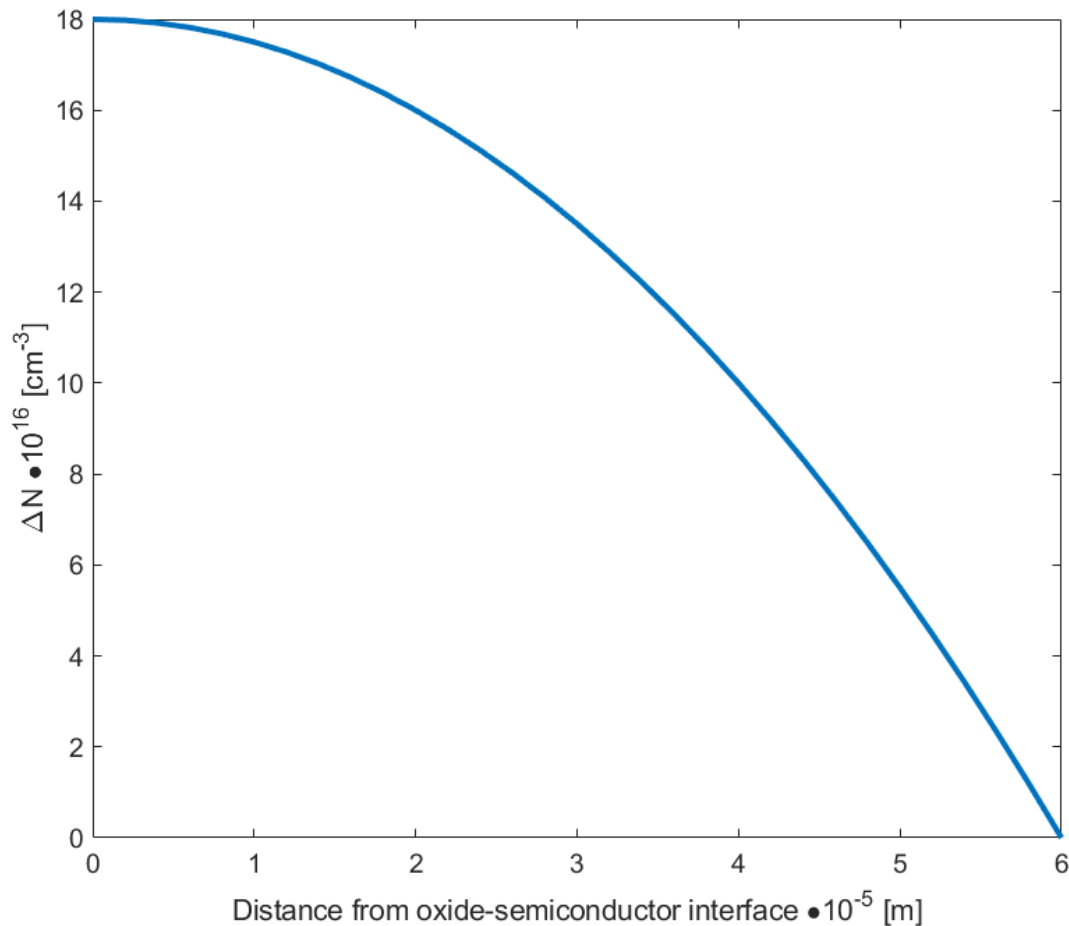


תרגיל בית 3

שאלה 1 – פרופיל אילוח מצע משתנה במרחב

נתון טרנזיסטור N-MOS בעל פרופיל אילוח חצי פרבולי (לא ניתן להניח קירוב לפונקציית מדרגה).

ניתן לתאר את פרופיל האילוח בתחום $0 < x < x_s$ כך ש $\Delta N(x) = a - \frac{x^2}{b}$, כאשר $N_B = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ו- $a = 18 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; $b = 2 \cdot 10^{-22} \text{ cm}^5$.



א. מהו רוחב שכבת המחסור כאשר $V_G = V_T$? יש להגיע לביטוי התלוי בפרמטרים הנתונים. הנחיה:

I. יש לחשב את סך כל השדה בשכבת המחסור לפי חוק גאוס, כתלות בx. בדיקה:

- מהו השדה המקסימלי לפי הביטוי הנ"ל? עבור איזה ערך של x הוא מתקבל?
 - מהו השדה המינימלי לפי הביטוי הנ"ל? עבור איזה ערך של x הוא מתקבל?
 II. יש לחשב את הפוטנציאל כתלות בx באיזור המחסור (זהו פוטנציאל פני-שטח)

III. ניתן לומר שפרופיל הפוטנציאל בשכבת המחסור משתנה בשני תחומים, $0 < x < x_s$ ו- $x_s < x < W_{dm}$

- יש לחשב את הפוטנציאל שנוצר בשכבת המחסור בהתאם לתחומים הנ"ל
 IV. יש לבדוד את הביטוי לרוחב שכבת המחסור מהקשר הנ"ל

ב. יש להניח כי בסף ההיפוך $\psi_s = 2\psi_B$ (הקירוב מוצדק כיוון שפוטנציאל זה תלוי בצורה לוגריתמית באילוח) מה תהיה ההשפעה על שכבת מחסור עבור פרופיל אילוח חצי פרבולי כאשר $a' = 2a$?

ו- $b' = 2b$?

ג. מהו מתח הסף של ההתקן הנ"ל? יש להגיע לביטוי התלוי בפרמטרים הנתונים.

פתרון

א. כדי למצוא את W_{Dm} , ראשית יש להבין מהו פרופיל האילוח במרחב. האילוח הכולל מורכב מפרופיל האילוח הפרבולי המתוסף לאילוח הבסיס (N_B):

$$N(x) = N_B + \Delta N(x) = N_B + a - \frac{x^2}{b}$$

נחשב את השדה לפי חוק גאוס,

$$\mathcal{E}(x) = -\frac{q}{\epsilon_s} \int_0^x N(x') dx'$$

נניח כי $W_{DM} > x_s$ ולכן :

$$\mathcal{E}(x) = -\frac{q}{\epsilon_s} \left[\int_0^{x_s} N_B + \Delta N(x') dx' + \int_{x_s}^x N_B dx' \right]$$

עבור $0 < x < x_s$:

$$\mathcal{E}(x) = -\frac{q}{\epsilon_s} \left[(N_B + a)x - \frac{x^3}{3b} + C_1 \right]$$

עבור $x_s < x < W_{Dm}$:

$$\mathcal{E}(x) = -\frac{q}{\epsilon_s} [N_B x + C_2]$$

תנאי שפה :

בקצה שכבת המחסור $x = W_{Dm}$ והשדה מתאפס.

$$0 = -\frac{q}{\epsilon_s} [N_B \cdot W_{Dm} + C_2]$$

$$C_2 = +\frac{q}{\epsilon_s} [N_B W_{Dm}]$$

רציפות השדה ב x_s :

$$\mathcal{E}(x_s) = -\frac{q}{\epsilon_s} \left[(N_B + a)x_s - \frac{x_s^3}{3b} + C_1 \right] = -\frac{q}{\epsilon_s} [N_B x_s - N_B W_{Dm}]$$

$$C_1 = \frac{x_s^3}{3b} - ax_s - N_B W_{Dm}$$

השדה המקסימלי מתקבל ב $x = 0$ ולכן :

$$|\mathcal{E}_{max}| = |\mathcal{E}_0| = \frac{q}{\epsilon_s} C_1$$

השדה שמתקבל :

עבור $0 < x < x_s$:

$$\mathcal{E}(x) = -\frac{q}{\epsilon_s} \left[(N_B + a)x - \frac{x^3}{3b} + C_1 \right]$$

עבור $x_s < x < W_{Dm}$:

$$\mathcal{E}(x) = -\frac{q}{\epsilon_s} [N_B x + C_2]$$

הקשר בין שדה לפוטנציאל :

$$-\frac{dV(x)}{dx} = \mathcal{E}(x)$$

הפוטנציאל בשכבת המחסור :

$$\begin{aligned}
\psi_s &= - \int_0^{W_{Dm}} \mathcal{E}(x) dx \\
\psi_s &= \frac{q}{\varepsilon_s} \left[\int_0^{x_s} (N_B + a)x - \frac{x^3}{3b} + C_1 dx + \int_{x_s}^{W_{Dm}} N_B x - C_2 dx \right] \\
\psi_s &= \frac{q}{\varepsilon_s} \left[\left(\frac{(N_B + a)x^2}{2} - \frac{x^4}{12b} + C_1 x \right) \Big|_0^{x_s} + \left(\frac{N_B x^2}{2} - N_B W_{Dm} x \right) \Big|_{x_s}^{W_{Dm}} \right] \\
\psi_s &= \frac{q}{\varepsilon_s} \left[\left(\frac{N_B x_s^2}{2} + \frac{a x_s^2}{2} - \frac{x_s^4}{12b} + \frac{x_s^4}{3b} - a x_s^2 - N_B W_{Dm} x_s \right) \right. \\
&\quad \left. + \left(\frac{N_B W_{Dm}^2}{2} - N_B W_{Dm}^2 - \frac{N_B x_s^2}{2} + N_B W_{Dm} x_s \right) \right] \\
\psi_s &= \frac{q}{\varepsilon_s} \left(-\frac{a x_s^2}{2} + \frac{x_s^4}{4b} - \frac{N_B W_{Dm}^2}{2} \right) \\
\frac{\psi_s \varepsilon_s}{q} &= -\frac{a x_s^2}{2} + \frac{x_s^4}{4b} - \frac{N_B W_{Dm}^2}{2} \\
W_{Dm} &= \sqrt{\frac{2}{N_B} \left(-\frac{\psi_s \varepsilon_s}{q} - \frac{a x_s^2}{2} + \frac{x_s^4}{4b} \right)} \\
W_{Dm} &= \sqrt{\frac{1}{N_B} \left(-\frac{2\psi_s \varepsilon_s}{q} - a x_s^2 + \frac{x_s^4}{2b} \right)}
\end{aligned}$$

בסוף ההיפוך $\psi_s = 2\psi_B$ ולכן:

$$W_{Dm} = \sqrt{\frac{1}{N_B} \left(-\frac{4\psi_s \varepsilon_s}{q} - a x_s^2 + \frac{x_s^4}{2b} \right)}$$

הביטוי עבור שכבת המחסור שמתקבל שלילי לכל a, b (בהצבת $x_s = \sqrt{ab}$ מתקבל כי W_{Dm}

הביטוי עבור שכבת המחסור שמתקבל שלילי לכל a, b (בהצבת $x_s = \sqrt{ab}$ מתקבל כי W_{Dm} $\left(\sqrt{\frac{1}{N_B} \left(-\frac{4\psi_s \varepsilon_s}{q} - \frac{a^2 b}{2} \right)} \right)$ ולכן ניתן להסיק כי כל איזור המחסור נמצא בין התחמוצות והנקודה בעומק ההתקן בה נעשה שינוי בריכוז המזהמים.

ב. המשמעות של הגדלת הפרמטר a הינה הגדלת הערך של ΔN , יצירת פרופיל אילוח חד יותר. ההשפעה של כך היא הקטנת איזור המחסור

כיוון ש $\Delta N(x) = 0$ כאשר

$$x_s = \pm \sqrt{a \cdot b}$$

המשמעות של הגדלת המכפלה ab הינה הגדלת עומק מדרגת הריכוז (x_s). ההשפעה של כך היא הקטנת איזור המחסור.

ג. מתח סף מחושב לפי:

$$V_T = V_{FB} + \psi_s + \frac{Q_B}{C_{ox}}$$

כאשר במתח הסף:

$$\psi_s = 2\psi_B$$

התרומה של שכבת המחסור למתח הסף הינה:

$$\begin{aligned}\frac{Q_B}{C_{ox}} &= \frac{q}{C_{ox}} \int_0^{W_{Dm}} N(x) dx = \frac{q}{C_{ox}} \left[\int_0^{x_s} (N_B + a)x - \frac{x^3}{3b} dx + \int_{x_s}^{W_{Dm}} N_B x dx \right] \\ &= \frac{q}{C_{ox}} \left[\left((N_B + a)x - \frac{x^3}{3b} \right) \Big|_0^{x_s} + \left(N_B x \right) \Big|_{x_s}^{W_{Dm}} \right] \\ &= \frac{q}{C_{ox}} \left(N_B x_s + a x_s - \frac{x_s^3}{3b} + N_B W_{Dm} - N_B x_s \right)\end{aligned}$$

מתקבל כי :

$$V_T = V_{FB} + \psi_s + \frac{Q_B}{C_{ox}} = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{q}{C_{ox}} \left(a x_s - \frac{x_s^3}{3b} + N_B W_{Dm} \right)$$

כאשר W_{Dm} חושב בסעיף א.

שאלה 2 – זרמי תת-סף

נתון טרנזיסטור בעל תחמוצת שער בעובי של $11 \text{ \AA}$, השער עשוי n+ poly-Si והמצע הוא p-type Si, באילוח של $N_A = 1E18 \text{ cm}^{-3}$. בנוסף נתון כי $Z = 1 \text{ }\mu\text{m}$, $L = 18 \text{ nm}$, ועבור מתח drain מסוים נתון כי $I_{ds} = 100Z/L \text{ (nA)}$ כאשר $V_g = V_t$

- מהו מתח הסף בהתקן?
- מהו ערך ה-subthreshold swing, S?
- מהו זרם הזליגה (הזרם כאשר $V_g = 0$)?

פתרון

א.

$$V_T = V_{FB} + \frac{Q_{dep}(\psi_s = 2\psi_B)}{C_{ox}} + 2\psi_B$$

$$V_{FB} = (\phi_{PS} - \phi_S) - \frac{Q_{fixed}}{C_{ox}}$$

$$\psi_B = kT \cdot \ln\left(\frac{N_A}{ni}\right) = \ln\left(\frac{10^{18}}{10^{10}}\right) = 0.479[V]$$

נתון כי השער עשוי n+ poly-Si ולכן $\psi_{PS} \approx \chi_{Si} = 4.05[V]$ פונקציית העבודה של המצע, p-type Si, באילוח של $N_A = 1E18 \text{ cm}^{-3}$:

$$\psi_s = \chi_{Si} + (E_c - E_F) = \chi_{Si} + \frac{E_g}{2q} + kT \cdot \ln\left(\frac{N_A}{ni}\right) = 4.05 + 0.56 + 0.026 \ln\left(\frac{10^{18}}{10^{10}}\right) = 5.0889[V]$$

$$V_{FB} = 4.05 - 5.09 = -1.038[V]$$

קיבול התחמוצת :

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{SiO_2} \epsilon_0}{t_{ox}} = \frac{3.9 \cdot 8.85 \cdot 10^{-14}}{1.1 \cdot 10^{-7}} = 3.13 \cdot 10^{-6} \left[\frac{F}{cm^2} \right]$$

המטען בשכבת המחסור :

$$Q_{dep} = \sqrt{2qN_A\epsilon_{si}\epsilon_0(2\psi_B)}$$

$$= \sqrt{4 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} [C] \cdot 10^{18} \left[\frac{1}{cm^3} \right] \cdot 11.8 \cdot 8.85 \cdot 10^{-14} \left[\frac{F}{cm} \right] \cdot 0.479 [V] \cdot \frac{\left[\frac{C}{V \cdot cm} \right]}{\left[\frac{C}{cm^2} \right]}}$$

$$= 5.65 \cdot 10^{-7} \left[\frac{C}{cm^2} \right]$$

ולכן:

$$V_T = -1.038 [V] + \frac{5.658 \cdot 10^{-7} \left[\frac{C}{cm^2} \right]}{3.13 \cdot 10^{-6} \left[\frac{F}{cm^2} \right]} + 2 \cdot 0.479 [V] = 0.1 [V] = 100 [mV]$$

ב. ה-subthreshold swing מחושב עפ"י:

$$S = \ln 10 \frac{KT}{q} \frac{C_{ox} + C_{dep}}{C_{ox}}$$

כאשר

$$C_{ox} = 3.13 \cdot 10^{-6} \left[\frac{F}{cm^2} \right]$$

$$C_{dep} = \sqrt{\frac{\epsilon_s q N_A}{2\psi_s}} = \sqrt{\frac{11.8 \cdot 8.85 \cdot 10^{-14} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{18}}{2 \cdot 2 \cdot 0.479}} = 2.95 \cdot 10^{-7} \left[\frac{F}{cm^2} \right]$$

ולכן

$$S = \ln 10 \cdot 0.026 \frac{3.13 \cdot 10^{-6} + 2.95 \cdot 10^{-7}}{3.13 \cdot 10^{-6}} = 65.5 \left[\frac{mV}{dec} \right]$$

ג. ככל שאילוח המצע גבוה יותר, כך גדל ערכו של ה-subthreshold swing. ה-subthreshold swing מגדיר את שיפוע תחום תת-הסף הלינארי, ולכן ניתן לחלץ את שיפוע התחום הלינארי מהגדרת ה-subthreshold swing. בנוסף, ידועה ערכה של נקודה נוספת הנמצאת על ישר זה $(I_D(V_G = V_T), V_T)$ ומכאן ניתן לחלץ את ערך הנקודה $(I_D(V_G = 0))$:

$$S = \ln(10) \frac{dV_G}{d(\ln(I_D))}$$

$$\frac{d(\ln(I_D))}{\ln(10)} = \frac{dV_G}{S}$$

$$\left[\log_{10} x = \frac{\ln(x)}{\ln(10)} \right]$$

$$\log[I_{DS}(V_G = V_T)] - \log[I_{DS}(V_G = 0)] = \frac{1}{S}(V_T - 0)$$

$$\log[I_{DS}(V_G = 0)] = \log[I_{DS}(V_G = V_T)] - \frac{1}{S}(V_T)$$

$$\log[I_{DS}(V_G = 0)] = \log\left[100 \cdot \frac{1000}{18}\right] - \frac{1}{65.5}(100) = 2.21$$

$$I_{DS}(V_G = 0) = 165.2 [nA]$$

שאלה 3 – הקשר בין I_{on} ו- I_{off}

• I_{off} מוגדר להיות זרם הזליגה (הזרם כאשר $V_{gs}=0$)

• I_{on} מוגדר להיות הזרם כאשר $V_{GS}=V_{DS}=V_{DD}$

א. יש לציין כיצד ערכי הפרמטרים הבאים מגדילים או מקטינים את I_{on} ו I_{off} :

- I. עלייה של מתח הסף
- II. L גדול יותר
- III. צומת עמוקה יותר (r_j גדול יותר)
- IV. ערך V_{DD} נמוך יותר
- V. תחמוצת דקה יותר

יש לנמק

ב. מי מהפרמטרים הבאים תורם להקטנת זרם הזליגה מבלי לגרום להקטנה ב I_{on} ?

פתרון

על פי הגדה, $I_{ON} = I_D(V_G = V_{DD} > V_T, V_D = V_{DD})$, Normally off, $V_T > 0$, ולכן, $V_D = V_{DD} > V_G - V_T$ כך שבמצב זה הטרנזיסטור נמצא ברוויה. לעומת זאת, במצב OFF, $I_{OFF} = I_D(V_G = 0 < V_T, V_D = V_{DD})$, ולכן הטרנזיסטור נמצא בתחום התת-סף.

א.

- I. בהינתן כי מתח הסף עולה, ו- V_{DS} ו- V_{GS} נותרו קבועים, ריכוז הנשאים בתעלה יורד שכן מתח השער קרוב יותר למתח הסף. לכן, מוליכות התעלה יורדת ו I_{ON} יורד גם כן. כאשר מתח השער הוא 0, הטרנזיסטור רחוק יותר ממצב של הולכה (כאשר מתח השער הוא 0, פוטנציאל פני השטח רחוק יותר ממתח הסף) ולכן גם I_{OFF} יורד
- II. מתח הסף פרופורציונאלי ל L , ולכן, בדומה לסעיף I, תעלה ארוכה יותר תגרוור מתח סף גבוה יותר, ולכן, ערכם של I_{on} ו I_{off} יקטן.
- III. r_j הינו פרמטר גיאומטרי המגדיר את עקמומיות ה-drain וה-source. ככל שערכו של r_j גבוה יותר, כך הצומת עמוקה יותר ומכאן שהתעלה מתקצרת (L קטן). לכן במקרה זה ערכם של I_{on} ו I_{off} יגדל
- IV. ירידה בערכו של V_{DD} תגרוור V_{DS} נמוך יותר, ומכאן לשדה חלש יותר בתעלה, ומכאן ערכו של I_{off} יקטן. אם מנגנון הרוויה הוא Pinch-off, אז הקטנה של V_{DD} לא תגרוור לשינוי בזרם שכן במצב זה הטרנזיסטור יהיה ברוויה. אם מנגנון הרוויה הוא רווית מהירות, זרם הטרנזיסטור משתנה חלש עם V_D ולכן הקטנה של V_{DD} תגרוור ירידה בזרם I_{ON} .
- V. תחמוצת דקה יותר תגרוור לעליה בקיבול השער. נתבונן כיצד הזרם I_{ON} תלוי הקיבול השער. במידה ומדובר בתעלה רחבה ומנגנון הרוויה הוא pinch-off,

$$I_D = \frac{Z}{2ML} \mu_n C_{ox} (V_G - V_T)^2 = K C_{ox} (V_G - V_T)^2 = K C_{ox} (V_G^2 - 2V_G V_T + V_T^2)$$

נציב את הביטוי למתח הסף (לשם הפשטות נניח כי $V_{FB}=0$):

$$V_T = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{\sqrt{qN_A 2\epsilon_s (2\psi_B)}}{C_{ox}} = A + \frac{B}{C_{ox}}$$

$$I_D = K C_{ox} \left(V_G^2 - 2V_G \left(A + \frac{B}{C_{ox}} \right) + \left(A + \frac{B}{C_{ox}} \right)^2 \right)$$

$$= K \left(C_{ox} V_G^2 - 2V_G (A C_{ox} + B) + \left(C_{ox} A^2 + 2AB + \frac{B^2}{C_{ox}} \right) \right)$$

$$I_D = K \left(C_{ox} V_G^2 - 2V_G (A C_{ox} + B) + C_{ox} A^2 + 2AB + \frac{B^2}{C_{ox}} \right)$$

$$\frac{dI_D}{dC_{ox}} = K \left(V_G^2 - 2V_G A + A^2 - \frac{B^2}{C_{ox}^2} \right) = K \left((V_G - A)^2 - \frac{B^2}{C_{ox}^2} \right)$$

$$\frac{dI_D}{dC_{ox}} = K \left((V_G - 2\psi_B)^2 - \frac{qN_A 2\epsilon_s (2\psi_B)}{C_{ox}^2} \right)$$

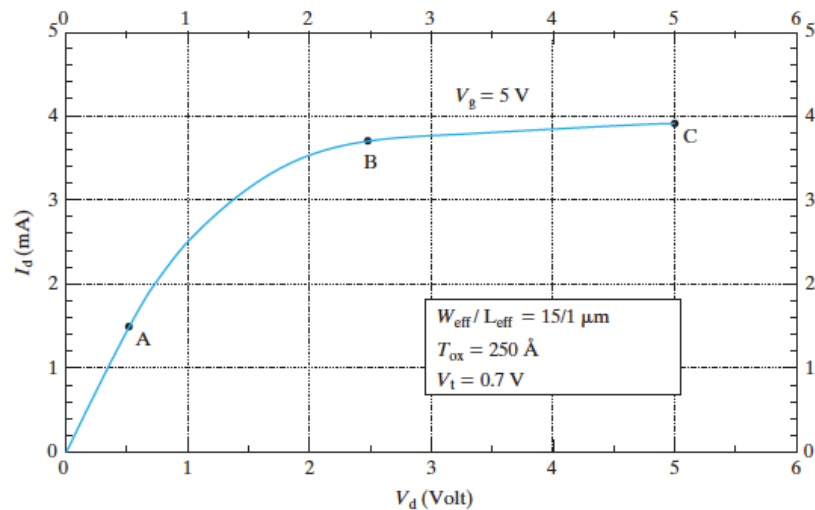
מאחר שמתח השער גדול ממתח הסף

$$V_G > 2\psi_B + \frac{\sqrt{qN_A 2\epsilon_s(2\psi_B)}}{C_{ox}} \Rightarrow (V_G - 2\psi_B)^2 > \frac{qN_A 2\epsilon_s(2\psi_B)}{C_{ox}^2}$$

ומכאן ש $-\frac{dI_D}{dC_{ox}} > 0$ זרם רוויה I_{ON} גדל ככל שעובי שכבת התחמוצות קטנה וקיבול השער גדל. כאשר $V_{FB}=0$, אין כיפוף פסים במל"מ כאשר מתח השער הוא 0 ולכן שינוי בעובי שכבת התחמוצות לא ישנה דבר ל- I_{OFF} . עם זאת, כאשר $V_{FB} \neq 0$ נניח בגלל מטען בשכבת התחמוצות, $\Delta V_T = -\frac{Q_F}{C_{ox}}$, ולכן, אם המטען שלילי עליה בקיבול תוביל לירידה מתח הסף ולעלייה בזרם I_{OFF} . לעומת זאת, אם המטען חיובי, מתח הסף יגדל בגלל עלייה בקיבול התחמוצות וכתוצאה מכך הזרם I_{OFF} ירד.

ב. כפי שראינו בסעיף האחרון, ישנם תנאים שבהם הקטנת עובי התחמוצות יכולה להוביל לירידה בזרם הזליגה מבלי לפגוע בזרם כאשר הטרנזיסטור במצב רוויה.

שאלה 4 – רוויית מהירות
נתונה עקומת I_d - V_d של טרנזיסטור NMOS:



א. למה שווה מהירות אלקטרונים בסמוך לdrain ובסמוך לsource עבור הנקודות A, B ו-C?
יש להשתמש בערכים:

- A: $I_{ds} = 1.5 \text{ mA}$ $V_{ds} = 0.5 \text{ V}$
- B: $I_{ds} = 3.75 \text{ mA}$ $V_{ds} = 2.5 \text{ V}$
- C: $I_{ds} = 4.0 \text{ mA}$ $V_{ds} = 5.0 \text{ V}$

ב. באילו מהנקודות (A, B או C) ההתקן ברוויית מהירות? נמק

פתרון

א. נניח כי $V_s = 0[V]$ ו- $V_{DS} = V(y=L)$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{SiO_2} \epsilon_0}{t_{ox}} = \frac{3.9 \cdot 8.85 \cdot 10^{-14}}{25 \cdot 10^{-7}} = 1.38 \cdot 10^{-7} \left[\frac{F}{cm^2} \right]$$

תחת ההנחות שצוינו בהרצאה 3, הזרם בתעלה הוא:

$$I_D(y) = Z|Q_n|v(y)$$

כאשר $v(y)$ היא מהירות נ"מ Z הוא רוחב הטרנזיסטור. ומכאן, מהירות האלקטרונים בסמוך לsource היא-

$$v(0) = \frac{I_D(0)}{Z} \cdot \frac{1}{|Q_n(0)|}$$

מהירות האלקטרונים בסמוך לdrain היא-

$$v(L) = \frac{I_D(L)}{Z} \cdot \frac{1}{|Q_n(L)|}$$

כאשר

$$\begin{aligned} |Q_n(y)| &= C_{ox}[V_G - V_T - \Delta\psi_i(y)] \\ |Q_n(0)| &= C_{ox}[V_G - V_T - 0] \\ |Q_n(L)| &= C_{ox}[V_G - V_T - V_{DS}] \end{aligned}$$

A: $I_{ds} = 1.5 \text{ mA}$ $V_{ds} = 0.5 \text{ V}$

$$v(0) = \frac{I_D(0)}{Z} \cdot \frac{1}{|Q_n(0)|} = \frac{1.5 \cdot 10^{-3} \text{ A}}{15 \cdot 10^{-4} \text{ cm}} \cdot \frac{1}{1.38 \cdot 10^{-7} \left[\frac{F}{\text{cm}^2} \right] [5 - 0.7] [V]} \stackrel{[A] = \left[\frac{C}{\text{sec}} \right]}{=} \stackrel{[F] = \left[\frac{C}{V} \right]}{=} \frac{1.68 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{cm}}{\text{sec}} \right]}{1}$$

$$\begin{aligned} v(L) &= \frac{I_D(L)}{Z} \cdot \frac{1}{|Q_n(L)|} = \frac{1.5 \cdot 10^{-3} \text{ A}}{15 \cdot 10^{-4} \text{ cm}} \cdot \frac{1}{1.38 \cdot 10^{-7} [5 - 0.7 - 0.5]} \\ &= 1.9 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{cm}}{\text{sec}} \right] \end{aligned}$$

B: $I_{ds} = 3.75 \text{ mA}$ $V_{ds} = 2.5 \text{ V}$

$$\begin{aligned} v(0) &= \frac{I_D(0)}{Z} \cdot \frac{1}{|Q_n(0)|} = \frac{3.75 \cdot 10^{-3} \text{ A}}{15 \cdot 10^{-4} \text{ cm}} \cdot \frac{1}{1.38 \cdot 10^{-7} [5 - 0.7]} = 4.213 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{cm}}{\text{sec}} \right] \\ v(L) &= \frac{I_D(L)}{Z} \cdot \frac{1}{|Q_n(L)|} = \frac{3.75 \cdot 10^{-3} \text{ A}}{15 \cdot 10^{-4} \text{ cm}} \cdot \frac{1}{1.38 \cdot 10^{-7} [5 - 0.7 - 2.5]} \\ &= 10.064 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{cm}}{\text{sec}} \right] \end{aligned}$$

C: $I_{ds} = 4.0 \text{ mA}$ $V_{ds} = 5.0 \text{ V}$

$$\begin{aligned} v(0) &= \frac{I_D(0)}{Z} \cdot \frac{1}{|Q_n(0)|} = \frac{4 \cdot 10^{-3} \text{ A}}{15 \cdot 10^{-4} \text{ cm}} \cdot \frac{1}{1.38 \cdot 10^{-7} [5 - 0.7]} = 4.49 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{cm}}{\text{sec}} \right] \\ v(L) &= \frac{I_D(L)}{Z} \cdot \frac{1}{|Q_n(L)|} = \frac{4 \cdot 10^{-3} \text{ A}}{15 \cdot 10^{-4} \text{ cm}} \cdot \frac{1}{1.38 \cdot 10^{-7} [5 - 0.7 - 5]} \\ &= 27.6 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{cm}}{\text{sec}} \right] \end{aligned}$$

המהירות שחושבה נומרית גבוהה ממהירות הרוויה של נ"מ בסיליקון, ולכן $v_{sat} \approx 10^7 \left[\frac{\text{cm}}{\text{s}} \right]$, ומכאן שההתקן נמצא ברוויה מהירות בנקודות B ו-C.

ב. ההתקן נמצא ברוויה מהירות כאשר מהירות נ"מ מגיעה לערך של מהירות רוויית נ"מ בסיליקון, $v_{sat} \approx 10^7 \left[\frac{\text{cm}}{\text{s}} \right]$, ומכאן שההתקן נמצא ברוויה מהירות בנקודות B ו-C.