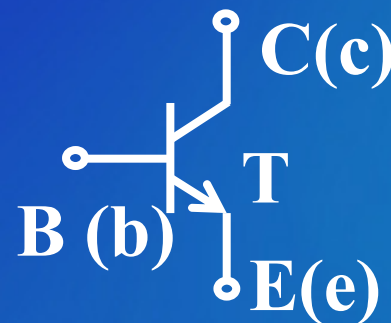


### 3 场效应晶体管及其放大电路

三极管的主要特点:

1. 电流控制型器件。
2. 输入电流大，输入电阻小。
3. 两种极型的载流子都参与导电，又称为**双极型晶体管**，简称**BJT** (Bipolar Junction Transistor)。

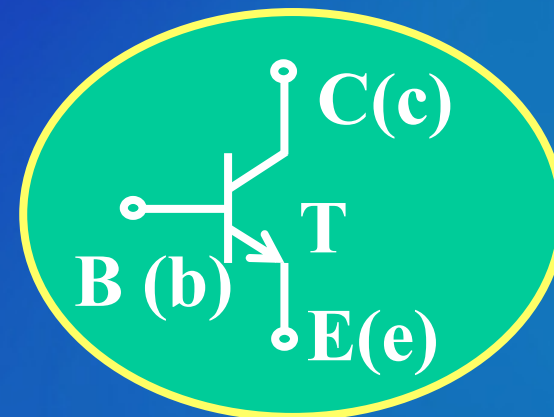


肖克利1949年提出了结型晶体管概念  
( sandwich transistor )



场效应管，简称FET (Field Effect Transistor )，其主要特点：**电压控制电流源**

与三极管对比：



- (a) 输入电阻高，可达 $10^7 \sim 10^{15} \Omega$ 。
- (b) 起导电作用的是多数（一种）载流子，又称为**单极型晶体管**。
- (c) 体积小、重量轻、耗电省、寿命长。
- (d) 噪声低、热稳定性好、抗辐射能力强和制造工艺简单。
- (e) 在大规模集成电路制造中得到了广泛的应用。

场效应管的类型:

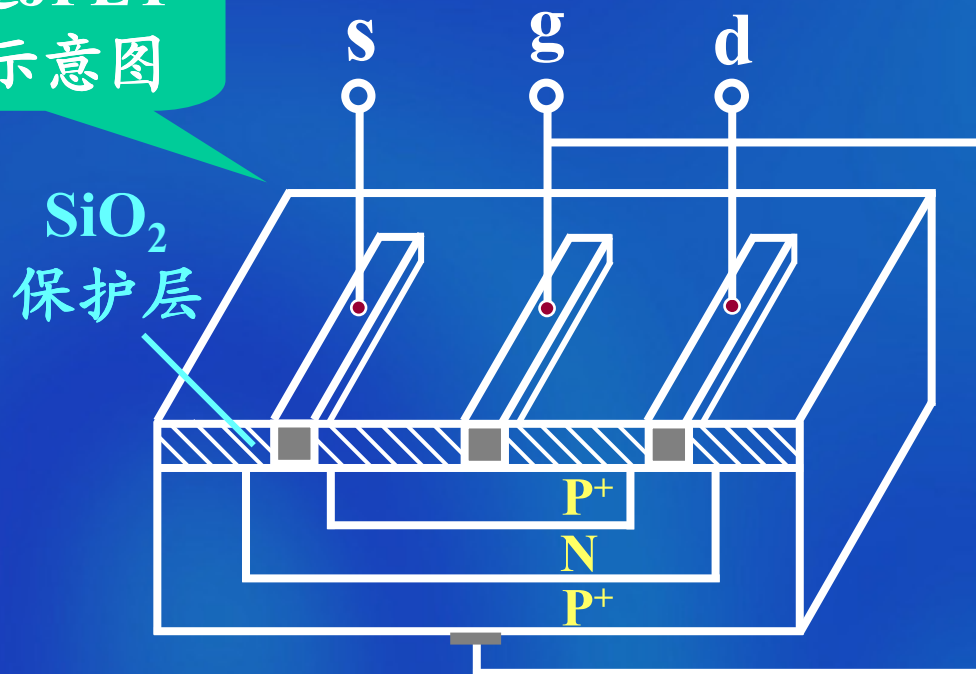
场效应管按结构可分为:

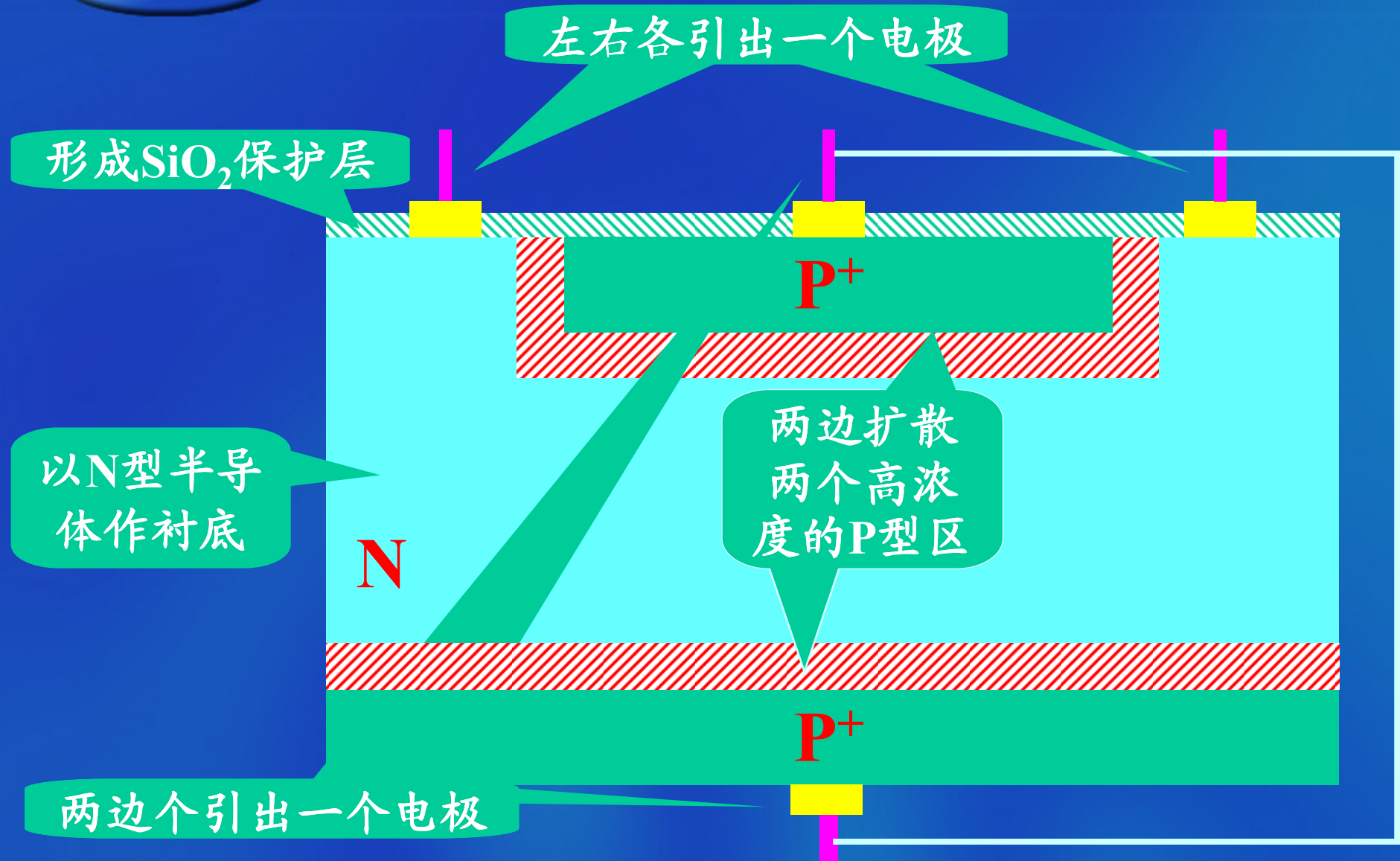
1. 结型场效应管, 简称**JFET** (Junction Field Effect Transistor)
2. 绝缘栅型场效应管, 简称**IGFET** (Isolated Gate Field Effect Transistor)

## 3.1 结型场效应管

### 3.1.1 结型场效应管的结构和类型

N沟道JFET  
结构示意图





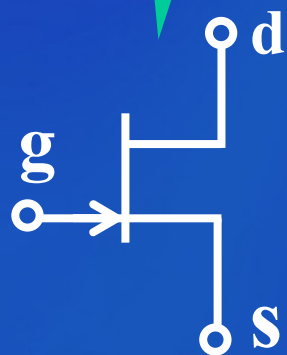
源极S (source)

栅极G (gate)

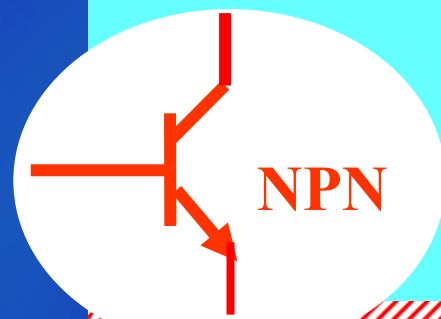
漏极D (drine)

称为N沟  
道JFET

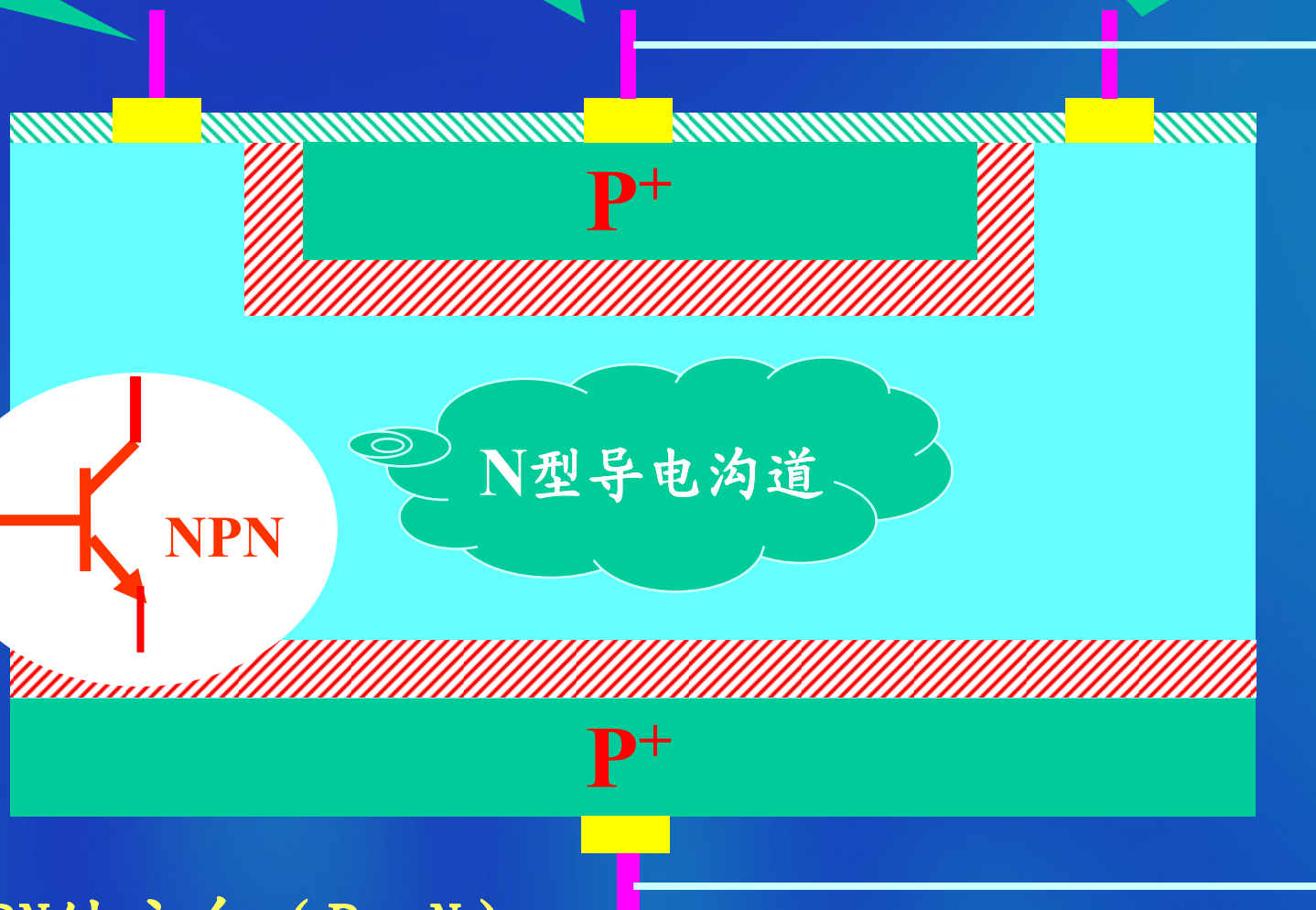
符号



箭头表示PN结方向 (P→N)



N型导电沟道



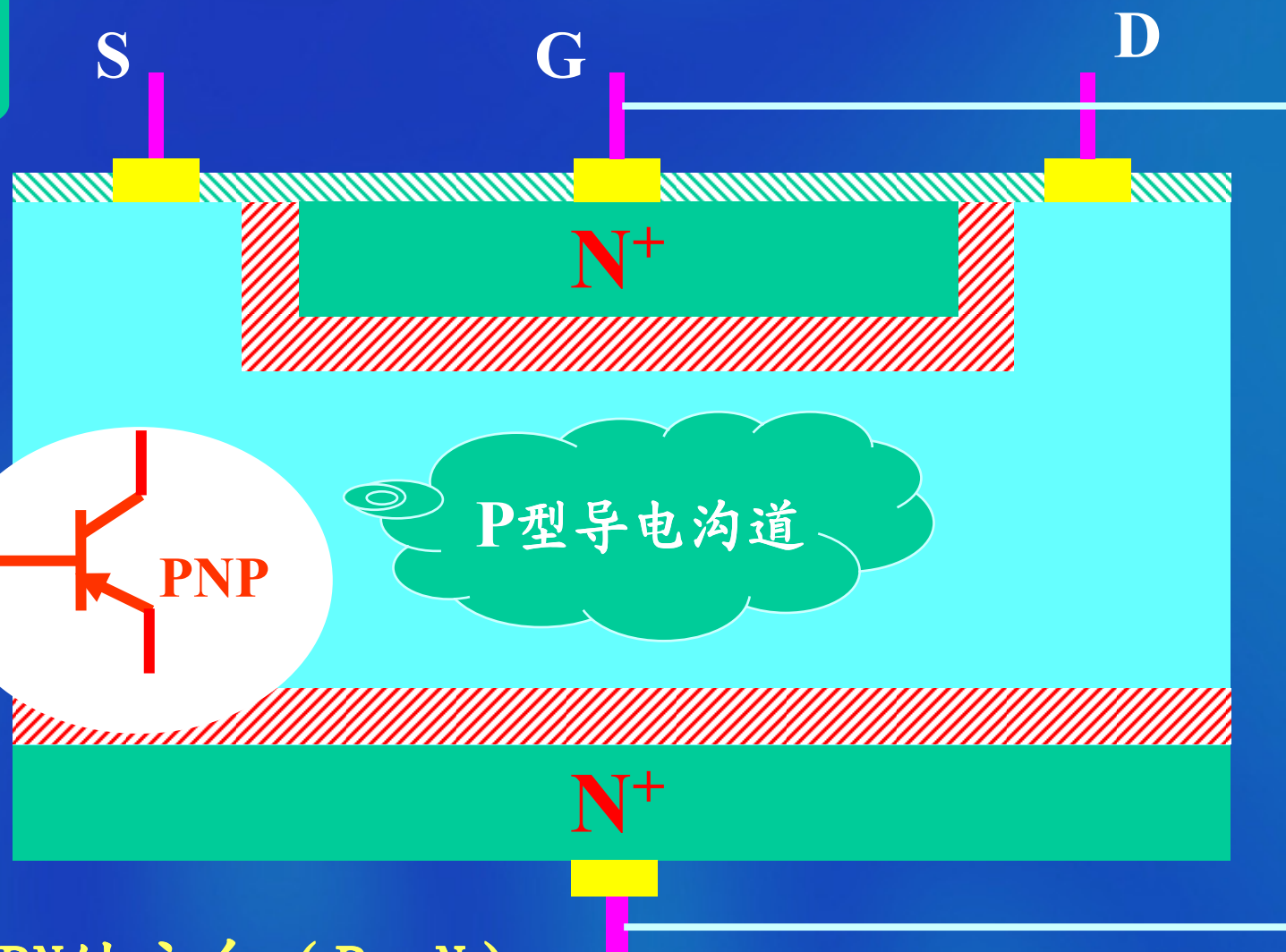
上页

下页

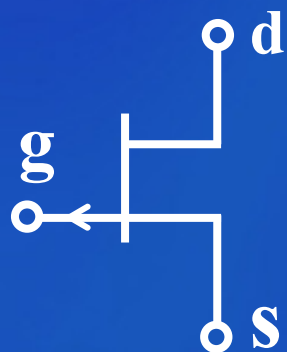
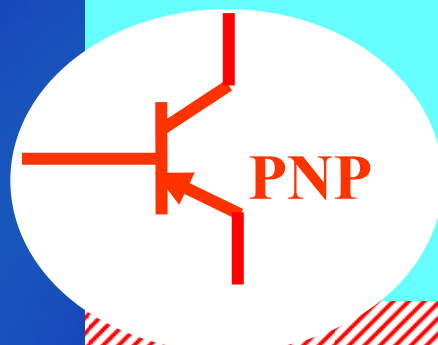
后退



P沟道JFET  
结构示意图



符号



箭头表示PN结方向 (P→N)

上页

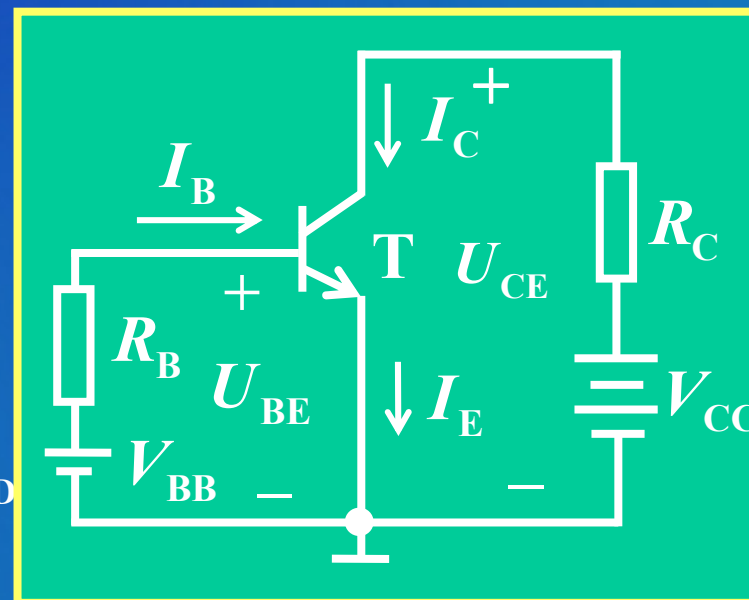
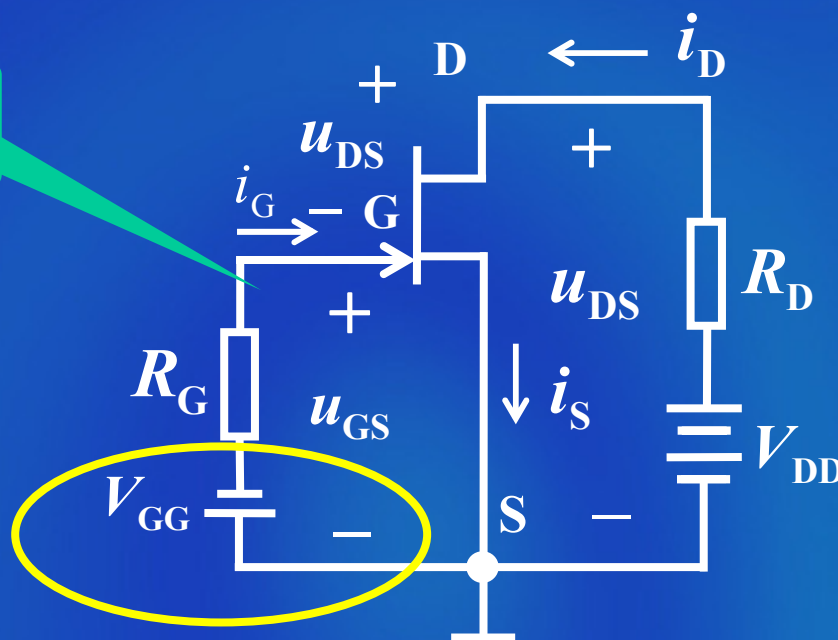
下页

后退

结型场效应管分 {  
N沟道结型场效应管  
P沟道结型场效应管

### 3.1.2 结型场效应管的工作原理

电路图

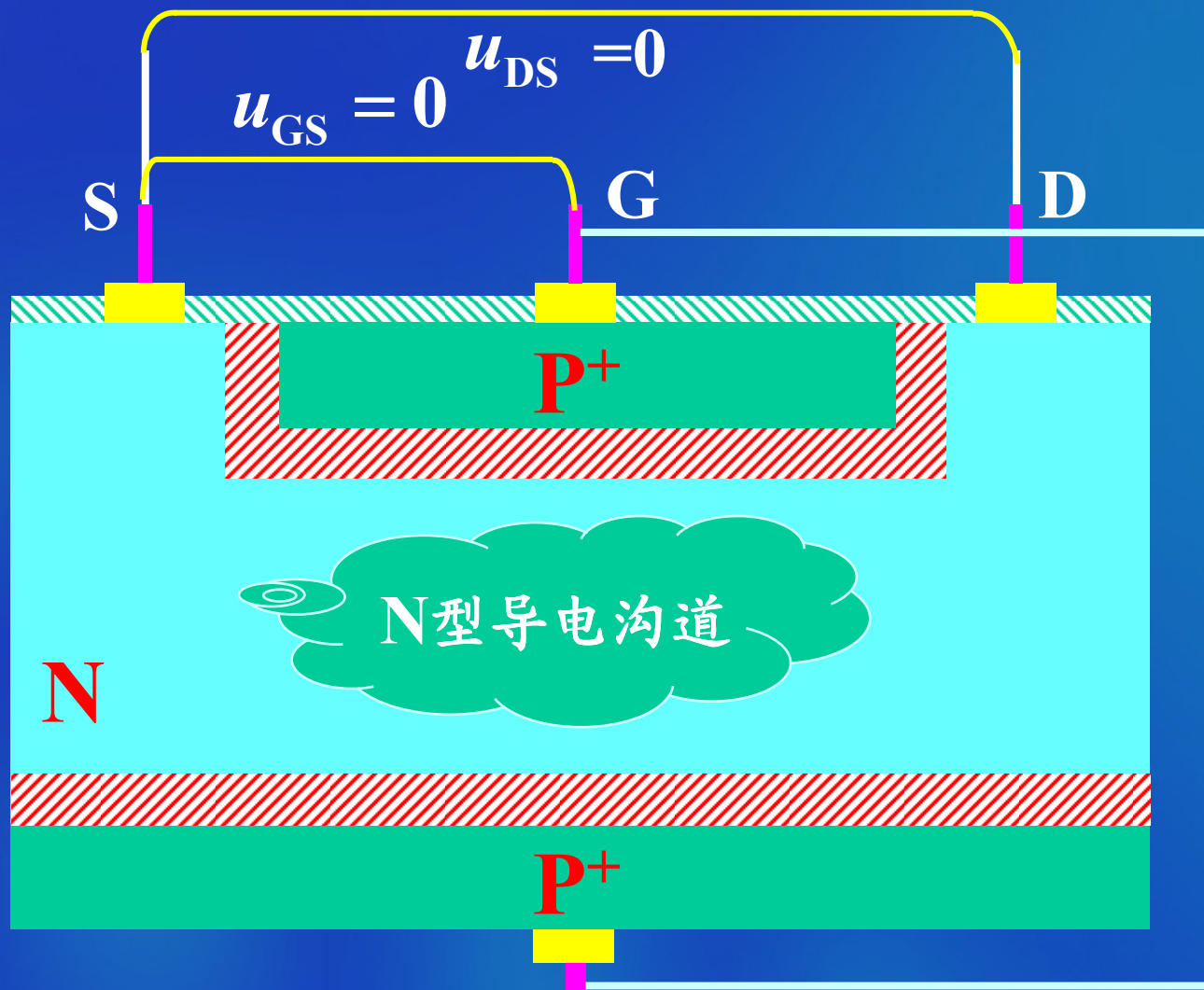




# 1. $u_{DS}=0$ 时, $u_{GS}$ 对沟道的控制作用

a. 当  $u_{GS}=0$ 时

沟道无变化



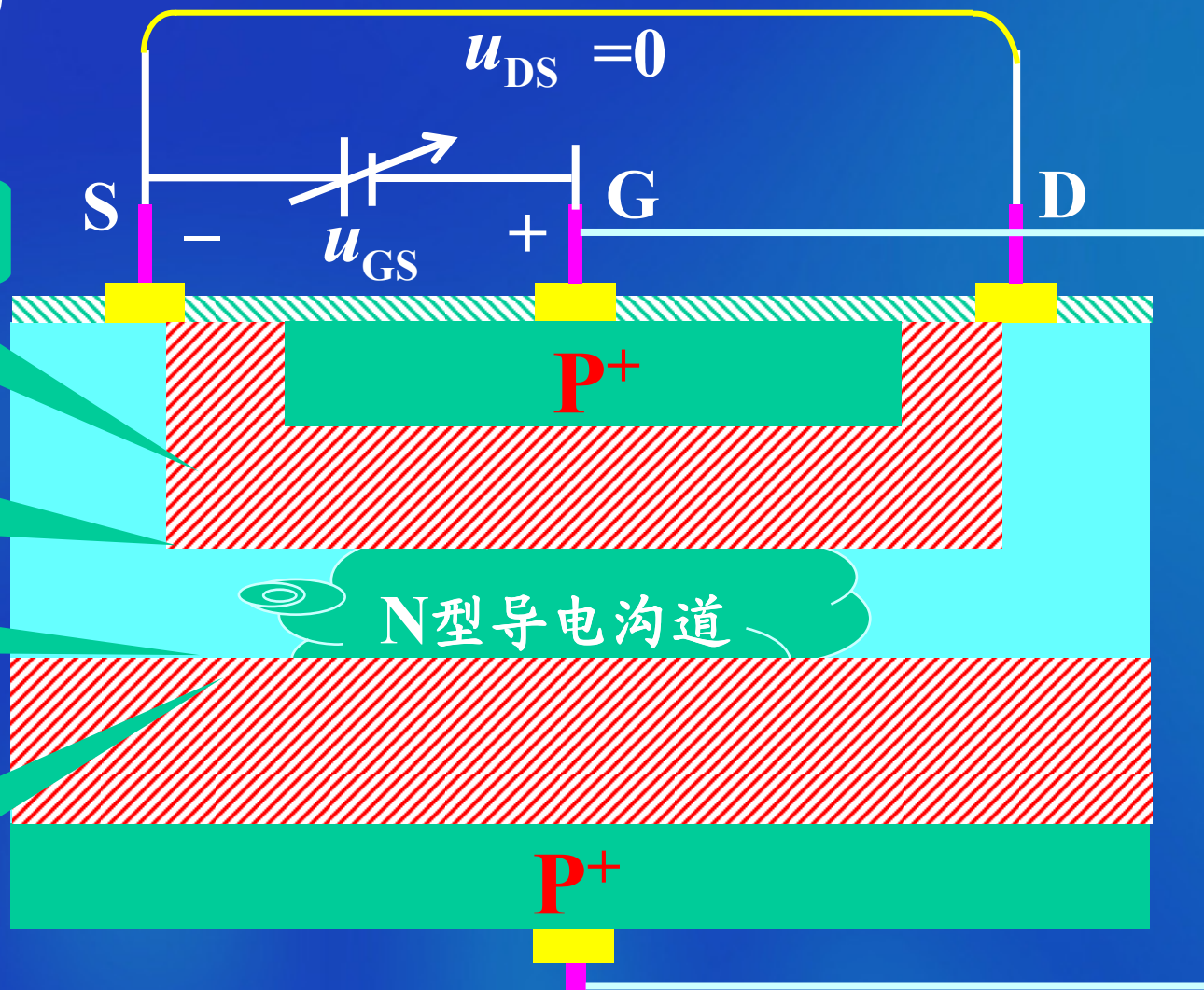
b.  $U_{GS(off)} < u_{GS} < 0$

(a) PN结加宽

(b) PN结主要向N区扩展

(c) 导电沟道变窄

(c) 导电沟道电阻增大



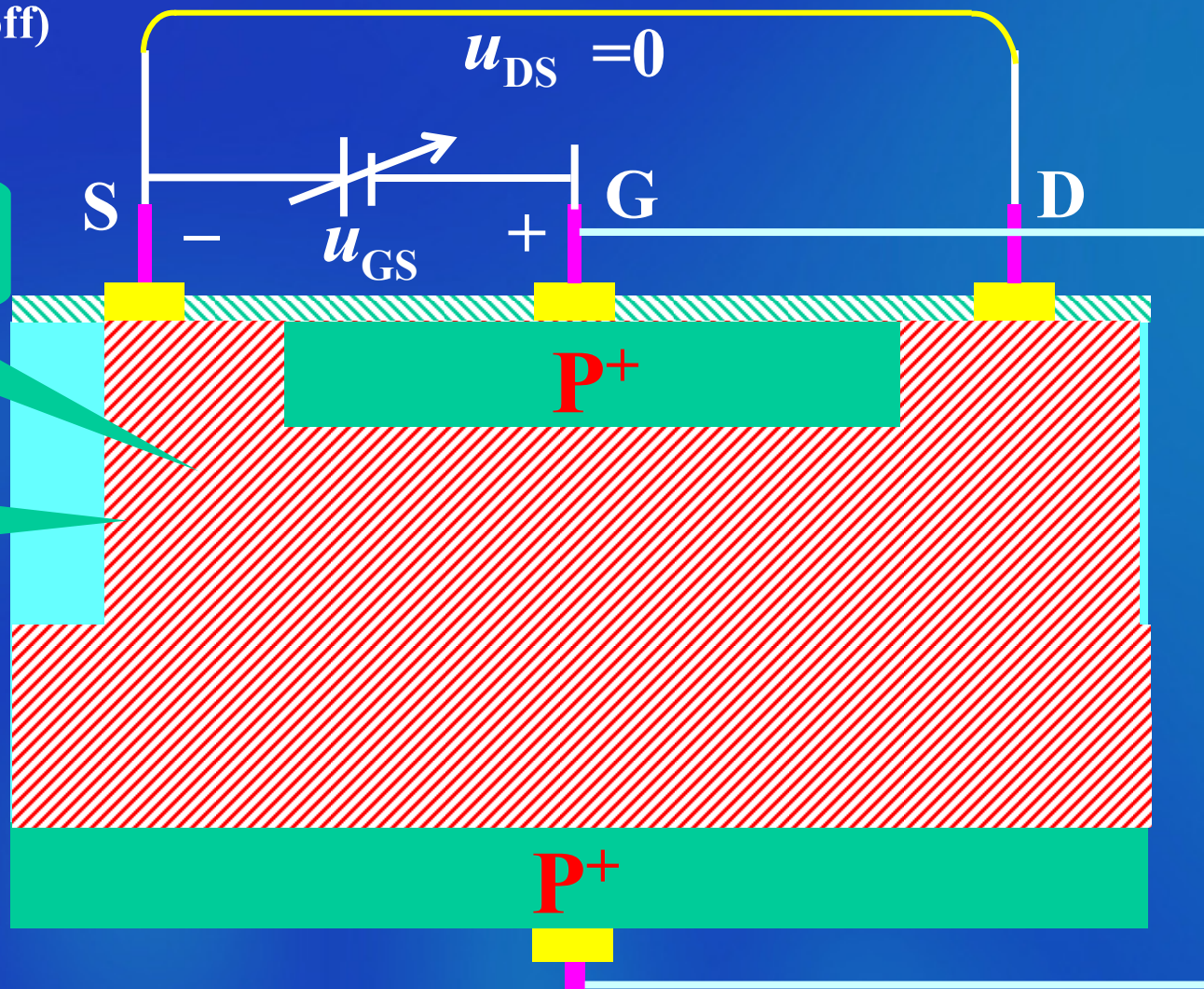
c.  $0 > u_{GS} = U_{GS(off)}$

(a) PN结合拢

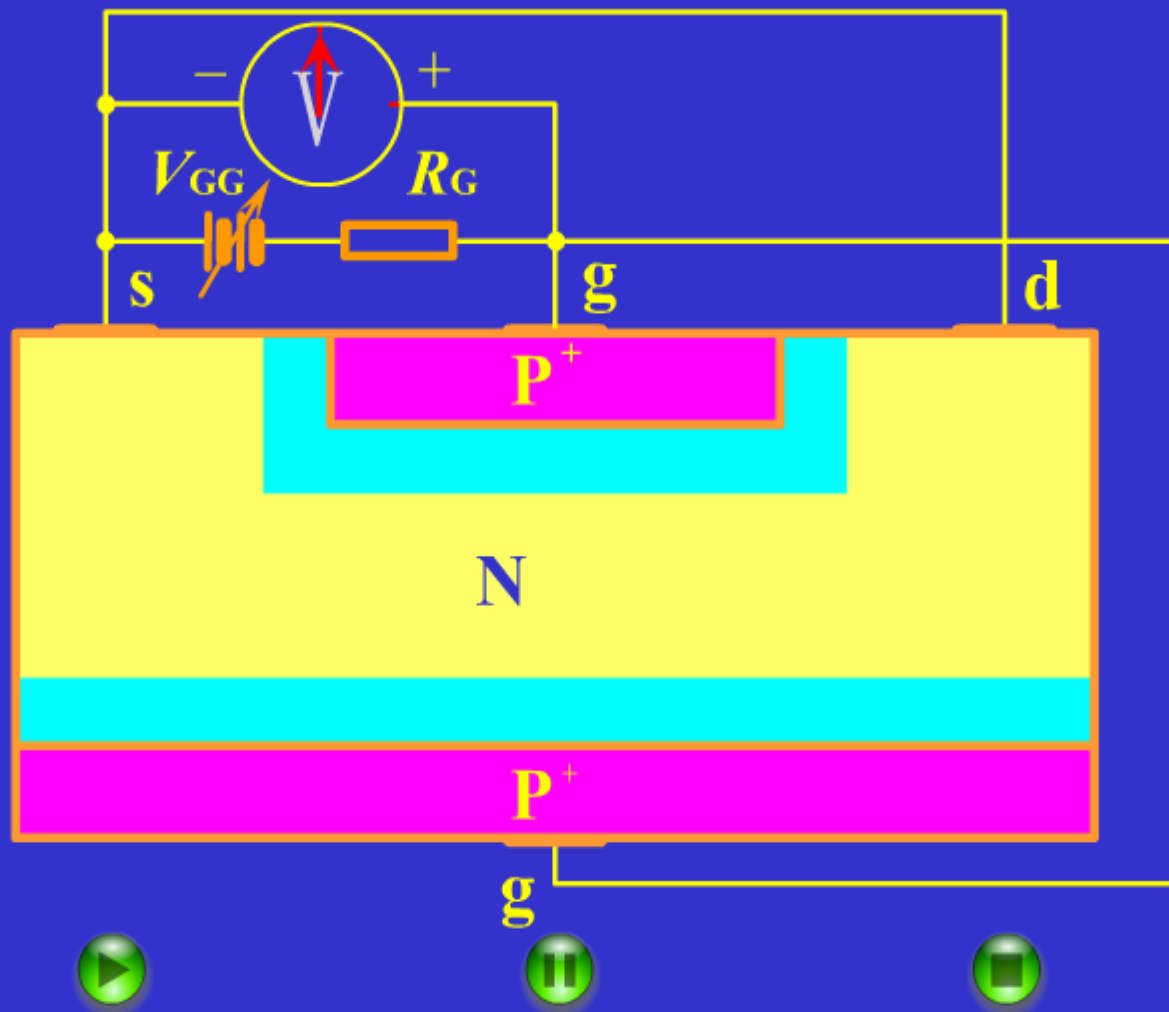
(b) 导电  
沟道夹断

$U_{GS(off)}$  ———

栅源截止电压  
或夹断电压



当  $u_{DS}=0$  时,  $u_{GS}$  对沟道的控制作用动画演示



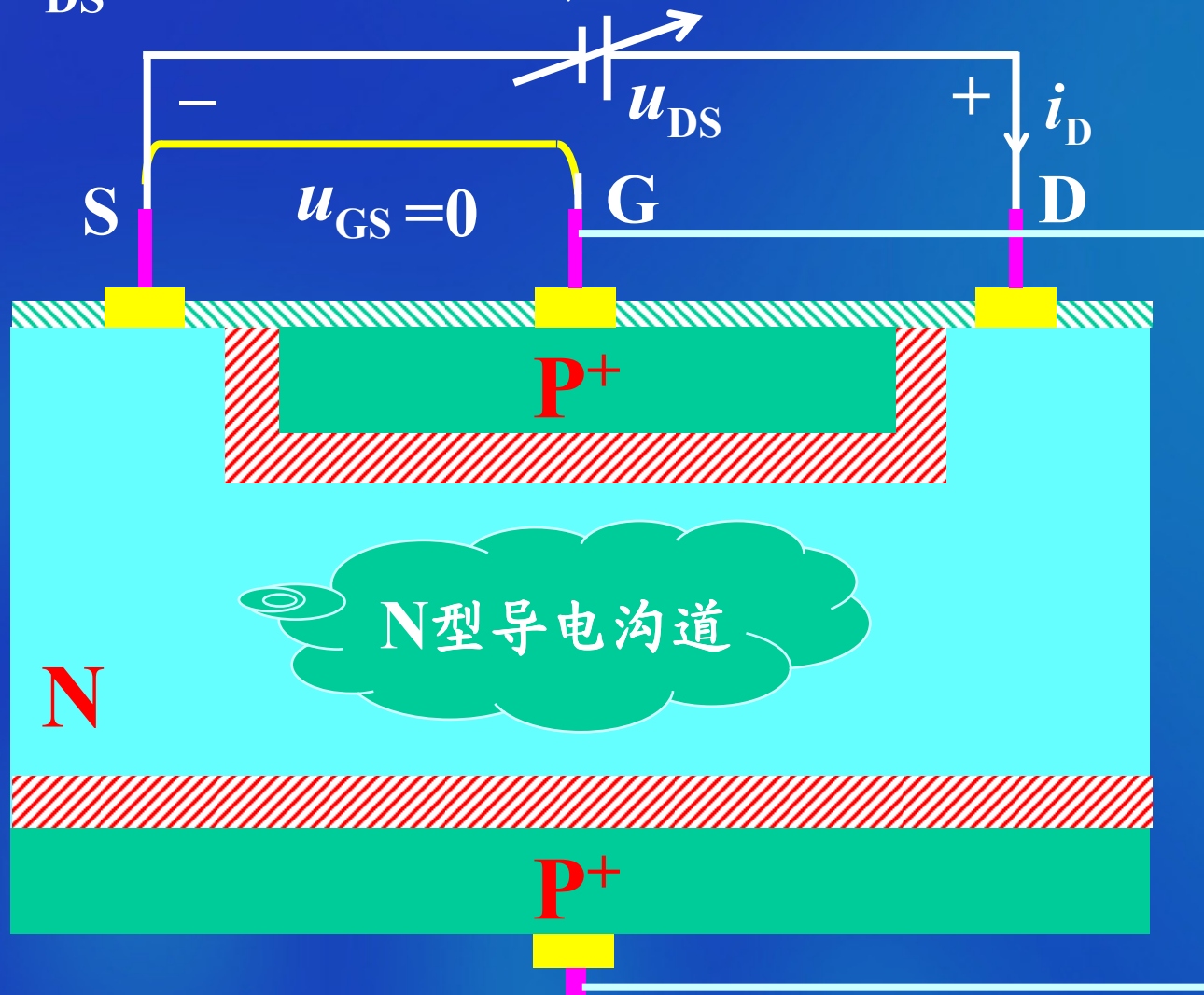
初始状态  $U_{DS}=0, U_{GS}=0$

上页

下页

后退

## 2. 当 $u_{GS}=0$ 时, $u_{DS}$ 对沟道的控制作用



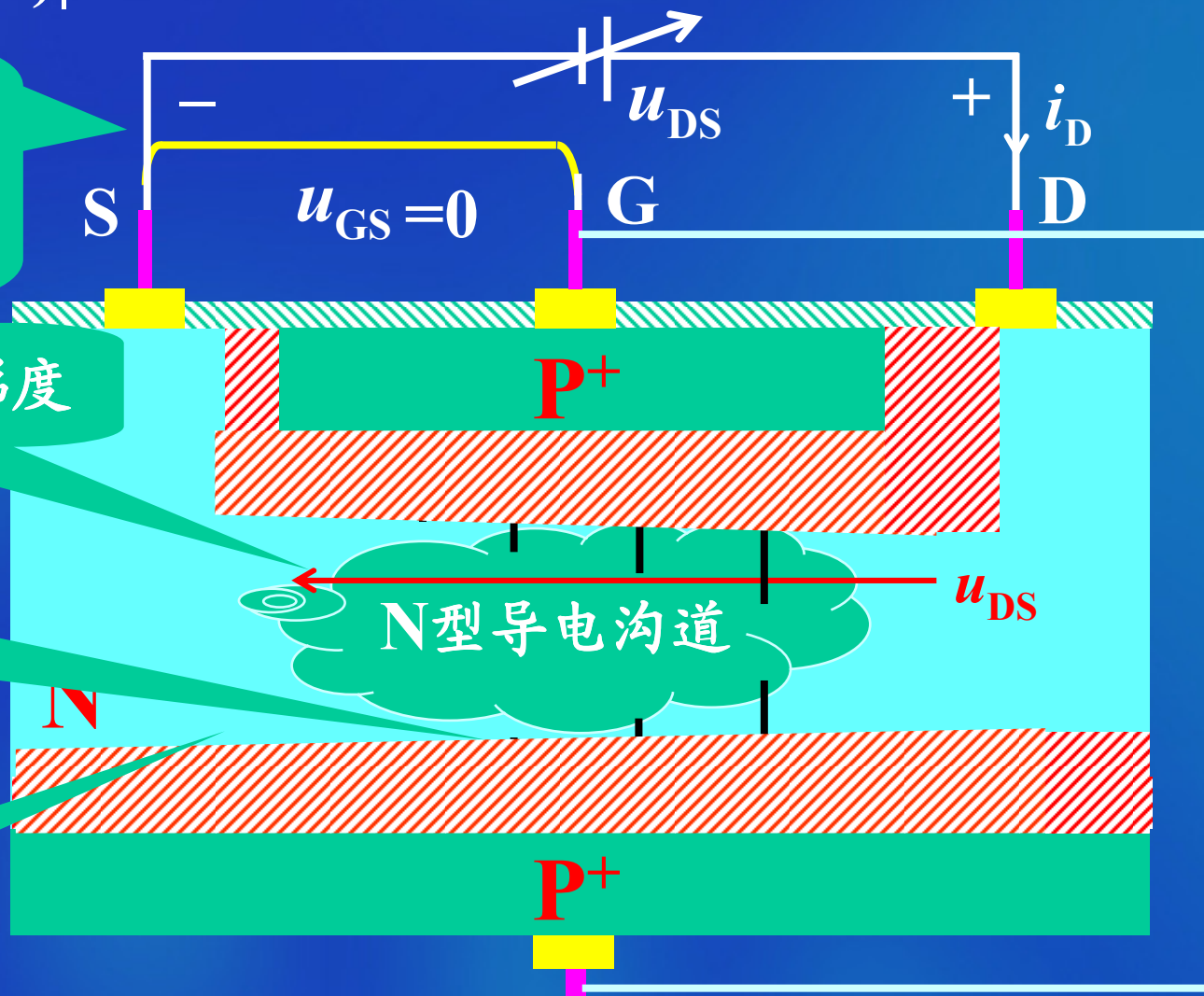
a.  $0 < u_{DS} < |U_{GS}(\text{off})|$

(a) 漏极电流  $i_D \neq 0$   
 $u_{DS}$  增大,  $i_D$  增大。

(b) 沿沟道有电位梯度

(c) 沿沟道PN结反偏电压不同

(d) 沟道PN结呈楔形

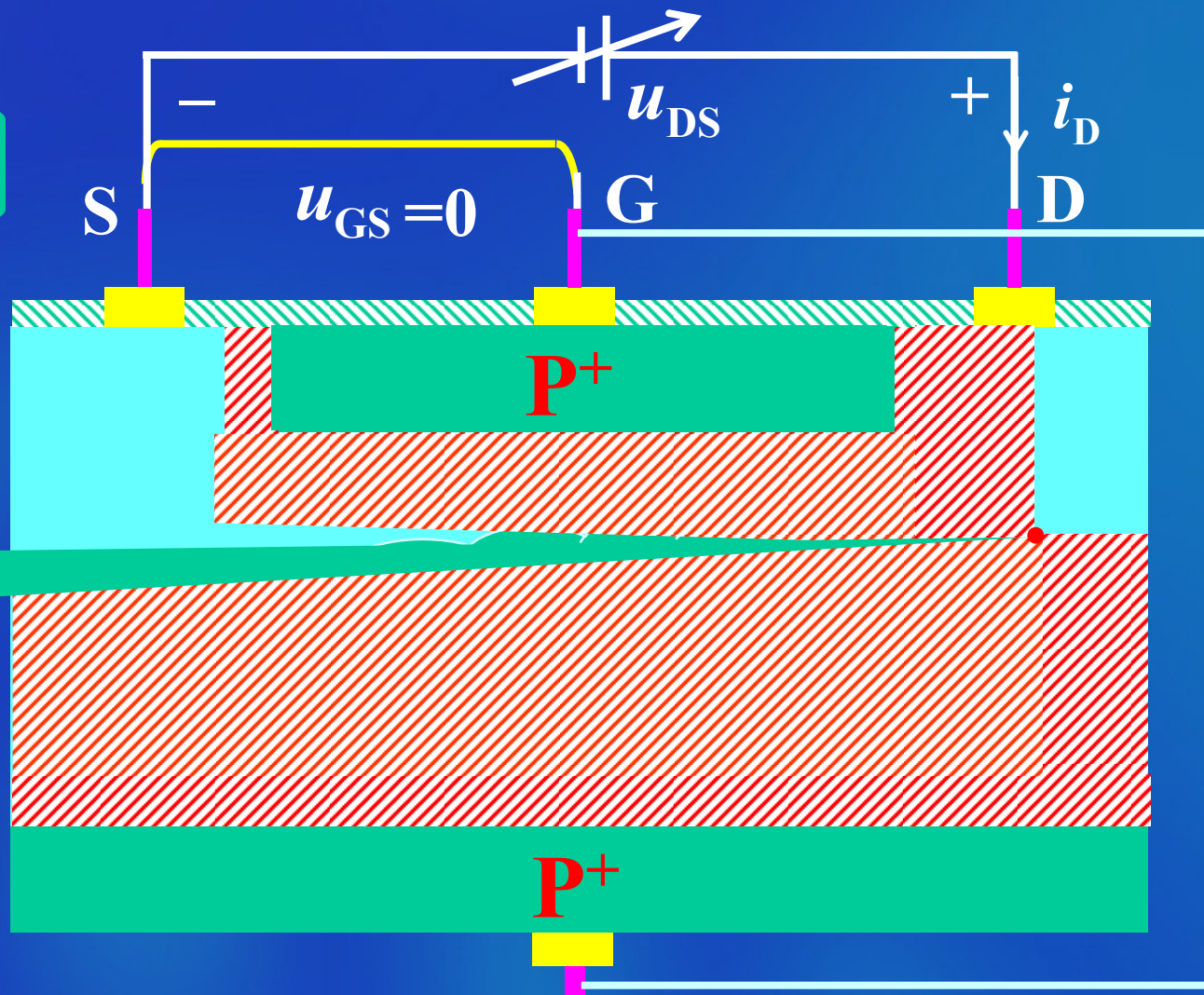




b.  $u_{DS}=|U_{GS(off)}|$

(a)  $i_D$  达到最大值

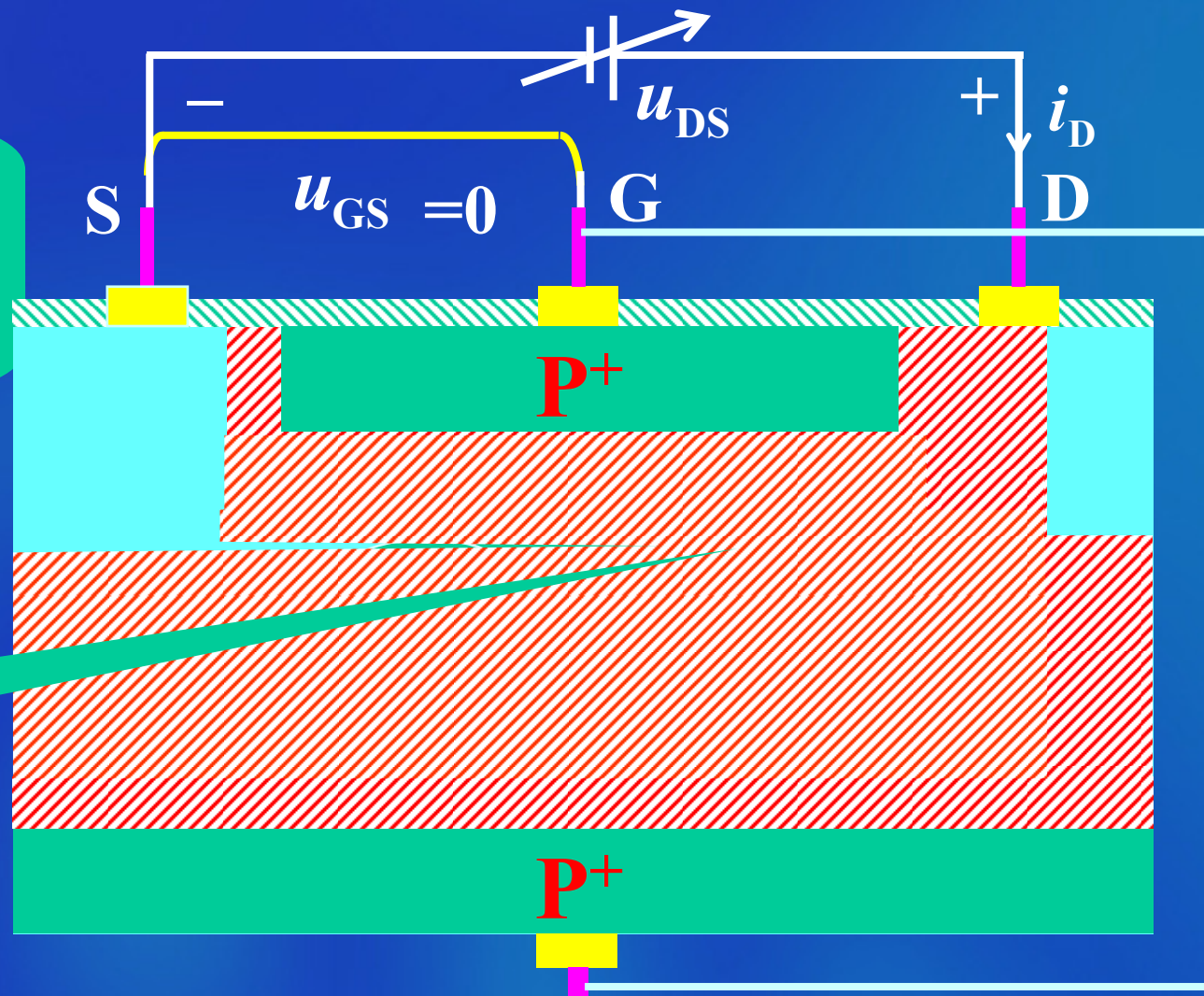
(b) 沟道点夹断(预夹断)



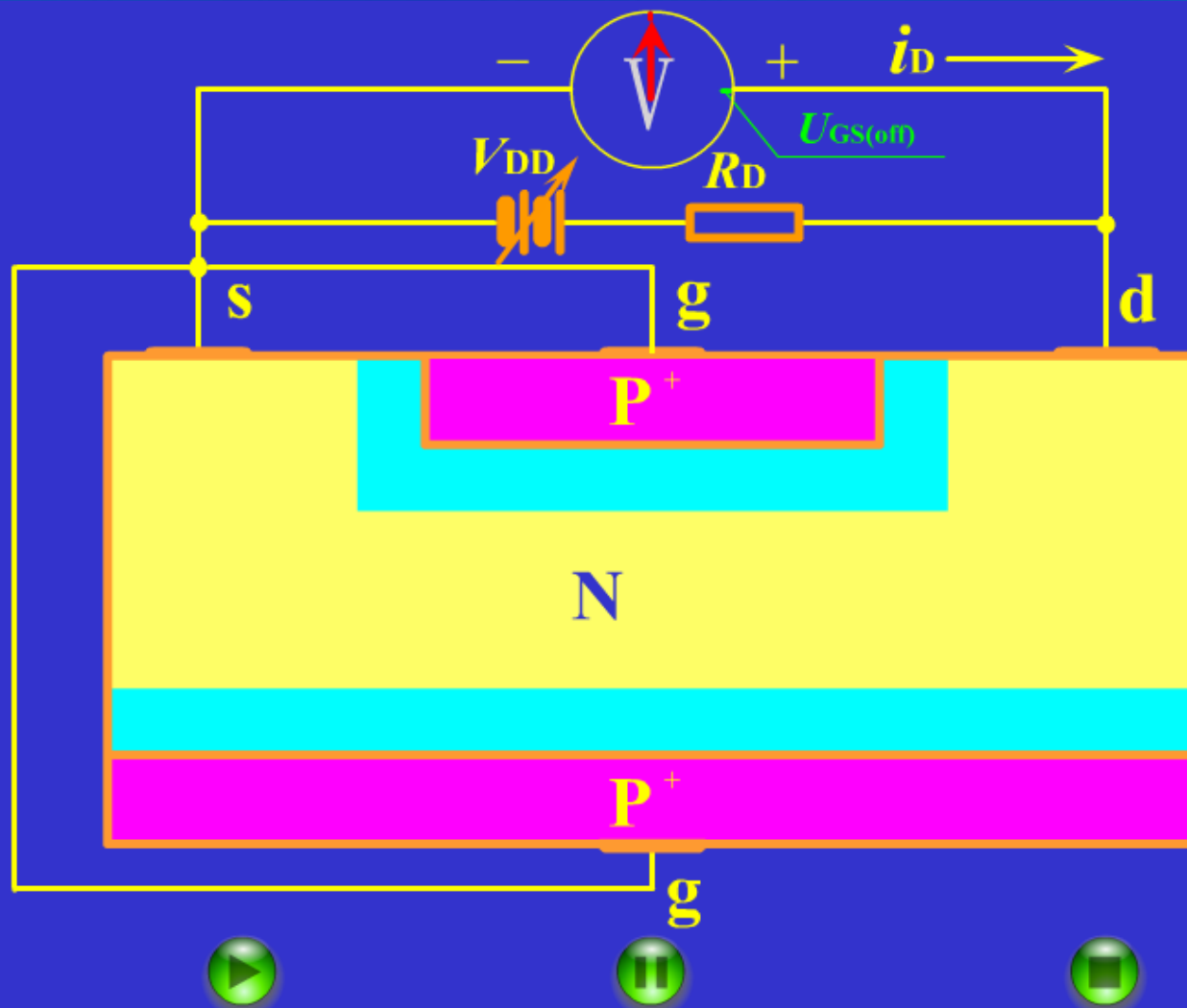
c.  $u_{DS} > |U_{GS(off)}|$

(a)  $i_D$  达到最大值  
几乎不随  $u_{DS}$  的增  
大而变化

(b) 沟道夹  
断区延长



当  $u_{GS}=0$  时,  $u_{DS}$  对沟道的控制作用动画演示



进入状态1:  $0 < u_{DS} < |U_{GS(off)}|$

上页

下页

后退

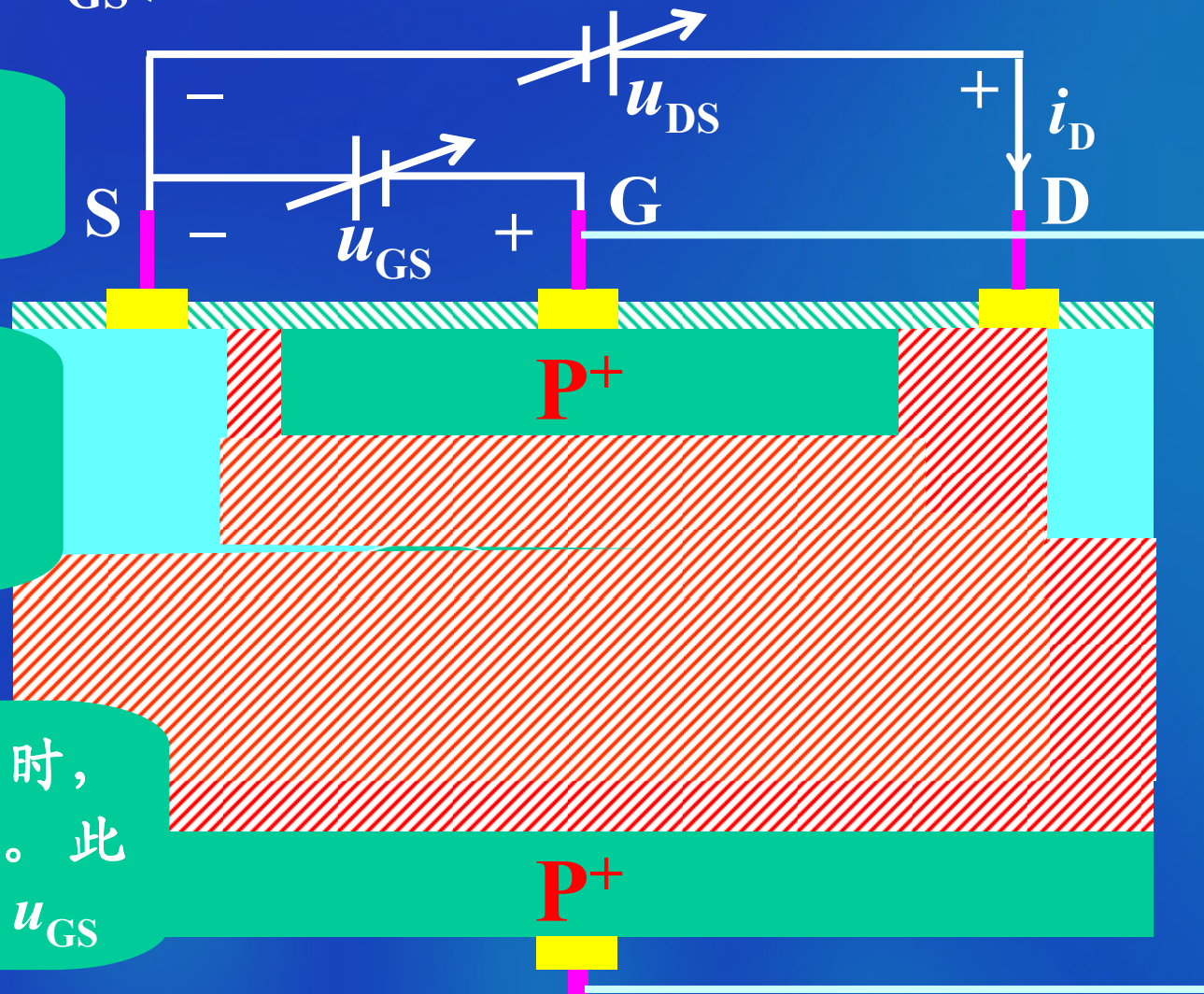
### 3. 当 $u_{DS} \geq 0$ 时, $u_{GS} (\leq 0)$ 对沟道的控制作用

a.  $u_{DS}$  和  $u_{GS}$  将一起改变沟道的宽度

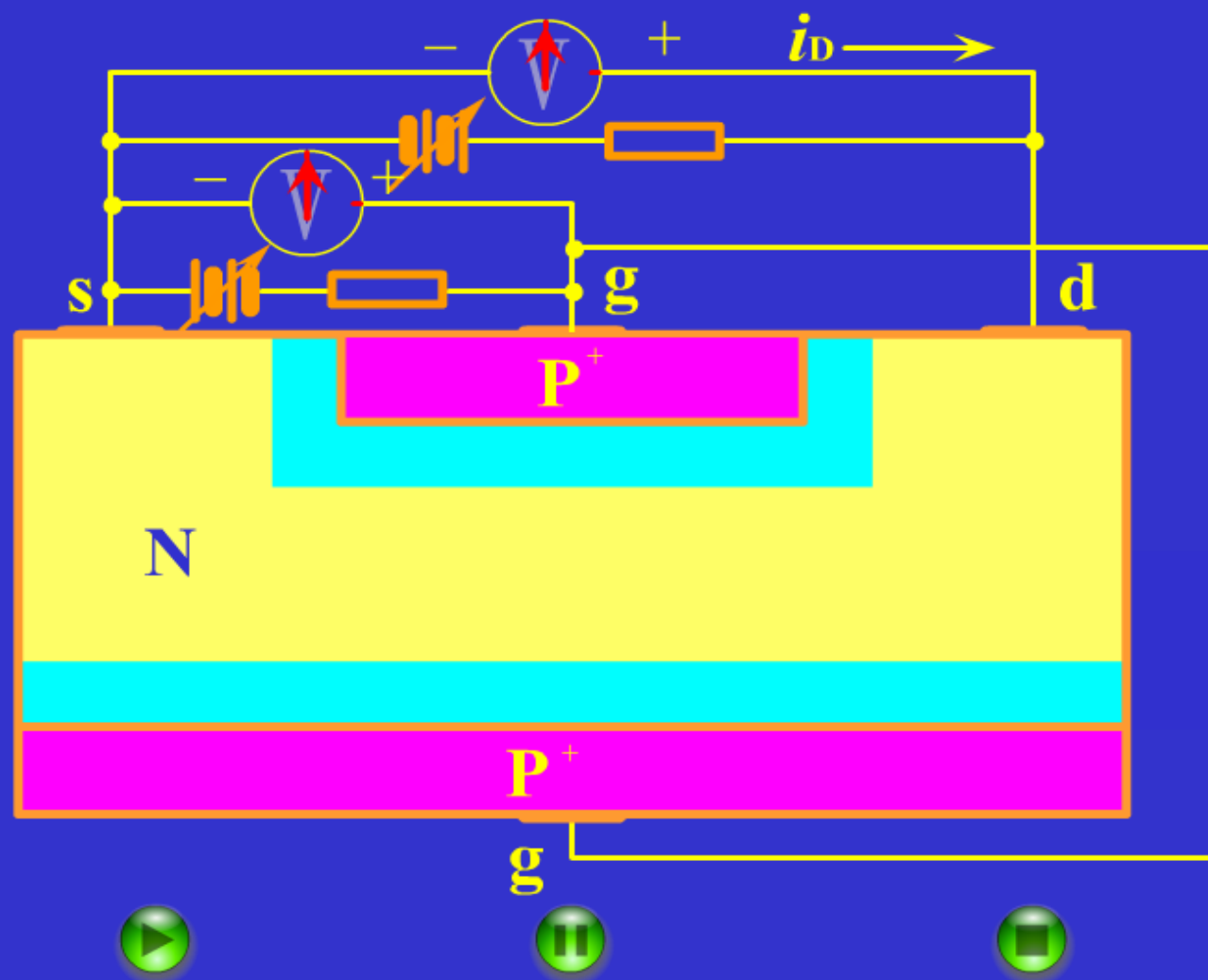
b. PN结在漏极端的反偏电压最大。

$$u_{DG} = u_{DS} - u_{GS}$$

c. 当  $u_{DG} = |U_{GS(off)}|$  时, 沟道出现夹断。此时,  $u_{DS} = |U_{GS(off)}| + u_{GS}$



# $u_{DS}$ 、 $u_{GS}$ 共同对沟道的控制作用动画演示



## 小结:

(1) JFET是利用 $u_{GS}$ 所产生的电场变化来改变沟道电阻的大小,即利用电场效应控制沟道中流通的电流大小,因而称为场效应管。

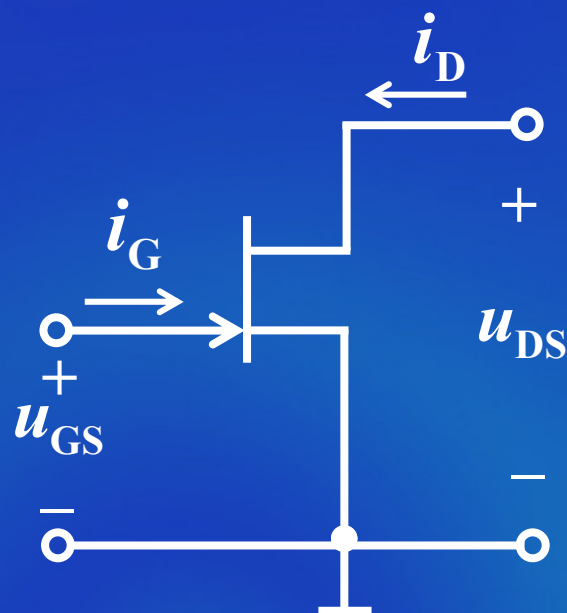
(2) 场效应管为一个电压控制型的器件。

(3) 在N沟道JFET中,  $u_{GS}$ 和 $U_{GS(off)}$ 均为负值。

在P沟道JFET中,  $u_{GS}$ 和 $U_{GS(off)}$ 均为正值。



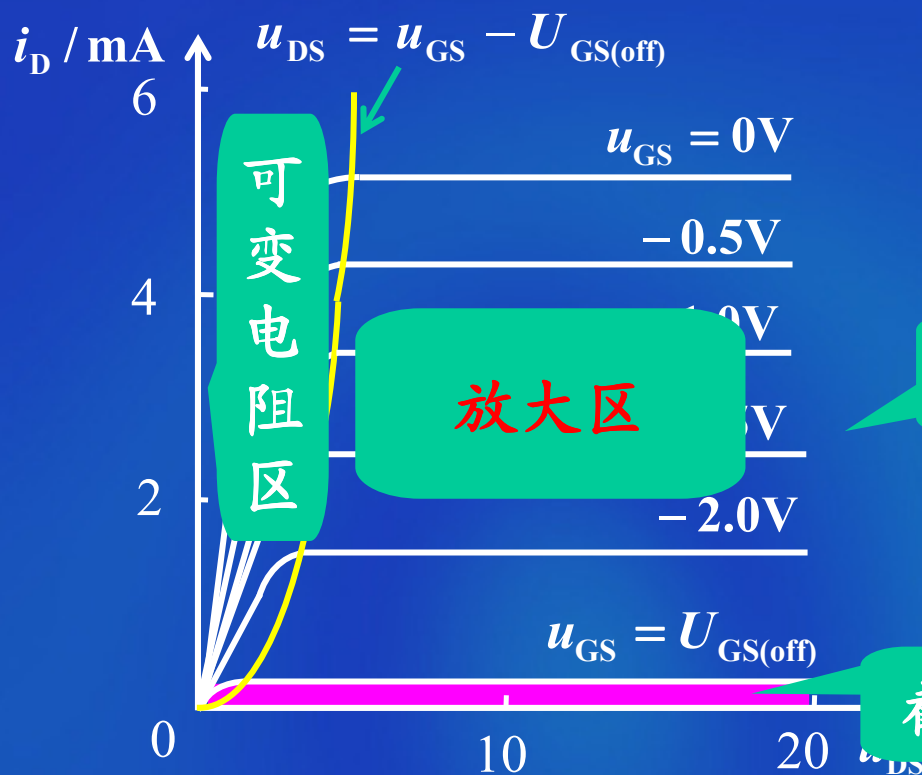
### 3.1.3 结型场效应管的伏安特性



在正常情况下， $i_G=0$ ，管子无输入特性。

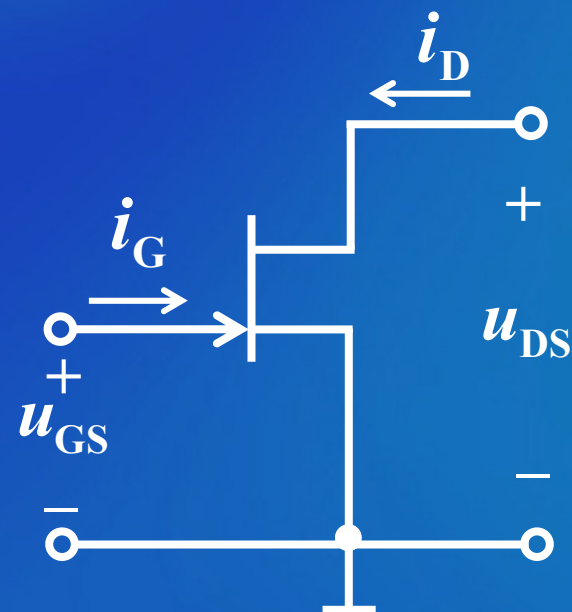
# 1. 输出特性（漏极特性）

$$i_D = f(u_{DS})|_{u_{GS}=\text{常数}}$$



特性曲线

截止区



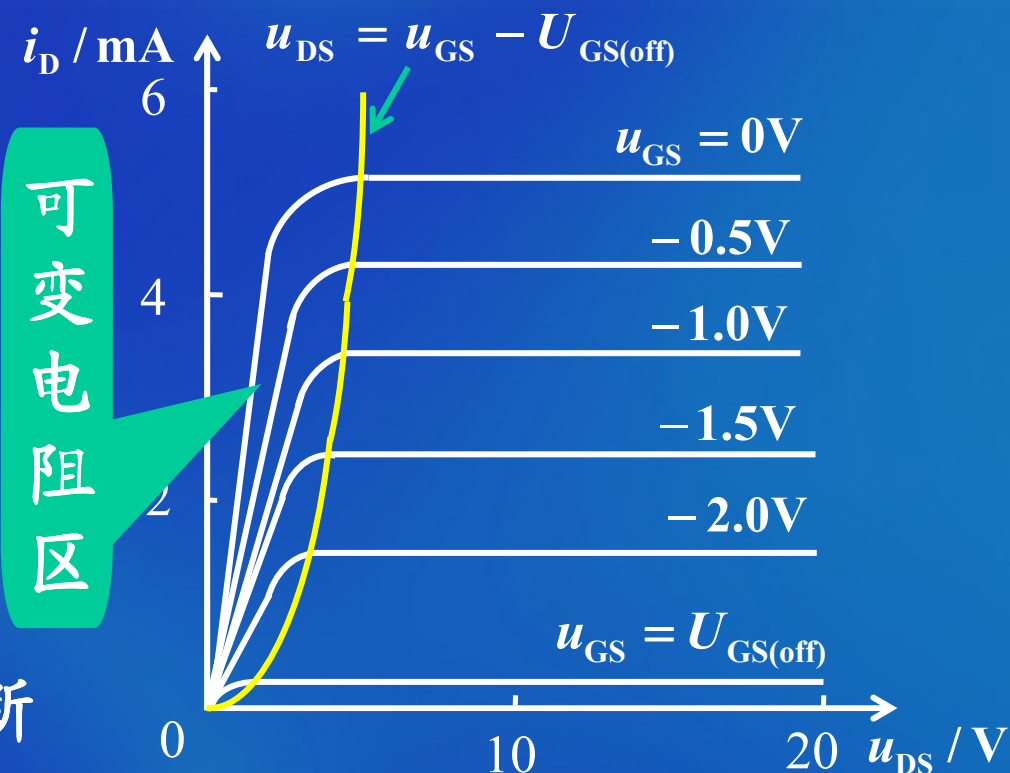
各区的特点:

# (1) 可变电阻区

a.  $u_{DS}$  较小, 沟道尚未夹断

b.  $u_{DS} < |U_{GS(off)}| + u_{GS}$

c. 管子相当于受  $u_{GS}$  控制的压控电阻



## (2) 放大区

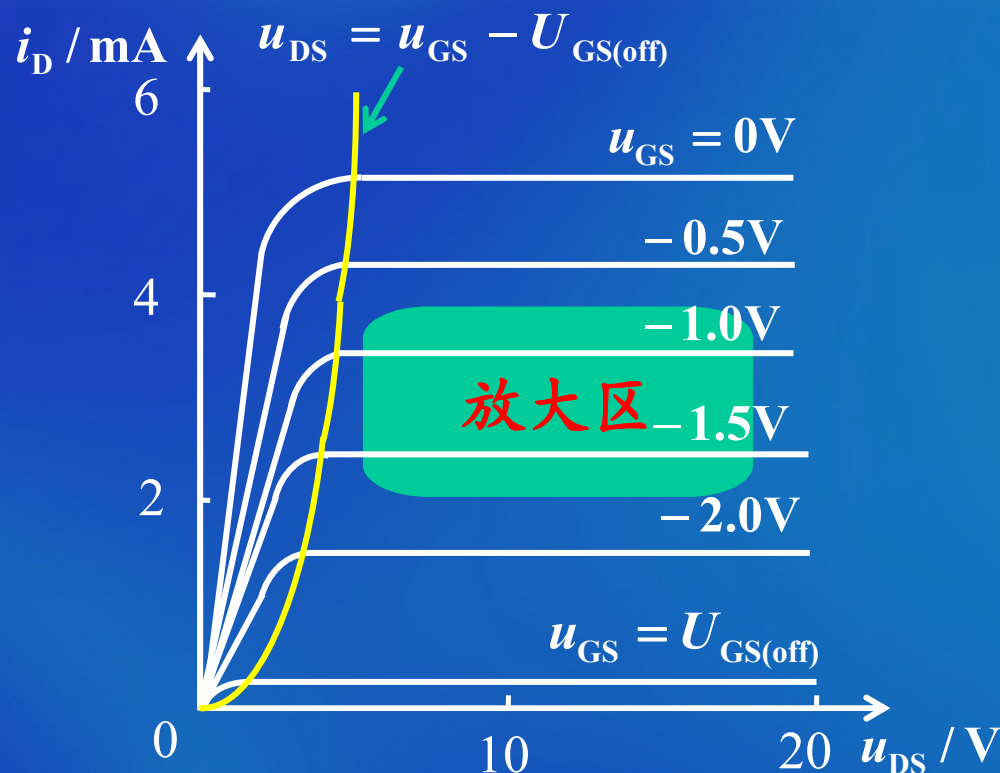
a. 沟道预夹断

b.  $u_{DS} \geq |U_{GS(off)}| + u_{GS}$

c.  $i_D$  几乎与  $u_{DS}$  无关。

d.  $i_D$  只受  $u_{GS}$  的控制。

放大区也称为饱和区、恒流区。

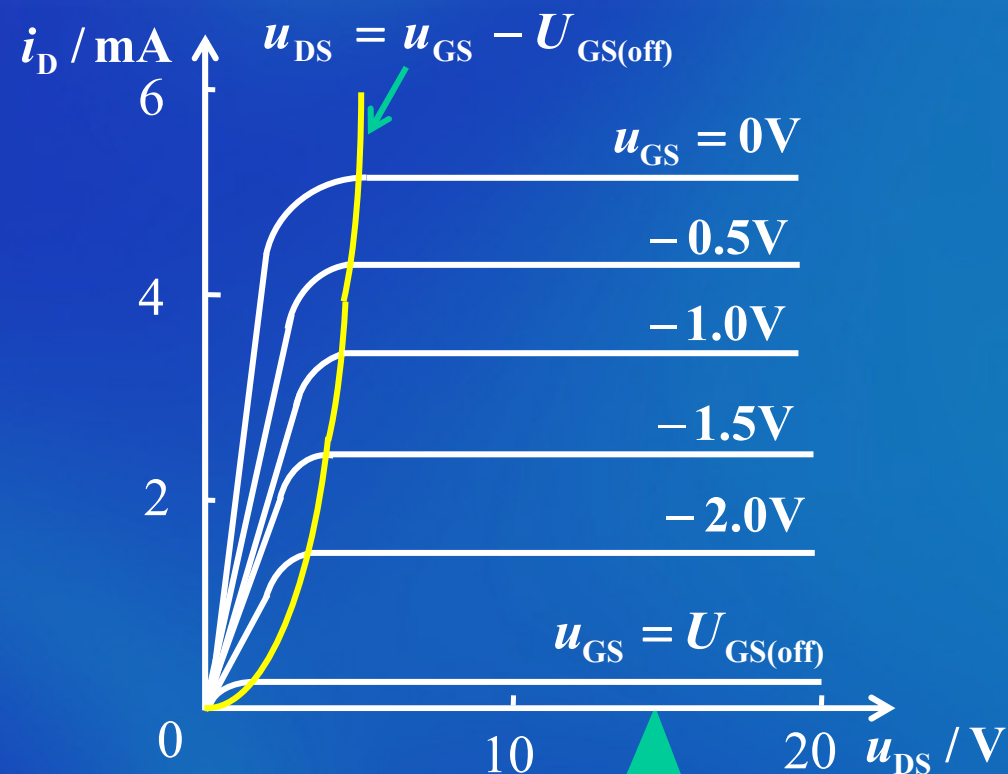


### (3) 截止区

a.  $u_{GS} < U_{GS(off)}$

b. 沟道完全夹断

c.  $i_D \approx 0$



截止区

## 2. 转移特性

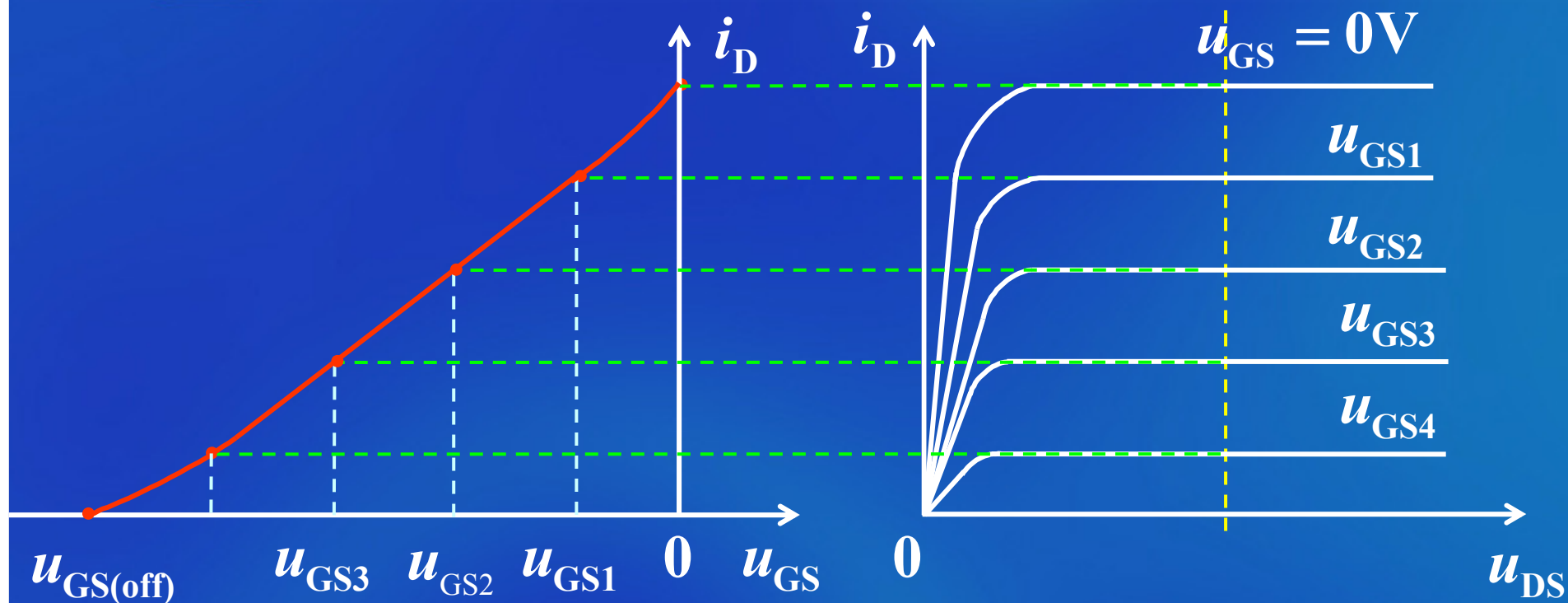
定义

$$i_D = f(u_{GS}) \Big|_{u_{DS}=\text{常数}}$$

表示场效应管的 $u_{GS}$ 对 $i_D$ 的控制特性。

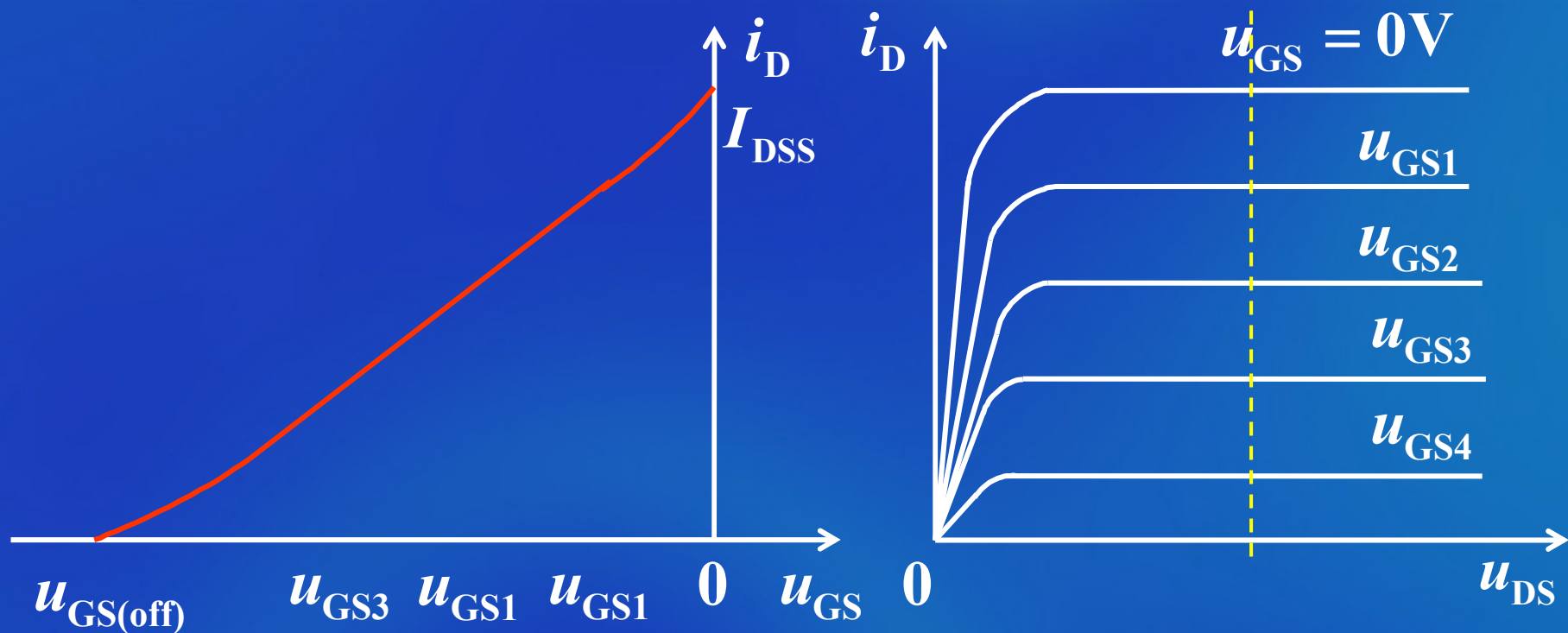
转移特性曲线可由输出特性曲线得到





曲线特点:

- (1) 对于不同的  $u_{DS}$ , 所对应的转移特性曲线不同。
- (2) 当管子工作于恒流区时, 转移特性曲线基本重合。



当管子工作于恒流区时

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}}\right)^2$$

$$I_{DSS} = i_D \Big|_{\substack{u_{GS}=0V \\ u_{DS} > |U_{GS(off)}|}} \quad \text{称为零偏漏极电流}$$

### 3.1.4 结型场效应管的主要电参数

#### 1. 直流参数

(1) 夹断电压  $U_{GS(off)}$

$$U_{GS(off)} = u_{GS} \left| \begin{array}{l} U_{DS} = \text{常数}(10V) \\ I_D < \text{测试值}(50\mu A) \end{array} \right.$$

(2) 零偏漏极电流  $I_{DSS}$  (也称为漏极饱和电流)

$$I_{DSS} = i_D \left| \begin{array}{l} U_{DS} = \text{常数}(>|U_{GS(off)}|) \\ U_{GS} = 0 \end{array} \right.$$

(3) 直流输入电阻  $R_{GS}$

$$R_{GS} = \frac{U_{GS}}{I_G} \left| \begin{array}{l} U_{DS} = \text{常数}(0V) \\ |U_{GS}| = \text{常数}(10V) \end{array} \right.$$

## 2. 交流参数

(1) 跨导 $g_m$  也称为互导。其定义为:

$$g_m = \left. \frac{di_D}{du_{GS}} \right|_{U_{DS}=\text{常数}}$$

当管子工作在放大区时

由 
$$i_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}} \right)^2$$

得管子的跨导

$$\begin{aligned} g_m &= \frac{di_D}{du_{GS}} \\ &= \frac{d}{du_{GS}} \left[ I_{DSS} \left( 1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}} \right)^2 \right] \\ &= -\frac{2I_{DSS}}{U_{GS(off)}} \left( 1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(off)}} \right) \\ &= -\frac{2}{U_{GS(off)}} \sqrt{I_{DSS} I_{DQ}} \end{aligned}$$

可见， $g_m$  与  $I_{DQ}$  有关。 $I_{DQ}$  越大， $g_m$  也就越大。

(2) 极间电容

{

- 栅源电容  $C_{gs}$
- 栅漏电容  $C_{gd}$
- 漏源电容  $C_{ds}$

### 3. 极限参数

(1) 漏极最大允许耗散功率  $P_{DSM}$

(2) 最大漏极电流  $I_{DSM}$

(3) 栅源击穿电压  $U_{(BR)GS}$

(4) 漏源击穿电压  $U_{(BR)DS}$



# 判断N沟道JFET工作区

$$u_{DS} > U_{(BR)DS}$$

击穿区

$$u_{GS}$$

$$u_{GS} \leq U_{GS(off)}$$

截止区

$$u_{GS} > U_{GS(off)}$$

当  $u_{DG} = |u_{GS(off)}|$  时  
预夹断

$$u_{DS} = u_{DG} + u_{GS}$$

$$u_{DS} < u_{GS} + |U_{GS(off)}|$$

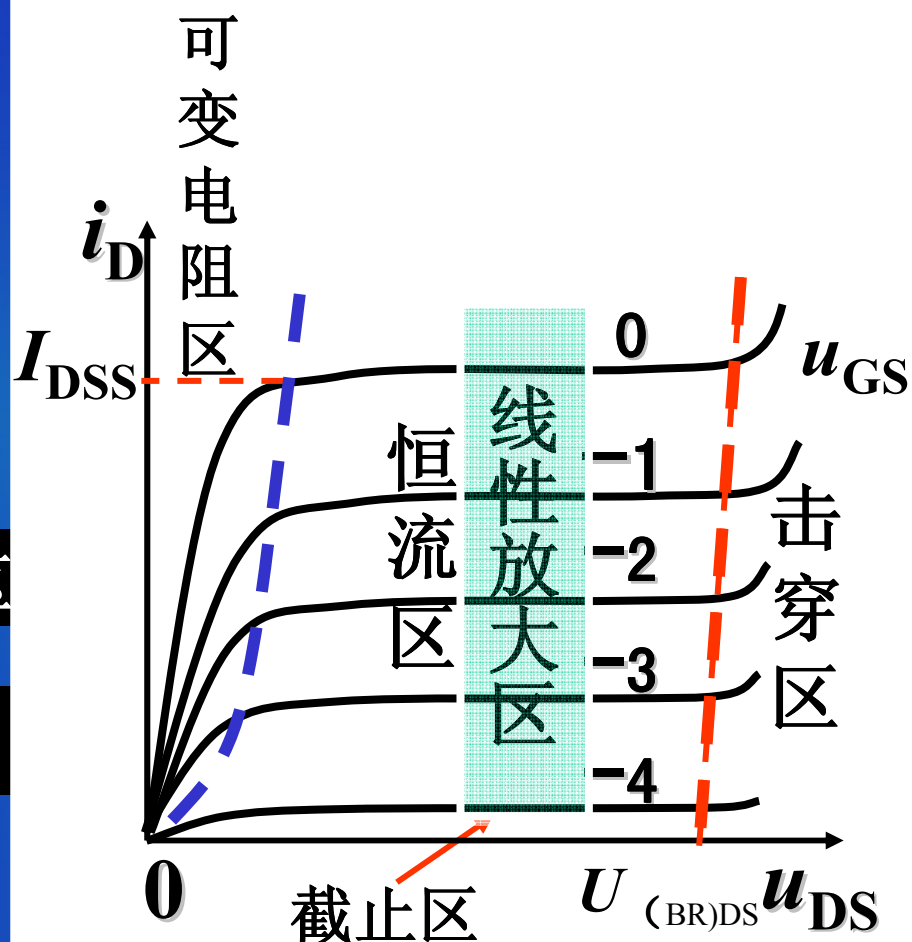
可变电阻区

$$u_{DS} = u_{GS} + |U_{GS(off)}|$$

预夹断

$$u_{DS} > u_{GS} + |U_{GS(off)}|$$

恒流区



上页

下页

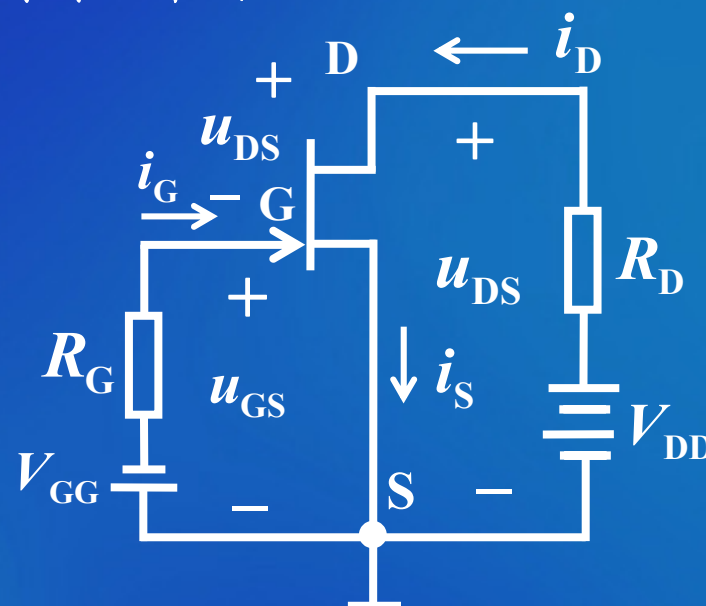
后退

例 在图示电路中，已知场效应管的  $U_{GS(off)} = -5V$ ；  
问在下列三种情况下，管子分别工作在哪个区？

(a)  $u_{GS} = -8V$  ,  $u_{DS} = 4V$

(b)  $u_{GS} = -3V$  ,  $u_{DS} = 4V$

(c)  $u_{GS} = -3V$  ,  $u_{DS} = 1V$



解 (a) 因为  $u_{GS} < U_{GS(off)}$ ，管子工作在截止区。

$$u_{DG} = (u_{DS} - u_{GS}) \pi ? = ? \phi ? |U_{GS(off)}|$$

$$(b) \quad u_{GS} = -3V, \quad u_{DS} = 4V$$

$$\begin{aligned} \text{因} \quad u_{DG} &= u_{DS} - u_{GS} \\ &= 4 - (-3) \\ &= 7V \end{aligned}$$

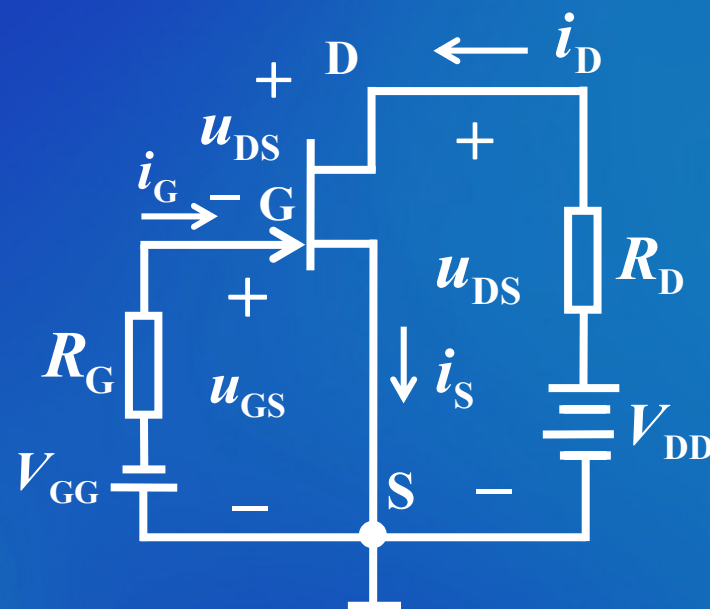
$$u_{DG} > |U_{GS(off)}|$$

管子工作在放大区。

$$(c) \quad u_{GS} = -3V, \quad u_{DS} = 1V$$

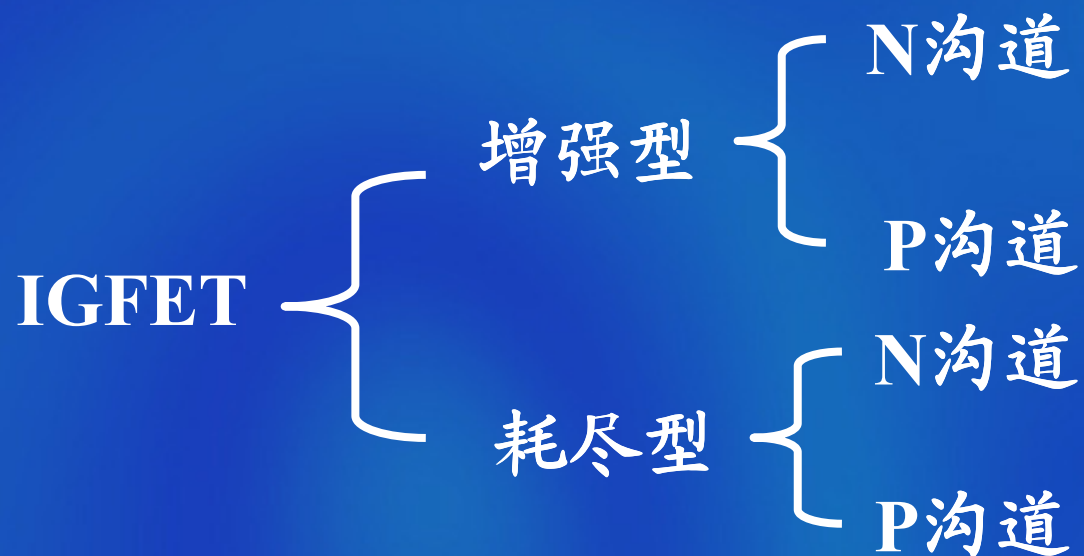
$$\text{因这时的} \quad u_{DG} = u_{DS} - u_{GS} = 1 - (-3) = 4V < |U_{GS(off)}|$$

管子工作在可变电阻区。



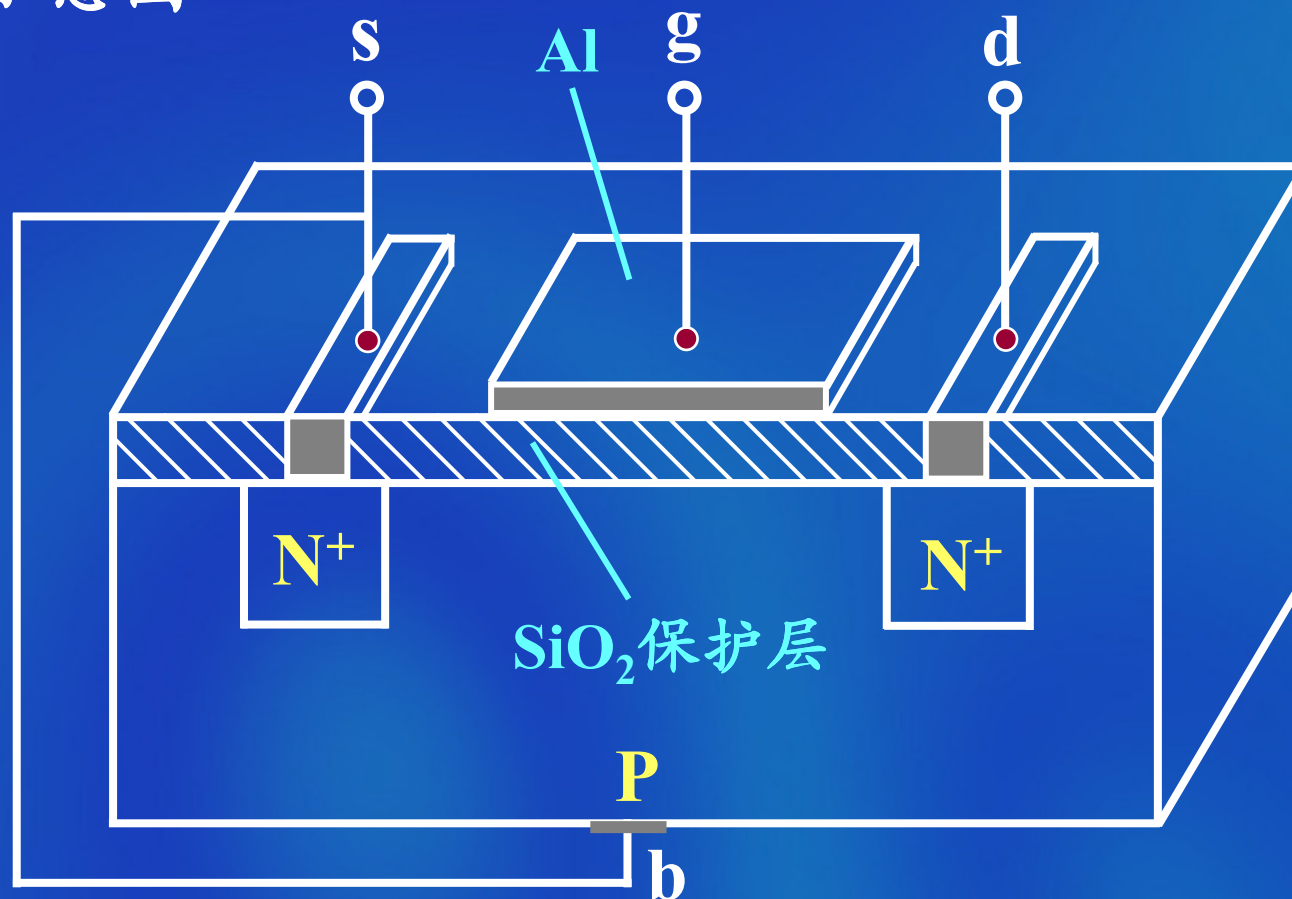
## 3.2 绝缘栅型场效应管

### 绝缘栅型场效应管的类别



## 3.2.1 增强型绝缘栅场效应管

### 1. 结构示意图



SiO<sub>2</sub>保护层

Al

引出两个电极

引出栅极

S

G

D

N<sup>+</sup>

两边扩散两个  
高浓度的N区

N<sup>+</sup>

形成两个PN结

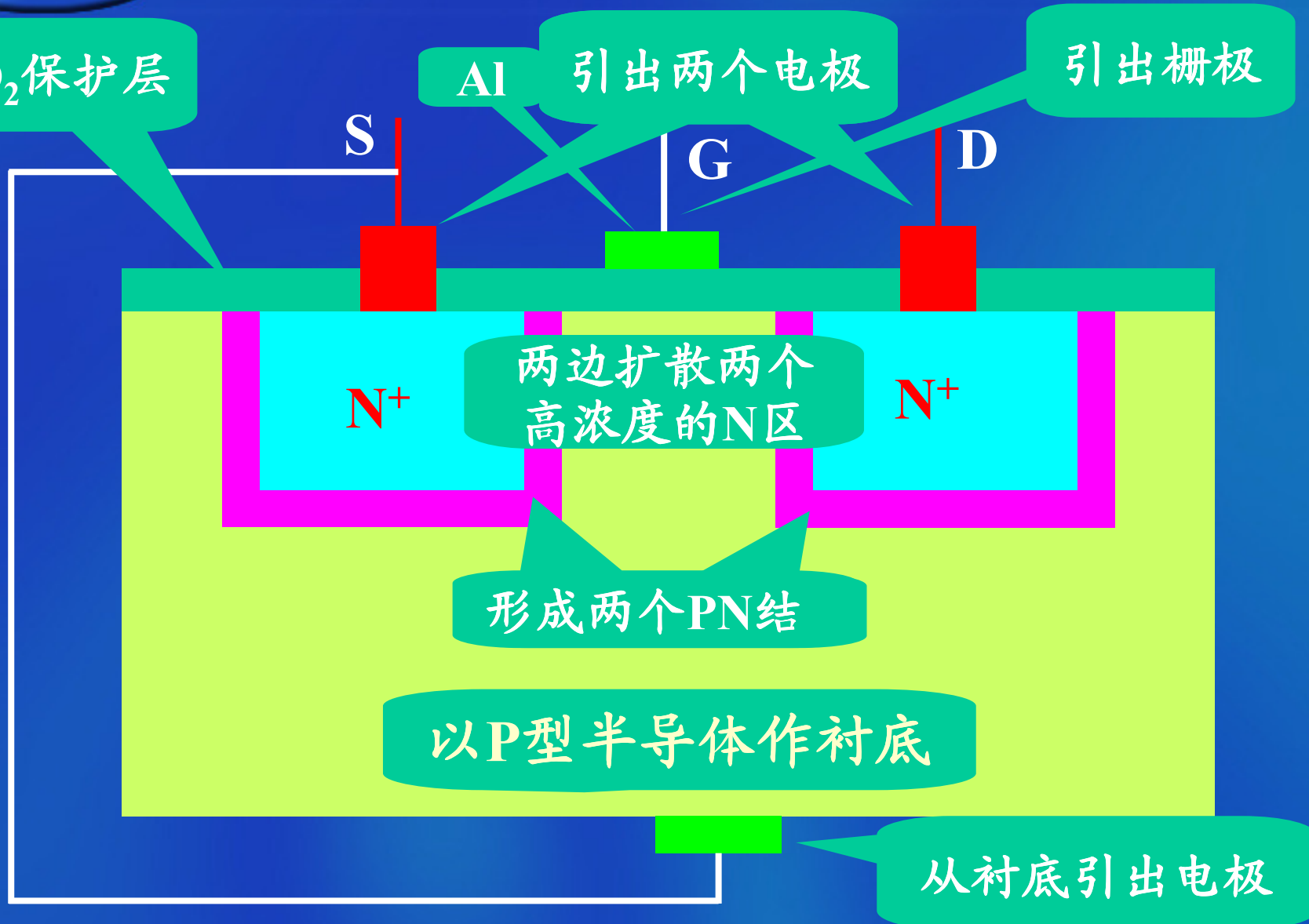
以P型半导体作衬底

从衬底引出电极

上页

下页

后退



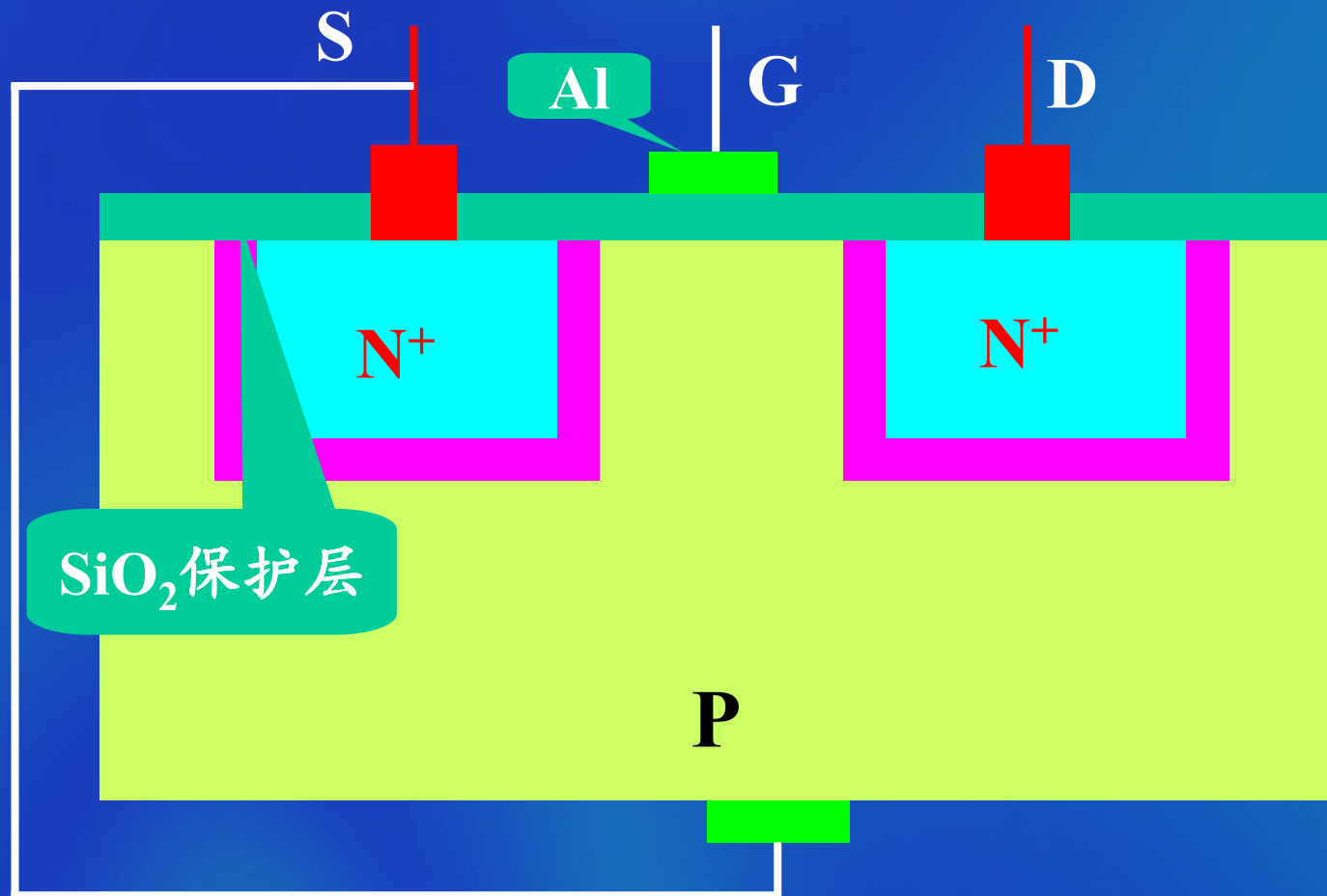


管子组成:

a. 金属  
(Metal)

b. 氧化物  
(Oxide)

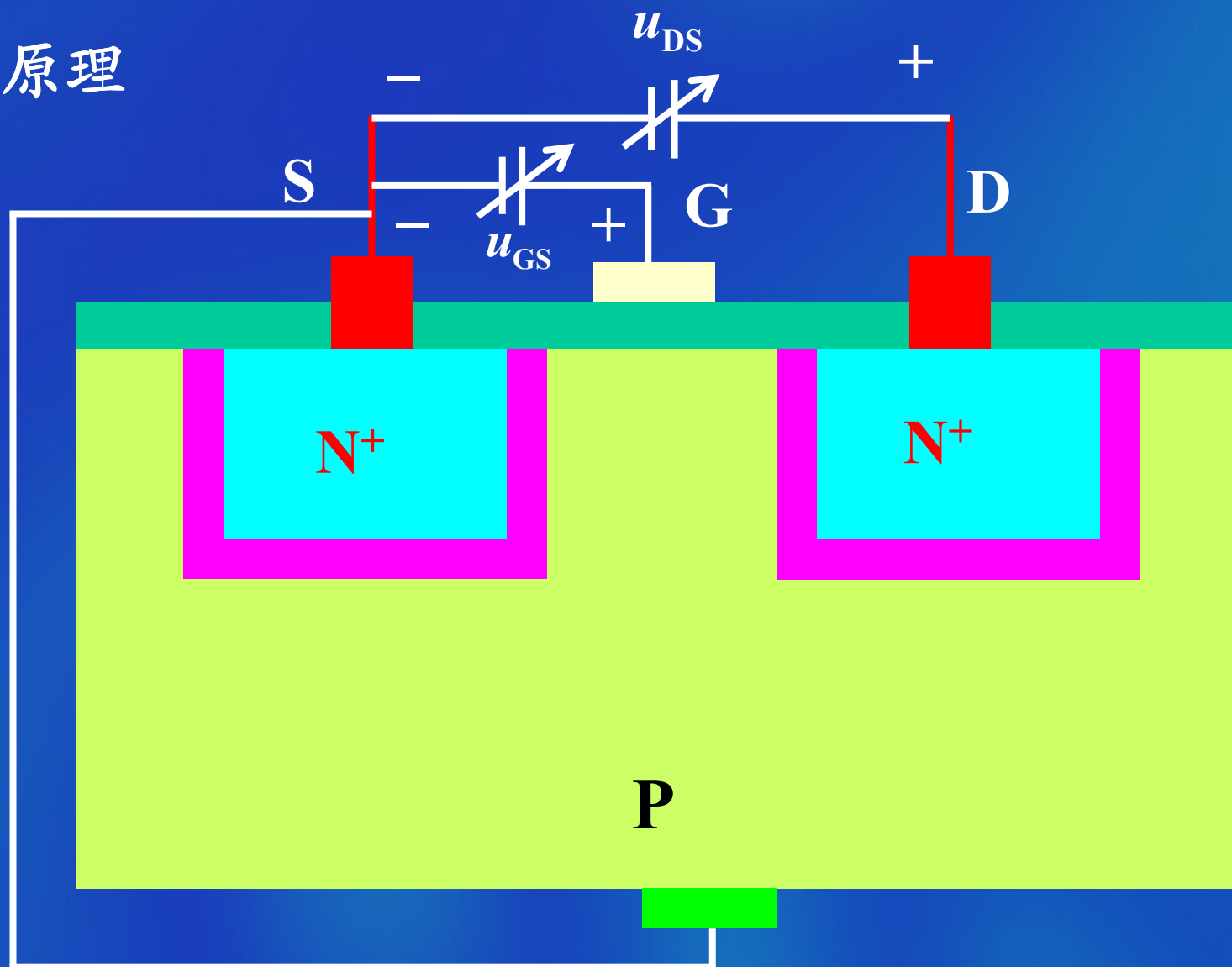
c. 半导体(Semiconductor)



故又称为MOS管

## 2. 工作原理

电路连接图

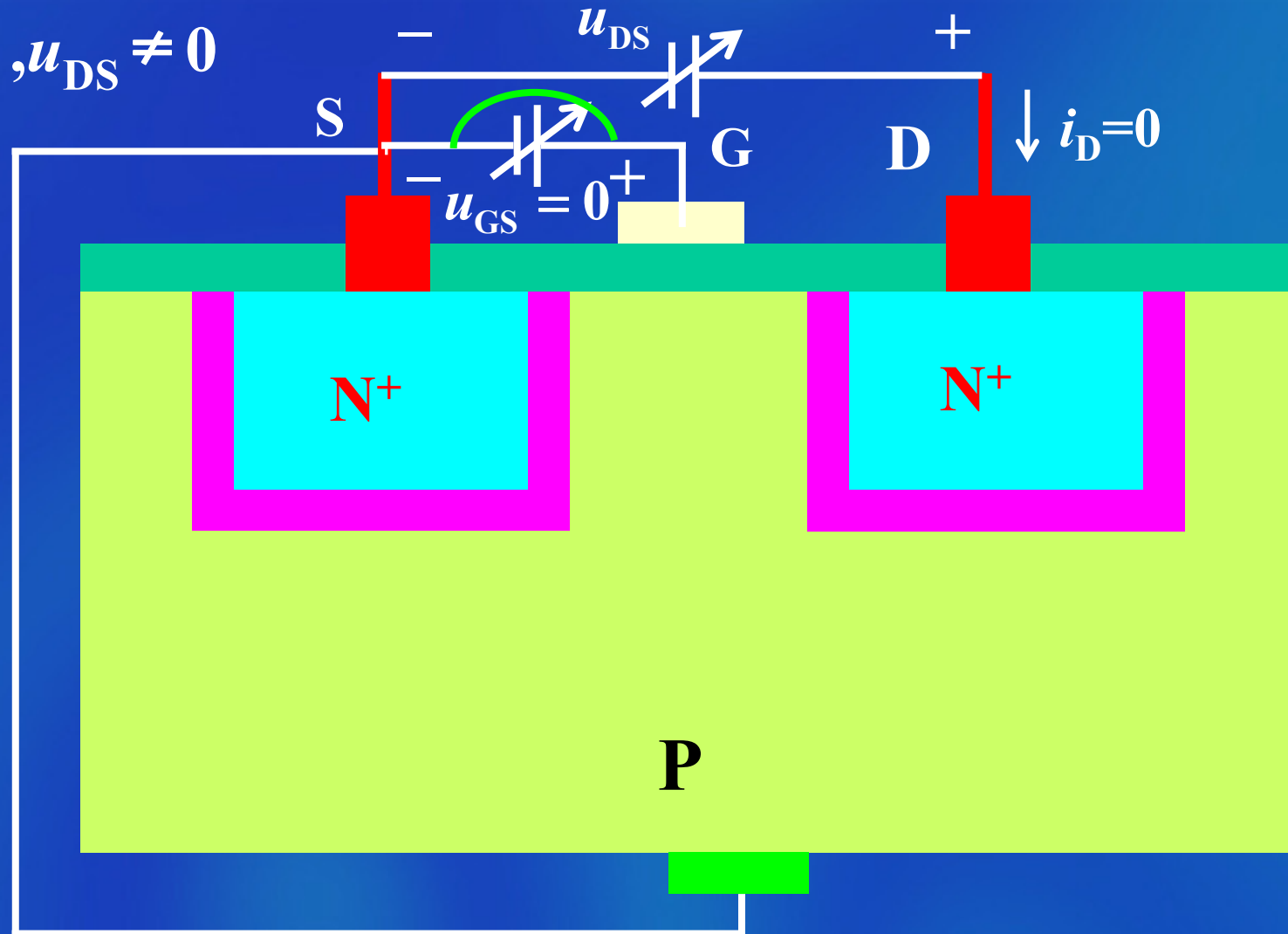


上页

下页

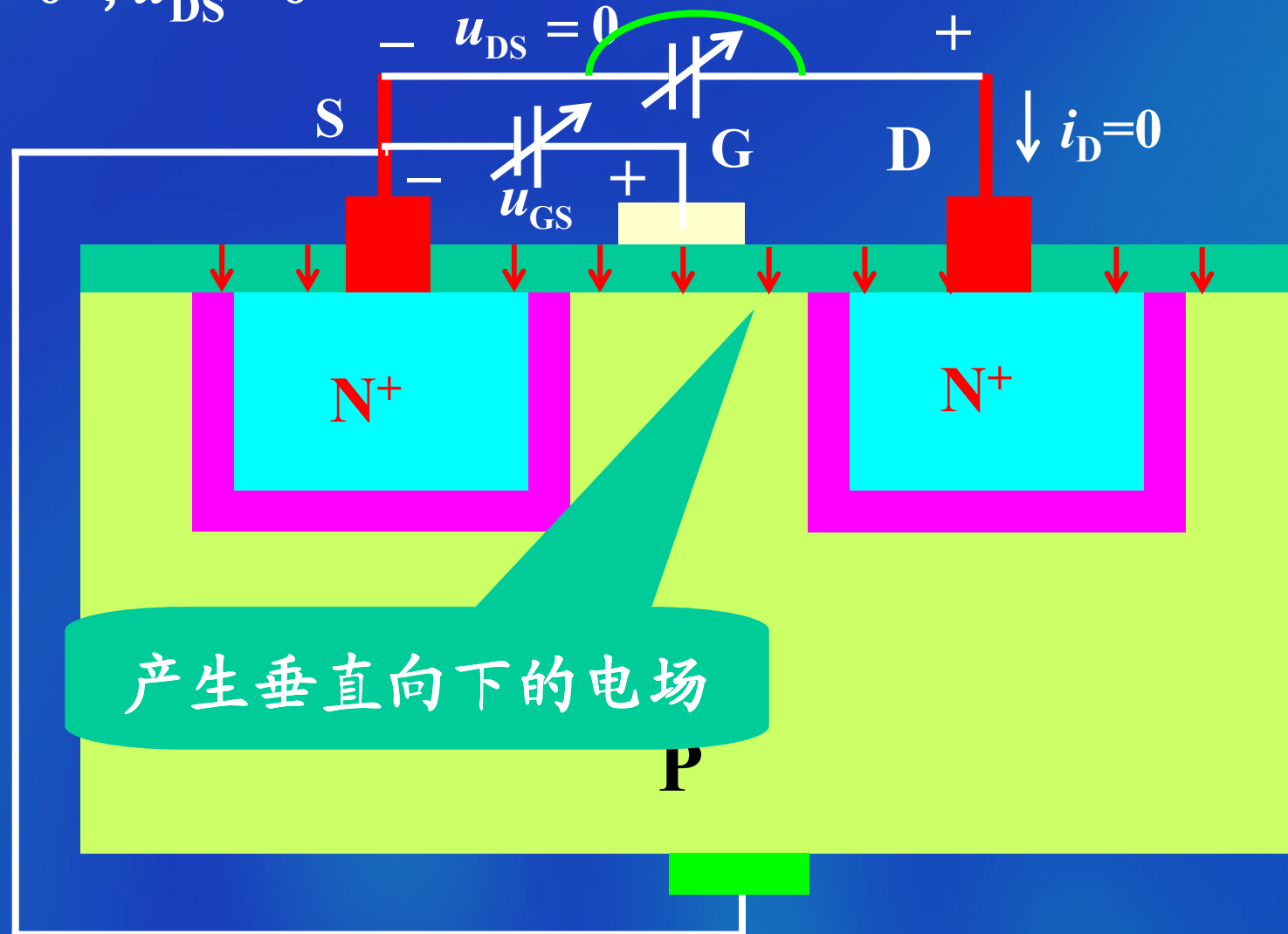
后退

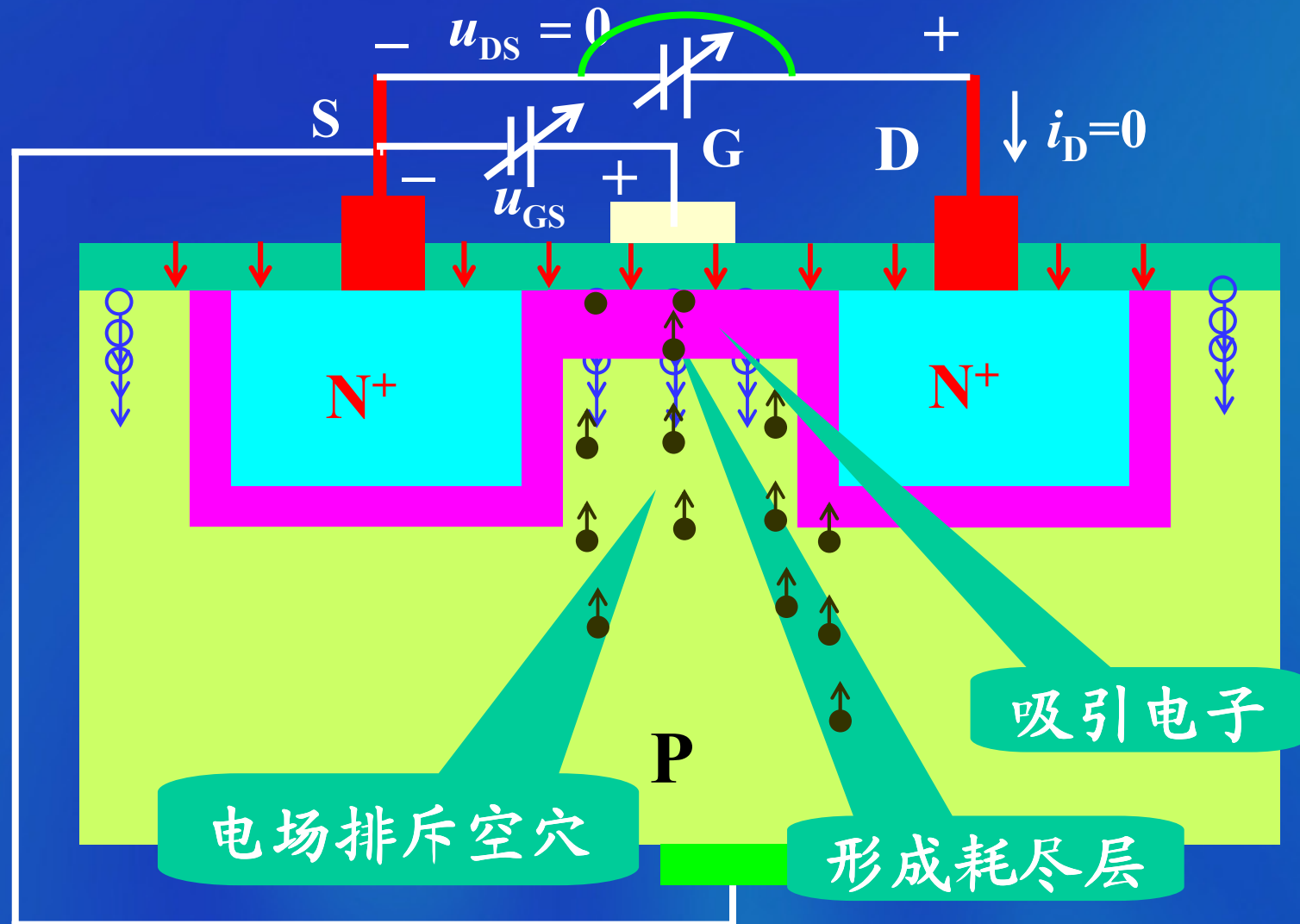
(1)  $u_{GS}=0, u_{DS} \neq 0$



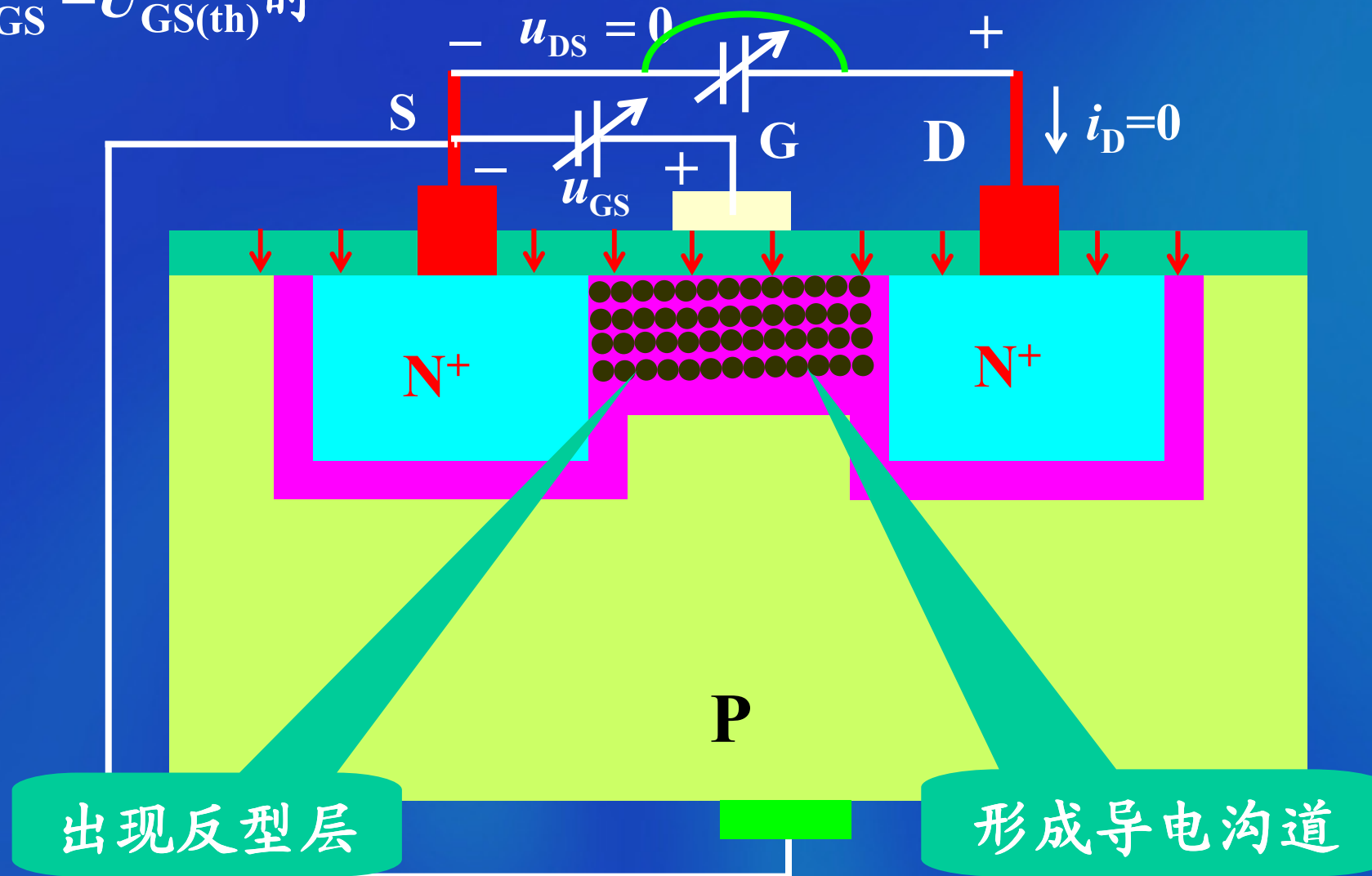
源极和漏极之间始终有一个PN结反偏,  $i_D=0$

2.  $u_{GS} > 0$  ,  $u_{DS} = 0$

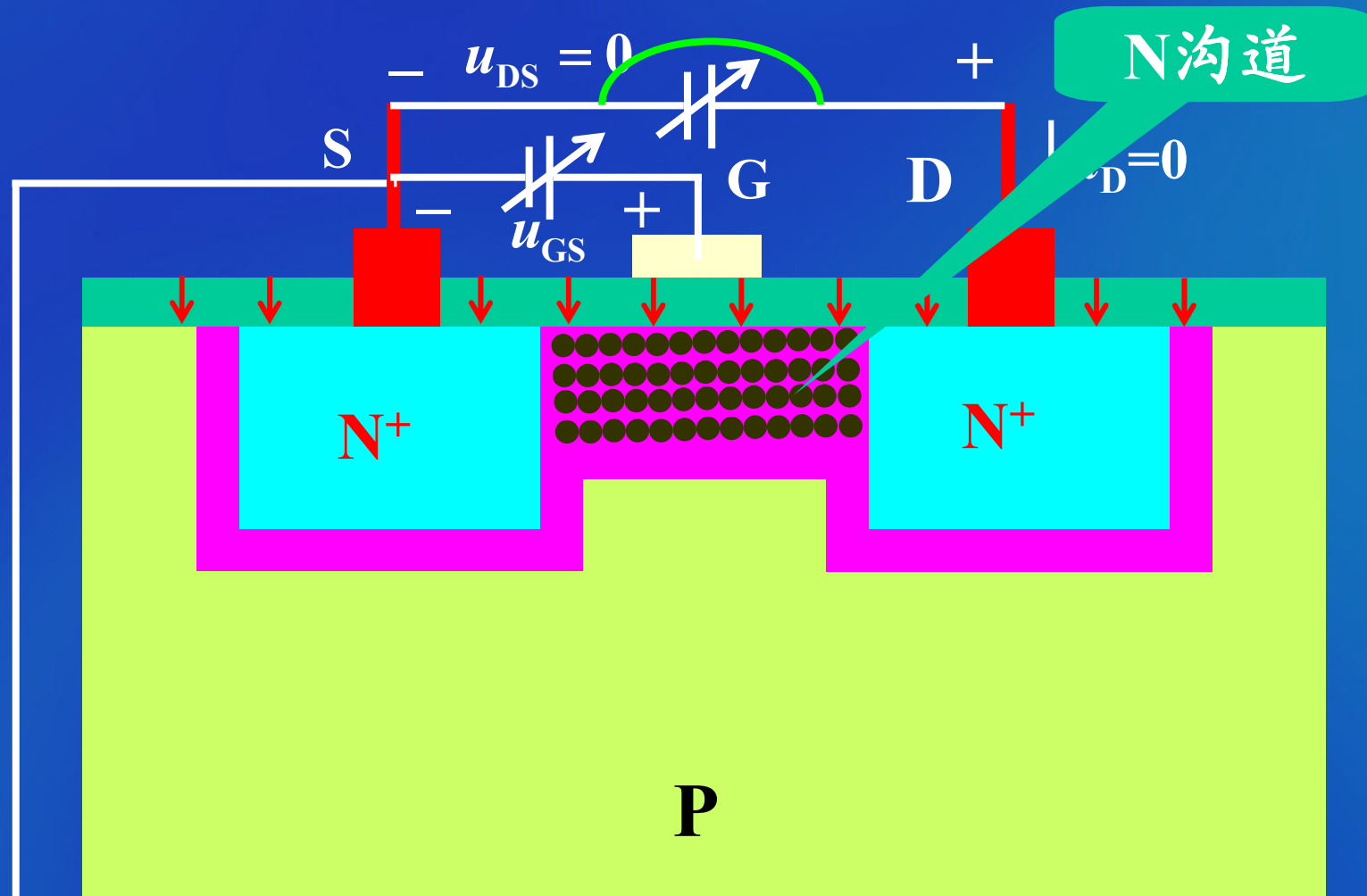




当  $u_{GS} = U_{GS(th)}$  时







$U_{GS(th)}$ —开启电压

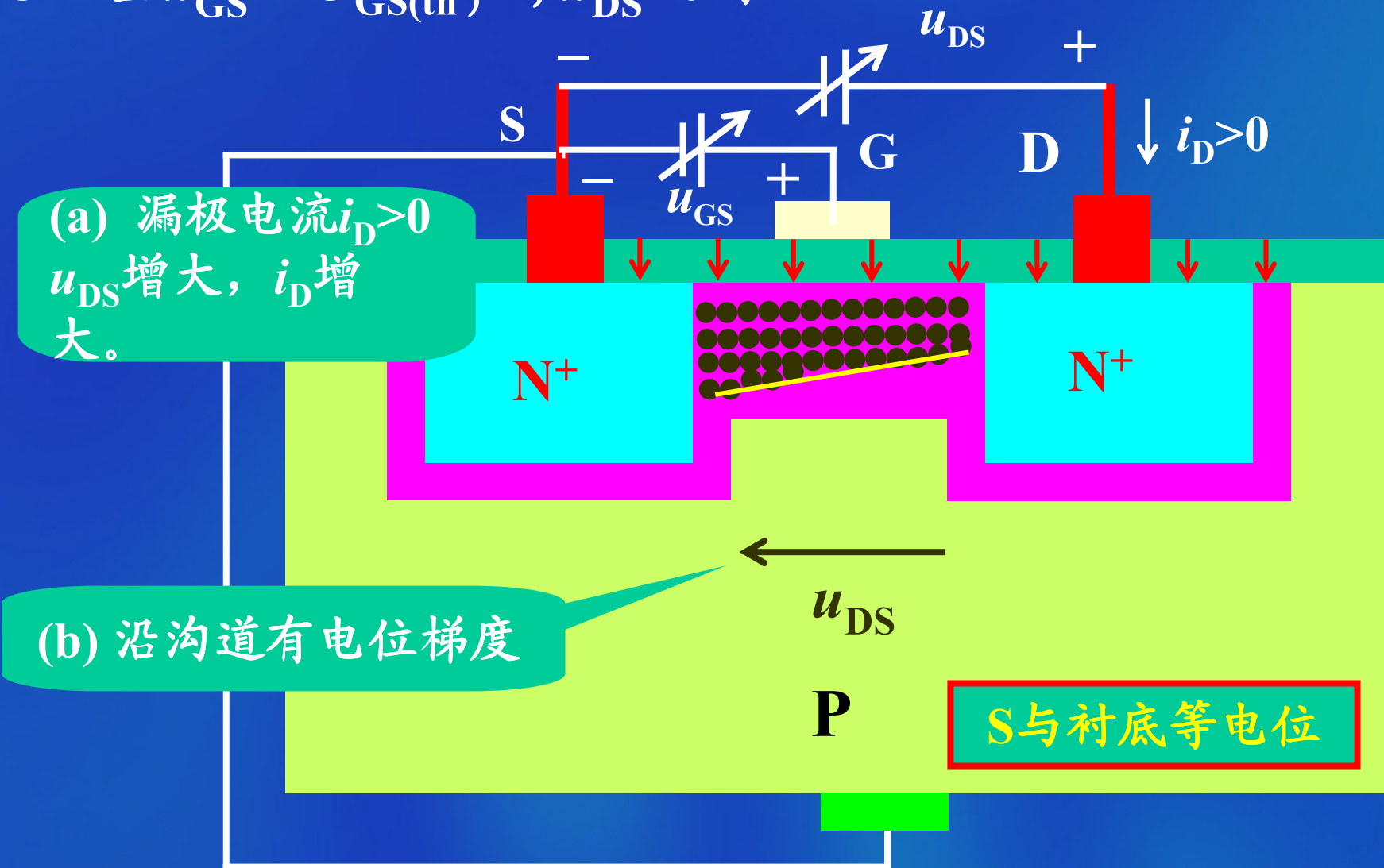
N沟道增强型MOS管，简称NMOS

上页

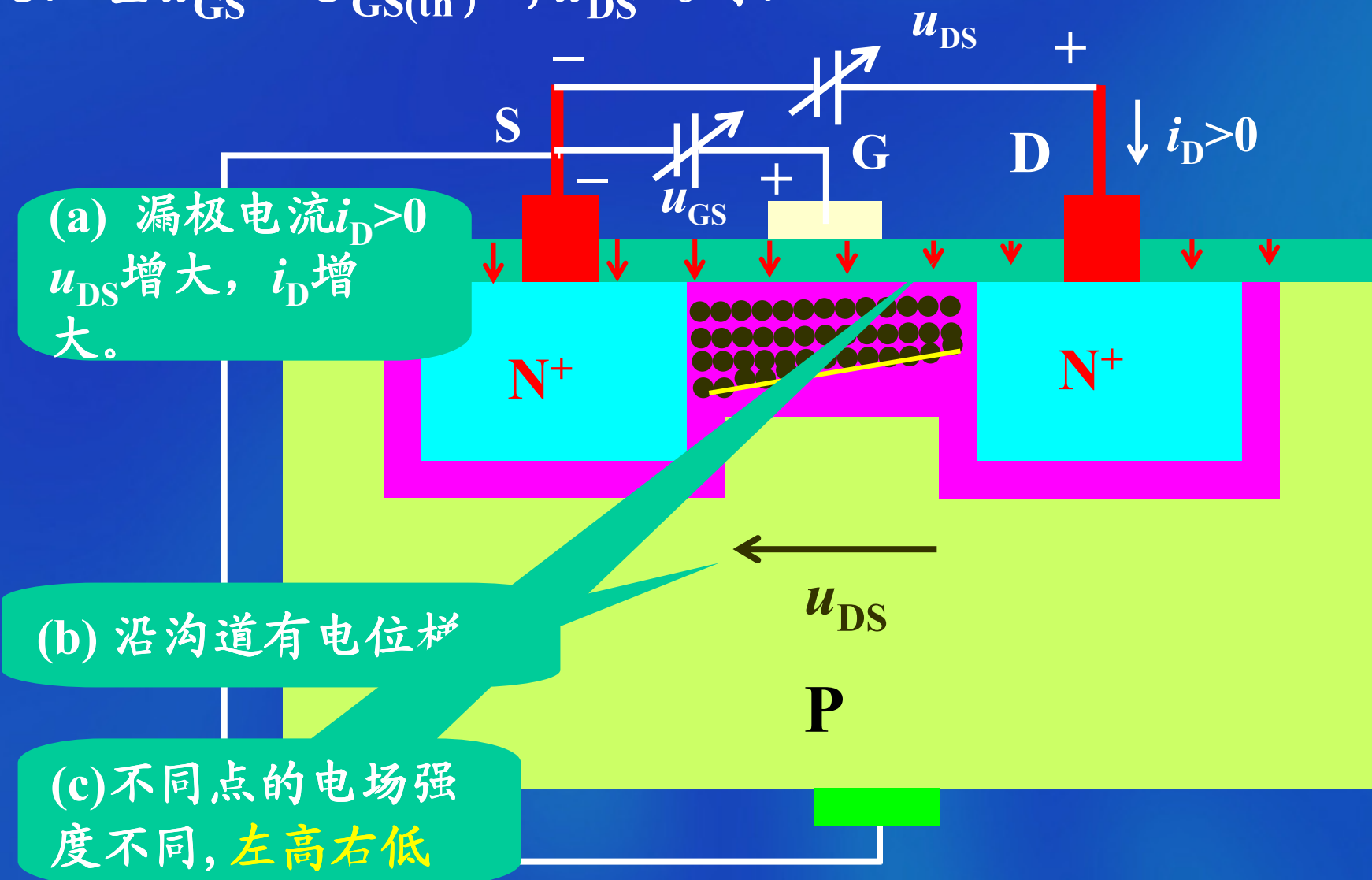
下页

后退

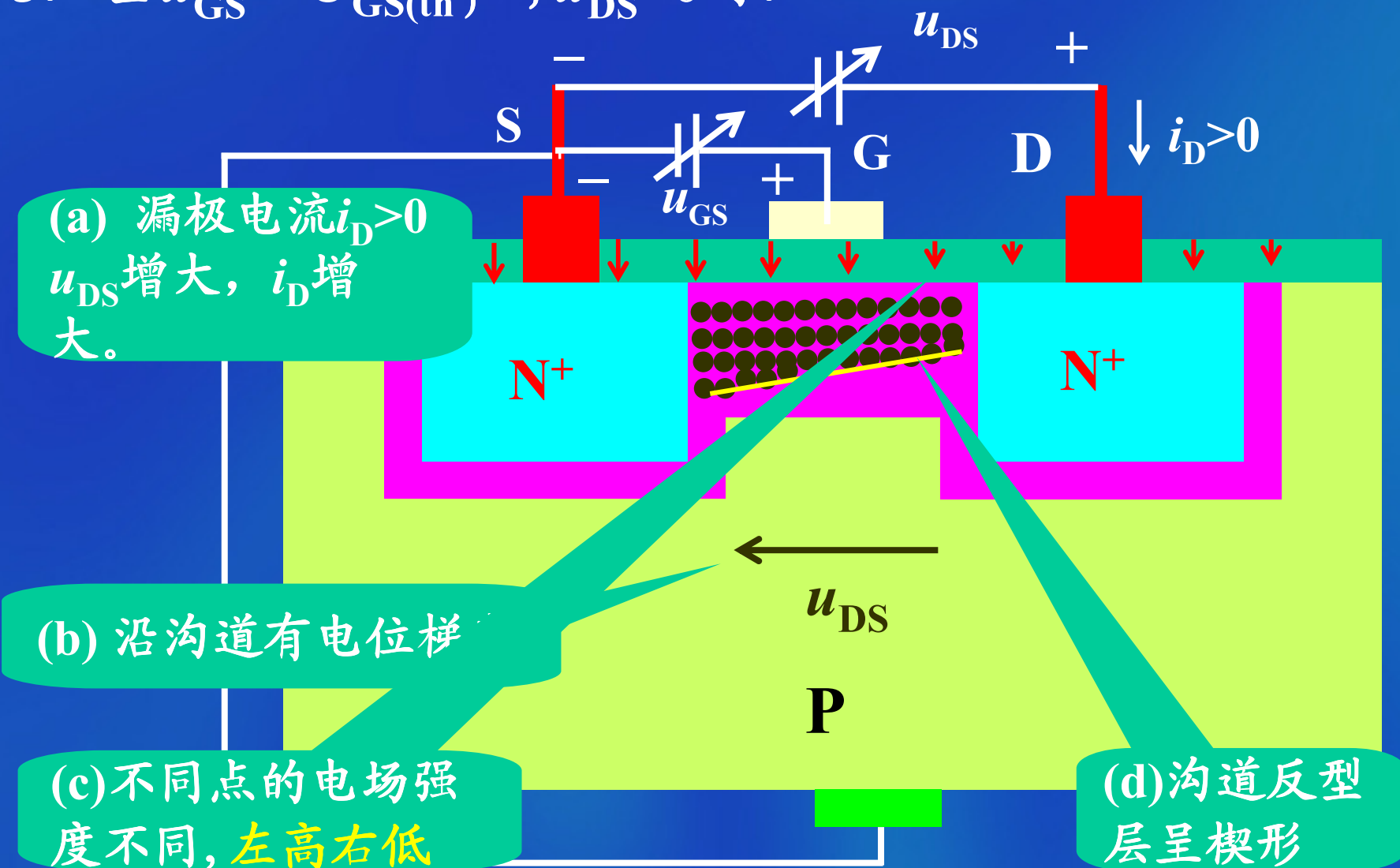
3. 当  $u_{GS} > U_{GS(th)}$  ,  $u_{DS} > 0$  时.



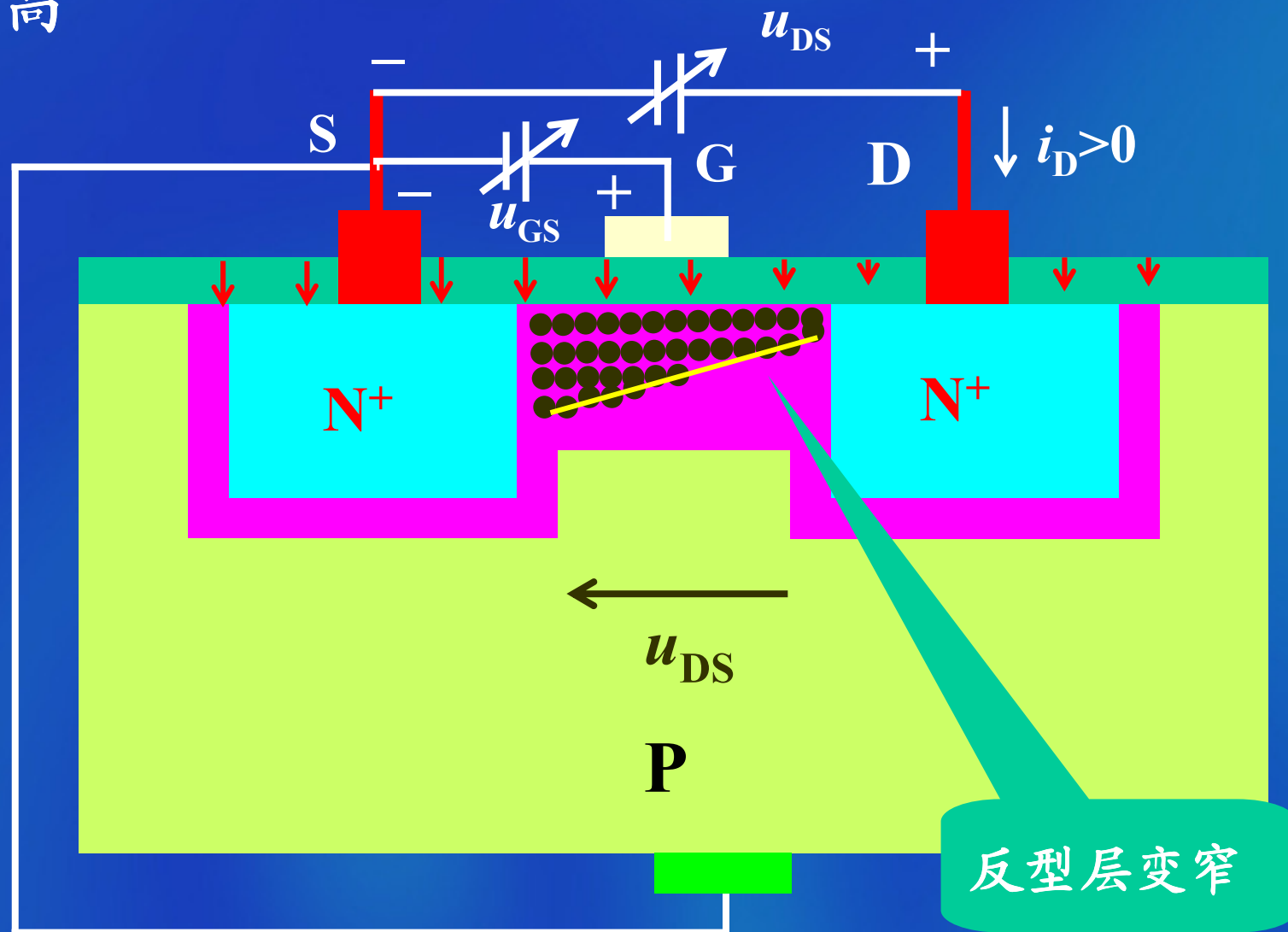
3. 当  $u_{GS} > U_{GS(th)}$  ,  $u_{DS} > 0$  时.



3. 当  $u_{GS} > U_{GS(th)}$  ,  $u_{DS} > 0$  时.

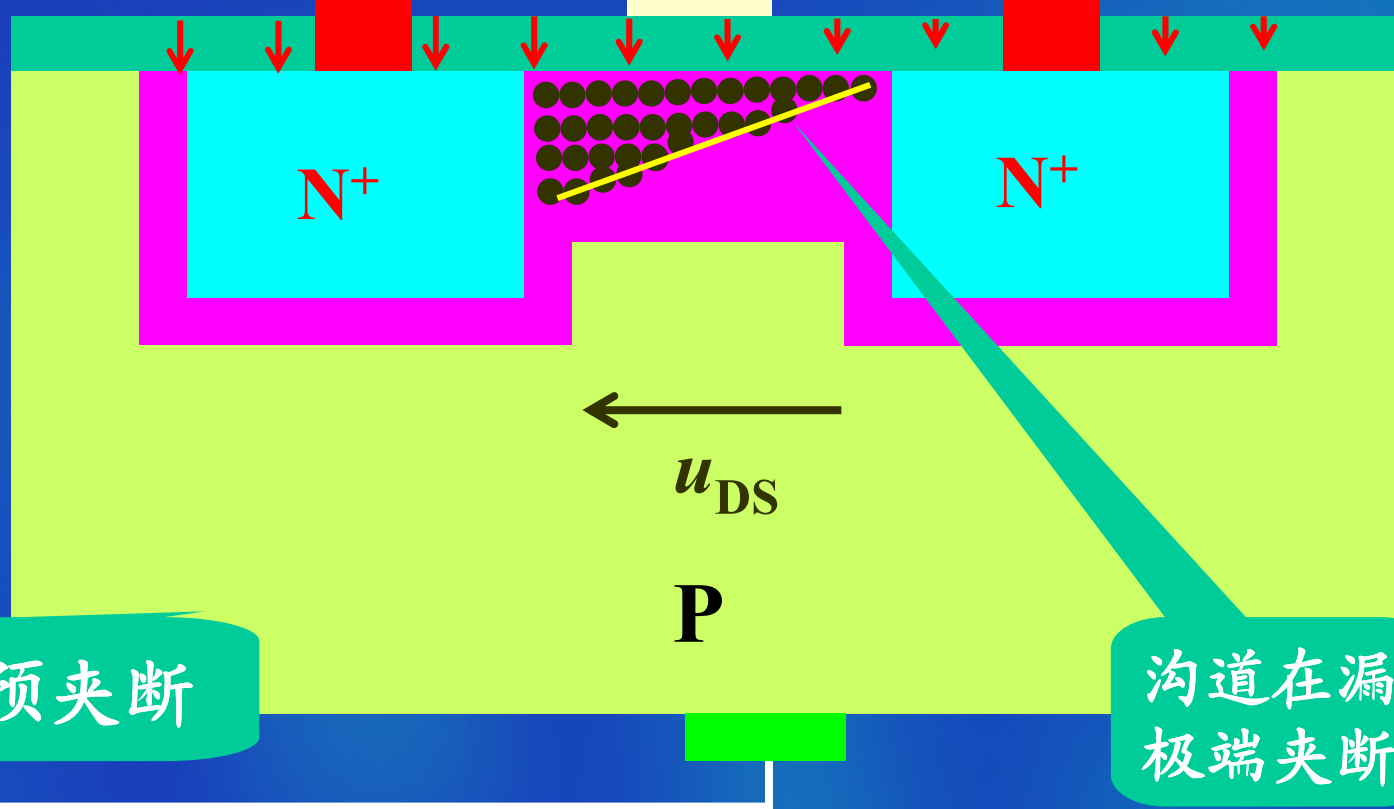
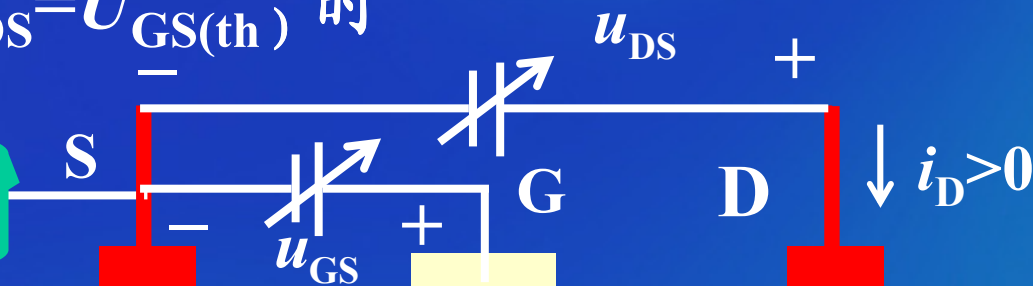


a.  $u_{DS}$  升高



b. 当  $u_{GD} = u_{GS} - u_{DS} = U_{GS(th)}$  时

(a)  $i_D$  达到最大值

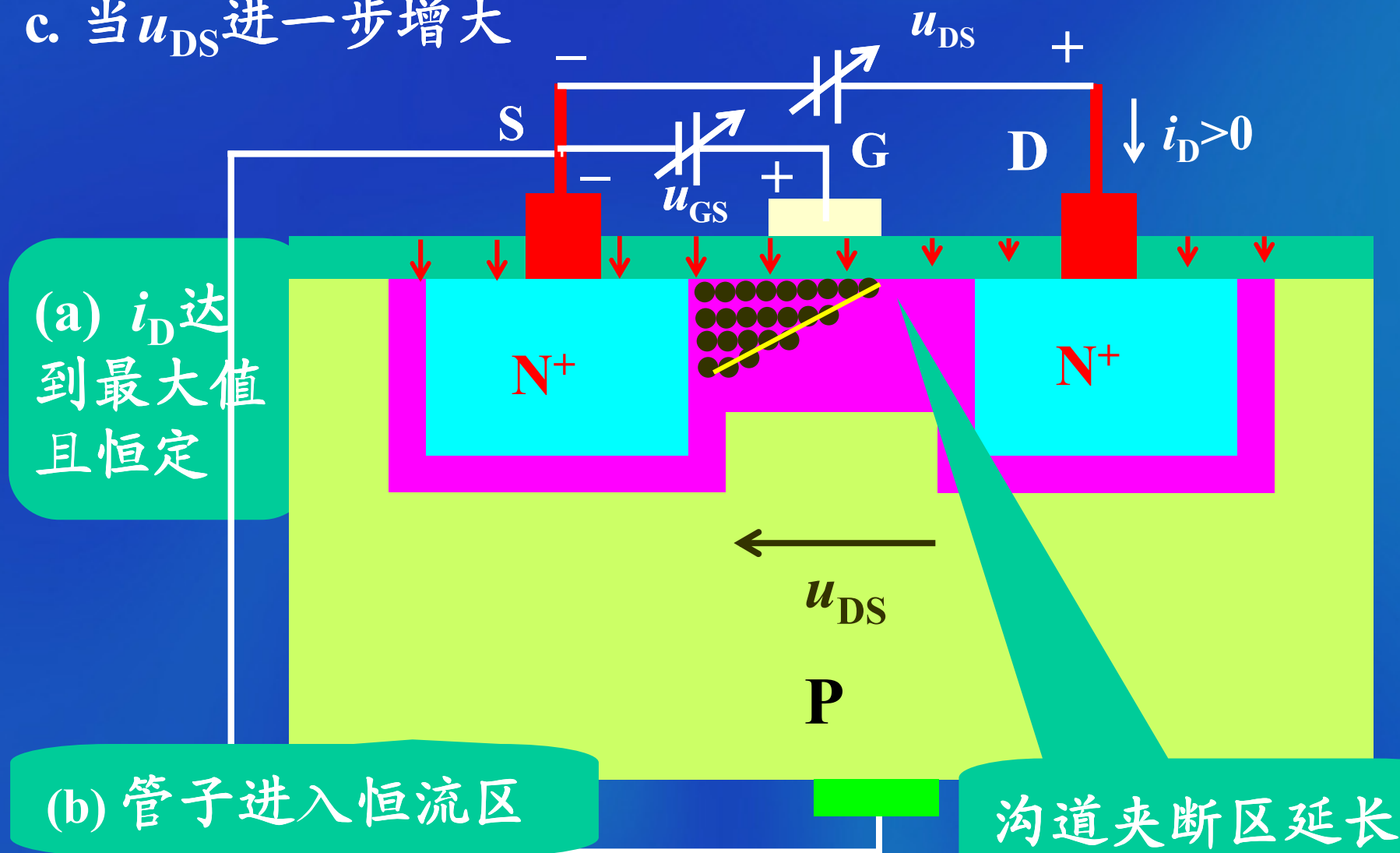


(b) 管子预夹断

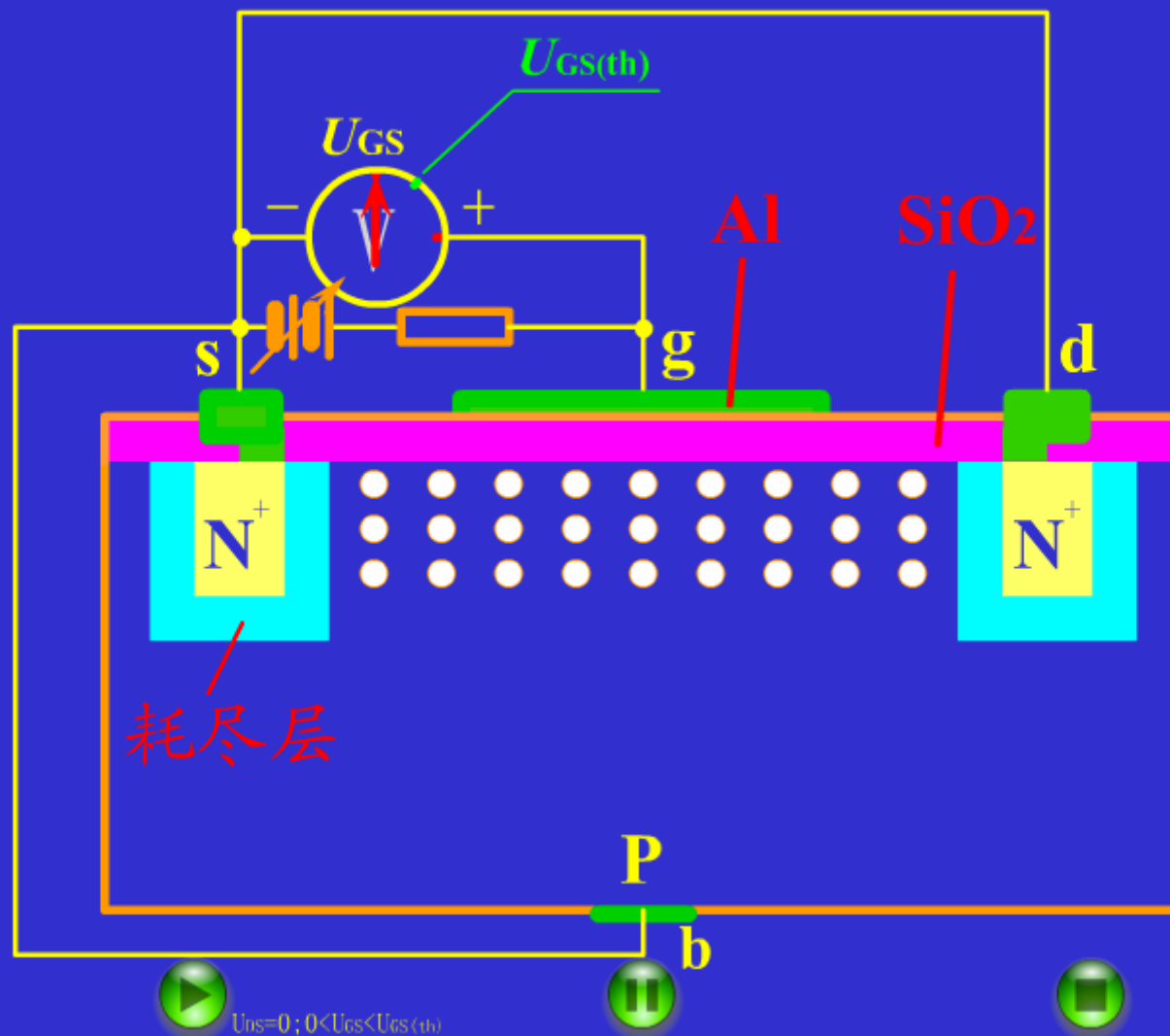
沟道在漏  
极端夹断



c. 当  $u_{DS}$  进一步增大



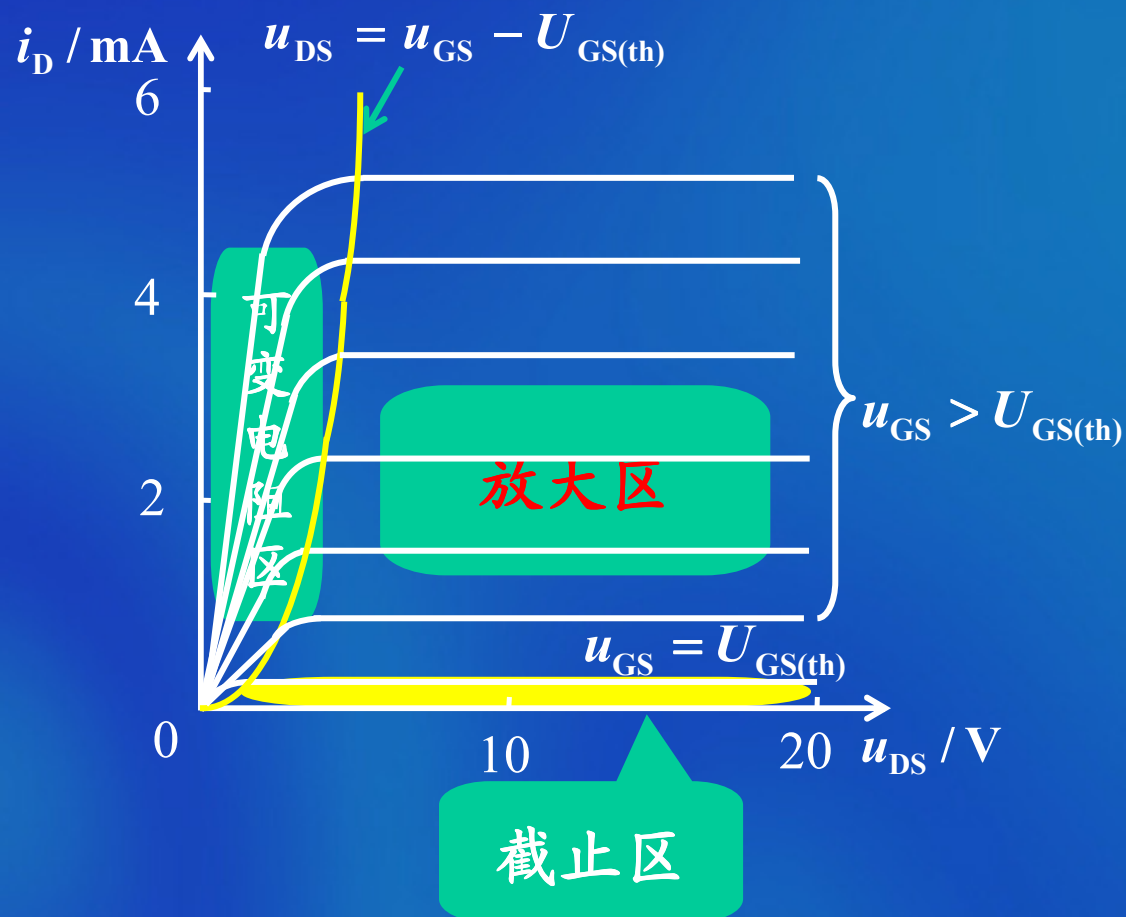
## 增强型NMOS管工作原理动画演示



## 2. 伏安特性与参数

### a. 输出特性

$$i_D = f(u_{DS}) \Big|_{u_{GS}=\text{常数}}$$



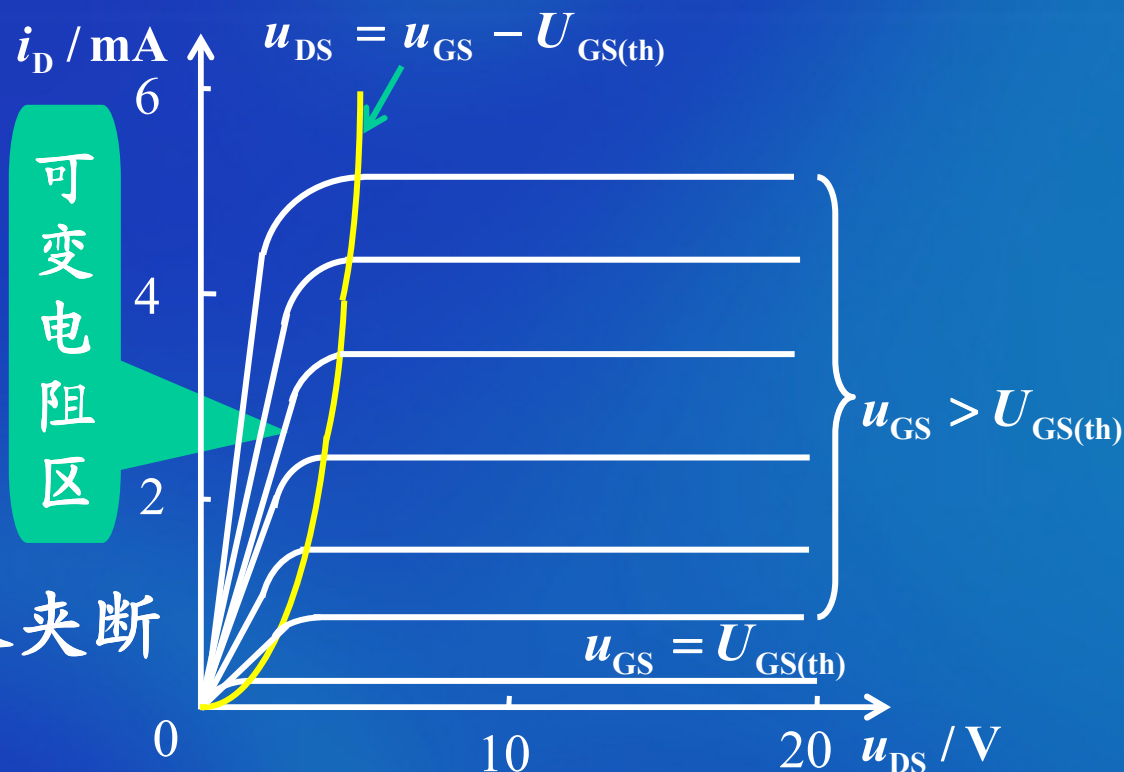
各区的特点:

# (1) 可变电阻区

a.  $u_{DS}$  较小, 沟道尚未夹断

b.  $u_{DS} < u_{GS} - |U_{GS(th)}|$

c. 管子相当于受  $u_{GS}$  控制的压控电阻



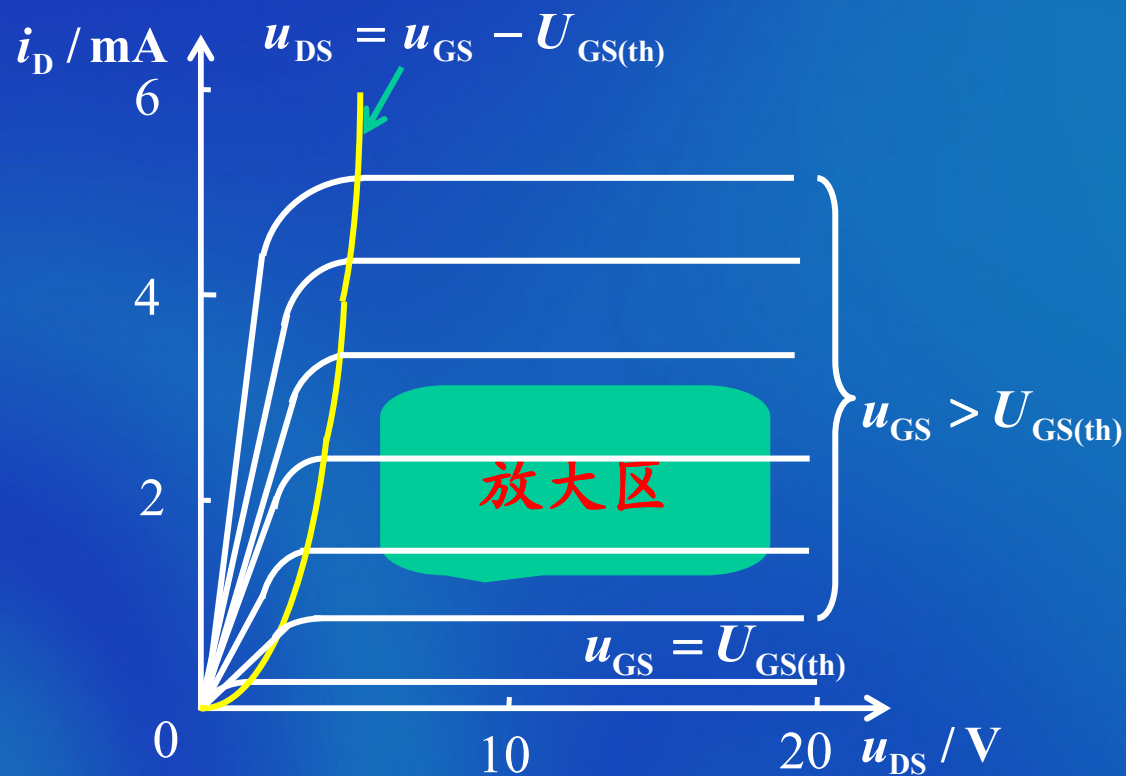
## (2) 放大区 (饱和区、恒流区)

a. 沟道预夹断

b.  $u_{DS} > u_{GS} - |U_{GS(th)}|$

c.  $i_D$  几乎与  $u_{DS}$  无关

d.  $i_D$  只受  $u_{GS}$  的控制

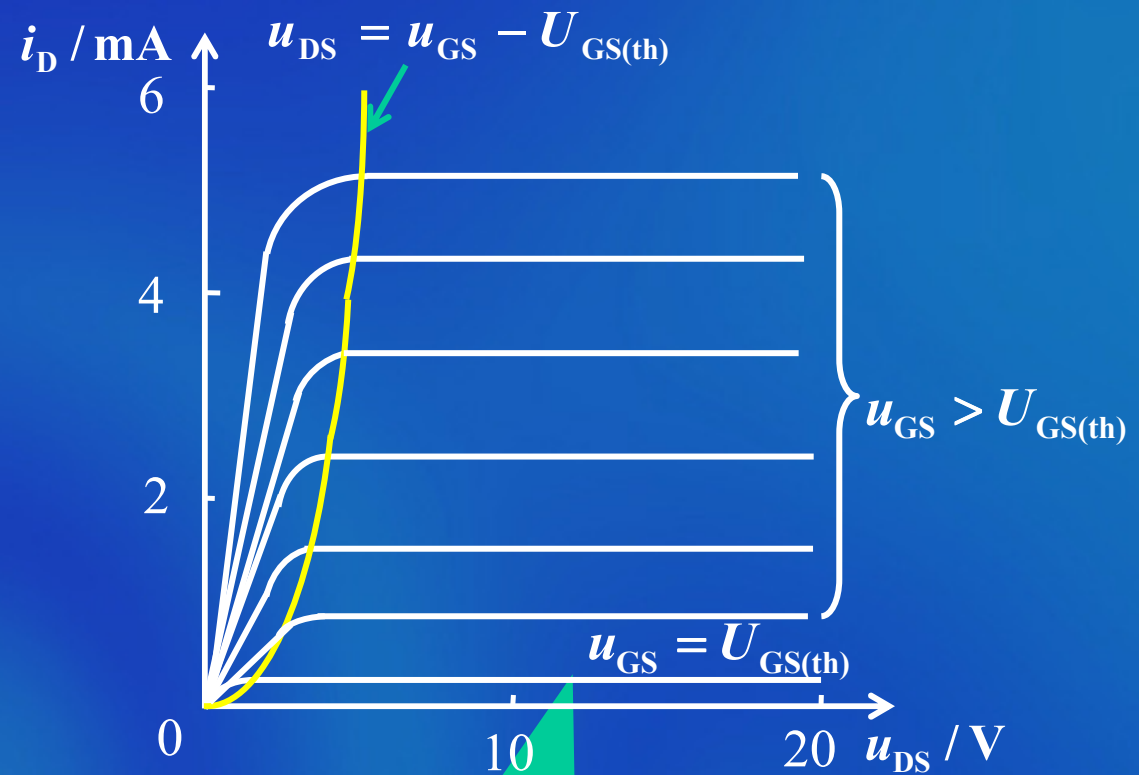


### (3) 截止区

a.  $u_{GS} < U_{GS(th)}$

b. 沟道未形成

c.  $i_D \approx 0$

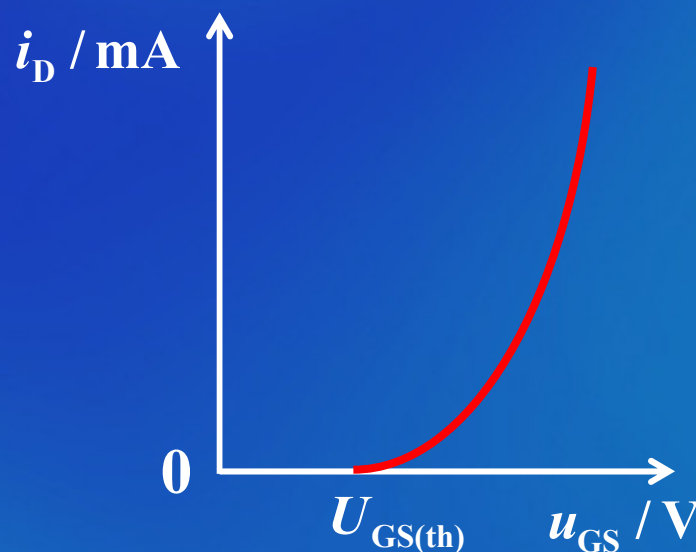




## b. 转移特性曲线

$$i_D = f(u_{GS}) \Big|_{u_{DS}=\text{常数}}$$

管子工作于放大区时函数表达式



转移特性曲线

$$i_D = K[u_{GS} - U_{GS(th)}]^2$$

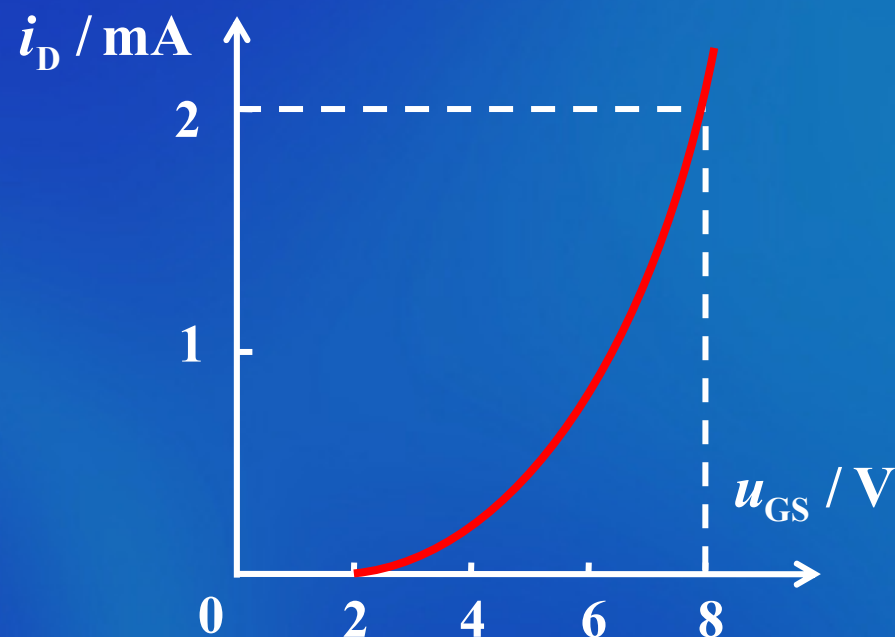
式中,  $K$ 为与管子有关的参数

例 图示为某一增强型NMOS管的转移特性。试求其相应的常数 $K$ 值。

解 由图可知，该管的

$$U_{GS(th)} = 2\text{ V}$$

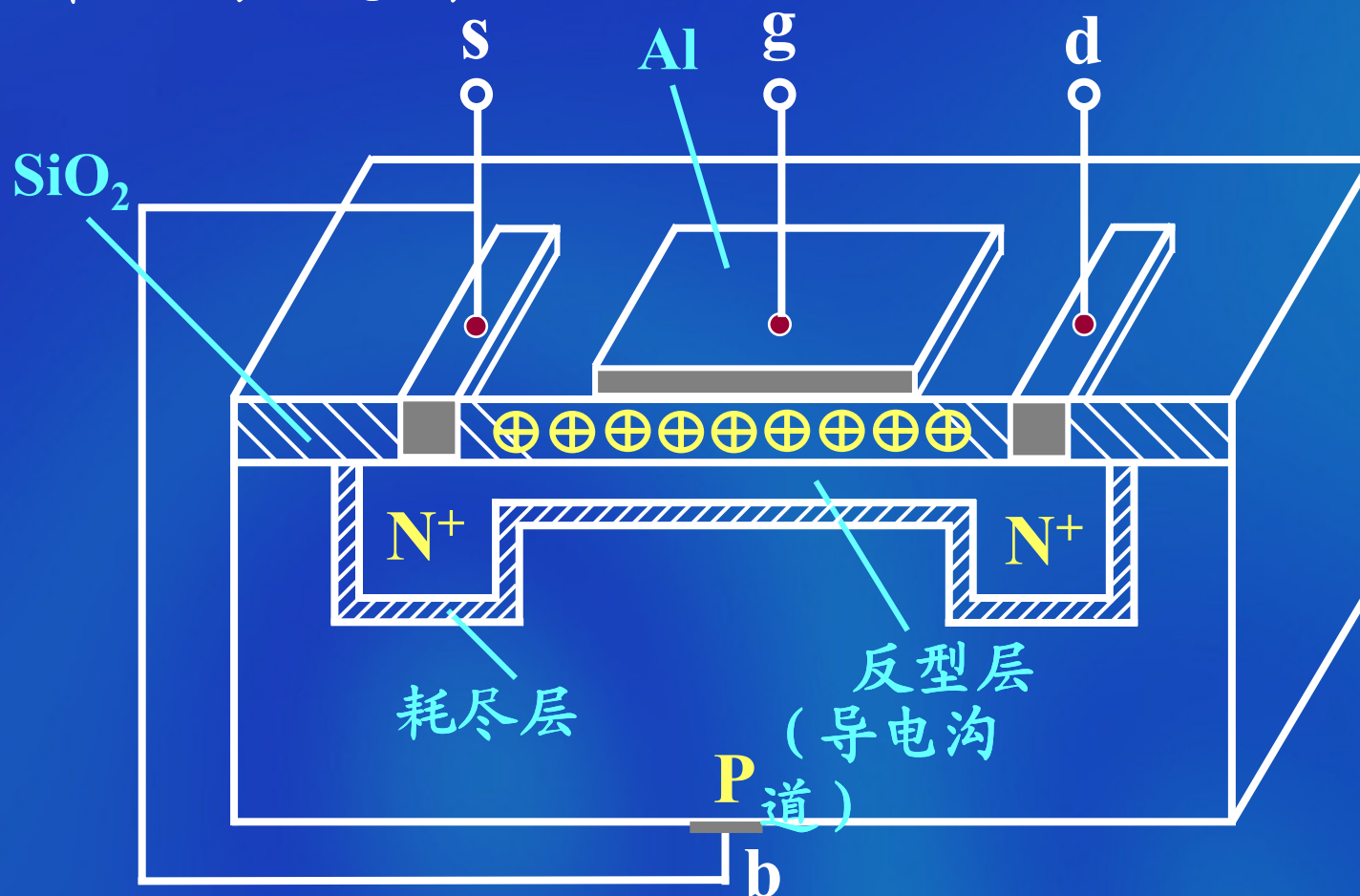
当  $U_{GS} = 8\text{ V}$  时， $I_D = 2\text{ mA}$



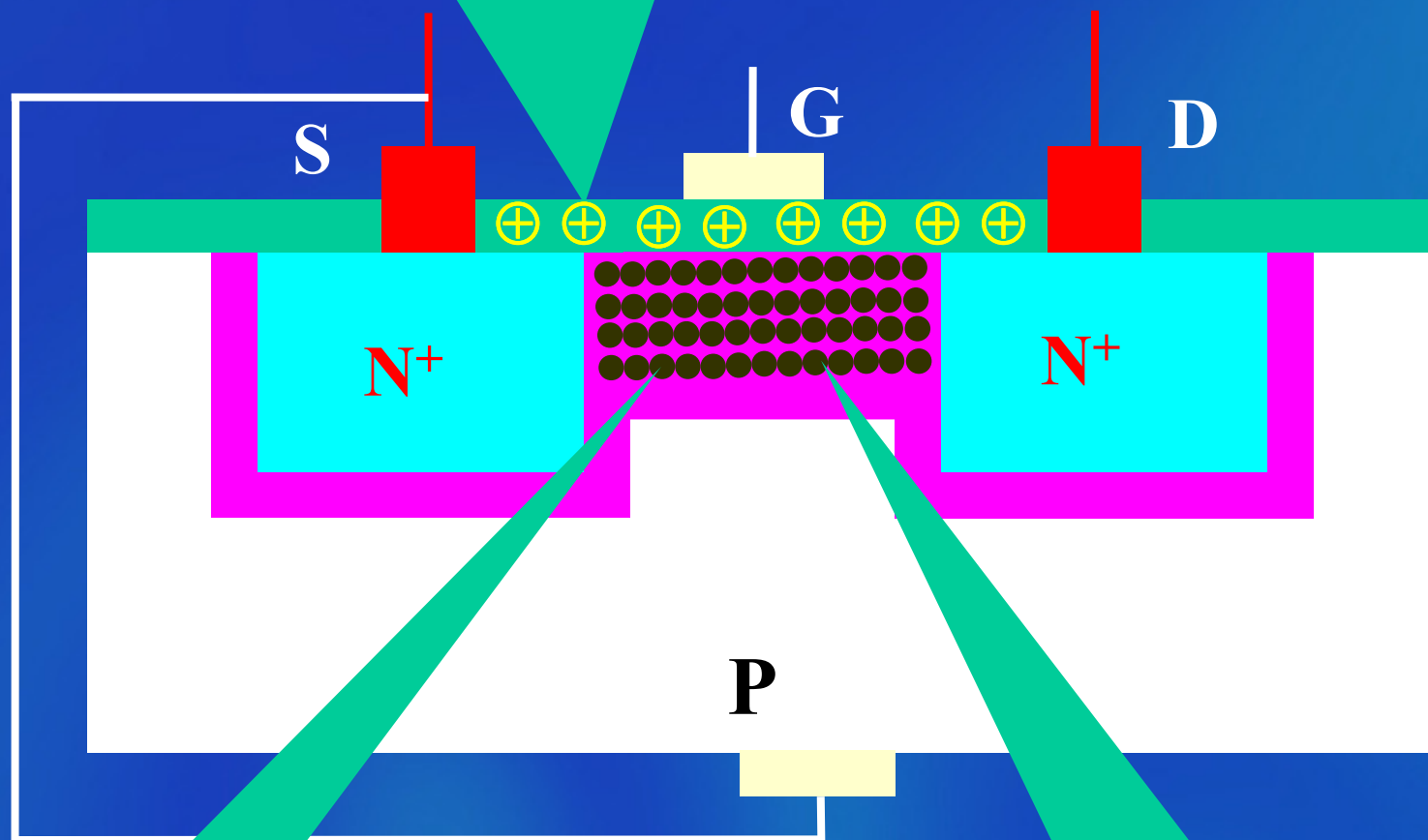
故 
$$K = \frac{I_D}{[U_{GS} - U_{GS(th)}]^2} = \frac{2}{[8 - 2]^2} = 0.056\text{ mA/V}^2$$

## 3.2.2 耗尽型MOS管

### 1. MOS管结构示意图



绝缘层中渗入了正离子



出现反型层

形成导电沟道

上页

下页

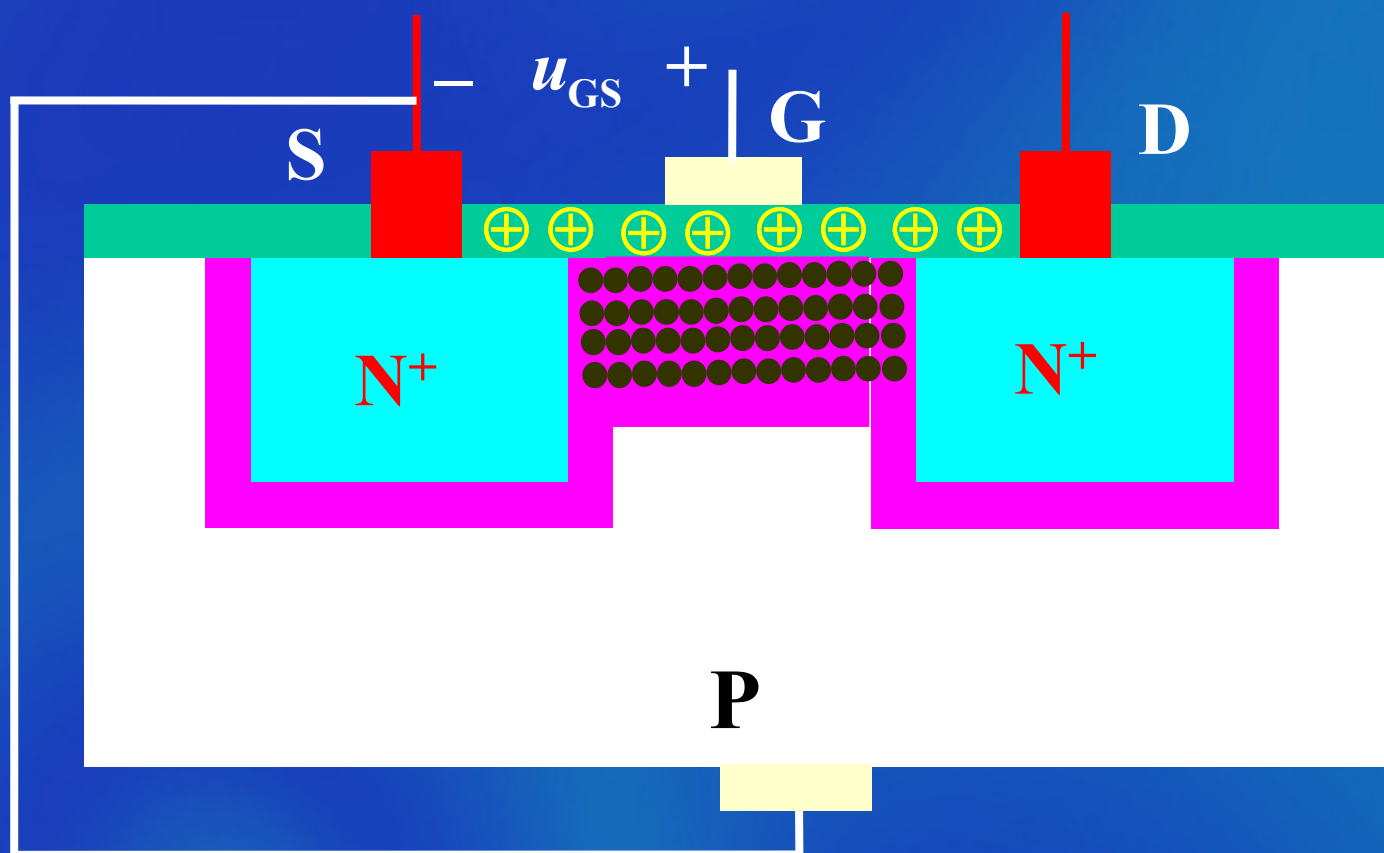
后退

a.  $u_{GS} > 0$

导电沟道增宽

b.  $u_{GS} < 0$

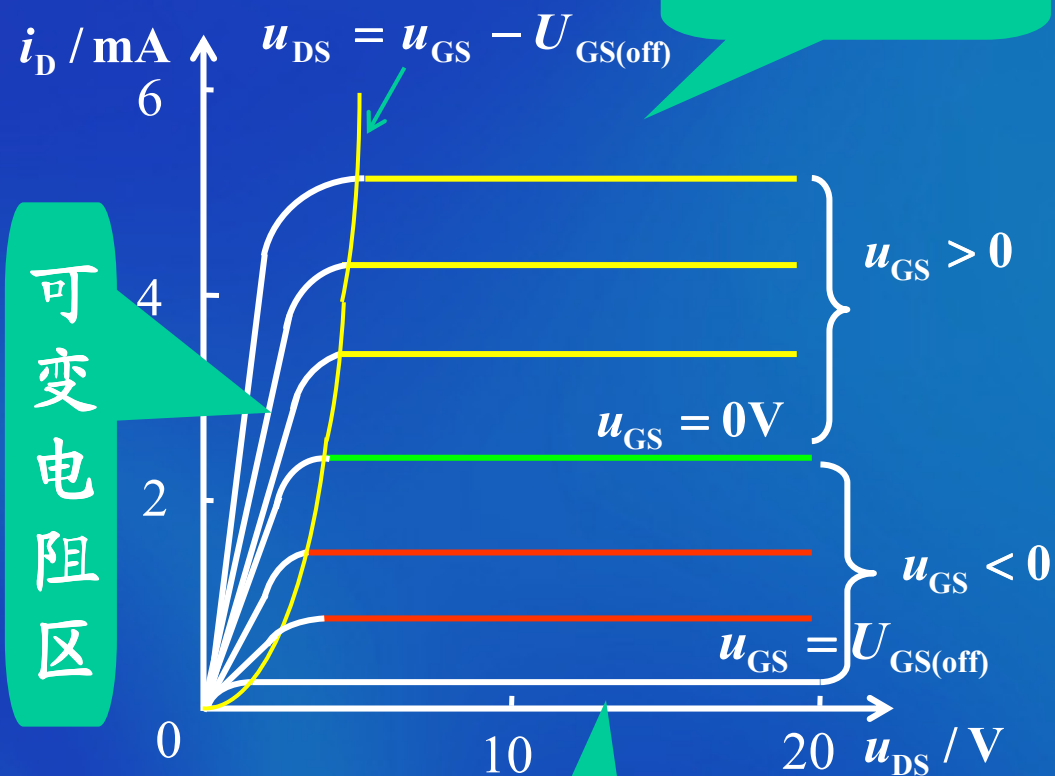
导电沟道变窄



耗尽型MOS管可以在 $u_{GS}$ 为正、为负或为零下工作。

## 2. 伏安特性与参数

### a. 输出特性曲线



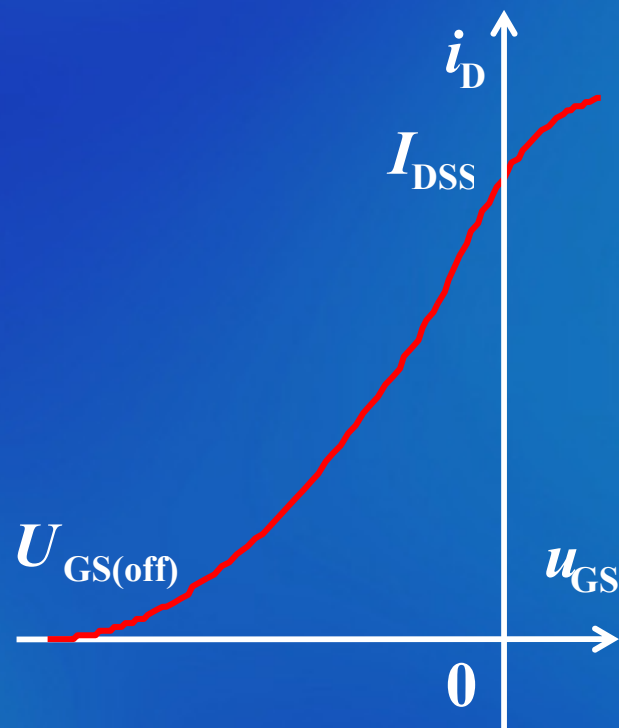


## b. 转移特性曲线

工作于放大区时

函数表达式

$$i_D = I_{DSS} \left[ 1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}} \right]^2$$



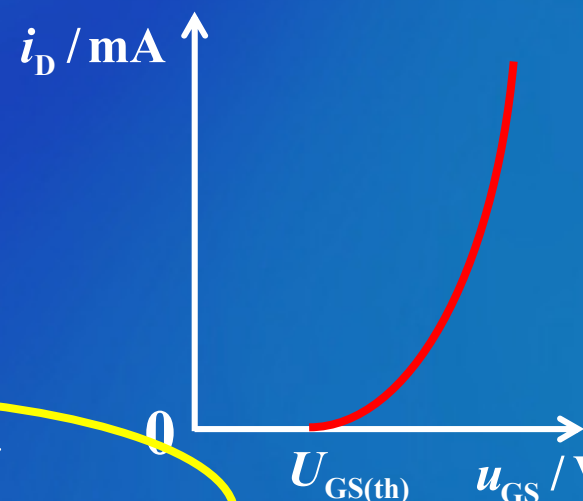
转移特性曲线

## 增强型与耗尽型管子的区别:

**增强型:** 当  $|u_{GS}| < |U_{GS(th)}|$  时,

$$i_D = 0$$

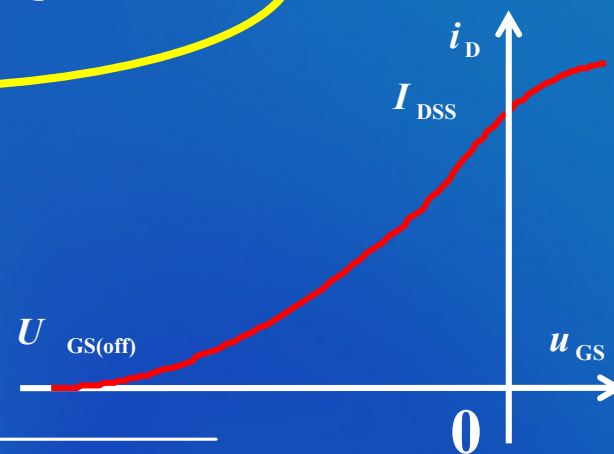
$$i_D = K[u_{GS} - U_{GS(th)}]^2 \quad g_m = 2\sqrt{KI_{DQ}}$$



**耗尽型:** 当  $|u_{GS}| > |U_{GS(off)}|$  时,

$$i_D = 0$$

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}}\right)^2 \quad g_m = -\frac{2}{U_{GS(off)}} \sqrt{I_{DSS} I_{DQ}}$$



## 耗尽型MOSFET和JFET（结型）比较

相同点：★  $U_{GS} = 0$  时，有沟道

★ 管子工作在放大区有

$$i_D = I_{DSS} \left[ 1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}} \right]^2$$

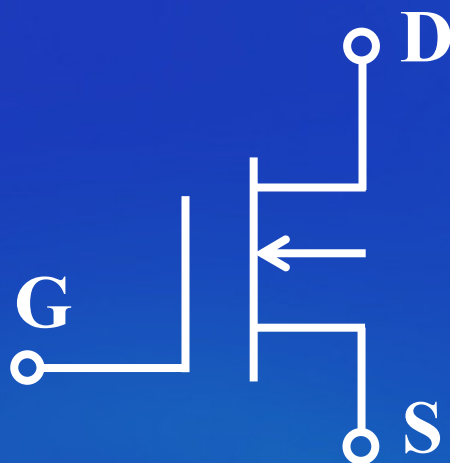
不同点：耗尽型：  $U_{GS}$  可正可负可为零

结型：  $U_{GS} \leq 0$

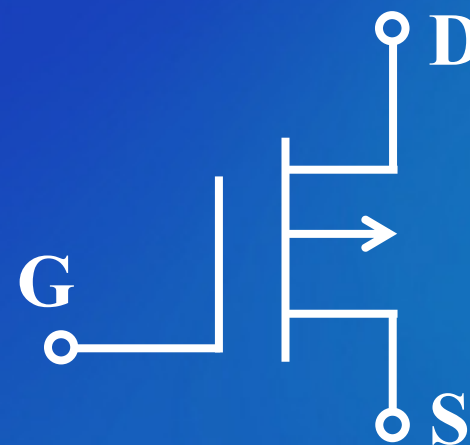
# MOSFET符号

耗尽型

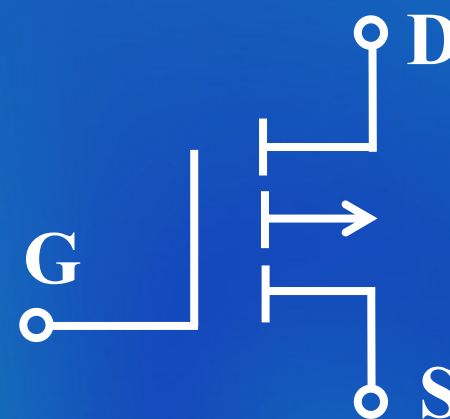
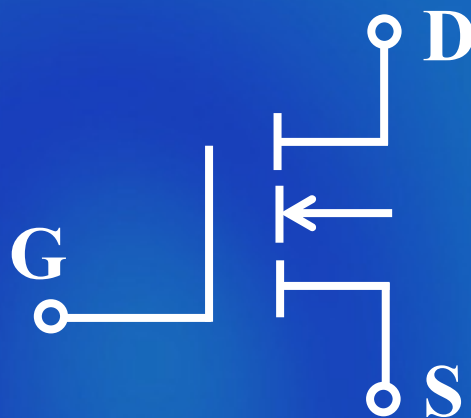
N沟道



P沟道



增强型



## JFET符号

N沟道



P沟道



## 场效应管的特点（与双极型三极管比较）

（1）场效应管是一种电压控制器件，即通过 $u_{GS}$ 来控制 $i_D$ ；

双极型三极管是一种电流控制器件，即通过 $i_B$ 来控制 $i_C$

（2）场效应管的输入端电流几乎为零，输入电阻非常高。

双极型三极管的发射结始终处于正向偏置，有一定的输入电流，基极与发射极间的输入电阻较小。



(3) 场效应管是利用多数（一种极性）载流子导电的。

在双极型三极管中二种极性的载流子（电子和空穴）同时参与了导电。

(4) 场效应管具有噪声小、受辐射的影响小、热稳定性较好，且存在零温度系数工作点。

(5) 场效应管的结构对称，有时（除了源极和衬底在制造时已连在一起的MOS管）漏极和源极可以互换使用，且各项指标基本不受影响，使用方便、灵活。

(6) 场效应管制造工艺简单，有利于大规模集成。

每个MOS场效应管在硅片上所占的面积只有双极性三极管5%。

(7) 场效应管的跨导小，当组成放大电路时，在相同的负载电阻下，电压放大倍数比双极性三极管低。

(8) 由于MOS管的输入电阻高，由外界感应产生的电荷不易泄露，而栅极上的绝缘层又很薄，这将在栅极上产生很高的电场强度，以致引起绝缘层的击穿而损坏管子。

## 思考题

1. 试比较三极管和场效应管的异同点。
2. 绝缘栅场效应管的栅极为什么不能开路？

## 3.3 场效应管放大电路

### 3.3.1 场效应管的偏置及其电路的静态分析

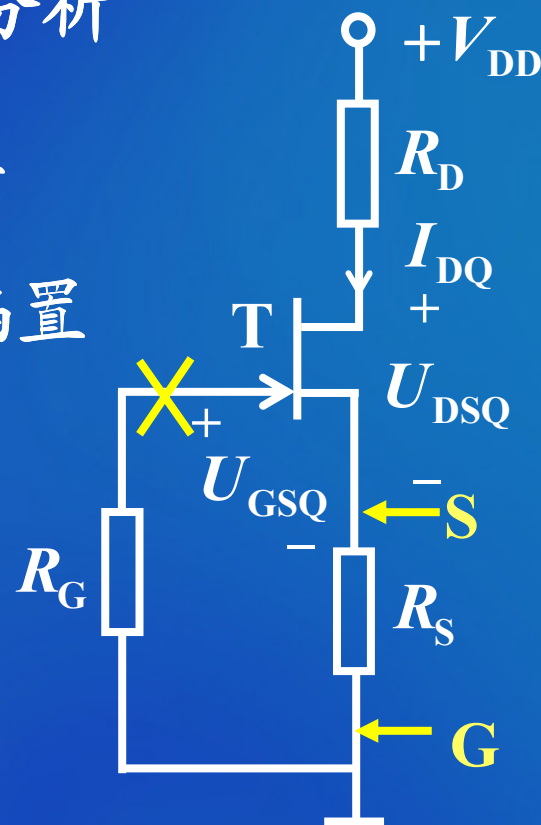
场效应管常用的偏置方式

- 自给偏压
- 分压式偏置

#### 1. 自给偏压

##### (1) 电路

##### (2) 自给偏压原理



$$I_{DQ} \rightarrow U_{SQ} = I_{DQ} R_S \rightarrow U_{GSQ} = -I_{DQ} R_S$$

### (3) 静态分析 方法：估算法

输入回路方程

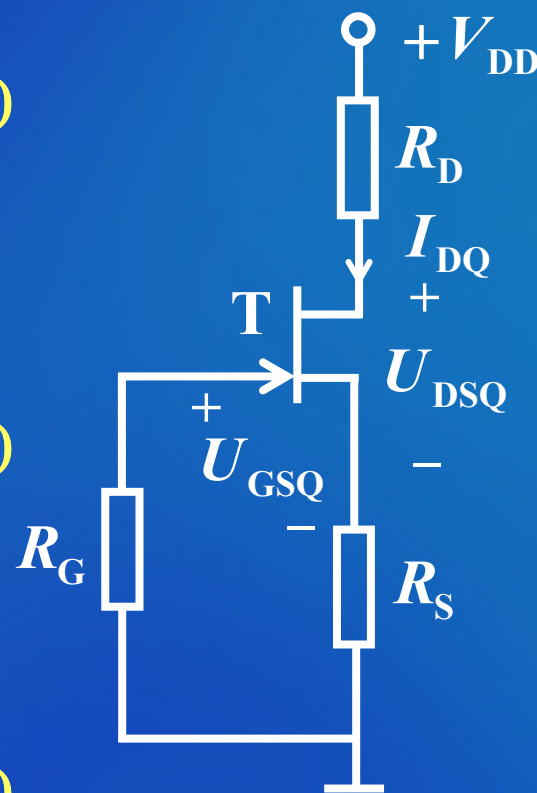
$$U_{GSQ} = -I_{DQ}R_S \quad (1)$$

当管子工作于放大区时

$$I_{DQ} = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(off)}}\right)^2 \quad (2)$$

两式联立可求得 $I_{DQ}$ 和 $U_{GSQ}$

由此可得  $U_{DSQ} = V_{DD} - (R_D + R_S)I_{DQ} \quad (3)$





例 在图示电路其中,  $V_{DD}=18V$ 、 $R_D=3k\Omega$ 、 $R_S=1k\Omega$ 、 $R_G=1M\Omega$ , FET的 $I_{DSS}=7mA$ 、 $U_{GS(off)}=-8V$ 。试求 $U_{GSQ}$ 、 $I_{DQ}$ 和 $U_{DSQ}$ 。

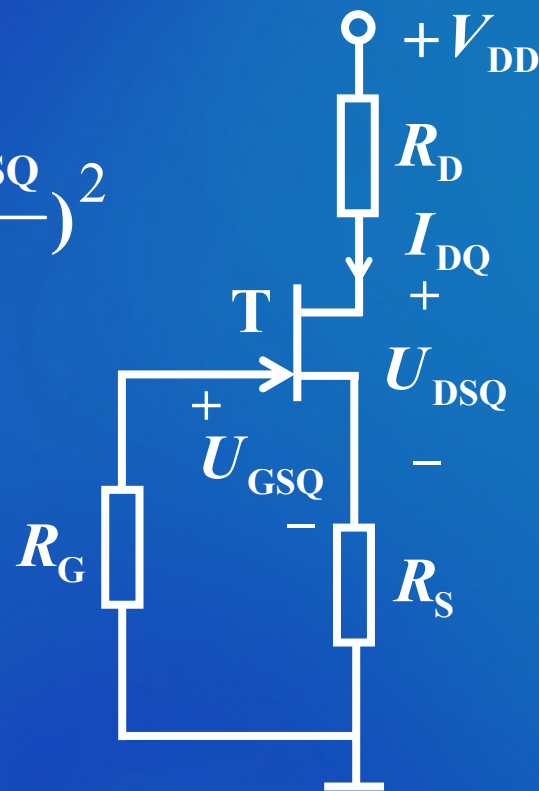
解 由 
$$I_{DQ} = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(off)}}\right)^2 = 7 \times \left(1 + \frac{U_{GSQ}}{8}\right)^2 \quad (1)$$

$$U_{GSQ} = -I_{DQ}R_S = -I_{DQ} \times 1 \quad (2)$$

得  $I_{DQ} = 2.9 \text{ mA}$

$$U_{GSQ} = -2.9V$$

$$U_{DSQ} = V_{DD} - (R_D + R_S)I_{DQ} = 18 - 2.9 \times (3 + 1) = 6.4V \quad (3)$$





## 2. 分压式偏置

### (1) 电路

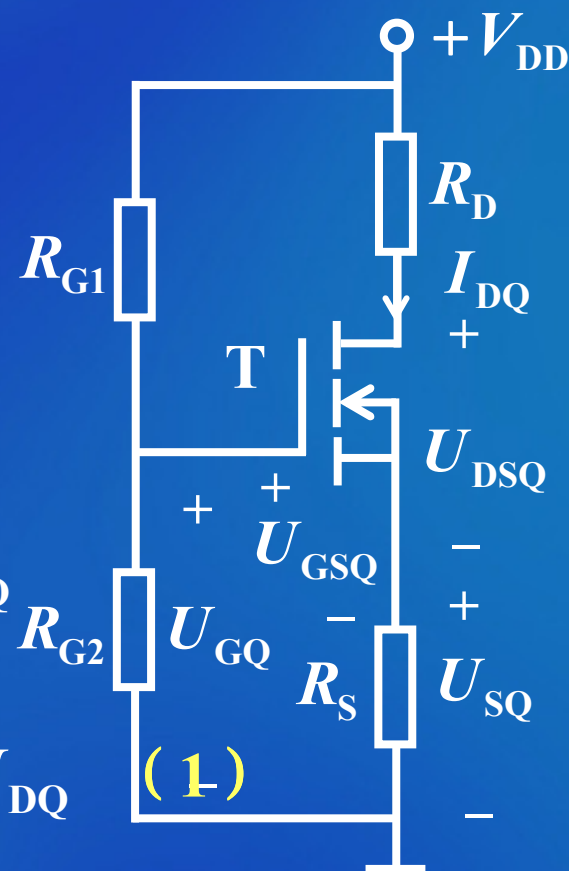
### (2) 静态分析

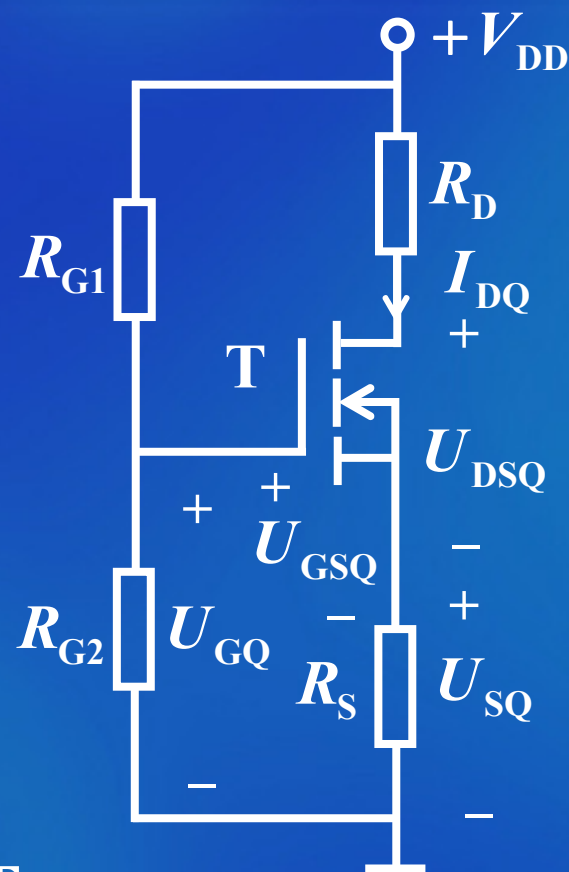
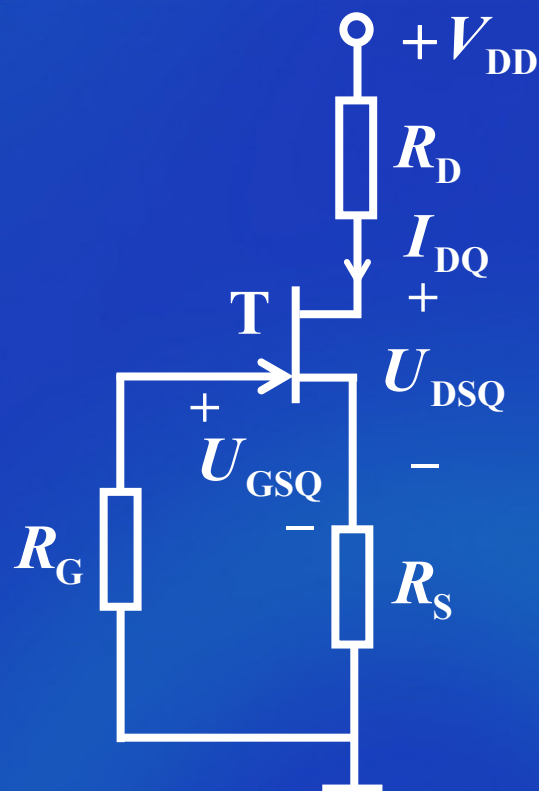
图中 
$$U_{GQ} = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD} \quad U_{SQ} = R_S I_{DQ}$$

$$U_{GSQ} = U_{GQ} - U_{SQ} = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD} - R_S I_{DQ} \quad (1)$$

$$I_{DQ} = K[U_{GSQ} - U_{GS(th)}]^2 \quad (2)$$

故 
$$U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ}(R_D + R_S) \quad (3)$$





两种偏置电路适用的FET:

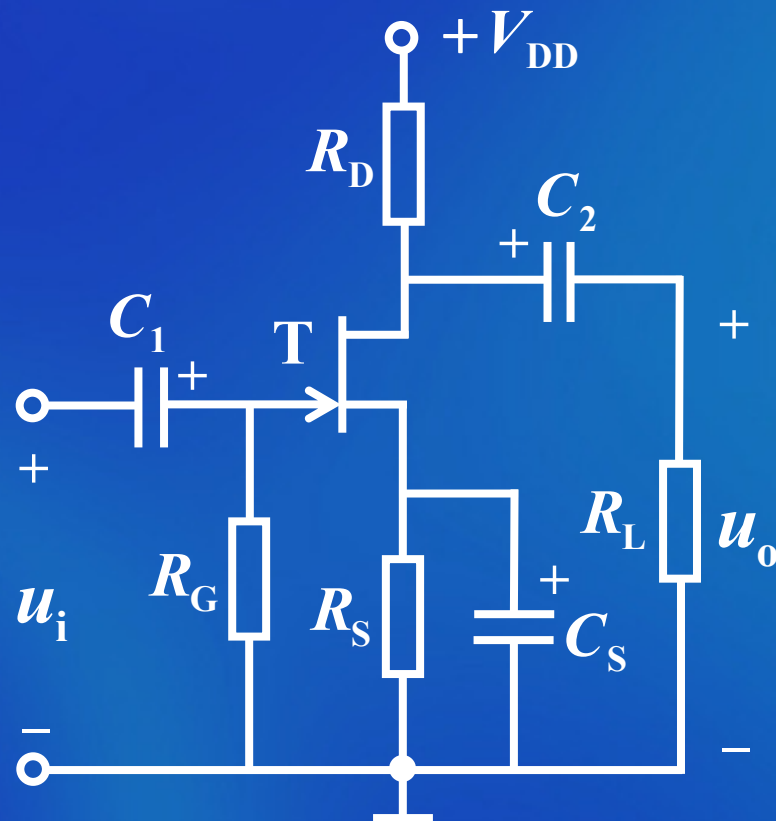
- 自给偏压: 耗尽型和结型
- 分压式偏置: 增强型、耗尽型和结型

### 3. 信号的输入和输出

常用的耦合方式

{ 阻容耦合  
变压器耦合  
直接耦合

一种典型的阻容耦合共源极放大电路



### 3.3.2 场效应管的微变等效电路

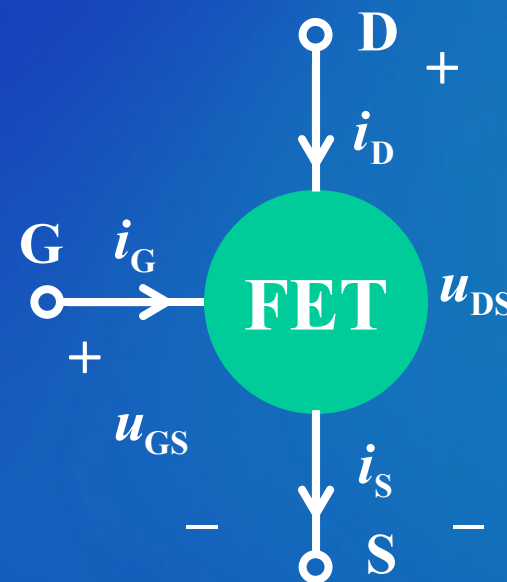
由场效应管工作原理知：

$$i_G = 0$$

$$i_D = f(u_{GS}, u_{DS})$$

对  $i_D$  全微分

$$di_D = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{\Delta u_{DS}=0} du_{GS} + \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{DS}} \right|_{\Delta u_{GS}=0} du_{DS}$$



$$di_D = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{\Delta u_{DS}=0} du_{GS} + \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{DS}} \right|_{\Delta u_{GS}=0} du_{DS}$$

式中  $g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{\Delta u_{DS}=0}$  为跨导

$$g_{ds} = \frac{1}{r_{ds}} = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{DS}} \right|_{\Delta u_{GS}=0}$$

$r_{ds}$  为FET共源极输出电阻

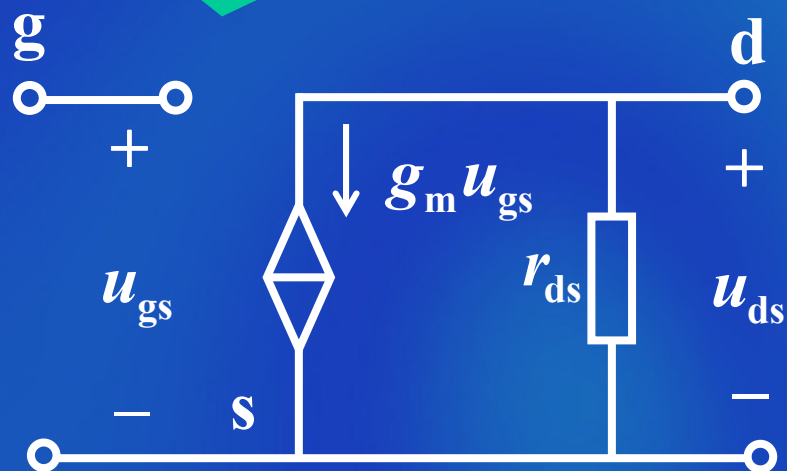
故  $di_D = g_m du_{GS} + \frac{1}{r_{ds}} du_{DS}$

$$di_D = g_m du_{GS} + \frac{1}{r_{ds}} du_{DS}$$

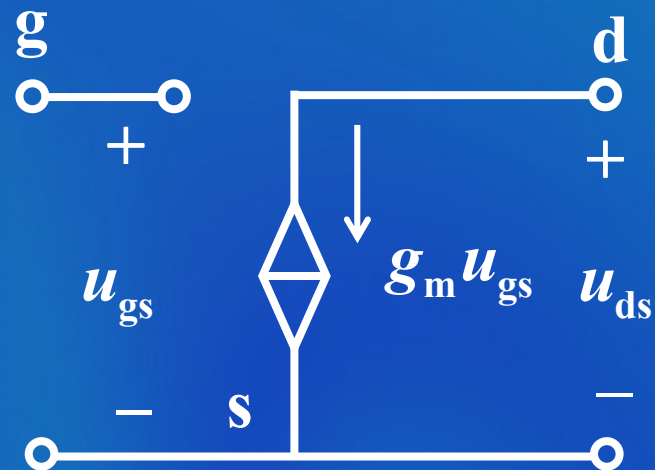
或者

$$i_d = g_m u_{gs} + \frac{1}{r_{ds}} u_{ds}$$

微变等效电路

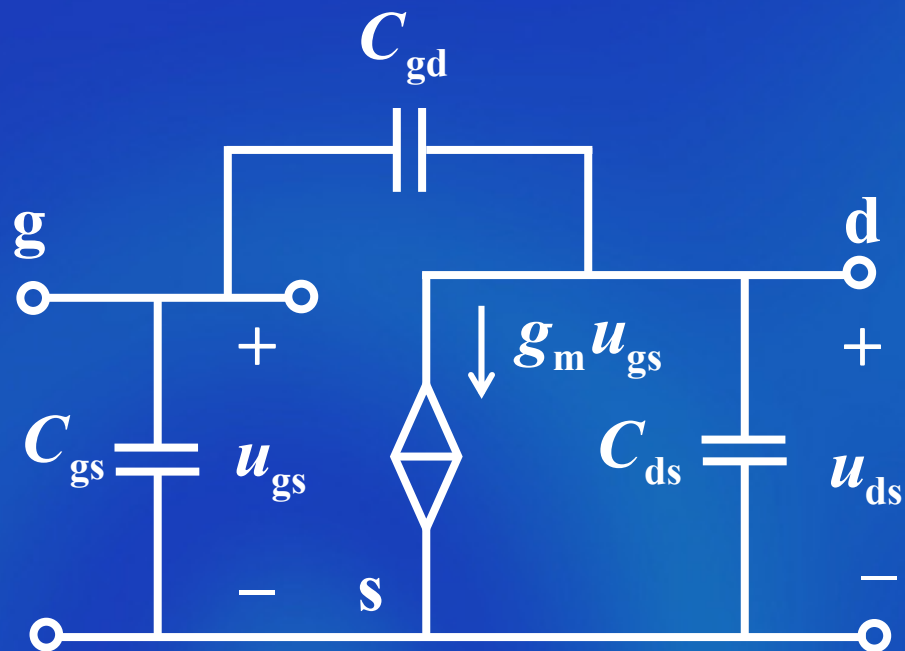


简化的微变等效电路



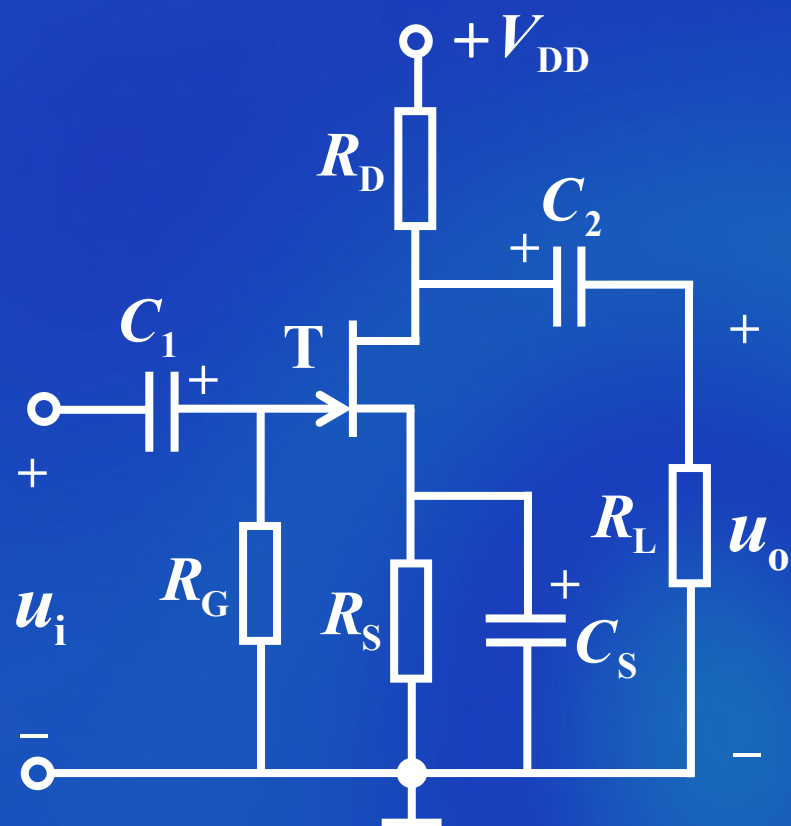


## FET的高频模型



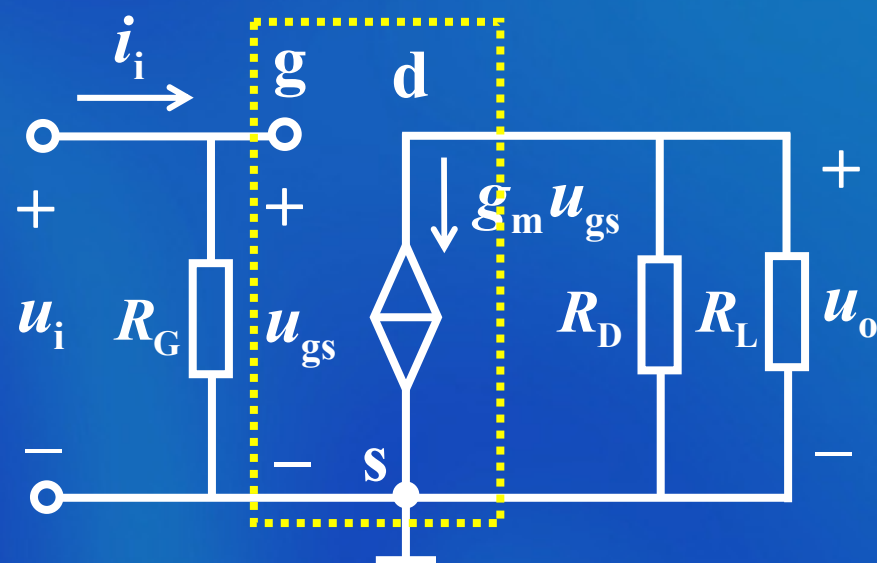
### 3.3.3 场效应管组成的三种基本放大电路

#### 1. 共源极放大电路

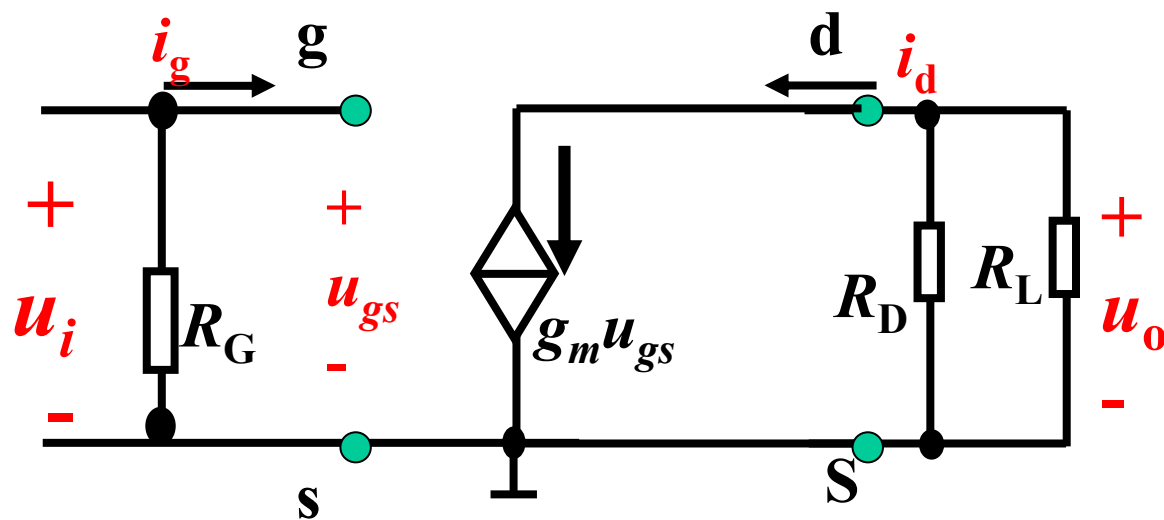


微变等效电路

先中间，后两边



## 场效应管微变等效电路画法:



## a. 求电压放大倍数

由图可知

$$\dot{U}_o = -g_m \dot{U}_{gs} (R_D // R_L)$$

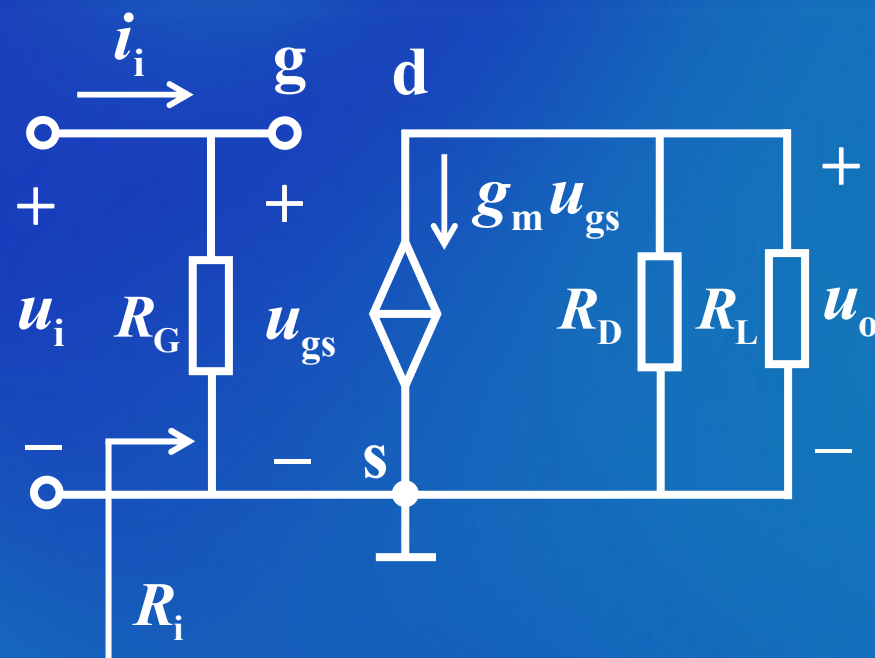
$$\dot{U}_i = \dot{U}_{gs}$$

故

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$$

$$= \frac{-g_m \dot{U}_{gs} (R_D // R_L)}{\dot{U}_{gs}}$$

$$= -g_m R'_L$$



$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

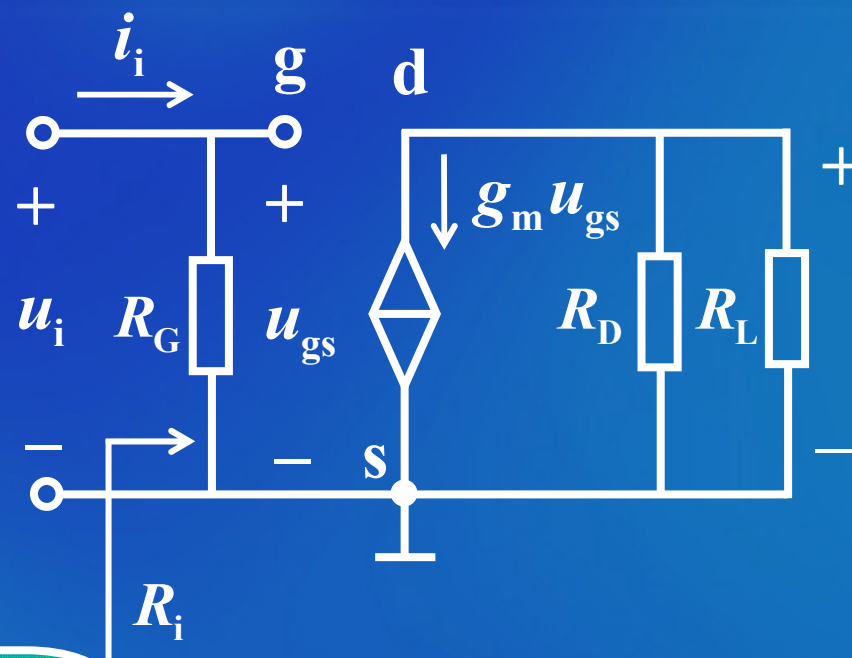
式中  $R'_L = R_L // R_D$

## b. 求输入电阻 $R_i$

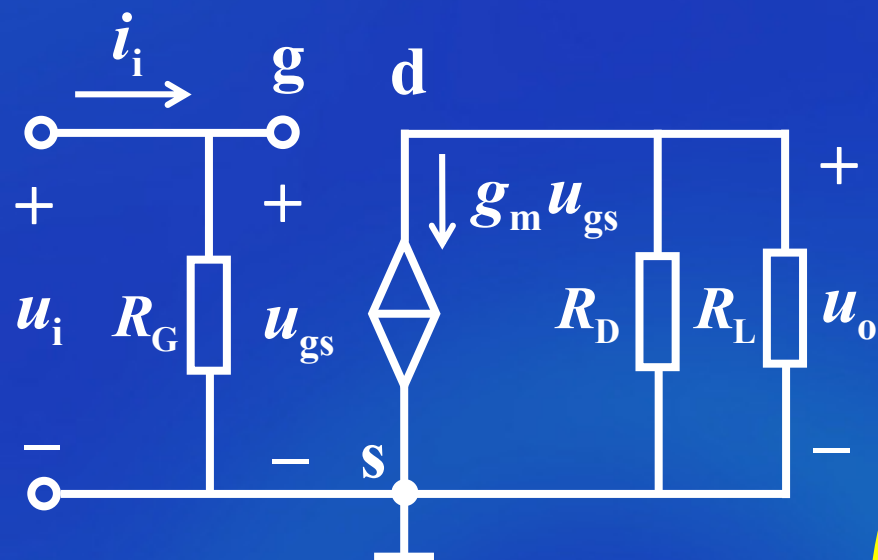
由图可知

$$R_i = R_G$$

$$R_i = R_B // r_{be}$$



# c. 求输出电阻 $R_o$



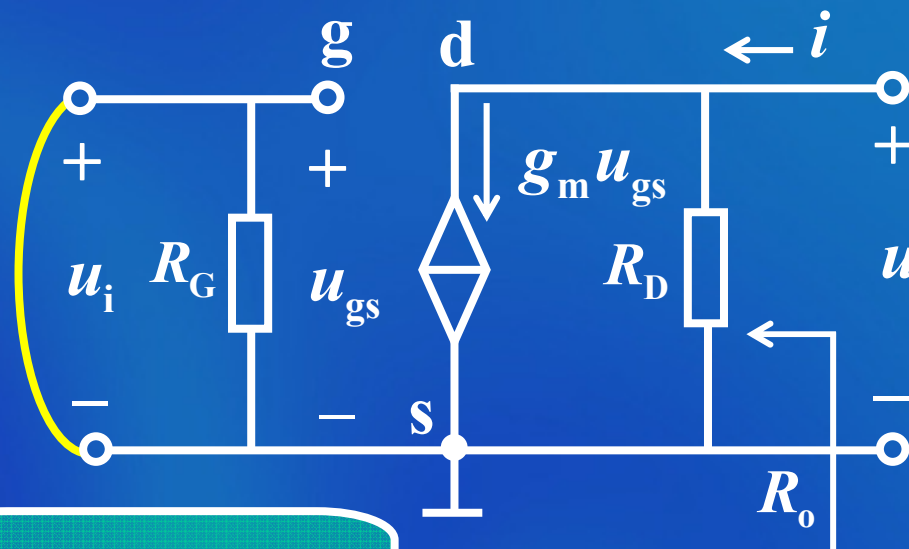
画出求输出电阻的等效电路

根据输出电阻的定义:

$$R_o = \frac{U}{I} \bigg|_{\substack{U_i=0 \\ R_L=\infty}}$$

由图可知

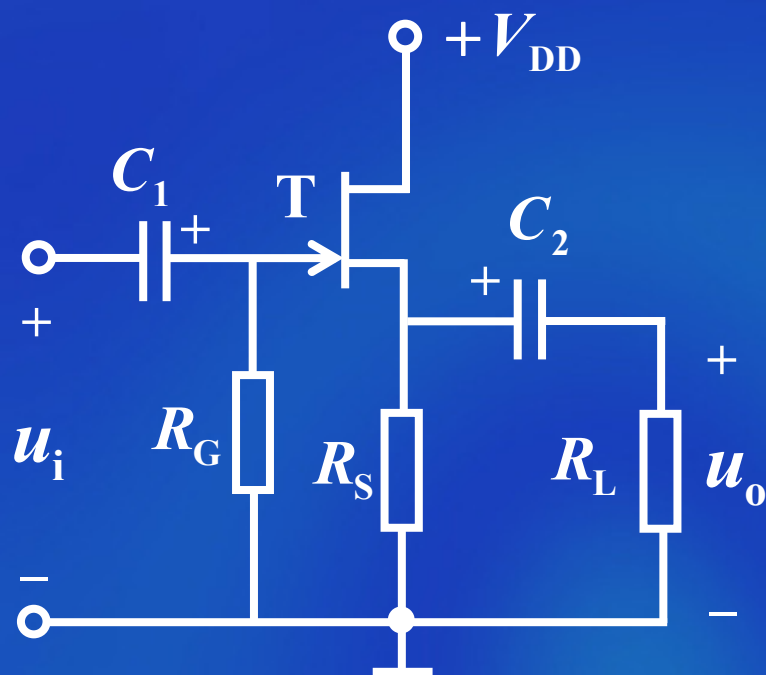
$$R_o = R_D$$



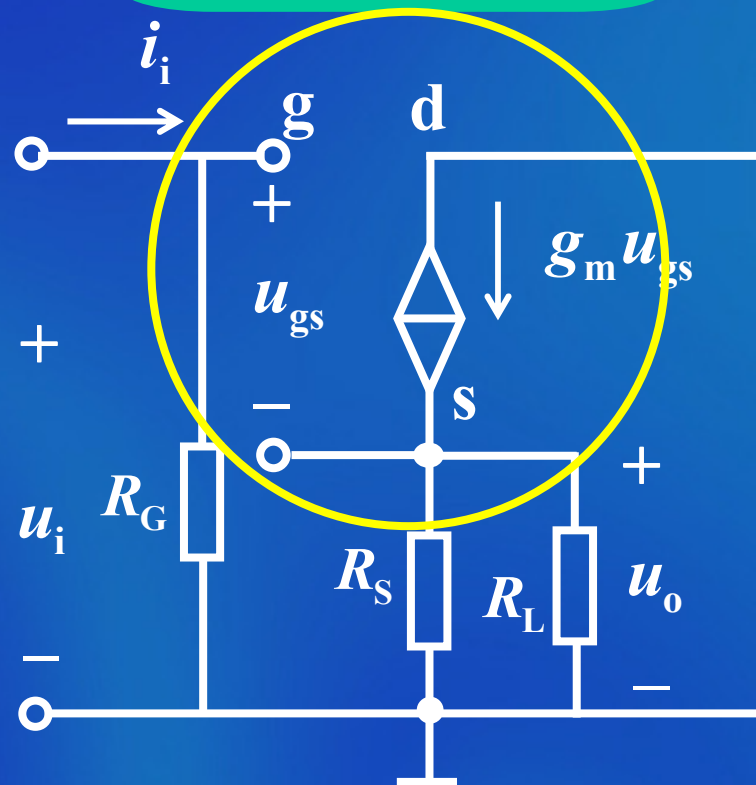
$$R_o = R_D$$



## 2. 共漏极放大电路



### 微变等效电路



# a. 求电压放大倍数

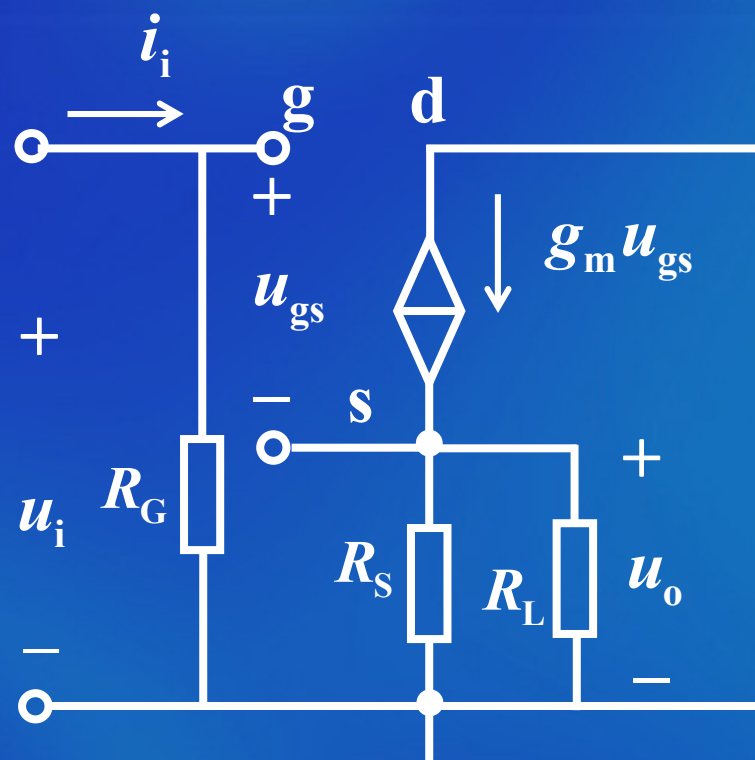
由图可知

$$\dot{U}_o = g_m \dot{U}_{gs} (R_S // R_L)$$

$$\dot{U}_i = \dot{U}_{gs} + \dot{U}_o$$

故

$$\begin{aligned} \dot{A}_u &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \\ &= \frac{g_m \dot{U}_{gs} (R_S // R_L)}{\dot{U}_{gs} + g_m \dot{U}_{gs} (R_S // R_L)} \\ &= \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R'_L} \end{aligned}$$



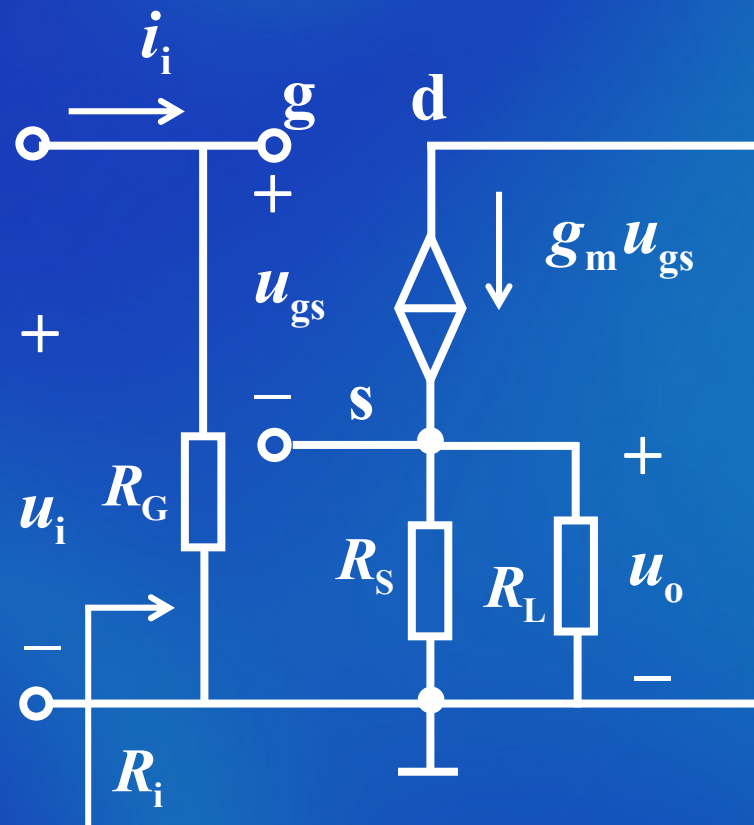
$$\dot{A}_u = \frac{(1 + \beta) R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R'_L}$$

式中  $R'_L = R_L // R_S$

## b. 求输入电阻 $R_i$

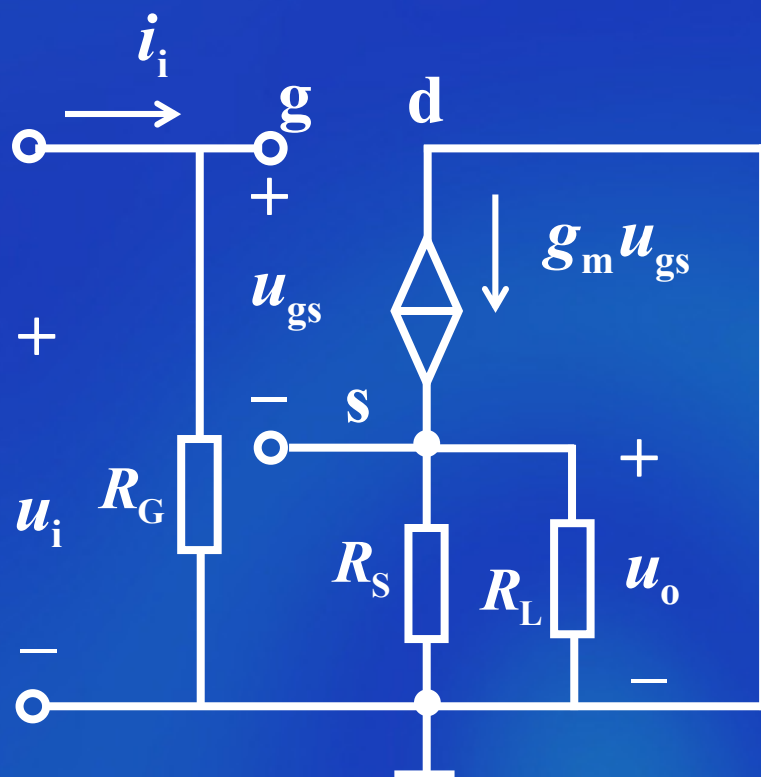
输入电阻

$$R_i = R_G$$

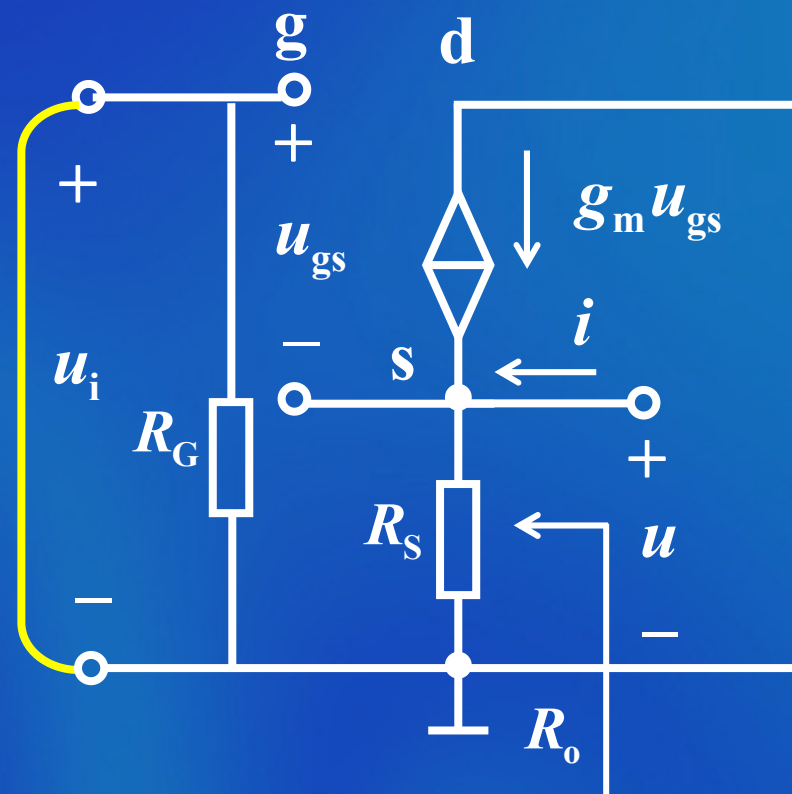


$$R_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta) R'_L]$$

# c. 求输出电阻 $R_o$



## 求 $R_o$ 的等效电路



由图可知

$$I + g_m U_{gs} = \frac{U}{R_s}$$

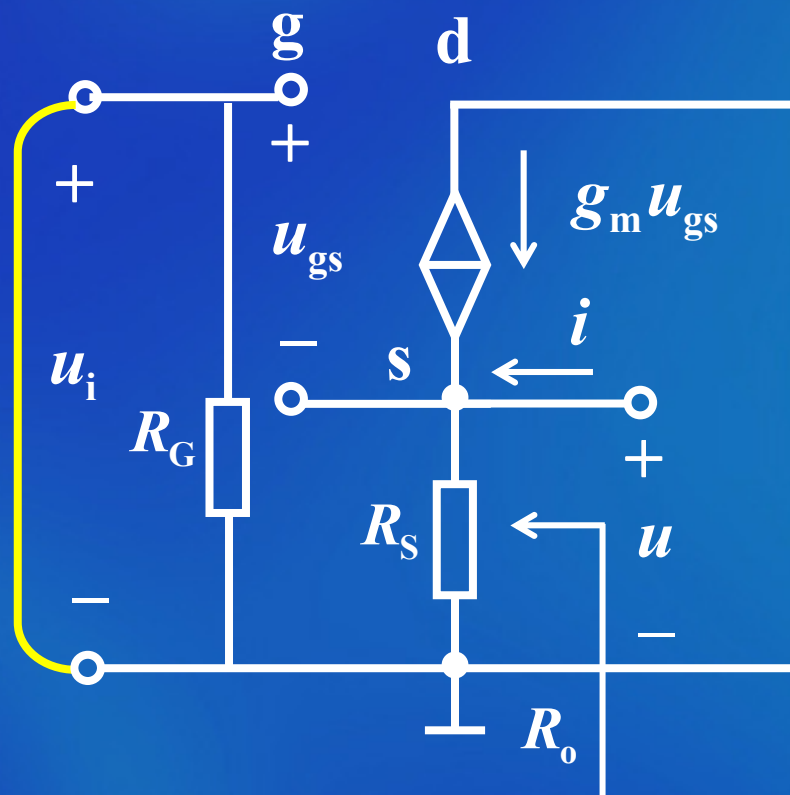
$$I = \frac{U}{R_s} - g_m U_{gs}$$

$$U_{gs} = -U$$

故电路的输出电阻

$$R_o = \frac{U}{I}$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{R_s} + g_m} = \frac{1}{\frac{1}{R_s} + \frac{1}{\frac{1}{g_m}}} = R_s // \frac{1}{g_m}$$



$$R_o = R_E // \frac{r_{be}}{1 + \beta}$$



## 双极性三极管与单极性（场效应）三极管 放大电路分析特点：

相同点：

1. 分析思路相同：先静态，后动态；
2. 分析方法相同：静态—估算法

不同点：

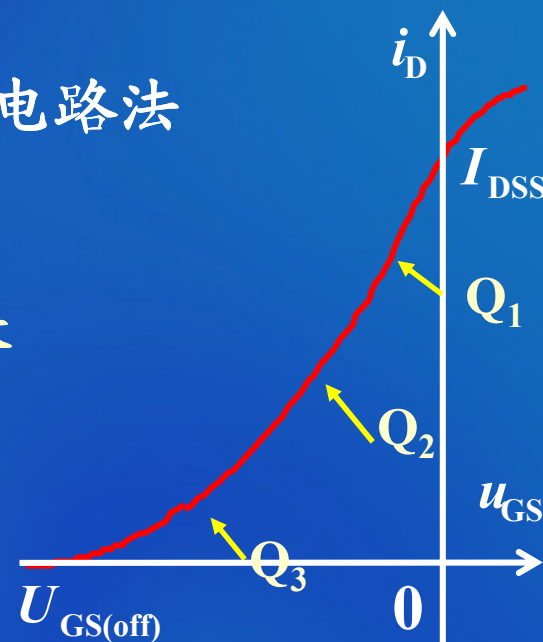
动态—微变等效电路法

1. 静态与动态参数联系：

双：--- $r_{be}$   
单：--- $g_m$  } 与Q点有关

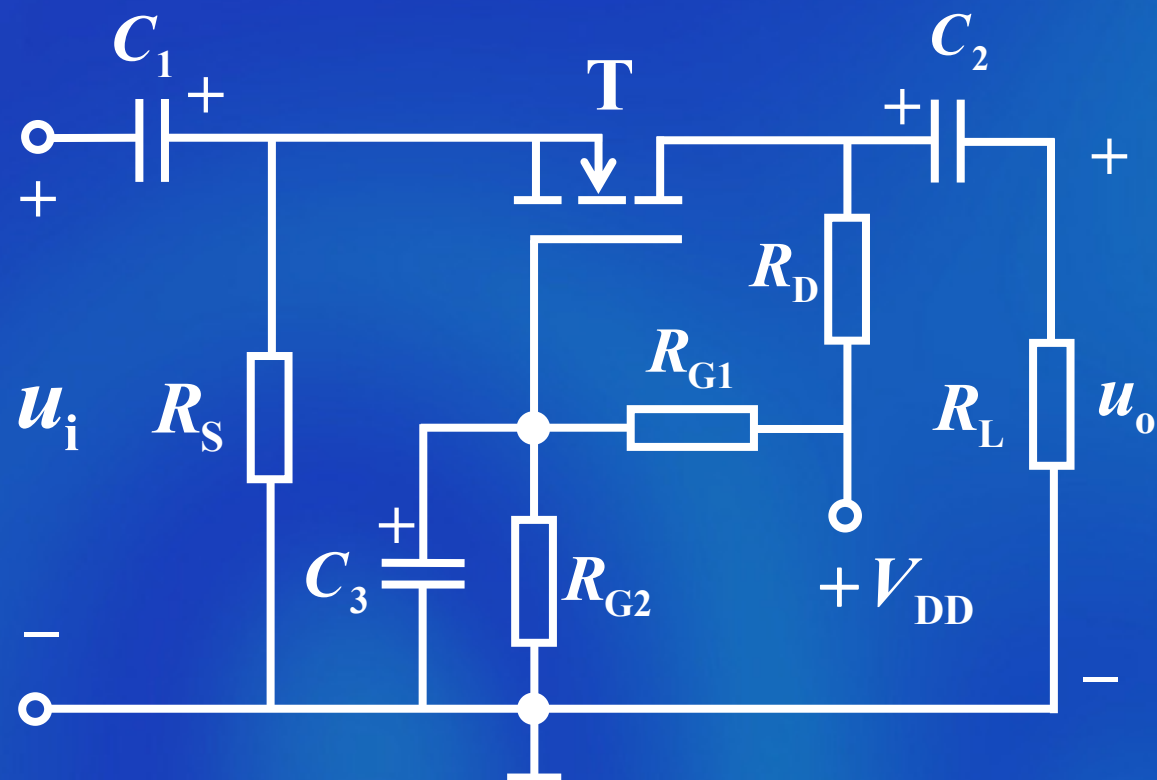
2. 表征管子放大能力参数：

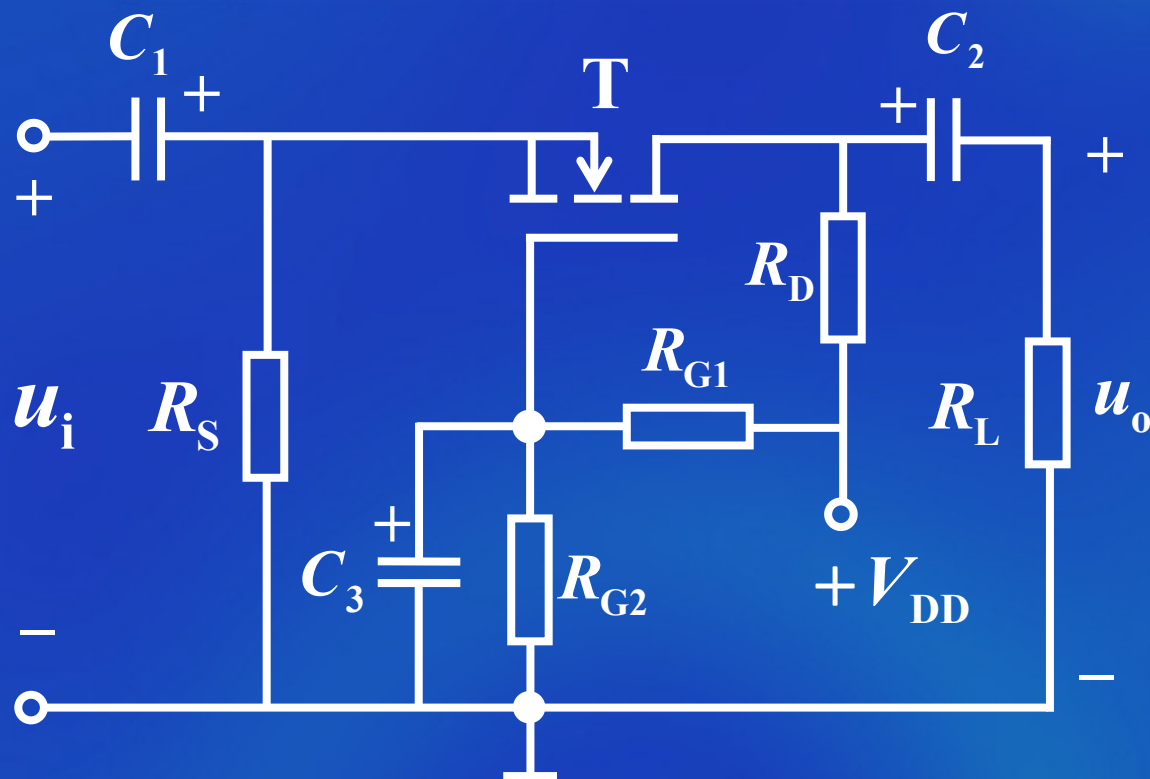
双：  $\beta$  与Q点无关---已知的  
单：  $g_m$  与Q点有关---求解的



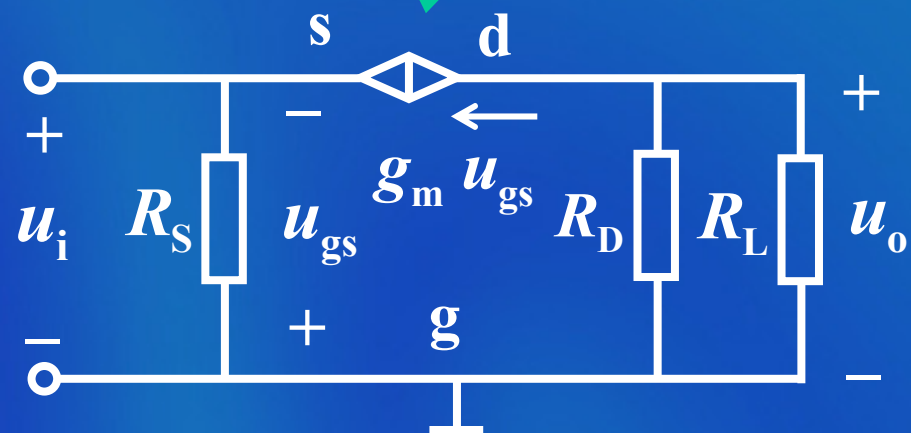


### 3. 共栅极放大电路 (自学)

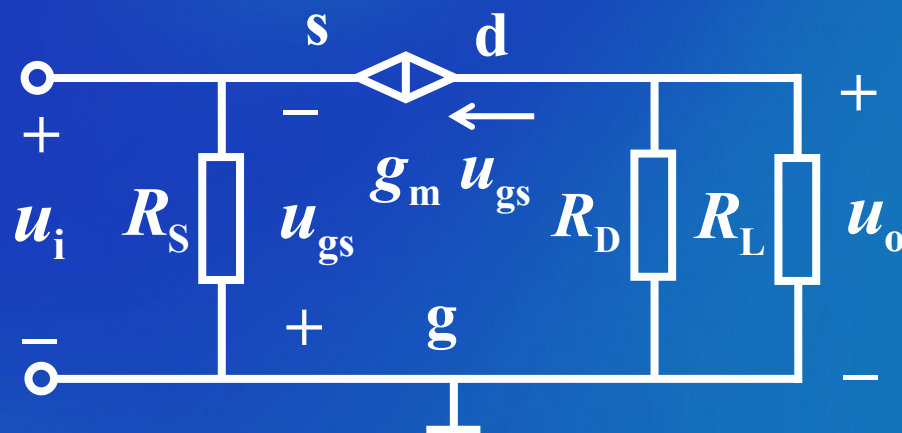




微变等效电路



# a. 求电压放大倍数



由图可知

$$\dot{U}_o = -g_m \dot{U}_{gs} (R_D // R_L)$$

$$\dot{U}_i = -\dot{U}_{gs}$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = g_m (R_D // R_L)$$

b. 求输入电阻 $R_i$ 

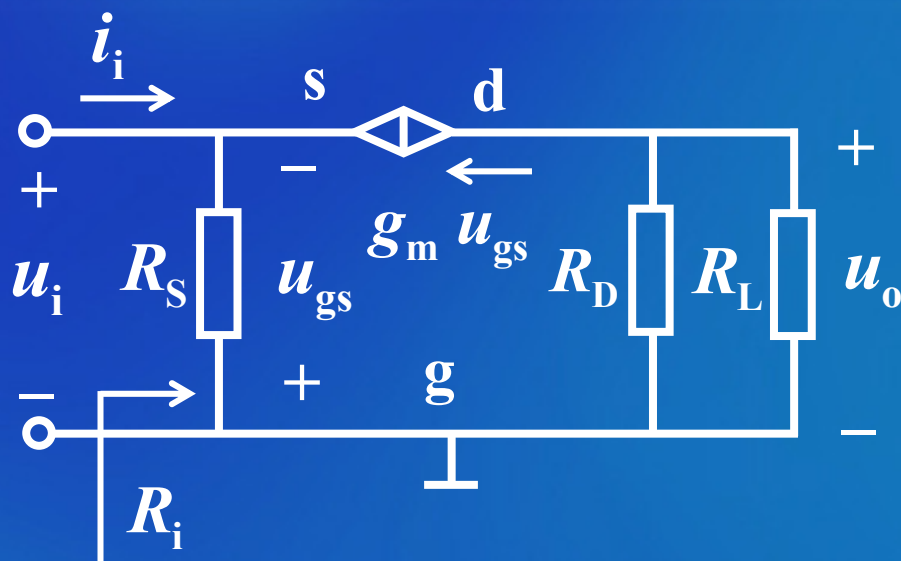
由于

$$I_i = \frac{U_i}{R_S} - g_m U_{gs}$$

$$= \frac{U_i}{R_S} + g_m U_i$$

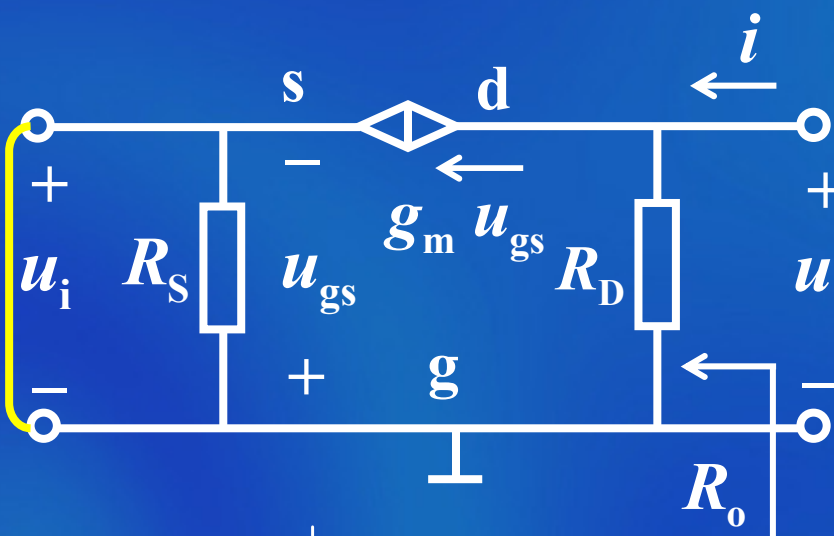
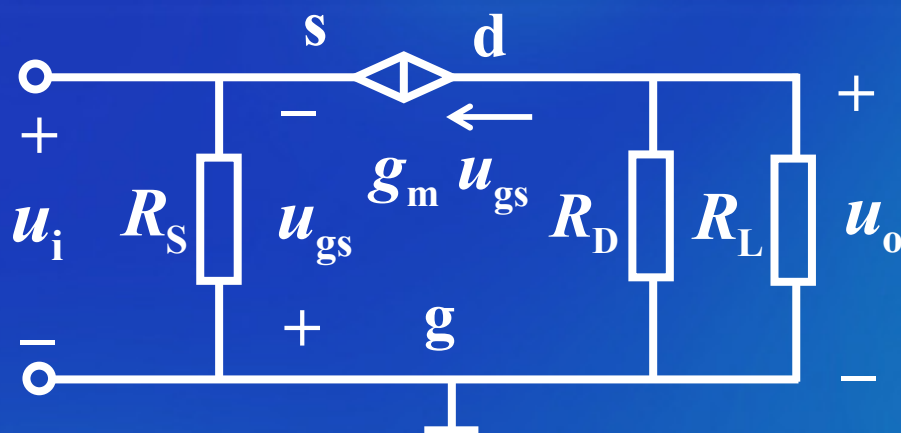
故

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{1}{\frac{1}{R_S} + g_m} = R_S // \frac{1}{g_m}$$



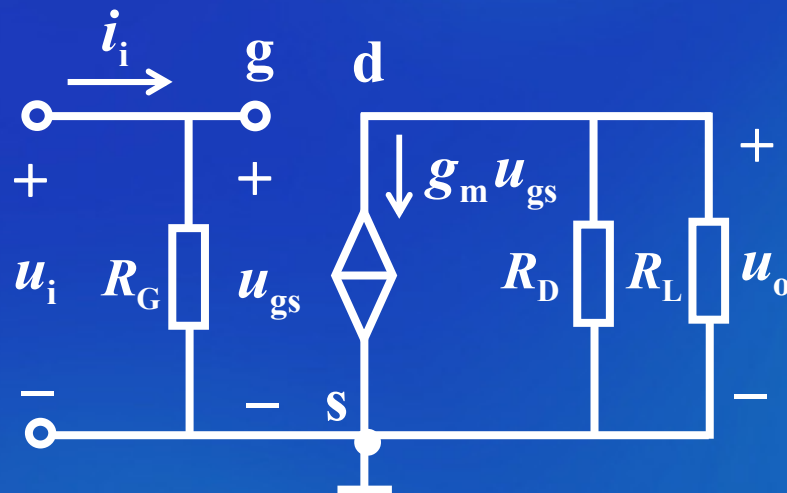
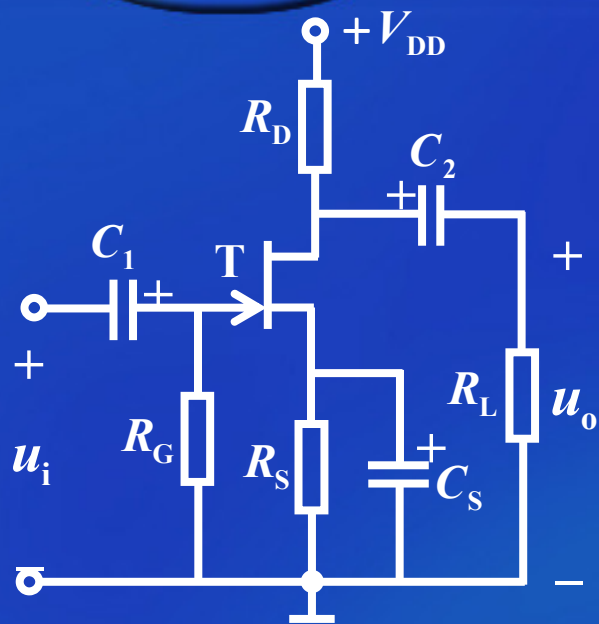
c. 求输出电阻  $R_o$

画出求  $R_o$  的  
等效电路



故

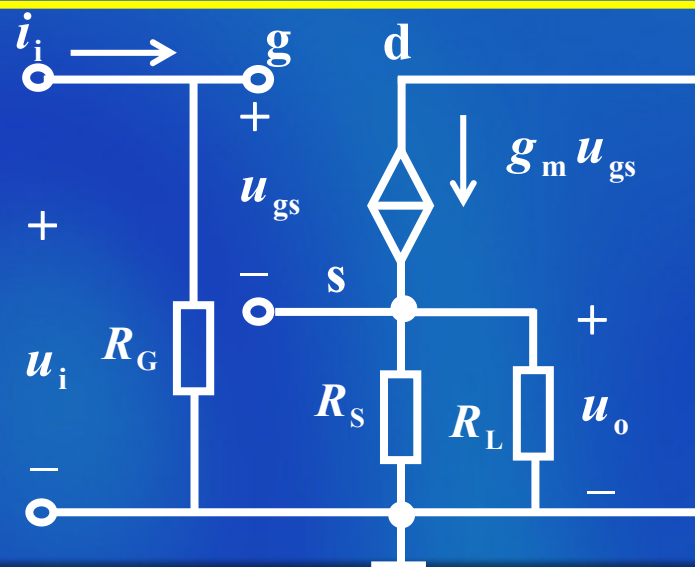
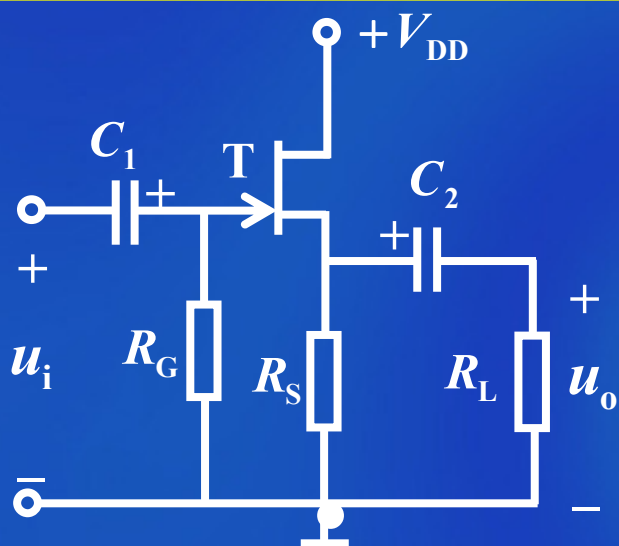
$$R_o = \frac{U}{I} \bigg|_{\substack{U_s=0 \\ R_L=\infty}} = R_D$$



$$A_u = -g_m R'_L$$

$$R_i = R_G$$

$$R_o = R_D$$



$$A_u = \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R'_L}$$

$$R_i = R_G$$

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



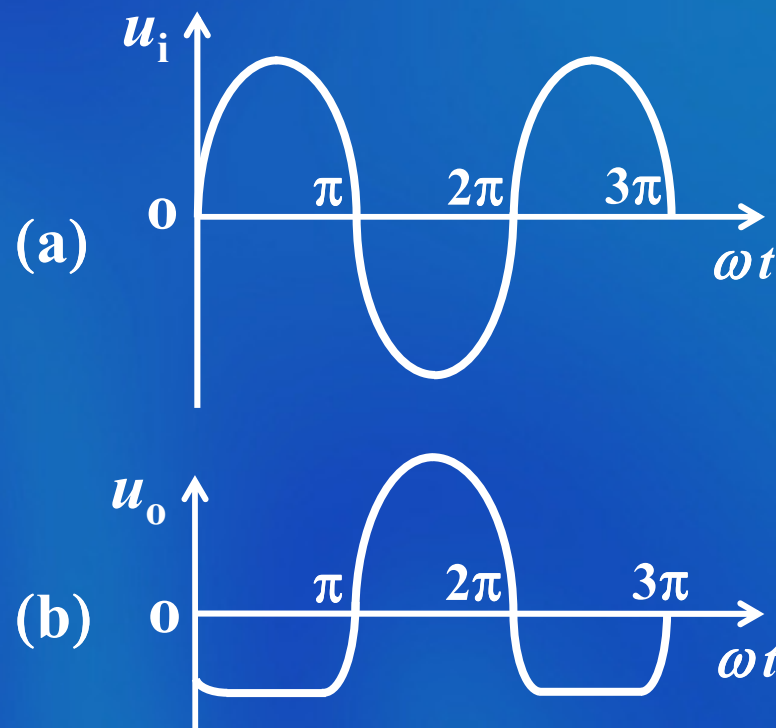
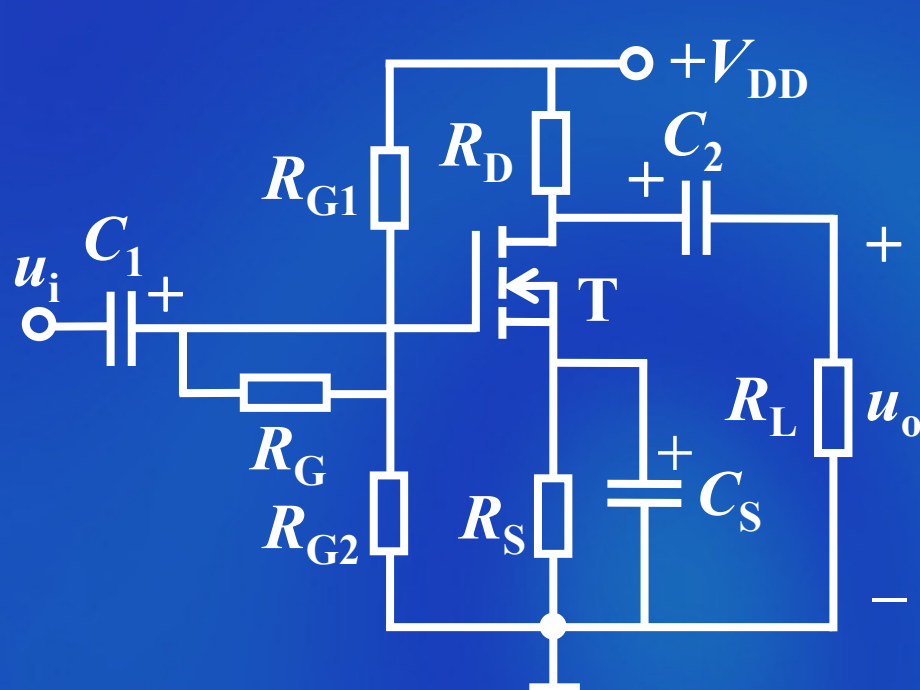
## 思考题

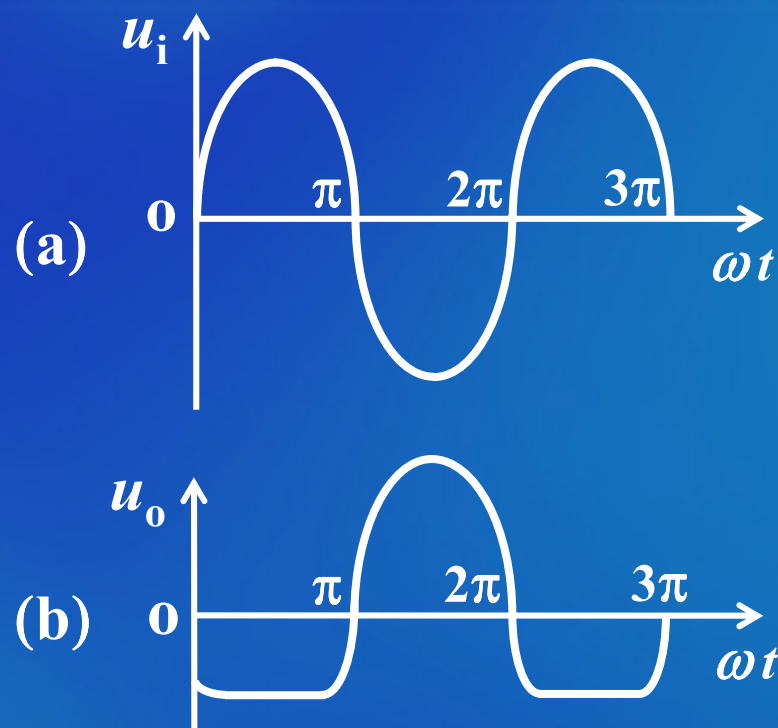
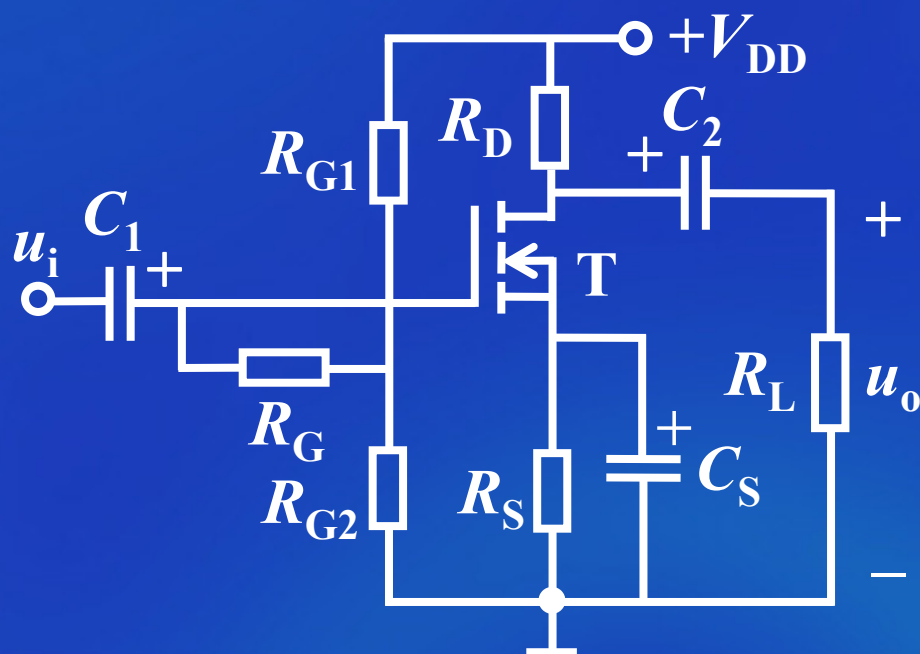
1. 比较共源极场效应管放大电路和共发射极晶体管放大电路，在电路结构上有何相似之处？为什么前者的输入电阻较高？
2. 为什么增强型绝缘栅场效应管放大电路无法采用自给偏置？

## 练习题

例1 在图示电路中:

- (1) 如果电路输入、输出电压的波形分别如图(a)、(b)所示。试问该电路的静态工作点可能处于或靠近哪个区?
- (2) 已知T工作于放大区及 $I_{DQ}$ ,  $R_{G1}$ 和 $R_{G2}$ , 求 $R_S$ 。
- (3) 在线性放大条件下, 写出电路的 $A_u$ 、 $R_i$ 及 $R_o$ 的表达式。





解：由图可知，该电路是一由N型沟道增强型MOS场效应管组成的共源极放大电路。

(1) 由于电路的输出波形负半周出现了失真，故该电路的静态工作点 $Q$ 靠近可变电阻。

(2) 已知T工作于放大区

故

$$I_{DQ} = k[U_{GSQ} - U_{GS(th)}]^2$$

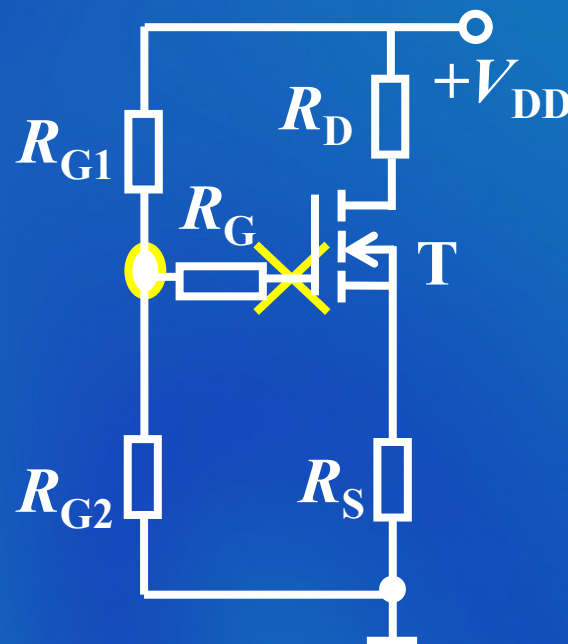
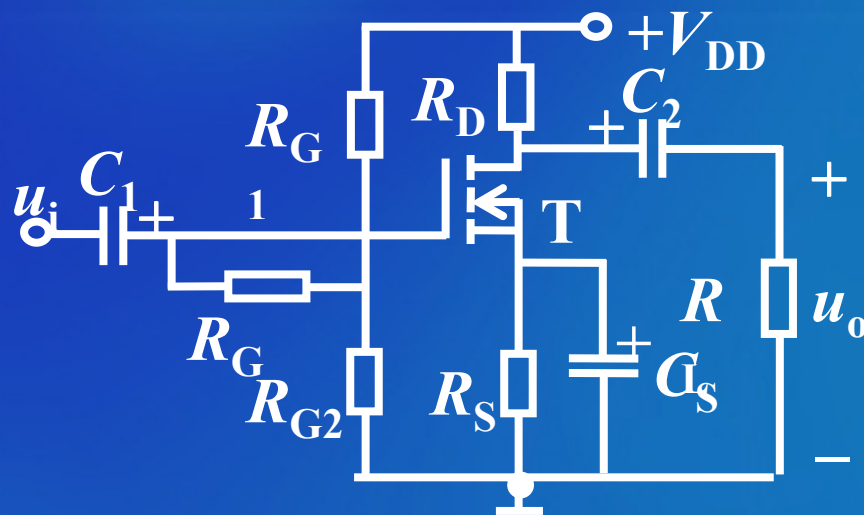
而

$$U_{GSQ} = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD} - I_{DQ} R_S$$

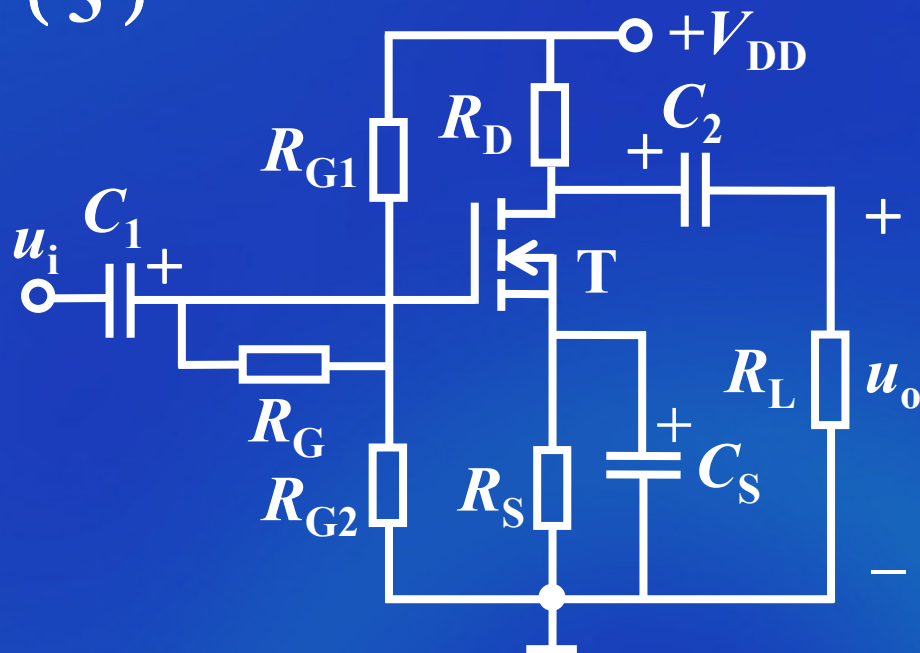
将以上两式联立求解

得:

$$R_S = \frac{1}{I_{DQ}} \left[ \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD} - \sqrt{\frac{I_{DQ}}{k}} - U_{GS(th)} \right]$$



(3)

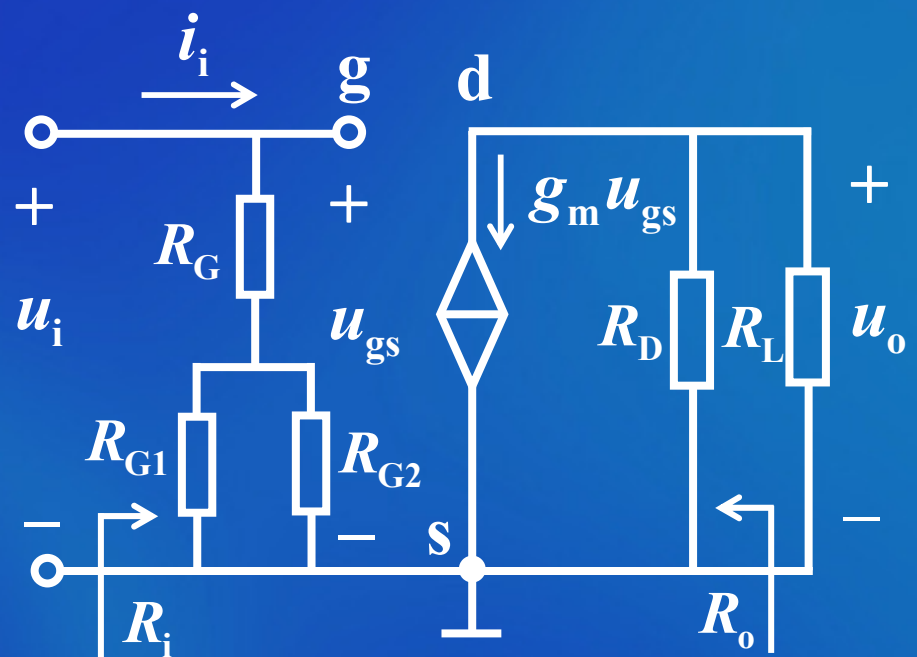


$$\dot{A}_u = -g_m R_D // R_L$$

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

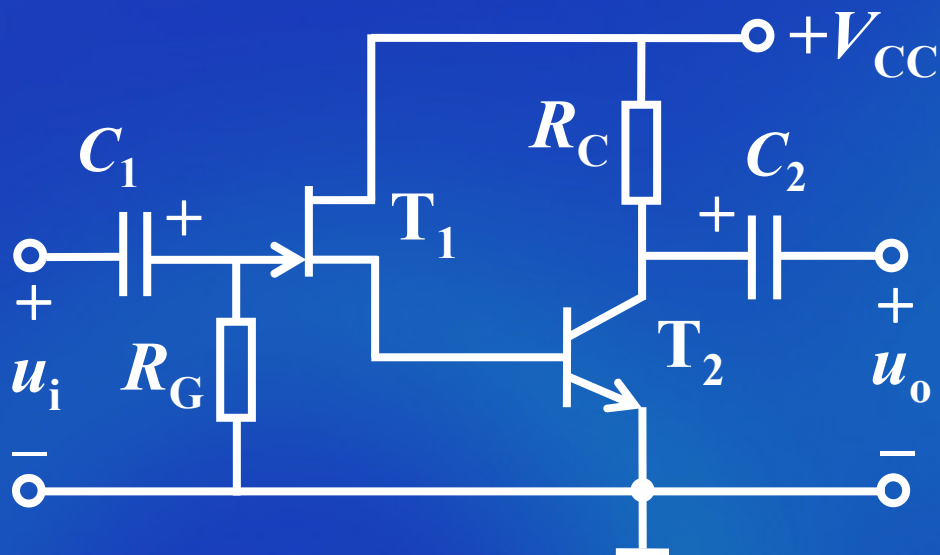
$$R_o = R_D$$

微变等效电路





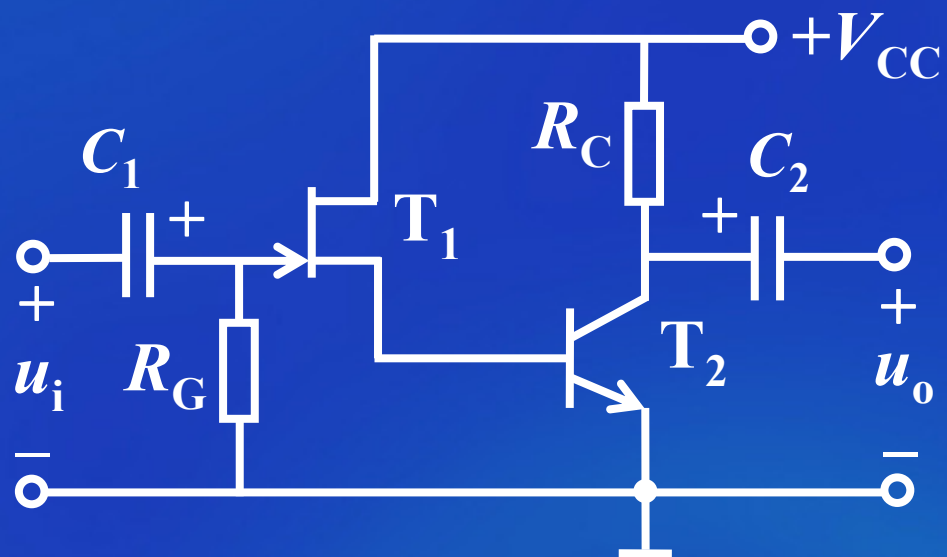
例2 电路如图所示，已知 $T_1$ 的 $g_m$  和 $T_2$ 的 $\beta$ 、 $r_{be}$ 。试写出电压放大倍数 $A_u$  的表达式。



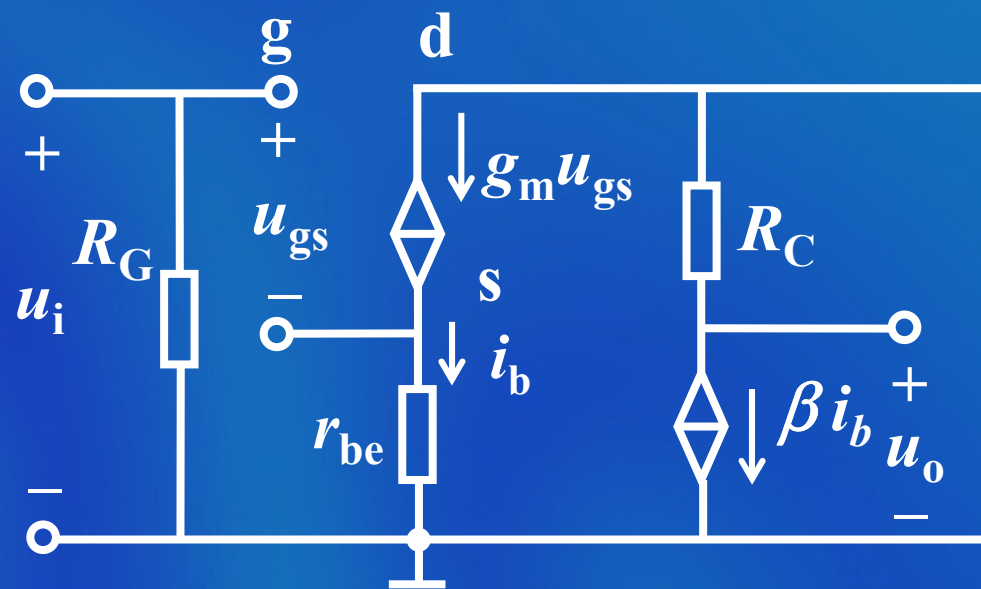
解 该电路是场效应管和晶体管组成的放大器。

画出该电路的微变等效电路。





微变等效电路



由图可知

$$\dot{U}_i = \dot{U}_{gs} + g_m \dot{U}_{gs} r_{be}$$

$$\dot{I}_b = g_m \dot{U}_{gs}$$

$$\dot{U}_o = -\beta \dot{I}_b R_C = -\beta g_m \dot{U}_{gs} R_C$$

故电压放大倍数

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta g_m R_C}{1 + g_m r_{be}}$$

