

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

فصل سوم: تقویت کننده‌های تک طبقه

۱-۳ کاربردها

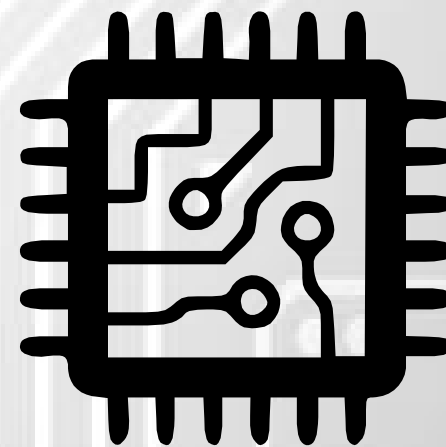
۲-۳ ملاحظات کلی

۳-۳ تقویت کننده سورس - مشترک

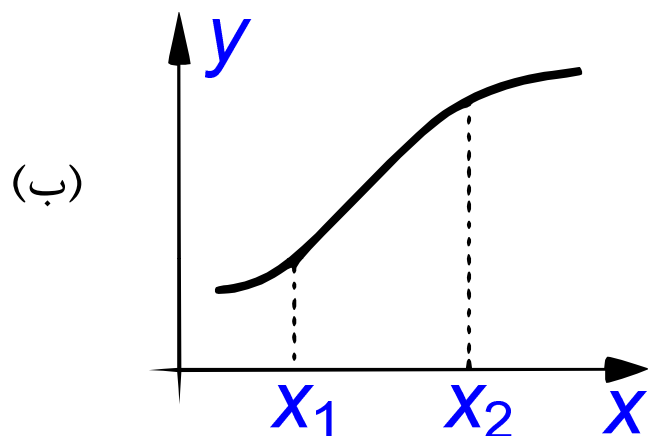
۴-۳ دنبال کننده سورس

۵-۳ تقویت کننده گیت - مشترک

۶-۳ تقویت کننده کسکود



تقویت کننده ایده آل و غیرایده آل



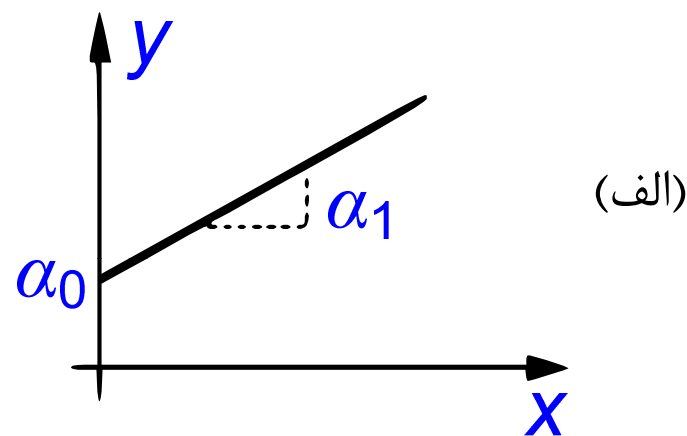
تقویت کننده غیرایده آل (غیرخطی) (شکل ب)

○ تغییرات بهره را با یک چندجمله ای تقریب می زنیم:

$$y(t) = \alpha_0 + \alpha_1 x(t) + \alpha_2 x^2(t) + \dots + \alpha_n x^n(t)$$

○ بهره (نسبت خروجی به ورودی) متغیر است.

○ بهره تابعی از نقطه کار است.



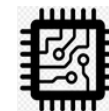
تقویت کننده ایده آل (خطی) (شکل الف)

○ مشخصه ورودی-خروجی، به صورت خط مستقیم و با شیب ثابت است.

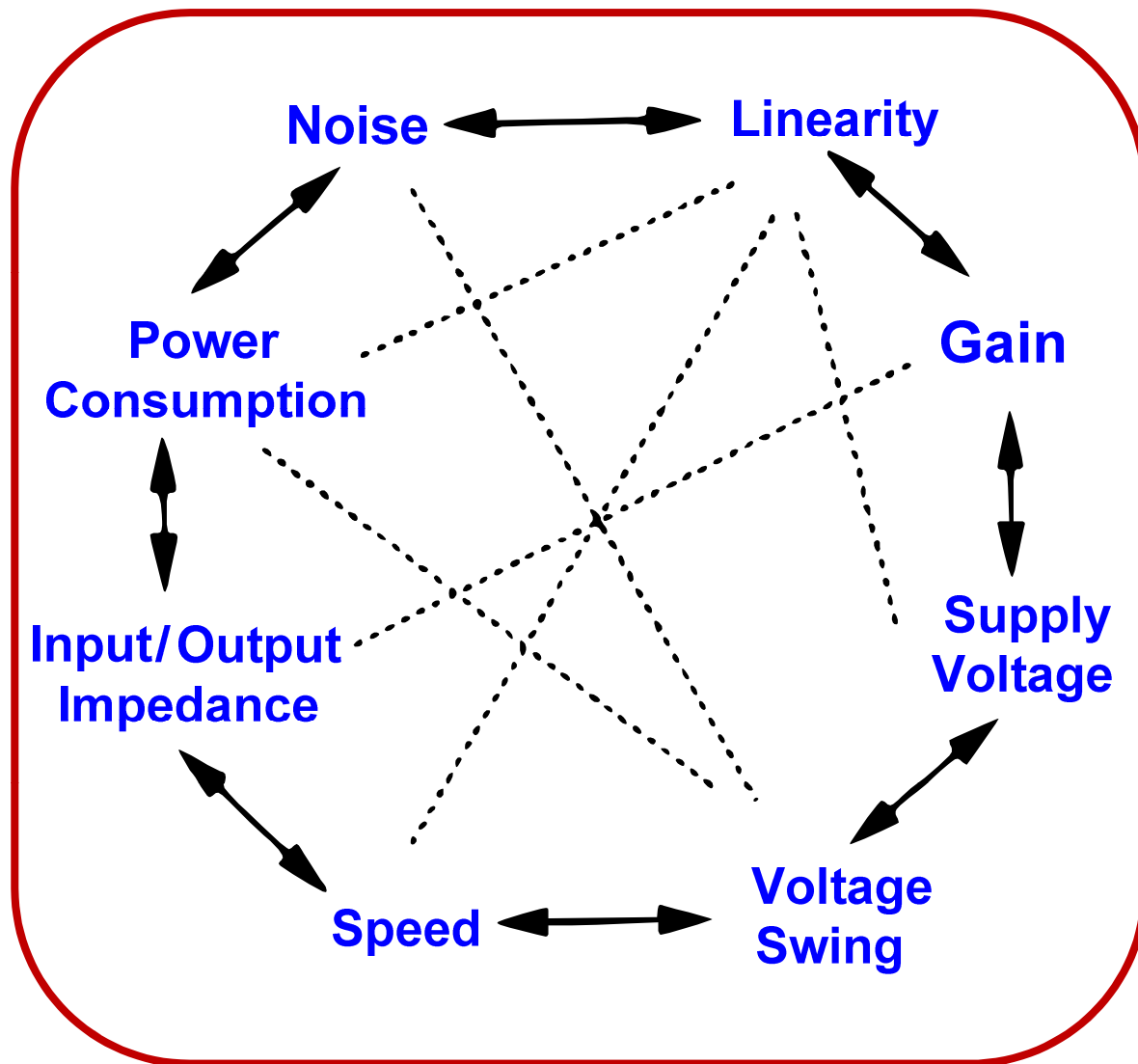
$$y(t) = \alpha_0 + \alpha_1 x(t)$$

○ α_1 بهره و α_0 بایاس dc است.

○ بهره (نسبت خروجی به ورودی)، مستقل از نقطه کار است.



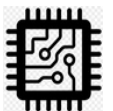
هشت ضلعی طراحی تقویت کننده‌ها



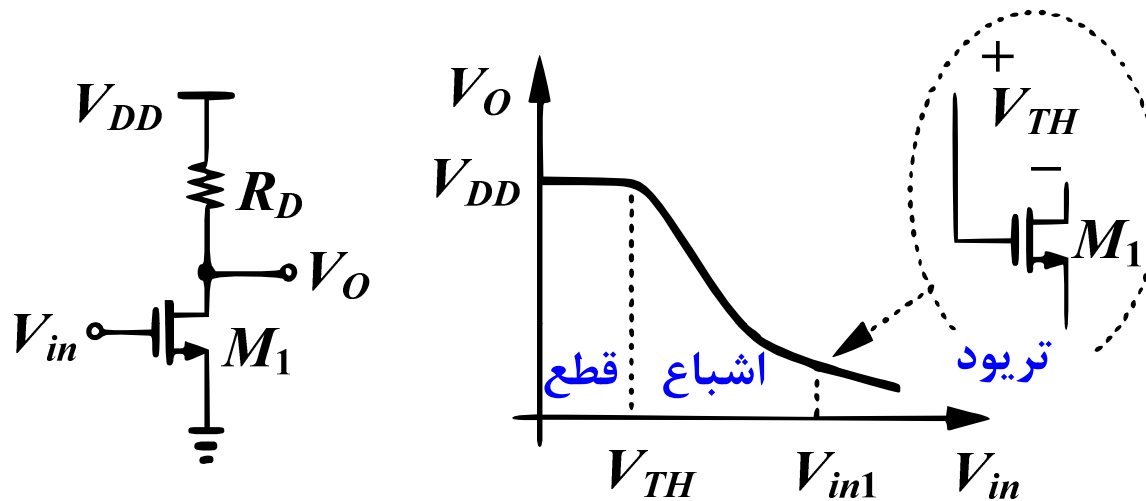
علاوه بر بهره و سرعت، پارامترهای دیگری هم در طراحی تقویت کننده مهم هستند.

امپدانس ورودی و خروجی، چگونگی تعامل تقویت کننده را با طبقات قبل و بعد از خودش مشخص می کند.

طراحی تقویت کننده‌ها، یک مسئله بهینه سازی چندبعدی است.



تقویت کننده سورس - مشترک با بار مقاومتی



- به ازای $V_{in} < V_{TH}$ ، ترانزیستور خاموش است و $V_O = V_{DD}$ خواهد بود.
- به ازای $V_{in} > V_{TH}$ ، ترانزیستور روشن شده و در ناحیه اشباع قرار می گیرد. لذا V_O ، افت می کند.

$$V_O = V_{DD} - R_D I_D = V_{DD} - R_D \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \times \frac{W}{L} (V_{in} - V_{TH})^2$$

- به ازای $V_{in} > V_{in1}$ ، ترانزیستور وارد ناحیه تریود می شود.

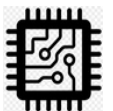
- در نقطه مرزی بین اشباع و تریود، یعنی به ازای $V_O = V_{in1} - V_{TH}$ ، ترانزیستور در آستانه ورود به

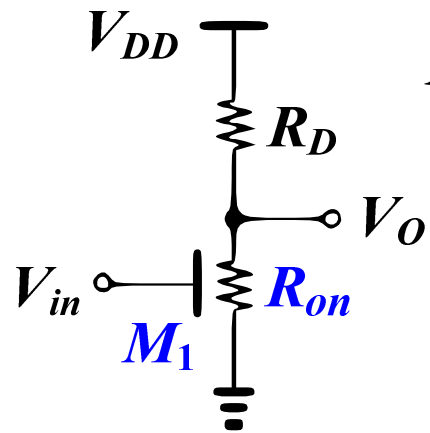
ناحیه تریود قرار می گیرد. در نقطه V_{in1} :

$$V_{in1} - V_{TH} = V_O = V_{DD} - R_D \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \times \frac{W}{L} (V_{in1} - V_{TH})^2$$

- با توجه به رابطه جریان - ولتاژ در ناحیه تریود، رابطه ورودی-خروجی :

$$V_{in} > V_{in1} : V_O = V_{DD} - R_D I_D = V_{DD} - R_D \left(\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \right) \left[(V_{in} - V_{TH}) V_O - \frac{1}{2} V_O^2 \right]$$





○ به ازای $V_{in} \gg V_{in1}$ و با افت زیاد خروجی، $V_O \ll V_{in} - V_{TH}$ شده و ترانزیستور وارد ناحیه تریود عمیق می شود. در این حالت، ترانزیستور شبیه به مقاومت کنترل شونده با ولتاژ رفتار می کند. با توجه به قانون تقسیم مقاومتی:

$$V_O = \frac{R_{on}}{R_{on} + R_D} V_{DD}, \quad R_{on} = \frac{1}{\mu_n C_{ox} (W/L)(V_{in} - V_{TH})}$$

○ معمولاً از ترانزیستور در ناحیه اشباع استفاده می شود. بهره ولتاژ سیگنال-کوچک در اشباع، از مشتق رابطه ورودی-خروجی بدست می آید.

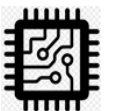
$$V_O = V_{DD} - R_D \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{in} - V_{TH})^2 \quad \downarrow$$

$$A_V = \frac{\partial V_O}{\partial V_{in}} = -\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{in} - V_{TH}) R_D = -g_m R_D = \left(\sqrt{2\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} I_D} \right) \left(\frac{V_{RD}}{I_D} \right)$$

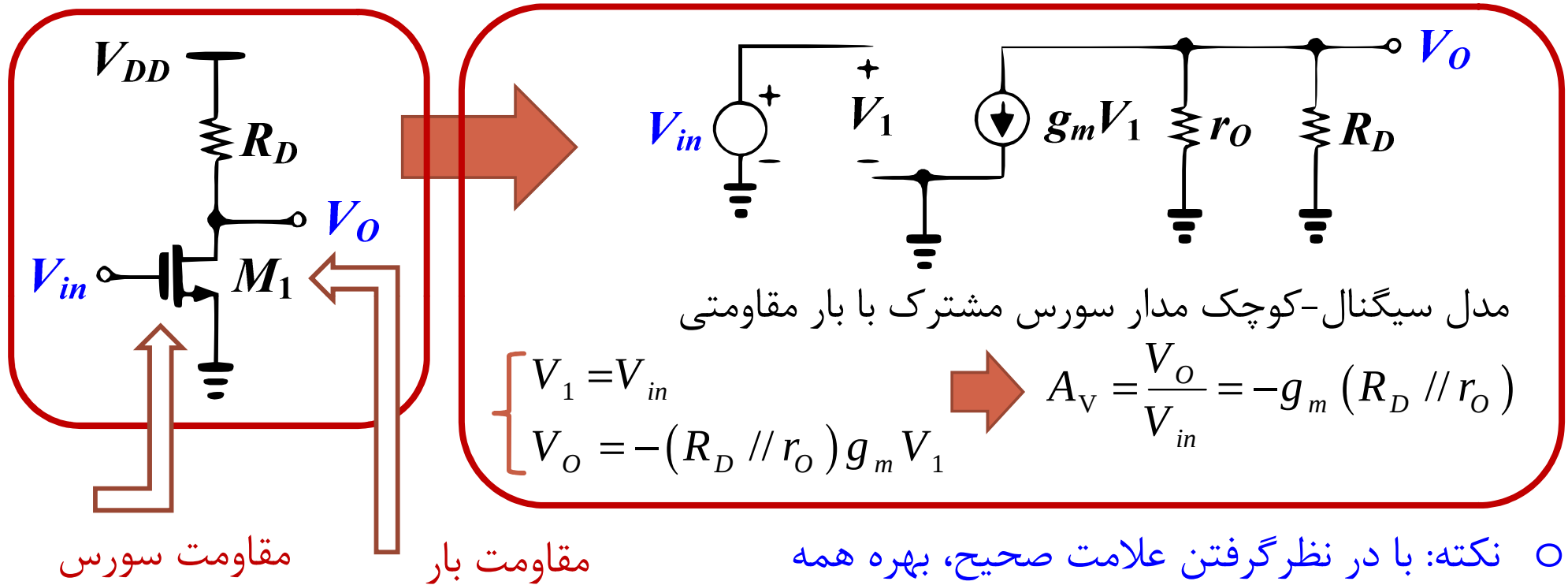
○ با چند روش می توان بهره ولتاژ را افزایش داد که هر کدام باعث بروز مشکلی می شود:

راه های افزایش بهره

- $\frac{W}{L} \uparrow \Rightarrow$ بزرگ شدن ابعاد $\Rightarrow$ بزرگ شدن خازن های ترانزیستوری
- $I_D \downarrow \Rightarrow V_{DS,sat} = \sqrt{\frac{2I_D}{\mu_n C_{ox} W/L}} = V_{GS} - V_{TH} \downarrow \Rightarrow$ کشیده شدن نقطه کار به ناحیه زیر آستانه
- $V_{RD} \uparrow \Rightarrow$ کشیده شدن نقطه کار به سمت پایین $\Rightarrow V_{Swing} = \min(V_{RD}, V_{Ron}) = \min(V_{RD}, V_{DD} - V_{RD}) \downarrow$



○ با رسم مدار معادل سیگنال-کوچک و تحلیل آن نیز می توان بهره ولتاژ را محاسبه کرد:



مدل سیگنال-کوچک مدار سورس مشترک با بار مقاومتی

$$\begin{cases} V_1 = V_{in} \\ V_O = -(R_D // r_O) g_m V_1 \end{cases} \Rightarrow A_V = \frac{V_O}{V_{in}} = -g_m (R_D // r_O)$$

○ نکته: با در نظر گرفتن علامت صحیح، بهره همه

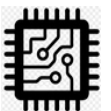
تقویت کننده ها از تقسیم کردن مقاومت خروجی (بار) به مقاومت سورس بدست می آید.

○ نکته: مقاومت دیده شده از سورس ترانزیستور به سمت بالا، تقریباً برابر با $1/g_m$ است (اسلاید بعد).

○ بهره ولتاژ در تقویت کننده سورس-مشترک، منفی است.

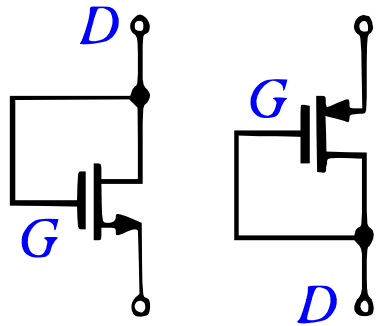
$$A_V = \frac{V_O}{V_{in}} = - \frac{\text{Load Resistance}}{\text{Source Resistance}}$$

$$= - \frac{R_D // r_O}{1/g_m} = -g_m (R_D // r_O)$$

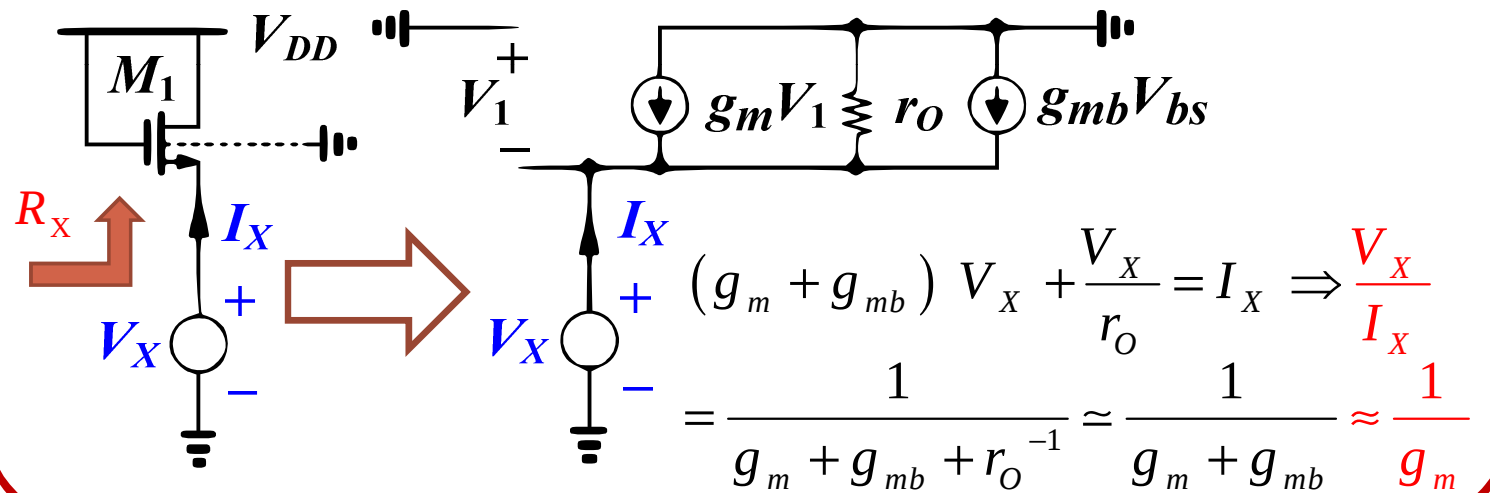


تقویت کننده سورس - مشترک با بار دیودی

○ در صورتی که درین و گیت به هم وصل شوند اتصال، دیودی خواهد بود.



در حالت ac ، اتصال دیودی شبیه به مقاومت با اندازه زیر است:



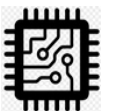
○ شکل روبرو، تقویت کننده سورس - مشترکی با بار دیودی را نشان می دهد.
بهره ولتاژ با در نظر گرفتن اثر بدنه ترانزیستور M_2 :

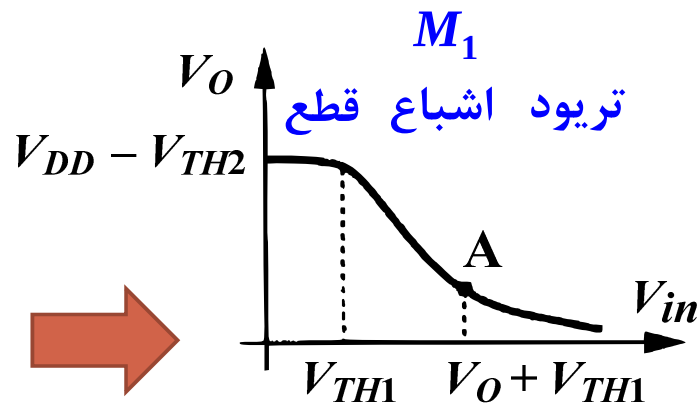
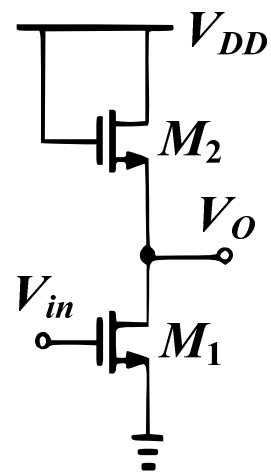
(اثبات)
مشابه
مثال
بالا

$1/g_{m1}$

$$A_v = \frac{V_o}{V_{in}} =$$

$$\left\{ \begin{array}{l} g_m = \sqrt{2\beta I} \\ I_1 = I_2 \end{array} \right. \quad -g_{m1} \frac{1}{g_{m2} + g_{mb2}} // r_{o1} // r_{o2} \approx -\frac{g_{m1}}{g_{m2}} \left(\frac{1}{1+\eta} \right) = -\sqrt{\frac{(W/L)_1}{(W/L)_2}} \left(\frac{1}{1+\eta} \right) \quad \eta = \frac{g_{mb2}}{g_{m2}}$$

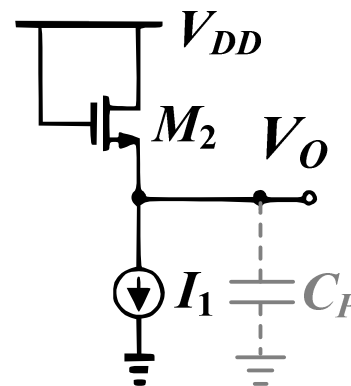




○ از نقطه نظر سیگنال-بزرگ، تقویت کننده با بار دیودی را می توان مشابه با بار مقاومتی تحلیل نمود. رابطه ولتاژ خروجی:

$$V_O = V_{DD} - V_{GS2} = V_{DD} - V_{TH2} - \sqrt{\frac{2I_1}{\beta_2}}$$

➤ عملکرد حالت گذرا را می توان با در نظر گرفتن ترانزیستور M_1 به عنوان یک منبع جریان با اندازه I_1 و سپس صفر کردن آن بررسی نمود. با در نظر گرفتن C_P به عنوان خازن پارازیت خروجی:

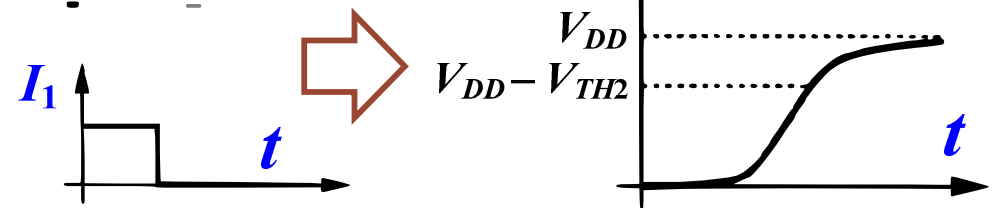


$$I_1 = \frac{1}{2} \beta_1 (V_{in} - V_{TH1})^2$$

$$I_1 = \beta_1 \left[(V_{in} - V_{TH1}) V_O - \frac{1}{2} V_O^2 \right]$$

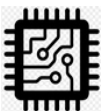
اشباع
تریود

$$\left\{ \begin{array}{l} I = I_1 \Rightarrow V_O = V_{DD} - V_{GS2} = V_{DD} - V_{TH2} - \sqrt{\frac{2I_1}{\beta_2}} \\ I = 0 \Rightarrow V_O = V_{DD} - V_{TH2} \end{array} \right.$$

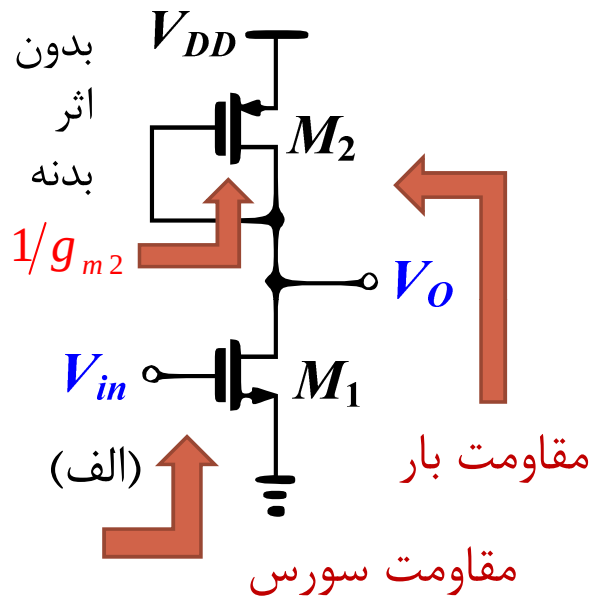


○ با صفر شدن جریان، V_O افزایش می یابد تا به $V_{DD} - V_{TH2}$ برسد. اما

عملکرد زیرآستانه ترانزیستور باعث می شود که همچنان شارژ خازن ادامه یابد و V_O به سمت V_{DD} میل کند.



طبقه سورس - مشترک با بار p MOS دیودی

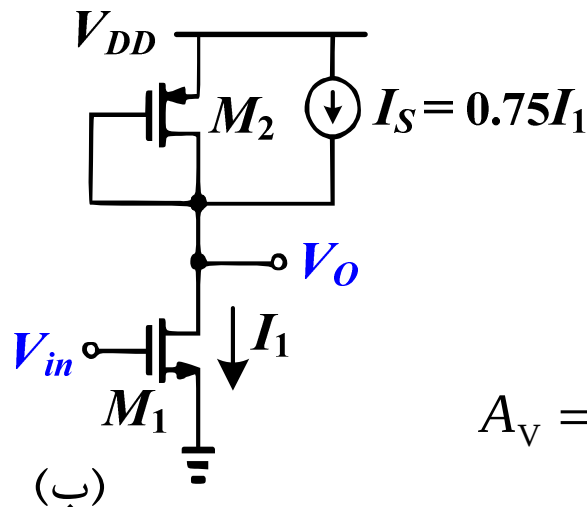


○ با اتصال بالک به سورس، ترانزیستور p MOS فاقد اثر بدنه خواهد شد.

○ لذا ترانزیستور بالایی تقویت کننده الف با بار دیودی p MOS دارای اثر بدنه نیست و بهره ولتاژ آن، از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$A_v = \frac{V_o}{V_{in}} = - \frac{\text{مقاومت بار}}{\text{مقاومت سورس}} = - \frac{1/g_{m2} // r_{O1} // r_{O2}}{1/g_{m1}} \approx - \frac{g_{m1}}{g_{m2}} = - \sqrt{\frac{\mu_n (W/L)_1}{\mu_p (W/L)_2}}$$

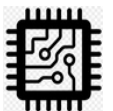
○ مثال: بهره ولتاژ را در مدار شکل ب بدست آورید:



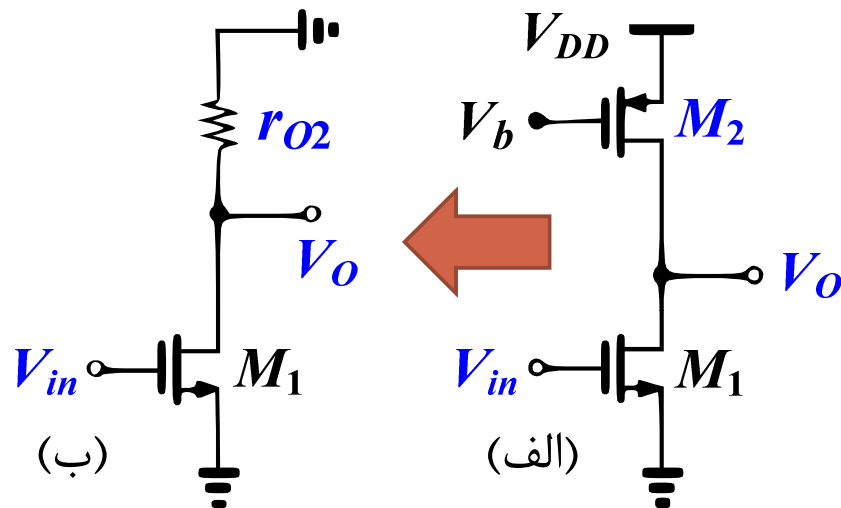
$$A_v = \frac{V_o}{V_{in}} \approx - \frac{g_{m1}}{g_{m2}} = - \sqrt{\frac{\beta_1 I_1}{\beta_2 I_2}} = - \sqrt{4\mu_n \left(\frac{W}{L}\right)_1 / \mu_p \left(\frac{W}{L}\right)_2}$$

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

○ در حضور مدولاسیون طول کانال :



تقویت کننده سورس - مشترک با بار منبع جریان



- برای تحقق بار منبع جریان، گیت ترانزیستور بالا را به یک منبع ولتاژ ثابت V_b وصل می کنیم (شکل الف).
- با ثابت ماندن ولتاژ سورس-گیت، ترانزیستور بالایی شبیه به یک منبع جریان رفتار خواهد کرد.
- لذا در وضعیت ac ، ترانزیستور بالا M_2 با مقاومت خروجی آن مدل سازی می شود (شکل ب).

$$A_V = -\frac{\text{مقاومت بار}}{\text{مقاومت سورس}} = -g_{m1}(r_{O1} // r_{O2})$$

- برای افزایش بهره، می توان مقاومت خروجی را با افزایش طول گیت ترانزیستورها بیشتر کرد.

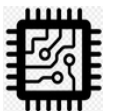
$$\left\{ \begin{aligned} g_m &= \sqrt{2\mu C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right) I} \\ r_o &= \frac{1}{\lambda I} \propto \frac{L}{I} \end{aligned} \right.$$

$$L \uparrow \Rightarrow r_o \uparrow \Rightarrow A_V \uparrow$$

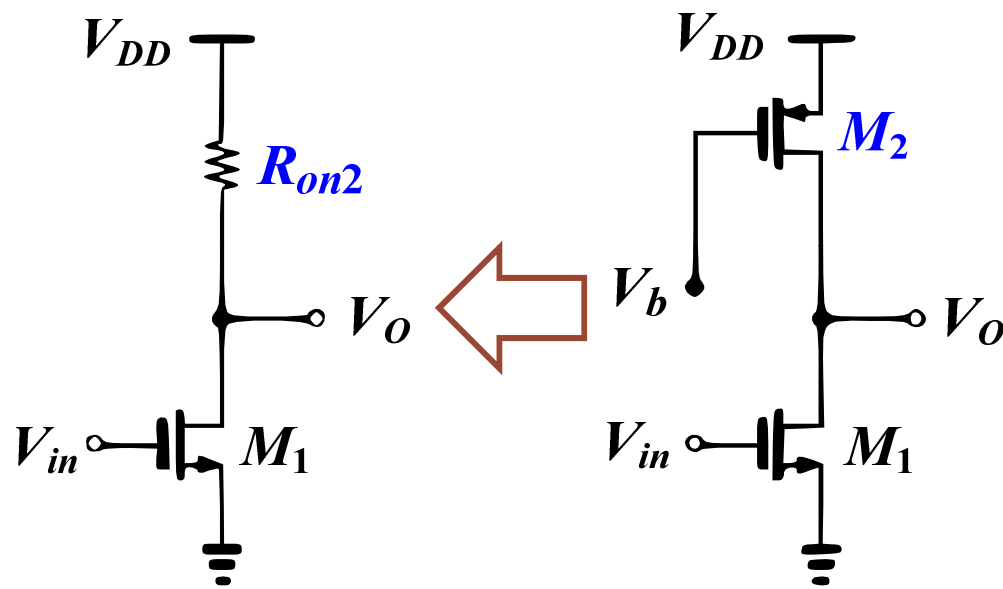
بهره ذاتی ترانزیستور: برابر با حاصل ضرب هدایت انتقالی در مقاومت خروجی ترانزیستور است و نشان دهنده حداکثر بهره قابل دستیابی از مدار سورس- مشترک است.

$$r_{O2} \rightarrow \infty \Rightarrow A_{V(\max)} = -g_{m1}r_{O1}$$

$$g_m r_o = \sqrt{2\mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right) I} \times \frac{1}{\lambda I} = \left[\sqrt{\frac{2\mu_n C_{ox}}{I} \left(\frac{W}{L}\right)} \right] \frac{1}{\lambda}$$



تقویت کننده سورس - مشترک با بار در وضعیت تریود



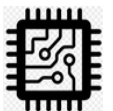
◀ می توان به جای بار منبع جریان، از بار ترانزیستوری در ناحیه تریود استفاده کرد.
 ◀ ولتاژ بایاس به گونه ای تنظیم می شود که ترانزیستور در ناحیه تریود عمیق قرار گیرد.
 ◀ با توجه به کوچک بودن ولتاژ درین-سورس در ناحیه تریود، ولتاژ خروجی در این حالت می تواند تا حد V_{DD} افزایش یابد.

◀ مشکل تقویت کننده شکل، وابستگی زیاد مقاومت روشنایی M_2 به متغیرهای فیزیکی ترانزیستور است که بهره ولتاژ را وابسته به آنها می کند.

$$R_{on2} = \frac{1}{\mu_p C_{ox} (W/L)_2 (V_{DD} - V_b - |V_{TH}|)} \Rightarrow A_V = -g_{m1} (r_{O1} // R_{on2})$$

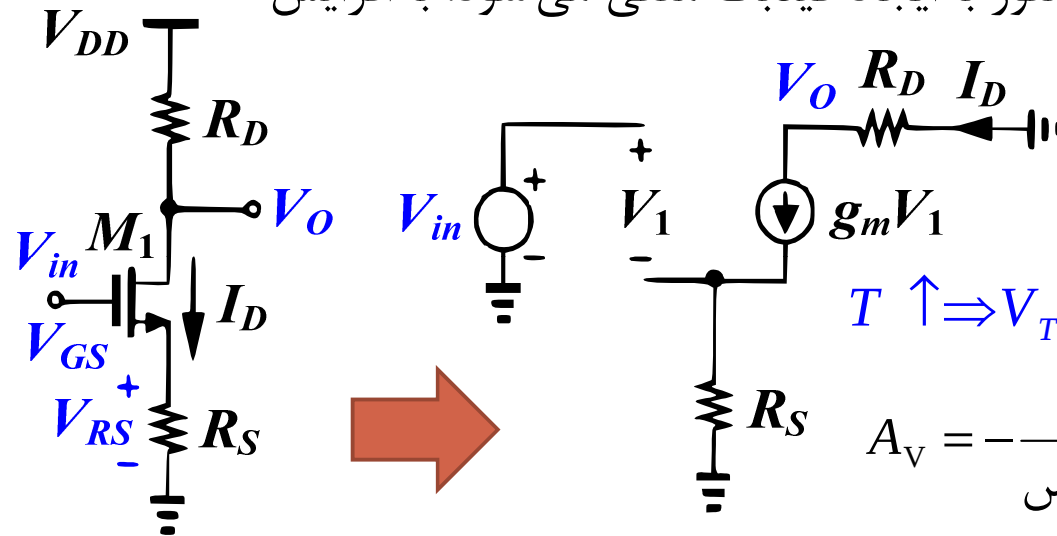
(* خصوصیات تقویت کننده سورس - مشترک:

بهره بالا - امپدانس ورودی بالا - امپدانس خروجی متوسط



تقویت کننده سورس - مشترک با مقاومت سورس

○ مقاومت سورس باعث افزایش پایداری حرارتی ترانزیستور با ایجاد فیدبک منفی می شود. با افزایش دما، ولتاژ آستانه ترانزیستور کاهش یافته و جریان آن بیشتر می شود. اما سازوکار فیدبک جریان را کاهش می دهد:



$$T \uparrow \Rightarrow V_{TH} \downarrow \Rightarrow I_D \uparrow \Rightarrow V_{RS} \uparrow \Rightarrow V_{GS} \downarrow \Rightarrow I_D \downarrow$$

$$A_V = -\frac{\text{مقاومت بار}}{\text{مقاومت سورس}} \approx -\frac{R_D}{R_S + \frac{1}{g_m}} = \frac{-g_m}{1 + g_m R_S} \times R_D$$

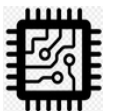
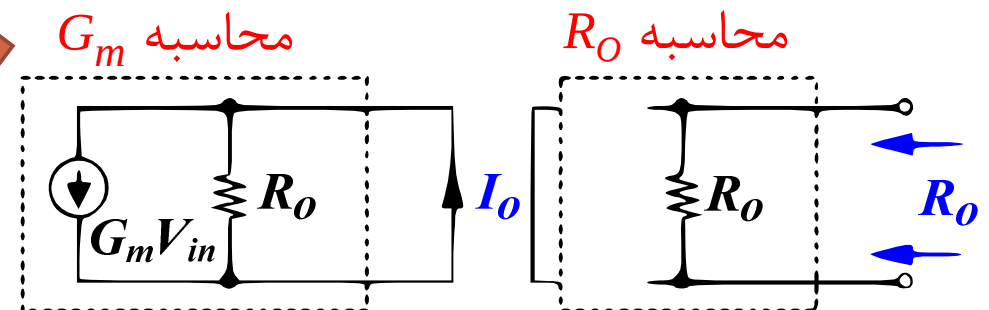
○ بهره ولتاژ بالا را می توان به صورت حاصل ضرب یک هدایت انتقالی کلی (G_m) در مقاومت خروجی یا بار

$$A_V = -G_m \times R_O \quad (R_O \text{ نیز در نظر گرفت:})$$

➤ شکل ها، نحوه محاسبه G_m را با اتصال کوتاه نمودن خروجی و R_O را با خاموش کردن منبع (مدار معادل نورتن) نشان می دهند.

$$G_m = \frac{1}{R_S + \frac{1}{g_m}} = \frac{g_m}{1 + g_m R_S} = \frac{1}{\text{Source Resistance}}$$

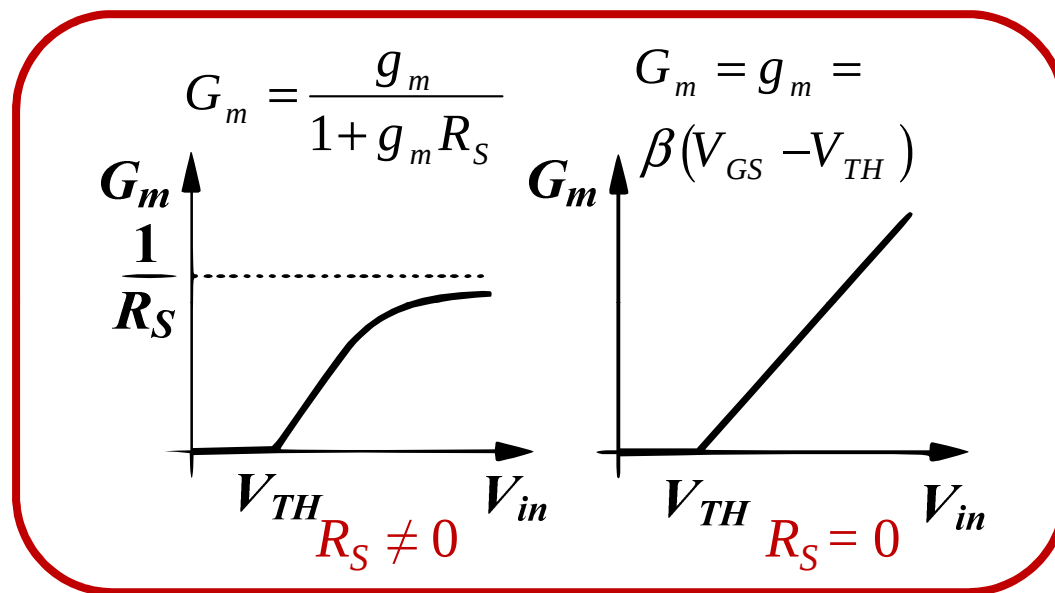
$R_O = \text{Load Resistance} \approx R_D$ با صرف نظر از مقاومت معادل دیده شده در گره خروجی به سمت پایین



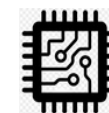
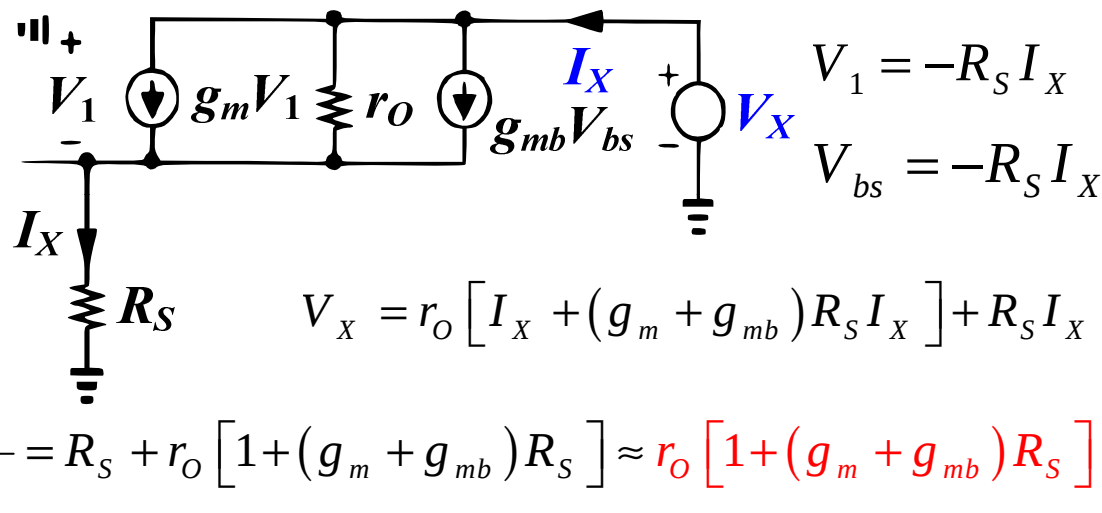
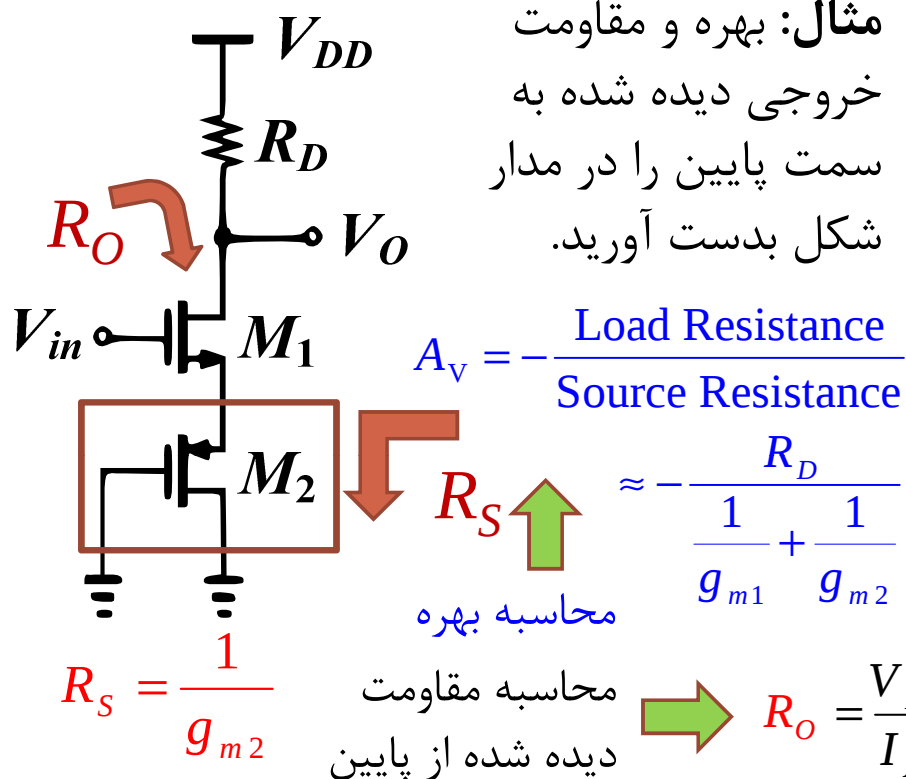
○ به ازای های کوچک، بهره تقویت کننده سورس - مشترک با مقاومت سورس شبیه به حالتی خواهد بود که R_S وجود ندارد. با افزایش g_m و کاهش $1/g_m$ ، اثر R_S زیاد شده و بهره به سمت مقدار زیر میل می کند:

$$g_m \rightarrow \infty \quad \rightarrow \quad A_V = -R_D / R_S$$

○ با وجود R_S ، G_m حداکثر به $1/R_S$ محدود می شود. بدون وجود این مقاومت، هدایت انتقالی متناسب با ولتاژ ورودی زیاد می شود.



مثال: بهره و مقاومت خروجی دیده شده به سمت پایین را در مدار شکل بدست آورید.

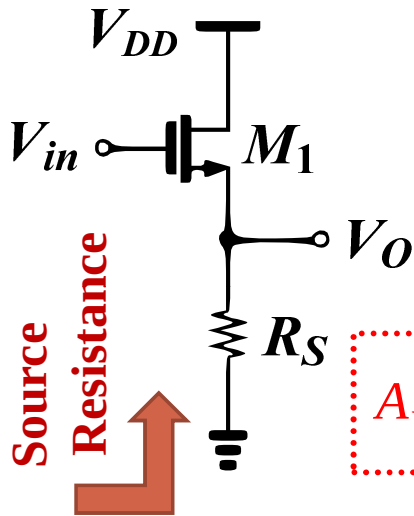


تقویت کننده درین - مشترک یا دنبال کننده سورس

○ دنبال کننده سورس، مقاومت ورودی بالا و مقاومت خروجی پایین دارد.

○ ورودی به گیت و خروجی به سورس متصل می شود. **علامت بهره ولتاژ، مثبت است.**

○ لذا ولتاژ سورس، ولتاژ گیت را دنبال نموده و ساختار همانند یک بافر ولتاژ با بهره نزدیک به یک عمل می کند. با توجه به فرمول کلی، بهره از رابطه زیر بدست می آید:



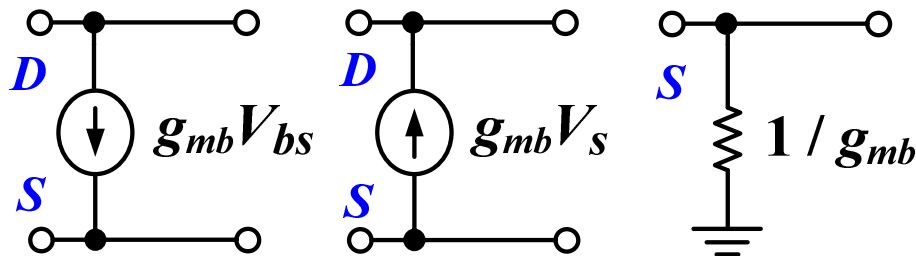
$$A_v = \frac{\text{Load Resistance}}{\text{Source Resistance}} = \frac{R_S // 1/g_{mb}}{R_S // 1/g_{mb} + 1/g_m} = \frac{g_m R_S}{1 + (g_m + g_{mb}) R_S}$$

○ بهره ولتاژ:

مقاومت دیده شده در سورس

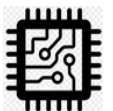
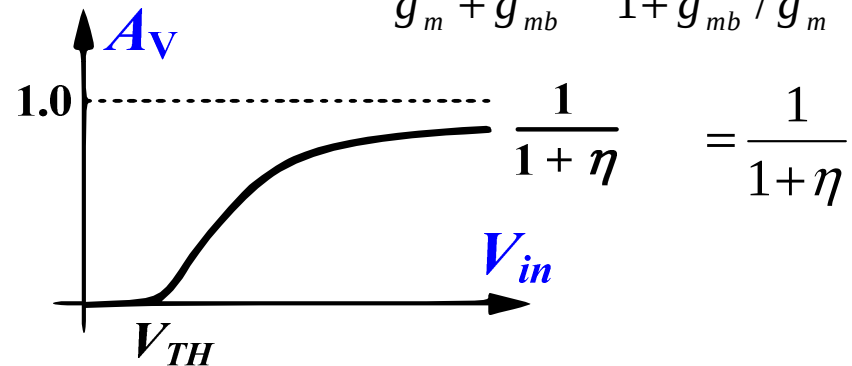
با در نظر گرفتن اثر بدنه:

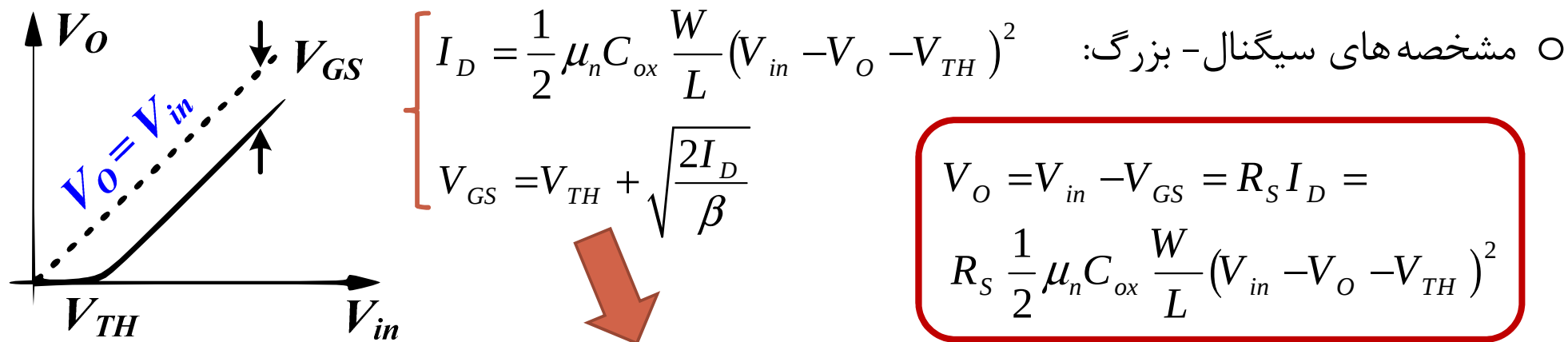
$$R_S // 1/g_{mb} + 1/g_m$$



$$\begin{cases} V_{in} \approx V_{TH} \Rightarrow g_m = 0 \Rightarrow A_v = 0 \\ V_{in} \gg V_{TH} \Rightarrow g_m, g_{mb} = \infty \Rightarrow \end{cases}$$

$$A_v = \frac{g_m}{g_m + g_{mb}} = \frac{1}{1 + g_{mb}/g_m}$$



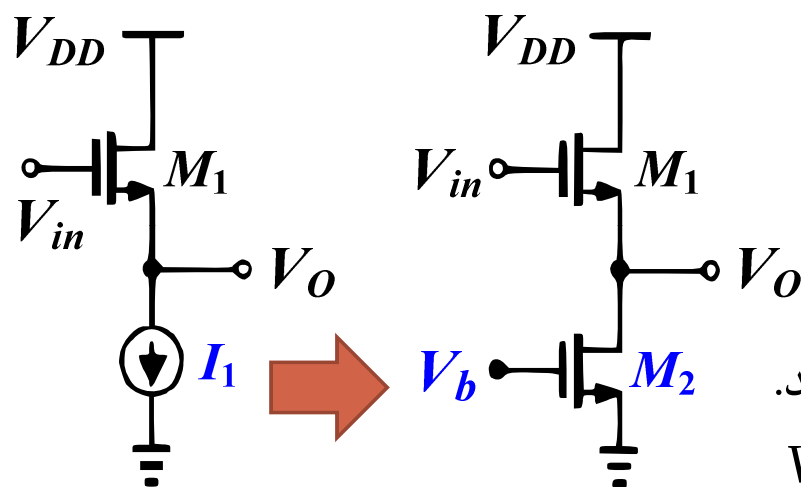


○ جریان بایاس ترانزیستور وابسته به سیگنال خروجی می‌باشد که این باعث بروز خطا می‌شود چرا که V_{GS} و در نهایت اختلاف ورودی-خروجی را وابسته به سیگنال خروجی می‌کند.

○ برای حل این مشکل می‌توان به جای مقاومت R_S از منبع جریان ثابت استفاده کرد (شکل زیر).

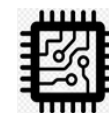
○ منبع جریان I_1 با استفاده از یک ترانزیستور $nMOS$ در ناحیه اشباع ساخته می‌شود.

○ حداکثر و حداقل ولتاژ خروجی:



$$V_{in} = V_{DD} \quad V_{Omax} = V_{DD} - V_{TH} - V_{DS,sat1}$$

حداکثر ولتاژ خروجی به ازای حداکثر ولتاژ ورودی بدست می‌آید. اگر بخواهیم ترانزیستور پایین در اشباع بماند. $V_{Omin} = V_{DS,sat2}$



مثال: بهره ولتاژ را در مدار شکل بدست آورید.

$$A_v = \frac{\text{مقاومت بار}}{\text{مقاومت سورس}} = \frac{\frac{1}{g_{m2}} // \frac{1}{g_{mb2}} // \frac{1}{g_{mb1}} // r_{O1} // r_{O2}}{\frac{1}{g_{m1}} + \frac{1}{g_{m2}} // \frac{1}{g_{mb2}} // \frac{1}{g_{mb1}} // r_{O1} // r_{O2}}$$

مقایسه دنبال کننده سورس با تقویت کننده سورس-مشارک:

(*) خصوصیات تقویت کننده سورس-مشارک: بهره ولتاژ بالا -

امپدانس ورودی بالا - امپدانس خروجی متوسط

(*) خصوصیات دنبال کننده سورس: بهره نزدیک

به یک (کاربرد به عنوان بافر و تغییر سطح dc) -

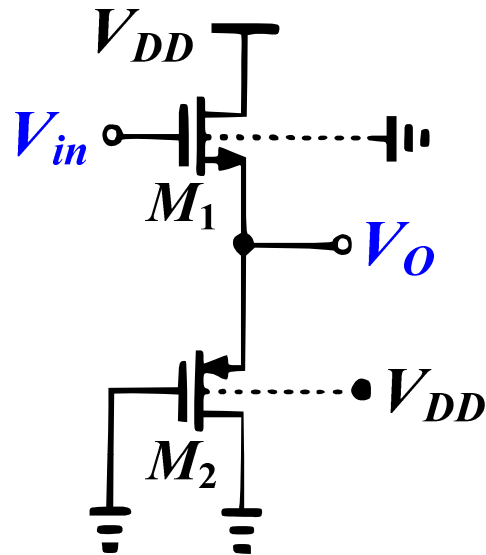
امپدانس ورودی بالا - امپدانس خروجی کم

(*) اشکالات دنبال کننده سورس

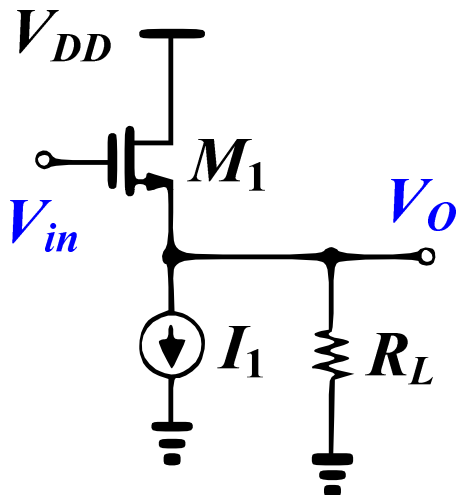
۱- غیرخطی بودن ساختار به دلیل وابستگی

ولتاژ آستانه و جریان به ولتاژ خروجی،

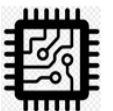
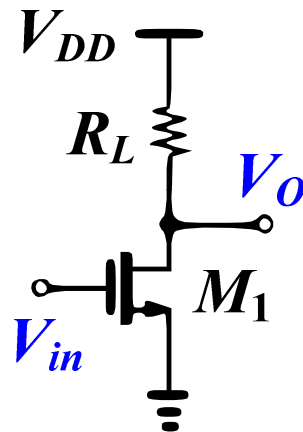
۲- محدود بودن دامنه نوسان خروجی.



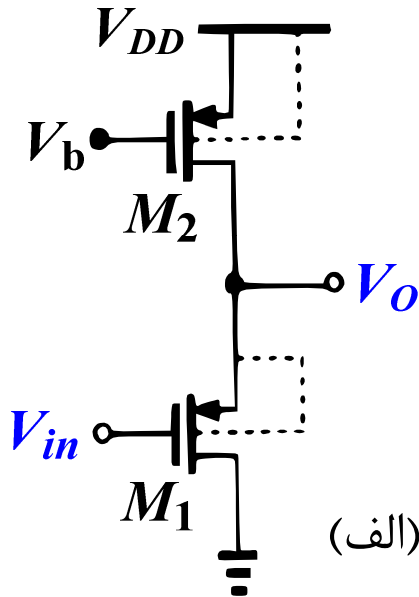
دنبال کننده سورس



تقویت کننده سورس مشارک



دنبال کننده سورس
بدون اثر بدنه



(الف)

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{V_X}{V_{in}} &= -g_{m1} r_{O1} \\ \frac{V_O}{V_X} &= \frac{r_{O3} // r_{O2} // \frac{1}{g_{mb2}}}{r_{O3} // r_{O2} // \frac{1}{g_{mb2}} + \frac{1}{g_{m2}}} \end{aligned} \right.$$

➤ بهره ولتاژ مدار، از حاصل ضرب بهره
ولتاژ دو طبقه بدست می آید:

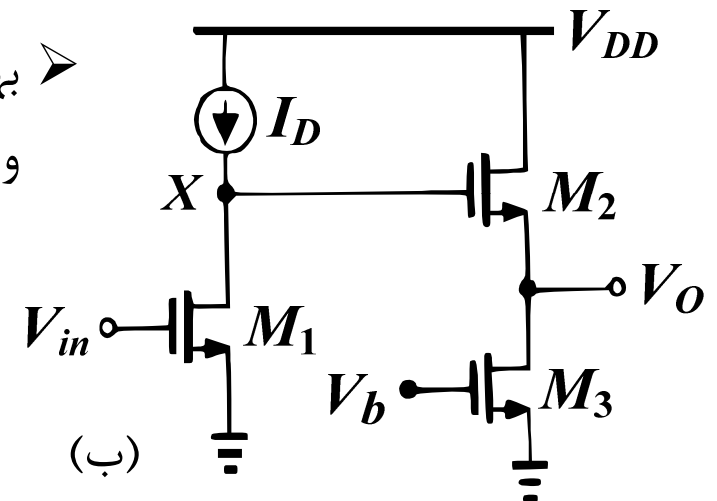
$$\Rightarrow A_V = \frac{V_O}{V_{in}} = \frac{V_X}{V_{in}} \times \frac{V_O}{V_X}$$

○ بهتر است که از ترانزیستورهای $pMOS$ جهت تحقق دنبال کننده سورس استفاده شود تا اثر بدنه حذف گردد.

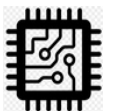
○ از کاربردهای دنبال کننده سورس، استفاده از آن به عنوان بافر ولتاژ در خروجی تقویت کننده های سورس-مستترک است (شکل ب).

○ با این کار، مقاومت خروجی طبقه سورس-مستترک کاهش می یابد.

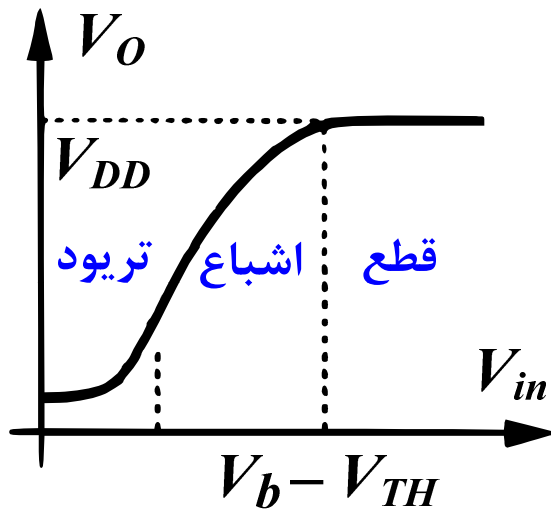
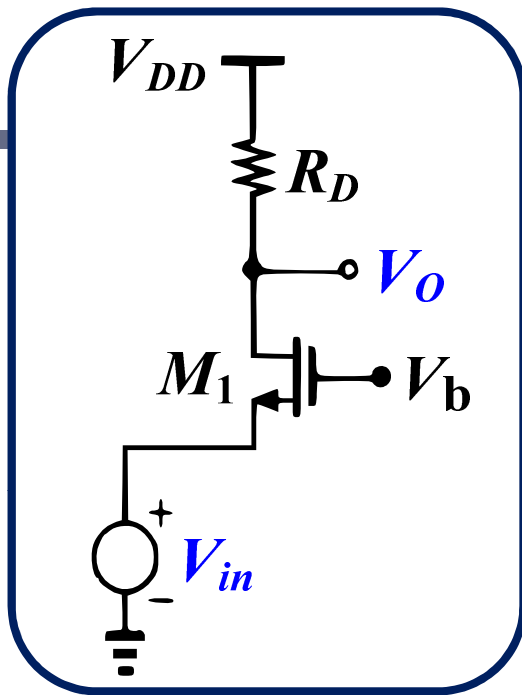
$R_O = r_{O1}$ مقاومت خروجی از گره X قبل از استفاده از دنبال کننده سورس
 $R_O \approx 1/g_{m2}$ مقاومت خروجی کوچک تر بعد از استفاده از دنبال کننده سورس



(ب)



تقویت کننده گیت - مشترک



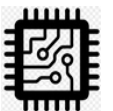
- ولتاژ ورودی موجود در پایانه سورس را حس کرده و در پایانه درین تقویت می کند. **علامت بهره ولتاژ مثبت است.**
- جریان بایاس ترانزیستور از منبع سیگنال متناوب ورودی نیز می گذرد.
- می توان ترانزیستور را توسط یک منبع جریان ثابت بایاس کرد و سیگنال ورودی را به صورت خازنی، به ورودی سورس تزویج نمود.
- با فرض در اشباع بودن ترانزیستور، جریان ترانزیستور و ولتاژ خروجی سیگنال - بزرگ :

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_b - V_{in} - V_{TH})^2$$

$$V_O = V_{DD} - R_D I_D = V_{DD} - R_D \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_b - V_{in} - V_{TH})^2$$

- به ازای ولتاژهای ورودی کوچک، ولتاژ گیت - سورس نسبتاً بزرگ بوده و M_1 در ناحیه تریود قرار می گیرد.

- این وضعیت ادامه می یابد تا در نهایت $V_O > V_b - V_{TH}$ شده و ترانزیستور اشباع شود. در نهایت، ترانزیستور به ازای $V_{GS} < V_{TH}$ خاموش شده و خروجی برابر با V_{DD} می شود.



○ با مشتق‌گیری از رابطه بدست آمده برای خروجی:

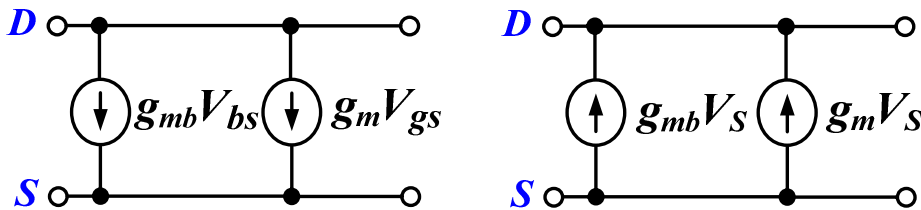
○ با توجه به رابطه میان ولتاژ آستانه و سورس - بالک (فصل دوم):

$$\frac{\partial V_o}{\partial V_{in}} = -\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_b - V_{in} - V_{TH}) \left(-1 - \frac{\partial V_{TH}}{\partial V_{in}} \right) R_D$$

$$\frac{\partial V_{TH}}{\partial V_{in}} = \frac{\partial V_{TH}}{\partial V_{SB}} = \frac{g_{mb}}{g_m} = \eta \Rightarrow \frac{\partial V_o}{\partial V_{in}} = g_m R_D (1 + \eta)$$

○ رابطه بهره ولتاژ بالا، از طریق تحلیل سیگنال-کوچک و فرمول کلی ارائه شده نیز بدست می‌آید:

$$A_v = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{\text{Load Resistance}}{\text{Source Resistance}} = \frac{R_D}{\frac{1}{g_m + g_{mb}}} = (g_m + g_{mb}) R_D$$



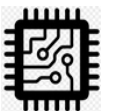
○ وجود اثر بدنه با اندازه تقریبی $g_{mb} \approx 0.2 g_m$ ، باعث افزایش بهره در ساختار گیت-مشارک می‌شود.

(*) **نکته:** امپدانس ورودی ساختار گیت-مشارک نسبتاً پایین و برابر با $1/(g_m + g_{mb})$ است. در برخی کاربردها مانند تقویت‌کننده‌های جریانی، امپدانس ورودی کم سودمند است.

○ حداکثر و حداقل ولتاژ خروجی:

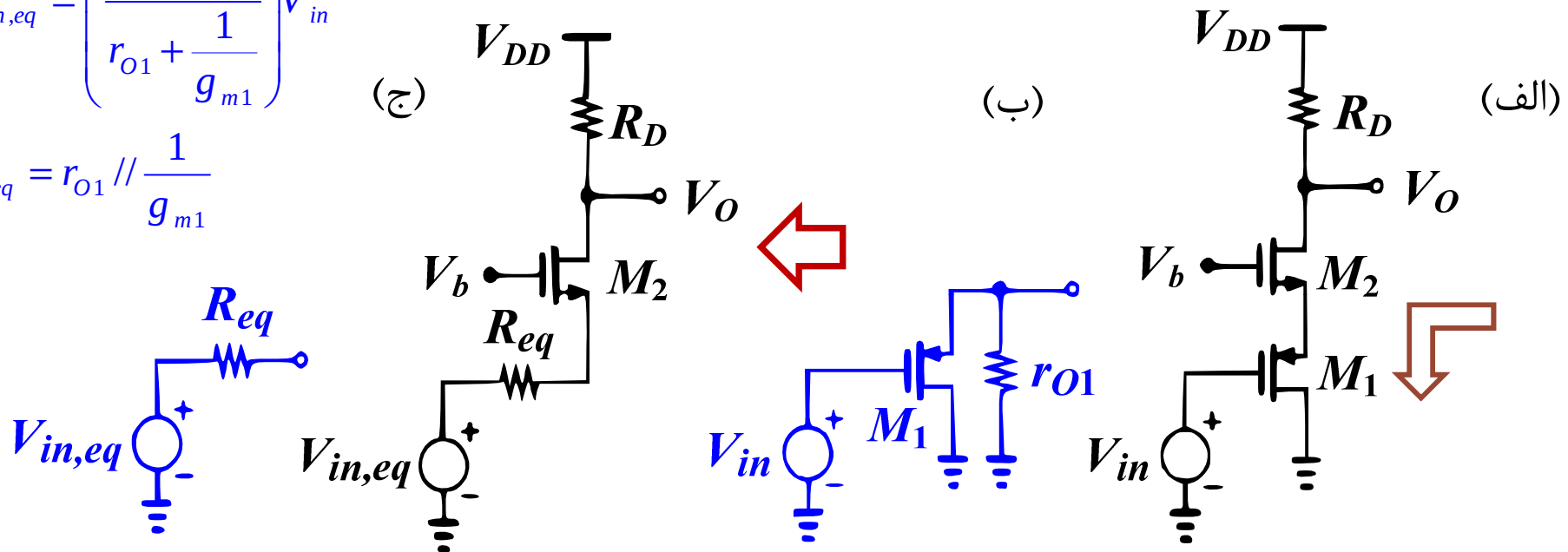
$$\left[\begin{array}{l} V_{Omax} = V_{DD} \\ V_{Omin} = V_b - V_{TH} \end{array} \right. \quad \text{در اشباع ماندن ترانزیستور } M_1 \Rightarrow V_{Swing} = V_{Omax} - V_{Omin}$$

(*) **تقویت‌کننده گیت-مشارک:** بهره ولتاژ بالا، مقاومت ورودی کم، مقاومت خروجی متوسط به بالا



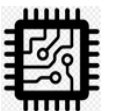
مثال: بهره ولتاژ را در مدار شکل الف محاسبه کنید.

$$\begin{cases} V_{in,eq} = \left(\frac{r_{O1}}{r_{O1} + \frac{1}{g_{m1}}} \right) V_{in} \\ R_{eq} = r_{O1} // \frac{1}{g_{m1}} \end{cases}$$

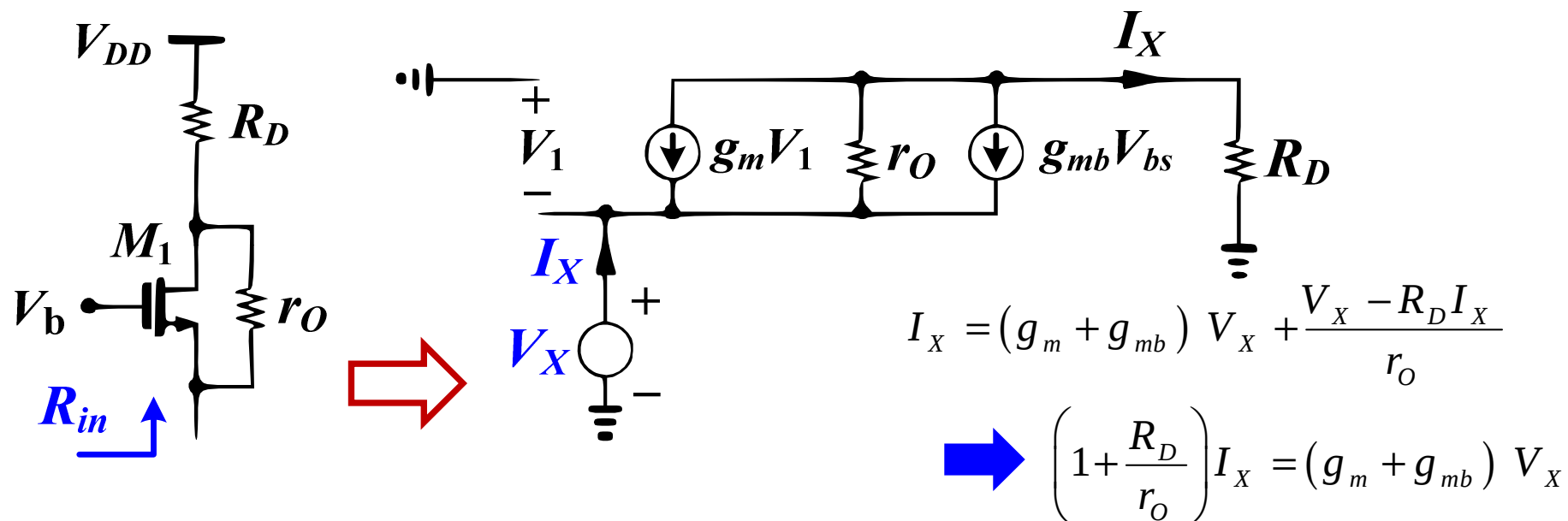


○ برای ساده تر شدن محاسبات، مدار معادل تونن از سمت سورس M_1 را در شکل ب رسم می کنیم تا به مدار ج برسیم. اندازه ولتاژ و مقاومت تونن حاصل، در بالا سمت چپ مشخص شده اند. لذا:

$$\frac{V_O}{V_{in,eq}} = \frac{\text{مقاومت بار}}{\text{مقاومت سورس}} = \frac{R_D}{R_{eq} + \frac{1}{g_{m2} + g_{mb2}}} \Rightarrow \frac{V_O}{V_{in}} = \left(\frac{r_{O1}}{r_{O1} + \frac{1}{g_{m1}}} \right) \frac{R_D}{R_{eq} + \frac{1}{g_{m2} + g_{mb2}}}$$



تقویت کننده گیت- مشترک: محاسبه مقاومت ورودی



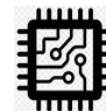
○ نتیجه روبرو نشان می دهد که به ازای R_D بزرگ و یا r_o کوچک،

مقاومت ورودی بزرگتر از مقدار متعارف $1/g_m$ خواهد شد.

○ به ازای $R_D = \infty$ ، مقاومت ورودی نامحدود می شود.

○ لذا مقاومت ورودی طبقه گیت- مشترک تنها وقتی کوچک و تقریباً برابر با $1/g_m$ است که مقاومت بار،

کوچک، و مقاومت خروجی ترانزیستور بزرگ باشد.



تقویت کننده گیت - مشترک: محاسبه مقاومت خروجی

○ مقاومت خروجی تقویت کننده گیت مشترک از دو جزء، یکی مقاومت دیده شده از خروجی به سمت پایین و دیگری مقاومت دیده شده از خروجی به سمت بالا، تشکیل شده است.

○ در اسلاید ۱۳ نشان دادیم که برای یک ترانزیستور با مقاومت سورس

R_S ، مقاومت ac دیده شده از سمت پایانه درین به سمت پایین از

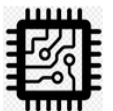
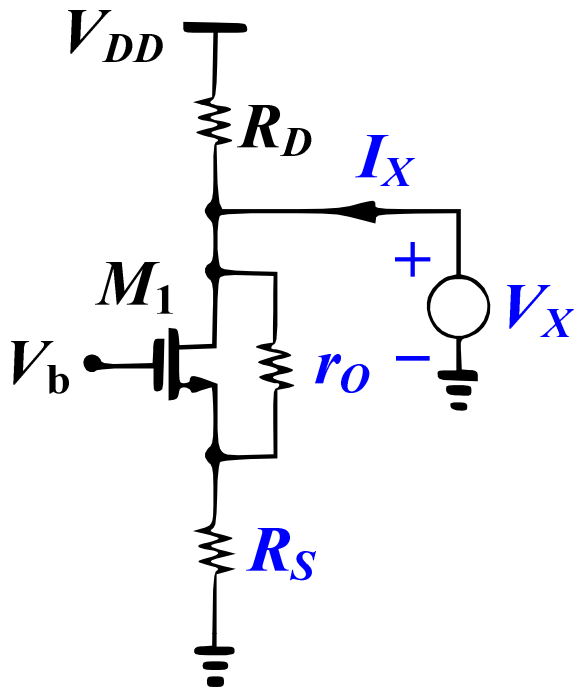
رابطه زیر بدست می آید:

$$\frac{\Delta V}{\Delta I} = r_o [1 + (g_m + g_{mb}) R_S] + R_S \approx g_m r_o \times R_S$$

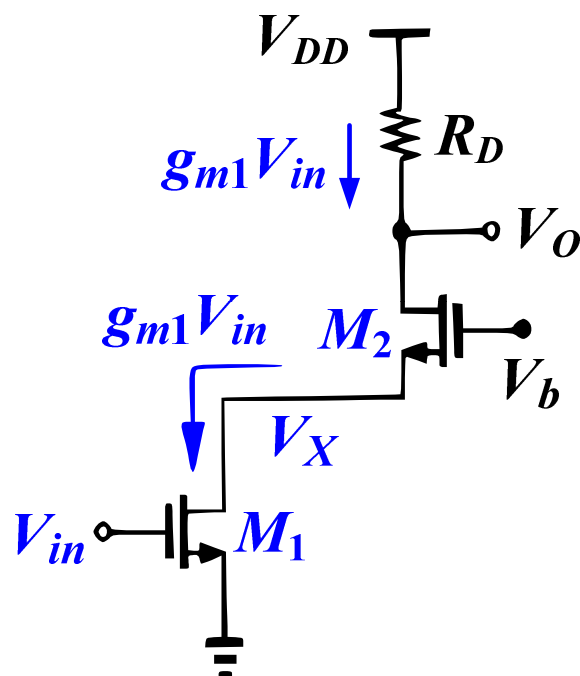
○ مقاومت دیده شده از سمت بار، حاصل موازی مقاومت رابطه

بالا و مقاومت دیده شده از سمت بالا (R_D) است.

$$R_O = \frac{V_X}{I_X} \approx R_D // r_o [1 + (g_m + g_{mb}) R_S]$$



تقویت کننده کسکود تلسکوپی (Telescopic-Cascode)



○ تقویت کننده کسکود تلسکوپی، از سری کردن دو تقویت کننده سورس-مشارک و گیت-مشارک بدست می آید.

○ سیگنال ورودی به یک تقویت کننده گیت-مشارک، می تواند از جنس جریان باشد. این اتفاق در تقویت کننده کسکود می افتد.

○ ترانزیستور M_1 در نقش مبدل ولتاژ به جریان (تبدیل V_{in} به $g_{m1}V_{in}$) و ترانزیستور M_2 نقش بافر جریان دارد.

○ ترانزیستور M_1 را ترانزیستور ورودی و ترانزیستور M_2 را کسکود می نامیم.

○ حداقل ولتاژ بایاس V_b لازم به منظور در اشباع نگاه داشتن ترانزیستور M_1 :

$$V_X > V_{in} - V_{TH1} \rightarrow V_b > V_{in} - V_{TH1} + V_{GS2}$$

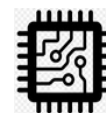
○ حداقل ولتاژ خروجی لازم به منظور در اشباع نگاه داشتن ترانزیستور M_2 :

$$V_O > V_b - V_{TH2} \rightarrow V_{Omin} = V_b - V_{TH2}$$

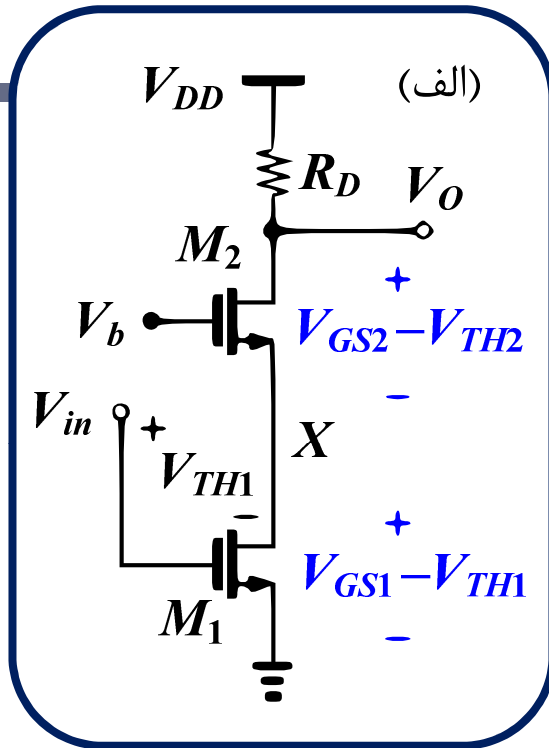
○ در مجموع برای دستیابی به ولتاژ خروجی حداقل،

ولتاژ بایاس باید طوری تنظیم شود که ترانزیستور M_1 در مرز اشباع قرار گیرد:

$$V_b = V_{GS2} + V_{DS,sat1}$$



تقویت کننده کسکود: شرایط بایاس



○ شکل الف، تقویت کننده کسکود را در وضعیتی نشان می دهد که هر دو ترانزیستور در مرز ناحیه اشباع و تریود هستند.

○ ولتاژ درین- سورس دو ترانزیستور طوری تنظیم شده است که برابر با $V_{DS,sat}$ باشند.

○ به ازای $V_{in} < V_{TH1}$ ، ترانزیستور M_1 خاموش بوده و $V_O = V_{DD}$ است.

○ با عبور ولتاژ ورودی از V_{TH1} ، ترانزیستور M_1 وارد ناحیه اشباع می شود.

○ با افزایش بیشتر ورودی، بروز دو اتفاق محتمل است:

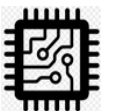
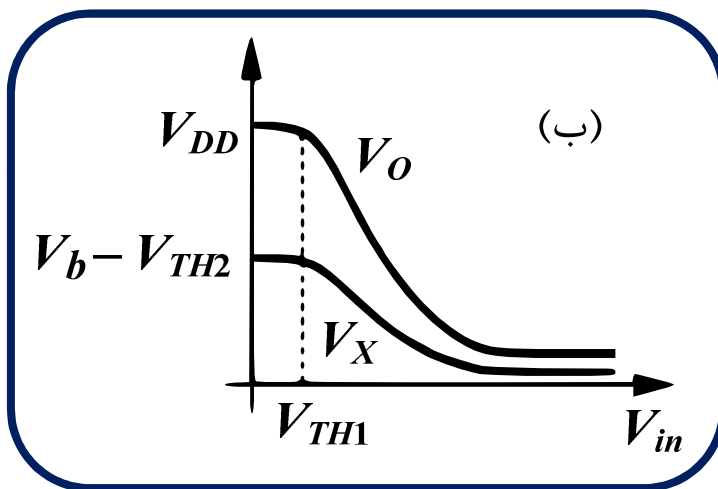
(الف) ولتاژ V_X به اندازه ای کم شود که ترانزیستور ورودی به ناحیه تریود

برود چراکه :

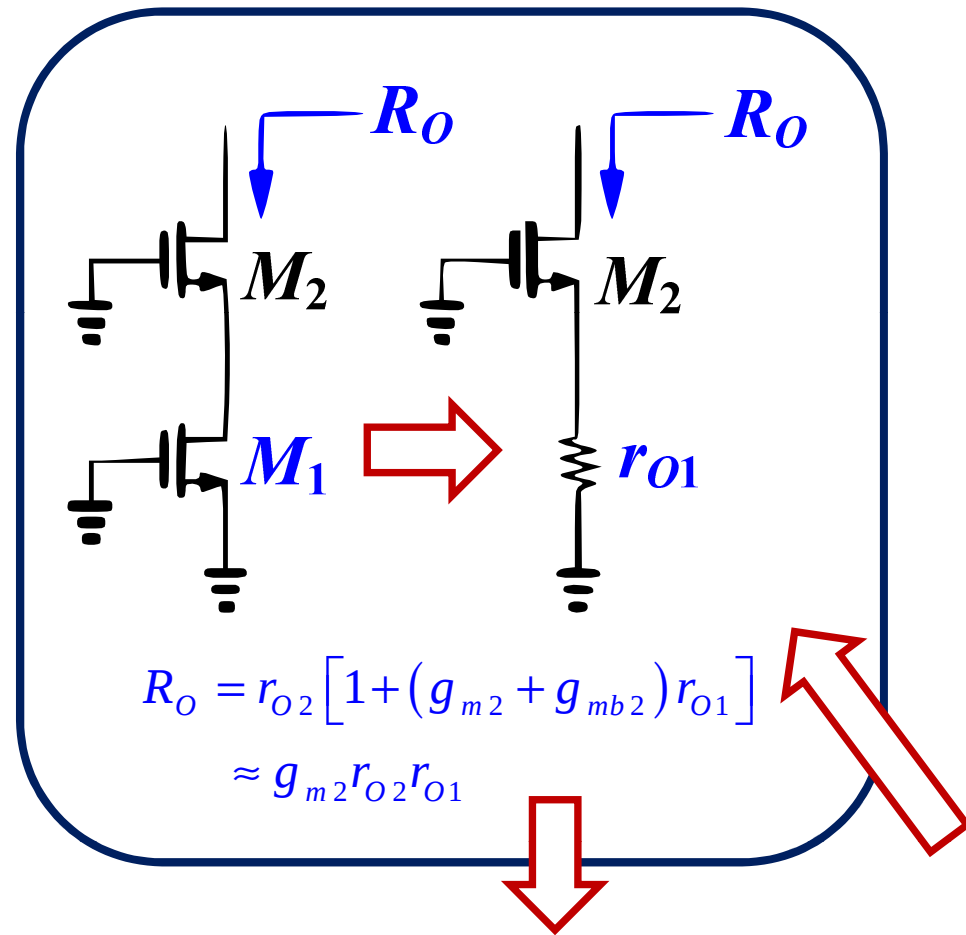
$$V_X = V_b - V_{GS} = V_b - V_{TH} - \sqrt{\frac{2I}{\beta}}$$

(ب) ولتاژ خروجی به اندازه یک ولتاژ آستانه از V_b کمتر شود که در این حالت ترانزیستور کسکود به ناحیه تریود می رود.

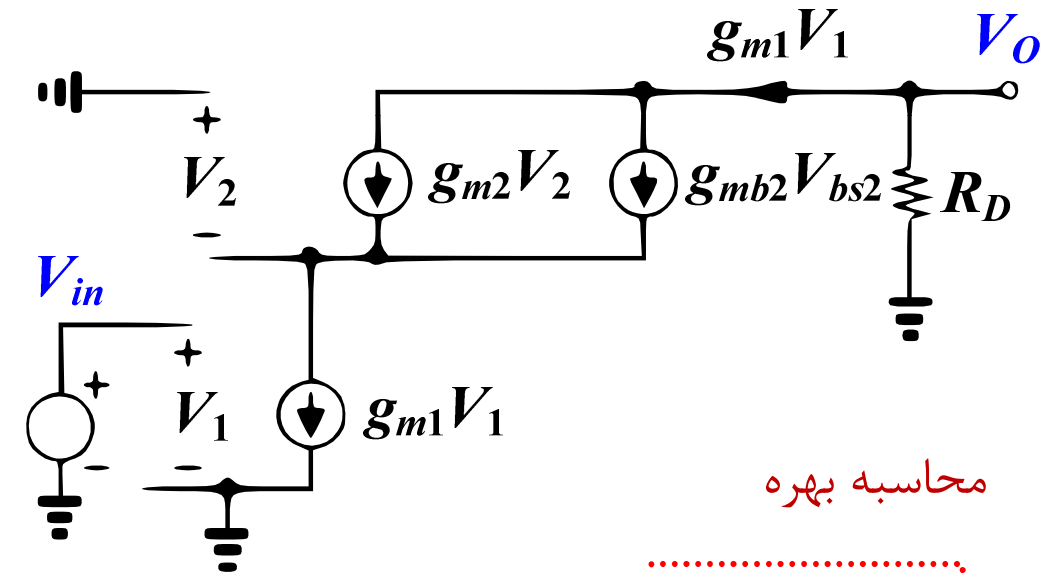
○ بسته به ابعاد ترانزیستورها، ولتاژ بایاس V_b و اندازه R_D ، یکی از دو اثر بالا ممکن است که زودتر اتفاق بیافتد.



تقویت کننده کسکود: محاسبه بهره و مقاومت خروجی



○ مدار معادل سیگنال-کوچک تقویت کننده کسکود
(مقاومت خروجی بی نهایت)



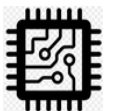
محاسبه بهره

$$A_V = -G_m R_O$$

$$G_m = g_{m1}$$

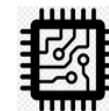
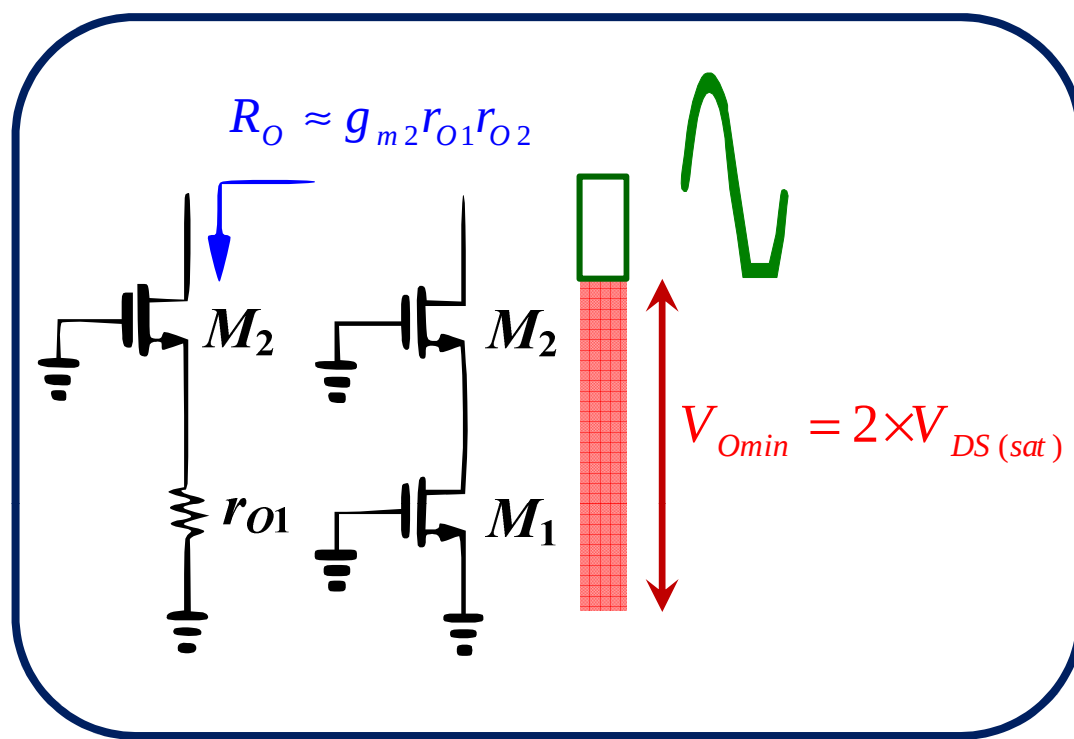
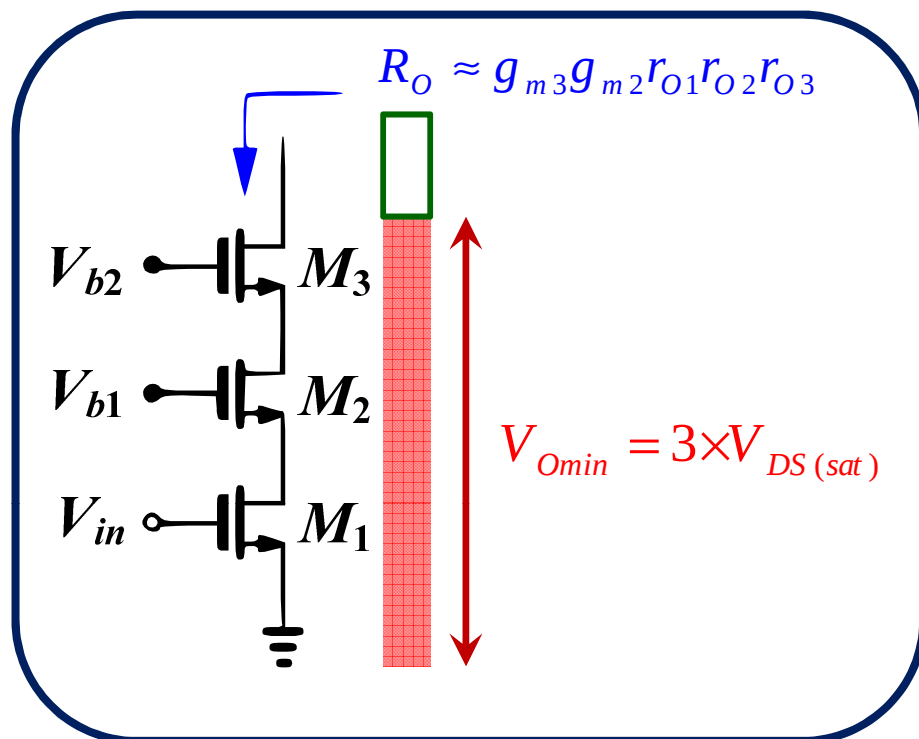
محاسبه مقاومت خروجی

○ ترانزیستور M_2 مقاومت خروجی r_{O1} تقویت کننده را به اندازه بهره ذاتی خود یعنی $g_{m2} r_{O2}$ افزایش داده است. این مقدار، بزرگ است و باعث افزایش قابل توجه در بهره ولتاژ تقویت کننده ها می شود.

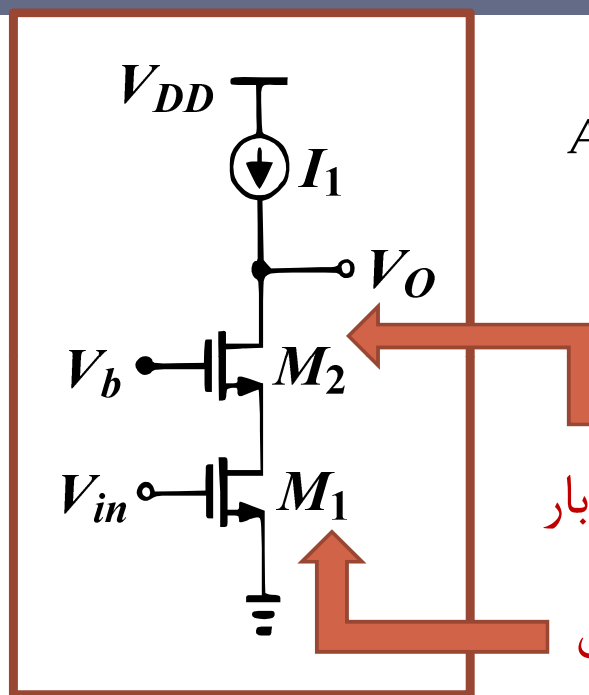


تقویت کننده کسکود سه گانه

○ ایده کسکود را می توان به سه ترانزیستور یا بیشتر هم تعمیم داد و به مقاومت خروجی بالاتر و بهره ولتاژ بزرگتر رسید. البته این ایده نیازمند حداقل ولتاژ اشباع بالاتر برای ترانزیستورهای کسکود موجود در مسیر است و ولتاژ خروجی حداقل را افزایش و سوئینگ ولتاژ را کاهش می دهد.



تقویت کننده کسکود تلسکوپی با بار منبع جریان



$$A_V = \frac{V_O}{V_{in}} = -\frac{\text{Load Resistance}}{\text{Source Resistance}} = -g_{m1} \times r_{O2} (1 + g_{m2} r_{O1})$$

$$\approx -g_{m1} \times (g_{m2} r_{O1} r_{O2})$$

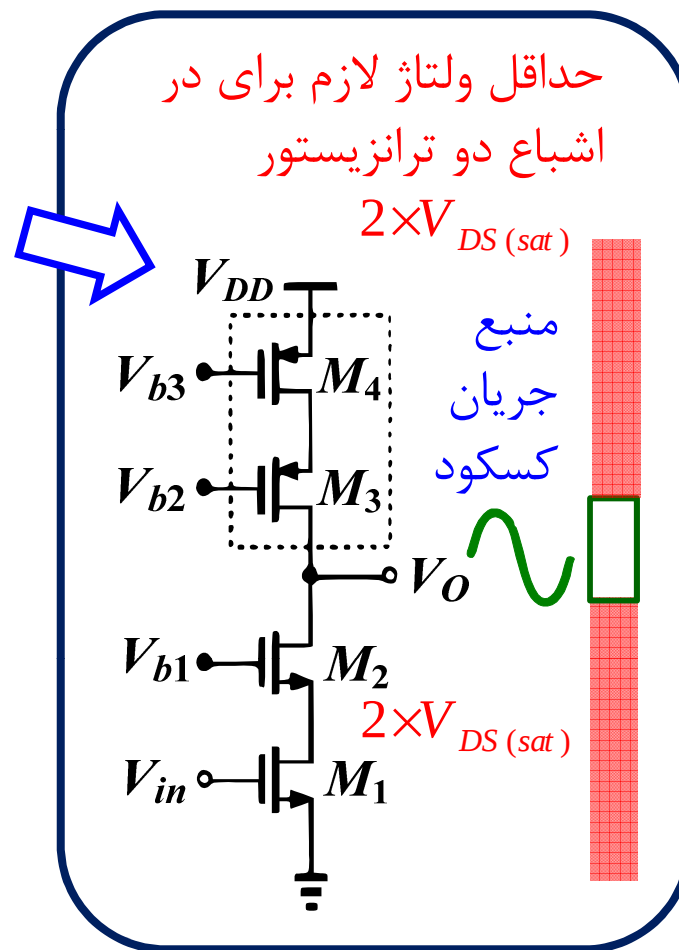
مقاومت بار

مقاومت سورس

نحوه پیاده سازی
منبع جریان I_1
برای تقویت کننده
کسکود.

حداقل ولتاژ لازم برای در
اشباع دو ترانزیستور

$$2 \times V_{DS(sat)}$$



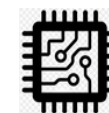
○ از یک ساختار کسکود دوگانه برای پیاده سازی I_1 استفاده شده است.

○ از چنین ساختارهایی به طور گسترده در آپ امپ های مجتمع و

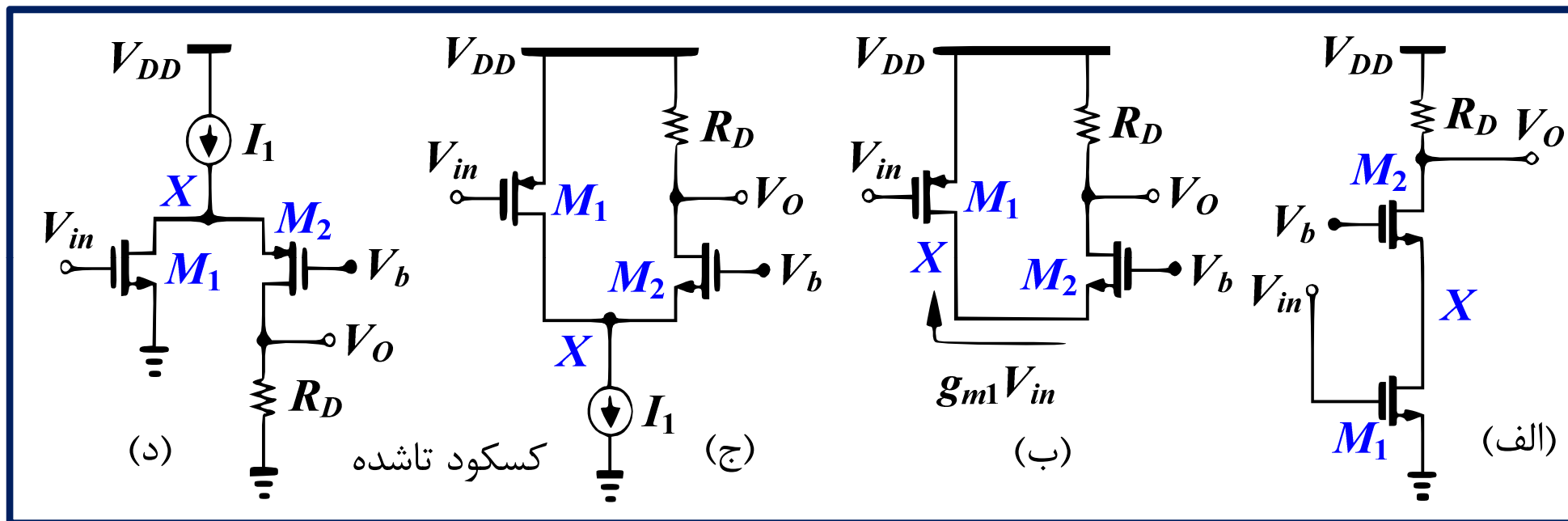
به منظور افزایش بهره ولتاژ آنها استفاده می شود.

○ به دلیل موازی بودن دو مقاومت، بهره شکل سمت راست :

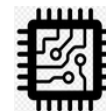
$$A_V = -g_{m1} (g_{m2} r_{O1} r_{O2} // g_{m3} r_{O3} r_{O4})$$



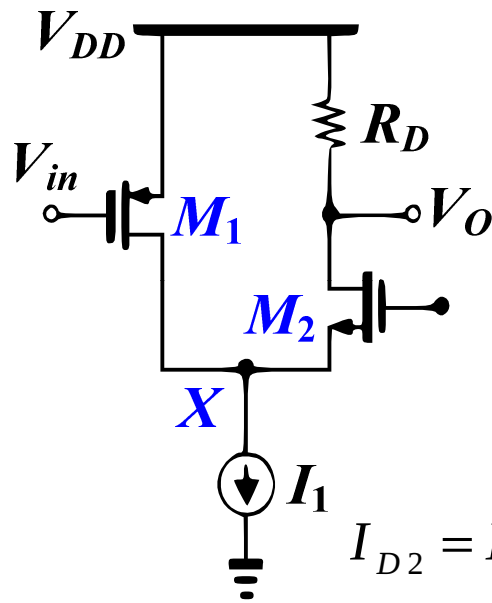
تقویت کننده کسکود تا شده (Folded-Cascode)



- در تقویت کننده کسکود شکل الف لازم نیست که ترانزیستور ورودی و کسکود از یک جنس باشند.
- شکل ب یک ترکیب $pMOS - nMOS$ از طبقه کسکود تا شده را نشان می دهد که عملکرد آن مشابه با شکل الف است. برای تغذیه M_2 و M_1 می توان از منبع جریان I_1 مشابه با شکل ج استفاده کرد.
- شکل د آرایش یک تقویت کننده کسکود تا شده از نوع $nMOS - pMOS$ نشان می دهد.
- ساختارهای ج و د کسکود تا شده نام دارند. زیرا در اصطلاح مسیر سیگنال به سمت بالا (در شکل ج) یا به سمت پایین (در شکل د) تا شده است.



تقویت کننده کسکود تاشده: عملکرد سیگنال - بزرگ

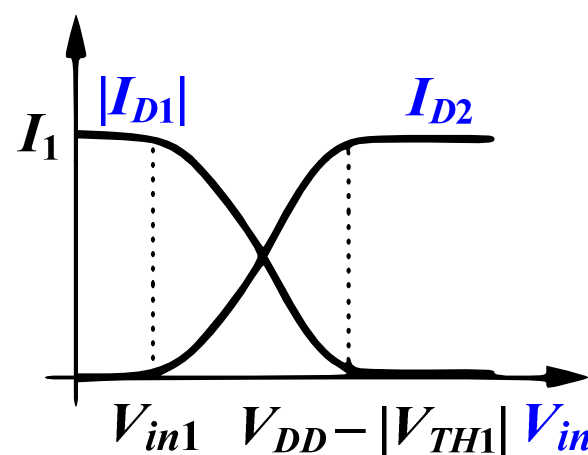
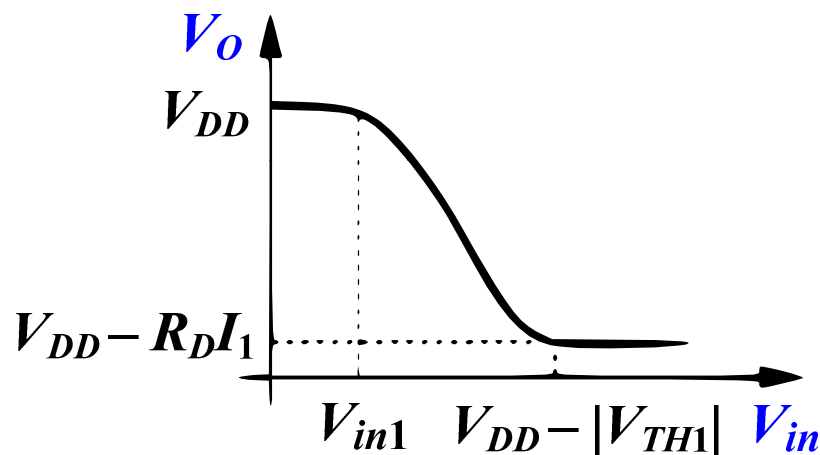


○ فرض کنید که ولتاژ V_{in} از V_{DD} به سمت صفر کاهش یابد.

○ به ازای $V_{in} > V_{DD} - |V_{TH1}|$ ، ترانزیستور M_1 خاموش شده و کل جریان I_1 از M_2 می گذرد. در این حالت $V_O = V_{DD} - R_D I_1$ خواهد شد.

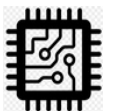
○ به ازای $V_{in} < V_{DD} - |V_{TH1}|$ ترانزیستور M_1 در اشباع قرار می گیرد. در این حالت

$$I_{D2} = I_1 - \frac{1}{2} \left[\mu_p C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right)_1 \right] (V_{DD} - V_{in} - |V_{TH1}|)^2 \quad V_O = V_{DD} - R_D I_{D2}$$



○ با کاهش بیشتر V_{in} ، I_{D2}

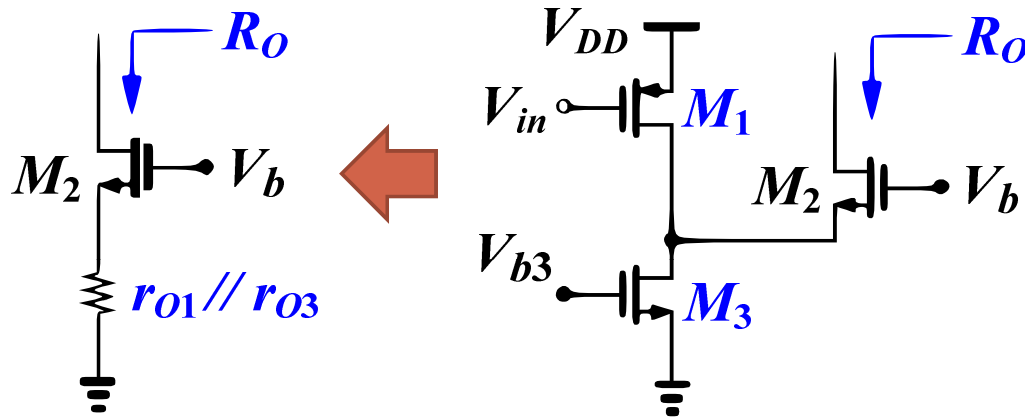
هم کم و کمتر می شود تا در نهایت به ازای $I_{D1} = I_1$ ، I_{D2} برابر با صفر خواهد شود.



تقویت کننده کسکود تاشده: محاسبه مقاومت خروجی

○ مقاومت خروجی در کسکود تاشده :

$$R_o \approx r_{o2} (1 + g_{m2} r_{o1} // r_{o3})$$



○ موازی شدن دو مقاومت r_{o1} و r_{o3} باعث می شود که مقاومت خروجی کسکود تاشده کمی کوچکتر از کسکود تلسکوپی باشد.

○ برای دستیابی به مقاومت خروجی و بهره ولتاژ بزرگ تر، بار طبقه کسکود تاشده را نیز باید به صورت کسکود پیاده سازی نمود.

تقویت کننده کسکود تاشده با بار آینه جریان کسکود

