Institut des Sciences Appliquées et Economiques
Electronique B7
Télécommunications Optiques

Deuxième session 2003-2004 **Deuxième composition**
Documents autorisés:Livre du cours: Ch.9 **Durée : 2 heures**

Exercise 1 *On considère une photodiode fabriquée à la base d'un semi-conducteur d'énergie de gap* $1.43\ eV$ *à* $300\,\mathrm{K}$,*d'indice de réfraction* $n = 3.5$. *Le coefficient d'absorption à la longueur d'onde* $\lambda = 0.85\mu m$ *est* $\alpha_s = 10^5 m^{-1}$, *la largeur de la zone désertée est* $w_d = 40\mu m$, *la photodiode reçoit des photons du côté de la zone P de largeur:* $w_p = 10\mu m$

1. Calculer la longueur d'onde de seuil de cette photodiode
2. Définir l'efficacité quantique et établir son expression en fonction de α_s, w_d, w_p et n . Calculer sa valeur numérique
3. Définir la sensibilité spectrale d'une photodiode et calculer sa valeur numérique.
4. Si la photodiode reçoit 3×10^{11} photons de longueur d'onde $0.85\ \mu m$ sous forme d'une impulsion de durée $100ms$ Calculer le nombre des électrons collectés et l'intensité du photocourant.
5. La photodiode est supposée à avalanche et l'intensité du courant de sortie est $51\ mA$. Calculer le facteur de multiplication

Exercise 2 *On considère une photodiode de bande passante* $\Delta f = 5\ MHz$.

Calculer la puissance optique incidente nécessaire pour telle photodiode, fonctionnant à la longueur d'onde $\lambda = 1\mu m$, *pour avoir un rapport signal-bruit de* $50\ dB$. *On suppose que seuls les bruits quantiques sont importants et que la photodiode est idéale* $\eta = 1$

Exercise 3 *On considère une photodiode de sensibilité spectrale* $S_\lambda = 0.5A/W$ *pour la longueur d'onde* $\lambda = 0.85\mu m$.

Déterminer la puissance optique minimale demandée pour avoir une probabilité d'erreur 10^{-7} *avec un débit numérique d'ordre de* $35Mbits/s$.

Exercise 4 *Pour la transmission numérique de 20 Mbits/s sur fibres optiques, sur une distance de 7 km, on a la structure suivante: Une LED de longueur d'onde* $0.85\mu m$, *émet une puissance optique moyenne* $100\mu W$ *injectée directement dans une fibre à gradient d'indice de diamètre de coeur* $50\mu m$ *vers une photodiode PIN convenablement choisie. L'atténuation linéique totale dans la fibre est* $\alpha_f = 2.6$ *dB/km, la perte par liaison fibre-fibre est* $\alpha_{ff} = 0.5dB$ *sur chaque liaison , où on a 7 fibres chacune de longueur 1 km, la perte due à la connexion fibre-détecteur est* $\alpha_{fd} = 1.5\ dB$. *La puissance exigeante pour la photodiode est* $41\ dBm$ *pour avoir une probabilité d'erreur d'ordre* 10^{-10} . *La marge proposée est* $6\ dB$.

Ecrire le budget de puissance optique du système et vérifier la validité de telle liaison de point de vue de puissance .

Solutions

Solution 1 .

1. La photodiode de largeur de bande interdite E_g est sensible aux photons d'énergie $\hbar\omega \geq E_g$ ou
$\dfrac{hc}{\lambda} \geq E_g \Longrightarrow \lambda \leq \dfrac{hc}{E_g} = \dfrac{1.24}{E_g}$ avec E_g en eV et λ en μm : $\lambda_s = \dfrac{1.24}{E_g} = \dfrac{1.24}{1.43} = 0.86713 \mu m$

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
$R = \left(\dfrac{n-1}{n+1}\right)^2 = \left(\dfrac{3.5-1}{3.5+1}\right)^2 = 0.30864$.
La puissance émergente dans la région P est $(1-R) P_0$, en traversant la distance w_p dans la zone P , la puissance devient $(1-R) P_0 \exp(-\alpha_s w_p)$, et en traversant 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
$$\eta = \frac{P_u}{P_0} = (1-R) \exp(-\alpha_s w_p) [1 - \exp(-\alpha_s w_d)]$$
$$= (1 - 0.30864) \times \exp(-10^5 \times 10 \times 10^{-6}) \times [1 - \exp(-10^5 \times 40 \times 10^{-6})]$$
$$= 0.69136 e^{-1} [1 - e^{-4}] = 0.24968$$

3. La sensibilité spectrale d'une photodiode représente le photocourant généré I_p par unité de puissance incidente P_0: $S_\lambda = \dfrac{I_p}{P_0}$
Si on suppose que chaque photon absorbé se transforme en électron alors : $\eta = \dfrac{N_e}{N_p}$; N_p est le nombre des photons incidents et N_e le nombre des photoélectrons, donc : $\eta = \dfrac{I_p/e}{P_0/hf} = \dfrac{I_p hc}{e P_0 \lambda} = S_\lambda \dfrac{hc}{e\lambda} = S_\lambda \dfrac{1.24}{\lambda_{(\mu m)}}$
Alors $S_\lambda = \eta \dfrac{\lambda}{1.24} = 0.24968 \times \dfrac{0.85}{1.24} = 0.17115$ A/W
$I_p = S_\lambda P_i = 0.17115 \times 3 = 0.51345$ mA

4. $\eta = \dfrac{N_e}{N_p} \Rightarrow N_e = \eta N_p = 0.24968 \times 3 \times 10^{11} = 7.4904 \times 10^{10}$

5. $M = \dfrac{I_s}{I_p} = \dfrac{51}{0.51345} = 99.328$

Solution 2 $\lambda = 1\mu m \quad \Delta f = 5\times 10^6 Hz$

Les bruits quantiques sont donnés par: $\left\langle i_q^2 \right\rangle = 2eI_p\Delta f$ *avec e est la charge de l'électron* $e = 1.6\times 10^{-19}$, Δf *la bande passante effective de photodiode et* I_p *l'intensité du photocourant*

le rapport signal à bruit est donné par $\dfrac{S}{N} = \dfrac{I_p^2}{\left\langle i_q^2\right\rangle + \left\langle i_{th}^2\right\rangle + \left\langle i_o^2\right\rangle}$ *avec* $\left\langle i_q^2\right\rangle$ *est la valeur quadratique moyenne du bruit quantique,* $\left\langle i_{th}^2\right\rangle$ *est la valeur quadratique moyenne du bruit thermique, et* $\left\langle i_o^2\right\rangle$ *est la valeur quadratique moyenne du bruit d'obscurité.*

Puisque seuls les bruits quantiques sont dominants alors le rapport signal à bruit s'écrit:
$\dfrac{S}{N} = \dfrac{I_p^2}{\left\langle i_q^2\right\rangle} = \dfrac{I_p^2}{2qI_p\Delta f} = \dfrac{I_p}{2q\Delta f}$

Calculons l'intensité du photocourant en fonction de la puissance optique incidente:

L'éfficacité quantique de photodiode est donnée par : $\eta = \dfrac{I_p hf}{Pq} = \dfrac{I_p hc}{Pq\lambda} = \dfrac{I_p\times 1.24}{P\lambda_{(\mu m)}}$

La photodiode est supposée idéale ($\eta = 1$) *donc :* $I_p = \dfrac{P\lambda}{1.24}$ *et par suite*

$\dfrac{S}{N} = \dfrac{I_p}{2q\Delta f} = \dfrac{P\lambda}{2\times 1.24q\Delta f}$ *et finalement on trouve:* $P = \dfrac{2.48\times q\times \Delta f}{\lambda}\times\left(\dfrac{S}{N}\right)$

On a $\left.\dfrac{S}{N}\right|_{dB} = 50\ dB = 10\log_{10}\dfrac{S}{N} \implies \dfrac{S}{N} = 10^5$

$\implies P = \dfrac{2.48\times q\times\Delta f}{\lambda}\times\left(\dfrac{S}{N}\right)$

$= \dfrac{2.48\times 1.6\times 10^{-19}\times 5\times 10^6}{1}\times(10^5) = 1.984\times 10^{-7}\ W = 0.198\mu W$

$P_{dB} = 10\log_{10}(1.984\times 10^{-7}) = -67.025\ dB = -37.025\ dBm$

Solution 3 *Dans le cas de distribution de Poisson, la probabilité d'erreur s'exprime en fonction du nombre moyen de photons détectés* $\widetilde{N}$ *par:* $P_e = \exp\left(-\widetilde{N}\right)$. *Si la probabilité demandée est de* 10^{-7} *alors:* $\exp\left(-\widetilde{N}\right) = 10^{-7} \implies \widetilde{N} = 7\times\ln(10) = 16.118$, *c'est le nombre moyenne de photons incidents pendant l'itervalle du temps* Δt. *Si* P_0 *est la puissance incidente alors l'énergie optique incidente est* $E = P_0\Delta t$ *tandis que l'énergie détectée est*
$\eta E = \eta P_0\Delta t = \widetilde{N}\dfrac{hc}{\lambda} \implies P_0 = \dfrac{\widetilde{N}hc}{\eta\lambda\Delta t}$

La sensibilité spectrale est $S_\lambda = \dfrac{I_p}{P_0} = \eta\dfrac{\lambda_{(\mu m)}}{1.24}$

On peut écrire P_0 *sous la forme* $P_0 = \dfrac{\widetilde{N}hc}{\eta\lambda\Delta t} = \dfrac{\widetilde{N}hce}{\eta\lambda e\Delta t} = \dfrac{\widetilde{N}e1.24}{\eta\lambda\Delta t} = \dfrac{\widetilde{N}e}{S_\lambda\Delta t}$

Si on suppose que les éléments binaires sont équiprobables: $P_e(0) = P_e(1) = \dfrac{1}{2}$

c'est-à-dire on a $\dfrac{b}{2}$ *bits/s sont les* (1), *donc :* $\dfrac{1}{\Delta t} = \dfrac{b}{2}$

Finalement $P_0 = \dfrac{\widetilde{N}eb}{2S_\lambda} = \dfrac{16.11\times 1.6\times 10^{-19}\times 35\times 10^6}{2\times 0.5} = 9.0216\times 10^{-11}W$

en dB: $P_{0dB} = 10\log_{10}(9.0216\times 10^{-11}) = -100.45\ dB = -70.44\ dBm$

Solution 4 $B = 20$ *Mbits/s,* $L = 7\ km$, $\lambda = 0.85\ \mu m$, $P_i = 100\mu W$, $a = 50\mu m$, $\alpha_f = 2.6$ *dB/km,* $\alpha_{ff} = 0.5\ dB$, *7 fibres* $L = 1\times 7 = 7\ km$, $P_e = 10^{-10}$, $M = 6\ dB$, $P_r = 41\ dBm$.

1. *La puissance injectée dans la fibre est :* $P_{i(W)} = 100\ \mu W = 10^{-4}W$

   $\Rightarrow P_{i(dB)} = 10 \times \log_{10}(10^{-4}) = -40\ dB$

   La sensibilité de photodiode est : $P_r = -41 dBm = -71\ dB$

   L'excés en puissance est: $P_i - P_r = -40 - (-71) = 31\ dB$

   Perte dans la fibre: $\alpha_f \times L = 2.6 \times 7 = 18.\,2\ dB$

   Perte de connexions fibre-fibre: $\alpha_{ff} \times 6 = 0.5 \times 6 = 3\ dB$

   Perte par connexion fibre photodiode$=1.5\ dB$, *Marge:* $6\ dB$

   Perte totales: $\alpha_T = 18.2 + 3 + 1.5 + 6 = 28.\,7$

   $(P_i - P_r) - \alpha_T = 31 - 28.7 = 2.\,3\ dB$

   ce système est donc valable de point de vue de puissance .