

תרגול 6 – טרנזיסטורים בעלי סימום לא אחיד

עד כה, דנו בטרנזיסטורים בעלי סימום מצע אחיד. ע"י פרופיל סימום משתנה באיזורי המצע השונים ניתן לשפר את ביצועי הטרנזיסטור, בהתאם לאפליקציה הדרושה.

מתח הסף

בהנחת סימום מצע אחיד (נוסחה 1 הרצאה 5):

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

Q_f – צפיפות המטען הכלוא בממשק שבין התחמוצת והמולי"מ.

Q_B – סך כל המטען בשכבת המחסור

$2\psi_B$ – כיפוף הפסים במלמ (הדרוש כדי להגיע לסף היפוך). $\psi_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right)$

כאשר סימום המצע **אינו** אחיד, יש לפתח מחדש את הביטוי, כאשר $N_A = N_A(x)$

התפלגות המזהמים במצע

כדי לנתח את השפעת התפלגות המזהמים על ביצועי הטרנזיסטור, נשתמש בקירוב מדרגה לתיאור פרופיל הסימום.

הביטויים התלויים ב- N_A הם Q_B ו- ψ_B , ולכן:

$$Q_B = q \int_0^{W_{Dm}} N_A(x) dx \quad \bullet$$

(נוסחה 1 הרצאה 6)

W_{Dm} – רוחב שכבת המחסור

$$\psi_s = 2\psi_B = \frac{q}{\varepsilon_s} \int_0^{W_{Dm}} x N(x) dx \quad \bullet$$

(נוסחה 2 הרצאה 6)

בנוסף, נגדיר:

D (dose) – סך מנת המזהמים

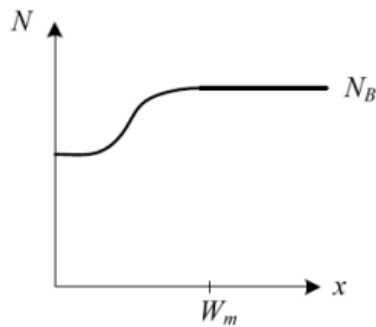
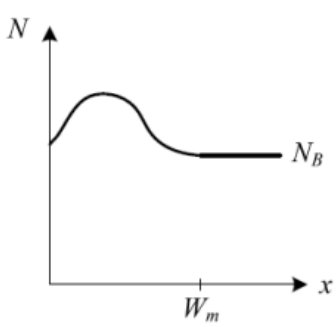
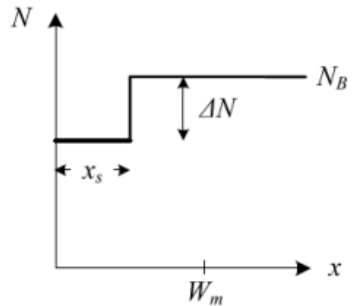
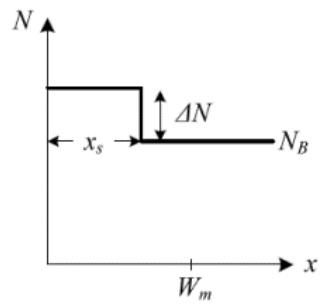
x_c – מרכז הכובד של ההתפלגות

$$D_I = \int_0^{W_{Dm}} \Delta N(x) dx$$

$$x_c = \frac{1}{D_I} \int_0^{W_{Dm}} x \Delta N(x) dx$$

(נוסחאות 6 ו-7, הרצאה 6)

השוואה בין פרופיל סימון גבוה-נמוך לפרופיל סימון נמוך גבוה

סימון גבוה-נמוך	סימון גבוה-נמוך	פרופיל הסימון
		
		קירוב מדרגה
$W_{Dm} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_B} \left(2\psi_B + \frac{qD_I x_c}{\varepsilon_s} \right)}$ (הצבת הביטוי עבור x_c בנוסחה 11, הרצאה 6)	$W_{Dm} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_B} \left(2\psi_B - \frac{qD_I x_c}{\varepsilon_s} \right)}$ (נוסחה 8, הרצאה 6)	רוחב שכבת המחסור
$V_T = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2q\varepsilon_s N_B \left(2\psi_B + \frac{q x_c D_I}{\varepsilon_s} \right) - \frac{q D_I}{C_{ox}}}$ (הצבת הביטוי עבור D_I ועבור x_c בנוסחה 12, הרצאה 6)	$V_T = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2q\varepsilon_s N_B \left(2\psi_B - \frac{q x_c D_I}{\varepsilon_s} \right) + \frac{q D_I}{C_{ox}}}$ (נוסחה 9, הרצאה 6)	מתח הסף

שאלה 1

נתון טרנזיסטור N-MOS בעל אילוח בפרופיל מדרגה גבוה-נמוך, כאשר $N_B = N_S = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ו- $x_s = 0.1 \mu\text{m}$, $d = 20 \text{ nm}$. המקדם הדיאלקטרי היחסי של תחמוצת סיליקון הוא 3.8. יש להניח כי $V_{FB} = 0$ ו- $\psi_B = 0.3 \text{ V}$.

א. אילוח מצע קבוע לעומת אילוח משתנה

מהו השינוי במתח הסף של הטרנזיסטור הנתון, בהשוואה לטרנזיסטור בעל אילוח מצע אחיד, N_B ? האם עבור נתונים אלו ניתן להתייחס למדרגת הסימום כאל מטען משטחי?

ב. אילוח גבוה-נמוך לעומת נמוך גבוה

כעת נתון טרנזיסטור זהה, פרט לכך ש- $N_S = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $N_B = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. מהו רוחב איזור המחסור ומתח הסף של כל אחד מהטרנזיסטורים?

ג. מיקום x_s ביחס ל- W_{dm}

כעת נתון כי $x_s = 0.3 \mu\text{m}$. מה ניתן להסיק מהתוצאה הנומרית המתקבלת עבור רוחב איזור המחסור בנוגע לתכנון הטרנזיסטור? יש להתייחס לנתוני הטרנזיסטור בתחילת השאלה

פתרון

א.

$$D_I = \int_0^{x_s} (N_S - N_B) dx = (10^{16} - 10^{15})(0.1 \cdot 10^{-4}) = 9 \cdot 10^{10} [\text{cm}^{-2}]$$

$$x_c = \frac{1}{D_I} \int_0^{x_s} x \Delta N(x) dx$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{D_I} \int_0^{x_s} [x(N_S - N_B)] dx = \frac{(10^{16} - 10^{15})(0.1 \cdot 10^{-4})^2}{2 \cdot 9 \cdot 10^{10}} = 5 \cdot 10^{-6} [\text{cm}] \\ &= 0.05 [\mu\text{m}] \end{aligned}$$

חישוב ההפרש במתח הסף (מתח הסף של טרנזיסטור בעל אילוח מצע קבוע N_B לעומת טרנזיסטור באילוח בעל פרופיל מדרגה):

$$\Delta V = \frac{qD_I}{C_{ox}} - \frac{\sqrt{2q\epsilon_s N_B}}{C_{ox}} \left(\sqrt{2\psi_B} - \sqrt{2\psi_B - \frac{qx_c D_I}{\epsilon_s}} \right) = 0.076 [\text{V}]$$

בהנחה כי x_c קרוב מאוד לפני השטח:

$$\Delta V_T \approx \frac{qD_I}{C_{ox}} = \frac{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 9 \cdot 10^{10}}{\frac{3.8 \cdot 8.85 \cdot 10^{-14}}{20 \cdot 10^{-7}}} = 0.085 [\text{V}]$$

ניתן לראות כי לא ניתן להניח ש- x_c קרוב מאוד לפני-שטח מל"מ-תחמוצת, שכן מחישוב מפורש מתקבל ערך שונה להפרש המתחים שמתקבל בעזרת הקירוב.

בנוסף, ניתן לראות את המגמה על-פיה מתקבל מתח סף גבוה יותר ככל ש- x_s קרוב יותר לפני השטח (בהינתן Dose קבוע).

ב.

סימנים גבוה-נמוך	סימנים גבוה-נמוך	רוחב שכבת המחסור
$W_{Dm} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_B} \left(2\psi_B + \frac{qD_I x_c}{\varepsilon_s} \right)}$ $= 5.85 \cdot 10^{-5} [cm]$	$W_{Dm} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_B} \left(2\psi_B - \frac{qD_I x_c}{\varepsilon_s} \right)}$ $= 4.03 \cdot 10^{-5} [cm]$	
$V_T = V_{FB} + 2\psi_B$ $+ \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2q\varepsilon_s N_B \left(2\psi_B + \frac{q x_c D_I}{\varepsilon_s} \right) - \frac{q D_I}{C_{ox}}}$ $= 0.57 [V]$	$V_T = V_{FB} + 2\psi_B$ $+ \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2q\varepsilon_s N_B \left(2\psi_B - \frac{q x_c D_I}{\varepsilon_s} \right) + \frac{q D_I}{C_{ox}}}$ $= 0.72 [V]$	מתח הסף

ניתן לראות כי בהינתן ΔN זהה עבור פרופילי אילוח גבוה-נמוך ונמוך-גבוה, עבור פרופיל אילוח גבוה-נמוך, רוחב שכבת המחסור קטן יותר, ואילו מתח הסף גבוה יותר.

ג. בהצבת $x_s = 0.3 \mu m$, מתקבל כי:

$$D_I = \int_0^{x_s} (N_s - N_B) dx = (10^{16} - 10^{15})(0.3 \cdot 10^{-4}) = 2.7 \cdot 10^{11} [cm^{-2}]$$

$$x_c = \frac{1}{D_I} \int_0^{x_s} x \Delta N(x) dx = \frac{1}{D_I} \int_0^{x_s} [x(N_s - N_B)] dx = \frac{(10^{16} - 10^{15})(0.3 \cdot 10^{-4})^2}{2 \cdot 2.7 \cdot 10^{11}} = 1.5 \cdot 10^{-5} [cm]$$

משמע, מרכז הכובד רחוק יותר מפני-השטח. בהצבת הערכים הנ"ל בביטוי לרוחב שכבת המחסור:

$$W_{Dm} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_B} \left(2\psi_B - \frac{qD_I x_c}{\varepsilon_s} \right)}$$

התקבל ערך שלילי לביטוי שנמצא בתוך השורש. כמובן שאין משמעות לרוחב שכבת מחסור בעל ערך מרוכב.

המשמעות לתוצאה זו היא ש $x_c > W_{Dm}$, כל אזור המחסור נימצא בין התחמוצת והמקום בו נעשה שינוי בריכוז המזהמים. מסיבה זו, השינוי בריכוז לא רלוונטי לפעולת השער. על-כן, ההנחות עליו מתבסס הפיתוח הנ"ל לתיאור שכבת המחסור אינן רלוונטיות.