

# مدارهای الکتریکی و الکترونیکی فصل دوازدهم: ترانزیستور (ادامه)

استاد درس: محمود ممتازپور

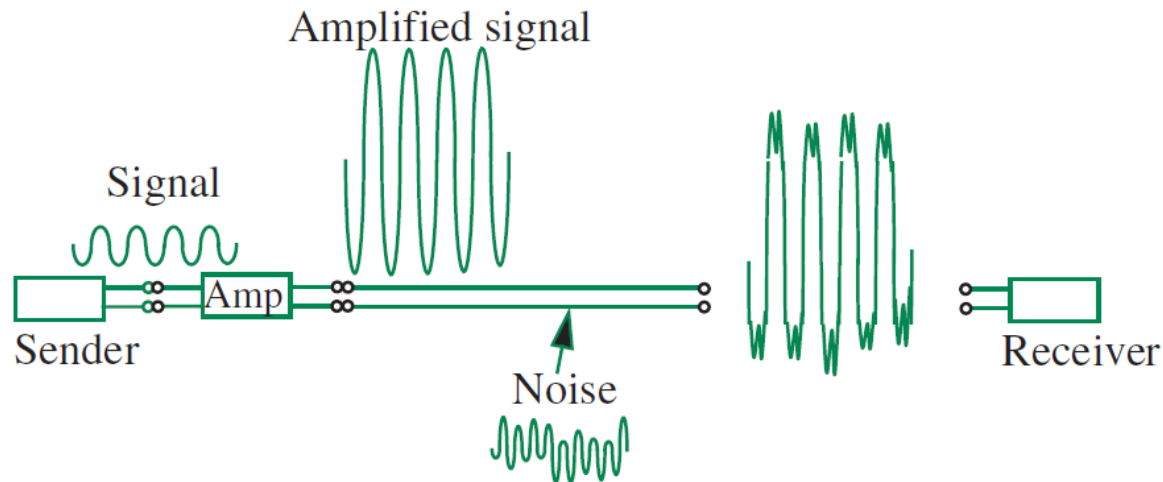
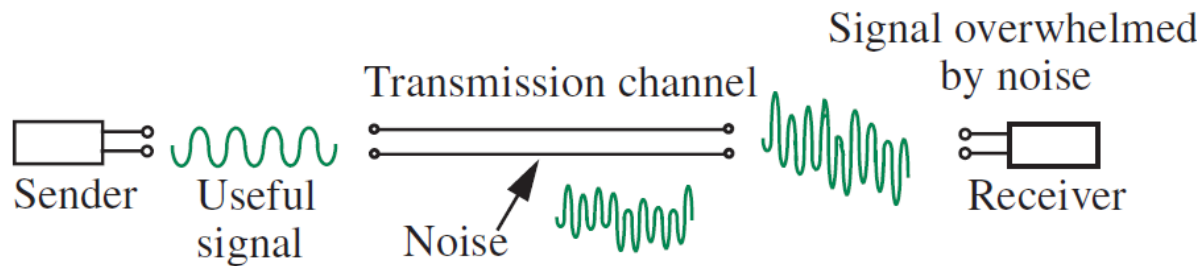
[ceit.aut.ac.ir/~momtazpour](http://ceit.aut.ac.ir/~momtazpour)

# فهرست مطالب

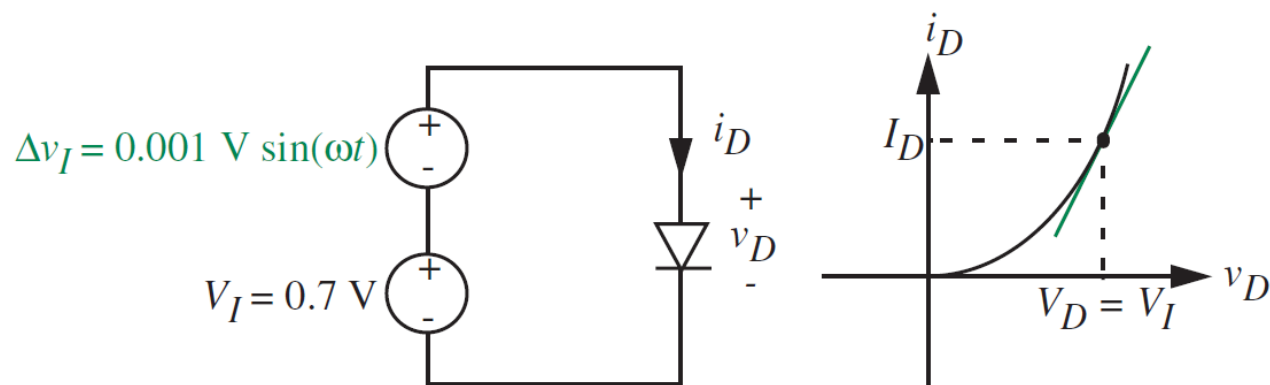
- مدل ترانزیستور به عنوان تقویت کننده
  - سیگنال بزرگ
  - سیگنال کوچک
- تحلیل DC و AC ترانزیستورها
- پیکربندی‌های مختلف

# کاربردهای ترانزیستور

□ در مدارهای آنالوگ به عنوان تقویت‌کننده



# رفتار غیرخطی دیود



□ با استفاده از مدل غیرخطی برای محاسبه جریان دیود داریم:

$$\square i_D = I_s [e^{(V_I + \Delta v_I)/V_{TH}} - 1]$$

# رفتار غیر خطی دیود

□ با استفاده از بسط تیلور حول  $V_I$  داریم:

$$\square f(x) = f(a) + f'(a)(x - a) + \frac{1}{2!} f''(a)(x - a)^2 + \dots$$

$$\square i_D = f(x) = I_s [e^{x/V_{TH}} - 1]$$

$$\square x = V_I + \Delta v_I$$

$$\square a = V_I$$

$$\square i_D = I_s [e^{(V_I + \Delta v_I)/V_{TH}} - 1]$$

$$= I_s (e^{V_I/V_{TH}} - 1) + I_s e^{V_I/V_{TH}} \left[ \frac{\Delta v_I}{V_{TH}} + \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta v_I}{V_{TH}} \right)^2 + \dots \right]$$

$$\approx I_s (e^{V_I/V_{TH}} - 1) + \frac{I_D}{V_{TH}} \Delta v_I$$

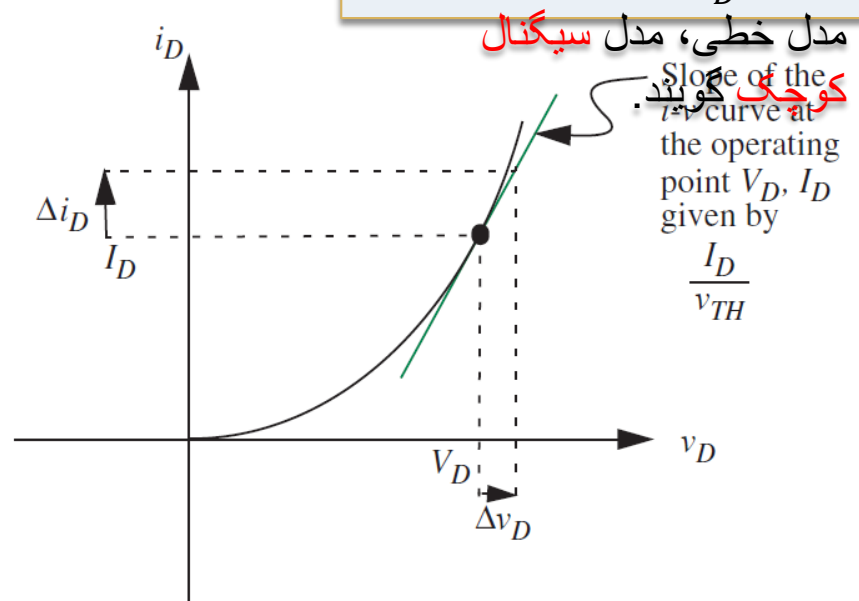
# مدل سیگنال کوچک و سیگنال بزرگ

$$\square i_D \approx I_S(e^{V_I/V_{TH}} - 1) + \frac{I_D}{V_{TH}} \Delta v_I$$

بخش DC جریان دیود با بخش DC منبع رابطه غیرخطی دارد. یعنی دیود در برابر یک سیگنال بزرگ رفتاری غیرخطی دارد. به این مدل غیرخطی که قبلاً نیز دیده بودیم، مدل **سیگنال بزرگ** گویند.

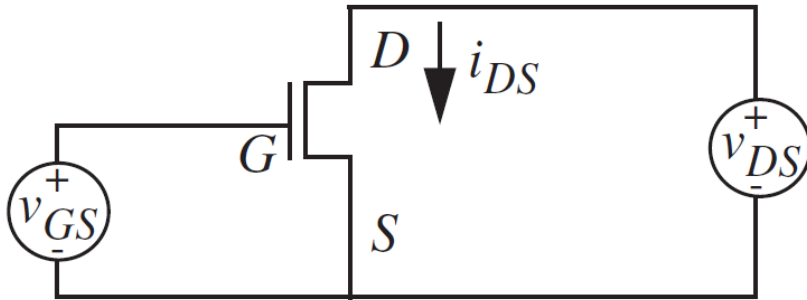
بخش AC جریان دیود با بخش AC منبع رابطه تقریباً خطی دارد.

یعنی دیود در برابر یک سیگنال کوچک رفتاری خطی دارد و مانند یک مقاومت با مقدار  $\frac{V_{TH}}{I_D}$  عمل می‌کند. به این



# مدل سیگنال بزرگ MOSFET

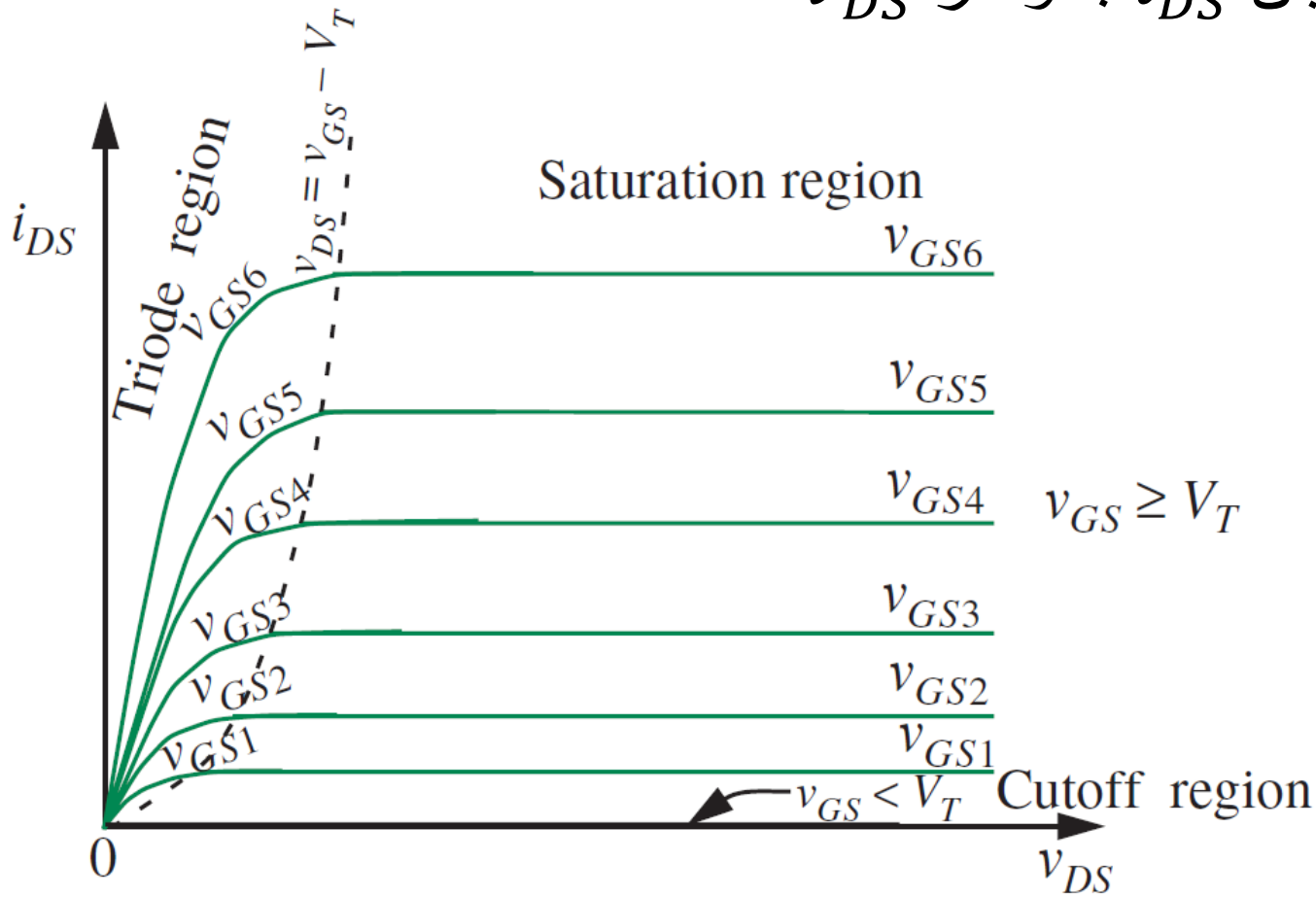
□ مدل مرتبه اول شاکلی Shockley



$$I_{ds} = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & V_{gs} < V_t \quad \text{قطع} \\ K \left( V_{gs} - V_t - \frac{V_{ds}}{2} \right) V_{ds} & V_{ds} < V_{gs} - V_t \quad \text{خطی} \\ \frac{K}{2} (V_{gs} - V_t)^2 & V_{ds} > V_{gs} - V_t \quad \text{اشباع} \end{array} \right.$$

# مشخصه ولتاژ-جریان MOSFET

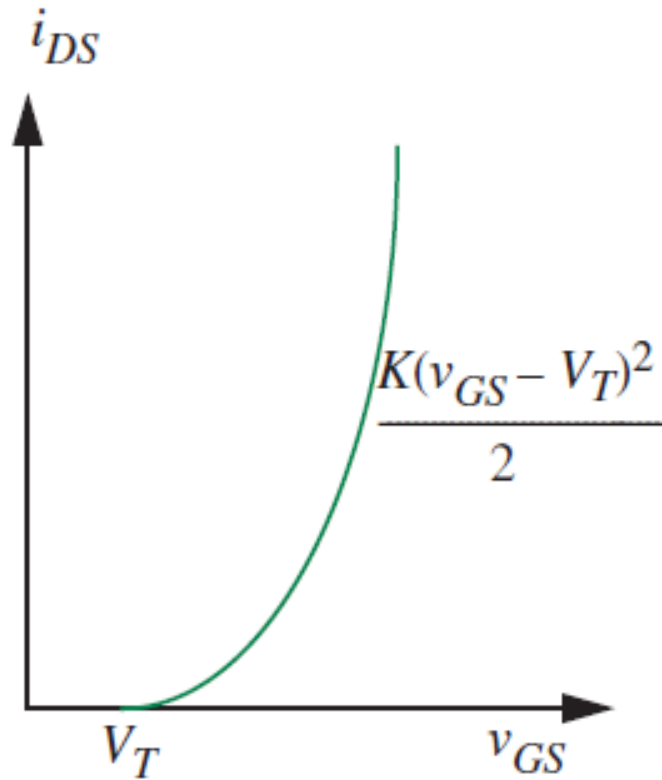
□ رابطه جریان  $i_{DS}$  با ولتاژ  $v_{DS}$





# مشخصه ولتاژ-جریان MOSFET

□ رابطه جریان  $i_{DS}$  با ولتاژ  $v_{GS}$



valid when  $v_{DS} \geq v_{GS} - V_T$

# تحلیل DC ترانزیستور MOSFET

- روابط KVL دو طرف ترانزیستور را بنویسید.
- با استفاده از این روابط، ولتاژ  $V_{gs}$  را به دست آورید. (جریان گیت همیشه صفر است).
- اگر  $V_{gs} < V_t$  باشد، ترانزیستور قطع است:  $I_{ds} = 0$
- اگر  $V_{gs} > V_t$  باشد، یا اشباع است یا خطی.
- فرض می‌کنیم اشباع است:  $I_{ds} = \frac{K}{2} (V_{gs} - V_t)^2$
- ولتاژ  $V_{ds}$  را به دست آورده و شرط اشباع بودن را چک می‌کنیم:  
 $V_{ds} > V_{gs} - V_t$  □
- اگر تناقض داشت خطی است:  $I_{ds} = K \left( V_{gs} - V_t - \frac{V_{ds}}{2} \right) V_{ds}$

□ ولتاژ  $V_o$  را بیابید. ( $K = 0.5 \frac{mA}{V^2}$ ,  $V_t = 2$ ,  $v_i = 0$ )

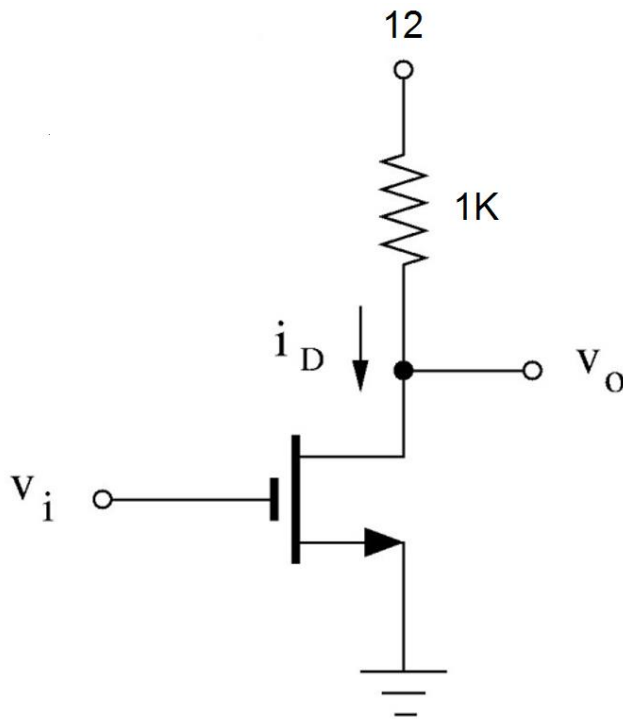
□ روابط KVL دو طرف:

$$v_{gs} = v_i = 0 \quad \square$$

$$-12 + 1000i_D + v_{ds} = 0 \quad \square$$

□  $v_{gs} < v_t$  پس قطع است:  $i_D = 0$

$$v_{ds} = 12 \quad \square$$



## مثال 2

□  $V_o$  را بیابید.  $(K = 0.5 \frac{mA}{V^2}, V_t = 2, v_i = 6)$

□ روابط KVL دو طرف:

$$v_{gs} = v_i = 6 \quad \square$$

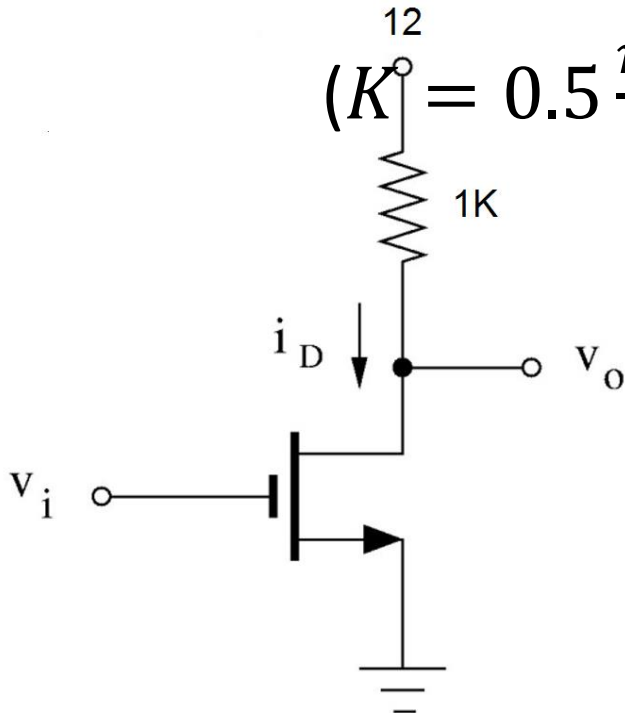
$$-12 + 1000i_D + v_{ds} = 0 \quad \square$$

□  $v_{gs} > V_t$  پس یا خطی است یا اشباع

□ فرض می‌کنیم اشباع است:

$$i_D = \frac{K}{2} (v_{gs} - V_t)^2 = 4mA \rightarrow v_{ds} = 12 - 4 = 8 \quad \square$$

$$v_{ds} > v_{gs} - V_t = 4 \quad \square$$



# مثال 3

□  $V_o$  را بیابید.  $(K = 0.5 \frac{mA}{V^2}, V_t = 2, v_i = 12)$

□ روابط KVL دو طرف:

$$v_{gs} = v_i = 12 \quad \square$$

$$-12 + 1000i_D + v_{ds} = 0 \quad \square$$

□  $v_{gs} > V_t$  یا اشباع است یا خطی

□ فرض اشباع:

$$i_D = \frac{K}{2} (v_{gs} - V_t)^2 = 25mA \rightarrow v_{ds} = 12 - 25 = -13 \quad \square$$

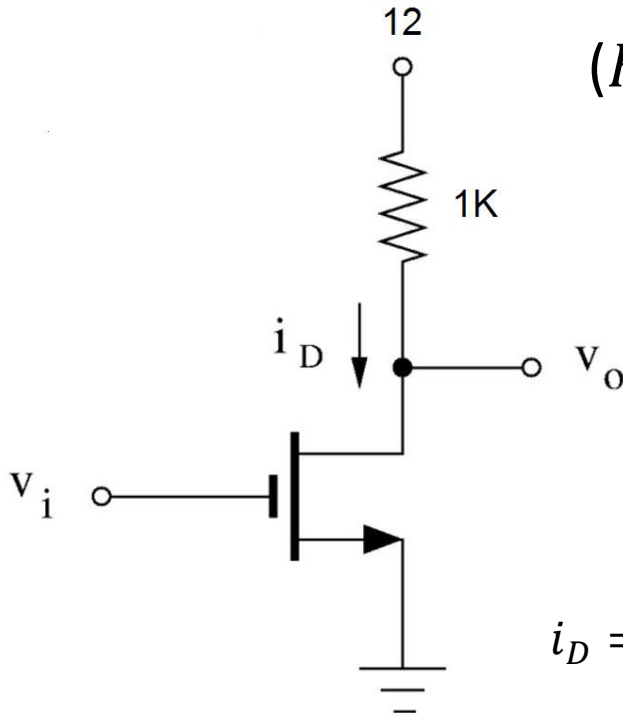
$$v_{ds} < v_{gs} - V_t = 10 \quad \square$$

□ فرض خطی:

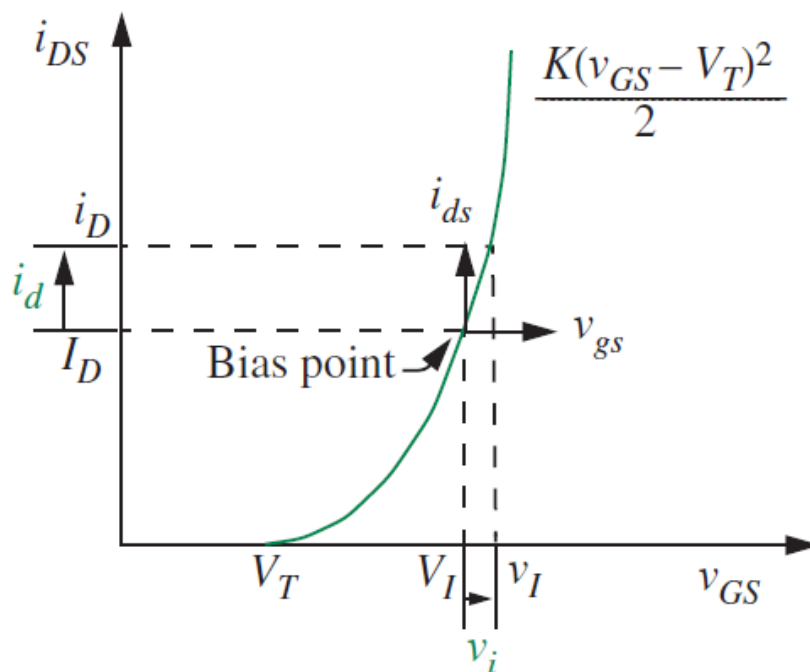
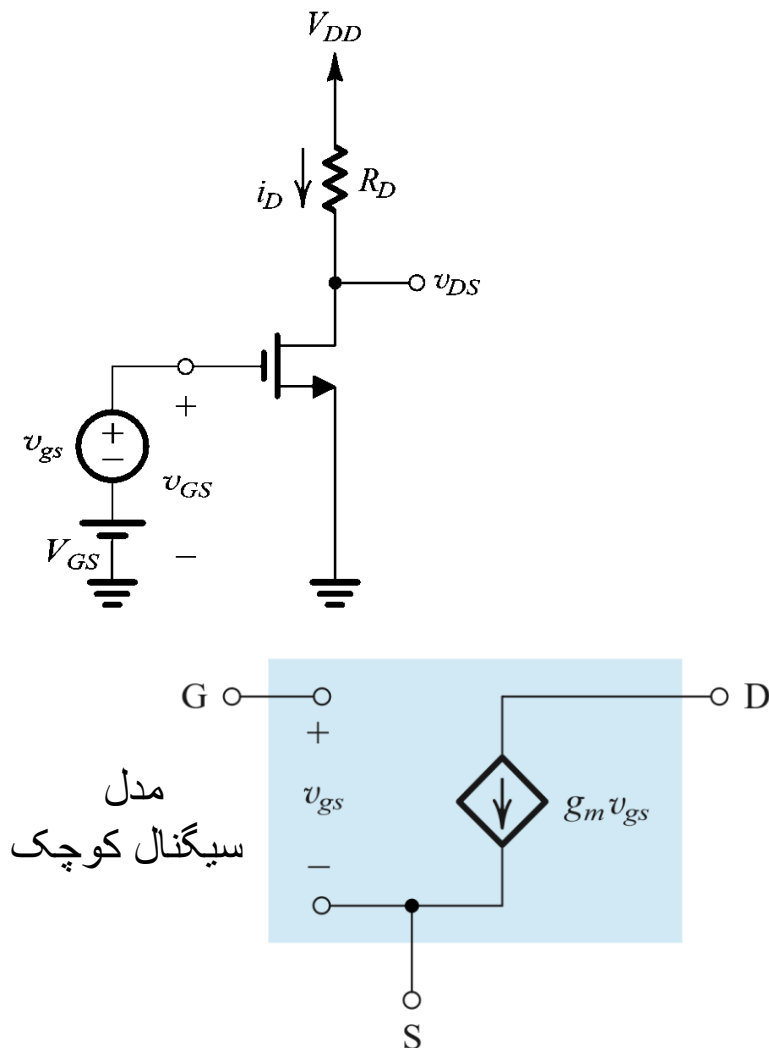
$$i_D = K \left( v_{gs} - V_t - \frac{v_{ds}}{2} \right) v_{ds} = 0.25 (20v_{ds} - v_{ds}^2) \xrightarrow{\text{use DS KVL}} \quad \square$$

$$v_{ds} = 21.8 \times$$

$$v_{ds} = 2.2 < 10 \checkmark \quad \square$$



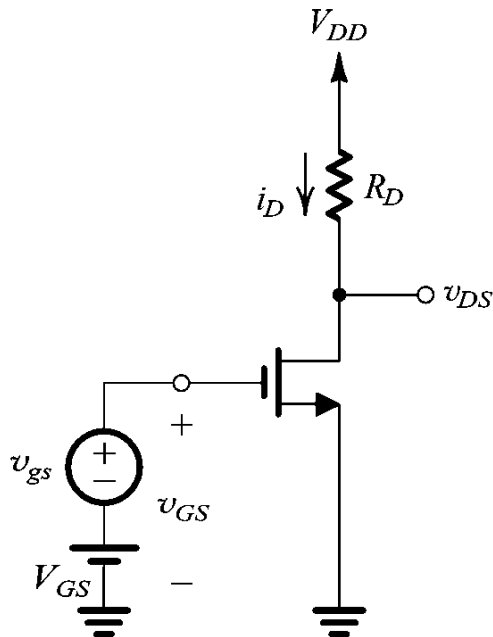
# مدل سیگنال کوچک MOSFET



در اشباع:

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \right|_{v_{GS}=V_{GS}} = K(V_{GS} - V_t)$$

# جداسازی تحلیل DC از AC



$$v_{DS} = V_{DD} - i_D R_D \quad \square$$

$$v_{DS} = \underbrace{V_{DS}}_{\text{بخش DC (بایاس)}} + \underbrace{v_{ds}}_{\text{بخش AC}} \quad i_D = \underbrace{I_D}_{\text{بخش DC (بایاس)}} + \underbrace{i_d}_{\text{بخش AC}} \quad \square$$

$$V_{DS} = V_{DD} - R_D I_D \quad \square$$

$$v_{ds} = -R_D i_d \quad \square$$

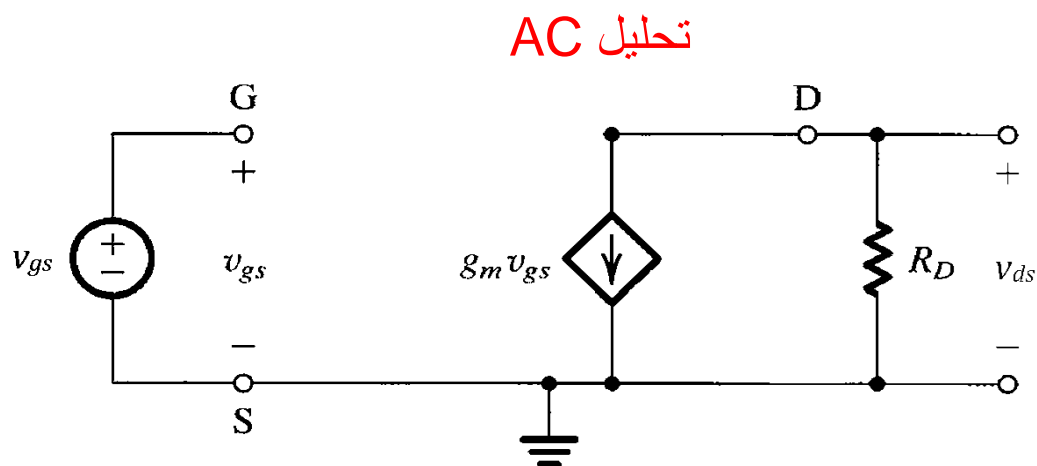
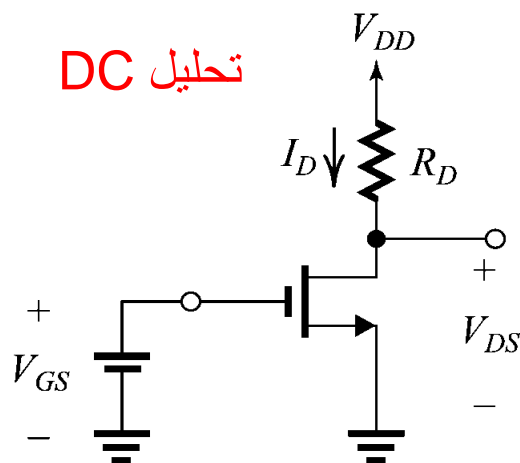
□ پاسخ به بخش DC ورودی DC است.

□ پاسخ به بخش AC ورودی هم AC است.

□ بنابراین می‌توان تحلیل DC و AC را جداگانه انجام داد.

# جداسازی تحلیل DC از AC

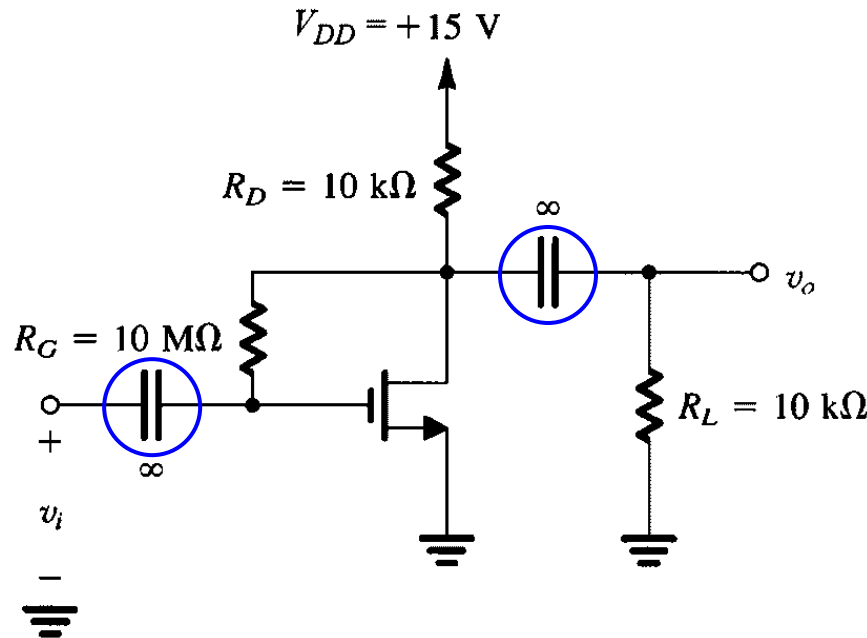
- $v_{ds} = -R_D i_d = -R_D g_m v_{gs}$
- $A_v = \frac{v_{ds}}{v_{gs}} = -g_m R_D$  بهره ولتاژ



چرا سر مقاومت  $R_D$  به زمین وصل شده است؟



□ دلیل استفاده از خازنهای کوپلینگ:



□ خازن در مقابل ولتاژهای DC مدار باز می‌شود. بنابراین اگر چند طبقه از این مدارها را به هم ببندیم، بایاس DC یک طبقه بر دیگری تاثیری ندارد و طراحی تقویت‌کننده راحت‌تر می‌شود.

□ خازن برای سیگنال AC اتصال کوتاه است (  $\frac{1}{cj\omega} \approx 0$  ) برای فرکانس‌های بالا). بنابراین سیگنال AC از خازن رد می‌شود.

# مثال (ادامه)

□ بهره ولتاژ  $A_v$  را بیابید. ( $K = 0.25 \frac{mA}{V^2}$ ,  $V_t = 1.5$ )

□ تحلیل DC

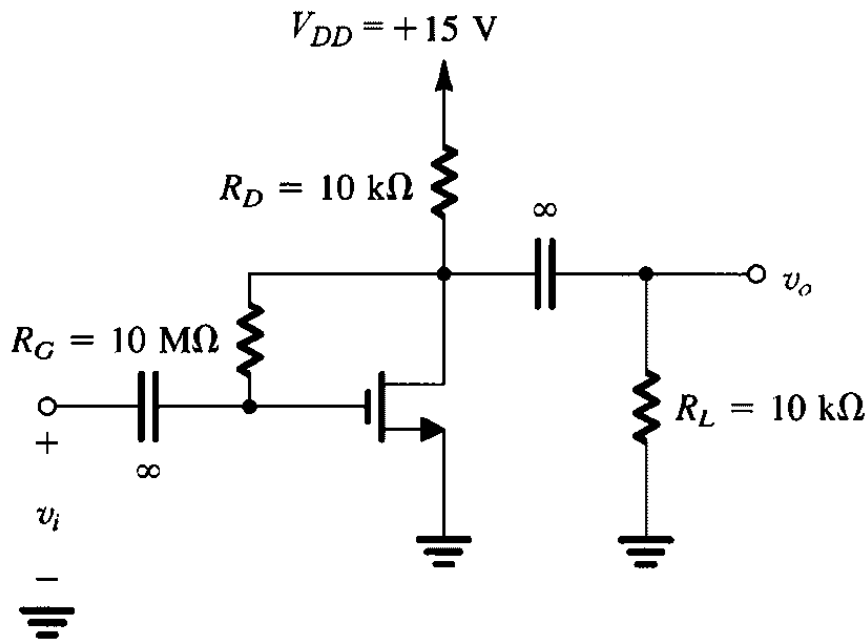
□ خازن‌ها مدار باز هستند.

□ بایاس و  $g_m$  را بیابید.

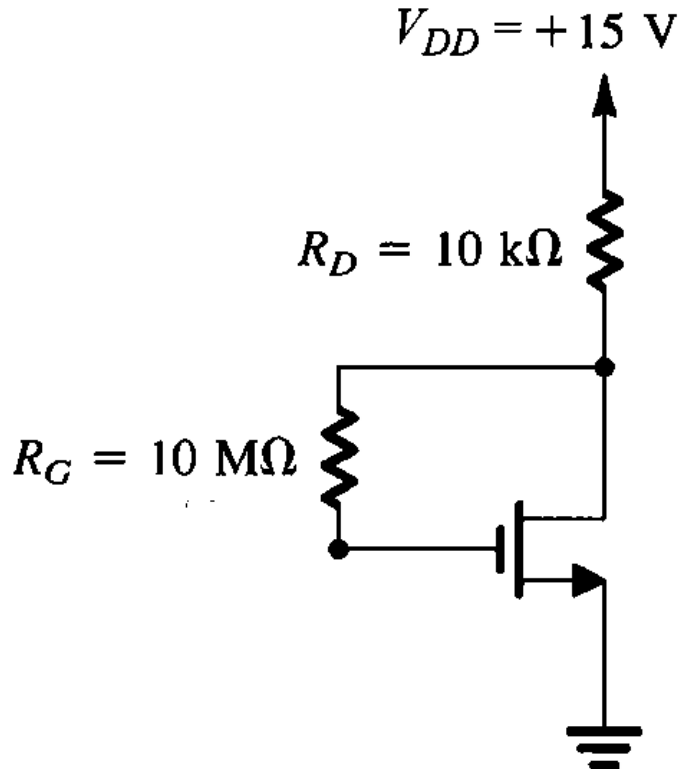
□ تحلیل AC

□ خازن‌ها اتصال کوتاه‌اند.

□ بهره  $A_v$  را بیابید.



# مثال (ادامه: تحلیل DC)



$$(K = 0.25 \frac{mA}{V^2}, V_t = 1.5) \quad \square$$

$$I_G = 0 \rightarrow V_{GS} = V_{DS} \quad \square$$

$$V_{DS} = 15 - 10000I_{DS} \quad \square$$

فرض قطع:  $\square$

$$I_{DS} = 0 \rightarrow V_{DS} = 15 \quad \square$$

$$V_{GS} = 15 > V_t \quad \times \quad \square$$

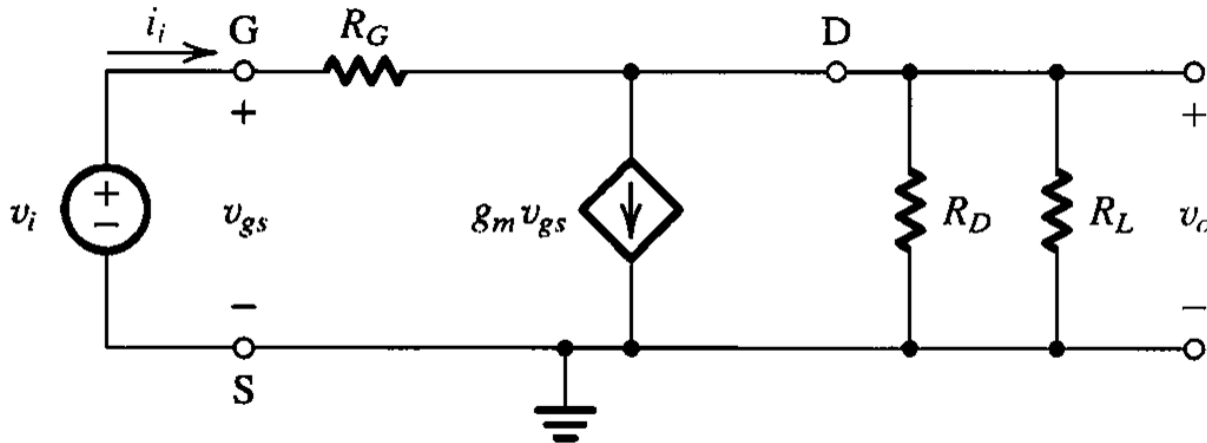
فرض اشباع:  $\square$

$$I_{DS} = 0.125(V_{GS} - 1.5)^2 \rightarrow I_{DS} = 1.06mA \quad \square$$

$$V_{GS} = V_{DS} = 4.4V \quad \square$$

$$g_m = \beta(V_{GS} - V_t) = 0.725mA/V \quad \square$$

## مثال (ادامه: تحلیل DC)



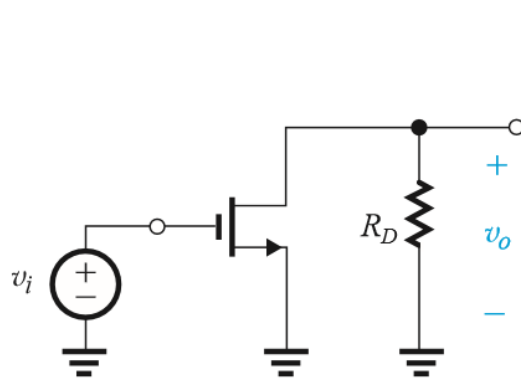
$$\square R'_L = R_D || R_L = 5K$$

$$\square v_o = R'_L (i_i - g_m v_i)$$

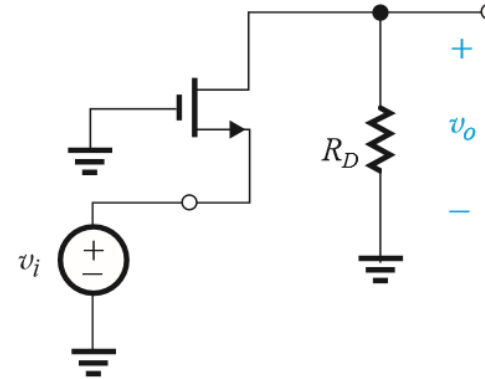
$$\square v_i = R_G i_i + v_o$$

$$\square \rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{1 - g_m R_G}{1 + R_G / R'_L} \approx -g_m R'_L = -3.625$$

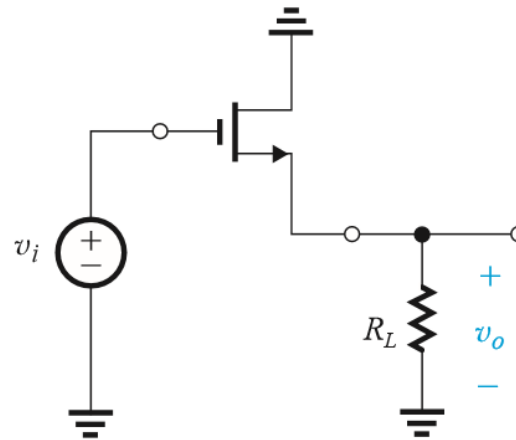
# پیکربندی‌های مختلف MOSFET



(a) Common Source (CS)

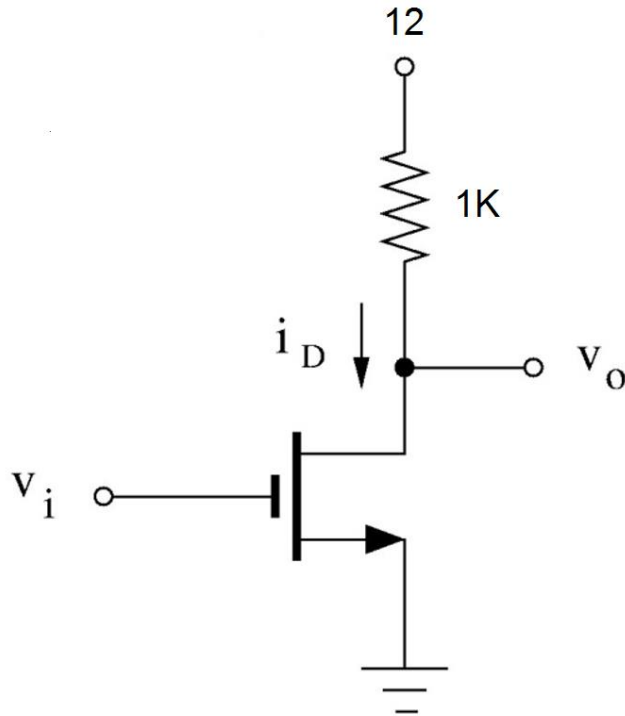


(b) Common Gate (CG)



(c) Common Drain (CD)

# ماسفت به عنوان سوئیچ



□ در مثال 3 داشتیم:

$$v_i = 0 \rightarrow v_o = 12 \quad \square$$

$$v_i = 12 \rightarrow v_o = 2.2 \quad \square$$

□ ماسفت همانند سوئیچ عمل می‌کند.

□ وقتی  $v_i$  کم است در حالت قطع هستیم.

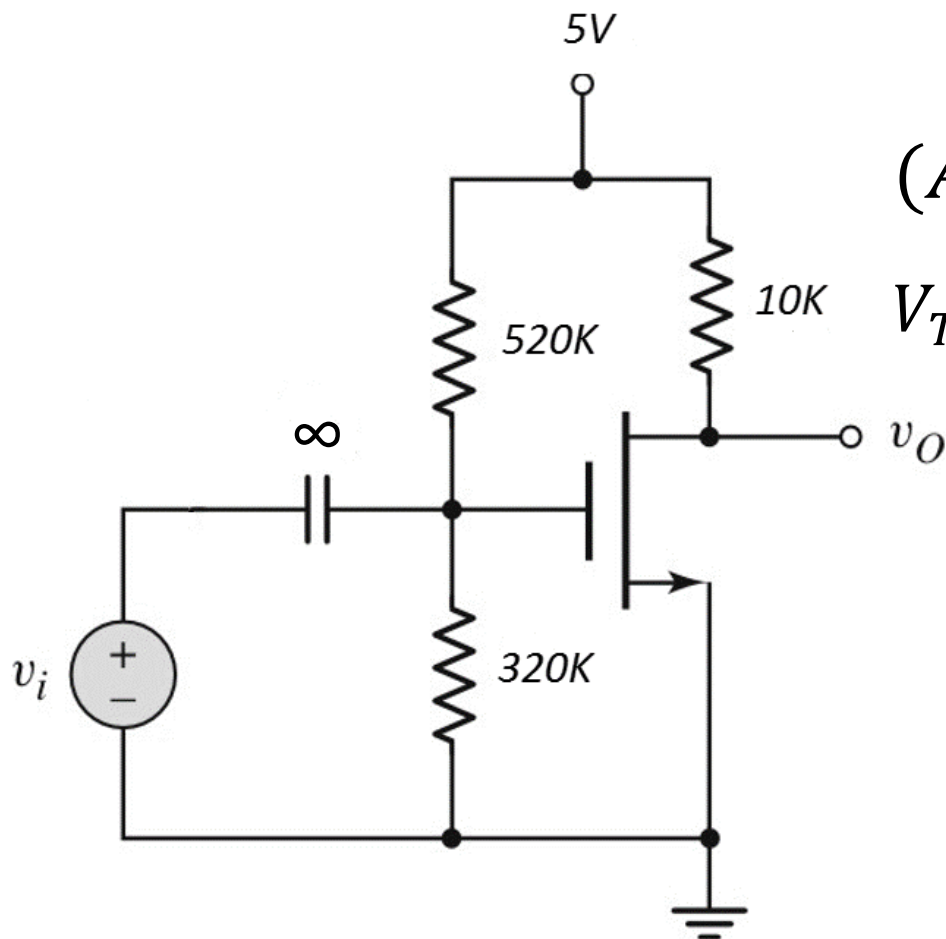
□ وقتی  $v_i$  زیاد است در حالت خطی هستیم.

□ پس این مدار یک اینورتر است.

$$v_i = 0 \rightarrow v_o = 1 \quad \square$$

$$v_i = 1 \rightarrow v_o \approx 0 \quad \square$$

# تمرین کلاسی 1 (سورس مشترک)



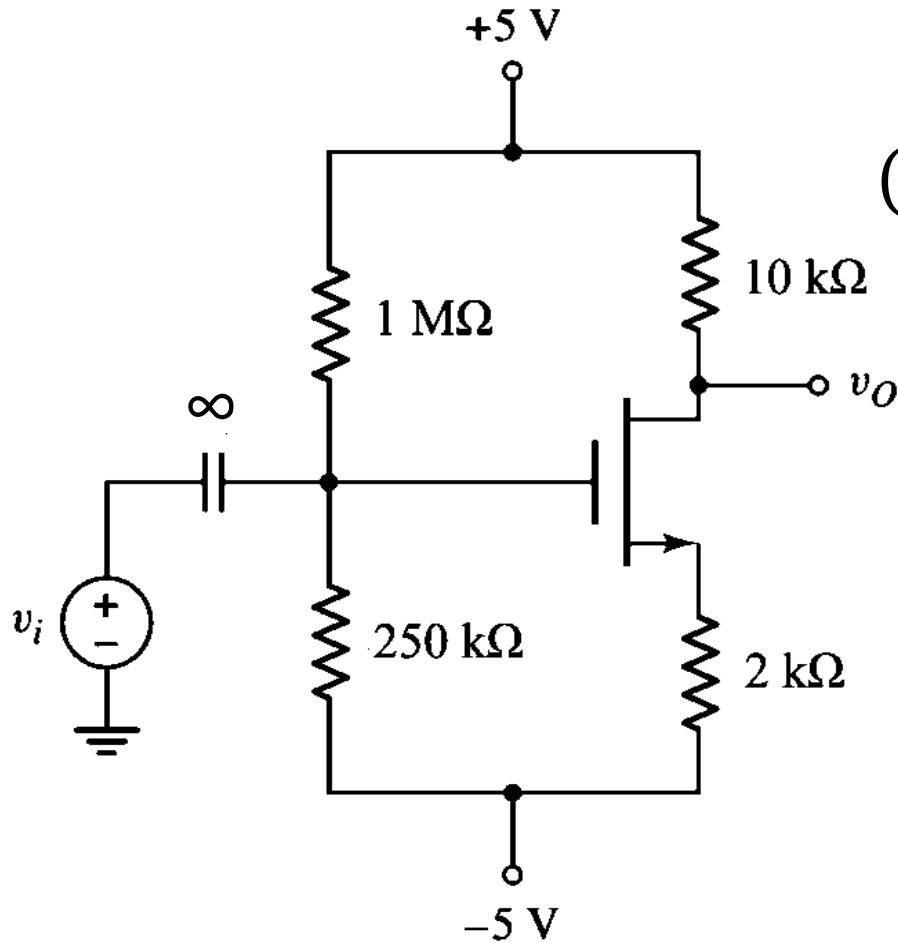
□  $g_m$  را بیابید.

□ بهره ولتاژ را بیابید. ( $A_v = \frac{v_o}{v_i}$ )

□  $V_T = 0.8V, K = 0.4mA/V^2$

□ Answer:  $g_m = 0.44mA/V$  ,  $A_v = -4.4$

## تمرین کلاسی 2 (سورس مشترک)



□  $g_m$  را بیابید.

□ بهره ولتاژ را بیابید. ( $A_v = \frac{v_o}{v_i}$ )

□  $V_T = 0.6V, K = 1mA/V^2$

□ Answer:  $g_m = 0.78mA/V$  ,  $A_v = -3$

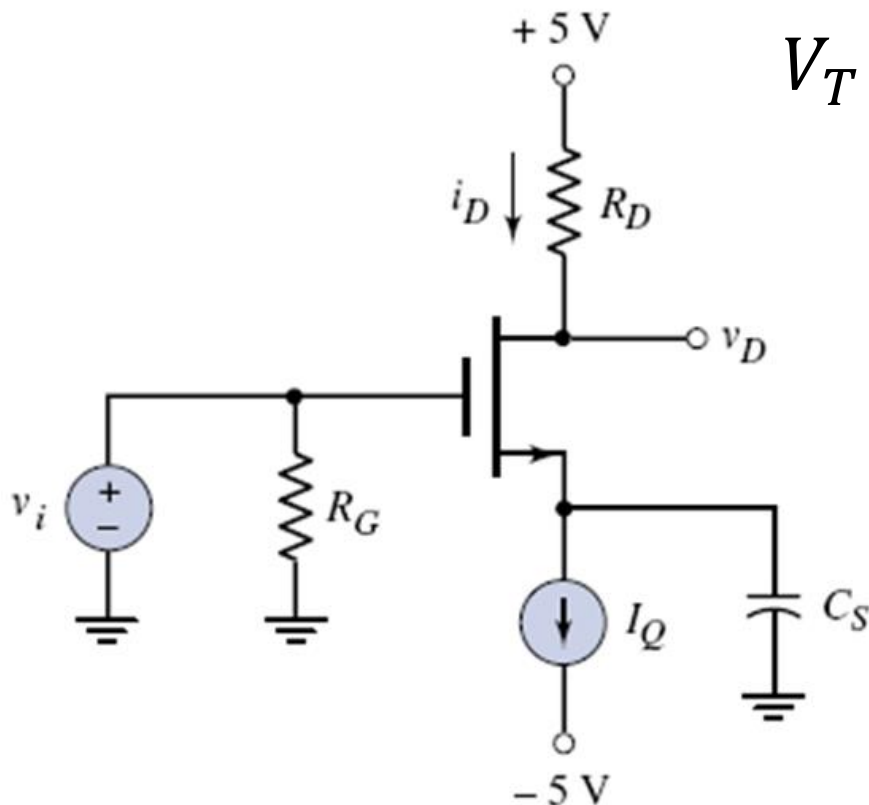


## تمرین کلاسی 3 (سورس مشترک)

□ مقاومت  $R_D$  و حالت کاری ترانزیستور را بیابید.

$$V_T = 0.8V, K = 0.24mA/V^2 \quad \square$$

$$I_Q = 250\mu A, V_D = 2.5V \quad \square$$

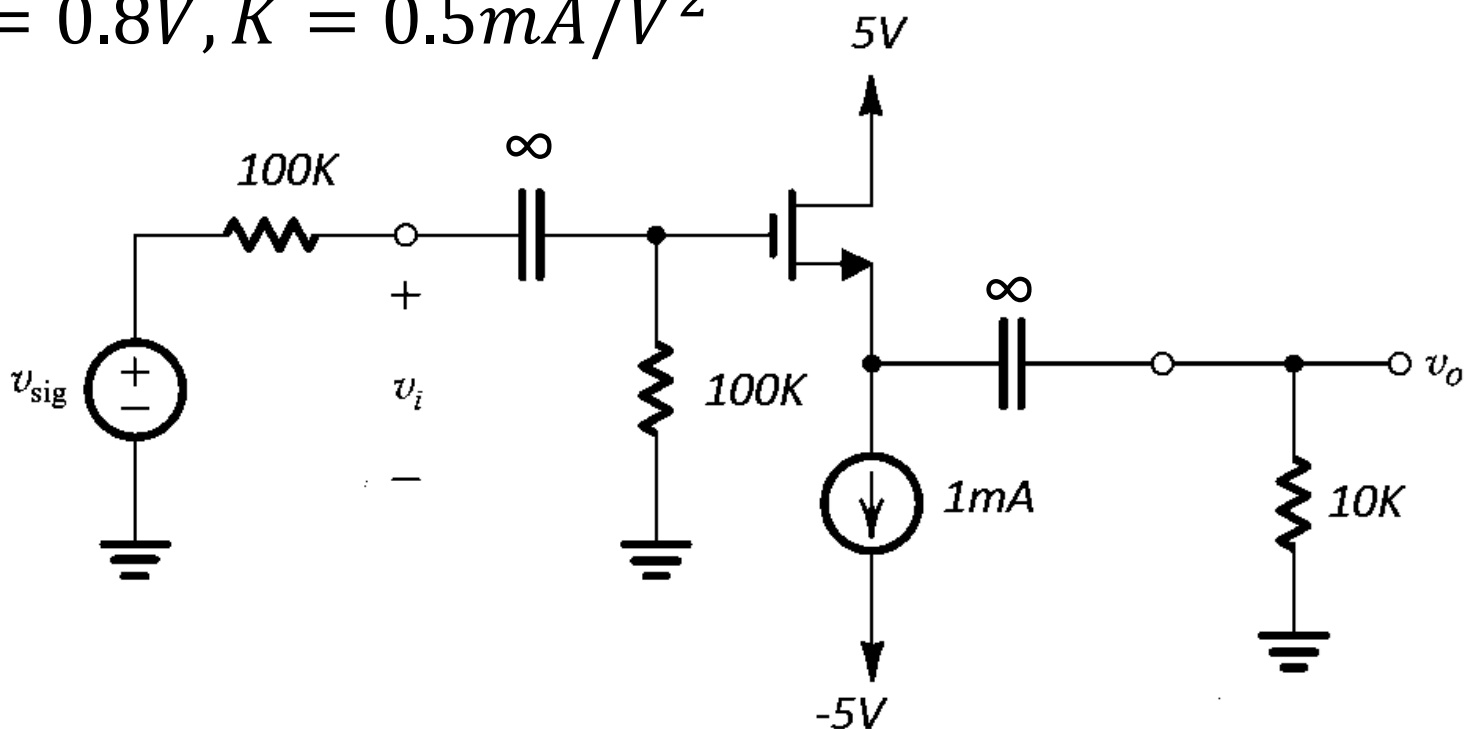


Answer:  $R_D = 10K\Omega$ , saturation □

# تمرین کلاسی 4 (درین مشترک)

□  $g_m$  و  $A_v$  را بیابید.

□  $V_T = 0.8V, K = 0.5mA/V^2$



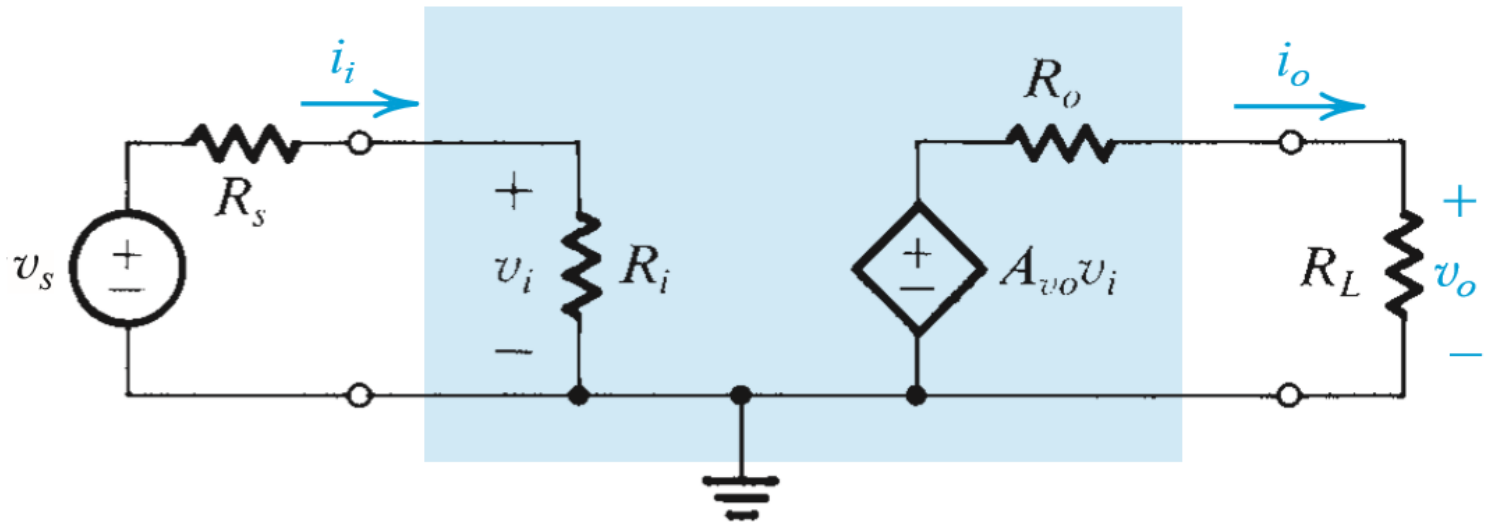
Answer:  $g_m = 1mA/V$  ,  $A_v = 0.45$  □

# مقاومت ورودی و خروجی

□ در یک تقویت کننده، معمولاً می‌خواهیم:

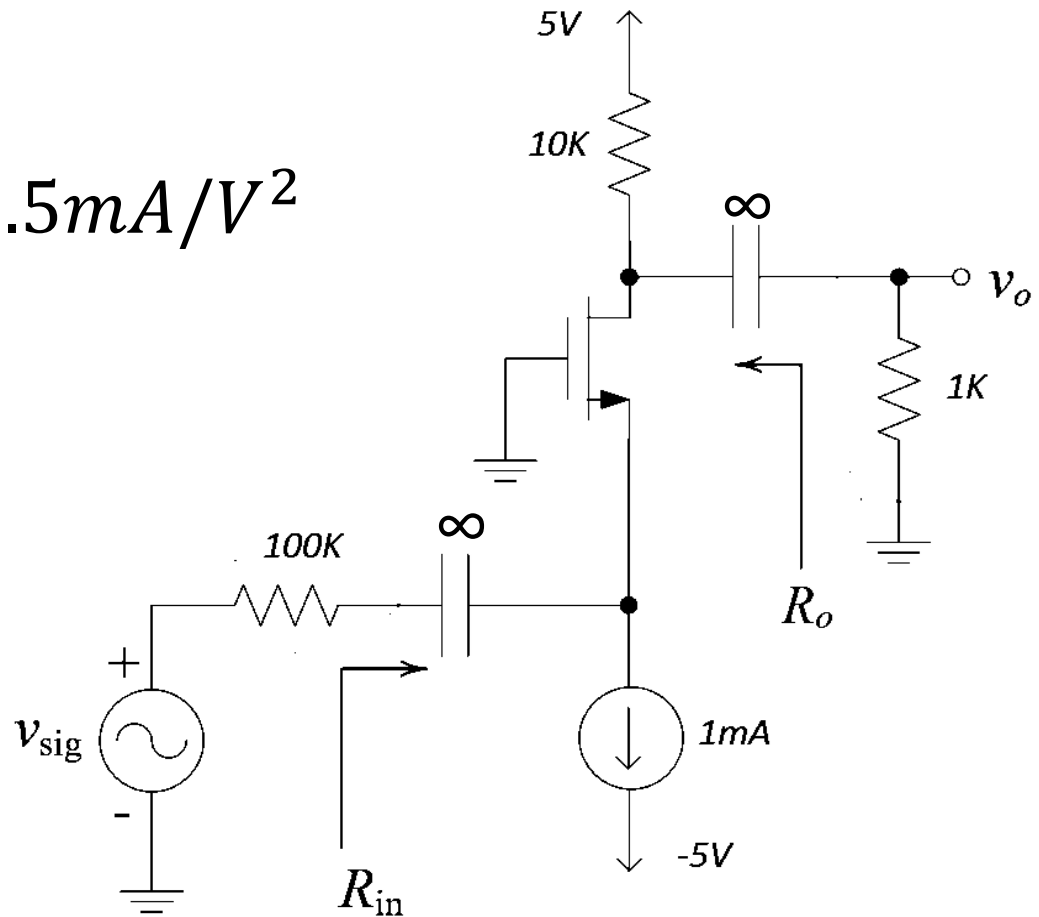
□ مقاومت ورودی  $R_i$  بزرگی داشته باشیم تا  $v_i \approx v_s$

□ مقاومت خروجی  $R_o$  کوچکی داشته باشیم تا  $v_o \approx A_v v_i$

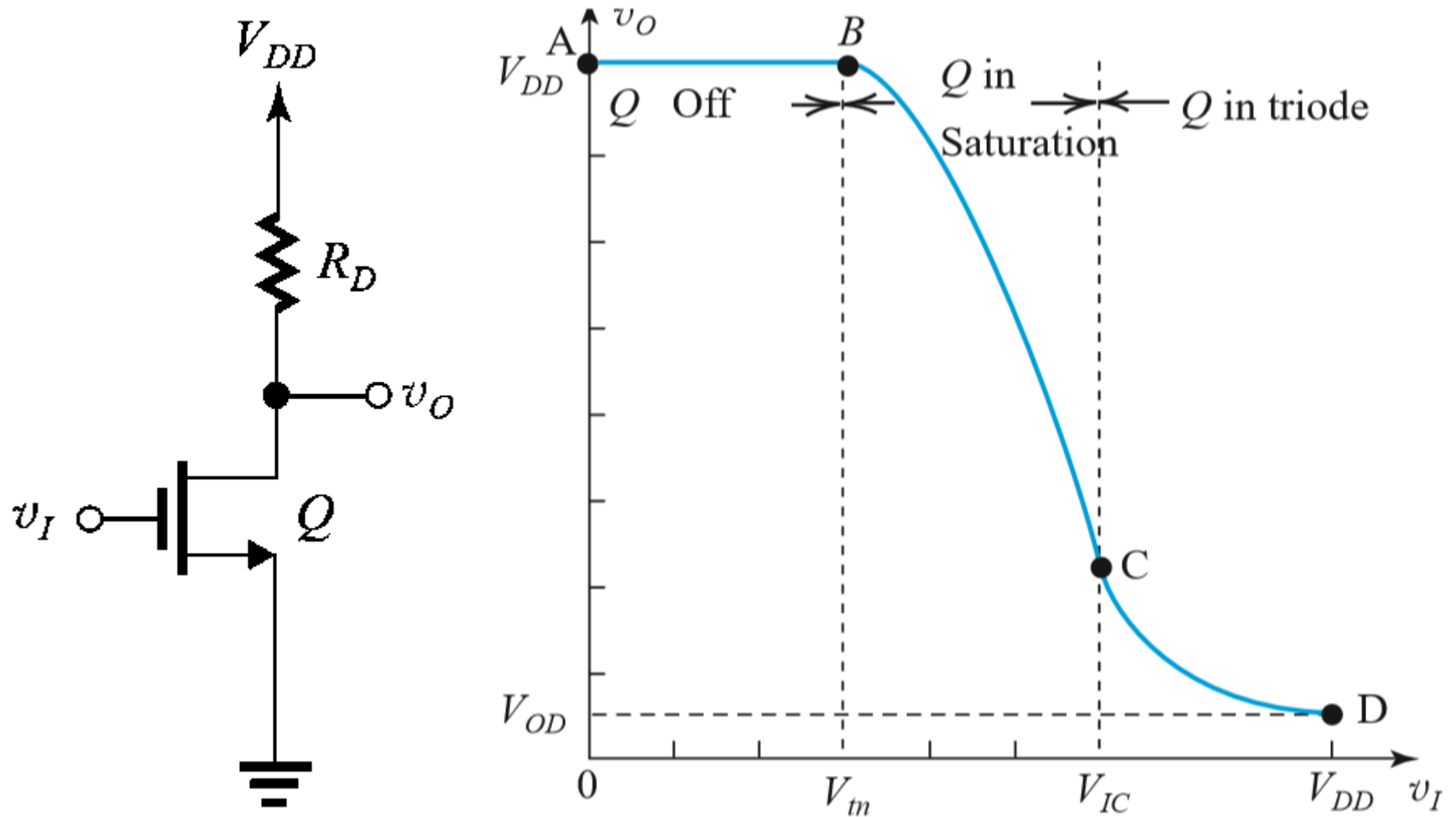


# تمرین کلاسی 5 (گیت مشترک)

- Find  $g_m$  and  $A_v$
- Find  $R_{in}$ ,  $R_o$
- $V_T = 0.8V$ ,  $K = 0.5mA/V^2$



# گیت اینورتر NMOS با بار مقاومتی



# گیت اینورتر CMOS

