

תוכן העניינים:

2	פרק 3
2	צומת PN
2	מבנה צומת PN וסוגי צמתים :
2	סיכום כללי :
7	שאלות :
10	תשובות סופיות :
11	דיודת PN בממתח קדמי ואחורי :
11	סיכום כללי :
12	שאלות :
12	תשובות סופיות :
13	קיבול של צומת PN :
13	סיכום כללי :
14	שאלות :
14	תשובות סופיות :

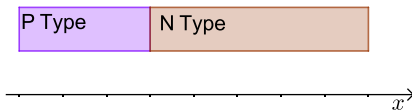
פרק 3

צומת PN

מבנה צומת PN וסוגי צמתים:

סיכום כללי:

צומת PN נוצרת בתהליך קרינה של יוני מקבלים על גבי מצע מסוג N (ולחיפך):



צומת PN כהתקן נקראת **דיודה**.

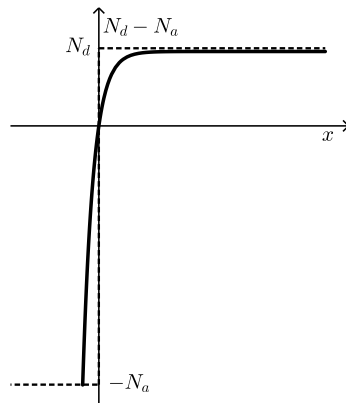
ישנם סוגים שונים של דיודות, הנבדלות זו מזו בתכונותיהן ואופן פעולתן.

דוגמאות לדיודות נפוצות:

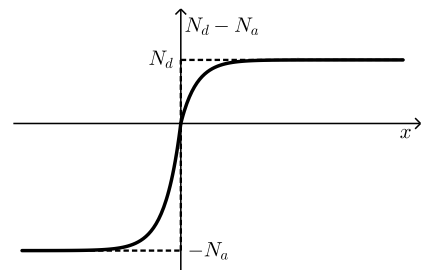
- דיודת פולטת אור (Light Emitting Diode - LED).
- דיודת לייזר (Laser Diode).

סוגי צמתים נפוצים בקירוב המחסור:

צומת חד-צדדי (One-Sided Junction):

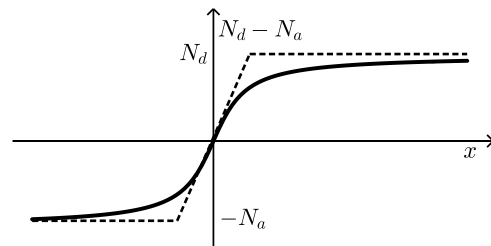


צומת מדרגה (Step Junction):

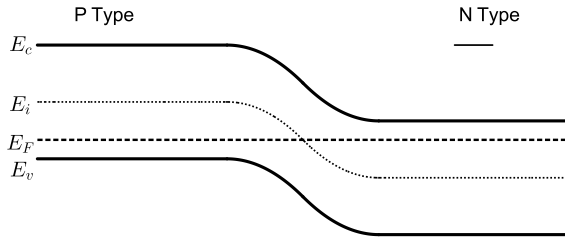


צומת מאולחת ליניארית

(Linearly Graded Junction):



מודל פסי האנרגיה ופוטנציאל מובנה של צומת PN:



במודל פסי האנרגיה קיימת הפרש אנרגיה שמבוטאת באמצעות פוטנציאל מובנה שנמצא בהתקן.

הפוטנציאל המובנה יחושב לפי:

$$\phi_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right)$$

הערות:

- (1) הפוטנציאל המובנה תלוי בריכוזי הזיהומים ולא ברוחב אזור המחסור.
- (2) יש המסמנים את הפוטנציאל המובנה ב- V_{bi} .

הקשר שבין צפיפות המטען, השדה החשמלי והפוטנציאל החשמלי:

משוואת פואסון המקשרת בין שדה חשמלי ξ וצפיפות מטען ρ : $\frac{d\xi}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon_s}$

כאשר:

ϵ_s - מקדם הדיאלקטריות של סיליקון שיסומן: ל- $\epsilon_r \epsilon_0 = k_s \epsilon_0$.

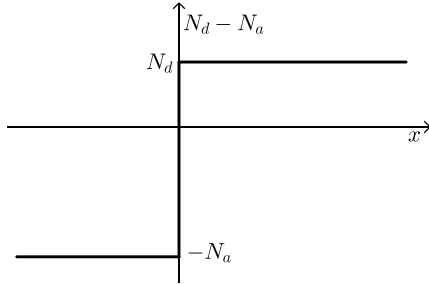
אצלנו נקפיד על הסימון k_s במקום ϵ_r , נתון: $k_s = 12$.

להלן הקשר שבין פוטנציאל חשמלי, שדה חשמלי וצפיפות מטען חשמלי על בסיס משוואת

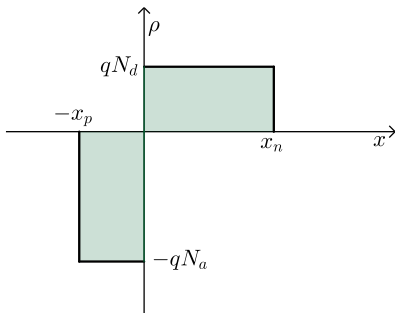
פואסון והקשר שבין פוטנציאל ושדה חשמליים: $\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{d\xi}{dx} = -\frac{\rho}{k_s \epsilon_0}$

מודל שכבת המחסור:

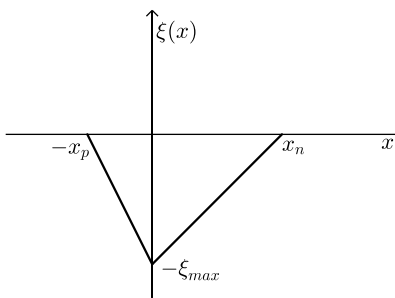
להלן תוצאות פיתוח הנוסחאות עבור צומת מדרגה לפי קירוב המחסור:



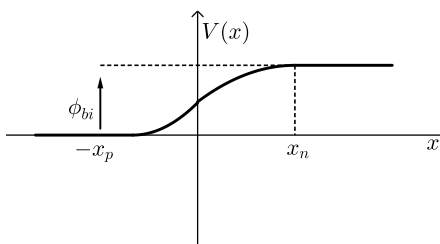
$$N_d - N_a = \begin{cases} -N_a & x \leq 0 \\ N_d & x \geq 0 \end{cases}$$



$$\rho(x) = \begin{cases} -qN_a & -x_p \leq x \leq 0 \\ qN_d & 0 \leq x \leq x_n \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$



$$\xi(x) = \begin{cases} -\frac{qN_a}{k_s \epsilon_0} (x + x_p) & -x_p \leq x \leq 0 \\ \frac{qN_d}{k_s \epsilon_0} (x - x_n) & 0 \leq x \leq x_n \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$



$$V(x) = \begin{cases} 0 & x \leq -x_p \\ \frac{qN_a}{2k_s \epsilon_0} (x + x_p)^2 & -x_p \leq x \leq 0 \\ \phi_{bi} - \frac{qN_d}{2k_s \epsilon_0} (x_n - x)^2 & 0 \leq x \leq x_n \\ \phi_{bi} & x \geq x_n \end{cases}$$

הכללה של נוסחת הפוטנציאל המובנה:

$$\phi_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{n(x_n)}{n(-x_p)} \right) : \text{ניתן לחשב את הפוטנציאל המובנה ע"י:}$$

כאשר: $n(x_n)$, $n(-x_p)$ הם ריכוז האלקטרונים בכל צד.

משוואות עבור רוחבי אזור המחסור:

מדרישות הרציפות מתקבלות המשוואות הבאות:

$$\begin{cases} 1. & x_p N_a = x_n N_d \\ 2. & \frac{q N_a x_p^2}{2k_s \epsilon_0} = \phi_{bi} - \frac{q N_d x_n^2}{2k_s \epsilon_0} \end{cases}$$

בהנחה כי ϕ_{bi} ידוע, נוכל לפתור את מערכת המשוואות ולקבל את הפתרונות הבאים:

$$x_n = \sqrt{\frac{2k_s \epsilon_0}{q} \frac{N_a}{N_d (N_a + N_d)} \phi_{bi}}$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2k_s \epsilon_0}{q} \frac{N_d}{N_a (N_a + N_d)} \phi_{bi}}$$

והנוסחה עבור אזור המחסור:

$$W_{dep} = x_p + x_n = \sqrt{\frac{2k_s \epsilon_0}{q} \frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \phi_{bi}}$$

הערות:

(1) יש הכותבים את ריכוזי הזיהומים באופן הבא:

$$x_n = \sqrt{\frac{2k_s \epsilon_0}{q} \left(\frac{N_a}{N_d} \right) \frac{1}{N_a + N_d} \phi_{bi}} \quad ; \quad W_{dep} = \sqrt{\frac{2k_s \epsilon_0}{q} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) \phi_{bi}}$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2k_s \epsilon_0}{q} \left(\frac{N_d}{N_a} \right) \frac{1}{N_a + N_d} \phi_{bi}}$$

(2) עבור צומת חד-צדדי, שבו זיהום אחד גדול משמעותית מהאחר, נקבל קירוב:

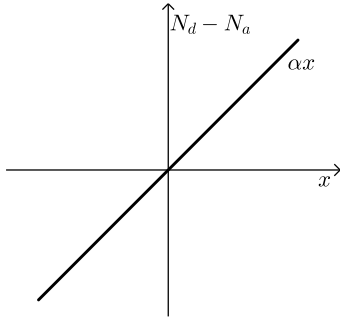
עבור: $N_d \gg N_a$ (צומת N^+P) נקבל: $W_{dep} \approx \sqrt{\frac{2k_s \epsilon_0}{q N_a} \phi_{bi}} \approx x_p$, וכן: $x_n \approx 0$.

עבור: $N_a \gg N_d$ (צומת P^+N) נקבל: $W_{dep} \approx \sqrt{\frac{2k_s \epsilon_0}{q N_d} \phi_{bi}} \approx x_n$, וכן: $x_p \approx 0$.

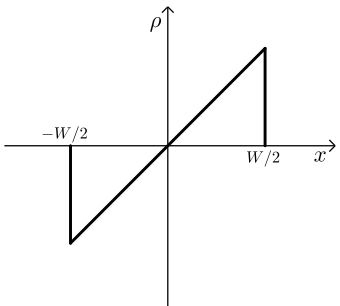
צומת מאולחת לינארית (Linearly Graded Junction):

בקירוב מסדר ראשון של ריכוזי הזיהומים נקבל: $N_d - N_a = \alpha x$ כאשר α הוא השיפוע (Grading Constant) ויחידותיו $[\text{cm}^{-4}]$.

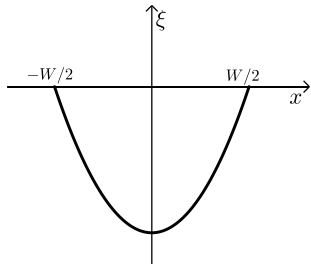
לפי קירוב זה הזיהום רציף ולכן אין צורך לחלק את החישוב לחלקים.



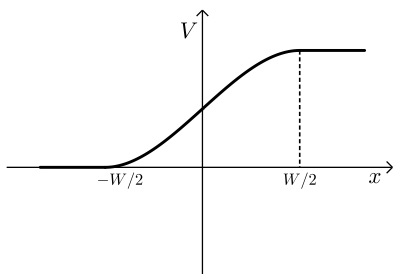
$$N_d - N_a = \alpha x$$



$$\rho(x) = \begin{cases} q\alpha x & -W/2 \leq x \leq W/2 \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$



$$\xi(x) = \begin{cases} \frac{q\alpha}{2k_s\epsilon_0} \left(x^2 - \left(\frac{W}{2} \right)^2 \right) & -W/2 \leq x \leq W/2 \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$



$$V(x) = \begin{cases} 0 & x \leq -W/2 \\ \frac{q\alpha}{6k_s\epsilon_0} \left(2 \left(\frac{W}{2} \right)^3 + 3 \left(\frac{W}{2} \right)^2 x - x^3 \right) & -W/2 \leq x \leq W/2 \\ \phi_{bi} & x \geq W/2 \end{cases}$$

חישוב הפוטנציאל המובנה עבור צומת ליניארית:

$$\phi_{bi} = \frac{2kT}{q} \ln \left(\frac{\alpha}{2n_i} \left(\frac{12k_s \epsilon_0}{q\alpha} \phi_{bi} \right)^{1/3} \right)$$

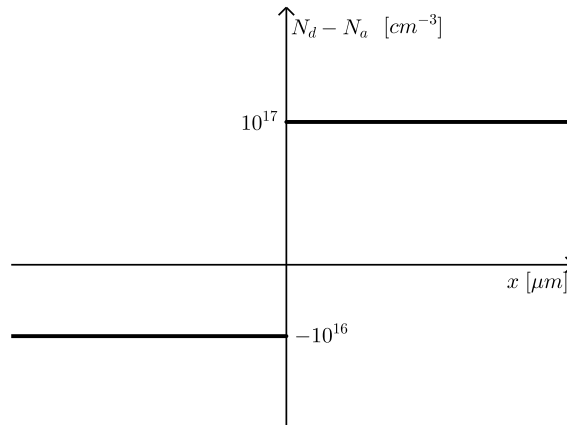
מפיתוח מתמטי מתאים מתקבל ביטוי איטרטיבי:

הביטוי תלוי במקדם α וכדי למצוא את ערכו המדויק יש לבצע איטרציות עבור הערכים המתאימים.

שאלות:

(1) נתונה צומת מדרגה מסיליקון השרוי בטמפרטורת החדר ובה הזיהומים אחידים בכל צד. רוחב אזור המחסור בצד N הוא 10% מרוחב אזור המחסור הכללי. הנח כי: $\phi_{bi} = 1.1V$, $k_s = 13.2$. יש למצוא את רוחבי אזורי המחסור בכל צד, את הזיהומים ואת גודל השדה המקסימלי.

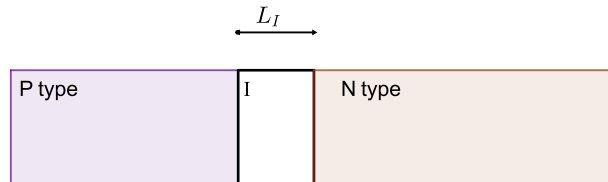
(2) בסרטוט שלפניך נתונים ריכוזי הזיהומים בצומת מדרגה PN של חומר מסוים בטמפרטורת החדר עם $\epsilon_r = 15$.



- א. על בסיס הגרף, איזה צד הוא P ואיזה צד הוא N?
- ב. מהם ריכוזי הזיהומים בכל צד?
- ג. מהו הפוטנציאל המובנה בצומת ϕ_{bi} ?
- ד. מהם רוחבי אזורי המחסור בכל צד x_n ו- x_p ורוחב הכללי W_{dep} ?
- ה. מהו ערך השדה החשמלי המקסימלי? היכן הוא מתקבל?
- ו. סרטט גרפים של צפיפות המטען $\rho(x)$, השדה החשמלי $\epsilon(x)$ והפוטנציאל החשמלי $V(x)$ (הנח כי הפוטנציאל מתאפס בצד ה-P).

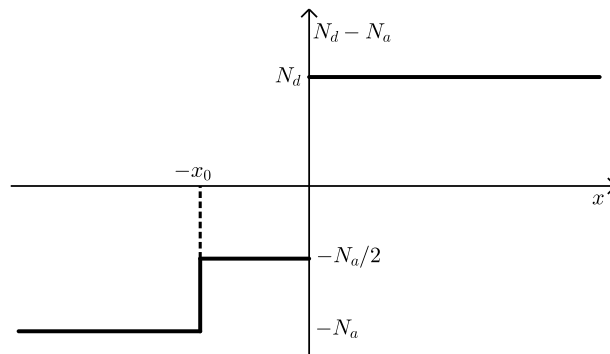
(3) נתונה צומת P⁺N מסיליקון בטמפרטורת החדר עם ריכוזים $N_a = 2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ו- $N_d = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. מצא את הפוטנציאל המובנה, רוחב אזור המחסור בכל צד והרוחב הכללי.

(4) בסרטוט שלפניך נתון תרשים של מבנה P-I-N כאשר אזור ה-I הוא אינטרינסי ובעל אורך $L_I = 0.2 \mu\text{m}$. נתונים הזיהומים: $N_d = 6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_a = 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.



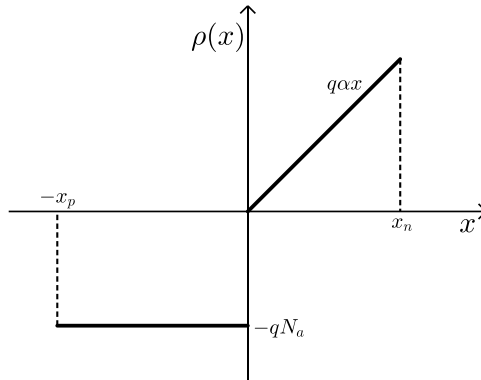
- א. צייר גרף של $N_d - N_a$ והסבר את המשמעות של כל אזור בו. הנח כי ראשית הצירים נמצאת בצומת PI.
- ב. חשב את הפוטנציאל החשמלי המובנה, את רוחבי אזור המחסור x_p, x_n , את W_{dep} ואת השדה המקסימלי.
- ג. צייר באופן איכותי את הגרפים של צפיפות המטען החשמלי, השדה החשמלי והפוטנציאל החשמלי.

(5) נתונה צומת PN עם פרופיל הזיהום הבא:



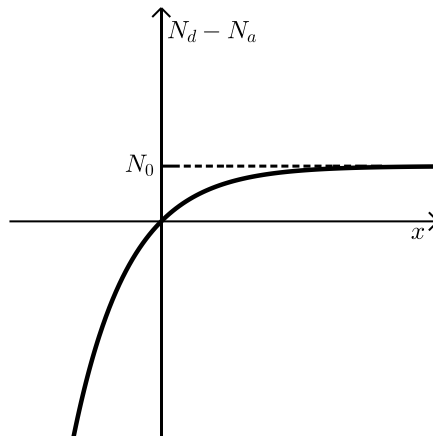
- הנח כי $|x_p| > |x_0|$ עבור כל ממתחי ההזנה האפשריים.
- א. מצא את הפוטנציאל המובנה של הצומת.
 - ב. היעזר בקירוב המחסור וסרטוט גרף של צפיפות המטען.
 - ג. מצא את השדה החשמלי בתוך אזור המחסור.

- 6 נתונה צומת PN מזוהמת ליניארית בצד ה-N עם $\alpha = 2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-4}$ ואחיד בצד ה-P עם $N_a = 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$.



- א. חשב את רוחב אזור המחסור W_{dep} , את המתח המובנה והשדה המקסימלי עבור רוחב המחסור בצד ה-P במרחק של $0.6 \mu\text{m}$ מהראשית.
 ב. סרטט גרפים של השדה, הפוטנציאל החשמלי ופסי האנרגיה.

- 7 נתונה צומת Si עם פרופיל ריכוזי הזיהומים הבא: $N_d - N_a = N_0 (1 - e^{-\alpha x})$ כאשר N_0 ו- α הם קבועים.



- א. היעזר בקירוב המחסור וכתוב ביטוי אנליטי לצפיפות המטען החשמלי.
 ב. כתוב ביטוי מתמטי לשדה החשמלי ולפוטנציאל החשמלי בתוך אזור המחסור.

תשובות סופיות:

$$x_n = 1.68 \mu\text{m}, x_p = 15.12 \mu\text{m} \quad (1)$$

$$N_a = 5.12 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, N_d = 4.61 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}, \epsilon_{\max} = 10.6 \cdot 10^6 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$$

$$N_a = 10^{16} \text{ cm}^{-3}, N_d = 10^{17} \text{ cm}^{-3} \quad \text{ב.} \quad \text{א. צד חיובי - N, צד שלילי - P.} \quad (2)$$

$$W_{dep} = 3.768 \cdot 10^{-5} \text{ cm}, x_n = 3.425 \cdot 10^{-6} \text{ cm}, x_p = 34.25 \cdot 10^{-6} \text{ cm} \quad \text{ד.} \quad \phi_{bi} = 0.778 \text{ V} \quad \text{ג.}$$

$$\epsilon_{\max} = 4.128 \cdot 10^4 \frac{\text{V}}{\text{cm}} \quad \text{ה.} \quad \text{ו. ראה גרפים בסרטון הוידאו.}$$

$$\phi_{bi} = 1.017 \text{ V}, W_{dep} = x_n = 1.63 \cdot 10^{-5} \text{ cm}, x_p = 4 \text{ nm} \quad (3)$$

$$\text{א. ראה ציור בסרטון הוידאו.} \quad (4)$$

$$\phi_{bi} = 0.783 \text{ V}, x_n = 3.26 \cdot 10^{-6} \text{ cm}, x_p = 9.7 \cdot 10^{-6} \text{ cm}, W_{dep} = 33.04 \cdot 10^{-4} \text{ cm}, \epsilon_{\max} = 29.46 \frac{\text{kV}}{\text{cm}} \quad \text{ב.}$$

$$\text{ג. ראה גרפים בסרטון הוידאו.}$$

$$\phi_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \quad \text{א.} \quad \text{ב. ראה איורים בסרטון הוידאו.} \quad (5)$$

$$\epsilon(x) = \begin{cases} -\frac{qN_a}{\epsilon_s} x & -x_p \leq x \leq -x_0 \\ -\frac{qN_a}{2\epsilon_s} x + C_1 & -x_0 \leq x \leq 0 \\ \frac{qN_d}{2\epsilon_s} x + C_2 & 0 \leq x \leq x_n \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad \text{ג.}$$

$$x_p = 0.72 \cdot 10^{-4} \text{ cm}, W_{dep} = 1.32 \mu\text{m} \quad \text{א.} \quad \text{ב. ראה איורים בסרטון הוידאו.} \quad (6)$$

$$\rho(x) = \begin{cases} qN_0 (1 - e^{-\alpha x}) & -x_p \leq x \leq x_n \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad \text{א.} \quad (7)$$

$$\epsilon(x) = \begin{cases} \frac{qN_0}{k_s \epsilon_0} \left((x + x_p) + \frac{1}{\alpha} (e^{-\alpha x} - e^{\alpha x_p}) \right) & -x_p \leq x \leq x_n \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad \text{ב.}$$

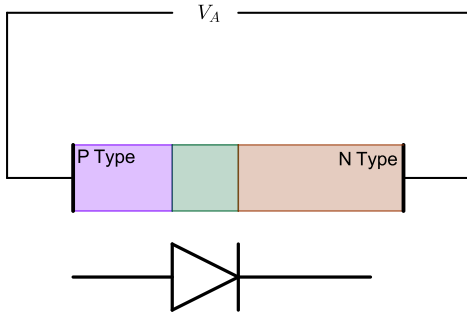
$$V(x) = -\frac{qN_0}{k_s \epsilon_0} \left(\frac{1}{2} (x^2 - x_p^2) + x x_p + \frac{e^{\alpha x_p}}{\alpha} (x_p - x) + \frac{1}{\alpha^2} (e^{-\alpha x_p} - e^{-\alpha x}) \right)$$

דיודת PN בממתח קדמי ואחורי:

סיכום כללי:

הפעלת ממתחים שונים על צומת PN:

בהפעלת מתח חיכוני יש לחזור על כל הפיתוחים על מנת למצוא נוסחאות המתאימות למפלי מתחים שונים. אולם תחת תנאי זרם וזיהומים סבירים, נוכל לעדכן את הנוסחאות באופן הבא:



- מפל המתח מתרכז באזור המחסור.
- מתח $V_A > 0$ מקטין את הפוטנציאל המובנה הכללי ולכן אזור המחסור קטן.
- מתח $V_A < 0$ מגדיל את הפוטנציאל המובנה הכללי ולכן אזור המחסור גדל.

נחליף את: ϕ_{bi} ב- $\phi_{bi} - V_A$ ונקבל את הנוסחאות הבאות:

$$\xi(x) = \begin{cases} -\frac{qN_a}{k_s \epsilon_0} (x_p + x) & -x_p \leq x \leq 0 \\ \frac{qN_d}{k_s \epsilon_0} (x - x_n) & 0 \leq x \leq x_n \end{cases}$$

$$V(x) = \begin{cases} \frac{qN_a}{2k_s \epsilon_0} (x_p + x)^2 & -x_p \leq x \leq 0 \\ \phi_{bi} - V_A - \frac{qN_d}{k_s \epsilon_0} (x - x_n)^2 & 0 \leq x \leq x_n \end{cases}$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2k_s \epsilon_0}{q} \cdot \frac{N_d}{N_a (N_a + N_d)} \cdot (\phi_{bi} - V_A)}$$

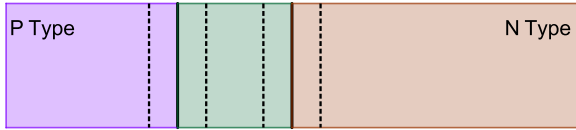
$$x_n = \sqrt{\frac{2k_s \epsilon_0}{q} \cdot \frac{N_a}{N_d (N_a + N_d)} \cdot (\phi_{bi} - V_A)}$$

$$W_{dep} = \sqrt{\frac{2k_s \epsilon_0}{q} \cdot \frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \cdot (\phi_{bi} - V_A)}$$

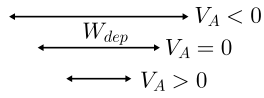
הערה:

נכונות הנוסחאות תקפה עבור $V_A \leq \phi_{bi}$.

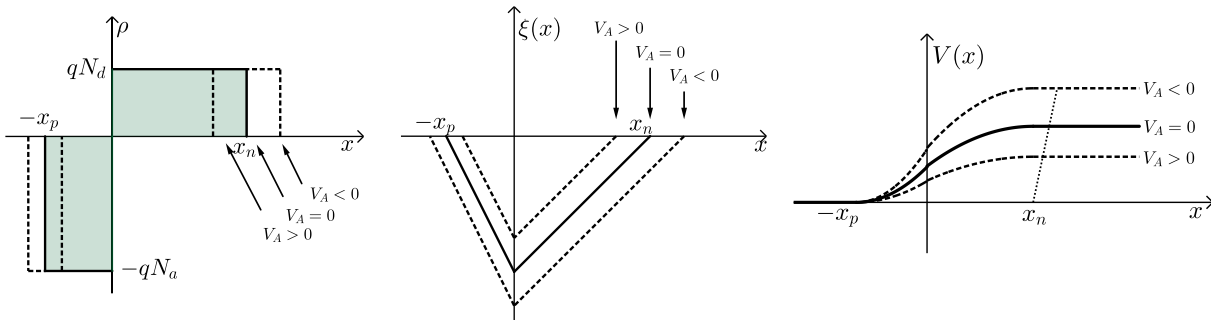
תיאורים גרפיים של צומת PN בממתחים שונים:



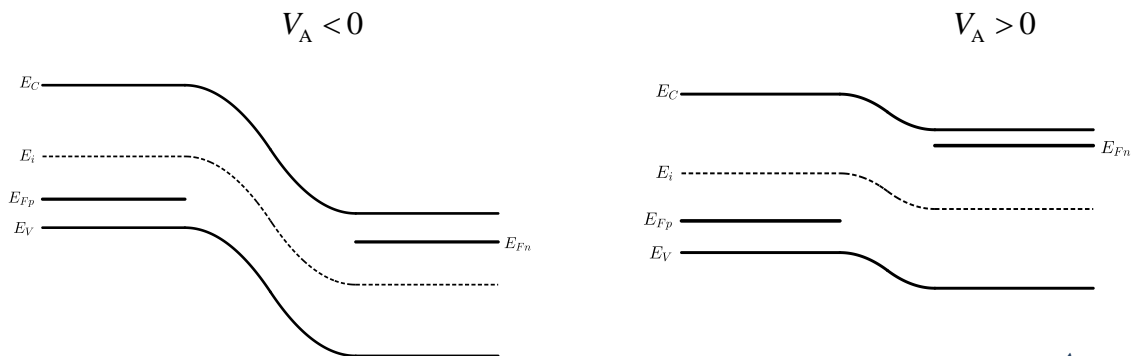
להלן תיאור רוחב אזור המחסור של צומת PN :



להלן תיאורים גרפיים של צפיפות המטען, השדה והפוטנציאל החשמלי:



להלן תיאורים גרפיים של מודל פסי האנרגיה:



שאלות:

- 1) נתונה צומת PN מסיליקון השרויה בטמפרטורת החדר. מחברים אותה למקור מתח חיצוני המספק V_A לא ידוע כלשהו. מדדו וקיבלו כי מפל המתח הפנימי באזור המחסור הוא $V_{Total} = 12V$.

ידוע כי: $N_a = 3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\epsilon_{\max} = 42.17 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$.

- א. מצא את N_d .
 ב. מצא את V_A (גודלו וכיוונו).

תשובות סופיות:

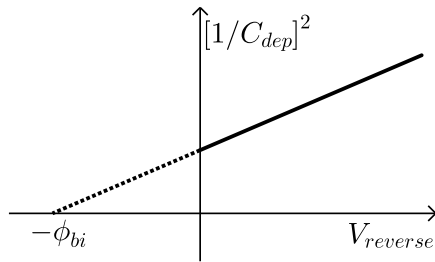
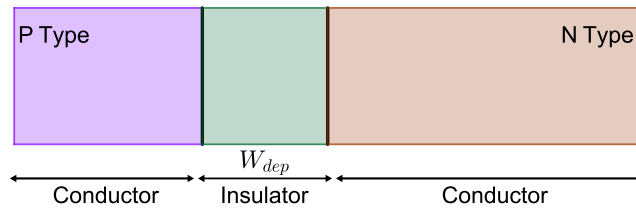
- 1) א. $N_d = 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. ב. $V_A = -11.33V$ (ממתח אחורי).

קיבול של צומת PN:

סיכום כללי:

הגדרה:

נתייחס למודל הבא של צומת PN בתור 'קבלי ונקבל': $C_{dep} = A \frac{\epsilon_s}{W_{dep}}$.



הקשר שבין הקיבול לממתח האחורי:

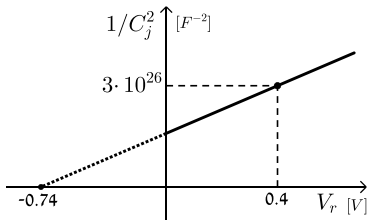
$$\frac{1}{C_{dep}^2} = \frac{W_{dep}^2}{A^2 \epsilon_s^2} = \frac{2(\phi_{bi} + V_r)}{qN \epsilon_s A^2}$$

$$\left(W_{dep} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s (\phi_{bi} + V_r)}{qN}} \right)$$

$$\frac{1}{C_{dep}^2} = \frac{2}{qN \epsilon_s A^2} \cdot V_r + \frac{2\phi_{bi}}{qN \epsilon_s A^2}$$

גדלים טיפוסיים: $C = 1\text{fF}$ כאשר $W_{dep} = 0.1\mu\text{m}$.

שאלות:



(1) נתונה צומת PN העשויה מסיליקון בטמפרטורת החדר. הצומת בממתח אחורי ושטח החתך שלה הוא $A = 6 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2$. הגרף שלפניך מתאר את קיבול הצומת בתלות בממתח האחורי.

- הנח כי הצומת היא אסימטרית ומצא את ריכוז המזהמים בצד הקל (כלומר, הפחות מזוהם).
- מצא את הזיהום בצד הכבד והראה את נכונות ההנחה לגבי סוג הצומת.
- מהו קיבול הצומת עבור ממתח אחורי של 0.8 V ?

(2) נתונה צומת PN מסיליקון בטמפרטורת החדר.

השיפוע של הגרף $\frac{1}{C_j^2} = f(V_r)$ הוא $4 \cdot 10^{23} \left[\frac{1}{\text{F}^2 \text{V}} \right]$ ונקודת החיתוך עם הציר האופקי היא 0.9 V . שטח הצומת הוא $A = 0.5 \mu\text{m}^2$. מצא את ריכוזי הזיהום הקל N_l והכבד N_h . הסבר מדוע לא ניתן לקבוע באיזה צד נמצא הריכוז הקל ובאיזה צד נמצא הריכוז הכבד.

(3) נתונה צומת P^+N חד-צדדית (מדרגה) ואסימטרית מסיליקון בטמפרטורת החדר. שטח חתך הרוחב של הצומת הינו 0.4 mm^2 וקיבול הצומת, כפונקציה של המתח

$$\frac{1}{C_j^2} = 3 \cdot 10^{21} \left(1 + \frac{7}{5} V_A \right)$$

$$\text{כאשר: } [C_j] = F \text{ ו- } [V_A] = V$$

האורכים הפיזיים של שני צדי ההתקן הם: $W_n = W_p = 8 \mu\text{m}$.

- חשב את המתח המובנה של הדיודה בשווי משקל.
- חשב את רוחב שכבת המחסור בשווי משקל.
- חשב את ריכוזי הזיהום משני צדי הצומת.
- מהו המתח שיש לשים על הצומת כדי להגיע לפריצת בקיעה?

תשובות סופיות:

(1) א. $N_{\text{low}} = 1.24 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ב. $N_{\text{high}} = 1.85 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ג. $C_{\text{dep}} = 50 \text{ fF}$

(2) א. $N_h = 1.8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $N_l = 5.9 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. לא ניתן לקבוע באיזה צד נמצא כל ריכוז.

(3) א. $\phi_{bi} = 0.714 \text{ V}$ ב. $W_{\text{dep}} = 2.3 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$

ג. $N_a = 4.8 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_d = 1.75 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ד. $V_R = 7.72 \text{ V}$