

3.4 מודל ליניארי ומעגל תמורה לטרנזיסטורי אפקט שדה

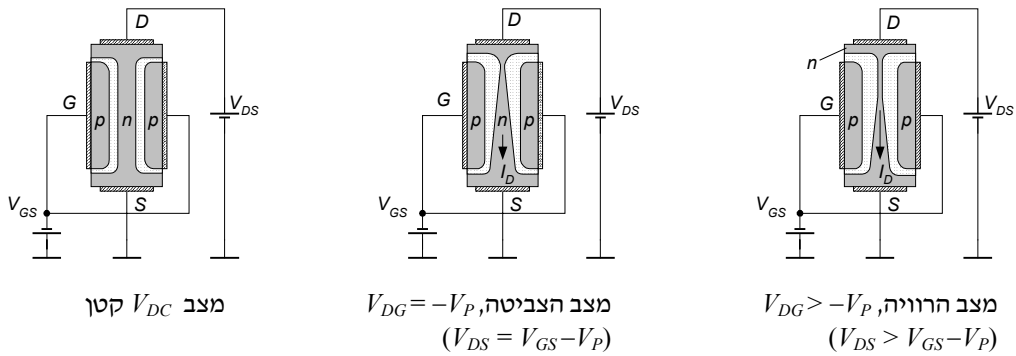
ישנם שני סוגים של טרנזיסטורי אפקט שדה:

- (א) JFET מבוסס על שיטת המיחסו (normally open),
- (ב) MOSFET המבוסס על שיטת המיחסו (normally open)
- ו-MOSFET המבוסס על שיטת העשרה (normally closed).

בכל סוג של JFET ו-MOSFET ישנם טרנזיסטורים עם תעלה מסוג  $n$  ו- $p$ . אנו נתרכז בטרנזיסטורים עם תעלה מסוג  $n$  בלבד. הניתוח יהיה נכון גם עבור טרנזיסטורים עם תעלה מסוג  $p$ , בתנאי שבמודל לאות גדול נהפוך את כיווני המתח והזרם.

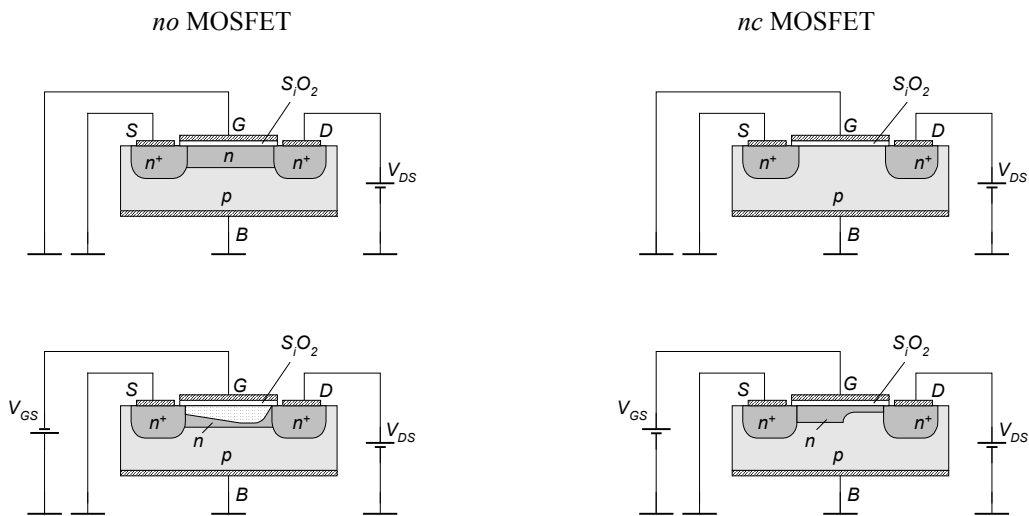
JFET	MOSFET	
	normally open (no)	normally closed (nc)
depletion mode	depletion and enhancement mode	enhancement mode
$n$ -type	$n$ -type	$n$ -type
$p$ -type	$p$ -type	$p$ -type

מבנה ומנגנון הפעולה של טרנזיסטור מסוג JFET



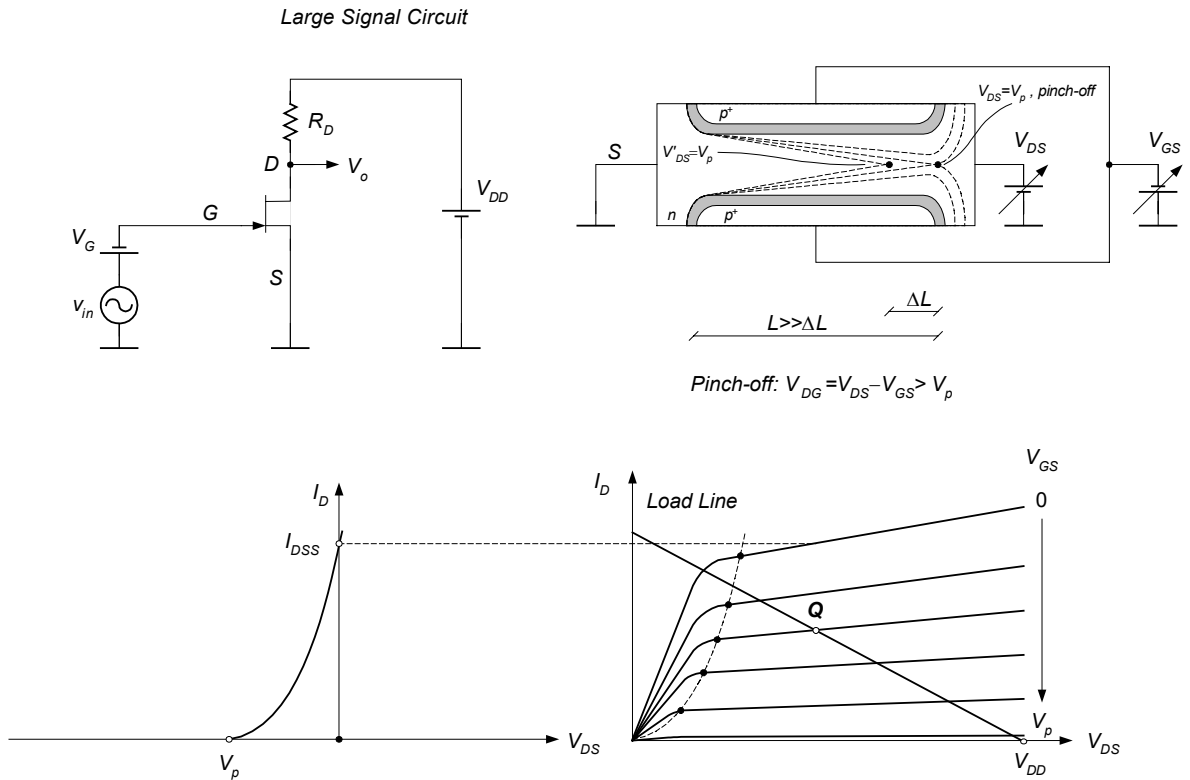
■ מסקנה חשובה. מצב הצביטה:  $V_{DG} = -V_P$

מבנה ומנגנון הפעולה של טרנזיסטורים מסוג MOSFET



■ מסקנה חשובה. מצב הצביטה:  $V_{DG} = -V_t$

מעגל אלקטרוני אלמנטרי עם טרנזיסטור FET



$$I_D = K(V_{GS} - V_p)^2$$

$$= KV_p^2 \left(1 - \frac{V_p}{V_p}\right)^2$$

$$= I_{DSS} \left(1 - \frac{V_p}{V_p}\right)^2, \quad I_{DSS} = KV_p^2$$

Pinch-off parabola:

$$I_{Dp} = K(V_{GSp} - V_p)^2 = K(V_{DSp} + V_p - V_p)^2$$

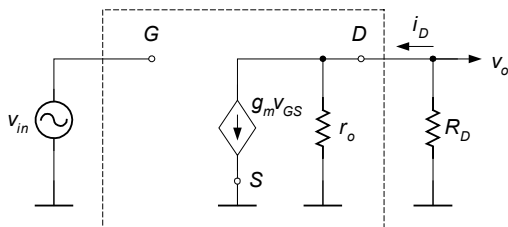
$$I_{Dp} = KV_{DSp}^2$$

$$g_m \equiv \frac{i_D}{v_{GS}} = 2K(V_{GS} - V_p)$$

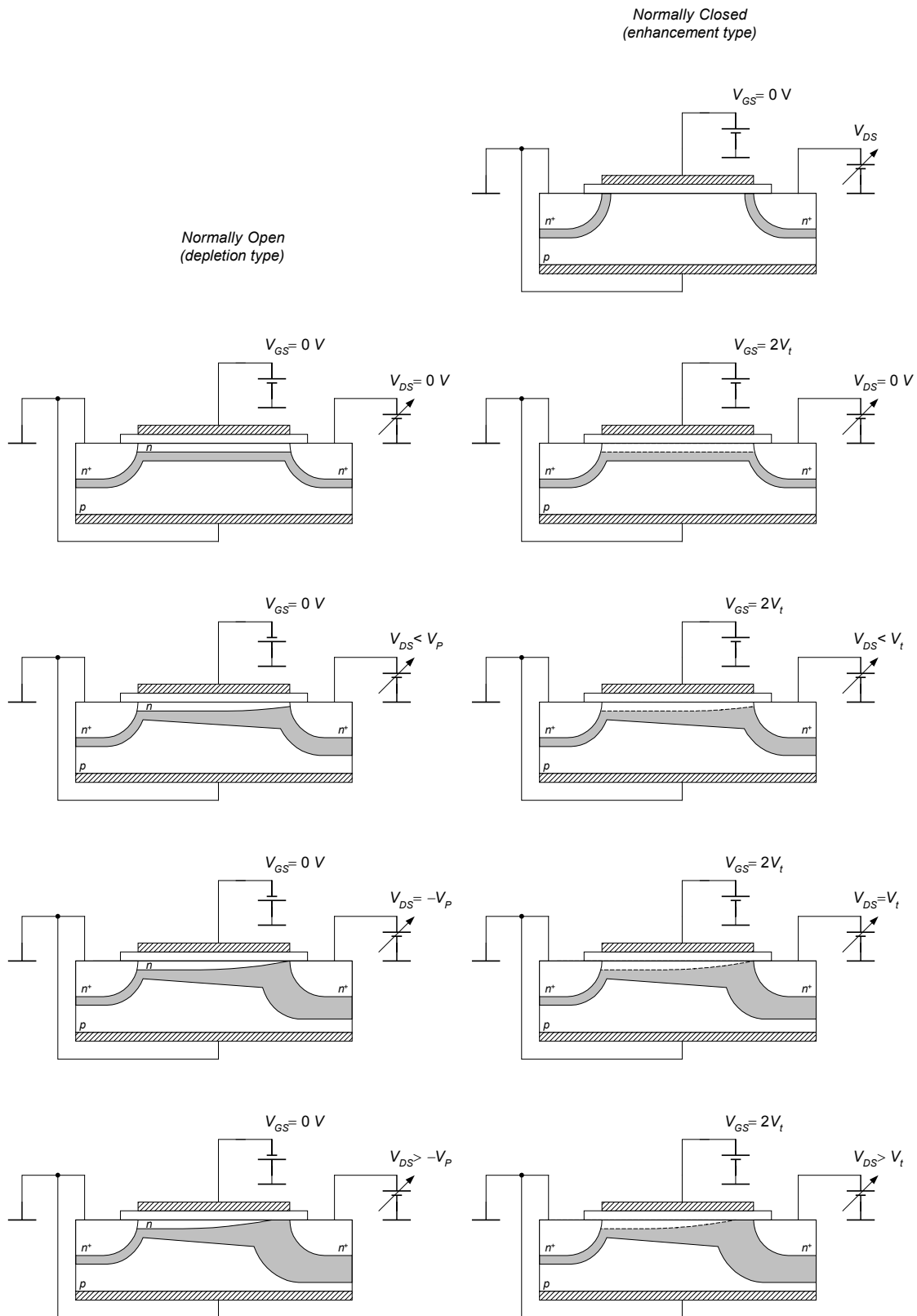
$$= 2\sqrt{K} \sqrt{I_{DQ}} = \frac{2}{V_p} \sqrt{I_{DSS}} \sqrt{I_{DQ}}$$

$$I_D = K(V_{GS} - V_p)^2 (1 + 1/V_{DS}), \quad \frac{1}{\lambda} \propto V_A \Rightarrow r_o = \frac{1/\lambda + V_{DSQ}}{I_{DQ}}$$

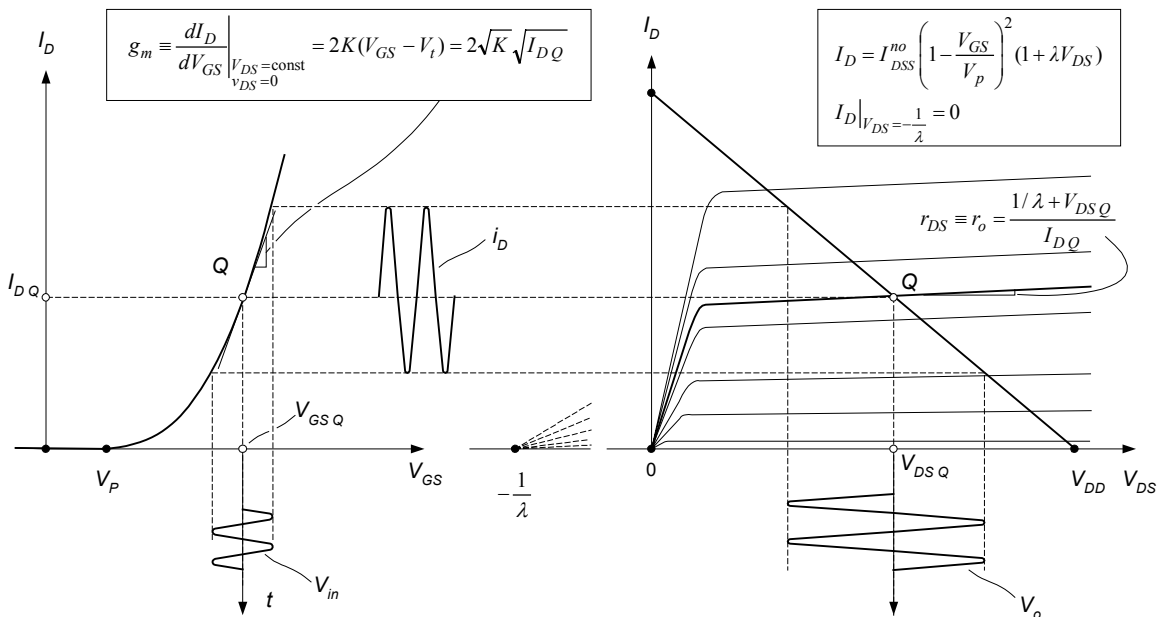
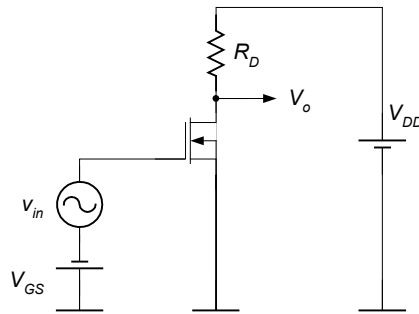
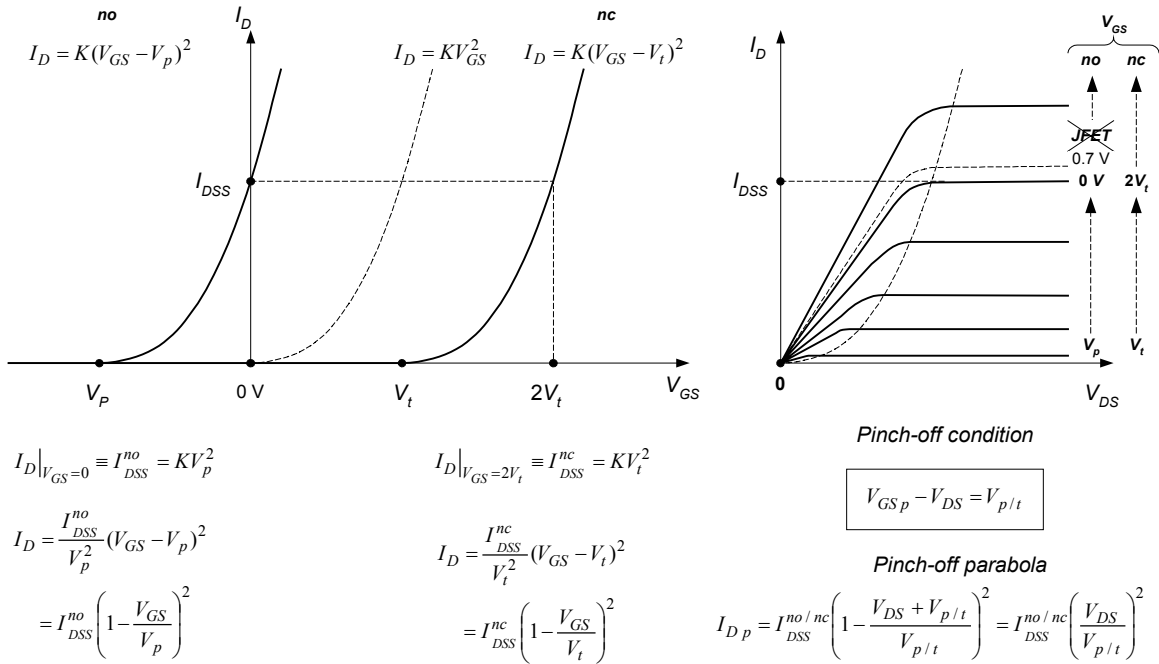
$$r_{in} \equiv \frac{v_{GS}}{i_{GS}} = \frac{V_T}{|I_{GSS}| - |I_{GS}|} \gg R_{leakage} \Rightarrow r_{in} = \infty$$



טרנזיסטור MOSFET

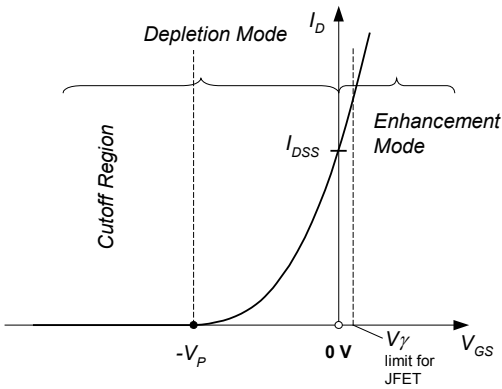


הסבר קצר

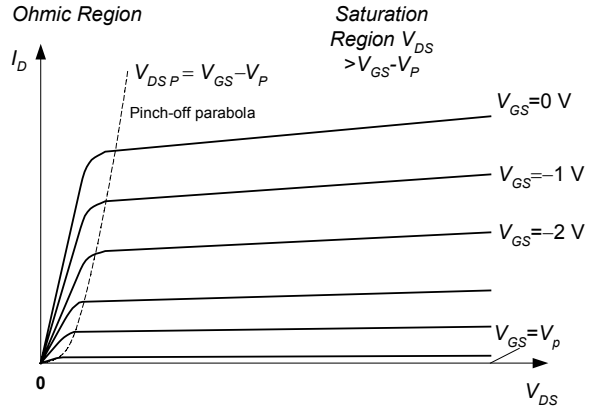


טרנזיסטור אפקט שדה מסוג no

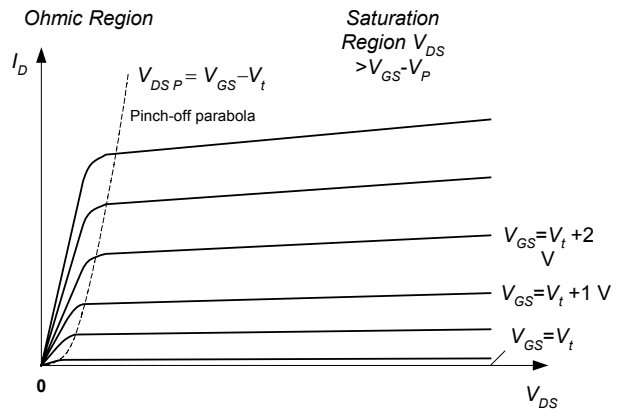
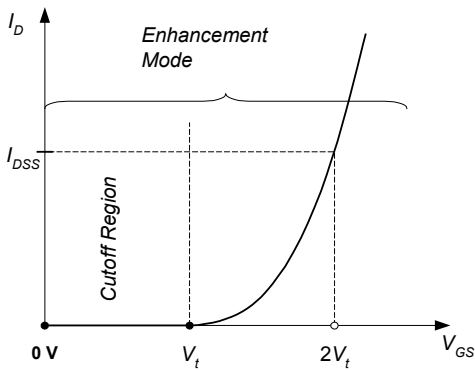
אופייין מעבר



אופייין מוצא



טרנזיסטור אפקט שדה מסוג nc



תחום הפעיל (ליניארי) עבור מגברים הוא תחום הרוויה. ישנו הבדל לגבי הגדרת התחום הפעיל עבור טרנזיסטורים BJT, משום שמדובר כאן על רווית זרם ולא רווית מתח.

◀ עבור טרי' מסוג no : מתח הצביטה (1) - 8 V.

◀ עבור טרי' מסוג nc : מתח הסף (1) - 8 V.

◀ עבור טרי' מסוג no : זרם drain-source הרוויה כאשר  $V_{GS} = 0$ .

◀ עבור טרי' מסוג nc : זרם drain-source הרוויה כאשר  $V_{GS} = 2V_t$ .

$$I_{DSS} = KV_t^2$$

◀  $K = f(\text{geometry, the surface mobility of electrons in the } n \text{ channel})$

$K = f(\text{geometry, the surface mobility of electrons in the } n \text{ channel})$

אופייין מוצא בתחום האומי:

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

Pinch-off parabola:

$$V_{DS P} = V_{GS} - V_P \Rightarrow I_{DP} = I_{DSS} \left( \frac{V_{DS}}{V_P} \right)^2$$

עבור  $V_{DS}$  קטנים אופייין המוצא הופך ל-:

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

התנגדות מוצא עבור  $V_{DS}$  קטנים ו-  $V_{GS} = \text{const}$ :

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

$$R_{DS} \propto \frac{1}{V_{GS} - V_P}$$

אופייין מוצא בתחום הרווייה (התחום הפעיל ל מגברים)

א) אופייין תיאורטי:

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

ב) אופייין מעשי:

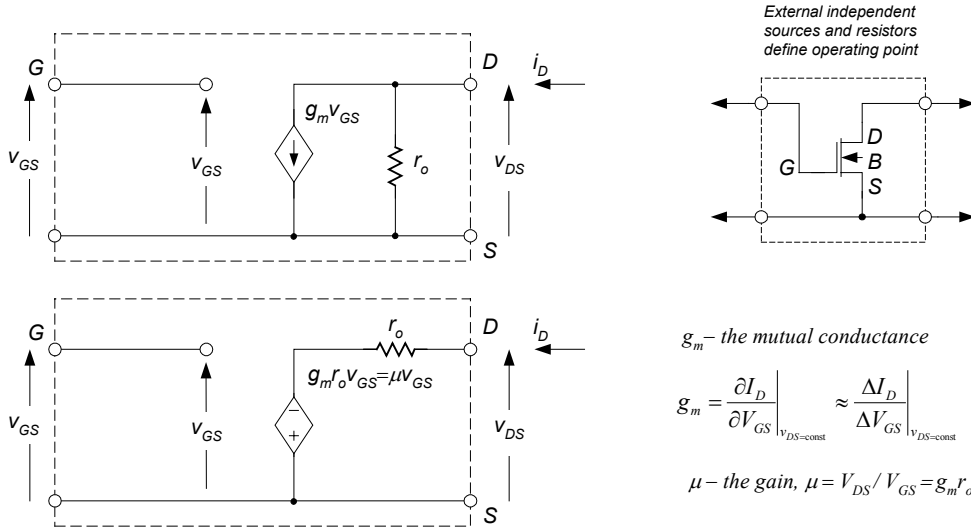
$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

BJT מתח ארלי,  $V_A$ , עבור טרנזיסטורים(לפי הנוסחה,  $I_D = 0$  |  $V_{DS} = -1/\lambda$ )

$$r_o = \frac{dV_{DS}}{dI_D} \Big|_{V_{GS}=\text{const}} \quad S = \frac{1}{r_o} = \lambda I_D$$

$$r_o = \frac{1/\lambda + V_{DS}}{I_D}$$

מעגל תמורה לאות קטן לטרנזיסטור אפקט השדה 3.4.2



חישוב כפונקציה של  $I_D$ .

$$g_m \equiv \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right|_{V_{DS}=\text{const}} = \frac{\partial [I_{DSS}(1 - V_{GS}/V_P)^2]}{\partial V_{GS}} = -\frac{2}{V_P} I_{DSS}(1 - V_{GS}/V_P)$$

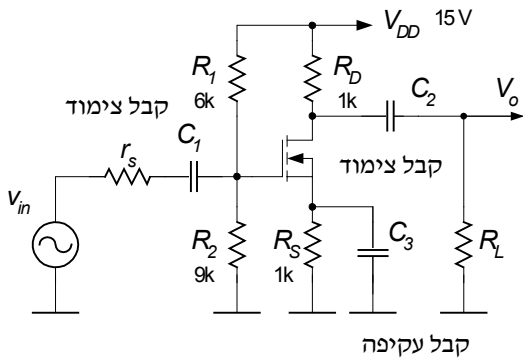
$$\left. \begin{aligned} g_m|_{no} &= \frac{2}{V_P} \sqrt{I_{DSS}} \sqrt{I_D} \\ g_m|_{nc} &= 2\sqrt{K} \sqrt{I_D}, \quad K = \frac{I_{DSS}}{V_t^2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow g_m \propto \sqrt{I_D}$$

$$g_m|_{BJT} \equiv \left. \frac{i_C}{v_{BE}} \right|_{v_{CE}=0} \approx \frac{i_E}{v_{BE}} = \frac{1}{r_E}, \quad \Rightarrow g_m \propto I_C$$

ערך אופייני של  $g_m$  הוא 1/100–1/10000 S.

3.4.3 דוגמה לשימוש במעגל התמורה לטרנזיסטור אפקט השדה

נניח שנתון המעגל הבא.



$$\begin{aligned}
 I_D &= 5(V_{GS} - 3)^2 \text{ mA} \\
 &= (5 \cdot 3^2)(1 - V_{GS}/3)^2 \text{ mA} \\
 &= K V_t^2 (1 - V_{GS}/V_t)^2 \text{ mA} \\
 &= I_{DSS}(1 - V_{GS}/V_t)^2 \text{ mA} \\
 V_t &= 3 \text{ V} \\
 I_{DSS} &= 45 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

$A_v = ?$

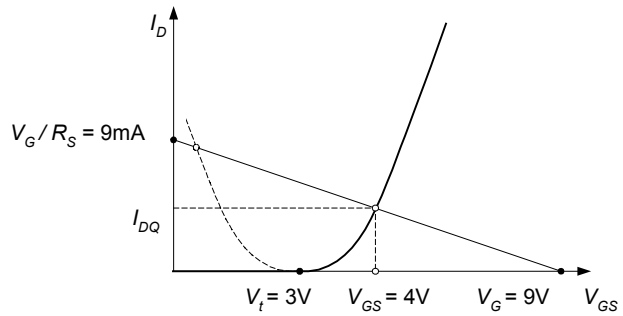
(א) ניתוח dc :

(1) מוציאים את נקודת העבודה  $Q(I_D, V_{DS})$

$$V_{GS} = V_G - V_S = V_G - I_D R_S = V_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - I_D R_S = 9 - 5(V_{GS} - 3)^2 \cdot 1 \Rightarrow V_{GS} = 4[\text{V}]$$

פתרון גרפי :

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



$$I_D = 5(V_{GS} - V_t)^2 = 5(4 - 3)^2 = 5[\text{mA}]$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_S - I_D R_D = 15 - 5(1 + 1) = 5[\text{V}]$$

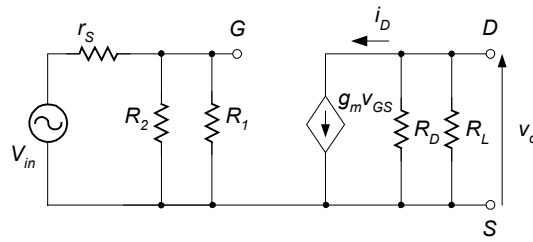
(2) בודקים את התחום  $V_{DS} > V_{GS} - V_t$  :

$$V_{DS} > V_{GS} - V_t; \quad 5 \text{ V} > 4 \text{ V} - 3 \text{ V}$$



(ב) ניתוח ac :

(1) בונים מעגל תמורה אות קטן למעגל הנתון :



$$R_G \equiv R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

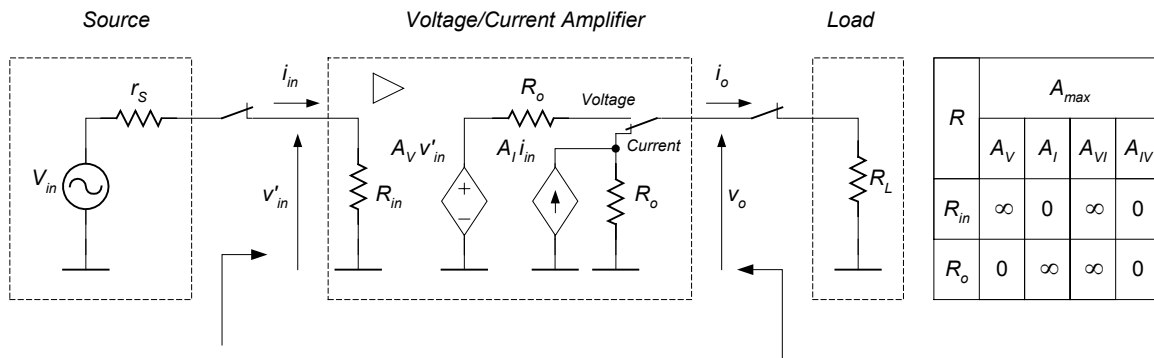
$$g_m = 2\sqrt{K} \sqrt{I_{DQ}} = 2\sqrt{5 \cdot 10^{-3}} \sqrt{5 \cdot 10^{-3}} \approx 10 \text{ mS}$$

(2) מחשבים את הגבר המתח :

$$A_v \equiv \frac{v_o}{v_{in}} = - \frac{\underbrace{v_{in} \frac{R_G}{r_s + R_G}}_{v_{GS}} g_m R_D \parallel R_L}{v_{in}} \bigg|_{\substack{R_L \rightarrow \infty \\ r_s = 0}} = -10 \text{ mS} \cdot 1\text{k} = -10$$

4 תכונות חיבורים שונים של טרנזיסטורים מסוג FET ו-BJT

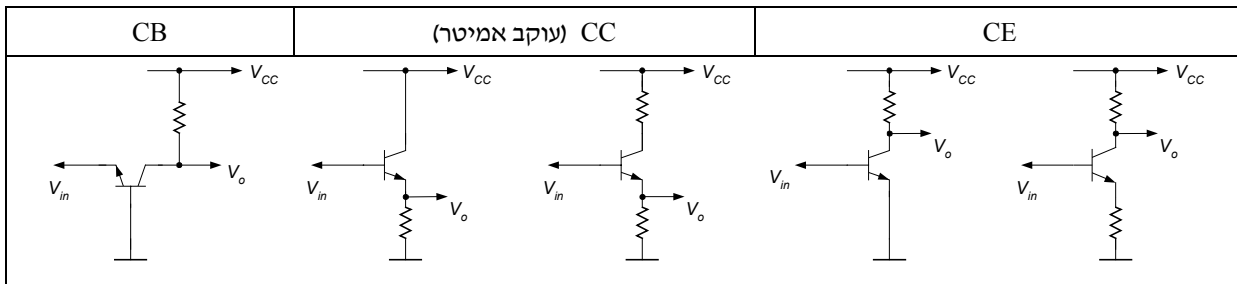
4.1 אפיון מגברים (מעגל תמורה של מגברים)



רואים שמעגל התמורה של הטרנזיסטור באות קטן, שפיתחנו לפני-כן, דומה למעגל התמורה המייצג מגבר. טרנזיסטור ניתן לחבר לפי שלוש תצורות שונות: CE/CS, CC/CD, CB/CG. יש לצפות שכל תצורה ותצורה מייצגת מגבר בעל תכונות מיוחדות.

כדי להבין מהם השימושים האפשריים של חיבורים שונים, חשוב למצוא את התכונות של כל החיבורים ולבדוק במה הם שונים ודומים.

4.2 חיבורים של טרנזיסטור BJT



סוג החיבור הוגדר עבור זוג מסוים של כניסה-מוצא.

קיימים שלושה חיבורים מעשיים בלבד ("השלישייה", "trio"), משום ש-

- א) לא משתמשים בקולקטור בתור כניסה בגלל שצמתים CB ו-CE לא מבקרים את הטרנזיסטור ואם אפילו נהפוך את הטרנזיסטור אז נקבל  $h_{fe}$  קטן.

- ב) לא משתמשים בבסיס בתור מוצא ( $i_B$  קטן).

4.3 חישוב  $A_V, R_o, R_{in}$  ו- $A_I$  עבור חיבורים שונים של טרנזיסטור BJT ו-FET

נניח שעבור הטרנזיסטור BJT  $r_S = 0, h_{re} = 0, 1/h_{oe} \gg R_C, R_E$  נחשב  $A_V, R_o, R_{in}$  ו- $A_I$  עבור החיבורים הבאים:

מעגל באות גדול	מעגל באדות קטן	$A_V, A_I, R_o, R_{in}$
<p><b>CE</b></p>		$R_{in} = (1 + h_{fe})r_E$ , medium $R_o = \infty$ , high $A_I = -h_{fe}$ , high $A_V = \frac{-h_{fe}i_B R_C}{(1 + h_{fe})i_B r_E} \Big _{h_{fe} \gg 1}$ $\approx -\frac{R_C}{r_E} = -\frac{R_C}{r_E + R_E}$ , high
<p><b>CC</b></p>		$R_{in} = (1 + h_{fe})(r_E + R_E)$ , high $R_o = r_E$ , low $A_I = 1 + h_{fe}$ , high $A_V = \frac{R_E}{r_E + R_E} \Big _{R_E \gg r_E} \approx 1$ , low
<p><b>CB</b></p>		$R_{in} = r_E$ , low $R_o = \infty$ , high to very high $A_I = \frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}} = \alpha_f \approx 1$ , low $A_V = \frac{h_{fe}i_B R_C}{(1 + h_{fe})i_B r_E} \Big _{h_{fe} \gg 1}$ $\approx \frac{R_C}{r_E}$ , high

**FET-ו BJT תכונות חיבורים שונים של טרנזיסטורים מסוג**

ניח שעבור הטרנזיסטור FET  $r_s = 0$ ,  $r_o \gg R_D, R_S$   $A_I, A_V, R_o, R_{in}$  עבור החיבורים הבאים:

מעגל באות גדול	מעגל באות קטן	$A_V, A_I, R_o, R_{in}$
<p><b>CS</b></p>		$R_{in} = \infty$ , very high $R_o = \infty$ , high $A_I$ , no sense $A_V = \frac{-g_m v_{GS} R_D}{v_{GS}}$ $= -\frac{R_D}{\underbrace{1/g_m}_{r_E = 1/g_m \text{ for BJT}}}$ , high
<p><b>CD</b></p>		$R_{in} = \infty$ , very high $R_o = \frac{1}{g_m}$ , $\propto r_E$ for BJT, low $A_I$ , no sense $A_V = \frac{g_m v_{GS} R_S}{v_{GS} + g_m v_{GS} R_S}$ $= \frac{R_S}{1/g_m + R_S} \Big _{R_S \gg 1/g_m} \approx 1$ , low
<p><b>CG</b></p>		$R_{in} = \frac{1}{g_m}$ , $\propto r_E$ for BJT, low $R_o = \infty$ , high to very high $A_I = 1$ , low $A_V = \frac{g_m v_{GS} R_D}{v_{GS}}$ $\approx \frac{R_C}{\underbrace{1/g_m}_{\propto r_E}}$ , high

שילוב של מספר דרגות מאפשר תכנון מגבר מכל סוג ( מגבר מתח, מגבר זרם, מגבר מוליכות, מגבר התנגדות) בעל פרמטרים המתקרבים לפרמטרים של המגבר האידיאלי.