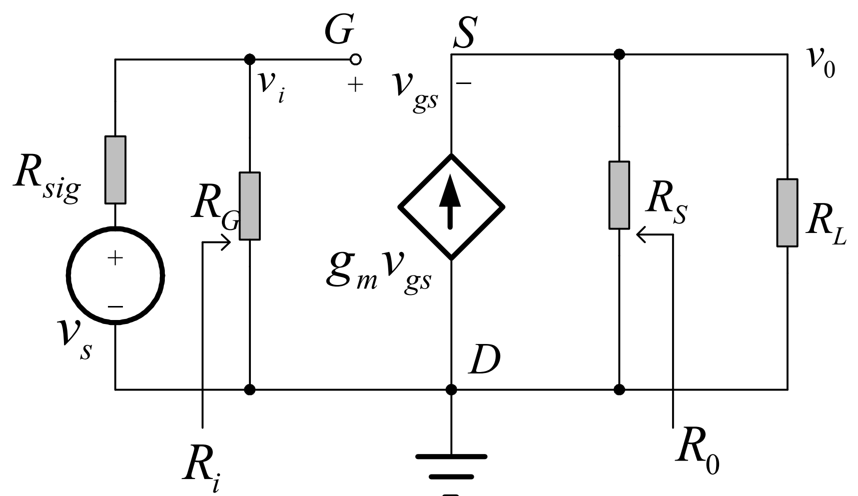
共源放大器特性：

非常高的输入电阻、适中的电压增益和相当高的输出电阻，频带窄。

2、共漏放大器



V_{DD}
R_{G1}
R_{G2}
R_{sig}
v_s
R_S
v_o
R_L



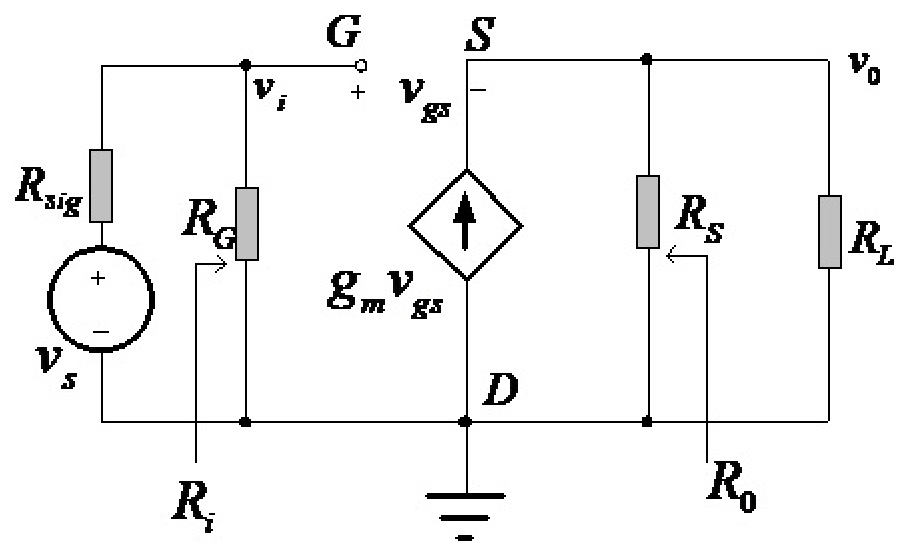
G
S
v_0
v_i
v_{gs}
R_{sig}
R_G
R_S
R_L
$g_m v_{gs}$
v_s
D
R_i
R_0

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{v_{gs} + v_o} = \frac{g_m(R_S//R_L)}{1 + g_m(R_S//R_L)}$$

$$A_{vs} = \frac{v_o}{v_{sig}} = \frac{v_i}{v_{sig}}\frac{v_o}{v_i} = \frac{R_G}{R_{sig} + R_G}A_v$$

$$R_i = R_G$$

$$R_o = R_S // \frac{1}{g_m}$$

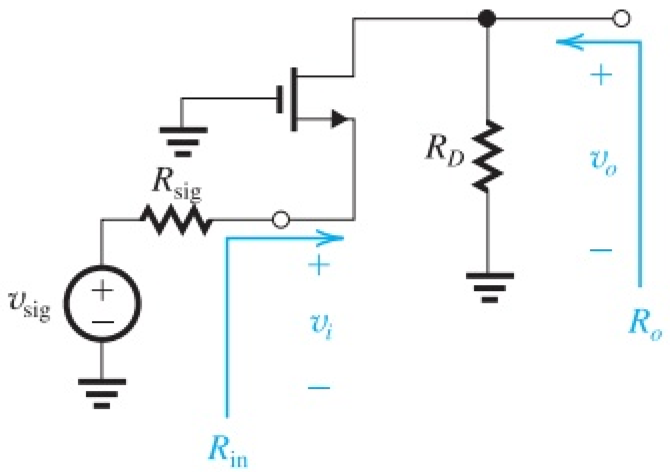


共漏放大器特性：

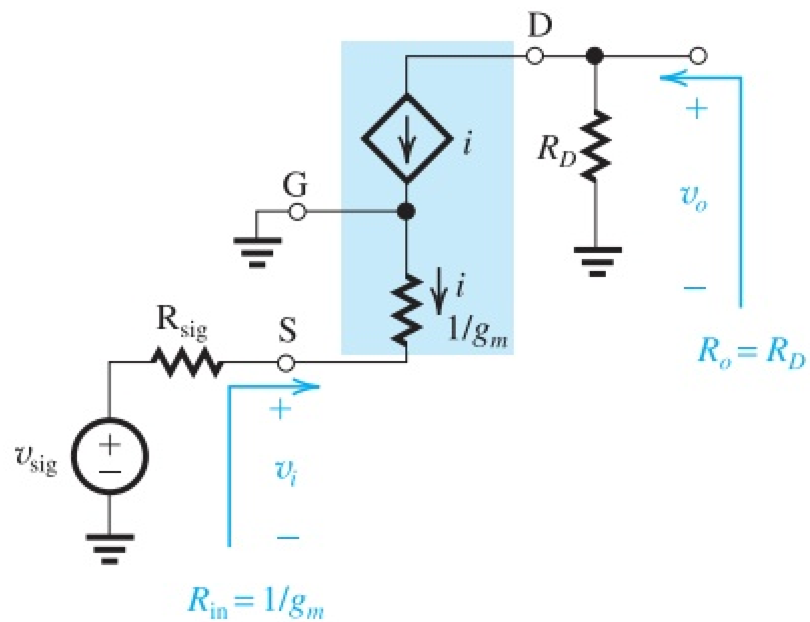
非常高的输入电阻、相当低的输出电阻和接近于1的电压增益，频带中等。

共漏放大器可作为单位增益的电压缓冲放大器，又称为**源极跟随器**。

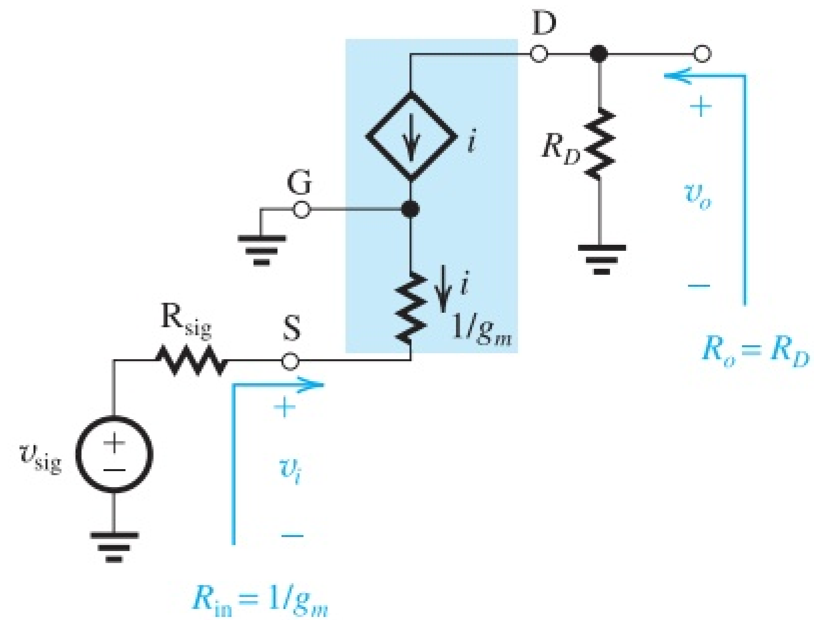
3、共栅放大器



R_{sig}
R_D
v_{sig}
v_i
v_o
R_o
R_{in}



D
G
S
i
$1/g_m$
R_D
R_{sig}
v_{sig}
v_i
v_o
$R_o = R_D$
$R_{in} = 1/g_m$



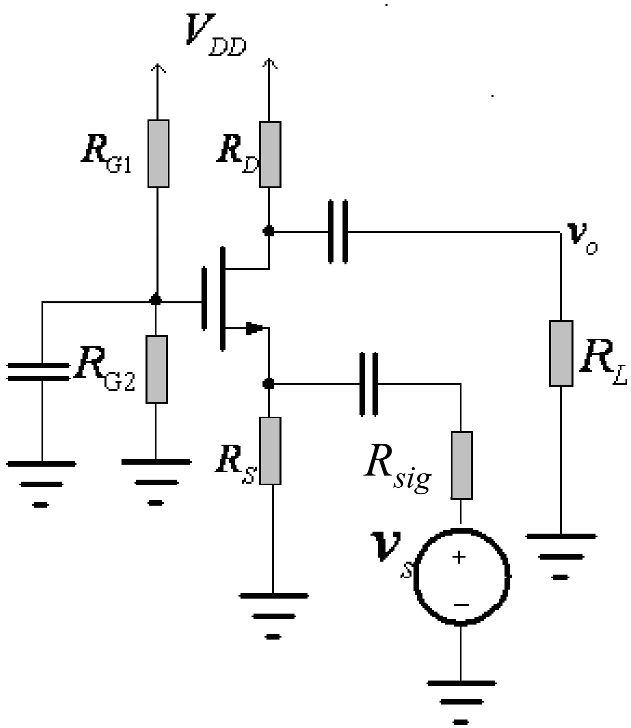
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-g_m v_{gs} R_D}{-g_m v_{gs} \times \dfrac{1}{g_m}} = g_m R_D$$

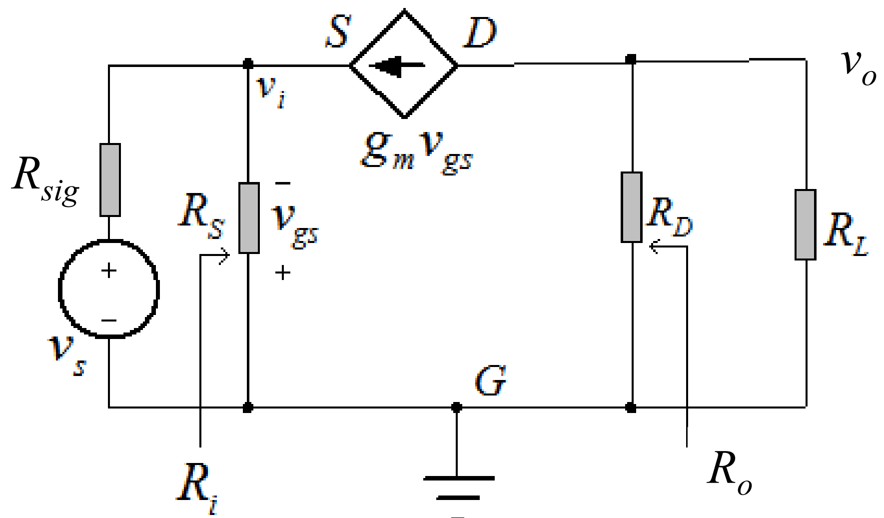
$$A_{vs} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_i}{v_s} \times \frac{v_o}{v_i} = \frac{-g_m v_{gs} \times \dfrac{1}{g_m}}{-g_m v_{gs} \times \left(R_{sig} + \dfrac{1}{g_m}\right)} \times g_m R_D = \frac{R_D}{R_{sig} + 1/g_m}$$

$$R_i = \frac{1}{g_m}$$

$$R_o = R_D$$

➢ 带源极电阻的共栅放大器

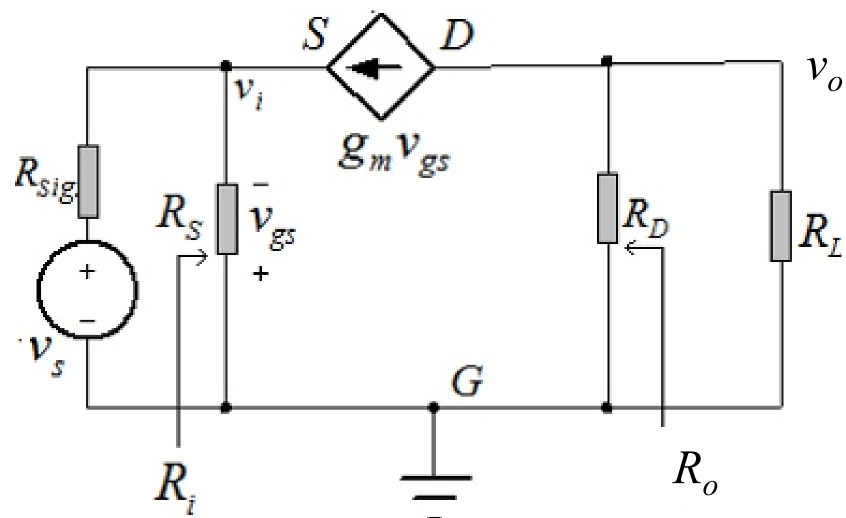




$$A_v=\frac{v_o}{v_i}=g_m R_D//R_L$$

$$A_{vs}=\frac{v_o}{v_s}=\frac{v_i}{v_s}\times\frac{v_o}{v_i}=\frac{-v_{gs}}{R_{sig}\left(-g_m v_{gs}-v_{gs}/R_S\right)-v_{gs}}\times g_m\left(R_D//R_L\right)$$

$$=\frac{g_m\left(R_D//R_L\right)}{\left(g_m+1/R_S\right)R_{sig}+1}$$



$$R_i=R_S//\frac{1}{g_m}$$

$$R_o\approx R_D$$

共栅放大器特性：

相当低的输入电阻、很大的输出电阻和接近于1的电流增益，且高频特性较好，频带宽。

共栅放大器可作为单位增益的电流缓冲放大器，又称为电流跟随器。

三种接法放大电路特性比较

接法	共源	共漏	共栅
A_v	适中	~1	适中
A_i	/	/	~1
R_i	大	大	小
R_o	大	小	大
频带	窄	中	宽