محمد اعرابیان

جزوه درس الکترونیک کاربردی

جلسه دوازدهم

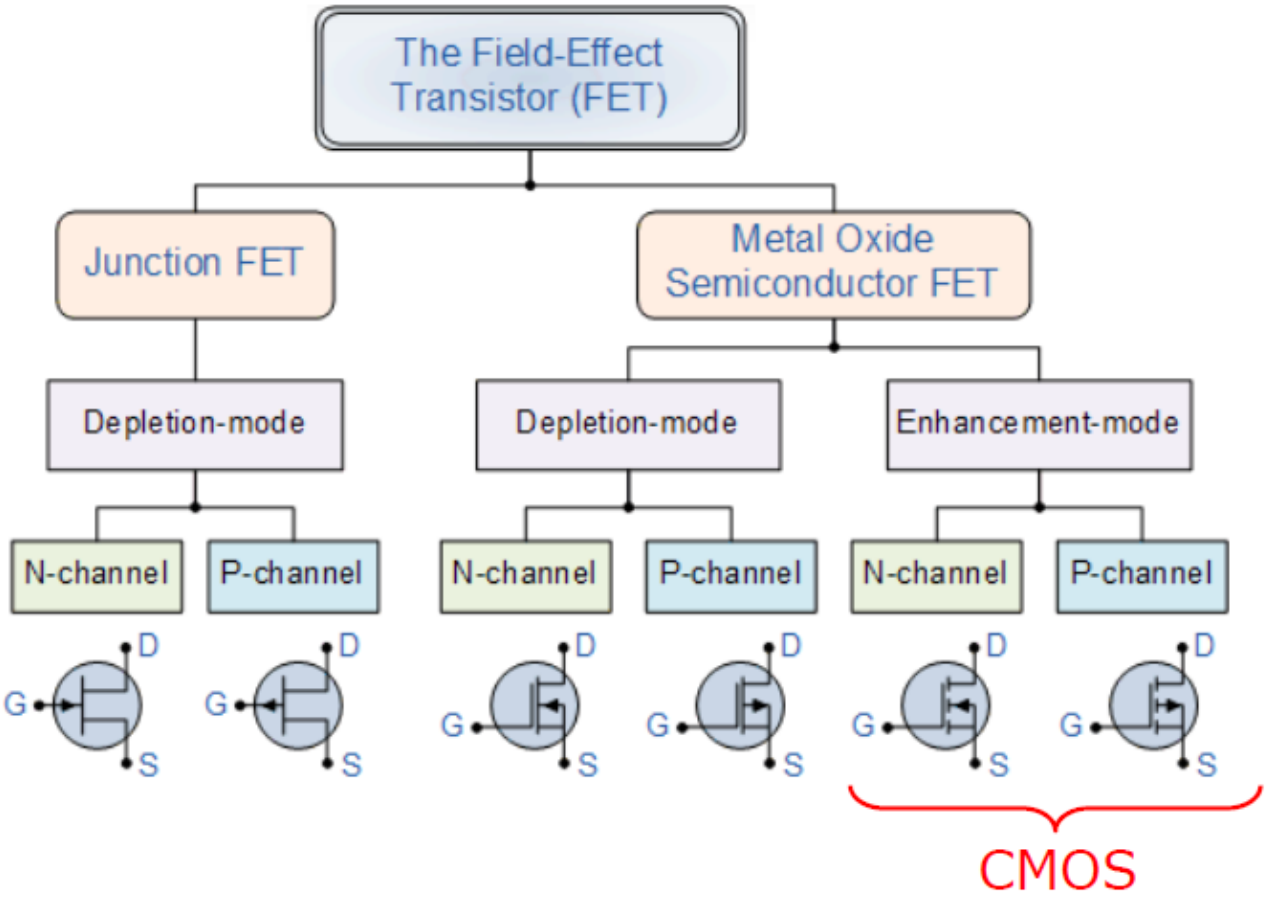
برای جزئیات بیشتر **اسکن کنید**

نسخه ۱.۱ | تهیه شده در بهمن ۱۴۰۰

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

ترانزیستور اثر میدان FET

ترانزیستور معمولی (BJT)، یک عنصر دوقطبی کنترل شونده با جریان است که توسط جریان بیس، جریان کلکتور آن کنترل می‌شود. ولی ترانزیستور اثر میدان یک عنصر تک قطبی کنترل شونده با ولتاژ است.



مقایسه کلی بین FET و BJT

BJT: شامل سه نیمه‌هادی، عناصر کنترل شده با جریان، بهره بیشتر، ارزان‌تر می‌باشد.

FET: شامل دو نیمه هادی، عناصر کنترل شده با ولتاژ، فرکانس قطع بالا، پایداری حرارتی بیش‌تر، راندمان بیشتر، مصونیت بیش‌تر در برابر اغتشاش

FET دارای مقاومت ورودی بسیار زیاد می‌باشد.

FET در هنگام استفاده به عنوان سوئیچ ولتاژ افست ندارد.

FET در مقابل تشعشات حساسیت بسیار کمی دارد.

FET پارازیت کمتری روی سیگنال ایجاد می‌کند

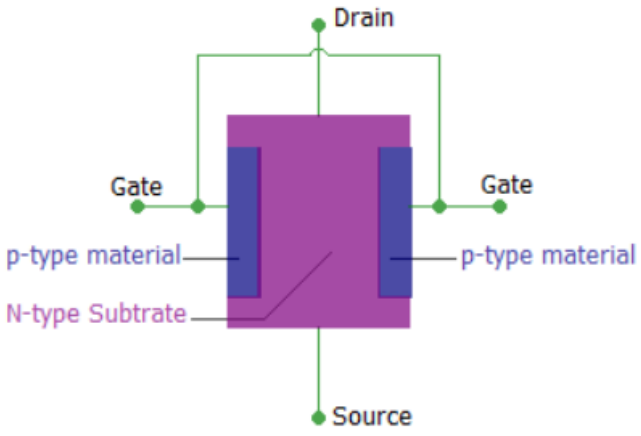
FET از BJT کوچکتر است و در ساخت مدارهای مجتمع (IC) استفاده بیشتری دارد.

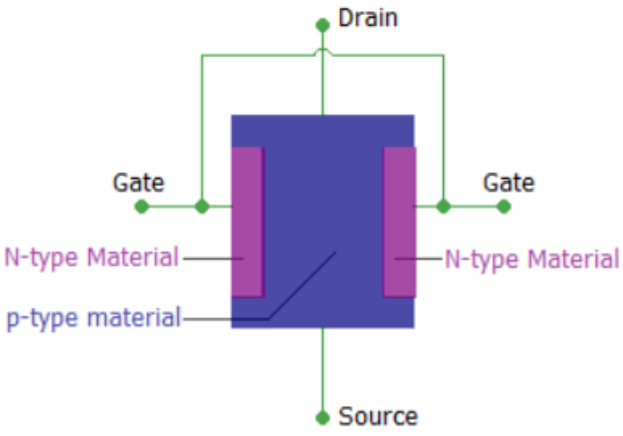
FET عرض باند تقویت کمتری نسبت به BJT دارد.

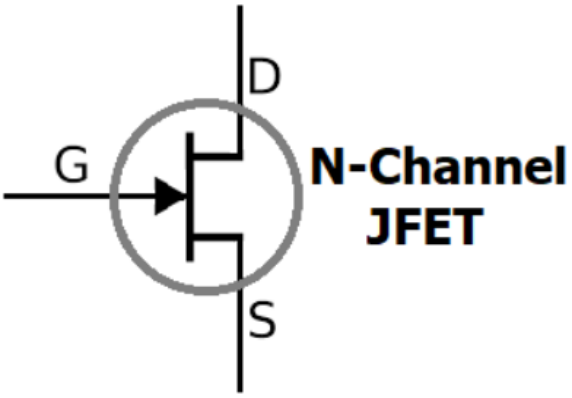
آسیب پذیری FET با دست بیشتر است.

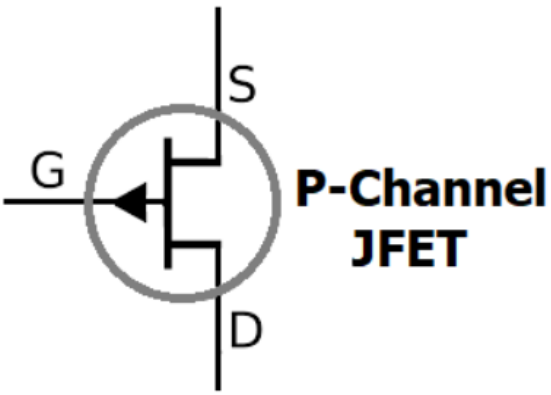
مقاومت ورودی ترانزیستور اثر میدان بسیار زیاد در حدود $10M\Omega$ تا $1000M\Omega$ است.

اساس ساختمان ترانزیستور JFET (اثر میدان پیوندی) در شکل زیر نشان داده شده است :









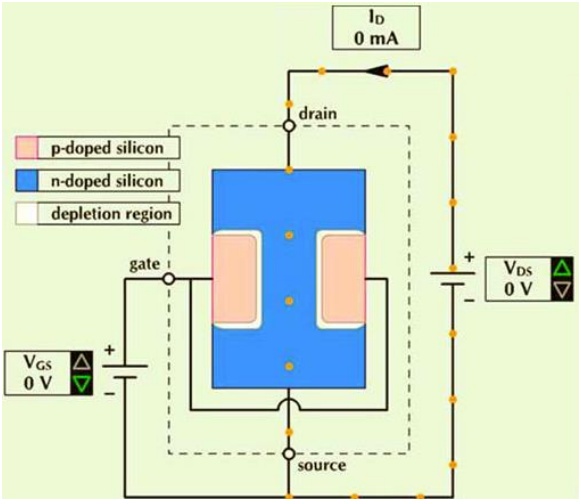
ترانزیستور JFET (اثر میدان پیوندی) از یك میله نیمه هادی از نوع N یا P تشکیل شده که در بالا و پائین آن ناخالصی از نوع دیگر وارد می‌کنند.

ترانزیستور JFET در دو نوع N کانال و P کانال ساخته می‌شود.حال به تشریح عملکرد نوع N کانال می‌پردازیم.

لایه N در حقیقت یك کانال عبور الکترون‌ها از سر سورس (S) به طرف درین (D) است. جریان در این کانال توسط میدان الکتریکی که از طریق سرهای گیت (G) اعمال می‌شود، کنترل پذیر است.

پایه گیت در وسط پایه درین و سورس قرار دارد و با علامت فلش نمایش می‌دهند.

عامل حرکت الکترون‌ها اتصال سر درین به قطب مثبت منبع است.

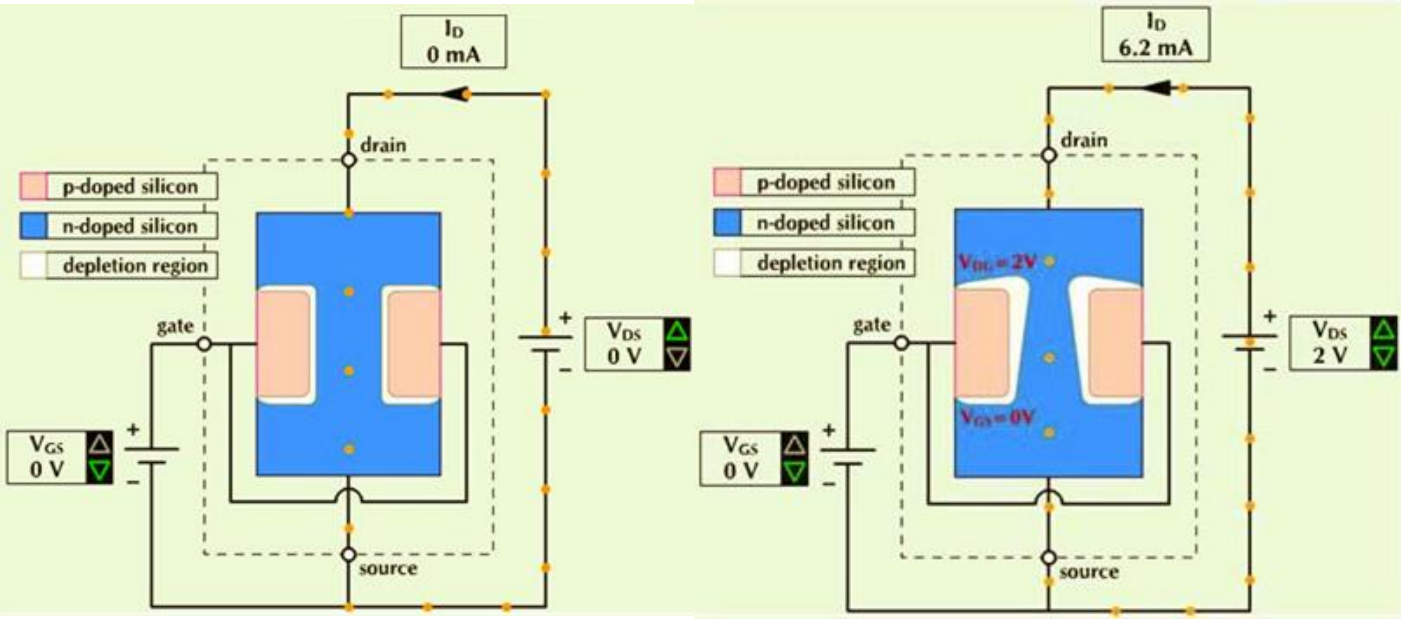


در ابتدا که این منبع صفر است، جریانی وجود ندارد.

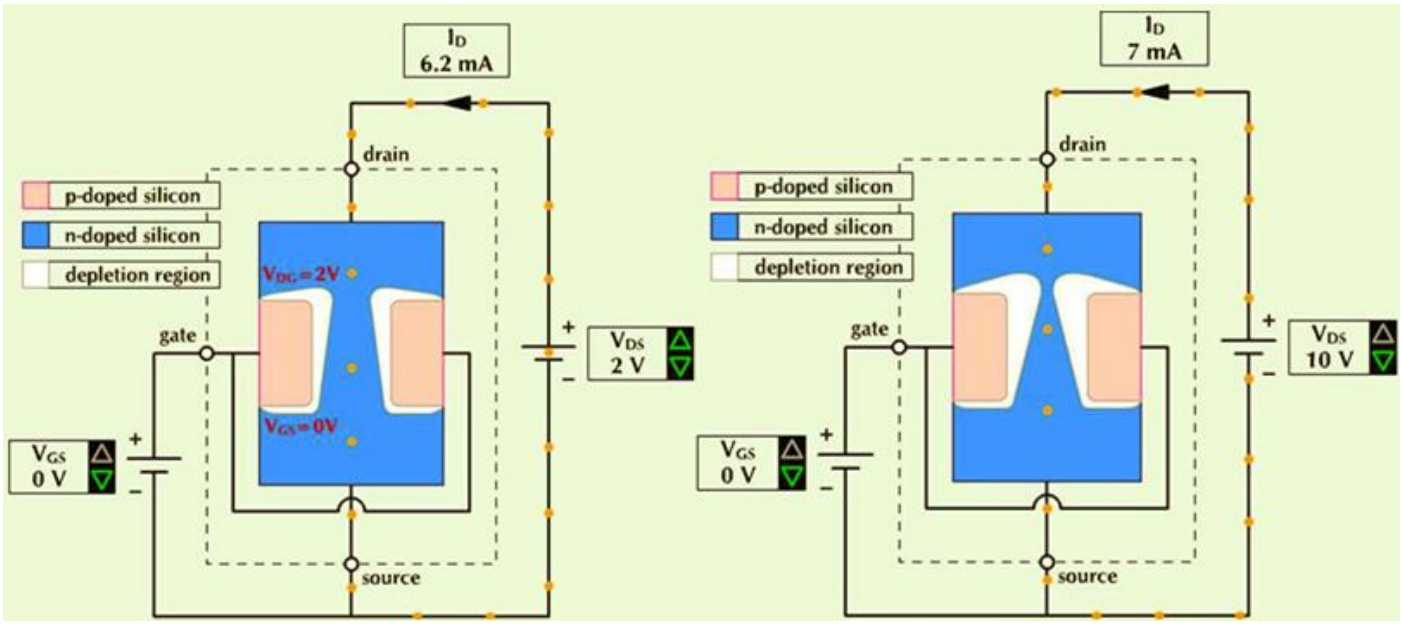
چون N به مثبت و P به زمین وصل شده است، لذا دیود PN در گرایش معکوس قرار دارد.

پس عرض لایه تهی با افزایش V_{DS} بالا می‌رود.

چون سطح مقطع کانال کم می‌شود، مقاومت آن زیاد خواهد شد. میدان مربوط به G و D بر جریان درین اثر می‌گذارد. لذا آن را ترانزیستور اثر میدان گویند.

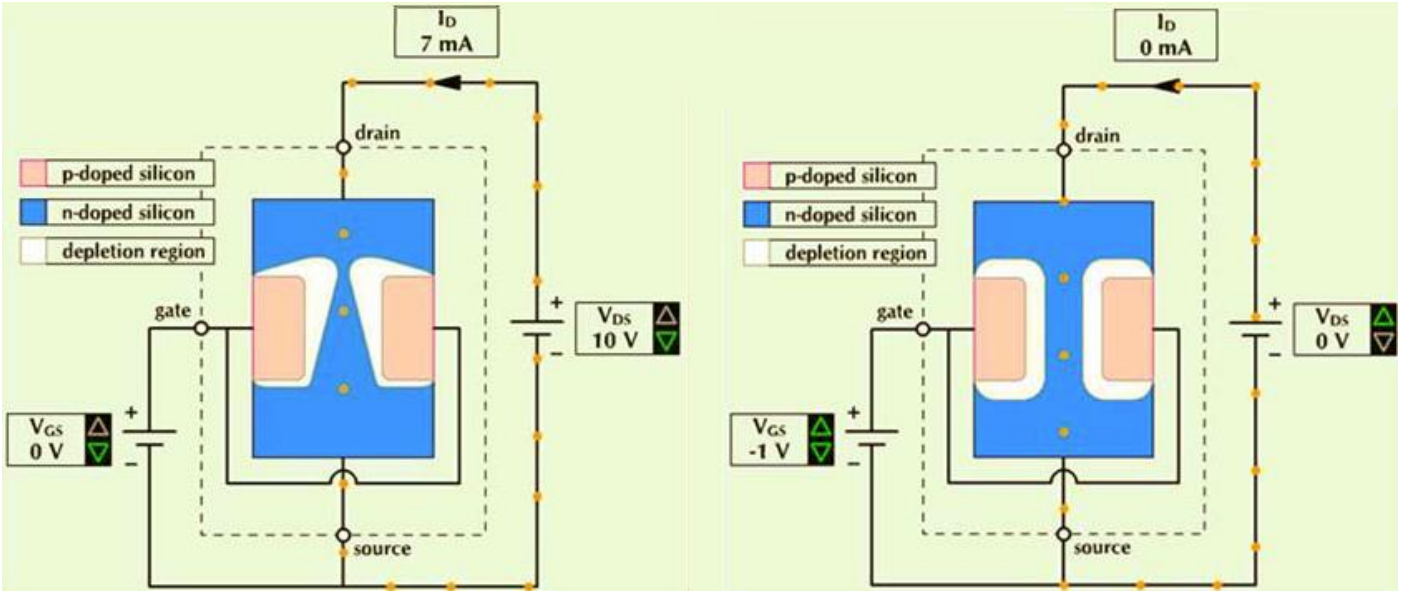


وقتی V_{DS} کوچك است، جریان درین بطور خطی افزایش می‌یابد، زیرا هنوز ضخامت لایه تهی بر آن تأثیر ندارد. ولی وقتی که منبع V_{DS} زیاد و بزرگ می‌شود، عرض دو لایه تهی بهم نزدیك شده و مقاومت کانال بالا می‌رود. وقتی که این منبع به مقدار $|V_P|$ (ولتاژ بحرانی یا ناحیه قطع و یا $V_{GS}(off)$) می‌رسد، نرخ افزایش جریان صفر می‌شود.



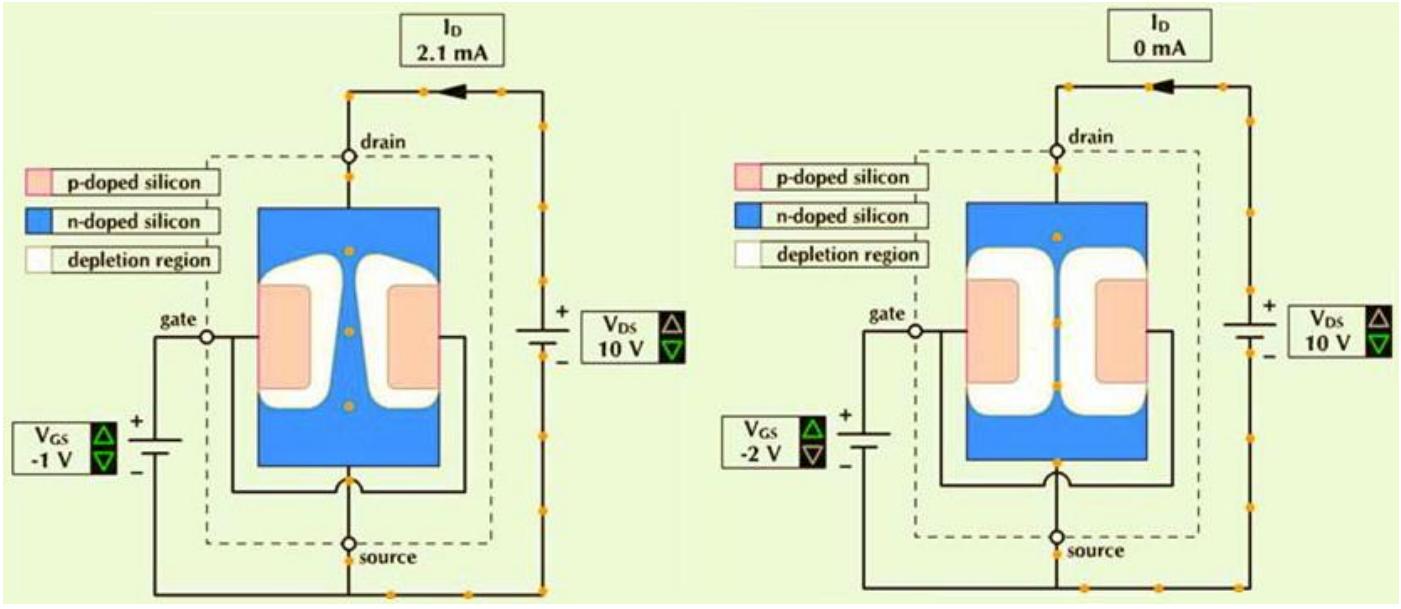
در این حالت جریان تقریبا ثابت می‌ماند و گفته می‌شود که جریان به مقدار اشباع رسیده است. اگر این منبع از حد مشخصی بگذرد، دیودهای PN به ناحیه شکست می‌رسند و جریان از طریق این دیودها برقرار می‌شود.

اگر فرض کنیم $V_{GS} = -1$ باشد، عرض لایه تهی نسبت به حالتی که این منبع صفر است، بیشتر می‌شود.



پس با افزایش منبع V_{DS} ، سریعتر و زودتر به ناحیه اشباع می‌رسد. شروع ناحیه اشباع (ثابت ماندن جریان درین) در زمانی است که منبع V_{DS} به اندازه $|V_P| + V_{GS}$ شده باشد.

اگر فرض کنیم $V_{GS} = -2$ باشد، عرض لایه تهی نسبت به حالت‌های قبل بیشتر شده، به طوری که راه برای عبور جریان بسته شده است.



ناحیه‌ای راکه در آن جریان درین تقریبا ثابت می‌ماند، ناحیه اشباع می‌نامند. ناحیه‌ای که در آن جریان درین تقریبا خطی تغییر می‌کند را ناحیه تریود یا اهمیك نامیده اند.

جریان اشباع درین سورس (I_{DSS}): بیشترین جریان درین است وقتی که گرفتگی کانال به حداکثر مقدار خود رسیده باشد. این جریان در حالتی است که $V_{GS} = 0$ باشد. مقدار I_{DSS} برای ترانزیستورهای معمولی در حدود 10 تا 30 میلی‌آمپر است.

ولتاژ بحرانی (V_P): عبارت است از ولتاژی که به گرفتگی کانال منجر می‌شود.

ولتاژ آستانه یا قطع ($V_{GS_{off}}$): عبارت است از مقدار V_{GS} که جریان درین را به صفر می‌رساند.

نکات:

! در ترانزیستور FET بین پایه‌های سورس و درین در هر دو جهت با اهمتر مقاومت ثابتی اندازه گیری می‌شود.

! در ولتاژ بحرانی جریان JFET به حداکثر مقدار خود می‌رسد. (I_{DSS})

! ولتاژ شکست ترانزیستور های JFET معمولا در حدود 20 تا 30 ولت است.

! در ترانزیستورهای JFET ولتاژ آستانه تقریبا با ولتاژ بحرانی برابر است.

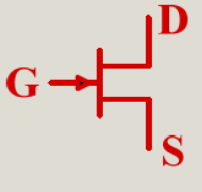
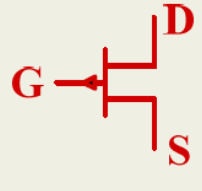
$$\left|V_{GS_{off}}\right| = |V_P| \rightarrow \begin{cases} V_{GS_{off}} = -V_P \\ V_P = -V_{GS_{off}} \end{cases}$$

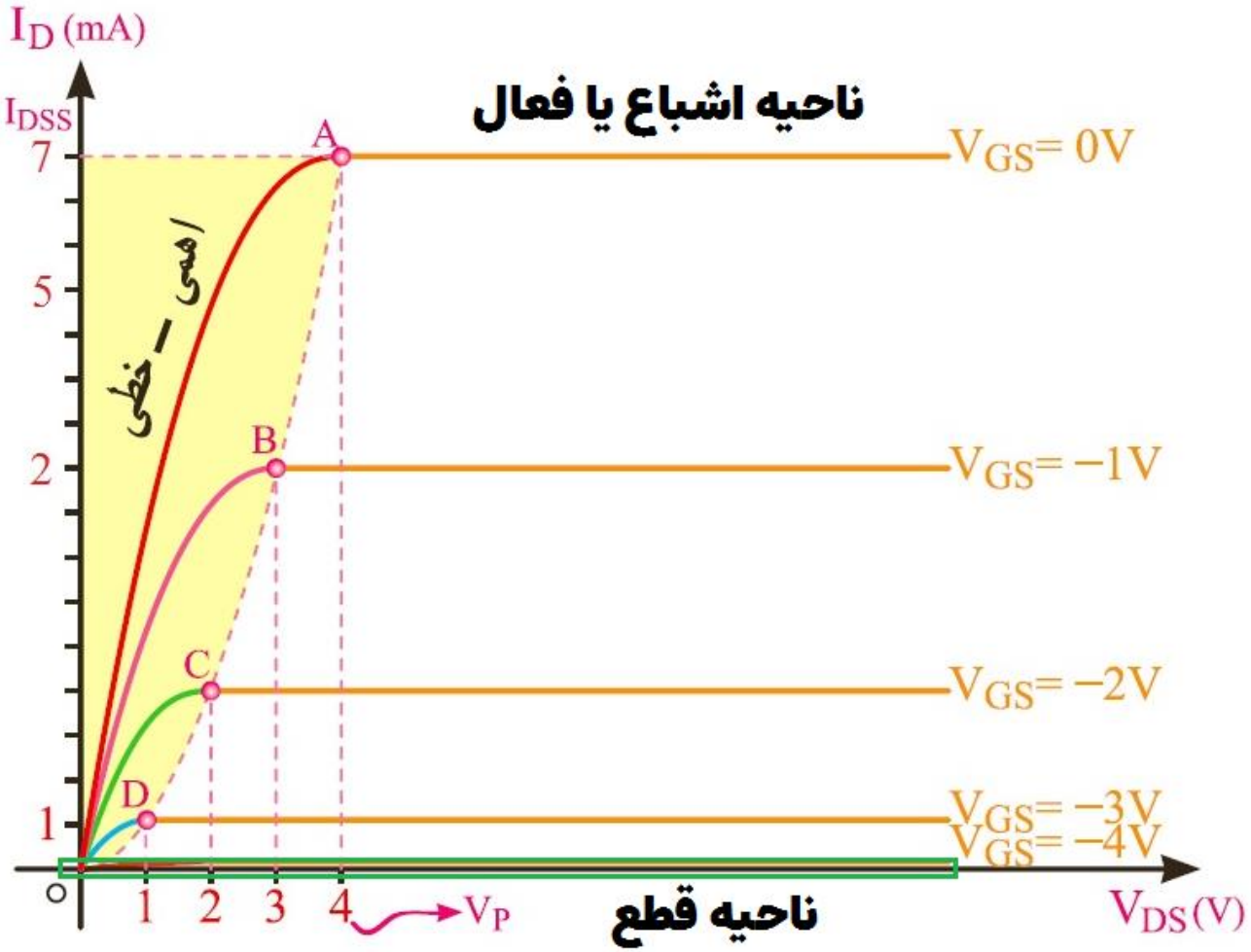
یکی از ویژگی‌های FET، مقاومت ورودی بسیار بزرگ آن است. زیرا پیوند n-p گیت سورس در همه کاربردها در حالت معکوس قرار داشته و جریان آن جریان اشباع معکوس است، که از این جریان صرف‌نظر می‌کنیم و آن را صفر فرض می‌کنیم. $I_G = 0$

اگر این پیوند در حالت مستقیم بایاس گردد، عملکرد گفته شده در مورد این ترانزیستور مختل شده و با افزایش جریان مستقیم ، ترانزیستور در معرض سوختن قرار می‌گیرد.

پس مقدار مجاز ولتاژ V_{GS} در N کانال برابر $0.5v$ خواهد بود.

جدول ذیل شرایط و نحوه عملکرد هر دو نوع ترانزیستور FET را نشان می‌دهد.

نوع FET	ناحیه اشباع	ناحیه تریود
کانال –n  $V_{DS} > 0$ $V_P < 0$	$V_{GD} < -\lvert V_P \rvert$ $-\lvert V_P \rvert < V_{GS} < 0.5$	$V_{GD} > -\lvert V_P \rvert$ $-\lvert V_P \rvert < V_{GS} < 0.5$
کانال –p  $V_{SD} > 0$ $V_P > 0$	$V_{DG} < -\lvert V_P \rvert$ $-\lvert V_P \rvert < V_{SG} < 0.5$	$V_{DG} > -\lvert V_P \rvert$ $-\lvert V_P \rvert < V_{SG} < 0.5$



در نوع N کانال $V_P < 0 \ , \ I_D = I_{SD} \geq 0 \ , \ V_{DS} \geq 0$

در نوع P کانال $V_P > 0 \ , \ I_D = I_{SD} \geq 0 \ , \ V_{DS} \leq 0 \rightarrow V_{SD} \geq 0$

در ترانزیستور JFET تغییرات جریان درین I_D وابسته به تغییرات دو عامل V_{DS} و V_{GS} است.

سه ناحیه کار ترانزیستور JFET:

ناحیه قطع: این ناحیه پس از رسیدن V_{GS} به ولتاژ آستانه $V_{GS_{off}}$ شروع می‌شود و هیچ جریانی از درین نمی‌گذرد و ترانزیستور به صورت یک کلید قطع عمل می‌کند. $V_{GS_{off}} \geq V_{GS}$

ناحیه خطی یا اهمی: در این ناحیه ترانزیستور درست مانند یک مقاومت اهمی عمل می‌کند و مقدار آن با ولتاژ گیت سورس کنترل می‌شود.

! در ناحیه‌ای که ترانزیستور مانند یک مقاومت اهمی عمل می‌کند V_{DS} نباید از چند دهم ولت تجاوز کند.

! برای افزایش ناحیه خطی ترانزیستور یک مقاومت فیدبک یک اهم بین درین و گیت قرار می‌دهند.

! در حالتی که $V_{GS} = 0$ است کانال کمترین مقدار مقاومت را دارد.

! در حالتی که $V_{GS} = V_{GS_{off}}$ است کانال بیش‌ترین مقدار مقاومت را دارد.

! محدوده خطی در ترانزیستورهای FET معمولی به صورت $-2v \leq V_{DS} \leq 2v$ است.

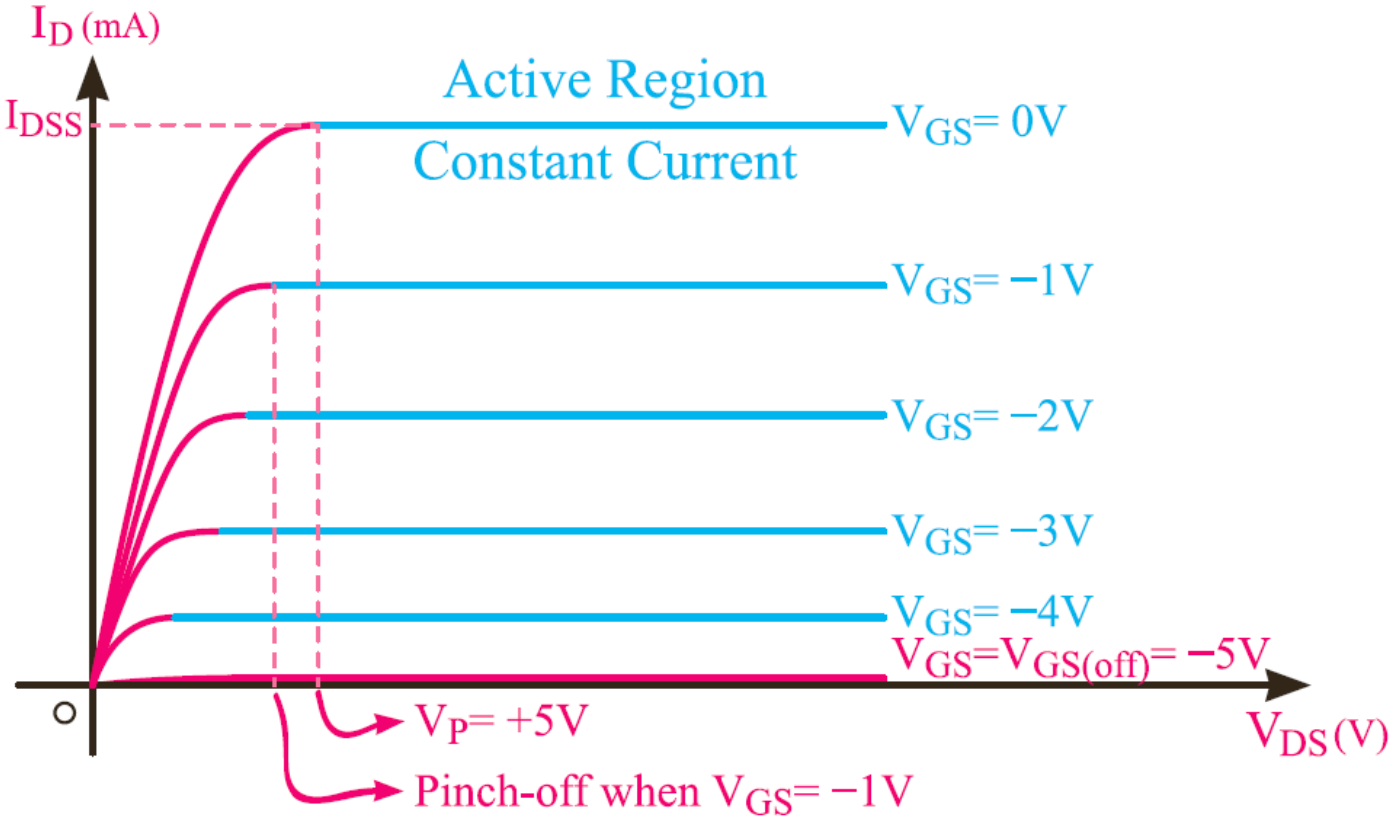
ناحیه اشباع یا فعال: در این ناحیه ترانزیستور مانند یک منبع جریان ثابت عمل می‌کندکه مقدار آن با V_{GS} مشخص می‌شود.

! حداقل ولتاژ لازم برای آن که ترانزیستور وارد ناحیه اشباع شود، برابر است با:

$$V_{DS_{(tr)}} = |V_P| + V_{GS}$$

$V_{DS_{(tr)}}$ ولتاژ گذر از ناحیه خطی به ناحیه اشباع یا فعال است.

! حداکثر مقدار برای وارد شدن به ناحیه فعال یا اشباع $V_{DS_{(tr)}}$ برابر با ولتاژ بحرانی V_P است.



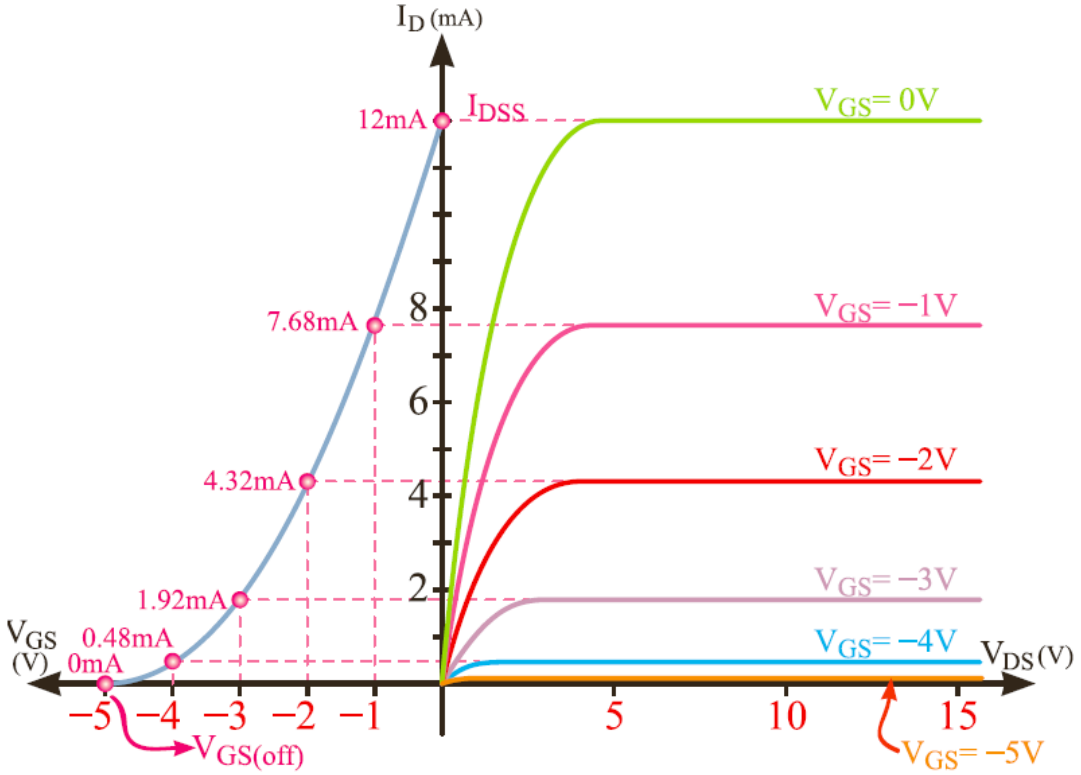
! در ناحیه اشباع مقدار جریان I_D برابر است با:

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

همواره باید مثبت باشد. $\frac{V_{GS}}{V_{GS_{off}}} = \frac{V_{GS}}{V_P}$

$$V_{GS} = 0 \Longrightarrow I_D = I_{DSS}$$
$$V_{GS} = V_P \Longrightarrow I_D = 0$$

ارتباط منحنی $V_{GS} - I_D$ و $V_{DS} - I_D$ را می‌توانید در شکل زیر مشاهده کنید.



معادلات توصیف کننده عملکرد ترانزیستور FET:

رابطه بین جریان درین و ولتاژ گیت سورس در ناحیه اشباع چنین است:

$$I_D = I_{DSS}\left(1 + 3\frac{V_{GS}}{V_P} + 2\left(\frac{-V_{GS}}{V_P}\right)^{1.5}\right)$$

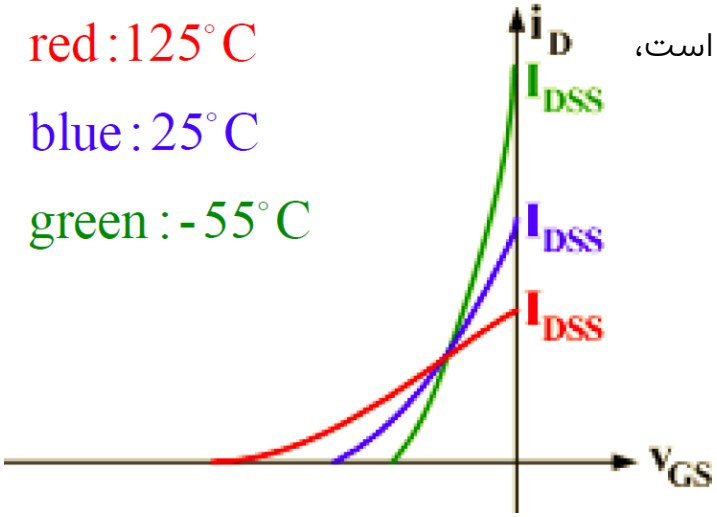
در این رابطه از تغییرات جریان درین در این ناحیه (با تغییرات ولتاژ درین سورس) صرفنظر شده است.

بخاطر کاربرد سخت رابطه فوق ، رابطه ذیل که اختلاف بسیار کمی با آن دارد، استفاده می‌شود.

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

این معادله به رابطه شاکلی Shockley معروف است. منحنی معادله فوق در شکل زیر رسم شده است.

چون در FET، V_{GS} ولتاژ ورودی و I_D جریان خروجی است، منحنی مذکور را مشخصه انتقالی FET می‌نامند.



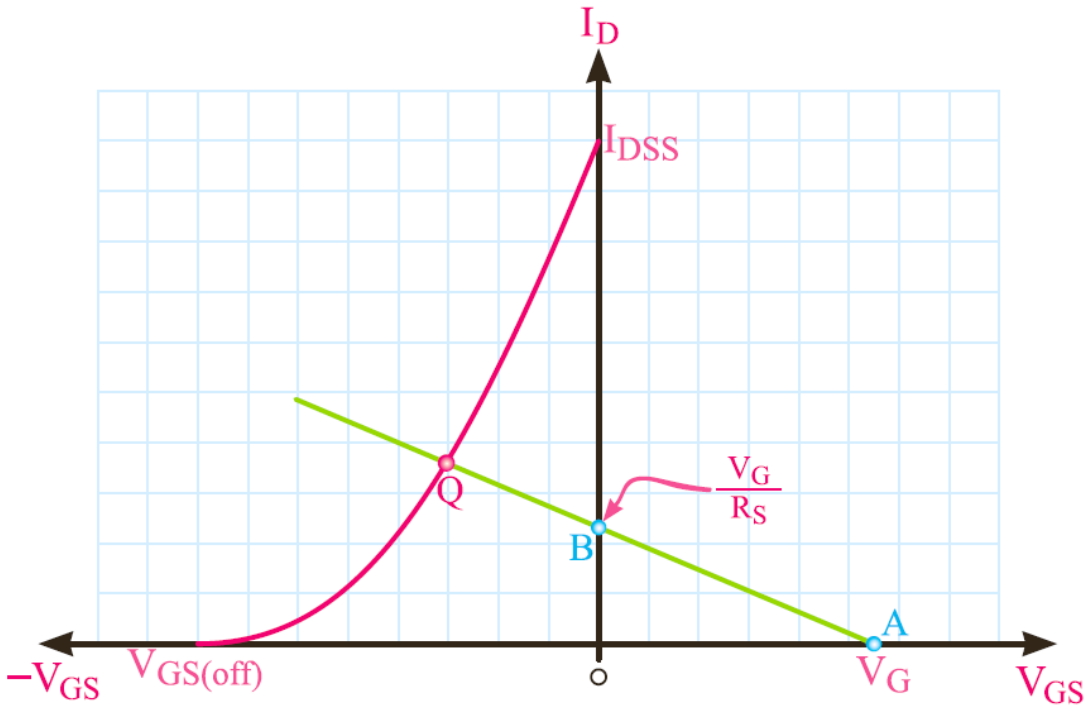
در این شکل اثر تغییر دما بر مشخصه انتقالی نشان داده شده است.

در واقع دو پارامتر I_{DSS} و V_P تابع دما هستند.

تغییرات حرارتی دو پارامتر مذکور در جهت مخالف یکدیگر بوده و منحنی های مشخصه انتقالی در یك نقطه همدیگر را قطع می‌کنند. این نقطه که در آن ضریب حرارتی صفر است، در واقع مناسب‌ترین نقطه کار FET است. برای جلوگیری از تغییر نقطه کار بادما، موارد زیر در نظر گرفته می‌شود :

۱) برای جلوگیری از تغییر نقطه کار با دما، از FET هایی با $|V_P|$ بزرگ استفاده می‌شود تا تغییرات نسبی حرارتی آن قابل توجه نباشد.

۲) سعی می‌شود که نقطه کار در محل تلاقی مشخصه های انتقالی قرار گیرد که معمولا از طریق کاتالوگ ترانزیستور بدست می‌آید. معمولا ولتاژ نقطه کار V_{GS} تقریبا بین $\frac{1}{2}$ تا $\frac{1}{3}$ ولتاژ V_P در نظر می‌گیرند.



در ناحیه تریود یا اهمیك بر خلاف ناحیه اشباع جریان درین به ولتاژ درین سورس حساس است، بطوریکه:

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

در این رابطه برای V_{DS} کوچك می‌توان از جمله دوم صرفنظر نمود و لذا جریان I_D با ولتاژ V_{DS} متناسب بوده و منحنی مشخصه خروجی ترانزیستور به خطوط گذرنده از مبدأ تبدیل می‌شوند. شیب این خطوط نشان دهنده مقاومت بین درین و سورس است.

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

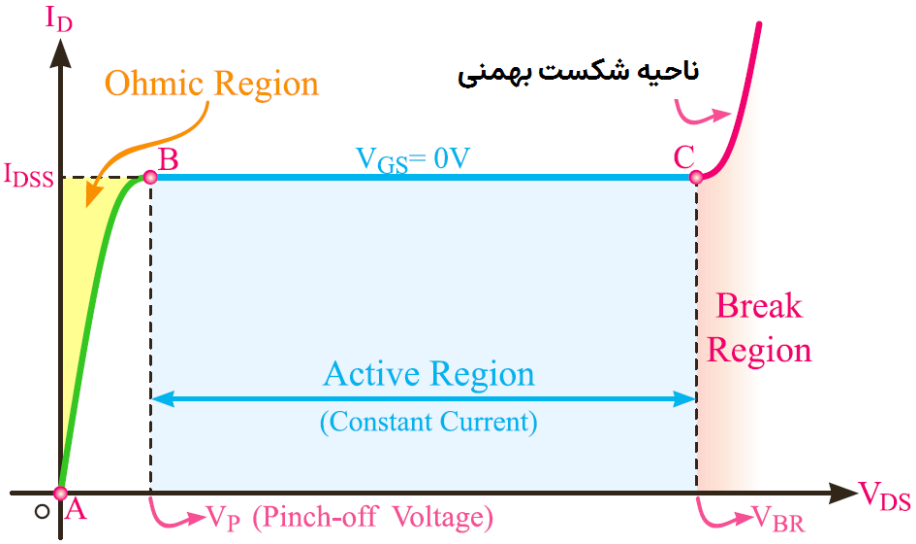
پس ترانزیستور در این ناحیه مثل یك مقاومت متغیر با ولتاژ Voltage Variable Resistor خواهد بود.

در مرز ناحیه اشباع و تریود داریم: $V_{GS} = V_P + V_{DS}$

با جایگذاری رابطه اخیر در رابطه ناحیه اهمیك خواهیم داشت:

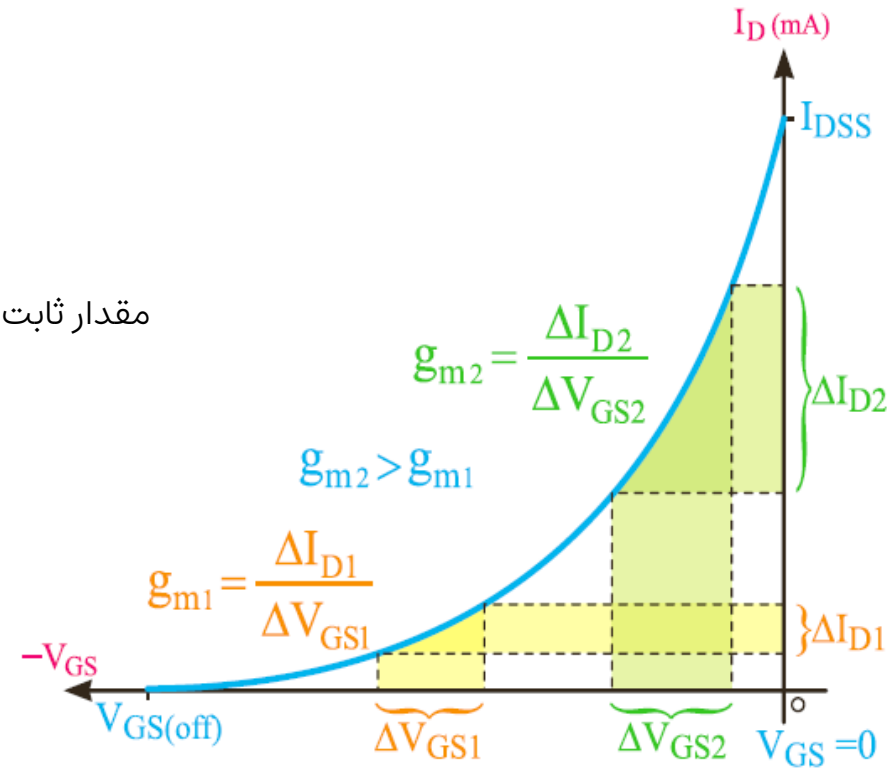
$$I_D = I_{DSS}\left(\frac{V_{DS}}{V_P}\right)^2$$

ناحیه شکست بهمنی: اگر V_{DS} از حد معینی تجاوز کند، در محل اتصال PN که در بایاس مخالف قرار دارد پدیده شکست بهمنی رخ می‌دهد یعنی جریان درین به سرعت افزایش می‌یابد و ترانزیستور آسیب می‌بیند.



هدایت انتقالی JFET (g_m) : نسبت تغییرات جریان درین ΔI_C به تغییرات ولتاژ سورس ΔV_{GS} به ازای ولتاژ درین سورس ثابت را هدایت انتقالی دینامیکی می‌نامند و تابع نقطه کار ترانزیستور است. چون منحنی مشخصه انتقالی برای JFET غیر خطی است هدایت انتقالی در نقاط مختلف آن متفاوت است.

$$g_m = \left.\frac{\Delta I_C}{\Delta V_{GS}}\right|_{V_{DS}=\text{ مقدار ثابت}}$$



مثال: یک ترانزیستور JFET کانال N که ولتاژ قطع آن $4v-$ و جریان اشباع درین سورس 12mA می‌باشد در شرایط زیر جریان I_D دست آورید؟ و سپس ترسیم کنید.

الف) $V_{GS}=0$ ب) $V_{GS}=-2v$ ج) $V_{GS}=-3v$ د) $V_{GS}=-3v$

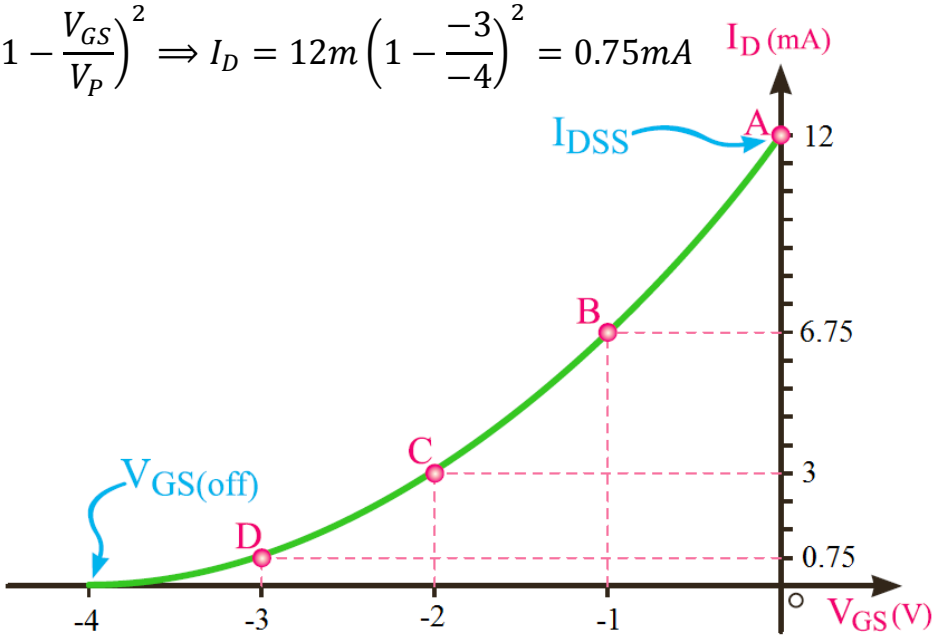
$I_{DSS}=12mA \;\;,\;\; V_P=-4$

$\longrightarrow V_{GS}=0 \Longrightarrow \;\; I_D=I_{DSS}=12mA$

$$\longrightarrow V_{GS}=-1v \Longrightarrow \;\; I_D=I_{DSS}\left(1-\frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 \Rightarrow I_D=12m\left(1-\frac{-1}{-4}\right)^2=6.75mA$$

$$\longrightarrow V_{GS}=-2v \Longrightarrow \;\; I_D=I_{DSS}\left(1-\frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 \Rightarrow I_D=12m\left(1-\frac{-2}{-4}\right)^2=3mA$$

$$\longrightarrow V_{GS}=-3v \Longrightarrow \;\; I_D=I_{DSS}\left(1-\frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 \Rightarrow I_D=12m\left(1-\frac{-3}{-4}\right)^2=0.75mA$$



مثال: یک ترانزیستور JFET کانال P که ولتاژ قطع آن $8v$ و جریان اشباع درین سورس 10mA می‌باشد در شرایط زیر جریان I_D دست آورید؟

الف) $V_{GS}=0$ ب) $V_{GS}=2v$ ج) $V_{GS}=4v$ د) $V_{GS}=6v$

$I_{DSS}=10mA \;\;,\;\; V_P=8$

$\longrightarrow V_{GS}=0 \Longrightarrow \;\; I_D=I_{DSS}=10mA$

$$\longrightarrow V_{GS}=2v \Longrightarrow \;\; I_D=I_{DSS}\left(1-\frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 \Rightarrow I_D=12m\left(1-\frac{2}{8}\right)^2=5.566mA$$

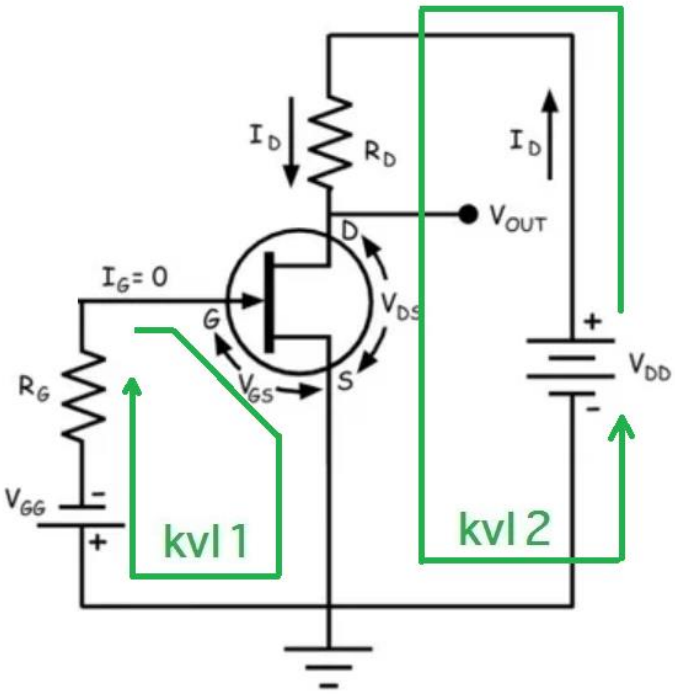
$$\longrightarrow V_{GS}=4v \Longrightarrow \;\; I_D=I_{DSS}\left(1-\frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 \Rightarrow I_D=12m\left(1-\frac{4}{8}\right)^2=2.5mA$$

$$\longrightarrow V_{GS}=6v \Longrightarrow \;\; I_D=I_{DSS}\left(1-\frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 \Rightarrow I_D=12m\left(1-\frac{6}{8}\right)^2=0.625mA$$

انواع تغذیه یا بایاسینگ در ترانزیستور FET

مشابه ترانزیستور BJT به سه روش بایاسینگ مستقیم، اتوماتیک (خودکار)، مقسم ولتاژ انجام می‌شود.

روش بایاسینگ مستقیم:



* برای محاسبه V_{GS} باید $kvl1$ در ورودی زد

$$I_G = 0 \quad , \quad I_D = I_S$$

$$kvl1: +V_{GG} + R_G(I_G) + V_{GS} = 0$$

$$\Longrightarrow V_{GS} = -V_{GG}$$

***محاسبه I_D**

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

* برای محاسبه V_{DS} باید $kvl2$ در خروجی زد

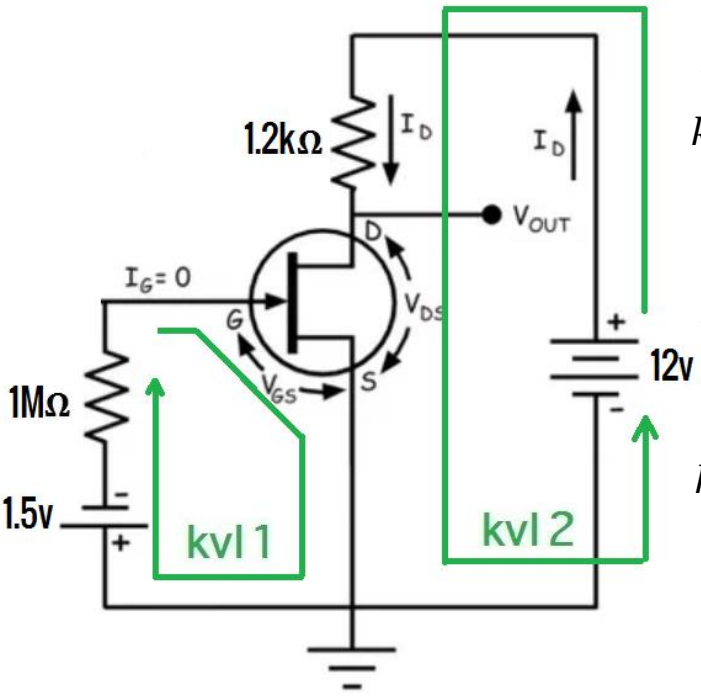
$$kvl2: -V_{BB} + R_D(I_D) + V_{DS} = 0$$

$$V_{DS} = V_{BB} - R_D(I_D)$$

$$V_S = 0 \quad , \quad V_D = V_{DS}$$

معمولا خط بار DC ترانزیستور معادله خطی I_D بر حسب V_{GS} می‌باشد.

مثال: مشخصات نقطه کار را بدست آورید. $I_{DSS} = 12mA \;\; , \;\; V_P = -4$



$$I_G = 0$$

$$kvl1: +V_{GG} + R_G(I_G) + V_{GS} = 0$$

$$\Longrightarrow V_{GS} = -V_{GG} \longrightarrow V_{GS} = -1.5$$

$$I_D = I_{DSS}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 = 12m\left(1 - \frac{-1.5}{-4}\right)^2$$

$$\Longrightarrow I_D = 4.69mA$$

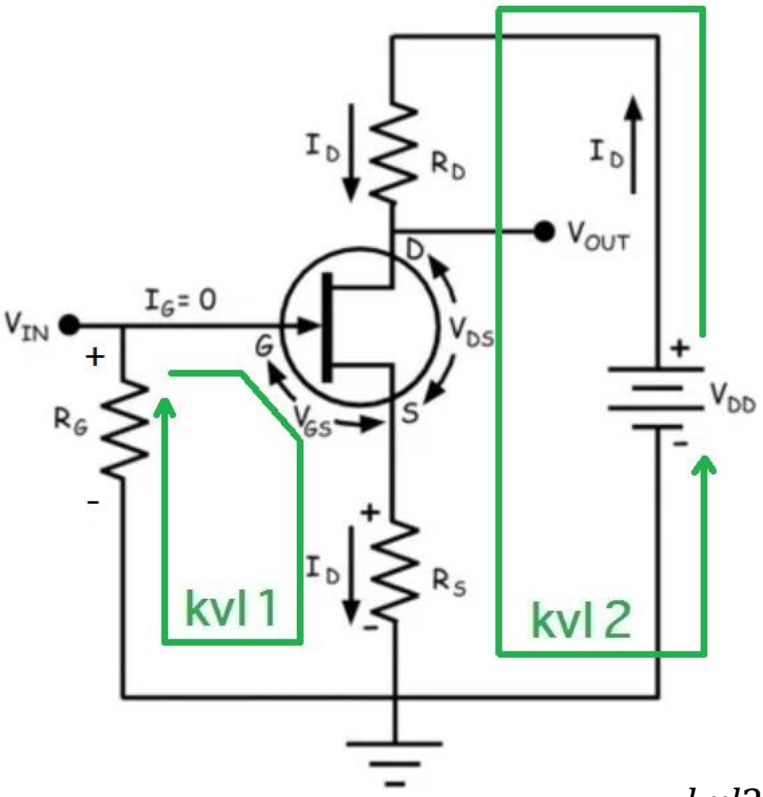
$$kvl2: -V_{BB} + R_D(I_D) + V_{DS} = 0$$

$$\Longrightarrow -12 + 1.2k(4.69m) + V_{DS} = 0$$

$$V_{DS} = 12 - 5.628 = 6.372v$$

$$V_S = 0 \quad , \quad V_D = V_{DS} = 6.372v$$

بایاس سرخود یا اتوماتیک



برای محاسبه V_{GS} باید $kvl1$ در ورودی زد

$$I_G = 0 \quad , \quad I_D = I_S$$

$$kvl1: -R_G(I_G) + V_{GS} + R_S(I_D) = 0$$

$$\Longrightarrow V_{GS} = -R_S(I_D)$$

***محاسبه I_D**

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

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

از حل معادله بالا I_D محاسبه می‌شود.

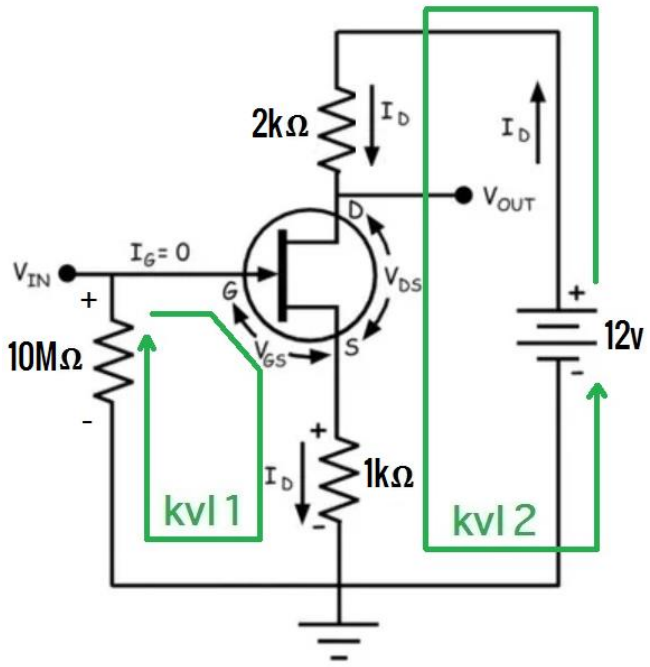
* برای محاسبه V_{DS} باید $kvl2$ در خروجی زد

$$kvl2: -V_{BB} + R_D(I_D) + V_{DS} + R_S(I_D) = 0$$

$$V_{DS} = V_{BB} - R_D(I_D) - R_S(I_D)$$

$$V_S = R_S(I_D) \quad , \quad V_D = V_{DS} + V_S \quad , \quad V_{GS} = -V_S$$

مثال: مشخصات نقطه کار را بدست آورید. $I_{DSS} = 10mA \quad , \quad V_P = -4$



$$I_G = 0 \quad , \quad I_D = I_S$$

$$kvl1: -R_G(I_G) + V_{GS} + R_S(I_D) = 0$$

$$\Longrightarrow V_{GS} = -1k(I_D)$$

*محاسبه I_D

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

$$\Longrightarrow I_D = 10mA\left(1 - \frac{(-1kI_D)}{-4}\right)^2$$

برای راحت‌تر شدن محاسبات I_D را از واحد A به mA $(10^{-3}A)$ تبدیل می‌کنیم، پس دو طرف تساوی را در (10^3) ضرب می‌کنیم.(واحد کوچک،عدد بزرگ) حال مقدار محاسبه شده I_D برحسب mA است.

$$\Rightarrow I_D = 10\left(1 - \frac{(-1I_D)}{-4}\right)^2 \Rightarrow \frac{(-1kI_D)}{-4} = \frac{1I_D}{4} = \frac{I_D}{4}$$

$$(a-b)^2 = a^2 - 2ab + b^2$$

$$\Rightarrow I_D = 10\left(1^2 - 2\times 1\frac{I_D}{4} + (\frac{I_D}{4})^2\right) \rightarrow I_D = 10\left(1 - \frac{2I_D}{4} + \frac{{I_D}^2}{16}\right)$$

$$\Rightarrow I_D = 10 - 5I_D + \frac{10}{16}{I_D}^2 \rightarrow 0 = \frac{10}{16}{I_D}^2 - 6I_D + 10$$

$$\xrightarrow{\times \frac{16}{10}} {I_D}^2 - 9.6I_D + 16 = 0 \Rightarrow \Delta = b^2 - 4ac \rightarrow I_{D_1}, I_{D_2} = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a}$$

$$\Rightarrow \Delta = b^2 - 4ac = (-9.6)^2 - 4\times 1\times 16 = 92.16 - 64 = 28.16$$

$$\Rightarrow I_{D_1}, I_{D_2} = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a} = \frac{-(-9.6) \pm \sqrt{28.16}}{2\times 1} = \begin{cases} I_{D_1} = 7.45mA \\ I_{D_2} = 2.14mA \end{cases}$$

حال باید دید کدام I_D قابل قبول است. (شرطی که ترانزیستور در ناحیه فعال باشد)

$$V_{GS} \geq V_P \rightarrow |V_{GS}| \leq |V_P|$$

$$V_{GS} \geq V_P \rightarrow V_{GS} = -1k(I_D) \geq -4 \rightarrow -2.14 \geq -4$$

$$\begin{cases} I_{D_1} = 7.45mA & \text{غ ق ق} \\ I_{D_2} = 2.14mA & \text{ق ق} \end{cases}$$

* برای محاسبه $\boldsymbol{V_{DS}}$ باید $\boldsymbol{kvl2}$ در خروجی زد

$$kvl2: -12 + 2k(2.14m) + V_{DS} + 1k(2.14m) = 0$$

$$V_{DS} = 12 - 4.28 - 2.14 \Rightarrow V_{DS} = 5.58$$

$$\Rightarrow V_{DS} \geq 0$$

$$V_S = R_S(I_D) = 1k(2.14m) = 2.14v \quad , \quad V_{GS} = -V_S = -2.14v$$

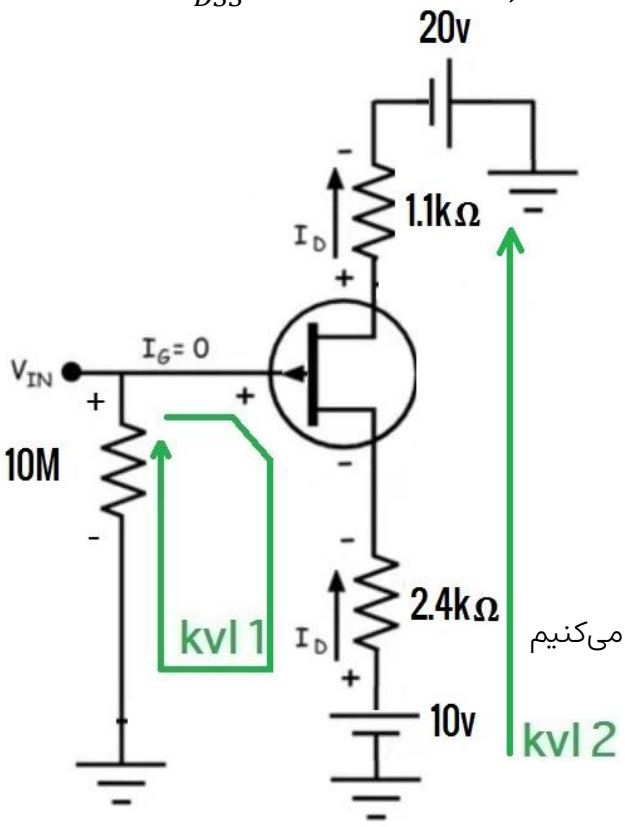
$$V_D = V_{DS} + V_S = 5.58 + 2.14 = 7.72v$$

نکته بسیار مهم

$$0 \leq I_D \leq I_{DSS} \quad , \quad |V_{GS}| \leq |V_P|$$

$$\begin{cases} N \text{ کانال } V_{DS} \geq 0 \\ P \text{ کانال } V_{DS} \leq 0 \end{cases}$$

مثال: مشخصات نقطه کار را بدست آورید. $V_P = 8$, $I_{DSS} = 20mA$



$$I_G = 0 \quad , \quad I_D = I_S$$

$$kvl1: -R_G(I_G) + V_{GS} - R_S(I_D) + 10 = 0$$

$$kvl1: -10M(I_G) + V_{GS} - 2.4k(I_D) + 10 = 0$$

$$\Longrightarrow V_{GS} = 2.4k(I_D) - 10$$

*محاسبه I_D

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

$$\Longrightarrow I_D = 20mA\left(1 - \frac{2.4k(I_D) - 10}{8}\right)^2$$

برای راحت‌تر شدن محاسبات I_D را از واحد A به mA $(10^{-3}A)$ تبدیل می‌کنیم

$$\Longrightarrow I_D = 20\left(1 - \frac{2.4(I_D) - 10}{8}\right)^2$$

$$\Longrightarrow I_D = 20(1 + 1.25 - 0.3I_D)^2 \Longrightarrow I_D = 10(2.25 - 0.3I_D)^2$$

$$(a-b)^2 = a^2 - 2ab + b^2$$

$$\Longrightarrow I_D = 20(2.25^2 - 2 \times 2.25 \times 0.3I_D + (0.3I_D)^2)$$

$$\Longrightarrow I_D = 20\left(5.0625 - 1.35I_D + 0.09{I_D}^2\right)$$

$$\Longrightarrow I_D = 101.25 - 27I_D + 1.8{I_D}^2 \rightarrow 0 = 1.8{I_D}^2 - 28I_D + 101.25$$

$$1.8{I_D}^2 - 28I_D + 101.25 = 0 \Longrightarrow \Delta = b^2 - 4ac \rightarrow I_{D_1}, I_{D_2} = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a}$$

$$\Longrightarrow \Delta = b^2 - 4ac = (-28)^2 - 4 \times 1.8 \times 101.25 = 784 - 729 = 55$$

$$\Longrightarrow I_{D_1}, I_{D_2} = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a} = \frac{-(-28) \pm \sqrt{55}}{2 \times 1.8} = \begin{cases} I_{D_1} = 9.83mA \\ I_{D_2} = 5.71mA \end{cases}$$

حال باید دید کدام I_D در شرطی که ترانزیستور در ناحیه فعال باشد صدق می‌کند.

$$V_{GS} \geq V_P \rightarrow |V_{GS}| \leq |V_P|$$

$$\Longrightarrow |V_{GS}| \leq |V_P| \rightarrow V_{GS} = 2.4k(9.83mA) - 10 = 23.59 - 10 = 13.59$$

$$\Longrightarrow |V_{GS}| \leq |V_P| \rightarrow V_{GS} = 2.4k(5.71mA) - 10 = 13.70 - 10 = 3.7$$

$$\begin{cases} I_{D_1} = 9.83mA & \text{غ ق ق} \\ I_{D_2} = 5.71mA & \text{ق ق} \end{cases}$$

* برای محاسبه $\boldsymbol{V_{DS}}$ باید $\boldsymbol{kvl2}$ در خروجی زد

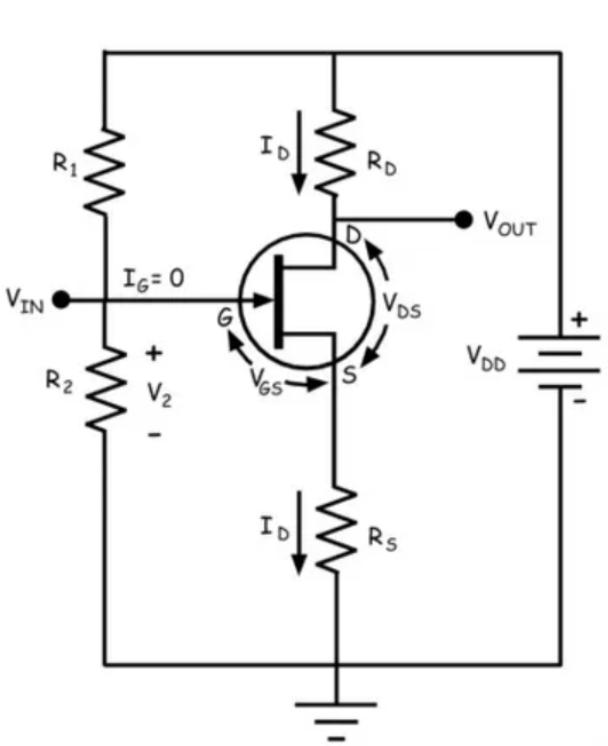
$$kvl2: -10 + R_S(I_D) - V_{DS} + R_D(I_D) - 20 = 0$$

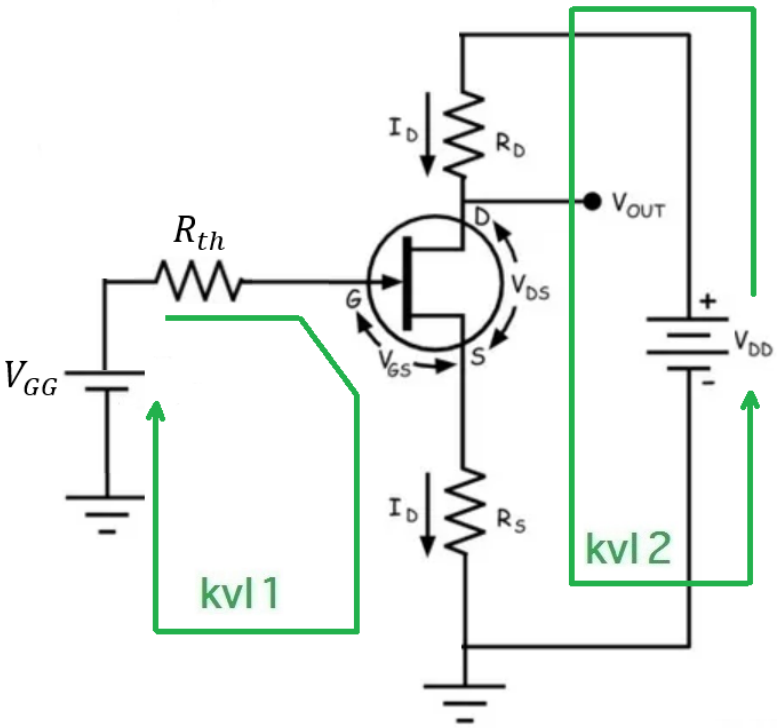
$$kvl2: -10 + 2.4k(5.71m) - V_{DS} + 1.1k(5.71m) - 20 = 0$$

$$\Longrightarrow V_{DS} = -10 + 13.704 + 6.281 - 20 \Longrightarrow V_{DS} = -30 + 19.985 \rightarrow V_{DS} = -10.015$$

$$\Longrightarrow P \text{ کانال } \quad V_{DS} \leq 0$$

بایاس مقسم ولتاژ





$$\begin{cases} R_{th} = R_{th} = \dfrac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} \quad , \quad I_G = 0 \quad \text{نیاز محاسبه نیست} \\ V_{R_2} = V_{GG} = \dfrac{V_{DD} \times R_2}{R_1 + R_2} \end{cases}$$

$$kvl1: -V_{GG} + R_{th}(I_G) + V_{GS} + R_S(I_D) = 0$$

$$\Longrightarrow V_{GS} = V_{GG} - R_S(I_D)$$

***محاسبه I_D**

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

از حل معادله بالا I_D محاسبه می‌شود.

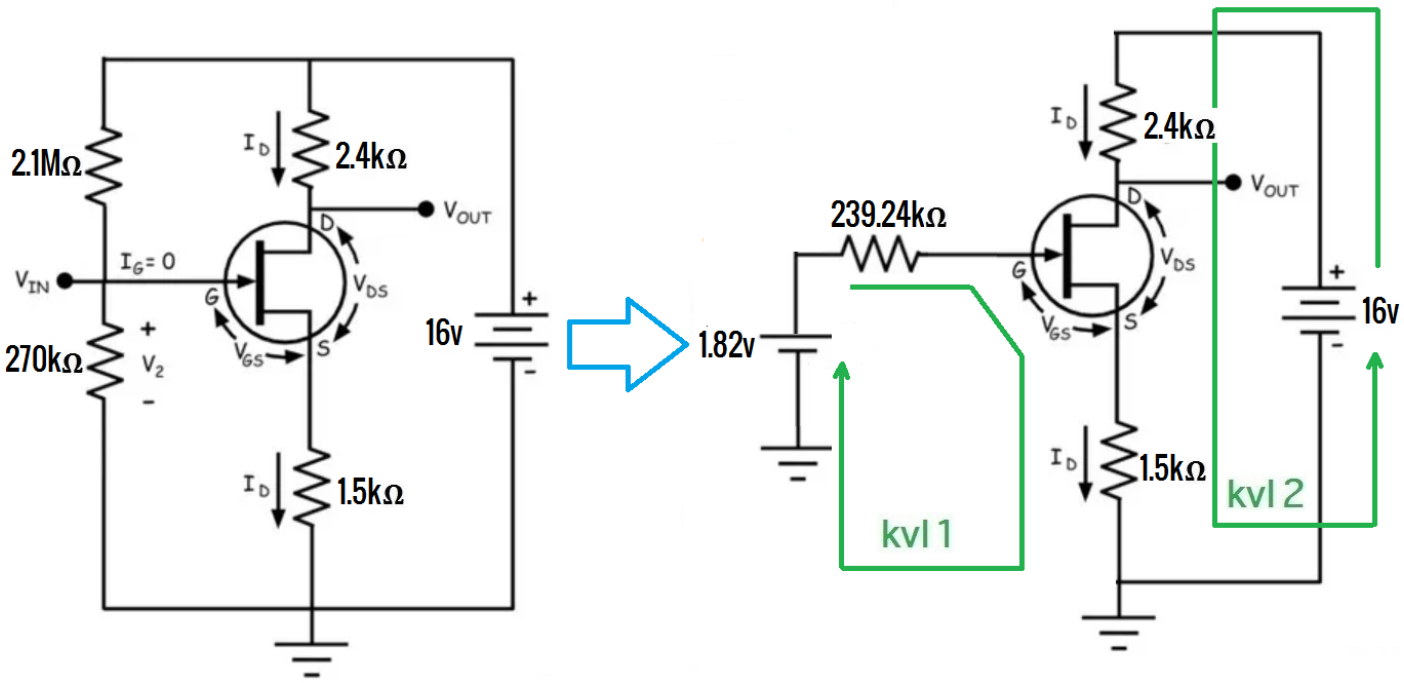
* برای محاسبه $\boldsymbol{V_{DS}}$ باید $\boldsymbol{kvl2}$ در خروجی زد

$$kvl2: -V_{BB} + R_D(I_D) + V_{DS} + R_S(I_D) = 0$$

$$V_{DS} = V_{BB} - R_D(I_D) - R_S(I_D)$$

$$V_S = R_S(I_D) \quad , \quad V_D = V_{DS} + V_S \quad , \quad V_{GS} = V_{GG} - R_S(I_D)$$

مثال: مشخصات نقطه کار را بدست آورید و نمودار آن را نیز رسم کنید. $(I_{DSS} = 8mA\ , V_P = |4|)$



$$\begin{cases} R_{th} = R_{th} = \dfrac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} = \dfrac{2.1M \times 270k}{2.1M \times 270k} = 239.24k\Omega \quad , \quad I_G = 0 \\ V_{R_2} = V_{GG} = \dfrac{V_{DD} \times R_2}{R_1 + R_2} = \dfrac{16 \times 270k}{2.1M \times 270k} = 1.82v \end{cases}$$

نیاز محاسبه نیست

$$kvl1: -1.82 + 239.24k(I_G) + V_{GS} + 1.5k(I_D) = 0$$

$$\Longrightarrow V_{GS} = 1.82 - 1.5k(I_D)$$

***محاسبه I_D**

$$I_D = I_{DSS}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 \Longrightarrow I_D = 8mA\left(1 - \frac{(1.82 - 1.5kI_D)}{-4}\right)^2$$

برای راحت‌تر شدن محاسبات I_D را از واحد A به mA $(10^{-3}A)$ تبدیل می‌کنیم

$$\Longrightarrow I_D = 8\left(1 - \frac{(1.82 - 1.5I_D)}{-4}\right)^2 \Longrightarrow I_D = 8\left(1 - \frac{(1.82 - 1.5I_D)}{-4}\right)^2$$

$$\Longrightarrow I_D = 8(1 + 0.455 + 0.375I_D)^2 \Longrightarrow I_D = 8(1.455 + 0.375I_D)^2$$

$$\rightarrow (a-b)^2 = a^2 - 2ab + b^2 \rightarrow I_D = 8(1.455^2 - 2 \times 1.455 \times 0.375I_D + 0.375{I_D}^2)$$

$$\Longrightarrow I_D = 8(2.117025 - 1.0125I_D + 0.140625{I_D}^2)$$

$$\Longrightarrow I_D = 16.9362 - 8.1I_D + 1.125{I_D}^2 \Longrightarrow 0 = 1.125{I_D}^2 - 9.1I_D + 16.9362$$

$$\Longrightarrow 1.125{I_D}^2 - 9.1I_D + 16.9362 = 0 \Longrightarrow \Delta = b^2 - 4ac \rightarrow I_{D_1}, I_{D_2} = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a}$$

$$\Rightarrow \Delta = (-9.1)^2 - 4 \times 1.125 \times 16.9362 = 82.81 - 76.2129 = 6.5971$$

$$\Rightarrow I_{D_1}, I_{D_2} = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a} = \frac{-(-9.1) \pm \sqrt{6.5971}}{2 \times 1.125} = \begin{cases} I_{D_1} = 5.185mA \\ I_{D_2} = 2.902mA \end{cases}$$

حال باید دید کدام I_D در شرطی که ترانزیستور در ناحیه فعال باشد صدق می‌کند.

$$V_{GS} \geq V_P \rightarrow |V_{GS}| \leq |V_P|$$

$$\Rightarrow |V_{GS}| \leq |V_P| \rightarrow V_{GS} = 1.82 - 1.5k(I_D) = 1.82 - 1.5k(5.185mA) = -5.9575v$$

$$\Rightarrow |V_{GS}| \leq |V_P| \rightarrow V_{GS} = 1.82 - 1.5k(I_D) = 1.82 - 1.5k(2.902mA) = --2.533v$$

$$\begin{cases} I_{D_1} = 5.185mA & \text{غ ق ق} \\ I_{D_2} = 2.902mA & \text{ق ق} \end{cases}$$

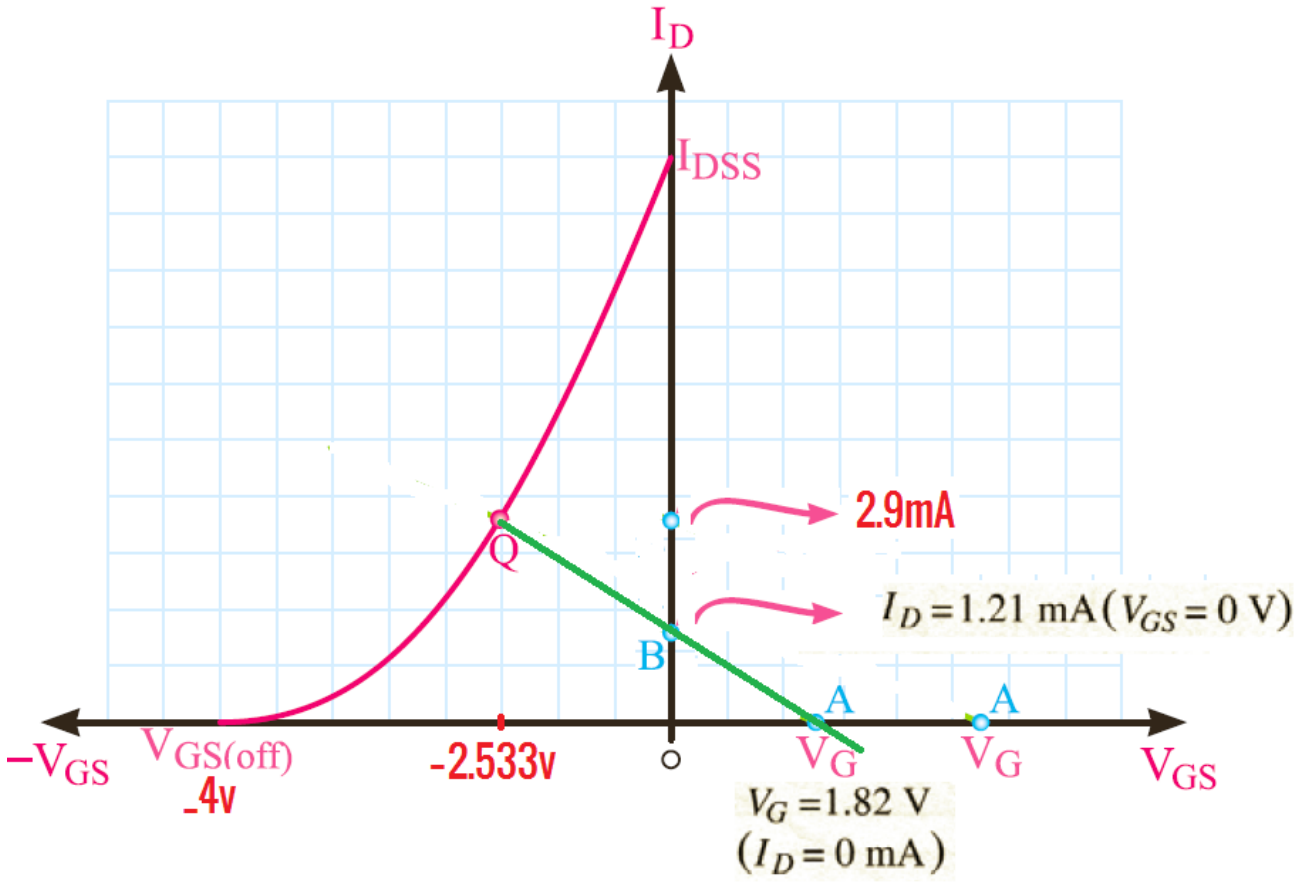
* برای محاسبه $\boldsymbol{V_{DS}}$ باید $\boldsymbol{kvl2}$ در خروجی زد

$$kvl2: -V_{BB} + R_D(I_D) + V_{DS} + R_S(I_D) = 0$$

$$kvl2: -16 + 2.4k(2.902mA) + V_{DS} + 1.5k(2.902mA) = 0$$

$$V_{DS} = 16 - 6.9648 - 4.353 \Rightarrow V_{DS} = 4.6822v$$

$$\Rightarrow N \text{ کانال } V_{DS} \geq 0$$



پایان جلسه دوازدهم

روزگار خوشی را برای شما آرزومندم.

محمد اعرابیان