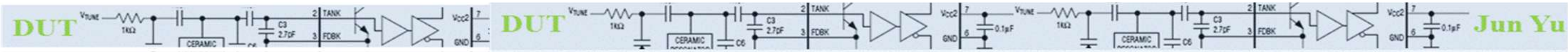


模拟电子线路

课件资源：基于《电子技术基础 模拟部分》(康华光主编 第五版)以及模电组郝育闻、林秋华、巢明等教师的课件编写。

- 大连理工大学电信学部
- 创新园A-416 余隽
- 84706002-3416
- junyu@dlut.edu.cn

§5 场效应管放大电路

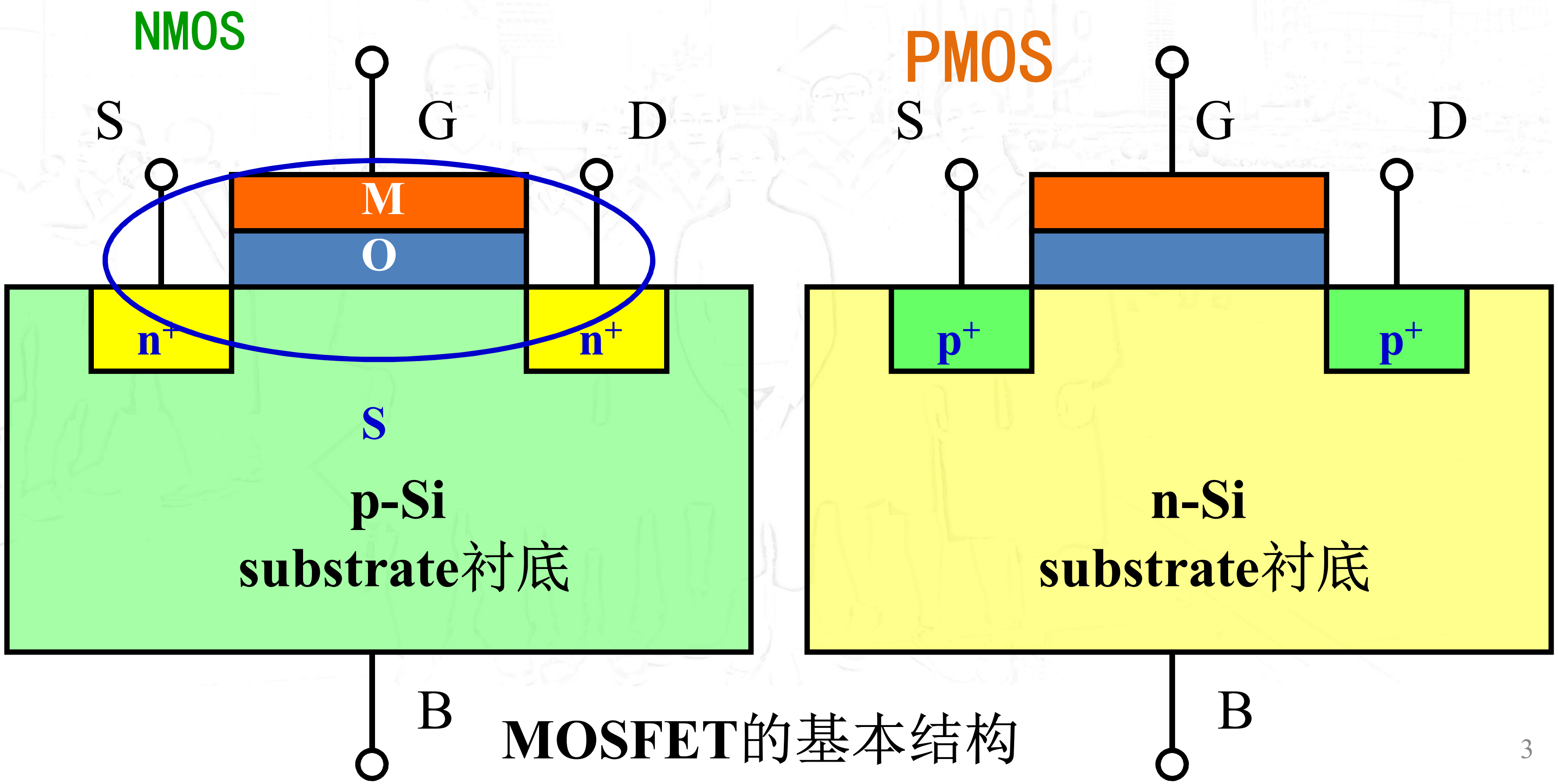
The Field-Effect Transistor and Basic FET Amplifiers

5.1.1 结构与原理

MOSFET：Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

S—源极source	D—漏极drain	G—栅极gate	B—体body

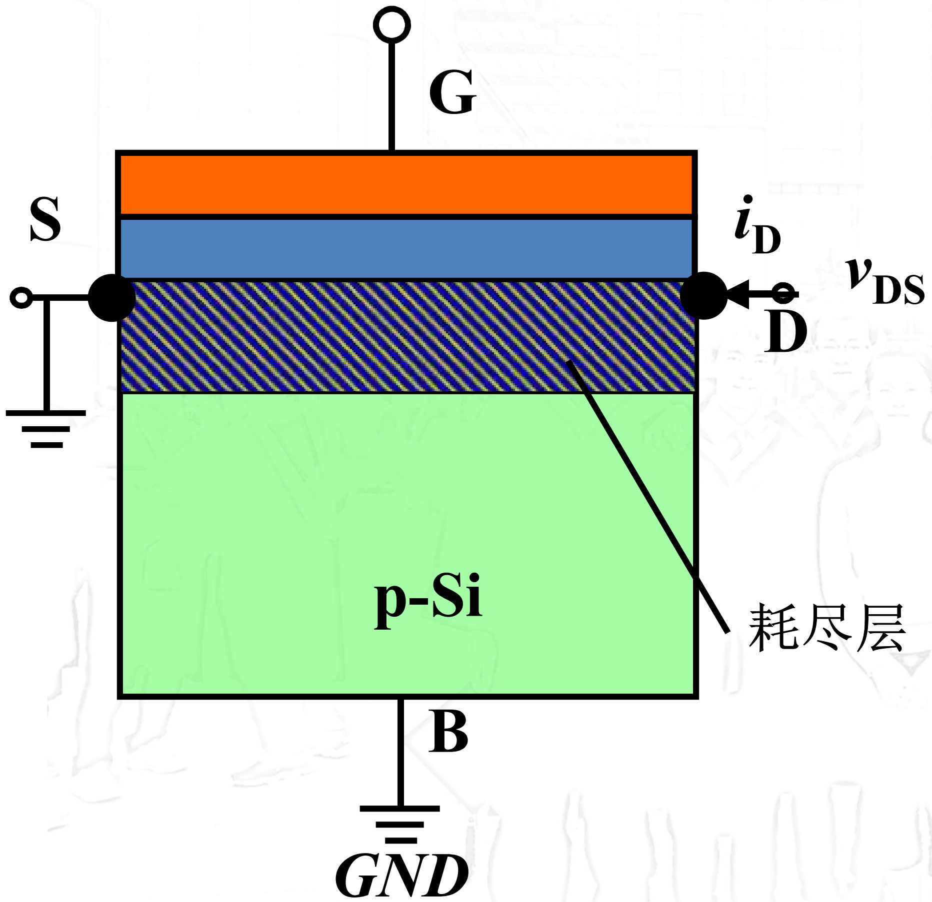
基本状态：两个PN结均不导通！



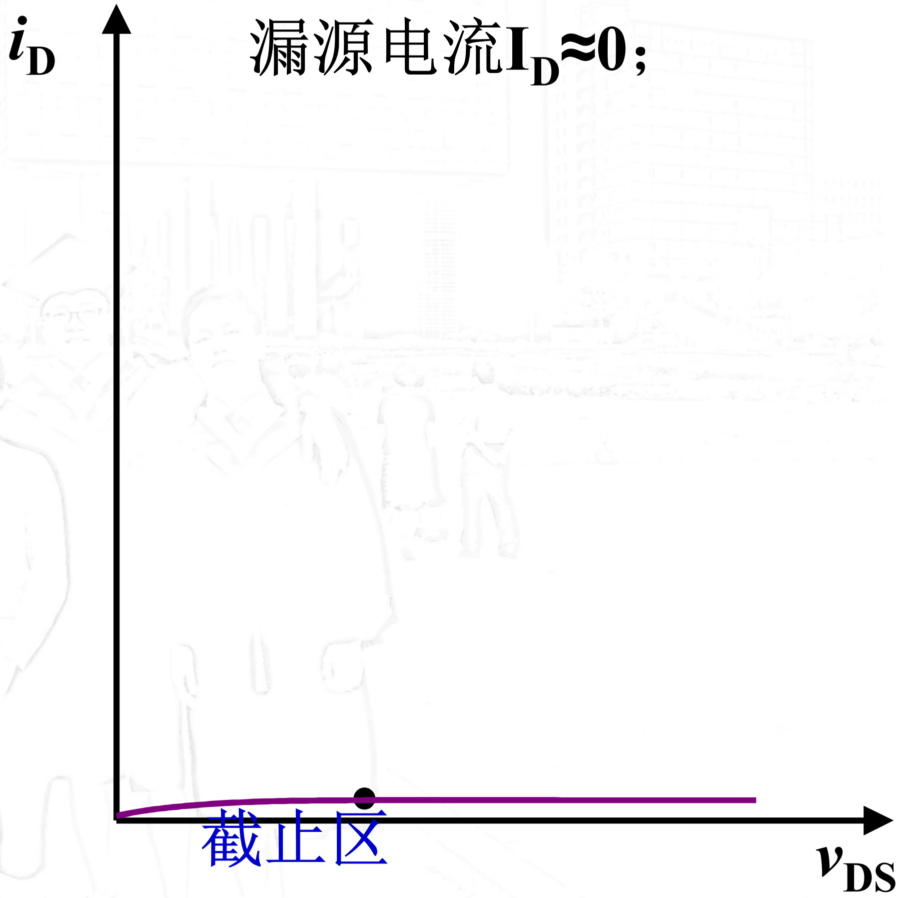
MOSFET的基本结构

5.1.1 结构与原理（增强型MOSFET）

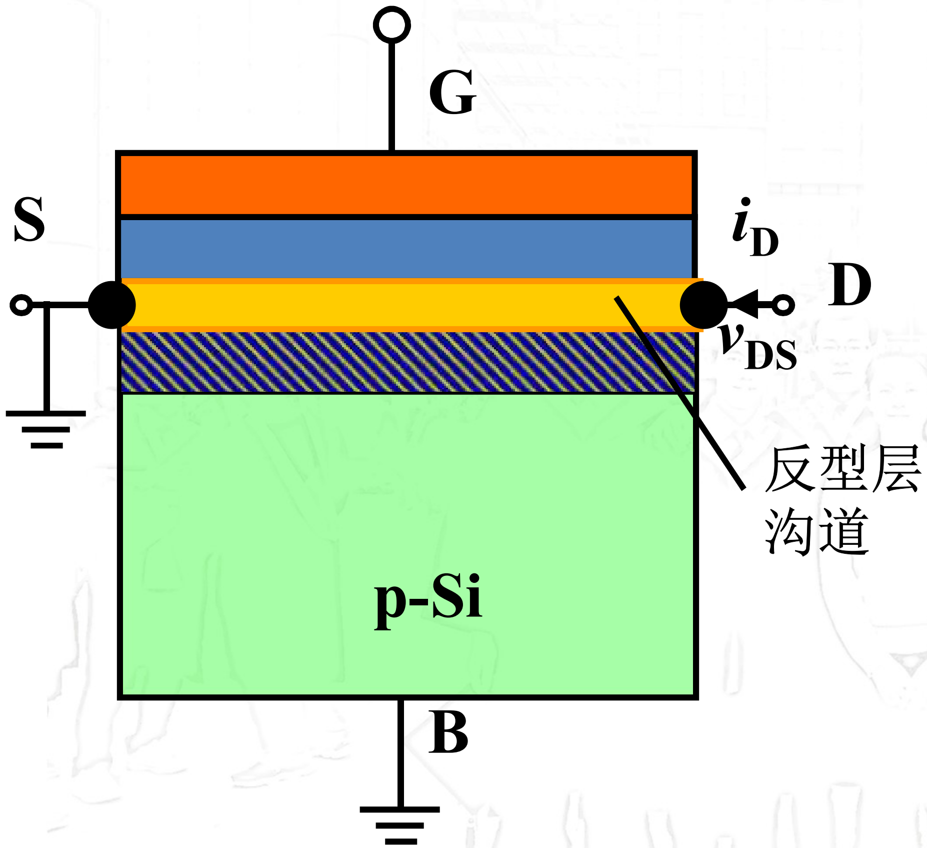
$0 < v_{GS} \le V_T$



截止区$(v_{GS} \le V_T)$：
无电流通道，
漏源电流$I_D \approx 0$；

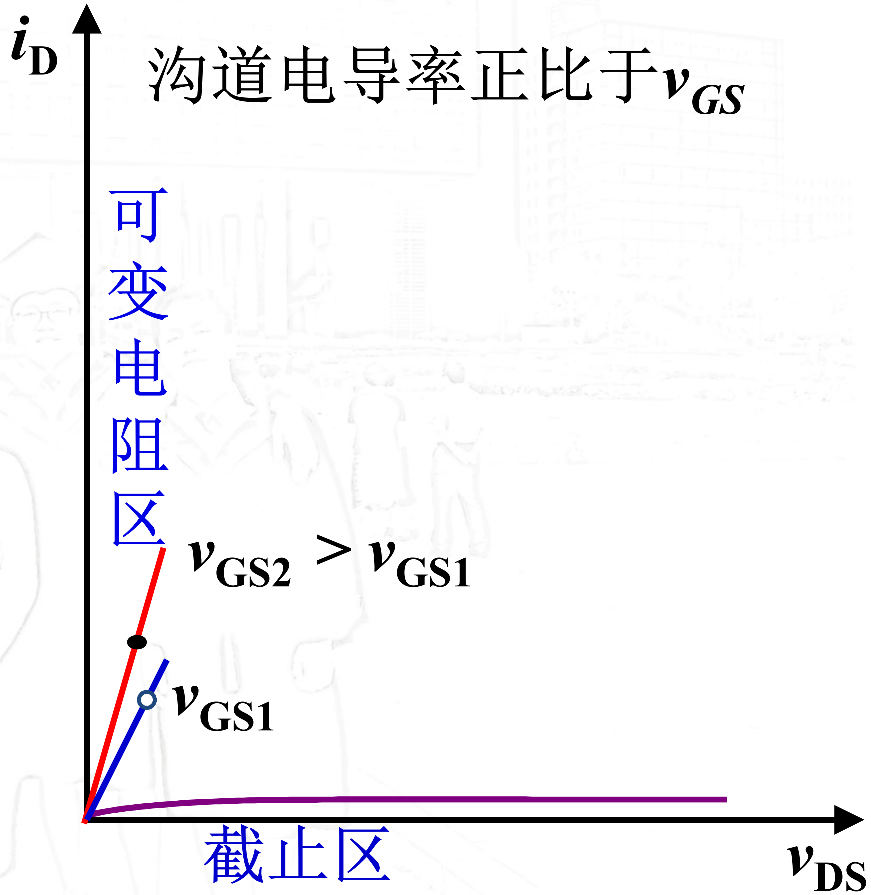


$v_{GS} > V_T$

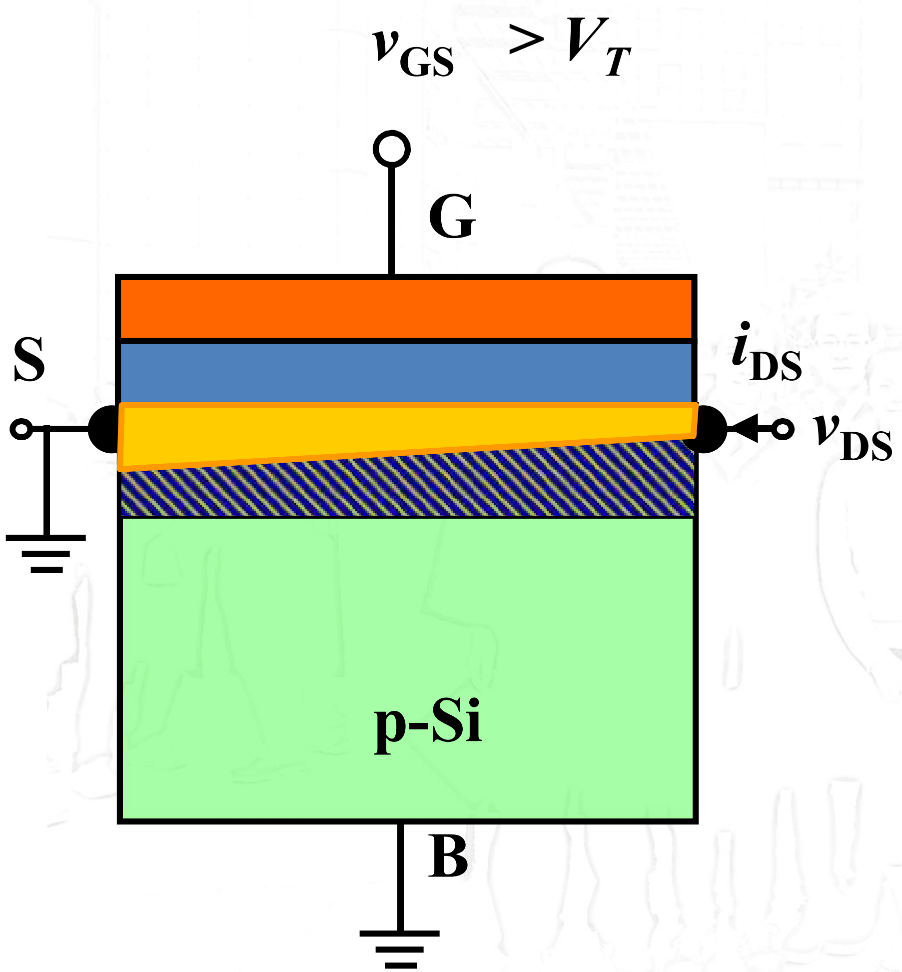


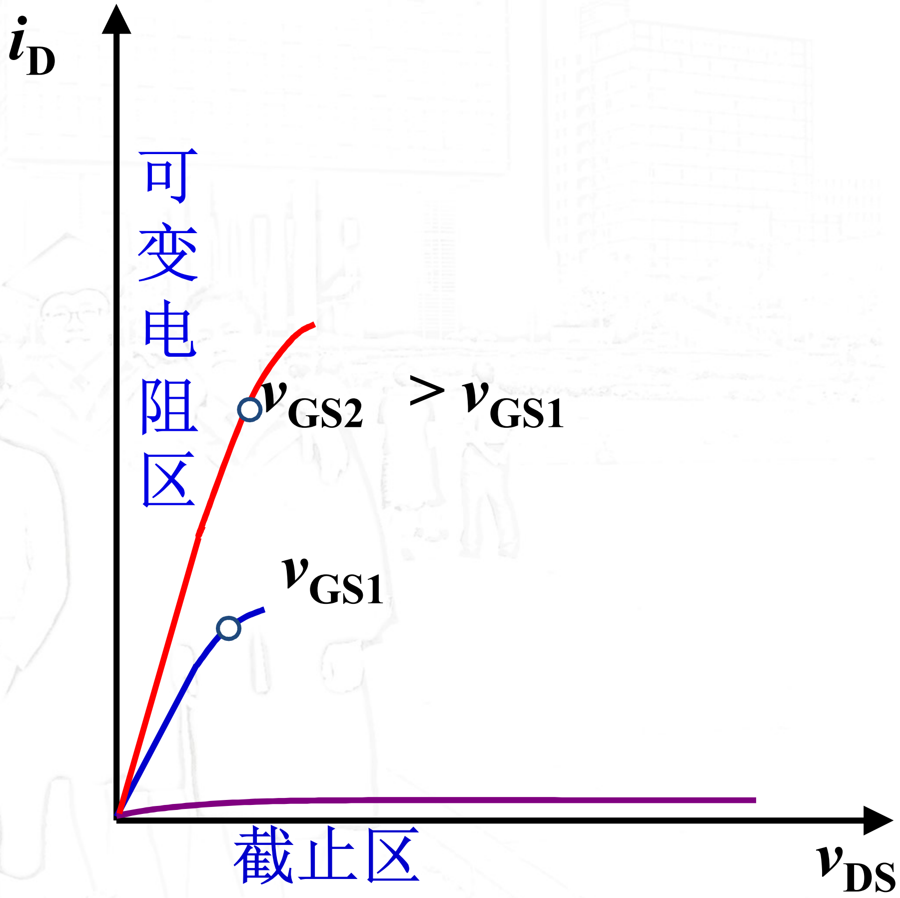
n沟道--仅电子参与导电

沟道电导率正比于v_{GS}



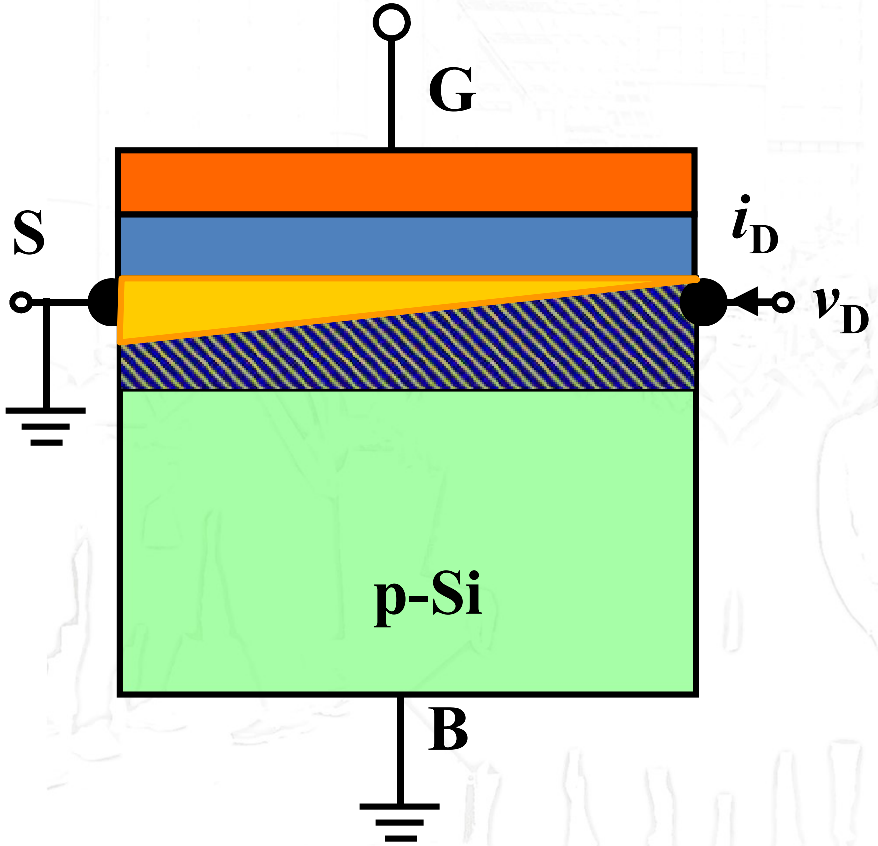
v_{DS}逐渐增大，v_{GD}逐渐减小，吸引少子较少，漏端沟道减小，沟道电阻增大。

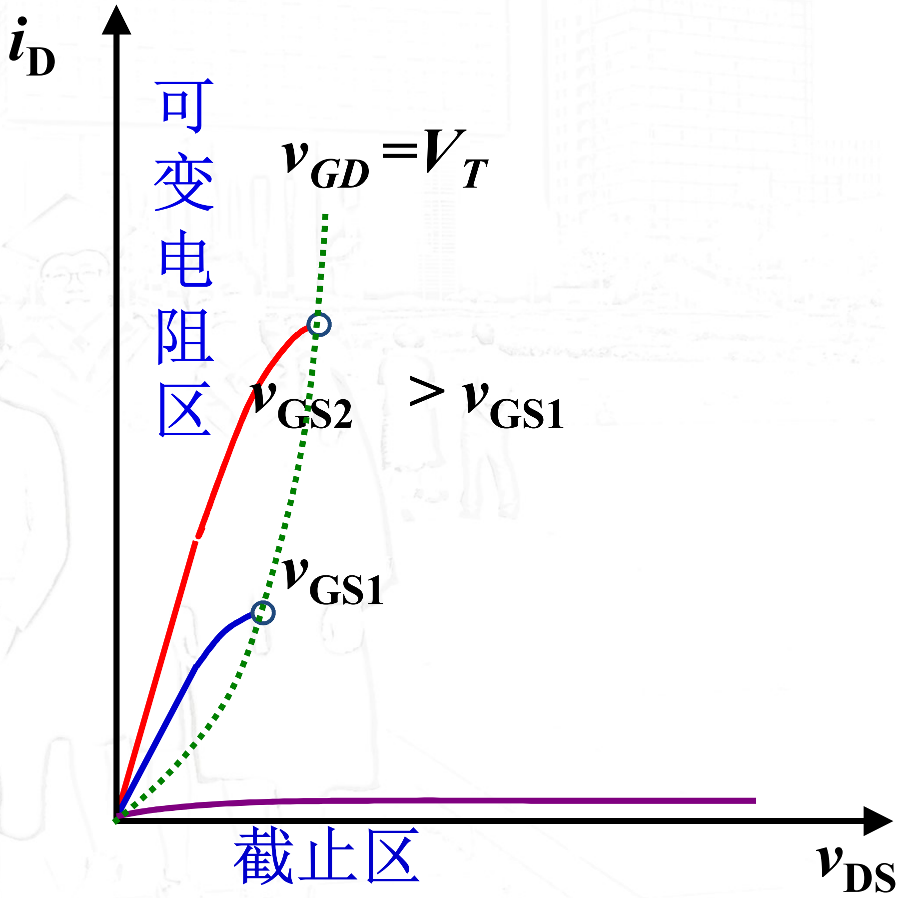




当v_{DS}增大，使v_{GD}减小到$v_{GD}=V_T$

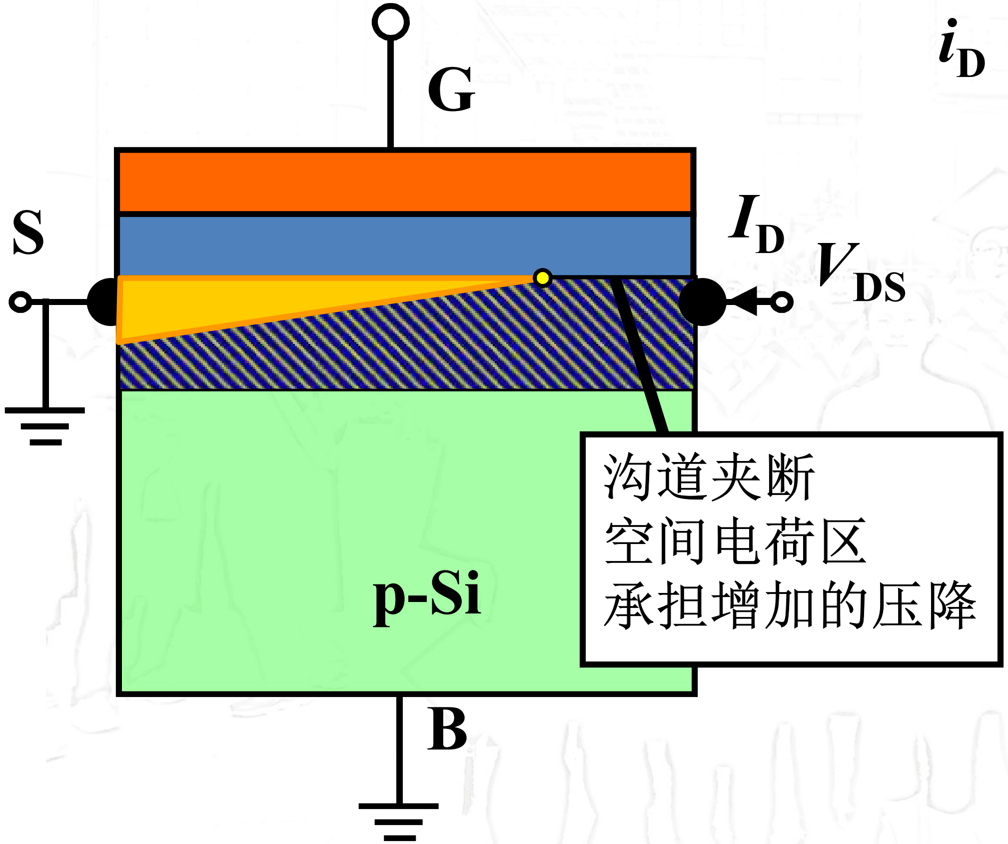
$v_{GS} > V_T$ 漏极处沟道预夹断 **(pinch off)**



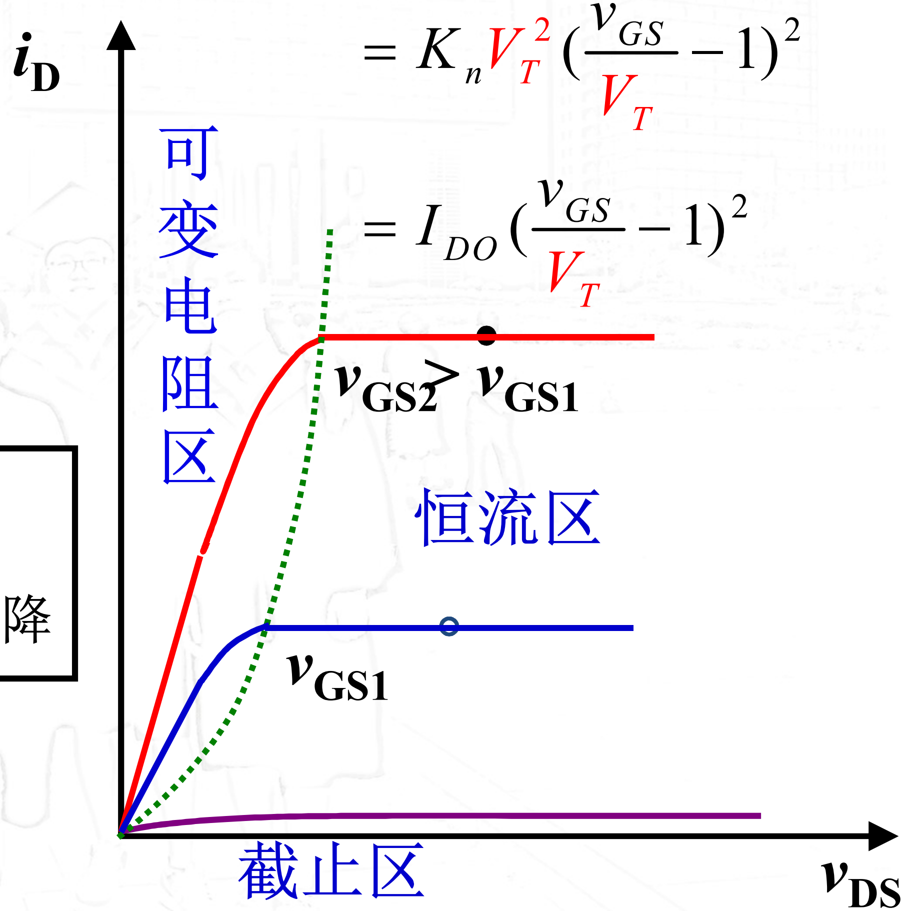


当v_{DS}继续增大： $v_{GD} < V_T$ i_D达到饱和，不再随v_{DS}增加。

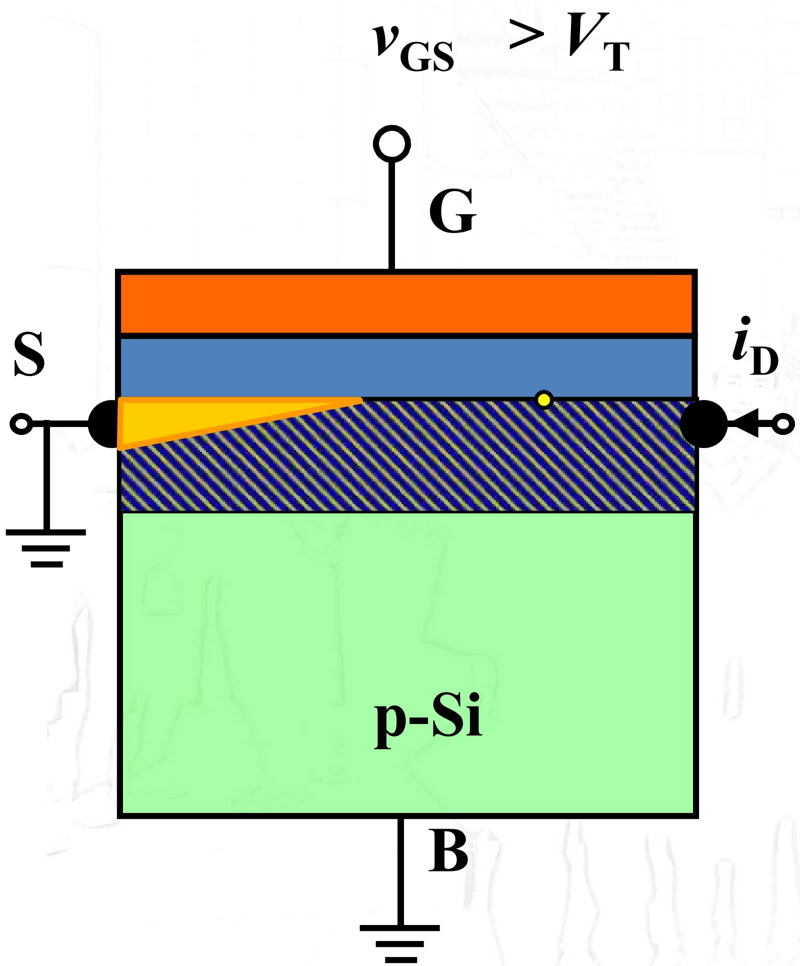
$v_{GS} > V_T$

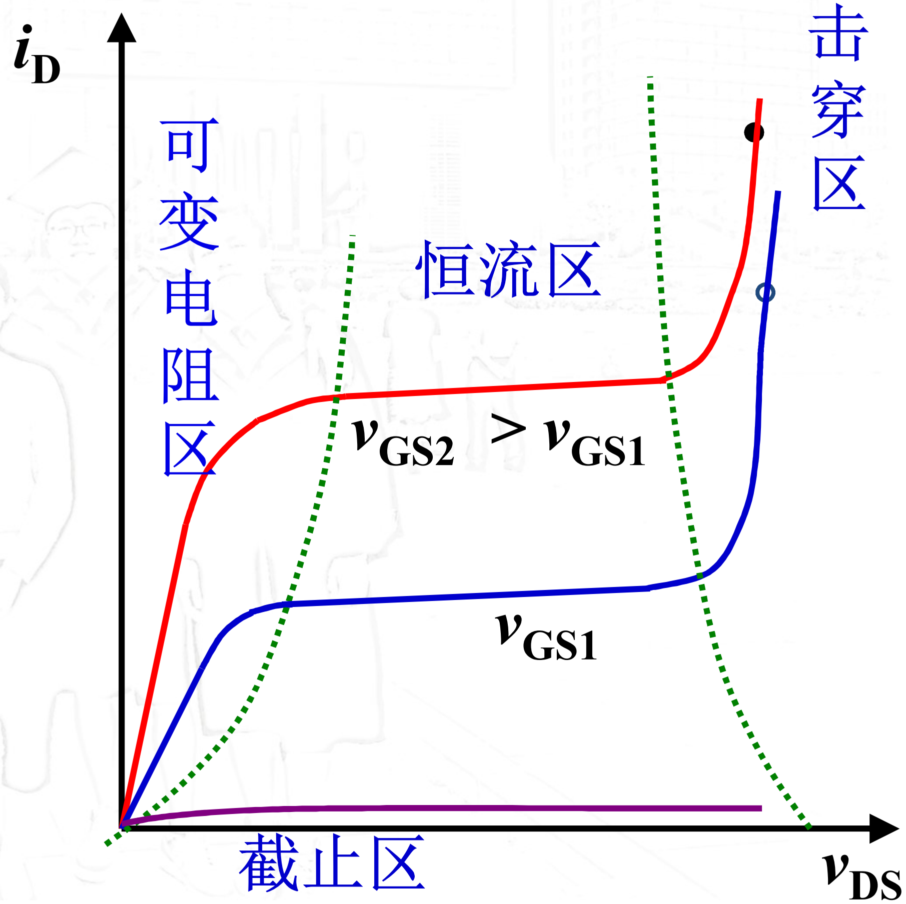


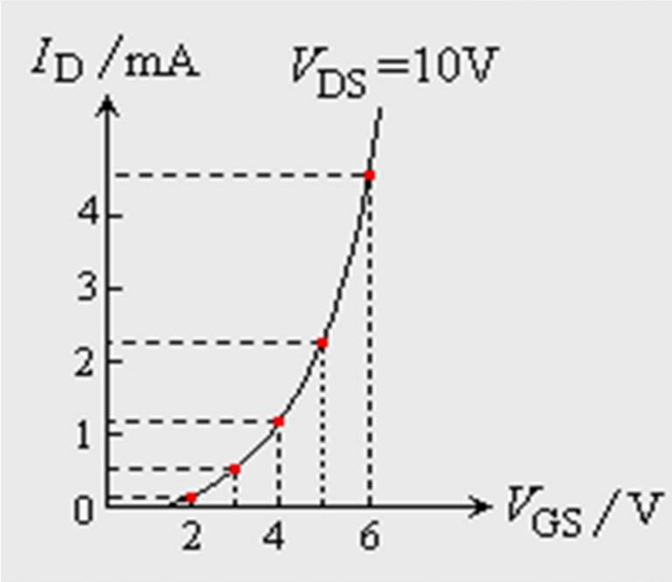
$$i_D = K_n(v_{GS} - V_T)^2$$
$$= K_n V_T^2 \left(\frac{v_{GS}}{V_T} - 1\right)^2$$
$$= I_{DO}\left(\frac{v_{GS}}{V_T} - 1\right)^2$$



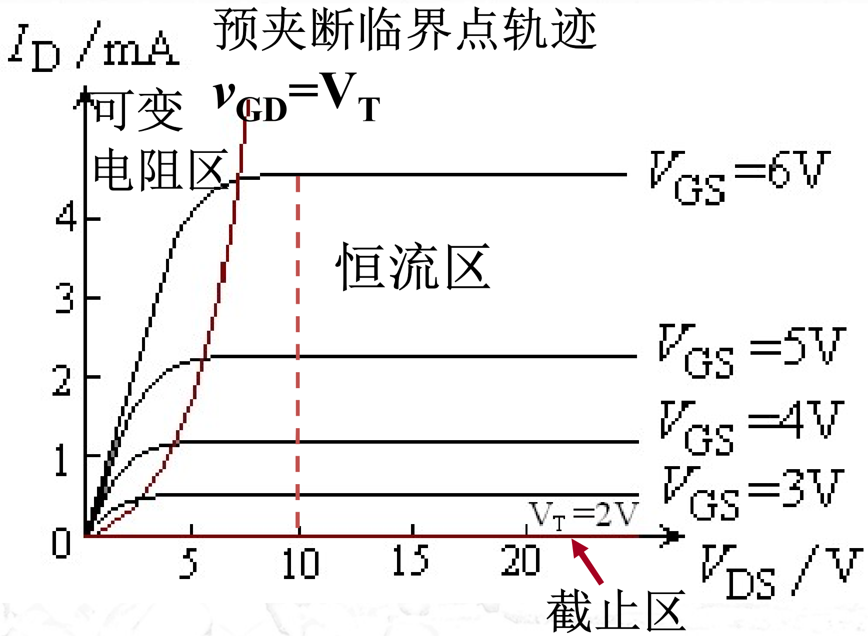
当v_{DS}继续增大：漏与衬底pn结击穿，漏电流迅速增大







放大区转移特性曲线



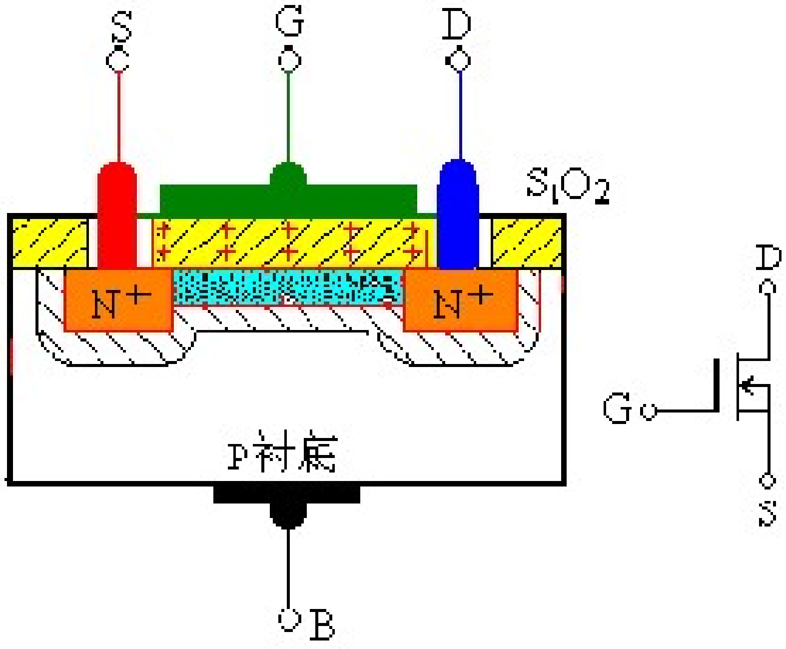
1) 截止区 $v_{GS} \le V_T$, $i_D=0$

2) 可变电阻区 $v_{GS} > V_T$, $v_{GD} > V_T$ （$v_{DS} < v_{GS}-V_T$）

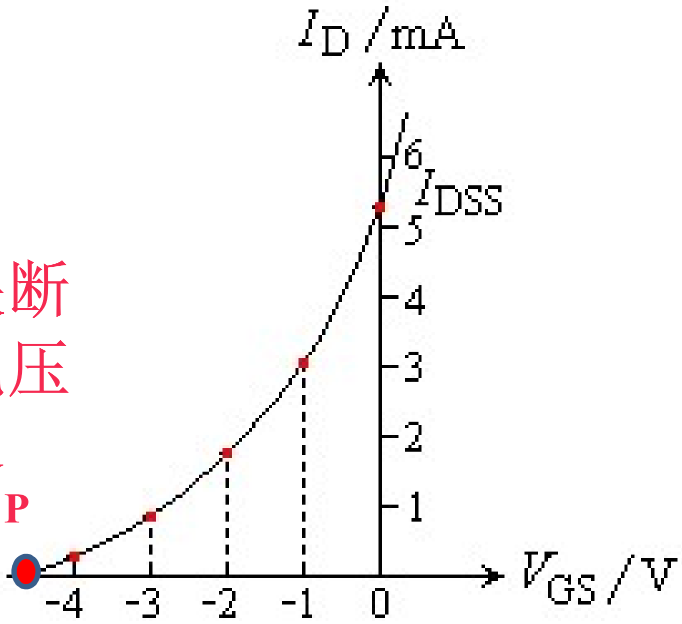
3) 恒流区（放大区） $v_{GD} < V_T < v_{GS}$ （$v_{DS} \ge v_{GS}-V_T$）

$$I_D = I_{DO}[V_{GS} / V_T - 1]^2$$

另：N沟道耗尽型MOSFET



(a) 结构和符号



(b) 转移特性曲线

增强型NMOS：

$$I_{DO} = K_n V_T^2$$

$$(v_{GS} = 2V_T)$$

$$K_n = \frac{1}{2}\mu_n C_{OX}\left(\frac{W}{L}\right)$$

$$i_D = K_n(v_{GS} - V_T)^2$$

$$= K_n V_T^2 (\frac{v_{GS}}{V_T} - 1)^2$$

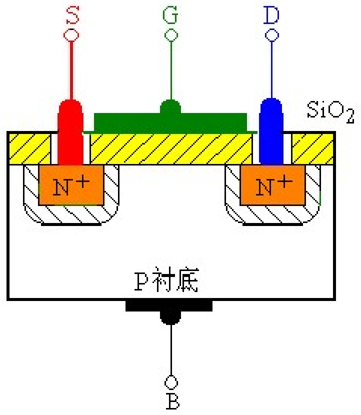
$$= I_{DO}(\frac{v_{GS}}{V_T} - 1)^2$$

耗尽型NMOS：

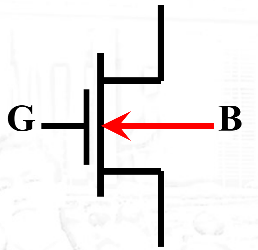
$$i_D \approx I_{DSS}(1 - \frac{v_{GS}}{V_P})^2$$

$$i_D \approx K_n V_P^2 = I_{DSS}\ (v_{GS} = 0)$$

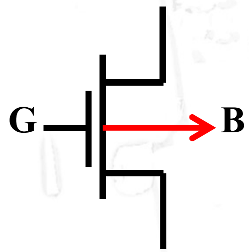
5.1.2 符号与特性



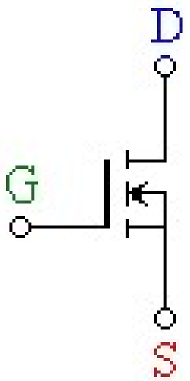
D(Drain): 漏极
G(Gate): 栅极
S(Source):源极
B(Body): 衬底
(Substrate)

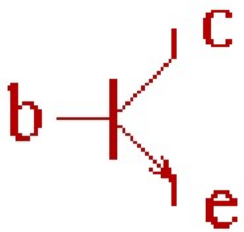


NMOS
(类似NPN管)



PMOS
(类似PNP管)





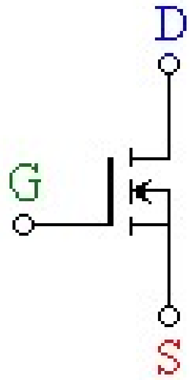
箭头:
P→N

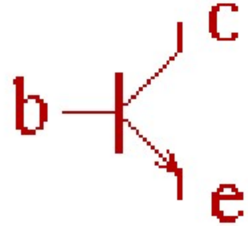
***Je箭头:**
P → N

D 相当于c
G 相当于b
S 相当于e

特性曲线

I-V Characteristics

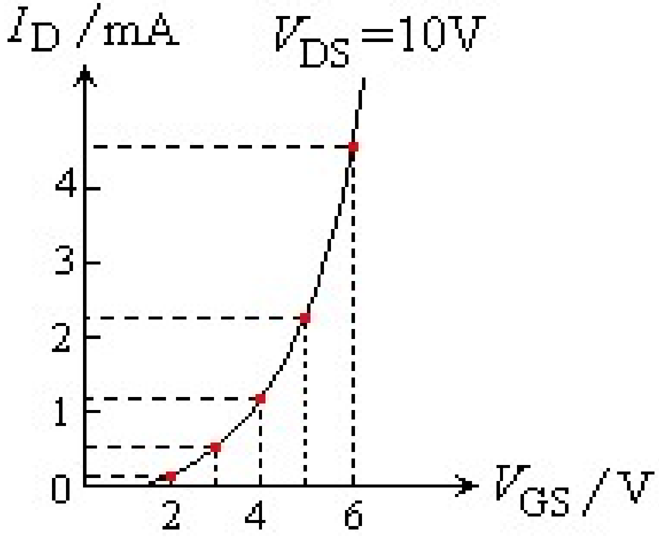




1、转移特性曲线

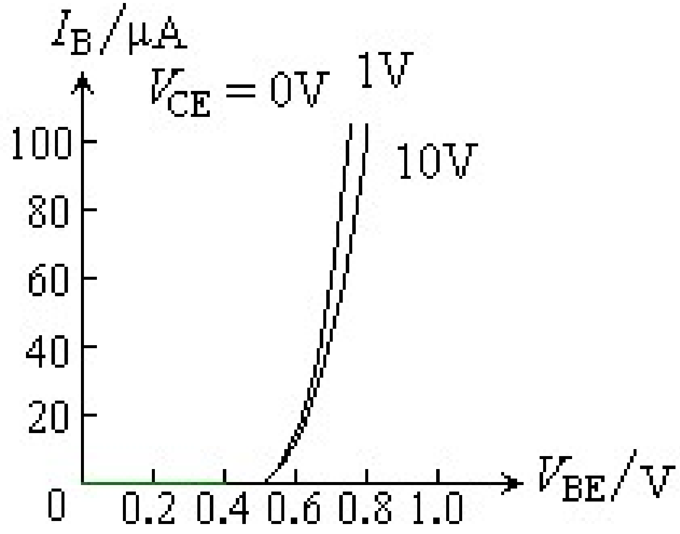
Transfer Characteristic

$$i_D = f(v_{GS})\big|_{v_{DS}=\text{const}}$$



1、输入特性曲线

$$i_B = f(v_{BE})\big|_{v_{CE}=\text{const}}$$



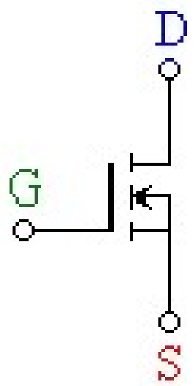
特性曲线

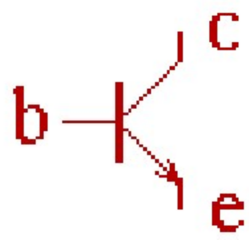
I-V Characteristics

2、输出特性曲线

Drain Characteristics

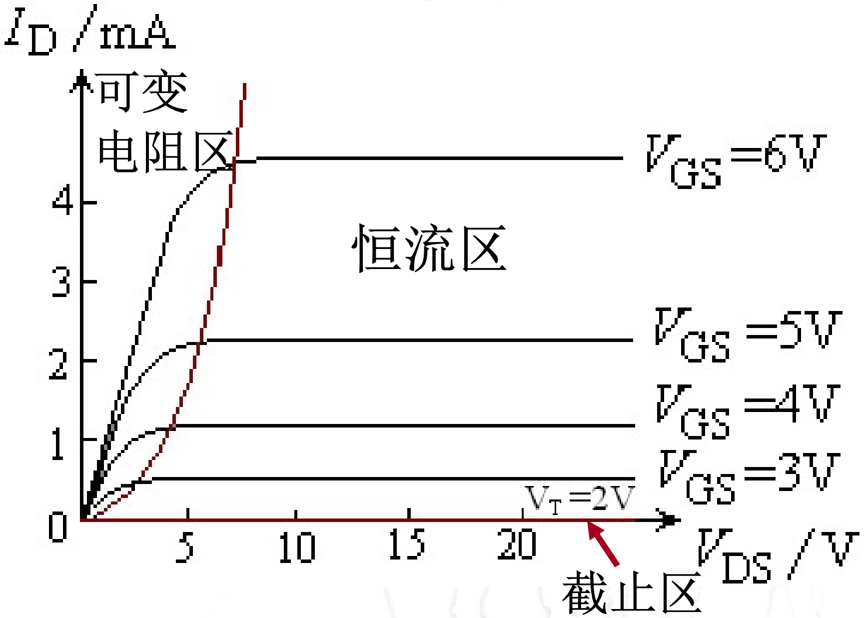
$$i_D = f(v_{DS})\big|_{v_{GS}=\text{const}}$$



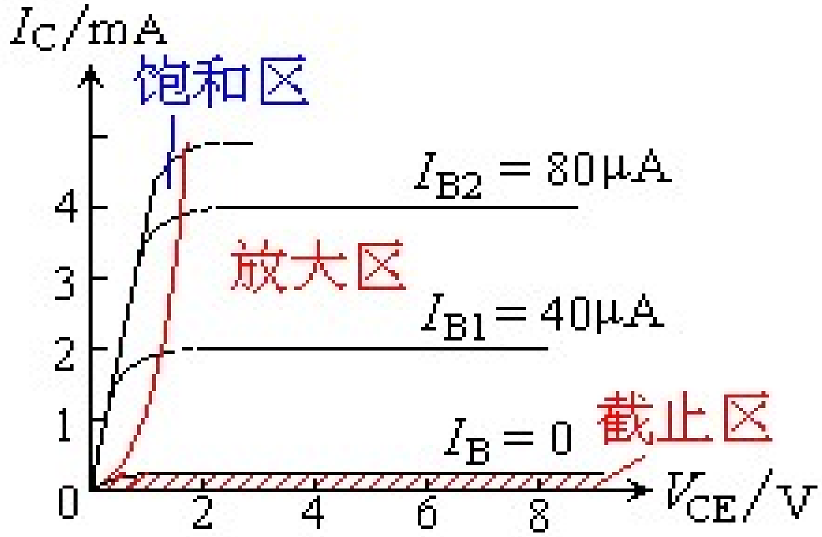


2、输出特性曲线

$$i_C = f(v_{CE})\big|_{i_B=\text{const}}$$



VCCS！



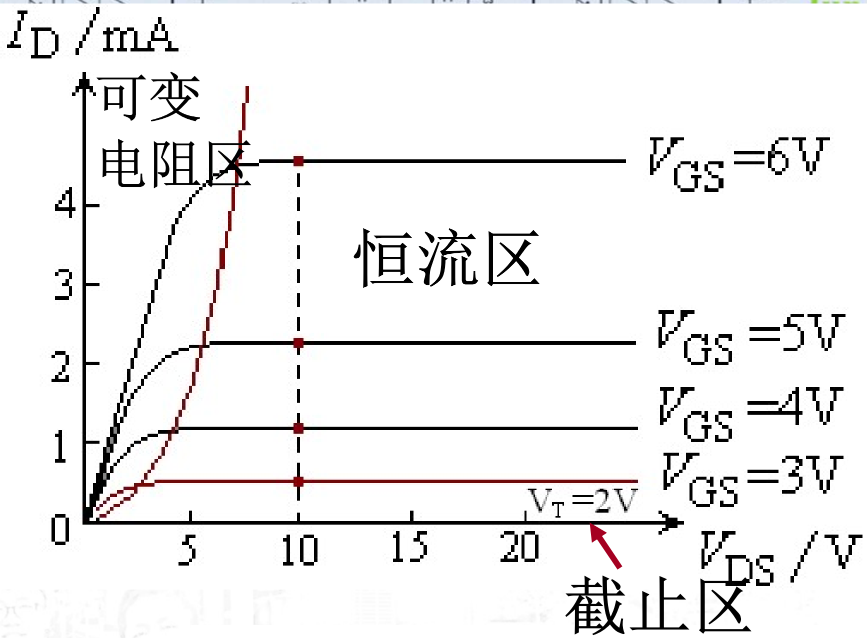
CCCS！

5.1.3 主要参数
（与MOS类型有关，以NMOS为例）

(1) 直流参数

① V_T___开启电压(增强型)

$V_{GS} \leq V_T$ 时，$I_D \approx 0$



or V_P___夹断电压(耗尽型)

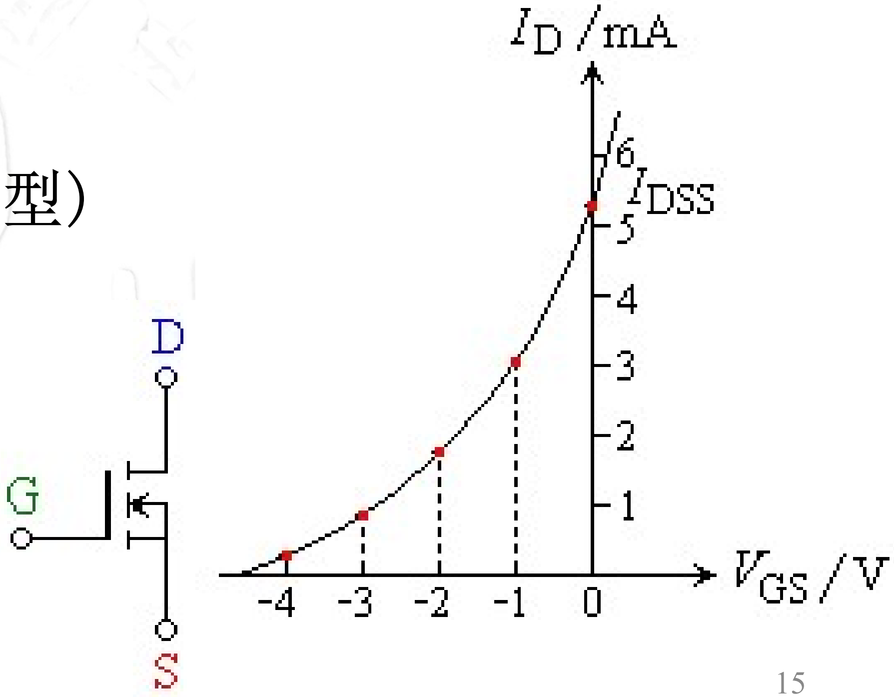
当$V_{GS} \leq V_P$时，I_D=0

② I_{DSS}___饱和漏极电流(耗尽型)

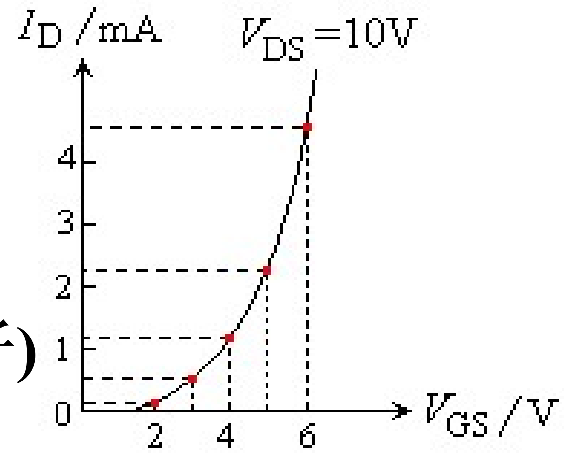
V_{GS}=0（shorted)时所对应的I_D

③ R_{GS}___直流输入电阻

约10^9～$10^{15}\Omega$



(2) 交流参数



① g_m ___低频跨导**transconductance**

- 反映V_{GS}对I_D的控制作用(**VCCS**)
- $g_m=\Delta I_D/\Delta V_{GS}\big|_{V_{DS}=\text{const}}$ (mS) (毫西门子)

$$g_m = 2K_n(v_{GS} - V_T) \quad (5.1.18)$$

g_m可以在转 移特性曲线上求取，即曲线的斜率

(3) 安全参数 ①最大漏极电流 I_{DM}

②U_{BRXX}___反向击穿电压

XX：**GS**、**DS**

③ P_{DM}___最大漏极功耗

由$P_{DM}= V_{DS} I_D$决定

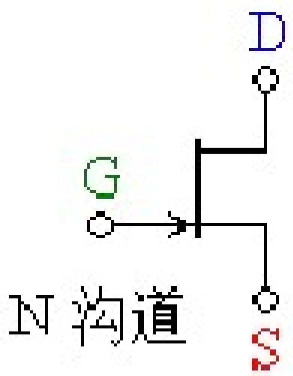
5.2 结型场效应管JFET

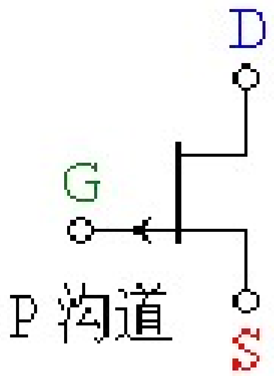
Junction Field Effect Transistor

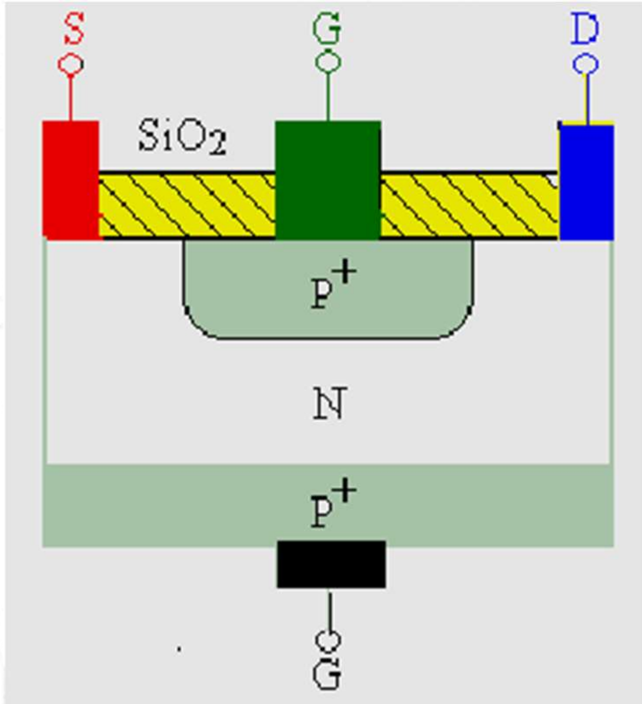
- 5. 2. 1　结构与符号
- 5. 2. 2　工作原理与特性曲线
- 5. 2. 3　主要参数

5.2.1 结构与符号

JFET分为：
N沟道
P沟道

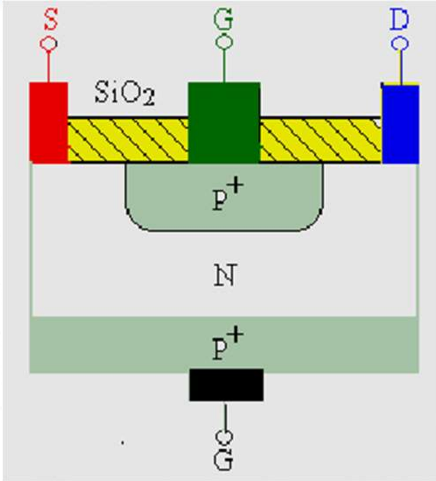






箭头：**P→N**

5.2.2 工作原理与特性曲线



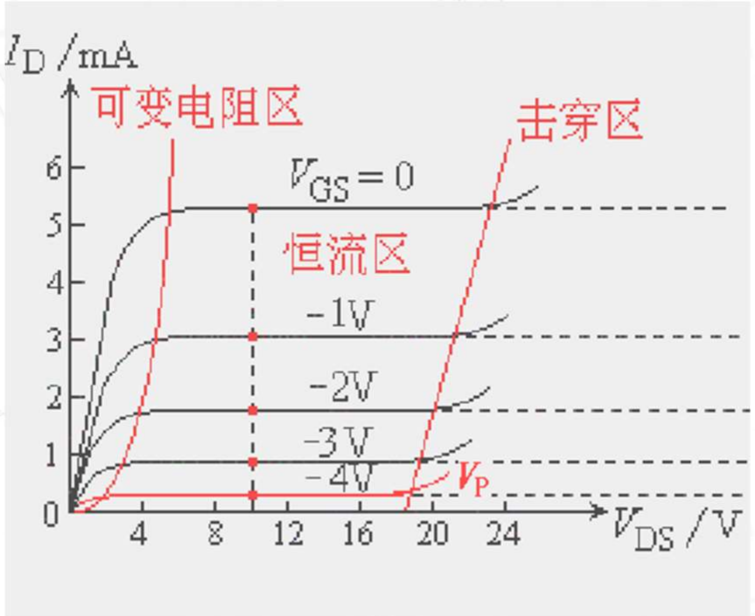
一、工作原理

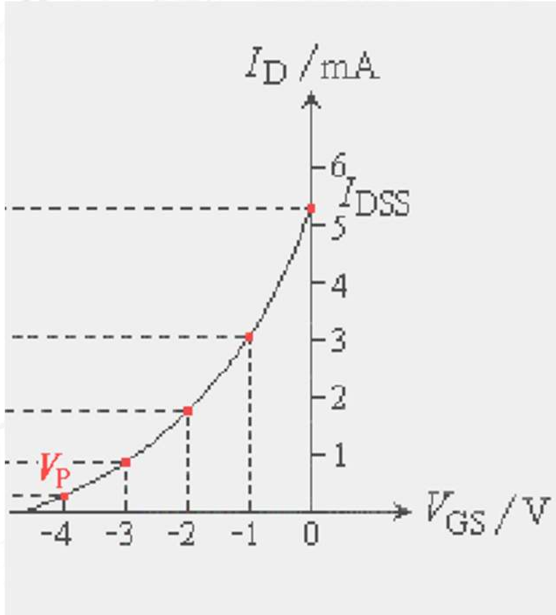
1． v_{GS}控制沟道宽窄

2． v_{DS}控制沟道形状

二、特性曲线

$$I_D = I_{DSS}[1-(V_{GS}/V_P)]^2$$





(a) 漏极输出特性曲线　　**(b)** 转移特性曲线

1. v_{GS}控制沟道宽窄($v_{DS}=0$)　→PN结必须反偏!

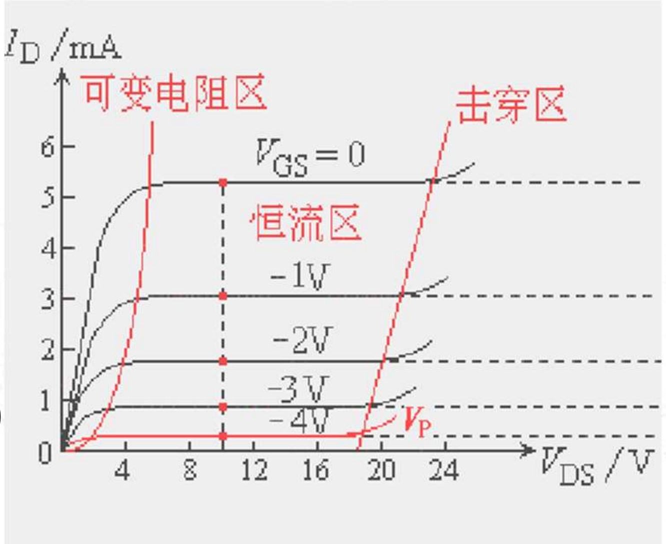
宽 ↓ 窄

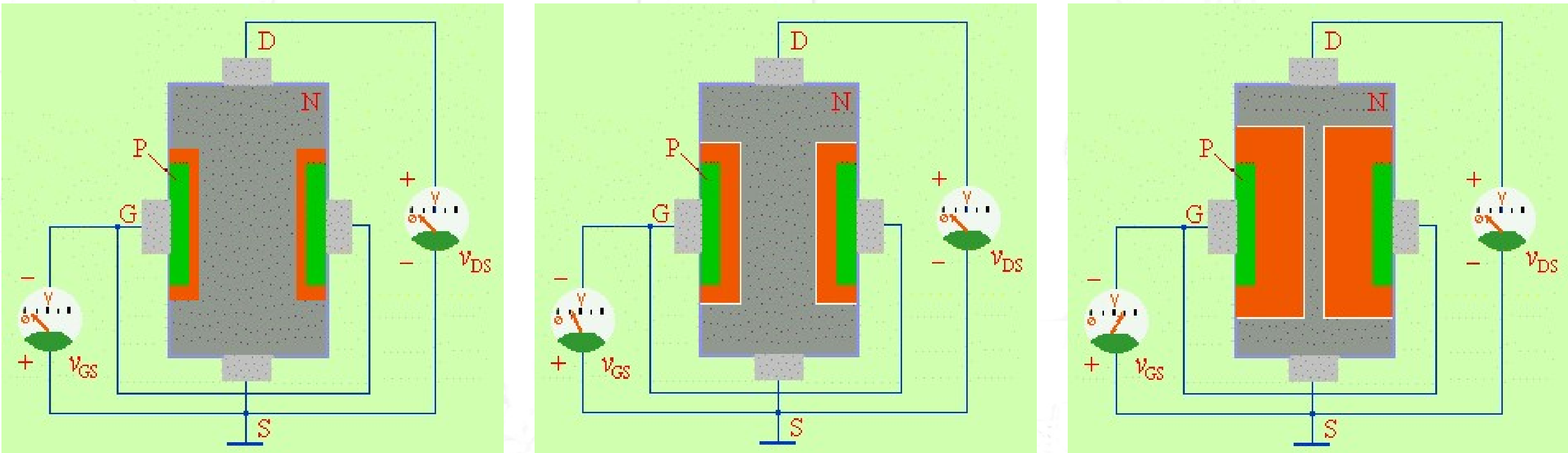
0V

-

$V_{GS}=V_P$(pinch off)

夹断电压

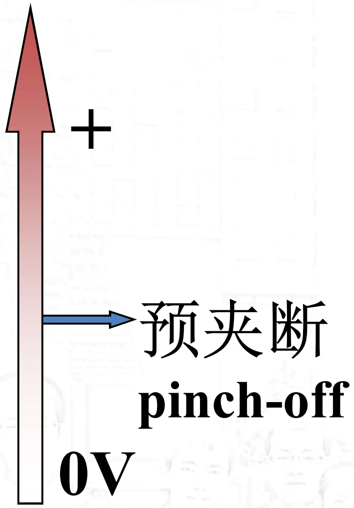




2. v_{DS}控制沟道形状(v_{GS}=0)

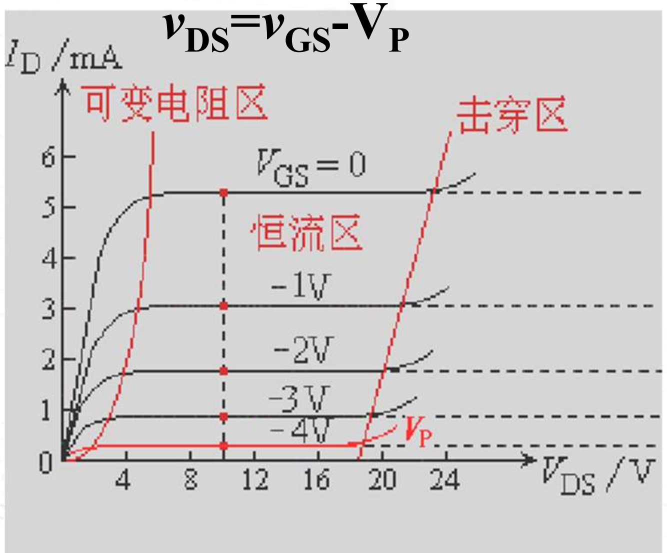
电位梯度

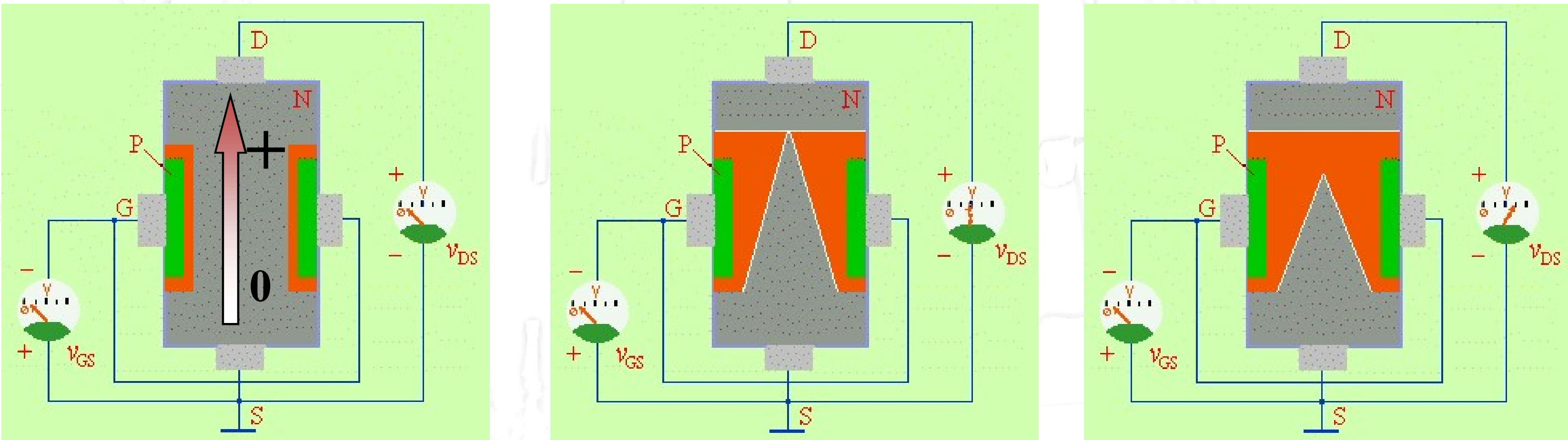
楔形沟道



预夹断临界点轨迹

$v_{DS}=v_{GS}-V_P$





5.2.3 主要参数

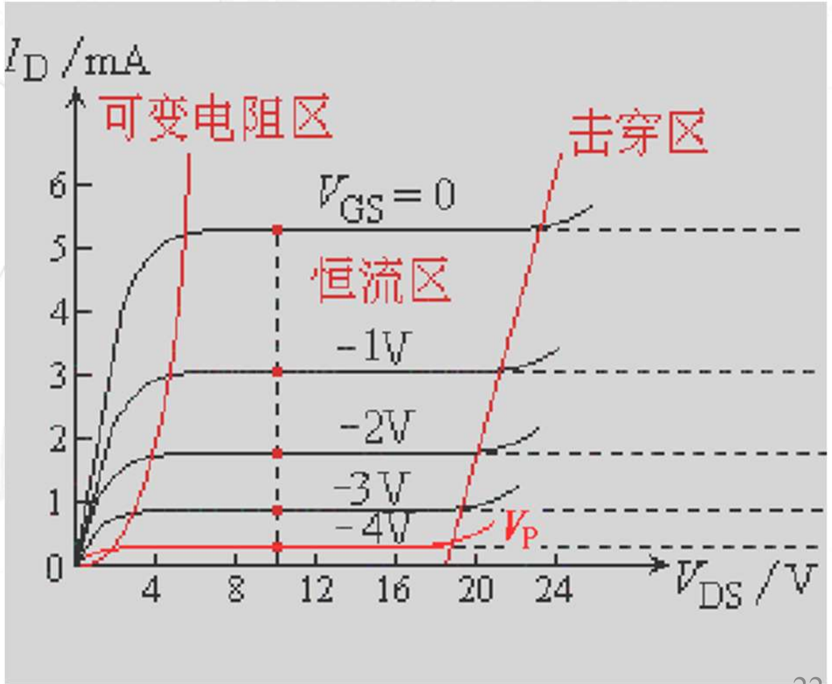
与MOSFET不同的参数

①V_P___夹断(pinch off)电压

耗尽型**FET**的参数，当$V_{GS}=V_P$时, $I_D=0$

② R_{GS}___输入电阻

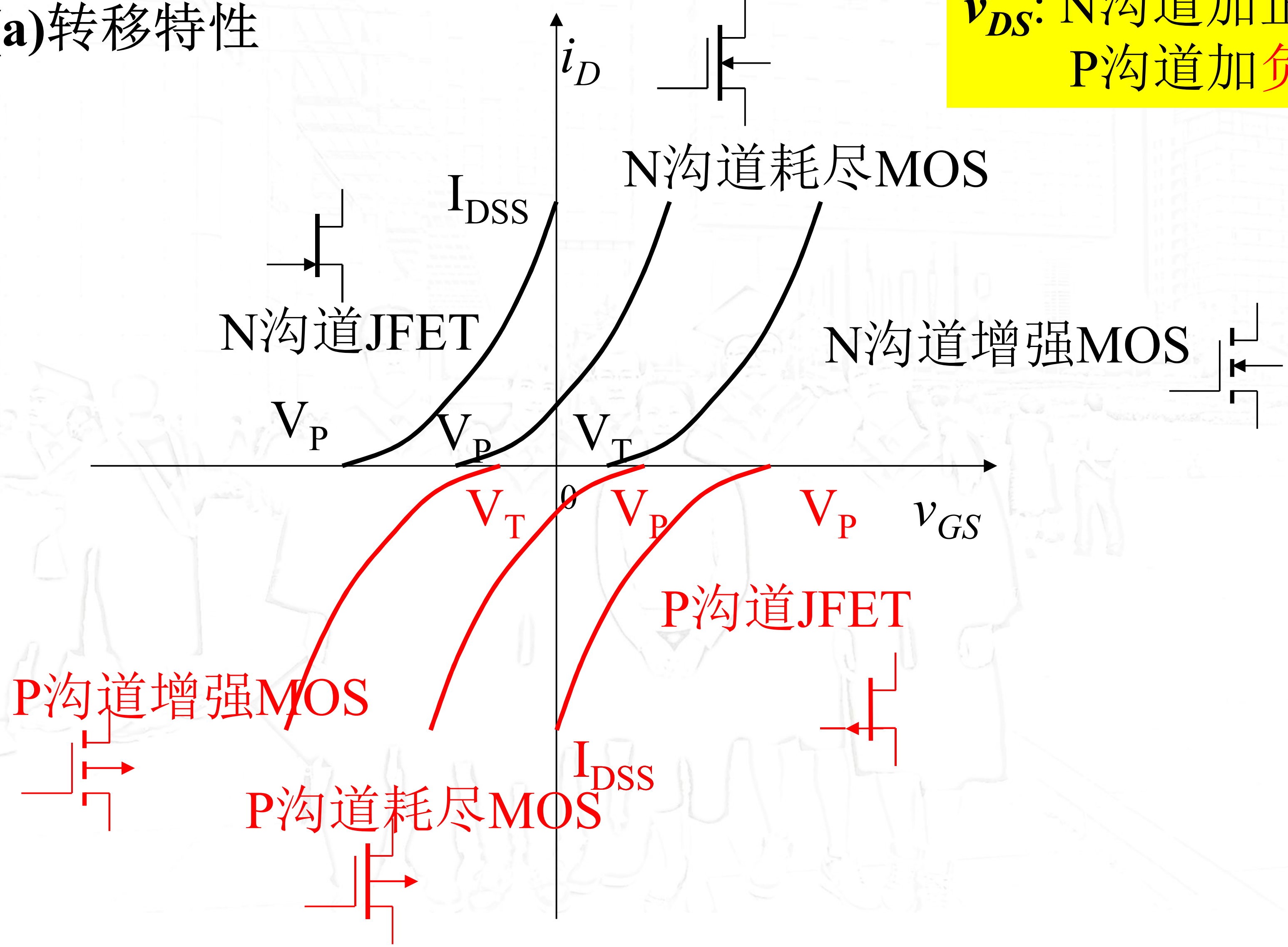
R_{GS}约大于$10^7\Omega$



各种场效应管的转移特性和输出特性对比

v_{DS}: N沟道加正电压
P沟道加负电压

(a)转移特性



作业:

P249: 5.1.1， 5.1.4

P251: 5.3.4

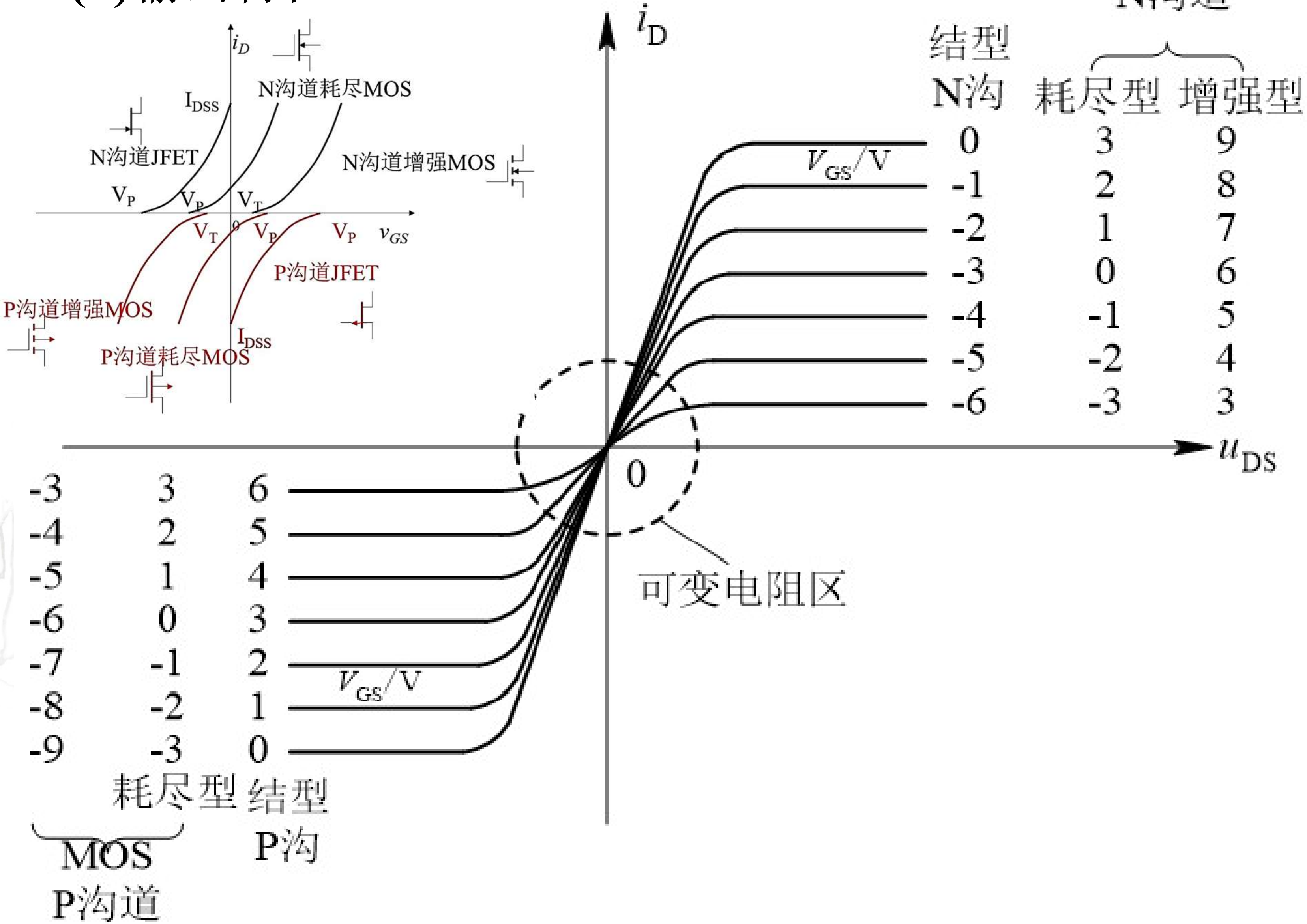
练习：

P249: 5.1.2

P251: 5.3.5

各种场效应管的转移特性和输出特性对比

(b)输出特性



5.3 型号(略)

双极型三极管和场效应型三极管的比较

	三 极 管	场 效 应 管
导电机制	双极性器件	单极性器件
导电方式	载流子的扩散与漂移	漂移
控制方式	电流控制	电压控制
类　　型	NPN 型、PNP 型	P、N 沟道，增强、耗尽型、结型
放大参数	$\beta=30\sim100$	$g_m=1\sim6mS$
输入电阻	$10^2\sim10^4\,\Omega$	$10^7\sim10^{15}\,\Omega$
抗辐射能力	差	好
噪　　声	大	小
热稳定性	差	好
制造工艺	不宜大规模集成	小尺寸；便于大规模集成
对称性	C、E 不能互换	D、S 可以互换
静电影响	不受静电影响	易受静电影响

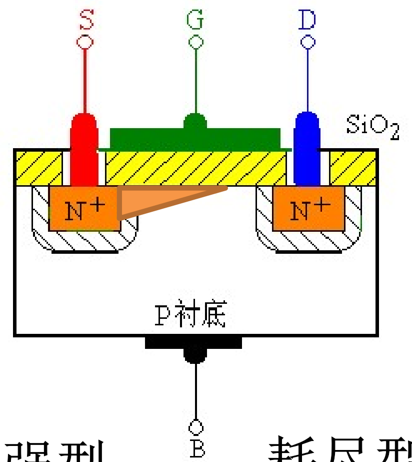
§5　场效应管放大电路　Field-Effect Transistors

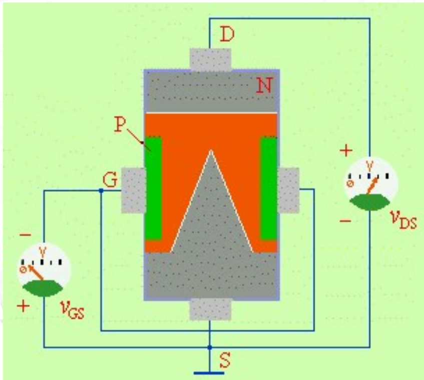
管子的输入阻抗：	电容(绝缘)	反偏pn结	正偏pn结
	>100MΩ	>10MΩ	k Ω

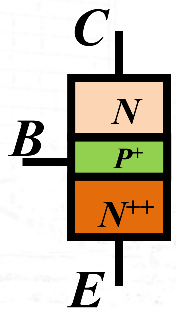
5.1 MOSFET

5.2 JFET

5.3 型号





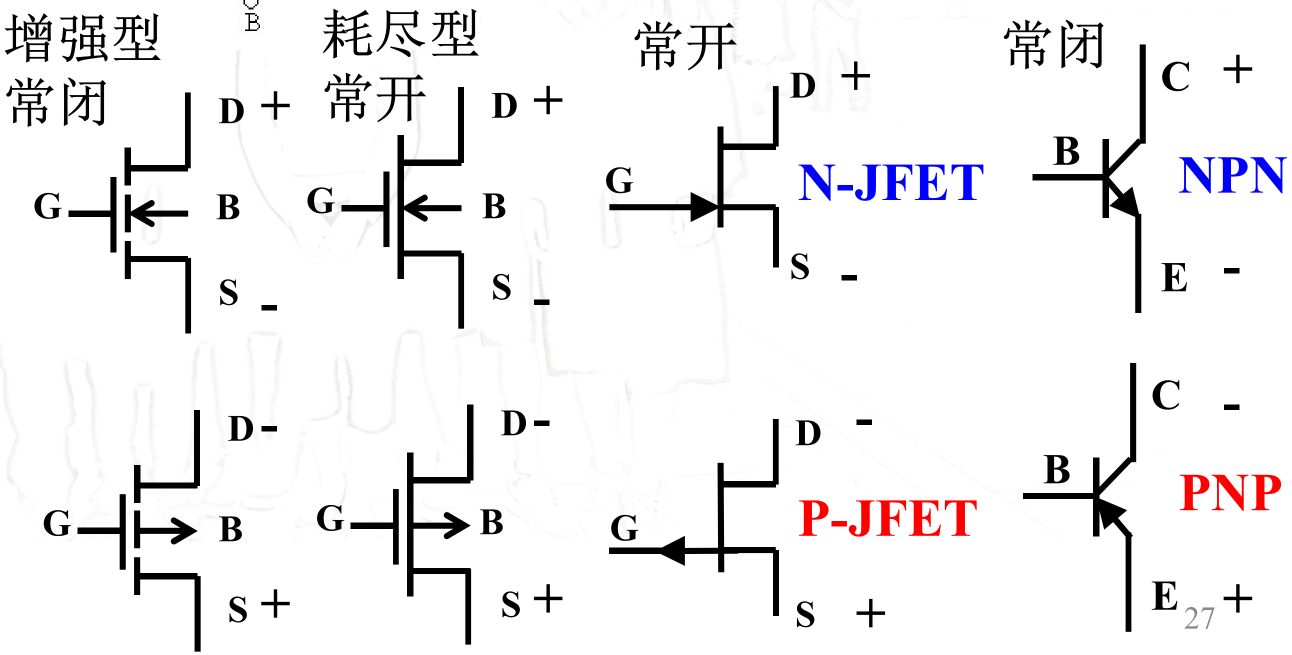


NMOS

N沟道，电子导电，
低电平端为源极，
实际电流方向D→S

PMOS

P沟道，空穴导电，
高电平端为源极，
实际电流方向S→D



5.4 FET放大电路

5.4.1 Common-Source Amplifier（共源）

5.4.2 Common-Drain Amplifier（共漏）

5.4.3 Comparison of Three Basic Amplifier Configurations（三种组态比较）

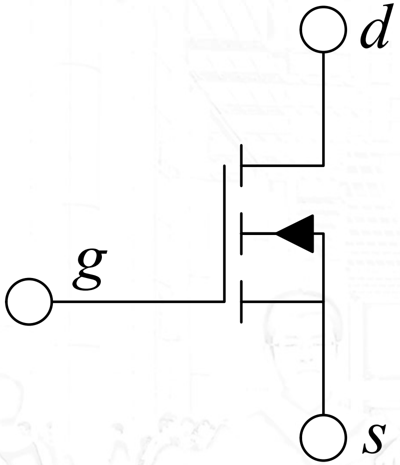
BJT → **CCCS**

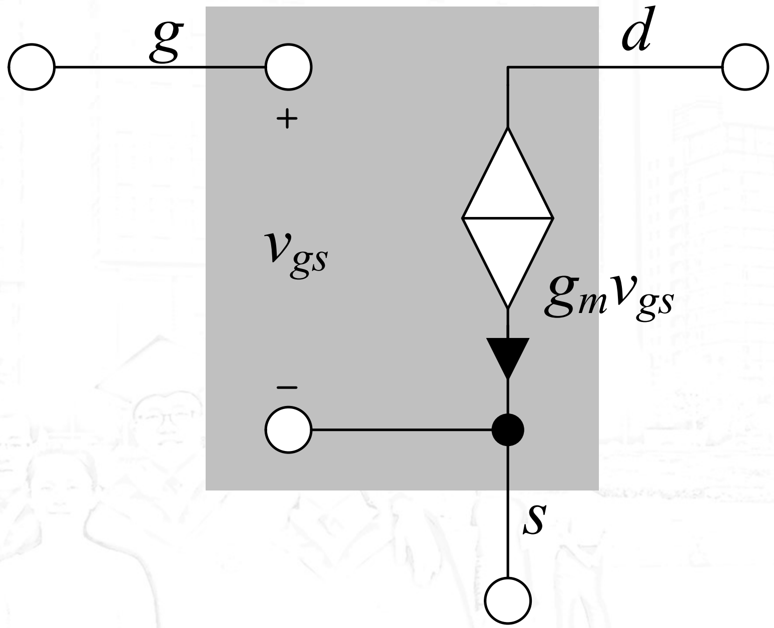
FET → **VCCS**

The type is different

Bias circuit is different

FET的小信号模型





耗尽型MOS以及JFET

增强型MOS

$$i_D = I_{DSS}[1 - (v_{GS} / V_P)]^2$$

$$i_D = K_N(v_{GS} - V_T)^2$$

$$i_D = K_P(v_{GS} - V_P)^2$$

$$K_P = I_{DSS} / V_P^2$$

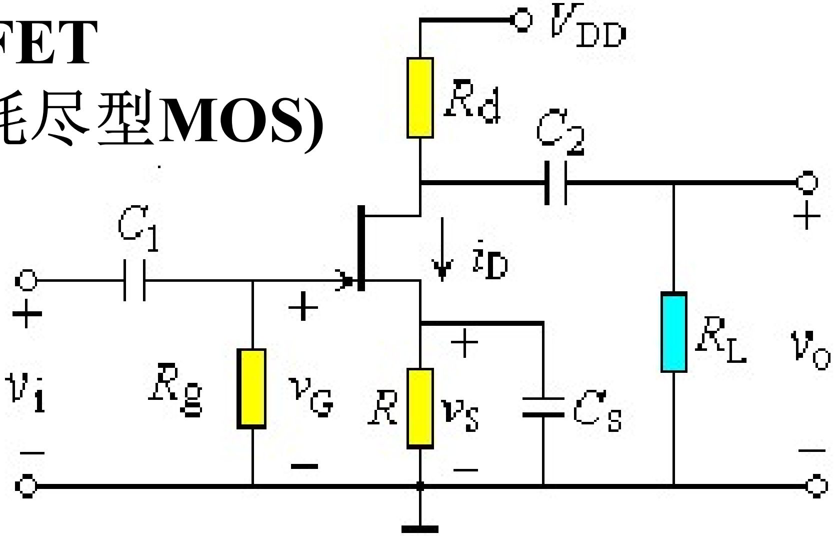
$$g_m = 2K_N(V_{GS} - V_T)$$

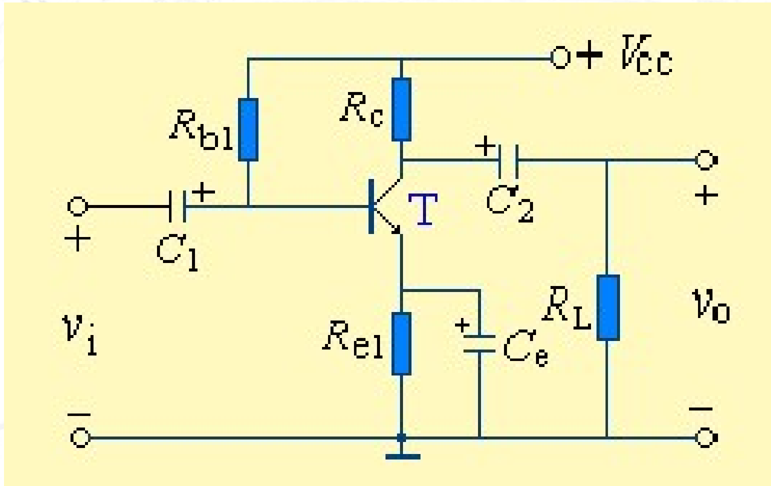
$$g_m = 2K_P(V_{GS} - V_P)$$

5.4.1 共源放大电路（CS）

(例1) 某N-JFET共源极放大器

JFET
(耗尽型MOS)

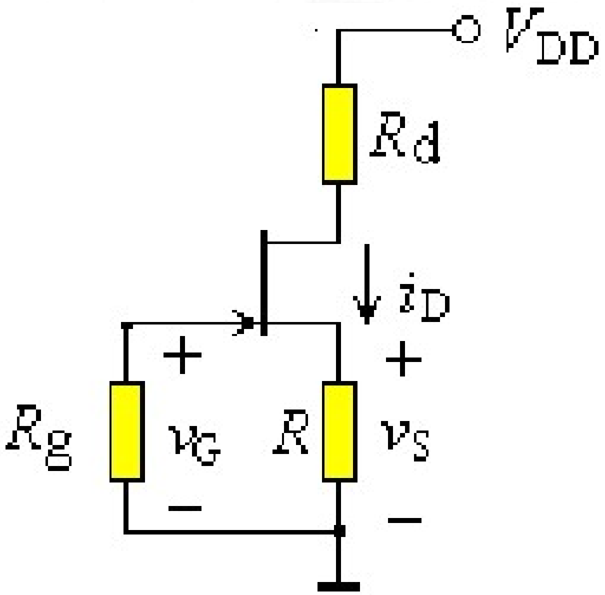


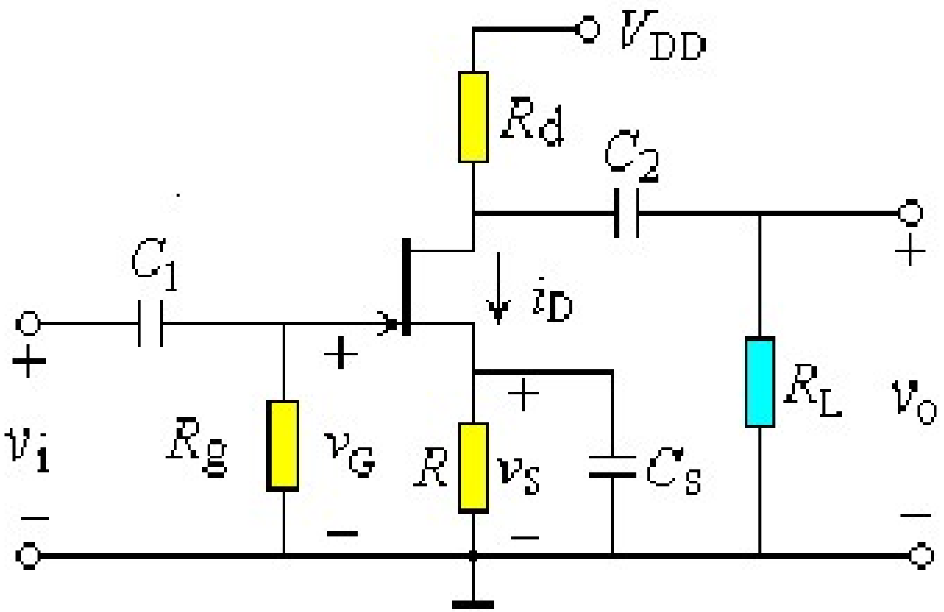


CS ⟷ **CE**

（1）静态分析

（Q： V_{GS}, I_D, V_{DS} ）





自偏压电路

Q计算:

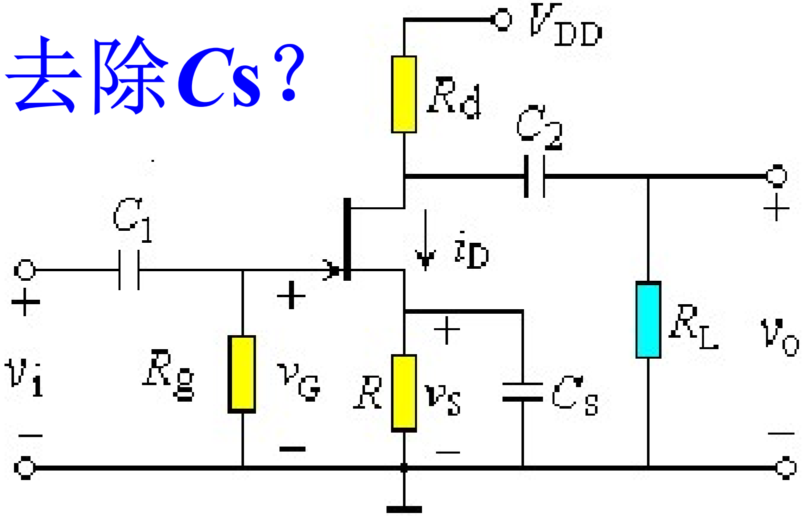
$$\begin{cases} V_{GS} = V_G - V_S = 0 - I_D R = -I_D R \\ I_D = I_{DSS}[1 - (V_{GS}/V_P)]^2 \end{cases}$$

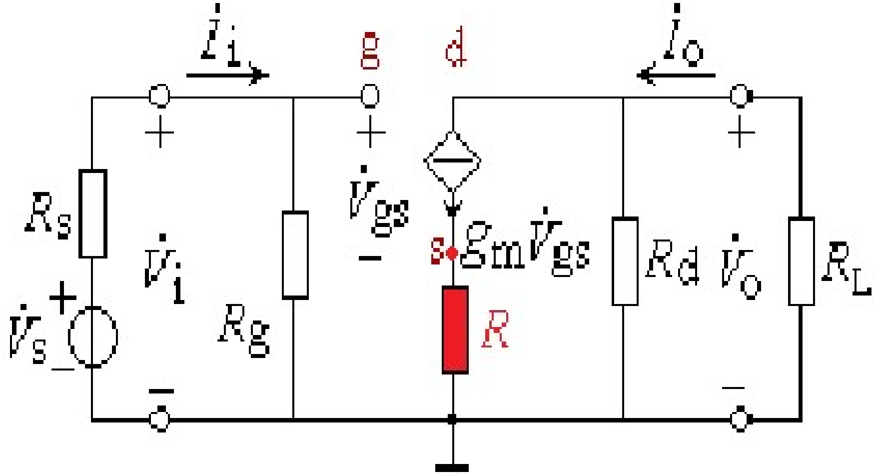
$$V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_d + R)$$

(2) 交流分析

$$\dot{A}_v=\frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i}=\frac{-g_m\dot{V}_{gs}(R_d//R_L)}{\dot{V}_{gs}+g_m\dot{V}_{gs}R}=-\frac{g_mR'_L}{1+g_mR}$$

去除Cs?





① Small-signal voltage gain（Av）

$$\dot{A}_v=\frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i}=\frac{-g_m\dot{V}_{gs}(R_d//R_L)}{\dot{V}_{gs}}=-g_mR'_L\quad R'_L=R_d//R_L$$

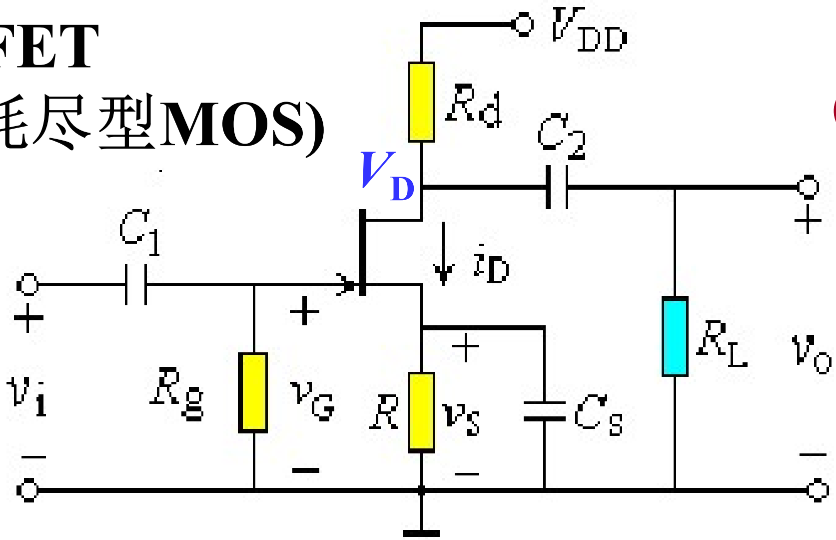
② Input resistance $R_i=\dfrac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i}=R_g$

③Output resistance

$$R_o=\frac{\dot{V}'_o}{\dot{I}'_o}\bigg|_{R_L=\infty,\dot{V}s=0}=R_d$$

(例) 某N-JFET共源极放大器

JFET
(耗尽型MOS)



已知Vs和gm

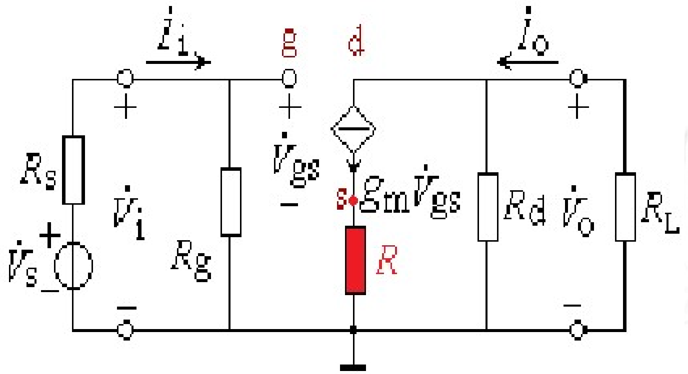
（1）静态分析 （Q点：V_{GS}, I_D, V_{DS}）

I_{D1} = Vs / R

V_{GS} = Vg-Vs = -Vs

V_D = VDD- $I_{D1}R_d$

（2）动态分析



$$A_v = -g_m R'_L \qquad R'_L = R_d // R_L$$

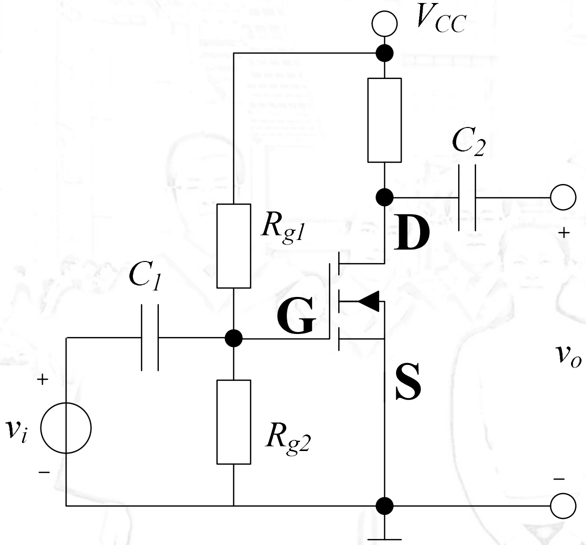
$$R_i = R_g$$

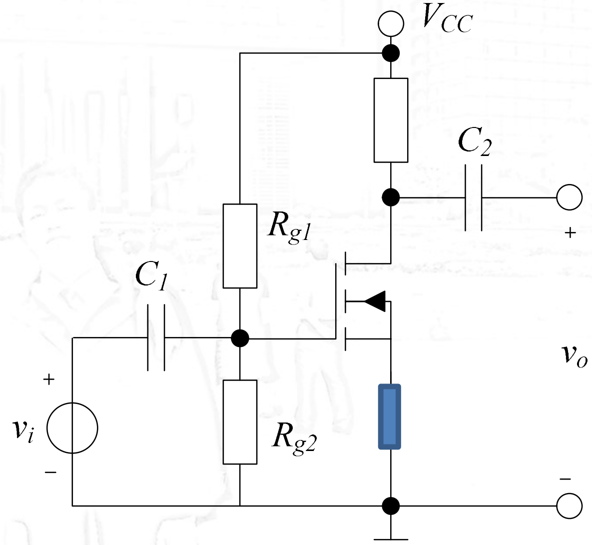
$$R_o = R_d$$

5.4.1 共源放大电路（CS）

(例2) 某增强型NMOS共源极放大器

NMOS:低电平端为源级





大信号分析

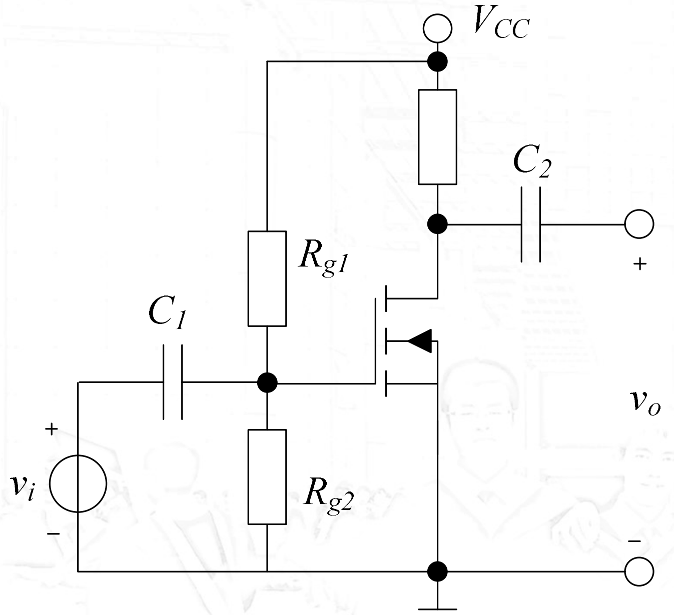
$$V_{GS} = \frac{V_{CC} R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}}$$

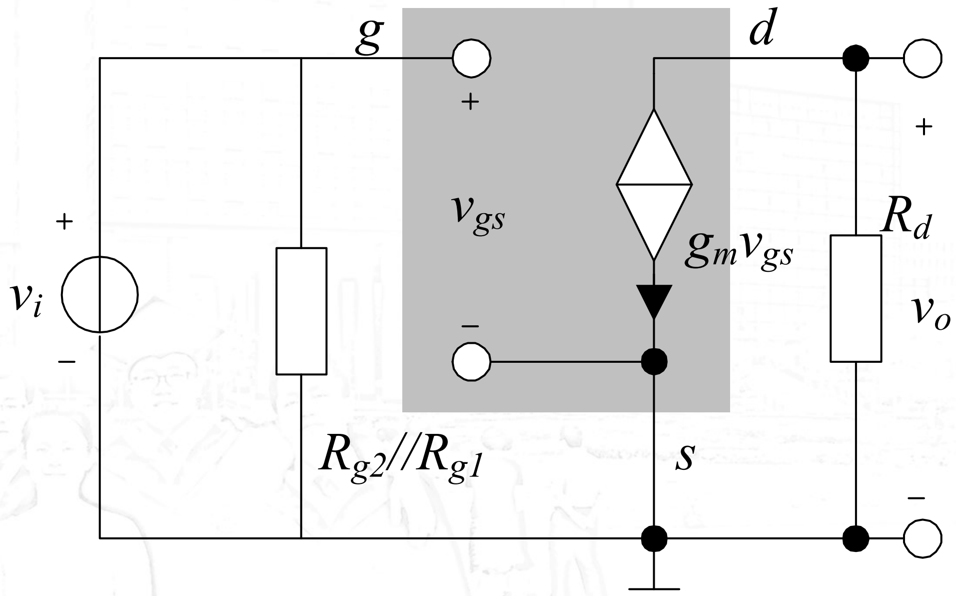
$$I_D = K_N (V_{GS} - V_T)^2$$

$$V_{DS} = V_{CC} - I_D R_D$$

$$g_m = 2K_N (V_{GS} - V_T)$$

交流小信号分析





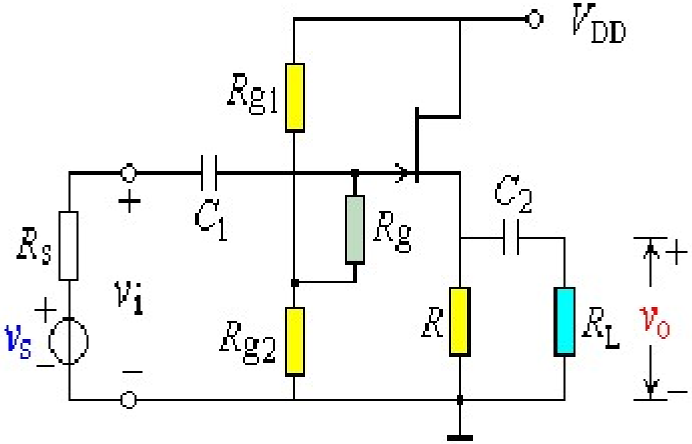
$$A_v = \frac{vo}{vi} = -g_m R_d$$

$$R_i = R_{g1} \| R_{g2}$$

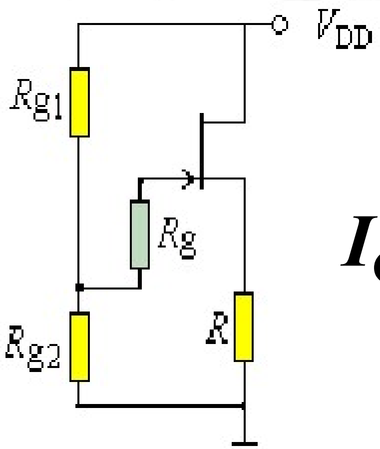
$$R_o = R_d$$

5.4.2 共漏放大电路（CD）

CD ⟷ **CC**



（1）静态分析



$I_G \approx 0$

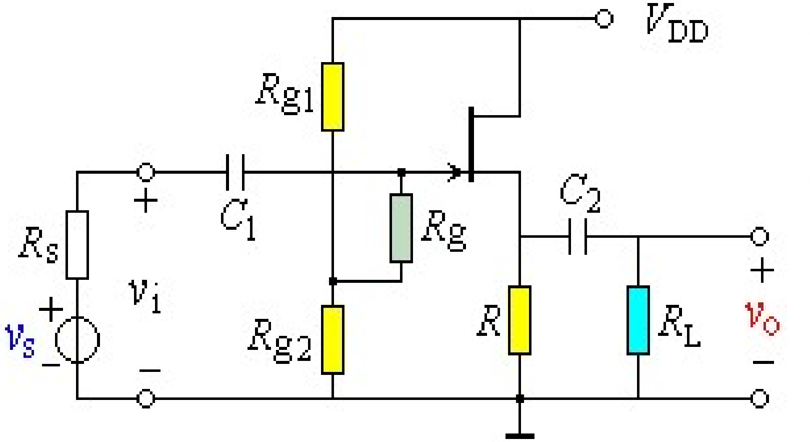
分压式偏置电路

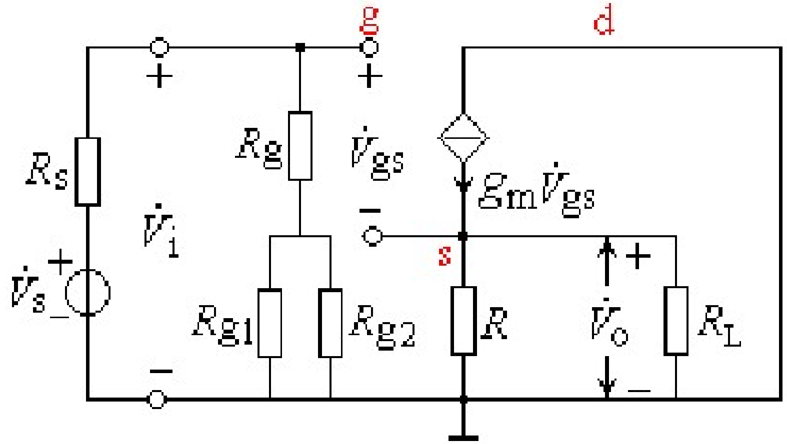
$$V_G = V_{DD} R_{g2}/(R_{g1}+R_{g2})$$

$$\begin{cases} V_{GS} = V_G - V_S = V_G - I_D R \\ I_D = I_{DSS}[1-(V_{GS}/V_P)]^2 \end{cases}$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R$$

(2) AC Analysis





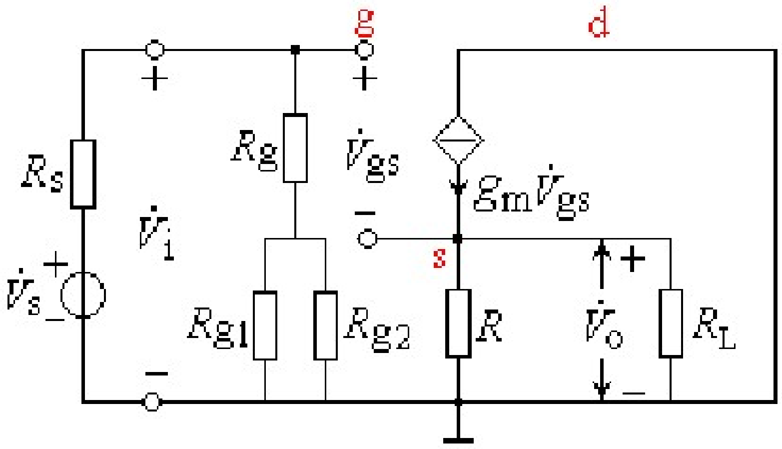
① Small-signal voltage gain

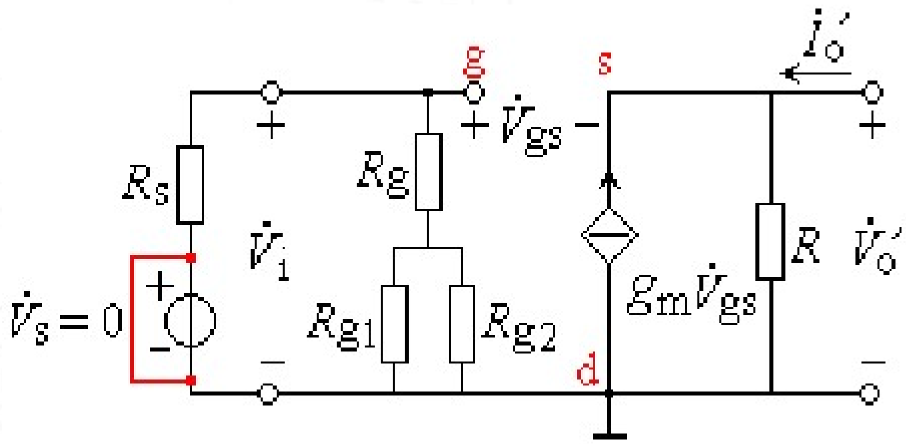
$$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{g_m \dot{V}_{gs}(R//R_L)}{\dot{V}_{gs} + g_m \dot{V}_{gs}(R//R_L)} = \frac{g_m R'_L}{1+g_m R'_L} \quad (R'_L = R // R_L)$$

② Input resistance

$$R_i = R_g + (R_{g1} // R_{g2})$$

③ Output resistance





$$R_o = \frac{\dot V'_o}{\dot I'_o}\bigg|_{R_L=\infty,\dot V_S=0}$$

$$\dot I'_o = \frac{\dot V'_o}{R} - g_m \dot V_{gs}$$

$$\dot V_{gs} = 0 - \dot V_s = -\dot V'_o$$

$$\dot I'_o = \frac{\dot V'_o}{R} + \frac{\dot V'_o}{1/g_m}$$

$$\boxed{R_o = \frac{\dot V'_o}{\dot I'_o} = R \parallel \frac{1}{g_m}}$$

5.4.3 三种组态放大电路比较

BJT-FET

The small-signal characteristics

(交流指标)

$$\frac{\beta}{r_{be}} \Leftrightarrow g_m$$

	CE / CC / CB	CS / CD / CG
$\dot{A}_v$	$CE: \dot{A}_v = -\dfrac{\beta R'_L}{r_{be}}$ $CC: \dot{A}_v = \dfrac{(1+\beta)R'_L}{r_{be}+(1+\beta)R'_L}$ $CB: \dot{A}_v = +\dfrac{\beta R'_L}{r_{be}}$	$CS: \dot{A}_v = -g_m R'_L$ $CD: \dot{A}_v = \dfrac{g_m R'_L}{1+g_m R'_L}$ $CG: \dot{A}_v = +g_m R'_L$

$\boldsymbol{R_i}$	$CE: R_b // r_{be}$
	$CC: R_b // [r_{be}+(1+\beta)R'_L\ ]$
	$CB: Re // [r_{be}/(1+\beta)]$
		CS: $R_{g1} // R_{g2}$
		CD: $R_g + (R_{g1} // R_{g2})$
		CG: $R//(1/g_m)$

$\boldsymbol{R_o}$	CE: R_c CC: $R_e // \dfrac{r_{be}+R_b // R_s}{1+\beta}$ CB: R_c	CS: R_d CD: $R//(1/g_m)$ CG: R_d

5.5 Summary and Requirements

Summary: Devices and Circuits

*Devices: FET

1. Class (type):

(1)Carrier involved (2)Physical structure (3) Operation

(1)Carrier involved	(2)Physical structure	(3) Operation
N-channel	MOSFET	Enhancement-mode
P-channel	JFET	Depletion-mode

2. I-V Characteristics

VCCS（Three regions）

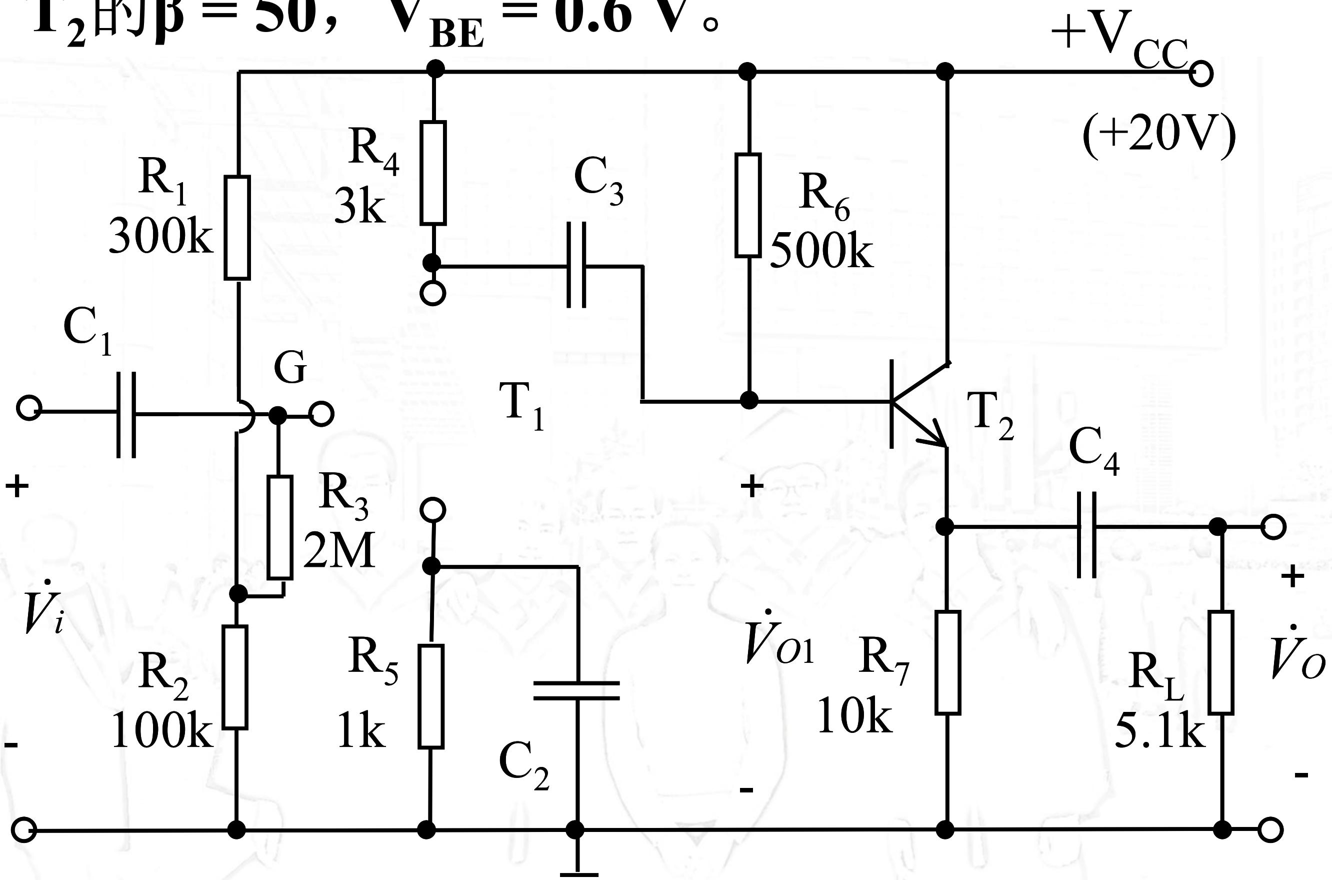
3.Parameters:

g_m、V_T（V_P）

*Circuits: Three configurations, two biasing circuits

DC and AC analysis for CS and CD circuits

两级电压放大电路如下图所示。**T_1的漏极电位V_D= 14V，其g_m = 3ms， T_2的β = 50，V_{BE} = 0.6 V**。



（**1**）在**T_1** 位置上画出合适的**FET**;

（**2**）求**T_1**的静态值 **I_D、V_{DS}、V_{GS}**？

（**3**）求**T2**的静态值**I_B、I_C、V_{CE}**？

（**4**）画出微变等效电路，并求A_V、R_i、R_O；

（**5**）求**C3**引起的f_L。

作业:

P249: 5.1.1，5.1.4

P251: 5.3.4

P251: 5.2.9

P254: 5.5.4（multistage amplifier）