

## התקנים אלקטרוניים מתקדמים תשפ"א – תרגול 1

נושאי התרגול :

- תנועת נושאי מטען
- משוואות הרציפות
- משוואת הטרנספורט

להזכירכם:

$$np = n_i^2$$

חוק פעולת המאסות :

$$n + N_A^- = p + N_D^+$$

עקרון הניטרליות החשמלית :

ריכוז אלקטרוניים וחורים :

$$n = n_i e^{\frac{E_F - E_i}{k_B T}} = N_C e^{\frac{E_C - E_F}{k_B T}}$$

$$p = n_i e^{\frac{E_i - E_F}{k_B T}} = N_V e^{\frac{E_F - E_V}{k_B T}}$$

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}$$

$$N_C = 2.5 \cdot \left(\frac{m_n^*}{m_0}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{T}{300}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot 10^{19} [cm^{-3}]$$

$$N_V = 2.5 \cdot \left(\frac{m_h^*}{m_0}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{T}{300}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot 10^{19} [cm^{-3}]$$

קשרי איינשטיין :

$$D_n = \frac{k_B T}{q} \mu_n$$

$$D_p = \frac{k_B T}{q} \mu_p$$

$$([\mu] = \frac{cm^2}{Volt \cdot sec} \text{ (יחידות של נושאי המטען) (יחידות } \mu_n, \mu_p \text{ - המוביליות) (ניידות) של נושאי המטען) (יחידות } [\mu] = \frac{cm^2}{Volt \cdot sec}$$

$D_n, D_p$  - מקדמי הדיפוזיה של נושאי המטען.

זרמי סחיפה: תנועת מטענים עקב שדה חשמלי (בשדה נמוך):

$$J_{n-drift} = q\mu_n n \vec{E}$$

$$J_{p-drift} = q\mu_p p \vec{E}$$

מהירות סחיפה: המהירות הממוצעת של נושאי מטען תחת שדה (ממתח).  
 לנושא מטען הנמצא בשווי משקל יש תנועה אקראית (לא מכוונת), סכום המהירויות של כל נושאי המטען בשווי משקל הוא אפס. בהפעלת שדה חשמלי נגרם לתנועה מכוונת של אלקטרונים לפי כיוון השדה.  
 הערות:

בשדות חלשים, היחס בין השדה למהירות הסחיפה הוא ליניארי, ניידות קבועה.  
 מהירות רוויה - מהירות הרוויה קרובה למהירות התרמית של נושאי המטען (המהירות המכסימלית אליה יכולים נושאי המטען להגיע)

אפקט Gunn - במספר מוליכים למחצה מורכבים, בשדה גבוה, אלקטרון יכול לעבור מפס הולכה נמוך לפס הולכה גבוה ולכן להיות באופן אפקטיבי כבד יותר, למרות העלייה בשדה מהירותו תקטן.

במה תלויה הניידות?

זרמי דיפוזיה: תנועת מטענים עקב הבדל ריכוזים במרחב:

$$J_{n-diff} = qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_{p-diff} = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

סה"כ הזרם:

$$\vec{J}_n = qD_n \vec{\nabla} n + q\mu_n n \vec{E}$$

$$\vec{J}_p = -qD_p \vec{\nabla} p + q\mu_p p \vec{E}$$

משוואות הרציפות:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{d^2 p}{dx^2} D_p - \frac{\mu_p d(p(x)\vec{E})}{dx} + (G_p - R_p)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{d^2 n}{dx^2} D_n + \frac{\mu_n d(n(x)\vec{E})}{dx} + (G_n - R_n)$$

לפתירת תרגילים בנושא זה נשתמש במספר ההנחות:

1. אם אין שדה חיצוני אז איבר הסחיפה נעלם  $\vec{\mathcal{E}} = 0$
2. מצב יציב (מצב מתמיד)  $\frac{dp}{dt} = \frac{dn}{dt} = 0$
3. ניתן להזניח את איבר הדיפוזיה באזורים הרחוקים מהמגעים ביותר מאשר  $L_p$  (פעמיים מרחק הדיפוזיה)

תנאי שפה שימושיים:

1. סימטריה סביב ציר X  

$$\left. \frac{dp}{dx} \right|_{x=0} = 0$$
2. רציפות נושאי מטען – שימושי אם יש חלוקה לאזורים שונים עם נקודות תפר
3. רציפות הזרם – רציפות בנגזרות לפי X
4. Blocking contact -  $(s \rightarrow 0)$  לדוגמא Pt על Si  

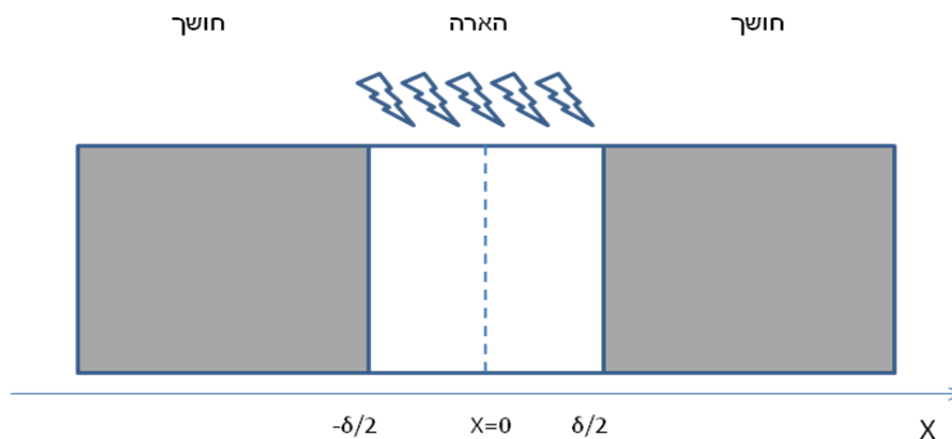
$$\frac{d(\delta p)}{dx} / \frac{d(\delta n)}{dx} = 0$$
5. מגעים אוהמים – בנקודת המגע (אינסוף  $s \rightarrow$ )  

$$\delta p / \delta n = 0$$
6. מהירות רקומבינציה משטחית – אם נתון רקומבינציה משטחית בקצב s אזי  

$$\pm D_p \left. \frac{d(\delta p)}{dx} \right|_{x=0} = s(\delta p)$$

### שאלה מס' 1:

נתון מלי"מ מסוג n-type הבא:



- א. מהן התופעות הפיסיקליות המעורבות בבעיה?
- ב. מהי משוואת הטרנספורט המתאימה לבעיה זו?
- ג. מהם תנאי השפה? (מדוע אנחנו לא מתעניינים בתנאי ההתחלה)?

## פתרון:

א. התופעות הפיסיקליות המעורבות בבעיה הן:

- גנרציה – הארה יוצרת זוגות אלקטרון חור
- רקומבינציה – הגנרציה יוצרת זוגות אלקטרון – חור באזור המרכזי ולכן גדלה שם הרקומבינציה
- דיפוזיה – ריכוז נושאי המטען בעודף באזור המרכזי גדול מהריכוז בצדדים ולכן נוצר שטף של נושאי מטען
- עקרון הקווי נייטרליות – יש גם שטף של נושאי רוב, היות ועודף ריכוז נושאי הרוב עוקב אחרי עודף ריכוז נושאי המיעוט

ב. משוואת הטרנספורט המתאימה לבעיה זו היא:

$$\frac{d(\delta p)}{dt} = -\mu_a \varepsilon \frac{d(\delta p)}{dx} + D_a \frac{d^2(\delta p)}{dx^2} + (G - R)$$

מתוך נתוני השאלה:

- קיים מצב יציב

$$\frac{d(\delta p)}{dt} = 0$$

- אין שדה

$$\varepsilon \frac{d(\delta p)}{dx} = 0$$

- מקדם הרקומבינציה הוא

$$R = \frac{\delta p}{\tau_p}$$

- הזרקה נמוכה

$$\delta p \ll n$$

$$\delta n = n - n_0 \rightarrow 0; \delta p = p - p_0 \neq 0$$

- הארה קבועה באזור II, כלומר יש גנרציה.

ג. תנאי השפה לשאלה הם:

- סימטריה סביב ציר x

$$\left. \frac{dp}{dx} \right|_{x=0} = 0$$

- רציפות נושאי המטען בכל המרחב

$$\delta p\left(x = \frac{\delta^-}{2}\right) = \delta p\left(x = \frac{\delta^+}{2}\right)$$

- רציפות זרם בכל ההתקן

$$\frac{d(\delta p)}{dx}\left(x = \frac{\delta^-}{2}\right) = \frac{d(\delta p)}{dx}\left(x = \frac{\delta^+}{2}\right)$$

- תנאי שפה על יד המגעים :

- בהנחת מגע אוהמי – נניח כי ריכוז נושאי המיעוט בעודף מתאפס ליד המגעים.
- בהנחת מוליך למחצה באורך אינסופי – נניח שהפתרונות שואפים לאפס במרחק גדול מההארה (כלומר ניקח רק את הפתרונות הדועכים כתלות במרחק)

### שאלה מס' 2 (מתוך בוחן 2012)

נתון מוליך למחצה מסוג N עם אילוח בריכוז  $N_D$ . מקדם הדיפוזיה של נושאי המיעוט בחומר הינו  $D_p$  וזמן החיים של נושאי המיעוט הרחק מהשטח הוא  $\tau_2$ . זמן חיים של נושאי המיעוט ליד השטח הנו  $\tau_1$  ; הנח  $\tau_1 < \tau_2$ .



- הסבר מה יכול לגרום לתופעה שזמן החיים של נושאי המיעוט ליד השטח שונה מזה שבאמצע.
- כתוב את המשוואות ותנאי השפה שיאפשרו לך לחשב את ריכוז נושאי המטען בעודף בתנאי הארה אחידה הגורמת לגנרציה של זוגות אלקטרון-חור בשיעור  $g [1/(\text{sec} \cdot \text{cm}^3)]$  בכל הנפח.

### פתרון:

- יפתר בכיתה
- משוואות הטרנספורט המתאימות לבעיה הן :

$$\frac{\partial(\delta P_1)}{\partial t} = D \frac{\partial^2(\delta P_1)}{\partial X^2} - \frac{(\delta P_1)}{\tau_1} + g$$

$$\frac{\partial(\delta P_2)}{\partial t} = D \frac{\partial^2(\delta P_2)}{\partial X^2} - \frac{(\delta P_2)}{\tau_2} + g$$

תנאי השפה הם :

$$I) \delta P_2(\infty) = g\tau_2$$

$$II) \delta P_1(d) = \delta P_2(d)$$

$$III) \frac{d(\delta P_1)}{dx}(d) = \frac{d(\delta P_2)}{dx}(d)$$

$$IX) \frac{d(\delta P_1)}{dx}|_{x=0} = 0$$

כיצד הסקנו מהו תנאי השפה הרביעי?