

תוכן העניינים:

2	פרק 1
2	אלקטרונים וחורים במוליכים למחצה
2	כללי:
2	סיכום כללי:
11	שאלות:
15	תשובות סופיות:
16	השפעת הטמפרטורה על ריכוז נושאי המטען:
16	סיכום כללי:
18	שאלות:
19	תשובות סופיות:

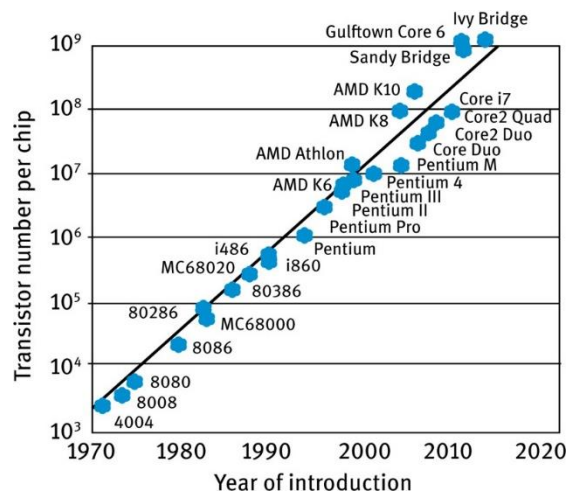
פרק 1

אלקטרוניקה וחורים במוליכים למחצה

כללי:

סיכום כללי:

חוק מור (Moore's Law):



סוגי חומרים בטבע:

מוליכים:

חומרים שבהם אלקטרוניקה חופשיים אשר מסוגלים לנוע בחופשיות לאורך החומר.

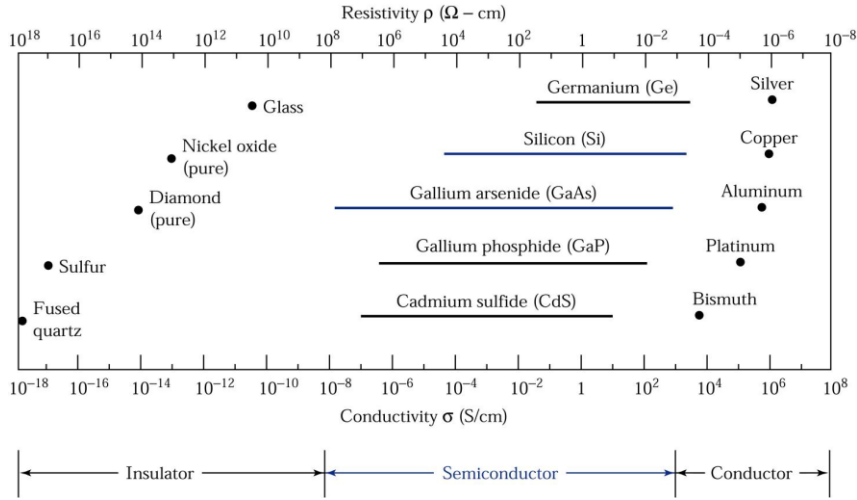
מבודדים:

חומרים שבהם האלקטרוניקה קשורים לאטומים שלהם ולא מסוגלים לנוע כלל לאורך החומר.

מוליכים למחצה:

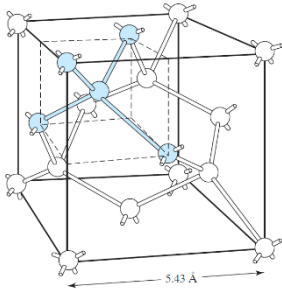
חומרים שבהם נדרש להשקיע אנרגיה על מנת לשחרר אלקטרוניקה כדי שינועו לאורך החומר.

גרף ההתנגדות והמוליכות החשמלית של חומרים וסיווגם:



אטום הסיליקון ומבנה גביש הסיליקון:

תא יחידה (Unit Cell) הינו מבנה של גביש סיליקון אשר נצפה ע"י X-rays.



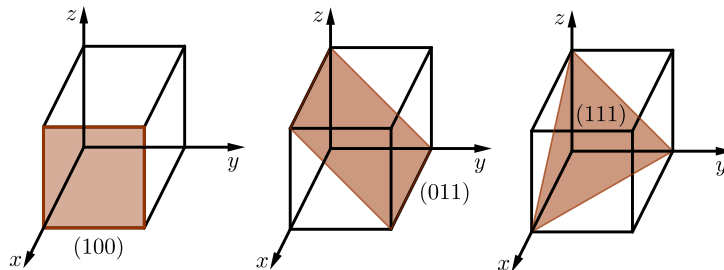
לצורת המבנה קוראים "מבנה יהלומי" (Diamond Structure).

כל אטום סיליקון מחובר ל-4 אטומים שכנים שלו.

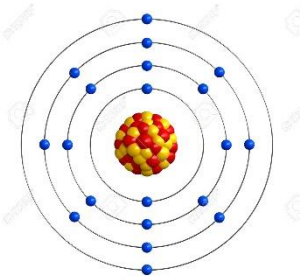
משטחי חיתוך:

גביש הסיליקון מגיב באופן שונה לאופן שבו חותכים אותו. הדבר משפיע על הזרמים שבו וכן על תכונות חשמליות נוספות.

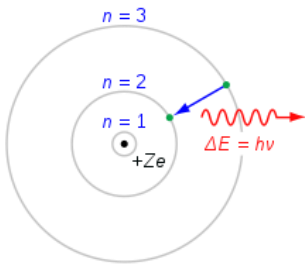
בתהליך הגידול והייצור של הסיליקון, מקפידים על חיתוך הסיליקון לפי מישורים הקובעים את כיווניות הגביש. האינדקסים של מילר (Miller Indices) מתארים את מישור החיתוך אשר זרימת אלקטרונים מאונכת לו.



סידור אלקטרוניים באטום (כללי):



מבנה האלקטרוניים באטום קובע את תכונותיו הכימיות ואופן ההתחברות שלו לאטומים אחרים ליצירת מולקולות. אלקטרוניים חגים סביב גרעין האטום במסלולים הנקראים **אורביטלים**. פונקציה אשר מתארת את ההסתברות למצוא אלקטרון בנקודה מסוימת (אזור מסוים) נקראת **פונקצית הגל**. האורביטלים מסודרים ברמות אנרגיה בדידות, כאשר כל אחד יכול לאכלס כמות אלקטרוניים שונה על פי סדר מסוים.



$$E_n = -\frac{13.6}{n^2} \text{ [eV]} : \text{ (לפי מודל בוהר)}$$

האנרגיה שנבלעת או נפלטת ממעברים של אלקטרוניים לרמות אנרגיה שונות מגיעה במנות קצובות התלויות בתדר הקרינה f .

$$E = hf = h \frac{\omega}{2\pi} = \hbar \omega : \text{ כותבים את אנרגיה זו}$$

כאשר $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ [J} \cdot \text{sec]} = 4.1357 \cdot 10^{-15} \text{ [eV} \cdot \text{sec]}$ נקרא **קבוע פלנק**.

כמו כן: $\hbar = 1.054 \cdot 10^{-34} \text{ [J} \cdot \text{sec]} = 6.582 \cdot 10^{-16} \text{ [eV} \cdot \text{sec]}$.

עיקרון אי הודאות:

היות ולא ניתן למצוא אלקטרון בזמן נקודתי במיקום מסוים ובעל תנע מסוים יחדיו, אלא ידיעת גודל אחד 'מקריסה' את האחר, קבוע פלנק משמש כחסם תחתון למכפלתם: $(\Delta x)(\Delta p) \geq \hbar$. לחסם זה קוראים בשם עיקרון אי הודאות של אייזנברג.

(ניתן גם לכתוב עבור אנרגיה בפרק זמן: $(\Delta E)(\Delta t) \geq \hbar$).

רמות האנרגיה באטום:

בוהר הגדיר מספר סוגי אורביטלים אפשריים שנצפים בכל רמת אנרגיה.

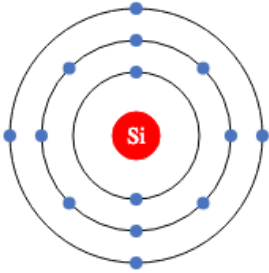
- ברמת האנרגיה הראשונה קיים אורביטל אחד, s , אשר מכיל 2 אלקטרוניים.
- ברמת האנרגיה השנייה יש אורביטל אחד מסוג s ושלושה אורביטלים מסוג p .
- ברמת האנרגיה השלישית יש אורביטל אחד מסוג s , שלושה מסוג p וחמישה מסוג d .
- ברמת האנרגיה הרביעית יש אורביטלים מסוגים s, p, d, f .

רמת האנרגיה האחרונה אשר קשורה לגרעין האטום נקראת **שכבת הערכיות**

של האטום (Valence Shell).

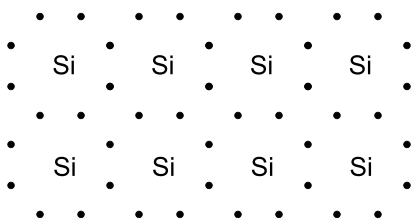
אלקטרון שעוזב את שכבת הערכיות משתחרר מהאטום וחופשי לנוע לאורך הגביש.

- אלקטרון שנמצא בשכבת הערכיות נקרא **אלקטרון-ערכיות** (Valence Electron).
- אלקטרון שעזב את שכבת הערכיות וחופשי לנוע לאורך סריג נקרא **אלקטרון-הולכה** (Conduction Electron).



לאטומים תהיה נטייה להיקשר לאטומים אחרים (מאותו הסוג או לא) לפי כמות האלקטרונים שנמצאים בשכבת הערכיות שלהם:

- אטומים עם 8 אלקטרונים בשכבת הערכיות נחשבים אצילים ולא יגיבו כימית כלל עם אטומים אחרים.
- אטומים ללא 8 אלקטרונים יחפשו 'שכנים' כך שבחיבור שלהם הם ישתפו אלקטרונים ליצירת שכבת ערכיות שלמה.



מודל ההיקשרות של אלקטרונים וחורים:

נתאר את גביש הסיליקון באופן דו מימדי:

לקשר שנוצר בין אטומי הסיליקון קוראים **קשר קוולנטי** (covalent bond המשמעות: שכבת ערכיות משותפת).

באפס מוחלט אין אלקטרונים אשר חופשיים לנוע לאורך הסריג אולם בטמפרטורת החדר, חלק מהאלקטרונים ישתחררו וייצרו זרם.

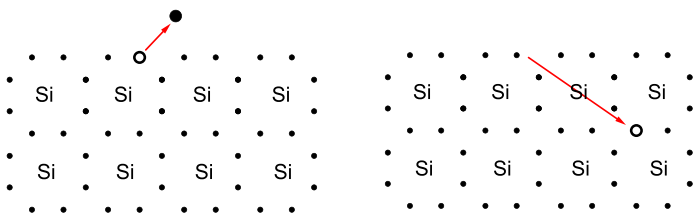
אלקטרון (Electron) וחור (Hole):

חור הוא היעדר אלקטרון.

לחור מטען חיובי.

נתייחס לחורים כאל ישויות

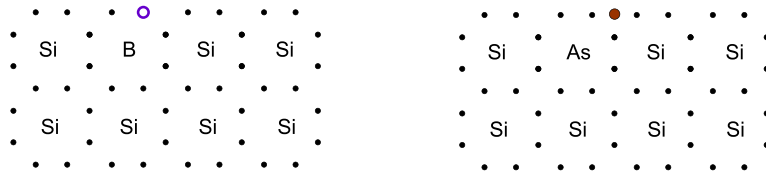
שמסוגלות לנוע לאורך הסריג.



זיהום/אילוח (doping):

כדי להעצים את כמות נושאי המטען (החיוביים והשליליים) נעזר בתהליך שנקרא זיהום (או סימום/אילוח), באנגלית Doping.

- תורמים Donors. אלו חומרים מסוג N-type. כמו As או P.
- מקבלים Acceptors. אלו חומרים מסוג P-Type. כמו Boron או In או Al.



שיערוכי אנרגיות יינון:

שיערוך האנרגיה הנדרשת לשיחרור של אלקטרון מתורם (תהליך יינון) מתבצעת ע"י

$$E_{\text{ion}} = \frac{m_0 q^4}{8 \epsilon_0^2 h^2} = 13.6 \text{ eV} : \text{ לקיחת הביטוי לאנרגית יינון של אטום המימן}$$

כאשר:

m_0 היא המסה של אלקטרון חופשי.

ϵ_0 הוא מקדם הפרימיטיביות של ריק.

h הוא קבוע פלאנק.

נחליף: $m_0 \rightarrow m_n$ ו- $\epsilon_0 \rightarrow 12\epsilon_0$ ונקבל את הערך המקורב: $E_{\text{ion}} \approx 50 \text{ meV}$.

נקבל כי על כל אטום ליחידת נפח משתחרר אלקטרון אחד, כלומר חומר מסוג 'תורם' עם 10^{20} אטומים ליחידת נפח (10^{20} cm^{-3}) ישחרר 10^{20} אלקטרונים ליחידת נפח!

מסה אפקטיבית:

בהשפעת שדה חשמלי, ξ , האלקטרון והחור יחוו תאוצה לפי החוק השני של ניוטון כך:

$$a_e = -\frac{q\xi}{m_n} ; a_h = \frac{q\xi}{m_p}$$

כאשר: m_n, m_p הן מסות אפקטיביות של אלקטרון וחור.

נגיד את המסות האפקטיביות באופן הבא: $\text{effective mass} = \frac{\hbar^2}{d^2 E / dk^2}$

כאשר k הוא מספר הגל ו- E היא האנרגיה של אלקטרון. אלו מתקבלים ממשוואת שרדינגר ופתרונה הכללי.

צפיפות מצבים:

ניקח תחום רמות אנרגיה ΔE בשכבת ההולכה ונוכל להגדיר צפיפות מצבים באופן

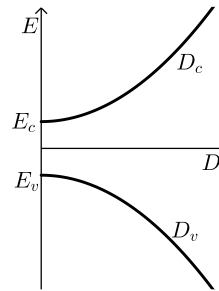
$$D_c(E) = \frac{\text{number of states in } \Delta E}{\Delta E \cdot \text{volume}} \quad \text{הבא:}$$

(באותו האופן נוכל להגדיר צפיפות מצבים בשכבת הערכיות: $D_v(E) = \frac{\text{number of states in } \Delta E}{\Delta E \cdot \text{volume}}$.)

מחישוב מקבלים את הקשרים הבאים:

$$D_c(E) = \frac{8\pi m_n \sqrt{2m_n(E - E_c)}}{h^3} \quad E \geq E_c$$

$$D_v(E) = \frac{8\pi m_p \sqrt{2m_p(E_v - E)}}{h^3} \quad E \leq E_v$$



צפיפות המצבים היא ביחידות של מצבי אנרגיה ליחידת נפח

(ניתן לכתוב: $\frac{1}{\text{cm}^3 \cdot \text{eV}}$), ולכן $D_c(E)dE$, $D_v(E)dE$ מתארים את מספר רמות

האנרגיה ליחידת נפח בין E ל- $E + dE$.

שיווי משקל תרמי ופונקצית פרמי:

פונקצית ההתפלגות של פרמי-דיראק (Fermi-Dirac Distribution Function)

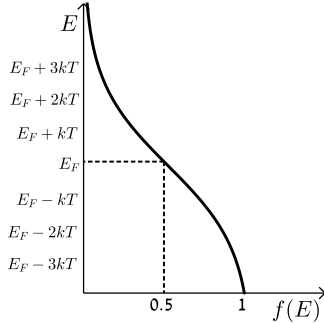
$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/kT}} \quad \text{הבא:}$$

זו היא פונקציה המתארת את הסיכוי (ההסתברות) למצוא אלקטרון ברמת אנרגיה E כלשהי כאשר E_F היא אנרגיית פרמי.

עבור רמות אנרגיה גבוהות $E - E_F \gg kT$ נוכל לקרב: $f(E) \approx e^{-(E-E_F)/kT}$ (קירוב בולצמן).

עבור רמות אנרגיה נמוכות $E - E_F \ll kT$ נוכל לקרב: $f(E) \approx 1 - e^{-(E-E_F)/kT}$.

עבור חורים מקבלים את ההיפך: $1 - f(E) \approx e^{-(E-E_F)/kT}$.



ריכוז אלקטרונים וחורים:

$D_c(E)dE$ מתאר את מספר רמות האנרגיה ליחידת נפח בין E ל- $E + dE$.

המכפלה $f(E) \cdot D_c(E) \cdot dE$ מתארת את מספר האלקטרונים בין הרמות הנ"ל ליחיד נפח.

מספר האלקטרונים ליחידת נפח מוגדר: $n = \int_{E_c}^{\text{Top of conduction band}} f(E) \cdot D_c(E) \cdot dE$

כאשר נפתח את האינטגרל נקבל: $n = N_c e^{-(E_c - E_F)/kT}$ כאשר: $N_c \equiv 2 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{3/2}$

N_c נקרא הצפיפות האפקטיבית של המצבים (Effective Density of States).

באופן דומה נגדיר את צפיפות החורים: $p = \int_{-\infty}^{E_v} f(E) \cdot D_v(E) \cdot dE$

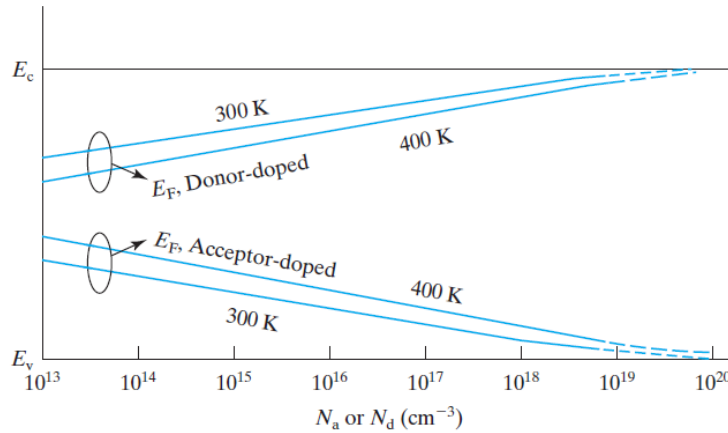
נקבל את התוצאה הבאה: $p = N_v e^{-(E_F - E_v)/kT}$ כאשר: $N_v \equiv 2 \left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2} \right)^{3/2}$

נבחין כי N_v ו- N_c שונים רק בגלל המסות האפקטיביות.

בגדול הן בסדר גודל של 10^{19} cm^{-3} אלקטרונים (ליחידת נפח).

הערכים האלה משתנים מחומר לחומר.

הקשר שבין רמת פרמי וריכוז נושאי המטען:



נוכחות של מזהם:

- בהינתן מזהם שהוא 'תורם' (Donor) נקבל צפיפות אלקטרונים הגדולה משמעותית מצפיפות החורים.
החומר הוא N-Type ונאמר כי האלקטרונים הם **נושאי מטען הרוב** (Majority carriers) והחורים הם **נושאי מטען המיעוט** (Minority carriers).
- בהינתן מזהם שהוא 'מקבלי' (Acceptor) צפיפות החורים הגדולה משמעותית מצפיפות האלקטרונים.
החומר הוא P-Type ונאמר כי החורים הם **נושאי מטען הרוב** (Majority carriers) והאלקטרונים הם **נושאי מטען המיעוט** (Minority carriers).

הגדרות חומרים:

- **חומר אינטרינסי:**
חומר שאינו מזוהם (או שמזוהם ומקיים: $N_a = N_d$) ובו תמיד מתקיים: $n = p = n_i$.
- **חומר מסוג N-Type:**
חומר המזוהם בתורמים (N_d), או בתורמים ומקבלים כך שמתקיים $N_d > N_a$.
- **חומר מסוג P-Type:**
חומר המזוהם במקבלים (N_a), או בתורמים ומקבלים כך שמתקיים $N_a > N_d$.

משוואות:

עבור כל חומר תמיד מתקיים: $np = n_i^2$.

בהינתן זיהום של תורמים/אקספטורים או שניהם:

(1) אם: $N_d - N_a \gg n_i$ (חומר מסוג N-Type) אז: $n = N_d - N_a$; $p = n_i^2 / n$

יתרה מכך, אם מתקיים: $N_d \gg N_a$ אז: $n = N_d$; $p = n_i^2 / N_d$

(2) אם: $N_a - N_d \gg n_i$ (חומר מסוג P-Type) אז: $p = N_a - N_d$; $n = n_i^2 / p$

יתרה מכך, אם מתקיים: $N_a \gg N_d$ אז: $p = N_a$; $n = n_i^2 / N_a$

נאמר כי ריכוז הזיהום (N_d או N_a) גדול משמעותית מהריכוז האינטרינזי n_i אם הוא גדול ממנו בשני סדרי גודל לפחות. במידה וריכוזי הזיהומים אינם גדולים בשני סדרי גודל, יש לחשב את ריכוזי נושאי המטען לפי הנוסחאות המלאות (ללא הקירוב):

$$n = \frac{N_d - N_a}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_d - N_a}{2}\right)^2 + n_i^2}$$

$$p = \frac{N_a - N_d}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_a - N_d}{2}\right)^2 + n_i^2}$$

נוסחאות של רמות פרמי:

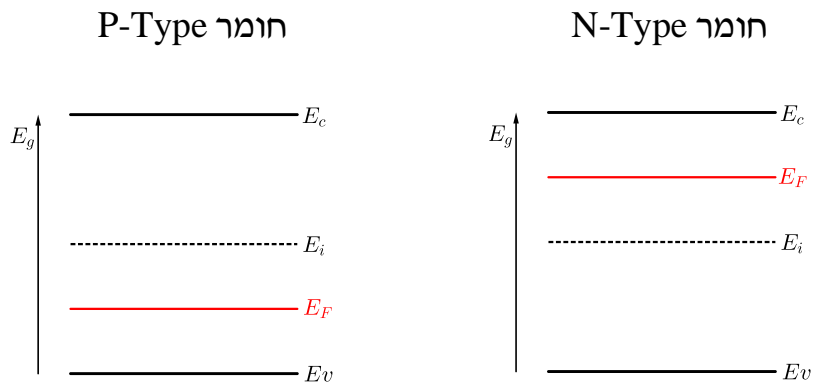
נוסחאות עבור נושאי מטען הרוב:

Type	Relation	Simplification
N-Type	$n = N_c e^{-(E_c - E_F)/kT}$	$E_c - E_F = kT \cdot \ln\left(\frac{N_c}{n}\right)$
P-Type	$p = N_v e^{-(E_F - E_v)/kT}$	$E_F - E_v = kT \cdot \ln\left(\frac{N_v}{p}\right)$

נוסחאות עבור הריכוז האינטרינסי:

Type	Relation	Simplification
N-Type	$n_i = n \cdot e^{-(E_F - E_i)/kT}$	$E_F - E_i = kT \cdot \ln\left(\frac{n}{n_i}\right)$
P-Type	$n_i = p \cdot e^{-(E_i - E_F)/kT}$	$E_i - E_F = kT \cdot \ln\left(\frac{p}{n_i}\right)$

תיאור רמות אנרגיה:



הערות:

- (1) הגודל kT בטמפרטורת החדר (כלומר: $T = 300^\circ\text{K}$) הוא 26 meV .
- (2) ניתן לבודד את k מהקשר: $kT|_{T=300^\circ\text{K}} = 0.026$ ולקבל: $k \approx 8.66 \cdot 10^{-5} \left[\frac{\text{eV}}{^\circ\text{K}} \right]$.

ריכוזים שונים:

מגדירים את הריכוז האינטרינסי: $n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{-E_g/2kT}$.

כאשר: $N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2} \right)^{3/2}$ ו- $N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{3/2}$.

ריכוזי מצבים אפקטיביים בטמפרטורת החדר ($T = 300^\circ\text{K}$):

	Ge	Si	GaAs
$N_c \text{ [cm}^{-3}\text{]}$	$1.04 \cdot 10^{19}$	$2.8 \cdot 10^{19}$	$4.7 \cdot 10^{17}$
$N_v \text{ [cm}^{-3}\text{]}$	$6 \cdot 10^{18}$	$1.04 \cdot 10^{19}$	$7 \cdot 10^{18}$

אנרגית ה-band-gap והריכוז האינטרינסי בטמפרטורת החדר ($T = 300^\circ\text{K}$):

	Ge	Si	GaAs
$E_g \text{ [eV]}$	0.67	1.12	1.42
$n_i \text{ [cm}^{-3}\text{]}$	$2 \cdot 10^{13}$	10^{10}	$2.1 \cdot 10^6$

שאלות:

(1) נתונה פיסת סיליקון המזוהמת באקספטורים בזיהום של $N_a = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$.

א. מה הוא ריכוז האלקטרונים (n) ומה הוא ריכוז החורים (p) בטמפרטורת החדר?

ב. מה הוא ריכוז התורמים (Donors) שיש להוסיף כדי להקטין את ריכוז החורים ל-90%?

(2) נתונה פיסת סיליקון המזוהמת באקספטורים בזיהום של $N_a = 4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

מוסיפים דונרים בריכוז של $N_d = 5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ לאזור מסוים.

א. מה הוא סוג האזור (n-Type או p-Type)?

ב. מה הוא ריכוז החורים p [cm^{-3}] באזור זה?

ג. מה הוא ריכוז האלקטרונים n [cm^{-3}] באזור זה?

(3) נתונה פיסת סיליקון שמזוהמת בדונרים עם $N_d = 8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

מוסיפים אקספטורים בריכוז של $N_a = 3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ לאזור מסוים.

א. איזה מהמטענים הוא נושא מטען הרוב (majority charge carriers)?

ב. מה הוא ריכוז האלקטרונים n [cm^{-3}] באזור זה?

ג. מה הוא ריכוז החורים p [cm^{-3}] באזור זה?

(4) נתונה פיסת סיליקון בטמפרטורת החדר.

מחממים את הפיסה לטמפרטורה T כלשהי.

כתוב את הקשר שבין $n_i(300^\circ\text{K})$ לבין $n_i(T^\circ\text{K})$.

(הנח כי E_g והמסות האפקטיביות נשארות קבועות בתחום הטמפרטורה T).

(5) נתונה פיסת סיליקון המזוהמת באטומי As בריכוז של 10^{17} cm^{-3} בטמפרטורת החדר.

א. חשב את ריכוז נושאי מטען הרוב ונושאי מטען המיעוט.

ב. חשב את רמת פרמי וצייר את מודל פסי האנרגיה.

ג. כיצד תשתנה רמת פרמי אם הטמפרטורה עולה ל- 400°K ?

(הנח כי E_g והמסות האפקטיביות אינן משתנות).

ד. כיצד תשתנה רמת פרמי אם מקטינים את ריכוז אטומי ה-As ל- 10^{15} cm^{-3} ?

(לא מחממים את הפיסה אלא היא נשארת בטמפרטורת החדר).

6) חשב את רמת פרמי (כלומר, אנרגיית פרמי E_F) בכל אחד מהמקרים הבאים:

- א. פיסת סיליקון Si יחסית ל- E_i עבור זיהום של $N_d = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.
- ב. פיסה של GaAs יחסית ל- E_i ויחסית ל- E_c עבור זיהום של $N_d = 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.
- ג. מטיל GaAs יחסית ל- E_i עבור זיהום של $N_a = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

הערה:

$$n_i(\text{GaAs}) \approx 2.25 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3} @ 300^\circ\text{K}$$

7) פיסת סיליקון בטמפרטורת החדר מכילה ריכוז אקספטורים של $N_a = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. מצא את ריכוז הדונרים שיש להוסיף על מנת שפיסת הסיליקון תהיה מסוג n-Type ואנרגיית פרמי תהיה 0.12eV מתחת לקצה פס ההולכה.

8) נתון מוליך למחצה כלשהו שבו: $n_i(300^\circ\text{K}) = 1.42 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ו- $E_g = 1.26\text{eV}$.

- א. בכל אחד מהמקרים הבאים, קבע את סוג החומר וכתוב ביטויים עבור ריכוז נושאי המטען החופשיים במל"מ זה בטמפרטורת החדר. הנח כי המל"מ מזהם ע"י דונרים ואקספטורים.
- i. $N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3} \gg N_a$
- ii. $N_a = 10^{16} \text{ cm}^{-3} \gg N_d$
- iii. $N_a = N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

ב. מצא את סוג החומר ואת ריכוז הזיהום שיש לזהם את מל"מ זה על מנת שבטמפרטורה של 450°K נקבל ריכוז של $3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ אלקטרונים בפס ההולכה. הנח כי E_g והמסות האפקטיביות אינן משתנות בטמפרטורה.

9) פיסת סיליקון בטמפרטורת החדר מזוהמת באופן אחיד באטומי בורון (B) בריכוז של $3 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ובאטומי זרחן (P) בריכוז של $5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. יש להניח כי כל המזהמים מיוניים. מה הוא ריכוז נושאי המטען בפיסה?

10) פיסת גרמניום (Ge) שרויה בטמפרטורה של 450°K ומזוהמת באופן אחיד באטומי זרחן (P) בריכוז של $4 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. מה הוא ריכוז נושאי המטען בפיסה? יש להניח כי כל המזהמים מיוניים. כמו כן, יש להיעזר בקבועים הבאים עבור גרמניום:

$$E_g = 0.67\text{eV}, \quad m_n = 0.55m_0, \quad m_p = 0.36m_0$$

- 11** מוליך למחצה אינטרינסי מקיים: $n = p = n_i$, כלומר: $E_c - E_F \approx E_F - E_v$.
 במקרה זה רמת פרמי נמצאת בקירוב במרכז פס האנרגיה, כלומר: $E_F \approx E_c - \frac{1}{2} E_g$.
 מגדירים את רמת אנרגיה זו בתור E_i - רמת האנרגיה האינטרינסי של החומר.
- א. הראה כי עבור מצב אינטרינסי מתקיים:

$$n_i = N_c \cdot \exp\left\{-\frac{E_c - E_i}{kT}\right\} = N_v \cdot \exp\left\{-\frac{E_i - E_v}{kT}\right\}$$
- ב. הראה כי: $E_i = E_c - \frac{E_g}{2} - kT \cdot \ln \sqrt{\frac{N_c}{N_v}}$
- ג. מזהמים את פיסת הסיליקון בזיהום אחיד $N_a \gg n_i$.
 הראה כי ניתן לבטא את p באופן הבא: $p = n_i \exp\left\{\frac{E_i - E_F}{kT}\right\}$
- ד. הסק על בסיס סעיף ג' כי בזיהום אחיד של: $N_d \gg n_i$ ניתן לבטא:

$$n = n_i \exp\left\{\frac{E_F - E_i}{kT}\right\}$$

- 12** ריכוז החורים בפיסת סיליקון השרויה בטמפרטורת החדר הוא: $p = 30 \cdot n_i$.
 מהי ההסתברות שרמת האנרגיה הנמוכה ביותר בפס ההולכה תהיה מאוכלסת ע"י אלקטרון?

תשובות סופיות:

- (1) א. $n = 10^6 \text{ cm}^{-3}$, $p = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. ב. $N_d = 10^{13} \text{ cm}^{-3}$.
- (2) א. p-Type . ב. $p = 3.95 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. ג. $n = 2.5 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}$.
- (3) א. n-Type . ב. $n = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. ג. $p = 2 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$.
- (4) $n_i(T^\circ\text{K}) = 10^{10} \left(\frac{T}{300} \right)^{1.5} \cdot \exp \left\{ 21.58 - \frac{6461}{T} \right\}$.
- (5) א. $n = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $p = 10^3 \text{ cm}^{-3}$. ב. $E_c - E_F = 0.146 \text{ eV}$.
- (6) א. $E_F - E_i = 0.4 \text{ eV}$. ג. $E_c - E_F = 0.21 \text{ eV}$.
- (7) א. $N_d = 3.77 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. ב. $E_c - E_F = 0.022 \text{ eV}$, $E_F - E_i = 0.056 \text{ eV}$, $E_i - E_F = 0.098 \text{ eV}$. ג. $E_i - E_F = 0.098 \text{ eV}$.
- (8) א. i. N-Type: $n = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $p = 2.016 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}$. ii. P-Type: $p = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $n = 2.016 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}$. iii. אינטרנינסי: $p = n = n_i = 1.42 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.
- (9) א. סוג P-Type ו- $N_a = 2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. ב. $n = 2.41 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$; $p = 4.14 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$.
- (10) א. $n = 4.01 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; $p = 1.58 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$.
- (11) שאלת הוכחה.
- (12) $\text{Pr} = 1.475 \cdot 10^{-11}$.

השפעת הטמפרטורה על ריכוז נושאי המטען:

סיכום כללי:

חזרה כללית על נוסחאות ריכוז נושאי המטען:

נוסחה למציאת ריכוז נושאי המטען של חומר אינטרינסי בתלות בטמפרטורה:

$$n_i(T) = 2 \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^{3/2} \cdot (m_p \cdot m_n)^{3/4} \exp \left\{ -\frac{E_g}{2kT} \right\}$$

כאשר הטמפרטורה T מוגדרת במעלות קלווין ($[T] = ^\circ\text{K}$).

במידה ויש להציג את הטמפרטורה במעלות צלזיוס ניעזר בהמרה: $T(^{\circ}\text{C}) = T(^{\circ}\text{K}) - 273.15$.

כדי למצוא ביטוי לריכוז האינטרינסי של חומר בטמפרטורה T השונה מטמפרטורת החדר נעזר בנוסחה הבאה:

$$n_i(T) = n_i(300^{\circ}\text{K}) \cdot \left(\frac{T}{300} \right)^{3/2} \cdot \exp \left\{ -\frac{E_g}{2k \cdot 300} \left(1 - \frac{300}{T} \right) \right\}$$

הצגה גרפית של ריכוז נושאי המטען:

נעזר בתלות הליניארית של גרף $\ln(n_i)$ כתלות ב- $\frac{1000}{T}$ על מנת למצוא מידע הקשור למוליכים למחצה טהורים עם E_g "גדול" (כגון סיליקון):

$$\ln(n_i(T)) = -\frac{E_g}{2000k} \frac{1000}{T} + \left(\ln(n_i(300^{\circ}\text{K})) + \frac{E_g}{600k} \right)$$

נעזר בתלות הליניארית של גרף $\ln(n_i)$ כתלות ב- $\frac{300}{T}$ על מנת למצוא מידע הקשור למוליכים למחצה טהורים עם E_g "קטן" (כגון גרמניום):

$$\ln(n_i(T)) = -\left(\frac{3}{2} + \frac{E_g}{2k \cdot 300} \right) \frac{300}{T} + \left(\ln(n_i(300^{\circ}\text{K})) + \frac{3}{2} + \frac{E_g}{2k \cdot 300} \right)$$

מסקנות מיידידות:

- ככל שהשיפוע קיצוני יותר E_g גדול יותר.
- בטמפרטורות נמוכות, חומרים עם E_g גדול יכילו פחות אלקטרונים בשכבת ההולכה ולכן הריכוז האינטרינסי יהיה קטן יותר מאשר חומרים שבהם E_g קטן יותר.
- בטמפרטורות גבוהות הריכוז גדל כמעט ללא תלות ב- E_g .

תלות ריכוז נושאי מטען הרוב והמיעוט במוליך למחצה מזוהם:

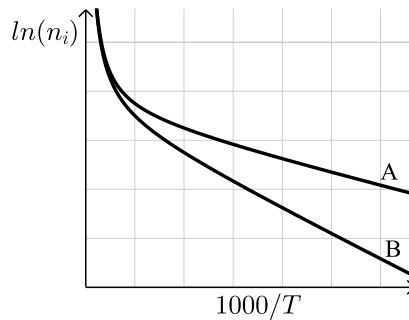
חומר אינטרינסי הינו מוליך למחצה שאינו כולל זיהום (טהור) בעוד שחומר אקסטרינסי הינו מוליך למחצה שעבר זיהום.

- באפס מוחלט אין אנרגיה תרמית ליינון של האטומים המזהמים.
- ככל שעולים עם הטמפרטורה, יותר אטומים מתייננים ולכן ריכוז נושאי המטען גדל.
- החל מטמפרטורה מסוימת, כל אטומי המזהם מיוניים ובתחום טמפרטורות זה ריכוז הוא קבוע. בהנחה והמזהם גדול בלפחות שני סדרי גודל מהריכוז האינטרינסי, נאמר כי ריכוז הפיסה הוא כפי של המזהם. אנו נמצאים בתחום טמפרטורות בהן החומר הוא אקסטרינסי.
- בטמפרטורות גבוהות יותר, נושאי מטען המיעוט גדלים. במקרה זה מתקבל: $n = p = n_i(T)$ ולכן נאמר כי החומר מתנהג כחומר אינטרינסי. בשונה מחומר אינטרינסי, המוליכות של הפיסה כעת תהיה גדולה יותר (יש יותר מטענים ניידים).

שאלות:

- (1) נתונה פיסת סיליקון בטמפרטורת החדר. מחממים את הפיסה לטמפרטורה T כלשהי וידוע כי $n_i(T) = 7.2 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ (כאשר T נמדד ב- $^{\circ}\text{K}$). מצא את T במעלות צלזיוס ($^{\circ}\text{C}$).

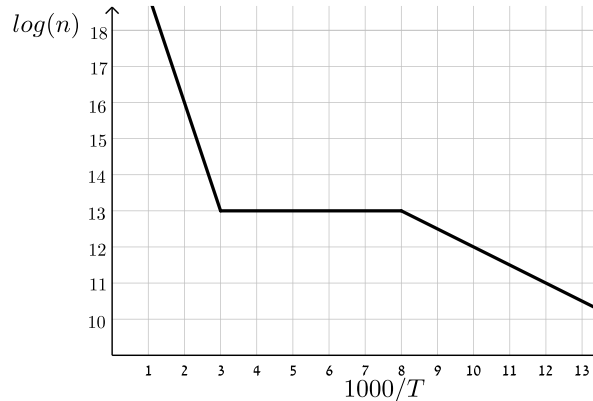
- (2) נתונים שני חומרים A ו-B. מבצעים ניסוי ומחממים אותם בטמפרטורות שונות. מציינים גרף של $\ln(n_i)$ כפונקציה של $1000/T$ כמתואר להלן:



- א. על בסיס הממצאים, באיזה מן החומרים E_g קטן יותר?
 ב. מה ניתן לומר על ריכוז נושאי המטען בחומר אחד ביחס לשני לאור תשובתך מסעיף א'?
- (3) פי כמה יגדל ריכוז נושאי המטען של פיסת סיליקון טהורה שנמצאת בטמפרטורת החדר אם מחממים אותה לטמפרטורה של 200 מעלות צלזיוס? הנח: $n_i(300^{\circ}\text{K}) = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

- (4) נתונות שתי פיסות: סיליקון טהור וגרמניום טהור. עבור סיליקון (Si) נתון: $E_g = 1.12\text{eV}$, $m_n = 1.18m_e$, $m_p = 0.81m_e$. עבור גרמניום (Ge) נתון: $E_g = 0.67\text{eV}$, $m_n = 0.55m_e$, $m_p = 0.36m_e$. כאשר: m_e היא המסה האלמנטרית של אלקטרון חופשי.
- א. מחממים את שני החומרים לטמפרטורה של 80 מעלות צלזיוס. באיזו פיסה יהיה ריכוז נושאי המטען בטמפרטורות הנתונות גדול יותר?
 ב. האם הדבר נכון גם כאשר פיסת הסיליקון תחומם לטמפרטורה של 180 מעלות צלזיוס ופיסת הגרמניום תהיה בטמפרטורת החדר?

5 נתון גרף של ריכוז האלקטרונים בתלות בטמפרטורה של פיסת מוליך למחצה.



- א. מהו ריכוז האלקטרונים וריכוז החורים בטמפרטורה של 250°K ?
 ב. מהו ריכוז האלקטרונים וריכוז החורים בטמפרטורה של 500°K ?
 ג. באיזו טמפרטורה 10% מהתורמים מיוננים?
 ד. מאיזו טמפרטורה ניתן להניח כי כל התורמים מיוננים?
 ה. מאיזו טמפרטורה ניתן להניח כי הפיסה מתנהגת כחומר אינטרינסי?

תשובות סופיות:

- (1) $T = 330.3^{\circ}\text{K} = 57.18^{\circ}\text{C}$
 (2) א. בחומר A, $(E_g(A) < E_g(B))$
 ב. בחומר A יימצאו יותר אלקטרונים בשכבת ההולכה כתוצאה מיינון בהשוואה לחומר B מכיוון ש- E_g שלו קטן יותר משל חומר B.
 (3) פי 2584 (או בעיגול גס, כ-2500).
 (4) א. בגרמניום יהיה ריכוז גודל פי 2000 מאשר בסיליקון.
 ב. בסיליקון יהיה ריכוז הגדול פי 1.5 מאשר בגרמניום.
 (5) א. $n = 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $p = 10^7 \text{ cm}^{-3}$
 ב. $n = p = n_i = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
 ג. 100°K ד. 125°K ה. 333.3°K