

תוכן העניינים:

| | |
|---|---|
| 2 | פרק 2 |
| 2 | תנועה של אלקטרונים וחורים |
| 2 | כללי: |
| 2 | סיכום כללי: |
| 4 | שאלות: |
| 8 | תשובות סופיות: |
| 9 | גרף מוביליות ודיפיוסיטיביות (בטמפרטורת החדר): |

פרק 2

תנועה של אלקטרונים וחורים

כללי:

סיכום כללי:

תנועה תרמית:

$$\bar{E}_{TH} = \frac{3}{2} kT : \text{ אנרגיה הקינטית הממוצעת של אלקטרון}$$

$$v_{TH} = \sqrt{\frac{3kT}{m_n}}, \quad v_{TH} = \sqrt{\frac{3kT}{m_p}} : \text{ מהירות תרמית (של אלקטרון ושל חור)}$$

$$\tau_{coll} = 10^{-13} \text{ sec} : \text{ זמן ממוצע להתנגשות הוא}$$

מהירות סחיפה (Drift Velocity):

תנועת מטענים לאורך מוליך למחצה כתוצאה משדה חשמלי חיצוני ξ .

$$v_p = \mu_p \xi$$

$$v_n = -\mu_n \xi$$

משוואות הסחיפה:

כאשר:

$$\mu_p = \frac{q \cdot \tau_{mp}}{m_p} \text{ נקרא המוביליות של חורים.}$$

$$\mu_n = \frac{q \cdot \tau_{mn}}{m_n} \text{ נקרא המוביליות של האלקטרונים.}$$

מוביליות מתארת עד כמה ניידים המטענים במוליך.

$$[\mu_p] = [\mu_n] = \left[\frac{q \cdot \tau_{mp}}{m_p} \right] = \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{sec}} : \text{ יחידות המוביליות הן}$$

הערות:

(1) מצורף בסוף הפרק גרף המוביליות עבור סיליקון (Si) וגליום-ארסניד (GaAs).

(2) מהירות הסחיפה המרבית היא בקירוב $v_{sat} = 10^7 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$ עבור סיליקון (Si)

ו- $v_{sat} = 1.3 \cdot 10^7 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$ עבור גליום-ארסניד (GaAs).

משוואת צפיפות הסחיפה:

$$J_{\text{drift}} = J_{p,\text{drift}} + J_{n,\text{drift}} = qp\mu_p\xi + qn\mu_n\xi = \sigma\xi$$

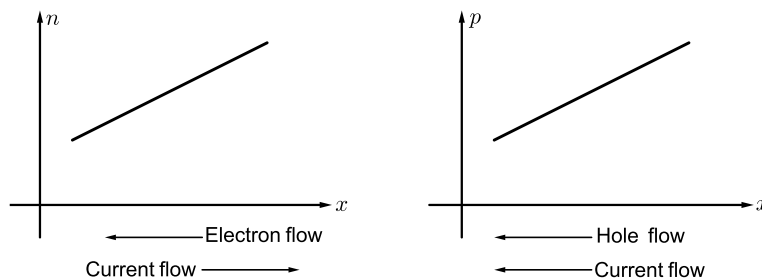
כאשר:

- מוליכות חשמלית ליחידת אורך: $\sigma = qp\mu_p + qn\mu_n$ (ונמדדת ביחידות של: S/m)
- התנגדות חשמלית אורכית: $\rho = \frac{1}{\sigma} = (qp\mu_p + qn\mu_n)^{-1}$ (ונמדדת ביחידות של: $\Omega \cdot \text{m}$).

זרם דיפוזיה:

זרם של מטענים כתוצאה משינוי בריכוז המזהמים לאורך הגביש.

כיווני הזרמי הדיפוזיה והזרם הכלליים:



מגדירים את צפיפות הזרם הכללי במוליך למחצה מזוהם באופן הבא:

$$J = J_n + J_p = (J_{n,\text{drift}} + J_{n,\text{diff}}) + (J_{p,\text{drift}} + J_{p,\text{diff}}) =$$

$$= qn\mu_n\xi + qD_n \frac{dn}{dx} + qp\mu_p\xi - qD_p \frac{dp}{dx}$$

כאשר D_n ו- D_p הם מקדמי הדיפוזיה של אלקטרונים וחורים בהתאמה ב- $\frac{\text{cm}^2}{\text{sec}}$.

הערות:

- (1) קיימים זרמי סחיפה במידה ומופעל שדה חשמלי חיצוני.
- (2) קיימים זרמי דיפוזיה במידה ויש גרדיאנט בריכוזי הזיהום.
- (3) נושאי מטען הרוב קובעים את צפיפות הזרם וכיוונו.

יחסי איינשטיין:

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q} \quad \text{קשר שבין המוביליות ומקדם הדיפוזיה:}$$

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q} \quad \text{ועבור חורים נכתוב:} \quad \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q} \quad \text{עבור אלקטרונים נכתוב:}$$

הערה:

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q} = 26\text{mV} @ T = 300^\circ\text{K} \quad (1) \quad \text{בטמפי החדר מקבלים:}$$

שאלות:

- (1) מטיל סיליקון נמצא בטמפרטורת החדר ומאולח לפי:

$$N_a = 10^{16} \text{ cm}^{-3}, N_d = 3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

א. איזה סוג חומר הוא?

ב. נתון שדה חיצוני של $\xi = 7 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$, מהי מהירות נושאי המטען?

מהו הזרם הכללי?

ג. עבור איזה שדה תתקבל מהירות נושאי מטען מקסימלית (הרוב והמיעוט).

זכור כי עבור סיליקון מהירות הרוויה היא: $v_{sat} = 10^7 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$

- (2) נתון מטיל גליום-ארסנייד (GaAs) שעובר תהליך זיהום לפי: $N_a = 10^{14} \text{ cm}^{-3}, N_d = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

חשב עבור איזה שדה תתקבל מהירות נושאי מטען מקסימלית (הרוב והמיעוט).

זכור כי עבור GaAs מהירות הרוויה היא: $v_{sat} = 1.2 \cdot 10^7 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$

(3) נתון סיליקון עם ריכוז אלקטרונים חופשיים: $n(x) = 10^{16} e^{-\frac{x}{5\mu\text{m}}} \text{ [cm}^{-3}\text{]}$

ורכוז אילוח $N_d = 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

- א. מהו גודל וכיוון צפיפות זרם הדיפוזיה?
 ב. שרטט את זרם הדיפוזיה עבור מטיל בגודל של $20 \mu\text{m}$.

(4) נתון חומר מסוג P-Type הנמצא בטמפרטורת החדר ואליו מזריקים נושאי

מטען מיעוט בנקודה מסוימת. מפעילים שדה חשמלי $\varepsilon = 40 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$ לכל אורך

המטיל אשר גורם לנשאי המיעוט לנוע מרחק של 0.5 cm במשך $50 \mu\text{sec}$.

- א. מצא את מהירות הסחיפה ואת מקדם הדיפוזיה של נושאי מטען המיעוט.
 ב. כיצד תשובתך תשתנה אם במקום טמפרטורת החדר, החומר נמצא עם $T = 400^\circ\text{K}$?

(5) כדי למצוא את מקדם הדיפוזיה של חומר מסוג N-Type שבו $n > 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ הנמצא בטמפרטורת החדר, מבצעים את הניסוי הבא:

מניחים את החומר באזור עם שדה חשמלי הומוגני של $50 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$ ומודדים את זרם הסחיפה.

לאחר מכן מוסיפים ריכוז אחיד של $p' = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ וחוזרים על הבדיקה.

זרם הסחיפה הראשון הוא: $J = 4.5 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$ וזרם הסחיפה השני הוא: $J = 4.7 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$.

- א. מהי מוליכות החומר בכל מדידה?
 ב. מהי המוביליות של נושאי מטען המיעוט?
 ג. מהו מקדם הדיפוזיה של נושאי מטען המיעוט בחומר?

(6) במוליך למחצה מסוג N-Type השרוי בטמפרטורת החדר, ריכוז האלקטרונים משתנה בצורה ליניארית מ- $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ל- $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ לאורך מרחק של 4 mm .

מצא את צפיפות זרם הדיפוזיה בהינתן $D_n = 36.6 \frac{\text{cm}^2}{\text{sec}}$.

(7) מזהמים סיליקון טהור מצד אחד לפי הקשר הבא: $N_d = N_0 \exp(-\alpha x)$.

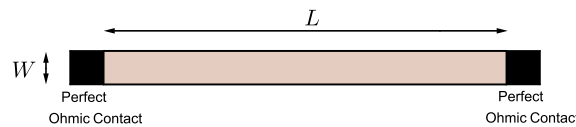
- א. מצא ביטוי עבור השדה החשמלי שנוצר כתוצאה מהשינוי בריכוז בשווי משקל תחת הנחה כי $N_d \gg n_i$.
 ב. מצא תנאי על α עבורו החומר יישאר מזוהם באותו הסוג לכל אורכו. הנח כי אורך המטיל הוא d . מהו הביטוי עבור השדה החשמלי במקרה הקטן ביותר?

הערה:

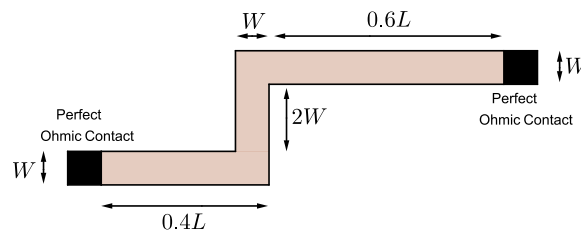
תלמידים יקרים! השאלות הבאות הינן שאלות חזרה מסכמות העוסקות בכל הנושאים שנלמדו עד כה. חלק מן הסעיפים מתייחסים לנושאים הנלמדים בהמשך הקורס. עקב כך, מומלץ לעבור עליהן גם במסגרת הלמידה השוטפת וגם כהכנה למבחן.

(8) מזהמים פיסת סיליקון בעובי של $50\mu\text{m}$ ב-As באופן אחיד של $N_d = 10^{17}\text{cm}^{-3}$. מידות פיסת הסיליקון הן: $W = 25\mu\text{m}$, $L = 300\mu\text{m}$ והיא שרויה בטמפרטורת החדר.

- א. חשב את כמות נושאי המטען הניידים בפיסת הסיליקון.
- ב. מהי ההתנגדות הסגולית של פיסת הסיליקון?
- ג. מהי ההתנגדות המשטחית של פיסת הסיליקון ליחידת שטח (כלומר: R_{\square} - התנגדות ריבוע)?
- ד. באיור שלפניך מתואר נגד המורכב מפיסת הסיליקון אשר בקצוותיו מגעים אוהמים מושלמים. מה הוא ערך התנגדות הנגד?

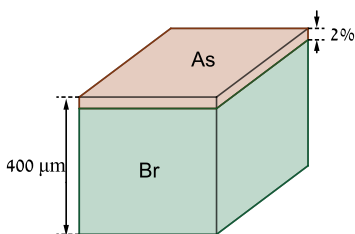


- ה. מחברים שתי פיסות סיליקון כמתואר באיור הבא - מצא את התנגדותו. הנח כי כל נתוני השאלה לא השתנו.



(9) באיור שלפניך מתואר חתך רוחבי תלת-ממדי של פרוסת סיליקון בעובי כולל

של $400\mu\text{m}$ המסוממת בצורה אחידה עם Br בריכוז של $3 \cdot 10^{14}\text{cm}^{-3}$.



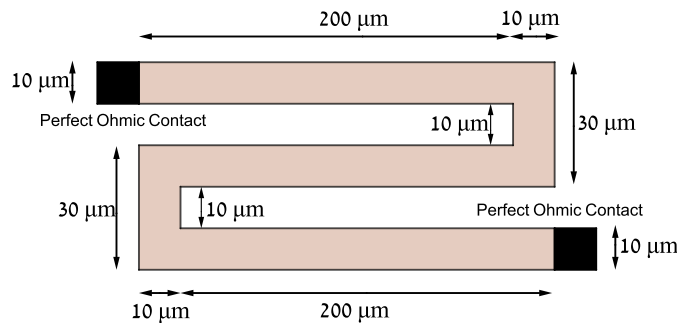
מזהמים את פני הפרוסה (החלק העליון) ב-As

בצורה אחידה בריכוז של $2 \cdot 10^{18}\text{cm}^{-3}$.

ידוע כי הזיהום של פני הפרוסה חודר לעומק של 2% מעובי הפרוסה הכולל.

- א. קבע מה הוא סוג נושאי המטען הניידים בפיסת הסיליקון עצמה (קרי: המצע) ועל פני הסיליקון (קרי: משטח הפרוסה העליון). חשב את ריכוז נושאי מטען אלו.
- ב. מצא את ההתנגדות המשטחית של פני הפרוסה (הזנח את תופעת המחסור).

- ג. בהסתמך על תוצאתך מהסעיף הקודם, קבע האם תרומת נושאי המטען הניידים במצע היא משמעותית לנושאי המטען שעל פני הפרוסה. נמק.
- ד. בהנחה כי רוצים לממש נגד באמצעות המצע בלבד, ואותו יש לחבר להתנגדות חיצונית נוספת (הם יהיו מחוברים ע"י שכבת מבודדת כך שמטענים לא יכולים לעבור מחומר אחד לשני), לאלו תכונות של המצע יש להתייחס ומדוע? תאר סכמתית את המקרה המדובר.
- ה. מנתקים את פני הפרוסה מההתקן ומממשים באמצעותה נגד שצורתו מופיעה בתרשים הבא. בקצוות הנגד ישנם מגעים אוהמים משולמים (כלומר, התנגדותם אפסית ואפשר להתעלם מהן). חשב את ההתנגדות של משטח זה.



10 מתכת ופיסת סיליקון נמצאות בטמפרטורת החדר.

ידוע כי ריכוזי האלקטרונים בכל חומר הוא:

מתכת: $n = 4 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$, פיסת סיליקון: $n = 8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

זמן הרלקסציה שנמדד במתכת הוא $\tau_m = 7 \cdot 10^{-15} \text{ sec}$ ובפיסת הסיליקון הוא: $\tau_{Si} = 10^{-13} \text{ sec}$.

א. (1) הוכיחו את הקשר: $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m_e} [\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}]$

(כאשר: $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ו- $m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ Kg}$).

(2) מהי המוליכות החשמלית של כל חומר?

ב. מצאו את השדה החשמלי שיש להפעיל על כל חומר על מנת לקבל

צפיפות זרם חשמלי של: $J = \frac{1}{2} \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$?

ג. מה תהיה מהירות הסחיפה של האלקטרונים עבור זרם זה?

ד. מה ניתן לומר על התכונות החשמליות של כל חומר ביחס לשני?

תשובות סופיות:

- (1) א. P-Type . ב. $v_{p,drift} = 3 \cdot 10^6 \frac{cm}{sec}$, $v_{n,drift} = -8.75 \cdot 10^6 \frac{cm}{sec}$. ג. הזרם הכללי: $J = J_p = 4816 \frac{A}{cm^2}$. $\epsilon_{sat(p)} = 23.25 \frac{kV}{cm}$, $\epsilon_{sat(n)} = 8 \frac{kV}{cm}$.
- (2) א. $\epsilon_{sat(p)} = 48 \frac{kV}{cm}$, $\epsilon_{sat(n)} = 2.4 \frac{kV}{cm}$.
- (3) א. $J_{n,diffusion} = -38.4 e^{-\frac{x}{5\mu m}} \frac{A}{cm^2}$. נגד כיוון הגרדיאנט. ב. ראה סרטוט בסרטון הוידאו.
- (4) א. $D_n = 6.5 \frac{cm^2}{sec}$, $v_{drift} = 10^4 \frac{cm}{sec}$. ב. $D_n = 8.66 \frac{cm^2}{sec}$.
- (5) א. $\sigma_1 = 90 mS$, $\sigma_2 = 94 mS$. ב. $\mu_p = 250 \frac{cm^2}{V \cdot sec}$. ג. $D_n = 6.5 \frac{cm^2}{sec}$.
- (6) א. $J_{diffusion} = 27.816 \frac{A}{cm^2}$.
- (7) א. $\epsilon(x) = \frac{kT}{q} \alpha$. ב. $\epsilon(x) = \frac{kT}{q} d \ln \left(\frac{N_0}{\bar{n}_o} \right)$.
- כאשר \bar{n}_o הוא הריכוז המינימלי שעבורו ניתן להניח כי החומר עדיין מסוג N.

תשובות לשאלות מסכמות:

- (8) א. $n = 10^{17} cm^{-3}$, $p = 10^3 cm^{-3}$. ב. $\rho = 89.28 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot cm$. ג. $R_{\square} = 17.856 \Omega / sq.$. ד. $R = 214.27 \Omega$. ה. $R = 252.12 \Omega$.
- (9) א. המצע - סוג P : $n = 3.3 \cdot 10^5 cm^{-3}$, $p = 3 \cdot 10^{14} cm^{-3}$. ב. $R_{\square}(As) = 19.53 \Omega / sq.$. ג. ראה נימוק מלא בסרטון הוידאו. ד. ראה תיאור סכמתי והסבר בסרטון הוידאו. ה. $R = 1235 \Omega$.
- (10) א. (1) ראה הוכחה בסרטון הוידאו. א. (2) $\sigma_{Si} = 2.248 \Omega^{-1} cm^{-1}$, $\sigma_{Metal} = 7.877 \cdot 10^4 \Omega^{-1} cm^{-1}$. ב. $\epsilon_{Metal} = 6.34 \cdot 10^{-6} V cm^{-1}$, $\epsilon_{Si} = 0.22 V cm^{-1}$. ג. $v_{drift,Metal} = 7.8 \cdot 10^{-9} \frac{cm}{sec}$, $v_{drift,Si} = 3.85 \cdot 10^{-3} \frac{cm}{sec}$. ד. זמן רלקסציה גדול מוביל למוביליות ומוליכות טובים יותר. אצלנו לסיליקון תכונות חשמליות טובות יותר בהשוואה למתכת. לעומת זאת, בסיליקון יש צורך בשדה חשמלי גדול יותר על מנת לקבל את אותו הזרם כמו במתכת.

גרף מוביליות ודיפיוזיביות (בטמפרטורת החדר):

