



Institut des Sciences Appliquées et Economiques
Cnam Liban

le cnam

Télécommunication optique (ELE107)

Examen Final 2010-2011 sem.2

Documents Interdits

Durée : 3 h

Exercice 1 Questions de compréhensions générales

1. Quelles sont les 2 aspects physiques de la lumière?

Réponse. Ondulatoire et corpusculaire

2. Quelle est la différence entre la vibration et l'onde?

Réponse. L'onde est une vibration qui se propage dans l'espace

3. Une onde caractérisée par la fonction de la forme

$$u(r, t) = \frac{u_0}{\sqrt{1 + x^2 + y^2 - z^2}} \exp(-j\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})$$

est-elle harmonique.?

Réponse. Oui car c'est la forme complexe de l'écriture en sinus ou cosinus.

4. Quelle est la relation entre la puissance optique et l'intensité de la lumière.?

Réponse. l'intensité de la lumière est la puissance optique par unité de surface.

5. Dans quelles conditions on aura une réflexion interne totale de la lumière?

6. Quelle est la polarisation d'une onde électromagnétique, qui se propage dans un guide d'onde planaire, dont le plan de propagation est le plan (xOz) et les vecteurs du champ électromagnétique sont tels que: $\vec{E}(E_x, 0, E_z)$ et $\vec{H}(0, H_y, 0)$?

Réponse. c'est une onde TM

7. Quelle est la particularité de l'angle de Brewster?

Réponse. L'angle de Brewster est $\theta_B = \arctan(n_1/n_2)$, pour lequel les ondes transmises et réfléchies sont des polarisations différentes.

8. Quelle est l'influence de la dispersion sur la qualité de transmission dans fibre optique?

Réponse. La dispersion limite la bande passante

9. Quelle est l'importance de la condition de synchronisation de phase?

Réponse. Les ondes qui se propagent en vérifiant la C.S.P. ne se déforment pas

10. Quelle est la différence entre les fibres à saut d'indice et celles à gradient d'indice.

Réponse. fibres à saut d'indice: indice du coeur constante, trajet en ZigZag, fibre à gradient d'indice: indice du coeur variable en fonction de la distance à l'axe, trajet sinusoidal

11. Citez 3 avantages de la fibre optique

Réponse. Pertes faibles, Large bande passante, Immunité au bruit, Absence de rayonnement vers l'extérieur, Absence de diaphonie, Isolation électrique, Résistance aux températures élevées et aux produits corrosifs, Poids et dimensions réduites

12. Qu'explique la métaphore du cylindre?

13. Que veut dire Bande de Valence.? Bande de Conduction?

Réponse. Bande de Valence : la dernière bande pleine, Bande de Conduction: la première bande vide

14. Comment on distingue les conducteurs, semi-conducteurs et le isolants?

Réponse. Par la largeur de la bande interdite

15. Comment on détermine expérimentalement que les niveaux d'énergie des atomes sont discrets?

Réponse. D'après le spectre d'émission

16. D'où vient le mot LASER.

Réponse. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

17. Que veut dire courant de seuil d'une diode laser?

18. Quelle est le principe du fonctionnement d'une photodiode

Réponse. Conversion de l'énergie optique en énergie électrique

19. Quelle est l'avantage d'une photodiode à avalanche?

Réponse. Amplification interne

20. Pourquoi la polarisation de photodiode doit être en inverse?

Exercice 2 On considère les deux ondes électromagnétiques harmoniques: E_1 et E_2 ;

$$E_1 = A_1 \cos(\omega t - kz + \varphi_1) \quad \text{et} \quad E_2 = A_2 \cos(\omega t - kz + \varphi_2)$$

1. Donner l'expression de l'onde résultante: $E = A \cos(\omega t - kz + \varphi)$ en précisant les expressions de l'amplitude et de la phase

Réponse. $A \cos(\omega t - kz + \varphi) = A_1 \cos(\omega t - kz + \varphi_1) + A_2 \cos(\omega t - kz + \varphi_2)$

$$A \cos(\alpha + \varphi) = A_1 \cos(\alpha + \varphi_1) + A_2 \cos(\alpha + \varphi_2)$$

$$= A_1 \cos \alpha \cos \varphi_1 + A_2 \cos \alpha \cos \varphi_2 - A_1 \sin \alpha \sin \varphi_1 - A_2 \sin \alpha \sin \varphi_2$$

$$= (A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2) \cos \alpha + (-A_1 \sin \varphi_1 - A_2 \sin \varphi_2) \sin \alpha$$

$$= A \cos \alpha \cos \varphi - A \sin \alpha \sin \varphi$$

$$\implies A^2 = A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$$

$$\tan \varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}$$

2. Déterminer l'amplitude, la phase, la fréquence, la période, la norme du vecteur d'onde, la longueur d'onde, la vitesse et la direction de propagation de l'onde résultante si on a

$$E_1 = \frac{2y}{x^2 + y^2} \sin\left(10^{15}t - 10z - \frac{\pi}{3}\right)$$

$$E_2 = \frac{-x}{x^2 + y^2} \sin\left(10^{15}t - 10z + \frac{\pi}{4}\right)$$

Réponse. On a $A_1 = \frac{2y}{x^2 + y^2}$, $A_2 = \frac{-x}{x^2 + y^2}$, $\varphi_1 = -\frac{\pi}{3}$, et $\varphi_2 = \frac{\pi}{4}$

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{2y}{x^2 + y^2}\right)^2 + \left(\frac{-x}{x^2 + y^2}\right)^2 - 2\frac{x}{x^2 + y^2} \times \frac{2y}{x^2 + y^2} \cos\left(-\frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{4}\right)}$$

$$= \frac{\sqrt{(x^2 + 4y^2 - \sqrt{2}xy + \sqrt{6}xy)}}{(x^2 + y^2)}$$

$$\tan \varphi = \frac{2y \sin\left(-\frac{\pi}{3}\right) - x \sin\left(\frac{\pi}{4}\right)}{2y \cos\left(-\frac{\pi}{3}\right) - x \cos\left(\frac{\pi}{4}\right)} = -\frac{\frac{1}{2}\sqrt{2}x + \sqrt{3}y}{y - \frac{1}{2}\sqrt{2}x} = \frac{\sqrt{2}x + 2\sqrt{3}y}{\sqrt{2}x - 2y}$$

Exercice 3 Soit une fibre optique à saut d'indice de longueur $L = 10$ km, de rayon du coeur $a = 40\mu\text{m}$ et de différence relative d'indice $\Delta = 1\%$. Cette fibre peut guider au maximum 1000 modes de longueur d'onde $\lambda = 1.55\mu\text{m}$

1. Calculer les indices des couches coeur (n) et gaine (n_1)

Réponse. Fibre à saut d'indice donc $M = \frac{2\pi^2 a^2 (n^2 - n_1^2)}{\lambda^2}$

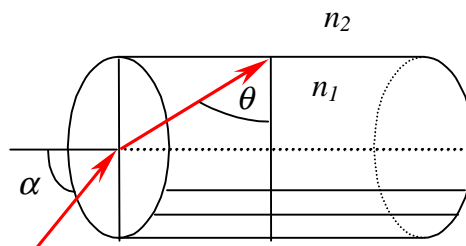
$$\Rightarrow ON^2 = (n^2 - n_1^2) = \frac{M\lambda^2}{2\pi^2 a^2} = \frac{1000 \times (1.55)^2}{2 \times \pi^2 \times (40)^2} = 0.07607 \Rightarrow ON = \sqrt{0.07607} = 0.27581$$

$$\Delta = \frac{n^2 - n_1^2}{2n^2} \Rightarrow n = \sqrt{\frac{ON^2}{2\Delta}} = \sqrt{\frac{0.07607}{0.02}} = 1.9503 \simeq 1.95$$

$$n_1 = \sqrt{n^2 - ON^2} = \sqrt{(1.9503)^2 - 0.07607} = 1.9307 \simeq 1.93$$

2. Montrer qu'il faut injecter la lumière dans la fibre à l'intérieur d'une cône de révolution d'angle au sommet α_c pour avoir de modes guidés. Exprimer α_c en fonction des indices n_1 et n . Calculer α_c

Réponse. Si θ est l'angle d'incidence sur l'interface coeur-gaine, on aura de réflexion interne totale si $\theta > \theta_\ell$



alors si $\sin \theta \geq \frac{n_1}{n}$ donc il faut injecter la lumière dans la fibre sous l'angle α tel que

$$\sin \alpha \leq \sin \alpha_c = n \cos \theta \leq n \sqrt{1 - \frac{n_1^2}{n^2}} = \sqrt{n^2 - n_1^2} = ON$$

$$\alpha_c = \arcsin (ON) = \arcsin (0.27581) = 0.27943 \text{ rad} = 16.01^\circ$$

3. Etablir l'expression de la dispersion intermodale. En négligeant les dispersions intramodales et chromatiques, de combien s'étale l'impulsion à la sortie de la fibre

Réponse. La cause principale de dispersion est donc celle intermodale

$$\Delta t = \frac{Ln^2\Delta}{cn_1} = \frac{10^4 \times (1.95)^2 \times 0.01}{3 \times 10^8 \times 1.93} = 6.5674 \times 10^{-7} \text{ sec} = 0.65 \mu\text{s}$$

4. On suppose que toute la puissance optique initiale $P_0 = 10 \text{ mW}$ est équi-distribuée entre les modes de la fibre, quelle est la puissance portée par chaque mode à la sortie de la fibre d'atténuation linéaire $\alpha_{dB} = 0.3 \text{ dB/km}$

Réponse. $\alpha_{dB} = -0.3 \text{ dB/km}$ la longueur de la fibre est 10 km donc la perte est de 3 dB c-à-d. la puissance devient la moitié à la sortie c.à.d. 5 mW la puissance de chaque mode est donc $5 \mu\text{W}$.

Exercice 4 On fabrique une photodiode à GaAs d'énergie de gap $E_g = 1.43 \text{ eV}$ à 300 K , d'indice de réfraction $n = 3.5$. Le coefficient d'absorption à la longueur d'onde $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$ est $\alpha_s = 10^5 \text{ m}^{-1}$, la largeur de la zone désertée est $w_d = 10 \mu\text{m}$, la photodiode reçoit des photons du côté de la zone P de largeur: $w_p = 10 \mu\text{m}$

1. Quelle est la longueur d'onde de seuil de cette photodiode.
2. Etablir l'expression de l'efficacité quantique en fonction de α_s, w_d, w_p et n . Calculer sa valeur numérique.
3. Définir la sensibilité spectrale de photodiode, calculer sa valeur numérique et en déduire l'intensité du photocourant généré en absorbant la puissance optique de 3 mW .

Solution

1. La photodiode de largeur de bande interdite E_g est sensible aux photons d'énergie $\hbar\omega \geq E_g$ ou

$$\frac{hc}{\lambda} \geq E_g \implies \lambda \leq \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g} E_g \text{ en eV et } \lambda \text{ en } \mu\text{m} .$$

$$\lambda_s = \frac{1.24}{E_g} = \frac{1.24}{1.43} = 0.86713 \mu\text{m}$$

2. On désigne par P_0 la puissance incidente sur la zone P une partie de cette puissance subit une réflexion partielle sur le dioptre air-semiconducteur de réflexivité

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 = \left(\frac{3.5-1}{3.5+1} \right)^2 = 0.30864 .$$

La puissance émergente dans la région P est $(1-R)P_0$, en traversant la distance w_p la puissance devient $(1-R)P_0 \exp(-\alpha_s w_p)$, et entraversant la zone désertée la puissance devient :

$$(1-R)P_0 \exp(-\alpha_s w_p) \exp(-\alpha_s w_d)$$

donc la puissance absorbée dans la zone désertée et qui se transforme en courant est donc:

$$P_u = (1-R)P_0 \exp(-\alpha_s w_p) [1 - \exp(-\alpha_s w_d)]$$

d'où l'efficacité quantique

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{P_u}{P_0} = (1 - R) \exp(-\alpha_s w_p) [1 - \exp(-\alpha_s w_d)] \\ &= (1 - 0.30864) \times \exp(-10^5 \times 10 \times 10^{-6}) \times [1 - \exp(-10^5 \times 10 \times 10^{-6})] \\ &= 0.69136e^{-1} [1 - e^{-1}] = 0.161\end{aligned}$$

3. La sensibilité spectrale d'une photodiode représente le photocourant généré I_p par unité de puissance incidente P_i : $S_\lambda = \frac{I_p}{P_i} = \eta \frac{\lambda}{1.24} = 0.161 \frac{0.85}{1.24} = 0.11036 \text{ A/W}$
 $I_p = S_\lambda P_i = 0.11036 \times 3 = 0.33108 \text{ mA}$

Exercice 5 On considère une diode laser dont la couche active est fabriquée de l'alliages quaternaires $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ où x et y sont les fractions molaires des composés et $y \simeq 2.203x - 0.015x^2$. Les valeurs de l'énergie de Gap en fonction de x se déterminent par la relation empirique: $E_g[\text{eV}] = 1.350 - 1.684x + 1.140x^2$.

1. Quelle est la longueur d'onde émise par la diode à la base de $In_{0.7}Ga_{0.3}As_{0.66}P_{0.34}$

Réponse. $\left(\frac{1}{2}pts\right)$ $x = 0.3 \implies E_g = 1.350 - 1.684 \times (0.3) + 1.140 \times (0.3)^2 = 0.9474 \text{ eV}$
 $\lambda = \frac{1.24}{0.9474} = 1.3088 \mu\text{m}$

2. La longueur de la cavité est $L = 400 \mu\text{m}$ et son indice de réfraction est $n = 3.4$. Définir le facteur du gain de seuil. Calculer sa valeur numérique sachant que les pertes intrinsèques sont équivalentes à $\alpha_i = 5 \times 10^5 \text{ m}^{-1}$.

Réponse. $\left(\frac{1}{2}pts\right)$ L'effet laser déclenche lorsque le gain compense toutes les pertes

donc lorsque le gain dépasse une valeur de seuil $g_s = \alpha_i + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R}$

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 = \left(\frac{3.4-1}{3.4+1}\right)^2 = 0.29752$$

$$g_s = 5 \times 10^5 + \frac{1}{400 \times 10^{-6}} \ln \left(\frac{1}{0.29752}\right) = 5.0303 \times 10^5 \text{ m}^{-1}.$$

3. En tenant compte de la perte due à la réflexion sur les miroirs de la cavité. Etablir en fonction de n, L , et α_i l'expression de la durée de vie (τ_p) du photon à l'intérieur de la cavité.

Réponse. $\left(\frac{1}{2}pts\right)$ variation de la puissance optique en fonction du temps: $P(t) =$

$$P_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right) \text{ et en fonction de la distance } P(x) = P_0 \exp(-g_s x)$$

$$\exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right) = \exp(-g_s x) \implies \frac{t}{\tau_p} = g_s x$$

$$\implies \tau_p = \frac{t}{g_s x} = \frac{t}{g_s v t} = \frac{1}{g_s v} = \frac{n}{g_s c}$$

$$= \frac{3.4}{5.0303 \times 10^5 \times 3 \times 10^8} = 2.253 \times 10^{-14} \text{ s}$$

4. En négligeant la dispersion dans la couche active, déterminer le nombre des modes excités (M) dans telle diode et calculer la largeur spectrale de diode.

Réponse. (1pts) Condition de résonance: $2nL = m\lambda$

$$\Rightarrow m = \frac{2nL}{\lambda} = \left\lfloor \frac{2 \times 3.4 \times 400}{1.3088} \right\rfloor = 2078$$

$$\Rightarrow 0 = m d\lambda + \lambda dm \Rightarrow \Delta m = m \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{2nL}{\lambda^2} \Delta\lambda$$

$$\text{pour } \Delta m = 1 \text{ on a } \delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2nL} = \frac{(1.3088)^2}{2 \times 3.4 \times 400} = 6.2976 \times 10^{-4} \mu\text{m}$$

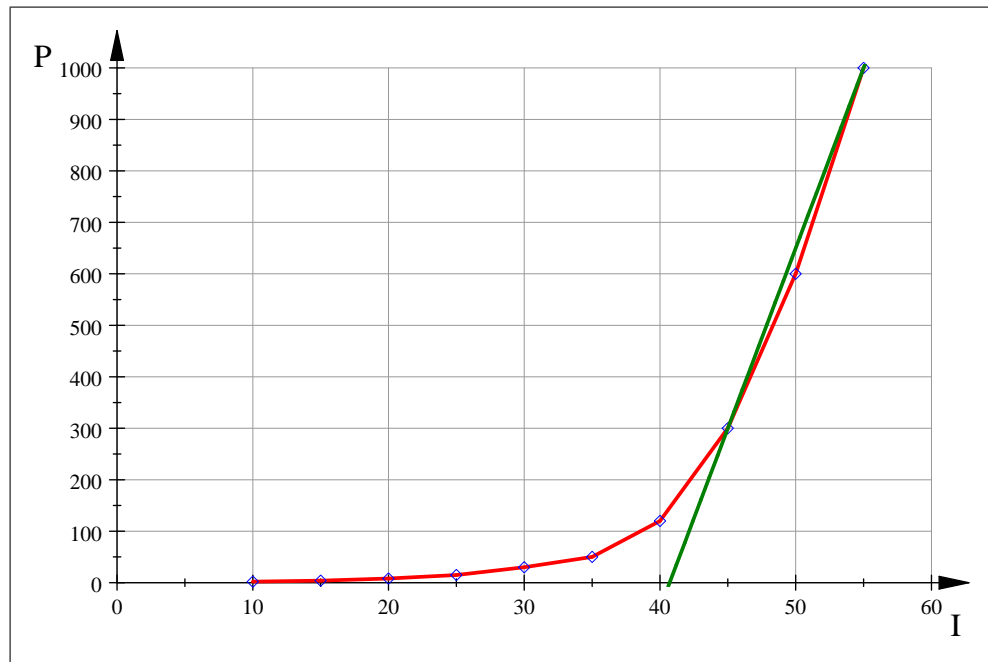
$$\delta f = c \frac{\delta\lambda}{\lambda^2} = \frac{3 \times 10^8 \times 6.2976 \times 10^{-4} \times 10^{-6}}{(1.3088 \times 10^{-6})^2} = 1.1029 \times 10^{11} \text{ Hz}$$

5. On mesure la puissance optique de diode, lorsque la température de diode est 60°C , pour différentes valeurs du courant appliqué:

I mA	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
P μW	2	4	8	15	30	50	120	300	600	1000

- (a) Tracer le graphe $P(I)$.

Réponse. (1pts)



- (b) Déterminer graphiquement l'intensité du courant de seuil (I_s).

Réponse. $\left(\frac{1}{2} \text{pts}\right)$ $I_s \approx 41 \text{ mA}$

- (c) Préciser par calcul la valeur de I_s .

(1pts)

$$\text{Réponse. } P_e = \frac{P_i}{2} \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} = \frac{1}{2} \eta_i \frac{I - I_s}{e} \frac{hc}{\lambda} \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} = K (I - I_s)$$

$$\text{Pour } I_1 = 45 \text{ mA on a } P_1 = 300 \mu\text{W} \Rightarrow 300 \times 10^{-3} = K (45 - I_s)$$

$$\text{Pour } I_2 = 55 \text{ mA on a } P_2 = 1000 \mu\text{W} \Rightarrow 1000 \times 10^{-3} = K (55 - I_s)$$

Réponse. $\frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 - I_s}{I_1 - I_s}$
 $\Rightarrow I_s = \frac{I_1 P_2 - I_2 P_1}{P_2 - P_1} = \frac{45 \times 1000 - 55 \times 300}{1000 - 300} = \frac{285}{7} = 40.714$

6. Sachant que l'intensité du courant de seuil à 0 K est 0.1 mA

(a) Que devient la valeur de I_s si la température devient 80 °C.

Réponse. (1pts) $I_s = I_0 \exp\left(\frac{T}{T_0}\right)$

pour $T = 60^\circ\text{C} = 273 + 60 = 333\text{ K}$ on a $I_s \approx 41\text{ mA}$

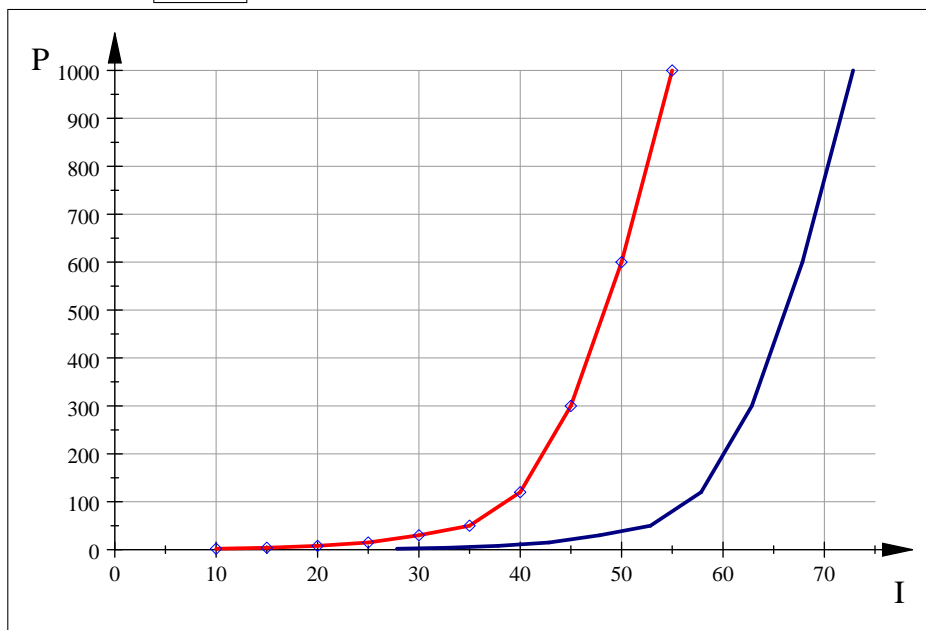
$$\frac{T}{T_0} = \ln\left(\frac{I_s}{I_0}\right) = \ln\left(\frac{41}{0.1}\right) = 6.0162$$

$$\Rightarrow T_0 = \frac{T}{6.0162} = \frac{333}{6.0162} = 55.351\text{ K}$$

Pour $T = 80^\circ\text{C} = 273 + 80 = 353\text{ K}$: $I_s = 0.1 \exp\left(\frac{353}{55.351}\right) = 58.844$

(b) Retracer le graphe $P(I)$.

Réponse. (1pts) le décalage de toute la courbe est de $58.84 - 41 = 17.84$



7. Calculer, pour les deux températures, l'efficacité quantique externe et le temps de réponse.

Réponse. (1pts) $\eta_d = \frac{\Delta P}{E_g \Delta I} = \frac{P}{(I - I_s) E_g} = \frac{\lambda_{\mu\text{m}} P}{1.24 (I - I_s)}$ et $\eta_{ext} = \eta_d \left(1 - \frac{I_s}{I}\right)$

$$T = 60^\circ\text{C} : \begin{array}{l} I = 55\text{ mA}, I_s \approx 40.7\text{ mA} \\ P = 1000\ \mu\text{W} = 1\text{ mW} \end{array}$$

$$\eta_d = \frac{1.3088 \times 1}{1.24 \times (55 - 40.7)} = 7.3\% \Rightarrow \eta_{ext} = 0.073 \times \left(1 - \frac{40.7}{55}\right) \approx 2\%$$

$$T = 80^\circ\text{C} : \begin{array}{l} I = 70\text{ mA}, I_s \approx 58.8\text{ mA} \\ P = 800\ \mu\text{W} = 0.8\text{ mW} \end{array}$$

$$\eta_d = \frac{1.3088 \times 0.8}{1.24 \times (70 - 58.8)} = 7.5392 \times 10^{-2} \Rightarrow \eta_{ext} = 7.5392 \times 10^{-2} \left(1 - \frac{58.8}{70}\right) = 0.16$$