תוכן העניינים:

יסודות התקני מוליכים למחצה

משוואת הרציפות

כללי:

סיכום כללי:

גנרציה (Generation):
באפס מוחלט ($T = 0°\mathrm{K}$) כל האלקטרונים קשורים לאטומי הסיליקון.
בטמפרטורות גבוהות יותר, יש לאלקטרון מספיק אנרגיה כדי לעזוב את האטום אליו הוא קשור. עזיבת האלקטרון משאירה חור בשכבת הערכיות.
לתהליך הזה קוראים גנרציה ובו נוצרים זוג אלקטרון-חור.

סוגי גנרציה:

- גנרציה תרמית ישירה (Direct Thermal: band-to-band)
- גנרציה תרמית לא ישירה (Indirect Thermal: R/G Center)
- גנרציה אופטית (Optical Generation)

ריקומבינציה (Recombination):

תהליך בו כאשר אלקטרון חופשי וחור חופשי נפגשים הם מבטלים זה את זה, כלומר חודלים מלהתקיים. האלקטרון חוזר לרמת האנרגיה שלו בתוך האטום והחור נעלם.

בדומה לגנרציה, ישנם שני סוגים של תהליכי ריקומבינציה:

- ריקומבינציה תרמית ישירה (Direct Thermal: band-to-band)
- ריקומבינציה תרמית לא ישירה (Indirect Thermal: R/G Center)

כל עוד המל"מ בשיווי משקל תרמי, והתהליכים היחידים שמתרחשים הם תרמיים, תמיד נקבל את הקשר: $n = p = n_i$.

גנרציה אופטית:

גנרציה הנובעת מהארה על פיסת מוליך למחצה.
נניח תדר קבוע ואנרגיה $h\nu$ קבועה.

עוצמת האור כשהולכים לעומק המוליך z נתונה ע״י: $\frac{dI}{dz}=-\alpha z$ והיא: $I(z)=I_0e^{-\alpha z}$.

מניחים שמספר זוגות האלקטרון-חור הנוצרים מההארה הוא פרופורציוני למספר הפוטונים וכמובן כי $h\nu>E_g$ על מנת שהגנרציה תתרחש.

לרוב נניח גנרציה קבועה ואז G_L הוא גודל קבוע: $G_L=\frac{G_0}{\alpha}\left(1-e^{-\alpha d}\right)$

אם מתרחשת הארה דרך פאה אחת או חריץ נקבל תלות במיקום: $G_L(x)$.

תהליכי גנרציה וריקומבינציה תרמיים:

נסמן ב- p_0 את ריכוז החורים במוליך למחצה כתוצאה מזיהום וב- p את סך הריכוז לאחר גנרציה. מתקיים: $p=p_0+\Delta p$ כאשר Δp מתאר את היווצרות החורים העודפים כתוצאה מגנרציה. מתקבלת המשוואה: $\frac{\partial p}{\partial t}=-\frac{\Delta p}{\tau_p}$

כאשר τ_p הוא זמן החיים של החורים (הזמן הממוצע עד שעוברים ריקומבינציה).

באותו אופן עבור אלקטרונים עודפים נקבל: $\frac{\partial n}{\partial t}=-\frac{\Delta n}{\tau_n}$.

עבור פיסה שאינה בשיווי משקל, המשוואה תלויה רק בשינוי של נושאי מטען המיעוט העודפים כאשר השינוי הזה יכול לנבוע מעירור הפיסה ע״י הארה, העלאת טמפרטורה וכו׳.

משוואת הרציפות הצורה הכללית:

משוואות הרציפות נכתבות עבור נושאי המטען המיעוט העודפים בפיסת מוליך למחצה.

- בחומר מסוג N נתעניין במשוואה עבור החורים.
- בחומר מסוג P נתעניין במשוואה עבור האלקטרונים.

המשוואות מתארות את קצב השינוי בריכוז נושאי מטען המיעוט העודפים כתלות בזמן (אגף שמאל) ובמיקום (ביטויים שבאגף ימין):

$$\text{N Type:}\quad \frac{\partial \Delta p}{\partial t}=G_L-\frac{\Delta p}{\tau_p}-\frac{1}{q}\frac{\partial}{\partial x}\left(q\mu_p\Delta p\xi-qD_p\frac{\partial \Delta p}{\partial x}\right)$$

$$\text{P Type:}\quad \frac{\partial \Delta n}{\partial t}=G_L-\frac{\Delta n}{\tau_n}-\frac{1}{q}\frac{\partial}{\partial x}\left(-q\mu_n\Delta n\xi+qD_n\frac{\partial \Delta n}{\partial x}\right)$$

כאשר:

- הגודל G_L מתאר את השינוי בריכוז נושאי המטען בתוצאה מעירור כגון הארה.
- הגודל $\frac{\Delta n}{\tau_n}$ / $\frac{\Delta p}{\tau_p}$ מתאר את ביטול המטענים כתוצאה מריקומבינציה.
- המחוברים $-qD_p\frac{\partial \Delta p}{\partial x}$ ו- $q\mu_p\Delta p\xi$ מתארים את צפיפות הזרם כתוצאה מדיפוזיה ומסחיפה בהתאמה. (ואותו דבר עבור המשוואה השנייה עבור אלקטרונים).

מקרים פרטיים:

- במצב שיווי משקל מתקיים: $\frac{\partial \Delta p}{\partial t}=\frac{\partial \Delta n}{\partial t}=0$ ולכן המשוואות תיכתבנה:

$$\text{N Type:}\quad 0=G_L-\frac{\Delta p}{\tau_p}-\frac{1}{q}\frac{\partial}{\partial x}\left(q\mu_p\Delta p\xi-qD_p\frac{\partial \Delta p}{\partial x}\right)$$

$$\text{P Type:}\quad 0=G_L-\frac{\Delta n}{\tau_n}-\frac{1}{q}\frac{\partial}{\partial x}\left(-q\mu_n\Delta n\xi+qD_n\frac{\partial \Delta n}{\partial x}\right)$$

- בנוסף אם אין שדה חשמלי $(\xi=0)$ נכתוב:

$$\text{N Type:}\quad 0=G_L-\frac{\Delta p}{\tau_p}+D_p\frac{\partial^2 \Delta p}{\partial x^2}$$

$$\text{P Type:}\quad 0=G_L-\frac{\Delta n}{\tau_n}-D_n\frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2}$$

- בנוסף אם אין עירור חיצוני $(G_L = 0)$ נכתוב:

$$\text{N Type:}\quad 0 = -\frac{\Delta p}{\tau_p} + D_p \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial x^2}$$

$$\text{P Type:}\quad 0 = -\frac{\Delta n}{\tau_n} - D_n \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2}$$

- כאשר הפיסה אינה בשיווי משקל נתייחס למשוואות בצורתן הכללית.
- אם אין שדה חשמלי $(\xi = 0)$ נכתוב:

$$\text{N Type:}\quad \frac{\partial \Delta p}{\partial t} = G_L - \frac{\Delta p}{\tau_p} + D_p \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial x^2}$$

$$\text{P Type:}\quad \frac{\partial \Delta n}{\partial t} = G_L - \frac{\Delta n}{\tau_n} - D_n \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2}$$

- אם אין עירור חיצוני $(G_L = 0)$ נכתוב:

$$\text{N Type:}\quad \frac{\partial \Delta p}{\partial t} = -\frac{\Delta p}{\tau_p} + D_p \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial x^2}$$

$$\text{P Type:}\quad \frac{\partial \Delta n}{\partial t} = -\frac{\Delta n}{\tau_n} - D_n \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2}$$

אורך הדיפוזיה של נושאי מטען המיעוט העודפים:

במשוואה המנוונת $0 = -\frac{\Delta n}{\tau_n} - D_n \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2}$ מתקבל הסידור: $\frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2} = -\frac{\Delta n}{\tau_n D_n}$.

לגודל $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$ קוראים **אורך הדיפוזיה (Diffusion Length)** של נושאי מטען המיעוט.

באופן דומה: $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$ הוא אורך הדיפוזיה בחומר מסוג N.

הערה כללית:

סימונים מקובלים לנושאי מטען המיעוט העודפים בפיסות מוליכים למחצה:

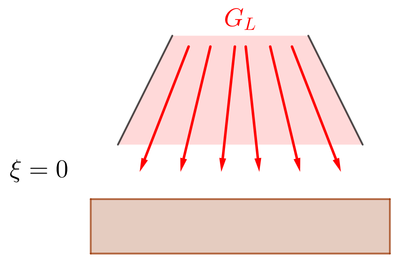
- חומר מסוג N: p' , Δp , p_n.
- חומר מסוג P: n' , Δn , n_p.

שאלות:

1) נתונה פיסת סיליקון מסוג N-type בטמפרטורת החדר $T=300°\mathrm{K}$.
הפיסה ארוכה מאוד ($W \gg L_p$) כך שאין נושאי מטען עודפים בקצה הפיסה.
מקובל להשתמש במל״מ עם תכונות כאלו לייצור טרנזיסטורים.
בשאלה זו נתמקד במציאת זמן החיים של החורים במל״מ τ_p.

נניח הזרקה של $N_d = 5\cdot 10^{16}\ \mathrm{cm}^{-3}$, כמו כן, לא מופעל שדה חשמלי בכל סעיפי השאלה.

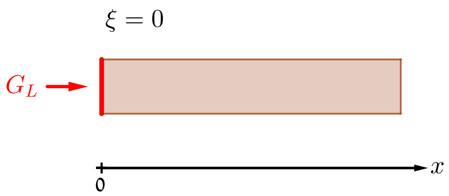
א. מאירים את פיסת הסיליקון בהארה אחידה לכל נפחה בקצב $G_L = 10^{16}\ \mathrm{cm}^{-3}\ \mathrm{sec}^{-1}$ במשך $t = 3\tau_p$ שניות. לאחר מכן סוגרים את ההארה.



(1) מצאו ביטוי מתמטי לשינוי בריכוז החורים העודפים כתלות בזמן $\Delta p_n(t)$ עבור הזמנים: $0 \le t \le 6\tau_p$.

(2) סרטטו גרף איכותי של $\Delta p_n(t)$ כפונקציה של t/τ_p.

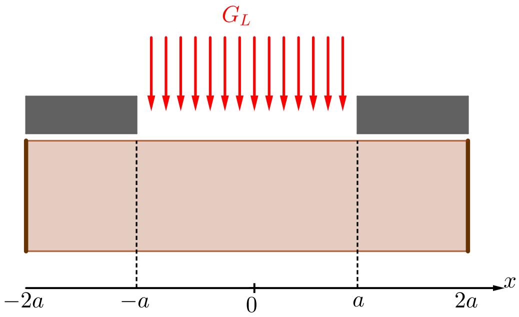
ב. במועד אחר, האירו את פיסת הסיליקון בהארה אחידה למשך זמן רב, אך הפעם מפני השטח של המל״מ כמתואר באיור.
מדידה שנעשתה במקום מראה כי ריכוז נושאי המטען העודפים במרחק של $x = L_p$ בעומק המל״מ הוא $2.4\cdot 10^{12}\ \mathrm{cm}^{-3}$.



(1) מצאו את τ_p.

(2) סרטטו גרף של צפיפות זרם החורים (בלבד) כפונקציה של המיקום.

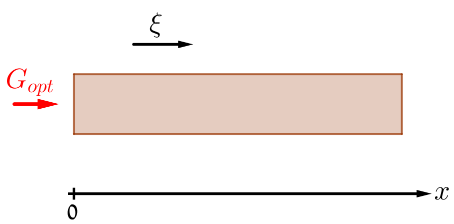
2) נתונה פיסת סיליקון מזוהמת באקספטורים בריכוז $N_a \gg n_i$ בטמפרטורת החדר.
מאירים את נפח הפיסה בתחום $\left[-a:a\right]$ כמתואר באיור ומניחים כי τ_n הוא אינסופי.
קצב הגנרציה האופטית קבוע ומסומן ב- G_L.
בקצות הפיסה ישנם מגעים אוהמים מתכתיים $\left(x = \pm 2a\right)$.



א. כתבו את משוואת הרציפות במצב היציב.
ב. פתרו את המשוואות ומצאו ביטוי מתמטי לשינוי צפיפות נושאי המטען העודפים בכל הפיסה במצב היציב.
ג. כתבו פתרון לצפיפות זרם הדיפוזיה של נושאי מטען המיעוט העודפים במצב היציב לכל אורך הפיסה.
ד. מניחים כעת כי τ_n הוא הוא סופי ביחס לאורך הפיסה.
(1) כיצד תשתנה משוואת הרציפות במקרה זה?
(2) כיצד ישתנה הפתרון של המשוואה?
(אין צורך לפתור אלא רק להציג איכותית).

3) נתונה פיסת סיליקון השרויה בטמפרטורת החדר ומזוהמת בריכוז תורמים של $N_d = 6 \cdot 10^{16}\ \mathrm{cm}^{-3}$.
א. מהו ריכוז נושאי מטען הרוב ונושאי מטען המיעוט בחומר?
ב. כיצד ישתנה ריכוז נושאי המטענים (רוב והמיעוט) אם מעלים את הטמפרטורה כך ש- $n_i = 10^{16}\ \mathrm{cm}^{-3}$?

מאירים את החומר באופן מתמשך וקבוע דרך דופן אחת כמתואר באיור הבא.
ניתן להניח כי האור אינו חודר לעומק המל״מ.



החומר נמצא בטמפרטורת החדר וידועים זמני החיים הבאים: $\tau_p = 2\tau_n = 3\text{ms}$.

קצב הגנרציה האופטית הוא $G_{opt} = 3\cdot 10^{13}\ \text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ וידוע כי אורך המל״מ גדול מאוד ביחס למרחק הדיפוזיה של נושאי המטען.

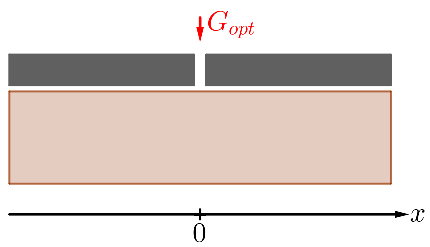
ג. בהנחה כי לא הופעל שדה חשמלי, מה הן המשוואות הדיפרנציאליות המתארות את ריכוז נושאי המטען העודפים (חורים ואלקטרונים) כפונקציה של x? מצא את התלות של ריכוז נושאי המטען באורך x. היעזר במשוואות הרציפות ובתנאי השפה.

ד. בהנחה כי מפעילים שדה חשמלי קבוע לכל אורך החומר בכיוון המתואר באיור ובעוצמה של $\xi = 15\,\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$, כיצד תיראנה כעת משוואות הרציפות? האם צפיפות המטען בחומר תהיה אפס זהותית לכל x? נמק.

4) מזהמים פיסת סיליקון השרויה בטמפרטורת החדר עם ריכוז תורמים אחיד של $N_d = 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$.

א. מה הוא ריכוז נושאי המטען (הרוב והמיעוט) במל״מ?

מניחים מסכה מבודדת על גבי פס הסיליקון ובה חור קטן המאפשר חדירה של אור. מאירים על המל״מ כך שנוצרת גנרציה בקצב אחיד של $G_{opt} = 10^{15}\ \text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ כמתואר באיור. נתון בנוסף: $\tau_n = 3\text{ms}$, $\tau_p = 4\ \text{ms}$.



ב. מהו אורך הגל המירבי המאפשר את הגנרציה בסיליקון? נמק.

ג. כתוב את משוואות הרציפות ותנאי השפה המתארים את ריכוז נושאי המטען העודפים בפיסה כולה. לשם הפשטות הנח כי אורך הפיסה גדול בהרבה ממרחק הדיפוזיה.

ד. פתור את משוואות הרציפות שכתבת ומצא ביטוי לריכוז נושאי המטען העודפים בתלות ב-x (כלומר מצא את: $p'(x)$ ואת $n'(x)$ עבור: $-\infty < x < \infty$).

בזמן t_0 מכבים את מקור האור.

ה. כיצד תשתננה משוואות הרציפות ותנאי השפה? נמק.

ו. סרטט באופן איכותי בלבד (אין צורך לפתור את המשוואות החדשות) ובמערכת צירים אחת את ריכוז נושאי המטען העודפים בזמן t_0 ובשני זמנים נוספים t_1 ו-t_2 כאשר: $t_0 < t_1 < t_2$.

ז. האם ישתנו הגרפים שסירטטת בסעיף הקודם אם כעת מפעילים שדה חשמלי אחיד לאורך הפיסה? הנח כי מפעילים את השדה החשמלי בזמן t_0 וכי הוא אינו תלוי בזמן.

תשובות סופיות:

1) א. (1) $0<t<3\tau_p : \Delta p_n(t)=G_L\tau_p\left(1-\exp\left\{-\frac{t}{\tau_p}\right\}\right)$,

$$3\tau_p<t<6\tau_p : \Delta p_n(t)=0.95G_L\tau_p\exp\left\{-\frac{t}{\tau_p}\right\}$$

א. (2) ראו גרף בסרטון הוידאו.

ב. (1) $\tau_p=652.4\mu\sec$ ב. (2) ראו גרף בסרטון הוידאו.

2) א.
$$\begin{cases} 0=\frac{d^2n'}{dx^2} & -2a<x<-a \\ 0=D_n\frac{d^2n'}{dx^2}+G_L & -a<x<a \\ 0=\frac{d^2n'}{dx^2} & a<x<2a \end{cases}$$

ב.
$$n'(x)=\begin{cases} a\frac{G_L}{D_n}(x+2a) & -2a<x<-a \\ \frac{G_L}{2D_n}(3a^2-x^2) & -a<x<a \\ a\frac{G_L}{D_n}(-x+2a) & a<x<2a \end{cases}$$

ג.
$$J_n(x)=\begin{cases} aqG_L & -2a<x<-a \\ -qG_Lx & -a<x<a \\ -aqG_L & a<x<2a \end{cases}$$

ד. (1)
$$\begin{cases} 0=D_n\frac{d^2n'}{dx^2}-\frac{n'}{\tau_n} & -2a<x<-a \\ 0=D_n\frac{d^2n'}{dx^2}-\frac{n'}{\tau_n}+G_L & -a<x<a \\ 0=D_n\frac{d^2n'}{dx^2}-\frac{n'}{\tau_n} & a<x<2a \end{cases}$$

ד. (2)
$$n'(x)=\begin{cases} A_1\exp\{-x/L_n\}+B_1\exp\{x/L_n\} & -2a<x<-a \\ C_1+C_2\exp\{-x/L_n\}+C_3\exp\{x/L_n\} & -a<x<a \\ A_3\exp\{-x/L_n\}+B_3\exp\{x/L_n\} & a<x<2a \end{cases}.$$

3) א. $n=6\cdot10^{16}\ \text{cm}^{-3}\ ,\ p=1.66\cdot10^{3}\ \text{cm}^{-3}$ ב. $n=6.16\cdot10^{16}\ \text{cm}^{-3}\ ,\ p=1.62\cdot10^{15}\ \text{cm}^{-3}$

ג. $n'(x)=4.5\cdot10^{10}\cdot\exp\left\{-\frac{x}{L_n}\right\}\ ,\ p'(x)=9\cdot10^{10}\cdot\exp\left\{-\frac{x}{L_p}\right\}$ ד. לא.

4) א. $n=6\cdot10^{17}\ \text{cm}^{-3}\ ,\ p=10^{3}\ \text{cm}^{-3}$ ב. $\lambda=1.1\mu\text{m}$.

ג. $\begin{cases}\frac{d^2n'}{dx^2}=\frac{n'}{L_n^2}\\ n'(x\to\infty)=n'(x\to-\infty)=0\\ n'(0)=3\cdot10^{12}\ \text{cm}^{-3}\end{cases}\ ,\ \begin{cases}\frac{d^2p'}{dx^2}=\frac{p'}{L_p^2}\\ p'(x\to\infty)=p'(x\to-\infty)=0\\ p'(0)=4\cdot10^{12}\ \text{cm}^{-3}\end{cases}$.

ד. $n'(x)=3\cdot10^{12}\exp\left\{-\frac{|x|}{L_n}\right\}\ ,\ p'(x)=4\cdot10^{12}\exp\left\{-\frac{|x|}{L_p}\right\}$.

ה. נקבל: $\frac{\partial p'}{\partial t}=-\frac{1}{q}\frac{\partial J_p}{\partial x}-\frac{p'}{\tau_p}+G_{opt}$. ראו הסבר מורחב בסרטון הוידאו.

ו. ראו גרפים בסרטון הוידאו. ז. ראו גרפים בסרטון הוידאו.