

Chapitre 3

Emetteurs et Récepteurs de lumière

Dans ce chapitre on va s'intéresser aux émetteurs et récepteurs utilisés en télécommunication.

3.1 Les transducteurs électro-optiques (Emetteurs)

L'émetteur de lumière transforme l'énergie électrique qu'il reçoit en une radiation optique, donc le rôle des émetteurs est de convertir le signal électrique en signal optique.

Ces composants sont utilisés dans la télécommunication sous forme de *diode électroluminescente* ou *diode laser*.

3.1.1 La diode électroluminescente LED (Light Emission Diode)

L'électroluminescence est l'émission consécutive de lumière suite à une excitation électrique.

Dans une LED, cette excitation électrique est obtenue en polarisant une diode PN en direct. Il en résulte de l'injection de porteurs en excès de part et d'autre de la jonction et si le matériau est convenablement choisi ou dopé, la recombinaison directe de ces porteurs en excès donne lieu à une émission de photons.

a) Principe de fonctionnement

Il s'agit essentiellement d'une jonction PN polarisée en direct, les porteurs injectés par les contacts (+ et – du générateur) vont diffusés : les électrons vont vers la région (P) et les trous vers la région (N), et on a une recombinaison d'une paire (électron-trou) avec émission de photons d'énergie $h\nu$ (recombinaison essentiellement radiative).

Une tension V est appliquée telle que la diode soit polarisée en direct et les porteurs circulent à l'intérieur de la jonction et se recombinent dans les trois régions : P, N et la ZCE (Zone de charge d'espace), et comme la mobilité des électrons est supérieure à celle des trous, donc les électrons arrivent rapidement dans la région P et les trous qui sont plus longs arrivent plus tard dans la région N. on aura une zone des électrons dans la région P $\therefore$ la région émettrice de la lumière est représentée par la région P.

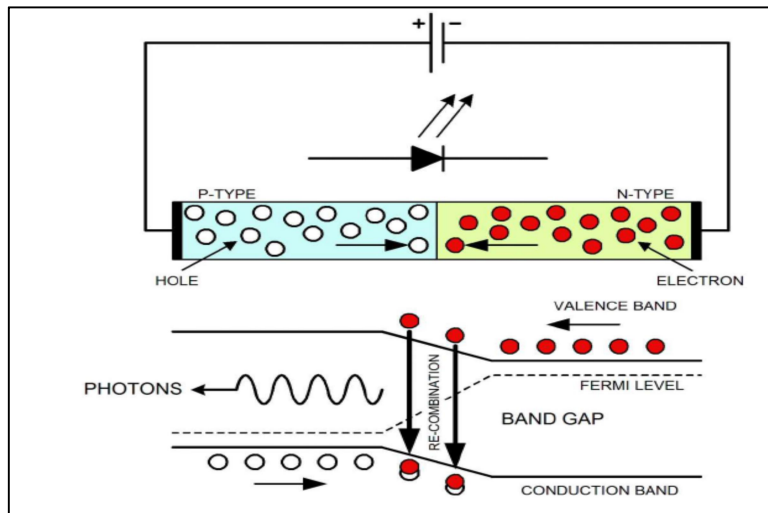


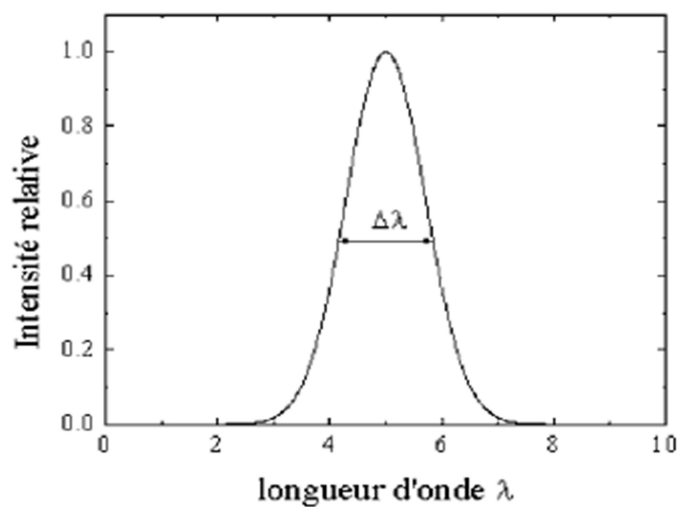
Figure (3.1) : *Principe de fonctionnement d'une LED*

b) Spectre d'émission

La longueur d'onde émise par la Led qui correspond à la couleur du rayonnement émis dépend du gap du matériau de type P.

Les photons sont émis indépendamment les uns des autres, ce qui donne une lumière non cohérente (non uniforme) et aussi non monochromatique (pas une seule longueur d'onde).

La réponse est sensiblement gaussienne avec un max λ_R (valeur voisine de λ_0 qui correspond au gap du matériau).



Figure(3.2) : *Spectre d'émission d'une LED*

c) Rendement d'une diode

On définit plusieurs rendements relatifs à la diode électroluminescente (LED).

♦ *Rendement quantique interne*

Il est défini comme étant le rapport du nombre de photons générés (recombinaison radiative) et celui de la recombinaison totale (radiative et non radiative).

$$\eta_i = \frac{r_r}{r_r + r_{nr}} = \frac{1/\tau_r}{1/\tau_r + 1/\tau_{nr}} \quad (3.1)$$

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \frac{\tau_r}{\tau_{nr}}}$$

$r_r = \frac{\Delta n}{\tau_r}$: Taux de recombinaisons radiatives ; τ_r : durée de vie des recombinaisons radiatives

$r_{nr} = \frac{\Delta n}{\tau_{nr}}$: Taux de recombinaisons non radiatives ; τ_{nr} : durée de vie des recombinaisons non radiatives.

➤ Pour les semi-conducteurs à gap direct $\eta_i \sim 100\%$

♦ *Rendement quantique externe*

Il est défini comme étant le rapport du nombre de photons émis par la led et le nombre de porteurs traversant la jonction.

$$\eta_{ex} = P \cdot \lambda / I \cdot 1240 \quad (3.2)$$

Soit I : courant traversant la led, $I = N \cdot e \cdot q$

N : nombre des électrons ; q : charge de l'électron

P : la puissance lumineuse émise par la diode, $P = N \cdot ph \cdot E_g$

$$E_g = hc/\lambda$$

h : constante de Planck $h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$

C : célérité de la lumière $C = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$, $E_g = 1240/\lambda(\text{nm})$

♦ Rendement d'absorption

Durant son parcours dans la région (P), le flux du rayonnement issu de la jonction est absorbée selon une loi exponentielle liée à la longueur parcourue dans le matériau

Le rendement d'absorption est donné par :

$$\eta_a = e^{-\alpha x} \quad (3.3)$$

Où :

α : coefficient d'absorption

x : distance parcourue par le photon pour sortir.

♦ Rendement global

Il est défini comme étant le rapport de la puissance optique émise et la puissance électrique.

$$\eta_g = \frac{h\nu}{qV}\eta_{ex} \quad (3.4)$$

Avec :

η_{ex} : rendement externe ;

ν : fréquence ; $\nu = C/\lambda$;

q : charge de l'électron ;

V : tension de polarisation de la diode

h : constante de Planck

3.1.2 La diode LASER(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Le laser est un dispositif qui émet la lumière grâce à l'émission stimulée.

Dans un semi-conducteur, le système formé par une paire électron-trou passe d'un état à un autre de trois façons Figure (3.4) :

Absorption : un photon peut fournir son énergie à un électron situé sur le niveau E1, ce qui provoque une transition $E1 \rightarrow E2$, le photon disparaît.

Emission spontanée : l'électron excité se recombine avec le trou en donnant une énergie (photon $h\nu$).

Emission stimulé : en supposant qu'un électron soit présent dans le niveau E_2 , le passage d'un photon peut déclencher une transition $E_2 \rightarrow E_1$, ce qui s'accompagne de l'émission un photon identique au photon incident.

Dans l'émission stimulée, le rayonnement correspondant à la même longueur d'onde, la même directivité que le photon incident.

Avec émission induite s'introduit la notion du gain ou l'amplification.

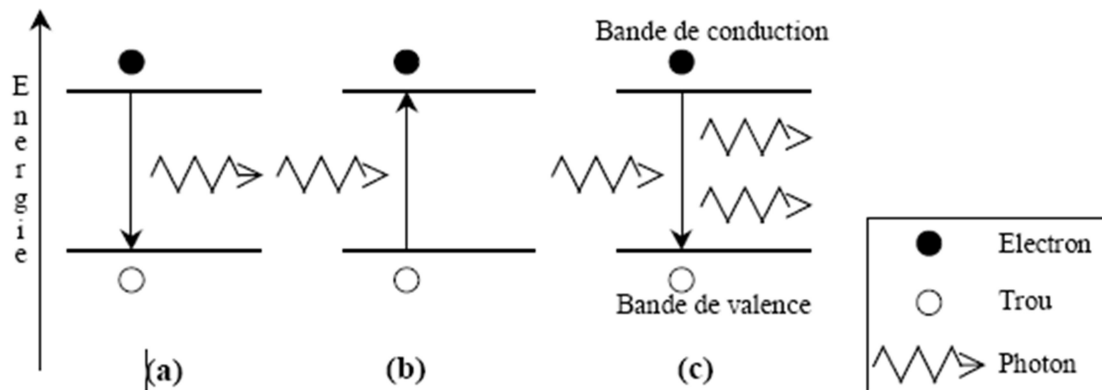


Figure (III.4) : Schémas du processus d'émission spontanée(a), d'absorption(b) et d'émission stimulée(c).

a) Effet laser

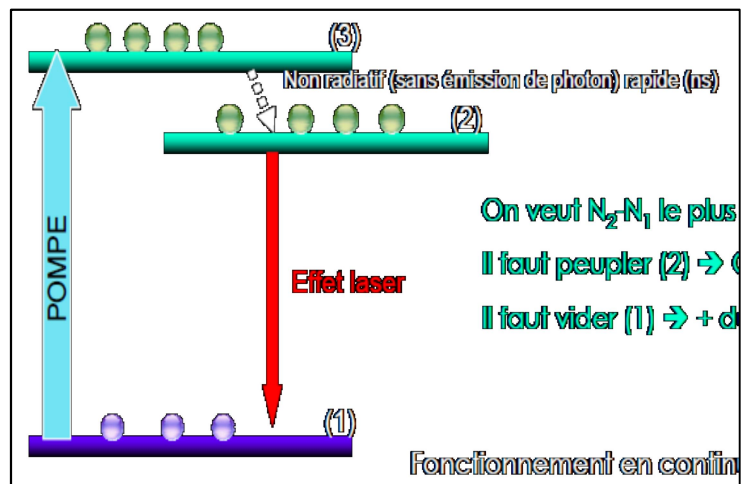
Deux conditions doivent être réalisées pour favoriser l'émission stimulée pour obtenir l'effet laser : *Inversion de population* et la *présence de cavité*.

1) Inversion de population :

Il faut qu'il y ait suffisamment de porteurs dans l'état supérieur, dans un semi-conducteur, cette inversion est réalisée par l'opération de pompage qui consiste à mettre suffisamment d'électrons dans la bande de conduction, pour cela le milieu doit comporter au moins trois niveaux d'énergie. Les électrons sont 'pompés' à partir du niveau fondamental E_1 sur un niveau E_3 . En

utilisant un rayonnement de longueur d'onde $\lambda_p = 0.98 \mu\text{m}$, la durée de vie τ_{32} pour les transitions $E_3 \rightarrow E_2$ étant très courte devant la durée de vie τ_{21} , pour les transitions $E_2 \rightarrow E_1$.

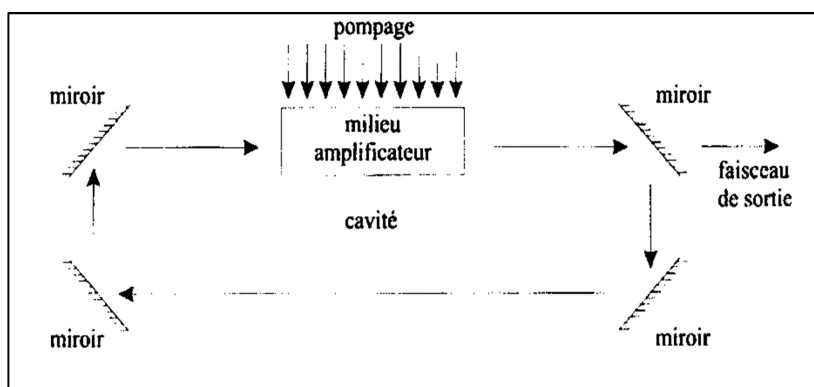
Les électrons vont s'accumuler sur le niveau E_2 , le niveau intermédiaire E_3 ne sert qu'à la facilité de l'inversion de population.



Figure(3.5) : Réalisation de l'inversion de population par l'opération de pompage

2) Présence de cavité

Il faut qu'il y'ait suffisamment de photons excitateurs, pour cela on oblige l'énergie lumineuse à s'accumuler sur place en enfermant le semi-conducteur dans une cavité résonnante constituée par un résonateur de type Fabry Péro.



3) Caractéristiques d'un Laser

- Un diagramme de rayonnement qui présente une raie très fine par rapport à la led.
- Caractéristique puissance-courant linéaire, après une valeur de seuil.



- En télécommunication il existe deux structures pour la diode laser : VCSEL et DFB.

3.2 Les transducteurs opto-électriques (Récepteurs de lumière)

Un récepteur optoélectronique (photorécepteur), permet de convertir le signal optique en un signal électrique.

- **Principe de fonctionnement d'un détecteur**

Quand la lumière pénètre dans un semi-conducteur, elle peut être absorbée si l'énergie des photons incidents est suffisante pour faire transiter un électron de la bande de valence vers la bande de conduction, c'est le phénomène d'absorption intrinsèque.

L'absorption du photon crée un électron dans la BC et un trou dans la BV, il y a création d'une paire (électron-trou) pour chaque photon absorbé. Si on arrive à récupérer les électrons dans un circuit extérieur, il y a création d'un courant électrique (photo courant).

- En télécommunication, les deux types principaux des photo détecteurs utilisés sont : la photodiode PIN et la photodiode à Avalanche.

3.2.1 La photodiode PIN

Elle utilise la photo détection (conversion d'un photon en une paire électron-trou, dans un semi-conducteur.

Sa structure est une simple diode PN polarisée en inverse, les photons sont absorbés dans la zone intrinsèque qui, du fait de la polarisation, est vide de porteurs mobiles.

Les électrons et les trous ainsi créés ont une faible probabilité d'être recombinaisonnés, ils sont séparés par le champ électrique 'E' qui règne dans la zone intrinsèque et qui les dirige vers la zone N et P, où ils sont majoritaires. La zone traversée par la lumière doit être de faible épaisseur et protégée par une couche antireflet qui améliore le rendement externe et protège le matériau.

➤ Caractéristiques de la photodiode

La photodiode est le plus souvent caractérisée par son rendement quantique interne et sa sensibilité.

a) Rendement quantique interne :

Il définit comme étant le rapport du nombre des électrons photo générés sur le nombre de photons.

$$\eta_{int} = I \cdot h\nu / q\Phi_i \quad (3.5)$$

Avec :

Φ_i : flux incident en Watt ;

I : courant électrique (A) ;

h : constante de planck, $h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{J.s}$

q : charge de l'électron, $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$

ν : fréquence, $\nu = C/\lambda$

b) Sensibilité

Elle est désignée par S, et son expression est donnée par :

$$S = \eta q / h\nu \quad (3.6)$$

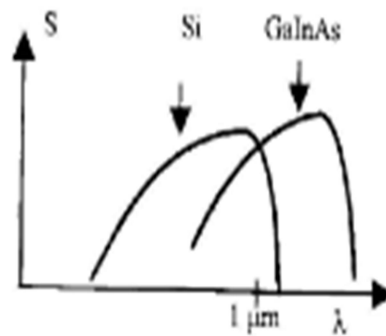
Avec :

η : Rendement quantique

q : charge de l'électron ; $q = 1.6.10^{-19}\text{C}$

h : constante de Planck ; $h = 6.62.10^{-34}\text{J.S}$

La sensibilité augmente avec la longueur d'onde, jusqu'à une valeur où elle est maximale, puis chute brusquement à l'approche de la longueur d'onde limite $\lambda_c = hc/Eg$. Au delà le matériau est devenu transparent.



Figure(3.6) : Réponse spectrale de la photodiode

Le courant établi dans la photodiode est : $i = i_s + i_D$,

Où : $i_s = S.P$ photo courant proportionnel à la puissance optique P .

i_D : courant d'obscurité, qui circule dans la jonction en absence d'éclairement, il provient à la fois de courants de fuite et de génération thermique, il augmente avec la température et la tension de polarisation.

3.2.2 La photodiode à Avalanche(APD)

Son principe est l'ionisation en chaîne, par impact de porteurs, sous l'effet d'un champ électrique très intense : c'est l'effet d'Avalanche qui, s'il n'est pas contrôlé, aboutit au claquage de la jonction pour une tension inverse V_B .

Chaque porteur primaire va donner naissance à m porteurs secondaires, ce champ électrique est obtenu, sous forte polarisation inverse dans une jonction PN abrupte, en général séparée par une zone d'absorption épaisse et peu dopée.

Le photo courant est donné par :

$$i_s = M.S.P \quad (3.7)$$

Avec :

M : facteur de multiplication, $M = 1/(1 - (V - V_B)^{m'})$ où $m' = 3-6$ (selon le matériau)

3.3 Sources de bruits dans les détecteurs

Dans les systèmes de communication par fibres optiques, il existe principalement de types de bruit dans les récepteurs optiques:

On a le bruit quantique (short noise) et le bruit thermique (thermal noise).

Le **bruit quantique** est dû au bruit provenant du courant d'obscurité et le photo courant.

Et le **bruit thermique** qui est dû aux différentes résistances contenues dans la photodiode.

Leurs expressions sont données comme suit :

$$\langle i_{th}^2 \rangle = 4KTB/R_d$$

$$\langle i_{qu}^2 \rangle = 2qB(I_{ph} + I_{ob}) :$$

T : température en Kelvin,

$K = K_B = 1,38.10^{-23}$ J.K : Constante de Boltzmann

$h = 6,62.10^{-34}$ J.s : Constante de Planck

$C = 3.10^8$ m.s⁻¹ : Célérité de la lumière

$e = q = 1,6.10^{-19}$ C : Charge de l'électron

R_d : résistance de charge

B : Bande passante du signal

I_{ob} : Courant d'obscurité, c'est le courant qui circule dans la jonction en absence de lumière

I_{ph} : photo courant crée par les photons de la lumière absorbée.