

תוכן העניינים:

2	פרק 6
2	טרנזיסטור תוצר שדה - MOSFET
2	כללי:
2	סיכום כללי:
11	שאלות:
16	תשובות סופיות:

פרק 6

טרנזיסטור תוצר שדה - MOSFET

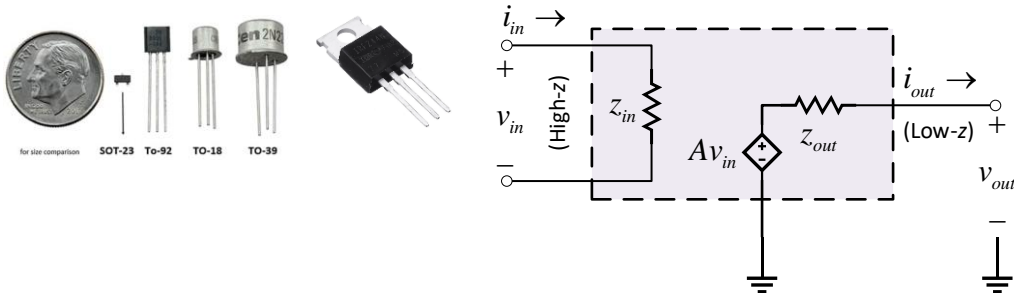
כללי:

סיכום כללי:

טרנזיסטור (Transistor) הגדרה:

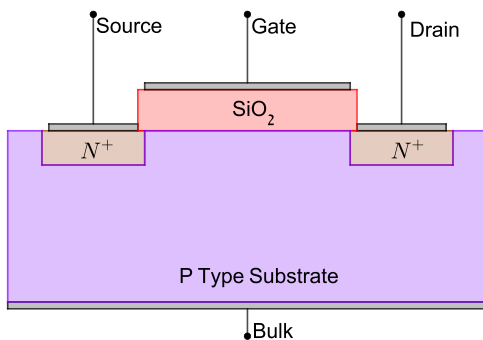
המילה 'טרנזיסטור' מיוחסת לרכיב בעל 3 הדקים הבנוי ממוליכים למחצה ומבודדים, כך שערך הזרם העובר דרך שניים מהדקיו תלוי בערך הזרם (או המתח) המורגש בהדק השלישי.

הרכיב מאופיין בהתנגדות כניסה גדולה והתנגדות מוצא נמוכה, והוא מסוגל להגביר אות כניסה נתון בעל הספק כניסה נמוך ולספק עומס בזרם מוצא הגדול משמעותית מזרם הכניסה.

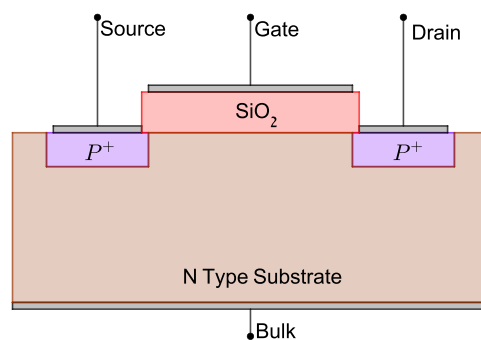


המבנה הבסיסי של התקן MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor):

N-channel MOSFET (NFET/NMOS)



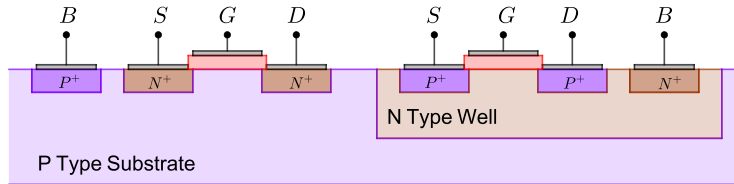
P-channel MOSFET (PFET/PMOS)



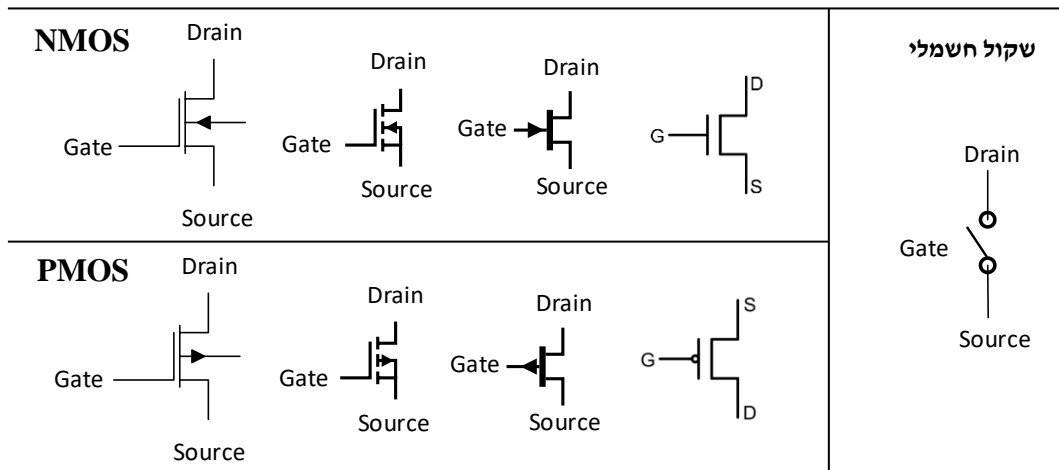
תרגום: שפך - Drain, שער - Gate, מקור - Source, גוף/מצע - Body/Bulk.

טכנולוגיית Complementary MOS (CMOS):

שיטת ייצור שבה מגדלים חומרים מזוהמים מסוג N ומסוג P באופן כזה שנוצרים טרנזיסטורים משני הסוגים על גבי מצע אחד.



סמל חשמלי והתייחסות חשמלית:



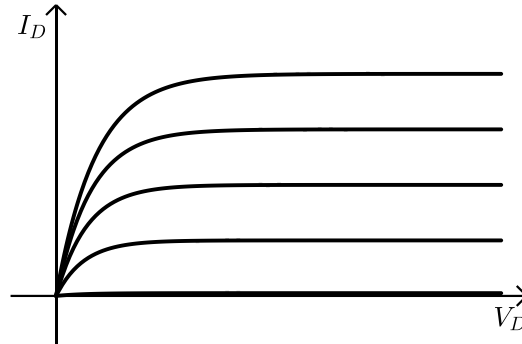
אופן הפעולה של MOSFET בצורה איכותית:

מאריקים את S ואת B יחדיו לאדמה ומבצעים ניתוח איכותי:

- כאשר מתח השער קטן ממתח הסף, אין תעלה וההתקן נחשב במצב סגור (OFF).
- כאשר מתח השער גדול ממתח הסף, נוצרת תעלה. ההתקן נחשב במצב פתוח (ON).
- כאשר מתח השפך גדול נוצרת תנועה של מטענים ניידים בתעלה (אלקטרונים במקרה של NMOS וחורים במקרה של PMOS). ההתקן במצב הולכה ליניארי.
- כאשר מתח השפך עובר סף מסוים, התעלה מצרה ונעלמת בחלקים. נקודת ההיעלמות שלה נקראת ה-pinch-off ורוחב אזור המחסור גדל. הזרם נשאר קבוע במקרה זה.

אופיין I-V של MOSFET:

להלן תיאור אופיין $I_D - V_D$ עבור מתחי הפעלה שונים:



מצבי פעולה:

- (1) קיטעון (Cutoff): $V_{GS} < V_T ; V_{DS} \geq 0$
(עבור מצע ומקור מוארקים נכתוב: $(V_G < V_T ; V_D \geq 0)$.)
- (2) ליניארי/טריודי (Linear/Triode): $V_{GS} \geq V_T ; 0 \leq V_{DS} \leq V_{DS,sat}$
(עבור מצע ומקור מוארקים נכתוב: $(V_G \geq V_T ; 0 \leq V_D \leq V_{D,sat})$.)
- (3) רוויה (Saturation): $V_{GS} \geq V_T ; V_{DS} \geq V_{DS,sat}$
(עבור מצע ומקור מוארקים נכתוב: $(V_G \geq V_T ; V_D \geq V_{D,sat})$.)

הערות:

- (1) בהתקן שבו התעלה קצרה, האופיין בחלק הרוויה יהיה בעל שיפוע קטן כלשהו. משמעות הדבר היא שהזרם יגדל מעט עם עלייה של V_{DS} מעבר לערך הרוויה שלו.
- (2) בהתקן PMOS, שבו התעלה היא מסוג P ונושאי מטען ההיפוך הם חורים, יהיה צורך להפוך את כל הכיוונים של המתחים: $(V_{DS} \rightarrow V_{SD} , V_{GS} \rightarrow V_{SG})$ וכן לשנות את סימני אי השוויונות בהתאם.

משוואות ומודלים של טרנזיסטור MOSFET:

נעסוק בשני מודלים לתיאור התנהגות הזרמים והמתחים:

- שיטת Square Law.
- שיטת Bulk Charge.

ביטוי למתח הסף (מתח ההפעלה):

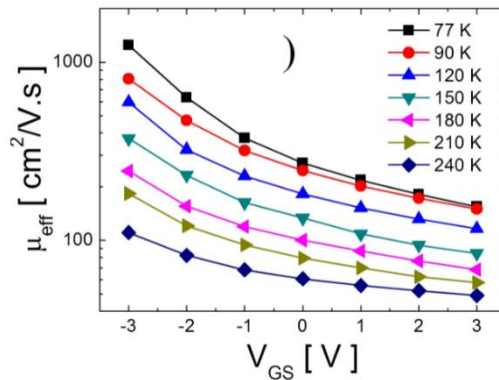
$$V_T = 2\phi_B + \frac{k_s d_{ox}}{k_{ox}} \sqrt{\frac{4qN_a}{k_s \epsilon_0}} \phi_B : \text{מתח הסף עבור NMOS}$$

$$V_T = 2\phi_B - \frac{k_s d_{ox}}{k_{ox}} \sqrt{\frac{4qN_d}{k_s \epsilon_0}} (-\phi_B) : \text{מתח הסף עבור PMOS}$$

מוביליות אפקטיבית של מטענים בתוך שכבת ההיפוך:

נסמן את המוביליות האפקטיבית של אלקטרונים ושל חורים בתוך שכבת ההיפוך ב- $\bar{\mu}_n$ ו- $\bar{\mu}_p$ בהתאמה.

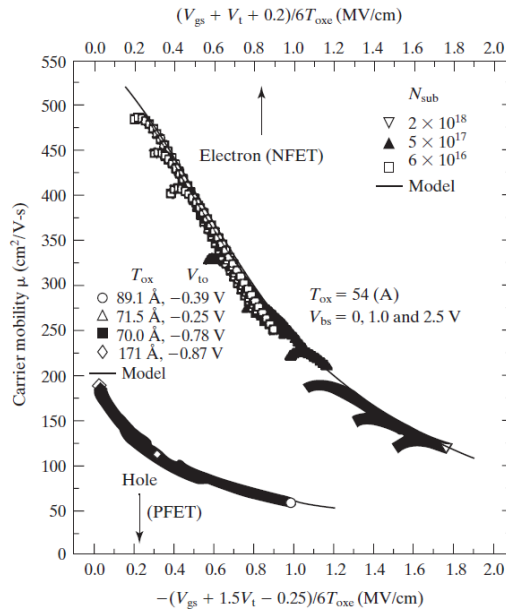
$$\bar{\mu}_n = \frac{\mu_0}{1 + \theta(V_G - V_T)} : \text{תלות מסדר ראשון}$$



ביטויים המתקבלים מחשבון עם שדה ממוצע:

• עבור המוביליות של האלקטרונים:
$$\bar{\mu}_n = \frac{540}{1 + \left(\frac{V_{GS} - V_T + 0.2}{5.4d_{ox}} \right)^{1.85}} \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{V sec}} \right]$$

• עבור המוביליות של החורים:
$$\bar{\mu}_p = \frac{185}{1 - \left(\frac{V_{GS} + 1.5V_T - 0.25}{3.38d_{ox}} \right)^{1.85}} \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{V sec}} \right]$$



שיטת Square Law:

סיכום משוואות מצבי הפעולה של טרנזיסטור MOSFET:

N-Channel MOSFET (NMOS)		מצב פעולה
משוואת זרם	תנאים	
$I_D = 0$	$V_{GS} < V_T$	קיטעון (Cutoff)
$I_D = \frac{Z\bar{\mu}_n C_{ox}}{L} \left((V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{1}{2}V_{DS}^2 \right)$	$V_{GS} \geq V_T$ $0 \leq V_{DS} \leq V_{DS,sat}$	ליניארי/טריודי (Linear/Triode)
$I_{D,sat} = \frac{Z\bar{\mu}_n C_{ox}}{2L} (V_{GS} - V_T)^2$	$V_{GS} \geq V_T$ $V_{DS} \geq V_{DS,sat}$	רוויה (Saturation)
$V_T = 2\phi_B + \frac{k_s d_{ox}}{k_{ox}} \sqrt{\frac{4qN_a}{k_s \epsilon_0}} \phi_B$		מתח סף (אידיאלי):
P-Channel MOSFET (PMOS)		
משוואת זרם	תנאים	
$I_D = 0$	$V_{SG} > V_T $	קיטעון (Cutoff)
$I_D = \frac{Z\bar{\mu}_p C_{ox}}{L} \left((V_{SG} - V_T)V_{SD} - \frac{1}{2}V_{SD}^2 \right)$	$V_{SG} \leq V_T$ $0 \leq V_{SD} \leq V_{SD,sat}$	ליניארי/טריודי (Linear/Triode)
$I_{SD,sat} = \frac{Z\bar{\mu}_p C_{ox}}{2L} (V_{SG} - V_T)^2$	$V_{SG} \leq V_T$ $V_{SD} \geq V_{SD,sat}$	רוויה (Saturation)
$V_T = 2\phi_B - \frac{k_s d_{ox}}{k_{ox}} \sqrt{\frac{4qN_d}{k_s \epsilon_0}} (-\phi_B)$		מתח סף (אידיאלי):

שיטת Bulk Charge :

הזרם (במצב ליניארי) יחושב לפי :

$$I_D = \frac{Z\bar{\mu}_n C_{ox}}{L} \left\{ (V_G - V_T)V_D - \frac{1}{2}V_D^2 - \frac{4}{3}V_W\phi_B \left[\sqrt{\left(1 + \frac{V_D}{2\phi_B}\right)^3} - \left(1 + \frac{3V_D}{4\phi_B}\right) \right] \right\}$$

כאשר : $V_W \triangleq \frac{qN_a W_T}{C_{ox}}$

מתח הרוויה יחושב לפי :

$$V_{D,sat} = V_G - V_T - V_W \left\{ \sqrt{\frac{V_G - V_T}{2\phi_B} + \left(1 + \frac{V_W}{4\phi_B}\right)^2} - \left(1 + \frac{V_W}{4\phi_B}\right) \right\}$$

כאשר עבור זרם הרוויה נשתמש באותו הביטוי של שיטת ה-Square Law.

כתיבה אלטרנטיבית של משוואות שיטת Bulk Charge :

ניתן לסדר את המשוואות, תוך לקיחת קירובים מתאימים מסדר ראשון, לצורה הבאה :

$$V_{D,sat} = V_G - 2\phi_B + K^2 \left\{ 1 - \sqrt{1 + \frac{2V_G}{K^2}} \right\} = \frac{V_G - V_T}{m}$$

$$I_{D,sat} = \frac{Z\bar{\mu}_n C_{ox}}{2mL} (V_G - V_T)^2$$

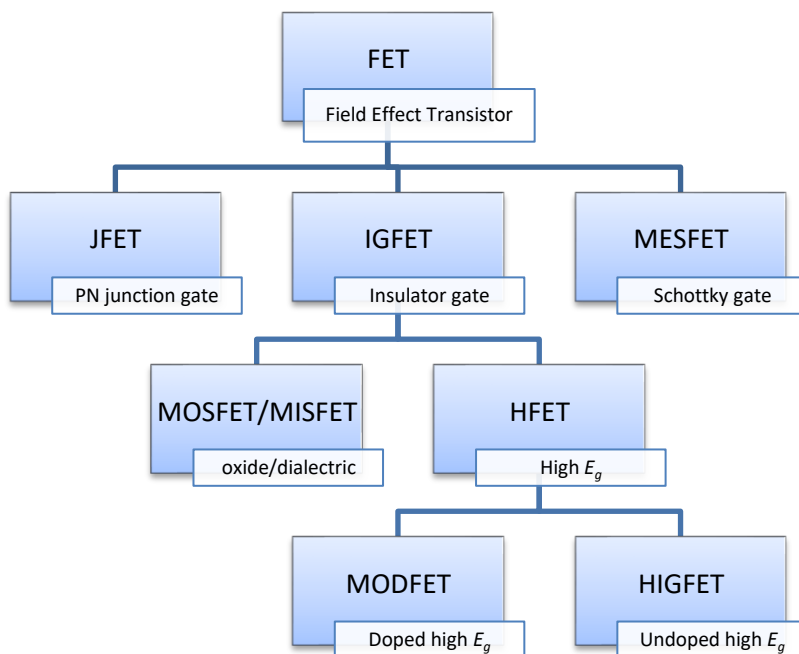
כאשר מגדירים : $K = \frac{\sqrt{k_S \epsilon_0 q N_a}}{C_{ox}}$ ו- $m = 1 + \frac{K}{2\sqrt{\phi_B}}$

סוגי טרנזיסטורים מסוג FET:

להלן מספר סוגים של התקנים מבוססי תוצר-שדה נפוצים:

- טרנזיסטור GaAs MESFET (Metal Semiconductor Field Effect Transistor). התקן הבנוי ללא שכבת התחמוצת ומבוסס על GaAs (במקום סיליקון). המוביליות של האלקטרונים גדולה משמעותית משל סיליקון ולכן הוא משמש ליישומים הדורשים מהירות גדולה. במקום שכבת התחמוצת, ישנה צומת שוטקי.
- טרנזיסטור עם תעלה מסוג Depletion וטרנזיסטור על תעלה מסוג Enhancement. התקן עם תעלה מסוג Depletion הוא כזה שבו עובי התעלה גדול מעובי שכבת המחסור דורש ממתח שער שלילי על מנת לכבות אותו. כלומר עבור $V_G = 0$ ההתקן מופעל. התקן עם תעלה מסוג Enhancement הוא כזה שבו עובי התעלה קטן יותר מעובי שכבת המחסור (המקרה 'הרגיל' שלנו) ובו מתח השער צריך להיות חיובי על מנת להפעיל אותו.
- טרנזיסטור HMET (High Electron-Mobility Field Effect Transistor). התקן שבו מגדלים מתחת לשכבת התחמוצת שכבה שאינה מזוהמת ('אינטרינזית') מסוג GaAlAs. היא מאפשרת למטענים שנוצרים בהיפוך לנוע בחופשיות יותר מאשר בסיליקון מזוהם ולכן המוביליות שלהם גדלה משמעותית.
- טרנזיסטור JFET (Junction Field Effect Transistor). מסירים את שכבת התחמוצת ויוצרים צומת P^+N עבור השער.

משפחת טרנזיסטורים מסוג אפקט שדה:



אפקט המצע (Body Effect):

התלות של מתח הסף, ומכאן של הזרם, במתח שבין המצע למקור נקראת "אפקט המצע". בטכנולוגיית CMOS מגדלים הרבה טרנזיסטורים על גבי מצע אחד. בתכנון מעגלים שכאלו יש דגש על השגת מתח V_{SB} הקטן ביותר לכל התקן עבור מהירות מירבית.

$$V_T(V_{SB}) \triangleq V_T + \frac{C_{dep}}{C_{ox}} V_{SB} = V_T + \alpha V_{SB} : \text{קשר בין מתח הסף ואפקט המצע}$$

כאשר: $\alpha = \frac{C_{dep}}{C_{ox}} = \frac{3d_{ox}}{W_{d,max}}$ והוא נקרא "המקדם של אפקט המצע" (Body Effect Coefficient).

$$V_T = V_{T0} + \frac{\sqrt{2qN_a\epsilon_s}}{C_{ox}} (\sqrt{2\phi_B + V_{SB}} - \sqrt{2\phi_B}) : \text{מתח הסף כתלות באפקט המצע}$$

$$V_{T0} = V_{FB} + 2\phi_B + \frac{\sqrt{4qN_a\epsilon_s\phi_B}}{C_{ox}} : \text{כאשר}$$

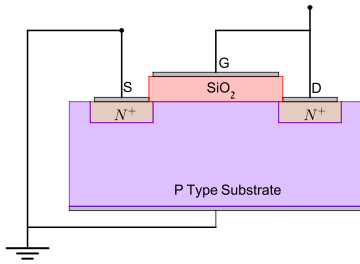
$$\Delta V_T = V_T - V_{T0} = \frac{\sqrt{2qN_a\epsilon_s}}{C_{ox}} (\sqrt{2\phi_B + V_{SB}} - \sqrt{2\phi_B}) : \text{ההפרש במתח הסף כתלות ב-} V_{SB} \text{ הוא}$$

כאשר מקובל לסמן: $\gamma = \frac{\sqrt{2qN_a\epsilon_s}}{C_{ox}}$ את פרמטר אפקט המצע (Body Effect Parameter).

שאלות:

- 1) נתון טרנזיסטור NMOS עם תחמוצת (SiO_2) בעובי $d_{ox} = 2.5 \text{ nm}$. מניחים כי המצע והמקור מחוברים לאדמה וכי ההתקן נמצא בטמפרטורת החדר. הגוף מזוהם בריכוז אקספטורים של $N_a = 6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. ידוע כי אורך התעלה הוא $L = 4 \mu\text{m}$, רוחב ההתקן הוא $Z = 5 \mu\text{m}$ והמוביליות של האלקטרונים בתוך ההתקן מחושבת להיות $\bar{\mu}_n = 250 \frac{\text{cm}^2}{\text{V sec}}$. מפעילים מתח שער של $V_G = 3.3 \text{ V}$.
- א. יש למצוא את המתח הרוויה $V_{D,sat}$.
- ב. יש למצוא את זרם הרוויה $I_{D,sat}$.

2) נתון NMOS שבו מקצרים את השער (Gate) והשפך (Drain) כמתואר בציור הבא :
ההתקן נמצא בטמפרטורת החדר וכן :

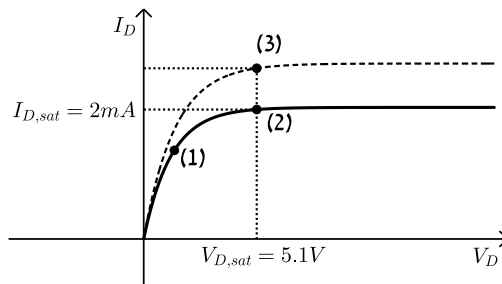


$$d_{ox} = 1.2 \text{ nm}, N_a = 10^{17} \text{ cm}^{-3}, \frac{Z}{L} = 8, \bar{\mu}_n = 575 \frac{\text{cm}^2}{\text{V sec}}$$

יש למצוא את הזרם I_D לפי מודל Square Law עבור כל אחד מהמקרים הבאים :

- א. $V_G = V_D = 0.7 \text{ V}$
ב. $V_G = V_D = 2.2 \text{ V}$

3) נתון טרנזיסטור MOSFET אידיאלי עם מצע מסוג P בעל האופיין IV הבא :



- א. באיזה מצב פעולה נמצא ההתקן בנקודה (1)?
ציירו חתך דו-מימדי של ההתקן וציינו בו את שכבת ההיפוך.
ב. נתון כעת כי: $V_T = 0.8 \text{ V}$.
מהו מתח השער שיש להפעיל על מנת לקבל את האופיין המתואר ע"י הקו הרציף?
הנח כי המקור והמצע מחוברים לאדמה.
ג. מהו המטען ליחידת שטח בשכבת ההיפוך בקצה השפך (Drain) עבור הנקודה (2)?
ד. יש להניח כי מתח השער כעת מקיים: $V_G - V_T = 6 \text{ V}$. מהו הזרם I_D אם: $V_D = 8 \text{ V}$?
ה. מה תהיה תוספת הזרם כאשר מגדילים את מתח השער ב-1V ועוברים מנקודה (2) לנקודה (3)?
(הנחייה: האם הטרנזיסטור נמצא באותו מצב הפעולה בנקודה (3) כמו של (2)?)

4) נתון N-channel MOSFET (NMOS) הנמצא בטמפרטורת החדר ומאופיין ע"י סט

$$\text{הפרמטרים הבא: } \bar{\mu}_n = 750 \frac{\text{cm}^2}{\text{V sec}}, N_a = 10^{16} \text{ cm}^{-3}, d_{ox} = 0.03 \mu\text{m}, L = 4 \mu\text{m}, Z = 40 \mu\text{m}$$

א. מצא את כל אחד מהגדלים הבאים :

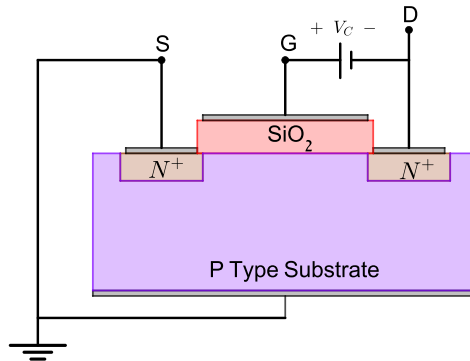
(1) V_T

(2) $I_{D,sat}$ לפי שיטת ה-Square Law עבור $V_G = 3 \text{ V}$

(3) $I_{D,sat}$ לפי שיטת ה-Bulk Charge עבור $V_G = 3 \text{ V}$

ב. סרטט אופיין IV של ה-MOSFET עבור מתח הפעלה $V_G = 3 \text{ V}$

5) נתון NMOS השרוי בטמפרטורת החדר ומגדירים ממתח קבוע $V_C \geq 0$ המחובר בין השער (Gate) והשפך (Drain) כמתואר באיור הבא :



היעזר בשיטת Square Law וענה על הסעיפים הבאים :

- מצא את I_D עבור $V_D \geq 0$ כאשר : $V_C = V_T / 2$.
- מצא את I_D עבור $V_D \geq 0$ כאשר : $V_C = 2V_T$.
- סרטט אופיין I-V מתאים עבור כל אחד מהמקרים הקודמים.

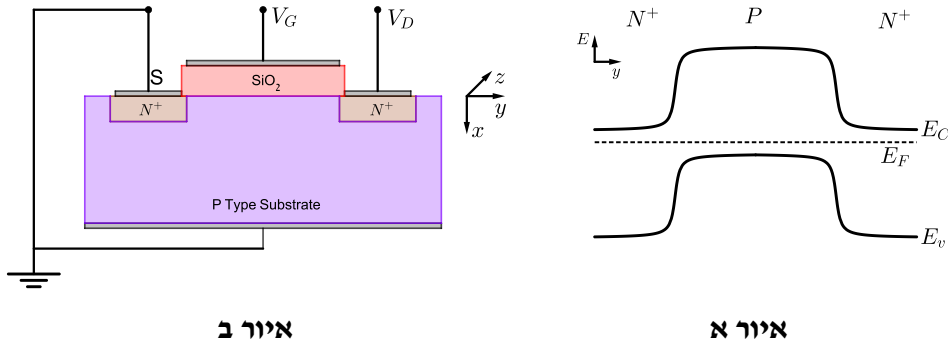
6) נתון NMOS שבו $N_a = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $d_{ox} = 2 \text{ nm}$ בטמפרטורת החדר.

- מהו מתח ההפעלה (V_T) של ההתקן?
- מחברים ממתח חיצוני למצע : $V_{SB} = 2 \text{ V}$. מה הוא השינוי במתח הסף (מתח ההפעלה) ΔV_T כתוצאה מכך?

7) נתון טרנזיסטור MOSFET אידיאלי עם תעלה מסוג P שמוחזק בטמפרטורת החדר.

- בהנחה כי $V_D = 0 \text{ V}$, סרטט את דיאגרמת פסי האנרגיה של חלק ה-MOS עבור השער (Gate) במצב מתח סף (Threshold).
- בהנחה כי $V_D = 0 \text{ V}$, סרטט את גרף צפיפות המטען בחלק ה-MOS עבור השער (Gate) במצב מתח סף (Threshold).
- סרטט חתך דו-ממדי של ההתקן במצב היפוך, סמן את כל הרכיבים הרלוונטיים ותאר את צורתה של שכבת המחסור מהשפך (Drain) למקור (Source).

8 באיור א מתוארת דיאגרמת פסי אנרגיה איכותית של התקן NMOS במצב שיווי משקל. ידוע כי השפך (Drain) והמקור (Source) מזהמים בריכוז כבד וכי המצע מזהם בינונית. הנח כי המצע והמקור מוארקים והתייחס לכיווני הצירים המתוארים באיור ב.



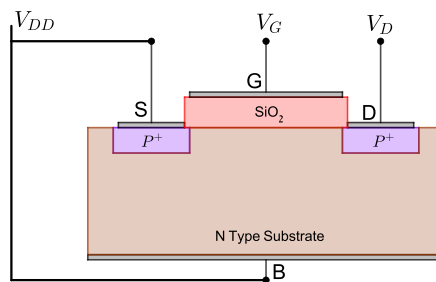
א. קבע האם ניתן להבין מהדיאגרמה באיזה מצב ממתח מתוך השניים הבאים נמצא ההתקן. נמק את קביעתך. במידה וניתן לקבוע מהו מצב הממתח המתואר, סרטט דיאגרמה מתאימה עבור המצב השני.

$$V_G < V_T, V_D \sim 0 \quad (1)$$

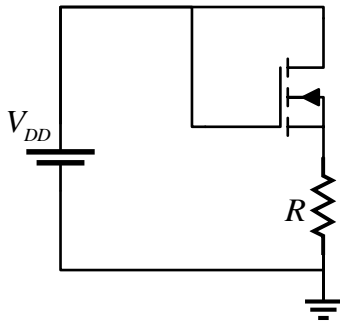
$$V_G > V_T, V_{DS} \sim 0 \quad (2)$$

- ב. סרטט דיאגרמת פסי אנרגיה מתאימה שתתאר מצב פעיל (ON) ליניארי.
ג. סרטט דיאגרמת פסי אנרגיה מתאימה שתתאר מצב פעיל (ON) ברוויה.

9 נתון טרנזיסטור מסוג PMOS כמתואר בסכמה הבאה :



- א. סרטט דיאגרמת פסי אנרגיה עבור מצב שיווי משקל כאשר $V_G > V_T$.
ב. סרטט דיאגרמת פסי אנרגיה עבור מצב שיווי משקל כאשר $V_G < V_T$.
ג. סרטט דיאגרמת פסי אנרגיה עבור מצב פעולה ליניארי כאשר $V_G < V_T$.
ד. סרטט דיאגרמת פסי אנרגיה עבור מצב רוויה כאשר $V_G < V_T$.
ה. סרטט את האופיין I-V של PMOS.
כתוב את הקשר המתאים עבור V_{SD} .



10 נתון טרנזיסטור n-channel MOS עם מתח סף חיובי. מחברים את הטרנזיסטור לנגד ולמקור מתח משתנה V_{DD} ומקצרים את ה-gate ל-drain. ערכו של הנגד הוא $R = 10\text{ k}\Omega$.

א. מהו סוג הטרנזיסטור? נמק.

ב. איזה תחום הולכה יימצא הטרנזיסטור כתלות ב- V_{DD} ? נמק.

ג. נתון: $\frac{W}{L} = 5$; $C_{ox} = 2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{F}}{\text{cm}^2}$; $\bar{\mu}_n = 200 \frac{\text{cm}}{\text{V sec}}$

וכי מתח הסף הוא $V_T = 1\text{V}$.

יש למצוא את מתח האספקה V_{DD} עבורו מפל המתח על הנגד יהיה $V_R = 10\text{V}$.

תשובות סופיות:

א. $V_{D,sat} = 2.4 \text{ V}$ ב. $I_{D,sat} = 1.242 \text{ mA}$ (1)

א. $I_D = 0 \text{ A}$ ב. $I_{D,sat} = 5.6 \text{ mA}$ (2)

א. ליניארי. ב. $V_G = 5.9 \text{ V}$ ג. 0 ד. $I_D = 2.768 \text{ mA}$ (3)

ה. $\Delta I = 0.78 \text{ mA}$

א. (1). $V_T = 1.14 \text{ V}$ א. (2). $I_{D,sat} = 1.49 \text{ mA}$ (4)

א. (3). חישוב בדרך המלאה: $I_{D,sat} = 1.21 \text{ mA}$, חישוב בדרך מקורבת: $I_{D,sat} = 1.15 \text{ mA}$.

ב. ראה אופיין מלא בסרטון הוידאו.

$$I_D = \frac{Z\bar{\mu}_n C_{ox}}{2L} V_D (V_D + 2V_T) : V_D \geq 0 \quad \text{ב.} \quad I_D = \begin{cases} \frac{Z\bar{\mu}_n C_{ox}}{2L} \left(V_D - \frac{V_T}{2} \right)^2 & V_D \geq V_T / 2 \\ 0 & 0 \leq V_D < V_T / 2 \end{cases} \quad \text{א.} \quad (5)$$

ג. ראה אופיינים מלאים לכל מקרה בסרטון הוידאו.

א. $V_T = 0.608 \text{ V}$ ב. $\Delta V_T = 8.8 \text{ mV}$ (6)

ראה את סרטוטי פסי האנרגיה לכל סעיפי השאלה בפתרון הוידאו. (7)

א. הדיאגרמה שייכת למקרה (1). ראה איור עבור מקרה (2) בסרטון הוידאו. (8)

ב. ראה דיאגרמה מלאה בסרטון הוידאו.

ג. ראה דיאגרמה מלאה בסרטון הוידאו.

ראה פתרון מלא של כל הדיאגרמות בפתרון הוידאו. (9)

א. טרנזיסטור מסוג חיזוק הולכה (Enhancement).

ב. קטעון עבור: $V_{DD} < V_T$, רוויה עבור: $V_{DD} \geq V_T$ ג. $V_{DD} = 12 \text{ V}$