

الکٹرونیک ۱

جلسہ پنجم

مدرس : سجاد قراگوزلو حصاری

دانشکده فنی انقلاب اسلامی

ترانزیستورهای اثر میدانی

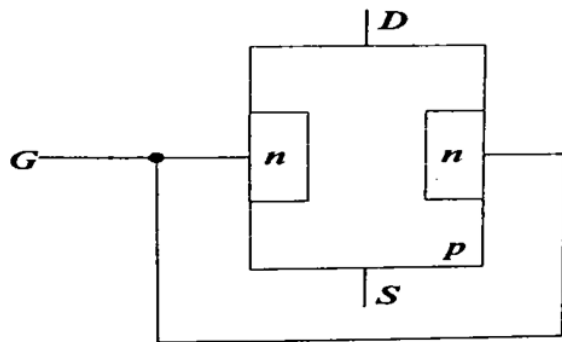
قسمت DC

FET یا ترانزیستور اثر میدانی یک عنصر کنترل شده با ولتاژ می باشد که در آن عامل ایجاد کننده جریان الکترون ها (در نوع n کانال) و حفره ها (در نوع P کانال) هستند.

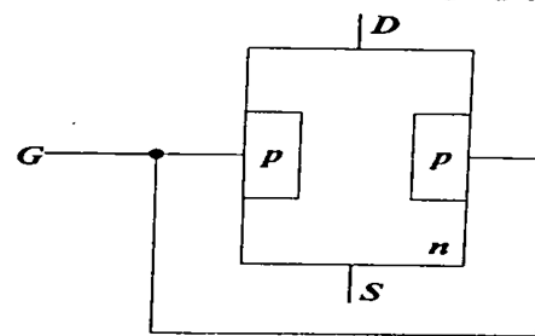
انواع ترانزیستورهای اثر میدانی

۱- کانال n	} JFET ۱
۲- کانال P	
۱- نوع تهی (D - MOS)	} MOSFET ۲
۲- کانال P	
۱- کانال n	
۲- نوع افزایشی (E - MOS)	
۲- کانال P	

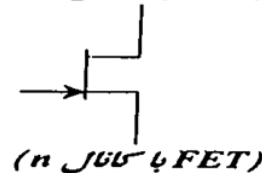
ساختمان و نحوه بایاس مناسب جهت عملکرد JFET

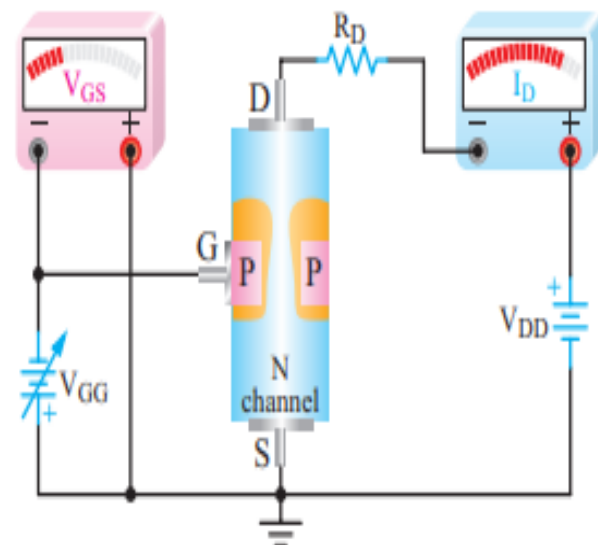
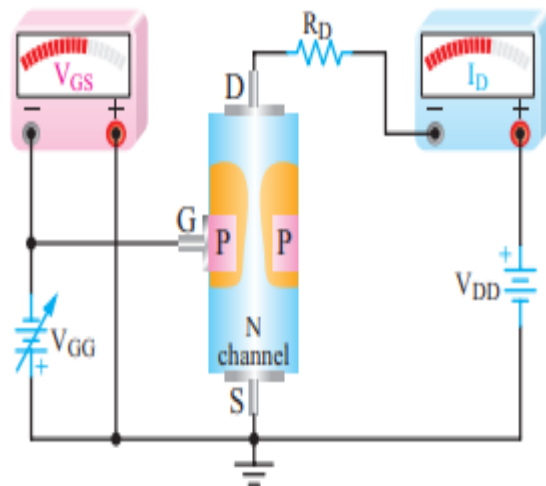
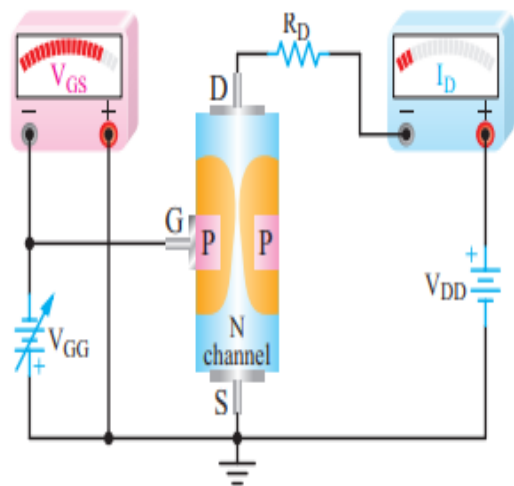
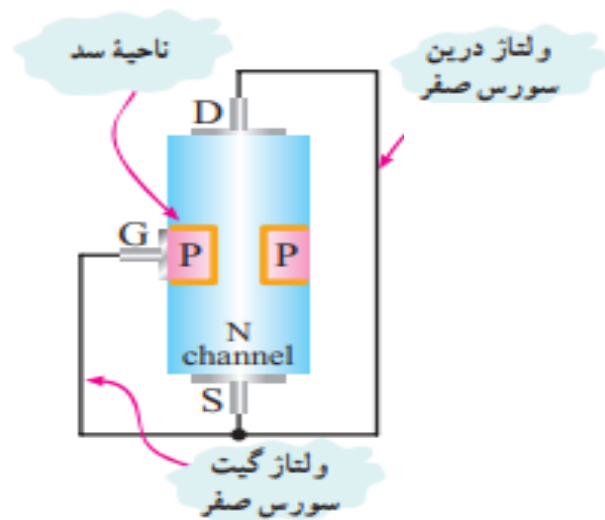
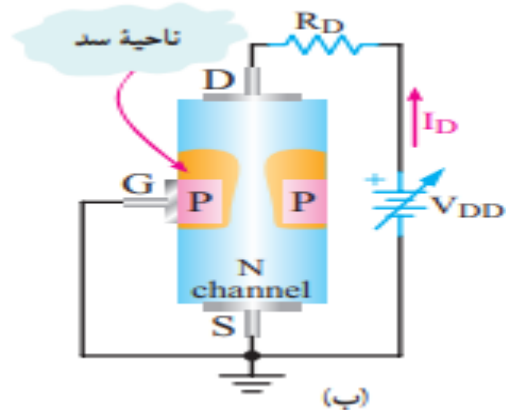
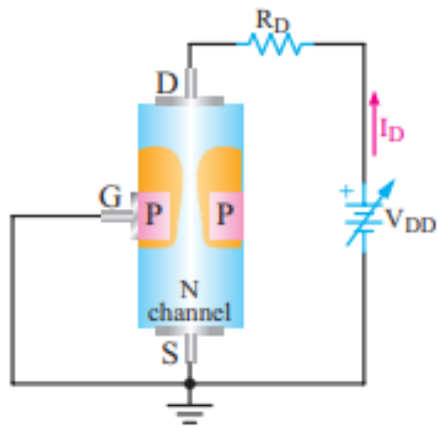


(FET با کانال n)



(FET با کانال p)





نحوه عملکرد JFET

در یک JFET n کانال با اعمال ولتاژ مثبتی در بین پایه‌های D و S مقداری جریان از D به سمت S جاری می‌شود. حال با اعمال V_{GS} منفی اتصال‌های (p - n) درون ترانزیستور به صورت معکوس بایاس می‌شوند و ناحیه تخلیه اطراف نواحی P ایجاد می‌شود. حال با افزایش V_{GS} به صورت منفی ناحیه تخلیه عریض‌تر می‌شود و مقاومت کانال زیاد و مقدار جریان عبوری از کانال کم می‌شود. در صورت وجود V_{DS} به مقدار کم عرض کانال تقریباً یکنواخت می‌باشد اما با افزایش V_{DS} نیز مقدار I_D افزایش دارد. همچنین با افزایش V_{GS} به صورت منفی می‌توان شرایطی ایجاد کرد که کانال عبور جریان کاملاً بسته شود و مقدار I_D صفر شود. لازم به ذکر است که افزایش V_{DS} از حد معینی باعث می‌شود که پدیده شکست بهمنی در JFET اتفاق بیافتد و جریان I_D به سرعت زیاد شود که در این حالت به ترانزیستور آسیب وارد می‌شود.

تعاریف اولیه

۱) ولتاژ بحرانی (Pinch - off)

مقدار V_{GS} که اگر به JFET اعمال شود باعث مسدود شدن کامل کانال می‌شود و در این حالت $I_D = 0$ می‌شود. لازم به ذکر است که ولتاژ بحرانی، ولتاژ تنجیدگی یا ولتاژ آستانه نیز نامیده می‌شود.

۲) جریان درین سورس اشباع (I_{DSS})

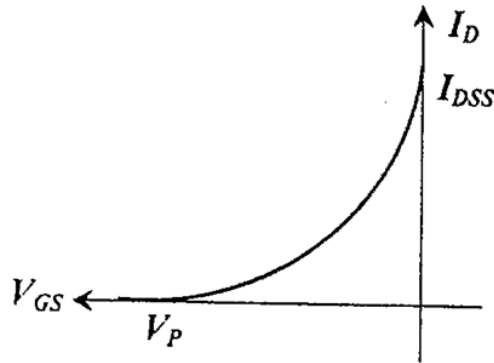
مقدار جریانی است که اگر دو شرط زیر برقرار باشد از کانال می‌گذرد و حداکثر مقدار مجاز جریان کانال است.

$$\begin{cases} V_{GS} = 0 \\ |V_{DS}| = |V_P| \end{cases} \Rightarrow I_D = I_{DSS}$$

مشخصات JFET از نوع n کانال

الف) منحنی مشخصه انتقالی :

در این منحنی تغییرات I_D بر حسب تغییرات V_{GS} رسم گردیده است مقدار V_P همان ولتاژ آستانه یا تنجیدگی کانال است و I_{DSS} همان حداکثر جریان عبوری از کانال است که جریان اشباع درین سورس می باشد.



$$g_m = \left. \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} \right|_{V_{DS} = \text{cte}}$$

شیب منحنی مشخصه انتقالی به صورت روبرو تعریف می شود:

لازم به ذکر است که شیب این منحنی یا g_m با توجه به حرکت نقطه کار در روی منحنی عوض می شود.

نکات مهم

در یک FET n کانال $V_{GS} < 0$ و $V_P < 0$ و $V_{DS} > 0$ می باشد همچنین جریان از سمت درین به سورس جاری است و همچنین حامل های اکثریت الکترون ها هستند.

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

معادله منحنی مشخصه انتقالی به صورت روبرو است:

دقت شود که مقادیر V_{GS} و V_P با علامت مربوطه در معادله لحاظ شوند.

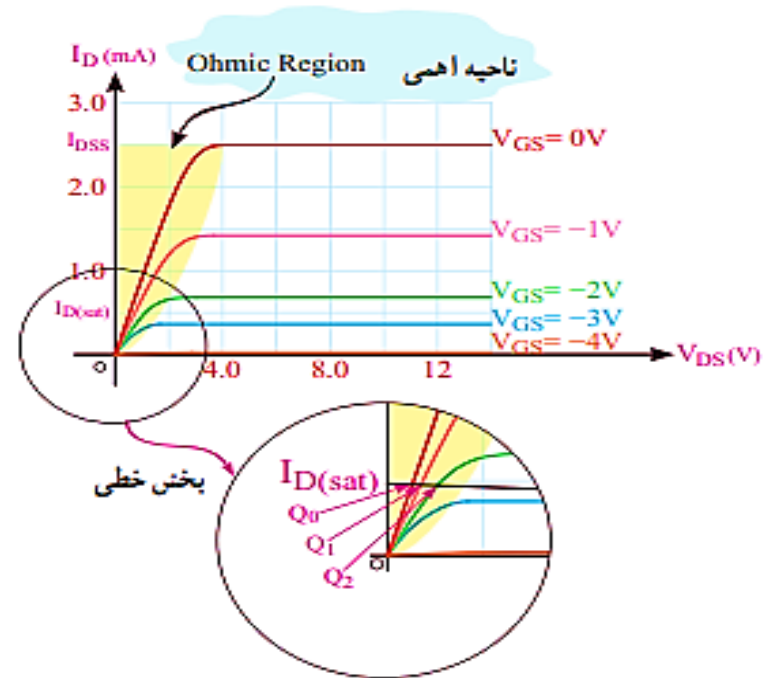
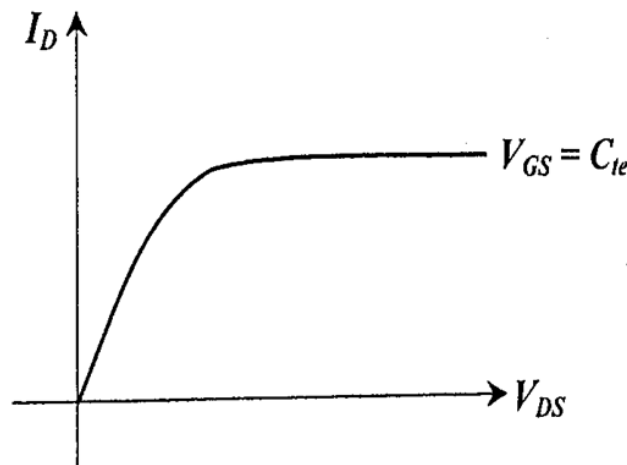
$$\begin{cases} \text{if } V_{GS} = 0 \Rightarrow I_D = I_{DSS} \\ \text{if } |V_{GS}| = |V_P| \Rightarrow I_D = 0 \end{cases}$$

با توجه به منحنی و معادله مربوطه داریم :

ب) منحنی مشخصه خروجی :

اگر تغییرات I_D بر حسب تغییرات V_{DS} رسم شود منحنی مشخصه خروجی حاصل می شود که در این حالت V_{GS} ثابت بوده است. اما با تغییرات V_{GS} منحنی های مختلفی حاصل می شود.

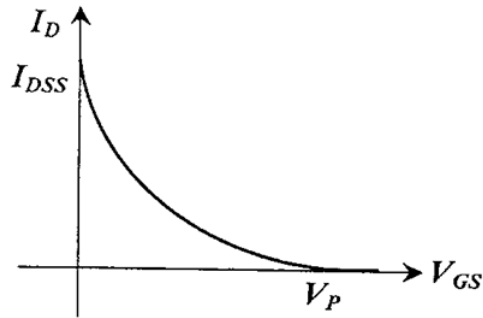
$$\begin{cases} V_{DS} = |V_P| \\ V_{GS} = 0 \end{cases} \Rightarrow I_D = I_{DSS}$$



ج) منحنی مشخصه ورودی :

با توجه به معکوس بایاس بودن اتصال های $p - n$ درون JFET مقدار جریان ورودی به گیت صفر است لذا با توجه به عدم وجود جریان I_G منحنی مشخصه ورودی برای JFET تعریف نمی شود.

مشخصات JFET از نوع p کانال



الف) منحنی مشخصه انتقالی :

در این منحنی نیز مانند نوع n کانال تغییرات I_D بر حسب V_{GS} رسم می‌شود. در این منحنی V_P همان ولتاژ آستانه یا (Pinch - off) است و بر خلاف نوع n کانال دارای مقداری مثبت می‌باشد و همچنین I_{DSS} همان جریان اشباع درین سورس است.

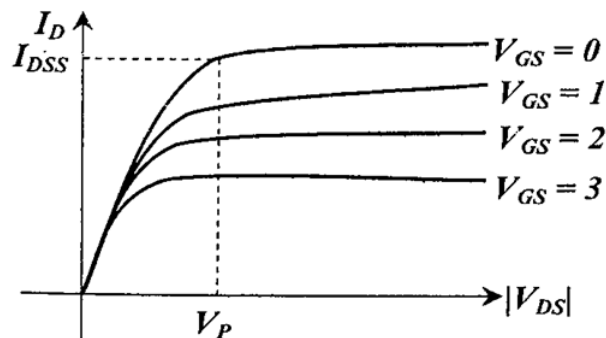
نکات مهم

در یک FET با کانال p مقادیر $V_{GS} > 0$ و $V_P > 0$ و $V_{DS} < 0$ می‌باشد و همچنین جریان از سمت سورس به درین جاری است و حامل‌های اکثریت حفره‌ها هستند.

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

معادله منحنی مشخصه انتقالی نیز به همان صورت گفته شده در نوع n کانال است.

لازم به ذکر است مقادیر V_P و V_{GS} در این حالت با علامت مربوطه یعنی $\oplus$ در معادله لحاظ می‌شوند.



ب) منحنی مشخصه خروجی :

در این حالت نیز تغییرات I_D بر حسب تغییرات $|V_{DS}|$ رسم شده است که به ازای V_{GS} های مثبت مختلف منحنی‌های مختلفی ایجاد شده است.

$$\begin{cases} |V_{DS}| = V_P \\ V_{GS} = 0 \end{cases} \Rightarrow I_D = I_{DSS}$$

ج) منحنی مشخصه ورودی :

با توجه به صفر بودن I_G لذا برای FET کانال P نیز منحنی مشخصه ورودی تعریف نمی‌شود.

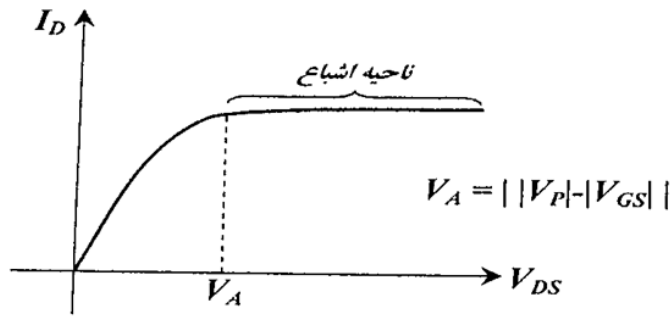
نواحی کار JFET

۱) ناحیه اشباع یا تنجیدگی (فعال) :

در این ناحیه JFET به عنوان تقویت کننده به کار گرفته می شود. در این حالت V_{DS} به اندازه کافی بزرگ می باشد و با افزایش آن I_D تقریباً ثابت است. شرط اشباع برای JFET برای هر دو نوع کانال n و p به صورت زیر است:

$$|V_{DS}| \geq |V_P| - |V_{GS}|$$

لازم به ذکر است که اگر شرط روبرو برقرار باشد JFET در مرز اشباع کار می کند. $|V_{DS}| = |V_P| - |V_{GS}|$



۲) ناحیه تریودی :

در این ناحیه JFET به صورت یک مقاومت متغیر با ولتاژ (VCR) کار می کند و مقاومت بین پایه ها درین و سورس به ولتاژ اعمالی V_{GS} بستگی داد. لازم به ذکر است که با افزایش V_{GS} مقاومت بین پایه های D و S زیاد می شود.

$$r_{ds} = \frac{V_{DS}}{I_D}, \quad \text{if } |V_{GS}| \uparrow \Rightarrow r_{ds} \uparrow$$

همچنین اگر $V_{GS} = 0$ باشد r_{ds} کمترین مقدار خود را دارد. شرط بودن یک JFET

$$|V_{DS}| < |V_P| - |V_{GS}|$$

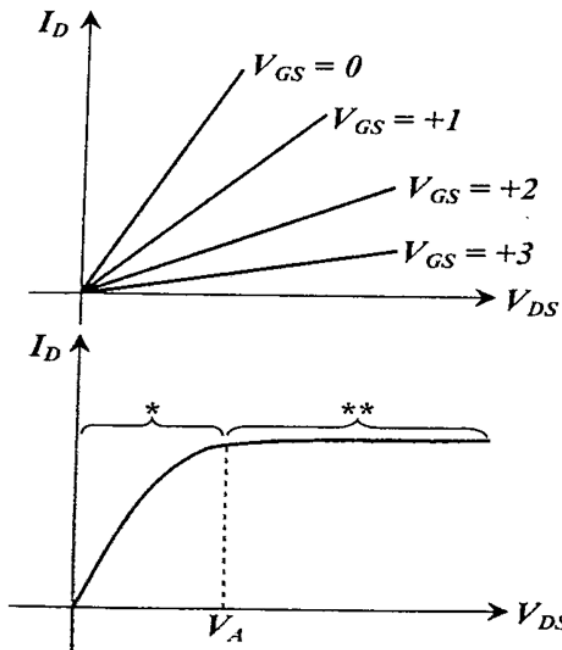
در ناحیه تریودی به صورت روبرو است :

دقت شود که در ناحیه تریودی مقدار ولتاژ درین سورس بسیار کم می باشد.

$$V_A = |V_P| - |V_{GS}|$$

ناحیه اشباع : **

ناحیه تریودی : *



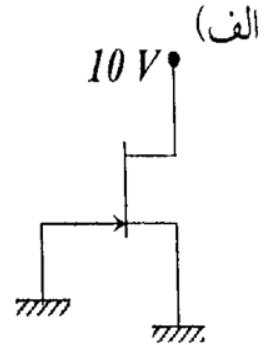
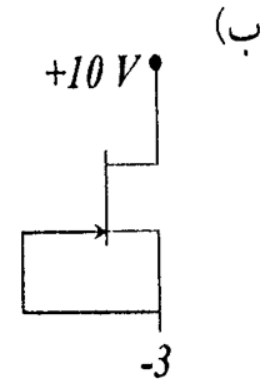
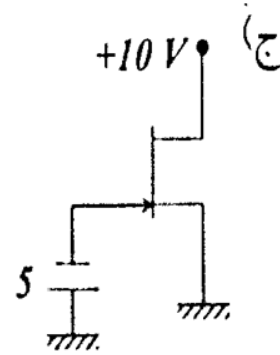
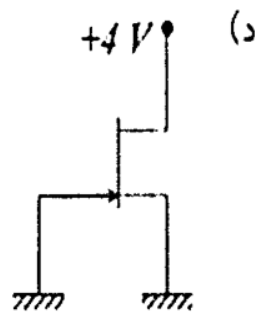
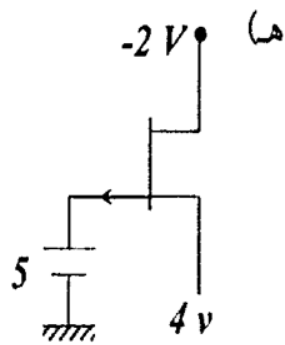
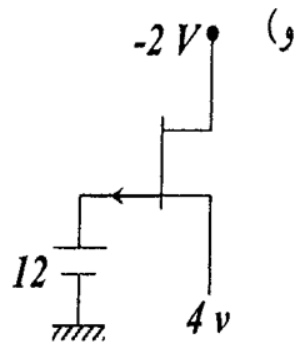
۳) ناحیه قطع :

در ناحیه قطع کانال عبور جریان کاملاً بسته شده است و در این حالت تغییرات V_{DS} باعث ایجاد یا تغییرات جریان نمی شود. شرط بودن

$$\text{if } |V_{GS}| \geq |V_P| \Rightarrow \text{ناحیه قطع} \Rightarrow I_D = 0$$

یک JFET در ناحیه قطع به صورت روبرو است :

مثال : برای JFET های زیر ناحیه کاری هر کدام را به دست آورید. ($|V_P| = 4$)



پاسخ: ☒

ب)
$$\begin{cases} V_{GS} = 0 \\ V_{DS} = 13 \end{cases} \quad \begin{cases} |V_{DS}| > |V_P| - |V_{GS}| \\ |13| > |4| \end{cases}$$

 $\Rightarrow$ ناحیه اشباع

د)
$$\begin{cases} V_{DS} = 4 \\ V_{GS} = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} |V_{DS}| > |V_P| - |V_{GS}| \\ |4| = |4| \end{cases}$$

 $\Rightarrow$ مرز ناحیه اشباع

و)
$$\begin{cases} V_{DS} = -6 \\ V_{GS} = +8 \end{cases} \quad \begin{cases} |V_{GS}| > |V_P| \\ |8| > |4| \end{cases}$$

 $\Rightarrow$ ناحیه قطع

الف)
$$\begin{cases} V_{GS} = 0 \\ V_{DS} = 10 \end{cases} \quad \begin{cases} |V_{DS}| > |V_P| - |V_{GS}| \\ |10| > |4| \end{cases}$$

 $\Rightarrow$ ناحیه اشباع

ج)
$$\begin{cases} V_{GS} = -5 \\ V_{DS} = 10 \end{cases} \quad \begin{cases} |V_{GS}| \geq |V_P| \\ |-5| \geq |4| \end{cases}$$

 $\Rightarrow$ ناحیه قطع

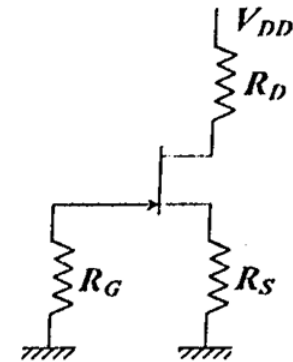
ه)
$$\begin{cases} V_{DS} = -6 \\ V_{GS} = 11 \end{cases} \quad \begin{cases} |V_{DS}| > |V_P| - |V_{GS}| \\ |-6| > |4| - |11| \end{cases}$$

 $\Rightarrow$ ناحیه اشباع

انواع مدارات بایاسینگ JFET

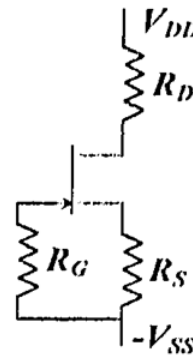
(۱) بایاسینگ سرخود :

(الف)



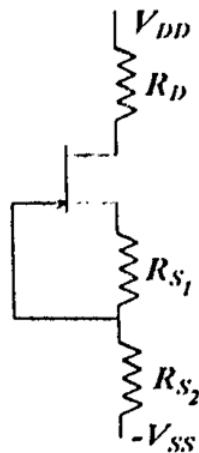
$$V_{GS} = -R_S I_D$$

(ب)



$$V_{GS} = -R_S I_D$$

(ج)



$$V_{GS} = -R_{S1} I_D$$

مراحل تحلیل :

۱- ابتدا مقدار V_{GS} را بر حسب R_S و I_D بدست می آوریم . لازم به ذکر است که افت ولتاژ روی مقاومتهای سری شده با گیت برابر

$$\begin{cases} V_G = 0 \\ V_S = I_D \cdot R_S \end{cases} \Rightarrow V_{GS} = V_G - V_S = -I_D \cdot R_S$$

صفر است. به طور مثال برای مدار (الف) داریم :

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

۲- حال مقدار V_{GS} را در معادله جریانی I_D (معادله شاکلی) می گذاریم.

حال با توجه به مشخص بودن مقادیر R_S و I_{DSS} و V_P از حل معادله درجه دوم مقادیر I_D بدست می آید حال از دو جواب بدست

$$\begin{cases} I_D < I_{DSS} \\ |V_{GS}| < |V_P| \end{cases}$$

آمده هر کدام که شرط روبرو را برقرار کند قابل قبول است .

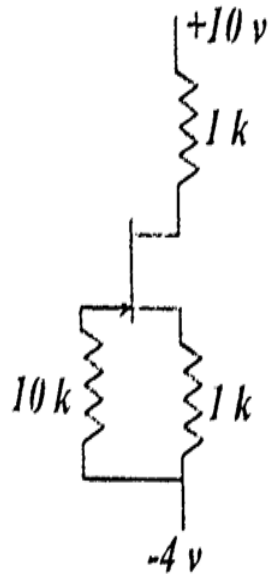
لازم به ذکر است که از تست گزینه ها در معادله درجه دوم نیز می توان به گزینه صحیح دست یابی داشت اما باید برای آن شرط بالا حتماً

$$\begin{cases} V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_S + R_D) \\ V_S = R_S \cdot I_D \end{cases}$$

چک شود. حال با داشتن I_D مقادیر V_S و V_{DS} به صورت روبرو محاسبه می شود.

مثال: در مدار زیر مقدار V_{DS} کدام است؟

پاسخ: ☒



$$I_{DSS} = 4 \text{ mA}$$

$$V_P = -2$$

$$\begin{cases} V_G = -4 \\ V_S = 1K \times I_D - 4 \end{cases} \Rightarrow V_{GS} = -I_D \cdot 1K$$

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

$$\Rightarrow \begin{cases} I_{D1} = 1 \text{ mA} \Rightarrow V_{GS} = -1 & \text{قق} \\ I_{D2} = 4 \text{ mA} \Rightarrow V_{GS} = -4 & \text{غقق} \end{cases} \Rightarrow I_D = 1 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow V_{DS} = V_{DD} + V_{SS} - I_D(R_S + R_D) \Rightarrow V_{DS} = 10 + 4 - 1(1 + 1) = 12 \text{ V}$$

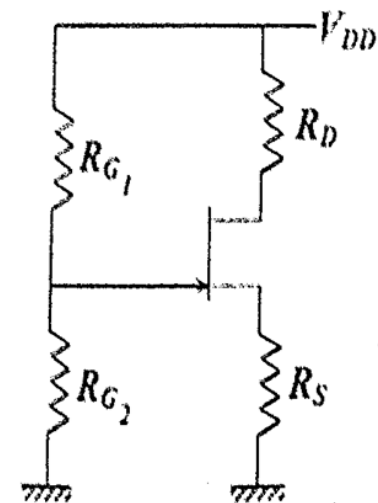
۲) بایاسینگ مقسم ولتاژی :

مراحل تحلیل :

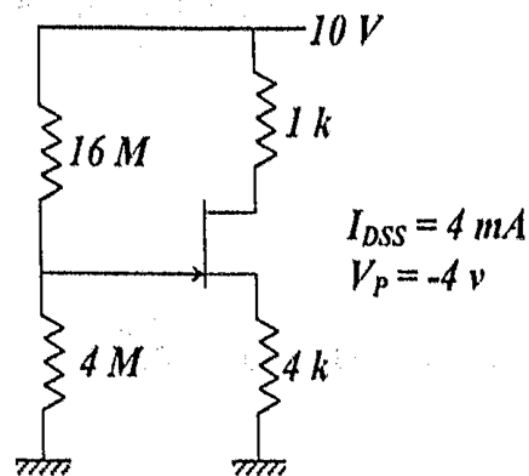
۱- گام اول بدست آوردن V_{GS} می باشد لذا ابتدا V_G محاسبه می شود. با توجه به عدم جریان گیری در گیت با تقسیم ولتاژ داریم:

$$V_G = \frac{V_{DD} \times R_{G_2}}{R_{G_1} + R_{G_2}}, \quad V_S = R_S I_D \Rightarrow V_{GS} = V_G - V_S = \frac{V_{DD} \times R_{G_2}}{R_{G_1} + R_{G_2}} - R_S I_D$$

۲- مرحله بعد گذاشتن V_{GS} در معادله شاکلی $I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$ است و از حل معادله درجه دوم و چک کردن شرایط صحیح بودن I_D که در قسمت قبل گفته شد مقدار I_D بدست می آید.



مثال : در مدار زیر مقدار I_D کدام است؟



$$\left. \begin{aligned} V_G &= \frac{10 \times 4}{16 + 4} = 2 \text{ V} \\ V_S &= 4 \text{ K} \cdot I_D \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_{GS} = 2 - 4 I_D$$

پاسخ: ☒

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 \Rightarrow I_D = 4 \left(1 - \frac{2 - 4 I_D}{-4}\right)^2 \Rightarrow \begin{cases} I_{D_1} = 2/25 \text{ mA} \\ I_{D_2} = 1 \text{ mA} \end{cases}$$

با توجه به اینکه $2/25 \text{ mA}$ در مدار V_{GS} غیر قابل قبول می سازد لذا $I_D = 1 \text{ mA}$ می باشد.

۳) بایاسینگ مستقل :

مراحل تحلیل :

۱- بدست آوردن V_{GS} مرحله اول است لذا داریم :

$$I_G = 0 \Rightarrow V_G = -V_{GG}, V_S = R_S \cdot I_D \Rightarrow V_{GS} = -V_{GG} - R_S I_D$$

۲- حال V_{GS} بدست آمده را در معادله جریانی شاکی قرار می دهیم و با چک کردن شرایط صحت I_D که در قبل گفته شد مقدار I_D از حل معادله درجه دوم حساب می شود.

۳- با داشتن I_D مقدار V_{DS} با اعمال KVL در حلقه خروجی حساب می شود.

مثال : مقدار V_{DS} را محاسبه کنید.

✓ پاسخ :

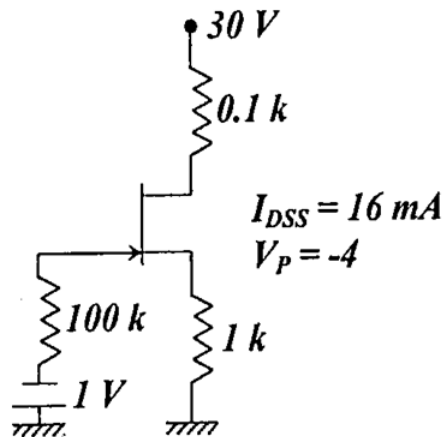
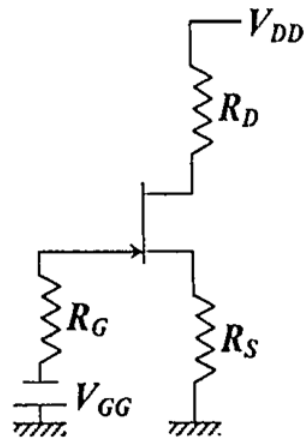
$$\begin{cases} I_G = 0 \Rightarrow V_G = -1 \\ V_S = 1K \cdot I_D \Rightarrow V_{GS} = -1 - I_D \end{cases}$$

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2, I_D = 16 \left(1 - \frac{-1 - I_D}{-4}\right)^2 \Rightarrow I_D = \begin{cases} 5/3 \text{ mA} \\ 1/7 \text{ mA} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{if } I_D = 5/3 \text{ mA} \Rightarrow V_{GS} = -1 - I_D = -1 - 5/3 = -6/3 \\ \Rightarrow |V_{GS}| > |V_P| \Rightarrow I_D \rightarrow \text{غ.ق.ق} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{if } I_D = 1/7 \text{ mA} \Rightarrow V_{GS} = -1 - I_D = -1 - 1/7 = -2/7 \\ \Rightarrow |V_{GS}| < |V_P| \Rightarrow I_D \rightarrow \text{ق.ق} \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_{DS} = V_{DD} - I_D(R_S + R_D) = 30 - 1/7(0.1K + 1K) = 28/7 \Rightarrow I_D = 1/7 \text{ mA}$$



محاسبه g_m و I_D در نواحی کاری مختلف

(۱) ناحیه اشباع

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

$$g_m = \left. \frac{\delta I_D}{\delta V_{GS}} \right|_{V_{DS} = \text{cte}} \Rightarrow g_m = \frac{2I_{DSS}}{|V_P|} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right) = g_{m_0} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)$$

g_{m_0} : g_m در حالت حداکثر می باشد و مربوط به زمانی است که گیت دارای بایاس نباشد.

$$\Rightarrow g_m = \frac{2I_{DSS}}{|V_P|} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right) \Rightarrow g_m = \frac{2}{|V_P|} \sqrt{I_D \cdot I_{DSS}}$$

(۲) ناحیه تریودی :

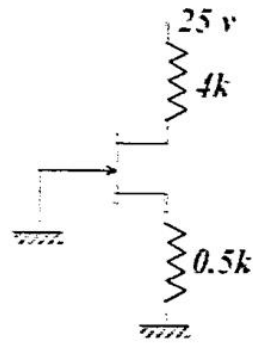
$$\begin{cases} I_D = K(2(V_{GS} - V_P)V_{DS} - V_{DS}^2) \\ K = \frac{I_{DSS}}{V_P^2} \end{cases}$$

با توجه به کوچک بودن V_{DS} در ناحیه تریودی I_D به صورت زیر ساده می شود :

$$I_D = I_{DSS} \left(\frac{V_{DS}}{V_P}\right)^2, \quad g_m = \left. \frac{\delta I_D}{\delta V_{GS}} \right|_{V_{DS} = \text{cte}} = 0$$

لذا در ناحیه تریودی g_m تقریباً صفر است.

مثال : در مدار زیر مقدار V_{GS} کدام است ؟



$$V_P = -2$$

$$I_{DSS} = 8 \text{ mA}$$

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

$$V_G = 0, V_S = R_S I_D = 0.5 \text{ k} \cdot I_D = \frac{1}{2} I_D$$

$$\Rightarrow V_{GS} = V_G - V_S = -\frac{1}{2} I_D \Rightarrow I_D = 8 \left(1 - \frac{-\frac{1}{2} I_D}{-2} \right)^2 \Rightarrow \begin{cases} I_{D1} = 2 \text{ mA} \\ I_{D2} = 8 \text{ mA} \end{cases}$$

با توجه به محدود بودن I_D توسط مقاومت‌های R_S , R_D به حداکثر مقدار $\frac{25}{2 \text{ k} + 0.5 \text{ k}}$ یعنی برابر $5/5 \text{ mA}$ لذا جواب $I_D = 2 \text{ mA}$

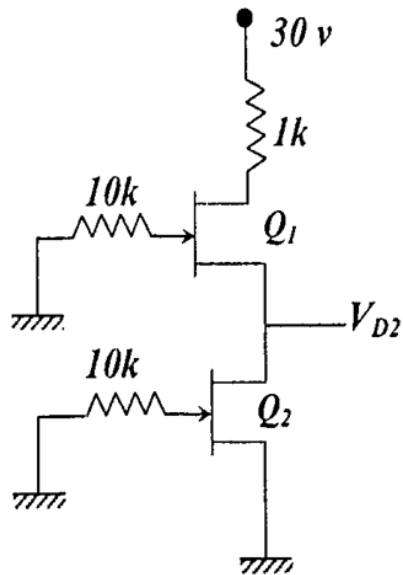
$$\Rightarrow V_{GS} = -\frac{1}{2} I_D = -\frac{1}{2} \times 2 = -1 \Rightarrow V_{GS} = -1 \text{ V}$$

قابل قبول است .

مقدار V_{DS} کدام است ؟

$$V_{DS} = V_{DD} - (R_D + R_S) I_D = 25 - (4 + 0.5) \cdot 2 = 16 \text{ V}$$

مثال : در مدار توان تلفاتی در R_{D1} کدام است ؟



$$Q_1 \begin{cases} I_{DSS} = 16 \text{ mA} \\ V_P = -8 \end{cases}$$

$$Q_2 \begin{cases} I_{DSS} = 4 \text{ mA} \\ V_P = -4 \text{ V} \end{cases}$$

$$V_{GS1} = 0 \Rightarrow I_{D1} = I_{DSS1} = 4 \text{ mA} \Rightarrow I_{D1} = I_{D2} = 4 \text{ mA} \Rightarrow P_{RD1} = R_{D1} \cdot I_{D1}^2 = 1 \text{ k} \times 4 \text{ m}^2 = 16 \text{ mW}$$

مقدار V_{GS1} کدام است ؟

+4 (4)

-2 (3)

-4 (2)

$$I_{D1} = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS1}}{V_P}\right)^2 \Rightarrow 4 = 16 \left(1 - \frac{V_{GS1}}{-8}\right)^2 \Rightarrow V_{GS} = -4$$

مقدار V_{D2} کدام است ؟

-4 (4)

-2 (3)

+4 (2)

$$V_{D2} = -V_{GS1} = +4 \text{ V}$$

انواع مقاومت های موجود در FET

الف) مقاومت دینامیکی :

$$r_{ds} = \frac{\delta V_{DS}}{\delta I_D} = \frac{V_P}{r_{I_{DSS}}} \times \frac{1}{1 - \sqrt{\frac{V_{GS}}{V_P}}} , \text{ if } V_{GS} = 0 \Rightarrow r_{ds} = \frac{V_P}{r_{I_{DSS}}} \rightarrow \text{مقاومت وصل}$$

ب) مقاومت دینامیکی (در حالت dc) :

$$R_{(DC)} = \frac{V_{DS}}{I_D}$$

ضریب تقویت ولتاژ در FET

$$\mu = \left. \frac{\delta V_{DS}}{\delta V_{GS}} \right|_{I_D = cte}$$

در یک ترانزیستور FET نسبت تغییرات V_{DS} به تغییرات V_{GS} ضریب تقویت ولتاژ گفته می شود.

مقاومت خروجی در FET

r_d مقاومت موجود بین درین و سورس است و دارای مقدار زیادی می باشد همچنین بین μ و r_d و g_m رابطه زیر برقرار است:

$$\mu = g_m \cdot r_d$$

نکته : مقدار g_m با تغییرات دما در جهت افزایشی زیاد می شود و همچنین مقدار g_m در بازه روبرو تغییر دارد: $1 \text{ ms} \leq g_m \leq 10 \text{ ms}$

قانون انعکاس امپدانس در FET

۱- کلیه امپدانس های موجود در سورس از دید درین در $(1 + \mu)$ ضرب می شوند.

۲- کلیه امپدانس های موجود در درین از دید سورس بر $(1 + \mu)$ تقسیم می شوند.