

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



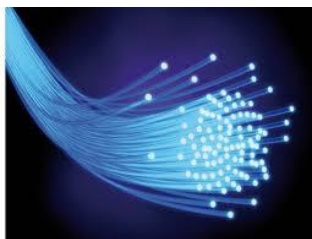
Université de Mohammed Seddik Ben Yahia- Jijel
Faculté des sciences et de la Technologie
Département d'Electronique

COURS

Destiné aux étudiants de 3^e Année Licence

Filière : Electronique

Dispositifs optoélectroniques



Dr. Samira DIB

Année universitaire 2015/2016

Programme

Semestre: S6

Unité d'enseignement: UED 3.2

Matière: Dispositifs optoélectroniques

Crédits: 02

Coefficient: 02

Volume horaire hebdomadaire : 03h00 de cours

Volume horaire Semestriel : 45h00 de cours (15 semaines)

Mode d'évaluation : Examen 100%

Objectifs de l'enseignement:

Acquérir des connaissances de base sur l'optoélectronique. Connaître les composants optoélectroniques et leurs utilisations.

Connaissances préalables recommandées: Physique des semi-conducteurs.

Contenu de la matière:

Chapitre 1. Interaction lumière-semi-conducteur (1 semaine)

Propriétés de la lumière, flux lumineux, flux luminance, dualité onde-particule de la lumière, spectre du rayonnement électromagnétique, différents types d'interactions lumière-matière: photo conductivité, photo-ionisation, photoélectron, photovoltaïque.

Chapitre 2. Propriétés électronique et optique des semi-conducteurs (2 semaines)

Structure de bandes des semi-conducteurs, notions sur les bandes d'énergie, processus radiatif et non radiatif dans les semi-conducteurs, phénomène d'absorption de la lumière, composants d'optoélectronique: émetteurs et détecteurs de lumière.

Chapitre 3. Emetteurs de lumière (4 semaines)

Diodes électroluminescentes: principe, caractéristiques électriques et spectrale, différents types de diode LED, diodes laser: oscillation laser, caractéristiques électriques et spectrale, différents types de diode laser.

Chapitre 4. Détecteurs de lumière

(4semaines)

Photorésistance: fonctionnement, technologie, symboles et codifications, schémas et applications. Photodiode: fonctionnement, caractéristiques électriques, caractéristiques optiques, symboles et codifications, circuits associés.

Phototransistor: principe, caractéristiques, symboles et codifications, schémas et applications.

Cellules photovoltaïques (Photopile, Batterie solaire): effet photovoltaïque, fabrication des cellules. Afficheurs à cristaux liquides, Photomultiplicateur, Capteurs d'images.

Chapitre 5. Fibres optiques

(4 semaines)

Introduction, optique géométrique, structure de la fibre optique, types de fibres, atténuation, dispersion, fonctionnement des fibres optiques (guidage de l'onde, paramètres, phénomènes non linéaires), connectiques et pertes dans les fibres.

Avant-propos

Ce cours d'optoélectronique est destiné aux étudiants de troisième année Licence Electronique. Il correspond au programme officiel du module « Optoélectronique » enseigné en 3^{ème} année Sciences et technologie, Filière Electronique.

Ce manuel rédigé avec un souci permanent de simplicité est structuré en cinq chapitres. Ils traitent des notions fondamentales de la lumière, des composants optoélectroniques, à savoir : (Interaction lumière-semi-conducteur, Propriétés électronique et optique des semi-conducteurs, Emetteurs de lumière, Détecteurs de lumière, Fibres optiques).

Samira DIB

Table des matières

1. Interaction lumière-semi-conducteur

1. Introduction à l'optoélectronique	1
2. Chronologie de l'optique et l'étude du rayonnement	1
3. Propriétés de la lumière	2
3.1. Définitions	2
3.2. Lois de radiations lumineuses	2
3.2.1. Réflexion et diffusion	3
3.2.2. Réfraction	4
3.2.3. Diffraction	6
3.2.4. Emission	7
3.2.5. Absorption	7
3.2.6. Polarisation	8
4. Dualité onde-particule de la lumière	9
5. Spectre du rayonnement électromagnétique	9
6. Différents types d'interactions lumière-matière	10
6.1. Photoconductivité	10
6.2. Photo-ionisation	10
6.3. Photoélectricité	11
6.4. Photovoltaïque	13
7. Unités de mesure photométriques et radiométriques	15
7.1. Flux lumineux	15
7.2. Intensité lumineuse	15
7.3. Eclairement	15
7.4. Luminance	15
7.5. Efficacité lumineuse	16

2. Propriétés électronique et optique des semi-conducteurs

1. Introduction	17
2. Structure de bandes de semi-conducteurs	17
3. Notions sur les bandes d'énergie	18
4. Génération et recombinaison des porteurs	20
4.1. Génération de paire électron-trou	20
4.2. Recombinaisons des porteurs	20
4.2.1. Recombinaisons radiatives	20
4.2.2. Recombinaisons non radiatives	21
5. Phénomènes d'absorption et d'émission de la lumière	22
5.1. Statistique de Boltzman	22
5.2. Absorption	23
5.3. Emission	23
5.3.1. Emission spontanée	23
5.3.2. Emission stimulée	24
5.3.3. Propriétés	25
5.3.4. Durée de vie dans un état excité	26
6. Composants d'optoélectroniques	26

3. Emetteurs de lumière

1. Introduction	27
2. LASER	27
2.1. Réalisation d'inversion de population	27
2.2. Principe du Laser	29
2.3. Types de laser	31
3. Diodes Laser	32
3.1. Définition.....	32
3.2. Principe	33
3.3. Caractéristiques électriques et spectrales	36
3.4. Applications	38
4. Diodes électroluminescentes (LED)	39
4.1. Définition	39
4.2. Principe.....	39
4.3. Caractéristiques électriques et spectrales	40
4.4. Avantages et inconvénients	43
4.5. Applications	44

4. Détecteurs de lumière

1. Introduction	45
2. Paramètres	45
3. Photorésistance.....	46
3.1. Principe de fonctionnement	47
3.2. Caractéristiques	48
4. Photodiode.....	49
4.1. Principe de fonctionnement	50
4.2. Caractéristiques	50
5. Phototransistor	51
5.1. Principe de fonctionnement	51
5.2. Caractéristiques	51
6. Cellules photovoltaïques	51
7. Afficheurs à cristaux liquides	53
8. Photomultiplicateurs	58
9. Capteurs d'images	58

5. Fibres optiques

1. Introduction.....	59
2. Structure de la fibre optique	59
3. Types de fibres optiques	60
4. Propagation de l'onde dans la fibre optique	65
5. Atténuation dans les fibres optiques	66
6. Dispersion du rayonnement	67
7. Capacité de transmission et bande passante	70

Bibliographie & Webographie	71
--	-----------

Chapitre 1

Interaction lumière-semi-conducteur

1. Introduction générale à l'optoélectronique

L'optoélectronique est une discipline émergente située au confluent des propriétés électroniques et optiques de la matière. C'est l'étude des composants qui émettent, modulent ou détectent le signal lumineux utilisant conjointement de l'électronique et l'optique. Elle a des répercussions importantes en télécommunications, informatique, électronique professionnelle (militaire, médicale...) et grand public. Mettant en œuvre des concepts très sophistiqués (optique quantique, physique des hétérostructures à semi-conducteurs...), elle présente toutefois un caractère applicatif immédiat.

2. Chronologie de l'optique et l'étude des rayonnements

L'optique est la science qui étudie la lumière et sa propagation dans les différents milieux matériels. Elle est en particulier mise à profit pour la conception d'appareils d'observations tels que les télescopes, lunettes, microscopes mais elle permet aussi d'étudier des phénomènes plus complexes comme la dispersion ou la diffraction de la lumière.

Cette chronologie présente les dates importantes de l'histoire de l'étude de la lumière visible et des autres rayonnements électromagnétiques.

1025 Théorie de la vision d'Alhazen

Le physicien arabe Alhazen (nom latinisé de Abu Ali Al-Hassan Ibn Al-Haytham) étudie l'optique et en particulier le mécanisme de la vision. Il soutient que celle-ci est liée à des rayons lumineux émanant des objets et pénétrant dans l'œil alors que jusque-là on supposait que les rayons provenaient des yeux.

1304 Interprétation de la formation des arcs-en-ciel (l'allemand Thierry).

1620 Optique géométrique (Descartes)

1621 Loi de la réfraction de Snell (Willebrord Snell).

1665 Etude de la diffraction (l'italien Francesco Maria Grimaldi).

- 1704** Newton soutient la théorie corpusculaire de la lumière et s'oppose ainsi à la théorie ondulatoire de la lumière.
- 1800** **Découverte des infrarouges** (Herschell).
- 1801** **Découverte des ultraviolets** (Johann Wilhem Ritter).
- 1842** **Découverte de l'effet Doppler** (Christian Johann Doppler).
- 1845** **La lumière est un phénomène électromagnétique** (Michael Faraday).
- 1861** **Analyse spectrale de la lumière solaire** (Gustav Kirchhoff).
- 1865** **Equations de Maxwell**
- 1879** Invention de la lampe à incandescence classique, par Joseph Swan et améliorée par les travaux de Thomas Edison. Production de la lumière en portant à incandescence un filament de tungstène.
- 1900** La loi est nommée d'après le physicien allemand Max Planck, qui l'a formulée en 1900. C'est un résultat précurseur de la physique moderne et de la **théorie quantique**.
- 1905** **L'effet photoélectrique** interprété par Einstein
- 1954** **Mise au point du premier "faisceau cohérent", Laser, par Charles Townes.**
- 1970** **Fibre optique** dans les télécommunications.

3. Propriétés de la lumière

3.1. Définitions

Chaque radiation élémentaire est caractérisée par sa longueur d'onde : $\lambda = \frac{v}{f}$

avec :- v : vitesse de la lumière en m/s ($v = c = 3.10^8$ m/s, vitesse de la lumière dans le vide).

- f : fréquence de la radiation en Hz
- λ : longueur d'onde en m.

3.2. Lois sur les radiations lumineuses

Définitions

- Dans un milieu transparent, isotrope et homogène, la lumière se propage en ligne droite.
- Si l'on inverse son sens de propagation, un rayon lumineux suit le même chemin.

- Aucune interaction n'existe entre deux rayons lumineux, un rayon ne peut pas dévier un autre.
- Homogène : Les propriétés physiques sont les mêmes en tout point du milieu.
- Isotrope : Les propriétés physiques sont les mêmes dans toutes les directions.
- Dioptré : surface de séparation entre deux milieux transparents

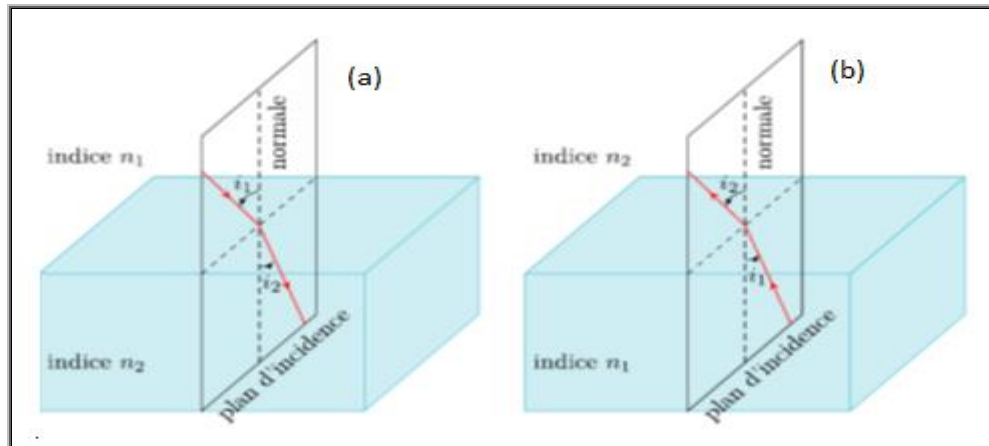


Figure 1.1 : Passage du milieu 1 d'indice n_1 au milieu 2 d'indice n_2

(a) $n_2 > n_1$ (b) $n_2 < n_1$

3.2.1. Réflexion et diffusion

- La réflexion (régulière) sur les surfaces lisses. La lumière réfléchi se propage dans une direction bien définie.
- La réflexion diffuse ou la diffusion sur les surfaces rugueuses. La lumière est renvoyée dans toutes les directions. D'un point de vue microscopique, chaque rayon lumineux subit cependant une réflexion régulière.

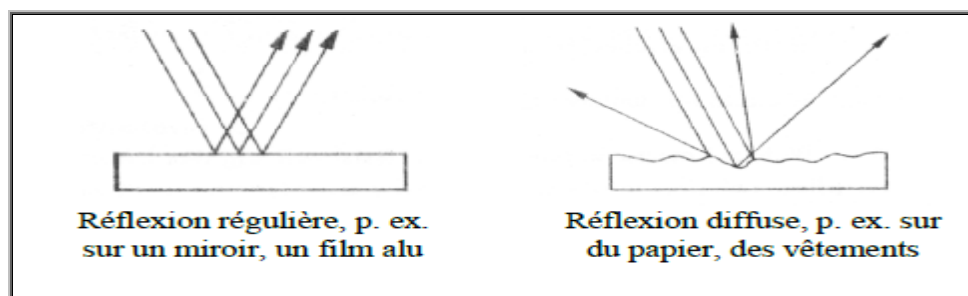


Figure 1.2 : Réflexion et diffusion

La réflexion régulière sur le miroir plan

Le rayon lumineux qui arrive sur le miroir est appelé rayon lumineux incident.

Le rayon lumineux qui est renvoyé par le miroir est appelé rayon lumineux réfléchi.

La normale est une ligne auxiliaire qui est perpendiculaire au miroir, au point où le rayon lumineux incident frappe le miroir.

L'angle d'incidence θ_i est l'angle entre le rayon lumineux incident et la normale.

L'angle de réflexion θ_r est l'angle entre le rayon lumineux réfléchi et la normale.

La loi de réflexion s'exprime comme suit :

Le rayon incident, la normale et le rayon réfléchi se trouvent dans un même plan.

L'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion : $\theta_i = \theta_r$

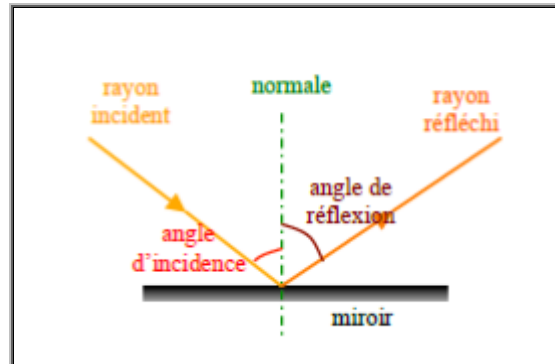


Figure 1.3 : Représentation schématique de la loi de réflexion

3.2.2. Réfraction

a. Définition

Lorsqu'un faisceau de lumière incident frappe une surface séparant deux milieux transparents, une partie de la lumière est réfléchi selon la loi de réflexion dans le milieu 1, tandis que le reste est transmis dans le milieu 2. Le rayon lumineux change de direction de propagation lors du passage du milieu 1 dans le milieu 2. On dit alors que la lumière est **réfractée** et cette déviation est définie comme étant la **réfraction**.

L'angle de réfraction θ_t est l'angle entre le rayon lumineux réfracté et la normale.

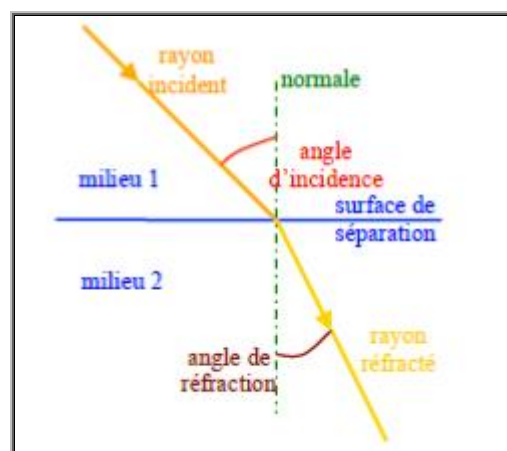


Figure 1.4 : Représentation schématique de la réfraction d'un rayon lumineux

b. Indice de réfraction

L'indice de réfraction n d'un milieu est défini comme le quotient de la vitesse de la lumière C dans le vide par la vitesse de la lumière v dans le milieu: $n = C / v$

Comme la vitesse de la lumière dans le milieu matériel est plus petite que dans le vide, l'indice de réfraction est toujours supérieur à 1 ($n > 1$).

c. Loi de réfraction :

La réfraction obéit aux lois suivantes:

1. Le rayon incident, le rayon réfracté et la normale à la surface sont dans le même plan d'incidence.
2. Les angles d'incidence θ_i et de réfraction θ_t sont liés par la loi de Snell-Descartes:

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$$

Où n_1 et n_2 sont les indices absolus de réfraction.

Remarques :

- Si $n_2 > n_1$, on dit que le milieu (2) est plus réfringent ; en passant du milieu (1) au milieu (2), la lumière s'approche alors de la normale.
- L'angle d'incidence θ_i peut prendre toutes les valeurs comprises entre 0° et 90° .
- La première loi nous permet de conclure de même pour l'angle de réflexion θ_r
- Les valeurs de l'angle réfracté θ_t sont liées à celles de θ_i et de $\frac{n_2}{n_1}$.
- Propagation vers un milieu plus réfringent : **réfraction limite**
Le rayon réfracté $\theta_t < \theta_i$ existe et atteint une valeur limite donnée par $\theta_i = 90^\circ$. C'est-à-dire, $\sin \theta_{tL} = \frac{n_1}{n_2}$; Dans ce cas, on parle de réfraction limite.
- Propagation vers un milieu moins réfringent : **réflexion totale**
Le rayon réfracté $\theta_t > \theta_i$ n'existe plus pour une incidence supérieure à une valeur limite fixée par $\sin \theta_{iL} = \frac{n_2}{n_1}$. Dans ce cas, on parle de réflexion totale.
- Si les angles sont faibles, $\sin \theta \approx \theta$, la loi de Snell-Descartes prend la forme approchée, dite loi de Kepler : $n_1 i_1 = n_2 i_2$

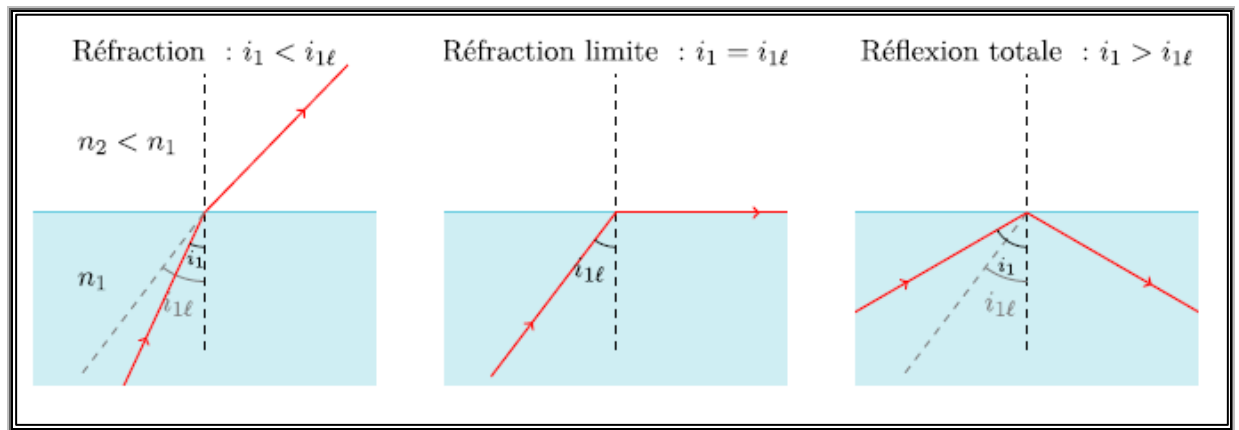


Figure 1.5 : Réfraction, Réfraction limite et Réflection totale

3.2.3. Diffraction

La diffraction est une propriété des ondes qui se manifeste par un étalement des directions de propagation de l'onde lorsque celle-ci rencontre une ouverture ou un obstacle.

Dans un milieu homogène et transparent, la lumière se propage en ligne droite. Lorsque la lumière passe à travers une fente dont les dimensions sont très petites, ou arrive sur un obstacle de dimensions très petites, le faisceau lumineux diverge et on observe sur un écran une alternance de zones lumineuses et de zones obscures. C'est le phénomène de diffraction. On dit que la lumière est diffractée.

Observation du phénomène de diffraction

La figure de diffraction observée est constituée de plusieurs taches : une tache centrale et des taches latérales dont l'intensité lumineuse décroît au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la tache centrale, séparées par des zones d'extinction.

L'observation du phénomène de diffraction est liée aux dimensions de l'ouverture (ou de l'obstacle) par rapport à la longueur d'onde λ .

- Si la dimension de l'ouverture (ou de l'obstacle) est supérieure à la longueur d'onde, l'onde se propage sans modification à travers l'ouverture.
- Si la dimension de l'ouverture (ou de l'obstacle) est du même ordre de grandeur ou plus petite que la longueur d'onde, l'onde est diffractée.

Le phénomène de diffraction est d'autant plus marqué que la dimension de l'ouverture ou de l'obstacle est petite par rapport à la longueur d'onde.

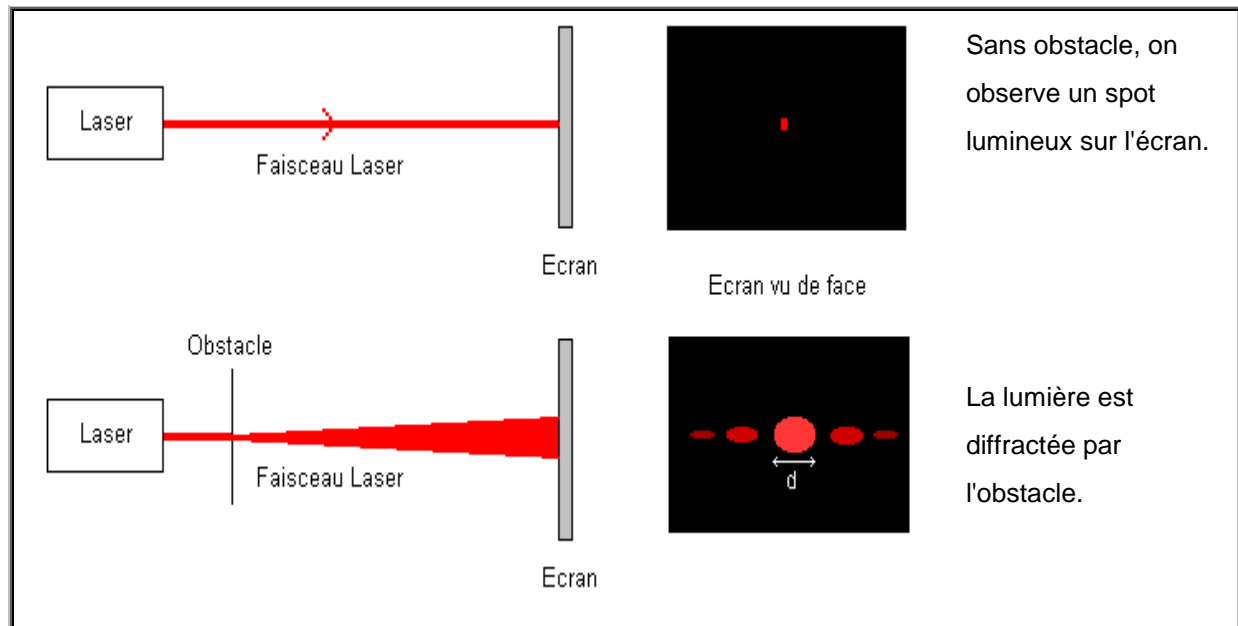


Figure 1.6 : Diffraction obtenue avec une fente rectiligne éclairée en lumière monochromatique

3.2.4. Emission

L'énergie absolue d'un électron est l'énergie nécessaire pour l'arracher complètement de l'atome, pour rompre ses forces de liaison. Plus son domaine de présence est éloigné du noyau, moins il faut d'énergie pour l'extraire car les forces de liaison faiblissent avec la distance. Mais avant d'extraire complètement un électron de son atome, nous pouvons le faire changer de domaine en apportant à l'atome l'énergie juste nécessaire. L'électron passe alors de son **état fondamental**, ou de repos, à un état dit **excité**, plus éloigné du noyau.

L'électron excité est dans un état instable et il va retomber dans son état fondamental en libérant l'énergie précédemment absorbée. Une des multiples formes d'énergie est l'émission d'une onde électromagnétique et le photon peut alors être directement relié à la fréquence d'oscillation de l'onde. L'électron a ainsi émis un photon d'énergie $E=h\nu$. L'atome est alors source de lumière.

3.2.5. Absorption

L'atome est source de lumière à condition qu'il ait avant cela absorbé de l'énergie pour changer les électrons de niveau. Cet apport d'énergie peut être électrique, chimique, cinétique, etc.; mais aussi électromagnétique. Cependant, de la même façon que l'émission est quantifiée, l'absorption d'un photon ne peut se faire que si son énergie correspond à l'**énergie de transition** d'un électron. Ainsi les propriétés d'absorption des ondes vont dépendre de la **constitution atomique** de la matière. Un filtre UV est par exemple un matériau dont les

atomes sont capables d'absorber les UV parce que certains électrons ont des énergies de transition correspondant aux fréquences des UV, et le filtre est complètement transparent pour les autres ondes. L'onde n'est pas à tous les coups absorbée par un électron susceptible de transiter. De plus si le flux est intense, il y a une saturation si tous les électrons ont transité. En fait, le matériau sera toujours absorbant à condition que les électrons puissent relaxer en libérant l'énergie par une autre voie. Par exemple, une cellule photovoltaïque absorbe des photons en continu pour fournir de l'énergie électrique et il n'y a pas de saturation si le courant circule.

3.2.6. Polarisation

L'onde électromagnétique est l'oscillation d'un champ électrique dans un plan en phase avec l'oscillation d'un champ magnétique dans un plan perpendiculaire au premier. Cette onde est par définition **polarisée linéairement**. C'est à dire qu'au cours du temps, les deux plans d'oscillation ne changent pas d'orientation.

Une lumière non polarisée est dite **naturelle**: elle se propage dans toutes les directions ; la direction du champ électrique est donc aléatoire.

Polariser la lumière revient à donner une direction spécifique au champ électrique qui la constitue. Si la lumière traverse un milieu dit polariseur, celle-ci ne sera transmise que selon un plan appelé « plan de polarisation ».

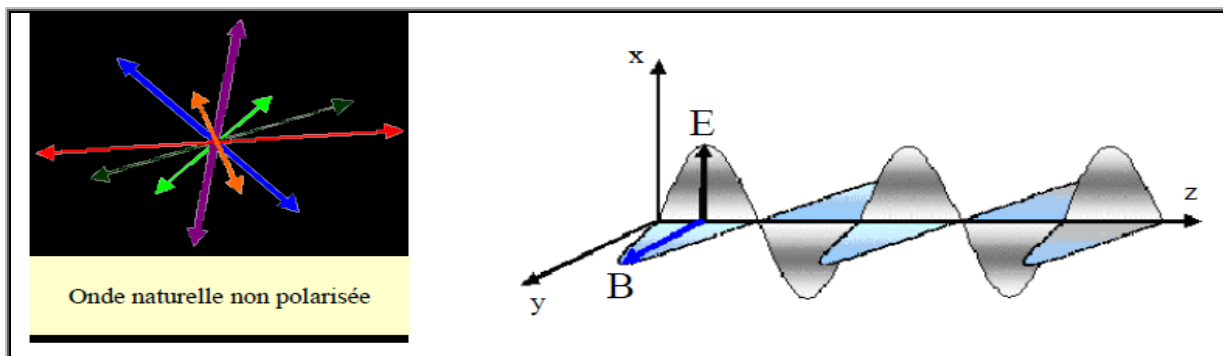


Figure 1.7 : Onde naturelle- champs E et B

Types de polarisation

a. Polarisation rectiligne ou linéaire

La direction d'oscillation du champ électrique est constante au cours du temps.

b. Polarisation circulaire

La direction d'oscillation du champ électrique évolue au cours du temps.

Les deux composantes du champ E n'oscillent plus en phase. L'extrémité M du champ électrique décrit un cercle.

c. Polarisation elliptique

Les deux composantes du champ E ont des amplitudes différentes. L'extrémité M du champ électrique décrit maintenant une ellipse.

4. Dualité onde-particule de la lumière

La lumière se présente sous deux aspects :

- Un aspect corpusculaire où elle est formée de corpuscules appelés photons qui sont animés d'une vitesse C (célérité de la lumière) et transportant un quantum d'énergie $h\nu$.
- Un aspect ondulatoire où elle est considérée comme un phénomène vibratoire se propageant par onde.

5. Spectre du rayonnement électromagnétique

La lumière, seul domaine visible par l'œil humain, est un spectre allant du violet, 380 nm, au rouge profond, 780 nm. L'émission de la totalité du spectre donne une impression de lumière blanche. Une lumière colorée présente simplement une forte proportion d'onde d'une partie restreinte du spectre visible. Par exemple, une lumière est rouge simplement parce qu'il y a beaucoup d'onde autour de 680 nm. A l'extrême, une lumière peut être **monochromatique** lorsqu'elle est constituée uniquement d'ondes de fréquence unique.

Le rayonnement électromagnétique comprend aussi bien la lumière visible que les ondes radio ou les rayons X et sa particule élémentaire est le photon. Le photon peut avoir des énergies très différentes. A chaque énergie qu'il peut prendre est reliée une longueur d'onde qui lui est inversement proportionnelle. L'ensemble des longueurs d'ondes du rayonnement électromagnétique permet de définir le spectre électromagnétique.

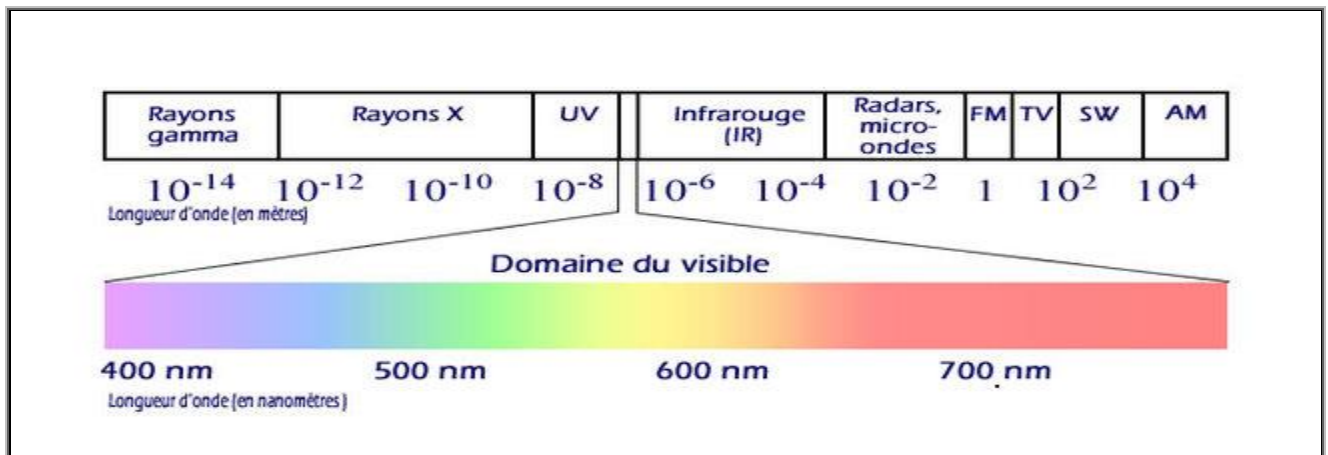


Figure 1.8 : Spectre des ondes électromagnétiques

6. Différents types d'interactions lumière-matière

Dans cette partie, on expose l'interaction lumière/semi - conducteur mettant en jeu divers processus physiques et devenant un outil de commutation de circuits électriques.

6.1. Photoconductivité

En physique, la **photoconductivité** survient chaque fois que la résistance électrique d'un corps varie lorsqu'on l'éclaire avec un rayonnement électromagnétique.

Ce phénomène s'observe sur les matériaux semi-conducteurs hautement résistifs. Une lumière avec une fréquence (donc une énergie) suffisante va restituer suffisamment d'énergie aux électrons de la bande de valence pour atteindre la bande de conduction. Les électrons résultants et leurs trous associés vont permettre la conductivité électrique, donc la diminution de la résistance.

L'effet photoconducteur est un phénomène optoélectronique à la base de nombreux dispositifs de détection ; on le rencontre couramment à plusieurs niveaux. Ainsi, il permet aussi bien de produire la photocopie de documents que d'assurer le traitement de données transmises par voie optique dans le domaine des télécommunications, comme par exemple Internet.

6.2. Photo-ionisation

L'ionisation est l'action qui consiste à enlever ou ajouter des charges à un atome ou une molécule. L'atome 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.

6.3. Effet photoélectrique

Il fut mis en évidence par Hertz en 1887.

L'effet photoélectrique est 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.

Entre une grille et une plaque métallique placées dans une ampoule de verre, sous vide, on applique une tension V et on éclaire la plaque avec une lumière monochromatique. On peut collecter les électrons, ce qui donne lieu à un courant détectable.

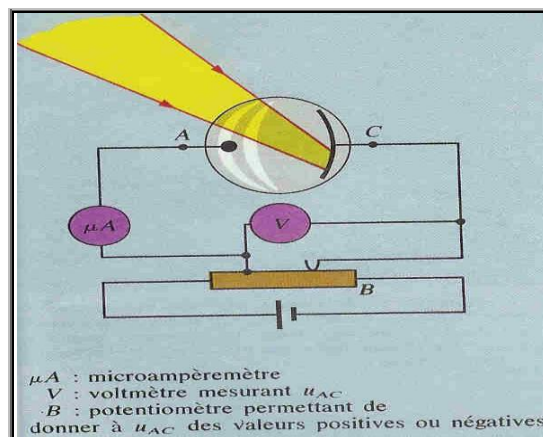


Figure 1.9 : Cellule photoélectrique

Observations :

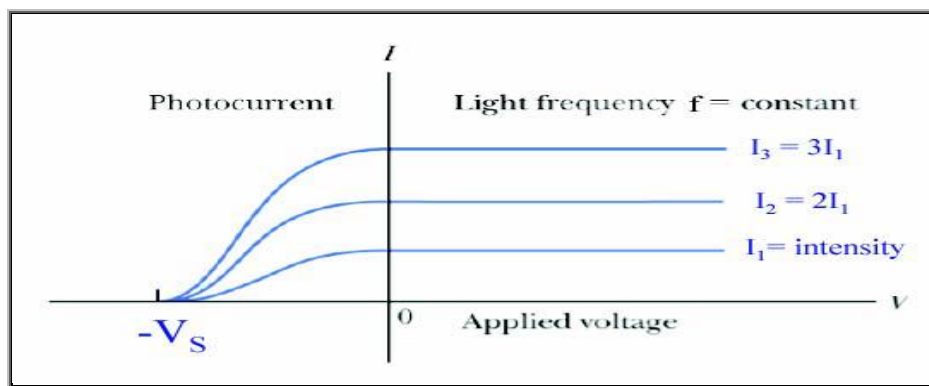


Figure 1.10 : Tracé du photocourant en fonction de la tension et l'intensité de la lumière

1^{ère} loi de Lenard:

L'émission photoélectrique ne se produit que si la fréquence de radiation monochromatique tombant sur le métal est supérieure à la radiation limite caractéristique du métal considéré. Cette émission est alors instantanée:

$$\frac{1}{2} m v^2 = e U_a \text{ où } U_a : \text{est le potentiel d'arrêt.}$$

2^{ème} loi de Lenard:

L'intensité I_s de saturation est proportionnelle à la puissance transportée par le faisceau lumineux reçu par la cathode.

3^{ème} loi de Lenard:

L'énergie cinétique maximale (E_{cmax}) émise par la cathode est indépendante de la puissance du faisceau monochromatique incident. Elle ne dépend que de la fréquence de la radiation monochromatique incidente et croît de façon affine avec cette fréquence.

Malgré l'aspect fort confortable avec les lois de Lenard, puisque très utilisable d'un point de vue pratique, des contradictions vont se faire. En effet:

1/ Une radiation plus forte devrait communiquer une vitesse aux électrons éjectés, mais en réalité il y a plus d'électrons éjectés sans modification du potentiel d'arrêt.

2/ Selon la théorie ondulatoire on aurait dû avoir une puissance seuil et non une fréquence seuil.

L'interprétation d'Einstein: Le photon ou quanta de lumière.

Einstein réinterpréta les équations de Lenard et fit l'hypothèse suivante:

L'énergie lumineuse est émise, se propage et est absorbée sous forme de grains d'énergie appelés **Photons**. Chaque Photon, correspond à une radiation électromagnétique monochromatique de fréquence ν et possède l'énergie: $h\nu$

On peut tirer les relations fondamentales suivantes: $\frac{1}{2} m v^2 = e. U_a = h(\nu - \nu_0)$

h : la constante de Planck, $h = 6,62.10^{-34} \text{J/s}$

Toutes les hypothèses de Lenard peuvent être alors "réexpliquées":

1- la fréquence seuil

L'effet photoélectrique ne peut se produire que si la fréquence est supérieure ou égale à la fréquence seuil du composant étudié appelé: ν_0 .

Cette énergie cinétique est indépendante de l'énergie rayonnante ; elle dépend de ν et ν_0 :

$$E_c = h(\nu - \nu_0)$$

D'où : $\frac{1}{2} m\nu^2 = h(\nu - \nu_0) > 0$ soit $\nu > \nu_0$ et $\nu_0 = \frac{W_0}{h}$: La fréquence du seuil

Métal	Symbole	λ_0 (μm)	ν_0 (10^{14} Hz)
Césium	Cs	0,65	4,62
Potassium	K	0,54	5,56
Sodium	Na	0,52	5,77
Baryum	Ba	0,50	6,00
Zinc	Zn	0,37	8,11
Molybdène	Mo	0,30	10,0
Cuivre	Cu	0,29	10,3
Argent	Ag	0,27	11,1
Platine	Pt	0,19	15,8

Tableau 1.1 : Longueur d'onde et fréquence seuil pour différents métaux.

2 - L'intensité du courant de saturation

Sachant que si la fréquence seuil est respectée, l'intensité du courant de saturation sera proportionnelle à la puissance du faisceau incident. On peut calculer aussi le rendement quantique de la cellule qui reçoit un faisceau incident multi chromatique.

3 - La tension d'arrêt U_a est fonction affine de la fréquence du rayonnement incident.

6.4. Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est mis en œuvre dans les cellules photovoltaïques pour produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire. L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français Edmond Becquerel et présenté à l'académie des sciences fin 1839. Il est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors des paires électrons-trous un courant électrique. Plusieurs types de composants peuvent être créés à partir de ce principe. Ils sont appelés photodiodes, phototransistors ou des photopiles. Cet effet photovoltaïque est notamment utilisé dans les panneaux solaires photovoltaïques.

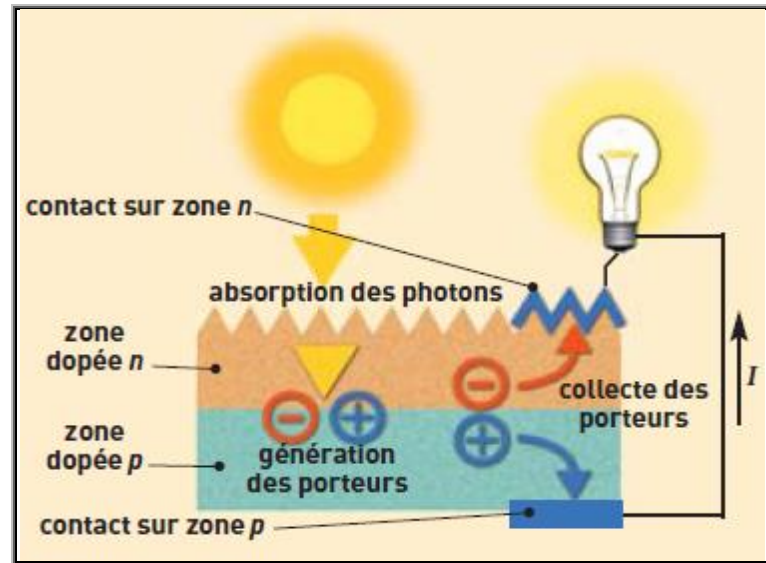


Figure 1.11 : Effet photovoltaïque

Le principe est le suivant :

1. Les photons heurtent la surface du matériau photovoltaïque disposé en cellules ou en couches minces.
2. Ils transfèrent leur énergie aux électrons qui gravitent autour des atomes dont est formé le matériau. C'est **l'effet photoélectrique**. Du fait de l'énergie qu'ils gagnent, les électrons "s'excitent". Ils reviennent généralement à l'état d'équilibre - leur niveau initial - en libérant l'énergie des photons sous forme de chaleur : le matériau chauffe au soleil.
3. Mais il est aussi possible de récupérer cette énergie sous forme électrique. L'électron excité forme avec le « trou » qu'il laisse au niveau inférieur une paire « électron-trou ». Les électrons et les trous sont de charges de signes opposés ($-q$; $+q$). Les cellules photovoltaïques sont des **jonctions PN**, faites en associant un semi-conducteur de type n avec un semi-conducteur de type p, comme le silicium dopé phosphore et le silicium dopé bore. Soumises à un champ électrique dans une jonction PN branchée sur un circuit extérieur, les paires électrons-trou vont se séparer et les électrons excités vont se mettre en mouvement dans une direction particulière : un courant électrique est créé.
4. Le **courant électrique continu** qui se crée est alors recueilli par des fils métalliques très fins connectés les uns aux autres et acheminé à la cellule suivante.
5. Le courant s'additionne en passant d'une cellule à l'autre jusqu'aux bornes de connexion du panneau, et il peut ensuite s'additionner à celui des autres panneaux raccordés en "champs".

Une cellule photovoltaïque n'absorbe pas l'ensemble du rayonnement émis par le soleil. Tout comme l'œil humain n'est sensible qu'à une partie du spectre électromagnétique, la cellule n'est sensible qu'à une partie du rayonnement solaire, avec des différences notables suivant les technologies utilisées.

7. Unités photométriques

7.1. Flux lumineux

C'est la quantité de lumière émise par une source placée au sommet d'un cône de 1 stéradian.

Unité : lumen (lm)

Formule : $F = I W$

Un stéradian (sr) est l'angle qui, ayant son sommet au centre O d'une sphère de rayon R, découpe sur la surface une aire égale à 1m^2 . Tous les points de cette surface sont situés à 1 m de ce sommet. Pour une sphère de rayon 1 m : $S = 4\pi$

7.2. Intensité lumineuse

Le candela est la mesure de la lumière émise dans une direction précise, et correspond à l'intensité lumineuse de la flamme d'une bougie pour un observateur situé à une distance de 1m.

Unité : candela (cd)

7.3. Eclairement

C'est le flux lumineux reçu en un point d'une surface.

Unité : Lux (Lx)

Formule: $E = F/S$

7.4. Luminance

Cette grandeur détermine l'aspect lumineux d'une surface éclairée ou d'une source, dans une direction donnée et dont dépend la sensation visuelle de luminosité.

Pour une même intensité lumineuse, le filament d'une lampe à incandescence éblouira alors qu'un tube fluorescent n'éblouira pas.

Formule : $L = I/S$

Unité : candela/m² (Cd/m²)

La luminance est une valeur permettant de caractériser la qualité de perception visuelle d'un observateur.

7.5. Efficacité lumineuse

C'est le flux lumineux émis pour une puissance donnée.

Unité : lumen/watt (lm/W).

Formule : $f_e = F/P$

DESIGNATION	DEFINITION	SYMBOLE	UNITE	FORMULE
INTENSITE LUMINEUSE	C'est la quantité d'énergie émise par une source de lumière	I	Candella Cd	
FLUX LUMINEUX	C'est la quantité de lumière émise par une source dans un angle solide d'un stéradian.	F	Lumen lm	$I \Omega$
ECLAIREMENT	C'est le flux lumineux reçu par une surface.	E	Lux Lx	$\frac{F}{S}$
LUMINANCE	C'est l'intensité lumineuse transmise par une surface.	L	Cd/m^2	$\frac{1}{S}$
EFFICACITE LUMINEUSE	C'est le flux lumineux émis pour une puissance donnée.	f_e	Lumen/ Watt lm/W	$\frac{F}{P}$
EFFICACITE ENERGETIQUE	Rapport entre la puissance électrique absorbée et le flux lumineux émis par une même source lumineuse	K	Watt/ lumen W/lm	$\frac{P}{F}$

Tableau 1.2 : Récapitulatif Unités Photométriques

Chapitre 2

Propriétés électroniques et optiques des semi-conducteurs

1. Rappels sur la structure de la matière

1.1. Structure de l'atome

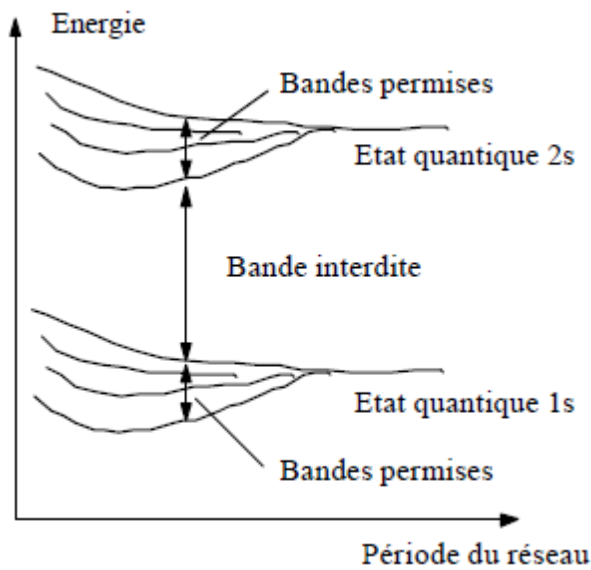
L'optoélectronique s'intéresse aux composants et techniques permettant l'émission ou la réception de signaux lumineux par des systèmes électroniques. Elle exploite essentiellement les phénomènes d'électroluminescence dans les semi-conducteurs pour les photo-émetteurs et les phénomènes en quelque sorte inverses pour les photo-récepteurs.

L'électroluminescence, phénomène par lequel une excitation électrique donne lieu à l'émission d'une radiation électromagnétique, fût constatée voilà plus de 70 ans, mais son explication donnée bien plus tard sur la base d'une théorie des semi-conducteurs et par la recombinaison radiative des porteurs de charges injectés au voisinage d'une jonction PN.

Parallèlement au développement des émetteurs, la technique des semi-conducteurs a permis de réaliser des photo-récepteurs présentant des caractéristiques en parfaite concordance avec les émetteurs et de concevoir des associations opto-électroniques de qualité.

2. Structure de bandes des semi-conducteurs

Un atome d'un élément donné présente donc des niveaux d'énergie bien définis auxquels on peut associer des fonctions d'onde bien définies. Il en est de même dans un solide cristallin où les atomes sont arrangés selon un réseau triplement périodique. Les électrons occupent alors des niveaux d'énergie bien définis correspondant à des modes de propagation également bien définis. Ces niveaux sont extrêmement proches les uns des autres et sont regroupés en bandes appelées bandes d'énergie permise. Le nombre de niveaux par bande est proportionnel au nombre d'atomes dans le cristal : environ 10^{22} atomes/cm³ pour un cristal de silicium. Les bandes d'énergie permise sont séparées par des zones appelées bandes interdites où il n'y a pas de niveau d'énergie permise.



Variation des niveaux d'énergie en fonction de la période du réseau pour une rangée d'atomes d'hydrogène; on notera la formation de bandes permises et de bandes interdites.

A mesure que les atomes se rapprochent, le couplage entre eux augmente et les niveaux d'énergie se décomposent. Le problème est analogue à celui du couplage d'une série d'oscillateurs électriques ou mécaniques

3. Notions sur les bandes d'énergie

Approche qualitative de la notion de bandes d'énergie dans les solides

- Lors de la formation du solide le rapprochement des atomes modifie le nombre des niveaux d'énergie disponibles pour les électrons autour du noyau. L'influence des atomes les uns sur les autres tend à modifier les niveaux d'énergie. Les électrons voient leur niveaux d'énergie non plus distribués sur des états discrets mais plutôt sur des « bandes » discrètes d'énergie comme le montre la figure ci-dessous, séparées par des bandes interdites.

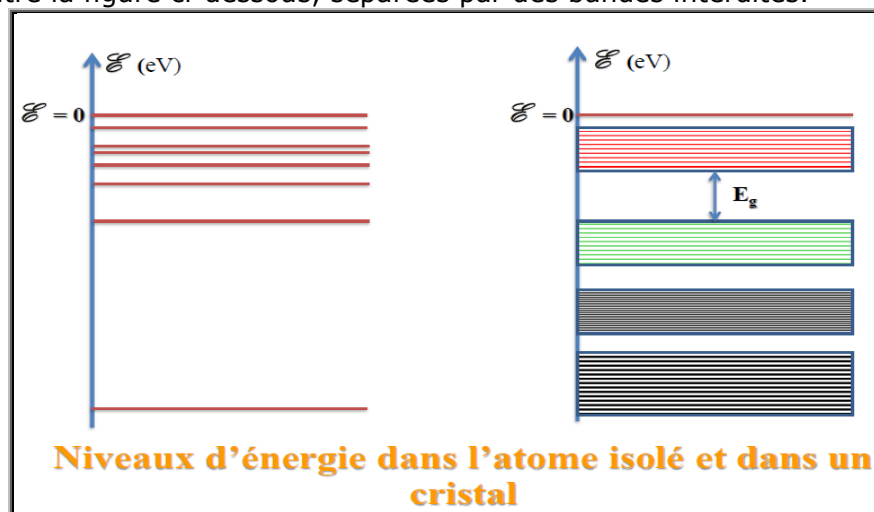


Figure 2.1 : R

- Aux couches les plus proches du noyau qui sont saturées pour l'atome isolé correspondent ainsi des bandes saturées pour l'état solide. A l'intérieur de ces bandes, tous les niveaux énergétiques sont occupés et aucun électrons supplémentaire ne peut y pénétrer.
- La première bande présentant un réel intérêt est la bande de valence qui correspond aux électrons de valence. Cette bande est généralement saturée mais ses électrons peuvent en sortir plus ou moins facilement suivant la nature du solide.
- Enfin, après la bande de valence on rencontre la bande de conduction; elle est suivant les cas vide ou incomplète.
- La séparation d'énergie E_g entre la bande de conduction et la bande de valence, appelée largeur de la bande interdite, détermine le comportement électrique du corps.
- Un isolant est un corps dont la bande de valence est saturée alors que la bande de conduction est entièrement vide ces deux bandes étant séparées par une bande interdite ou « gap » de valeur E_g supérieure à 6 eV.

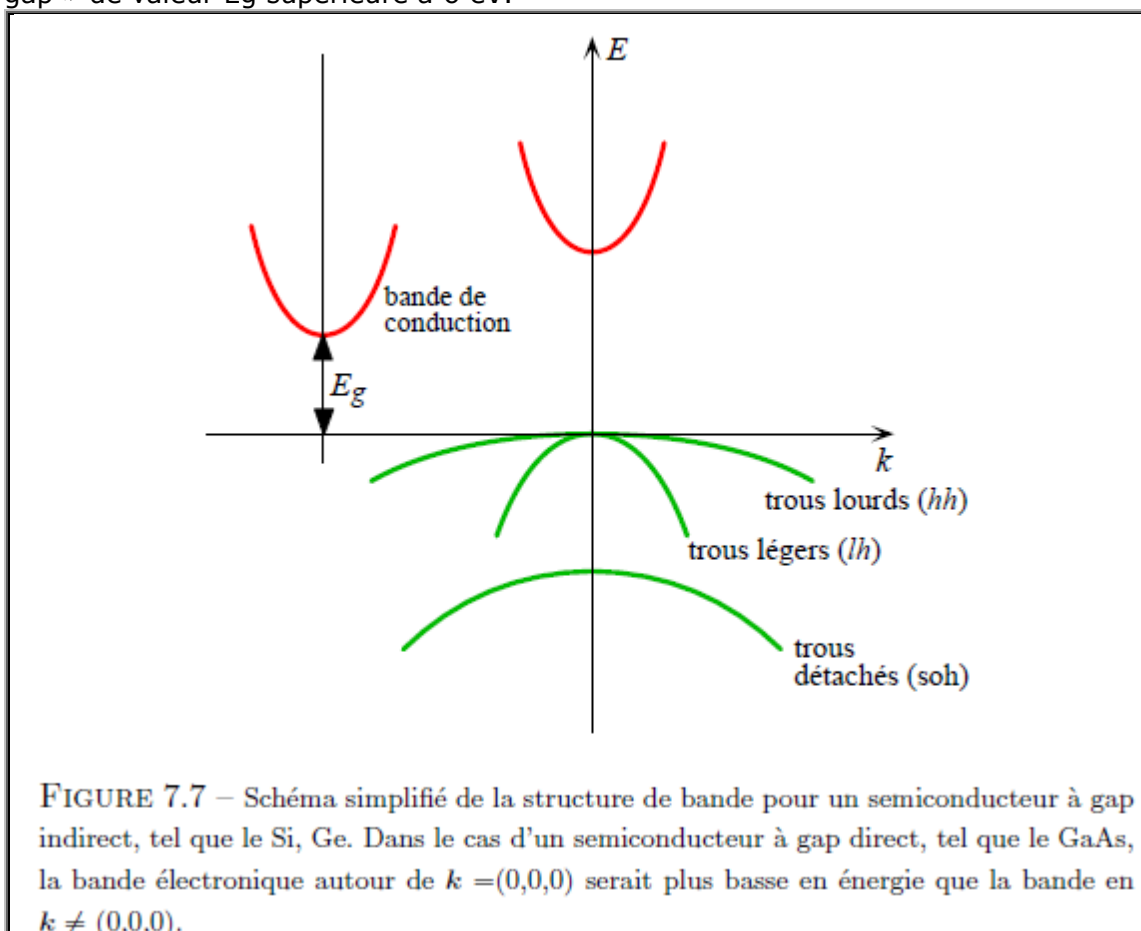


Figure 2.1 : R

4. Génération et recombinaisons des porteurs

4.1. Génération de paire électron-trou

Quand on éclaire un semi-conducteur à l'aide d'un faisceau lumineux tel que l'énergie du photon satisfait la condition $h\nu \geq E_g = E_C - E_V$, on va exciter un électron de la bande de valence qui passe vers la bande de conduction. On dit qu'il y a une génération d'une paire électron-trou : c'est l'effet photoélectrique.

Cette génération n'est possible que si :

$$h\nu \geq E_g$$

et comme :

$$E_g = h\nu_0 = hc/\lambda_0$$

Alors

$$\frac{hc}{\lambda} \geq \frac{hc}{\lambda_0}$$

Ce qui donne : $\lambda \leq \lambda_0$

λ_0 : est appelée longueur d'onde –seuil de génération- elle est donnée par :

$$E_g = \frac{hc}{\lambda_0} \text{ ou } \lambda_0 (\mu m) = \frac{1240}{E_g (eV)}$$

Remarque:

- 1- Si $\lambda > \lambda_0$ le photon traverse la matière sans perdre son énergie, on dit que le matériau est transparent.
- 2- Absorption : l'absorption d'un flux lumineux dans un matériau suit une loi exponentielle, si Φ_0 est le flux envoyé $\Phi(x=0)$, alors $\Phi(x) = \Phi_0 e^{-\alpha x}$

4.2. Recombinaisons des porteurs

Inversement, un électron de la bande de conduction (B_C) peut retomber spontanément dans la bande de valence (B_V) (dans un état vide) en cédant un photon d'énergie $h\nu$: C'est le phénomène de recombinaison. L'énergie libérée lors de la recombinaison s'écrit :

$$h\nu = E_g = E_C - E_V$$

C'est l'effet électroluminescent.

La longueur d'onde émise est une caractéristique du matériau :

$$\lambda_0 = \frac{hc}{E_g}$$

Il existe deux types de recombinaisons : radiative et non radiative.

4.2.1. Recombinaisons radiatives

Pendant les recombinaisons radiatives, il y a émission photonique (émission de photon). Pour ce genre de recombinaison on distingue :

a. Recombinaison bande à bande

C'est la recombinaison directe : un électron de la bande de conduction se recombine avec un trou de la bande de valence.

b. Recombinaison excitronique

L'excitant est représenté par un électron peu lié, il faut lui fournir très peu d'énergie pour qu'il devienne libre et l'énergie de recombinaison est légèrement inférieure à E_g .

c. Recombinaison par l'intermédiaire des centres donneurs ou accepteurs

A basse température, un nombre d'atomes donneurs peuvent être encore neutre quand la température augmente un peu, l'électron quasi-libre de centre donneur, au lieu de monter vers la bande de conduction, il descend vers la bande de valence et se recombine avec un trou avec l'émission d'un photon.

d. Recombinaison due aux centres isoélectroniques (complexes d'impureté)

On appelle impureté iso électronique des atomes (ou des molécules) qui ont la même valence que l'atome (ou la molécule) qu'il remplace.

Ils n'ont par contre ni le même diamètre, ni la même électronégativité. Si électronégativité d'un complexe est plus faible que celle des atomes du cristal, le complexe peut capter des électrons ; dans le cas contraire il capte des trous.

4.2.2. Recombinaisons non radiatives

Ce sont des recombinaisons qui se font sans émission de photon, mais, avec émission de phonons (particules fictives qui correspondent à la vibration du réseau et se dégage en chaleur). On distingue :

a. Recombinaison Auger

Cette recombinaison se fait par transition direct : Bande à bande, ou par un centre de recombinaison, cette recombinaison fait intervenir 3 particules : c'est-à-dire que la recombinaison d'une paire électron-trou va libérer une énergie $E_g = h\nu$ qui servira à exciter un 3ème porteur qui va passer vers les vallées d'énergie supérieures. Quand ce 3ème porteur relaxe (revient à l'état initial), il y a émission de phonons (chaleur) qui va échauffer le semi-conducteur.

b. Recombinaison par l'intermédiaire d'un centre H-S-R (Sockley-Read-Hall)

Ce phénomène intervient surtout dans les semi-conducteurs à gap indirect tel que le Silicium. En effet la présence d'impureté dans le silicium entraîne l'existence de niveau énergétique dans la bande interdite qui se comportent comme des centres de recombinaison ou de centre de piégeage porteurs.

Ces centres interceptent les électrons de la bande de conduction dans son trajet vers la bande de valence et la recombinaison électron-trou se fait par émission de phonons d'énergie égale à E_g , (émission de chaleur).

Les niveaux énergétiques supplémentaires se trouvent dans la bande interdite et on les note E_T , on a trois type de centre de recombinaison.

- Centre piège à électron : Ce niveau est voisin de bande conduction (probabilité de capture d'un e^- est supérieur à celle capture d'un trou).
- Centre piégé à trou : il se trouve près de la bande de valence et la probabilité de capture d'un trou est supérieure à celle de capture d'un électron.
- Centre de recombinaison : où la probabilité de capture d'un électron est voisine à celle de capture d'un trou, conduisant au processus de recombinaison indirecte.

5. Phénomènes d'absorption et d'émission de la lumière

Ce mécanisme s'effectue dans un gaz d'atome, et on considère que l'atome a seulement 2 niveaux d'énergies.

Lorsqu'une onde électromagnétique entre en interaction avec un atome, celui-ci prélève une énergie $E_2 - E_1$ à l'onde, pour que l'un de ses électrons passe de niveau 1 (appelé fondamental) au niveau 2 appelé excité.

5.1. Statistique de Boltzman

La statistique de Maxwell-Boltzmann est une loi de probabilité ou distribution utilisée en physique statistique pour déterminer la répartition des particules entre différents niveaux d'énergie.

$$\frac{n_1}{n_2} = e^{-(E_1 - E_2)}$$

n_1 : est le nombre des électrons au niveau 1.

n_2 : est le nombre des électrons au niveau 2.

Remarques

- A l'équilibre $E_1 < E_2$ ce qui implique que $n_1 > n_2$ c'est-à-dire que niveau le plus bas est plus rempli par rapport au niveau haut.
- Transition : il s'agit d'un phénomène d'émission ou d'absorption.

5.2. Absorption

La transition du niveau E_1 à E_2 se fait par l'absorption d'un photon de fréquence convenable.

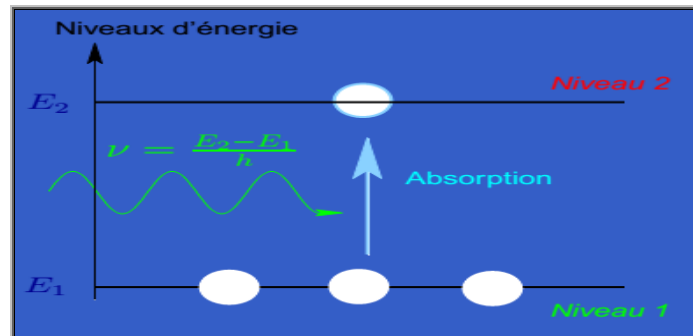


Figure 2.1 : R

On suppose qu'on a un gaz d'atomes $n_1 + n_2$, et on s'intéresse aux photons dont

$$E_2 - E_1 = h\nu$$

Le nombre d'atomes passés du niveau E_1 au niveau E_2 sous l'effet de l'énergie U_ν est :

$$dn_1 = -An_1U_\nu dt$$

A : Probabilité d'absorption, c'est une caractéristique du milieu.

n_1 : Nombre d'atomes présents dans l'état fondamental E_1

U_ν : Densité spectrale volumique d'énergie

dt : Temps d'interaction

5.3. Emission

La transition de E_2 à E_1 peut avoir deux origines : d'émission spontanée ou d'émission stimulée.

5.3.1. Emission spontanée

On parle d'émission spontanée lorsque le processus de recombinaison radiative est entièrement aléatoire : quand l'électron passe au niveau E_2 et l'énergie s'écoule, il retombe (on

a retour spontané) et les photons émis le sont à des instants indépendants, et ne présentent aucune sorte de corrélation entre eux.

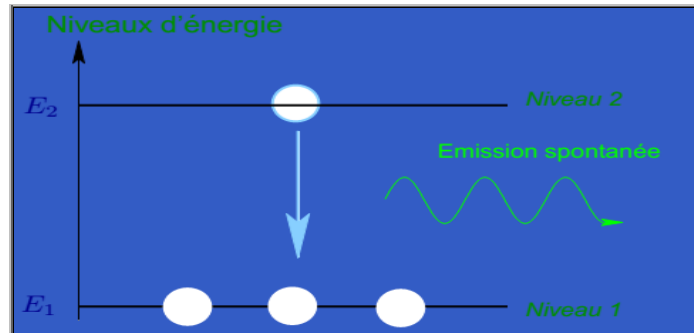


Figure 2.1 : R

Le nombre d'électrons qui passent de E_2 à E_1 spontanément : $dn_2 = -B_1 n_2 dt$

B_1 : Probabilité d'émission spontanée

n_2 : Nombre d'électrons dans le niveau 2

5.3.2. Emission stimulée

Un photon possédant une énergie $h\nu$ égale à celle de la largeur de la bande interdite E_g est susceptible d'induire une transition radiative, avec production d'un second photon de même fréquence ν et par conséquent de même énergie $h\nu$ que le photon inducteur. De plus, le photon induit possède la même phase que le photon inducteur. Ce processus constitue l'émission stimulée c'est la base du fonctionnement des Lasers.

Le nombre d'électrons qui passent de E_2 à E_1 sous l'effet d'une excitation :

$$dn_2' = -B_2 n_2 U_\nu dt$$

B_2 : Probabilité d'émission stimulée

n_2 : Nombre d'électrons dans le niveau 2

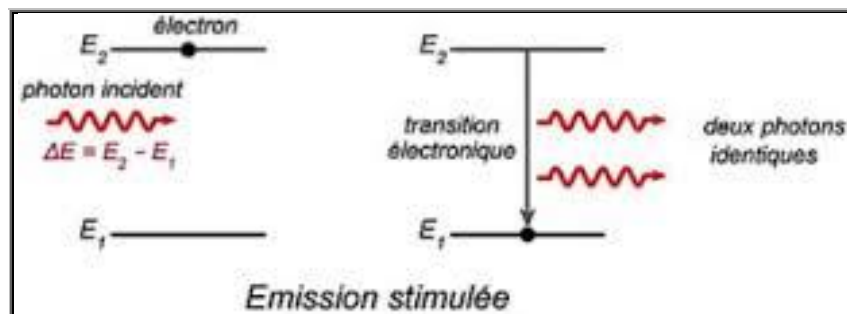


Figure 2.1 : R

Pour qu'un ensemble d'atome reste en équilibre il faut que le passage au niveau haut s'équilibre avec ceux du retour au niveau bas :

$$dn_1 = dn_2 + dn_2'$$

En remplaçant $-An_1U_vdt = -B_1n_2dt - B_2n_2U_vdt$

On peut déduire : $B_1 = \left(A \frac{n_1}{n_2} - B_2\right) U_v$

D'après les statistiques de Boltzman : $\frac{n_1}{n_2} = e^{-(E_1-E_2)} = e^{\frac{h\nu}{kT}}$

Et on a :

$$u_v(T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

On remplace

$$B_1 = \left(Ae^{\frac{h\nu}{kT}} - B_2\right) \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Si T tend vers l'infini (∞), on aura : $B_1 = (A - B_2) \cdot \infty$

Pour éviter la solution non triviale il faut que : $A - B_2 = 0$

Ce qui donne : $A = B_2$ (Probabilité d'absorption = probabilité d'émission stimulée)

Et on déduit :

$$B_1 = A \cdot \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}$$

5.3.3. Propriétés de l'émission spontanée et l'émission stimulée

On a :

$$\frac{dn_2}{dn_2'} = \frac{-B_1n_2dt}{-B_2n_2U_vdt} = e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1$$

Lorsque

- $\frac{h\nu}{kT} \ll 1$ cas des Radiofréquences

$$\frac{dn_2}{dn_2'} \approx \frac{h\nu}{kT} \ll 1$$

Dans ce cas : $dn_2 \ll dn_2'$

L'émission stimulée est plus importante que l'émission spontanée.

- $\frac{h\nu}{kT} \gg 1$ cas du visible

Dans ce domaine, l'émission spontanée est plus importante que l'émission stimulée.

5.3.4. Durée de vie moyenne dans un état excité

Prenant l'expression Le nombre d'électrons qui passent de E_2 à E_1 spontanément :

$$dn_2 = -B_1 n_2 dt$$

$$\frac{dn_2}{dt} = -B_1 n_2$$

La solution de cette équation différentielle est de la forme :

$$n_2 = N_2 e^{-B_1 t}$$

n_2 : Le nombre d'électrons passé au niveau bas spontanément.

Nous avons l'expression du flux des photons

$$\phi = \phi_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = n_2 \cdot h\nu$$

Par analogie :

$$B_1 = \frac{1}{\tau}$$

τ : la durée de vie moyenne dans un état excité.

6. Composants d'optoélectroniques

Une multitude de variantes de composants optoélectroniques envahit le marché. Les photoémetteurs, photodétecteurs, fibre optique, LED, DL, afficheurs LCD.....et qui seront détaillés dans les chapitres qui suivent.

Chapitre 3

Emetteurs de lumière

1. Introduction

Les émetteurs de lumière transforment l'énergie électrique qu'ils reçoivent en radiation optique (UV - IR). La lumière émise résulte de la recombinaison paire électron-trou. Ces composants sont utilisés dans les télécommunications sous forme de diodes électroluminescentes LED, ou diodes Lasers.

2. LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation -

Au 19e siècle, le Laser est généralement vu comme une amplification de tout rayonnement électromagnétique dont fait partie la lumière visible. Les longueurs d'ondes concernées étaient d'abord les micro-ondes (MASER), puis elles se sont étendues aux domaines de l'IR, du visible, de l'UV et on commence même à les appliquer aux rayons X.

Le laser est un amplificateur de la lumière par émission stimulée de radiation. C'est un amplificateur et oscillateur car l'amplification se fait en boucle fermée.

2.1. Inversion de population

Pour amplifier la radiation, il faut rompre l'équilibre. Pour cela, il faut réaliser l'inversion de population par pompage. Mais il faut que le milieu actif soit un système à 3 niveaux d'énergie ou plus.

$$\nu_{13} = \frac{E_3 - E_1}{h}$$

Avec cette fréquence, on fait passer les atomes de E_1 à E_3 . Après passage, on peut avoir $n_3 > n_2$ dans ce cas, on peut amplifier la radiation de fréquence ν_{23} (ou $n_2 > n_1$ on peut amplifier la radiation de fréquence ν_{12}).

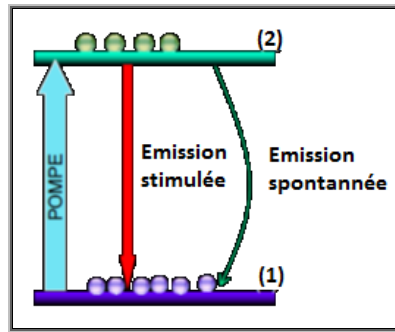


Figure 3.1 : Système à deux niveaux d'énergie

Remarque:

Un système de 2 niveaux d'énergie ne permet pas l'obtention de l'inversion de population.

- Démonstration : On considère 2 niveaux d'énergie :

$n = n_1 + n_2$: Nombre total d'atomes.

On a : $\frac{n_1}{n_2} = e^{E_2 - E_1 / KT} > 1 \quad \Rightarrow n_1 > n_2$

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

A l'équilibre : $dn_1 = dn_2 + dn'_2$ ou $An_1U_\nu = B_1n_2 + B_2n_2U_\nu$

Sachant que $A = B_2 \Rightarrow n_1(AU_\nu) = n_2(B_1 + AU_\nu)$

Alors $n_1 = n_2 \frac{B_1 + AU_\nu}{AU_\nu} = n - n_2$

$$AnU_\nu = n_2(B_1 + 2AU_\nu)$$

D'où $n_2 = n \frac{AU_\nu}{B_1 + 2AU_\nu} = \frac{n}{2} \frac{2A/B_1 \cdot U_\nu}{1 + 2A/B_1 \cdot U_\nu}$ ou encore $n_2 = \frac{n}{2} \frac{\xi}{1 + \xi}$ avec $\xi = 2A/B_1 \cdot U_\nu$: Paramètre de saturation

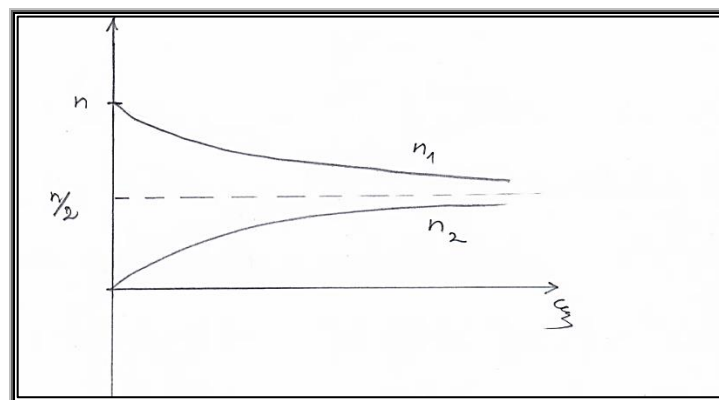


Figure 3.2 : Le tracé de $n_1(n_2)$ en fonction de ξ

Conclusion :

A partir de la courbe de $n_1(n_2)$ en fonction de ξ on remarque :

La totalité des atomes est dans le niveau bas. Si on a un système de 2 niveaux d'énergie, on ne peut pas réaliser l'inversion de population, mais seulement $n_1 = n_2 = \frac{n}{2}$

2.2. Principe du Laser

Un système optique, composé en général de miroirs, permet de réinjecter une partie du faisceau de sortie sur l'entrée de l'amplificateur optique. On a donc l'équivalent optique de la boucle de réaction ou de contre-réaction de l'électronique. Ces miroirs constituent une cavité optique, ayant des fréquences de résonance bien déterminées, analogues à une cavité Fabry-Pérot. Cette cavité peut être linéaire, (Figure 3. 3 (a)), ou bien en anneau (Figure 3. 3(b)). C'est le couplage entre un système résonnant quantique, constitué par le milieu amplificateur, et un système résonnant électromagnétique, constitué par la cavité, qui est à l'origine des propriétés du laser.

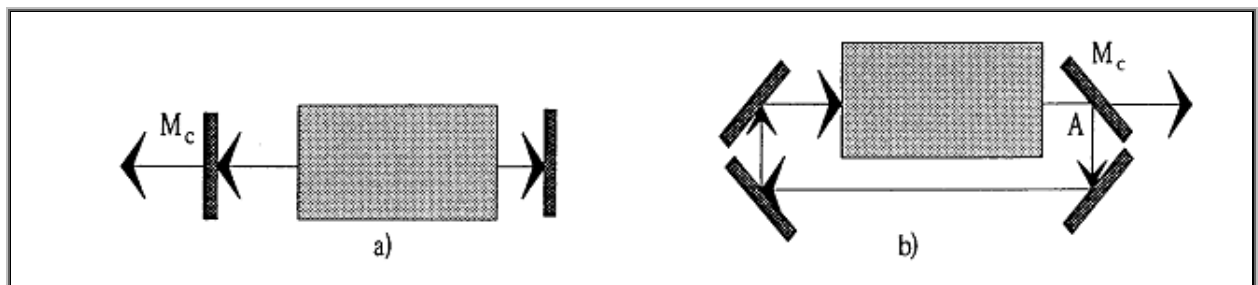


Figure 3.3 : Cavité résonnante

(a) à deux miroirs

(b) à 4 miroirs

Le principe de la source Laser consiste en 1er lieu à exciter les électrons d'un milieu puis à y déclencher l'émission stimulée des photons (qui est la lumière de sortie). Pour cela, un Laser possède un réservoir d'électrons (ce réservoir peut être solide, liquide ou gaz) associé à une source excitante qui "pompe" les électrons à de hauts niveaux d'énergie.

Dans un second temps, un photon est injecté dans le milieu, ce qui produit, pendant la désexcitation d'un des atomes un 2e photon identique. Ces deux photons produisent à leur tour 2 autres photons identiques pendant la désexcitation de deux autres atomes : c'est une réaction en chaîne.

Dans un Laser, le photon de stimulation est d'une nature différente des photons utilisés pour le pompage optique.

On peut utiliser un système de 3 niveaux d'énergie ou plus ; E1, E2 et E3 sont du domaine optique.

- 1- le pompage fait passer les atomes du niveau le plus bas E1 au niveau le plus haut E3
- 2- Les atomes passent spontanément à un niveau intermédiaire (ce qui évite l'émission stimulée par la lumière de pompage).
- 3- et c'est le retour du niveau intermédiaire E2 vers le plus bas qui est stimulée avec production du rayonnement laser.

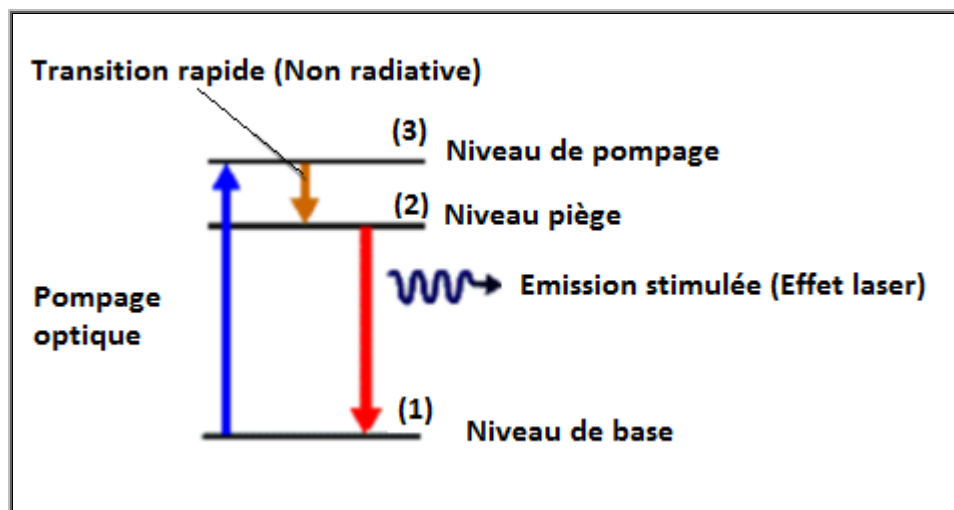


Figure 3.4 : Système à trois niveaux d'énergie

Le rayonnement Laser est accumulé entre 2 surfaces réfléchissantes qui forment ce qu'on appelle cavité résonante, avant de le relâcher sous forme de faisceau.

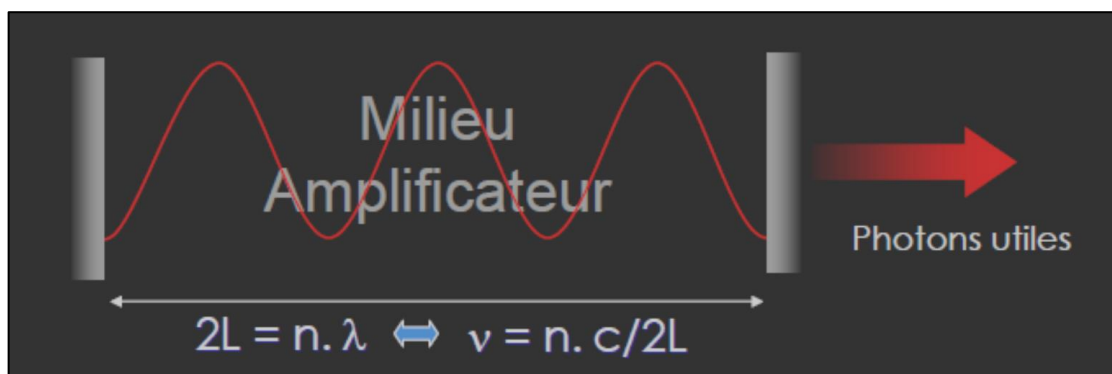


Figure 3.5 : Condition de « rebouclage en phase » sur un aller-retour

C'est un système d'une cavité résonante de longueur $L = n \frac{\lambda}{2}$

Confiner la lumière dans une cavité qui permet d'amplifier cette lumière.

Deux miroirs, dont un semi- réfléchissants, situés aux extrémités du Laser, se renvoient les photons émis, donc la réaction en chaîne ne s'arrête pas. Lorsqu'on arrive au bout du réservoir d'électrons, on les renvoie dans le réservoir et la chaîne se poursuit dans l'autre sens. Ainsi, la lumière s'intensifie à chaque passage jusqu'à ce qu'elle soit libérée par le miroir partiellement transparent à l'extrémité du dispositif.

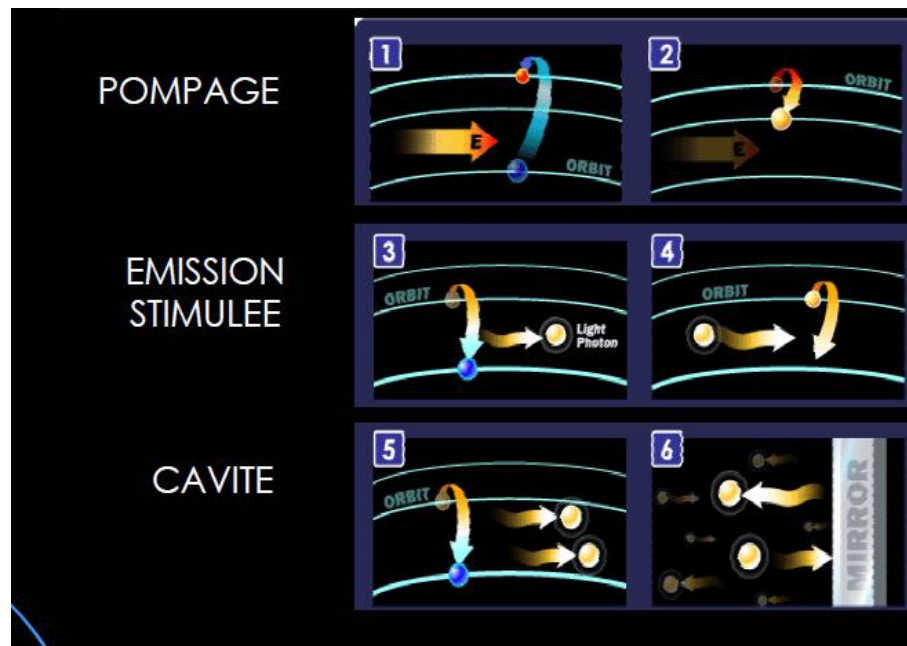


Figure 3.6 : Principe du LASER

2.3. Types de Lasers

Laser à gaz : Comme son nom l'indique, le milieu actif de ce type de laser est un gaz, pur ou en mélange. Le milieu est habituellement excité par une décharge électrique, mais le pompage peut aussi être optique. Les lasers de ce type sont d'une efficacité moyenne, d'une directivité du faisceau exceptionnelle et d'une puissance variable.

- Laser à gaz ionisé;
- Laser à gaz moléculaire;
- Laser à gaz atomique.

C'est le plus répandu, il est économique, fiable et facile à utiliser.

Caractéristiques :

- Puissance de 0.5 à 50 mW.

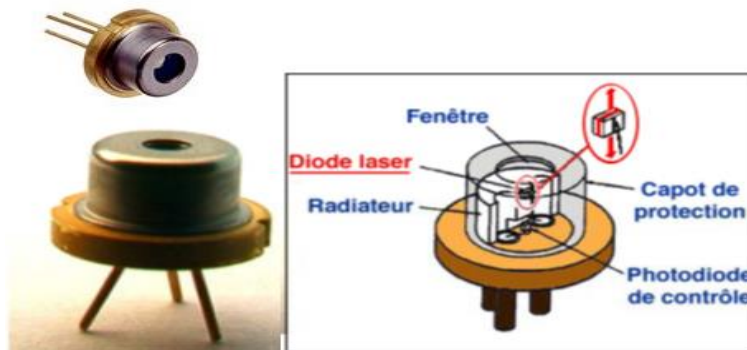
- Cylindre de 3 à 5 cm de diamètre et 30 à 50 cm de longueur.
- Alimentation 2kV continue.
- Constitution des gaz 10% (milieu actif) et 90% He (pompage)
- Faisceau rouge brillant (632.8)

Lasers chimiques : L'amplification est produite par réactions chimiques. Ces réactions excitent les états vibrationnels des atomes ou molécules.

Lasers solides : se présentent en deux catégories qui se diffèrent par la procédure de pompage utilisée:

- a- 1ère catégorie: c'est celle d'un laser solide pompé optiquement.
- b- 2ème catégorie : les lasers à semi-conducteurs donnent l'inversion de population produite au sein de la jonction au moyen de pompage électrique.

3. Diode laser, DL



3.1. Définition

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

La diode laser est un composant essentiel des lecteurs et graveurs de disques optiques. Dans ce cas, elle émet le faisceau lumineux dont la réflexion sur le disque est détectée par une photodiode ou un phototransistor.

Elle trouve également son application dans les dispositifs électroniques de mesure de distance, de vitesse, de guidage et de pointage précis.

3.2. Principe de fonctionnement :

Comme tout laser, une diode laser fonctionne à l'aide d'un milieu amplificateur, d'une structure résonante et d'un processus de pompage (courant électrique).

Structure de base

Une diode laser est une jonction de semi-conducteurs. Elle possède trois zones caractéristiques : une couche de confinement de type N, une zone active et une couche de confinement de type P. Les couches de confinement permettent d'optimiser l'utilisation du courant dans la diode et d'augmenter le rendement. La zone active est formée d'un guide d'onde encadrant le lieu de l'émission laser. Lorsque cette diode est polarisée en direct, elle laisse passer un fort courant qui peuple la bande de conduction et peut réaliser l'inversion de population. En réalité, une couche intermédiaire d'indice optique supérieur joue le rôle de guide optique, comme dans une fibre. Les extrémités sont clivées et donnent des faces parfaitement planes jouant le rôle de miroirs semi-réfléchissants, créant la cavité résonante. Le dioptre entre le semi-conducteur d'indice 3.5 environ et l'air d'indice 1 possède ainsi un coefficient de réflexion de 30%. Ce coefficient peut être diminué sur les deux côtés par l'application d'un revêtement anti-réfléchissant afin d'obtenir une puissance de sortie plus importante.

Une diode Laser a la forme d'un parallélépipède rectangle 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.

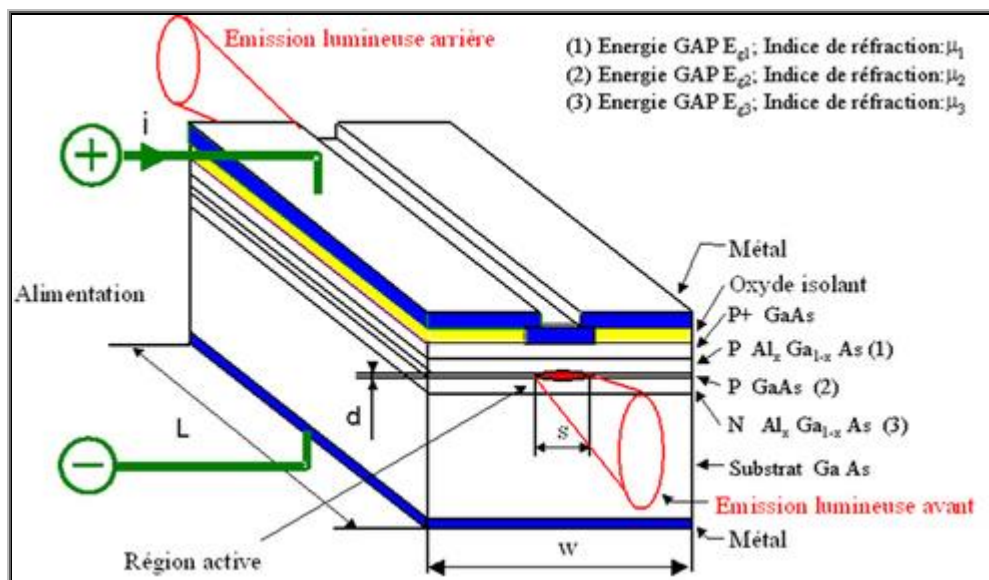


Figure 3.7 : Diode LASER type DH-OS ("Double Hétérostructure Oxyde-isolée Stripe")

Afin d'obtenir une émission Laser continue et puissante à température ambiante, la jonction de semi-conducteurs sera une structure complexe telle que la double hétérojonction (DH) de la figure précédente. Cette dernière présente l'avantage de confiner les porteurs par une barrière

de potentiel électrostatique dans un volume très réduit $V = L \cdot d \cdot s$ appelé zone active. Ce confinement permet d'obtenir pour un faible courant d'injection, une densité de porteurs élevée et par conséquent un gain élevé. Pour fixer l'échelle de taille de la zone active, il faut savoir que $L \sim 100$ à $500 \mu\text{m}$, $d \sim 0,1$ à $0,5 \mu\text{m}$, $s \sim 2$ à $5 \mu\text{m}$.

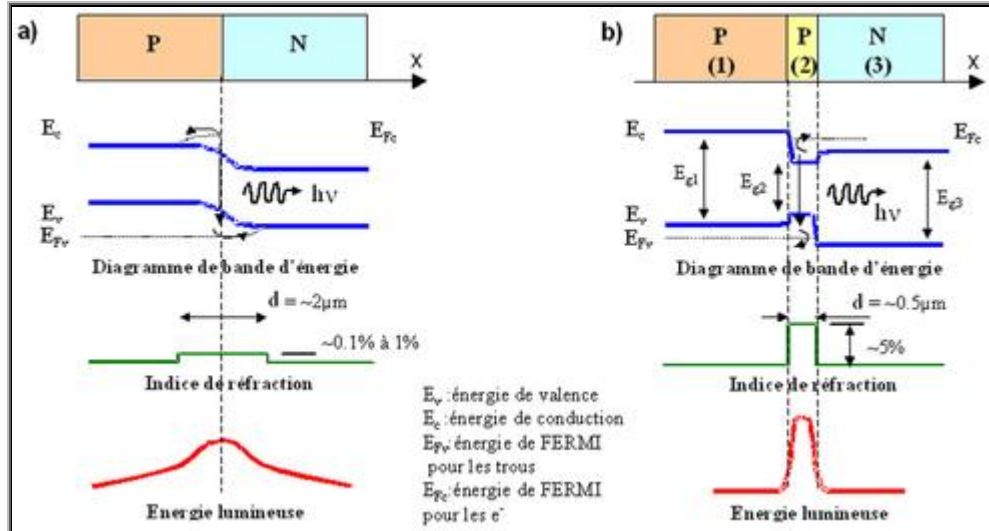


Figure 3.8 : Jonctions émettrices. a) Homojonction. b) Double-hétérojonction.

Retenons qu'une diode Laser monomode est un émetteur de lumière intense (qqm mW à qqm 100 mW), quasi monochromatique (une seule longueur d'onde) et de grande cohérence temporelle (interférences avec différence de chemin optique de plusieurs mètres).

Inversion de population

La région de type P est très dopée pour qu'à l'équilibre, le niveau de Fermi soit dans la bande de valence. La région de type N est très dopée pour que la densité d'électrons injectés dans la région du type P, sous l'action de la tension de polarisation, soit tel que le pseudo niveau de Fermi des électrons soit dans la bande de conduction.

La condition d'inversion de population s'écrit alors :

- A l'équilibre (sans polarisation), les niveaux de Fermi des deux semi-conducteurs s'alignent. Le diagramme énergétique est représenté par la figure suivante.

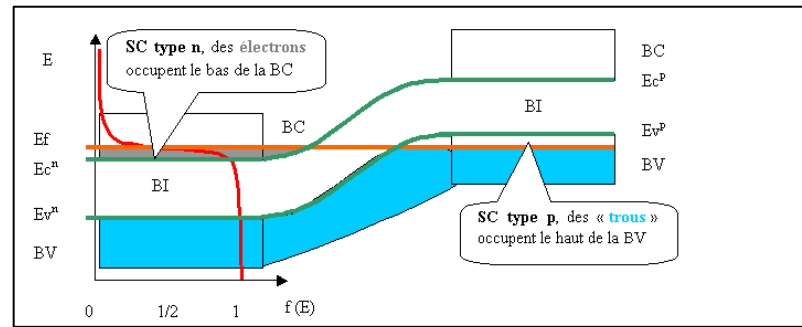


Figure 3.9 : Jonction p-n à l'équilibre

- On place cette jonction hors équilibre par polarisation directe. La ddp qui résulte décale les niveaux de Fermi et deviennent des quasi niveaux de Fermi. Les électrons du semi conducteur de type N sont attirés par les trous du semi conducteur de type P avec lesquels ils se recombinent. Cette recombinaison correspond à une désexcitation des électrons du niveau E2 vers le niveau E1. Cette désexcitation s'accompagne par l'émission d'un photon de longueur d'onde correspondant à l'énergie du gap : Il y a effet laser.

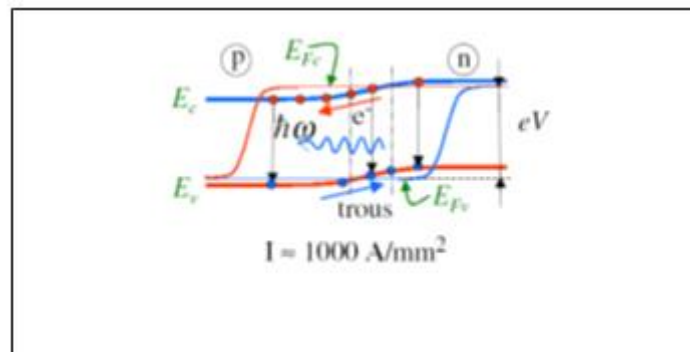


Figure 3.10 : Diagramme de bande d'une homojonction

Oscillation dans la cavité laser

La structure de base d'une diode laser GaAs à homojonction :

- Les semi conducteurs de type N et P sont à base de GaAs d'indice de réfraction $n=3.5$; placés dans l'air d'indice de réfraction $n=1$. Les miroirs sont inutiles car le faisceau laser émis par les milieux actifs est réfléchi par les parois du cristal du semi conducteur. Cette réflexion est due à la différence d'indices entre les deux milieux (loi de Snell Descartes).
- L'oscillation est ainsi obtenue dans la cavité. D'autre part, un courant de polarisation important est nécessaire (pour une homojonction, un courant minimum de l'ordre de 50 000 A/Cm est nécessaire. C'est pour cette raison que le premier laser à semi conducteur fonctionne en régime pulsé).

3.3. Caractéristiques

Ses caractéristiques sont proches de celles des lasers conventionnels. La plus faible longueur de la cavité, quelques centaines de micromètres au lieu de quelques dizaine de centimètres, entraîne une plus grande divergence du faisceau et des raies d'émission plus éloignées les unes des autres, ce qui facilite la création de lasers monomodes (une seule raie d'émission) par filtrage.

Selon la puissance et la longueur d'onde d'émission de la diode laser, celle-ci peut représenter un réel danger pour la vue et provoquer des brûlures irréparables de la rétine.

a- Modes de propagations:

Dans une cavité laser, les ondes stationnaires s'établissent donnant naissance à deux types de modes :

- * Les modes longitudinaux, qui s'établissent le long de la cavité;
- * Les modes latéraux qui s'établissent dans le plan transversal.

b- Distribution spatiale (diagramme de rayonnement):

- * Le rayonnement de l'onde optique issue des ouvertures réalisées dans le miroir conserve les modes longitudinaux.
- * Lors de l'étude du diagramme de rayonnement, on s'intéresse à deux plans: le plan contenant la jonction (plan parallèle) et plan perpendiculaire à la jonction.

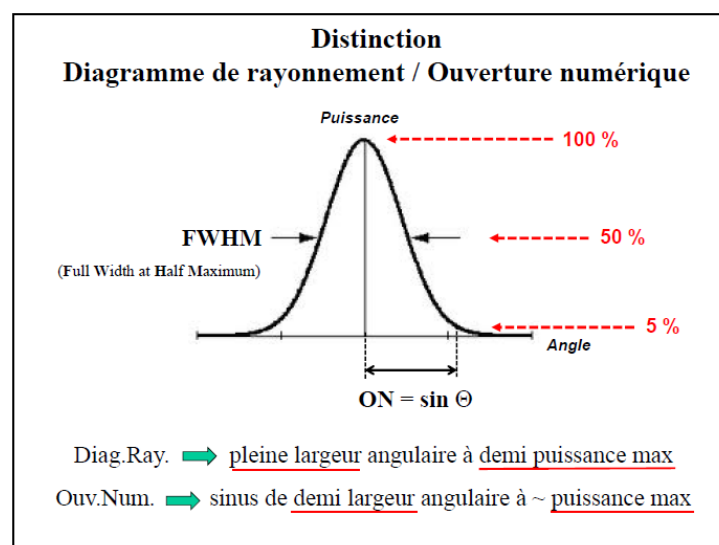


Figure 3.11 : Diagramme de rayonnement

* L'évolution de la puissance optique fournie par une DL en fonction de son courant de polarisation est représentée sur la figure suivante:

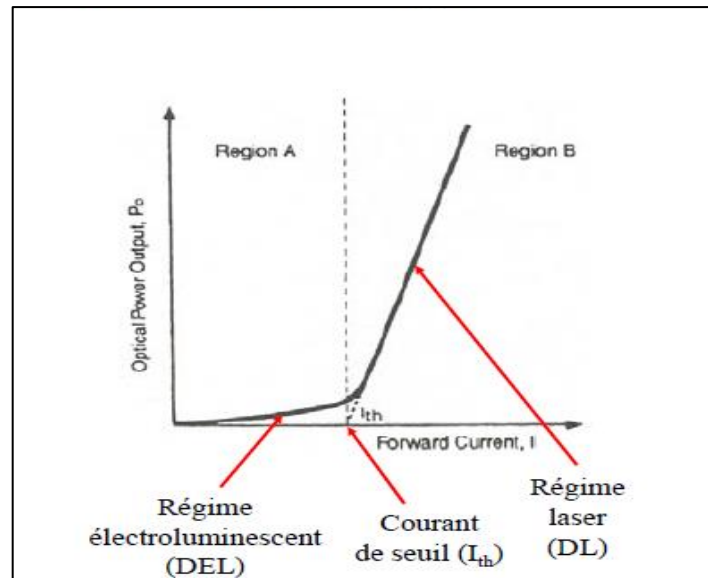


Figure 3.12 : Caractéristique d'une diode laser ($P(I)$)

* L'augmentation de la température entraîne une modification du courant de polarisation. La figure suivante illustre ce phénomène:

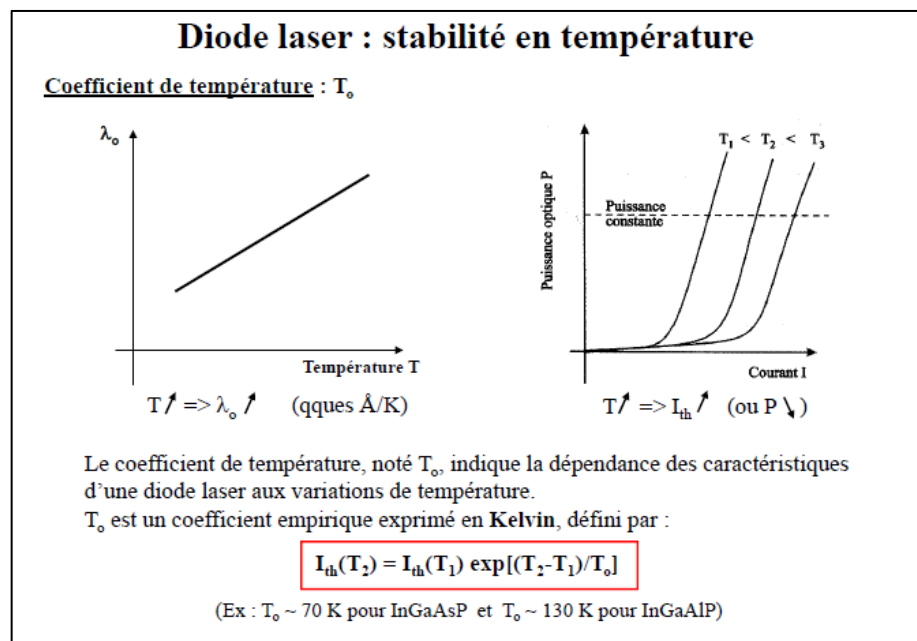


Figure 3.13 : Exemple d'évolution de la caractéristique d'une diode laser avec la température

c- Rendement de la diode laser:

* La pente de la courbe de puissance en fonction du courant de polarisation, appelée efficacité différentielle , est liée au rendement quantique par la formule suivante :

- Efficacité différentielle :
- Le rendement quantique :
- Le rendement quantique total ou rendement externe :
- Rendement en puissance :

d- Spectre de puissance :

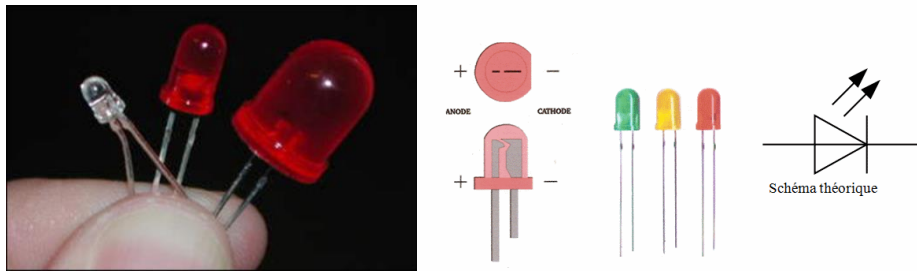
* La cavité d'existence dans la DL assure la discrétisation des modes de résonance. Cette résonance est obtenue par des longueurs déterminées de la cavité. D'autre part, l'oscillation n'est obtenue que pour un courant de polarisation supérieur au courant de seuil.

- La condition d'oscillation est :
- La distance entre deux modes successifs est :

3.4. Applications

Ces diodes laser sont largement utilisées dans les télécommunications car ils sont facilement modulées et deviennent des sources lumineuses couplées pour des fibres optiques de communication. Elles sont utilisées dans divers instruments de mesure, par exemple, les télémètres. Un autre usage est en lecteur de code-barres. Lasers visibles, généralement de couleur rouge, mais aussi verte, sont fréquentes, comme les pointeurs laser. Les diodes laser de basses ainsi que de hautes puissances sont largement utilisées dans l'industrie de l'imprimerie en tant que sources de lumière pour la numérisation d'images (entrée) ainsi que pour la fabrication de plaque d'impression de très haute vitesse et haute résolution (sortie). Des diodes laser infrarouge et rouge sont courantes dans les lecteurs de CD, CD-ROM et la technologie DVD. Diodes lasers de couleur violette sont utilisées en HD DVD et la technologie Blu-ray. Des diodes laser de haute puissance sont utilisées dans des applications industrielles telles que le traitement thermique, le plaquage, le soudage et pour le pompage d'autres lasers.

4. Diode électroluminescente



4.1. Définition

Diode électroluminescente (DEL ou LED pour Light Emetting Diode) : est un composant électronique permettant de transformer un signal électrique en énergie lumineuse proportionnelle. L'électroluminescence est l'émission de lumière consécutive à l'excitation électrique d'un matériau.

Cette excitation électrique est obtenue en polarisant la jonction directe. Il en résulte l'injection de porteurs en excès de part et d'autre de la jonction, et, si le matériau a été convenablement choisi ou dopé, la recombinaison directe ou indirecte de ces porteurs en excès donne lieu à une émission de photons.

4.2. Principe de fonctionnement

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

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

Si l'on applique une tension positive du côté de la région P, cette tension attire les électrons minoritaires et laisse un plus grand nombre d'atomes porteurs d'un trou. Dans le même temps, les électrons, côté N, sont poussés par ceux venant du pôle négatif. A la jonction, soit des électrons tombent dans un trou, en émettant des photons, soit continuent leur course au travers de l'autre semi-conducteur de type (P) jusqu'à atteindre l'électrode opposée (+).

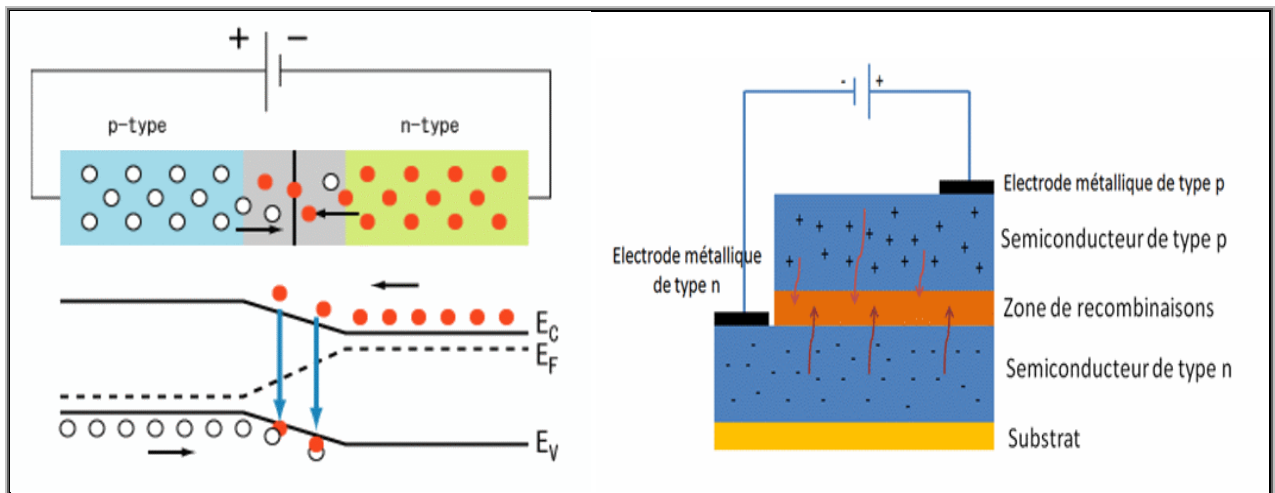


Figure 3.14 : Principe de fonctionnement d'une LED

4.3. Caractéristiques

4.3.1. Spectre d'émission

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

Les photons sont émis indépendamment les uns des autres, ce qui donne une lumière non cohérente (non uniforme) et non monochromatique (pas une seule longueur d'onde), la réponse est sensiblement Gaussienne avec un maximum P_{pic} (valeur voisine de λ_0 qui correspond au gap du matériau).

Exemple : pour une longueur d'onde à intensité maximale égale à 520 nm, la longueur d'onde à intensité moitié pourra être comprise entre 505 nm à 535 nm (soit une largeur spectrale de 30 nanomètres).

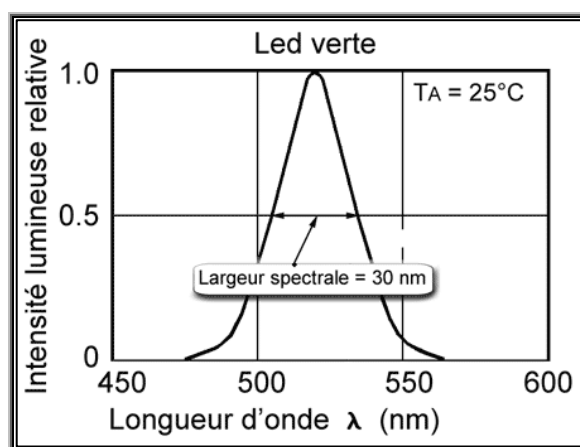


Figure 3.15 : Spectre d'émission d'une LED

4.3.2. Rendement d'une LED

a- Rendement quantique interne (ou rendement de luminescence)

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

$r_r = \frac{\Delta n}{\tau_r}$: Taux de recombinaisons radiatives.

$r_{nr} = \frac{\Delta n}{\tau_{nr}}$: Taux de recombinaisons non radiatives.

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

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

Pour les semiconducteurs à gap direct $\eta_i \sim 100\%$

b- Rendement optique

$$\eta_0 = \frac{\text{nombre de photons émis}}{\text{Nombre de photons créés}}$$

c- Perte de Fresnel

Le passage de lumière d'un niveau vers un autre d'indices différents se traduit par des pertes à l'interface, appelé perte de Fresnel. Si R est le coefficient de réflexion de l'onde et pour une incidence normale, on a :

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

Exemple : $n_{sc} = 3.4$

$$\text{Le rendement de Fresnel : } R = \left(\frac{3.4-1}{3.4+1} \right)^2 = 0.3 \Rightarrow T = 1 - R = \frac{4n_{sc}}{(n_{sc}+1)^2} = 0.7$$

T : Le coefficient de transmission

d- Rendement quantique externe

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

$$\eta_e = \frac{\text{nombre de photons émis de la LED}}{\text{nombre des électrons injectés dans la LED}}$$

Soit I le courant traversant la LED : $I = \text{nombre} \cdot q$

La puissance lumineuse émise par la diode est : $\Phi = \text{nombre de photons} \cdot E_g(W)$

$$\text{Avec : } E_g = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \eta_e = \frac{\Phi \lambda q}{hc I} = \frac{\Phi q \lambda}{I hc} \text{ ou } \eta_e = \frac{\Phi}{I} \cdot \frac{\lambda(mm)}{1240}$$

Or $\eta_0 = \frac{\text{Nombre de photon émis}}{\text{Nombre de photons créés}}$ et $\eta_i = \frac{\text{Nombre de photons créés}}{\text{Nombre de porteurs dans la jonction}}$

Donc $\eta_e = \eta_i \cdot \eta_0$

e. Rendement de l'angle critique

Le passage de la lumière d'un milieu à un autre est lié à une loi de réfraction définissant un angle limite qui, une fois dépassé, se traduit par réflexion (transmission) totale dans le milieu (P) (face émettrice).

La loi de Snell-Descart s'écrit : $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

L'angle critique est défini lorsque : $\theta_2 = 90^\circ \Rightarrow n_1 \sin \theta_c = n_2$

$$\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow n_2 < n_1$$

On appelle rendement de l'angle critique : $\eta_{\text{Crit}} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$

Exemple : $n_1 = 3.4$, $n_2 = 1$; Calculer l'angle critique θ_c et η_c :

On trouve, $\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} = 17^\circ.10$ et $\eta_{\text{Crit}} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 = 0.086 = 8.6\%$

f. Rendement d'absorption :

Durant son parcours dans la région (P), le flux de rayonnement issu de la jonction est absorbé selon une loi exponentielle liée à la longueur parcourue dans le matériau. Le rendement d'absorption est donné par : $\eta_a = e^{-\alpha x}$

α : Coefficient d'absorption et x : Distance parcourue pour sortir.

Remarque : On utilise les matériaux très faiblement absorbant

Le rendement optique total sera : $\eta_o = \eta_a \cdot \eta_{\text{Crit}} \cdot T$

g. Rendement de couplage η_c

Dans une chaîne de télécommunication : LED-Fibre optique-Photodiode, le système subit des pertes de lumière par couplage de la LED avec la fibre optique, ces pertes sont évaluées par le rapport du nombre de photons transmis dans la fibre au nombre de photons sortant de la LED, c'est le rendement par couplage :

$$\eta_c = \frac{\text{Nombre de photons dans la Fibre optique}}{\text{Nombre de photons sortant de la LED}}$$

h. Rendement global ou rendement de puissance η_g

$$\eta_g = \frac{\text{Puissance optique émise}}{\text{Puissance électrique absorbée}}$$

Puissance optique émise : $W_{op} = N_{ph} \cdot h\nu$

Puissance électrique absorbée : $W_{el} = IV = N_{el} \cdot e \cdot V$ D'où : $\eta_g = \frac{W_{op}}{W_{el}} = \frac{N_{ph} \cdot h\nu}{N_{el} \cdot e \cdot V}$ ou $\eta_g = \frac{h\nu}{e \cdot V} \eta_{ext}$

4.3.3. Caractéristique de la lumière émise par une LED

P(I) donne la caractéristique de la puissance émise en fonction du courant direct de la polarisation de la diode.

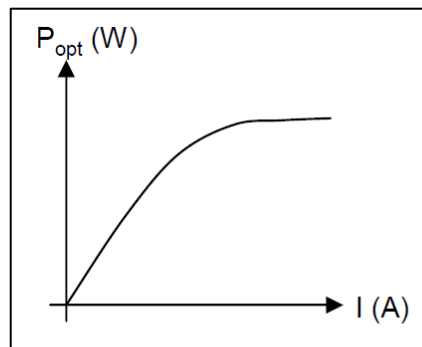


Figure 3. 16 : Réponse d'une LED en fonction du courant de polarisation

La puissance est linéaire à faible courant $I < 100\text{mA}$.

A fort courant où l'effet Joule devient important et la recombinaison Auger devient prédominante, on a échauffement du semi-conducteur et saturation de la puissance émise.

Remarque : pour $I < I_s$, la diode laser est équivalente à une DEL.

4.4. Avantages et inconvénients

4.4.1. Avantages

- Facilité de montage sur un circuit imprimé, traditionnel ou CMS ;
- Excellente résistance mécanique (chocs, écrasement, vibrations) ;
- Faible à très faible consommation électrique (quelques dizaines de milliwatts) pour un très bon rendement ;
- Durée de vie beaucoup plus longue qu'une lampe à incandescence classique (50 000 à 100 000 heures contre au maximum un millier d'heures pour les lampes à incandescence) ;
- Taille beaucoup plus petite que les lampes classiques. En assemblant plusieurs LED, on peut réaliser des éclairages avec des formes novatrices ;
- Fonctionnement en très basse tension ;

- Elles s'allument et s'éteignent en un temps très court, ce qui permet l'utilisation en transmission de signaux à courte distance (optocoupleurs) ou longue (fibres optiques).
- Vu leur puissance, les LED classiques 5 mm ne chauffent presque pas et ne brûlent pas les doigts. Pour les montages de puissance supérieure à 1 W, il faut prévoir une dissipation de la chaleur sans quoi la diode sera fortement endommagée voire détruite du fait de l'échauffement. En effet, une diode électroluminescente convertit environ 20 % de l'énergie électrique en lumière, le reste étant dégagé sous forme de chaleur.

4.4.2. Inconvénients

- Désavantages propres aux LED de forte puissance :
 - Le rendement lumineux est plus faible.
 - Les LED bleues ainsi que les blanches contiennent un spectre bleu de forte intensité dangereux pour la rétine si leur rayonnement entre dans le champ de vision, même périphérique. Le problème se pose par exemple avec les flashes à base de LED.
- La lumière bleue, même de faible intensité, présente dans une chambre à coucher pendant la nuit (par exemple, veille d'un appareil ou radio-réveil) perturbe le cycle du sommeil en diminuant la synthèse de la mélatonine.
- La LED étant un semi-conducteur, elle est affectée par la température : plus elle chauffe, plus sa tension directe de jonction décroît, et son rendement lumineux se dégrade. Cela pose des problèmes de fiabilité si une mise en œuvre thermique adéquate n'est pas réalisée (pour les modèles de puissance).

4.5. Applications de la diode électroluminescente

Ce composant de performances limitées est cependant très utile grâce à son coût faible, bruit très bas et son excellente fiabilité.

Les trois principales fonctions de la LED sont : l'affichage, les photo-coupleurs, télécommunication par fibres optiques.

- Dans le 1er cas, la LED émet dans le visible avec une couleur bien déterminée et fixée par le Gap du matériau utilisé.
- Dans le 2ème cas du photocoupleur, la diode est montée en regard d'un phototransistor en silicium. Les deux composants sont entièrement isolés l'un de l'autre.
- Dans le 3ème cas, télécom par fibre :
 - a. LED pour le visible : Le semi-conducteur dont le Gap est supérieur à 1.8eV ($\lambda < 0.7\mu\text{m}$), sont particulièrement intéressante pour la réalisation des LED qui émettent dans le visible.
 - b. LED pour l'infrarouge : Les diodes les plus courantes sont à base de GaAs; $\lambda_0 = 1\mu\text{m}$

Les longueurs d'ondes intéressantes en télécommunication sont : $\lambda = 1.3\mu\text{m}$; $\lambda = 1.55\mu\text{m}$

Chapitre 4

Récepteurs de lumières (Photo détecteurs)

1. Introduction

Tout comme il existe plusieurs méthodes pour envoyer l'information sur le signal lumineux, il existe différentes techniques pour la récupérer : les photodétecteurs sont des composants susceptibles de convertir des signaux lumineux en signaux électriques c'est l'effet photorécepteur. Quand on crée une paire électron-trou dans un semi-conducteur, si ces porteurs libres sont collectés avant de se recombiner, un photocourant va s'établir. On distingue deux grandes catégories de photodétecteurs suivant la nature du champ électrique qui assure la séparation des charges des paires électron – trou photogénérées:

- Photoconducteurs : qui sont constitués d'un simple barreau de semi-conducteur sur lequel sont disposés deux contacts ohmiques, où le champ électrique permettant la collecte des photoporteurs est fourni par l'application d'une tension de polarisation entre les contacts d'extrémités.
- Photovoltaïques : qui utilisent le champ électrique interne d'une jonction PN ou Schottky (type métal-semiconducteur) pour assurer cette séparation des porteurs.

2. Paramètres de fonctionnement des photodétecteurs

2.1. Coefficient d'absorption

Soit un flux de photons Φ_t et si R est le coefficient de réflexion du semi-conducteur. Le flux du photon entrant dans les échantillons est donné par : $\Phi_t = \Phi_i(1 - R) = \Phi_i T$

T : Coefficient de transmission et $R = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$

On définit le coefficient d'absorption α du matériau par : $\alpha = \frac{-1}{\Phi} \frac{d\Phi}{dx} \quad [Cm^{-1}]$

Si on considère Φ_t à une distance x de la surface du semiconducteur, $\Phi(x) = \Phi_t e^{-\alpha x}$

En remplaçant Φ_t , on obtient : $\Phi(x) = \Phi_i(1 - R)e^{-\alpha x}$

R compris entre 0.25 et 0.35 dans le S_i on a absorption si $\lambda < 1.1\mu m$

Dans le $GaAs$ on a absorption si $\lambda < 0.9\mu m$.

2.2. Rendement quantique interne :

C'est un paramètre qui mesure le nombre de paires (électron-trou) photo générées au nombre de photons incidents :

$$\eta_{int} = \frac{\text{Nombre des électrons}}{\text{Nombre des photons}} = \frac{I_{ph}/q}{\Phi_i/h\nu}$$

I_{ph} : Photocourant et Φ_i : Flux incident en Watt

2.3. Sensibilité spectrale

La sensibilité spectrale est définie par : $S(\lambda) = \frac{\text{Courant électrique } (I_p) \text{ fourni par le détecteur}}{\text{Flux énergétique } (\Phi_i) \text{ que reçoit ce détecteur}}$

Ou bien $S(\lambda) = \frac{I_p(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)} [A/W]$

$$S(\lambda) = \frac{\text{Nombre des électrons} \cdot q}{\text{Nombre de photons} \cdot h\nu} \cdot \lambda = 0.8\eta_{int} \cdot \lambda(\mu m)$$

La sensibilité spectrale normalisée est donnée par : $R(\lambda) = \frac{S(\lambda)}{S(\lambda_p)}$

λ_p : La largeur d'onde pic.

2.4. Réponse temporelle et bande passante

La réponse d'un photodétecteur peut être limitée par des effets capacitifs, par le piégeage des porteurs ou par la vitesse limite de saturation des porteurs dans le semiconducteur. La réponse temporelle d'un photodétecteur est caractérisée par le temps de déclin (ou temps de montée), qui est par définition le temps nécessaire au photodétecteur pour tomber de 90% à 10% de son maximum (ou pour monter de 10% à 90% de celui-ci).

Différents types de photodétecteurs

3. Photorésistance ou cellule photoconductrice (LDR)

On peut également la nommer résistance photo-dépendante (light dependent resistor (LDR)) ou cellule photoconductrice.

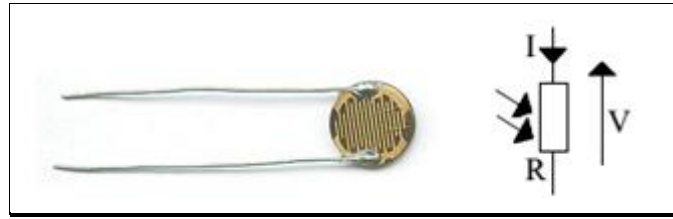


Figure 4. 1 : Symbole d'une photorésistance

Ces composants passifs exploitent le principe de la photoconduction. La photoconduction est un effet photoélectrique qui se manifeste par la diminution de la résistivité d'un matériau irradié : la libération dans le matériau de charges électriques (paires électron-trou) sous l'influence du rayonnement provoque une diminution de sa résistivité.

Remarques :

- Dans l'obscurité la valeur de la résistance est supérieure à 10 MW et peut chuter à 75W pour un éclairage intense.
- Le temps de réponse étant relativement important (ordre de grandeur : 20 à 100 ms), ce type de composant est peu intéressant pour des communications.

3.1. Principe

Une photorésistance est 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. La compréhension de ce phénomène entre dans le cadre de la théorie des bandes. 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, cette relation peut être considérée comme linéaire sur une plage d'utilisation limitée.

Un cristal de semi-conducteur à température basse contient peu d'électrons libres et sa conductivité est très faible, et si le semiconducteur est soumis à une radiation lumineuse, l'énergie apportée par les photons peut suffire à libérer certains électrons. Plus le flux lumineux sera intense, plus le nombre d'électrons disponibles pour assurer la conduction sera grand. Ainsi que la photorésistance(LDR) est inversement proportionnelle à la lumière reçue.

$$J_{ph} = \sigma \cdot E$$

Où σ : La conductivité et μ : La mobilité

$$\sigma = q(\mu_n + \mu_p) \cdot \delta n \quad \delta n = \delta p$$

$$E = \frac{V}{L}$$

$$J_{ph} = q \cdot \mu_n \cdot \delta n \cdot \frac{V}{L}$$

$$I = J_{ph} \cdot S = q \cdot \mu_n \cdot \delta n \cdot \frac{V}{L} \cdot h \cdot l$$

3.2. Caractéristiques des photorésistances

Loi de la variation de la résistance R

$$R = \frac{R_0}{R_p}$$

R_0 : Résistance de la cellule dans l'obscurité;

R_p : Résistance déterminée par l'effet photoélectrique du flux incident;

$$R_p = aE^{-\gamma}$$

E : Éclairement (flux incident)

a : Constante dépendant du matériau et de la température

γ : Coefficient compris, en général, entre 0.5 et 1.

a. Gain en photocourant

$$\text{Gain} = \frac{N_e - \text{Nombre des électrons}}{N_{ph} - \text{Nombre des photons}}$$

Avec $N_e = \frac{I_{ph}}{q}$ et $N_{ph} = G \cdot V = G \cdot L \cdot l \cdot h$ V : Volume de la structure.

La génération en régime stationnaire : $G = \frac{\Delta n}{\tau} = R$

τ : La durée de vie des porteurs en excès.

En remplaçant dans l'expression du gain : $G = \frac{q \cdot \mu_n \cdot \delta n \cdot \frac{V}{L} \cdot h \cdot l}{q \cdot \frac{\delta n}{\tau} \cdot h \cdot l \cdot L}$

Le gain devient : $G = \frac{\mu_n \cdot V \cdot \tau}{L^2}$

On a aussi : $E = \frac{V}{L}$ et $G = \frac{\mu_n \cdot E \cdot \tau}{L} = \frac{v_n \cdot \tau}{L}$ avec $v_n = \mu_n \cdot E$: La vitesse de propagation des électrons

$\frac{L}{v_n} = t_t$: Temps de transition

L'expression du gain sera : $G = \frac{\tau}{t_t}$

Remarque :

Il faut que la durée de vie soit très grande pour que les porteurs puissent traverser toute la résistance.

b. Sensibilité

$$S = \frac{I_{ph}}{P_i} = \frac{I_{ph}}{N_{ph} \cdot h\nu} [A/W]$$

P_i : Puissance incidente d'éclairement

4. Photodiode



4.1. Principe de fonctionnement

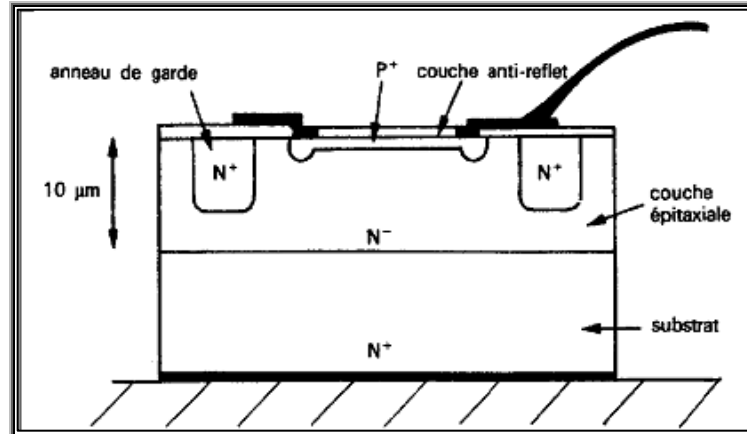


Figure 4.2 : Représentation d'une photodiode

Une photodiode est une jonction p-n ou une structure PIN. Quand un photon d'une énergie suffisante frappe la diode, il excite un électron, créant ainsi un électron libre (et un trou d'électrons chargé positivement). Ce mécanisme est également connu comme l'effet photoélectrique interne. Si l'absorption a lieu dans la région d'appauvrissement de la jonction, ou une longueur de diffusion de distance de celle-ci, ces transporteurs sont entraînés à partir de la jonction de la zone intégrée de la région d'appauvrissement. Ainsi trous se déplacer vers l'anode, les électrons et vers la cathode, et un courant photoélectrique est produit. Ce

photocourant est la somme des deux du courant d'obscurité (sans lumière) et le courant de lumière, de sorte que le courant d'obscurité doit être réduit au minimum pour améliorer la sensibilité du dispositif.

4.2. Caractéristiques électriques

Une photodiode peut être représentée par une source de courant I_{ph} (dépendant de l'éclairement), en parallèle avec la capacité de jonction C_j et une résistance de shunt R_{sh} d'une valeur élevée (caractérisant la fuite de courant), l'ensemble étant en série avec une résistance interne R_s :

- Résistance de shunt : la résistance de shunt d'une photodiode idéale est infinie. En réalité cette résistance est comprise entre 100 k Ω et 1 G Ω selon la qualité de la photodiode. Cette résistance est utilisée pour calculer le courant de fuite (ou bruit) en mode photovoltaïque, c'est-à-dire sans polarisation de la photodiode.
- Capacité de jonction : cette capacité est due à la zone de charge ; elle est inversement proportionnelle à la largeur de charge d'espace (W) : . Où A est la surface de coupe de la photodiode. W est proportionnel à la polarisation inverse et la capacité diminue si la polarisation augmente. Cette capacité oscille autour de 100 pF pour les faibles polarisations à quelques dizaines de pF pour les polarisations élevées.
- Résistance interne : cette résistance est essentiellement due à la résistance du substrat et aux résistances de contact. R_s peut varier entre 10 et 500 Ω selon la surface de la photodiode.

5. Phototransistor



La jonction base collecteur d'un transistor NPN fonctionnant en linéaire est polarisé en inverse. Si on éclaire cette jonction (qui devient une photodiode), le courant collecteur du transistor devient proportionnel à l'éclairement, tout en intégrant déjà une amplification (qui ne sera pas forcément suffisante). Le temps de réponse (ordre de grandeur : de quelques μs à la centaine de μs) et par contre diminué par rapport à la photodiode. Le courant d'obscurité est aussi important dans le collecteur (quelques centaines de nA)

Certains modèles laissent accès à la base du transistor, ce qui permet de fixer le point de polarisation.

Un phototransistor est un transistor bipolaire dont la base est sensible au rayonnement lumineux ; la base est alors dite flottante puisqu'elle est dépourvue de connexion. Lorsque la base n'est pas éclairée, le transistor est parcouru par le courant de fuite I_{CE0} . L'éclairement de

la base conduit à un photocourant I_{ph} que l'on peut nommer courant de commande du transistor.

Celui-ci apparaît dans la jonction collecteur-base sous la forme : $I_c = \beta I_{ph} + I_{CE0}$

Lorsque la base est éclairée le phototransistor est équivalent à un interrupteur fermé entre l'émetteur et le collecteur et lorsque la base n'est pas éclairée, c'est équivalent à un interrupteur ouvert.

Le courant d'éclairement du phototransistor est le photocourant de la photodiode collecteur-base multiplié par l'amplification β du transistor. Sa réaction photosensible est donc nettement plus élevée que celle d'une photodiode (de 100 à 400 fois plus). Par contre le courant d'obscurité est plus important.

On observe une autre différence entre phototransistor et photodiode : la base du phototransistor est plus épaisse, ce qui entraîne une constante de temps plus importante et, donc une fréquence de coupure plus basse que celle des photodiodes. On peut éventuellement augmenter la fréquence de coupure en diminuant la photosensibilité en connectant la base à l'émetteur.

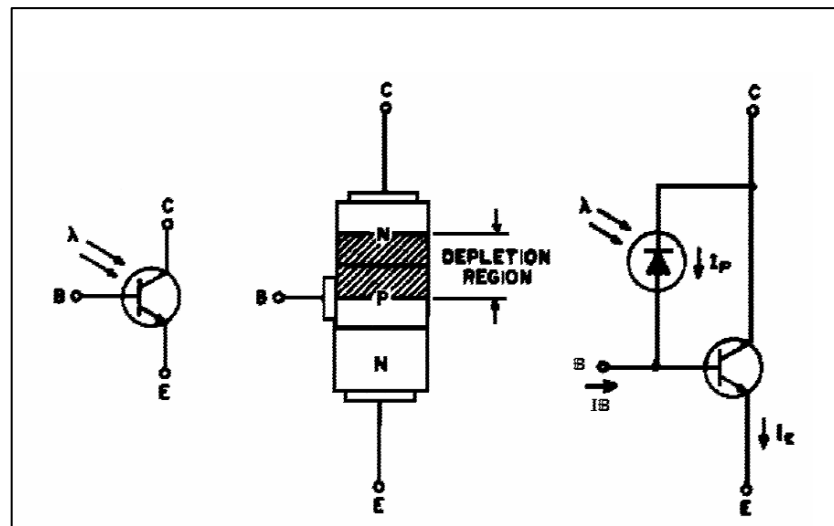


Figure 4.3 : Fonctionnement d'un phototransistor

6. Cellules photovoltaïques

Un couple photovoltaïque est constitué par un matériau semi conducteur (Si ou Ge) déposé sur un métal (Fe). La face exposée à la lumière présente une très fine couche métallique (Pt) et est transparente.

On est alors en présence d'une couche dissymétrique (Pt-Si-Fe). Le flux de photons donnent lieu à une libération d'électrons et à une formation de trous positifs dans le semi conducteur. Lorsque l'on relie les deux pôles métalliques, il apparaît un courant électrique dû à la différence de potentiel entre les métaux.

Fonctionnement d'une photopile au silicium:

Dans une photopile, les atomes de silicium sont placés dans un champ électrique interne entre deux métaux (dopants). Classiquement, les électrons tournent autour des noyaux. Lorsqu'un photon frappe un atome de silicium, l'électron sur une orbite de basse énergie est excité et passe sur un niveau d'énergie supérieur. Il est alors mis en mouvement par le champ électrique interne. Le circuit étant fermé, le flux électronique donne de l'électricité. Les électrons qui ont perdu leur énergie, en la fournissant à l'utilisateur, sont réinjectés dans le circuit. Cependant, une contrainte trop importante (choc mécanique, rayons cosmiques, atomes étrangers...) peut dégrader les orbites électroniques et créer un défaut dans le cristal

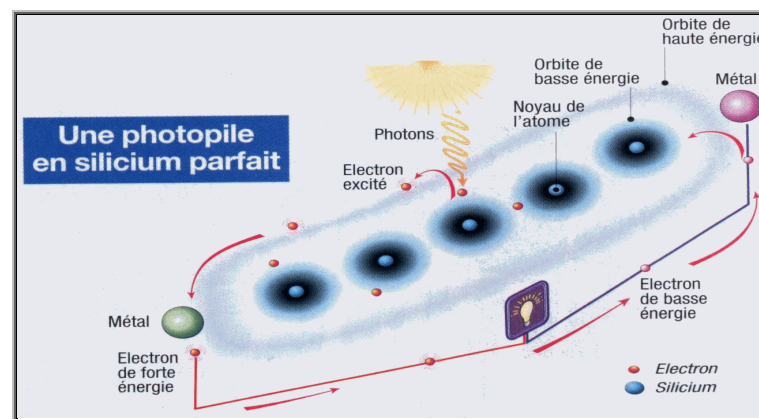


Figure 4.4 : Représentation d'une photopile en silicium parfait

Les niveaux d'énergie des électrons sont perturbés, les orbites électroniques déformées. Si un électron rencontre sur son passage l'atome défectueux, l'électron est happé par son orbite altérée, perd son état excité créant un court-circuit. Des pièges à électrons s'installent ainsi et perturbent la génération et la conduction d'électricité. Ce défaut est souvent irréparable dans une telle structure.

7. Afficheurs à cristaux liquides (LCD: Liquid Crystal Display)

En 1888, l'autrichien Friedrich Reinitzer et son collègue Lehmann qui étudiaient les cristaux de benzoate de cholestérol, extraits de calculs biliaires, ont découvert qu'ils possédaient l'aspect caractéristique des cristaux lorsqu'on les observe sous lumière polarisée mais qu'ils coulaient comme des liquides. De là est né le nom de « cristal liquide » en 1900. Aujourd'hui, ils trouvent leur principale application dans les afficheurs à cristaux liquides.

7.1. Propriétés physico-chimiques

7.1.1. Définition de l'état de cristal liquide

Les cristaux liquides sont caractérisés par un état intermédiaire entre la phase cristalline, où règne un ordre de position tridimensionnel, et la phase liquide où aucun ordre n'existe. Grâce à leur ordre de position partiel (dimension 1 ou 2), les cristaux liquides possèdent les propriétés d'anisotropie des cristaux tout en ayant un aspect fluide.

La plupart des cristaux liquides sont constitués de molécules organiques qui comportent aux moins deux parties différentes, par leur structure (une partie rigide et une partie flexible) et par leurs propriétés (l'une hydrophile et l'autre hydrophobe). Les molécules, globalement neutres, peuvent posséder un moment dipolaire ce qui permet de les assimiler à un dipôle électrique permanent.

7.1.2. Différentes phases pour les cristaux liquides

Il existe de nombreuses phases pour les cristaux liquides que l'on peut répertorier dans 3 grandes « familles » :

Phase smectique : elle possède un ordre de position à une seule dimension, le matériau étant stratifié en couches pouvant glisser les unes par rapport aux autres. Dans chacune des couches, les molécules possèdent la même orientation.

Phase nématique : c'est la plus employée pour les applications en électronique. Elle est caractérisée par l'absence d'ordre de position. Seul un ordre d'orientation est présent et une direction moyenne est définie.

Phase cholestérique : elle rejoint la phase nématique mais en plus, son vecteur directeur possède une orientation périodique hélicoïdale ce qui est très intéressant pour les applications en électronique.

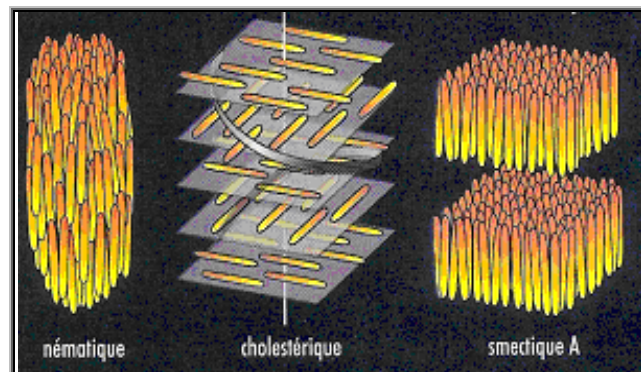


Figure 4.5 : Différentes phases pour les cristaux liquides

7.2. Propriétés optiques

Les cristaux liquides ont des propriétés polarisantes qui sont utilisées pour l'affichage.

7.2.1. Action d'un champ électrique sur les cristaux liquides

Les cristaux liquides ont des structures chimiques variables. Si le barycentre des charges positives de la molécule n'est pas confondu avec celui des charges négatives, la molécule constitue un dipôle électrique permanent. Lorsque ces barycentres sont confondus, on peut appliquer aux molécules un champ électrique, qui du fait de l'agitation, va créer un moment dipolaire induit.

Les cristaux liquides se comportent donc comme des dipôles, permanents ou induits, qui sous l'action d'un champ électrique, sont soumis à un couple de forces et vont s'orienter selon les lignes de ce champ.

Il est possible de les diriger en changeant la direction du champ électrique qu'on leur applique.

7.2.2. Mode nématique en hélice ou nématique twisté

Voici la structure générale d'une cellule à cristaux liquides en mode nématique twisté : les cristaux sont coincés entre deux plaques appelées couches d'ancrage, elles-mêmes comprises entre deux polariseurs croisés. Les deux couches d'ancrage sont des plaques gravées de sillons dont les directions sont perpendiculaires l'une par rapport à l'autre. Au repos, les cristaux qui s'orientent selon ces sillons passe progressivement d'une direction à l'autre, pour former une « hélicoïde » qui tourne d'un quart de tour. Ainsi, si une lumière passe à travers une couche de cristal, celle-ci va suivre la rotation de l'hélicoïde grâce au pouvoir polarisant des cristaux liquides. Les polariseurs étant croisés, c'est-à-dire que les plans de polarisation sont orthogonaux, la lumière peut traverser la cellule. Si on applique un champ électrique aux cristaux liquides, ils vont s'orienter dans la direction du champ. Le deuxième polariseur bloque alors la lumière, puisque les cristaux ne l'auront plus dirigé dans le plan nécessaire à son passage. En sortie, il y a donc extinction de la lumière.

7.3. Structure et principe de fonctionnement d'une cellule LCD

Entre deux plaques de verres collées, une cavité de quelques dizaines microns d'épaisseur est remplie de cristaux liquides dans la phase nématique. Toutes les molécules sont orientées localement dans la même direction. Elles sont parallèles aux surfaces de la cavité, qui leur imposent de plus un axe préférentiel grâce au dépôt d'une couche de polymères qui sont striés dans une direction. Les deux surfaces imposent des directions perpendiculaires de sorte que l'orientation locale des molécules est forcée de tourner de façon continue de 90° à l'intérieur de la cellule. On dit que le liquide nématique est twisté.

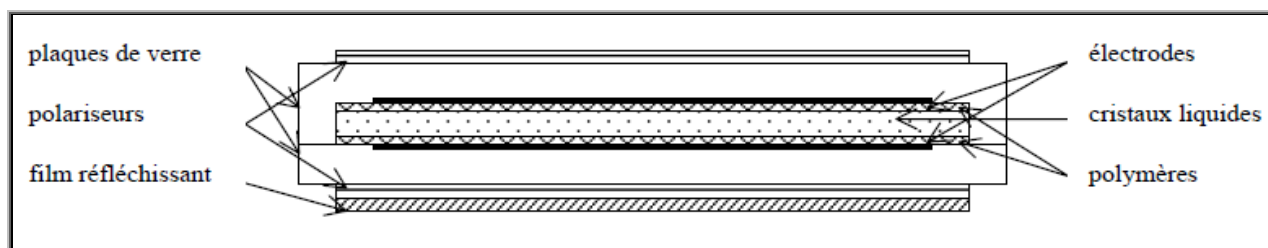


Figure 4.6 : Structure d'une cellule LCD

Un liquide nématique est anisotrope pour la propagation de la lumière, avec l'axe optique parallèle aux molécules (la différence d'indices Δn peut être de l'ordre de 0,3). Lorsque la cellule précédente est placée entre deux polariseurs croisés, chacun étant parallèle à l'orientation du traitement de surface correspondant. La lumière entrante est d'abord polarisée rectilignement suivant l'axe du premier polariseur, puis le plan de polarisation tourne de 90° en suivant l'axe des molécules, se retrouvant ainsi parallèle au second polariseur et la lumière est transmise (Figure 4.7 - a). L'épaisseur d de la cellule doit vérifier la condition $\Delta n d \gg \lambda$. Sous l'application d'un champ électrique perpendiculaire aux plaques et supérieur à une valeur critique, les molécules s'orientent dans la direction du champ, ce phénomène porte le nom de transition de Fredericks. L'axe optique est maintenant le long de l'axe de propagation de la lumière, la polarisation n'est plus modifiée, la lumière voit seulement les deux polariseurs croisés, elle est donc entièrement absorbée (Figure 4.7 - b). Cette transition se manifeste par une chute brutale du coefficient de transmission de la lumière en fonction de la tension appliquée (Figure 4.7).

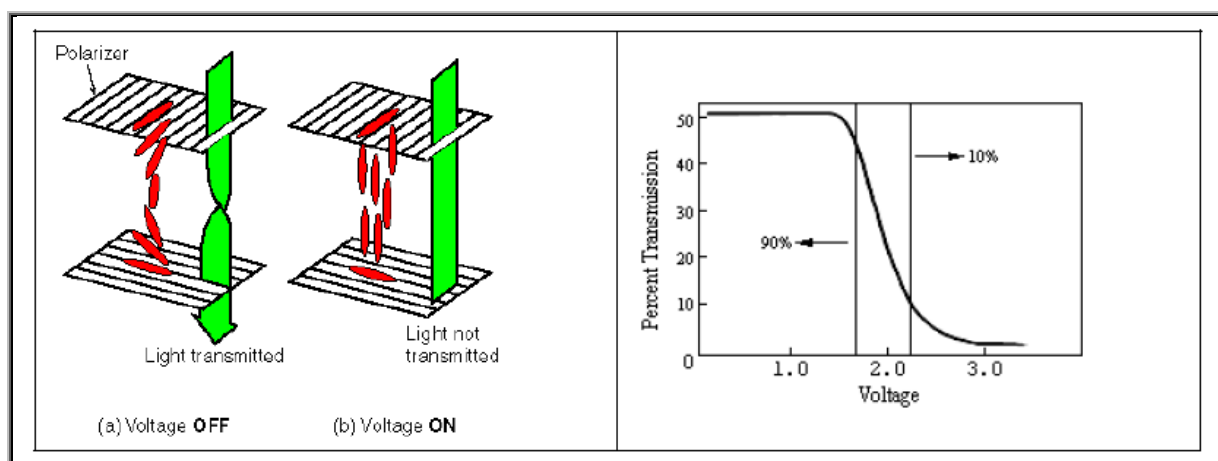


Figure 4.7 : Principe de fonctionnement

C'est ce qui se passe lorsqu'un segment (ou un pixel) d'un écran à cristaux liquides apparaît noir. La tension électrique est appliquée entre deux électrodes métalliques transparentes ayant

la forme du segment. Celles-ci sont gravées sur les parois intérieures de la cavité. Sur une des deux faces, toutes les électrodes sont reliées à une broche commune. Sur l'autre face, chaque électrode est reliée à sa propre broche. Pour noircir un segment, il faut donc appliquer une tension entre sa broche propre et la broche commune.

Un afficheur peut fonctionner en transmission, mais il est souvent utilisé en réflexion en ajoutant au dos de la cellule un film réfléchissant faisant office de miroir. Lorsque la lumière arrive sur un segment où est appliqué un champ électrique, elle est absorbée et n'arrive donc pas jusqu'au miroir, le segment paraît noir. Mais lorsqu'elle arrive sur une zone sans champ électrique, elle peut traverser la cellule, elle se réfléchit sur le miroir et peut de nouveau traverser la cellule, cette zone paraît claire.

8. Photomultiplicateur

Le photomultiplicateur (PM) est un dispositif permettant la détection de photons. Il se présente sous la forme d'un tube électronique. 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, le temps de réponse est de l'ordre de la nanoseconde (10^{-9} seconde).



8.1. Structure et principe de fonctionnement

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

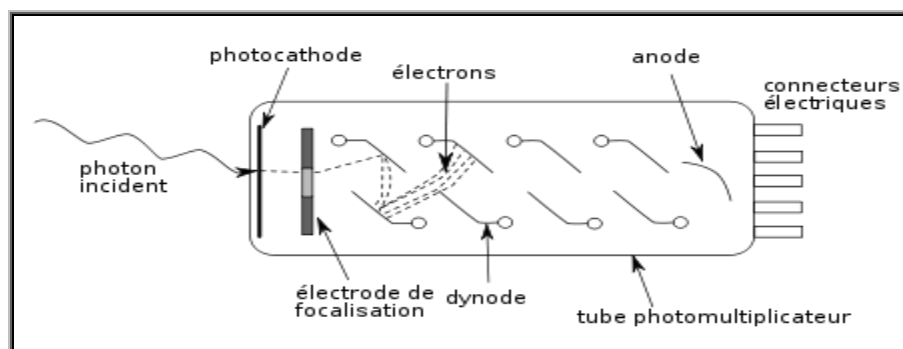


Figure 4.8 : Schéma d'un photomultiplicateur

Les photons incidents traversent une photocathode, 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 » : c'est l'effet photoélectrique. La probabilité pour un photon incident de produire un photoélectron est définie comme l'efficacité quantique, et dépend entre autres des matériaux utilisés pour la fenêtre et le semi-conducteur, ainsi que de la longueur d'onde du photon incident.

Les photoélectrons quittent la photocathode et sont ensuite focalisés par un jeu d'électrodes vers un électromultiplicateur, 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.

Finalement, 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.

9. Capteurs d'images

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 met à profit l'effet photoélectrique^{1,2}, 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.

Deux grandes familles de capteurs sont disponibles : les CCD et les CMOS.

Les CCD existent encore sur les marchés des appareils compacts et les appareils à très haute résolution. Les appareils reflex les plus courants quant à eux l'ont délaissé et utilisent majoritairement des capteurs CMOS.

Chapitre 5

Fibres optiques

1. Introduction



Les fibres optiques sont utilisées surtout dans le domaine de la transmission optique. Ce système requiert l'utilisation de certains composants électroniques, tels que : émetteur et récepteur de lumière.

Si on veut transmettre un signal électrique, il sera converti, dans un premier lieu, en un signal lumineux proportionnel, grâce à un ensemble de composants optoélectroniques appelé émetteur; qui assure également la modulation du signal. Ce signal est guidé par la fibre optique, et aboutit finalement au récepteur dans lequel il développe un signal proportionnel au signal initial; et ce signal sera démodulé avant de parvenir à l'utilisateur.

2. Structure de la fibre optique

La fibre optique est une baguette très fine d'un matériau diélectrique. Elle est flexible et souple et est constituée, en général, d'un milieu diélectrique appelé "cœur" de la fibre d'indice de

réfraction (n_c) recouvert d'un matériau appelé "gaine" d'indice de réfraction (n_g) tel que $n_g < n_c$ pour qu'il y ait propagation dans le cœur. La gaine, elle-même, peut être recouverte d'une couche de matériau plastique appelée "revêtement" destiné à la protéger. La différence entre les indices n_g et n_c fait que le faisceau subisse des réflexions totales à l'intérieur de la fibre, et sorte de l'autre extrémité. Il y a confinement de l'onde électromagnétique dans le cœur de la fibre.

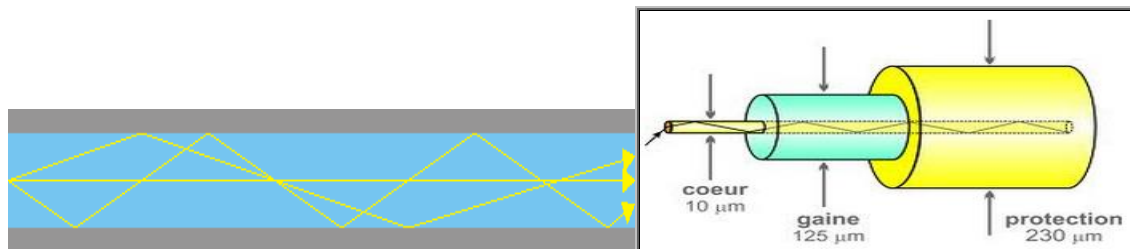


Figure 5.1 : Structure de la fibre optique

Remarques

- La fibre optique, ainsi décrite, est l'analogue d'un guide d'onde diélectrique cylindrique.
- Le matériau diélectrique du cœur est, généralement, de la silice (SiO_2).
- Un câble de fibre optique peut comprendre une multitude de fibres optiques avec leurs revêtements.

Une fibre optique est souvent décrite selon deux paramètres :

- Le premier est l'écart relatif concernant les deux indices: la différence d'indice normalisée, qui donne une mesure du saut d'indice entre le cœur et la gaine :

$$\Delta = \frac{n_c - n_g}{n_c} \Rightarrow \begin{cases} n_c = n_g(1 + \Delta) \\ n_g = n_c(1 - \Delta) \end{cases}$$

- Le second est l'ouverture numérique de la fibre. Concrètement, ce paramètre est le sinus de l'angle d'entrée maximal de la lumière dans la fibre pour que la lumière puisse être guidée sans perte. Cet angle est mesuré par rapport à l'axe de la fibre.

3. Types de fibres optiques

3.1. Fibre optique à saut d'indice

C'est le type de fibre le plus simple, directement issue des applications optiques traditionnelles. Dans cette fibre, le cœur, de diamètre $2a$, est homogène et d'indice n_1 . Il est entouré d'une gaine optique de diamètre extérieur $2b$ et d'indice n_2 inférieur à n_1 . Ces deux indices sont peu différents et doivent être de l'ordre de 1.5. Quant à la gaine optique, elle joue un rôle actif

dans la propagation, et ne doit pas être confondue avec les revêtements de protection déposés sur la fibre. D'après la loi de Descartes, un rayon lumineux injecté va rester guidé dans la fibre (dans le cœur) si son angle d'inclinaison q sur Oz reste inférieur à q_0 . Le rayon est dans ce cas guidé par réflexion totale au niveau de l'interface cœur-gaine, sinon il est réfracté dans la gaine. Ceci reste vrai si la fibre cesse d'être rectiligne, à condition que le rayon de courbure reste grand devant son diamètre. Dans ce type l'indice varie brusquement entre le cœur et la gaine.

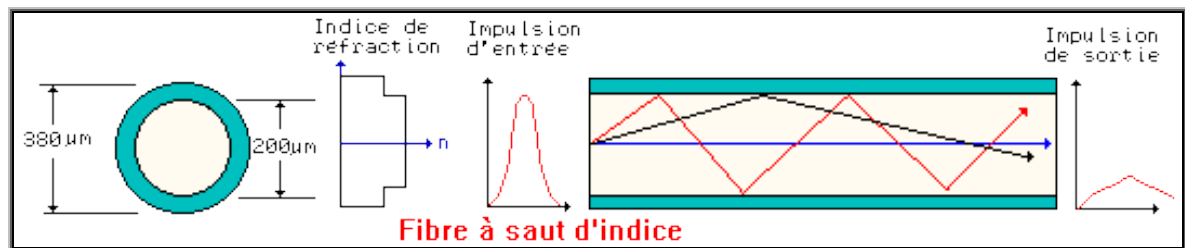


Figure 5.2 : Fibre optique à saut d'indice

La propagation de la lumière dans la fibre peut se faire avec de très faibles pertes même lorsque la fibre est courbée significativement.

3.1.1. Ouverture Numérique de la fibre optique

Considérons une fibre optique à saut d'indice et dans la mesure où $D_c \ll \lambda$, un grand nombre de modes peuvent se propager dans la fibre.

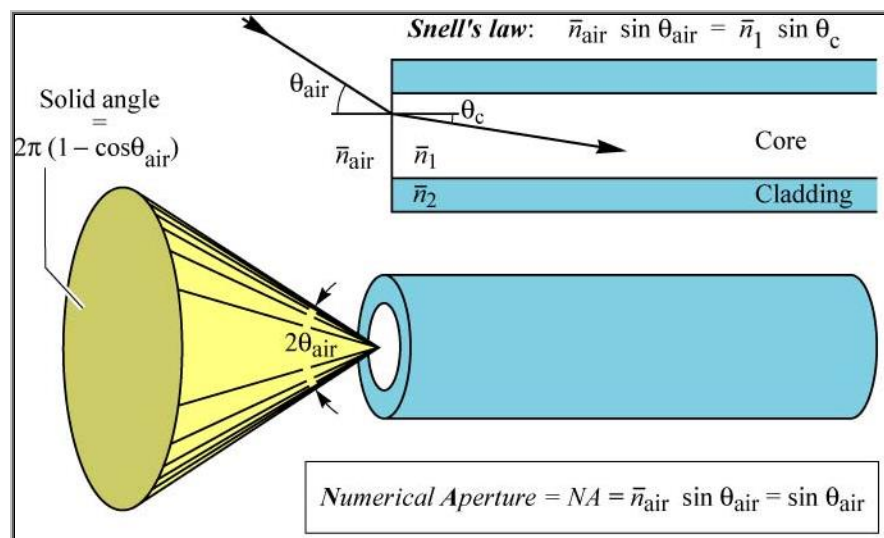


Figure 5.3 : Ouverture numérique

Considérons un rayon lumineux dans l'air, si le faisceau incident pénètre dans la fibre, à cause de la réfraction à l'interface air-silice, l'angle du rayon qui rentre dans la fibre est différent de " α ", qu'on appellera θ_r . En appliquant la loi de Snell-Descartes:

$$n_{air} = \sin\alpha = n_c \sin\theta_r$$

On peut définir également un angle fait le rayon réfléchi :

$$\theta_r + \theta = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \theta_r = \frac{\pi}{2} - \theta$$

L'indice de l'air $n_{air} = 1$

$$\sin\alpha = n_c \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)$$

$$\sin\alpha = n_c \cos\theta$$

Remarque :

Dans un guide diélectrique, il existe un angle θ_c : angle critique pour lequel il y a réflexion totale. On veut appliquer cette loi à la fibre optique pour qu'il y ait réflexion totale à l'interface cœur-gaine :

- Si $\theta > \theta_c$ La réflexion est totale
- Si $\theta < \theta_c$ une partie de l'énergie lumineuse est réfractée dans la gaine de diamètre D_g

3.1.2. L'angle critique

Il est défini comme un angle pour lequel le rayon est réfracté parallèlement à la gaine :

$$n_c \sin\theta_c = n_g \sin\frac{\pi}{2} \Rightarrow \sin\theta_c = \frac{n_g}{n_c}$$

Si on considère le rayon lumineux provenant de l'extérieur, l'angle critique sera lié à (α) par la relation suivante :

$$n_{air} \sin\alpha = n_c \sin\theta_r = n_c \cos\theta \quad \theta + \theta_r = \frac{\pi}{2}$$

$$n_{air} \sin\alpha = n_c \sqrt{1 - \sin^2\theta}$$

On a :

$$\sin\theta_c = \frac{n_g}{n_c}$$

Alors l'angle critique θ_c qui correspond à α_{Max} :

$$n_{air} \sin\alpha_{Max} = n_c \sqrt{1 - \sin^2\theta}$$

$$n_{air} \sin \alpha_{Max} = n_c \sqrt{1 - \frac{n_g^2}{n_c^2}}$$

$$\Rightarrow \sin \alpha_{Max} = \sqrt{n_c^2 - n_g^2} = ON : \text{Ouverture numérique}$$

Cette quantité est appelée ouverture numérique de la fibre optique et l'angle total limité permettant d'accepter la lumière dans la région cœur est donné par ($2\alpha_{Max}$)

$$\sin \alpha_{Max} = n_c \cos \theta_c = ON$$

$$\Rightarrow 2\alpha_{Max} = 2\arcsin(n_c \cos \theta_c) : \text{angle d'acceptance}$$

$$\Rightarrow \alpha_{Max} = \arcsin(ON)$$

$$\theta_c = \arccos \frac{ON}{n_c}$$

Application : Calculer l'angle α_{max} et l'ON d'une fibre optique constituée d'un cœur de silice dopé tel que :

$n_c = 1.53$ et d'une gaine de silice pure tel que $n_g = 1.5$

$$ON = \sqrt{n_c^2 - n_g^2} = 0.3$$

$$\alpha_{max} = \arcsin ON = 17^\circ.54$$

L'angle d'acceptance est : $2\alpha_{Max} = 35^\circ.08$

3.2. Fibre optique à gradient d'indice

Ces fibres sont spécialement conçues pour les télécommunications. Leur cœur n'est plus homogène : la valeur de l'indice décroît depuis l'axe jusqu'à l'interface. Le guidage est cette fois dû à l'effet du gradient d'indice. Les rayons guidés suivent une trajectoire d'allure sinusoïdale. La gaine d'indice n_2 n'intervient pas directement, mais élimine les rayons trop inclinés. On peut de même définir l'ouverture numérique. L'avantage essentiel de ce type de fibre est de minimiser la dispersion du temps de propagation entre les rayons, sans utiliser pour cela l'ouverture numérique trop faible. La fibre optique la plus courante, utilisée en télécommunications à moyenne distance a pour ouverture numérique 0.2 et pour diamètres cœur / gaine 50/125 μm . Il existe aussi les fibres 62.5/125 utilisées en micro-informatique et 85/125 utilisées en vidéocommunications.

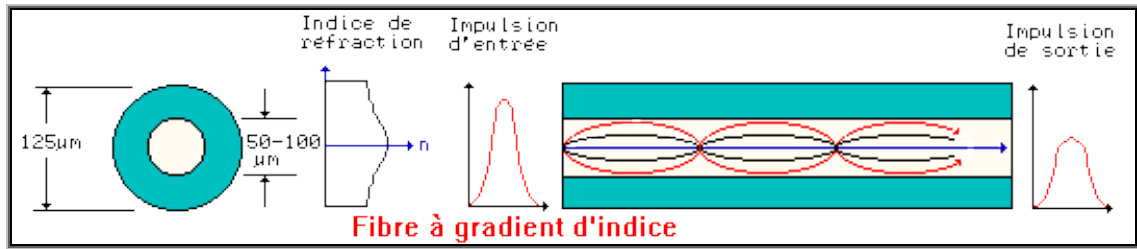


Figure 5.4 : Fibre optique à gradient d'indice

La fibre optique à gradient d'indice permet de réduire les pertes qui peuvent se manifester lors du passage du rayon lumineux du cœur vers la gaine. Le but étant d'augmenter le débit d'information par réduction de la dispersion modale.

a. Ouverture Numérique de la fibre optique

Calcul de l'indice à une distance r de l'axe de la fibre : $n_c(0) \neq n_c(r)$

$$n_c(0) = n_c(\text{matériau})$$

L'indice de réfraction en un point r/oz est donné par : $n_c = n_c(0) \sqrt{1 - \Delta \left(\frac{2r}{D_c}\right)^v}$

Δ : C'est l'écart relatif $\Delta = \frac{n_c(0) - n_g}{n_c(0)}$

v : est une constante dépend du matériau $v \neq 2$ pour un profile parabolique.

On peut exprimer l'ouverture numérique de deux manières :

- Pour le mode central ou axial, ON s'exprime de la même manière que dans la fibre à saut d'indice :

$$ON = \sqrt{n_c^2(0) - n_g^2}$$

- Pour les autres modes, ON est donnée par : $ON(r) = ON(0) \left[1 - \Delta \left(\frac{2r}{D_c}\right)^v\right]^{\frac{1}{2}}$

b. Nombre de modes dans une fibre optique à gradient d'indice

Le nombre de modes qui se propagent dans la fibre est donnée par : $N_m = 0.5 \left(\frac{\pi D_c ON}{\lambda}\right)^2 \cdot \frac{v}{v+2}$

En générale $v=2$ et $N_m = 0.5 \left(\frac{\pi D_c ON}{\lambda}\right)^2$

Remarque : le nombre de mode est divisé par 2 par rapport à la fibre à saut d'indice, de même ouverture numérique, même longueur d'onde et même D_c .

4. Propagation de l'onde dans la fibre optique

L'onde optique est guidée par les réflexions totales internes (zigzag). Elle peut être représentée par des modes de propagation, on distingue :

4.1. Fibres optiques monomodes

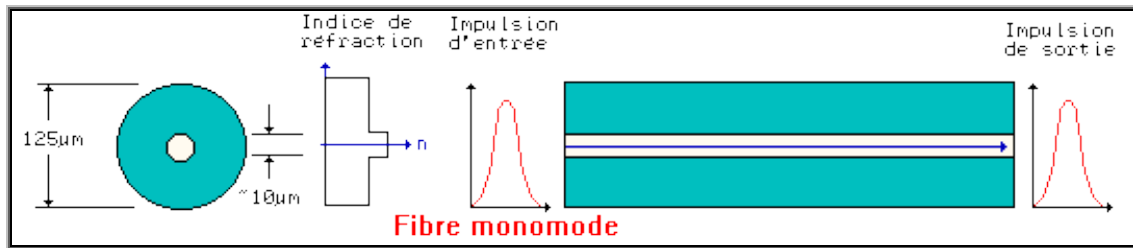


Figure 5.5 : Fibre optique monomode

Ne disposant pas la dispersion intermodale, elles ont pris une importance considérable dans les transmissions à grande distance. On les trouve également dans les systèmes où la cohérence de la lumière doit être conservée. Une fibre monomode classique est à saut d'indice, mais le diamètre du cœur et la différence relative d'indice doivent être plus petit.

Ce sont des fibres dont le cœur possède un diamètre très étroit; une onde unique se propage sur l'axe central.

Cette condition est donnée par la relation suivante : $\frac{\pi \cdot D_c \cdot ON}{\lambda} < 2.4$

λ :longueur d'onde du faisceaux hertzien incident.

Application : Pour $\lambda = 1.55 \mu m$, $ON=0.15$ pour $D_c < 7.63 \mu m$ la fibre optique est monomode.

4.2. Fibres optiques multimodes:

Elles ont des paramètres assez importants et permettent la propagation de plusieurs modes. Chaque rayon entre dans la fibre avec un angle différent par rapport à (oz) et on a existence de plusieurs modes. Le nombre de modes qui se propagent dans la fibre est limité et est estimé par :

$$N_{mode} \approx 0.5 \left(\frac{\pi \cdot D_c \cdot ON}{\lambda} \right)^2$$

Si le nombre des modes (N_{mode}) est faible on ne peut pas l'estimer

Application numérique

Pour $\lambda = 0.85\mu m$ (Utilisé en télécommunication)

$$n_c = 1.5 ; ON = 0.116$$

1- Déterminer D_c si la fibre est monomode :

On utilise l'équation : $\frac{\pi \cdot D_c \cdot ON}{\lambda} < 2.4$

Ce qui donne $D_c < \frac{2.4 \cdot \lambda}{\pi \cdot ON} \Rightarrow D_c < 5.6\mu m$

Si $D_c > 5.6\mu m$ la fibre optique est multimodes.

2- Calculer le nombre de modes se propageant dans la fibre pour $D_c = 30\mu m$ et $D_c = 90\mu m$

On utilise la formule : $N_{mode} \approx 0.5 \left(\frac{\pi \cdot D_c \cdot ON}{\lambda} \right)^2$

Pour $D_c = 30\mu m$ le nombre des modes : $N_{mode} \approx 82 \text{ modes}$

Pour $D_c = 90\mu m$ le nombre des modes : $N_{mode} \approx 745 \text{ modes}$

Remarque : L'augmentation du diamètre du cœur entraîne l'augmentation du nombre des modes.

5. Atténuation dans la fibre optique

Les facteurs contribuant à l'atténuation dans une fibre optique sont principalement : l'absorption, la diffusion due aux hétérogénéités de l'indice de réfraction du cœur, la diffusion due aux irrégularités de l'interface cœur-gaine, et les pertes dues aux courbures de la fibre optique (conversion de modes) et les pertes dues au couplage aux extrémités d'entrée et de sortie.

La principale cause des pertes par absorption est due à la présence d'impuretés intervenant dans la technologie de fabrication. Ces pertes sont exprimées en fonction du coefficient d'absorption du matériau du cœur.

Toutes les pertes sont exprimées en fonction du coefficient d'absorption ($\alpha [m^{-1}]$) du matériau du cœur.

Si P_i est la puissance incidente et si L est la longueur de la fibre. La puissance de sortie P_s est :

$$P_s = P_i e^{-\alpha L}$$

α Dépend du matériau et de la longueur d'onde .

Pour minimiser l'atténuation A , il faut que (α) soit le plus petit possible. L'atténuation est affichée en décibel (dB) tel que :

$$A = 10 \log \left(\frac{P_s}{P_i} \right)$$

Pour une propagation dans un câble ou une fibre optique sur une longueur L , on définit le coefficient d'atténuation linéique qui s'exprime par $\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$.

$$\text{Att} = \frac{A}{L} = \frac{10}{L} \log \left(\frac{P_s}{P_i} \right)$$

Le graphique ci-dessous représente le coefficient d'atténuation linéique d'une fibre optique de la longueur d'onde de la radiation utilisée.

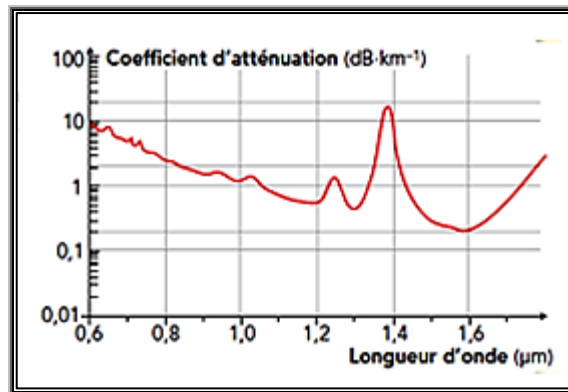


Figure 5.6 : Atténuation dans une fibre optique

Application : Pour $L = 1 \text{ km}$

$$A = 10 \log \left(\frac{P_s}{P_i} \right) = 10 \log(e^{-\alpha L}) = -10 \cdot L \cdot \alpha \cdot \log(e)$$

$$A = -10 \cdot 10^3 \cdot \alpha \cdot 0.434$$

$$A = -4.34 \cdot 10^3 \alpha$$

6. Dispersion du rayonnement

6.1. Dispersion modale

Lorsqu'on utilise une fibre multimode, la lumière peut prendre plusieurs chemins (modes) lorsqu'elle se propage dans la fibre. La distance parcourue par certains modes est donc différente de la distance parcourue par d'autres modes. Lorsqu'une impulsion est envoyée dans la fibre, elle se décompose selon les différents modes. Certaines composantes (modes) arrivent donc avant d'autres et l'impulsion s'étale.

Ce phénomène de dispersion modale n'apparaît bien sûr qu'avec les fibres multimodes.

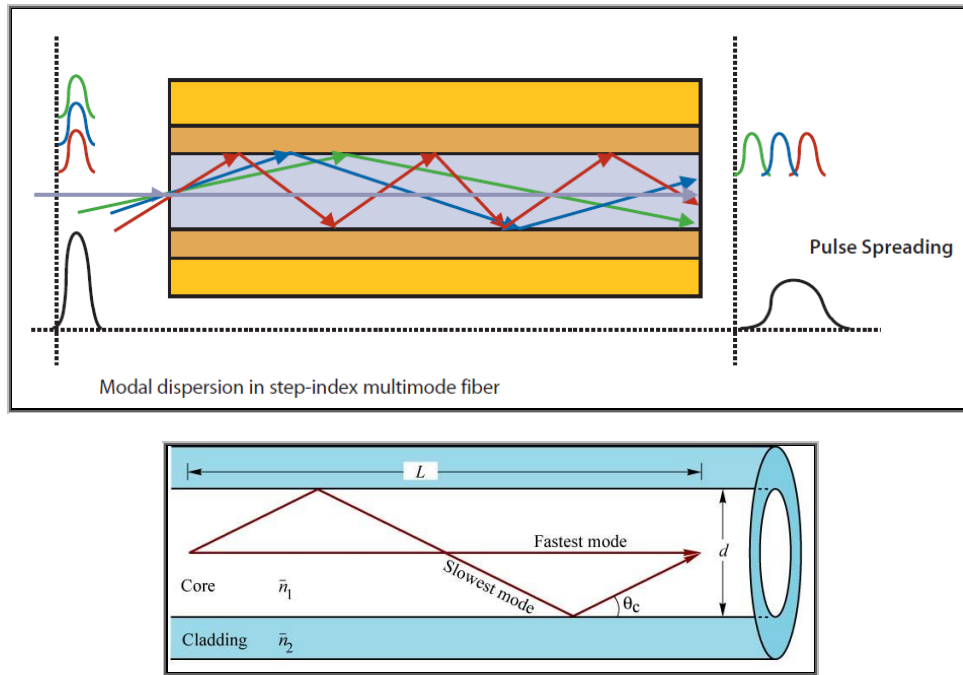


Figure 5.7 : Dispersion modale dans une fibre optique

Le mode axial qui arrive le premier avec une vitesse (v), parcourt la longueur L en un temps τ_0 .

Le mode extrême possède une vitesse ($v \cos \theta$) par rapport au mode fondamental.

$$\tau_l = \frac{L}{\cos \theta_c} \frac{n_c}{c} : \text{le temps le plus long}$$

Le mode fondamental qui est le plus rapide arrive le premier à la sortie de la fibre; ensuite les modes moyens et en derniers le mode extrême qui est le plus lent. La dispersion modale correspond à la différence de temps mais entre le mode fondamental et le mode extrême pour arriver au bout de la fibre optique :

$$\Delta \tau_m = \tau_l - \tau_0 = \frac{L n_c}{c} \left(\frac{1}{\cos \theta_c} - 1 \right)$$

L'ouverture numérique

En appliquant la loi de Snell-Descartes : $\sin \alpha_{\max} = ON = n_c \sin \theta_l$ ce qui donne $\sin \theta_l = \frac{ON}{n_c}$

$$\text{Avec } \cos \theta_l = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_l} \quad \text{et} \quad \cos \theta_l = \left[1 - \left(\frac{ON}{n_c} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cong 1 - \frac{ON^2}{2n_c^2} \quad (ON \ll n_c)$$

$$\cos \theta_l = \left[1 - \left(\frac{ON}{n_c} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \cong 1 + \frac{ON^2}{2n_c^2}$$

En remplaçant dans l'expression de la dispersion modale:

$$\Delta\tau_m = \frac{L \cdot (ON)^2}{2 \cdot C \cdot n_c}$$

$$\frac{\Delta\tau_m}{L} = \frac{(ON)^2}{2 \cdot C \cdot n_c}$$

L'écart relatif

$$\frac{\Delta\tau_m}{L} = \frac{(ON)^2}{2 \cdot C \cdot n_c}$$

Sachant que : $ON = n_c \sqrt{2\Delta}$

L'expression de la dispersion modale devient:

$$\frac{\Delta\tau_m}{L} \cong \frac{n_c \cdot \Delta}{C}$$

Exemples :

$$n_c = 1.5 \quad C = 3 \cdot 10^8 \text{ km/s}$$

$$ON = 0.14 \quad \frac{\Delta\tau_m}{L} = \frac{(ON)^2}{2 \cdot C \cdot n_c} = 20 \text{ ns/km}$$

$$ON = 0.4 \quad \frac{\Delta\tau_m}{L} = \frac{(ON)^2}{2 \cdot C \cdot n_c} = 180 \text{ ns/km}$$

6.2. Dispersion chromatique dans les fibres optiques monomodes

L'effet de la dispersion chromatique résulte du fait que la vitesse de propagation du mode dépend de la longueur d'onde et de la dispersion propre du matériau. Cette dernière est due à la variation du nombre n_c en fonction de la longueur d'onde. Une impulsion lumineuse est constituée d'un paquet d'ondes et la vitesse de déplacement de l'impulsion est appelée vitesse du groupe :

$$v = \frac{c}{n_c}$$

$$v_g = \frac{c}{N_c}$$

$$N_c(\lambda) = n_c - \lambda \frac{dn_c}{d\lambda} : \text{indice de groupe de la propagation guidée}$$

$$\text{Le temps moyen du groupe est : } \tau = \frac{L}{v_g} = L \frac{N_c(\lambda)}{c}$$

$$\text{On calcule : } \frac{dN_c}{d\lambda} = \frac{dn_c}{d\lambda} - \frac{dn_c}{d\lambda} - \frac{\lambda d^2 n_c}{d\lambda^2} = -\frac{\lambda d^2 n_c}{d\lambda^2}$$

$$\text{D'où : } |\Delta\tau_c| = \left| \frac{L}{c} \frac{\lambda d^2 n_c}{d\lambda^2} \Delta\lambda \right|$$

On peut écrire l'expression de la dispersion chromatique :

$$\frac{\Delta\tau_c}{L} = \frac{\lambda^2}{c} \frac{d^2 n_c}{d\lambda^2} \Delta\lambda \quad [\text{ns/km}]$$

$\Delta\lambda_c$: La largeur de l'impulsion de sortie à mi-hauteur

$\Delta\lambda$: Est la largeur spectrale du rayonnement

$\frac{d^2n_c}{d\lambda^2}$: Dispersion propre du matériau

Exemple : Soit une fibre optique de silice tel que : $L=1\text{km}$ excité à une longueur d'onde $\lambda=0.85\mu\text{m}$ (dans l'infrarouge), avec $\Delta\lambda = 500\text{\AA}$, $\frac{d^2n_c}{d\lambda^2} = 30\text{m}^{-2}$, Calculer $\Delta\tau_c$

Réponse :

$$\Delta\tau_c = \frac{L}{c} \frac{d^2n_c}{d\lambda^2} \Delta\lambda = \frac{10^3 (0.85 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 30 \cdot 500 \cdot 10^{10}}{3 \cdot 10^8 \cdot 0.85 \cdot 10^{-6}}$$

$$\Delta\tau_c = 4.25 \cdot 10^{-18} \text{s}$$

7. Capacité de transmission et largeur de la bande passante

La capacité de transmission est : $C_T = \frac{1}{\Delta\tau}$ [bits/s]

La fréquence de coupure est donnée par :

La bande passante, BP, est la quantité d'informations que l'on peut transmettre sur la fibre optique pendant un intervalle de temps, exprimée en bits par secondes (bps). Elle désigne aussi la longueur de l'intervalle de fréquence utilisable sur un support, dans ce cas elle s'exprime en hertz (Hz).

Remarques :

- Ce type de fibre optique ne convient pas pour les liaisons à grande distance; on les utilise pour les liaisons à courtes distances et à faible débit.
- La dispersion modale est minimisée par rapport à celle à saut d'indice
Pour la fibre à saut d'indice $\frac{\Delta\tau_m}{L} = \frac{ON^2}{2cn_c} \cong \frac{\Delta n_c}{c}$
Pour la fibre optique à gradient d'indice $\frac{\Delta\tau_m}{L} = \frac{[ON(0)]^4}{8n_c^3(0).c} = \frac{n_c(0).\Delta^2}{2c}$
- La dispersion modale $\frac{\Delta\tau_m}{L}$ est divisée par $\frac{2}{\Delta}$ par rapport à la fibre à saut d'indice.
- La dispersion chromatique qui concerne le rayon direct reste inchangée par rapport à la fibre à saut d'indice.

Bibliographie et webographie

- [1] E. Rosencher, B. Vinter ; Optoélectronique ; Collection Sciences Sup, Dunod, 2002 - 2e éd.
- [2] Z. Toffano ; Optoélectronique: composants photoniques et fibres optiques ; Ellipses, 2001.
- [3] G. Broussaud ; Optoélectronique ; Edition Masson, 1974.
- [4] P. Mayé ; Optoélectronique industrielle : conception et applications ; Dunod, 2001.
- [5] J-C. Chaimowicz ; Introduction à l'optoélectronique principes et mise en œuvre ; Dunod
- [6] J-M. Mur ; Les fibres optiques : Notions fondamentales ; Epsilon, 2011.
- [7] D. Decoster, J. Harari ; Détecteurs optoélectroniques ; Lavoisier, 2002.
- [8] Romain Maciejko, Optoélectronique, Presses internationales, 2002
- [9] André Moliton, Electronique et Optoélectronique organique, Springer, Collection Télécom, 2011
- [10] <http://www.ulb.ac.be/inforsciences/files/JagerDilawar.pdf>
- [11] http://www.editions-ellipses.fr/PDF/9782729835262_extrait.pdf
- [12] <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=3694>
- [13] <https://www.kartable.fr/terminale-s/physique-chimie/specifique/chapitres-33/les-proprietés>
- [14] http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M05_C04/co/Contenu.html
- [15] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Photomultiplicateur>
- [16] http://meteosat.pessac.free.fr/Cd_elect/www.esil.univ-mrs.fr/Eleves/P98/kit/fibres.html#