

الکترونیک ۱

جلسه هفتم

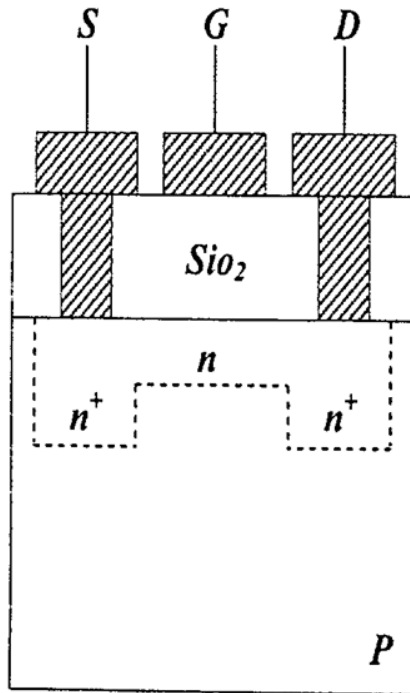
مدرس : سجاد قراگوزلو حصاری

دانشکده فنی انقلاب اسلامی

ترانزیستورهای MOSFET

۲. MOSFET تشکیل شونده یا افزایشی }
n کانال
P کانال

۱. MOSFET تهی یا کاهشی }
n کانال
P کانال

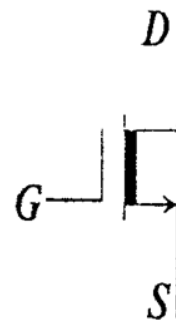
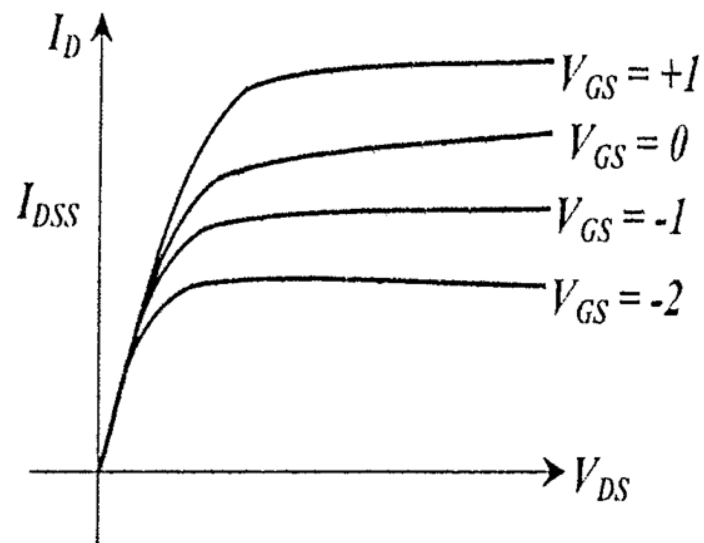
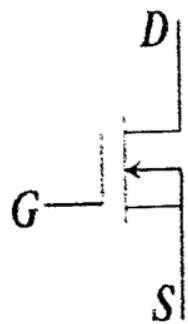
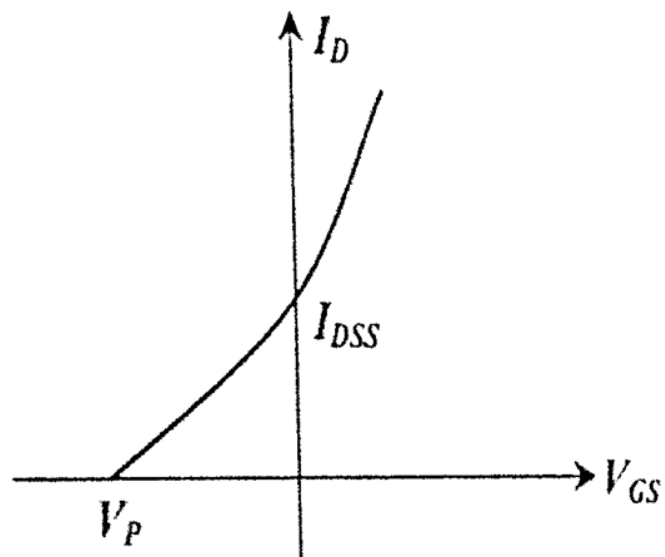


MOSFET تهی یا کاهشی با کانال n : (N - Mos)

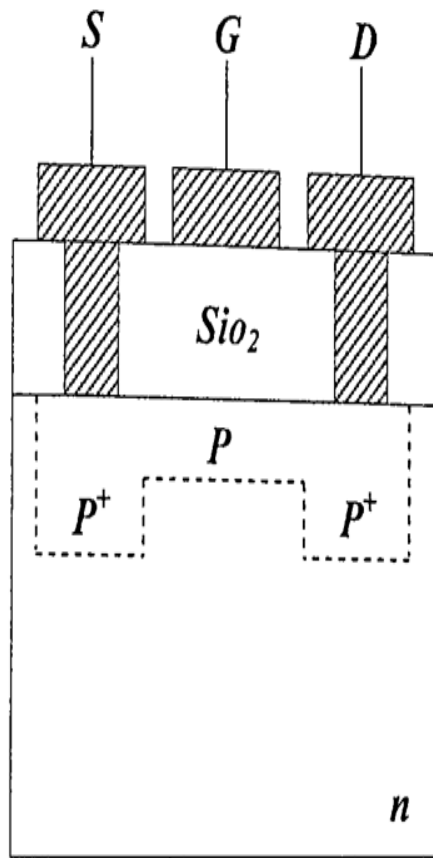
ساختمان یک MOSFET تهی با کانال n به صورت زیر می باشد که شامل یک بلور از نوع P است که دو ماده نوع n با ناخالصی زیاد در آن نفوذ داده شده است. جهت عایق سازی گیت از کانال از یک عایق به نام SiO_2 یا دی اکسید سیلیسیم استفاده شده است. نحوه عملکرد این نوع MOSFET کاملاً شبیه JFET کانال n است بدین صورت که با معکوس بایاس کردن پیوندهای p-n داخلی MOSFET یا به عبارتی با اعمال یک V_{GS} منفی و یک V_{DS} مثبت، جریان از درین به سمت سورس جاری می شود.

حال با افزایش V_{GS} در جهت منفی عرض ناحیه تخلیه ایجاد شده در کانال زیاد می شود و I_D کم می شود. لذا با کنترل V_{GS} می توان I_D را کنترل نمود لازم به ذکر است که تفاوت این نوع MOSFET با نوع JFET در این نوع است که پیوندهای P-n داخلی در این ترانزیستور می توانند بایاس مستقیم شوند یا به عبارتی می توان V_{GS} را مثبت نمود و جریان کانال را از I_{DSS} زیادتر کرد.

منحنی مشخصه‌های خروجی و انتقالی و سمبل مداری MOSFET تهی یا D-MOS با کانال n به صورت زیر است:



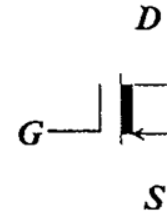
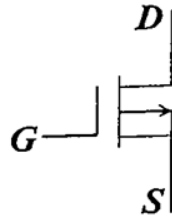
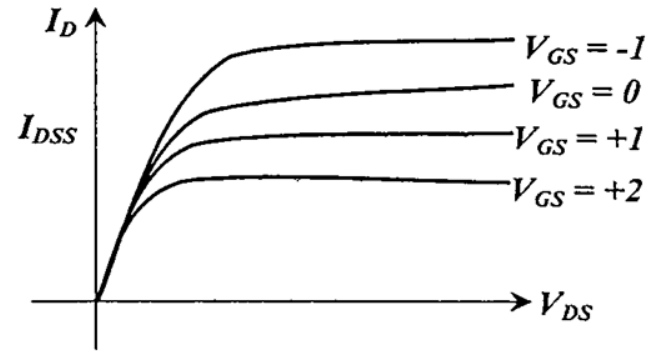
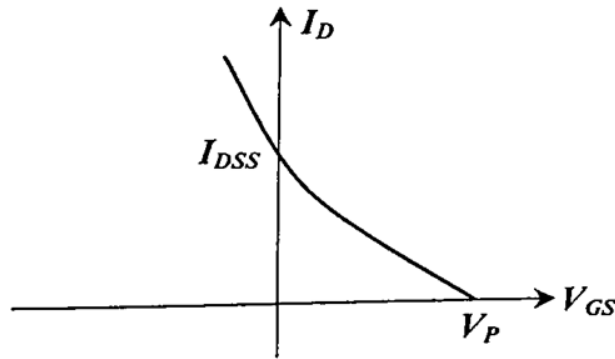
« نمادهای مداری DMOS با کانال n »



MOSFET کاهش‌ی با کانال P : (P-MOS)

ساختمان داخلی یک D – MOS با کانال P به صورت زیر است. دیده می‌شود که ساختمان آن شبیه به D – MOS با کانال n است اما کانال عبور جریان در این حالت از نوع P و بلور اصلی ترانزیستور از جنس ماده n است. نحوه کارکرد D – MOS با کانال P همانند کارکرد یک JFET با کانال P است. و تفاوت آن با JFET در این است که در این D – MOS جریان I_D اجازه دارد از I_{DSS} زیادتر شود و V_{GS} نیز می‌تواند منفی شود.

منحنی مشخصه‌های خروجی و انتقالی و نماد مداری D-MOS با کانال P به صورت زیر است :



«سمبل‌های مداری MOS - D با کانال P»

نکته : معادله جریانی شاکلی و g_m در D-MOS ها نیز شبیه به همان JFET ها به صورت زیر است همچنین کلیه فرمول‌های گفته شده جهت تحلیل ac تقویت کننده‌ها و شرایط نواحی کار ترانزیستور برای D-MOS نیز صادق است.

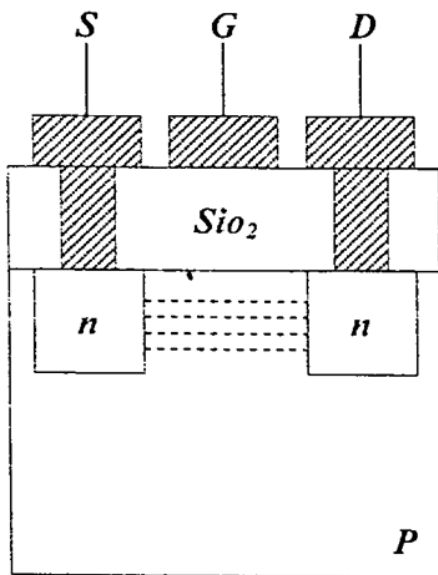
$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

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

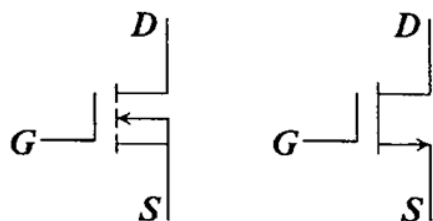
MOSFET تشکیل شونده یا افزایشی (E – MOS)

E – MOS با کانال n یا (N – MOS):

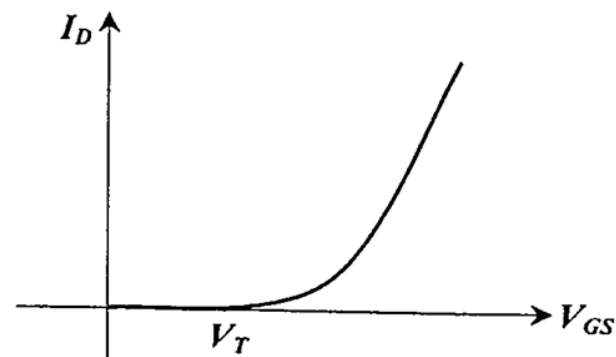
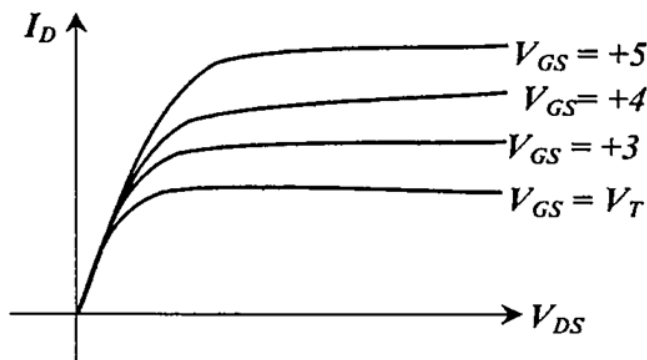
همان طور که در اشکال ترانزیستورهای D – MOS دیده می شود در حالت ایستا در D – MOS کانال عبور جریان وجود خارجی دارد اما در E – MOS ها کانال عبور جریان وجود ندارد و باید با اعمال V_{GS} مناسب این کانال عبور جریان ایجاد شود. این ولتاژ V_T یا ولتاژ آستانه نامیده می شود به بیان دیگر می توان گفت که V_T حداقل V_{GS} لازمه جهت ایجاد کانال عبور جریان است.



ساختمان درونی و مشخصه های خروجی و انتقالی و سمبل مداری E – MOS با کانال n به صورت زیر است:



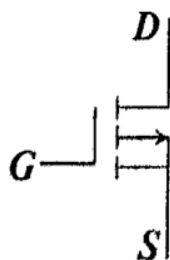
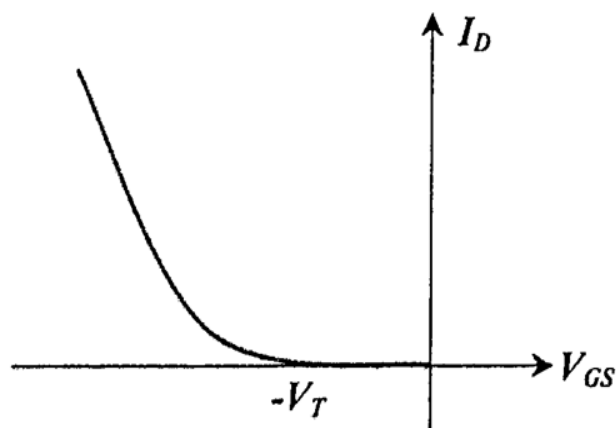
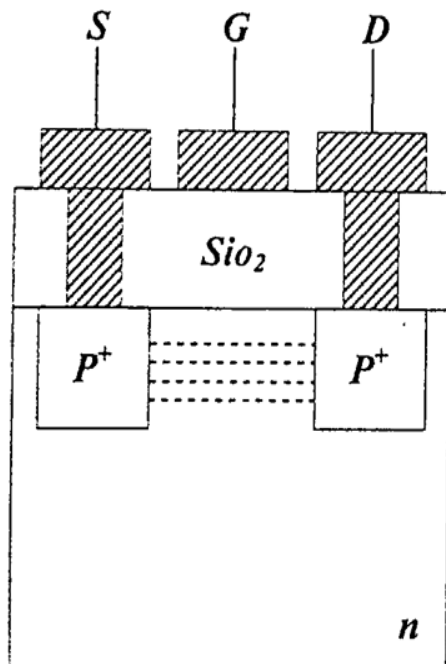
«نماد مداری یک E – MOS با کانال n»



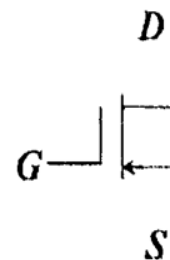
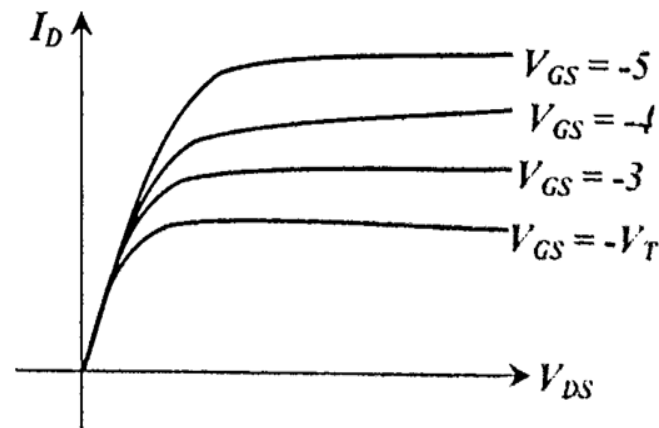
دقت شود که با افزایش V_{GS} در E – MOS با کانال n مقدار جریان I_D زیاد می شود. همچنین مقدار V_T در بازه $1 < V_T < 7$ تغییر دارد. لازم به ذکر است که مقادیر V_{DS} و V_{GS} و V_T از لحاظ علامتی به صورت روبرو است. $V_{DS} > 0, V_{GS} > 0, V_T > 0$

MOSFET افزایش یا تشکیل شونده با کانال P یا (E – MOS)

ساختار داخلی و نحوه عملکرد این نوع E – MOS با نوع مشابه خود از کانال n مشابه است فقط در این حالت پلاریته V_T منفی می باشد. منحنی های خروجی و انتقالی و نماد مداری و ساختار درونی E – MOS با کانال P به صورت زیر است:



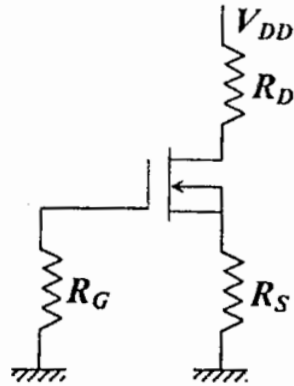
$V_{DS} < 0, V_{GS} < 0, V_T < 0$
 « نماد مداری E – MOS با کانال P »



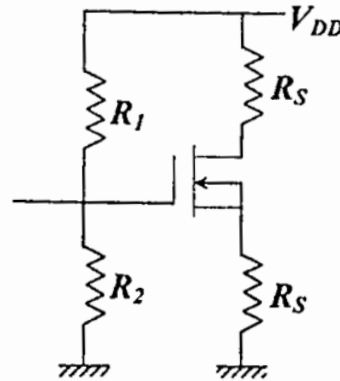
روابط جریانی و g_m در (E – MOS)

$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2$, $g_m = 2K(V_{GS} - V_T)$: مقدار ثابت که به مشخصات داخلی ترانزیستور بستگی دارد.

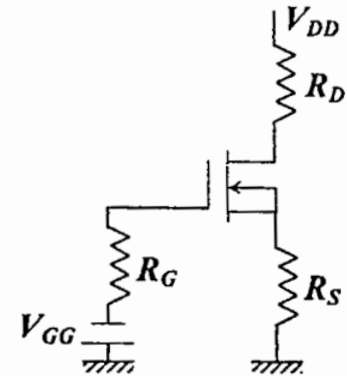
نکته : بایاسینگ ترانزیستورهای نوع D – MOS همانند بایاسینگ ترانزیستورهای JFET می باشد و هر سه نوع بایاسینگ (بایاس سرخود- بایاس مقسم ولتاژ - بایاس با منبع تغذیه ثابت) برای آنها وجود دارد. اما برای ترانزیستورهای E-MOS بایاس از نوع بایاسینگ سرخود امکان ندارد و بقیه بایاسینگ ها با افزایش شرایط مناسب قابل اجرا است.



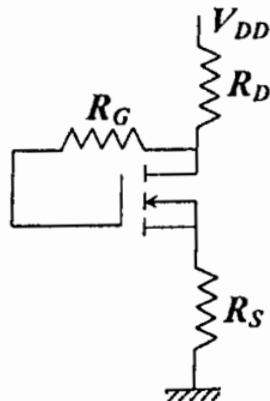
«بایاس سرخود برای D – MOS»



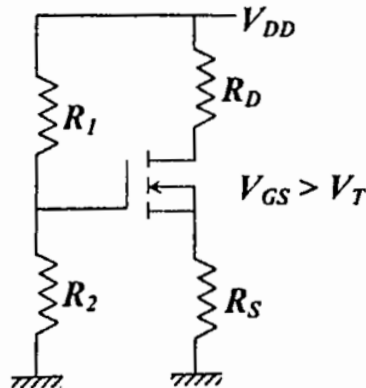
«بایاس مستقیم ولتاژ برای D – MOS»



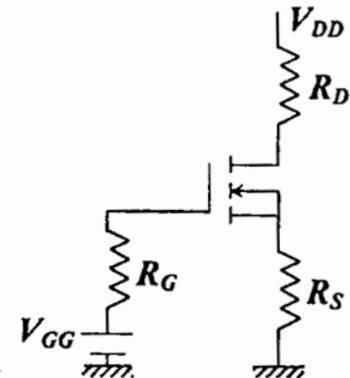
«بایاس از طریق منبع ثابت برای D – MOS»



«بایاس از طریق فیدبک برای E – MOS»

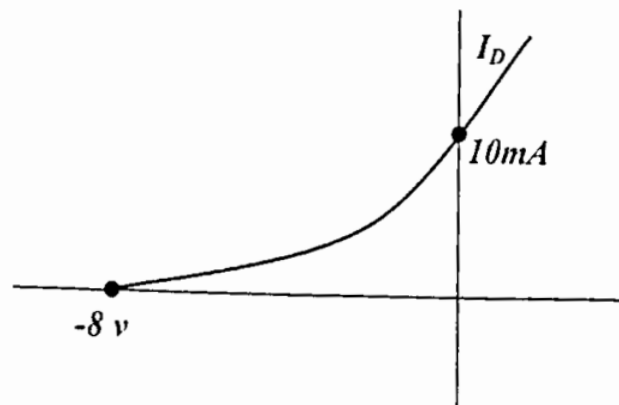
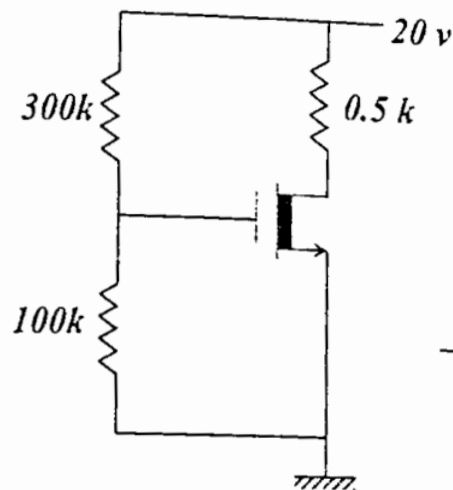


«بایاس مستقیم ولتاژ برای E – MOS»



«بایاس از طریق منبع ثابت برای E – MOS»

مثال : توان تلفاتی در مقاومت $0.5k$ / کدام است ؟



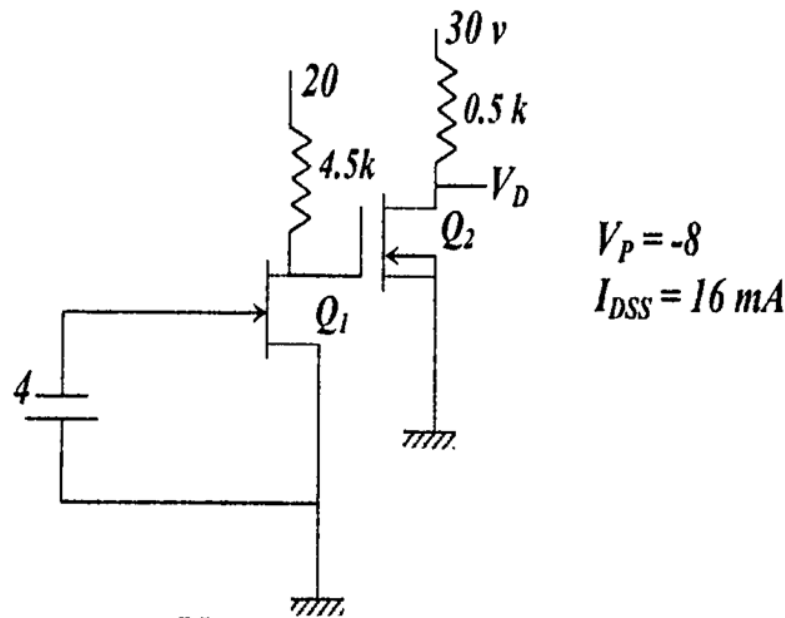
با توجه به اینکه T_r از نوع DMOS است لذا I_D می تواند از I_{DSS} تجاوز کند لذا داریم :

$$V_G = \frac{20 \times 100k}{100k + 300k} = 5V, \quad I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

$$\left. \begin{array}{l} V_{GS} = 5V \\ I_{DSS} = 10mA \\ V_P = -8 \end{array} \right\} \Rightarrow I_D = 10 \left(1 - \frac{5}{-8}\right)^2 \Rightarrow I_D = 26.4mA$$

$$P_{R_D} = R_D \cdot I_D^2 = 0.5 \times 26.4^2 \approx 348.6mW$$

مثال : V_D در مدار زیر کدام است ؟



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

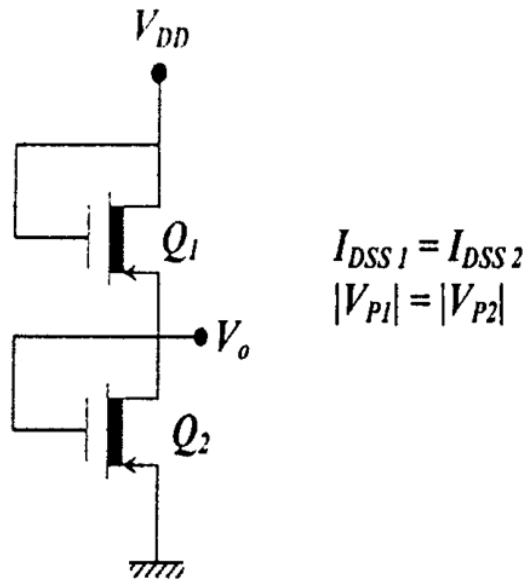
$$V_{GS1} = V_{D1} = V_{DD} - R_D I_D = 20 - 4/5 \times 4 = 2 \text{ V} \Rightarrow V_{GS2} = 2 \text{ V}$$

$$I_{D2} = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS2}}{V_P}\right)^2 = 16 \left(1 - \frac{2}{-8}\right)^2 = 25 \text{ mA} , \quad V_D = V_{DD} - R_D I_{D2} = 30 - 0.5 \times 25 = 17.5 \text{ V}$$

مقدار توان تلفاتی ترانزیستور Q_1 کدام است ؟

$$\left. \begin{aligned} P_{T_{r1}} &= V_{DS1} \cdot I_{D1} \\ V_{DS1} &= V_{D1} = 2 \text{ V} , \quad I_{D1} = 4 \text{ mA} \end{aligned} \right\} P_{T_{r1}} = 2 \times 4 \text{ mA} = 8 \text{ mW}$$

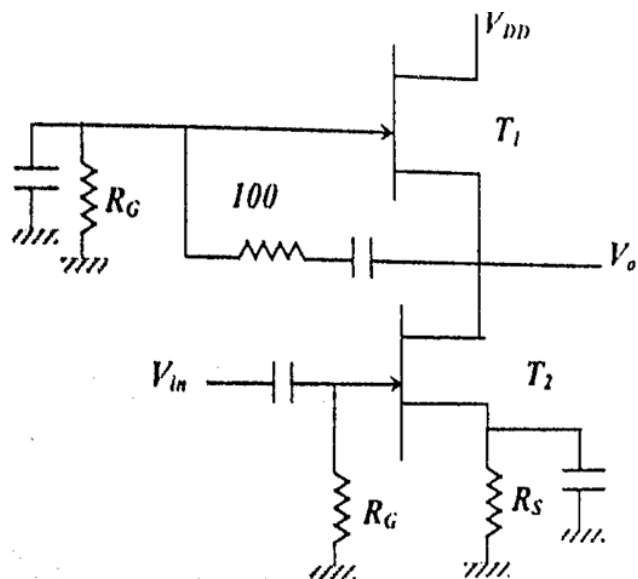
مثال : V_o در مدار زیر کدام است ؟



$$I_{D1} = I_{D2} \Rightarrow \begin{cases} I_{D1} = I_{DSS1} \left(1 - \frac{V_{GS1}}{V_{P1}}\right)^2 \\ I_{D2} = I_{DSS2} \left(1 - \frac{V_{GS2}}{V_{P2}}\right)^2 \end{cases}$$

$$\left. \begin{array}{l} I_{DSS1} = I_{DSS2} \\ |V_{P1}| = |V_{P2}| \end{array} \right\} \Rightarrow I_{DSS1} \left(1 - \frac{V_{GS1}}{V_{P1}}\right)^2 = I_{DSS2} \left(1 - \frac{V_{GS2}}{V_{P2}}\right)^2 \Rightarrow |V_{GS2}| = |V_{GS1}|$$

$$V_{DD} = V_{GS1} + V_{GS2} \Rightarrow V_{DD} = 2V_{GS2} \Rightarrow V_{GS2} = \frac{V_{DD}}{2} \Rightarrow V_o = V_{GS2} = \frac{V_{DD}}{2} \quad \text{با اعمال یک KVL داریم:}$$



$$g_m = 10 \text{ ms}$$

مثال: در مدار زیر $\frac{V_o}{V_{in}}$ کدام است؟

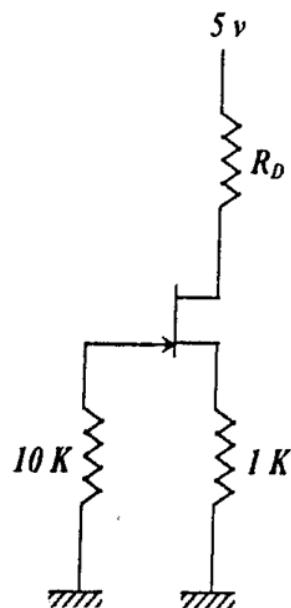
تقویت کننده T_1 از نوع سوری مشترک است لذا داریم:

$$AV = \frac{\text{(مقاومت خروجی)} - g_m}{\text{(مقاومت های سورس)} + 1}$$

$$\text{مقاومت دیده شده از خروجی} = 100 \parallel \frac{1}{g_m} = 100 \parallel 100 = 50 \Omega = 0.05 \text{ k}$$

$$\Rightarrow AV = \frac{-g_m \times 50}{1 + g_m(0)} = -10 \times 0.05 = -0.5$$

مثال : مقدار مقاومت R_D کدام است؟



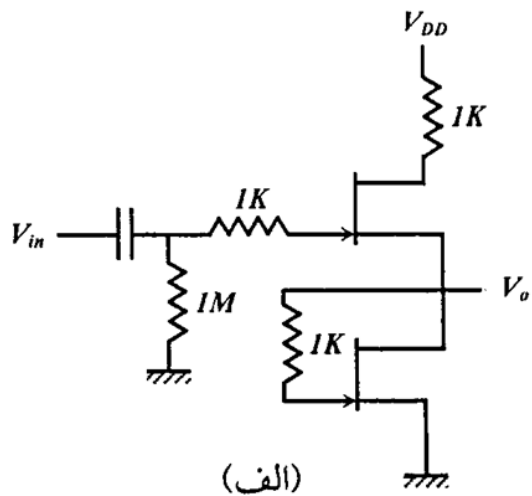
$$I_{DSS} = 4 \text{ mA}$$

$$|V_P| = 4$$

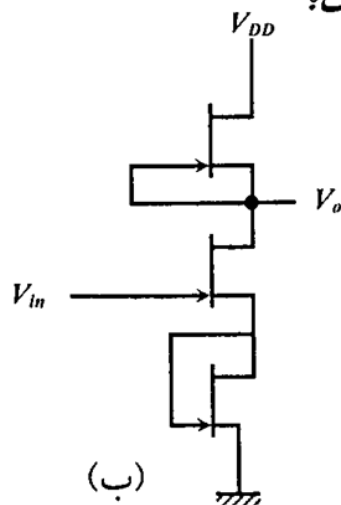
$$V_{DS} = 4 \text{ V}$$

$$\begin{cases} V_{DS} = 5 - I_D \cdot (R_D + 1\text{k}) = 4 \\ I_D = 4 \left(1 - \frac{-I_D}{-4} \right)^2 \Rightarrow I_D = 1 \text{ mA} \Rightarrow R_D = 1\text{k} \end{cases}$$

مثال: در مدارهای الف و ب مقدار $\frac{V_o}{V_{in}}$ کدام است؟



(مدار الف)



(مدار ب)

تقویت کننده مدار الف از نوع C.D است و مدار ب از نوع C.S است.

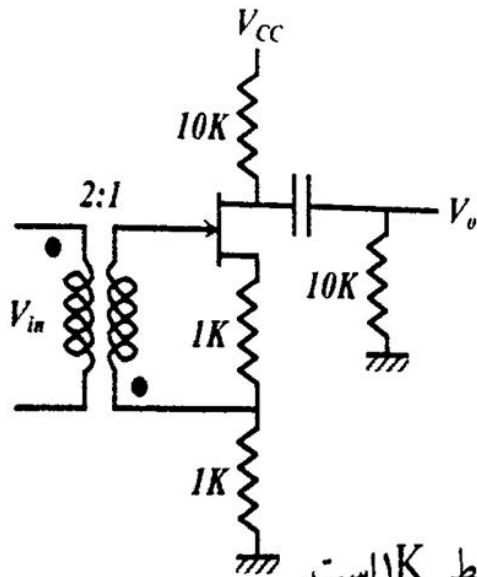
$$AV = \frac{g_m \times \frac{1}{g_m}}{1 + g_m \times \frac{1}{g_m}} = \frac{1}{2}$$

$$AV = \frac{-g_m(r_d \parallel [r_d + (1 + \mu) \frac{1}{g_m}])}{1 + g_m \times \frac{1}{g_m}}$$

$$AV = \frac{-g_m[r_d \parallel r_d]}{2}$$

$$AV = \frac{-g_m r_d}{3} = \frac{-\mu}{3}$$

مثال: در مدار زیر مقدار $\frac{V_o}{V_{in}}$ کدام است؟



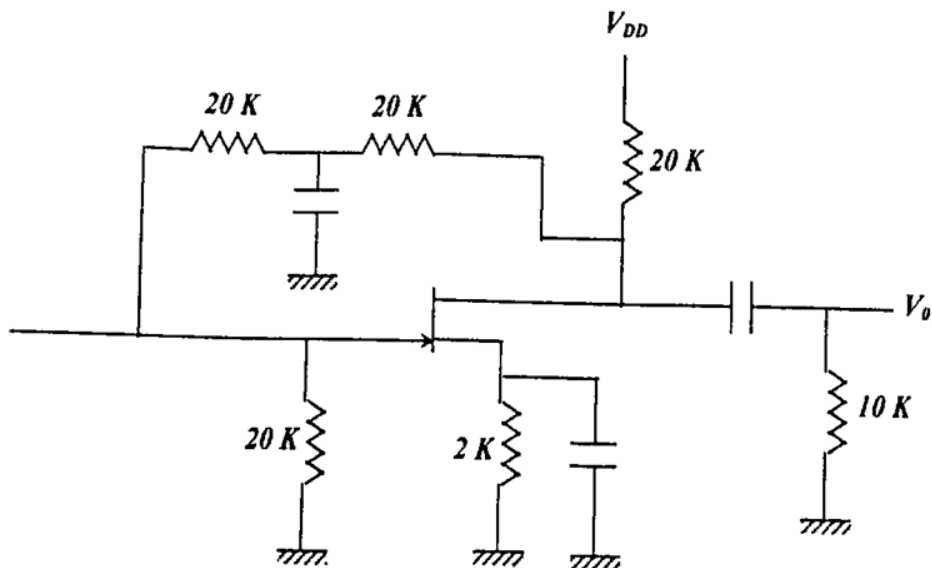
$$g_m = 2 \text{ ms}$$

مقاومت 1K پایین ترانس اثری برگین ندارد، لذا مقاومت معادل سورس فقط 1K است.

$$AV = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{-g_m(10k \parallel 10k)}{1 + g_m(1k)} \times \frac{-1}{2}$$

$$\Rightarrow AV_T = \frac{-20 \times 5k}{1 + 20 \times 1k} \times \frac{-1}{2} = -2/5$$

مثال: در مدار زیر مقدار $|V_o|$ چند میلی ولت است؟



$$V_{in} = 10 \text{ mV}$$

$$I_{DSS} = 16 \text{ mA}$$

$$V_P = -2$$

$$I_D = 4 \text{ mA}$$

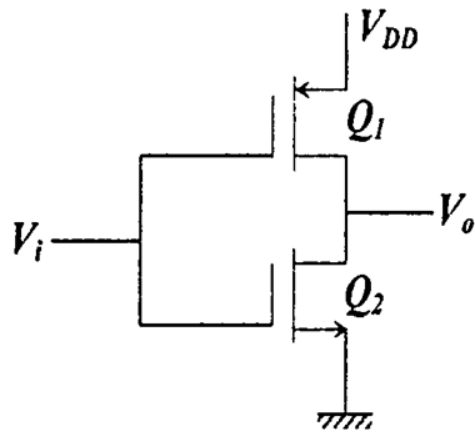
$$g_m = \frac{2}{|V_P|} \sqrt{I_D \cdot I_{DSS}} = \frac{2}{2} \sqrt{4 \times 16} = 8 \text{ ms}$$

$$AV = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{-g_m (10k \parallel 20k \parallel 20k)}{1 + g_m (0)} = -8 \times 5 = -40$$

$$V_o = AV \cdot V_{in} = 40 \times 10 \text{ mV} = 400 \text{ mV}$$

وارون ساز CMOS

این مدار یک معکوس کننده دیجیتال می باشد که از دو E-MOS به صورت زیر است و نحوه عملکرد آن به صورت زیر است:

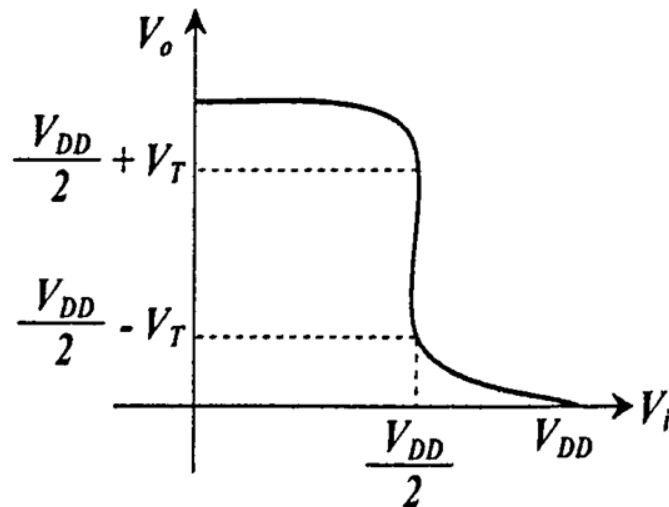


$$\begin{cases} \text{if } V_i = 0 (\text{Low}) \Rightarrow \begin{cases} Q_1(\text{on}) \\ Q_2(\text{off}) \end{cases} \Rightarrow V_o \approx V_{DD} \\ \text{if } V_i = V_{DD} (\text{high}) \Rightarrow \begin{cases} Q_1(\text{off}) \\ Q_2(\text{on}) \end{cases} \Rightarrow V_o \approx 0 \end{cases}$$

منحنی مشخصه V_o بر حسب V_i در وارون گر CMOS به صورت زیر است . دیده

می شود که تغییر حالت خروجی از Low به high در منطق دیجیتال در $\frac{V_{DD}}{2}$

صورت می گیرد.



مقایسه اجمالی بین BJT و FET و MOSFET

۱- امپدانس ورودی در این ترانزیستورها به صورت زیر است :

$$R_{in}(MOSFET) > R_{in}(FET) > R_{in}(BJT) \quad , \quad R_{in}(E-MOS) > R_{in}(D-MOS)$$

۲- نویزپذیری FET ها و MOSFET ها از BJT کمتر است.

۳- ولتاژ سوئیچینگ V_{γ} در ترانزیستورهای FET و MOSFET وجود ندارد.

۴- نسبت سیگنال به نویز در تقویت کننده‌های شامل FET بیشتر از BJT است.

۵- پایداری حرارتی FET و MOS ها از BJT زیادتر است.

۶- حاصلضرب گین در پهنای باند یا f_T در ترانزیستورهای FET کمتر از BJT است.

۷- آسیب‌پذیری FET و MOS در برابر الکتریسته ساکن و تماس دست از BJT زیادتر است.

۸- اندازه MOS و FET نسبت به BJT کوچکتر است.

۹- عملکرد FET و MOS در فرکانس‌های بالا نسبت به BJT بهتر است.

۱۰- AV در ترانزیستورهای FET و MOS به دلیل کم بودن g_m نسبت به موارد مشابه خود در BJT کمتر است.

۱۱- با افزایش دما در MOS ها مقدار I_D کم می‌شود اما در BJT ها مقدار I_C زیاد می‌شود.