

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique



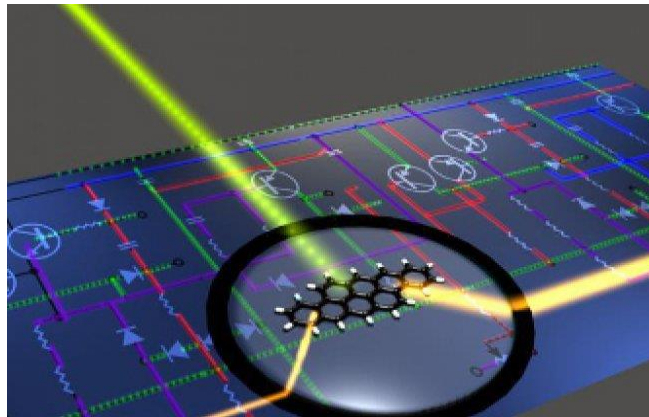
Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique

## *Support de Cours*

Destiné aux étudiants de 3ème année Licence,  
Option: Electronique (ELN)

*Titre*

# *Dispositifs optoélectroniques*



*Elaboré par :*  
**Dr. Linda DJOUABLIA**

**Maître de Conférences B**

**Université 20 Aout 1955  
Skikda**

*Année universitaire : 2017/2018*

## ***PREFACE***

**L'**optoélectronique est une discipline émergente qui s'intéresse à l'optique et l'électronique. Elle a éventuellement des portées importantes dans plusieurs domaines, tel que l'électronique médicale, l'informatique, les commandes infrarouge, l'imagerie par satellite, CD, lecteur de code barre, les télécommunications.....etc.

Les interactions rayonnement électromagnétique – semi-conducteurs sont le principe des composants optoélectroniques dont le rôle est la conversion d'un signal optique en un signal électrique ou réciproquement. Ce sont donc des transducteurs électronique vers l'optique ou optique vers l'électrique. Cependant, les composants optoélectronique trouvent actuellement leurs applications dans différents domaines, ils ont balayé notamment tous les systèmes de communication modernes et autres. De tels systèmes ont été déployés dans le monde entier et ont en effet révolutionné la technologie derrière les télécommunications grâce au développement du principe de la fibre optique.

Ce cours s'adresse plus particulièrement à des étudiants de 3<sup>ème</sup> année licence électronique (ELN). L'objectif de ce cours est avant tout la maîtrise des concepts de base de l'optique et de l'interaction lumière-matière. Il permet par la suite au étudiants d'acquérir des connaissances sur les composants optoélectroniques les plus répandus et leurs utilisations. Les chapitres 1 à 2 fournissent les base théoriques sur la physique des semi-conducteurs et les principes d'interactions matière-lumière, tandis que les chapitres 3- 4 couvrent les questions liées à la conception et l'application des émetteurs et récepteurs de lumière. Le chapitre 5 se concentre sur le principe de fonctionnement des différents types de fibre optique, et traite quelques phénomènes agissant sur les transmissions par fibres optiques.

Dr Linda DJOUABLIA

# TABLE DES MATIERES

<b>Introduction</b> .....	1
 <b>Chapitre 1 : Interaction lumière- semi-conducteurs</b>	
I- Introduction.....	2
II- Propriétés de la lumière.....	2
III- Flux lumineux et luminance.....	3
IV- Spectre de rayonnement électromagnétique.....	4
V- Interaction matière-rayonnement.....	5
V-1- L'énergie d'un photon.....	5
V-2- Les niveaux d'énergie de la matière.....	6
V-3- L'absorption de lumière.....	6
V-4- L'émission de lumière.....	6
VI- Différent types d'interaction lumière-matière.....	7
VI-1- L'ionisation.....	7
VI-2- Photoélectron.....	8
VI-3- l'effet Photovoltaïque.....	8
Exercice d'application.....	9
 <b>Chapitre 2 : Propriétés électronique et optique des semi-conducteurs</b>	
I- Généralités sur les semi-conducteurs.....	11
II- Structure de bandes des semi-conducteurs.....	11
III- Notions sur les bandes d'énergies.....	13
IV- Processus radiatif et non radiatif dans les Semi-conducteurs.....	14
V- Phénomènes d'absorption de la lumière.....	15
VI- Dopage et jonction PN.....	16
VII- Applications : capteurs et émetteurs optiques.....	17
 <b>Chapitre 3 : Emetteurs de lumière</b>	
I- La diode électroluminescente LED.....	19
I-1- Principe de fonctionnement et étude quantique de la LED.....	19
I-2- Caractéristiques électrique et spectrales de la LED.....	22
II- La diode Laser.....	25
II-1- Semi-conducteurs et émission laser.....	26
II-1-a- Emission stimulée.....	26
II-1-b- Cavité résonante.....	28
II-2- Caractéristiques spectrales des diodes Laser.....	28
II-2-a- Gain seuil.....	29
II-2-b- Faisceau Laser.....	30
II-2-c- Fréquence d'émission.....	31
II-3- Caractéristiques électriques d'une diode laser.....	32
II-3- a- Courant de seuil d'une diode laser.....	32
II-4- Types de Diodes Laser.....	33
II-4-a- Diodes Laser simples.....	33
II-4-b- Diodes Laser DPSS (Diode pumped solide state).....	33
II-4-c- Diode laser de pompage et cristaux.....	34
II-4-d- Diode laser a cristal Nd: YVO4 ou Nd :YAG.....	34

II-4- e- Diode Laser a cristaux doubleurs de fréquence.....	34
II-5- f Exemples de diodes Laser.....	34
II-6- Utilisation des diodes laser.....	35
Exercice d'application.....	37

### **Chapitre 4 : Les photo-détecteurs**

I- Introduction.....	39
II- La photorésistance.....	40
II-1- Technologie et fonctionnement des LDRs.....	40
II-2- Symbole et des LDRs.....	42
II-3- Utilisation des LDRs dans des schémas électriques et applications.....	42
III- La photodiode.....	43
III-1- Fonctionnement de la photodiode.....	43
III-2- Caractéristiques électriques de la photodiode.....	45
III-3- Symbole et schéma équivalent de la photodiode.....	48
III-4- Caractéristiques optiques de la photodiode.....	49
III-4-a- Efficacité quantique de la photodiode.....	49
III-4-b- Temps de réponse de la photodiode.....	50
III-5- Les principaux schémas d'utilisation des photodiodes.....	51
III-5-a- Photodiode non polarisée.....	51
III-5-b- Photodiode polarisée.....	51
III-5-c- Montage transimpédance.....	52
IV- Le phototransistor.....	53
IV-1- Principe de fonctionnement d'un phototransistor.....	54
IV-2- Caractéristiques des phototransistors.....	54
IV-2-a- Le courant d'obscurité.....	54
IV-2-b- La sensibilité des phototransistors.....	54
IV-2-c- L'amplification.....	55
IV-2-d- Le temps de commutation.....	55
IV-3- Schéma équivalent et applications.....	55
IV-3-a- Montage en commutation en émetteur commun.....	56
IV-3-b- Montage en commutation en collecteur commun.....	56
V- La cellule photovoltaïque.....	57
V-1- Effet photovoltaïque.....	58
V-2- Techniques de fabrication.....	59
VI- Le photomultiplicateur.....	59
VII- Capteur d'image.....	61
VIII- Afficheur à cristaux liquides.....	63
Exercice d'application.....	64

### **Chapitre 5: Les fibres optiques**

I- Introduction.....	65
II- Structure de la fibre optique.....	65
III- Optique géométrique.....	66
III-1- Passage de la lumière dans un milieu plus réfringent : $n_2 > n_1$ .....	67
III-2- Passage de la lumière dans un milieu moins réfringent : $n_2 < n_1$ .....	68
III-3- Aspect énergétique de la réflexion et de la réfraction.....	68
IV- Types de fibres optiques.....	69
IV-1- La fibre optique multimodale à saut d'indice.....	70

IV-2- La fibre optique multimodale à gradient d'indice.....	70
IV-3- La fibre optique monomode.....	71
V- Fonctionnement des fibres optiques.....	71
V-1- Fonctionnement et propriétés des fibres optiques à saut d'indice.....	71
V-1-a- La fibre optique monomode à saut d'indice.....	74
V-1-b- La fibre optique multimodales.....	74
V-2- Fonctionnement et propriétés des fibres optiques à gradient d'indice.....	74
VI- Atténuation et dispersion dans une fibre optique.....	76
VI-1- L'Affaiblissement.....	76
VI-1-1- Les pertes intrinsèques à la fibre.....	76
VI-1-1-a- La diffusion Rayleigh.....	76
VI-1-1-b- L'absorption.....	77
VI-1-2- Les pertes dues aux diffusions à l'interface cœur/gaine.....	78
VI-1-2-a- L'atténuation provoquée par les courbures et les micro-courbures.....	87
VI-1-2-b- L'atténuation linéique.....	79
VI-3- Les pertes liées aux défauts de connections.....	79
VI-4- Les dispersions du signal.....	80
VI-4-1- La dispersion modale.....	80
VI-5- Bande passante et fréquence de coupure.....	81
VII- Connectiques et pertes dans les fibres.....	82
Exercices d'application.....	82
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>85</b>

# Chapitre 1

## Interaction lumière- semi-conducteurs

### I- Introduction

L'optique est la partie de la physique qui s'intéresse à l'étude de la lumière et les phénomènes qu'elle engendre, même lorsque ceux-ci ne sont pas détectables par l'œil humain. Mais, pourquoi étudier l'optique ?

- L'optique conditionne notre perception de l'environnement puisqu'elle est la science de la vision.
- Le laser a entraîné un renouveau complet de cette discipline.
- Les technologies optiques sont partout : télécommande infrarouge, CD, lunettes, télescope, imagerie par satellite, lecteur de code barre....

### II- Propriétés de la lumière

La lumière est définie comme une perturbation du champ électromagnétique qui se propage (Figure I.1), elle est caractérisée donc par un couple (Champ électrique E, Champ magnétique B). Les sources de lumière sont très variées. Elles peuvent être à incandescence comme le soleil ou la plupart des ampoules que l'on utilise.

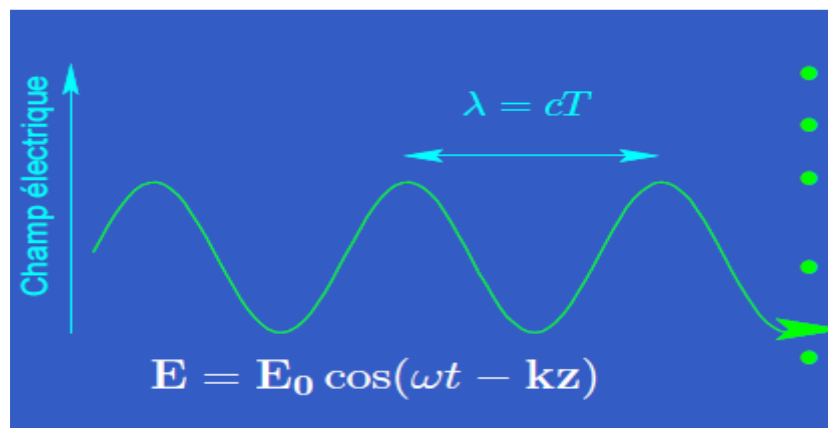


Figure I.1 : Nature électromagnétique de la lumière.

Cependant, tous les corps portés à une certaine température émettent de la lumière. Lorsque la lumière est produite par tout autre moyen que le chauffage, on parle de luminescence : par exemple, les tubes néon ou les lampes fluorescentes. Le laser est un autre type de source lumineuse considérée comme quasi-parfaite. Ces diverses sources de lumière peuvent être caractérisées par différents paramètres : leur intensité, leur direction d'émission, leur rendement (puissance lumineuse émise sur puissance fournie) ou leur mode d'émission. Un autre paramètre important est la « couleur » du rayonnement émis.

### III- Flux lumineux et luminance

Le rayonnement optique transporte de l'énergie, le flux énergétique correspond donc à l'énergie émise par unité de temps dans toutes les directions (puissance) son unité est le WATT (W). Le flux visuel correspond à la simulation visuelle de l'œil, son unité est le LUMEN.

$$\psi_l(\lambda_0) = \beta \times K(\lambda_0) \times \psi_w(\lambda_0) \quad (\text{I.1})$$

Avec  $\psi_l(\lambda_0)$  est le flux en LUMEN.

$\psi_w(\lambda_0)$  est le flux en WATT.

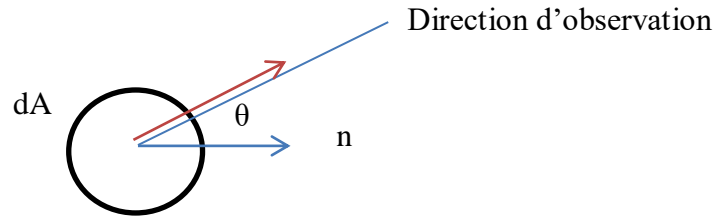
$\beta = 680$  et  $K$  est la fonction de sensibilité spectrale.

La luminance correspond à l'intensité divisée par la surface apparente de la source, son unité est  $\text{WATT} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  :

$$L_e = \frac{dI_e}{d\Sigma} \quad (\text{I.2})$$

Avec  $d\Sigma = dA \cos \theta$  est la surface apparente dans la direction  $u$ .

Plus la surface apparente est petite, plus la luminance est élevée (source plus brillante).



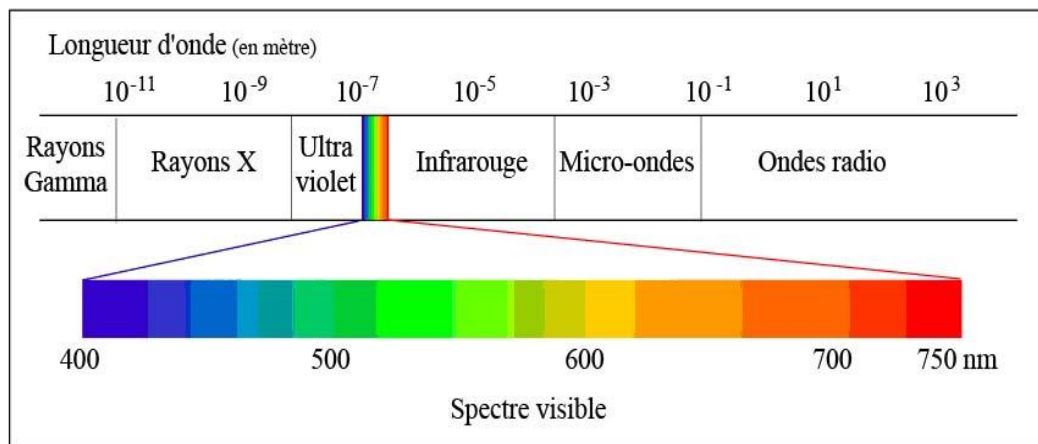
**Figure I.2 :** Surface apparente d’une source.

## IV- Spectre de rayonnement électromagnétique

Les ondes électromagnétiques couvrent une très large gamme de fréquences : la lumière visible ne constitue notamment qu’une infime partie des ondes électromagnétiques, parmi lesquelles on compte les ondes radio (et télé), les micro-ondes, l’infrarouge (responsable de la sensation de chaleur), l’ultraviolet (responsable entre autres du bronzage...), les rayons X et les rayons gamma.

On classe les ondes en fonction de leur longueur d’onde dans le vide  $\lambda_0$  (en mètres) ou de leur fréquence  $\nu$  (en Hz).

La relation  $\lambda_0 = c/\nu$  relie la vitesse de la lumière  $c$  dans le vide et la fréquence  $\nu$ . Excepté la lumière produite par un laser qui est quasiment monochromatique (une seule couleur), toute lumière produite par d’autres sources peut être décomposée en plusieurs couleurs (c’est le but de la spectrométrie). Le visible correspond à la partie du spectre correspondant généralement à  $\lambda_0$  compris entre 400 et 800 nm (Figure I.3).



**Figure I.3 :** Spectre visible.



## V- Interaction matière-rayonnement

La lumière est capable d'interagir avec la matière. Plus précisément, au niveau microscopique, les photons qui composent la lumière peuvent interagir avec les atomes qui constituent la matière. Tout rayonnement monochromatique de fréquence  $\nu$  peut être considéré comme un ensemble de corpuscules, appelé photon, transportant chacun un quantum d'énergie  $h\nu$ .

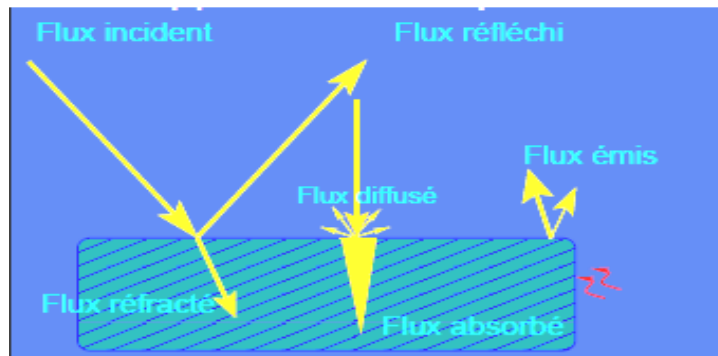


Figure I.4 : Interaction lumière-matière.

### V-1-L'énergie d'un photon

L'énergie d'un photon de fréquence  $\nu$  se note  $\Delta E$ .

$$\Delta E = h \nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (I-3)$$

Avec :

$$1eV = 1.60 \times 10^{-19} j$$

$h$  est la constante de Planck,  $h = 6.63 \times 10^{-34} j \cdot s^{-1}$

$\nu$  est la fréquence de rayonnement, exprimée en Hz.

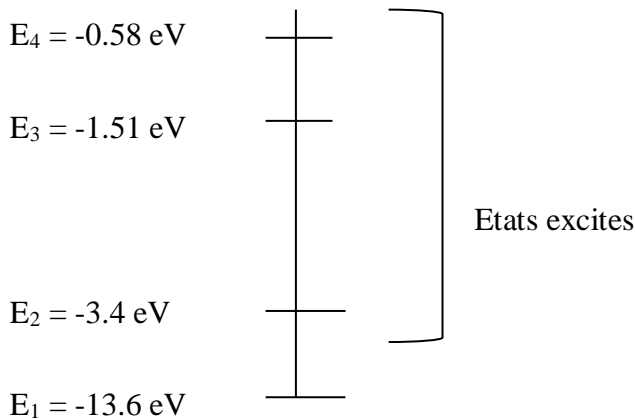
$\lambda$  est la longueur d'onde dans le vide, exprimée en m.

$c$  est la vitesse de la lumière dans le vide,  $c = 3 \times 10^8 m/s$ .

## V-2- Les niveaux d'énergie de la matière

Le niveau d'énergie le plus faible d'un atome correspond à son état stable. Il est appelé état fondamental. Les niveaux d'énergie plus élevés que l'état fondamental correspondent à un état excité de l'atome.

Exemple : Le diagramme d'énergie de l'atome d'hydrogène.



Dans son état fondamental, l'atome est à son niveau d'énergie le plus bas. Les autres niveaux correspondent à des états d'excitation de l'atome.

## V-3- L'absorption de lumière

Les photons en fonction de leur longueur d'onde  $\lambda$  peuvent interagir avec seulement certains atomes de la matière. Cette interaction se traduit par l'absorption de ces photons (ceux dont la longueur d'onde correspond à l'élément chimique de la matière étudiée). Lors de l'absorption, l'énergie lumineuse du photon est transmise à l'atome. Elle est alors transformée en une autre énergie qui se traduit par l'excitation de l'atome. A cette occasion, de la lumière disparaît du spectre, ce qui donne naissance à un spectre de raies d'absorption.

## V-4- L'émission de lumière

Un atome excité (par conversion d'énergie lumineuse ou électrique) libère un photon lorsqu'il revient dans son état normal (état non excité). Lors de cette « désexcitation » l'atome émet un photon de longueur d'onde identique à celui qui a servi à son excitation (cette explication est une simplification du phénomène).

Il faut noter que l'atome ne peut échanger que certaines quantités d'énergie et pas d'autres.  
Lors de l'absorption :

- l'énergie lumineuse du photon absorbée permet la création d'un spectre de raies d'absorption ;
- si l'atome est excité électriquement, l'énergie électrique absorbée est égale à celle qui aurait été absorbée par conversion de l'énergie lumineuse. Dans ce cas, il n'y a pas de lumière donc pas de spectre.

Lors de l'émission : l'énergie qui a servi à exciter l'atome est libéré sous forme d'énergie lumineuse.

Il existe deux types d'émissions de la lumière :

- L'émission spontanée d'un photon par retour de l'électron excité de la bande de conduction vers la bande de valence et sa recombinaison avec le trou, dans le cas où l'énergie cédée par l'électron est de type radiatif.
- L'émission stimulée d'un photon avec retour de l'électron excité vers la bande de valence et sa recombinaison avec un trou. le photon émis est identique, en longueur d'onde et en phase, au photon incident, il est dans le même état de polarisation. Ce dernier processus est à la base de l'effet laser.

## **VI- Différent types d'interaction lumière-matière**

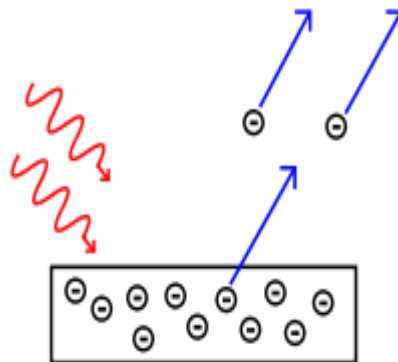
### **VI-1- L'ionisation**

L'ionisation est l'action qui consiste à enlever ou ajouter des charges à un atome ou une molécule. L'atome (ou la molécule) perdant ou gagnant des charges n'est plus neutre électriquement, il est alors appelé ion. L'ionisation peut être réalisée par des rayonnements de longueur d'onde suffisante pour éjecter cet électron périphérique. Lorsque le rayonnement ionisant est constitué de photons, on parle de photo-ionisation. C'est par exemple ce qui se passe dans les nébuleuses planétaires.

## VI-2- Photoélectron

En physique, l'effet photoélectrique (EPE) désigne en premier lieu l'émission d'électrons par un matériau soumis à l'action de la lumière (figure I.5). Par extension, il regroupe parfois l'ensemble des phénomènes électriques d'un matériau provoqués par l'action de la lumière. On distinguera alors deux effets : des électrons sont éjectés du matériau (émission photoélectrique) et une modification de la conductivité du matériau (photoconductivité, effet photovoltaïque lorsqu'il est en œuvre au sein d'une cellule photovoltaïque, effet photo-électrochimique, effet photo-résistif).

Lorsque l'EPE se manifeste, toute l'énergie du photon incident se transmet à l'électron périphérique. Une quantité d'énergie minimale est nécessaire pour extraire l'électron de l'atome, l'énergie excédentaire est transmise à l'électron sous forme d'énergie cinétique. Une absorption partielle est caractérisée par la diffusion Compton.



**Figure I.5 :** l'effet photoélectrique.

L'effet photoélectrique consiste donc en l'émission d'électrons par un matériau, généralement métallique lorsque celui-ci est exposé à la lumière ou un rayonnement électromagnétique de fréquence suffisamment élevée, qui dépend du matériau.

## VI-3- l'effet Photovoltaïque

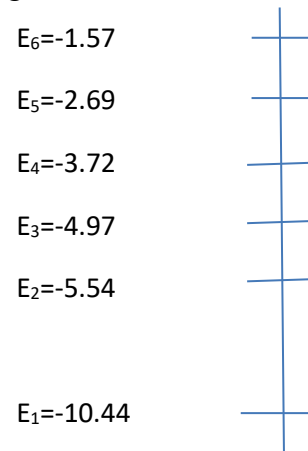
L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire. Cependant, l'énergie produite par une centrale solaire photovoltaïque est dite renouvelable, car sa source est considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humaine. Cette énergie n'est cependant pas totalement renouvelable, car la fabrication des

panneaux photovoltaïques, leur installation et leur exploitation consomment de l'énergie issue en grande partie de sources non renouvelables ; mais un système photovoltaïque produit entre 20 et 40 fois plus d'énergie que ce qui a été utilisé pour le fabriquer. La cellule photovoltaïque est le composant électronique de base. Elle utilise l'effet photoélectrique pour convertir les ondes électromagnétiques émises par le soleil en électricité. Plusieurs cellules reliées entre elles forment un module solaire photovoltaïque. Plusieurs modules regroupés forment une installation solaire. L'électricité est soit consommée ou stockée sur place, soit transportée par le réseau de distribution et le réseau de transport. Dans l'effet photoélectrique, on éclaire une plaque de métal et celle-ci émet des électrons.

### **Exercice d'application :**

Le spectre d'émission du mercure contient trois raies intenses : jaune, verte et bleu indigo, de longueurs d'ondes respectives  $\lambda_j = 579.2 \text{ nm}$  ;  $\lambda_v = 546.2 \text{ nm}$  ;  $\lambda_B = 436.0 \text{ nm}$ .

- 1- Calculer l'énergie en, eV, des photons de longueurs d'ondes  $\lambda_j$ ,  $\lambda_v$ ,  $\lambda_B$ .
- 2- Le diagramme simplifié des niveaux d'énergie de l'atome de mercure est donné ci-dessous.



- a- Quelle raie d'émission du mercure correspond à la désexcitation des atomes de mercure des niveaux  $E_6$  à  $E_4$  ?
- b- A quelles désexcitations correspondent les deux autres raies ? justifier.

### **Solution :**

- 1- Pour  $\lambda_j = 579.2 \text{ nm}$

$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda}$$

$$D'ou : \Delta E = \frac{(6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8)}{579.2 \times 10^{-9}} = 3.4 \times 10^{-19} \text{ j} = 2.15 \text{ eV}$$

Pour  $\lambda_V = 546.2 \text{ nm}$

$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda}$$

$$D'ou : \Delta E = \frac{(6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8)}{546.2 \times 10^{-9}} = 3.6 \times 10^{-19} \text{ j} = 2.28 \text{ eV}$$

Pour  $\lambda_B = 436.0 \text{ nm}$

$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda}$$

$$D'ou : \Delta E = \frac{(6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8)}{436.0 \times 10^{-9}} = 4.6 \times 10^{-19} \text{ j} = 2.85 \text{ eV}$$

2-

a-  $E_6 - E_4 = -1.57 - (-3.72) = 2.15 \text{ eV}$

La raie d'émission du mercure qui correspond à la désexcitation des atomes de mercure des niveaux  $E_6$  à  $E_4$  est la raie jaune.

b- Pour  $\lambda_V = 546.2 \text{ nm}$ ,  $\Delta E = 2.28 \text{ eV}$

$$E_5 - E_3 = -2.69 - (-4.97) = 2.28 \text{ eV}$$

La raie d'émission du mercure qui correspond à la désexcitation des atomes de mercure des niveaux  $E_5$  à  $E_3$  est la raie verte.

Pour  $\lambda_B = 436.0 \text{ nm}$ ,  $\Delta E = 2.85 \text{ eV}$

$$E_5 - E_2 = -2.69 - (-5.54) = 2.85 \text{ eV}$$

La raie d'émission du mercure qui correspond à la désexcitation des atomes de mercure des niveaux  $E_5$  à  $E_2$  est la raie bleue.

## Chapitre 2

### Propriétés électroniques et optiques des semi-conducteurs

#### I- Généralités sur les semi-conducteurs

En général, la résistance croît avec la température, mais pour certains corps, dits semi-conducteurs c'est l'inverse qui se passe, comme par exemple le germanium, le silicium, graphite, arséniure de galium...etc. La résistivité intermédiaire entre conducteur ( $10^{-8} \Omega.m$ ) et isolants ( $10^{10} \Omega.m$ ) est :  $10^{-4} \Omega.m \leq \text{Résistivité S/C} \leq 10^{-6} \Omega.m$ .

Les semi-conducteurs sont définis donc par leurs résistivités  $\rho$ , leurs concentrations intrinsèques  $n_i$  et leurs énergies de gap  $E_g$ . La nature et l'énergie du gap du semi-conducteur jouent un rôle déterminant dans le choix du matériau à utiliser pour la fabrication du composant optoélectronique, L'ajout d'impuretés permet aussi d'augmenter la conductivité du matériau.

#### II- Structure de bandes des semi-conducteurs

La structure électronique d'un atome isolé est différente de la structure de plusieurs atomes. Les atomes peuvent se lier entre eux grâce aux électrons de leur dernières couches (électrons de valences : liaisons covalentes). Dans le cas du silicium nous avons la structure de la figure II.1:

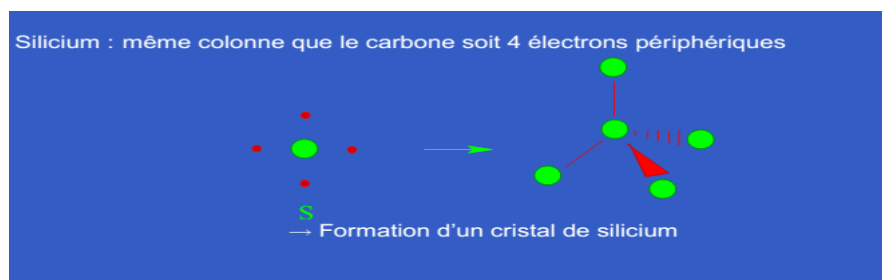
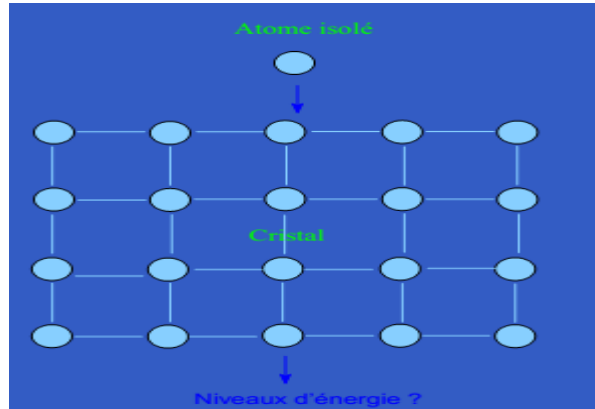


Figure II.1 : Structure atomique du Silicium.

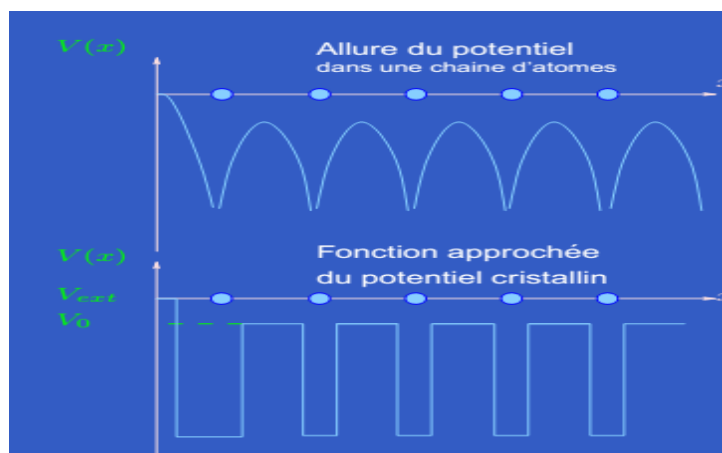
Le cristal du silicium est constitué de plusieurs atomes permettant la possibilité de liaison covalente grâce aux électrons périphériques (Figure II.2).



**Figure II.2 :** Structure cristalline du Silicium.

Par définition, le cristal est donc un arrangement tridimensionnel périodique d'atomes, c'est des atomes empilés, proches les uns des autres. Dans le cas de deux atomes proches, on peut distinguer les phénomènes suivants (Figure II.3) :

- Les puits de potentiel se recouvrent partiellement, mais les électrons ne peuvent avoir un même état quantique.
- Dédoublement des niveaux d'énergie (principe d'exclusion).
- Un niveau légèrement plus "haut", un niveau légèrement plus bas.



**Figure II.3:** Potentiel cristallin.



Si  $V_{\text{ext}}$  est le potentiel de sortie.

Alors  $E_0 > V_{\text{ext}} \rightarrow$  l'électron peut sortir du cristal.

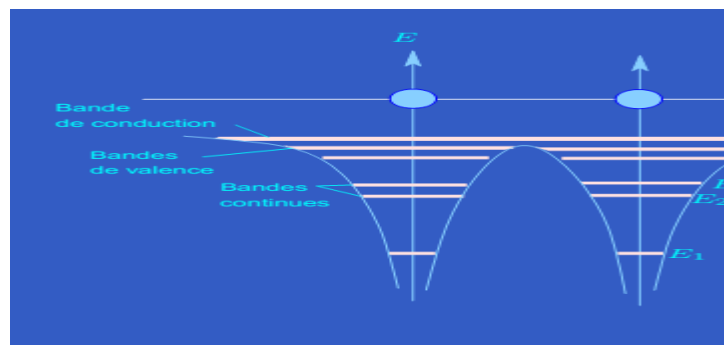
Si  $E < V_0 \rightarrow$  électron lié au noyau.

$E > V_0 \rightarrow$  électron libre.

La théorie de Schrödinger annonce donc l'apparition de "bandes d'énergie". Niveaux quasi continus d'énergie, ce qui implique l'apparition de bande permises et de bandes interdites.

### III- Notions sur les bandes d'énergies

L'ensemble des niveaux permis pour les électrons de valence correspond à la bande de valence (électron les moins liés aux atomes).



**Figure II.4:** Les bandes d'énergie.

L'énergie de gap des semi-conducteurs est comprise entre 0.5 et 4 eV, elle est surtout voisine de 1 eV. Les niveaux d'énergie d'un cristal infini sont définis par l'existence d'une bande interdite l'énergie  $E_g$  (Gap, mesuré en eV, par exemple : Germanium 0.67 eV, Silicium 1.12 eV, Diamant 5.5 eV, Silice 8 eV).

Dans ce cas, on peut dire qu'il n'existe pas d'états permis pour les électrons et les paramètres fondamentaux des semi-conducteurs permettent la distinction qualitative entre isolant et semi-conducteur grâce à  $E_g$ .

1.  $SC \approx 1 \text{ eV}$

2. Isolant  $> 3\text{eV}$

3. Métaux : recouvrement bande de valence et bande de conduction.

A  $T = 0\text{K}$ , Silicium et Germanium sont isolant. Si la température augmente, une agitation thermique se produit et des électrons se déplacent vers la bande de conduction, on parle alors de semi-conducteur intrinsèque (pur).

#### IV-Processus radiatif et non radiatif dans les Semi-conducteurs

Généralement les niveaux d'énergie supérieurs au fondamental sont instable, donc un électron excité revient spontanément à l'état fondamental. Et dans ce cas l'électron restitue l'énergie sous forme de rayonnement, comme le montre la figure II.5.

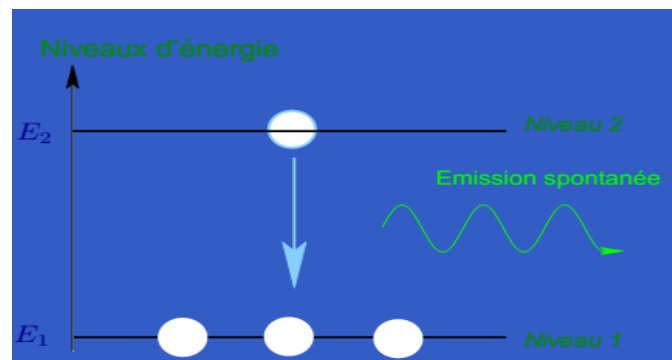


Figure II.5: L'émission spontanée.

Le choix de la longueur d'onde émise dépend donc du matériau. La relation entre la longueur d'onde  $\lambda_0$  d'émission et l'énergie de gap  $E_g$  du matériau étant :

$$E_g \text{ (eV)}. \lambda_0 \text{ (\mu m)} = 1.24 \quad (\text{II-1})$$

Contrairement au rendement photoélectrique, celui de l'effet luminescent sera en général assez faible. L'émission se produit de façon efficace à des longueurs d'onde voisines de  $\lambda_0$  :

- $\lambda < \lambda_0 \Rightarrow$  matériau peut être utilisé en photorécepteur.
- $\lambda > \lambda_0 \Rightarrow$  milieu optiquement transparent avec  $n > n$  (isolant).
- $\lambda \approx \lambda_0 \Rightarrow$  il peut être utilisé, à priori, comme émetteur de lumière.

Le phonon traduit la notion de choc ou de vibration mécanique ou thermique avec une faible variation d'énergie (l'énergie du phonon est de l'ordre de  $KT$ , elle est dans la gamme 0,01-0,1 eV, donc plus faible que l'énergie de gap).

## V- Phénomènes d'absorption de la lumière

L'absorption du photon par un électron de la bande de valence est son passage vers la bande de conduction, entraînant l'apparition d'un trou dans la bande de valence. L'absorption de la lumière se produit si le spectre de l'onde contient la fréquence correspondant à la transition. L'énergie du photon absorbée est donc :  $\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu$  ; Cette relation bien connu des chimistes sous le nom de spectre d'absorption caractérisant un produit ( ou spectrométrie), les niveaux 1 et 2 sont des niveaux permis. Tout niveau intermédiaire entre deux niveaux permis est un niveau interdit.

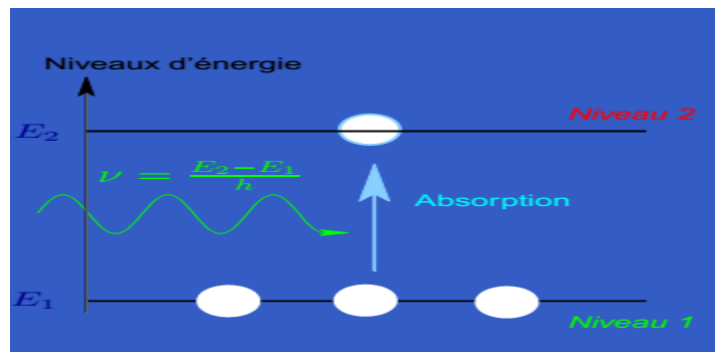


Figure II.6: Phénomène d'absorption.

Les trois possibilités d'absorption de photon sont illustrées sur la figure II-7.

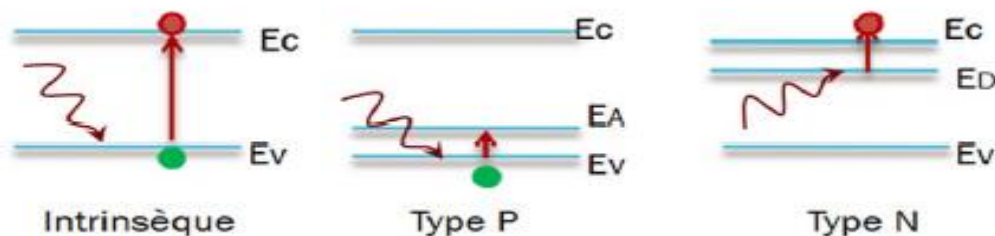


Figure II.7 : Les trois possibilités d'absorption d'un photon par un semi-conducteur.

## VI- Dopage et jonction PN

Le but du dopage est d'améliorer la conductivité en augmentant le nombre de porteurs soit positifs, soit négatifs par l'ajout d'un élément étranger.

Dopage N : Si nous avons par exemple un élément de la colonne V, c'est à dire cinq électrons périphériques (donneur d'électrons). Quatre  $e^-$  vont participer à la structure cristalline et un va être libre, et va avoir la possibilité de se déplacer dans le cristal.

Le dopage permet l'apparition d'un niveau donneur proche de la bande de conduction et le déplacement du niveau de Fermi vers cette dernière.

Dopage P : Dans ce cas on incorpore un élément « accepteur » (trivalent groupe III). Une lacune en  $e^-$  - trous se produit et on remarque l'apparition d'un niveau donneur proche de la bande .

La jonction PN : Est composée d'une région dopée N et d'une autre dopée P (Figure II.8). Une jonction PN désigne donc une zone du cristal où le dopage varie brusquement, passant d'un dopage P à un dopage N. Lorsque la région dopée P est mise en contact avec la région N, les électrons et les trous diffusent spontanément de part et d'autre de la jonction, créant ainsi une zone de déplétion où la concentration en porteurs libres est quasiment nulle. Alors qu'un semi-conducteur dopé est un bon conducteur, la jonction ne laisse quasiment pas passer le courant. La longueur de la zone de déplétion varie avec la tension appliquée de part et d'autre de la jonction. Plus cette zone est courte, plus la résistance de la jonction est faible. La caractéristique  $I(V)$  de la jonction est donc fortement non linéaire : c'est celle d'une diode.

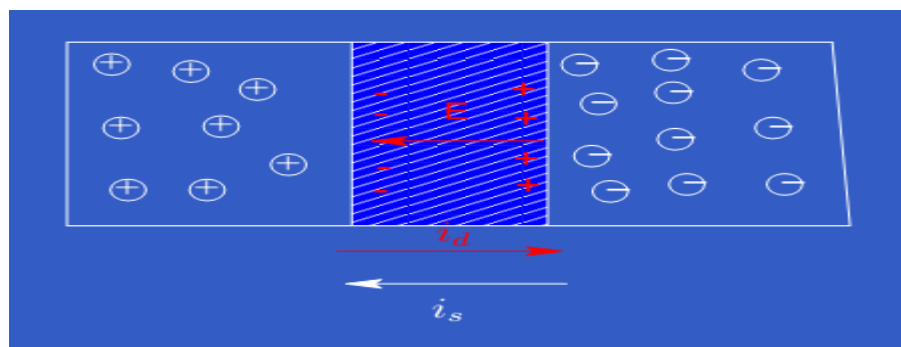


Figure II.8: La jonction PN.

## VII- Composants optoélectroniques : capteurs et émetteurs optiques

L'optoélectronique comme déjà expliqué est à la fois une branche de l'électronique et de la photonique. Elle concerne l'étude des composants électroniques qui émettent ou interagissent avec la lumière. À savoir: un capteur optique qui capte l'information, une carte électronique qui traite selon un logiciel déterminé les émissions du dit capteur et un relais qui produit les effets attendus.

Le choix du matériau utilisé pour la fabrication des composants optoélectroniques est basé sur certaines propriétés suivant l'utilisation du composant :

- **Pour un détecteur optique, il faut considérer :**

- L'absorption de la lumière.
- La création de porteurs en excès.
- Le rendement photoélectrique.
- La sensibilité spectrale.

- **Pour un émetteur de lumière, il faut considérer :**

- La longueur d'onde de la radiation émise.
- La recombinaison de porteurs en excès et la durée de vie.
- Le rendement d'électroluminescence.

Parmi les applications de l'optoélectronique nous trouvons quelques composants dont :

- La photodiode.
- L'Opto-triac.
- Le photomultiplicateur.
- La photorésistance.
- Le phototransistor.
- Le capteur de photo scope.
- La cellule photoélectrique.
- La diode laser.

- La diode électroluminescente (DEL).
- L'opto-coupleur.
- L'interféromètre de Mach-Zehnder.....

Nous allons détailler dans les chapitres qui suivent le principe de fonctionnement de quelques composants optoélectroniques.

## Chapitre 3

### Emetteurs de lumière

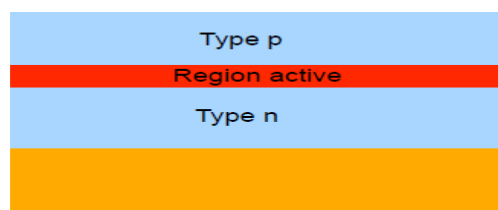
#### I- La diode électroluminescente LED

Le premier rapport de recherche connu d'une diode électroluminescente à semi-conducteurs a été établi en 1907 par le chercheur britannique H. J. Round. Au milieu des années vingt, le Russe Oleg Vladimirovich Losev créa la première LED, bien que sa recherche ait été ignorée dans cette époque, mais après plusieurs recherches et inventions ont succédé jusqu'à ce que le japonais Shuji Nakamura présente pour la première fois une LED en bleue basée sur InGaN. Cette invention a eu le prix de la technologie du millénaire 2006.

Du point de vue électrique une diode électroluminescente ou LED (light emitting diode) est une diode qui a la propriété d'émettre de la lumière quand elle est parcourue par un courant (phénomène d'électroluminescence). Comme une diode, elle est constituée de couches de substrats semi-conducteurs, avec la particularité de créer une zone active entre la région P et la région N.

##### I-1- Principe de fonctionnement et étude quantique de la LED

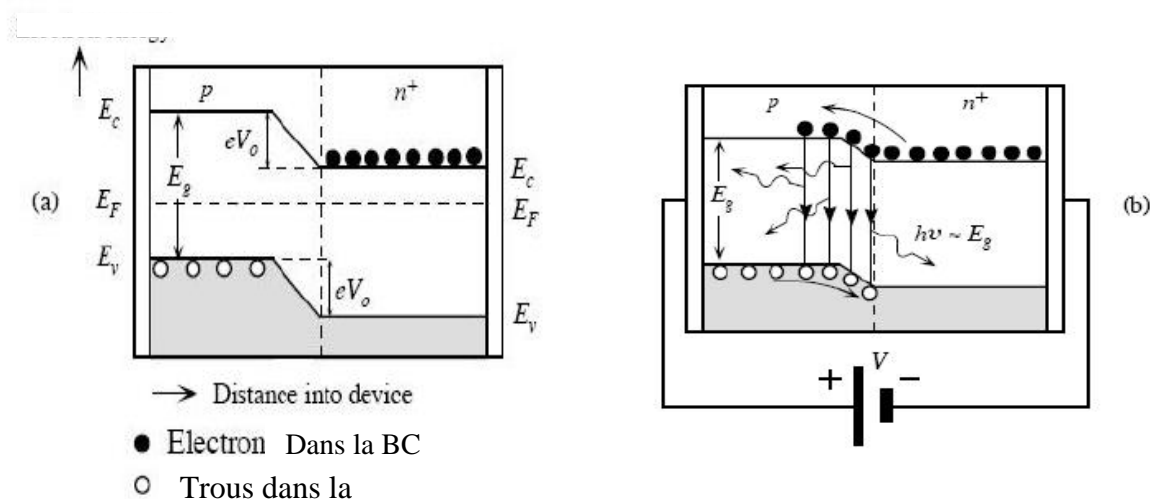
Une diode électroluminescente est constituée d'une jonction PN et d'une zone active au cœur de celle-ci (Figure III.1). C'est là que vont avoir lieu les recombinaisons électrons-trous.



**Figure III.1** : Constitution d'une LED.

Si l'on considère une jonction PN non polarisée (Figure III.2-a). La région d'appauvrissement s'étend principalement dans le côté P. Il existe une barrière de potentiel séparant les régions P et N, appelée tension intégrée  $V_0$  qui va empêcher la diffusion des électrons libres excédentaires du côté N dans le côté P.

Quand on applique une tension  $V$  à travers la jonction, le potentiel intégré est réduit de  $V_0$  à une valeur  $V_0 - V$ . Cela permet aux électrons du côté N d'être injectés dans le côté P. Les électrons sont les porteurs minoritaires de la région P. Mais l'injection de trous du côté P au côté N est très inférieure et donc le courant est principalement due à l'écoulement des électrons dans le côté P. Ces électrons injectés dans le côté P se recombinent avec les trous. Cette recombinaison entraîne l'émission spontanée de photons (lumière).



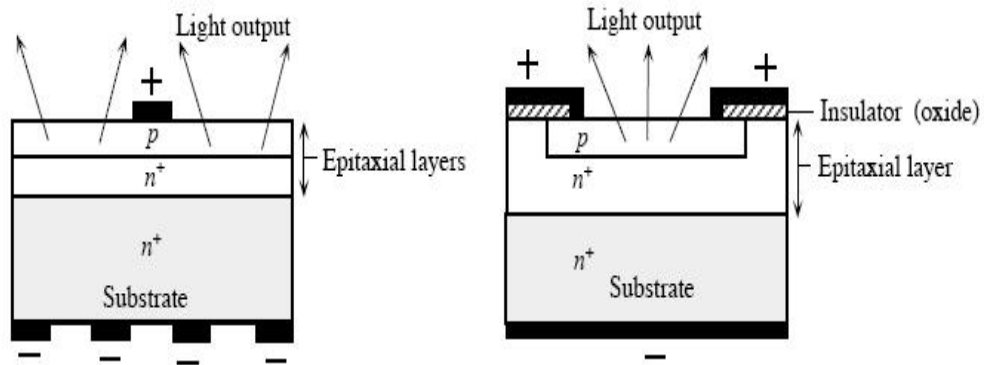
**Figure III.2 :** Diagramme de bandes d'énergies d'une jonction PN

(a) Jonction non polarisée ; (b) Jonction polarisée

Cet effet est appelé électroluminescence par injection. Ces photons devraient pouvoir s'échapper du dispositif sans être réabsorbé.

La structure de la LED joue un rôle important dans l'émission de la lumière à partir de sa surface. La LED doit être structurée de sorte que les photons générés par l'appareil soient émis sans être réabsorbé. La figure III.3 illustre la structure usuelle d'une LED.





**Figure III.3 :** Structure d'une LED (Dispositifs de jonction PN et diodes électroluminescentes de Safa Kasap).

Un paramètre très important à étudier pour une LED, est l'efficacité quantique ou le rendement externe  $\eta_{ext}$ . Il quantifie l'efficacité de la conversion de l'énergie électrique en énergie optique émise. L'efficacité de conversion des électrons en photons est calculée à partir du rendement quantique interne :

$$\eta_i = \tau_{NR} / (\tau_{NR} + \tau_R) \quad (III-1)$$

Avec  $\tau_{NR}$  la durée de vie non-radiative.

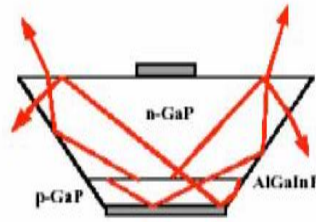
$\tau_R$  durée de vie radiative.

Le flux de photons émis est alors :  $\phi = \eta_i J/q$

Avec  $J$  est le flux d'électrons.

Le rendement interne peut atteindre jusqu'à 80%.

Le rendement externe se définit par le rapport entre le nombre de photons émis et le nombre d'électrons. Il peut atteindre 40-50 % à condition de jouer sur l'extraction lumineuse. Cependant, le rendement externe est très faible si l'on considère une géométrie simple, généralement la géométrie pyramidale est la plus adaptée et utilisée (Figure III.4).



**Figure III.4** : Une LED en structure pyramidale.

La puissance d'émission étant proportionnelle à la densité de photons dans la cavité, elle est alors exprimée en fonction du courant d'injection :

$$P_{int} = \eta_i h\nu \frac{I_d}{q} = \eta_i \frac{I_d}{\lambda(nm)}. \quad (\text{III-2})$$

## I-2- Caractéristiques électriques et spectrales de la LED

La diode électroluminescente fonctionne sous polarisation directe. Lorsque la tension d'alimentation est assez importante, la LED doit être protégée par une résistance pour limiter le courant qui la traverse à des valeurs inférieures qui ne dépassent pas l'intensité maximale du courant tolérée. Ainsi, l'alimentation de la LED se fait plutôt en courant qu'en tension, et ceci à travers la résistance qui permet de fixer ou limiter la valeur du courant ainsi que celle de la puissance lumineuse émise. Le courant qui travers la jonction est donné par l'expression :

$$I = I_s(e^{eV_d/KT} - 1) \quad (\text{III-3})$$

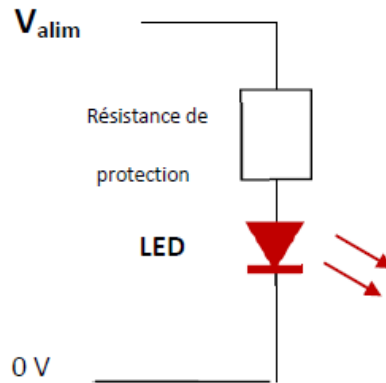
Avec

$I_s$  ; le courant de saturation de la diode.

$K$  ; la constante de Boltzmann.

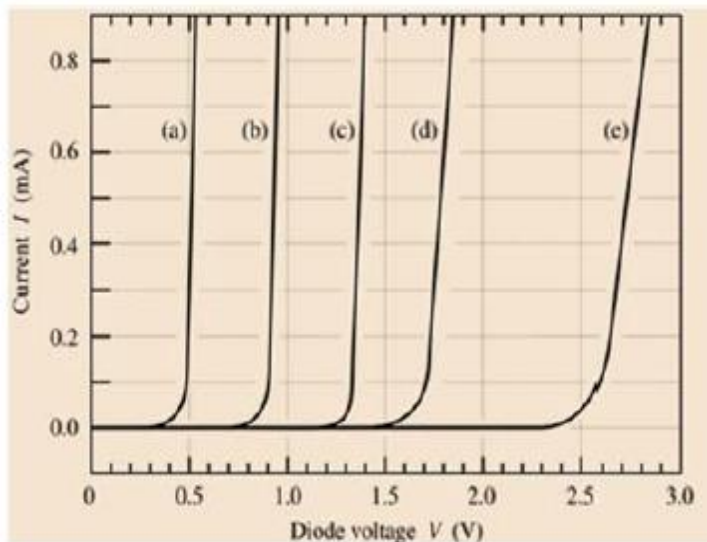
$T$  ; la température

et  $V_d$  ; la tension aux bornes de la diode.



**Figure III.5:** Circuit de polarisation de la LED.

La LED est aussi caractérisée par une tension de seuil  $V_{th}$  représentant la tension à partir de laquelle des photons commencent à être émis par la LED. Il est intéressant de noter que l'on retrouve la valeur de la tension de seuil sur la caractéristique expérimentale de la LED rouge (1.5V). Cependant, la tension de seuil est liée au fonctionnement d'une LED.



**Figure III.6:** Caractéristique I(V) de la diode à base de : (a) Ge, (b) Si, (c) GaAs, (d) GaAsP, (e) GaInN [Réf : LIGHT-EMITTING DIODES, E. F. SCHUBERT, CAMBRIDGE University Press, 2003, page 58].

La caractéristique I-V de la LED, illustrée sur la figure III.6, ressemble à celle d'une diode classique au silicium avec une tension de seuil  $V_{th}$  assez élevée.

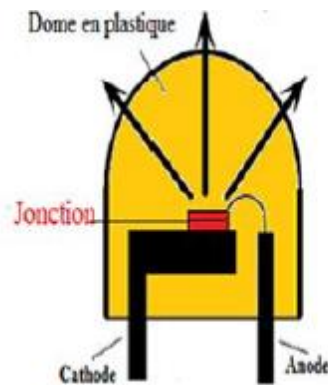
\* La tension directe appliquée à la LED doit être supérieure à  $V_{th}$ , elle :

- Est de l'ordre de 1,1 V pour les diodes à émission dans l'infrarouge.
- Varie de 1,8 V à 2,5 V pour les LED à émission dans le rouge, le jaune et le vert.
- Est supérieure à 3,5 V pour l'émission dans le bleu et le violet.

\* Le courant nominal d'une diode électroluminescente est de l'ordre de 10 à 50 mA, pour les LED usuelles, suivant la couleur de la radiation.

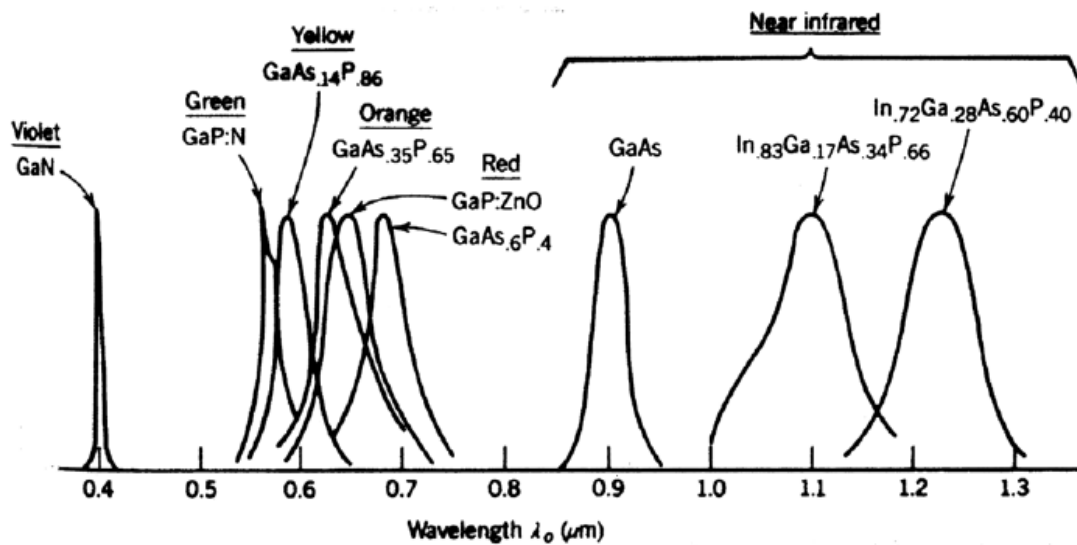
\* En polarisation inverse, la LED est plus fragile qu'une diode classique. Elle tolère des tensions inverses de l'ordre de 4 à 5 V.

La figure III-7 suivante représente une diode électroluminescente usuelle encapsulée dans un matériau plastique transparent qui joue le rôle de lentille et détermine l'angle d'émission lumineuse.



**Figure III.7 :** Diode Electroluminescente usuelle encapsulée.

Les LEDs commerciales couvrant le spectre visible sont généralement fabriquées à base d'alliage de GaAs et GaP comme le montre la figure III.8 en dessous.



**Figure III.8 :** Elargissement spectral des LEDs commerciales et alliages de fabrication.

## II- La diode Laser

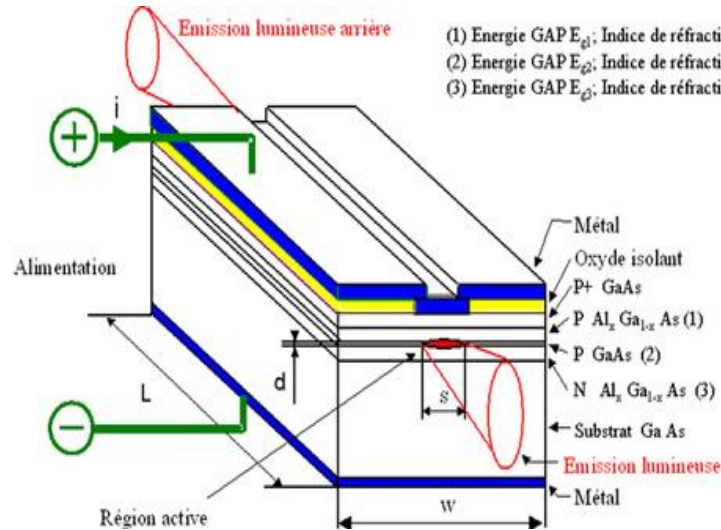
La faisabilité d'une émission laser au sein d'un semi-conducteur fut démontrée expérimentalement dans l'arséniure de gallium (GaAs) en 1962 par R.N. Hall et al.

Une diode laser est un composant optoélectronique à base de matériaux semi-conducteurs. Elle émet de la lumière monochromatique cohérente (une puissance optique) destinée, entre autres, à transporter un signal contenant des informations sur de longues distances (dans le cas d'un système de télécommunications) ou à apporter de l'énergie lumineuse pour le pompage de certains lasers (lasers à fibre, laser DPSS) et amplificateurs optiques (OFA).

Une diode Laser a la forme d'un parallélépipède rectangle (Figure III-9) dont les deux faces clivées perpendiculairement au plan d'une jonction de semi-conducteurs émettrice, constituent un résonateur Fabry-Pérot. Ce résonateur est à l'origine de l'émission stimulée de photons caractéristique de l'émission Laser.

Afin d'obtenir une émission Laser continue et puissante à température ambiante, la jonction de semi-conducteurs doit être une structure complexe telle que l'homojonction, l'hétérojonction et la double hétérojonction (DH), cette dernière présente l'avantage de confiner les porteurs

par une barrière de potentiel électrostatique dans un volume très réduit  $V = L.d.s$  : appelé zone active.



**Figure III.9 :** Diode Laser type DH-OS ("Double Heterostructure Oxide-isolated Stripe").

Pour fixer l'échelle de taille de la zone active,  $L \sim 100$  à  $500 \mu\text{m}$ ,  $d \sim 0,1$  à  $0,5 \mu\text{m}$  et  $s \sim 2$  à  $5 \mu\text{m}$ .

## II-1- Semi-conducteurs et émission laser

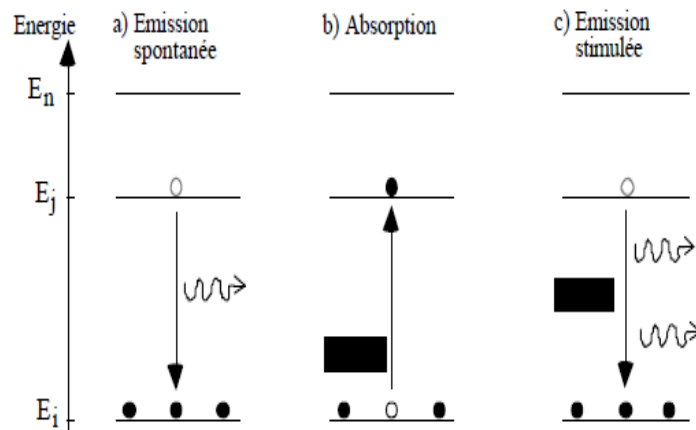
Le semi-conducteur de base utilisé dans les diodes Laser est l'arséniure de gallium-aluminium (GaAlAs), il possède une largeur de bande  $E_g = 1,6 \text{ eV}$ .

La relation  $\lambda = \frac{hc}{E_g}$  s'écrira donc  $\lambda_{nm} = 1242/E_g \text{ (eV)}$ .

Si on exprime  $E_g$  en électron-volt et  $\lambda$  en nanomètre, on peut se situer à une longueur d'onde de l'ordre de  $780 \text{ nm}$ , à la limite du visible.

### II-1-a- Emission stimulée

Comme déjà expliqué dans les chapitres précédents, une raie spectrale déterminée correspond à la transition radiative d'un électron entre 2 niveaux d'un système donné (atome, molécule, cristal semi-conducteurs... etc). Cependant, cette transition peut s'effectuer selon trois processus (Figure II.10):



**Figure III.10 :** Différents types d'émission dans les semi-conducteurs.

a) Emission spontanée : l'électron descend spontanément d'un niveau  $E_j$  vers un niveau inférieur  $E_i$  et le système émet un photon d'énergie  $h \nu_{ij} = E_j - E_i$ .

b) Absorption : si des photons d'énergie  $h \nu_{ij}$  sont déjà présents dans le milieu, alors le système peut en absorber un en faisant passer un électron du niveau fondamental  $E_i$  vers le niveau supérieur  $E_j$ .

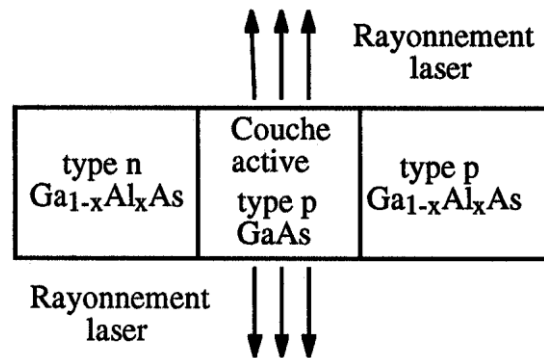
c) Emission stimulée (ou induite) : c'est le phénomène inverse du précédent. L'un de ces photons  $h \nu_{ij}$  peut induire un électron se trouvant dans le niveau supérieur  $E_j$  à redescendre vers l'état  $E_i$  en émettant un second photon dont non seulement l'énergie  $h \nu_{ij}$  mais aussi toutes les autres caractéristiques (direction, polarisation, phase) sont identiques à celles du photon "inducteur". L'émission stimulée, qui crée une population de photons aux caractéristiques identiques (énergie et direction notamment), est le principe de base du laser. Cependant l'émission stimulée et l'absorption sont deux phénomènes concurrents.

Pour favoriser l'émission stimulée, il faut que la population du niveau excité  $E_j$  soit plus élevée que celle du niveau fondamental  $E_i$ . Cette situation d'inversion de population nécessite un mécanisme de pompage pour maintenir constante la population du niveau supérieur  $E_j$ , qui tend naturellement à se vider (émission spontanée). D'autre part il faut confiner les photons ("inducteurs") dans la zone active afin d'amplifier le phénomène d'émission stimulée. On place à cet effet le système dans une cavité résonnante accordée à la fréquence  $\nu_{ij}$ .

L'émission laser apparaît alors quand le gain du milieu amplificateur excède les pertes de la cavité (notamment la perte associée à l'émission du faisceau laser). Dans le cas des diodes laser, le niveau  $E_i$  se situe dans la bande de valence et le niveau supérieur  $E_j$  dans la bande de conduction. Le mécanisme de pompage se fait par injection de porteurs.

### II-1-b- Cavité résonante

Un système d'ondes stationnaires s'établit dans la cavité délimitée par les variations d'indice dans le milieu semi-conducteur. L'indice de GaAs est supérieur de quelques pour cent à celui de  $Ga_{1-x}Al_xAs$  ce qui permet de confiner la lumière dans la couche active (Figure III.11).



**Figure III.11** : Structure d'une diode laser au Ga Al.

La longueur  $L$  d'une telle cavité est de l'ordre de  $300 \mu m$  et l'indice de la couche active  $n$  de l'ordre de 3,5. Il y a un nombre entier  $q$  de demi-longueurs d'onde dans  $L$  tel que :

$$L = q \frac{\lambda}{2n} \quad (III-4)$$

$q$  est de l'ordre de 2000.

### II-2- Caractéristiques spectrales des diodes Laser

Une diode Laser peut être modélisée par un milieu actif de longueur  $L$  délimité par les interfaces 1 et 2 formant la cavité Fabry-Pérot (Figure III-12).

Ces interfaces sont caractérisées par leurs coefficients de réflexion  $r$  et  $r'$  et de transmission  $t$  et  $t'$  en amplitude du champ électrique. On notera  $\mu_{es}$  l'indice effectif de réfraction de phase sans rétro-injection.



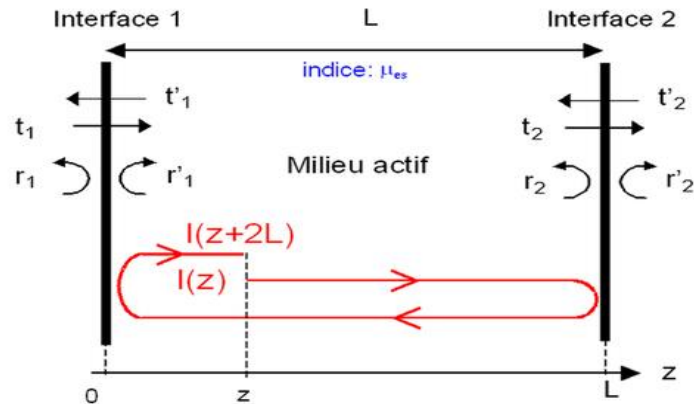


Figure III.12 : Modélisation d'une diode Laser.

### II-2-a- Gain seuil

Le flux d'intensité optique dans la cavité  $I(z)$  suit une loi exponentielle  $-\gamma z$  où  $\gamma = -g + \alpha_p$  est le coefficient d'absorption du milieu actif,  $g$  le gain de ce milieu et  $\alpha_p$  le coefficient de perte principalement dû aux absorptions par porteurs libres (effet Auger).

La condition d'émission Laser est obtenue lorsque le champ électrique associé à ce flux est inchangé en amplitude et phase par un aller-retour dans la cavité active d'où:

$$r'_1 r'_2 \exp\left(-j_c \frac{4\pi\mu_{es}v_s}{c} L + (g_{ths} - \alpha_p)L\right) = 1 \quad (\text{III-5})$$

Où  $g_{th}$  est le gain seuil sans rétro-injection,  $v_s$  la fréquence d'émission sans rétro-injection et  $c$  la célérité de la lumière dans le vide.

La résolution de cette équation en module et phase conduit au gain seuil et aux fréquences d'émission autorisées.

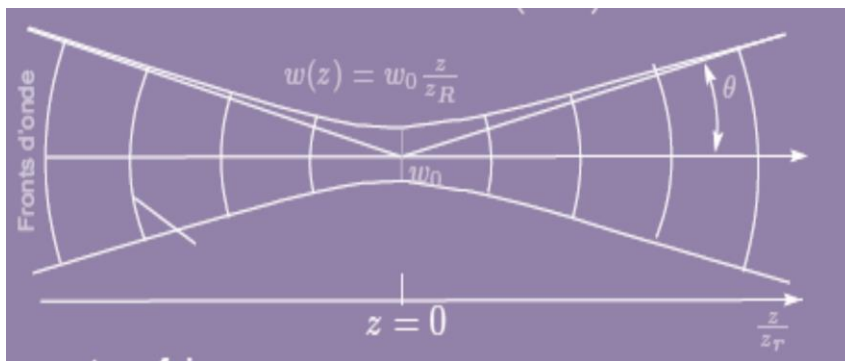
$$g_{ths} = \alpha_p + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{r'_1 r'_2} \quad \text{et} \quad v_s = u \frac{c}{2L\mu_{es}} \quad (\text{III-6})$$

$u$  est un entier.

A chaque valeur de  $u$  correspond une fréquence distincte autorisée, donc un mode longitudinal distinct d'émission Laser possible.

## II-2-b- Faisceau Laser

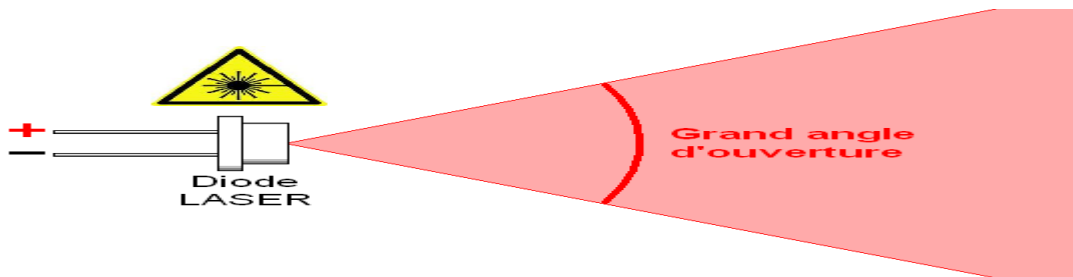
La première caractéristique des diodes laser est de présenter une très grande divergence et une asymétrie, dues principalement aux dimensions très petites de la zone active d'émission. Le faisceau émis par une diode laser peut être considéré comme gaussien, par conséquent la zone active rectangulaire forme un faisceau de taille (appelé généralement beam waist)  $w_0$  (figure III-13).



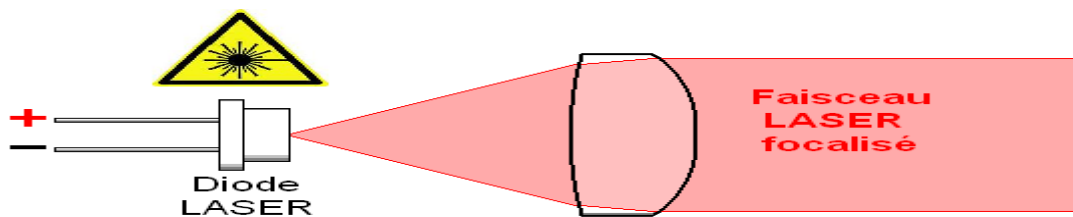
**Figure III.13 :** Allure d'un faisceau Laser.

L'angle de divergence varie en général de  $20^\circ$  à  $40^\circ$ . La divergence est plus grande dans le sens de la largeur que dans celui de la longueur de la zone active. Une optique correctrice sera donc nécessaire pour focaliser le faisceau laser.

La finesse d'un faisceau laser et son non divergence ne sont que des propriétés d'optiques géométriques de base, rien à voir avec la nature de la lumière (longueur de cohérence, largeur spectrale, polarisation). C'est toujours la lentille qui crée l'allure du faisceau laser (figures III-14 et III-15).



**Figure III.14** : Faisceau émis par une diode Laser sans lentille.



**Figure III.15** : Faisceau émis par une diode Laser avec lentille.

C'est la lentille qui réduit l'angle de divergence à 0.001 radian environ. On ne peut pourtant pas transformer une LED en faisceau Laser. En fait, l'étendue de la source lumineuse laser est extrêmement petite (quelques microns) et c'est pour cela que le faisceau diverge très peu. Le laser est une source quasi ponctuelle extrêmement intense.

Attention : même sans lentille, une diode laser est dangereuse pour les yeux ! L'image qui s'en forme sur la rétine est très ponctuelle, donc très concentrée.

### II-2-c- Fréquence d'émission

Les diodes lasers n'ont pas une longueur d'onde d'émission bien définie parce qu'il n'y a pas deux niveaux d'énergie discrets responsables du processus comme dans les lasers traditionnels mais plutôt une distribution d'énergie électronique en bandes. La production et le guidage du faisceau laser s'effectue dans un espace très réduit (couche **p-n**) en contraste avec le laser conventionnel, les dimensions du résonateur sont à peu près du même ordre de grandeur que la longueur d'onde du faisceau laser.

Globalement, la longueur d'onde émise par la diode laser peut être exprimée en fonction de deux variables (la température et le courant) selon l'équation polynomiale suivante :

$$\lambda(T, I) = \lambda(T_0, I_0) + \alpha_T(T - T_0) + \alpha_I(I - I_0) + \alpha_T^2(T - T_0)^2 + \alpha_I^2(I - I_0)^2 + \dots + \alpha_T^n(T - T_0)^n + \alpha_I^n(I - I_0)^n \quad (\text{III-7})$$

Pour une opération à longueur d'onde constante  $\lambda(T, I) = \lambda_c$  l'équation ci-dessus se réduit à :

$$I = (\lambda_c - \lambda_0) / \alpha_I + I_0 - \alpha_T / \alpha_I (T - T_0) \quad (\text{III-8})$$

### II-3- Caractéristiques électriques d'une diode laser

Les diodes Laser reposent sur des technologies bien différentes en fonction de la couleur émise. En fonction de la couleur du laser, le principe sera différent : diode laser simple ou diode laser de pompage et cristaux spécifiques.

Electriquement, une diode laser s'alimente comme une LED. Comme toute diode, elle est polarisée. Cependant, le courant qui circule dans la diode laser doit être maîtrisé avec une grande précision que pour une LED, une pointe de courant même très brève, ou une décharge d'électricité statique sont fatales à une diode laser. En tension inverse, une diode laser ne supporte que 2 ou 3V, donc attention à la polarité !

Comme une LED, la caractéristique courant-tension fait qu'il s'établit une tension aux bornes de la diode laser qui varie assez peu avec le courant. La diode laser doit donc être contrôlée en courant.

#### II-3- a- Courant de seuil d'une diode laser

La lumière "laser" ne commence à être émise qu'à partir d'un certain courant (10% à 25% du courant maximum). Par exemple, il faut au moins 80 mA pour commencer à voir le faisceau laser rouge pour la diode laser 300 mW (ce phénomène n'existe pas sur les LEDs).

La puissance d'émission sans rétro-injection  $P_s$  étant proportionnelle à la densité de photons dans la cavité, elle est alors exprimée en fonction du courant d'injection  $i = j.l.s$  et du courant d'injection seuil sans rétro-injection  $i_{ths}$  par la relation :

$$P_s = \eta(i - i_{ths}) \text{ avec } \eta = \frac{k}{qVv_g g_{ths}} \quad (\text{III-9})$$

## II-4- Types de diodes Laser

### II-4-a- Diodes laser simples

Dans une diode laser simple, le courant électrique est directement converti en lumière laser, comme dans une LED, il existe comme exemples les diodes Lasers:

- rouge 650nm (pointeurs laser rouge, lasers pour lightshow).
- rouge 635nm (diodes industrielles spécifiques).
- bleu 445nm (nouvelles diodes laser 1W et 2W pour lightshow).
- bleu 405nm (Blu ray).



**Figure III.16 :** Diode laser bleu 1W, 445nm.

### II-4-b- Diodes laser DPSS (Diode pumped solide state)

C'est l'autre grande famille de lasers à semi-conducteurs. Sans trop entrer dans la théorie de la physique, on peut dire que le principe est différent et que la lumière laser finale est obtenue en plusieurs étapes. Exemple : le laser vert 532 nm très courant depuis les années 2000.

#### II-4- c- Diode laser de pompage et cristaux

La source électrique (piles 1.5V dans les pointeurs, cartes d'alimentation pour les lasers de discothèque) alimente une puissante diode laser infrarouge qui excite un cristal spécifique. Cette diode est la source d'énergie optique : c'est la diode de pompage (elle réalise le "pompage optique"). Souvent, sa longueur d'onde est de 808nm (proche infrarouge). Le rendement de la diode laser de pompage va de 10 à 25% et le faisceau de la diode de pompage est souvent parallèle au faisceau de la cavité laser. Ce type de pompage est plus efficace que le pompage transverse mais requiert aussi plus d'éléments optiques et de réglages.

#### II-4- d- Diode laser a Cristal Nd : YVO4 ou Nd :YAG

Ce cristal (d'où le nom "solid state") est irradié par la diode laser de pompage (808nm). Recevant cette énergie concentrée, il convertit la longueur d'onde de 808 nm en une nouvelle longueur d'onde : 1064 nm (914 nm, 946 nm, 1342 nm aussi possibles...).

Le cristal Nd : YVO4 (orthovana date d'yttrium dopé au néodyme) (Figure III.17) est avantageux par rapport au plus ancien Nd :YAG (grenat d'aluminium et d'yttrium dopé au néodyme) : il encaisse un avantage de puissance et est moins sensible aux variations de longueur d'onde de pompage. Un excès de puissance dégrade définitivement le cristal.



**Figure III.17** : Cristaux Nd:YVO4 pour applications laser.

#### II-4- e- Diode laser a cristaux Doubleurs de fréquence

Il existe un cristal qui a pour but de doubler la fréquence optique, c'est-à-dire divisé par deux la longueur d'onde. Par exemple : à son entrée on dispose d'une lumière laser à 1064 nm (infrarouge), à sa sortie on obtient une lumière laser à 532 nm (vert visible).

Ce cristal est composé de phosphate de titanyle potassium (formule chimique :  $\text{KTiOPO}_4$ , abrégé "KTP") pour les lasers verts (532nm). Pour les lasers bleus, le triborate de lithium est aussi utilisé (formule chimique :  $\text{LiB}_3\text{O}_5$ , abrégé "LBO").



**Figure III.18 :** Cristaux LBO pour applications laser.

Le doubleur de fréquence repose sur l'optique non linéaire. Ces propriétés apparaissent à des champs électromagnétiques intenses (forte irradiation en 1064 nm ou 946 nm).

A la modeste lumière du jour, un cristal doubleur de fréquence est transparent et ne modifie nullement les couleurs.

### III-5- Exemples de diodes Laser

Il existe sur le marché international plusieurs types de diodes laser selon l'utilité, la couleur émise est la puissance d'émission, dont on peut citer quelque unes :

- **Eléments d'un pointeur laser vert**

Voici un pointeur laser vert vu en coupe :

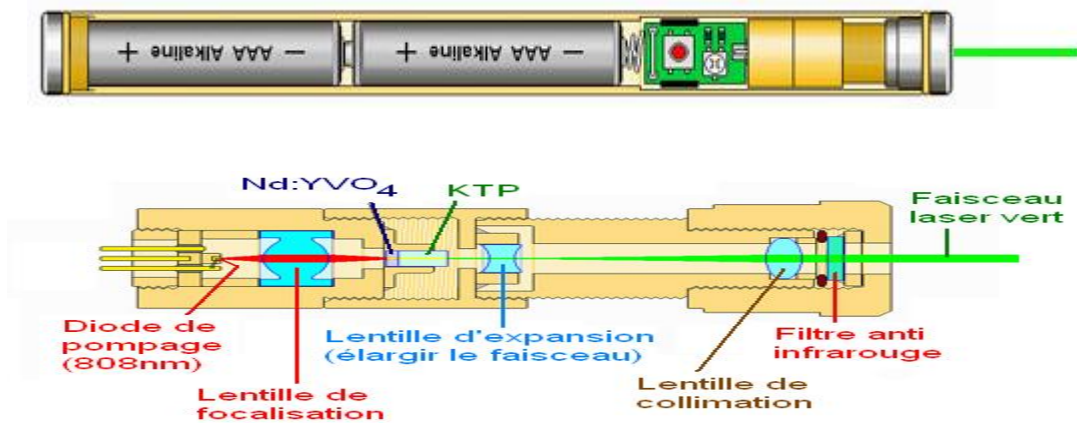


Figure III.19 : Pointeur laser vert : diode de pompage, Nd:YVO4 et KTP.

Le filtre anti infrarouge empêche l'infrarouge résiduel de sortir.



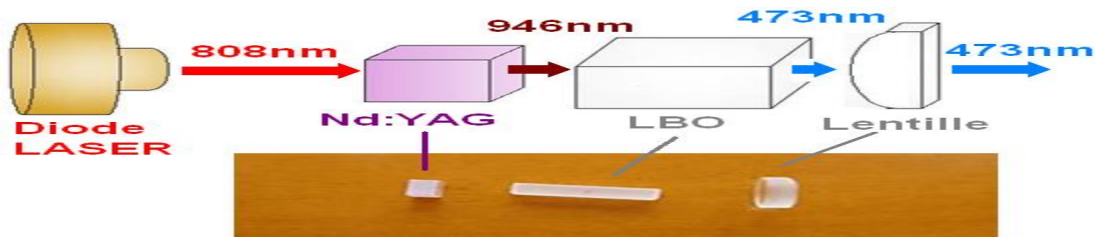
Figure III.20 : Vue synoptique d'un laser vert 532nm.

Le rendement d'un laser vert (puissance optique à 532 nm / puissance électrique consommée) va de 1% à 5% environ.

- **Eléments d'une diode laser bleu 473 nm**

C'est le même principe qu'un laser vert, sauf que le doubleur de fréquence est un cristal de LBO, optimisé pour transformer 946 nm en 473 nm (figure III-20).





**Figure III.21:** Diode laser bleu 473nm : principe et éléments optiques.

- **Laser jaune à 593nm**

Le laser jaune aussi obtenu par pompage. Le cristal non linéaire ne double pas la fréquence mais combine deux longueurs d'ondes (1064 nm et 1342 nm) en additionnant leurs énergies respectives.

$$E = \frac{hc}{1064nm} + \frac{hc}{1342nm} = \frac{hc}{593nm} \quad (\text{III-10})$$

$h$  : Constante de Planck ( $h= 6,62607004 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg / s}$ ).

## II-6- Utilisation des diodes laser

Les diodes laser sont utilisées dans de nombreuses applications, d'une part comme substitut des lasers à gaz car elles présentent sous un volume réduit sans haute tension et à moindre prix une puissance équivalente, d'autre part comme laser pompe pour le laser à cristaux. Mais leur utilisation principale concerne les télécommunications où elles permettent grâce à leurs fréquences de modulation élevées d'alimenter les réseaux de transmission à fibres optiques. Les imprimantes laser en font également usage. La diode laser est aussi un composant essentiel des lecteurs et graveurs de disques optiques.

### Exercice d'application :

Soit une LED au GaAsP à émission dans le rouge avec  $\lambda= 670 \text{ nm}$  et un rendement quantique interne de 0.16.

- 1- Si le courant qui la traverse est de 20 mA, calculer la puissance optique générée dans la zone active.

- 2- Pour un courant nominal de 20 mA et une tension de seuil de 1.7 V, si la LED, à émission dans le rouge, est alimentée par une tension de 9 V, calculer la valeur de sa résistance de protection.

**Solution :**

- 1- La puissance optique d'une LED est donnée par :

$$P_{int} = \eta_i h\nu \frac{I_d}{q} = \eta_i \frac{I_d}{\lambda(nm)} 1.24$$

Donc :  $P_{int} = 0.16 \frac{20 \cdot 10^{-3}}{670} \cdot 1.24 \approx 6 \text{ mW}$

2-  $R = \frac{V_{alim} - V_d}{I_d} = \frac{9 - 1.7}{0.02} = 365 \Omega$

Le choix d'une valeur de la résistance supérieure à celle calculée produira un courant plus faible et par conséquent une lumière moins intense.

## Chapitre 4

### Les photo-détecteurs



#### I- Introduction

Les photorécepteurs sont des dispositifs photosensibles. Leur fonctionnement est basé sur l'interaction photon – électron. Lorsque la radiation lumineuse est absorbée par le matériau photosensible, elle cède son énergie aux électrons du matériau les faisant passer vers des niveaux énergétiques supérieur, on peut distinguer alors deux sortes de photo-détecteurs :

- **Les détecteurs à effet de surface** qui sont à effet photoélectrique externe :
  - Photocathodes
  - Tubes Photomultiplicateurs
- **Les Photo détecteurs à effet de volume** qui sont à effet photoélectrique interne :
  - Photodiodes
  - Photorésistances

On distingue dans cette catégorie :

- Des détecteurs actifs qui génèrent un signal électrique sans l'aide d'une source d'énergie auxiliaire : photopile.
- Des détecteurs passifs qui ont besoin d'être polarisés par une source d'énergie externe : photodiode, phototransistor,

Les photorécepteurs utilisés dans les transmissions par fibres optiques sont:

- Des photoconducteurs à effet de volume.
- Des photorécepteurs sensibles au gradient de porteurs en excès.

Ces composants assurent, au bout de la chaîne de transmission, la conversion optique-électrique. Ils ont des dimensions compatibles avec le diamètre des fibres et sont alimentés par des tensions assez faibles.

Les paramètres essentiels pour choisir un photodétecteur vis à vis des exigences de transmissions optiques sont alors :

- Une bonne sensibilité à la longueur d'onde de transmission (850 nm – 1550 nm) ; soit un bon rapport photo-courant / puissance optique incidente.
- Une réponse rapide ; soit un faible temps de transit des porteurs photo-générés. Il faut pouvoir utiliser le photodétecteur jusqu'à des débits de plusieurs dizaines de Gbit/s.
- Un fort rapport signal / bruit ; soit une bonne détectivité.
- Une Insensible aux variations de température

## **II- La photorésistance**

Une photorésistance est un composant électronique dont la résistivité varie en fonction de la quantité de lumière incidente. On peut également la nommer résistance photo-dépendante (light-dependent resistor (LDR)) ou cellule photoconductrice.

### **II-1- Technologie et fonctionnement des LDR**

Une photorésistance est généralement composée d'un semi-conducteur à haute résistivité. Si la lumière incidente est de fréquence suffisamment élevée (donc d'une longueur d'onde inférieure à la longueur d'onde seuil), elle transporte une énergie importante. Au-delà d'un certain niveau propre au matériau, les photons absorbés par le semi-conducteur donneront aux électrons liés assez d'énergie pour passer de la bande de valence à la bande de conduction. Les électrons libres et les trous d'électron ainsi produits abaissent la résistance du matériau.

Lorsque le photon incident est suffisamment énergétique, la production des paires électron-trou est d'autant plus importante que le flux lumineux est intense. La résistance évolue donc comme l'inverse de l'éclairement.

Les matériaux utilisés dans les photorésistances sont le plus souvent des composés des colonnes II-VI de la classification périodique des éléments. Pour une utilisation dans le

domaine visible et à faible coût, on utilise le plus souvent le sulfure de cadmium (CdS) ou le séléniure de cadmium (CdSe). Pour des utilisations dans l'infrarouge on utilise le sulfure de plomb (PbS).

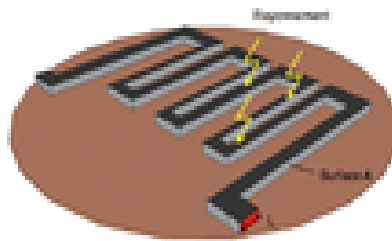
La surface réceptrice du flux lumineux est un ruban, cette forme minimise la largeur séparant les électrodes et les laissent en contact avec le ruban sur une grande surface. C'est cette configuration qui donne la résistance la plus faible. Seules les photorésistances utilisées sous haute tension sont constituées d'un ruban large.

En effet le courant traversant la photorésistance s'écrit:

$$I = q\mu n \frac{A}{L} V \quad (\text{IV-1})$$

Dans cette expression :

- **q** est la charge de l'électron
- **μ** est la mobilité de l'électron
- **n** est la densité d'électrons présents
- **A** est l'aire de la surface de contact entre les électrodes et la zone photosensible
- **L** est la largeur du ruban

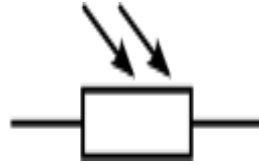


**Figure IV.1** : Géométrie optimale d'une LDR (ruban).

On constate que pour augmenter cette intensité il faut maximiser **A** et minimiser **L**. C'est pourquoi le ruban est la forme la plus efficace.

## II-2- Symbole et des LDR

Le symbole d'une photorésistance utilisé dans un grand nombre de schémas de circuit électrique est le suivant (Figure IV.2) :



**Figure IV.2** : Symbole d'une photorésistance.

## II-3- Utilisation des LDR dans des schémas électriques et applications

Le composant sert majoritairement à distinguer la présence ou l'absence de lumière. Les photorésistances trouvent leurs applications principales dans la détection d'une différence de flux plutôt que dans la mesure précise du niveau de flux reçu (impulsions lumineuses, variation d'éclairage par exemple). Cependant, le type de rayonnement détectable dépend du type de semi-conducteur composant la photorésistance. Par exemple, les photorésistances au CdSe (séléniure de cadmium) permettent de détecter un rayonnement dans les proches IR et le visible alors que celles de ZnO (oxyde de zinc) permettent de détecter un rayonnement UV. L'utilisation de ce type de détecteurs est très variée :

- Les détecteurs de flammes qui sont des photorésistances à détection d'infrarouges ou d'UV. À savoir que seule une forte fumée cause une inhibition du capteur UV et que la foudre ou une soudure peut le déclencher accidentellement. Pour la photorésistance à infrarouges, la présence de vapeur d'eau atténue fortement sa sensibilité.
- Les détecteurs de présence se déclinent sous deux principes différents : Un premier détectant l'augmentation du flux induit par la présence d'un corps dans le champ (principalement des capteurs à infrarouges), le second détectant la diminution du flux induit par l'ombre du corps présent dans le champ du capteur qui est plus limité que celui à infrarouges (détection dans le visible et capteur LDR plus directif).

- Les récepteurs infrarouges permettent de faire communiquer deux appareils sans contact. L'un des appareils possède un émetteur infrarouge et le second la photorésistance.
- Les détecteurs à UV qui permettent de mettre en évidence toute source d'UV et ainsi asservir la source ou détecter une fuite par exemple.
- L'allumage des lumières lorsque la luminosité diminue (éclairage public ou domestique).
- La mesure de la luminosité extérieure dans les appareils photographiques ou les ordinateurs.

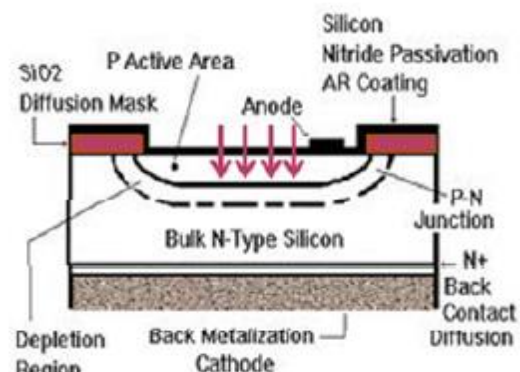
Les applications de ce composant sont donc très variées, que ce soit dans le monde industriel ou domestique. Étant peu cher, il présente un bon rapport qualité pour les industriels souhaitant l'intégrer dans leurs systèmes.

### III- La photodiode

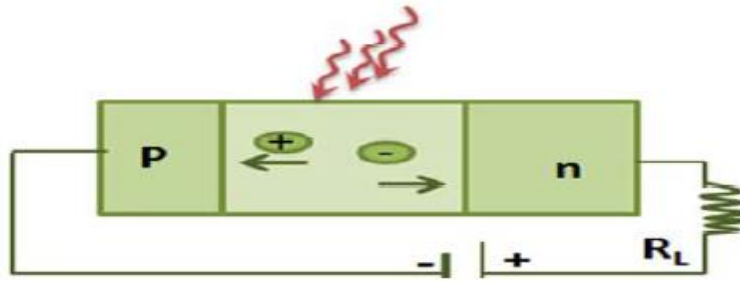
#### III-1- Fonctionnement de la photodiode

La photodiode est une diode qui n'a pas été encapsulé et qui est donc sensible aux radiations extérieures (Figure IV.3 et 4). Son principe de fonctionnement est basé sur les mécanismes de conduction dans une jonction PN polarisée en inverse et soumise à un rayonnement.

Figure IV.3 : Structure d'une photodiode.



Les porteurs photo-générés sont séparés et accélérés par un champ électrique puis collectés pour contribuer au courant mesuré.



**Figure IV.4 :** jonction PN sous polarisation inverse et soumise à un rayonnement.

Le courant qui circule dans une diode est donné par l'expression :

$$I = I_s(e^{V/U_T} - 1) \quad (\text{IV-1})$$

Où  $I_s$  est le courant de saturation  $U_T \approx 26 \text{ mV}$  à 300K et  $V$  la tension appliquée.

Lorsque la diode est polarisée en inverse et pour  $|V| \gg U_T \Rightarrow I = -I_s$  Le courant mesuré est dû aux porteurs minoritaires des régions P et N et de la génération de paires électron-trou dans la Z.C.E.

Dans le cas de la photodiode, le rayonnement absorbé augmente ce courant par la création de porteurs dans la zone de charge d'espace.

Les photons incidents créent des paires électron-trou dans chacune des régions : P, ZCE et N :

- Dans les régions neutres P et N, les porteurs minoritaires diffusent. Ceux qui atteignent la charge d'espace sont attirés par le champ et contribuent au courant par leur diffusion créant un photo-courant de diffusion ( $I_{diff}$ ).
- Dans la ZCE, les paires électron-trou créées sont dissociées par le champ électrique ; l'électron est propulsé vers la région N et le trou vers la région P. ces deux photo-porteurs donnent naissance à un photo-courant de génération ( $I_g$ ).

Les deux mécanismes s'ajoutent pour donner naissance au photo-courant  $I_{ph}$ .



$$I_{ph} = I_{ndiff} + I_{pdiff} +$$

$I_g$

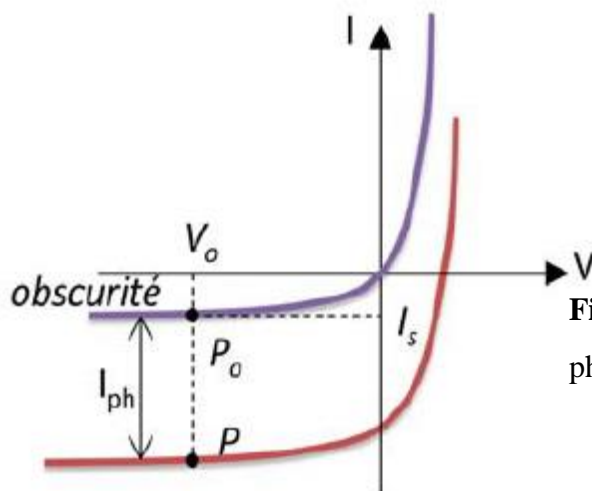
(IV-2)

Ce photo-courant contribue alors à l'augmentation du courant inverse de la photodiode :

$$I = \left( e^{V/U_T} - 1 \right) - I_{ph} \quad (IV-3)$$

### III-2- Caractéristiques électriques de la photodiode

Le photo-courant dans une photodiode est pratiquement indépendant de la tension de polarisation. La caractéristique de la diode en obscurité et sous éclaircissement est donnée sur la figure (VI.5) suivante :



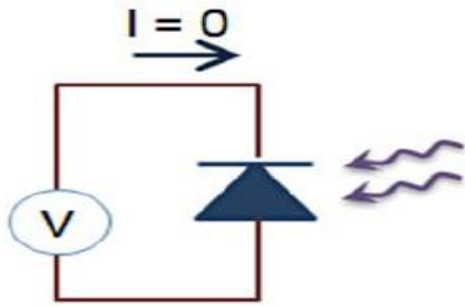
**Figure VI.5 :** caractéristiques I(V) de la photodiode en obscurité et sous éclaircissement.

En pratique, une photodiode peut être utilisée suivant deux modes de fonctionnement :

#### **Mode 1: photovoltaïque ; $I = 0$**

La diode, sans polarisation externe, est en circuit ouvert (cas des cellules solaires). Dans ce cas, on mesure le photo-voltage  $V_{co}$  qui apparaît aux bornes de la photodiode (Figure VI.6):

$$I = I_s \left( e^{V_{co}/U_T} \right) - I_{ph} = 0 \quad \text{ce qui donne} \quad V_{co} = U_T \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right)$$



**Figure VI.6 :** Mode photovoltaïque, Diode en circuit ouvert.

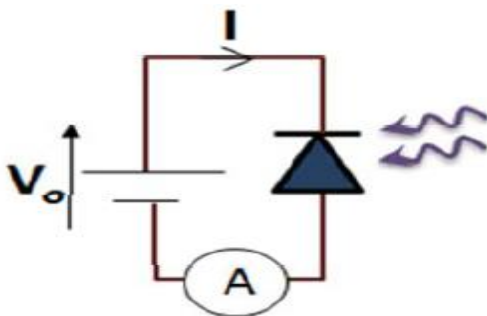
**Mode 2 : polarisation en inverse ( $V_o < 0$ )**

La diode est polarisée en inverse, (cas des photodiodes). Dans ce cas, on mesure le photocourant débité par la diode.

$$I = \left( e^{V_o/U_T} - 1 \right) - I_{ph} \quad (IV-4)$$

Les photodiodes sont, en général, polarisées par des tensions de l'ordre de 5V et inférieures à la tension d'avalanche. Dans ce cas on peut supposer que la tension  $V_o$  est très grande devant  $U_T$ , ce qui nous permet d'écrire :

$$I = -(I_s + I_{ph}) \approx -I_{ph} \quad (IV-5)$$



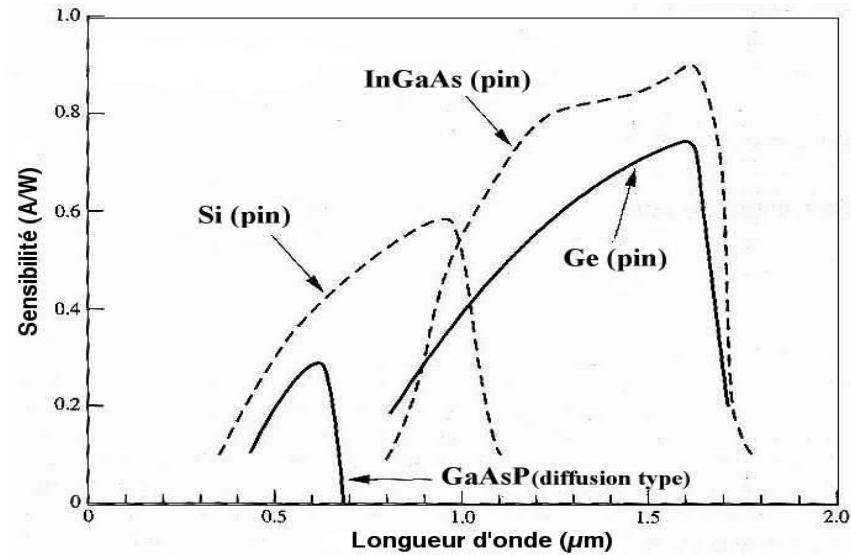
**Figure IV.7 :** Fonctionnement photodiode, polarisation inverse

Le courant mesuré est alors proportionnel à l'intensité de lumière incidente. On introduit alors la notion de sensibilité  $S_\lambda$ . C'est le rapport entre la puissance lumineuse incidente  $P_{lumière}$  et le courant photo-généré  $I_{ph}$  :

$$|I_{ph}| = P_{lumière} \times S_\lambda + I_N \quad (IV-6)$$

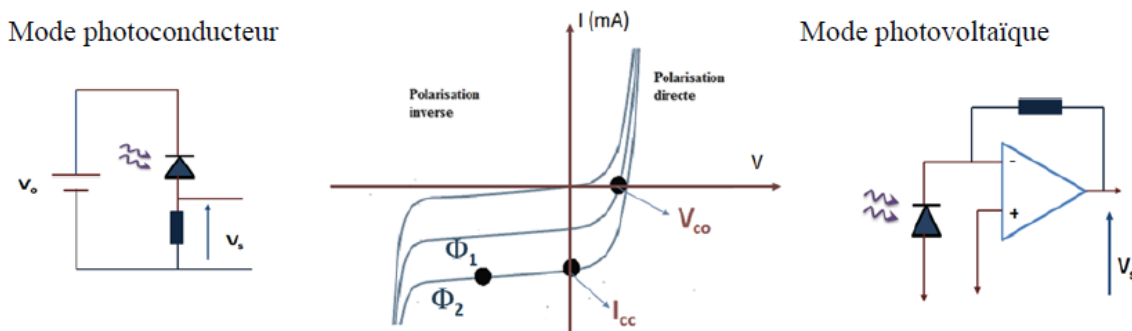
$I_N$  étant le courant d'obscurité quasiment présent dans la photodiode, même en absence de la source de lumière.

La figure (IV.8) représente la variation de la sensibilité en fonction des longueurs d'ondes. Pour chaque composé, les courbes présentent un maximum à une longueur d'onde précise. C'est généralement ce maximum qui est donné dans les documentations techniques des photodétecteurs (Il noter que la sensibilité dépend également de la température).



**Figure IV.8 :** Variation de la sensibilité en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  (documentation Hamamatsu.)

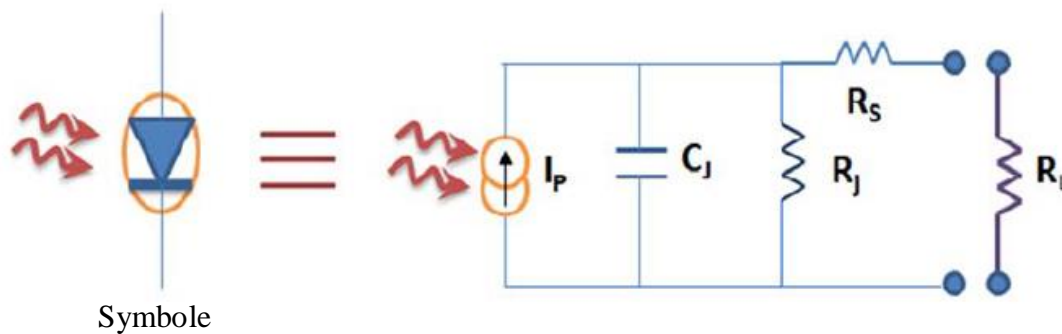
La caractéristique I (V) d'une photodiode est donnée par la figure (IV.9) suivante :



**Figure IV.9 :** Caractéristique I (V) de la photodiode sous différents éclaircissements.

### III-3- Symbole et schéma équivalent de la photodiode

La photodiode étant habituellement polarisée en inverse, son schéma équivalent est celui d'une diode en inverse en parallèle avec un générateur de courant ( $I_{ph}$ ). Ceci se traduit par le circuit de la figure (IV.10) :



**Figure IV.10:** Schéma équivalent de la photodiode.

$R_j$  est la résistance dynamique de la jonction polarisée en inverse, sa valeur est très élevée, elle est de l'ordre de  $10^{10} \Omega$ .

$R_s$  est la résistance série : c'est la résistance d'accès, elle est essentiellement due à la résistance du substrat et à la résistance des contacts.  $R_s$  est très faible, elle est de l'ordre de  $10\Omega$ .

$C_j$  est la capacité de jonction : c'est la capacité de la zone de charge d'espace, elle est inversement proportionnelle à la largeur de la zone de charge d'espace  $W$  :

$$C_j = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{W} \quad (IV-7)$$

Où  $A$  est la surface de la photodiode.

L'épaisseur de la zone de charge d'espace  $W$  étant proportionnelle à la polarisation inverse. Cette capacité oscille autour de  $100 pF$  pour les faibles polarisations à quelques dizaines de  $pF$  pour les polarisations élevées. Si le courant est injecté dans une résistance de charge  $R_L$ , et en négligeant l'effet de  $R_s$  et  $R_j$ , le circuit de la figure (IV.10) se résume en un filtre RC de fréquence de coupure  $f_c$  égale à :

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_L C_j} \quad (\text{IV-8})$$

### III-4- Caractéristiques optiques de la photodiode

Les caractéristiques optiques des photodiodes dépendent essentiellement de la nature des substrats constitutifs. La nature du semi-conducteur, le dopage et la quantité de la puissance optique incidente sont les paramètres agissant sur l'efficacité et le rendement de la photodiode ainsi que sa bande passante.

#### III-4-a- Efficacité quantique de la photodiode

L'efficacité quantique de la photodiode est définie par le rapport :

$$\eta_e = \frac{\text{nombre de porteurs collectés}}{\text{nombre de photons incidents}} \quad \text{soit} \quad \eta_e = \frac{I_p/q}{\Phi/h\nu} \quad (\text{IV-9})$$

Où  $\Phi$  est le flux exprimé en Watts.

Pour calculer  $\eta_e$  considérons le cas idéal d'une structure où les épaisseurs,  $d_1$  et  $d_2$ , des régions P<sup>+</sup> et N sont très faibles devant la zone de charge d'espace  $W$ . Où toutes les paires photo-générées sont collectées (pas de recombinaisons). Pour un flux de lumière incidente  $\Phi_i$  (W), et en négligeant le courant de diffusion devant le photo-courant de génération dans la zone de charge d'espace, le courant peut avoir l'expression suivante :

$$I_p = \frac{q\Phi_i(1-R)(1-e^{-\alpha w})}{h\nu} \quad (\text{IV-10})$$

Ainsi le rendement quantique de la photodiode est :

$$\eta_e = \frac{I_p/q}{\Phi/h\nu} \quad \text{soit} \quad \eta_e = (1-R)(1-e^{-\alpha w}) \quad (\text{IV-11})$$

Mais pour une longueur d'onde donnée, cette efficacité quantique est reliée à la réponse spectrale de la photodiode par :

$$\eta_e = s(\lambda) \cdot \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{IV-12})$$

Il faut noter que lorsqu'on utilise la photodiode en tant que composant électronique, la notion de rendement quantique est peu pratique.

### III-4-b- Temps de réponse de la photodiode

Le temps de réponse d'une photodiode représente le temps nécessaire à cette dernière pour répondre à un signal lumineux incident et de donner, à partir de la charge accumulée, un courant électrique en sortie. Il est habituellement exprimé en tant que le temps de montée ou de fréquence de coupure. Le temps de montée étant le temps nécessaire pour le signal de sortie de passer de 10 % à 90 % de sa valeur crête (Figure IV.11).

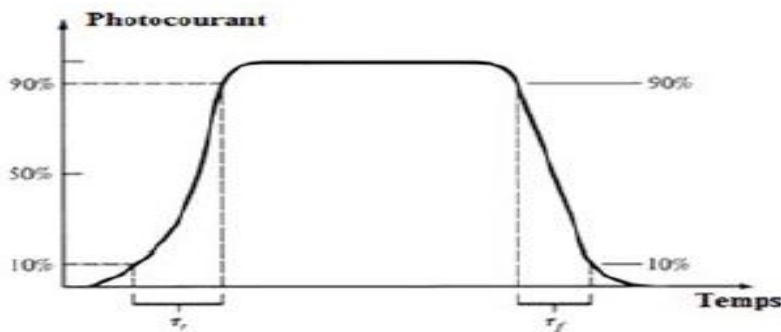


Figure IV.11: Temps de réponse d'une photodiode.

Compte tenu de la double origine du photo-courant, le temps de réponse de la photodiode, qui est particulièrement lié à la durée de vie des porteurs en excès, est conditionné par :

- La diffusion des minoritaires des régions p et n neutres vers la zone de charge d'espace, la durée  $t_1$  de cette diffusion est de l'ordre de  $10^{-8}$  à  $10^{-9}$  s.
- Le temps  $t_2$  de transit des porteurs photo-générés à travers la zone de charge d'espace qui est de l'ordre de  $10^{-10}$  à  $10^{-11}$  s.

Lorsque la photodiode est connectée à une résistance de charge  $R_c$ , l'influence de la capacité parasite apparaît car on retrouve l'étude classique d'un circuit RC. On peut définir une constante de temps électronique que l'on notera :

$$t_{RC} = 2.2 \times R_c C_t \quad (IV-13)$$

Le temps de réponse sur une impulsion lumineuse, selon la norme classique 10% - 90%, comme représentée sur la figure VI.11 peut s'estimer par la relation :

$$t_r = \sqrt{t_p^2 + t_{diff}^2 + t_{RC}^2} \quad (IV-14)$$

où  $t_p$  représente le temps de traversée de la zone de charge d'espace et  $t_{diff}$  le temps de diffusion des porteurs dans la zone N ou la zone P. Ces deux temps diminuent si la tension de polarisation  $V_p$  augmente ; ils sont souvent inférieurs à  $t_{RC}$ .

On peut ensuite définir la bande passante liée à ce temps de réponse :

$$BP = \frac{0.35}{t_r} \quad (IV-15)$$

Ce critère de bande passante est un critère important dans le cas de transmission optoélectronique haut débit.

### III-5- Les principaux schémas d'utilisation des photodiodes

Les photodiodes sont utilisées dans plusieurs applications sous différents schémas et montages, parmi les plus utilisés, on peut trouver :

#### III-5-a- Photodiode non polarisée

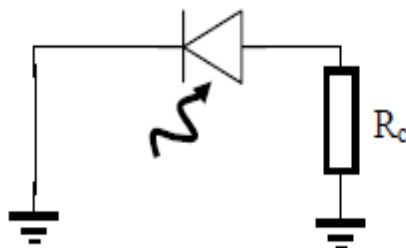


Figure IV.12: Schéma d'utilisation, photodiode non polarisée

#### III-5-b- Photodiode polarisée

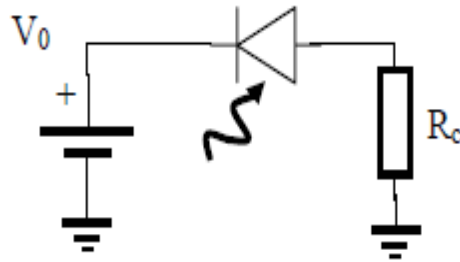


Figure IV.13: Schéma d'utilisation, photodiode polarisée.

### III-5-c- Montage transimpédance

Le montage transimpédance utilise un AOP pour convertir le courant photo-généré en une tension. L'intérêt réside dans le fait que l'impédance de sortie globale est celle de l'AOP, donc proche de 0. Quel que soit le montage connecté ensuite, l'adaptation d'impédance est assurée pour transmettre la tension générée correctement. L'inconvénient majeur est la limitation en fréquence que peut apporter l'AOP. Ce type de schéma est donc choisi pour des montages basse fréquence (inférieur à quelques dizaines de kHz à quelques MHz) faible bruit nécessitant ensuite une adaptation d'impédance. Un des schémas possible est illustré par la figure (IV.14).

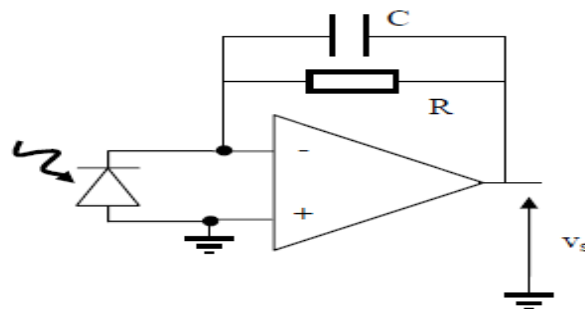


Figure IV.14 : Amplificateur de transimpédance.



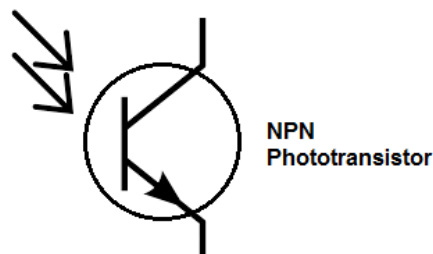
**Remarques importantes :**

- Lorsque la photodiode est en court-circuit, soit à  $V_0$  nulle, le courant mesuré pour un flux de lumière donnée est le courant de court-circuit  $I_{cc}$  (point d'intersection de la caractéristique avec l'axe des courants- figure IV-8), il correspond au photo-courant.
- Le courant issu d'une photodiode est très faible, il varie de quelques pico-ampères à quelques micro-ampères selon l'intensité de la lumière et la surface de la photodiode. Une amplification du photo-courant est alors souvent effectuée à l'aide de montages à base d'amplificateurs opérationnels qui assure en même temps la conversion du photo-courant issu de la diode en une tension. Ainsi, la bande passante de la photodiode est limitée par son temps de réponse.
- La photodiode présente une faible surface, ce qui réduit sa capacité de jonction et augmente sa fréquence de coupure.
- La résistance de charge influe sur la bande passante ; une grande valeur de  $R_L$  réduit la fréquence de coupure mais augmente la tension mesurée.

#### IV- Le phototransistor

Un phototransistor est un composant qui possède la même structure qu'un transistor bipolaire classique, mais dont la jonction collecteur - base peut être éclairée par un rayonnement lumineux, il est en général de type NPN et au Silicium.

Symbole :



#### IV-1- Principe de fonctionnement d'un phototransistor

La jonction collecteur- base, polarisée en inverse, se comporte comme une photodiode en mode photoconducteur, dont le courant  $I$  est la somme d'un courant d'obscurité  $I_N$  et d'un photo-courant  $I_p$  proportionnel au flux reçu :

$$I = I_N + I_p \quad (\text{IV-16})$$

Le phototransistor peut être utilisé soit de manière classique (base polarisée), soit base en l'air qui est l'application la plus fréquente. Le comportement dynamique du phototransistor est moins bon que celui de la photodiode à cause du mécanisme d'amplification.

L'effet transistor conduit donc à une amplification de ce courant par le coefficient  $\beta$ . Compte tenu de la loi des nœuds, ce courant amplifié s'ajoute au courant de la photodiode pour former le courant collecteur  $I_c$ .

$$I_c = \beta I + I = (\beta + 1)(I_N + I_p) \quad (\text{IV-17})$$

#### IV-2- Caractéristiques des phototransistors

##### IV-2-a- Le courant d'obscurité

Le courant de fuite  $I_N$  de la jonction BC est multiplié par l'amplification en courant  $\beta$  pour donner naissance au courant d'obscurité  $I_{CN}$  :

$$I_{CN} = \beta I_N \quad (\text{IV-18})$$

Vue la surface importante de la jonction CE nécessaire pour obtenir une sensibilité élevée et aussi de l'ordre de grandeur de  $\beta$ , le courant d'obscurité dans ce cas est assez élevé, de 1nA à 10 nA à 25 °C (la température a une grande influence sur le courant d'obscurité), la tension  $V_{CE}$  entre le collecteur et l'émetteur modifie aussi la valeur de ce dernier.

##### IV-2-b- La sensibilité des phototransistors

La sensibilité d'un phototransistor est multipliée x100 par rapport à la photodiode. Les photo-Darlington par exemple se caractérisent par une sensibilité très élevée.

### IV-2-c- L'amplification

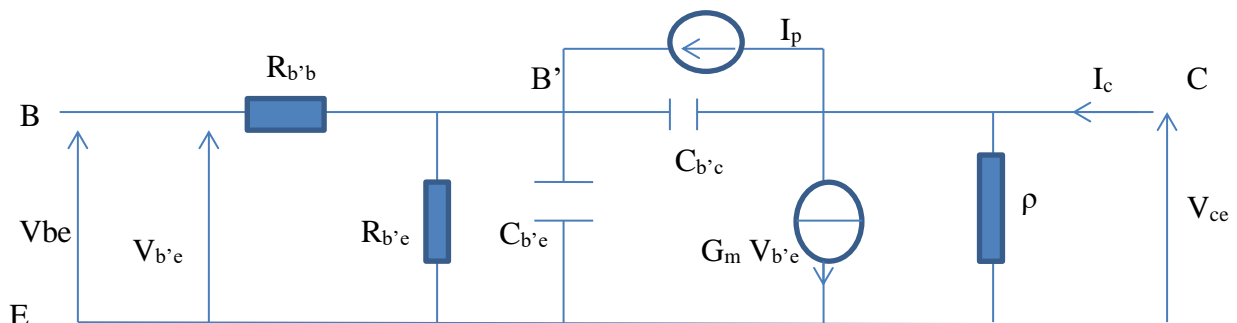
L'amplification en courant du phototransistor varie normalement de 100 à 1000, elle varie avec l'éclairement. Les constructeurs donnent des courbes représentant  $I_C(L)$  en fonction de  $V_{CE}$  pour un éclairement défini et ceci pour différents éclairements.

### IV-2-d- Le temps de commutation

Le temps de commutation des phototransistors est très long (due à l'amplification et aux capacités parasites) ils sont de l'ordre de 1 à  $30\mu s$  sur charge résistive de 1K et dépendent de  $R_L$  (résistance de charge).

### IV-3- Schéma équivalent et applications

Le modèle d'un phototransistor pour le fonctionnement dynamique est obtenu à partir du schéma de Giacoletto, en ajoutant la source de photo-courant entre le collecteur et la base interne  $B'$  (Figure VI.15).



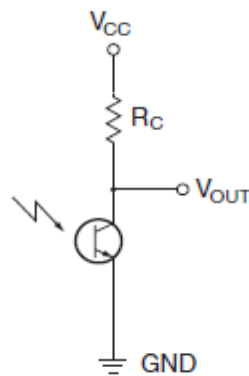
**Figure IV.15 :** Schéma équivalent du phototransistor (modèle petit signaux).

Il faut noter qu'un phototransistor est beaucoup plus lent qu'une photodiode, ce qui présente un inconvénient majeur surtout si on l'emploie dans des systèmes exigeant une bonne rapidité.

Les applications des phototransistors sont multiples, parmi les plus utilisées :

#### IV-3-a- Montage en commutation en émetteur commun

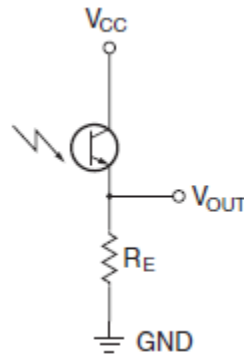
Le circuit amplificateur à émetteur commun (figure IV.16) génère une sortie qui passe d'un état haut à un état bas lorsque la lumière dans la gamme du proche infrarouge est détectée par le phototransistor. La gamme de longueurs d'onde de lumière utilisée est le proche infrarouge dans la région d'environ 700 nm à 1100 nm. La sortie est créée en connectant une résistance entre l'alimentation en tension et le collecteur du composant, dans ce cas la tension de sortie est lue à la borne du collecteur. On appelle ce circuit amplificateur parce que le courant généré dans le composant lorsque la lumière est détectée est très petit. Cependant, le composant a un amplificateur interne (dans ce cas, un phototransistor) qui amplifie ce courant à des niveaux utiles.



**Figure IV.16 :** Circuit en montage amplificateur en émetteur commun.

#### IV-3-a- Montage en commutation en collecteur commun

L'amplificateur à collecteur commun (figure IV.17) génère une sortie qui passe d'un état bas à un état haut quand la lumière est détectée par le phototransistor. La sortie est créée en connectant une résistance entre la broche d'émetteur du composant et la terre. La sortie est lue sur l'émetteur Terminal.



**Figure IV.17 :** Circuit en montage amplificateur en collecteur commun.

Cependant, dans les deux circuits, le phototransistor peut être utilisé dans deux modes, un mode actif et un mode de commutation. Opérant dans le mode actif signifie que le phototransistor génère une réponse proportionnelle à la lumière reçue par le composant jusqu'à un certain niveau de lumière. Lorsque la quantité de lumière dépasse ce niveau, le phototransistor devient saturé et la tension de sortie n'augmentera pas même si le niveau de lumière augmente. Ce mode est utile dans les applications où l'on souhaite détecter deux niveaux de tension d'entrées pour la comparaison. Opérant dans le mode de commutation signifie que le phototransistor sera soit "Off" (coupure) ou "on" (saturé) en réponse à la lumière. Ce mode est utile lorsqu'une sortie numérique est requise pour la détection d'objet ou détection de codeur.

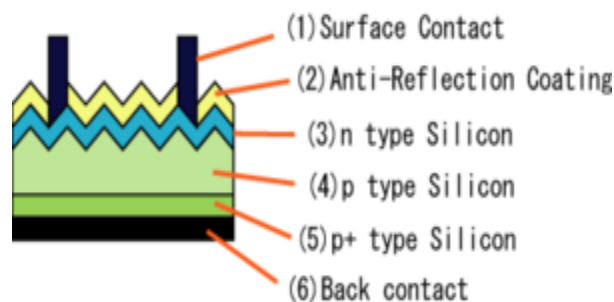
## V- La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque également dénommée cellule solaire est un composant électronique qui, exposé à la lumière, produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. Le courant obtenu est proportionnel à la puissance lumineuse incidente, et la cellule photovoltaïque délivre une tension continue. Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs : sélénure de cuivre et sélénure d'indium ( $CuIn(Se)_2$  ou  $CuInGa(Se)_2$ ), tellure de cadmium (CdTe), etc. Elles se présentent généralement sous la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté.

Les cellules sont souvent réunies dans des modules solaires photovoltaïques ou panneaux solaires, en fonction de la puissance recherchée.

### V-1- Effet photovoltaïque

Dans un semi-conducteur exposé à la lumière, un photon d'énergie suffisante arrache un électron à la matrice, créant au passage un « trou ». Normalement, l'électron trouve rapidement un trou pour se recombiner, et l'énergie apportée par le photon est ainsi dissipée. Le principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau au lieu de se recombiner en son sein : ainsi, il apparaîtra une différence de potentiel et donc une tension entre les deux faces, comme dans une pile. L'une des solutions, couramment utilisée, pour extraire sélectivement les électrons et les trous utilise un champ électrique au moyen d'une jonction PN, entre deux couches dopées respectivement P et N :



**Figure IV.18 :** Structure d'une cellule photovoltaïque.

D'un point de vue électrique, une cellule photovoltaïque est l'équivalent d'un générateur de courant auquel on a adjoint une diode. Il faut ajouter des contacts électriques (qui laissent passer la lumière en face éclairée : en pratique, on utilise un contact par une grille), une couche antireflet pour assurer une bonne transmission des photons vers l'absorbeur. Pour que la cellule fonctionne, et produise le maximum de courant, on ajuste le gap du semi-conducteur au niveau d'énergie des photons. On peut éventuellement empiler les jonctions, de façon à exploiter au mieux le spectre d'énergie des photons, ce qui donne les cellules multi-jonction.

## **V-2- Techniques de fabrication**

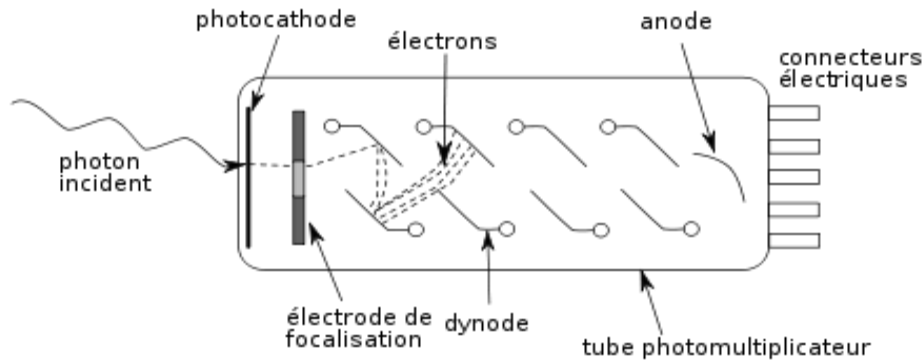
Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. On l'obtient par réduction à partir de silice, composé le plus abondant dans la croûte terrestre et notamment dans le sable ou le quartz. La première étape est la production de silicium dit métallurgique, pur à 98 % seulement, obtenu à partir de morceaux de quartz provenant de galets ou d'un gisement filonien (la technique de production industrielle ne permet pas de partir du sable). Le silicium de qualité photovoltaïque doit être purifié jusqu'à plus de 99,999 %, ce qui s'obtient en transformant le silicium en un composé chimique qui sera distillé puis retransformé en silicium. Le silicium est produit sous forme de barres nommées « lingots » de section ronde ou carrée. Ces lingots sont ensuite sciés en fines plaques mises au carré (si nécessaire) de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées « wafers ». Après un traitement pour enrichir en éléments dopants (P, As, Sb ou B) et ainsi obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N, les wafers sont « métallisés » : des rubans de métal sont incrustés en surface et reliés à des contacts électriques. Une fois métallisés les wafers sont devenus des cellules photovoltaïques.

La production des cellules photovoltaïques nécessite de l'énergie, et on estime qu'un module photovoltaïque doit fonctionner environ deux à trois ans suivant sa technique de fabrication pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication (retour énergétique du module). Les matériaux et procédés de fabrication font l'objet de programmes de recherches ambitieux pour réduire les coûts de fabrication et de recyclage des cellules photovoltaïques. L'industrie cherche à faire baisser la quantité de silicium utilisé. Les cellules monocristallines sont passées de 300 microns d'épaisseur à 200 et on pense maintenant atteindre rapidement les 180 puis 150 microns, diminuant la quantité de silicium et d'énergie nécessaire.

## **VI- Le photomultiplicateur**

Le photomultiplicateur (PM) est un dispositif permettant la détection de photons. Il se présente sous la forme d'un tube électronique (Figure VI.19). Sous l'action de la lumière, des électrons sont arrachés d'un métal par effet photoélectrique à une photocathode, le faible courant électrique ainsi généré est amplifié par une série de dynodes utilisant le phénomène

d'émission secondaire pour obtenir un gain important. Ce détecteur permet de compter les photons individuellement. Il est sensible de l'ultraviolet à l'infrarouge proche, et le temps de réponse est de l'ordre de la nanoseconde ( $10^{-9}$  seconde).



**Figure IV.19 :** structure d'un photomultiplicateur

Les principaux éléments d'un photomultiplicateur sont le tube à vide, la phot cathode, les dynodes, et l'anode.

Dans un photomultiplicateur, les photons incidents traversent une phot cathode, constituée d'une « fenêtre » de verre, sur l'intérieur de laquelle est apposée une fine couche de métal ou de semi-conducteur. Lorsqu'un photon atteint le semi-conducteur, il excite un électron de la bande de valence, qui est alors diffusé vers la surface du semi-conducteur du fait de la différence de potentiel avec l'extérieur. Si l'énergie de l'électron est supérieure au niveau énergétique du vide à l'intérieur du PM, alors il est éjecté du semi-conducteur, et appelé « photoélectron ».

Les photoélectrons quittent la phot cathode avec une énergie correspondant à celle du photon incident (moins le travail de sortie de la phot cathode), et sont ensuite focalisés par un jeu d'électrodes vers un électro-multiplicateur, constitué d'une série de dynodes dont le but est de transformer le photoélectron initial en un paquet d'électrons suffisant pour constituer un signal électrique mesurable. Chaque dynode étant maintenue à une valeur de potentiel plus importante que la précédente, la différence de potentiel entre la dynode et la dynode suivante accélère les électrons ainsi émis, qui acquièrent suffisamment d'énergie pour générer un certain nombre d'électrons secondaires sur la dynode suivante. Il se produit donc, de dynode



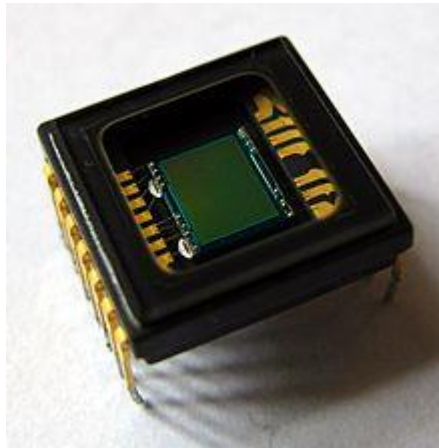
en dynode, un effet d'avalanche. La position et la forme des dynodes sont optimisées de sorte que le temps de transit des électrons soit minimisé, l'efficacité de collection de chaque dynode maximisée, et d'éviter que d'éventuels ions ou photons puissent être captés par les dynodes, ce qui créerait du bruit instrumental. Une anode collecte les électrons secondaires émis par la dernière dynode (techniquement, l'anode est la dernière dynode, mais en pratique on appelle souvent « dernière dynode » la dynode précédente), à partir desquels elle génère un courant électrique, recueilli en sortie du photomultiplicateur.

Finalelement, l'arrivée du photon sur la cathode se traduit par une impulsion de charge suffisamment importante pour être utilisée par un dispositif annexe, souvent composé d'un amplificateur et d'un discriminateur.

## **VII- Capteur d'image**

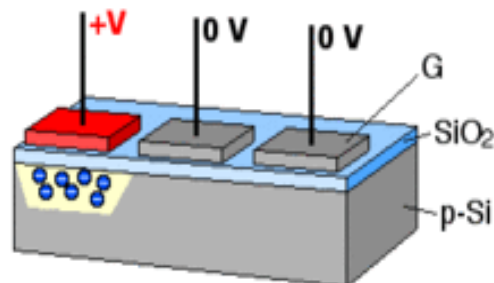
Un capteur photographique est un composant électronique photosensible servant à convertir un rayonnement électromagnétique (UV, visible ou IR) en un signal électrique analogique. Ce signal est ensuite amplifié, puis numérisé par un convertisseur analogique-numérique et enfin traité pour obtenir une image numérique. Le capteur est donc le composant de base des appareils photo et des caméras numériques, l'équivalent du film (ou pellicule) en photographie argentique.

Le capteur photographique utilise l'effet photoélectrique, qui permet aux photons incidents d'arracher des électrons à chaque élément actif (photosite) d'une matrice de capteurs élémentaires constitués de photodiodes (ou photomos). Il est nettement plus efficace que la pellicule : jusqu'à 99 % (en théorie) et près de 50 % (en pratique) des photons reçus permettent de collecter un électron, contre environ 5 % de photons qui révèlent le grain photosensible de la pellicule, d'où son essor initial en astrophotographie. Il existe deux grandes familles de capteurs : les CCD et les CMOS.



**Figure IV.20** : Image d'un capteur CCD.

Le CCD (charge-coupled device, ou en français « dispositif à transfert de charge » (DTC)) est le plus simple à fabriquer. Inventé par George E. Smith et Willard Boyle dans les Laboratoires Bell en 1969 (cette invention leur rapportera la moitié du Prix Nobel de physique en 2009), il a rapidement été adopté pour des applications de pointe (imagerie astronomique) puis popularisé sur les caméras et appareils photo.



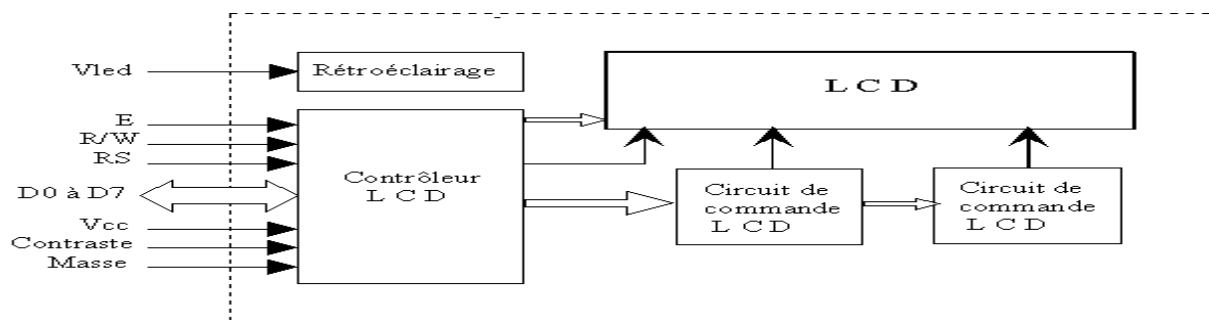
**Figure IV.21** : Principe du transfert de charges dans un CCD.

Un CCD transforme les photons lumineux qu'il reçoit en paires électron-trou par effet photoélectrique dans le substrat semi-conducteur, puis collecte les électrons dans le puits de potentiel maintenu au niveau de chaque photosite. Le nombre d'électrons collectés est proportionnel à la quantité de lumière reçue. À la fin de l'exposition, les charges sont transférées de photosite en photosite par le jeu de variations de potentiel cycliques appliquées aux grilles (bandes conductrices horizontales, isolées entre elles par une couche de SiO<sub>2</sub>) jusqu'au registre horizontal. Elles sont transformées en tension, proportionnelle au nombre

d'électrons, dans la capacité d'une diode « flottante ». Ce signal sera, à l'extérieur du CCD, filtré par un circuit à « double échantillonnage corrélé » avant d'être amplifié et numérisé.

## VIII- Afficheur à cristaux liquides

Les afficheurs à cristaux liquides sont des modules compacts intelligents et nécessitent peu de composants externes pour un bon fonctionnement. Ils sont relativement bons marchés et s'utilisent avec beaucoup de facilité. Un exceptionnel microprocesseur "pilote" de la famille C-MOS diminue considérablement leur consommation (inférieur à 0.1 mW). Ils sont pratiquement les seuls à être utilisés sur les appareils à alimentation par piles. Plusieurs afficheurs sont disponibles sur le marché et ne diffèrent les uns des autres, non seulement par leurs dimensions, (de 1 à 4 lignes de 6 à 80 caractères), mais aussi par leurs caractéristiques techniques et leurs tension de service. Cette fonction fait appel à des LED montées derrière l'écran du module, cependant, cet éclairage est gourmand en intensité (250 mA max.).



**Figure IV.22 :** Schéma fonctionnel d'un afficheur à cristaux liquides.

Comme il est indiqué sur la figure (IV.22), le schéma fonctionnel indique que l'affichage comporte d'autres composants que l'afficheur à cristaux liquides (LCD) seul. Un circuit intégré de commande spécialisé, le contrôleur LCD est chargé de la gestion du module. Le "contrôleur" remplit une double fonction: d'une part il commande l'affichage et de l'autre se charge de la communication avec l'extérieur.

En général un afficheur à cristaux liquides simple est composé de 4 couches :

- Le film polariseur de devant P1.
- La cellule à cristaux liquides CL.
- Le film polariseur de derrière P2.
- Le film réfléchissant (miroir) M.

Les deux plaques de verre sont recouvertes d'électrodes transparentes et conductrices, situées face à face : elles permettent d'imposer un champ électrique E vertical dans la couche de cristal liquide (figure IV.23)

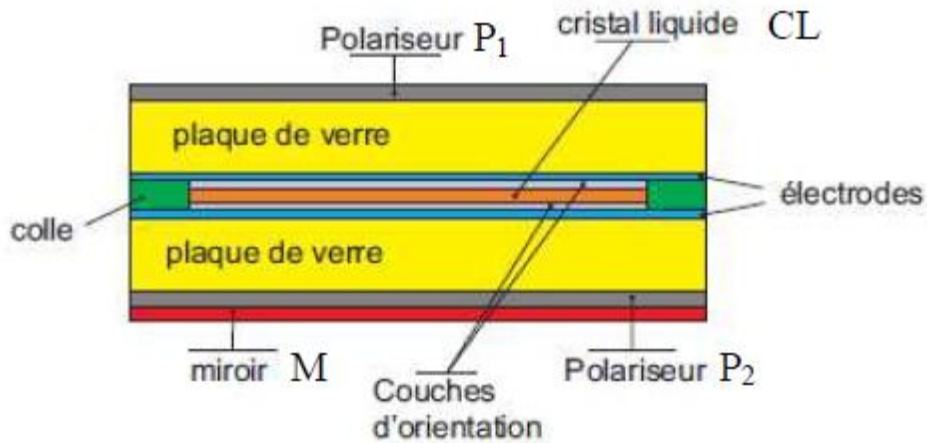


Figure IV.23 : Composition d'une cellule à cristaux liquide.

### Exercice d'application :

Calculer l'efficacité quantique d'un détecteur optique ayant une réponse spectrale de 8.5 mA/W à une longueur d'onde  $\lambda$  de 845 nm.

### Solution :

$$\eta_e = s(\lambda) \cdot \frac{hc}{\lambda} = s(\lambda) \frac{1.24}{\lambda (\mu m)} = 8.5 \cdot 10^{-3} \frac{1.24}{0.845}$$

Soit  $\eta_e = 1.24\%$

## **Chapitre 5**

### **Les fibres optiques**



#### **I- Introduction**

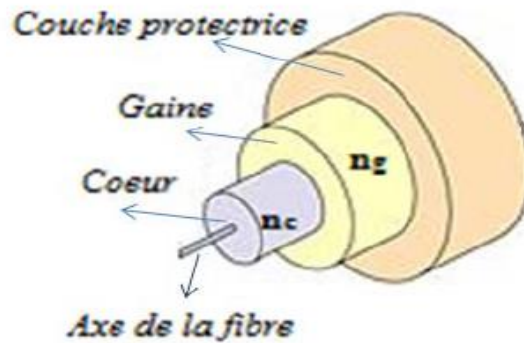
La fibre optique est un guide d'onde cylindrique dans lequel, la lumière convenablement injectée à une extrémité, reste confinée au cours de sa propagation durant une transmission sur de longues distances (jusqu'à des milliers de kilomètres). Elle permet la transmission d'une grande quantité d'informations avec de très forts débits par codage du signal lumineux en variant son intensité.

Généralement les longueurs d'ondes utilisées dans les communications utilisant des fibres optiques sont du domaine de l'infrarouge (entre 800 et 1600 nm).

#### **II- Structure de la fibre optique**

La fibre optique, illustrée sur la figure (V.1), est formée de deux milieux transparents : le cœur, cylindrique, d'indice  $n_c$  constant ou variable, entouré d'une gaine, d'indice  $n_g$  plus petit. L'ensemble est entouré d'un premier revêtement de 250  $\mu\text{m}$  qui assure une protection mécanique de la fibre. Un second revêtement est appliqué directement sur le revêtement primaire pour renforcer la protection de la fibre pendant sa manipulation et son installation. Les matériaux les plus utilisés pour la fabrication du cœur et de la gaine sont la silice et le verre. Dans certaines applications (circuits optiques à films minces) on emploie d'autres matériaux comme :

- le verre dopé.
- les matières plastiques.
- les substances organiques.
- les cristaux optiques.



**Figure V.1** : Constitution d'une fibre optique.

Pour une fibre de silice l'indice de réfraction de la région de cœur est de l'ordre de 1.48 et celui de la gaine est de l'ordre de 1.46. Le diamètre du cœur et de la gaine varient selon le type d'utilisation. Le diamètre de cœur d'une FO (2a) varie habituellement de quelques microns à quelques dizaines de  $\mu\text{m}$ . Son diamètre de gaine (2b) est de 100 à 200  $\mu\text{m}$ .

La fibre nue est mécaniquement très fragile et sujette aux attaques chimiques ; c'est pourquoi elle reçoit normalement un premier revêtement en plastique puis un second revêtement qui vient renforcer la protection de la fibre pendant son maniement.

Un câble à fibres optiques peut contenir une, deux ou plusieurs fibres optiques avec leurs revêtements, dans ce cas plusieurs techniques de câblage existent.

### III- Optique géométrique

La lumière est représentée par des "rayons lumineux". Le chemin suivi par la lumière est celui qui prend le moins de temps, il est indépendant du sens de parcours. Dans un milieu homogène, la lumière se propage en ligne droite.

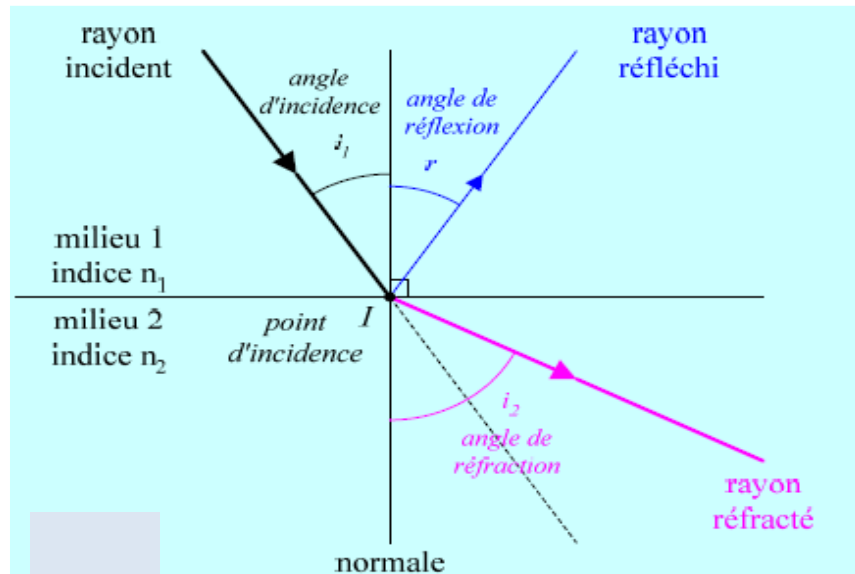
Les lois de Snell Descart déclarent que le rayon incident et la normale au point d'incidence définissent le plan d'incidence (figure V-2). Ces lois sont définies comme suit :

- 1ère loi : le rayon réfléchi et le rayon réfracté sont dans le plan d'incidence.
- 2ème loi (loi de la réflexion) : l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence :

$$r = i_1 \quad (V-1)$$

- 3ème loi (loi de la réfraction) :

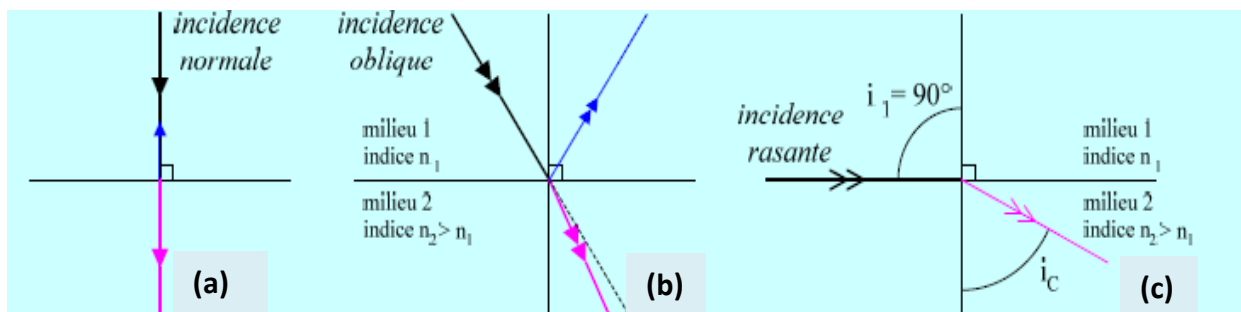
$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad (V-2)$$



**Figure V.2 :** Représentation du chemin d'un rayon lumineux.

Il faut noter qu'un milieu est d'autant plus réfringent que son indice de réfraction est important.

### III-1- Passage de la lumière dans un milieu plus réfringent : $n_2 > n_1$



**Figure V.2 :** Représentation des différents cas du passage du rayon dans un milieu plus réfringent.

Le rayon réfracté se rapproche de la normale :  $i_2 < i_1$

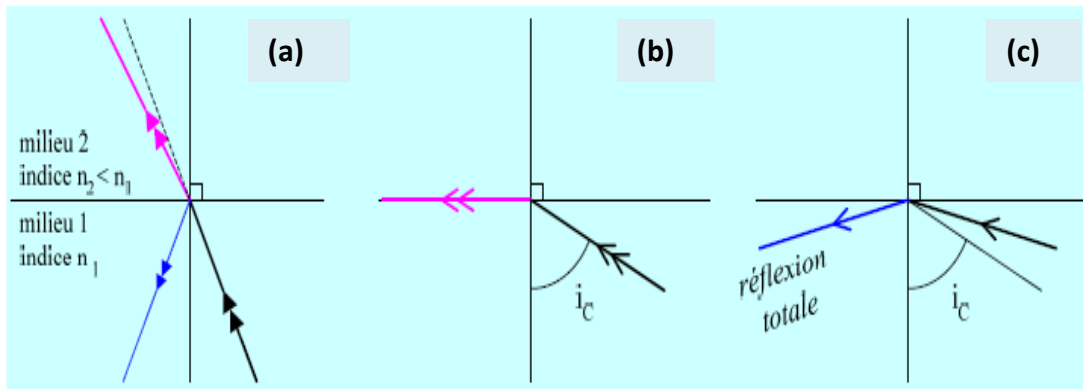
$$i_2 \leq i_c(\text{angle critique})$$

$$\sin i_c = n_1/n_2 \quad (\text{V-3})$$

Exemple : Le passage de l'air ( $n_1 \approx 1$ ) dans l'eau ( $n_2 \approx 1.33$ ) :

$$i_c \approx 49^\circ$$

### III-2- Passage de la lumière dans un milieu moins réfringent : $n_2 < n_1$



**Figure V.3 :** Représentation des différents cas du passage du rayon dans un milieu moins réfringent.

Le rayon réfracté s'écarte de la normale (Fig. V-3a) :  $i_2 > i_1$

$$\sin i_c(\text{angle critique}) = n_2/n_1 \quad (\text{Fig. V-3b}) \quad (\text{V-4})$$

Si  $i_1 > i_c$  il n'y a pas de rayon réfracté : on parle de **réflexion totale** (Fig. V-3c).

Exemple : Passage Diamant ( $n_1=2.42$ ) – air ( $n_2 \approx 1$ ) :

$$i_c \approx 24^\circ$$

### III-3- Aspect énergétique de la réflexion et de la réfraction

La lumière transporte de l'énergie, les paramètres et les lois régissant sur le transport de cette énergie sont:

- Le coefficient de réflexion est donné par l'expression :



$$R = \frac{\text{Energie du faisceau réfléchi}}{\text{Energie du faisceau incident}} \quad (\text{V-5})$$

- Le coefficient de transmission (réfraction) est donné par l'expression :

$$T = \frac{\text{Energie du faisceau réfracté}}{\text{Energie du faisceau incident}} \quad (\text{V-6})$$

- La loi de conservation de l'énergie donne la condition :  $R+T=1$ .
- La formule de Fresnel (sous incidence normale) est donnée par l'expression :

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_2 + n_1}\right)^2 \quad (\text{V-7})$$

Exemple : Dans le passage d'un rayon lumineux de l'air vers un verre (indice 1.5) les coefficients de réflexion et de transmission, respectivement sont estimés à :

$$R=0.04=4\% \quad \text{et} \quad T=96\%$$

#### IV- Types de fibres optiques

L'allure de l'indice de réfraction  $n_c$  du cœur joue un rôle important dans la propagation de la lumière dans la fibre et dans la distinction des différents types de fibres existantes. On peut trouver trois types de profils d'indice de réfraction  $n_c$  :

- La fibre monomode à saut d'indice.
- La fibre multimodale à saut d'indice.
- La fibre multimodale à gradient d'indice.

Il faut noter que les fibres optiques multimodales sont caractérisées par une région de cœur assez importante. Les valeurs typiques du diamètre du cœur (2a) sont 50 à 100  $\mu\text{m}$  pour des diamètres de gaine (2b) de 125 à 250  $\mu\text{m}$ .

Pour des dimensions du cœur du même ordre de grandeur que la longueur d'onde, l'étude des fibres optiques est basée sur les équations de Maxwell et de la théorie des guides d'ondes. Cependant, pour des rayonnements de courtes longueurs d'ondes ( $<1.6 \mu\text{m}$ ) il est souvent commode d'employer le concept de rayon lumineux et l'optique géométrique. Cependant, La

une fibre monomode a un diamètre de cœur plus petit par rapport au diamètre de la gaine. Il est typiquement de 5 à 10  $\mu\text{m}$  pour un diamètre de la région de gaine de 125  $\mu\text{m}$ .

#### IV-1- La fibre optique multimodale à saut d'indice

Dans les fibres optiques multimodales à saut d'indice l'indice de réfraction varie brusquement quand on passe du matériau de cœur ( $0 < r \leq a$ ) à celui de la gaine ( $a < r \leq b$ ) (Figure V.4a). Le guidage de la lumière se fait selon des trajets différents suivant l'angle de réfraction, suite à des réflexions successives sur la rupture d'indice (Figure V.4b). Les rayons ici peuvent arriver au bout de la fibre à des instants différents, d'où une certaine dispersion du signal.

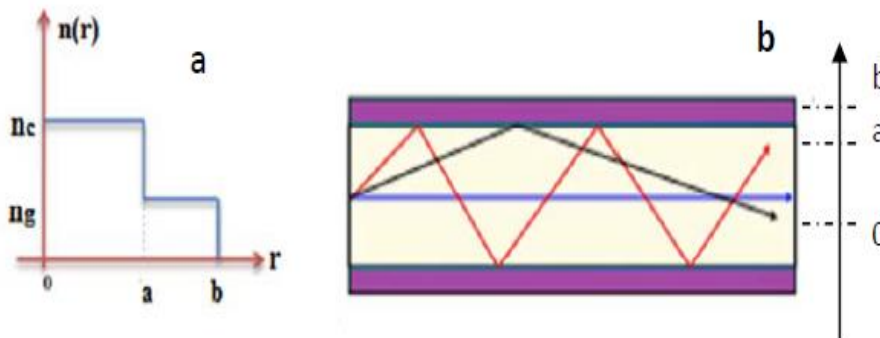


Figure V.4 : Fibre optique à saut d'indice ; (a) profil d'indice, (b) propagation de la lumière.

#### IV-2- La fibre optique multimodale à gradient d'indice

Ici l'indice de réfraction diminue progressivement du centre du cœur jusqu'à l'interface avec la gaine, l'indice de réfraction de la gaine étant constant (Figure V- 5a). Un exemple de ce type de profil est le profil parabolique. Ici la propagation des rayons lumineux se fait en trajectoires sinusoïdales (Figure V. 5b).

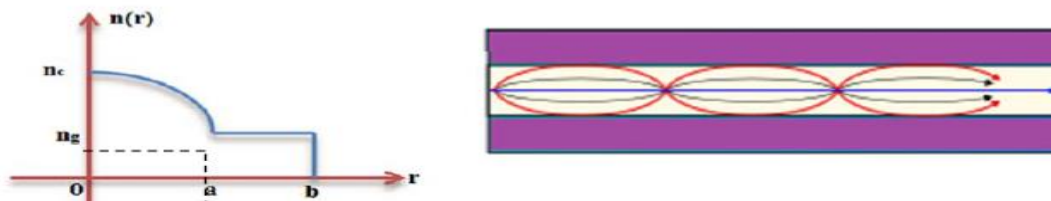
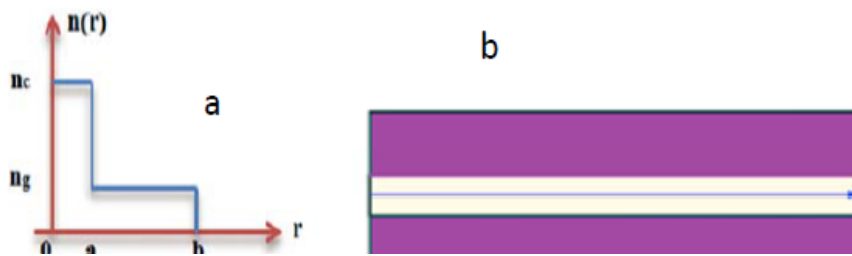


Figure V.5 : Fibre optique à gradient d'indice ; (a) profil d'indice, (b) propagation de la lumière.

### IV-3- La fibre optique monomode

Elle présente une variation brusque de l'indice de réfraction quand on passe de la région de cœur à celle de la gaine (figure V. 6a). De plus la région de cœur est très étroite et ne permet la propagation que du mode axial (Figure V. 6b).



**Figure V.6 :** Fibre optique monomode ; (a) profil d'indice, (b) propagation de la lumière.

## V- Fonctionnement des fibres optiques

Le principe de propagation de la lumière dans les fibres optiques obéit aux lois de l'optique géométrique, sans tenir compte de la nature ondulatoire de cette dernière. En revanche, dès que le diamètre de la fibre est grand devant la longueur d'onde de la lumière introduite, le mode de transmission ressemble à la manière dont se propagent les microondes le long des guides d'ondes. Les dimensions du cœur jouent un rôle très important; s'il est de l'ordre de plusieurs dizaines de microns on parlera de fibre multimodale dans laquelle la propagation de la lumière sera assez complexe avec des phénomènes de dispersion plus importants. S'il est de quelques microns la lumière va s'y propager selon un seul mode (fibre uni-modale).

### V-1- Fonctionnement et propriétés des fibres optiques à saut d'indice

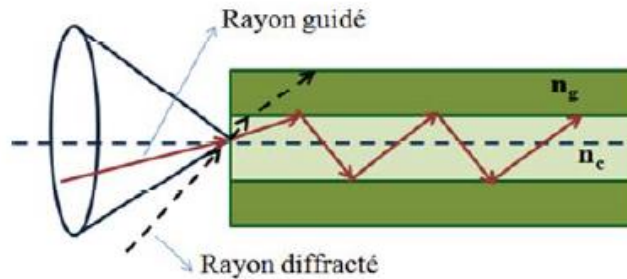
L'indice de réfraction de la région du cœur ( $n_c$ ), dans une fibre optique, est généralement de l'ordre de 1.4 à 1.5, il est légèrement supérieur à celui de la gaine ( $n_g$ ). L'écart relatif  $\Delta$  est donné par :

$$\Delta = \frac{n_c - n_g}{n_c} \quad (\text{V-8})$$

$\Delta$  est alors de l'ordre de 0.001 à 0.01, ce qui permet d'écrire :

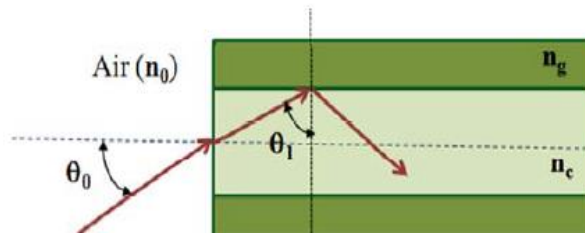
$$n_c = n_g(1 + \Delta) \text{ ou } n_g = n_c(1 - \Delta) \quad (\text{V-9})$$

L'ouverture numérique se définit comme la mesure d'un cône de lumière (Figure V.7) qu'une fibre optique peut accepter pour donner une réflexion totale des ondes.



**Figure V.7 :** Cône d'acceptance représentant l'ouverture numérique de la fibre optique.

Si on injecte à l'intérieur de la fibre un rayon lumineux avec un angle  $\theta_0$ , l'onde transmise dans le cœur va faire un angle  $\theta_1$  avec la normale au plan de séparation des deux milieux cœur/gaine (Figure V.8):



**Figure V.8 :** Réfraction du faisceau lumineux à l'interface cœur/gaine.

L'onde subit une réflexion dans la région de cœur avec un angle  $\theta_1$  et une réfraction dans la gaine avec un angle  $\theta_2$  suivant la loi de Snell-Descartes:

$$n_c \sin \theta_1 = n_g \sin \theta_2 \quad (\text{V-10})$$

Comme  $n_c > n_g$ , l'angle  $\theta_1$  est alors inférieur à  $\theta_2$ :

- il existe un angle  $\theta_1 = \theta_c$  pour lequel  $\theta_2 = \pi/2$ .
- $\theta_c$  est appelé angle critique : angle pour lequel le rayon est réfracté parallèlement à la gaine, on a alors :

$n_c \sin \theta_c = n_g \sin \pi/2$ , ce qui donne  $\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_g}{n_c}\right)$ .

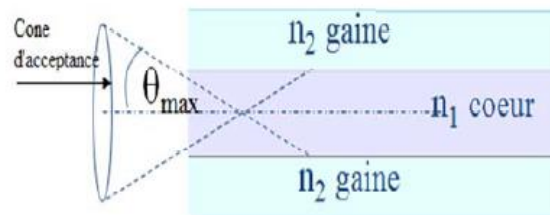
- Si  $\theta_1 > \theta_c$  : l'onde est totalement réfléchi à l'interface cœur/gaine et se propage à l'intérieur de la fibre.
- Si  $\theta_1 < \theta_c$  : l'onde se perd dans la région de gaine de la fibre, ce qui correspond à la condition de guidage de l'onde dans la région du cœur suivante :

$$\theta_1 \geq \arcsin\left(\frac{n_g}{n_c}\right) \quad (\text{V-11})$$

Les ondes guidées dans la région du cœur viennent de l'extérieur (air  $n_0=1$ ), l'angle d'incidence du rayon externe est lié à  $\theta_c$  par:

$$n_0 \sin \theta_{max} = n_c \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_c\right) \quad (\text{V-12})$$

$\theta_{max}$  est l'angle d'acceptance ou angle maximum du faisceau externe qui peut se propager dans la fibre (Figure V.9).



**Figure V.9:** Angle d'acceptante de la fibre optique.

L'ouverture numérique ON est alors donnée par:

$$ON = \sin \theta_{max} = \sqrt{n_c^2 - n_g^2} = n_c \sqrt{2\Delta} \quad (\text{V-13})$$

Les fibres optiques ont une ouverture numérique qui varie de 0.16 à 0.66 et peut se situer même en dehors de ces limites. La longueur d'onde de coupure ( $\lambda_c$ ) est celle au-dessus de laquelle une fibre optique, caractérisée par son ouverture numérique et sa dimension de cœur, devient monomode. Elle est déduite des relations précédentes et s'exprime par:

$$\lambda_c = \frac{2\pi a ON}{2.404} \quad (\text{V-14})$$

En dessous de cette valeur ( $\lambda_c$ ) le mode fondamental perd de l'énergie au profit des modes d'ordre supérieur. Les fibres optiques standards des télécommunications ont une longueur

d'onde de coupure de 1100 nm, elles sont monomodes pour les longueurs d'onde des télécommunications.

Une onde optique guidée par des réflexions totales internes successives peut être représentées par des faisceaux de rayons appelés modes, on distingue:

### V-1-a- La fibre optique monomode à saut d'indice

Ici la région de cœur est très étroite (le diamètre du cœur est de quelques micromètres) et ne permet la propagation que du mode axial (central). La fibre est monomode si, entre le rayon du cœur et la longueur d'onde de propagation, existe la relation :

$$v = \frac{2\pi a ON}{\lambda_0} < 2.404 \quad (\text{V-15})$$

Ou bien :

$$v = \frac{2\pi a \sqrt{n_c^2 - n_g^2}}{\lambda_0} < 2.404$$

Ou  $v$  représente la fréquence normalisée et  $\lambda_0$  la longueur d'onde de la radiation dans le vide.

### V-1-b- La fibre optique multimodales

Si le cœur de la fibre est plus important, il permet la propagation de plusieurs modes. Chaque rayon lumineux qui se propage dans la fibre optique avec un angle différent correspond à un mode différent.

L'étude des conditions de propagation à partir des équations de Maxwell montre qu'un seul nombre limite de types d'ondes est susceptible de s'y propager. Il correspond aux modes de propagation. Lorsque le nombre de modes est important il est approché par la relation :

$$N_{modes} \approx 0.5 \left( \frac{2\pi a ON}{\lambda_0} \right) \quad (\text{V-16})$$

### V-2- Fonctionnement et propriétés des fibres optiques à gradient d'indice

La fibre optique à gradient d'indice (Figure V.10.a) permet de réduire les pertes qui peuvent survenir par pénétration des rayons dans la région de gaine :

- La variation graduelle de l'indice de réfraction du cœur mène à un changement moins brusque de la direction de propagation des rayons (Figure V.10.b).
- Le gradient d'indice modifie aussi la vitesse de propagation ; Les faisceaux les plus éloignés de l'axe de la fibre sont les plus rapides. Il en résulte une égalisation des chemins optiques (Figure V.10.c).



**Figure V.10:** propagation des rayons dans la fibre à gradient d'indice.

(a) Gradient d'indice.

(b) Egalisation des chemins optiques.

Ici la variation de l'indice de réfraction est exprimée par :

$$n_c(R) = n_c(0) \sqrt{1 - \Delta \left(\frac{2R}{d}\right)^\alpha} \quad (\text{V-17})$$

Où : R est la distance par rapport à l'axe de la fibre.

d est le diamètre du cœur ( $2d=a$ ).

$$\text{et } \Delta = \frac{n_c(0) - n_g}{n_c(0)}$$

$\alpha$  est le paramètre du profil d'indice.

L'ouverture numérique est la même que celle d'une fibre à saut d'indice, pour les rayons qui pénètrent juste au milieu de la fibre. Cependant pour les autres rayons, elle s'exprime par :

$$ON(R) = ON(0) \sqrt{1 - \Delta \left(\frac{2R}{d}\right)^\alpha} \quad (\text{V-18})$$

Le nombre de modes qui se propagent est donné par :

$$N_{modes} \approx 0.5 \left( \frac{2\pi a ON}{\lambda_0} \right)^2 \cdot \frac{\alpha}{\alpha+2} \quad (\text{V-19})$$

## VI- Atténuation et dispersion dans une fibre optique

La liaison par fibre optique permet la transmission de données numériques codées en binaire par deux états logiques 0 et 1. Le signal injecté dans la fibre est alors composé d'impulsions qui doivent être récupérées à l'autre extrémité de la chaîne de transmission. Or, dans une fibre optique réelle on constate que toute l'énergie lumineuse entrante n'est pas entièrement récupérée en sortie. Il y a des problèmes de dispersion et d'atténuation qui causent cette perte d'énergie et cet élargissement de l'impulsion pouvant mener jusqu'à la déformation de l'information.

On rencontre, en général, trois types de problèmes :

- Les causes d'affaiblissement dans la fibre par absorption et diffusion.
- Les pertes liées aux défauts de connections.
- Les problèmes de bandes passantes liés aux différentes dispersions du signal optique.

### VI-1- L'Affaiblissement

L'atténuation caractérise l'affaiblissement du signal au cours de la propagation de la lumière dans la fibre optique. Elle est due principalement aux pertes intrinsèques dans le matériau de cœur et aux micro-courbures présentes à l'interface cœur/gaine. Parmi ces causes des pertes on distingue :

#### VI-1-1- Les pertes intrinsèques à la fibre

##### VI-1-1-a- La diffusion Rayleigh

C'est la diffusion de la lumière sur les molécules du matériau (la silice), due à des variations locales de l'indice de réfraction créées par des changements de densité ou de composition apparus au moment de la solidification du matériau. La lumière qui se propage est plus faible après cette diffusion optique. Les pertes qui en résultent sont proportionnelles à  $\lambda^{-4}$ , elles s'expriment par :

$$A_R = C\lambda^{-4} \left(\frac{dB}{Km}\right) \quad (V-20)$$

Avec  $C=1.2 \text{ dB/Km}\cdot\mu\text{m}^4$  par exemple :

- $A_R = 6 \text{ dB/Km}$ , pour  $\lambda= 0.67 \mu\text{m}$ .
- $A_R = 0.2 \text{ dB/Km}$ , pour  $\lambda= 1.55 \mu\text{m}$ .



Ainsi la diffusion Rayleigh réduit les performances dans le domaine des courtes longueurs d'onde et limite les communications optiques à l'infrarouge.

### VI-1-1-b- L'absorption

L'absorption de la lumière, par le matériau du cœur de la fibre optique, a lieu lorsqu'elle est en présence d'impuretés métalliques telles que le fer (Fe), le nickel (Ni), le chrome (Cr) et le cuivre (Cu) ainsi que les ions OH<sup>-</sup> qui proviennent des molécules d'eau. Pour une fibre optique de silice l'atténuation par absorption, illustrée sur la figure V-11, peut être de 1 à 10 dB/km pour le visible. Les fibres en silice connaissent un minimum d'atténuation pour l'infrarouge, vers 1550 nm (environ 0.2 dB/km). Cette longueur d'onde du proche infrarouge sera donc privilégiée pour les communications optiques.

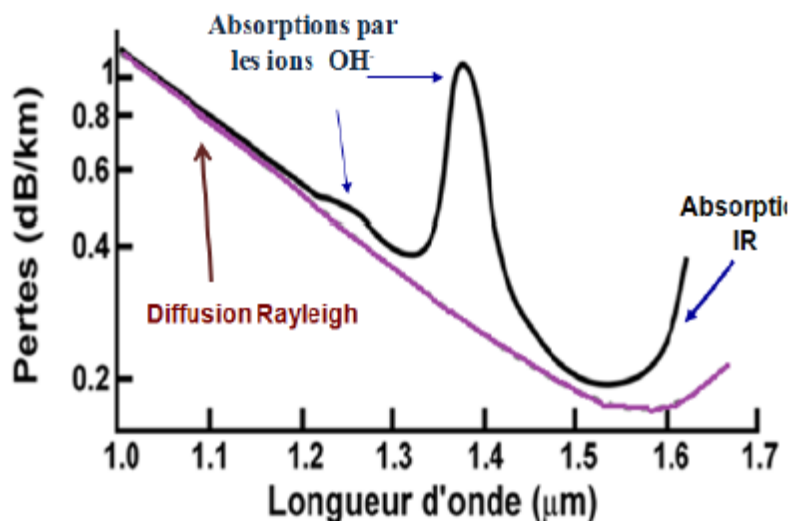


Figure V.11: Pertes de propagation en fonction de la longueur d'onde.

Ainsi les trois premières fenêtres utilisées en télécommunication sont autour de :

- 850 nm, pour la première fenêtre qui est adaptée aux composants photorécepteurs réalisés en silicium qui présente une meilleure sensibilité pour ces longueurs d'onde.
- 1300 nm, pour la seconde fenêtre qui présente un minimum d'atténuation.
- 1550 nm, pour la troisième fenêtre qui présente une atténuation minimale (0.2 dB/km) pour les fibres de silices.
- 1650 nm pour la quatrième fenêtre.

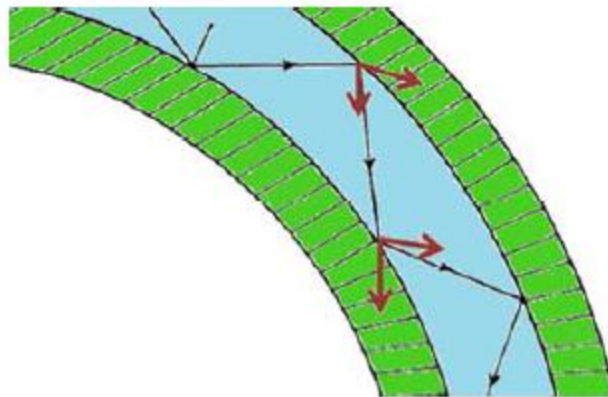
### VI-1-2- Les pertes dues aux diffusions à l'interface cœur/gaine

Elles sont dues aux défauts de fabrication et se produisent lorsque l'interface cœur/gaine est irrégulière et présente des inhomogénéités. Elles se présentent sous forme de :

- conversion de modes.
- diffusion des rayons vers la source ou la gaine.

#### VI-1-2-a- L'atténuation provoquée par les courbures et les micro-courbures

La fibre ne peut pas dans une application réelle être, sauf exception, exempte de courbures. De ce fait, le risque pour un rayon lumineux de ne plus satisfaire la condition de réflexion totale est inévitable. Ainsi, comme le montre la figure V.12. Une forte courbure de la fibre peut causer une perte dans la gaine par réfraction. Ceci s'explique par une conversion du rayon incident sur l'interface cœur/gaine en un mode de fuite avec un angle d'incidence inférieur à l'angle critique  $\theta_c$ .



**Figure V.12** : Conversion de rayons incidents en modes de fuite provoquée par la courbure de la fibre optique.

L'atténuation provoquée dépend du rayon du cœur et du rayon de courbure  $R$ . Elle est négligeable lorsque son rayon est grand devant un rayon critique  $R_c$  donné par les formules empiriques suivantes :

Pour une fibre multimodale :

$$R_c = \frac{20}{(n_c - n_g)^2} \cdot \lambda \cdot \left(2.75 - \frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^{-3} \quad (\text{VI-12})$$

Pour une fibre monomode :

$$R_c = \frac{2.a.n_c^2}{ON^2} \quad (\text{VI-13})$$

Par ailleurs, la micro-courbure est due à une déformation locale de l'axe de la fibre et elle peut causer le même type de pertes que la courbure de la fibre optique.

### VI-1-2-b- L'atténuation linéique

Soient  $P_0$  et  $P_L$  les puissances à l'entrée et à la sortie d'une fibre de longueur  $L$ , l'ensemble des pertes que subit le rayonnement par sa propagation dans la fibre est estimé par le coefficient d'atténuation linéique  $\alpha$  qui dépend de la nature du matériau de cœur et de la longueur d'onde de la lumière. L'atténuation linéique se traduit alors par une décroissance exponentielle de la puissance en fonction de la longueur de la fibre. La puissance à la sortie de la fibre est alors donnée par :

$$P_L = P_0 \cdot e^{-\alpha L} \quad (\text{VI-14})$$

Et l'affaiblissement est donné par :

$$A = \frac{1}{L} \cdot 10 \cdot \log\left(\frac{P_0}{P_L}\right) \quad (\text{VI-15})$$

Ou bien :

$$A = 4.34 \times 10^3 \alpha \text{ (m}^{-1}\text{)} \quad (\text{VI-16})$$

### VI-2- Les pertes liées aux défauts de connections

Les défauts de connexion représentent l'une des sources les plus importantes des pertes d'une ligne de transmission par fibres optiques. Seule la lumière qui est couplée dans le cœur de la fibre de réception se propage, tout le reste de la lumière est perdu par connexion ou épissure. Deux méthodes sont utilisées pour raccorder deux fibres optiques entre elles :

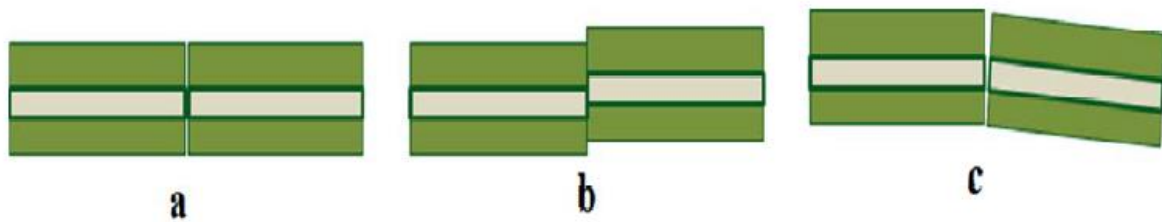
- par épissure (fusion) ; c'est un raccord définitif par soudure à l'arc électrique ou par l'utilisation de colle spéciale.

- par connecteur, pour les raccords démontables utilisant des pièces mécaniques.

Ces deux types de raccord ainsi que les raccordements entre la fibre et les équipements d'émission et de réception du signal optique entraînent des pertes provoquées par un certain nombre de facteurs. On peut citer, entre autre (Figure V.13) :

- Une Séparation longitudinale (a)
- Un décalage axial (b)

- Un désalignement angulaire (c)



**Figure V.13:** Types de défauts de connexion entre deux fibres.

Ces pertes sont minimales lorsque les deux cœurs de fibres sont identiques et parfaitement alignés. Les connecteurs utilisent un certain nombre de techniques de polissage pour assurer un contact physique de la fibre qui permet de réduire au maximum la réflexion. Sur les épissures mécaniques, il est possible de réduire la réflexion à l'aide d'un clivage non-perpendiculaire. La finition de l'extrémité de la fibre doit être convenablement polie pour minimiser les pertes.

### VI-3- Les dispersions du signal

L'autre paramètre qui perturbe la propagation d'un signal lumineux dans une fibre optique est sa dispersion. Elle se traduit par l'étalement temporel des impulsions lumineuses constituant le signal, lors de sa propagation dans la fibre. Ceci a pour effet d'introduire des distorsions dans le signal transmis en bout de ligne. La dispersion est estimée en ns/km. C'est elle qui limite la bande passante de la fibre optique. De plus elle entraîne une diminution de l'amplitude de l'impulsion (conservation de l'énergie lumineuse transportée).

La dispersion du signal a des causes multiples. Les plus importantes sont :

#### VI-3-1- La dispersion modale

Lorsque plusieurs modes se propagent dans la fibre optique, ils sont à vitesses différentes même si le rayonnement est monochromatique. Ceci donne naissance à une dispersion entre les modes et entraîne un élargissement dans le temps et une déformation de l'impulsion. Cette déformation peut entraîner un chevauchement des impulsions à la sortie de la fibre et rendre, par conséquent impossible, le codage du signal.

La dispersion chromatique par contre dépend de la longueur d'onde considérée et résulte de la somme de deux effets :

- la dispersion propre au matériau
- la source de lumière utilisée

La dispersion chromatique est la même quel que soit le type de fibre optique et caractérise l'étalement du signal lié à sa largeur spectrale (deux longueurs d'ondes différentes ne se propagent pas exactement à la même vitesse).

Une impulsion optique est un paquet d'ondes dont la vitesse de groupe est donnée par :

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} \quad \text{Avec :}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \nu \text{ est la pulsation}$$

$$\text{Et } k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ est le nombre d'onde.}$$

#### **VI-4- Bande passante et fréquence de coupure**

Pour déterminer la bande passante d'une fibre optique, il faut connaître l'élargissement du signal (de l'impulsion) au cours de sa propagation suite aux phénomènes de dispersions chromatique et/ou modale. Le codage binaire de l'information consiste à envoyer des impulsions lumineuses " bits" avec une période T et la dispersion provoque leur élargissement dans le temps. Pour qu'il n'y ait pas de recouvrement entre les trois impulsions à la sortie de la fibre et que le signal soit déchiffrable, il faut que la période considérée soit supérieure ou égale à la dispersion totale  $\Delta\tau$  :  $T \geq \Delta\tau$ .

La fibre optique se comporte alors comme un filtre passe bas avec une fréquence de coupure :

$$f_c = \frac{1}{\Delta\tau} \quad (\text{VI-17})$$

On définit aussi la capacité de transmission d'une fibre optique qui représente son débit d'information en bit/s par :

$$C_\tau = \frac{1}{\Delta\tau} \quad (\text{VI - 18})$$

Comme la dispersion du signal évolue avec la longueur L de la fibre, on donne en générale la bande passante BP de la fibre par le produit :

$$BP = f_c \times L \quad (\text{VI-19})$$

Qui s'exprime MHz× Km.

De manière générale, la fréquence de coupure, donc la bande passante d'une fibre optique est donnée par :

$$f_c = \frac{A}{\Delta\tau} \quad (\text{VI-20})$$

Le facteur A dépend de la nature de la fibre et du type de dispersion.

## VII- Connectiques et pertes dans les fibres

Les lacunes aux extrémités des fibres causent deux problèmes ; la perte d'insertion et la perte de réflexion. Cependant, le cône de lumière émergeant du connecteur se répercute sur le cœur de la fibre réceptrice et se perd. IL faut noter que les ouvertures numériques et les diamètres de cœur sont aussi deux sources de pertes :

- Les différences dans ces deux paramètres vont créer des connexions qui ont des pertes en fonction de la direction de propagation de la lumière. La lumière d'une fibre avec une plus grande ouverture numérique sera plus sensible à l'angularité et à l'écart d'extrémité.
- De même, la lumière provenant d'une fibre avec un plus grand diamètre aura des pertes élevées si elle est couplée à une fibre de plus petit diamètre, tandis que l'on peut coupler une fibre de faible diamètre à une fibre de grand diamètre avec un minimum de pertes, car elle est beaucoup moins sensible à l'écart ou au décalage latéral à l'extrémité.

Cependant, Pour résoudre les problèmes de dispersion et d'atténuation on fait appel à certaines techniques qui permettent l'amélioration de la forme du signal de sortie, l'amplification de son intensité et l'augmentation de la capacité de transmission.

### Exercices d'application :

#### Exercice1 :

Considérant une fibre optique avec un cœur d'indice  $n_c = 1.5$ , un écart relatif  $\Delta = 0.003$  et une ouverture numérique  $ON=0.116$ .

Dans le cas d'une onde monochromatique de longueur d'onde  $\lambda_0 = 850$  nm, discuter ses modes de propagation.

#### Solution :

La fibre optique est monomode si elle présente un rayon de cœur :

$$a < \frac{2.404 \cdot \lambda_0}{2\pi \cdot ON} = 2.8 \mu m$$

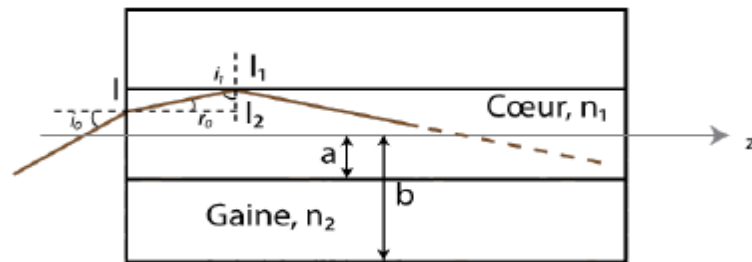
Elle devient multimode pour  $a > 2.8 \mu m$ :

Pour  $a = 15 \mu m$  on peut trouver 82 modes presque.

Pour  $a = 45 \mu m$  on peut trouver 745 modes presque.

### Exercice2 :

Pour guider la lumière dans une direction donnée, on réalise des fibres optiques, longs fils cylindriques dont l'indice diminue quand on s'éloigne de l'axe. La lumière suit la direction moyenne de l'axe grâce au phénomène de réflexion totale, à condition que le faisceau incident ait une ouverture angulaire convenable. Dans le modèle qui suit, on considère que la fibre est constituée d'un cœur cylindrique de rayon  $a$ , d'indice  $n_1 = 1,510$  et d'une gaine de rayon extérieur  $b$ , d'indice  $n_2 = 1,495$ .



1- Un rayon incident se propage dans l'air dans un plan axial de la fibre et arrive en I, à une distance  $OI < a$  de l'axe, sur une extrémité de la fibre, sous un angle d'incidence  $i_0$ . On note  $i_1$  l'angle que fait le rayon avec la normale séparant la gaine du cœur. Déterminer la condition sur  $i_1$  tel qu'il y a guidage dans la fibre, et exprimer la relation entre  $i_0$  et  $i_1$ .

2- En déduire la condition sur  $i_0$ , de la forme  $i_0 < i_m$ , permettant le confinement du rayon dans la fibre.

3- On appelle ouverture numérique O.N. la quantité  $\sin(i_m)$ . Exprimer ON en fonction de  $n_1$  et  $n_2$ .

### Solution :

1- A- D'après les lois de Descartes au point  $I_1$ , il y a réflexion totale si  $\sin(i_1) > \frac{n_2}{n_1}$

comme :  $n_2 < n_1$ . Numériquement,  $i_1 > \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = 81.9^\circ$ .

B-Dans le triangle  $II_1I_2$ , on a la relation  $i_1 + r_0 + \frac{\pi}{2} = \pi$ , soit  $r = \frac{\pi}{2} - i_1$ , et en appliquant la relation de Descartes en I :

$$\sin(i_0) = n_1 \sin(r) = n_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} - i_1\right) = n_1 \cos(i_1)$$

Donc :  $\sin(i_0) = n_1 \cos(i_1)$ .

2- Avec la relation  $\cos(\alpha)^2 + \sin(\alpha)^2 = 1$ , on a :

$$\sin(i_0) = n_1 \sqrt{1 - \sin(i_1)^2} < n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$$

Donc :  $\sin(i_0) < \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$

3- Trivialement l'ouverture numérique vaut :  $ON = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ .



# ***REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES***

## **Sites web :**

- <http://en.wikipedia.org/wiki/Led>
- <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photodiode-closeup.jpg?uselang=fr>
- [http://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre\\_optique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre_optique)
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Diode\\_laser](https://fr.wikipedia.org/wiki/Diode_laser)
- <http://pagesperso-orange.fr/fabrice.sincere>
- <https://wiki.epfl.ch/houdre/documents/DispElec/chapitre%2001%20introduction.pdf>
- <https://www.scribd.com/document/.../Cours-Optoelectronique-2005-2006-pdf>
- <https://phitem.univ-grenoble-alpes.fr/.../plateformes/plateforme-matiere-condensee-cri>

## **Livres :**

- P. Mayé « Optoélectronique industrielle : conception et applications », Dunod 2001.
- Romuald Houdré « Science et génie des matériaux : dispositifs optoélectroniques et optique a semi-conducteurs », cours 2006 /2007.
- A. GHATAK, K. Thyagaraja, « Introduction to fiber optics », Cambridge University Press.
- Marius Grundmann, « the physics of semiconductors. An introduction including nanophysics and applications », Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.
- E. F. SCHUBERT, « LIGHT-EMITTING DIODES», CAMBRIDGE University Press, 2003.
- ON Semiconductor « Application Note AN-3005 : Design Fundamentals for phototransistor Circuits : [www.onsemi.com](http://www.onsemi.com).
- Toffano Zéno, « Optoélectronique, Composants photoniques et fibres optiques », Edition Ellipse, 2001.
- H. Mathieu, H , « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques ». Fanet, Edition Dunod, Paris, 2009. [fac.umc.edu.dz/fstech/Electronique/2.pdf](http://fac.umc.edu.dz/fstech/Electronique/2.pdf).

- Luc Chassagne, «Cours d'Optoélectronique système», cours 2005/2006.
- M. Grundmann, « The physics of semiconductors, an introduction including nanophysics and applications », M. Grundmann, Springer, Verlag, Berlin Heidelberg 2010, ISSN 1868-4513, ISBN 978-3-642-13884-3
- Pierre Lecoy, « Télécoms sur fibres optiques », édition LAVOISIER, 2008.
- François Cerf, HERMES, « Les composants optoélectroniques », science Publications, 2000.
- Govind p. Agrawal, « Fiber-optic communication systems», 3<sup>rd</sup> edition, A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2002.