

תרגול 5 – מתח תת-סף

- מתח הסף (V_T) – מתח ה- V_{GS} המינימלי הדרוש כדי ליצור תעלה מוליכה (channel) בין ה-source ל-drain. כאשר מופעל על ה-MOSFET מתח גבוה ממתח הסף, מצב הפעולה של ההתקן משתנה ממחסור להיפוך.

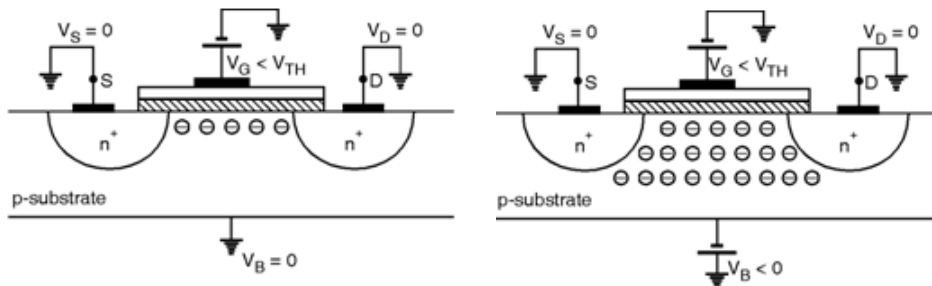
מתח הסף מקיים (נוסחה 1 הרצאה 5):

$$V_T = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A (2\psi_B)}}{C_{ox}} = \left(\phi_{ms} - \frac{Q_f}{C_{ox}} \right) + 2\psi_B + \frac{\sqrt{4\varepsilon_s q N_A \psi_B}}{C_{ox}}$$

ובהפעלת ממתח V_{BS} בין המצע וה-source (נוסחה 2 הרצאה 5):

$$V_T = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A (2\psi_B - V_{BS})}}{C_{ox}}$$

(כאשר V_{BS} הוא שלילי עבור תעלה מסוג n וחיויבי עבור תעלה מסוג p)

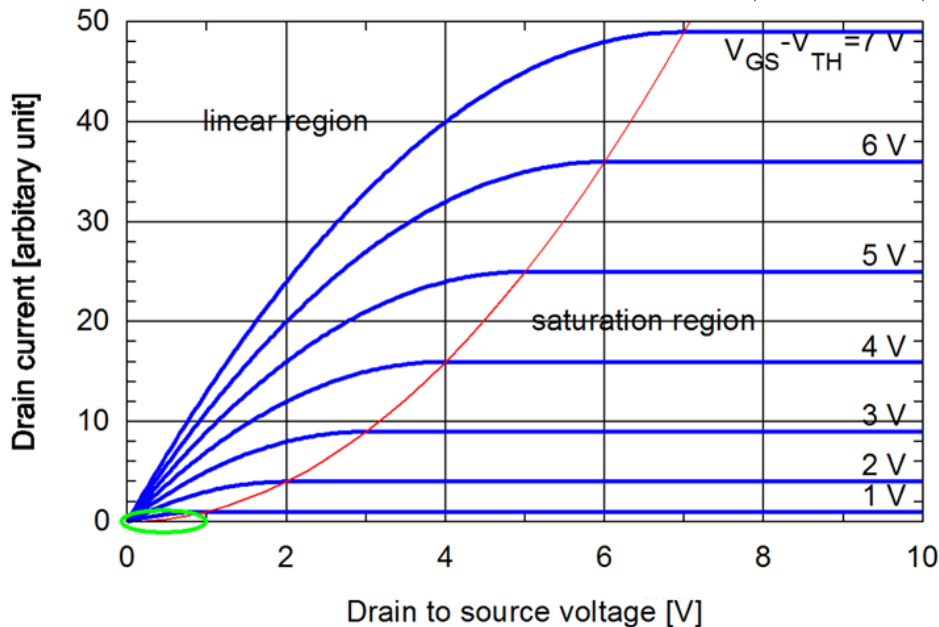


באיור הנ"ל ניתן לראות את השפעת הפעלת מתח מצע על איזור המחסור במצב בו $V_G < V_T$.

ומכאן שהשינוי במתח הסף כתוצאה מהפעלת מתח המצע (נוסחה 3 הרצאה 5):

$$\Delta V_T = V_T(V_{BS}) - V_T(V_{BS} = 0) = \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A}}{C_{ox}} (\sqrt{2\psi_B - V_{BS}} - \sqrt{2\psi_B})$$

- הולכה בתחום תת הסף – מתקבלת כאשר נושאי מטען המיעוט במצע יוצרים זרם חשמלי בין ה-source ל-drain במצב בו $V_G < V_T$ (הטרנזיסטור במצב של היפוך חלש או מיחסור). זרם זה נקרא זרם תת-סף.

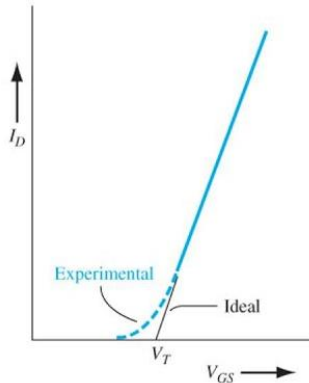


באיור מסומן בעיגול תחום תת-הסף בעקומת זרם ה-drain כתלות במתח ה-drain, עבור מתחי שער שונים.

זרם תת-הסף (נוסחה 9 הרצאה 5):

$$I_D = \frac{Z\mu_n}{L\beta^2} \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_A}{2\psi_s}} \left(\frac{n_i}{N_A}\right)^2 \exp(\beta\psi_s) [1 - \exp(-\beta V_D)]$$

$$\text{for } V_D \gg \beta \approx \frac{Z\mu_n}{L\beta^2} \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_A}{2\psi_s}} \left(\frac{n_i}{N_A}\right)^2 \exp(\beta\psi_s)$$



האיור הנ"ל מתאר את זרם הטרנזיסטור כתלות במתח השער בתחום הלינארי. ניתן לראות את הפער בין הקירוב הלינארי לחישוב מתח הסף לבין הזרם שמתקבל בפועל. זהו זרם תת-הסף.

- Subthreshold swing (S) – שינוי מתח השער הדרוש כדי לגרום לשינוי בסדר גודל אחד של זרם תת-הסף.

Subthreshold swing (נוסחה 14 הרצאה 5):

$$S = \ln(10) \frac{kT}{q} \left(1 + \frac{C_D}{C_{ox}}\right)$$

D_{it} – צפיפות מלכודות פני שטח בין המל"מ לתחמוצת.

S בהשפעת מלכודות בפני השטח (נוסחה 14 הרצאה 5):

$$S = \ln(10) \frac{kT}{q} \left(\frac{C_{ox} + C_D + C_{it}}{C_{ox}}\right)$$

היחס בין S עם וללא מלכודות (נוסחה 15 הרצאה 5):

$$S(D_{it} > 0) = S(D_{it} = 0) \left(\frac{C_{ox} + C_D + C_{it}}{C_{ox}}\right)$$

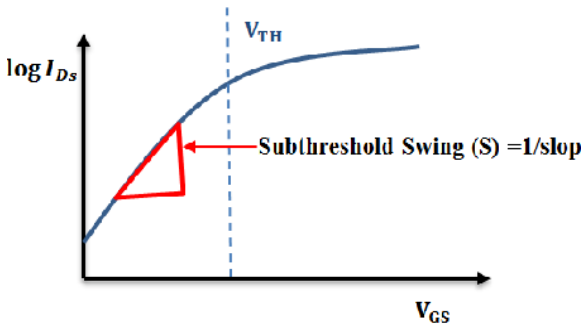
- השפעת הטמפר' על מתח הסף (נוסחה 23 הרצאה 5):

$$\frac{dV_T}{dT} = \frac{d\psi_B}{dT} \frac{dV_T}{d\psi_B} = \frac{d\psi_B}{dT} \left(2 + \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{\frac{\epsilon_s q N_A}{\psi_B}}\right)$$

כאשר (נוסחה 26 הרצאה 5):

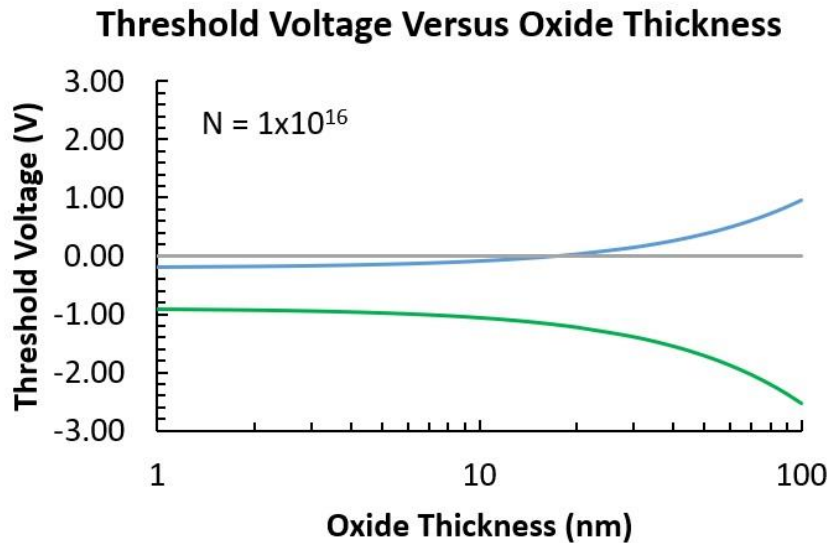
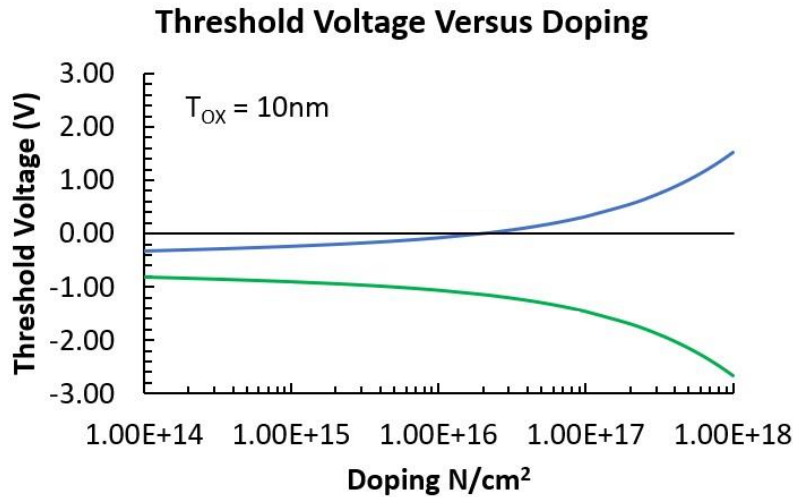
$$\frac{d\psi_B}{dT} \approx \frac{1}{T} \left(\psi_B - \frac{E_g^0}{2q}\right)$$

E_g^0 – פער האנרגיה ב 0K.



שאלה 1 – הגורמים המשפיעים על מתח הסף

הגרפים הבאים מתארים את מתח הסף כתלות בריכוז המזהמים וכתלות בעובי תחמוצת השער. בגרפים מתוארים שני טרנזיסטורים שונים – nMOS, pMOS.



- א. איזו עקומה בכל אחד מהגרפים (כחול/ ירוק) מתארת איזה מהטרנזיסטורים?
 ב. בעקבות תהליך היצור, אילוח המצע משתנה ב $\pm 10\%$. מהי ההשפעה של שינוי זה על מתח הסף? חשבו את טווח השינוי במתח הסף שמתקבל.
 נתון: $N_A = 10^{16} \text{cm}^{-3}$; $Q_f = 8 \cdot 10^{10} \text{cm}^2$; $d_{ox} = 10\text{nm}$
 ג. בעת הפעלת טרנזיסטור nMOS, על המצע מופעל מתח V_{BS} .
 a. האם התשובה לסעיף ב' תשתנה? אם כן, ענו באופן איכותי כיצד.
 b. כיצד ניתן לצמצם (מבחינה הנדסית) את השפעת מתח המצע?
 c. שרטטו בצורה איכותית את מבנה הפסים של טרנזיסטור nMOS כאשר $V_{BS} = 0$ וכאשר $V_{BS} < 0$

פתרון

- א. גרף כחול – nMOS (בעל מצע p), גרף ירוק – pMOS (מצע n)
 ב. נרצה להבין מהי התלות של השינוי במתח הסף באילוח המצע

$$V_T = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A (2\psi_B)}}{C_{ox}} = \left(\phi_{ms} - \frac{Q_f}{C_{ox}} \right) + 2\psi_B + \frac{\sqrt{4\varepsilon_s q N_A \psi_B}}{C_{ox}}$$

$$\frac{dV_{FB}}{dN_A} = -\frac{kT}{qN_A}$$

$$\frac{d\psi_B}{dN_A} = \frac{kT}{qN_A}$$

$$\frac{d(Q_{dep(2\psi_B)})}{dN_A \cdot C_{ox}} = \frac{\sqrt{4\varepsilon_s q \psi_B}}{2\sqrt{N_A}} + \frac{\sqrt{4\varepsilon_s q N_A}}{2\sqrt{\psi_B}} \cdot \frac{d\psi_B}{dN_A} =$$

$$\frac{\sqrt{4\varepsilon_s q \psi_B N_A}}{2N_A} + \frac{\sqrt{4\varepsilon_s q N_A \psi_B}}{2\psi_B} \cdot \frac{kT}{qN_A}$$

$$\frac{dV_T}{dN_A} = \frac{1}{N_A} \left[-\frac{kT}{q} + 2\frac{kT}{q} + \frac{Q_{dep}}{2C_{ox}} + \frac{Q_{dep}}{2C_{ox}} \left(\frac{kT}{q\psi_B} \right) \right]$$

$$\frac{dV_T}{dN_A/N_A} = \frac{kT}{q} + \frac{Q_{dep}}{2C_{ox}} \left(1 + \frac{kT}{q\psi_B} \right)$$

כמו כן נתון כי $\frac{dN_A}{N_A} = 0.1$ ולכן:

$$\Delta V_T = 0.1(0.026 + \frac{0.139}{2} \left(1 + \frac{0.026}{0.347} \right)) = 10mV$$

ג.

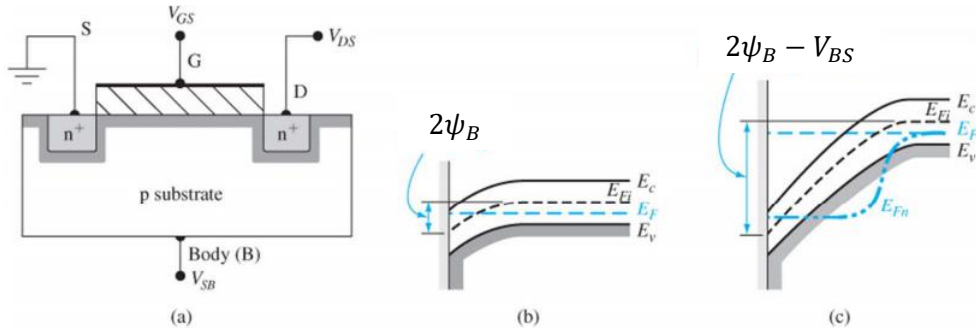
- א. השינוי במתח הסף כתוצאה מהפעלת מתח המצע (נוסחה 3 הרצאה 5):

$$\Delta V_T = V_T(V_{BS}) - V_T(V_{BS} = 0) = \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A}}{C_{ox}} (\sqrt{2\psi_B - V_{BS}} - \sqrt{2\psi_B})$$

ולכן הפעלת מתח על המצע תגרום לעליה ב ΔV_T .

- ב. ניתן לצמצם שינויים במתח הסף הנובעים ממתח המצע, ע"י הקטנת אילוח המצע או ע"י הגדלת קיבול התחמוצת (על-ידי הקטנת עובי התחמוצת או שינוי החומר הדיאלקטרי).

ג.



בשרטוט ניתן לראות את המתחים הפועלים על הטרנזיסטור (a), דיאגרמת פסי אנרגיה עבור $V_{BS} = 0$ (b) ודיאגרמת פסי אנרגיה עבור $V_{BS} < 0$ (c).

שאלה 2 – Subthreshold swing (S)

- א. מהו הערך המינימלי של הפרמטר S שיכול להיות לטרנזיסטור, בטמפ' החדר? איך ניתן להגיע לערך שכזה מבחינה הנדסית?
- ב. לפעולת הטרנזיסטור נדרש כי ה-Subthreshold swing המקסימלי להיות בעל ערך של $80 \left[\frac{mV}{dec} \right]$. מהי הטמפ' המקסימלית אליה יכול להגיע הטרנזיסטור?
- ג. נתון טרנזיסטור סיליקון MOSFET בעל תחמוצת שער בעובי של $10[nm]$, קיבול מחסור של $C_D = 7.1 \cdot 10^{-8} \left[\frac{F}{cm^2} \right]$ וצפיפות מלכודות פני שטח של $10^{11} [cm^{-2} eV^{-1}]$. חשב את הפרמטר S .

פתרון

- א. $S = \ln(10) \frac{kT}{q} \left(1 + \frac{C_D}{C_{ox}} \right)$ (נוסחה 13 הרצאה 5).
 בטמפ' החדר, הביטוי יקבל ערך מינימלי כאשר $C_D \rightarrow 0$ או כאשר $C_{ox} \rightarrow \infty$, במקרה זה,

$$S = \ln(10) \frac{kT}{q} \left(1 + \frac{C_D}{C_{ox}} \right) = S = \ln(10) \frac{kT}{q} = 60 \left[\frac{mV}{dec} \right]$$
 כיוון ש $C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{d}$, מבחינה הנדסית ניתן להגדיל את קיבול התחמוצת ע"י הקטנה של עובי התחמוצת ($d \rightarrow 0$) או בחירה בחומר בעל מקדם דיאלקטרי גבוה (high-K dielectrics).
 C_D פרופורציונאלי לאילוח המצע, ולכן ניתן להקטין את C_D ע"י בחירה במצע בעל אילוח נמוך.
 ב. טמפ' עבודה מקסימלית תתקבל עבור S אידיאלי, על-פי $S = \ln(10) \frac{kT}{q}$

$$S = \ln(10) \frac{kT}{q} = 80 \left[\frac{mV}{dec} \right]$$
 ולכן $T_{max} = 80 \left[\frac{mV}{dec} \right] \frac{q}{k \ln(10)} = 400K$
 ג. בהינתן מלכודות פני שטח, הפרמטר S מוגדר כ: $S = S(D_{it} = 0) \left(\frac{C_{ox} + C_D + C_{it}}{C_{ox} + C_D} \right)$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{d} = \frac{3.9 \cdot 8.85 \cdot 10^{-14} \left[\frac{F}{cm} \right]}{10 \cdot 10^{-7} [cm]} = 34.5 \cdot 10^{-8} \left[\frac{F}{cm^2} \right]$$

$$S(D_{it} = 0) = \ln(10) \frac{kT}{q} \left(1 + \frac{C_D}{C_{ox}} \right) = 60 \left[\frac{mV}{dec} \right] \left(1 + \frac{7.1}{34.5} \right) = 72.34 \left[\frac{mV}{dec} \right]$$

$$C_{it} = q^2 D_{it} = 1.6 \cdot 10^{-19} [C] \cdot 10^{11} [cm^{-2} V^{-1}] = 1.6 \cdot 10^{-8} \left[\frac{F}{cm^2} \right]$$
 ולכן:

$$S = S(D_{it} = 0) \left(\frac{C_{ox} + C_D + C_{it}}{C_{ox} + C_D} \right) = 75.1 \left[\frac{mV}{dec} \right]$$