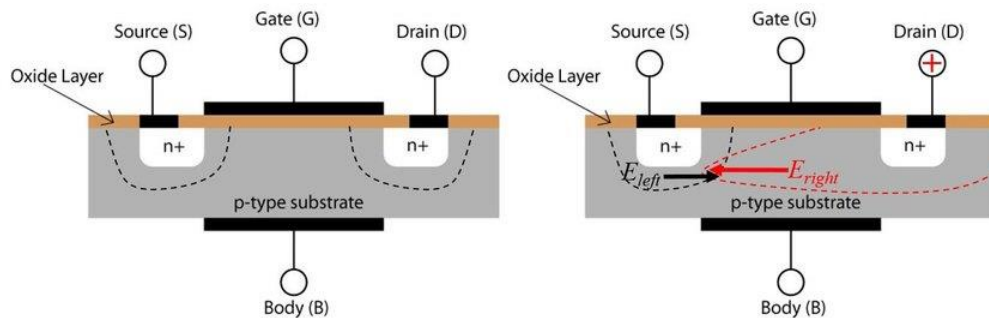


תרגול 7 – מזעור ואפקטי תעלה קצרה

בעקבות מזעור רוחב התעלה ב-MOSFET, מתרחשות בין היתר התופעות הבאות:

- שדה חזק ומוביליות משתנה (כפי שנלמד בשבוע 4)
- קירוב ה-gradual channel approximation כבר לא תקף. על פי קירוב זה, בתעלה ארוכה ניתן להניח כי השדה הרוחבי $\mathcal{E}_x$ בתעלה גדול בהרבה מהשדה האורכי $\mathcal{E}_y$. עם מזעור רוחב התעלה גדלים השדות החשמליים שבה, ועל כן התפלגות הפוטנציאל בתעלה בעקבות המזעור מושפעת גם מהשדה הרוחבי וגם משדה האורכי.
- punch through בין ה-source וה-drain. התופעה יכולה להגרם במצב שבו סכום רוחב שכבות המחסור של ה-Source וה-Drain הופכים להיות מאותו סדר הגודל של התעלה; $L \approx y_S + y_D$. המקור לתופעה זו הוא אפקט Drain Induced Barrier Lowering - DIBL

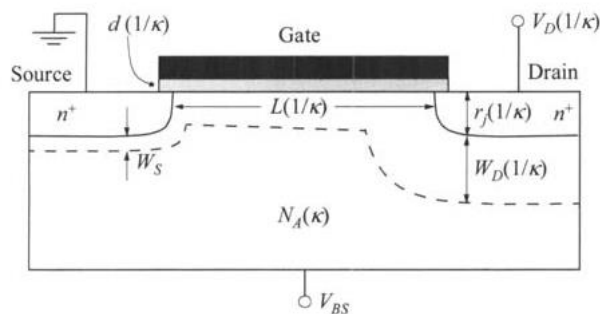


באיור הנ"ל מתוארת תופעת ה-punch-through.

כלל המזעור האידיאלי

לפי כלל זה, על-מנת להימנע מאפקטי תעלה קצרה, יש להקטין את הממדים והפרמטרים בטרנזיסטור לפי יחס קבוע, בהתאם לדרישה האפליקטיבית – בין אם המטרה היא לשמור על שדה קבוע, או מתח קבוע, בהשוואה לערכי המתח או השדה של התעלה הארוכה. יחס זה מסומן באות κ , ונקרא פקטור המזעור.

פרמטר	שדה קבוע	מתח קבוע	קבוע המזעור בפועל	מגבלות
L	$1/\kappa$	$1/\kappa$	$1/\kappa$	
ϵ	1	> 1	> 1	
d	$1/\kappa$	$1/\kappa'$	$> 1/\kappa$	מינהור, פגמים
r_j	$1/\kappa$	$> 1/\kappa$	$> 1/\kappa$	התנגדות
V_T	$1/\kappa$	1	$\gg 1/\kappa$	זרם במצב כבוי
V_D	$1/\kappa$	1	$\gg 1/\kappa$	מערכת, ומתח הסף
N_A	κ	κ	$< \kappa$	פריצה



בטבלה הנ"ל מוצגים קבועי המזעור האידיאליים על-פיהם יש להקטין את ההתקן. בפועל, מתקבלת סטייה מאידיאליות, שכן המזעור מוגבל בעקבות תופעות נוספות המתרחשות עם מזעור ההתקן.

שאלה 1 – כללי מזעור

יש לחשב את הזרם ליחידת אורך (I_D/Z) שמתקבל בעקבות מזעור התעלה עבור שני טרנזיסטורי MOSFET, כאשר:

- MOSFET ממוזער עפ"י מתח קבוע
- MOSFET ממוזער עפ"י שדה קבוע

יש להניח כי ההתקן פועל בתנאי רוויית מהירות.

הערכים ההתחלתיים של ההתקן (לפני המזעור) הינם:

$$L = 1[\mu m], d = 10[nm], V_D = 5[V], \frac{I_D}{Z} = 500 \left[\frac{\mu A}{\mu m} \right]$$

פקטור המזעור הוא $\kappa = 5$. יש להניח כי $M = 1$ וערכו נשמר עם המזעור.

פתרון

בהינתן רוויית מהירות, זרם הרוויה הוא:

$$\frac{I_{Dsat}}{Z} = \mu C_{ox} (V_G - V_T) \quad (\text{הרצאה 4 נוסחה 16})$$

- עבור מזעור לפי מתח קבוע, $C_{ox} \propto \kappa$ ולכן $\frac{I_D}{Z} \propto \kappa$

$$\frac{I_D}{Z} = 500 \cdot 5 = 2500 \left[\frac{\mu A}{\mu m} \right]$$

- עבור מזעור לפי שדה קבוע, $C_{ox} \propto \kappa$, ובנוסף $(V_G - V_T)$ קטן פי κ , ולכן:

$$\frac{I_D}{Z} = 500 \left[\frac{\mu A}{\mu m} \right]$$

שאלה 2 – רוויית מהירות ורוויית זרם

נתון טרנזיסטור NMOS עבורו:

- ריכוז האילוח במצע $N_A = 3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
- ריכוז אינטרינזי $n_i = 1.5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
- עובי התחמוצת 3 nm
- מתח פסים ישירים $V_{FB} = 0.8 \text{ V}$
- מתח השער 3 V
- ניידות $\mu = 600 \frac{\text{cm}^2}{\text{Volt} \cdot \text{sec}}$
- יש להניח עבור אלקטרונים: $v_{sat} = 8 \cdot 10^6 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$

- בהנחת תעלה ארוכה, עבור אילו תחום אורכי תעלה תתרחש רוויית זרם הנוצרת מ-pinch-off? יש להשתמש בקירוב הלינארי למקוטעין.
- בהנחת תעלה קצרה, עבור אילו תחום אורכי תעלה תתרחש רוויית מהירות? יש להשתמש בקירוב הלינארי למקוטעין.
- מהו הביטוי לשדה המקסימלי, בהנחת תעלה ארוכה? יש להשתמש במודל על-פיו $n = 1$

פתרון

א. כדי לחשב את אורך התעלה המינימלי, עבורו יתרחש pinch-off, יש למצוא את הקשר בין מתח הרוויה לרוחב התעלה.

$$\mathcal{E}_{pinch-off} = \frac{V_{Dsat}}{L}$$

מתח רוויה מוגדר כ:

$$V_{Dsat} = \frac{V_G - V_T}{M} \quad (\text{הרצאה 3 נוסחה 38})$$

$$v_{sat} \approx \mathcal{E}_{sat} \cdot \mu$$

$$\mathcal{E}_{sat} = \frac{8 \cdot 10^6}{600} = 1.33 \cdot 10^4 \frac{Volt}{cm}$$

$$V_T = V_{FB} + 2\phi_b - \frac{Q_{dep}}{C_{ox}}$$

$$\phi_b = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 0.026 \cdot \ln\left(\frac{3 \cdot 10^{16}}{1.5 \cdot 10^{10}}\right) = 0.38V$$

$$Q_{dep} = \sqrt{2\epsilon_0\epsilon_s q N_A 2\phi_b} = 2.54 \cdot 10^{-8} \frac{C}{cm^2}$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_0\epsilon_{ox}}{d_{ox}} = 11.5 \cdot 10^{-7} F/cm^2$$

$$V_T = -0.8 + 2 \cdot 0.38 + \frac{2.54 \cdot 10^{-8}}{11.5 \cdot 10^{-7}} = 0.18V$$

ולכן ניתן לומר כי רווית זרם תתרחש כאשר

$$\mathcal{E}_{pinch-off} \leq \mathcal{E}_{sat} \Rightarrow \frac{V_{Dsat}}{L} = \frac{V_G - V_T}{ML} \leq \mathcal{E}_{sat} \Rightarrow L > \frac{3 - 0.18}{1.3 \cdot 10^4} = 2.17 \cdot 10^{-4} cm$$

ב. רוויית מהירות תתרחש כאשר

$$L < \frac{3 - 0.18}{1.3 \cdot 10^4} = 2.17 \cdot 10^{-4} cm$$

ג. כפי שפותח בהרצאה 7, השדה בתעלה הוא:

$$\mathcal{E}_{max} = -\frac{d\psi}{dy} = \frac{I_{DS}}{Z\mu_{eff}C_{ox}(V_G - V_T - \psi) - \frac{I_D}{\mathcal{E}_{sat}}}$$

בתעלה ארוכה, השדה המקסימלי מתקבל ליד ה-drain, ולכן:

$$\mathcal{E}_{max} = \mathcal{E}(L) = \frac{I_{DS,sat}}{Z\mu_{eff}C_{ox}(V_G - V_T - V_{DS,sat}) - \frac{I_{DS,sat}}{\mathcal{E}_{sat}}}$$

שאלה 3 – Punch-through

כדי להמנע מאפקט מצע וכדי לקבל ערך subthreshold-swing נמוך ככל הניתן, ההעדפה היא למצע בעל אילוח נמוך. עם זאת, ניתן למנוע punch-through ע"י אילוח גבוה של המצע.

נתון: $\psi_{Bi} = 0.7[V]$; $\psi_s = 0.6[V]$; $V_{BS} = 0[V]$; $V_D = 2.5[V]$; $L = 0.6[\mu m]$; $V_{FB} = -0.4[V]$

- מהו האילוח המינימלי הדרוש עבור המצע כדי למנוע punch-through? יש להניח כי השינוי ב ψ_B כתלות בשינוי האילוח זניח.
- מהו מתח הסף עבור מקרה זה?
- באילו דרכים נוספות ניתן למנוע פריצה במנגנון punch-through, תוך שמירה מתח סף קיים?

פתרון

- Punch-through נוצר כאשר $L \approx y_s + y_D$. כיוון שהגדלת אילוח המצע מונעת את תופעת ה-Punch-through, נמצא מהו האילוח המינימלי הדרוש למניעת התופעה. עבור תעלה קצרה:

$$y_s \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_A}(\psi_{Bi} - \psi_s - V_{BS})}$$

$$y_D \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_A}(\psi_{Bi} + V_D - \psi_s - V_{BS})}$$

$$L \approx y_s + y_D = \sqrt{\frac{1}{N_A} \left(\sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}(\psi_{Bi} - \psi_s - V_{BS})} + \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}(\psi_{Bi} + V_D - \psi_s - V_{BS})} \right)}$$

$$\sqrt{\frac{1}{N_A}} = \frac{L}{\left(\sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}(\psi_{Bi} - \psi_s - V_{BS})} + \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}(\psi_{Bi} + V_D - \psi_s - V_{BS})} \right)} =$$

$$= \frac{L = 0.6 \cdot 10^{-4}[cm]}{\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.36 \cdot 10^{-13} \left[\frac{F}{cm} \right]}{1.6 \cdot 10^{-19}[Q]}}(0.7 - 0.6 - 0.1)[V] + \sqrt{\frac{2 \cdot 3.36 \cdot 10^{-13} \left[\frac{F}{cm} \right]}{1.6 \cdot 10^{-19}[Q]}}(0.7 + 2.5 - 0.6 - 0.1)[V] \right)}$$

$$= 1.51 \cdot 10^{-8} \left[\frac{cm}{\sqrt{cm^{-1}}} \right]$$

$$N_A(min) = 4.3 \cdot 10^{15}[cm^{-3}]$$

- מתח הסף במקרה זה הוא

$$V_T = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{Q'_B}{C_{ox}A} \quad (4 \text{ נוסחה 7})$$

כאשר Q'_B הוא סך כל מטען המזהמים בשכבת המחסור.

ע"י קירוב שטח שכבת המחסור (A) לשטח טרפז, ניתן לומר כי:

$$Q'_B = zqN_A W_{dm} \frac{L+L'}{2} \quad (6 \text{ נוסחה 7})$$

וכי רוחב שכבת המחסור הוא

$$W_{Dm} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(2\psi_B - V_{BS})}{qN_A}} \quad (\text{הרצאה 7 נוסחה 5})$$

ע"י הצבה נקבל:

$$\begin{aligned} V_T &= V_{FB} + 2\psi_B + \frac{1}{C_{ox}zL} \cdot zqN_A \frac{L+L'}{2} \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(2\psi_B - V_{BS})}{qN_A}} \\ &= -0.4 + 0.6 + \frac{1}{1.68 \cdot 10^{-7} \cdot z \cdot 0.4 \cdot 10^{-4}} \cdot z \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 4.3 \\ &\quad \cdot 10^{15} \frac{0.4 \cdot 10^{-4} + 0}{2} \sqrt{\frac{2 \cdot 3.36 \cdot 10^{-13} (0.6 - 0)}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 4.3 \cdot 10^{15}}} \end{aligned}$$

$$V_T = 0.25[V]$$

ג. ניתן למנוע punch-through ע"י:

1. פרופיל אילוח משתנה בעומק התעלה
2. עבודה עם תחמוצות דקות, כיוון שאילוח גבוה יעלה את V_T
3. שינוי החומר הדיאלקטרי לחומר בעל מקדם דיאלקטרי גבוה