

# יסודות התקני מוליכים למחצה

## 044127

## תרגיל מחשב 2

מגישים:

040517708	אבי בנדל
060634078	תומר גפנר
061015616	רועי שמידט

## חלק א – לימוד עצמי של JFET

$$d_1 = 8 \geq d_2 = 6$$

1. טרנזיסטור JFET הוא התקן מליימ בעל שער שבאמצעותו ניתן גם להגדיל את סדר גודל הזרמים הרצויים וגם לנעול את הטרנזיסטור, כלומר לא לאפשר לזרם לזרום דרכו. בטרנזיסטור ניתן לשלוט על עוצמת הזרם בעזר מתח הדקים  $V_{DS}$ . אלו הם הפרמטרים המשמשים לשליטה (אותות כניסה). הזרם משמש כאות יציאה.

2. אם נביט בטרנזיסטור JFET שהשער שלו מסוג  $N$ , אזי מתח השער קובע את מתח כיפוף הפסים וכך את עומק שכבת המחסור בין השער  $N$  לתעלה, שהיא מסוג  $P$ . שינוי זה של עומק שכבת המחסור משפיע על עומק התעלה, וכך משנה את ההתנגדות האפקטיבית שדרכה זורם הזרם בתעלה. עבור מתח בשער מספיק גדול (ב-  $P$ -type), כל שכבת המחסור תחדור לאורך כל התעלה ולכן הטרנזיסטור יהיה במצב קיטעון, כלומר אינו מוליך.

3. כן, יש יתרון לתעלה מסוג  $N$ , משום שהאלקטרונים ניידיים יותר ולכן עבור אותם פרמטרים שנקנה למערכת  $(|V_{GS}|, |V_{DS}|)$ , נקבל זרם גדול יותר.

$P$

4. עבור תעלה מסוג  $N$ , הפוטנציאל בשער צריך להיות קטן יותר מאשר בתעלה, כלומר נצטרך להפעיל ממתח  $V_{GS}$  שלילי, כי זה יהיה ממתח אחורי עבור הצומת שער-תעלה, שיגרום לשכבת המחסור לגדול, וכך לסתום את התעלה. מתח הפוך יגרום לפעולה לא תקינה של הטרנזיסטור בכך שעלול להיות זרם גדול בשער (יחסית לזרם הזליגה שקיים ממילא). עבור תעלה מסוג  $P$ , כיוון הממתח יהיה הפוך, כלומר  $V_{GS}$  חיובי.

5. בשאלה הקודמת כבר קבענו את סימני  $V_{GS}$ : שלילי עבור תעלת  $N$ , חיובי עבור תעלת  $P$ .

בתעלה מסוג  $N$ , יזרמו אלקטרונים אל השפך, ולכן יש להניח את השפך בפוטנציאל חיובי כלומר  $V_{DS}$  חיובי. בתעלה מסוג  $P$ , יש להניח את השפך בפוטנציאל שלילי, כדי לגרום, בסופו של דבר, ל pinch-off וכך נגיע לרוויה – פעולתו התקינה של הטרנזיסטור.  $V_{DS}$  שלילי ולכן יזרמו חורים מהמקור, ואז נקבל זרם שלילי, ע"פ הסכם הסימנים בשאלה.

6. עבור תעלת  $P$ -type כאשר  $V_{GS} > 0$  נקבל ממתח אחורי על הדיודה שער-מקור (כלומר, אצלנו  $V_{GS} = -V_A$ ). רוחב השכבה, עבור תעלה מסוג  $P$ , בכל צד, נתון ע"י:

$$d_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r(V_{bi} + V_{GS})N_A}{qN_D(N_A + N_D)}}, \quad d_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r(V_{bi} + V_{GS})N_D}{qN_A(N_A + N_D)}}$$

7. אנו יודעים שבכל צומת  $PN$ , שכבת המחסור תתפשט לעומק גדול יותר ככל שרמת הסימום בה קטנה יותר יחסית לרמת הסימום בצד השני. לכן, כדי להגדיל את רוחב שכבת המחסור בתעלה, נעלה את רמת הסימום בשער.

8. בתעלה מסוג  $P$ , נחשב ראשית את רוחב אזור המחסור בתעלה כתלות בציר  $y$  וכתלות במתח השער:

$$d(y) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r(V_{bi} + V_{GS} - V(y))N_D}{qN_A(N_A + N_D)}}$$

לכן, כאשר המרחק בין השערים  $2a$ , הרוחב האפקטיבי של התעלה הוא:

$$\ell(y) = 2a - 2d_n = 2(a - d(y)) = 2 \cdot \left( a - \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r(V_{bi} + V_{GS} - V(y))N_D}{qN_A(N_A + N_D)}} \right)$$

9. אנו לא כוללים את אזורי המחסור בתעלה משום שנושאי הרוב שנכנסים לאזור המחסור נמשכים, ע"י השדה החשמלי העצמתי שבשכבה, חזרה אל התעלה, ולכן באזור המחסור אין זרם נושאי רוב (של התעלה).

10. אנו מאריקים את החיבור  $S$ , ולכן הפוטנציאל שם 0. בתעלה מסוג  $P$ , הפוטנציאל ב  $D$  קטן יותר מאשר ב  $S$ , וזאת כדי לגרום לזרם  $I_{DS}$  שלילי (כיוון הפוך שמתאור בציר), כפי שראינו בשאלה 5. הפוטנציאל בנקודה  $D$  הוא מתח המקור  $V_{DS}$ . בתעלה מסוג  $N$ , ע"פ הגבלות השאלה, יש לתת מתח  $V_{DS}$  חיובי דווקא, כדי לגרום לזרם חיובי.

11. בתעלה מסוג  $P$ , הביטוי עבור צפיפות זרם סחיפה הוא  $J_h = q\mu_h pE$ . מהגדרת הפוטנציאל,  $E = -\frac{\partial V}{\partial y}$

וכאשר מספר החורים הוא מספר הסיגים הנוטלים,  $N_A$ , והמתח  $V(y)$  קטן בכיוון  $y$ , נקבל

$$J(y) = q\mu_h p\vec{E} = q\mu_h N_A \frac{dV}{dy}$$

12. בתעלה מסוג  $P$ , שטח החתך של התעלה המתקבל הוא מכפלת רוחבה המשתנה  $\ell(y)$  באורכה הקבוע  $W$ ,

כלומר שטח התעלה נתון ע"י הביטוי  $A(y) = W\ell(y) = 2W \left( a - \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r(V_{GS} - V(y))N_D}{qN_A(N_D + N_A)}} \right)$  כאשר

הזנחנו את  $V_{bi}$ , כפי שנאמר בשאלה 10. נותר להכפיל את צפיפות הזרם בשטח ולקבל את הביטוי לזרם:

$$I_{DS} \triangleq I(y) = A(y)J(y) = 2q\mu_h W N_A \frac{dV}{dy} \left( a - \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r(V_{GS} - V(y))N_D}{qN_A(N_D + N_A)}} \right)$$

13. בתעלה מסוג  $P$ , הביטוי לזרם שקיבלנו בשאלה 12:

$$I_{DS} dy = 2q\mu_h W N_A dV \left( a - \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r(V_{GS} - V(y))N_D}{qN_A(N_D + N_A)}} \right)$$

נבצע אינטגרציה על התעלה ונקבל:

$$\int_0^L I_{DS} dy = \int_0^{V_{DS}} 2q\mu_h W N_A dV \left( a - \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r(V_{GS} - V)N_D}{qN_A(N_D + N_A)}} \right)$$

מכיוון שהזרם קבוע בתעלה, נקבל

$$\int_0^L I_{DS} dy = \int_0^{V_{DS}} 2q\mu_h W N_A dV \left( a - \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r(V_{GS} - V)N_D}{qN_A(N_A + N_D)}} \right)$$

$$L \cdot I_{DS} = 2q\mu_h W N_A \int_0^{V_{DS}} \left( a - \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r N_D}{qN_A(N_A + N_D)}} \sqrt{V_{GS} - V} \right) dV$$

$$= 2q\mu_h W N_A \left[ aV + \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r N_D}{qN_A(N_A + N_D)}} \frac{2}{3} (V_{GS} - V)^{\frac{3}{2}} \right]_0^{V_{DS}}$$

$$= 2q\mu_h W N_A \left( aV_{DS} + \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r N_D}{qN_A(N_A + N_D)}} \frac{2}{3} \left( (V_{GS} - V_{DS})^{\frac{3}{2}} - (V_{GS})^{\frac{3}{2}} \right) \right)$$

ולכן זרם החורים (בכיוון מהשפך  $D$  למקור  $S$ ):

$$I_{DS} = \frac{2q\mu_h W N_A a}{L} \left( V_{DS} + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r N_D}{q a^2 N_A (N_A + N_D)}} \left( (V_{GS} - V_{DS})^{\frac{3}{2}} - (V_{GS})^{\frac{3}{2}} \right) \right)$$

14. נגדיר את מקדם המוליכות בצורה הבאה :

$$G_0 \triangleq \frac{2q\mu_h N_A W a}{L}$$

נחשב את היחידות של מקדם זה :

$$[G_0] = \left[ \frac{2q\mu_h N_A W a}{L} \right] = \frac{Cb \frac{\text{sec}}{[E]} \frac{1}{m^3} m \cdot m}{m} = \frac{Cb}{m \cdot [E] \text{sec}} = \frac{[I]}{m[E]} = \frac{A}{V} = \frac{1}{\Omega} = \sigma$$

15. בתעלה מסוג  $P$ , התנגדות התעלה כפונקציה של  $V_{GS}$  הינה :

$$R(V_{GS}) = \frac{V_{DS}}{I_{DS}} = \frac{V_{DS}}{G_0 \left( V_{DS} + \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r N_D}{qa^2 N_A (N_A + N_D)}} \frac{2}{3} \left( (V_{GS} - V_{DS})^{\frac{3}{2}} - (V_{GS})^{\frac{3}{2}} \right) \right)}$$

מההנחה ש-  $V_{DS} \ll V_{GS}$  נפתח לטור ונקבל :

$$\begin{aligned} R &= \frac{V_{DS}}{I_{DS}} = \frac{V_{DS}}{G_0 \left( V_{DS} + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r N_D}{qa^2 N_A (N_A + N_D)}} \left( (V_{GS} - V_{DS})^{\frac{3}{2}} - (V_{GS})^{\frac{3}{2}} \right) \right)} = \\ &= \frac{V_{DS}}{G_0 \left( V_{DS} + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r N_D}{qa^2 N_A (N_A + N_D)}} (V_{GS})^{\frac{3}{2}} \left( \left( 1 - \frac{V_{DS}}{V_{GS}} \right)^{\frac{3}{2}} - 1 \right) \right)} \\ &\stackrel{\sim}{=} \frac{V_{DS}}{G_0 \left( V_{DS} + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r N_D}{qa^2 N_A (N_A + N_D)}} (V_{GS})^{\frac{3}{2}} \left( 1 - \frac{3}{2} \frac{V_{DS}}{V_{GS}} - 1 \right) \right)} \\ &= \frac{1}{G_0 \left( 1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r N_D}{qa^2 N_A (N_A + N_D)}} (V_{GS})^{\frac{1}{2}} \left( \frac{3}{2} \right) \right)} \\ &\Rightarrow R \sim \frac{1}{G_0 \left( a - \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r N_D V_{GS}}{q N_A (N_A + N_D)}} \right)} \end{aligned}$$

קל לראות מהביטוי שכאשר  $V_{GS} \rightarrow 0$  נקבל התנגדות מינימאלית ששווה ל

$$R_{\min} = \frac{1}{G_0} = \frac{L}{2q\mu_h W N_A a}$$

בנוסף, ככל ש  $V_{GS}$  גדל בערכו המוחלט ההתנגדות גדלה. בהכרח, ההתנגדות המכסימלית מתקבלת כאשר  $V_{GS}$  הוא כזה ששכבת המחסור מכסה את כל התעלה (נסמן מתח זה ב  $V_{GS \max}$ ). התנגדות זו מתקבלת, אפוא, כאשר

$$d(V_{GS}) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r N_D V_{GS}}{q N_A (N_A + N_D)}} \xrightarrow{V_{GS} \rightarrow V_{GS \max}} a$$

כאשר  $d$  הוא גודל שכבת המחסור ליד אחד השערים.

16. אם מתעלמים משכבת המחסור, כלומר מסתכלים על ההתקן כאשר אין כלל שער – ישנה רק תעלה, אנו בעצם מספקים מתח לפיסת סיליקון בודדה, ולכן, תיאורטית, נקבל תלות ליניארית של הזרם  $I_{DS}$  במתח  $V_{DS}$  מכיוון ש

$$I_{DS} \propto J \propto E \propto V_{DS}$$

17. בתעלה מסוג  $P$ , אם אנו מתייחסים רק לשכבת המחסור, כלומר נתון  $V_{GS}$  קבוע שעבורו ישנה שכבת מחסור בעובי מסוים, הקטנה של  $V_{DS}$  (או במקרה של תעלת  $N$  - הגדלת  $V_{DS}$ ) תתואר ע"י ההתנהגות הבאה:

- עבור  $|V_{DS}|$  קטנים מאוד, אין השפעה על שכבת המחסור וכך נקבל התנהגות ליניארית של הזרם  $I_{DS}$  במתח  $V_{DS}$  (כי ההתנגדות של התעלה לא תשתנה)
- עבור  $|V_{DS}|$  הולכים וגדלים, הזרם  $I_{DS}$  יגדל, אך בקצב קטן, מכיוון שהגדלת  $|V_{DS}|$  מקטינה את עובי התעלה.  $I_{DS}$  יגדל עד ערך רוויה מקסימאלי, מכיוון שנגיע למצב pinch-off, שבו שכבות המחסור של כל שער נוגעות זו בזו, דבר שיוצר שכבת מחסור רציפה בין השערים, וגורם לזרם להפסיק לגדול.

18. בתעלה מסוג  $P$ , נגדיר את הגודל הבא:

$$V_P \triangleq V_{GS} - V_{DS}(sat) = V_{GD}$$

גודל זה הוא יהיה מתח ההדקים בשאלה זו. התעלה נסגרת כאשר

$$\ell = 2(a - d(L)) = 0 \Rightarrow d(L) = a$$

$$\sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r(V_{GS} - V(L))N_D}{qN_A(N_A + N_D)}} = a$$

$$\sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r(V_{GS} - V_{DS})N_D}{qN_A(N_A + N_D)}} = a$$

אם  $V(L)$  הוא המתח בקצה התעלה, כלומר  $V(L) = V_{DS}(sat)$ , אזי  $V_{DS}(sat)$  יהיה המתח המינימאלי שבו נקבל סגירת תעלה. נחשב מתח זה:

$$\sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r V_P N_D}{qN_A(N_A + N_D)}} = a$$

$$\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r V_P N_D}{qN_A(N_A + N_D)} = a^2$$

$$V_P \triangleq \frac{qN_A(N_A + N_D)a^2}{2\varepsilon_0\varepsilon_r N_D}$$

כל מתח  $V_{DS} > V_{DS}(sat)$ , לא יפסיק את הצביטה, ולכן עדיין התעלה תהיה סגורה ונקבל זרם רוויה.

19. את הביטוי האנליטי קיבלנו בשאלה הקודמת

$$V_P \triangleq \frac{qN_A(N_A + N_D)a^2}{2\varepsilon_0\varepsilon_r N_D}$$

בתעלה מסוג  $P$ ,  $V_P = V_{GS} - V_{DS}(sat) = V_{GD} > 0$ , כי  $V_{GS} > 0$  ו  $V_{DS} < 0$ .

בתעלה מסוג  $N$ ,  $V_P = V_{GS} - V_{DS}(sat) = V_{GD} < 0$ , כי  $V_{GS} < 0$  ו  $V_{DS} > 0$ .

20. מעל נקודת הצביטה (כאמור, pinch-off), באופן אידיאלי, זרם הרוויה  $I_{DS}(sat)$  לא יהיה כלל תלוי במתח  $V_{DS}$ . כפי שראינו בטרנזיסטור ה-MOS, כנראה הזרם לא יהיה קבוע לגמרי, אלא יגדל מעט, בגלל שאורך התעלה קטן באופן מעשי.

21. בתעלה מסוג  $P$ , כדי לחשב את  $I_{DS}(sat)$  נציב את  $V_P$  בביטוי לזרם :

$$\begin{aligned}
 I_{DS}(sat) &= G_0 \left( V_{DS} - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r N_D}{qa^2 N_A (N_A + N_D)}} \left( (V_{GS})^{\frac{3}{2}} - (V_{GS} - V_{DS})^{\frac{3}{2}} \right) \right) \\
 &= G_0 \left( V_{DS} - \frac{2}{3} (V_P)^{\frac{1}{2}} \left( (V_{GS})^{\frac{3}{2}} - (V_P)^{\frac{3}{2}} \right) \right) = G_0 \left( V_{GS} - V_P - \frac{2}{3} \left( (V_P)^{\frac{1}{2}} (V_{GS})^{\frac{3}{2}} - (V_P)^{\frac{3}{2}} \right) \right) \\
 &= G_0 \left( V_{GS} - V_P - \frac{2}{3} (V_P)^{\frac{1}{2}} (V_{GS})^{\frac{3}{2}} + \frac{2}{3} V_P \right) = G_0 \left( V_{GS} - \frac{1}{3} V_P - \frac{2}{3} (V_P)^{\frac{1}{2}} (V_{GS})^{\frac{3}{2}} \right) \\
 &= G_0 \left( V_{GS} \left( 1 - \frac{2}{3} (V_P)^{\frac{1}{2}} (V_{GS})^{\frac{1}{2}} \right) - \frac{1}{3} V_P \right) = G_0 \left( V_{GS} \left( 1 - \frac{2}{3} (V_P)^{\frac{1}{2}} (V_{GS})^{\frac{1}{2}} \right) - \frac{1}{3} V_P \right) \\
 &= G_0 \left[ V_{GS} \left( 1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{V_{GS}}{V_P}} \right) - \frac{1}{3} V_P \right]
 \end{aligned}$$

בתעלה מסוג  $N$ ,  $V_P$  וגם  $V_{GS}$  יהפכו סימנים, ולכן נקבל את הביטוי

$$I_{DS}(sat) = -G_0 \left[ V_{GS} \left( 1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{V_{GS}}{V_P}} \right) - \frac{1}{3} V_P \right]$$

חלק 2 – סימולציה ותכנון

נשתמש בערכים:

$$d_1 = 8 \geq d_2 = 6$$

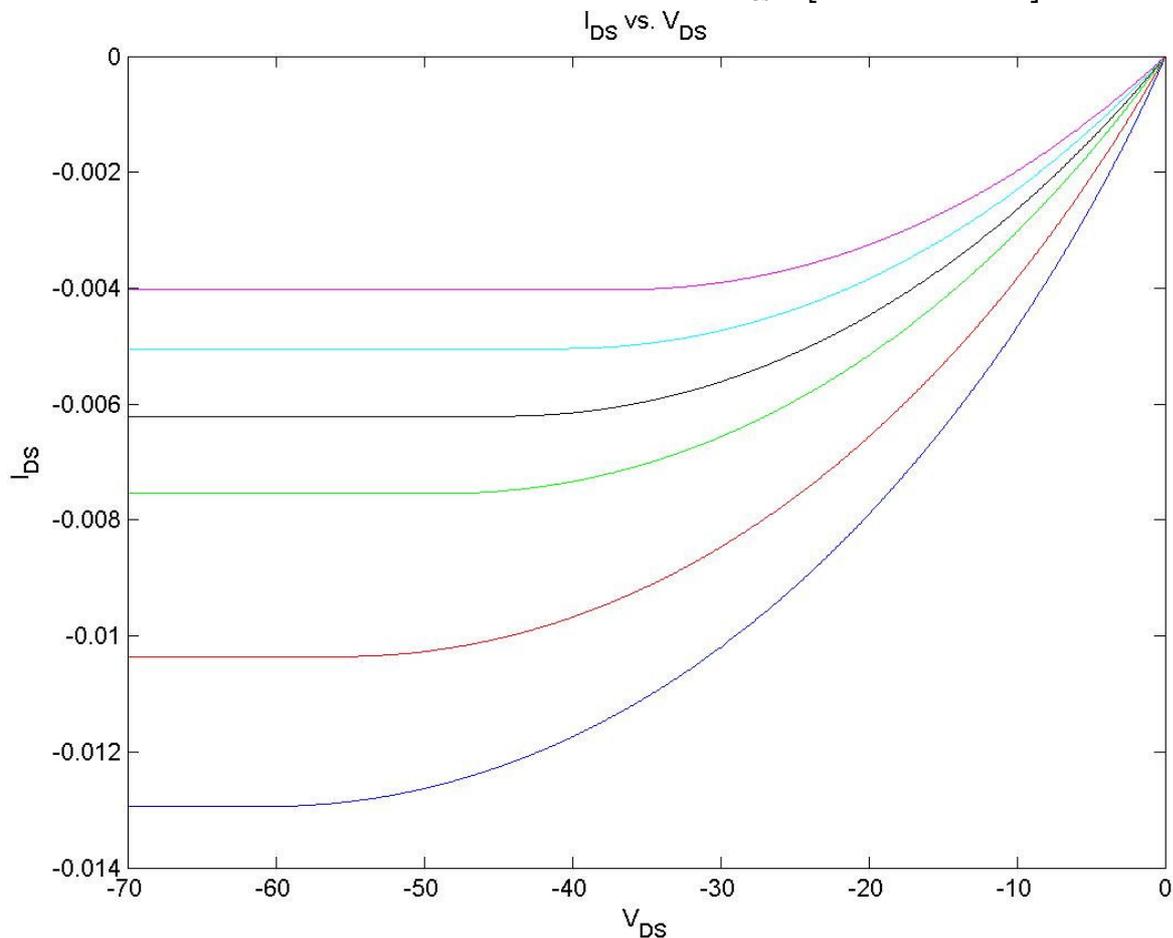
$$\Rightarrow \begin{cases} L = 960 \mu [cm] \\ W = 1600 \mu [cm], \quad N_D = 8 \cdot 10^{16} cm^{-3}, \quad N_A = 6 \cdot 10^{15} cm^{-3} \\ a = 300 \mu [cm] \end{cases}$$

.22 בתעלה מסוג  $P$ , נכתוב את הביטוי לזרם:

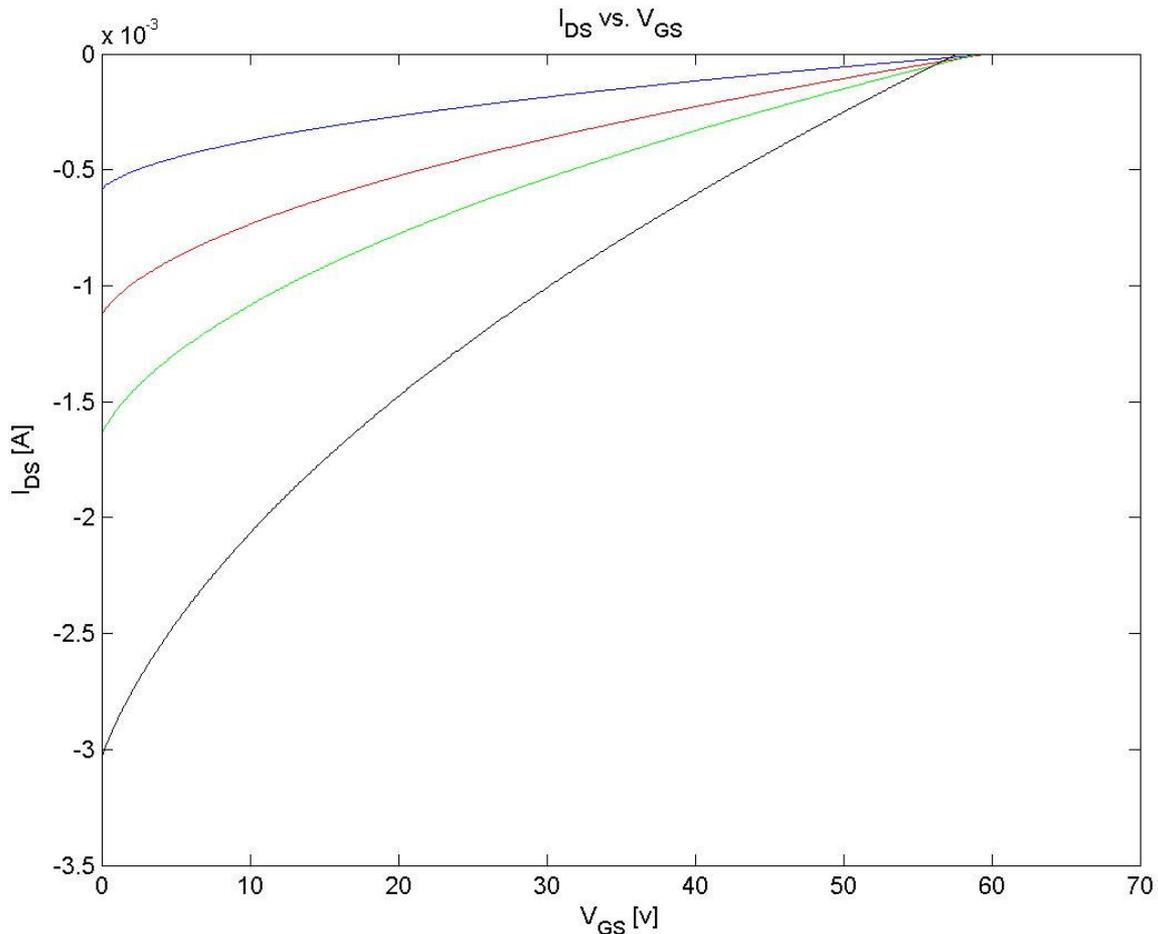
$$I_{DS} = G_0 \left( V_{DS} + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{1}{V_P}} \left( (V_{GS} - V_{DS})^{\frac{3}{2}} - (V_{GS})^{\frac{3}{2}} \right) \right)$$

 $G_0$  הוא קבוע עבור הטרנזיסטור:

$$G_0 \triangleq \frac{2q\mu_n N_A W a}{L} = 8.5333 \mu S$$

הגרף שהתקבל, עבור  $V_{GS} = [0, 5, 12, 16, 20, 24]$ 

23. הגרף שהתקבל, עבור  $V_{DS} = [-3, -6, -12, -20, -25, -50]$



24. עבור שאלה 22, גרף  $I_{DS}$  כפונקציה של  $V_{DS}$ , אנו רואים התנהגות דומה לטרנזיסטור MOS, כלומר כאשר  $|V_{DS}|$  קטן אנו בתחום הליניאריות, וכאשר  $|V_{DS}|$  עובר סף מסוים (שאותו נראה בהמשך), מתקבל אפקט pinch-off בטרנזיסטור והזרם מגיע לרוויה. תחום הקיטעון הוא כאשר לא מפעילים ממתח חיצוני על הטרנזיסטור,  $V_{DS} = 0$ , ולכן אין זרם.

עבור שאלה 23, גרף  $I_{DS}$  כפונקציה של  $V_{GS}$ , אנו מבחינים בשני תחומים: הזרם  $|I_{DS}|$  קטן ככל ש  $|V_{GS}|$  גדל, וכך התעלה נסגרת יותר ויותר, עד התחום השני, בו הזרם מתאפס והגדלת  $|V_{GS}|$  לא תשפיע יותר על הזרם, כי התעלה סגורה לגמרי בצד ה Source.

25. הביטוי שקיבלנו לזרם הוא, אפוא, הביטוי הבא:

$$I_{DS} = \frac{2q\mu_h W N_A a}{L} \left( V_{DS} + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r N_D}{qa^2 N_A (N_A + N_D)}} \left( (V_{GS} - V_{DS})^{\frac{3}{2}} - (V_{GS})^{\frac{3}{2}} \right) \right)$$

בהינתן  $V_{GS} = 5[V]$  ניקח  $V_{DS} = -4[V]$  שהוא מתח שבו האופייני  $I_{DS}(V_{DS})$  הוא ליניארי.

נשנה את הפרמטרים  $N_A, N_D, L$  באופן הבא (חושב בעזרת Matlab):

$$N_A^* = 1.0775 N_A$$

$$N_D^* = 0.143 N_D$$

$$L^* = 0.9091 L$$

שינוי ערכים אלו יגרום לגידול של 10% ב-  $I_{DS}$

- הגדלת  $N_A$  גורמת לגידול מספר החורים מצד אחד, ומצד שני היא מביאה להקטנת אזור המחסור בתעלה.
- הקטנת  $N_D$  מאפשרת הגדלת התעלה מפני שאזור המחסור שנוצר בין התעלה לשער מתפשט ברובו בשער.
- הקטנת  $L$  גורמת להקטנת ההתנגדות ולכן להגדלת הזרם.

26. נשנה את הפרמטרים  $N_A, a, \epsilon_{si}$  באופן הבא :

$$N_A^* \sim 1.091N_A, \quad a^* \sim 1.0489a, \quad N_D^* \sim 0.477N_D$$

שינוי ערכים אלו יגרום לגידול של 10% ב- $V_P$ .

- הגדלת  $N_A$  גורמת להקטנת אזור המחסור בתעלה, כלומר להגדלת התעלה, ולכן המתח שצריך להשקיע בכדי לחסום את התעלה בצד  $V_P, D$ , גדל.
- הגדלת  $a$  גורמת להגדלת התעלה, ולכן המתח שצריך להשקיע בכדי לחסום את התעלה בצד  $V_P, D$ , גדל.
- הקטנת  $N_D$  מאפשרת הגדלת התעלה מפני שאזור המחסור שנוצר בין התעלה לשער מתפשט ברובו בשער. המתח שצריך להשקיע לכן בכדי לחסום את התעלה בצד  $V_P, D$ , גדל.

27. הביטוי לזרם הרוויה הוא :

$$I_{DS}(sat) = G_0 \left( V_{GS} \left( 1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{V_{GS}}{V_P}} \right) - \frac{1}{3} V_P \right)$$

נגזור את הביטוי :

$$\frac{dI_{DS}(sat)}{dV_{GS}} = G_0 \left( 1 - \frac{1}{3} \sqrt{\frac{1}{V_P V_{GS}}} \right) = \frac{q\mu_h W N_A a}{L} \left( 1 - \frac{1}{3} \sqrt{\frac{1}{V_P V_{GS}}} \right)$$

הפרמטרים שאותם אנו יכולים לשנות הם  $a, L, W$  והסימומים  $N_A, N_D$ .

- הגדלת/הקטנת עומק התעלה  $W$  תיתן הקטנה/הגדלה של התנגדות התעלה ולכן גידול/קיטון ב  $\frac{\partial I_{DS}(sat)}{\partial V_{GS}}$

כדי להקטין את  $\frac{\partial I_{DS}(sat)}{\partial V_{GS}}$  נרצה להשתמש ברוחב חדש  $W^* = 0.9W$ .

- הגדלת/הקטנת אורך התעלה  $L$  תיתן הגדלה/הקטנה של התנגדות התעלה ולכן קיטון/גידול ב  $\frac{\partial I_{DS}(sat)}{\partial V_{GS}}$

כדי להקטין את  $\frac{\partial I_{DS}(sat)}{\partial V_{GS}}$  נרצה להשתמש באורך חדש  $L^* = 1.1L$ .

- הגדלת/הקטנת רוחב התעלה  $a$  תיתן הקטנה/הגדלה של התנגדות התעלה ולכן גידול/קיטון ב  $\frac{\partial I_{DS}(sat)}{\partial V_{GS}}$

כדי להקטין את  $\frac{\partial I_{DS}(sat)}{\partial V_{GS}}$  נרצה להשתמש ברוחב חדש  $a^* = 0.9a$ .

28. נתבונן בביטוי הבא :

$$I_{DS} = G_0 \left( V_{DS} - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r N_D}{qa^2 N_A (N_A + N_D)}} \left( (V_{GS})^{\frac{3}{2}} - (V_{GS} - V_{DS})^{\frac{3}{2}} \right) \right)$$

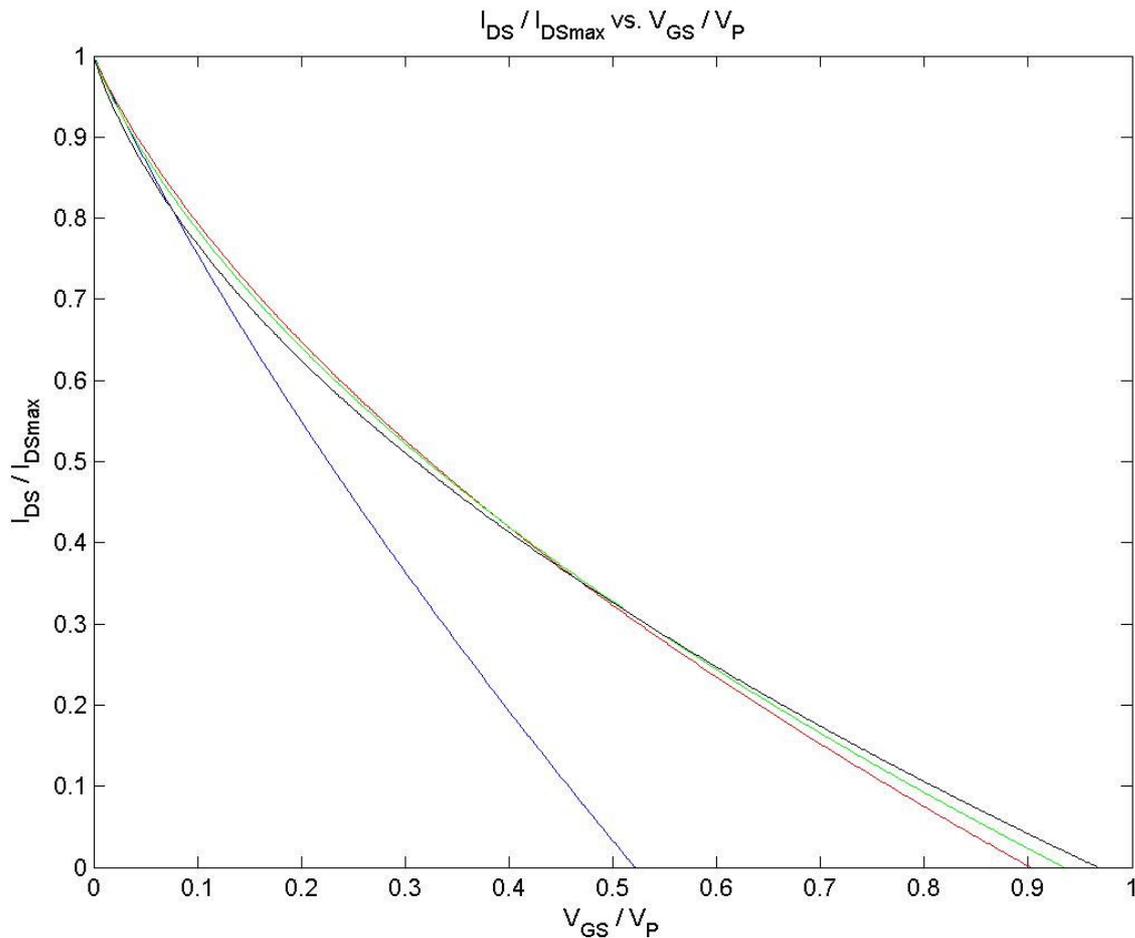
בתעלה מסוג  $P$ , בהינתן  $V_{DS} < 0$  קבוע, יש לתת מתח שער שיקטין את אזור המחסור ככל הניתן, מבחינה מעשית, ידוע שלא ניתן ליישר את פסי האנרגיה לגמרי, ולכן נבחר  $V_{GS} = 0$  ונקבל את הביטוי הבא :

$$I_{DS\max} = G_0 \left( V_{DS} + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{1}{V_P}} \left( (-V_{DS})^{\frac{3}{2}} \right) \right)$$

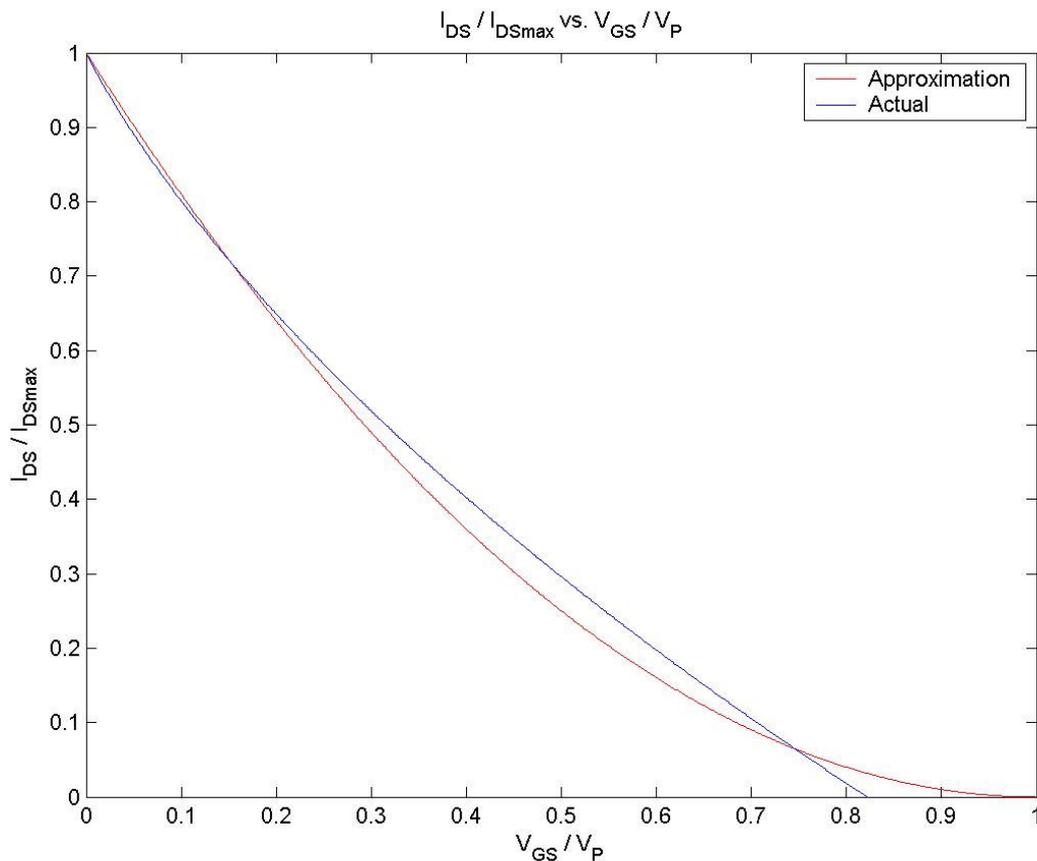
נציין כי הזרם המכסימלי שנוכל לקבל בטרנזיסטור יהיה עבור  $|V_{DS}| \geq |V_{DS}(sat)| = V_P$  ו-  $V_{GS} = 0$  וערכו יהיה :

$$I_{DS\max} = G_0 \left( V_{DS} + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{1}{V_P}} \left( (-V_{DS})^{\frac{3}{2}} \right) \right) \Big|_{|V_{DS}|=V_P} = -G_0 \frac{5}{3} V_P$$

29. קיבלנו את הגרף הבא, עבור הערכים  $V_{DS} = [-V_P, -12, -8, -4, 0]$ :



30. עבור  $V_{DS} = -22[V]$ , נקבל את הגרפים הבאים:

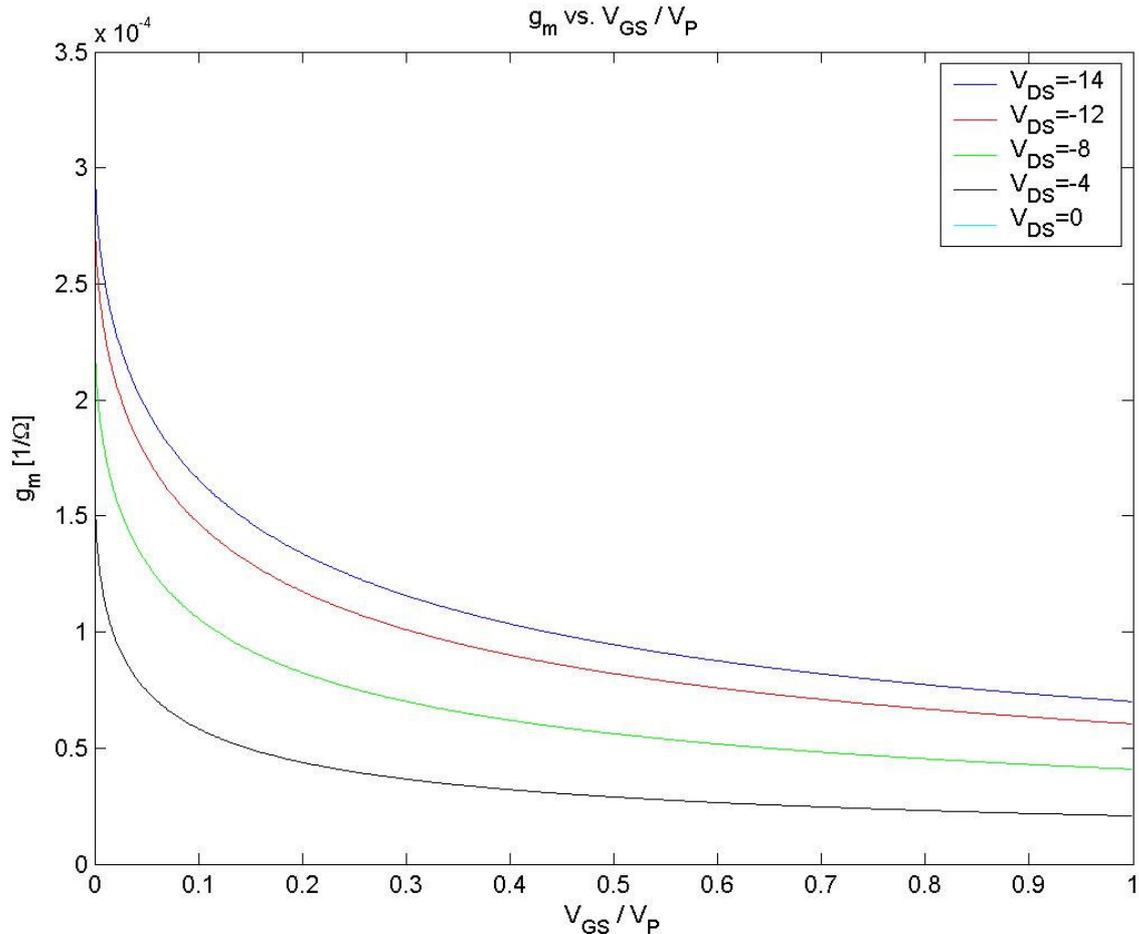


אנו רואים שעבור  $\frac{V_{GS}}{V_P} < 0.2$  הגרפים מתלכדים.

$$\begin{aligned}
 g_m &\triangleq \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} = G_0 \frac{d}{dV_{GS}} \left( V_{DS} - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r N_D}{qa^2 N_A (N_A + N_D)}} \left( (V_{GS})^{\frac{3}{2}} - (V_{GS} - V_{DS})^{\frac{3}{2}} \right) \right) \\
 &= G_0 \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r N_D}{qa^2 N_A (N_A + N_D)}} \left( \sqrt{V_{GS} - V_{DS}} - \sqrt{V_{GS}} \right) \\
 &= G_0 \sqrt{\frac{1}{V_P}} \left( \sqrt{V_{GS} - V_{DS}} - \sqrt{V_{GS}} \right)
 \end{aligned}$$

הביטוי האנליטי הנ"ל תלוי במתחי ההדקים של הטרנזיסטור  $V_{GS}, V_{DS}$ , וכמובן במאפייני ההתקן.

הגרף שקיבלנו :



הגרף מתיישב עם ההבנה הפיזיקאלית שלנו - המוליכות גדלה כאשר  $V_{GS} \rightarrow 0$  וקטנה כאשר  $V_{GS} \rightarrow V_P$ .

32. ההבדלים העיקריים בין טרנזיסטור MOS ל-JFET הם :
- בטרנזיסטור MOS דרוש להפעיל מתח  $V_{GS}$  על מנת לקבל הולכה, ובטרנזיסטור JFET דרשה הפעלה של המתח  $V_{GS}$  כדי להקטין את ההולכה.
  - בטרנזיסטור MOS ישנה הולכה החל ממתח סף  $V_T$  מסוים, ובטרנזיסטור JFET ההולכה נקטעת במתח  $V_{GS}$  מסוים.
  - בטרנזיסטור MOS, התעלה בנויה מנושאי מיעוט שמצטברים על מצע מסוג הפוך לנושאי מיעוט אלו, ובטרנזיסטור JFET התעלה בנויה מנושאי רוב שקיימים כבר בתעלה.
  - טרנזיסטור MOS מסובך יותר לבניה, כי יש לו שכבת בידוד ומתכת. בטרנזיסטור JFET יש רק סיליקון עם סימומים שונים.
  - באשר ליתרון הטרנזיסטור המדובר : JFET הוא אכן טרנזיסטור יותר מגושם, אבל אם נביט בקיבול MOS מעשי, בשכבת התחמוצת, נראה שהוא בסדר גודל של  $10^{-7} \left[ \frac{F}{cm} \right]$ , ואילו הקיבול המעשי של טרנזיסטור JFET טיפוסי הוא בסדר גודל של  $10^{-14} \left[ \frac{F}{cm} \right]$ , ולכן לטרנזיסטור JFET אימפדנס כניסה גבוה יותר.
34. ניתן להפעיל את ההתקן עם  $V_{GS}$  שלילי (קדמי) אבל במתחים קטנים מאוד ביחס ל-  $V_{BI}$ , מכיוון שבמתחים שליליים יותר הדיודה תהיה בממתח קדמי ויוצרו זרמים לא רצויים מהשער לתעלה.