第9章　场效应晶体管（FETs）

场效应晶体管的结构和工作原理

场效应晶体管的特性及其等效模型

场效应晶体管放大电路的构成及其分析

9.1 场效应晶体管的结构和工作原理

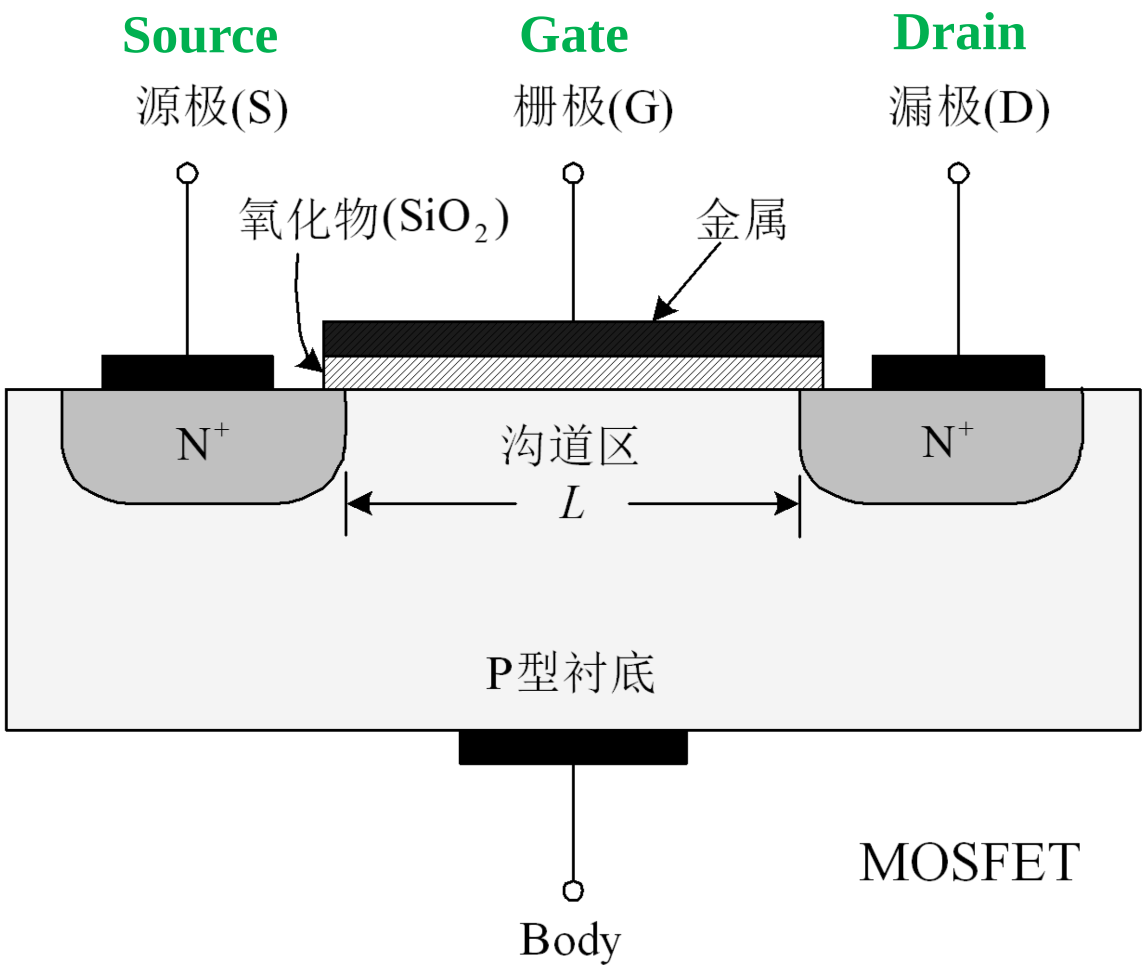
9.1.1 场效应晶体管的结构及其电路符号

单极型管：噪声小、抗辐射能力强、低电压工作

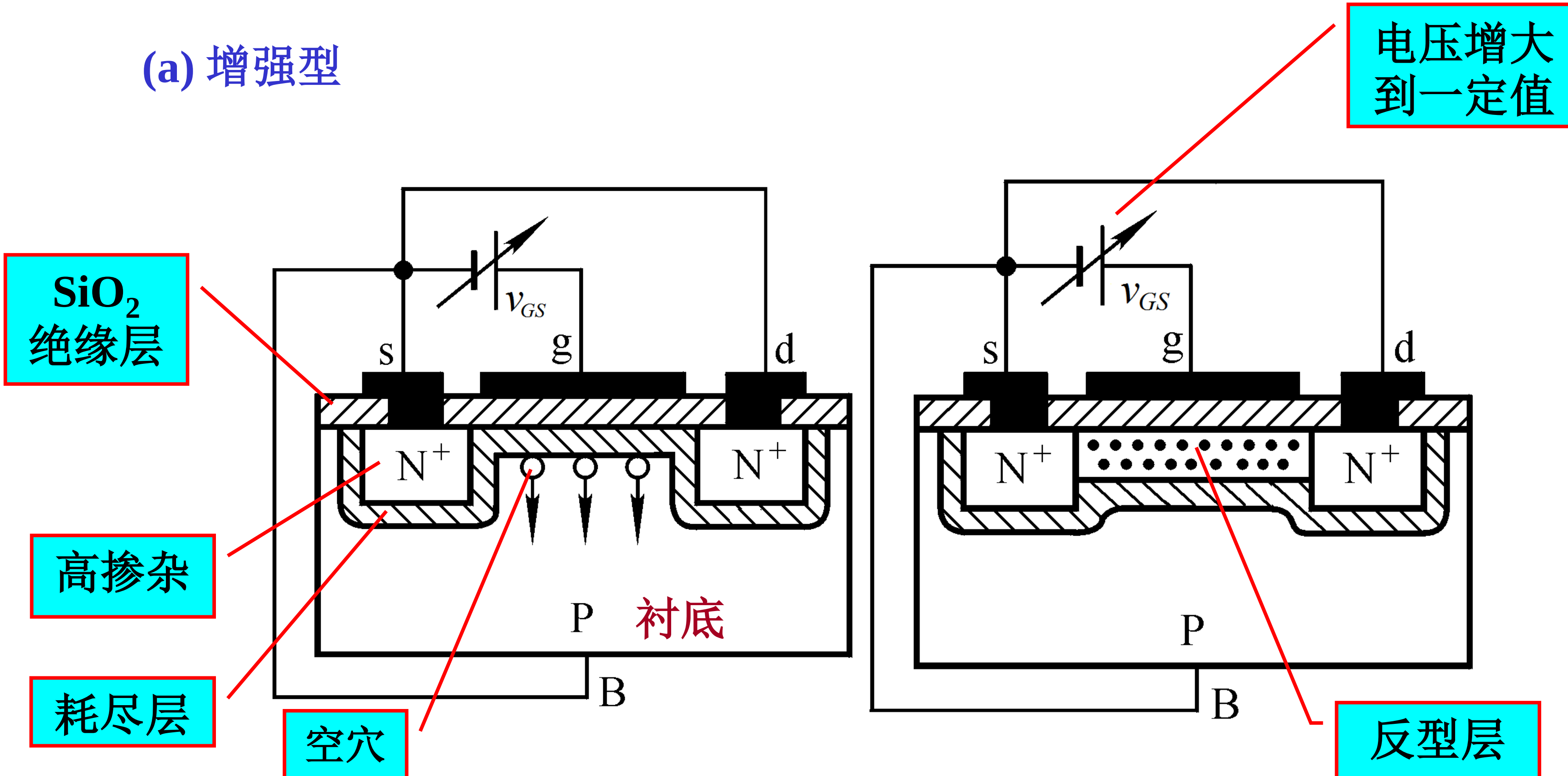
- FET (Field Effect Transistor)
  - 结型FET (J-FET)
    - P沟道 (P-Channel)
    - N沟道 (N-Channel)
  - (MOS) 绝缘栅型FET (IG-FET) (Insulated Gate)
    - 增强型 (Enhancement-Type)
      - P沟道 (P-Channel)
      - N沟道 (N-Channel)
    - 耗尽型 (Depletion-Type)
      - P沟道 (P-Channel)
      - N沟道 (N-Channel)

一、场效应晶体管的结构

1、绝缘栅型场效应晶体管的结构

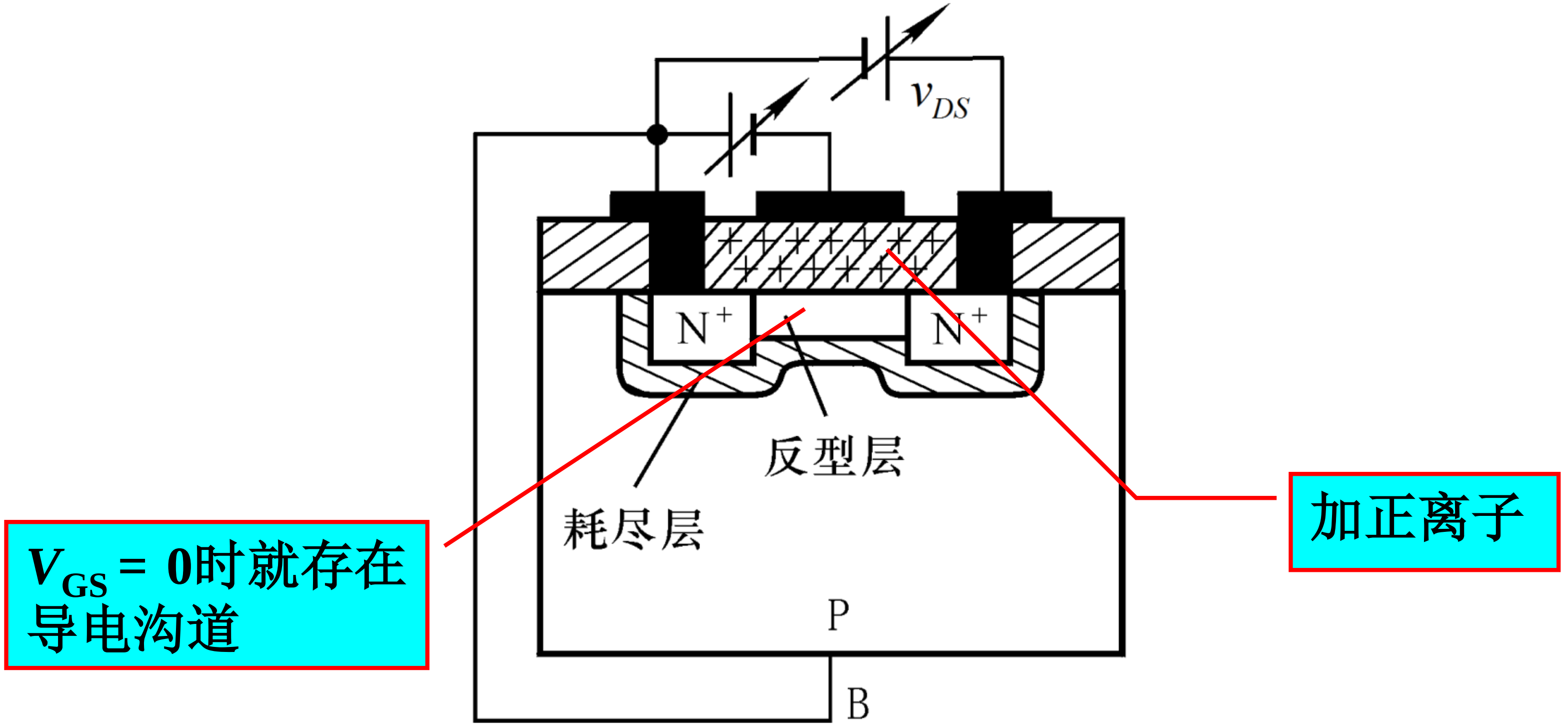


(a) 增强型



V_{GS}增大，反型层（导电沟道）将变厚变长。当反型层将两个N区相接时，形成导电沟道。

(b) 耗尽型

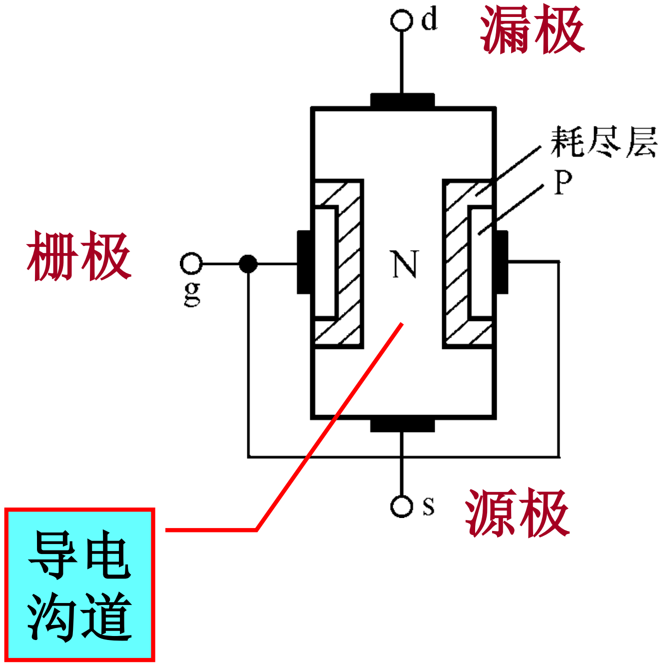


耗尽型MOS管在 $V_{GS}>0$、 $V_{GS}<0$、 $V_{GS}=0$时均可导通。

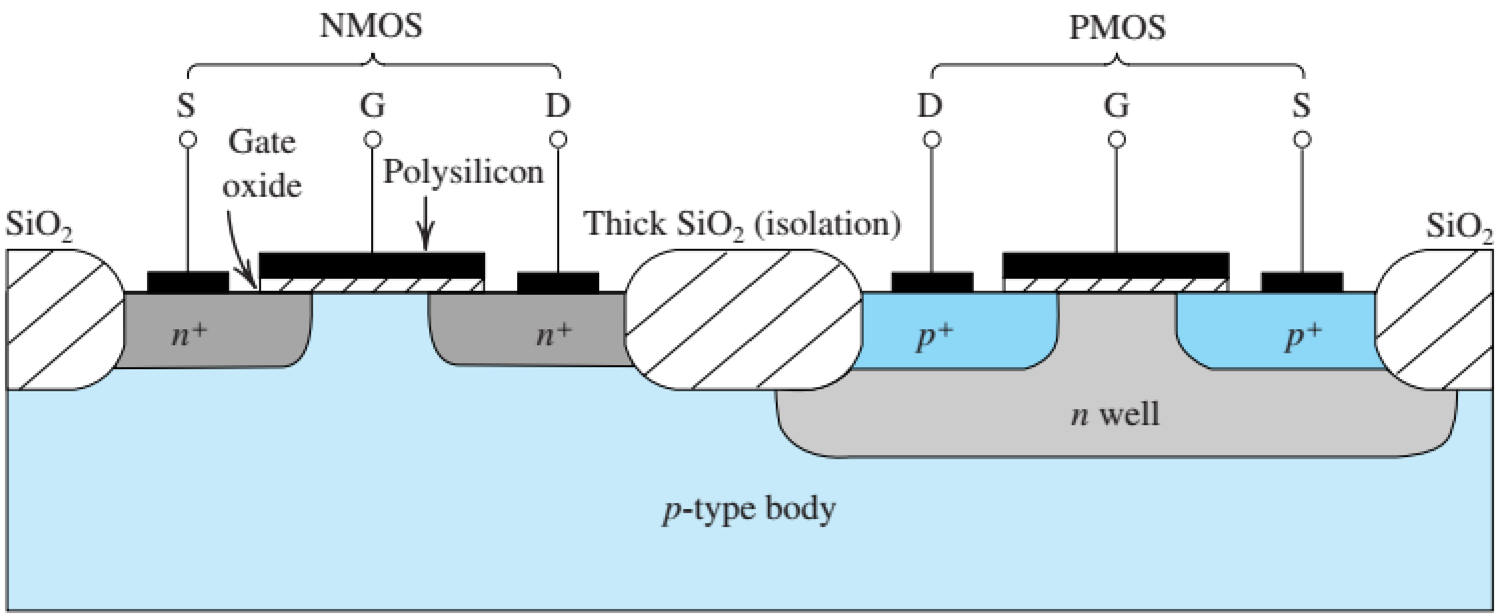
2、结型（Junciton-FET）场效应管的结构

N沟道结型

场效应晶体管

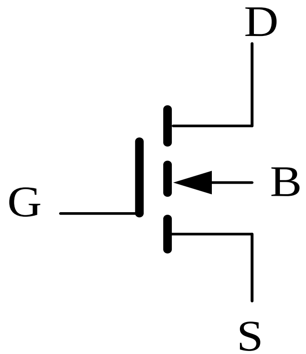


3、 Complementary MOS（CMOS）的结构

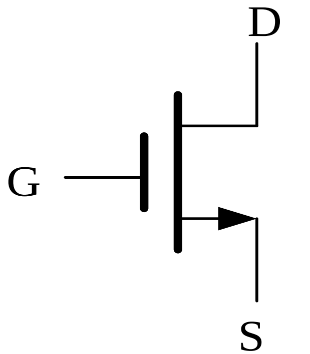


二、场效应晶体管的符号

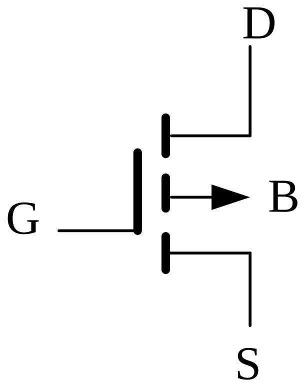
1、增强型（MOSFET）



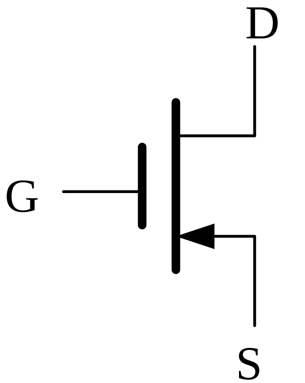
N沟道



简化符号

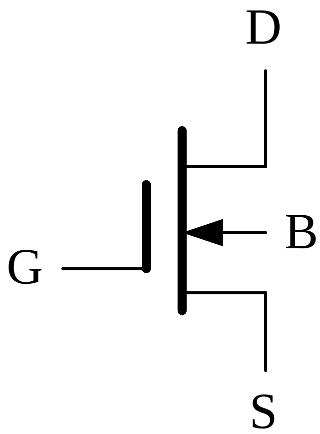


P沟道

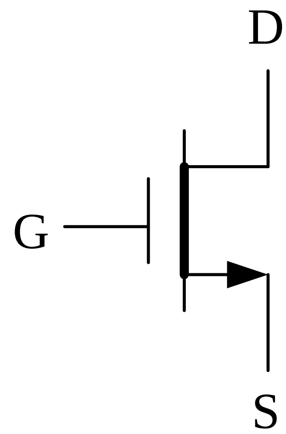


简化符号

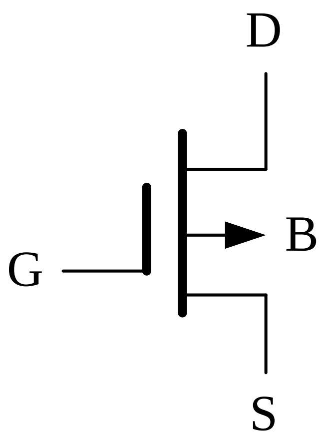
2、耗尽型（MOSFET）



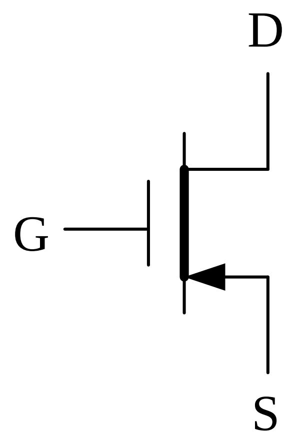
N沟道



简化模型

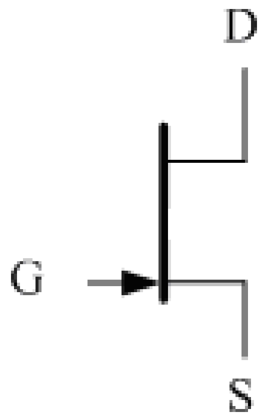


P沟道

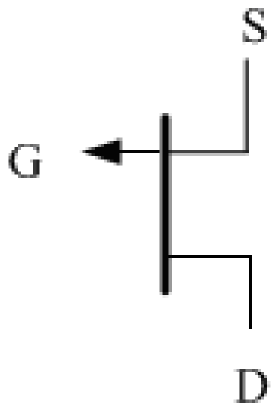


简化模型

3、结型场效应晶体管（J-FET）



N沟道

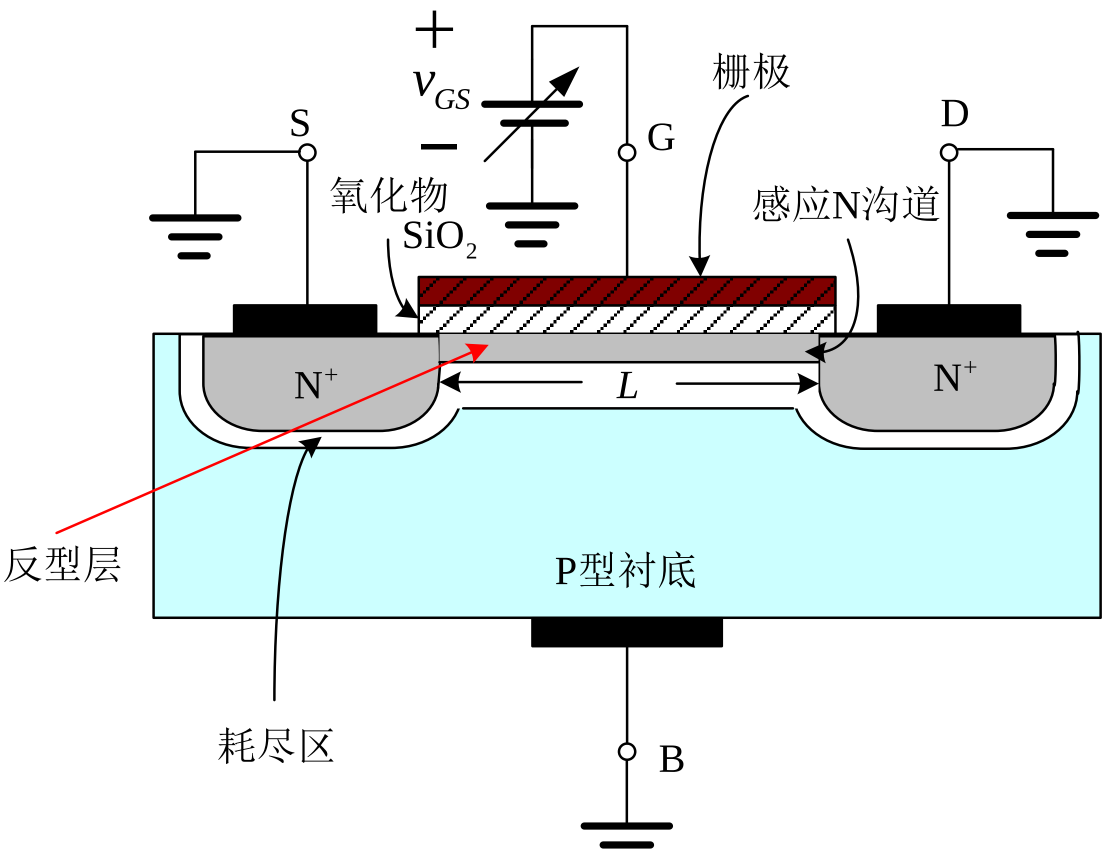


P沟道

9.1.2 场效应晶体管的工作原理

一、N沟道增强型MOSFET的工作原理

1、导电沟道的形成



特点：

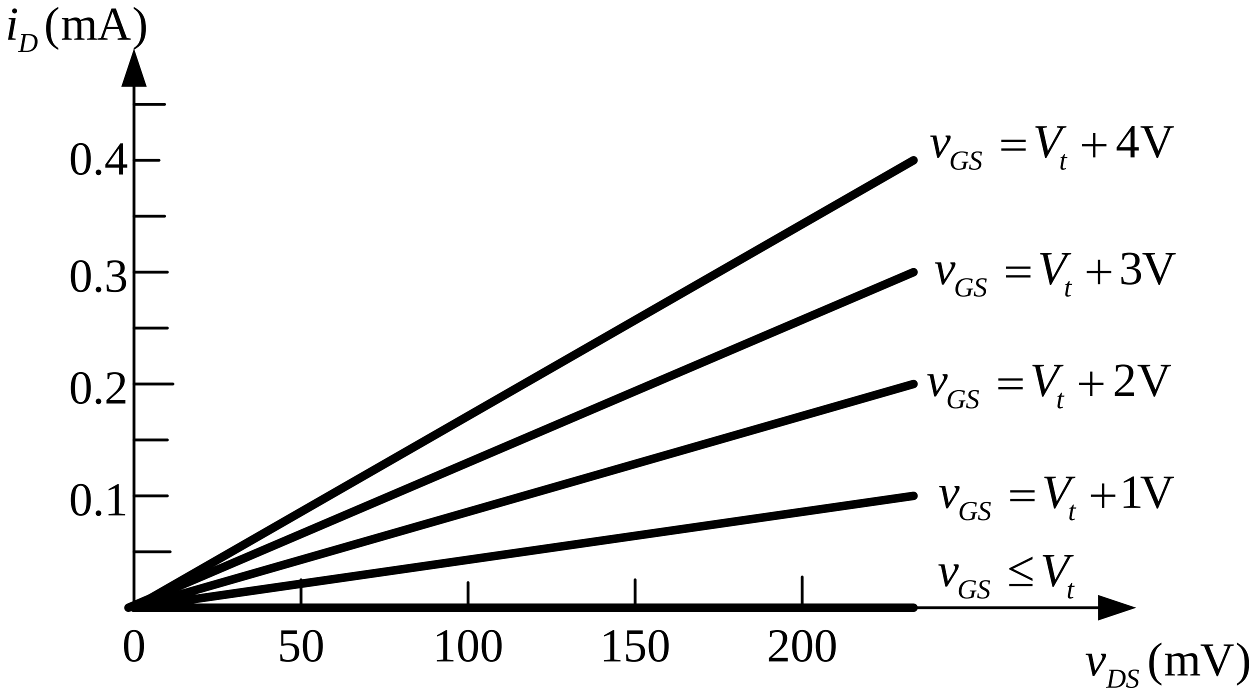
(1) 由电子形成的反型层称N沟道，对应为NMOS；由空穴构成的反型层称P沟道，对应为PMOS。

(2) 对于NMOS，反型层形成的先决条件是$V_{GS} > V_t$（开启电压，阈值电压，threshold voltage）。V_t 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_t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。

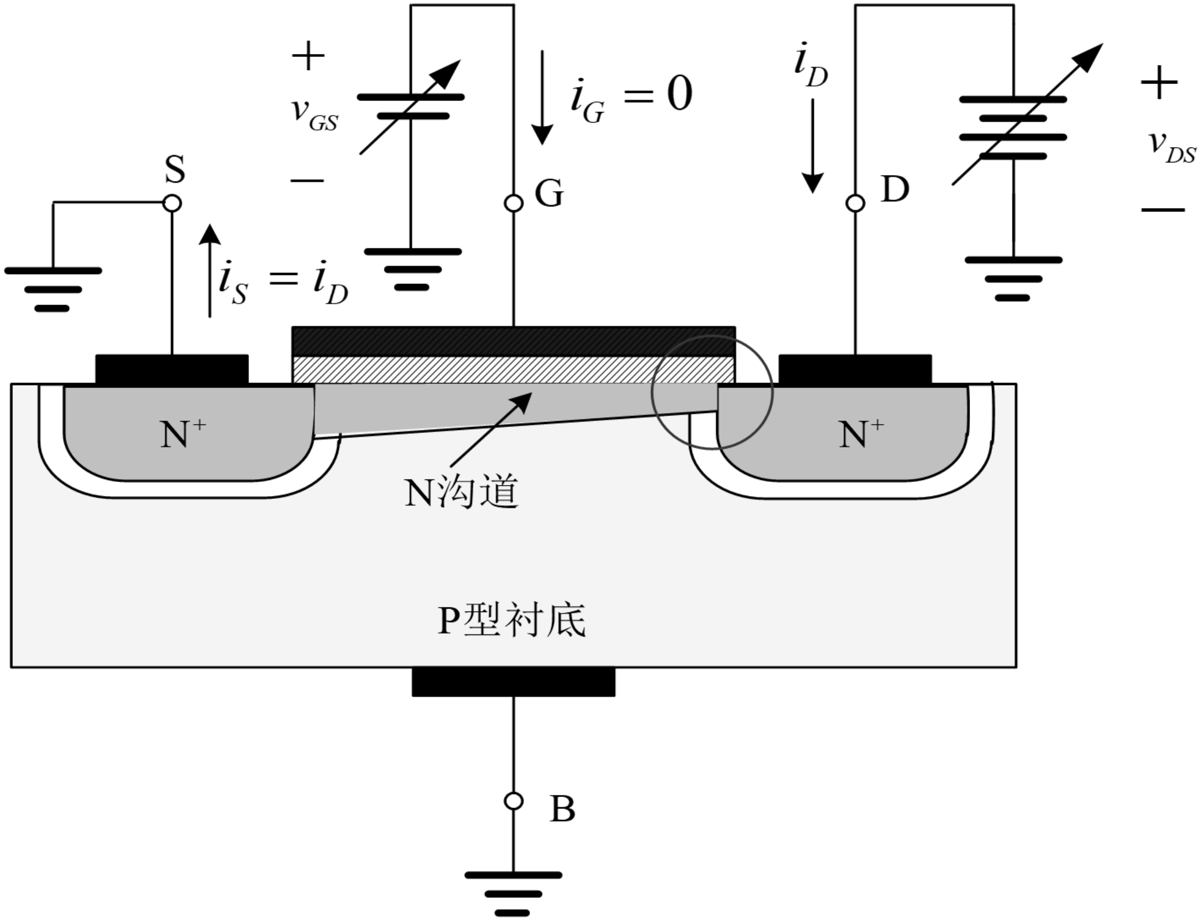
(4) 如果在源漏间加上一个小电压（如100 ~ 200 mV），沟道呈电阻特性。

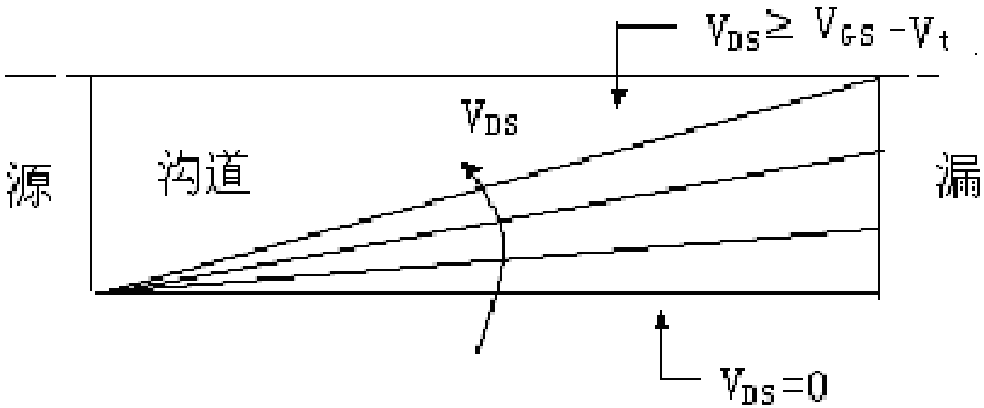
增强型NMOS管在很小的V_{DS}作用下的伏安特性



2、沟道夹断（channel pinch-off）

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

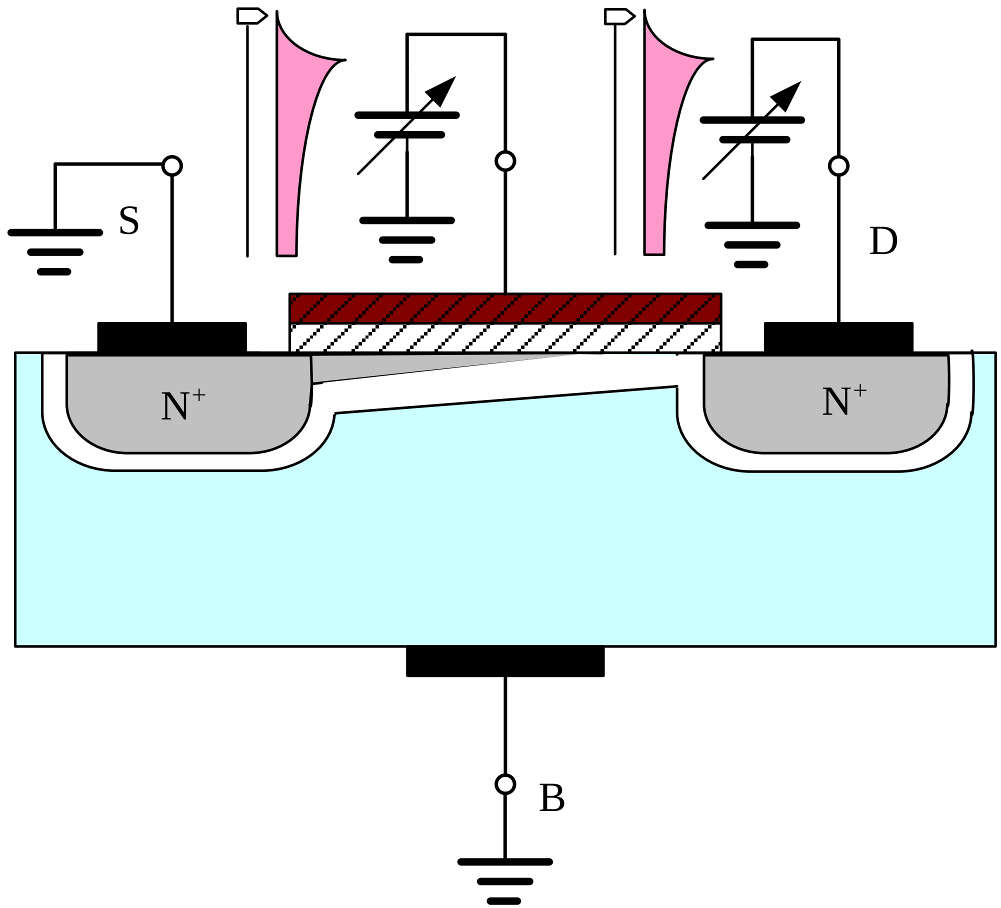




当 $v_{DS} \geq v_{GS} - V_t$ 时，如果继续升高漏极电压，漏极电流达到饱和，不再随漏极电压的升高而增大。

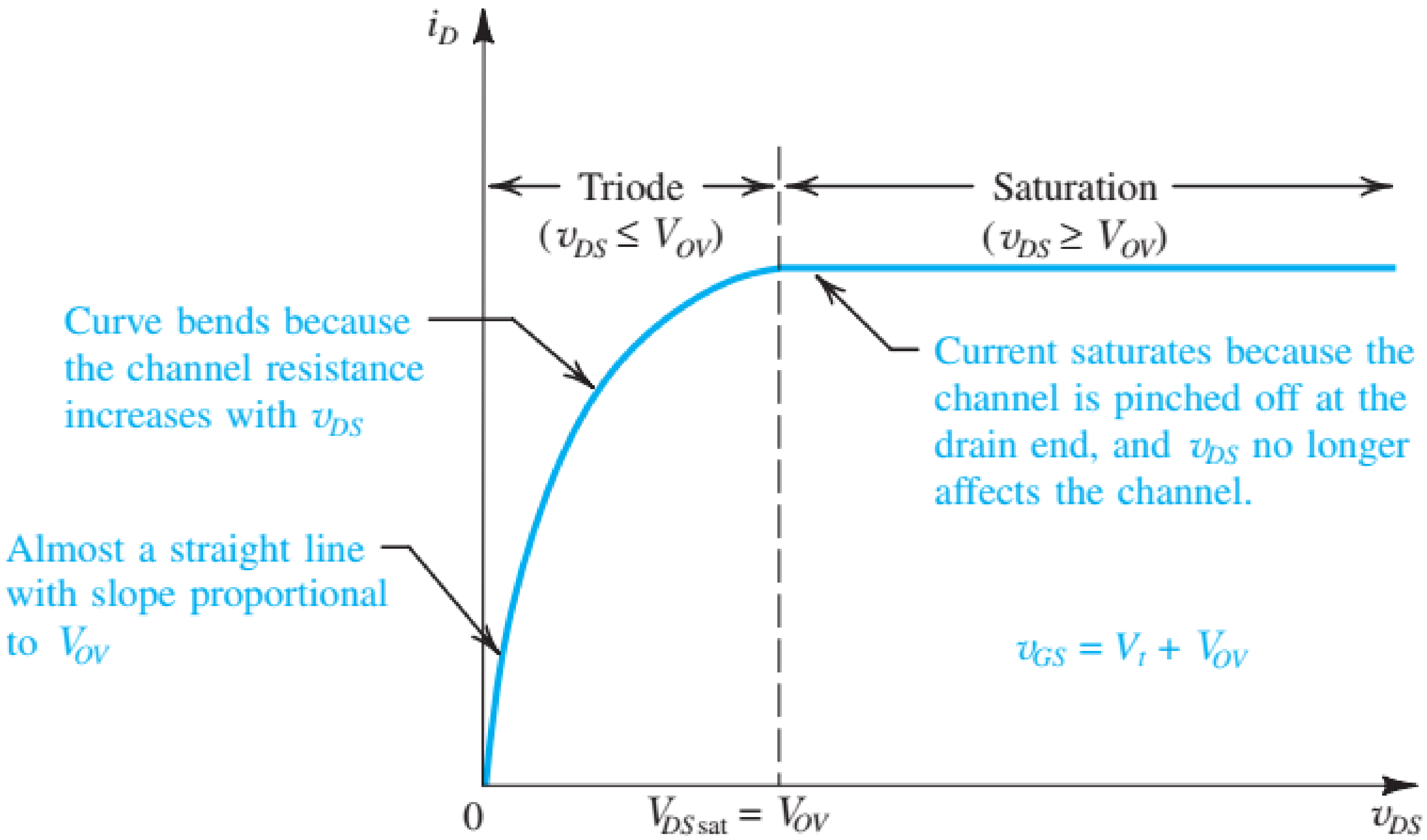
$$v_{OV} = v_{GS} - V_t$$

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。

3、漏极电流的分析



i_D
Triode
$(v_{DS} \le V_{OV})$
Saturation
$(v_{DS} \ge V_{OV})$
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
$V_{DS\,sat} = V_{OV}$
v_{DS}

漏极电流

变阻区（triode region）

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

饱和区（saturation region）

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

$$k_n{}' = \mu_n C_{ox}$$

$k_n{}'$ ： **the process transconductance parameter**

μ_n ： **the electron mobility**

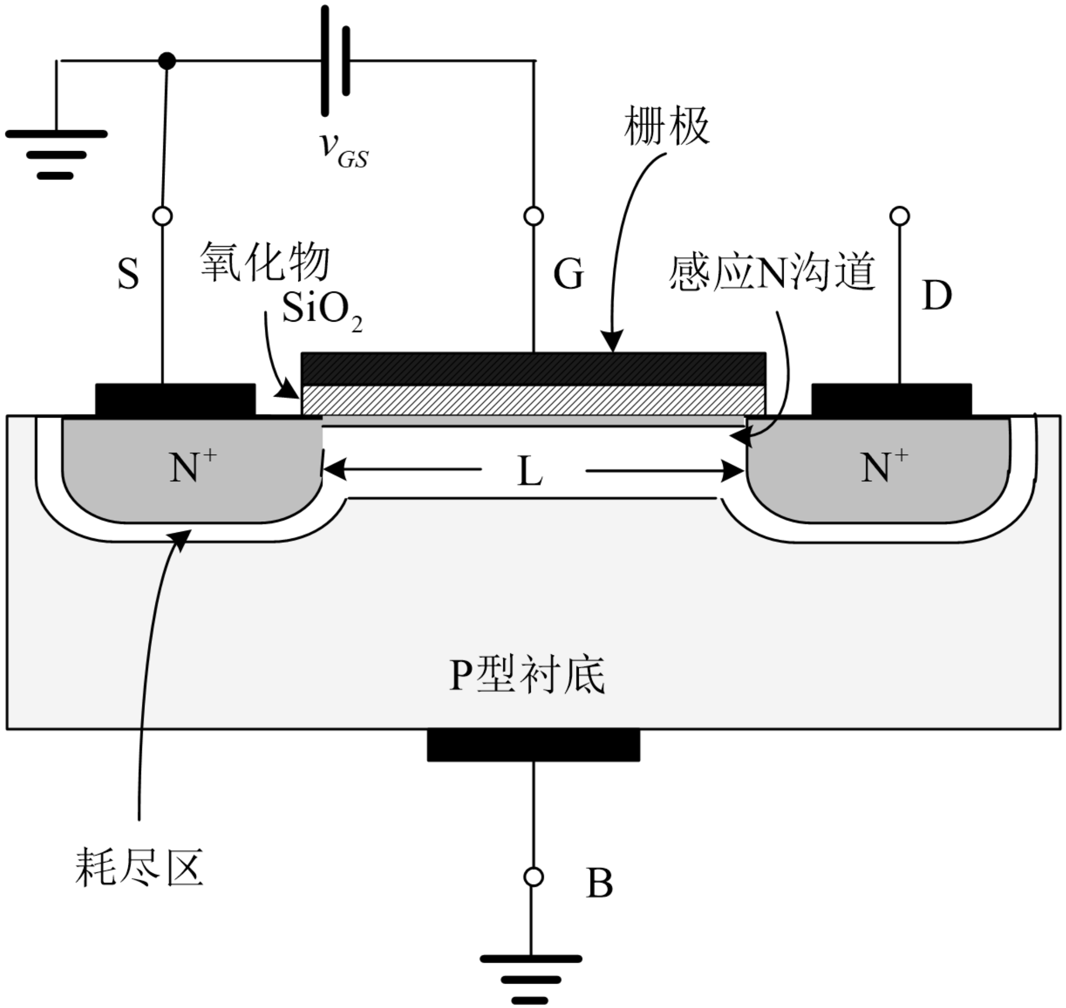
C_{ox} ： **the oxide capacitance**

W、L ： 沟道的宽度和长度

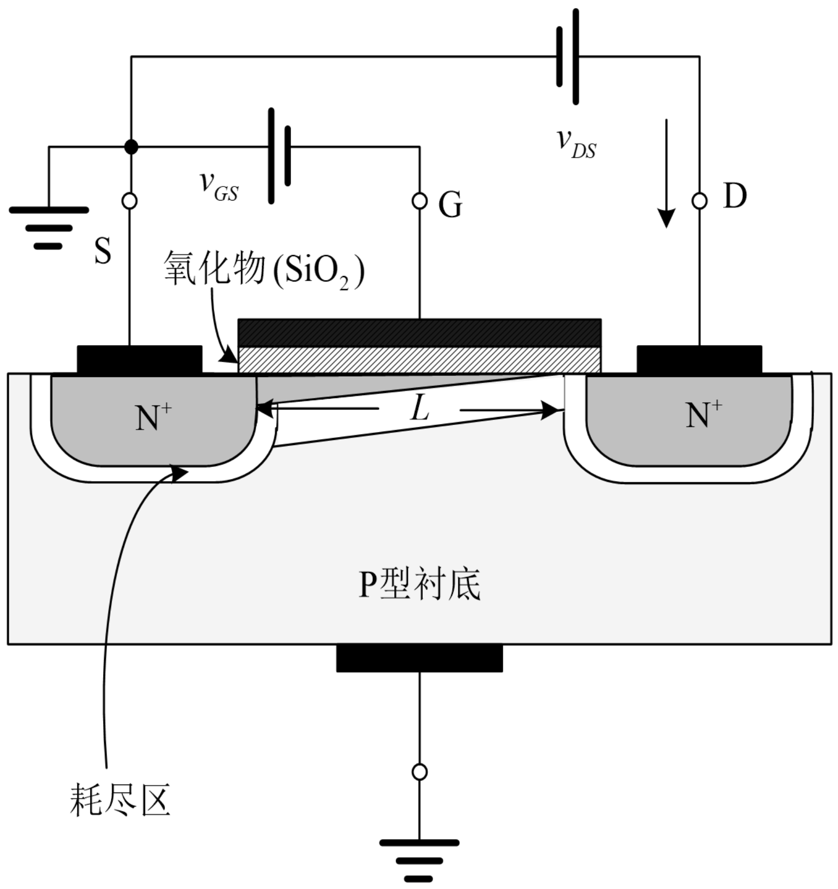
二、耗尽型MOSFET的工作原理

1、通道夹断

夹断电压 V_{GS}(off)



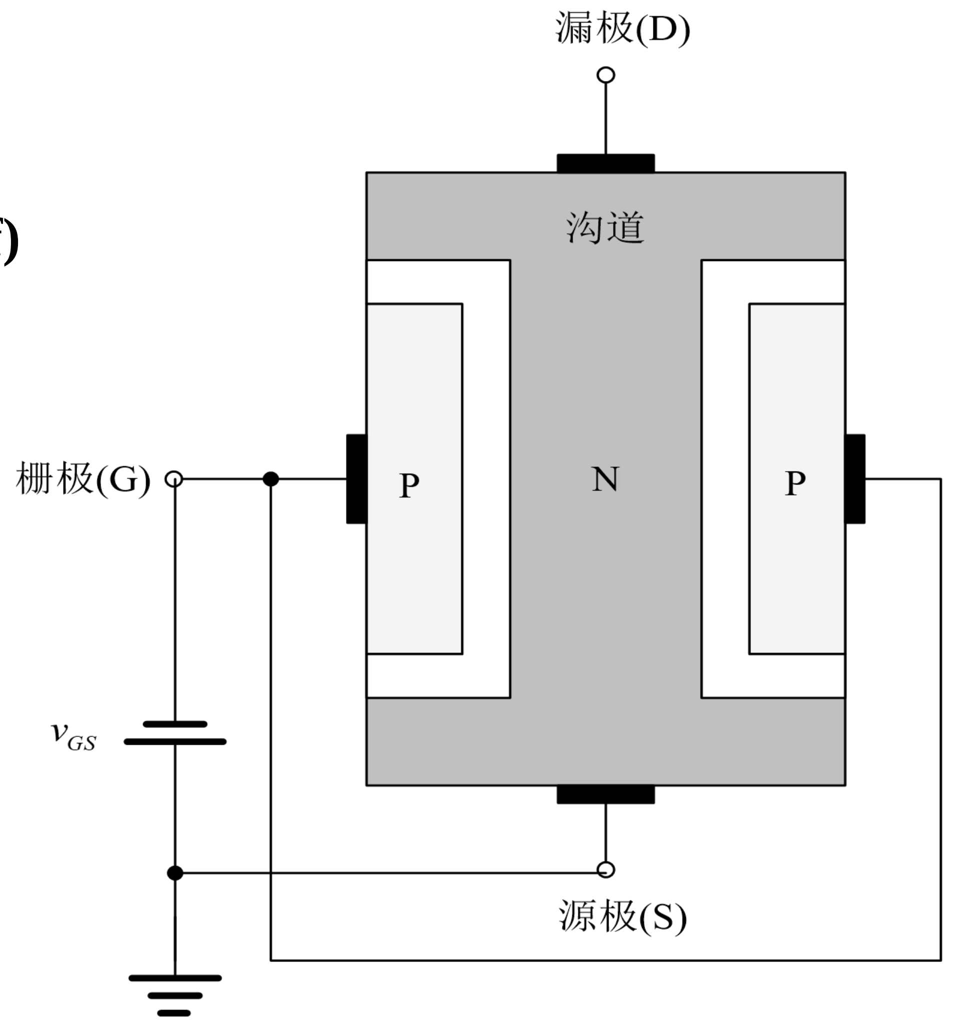
2、预夹断



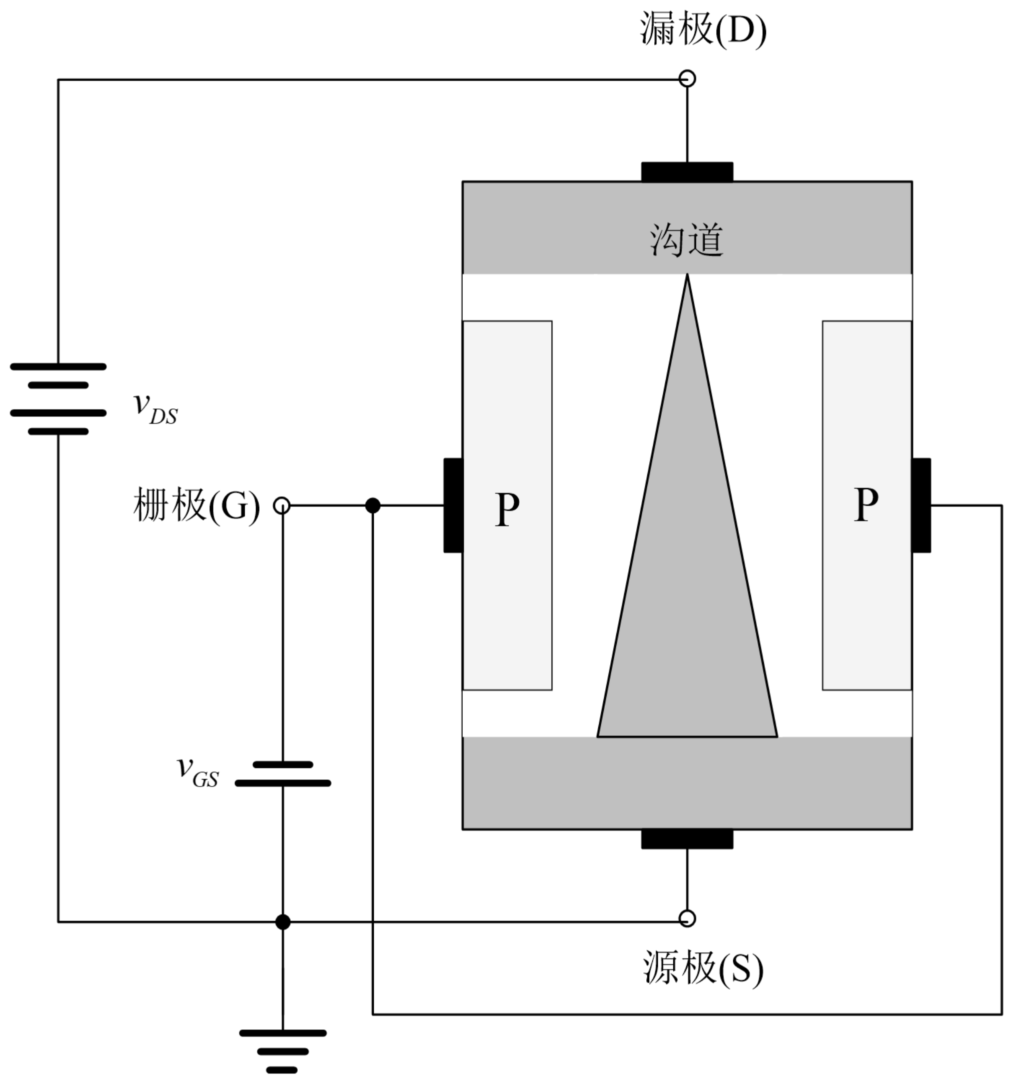
三、结型场效应管的工作原理

1、通道夹断

夹断电压 V_{GS}(off)



2、预夹断



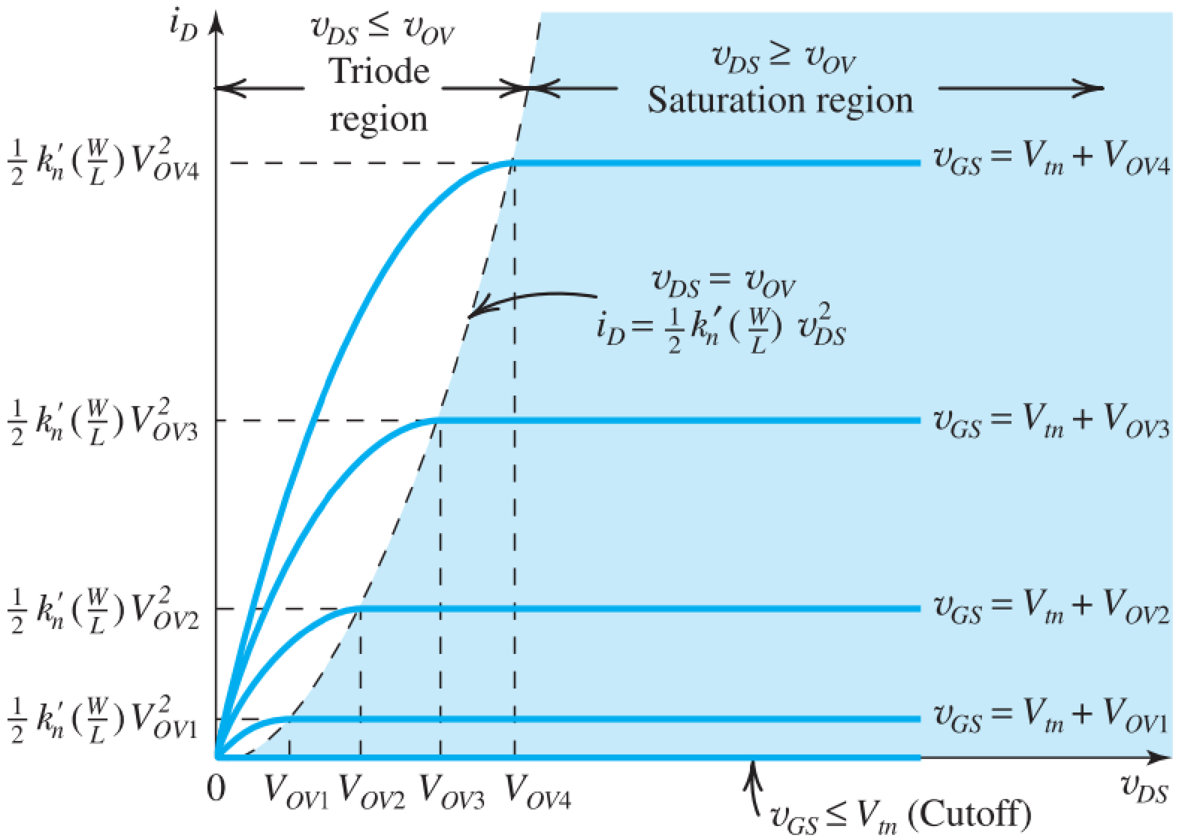
9.2 场效应晶体管的特性及其等效模型

9.2.1 输出特性和转移特性

一、输出特性

增强型NMOS管

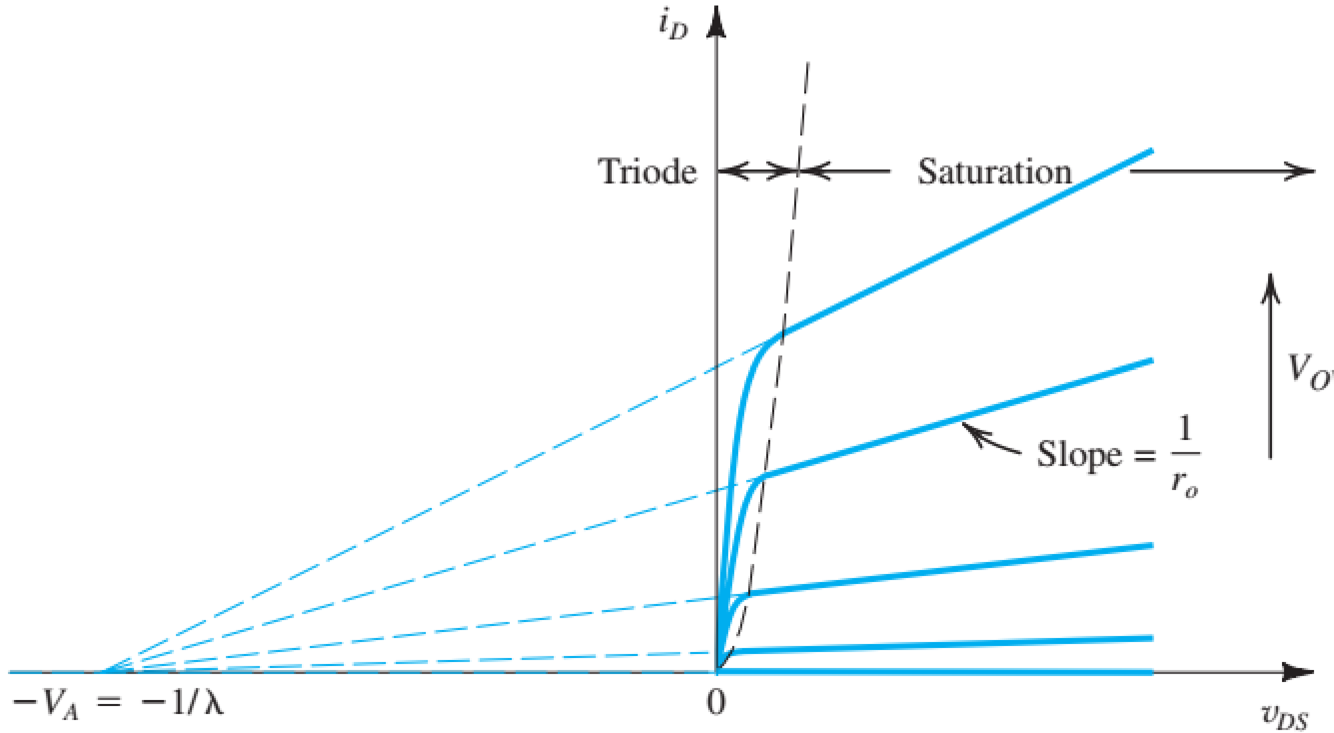
输出特性曲线



若考虑沟道长度调制效应

（channel-length modulation）

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

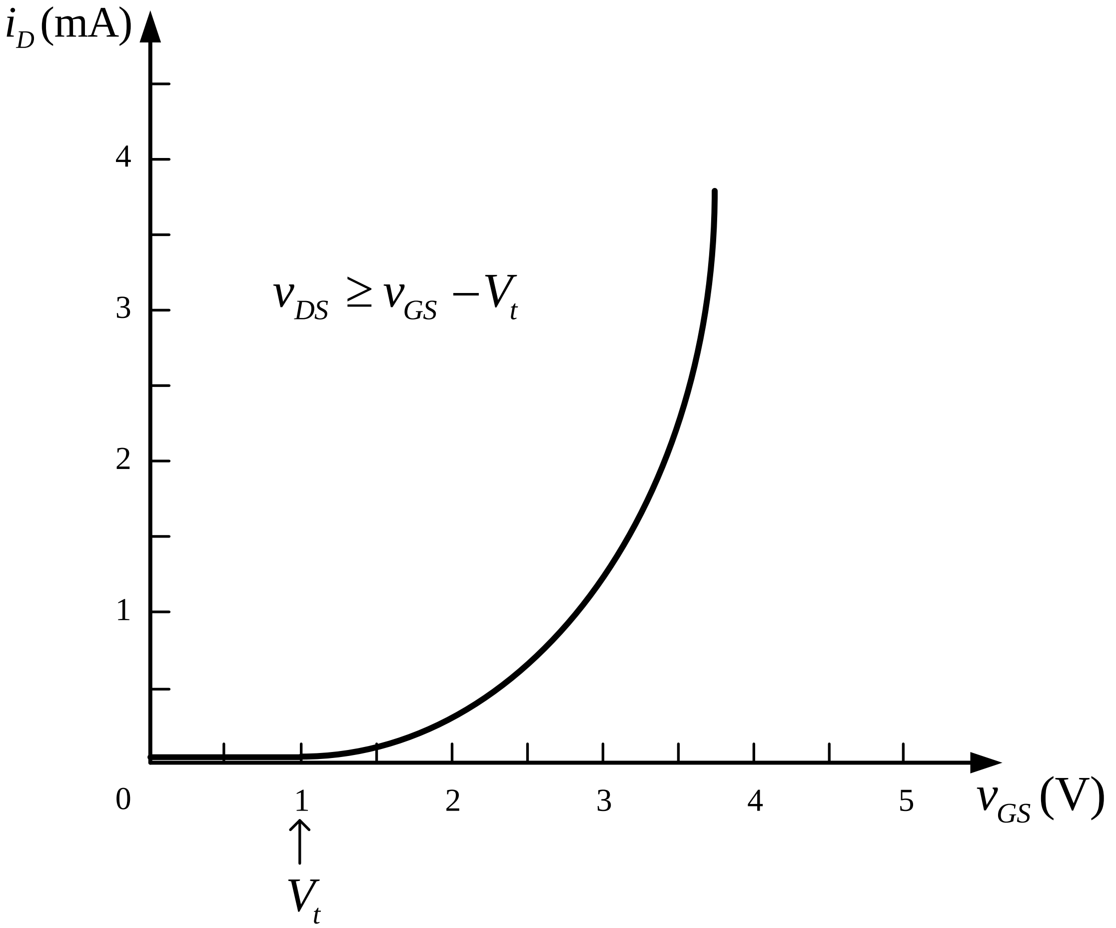


$$i_D = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 (1 + \lambda v_{DS}) \qquad \lambda = \frac{1}{V_A}$$

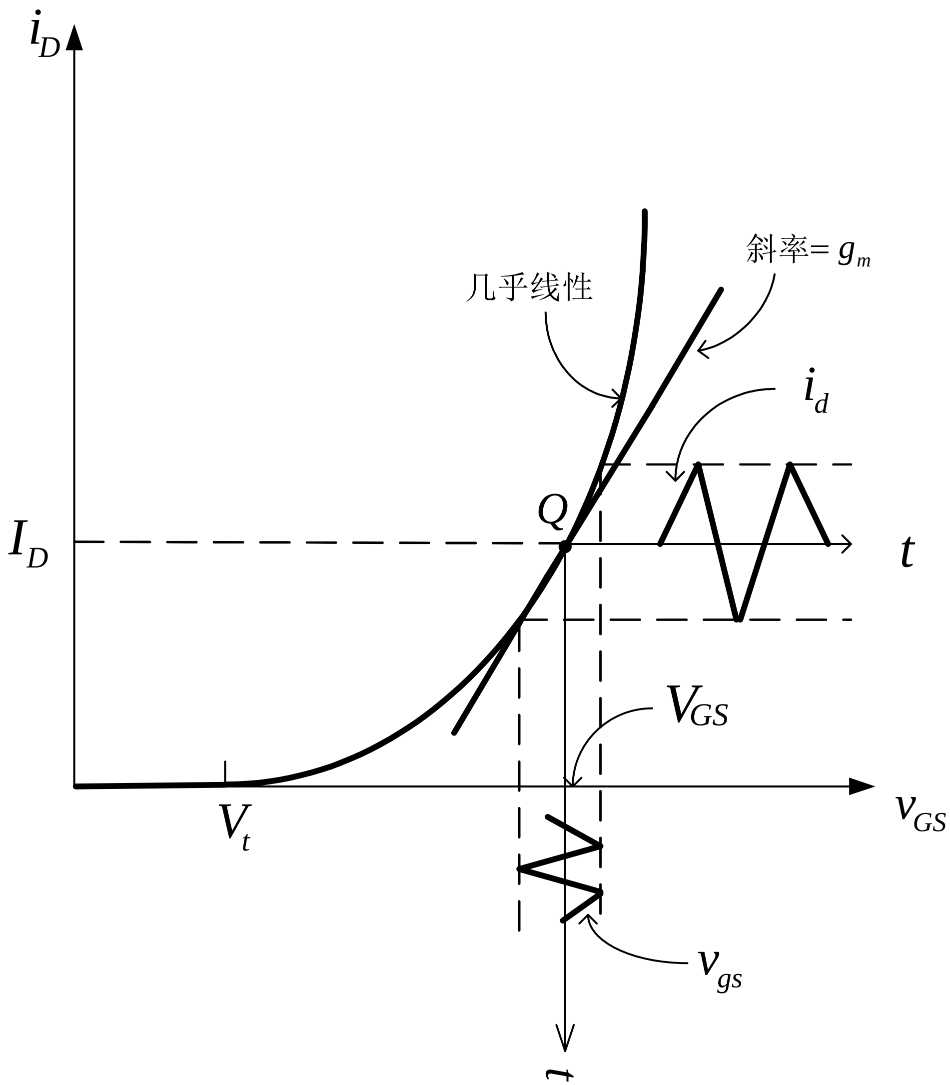
二、转移特性

增强型NMOS管

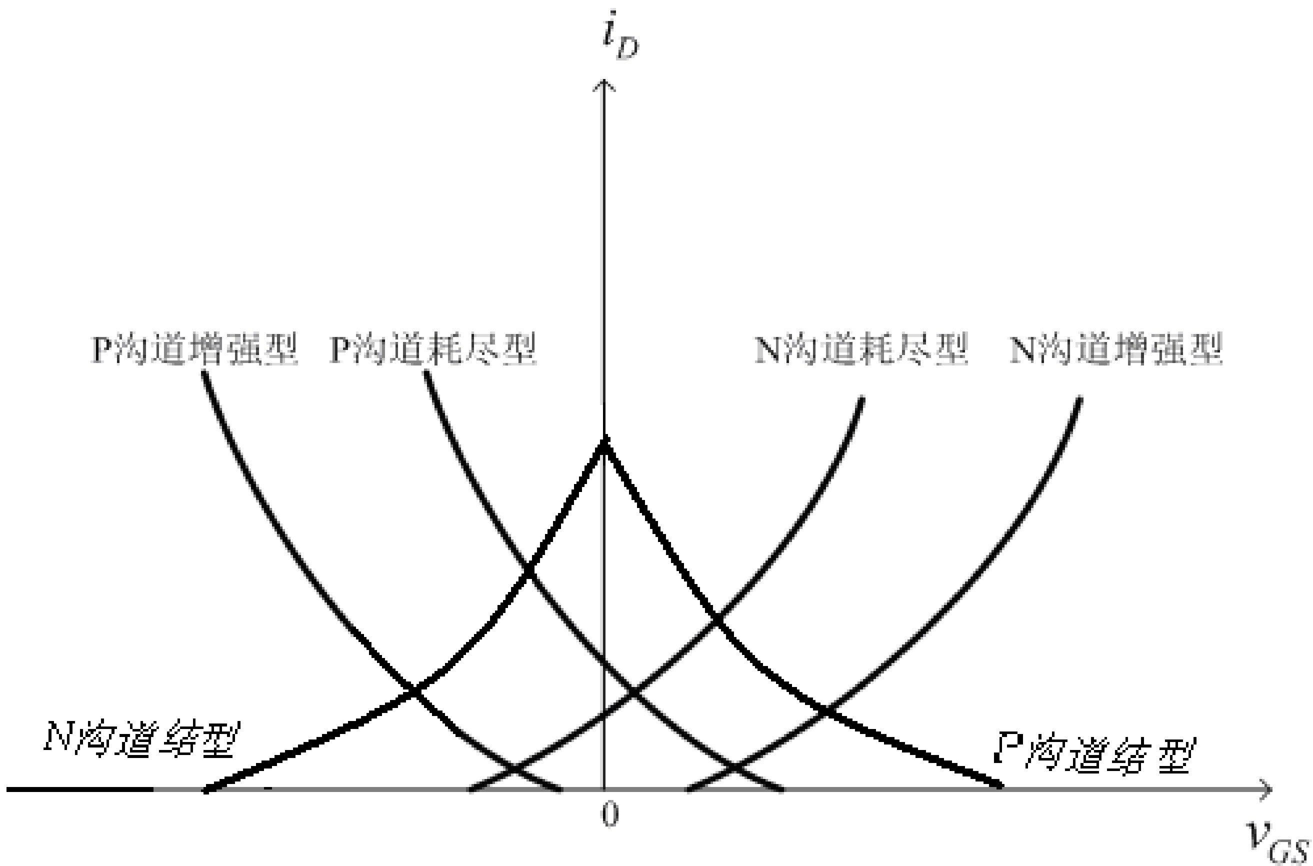
转移特性曲线



场效应管工作点的确定



6种场效应管的转移特性曲线



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（耗尽型MOSFET特有的参数），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

- **交流参数：**

g_m、r_o、C_{GS}、C_{GD}、C_{DS}

9.2.2 中频等效电路

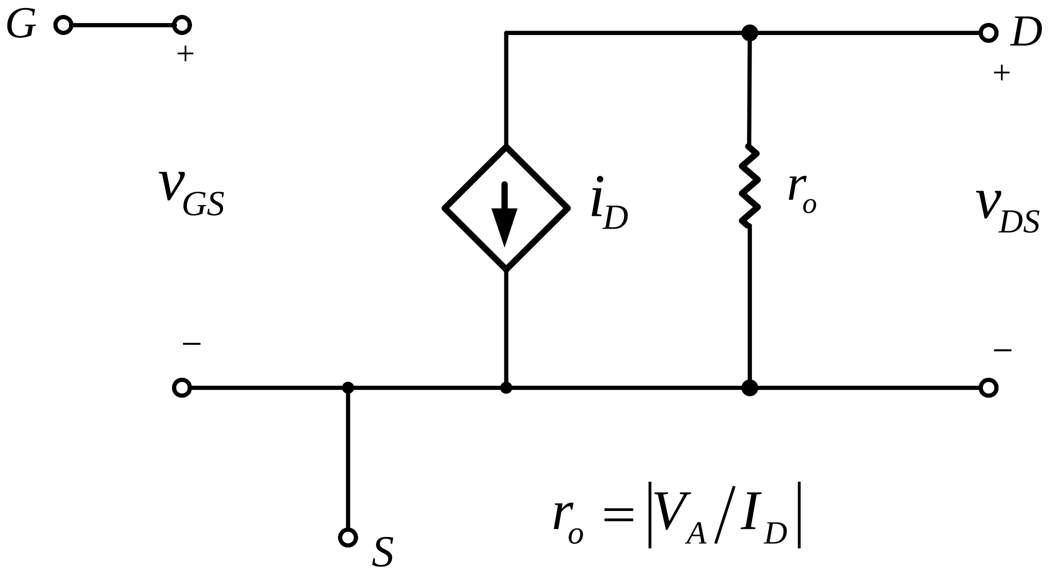
一、大信号模型

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

也可写为

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

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



二、小信号模型

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

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

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

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

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

$$I_D=\frac{1}{2}k_n{}'\frac{W}{L}(V_{GS}-V_t)^2 \qquad \boxed{i_d=k_n{}'\frac{W}{L}(V_{GS}-V_t)v_{gs}}$$

1、π型等效电路

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

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

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

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

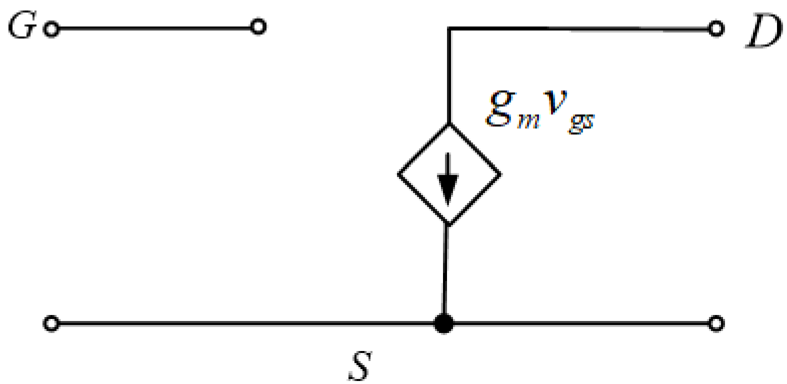
又可得 $g_m = \frac{I_D}{(V_{GS} - V_t)/2}$

对照三极管 $g_m = \frac{I_C}{V_T}$

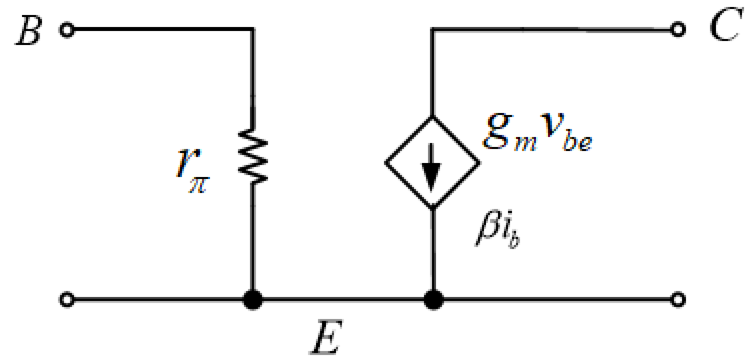
$$i_d = k_n{}' \frac{W}{L}(V_{GS} - V_t)v_{gs} = g_m v_{gs}$$

对比

FET

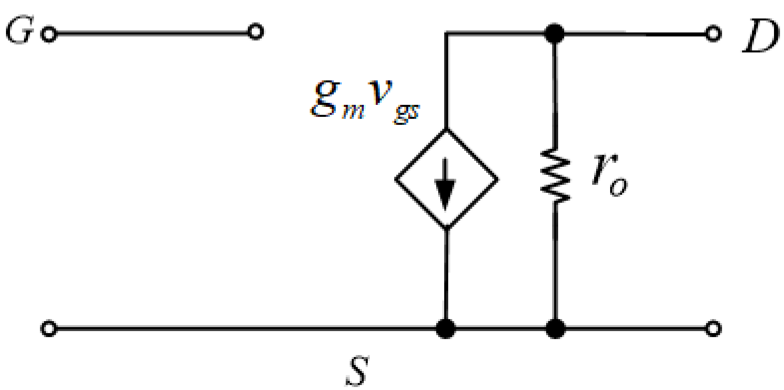


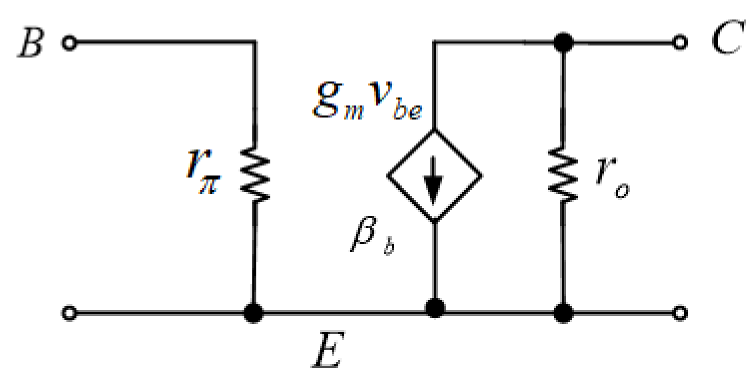
BJT



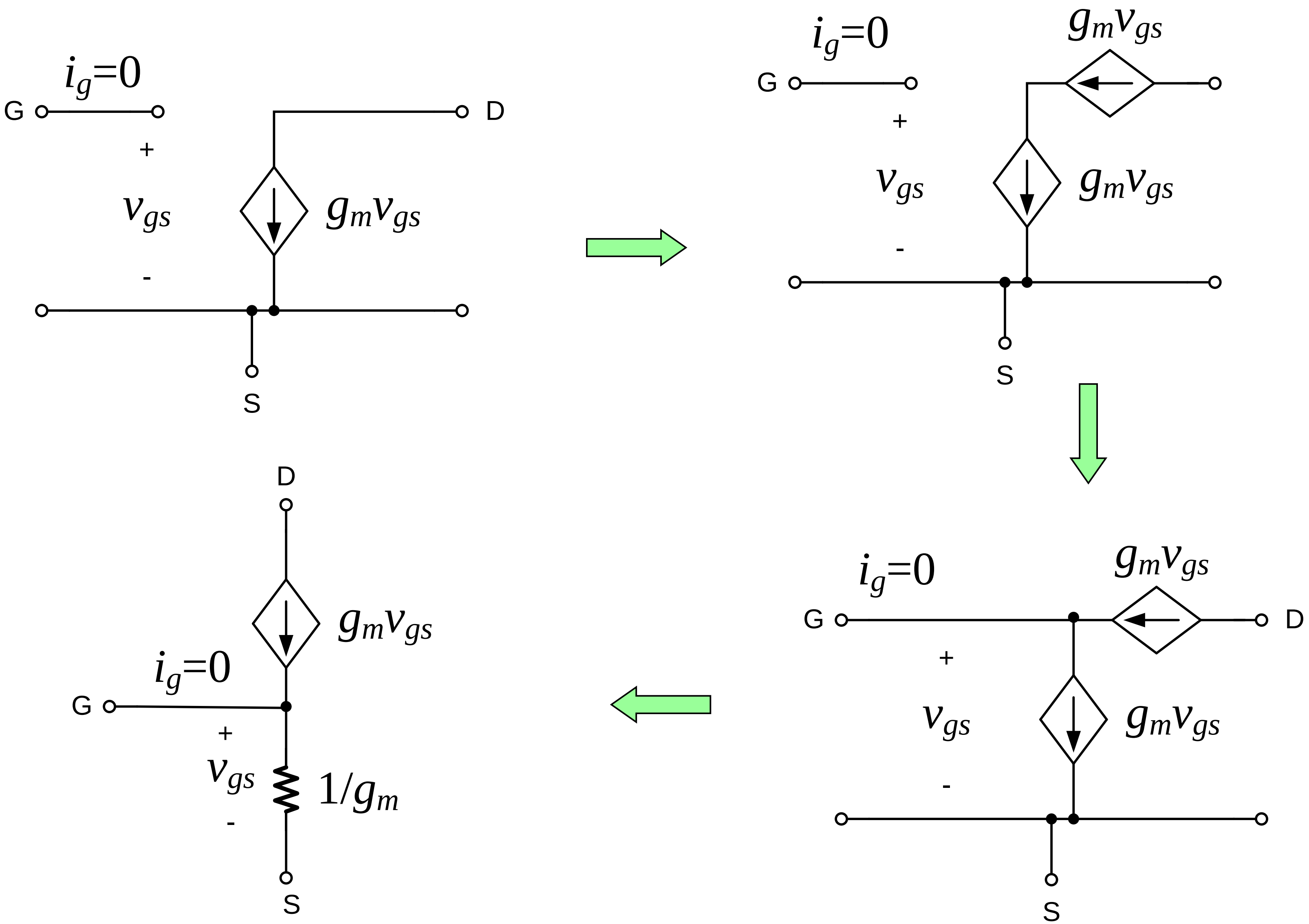
考虑沟道长度调制效应

考虑厄利效应



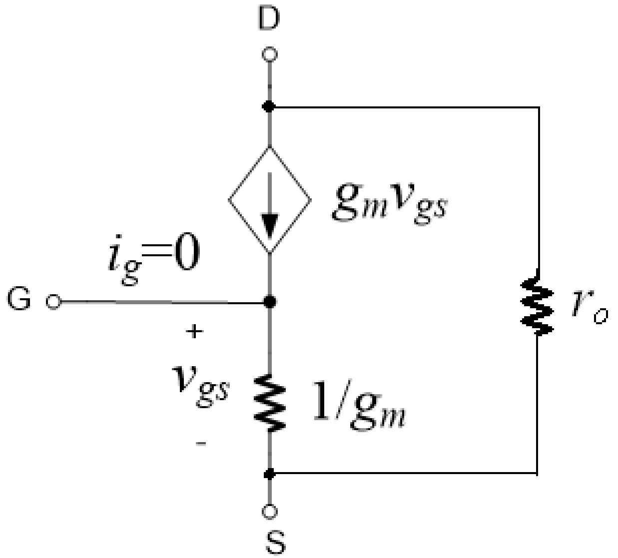


2、T型等效电路



i_g=0
G
D
+
v_{gs}
-
$g_m v_{gs}$
S
i_g=0
G
+
v_{gs}
-
$g_m v_{gs}$
$g_m v_{gs}$
S
i_g=0
$g_m v_{gs}$
G
D
+
v_{gs}
-
$g_m v_{gs}$
S
D
$g_m v_{gs}$
i_g=0
G
+
v_{gs}
-
$1/g_m$
S

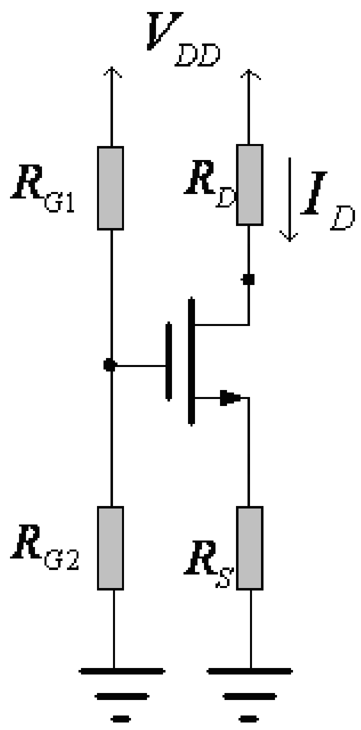
考虑输出电阻的T型等效电路



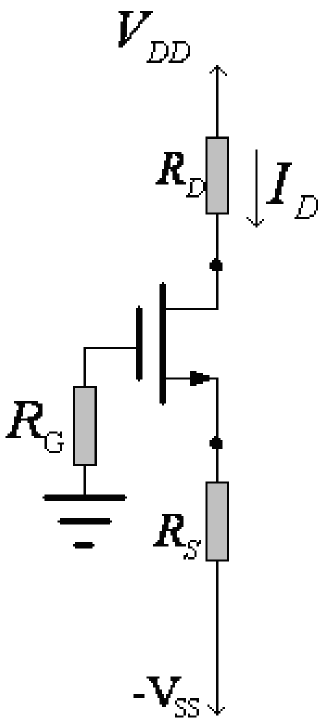
9.3 场效应晶体管放大电路的构成及其分析

9.3.1 直流偏置电路及其分析

一、自给偏置电路

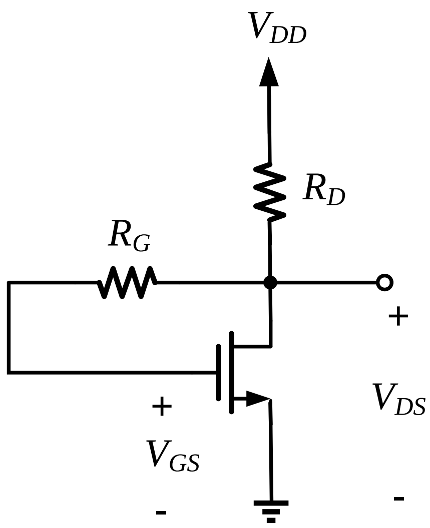


单电源



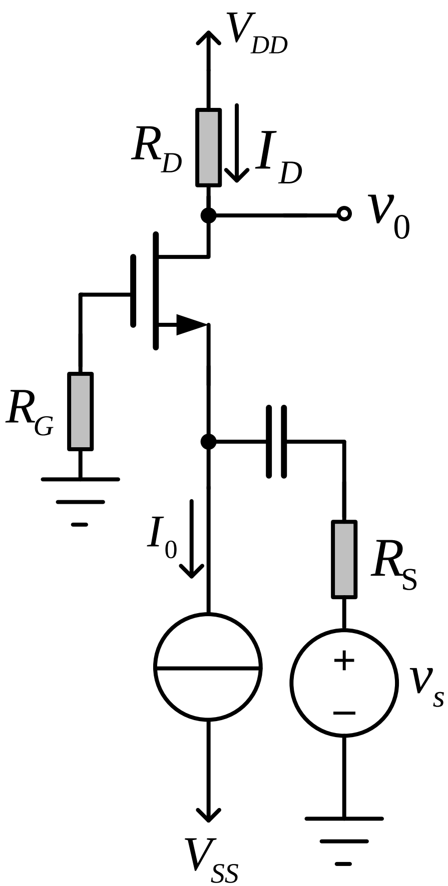
双电源

二、栅源间接反馈电阻的偏置电路

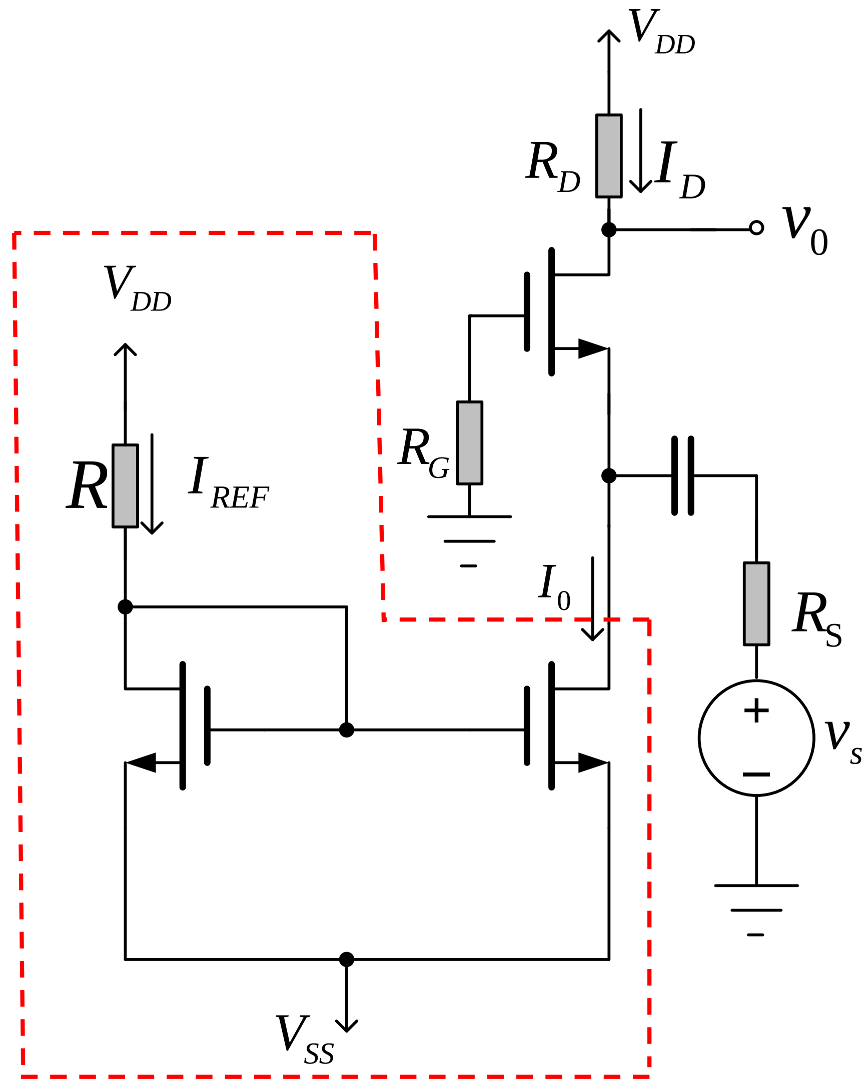


$$V_{DD} = V_{GS} + R_D I_D$$

三、恒流源偏置电路



镜像电流源



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

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

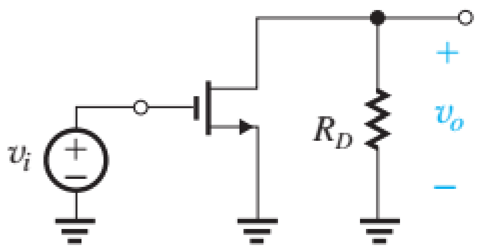
9.3.2 三种接法放大电路的分析计算

一、三种接法

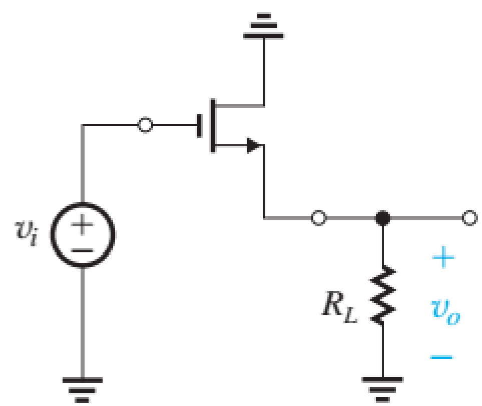
1、共源接法 Common-Source（CS)

2、共漏接法 Common-Drain（CD)

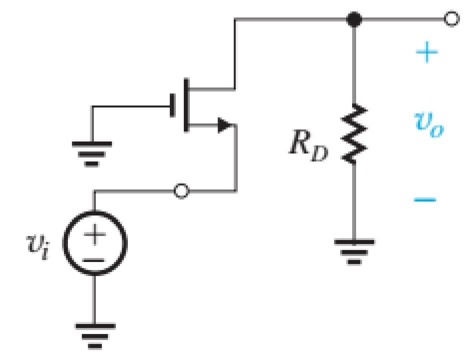
3、共栅接法 Common-Gate（CG)



(a) Common Source (CS)



(c) Common Drain (CD)
or Source Follower



(b) Common Gate (CG)

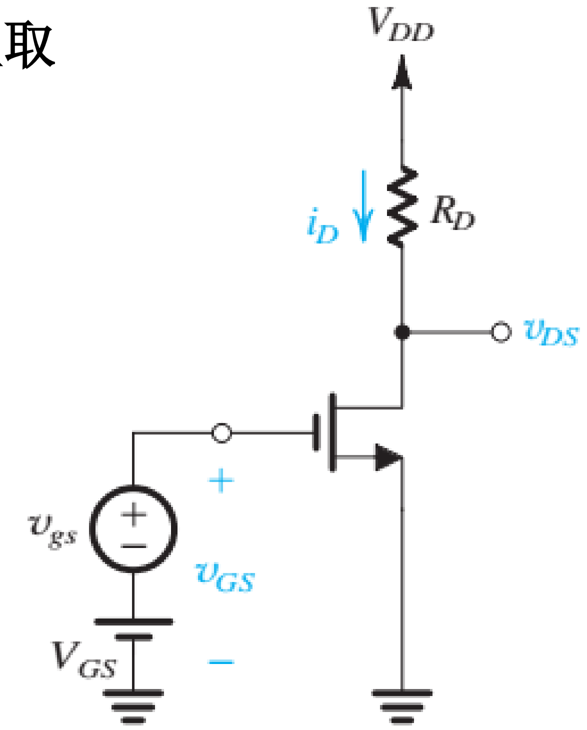
二、 直流偏置通路的计算

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。

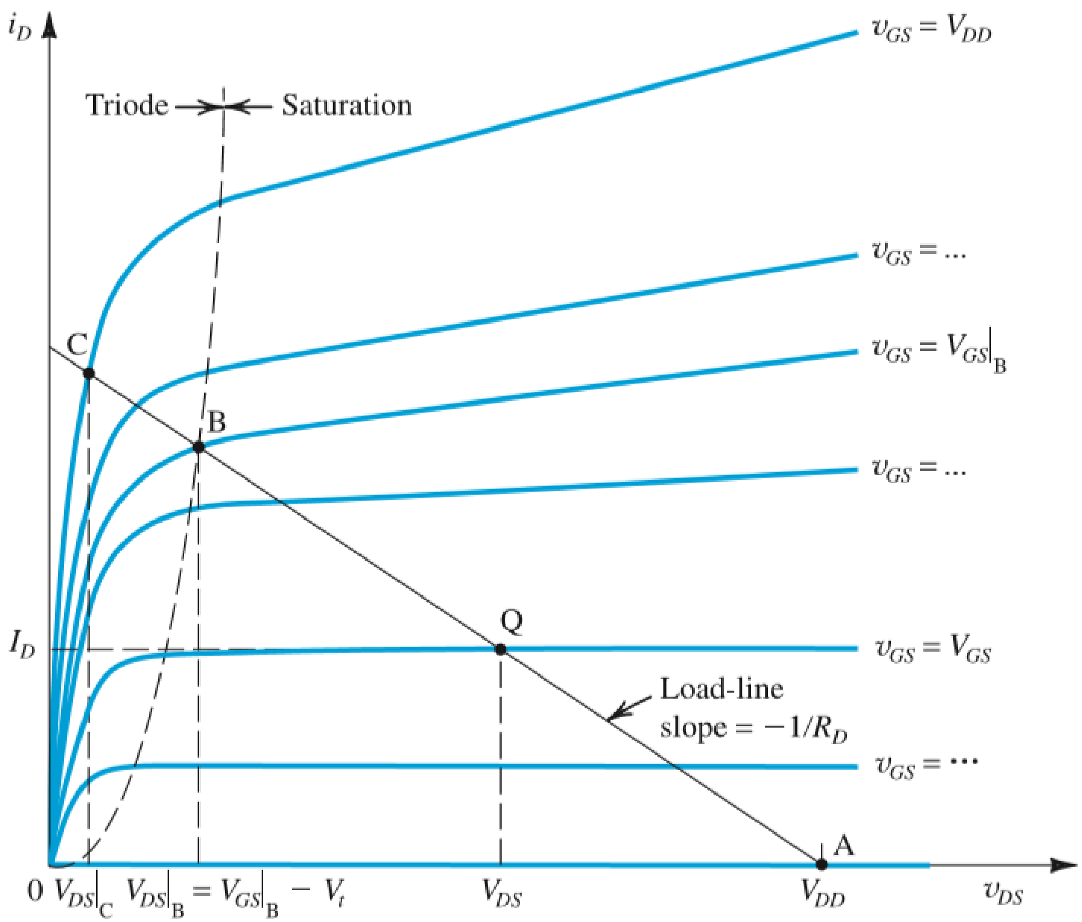
$$I_D = k_n'\frac{W}{L}\left[(V_{GS}-v_t)V_{DS}-\frac{1}{2}V_{DS}{}^2\right]$$

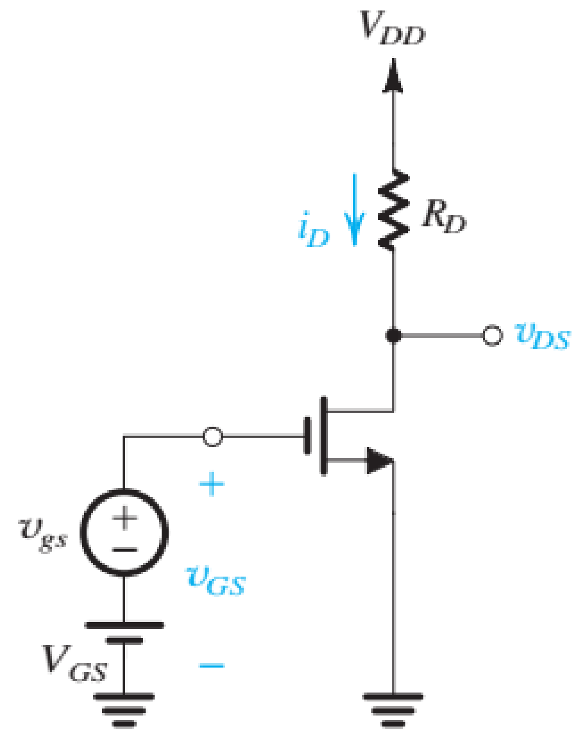
$$I_D = \frac{1}{2}k_n'\frac{W}{L}(V_{GS}-V_t)^2$$



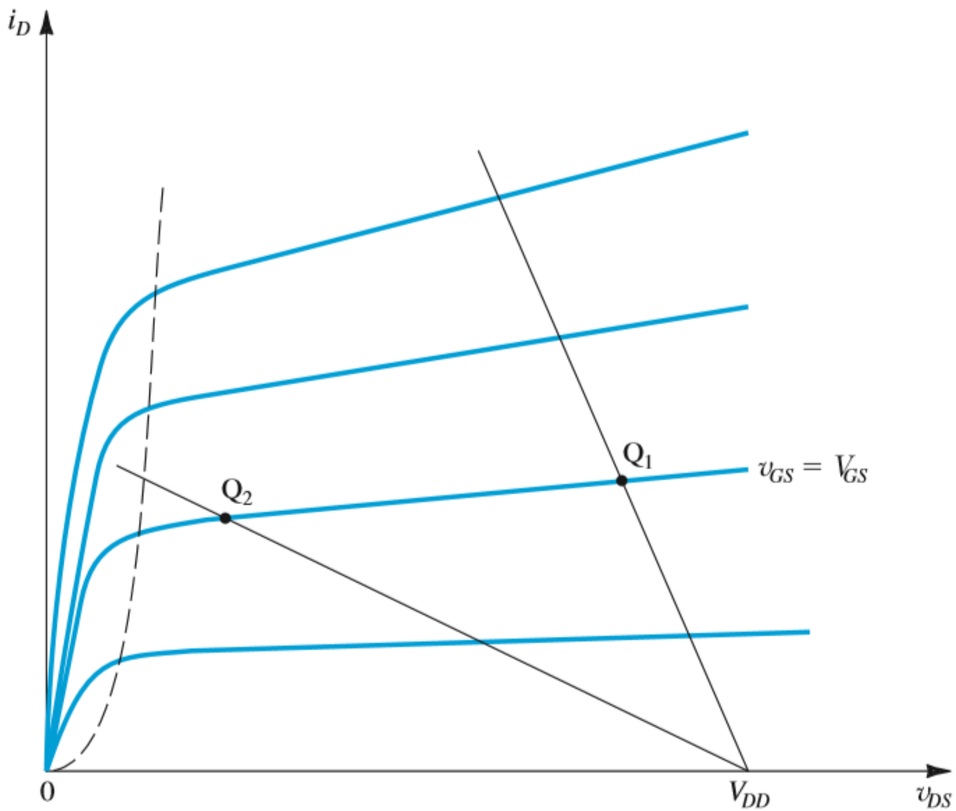
三、 交流通路的计算

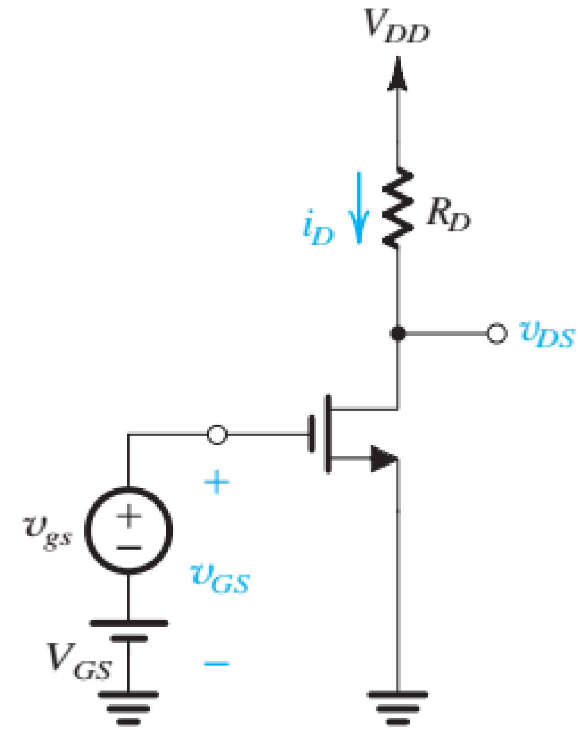
1、图解法





◆ 注意直流偏置的合理性





上述偏置方式存在什么问题？

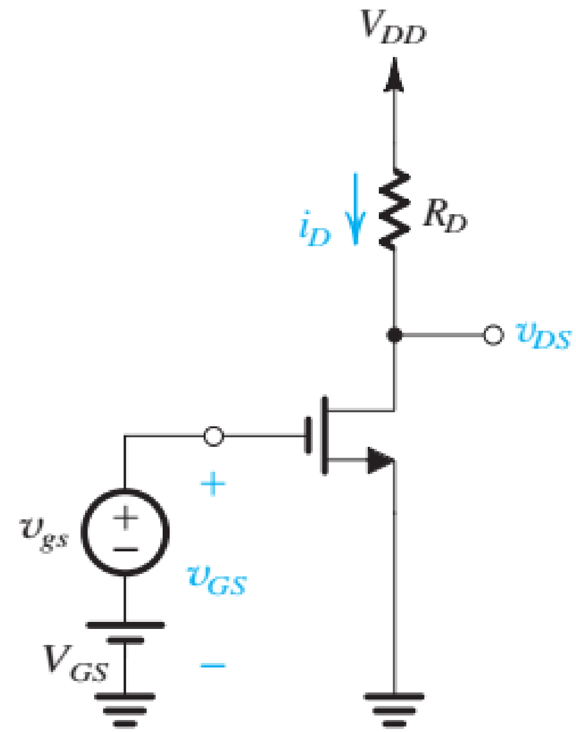
- 对于偏置点Q_1，在漏极没有提供足够大的正信号摆幅。
- 对于偏置点Q_2，在漏极没有提供足够大的负信号摆幅。

2、小信号等效电路法

a、确定跨导 g_m

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

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



b、电压增益

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

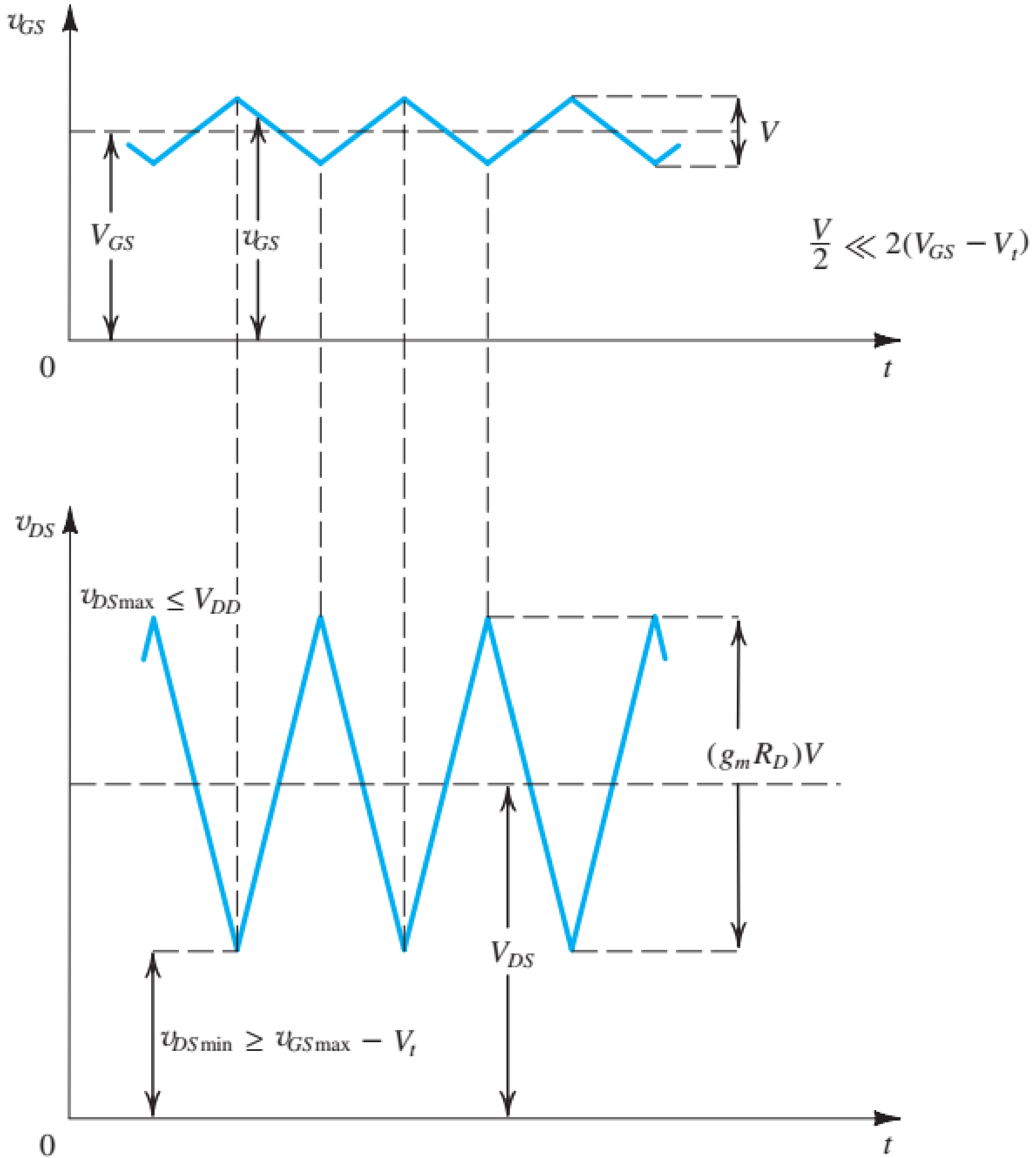
$$v_{DS} = V_{DD} - R_D I_D - R_D i_d = V_{DS} - R_D i_d$$

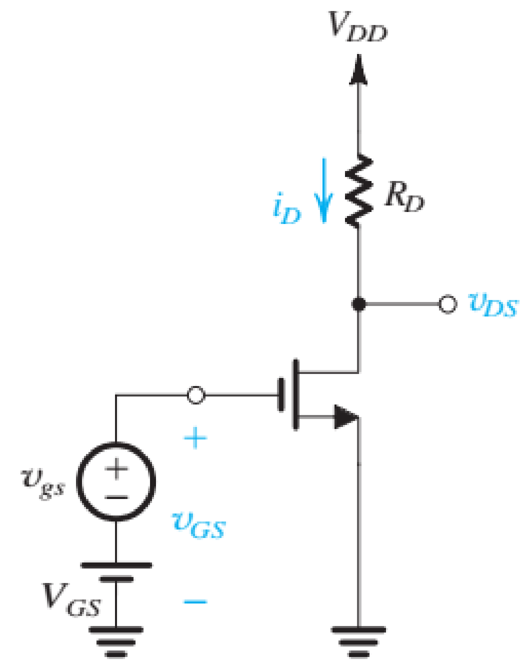
$$v_{ds} = -R_D i_d = -g_m v_{gs} R_D$$

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

输出电压 v_{DS} 的范围是否有限制？

输出电压 V_{DS} 的范围是否有限制？





例1 一耗尽型MOSFET的特性为：$k_n'\dfrac{W}{L}$=2 mA/V^2，$V_t=-3$ V， 已知MOS管的源极和栅极都接地，在下列四种情况下，请指出MOS管的工作区域和漏极电流。（忽略沟道长度调制效应）
(a) $v_D=0.1$ V，(b) $v_D=1$ V，(c) $v_D=3$ V，(d) $v_D=5$ V

解

(a) $v_D=0.1$ V，$v_G=v_S=0$ V $\Longrightarrow$ $v_{DS}=0.1$ V，$v_{GS}=0$ V

$$v_{GS}-v_t=0-(-3)=3\text{ V}$$

$\therefore v_{DS}<v_{GS}-v_t$ 该MOSFET工作在变阻区

$$i_D=k_n'\frac{W}{L}\left[(v_{GS}-v_t)v_{DS}-\frac{1}{2}{v_{DS}}^2\right]=2\left[3\times0.1-\frac{1}{2}\cdot(0.1)^2\right]=0.59\text{ mA}$$

(b) $v_D = 1\ \text{V}$, $v_G = v_S = 0\ \text{V}$ $\Longrightarrow$ $v_{DS} = 1\ \text{V}$, $v_{GS} = 0\ \text{V}$

$$v_{GS} - v_t = 0 - (-3) = 3\ \text{V}$$

$\therefore v_{DS} < v_{GS} - v_t$ 该MOSFET工作在变阻区

$$i_D = k_n'\frac{W}{L}\left[(v_{GS} - v_t)v_{DS} - \frac{1}{2}v_{DS}^{\ 2}\right] = 2\left[3\times 0.1 - \frac{1}{2}\cdot 1^2\right] = 5\ \text{mA}$$

(c) $v_D = 3\ \text{V}$, $v_G = v_S = 0\ \text{V}$ $\Longrightarrow$ $v_{DS} = 3\ \text{V}$, $v_{GS} = 0\ \text{V}$

$$v_{GS} - v_t = 0 - (-3) = 3\ \text{V}$$

$\therefore v_{DS} = v_{GS} - v_t$ 该MOSFET工作在饱和区

$$i_D = \frac{1}{2}k_n'\frac{W}{L}(v_{GS} - v_t)^2 = \frac{1}{2}\cdot 2\cdot 3^2 = 9\ \text{mA}$$

(d) $v_D = 5\text{ V}$, $v_G = v_S = 0\text{ V} \Longrightarrow v_{DS} = 5\text{ V}$, $v_{GS} = 0\text{ V}$

$$v_{GS} - v_t = 0 - (-3) = 3\text{ V}$$

$\therefore v_{DS} > v_{GS} - v_t$ 该MOSFET工作在饱和区

$$i_D = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (v_{GS} - v_t)^2 = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 3^2 = 9\text{ mA}$$

例2 一个增强型P沟道MOS管：$k_p'\dfrac{W}{L}$=80 μA/V^2，$V_t = -1.5$ V，$\lambda = -0.02$ V^{-1}，栅极接地，源极接+5V 。请计算下列情况下漏极电流：

(a) $v_D = 4$ V，(b) $v_D = 1.5$ V, (c) $v_D = 0$ V，(d) $v_D = -5$ V

解

(a) $v_D = 4$ V ， $v_G = 0$ V， $v_S = 5$ V

$$v_{GS} - V_t = -5 + 1.5 = -3.5\ \text{V}$$

$\Rightarrow$ $v_{DS} = -1\ \text{V} > v_{GS} - V_t$ 该MOSFET工作在变阻区

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

$$= 0.08\left[(-5+1.5)\times(-1) - \frac{1}{2}\cdot(-1)^2\right] = 0.24\ \text{mA}$$

(b) $v_D = 1.5\ \text{V}$ ， $v_G = 0\ \text{V}$ ， $v_S = 5\ \text{V}$

$$v_{GS} - V_t = -5 + 1.5 = -3.5\ \text{V}$$

$\Longrightarrow$ $v_{DS} = -3.5\ V = v_{GS} - V_t$ 该MOSFET工作在饱和区

$$i_D = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 (1 + \lambda v_{DS})$$
$$= \frac{1}{2} \cdot 0.08 \cdot (-3.5)^2 \left[1 + (-0.02) \times (-3.5)\right] = 0.5243\ \text{mA}$$

(c) $v_D = 0\text{V}$ ， $v_G = 0\ \text{V}$ ， $v_S = 5\ \text{V}$

$$v_{GS} - v_t = -5 + 1.5 = -3.5\ \text{V}$$

$\Longrightarrow$ $v_{DS} = -5\ \text{V} < v_{GS} - V_t$ 该MOSFET工作在饱和区

$$i_D = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 (1 + \lambda v_{DS}) = \frac{1}{2} \cdot 0.08 \cdot (-3.5)^2 [1 + 0.02 \times 5] = 0.539\ \text{mA}$$

(d) $v_D = -5\ \text{V}$, $v_G = 0\ \text{V}$, $v_S = 5\ \text{V}$

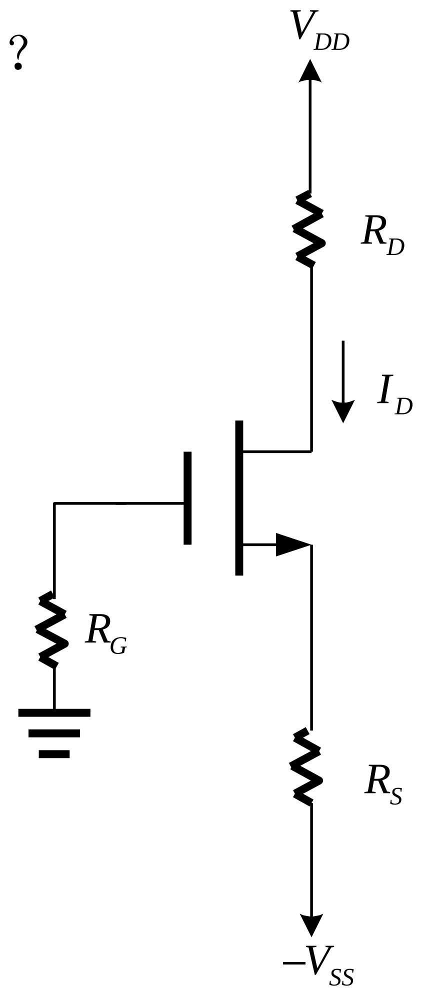
$$v_{GS} - v_t = -5 + 1.5 = -3.5\ \text{V}$$

$\Longrightarrow$ $v_{DS} = -10\ \text{V} < v_{GS} - V_t$ 该MOSFET工作在饱和区

$$i_D = \frac{1}{2} k_n{}' \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 (1 + \lambda v_{DS})$$

$$= \frac{1}{2} \times 0.08 \times (-3.5)^2 [1 + 0.02 \times 10] = 0.588\ \text{mA}$$

例3 一增强型MOSFET的特性为：$k_n'\dfrac{W}{L}$=2 mA/V^2， V_t=2 V， 已知 $V_{DD}=V_{SS}=10$ V，要得到如下结果：I_D=1 mA， 电压增益最大，漏极上的信号峰-峰值为2V，请问该如何设计电路？



解

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

$$1=\frac{1}{2}\times 2(V_{GS}-2)^2$$

得 $V_{GS}=3\text{ V or }1\text{ V}$

取 $V_{GS}=3\text{ V}$

$$\therefore\ V_S = -3\ \text{V}$$

$$I_D = I_S = 1\ \text{mA}$$

$$R_S = \frac{-3+10}{1} = 7\ \text{K}\Omega$$

$$v_{DS} \geq v_{GS} - V_t \quad \Rightarrow \quad v_{DG} \geq -V_t$$

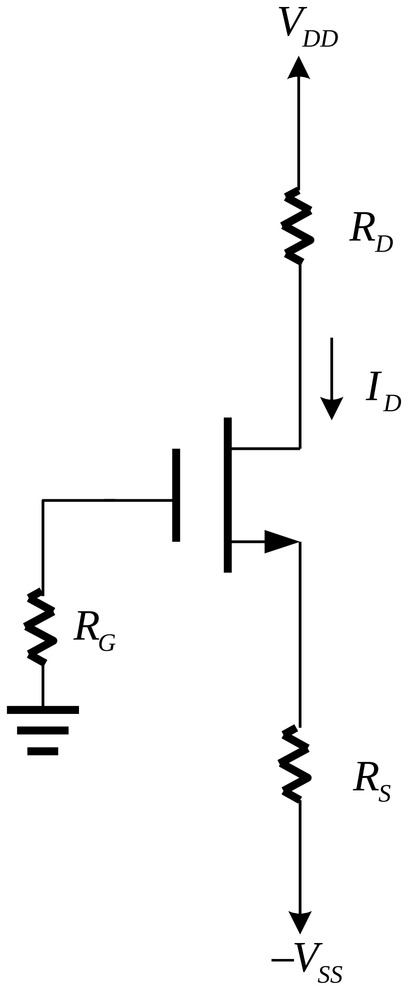
$$V_{DG} - \left|v_{DG}\right|_{\max} \geq -V_t$$

$$V_{DD} - I_D R_D - 1 \geq -V_t$$

即 $$10 - R_D \cdot 1 - 1 \geq -2$$

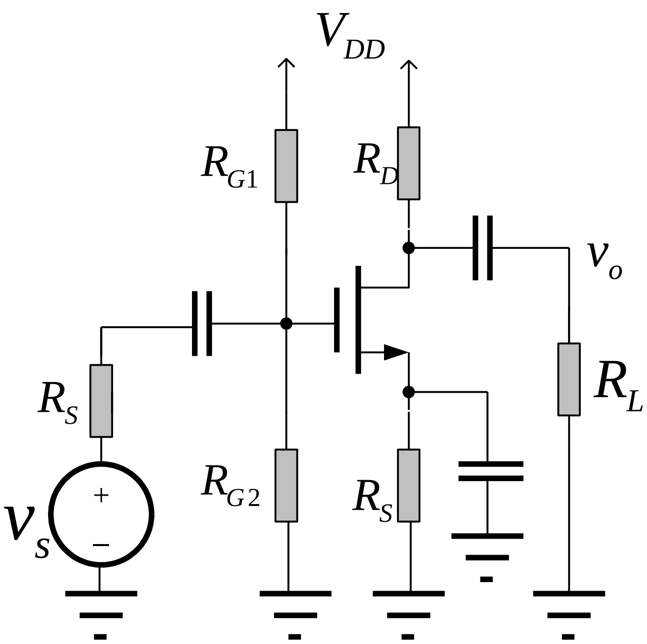
得 $$R_D \leq 11\ \text{K}\Omega$$

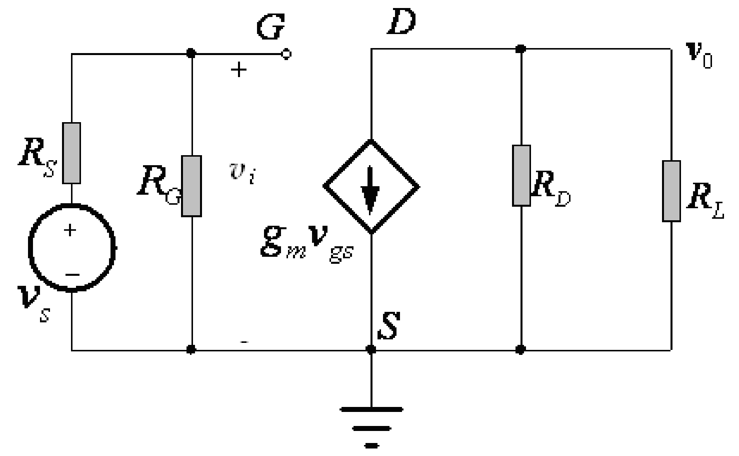
R_G 取1 ~ 10 MΩ



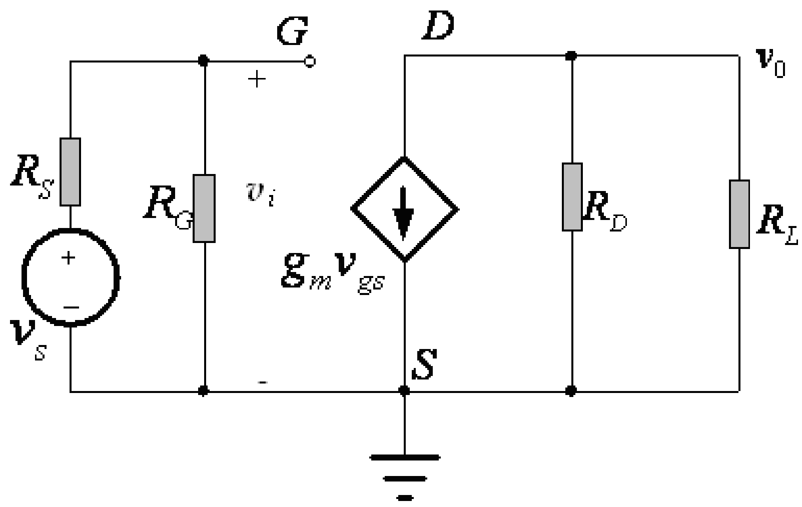
二、三种接法放大电路的分析计算

1、共源放大器





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



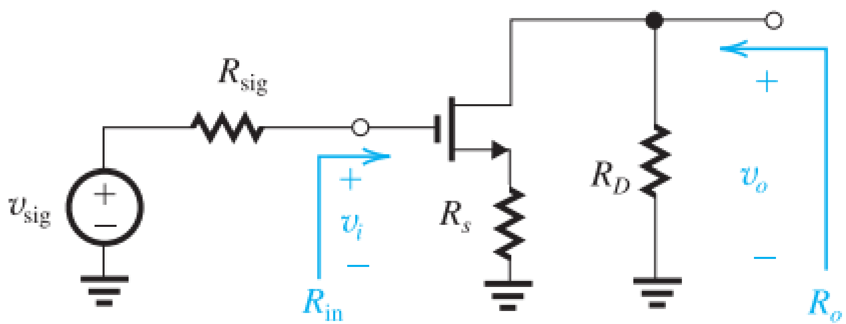
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -g_m\left(R_D // R_L\right)$$

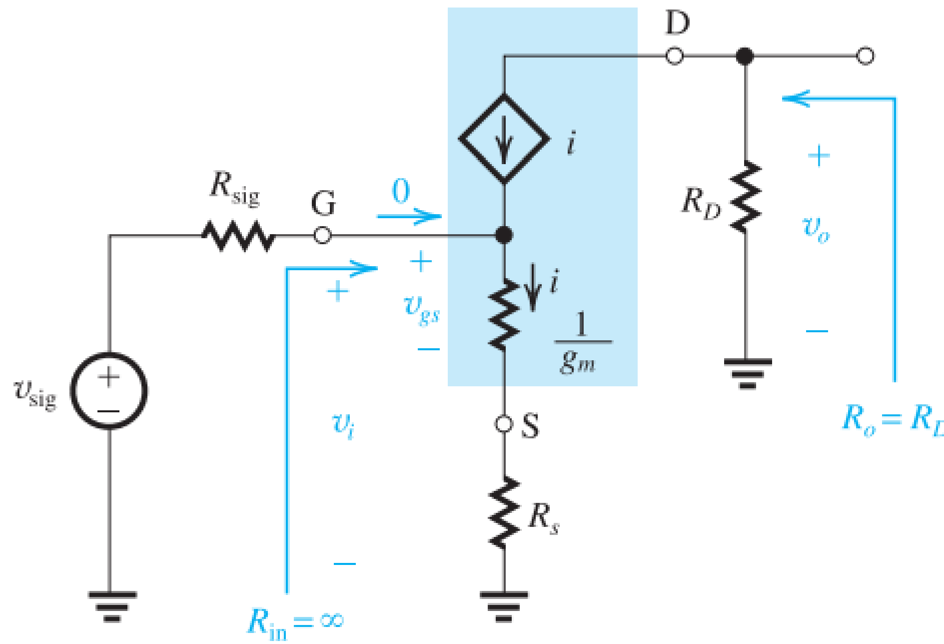
$$A_{vs} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_i}{v_s}\frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_G}{R_{sig}+R_G} g_m\left(R_D // R_L\right)$$

$$R_i = \infty$$

$$R_o = R_D$$

➢ 带源极电阻的共源放大器



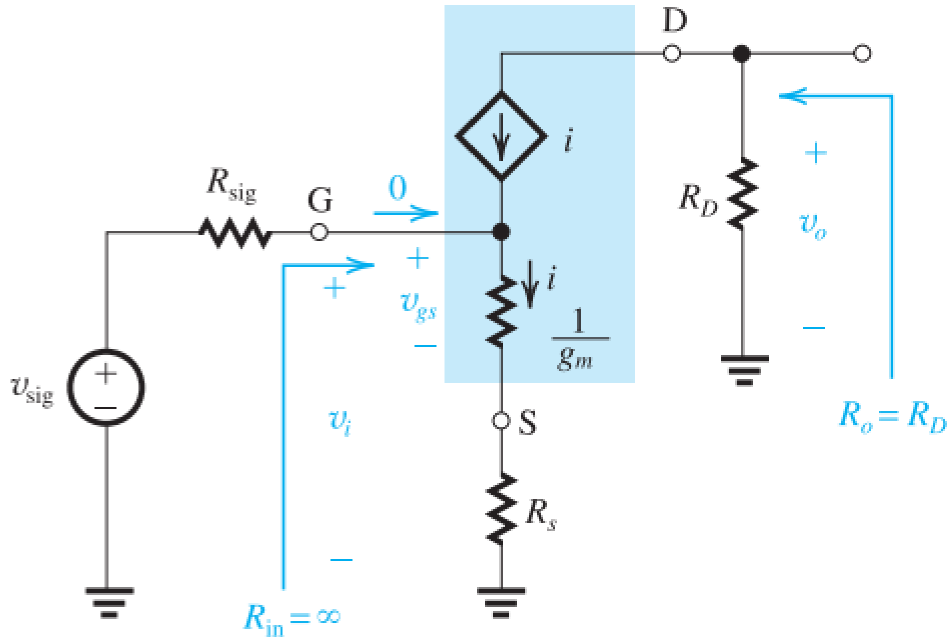


$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-g_m v_{gs} R_D}{g_m v_{gs}\left(1/g_m + R_S\right)} = -\frac{R_D}{1/g_m + R_S}$$

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

$$R_i = \infty$$

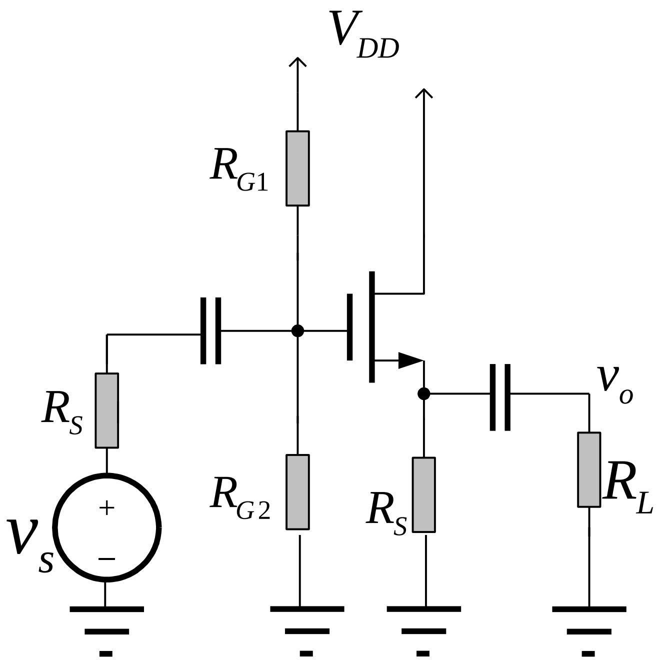
$$R_o = R_D$$

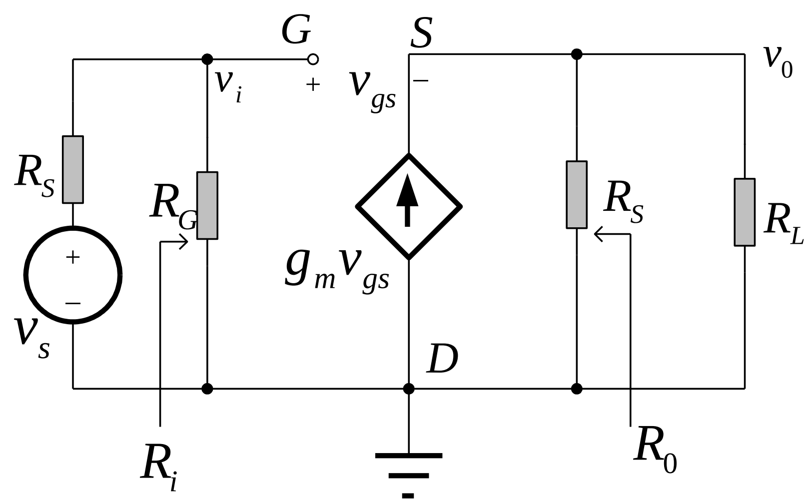


共源放大器特性：

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



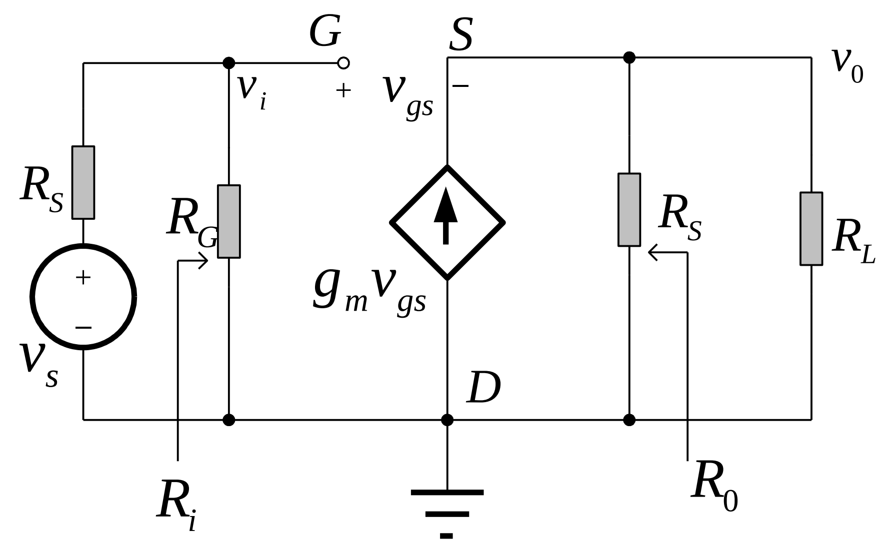


$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{g_m(R_S//R_L)}{1+g_m(R_S//R_L)}$$

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

$$R_i = R_G$$

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

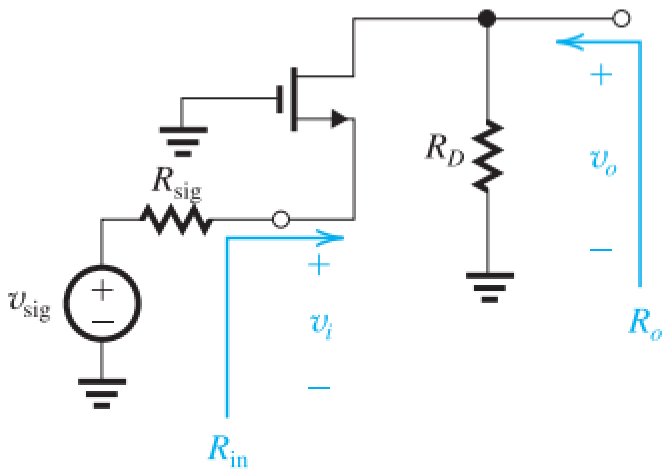


共漏放大器特性：

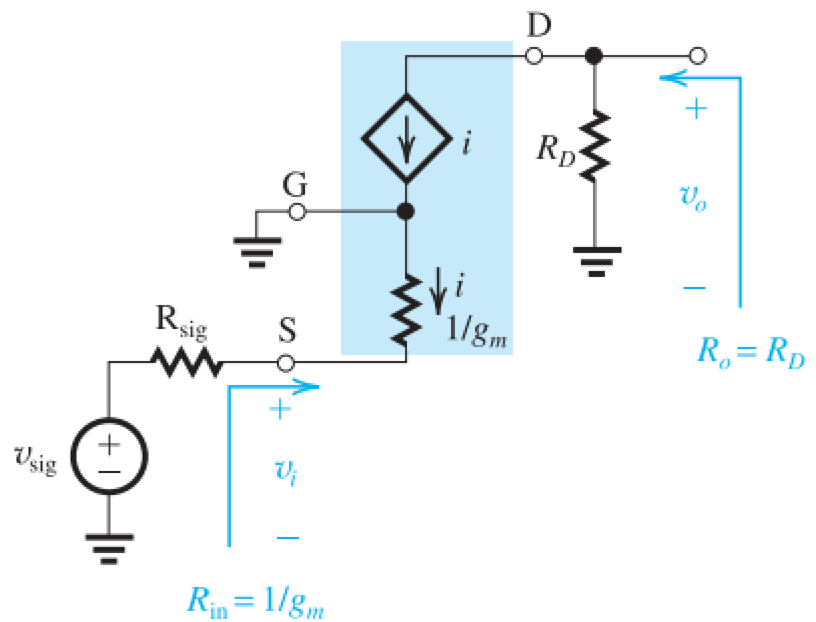
非常高的输入电阻、相当低的输出电阻和接近于1的电压增益，频带中等。

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。

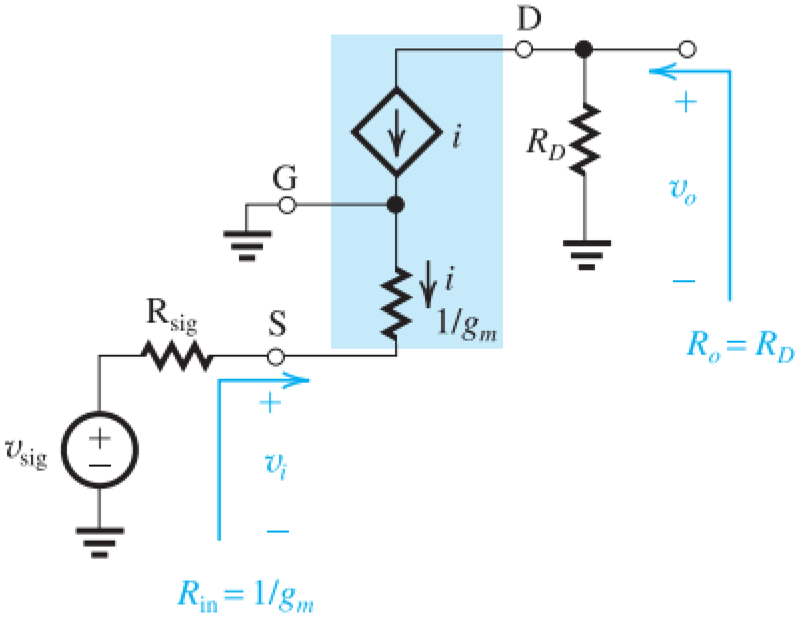
3、共栅放大器



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



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



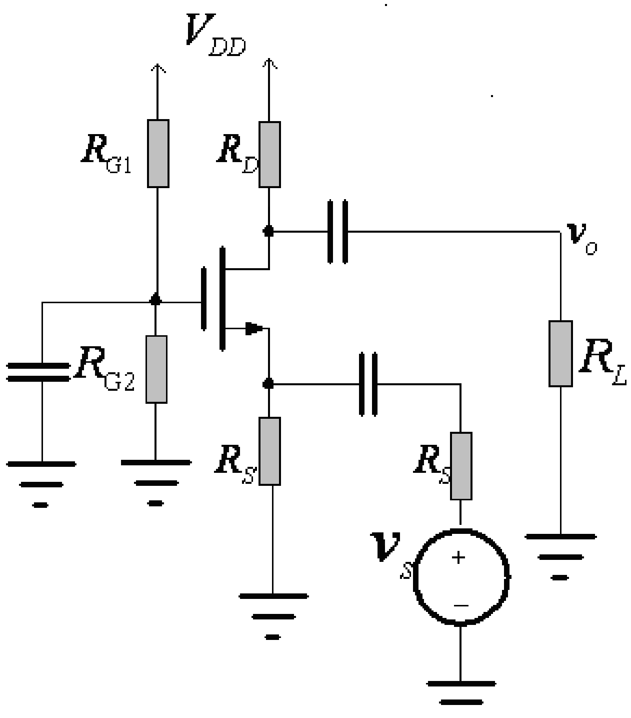
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = g_m R_D$$

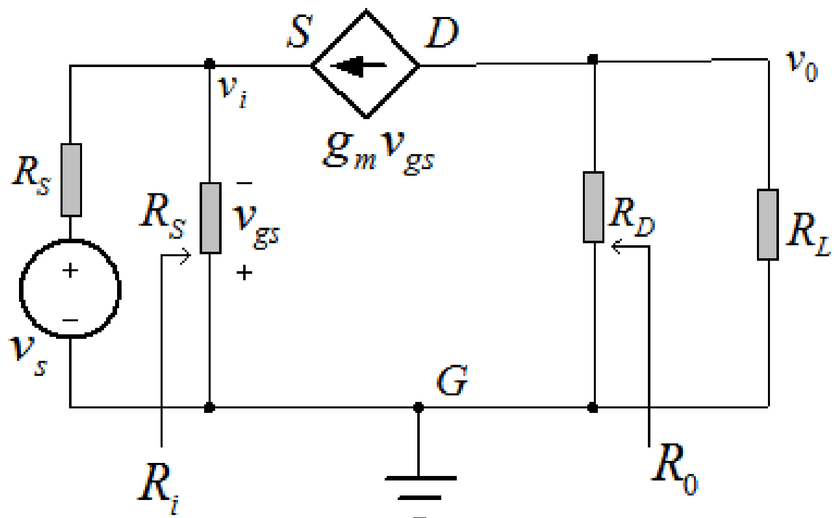
$$A_{vs} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_D}{R_{sig} + 1/g_m}$$

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

$$R_o = R_D$$

➢ 带源极电阻的共栅放大器



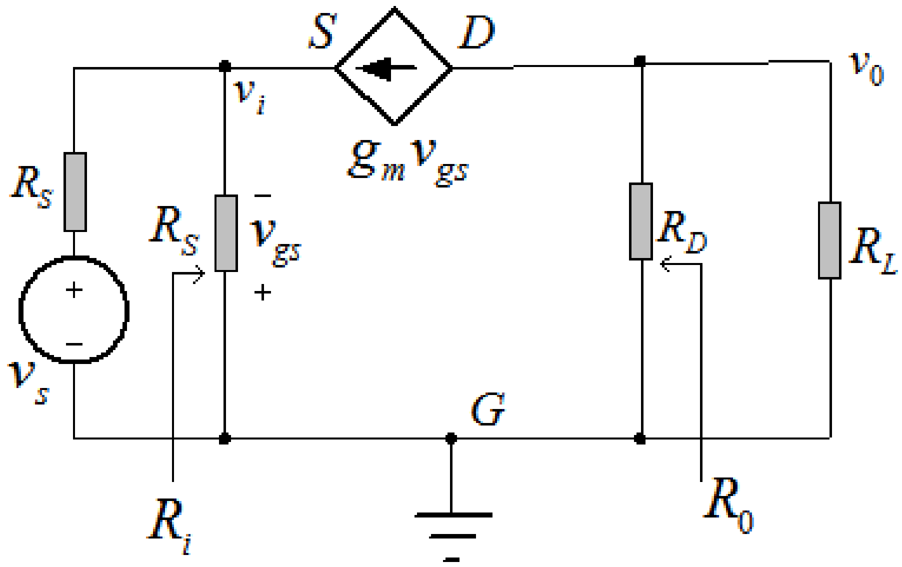


$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = g_m R_D // R_L$$

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

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

$$R_o = R_D$$



共栅放大器特性：

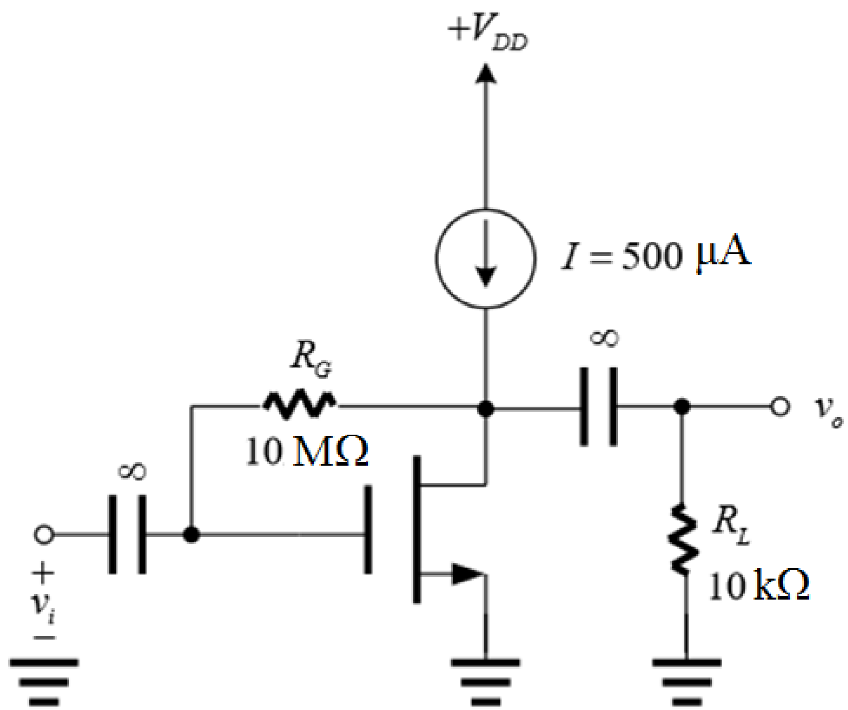
相当低的输入电阻、很大的输出电阻和接近于1的电流增益，且高频特性较好，频带宽。

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

例1 下图电路中的增强型NMOS管 $|V_t| = 0.9\ \text{V}$ ，$V_A = 50\ \text{V}$ ，已知漏极电压 $V_D = 2\ \text{V}$，计算电压增益 v_o/v_i。当 I 增加到1 mA时，V_D 和 v_o/v_i 又会变成多大？



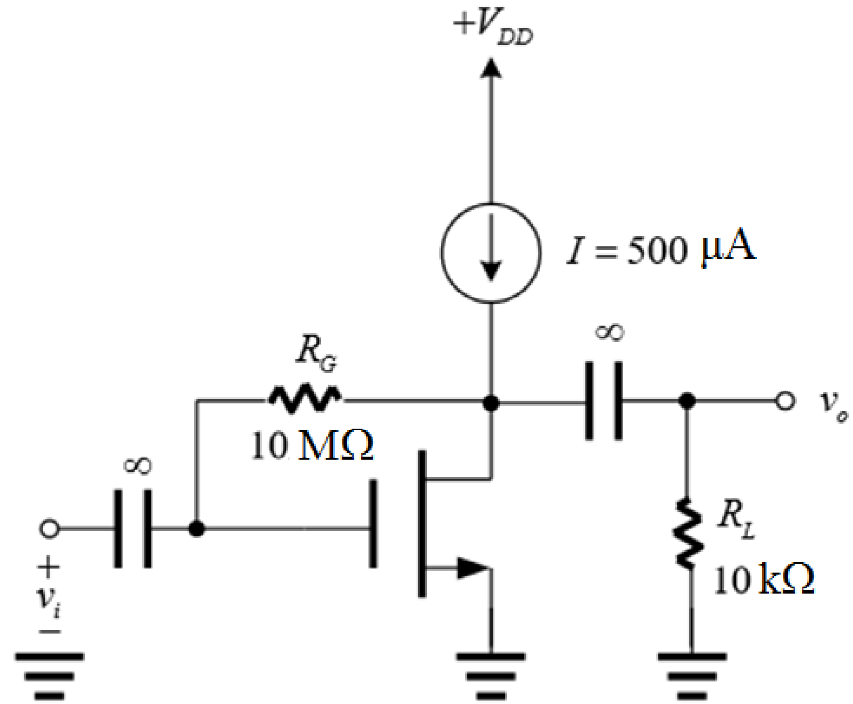
解：

$$V_D = V_G \quad \Longrightarrow \quad V_{DS} = V_{GS} = 2\ \text{V}$$

$$I_D = 0.5\ \text{mA}$$

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

$$k_n' \frac{W}{L} = \frac{2I_D}{(V_{GS} - V_t)^2} = \frac{2 \times 0.5}{(2-0.9)^2} \approx 0.826$$



而

$$g_m = k_n' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) = 0.826 \times (2-0.9) = 0.91\ \text{mA/V}$$

$$r_o = \frac{V_A}{I_D} = \frac{50}{0.5} = 100\ \text{K}\Omega$$

$$\therefore v_o / v_i = -g_m r_o // R_L = -0.91 \times 100 // 10 = -8.27\ \text{V/V}$$

当 $I_D = 1$ mA 时，则有

$$1 = \frac{1}{2} \times 0.826 (V_{GS} - V_t)^2$$

求得

$$V_{GS} \approx 2.456 \text{ V} \qquad \cancel{V_{GS} \approx -0.656 \text{ V}}$$

此时

$$g_m = k_n' \frac{W}{L} \left(V_{GS} - V_t \right)$$

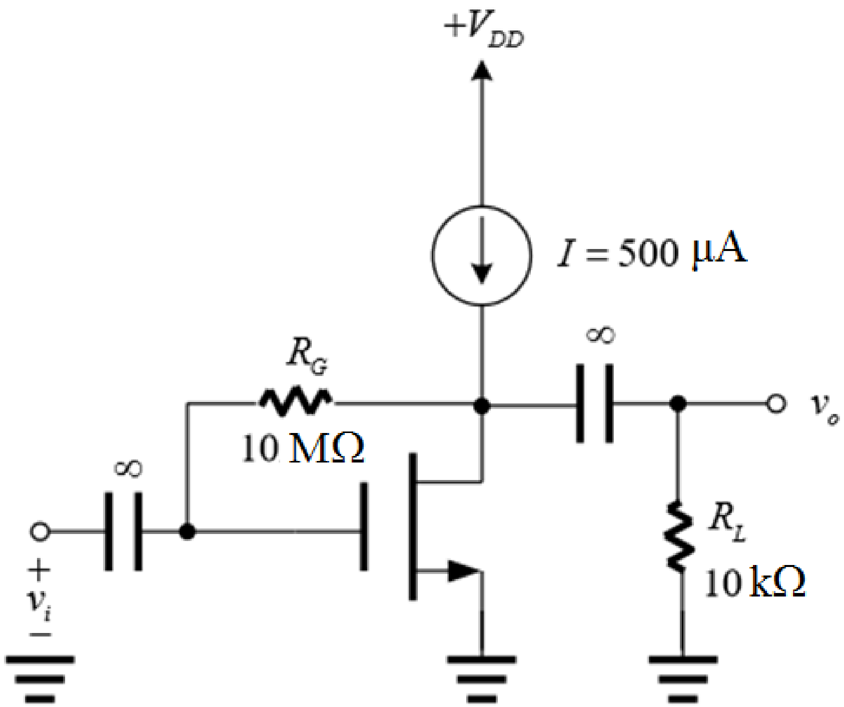
$$= 0.826 \times (2.456 - 0.9)$$

$$\approx 1.285 \text{ mA/V}$$

而

$$r_o = \frac{V_A}{1} = 50 \text{ K}\Omega$$

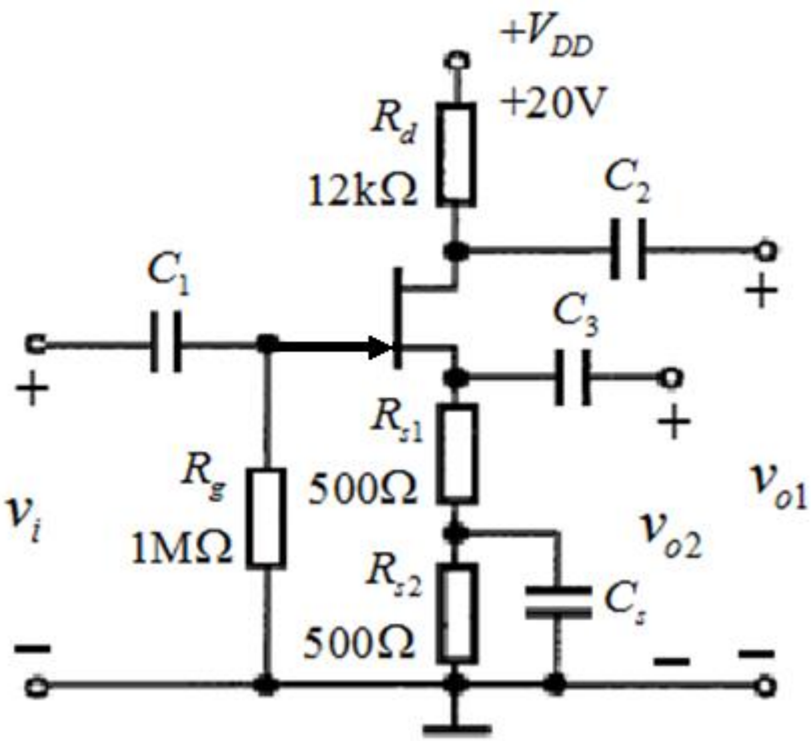
$$\therefore v_o / v_i = -g_m r_o // R_L = -1.285 \times 50 // 10 = -10.71 \text{ V/V}$$



例2 电路如下图所示，该结型场效应管的$V_t=-3\text{ V}$，$I_{DSS}=3\text{ mA}$，$r_o>>R_d$，试用小信号等效电路法求：

(1)结型场效应管的直流偏置，电压放大倍数 A_{v1} 和 A_{v2}。

(2) 输入电阻R_i和输出电阻R_{o1}及R_{o2}。



$$I_{DSS}=\frac{1}{2}k_n'\frac{W}{L}V_t^2$$

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

解：

(1) 由直流通路可列方程

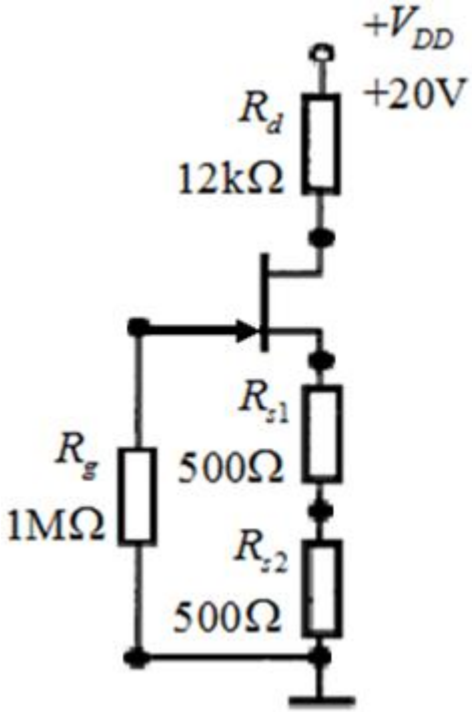
$$V_{GS} = -I_D(R_{S1} + R_{S2}) = -\left[I_D\left(0.5 + 0.5\right)\right]\mathrm{V} = -(I_D \times 1)\mathrm{V}$$

$$I_D = I_{DSS}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_t}\right)^2 = \left[3\left(1 - \frac{V_{GS}}{-3}\right)^2\right]\mathrm{mA}$$

联立求解得

$$\begin{cases} V_{GS} = -1.15\ \mathrm{V} \\ I_D = 1.15\ \mathrm{mA} \end{cases}$$

舍去 $V_{GS} = -7.85\ \mathrm{V} \quad \left(< V_t\right)$



(2) 求 g_m

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

$$\therefore g_m = \frac{di_D}{dv_{GS}} = -\frac{2I_{DSS}}{V_t}\left(1-\frac{V_{GS}}{V_t}\right) = -\frac{2\times 3}{-3}\left(1-\frac{-1.15}{-3}\right)\frac{\text{mA}}{\text{V}} \approx 1.23\ \text{mS}$$

或者

$$g_m = \frac{I_D}{\left(V_{GS}-V_t\right)/2} = \frac{1.15}{\left(-1.15+3\right)/2} \approx 1.24\ \text{mS}$$

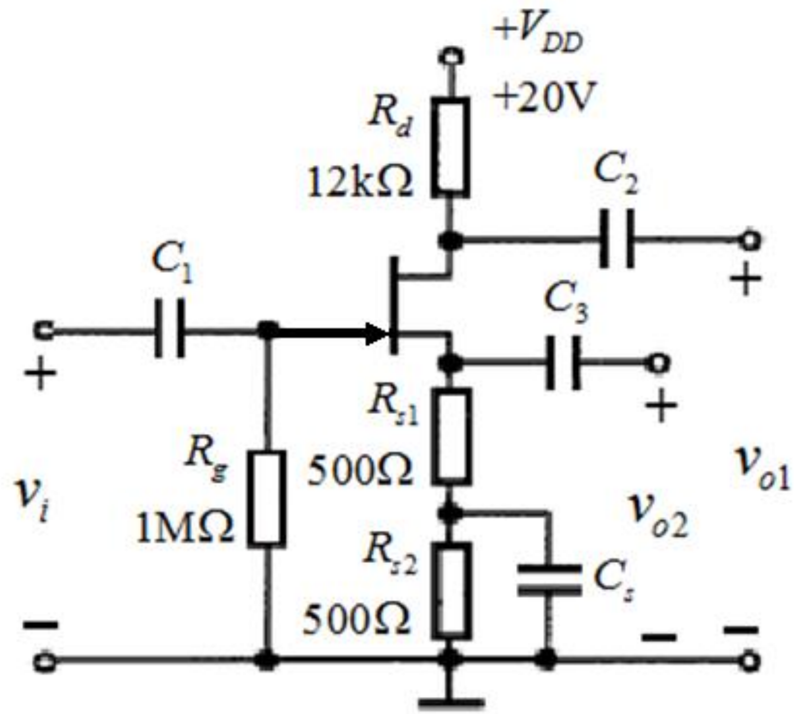
(3) 画微变等效电路，求 A_{v1} 和 A_{v2}

由微变等效电路得

$$v_{o1} = -g_m v_{gs} R_d$$

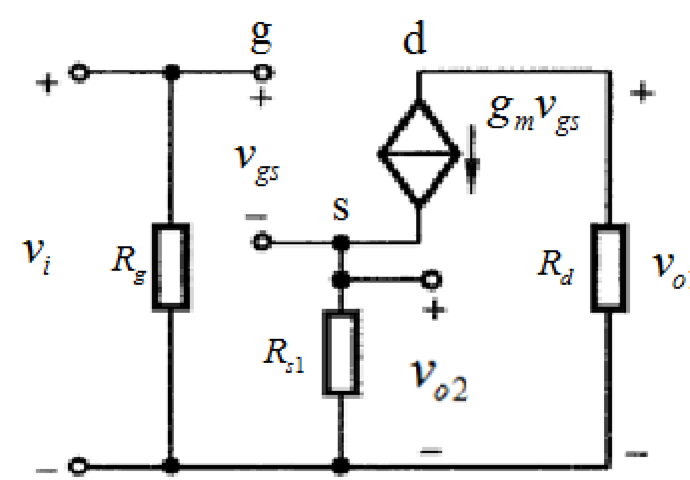
$$v_{o2} = g_m v_{gs} R_{s1}$$

$$v_i = v_{gs} + g_m v_{gs} R_{s1}$$

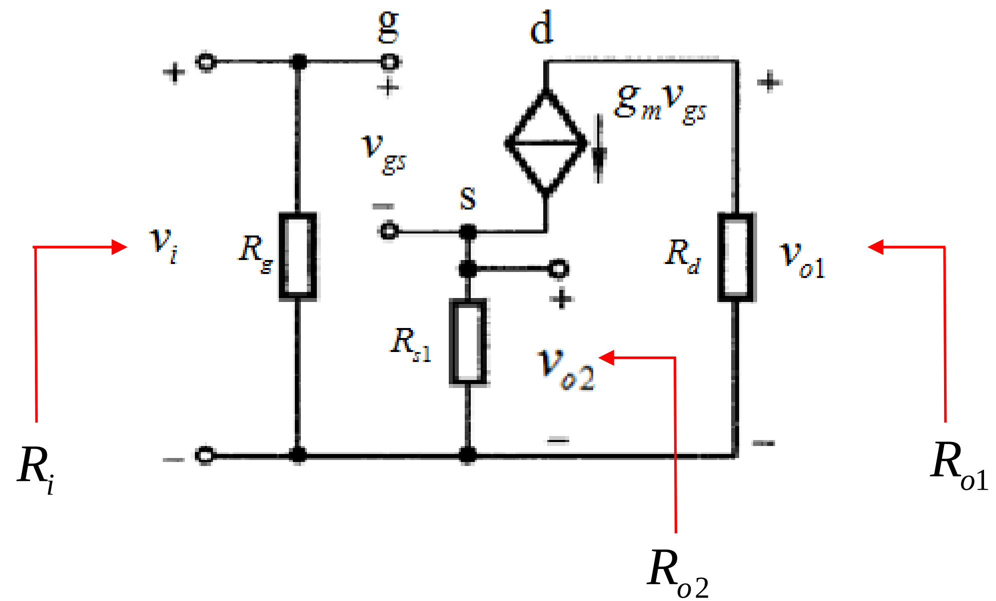


$$A_{v1} = \frac{v_{o1}}{v_i} = -\frac{g_m R_d}{1+g_m R_{s1}} = -\frac{1.23\times 12}{1+1.23\times 0.5} = -9.14 \text{ V/V}$$

$$A_{v2} = \frac{v_{o2}}{v_i} = \frac{g_m R_{s1}}{1+g_m R_{s1}} = -\frac{1.23\times 0.5}{1+1.23\times 0.5} = -0.38 \text{ V/V}$$



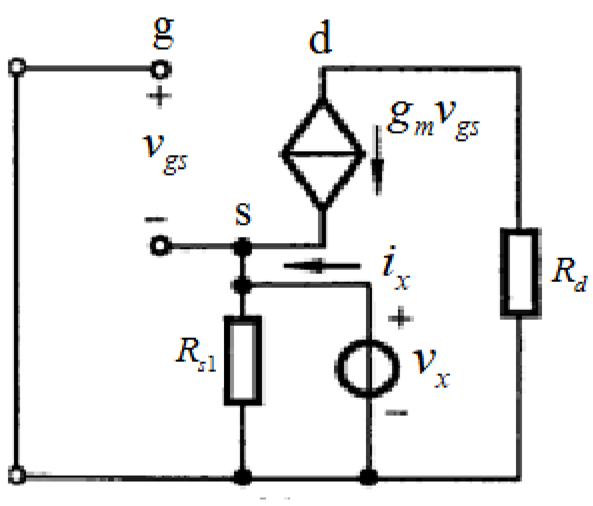
(4) 求 R_i 、R_{o1}、R_{o2}



$$R_i = R_g = 1\ \mathrm{M\Omega}$$

$$R_{o1} = R_d = 12\ \mathrm{k\Omega}$$

求 R_{o2}



$$v_x = -v_{gs}$$

$$i_x = -g_m v_{gs} - \frac{v_{gs}}{R_{s1}}$$

$$R_{o2} = \frac{v_x}{i_x} = \frac{1}{g_m + \dfrac{1}{R_{s1}}} = \frac{1}{1.23 + \dfrac{1}{0.5}} \approx 0.31\ \mathrm{k\Omega}$$