

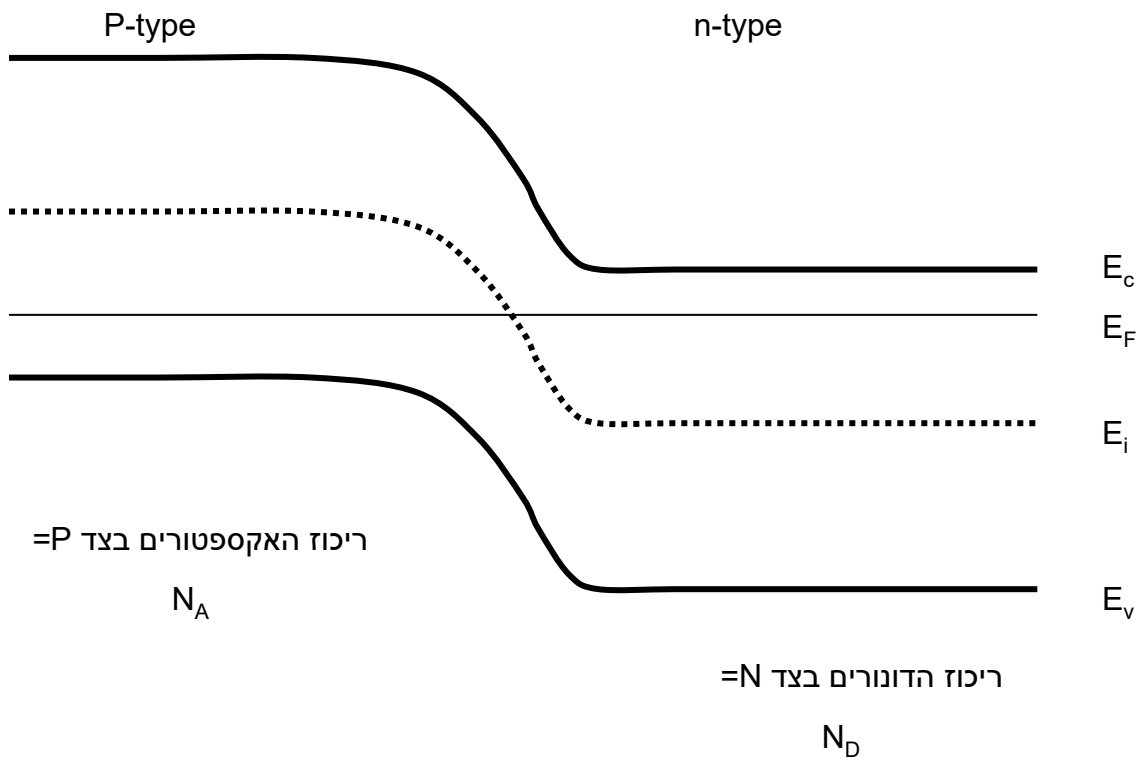
התקנים אלקטרוניים מתקדמים תשפ"א – תרגול 2

נושא התרגול:

- צומת P-N

דיודה מבנה כללי שווי משקל:

- ביצירת צומת PN מחברים 2 מל"מים בעלי רמת פרמי שונה יחסית למיקום פסי האנרגיה.
- א. רמת פרמי בחומר קבועה ולכן נוצר כיפוף של פסי האנרגיה. כיפוף פסי האנרגיה בחומר גורם להיווצרות פוטנציאל פנימי שהרי פס ההולכה ופס הערכיות משנים את מיקומם במרחב.
- ב. כאשר מחברים חומר N וחומר P נוצר גראדינט עצום של נושאי מטען הגורם לדיפוזיה בין צידי הצומת. תחת גראדינט זה ינועו נושאי מטען בדיפוזיה לצד הצומת בו הם מיעוט ו"ישאירו" מאחוריהם יונים ללא נושאי מטען חופשיים. האזור בו היונים נותרים הינו אזור המחסור. למעשה, מתקבל מצב בו קיימים יונים חיוביים בצד N ויונים שליליים בצד P.



תופעות פיזיקליות המתרחשות בצומת PN :

- דיפוזיה כתוצאה מגרדיאנט ריכוזים
- זרמי סחיפה שנוצרים מהשדה החשמלי הפנימי – מאזן את זרמי הדיפוזיה

הפוטנציאל שנבנה בצומת, ψ_{bi} :

$$\psi_{bi} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{N_{A,0} N_{D,0}}{n_i^2} \right)$$

משוואת פואסון :

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_s}$$

רוחב שכבת המחסור :

$$x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(\psi_{bi} - V_A)}{qN_D \left(1 + \frac{N_D}{N_A}\right)}}; x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(\psi_{bi} - V_A)}{qN_A \left(1 + \frac{N_A}{N_D}\right)}}$$
$$W = x_p + x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_r \epsilon_0(\psi_{bi} - V_A)}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D}\right)}$$

צומת PN תחת ממתח :

תחת ממתח מתקיים יציאה משיווי משקל, ולכן נוצרות בכל צד של הצומת קוואזי רמות פרמי.

צומת PN תחת ממתח קדמי :

- ההדק החיובי של המתח נמצא על חלק P של המל"מ, ההדק השלילי נמצא על חלק N של המל"מ.
- ממתח זה "מיישר" את פסי האנרגיה (מחסום הפוטנציאל קטן) – הקטנת המחסום מאפשרת דיפוזיה מוגברת של אלקטרונים וחורים מ-P ל-N ולהפך, כלומר ממתח קדמי גורם להזרקה נושאי מיעוט.
- רחוב איזור המחסור קטן.

צומת PN תחת ממתח אחורי :

- ההדק החיובי של המתח נמצא על חלק N של המל"מ, ההדק השלילי נמצא על חלק P של המל"מ.
- ממתח זה "מעקם" את פסי האנרגיה (מחסום הפוטנציאל גדל) – ממתח זה גורם לשאיבה של מטעני מיעוט משני הצדדים.
- רחוב איזור המחסור גדל.

זרמי דיודה (בהנחת דיודה ארוכה)

$$J_0 = q \left(\frac{D_n}{L_n} \frac{n_i^2}{N_A} + \frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_D} \right) = q \left(\frac{D_n}{L_n} n_{0,p} + \frac{D_p}{L_p} p_{0,n} \right)$$

$$J = J_0 \left(e^{\frac{qV_A}{k_B T}} - 1 \right)$$

פריצת דיודה :

- בקיעה - כאשר אזור המחסור נוגע במגעיים
- מפולת - (עקרון הכפלת נ"מ – הועבר בהרצאה)
- פריצה - השדה החשמלי (תחת ממתח אחורי) מגיע לשדה הפריצה של החומר.
- פריצת מנהור - זנר

קיבול דיודה :

בש"מ ותחת ממתח – קיבול מחסור :

$$C_{dep} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{W}$$

בממתח קדמי אנו מייצרים הזרקת נ"מ ולכן קיבול הדיפוזיה יחושב עבור כל צד של הצומת בנפרד :

$$C_{diff} = \frac{dQ}{dV}$$

הקיבול הכללי :

$$C_{total} = C_{diff} + C_{dep}$$

שאלה מס' 1:

נתונה צומת PN בעלת הפרמטרים הבאים:

$$N_D = 10^{16} [cm^{-3}] \quad N_A = 10^{17} [cm^{-3}] \quad n_i = 10^{10} [cm^{-3}]$$

$$\mu_n = 1350 \left[\frac{cm}{Volt \cdot sec} \right] \quad \mu_p = 600 \left[\frac{cm}{Volt \cdot sec} \right]$$

$$\tau_p = 2 [\mu sec] \quad \tau_n = 1 [\mu sec]$$

$$\epsilon_{si} = 11.8 \quad T = 300 [K]$$

- א. מהו רוחב אזור המחסור בכל צד של הצומת?
- ב. מהו קיבול הדיודה ללא ממתח חיצוני?
- ג. מהו זרם הזליגה?
- ד. כעת מופעל ממתח חיובי של $V_F = 0.5 [Volt]$.
 - a. מהו רוחב אזור המחסור בכל צד של הצומת?
 - b. מהו זרם הדיודה?
 - c. מהו קיבול המחסור?
- ה. מהו זרם הדיודה עבור הערכים הבאים, המתייחסים לרוחב הדיודה, בכל צד של הצומת:
 - a. $W_N = 400 [\mu m] W_P = 400 [\mu m]$
 - b. $W_N = 400 [\mu m] W_P = 40 [\mu m]$
- ו. עבור שדה פריצה בסיליקון ($E_{BD} = 3 \cdot 10^5 \left[\frac{Volt}{cm} \right]$) ועבור ההתקן מסעיף ה-a: איזו פריצה תתרחש קודם, בקיעה או פריצה תחת ממתח אחורי? באיזה ממתח?
- ז. (לא הועבר בכיתה) מהו קיבול הדיפוזיה, בהנחת דיודה ארוכה?

פתרון:

א. אזור המחסור בכל צד של הדיודה:

$$\psi_{bi} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{N_{A,0} N_{D,0}}{n_i^2} \right) = 0.778 [Volt]$$

$$x_n = \sqrt{\frac{2 \epsilon_r \epsilon_0 \psi_{bi}}{q N_D \left(1 + \frac{N_D}{N_A} \right)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 11.8 \cdot 8.85 \cdot 10^{-14} \cdot 0.778}{1.602 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{16} \left(1 + \frac{10^{16}}{10^{17}} \right)}} = 3.03 \cdot 10^{-5} [cm]$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2 \epsilon_r \epsilon_0 \psi_{bi}}{q N_A \left(1 + \frac{N_A}{N_D} \right)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 11.8 \cdot 8.85 \cdot 10^{-14} \cdot 0.778}{1.602 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{17} \left(1 + \frac{10^{17}}{10^{16}} \right)}} = 3.03 \cdot 10^{-6} [cm]$$

$$W = x_n + x_p = 3.33 \cdot 10^{-5} [cm]$$

ב. קיבול המחסור:

$$C_{dep} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{W} = 3.12 \cdot 10^{-8} \left[\frac{F}{cm^2} \right]$$

ג. לצורך חישוב זרם הזליגה:

$$D_p = k_B T \mu_p = 15.6 \left[\frac{cm}{sec} \right]; \quad D_n = k_B T \mu_n = 35.1 \left[\frac{cm}{sec} \right]$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = 5.58 \cdot 10^{-3} [cm]; L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = 5.92 \cdot 10^{-3} [cm]$$

$$n \cdot p = n_i^2 \Rightarrow$$

$$p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{10^{20}}{10^{16}} = 10^4 [cm^{-3}]; n_{p0} = \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{10^{20}}{10^{17}} = 10^3 [cm^{-3}]$$

$$J_0 = q \left[\frac{D_p n_i^2}{L_p N_D} + \frac{D_n n_i^2}{L_n N_A} \right] = \frac{q D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{q D_n n_{p0}}{L_n} = 5.43 \left[\frac{pA}{cm^2} \right]$$

ד. כעת מופעל ממתח חיובי של $V_F = 0.5 [Volt]$.

a. מהו רוחב אזור המחסור בכל צד של הצומת?

- הנוסחה הכללית עבור רוחב איזור המחסור תחת ממתח:

$$W = x_p + x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_r \epsilon_0 (\psi_{bi} - V_F)}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right)} = W(V=0) \sqrt{\frac{\psi_{bi} - V_F}{\psi_{bi}}}$$

רוחב אזור המחסור יהיה:

$$W(V) = W(V=0) \sqrt{\frac{\psi_{bi} - V_F}{\psi_{bi}}} = 1.99 \cdot 10^{-5} [cm]$$

$$x_p(V) = x_p(V=0) \sqrt{\frac{\psi_{bi} - V_F}{\psi_{bi}}} = 1.81 \cdot 10^{-6} [cm]$$

$$x_n(V) = x_n(V=0) \sqrt{\frac{\psi_{bi} - V_F}{\psi_{bi}}} = 1.81 \cdot 10^{-5} [cm]$$

b. מהו זרם הדיודה?

- זרם הדיודה:

מופעל ממתח קדמי לכן הביטוי באקספוננט יהיה גדול בהרבה מ-1 ולכן:

$$J_d = J_s \left(e^{\frac{qV_A}{k_B T}} - 1 \right) \simeq J_s e^{\frac{qV_A}{k_B T}} = 1.36 \left[\frac{mA}{cm^2} \right]$$

c. קיבול מחסור:

$$C_{dep} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{W(V)} = 5.25 \cdot 10^{-8} \left[\frac{F}{cm^2} \right]$$

ה. מהו זרם הדיודה עבור הערכים הבאים, המתאימים לרוחב הדיודה, בכל צד של הצומת:

$$W_N = 400 [\mu m] W_P = 400 [\mu m] \quad a.$$

$$W_N = 400 [\mu m] W_P = 40 [\mu m] \quad b.$$

ראשית נשווה את רוחב הדיודה למרחקי הדיפוזיה שחישבנו:

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = 5.58 \cdot 10^{-3} [cm]; L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = 5.92 \cdot 10^{-3} [cm]$$

a. נתון כי :

$$W_N = 400[\mu m] = 40 \cdot 10^{-3}[cm] \Rightarrow W_{N-eff} = W_N - x_n \approx W_N \gg L_p$$

$$W_P = 400[\mu m] = 40 \cdot 10^{-3}[cm] \Rightarrow W_{P-eff} = W_P - x_p \approx W_P \gg L_n$$

בהנחת דיודה ארוכה ($W_N \gg L_p$ בצד N או $W_P \gg L_n$ בצד P) הביטוי לזרם הוא :

$$J_F = J_0 \left(e^{\frac{qV_F}{k_B T}} - 1 \right) \Rightarrow$$

$$J_d = \left(\frac{qD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} \right) \left(e^{\frac{qV_F}{k_B T}} - 1 \right) = J_s \left(e^{\frac{qV_F}{k_B T}} - 1 \right) \cong J_s e^{\frac{qV_F}{k_B T}}$$

$$= 5.43 e^{\frac{0.5}{0.026}} \left[\frac{pA}{cm^2} \right] = 1.362 \left[\frac{mA}{cm^2} \right]$$

b. נתון כי :

$$W_N = 400[\mu m] = 40 \cdot 10^{-3}[cm] \Rightarrow W_{N-eff} = W_N - x_n \approx W_N \gg L_p$$

$$W_P = 40[\mu m] = 4 \cdot 10^{-3}[cm] \Rightarrow W_{P-eff} = W_P - x_p \approx W_P < L_n$$

כלומר מצאנו שבצד P הדיודה היא למעשה דיודה קצרה ולכן הנוסחה לזרם תשתנה.
הביטוי עבור הזרם יהיה (שימו לב לשינוי במכנה, לא נציב את מרחק הדיפוזיה L אלא את האורך הפיזי של הדיודה, שכן במקרה זה אורך הדיודה קצר יותר לכן נציב אותו בנוסחה) :

$$J_s = \frac{qD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{p0}}{W_p} = 5.885 \left[\frac{pA}{cm^2} \right]$$

$$J_d = J_s \left(e^{\frac{qV_F}{k_B T}} - 1 \right) \cong J_s e^{\frac{qV_F}{k_B T}} = 5.885 e^{\frac{0.5}{0.026}} \left[\frac{pA}{cm^2} \right] = 1.477 \left[\frac{mA}{cm^2} \right]$$

1. עבור שדה פריצה בסיליקון ($E_{BD} = 3 \cdot 10^5 \left[\frac{Volt}{cm} \right]$) ועבור ההתקן מסעיף ה-a: איזו פריצה תתרחש

קודם, בקיעה או פריצה תחת ממתח אחורי? באיזה ממתח?

תחילה נחשב עבור איזה ממתח תתרחש בקיעה

בממתח אחורי רוחב כל צד של אזור המחסור מתנהג כמו :

$$x_p(V) = x_p(V=0) \sqrt{\frac{\psi_{bi} + V_R}{\psi_{bi}}}$$

$$x_n(V) = x_n(V=0) \sqrt{\frac{\psi_{bi} + V_R}{\psi_{bi}}}$$

היות ונתון כי $W_N = 400[\mu m]$; $W_P = 400[\mu m]$
נחשב את הממתח האחורי הדרוש לבקיעה בכל צד – המינימום בין שני המתחים שנקבל
יהיה מתח הבקיעה (כאמור, התנאי לבקיעה הוא $w_n = x_n$, או $w_p = x_p$) :

$$x_p(V=0) \sqrt{\frac{\psi_{bi} + V_R}{\psi_{bi}}} = W_p \Rightarrow V_R = \psi_{bi} \left(\left(\frac{W_p}{x_p} \right)^2 - 1 \right) = 135 [MVolt]$$

$$x_n(V=0) \sqrt{\frac{\psi_{bi} + V_R}{\psi_{bi}}} = W_n \Rightarrow V_R = \psi_{bi} \left(\left(\frac{W_n}{x_n} \right)^2 - 1 \right) = 1.35 [MVolt]$$

כלומר בכדי להביא את הדיודה לבקיעה נצטרך להפעיל ממתח אחורי של :

$$V_{pt} = 1.35 [MVolt]$$

נחשב מתי תהיה פריצה (מתי מקסימום השדה בדיודה יגיע לערך $(E_{BD} = 3 \cdot 10^5 \left[\frac{Volt}{cm} \right])$:

את השדה באזור המחסור תחת ממתח נחשב באופן הבא :

$$E(x=0) = E_{MAX} = -\frac{qN_D}{\epsilon_{si}\epsilon_0} x_n = -\left[\frac{2q}{\epsilon_{si}\epsilon_0} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} (\psi_{bi} + V_R) \right]^{\frac{1}{2}}$$

כעת אנו נניח כי הממתח האחורי הדרוש לפריצה גבוה מהפוטנציאל המובנה

$$E_{bd} \cong -\left[\frac{2q}{\epsilon_{si}\epsilon_0} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} V_{BD} \right]^{\frac{1}{2}} \Rightarrow$$

$$V_{BD} = E_{bd}^2 \frac{\epsilon_{si}\epsilon_0}{2q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} = 32.28 [Volt] \gg V_{bi}$$

המתח הדרוש לפריצה נמוך בהרבה מהמתח הדרוש לבקיעה.

2. קיבול דיפוזיה – בהנחה והדיודה ארוכה :

$$C_{diff} = \frac{dQ}{dV}$$

$$Q_{n-side} = q \int_0^\infty \delta p(x) dx$$

לצורך חישוב המטען בכל צד של הצומת עלינו לפתור את משוואת הרציפות בצד n תחת תנאי שפה כי בגבול אזור המחסור ניתן ע"י חוק הצומת :

$$n_p = n_{p0} e^{\frac{qV_F}{k_B T}} - p_{side}$$

$$p_n = p_{n0} e^{\frac{qV_F}{k_B T}} - n_{side}$$

הפתרונות עבור משוואת הרציפות (בהנחת דיודה ארוכה) כאשר בכל צד קבענו את x=0 על גבולות אזור המחסור :

$$n_p = n_{p0} e^{\frac{qV_F}{k_B T}} e^{-\frac{x}{L_n}} - p_{side}$$

$$p_n = p_{n0} e^{\frac{qV_F}{k_B T}} e^{-\frac{x}{L_p}} - n_{side}$$

האינטגרלים עבור המטען :

$$\begin{aligned}
Q_{n-side} &= q \int_0^\infty \delta p(x) dx = q \int_0^\infty p_{n0} e^{\frac{qV_F}{K_B T}} e^{-\frac{x}{L_p}} dx = qp_{n0} e^{\frac{qV_F}{K_B T}} L_p \left[-e^{-\frac{x}{L_p}} \right]_{x=0}^{x=\infty} \\
&= qp_{n0} e^{\frac{qV_F}{K_B T}} L_p \\
Q_{p-side} &= q \int_0^\infty \delta n(x) dx = q \int_0^\infty n_{p0} e^{\frac{qV_F}{K_B T}} e^{-\frac{x}{L_n}} dx = qn_{p0} e^{\frac{qV_F}{K_B T}} L_n \left[-e^{-\frac{x}{L_n}} \right]_{x=0}^{x=\infty} \\
&= qn_{p0} e^{\frac{qV_F}{K_B T}} L_n
\end{aligned}$$

וקיבול הדיפוזיה :

$$\begin{aligned}
C_{diff}^{n-side} &= \frac{dQ_{n-side}}{dV} = qp_{n0} L_p \frac{d}{dV} e^{\frac{qV_F}{K_B T}} = qp_{n0} L_p \frac{q}{K_B T} e^{\frac{qV_F}{K_B T}} \\
C_{diff}^{p-side} &= \frac{dQ_{p-side}}{dV} = qn_{p0} L_n \frac{d}{dV} e^{\frac{qV_F}{K_B T}} = qn_{p0} L_n \frac{q}{K_B T} e^{\frac{qV_F}{K_B T}}
\end{aligned}$$