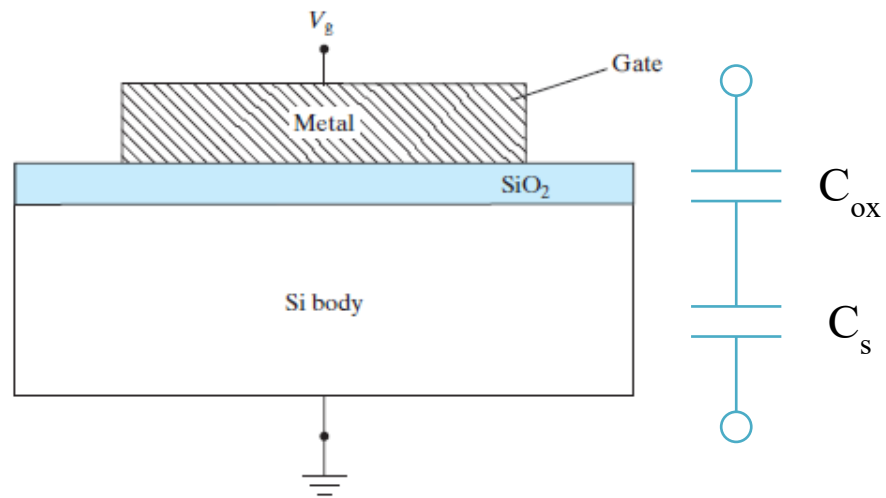
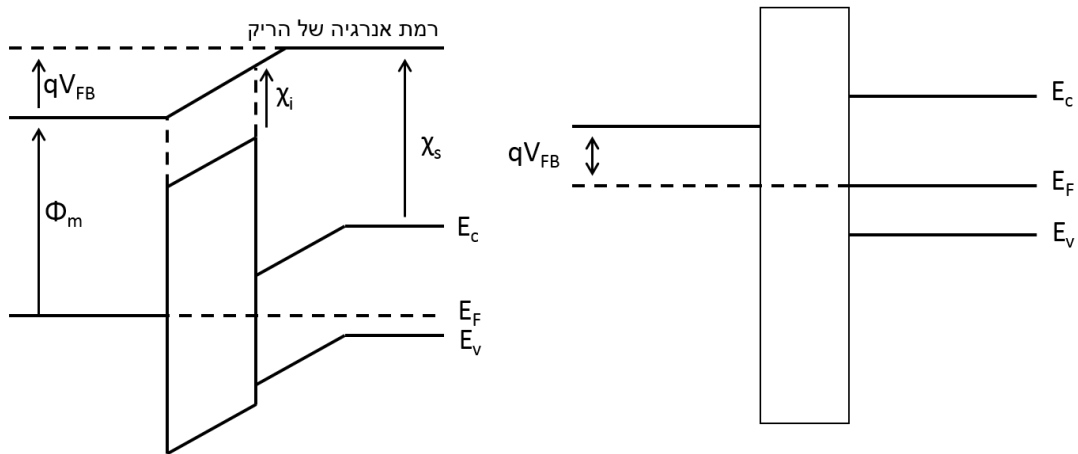


תרגול 3 - קבל MOS, MOSFET

קבל MOS



דיאגרמת פסי אנרגיה :



מתכת מבודד מוליך למחצה

מצב שווי משקל $V_G=0$

מצב פסים ישרים $V_G=V_{FB}$

ϕ_m - פונקציית העבודה של המתכת.

χ_s - האפיניות האלקטרונית של המל"מ.

$E_C - E_F$ - המרחק בין פס ההולכה לאנרגיית פרמי במל"מ.

** באופן כללי, בקבל MOS לא זורם זרם במצב יציב ולכן בכל מקום בהתקן מתקיים השוויון :

$$np = n_i^2$$

כיוון שלא זורם זרם, אז הקוואזי רמות פרמי קבועות. אנו מניחים כי ההתקן רחב מספיק כך שרחוק מהממשק בין התחמוצת לסיליקון רמות פרמי מתלכדות בגובה בו רמת פרמי נמצאת בשיווי משקל. מאחר והקוואזי רמות פרמי קבועות, הן יהיו ברמה הזו לכל אורך הקבל. בדוגמה הנ"ל מתח השער חיובי ולכן האנרגיה של האלקטרונים בפס ההולכה יורדת, אנרגיית החורים בפס הערכיות עולה, ונוצר מצב של כיפוף פסים.

מספר הגדרות נוספות :

ϕ_s - כיפוף הפסים ליד פני השטח

Q_s - המטען המשטחי במל"מ

E_s - השדה החשמלי ליד פני השטח

סה"כ המתח על הקבל :

$$V_G = V_{OX} + \phi_s + V_{FB}$$

$$V_{OX} = \frac{\epsilon_s \epsilon_0 E_s}{C_{OX}} = - \frac{Q_{OX}}{C_{OX}}$$

נניח מצע מסוג p -

לקבל MOS ישנם שלושה מצבים :

1. $V_{FB} > V_G$ - צבירה, ϕ_s קטן מאוד, ישנה צבירת חורים (מטעני רוב) ליד פני השטח.
2. $V_{FB} < V_G < V_T$ - מחסור, שכבת המחסור גדלה עם הפוטנציאל - ממתח חיובי מוריד את האנרגיה של האלקטרונים, ריכוז האלקטרונים שיוצר קטן, עיקר האפקט הוא דחייה של החורים מאזור זה.
3. א. $V_T < V_G$ סף אינברסיה, הסף הינו החל מ- $\phi_B = \phi_s - (\phi_B = E_i - E_F)$, ריכוז האלקטרונים על פני השטח שווה לריכוז החורים בחומר
ב. $V_T < V_G$ אינברסיה חזקה $2\phi_B = \phi_s$

ישנם שני ממתחים אשר תוחמים את אזורים אלו :

1. V_{FB} - מפריד את אזור הצבירה מאזור המחסור
2. V_T - מפריד את אזור המחסור מאזור האינברסיה

1. צבירה (accumulation) -

כאשר מפעילים מתח שלילי על המתכת, ישנה השראה שלילית על המתכת וכתוצאה מכך משיכה של מטענים חיוביים (חורים) מהמוליך למחצה. ריכוז החורים בפני שטח המוליך למחצה גדול מריכוז החורים בנפח המוליך למחצה ולכן מצב זה נקרא צבירה. V_{FB} - הוא המתח בו אין מטען על לוחות הקבל ולכן אין שדה חשמלי "שנופל" על התחמוצת. ערכו המספרי של V_{FB} תלוי באילוח המוליך למחצה וזיהומים (אם קיימים) בפני השטח של המוליך למחצה. כאשר אנו נמצאים במצב צבירה, שיפוע הגרף של מטען פר יחידת שטח (Q_N) של המוליך למחצה/תחמוצת למתח המופעל (V_G) הוא לינארי והשיפוע הוא קיבול התחמוצת ליחידת שטח אשר מחושב לפי :

קיבול התחמוצת :

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox} \epsilon_0}{t_{ox}}$$

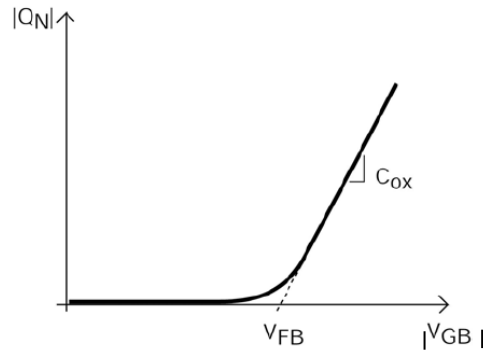
t_{ox} - עובי המבודד

$-V_G$ - מתח השער

$$V_G = V_{FB} + \phi_s + V_{ox}$$

$$\phi_s \rightarrow 0$$

$$V_{ox} = V_G - V_{FB}$$



2. מחסור (depletion) –

ממתח חיובי על פני שטח המוליך למחצה דוחה את מטעני הרוב הניידים (חורים) בהשאינם מאחור אזור ללא מטענים ניידים – אזור מחסור. לשכבת המחסור ישנו קיבול (C_D) אשר גם הוא תלוי ב V_G אשר מחושב לפי:

$$C_D = \frac{\epsilon_{si}}{x_d(V_G)}$$

קיבול התחמוצות נמצא בטור לקיבול שכבת המחסור ולכן קיבול קבל MOS במצב מחסור הינו:

$$\frac{1}{C_{dep}} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_D}$$

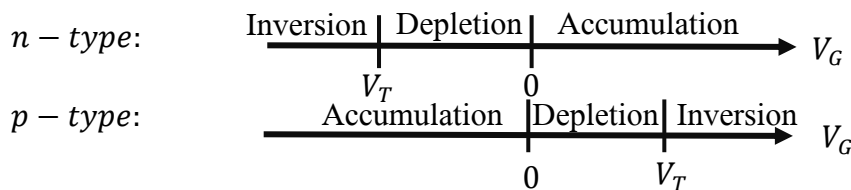
3. אינברסיה (inversion) –

כאשר עוברים את מתח הסף המוליך למחצה משנה את אופיו ומתחיל להצטבר מטעני מיעוט בפני השטח (במקרה שלנו אלקטרונים) עד שמגיעים למצב בו המוליך למחצה "התהפך" (inverter) באופיו והופך להיות כמו מוליך למחצה מסוג n. מתח הסף מוגדר כמתח בו המוליך למחצה משנה את אופיו. במתח הסף מתקיים:

$$\varphi_s = 2\varphi_b = \frac{2kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}$$

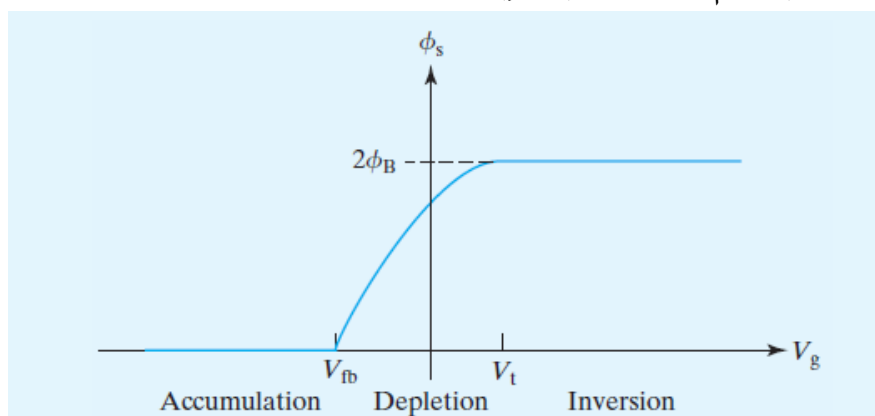
$$V_G = V_{FB} + 2\varphi_b + \frac{\sqrt{qN_A 2\epsilon_s 2\varphi_b}}{C_{ox}}$$

סיכום מצבי הפעולה עבור קבל MOS, כתלות ב V_G :

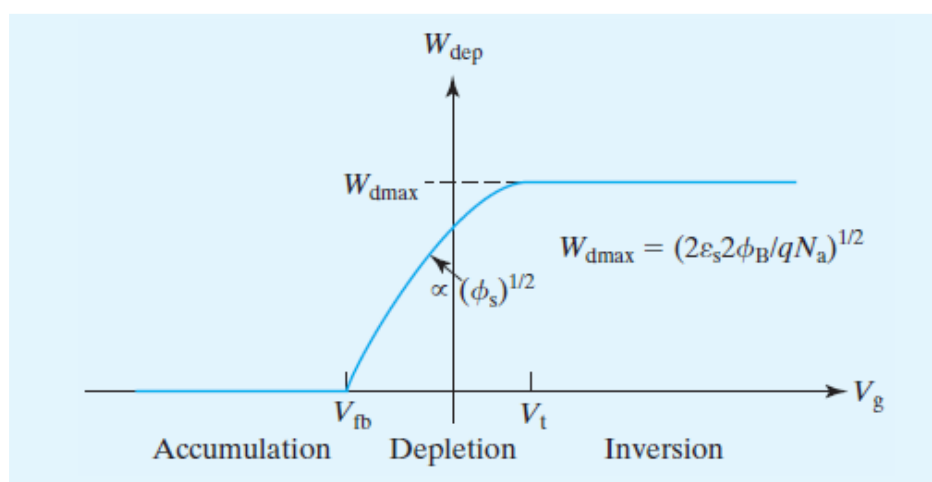


לסיכום

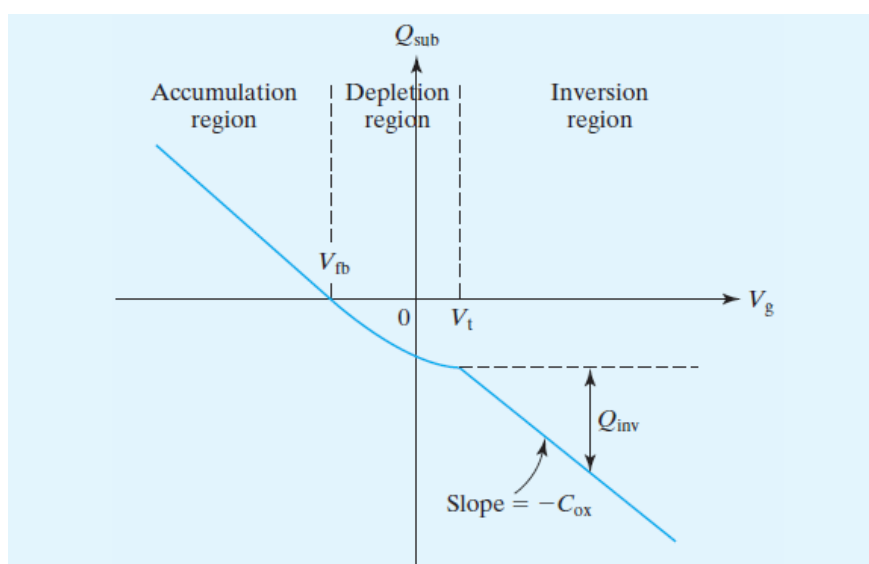
פוטנציאל פני שטח כפונקציה של מתח השער:



רוחב שכבת המחסור כפונקציה של מתח השער:

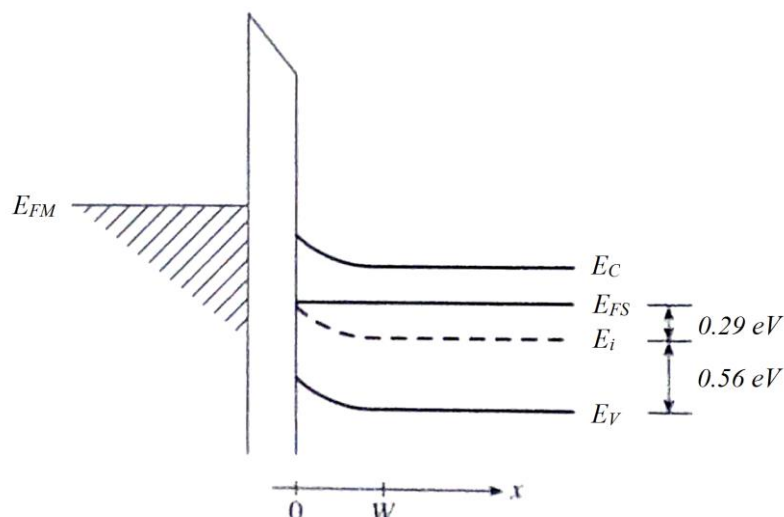


המטען הצבור בקבל כפונקציה של מתח השער:



שאלה 1

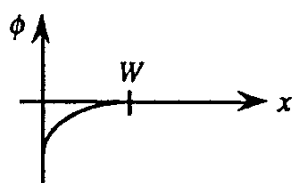
להלן דיאגרמת פסי אנרגיה של קבל MOS אידיאלי בעל $x_0 = 0.05 \mu m$ בטמפרטורת חדר. על הקבל מופעל מתח הגורם לכיפוף פסים כך שרמת פרמי מתלכדת עם הרמה האינטרינזית בממשק המל"מ-תחמוצת. ידוע שהמל"מ הוא סיליקון והתחמוצת SiO_2 .



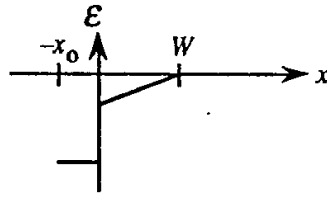
- שרטטו את הפוטנציאל האלקטרוסטטי ϕ במל"מ כפונקציה של x .
- שרטטו את השדה החשמלי $\mathcal{E}$ כפונקציה של x (בכל המרחב). וודאו שהשרטוט בפרופורציה ומשקף את היחס בין השדות באזורים השונים.
- האם ההתקן מצוי במצב שיווי משקל? מה ניתן לומר על כל אחד מהאזורים בהקשר זה?
- מהו ריכוז האלקטרונים בממשק המל"מ-תחמוצת (נקודה $x = 0$)?
- חשבו את N_D .
- חשבו את ϕ_S .

פתרון

- אנו יודעים כי הפוטנציאל מקיים $\phi(x) = \phi_0 - E_i/q$ כאשר E_i היא הרמה האינטרינזית ואילו ϕ_0 הוא פוטנציאל הייחוס. מכאן שהפוטנציאל משתנה כמו פסי האנרגיה רק עם היפוך סימן



- השדה החשמלי מקיים $\mathcal{E}(x) = \frac{1}{q} \frac{\partial E_C}{\partial x}$. בהנחה ואין מטען כלוא בשכבת התחמוצת, השדה החשמלי בה הוא קבוע. כמו כן, במידה ואין מטען בפני השטח בין המל"מ והתחמוצת מתקיים $K_S \epsilon_0 \mathcal{E}_S - K_O \epsilon_0 \mathcal{E}_{ox} = 0$ כך שעבור הקבועים של סיליקון ותחמוצת סיליקון מתקבל כי $\mathcal{E}_{ox} = \frac{11.8}{3.8} \mathcal{E}_S \approx 3\mathcal{E}_S$. כמו כן, על פי קירוב המיחסור, השדה החשמלי לינארי באיזור המיחסור, ומגיע לערך שלילי מקסימלי בממשק בין המל"מ והתחמוצת. לבסוף, אנו יודעים כי בתוך המתכת השדה הוא 0. אם נחבר את כל הפרטים האלו יחד, נקבל את התפלגות השדה הבאה:



- ג. מאחר ומופעל מתח על ההתקן הוא לא נמצא בשיווי משקל. קל לראות כי רמת פרמי איננה אחידה בהתקן (היא גבוהה יותר במתכת).
- ד. מאחר וזרם לא זורם בהתקן, הקוואזי רמות פרמי קבועות והן מתלכדות עם רמת פרמי. מסיבה זו, למרות שההתקן לא נמצא בשיווי משקל, ניתן לחשב את ריכוז הנשאים מתוך הקשר בין רמת פרמי והרמה האינטרינזית. מכיוון שרמת פרמי מתלכדת עם הרמה האינטרינזית בנקודת הממשק בין המל"מ והתחמוצת, ריכוז הנשאים בנקודה זו הוא בדיוק הריכוז האינטרינזי n_i .
- ה. נחשב את ריכוז המזהמים מתוך הפער בין הרמה האינטרינזית ורמת פרמי בנקודה מחוץ לאזור המיחסור.

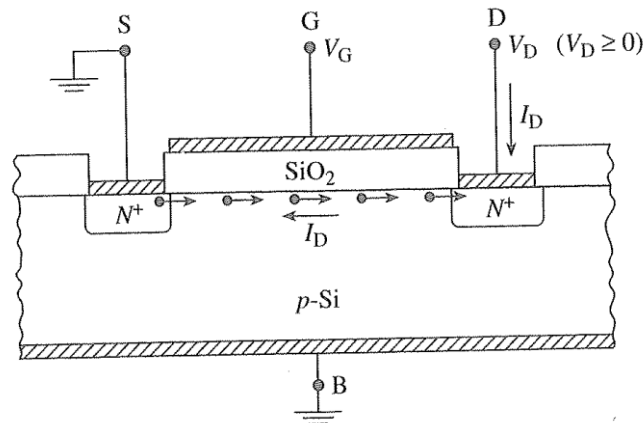
$$N_D \cong n_{bulk} = n_i e^{[E_{FS} - E_i(bulk)]/kT} = 10^{10} e^{\frac{0.29}{0.0259}} = 7.29 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

- ו. יש לחשב את הפוטנציאל בממשק בין המל"מ והתחמוצת. אנו יודעים כי

$$\phi_s = \frac{1}{q} (E_{i,bulk} - E_{i,surface}) = \phi(x=0)$$

קל לראות מתוך הדיאגרמה בשאלה כי $\phi_s = -0.29 \text{ V}$ (נזכור כי הפוטנציאל הוא בסימן הפוך מהאנרגיה).

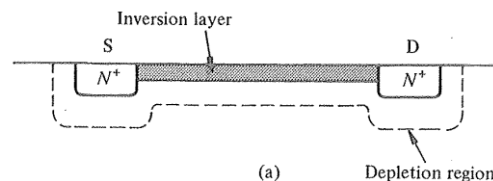
טרנזיסטור MOSFET



- טרנזיסטור NMOS הוא למעשה קבל MOS בתוספת 2 אזורי n-type הממוקמים מיד בסמוך לאזור המוליך הנשלט ע"י השער (Gate) ומווסתים את הזרם.
- לטרנזיסטור 4 הדקים: **Source, Drain, Gate, Bulk**.
- זרם הטרנזיסטור I_{DS} זורם כך שתמיד נ"מ (אלקטרונים בציור) נכנסים להתקן מהדק Source (מקור) עוזבים דרך הדק Drain (נקז) ומבוקרים (gated) ע"י מתח ה-Gate.
- ישנם שני סוגי טרנזיסטורים: n-channel-MOS=NMOS (תעלה מסוג n ומצע מסוג p) ו-p-channel-MOS=PMOS (תעלה מסוג p ומצע מסוג n).

השפעת מתח ה-Gate (נניח $V_D=0$ טרנזיסטור n-MOSFET)

- מצב אקומולציה (Accumulation) או מחסור (Depletion), קיים עודף או חוסר בחורים (נ"מ רוב של המצע) ומעט מאד אלקטרונים (נ"מ מיעוט של המצע) ולא זורם זרם בין הדקי D-S (בין אזורי ה-n⁺) ← **תחום קיטעון**.
- כאשר עוברים להיפוך (inversion), שכבת היפוך דקה המכילה אלקטרונים ניידיים נוצרת בסמוך לפני השטח של הסיליקון. שכבה מוליכה זו מחברת בין אזורי ה-n⁺ ונקראת התעלה.



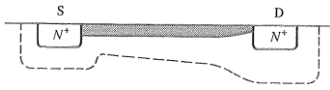
- היפוך חזק יותר ← יצטברו יותר אלקטרונים בפני השטח ← מוליכות התעלה (זרם) תגדל.

ה-Gate פותח/סוגר את הטרנזיסטור - יוצר את התעלה המחברת את ה-S-D - וקובע המוליכות המקסימלית שלה

השפעת מתח ה-Drain (נניח $V_G > V_T$ טרנזיסטור n-MOSFET)

- $I_D = 0 : V_D = 0$

- $V_D > 0$



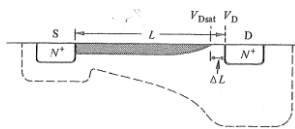
○ **תחום ליניארי:** תחת מתח חיובי קטן, פני השטח מתפקדים כמו נגד זרם פרופורציוני ל- V_D מתחיל לזרום לתוך ה-D.

○ כאשר V_D מעל כמה עשיריות וולט, מפל המתח D-S מתחיל לבטל את אפקט ההיפוך של ה-G. רוחב איזור המחסור מתרחב כלפי מטה יחסית לתעלה מה-S לכיוון ה-D. כמות נ"מ בשכבת ההיפוך קטנה בהתאמה, וגורמת לירידה במוליכות התעלה ובשיפוע אופיין ה- I_D-V_D .

○ **צביטה:** עלייה נוספת ב- V_D גוררת ירידה נוספת (חזקה יותר ככל שקרובים ל-D) בכמות נ"מ בשכבת ההיפוך, וירידה בשיפוע עד שהתעלה (שכבת ההיפוך) נעלמת לגמרי בסמוך ל-D (צביטה). $(n_{\text{surface}} = N_A) \leftarrow$ צביטה.

בנקודה זו נגדיר $V_D = V_G - V_T = V_{Dsat}$ ובה שיפוע אופיין ה- I_D-V_D שואף ל-0.

○ **תחום רוויה:** $V_D > V_{Dsat}$: נקודת הצביטה מתרחבת לאזור מחסור ברוחב ΔL . אזור זה המכיל מעט מאד נ"מ ניידים ובעל מוליכות נמוכה. בהנחה כי אורך

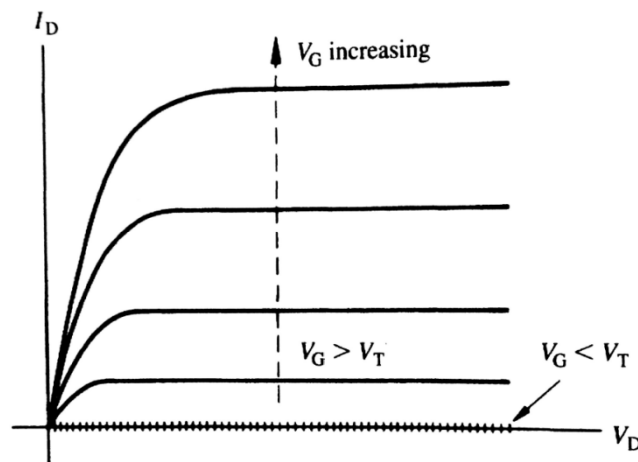


התעלה אורך ביחס ל- ΔL (הנחת תעלה ארוכה), אזור הצביטה סופג את רוב המתח הנוסף על ה-D $\leftarrow I_D$ בקירוב לא תלוי ב- V_D .

במקום תעלה יש איזור מיחסור באורך ΔL והזרם ממשיך לזרום בהתקן. זרם זה הוא בעיקר זרם דיפוזיה. מאחר ויש מחסור של נשאי מטען סמוך ל-Drain, זרם הסחיפה (אשר ליניארי עם צפיפות הנשאים) יהיה נמוך בתחום זה.

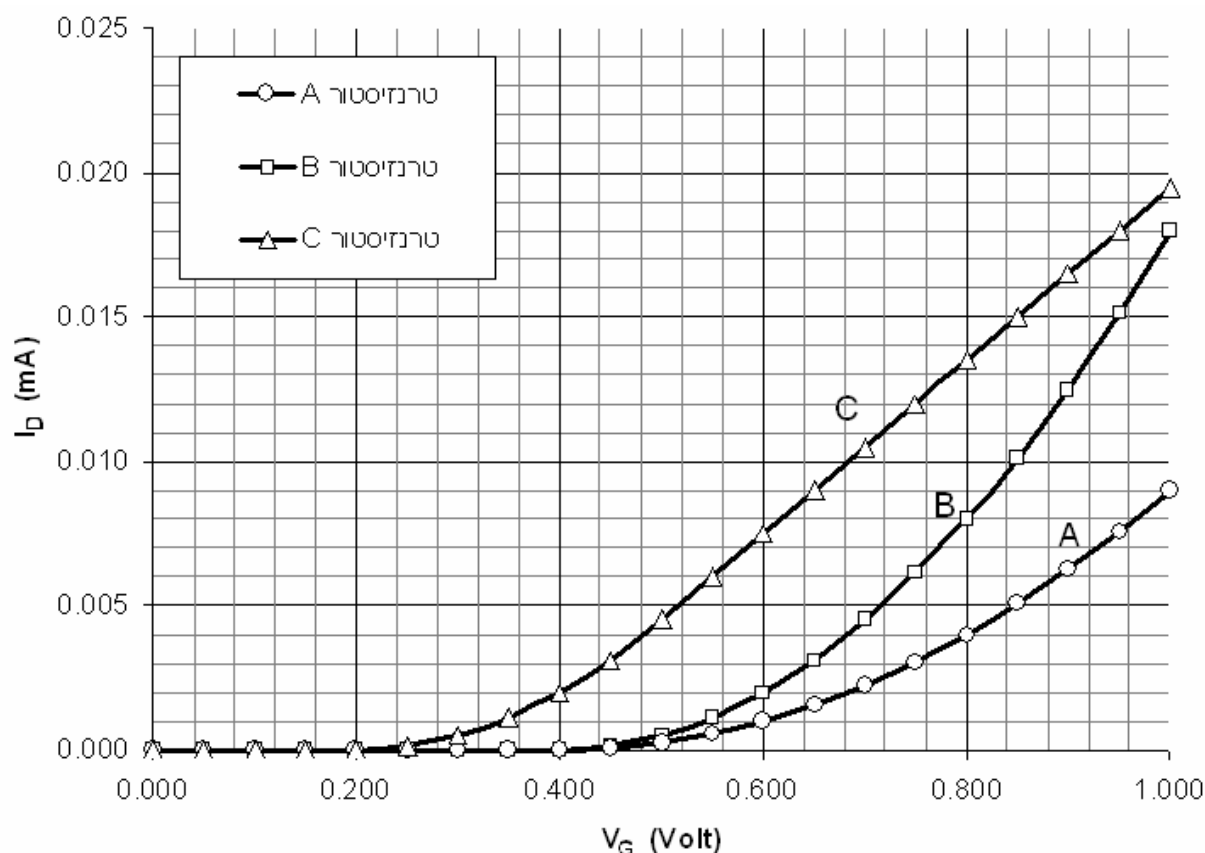
אופיין I_D-V_D של הטרנזיסטור:

- עבור $V_G < V_T$ התעלה סגורה ובקירוב אין זרם
- עבור $V_G > V_T$ היות ומוליכות התעלה גדלה עם מתח השער, אזי גם שיפוע הזרם בהתחלה גדל עם V_G . בנוסף, ככל שיש יותר מטען בשכבת ההיפוך עבור $V_D = 0$ נדרש V_D גדול יותר לקבלת צביטה V_{Dsat} גם כן גדל עם V_G .



שאלה 2

בשרטוט הבא מתוארות עקומות זרם ה- Drain כתלות במתח השער עבור שלושה טרנזיסטורי MOSFET שונים.



- נתון כי $V_D = 0.3V$ וערכו נשאר קבוע לאורך כל המדידות עבור שלושת הטרנזיסטורים. כמו כן, נתון לשלושת הטרנזיסטורים $T = 300K, n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.
- מהו סוג המצע של הטרנזיסטורים?
 - העריכו את מתח הסף, V_T , של כל אחד מהטרנזיסטורים.
 - עבור כל אחד מהטרנזיסטורים, מהו תחום מתחי השער בו הטרנזיסטור נמצא ברווית זרם?
 - נתון כי $z/L = 12$ וכי מקדם הדיפוזיה של נשאי המטען בתעלה הוא $D = 20 \text{ cm}^2/\text{s}$, העריכו מתוך הגרף את קיבול התחמוצת ליחידת שטח, C_{ox} , של טרנזיסטור B. רמז: ניתן להניח כי עקומת הזרם שבאיור ליניארית עבור מתחים הגבוהים מ- $0.8V$.

פתרון

- מאחר ומתח הסף גדול מ-0, וזרם גדל עם המתח, זהו טרנזיסטור עם מצע מסוג p.
- מתח הסף הוא המתח בו זרם הטרנזיסטור מתחיל לעלות. מתוך הגרף ניתן לקבל את הערכים הבאים:

$$V_{T,A} = V_{T,B} = 0.4V, V_{T,C} = 0.2V$$
- כאמור, נתן כי $V_D = 0.3V$. בתחום הרוויה, $V_D = 0.3V \Rightarrow V_G < V_D + V_T$. על כן, טרנזיסטורים יהיו בתחום הרוויה בתחום $V_T < V_G < V_D + V_T$. על כן, טרנזיסטורים A ו-B יהיו ברוויה בתחום

$$0.4V < V_G < 0.3V + 0.4V = 0.7V$$

בדומה, טרנזיסטור C יהיה ברוויה בתחום

$$0.2V < V_G < 0.5V$$

ד. אנו יודעים כי בתחום הליניארי, $I_{DS} = \frac{1}{2} \bar{\mu}_n C_{ox} \frac{Z}{L} [2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2]$. על כן, השינוי בזרם עם מתח השער הוא

$$\frac{\partial I_{DS}}{\partial V_G} = \bar{\mu}_n C_{ox} \frac{Z}{L} V_{DS}$$

נחלץ מתוך הגרף את השינוי בזרם עם מתח השער. $\frac{\partial I_{DS}}{\partial V_G} = \frac{0.018-0.008}{1-0.8} = 0.05 \frac{mA}{V}$.

$$5 \cdot 10^{-5} \frac{A}{V}$$

כמו כן, $\bar{\mu}_n = \frac{D_n}{0.026} = 770 \frac{s}{Vcm^2}$, נציב בביטוי שקיבלנו:

$$5 \cdot 10^{-5} = 770 C_{ox} \cdot 12 \cdot 0.3 \Rightarrow C_{ox} = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{770 \cdot 12 \cdot 0.3} = 18 \frac{nF}{cm^2}$$