

Chapitre 3. Emetteurs et Récepteurs Electro-optiques

I. Introduction

Le rôle des composants optoélectronique est de convertir le signal électrique en signal optique et réciproquement, par l'intermédiaire de diodes émettrices et réceptrices à semiconducteurs. Dans ce chapitre, nous nous intéressons dans une première partie à l'émission de la lumière et sa mise en œuvre dans les diodes à semiconducteurs pour donner soit des diodes électroluminescentes (light emitting diodes, LED) soit des diodes laser, la seconde partie est consacrée aux récepteurs électrooptiques en particulier les photodiodes PIN et les diodes à avalanche.

II. Sources de lumière à semi-conducteurs

En télécommunications optiques, la nécessité d'utiliser des bandes passantes de plus en plus larges impose le choix de sources à spectres réduits telles que les diodes Laser (DL) et les diodes électroluminescentes (LED). La LED présente, contrairement au Laser, un spectre d'émission assez large et un diagramme de rayonnement moins directif. Elle est utilisée essentiellement dans les systèmes de transmissions qui ne nécessitent pas de très grandes bandes passantes. La DL est surtout utilisée dans les systèmes de transmission à très grandes distances. Pour être utile dans les systèmes

de télécommunications, une source de lumière doit posséder des caractéristiques compatibles pour les transmissions par fibres optiques. La puissance émise par la source doit être suffisante et permettre un couplage facile avec le support de transmission (fibre optique).

II.1. Principe de l'électroluminescence

Dans les semiconducteurs à gap direct, un photon peut être émis si un électron transite de la bande de conduction à la bande de valence, il s'agit de la recombinaison d'une paire électron-trou. Ce phénomène est radiative (figure 1), on a donc une émission de lumière appelé électroluminescence, l'énergie du photon émis est donnée par :

$$h\nu \approx E_g(\text{eV}) = \frac{1,24}{\lambda(\mu\text{m})} \quad (1)$$

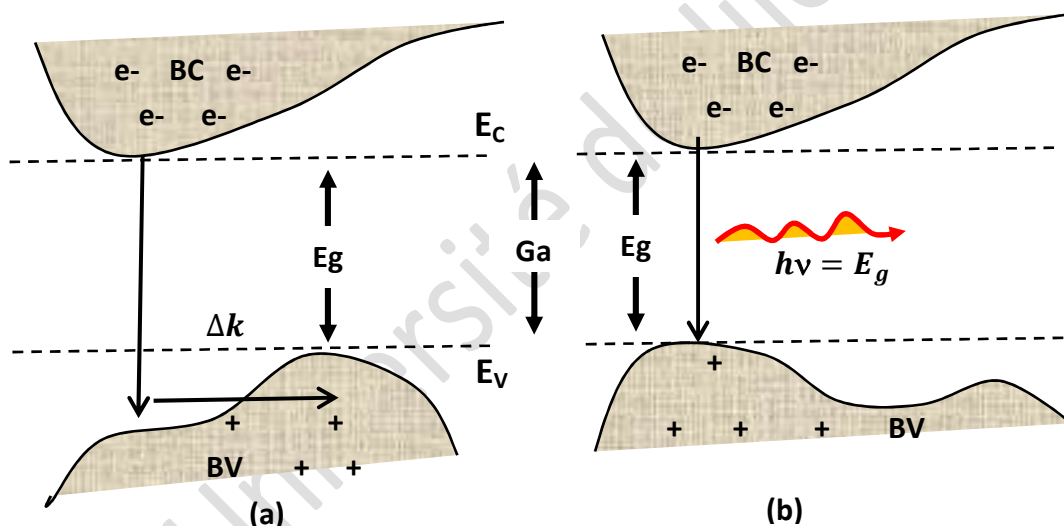


Figure 1. (a) Transition non radiative directe, (b) Emission d'un photon par recombinaison électron-trou dans une transition directe radiative.

La transition entre la bande de conduction et la bande de valence est directe sans changement de vecteur d'onde. Une structure de diode permet de créer un grand nombre de recombinaisons de porteurs minoritaires injectés à travers la jonction PN et l'émission d'un grand nombre de photons.

Le rayonnement émis par le semiconducteur autour d'une longueur d'onde centrale d'émission λ_0 , présente une largeur spectrale de $\Delta\lambda$. Le spectre de l'émission de l'émission spontanée a une forme générale relativement gaussienne (figure 2).

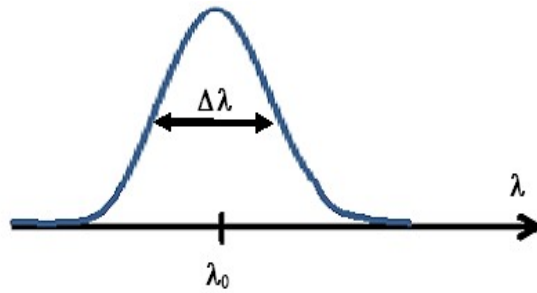


Figure 2. Spectre de l'émission spontanée

Les semiconducteurs III-V sont essentiellement utilisés pour réaliser des émetteur de lumière en particulier (Figure 3) le GaAs ($\lambda = 0,9 \mu\text{m}$) et le GaP ($\lambda = 0,6 \mu\text{m}$) ainsi que d'autres alliages dont le $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ qui émet dans la deuxième ou la troisième fenêtre télécom ($\lambda = 1200$ à 1600 nm) en fonction de x et y . Les paramètres de maille cristallographiques entre les différents éléments de l'alliage doivent être voisins afin de ne pas provoquer des défauts cristallins pouvant conduire à une baisse d'efficacité.

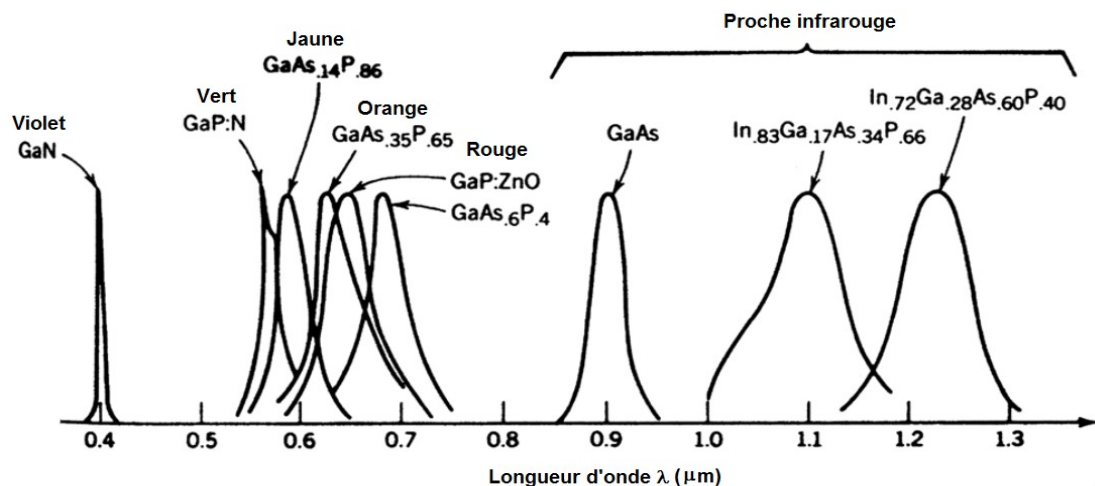


Figure 3. Distribution spectrale d'émission de LED pour différents matériaux

II.2. Émetteurs optiques à semiconducteurs

II.2.1. Diodes électroluminescente (LED : Light Emetting Diode)

Elle est basée sur le phénomène de l'électroluminescence (phénomène par lequel une excitation électrique donne lieu à l'émission d'une radiation électromagnétique). Sous certaines conditions, la recombinaison de porteurs de charge provoque l'émission spontanée d'une radiation lumineuse. En optoélectronique, le procédé utilisé est celui de l'injection de porteurs par polarisation en direct d'une jonction à semi-conducteur.

Afin d'obtenir une émission lumineuse en quantité suffisante, le matériau de base dans lequel est formée la jonction, est dopé jusqu'à la dégénérescence.

La diode électroluminescente (LED) est le composant émetteur le plus simple constituée d'une jonction PN (Figure 4) est une source souvent utilisée avec des fibres multimodes (rayon du cœur assez important). La LED utilise le principe de l'émission spontanée (figure 2). Elle émet un large spectre d'où une forte sensibilité à la dispersion chromatique.

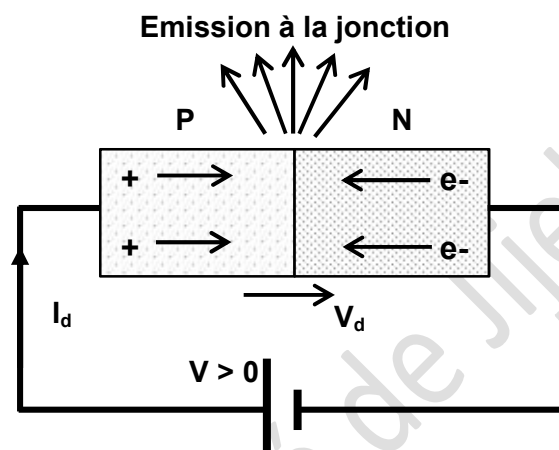


Figure 4. Jonction PN polarisée en direct

La bande de conduction d'un semi-conducteur est remplie d'électrons injectés grâce à un courant de polarisation direct. Un photon est créé lorsqu'un électron se recombine avec un trou dans la bande de valence. L'énergie émise est égale à l'énergie de la bande interdite du matériau semi-conducteur. Tous les photons émis ont une phase aléatoire et une direction quelconque. Le rayonnement est émis au niveau de la jonction lorsque la diode est polarisée en direct (figure 5). Pour obtenir une émission permanente de lumière il faut maintenir un gain positif dans le milieu semiconducteur.

Le courant d'injection I_d amène des trous qui au niveau de la jonction peuvent effectuer une recombinaison électron-trou donnant un photon, ce phénomène est caractérisé par le rendement quantique interne η_i de la LED.

- **Rendement quantique** est défini comme étant le rapport entre le nombre de photon créés et le nombre d'électrons injectés.

$$\eta_i = \frac{\text{Nombre de photons créés à l'intérieur}}{\text{Nombre d'électrons injectés (courant)}} \quad (2)$$

Ce coefficient η_i stipule le pourcentage de paires électron-trou effectivement transformées en photons lors de leur recombinaison.

L'absence d'amplification limite ce rendement quantique. Les recombinaisons (électron-trou) qui se produisent, ne sont pas toutes radiatives à cause des imperfections de la structure cristalline et de la présence d'impuretés.

La puissance interne émise au niveau de la jonction est :

$$P_{int} = \eta_i \cdot h\nu \frac{I_d}{q} \quad (3)$$

Le rendement externe d'une LED

$$\eta_{ext} = \frac{\text{Nombre de photons émis à l'extérieur}}{\text{Nombre d'électrons injectés (courant)}} \quad (4)$$

La puissance émise d'une LED est donnée par :

$$P_{LED} = \eta_{ext} P_{int} = \eta_{ext} \eta_i \cdot h\nu \frac{I_d}{q} \quad (5)$$

La puissance émise par une LED, doit tenir compte des pertes par réflexion à l'intérieur du matériau et des pertes par absorption.

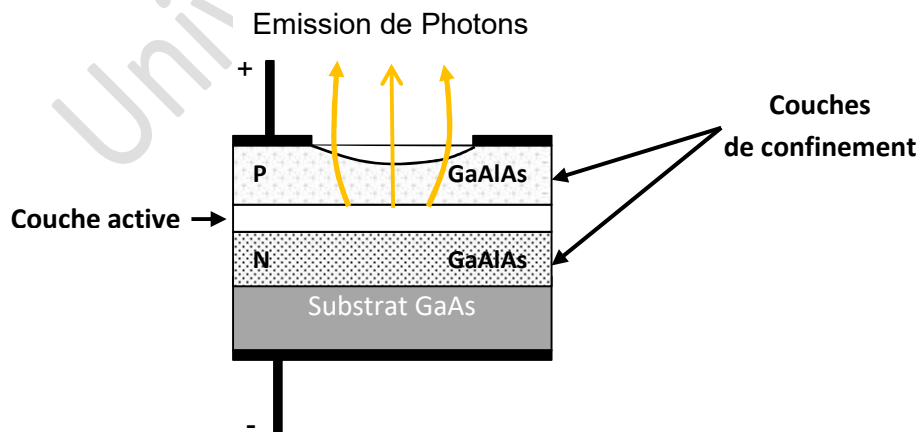


Figure 5. Structure d'une diode électroluminescente

La caractéristique de transfert permet de donner la puissance délivrée par la source LED en fonction de son courant de polarisation.

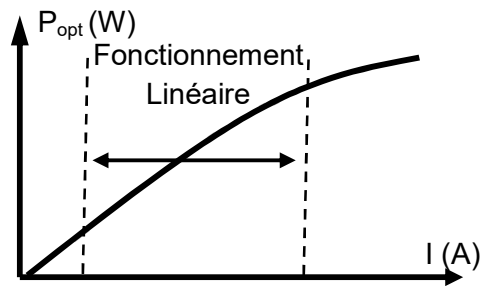


Figure 6. Caractéristique Puissance optique-courant de polarisation d'une LED.

Cette caractéristique est assez linéaire (figure 6), elle permet une bonne utilisation en analogique. La LED n'est pas un dispositif à seuil, elle nécessite donc un circuit d'alimentation assez simple. Elle est beaucoup plus stable en température qu'un Laser et ne nécessite pas de stabilisation en température.

Les LEDs sont caractérisées par leurs spectres d'émission, la puissance, le rendement, la luminosité et la fréquence de coupure.

Spectre d'émission (figure 7) : Pour les diodes électroluminescentes, on s'intéresse principalement aux deux paramètres suivants :

- **Longueur d'onde d'émission principale** : c'est la longueur d'onde λ_p à laquelle le spectre d'émission de la source atteint son maximum (en nm ou μm).
- **Largeur spectrale** : c'est la différence en longueurs d'ondes $\Delta\lambda$ là où l'émission atteint la moitié de sa valeur à la longueur d'onde principale (en nm).

La présence d'impuretés dans le matériau fait que ce type de source n'est pas monochromatique. En effet, les transitions, en présence d'impuretés, créent des niveaux intermédiaires (Gap intermédiaires). De plus, les longueurs d'ondes émises n'ont pas la même amplitude.

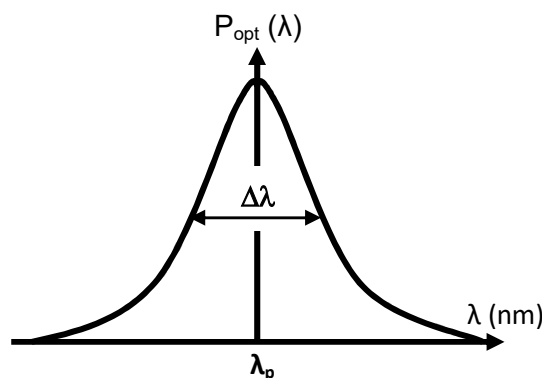


Figure 7. Largeur Spectrale d'une source LED.

Il est important de noter que la largeur spectrale de la source est déterminée à mi-puissance, elle est fonction de la largeur d'onde de fonctionnement. La lumière émise par une LED n'est pas monochromatique: élargissement spectral.

Le spectre d'émission d'une LED (distribution en longueur d'onde) dépend de trois facteurs :

- La concentration des porteurs,
- La bande d'énergie interdite,
- La géométrie du dispositif.

II.2.2. Diodes lasers (DL) (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

La diode laser appelée aussi laser à semiconducteur est une LED placée dans une cavité résonante (figure 8). Les mêmes matériaux et alliages utilisés pour les diodes électroluminescentes sont aussi utilisés pour les diodes lasers.

Elle est caractérisée par :

- Une large bande passante
- Une puissance émise importante
- Un bon rendement de couplage avec la fibre optique (meilleure efficacité de couplage optique avec la FO)

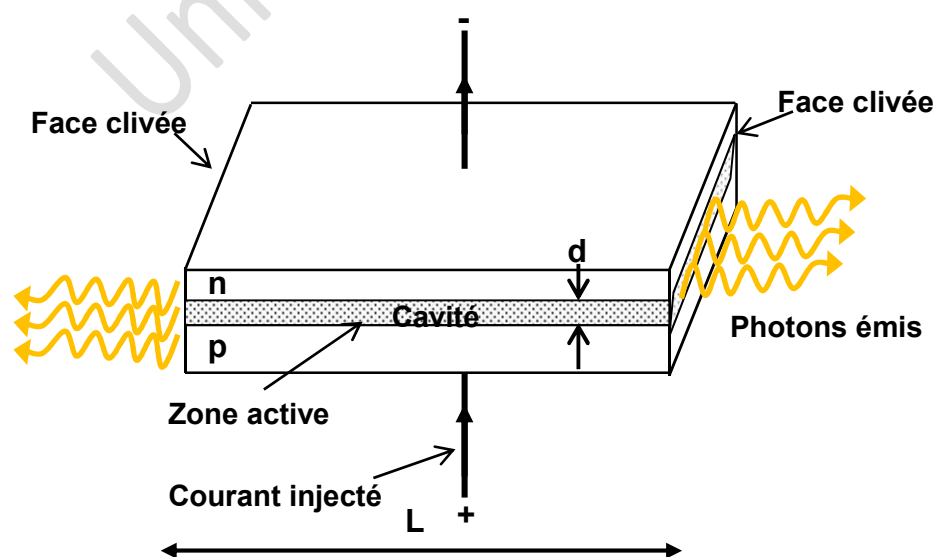


Figure 8. Structure de base d'une diode laser à semiconducteur avec deux miroirs clivés

Ainsi la diode laser est la source la mieux adaptée pour les télécommunications optiques. La structure de la diode laser est plus complexe, la lumière est guidée dans la couche active d'indice de réfraction supérieur à celui des couches de confinement. La lumière est émise par les deux extrémités du guide

- **L'amplification de la lumière**

Pour obtenir l'effet laser, il faut favoriser l'émission stimulée le plus possible. La couche active de la structure présente une cavité résonnante de type Fabry Péroth constituée d'un guide diélectrique plan, grâce à son indice plus élevé et à la réflexion partielle sur les deux faces clivées à ses extrémités. L'interface semiconducteur-air fournit un miroir diélectrique dont la réflectance R_m est :

$$R_m = \frac{(n_{sc} - 1)^2}{(n_{sc} + 1)^2} \quad (6)$$

$R_m = 0,30$ (30%) pour chaque face dans le cas du GaAs ($n_{GaAs} = 3,6$).

L'oscillation laser est réalisée lorsque le gain du milieu amplificateur dépasse les différents mécanismes de pertes du résonateur optique.

Il existe deux types de pertes :

- Perte intrinsèque α_m de la structure laser due aux coefficients de réflexion des miroirs qui représente la fuite des photons par ces miroirs :

$$\alpha_m = \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_{m1} R_{m2}} \quad (7)$$

où L représente la longueur de la cavité, R_{m1} et R_{m2} sont les coefficients de réflexion des facettes (miroirs).

- Perte parasite α_p qui provient des porteurs libres des contacts électriques, la diffusion.

La condition de seuil d'oscillation laser est alors :

$$\gamma_{seuil}(h\nu) = \alpha_p + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_{m1} R_{m2}} \quad (8)$$

La diode laser émet une lumière de grande pureté, quasiment monochromatique, elle est adaptée aux liaisons longue distance.

Le spectre d'émission présente un certain nombre de raies correspondant aux fréquences de résonance de la cavité ν_p .

$$\lambda_p = \frac{c}{\nu_p} = \frac{2nL}{p} \quad (9)$$

Avec : p entier (ordre du mode)

La distance intermodale est donnée par :

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2L} \frac{1}{\left(n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}\right)} \quad (10)$$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2NL} \quad (11)$$

$N \approx n$ (indice de groupe)

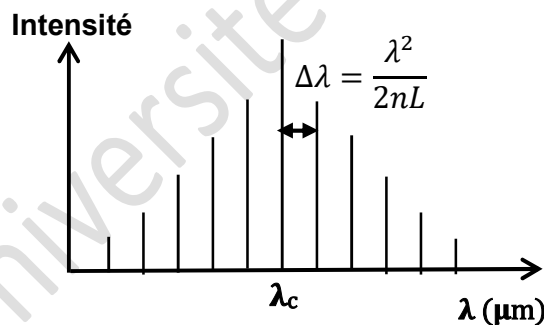


Figure 9. Spectre de raies d'émission de la diode laser

Le diagramme d'émission dépend des dimensions de la région émissive. Le guide d'onde qui constitue la cavité est suffisamment étroit pour être monomode. Le faisceau émis est relativement gaussien.

Les principales structures de diode laser sont :

- Les structures à guidage par gain ;
- Les structures à guidage par indice ;
- Les structures à puits quantiques ;
- Les structures à contre réaction distribuée ou DFB (Distributed Feed-Back).

III. Récepteurs électro-optiques

III.1. Principe de la photodétection

La photodétection consiste à convertir le signal lumineux issu du canal de transmission (fibre optique) en un signal électrique. En général, cette conversion s'accompagne d'un apport de bruit qui contribue à dégrader le signal.

Un photon absorbé par un semiconducteur (même à gap indirect) peut créer une paire électron-trou, à condition que $h\nu$ soit supérieur au gap E_g ($h\nu > E_g$) d'où la longueur d'onde de coupure est :

$$\lambda < \lambda_c(\mu\text{m}) = \frac{hc}{E_g} = \frac{1,24}{E_g(\text{eV})} \quad (12)$$

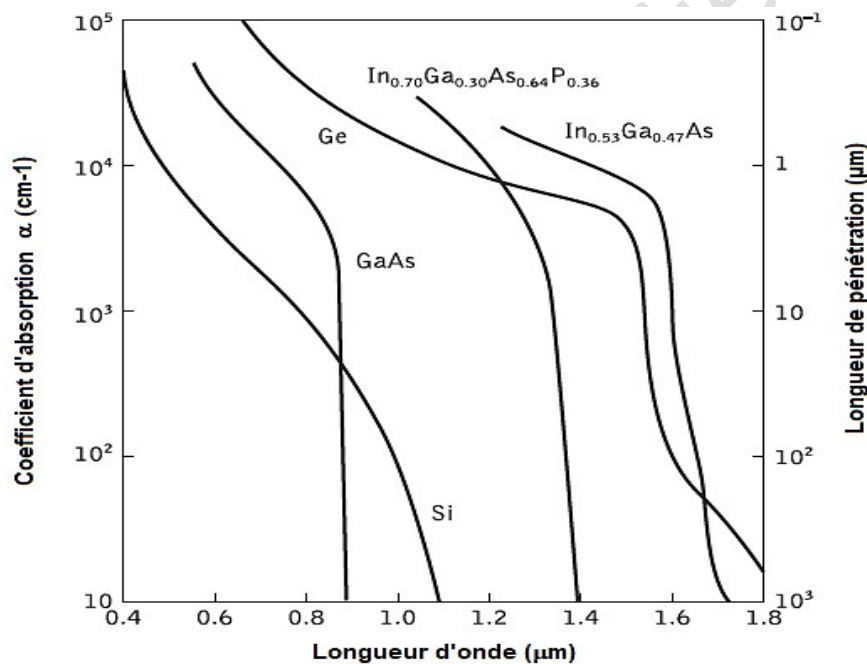


Figure 10. Coefficient d'absorption et longueur d'onde d'absorption de certains matériaux semiconducteurs

Les photons transmis par la fibre pénètrent dans le détecteur, à base de matériau semiconducteur. Absorbés, ils peuvent provoquer le passage d'électrons d'un état de la bande de valence à un état plus élevé de la bande de conduction. Dans cette dernière, les électrons moins liés deviennent libres. Le photon a donc laissé place à une paire électron-trou. Une différence de potentiel est appliquée afin d'empêcher les électrons de retomber dans son état le plus stable. Sous l'effet du champ électrique, les deux

types de porteurs sont séparés et entraînés vers des zones où ils sont majoritaires (P ou N). Les porteurs ainsi générés sont alors recueillis sous forme de photocourant. Le nombre de paires électron-trou est égal au nombre de photons absorbés.

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). Lorsqu'on considère le bilan d'une liaison par fibres optiques, les performances du système dépendent en partie de celles du photodétecteur. Ce composant intervient grâce à la puissance seuil qu'il peut détecter et au bruit qu'il introduit.

Lorsqu'on veut augmenter l'espacement entre répéteurs (régénérateurs) afin de réduire le coût total d'une liaison, il est nécessaire de choisir un détecteur de grande qualité.

Pour cela, les photodétecteurs doivent satisfaire les critères suivants :

- une grande sensibilité à la longueur d'onde de fonctionnement voulue (autour de $0,85\ \mu\text{m}$, $1,3\ \mu\text{m}$ et $1,55\ \mu\text{m}$, des trois fenêtres de télécommunication optique).
- une bande passante large, réponse rapide.
- un faible bruit (courant d'obscurité le plus faible possible).
- reconstitution du signal original avec la plus grande fidélité.
- un bon couplage avec la fibre.
- une bonne stabilité en température, insensibilité aux variations de température
- facile à mettre en œuvre.
- une grande fiabilité et un coût modéré.
- une durée de vie élevée
- faible consommation électrique et de petites dimensions.

Afin de satisfaire la plupart de ces conditions, le choix se porte sur les photodétecteurs à semiconducteur, qui présentent les avantages d'être très rapides et faciles à utiliser, bien que d'autres dispositifs soient plus sensibles. Dans ce paragraphe, nous rappellerons le principe de la photodétection avant d'étudier plus précisément deux exemples de photodétecteurs : la photodiode PIN et la photodiode à avalanche (PDA).

- **le rendement quantique** (η_Q) est donné par le rapport du Nombre d'électrons photocréés par rapport aux photons incidents :

$$\eta_Q = \frac{I_{ph}/q}{P_{opt}(\lambda)/h\nu} \quad (13)$$

où I_{ph} est le photocourant détecté, $q = e$ charge de l'électron, $P_{opt}(\lambda)$ la puissance optique dépendant de la longueur d'onde et $h\nu$ l'énergie du photon.

Il est à noter que le rendement quantique dépend du coefficient d'absorption du matériau et est défini pour une longueur d'onde donnée.

- **la sensibilité** (S) de la photodiode exprimée en ampères par watt ($A.W^{-1}$) et définissant le rapport du photocourant I_{ph} au flux énergétique (ou puissance optique P_{opt}) reçue.

$$S(\lambda) = \frac{I_{ph}}{P_{opt}(\lambda)} = \frac{\eta_Q e}{h\nu} \approx \eta_Q \frac{\lambda(\mu m)}{1,24} \quad (14)$$

Elle caractérise le rendement global de conversion de la puissance lumineuse en courant électrique, elle varie selon le coefficient d'absorption du matériau, et selon la largeur de la zone intrinsèque.

III.1. Différents types de photodétecteurs

Les photodétecteurs utilisés en télécommunications optiques sont presque exclusivement à base de semiconducteurs opérant en mode photovoltaïque. Il s'agit de photodiodes semiconductrices (PIN) réalisées à partir de jonctions polarisées en inverse. Elles fonctionnent suivant le processus inverse des sources optiques (LED et DL) ainsi que les photodiodes à avalanche (PDA).

III.1.1. Photodiode PIN

Les photodiodes sont les dispositifs les plus utilisés en photonique. Elles sont à base de semiconducteurs et bénéficient d'une taille réduite, d'une haute sensibilité et d'une réponse temporelle extrêmement rapide. La photodiode PIN utilise la photodétection dans un semiconducteur sachant que seuls les photons d'énergie $h\nu$ supérieure à E_g pourront être détectés.

Les photodiodes PIN sont constituées de trois zones (figure 11) :

- Une zone dopée P
- Une zone intrinsèque I
- Une zone dopée N

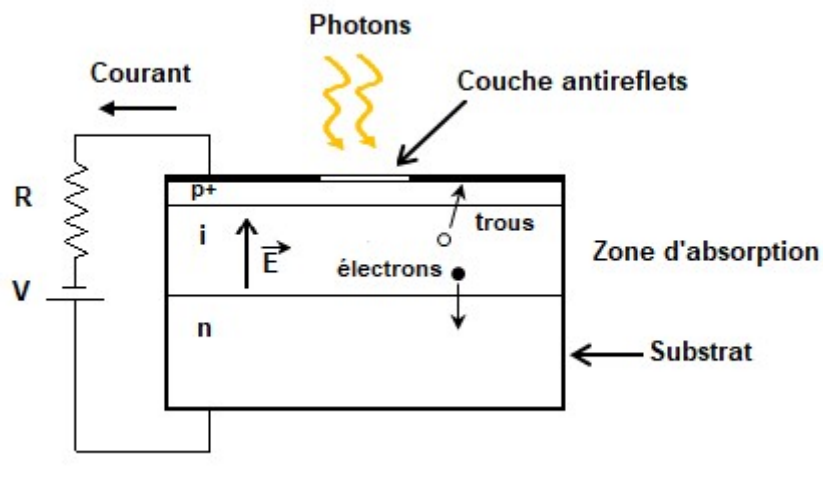


Figure 11. Structure d'une photodiode PIN

La largeur de la zone intrinsèque est optimisée afin de maximiser le rendement η_Q

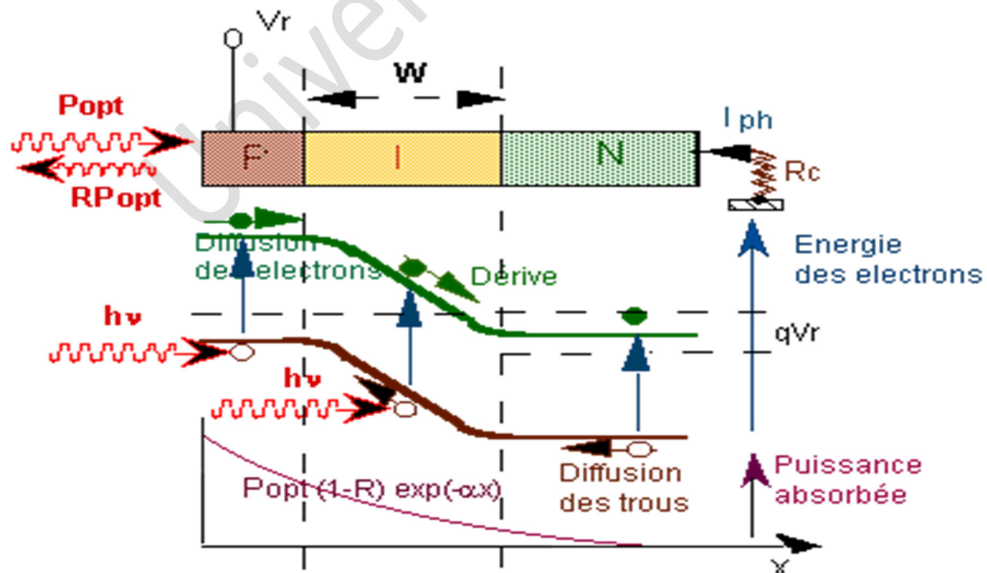


Figure 12. Différentes zones de fonctionnement d'une photodiode PIN, Zone antireflets AR, Zone dopée P, Zone intrinsèque I et Zone dopée N avec les niveaux d'énergie correspondants et le profil d'absorption

Le photocourant I_{ph} généré dans la photodiode est donné par :

$$I = \frac{e}{h\nu} [1 - \exp(-\alpha W)] (1 - R_F) P_{opt} \quad (15)$$

P_{opt} : puissance optique, W est la largeur de la zone d'absorption, α le coefficient d'absorption, R_F facteur de réflexion de Fresnel du à l'interface air semiconducteur.

$$R = \left(\frac{n_{sc} - 1}{n_{sc} + 1} \right)^2 \quad (16)$$

Le rendement total pour un composant rapide où $\alpha W \ll 1$ est donné par :

$$\eta_{tot} = [1 - \exp(-\alpha W)] (1 - R) \quad (17)$$

Les détecteurs développés aujourd'hui pour les télécommunications sont des photodiodes GaInAs sur substrat InP. Les premières structures développées sont de type planar à éclairage par la surface. Leur réponse spectrale couvre les deuxième et troisième fenêtres de transmission.

III.2. Diode à avalanche PDA

Les photodiodes à avalanche (PDA) sont des photodiodes qui ont un mécanisme de gain interne basé sur le phénomène d'avalanche. Pour obtenir l'effet d'avalanche il faut appliquer sur la PDA une tension inverse élevée.

Dans une diode à avalanche on obtient un champ fort en appliquant une tension inverse très importante à une structure PIN. Les électrons créés dans la zone intrinsèque I sont multipliés par effet avalanche. Cet effet est caractérisé par un gain d'avalanche appelé aussi facteur de multiplication M ou gain d'avalanche. Le courant généré s'écrit :

$$I_{PDA} = M \cdot S(\lambda) \cdot P_{opt} \quad (18)$$

Dans le cas d'une photodiode PIN le courant engendré s'écrit :

$$I_{PIN} = S(\lambda) \cdot P_{opt} \quad (19)$$

Le facteur multiplication $M(V)$ dépend de la tension inverse appliquée.

La photodiode à avalanche est formée de quatre couches $p^+ \pi p n^+$. La couche p^+ est un substrat de type p fortement dopé, suivi d'une couche π qui est une région intrinsèque légèrement dopée p . La région suivante est une couche hautement résistive p , suivie d'une couche n^+ , de type n , fortement dopée.

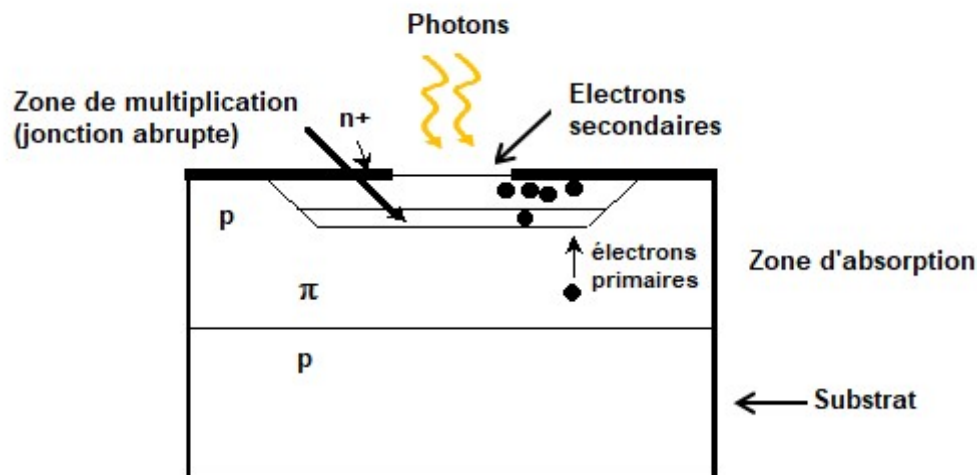


Figure 13. Structure d'une photodiode à avalanche

L'emploi des photodiodes à avalanche s'est réduit du fait du développement des amplificateurs optiques à fibres dopées erbium, néanmoins les PDA sont utilisées dans le sens montant des réseaux FTTH/PON à $1,3 \mu\text{m}$.

IV. Sources de bruit et rapport signal sur bruit

Les sources de bruit dans le processus de photodetection proviennent de la nature statistique de la conversion photon-électron et du bruit thermique associé avec le circuit d'amplification.

Les sources de bruits dans les détecteurs se manifestent sous forme de courants. Pour évaluer les performances de la photodiode on détermine le rapport signal sur bruit (S/B)

La performance d'un photodétecteur n'est pas déterminée tant par la valeur du signal, qu'on peut toujours amplifier que par le rapport signal sur bruit.

Différents sources de bruit doivent être considérées :

- Bruit quantique ou photonique ;

- Bruit d'obscurité : ce bruit est associé au courant inverse dans une diode présent en absence d'éclairement extérieur.
- Bruit thermique : cette source de bruit est associée à la résistance équivalente R_{eq} à l'entrée du préamplificateur
- Bruit de grenaille des composants électronique associés : ce bruit supplémentaire correspond aux facteurs de bruit des transistors associés aux étages de préamplification.

Rapport signal sur bruit

Le rapport S/B est défini par :

$$\frac{S}{B} = \frac{\text{photocourant engendré par la puissance du signal optique}}{\text{courant de bruit photodétecteur} + \text{courant de bruit de l'amplificateur}} \quad (20)$$

Le choix du détecteur est particulièrement déterminé par le rapport signal à bruit (S/B) qui est défini par le rapport du photocourant engendré par la puissance du signal optique sur le courant de bruit du photodétecteur plus le courant de bruit de l'amplificateur. Pour de faibles niveaux, le rapport S/B est meilleur avec une photodiode à avalanche alors que pour des niveaux plus forts, il vaut mieux utiliser une photodiode PIN.