

תרגול 10 – פוטו-דיודות

שאלה 1

א. יש להוכיח כי יעילות פוטו-דטקטור p-i-n שווה ל-

$$\eta = (1 - R) \left[1 - \frac{\exp(-\alpha W_D)}{1 + \alpha L_p} \right]$$

(נוסחה 27, הרצאה 10)

ב. פוטו-דטקטור p-i-n מבוסס InGaAs, בעל ציפוי אנטי-רפלקטיבי (antireflection coating), מואר בפני השטח.

נתון כי עבור אורך גל מסוים, מקדם הבליעה הוא $\alpha = 10^4 \text{ cm}^{-1}$. בנוסף נתון כי אורך הדיפוזיה הוא $L_p = 10^{-4} \text{ cm}$. יש להניח כי בליעת האור מתרחשת רק בחלק האינטרינזי של ההתקן ועוביו הוא $1 \mu\text{m}$.

a. מהי היעילות הקוונטית של הפוטו-דיודה עבור קרינה באורך הגל הנתון? יש להניח כי מקדם ההעברה מהמצע האחורי = 1.

b. מהי היעילות הקוונטית של הפוטו-דיודה כאשר פוטון נבלע בהתקן לאחר שהוא חוצה את השכבה שבולעת אור פעמיים? יש להניח כי מקדם ההחזרה מהמצע האחורי = 1.

פתרון

א. היעילות הקוונטית של ההתקן :

$$\eta = \frac{I_{ph}}{q\phi} = \frac{I_{ph}}{q} \left(\frac{hv}{P_{opt}} \right)$$

(נוסחה 2 הרצאה 10)

סך כל הזרם בהתקן (סכום זרמי הדיפוזיה וזרם החושך) :

$$J_{tot} = q\phi_0 \left[1 - \frac{\exp(-\alpha W_D)}{1 + \alpha L_p} \right] + \frac{qp_{n0}D_p}{L_p}$$

(נוסחה 26, הרצאה 10)

כיוון שתרומו זרם החושך זניחה ביחס לתרומת הפוטו-זרם, ניתן לומר כי

$$J_{tot} \approx q\phi_0 \left[1 - \frac{\exp(-\alpha W_D)}{1 + \alpha L_p} \right]$$

כאשר W_D הוא רוחב האזור האינטרינזי. פיתוח זה מתבסס על ההנחה כי רוחב האזור הקוואזי ניטרלי זניח.

שטף הפוטונים ליחידת שטח :

$$\phi_0 = \frac{P_{opt}}{Ahv} (1 - R)$$

ולכן :

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{I_{ph}}{q} \left(\frac{hv}{P_{opt}} \right) = \frac{AJ_{tot}}{q} \left(\frac{hv}{P_{opt}} \right) = \frac{Aq \overbrace{\frac{P_{opt}}{Ahv} (1 - R)}^{\phi_0} \left[1 - \frac{\exp(-\alpha W_D)}{1 + \alpha L_p} \right]}{q} \left(\frac{hv}{P_{opt}} \right) = \\ &= (1 - R) \left[1 - \frac{\exp(-\alpha W_D)}{1 + \alpha L_p} \right] \end{aligned}$$

ב. a. עבור $T_B=1$, $L=1\mu m=10^{-4}cm$:

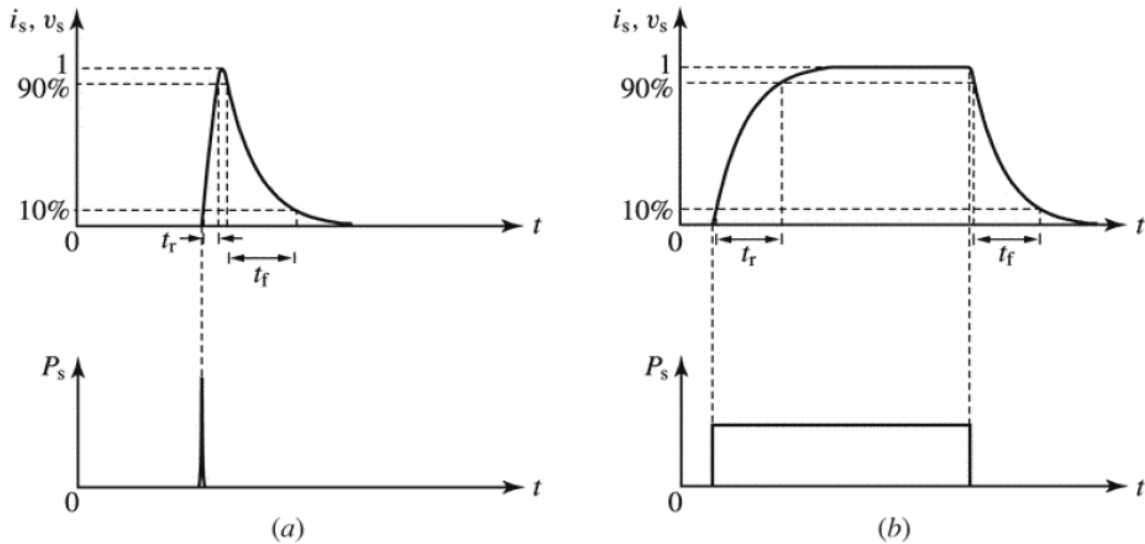
$$\eta = (1 - R) \left[1 - \frac{\exp(-\alpha W_D)}{1 + \alpha L_p} \right] = \eta = (1 - 0) \left[1 - \frac{\exp(-10^4 \cdot 10^{-4})}{1 + 10^4 \cdot 10^{-4}} \right] = 81.61\%$$

b. עבור $R_B=1$, $L=2\mu m$:

$$\eta = (1 - R) \left[1 - \frac{\exp(-\alpha 2W_D)}{1 + \alpha L_p} \right] = (1 - 0) \left[1 - \frac{\exp(-10^4 \cdot 2 \cdot 10^{-4})}{1 + 10^4 \cdot 10^{-4}} \right] = 93.23\%$$

תגובת תדר

מהירות תגובת הפוטו-דטקטור הינה ביחס ישר לתגובת התדר של ההתקן, והיא קובעת את היכולת של הפוטו-דטקטור לעקוב אחר אות אופטי משתנה. כדי לתעד אות אופטי בצורה אמינה, לפוטו-דטקטור צריכה להיות מהירות תגובה הגבוהה מהשינוי המהיר ביותר באות האופטי, או, בצורה שקולה, תדירות תגובה בעלת רוחב פס (bandwidth) אשר מכסה את רוחב הפס של האות האופטי.



תגובה אופיינית של פוטו-דטקטור עבור (a) אות פולס ו-(b) אות מלבני

במישור הזמן, ניתן לאפיין את מהירות הפוטו-דטקטור ע"י הפרמטר t_r , risetime, ו- t_f , falltime. הפרמטרים הללו מתארים את הזמן שלוקח לזרם בהתקן לעלות מ-10% ל-90% מערך הזרם המקסימלי, והזמן שלוקח לזרם בהתקן לרדת מ-90% ל-10% מערך הזרם המקסימלי, בהתאמה.

ה-risetime הוא זמן החצייה של נ"מ את ההתקן, $t_r = \frac{W_D}{v_d}$, וניתן להגדיר פרמטר זה ביחס לרוחב הסרט של ההתקן-

$$t_r \approx \frac{2.78}{2\pi f_{3dB}}$$

(נוסחה 34 הרצאה 11)

כאשר f_{3dB} הוא רוחב הסרט של הדיודה.

שאלה 2

עבור הנתונים משאלה 1, סעיף ב-a, נתון כי עבור אפליקציה מסוימת, דרושה יעילות קוונטית של לפחות 90%.

- א. איזה שינוי הנדסי ניתן לבצע בהתקן כדי לגרום לשינוי ביעילות הקוונטית הדרושה?
ב. מה יהיה השינוי ברוחב הסרט בעקבות כך?

פתרון

א. בשאלה הקודמת ראינו כי :

$$\text{בסעיף ב-a, } \alpha = 10^4 [cm^{-1}] = \frac{1}{w_D}, \text{ ולכן } \eta \propto -e^{-\alpha w_D} = -e^{-1}.$$

$$\text{בסעיף ב-b, } \alpha = 10^4 [cm^{-1}] = \frac{1}{2} \frac{1}{w_D}, \text{ ולכן } \eta \propto -e^{-2\alpha w_D} = -e^{-2}.$$

ולכן, כדי לקבל את השינוי הדרוש ביעילות הקוונטית, ניתן להוסיף לגב הדיודה שכבה מחזירה, מראה, שתגרום לכך ש $R_B = 1$, ומכאן לשיפור ביעילות.

ב. השינוי ברוחב הסרט מתקבל ביחס הפוך לרוחב האזור האינטרינזי, ולכן רוחב הסרט יקטן פי 2.