

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

**UNIVERSITE MUSTAPHA STAMBOULI DE MASCARA
FACULTÉ DES SCIENCES ET DES TECHNOLOGIES**

Polycopié de Cours

**DISPOSITIFS
OPTOELECTRONIQUES**

Ce cours est destiné aux étudiants de 3^{ème} année licence

Electronique

Présenté par:

Samir Ghouali

Algérie

2021

Avant-Propos

Ce fascicule pédagogique met à la disposition des étudiants électroniciens, un cours sur les notions fondamentales de l'optoélectronique, visant à les préparer pour entamer les différentes spécialités de cette vaste discipline. Ce cours a pour but donc d'enseigner les éléments de base de la physique des interactions lumière-matière dans les semi-conducteurs et de présenter leurs applications les plus courantes dans le domaine de la génération et de la détection de lumière. Une importance particulière est donc donnée au contenu physique des développements théoriques plutôt qu'à leur aspect mathématique. Pour cette raison, les développements théoriques sont, parfois au détriment de leur rigueur, fortement simplifiés par rapport à ceux rencontrés dans la plupart des livres traitant de l'optique des semi-conducteurs et plus exactement l'étude des dispositifs optoélectroniques.

L'optoélectronique désigne un des domaines regroupant les composants et les applications faisant appel aux plus récentes technologies dans le domaine de l'optique, de l'électronique et des matériaux. La découverte du LASER et de la fibre optique ont été des étapes très importantes dans ce développement. Le terme photonique est plus générique et décrit tout composant ou équipement dans lequel a lieu une production, un transport, une transformation ou une détection de photons, toutes les applications LASER en font partie. Le terme Optoélectronique est plus particulièrement utilisé dans le domaine des Télécommunications et en électronique et dans les applications grand public comme les lecteurs optiques. On rencontre aussi le terme Optronique. Comprendre la nature de la lumière a toujours été une préoccupation essentielle des scientifiques. La lumière peut être caractérisée à la fois comme une onde dans le spectre électromagnétique ou une particule, le photon. L'avantage de l'étude des dispositifs d'optoélectroniques par rapport à d'autres technologies est obtenu grâce aux propriétés suivantes :

- Les courtes longueurs d'onde, qui correspondent à des très hautes fréquences et qui s'étendent des rayons X mous jusqu'à l'infrarouge lointain, permettant la réalisation de transmissions optiques de très grande capacité, la fabrication d'instruments de métrologie et de capteurs.
- La nature quantique des photons qui leur permet de se regrouper sans limitation de nombre, ce phénomène est à la base du rayonnement cohérent LASER. À cause de cette propriété, les photons peuvent se propager et se croiser dans l'espace sans échanger d'énergie, cette propriété permet aussi de stocker de l'information de très haute densité sur une très petite surface.
- Les effets optiques dans des matériaux spécifiques permettant de réaliser des fonctions comme le filtrage, la modulation, l'amplification et la conversion optique.
- L'existence de supports d'information comme la fibre optique possédant des très faibles pertes, permettant de véhiculer à la vitesse de la lumière une grande quantité d'informations avec une bonne confidentialité.

- Grâce au progrès de l'optique intégré et des nouveaux composants semi-conducteurs, des systèmes entièrement optiques verront le jour utilisant pleinement le spectre lumineux, la rapidité et la cohérence des processus quantiques.

Cet ouvrage est organisé comme suit :

Un premier chapitre traite du caractère électromagnétique de la lumière, l'interaction lumière-semi-conducteur, propriétés de la lumière, flux lumineux, flux luminance, dualité onde-particule de la lumière, aperçu sur le spectre du rayonnement électromagnétique ainsi que les différents types d'interaction lumière-matière à savoir : la photoconductivité, photo-ionisation, photoélectrons ainsi que le phénomène photovoltaïque. Ce chapitre est aussi consacré à la nature corpusculaire de la lumière à travers le photon.

Dans un deuxième chapitre, on traite les propriétés électroniques et optiques des semi-conducteurs, on va détailler en quelque sorte la structure de bandes des semi-conducteurs ainsi que les processus radiatifs et non radiatifs dans ces derniers, on détaille ainsi des phénomènes très connus dans ce monde à savoir l'absorption et l'émission de la lumière.

Dans un troisième chapitre, on va étudier les dispositifs émetteurs de lumières, en se basant beaucoup plus sur les diodes électroluminescentes LED ainsi que les LASERs, un bref historique introduit les coefficients d'Einstein et le phénomène d'émission stimulée. Le gain du LASER est calculé à partir des propriétés des substances actives et du pompage. Le LASER en tant que source est analysé pour différents types de fonctionnement ainsi que les principales catégories de LASERs.

Les détecteurs optiques à semi-conducteurs sont décrits au chapitre quatre, ces composants sont utilisés dans les transmissions optiques, en détection infrarouge et dans la capture d'images. Les composants comme les photorésistances, photodiodes PIN et à avalanche PDA sont étudiées, phototransistors, cellules photovoltaïques, les afficheurs à cristaux liquides.

Le dernier chapitre traite de l'optique guidée. Les guides optiques rectangulaires sont à la base de la technologie optique intégrée en très fort développement. Les principales propriétés des fibres optiques sont abordées comme le caractère multi mode et monomode, la dispersion temporelle et les phénomènes non linéaires. Les problèmes de raccordement entre fibres optiques sont décrits. Ce chapitre se termine par quelques exemples de capteurs à fibres optiques.

Le contenu de ce polycopié est enseigné au département d'**Électrotechnique** de la **Faculté des Sciences et de la Technologie à l'Université Mustapha Stambouli de Mascara**. Ce fascicule est destiné aux étudiants de la troisième année Electronique et d'autres filières. Le contenu de ce polycopié est conforme au dernier canevas/programme du module dispositifs optoélectroniques recommandé et établi par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique (MESRS).

J'espère que ce modeste travail sera utile et bénéfique à tous ceux qui ont à apprendre ou à enseigner le module **dispositifs optoélectroniques**.

Résumé

Cet ouvrage est organisé comme suit : Un premier chapitre traite du caractère électromagnétique de la lumière, l'interaction lumière-semi-conducteur, propriétés de la lumière ainsi que les différents types d'interaction lumière-matière à savoir : la photoconductivité, photo-ionisation, photoélectrons ainsi que l'interaction photovoltaïque. Dans un deuxième chapitre, on traite les propriétés électroniques et optiques des semi-conducteurs. Dans un troisième chapitre, on va étudier les dispositifs émetteurs de lumières, en se basant beaucoup plus sur les diodes électroluminescentes LED ainsi que les LASERs. Les détecteurs optiques à semi-conducteurs sont décrits au chapitre quatre. Le dernier chapitre traite de l'optique guidée. Les guides optiques rectangulaires sont à la base de la technologie optique intégrée en très fort développement. Les principales propriétés des fibres optiques sont abordées comme le caractère multi mode et monomode, la dispersion temporelle et les phénomènes non linéaires. Les problèmes de raccordement entre fibres optiques sont décrits. Ce chapitre se termine par quelques exemples de capteurs à fibres optiques.

Mots-clés

Optoélectronique, Lumière, Matière, Semi-conducteur, bandes d'énergies, absorption, émissions, capteurs de lumières, émetteur de lumière, LASER, LED, Photodiodes, Phototransistors, Fibres Optiques.

Notations et Abréviations

(lx)	Le lux
AlGaAs	Aluminium gallium arsenide
APD	An avalanche photodiode
AsGa	Arsenic de Galium
cd	Candela
CDS	Cadmium sulfide
CMS	Composant Monté en Surface
DEL	Diode Electroluminescente
E-M	Onde électromagnétique
FDDI	Fiber Data Distributed Interface
FDDI	Fibre Distributed Data Interface
FIR	Far Infra-Red
FPGA	Field-Programmable Gate Array
FTTH	Fiber to the Home
Ge	Germanium
GI	Gradient d'indice
GTL	Gaine Technique de Logement
HgCdTe	Mercury cadmium telluride
InSb	Indium antimonide
JGL	Jonction Graduelle Linéaire
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation Light Emitting
LED	Diode Electroluminescente
lm	Lumens
MIR	Mid Infra-Red
MOS	Metal Oxide Semiconductor
MQW	Multiple Quantum Well
PBO	point de branchement optique
PDEL	Puissance d'une DEL
PINFET	A fin field-effect transistor
PN	ions Positif/ions Negatifs
RVB	initiales de Rouge-Vert-Bleu
SC	Semi-Conducteur
SCH	Separate Confinement Heterostructure
Si	Silicium
SI	saut d'indice
SQW	Single Quantum Well
UIT-T	(Union Internationale des Télécommunications)
VCSEL	Vertical Cavity Surface Emitting Laser
ZCE	Zone de Charge d'espace

Table des matières

Avant-Propos	i
Résumé	iii
Mots-clés	iii
Notations et Abréviations	iv

Chapitre I: Interaction Lumière-Semi-conducteur

Rappels.....	2
I.1. Propriétés de la lumière et dualité lumière-matière	2
I.1.1. Aspect ondulatoire de la lumière.....	3
I.1.2. Aspect particulaire de la lumière	4
a. Qu'est-ce qu'un photon ?.....	4
I.1.3. Historique et description de la lumière	5
a. Comment quantifier la lumière ?.....	5
b. Flux lumineux.....	5
c. Quantité de lumière	6
d. Intensité lumineuse	6
e. Éclairement	6
f. Luminance.....	7
I.1.4. Phénomènes lumineux	8
a. Spectre électromagnétique.....	8
b. Source lumineuse.....	9
c. Types de milieux.....	9
d. Système optique	9
e. Faisceaux lumineux	9
I.1.5. Différents types d'interactions lumière- matière	10
a. Généralités	10
Conclusion.....	13

Chapitre II: Propriétés électronique et optique des semi-conducteurs

II.1. Propriétés électroniques des semi-conducteurs.....	15
II.1.1. Introduction	15
II.1.2. Jonction PN	15
a. Jonction abrupte à l'équilibre thermodynamique	16
b. Caractéristiques de la ZCE.....	18
II.2. Notions sur les bandes d'énergie, absorption et émission	22

II.2.1. Historique.....	22
II.2.2. Notions sur les bandes d'énergie.....	23
a. Bandes de conduction, bande de valence et zone interdite.....	23
Rappels.....	24
Conclusion.....	26

Chapitre III: Emetteurs de lumière

III.1. Introduction.....	28
III.2. Rappels.....	28
III.2.1. Jonction P-N à l'équilibre	28
III.3. Emetteurs de lumière.....	28
III.3.1. Matériaux semi-conducteurs pour les émetteurs de lumières	29
a. Rendement interne d'électroluminescence	29
b. Jonctions semi-conductrices pour émetteurs.....	30
c. Gain et spectre d'électroluminescence du milieu semi-conducteur.....	30
III.4. Diodes électroluminescentes (LED (Ligh Emetting Diode)).....	32
III.4.1. Caractéristiques principales	32
III.4.2. Diodes Electroluminescentes DEL.....	34
a. Rendement externe d'une DEL	35
b. Caractéristiques d'une DEL	36
c. Différents types de LEDs émettant dans le domaine visible.....	37
d. Applications des DELs	38
e. Avantages et inconvénients	39
III.5. Diodes LASERs	39
III.5.1. Structure des Diodes LASERs	40
a. Guidage par le gain et guidage par l'indice.....	40
b. Structures à puits quantiques	41
c. Amplification de la lumière dans une diode LASER.....	42
III.5.2. Différents types de LASER.....	45
a. LASERs à solide.....	45
b. LASERs à fibre.....	45
c. LASERs à semi-conducteur	45
d. LASERs à Gaz	45
e. Matériaux utilisés pour les diodes LASERs.....	45
III.5.4. Application des Diodes LASERs	46

a. Diodes LASER en Télécommunications	46
b. Répéteurs	46
c. Diodes LASER de pompe.....	47
d. LASERs VCSEL	47
Conclusion.....	47

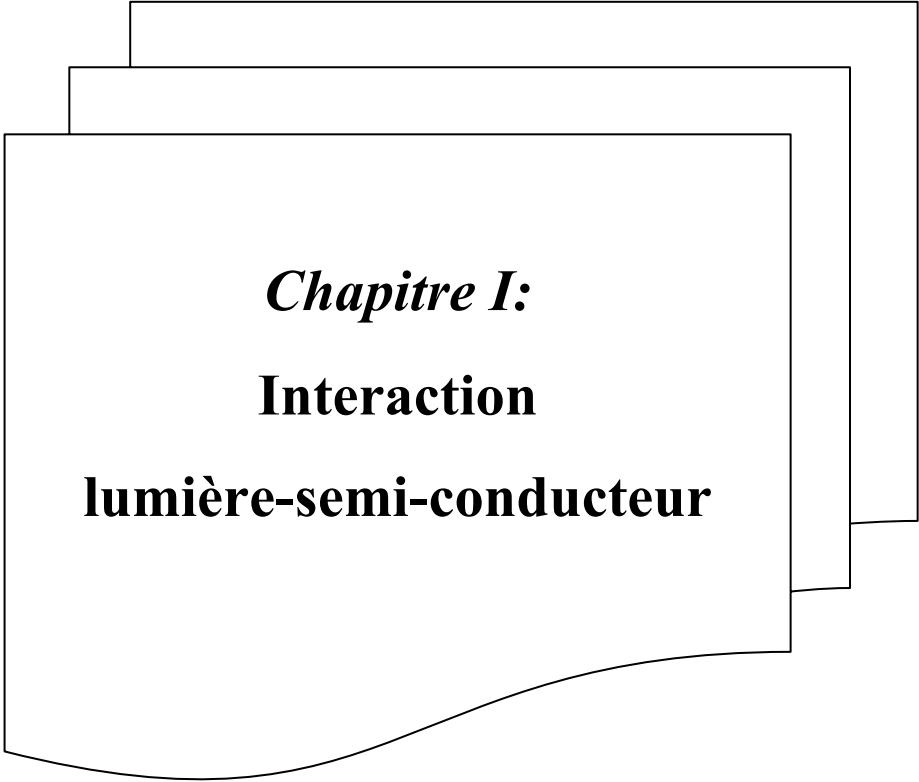
Chapitre IV: Détecteurs de lumière

Introduction	50
IV.1. Détecteurs de lumière à semi-conducteurs.....	50
IV.1.1. Absorption dans les semi-conducteurs	50
a. Matériaux semi-conducteurs utilisés pour ces détecteurs.....	50
b. Coefficient d'absorption et sensibilité des détecteurs	51
c. Sensibilité	52
IV.2. Photo détecteurs	53
IV.2.1. Photoconducteurs	53
IV.2.2. Photodiodes.....	54
a. Photodiode PIN	55
b. Photodiode à avalanche PDA.....	57
c. Photodiode Schottky	59
d. Le phototransistor.....	59
IV.2.2.5. Cellule solaire Photovoltaïque.....	61
f. Afficheurs à cristaux liquides (afficheurs LCD: Liquid Cristal Display)	67
g. Photomultiplicateur	68
h. Capteurs d'images.....	69
Conclusion.....	70

Chapitre V: Fibres optiques

V.1. Introduction	72
V.2. Constitution et principe de transmission.....	73
V.3. Technologie de la fibre optique	74
V.4. Types de fibres optiques	74
V.4.1. Fibre mono mode	75
V.4.2. Fibre multi mode	75
V.5. Propriétés d'une fibre optique.....	76
V.5.1. Condition de guidage dans une fibre.....	76
V.5.2. Ouverture numérique d'une fibre optique : (ON)	77

V.5.3. Longueur d'onde de coupure	78
V.5.4. Atténuation du signal	78
V.5.5. Dispersion	80
V.5.6. Bande passante d'une fibre optique	81
a. Signal analogique	81
b. Signal numérique	82
V.6. Raccordement entre fibres optiques	83
V.6.1. Types de raccords	83
a. Soudure optique.....	84
b. Raccordement FTTH : les prises terminales optiques.....	84
c. Brassage optique	85
V.6.2. Pertes aux raccords	85
V.6.3. Quelques connecteurs optiques.....	86
a. Connecteur ST	86
b. Connecteur SC.....	86
c. Connecteur MIC.....	86
d. Connecteur Souriau	86
e. Connecteur VFO	86
f. Connecteur MPO	87
Conclusion.....	87
Références	88



Chapitre I:
Interaction
lumière-semi-conducteur

Chapitre I: Interaction lumière-semi-conducteur

Rappels

Avant d'examiner attentivement les interactions lumière-matière, nous proposons ci-dessous un rappel des automatismes employés pour représenter la lumière. Logiquement, décrite par les formules de Maxwell, la lumière est constituée d'ondes électromagnétiques combinées aux relations constitutives caractérisant le milieu dans lequel elle se répand.

Lumière = onde électromagnétique \longrightarrow Equations de Maxwell

$\begin{aligned}\vec{\text{rot}}(\vec{E}) &= -\mu_o \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \vec{\text{rot}}(\vec{H}) &= \epsilon_o \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\end{aligned}$	Dans le vide :	$\begin{aligned}\text{div}(\vec{E}) &= 0 \\ \text{div}(\vec{H}) &= 0\end{aligned}$
--	----------------	--

La combinaison des deux équations de Maxwell donne la formule d'onde dont le résultat le plus simple est une onde périodique progressive (onde de propagation) défini par un vecteur d'onde attaché à la fréquence par la vitesse de la lumière c . Comme l'équation d'onde est une équation linéaire, toutes ses résultats peuvent être séparés en somme de telles ondes périodiques (ou modes électromagnétiques). Les ondes sont analysées ici en figure complexe symbolique.

$$\text{solution : } \vec{E} = A e^{i(kx - \omega t)} + c.c.$$

(où $k = \omega / c$)

L'énergie transportée par l'onde E est donnée par le vecteur de Poynting $S = E \times H$ et est donc simplement proportionnelle au carré de l'amplitude du champ. Comme l'amplitude A peut avoir n'importe quelle valeur, l'énergie de l'onde électromagnétique (E-M) de pulsation donnée ω , est une quantité qui peut varier de manière continue.

I.1. Propriétés de la lumière et dualité lumière-matière

La conception corpusculaire de la lumière s'oppose à une conception ondulatoire, comme celle de Christiaan Huygens ou de Robert Hooke qui estimaient la lumière comme une vibration transversale, analogue à la vibration d'une corde. Après leur analyse des phénomènes d'interférence et de diffraction Thomas Young et Augustin Fresnel établirent une base cohérente à cette conception ondulatoire qui se compléta dans la seconde moitié du XIX^{ème} siècle, lorsque James Clerk Maxwell proposa des équations portant son nom, qui présentaient la lumière comme une onde

électromagnétique formée par un champ électrique et un champ magnétique, oscillant et se propageant dans l'espace à une grande vitesse, de l'ordre de 300.000 kilomètres par seconde.

Ainsi, à la fin du XIX^{ème} siècle, la théorie électromagnétique paraissait confirmer de manière certaine la double nature de la lumière et donnait un premier exemple de théorie unifiée, permettant de d'analyser par les mêmes équations des phénomènes aussi changeants que l'électricité, le magnétisme, les ondes radio ou lumineuses.

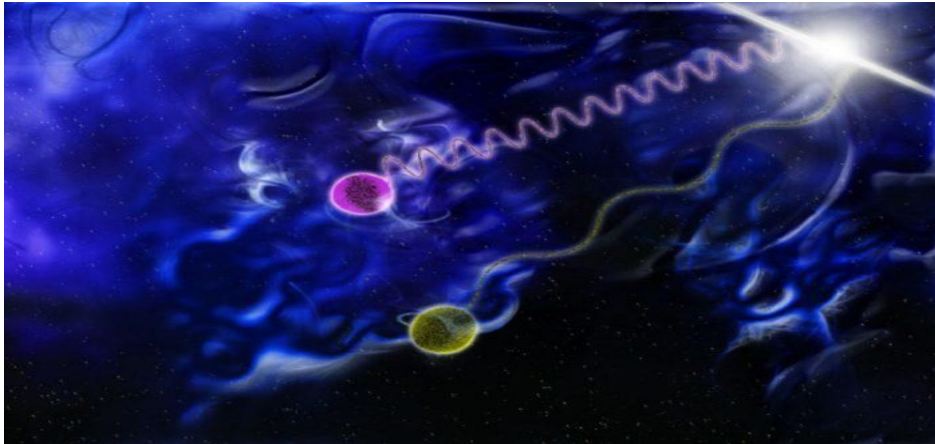


Figure I.1. Aspects Ondulatoire et Corpusculaire de la lumière.

Quelques manifestations ne peuvent être expliquées qu'en considérant leurs spécificités ondulatoires et particulaires. Ces deux phénomènes ne s'opposent pas, ils sont complémentaires. L'observation du phénomène ondulatoire correspond à l'étude du flux de particules, et, l'aspect corpusculaire correspond à celui d'une particule distinctive constituant ce flux. La lumière en est l'exemple le plus connu. Il n'est pas possible de considérer la lumière comme un phénomène exclusivement ondulatoire ou particulaire, chaque description est incomplète sans l'autre. En fonction des phénomènes étudiés, on ne considérera que l'un ou l'autre de ces aspects.

I.1.1. Aspect ondulatoire de la lumière

Jusqu'au début du XX^{ème} siècle, la lumière était une onde. Les arguments en faveur de la nature ondulatoire de la lumière étaient aussi bien théoriques que pratiques:

- James Clerk Maxwell (physicien et mathématicien écossais) démontra, grâce aux équations qui portent son nom, que la lumière était une onde électromagnétique.
- De nombreux phénomènes tels que les interférences et la diffraction ne peuvent être expliqués que si la lumière est une onde.
- Ainsi, comme toute onde, la lumière est définie par une célérité, une longueur, une période et donc une fréquence.

La lumière correspond aux ondes électromagnétiques de longueurs d'ondes visibles par l'œil humain. La couleur perçue par l'œil dépend de cette longueur d'onde.

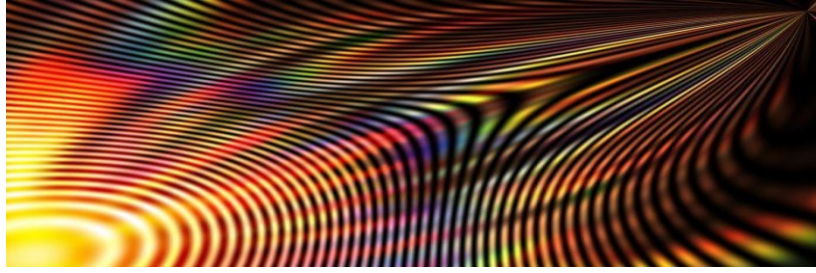


Figure I.2. L'aspect ondulatoire de la lumière est à l'origine de phénomènes d'interférences.

I.1.2. Aspect particulaire de la lumière

Au début du XX^{ème} siècle, l'étude des interactions de la lumière avec la matière amène à la découverte d'un certains nombres de phénomènes qui ne peuvent pas être expliqués par la nature ondulatoire.

Einstein interpréta l'effet photoélectrique (émission d'électrons par une matière exposée à une lumière ou un autre rayonnement électromagnétique). Il posa comme l'hypothèse que l'énergie de la lumière est quantifiée et que chaque quanta d'énergie est associé à une particule de lumière qui fut nommée "photon". Ainsi, certains phénomènes nécessitent de considérer que la lumière est composée d'un flux de photons.

L'aspect corpusculaire de la lumière explique sa faculté à se propager dans le vide, ce qui n'est pas le cas d'une onde mécanique (déplacement de la déformation de la matière uniquement, pas de propagation dans l'espace).

a. Qu'est-ce qu'un photon ?

Un photon correspond à un quantum d'énergie électromagnétique qui présente des caractéristiques particulières. C'est à dire qu'ils sont capables d'interagir avec d'autres particules élémentaires. Cependant, à la différence de nombreuses particules élémentaires, il n'a pas de masse.

L'énergie déployée par un photon est caractérisée de la manière suivante :

$$E = h \cdot \nu \quad (I.1)$$

Avec :

E est l'énergie en joules

h , la constante de Planck en $6.63 \cdot 10^{-34}$ J.s

ν , la fréquence de l'onde en hertz

Ainsi, l'énergie d'un photon est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde. Plus la longueur d'onde est faible plus l'énergie est grande. Ainsi un rayonnement rouge est moins énergétique qu'un rayonnement violet.

I.1.3. Historique et description de la lumière

Dès le XVI^{ème} siècle les savants étudiant la lumière se disputent deux théories qu'ils pensent opposées :

- La lumière est un phénomène ondulatoire. Cette thèse est défendue par Christian Huygens (mathématicien, astronome et physicien néerlandais). Théorie qu'il publia dans le traité de la lumière.
- La lumière est un phénomène corpusculaire. Cette théorie proposée pour la première fois par Pierre Gassendi (mathématicien, philosophe et astronome français) au début du XVI^{ème} siècle et très fortement défendue par Isaac Newton (philosophe, mathématicien, physicien, alchimiste, astronome anglais).
- Du fait de la grande renommée de Newton, la théorie corpusculaire fut alors privilégiée par le monde scientifique de l'époque pendant environ un siècle. Cependant devant l'incapacité de la théorie corpusculaire à expliquer les phénomènes de diffraction, d'interférences ou encore de polarisation, cette théorie fut mise de côté au profit de la description ondulatoire proposée par Huygens.
- Cette théorie est renforcée par les travaux de Thomas Young (physicien et médecin britannique) sur la diffraction et interférences de la lumière (fentes de Young), ainsi que les travaux d'Augustin Fresnel (ingénieur et physicien français) sur la polarisation de la lumière.
- Ce n'est qu'à la fin du XVI^{ème} siècle que Maxwell démontre formellement les caractéristiques ondulatoires de la lumière.

La théorie corpusculaire jusqu'alors mise de côté, est finalement revalorisée par Albert Einstein (physicien théoricien d'origine allemande) grâce aux connaissances en physique quantique notamment. Ce n'est qu'à ce moment-là, finalement assez récemment, que le monde scientifique reconnaît la dualité onde corpuscule de la lumière.

a. Comment quantifier la lumière ?

Les caractéristiques de l'onde lumineuse sont étudiées en optique géométrique et ondulatoire. La photométrie, quant à elle, s'attelle à la caractérisation de l'intensité lumineuse.

b. Flux lumineux

Le flux lumineux est la grandeur photométrique qui caractérise la puissance lumineuse d'une source, telle qu'elle est perçue par l'œil humain. Le flux lumineux est le flux énergétique, c'est-à-dire la puissance électromagnétique rayonnée, pondéré par la sensibilité de l'œil humain, normalisée par la fonction d'efficacité lumineuse spectrale, aux différentes longueurs d'onde.

En effet, un rayonnement électromagnétique monochromatique produit une sensation visuelle d'intensité très variable selon la longueur d'onde, et une sensation nulle en dehors du spectre visible. Les rayonnements invisibles pour l'œil humain, tels que les infrarouges et ultraviolets, qui peuvent pourtant cumuler une puissance rayonnée considérable dans de nombreux cas, n'ont aucune influence dans le calcul ou la mesure du flux lumineux. D'une manière très simplifiée, on peut résumer le flux lumineux dans la figure suivante.

Tableau I.1. Flux lumineux.

Flux lumineux	
Unités SI	lumen (lm)
Dimension	J
Base SI	cd·sr
Nature	Grandeur scalaire conservative extensive
Symbole usuel	Φ_v, Φ

c. Quantité de lumière

Cela correspond à un flux lumineux détecté par l'œil par unité de temps. Son unité est donc le lumen seconde (lm.s). Elle tient compte de la sensibilité de l'œil qui diffère selon la longueur d'onde. Elle correspond à un nombre de photon sauf que les photons ne sont pas équivalents suivant leur longueur d'onde. Certaines longueurs d'ondes sont vues plus intensément que d'autres (l'œil humain est très sensible aux longueurs d'ondes vert-jaune), et certaines pas du tout (infrarouge, ultraviolets...).

d. Intensité lumineuse

L'intensité lumineuse exprime la capacité à éclairer d'une source de lumière. Il s'agit de la grandeur de base de la photométrie, discipline scientifique qui étudie les caractéristiques des sources lumineuses telles qu'elles sont perçues par l'œil humain. Dans le cas d'une ampoule, on peut souvent indiquer le flux lumineux pour quantifier les performances. Il est cependant intéressant de connaître la notion d'intensité lumineuse, et la notion d'éclairement qui en découle directement. Cela permet en effet de choisir le type d'ampoule LED le plus adapté à une situation donnée. Une bougie éclaire avec une intensité lumineuse horizontale d'environ 1 candela.



e. Éclairement

L'éclairement lumineux est la grandeur définie par la photométrie correspondant à la sensation humaine sur la manière dont une surface est éclairée. Pour qu'un objet qui ne produit pas de lumière

par lui-même soit visible, il faut qu'il reçoive de la lumière. Plus il en reçoit, plus il est clair, et visible distinctement. La photométrie définit rigoureusement la lumière reçue, afin de pouvoir calculer cette grandeur, connaissant l'intensité lumineuse des sources de lumière, leur distance et leur direction.

L'éclairement lumineux est la seule grandeur photométrique directement mesurable. Dans le Système international d'unités, il s'exprime en lux (lx).

Tableau I.2. Eclairement lumineux.

Éclairement lumineux	
Unités SI	lux (lx)
Autres unités	1 phot (ph) = 10 000 lx 1 nox = 1 mlx 1 fc ≈ 10,764 lx
Dimension	$L^{-2} J$
Base SI	$cd \cdot sr \cdot m^{-2}$
Nature	Grandeur scalaire intensive
Symbole usuel	E ou E_v

f. Luminance

La luminance est une mesure photométrique de l'intensité lumineuse par unité de surface de lumière voyageant dans une direction donnée. Il décrit la quantité de lumière qui traverse, est émise ou réfléchié par une zone particulière et se situe dans un angle solide donné. La luminosité est le terme pour l'impression subjective de l'étalon de mesure de luminance objectif.

L'unité SI pour la luminance est la candela par mètre carré (cd/m^2), telle que définie par le système international d'unités pour le système métrique moderne. Pour bien illustrer cette mesure, ci-joint une bougie de type chauffe-plat, imagée avec une caméra à luminance; les fausses couleurs indiquent les niveaux de luminance par la barre de droite.



Figure I.3. Luminance.

I.1.4. Phénomènes lumineux

C'est l'ensemble des phénomènes au quels l'œil est sensible. Pour être visible un objet doit pouvoir faire parvenir de la lumière à l'œil.

a. Spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique est le classement des rayonnements électromagnétiques par fréquence, longueur d'onde dans le vide.

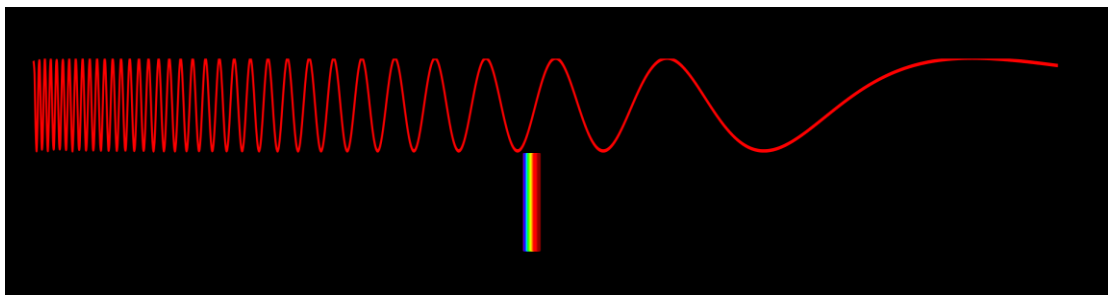
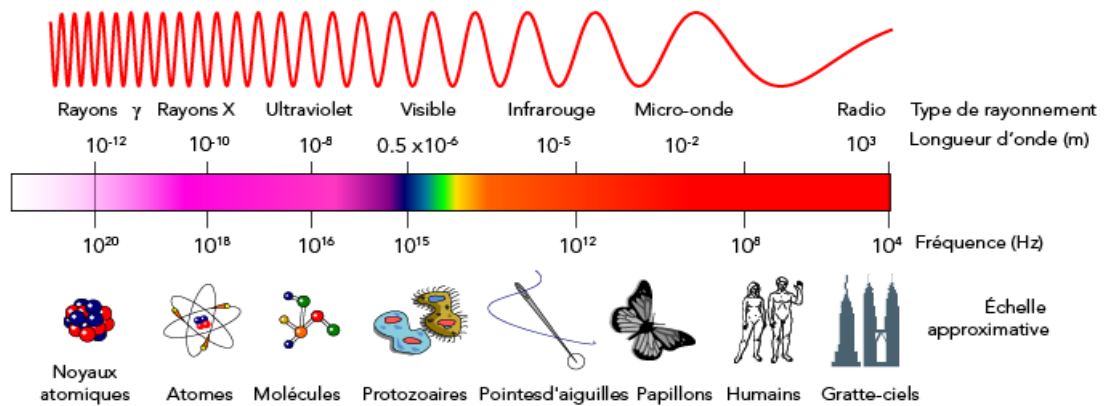


Figure I.4. Régions approximatives en fréquence et en longueur d'onde du spectre électromagnétique.

Domaine Visible

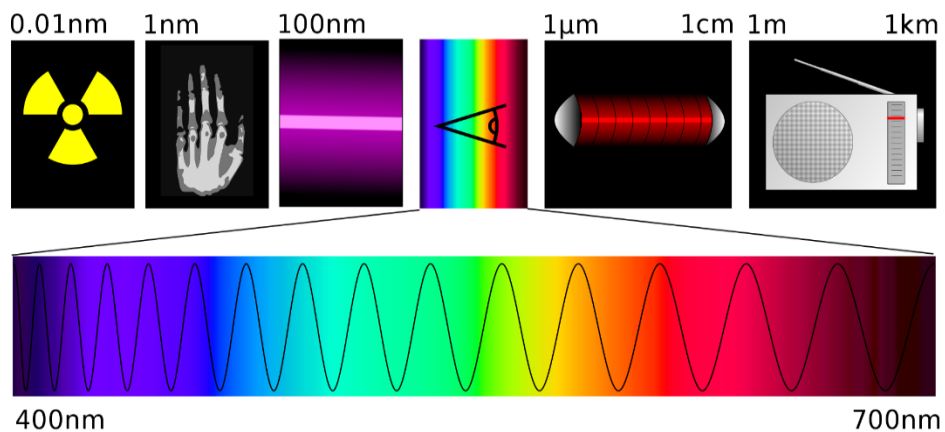


Figure I.5. Applications dans le domaine visible du spectre électromagnétique.

b. Source lumineuse

Source primaire : Emet elle-même de la lumière ; Exemple : Lampe, soleil, bougie.

Source secondaire : Réfléchir de la lumière ; Exemple : Miroir, lune.

Remarque : La lumière se propage dans un milieu transparent.

c. Types de milieux

Milieu transparent : On voit nettement les objets ; Exemple : Air, eau, verre.

Milieu opaque : on ne voit pas les objets ; Exemple : Mur, bois, carton.

Milieu translucide : laisse passer la lumière mais on ne voit pas nettement ; Exemple : Verre dépoli.

d. Système optique

C'est l'ensemble des milieux transparents d'indices de réfractons différents séparés par des dioptries pan ou sphérique.

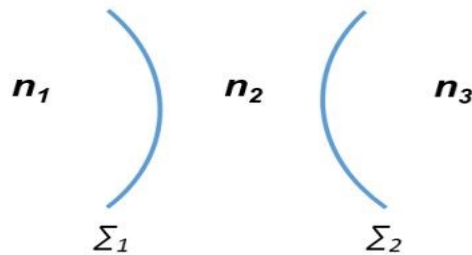


Figure I.6. Milieux transparents d'indices de réfractons différents séparés par des dioptries sphériques.

e. Faisceaux lumineux

C'est l'ensemble des rayons lumineux.

Un faisceau lumineux est constitué d'un ensemble de rayons. Il peut être :

- Parallèle si les rayons qui le constituent sont parallèles,
- Convergent si les rayons qui le constituent, convergent vers un même point,
- Divergent si les rayons qui le constituent, semblent provenir d'un même point.

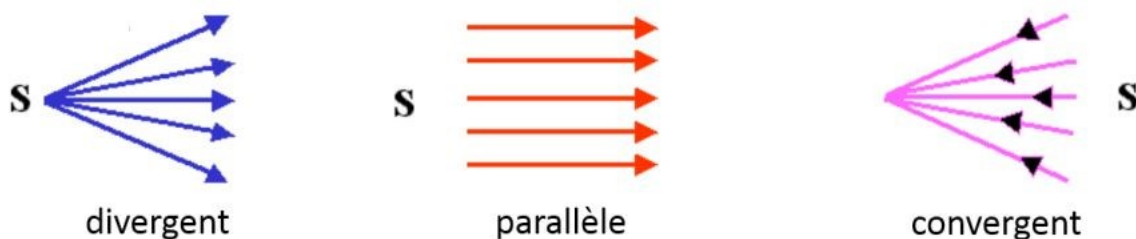


Figure I.7. Différentes formes d'un Faisceau lumineux.

I.1.5. Différents types d'interactions lumière- matière

a. Généralités

Types de rayonnement

On distingue trois types de rayonnement:

- Rayonnement électromagnétique ou photons; comme rayonnement gamma, rayonnement X et la lumière, ...etc.
- Particules chargées; comme les protons, particules alpha, ...etc.
- Particules non chargées; comme les neutrons, faisceaux d'atomes ou de molécules, ...etc.

Rayonnement ionisant et non ionisant

Un rayonnement particulaire ou électromagnétique est ionisant lorsqu'il est susceptible d'arracher des électrons de la matière. Pour cela, il est nécessaire que l'énergie individuelle des particules ou des photons soit supérieure à l'énergie de liaison minimale des électrons du milieu considéré.

Interaction avec la matière

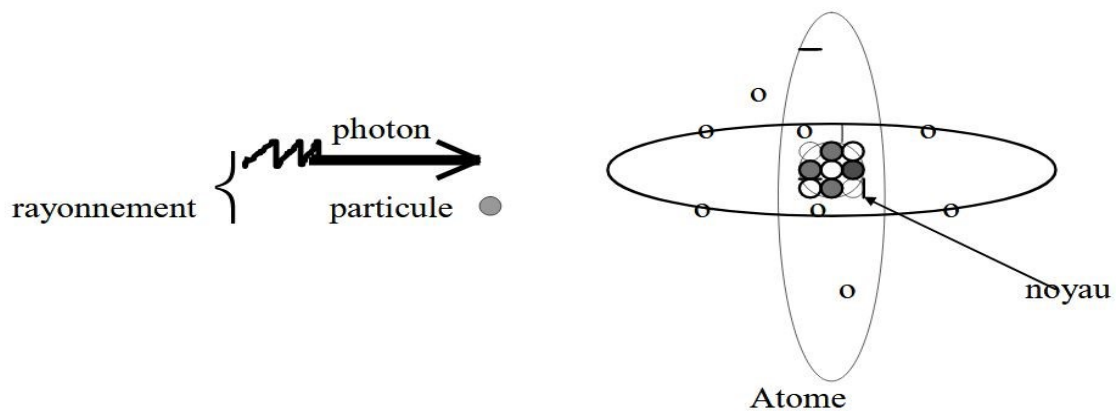


Figure I.8. Interaction photo-matière.

Quand un rayonnement passe à travers la matière, il peut y avoir les interactions suivantes:

- Interactions avec l'atome pour un rayonnement dont la longueur d'onde est de l'ordre de la dimension de l'atome (quelques angströms). Dans la majorité des cas l'interaction se fait avec les électrons atomiques, comme par exemple; l'effet photoélectrique ou l'effet de Compton.
- Interactions avec le noyau atomique pour un rayonnement de longueur d'onde de l'ordre de la dimension du noyau (quelques fermis), c'est le cas des réactions nucléaires.
- Interactions avec les nucléons, pour un rayonnement d'énergie élevée, c'est le cas des bombardements des particules dans les accélérateurs de particules de haute énergie.

D'une manière générale; chaque interaction a une certaine probabilité de se produire. Cette probabilité dépend de la nature et de l'énergie du rayonnement.

En ce qui concerne le développement de notre cours (Suivant le canevas), on va s'intéresser à quatre interactions lumière – matière à savoir la photoconductivité, la photo-ionisation, photoélectron ainsi que le phénomène photovoltaïque.

Photoconductivité

La photoconductivité survient chaque fois que la résistance électrique d'un corps varie lorsqu'on l'éclaire avec un rayonnement électromagnétique appartenant à tous les domaines du spectre lumineux (domaine visible, ultra-violet et infrarouge). 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.

Un matériau photoélectrique peut l'être de manière intrinsèque ou extrinsèque. Dans le 1^{er} cas, seuls les électrons dans la bande de valence du matériau pourront être excités, et un photon doit avoir suffisamment d'énergie pour exciter les électrons à travers la bande interdite. Dans le 2^{ème} cas, des impuretés sont ajoutées au matériau, celles-ci possédant un état énergétique proche de celui de la bande de conduction. Cela a pour effet de faciliter le transfert des électrons, et le matériau a besoin de photons moins énergétiques, donc une longueur d'onde plus grande, et une plage d'utilisation plus importante.

Les applications de cette photoconductivité sont multiples, on peut citer par exemple les capteurs de luminosité.

Photo-ionisation

La photo ionisation est le processus physique dans lequel un ion est formé à partir de l'interaction d'un photon avec un atome ou une molécule, pour être plus explicite, La photo ionisation est le processus qui fait briller des filaments autrefois invisibles dans l'espace lointain.



Figure I.9. La photo ionisation dans l'espace.

Toutes les interactions entre un photon et un atome ou une molécule ne se traduiront forcément pas par une photo ionisation. La probabilité de photo ionisation est liée à la section efficace de photo ionisation de l'espèce, qui dépend de l'énergie du photon (elle est proportionnelle à son nombre d'onde) et de l'espèce considérée. Dans le cas des molécules, la section efficace de photo ionisation peut être estimée par examen des facteurs de Franck-Condon entre une molécule à l'état fondamental et l'ion cible. Pour les énergies photoniques inférieures au seuil d'ionisation, la section efficace de photo ionisation est proche de zéro. Mais avec le développement des lasers pulsés, il est devenu possible de créer une lumière extrêmement intense et cohérente où une ionisation multi-photon peut se produire.

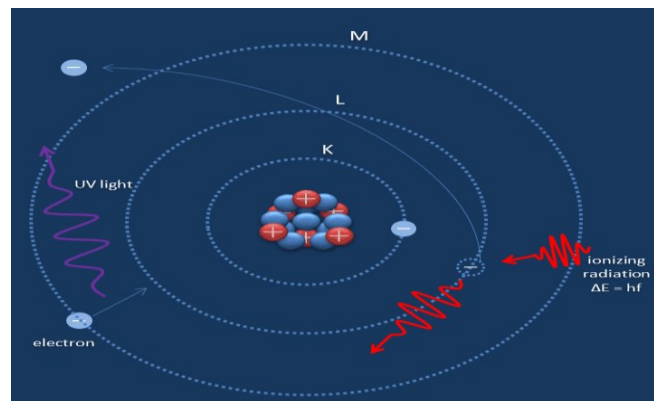


Figure I.10. La photo ionisation au niveau d'une particule.

On trouve aussi l'ionisation multi-photons, dans ce cas-là, Plusieurs photons d'énergie en dessous du seuil d'ionisation peuvent en fait combiner leurs énergies pour ioniser un atome. Cette probabilité décroît rapidement avec le nombre de photons requis, mais le développement de lasers pulsés très intenses le permet toujours. Dans le régime perturbateur la probabilité d'absorption de N photons dépend de l'intensité de lumière laser I en I^N . Pour des intensités plus élevées, cette dépendance devient invalide en raison de l'effet AC Stark qui se produit alors.

Photoélectron

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

Lorsque l'effet photoélectrique se manifeste, toute l'énergie du photon incident se transmet à l'électron des couches profondes. Une quantité d'énergie minimale est nécessaire pour extraire l'électron de l'atome, l'énergie excédentaire est transmise à l'électron sous forme d'énergie cinétique.

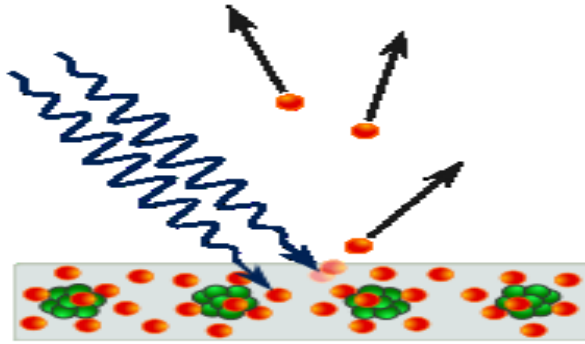


Figure I.11. Un schéma montrant l'émission d'électrons depuis une plaque métallique. L'émission de chaque électron (particules rouges) requiert une quantité minimale d'énergie, laquelle est apportée par un photon (ondulations bleues).

Pour simplifier les choses, on peut dire que l'effet photoélectron se provoque lorsqu'une onde électromagnétique (Lumière) incidente éjecte des électrons d'un matériau donné, figure I.12.

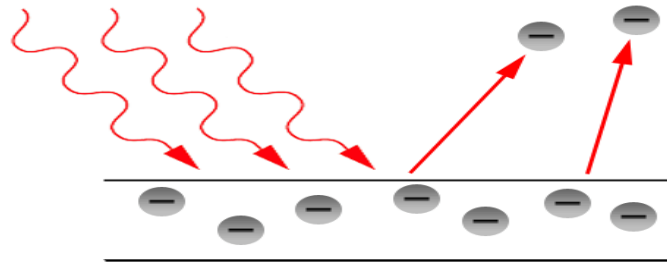


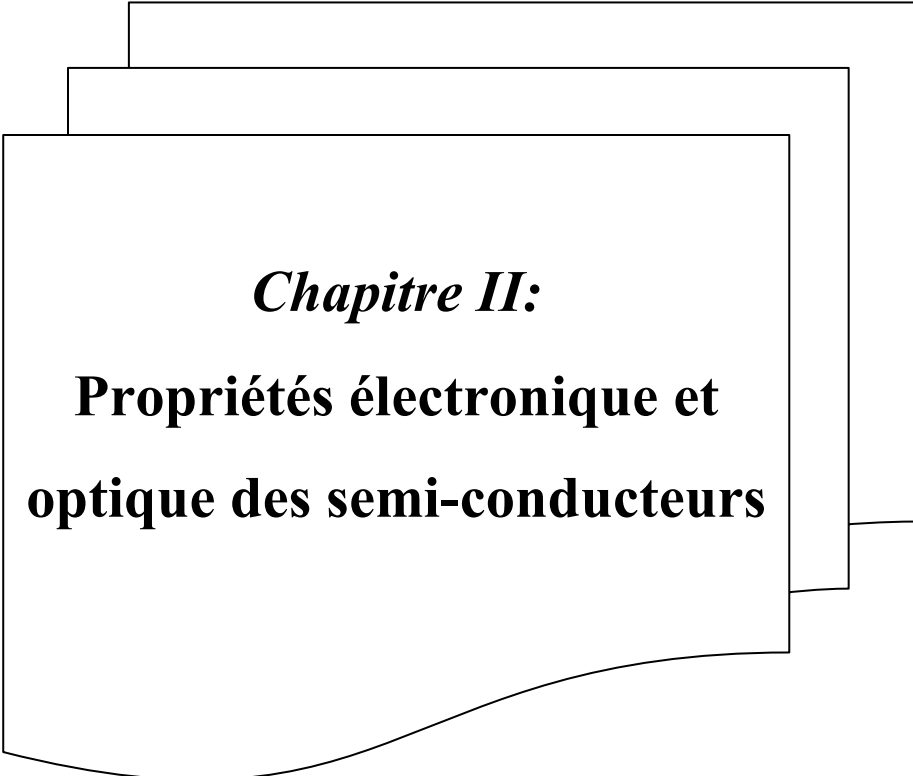
Figure I.12. Une onde électromagnétique incidente éjecte les électrons d'un matériau.

Photovoltaïque

La photovoltaïque est la conversion de la lumière en électricité à l'aide de matériaux semi-conducteurs qui présentent l'effet photovoltaïque, un phénomène étudié en physique, en photochimie et en électrochimie. L'effet photovoltaïque est utilisé commercialement pour la production d'électricité et comme capteurs photoélectriques.

Conclusion

D'après ce qu'on a vu jusqu'à maintenant, c'est que la lumière est considérée comme un phénomène ondulatoire-corporel, donc caractérisée par sa longueur d'onde (qui définit la couleur dans le spectre électromagnétique). De façon générale, les atomes ont tendance à s'associer pour former des molécules stables par mise en commun d'électrons. Lorsque la lumière arrive sur la matière, ces atomes et molécules peuvent réagir de diverses manières. Nous avons présenté dans ce chapitre une étude générale sur la lumière autant qu'une onde (Aspect Ondulatoire) et un photon (Aspects Corporel) où on a détaillé beaucoup plus les propriétés de la lumière (Flux lumineux, flux luminance, spectre électromagnétique...) ainsi que les différents types d'interactions lumière – matière (photoconductivité, photo-ionisation, photoélectron, photovoltaïque).



Chapitre II:
**Propriétés électronique et
optique des semi-conducteurs**

Chapitre II: Propriétés électronique et optique des semi-conducteurs

II.1. Propriétés électroniques des semi-conducteurs

II.1.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à un rappel des principes de base de la physique de semi-conducteurs. Nous passons brièvement en revue les modèles de l'électron. Ceci nous permet d'introduire les concepts de base de la physique des semi-conducteurs tels que la structure de bande des diagrammes d'énergie. Des notions, utiles pour la compréhension des interactions lumière-matière.

Cette partie traite entre autres les interactions entre lumière et semi-conducteur, on va détailler en quelque sorte les dispositifs électroniques à base de semi-conducteurs ainsi que les aspects physiques de la lumière. On traite aussi les jonctions PN (Révision pour les étudiants) qui sont primordiale pour la bonne compréhension de la suite des interactions entre la lumière et les semi-conducteurs.

II.1.2. Jonction PN

Une jonction PN correspond à la réunion de deux semi-conducteurs, l'un dopé type N (contenant des électrons libres) et l'autre dopé type P (contenant des trous (emplacements libres)) tous deux électriquement neutres.

Lors de cette mise en contact, les électrons de la zone N sont dirigés vers la zone P car les électrons sont attirés par la zone « P » Positive (zone P) et compensent les trous existant dans cette zone par phénomène de diffusion (et inversement, les trous de la zone P sont entraînés vers les électrons de la zone N) se neutralisant les uns les autres.

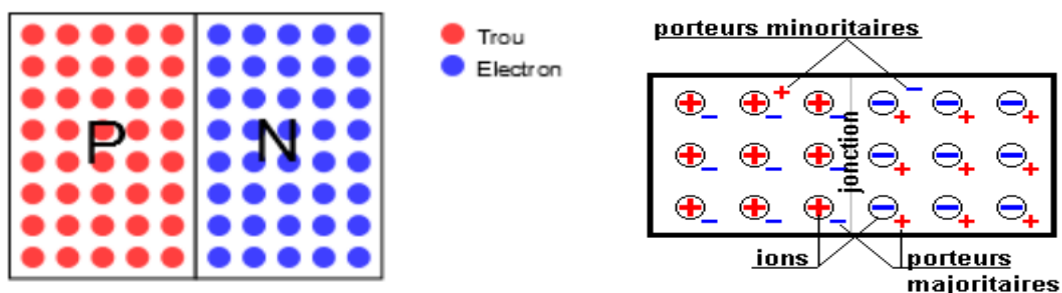


Figure II.1. Jonction PN à l'équilibre.

Une jonction PN est réalisée par la juxtaposition de deux régions de types différents soit du même semi-conducteur, soit de deux semi-conducteurs différents.

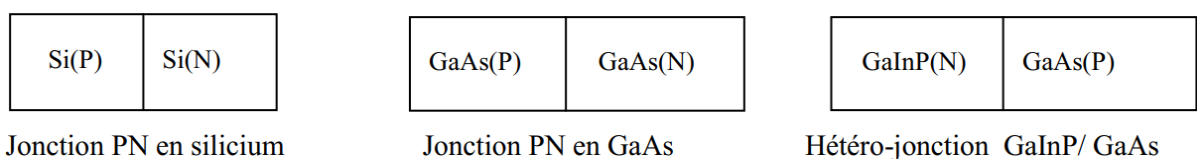


Figure II.2. Différentes Variétés de Jonction PN.

Dans le modèle unidimensionnel, la distribution des impuretés dans une jonction sera étudiée uniquement selon un axe Ox. La figure 2.3, nous montre trois sortes de jonctions (Jonction réelle, abrupte et graduelle) :

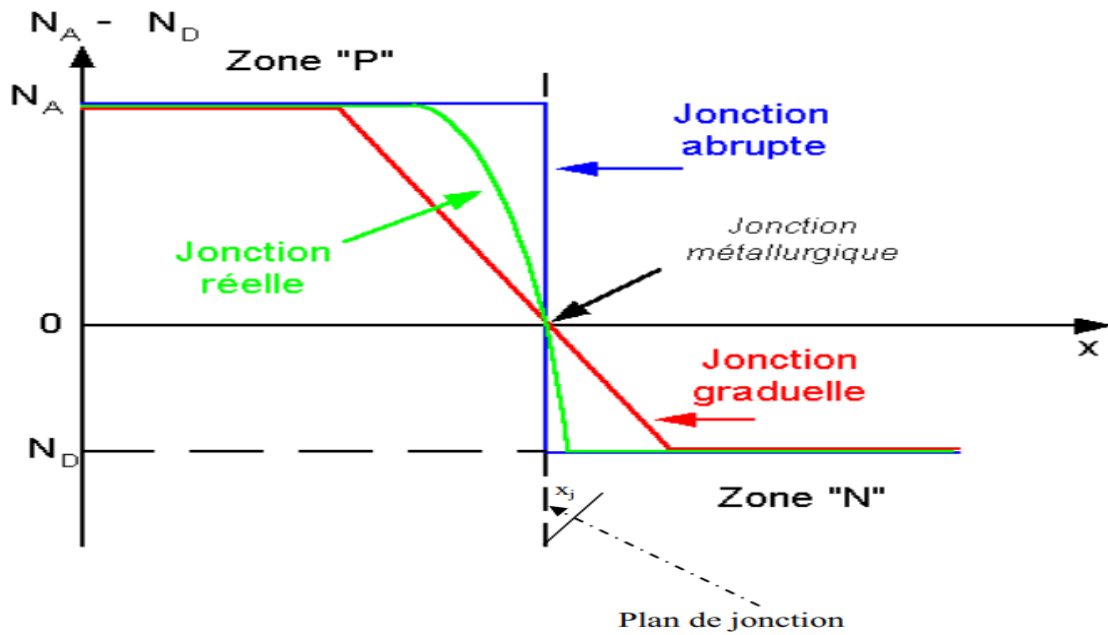


Figure II.3. Profil de dopage dans une jonction PN.

- Une jonction abrupte où le passage de la région N à la région P se fait d'une façon brutale dans le plan x_j , le passage de la région P à la région N s'effectue sur une épaisseur infiniment fine.
- Une jonction graduelle (ou progressive) où le passage de la région N à la région P se fait d'une manière graduelle, un cas intéressant de ce type de jonction, est la jonction graduelle linéaire (JGL).
- Dans le cas d'une jonction abrupte, on peut parler de plan de jonction, plan où le semi-conducteur change de type.

a. Jonction abrupte à l'équilibre thermodynamique

Avant la réalisation de la jonction, les deux matériaux P et N étaient quasi-neutres électriquement, la figure II.4 illustre cela :

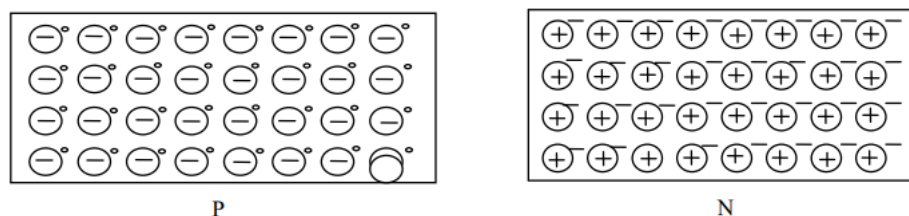


Figure II.4. Modèle représentant la neutralité électrique dans les matériaux SC(P) et SC(N).

Quand on réalise la jonction PN, les trous majoritaires dans la région P diffusent dans la région N où ils sont minoritaires et les électrons majoritaires dans la région N diffusent dans la région P : c'est un régime transitoire.

Les trous et les électrons diffusés de part et d'autre de la jonction laissent derrière eux des charges fixes non compensées : des charges \ominus côté P et des charges \oplus côté N, ce qui donne naissance à une zone de charge d'espace (ZCE).

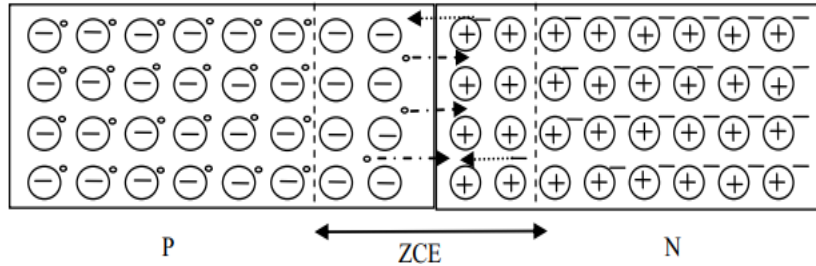


Figure II.5. Jonction PN : Formation de la ZCE.

La zone ZCE est dépourvu de porteurs libres (hypothèse de Schokley)*, elle est constituée d'ions donneurs et accepteurs non compensés. Ces ions créent donc un champ électrique qui va s'opposer à la diffusion de porteurs libres majoritaires de part et d'autre de la jonction, donc au courant des majoritaires I_M orienté de P vers N. Par contre ce champ favorise le passage de porteurs minoritaires (charges minoritaires très proche de la jonction) à travers la ZCE, donnant lieu à un courant de minoritaires I_m orienté de N vers P, figure II.6.

L'équilibre de la jonction qui se traduit par un courant des minoritaires I_m égale et opposé au courant des majoritaires I_M ($I_M = I_m$) est atteint par l'établissement d'une barrière de potentiel constante V_d au niveau de la zone de charge d'espace ZCE, figure II.7.

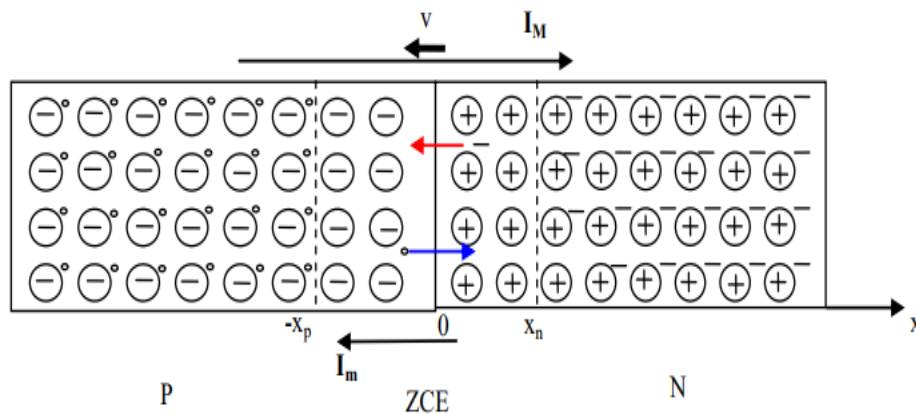


Figure II.6. Jonction PN en régime transitoire.

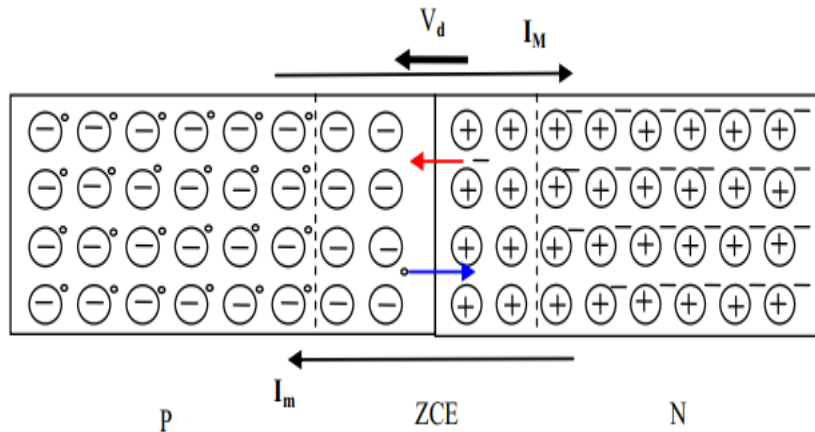


Figure II.7. Jonction PN en régime d'équilibre.

Hypothèses de Schokley:

- La densité des charges mobiles dans la ZCE est négligeable devant la densité des charges fixes. On admet qu'il n'y a pas de charges mobiles dans la ZCE. C'est l'hypothèse de la zone totalement désertée de porteurs majoritaires.
- La ZCE s'étend : de $-x_p$ à 0 du côté "P" et de 0 à x_n du côté "N"
 $W = x_p + x_n$: épaisseur de la ZCE en μm
- Aux plans $x = -x_p$ et $x = x_n$ le semi-conducteur passe brutalement de l'état neutre à l'état déserté.

b. Caractéristiques de la ZCE

Charge d'Espace

Essayons maintenant de déterminer la densité de charge électrique existant dans le domaine $[-x_p, x_n]$. La zone chargée négativement s'étend du point $x=0$ à $x=-x_p$ du côté P et la zone chargée positivement s'étend du point $x=0$ à $x=x_n$ du côté N. La densité de charge totale en un point x est donnée par :

$$\rho(x) = e (p(x) - n(x) + N_D(x) - N_A(x)) \quad (\text{II.1})$$

Si nous considérons que les concentrations de dopage N_D et N_A sont uniformes dans tout le volume des semi-conducteurs N respectivement P, nous aurons:

$$\left\{ \begin{array}{l} x < -x_p \text{ et } x > x_n : \rho(x) = 0 \\ -x_p \leq x < 0 : \rho(x) = -eN_A \\ 0 < x \leq x_n : \rho(x) = eN_D \end{array} \right. \quad (\text{II.2})$$

On peut illustrer ces trois équations en un tracé dit tracé de la densité de charge volumétrique $\rho(x)$ est donné par la figure II.8:

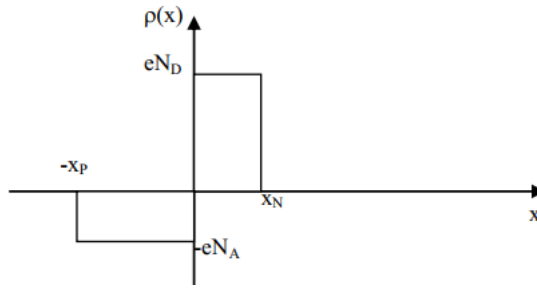


Figure II.8. Densité de charge volumique.

Diagramme d'énergie dans une jonction PN

Les concentrations de porteurs de charges côté N de la jonction sont données par:

$$n_n = N_c \cdot \exp\left(-\frac{E_{cn} - E_F}{KT}\right) \quad (\text{II.3})$$

Et

$$n_p = N_c \cdot \exp\left(-\frac{E_{cp} - E_F}{KT}\right) \quad (\text{II.4})$$

Avec : K est la constante de Boltzmann

T est la température (en Kelvin)

De même, nous avons :

$$E_{cn} = -eV_n \quad (\text{II.5})$$

Et

$$E_{cp} = -eV_p \quad (\text{II.6})$$

Ce qui donne :

$$V_n - V_p = V_d = \frac{KT}{e} \cdot \log \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (\text{II.7})$$

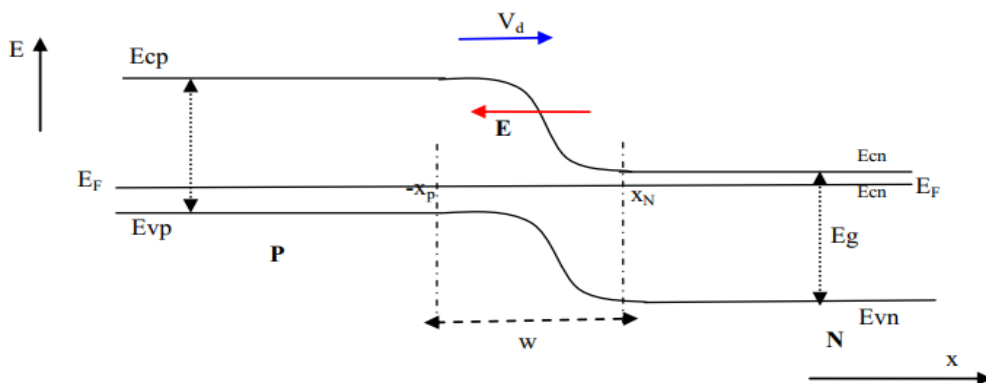


Figure II.9. Diagramme d'énergie dans une jonction PN à l'équilibre thermodynamique.

Densité de porteurs de charges aux limites de la ZCE

- Dans la région N, nous avons $n_n = N_D$ et $P_n = \frac{n_i^2}{N_D}$
- Dans la région P, nous avons $P_p = N_A$ et $n_p = \frac{n_i^2}{N_A}$

Et en tenant compte de l'expression de V_d , nous aurons:

$$P_n = P_p \cdot \exp - \frac{e V_d}{KT} \quad (\text{II.8})$$

Et

$$n_p = n_n \cdot \exp - \frac{e V_d}{KT} \quad (\text{II.9})$$

Par conséquent, on peut dire que toute variation du potentiel V_d entraîne une variation des densités de porteurs minoritaires aux limites de la ZCE.

Jonction PN polarisée

Polarisation directe : $V_a > 0$

Si la tension passe de la zone N à la zone P, la jonction est alimentée en sens direct.

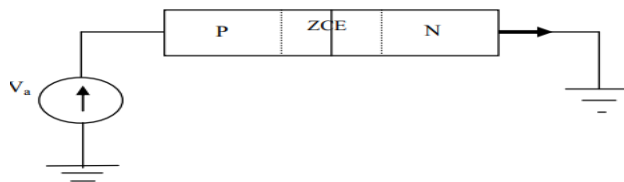


Figure II.10. Jonction polarisée.

En simplifiant la figure II.10, on obtient :

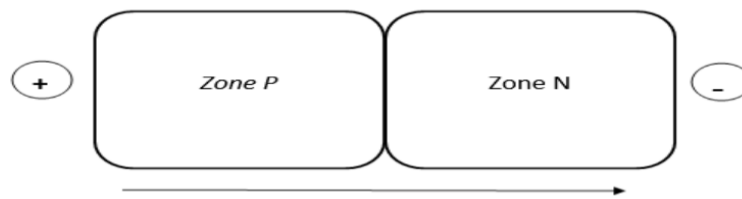


Figure II.11. Figure simplifiée d'une jonction polarisée.

On peut dire que les parties P et N sont des "conducteurs", donc la quasi-totalité de la tension V_a se trouve appliquée au niveau de la zone de charge d'espace (ZCE). Sur les figures II.12.a ainsi que la figure II.12.b, nous représente le diagramme de potentiel ainsi que le diagramme d'énergie:

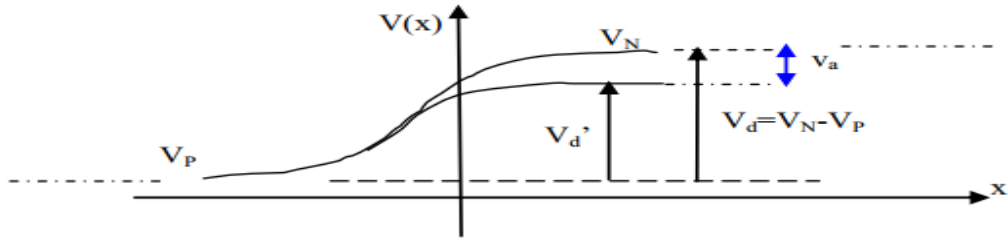


Figure II.12.a. Diagramme de potentiel dans une jonction PN polarisée.

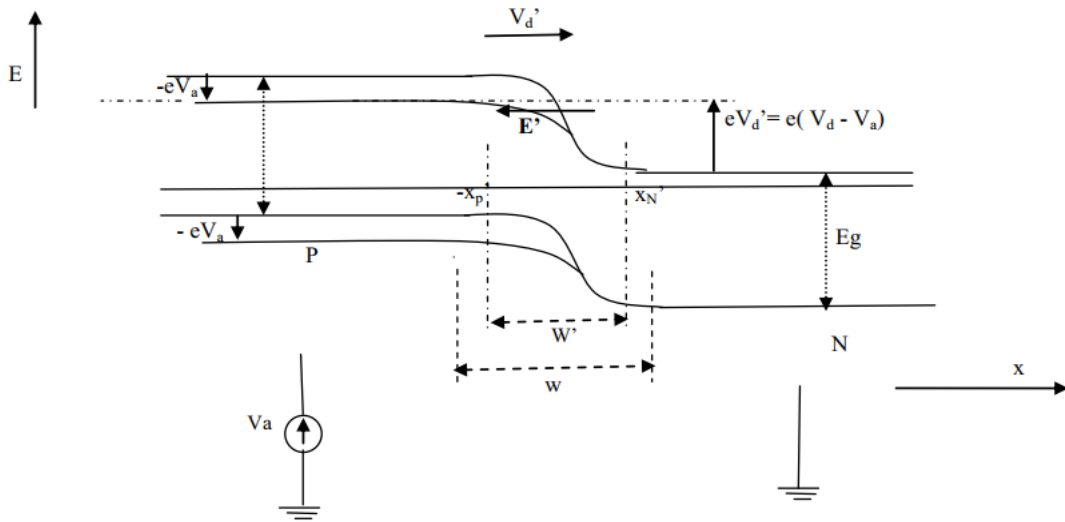


Figure II.12.b. Diagramme d'énergie dans une jonction PN polarisée.

A partir d'une barrière de potentiel $V_d' = V_s$ (la tension de seuil), les électrons majoritaires dans N transitent facilement vers la partie P et les trous majoritaires dans P transitent facilement dans N; conséquence, nous aurons un courant de diffusion I_d des électrons et des protons :

$$I_d = I_{de} + I_{dp} \quad (II.10)$$

Avec I_d est appelé courant direct de la jonction PN.

Polarisation inverse : $V_a < 0$

Si la tension passe de la zone P à la zone N, la jonction est alimentée en sens inverse.

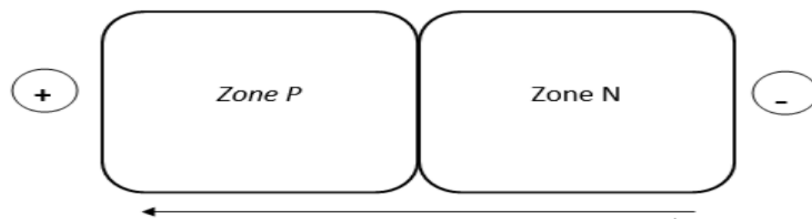


Figure II.13. Jonction PN polarisée en Inverse.

a. Courant traversant la ZCE

L'expression de courant établit ci- dessus restera valable:

$$I_d = I_s \cdot \left(\exp \frac{qV_a}{KT} - 1 \right) \quad (II.11)$$

La polarisation est négative, $V_a < 0$, ce qui donne : $I_a = I_i \approx -I_s$ (nA), le courant inverse I_i n'est que le courant de saturation de la diode en valeur absolue, il est donc quasi-indépendant de la tension de polarisation V_a .

b. Claquage de la jonction PN

Si on continue à augmenter la tension de polarisation inverse V_a jusqu'à une certaine valeur V_c : appelée tension de claquage (breakdown voltage en Anglais), le courant inverse croît très brusquement : c'est le phénomène de claquage inverse, la figure II.14 illustre cela :

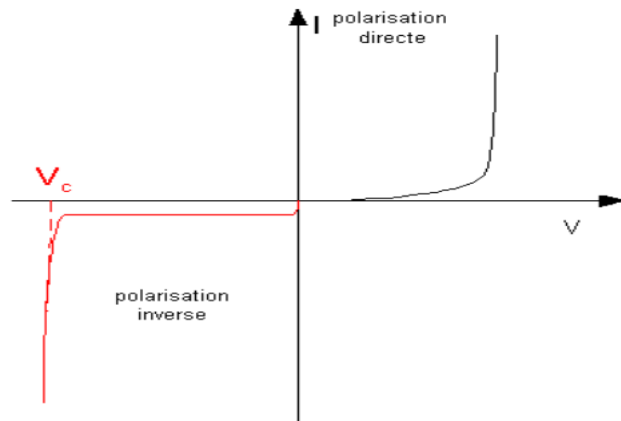
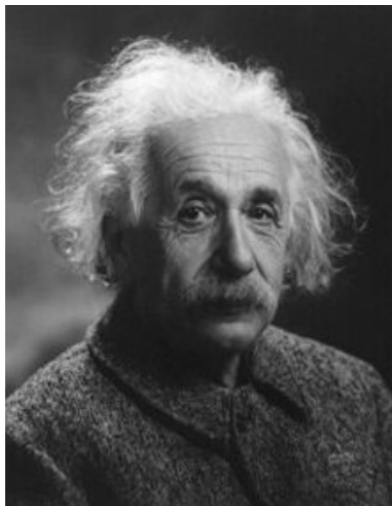


Figure II.14. Claquage inverse de la jonction PN.

Ce claquage peut être destructif si on ne limite pas l'augmentation du courant inverse par un élément extérieur, tel qu'une résistance par exemple.

II.2. Notions sur les bandes d'énergie, absorption et émission

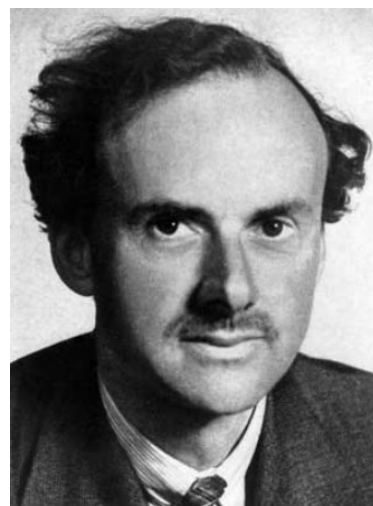
II.2.1. Historique



Albert Einstein 1879-1955
Émission stimulée.



Niels Bohr 1885-1962
Traitement quantique de
l'interaction matière
rayonnement.



Paul Dirac 1902-1984
Fondements de
l'électrodynamique
quantique, règle d'or de Fermi.



Edward Purcell
1912-1997
Effet Purcell.



Enrico Fermi 1901–1954
Règle d'or de Fermi.



Edwin Jaynes
1922–1998
Modèle de Jaynes-Cummings.

L'émission spontanée et l'absorption sont les deux mécanismes d'interaction entre la matière et la lumière en 1916, Einstein calculant l'équilibre thermodynamique entre les niveaux excités d'un atome placé dans ce même corps noir et le champ électromagnétique en présence est conduit à postuler l'existence d'un nouveau mécanisme d'émission lumineuse, l'émission stimulée. Ce qui donnera naissance cinquante ans plus tard au premier dispositif à émission stimulée, le maser dans les micro-ondes (1952-1954) et dans les longueurs d'ondes optiques en 1960 : le LASER.

Au début du XX^{ème} siècle, les nouveaux outils théoriques de l'électrodynamique quantique permettent de mieux comprendre ces mécanismes et de prédire les valeurs numériques de nombreux paramètres (temps de vie, force d'oscillateur, etc...). Paradoxalement, alors que l'absorption et l'émission stimulée peuvent se comprendre dans le cadre d'une théorie semi-classique, l'émission spontanée se révélera être un effet complètement quantique.

II.2.2. Notions sur les bandes d'énergie

a. Bandes de conduction, bande de valence et zone interdite

Dans un atome isolé, les électrons sont répartis sur différentes couches correspondant à des niveaux d'énergie quantifiés (programme de seconde: couches K, L, M).

Dans un cristal, les niveaux d'énergie des atomes le constituant « se chevauchent » et se mélangent de sorte que les niveaux d'énergie accessibles aux électrons sont beaucoup plus larges et constituent ce qu'on appelle des « bandes » d'énergie (chaque bande est en fait constituée de multiples niveaux d'énergie discrets autorisés).

Rappels

Les atomes sont constitués de niveaux énergétiques discrets.

- La bande de valence dans laquelle les électrons ne font que participer aux liaisons inter atomiques conférant au cristal sa solidité.
- La bande de conduction dans laquelle les électrons sont libres de se mouvoir et de conduire ainsi un courant électrique.
- La bande interdite séparant les bandes de valence et de conduction dans laquelle on ne trouve aucun électron (pas de niveau d'énergie).

Un matériau est conducteur, isolant ou semi-conducteur selon le remplissage de ces bandes :

- Conducteur : la bande de conduction est partiellement remplie et ces électrons peuvent en présence d'un champ électrique acquérir une énergie supplémentaire et peupler des niveaux d'énergie supérieure disponibles dans la bande de conduction. Un courant électrique peut donc passer.
- Isolant : aucun électron ne se trouve dans la bande de conduction et la bande interdite est trop large pour permettre à des électrons de passer de la bande de valence à la bande de conduction, même en présence d'un champ électrique. Aucun courant ne peut passer.
- Semi-conducteur : dans ces matériaux, la bande interdite est moins large et un électron peut acquérir grâce à l'agitation thermique (liée à la température ambiante) une énergie suffisante pour « sauter » de la bande de valence à la bande de conduction, laissant un trou (charge +) dans la bande de valence. Sous l'action d'un champ électrique, les électrons situés dans la bande de conduction et les trous situés dans la bande de valence peuvent acquérir un mouvement collectif : le solide devient conducteur.

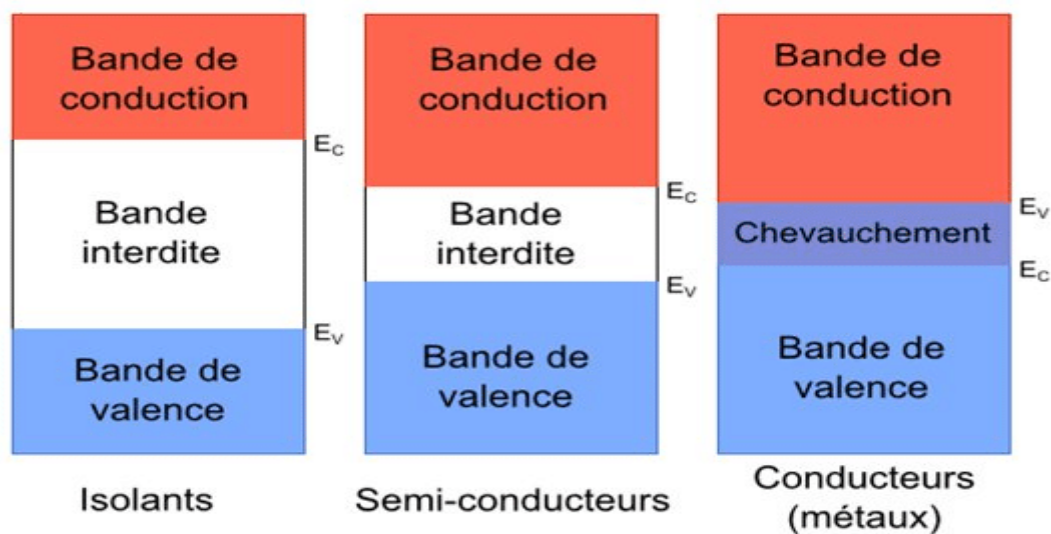


Figure II.15. Schéma des bandes d'énergie dans le cas d'un matériau isolant, semi-conducteur puis conducteur, de gauche à droite

Qui sont peuplés par les électrons selon une statistique de Fermi-Dirac.

$$f(E) = \frac{1}{\exp \frac{(E-E_f)}{K_B T} + 1} \quad (\text{II.12})$$

Que l'on peut souvent approximer par une statistique de Maxwell-Boltzmann pour les couches supérieures quand $E > E_f$, Ps : $K_B = K$ (constante de Boltzmann).

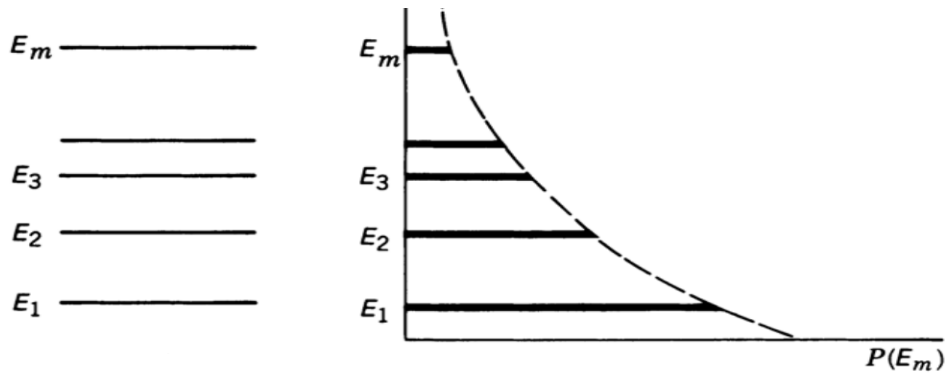


Figure II.16. Statistique d'occupation Energétique d'un atome.

L'expérience nous dit que de la lumière peut être émise ou absorbée par un atome. Nous avons vu que l'énergie lumineuse est quantifiée par quanta d'énergie $E=h.v$. Il est assez raisonnable de décrire l'émission ou l'absorption de lumière comme l'émission ou l'absorption d'un quanta d'énergie lumineuse.

Cette énergie étant transférée à l'atome sous forme de la promotion d'un électron d'énergie E_1 vers un état d'énergie E_2 , par conservation de l'énergie:

$$|E_2 - E_1| = h.v \quad (\text{II.13})$$

$$E_2 > E_1 \text{ Absorption}$$

$$E_2 < E_1 \text{ Émission}$$

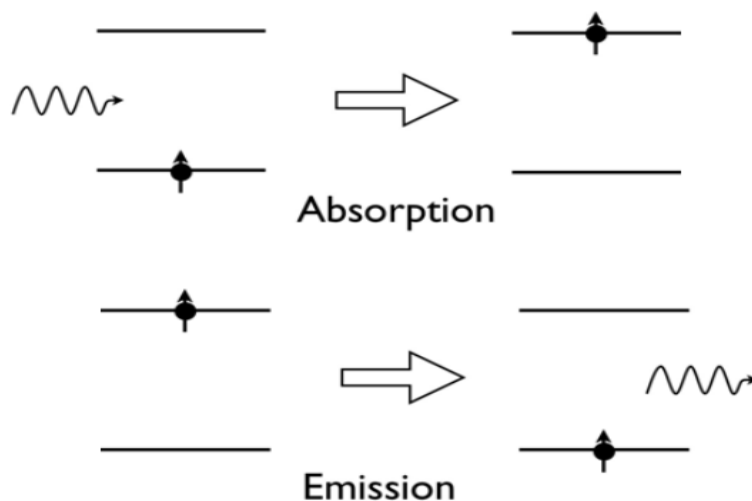


Figure II.17. Phénomènes d'absorption et d'émission.

Ou plus généralement :

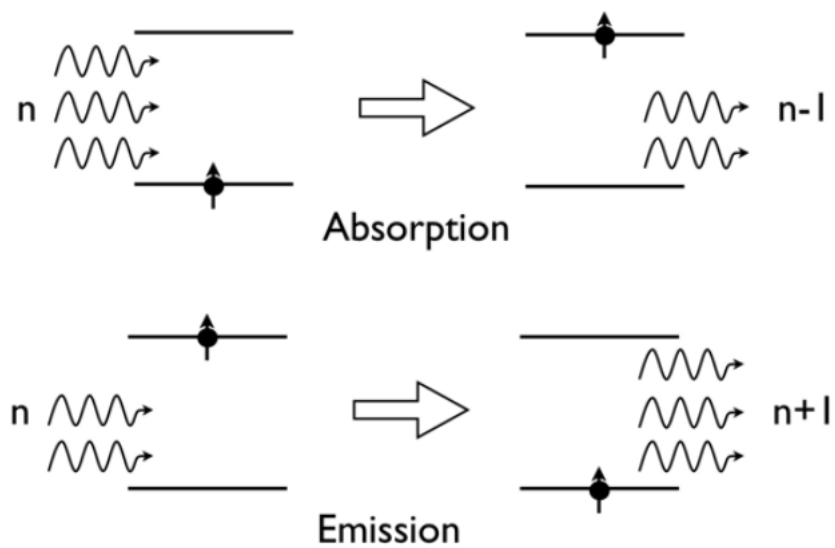


Figure II.18. Phénomènes d'absorption et d'émission (Version Standard).

Conclusion

Au début des années 50, l'idée de transmettre des signaux à haut débit en utilisant des porteuses dans les régions optiques était déjà établie. Malheureusement, n'étaient disponibles ni source de lumière, ni milieu de transmission appropriés. Suite à l'invention des dispositifs émetteurs/ récepteurs de lumières, l'attention des chercheurs s'est focalisée sur le développement d'un milieu de transmission adéquate. Jusqu'à la fin des années 60, le concept de confinement de la lumière, ainsi que la possibilité d'utiliser des milieux de transmissions 100% optiques étaient largement diffusés.

La suite de ce cours traite l'ensemble des émetteurs/ récepteurs de lumières ainsi qu'une étude détaillée de la fibre optique qui représente un moyen très efficace dans une transmission de données.



Chapitre III:
Emetteurs de lumière

Chapitre III: Emetteurs de lumière

III.1. Introduction

Dans un premier temps (Chapitre I et II), on a pu voir tout ce qui se passe en matière d'interactions entre lumières (Aspects Ondulatoires et Corpusculaires) et les semi-conducteurs. Pour comprendre les dispositifs dits optoélectroniques, cette section étudiera d'une manière détaillée les émetteurs de lumière (LED(s), LASER, afficheurs LCD...).

III.2. Rappels

III.2.1. Jonction P-N à l'équilibre

Une jonction PN à l'équilibre (figure III.1). La zone N renferme une certaine quantité d'électrons libres, alors que la zone P contient des trous.

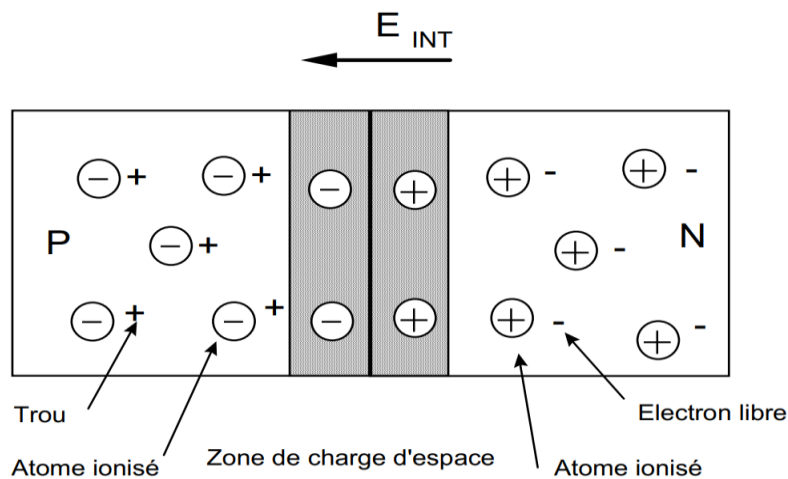


Figure III.1. Jonction PN à l'équilibre.

Après voisinage de la jonction, les électrons libres de la zone N vont diffuser vers la zone P et réciproquement, les trous de la zone P vont diffuser vers la zone N. Il y a recombinaison chaque fois qu'un électron rencontre un trou. Au repos, il existe donc au voisinage de la jonction une zone dans laquelle il n'y a plus de porteurs libres : du côté N il ne reste plus d'électrons libres et il ne subsiste que des atomes ionisés positivement. De même du côté P, il ne subsiste que des atomes ionisés négativement. Il en résulte la création d'une zone de charge d'espace. Il s'établit ainsi une barrière de potentiel qui repousse les trous vers la zone P et les électrons vers la zone N.

III.3. Emetteurs de lumière

Les sources optiques à semi-conducteurs sont très utilisées pour plusieurs aspects : du fait de leurs petites tailles, des émissions à des longueurs d'onde λ dans le visible et l'infrarouge, un bon rendement, la possibilité de moduler le courant, une faible consommation, d'une facile intégration et d'un prix intéressant.

A cause de la structure de bande qui est une propriété interne des semi-conducteurs, tous les matériaux semi-conducteurs ne sont pas adaptés pour des émetteurs optiques, en général la structure

de bande doit être directe. Les diodes électroluminescentes, DEL, constituent les composants les plus simples, tout le spectre visible est couvert, elles peuvent être modulées par le courant jusqu'à des fréquences de l'ordre de 100 MHz.

III.3.1. Matériaux semi-conducteurs pour les émetteurs de lumières

Dans les émetteurs dits classiques les transitions ont lieu entre niveaux d'énergie discrets, comme on l'a vu au chapitre précédent, les transitions ont lieu entre bandes d'énergie séparé par une bande d'énergie interdite appelée aussi gap.

Un photon peut être émis dans un semi-conducteur si un électron transite de la bande de conduction à la bande de valence, il s'agit d'une recombinaison électron-trou.

La différence d'énergie entre les deux bandes est l'énergie de gap E_g . Ce phénomène est appelé électroluminescence. Dans ce cas l'énergie du photon est donnée par :

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

Le rayonnement émis par le semi-conducteur autour de la longueur d'onde centrale d'émission λ_0 , présente une largeur spectrale $\Delta\lambda$. Le semi-conducteur doit vérifier une autre condition: il faut que la transition de l'entrer la bande de conduction et la bande de valence soit directe, c'est à dire sans changement de vecteur d'onde, ou impulsion, de l'électron. Ceci exclut un certain nombre de semi-conducteurs simples comme le Silicium Si, ou le Germanium Ge.

Certains matériaux à structure indirecte peuvent aussi être utilisés, par exemple GaP très fortement dopé, mais en général ils possèdent des rendements beaucoup plus faibles.

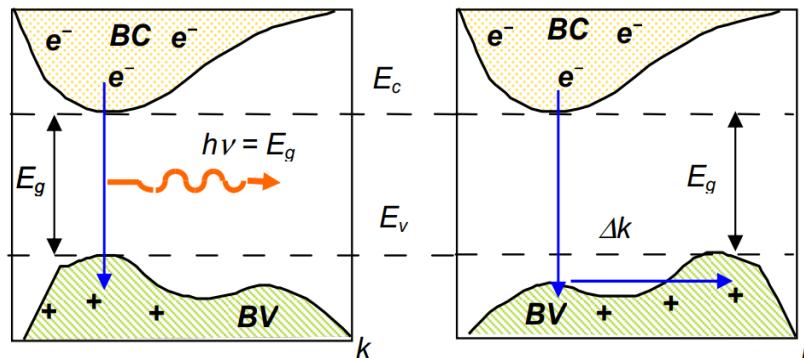


Figure III.2. Transition directe et indirecte : émission d'un photon par recombinaison électron-trou dans une transition directe radiative (gauche) et transition non-radiative indirecte (droite).

a. Rendement interne d'électroluminescence

Le rendement interne d'électroluminescence est défini par :

$$\eta_i = \frac{1/\tau_r}{1/\tau_r + 1/\tau_{nr}} \quad \text{(III.2)}$$

Où τ_r est la durée de vie des porteurs, électrons et trous, avant recombinaison radiative, l'inverse $1/\tau_r$ correspond au taux de recombinaisons radiatives. τ_{nr} est le temps de vie des porteurs avant recombinaison non radiative. Par exemple pour Si $\tau_{rSi}=10$ ms et pour AsGa $\tau_{rAsGa}=10$ ns, pour Si et AsGa $\tau_{nr}=10$ ns. Donc d'après l'expression du rendement un semi-conducteur à bande indirecte, ici Si, possède un rendement très inférieur, $\eta_{Si}=0,005\%$, par rapport à un semi-conducteur à bande directe, ici AsGa est $\eta_{AsGa}=50\%$.

Pour avoir une émission significative, il faut créer une densité de porteurs en excès ΔN , obtenue par le courant d'injection I dans une diode, le taux de densité de porteurs R en excès s'exprime alors par :

$$R = \Delta N / \tau = I / e \text{ vol} \quad (\text{III.3})$$

Avec

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}} \quad (\text{III.4})$$

τ est le temps de recombinaison total et vol est le volume de la zone active. La puissance P_{int} à l'intérieur du composant sera alors:

$$P_{int} = h \nu . R . \text{vol} . \eta_i \quad (\text{III.5})$$

Exemple :

Si on considère pour AsGa $\eta_i=50\%$, $\tau=ns$ et $\Delta N=10^{17} \text{ cm}^3$.

On trouve une densité de puissance par unité de volume $p = 230 \text{ kW.cm}^{-3}$.

b. Jonctions semi-conductrices pour émetteurs

Les diodes à semi-conducteur sont constituées de jonctions entre des matériaux dopés N et des matériaux dopés P. Elles peuvent être de type homo-jonction, mêmes éléments, ou de type hétérojonction éléments différents. La zone d'émission, appelée zone active est constituée par un matériau choisi en fonction de sa longueur d'onde d'émission λ_0 .

Dans une hétérojonction la zone active, où il y'a émission de lumière, est entourée par deux matériaux de type non radiatif de gap plus grand et en général aussi d'indice de réfraction plus petit ce qui permet un double confinement, confinement électronique et confinement optique. En effet les électrons sont piégés par les barrières de potentiel dans la zone active et les photons ne peuvent pas traverser les jonctions par effet de guidage à cause de la différence d'indice de réfraction.

c. Gain et spectre d'électroluminescence du milieu semi-conducteur

Pour obtenir une émission permanente de lumière il faut maintenir un gain positif dans le milieu semi-conducteur, il faut créer une différence de population ΔN positive entre les niveaux

d'énergie E_2 et E_1 situés dans les bandes, les niveaux supérieurs dans la bande conduction et les niveaux inférieurs dans la bande valence: $h\nu = E_2 - E_1$

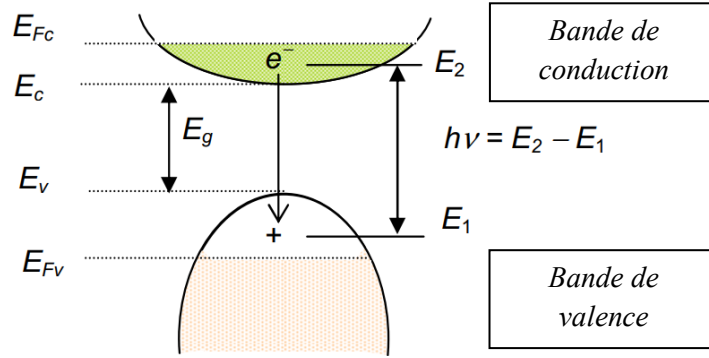


Figure III.3. Transition radiative entre bande de conduction et bande de valence.

Les électrons dans la bande de conduction et les trous dans la bande de valence obéissent à la statistique de Fermi-Dirac dont les probabilités d'occupation $f_c(E)$ et $f_v(E)$ en fonction des niveaux d'énergie E_2 et E_1 sont respectivement (Vu précédemment : II.2.2):

$$f_c(E_2) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E_2 - E_{fc}}{k_B T}\right) + 1} \quad (\text{III.6})$$

Et

$$f_v(E_1) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E_1 - E_{fv}}{k_B T}\right) + 1} \quad (\text{III.7})$$

Où E_{fc} est le pseudo-niveau de Fermi de la bande de conduction et E_{fv} est celui de la bande de valence, T est la température. La probabilité de transition entre les deux niveaux est proportionnelle au produit de la probabilité d'occupation d'un électron au niveau haut par la probabilité de non-occupation au niveau bas c'est à dire la probabilité d'avoir un trou:

$$Pr\ 2 \rightarrow 1 = f_c(E_2) [1 - f_v(E_1)] \quad (\text{III.8})$$

Spectre d'émission de luminescence

Le spectre d'émission $\Delta\lambda$ dépend de la structure de bande et de la température T . On peut évaluer la largeur du spectre en considérant la distribution de Fermi-Dirac des électrons et des trous en bas de bande de conduction et en haut de bande de valence.

Cette distribution correspond approximativement à une étendue en énergie de $k_B T$. Donc les transitions correspondront au maximum à $2k_B T$, si l'on considère la largeur à mi-hauteur on obtient une formule approchée :

$$\Delta\nu \approx 1,5 \frac{k_B T}{h} \quad (\text{III.9})$$

Et

$$\Delta\lambda \approx 1,5 \frac{\lambda^2 k_B T}{h} \quad (\text{III.10})$$

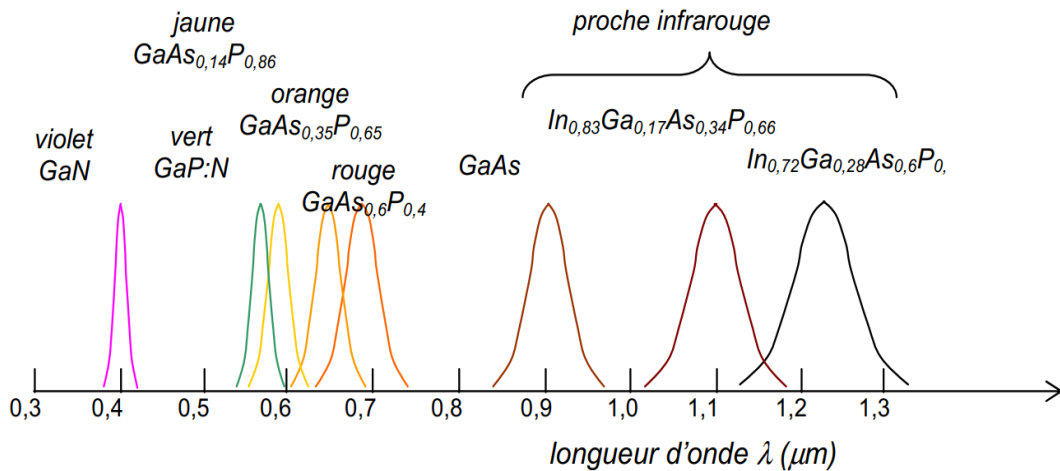


Figure III.4. Spectres d'électroluminescence.

Les progrès réalisés dans les domaines de l'optoélectronique et de la photo-électricité ont abouti à la commercialisation de composants massivement utilisés dans l'industrie, notamment les diodes électroluminescentes (LED).

III.4. Diodes électroluminescentes (LED (Light Emitting Diode))

Le passage d'un courant dans une jonction PN provoque une dissipation d'énergie, habituellement sous forme thermique; en choisissant correctement les matériaux, on peut obtenir aussi un rayonnement lumineux dans un spectre électromagnétique soit visible ou infrarouge.

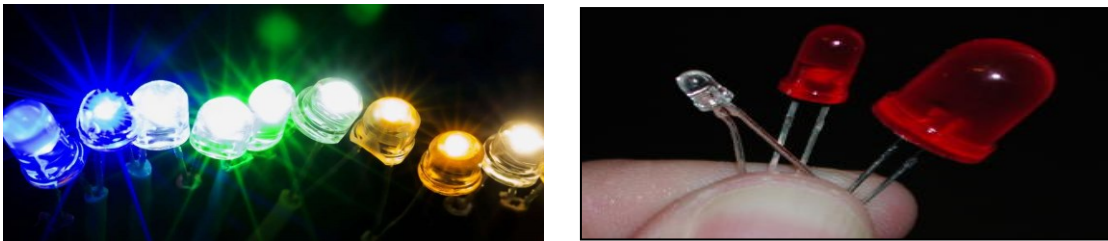


Figure III.5. Les différents couleurs des LED's.

III.4.1. Caractéristiques principales

L'alimentation la plus simple à mettre en œuvre est une polarisation continue: la LED se comporte comme une diode classique, qui se polarise en direct pour éclairer, avec un courant de polarisation de 10 mA qui représente la valeur classique à 20mA suivant les composants, pour une tension de seuils de 1,5V (valeur classique) à 3,5V suivant les composants.

La première caractéristique à prendre en compte pour ces diodes est la longueur d'ondes d'émission: lumière visible (380 nm à 770 nm) ou infrarouge (770 nm à 1100 nm) pour les télécommandes par exemple.

L'éclairage, précisé par l'intensité visuelle en mcd (milli candela) pour les DEL's émettant dans le visible, et par la valeur du flux lumineux (en mW) pour les diodes infrarouges, est évidemment une donnée importante, l'objectif étant de produire un rayonnement.

Si l'objectif est une transmission d'information vers un autre système électronique, les diodes étant généralement commandées en tout ou rien, les temps de commutation nécessaire pour établir et couper le courant dans le composant définira le débit d'information maximal (en bit par secondes).

La tension de seuil de la diode peut être une grandeur importante pour un système alimenté par batterie d'accumulateur (une tension de seuil de 3,5 V nécessitera un élévateur de tension si l'alimentation est composée de deux accumulateurs de 1,2 V en série). La tension aux bornes de la diode dépend également beaucoup du courant dans la diode.

Donc c'est le courant qui impose l'éclairement de la diode. Si on dispose d'une source de tension (ce qui est généralement le cas), deux options sont possibles:

- Limiter le courant par une résistance comme le montrent les figures suivantes:

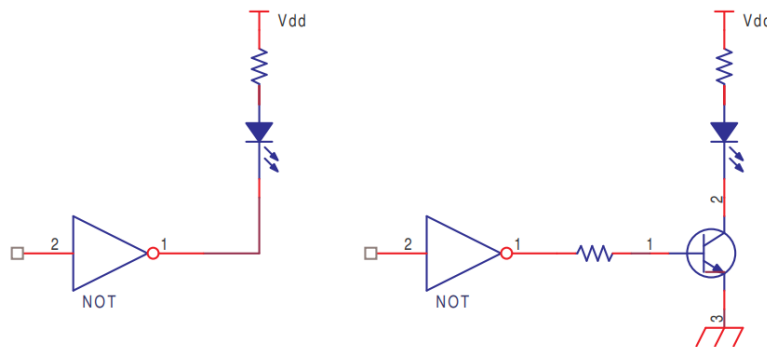


Figure III.6. Limitation du courant par une résistance dans un montage à DEL

La figure à gauche, on suppose que la sortie du circuit numérique soit capable d'absorber le courant nécessaire à la DEL (ce qui est généralement dans le cas avec FPGA), à droite une adaptation à l'aide d'un transistor est nécessaire. Dans les deux cas des pertes importantes ont lieu au niveau de la résistance, ce qui peut être pénalisant pour un système alimenté par batterie. On trouvera aussi souvent les LED's alimentées par un système dit à découpage, comme le montre l'exemple suivant:

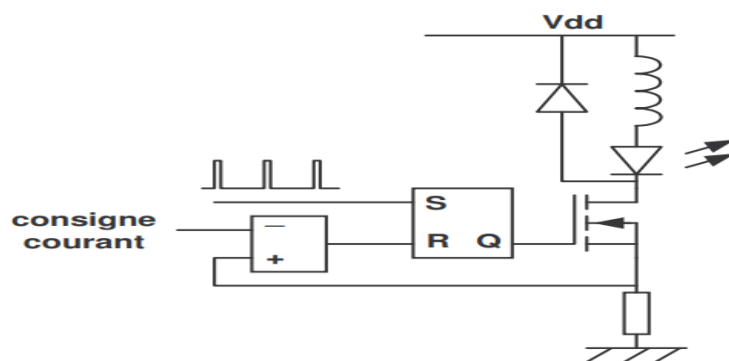


Figure III.7. Système à découpage.

La bascule RS est régulièrement mise au NL1 par le train d'impulsion à une fréquence fixe sur son entrée S, ce qui met le transistor MOS en conduction et provoque la croissance du courant dans la DEL, croissance limitée par l'inductance. Lorsque le courant, mesuré aux bornes de la résistance atteint la valeur de consigne, la bascule est mise au NL0, bloquant le transistor. L'énergie

emmagasinée dans l'inductance est alors restituée dans la LED. Le cycle recommence lors de l'apparition d'une nouvelle impulsion sur l'entrée S de la bascule. La résistance de mesure étant de faible valeur, les pertes sont également très faibles dans ce cas-là. Si l'inductance est de valeur suffisamment importante, le courant est presque continu dans la DEL.

III.4.2. Diodes Electroluminescentes DEL

Depuis 1956, on sait qu'une jonction PN parcourue par un courant direct émet une radiation lumineuse. Cependant, en raison de difficultés technologiques, il a fallu attendre 1964 pour voir apparaître sur le marché des diodes émettant une radiation lumineuse dans le visible.

Une diode électroluminescente, DEL, Light Emitting Diode LED, est formée par une jonction P-N suffisamment dopée. Le rayonnement est émis au niveau de la jonction lorsque la diode est polarisée en direct.

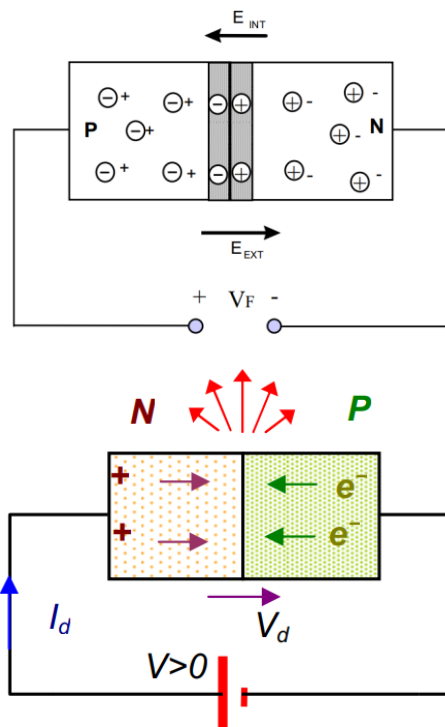


Figure III.8. Jonction PN polarisée en direct.

Le courant d'injection I_d amène des électrons qui au niveau de la jonction peuvent effectuer une recombinaison électron-trou donnant un photon.

A l'intérieur du matériau, il y a injection de trous dans la zone N et d'électrons dans la zone P, c'est le phénomène d'injection des porteurs minoritaires. Statistiquement, un certain nombre de porteurs minoritaires se recombinent en libérant de l'énergie.

En effet, lorsqu'un électron libre rencontre un trou, l'énergie de cet électron passe donc de la bande de conduction à la bande de valence du matériau P, libérant par conséquent une énergie égale à

la différence entre ces deux bandes (largeur de bande interdite ou band gap). Une partie de cette énergie est libérée sous forme de lumière (photon) et le reste sous forme de chaleur.

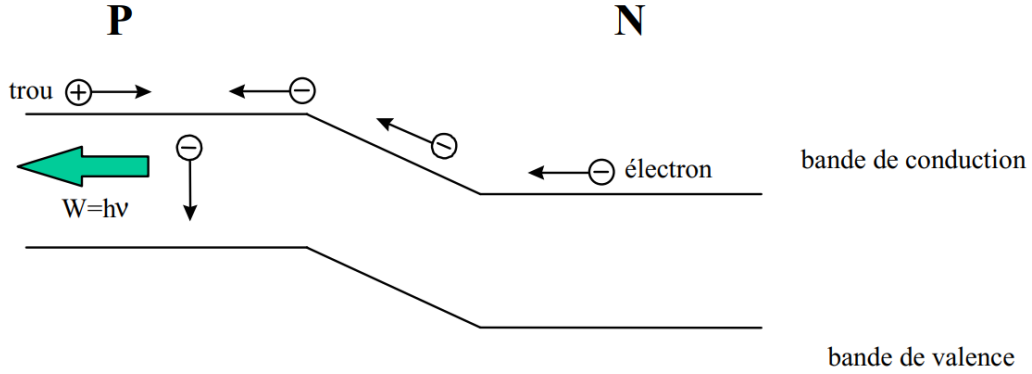


Figure III.9. Emission d'un photon lors de la recombinaison d'un électron et d'un trou.

Ce phénomène est caractérisé par le rendement quantique interne η_i de la DEL défini précédemment et qui peut aussi s'exprimer par :

$$\eta_i = \frac{\text{nombre de photons créés à l'intérieur}}{\text{nombre d'électrons injectés (courant)}} \quad 10\% < \eta_{iDEL} < 30\% \quad (\text{III.11})$$

Avec une puissance interne émise au niveau de la jonction :

$$P_{int} = \eta_i \cdot h \cdot \nu \frac{I_d}{e} \quad (\text{III.12})$$

a. Rendement externe d'une DEL

La puissance émise par une DEL, PDEL, doit aussi tenir compte des pertes par réflexion à l'intérieur du semi-conducteur, et aussi des pertes par absorption du matériau. Le facteur de réflexion en incidence normale correspond au facteur de réflexion de Fresnel R_F est défini comme suit :

$$R_F = \frac{(n_{sc} - n_{air})^2}{(n_{sc} + n_{air})^2} \quad (\text{III.13})$$

Où n_{sc} est l'indice de réfraction du semi-conducteur, typiquement $n_{sc} \approx 3,5$ et celui de l'air $n_{air} \approx 1$, ce qui donne un facteur $R_F \approx 30\%$.

Les réflexions internes sont importantes surtout pour des angles d'incidence faibles. On trouve en intégrant sur les angles une formule approchée du rendement externe η_{ext} :

$$\eta_{ext} = \eta_{int} \frac{4 n_{sc}}{(n_{sc} + 1)^2} \frac{1}{2 n_{sc}^2} \quad \eta_{ext} \approx 1,3\% \eta_{int} \quad (\text{III.14})$$

Ce qui donne pour la puissance émise :

$$P_{DEL} = \eta_{ext} P_{int} \quad (\text{III.15})$$

En général on place un hémisphère en plastique au-dessus de la DEL d'indice intermédiaire $n_{air} < n_l < n_{sc}$ afin de diminuer les réflexions. Par exemple $n_l \approx 2$ pour $n_{sc} \approx 3,5$ dans AsGa.

Le plastique joue le rôle d'un traitement antireflet, et il sert aussi de lentille pour modifier le diagramme de rayonnement. Une expression approchée dans ce cas donne pour le rendement externe:

$$\eta_{ext} = \eta_{int} \frac{n_1^2}{(n_{sc}+1)^2} \quad ; \quad \eta_{ext} \approx 20\% \eta_{int} \quad (III.16)$$

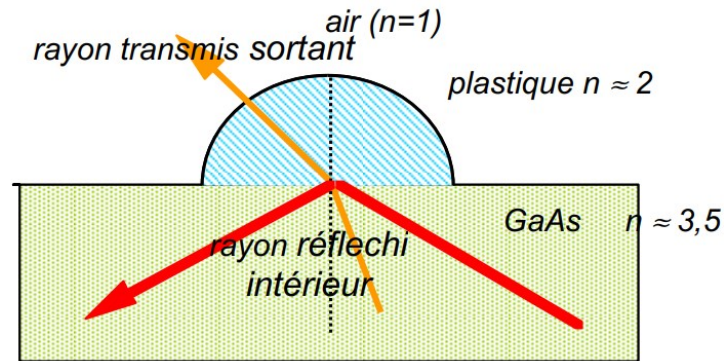


Figure III.10. Rayons optiques traversant les matériaux d'indice différent dans une DEL.

Une DEL peut fonctionner en émission par la surface 'surface emitting', c'est le cas le plus fréquent dans les composants à bas coût de type homo-jonction, ou en émission par la tranche 'Edge emitting', de type hétérojonction pour les applications les plus performantes afin d'obtenir un meilleur rendement.

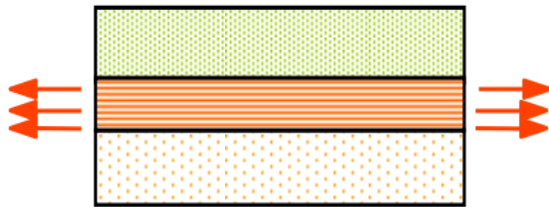


Figure III.11. Hétérojonction émission par la tranche.

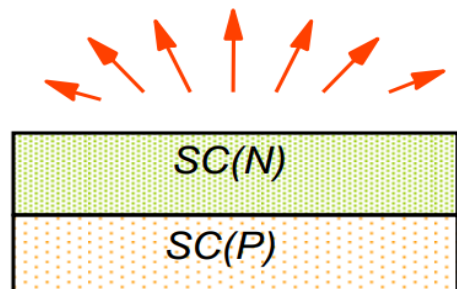


Figure III.12. Homo-jonction émission par la surface.

b. Caractéristiques d'une DEL

Paramètres électriques

- Le courant d'injection I_d exprimé usuellement en mA.
- La tension de diode V_d (V), pratiquement égale à $(\frac{E_{GAP}}{e}) = \frac{1,24}{\lambda}$ (μm) puisque les matériaux sont fortement dopés.

Paramètres optiques

- La puissance optique P exprimée usuellement en mW, de l'ordre de quelques mW.
- L'intensité optique dans l'axe I_0 en $\text{mW} \cdot \text{Sr}^{-1}$ et qui dépend de la forme du diagramme de rayonnement de la DEL.

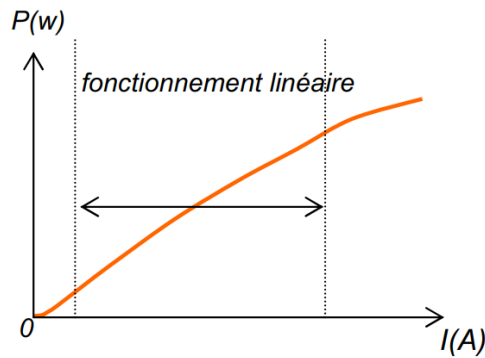


Figure III.13. Puissance de sortie en fonction du courant d'injection pour une DEL.

- L'ouverture angulaire à mi-intensité $\Delta\theta$ pour le diagramme de rayonnement qui dépend de la présence d'une lentille elle vaut typiquement 20° . Une DEL émettant par la surface sans optique émet un diagramme de rayonnement Lambertien.

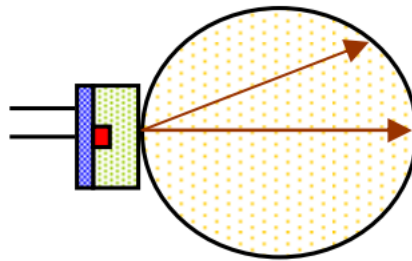


Figure III.14. DEL émettant par la surface sans lentille.

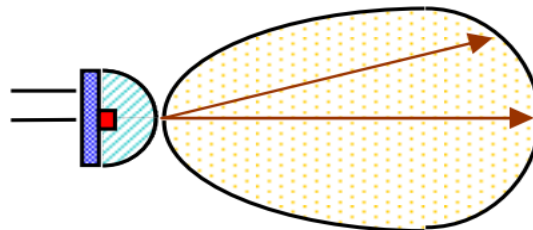


Figure III.15. DEL munie d'une lentille hémisphérique.

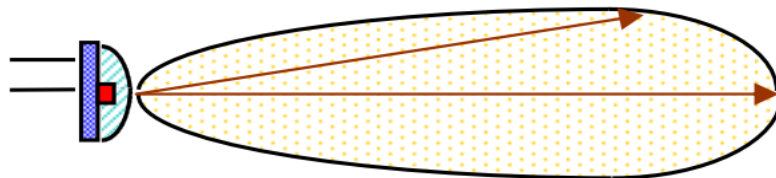


Figure III.16. DEL munie d'une lentille parabolique.

c. Différents types de LED émettant dans le domaine visible

Les constructeurs proposent un choix important de LED émettant dans le visible:

- DEL de couleurs différentes, rouge, jaune, verte, orange, bleue et même blanche. Leur luminosité est de l'ordre de 10 mcd pour un courant de 10 mA. Il est à noter que ces diodes présentent des

tensions de seuil différentes, en conséquence de quoi il est déconseillé de les brancher en parallèle; On peut ajouter quelques ordres de grandeurs pour des LED émettant dans le visible comme ça une idée plus claire, polarisées par un courant de 20 mA: LED rouge 1,6V, LED orange 2,0V, LED jaune 2,4V, LED verte 2,4V, LED bleue 3,0V et une LED blanche 3,5V.

- DEL faible consommation, pour les systèmes alimentés sur batterie par exemple, qui présente une luminosité de 2 mcd pour un courant de 2 mA.
- DEL à haute luminosité pour l'éclairage (torche électrique) ou les DEL concurrencent par leur bon rendement les ampoules à incandescence et allogènes; la luminosité d'une DEL blanche atteint 300 mcd pour un courant de 20 Ma.
- DEL clignotantes (fréquence de l'ordre de 3 Hz), ce qui permet de faire l'économie d'un générateur de signaux carrés.
- DEL bicolores (3 broches) et arc-en-ciel (6 broches), la commande étant envoyée sur une des broches suivant la couleur désirée.
- DEL avec résistance intégrée (le constructeur précise alors la tension d'alimentation en fonction de la luminosité désirée).
- Afficheurs sept segments et pavés lumineux (bargraphes et matrices).

d. Applications

Les grands domaines d'application des DEL sont l'affichage et l'éclairage dans le visible et la transmission d'information dans le visible et le proche infrarouge. Dans le domaine de l'affichage on dispose de DEL émettant dans les principales couleurs du spectre visible et notamment le rouge, le vert et le bleu utilisés dans les systèmes RVB permettant de réaliser des grands écrans lumineux pouvant afficher des images télévision.

Les DEL d'affichage sont aussi très utilisées dans les feux tricolores et aussi pour les feux de signalisation pour les automobiles. Les télécommandes en espace libre utilisent surtout des DEL émettant dans le proche infrarouge autour de $\lambda \approx 900$ nm en AsGa ou AlGaAs.

Utilisées aussi pour réaliser des liaisons entre périphériques informatiques par transmission infrarouge en espace libre. Il s'agit de liaisons avec une portée de quelques mètres et en vue, par exemple à l'intérieur d'une pièce. Pour la transmission sur fibre optique en silice on utilise les DEL. Il existe une norme pour ce type de transmission, la norme FDDI (Fiber Data Distributed Interface), sur des courtes distances dans les réseaux locaux de type Ethernet jusqu'à 100 Mb.s⁻¹ à une longueur d'onde $\lambda = 1300$ nm.

Sur fibre optique polymère on utilise des DEL émettant dans le rouge à 630 nm et dans le vert à 540 nm. Du fait de leur spectre large les DEL ne peuvent pas être utilisées dans les transmissions par fibre optique sur une longue distance à cause du problème de la dispersion de la fibre optique (On le verra au dernier chapitre).

e. Avantages et Inconvénients

Avantages

- Petite taille: on peut par exemple construire des LED de la taille d'un pixel (ce qui ouvre la possibilité d'utiliser des diodes pour construire des écrans de haute résolution).
- Facilité de montage sur un circuit imprimé, traditionnel ou CMS (Composant Monté en Surface).
- Consommation inférieure aux lampes à incandescence et du même ordre de grandeur que les tubes fluorescents.
- Excellente résistance mécanique (chocs, écrasement, vibrations).
- Taille beaucoup plus réduite que les lampes classiques ce qui offre la possibilité de réaliser des sources de lumière très ponctuelles, de faible à très faible consommation.
- En assemblant plusieurs LED, on peut réaliser des éclairages avec des formes novatrices.
- Durée de vie (20000 à 50000 heures environ) beaucoup plus longue qu'une lampe à incandescence (1000 heures) ou qu'une lampe halogène (2000 heures).
- Vu leur puissance, les LED classiques ne chauffent presque pas et ne brûlent pas les doigts.

Inconvénients

- Les LED, comme tout composant électronique, ont des limites maximales de température de fonctionnement ce qui conditionne en partie la durée de vie des lampes à LED.
- La dissipation thermique des composants des ampoules à LED est un facteur limitant leur montée en puissance.
- L'efficacité lumineuse de certaines LED baisse rapidement (comme pour la plupart des technologies lumineuses) pour ne plus produire en fin de vie que 20% de la quantité de lumière initiale, mais pour les LED les plus performantes du marché, la quantité de lumière produite en fin de vie serait encore d'au moins 70%.
- Le processus de fabrication d'une LED est très coûteux en énergie (mais une production à grande échelle comme actuellement permet de réduire massivement ce coût).

III.5. Diodes LASERs

Un rayon LASER est composé d'une lumière monochromatique (une seule longueur d'onde), dont les rayons sont tous en phase (on parle de lumière cohérente). On obtient ainsi un rayonnement de haute énergie dont les applications sont aussi variables, on peut citer par exemple la découpe de métaux, la télémétrie et la lecture de disques optiques, le pointage ou bien les télécommunications (liaison par fibre optique).

III.5.1. Structure des Diodes LASERs

Le mot LASER est un procédé d'amplification de la lumière, défini en anglais par l'acronyme LASER : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. En français signifie L'amplification de la lumière par émission stimulée de photons produit une lumière qui est monochromatique, directionnelle, cohérente et de haute intensité.

a. Guidage par le gain et guidage par l'indice

La diode LASER est un composant similaire à la diode électroluminescente, car elle est constituée d'une jonction p-n réalisée sur des matériaux à gap direct avec une région active où les porteurs injectés, par forte polarisation directe de la diode, se recombinent de façon radiative, produisant une lumière cohérente issue d'émissions stimulées de photons. Les mêmes matériaux et alliages utilisés pour les DEL sont aussi utilisés pour les diodes LASER appelés aussi LASERs à semi-conducteurs.

Les premières diodes LASER réalisées étaient des homo-jonctions sans confinement latéral, utilisées en régime impulsif à cause du faible rendement provoquant un échauffement important de la zone active.

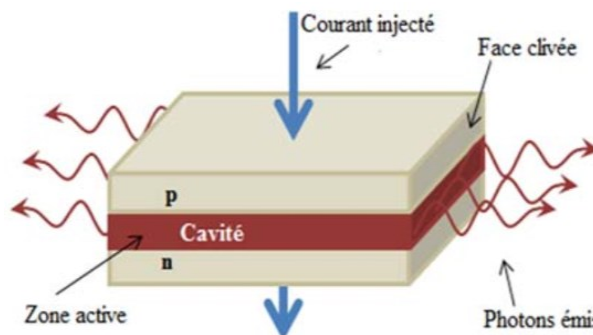


Figure III.17. Structure de base d'une diode LASER.

Dans les diodes LASERs actuelles à hétérojonctions l'émission se fait par les faces. Le confinement est à la fois électronique et optique se fait dans la direction perpendiculaire aux jonctions. Dans la direction parallèle aux jonctions le confinement par guidage peut être de deux types:

- Guidage par le gain : dans ce cas le courant électronique est confiné dans une région définie par des zones environnantes passivées par bombardement protonique.
- Guidage par l'indice : le courant électrique est confiné latéralement par des jonctions bloquantes, le faisceau optique est confiné à cause de la différence d'indice de réfraction. Actuellement on rencontre surtout des diodes LASER de ce type. Dans la plupart des composants la dimension de la zone active reflète la nécessité d'avoir une émission sur un seul mode spatial ce qui implique des dimensions transverses très petites.

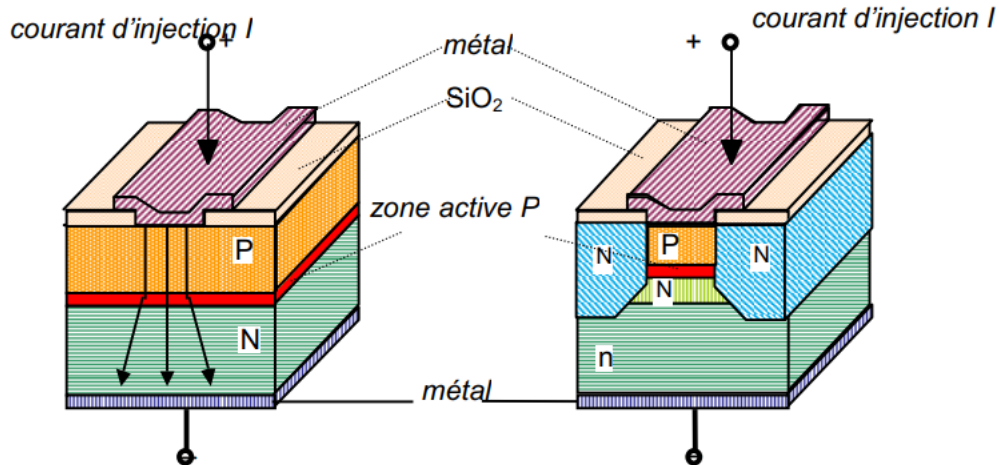


Figure III.18. Guidage par le gain.

Figure III.19. Guidage par l'indice.

b. Structures à puits quantiques

Afin d'augmenter le rendement des LASERS à semi-conducteurs, on réalise des structures à puits quantiques, les électrons sont confinés dans des couches d'épaisseur fine $d_Q \approx 0,2$ nm, situées dans la zone active du LASER.

Les puits quantiques peuvent se présenter sous forme de couches contraintes 'Strained layers Str', soit à partir d'une seule couche et appelée SQW, ou plusieurs couches MQW, ceci est afin d'obtenir une valeur très précise et spécifiée de la longueur d'onde d'émission λ avec un gain élevé. Les électrons dans ces couches très fines sont soumis à des effets essentiellement quantiques ce qui induit des niveaux d'énergie discrets en faible nombre et donc une quantité d'électrons plus petite pour réaliser l'inversion de population.

Les structures à base de puits quantiques permettent un meilleur confinement latéral, ceci permet d'augmenter les performances au niveau du courant de seuil, du rendement, de la bande passante et de la puissance. Pour ces LASERS les courants de seuil I_s sont faibles typiquement de quelques mA, et les rendements élevés.

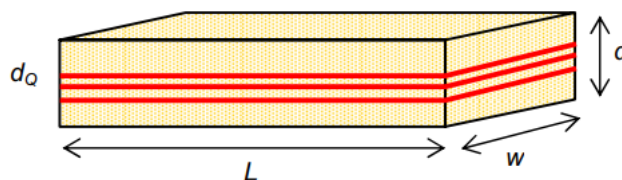


Figure III.20. Exemple de zone active avec 3 puits quantiques.

Avec ce genre de LASER, on trouve typiquement les valeurs comme suit: $L=500\mu\text{m}$, $w=10\mu\text{m}$, $d=0,2\mu\text{m}$, $d_Q=0,5$ nm.

c. Amplification de la lumière dans une diode LASER

Dans un premier temps le processus d'émission spontanée va prédominer. Les premiers photons créés dans la zone active sont obtenus par émissions spontanées. Ensuite les ondes qui se propagent vers les faces miroirs vont être amplifiées par stimulation d'autres photons. Dès que la lumière induite dépasse la lumière absorbée dans le milieu amplificateur (absorption par porteurs libres (effet Auger) et par défauts dans le matériau), l'oscillation LASER commence. Si on désigne par $\alpha_p(\lambda)$ le coefficient d'absorption par porteurs libres, qui est de l'ordre de 100 cm^{-1} , et par $g(\lambda)$ le gain de la cavité par émission stimulée, pour que le LASER oscille et l'émission LASER apparaisse il faut que le gain compense les pertes par absorption et que le coefficient net d'absorption (3.17) soit positif :

$$A(\lambda) = [g(\lambda) - \alpha_p(\lambda)] \quad (\text{III.17})$$

Cavité optique résonnante (Fabry- Pérot)

La région active de la diode, comprise entre les régions N et P, est quasi neutre. Elle est équivalente à une cavité optique résonnante (cavité Fabry- Pérot) qui consiste en un guide d'ondes délimité par deux faces clivées perpendiculairement au plan de la jonction qui forment. Deux miroirs semi-transparents de facteurs de réflexion R_1 et R_2 (figure III.21), le clivage consistant à réaliser une cassure nette et parallèle à un plan réticulaire. Les autres côtés de la structure sont rugueux pour éviter des réflexions sur les autres faces de la structure.

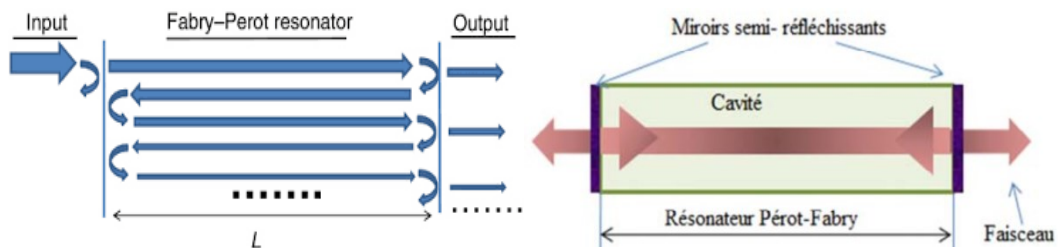


Figure III.21. Cavité optique d'une diode LASER.

- La longueur L de cette cavité résonnante est un multiple entier de la demi-longueur d'onde des photons créés par émission stimulée pour que les ondes stationnaires qui peuvent se former pour certaines longueurs d'onde discrètes subissent des réflexions multiples par les miroirs et s'additionnent en phase pour former un signal de grande amplitude : La diode fonctionne alors comme un amplificateur.

$$L = m \frac{\lambda}{2} = m \frac{\lambda_0}{2n} \quad (\text{III.18})$$

Avec m un entier égal à 1, 2, 3,4,... et $\lambda_0 = c/v$ est la longueur d'onde de la radiation dans le vide.

- L'épaisseur d de la zone active est limitée par la longueur de diffusion des porteurs.

- Les dimensions types de la diode à homo-jonction sont: L : longueur de la diode: 200- 500 μm ; l: largeur de la diode: 100 - 300 μm ; d : épaisseur de zone active (au voisinage de la jonction): 0.1 – 0.3 μm .

Conditions de résonance

La condition d'émission LASER s'obtient en écrivant les conditions de résonance :

- Le gain sur un aller-retour, dans la cavité doit être supérieur aux pertes (figure III.22).
- Le déphasage sur un aller-retour doit être un multiple de 2π .

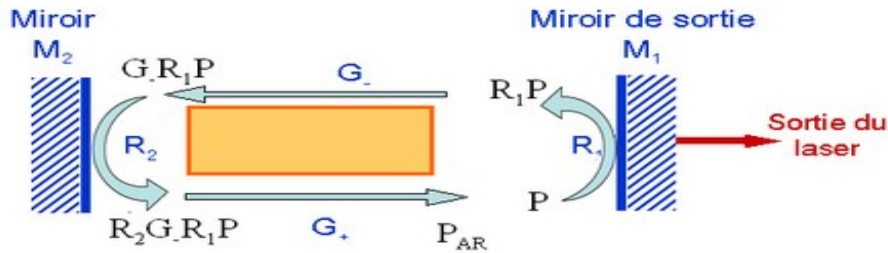


Figure III.22. Milieu amplificateur avec miroirs de coefficients de réflexion.

Soit :

$$E_0 e^{j\omega t} = r_1 r_2 \cdot E_0 e^{j(\omega t - 2KL)} e^{(g - \alpha_p)L} \quad (\text{III.19})$$

On a :

$$L = m \frac{\lambda_0}{2n} \quad (\text{III.20})$$

donc :

$$2KL = 2m\pi \quad \text{et} \quad e^{-j2KL} = 1 \quad (\text{III.21})$$

Par conséquent on obtient pour l'intensité de lumière

$$1 = (|r_1|^2 \cdot |r_2|^2) e^{2(g - \alpha_p)L} \quad (\text{III.22})$$

Ou bien :

$$1 = R_1 R_2 e^{2(g - \alpha_p)L} \quad (\text{III.23})$$

Ce qui constitue la condition d'oscillation pour que le gain compense les pertes par absorption interne α_p et les pertes par transmission des miroirs R_1 et R_2 .

On obtient la condition de gain :

$$g_s(\lambda) = \alpha_p(\lambda) + \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right) \quad (\text{III.24})$$

g_s est le gain seuil de la cavité, il représente le gain minimal que la région active doit fournir pour que l'effet LASER se produise. Il est déterminé par la géométrie et les caractéristiques de la

cavité. L'expression montre, par exemple, que lorsque la longueur de la cavité décroît, ce gain seuil augmente. Lorsque le gain est supérieur à g_s , la cavité est en oscillation.

- La moindre émission stimulée présente une augmentation brutale du signal lumineux émis par la diode.
- Il apparaît une certaine directivité de l'émission dans la direction de la plus grande longueur du milieu amplificateur.
- La cavité sélectionne un certain nombre de modes de résonance définis par $2nL=m\lambda$.
- On dit que la diode est super radiante.

Ainsi, selon la densité de porteurs injectés, donc l'intensité du courant de polarisation de la diode, les mécanismes de recombinaison des paires électron-trou dominants changent, il est donc possible de définir trois régimes de fonctionnement :

- A faible niveau d'injection, l'émission spontanée domine l'émission stimulée. La diode LASER fonctionne comme une diode électroluminescente (LED).
- Lorsque le niveau d'injection augmente, l'émission stimulée domine l'émission spontanée, mais les pertes de la cavité sont supérieures au gain du milieu. La diode LASER opère comme un amplificateur optique ou une diode super luminescente.
- A fort niveau d'injection, l'émission stimulée domine l'émission spontanée et le gain du milieu est supérieur aux pertes de la cavité. La diode entre en régime d'oscillations LASER.

Le nombre de photons créés par seconde dans la zone active est proportionnel au courant injecté. L'effet LASER s'établit lorsque le gain est supérieur aux pertes, c'est-à-dire lorsque le nombre d'électrons injectés est supérieur à un certain seuil. La valeur de g_s correspond donc à un courant seuil j_s au-dessous duquel l'effet LASER n'apparaît pas.

Dans la diode LASER à homo-jonction, le courant seuil j_s est assez élevé. Il est de l'ordre de 3.10^4 à 5.10^4 A/cm² à 300K pour le GaAs. Cette valeur élevée impose un fonctionnement en régime pulsé à cause des problèmes thermiques.

Exemple d'application

Pour $\alpha_p = 10 \text{ cm}^{-1}$, une surface avec un coefficient de réflexion de 30% et l'autre totalement réfléchissante.

Déterminer le gain seuil d'une diode LASER au GaAs de 300 μm de longueur.

Réponse:

On va utiliser cette loi :

$$g_s(\lambda) = \alpha_p(\lambda) + \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)$$

Donc

$$g_s = 10 + \frac{1}{2.300.10^{-4}} \ln \frac{1}{1.0,3}$$

Soit, le gain seuil est de :

$$g_s \approx 50 \text{ cm}^{-1}$$

III.5.2. Différents types de LASER

La très grande diversité des LASERs en rend difficile une classification claire. La classification ci-dessous, basée essentiellement sur la nature du milieu amplificateur :

a. LASERs à solide

Le milieu amplificateur est un solide (cristal, verre).

b. LASERs à fibre

Au sens strict, les LASERs à fibre sont également des LASERs à solide : des ions métalliques (néodyme, erbium, ytterbium, etc.).

c. LASERs à semi-conducteur

Le milieu actif est encore un solide (semi-conducteur), mais avec des propriétés et des applications très différentes de celles des LASERs à solide.

d. LASERs à Gaz

Ces LASERs utilisent comme milieu amplificateur un gaz (CO₂, hélium-néon (*He – Ne*))

e. Matériaux utilisés pour les diodes LASERs

Tableau III.1. Matériaux pour les diodes LASERs.

Tableau périodique	Zone active	Zones de confinement	Substrat	longueur d'onde (nm)	Applications
III-V	As Ga	As Ga	As Ga	904	Télécom et pompe
	Al Ga As	Al Ga As	As Ga	670 - 890	LASERs CD
	In Ga As P	In Ga P	As Ga	670 - 900	Visualisation
	In Ga As P	In Ga P	As Ga P	600 - 890	Visualisation
	In Ga As P	Al Ga In P	As Ga	670 - 890	Visualisation
	Al Ga In P	Al Ga In P	As Ga	560 - 660	Visualisation
	In Ga As P	In P	In P	900 - 1800	LASERs FO et pompe
	In As Sb Pb	In As Sb Pb	In As	1900 - 3700	IR moyen
IV - VI	Pb Sn Se Te	Pb Sn Se Te	Pb Te	4000 - 10500	IR lointain
II - VI	Zn S Se		As Ga	400 - 520	Bleu

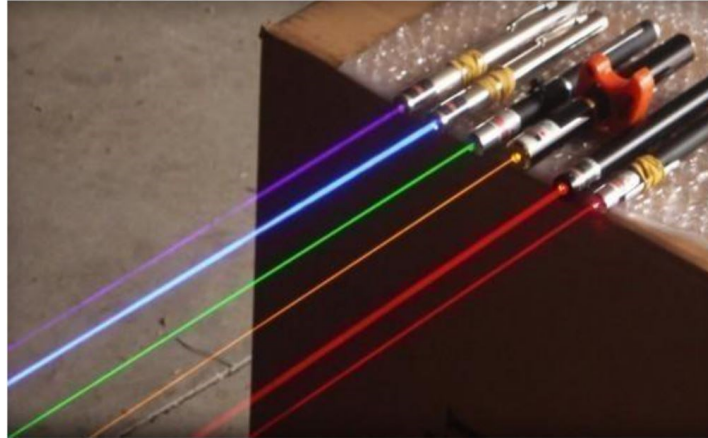


Figure III.23. De gauche à droite : pointeurs laser à 405, 473, 532, 593, 635 et 650nm

III.5.4. Application des Diodes LASERs

Pour l'enregistrement et pour la lecture optique, il s'agit de LASERs avec des longueurs d'onde dans la gamme $750 \text{ nm} < \lambda < 900 \text{ nm}$, le matériau est l'alliage $Ga_{1-x}Al_xAs$. L'énergie de gap en fonction de la proportion stœchiométrique x s'exprime par :

$$E_{g_{GaAlAs}} = 1,42 + 1,25 \cdot x + 0,27 \cdot x^2 \quad (\text{eV}) \quad (\text{III.25})$$

a. Diodes LASER en Télécommunications

pour émetteurs dans les liaisons à fibres optiques, dans la première fenêtre à $\lambda_I=850 \text{ nm}$ l'alliage $Ga_{0,9}Al_{0,1}As$, de moins en moins utilisé, dans la deuxième fenêtre à $\lambda_{II}=1310 \text{ nm}$ en $In_{0,73}Ga_{0,27}As_{0,58}P_{0,42}$ et dans la troisième fenêtre à $\lambda_{III}=1550 \text{ nm}$, en $In_{0,58}Ga_{0,42}As_{0,9}P_{0,1}$. L'énergie de gap de l'alliage $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y$ en fonction des proportions stœchiométriques x et y s'exprime par :

$$E_{g_{InGaAsP}} = 1,35 - 1,98 \cdot x + 1,48 \cdot x^2 - 0,56 \cdot x^3 \quad (\text{eV}) \quad (\text{III.26})$$

Et

$$y \approx 2,2 \cdot x \quad (\text{III.27})$$

b. Répéteurs

Malgré la transparence importante de silice (4 % de perte par kilomètre), le signal a besoin d'être amplifié tous les 50 ou 100 km dans des répéteurs. Il est dorénavant possible d'éviter la conversion du signal optique en signal électronique à des fins d'amplification : les répéteurs sont maintenant « tout optique ». Un répéteur est constitué d'une section de quelques dizaines de mètres de fibre dopée à l'erbium (amplification à 1,55), pompée en continu à 980 nm. Il s'agit donc d'un amplificateur à émission stimulée.

c. Diodes LASERs de pompe

Il s'agit de LASERs pouvant émettre plusieurs watts. Ils sont utilisés dans les amplificateurs à fibres optiques en erbium, EDFA, aux longueurs d'onde 900 nm et 1400 nm. Ils sont aussi utilisés pour pomper des LASERs solides à 890 nm.

d. LASERs VCSEL

Ce type de LASER est appelé à émission par la surface de type VCSEL (Vertical Cavity Surface-Emitting Laser), ce dernier est un type de semi-conducteur diode laser avec laser perpendiculaire à émission de faisceau à partir de la surface supérieure, contrairement à des lasers à semi-conducteurs à émission latérale classiques qui émettent à partir de surfaces formées par clivage de la puce individuelle hors d'une tranche. Les VCSEL sont utilisés dans divers produits laser, y compris les souris d'ordinateur, les communications par fibre optique, les imprimantes laser, l'identification de visage, et des lunettes intelligentes.

Le concept de laser à cavité verticale a été proposé par K. Iga il y a maintenant trente ans et a suscité depuis lors des recherches considérables, à l'origine de nombreuses innovations technologiques pour obtenir des composants performants et à présent mûres. Un tel engouement s'explique par les performances prometteuses que peuvent atteindre ces composants à microcavité grâce leurs propriétés : réalisation matricielle, émission monomode, faible courant de seuil laser, bande passante étendue, compacité, qualité du faisceau.

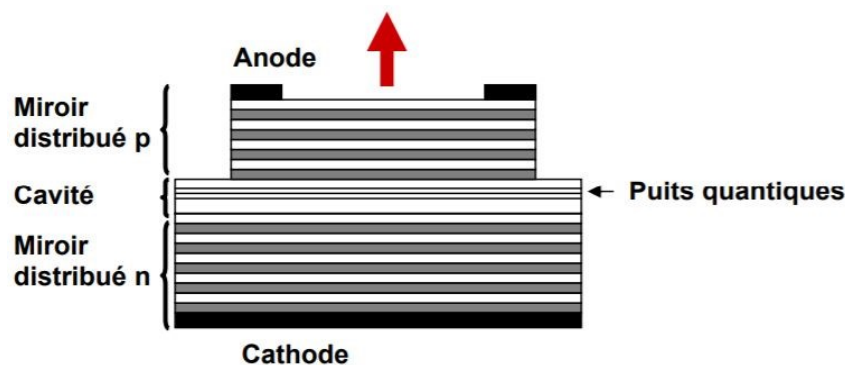


Figure III.24. Schéma d'un VCSEL standard à pompage électrique.

Les diodes LASERs sont donc utilisées dans plusieurs domaines, particulièrement dans: Les télécommunications optiques, la lecture de CD, l'holographie et le stockage de l'information dans les disques optiques (CD ou DVD pour la musique comme pour l'informatique), les photocopieuses ou les imprimantes LASER, les applications médicales et industrielles... (Lecteurs code barre), les systèmes d'interconnexion optique par fibre ou en espace libre ainsi que d'autres applications.

Conclusion

La complexité des systèmes de transmission évolue rapidement de façon à offrir plus de fiabilité. Les émetteurs optiques à semi-conducteurs, utilisés dans les liaisons, ont les propriétés

suivantes: petite taille, émission à des longueurs d'onde couvrant le visible et l'infrarouge et même l'ultraviolet, bon rendement et tout cela avec une intégration facile. Après avoir vu l'essentiel des composants émetteurs de lumières à savoir les diodes électroluminescentes ainsi que les diodes LASERs, il est nécessaire de passer au quatrième chapitre où on va voir les dispositifs détecteurs de lumières.



Chapitre IV:
Détecteurs de lumière

Chapitre IV: Détecteurs de lumière

Introduction

Les semi-conducteurs peuvent également être utilisés pour détecter la lumière. Le principe en est très simple. Imaginons que l'on place un semi-conducteur entre deux plaques d'un condensateur aux bornes duquel est appliquée une différence de potentiels. Si le semi-conducteur est éclairé avec une lumière dont la fréquence est supérieure à celle du gap, il y aura création de paires électron-trou. Les électrons et les trous vont dériver en sens inverse dans le champ électrostatique et vont donc créer un courant. La mesure de ce courant sera une mesure de la puissance lumineuse incidente sur le semi-conducteur.

IV.1. Détecteurs de lumière à semi-conducteurs

Les détecteurs optoélectroniques couvrent aujourd'hui un grand domaine d'applications, comme les transmissions par fibre optique, les systèmes de prise de vue, la détection infrarouge ou les panneaux solaires. Plusieurs matériaux spécifiques, ont été développés pour leur réalisation. Les performances des détecteurs à semi-conducteurs sont grandes, en effet ils peuvent détecter jusqu'à quelques photons seulement avec des rendements proches de 100%. Ceci a permis le développement des transmissions optiques à très longue distance.

Une autre propriété intéressante se situe au niveau de l'étendue spectrale du rayonnement optique détectée. On trouve actuellement des détecteurs à semi-conducteurs travaillant de l'ultraviolet proche autour de $\lambda \approx 100$ nm, jusqu'à à l'infrarouge lointain autour de $\lambda \approx 100\mu\text{m}$ couvrant donc trois ordres de grandeur en longueur d'onde.

En gros, on peut définir Les photorécepteurs comme étant des dispositifs photosensibles. Leur fonctionnement est basé sur l'interaction photon-électron. Lorsque la radiation lumineuse est absorbée par le matériau photosensible, elle cède son énergie aux électrons du matériau les faisant passer vers des niveaux énergétiques supérieurs.

IV.1.1. Absorption dans les semi-conducteurs

a. Matériaux semi-conducteurs utilisés pour ces détecteurs

Les matériaux utilisés sont nombreux. Le Silicium Si, est utilisé dans le domaine visible, $450 \text{ nm} < \lambda < 750 \text{ nm}$, et le proche infrarouge jusqu'à $1 \mu\text{m}$. Le Germanium (Ge), est utilisé dans le proche infrarouge, $900 \text{ nm} < \lambda < 1700 \text{ nm}$.

La transmission par fibre optique, dans l'infrarouge proche, utilise trois fenêtres de transmission, dans la première fenêtre à $\lambda_I = 850 \text{ nm}$ on dispose de photodiodes en Si, et dans la deuxième, à $\lambda_{II} = 1300 \text{ nm}$, et la troisième, à $\lambda_{III} = 1550 \text{ nm}$, en *InGaAs* et en Ge. On utilise surtout *InGaAs* qui présente moins de bruit que G.

Dans les applications infrarouges pour l'imagerie infrarouge ou la détection thermique, on dispose de photoconducteurs ou de photodiodes constitués de matériaux spécifiques. L'alliage $HgCdTe$ est très utilisé dans l'infrarouge moyen et lointain.

Une structure de composant simple est le photoconducteur qui fonctionne sur le principe d'un changement de conductivité dans le matériau semi-conducteur, en fonction du rayonnement incident. Ce composant est largement utilisé en détection thermique infrarouge.

Les photodiodes sont les éléments les plus sensibles et les plus rapides, elles peuvent être utilisées en mode photoconducteur, par une jonction polarisée en inverse, par exemple dans les transmissions ou en mode photovoltaïque, à l'aide d'une jonction non polarisée, par exemple dans les cellules solaires.

b. Coefficient d'absorption et sensibilité des détecteurs

Le phénomène important qui détermine le rendement d'une photodiode est l'absorption du matériau semi-conducteur, caractérisée par le coefficient d'absorption α , qui est défini par unité de longueur habituellement en cm^{-1} . La puissance absorbée dans le matériau sur une tranche comprise entre z et $z + dz$ en fonction de la profondeur z sera fonction de ce coefficient:

$$dP_{abs}(z) = P_{inc} \{ \exp[-\alpha(\lambda) \cdot z] \} dz \quad (IV.1)$$

Où P_{inc} est la puissance incidente arrivant sur la surface du détecteur. La puissance totale absorbée sera l'intégrale de toutes ces puissances. Afin d'obtenir une détection efficace il faut une épaisseur d'absorption $z = W$ suffisante au moins supérieure à la longueur d'absorption $L_a = \alpha^{-1}$.

Le coefficient d'absorption dépend de la longueur d'onde λ et donc aussi de l'énergie de gap E_g dans le semi-conducteur. Si l'énergie du photon $h \cdot \nu$ est supérieure à E_g il y a absorption. Pour une détection il faut donc que la longueur d'onde soit inférieure à la longueur d'onde de coupure λ_c .

Si l'on exprime les énergies en électronvolt, avec $1eV = 1,602 \cdot 10^{-19} J$, une relation utile pour la longueur d'onde de coupure est :

$$\lambda_c(\mu m) = \frac{1,24}{E_g(eV)} \quad (IV.2)$$

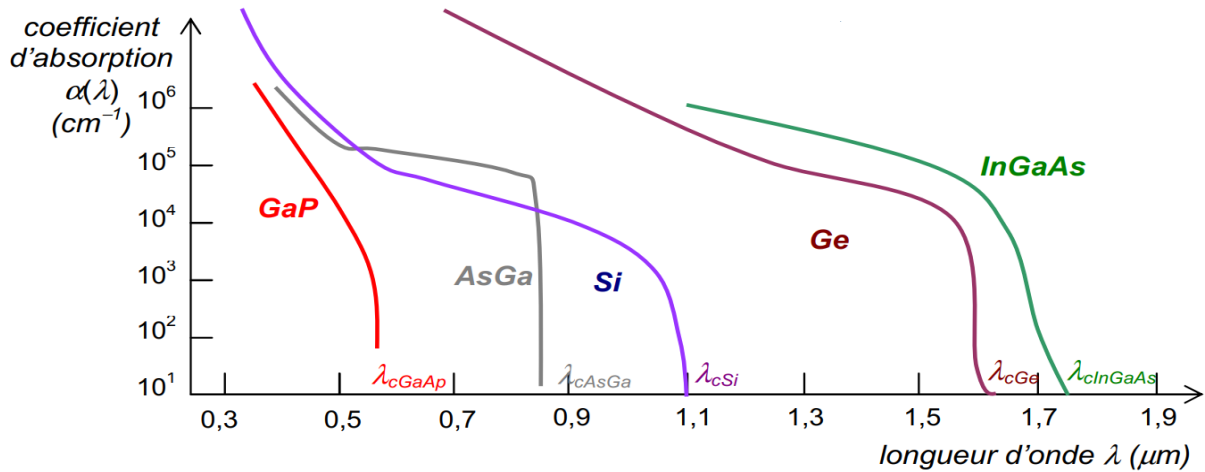


Figure IV.1. Coefficients d'absorption dans différents semi-conducteurs.

On peut distinguer plusieurs zones dans la variation de l'absorption en fonction de la longueur d'onde :

- Une zone d'absorption pour $\lambda < \lambda_c$ où l'on peut considérer en première approximation α constant.
- Une zone de transparence pour $\lambda > \lambda_c$.
- Une zone où α devient très grand pour des longueurs d'onde petites et où pratiquement toute l'absorption se fait à la surface avec un temps de recombinaison est très court.

c. Sensibilité

Un exemple de sensibilité pour les trois semi-conducteurs les plus utilisés comme détecteurs dans les transmissions par fibre optique en fonction de la longueur d'onde λ .

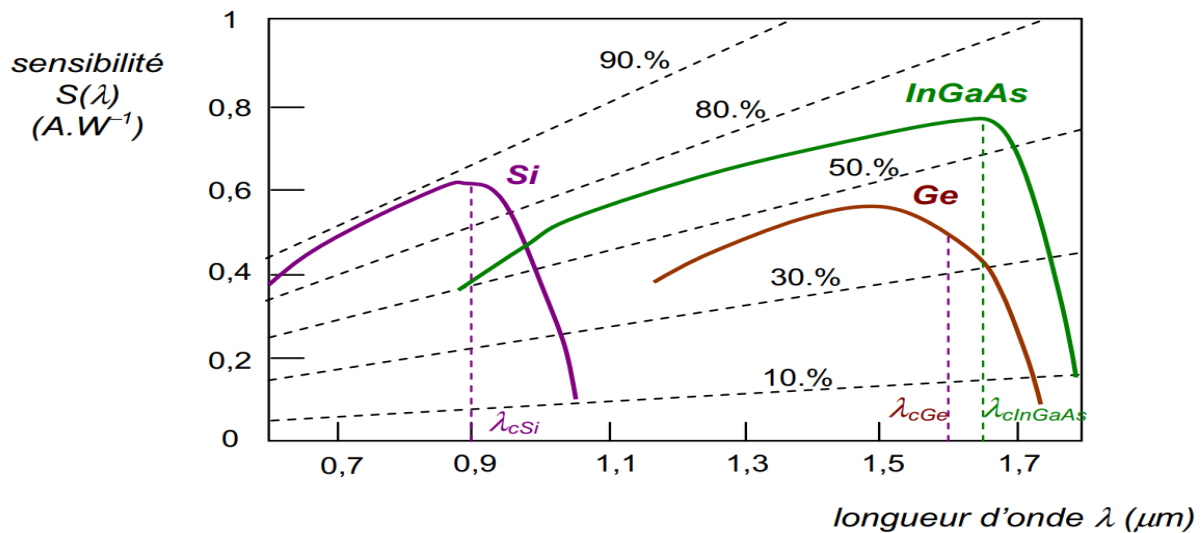


Figure IV.2. Sensibilités pour les trois semi-conducteurs utilisés comme Détecteurs dans les transmissions par fibre optique en fonction de la longueur d'onde λ .

C'est qu'à maintenant qu'on va voir quelques dispositifs détecteurs de lumières.

IV.2. Photo détecteurs

Un photo détecteur (ou détecteur photosensible ou détecteur optique ou détecteur de lumière) est un dispositif (détecteur) qui transforme la lumière qu'il absorbe en une grandeur mesurable généralement un courant électrique ou une tension électrique.

IV.2.1. Photoconducteurs

Les détecteurs fonctionnant dans l'infrarouge sont principalement employés dans les trois fenêtres de transmission de l'atmosphère: fenêtre NIR 'Near Infra Red' de 0,8 μm à 3 μm , fenêtre MIR 'Mid Infra Red' de 3 μm à 20 μm , et la fenêtre FIR 'Far Infra Red' de 20 μm à 100 μm . Ces détecteurs sont utilisés dans les caméras infrarouges pour la vision nocturne, dans la détection de cibles chaudes, dans le contrôle non destructif, dans la métrologie et en astronomie. Ici on ne considérera que les détecteurs de type quantique, photoconducteurs et photodiodes, et on ne traitera pas les détecteurs thermiques comme les bolomètres.

Les photoconducteurs sont utilisés principalement en détection infrarouge. Dans le visible, dans la fenêtre autour 0,5 μm on peut utiliser le composé *CdS*. Dans le proche infrarouge le composé *InSb* offre une sensibilité élevée et dans la région de 3-15 μm l'alliage *HgCdTe* est très utilisé.

Un photoconducteur est constitué par un film de matériau semi-conducteur possédant aux deux extrémités des contacts ohmiques. Quand le rayonnement incident arrive sur la surface du photoconducteur, les porteurs sont créés par:

- Des transitions de la bande de valence à la bande de conduction, cas intrinsèque.
- Des transitions de ou vers des niveaux situés dans la bande interdite cas extrinsèque.

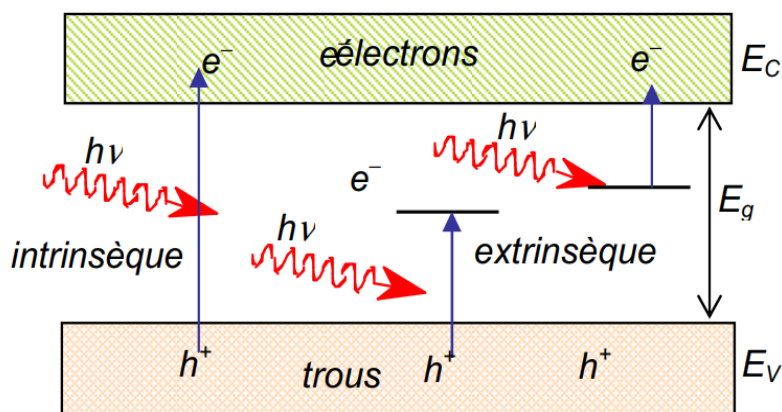


Figure IV.3. Absorption de photons dans un semi-conducteur (Intrinsèque $h \cdot \nu > E_g$; Extrinsèque $h \cdot \nu < E_g$).

Dans le cas d'un photoconducteur intrinsèque la fréquence ν du rayonnement incident doit vérifier la condition d'absorption à travers le gap: $h\nu \approx E_g$

La conductivité d'un semi-conducteur intrinsèque est fonction des concentrations des porteurs, électrons N_e et trous N_h :

$$\sigma = e(\mu_e \cdot N_e + \mu_h \cdot N_h) \quad (IV.3)$$

μ_e et μ_h sont les mobilités des électrons et des trous respectivement. L'augmentation de la conductivité σ est due à l'augmentation de la concentration des porteurs engendrée par l'absorption des photons incidents.

Le phénomène de génération-recombinaison des porteurs à l'origine de ce bruit, possède deux contributions équivalentes, celle due à la détection de photons et celle due à l'agitation thermique. Pour un gain unitaire, $G_{Iph}=1$, on obtient une contribution double par rapport au cas de la photodiode, où l'on ne considère que la contribution des photons.

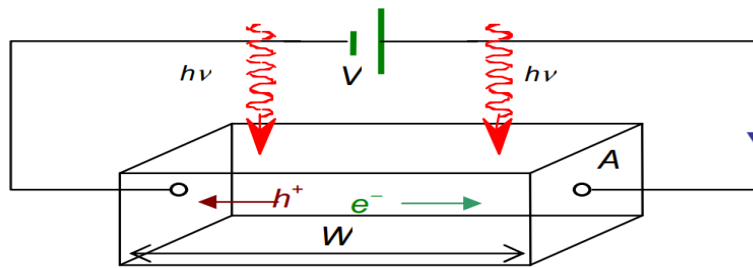


Figure IV.4. Configuration et structure d'un photoconducteur.

IV.2.2. Photodiodes

Une photodiode est constituée par une jonction P-N. Entre les zones P et N apparaît sous l'application d'un champ électrique une zone de transition, appelée zone de charge d'espace (Vue dans les chapitres précédents), qui permet la création et la séparation des paires électron-trou.

Pour pouvoir augmenter le rendement quantique, la zone de transition doit posséder une épaisseur W suffisante, mais dans les photodiodes rapides la zone de transition ne doit pas être trop grande afin de diminuer le temps de transit t_r des porteurs, il existe donc un compromis entre rendement et vitesse.

Les photodiodes peuvent prendre plusieurs formes et présentent des structures comme : PN, PIN, métal semi-conducteur et à hétérojonctions.

Les photodiodes à avalanche, PDA, utilisent en plus la multiplication des porteurs par effet d'avalanche afin de créer un gain.

Une photodiode peut être utilisée suivant deux modes :

- Mode photovoltaïque : qui correspond à une diode non polarisée en circuit ouvert. La lumière crée des paires électron-trou dans la zone de charge d'espace, il se crée alors une différence de potentiel à travers la jonction. C'est le cas des cellules solaires, dans ces composants de grande taille, la structure est modifiée par rapport aux photodiodes classiques afin de permettre des rendements élevés sur une grande gamme de longueurs d'onde.



- Mode photoconducteur : ici on applique une tension inverse, c'est le mode le plus utilisé pour les longueurs d'onde dans le visible et dans le proche infrarouge (Vu précédemment dans la section IV.2.1). Les photodiodes sont polarisées en inverse avec des tensions de l'ordre de 5V et inférieures à la tension d'avalanche, afin de réduire le temps de transit et la capacité de jonction.

La caractéristique courant-tension d'une photodiode dans les deux modes pourra se présenter comme suit:

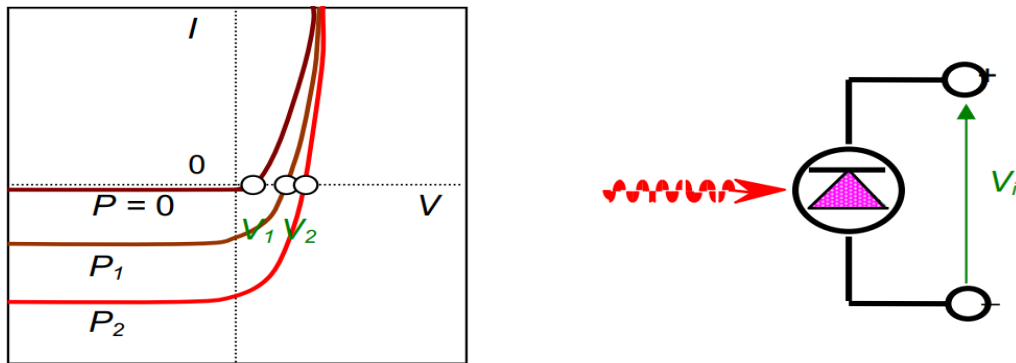


Figure IV.5. Mode photovoltaïque.

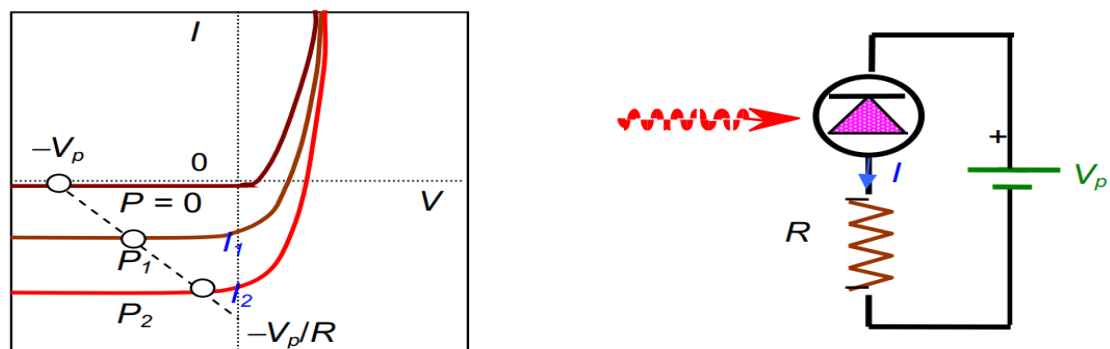


Figure IV.6. Mode photoconducteur.

Des photodiodes rapides et de grande sensibilité sont nécessaires pour les transmissions par fibre optique. Les structures des photodiodes les plus utilisées sont les photodiodes PIN et les photodiodes à avalanche PDA. Les PDA ont un gain interne et représentent donc les récepteurs les plus sensibles. Pour les applications à très fort débit, supérieur à 10Gb/s, la meilleure sensibilité est obtenue pour les récepteurs qui associent une photodiode PIN et un transistor à effet de champ il s'agit des structures PIN-FET. Les PIN possèdent en général une bande passante supérieure et des courants de fuite plus faibles que les PDA.

a. Photodiode PIN

Les photodiodes PIN sont constituées par trois zones: une zone dopée P suivie d'une zone intrinsèque I et d'une zone N d'où le nom du composant. Le composant est fabriqué sur un substrat, par exemple pour un composant en *InGaAs* on aura une zone P en *InGaAs*, une zone N- intrinsèque *InGaAs* et une zone N en *InP* qui constitue le substrat.

La largeur de la zone intrinsèque est optimisée afin de maximiser le rendement et aussi la réponse en fréquence à travers la bande passante Δf . Le rayonnement est presque entièrement absorbé dans la zone intrinsèque I.

Rendement d'une photodiode PIN

On peut exprimer le photo courant I engendré dans la photodiode par:

$$I = \frac{e}{h\nu} [1 - \exp(-\alpha W)] (1 - R_F) P \quad (IV.4)$$

Le terme multiplicatif devant la puissance optique P représente en fait la sensibilité de la photodiode S . W est la largeur de la zone d'absorption, α le coefficient d'absorption. R_F est le facteur de réflexion Fresnel dû à l'interface air semi-conducteur donné par:

$$R_F = \left(\frac{n_{sc} - 1}{n_{sc} + 1} \right)^2 \quad (IV.5)$$

De l'ordre de 30% dans les semi-conducteurs compte tenu des indices $n_{sc} \approx 3$.

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

$$\eta_{tot} = [1 - \exp(-\alpha W)] (1 - R) \approx \alpha W \cdot (1 - R) \quad (IV.6)$$

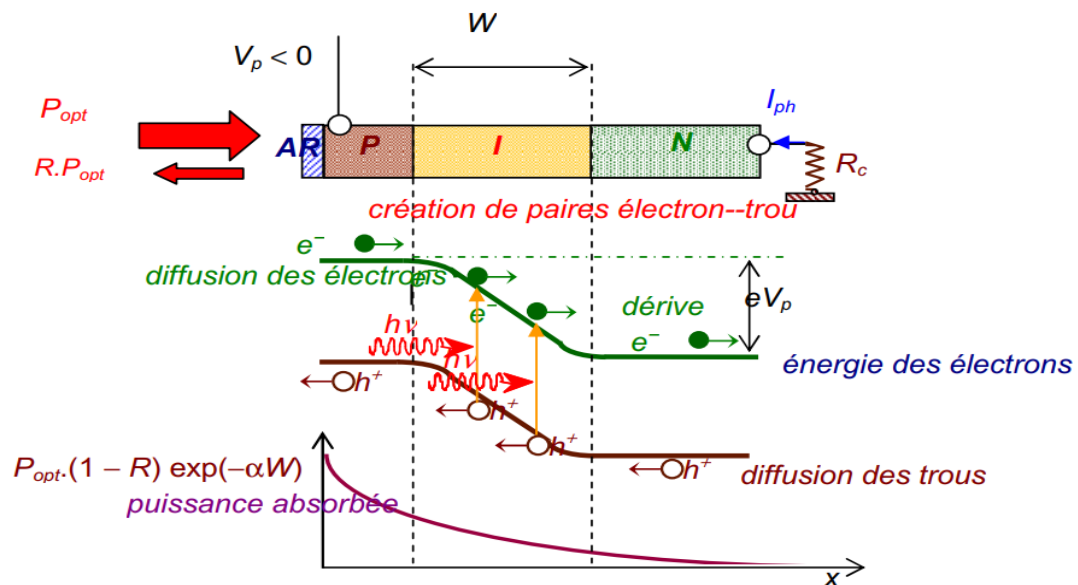


Figure IV.7. Photodiode PIN avec les différentes zones de fonctionnement, zone antireflet AR, zone dopée P, zone intrinsèque I et zone dopée N, les niveaux d'énergie correspondants et le profil d'absorption.

On utilise deux configurations de photodiodes PIN rapides en *InGaAs*:

- PIN éclairée par l'avant 'front illuminated', qui correspond à la configuration habituelle. Ici la lumière entre par la zone P, cette configuration nécessite de placer le contact en dehors de la zone active.

- PIN éclairée par l'arrière 'back-illuminated', ici la lumière entre par la zone N, ceci permet de placer le contact dans la zone P entièrement en dessous de la jonction de façon à rendre la surface effective de la jonction constante.

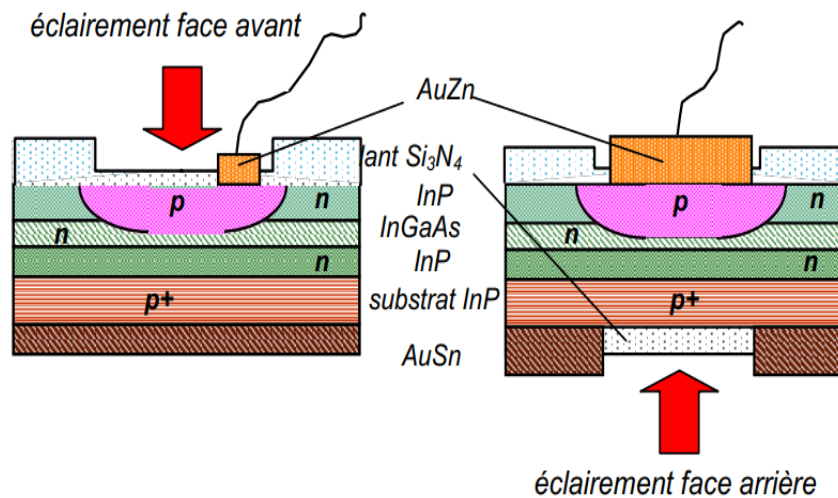


Figure IV.8. Structure d'une photodiode PIN en Si éclairée face avant et face arrière montrant les contacts ohmiques et les dimensions des zones P, I et N.

Temps de réponse d'une photodiode PIN

Les contributions au temps de réponse sont de différente nature :

- Temps de transit t_{tr} à travers la zone intrinsèque $10\text{ ps} < t_{tr} < 100\text{ ps}$.
Temps de diffusion $t_{diffusion}$ à travers la zone intrinsèque, surtout quand W est grand alors $t_{diffusion} \approx 10\text{ ns}$.

b. Photodiode à avalanche PDA

Dans une photodiode à avalanche PDA, les électrons créés dans la zone intrinsèque I sont multipliés par effet d'avalanche. On caractérise cet effet par un gain d'avalanche appelé aussi facteur de multiplication M ou gain d'avalanche, le courant engendré s'écrit de la façon suivante:

$$I_{PDA} = M \cdot S(\lambda) \cdot P_{Opt} \quad (IV.7)$$

Alors que pour une photodiode PIN on a :

$$I_{PIN} = S(\lambda) \cdot P_{Opt} \quad (IV.8)$$

Pour obtenir l'effet d'avalanche il faut appliquer sur la PDA une tension inverse élevée. Le facteur de multiplication $M(V)$ dépend de cette tension inverse. L'effet d'avalanche est déclenché pour une tension inverse supérieure à la tension d'avalanche V_A . Les tensions d'avalanche V_A varient typiquement de 10V à 100V, et les facteurs de multiplication M de 1 à 100.

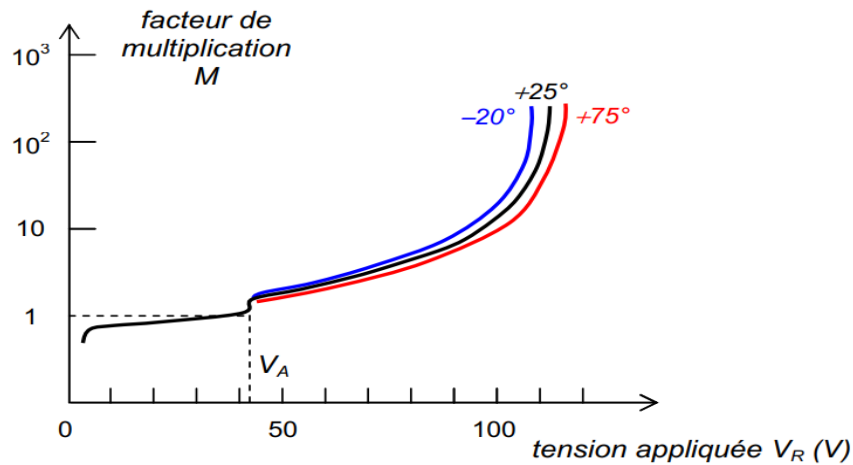


Figure IV.9. Gain d'une PDA en *InGaAs* en fonction de la tension appliquée V_R .

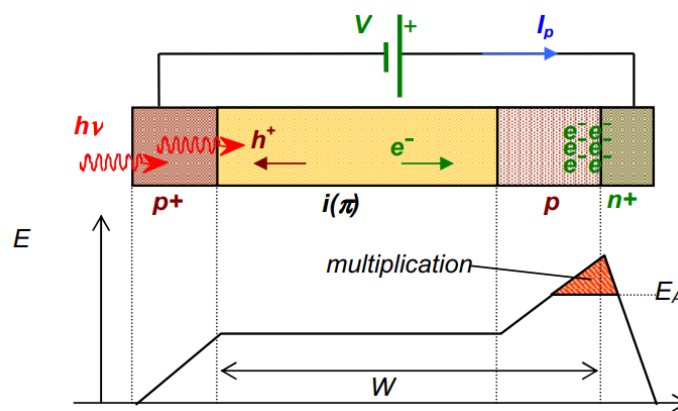


Figure IV.10. Structure d'une photodiode à avalanche SAM-APD avec le profil du champ électrique, l'effet de multiplication est obtenu au-delà du champ critique E_A .

Pour que cette structure de photodiode fonctionne convenablement, il faut satisfaire les conditions suivantes :

- Le champ électrique dans la zone de multiplication doit être suffisamment élevé afin de produire un gain suffisant.
- Le champ électrique dans la zone d'absorption doit être suffisamment faible afin d'éviter les transitions par effet tunnel.
- La zone intrinsèque doit être suffisamment étendue dans la zone d'absorption de façon à éliminer les effets de diffusion.

c. Photodiode Schottky

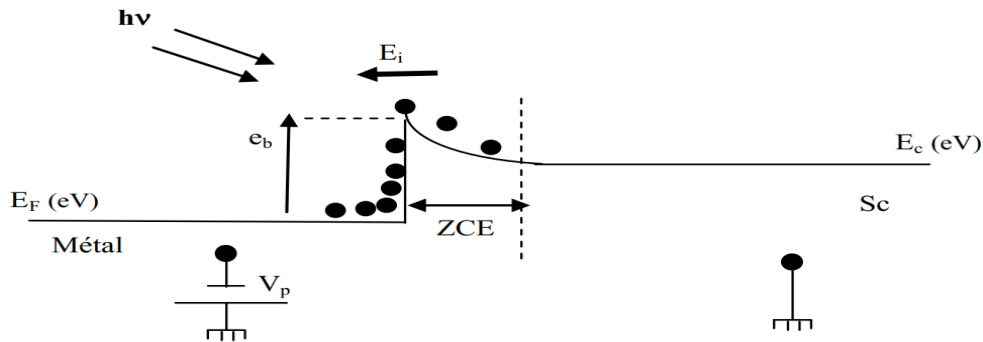


Figure IV.11. Diagramme d'énergie pour une photodiode Schottky.

Dans une photodiode Schottky, le flux lumineux qui traverse le métal de contact (transparent au rayonnement dans le domaine du proche ultra-violet) est absorbé dans la ZCE côté semi-conducteur, figure IV.11.

Les porteurs libres ainsi créés sont rapidement balayés par le champ électrique interne (E_i) de la jonction. A ce flux de porteurs créés par absorption, nous devons rajouter le flux d'électrons issus du métal qui acquièrent de l'énergie et transitent vers le semi-conducteur par le champ électrique interne E_i de la jonction à travers la barrière e_b , augmentant ainsi le courant inverse de la jonction polarisée en inverse par le potentiel V_p .

Ce type de photodiode est très sensible dans l'ultra-violet et le bleu contrairement aux photodiodes pin (à base de silicium) utilisées habituellement dans les systèmes de communication par fibre optique, qui présentent une forte sensibilité dans le proche infrarouge.

d. Phototransistor

Un phototransistor est un transistor bipolaire dont la base est sensible au rayonnement lumineux : c'est le courant photoélectrique qui constitue le courant de commande (ou courant de base). La figure IV.12 montre une coupe transversale de la structure de ce composant ainsi que les symboles représentatifs.

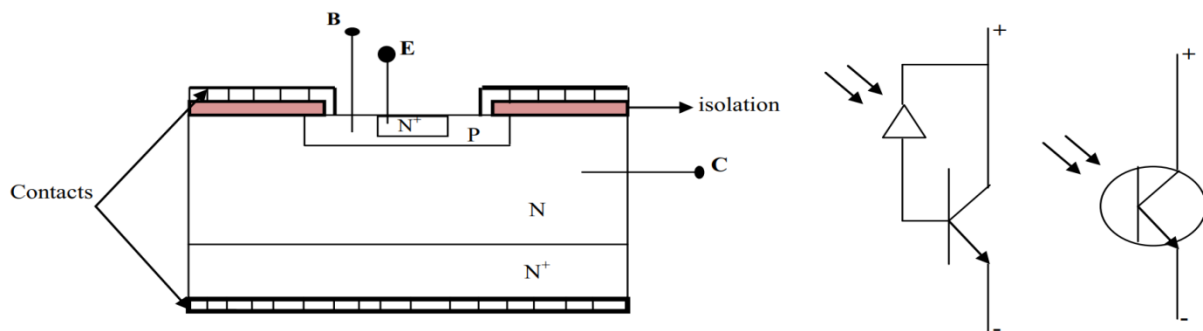


Figure IV.12. Structure et schémas d'un phototransistor.

Le courant produit par le phototransistor I_{Cph} sous un éclairage précis est donné par l'équation :

$$I_{Cph} = \beta \cdot I_{ph} + I_{CE0} \quad (IV.9)$$

Le courant de la base qui résulte de l'éclairage est multiplié par le facteur β du transistor : ($100 \leq \beta \leq 1000$), ce qui explique la forte sensibilité de ce composant aux faibles éclairagements d'une part, et d'autre part le fort courant fourni par ce photorécepteur, comparativement à une photodiode classique PN.

Sur la figure IV.13, nous avons représenté les caractéristiques de sortie $I_C (V_{CE})$ pour différents éclairagements.

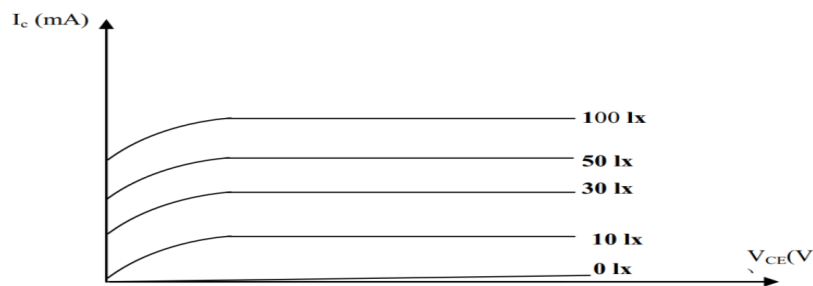


Figure IV.13. Caractéristiques $I_C (V_{CE})$.

Remarques

- Le phototransistor a une sensibilité élevée aux faibles éclairagements.
- Le phototransistor fournit un courant à sa sortie qui n'est pas parfaitement proportionnel à l'intensité de l'éclairage absorbé : problème de non linéarité.
- Le phototransistor a un temps de réponse un peu élevé ce qui limite son utilisation dans les applications qui demandent la haute fréquence.
- Dans certaines applications où on demande des niveaux de courants élevés, on préfère utiliser le photo-Darlington (Le photo-Darlington est composé d'un phototransistor, suivi d'un transistor normal qui amplifie le courant. Ce photo coupleur a une vitesse de commutation moyenne), car il permet d'avoir un gain beaucoup plus important que celui du phototransistor.

Applications

1- Générateur de tension variable

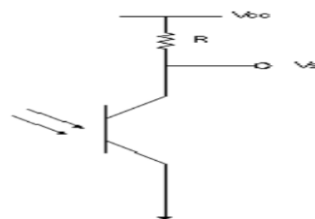


Figure IV.14. Générateur de tension variable.

2- Phototransistor en émetteur commun

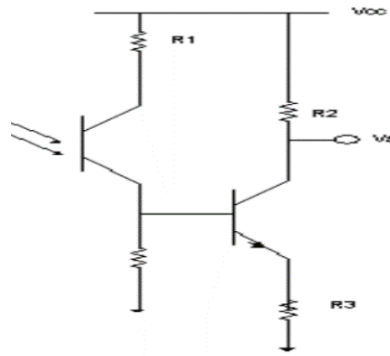


Figure IV.15. Phototransistor en émetteur commun.

3- Détection d'un signal

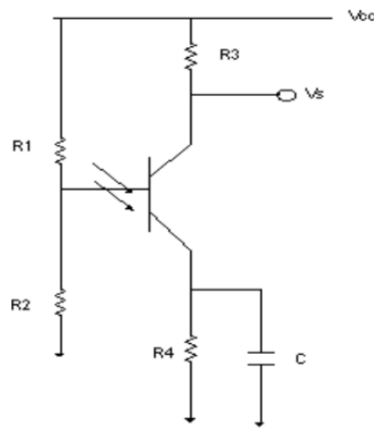


Figure IV.16. Détection d'un signal.

IV.2.2.5. Cellule solaire Photovoltaïque

Contrairement aux photodiodes, ces cellules fonctionnent sans polarisation extérieure. La figure IV.17, montre la structure d'une cellule solaire.

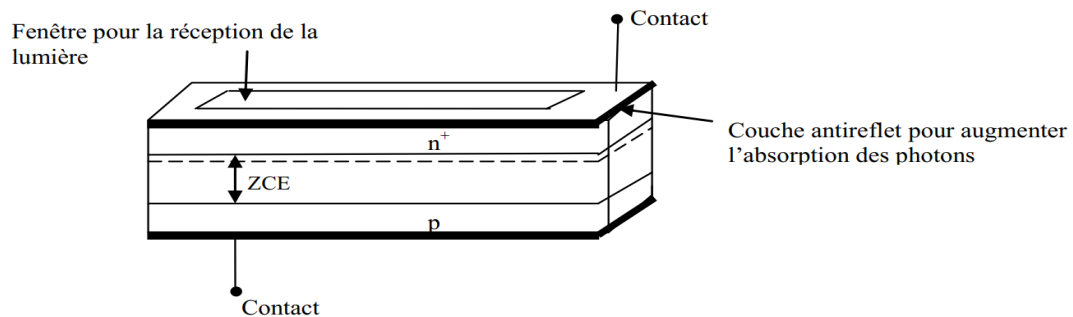


Figure IV.17. Structure d'une cellule solaire.

Principe de fonctionnement

Les porteurs de charges (e^- , h^+) générés par l'absorption des photons dans la zone ZCE seront séparés par le champ électrique interne de la jonction et y diffusent dans les zones p et n+ où ils sont majoritaires.

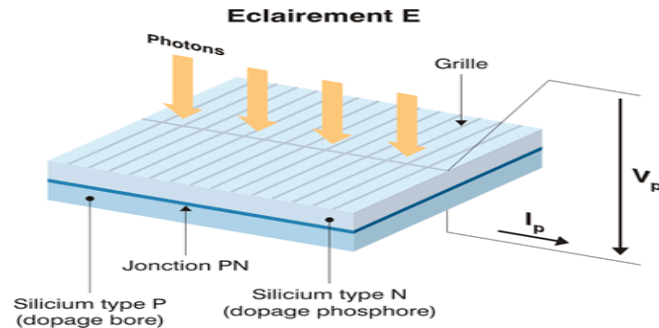


Figure IV.18. Structure d'une cellule solaire avec éclairage.

Ensuite, ils seront collectés au niveau des contacts métalliques qui assurent la liaison électrique avec le circuit extérieur donnant lieu à un courant photoélectrique I_{ph} qui en parcourant une charge R (batterie, moteur, résistance...), fait apparaître une différence de potentiel V entre les deux faces de la cellule comme c'est indiqué sur la figure IV.19.

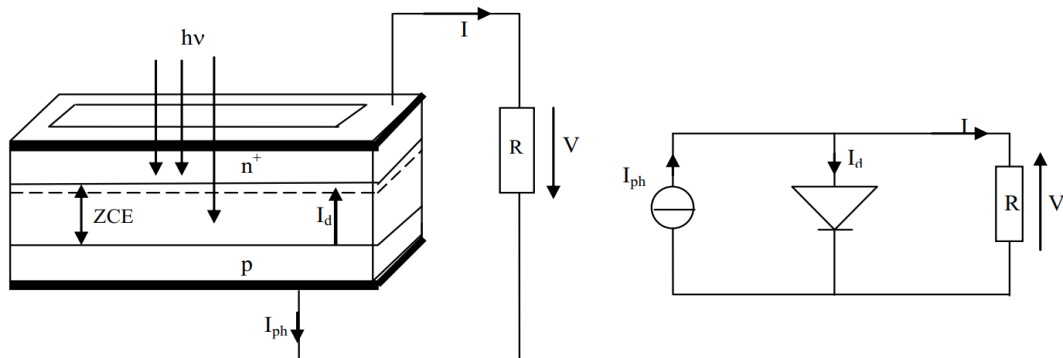


Figure IV.19. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

Schéma électrique équivalent

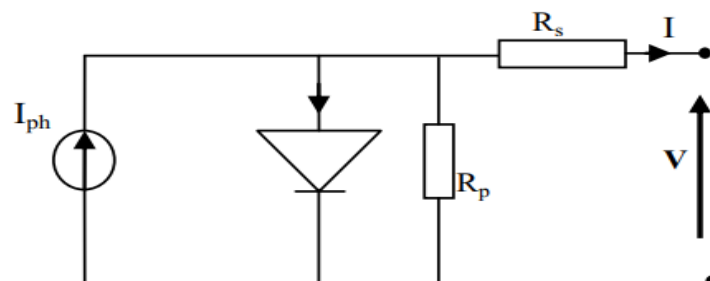


Figure IV.20. Schéma équivalent d'une cellule solaire.

- Le générateur (I_{ph}) modélise le courant photoélectrique produit sous éclairage.

- La diode modélise le composant en obscurité.
- R_s : résistance série du composant, c'est la somme des résistances des zones de contact plus la résistance de la zone intrinsèque.
- R_p : résistance parallèle qui modélise les courants parasites traversant la cellule dus aux porteurs photo-générés puis recombinaison.

Courant fourni par une cellule photovoltaïque

$$I = I_{ph} - I_s \exp \left[\frac{q(V + R_s I)}{KT} - 1 \right] - (V + R_s I) / R_p \quad (IV.10)$$

Vue la très faible valeur de R_s , on peut négliger la chute de tension à ses bornes ($R_s I$) devant la tension de sortie V , et l'équation de courant devient alors :

$$I = I_{ph} - I_s \exp \left[\frac{qV}{KT} - 1 \right] - V / R_p \quad (IV.11)$$

Le schéma représentatif de la cellule est alors représenté par la figure IV.21.

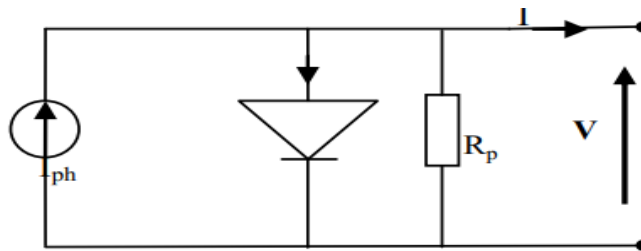


Figure IV.21. Schéma équivalent simplifié.

Comme on peut ne pas tenir compte du faible courant traversant la très forte résistance R_p , on travaille avec l'équation de courant suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \exp \left[\frac{qV}{KT} - 1 \right] \quad (IV.12)$$

Le schéma représentatif de la cellule encore simplifié est alors représenté par la figure IV.22.

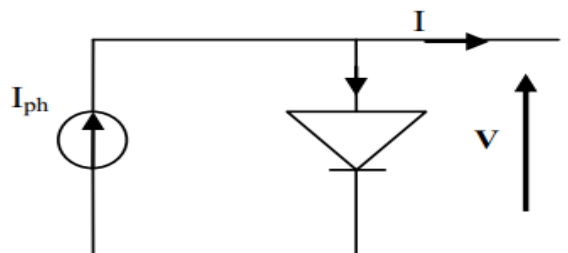


Figure IV.22. Schéma équivalent encore simplifié.

Paramètres d'une cellule solaire

Sous un éclairage donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension-Puissance représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe:

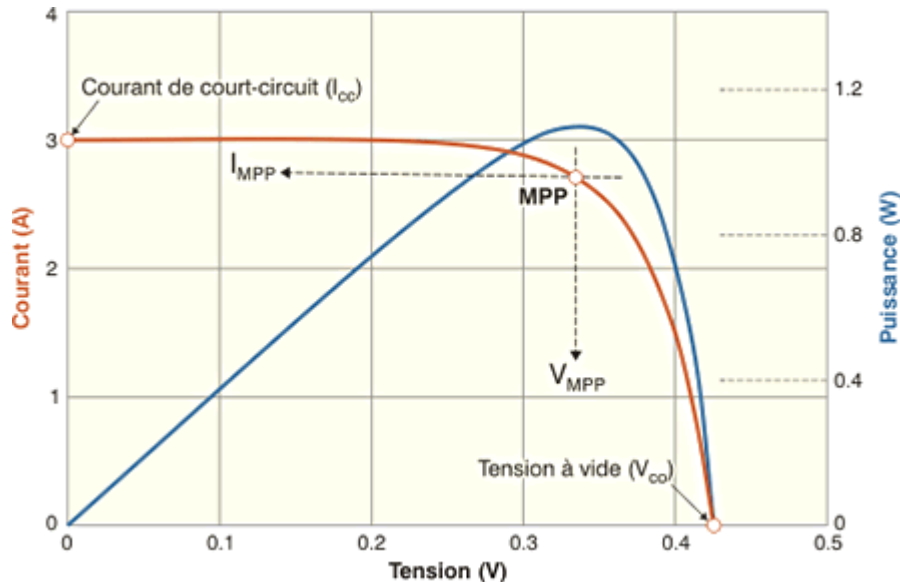


Figure IV.23. Caractéristique et paramètres d'une cellule solaire (Courant-Tension-Puissance) d'une cellule solaire au silicium.

- Sa tension à vide: V_{co} . Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Son courant court-circuit: I_{cc} . Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Son point de puissance maximal: *MPP* (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimaux : V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{mpp} , I_{mpp}).

Remarque

Pour permettre une comparaison de l'efficacité de différentes cellules, on définit ces caractéristiques dans des conditions de test bien précises (STC = Standard Test Conditions). Ces conditions sont : émission lumineuse de $1\ 000\ \text{W/m}^2$, température de $25\ ^\circ\text{C}$, conditions spectrales Air Mass 1.5 (composition du spectre identique au spectre solaire lorsqu'il traverse une épaisseur et demie d'atmosphère, ce qui correspond à un angle d'incidence de 41.8° par rapport à l'horizontale).

Récapitulatif

La cellule peut être caractérisée par trois paramètres :

- Le courant de court-circuit I_{cc} ,
- La tension en circuit ouvert V_{co} ,

- Le facteur de forme F_F , défini par le rapport de la puissance utile fournie par la cellule sur le produit $I_{CC} \cdot V_{CO}$. Pour les cellules de bonne performance : $0,75 \leq F_F < 1$.
- Le rendement optique η : rapport entre l'énergie électrique fournie et la puissance lumineuse incidente.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = F_F \cdot I_{CC} \cdot V_{CO} / P_{inc} \quad (IV.13)$$

En général, le rendement d'une cellule unique ne dépasse pas 15–16%, c'est pour cela on associe des batteries de cellules pour arriver à une puissance électrique convenable. Actuellement les cellules très consommées en grande quantité dans le marché du photovoltaïque sont à base de silicium (*Si*) vu leur bas prix par comparaison aux cellules à base des matériaux tels que : *GaAs*, *CdTe*, *CIGS*,...

Raccordement des cellules entre elles

Dans les conditions standardisées de test, la puissance maximale pour une cellule *Si* (silicium) de 100cm² (10 sur 10) tourne aux alentours de 1,25 Watt. Cette cellule constitue donc un générateur de très faible puissance, insuffisant pour les applications électriques courantes. Les modules sont donc réalisés par association, en série et/ou en parallèle, de cellules élémentaires. La connexion en série augmente la tension pour un même courant alors que la connexion en parallèle augmente le courant pour une tension identique. Pour que l'électricité générée soit utilisable pour nos applications électriques, il est donc nécessaire d'associer entre elles un grand nombre de cellules.

Association en série

Par association en série (appelée "String"), les cellules sont traversées par le même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules.

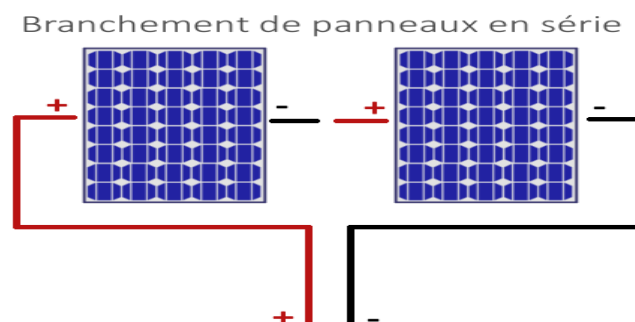


Figure IV.24. Branchement de panneaux en série.

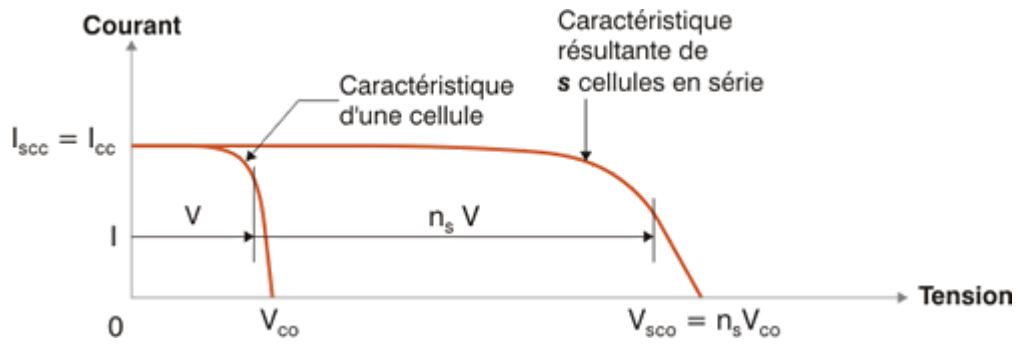


Figure 4.25. Caractéristiques pour le branchement de panneaux en série.

Association en parallèle

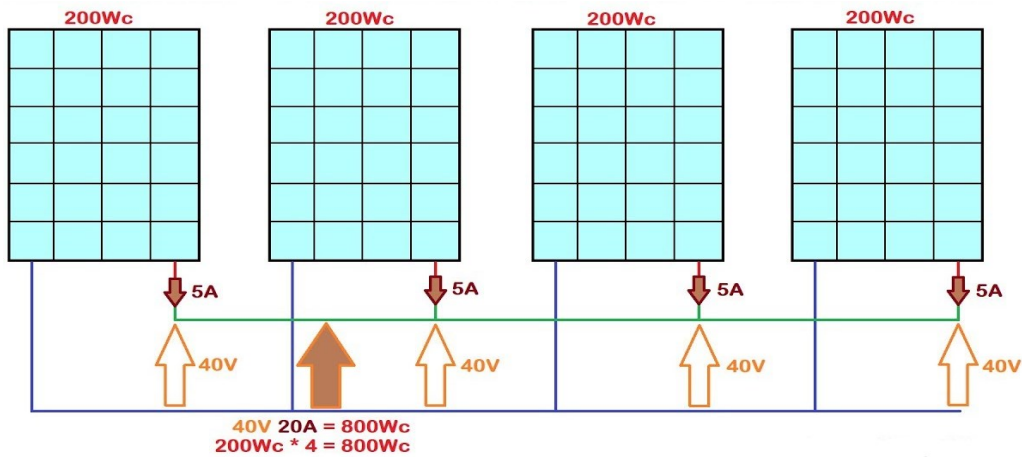


Figure IV.26. Branchement de panneaux en parallèles.

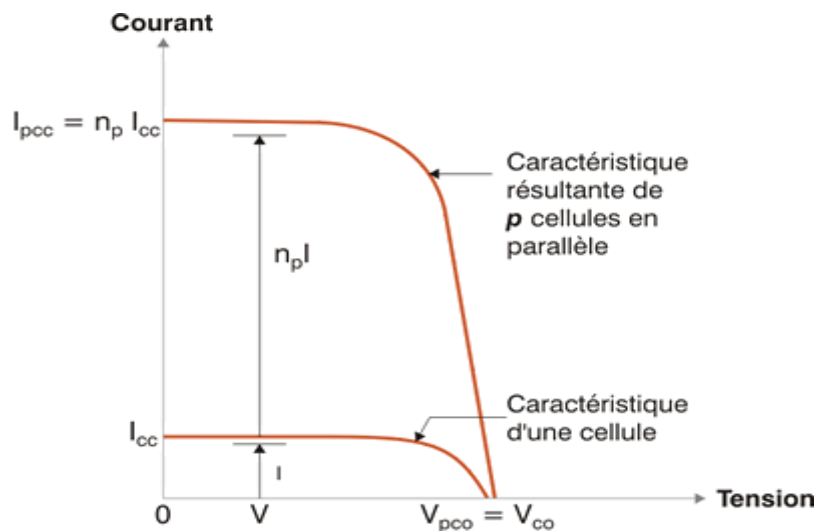


Figure IV.27. Caractéristiques pour le branchement de panneaux en parallèles.

Par association en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules.

f. Afficheurs à cristaux liquides (afficheurs LCD: Liquid Cristal Display)

Principe de l'afficheur

Le cœur de l'afficheur est constitué d'un cristal, d'épaisseur 20 μm , dans un état semi-liquide, mis en « sandwich » entre deux plaques de verres. Sur la plaque de verre supérieure, de fines pistes conductrices correspondant aux zones à afficher sont reliées à une électrode de commande. La plaque de verre inférieure est couverte d'une zone conductrice reliée à une électrode commune. A l'état de repos l'ensemble est translucide.

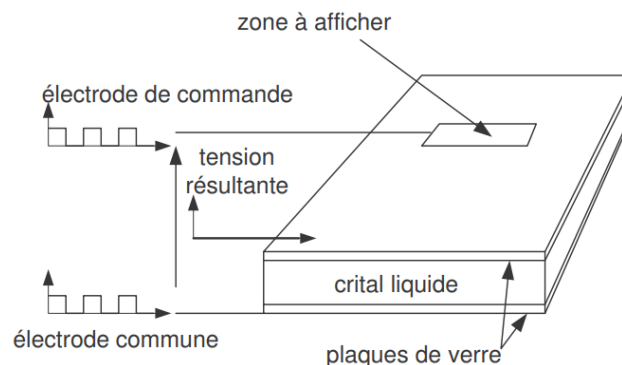


Figure IV.28. Principe de fonctionnement d'un afficheur LCD.

Si on applique une différence de potentiel alternative entre une des électrodes de commande et l'électrode commune, la zone concernée devient opaque.

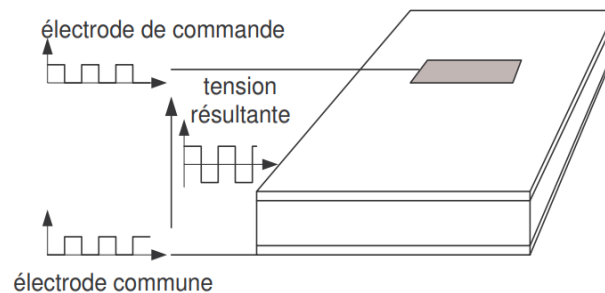


Figure IV.29. Principe de fonctionnement d'un afficheur LCD après application d'une différence de potentiel.

Le cristal ne produisant pas de lumière, pour permettre un affichage, il faut:

- Soit renvoyer la lumière ambiante par une surface réfléchissante placée contre la plaque inférieure.
- Soit produire de la lumière à l'arrière de l'afficheur avec une DEL par exemple.

La tension appliquée doit impérativement ne pas présenter de composante continue, sous peine de destruction de l'afficheur. Afin d'éviter d'avoir à générer une tension négative au niveau du composant, on produit deux signaux carrés $0/V_{dd}$, de même fréquence, décalés d'une demi-période.

L'un de ses signaux est appliqué en permanence à l'électrode commune :

- Si on applique le même signal à une électrode de commande, la différence de potentiel entre cette électrode et l'électrode commune est nulle, le segment n'est pas « affiché », il reste translucide ;
- Si on applique le signal en « opposition de phase » à l'électrode de commande, la différence de potentiel est alternative (+/-) V_{dd} , le segment « s'affiche », il devient opaque.

La fréquence des signaux doit être supérieure à 30Hz pour éviter le scintillement et inférieure à 1kHz pour diminuer la consommation électrique.

Afficheurs LCD commercialisés

Deux types d'afficheurs sont classiquement commercialisés :

- Les afficheurs laissant accès à toutes les électrodes, sous forme de matrice de points (128 par 64 par exemple) ou de lignes (3 digits ½ ou 4 digits par exemple). L'utilisateur doit produire alors les signaux carrés et les appliquer aux électrodes adéquates.
- Les afficheurs « intelligents » : le composant comprend un microcontrôleur permettant de gérer l'affichage, la communication se faisant par un bus 8 bits, sur lequel on envoie le code correspondant au caractère à afficher, et celui de l'endroit où l'on souhaite l'afficher. Une phase d'initialisation est nécessaire afin de préciser le mode de communication (format 8 ou 4 bits) et le mode d'affichage (une ligne ou deux lignes, curseur visible ou invisible etc...). Il est possible de définir ses propres caractères.

Ce type d'afficheur est commercialisé en afficheurs de 1 ligne de 8 caractères (de 8 points par 5), à 4 lignes de 40 caractères, ou encore sous forme de matrice. Par rapport aux afficheurs 7 segments à LED, ils permettent :

- Une meilleure résolution avec l'affichage possible d'autres caractères que les chiffres;
- Une densité d'affichage plus grande (plus d'information sur la même surface);
- Une consommation nettement inférieure, surtout en l'absence de rétro éclairage;
- Ils sont par contre plus complexes à mettre en œuvre et nécessitent d'être pilotés par un microcontrôleur.

g. Photomultiplicateur

Le photomultiplicateur 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).

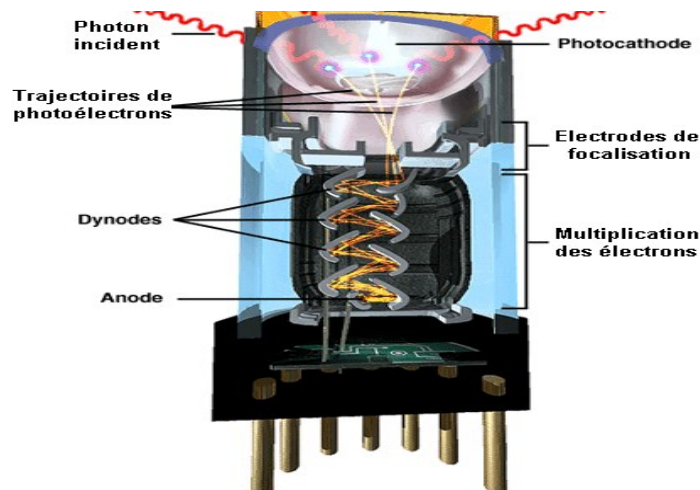


Figure IV.30. Schéma d'un photomultiplicateur

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 ». Les photoélectrons quittent la photocathode et sont ensuite focalisés par un jeu d'électrodes vers un électro multiplicateur, constitué d'une série de dynodes dont le but est de transformer le photoélectron initial en un paquet d'électrons suffisant pour constituer un signal électrique mesurable.

Une anode collecte les électrons secondaires émis par la dernière dynode 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.

h. Capteurs d'images

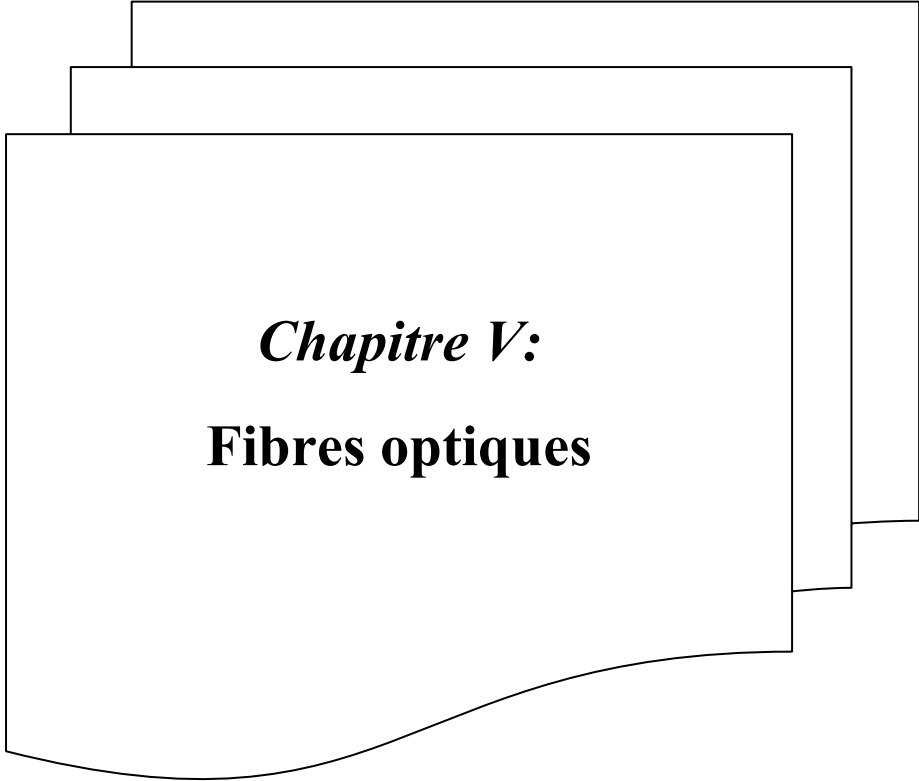
Un capteur d'images est un composant électronique photosensible servant à convertir un rayonnement électromagnétique (UV, visible ou IR) en un signal électrique analogique. Ce signal est ensuite amplifié, puis numérisé par un convertisseur analogique-numérique et enfin traité pour obtenir une image numérique.

Le capteur est donc le composant de base des appareils photo et des caméras numériques, l'équivalent du film en photographie argentique. Le capteur photographique met à profit l'effet photoélectrique, qui permet aux photons incidents d'arracher des électrons à chaque élément actif d'une matrice de capteurs élémentaires constitués de photodiodes. 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 photo sensible 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 utilisé majoritairement des capteurs CMOS.

Conclusion

Après avoir vu pratiquement l'ensemble des dispositifs émetteurs/ récepteurs de lumières, il est nécessaire maintenant de passer au cinquième et dernier chapitre qui se réside en étude de la fibre optique. La fibre optique constitue actuellement l'élément clef dans les télécommunications optiques à grandes distances et dans la fabrication des capteurs très sensibles comme les capteurs de température, de pression... Ses propriétés sont aussi exploitées d'une manière très large en médecine (en chirurgie, en endoscopie pour éclairer l'intérieur du corps et transmettre les images jusqu'au médecin), en aéronautique et en éclairage (espaces publics ou domestiques).



Chapitre V:
Fibres optiques

Chapitre V: Fibres optiques

V.1. Introduction

Pour transmettre l'information émise par les sources optiques il faut disposer de milieux matériels ayant des faibles pertes et pouvant guider la lumière. Le matériau privilégié est le verre de grande pureté, qui est la silice SiO_2 .

La transmission par guidage du faisceau optique dans un guide diélectrique évite la divergence des faisceaux qui est un inconvénient dans la transmission en espace libre.

Une fibre optique est un fil en verre (ou en plastique) très fin (diamètre de quelques μm à une centaine de μm) qui nous permet de faire circuler de la lumière transportant un grand débit d'informations (données informatiques, sons, images, téléphone, visioconférence...) qui peut atteindre les Tbit/s.

La fibre optique constitue actuellement l'élément important dans les télécommunications optiques à grandes distances et dans la fabrication des capteurs très sensibles comme les capteurs de température, de pression... Ses propriétés sont aussi exploitées d'une manière très large en médecine (en chirurgie, en endoscopie pour éclairer l'intérieur du corps et transmettre les images jusqu'au médecin), en aéronautique et en éclairage (espaces publics ou domestiques).

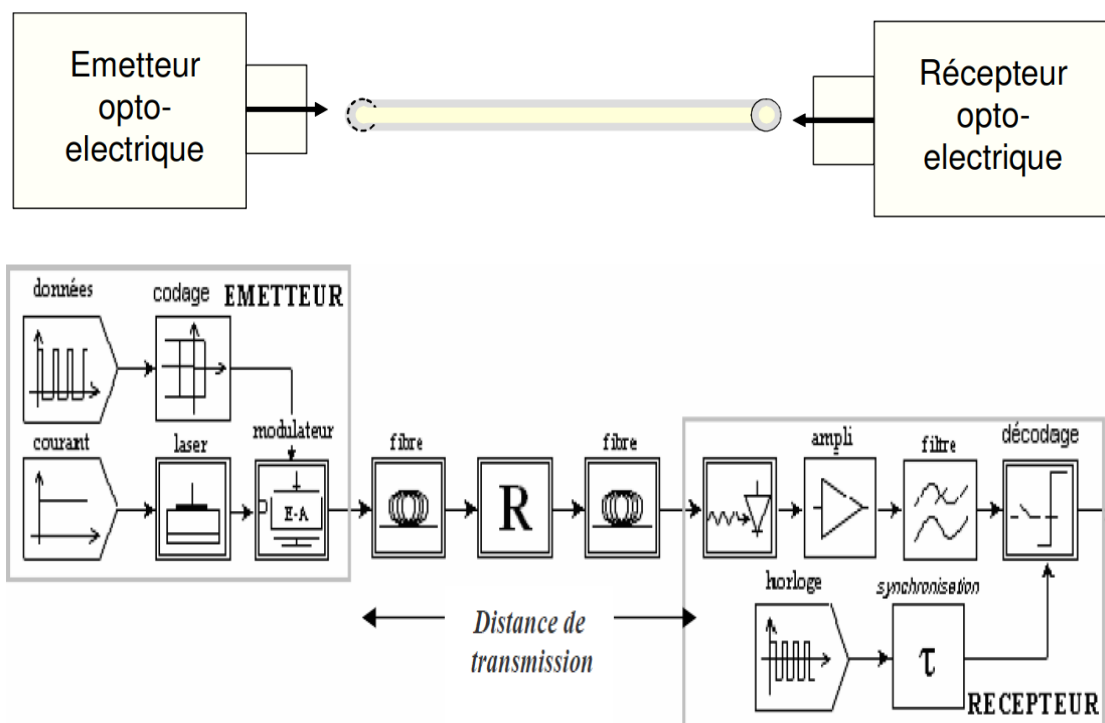


Figure V.1. Illustration schématique d'une ligne de transmission de données à fibre optique.

Cette forte utilisation de la fibre optique est favorisée par le grand développement que connaît l'industrie des composants optoélectroniques : les sources LASERs, les LEDs, les photodiodes, les phototransistors.

V.2. Constitution et principe de transmission

Une fibre optique est un guide d'onde diélectrique de géométrie cylindrique. La lumière, est confinée à l'intérieur du guide et se propage le long de l'axe de la fibre optique. La propagation se fait sous forme de modes, seulement un nombre fini de modes se propage le long de la fibre.

La fibre optique est constituée d'un cœur cylindrique de silice dopée, entouré par une gaine optique en silice dont l'indice de réfraction est plus faible que celui du cœur et le tout est protégé par un revêtement en plastique, figure V.2.

Les principales qualités des fibres optiques sont : une faible absorption, une faible dispersion, l'insensibilité aux parasites électromagnétiques, pas de rayonnement propre vers l'extérieur, une taille réduite, un poids faible, l'isolation électrique totale et pas de déflagration en cas de rupture.

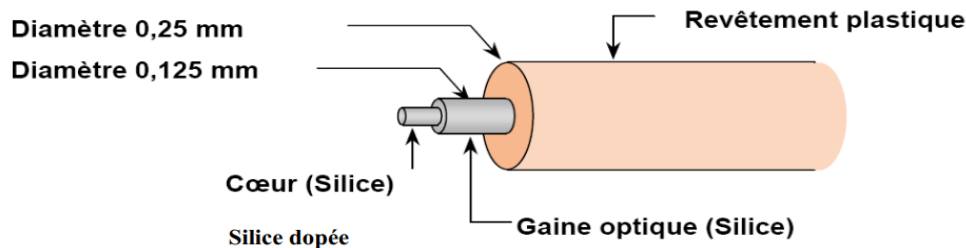


Figure V.2. Constitution d'une fibre optique.

Un rayon lumineux entrant dans la fibre optique avec un angle adéquat est guidé en subissant de multiples réflexions totales internes à l'interface entre le cœur et la gaine, figure V.3.

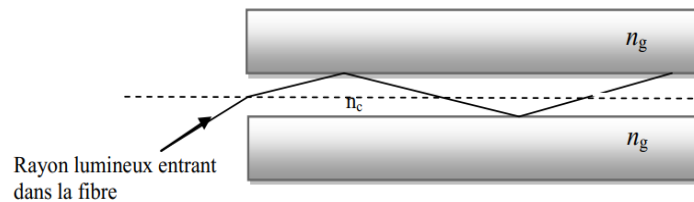


Figure V.3. Principe de la transmission de la lumière dans une fibre optique.

La partie centrale d'une fibre optique est le cœur d'indice n_c , elle est entourée par la gaine constituée du même matériau mais d'indice légèrement inférieur n_g . La condition de guidage impose $n_g < n_c$.

La gaine est en général entouré d'un matériau appelé le manteau protégeant la fibre des polluants externes. On définit la différence d'indice relative Δ par :

$$\Delta = \frac{n_c^2 - n_g^2}{2n_c^2} \approx \frac{n_c - n_g}{n_c} \quad (\text{V.1})$$

Δ varie typiquement de 0,1% à quelques %. Le rayon de cœur est noté a et le rayon de gaine b , Par exemple une fibre optique dénommée 50/125 possède un diamètre de cœur $2a = 50 \mu\text{m}$ et un diamètre de gaine $2b = 125 \mu\text{m}$. On distingue entre une fibre monomode et une fibre multi mode, dans la première un seul mode peut se propager il s'agit de la fibre la plus performante pour les télécommunications.

Remarques

- Possibilité qu'un rayon lumineux parcourt la fibre par son axe sans subir de réflexions.
- Toutes les réflexions subites par le rayon lumineux entrant dans la fibre se font avec le même angle au niveau du dioptre n_g/n_c .

V.3. Technologie de la fibre optique

Dans presque tous les procédés d'élaboration de la fibre optique, on élabore d'abord une préforme vitreuse constituée d'un cœur et d'une gaine, figure V.4. Ensuite on étire les fibres (de la taille d'un cheveu) par le procédé de fibrage, après on protège la fibre par un revêtement en plastique contre toutes influences externes (mécaniques, électrique, optiques...), La figure V.5 montre un touret de fibre optique.

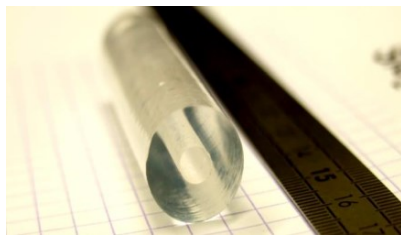


Figure V.4. Préforme en verre de silice.



Figure V.5. Touret de fibre optique.

V.4. Types de fibres optiques

On rencontre principalement deux structures de fibre optique suivant le type de profil d'indice. La fibre optique à saut d'indice 'SI', où l'indice est constant dans le cœur et la fibre optique à gradient d'indice 'GI', où le cœur possède un indice dépendant de la position, que l'on trouve dans les fibres optiques multi modes.

D'autres profils existent, surtout dans les fibres monomodes, par exemple les structures avec des profils en V ou en W qui correspondent à des utilisations particulières, la figure V.6 résume tout cela.

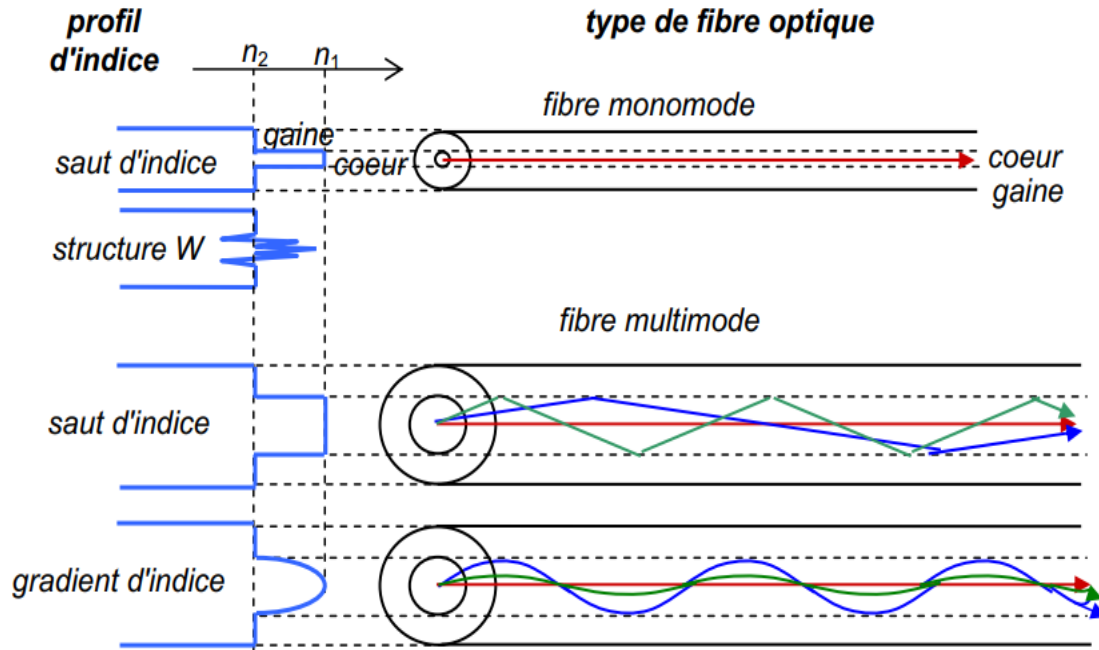


Figure V.6. Types de Fibres Optiques.

Remarque

Le mode de propagation exprime en quelque sorte le chemin optique possible suivi par la lumière au cours de sa propagation dans la fibre.

V.4.1. Fibre mono mode

- Les fibres mono mode dans lesquelles la lumière suit un seul mode de propagation, c'est le mode en ligne droite.
- Le cœur de la fibre mono mode a une taille en général qui ne dépasse pas $50\mu\text{m}$.
- Vu la faible épaisseur de la fibre mono mode, seul la lumière LASER est utilisée comme source d'impulsions optiques.
- La portée maximale de ce type de fibres peut atteindre 100 km avec un affaiblissement de $0,5\text{dB/km}$. Ce type de fibre est très utilisé dans les liaisons intercontinentales.

V.4.2. Fibre multi mode

- A noter que la fibre multi mode possède un cœur très large (entre 100 et $300\mu\text{m}$) et leur portée maximale est d'environ 2 km avec un affaiblissement de 10 dB/km selon la technologie de fabrication de la fibre.
- Ce type de fibre est très utilisé dans les liaisons internes ou réseaux locaux.
- Dans la fibre à Gradient d'indice, on a une variation progressive (ou graduelle) entre l'indice de réfraction du cœur et celui de la gaine optique, en conséquence les rayons lumineux se propagent dans la fibre en suivant des chemins optiques "presque elliptiques".

- C'est la variation d'indice dans le cœur de la fibre qui définit la forme du chemin optique suivi par les modes se propageant dans la fibre.
- Le diamètre de cœur de la fibre à Gradient d'indice a une taille intermédiaire (entre 50 et 100 μm), et leur portée maximale atteint 2 km avec un affaiblissement de 10 dB/km.

Tableau V.1. Comparaison entre une fibre multimode et une autre monomode.

Fibre Multimode	Fibre monomode
cœur = 50, 62,5 ou 100 μm	cœur < 10 μm
Bande passante < 1Ghz	Bande passante > 1Ghz
Fibre à saut ou à gradient d'indice	Fibre à saut d'indice

V.5. Propriétés d'une fibre optique

V.5.1. Condition de guidage dans une fibre

La lumière entrant dans la fibre ne sera guidée le long de ce support, que si l'incidence i est supérieure à l'angle limite $i = i_{lim}$ donné par :

$$i_{lim} = \arcsin(n_g/n_c) \quad (V.2)$$

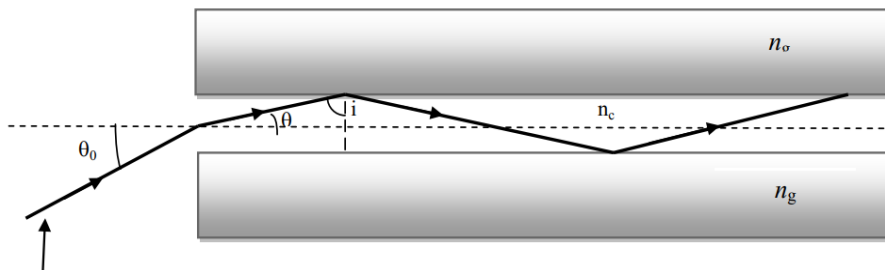


Figure V.7. Guidage d'un signal lumineux.

- La condition de guidage d'un signal sur l'angle d'incidence i : $i > \arcsin(n_g/n_c)$ ou condition de guidage d'un signal.
- Cette condition de guidage d'un signal lumineux dans la fibre est nécessaire mais non suffisante.
- Si la lumière incidente forme un angle i tel que : $i \leq \arcsin(n_g/n_c)$, la lumière est réfracté dans la gaine optique de la fibre et ne sera donc pas transmise, figure V.8.

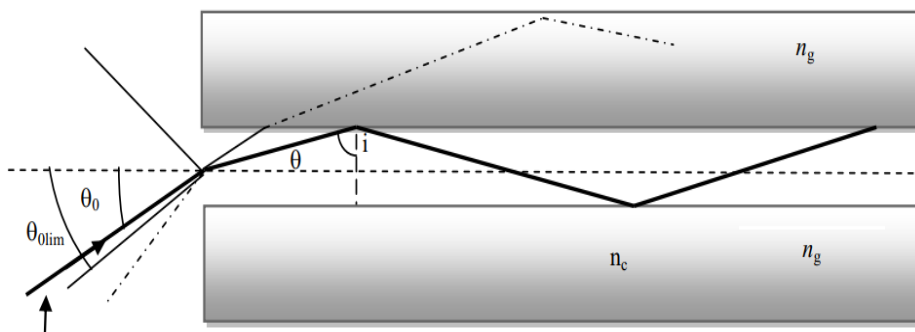


Figure V.8. Angle d'acceptance limite.

V.5.2. Ouverture numérique d'une fibre optique : (ON)

La loi de Descartes appliquée au signal lumineux faisant un angle θ_0 avec l'axe de la fibre donne :

$$n_0 \sin \theta_0 = n_c \sin \theta = n_c \cos i \quad (\text{V.3})$$

Seules les impulsions lumineuses d'incidences (θ_0) contenues dans le cône d'acceptance définie par l'angle limite θ_{0lim} seront guidées dans la fibre, figure V.8, en effet:

A l'entrée de la fibre, l'incidence limite $\theta = \theta_{0lim}$ correspond aux incidences internes $i = i_{lim}$ au niveau du dioptre gaine/cœur, ceci donne :

$$n_0 \sin \theta_{0lim} = n_c \sin \theta_{max} = n_c \cos i_{lim} = n_c \sqrt{1 - \sin^2 i_{lim}} \quad (\text{V.4})$$

$$n_0 = 1 \text{ et } \sin \theta_{0lim} = n_c \sqrt{1 - \sin^2 i_{lim}} = n_c \cdot \sqrt{1 - (n_g/n_c)^2} \quad (\text{V.5})$$

$$\sin \theta_{0lim} = \sqrt{n_c^2 - n_g^2} \quad (\text{V.6})$$

Par définition, l'ouverture numérique (ON) de la fibre optique n'est que le sinus de l'angle d'acceptance limite θ_{0lim} :

$$\text{ON} = \sin \theta_{0lim} = \sqrt{n_c^2 - n_g^2} \quad (\text{V.7})$$

Remarques

- Pour une fibre à gradient d'indice, l'ouverture numérique (ON) change dans le cœur de la fibre : elle est maximale sur l'axe de la fibre et nulle au niveau du dioptre gaine/cœur.

$$\text{ON}(\mathbf{r}) = \sin \theta_{0lim}(\mathbf{r}) = \sqrt{n_c^2(\mathbf{r}) - n_g^2} \quad (\text{V.8})$$

- Plusieurs réfractions correspondant à plusieurs angles limites selon la position r dans le cœur de la fibre.

Dans le marché des fibres optiques, les producteurs fournissent une relation de deux paramètres à savoir le paramètre différence relative d'indice Δ (vu Précédemment) et le paramètre (ON), la relation entre les deux est :

$$\text{ON} = n_c \sqrt{2\Delta} \quad (\text{V.9})$$

- La connaissance de l'écart relatif Δ , nous permet de calculer automatiquement l'ouverture (ON) et d'enduire alors l'angle d'acceptance limite θ_{0lim} de la fibre.
- L'ouverture numérique (ON) détermine aussi la puissance lumineuse qu'on peut injecter dans la fibre, en conséquence, plus l'écart entre l'indice du cœur et celui de la gaine est grand, plus l'ouverture numérique est grande et plus la puissance injectée dans la fibre est importante.

- On peut injecter plus de puissance dans les fibres multimodes à saut d'indice que par rapport aux autres types de fibres mais cet avantage est limité par les pertes considérables dans ce genre de fibres.

Pour pouvoir continuer, on a besoin de définir encore plus d'autres longueurs à savoir :

V.5.3. Longueur d'onde de coupure

La longueur d'onde de coupure λ_c est celle au-dessus de laquelle la fibre devient monomode. Si la longueur d'onde de propagation est inférieure à λ_c la fibre devient multi modes. Elle est définie comme suit dont a est le rayon du cœur :

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{2.404} \alpha \cdot ON \quad (V.10)$$

V.5.4. Atténuation du signal

La lumière transmise dans la fibre optique subit toujours une atténuation (ou affaiblissement), figure V.9, causée essentiellement par les pertes d'énergie au niveau de l'interface gaine/cœur et par l'absorption due aux impuretés (Fe , Cu , Co , Ni , $OH^- \dots$) présents dans le verre silice constituant le cœur de la fibre. Ces pertes d'énergie doivent être minimisées sur des grandes distances pour pouvoir récupérer toutes les impulsions à la sortie de la fibre.

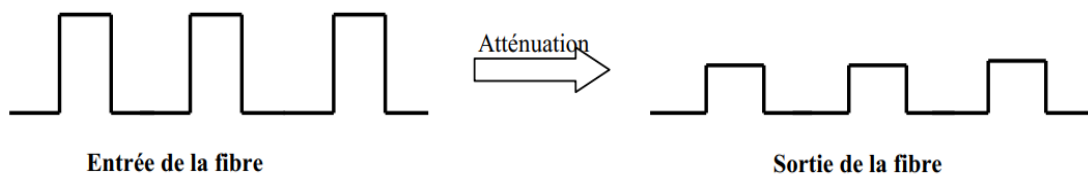


Figure V.9. Atténuation d'un signal.

L'atténuation du signal dans une fibre de longueur L par le coefficient α en dB/km. α est donné par :

$$\alpha(\lambda) \cdot L = 10 \cdot \log (P_0 / P_L) \quad (V.11)$$

P_0 et P_L sont respectivement les puissances à l'entrée et à la sortie d'une fibre de longueur L . Donc, c'est rien que le rapport entre la puissance d'entrée et la puissance de sortie. α est encore appelé coefficient d'affaiblissement du signal.

L'atténuation dans la fibre a plusieurs origines :

- Pertes par absorption moléculaire: elles sont causées par l'absorption des rayons optiques par la silice et les impuretés contenus dans celle-ci.
- Pertes par micro courbures: elles sont dues principalement aux techniques de fabrication, elles se traduisent par l'irrégularité de l'interface cœur-gaine. Lorsqu'un faisceau de rayons optiques atteint l'interface cœur-gaine qui présente des irrégularités, chaque rayon incident est caractérisée par sa trajectoire qui est imposée par le point de réflexion.

- Pertes par courbures: lorsqu'on courbe une fibre, l'angle d'incidence diminue, ce qui a pour conséquence soit une conversion de mode, soit un rayonnement dans la gaine.
- Pertes par épissurage: elles sont dues au couplage des fibres.

L'atténuation de la lumière dans la fibre optique dépend fortement de la longueur d'onde λ , comme montre la figure V.10, elle est maximale dans le domaine des courtes longueurs l'onde (domaine du proche ultra-violet du visible), diminue progressivement dans le domaine *IR* et présente des minimums autour des longueurs d'onde $\lambda = 1,30\mu\text{m}$ et $\lambda = 1,55\mu\text{m}$.

La transmission optique du signal sur les câbles à fibres monomodes (en silice) utilise couramment les fenêtres optiques autour des longueurs $\lambda = 1,30\mu\text{m}$ et $\lambda = 1,55\mu\text{m}$ pour récupérer les signaux avec le minimum de pertes.

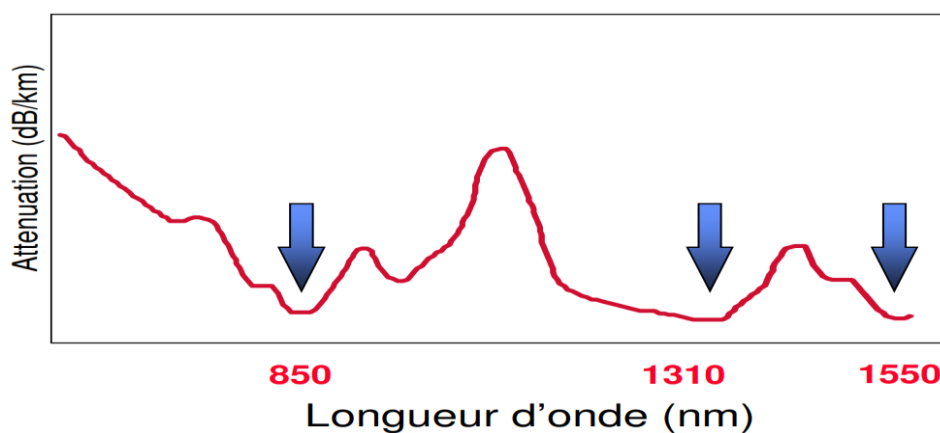


Figure V.10. Atténuation dans une fibre de silice.

La fibre en silice (SiO_2), présente trois bandes d'intérêts appelées fenêtres optiques:

- $0,85\mu\text{m}$ (première fenêtre optique) :
 - Composants électro-optiques bon marché.
 - Transport d'informations sur de courtes distances (5 Km pour une perte par absorption de 90% du signal et grande dispersion $>25 \text{ ps}^2/\text{Km}$).
- $1,31\mu\text{m}$ (deuxième fenêtre optique) :
 - Réseau de communication standard (80 Km).
 - Dispersion nulle dans la fibre.
- $1,55\mu\text{m}$ (troisième fenêtre optique) :
 - Réseau de communication longue distance (105km avec une dispersion de $-20\text{ps}^2/\text{km}$).
 - Amplificateur optique à fibre dopée en erbium.

Remarques

- Pour les fibres optiques multi modes, les opérateurs de télécommunication optiques utilisent la fenêtre [850 - 1300nm].
- Pour minimiser cet effet négatif de l'affaiblissement du signal au cours de sa transmission sur les grandes distances (supérieures en général à 500 km) on doit ré amplifier le signal d'une manière périodique le long de la fibre optique.

- Au cours du calcul des paramètres d'une ligne de transmission optique, on doit tenir compte des pertes d'énergie lumineuses au niveau de toutes les connexions entre fibres constituant la ligne (soudures, épissures...) et entre fibres et modules électroniques constituant la ligne.

V.5.5. Dispersion

Le phénomène de dispersion se traduit par un élargissement des impulsions au cœur de leur propagation, cet élargissement limite la bande passante du canal, figure V.11 et V.12 illustrent cela :

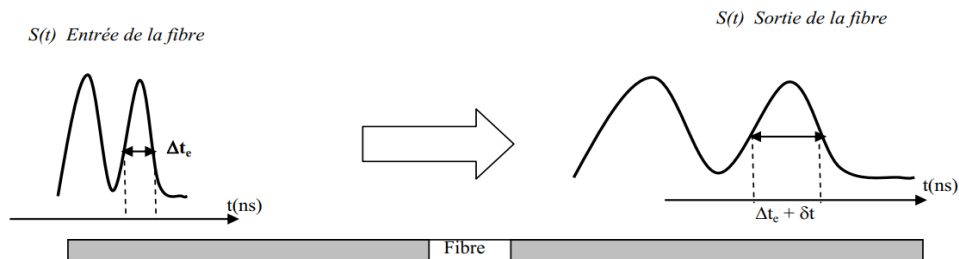


Figure V.11. Dispersion d'un signal analogique le long d'une fibre optique.

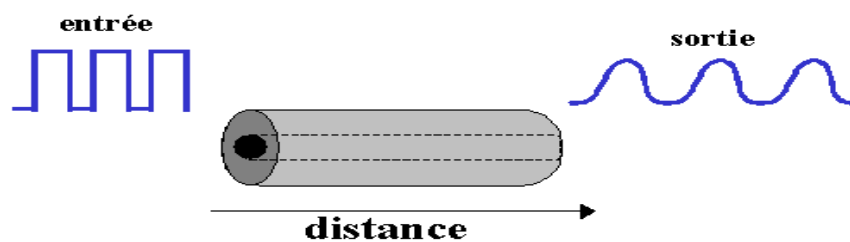


Figure V.12. Dispersion d'un signal numérique le long d'une fibre optique.

Il existe deux types de dispersion :

- La dispersion chromatique: qui résulte de la différence de vitesses de groupes des différentes composantes spectrales du signal de transmission.
- La dispersion modale: qui résulte de la différence de temps de propagation des différentes modes qui se propage dans la fibre multi modes.

La dispersion est une grandeur très importante pour les télécoms à grandes distances. Les fibres monomodes en silice offrent actuellement la meilleure fiabilité et la plus grande bande passante que toute autre fibre, indispensables pour une propagation du signal sur de longues distances.

Remarques

- La dispersion modale limitera donc largement le débit de transmission de la fibre mesuré en Gbit/s.
- La dispersion intermodale calculée dans les fibres à saut d'indice est beaucoup plus grande que celle relevée sur les fibres à gradient d'indice, ce qui limite leur utilisation dans les grandes distances, car on risque de perdre totalement l'information transmise.

V.5.6. Bande passante d'une fibre optique

C'est ce paramètre, directement lié aux phénomènes de dispersion qui induit les limites d'utilisation de la fibre optique.

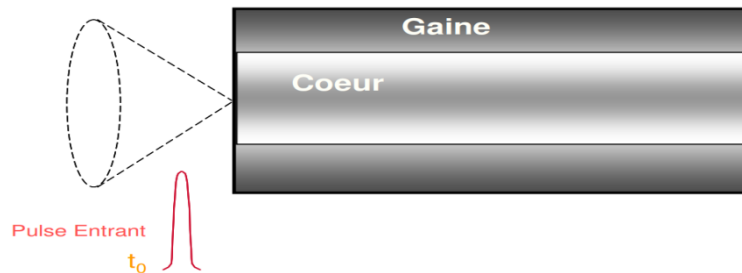


Figure V.13. Les limites d'utilisation de la fibre optique.

Pour ne pas avoir un mélange d'informations et une perte, la fréquence d'émission est donc limitée ce qui a pour conséquence de réduire la bande passante.

a. Signal analogique

Comme nous avons signalé, l'impulsion lumineuse émanée d'une diode LED comme exemple, s'étaie dans la fibre à cause de la dispersion. Afin de récupérer le signal à la sortie de la fibre avec le maximum de ses caractéristiques, il faut maintenir donc sa période T largement supérieure à l'étalement ΔT : $T > \Delta T$ et $T = 1/F$ (F = fréquence d'émission des impulsions). La fréquence F ne doit pas dépasser alors une certaine fréquence limite $F = F_{lim} = 1/\Delta T$.

Pratiquement, la fibre n'atteindra pas la fréquence F_{lim} , elle coupera le signal à une fréquence F_c inférieure à F_{lim} et se comporte comme "un filtre passe-bas" de bande passante comprise entre 0(Hz) et une fréquence de coupure F_c donnée par:

$$P_0 = P_L/2 \quad (V.12)$$

Avec : P_L =la puissance maximale transmise par la fibre.

P_0 =la puissance transmise à la fréquence F_c .

Pour $F = F_c$, nous aurons une chute de puissance de 3dB. C à d de la quantité $10\log P_0/P_L$. En conséquence, la bande passante est limité par la fréquence $F = F_c$, pour laquelle, nous aurons une perte de puissance transmise de l'ordre de -3dB. C'est la bande de fréquences dans laquelle les signaux sont correctement reçus. (Concernant le dB, on va ouvrir une petite parenthèse).

Remarque

Le décibel (dB) est une unité définie comme dix fois le logarithme décimal du rapport entre deux puissances, utilisée dans les télécommunications, l'électronique et l'acoustique.

$$X_{db} = 10\log_{10}\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (V.13)$$

Exemples numériques

Si $P_1=100\times P_0$, le rapport entre les deux puissances est de $100 = 10^2$; ce qui correspond à 20 dB ;

Si $P_1=2\times P_0$, leur rapport est de $2 \approx 100,3$, ce qui correspond à 3 dB. Ainsi, multiplier par 2 une puissance correspond à ajouter 3 dB.

Rapports des puissances et décibels

Rapport	1	1,26	1,6	2	2,5	≈3,2	4	5	10	40	100	1 000
		≈ 5/4			5/2	√10	2 ²					
dB	0	1	2	3	4	5	6	7	10	16	20	30

La connaissance de la variation de la puissance transmise P en fonction de la fréquence, nous permet de connaître facilement la valeur de la fréquence de coupure F_c et donc la bande passante de la fibre. Plusieurs applications ont montré que la bande passante ΔF_b du fibre est inversement proportionnelle à la dispersion totale du signal:

$$\Delta F_b = k / \Delta T \quad (\text{V.14})$$

Avec $0,4 \leq k \leq 0,5$

b. Signal numérique

Pour la transmission des signaux numériques, les professionnels de la fibre optique utilisent la notion de débit d'informations transmis par le câble à fibre optique en équivalence à sa bande passante.

En effet la dispersion (chromatique plus modale) va contraindre la transmission du signal numérique à cause du recouvrement des impulsions successives (Figure V.12), ce qui impose un espacement dans le temps suffisamment limite pour éviter le recouvrement de ces impulsions et par suite récupérer l'ensemble de l'information transmise.

L'UIT-T (Union Internationale des Télécommunications) a instauré des normes internationales pour les fibres optiques déployées dans les réseaux de télécommunications. Les recommandations G.650 à G.655 portent sur les paramètres géométriques, mécaniques et optiques des fibres et sur les tolérances admissibles sont mentionnées dans le tableau suivant:

Tableau V.1. Exemples de caractéristiques de quelques fibres optiques de transmission.

Norme UIT-T		G. 652	G. 653	G. 655 (NZDSF)	G. 655 (Téralight)
Propriétés géométriques	Diamètre coeur (μm)	9	9	9	9
	Diamètre fibre (μm)	125	125	125	125
Propriétés optiques (à 1550 μm)	Atténuation (dB/km)	0,25	0,25	0,25	0,22
	Dispersion Chromatique (ps/nm/km)	17	0	0,07	8
	Coefficient de non linéarité (W/m^2)	$2,7 \cdot 10^{-20}$	$2,7 \cdot 10^{-20}$	$2,7 \cdot 10^{-20}$	$2,7 \cdot 10^{-20}$
	Section effective (μm^2)	80	57	57	65
	PMD ps/sqrt(km)	0,05 à 0,08	0,1 max.	0,1 max.	0,04

V.6. Raccordement entre fibres optiques

V.6.1. Types de raccords

Dans l'établissement d'une liaison de transmission par fibre optique (entre stations, entre villes,...) on est contraint de relier plusieurs fibres entre elles pour couvrir la distance demandée, ceci d'une part et d'autre part, raccorder la fibre aux circuits émetteur et récepteur d'informations. Lors de la construction, la fibre optique est installée jusqu'à un boîtier de terminaison proche de votre logement, dans la rue pour les pavillons ou dans les parties communes pour les immeubles. Ce boîtier est appelé PBO (point de branchement optique). Le dernier câble à installer, allant de ce boîtier « PBO » jusqu'à la prise optique de votre box internet dans votre habitation est appelé : le raccordement final.



PBO dans les parties communes



PBO Souterrain



PBO Aérien

Figure V.14. Raccordement entre fibres optiques

a. Soudure optique

L'opération de soudure est essentielle lors de la phase de déploiement des infrastructures fibre optique et aura un impact déterminant sur la qualité des réseaux. Une soudeuse fibre optique permet en effet de réaliser une jointure par fusion de deux fibres optiques dans le but d'établir une connexion. Celle-ci s'avère utile lors du déploiement des réseaux optiques pour établir des connexions entre les fibres optiques.



Figure V.15. Soudure optique.

b. Raccordement FTTH : les prises terminales optiques

La prise terminale optique est la dernière partie du réseau FTTH et fait partie du câblage client final. A installer directement chez l'abonné, généralement au niveau de la GTL (Gaine Technique de Logement), ce boîtier permet d'être raccordé à la box opérateur. En outre, la PTO fibre permet d'avoir accès au très haut débit.



Figure V.16. Prise terminale optique FTTH.

c. Brassage optique

Un tiroir optique permet de raccorder des câbles pour ainsi en assurer leur distribution vers du matériel actif ou d'autres câbles. Les tiroirs optiques sont à installer dans les baies ou répartiteurs et répondent à diverses applications des réseaux fibrés. Les tiroirs coulissants sont dotés d'un système de retenue de fin de course pour faciliter le raccordement en baie. Les tiroirs télescopiques offrent un accès facilité aux cassettes et aux pigtails, simplifiant les interventions et maintenances. Les tiroirs pivotants conviennent parfaitement à une utilisation en armoire de rue. Ils laissent un libre accès à l'arrière du tiroir ce qui permet de faciliter l'installation et la maintenance des équipements.



Figure V.17. Brassage Optique.

V.6.2. Pertes aux raccordements

Il est indispensable de raccorder de nombreuses fibres pour les transmissions à grande distance. Il est nécessaire aussi de couper les fibres à la longueur appropriée à chaque répéteur et de les connecter à d'autres composants. Les figures suivantes montrent les déplacements qui peuvent survenir lors d'une connexion bout à bout :

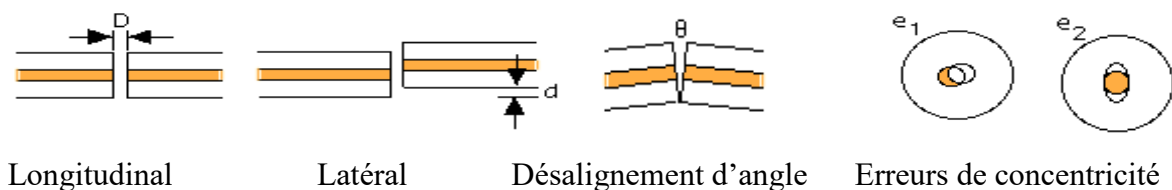


Figure V.18. Pertes aux raccordements.

V.6.3. Quelques connecteurs optiques

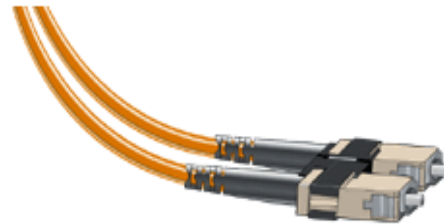
a. Connecteur ST

- Système de verrouillage à baïonnette
- Possède une fêrle en céramique
- La perte d'insertion est entre 0,3 et 0,5 db



b. Connecteur SC

- Forme carré pour un clipsage du connecteur
- Système de verrouillage coulissant
- Utilisé pour les applications bureaux
- Perte d'insertion à 0,3 db



c. Connecteur MIC

- Utilisé pour les réseaux FDDI (Fibre Distributed Data Interface)



d. Connecteur Souriau

- Multimode. Obsolète. Date des premiers réseaux optiques en France pour la transmission PDH (TNLO 34MBit/s).



e. Connecteur VFO

- Verranne Fibre Optique
- Maximum 2.5GBits/s.



f. Connecteur MPO

- Multi-fibre Push-On/Push Off
- Snap (couplage multiple push-pull)
- Intègre 12 (version la plus courante) ou 24 brins optiques.



Conclusion

A la lecture de ce chapitre, nous pouvons dire que la fibre optique utilisée en tant que support de propagation pour la lumière est devenue un élément clé de l'électronique et des Télécommunications d'aujourd'hui. La fibre optique est loin d'être un milieu de transmission idéal. Différentes sources de distorsion agissent sur les signaux envoyés ce qui rend difficile la tâche du concepteur. Seule une compréhension approfondie de ces sources de distorsion permettra de concevoir de systèmes plus robustes. La fibre possède des qualités non négligeables comme support de transmission de l'information qui lui ont permis de s'imposer dans les réseaux de télécommunications. Et plusieurs de ses défauts semblent pouvoir se corriger (la dispersion chromatique par une fibre, l'atténuation...).

Références

- [1] Chovet., P. Masson. (2005). Physique des semi-conducteurs. Ecole Polytechnique, Univ Marseille.
- [2] A. Moussa et P. Ponsoinet. (1992). Cours de physique–Optique, éditions Desvigne.
- [3] AH. Belbachir. Interaction Rayonnement-Matière (Cours et Exercices). Université des Sciences et de la Technologie d’Oran Faculté de Physique Département de Génie Physique. 2010.
- [4] B. Patin. (2013). Matériaux et Dispositifs optoélectroniques pour la génération et la détection de signaux THz impulsions par photo commutation à 1,55 μ m. Université de Grenoble.
- [5] Cheuk-Yiu. Ng. (1991). Photoionisation ultraviolette sous vide et photodissociation de molécules et d'amas. Monde scientifique. ISBN 978-981-02-0430-3.
- [6] D. Decoster, J. Harari. (2002). Détecteurs optoélectroniques; Ed. Lavoisier.
- [7] D.A. Neamen. (2003). semiconductors physics and devices? McGrawHill, 3 Ed.
- [8] E. Rosencher., B. Vinter. (2002). Optoélectronique; Collection Sciences Sup ; Ed. Dunod, -2e éd.
- [9] F. Schubert, Light emitting diodes, www.lightemittingdiodes.org
- [10] H. Mathieu., H. Fanet. (2009). Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques. 6ème édition.
- [11] JC. Chaimowicz. Introduction à l’optoélectronique principes et mise en œuvre; Ed. Dunod.
- [12] JL. Queyrel et J. Mesplede. (1999). Les Nouveaux Précis de Physique. Optique- Cours et exercices résolus. Ed. Bréal.
- [13] J-M. Mur. (2011). Les fibres optiques: Notions fondamentales; Ed. Epsilon.
- [14] JP. Parisot, P. Segonds, S. Le Boiteux. (2003). Cours Physique Optique. Sciences Sup; Ed. Dunod.
- [15] L. Quaranta. (1999). Introduction à l’optique; Ed.Masson.
- [16] M. May. (1993). Introduction à l’optique; Ed. Dunod.
- [17] N. Awanou. (1996). Cours de Physique. Optique. Fascicule. Cotonou.
- [18] P. Mayé. (2001). Optoélectronique industrielle: conception et applications; Ed. Dunod.
- [19] R. Houdré. (2018). Cours d'optique II. Phys-318. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [20] RF. Pierret. (1996). Semiconductor device fundamentals.
- [21] Romuald. Houdré. (2007). Dispositifs électroniques et Optiques à semi-conducteurs. Science et génie des matériaux.
- [22] S. M. Sze. (2006). Physics of semiconductor devices, Wiley. 3rd Edition. ISBN: 978-0-471-14323-9
- [23] T. Bécherrawy. (2005). Optique géométrique : Cours et exercices corrigés; Ed. Broché.
- [24] U. Becker., DA. Shirley. (1996). Photoionisation VUV et Soft X-Ray. Springer Science. ISBN 978-0-306-45038-9.
- [25] Z. Toffano. (2001). Optoélectronique: composants photoniques et fibres optiques; Ed. Ellipses.