محمد اعرابیان

جزوه درس الکترونیک کاربردی

جلسه پانزدهم

برای جزئیات بیشتر **اسکن کنید**

نسخه ۱.۱ | تهیه شده در بهمن ۱۴۰۰

تمامی حقوق این جزوه برای **محمد اعرابیان** محفوظ است.

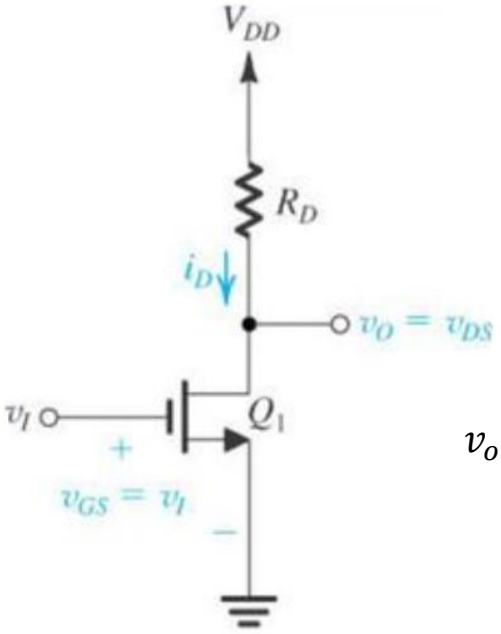
استفاده از MOSFET در مدارات تقویت کننده

ایده استفاده از MOSFET بعنوان تقویت کننده از این خاصیت نشات میگیرد که وقتی که ترانزیستور در ناحیه اشباع قرار میگیرد بصورت یک منبع جریان کنترل شونده توسط ولتاژ عمل میکند (تغییرات ولتاژ V_{GS} باعث تغییر جریان I_D میشود). ازاینرو ترانزیستور میتواند بصورت یک تقویت کننده transconductance عمل نماید.

باید توجه شود که رابطه جریان I_D با V_{GS} یک رابطه کاملا غیر خطی است در حالیکه علاقمند هستیم تقویت کننده ای با رابطه خطی داشته باشیم. برای فائق آمدن بر این مشکل از بایاس DC استفاده میشود.

در این روش ترانزیستور با یک مقدار V_{GS} مشخص بایاس میشود تا یک مقدار I_D مشخص پیدا کند سپس سیگنال کوچک v_{gs} به آن اضافه میشود تا جریان i_d متناسب با این مقدار کوچک تغییر نماید.

مشخصه انتقال ترانزیستور: کار با سیگنال بزرگ



شکل مقابل یک تقویت کننده متداول یعنی سورس مشترک را نشان می‌دهد (Common Source) که در آن سورس زمین شده، بین ورودی و خروجی تقویت کننده مشترک است.

اگرچه با تغییر ولتاژ v_{gs} قصد تغییر i_d را داریم اما میتوان با قرار دادن مقاومت RD در مدار ولتاژ خروجی متغیری داشت:

$$v_o = v_{DS} = V_{DD} - R_D i_D$$

مقدار جریان برابر است با:

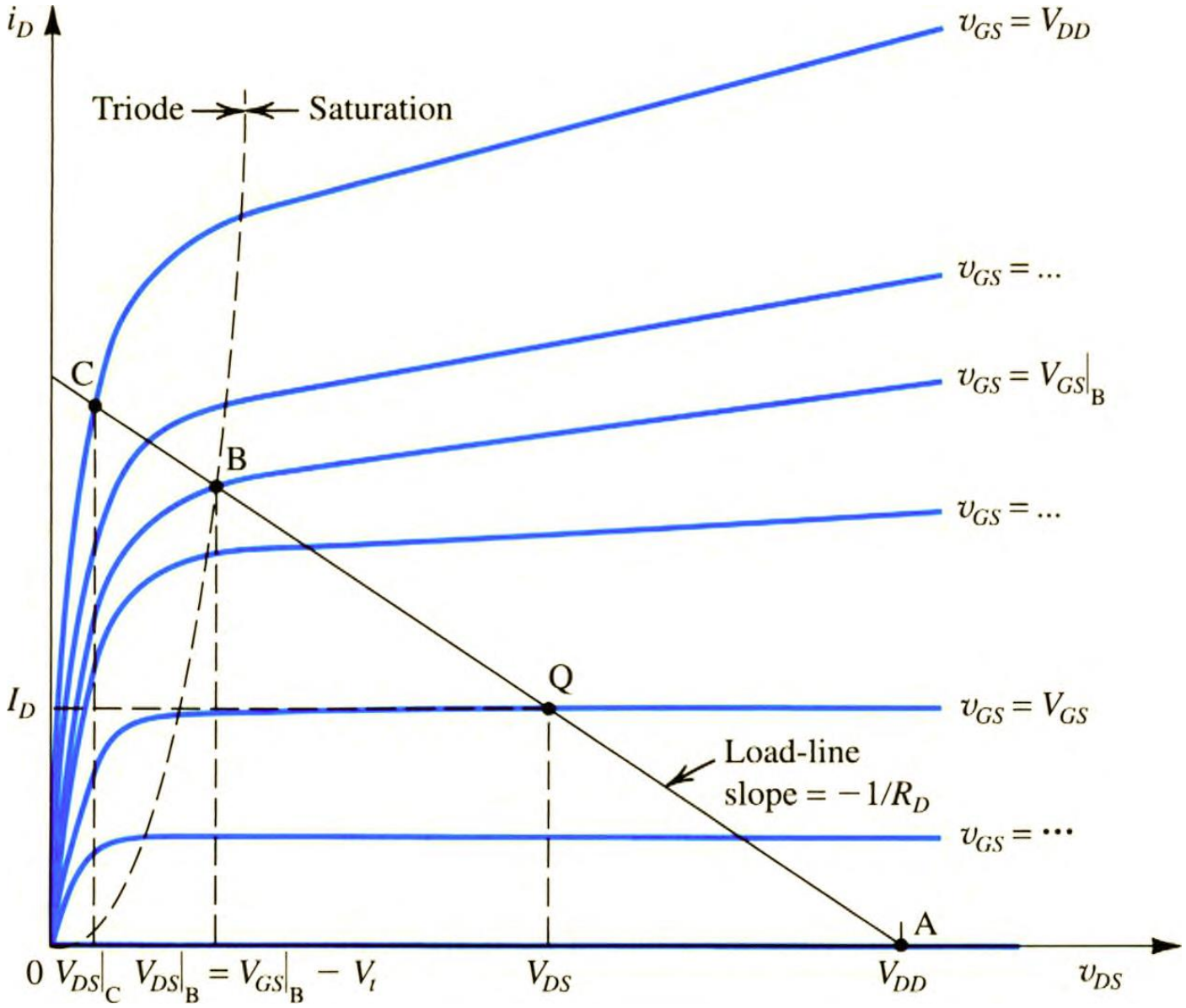
$$i_D = \frac{V_{DD}}{R_D} - \frac{1}{R_D} v_{DS}$$

بدست آوردن مشخصه انتقال به روش گرافیکی

رابطه

$$i_D = \frac{V_{DD}}{R_D} - \frac{1}{R_D} v_{DS}$$

را می‌توان بصورت یک خط راست بر روی منحنی مشخصه ترانزیستور رسم نمود.



شیب این خط برابر است با $-\frac{1}{R_D}$

از آنجائیکه معمولا R_D همان مقاومت بار است، این خط راست را خط بار (load line) میگویند. با استفاده از نمودار شکل مقابل می‌توان به ازای هر مقدار ($V_I = V_{GS}$) ، V_I مقدار خروجی V_O مربوطه را مشخص نمود. به ازای مقادیر $V_I = V_{GS} < V_t$ ترانزیستور قطع بوده و جریان صفر است(نقطه A) لذا:

$$v_o = v_{DS} = V_{DD}$$

با بیشتر شدن $V_I = V_{GS}$ از V_t ترانزیستور روشن شده و i_D افزایش یافته و v_o کاهش خواهد یافت. از آنجائیکه در ابتدا v_o زیاد بود ترانزیستور در ناحیه اشباع شروع به کار میکند و با افزایش ورودی V_I در بین دو نقطه A و B همچنان دراشباع باقی میماند. در بین این دو نقطه بازای یک مقدار مشخص با نام نقطه کار (Q) داریم:

$$V_I = V_{GS} = v_{GS}$$
$$V_{O_Q} = V_{DS_Q} \ , \ I_{O_Q} = I_{D_Q}$$

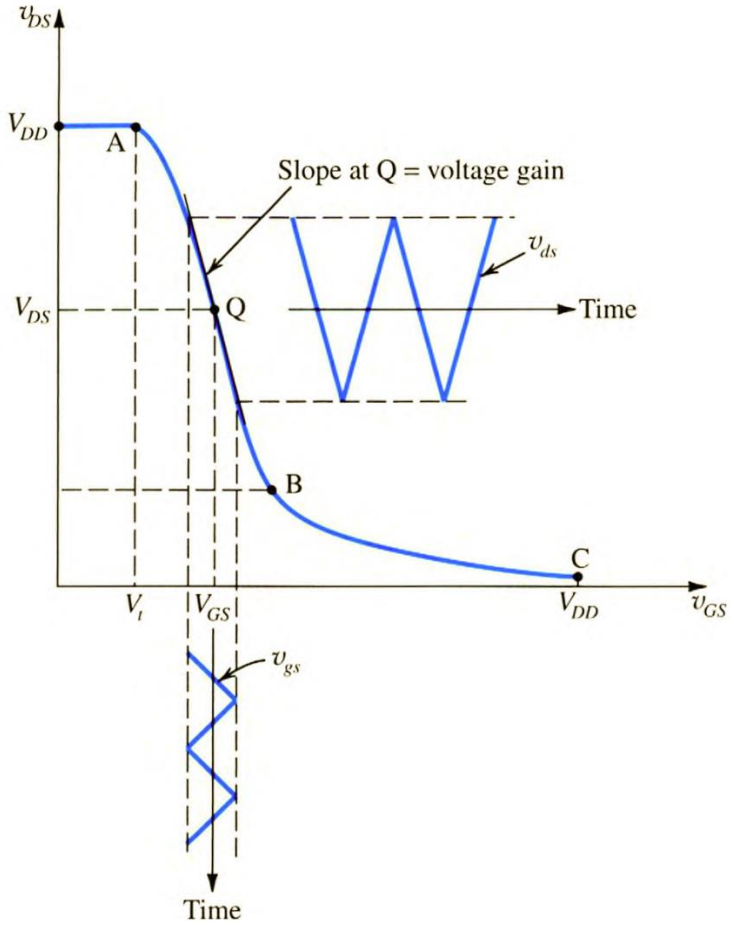
هنگامی که تفاضل مقدارخروجی از ورودی از V_t کمتر می‌شود ترانزیستور از ناحیه اشباع خارج و وارد ناحیه تریود می‌شود.

$$V_{DS}\Big|_B = V_{GS}\Big|_B - V_t$$

برای مقادیر $V_t > V_{GS}\Big|_B$ ترانزیستور بصورت عمیق تری در ناحیه تریود فرو رفته و ولتاژ خروجی به صفر میل می‌کند.

مشخصه ولتاژ $V_i - V_o$

رابطه ولتاژ ورودی و خروجی تقویت کننده سورس مشترک را می‌توان بصورت شکل زیر نشان داد که در آن سه ناحیه کار مختلف قطع، اشباع و تریود نشان داده شده اند.



برای کار بصورت تقویت کننده، ترانزیستور طوری بایاس میشودکه نقطه کار Q در ناحیه اشباع قرار گیرد. سپس یک سیگنال کوچک طوری به ورودی اضافه می‌شود که خروجی دراطراف نقطه کار با یک رابطه تقریبا خطی با ورودی سیگنال کوچک تغییر نماید. در این حالت گین تقویت کننده بصورت زیر تعریف میشود:

$$A_V = \frac{dV_O}{dV_I} = \frac{dV_{DS}}{dV_{GS}}\Big|_Q$$

که با شیب مشخصه فوق برابر است. توجه شودکه این شیب منفی است.

انتخاب نقطه کار مناسب

از آنجائیکه سیگنال خروجی بر روی مقدار V_{O_Q} و یا V_{DS_Q} سوار میشود، مقدار V_{DS_Q} باید طوری باشد که خروجی بتواند نوسان لازم را داشته باشد. از اینرو باید مقدار V_{DS_Q}به اندازه کافی از V_{DD} کمتر بوده و از $V_{DS}\Big|_B$ بیشتر باشد تا ترانزیستور وارد ناحیه قطع و یا تریود نشود.

تحلیل عملکرد تقویت کننده از روی رابطه

برای تقویت کننده سورس مشترک سه ناحیه کاری در نظر گرفته می‌شود:

در ناحیه قطع:

$$V_I = V_{GS} \le V_t \rightarrow v_o = v_{DS} = V_{DD}$$

در ناحیه اشباع: در این ناحیه داریم:

$$V_I = V_{GS} \ge V_t \rightarrow v_o \ge V_{GS} - V_t$$

با در نظر گرفتن رابطه جریان

$$\Longrightarrow i_D = \frac{1}{2}(\mu_n C_{ox})\left(\frac{W}{L}\right)(v_{GS} - V_t)^2$$

و قرار دادن آن در رابطه

$$v_o = V_{DS} = V_{DD} - R_D i_D$$

داریم:

$$v_o = V_{DD} - \frac{1}{2}R_D(\mu_n C_{ox})\left(\frac{W}{L}\right)(v_{GS} - V_t)^2$$

با استفاده از تعریف $\frac{dV_{DS}}{dV_{GS}}\Big|_Q$ و رابطه فوق مقدار گین ولتاژ در نقطه کار از روی رابطه

$$A_v = -R_D(\mu_n C_{ox})\left(\frac{W}{L}\right)\left(V_{GS_Q} - V_t\right)^2$$

بدست می آید.

یک راه دیگر بدست آوردن مقدار گین قرار دادن مقادیر $v_{GS} = V_{GS_Q}$ و $v_o = V_{DS_Q}$ در رابطه می‌باشد.

$$I_D = \frac{1}{2} k_n {V_{OV}}^2 \quad , \quad V_{RD} = V_{DD} - V_{DS}$$

$$\begin{cases} v_o = V_{DD} - \frac{1}{2} R_D (\mu_n C_{ox}) \left(\frac{W}{L}\right) (V_{GS} - V_t)^2 \\ V_{OV} = V_{GS} - V_t \\ A_v = -R_D (\mu_n C_{ox}) \left(\frac{W}{L}\right) (V_{GS} - V_t)^2 \end{cases} \Longrightarrow A_v = \frac{2(V_{DD} - V_{DS})}{V_{OV}} = -\frac{2V_{RD}}{V_{OV}}$$

در ناحیه تریود داریم:

$$V_I = V_{GS} \geq V_t \rightarrow v_o \leq V_{GS} - V_t$$

با جایگزینی رابطه جریان و ولتاژ خواهیم داشت:

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

$$v_o = V_{DS} = V_{DD} - R_D i_D$$

$$v_o = V_{DD} - R_D (\mu_n C_{ox}) \left(\frac{W}{L}\right) \left((v_{GS} - V_t) v_o - \frac{1}{2} v_o^2 \right)$$

برای مقادیر کم v_o داریم:

$$v_o = V_{DD} - R_D (\mu_n C_{ox}) \left(\frac{W}{L}\right) (v_{GS} - V_t) v_o$$

$$\Longrightarrow v_o = \frac{V_{DD}}{\left(1 + R_D (\mu_n C_{ox}) \left(\frac{W}{L}\right) (v_{GS} - V_t)\right)}$$

که مقدار مقاومت در نزدیکی مبدا برابر خواهد بود با

$$r_{DS} = \frac{1}{(\mu_n C_{ox}) \left(\frac{W}{L}\right) (v_{GS} - V_t)}$$

$$\Longrightarrow v_o = V_{DD} \frac{r_{DS}}{r_{DS} + R_D} \xrightarrow{r_{DS} \ll R_D} v_o \cong V_{DD} \frac{r_{DS}}{R_D}$$

روش‌های مختلف بایاس کردن MOSFET

بایاس تقویت کننده باید بگونه ای باشد که ضمن داشتن جریان I_D پایدار و قابل پیش بینی، مقدار V_{DS} نیز بگونه ای باشد که بازای تمامی مقادیر سیگنال ورودی ترانزیستور در ناحیه اشباع کار کند.

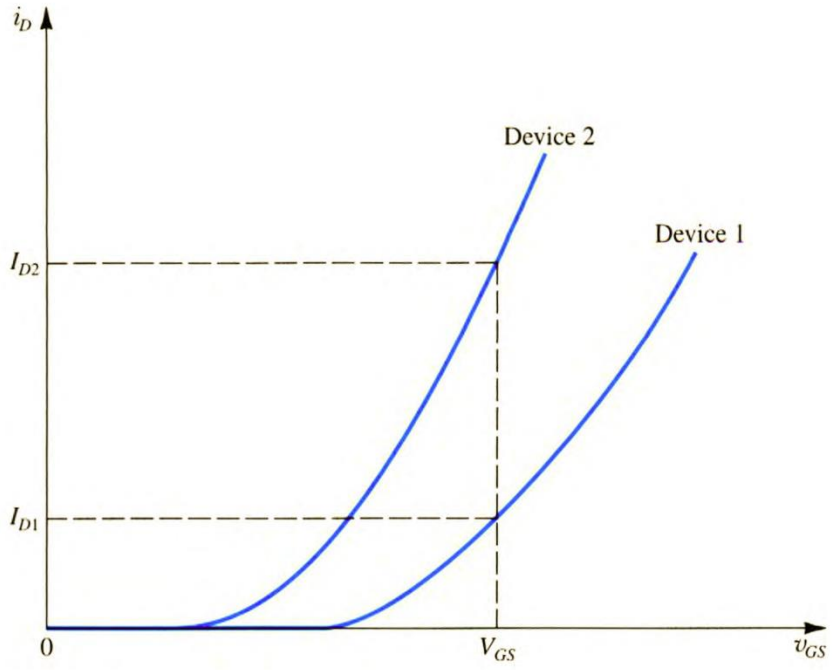
بایاس از طریق ثابت نگه داشتن V_{GS}

ساده ترین راه بایاس این است که ولتاژ گیت-سورس طوری انتخاب شود که I_Dدلخواه را بوجود آورد. این کار را میتوان با استفاده از یک مقسم ولتاژ مقاومتی که به V_{DD} وصل است انجام داد.

این روش گرچه ساده است ولی چندان مناسب نیست! زیرا طبق رابطه

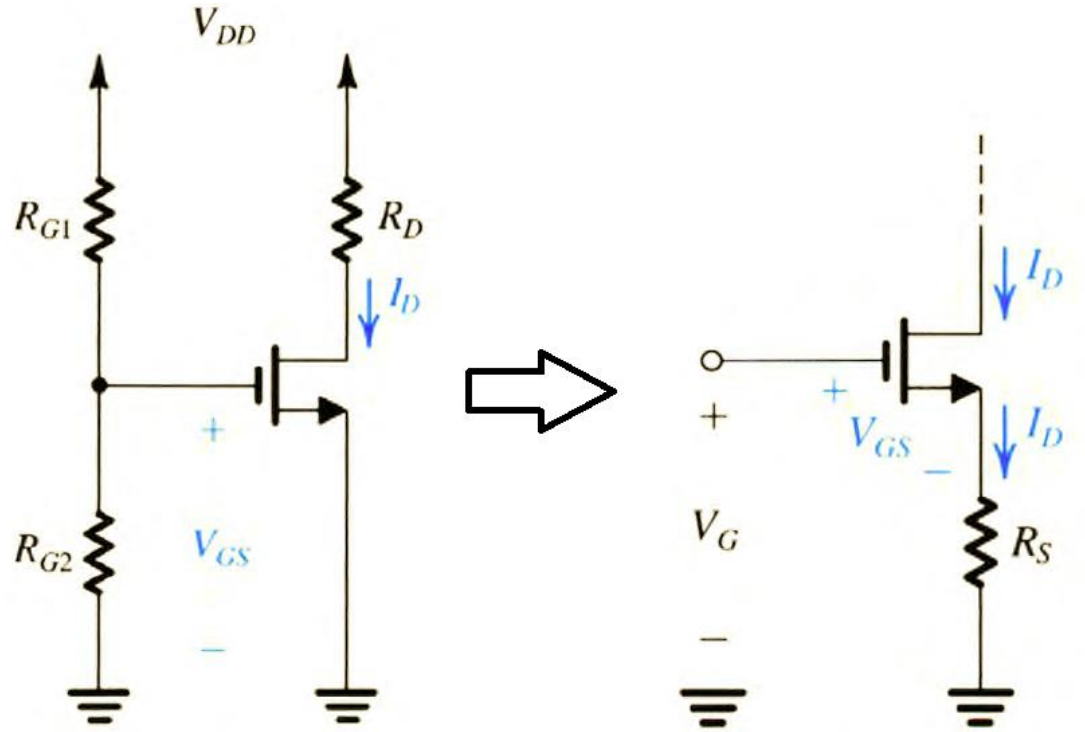
$$i_D = \frac{1}{2}(\mu_n C_{ox})\left(\frac{W}{L}\right)(v_{GS} - V_t)^2$$

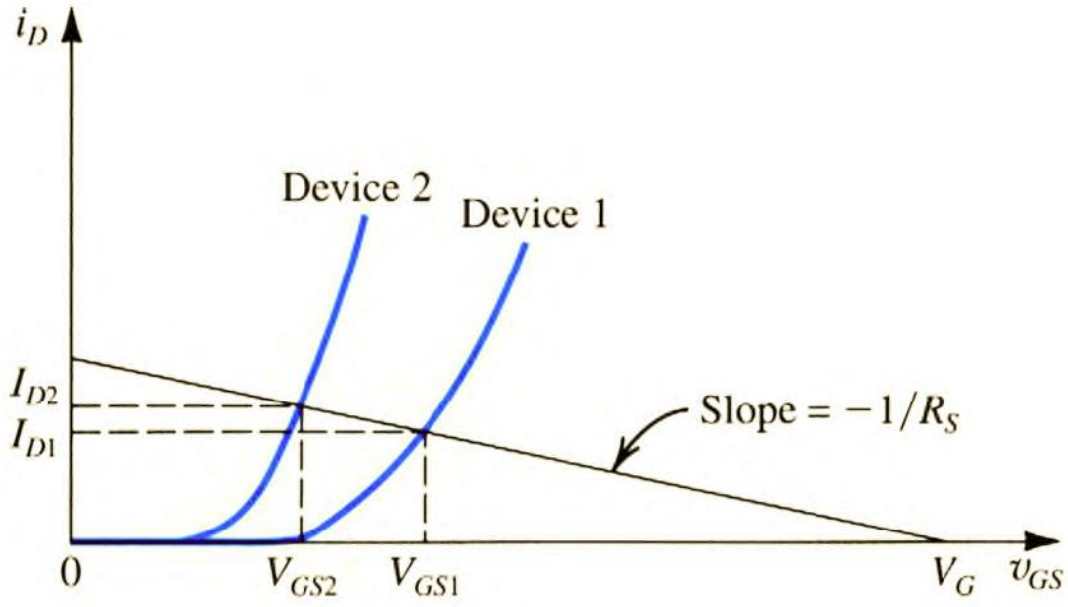
مقدار جریان علاوه بر ولتاژ V_{GS}به پارامترهای دیگری چون C_{ox} و $\frac{W}{L}$ بستگی دارد که چه برای ترانزیستورهای منفرد و چه ترانزیستورهای داخل مدارات مجتمع مقدار آنها ازیک ترانزیستوری به دیگری میتواند متفاوت باشد. شکل زیرتغییر جریان بواسطه تغییر در مشخصه های ترانزیستور های مختلف نشان می‌دهد.



بایاس از طریق ثابت نگه داشتن V_G و قرار دادن مقاومت در سورس

یک روش بایاس مناسب در شکل زیر نشان داده شده است.





برای این مدار داریم: اگر V_G خیلی بزرگتر از V_{GS} باشد، مقدار I_D عمدتا به V_G و R_S بستگی خواهد داشت. در شکل بالا اثر استفاده از مقاومت سورس برای دو ترانزیستور متفاوت نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که بازای یک V_G ثابت تغییر در مشخصه ترانزیستور به تغییرات کمی در جریان گیت منجر می‌شود. در این روش در واقع مقاومت سورس یک فیدبک منفی برقرار میکند که باعث تثبیت مقدار I_D میگردد.

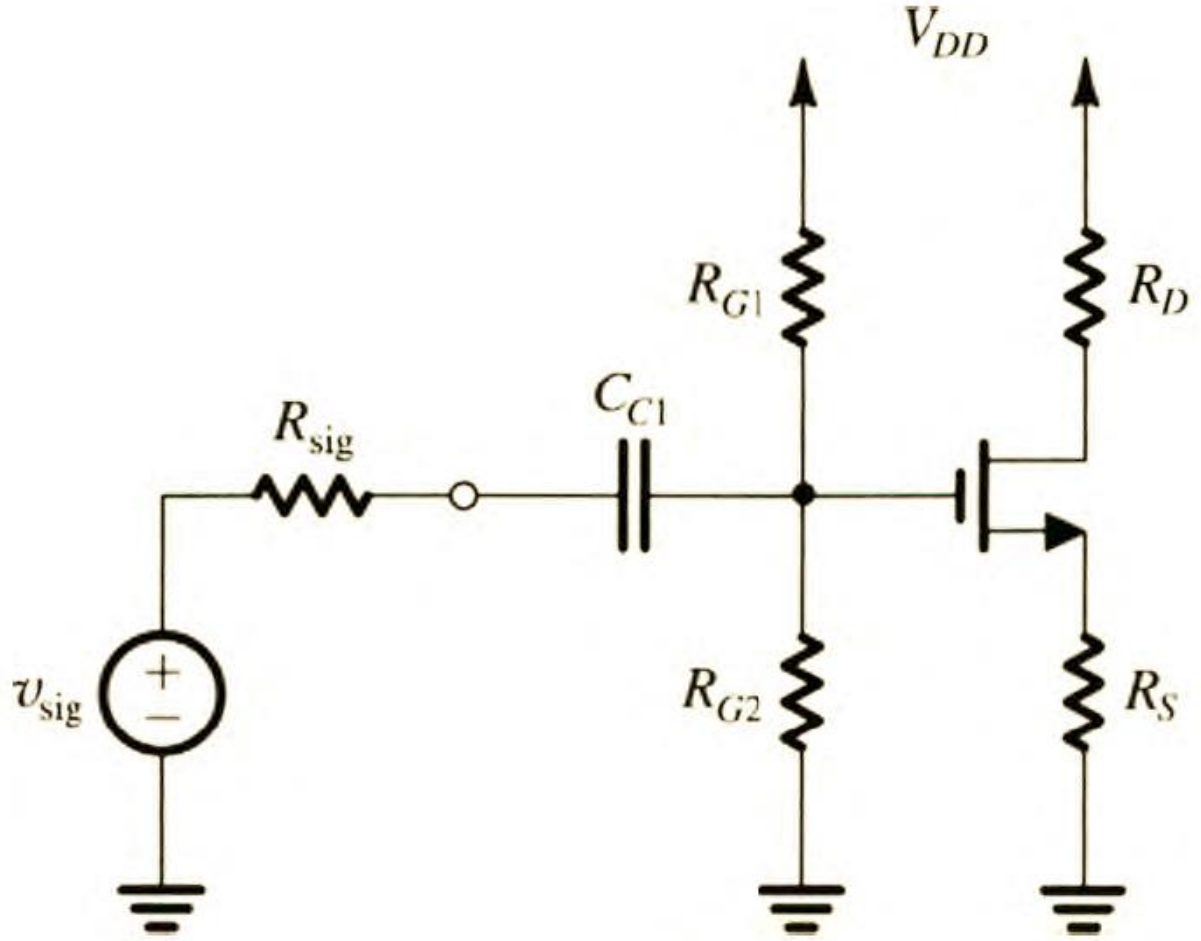
در نظر بگیرید که به هر علتی مقدار جریان I_D افزایش پیدا کند. در اینصورت طبق رابطه

$$V_G = V_{GS} + R_S I_D$$

اگر V_G ثابت باشد مقدار V_{GS} مجبور است تا کم شود. که با کم شدن آن مقدار جریان I_D نیز کم خواهد شد. به علت این نقش مقاومت سورس به آن Degeneration Resistance می‌گویند.

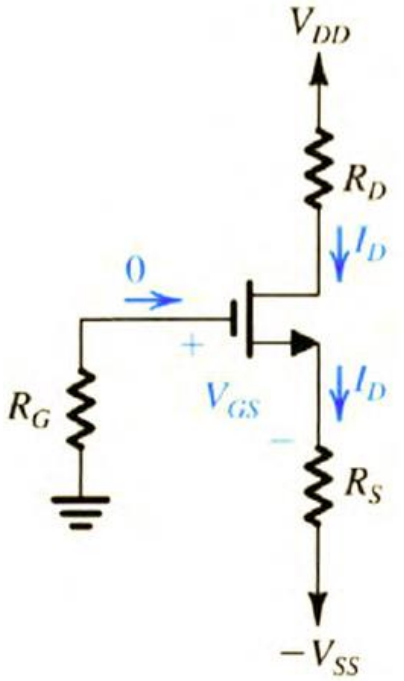
مدار عملی

در شکل زیر مداری برای بایاس کردن یک تقویت کننده سورس مشترک نشان داده شده است که با استفاده از یک مقسم مقاومتی و از طریق V_{DD} مقدار مورد نظر برای V_G تامین میشود. معمولا مقاومت ها خیلی بزرگ انتخاب میشوند تا مقاومت ورودی تقویت کننده هنگامی که به منبع سیگنال وصل میشود بزرگ باشد.



معمولا برای اتصال به منبع سیگنال از یک خازن کوپلینگ استفاده میشود. این خازن تقویت کننده را از لحاظ DC از منبع سیگنال جدا میکند تا منبع سیگنال باعث به هم خوردن بایاس DC آن نشود. مقدار خازن کوپلینگ باندازه کافی بزرگ انتخاب میشود تا در همه فرکانس های کاری تقویت کننده بصورت اتصال کوتاه عمل نماید. در این مدار همچنین مقدار R_D بزرگ انتخاب میشود تا تغییرات ورودی باعث خروج ترانزیستور از حالت اشباع نشود.

اگر دو منبع تغذیه در اختیار باشد ساده تر خواهد بود که از مدار مقابل استفاده شود. سیگنال ورودی از طریق مقاومت بزرگ R_G به تقویت کننده وصل خواهد شد.

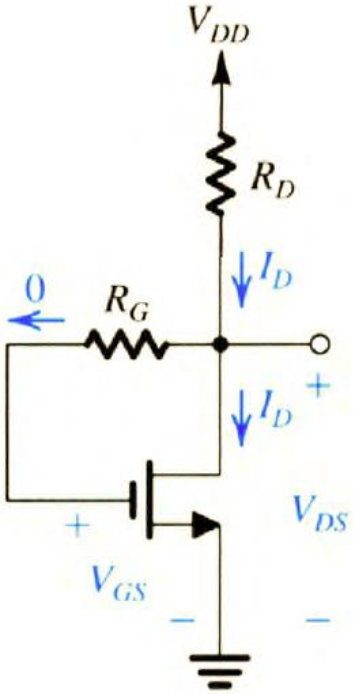


بایاس از طریق مقاومت فیدبک

یک راه ساده که برای ترانزیستورهای مجزا بکار میرود استفاده از مقاومت فیدبکی است که درین را به گیت وصل میکند. مقداراین مقاومت مقدار بسیار بزرگ است (مگا اهم) و صفر بودن جریان گیت باعث میشود تا ولتاژ گیت و درین مساوی شوند.

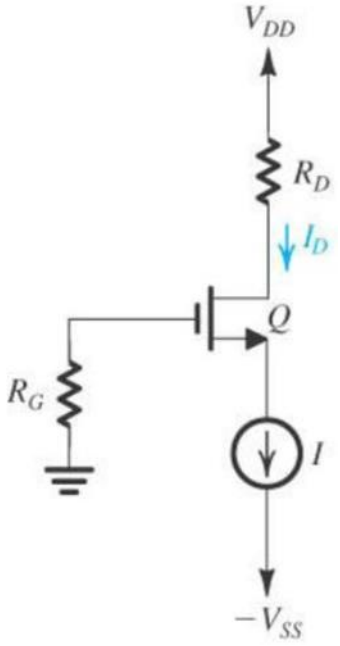
$$V_{GS} = V_{DS} - R_S I_D \Longrightarrow V_{DD} = V_{GS} + R_S I_D$$

در این رابطه نیز اثر فیدبک منفی حاصل از مقاومت degeneration یعنی R_D دیده میشود: اگر جریان I_D زیاد شود، مقدار V_{GS} کم می‌شود که به نوبه خود باعث کم شدن جریان I_D و خنثی کردن افزایش جریان و یا تثبیت آن می‌شود.در عمل اعمال ورودی به گیت این مدار و دریافت خروجی از آن از طریق خازن‌های کوپلینگ انجام می‌شود.



بایاس از طریق یک منبع جریان ثابت

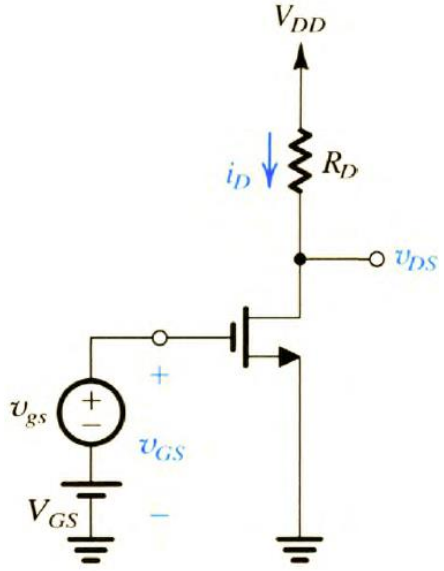
یک راه ساده برای بایاس کردن ترانزیستور که در مدارات مجتمع کاربرد زیادی دارد استفاده از یک منبع جریان ثابت مطابق شکل زیر است. در این مدار یک مقاومت بزرگ R_G گیت را به زمین وصل کرده و مقاومت ورودی ترانزیستور را بالا نگه میدارد. R_D مقدارDC خروجی را تعیین کرده و باید بگو نه ای باشد که ترانزیستور از حالت اشباع خارج نشود.



مدل سیگنال کوچک

در بخش‌های قبل دیدیم که یک ترانزیستور MOSFET در ناحیه اشباع میتواند بصورت یک تقویت کننده عمل نماید. در صورتیکه سیگنال ورودی کوچک باشد این تقویت تقریبا خطی خواهد بود. ترانزیستور با انتخاب V_{GS} و V_{DS} مناسب در یک نقطه کار DC بایاس میشود.

سیگنال کوچک v_{gs} به مقدار DC لازم برای بایاس یعنی V_{GS} اضافه میشود. این سیگنال که مقدار آن باید کوچک باشد سیگنالی است که باید تقویت شود. برای بررسی تقویت کننده از مدار سورس مشترک مقابل استفاده میشود که برای نشان دادن مفاهیم مورداستفاده قرار میگیرد و در عمل مورد استفاده چندانی ندارد.



نقطه بایاس DC

برای پیدا کردن نقطه کار DC مقدار ولتاژ سیگنال کوچک صفر در نظر گرفته میشود. در اینصورت با صرفنظراز مدولاسیون کانال برای جریان دین داریم:

$$i_D = \frac{1}{2}k'_n\left(\frac{W}{L}\right)(v_{GS} - V_t)^2$$

ومقدار ولتاژ درین برابر میشود با:

$$V_D = V_{DD} - R_D I_D$$

شرط قرار گرفتن در ناحیه اشباع :

$$V_D > V_{GS} - V_t$$

از آنجائیکه ولتاژ درین نیز مولفه متغیر با زمان (AC) خواهد داشت برای اینکه با تغییر ورودی ترانزیستور از اشباع خارج نشود، باید مولفه DC ولتاژ درین باندازه کافی از $V_{GS} - V_t$ بزرگتر باشد.

جریان سیگنال در درین

با اضافه کردن سیگنال ورودی v_{GS} به مقدار بایاس خواهیم داشت:

$$i_D = \frac{1}{2}k'_n\left(\frac{W}{L}\right)(V_{GS} + v_{gs} - V_t)^2$$

$$\Longrightarrow i_D = \frac{1}{2}k'_n\left(\frac{W}{L}\right)(V_{GS} - V_t)^2 + k'_n\left(\frac{W}{L}\right)(V_{GS} - V_t)v_{gs} + \frac{1}{2}k'_n\left(\frac{W}{L}\right){v_{gs}}^2$$

$\frac{1}{2}k'_n\left(\frac{W}{L}\right)(V_{GS} - V_t)^2$ مولفه DC

$k'_n\left(\frac{W}{L}\right)(V_{GS} - V_t)v_{gs}$ مولفه‌ای از جریان که با سیگنال ورودی متناسب است

$\frac{1}{2}k'_n\left(\frac{W}{L}\right){v_{gs}}^2$ مولفه غیر خطی جریان (مطلوب نیست)

برای کاهش اثر مولفه غیر خطی باید ورودی به اندازه کافی کوچک باشد تا:

$$\frac{1}{2}k'_n\left(\frac{W}{L}\right){v_{gs}}^2 \ll k'_n\left(\frac{W}{L}\right)(V_{GS} - V_t)v_{gs}$$

در نتیجه باید:

$$v_{gs} \ll 2(V_{GS} - V_t)$$

در صورت برقراری شرط فوق میتوان نوشت:

$$i_D \approx I_D + i_d$$

که در آن:

$$i_d = k'_n\left(\frac{W}{L}\right)(V_{GS} - V_t)v_{gs}$$

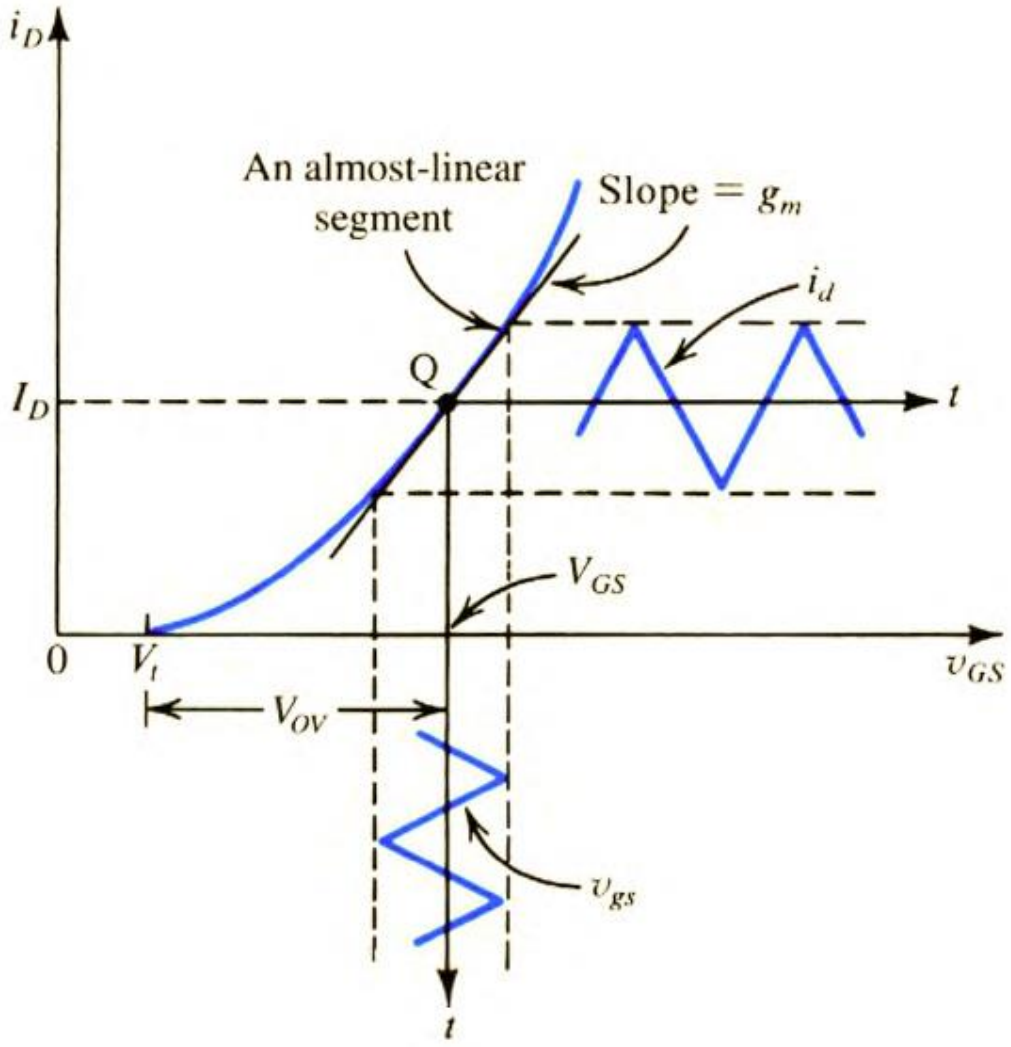
مقدار transconductance

رابطه i_d با v_{gs} بصورت g_m نشان داده میشود که برابر است با:

$$g_m = \frac{i_d}{v_{gs}} = k'_n \left(\frac{W}{L}\right)(V_{GS} - V_t)$$

که در واقع با شیب منحنی $i_d - v_{gs}$ در نقطه کار برابر است.

$$g_m = \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}}\bigg|_{v_{GS} = V_{GS}}$$



گین ولتاژ مقدار لحظه ای ولتاژ درین برابر است با:

$$v_D = V_{DD} - R_D i_D$$

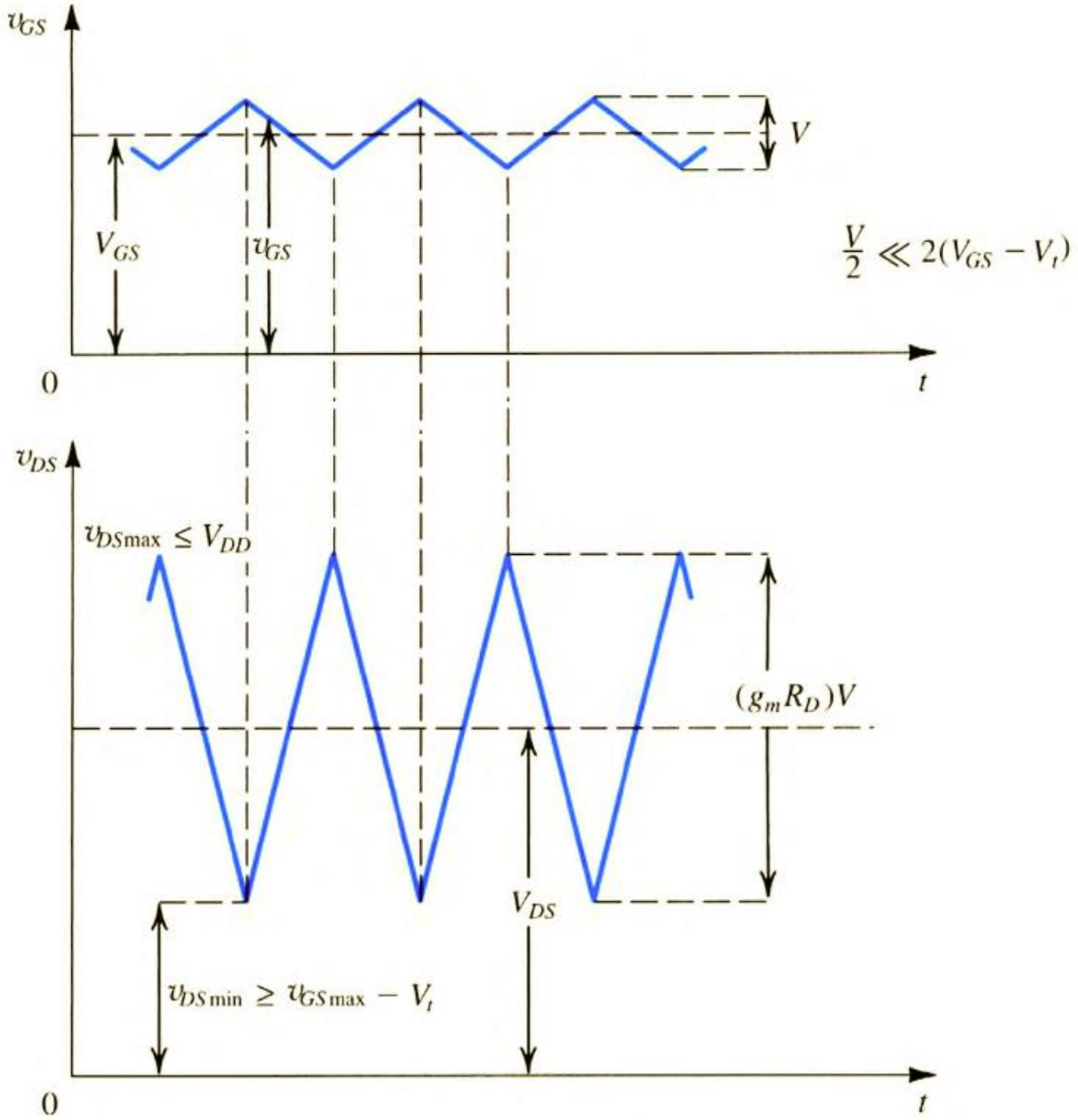
که تحت شرایط سیگنال کوچک می‌توان آنرا بصورت زیر نوشت:

$$v_D = V_{DD} - R_D(I_D + i_d) \Longrightarrow v_D = V_D - R_D i_d$$

از این رو مولفه سیگنال ولتاژ خروجی برابر است با:

$$V_O = v_d = -R_D i_d = -g_m v_{gs} R_D \Longrightarrow A_V = \frac{v_d}{v_{gs}} = -g_m R_D$$

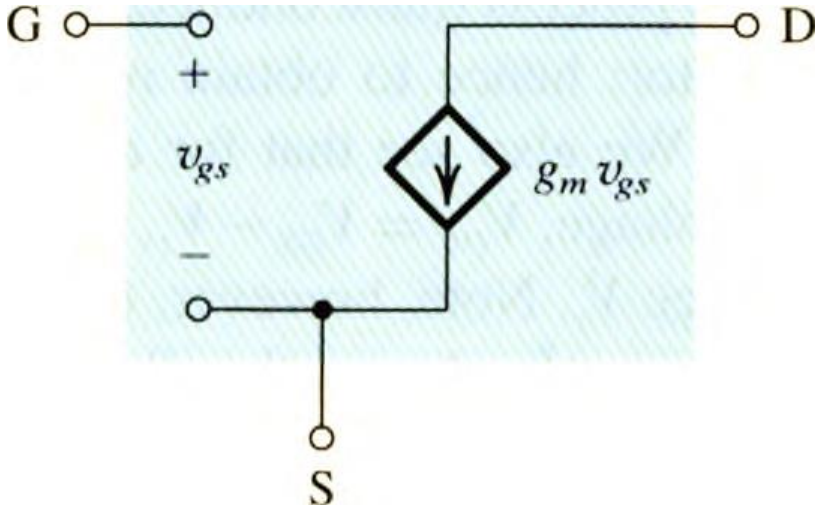
شکل زیر سیگنال ورودی و خروجی تقویت کننده و همچنین شرایطی را که برای کار تقویت کننده در ناحیه اشباع لازم است نشان می‌دهد.



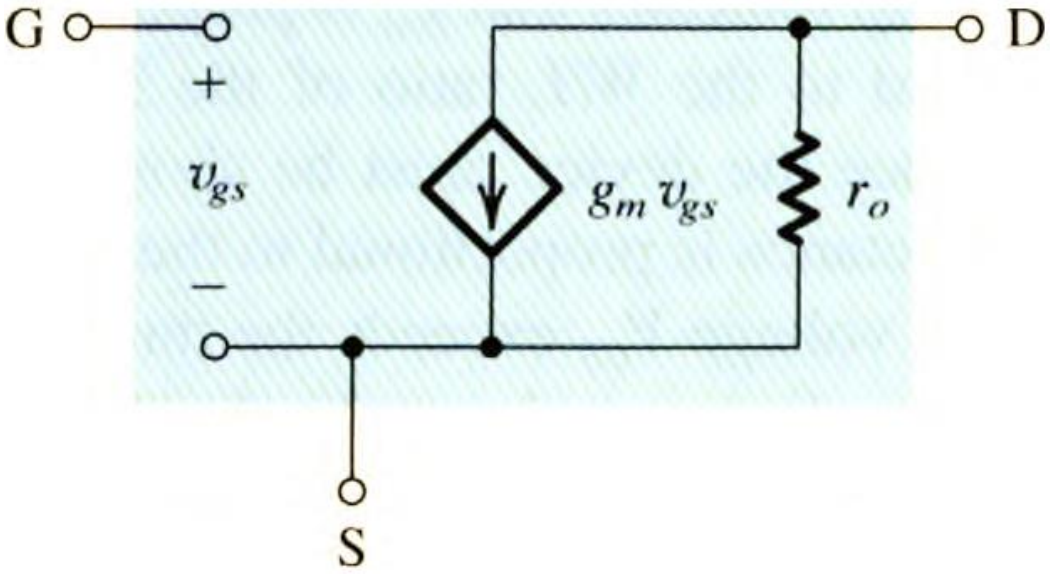
مدار معادل سیگنال کوچک

آنالیز یک تقویت کننده را می‌توان بطور جداگانه برای ورودی بایاس و سیگنال کوچک انجام داد.

در حالت سیگنال کوچک ترانزیستور را می‌توان بصورت یک تقویت کننده جریان که مقدار آن توسط ولتاژ گیت کنترل می‌شود مدل نمود.



مقدار مقاومت ورودی آن بسیار بزرگ (بی نهایت) است. مقدار مقاومت خروجی آن نیز بسیار بزرگ است.



از آنجائیکه در عمل در ناحیه اشباع بواسطه وجود خاصیت مدولاسیون کانال، جریان درین علاوه بر v_{gs} به ولتاژ V_{ds} نیز بستگی دارد، این وابستگی رامیتوان بصورت مقاومت r_o مطابق شکل مقابل در مدل سیگنال کوچک در نظر گرفت:

توجه شود که هم مقدار g_m و هم مقدار r_o به نقطه کار DC بستگی دارند.

$$r_o = \frac{|V_A|}{I_D} \quad , \quad V_A = \frac{1}{\lambda} \quad , \quad i_D = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L}\right)(V_{OV})^2$$

آنالیز سیگنال کوچک

برای تحلیل مدار به صورت سیگنال کوچک:

! ترانزیستور را با مدل سیگنال کوچک آن جایگزین می‌کنیم

بقیه مدار دست نمی خورد مگر:

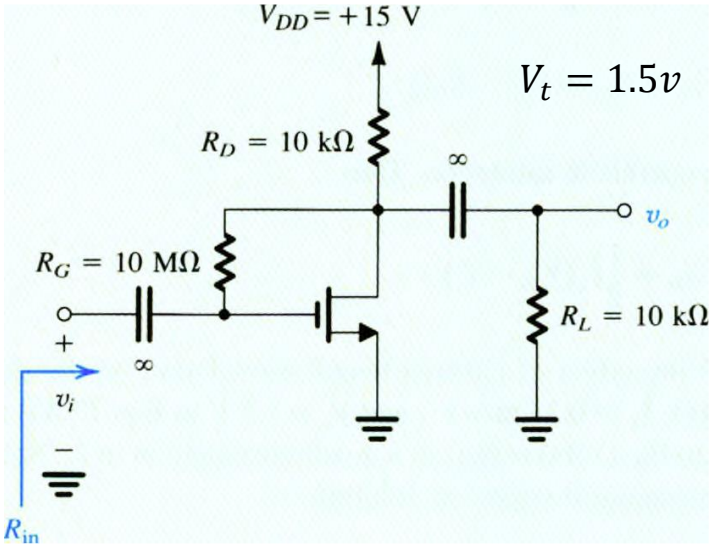
! منابع تغذیه ایده آل با ولتاژ ثابت را با اتصال کوتاه جایگزین می‌کنیم

! منابع جریان ثابت ایده آل را بصورت مدار باز در نظر می‌گیریم

! از مدار حاصل می‌توان برای محاسباتی نظیر محاسبه گین استفاده نمود.

مثال: برای مدار مقابل مقادیر زیر را بدست آورید:

$$V_t = 1.5v \quad , \quad k'_n\left(\frac{W}{L}\right) = 0.25\,mA/V^2 \quad , \quad V_A = 50v$$



گین سیگنال کوچک، مقدار مقاومت ورودی، حداکثر مقدار مجاز ورودی، فرض کنید مقدار خازن‌های کوپلینگ به اندازه ای بزرگ است که برای کلیه فرکانس‌های کاری مدار بصورت اتصال کوتاه عمل می‌کنند.

آنالیز DC: ابتدا نقطه کار DC را بدست می آوریم:

$$I_D = \frac{1}{2}\,k'_n\left(\frac{W}{L}\right)(V_{GS} - V_t)^2 \Rightarrow I_D = \frac{1}{2} \times 0.25 \times (V_{GS} - 1.5)^2$$

از آنجائیکه جریانی از R_G نمی‌گذرد و $V_G = V_D$ است خواهیم داشت:

$$\Rightarrow I_D = \frac{1}{2} \times 0.25 \times (V_D - 1.5)^2$$

و از طرفی:

$$\Rightarrow V_D = V_{DD} - R_D I_D \Rightarrow V_D = 15 - 10I_D$$

که با حل این معادله داریم:

$$\Rightarrow I_D = \frac{1}{2} \times 0.25 \times (15 - 10I_D - 1.5)^2 \Rightarrow I_D = 0.125 \times (13.5 - 10I_D)^2$$

$$\Rightarrow I_D = 1.06mA \ , \ V_D = 4.4v$$

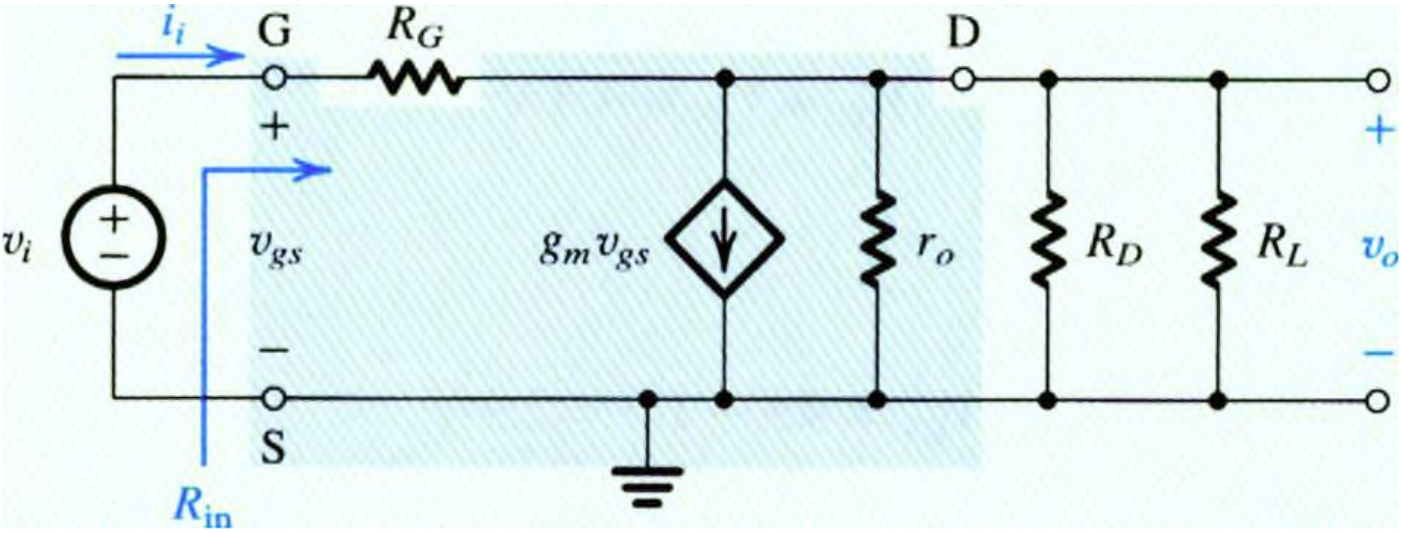
در نتیجه خواهیم داشت:

$$g_m = \frac{i_d}{v_{gs}} = k'_n\left(\frac{W}{L}\right)(V_{GS} - V_t) = 0.25(4.4 - 1.5) = 0.725\,mA/V$$

$$r_o = \frac{|V_A|}{I_D} = \frac{50}{1.06mA} = 47k\Omega$$

آنالیز سیگنال کوچک:

مدل سیگنال کوچک مدار با جایگزین کردن ترانزیستور با مدل آن و اتصال کوتاه کردن منبع ولتاژ به زمین و همچنین اتصال کوتاه کردن خازن‌های کوپلینگ بدست می آید.



با صرفنظر کردن از جریان مقاومت بزرگ R_G میتوان نوشت:

$$V_O \cong -g_m v_{gs}(R_D \parallel R_L \parallel r_O) \Longrightarrow A_V = \frac{v_o}{v_{gs}} = -g_m(R_D \parallel R_L \parallel r_O)$$

$$\Longrightarrow A_V = -0.725\,mA/V \times (10k \parallel 10\text{k} \parallel 47\text{k}) = -3.3$$

برای محاسبه مقاومت ورودی داریم:

$$i_i = \frac{(v_i - v_o)}{R_G} = \frac{v_i}{R_G}\left(1 - \frac{v_o}{v_i}\right) = \frac{v_i}{R_G}(1 - (-3)) = \frac{4.3v_i}{R_G}$$

بنابر این مقدار مقاومت برابر است با:

$$R_{in} = \frac{v_i}{i_i} = \frac{R_G}{4.3} = \frac{10k}{4.3} = 2.33M\Omega$$

مقدار حداکثر ورودی باید به نحوی باشد که ترانزیستور از اشباع خارج نشود: ($\hat{v}_i$)

$$V_{DS} \geq v_{GS} - V_t$$

$$V_{DS_{min}} = v_{GS_{min}} - V_t \Longrightarrow V_{DS} - |A_v|\hat{v}_i = V_{GS} + \hat{v}_i - V_t$$

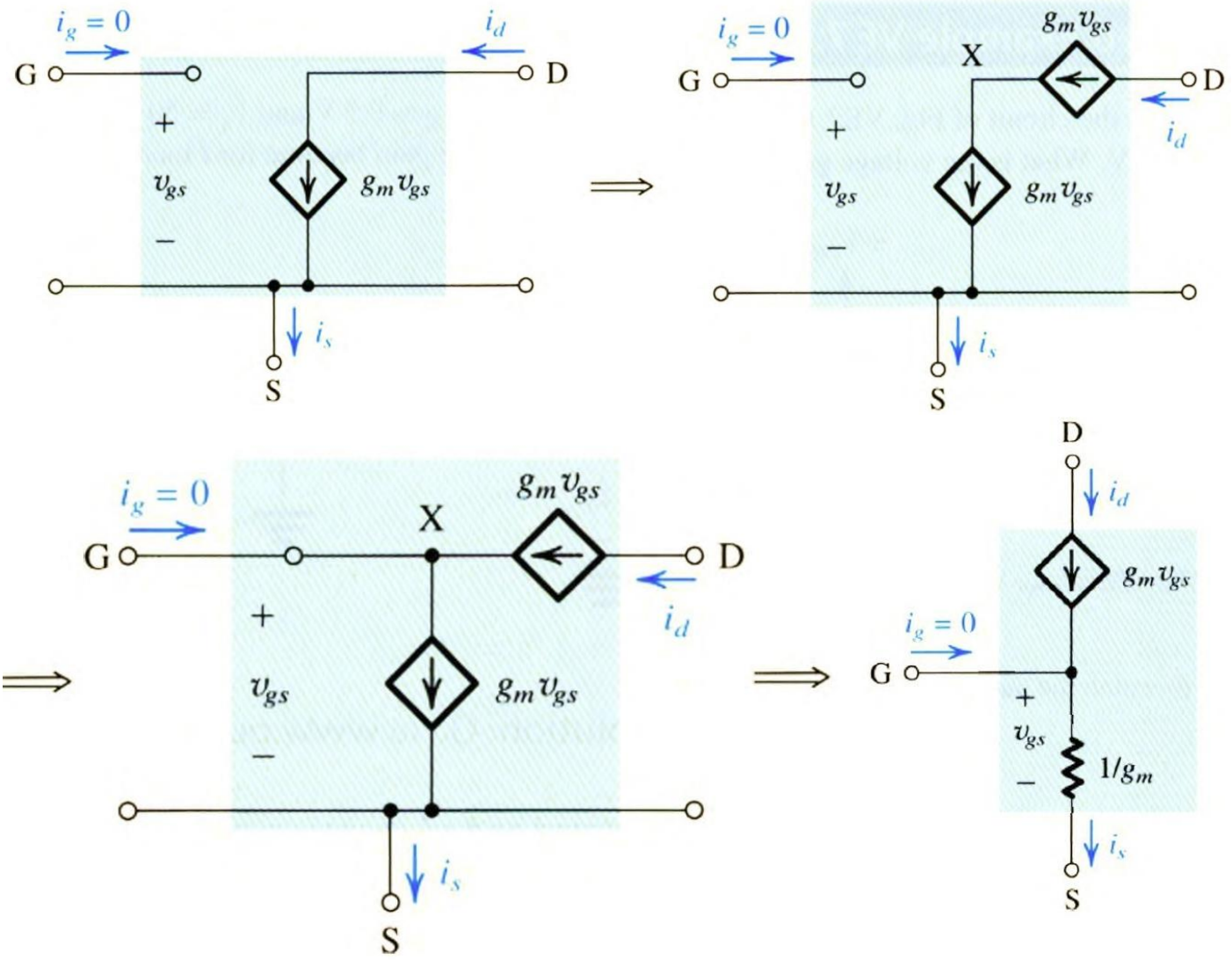
$$\Longrightarrow 4.4 - 3.3\hat{v}_i = 4.4 + \hat{v}_i - 1.5 \Longrightarrow \hat{v}_i = 0.34v$$

اگر $V_{DS} = V_{GS}$ باشد

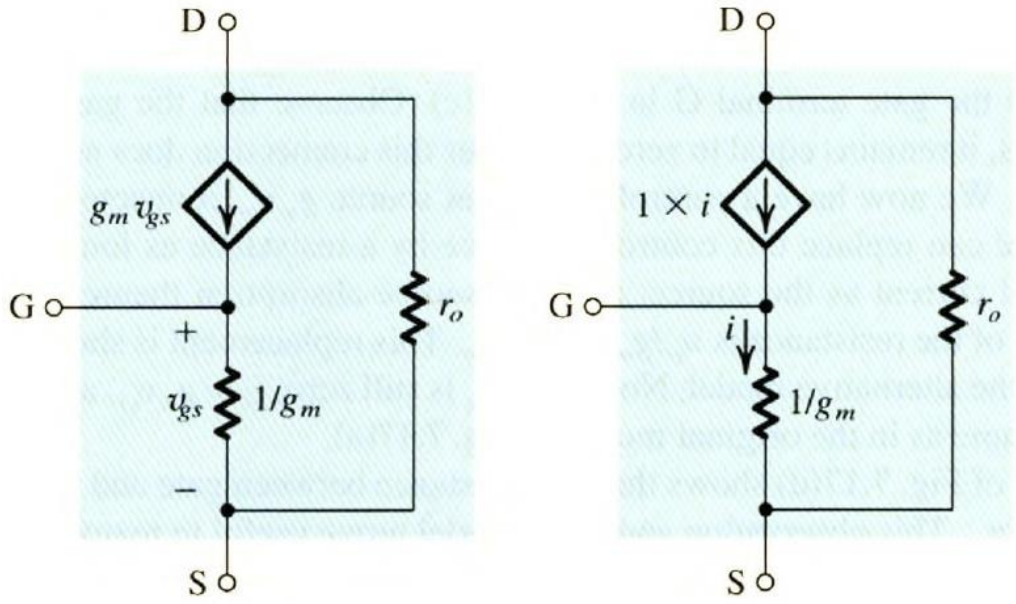
$$\hat{v}_i = \frac{V_t}{|A_v| + 1} = 0.35v$$

مدل T

با اندکی دستکاری در مدل سیگنال کوچک میتوان به مدل جدیدی با نام مدل T رسید.



مدلT با در نظر گرفتن مقاومت خروجی



تقویت کننده های یک طبقه

در حالت کلی تقویت کننده های یک طبقه شامل یک ترانزیستور و یک مقاومت بار میشود که ترانزیستور در ناحیه اشباع کار میکند. سه نوع آرایش مختلف امکان پذیر میباشد:

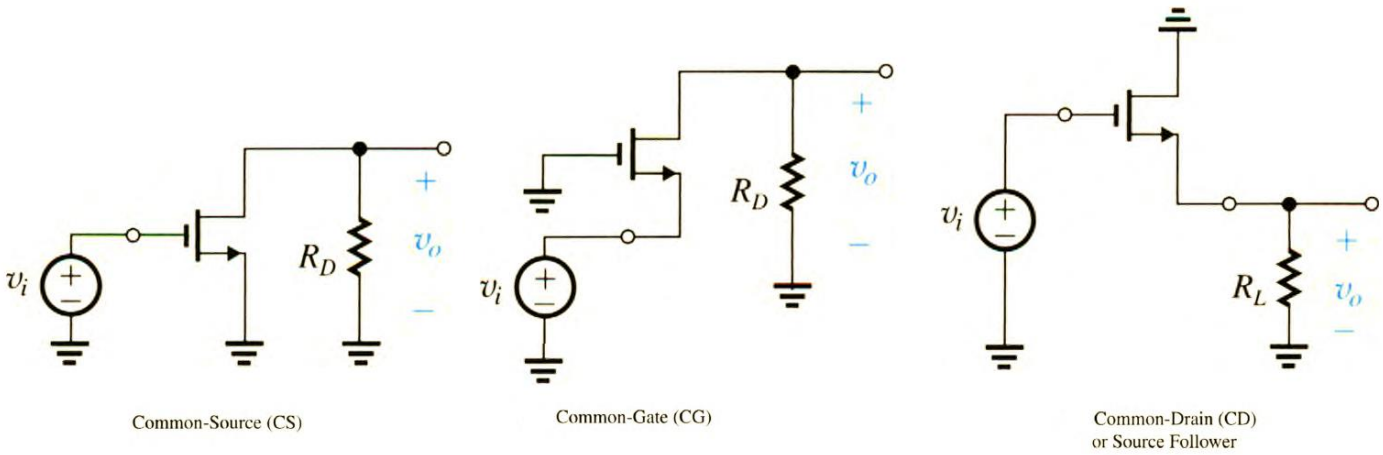
سورس مشترک: ورودی: گیت ، خروجی : درین

گیت مشترک: ورودی: سورس ، خروجی : درین

درین مشترک: ورودی: گیت ، خروجی : سورس

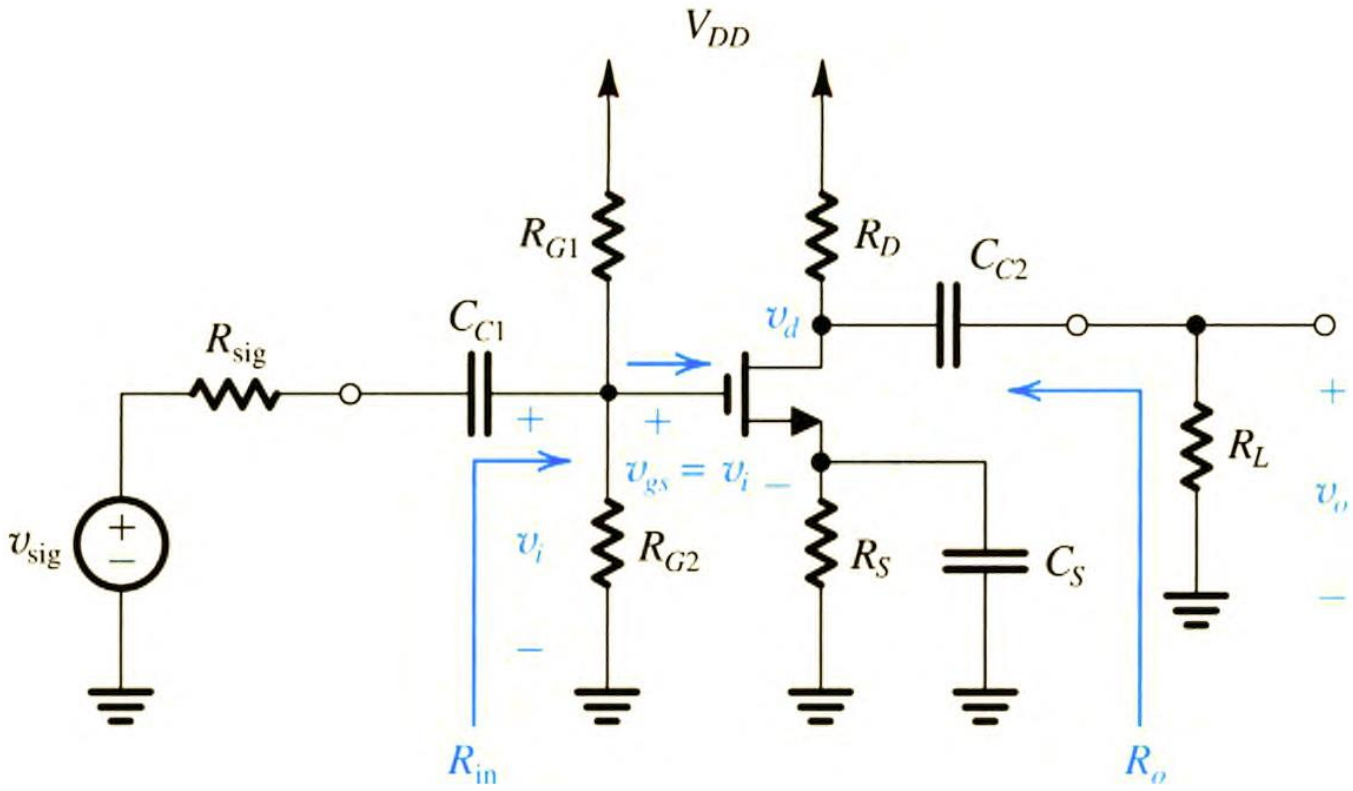
آنالیز کامل مدار شامل مراحل زیر میگردد:

Load-line analysis, Transfer characteristics, Small-signal analysis



تقویت کننده سورس مشترک

یک نمونه متداول از این تقویت کننده در شکل زیر نشان داده شده است.

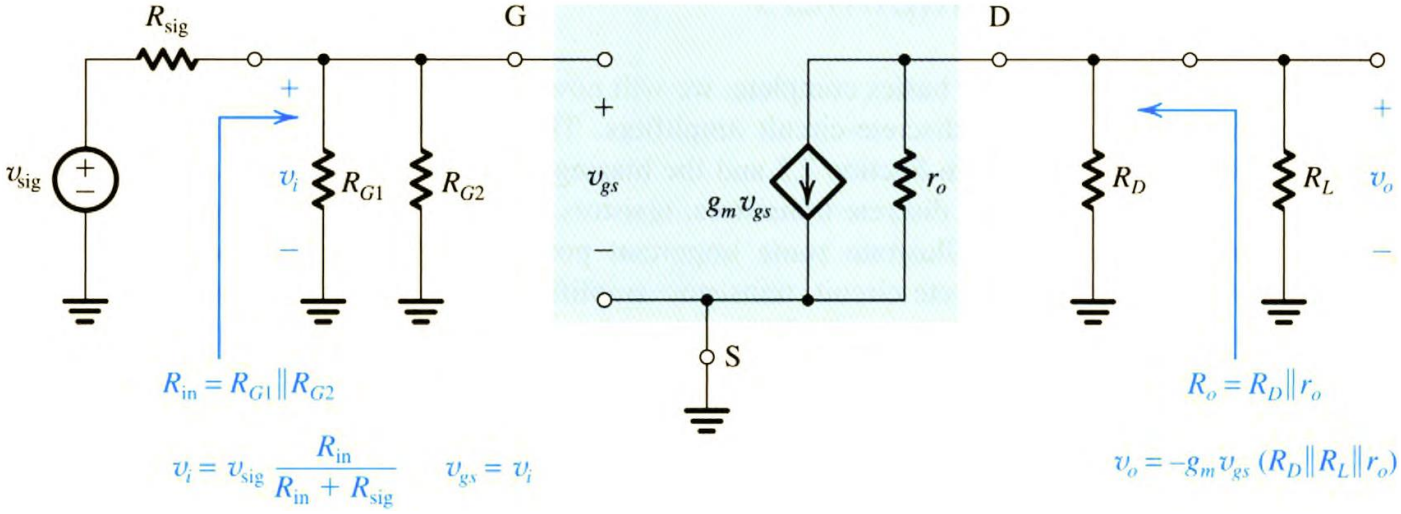


سورس از طریق یک خازن بزرگ به زمین وصل شده است. این خازن برای سیگنال کوچک بصورت اتصال کوتاه به زمین عمل خواهد نمود. این عمل باعث میشود تا مقاومت خروجی منبع جریان تاثیری در سیگنال نداشته باشد. به این خازن Bypass Capacitor گفته میشود.

منبع سیگنال نیز از طریق خازن کوپلینگ بزرگی که برای فرکانسهای کاری میتوان آنرا اتصال کوتاه فرض کرد به تقویت کننده وصل میشود تا تاثیری در بایاس نداشته باشد. خروجی نیز از طریق خازن کوپلینگ دیگری به بار اعمال میشود. مقاومت بار ممکن است بار نهائی و یا مقاومت ورودی یک طبقه تقویت کننده دیگر باشد.

مشخصه های تقویت کننده سورس مشترک

برای آنالیز مدار آنرا با معادل سیگنال کوچک جایگزین می‌کنیم.



در ورودی داریم:

$$v_i = v_{sig} \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{sig}} = v_{sig} \frac{R_G}{R_G + R_{sig}} \quad , \quad R_{in} = R_G \quad , \quad i_g = 0$$

معمولا R_G خیلی بزرگ انتخاب میشود و $R_G \gg R_{sig}$ لذا $v_i \cong v_{sig}$

برای محاسبه گین ولتاژ داریم:

$$v_{gs} = v_i \quad , \quad V_O \cong -g_m v_{gs} (R_D \parallel R_L \parallel r_O)$$

$$A_V = \frac{v_o}{v_{gs}} = -g_m (R_D \parallel R_L \parallel r_O)$$

بهره ولتاژ کلی از خروجی به منبع برابر است با:

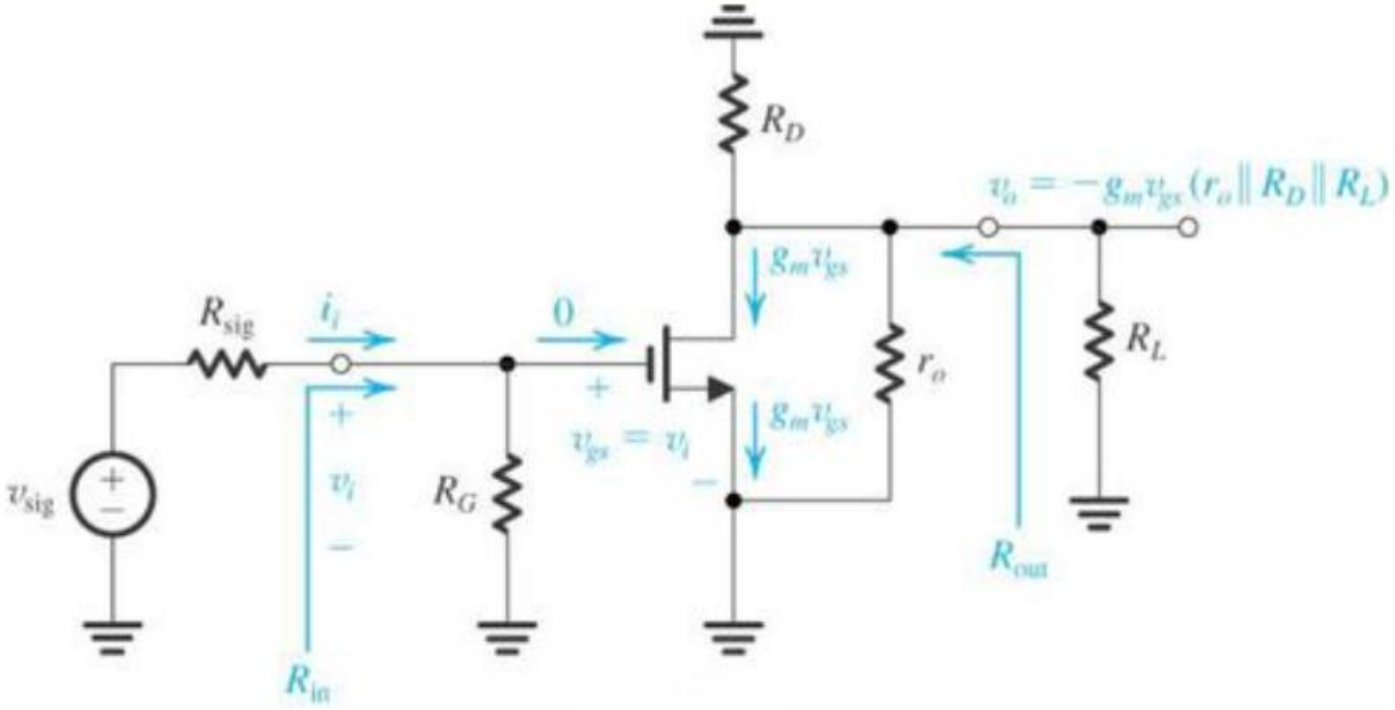
$$G_v = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{sig}} A_V = \frac{R_G}{R_G + R_{sig}} = -g_m (R_D \parallel R_L \parallel r_O)$$

برای تعیین مقاومت خروجی مقدار $v_{gs} = 0$ قرار داده میشود:

$$R_{out} = r_o \parallel R_D$$

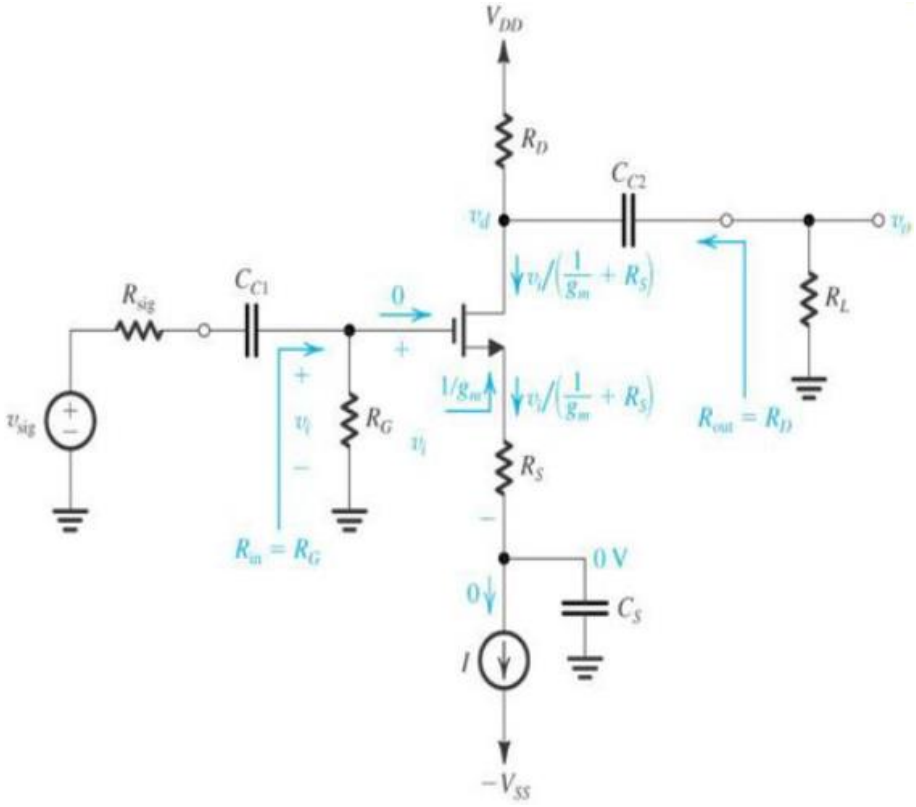
تاثیر مقاومت خروجی ترانزیستور

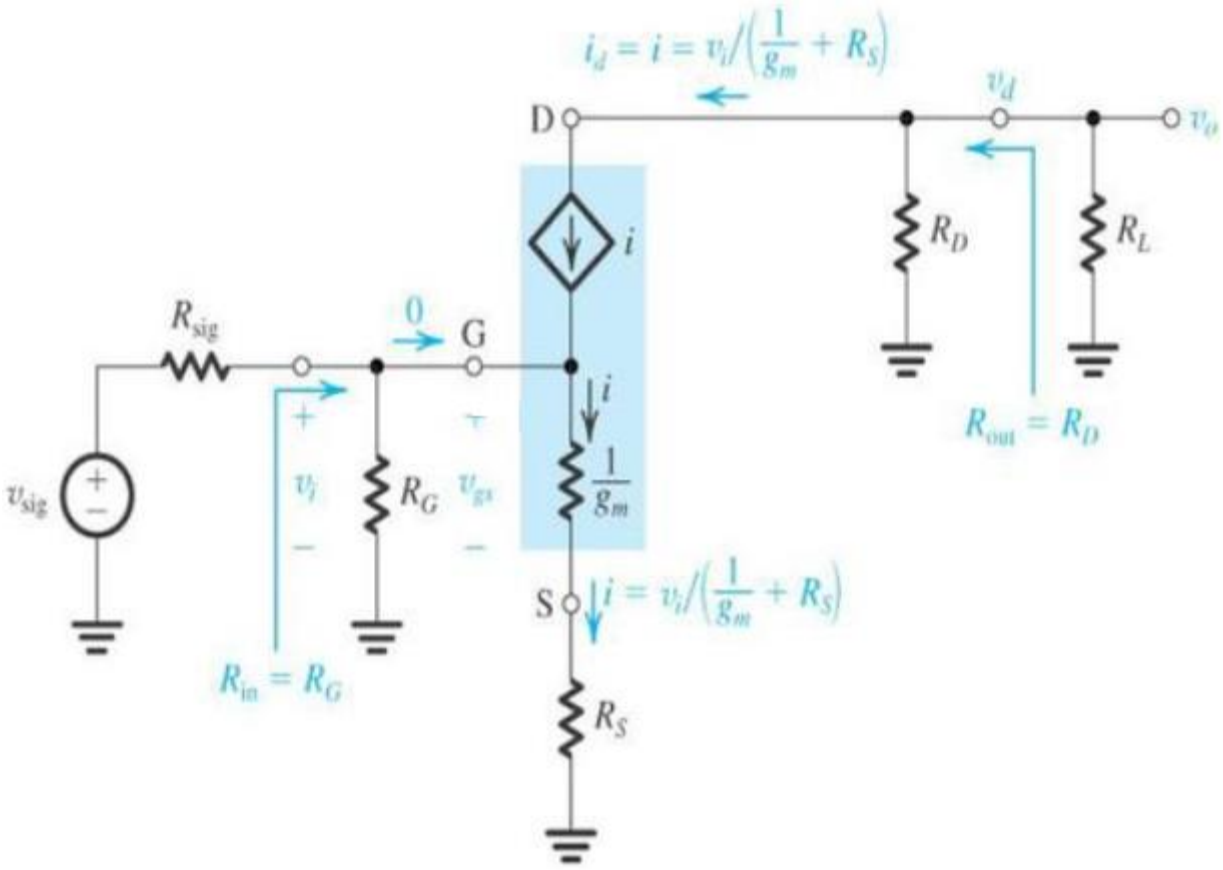
مقاومت خروجی ترانزیستور(r_o) بین درین وسورس ظاهر میشود. در حالت سیگنال کوچک این مقاومت با R_D موازی خواهد شد و در نتیجه تاثیر آن باعث کاهش گین ولتاژ خواهد شد. همچنین مقاومت خروجی را نیز کاهش خواهد داد.



تقویت کننده سورس مشترک با مقاومت در سورس

در برخی مدارات سودمند یک مقاومت بین سورس و زمین قرار داده می‌شود.





$$R_{in} = R_i = R_G$$

$$v_i = v_{sig}\frac{R_G}{R_G + R_{sig}} \quad , \quad v_{sig} = v_i\frac{\frac{1}{g_m}}{\frac{1}{g_m} + R_S} = \frac{v_i}{1 + g_m R_S}$$

$$i_d = i = \frac{v_i}{\frac{1}{g_m} + R_S} = \frac{g_m v_i}{1 + g_m R_S}$$

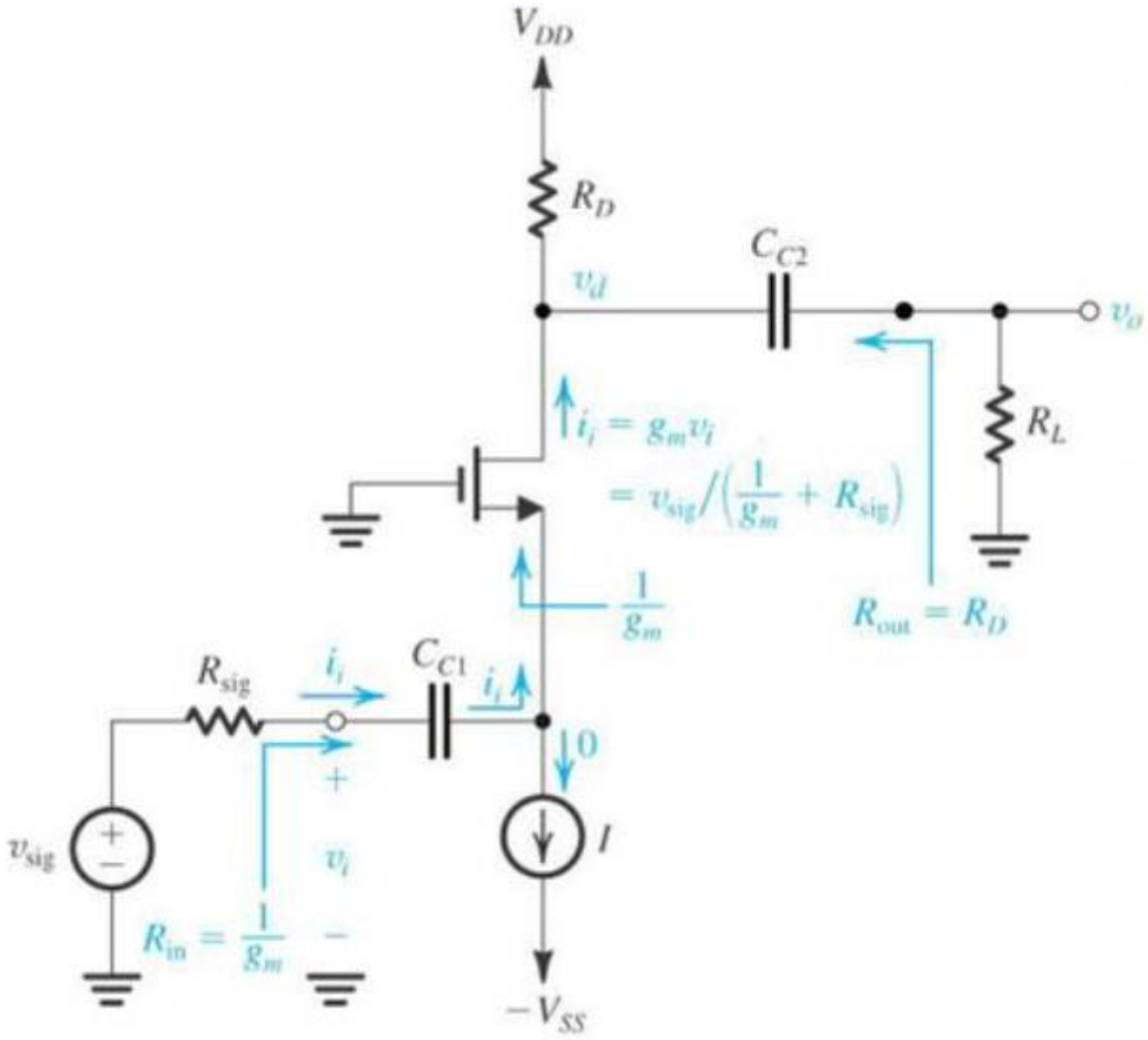
$$A_v = -\frac{g_m(R_D \parallel R_L)}{1 + g_m R_S}$$

$$G_v = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{sig}}A_V = -\frac{R_G}{R_G + R_{sig}}\frac{g_m(R_D \parallel R_L)}{1 + g_m R_S}$$

تقویت کننده گیت مشترک

در این تقویت کننده گیت به زمین وصل شده و سیگنال از طریق سورس اعمال میشود. خروجی کماکان از درین گرفته میشود. در واقع گیت بصورت ترمینال مشترک بین ورودی و خروجی عمل میکند.

در این مدار نیازی به R_G نیست زیرا گیت مستقیما به زمین وصل شده. ولی ورودی و خروجی همچنان از طریق خازنهای کوپلینگ به مدار متصل میشوند.

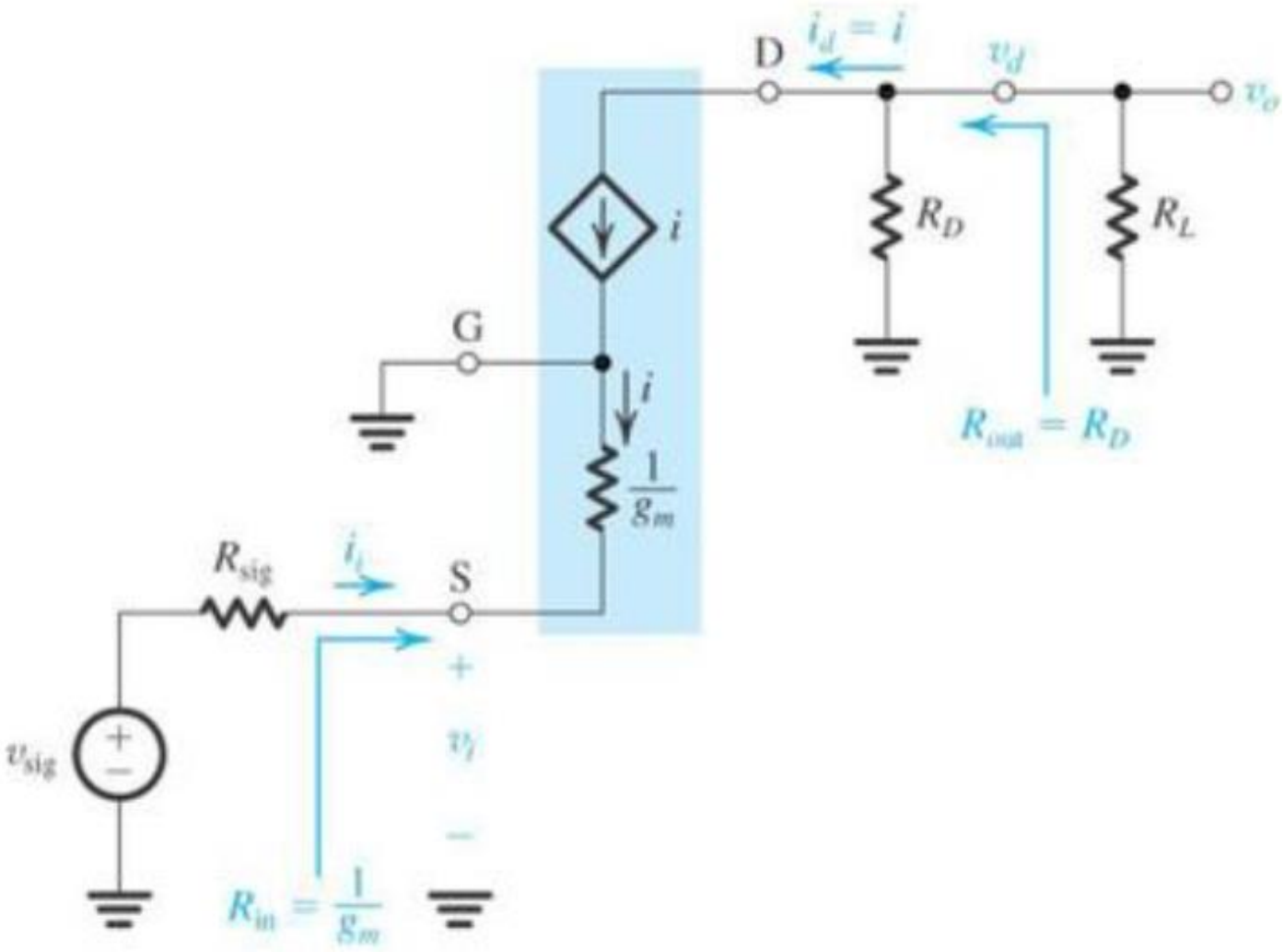


مدل سیگنال کوچک تقویت کننده گیت مشترک

نشان دادن مدل سیگنال کوچک با استفاده از مدل T ترانزیستور ساده تر است.

در این مدل از r_o صرفنظر شده است زیرا بعلت وصل کردن خروجی به ورودی بررسی مدار را تا حد بسیار زیادی پیچیده میکند.از روی شکل داریم:

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



بعلت اینکه g_m در حد $\frac{1mA}{V}$ mA/V۱ است، مقدار R_{in} در حد $1k\Omega$ خواهد شد که مقدار کوچکی است. از این رو مقاومت ورودی تقویت کننده باعث تلف شدن سیگنال منبع خواهد شد!

مشخصات تقویت کننده گیت مشترک

نسبت ولتاژ ورودی به منبع سیگنال برابر است با

$$v_i = v_{sig}\frac{R_{in}}{R_{in}+R_{sig}} \quad , \quad v_i = v_{sig}\frac{\frac{1}{g_m}}{\frac{1}{g_m}+R_{sig}} = v_{sig}\frac{1}{1+g_mR_S}$$

برای جلوگیری از اتلاف منبع سیگنال باید: $R_{sig} \ll \frac{1}{g_m}$

مقدار جریان درین از رابطه زیر بدست می آید:

$$i_i = \frac{v_i}{R_{in}} = \frac{v_i}{\frac{1}{g_m}} = g_m v_i$$

برای مقدار ولتاژ خروجی و گین ولتاژ داریم:

$$V_O = v_d = -i_d(R_D \parallel R_L) = g_m(R_D \parallel R_L)v_i$$

$$A_v = g_m(R_D \parallel R_L)$$

مقدار بهره کلی عبارت است از:

$$G_v = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{sig}} A_V = \frac{\frac{1}{g_m}}{\frac{1}{g_m} + R_{sig}} A_v = \frac{A_v}{1 + g_m R_{sig}} = \frac{g_m(R_D \parallel R_L)}{1 + g_m R_{sig}}$$

مقدار مقاومت خروجی:

$$R_{out} = R_o = R_D$$

مقایسه تقویت کننده گیت مشترک با سورس مشترک

تقویت کننده گیت مشترک non inverting است. در حالیکه تقویت کننده سورس مشترک مقاومت ورودی بالائی داشت، مقاومت ورودی تقویت کننده گیت مشترک بسیار پائین است. گین ولتاژ A_v برای هر دو تقریبا یکسان است در حالیکه گین ولتاژ کلی برا ی تقویت کننده گیت مشترک به اندازه $1 + g_m R_{sig}$ کوچکتر است.

کاربرد تقویت کننده گیت مشترک

اگر منبع سیگنال را بصورت منبع جریان در نظر بگیریم، نسبتی از جریان منبع که وارد ترانزیستور میشود از رابطه زیر مشخص میشود

$$i_i = i_{sig} \frac{R_{sig}}{R_{sig} + R_{in}} = i_{sig} \frac{R_{sig}}{R_{sig} + \frac{1}{g_m}}$$

که اگر $R_{sig} \gg \frac{1}{g_m}$ باشد داریم: $i_i \cong i_{sig}$

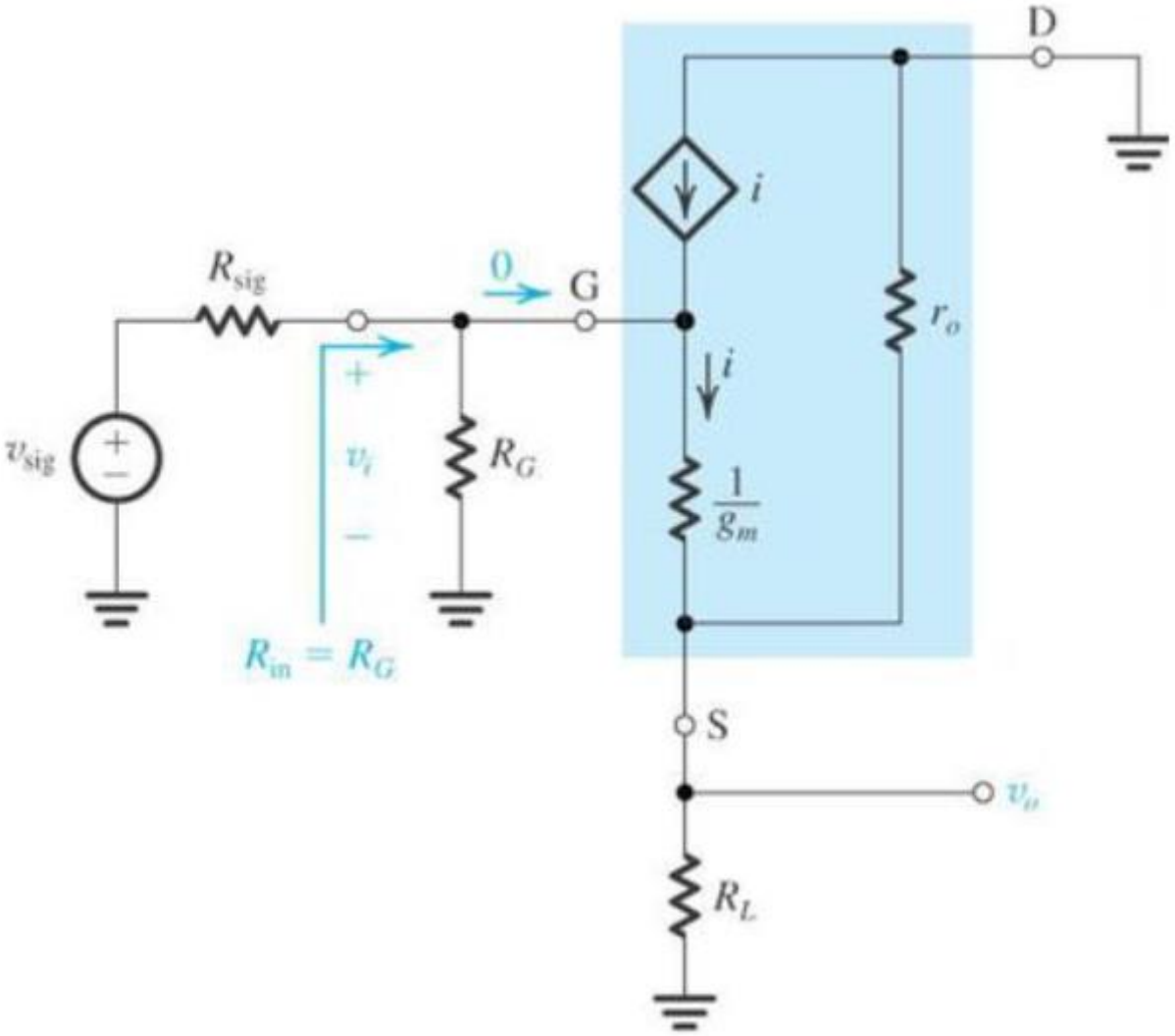
ترانزیستور همین جریان را در خروجی اما با مقاومت بیشتری ظاهر میکند. لذا میتوان آنرا یک تقویت کننده جریان با گین واحد فرض کرد. کاربرد مهم این مدار درمدارات با فرکانس بالاست.

تقویت کننده درین مشترک و یا Source Follower

در این تقویت کننده درین از لحاظ سیگنالی به زمین وصل شده و بین ورودی و خروجی مشترک خواهد بود. در این مدار نیازی به R_D نخواهد بود.

مدل سیگنال کوچک

برای نشان دادن مدل سیگنال کوچک از مدلT استفاده میکنیم.



مقاومت ورودی برابر است با:

$$R_{in} = R_G$$

بنابراین:

$$v_i = v_{sig}\frac{R_{in}}{R_{in} + R_{sig}} = v_{sig}\frac{R_G}{R_G + R_{sig}}$$

معمولا R_G خیلی بزرگ انتخاب میشود و $R_G \gg R_{sig}$ لذا $v_i \cong v_{sig}$

برای محاسبه v_o باید توجه داشت که r_O با R_L موازی قرار میگیرد.

$$v_o = v_i \frac{R_L \parallel r_O}{R_L \parallel r_O + \frac{1}{g_m}}$$

گین مدار باز را میتوان بصورت زیر نوشت:

$$A_v = \frac{R_L \parallel r_O}{R_L \parallel r_O + \frac{1}{g_m}}$$

لذا گین مدار باز را می‌توان به صورت زیر نوشت:

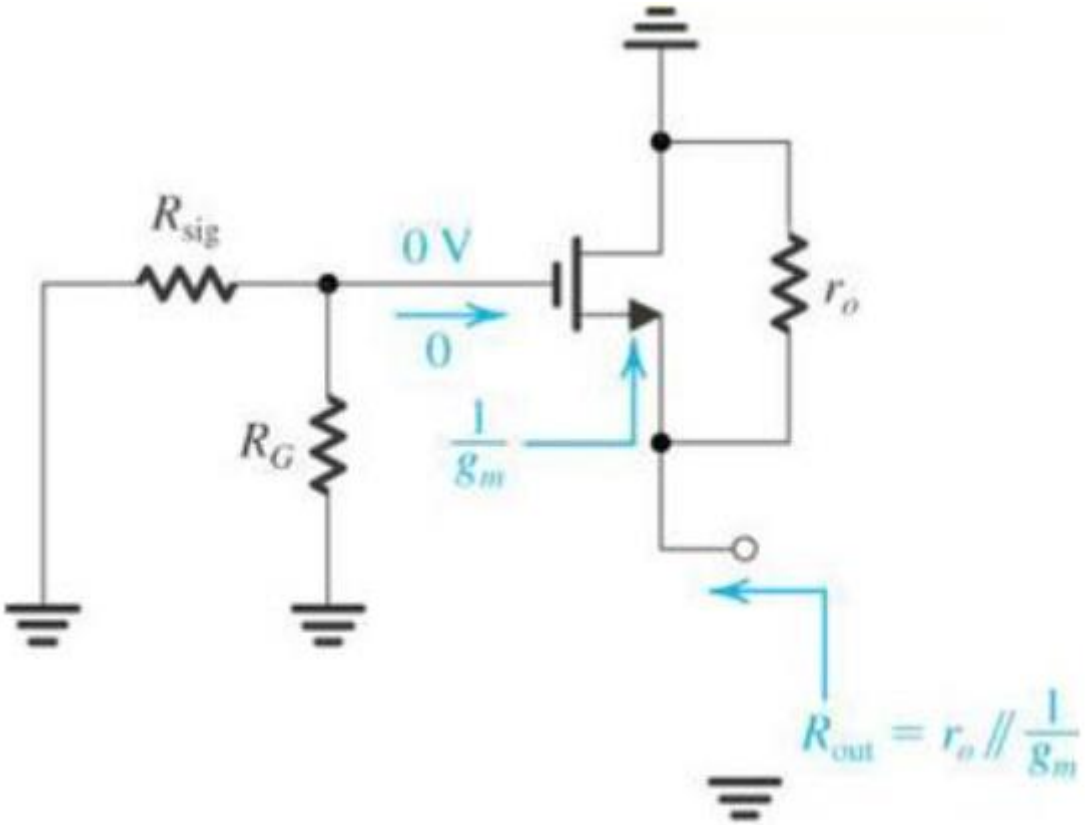
$$A_{vo} = \frac{r_O}{r_O + \frac{1}{g_m}}$$

معمولا $r_O \gg \frac{1}{g_m}$ لذا گین مدار باز برابر با ۱ است. از اینرو بعلت مساوی بودن ولتاژ سورس و گیت این مدار را Source Follower می‌نامند. گین کلی از رابطه زیر بدست می آید:

$$G_v = A_V = \frac{R_G}{R_G + R_{sig}} A_V = \frac{R_G}{R_G + R_{sig}} \frac{R_L \parallel r_O}{R_L \parallel r_O + \frac{1}{g_m}}$$

مدل سیگنال کوچک

برای محاسبه مقاومت خروجی از مدار شکل زیر استفاده میشود.



$$R_{out} = \frac{1}{g_m} \parallel r_O$$

که در عمل داریم:

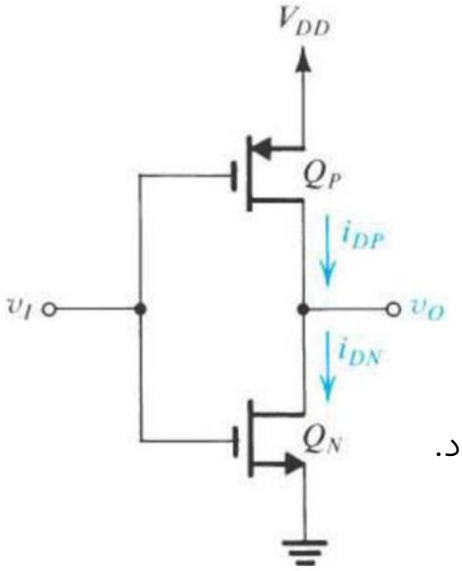
$$R_{out} = \frac{1}{g_m}$$

این مدار دارای مقاومت ورودی زیاد، مقاومت خروجی کم و گین تقریبا واحد است. لذا از آن در مدارات طبقه اول و یا آخر تقویت کننده های مجتمع استفاده میشود.

برای استفاده از ترانزیستور بعنوان سوئیچ، ورودی طوری اعمال میشود که ترانزیستور در حالت قطع $v_i < V_t$ و یا تریود کار کند. $v_I = V_{DD}$

یک گیت NOT با استفاده از CMOS

شکل زیر یک مدار ساده برای ساخت معکوس کننده با استفاده از تکنولوژی CMPS را نشان می‌دهد.



وقتی ورودی $v_I = V_{DD}$ است داریم:

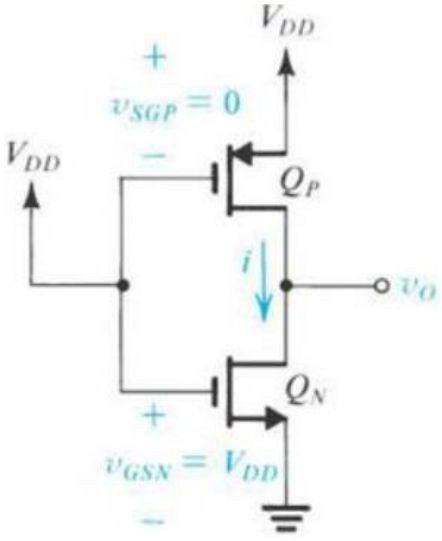
$$v_{GSN} = V_{DD} \quad , \quad v_{GSP} = 0$$

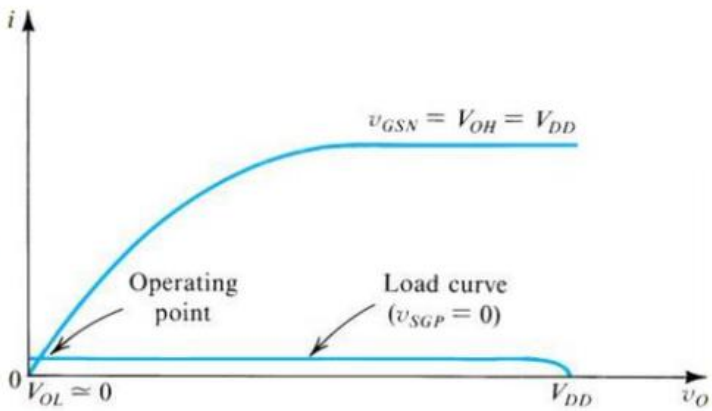
برای پیدا کردن نقطه کار ترانزیستور باید منحنی مشخصه هر دو را با هم تلاقی دهیم. برای ترانزیستور P این منحنی بصورت یک خط راست با مقدار جریان صفر است.

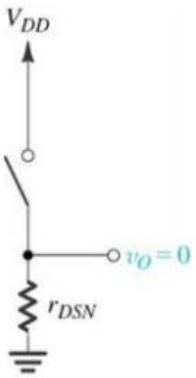
بدست آوردن نقطه کار

نقطه کار در محلی با مقدار ولتاژ و جریان نزدیک به صفر خواهد بود.

ترانزیستور N یک مسیر با مقاومت کم بین خروجی و زمین بوجود می آورد.

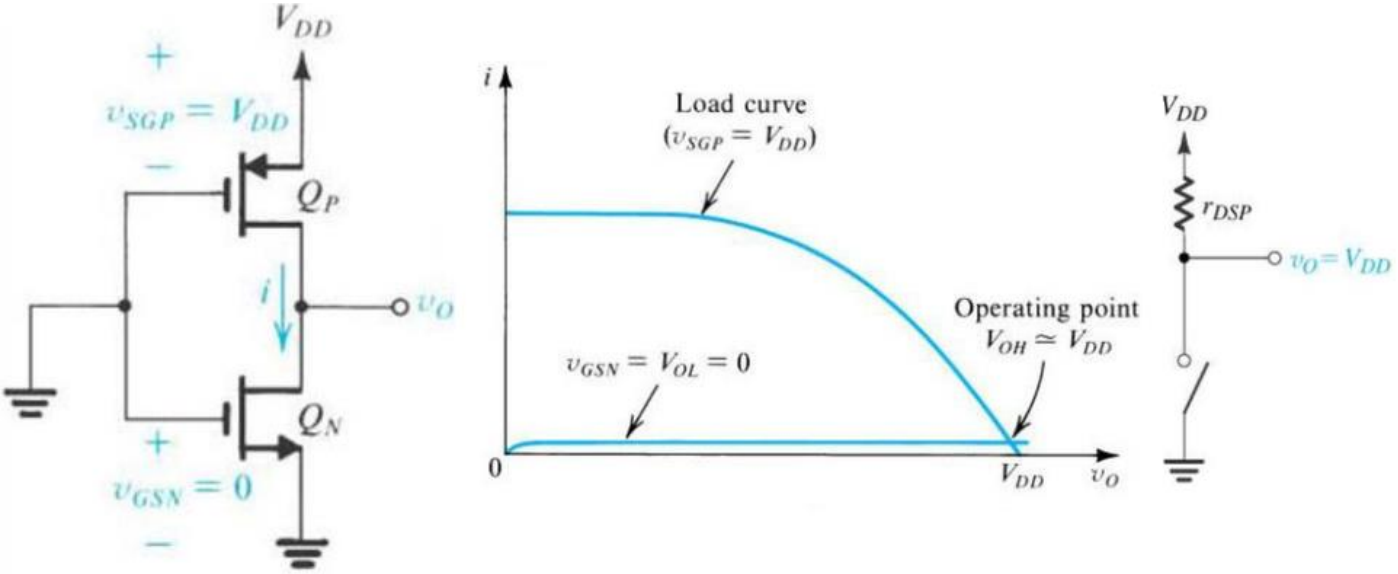




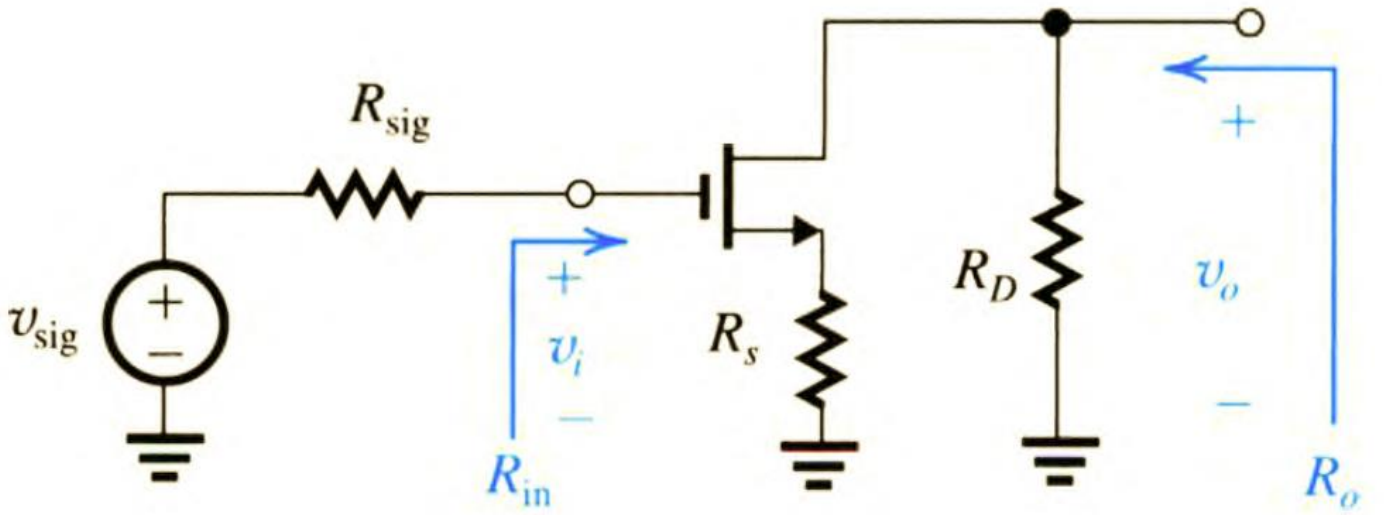


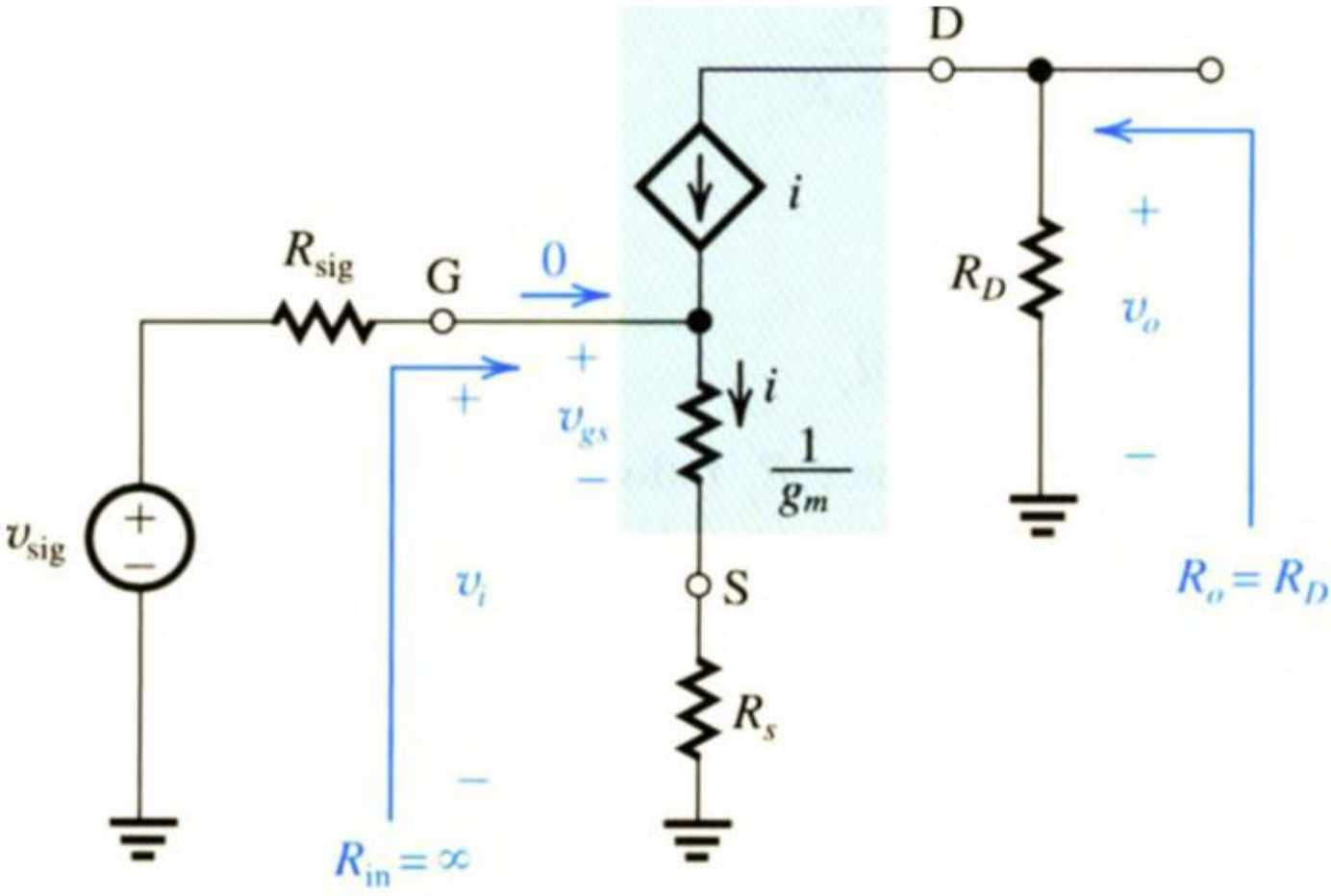
نقطه کار برای ورودی صفر

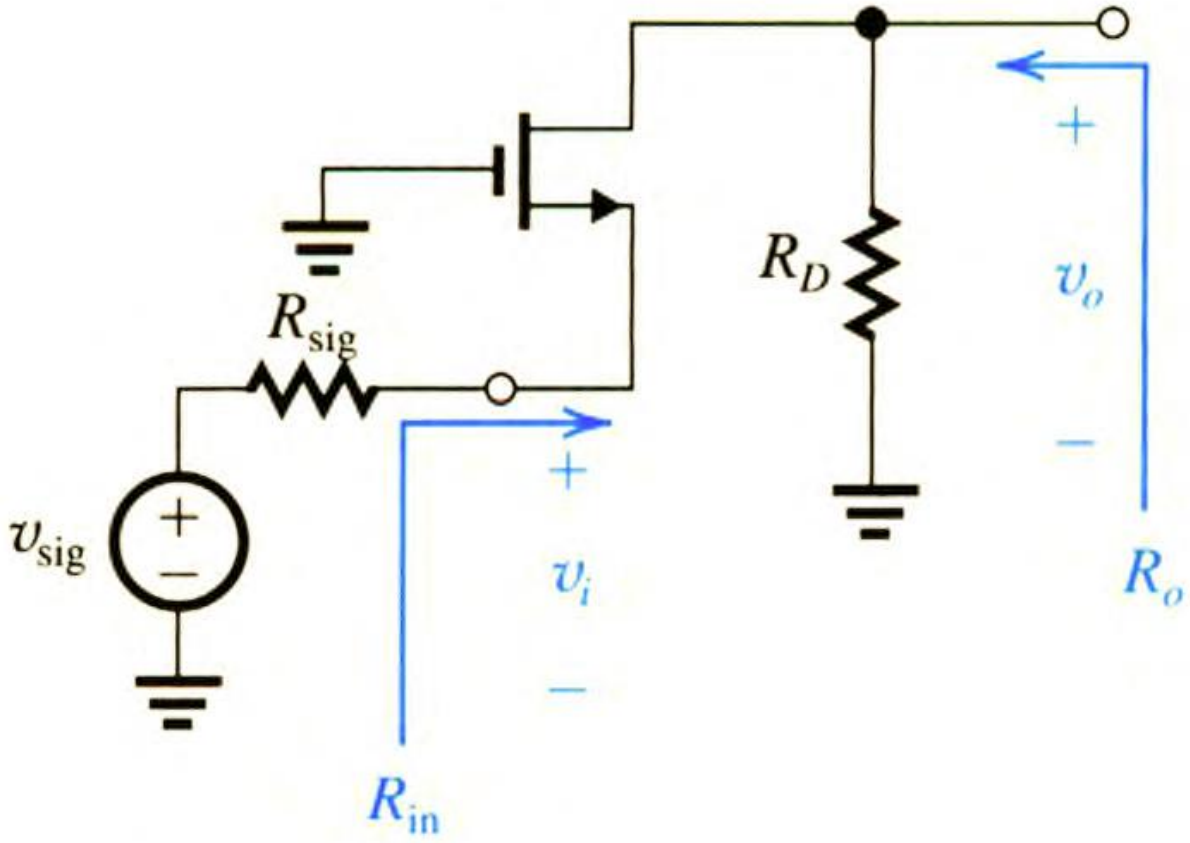
اگر $v_I = 0$ انتخاب شود، نقطه کار مطابق شکل زیر در محلی با ولتاژ نزدیک V_{DD} و جریان نزدیک به صفر خواهد بود. توجه شود که در هر دو حالت مقدار جریان ترانزیستور بسیار کم است.

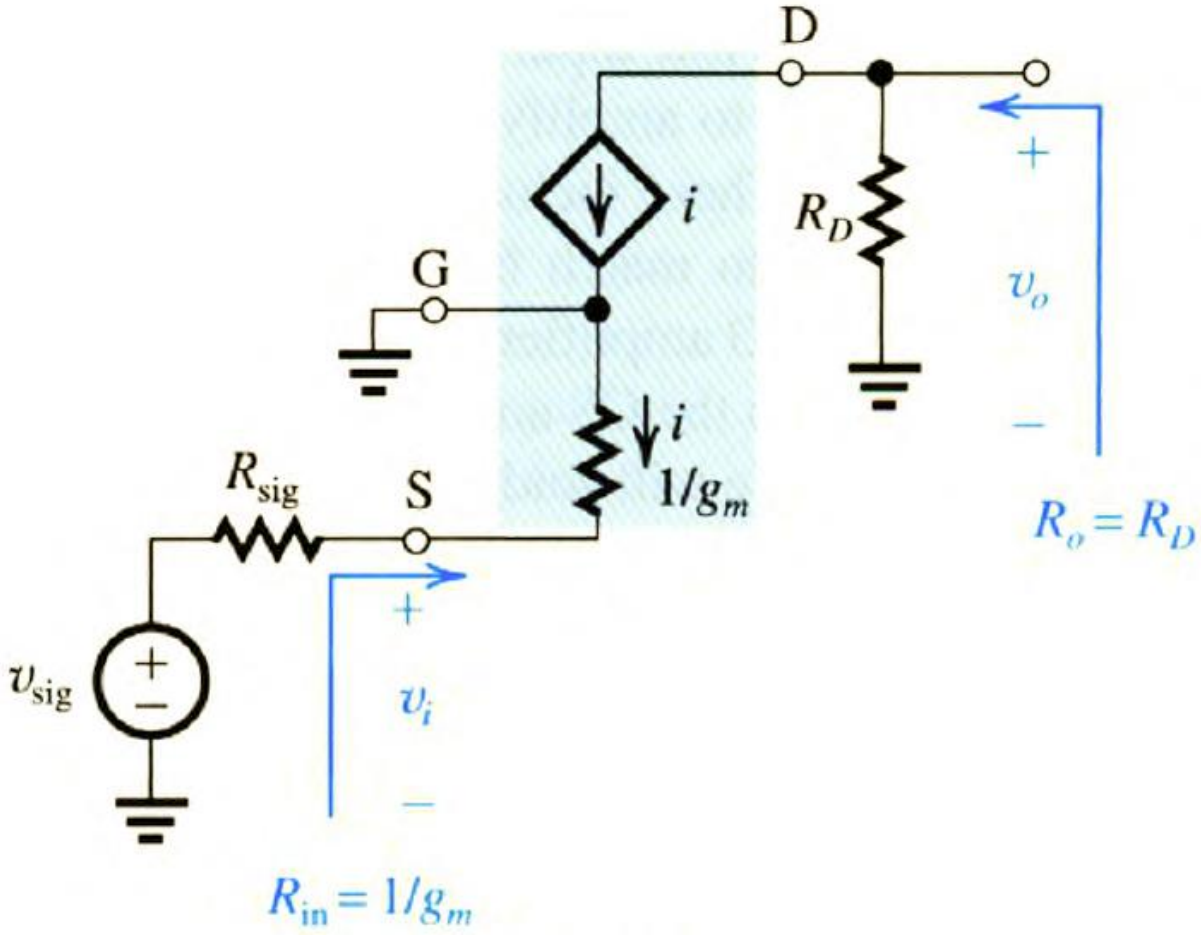


سورس مشترک با سیگنال کوچک مدل T

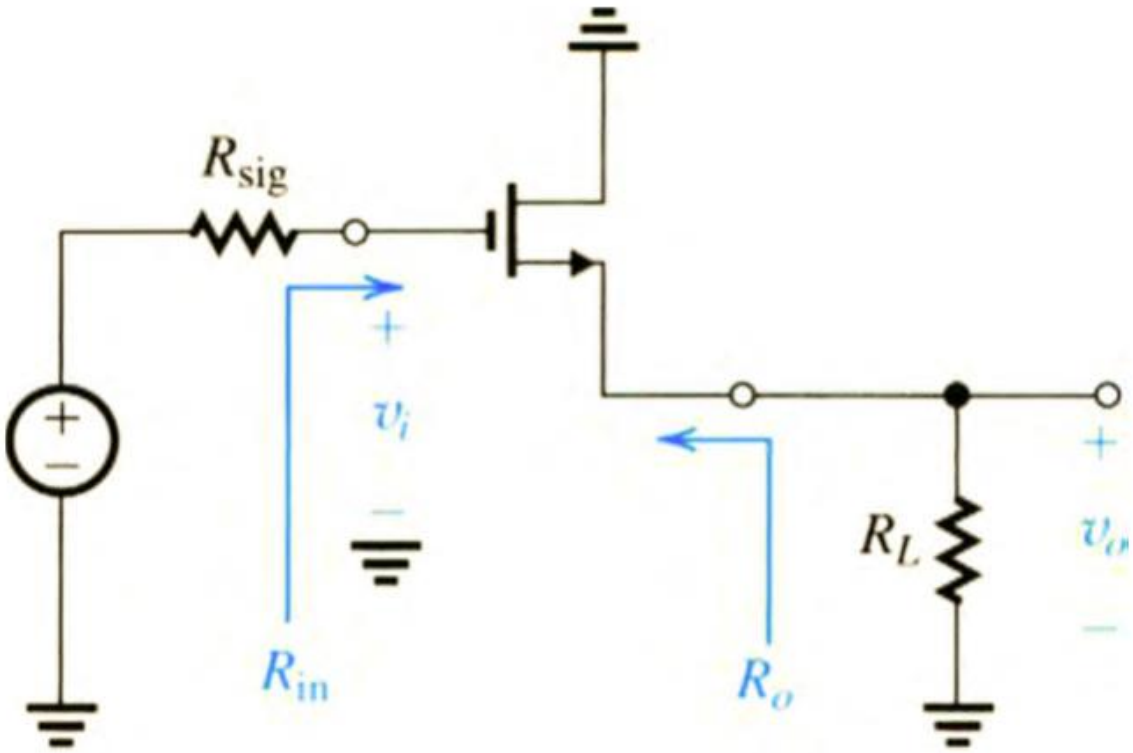


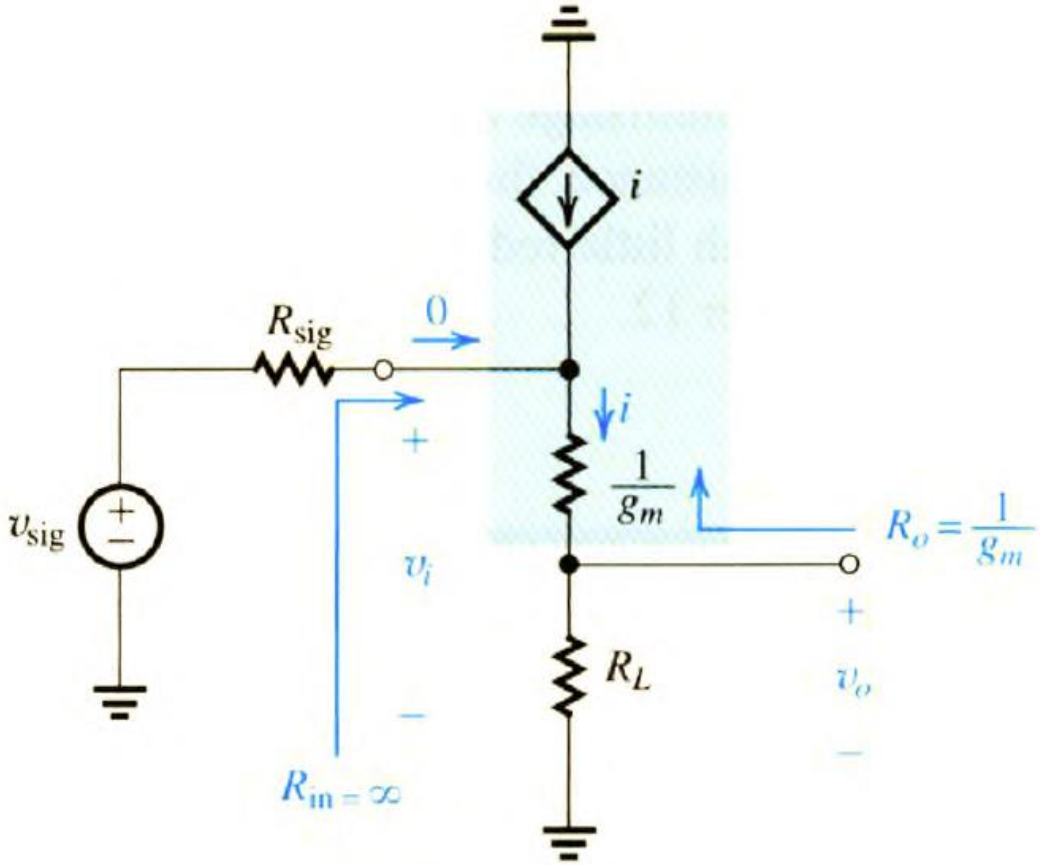



R_{sig}
R_D
v_o
v_{sig}
v_i
R_o
R_{in}


D
i
R_D
G
v_o
i
$1/g_m$
R_{sig}
S
$R_o = R_D$
v_{sig}
v_i
$R_{in} = 1/g_m$

درین مشترک با مدل سیگنال کوچک T





منابع:

۱- جزوه استاد شیری

پایان جلسه پانزدهم

روزگار خوشی را برای شما آرزومندم.

محمد اعرابیان