

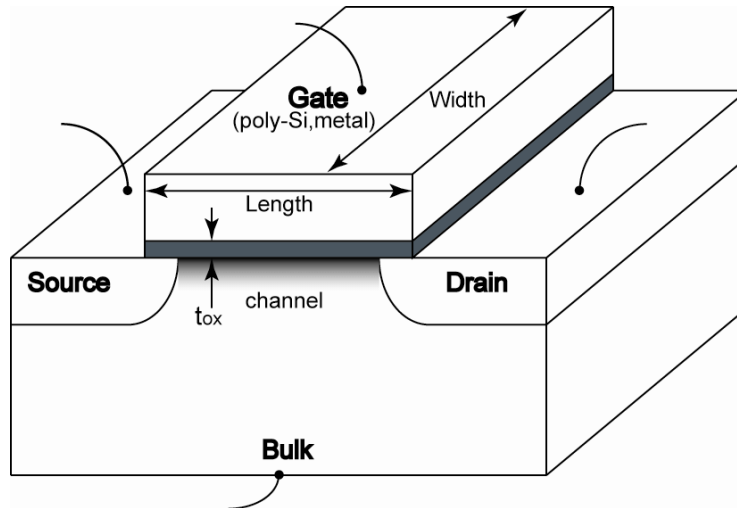
תרגול 4 – מוביליות תלוית שדה

בתרגול זה נבחן את התנהגות המוביליות (μ) ומהירות הסחיפה (v), כתלות ב:

- עוצמת השדה ($\mathcal{E}$)

- רוחב התעלה (L)

ואת ההשפעה של פרמטרים אלו על אופייני מתח-זרם של ההתקן.

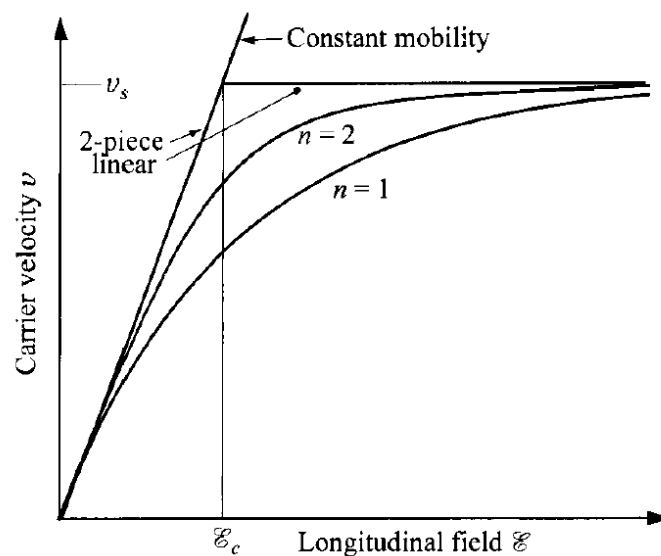


השפעת עוצמת השדה

- עבור שדות חלשים, מהירות הסחיפה לינארית לעוצמת השדה, ושיפוע הגרף שווה למוביליות $\mu = v/\mathcal{E}$
- עבור שדות חזקים, מהירות הסחיפה מגיעה לרוויה (v_s)
- בתחום הביניים, הקשר בין מהירות הסחיפה לעוצמת השדה **אינו** לינארי (נוסחה 1 הרצאה 4)

$$v(\mathcal{E}) = \frac{\mu_n \mathcal{E}}{\left[1 + \left(\frac{\mu_n \mathcal{E}}{v_s}\right)^n\right]^{1/n}} = \frac{\mu_n \mathcal{E}}{\left[1 + \left(\frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_c}\right)^n\right]^{1/n}} \quad (1)$$

כאשר μ_n היא המוביליות תחת שדה חשמלי נמוך, $\mathcal{E}_c$ הוא השדה הקריטי וערכו של n תלוי בחומר. עבור סיליקון הוא בין 1 ל-2.



בהרצאה התקבלו הביטויים הבאים עבור זרם ומתח רוויה, בעקבות רווית מהירות (מתוך הרצאה 4):

$$I_{Dsat} = \frac{Z}{L} \mu_n C_{ox} \left(V_G - V_T - \frac{M V_{Dsat}}{2} \right) V_{Dsat} \quad (8)$$

$$V_{Dsat} = L \mathcal{E}_c + \frac{V_G - V_T}{M} - \sqrt{(L \mathcal{E}_c)^2 + \left(\frac{V_G - V_T}{M} \right)^2} \quad (9)$$

$$K = \frac{\sqrt{q N_A \mathcal{E}_s}}{C_{ox}} \text{ ו- } M = 1 + \frac{K}{2\sqrt{\psi_B}}$$

עבור $n = 1$ מתקבל:

$$I_D = \frac{Z C_{ox} \mu_n \mathcal{E}_c}{L \mathcal{E}_c + V_D} \left(V_G - V_T - \frac{M V_D}{2} \right) V_D \quad (14)$$

$$V_{Dsat} = L \mathcal{E}_c \left[\sqrt{1 + \frac{2(V_G - V_T)}{M L \mathcal{E}_c}} - 1 \right] \quad (15)$$

שאלה 1

נתונים שני טרנזיסטורי MOSFET בעלי מצע מסוג p-type. רוחב התעלה של הטרנזיסטור הראשון הוא $L_1 = 10 [\mu m]$ ורוחב התעלה של הטרנזיסטור השני הוא $L_2 = 0.1 [\mu m]$. פרט לרוחב התעלה, שאר הערכים של שני הטרנזיסטורים זהים:

$$\mathcal{E}_c = 6.1 \cdot 10^4 \frac{V}{cm}; V_G = 1 V; V_T = 0.3 V;$$

$$M = 1.18; \mu_n = 1450 \frac{cm^2}{Vs}; C_{ox} = 20 \frac{nF}{cm^2}; z/L = 12$$

א. מהו **טווח ערכי מתח הרוויה** של הטרנזיסטור, הנגרם מרווית מהירות? יש לקחת בחשבון את

המודל הלינארי למקוטעין ואת המודל על-פיו $n = 1$ בנוסחה (1) בהרצאה 4.

ב. מהו **טווח ערכי זרם הרוויה** של הטרנזיסטור, הנגרם מרווית מהירות? יש לקחת בחשבון את

המודל הלינארי למקוטעין ואת המודל על-פיו $n = 1$.

ג. איך V_{Dsat} ישתנה אם הערך $V_G - V_T$ יקטן?

פתרון

א. לפי המודל הלינארי:

$$V_{Dsat} = L \mathcal{E}_c + \frac{V_G - V_T}{M} - \sqrt{(L \mathcal{E}_c)^2 + \left(\frac{V_G - V_T}{M} \right)^2}$$

$$V_{Dsat}^{L_1=10[\mu m]} = 10 \cdot 10^{-4} cm \cdot 6.1 \cdot 10^4 \frac{V}{cm} + \frac{1 - 0.3}{1.18} V$$

$$- \sqrt{\left(10 \cdot 10^{-4} cm \cdot 6.1 \cdot 10^4 \frac{V}{cm} \right)^2 + \left(\frac{1 - 0.3}{1.18} V \right)^2} = 0.5903 V$$

בצורה דומה,

$$V_{Dsat}^{L_1=0.1[\mu m]} = 0.352 V$$

עפ"י המודל עבורו $n = 1$:

$$V_{Dsat} = L \mathcal{E}_c \left[\sqrt{1 + \frac{2(V_G - V_T)}{M L \mathcal{E}_c}} - 1 \right]$$

$$V_{Dsat}^{L_1=10[\mu m]} = 10 \cdot 10^{-4} cm \cdot 6.1 \cdot 10^4 \frac{V}{cm} \left[\sqrt{1 + \frac{2(1-0.3)}{1.18 \cdot 10 \cdot 10^{-4} \cdot 6.1 \cdot 10^4}} - 1 \right]$$

$$= 0.5904 V$$

בצורה דומה,

$$V_{Dsat}^{L_1=0.1[\mu m]} = 0.436 V$$

התקבל כי עבור $V_{Dsat} \cong 0.590 V$, $L_1 = 10[\mu m]$
ועבור $0.352 < V_{Dsat} < 0.436 V$, $L_2 = 0.1[\mu m]$

נשים לב כי:

- ערך V_{Dsat} גבוה יותר עבור תעלה ארוכה יותר (בשיעורים הקרובים נלמד על אפקטים נוספים שמשפיעים על ערכי V_{Dsat})
- עבור תעלה ארוכה (L_1) מתקבל V_{Dsat} כמעט וזהה בחישוב עפ"י שני המודלים, ואילו עבור תעלה קצרה מתקבלת סטייה של כמה עשרות mV בין שני המודלים

ב. עבור הביטויים לזרם הרוויה, נציב את V_{Dsat} שהתקבל בסעיף א' עבור כל מקרה. המודל הלינארי:

$$I_{Dsat} = \frac{Z}{L} \mu_n C_{ox} \left(V_G - V_T - \frac{MV_{Dsat}}{2} \right) V_{Dsat}$$

$$I_{Dsat}^{L=10[\mu m]} = 12 \cdot 1450 \frac{cm^2}{Vs} \cdot 20 \cdot 10^{-9} \frac{F}{cm^2} \left(1V - 0.3V - \frac{1.18 \cdot 0.59}{2} V \right) 0.59V$$

$$= 7.22 \cdot 10^{-5} [A]$$

$$I_{Dsat}^{L=0.1[\mu m]} = 6.03 \cdot 10^{-5} [A]$$

עבור $n = 1$:

$$I_D = \frac{Z C_{ox} \mu_n \mathcal{E}_c}{L \mathcal{E}_c + V_D} \left(V_G - V_T - \frac{MV_D}{2} \right) V_D$$

$$I_{Dsat}^{L=10[\mu m]} = \frac{12 \cdot 10 \cdot 10^{-4} \cdot 20 \cdot 10^{-9} \frac{F}{cm^2} \cdot 1450 \frac{cm^2}{Vs} \cdot 6.1 \cdot 10^4 \frac{V}{cm}}{10 \cdot 10^{-4} cm \cdot 6.1 \cdot 10^4 \frac{V}{cm} + 0.59V}$$

$$\cdot \left(1V - 0.3V - \frac{1.18 \cdot 0.59}{2} V \right) 0.59V = 7.15 \cdot 10^{-5} [A]$$

$$I_{Dsat}^{L=0.1[\mu m]} = 3.92 \cdot 10^{-5} [A]$$

התקבל כי עבור $I_{Dsat} \cong 7.2 \cdot 10^{-5} [A]$, $L_1 = 10[\mu m]$
ועבור $3.92 \cdot 10^{-5} [A] < I_{Dsat} < 6.03 \cdot 10^{-5} [A]$, $L_2 = 0.1[\mu m]$

נשים לב כי:

- ערך I_{Dsat} גבוה יותר עבור תעלה ארוכה יותר
- עבור תעלה ארוכה (L_1) מתקבל I_{Dsat} כמעט וזהה בחישוב עפ"י שני המודלים, ואילו עבור תעלה קצרה מתקבלת סטייה של כמה עשרות μA בין שני המודלים
- ג. בשני המודלים מתקבל ערך V_{Dsat} נמוך יותר עם הירידה בערך של $(V_G - V_T)$

שאלה 2

נתונים שלושה טרנזיסטורי MOSFET עם מצע מסוג p-type בעלי מבנה וערכים זהים, פרט לסוג השכבה הדיאלקטרית בכל אחד מהם: לטרנזיסטור A שכבת SiO_2 , לטרנזיסטור B שכבת Al_2O_3 ולטרנזיסטור C שכבת HfO_2 .

$$\epsilon_{\text{SiO}_2} = 3.9; \epsilon_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 9; \epsilon_{\text{HfO}_2} = 25 \text{ נתון כי}$$

עבור איזה טרנזיסטור יתקבל מתח הסף הגבוה ביותר?

פתרון

מתח הסף מוגדר כ: $V_T = 2\psi_B + \frac{\sqrt{qN_A 2\epsilon_s(2\psi_B)}}{C_{ox}}$ (נוסחה 19 הרצאה 3)
ולכן ניתן לומר כי מתח סף גבוה יותר יתקבל עבור התקן עם קיבול נמוך יותר.
 $C_{\text{SiO}_2} < C_{\text{Al}_2\text{O}_3} < C_{\text{HfO}_2}$
הקשר בין הקיבול למקדם הדיאלקטרי הוא $C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{d}$
ולכן יתקבל מתח סף מקסימלי עבור התקן A (SiO_2).