

Chapitre 5 : Photosdétecteurs pour les Télécommunications optiques

5-1 Introduction :

Le photodétecteur est un composant essentiel dans les communications par fibres optiques. Son rôle est de convertir, en énergie électrique, la puissance optique reçue (photons).

L'énergie électrique délivrée par le photodétecteur subit un traitement électronique.

5-2 Exigence :

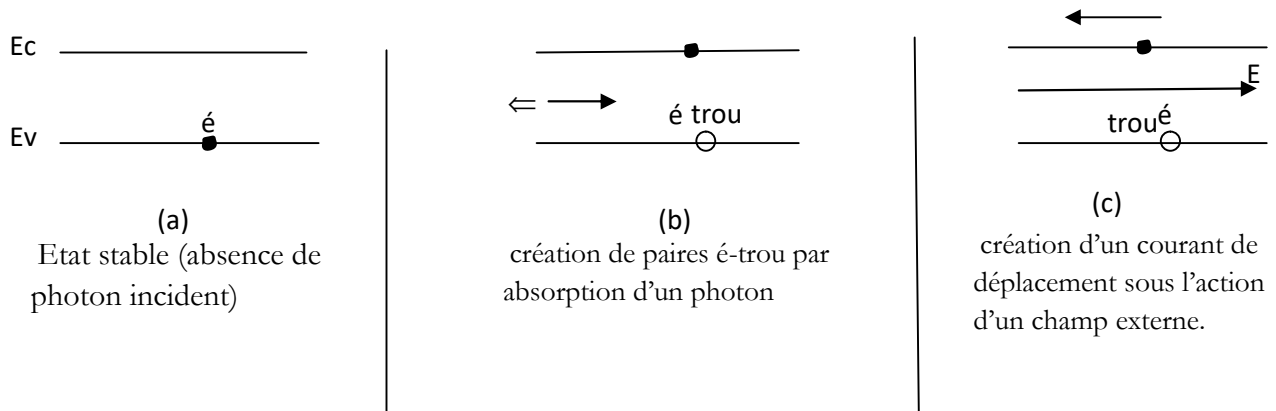
Lorsque l'on considère le bilan d'une liaison par fibre optique, les performances du système dépendent en partie de ce photodétecteur. Ce composant intervient grâce à la puissance seuil qu'il peut détecter et au bruit qu'il introduit.

Lorsque l'on veut augmenter l'espacement entre récepteurs (régénérateurs) afin de réduire le coût total d'une liaison, il est nécessaire de choisir un détecteur de grande qualité. Pour cela, on demande au photodétecteur :

- d'avoir une grande sensibilité à la longueur d'onde de fonctionnement (autour de 0.85 μm , de 1.3 μm et 1.55 μm).
- de posséder une bande passante convenable.
- d'introduire un bruit minimum (courant d'obscurité le plus faible possible).
- de reconstituer le signal original avec une grande fidélité et d'offrir un bon couplage avec la fibre.

5-3 Principe de la Photodétection :

Sous l'effet d'un photon d'énergie suffisante, un électron de la bande de valence est arraché et passe dans la bande de conduction produisant une paire de porteurs (électron – trou). Les porteurs sont dissociés sous l'action d'un champ électrique et participent au photocourant de déplacement.



Le photon incident ne peut être absorbé que si son énergie ($h.f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$) est au minimum égale au GAP ($\delta E = E_c - E_v$) du matériau.

$$\frac{h \cdot c}{\lambda} \geq G = \delta E, \quad \lambda \leq \frac{h \cdot c}{G} = \text{Constante pour un matériau donnée}$$

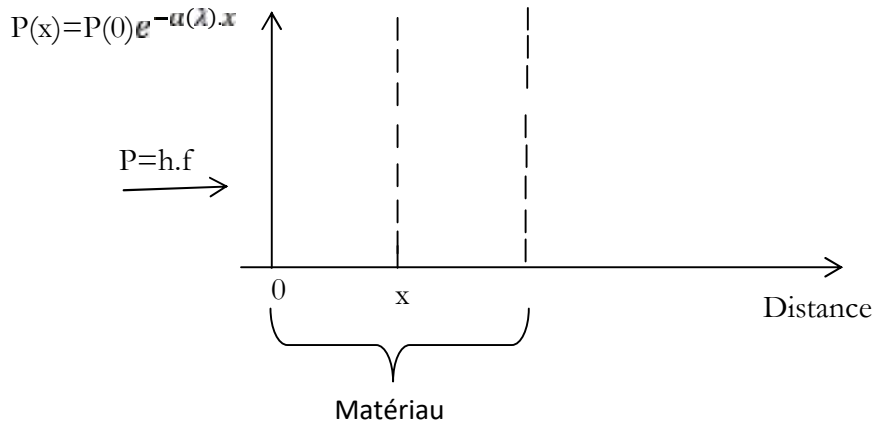
$$h \cdot f \geq G = \delta E, \quad f \geq \frac{G}{h}$$

5-4 Caractéristiques principales des photodétecteurs :

Les photodétecteurs sont caractérisés par le coefficient d'absorption, la longueur d'onde de coupure, le rendement quantique ainsi que la sensibilité.

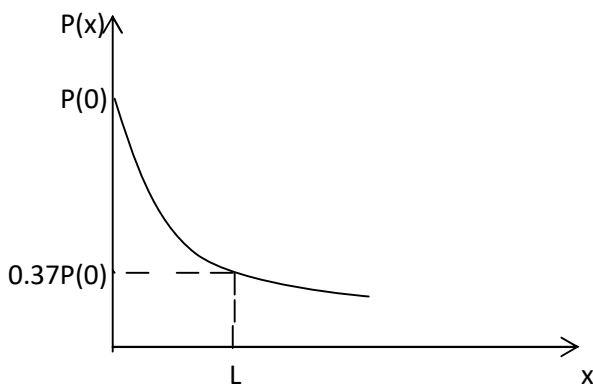
5-4-1 Coefficient d'absorption :

L'absorption du flux lumineux par le matériau suit une loi exponentielle donnée par



où $\alpha(\lambda)$: est le coefficient d'absorption du matériau fonction de la longueur d'onde.

x : est la profondeur de pénétration de l'onde lumineuse dans le matériau (épaisseur du matériau pour laquelle le flux lumineux chute de 1 Neper correspondant à une absorption énergétique de 63%.



5-4-2 Rendement quantique :

Il nous renseigne sur le taux de conversion des photons en paires d'électrons-trous. Il est défini comme étant le rapport entre le nombre d'é créé et le nombre de photons incidents.

$$\text{Rendement} = \frac{\text{nbre d'é créés}}{\text{nbre de photons incidents}}$$

$R = \frac{n_e}{n_p}$

Pour les dispositifs sans gain interne, le rendement quantique est généralement inférieur à l'unité. Ceci s'explique par le fait que parmi tous les photons incidents, seul un certain nombre d'entre eux créent des paires e^- -trous.

Dire que le rendement quantique est de 75% signifie que 75 e^- ont été créés par 100 photons incidents.

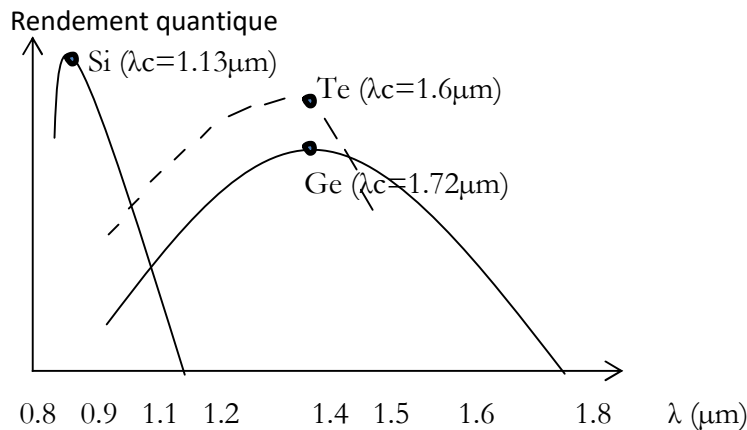


Fig. : Evolution du rendement quantique en fonction de la longueur d'onde pour différents matériaux.

Il est à noter que le rendement quantique dépend du coefficient d'absorption du matériau et est défini pour une longueur d'onde donnée $\rightarrow \eta = \eta(\lambda)$.

Connaissant $P(0)$, le flux lumineux incident ainsi que le rendement quantique $\rightarrow \eta$, il est aisé de calculer le photocourant qui est donné par :

$$I_{ph} = \eta(\lambda) \cdot \frac{e}{hc} \cdot P(0) \cdot \lambda$$

Facteurs diminuant le rendement quantique

Le taux de conversions photon-électron peut être diminué par les facteurs suivants :

- La réflexion de l'énergie lumineuse sur l'interface air-détecteur due à la différence d'indice de réfraction. Le coefficient de réflexion de cette interface est donné par :

$$R = 1 - \frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}$$

Cette réflexion peut être minimisée grâce à un liquide adaptateur d'indice.

Exercice :

Un flux lumineux de $3 \cdot 10^{11}$ photons de $\lambda = 0,85 \mu m$ irradie une photodiode et crée $1,2 \cdot 10^{11}$ électrons. Déterminer le rendement quantique.

$$\eta = \frac{n}{n_p} = \frac{1,2 \cdot 10^{11}}{3 \cdot 10^{11}} = 40\%$$

5-4-3 Sensibilité du photo-détecteur

Elle est déterminée pour une puissance incidente de 1 watt et représente la caractéristique de transfert du photo-détecteur. Elle caractérise le rendement global de conversion de la puissance lumineuse en courant électrique :

$$S = \frac{I_p \text{ (A)}}{P \text{ (W)}}$$

$$\left. \begin{aligned} I_p &= \frac{n e \cdot \epsilon}{t} \\ P &= n p \frac{h f}{t} \end{aligned} \right\} \Rightarrow S = \frac{n \cdot \epsilon \cdot t}{n \cdot t \cdot h \cdot f} = \eta \cdot \frac{\epsilon \cdot \lambda}{h \cdot c} \Rightarrow S = 0.805 \cdot \eta(\lambda) \cdot \lambda(\mu\text{m})$$

$$S_{A/W} = 0,805 \cdot 0,40 \cdot 0,85 = 0,27 \text{ A/W}$$

L'exercice précédent : $\eta = 40\% = 0,40$

$$\Rightarrow S_{A/W} = 0,805 \cdot 0,40 \cdot 0,85 = 0,27 \text{ A/W}$$

Dans le tableau suivant nous avons regroupé les caractéristiques de certains photodétecteurs :

Matériau	λ (μm)	η	$S(\text{A/W})$
Si	0,85	0,85	0,58
Ge	1,27	0,60	0,61
III - V	1,27	0,85	0,86
GaInAsP			0,7

Au vu de ce tableau, nous remarquons que les éléments du groupe III-V ont une sensibilité plus élevée que les éléments simples. Ils sont pour cela mieux adaptés à la réalisation de photodétecteurs pour les télécommunications.

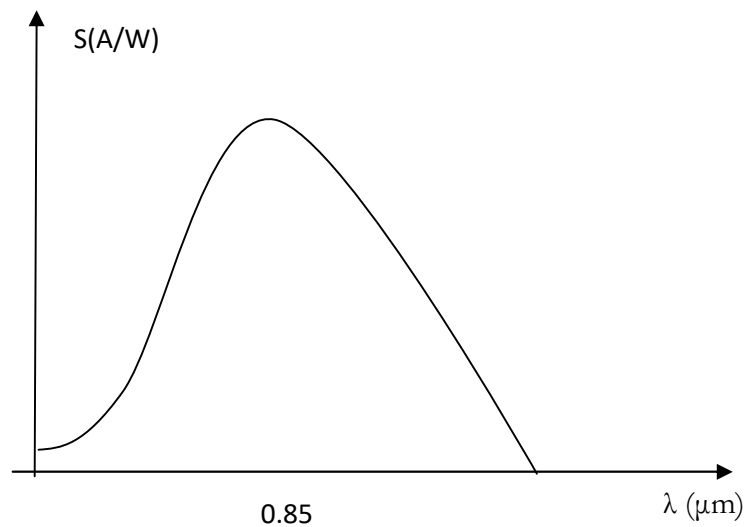


Fig. : évolution de la sensibilité du photo-détecteur en fonction de la longueur d'onde pour le Silicium (Si)

5-5- Différents types de photo-détecteurs

En télécommunications optiques, les détecteurs utilisés sont à base des diodes semi-conductrices réalisées à partir de jonctions polarisées inverse. Elle fonctionne suivant le processus inverse de sources optiques (diode laser et DEL). Ces photodiodes peuvent être classées en deux catégories : celles qui n'ont aucun gain interne (PN et PIN) et celles qui ont un gain interne (APD).

5-5-1 Photodiodes PN :

5-5-1-1 Principe :

Elles sont réalisées à partir de jonction PN polarisée en inverse. Dans une telle jonction, il existe une zone déserte ou règne un champ électrique qui s'oppose au passage des porteurs majoritaires.

Lorsqu'un photon incident est absorbé, des paires de porteurs sont générés aussi bien dans la zone déserte qu'en dehors de celle-ci (zone de diffusion).

Dans la zone déserte, les porteurs sont dissociés, par le champ électrique et chaque porteur se déplace vers la région où il majoritaire et crée ainsi un courant de déplacement.

5-5-1-2 Sensibilité

Les photons incidents d'énergie supérieure à celle du GAP ($h.f$) sont absorbés aussi bien dans la zone déserte que dans la zone de diffusion. Seuls ceux de la zone déserte sont accélérés et participent au courant de diffusion.

Sensibilité grande $\Longrightarrow$ Zone d'espace large

5-5-1-3 Temps de réponse

Il correspond au temps que mettent les porteurs pour quitter la zone déserte.

Pour diminuer le temps de réponse du dispositif, il y a lieu de diminuer la largeur de la zone déserte.

Temps de réponse rapide $\Longrightarrow$ zone d'espace étroite.

5-5-1-4 Bande passante

Du fait de l'apparition de charges $+q$ et $-q$ de part et d'autre de la jonction, il y a apparition d'une capacité de jonction exprimée par la relation suivante :

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S}{w}$$

où w : la largeur de la zone déserte

S : surface de la jonction

La capacité de jonction est inversement proportionnellement à la zone déserte qui dépend de la tension de polarisation. Il est nécessaire de savoir que cette capacité introduit une constante de temps qui limite la Bande Passante (B_p) de la photodiode. Pour augmenter cette dernière, il revient à augmenter la largeur de la zone d'espace (ordre de grandeur pour $w=10\mu m$. on a une $B_p = 3GHz$).

Bande passante grande $\implies$ zone d'espace large

Un compromis doit être fait entre la sensibilité, le temps de réponse et la bande passante.

5.5.2 Photodiode PIN :

Cette photodiode polarisée en inverse est réalisée à partir de 3 couches de SC. Deux couches fortement dopées $P+$ et $N+$ entre lesquelles existe une couche de grande résistivité où il existe très peu de charges mobiles. La profondeur de pénétration des photons dans la photodiode dépend du type de matériau utilisé ainsi que de la longueur d'onde. Plus celle-ci est élevée, plus l'onde pénètre dans le semi-conducteur. Les paires d'é-trous créés par les photons incidents sont rapidement dissociés et collectés par les électrodes.

$P+$	I	$N+$
------	-----	------

Ordre de grandeurs : - Rendement $\approx 85\%$

- Temps de réponse $\approx 1ns$

- Courant d'obscurité : $\approx 1 nA$ (C'est le courant mesuré en l'absence de flux lumineux pour la jonction polarisée en inverse).

5.3 Photodiode à avalanche

5.3.1 Constitution :

Lorsque la puissance lumineuse à détecter est très faible, les courants détectés sont peu élevés (quelques nA) et se superposent au courant d'obscurité, conduisant à un mauvais rapport signal sur bruit. Pour augmenter ce dernier, il est nécessaire que le courant détecté soit plus important et ceci grâce à l'utilisation de diodes à gain interne de type avalanche.

N	P	I	P+
---	---	---	----

Photodiode à avalanche (APD)

5.5.3.2 Principe :

Lorsque le champ électrique existant dans la zone déserte est suffisamment intense (polarisation inversée), les porteurs accélérés par le champ peuvent atteindre l'énergie d'ionisation du matériau et produire la rupture des liaisons de valence. Il y a dans ce cas création d'autre paires secondaires (électrons-trous) qui sont dissociés par le champ intense et sont accélérés et accentuent le processus d'avalanche.

5.5.3.3 caractéristiques :

a) Gain d'avalanche :

Le gain d'avalanche est exprimé par :

$$M = \frac{\text{Nombre de paires secondaires}}{\text{Nombre de paires primaires}}$$

b) Tension de polarisation :

La création de champ intense au voisinage de la jonction nécessite une tension d'alimentation très élevée. Le phénomène d'avalanche ne se déclenche qu' à partir d'une certaine tension (100V à 400V) qui est proportionnelle à épaisseur de la zone d'absorption. V_c est la tension de claquage du matériau, alors on a

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V}{V_c}\right)^m} \text{ où } 3 \leq m \leq 6$$

Le gain d'avalanche M est fonction de la tension de polarisation inverse V .

C) Temps de réponse :

Il est limité par deux phénomènes :

- le temps de transit des porteuses dans la zone d'absorption
- le temps de déclenchement du processus d'avalanche.