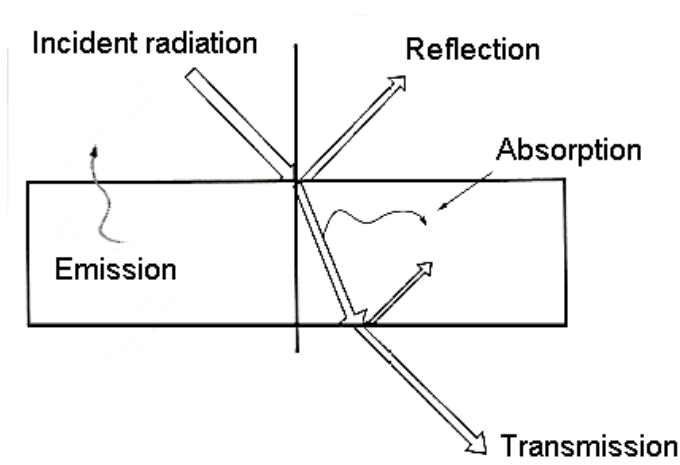


כאשר קרינה אלקטרומגנטית פוגעת במשטח, הקרינה יכול להיות מוחזרת מהמשטח, להיבלע בתווך או להיות מועברת דרכו.



R – היחס בין עוצמת האור המוחזר ממשטח לעוצמת האור הפוגע.

$$R = \frac{I_{ref}}{I_0}$$

T – היחס בין עוצמת האור המועבר דרך תווך לעוצמת האור הפוגע.

$$T = \frac{I_{tr}}{I_0}$$

A – היחס בין עוצמת האור הנבלע בתווך לעוצמת האור הפוגע.

$$A = \frac{I_{abs}}{I_0}$$

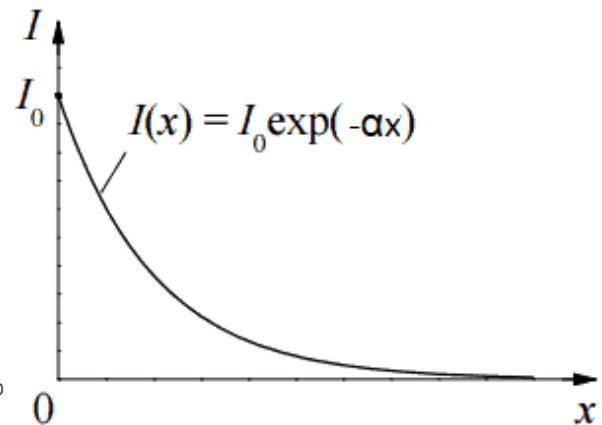
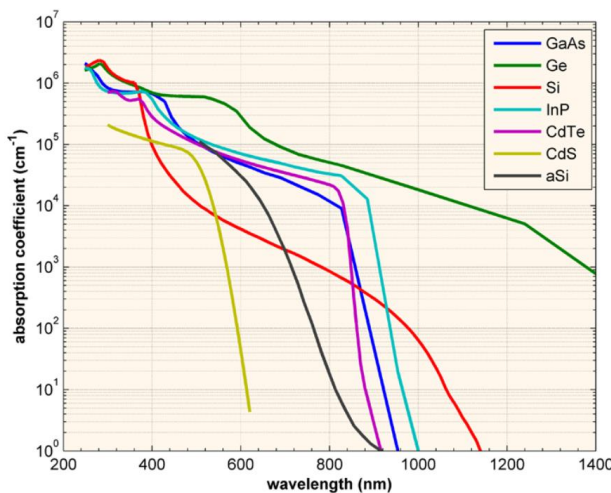
משימור אנרגיה :

$$A = 1 - T - R$$

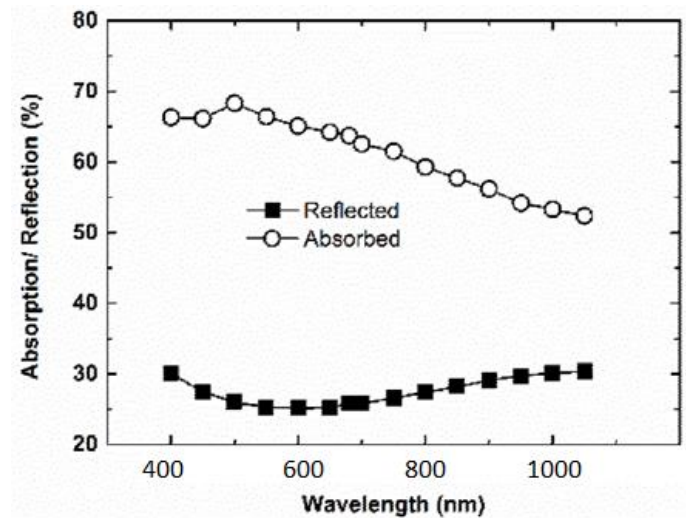
מקדם בליעה (α) – מאפיין של חומר המתאר את קצב הדעיכה בעוצמת הקרינה האלקטרומגנטית הנבלעת בו. מקדם הבליעה קובע לאיזה עומק אלומת אור באורך גל מסוים יכולה לחדור עד שהיא תבלע במלואה בחומר.

חוק בר-למברט – מתאר את עוצמת האור העובר בתווך, ביחס לעוצמת האור ההתחלתית :

$$I(x) = I_{in}(\lambda)e^{-\alpha(\lambda)x}$$



בגרף הבא ניתן לראות את ערכי R ו A של סיליקון, עבור אורכי גל שונים. ניתן לראות כי באורכי גל נמוכים, $1=R+A$, אך אין זה המקרה עבור אורכי גל ארוכים. כיצד ניתן להסביר זאת?



פרופיל הבליעה בחומר, כאשר ההתקן הוא חצי אינסופי:

$$G(x) = \Phi_{in}(\lambda)(1 - R(\lambda))\alpha(\lambda)e^{-\alpha(\lambda)x}$$

ובמונחים של הספק אופטי:

$$I(x) = I_{in}(\lambda)(1 - R(\lambda))\alpha(\lambda)e^{-\alpha(\lambda)x}$$

נניח התקן בעובי W בעל משטח אחורי עם בליעה מושלמת ($R_B=1$ לכל אורך גל). במקרה כזה, סך כל הבליעה הוא:

$$G_{total} = \Phi_{in}A(\lambda) = \int_0^W G(x)dx = \Phi_{in}(\lambda)(1 - R(\lambda))(1 - e^{-\alpha(\lambda)W})$$

וההעברה היא:

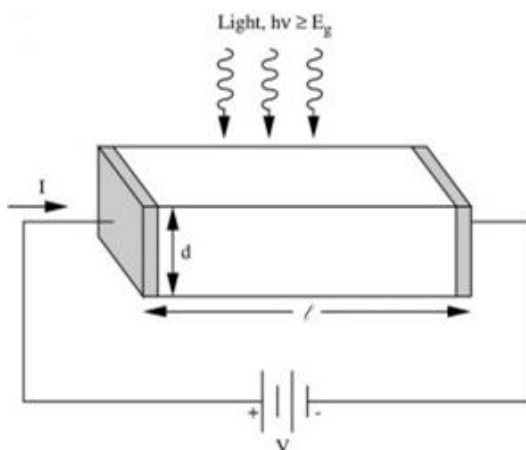
$$T(\lambda) = (1 - R(\lambda))e^{-\alpha(\lambda)W}$$

פוטו-מוליכים – מל"מ אשר המוליכות החשמלית שלו משתנה בעקבות הארה.

מוליכות מל"מ:

$$\sigma = q(\mu_n n + \mu_p p)$$

(נוסחה 4 הרצאה 10)



שאלה 1

- א. יש להוכיח כי הקשר בין היעילות הקוונטית η לרספונסיביות R הוא $\mathcal{R} = \frac{\eta\lambda}{1.24} \left[\frac{A}{W} \right]$
- ב. פוטו-מוליך מואר באורך גל λ_1 . ברגע מסוים האור הפוגע משתנה ל- $\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{2}$. נתון כי אנרגיית שני אורכי הגל גבוהה מהפער האסור, והיעילות הקוונטית קבועה עבור שני אורכי הגל. כיצד ישתנו שטף נשאי המטען, ההספק האופטי והרספונסיביות, בעקבות שינוי אורך הגל הפוגע בדגם?
- ג. נתון כי פער האנרגיה של GaAs הוא 1.42eV, ופער האנרגיה של $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ הוא $1.424 + 1.247x$ [eV]. מהי הרספונסיביות התיאורטית, עבור חומר אידיאלי בעל יעילות קוואנטית של 100%, כאשר אורך הגל הפוגע הוא 0.8um, עבור:
- a. Homojunction GaAs
b. Homojunction $\text{Al}_{0.34}\text{Ga}_{0.66}\text{As}$
c. Hetrojunction $\text{Al}_{0.34}\text{Ga}_{0.66}\text{As}$ GaAs

פתרון

א. יעילות קוונטית (נוסחה 2 הרצאה 10)-

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

ולכן

$$\mathcal{R} = \frac{\eta\lambda}{1.24} \left[\frac{A}{W} \right]$$

ב. כיוון ששטף הפוטונים הפוגע בהתקן (המוגדר בתור מספר הפוטונים ביחידת זמן ליחידת נפח)

$$\phi = \frac{\# \text{ of photons}}{\text{sec} \cdot \text{m}^2}$$

לא משתנה עם שינוי אורך הגל הפוגע, ונתון כי היעילות הקוונטית נותרת קבועה, שטף נשאי המטען (I_{ph}) לא ישתנה בעקבות השינוי באורך הגל הפוגע.

$$I_{ph1} = I_{ph2}$$

עם זאת, ההספק האופטי ישתנה בעקבות שינוי אורך הגל הפוגע (האנרגיה של λ_2 גבוהה משל λ_1):

$$\eta_{\lambda_1} = \frac{I_{ph}}{q\phi} = \frac{I_{ph}}{q} \left(\frac{hv_1}{P_{opt1}} \right)$$

$$\eta_{\lambda_2} = \frac{I_{ph}}{q\phi} = \frac{I_{ph}}{q} \left(\frac{2 \cdot hv_1}{P_{opt2}} \right)$$

$$P_{opt2} = 2 \cdot P_{opt1}$$

הרספונסיביות הינה פונקציה של ההספק ולכן תלויה באורך הגל הפוגע

$$\mathcal{R}_1 = \frac{I_{ph}}{P_{opt1}} = \frac{\eta_{\lambda_1}}{1.24}$$

$$\mathcal{R}_2 = \frac{I_{ph}}{2P_{opt1}} = \frac{\eta \frac{\lambda_1}{2}}{1.24}$$

$$\mathcal{R}_2 = \frac{1}{2} \mathcal{R}_1$$

ג.

$$\lambda = 0.8 \mu m$$

$$\mathcal{R}(ideal) = \frac{1 \cdot 0.8}{1.24} = 0.645 \left[\frac{A}{W} \right]$$

a. אנרגיית הפוטון גבוהה מפער האנרגיה של GaAs ($1.42[eV] < 1.55 = \frac{1.24}{0.8}$), ולכן $\mathcal{R} = 0.645 \left[\frac{A}{W} \right]$.

b. פער האנרגיה של $Al_{0.34}Ga_{0.66}As$ הוא

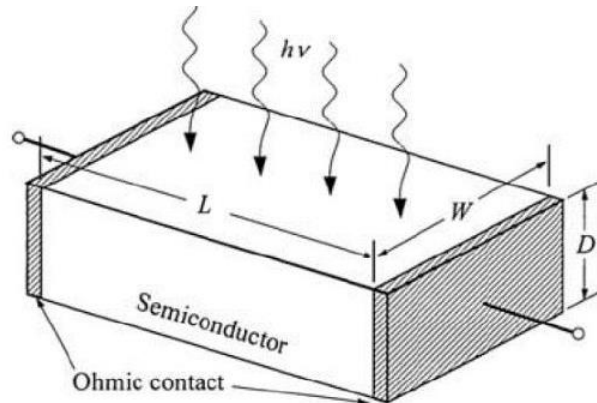
$$Eg(Al_{0.34}Ga_{0.66}As) = 1.42 + 1.247 \cdot 0.34 = 1.85[eV]$$

אנרגיית הפוטון נמוכה מפער האנרגיה של המל"מ, ולכן לא ניתן ליצור הפרדת נ"מ ע"י אורך הגל הנתון. לכן $\eta = \mathcal{R} = 0$.

c. במקרה של ההטרו-צומת, פוטונים יבלעו במל"מ בעל פער האנרגיה הנמוך מאנרגיית הפוטון הפוגע.

שאלה 2

נתון פוטו-מוליך בעל מימדים של $L=6mm$, $W=2mm$, $D=1mm$. נתון כי ההתקן מואר בהארה אחידה, ובליעת האור גורמת לפוטו-זרם בערך של $2.83mA$. על ההתקן פועל ממתח של $10V$.



ברגע מסוים ההארה פוסקת באופן מדי, והזרם נחלש בקצב של $23.6A/s$. מובילות האלקטרונים והחורים היא 3600 ו- $1700 cm^2/Vs$, בהתאמה.

יש לחשב את:

- צפיפות המטען של זוגות אלקטרון-חור, אשר נוצרו בעקבות ההארה.
- זמן החיים של נ"מ מיעוט
- צפיפות נ"מ המטען העודפת $1ms$ לאחר כיבוי ההארה

פתרון

a. פוטו-זרם (נוסחה 7 הרצאה 10):

$$I_p = q(\mu_n + \mu_p)n\mathcal{E}WD$$

ולכן

$$\begin{aligned}\Delta n = \text{electron} - \text{hole pairs} &= \frac{\Delta I}{q(\mu_n + \mu_p)\varepsilon WD} \\ &= \frac{2.83 \cdot 10^{-3}[A]}{1.6 \cdot 10^{-19}[Q] \cdot (3600 + 1700) \left[\frac{cm^2}{Vs} \right] \cdot \frac{10[V]}{0.6[cm]} \cdot (0.2[cm] \cdot 0.1[cm])} \\ &= 10^{13}[cm^{-3}]\end{aligned}$$

ב. הפוטו-זרם שנוצר במל"מ :

$$I_p = \sigma \varepsilon WD = \overbrace{q(\mu_p + \mu_n)}^{\text{קבועים}} n \overbrace{\varepsilon WD}^{\text{קבועים}}$$

ברגע הכיבוי, השינוי בזרם הוא :

$$\begin{aligned}\frac{dI_p}{dt} &= \frac{dn}{dt} \cdot \varepsilon + \frac{d\varepsilon}{dt} \cdot n \\ \varepsilon &= -\frac{dV}{dx} \approx -\frac{V}{L} \quad \text{כיוון שהמתח קבוע, השדה קבוע} \\ &\quad \text{ולכן}\end{aligned}$$

$$\frac{dI_p}{dt} \propto \frac{dn}{dt}$$

צפיפות נ"מ מזמן הפסקת ההארה (נוסחה 11 הרצאה 10) :

$$\begin{aligned}n(t) &= n(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \\ \frac{dn}{dt} &= -\frac{n(0)}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \\ \left. \frac{dn}{dt} \right|_{t=0} &= -\frac{n(0)}{\tau}\end{aligned}$$

ולכן,

$$\tau = \frac{I_p}{I_{decay}} = \frac{2.83 \cdot 10^{-3}[A]}{23.6 \left[\frac{A}{s} \right]} = 120[\mu s]$$

ג. צפיפות נ"מ מזמן הפסקת ההארה (נוסחה 11 הרצאה 10) :

$$n(t) = \underbrace{n(0)}_{\Delta n} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) = 10^{13} \exp\left(\frac{1 \cdot 10^{-3}}{120 \cdot 10^{-6}}\right) = 2.4 \cdot 10^9[cm^{-3}]$$