

תוכן העניינים:

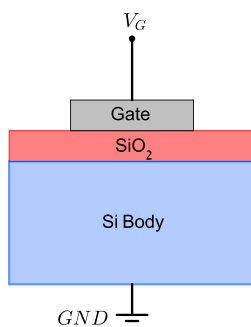
2	פרק 5
2	קבל MOS
2	כללי:
2	סיכום כללי:
12	שאלות:
15	תשובות סופיות:

פרק 5

קבל MOS

כללי:

סיכום כללי:



מבנה כללי של קבל MOS והגדרות יסודיות:

MOS זה קיצור של Metal Oxide Semiconductor. קבל MOS מורכב מחומר מזוהם מסוג P או N שנקרא ה-Silicon Body של ההתקן (המצע - Bulk), משכבה דקה של מבודד הנקרא Silicon-Oxide (SiO_2) וחומר מתכתי שנקרא Gate (שער).

מקובל לחוות את הקבל ע"י ממתח V_G ביחס לאדמה המחוברת לגוף ההתקן (כלומר ל-Si Body).

המתכת שמתפקדת בתור השער עשויה מסיליקון בעל זיהום כבד (P^+ או N^+) ונקראת polycrystalline silicon או בקיצור poly-Si.

סוג הקבל נקבע עפ"י סוג הזיהום של השער.

- קבל מסוג N (N-Type Device) הוא בעל שער מזוהם N^+ ומצע מסוג P.
- קבל מסוג P (P-Type Device) הוא בעל שער מזוהם P^+ ומצע מסוג N.

זיקה אלקטרונית (Electron Affinity) - χ :

זיקה אלקטרונית מתארת "כמה משתלם לאטום מבחינה אנרגטית לקבל אלקטרון".

בפועל יתורגם להפרש $\chi = E_0 - E_c$ כאשר מדובר על תכונה של החומר (כגון E_{gap}).

(ערך גדול משמעו שהאטום יקבל הרבה אנרגיה מקליטת אלקטרון חיצוני בעוד שערך נמוך משמעו שהאטום לא מרוויח הרבה אנרגיה מקליטת אלקטרון חיצוני).

פונקציית העבודה (Work Function) ψ :

פונקציית העבודה מיוחסת למתח הנדרש על מנת לשחרר אלקטרון מהאטום אליו

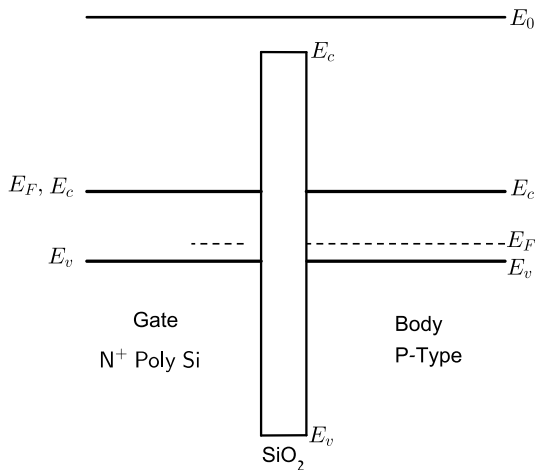
הוא משויך ומחושבת לפי: $\psi = \frac{E_0 - E_F}{q}$, כאשר E_0 היא האנרגיה בוואקום.

נעזר ביחידות eV או פשוט ביחידות V (הבחירה תהיה לפי הנתונים והיא טכנית לחלוטין!)

אנו נתייחס לשני סוגים של פונקציית עבודה:

$\psi_S = \phi_S$ - פונקציית העבודה של המל"מ.

$\psi_{M/G} = \phi_{M/G}$ - פונקציית העבודה של המתכת (יש המסמנים עם M ויש עם G).



תנאי Flat-Band :

תנאי Flat Band הוא: $V_G = V_{FB} = \psi_S - \psi_G$.

כתיבה באמצעות רמות אנרגיה (הפרש רמות פרמי):

$$V_G = V_{FB} = \frac{E_{F,metal} - E_{F,Semiconductor}}{q}$$

מצבי הפעולה של קבל MOS :

בניתוח שמובע בסרטונים, נתייחס לקבל עם מצע מסוג P לשם הניתוח עצמו

ולאחר מכן נדבר על ההבדלים והדמיון עבור קבל עם מצע מסוג N.

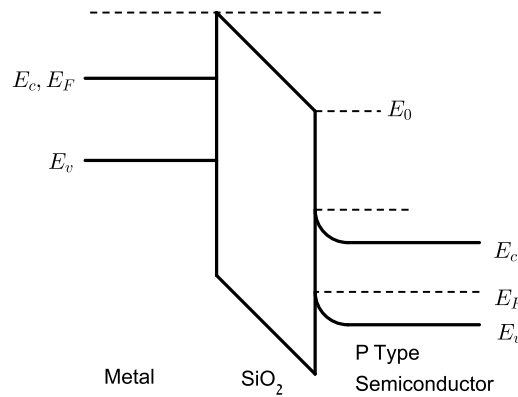
קבל MOS יכול להימצא בשלושה מצבים פיזיקליים:

1. מצב צבירה – Surface Accumulation.

2. מצב מחסור – Surface Depletion.

3. מצב היפוך – Surface Inversion.

מצב צבירה – Surface Accumulation :



בחומר מסוג P ריכוז האקספטורים במצע הוא: $p_0 = N_a$.
נגדיר: ϕ_s - פוטנציאל הכיפוף של פסי האנרגיה.

על המשטח שבין המצע לתחמוצת (המבודד) נוצר מטען: $p_s = N_a \exp\left\{-\frac{q\phi_s}{kT}\right\}$

היות ו- ϕ_s הוא באזור $[-100\text{mV} : -200\text{mV}]$ הרי ש- $p_s \gg p_0$.

לחורים שמצטברים על שכבת המבודד קוראים **שכבת חורים מצטברת**

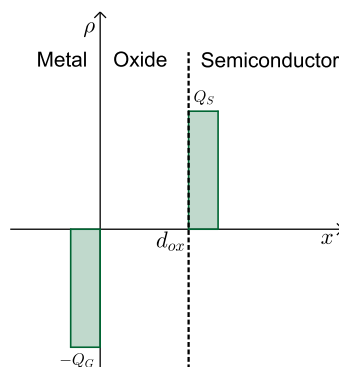
(באנגלית: Accumulation layer Holes) והמטען הכולל שלהם ליחידת שטח יסומן: Q_{acc} .

קשרים בין המתחים: $V_G = V_{FB} + \phi_s + V_{ox}$ או בקירוב: $V_{ox} = V_G - V_{FB}$ (מקובל להשמיט את ϕ_s).

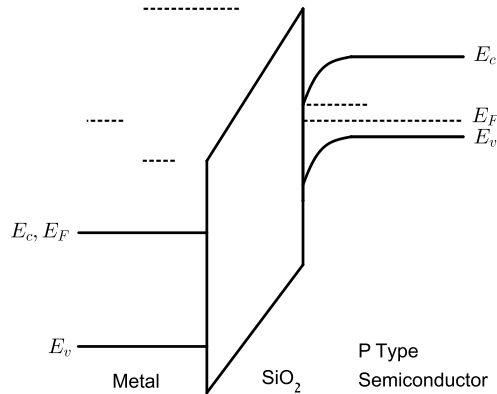
קשר בין מתחים המטעם וקיבול הקבל: $Q_{acc} = -C_{ox}(V_G - V_{FB})$, כאשר: $[C_{ox}] = \frac{F}{\text{cm}^2}$.

ניתן להכליל: $V_{ox} = -\frac{Q_{sub}}{C_{ox}}$ כאשר Q_{sub} הוא סך המטען (כולל Q_{acc}).

גרף צפיפות המטען:



מצב מחסור – Surface Depletion :



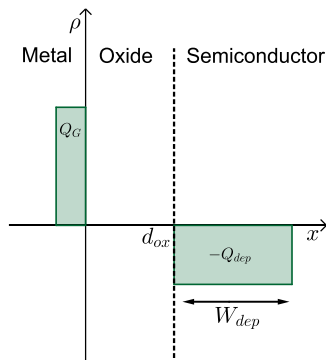
המתח על פני שכבת המבודד הוא : $V_{ox} = -\frac{Q_{sub}}{C_{ox}} = -\frac{Q_{dep}}{C_{ox}} = \frac{\sqrt{qN_a \cdot 2\epsilon_s \phi_s}}{C_{ox}}$

מתח השער הוא : $V_G = V_{FB} + \phi_s + V_{ox}$

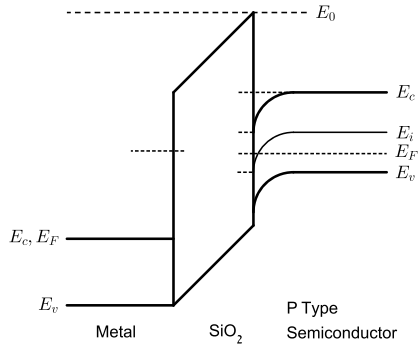
מתח השער כתלות ב- W_{dep} : $V_G = V_{FB} + \frac{qN_a W_{dep}^2}{2\epsilon_s} + \frac{qN_a W_{dep}}{C_{ox}}$

מתח השער כתלות ב- ϕ_s : $V_G = V_{FB} + \phi_s + V_{ox} = V_{FB} + \phi_s + \frac{\sqrt{qN_a \cdot 2\epsilon_s \phi_s}}{C_{ox}}$

גרף צפיפות המטען :



מצב היפוך – Surface Inversion



מתח הסף מקיים :

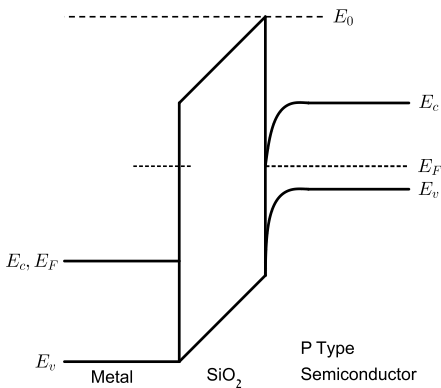
$$V_T = V_{FB} + 2\phi_B + V_{ox} = V_{FB} + 2 \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a}{n_i} + \frac{\sqrt{qN_a \cdot 2\epsilon_s 2\phi_B}}{C_{ox}}$$

כאשר : $\phi_{ST} = 2\phi_B = 2 \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a}{n_i}$

הערה:

יש מקומות שבהם מסמנים את ϕ_B כ- ϕ_F - הפוטנציאל בעומק המלי"מ.

נקבל את הנוסחה: $\phi_F = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a}{n_i}$ (עבור מלי"מ מסוג P).



מצב היפוך (Strong Inversion), בו מתקיים: $V_G > V_T$.

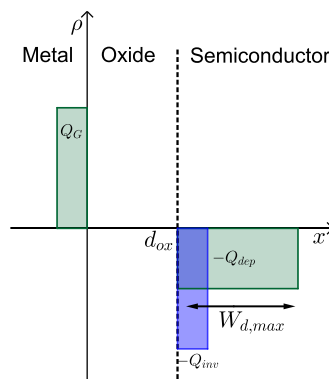
כעת מתקיים :

$$V_G = V_{FB} + 2\phi_B - \frac{Q_{dep}}{C_{ox}} - \frac{Q_{inv}}{C_{ox}} = V_{FB} + 2\phi_B + \frac{\sqrt{qN_a \cdot 2\epsilon_s \phi_S}}{C_{ox}} - \frac{Q_{inv}}{C_{ox}} = V_T - \frac{Q_{inv}}{C_{ox}}$$

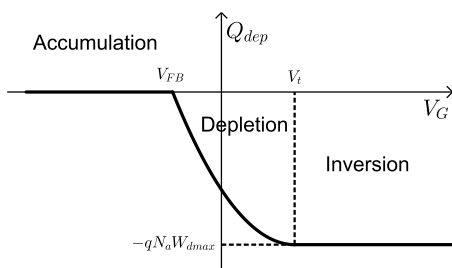
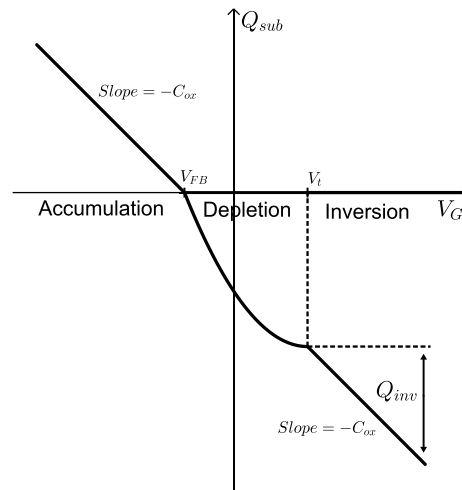
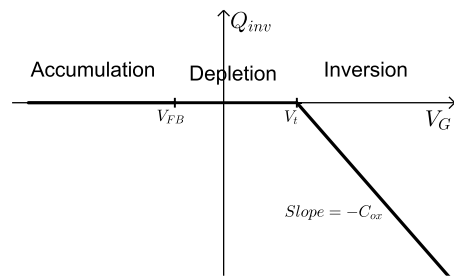
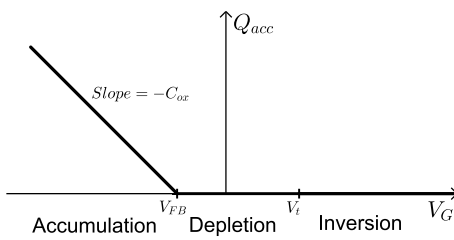
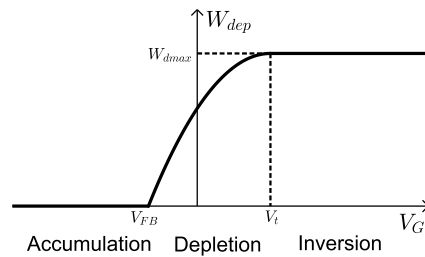
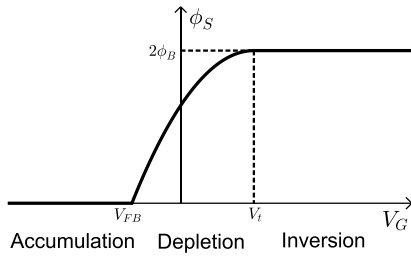
כלומר : $Q_{inv} = -C_{ox} (V_G - V_T)$

במצב היפוך, רוחב אזור המחסור לא גדל עוד ולכן $W_{d,max} = W_T = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \cdot 2\phi_B}{qN_a}}$

גרף צפיפות המטען :



סיכום מצבי הפעולה של קבל MOS עם מצע P:



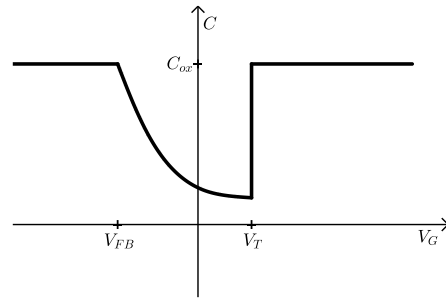
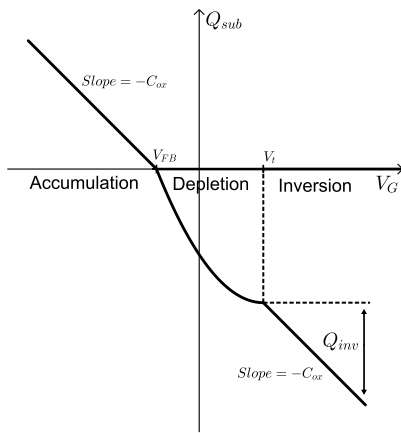
אופיין C-V של קבל MOS:

כאשר נדבר על קיבול של קבל MOS נתייחס לאות מתח קבוע (DC) שעליו רוכב אות סינוסי (AC) קטן בתחום של 100MHz:1kHz.

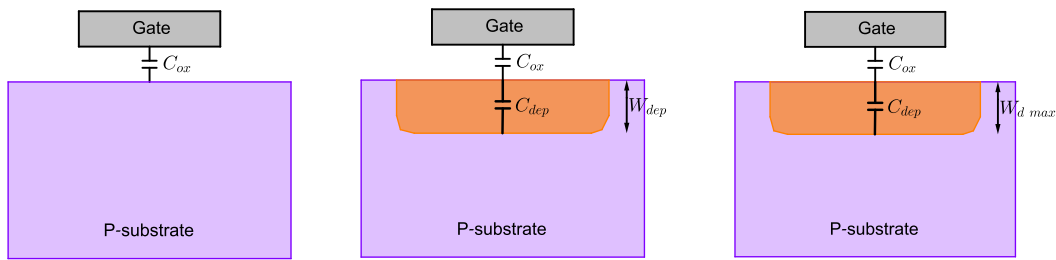
ע"י מדידת ערך ה-RMS של זרם החילופין ניתן למשוך את ערך הקיבול לפי:
 $i_{cap} / v_{ac} = \omega C$

כל תיאורית הקיבול של קבל MOS מתייחסת למודל אות קטן!

$$C = \frac{dQ_G}{dV_G} = -\frac{dQ_{sub}}{dV_G}$$



מודלים של קיבול לפי מצבי הפעולה:



חישוב קיבול C_{ox} : $C_{ox} = C_0 = C_{max} = A \frac{k_{ox} \epsilon_0}{d_{ox}}$ [F] (וליהי שטח): $C_{ox} = C_0 = C_{max} = \frac{k_{ox} \epsilon_0}{d_{ox}} \left[\frac{F}{cm^2} \right]$.

$$C_{dep} = \frac{\epsilon_s}{W_{dep}}$$

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

במקרה של מחסור נקבל:

$$\frac{1}{C} = \sqrt{\frac{1}{C_{ox}^2} + \frac{2(V_G - V_{FB})}{qN_a \epsilon_s}}$$

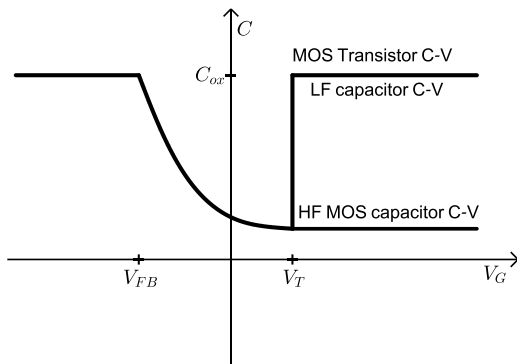
אופיין עבור תדרים גבוהים ונמוכים:

(1) בתדרים נמוכים ($\omega \rightarrow 0$) מטעני המיעוט מצליחים להיווצר באמצעות תהליכים גרציה וריקומבינציה.

עקב כך יש יותר מטען והקיבול גדול יותר: $C_{\max} = \frac{k_{ox}\epsilon_0}{d_{ox}} \left[\frac{F}{\text{cm}^2} \right]$

(2) בתדרים גבוהים ($\omega \rightarrow \infty$) מטעני המיעוט לא מצליחים להיווצר.

עקב כך המטען קטן יותר ולכן נשתמש: $C_{\min} = \frac{C_0}{1 + \frac{k_{ox}W_T}{k_S d_{ox}}} \left[\frac{F}{\text{cm}^2} \right]$



נקבל את החישוב הבא עבור הקיבולים:

$$C_{\max} = C_{ox} = C_0 = \frac{k_{ox}\epsilon_0}{d_{ox}}$$

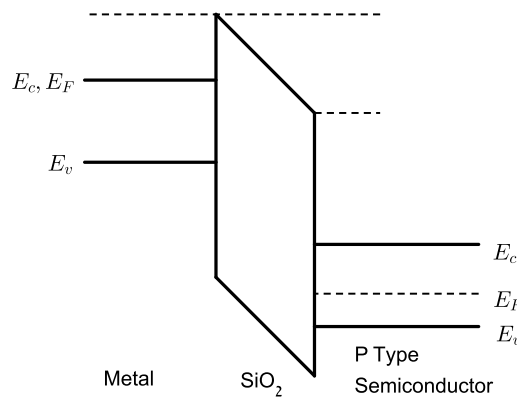
$$C_{\min} = \left(\frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_S} \right)^{-1} = \frac{C_0}{1 + \frac{k_{ox}W_T}{k_S d_{ox}}}$$

מטענים בשכבת התחמוצת:

בנוכחות צפיפות מטען משטחית Q_{ox} על שכבת המבודד נקבל הטיה של פסי האנרגיה.

עקב נוכחות מטענים נקבל: $V_{FB} = \psi_G - \psi_S - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} = V_{FB0} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}$ כאשר $V_{FB0} = \psi_G - \psi_S$

הוא מתח יישור פסי האנרגיה ללא נוכחות של מטענים.



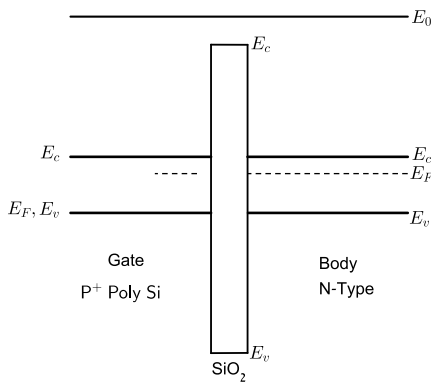
סוגי מטעני תחמוצת:

- (1) מטענים חיוביים קבועים (Fixed Oxide Charge) – מיוחסים ליוני הסייליקון שנמצאים בין המצע לשכבת המבודד.
- (2) מטענים ניידים כתוצאה מזיהום (Mobile Oxide Charge) – בעיקר יוני סודיום שנשארים כתוצאה מניקיון לא מספיק במפעל (באמצעות מים או כימיקלים אחרים).
- (3) מלכודות מטענים (Interface traps) – מצבי אנרגיה שמסוגלים לתפוס ולשחרר אלקטרונים ובכך ליצור רעש לא רצוי ולעוות את הערכים של V_{FB} ו- V_T .
- (4) מתחים מושרים כתוצאה משדות חזקים וטמפרטורות תפעול גבוהות שמופעלים על הקבל במשך זמן ומעוותים את המבנה הכימי של ההתקן.

קבל MOS עם מצע מסוג N:

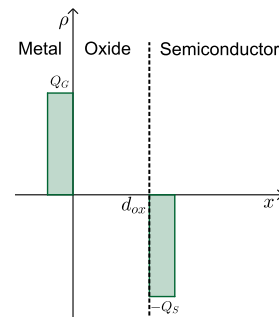
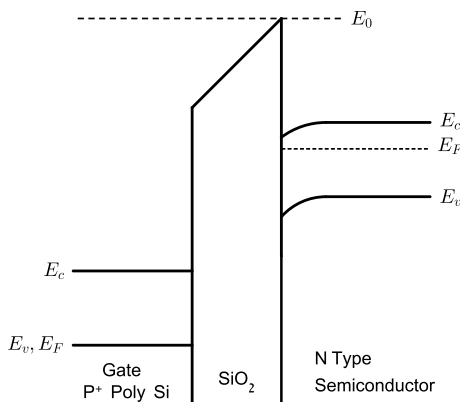
תנאי Flat-Band:

כעת $V_{FB} > 0$.



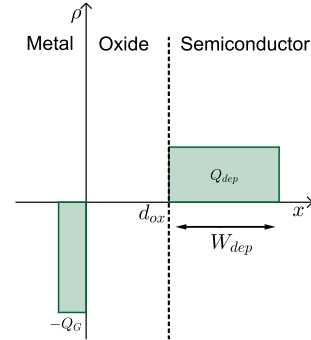
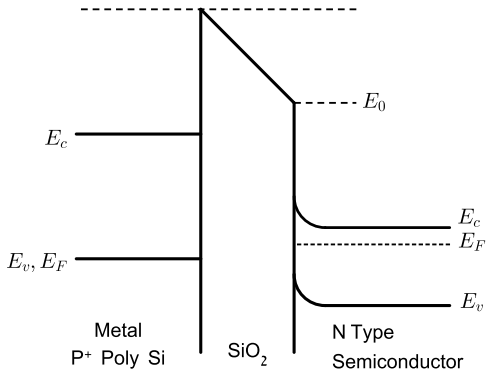
מצב אקומולציה:

מתקיים עבור: $V_G > V_{FB}$



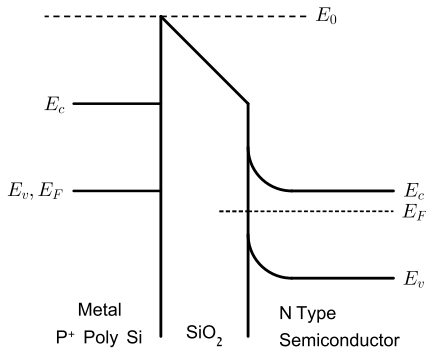
מצב מחסור:

מתח השער נמצא בתחום: $V_T < V_G < V_{FB}$.



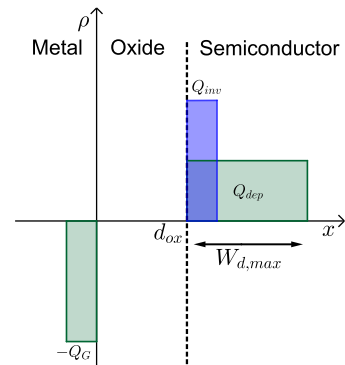
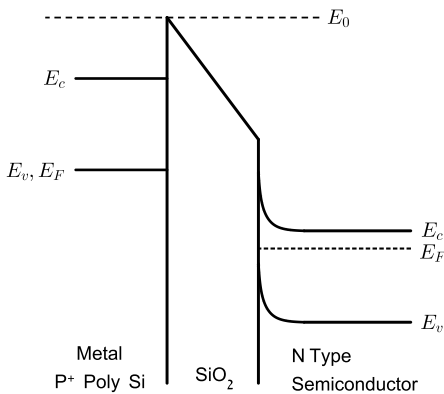
תנאי סף:

כאן מתקיים: $V_G = V_T$.



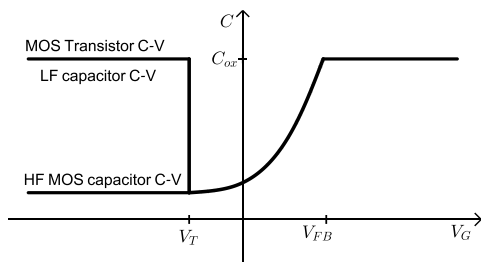
מצב היפוך:

מתח השער נמצא בתחום: $V_G < V_T$.



כאן יש לקחת סימן שלילי: $\phi_F = -\frac{kT}{q} \ln \frac{N_d}{n_i}$ (עבור מ"מ מסוג N).

אופיין C-V של קבל MOS עם מצע מסוג N:



קבל MOS אידיאלי:

בקבל אידיאלי אנו נתעלם ממתח יישור פסי האנרגיה: $V_{FB} = 0$.

במקרה זה נקודות המעבר בין מצבי הקבל הן:

מצע סוג N	מצע סוג P	
$V_G > 0$	$V_G < 0$	אקומולציה
$V_T < V_G < 0$	$0 < V_G < V_T$	מחסור
$V_G < V_T$	$V_G > V_T$	היפוך

כל הנוסחאות נשארות זהות רק שיש להציב: $V_{FB} = 0$.

שאלות:

1) נתון קבל MOS על מצע סיליקון מסוג P בטמפרטורת החדר.

ידוע כי $N_a = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ וכי מתח היישור הוא -0.4 V .

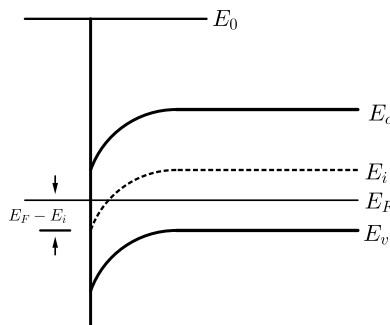
עובי שכבת התחמוצת הוא 250 \AA , שטח הקבל הוא $8 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$ ו- $k_{ox} = 3.9$, $k_s = 12$.

א. מהי צפיפות המטענים המשטחית במתכת השער עבור מתח $V_G = -1 \text{ V}$?

ב. הדיאגרמה הבאה מתארת את פסי האנרגיה עבור V_G מסוים.

הנח כי במצב הנ"ל מתקיים על פני המשטח Si-SiO_2 : $E_F - E_i = 0.4 \text{ eV}$.

מצא את צפיפות המטענים המשטחית על מתכת השער במצב זה.



ג. מהו הקיבול לאות קטן הנמדד בתדר נמוך באות מתח השער.

ד. מהו מתח השער בו תתקבל דיאגרמת הפסים המופיעה באיור ב?

ה. מהו מתח הסף של הקבל?

(2) נתון קבל MOS עם מצע מסוג P.

נתון: $N_a = 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, מתח היישור הוא -0.75 V , עובי שכבת התחמוצת

הוא 120 \AA והמקדמים הדיאלקטריים הם $k_{ox} = 3.9$ ו- $k_s = 12$.

א. יש למצוא את מצב הקבל עבור $V_G = -0.8 \text{ V}$. נמק.

ב. מה הוא מתח הסף של הקבל?

ג. מה הוא הקיבול ליחידת שטח עבור $V_G = V_T$?

(3) נתון קבל MOS עם מצע מסוג N.

נתון: $N_d = 6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, מתח היישור הוא 0.8 V , עובי שכבת התחמוצת הוא

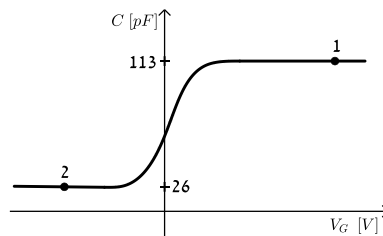
150 \AA והמקדמים הדיאלקטריים הם $k_{ox} = 3.9$ ו- $k_s = 12$.

א. יש למצוא את מצב הקבל עבור $V_G = 0.5 \text{ V}$. נמק.

ב. מה הוא מתח הסף של הקבל?

ג. מה הוא הקיבול ליחידת שטח עבור $V_G = V_T$?

(4) נתון האופיין הבא של קבל MOS:



א. מה הוא סוג הקבל? איזה מצע יש לו? נמק.

ב. צייר דיאגרמת פסי אנרגיה עבור הנקודה 2 שבתמונה (ציין את רמת פרמי במתכת ובמל"מ, צייר דיאגרמה מלאה עבור כל חלקי הקבל). באיזה מצב הקבל נמצא בנקודה זו?

ג. צייר את גרף המטען של הקבל עבור נקודה 1 שבאופיין. באיזה מצב נמצא הקבל כעת?

ד. נתון כי שטח החתך של הקבל הוא $A = 10^{-3} \text{ cm}^2$, חשב את עובי התחמוצת.

ה. קבע מהו רוחב אזור המחסור המקסימלי $W_{d\max}$ ומהו ריכוז הזיהום המתאים לקבל זה.

5) נתון קבל MOS אידיאלי בטמפרטורת החדר.

ידוע כי עובי התחמוצת הוא $d_{ox} = 20 \text{ nm}$, וכן: $N_d = 8 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

שטח החתך של הקבל הוא $5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$.

א. צייר את אופיין ה-C-V של הקבל עבור תדירות גבוהה.

ב. הגדר את C_{\max} ואת C_{\min} (מיקום וערך).

ג. מצא את ϕ_s עבור $V_G = V_T$.

ד. חשב את מתח הסף V_T .

ה. נניח שמתח השער מקיים כי $\phi_s = 1.75\phi_B$.

צייר את דיאגרמת פסי האנרגיה המתאימה לתיאור.

ו. נניח וכעת מתח השער שונה כך שכעת נמדד $\phi_s = 3\phi_B$.

צייר את התפלגות צפיפות המטען עבור מקרה זה.

6) נתון קבל MOS על מצע סיליקון מסוג P בטמפרטורת החדר.

ידועים הנתונים הבאים: $C_{ox} = 44 \text{ pF}$, $C_1 = 6 \text{ pF}$.

שטח הקבל הוא $6000 \mu\text{m}^2$ והשער עשוי מ-N-Type Poly-Si.

בשאלה זו נניח את הקבועים: $k_{ox} = 3.9$, $k_s = 11.8$, ו- $\chi_{Si} = 4.05 \text{ eV}$.

א. מה היא עובי התחמוצת?

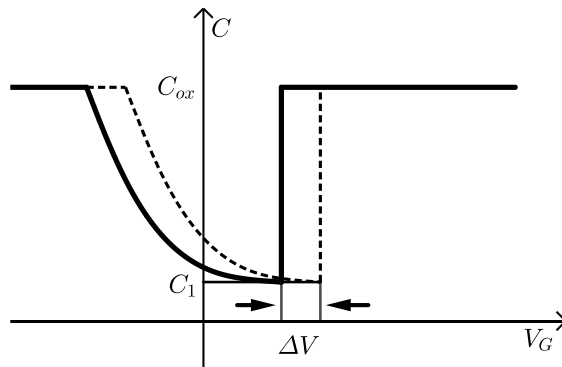
ב. מהו רוחב שכבת המחסור עבור $\phi_s = 2\phi_F$?

ג. כתוצאה מאי-שלמות של תהליכים כימיים, נוצרים יוני נתרן במצע הקבל.

היונים יושבים בין המצע לשער ויוצרים מטען, שיסומן Q_{ox} אשר קיים גם בתנאי FB.

אחת ההשלכות של מציאות זו היא הזזה של מתחי הקבל ב- $\Delta V = 0.07 \text{ V}$.

להלן איור של גרף הקבל, מוסט בגודל הנ"ל:



(1) הראו כיצד V_{FB} - מתח היישור החדש, תלוי ב- V_{FB0} - מתח היישור במקרה

האידיאלי, וב- Q_{ox} .

(2) ציירו את דיאגרמת פסי האנרגיה במקרה זה.

(3) מהו סימן המטענים וגודל הצפיפות המטען המשטחי, Q_{ox} ?

תשובות סופיות:

- (1) א. $Q_{acc} = 82.8 \frac{nC}{cm^2}$ ב. $Q_{dep} = 164.8 \frac{nC}{cm^2}$ ג. $C = 62.62 pF$ ד. $V_G = 1.35V$ ה. $V_T = 1.388V$
- (2) א. באקומולציה. ב. $V_T = 0.971V$ ג. $C = 93.9 \frac{nF}{cm^2}$
- (3) א. במחסור. ב. $V_T = -0.56V$ ג. $C = 58.96 \frac{nF}{cm^2}$
- (4) א. הקבל הוא MOS מסוג P עם מצע N. ג. ראה גרף בסרטון הוידאו. ד. $d_{ox} = 9.16 \text{ \AA}$
- (5) א. ראה אופיין בסרטון הוידאו. ג. $\phi_s = 2\phi_B = -0.946V$ ה. ראה דיאגרמה בסרטון הוידאו. ב. $C_{max} = 86.28 pF, C_{min} = 52.51 pF$ ד. $V_T = -3.88V$ ו. ראה גרף בסרטון הוידאו.
- (6) א. $t_{ox} = 470 nm$ ב. $W_T = 9 \mu m$ ג. (3) סימן חיובי. ג. (2) ראה דיאגרמה בסרטון הוידאו. צפיפות המטענים המשטחיים: $N_e = 19.25 \cdot 10^6 cm^{-2}$
- ג. $Q_{ox} = 3.08 \cdot 10^{-12} \frac{C}{cm}$ ג. (1) $V_{FB} = V_{FB0} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}$