

## תוכן העניינים:

2	..... יסודות התקני מוליכים למחצה
2	..... הדיודה כהתקן
2	..... משוואת הדיודה האידיאלית :
2	..... סיכום כללי :
9	..... שאלות :
11	..... תשובות סופיות :
12	..... ממתח אחורי ודיודת זנר :
12	..... סיכום כללי :
14	..... תאים סולריים ופוטו דיודות :
14	..... סיכום כללי :
17	..... שאלות :
17	..... תשובות סופיות :
18	..... אדמיטנס הדיודה במודל אות קטן :
18	..... סיכום כללי :
20	..... שאלות :
20	..... תשובות סופיות :

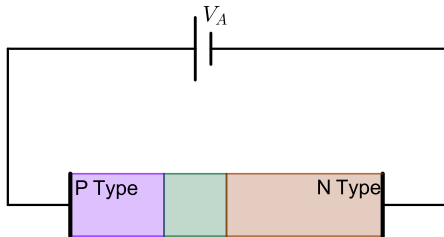
# יסודות התקני מוליכים למחצה

## הדיודה כהתקן

### משוואת הדיודה האידיאלית:

#### סיכום כללי:

משוואות נושאי מטען המיעוט בממתח קדמי – משוואות שוקלי:



בהינתן ממתח על פני הדיודה באופן הבא, נוכל לבטא את צפיפות נושאי מטען המיעוט

$$\text{באופן הבא: } n(-x_p) = n_{p0} e^{qV/kT} = \frac{n_i^2}{N_a} e^{qV/kT}$$

כאשר  $n_{p0}$  הוא צפיפות נושאי המטען השליליים בצד ה-P (נושאי מטען המיעוט) בשיווי-משקל.

$$\text{באופן דומה נקבל בצד ה-N עבור צפיפות נושאי מטען המיעוט: } p(x_n) = p_{n0} e^{qV/kT} = \frac{n_i^2}{N_d} e^{qV/kT}$$

המשוואות הנ"ל נקראות **משוואות בתנאי שיווי-משקל חלקי (Quasi-Equilibrium)** או **משוואות שוקלי (Shockley Equations)** או **Boundary Condition**.

#### הערות:

(1) כאשר הממתח הוא שלילי, נושאי מטען המיעוט שואפים לאפס. מקובל לקרוא לסיטואציה כזו בתור: minority carrier extraction.

(2) נגדיר את הקשר עבור נושאי המטען העודפים (Excess minority carriers) בקצוות אזור המחסור (משני הצדדים) בצורה הבאה:

$$n'(-x_p) = n(-x_p) - n_{p0} = n_{p0} (e^{qV/kT} - 1)$$

$$p'(x_n) = p(x_n) - p_{n0} = p_{n0} (e^{qV/kT} - 1)$$

נעדיף להתמקד בנושאי מטען המיעוט **העודפים** מכיוון שהם אלו שיזרמו בין קצוות הדיודה כולה ולמעשה יגדירו את הזרם החשמלי שעובר בדיודה.

### תהליכי הריבומניציה של אלקטרון-חור:

ניתן להגדיר את נושאי מטען המיעוט **העודפים** בתור הפרש שבין סך מטען המיעוט בכל אזור ומטען המיעוט במצב שיווי משקל באופן הבא:

$$n' = n - n_{p0}$$

$$p' = p - p_{n0}$$

בתנאי שיווי משקל מקבלים מנייטרליות המטען כי:  $n' = p' = 0$ .  
כתוצאה מתהליכים שונים (הארה / ממתח חיזוני וכו') נוצרים מטענים עודפים.  
במקרה זה  $n' = p' \neq 0$ .

אם נייטרליות המטען לא מושגת בנקודת זמן מסוימת, תתרחש סחיפה של המטען הכולל (כלומר נושאי מטען הרוב בכל צד) כך שע"י תהליכי משיכה או דחייה תושג הנייטרליות. כך יתקבל לבסוף:  $n' = p'$  ולכן נניח כי במצב היציב שתי צפיפויות אלו שוות בגודלן.

### זמני הריקומבינציה של מטעני המיעוט העודפים:

נסמן:  $\tau_{\text{decay}}$  את **זמן החיים של נושאי המטען** או בפשטות: **קבוע זמן הריקומבינציה**.  
(או באנגלית: Recombination Time או Carrier Lifetime).  
תהליך הריקומבינציה הוא הביטוי הטבעי להחזרת שיווי משקל (כלומר:  $n' = p' = 0$ ).

### הערה:

(1) עקב צפיפויות שונות  $N_d$  ו-  $N_a$  בכל צד, ייתכנו קבועי זמן שונים.  
לכן נסמן בפועל:  $\tau_{\text{decay},p} = \tau_p$  ו-  $\tau_{\text{decay},n} = \tau_n$  בהתאם לקבועי הזמן של כל נושאי מטען מיעוט עודפים.

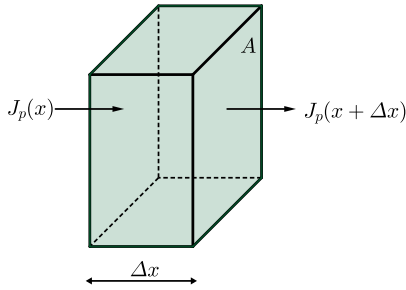
### משוואות הזמנים:

$$\frac{dn'}{dt} = -\frac{n'}{\tau}$$

$$\frac{dp'}{dt} = -\frac{p'}{\tau}$$

$$\text{for } n' = p': \quad \frac{dn'}{dt} = -\frac{n'}{\tau} = -\frac{p'}{\tau} = \frac{dp'}{dt}$$

**משוואות הרציפות של צפיפות הזרם:**



עבור הסכמה בצד נקבל:

$$A \cdot \frac{J_p(x)}{q} = A \cdot \frac{J_p(x + \Delta x)}{q} + A \cdot \Delta x \cdot \frac{p'}{\tau}$$

$$\frac{J_p(x + \Delta x) - J_p(x)}{\Delta x} = q \frac{p'}{\tau}$$

$$-\frac{dJ_p}{dx} = q \frac{p'}{\tau}$$

אם צפיפות נושאי מטען המיעוט העודפים היא אפס (כלומר, הצומת במצב שיווי משקל) אין זרם של מטענים (עודפים או לא עודפים – אין זרם כלל!)

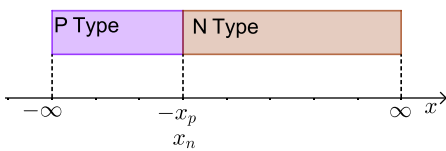
**אורך הדיפוזיה:**

נגדיר:  $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$  בתור **אורך הדיפוזיה (Diffusion Length)** ובאופן דומה נקבל עבור נושאי מטען שליליים:  $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$

**הערה:**

(1) מדובר בגדלים עם יחידות של אורך (מטרים) והם נעים בתחום שבאזור של  $\mu\text{m}$ . קשרים אלו תקפים רק עבור נושאי מטען המיעוט!

**נוסחאות צפיפות נושאי מטען המיעוט העודפים בממתח קדמי:**



עבור המודל המתואר בצד, נפתור את המשוואה:  $\frac{d^2 p'}{dx^2} = \frac{p'}{L_p^2}$

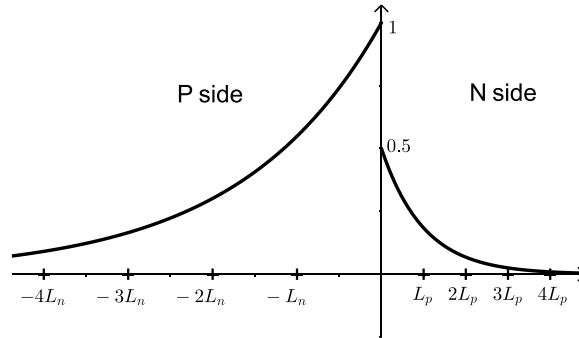
עבור צד ה-N (כלומר בתחום:  $x > x_n$ ) ונקבל:

$$p'(x) = p_{n0} e^{x_n/L_p} (e^{qV/kT} - 1) e^{-x/L_p} = p_{n0} (e^{qV/kT} - 1) e^{-(x-x_n)/L_p}, \quad x > x_n$$

באותו האופן, כאשר נחזור על התהליך עבור צפיפות נושאי מטען המיעוט העודפים בצד P- נקבל:

$$n'(x) = n_{p0} (e^{qV/kT} - 1) e^{(x-x_p)/L_n}, \quad x < -x_p$$

התיאור הגרפי של נושאי צפיפויות מטעני המיעוט בכל אזור הינו :



### אופיין IV של דיודת PN :

נכתוב את צפיפויות נושאי מטען המיעוט העודפים :

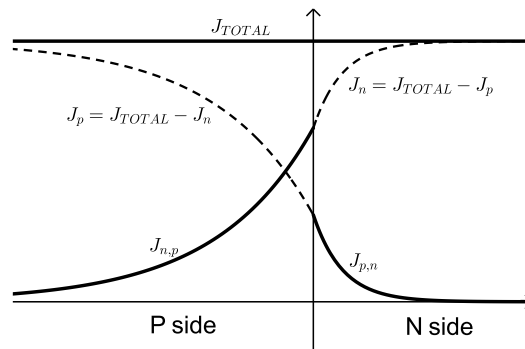
$$J_{p,n} = -qD_p \frac{dp'(x)}{dx} = q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} (e^{qV/kT} - 1) e^{-(x-x_n)/L_p}, \quad x > x_n$$

$$J_{n,p} = qD_n \frac{dn'(x)}{dx} = q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} (e^{qV/kT} - 1) e^{(x-x_p)/L_n}, \quad x < -x_p$$

היות ובאזור  $x \approx 0$  אנו יודעים את הערכים של  $J_{p,n}$  ו-  $J_{n,p}$ , נוכל לכתוב :

$$\text{Total Current} = J_{n,p}(x_n) + J_{p,n}(-x_p) = \left( q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} + q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} \right) (e^{qV/kT} - 1) = \text{Total Current for all } x$$

נוכל להשלים את גרף צפיפויות המטען ולכלול את נושאי מטען הרוב בכל צד :



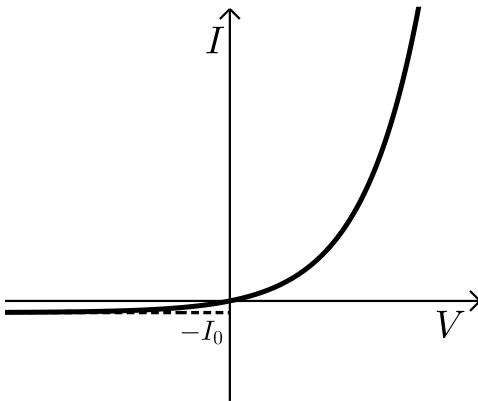
משוואת הזרם בדיודה :

$$I = J_{\text{TOTAL}} \cdot A = A \left( q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} + q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} \right) \left( e^{qV/kT} - 1 \right) = I_0 \left( e^{qV/kT} - 1 \right)$$

$$I_0 = Aqn_i^2 \left( \frac{D_n}{L_n N_a} + \frac{D_p}{L_p N_d} \right) : \text{כאשר}$$

מוגדר בתור זרם רוויה אחורי (Reverse saturation current).

גרף אופייני הדיודה :

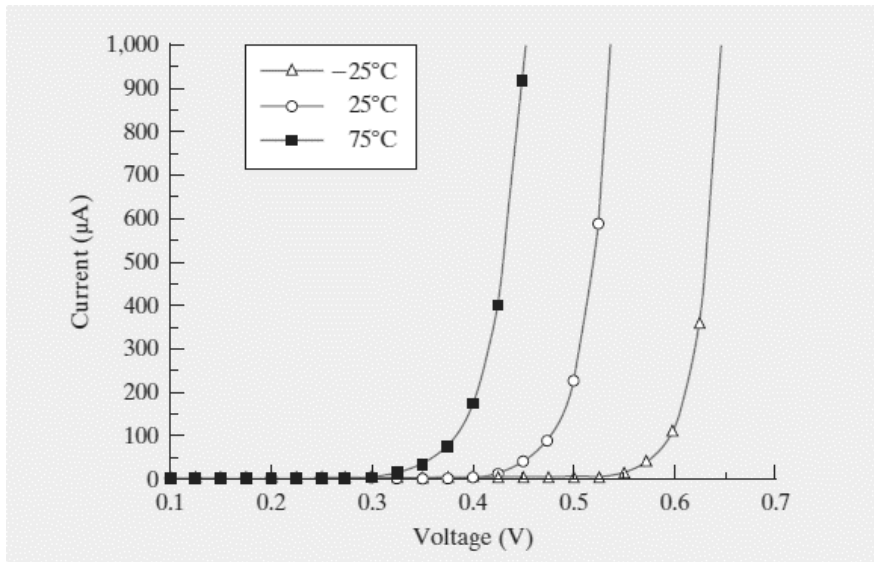


אופיין הדיודה מתאר את הקשר שבין הזרם למתח על פני הדיודה וניתן לכתוב באופן הבא :

$$I = I_0 \left( e^{qV/kT} - 1 \right)$$

כאשר :  $V_{\text{TH}} = 0.026\text{V}$  בטמפרטורת החדר.

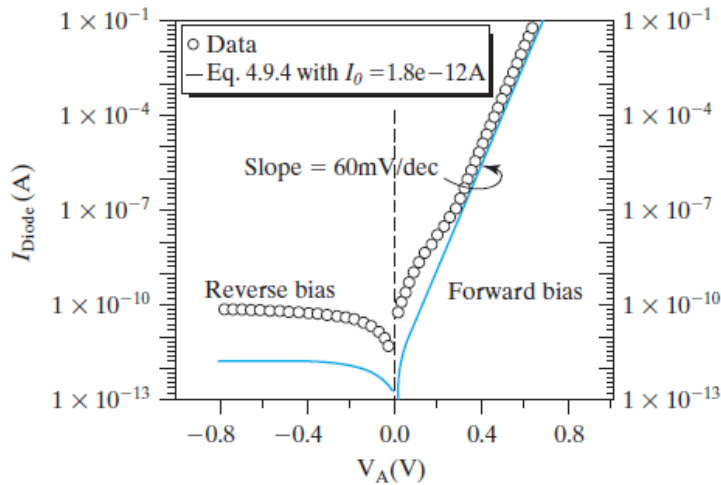
תלות אופיין הדיודה בטמפרטורה :



**אופיין לוגריתמי של הדיודה:**

להלן אופיין הדיודה לסקלה חצי לוגריתמית (Semilog Graph):

כאשר התייחסות היא למשוואה:  $I = I_0 (e^{qV_A/kT} - 1) \approx I_0 e^{qV_A/kT}$  ולכן:  $\ln I = \ln I_0 + \frac{q}{kT} V_A$



**זרם באזור המחסור:**

זרם הנוצר כתוצאה מתהליך ריקומבינציה או גנרציה באזור המחסור. הוא נקרא **זרם אזור המחסור (SCR Current – Space Charge Region Current)**.

משוואת הזרם הכללית:

$$I = I_0 (e^{qV/kT} - 1) + A \frac{qn_i W_{dep}}{\tau_{dep}} (e^{qV/2kT} - 1)$$

כאשר זרם הזליגה (Leakage Current) הוא (מתקבל עבור  $V \ll 0$ ):

$$I_{leakage} = I_0 + A \frac{qn_i W_{dep}}{\tau_{dep}}$$

**אחסון מטען בדיודה:**

מטען  $Q$  האגור בצומת הדיודה, פרופורציוני לזרם  $I$  (שהרי גם הרי תלוי במתח לפי  $-1 : (e^{qV/kT} - 1) : Q \propto I$  .  
נגדיר את  $\tau_s$  - זמן אגירת המטען (Charge Storage Time) ונכתוב את הקשר הבא:

$$I = Q / \tau_s \rightarrow \boxed{Q = I \cdot \tau_s}$$

**מודל אות קטן של דיודה:**

מודל אות קטן של דיודה מורכב מאלמנט התנגדותי במקביל לאלמנט קיבולי כמתואר:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{dI}{dV} = \frac{d}{dV} \left[ I_0 (e^{qV/kT} - 1) \right] \approx \frac{q}{kT} I_0 e^{qV/kT} = I_{DC} / \frac{kT}{q}$$

$$C = \frac{dQ}{dV} = \tau_s \cdot \frac{dI}{dV} = \tau_s \cdot G = \tau_s I_{DC} / \frac{kT}{q}$$

**❖ דוגמא מספרית:**

נניח וזורם זרם של:  $i(t) = 2 + 0.05 \sin(50\pi t)$  [A] דרך דיודת סיליקון הנמצאת בטמפ' החדר.  
לאחר מדידת הקיבול של הדיודה התקבל:  $\tau_s = 3 \text{ nsec}$ .  
במקרה זה נוכל למדל את הדיודה בתור התנגדות במקביל לקיבול שערכם הם:

$$G = I_{DC} / \frac{kT}{q} = \frac{2}{0.026} = 77 \text{ S} \rightarrow R = 0.013 \Omega$$

$$C = \tau_s I_{DC} / \frac{kT}{q} = 3 \cdot 10^{-9} \cdot 77 = 231 \text{ nF}$$



שאלות:

- (1) ענה בתמצות על כל אחת מהשאלות הבאות:
- עם איזה סוג של נושאי מטען (רוב או מיעוט) ממתח קדמי משויד?
  - עם איזה סוג של נושאי מטען (רוב או מיעוט) ממתח אחורי משויד?
  - מדוע הזרם בדיודה שנמצאת בממתח אחורי קטן בגודל ונמצא ברוויה?

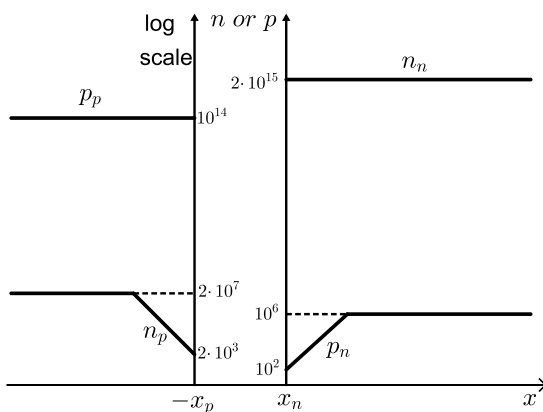
- (2) נתונה דיודה הנמצאת בממתח אחורי. איזה תהליך מתרחש באזורים הנייטרלים למחצה הסמוכים לאזור המחסור (Quasi-Neutral Regions)? נמק.
- סחיפה ודיפוזיה.
  - דיפוזיה וריקומבינציה.
  - גנרציה ודיפוזיה.
  - גנרציה וסחיפה.

- (3) ענה על השאלות הבאות:
- מדוע לא ניתן להיעזר במשוואות ריכוז נושאי מטען המיעוט העודפים כדי לקבוע את ריכוזם והתנהגותם בתוך אזור המחסור?
  - איזו הצדקה יש לטענה: "תהליכי הגנרציה-ריקומבינציה בתוך אזור המחסור הם זניחים"?

- (4) ענה על השאלות הבאות:
- מהי דיודה עם בסיס רחב (Wide-Base Diode)?
  - מהו חוק הצומת?
  - איך ניתן למצוא את  $I_0$  מאופיין IV של דיודה הנתון בגרף semilog?

- (5) באיור שלפניך מתואר המצב היציב של ממתח כלשהו על פני דיודה בטמפרטורת החדר.

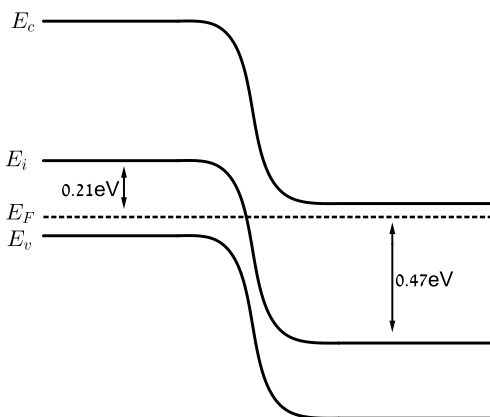
- האם הדיודה נמצאת בממתח קדמי או אחורי? נמק.
- מהם הריכוזים בצד  $p$  ובצד  $n$ ?
- מצא את  $V_A$ .



6) בשאלה זו נסכם את הידע שנרכש בצומת PN במצב שיווי משקל, ממתח אחורי וממתח קדמי. נתונה דיודת מדרגה מסיליקון שנמצאת בטמפרטורת החדר. נתון כי:  $N_d = 4000N_a$ .

- א. עבור מצב שווי משקל צייר סקיצה מקורבת של:
- צפיפות המטען לאורך הפיסה.
  - השדה החשמלי לאורך הפיסה.
  - הפוטנציאל החשמלי לאורך הפיסה.
  - פסי האנרגיה לאורך הפיסה.
- ב. חשב את המתח המובנה עבור שינוי הטמפרטורה ב- $10^\circ\text{K}$  למעלה ולמטה. מה המסקנה לגבי שינוי המתח המובנה ביחס לטמפרטורה?
- ג. מהו השינוי ברוחב שכבת המחסור בכל מקרה (אין קשר בין המקרים):
- i. מגדילים את ריכוז התורמים (בלבד) בצד N פי 25.
  - ii. מגדילים את ריכוז המקבלים (בלבד) בצד P פי 25.
  - iii. מחברים את הדיודה למתח אחורי הגדול פי 100 מהמתח המובנה (בשווי משקל).
- ד. כיצד ישתנה הזרם של הדיודה בממתח קדמי בכל מקרה (אין קשר בין המקרים):
- i. מגדילים את ריכוז התורמים בצד N פי 100.
  - ii. מגדילים את ריכוז המקבלים בצד P פי 5.
- ה. מה יקרה לזרם בממתח אחורי (זרם הרוויה האחורי) בכל מקרה:
- i. משנים את הטמפרטורה (התייחס להעלאה והורדה וציין כיצד הוא משפיע במידה וכן).
  - ii. מגדילים את המתח האחורי פי 15.

7) בציור שלפניך מתוארת דיאגרמה איכותית של פסי אנרגיה של דיודת מדרגה מסיליקון בטמפרטורת החדר. נתונים:



$$n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}, \quad D_n = 36 \frac{\text{cm}^2}{\text{sec}}, \quad D_p = 14 \frac{\text{cm}^2}{\text{sec}}$$

$$\tau_n = \tau_p = 8 \cdot 10^{-7} \text{ sec}, \quad A = 10^{-2} \text{ cm}^2$$

- א. מהו המתח המובנה של הדיודה (בשווי משקל)?
- ב. מצא את זרם הזליגה.
- ג. מהו הזרם עבור מתח של  $V_D = 0.55\text{V}$  ומהו הזרם עבור מתח של  $V_D = -12\text{V}$ ?

## תשובות סופיות:

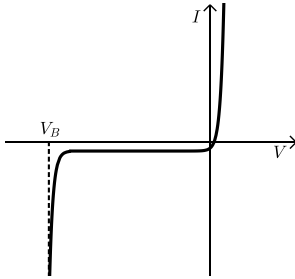
- (1) א. נושאי מטען הרוב אשר עוברים ע"י דיפוזיה לצד השני של הצומת.  
 ב. משויך עם נושאי מטען המיעוט שנכנסים לתוך אזור המחסור ונסחפים לצד הנגדי של הצומת (אלקטרונים לצד P וחורים לצד N).  
 ג. הזרם קטן מכיוון שהוא נבנה מנוכחות נושאי מטען המיעוט.  
 תשובה: ג'. (גנרציה ודיפוזיה).
- (2) א. באזור המחסור קיימת נוכחות של שדה חשמלי, ולכן אנו לא יודעים כיצד ריכוזי נושאי מטען המיעוט מתנהגים שם. כמו כן מתרחשים תהליכים אקראיים של גנרציה וריקומבינציה תרמית.  
 כלומר,  $n_p$  ו- $p_n$  בתחום  $-x_p < x < x_n$  לא ידועים ולכן גם לא  $n'(x)$  ו- $p'(x)$ .  
 ב. אין הצדקה כלל!
- (3) א. דיודה שבה המגעים האוהמים מרוחקים לפחות בכמה גדלים של  $L_n$  ו- $L_p$  מקצות אזור המחסור.  
 ב. חוק הצומת מתייחס לקשר שבין ריכוזי נושאי המטען בתוך אזור המחסור והוא:  $np = n_i^2 \exp\{qV_A / kT\}$ .  
 ג. יש למשוך קו ישר מאזור הממתח האחורי ולקחת את נקודת החיתוך שלו עם ציר ה-y שהוא ציר הזרם I בסקלה לוגריתמית.
- (4) א. ממתח אחורי. ב.  $N_d = n_n = 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ;  $N_a = p_p = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ .  
 ג.  $V_A = -0.419 \text{ V}$ .
- (5) א. ראה סקיצות בסרטון הוידאו.  
 ב. השינויים זניחים (ראה סרטון בוידאו) ולכן המתח המובנה קבוע ביחס לשינויים בסדרי גודל שכאלה.  
 ג. אין שינוי. ד.  $W_{dep.new} = \frac{W_{dep.0}}{5}$ .  
 ה.  $W_{dep.new} = 10 \cdot W_{dep.0}$ .
- (6) א. ההשפעה זניחה. ב. זרם הרוויה יקטן פי 5 ואיתו זרם הדיודה.  
 ה. הזרם יגדל מעריכית עם שינוי הטמפרטורה. ו. אין שינוי.  
 א.  $\phi_{bi} = 0.68 \text{ V}$ . ב.  $I_0 = 33.54 \cdot 10^{-12} \text{ A}$ .  
 ג.  $I_D(V_D = -12 \text{ V}) = -33.54 \cdot 10^{-12} \text{ A}$ ,  $I_D(V_D = 0.55 \text{ V}) = 51.5 \text{ mA}$ .

## ממתח אחורי ודיודת זנר:

### סיכום כללי:

#### הגדרה:

דיודה הפועלת בתחום הממתח האחורי שלה (בנוסף לממתח קדמי) היא דיודת זנר (Zener Diode).



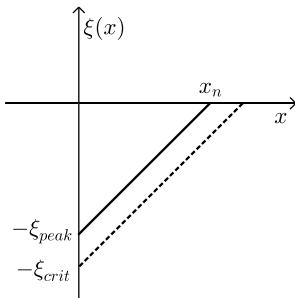
#### ביטויים מתמטיים:

שדה חשמלי:  $\xi(x) = -\frac{qN}{k_S \epsilon_0} (x - x_n)$

שדה חשמלי מירבי:  $\xi(x=0) = \frac{qN x_n}{k_S \epsilon_0} = \sqrt{\frac{2qN}{k_S \epsilon_0} (\phi_{bi} + |V_r|)} \triangleq \xi_{peak}$

פוטנציאל חשמלי:  $V_B = \frac{k_S \epsilon_0 \xi_{crit}^2}{2qN} - \phi_{bi}$

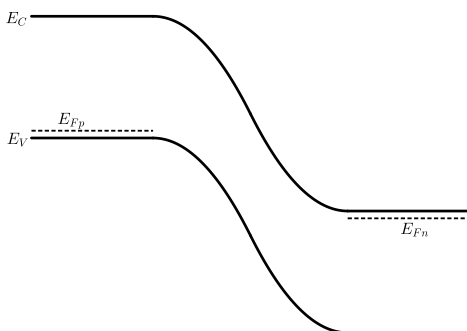
כאשר:  $N = \text{avg}(N_a, N_d)$



#### דרכים לשבירת צומת:

- שבירת צומת בעקבות מינהור (Tunneling Breakdown).
- שבירת צומת בעקבות מפולת (Avalanche breakdown).

#### שבירת צומת בעקבות מינהור (Tunneling Breakdown):



תופעה לפיה עקב ריכוזי מזהמים גדולים ואורך שכבת מחסור קטן, נוצר מצב בו יש ריכוז גדול של אלקטרונים ניידים בשכבת הערכיות של צד P ומספר אפסי של אלקטרונים ניידים בשכבת ההולכה בצד N. אפקט המנהור מתייחס ל-ימעברי של אלקטרונים דרך מחסום אנרגיה גדול גם כאשר אין להם אנרגיה לעבור מעליו.

האלקטרונים ישאפו לאזן את הצפיפויות שלהם ע"י איכלוס רמות האנרגיה הריקות בצד ה-N ובכך יעברו את שכבת המחסור.

$$J = G \cdot e^{-H/\xi_{\text{peak}}} : \text{כך } \frac{1}{\xi}$$

$$\xi_{\text{crit}} = 10^6 \frac{\text{V}}{\text{cm}} : \text{השדה הגדול ביותר (הקריטי) הוא באזור}$$

### שבירת צומת בעקבות מפולת (Avalanche breakdown):

אלקטרונים שעוברים מצד ה-P לציר ה-N יוצרים זוג אלקטרון-חור (electron-hole pair - Generation) בתופעה הנקראת Impact ionization. התהליך חוזר ויוצר זרם הגדל מעריכי כמפולת - Avalanche breakdown.

$$V_B = \frac{k_s \epsilon_0 \xi_{\text{crit}}^2}{2qN} : \text{הממתח האחורי (בהזנחת הפוטנציאל המובנה) הוא}$$

$$\xi_{\text{crit}} \propto \sqrt[5]{N} : \text{עבור } N \approx 10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ נקבל: } \xi_{\text{crit}} \approx 5 \cdot 10^5 \frac{\text{V}}{\text{cm}} \text{ והוא גדל ביחס}$$

$$V_B \approx 15 \cdot \left( \frac{10^{17}}{N} \right)^{0.6} \propto N^{-0.6} : \text{בהתאם לכך מקבלים}$$

## תאים סולריים ופוטו דיודות:

סיכום כללי:

תאים סולריים:

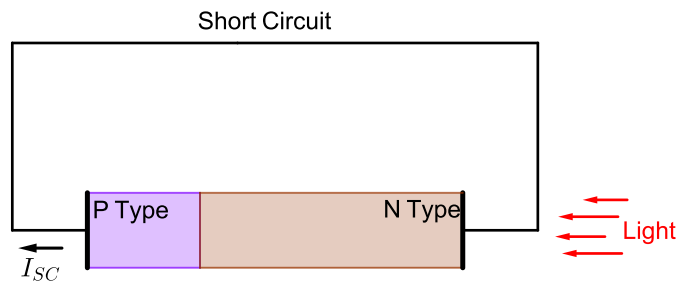


נקראים גם תאים פוטו-וולטאים (Photovoltaic cells), והם מסוגלים להפוך את האנרגיה הקרינה של השמש לאנרגיה חשמלית עם נצילות של 15%-30%.

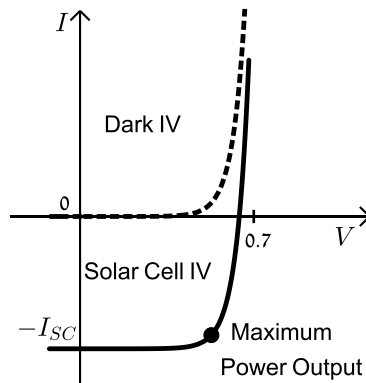
זרם חשמלי:

$$I = I_0 \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - I_{SC}$$

כאשר נקצר תא סולרי נקבל זרם לפי:



אופיין IV של תא סולרי:



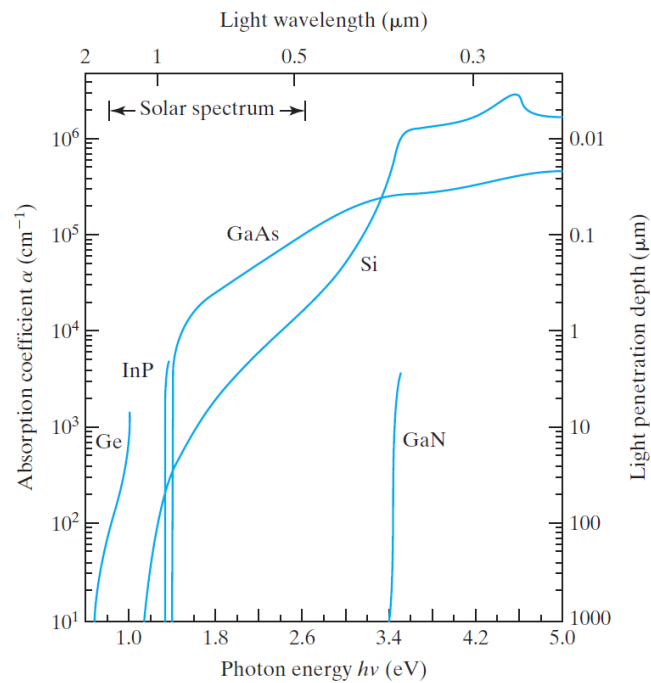
**עומק החדירה של אנרגיה פוטונית:**

אנרגיית פוטון תלויה באורך הגל:  $E_{ph} = \frac{hc}{\lambda} \approx \frac{1.24}{\lambda} [eV]$

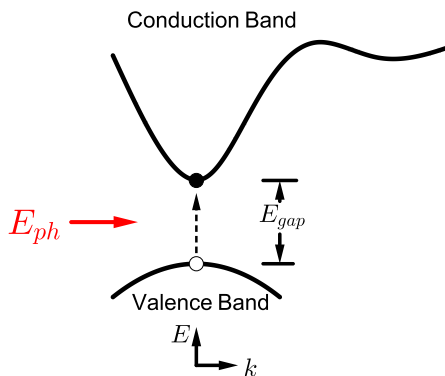
חדירות האור בעומק  $x$ :  $Light Intensity(x) \propto e^{-\alpha x}$

כאשר  $\frac{1}{\alpha}$  נקרא עומק החדירה – Penetration Depth

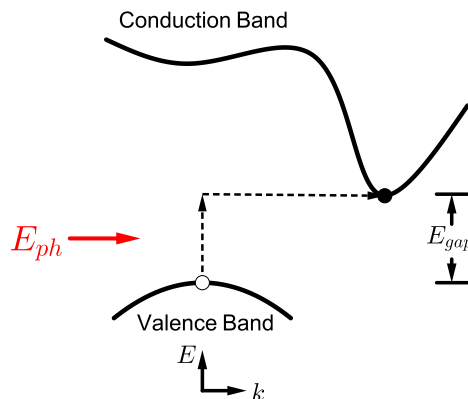
(או  $\alpha$  נקרא בשם מקדם הספיגה – Absorption Coefficient).



**Direct Gap Semiconductor**



**Indirect Gap Semiconductor**



**משוואת הרציפות:**

$$\frac{d^2 p'}{dx^2} = \frac{p'}{L_p^2} - \frac{G}{D_p} : \text{מניחים קצב הגנרציה הוא } G [s^{-1}cm^{-3}] \text{ ומקבלים}$$

**הערה:**

חשוב לציין כי המשוואה נכתבה ליחידת זמן. במקרה בו ההארה משתנה בזמן,

וקצב הגנרציה לא קבוע, האיבר  $\frac{\partial p'}{\partial t} \neq 0$  ואז המשוואה תראה כך:

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = -\frac{d^2 p'}{dx^2} + \frac{p'}{L_p^2} - \frac{G}{D_p}$$

**ביטויים אנליטית לזרמים ומתחים:**

להלן ביטויים עבור הזרם והמתח שעל פני תא סולרי (או מליימ שעובר תהליך הארה):

$$I = I_0 \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - I_{SC} = Aq \frac{n_i^2}{N_d} \frac{D_p}{L_p} \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - A \cdot q \cdot L_p \cdot G$$

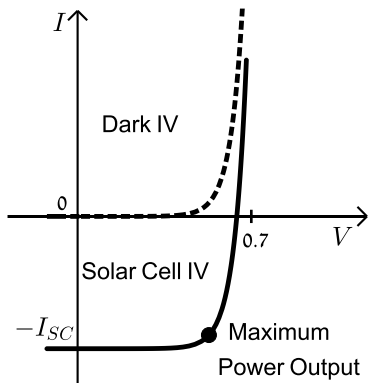
$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{\tau_p G N_d}{n_i^2} \right)$$

**הספק מוצא:**

$$P_{out} = I_{SC} \cdot V_{OC} \cdot FF : \text{הספק מוצא מחושב}$$

כאשר  $FF$  (Fill Factor) הוא היחס שבין ההספק המירבי

$$\text{לבין ההספק המתקבל ע"י: } I_{SC} \cdot V_{OC} \text{ כך: } FF = \frac{I \cdot V|_{P_{max}}}{I_{SC} \cdot V_{OC}}$$





## שאלות:

- 1) פוטו-דיודה המבוססת על צומת PN היא דיודת PN שיוצרה ונארזה כך שאור יכול לחדור ולהאיר את אזור הצומת. בשאלה זו נתייחס לפוטו-דיודה המבוססת על צומת  $P^+N$  אידיאלית שבה האור הפוגע נבלע בצורה אחידה לאורך ההתקן וגורם לגנרציה אופטית של  $G_L$  זוגות אלקטרון-חור (ביחידות של  $\text{cm}^{-3} \cdot \text{sec}^{-1}$ ). ניתן להניח תנאי הזרקה נמוכים.
- א. מהו ריכוז נושאי מטען המיעוט בצד ה-N רחוק מאזור הצומת (כלומר עבור:  $x \rightarrow \infty$ ) שים לב:  $\Delta p_n(x \rightarrow \infty) \neq 0$ .
- ב. כאשר מקצרים את הפוטו-דיודה ומאירים עליה באופן אחיד כך שנוצרים  $G_L$  זוגות של אלקטרון-חור כמתואר בתחילת השאלה, נוצר זרם קצר,  $I_{SC}$ . מצא את הקשר שבין  $I_{SC}$  לבין  $G_L$  ואורך הדיפוזיה של החומר.
- ג. נניח כי אורך כל ההתקן (הפוטו-דיודה) הוא  $10L_p < l < 16L_p$ . בזמן מסוים, חותכים את הפוטו-דיודה בדיוק במרכזה כך שכעת אורכה הכללי הוא  $0.5l$ . על מה (אם בכלל) ישפיע הדבר? נמק. (הנח כי עובי צד ה- $P^+$  הוא קטן לצורך הפשטות).
- i. קצב הגנרציה האופטית  $G_L$ .
- ii. אורך הדיפוזיה של ההתקן  $L_p$ .
- iii. זרם הקצר  $I_{SC}$ .
- ד. כתוב ביטוי אנליטי לתיאור אופיין IV המלא של פוטו-דיודה ותאר כיצד האופיין משתנה כתלות ב- $G_L$ .
- ה. סרטט את הצורה הכללית של אופיין IV של פוטו-דיודה עבור המקרים הבאים: (הגודל  $G_{L0}$  מתייחס לגנרציה ראשונית כנקודת יחס).
- i.  $G_L = 0$
- ii.  $G_L = G_{L0}$
- iii.  $G_L = 2G_{L0}$
- iv.  $G_L = 4G_{L0}$

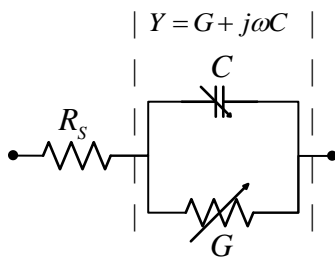
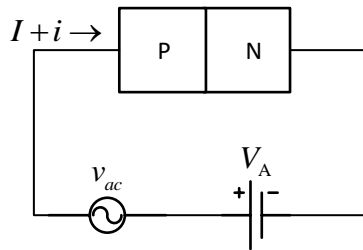
## תשובות סופיות:

- 1) א.  $p'(x \rightarrow \infty) = \tau_p G_L$  ב.  $I_{SC} = q \cdot L_p \cdot A \cdot G_L$  ג. ראה נימוקים בסרטון הוידאו.
- ד.  $I = Aq \frac{n_i^2 D_p}{N_d L_p} \left( \exp \left\{ \frac{qV}{kT} \right\} - 1 \right) - AqL_p G_L$  ה. ראה סרטוטים בסרטון הוידאו.

## אדמיטנס הדיודה במודל אות קטן:

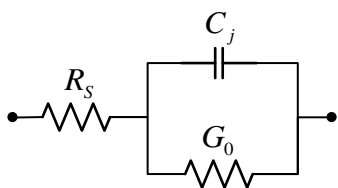
### סיכום כללי:

נתייחס לממתח מורכב ממקור מתח קבוע DC, ומקור מתח חילופין AC.  
 נסמן:  $V = V_A + v_{ac}$  כאשר  $V_A = V_{DC}$  הוא המתח הקבוע ו- $v_{ac}$  הוא מתח החילופין.  
 הזרם הנכנס לדיודה יפוצל גם הוא כאשר  $I = I_{DC}$  ו- $i = i_{ac}$ .

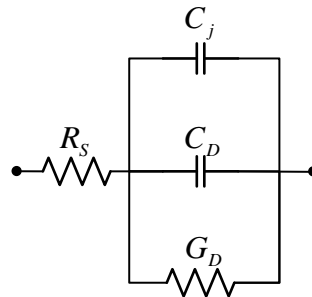


אפיון באמצעות האדמיטנס:  $Y = G + j\omega C$   
 כאשר  $G$  מייצג את המוליכות האוהמית הטהורה ו- $C$  מייצג את קיבול הדיודה.  
 ההתנגדות טורית  $R_s$  זניחה ברוב המקרים.

### ממתח אחורי



### ממתח קדמי



- נכתוב את האדמיטנס הכללי:  $Y = G_D + j\omega(C_j + C_D)$ .
- בממתח קדמי גדול נוכל להשמיט את  $C_j$ .
- בממתח אחורי, עבור דיודה אידיאלית נוכל להשמיט את  $G_0$  (כלומר:  $G_0 = 0$  ולכן  $G_D = 0$ ).
- את  $R_s$  נחשב במידה ונתבקש, אולם השפעתו זניחה למעט ממתחים קדמיים גדולים.

**נוסחאות:**

- קיבול צומת אחורי:  $C_j = \frac{C_{j0}}{(1 - V_A / \phi_{bi})^{1/(m+2)}}$  כאשר:  $C_{j0} = k_s \epsilon_0 A \cdot \left[ \frac{(m+2) k_s \epsilon_0 \phi_{bi}}{qb} \right]^{-1/(m+2)}$ .
- הזיהום הוא:  $N_B(x) = bx^m$ . עבור צומת מדרגה:  $m=0$ , עבור צומת ליניארי:  $m=1$ .
- המוליכות היא:  $G_0 = \frac{dI}{dV_A} = \frac{q}{kT} I_0 \exp\{qV_A / kT\} = \frac{I + I_0}{V_{TH}}$  כאשר:  $V_{TH} = \frac{kT}{q}$ .
- עבור ממתח קדמי:  $I \gg I_0$  ולכן:  $G_0 = \frac{I}{V_{TH}}$  ועבור ממתח אחורי:  $I = -I_0$  ולכן:  $G_0 = 0$ .
- המוליכות וקיבול הדיפוזיה בממתח קדמי:  

$$G_D = \frac{G_0}{\sqrt{2}} \left( \sqrt{1 + \omega^2 \tau^2} + 1 \right)^{1/2}, \quad C_D = \frac{G_0}{\omega \sqrt{2}} \left( \sqrt{1 + \omega^2 \tau^2} - 1 \right)^{1/2}$$
 כאשר  $\tau$  משויך לנושאי מטען המיעוט במ"מ.
- אם  $\omega \tau \ll 1$  אז:  $C_D = G_0 \tau / 2$ ,  $G_D = G_0$ .

**הערות:**

- (1) מניחים כי גודל האמפליטודה של מתח ה-AC, כלומר  $|v_{ac}|$ , משתנה בתחום של עשרות mV ופחות.
- (2) עבור צומת N<sup>+</sup>P נחליף את  $\tau_p$  ב- $\tau_n$ .
- (3) עבור צומת שאינו מנוון יש לחשב את  $G_0$  בנפרד עבור כל צד.

### שאלות:

- (1) נתון צומת P<sup>+</sup>N מסיליקון ארוך השרוי בטמפרטורת החדר. שטח החתך של הצומת הוא  $A = 10 \text{ mm}^2$ . מחברים את הצומת לממתח AC שבו  $f = 100 \text{ kHz}$ . כמו כן ידוע כי:  $C_j(-22.7 \text{ V}) = 492 \text{ pF}$  ו-  $C_j(V_F) = C_j(0)$ . בממתח  $V_F$  נתונים האדמיטנסים עבור שני זרמים שונים,  $I_1$  ו-  $I_2$ :
- $$Y(I_1) = 1.86 \cdot 10^{-2} + j \cdot 4.1 \cdot 10^{-3} \quad [\Omega^{-1}]$$
- $$Y(I_2) = 5.72 \cdot 10^{-2} + j \cdot 9.3 \cdot 10^{-3} \quad [\Omega^{-1}]$$
- א. מצאו את הזרמים  $I_1$  ו-  $I_2$ .
- ב. עבור הזרם  $I_1$  קבעו מה הם  $C_j$ ,  $C_D$  ו-  $\tau_p$ . הראו כי התנאי  $\omega \tau_p \ll 1$  מתקיים.
- ג. מצאו את  $N_d$  ואת  $\phi_{bi}$  (הניחו צומת מדרגה).
- ד. מצאו את  $N_a$  והראו כי אכן מתקיים התנאי של צומת P<sup>+</sup>N.

### תשובות סופיות:

- (1) א.  $I_1 = 483 \mu\text{A}$ ,  $I_2 = 4.1 \text{ mA}$ .
- ב.  $\tau_p = 428 \text{ n sec}$ ,  $C_D = 4 \text{ nF}$ ,  $C_j(0) = 2.52 \text{ nF}$ .
- ג.  $\phi_{bi} = 0.9 \text{ V}$ ,  $N_d = 6.72 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .
- ד.  $N_a = 1.6 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .