

الکٹرونیک ۲

فصل اول (یادآوری)

MOSFET

مدرس: احمد توکلی



کانال تلگرام: @integrated_circuit



ایمیل: atavakoli53@gmail.com

- امروزه ترانزیستورهای فلز- اکسید- نیمرسانا ($MOSFET^1$) دنیای میکروالکترونیک را احاطه کرده‌اند.
- ایده اولیه ترانزیستورهای $MOSFET$ در دهه ۱۹۳۰ به ثبت رسید، ولی به دلیل محدودیت‌های ساخت، اجرای آن در دهه ۱۹۶۰ عملی شد.
- امروزه بیشتر مدارهای مجتمع با مقیاس بزرگ ($VLSI^2$) با استفاده از تکنولوژی MOS ساخته می‌شوند.
- دلایل برتری $MOSFET$ نسبت به BJT :
 - ✓ ساخت مدارهای دیجیتال و حافظه
 - ✓ ابعاد کوچک تراشه‌های MOS
 - ✓ ساده بودن فرایند ساخت

¹ Metal Oxide- Semiconductor Field-Effect Transistor

² Very-Large-Scale Integration

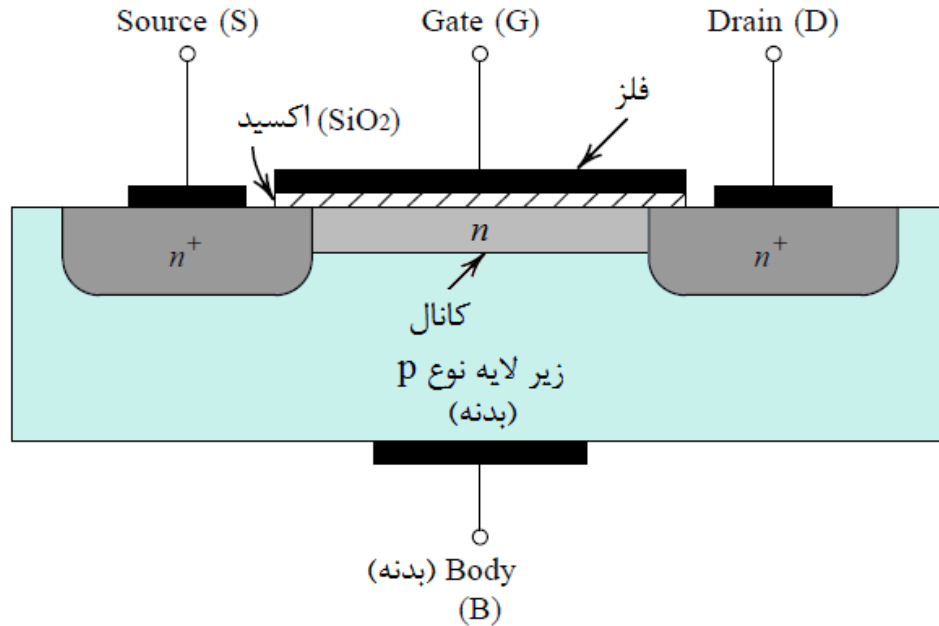
- در اواسط دهه 1960 تکنولوژی ترانزیستورهای مکمل ($CMOS^1$) انقلابی در صنعت نیم‌رسانا ایجاد کرد.
- در ساخت ترانزیستورهای CMOS، از ترانزیستورهای کانال n ($NMOS$) و کانال p ($PMOS$) بر روی یک تراشه استفاده می‌شود.
- دریچه‌های CMOS فقط هنگام سوئیچ کردن توان تلف می‌کنند، ابعاد کوچکتری دارند و هزینه ساخت پایینی دارند.

¹ Complementary Metal-Oxide-Semiconductor

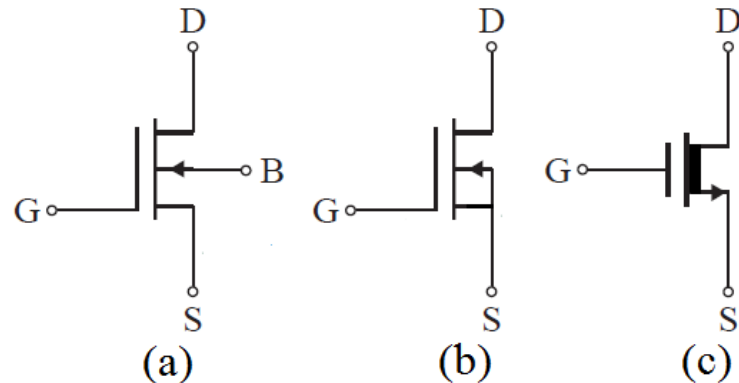
انواع MOSFET:

- بر خلاف ترانزیستورهای JFET که همگی از نوع تخلیه‌ای هستند، ترانزیستورهای MOSFET به دو نوع تخلیه‌ای و افزایشی تقسیم می‌شوند:
- ✓ MOSFET تخلیه‌ای یا کاهش‌ی (Depletion MOSFET) که در این نوع MOSFET کانال در طی فرایند ساخت ترانزیستور ایجاد می‌شود.
- ✓ MOSFET افزایشی یا ارتقای (Enhancement MOSFET) که در این نوع MOSFET کانال در حین کار و با بایاس شدن ترانزیستور ایجاد می‌شود.
- در هر دو نوع ترانزیستور، گیت توسط یک لایه عایق از کانال جدا می‌شود
- با توجه به نوع کانال، هر یک از ترانزیستورهای D-MOSFET و E-MOSFET به دو نوع کانال n و کانال P تقسیم می‌شوند که به آنها NMOS و PMOS گفته می‌شود.

MOSFET تخلیه‌ای (D-MOSFET):



ساختمان D-MOSFET کانال n-



(a) نماد مداری D-MOSFET کانال n-

(b) نماد مداری وقتی که سورس به بدنه وصل باشد

(c) نماد مداری ساده شده شکل (b)

✓ D-MOSFET بسیار شبیه JFET عمل می‌کند.

✓ D-MOSFET می‌تواند در دو حالت تخلیه‌ای و افزایشی کار کند:

➤ ناحیه بین مقدار قطع ($V_{GS} = V_P$) و مقدار اشباع I_{DSS} ناحیه تخلیه‌ای نام دارد.

➤ ناحیه ولتاژهای مثبت گیت، ناحیه افزایشی نام دارد.

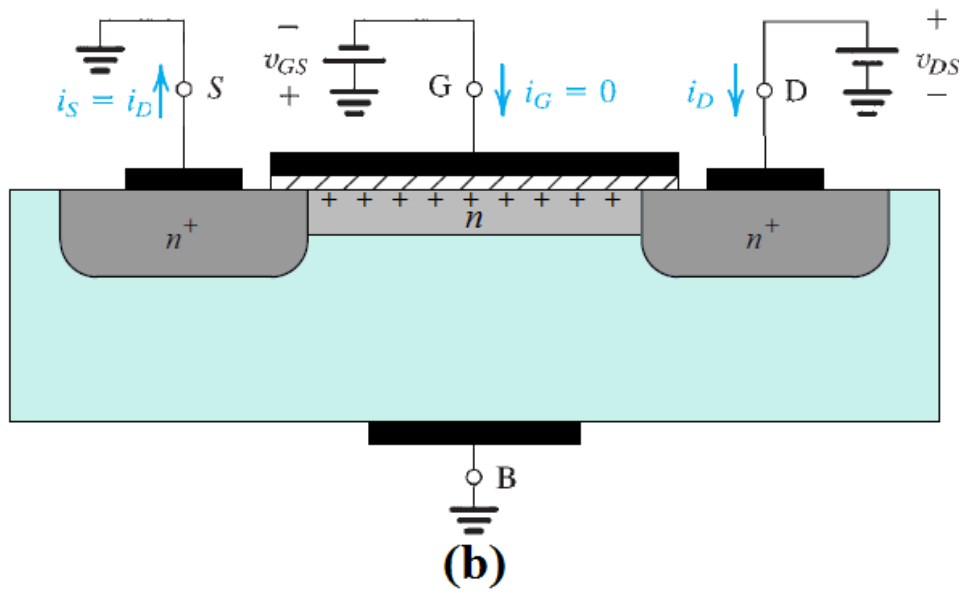
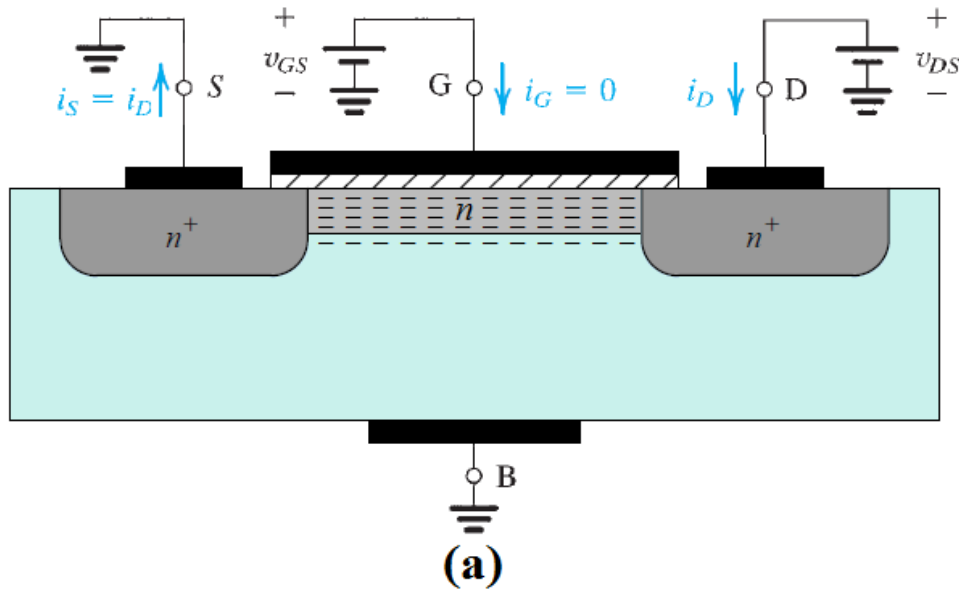
MOSFET

MOSFET تخلیه‌ای (D-MOSFET):

معادله جریان کانال در ناحیه اشباع:

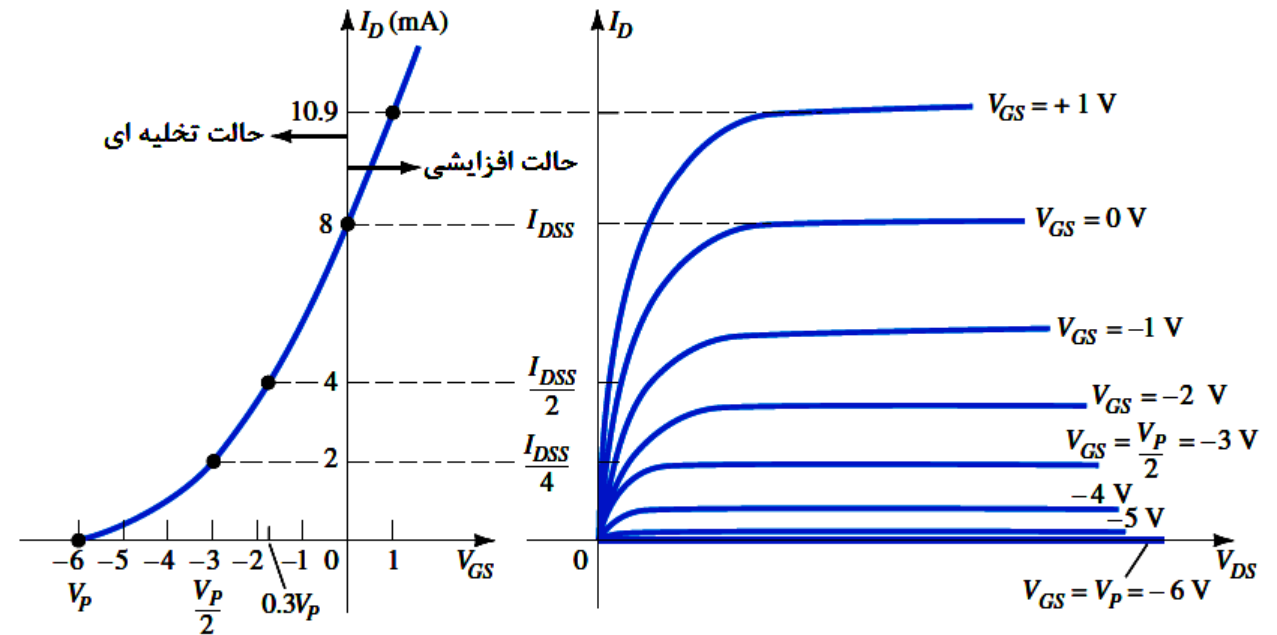
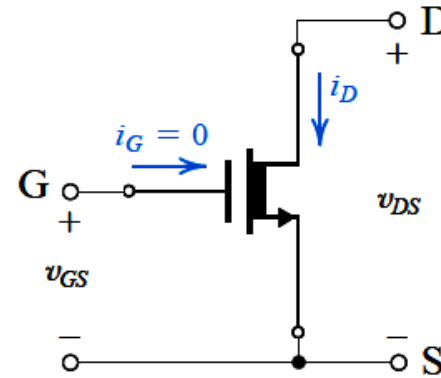
$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

شرط قرار داشتن D-MOSFET در ناحیه اشباع: $V_{DS} \geq V_{GS} - V_P$



عملکرد D-MOSFET:

(a) حالت افزایشی (b) حالت تخلیه‌ای



منحنی مشخصه انتقالی و خروجی D-MOSFET کانال - n

MOSFET افزایشی (E-MOSFET):

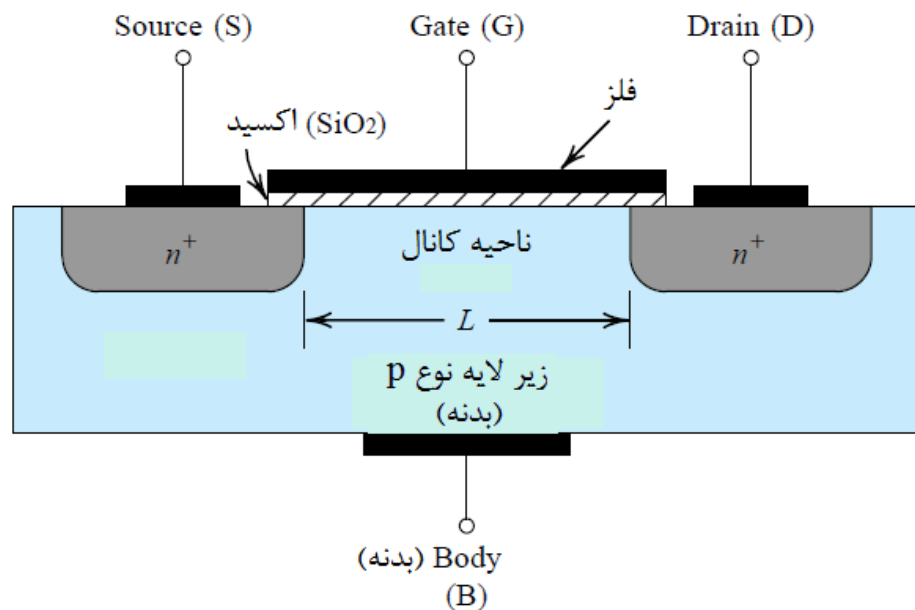
✓ در این نوع MOSFET چون کانال در هنگام ساخت ترانزیستور ایجاد نشده، بنابراین اتصال درین و سورس به صورت دو پیوند pn پشت به پشت هستند و در نتیجه هیچ جریانی از کانال عبور نمی کند.

✓ با اعمال ولتاژ V_{GS} مثبت، الکترون ها که حامل های اقلیت بستر p هستند به سمت گیت کشیده می شوند.

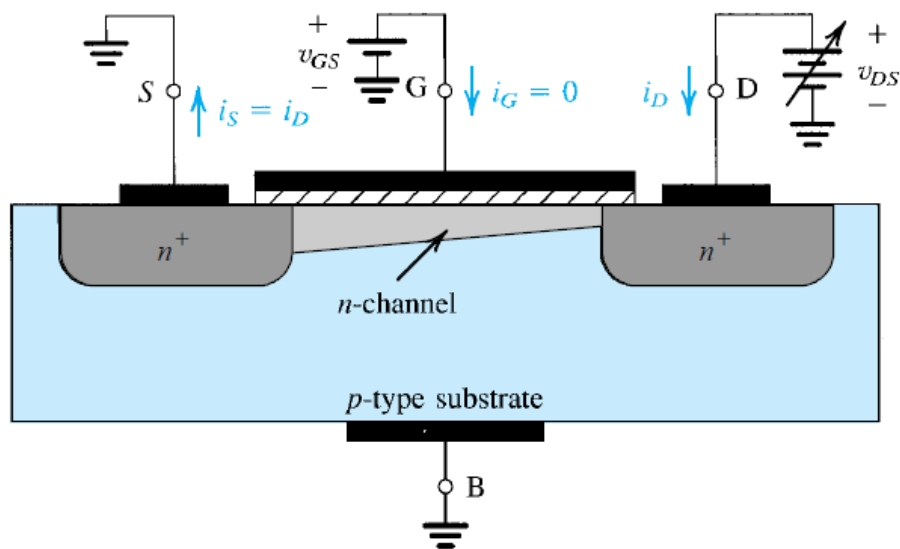
✓ پس از اینکه ولتاژ مثبت گیت به مقدار معینی به نام ولتاژ آستانه (Threshold) رسید، مقدار الکترون ها در اطراف گیت به حدی می رسد که کانال بین درین و سورس ایجاد شده و جریان در آن برقرار می شود.

✓ از این پس با افزایش بیشتر V_{GS} ، جریان I_D افزایش می یابد.

نکته: ولتاژ آستانه را با V_T یا V_{TH} نشان می دهند.

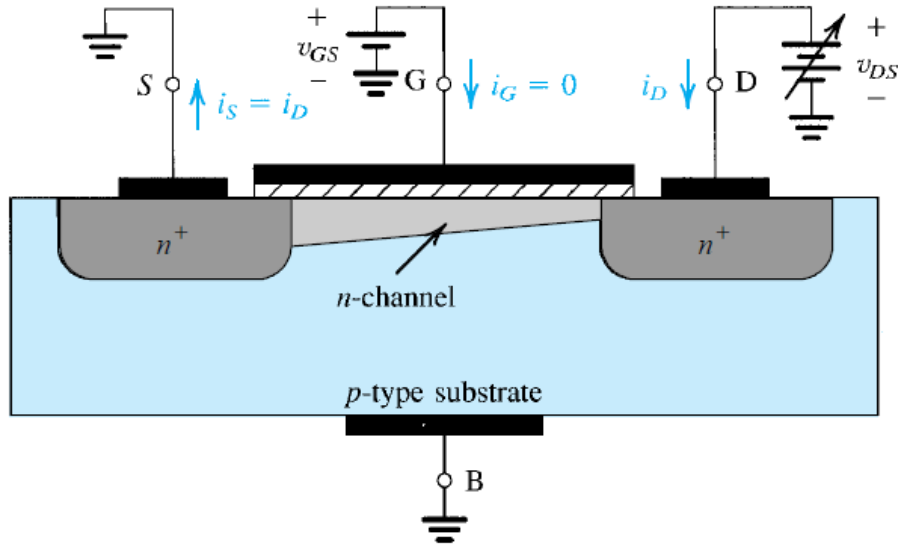


ساختمان E-MOSFET کانال n-



MOSFET

MOSFET افزایشی (E-MOSFET):



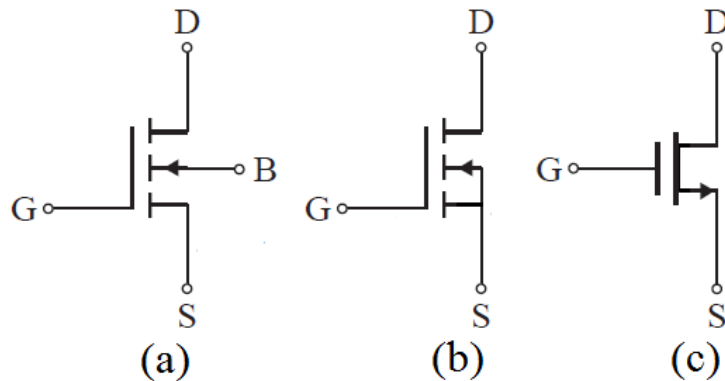
✓ چون اختلاف پتانسیل بین گیت و سورس بیشتر است، بنابراین عرض کانال در مجاورت سورس بیشتر از درین است.

✓ مقدار V_T بین ۱ تا ۳ ولت است.

✓ مقدار V_T برای ترانزیستورهای NMOS مثبت و برای ترانزیستورهای PMOS منفی است.

✓ اگر V_{GS} کمتر از V_T باشد، جریان I_D چشمگیر نخواهد بود.

✓ نماد مداری MOSFET کانال n به صورت مقابل است.

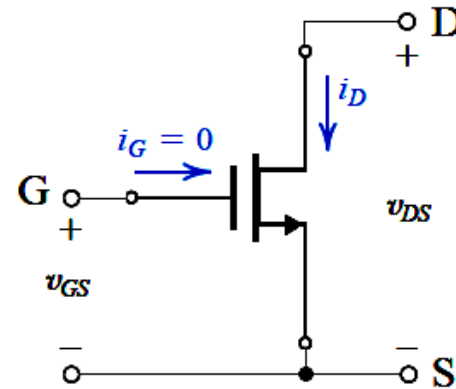
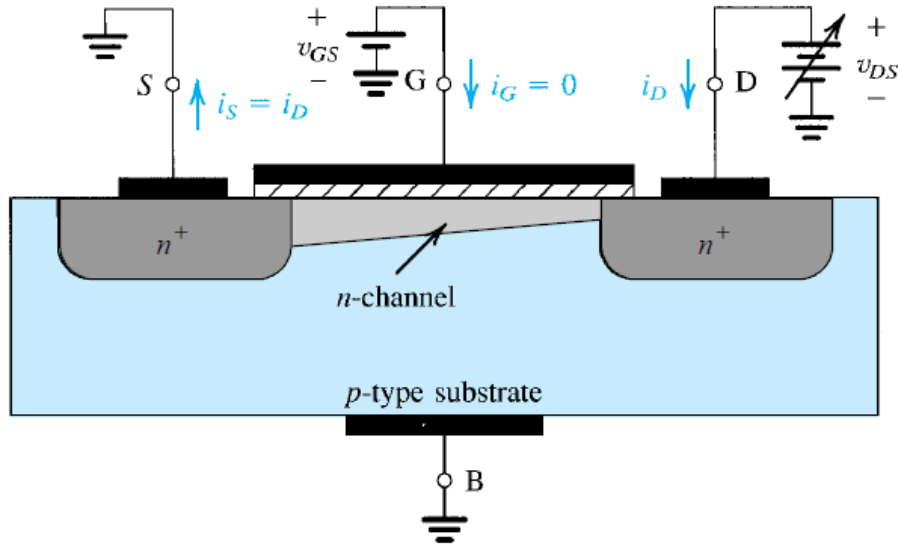


(a) نماد مداری D-MOSFET کانال n-

(b) نماد مداری وقتی که سورس به بدنه وصل باشد

(c) نماد مداری ساده شده شکل (b)

MOSFET افزایشی (E-MOSFET):



معادله جریان کانال در ناحیه اشباع:

$$I_D = K(V_{GS} - V_{TH})^2$$

مقدار ثابت K برابر است با: $K = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right)$

واحد K ، mA/V^2 می باشد.

μ_n : تحرک الکترون ها در کانال n ایجاد شده

C_{ox} : ظرفیت واحد سطح خازن گیت به کانال بر حسب $F/\mu m^2$

L : طول کانال بر حسب μm

W : پهنای کانال بر حسب μm

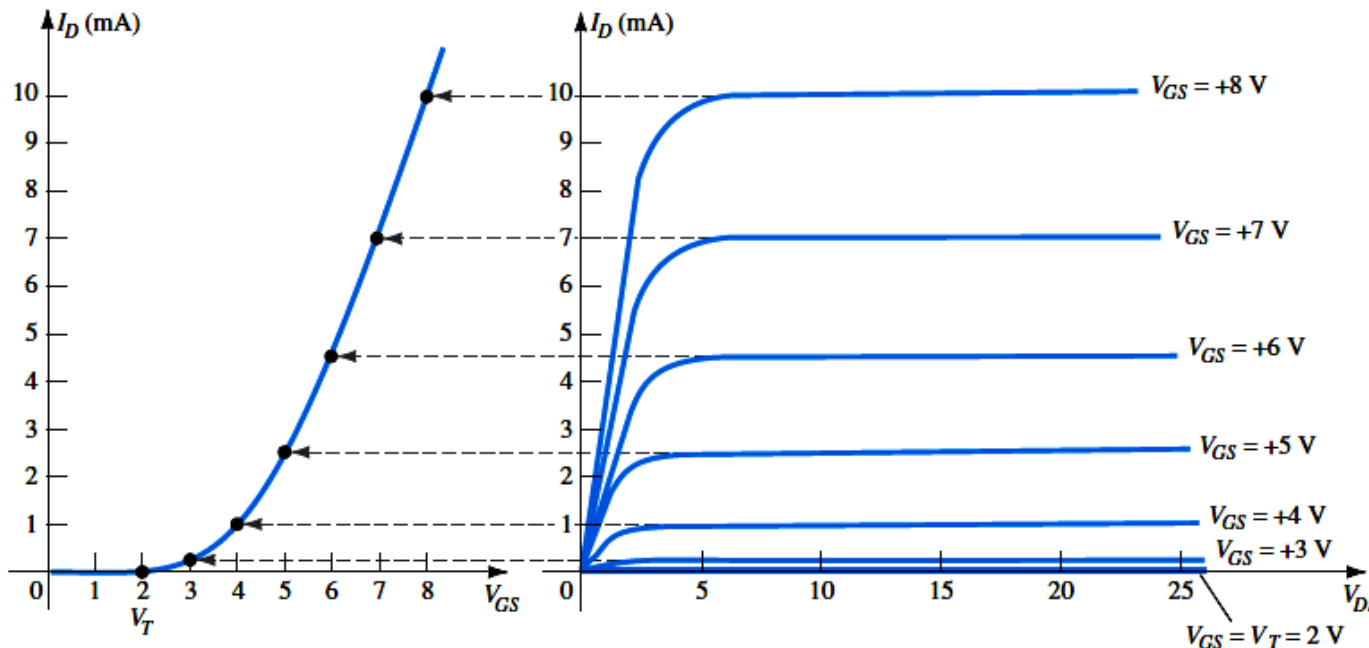
نسبت W/L را «نسبت ابعاد» می نامند.

شرط قرار داشتن E-MOSFET در ناحیه اشباع:

$$V_{DS} \geq V_{GS} - V_{TH}$$

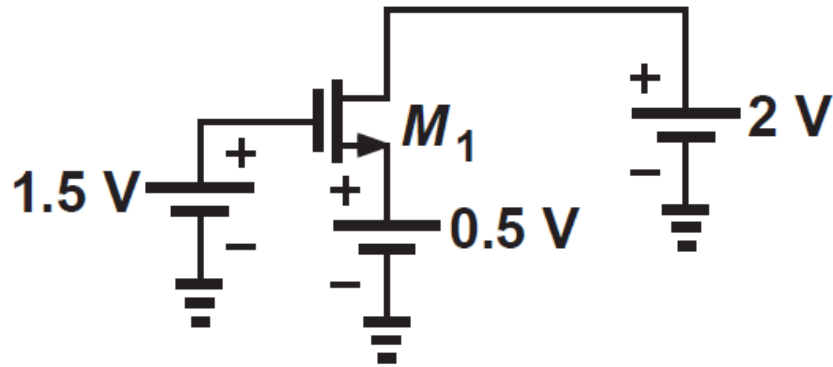
$V_{GS} - V_{TH}$ را ولتاژ اضافه تحریک (Overdrive)

نیز می نامند: $V_{od} = V_{GS} - V_{TH}$



منحنی مشخصه انتقالی و خروجی E-MOSFET کانال n -

MOSFET افزایشی (E-MOSFET):



مثال ۱: در مدار مقابل اگر $V_T = 0.4V$ و $\mu_n C_{ox} = 200 \mu A/V^2$ باشد، ناحیه کار ترانزیستور را به دست آورید.

حل:

$$V_{GS} = V_G - V_S = 1.5 - 0.5 = 1V$$

چون $V_{GS} > V_T$ است پس ترانزیستور قطع نیست.

$$V_{DS} = V_D - V_S = 2 - 0.5 = 1.5V$$

$$V_{od} = V_{GS} - V_T = 1 - 0.4 = 0.6V$$

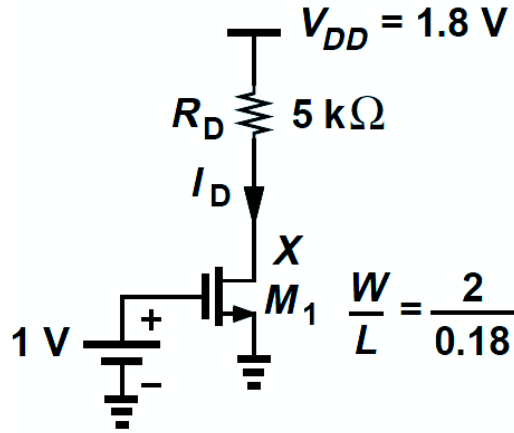
ولتاژ اضافه تحریک:

$$V_{DS} \geq V_{od} \text{ یا } V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$$

شرط اشباع ترانزیستور:

چون این شرط برقرار است پس ترانزیستور در ناحیه اشباع قرار دارد.

MOSFET افزایشی (E-MOSFET):



مثال ۲: در مدار مقابل اگر $V_{TH} = 0.4V$ و $\mu_n C_{ox} = 100 \mu A/V^2$ باشد، جریان درین (I_D) را محاسبه

کنید. اگر ولتاژ گیت به اندازه 10mV افزایش پیدا کند، ولتاژ درین چه مقدار افزایش پیدا می کند؟

حل: چون $V_{GS} > V_T$ است پس ترانزیستور در ناحیه قطع قرار ندارد.

حال باید ببینیم ترانزیستور در ناحیه اشباع قرار دارد یا خطی. از آنجا که $V_{GS} = 1V$ است، بنابراین:

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_T)^2 = \frac{1}{2} \times 100 \times 10^{-6} \left(\frac{2}{0.18} \right) (1 - 0.4)^2 = 200 \mu A$$

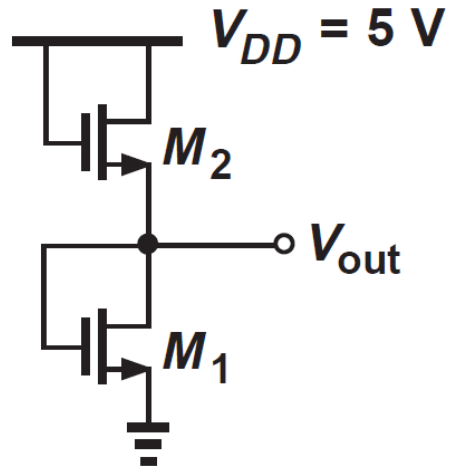
حال ولتاژ V_{DS} را محاسبه می کنیم تا ببینیم آیا فرض ناحیه اشباع ترانزیستور صحیح است یا خیر: $V_{DS} = V_{DD} - R_D I_D = 0.8V$

شرط قرار داشتن ترانزیستور در ناحیه اشباع این است که $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$. می بینیم که این شرط برقرار بوده و ترانزیستور در ناحیه اشباع قرار دارد.

اگر ولتاژ گیت ۱۰ میلی ولت افزایش پیدا کند، یعنی $V_{GS} = 1.01V$ شود، جریان I_D برابر است با: $I_D = 206.7 \mu A$

در این صورت ولتاژ درین برابر است با: $V_{DS} = 0.766V$. یعنی ترانزیستور همچنان در ناحیه اشباع قرار دارد.

MOSFET افزایشی (E-MOSFET):



مثال ۳: در مدار مقابل اگر برای هر دو ترانزیستور $K = 0.1 \text{ mA/V}^2$ باشد، V_o را در دو حالت زیر محاسبه کنید:

الف) $V_{T1} = V_{T2} = 2 \text{ V}$ ب) $V_{T1} = 2V_{T2} = 2 \text{ V}$

حل:

$$\begin{cases} V_{GS1} = V_o \\ V_{GS2} = V_{DD} - V_o = 5 - V_o \end{cases}$$

الف) به ازای $V_{T1} = V_{T2}$ دو ترانزیستور کاملاً مشابه هستند و چون جریان درین ترانزیستورها نیز برابر است، بنابراین باید V_{GS} دو ترانزیستور نیز برابر باشد. یعنی: $V_{GS1} = V_{GS2}$

$$V_{GS1} = V_{GS2} \Rightarrow V_o = 5 - V_o \Rightarrow V_o = 2.5 \text{ V}$$

ب) به ازای $V_{T1} = 2V_{T2}$ چون جریان درین ترانزیستورها برابر است، بنابراین:

$$V_{T1} = 2V_{T2} = 2 \text{ V} \Rightarrow V_{T2} = 1 \text{ V}$$

$$I_{D1} = I_{D2} \Rightarrow K(V_{GS1} - V_{T1})^2 = K(V_{GS2} - V_{T2})^2 \Rightarrow (V_o - 2)^2 = (5 - V_o - 1)^2 \Rightarrow (V_o - 2)^2 = (4 - V_o)^2$$

$$V_o - 2 = 4 - V_o \Rightarrow 2V_o = 6 \text{ V} \Rightarrow V_o = 3 \text{ V}$$

با توجه به اینکه جریان گیت صفر است:

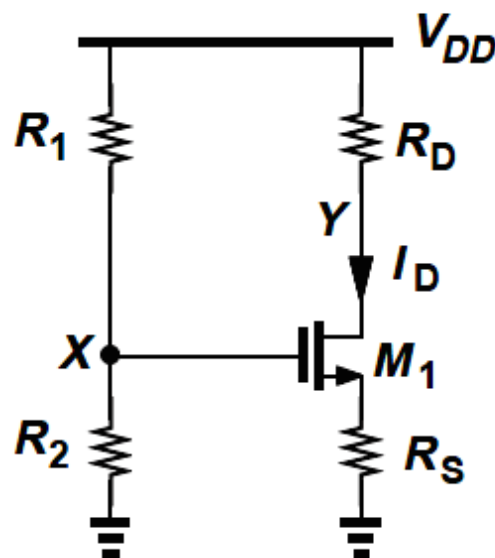
$$V_X = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD}. \quad (۱)$$

از آنجا که $V_X = V_{GS} + I_D R_S$,

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} = V_{GS} + I_D R_S. \quad (۲)$$

از طرف دیگر:

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2. \quad (۳)$$



بایاس با مقاومت های مقسم ولتاژ از معادلات (۲) و (۳) می توان مقادیر V_{GS} و I_D را محاسبه کرد.

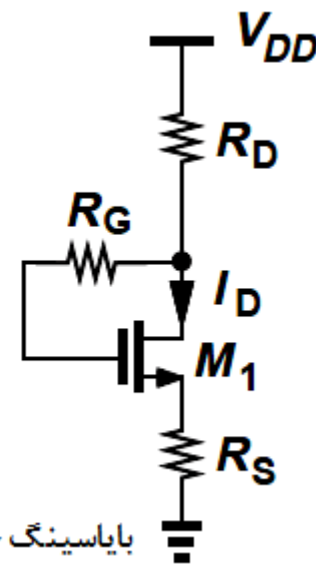
در این بایاسینگ، ترانزیستور M_1 همواره در ناحیه اشباع قرار دارد (چرا؟)

چون افت ولتاژ دو سر مقاومت R_G صفر است،

$$I_D R_D + V_{GS} + R_S I_D = V_{DD}. \quad (۱)$$

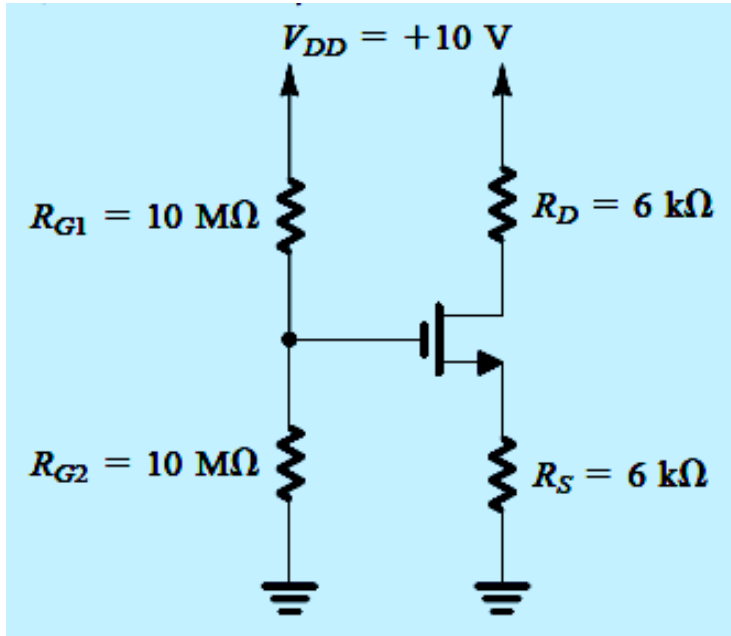
بنابراین رابطه جریان کانال را می توان به صورت زیر نوشت:

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} [V_{DD} - (R_S + R_D) I_D - V_{TH}]^2 \quad (۲)$$



بایاسینگ خودبایاس

E-MOSFET بایاسینگ



مثال ۴: در مدار مقابل اگر $V_{TH} = 1V$ و $\mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right) = 1 \text{ mA/V}^2$ باشد، نقطه کار ترانزیستور (V_{DS} و I_D) را محاسبه کنید.

حل:

$$V_G = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \times V_{DD} = \frac{10}{10 + 10} \times 10 = 5V$$

$$V_S = R_S I_D = 6I_D$$

$$V_{GS} = V_G - V_S = 5 - 6I_D$$

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right) (V_{GS} - V_T)^2 = \frac{1}{2} \times 1 \times (5 - 6I_D - 1)^2$$

$$18I_D^2 - 25I_D + 8 = 0$$

با حل معادله دو مقدار برای I_D به دست می آید: $I_D = 0.5\text{mA}$ و $I_D = 0.89\text{mA}$

$$\begin{cases} I_D = 0.5\text{mA} \Rightarrow V_{GS} = 5 - 6I_D = 2V \\ I_D = 0.89\text{mA} \Rightarrow V_{GS} = 5 - 6I_D = -0.34V < V_{TH} \text{ پس قابل قبول نیست} \end{cases}$$

با مقدار $I_D = 0.5\text{mA}$ ولتاژ V_{DS} را محاسبه می کنیم: $V_{DS} = V_{DD} - (R_D + R_S)I_D = 4V$

شرط قرار داشتن ترانزیستور در ناحیه اشباع این است که $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$ می بینیم که این شرط برقرار است و ترانزیستور در ناحیه اشباع قرار دارد.

E-MOSFET بایاسینگ

مثال ۵: در مدار مقابل اگر $V_D = 0.5V$ و $I_D = 0.4mA$ باشد، مقدار مقاومت‌های R_D و R_S را محاسبه کنید. برای ترانزیستور $W = 32\mu m$ و $L = 1\mu m$ ، $\mu_n C_{ox} = 100\mu A/V^2$ ، $V_T = 0.7V$ است.

حل:

$$V_D = V_{DD} - R_D I_D \Rightarrow R_D = \frac{V_{DD} - V_D}{I_D} = \frac{2.5 - 0.5}{0.4} = 5K\Omega$$

برای محاسبه R_S ابتدا باید V_{GS} را به دست آوریم:

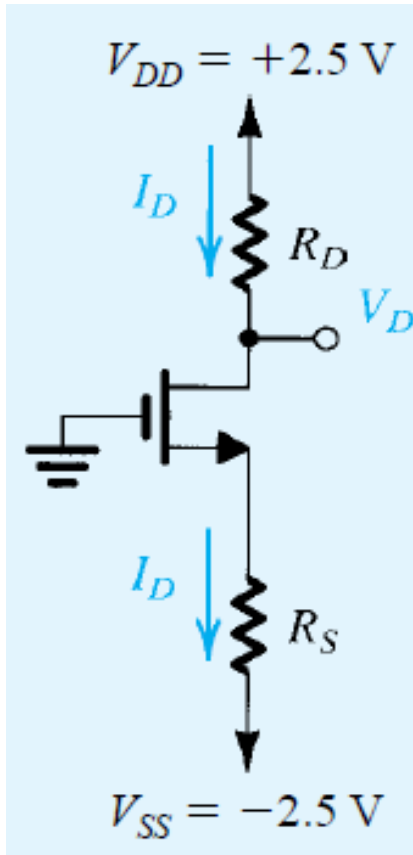
$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_T)^2$$

$$0.4 = \frac{1}{2} \times 100 \times 10^{-3} \times \left(\frac{32\mu}{1\mu} \right) (V_{GS} - 0.7)^2 \Rightarrow 0.4 = 1.6(V_{GS} - 0.7)^2$$

$$(V_{GS} - 0.7)^2 = 0.25 \Rightarrow V_{GS} - 0.7 = 0.5 \Rightarrow V_{GS} = 1.2V$$

$$V_{GS} = V_G - V_S \Rightarrow V_S = V_G - V_{GS} = 0 - 1.2 = -1.2V$$

$$V_S = R_S I_D + V_{SS} \Rightarrow R_S = \frac{V_S - V_{SS}}{I_D} = \frac{-1.2 - (-2.5)}{0.4} = 3.25K\Omega$$



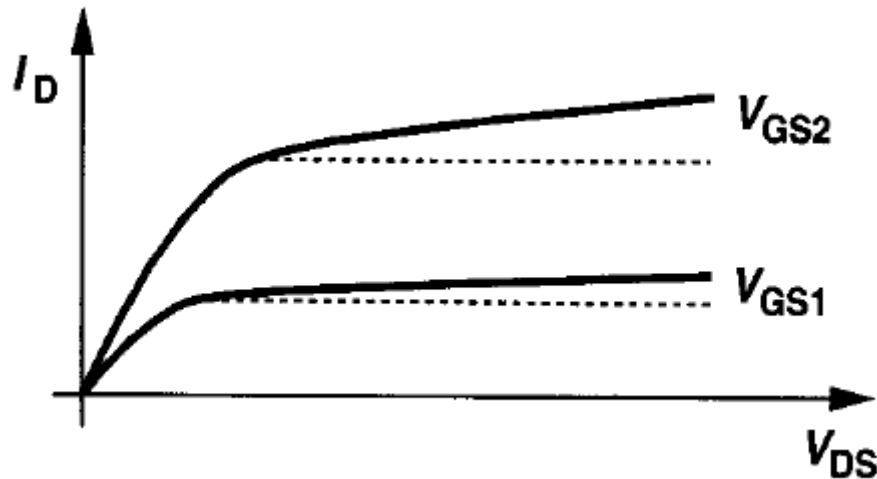
تقویت کننده‌های MOS

مدولاسیون طول کانال:

با افزایش V_{DS} طول کانال به تدریج کاهش می‌یابد که به این اثر، مدولاسیون طول کانال می‌گویند.

معادله جریان کانال با در نظر گرفتن اثر مدولاسیون طول کانال:

$$i_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right) (v_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda v_{DS})$$



λ ضریب مدولاسیون طول کانال نام دارد و به تکنولوژی ساخت قطعه و نیز طول کانال (L) بستگی داشته و واحد آن V^{-1} است.

λ با طول کانال (L) نسبت عکس دارد، بنابراین در تکنولوژی‌های جدیدتر به خاطر کوتاه‌تر بودن طول کانال، اثر λ چشمگیرتر است.

MOSFET

تقویت کننده های MOS

مدل سیگنال کوچک MOSFET

✓ هدایت انتقالی ترانزیستور (g_m):

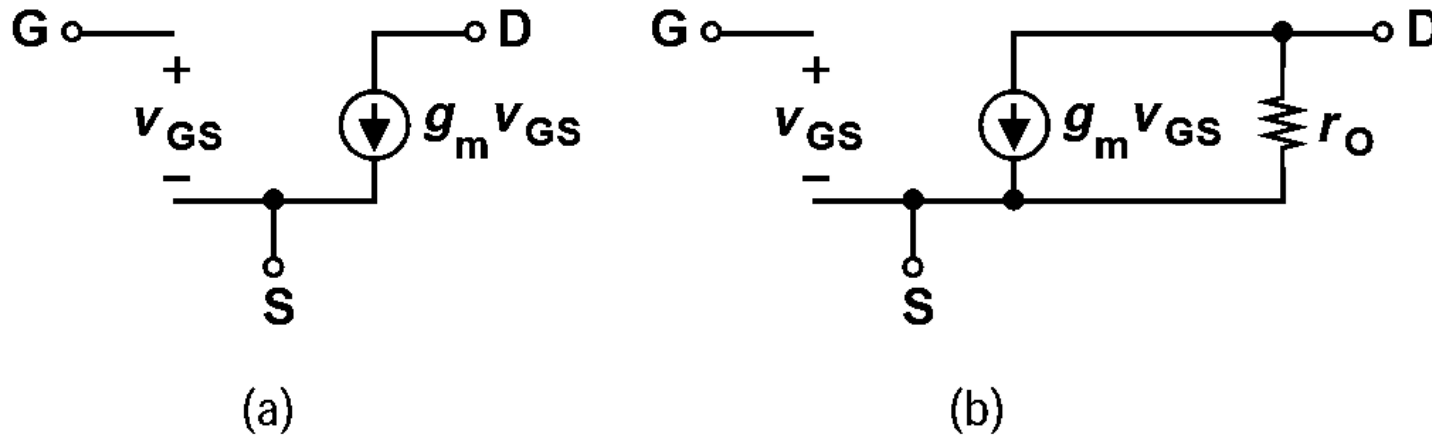
$$= \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right|_{V_{DS} \text{ const}} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)$$

$$g_m = \sqrt{2\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} I_D} = 2\sqrt{KI_D}$$

✓ مقاومت خروجی (r_o):

$$r_o = \left[\frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right]_{V_{GS} \text{ const}}^{-1} = \left[\frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right) (v_{GS} - V_T)^2 \lambda \right]^{-1}$$

$$r_o = \frac{1}{\lambda I_D}$$



مدل سیگنال کوچک MOSFET

(a) بدون در نظر گرفتن اثر مدولاسیون طول کانال $\lambda = 0$

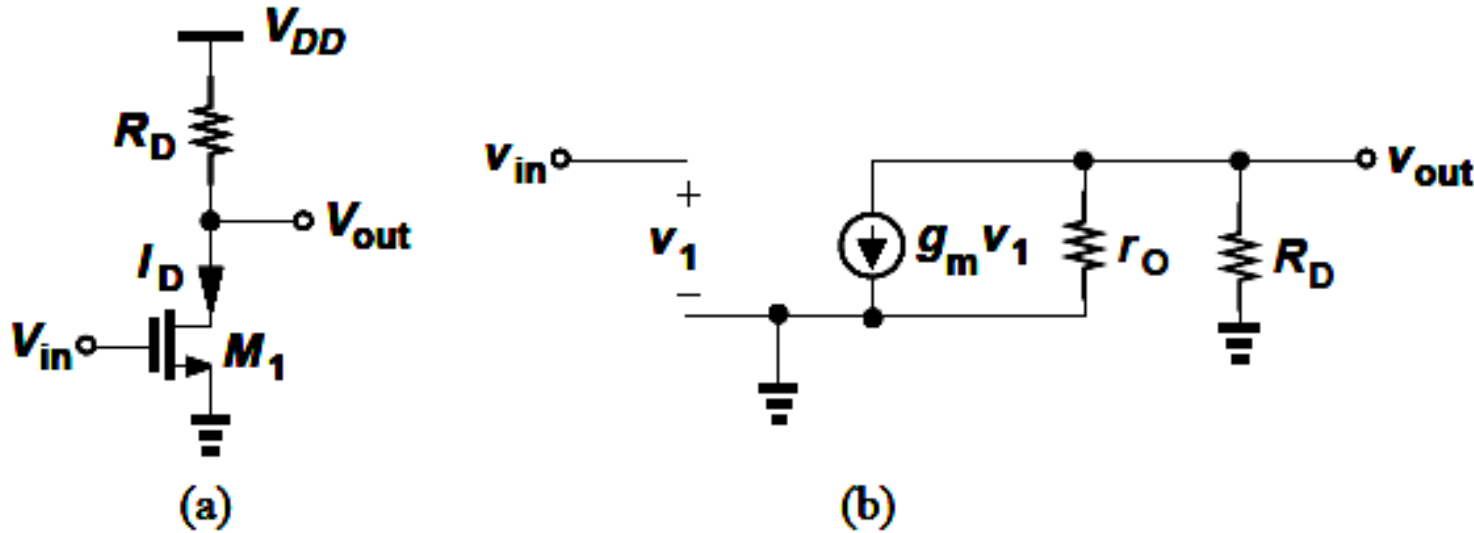
(b) بادر نظر گرفتن اثر مدولاسیون طول کانال $\lambda \neq 0$

MOSFET

تقویت کننده های MOS

تقویت کننده سورس مشترک

با در نظر گرفتن اثر مدولاسیون طول کانال ($\lambda \neq 0$)



(a) Common-source stage, (b) small-signal mode.

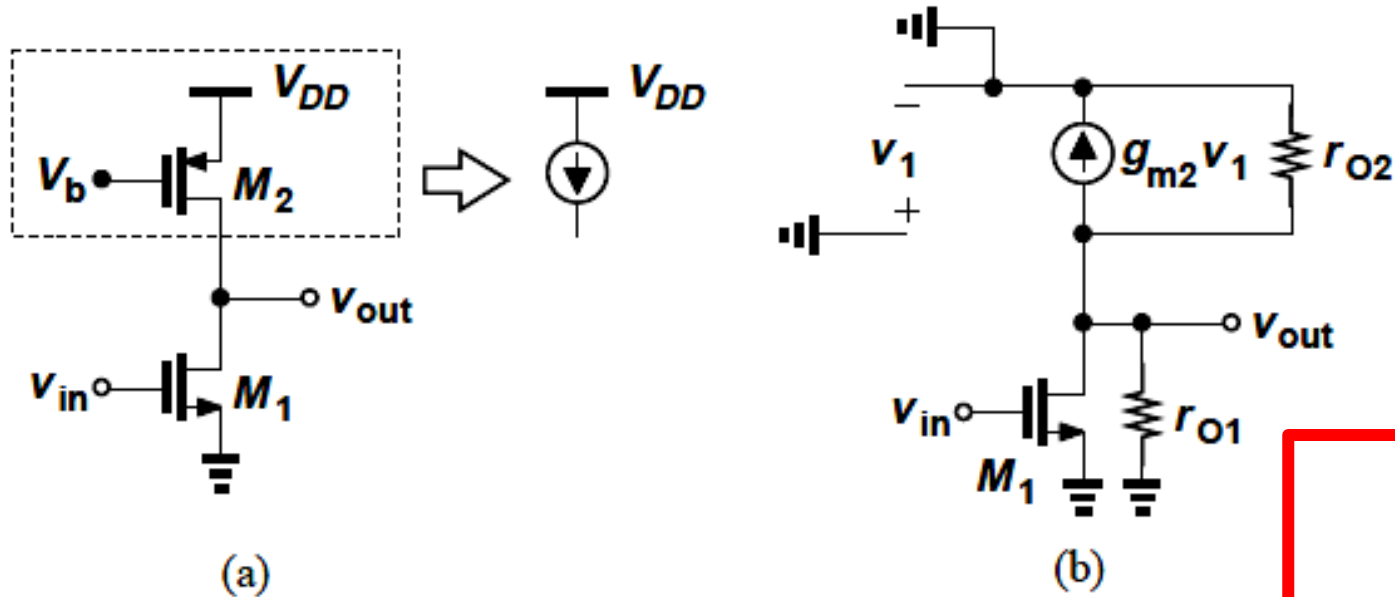
$$v_{in} = v_1$$

$$v_{out} = -g_m v_1 (R_D || r_O)$$

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = -g_m (R_D || r_O)$$

$$R_{in} = \infty$$

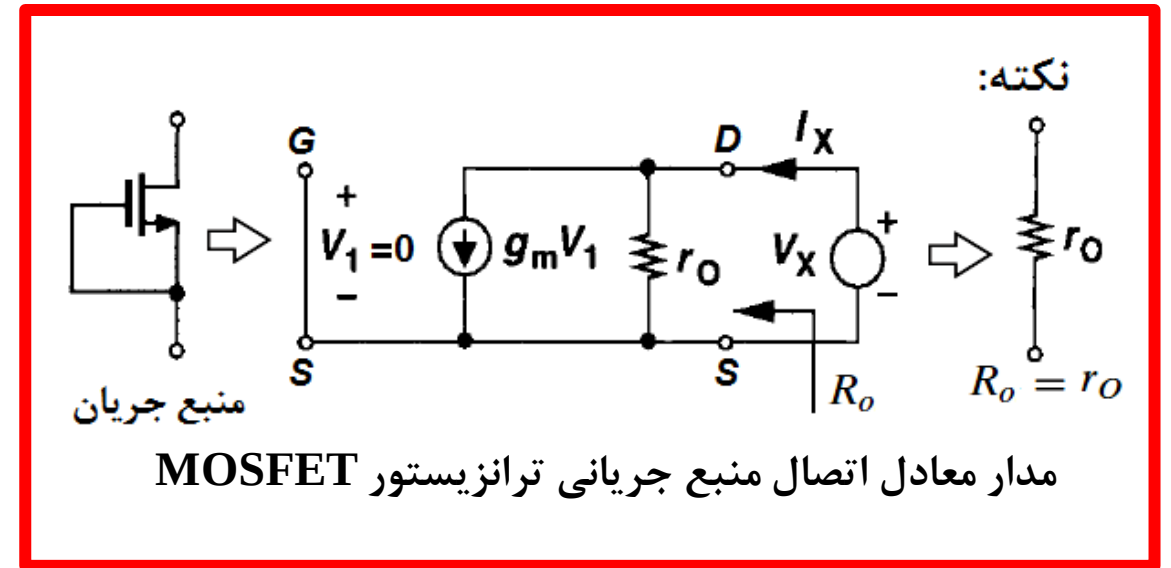
$$R_{out} = R_D || r_O \quad (\text{چرا؟})$$



$$v_1 = 0 \Rightarrow g_{m2}v_1 = 0$$

$$A_v = -g_{m1}(r_{O1} || r_{O2})$$

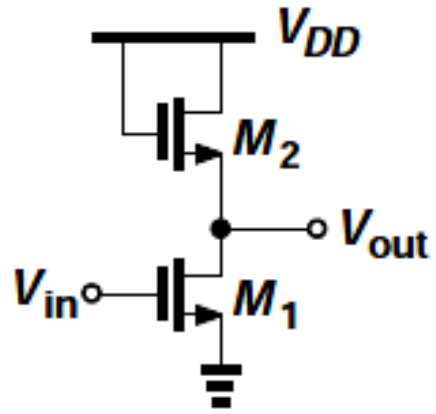
$$R_{out} = r_{O1} || r_{O2}$$



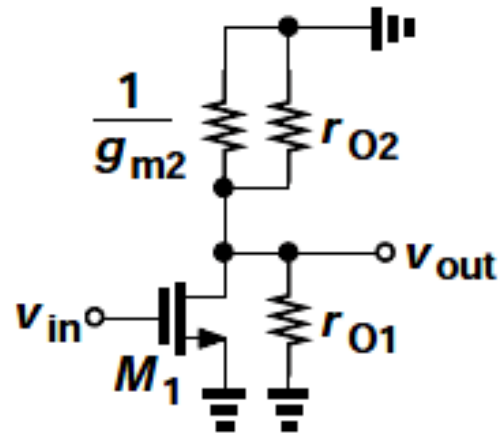
MOSFET

تقویت کننده های MOS

تقویت کننده سورس مشترک با بار دیودی



(a)



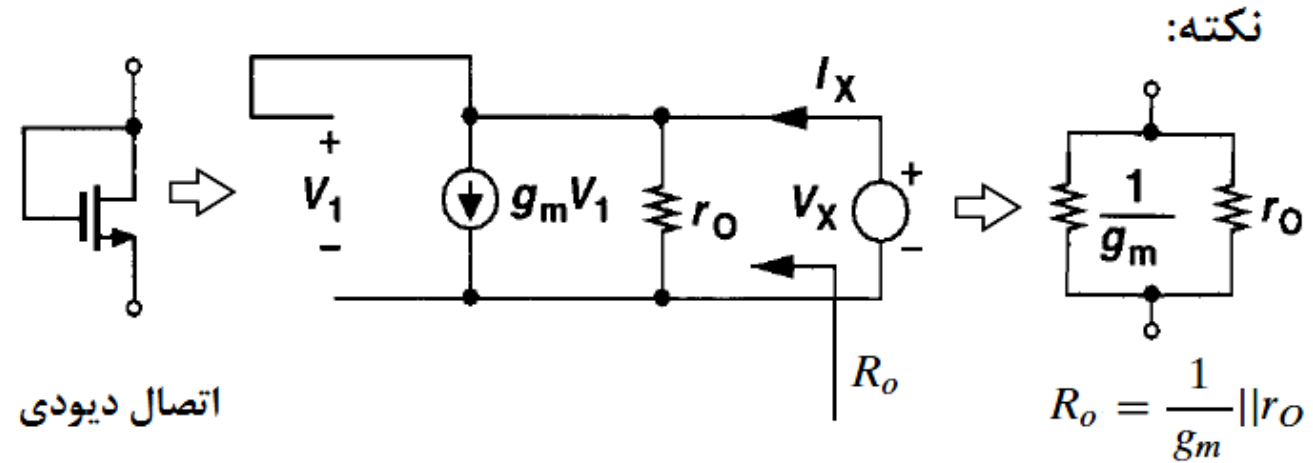
(b)

(a) MOS stage using a diode-connected load

(b) simplified circuit of (a)

$$A_v = -g_{m1} \left(\frac{1}{g_{m2}} || r_{O2} || r_{O1} \right)$$

$$R_{out} = \frac{1}{g_{m2}} || r_{O2} || r_{O1}$$

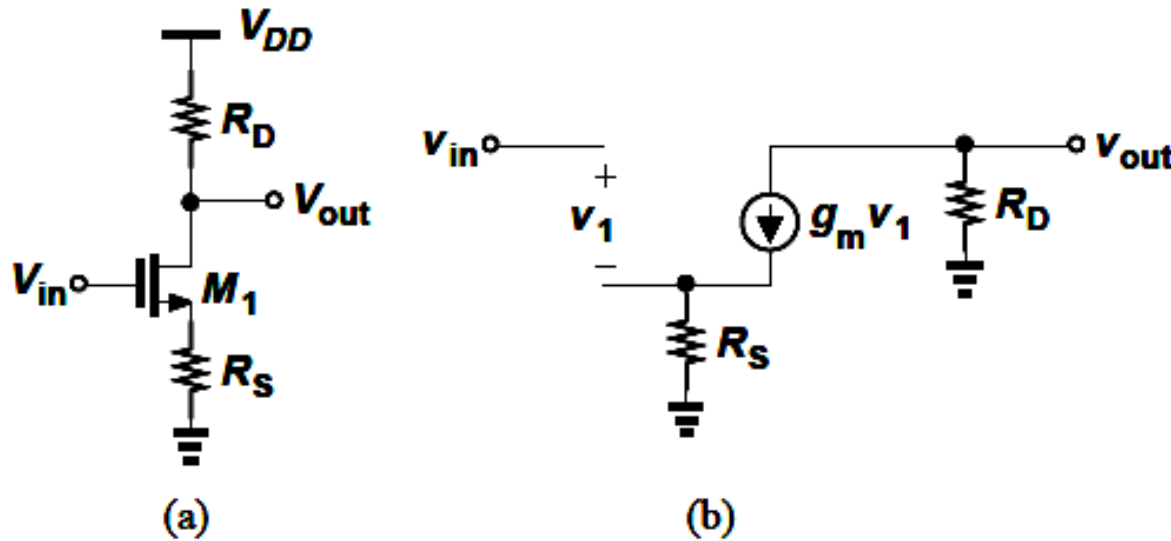


مدار معادل اتصال دیودی ترانزیستور MOSFET

تقویت کننده‌های MOS

تقویت کننده سورس مشترک با مقاومت سورس

محاسبه R_{out} با در نظر گرفتن اثر مدولاسیون طول کانال ($\lambda \neq 0$):



(a) CS stage with degeneration, (b) small-signal model.

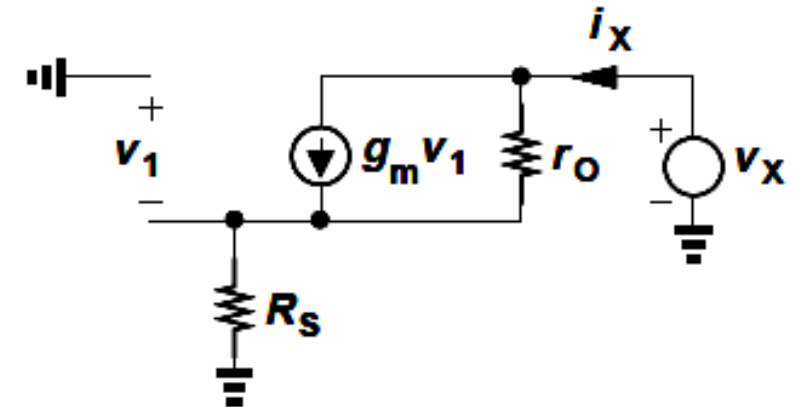
$$v_{in} = v_1 + g_m v_1 R_S \Rightarrow v_1 = \frac{v_{in}}{1 + g_m R_S}$$

$$v_{out} = -g_m v_1 R_D$$

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = -\frac{g_m R_D}{1 + g_m R_S} = -\frac{R_D}{\frac{1}{g_m} + R_S}$$

$$R_{in} = \infty$$

$$R_{out} = R_D \quad (\text{چرا؟})$$



$$v_1 = -i_X R_S \quad (1)$$

$$-\frac{v_1}{R_S} - g_m v_1 + \frac{-v_1 - v_X}{r_O} = 0 \quad (2)$$

با ترکیب معادلات (1) و (2):

$$\frac{v_X}{i_X} = (1 + g_m r_O) R_S + r_O \approx g_m r_O R_S + r_O.$$

$$R_{out} = R_D || (g_m r_O R_S + r_O).$$

تقویت کننده های MOS

مثال ۶: بهره ولتاژ مدار را به دست آورید. $V_T = 0.8V$ ، $K = 1 \text{ mA/V}^2$ و $\lambda = 0$
حل:

الف) تحلیل DC:

ابتدا باید ببینیم که ترانزیستور در ناحیه اشباع بایاس شده یا خیر:

$$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow 0.5 = 1 \times (V_{GS} - 0.8)^2 \Rightarrow V_{GS} = 1.51V$$

$$V_S = V_G - V_{GS} = 0 - 1.51 = -1.51V$$

$$V_D = V_{DD} - R_D I_D = 5 - (7)(0.5) = 1.5V$$

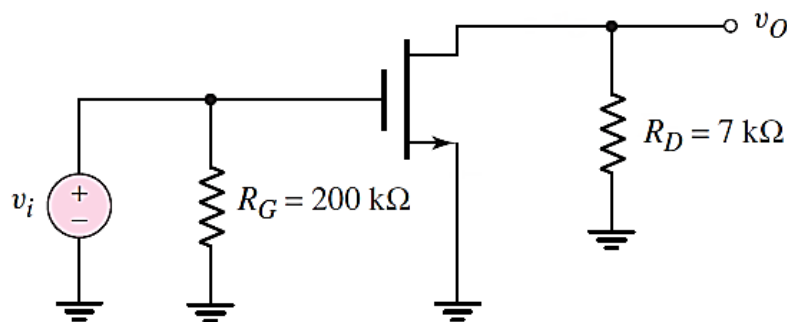
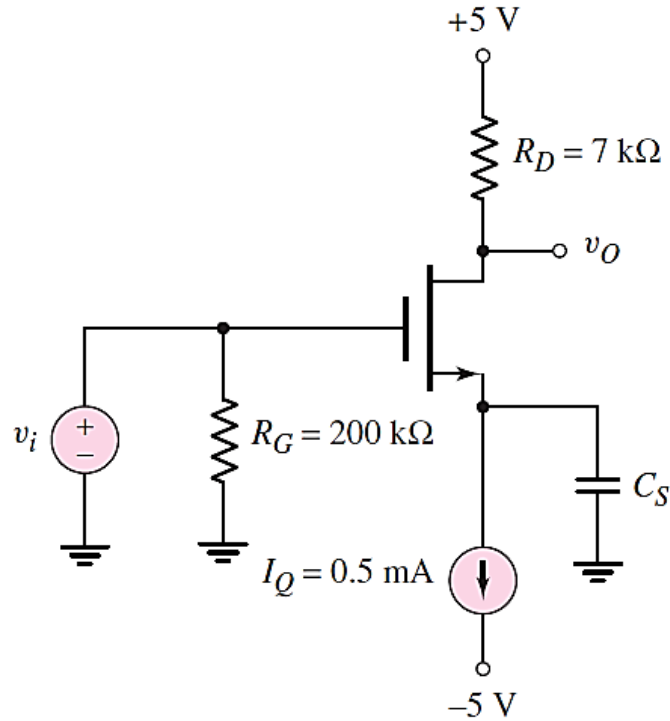
$$V_{DS} = V_D - V_S = 1.5 - (-1.51) = 3.01V$$

شرط اشباع ترانزیستور یعنی $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$ برقرار است. پس ترانزیستور در ناحیه اشباع قرار دارد.

ب) تحلیل AC:

$$g_m = 2\sqrt{KI_D} = 2\sqrt{1 \times 0.5} = 1.414S \quad \lambda = 0 \Rightarrow r_o = \frac{1}{\lambda I_D} = \infty$$

$$A_v = -g_m R_D = -1.414 \times 7 = -9.9$$

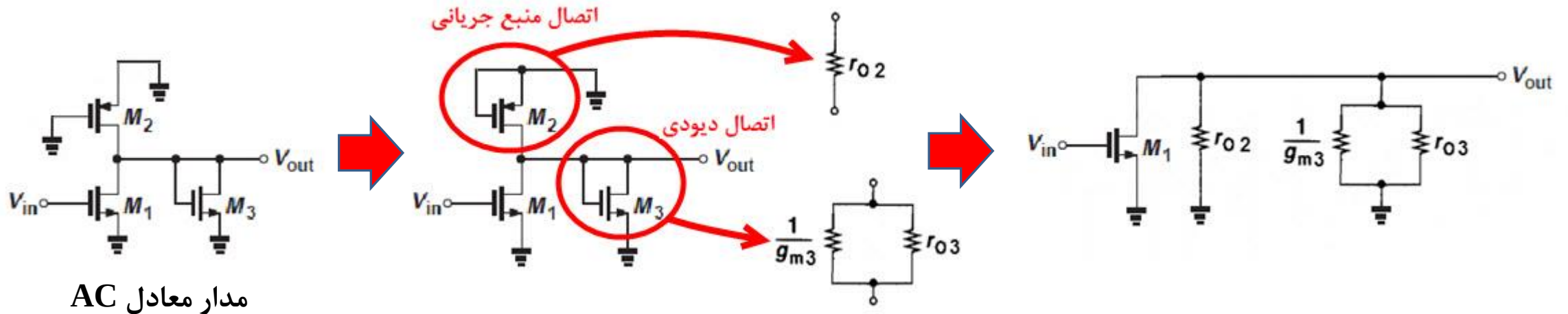
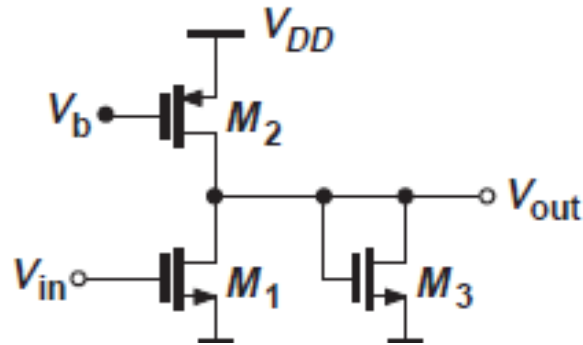


مدار معادل AC

تقویت کننده‌های MOS

مثال ۷: در تقویت کننده CS مقابل بهره ولتاژ (V_{out}/V_{in}) و مقاومت خروجی تقویت کننده را به دست آورید ($\lambda \neq 0$).

حل:



مدار معادل AC

با توجه به رابطه بهره ولتاژ در تقویت کننده سورس مشترک ($A_V = -g_m r_o$) می توان نوشت:

$$A_V = -g_{m1} \left(r_{o1} \parallel r_{o2} \parallel r_{o3} \parallel \frac{1}{g_{m3}} \right)$$

$$R_O = r_{o1} \parallel r_{o2} \parallel r_{o3} \parallel \frac{1}{g_{m3}}$$

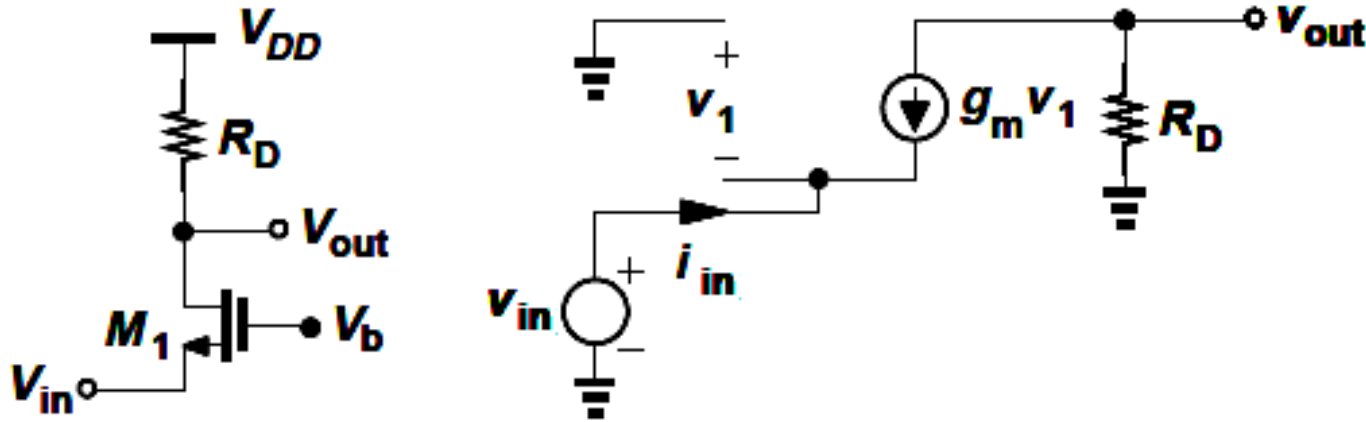
مقاومت خروجی برابر است با:

MOSFET

تقویت کننده های MOS

تقویت کننده گیت مشترک

بدون در نظر گرفتن اثر مدولاسیون طول کانال ($\lambda = 0$)



(a) Common-gate stage, (b) small-signal mode.

$$v_1 = -v_{in}$$

$$i_{in} = -g_m v_1 = g_m v_{in}$$

$$R_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = \frac{1}{g_m}$$

$$v_{out} = -g_m v_1 R_D = -g_m (-v_{in}) R_D = g_m v_{in} R_D$$

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = g_m R_D$$

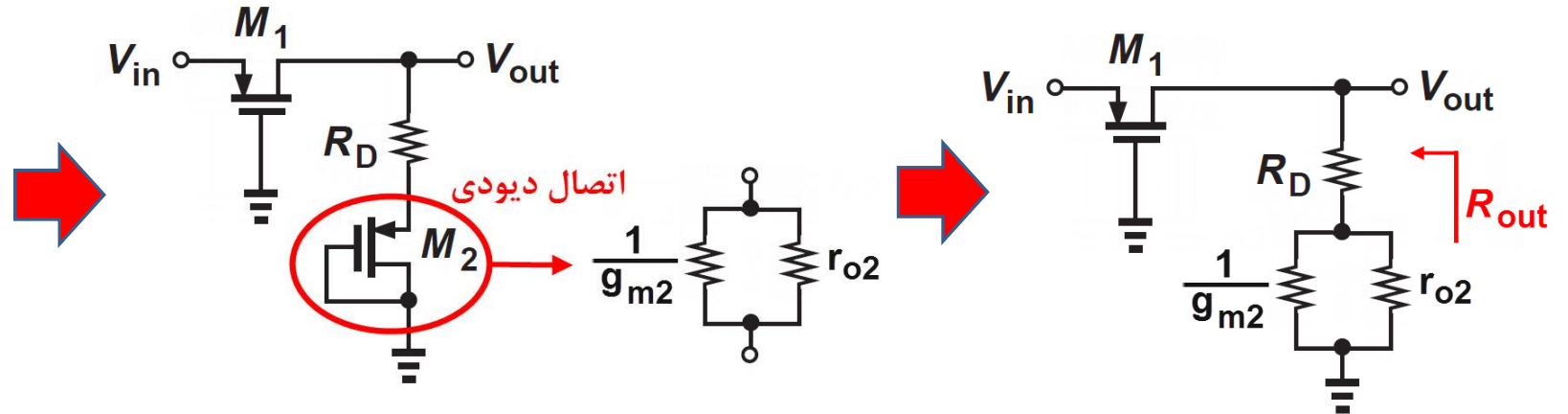
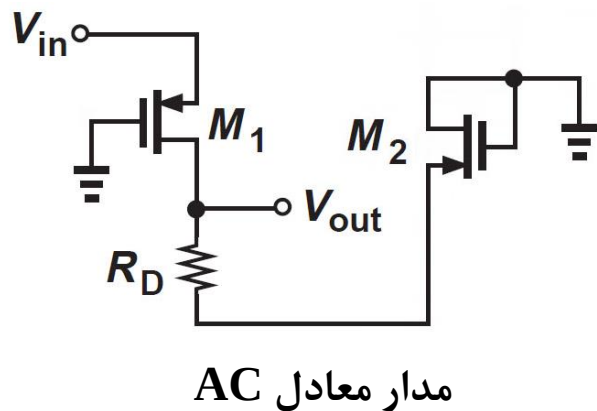
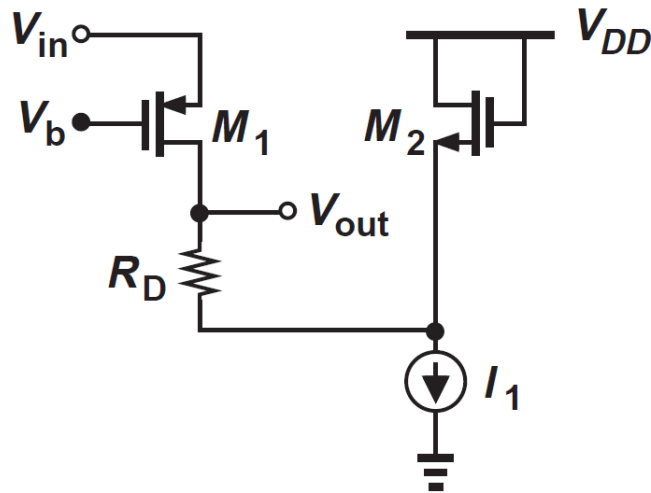
$$R_{out} = R_D$$

تمرین: A_v ، R_{in} و R_{out} را با در نظر گرفتن اثر مدولاسیون طول کانال ($\lambda \neq 0$) محاسبه کنید.

تقویت کننده های MOS

مثال ۸: در تقویت کننده CG مقابل بهره ولتاژ (V_{out}/V_{in}) و مقاومت خروجی تقویت کننده را به دست آورید ($\lambda \neq 0$).

حل:



$$R_{out} = r_{o1} \parallel \left[R_D + \left(r_{o2} \parallel \frac{1}{g_{m2}} \right) \right]$$

مقاومت خروجی برابر است با:

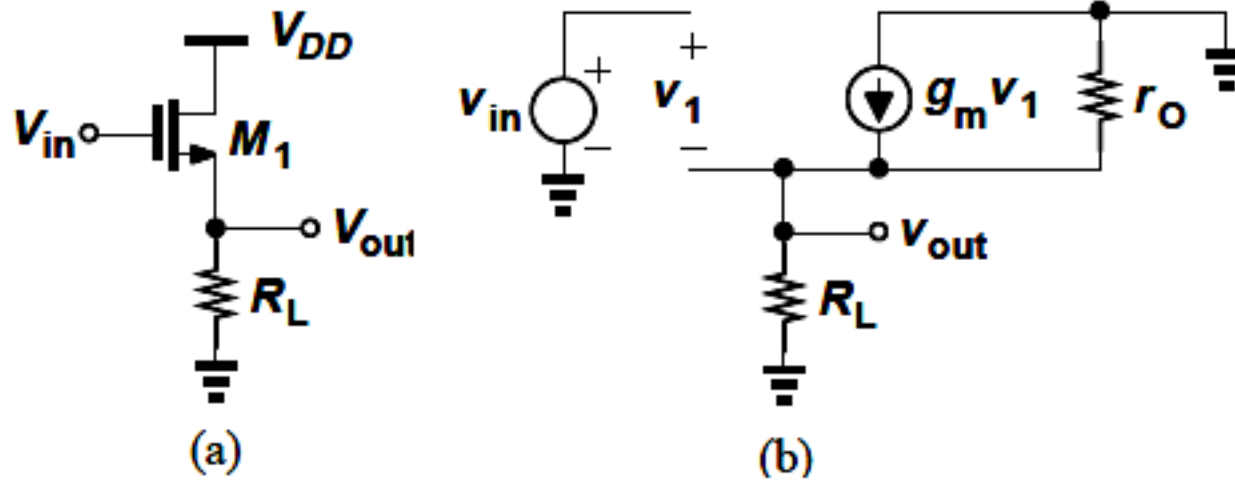
$$A_V = g_{m1} R_{out} = g_{m1} \left[r_{o1} \parallel \left[R_D + \left(r_{o2} \parallel \frac{1}{g_{m2}} \right) \right] \right]$$

با توجه به رابطه بهره ولتاژ در تقویت کننده گیت مشترک می توان نوشت:

تقویت کننده های MOS

تقویت کننده درین مشترک (سورس فالوئر)

با در نظر گرفتن اثر مدولاسیون طول کانال ($\lambda \neq 0$)



(a) Source follower,

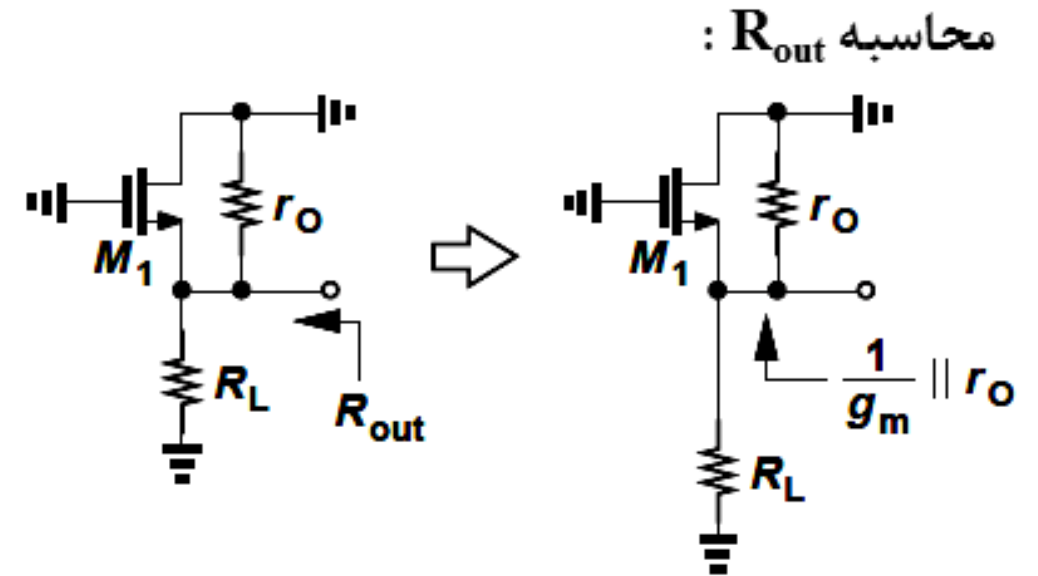
(b) Small-signal equivalent of source follower.

$$g_m v_1 (r_o \parallel R_L) = v_{out}$$

$$v_{in} = v_1 + v_{out}$$

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{g_m (r_o \parallel R_L)}{1 + g_m (r_o \parallel R_L)} = \frac{r_o \parallel R_L}{\frac{1}{g_m} + r_o \parallel R_L}$$

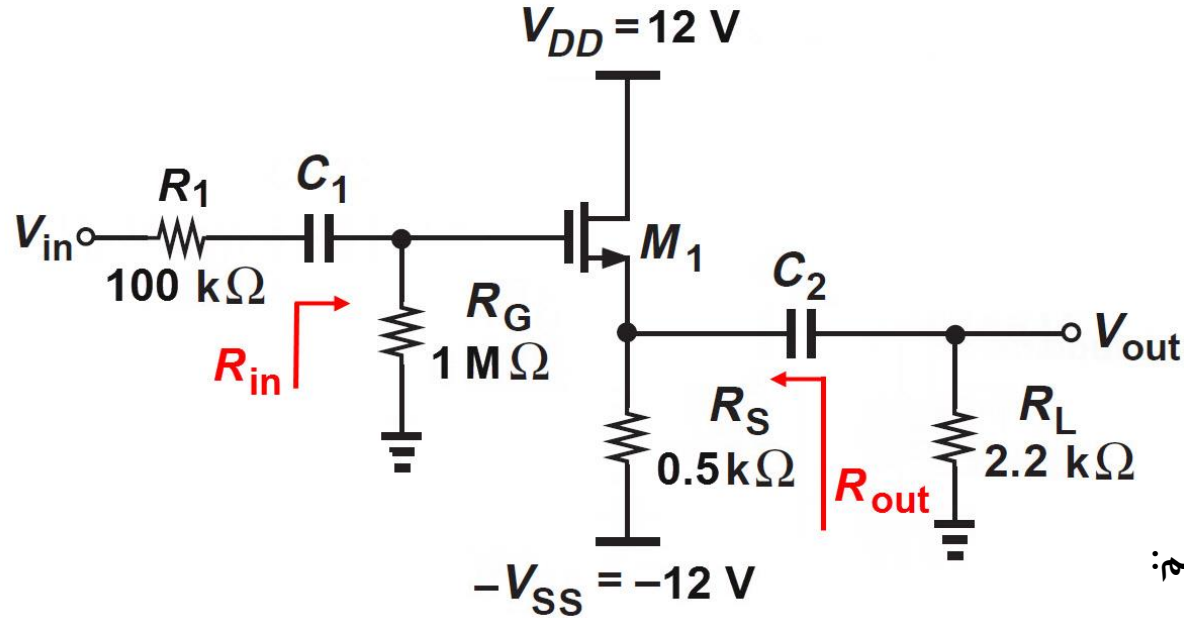
$$R_{in} = \infty$$



$$R_{out} = \frac{1}{g_m} \parallel r_o \parallel R_L \approx \frac{1}{g_m} \parallel R_L$$

MOSFET

تقویت کننده‌های MOS



مثال ۹: بهره ولتاژ (V_{out}/V_{in}) ، مقاومت ورودی (R_{in}) و مقاومت خروجی (R_{out}) تقویت کننده مقابل را به دست آورید.

$$\lambda = 6.25 \text{ mV}^{-1} \text{ و } K = 4 \text{ mA/V}^2, V_T = 2 \text{ V}$$

حل:

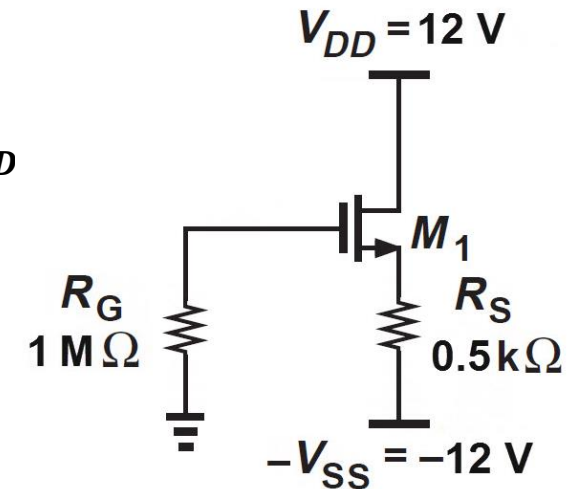
الف) تحلیل DC:

ابتدا مقدار I_D را به دست می آوریم تا بتوانیم g_m و r_o را محاسبه کنیم:

$$\left. \begin{aligned} I_G = 0 &\Rightarrow V_G = 0 \\ V_S = R_S I_D + (-V_{SS}) &= 0.5 I_D - 12 \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_{GS} = V_G - V_S = 0 - (0.5 I_D - 12) = -0.5 I_D$$

$$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2 = 4(-0.5 I_D + 12 - 2)^2 \Rightarrow I_D = 4(-0.5 I_D + 10)^2$$

$$I_D = 4(0.25 I_D^2 - 10 I_D + 100) \Rightarrow I_D = I_D^2 - 40 I_D + 400$$



مدار معادل DC

$$I_D^2 - 41I_D + 400 = 0 \Rightarrow \begin{cases} I_D = 25 \text{ mA} \Rightarrow V_{GS} = -0.5 \text{ V} < V_T \\ I_D = 16 \text{ mA} \Rightarrow V_{GS} = 4 \text{ V} \end{cases} \text{ غیر قابل قبول}$$

$$V_{od} = V_{GS} - V_T = 4 - 2 = 2 \text{ V}$$

$$\left. \begin{array}{l} V_S = 0.5I_D - 12 = -4 \text{ V} \\ V_D = V_{DD} = 12 \text{ V} \end{array} \right\} \Rightarrow V_{DS} = V_D - V_S = 12 - (-4) = 16 \text{ V}$$

چون $V_{DS} > V_{od}$ است، بنابراین ترانزیستور در ناحیه اشباع قرار داشته و جواب $I_D = 16 \text{ mA}$ قابل قبول است.

محاسبه r_o و g_m :

$$g_m = 2\sqrt{KI_D} = 2\sqrt{4 \times 16} = 16 \text{ mS}$$

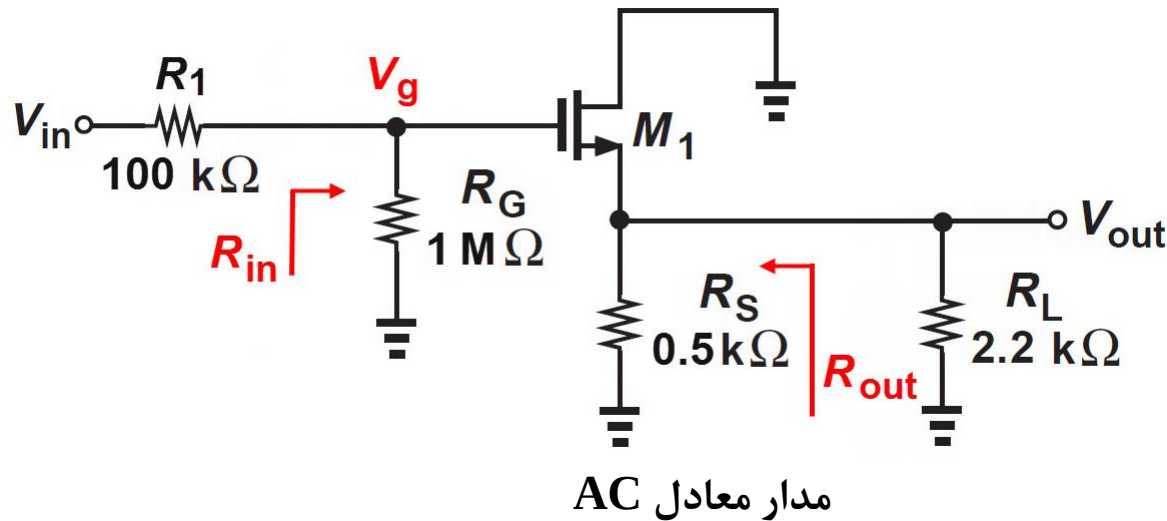
$$r_o = \frac{1}{\lambda I_D} = \frac{1}{6.25 \text{ m} \times 16 \text{ m}} = 10 \text{ k}\Omega$$

MOSFET

تقویت کننده های MOS

ادامه حل مثال ۹:

(ب) تحلیل AC:



$$R_{in} = R_G = 10\text{ M}\Omega$$

$$R_{out} = R_S \parallel r_o \parallel \frac{1}{g_m} = 0.5\text{ k}\Omega \parallel 10\text{ k}\Omega \parallel \frac{1}{16\text{ m}} = 0.5\text{ k}\Omega \parallel 10\text{ k}\Omega \parallel 0.0625\text{ k}\Omega = 0.0552\text{ k}\Omega = 55.2\Omega$$

با توجه به رابطه بهره ولتاژ در تقویت کننده درین مشترک می توان نوشت:

$$\frac{v_{out}}{v_g} = \frac{g_m(R_L \parallel R_S \parallel r_o)}{1 + g_m(R_L \parallel R_S \parallel r_o)} = \frac{16\text{ m}(2.2\text{ k}\Omega \parallel 0.5\text{ k}\Omega \parallel 10\text{ k}\Omega)}{1 + 16\text{ m}(2.2\text{ k}\Omega \parallel 0.5\text{ k}\Omega \parallel 10\text{ k}\Omega)} = \frac{16\text{ m} \times 0.391\text{ k}}{1 + 16\text{ m} \times 0.391\text{ k}} = 0.862$$

$$\frac{v_g}{v_{in}} = \frac{R_{in}}{R_1 + R_{in}} = \frac{1000\text{ k}}{100\text{ k} + 1000\text{ k}} = \frac{1000\text{ k}}{1100\text{ k}} = 0.91$$

$$A_V = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{v_{out}}{v_g} \times \frac{v_g}{v_{in}} = 0.862 \times 0.91 = 0.784$$