

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

UNIVERSITE « Dr. TAHAR MOULAY » DE SAIDA

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : PHYSIQUE

Option : Physique du rayonnement

Par

AMARI Samira

Sur le thème

**Etude comparative sur les différents dispositifs à
semiconducteurs pour les applications optoélectronique**

Soutenu le : 30/09/2020 devant le jury composé de :

M. MOKADDEM Allel	Pr	Centre universitaire Nour Bachir El Bayadh	Président
M. MAHI Abdelhamid	MCA	Centre universitaire Nour Bachir El Bayadh	Encadrant
M. ELKEURTI Mohammed	Pr	Université Dr. Tahar Moulay de Saida	Co-encadrant
M. MESKINE Mohamed	MCA	Université Dr. Tahar Moulay de Saida	Examineur

Année Universitaire 2019 - 2020

Sommaire

REMERCIEMENT

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Chapitre 01 : Généralités sur les semiconducteurs

Partie I : Semiconducteurs.....01

1. Introduction.....01

2. Définition d'un semi-conducteur.....01

3. La notion de bandes d'énergie.....02

4. Bande interdite (gap énergétique).....03

5. Différentes types des semi-conducteurs.....05

6. Les matériaux semi-conducteurs.....05

7. Les semi-conducteurs par groupe.....07

Partie II :

1 Rappels sur la structure de matière.....10

1.1 Cas de l'atome.....10

1.2 Cas d'un cristal.....11

1.3 Liaison de covalence : semi-conducteur non excité.....13

2.2 Ionisation thermique : génération de paires électron-trou.....	13
2.3 Hauteur de bande interdite et génération de paires électrons-trous.....	14
2.4 Recombinaison.....	16
2.5 Concentration ni des porteurs dans le silicium intrinsèque.....	16
1.3 Silicium dopé uniquement N	18
4 Silicium dopé uniquement P	19
5 Conduction des semi-conducteurs.....	20
5.1 Mobilité des porteurs de charge : électrons et trous.....	20
5.2 Densité de courant de conduction.....	22
6 Densité de courant de diffusion des semi-conducteurs.....	23
6.1 Diffusion des électrons.....	23
6.2 Diffusion des trous.....	24
7 Jonction semi-conductrice au Silicium.....	25
7.1 Formation de la jonction PN	25
7.2 Jonction polarisée en inverse.....	30
7.2.1 Courant inverse de saturation : Tension faible.....	30
7.3 Jonction polarisée en direct.....	31
7.3.1 Courant direct de la jonction.....	31
8 Conclusion :.....	32

Références Bibliographiques	33
 Chapitre II : Etude de l'effet photoélectrique, émission stimulé et émission spontanée.	
1.Introduction	34
2. Jonction PN	34
2.1. Types de Jonction P-N	35
2.2. Jonction P-N Abrupte	35
2.3. Jonction P-N graduelle	35
3. l'effet photovoltaïque	36
3.1. Le principe de conversion photovoltaïque.....	37
II.4.Emission spontanée	38
II.5.L'émission stimulée	39
Références bibliographiques.....	40

Chapitre III : Etude analytique et interprétation

1 Introduction.....	41
2. Caractéristique électrique de la cellule solaire.....	42
2.1 Courant d'éclairement dans une homojonction.....	42
2.2 Courant dans la région quasi-neutre N.....	43
2-3 Courant dans la région quasi-neutre P.....	44
2.4 Courant dans la région de charge d'espace	45

2.5 Photo-courant total	46
2-6 Réponse spectrale	47
2.6 Circuit équivalent.....	50
2.7 Le Rendement	52
3 Caractéristique électrique d'une diode électroluminescence.....	52
3.1 Principe de fonctionnement.....	52
3.2 L'émission spontanée.....	54
3.3 Longueur d'onde et largeur spectrale.....	55
3.4 Puissance lumineuse émise.....	56
4 Caractérisation laser.....	57
5 Conclusion.....	64
Références Bibliographiques	66
Conclusion générale.....	67

REMERCIEMENT

En premier lieu, je remercie **ALLAH** notre dieu qui nous a aidé à accomplir ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mon encadrant **Dr A. MAHI** et mon Co-encadrant **Pr M.ElKeurti** pour m'avoir accepté et dirigé le long de ce mémoire, et qu'ils ont partagé avec moi leurs expériences scientifiques en me prodiguant de précieux conseils.

Mes vifs remerciements s'adressent à **M. A.MOKADDEM**, professeur au Centre universitaire Nour Bachir El Bayadh d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.

Je remercie également Monsieur **M. MESKINE**, Docteur à l'université Dr.Tahar Moulay d'avoir accepté de juger ce travail.

Liste des figures

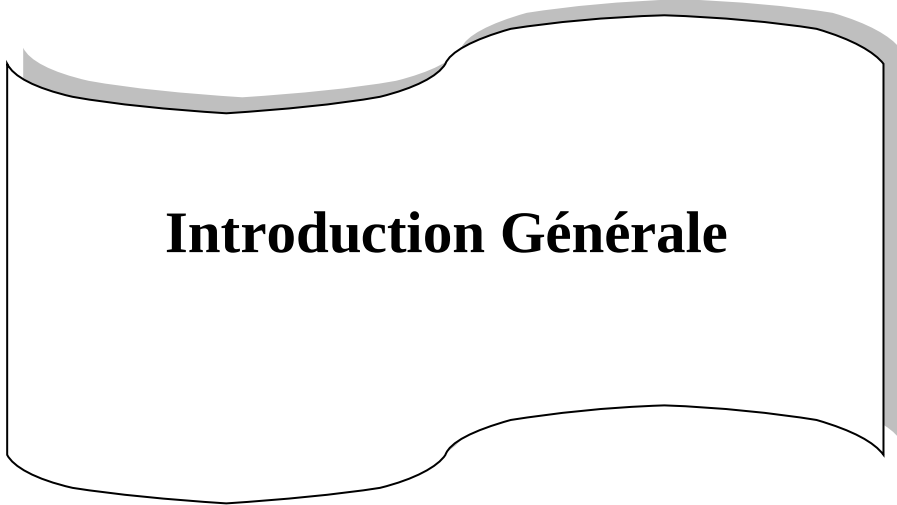
Figure I. 1 : Diagramme des bandes d'énergie des semi-conducteurs.....	03
Figure I. 2 : Les structures des bandes énergétiques: Métal, semi-conducteur, isolant.....	04
Figure I. 3 : Les transitions optique directes et indirectes.....	05
Figure 1.4 : Silicium dopé au Phosphore (dopage n) : a $T = 0K$ et b $T \neq 0$	06
Figure I.5 : Silicium dopé au Bore (dopage p) : a $T = 0K$ et b $T \neq 0K$	06
Figure I.A : La structure énergétique d'un atome de Silicium.....	10
Figure 1.B : La structure énergétique d'un Cristal.....	11
Figure I.C : Le silicium : isolant	14
Figure 1.D : Phénomènes de génération thermique et de recombinaison de paires électrons trous conduisant à un équilibre à température constante.....	14
Figure I.E : populations des porteurs du S. C. Intrinsèque et niveau de Fermi.....	17
Figure I.F : Libération d'un électron par l'atome de phosphore	18
Figure I.G : 1Libération d'un trou par le bore	19
Figure I.H : un barreau de silicium homogène de section S et de longueur L température constante.....	22
Figure I.I : Le schéma de bandes du S/C dans le sens des potentiels croissants.....	23
Figure I.J La diffusion des électrons dans le silicium P non homogène.....	24
Figure I.K un barreau de S/C de type N soumis à une source lumineuse intense sur une de ses faces.....	25
Figure I.L : La formation de la Jonction PN	26
Figure I.M : L'origine des courants opposés circulant dans la jonction PN en court-circuit.....	28
Figure I.N : Schéma de bandes de la jonction PN en court-circuit.....	29
Figure I.O : L'origine du courant inverse de saturation I_S d'une jonction bloquée..	30

Figure I.P : La jonction polarisée dans le sens passant.....	32
Figure II.1 : La jonction PN.....	34
Figure II.2 : Evolution de la différence (Nd -Na). a) abrupte et b) graduelle	36
Figure II.3 : schéma de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	38
Figure II.4 : Emission spontanée.....	39
Figure II.5 : L'émission stimulée.....	39
Figure III.1 : Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire dans l'obscurité et sous illumination.....	41
Figure III.2 : Courant d'éclairement dans une jonction <i>PN</i>	46
Figure III.3 : Courant d'éclairement dans une jonction <i>NP</i>	47
Figure III.4 : Réponse spectrale.....	48
Figure III.5 : Les réponses spectrales de la jonction <i>PN</i>	49
Figure III.6 : Réponse spectrale interne d'une cellule <i>Si NP</i>	49
Figure III.7 : Schéma équivalent.....	50
Figure III.8 : Caractéristique courant tension jonction <i>PN</i>	51
Figure III.9 : Caractéristique courant tension jonction <i>NP</i>	51
Figure III.10 : Phénomène de transition radiative.....	53
Figure III.11 : Principe de fonctionnement d'une diode électroluminescence.....	55
Figure III.12 : Longueur d'onde et le largeur spectral d'une diode électroluminescence.....	56
Figure III.13 : La puissance émise en fonction du courant.....	57
Figure III.14 : Pompage par du Laser	57
Figure III.15 : L'énergie d'impulsion et rendement du laser	60
Figure III.16 : Puissance laser pour différentes lentilles de focalisation.....	60

Figure III.17 : L'absorption optique d' $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ et GaAs.....	62
Figure III.18 : Profondeur d'absorption optique pour $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ et GaAs.....	62
Figure III.19 : Diamètre de faisceau en fonction de position Z.....	63
Figure III.20 : Mesure des paramètres du faisceau.....	64

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Classification périodique des semi-conducteurs.....	12
Tableau I.2 : La bande interdite pour divers matériaux.....	15
Tableau III.1 : La puissance d'impulsion et rendement d'un laser à saphir.....	59



Introduction Générale

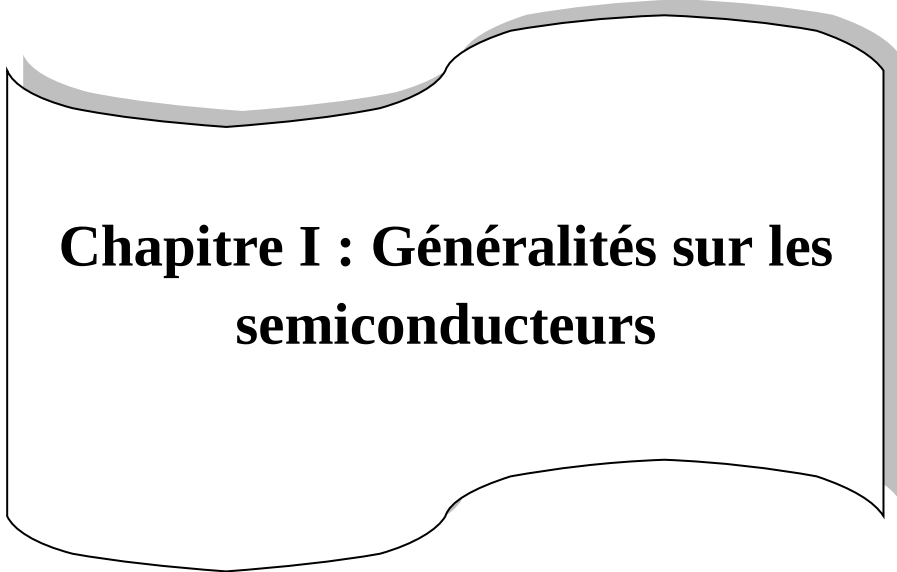
Introduction générale

Les semi-conducteurs s'intègrent dans le plus part des applications actuelles et qui jouent un rôle essentiel dans les différents domaines. Les applications, en photonique, optique et électronique, nécessitent de comprendre les phénomènes physiques apparaissent lors de la présence des photons dans les semi-conducteurs. Généralement, lorsque l'énergie des photons est supérieure ou égale à la bande interdite du semi-conducteur, l'absorption de cette énergie par les porteurs du semi-conducteur permet la création des paires électron-trou et l'émission des porteurs à travers des niveaux énergétiques. Ces deux phénomènes sont l'origine de fonctionnement des dispositifs optiques et photoniques. Particulièrement, les cellules solaires, les lasers et LEDs utilisent deux phénomènes de base sont l'effet photovoltaïque, l'émission stimulé et spontané, respectivement.

Notre travail consiste à étudier trois composants, les cellules, les lasers et LEDs, qui sont basé sur les semi-conducteurs et les phénomènes cités par avant. Le principe de fonctionnement de ces composants montre l'intérêt des applications des semi-conducteurs dans le domaine des photons. Cette étude théorique permet de définir les conditions de performance pour obtenir le bon fonctionnement de dispositifs sélectionnés dans ce travail. Afin d'atteindre cet objectif, notre mémoire est structuré en trois chapitres, d'une introduction, et d'une conclusion générale.

- Le premier chapitre présente un vue général sur les semi-conducteurs, particulièrement en présente la technologie de fabrication, la manière de dopage et les différents propriétés (la bande interdite, la conductivité...) des semi-conducteurs. En plus, une introduction sur les semi-conducteurs intrinsèques, extrinsèques présentée ainsi tous les informations intéressantes pour exposer les phénomènes physiques dans le chapitre 2.
- Le deuxième chapitre donne une définition des effets : photoélectriques, émission stimulé et émission spontané. En particulier, l'effet photovoltaïque est un des effets photoélectriques et les émissions stimulé/spontané sont généralement basé sur la transition d'un électron entre deux niveaux d'énergie différents.

- Le dernier chapitre présente les cellules solaires, les lasers et les diodes LED où les effets : photovoltaïque et les émissions stimulé/spontané sont les principes de fonctionnement de ces composants. Nous terminons notre travail par une conclusion générale.



Chapitre I : Généralités sur les semiconducteurs

Partie I : Semiconducteurs**1. Introduction**

Les matériaux sont présentés dans de multiples domaines et prennent une place plus importante dans le système que nous trouvons autour de nous ou que nous utilisons chaque jour. Elles sont subdivisées en trois classes : conducteurs, semi-conducteurs et isolants [1].

Les trois types des matériaux contiennent une bande basse en énergie appelée bande de valence et une bande haute d'énergie appelée bande de conduction, la différence entre les trois types des matériaux est la distance qui sépare la bande de valence de la bande de conduction ou ce qu'on appelle la bande interdite s'appelle aussi le gap [2].

Dans l'ensemble des matériaux, les semi-conducteurs constituent une classe bien définie, avec des propriétés physiques particulières qui sont sources d'intérêt au plan de la connaissance fondamentale et à celui des applications. Ces deux facteurs indissociables font l'importance de ces matériaux, malgré le nombre limité d'éléments et de composés semi-conducteurs [3].

Ces matériaux ont un champ d'application très élargi, ils sont actuellement utilisés dans plusieurs composants électroniques très importants. Pour connaître l'importance de ces matériaux, nous allons rappeler quelques notions fondamentales sur la physique des semi-conducteurs.

Dans ce chapitre nous allons donner une définition de semi-conducteur et la notion de bandes d'énergie, puis les différents types de semi-conducteurs et leur structure cristalline.

On le terminera par une conclusion.

2. Définition d'un semi-conducteur

Un semi-conducteur est un corps cristallin dont les propriétés de conductivité électrique sont intermédiaires entre celles des isolants et des conducteurs, elles varient très sensiblement sous l'influence des facteurs extérieurs de l'environnement

(température, pression...), de la présence des impuretés (dopage, défauts du réseau), et de la lumière [4].

3. La notion de bandes d'énergie

Le comportement électrique des semi-conducteurs est généralement modélisé à l'aide de la théorie des bandes qui est un modèle quantique en physique des solides, déterminant les énergies permises des électrons dans un solide et permet de comprendre la notion de conductivité électrique, Cette théorie est issue de la théorie des orbitales moléculaires.

Dans ce modèle les énergies possibles pour un électron dans un solide forment ce qu'on appelle des bandes permises, séparées par d'autres bandes appelées bandes d'énergies interdites ou gap. Ce gap correspond à l'énergie nécessaire au système pour faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction.

Les bandes de faible énergie sont complètement occupées; ce sont des bandes dites de valence, par contre les bandes de haute énergie sont vides ; sont appelées bandes de conduction [5].

On distingue alors :

- La bande de conduction BC
- La bande de valence BV
- La bande interdite BI

La structure de bandes dans un semi-conducteur est représentée dans la figure suivante
Figure I.1:

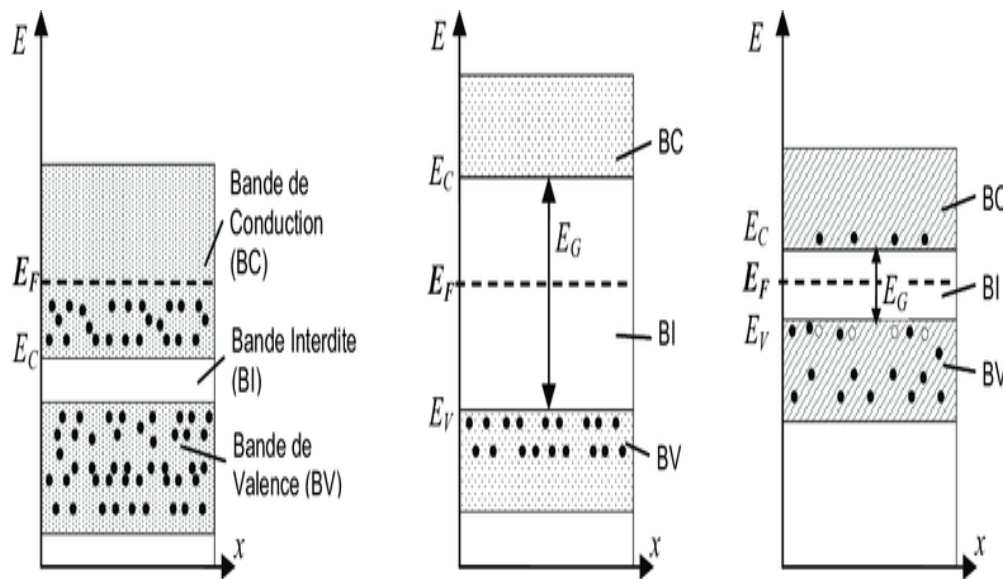


Figure I-1. Diagramme des bandes d'énergie des semi-conducteurs [6].

4. Bande interdite (gap énergétique)

Dans un semi-conducteur comme dans un isolant, l'écart énergétique entre la bande de conduction et la bande de valence est appelé largeur de bande interdite, ou tout simplement gap noté E_g , dans lequel, un porteur de charge ne peut se retrouver. C'est un paramètre fondamental, déterminant les propriétés électroniques et optiques des semi-conducteurs et évaluant ainsi, leur domaine d'application.

Dans les isolants, cette valeur de bande interdite est si grande que les électrons ne peuvent pas passer de la bande de valence à la bande de conduction.

Alors que pour les semi-conducteurs, cette bande est suffisamment petite pour qu'une excitation adéquate, permette aux électrons de la bande de valence de rejoindre la bande de conduction, ainsi le semi-conducteur peut transporter de l'électricité et donc devenir conducteur. Par contre dans les métaux, on rencontre un chevauchement des bandes, les électrons peuvent passer directement de la bande de valence à la bande de conduction et circulent dans tout le solide [7].

Une structure de bandes comparative des trois types de matériaux métal, semi-conducteur et isolant est représentée sur la figure (I.2).

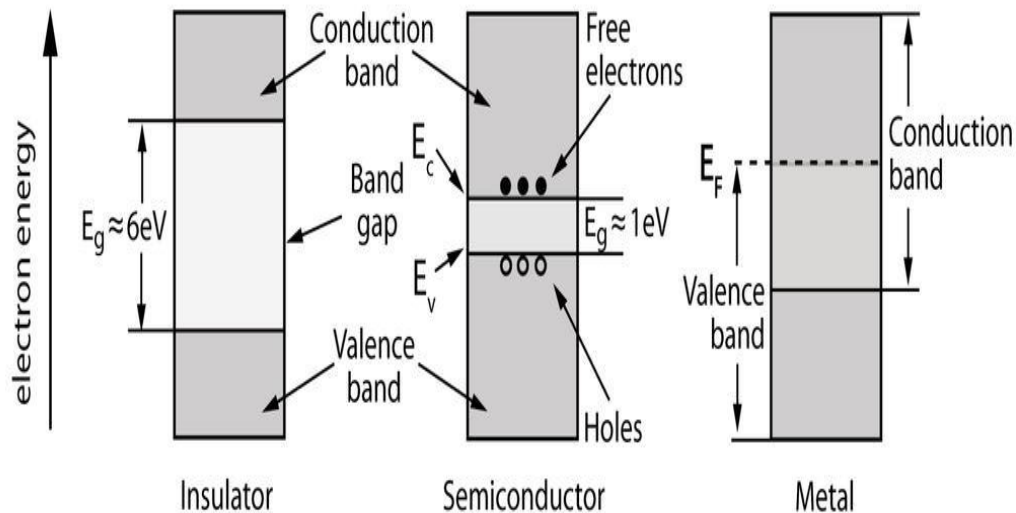


Figure I.2 Les structures des bandes énergétique: Métal, semi-conducteur, isolant [8].

4.1 Gap direct et gap indirect

Pour un cristal semi-conducteur, le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction sont caractérisés par une énergie E et un vecteur d'onde k .

Le gap est défini, comme étant la différence d'énergie entre le minimum absolu de la bande de conduction et le maximum absolu de la bande de valence [10].

Les structures de bandes représentées sur la figure (I.3) font apparaître deux types fondamentaux de semi-conducteurs :

Les semi-conducteurs à gap direct : si le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction peuvent correspondre au même vecteur d'onde k .

Les semi-conducteurs à gap indirect : si le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction ne correspondent pas au même vecteur d'onde k .

La distinction entre les semi-conducteur à gap direct et indirect est très importante, notamment, dans les processus radiatifs, les processus d'absorption ou

d'émission sont considérablement plus importants dans les semi-conducteurs à gap direct que dans les semi-conducteurs à gap indirect [1].

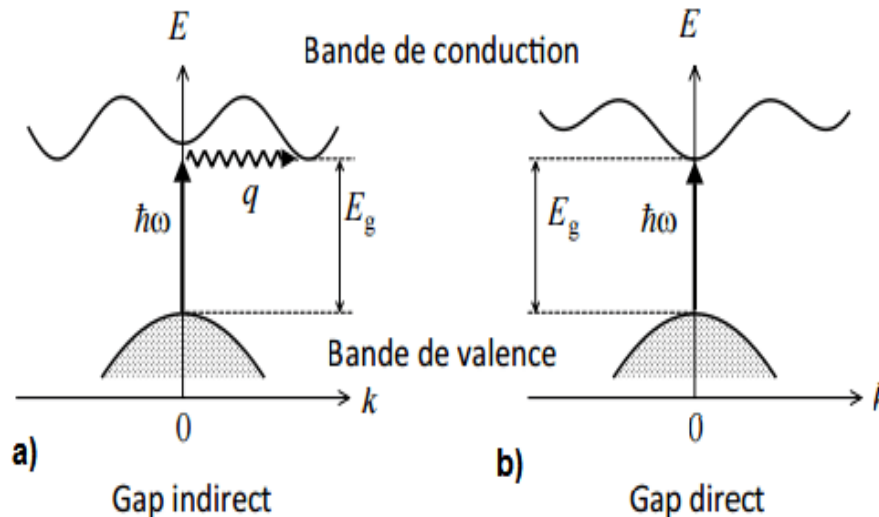


Figure I.3 Les transitions optique directes et indirectes [3].

5. Différentes types des semi-conducteurs

5.1 Semi-conducteur intrinsèque

Un semi-conducteur est dit intrinsèque si le nombre d'électrons est égal au nombre de trous. Le taux d'impuretés y est très faible (moins d'un atome pour 1310 atomes de l'élément semi-conducteur).

5.2 Semi-conducteur extrinsèque

Un semi-conducteur est dit extrinsèque s'il comporte un taux d'impuretés très grand par rapport à celui du semi-conducteur intrinsèque (un atome pour 5 10 atomes de l'élément semi-conducteur). Selon la nature des impuretés il existe deux types des semi-conducteurs: type n et type p.

5.2.1 Les semi-conducteurs extrinsèques dopés N

Considérons par exemple les semi-conducteurs tétravalents tels que Si ou Ge. Ils cristallisent dans une structure où chaque atome est relié à quatre atomes voisins par des liaisons covalentes. Introduisons un atome ayant cinq électrons de valence (phosphore, arsenic antimoine...). Il prend la place d'un atome du cristal. Parmi les électrons de l'impureté, quatre participeront aux liaisons avec les voisins et le

cinquième restera célibataire. L'atome d'impureté est associé à un niveau d'énergie appelé niveau donneur qui situe juste en dessous de la bande de conduction. Dans ce cas, le semi-conducteur est dit de type n.

5.2.2 Les semi-conducteurs extrinsèques dopés P

Si on introduit un atome d'impureté ayant trois électrons de valence (bore aluminium ou galium). Celui-ci ne peut saturer que trois liaisons. Ainsi une liaison par atome d'impureté manque et correspond un niveau d'énergie situé au-dessus de la bande de valence appelé niveau accepteur. Le semi-conducteur est dit de type p [9].

Les figures (I.6 et I.7) décrivent les deux types de dopage dans le cas de silicium.

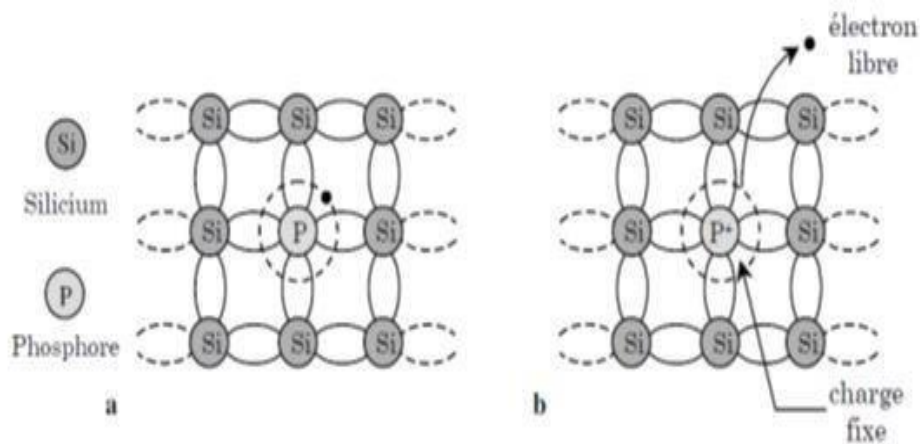


Figure I.4 Silicium dopé au Phosphore (dopage n) : a $T = 0K$ et b $T \neq 0$.

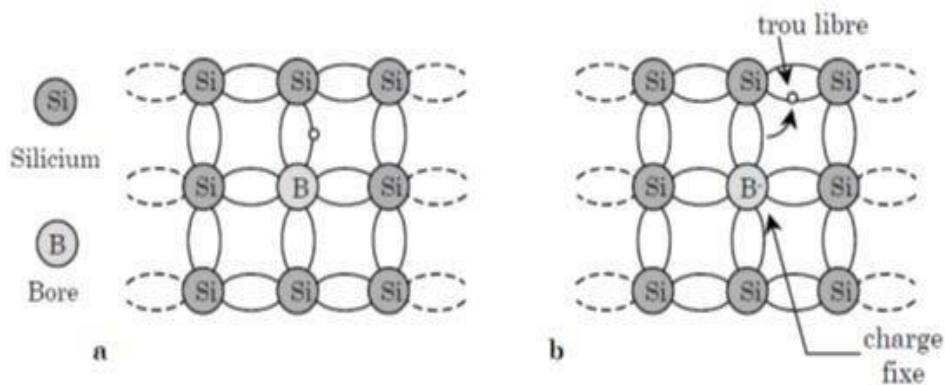


Figure I.5 Silicium dopé au Bore (dopage p) : a $T = 0K$ et b $T \neq 0K$ [10].

6. Les matériaux semi-conducteurs

La famille des semi-conducteurs est très vaste.

Les semi-conducteurs sont classés selon leur composition chimique. Il existe des semi-conducteurs élémentaires tels que le silicium (Si), le germanium (Ge) et l'étain gris (α -Sn), qui appartiennent tous au groupe IV du tableau périodique. Il existe également des semi conducteurs composites, binaires, ternaires, quaternaires, voire quinaires, constitués de deux, trois, quatre ou cinq espèces chimiques différents respectivement. Ces éléments peuvent être du groupe IV, comme dans le cas carbure de silicium, mais il est plus courant qu'il s'agisse d'éléments d'autres groupes, les plus courants étant les semi-conducteurs III-V, constitués d'éléments du groupe III (aluminium, gallium, indium, etc.) et d'éléments du groupe V (azote, phosphore, arsenic, antimoine, etc).

7.1 Les semi-conducteurs par groupe

Groupe IV

Les éléments du groupe IV sont exceptionnels dans le tableau périodique en ce sens que l'enveloppe extérieure des atomes individuels est exactement à moitié remplie. Par un échange de quatre électrons de la coque extérieure avec un autre atome de Si, une structure cristalline tridimensionnelle sans direction préférentielle peut être réalisée. On peut aussi combiner deux différents groupes semi-conducteurs IV pour obtenir un matériau composé tel que le SiC (carbure de silicium). SiC est une matière proche de la ligne frontière entre les semi-conducteurs et des isolants avec une constante de réseau de 0,436 nm et un écart d'énergie de 3,0 eV (413 nm).

Les semi-conducteurs suivants font partie des cristallogènes :

Semi-conducteurs élémentaires :

- Diamant (C)
- Silicium (Si)
- Germanium (Ge)

Semi-conducteurs composites :

- Carbure de silicium (SiC)

- Silicium-germanium (SiGe)

2) Groupe III-V

Un semi-conducteur III-V est un semi-conducteur composite fabriqué à partir d'un ou plusieurs éléments de la colonne III du tableau périodique des éléments (bore, aluminium, gallium, indium, etc.), et d'un ou plusieurs éléments de la colonne V (azote, phosphore, arsenic, antimoine, etc.). Les semi-conducteurs III-V présentent un grand intérêt en raison

de leurs propriétés :

- ils sont robustes ;
- ils possèdent une conductivité thermique élevée ;
- leur point de fusion est élevé ;
- ils ont une bande interdite directe.

Ces matériaux sont principalement utilisés en microélectronique pour des circuits intégrés, dans les cellules photovoltaïques et dans les dispositifs optoélectroniques tels que les diodes électroluminescentes (DEL ou LED en anglais).

Alliages binaires :

- Nitrure de bore (BN)
- Phosphure de bore (BP)
- Arséniure de bore (BAs)
- Nitrure d'aluminium (AlN)
- Phosphure d'aluminium (AlP)
- Arséniure d'aluminium (AlAs)

Alliages ternaires :

- Arséniure de gallium-aluminium (AlGaAs, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$)
- Arséniure de gallium-indium (InGaAs, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$)
- Phosphure de gallium-indium (InGaP)
- Arséniure d'aluminium-indium (AlInAs)
- Antimoniure d'aluminium-indium (AlInSb)

Groupe II-VI

Les semi-conducteurs suivants sont des alliages d'éléments appartenant au groupe 12 et au groupe des chalcogènes [11] :

Alliages binaires :

- Sulfure de cadmium (CdS)
- Séléniure de cadmium (CdSe)
- Tellure de cadmium (CdTe)
- Sulfure de mercure (HgS)

Alliages ternaires :

- Tellure de zinc-cadmium (CdZnTe, CZT)
- Tellure de mercure-cadmium (HgCdTe, MCT)
- Tellure de mercure-zinc (HgZnTe, MZT)
- Séléniure de zinc-mercure (HgZnSe)

Partie II

1 Rappels sur la structure de matière

1.1 Cas de l'atome

L'atome est constitué d'un noyau autour duquel gravitent des électrons de charge électrique $-q$ soit -1.6×10^{-19} Coulomb. Le noyau contient deux types de particules : les neutrons qui ne sont pas chargés et les protons qui portent une charge électrique $+q$. L'atome étant électriquement neutre, le nombre de protons est égal au nombre d'électrons. On distingue:

- Les électrons internes qui occupent les couches internes et qui sont très fortement liés au noyau
- Les électrons périphériques (ou de valence) qui occupent la couche la plus externe et qui sont peu liés au noyau.

Les électrons d'un atome gravitant autour du noyau sont assujettis à occuper des niveaux discrets $E_1, E_2, \dots, E_n$ qui définissent chacun une couche électronique. Plus le niveau est élevé, plus la couche qui lui correspond est éloignée du noyau. Si l'on choisit comme origine des énergies ($E = 0 \text{ eV}$, 1 eV représentant 1.6×10^{-19} Joule) celle d'un électron soustrait à l'influence du noyau (c'est à dire porté à une distance infinie), toutes les valeurs de E_n sont négatives. Cela se traduit par le fait qu'il faut produire un travail pour éloigner un électron

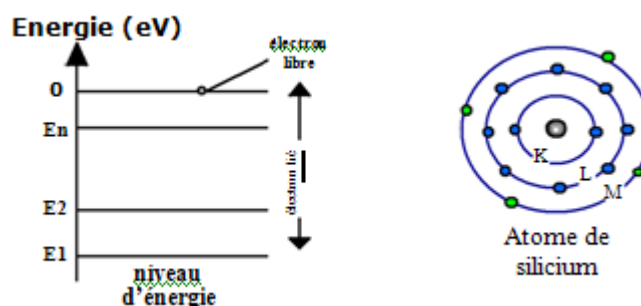


Figure A : La structure énergétique d'un atome de Silicium.

A titre d'exemple, l'atome de silicium possède 14 électrons qui sont répartis sur trois couches : K avec 2 électrons, L avec 8 électrons et M qui possède 4 électrons. Contrairement aux deux premières, la couche M est incomplète, en effet elle

peut accueillir 4 électrons supplémentaires (suivant la *figure A*). De façon générale, tous les atomes tendent à avoir huit électrons sur leur couche externe. A titre d'exemple, l'atome de silicium possède 14 électrons qui sont répartis sur trois couches : K avec 2 électrons, L avec 8 électrons et M qui possède 4 électrons. Contrairement aux deux premières, la couche M est incomplète, en effet elle peut accueillir 4 électrons supplémentaires (suivant la *figure A*). De façon générale, tous les atomes tendent à avoir huit électrons sur leur couche externe.

1.2 Cas d'un cristal

Un cristal est constitué d'un ensemble d'atomes dont les noyaux sont répartis dans l'espace de façon régulière. La cohésion des atomes est assurée par la mise en commun des électrons de valence pour former des liaisons dites de covalence.

Les états énergétiques possibles des électrons du cristal sont représentés par un diagramme analogue à celui de l'atome. Mais du fait de l'interaction des atomes, les niveaux d'énergie se transforment en bandes d'énergie séparées par des bandes interdites (où il n'y a pas d'états permis).

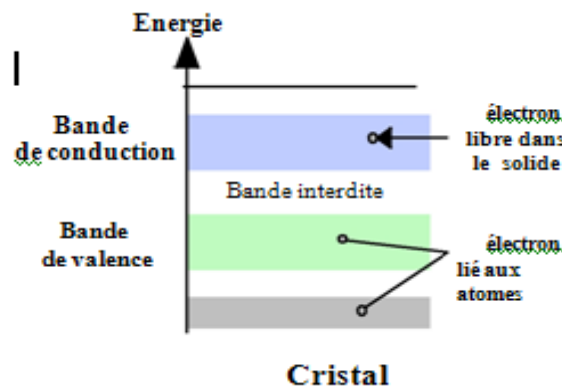


Figure B: La structure énergétique d'un Cristal.

Comme dans le cas de l'atome, le nombre d'électrons susceptibles d'occuper une bande d'énergie est limité et les électrons du solide comblent en priorité les états d'énergie les plus faibles.

Un électron dont l'énergie est située dans une bande en dessous de la bande de valence est lié à un atome donné du solide. Dans la **bande de valence**, l'électron est commun à plusieurs atomes.

La bande située au-dessus de la bande interdite s'appelle la **bande de conduction**. L'électron dont l'énergie est comprise dans cette bande circule librement dans le solide. C'est un porteur de charge qui participe à l'écoulement du courant dans le solide lorsque ce dernier est soumis à une différence de potentiel. Chaque type de matériau présente une hauteur de **bande interdite** qui lui est propre, cette différence d'énergie, qui joue un rôle fondamental, permet de distinguer les matériaux isolants, semi- conducteurs et conducteurs (*figure B*).

Conducteurs intrinsèques

II	III	IV	V
	Bore B (Z=5)	Carbone C (Z =6)	Azote N (Z = 7)
	Aluminium Al (Z = 13)	Silicium Si (Z = 14)	Phosphore P (Z = 15)
Zinc Zn (Z= 30)	Gallium Ga (Z = 31)	Germanium Ge (Z = 32)	Arsenic As (Z = 33)
Cadmium Ca (Z= 48)	Indium In (Z = 49)	Étain Sn (Z = 50)	Antimoine Sb (Z = 51)

SILICIUM : 14 électrons et 4 électrons de valence

Tableau I.1 : Classification périodique des semi-conducteurs.

Les semi-conducteurs (germanium et surtout silicium dont les propriétés sont indiquées en annexe) possèdent 4 électrons sur leur couche périphérique car ils appartiennent à la 4^e colonne de la classification périodique des éléments indiquée ci-dessus. Il est possible de les produire avec un haut degré de pureté (moins de 1 atome étranger pour 10^{11} atomes de semi-conducteur) : on parle alors de *S/C intrinsèque*.

1.3 Liaison de covalence : semi-conducteur non excité

Considérons un cristal de silicium non excité au zéro absolu ($0^\circ K$) dans l'obscurité. Afin de voir huit électrons sur sa couche externe, chaque atome de silicium met ses 4 électrons périphériques en commun avec les atomes voisins. On obtient ainsi, pour le cristal de silicium la représentation précitée. C'est la mise en commun des électrons périphériques, appelée liaison de covalence, qui assure la cohésion du cristal de silicium. Les électrons qui participent à ces liaisons sont fortement liés aux atomes de silicium. Il n'apparaît donc aucune charge mobile susceptible d'assurer la circulation d'un courant électrique. Le *S/C* est alors un isolant, en effet la bande de valence est saturée, toutes les places sont occupées alors que la bande de conduction qui offre des places libres est vide.

2.2 Ionisation thermique : génération de paires électron-trou

Lorsque la température n'est pas nulle, l'agitation thermique désordonne la configuration précédente : les électrons possèdent une énergie supplémentaire positive qui provoque la rupture de quelques liaisons de covalences (*figure C.b*). Un des électrons participant à cette liaison acquiert ainsi de l'énergie nécessaire pour quitter l'atome auquel il était lié. Il devient un porteur de charge libre, capable de se déplacer dans le cristal, et autorisant ainsi la circulation d'un courant électrique sous une différence de potentiel.

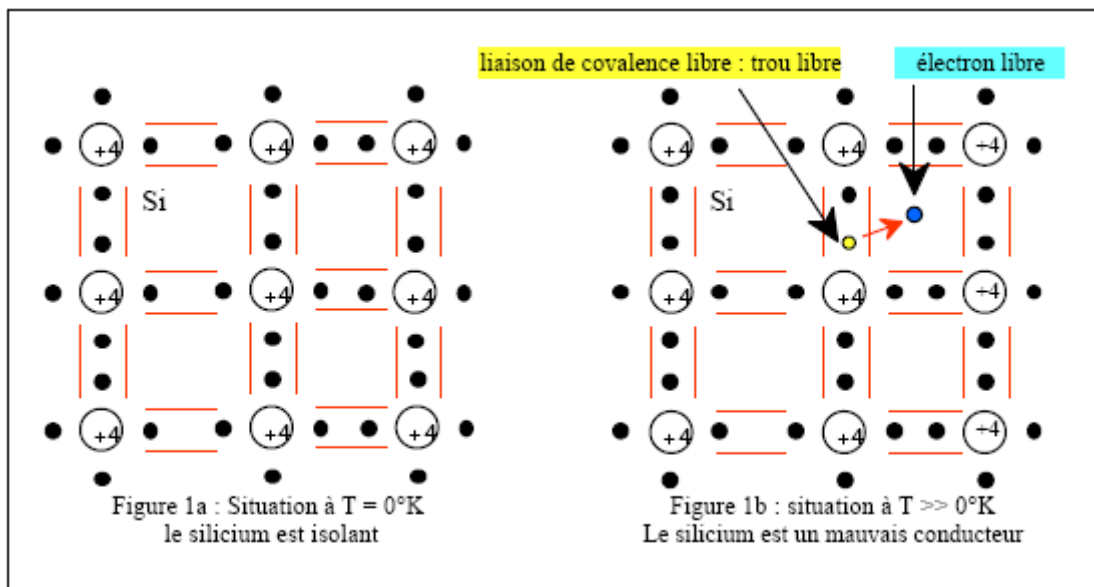


Figure C (a, b) : a : le silicium est isolant.

b : le silicium est mauvais conducteur.

L'atome de silicium qui a perdu un électron n'est plus électriquement neutre : il est devenu un ion positif. Ce phénomène n'intéresse qu'un nombre très faible d'atomes de silicium (3 sur 10^{13} à la température de 300°K).

2.3 Hauteur de bande interdite et génération de paires électrons-trous

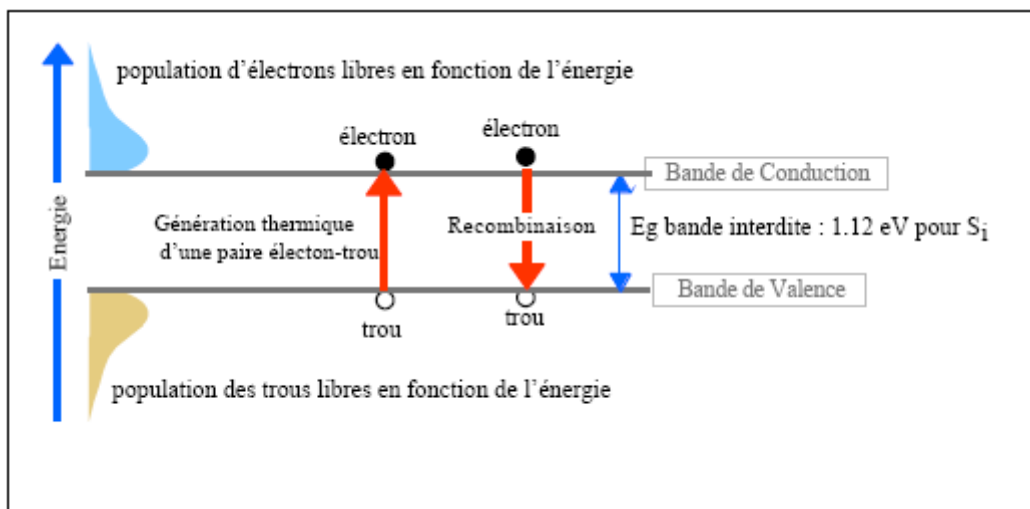


Figure D : Phénomènes de génération thermique et de recombinaison de paires électrons trous conduisant à un équilibre à température constante.

Le paramètre essentiel qui caractérise le S/C est la quantité d'énergie minimale nécessaire pour briser une liaison de covalence, ce qui revient dans le modèle des "bandes d'énergie" à faire "grimper" un électron de l'un des niveaux de la bande de valence sur l'un des niveaux de la bande de conduction (*figure I.4*)

L'énergie minimale requise pour générer une **paire électron-trou** correspond à la **hauteur de bande interdite EG** dont la valeur est indiquée dans le (*tableau I.2*) pour divers matériaux :

Semi-conducteur	$E_g(ev)300^\circ k$	$E_g(ev)0^\circ k$
<i>C diamant</i>	5.47	5.51
<i>Ge</i>	0.66	0.75
<i>Si</i>	1.12	1.16

Tableau I.2 : La bande interdite pour divers matériaux.

A une température différente du zéro absolu, un certain nombre d'électrons de valence acquiert assez d'énergie thermique pour rompre leurs liaisons et devenir des électrons libres. Ce gain d'énergie, qui doit être au moins égal à E_g , fait accéder les électrons à des places libres de la bande de conduction. Corrélativement, ils laissent derrière eux des places disponibles vides (*trous*) dans la bande de valence.

La hauteur de bande interdite du diamant ($E_g = 5.47 \text{ eV}$) en fait un parfait isolant. En effet même aux températures élevées, il est impossible de faire passer des électrons de la bande de valence à la bande de conduction. L'oxyde de silicium SiO_2 important pour la fabrication des circuits intégrés, avec $E_g = 9 \text{ eV}$ est lui aussi un isolant .

Les conducteurs métalliques ont une structure cristalline et à ce titre on leur associe un schéma de bandes. Celui-ci présente cependant une configuration particulière telle qu'à toutes les températures il existe des électrons libres disponibles (*environ* 10^{23} cm^{-3}). En effet, soit la bande de conduction dispose toujours de places libres, soit il existe un chevauchement entre bandes de valence et de conduction qui supprime la bande interdite.

2.4 Recombinaison [1]

L'ionisation thermique conduirait, à terme à l'ionisation de tous les atomes de silicium (*soit 5×10^{22} atomes par cm^3*) si elle n'était compensée par un autre phénomène : **les recombinaisons**.

En effet, un électron libre, arrivant, lors de son déplacement dans le cristal, à proximité d'un ion positif peut être "capturé" par ce dernier afin de satisfaire sa liaison de covalence (trou libre). La liaison de covalence est alors rétablie. Dans le modèle des bandes (*figure I.4*) un électron de la bande de conduction libère sa place et vient occuper une place libre dans la bande de valence, neutralisant alors un trou.

Lorsque l'électron descend de la bande de conduction vers la bande de valence, le semi-conducteur restitue l'énergie sous forme de chaleur ou émet de la lumière (photon). Ce dernier effet est utilisé dans les diodes électroluminescentes (*L.E.D.*) ou les lasers semi-conducteurs. Le photon émis a une énergie égale à E_g selon : $E_g = h \cdot c / \lambda$ (où λ représente la longueur d'onde, h la constante de Planck et c la vitesse de la lumière) soit $\lambda(\mu m) \cdot E_g(eV) = 1.24$.

En sens inverse, un photon qui possède une énergie supérieure ou égale à E_g a le pouvoir de générer une paire électron-trou.

2.5 Concentration ni des porteurs dans le silicium intrinsèque

A température constante, un équilibre s'établit (*figure E*) entre les phénomènes d'ionisation thermique et de recombinaison ; les électrons libres et les ions de silicium apparaissant en quantités égales. La concentration en électrons libres n et en trous libres p sont égales à n_i la concentration intrinsèque.

La mécanique statistique montre que la population des porteurs libres (n électrons cm^{-3}) dans la bande de conduction et (p trous cm^{-3}) dans la bande de valence s'exprime selon les lois :

$$n = N_c \exp\left(-\frac{\Delta E_n}{KT}\right) \quad (I.1)$$

$$p = N_v \exp\left(-\frac{\Delta E_p}{KT}\right) \quad (I.2)$$

- Où N_c et N_v sont respectivement la densité effective d'états des électrons dans la bande de conduction ($2.82 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ à 300°K pour Si) et la densité effective d'états des trous dans la bande de valence ($1.83 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ à 300°K pour Si). Ces deux coefficients évoluent avec la température selon une loi en $T^{3/4}$.
- ΔE_c et ΔE_v représentent deux différences d'énergies liées à un niveau dit de Fermi qui indique les écarts de population entre les électrons et les trous.

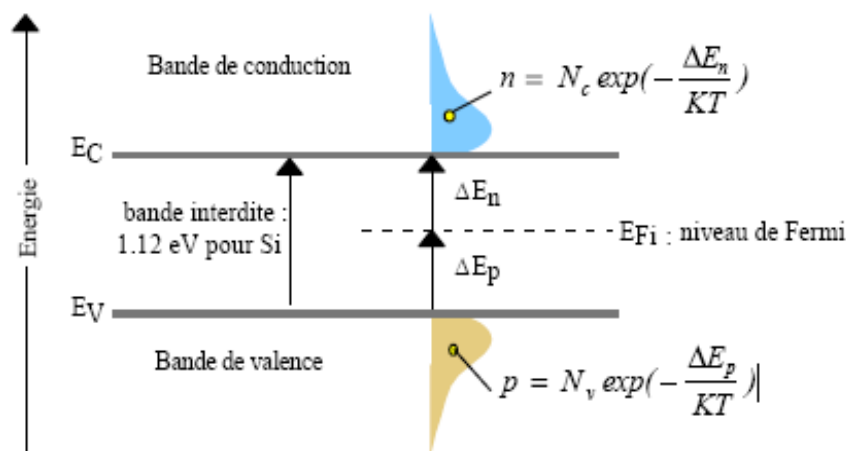


Figure E: populations des porteurs du S.C. Intrinsèque et niveau de Fermi

Pour le silicium pur à 300°K , où $p = n = n_i$, on montre que le niveau indicateur de Fermi E_{Fi} est situé au milieu de la bande interdite (en effet : $\Delta E_c - \Delta E_v = 11.2 \text{ eV}$ est négligeable devant la hauteur de bande interdite $\Delta E_c + \Delta E_v = 1.12 \text{ eV}$). La concentration intrinsèque n_i en électrons libres et en trous libres par cm^3 dépend de la hauteur de bande interdite E_g et de la température T selon la loi :

$$n = p = n_i = AT^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (I.3)$$

A : constante du matériau

E_g : Hauteur de bande interdite (eV)

K : constante de Boltzmann $8,6 \times 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$

T : température absolue en $^\circ \text{K}$

Concentration intrinsèque du silicium à $T = 300^\circ K$: $n_i = 1,45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

Le silicium intrinsèque a des applications pratiques limitées : photorésistance, thermistance. Cependant, il est possible en introduisant certaines impuretés en quantité contrôlée, de privilégier un type de conduction : par électrons libres ou trous libres.

I.3 Silicium dopé uniquement N

On obtient un S/C de type N en injectant dans le cristal de silicium des atomes qui possèdent 5 électrons sur leur couche périphérique (phosphore ou arsenic des 5^{ème} colonnes de la classification).

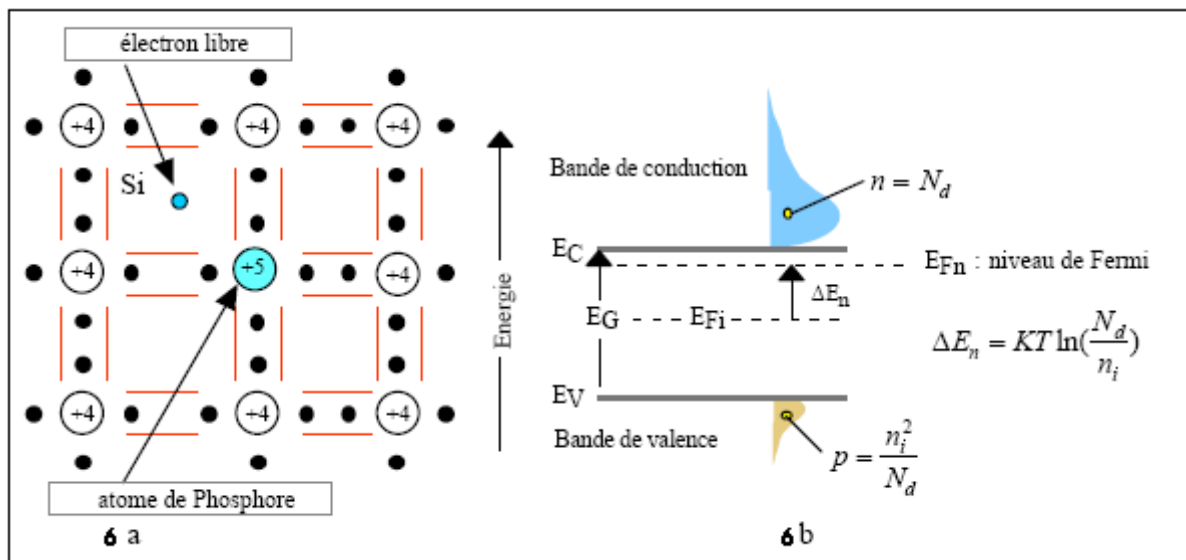


Figure F : a. libération d'un électron par l'atome de phosphore.

b. schéma des bandes.

Quatre de ces cinq électrons sont mis en commun avec les atomes de silicium voisins pour réaliser des liaisons de covalences (*figure E.a*). Le 5^o électron, inutilisé, est très faiblement lié à l'atome pentavalent. Une très faible énergie suffit pour le libérer et il se retrouve "libre" dans la bande de conduction. L'atome de phosphore qui a fourni un électron libre est appelé atome donneur. Il a perdu sa neutralité pour devenir un ion positif fixe.

A la température ordinaire, la quasi-totalité des atomes donneurs sont ionisés. Si N_D est la concentration des atomes donneurs, ceux-ci vont libérer $n = N_D$ électrons libres.

Les concentrations en électrons libres (n) et en trous libres (p) sont liées par la loi d'action de masse :

$$n.p = n_i^2 \quad (I.4)$$

Avec : $N_D = n = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ alors: $p = 225 \text{ cm}^{-3}$ à $T = 300^\circ \text{K}$.

Dans la modélisation du schéma des bandes d'énergie (figure E.b), la population des électrons libres de la B.C. est beaucoup plus importante que celle des trous libres dans B.V.

Le niveau indicateur de Fermi E_{FI} se déplace donc du milieu de la bande interdite (E_{FI}) vers la bande de conduction de telle manière que :

$$\Delta E_n = KT \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) \quad (I.5)$$

$$\text{Avec :} \quad \Delta E_n = E_{Fn} - E_{FI}$$

4 Silicium dopé uniquement P

On obtient un S.C. Dopé P en injectant dans le silicium des atomes de la 3^e colonne (bore, indium) qui possèdent trois électrons périphériques.

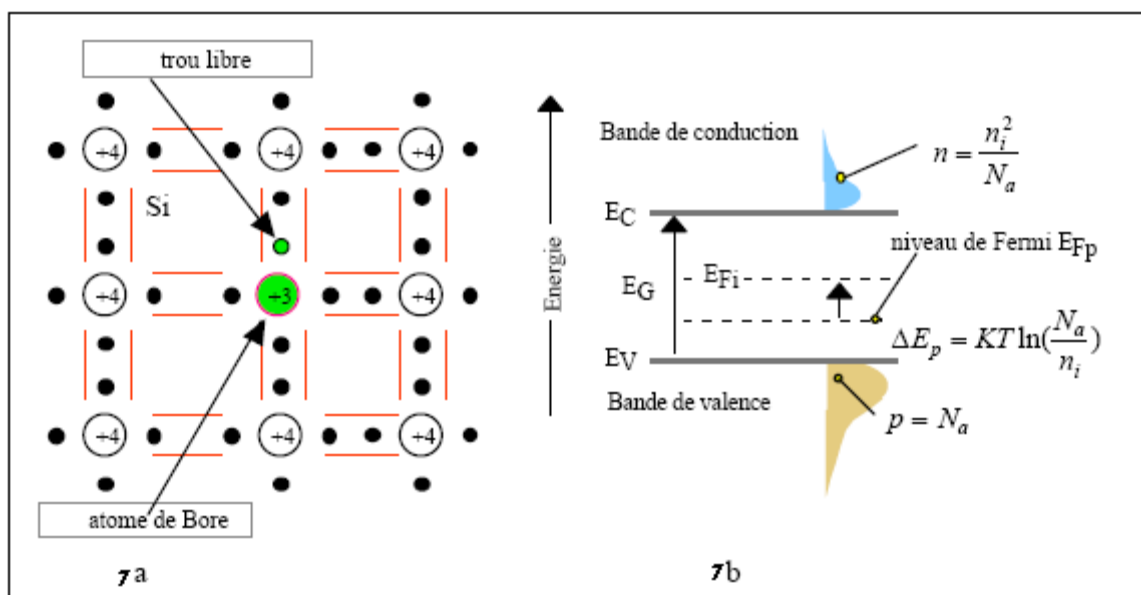


Figure G: a. libération d'un trou par le bore. b. Schéma des bandes

Il manque ainsi un électron à l'atome trivalent pour réaliser les liaisons covalentes avec les quatre atomes de silicium qui l'entourent (*figure F.a*). En fait, les électrons participant aux liaisons sont indiscernables les uns des autres. Tout ce passe alors comme si un des atomes de silicium voisin avait cédé un électron à l'atome trivalent de bore, créant ainsi un trou dans le cristal de silicium.

L'atome de bore qui capte un électron est appelé atome accepteur, il a perdu sa neutralité pour devenir un ion négatif fixe.

A la température ordinaire, la quasi-totalité des atomes accepteurs sont ionisés. Si N_A est la concentration par cm^3 des atomes accepteurs, ceux-ci vont libérer : $p = N_A$ trous libres.

Les concentrations en électrons libres (n) et en trous libres (p) sont liées par la loi d'action de masse :

$$n \cdot p = n_i^2 \quad (I.6)$$

Si $N_A = p = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et $n = 2 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}$ à $T = 300^\circ \text{K}$.

➤ Les trous sont les porteurs majoritaires et les électrons les porteurs minoritaires. Dans la modélisation du schéma des bandes d'énergie (*figure 7b*), la population des électrons

libres de la $B.C.$ est beaucoup plus faible que celle des trous libres dans $B.V.$. Le niveau indicateur de Fermi E_{FP} se déplace du niveau intrinsèque E_{FI} vers la bande de valence de telle manière que :

$$\Delta E_p = KT \ln \left(\frac{N_a}{n_i} \right) \quad (I.7)$$

Avec : $\Delta E_p = E_{FI} - E_{FP}$

5 Conduction des semi-conducteurs

5.1 Mobilité des porteurs de charge : électrons et trous

Considérons un semi-conducteur isolé. Les porteurs de charges mobiles s'y déplacent en tous sens et comme aucune direction n'est privilégiée, on n'observe aucune circulation de charges à l'échelle macroscopique.

Appliquons au S/C une différence de potentiel V . Compte-tenu de la relation champ-potentiel :

$$\Delta E = -gradV \quad (I.8)$$

$$E = -\frac{dV(x)}{dx} \quad (I.9)$$

Il apparaît dans le S/C un champ électrique E qui favorise le déplacement des trous dans le sens du champ électrique et le déplacement des électrons mobiles dans le sens opposé.

A l'échelle macroscopique, les trous et les électrons prennent des vitesses d'ensemble :

$$V_p = \mu_p E \quad (I.10)$$

$$V_n = \mu_n E \quad (I.11)$$

- μ_p est la mobilité des trous.
- μ_n est la mobilité des électrons.

Mobilité à $T = 300^\circ K$	Electrons ($cm^2 V^{-1} S^{-1}$)	Trous ($cm^2 V^{-1} S^{-1}$)
Ge	3900	1900
Si	1500	475
GaAs	8500	400

Ces mobilités dépendent de la température, du champ électrique et du dopage.

- La mobilité diminue lorsque la température augmente, en effet, l'agitation thermique accroît le nombre de "chocs" qui s'oppose au déplacement.
- A température ordinaire, μ_p , la mobilité des trous est inférieure à μ_n la mobilité des électrons.

Cela se conçoit dans la mesure où μ_n provient du déplacement direct des électrons de la bande de conduction alors que μ_p résulte des actions successives illustrées par :

Situation 1 : ionisation thermique, c'est à dire, création d'une paire électron-trou au niveau de l'atome de silicium 1 qui devient un ion positif.

Situation 2 : sous l'action du champ électrique, l'électron de valence de l'atome 2 est venu combler le trou de l'atome 1.

Situation 3 : sous l'action du champ électrique, l'électron de valence de l'atome 3 est venu combler le trou de l'atome 2.

Le mouvement des trous correspond à un mouvement d'électrons dans la bande de valence.

5.2 Densité de courant de conduction

Considérons (figure I.8) un barreau de silicium homogène de section S et de longueur L à température constante où les porteurs libres sont constitués de p trous et n électrons par cm^3 .

La différence de potentiel V appliquée au barreau crée un champ électrique de norme constante qui provoque le déplacement des porteurs.

Durant un **temps** dt , un observateur placé en x voit passer :

- N électrons animés de la vitesse :

$$V_n = \mu_n E \quad (I.12)$$

- P trous animés de la vitesse :

$$V_p = \mu_p E \quad (I.13)$$

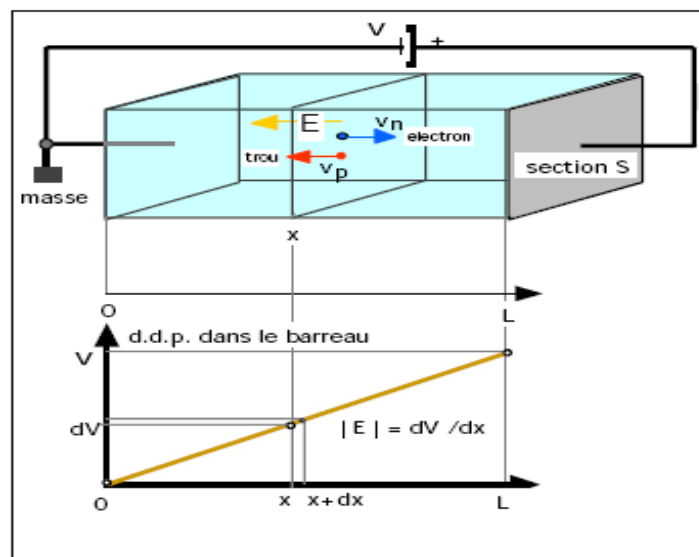


Figure H : un barreau de silicium homogène de section S et de longueur L température constante

Durant le temps dt , ces porteurs vont parcourir une distance dx_n et dx_p .

La densité de courant totale J_{tot} est alors proportionnelle au champ électrique et à la conductivité $\sigma (\Omega^{-1} \text{cm}^{-1})$ du cristal :

$$J_{tot} = q \frac{N}{Sdt} + q \frac{P}{Sdt} \quad (I.14)$$

$$J_{tot} = q(n\mu_n + p\mu_p)E = \sigma E \quad (I.15)$$

Avec : $dt = \frac{dx_n}{\mu_n E} = \frac{dx_p}{\mu_p E}$

On montre que la présence d'un champ électrique dans le barreau, conséquence de la d.d.p appliquée, va entraîner une inclinaison du schéma de bandes du S/C dans le sens des potentiels croissants (*figure H*). On dispose alors d'une analogie mécanique pour illustrer le sens du mouvement des porteurs :

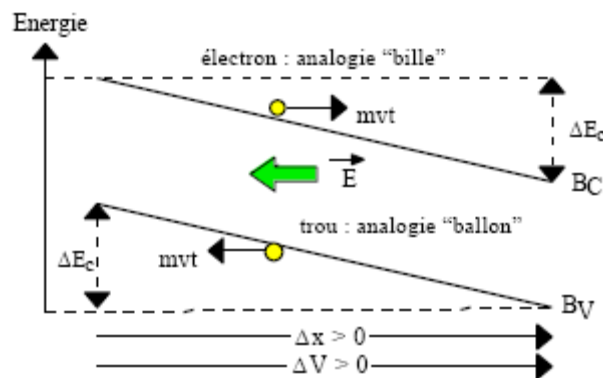


Figure I: Le schéma de bandes du S/C dans le sens des potentiels croissants.

Les électrons de la bande de conduction se comportent comme des billes sur un plan incliné. En se déplaçant vers la droite leur énergie cinétique augmente alors que leur énergie potentielle diminue. La somme des énergies étant bien entendu constante. Les trous de la bande de valence se comportent comme des ballons se déplaçant le long d'un plafond incliné. Vers la gauche ils voient leur énergie cinétique augmenter alors que leur énergie potentielle diminue.

6 Densité de courant de diffusion des semi-conducteurs

6.1 Diffusion des électrons

Considérons un barreau de S/C de type **P** soumis à une source lumineuse intense sur une de ses faces (*figure H*). Cette source lumineuse va produire, par apport d'énergie, une génération locale de paires électrons-trous. En effet, au niveau de la surface éclairée, on crée une surpopulation d'électrons $n(x = 0)$ par rapport à l'équilibre où $n(L) = n_i^2 / p$. Les électrons en surplus, vont diffuser de la gauche vers la droite du barreau comme les molécules d'un gaz qui, injectées dans un récipient, tendent à occuper tout le volume (autres analogies : diffusion d'un parfum dans une pièce,

diffusion du thé dans de l'eau...). Ces électrons supplémentaires sont recombinés par la forte population des trous du Si P et leur population diminue en fonction de x selon

$$n(x) = n(0) \exp\left(\frac{-x}{L_n}\right) \quad (I.16)$$

Avec L_n : longueur de diffusion des électrons

On définit en x une densité de courant de diffusion des électrons : J_{Dn} proportionnelle au gradient de concentration ($D_n \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ est la constante de diffusion des électrons dans le silicium) :

$$J_{Dn} = qD_n \frac{dn(x)}{dx} \quad (I.17)$$

$$D_n = \mu_n \frac{KT}{q} \quad (I.18)$$

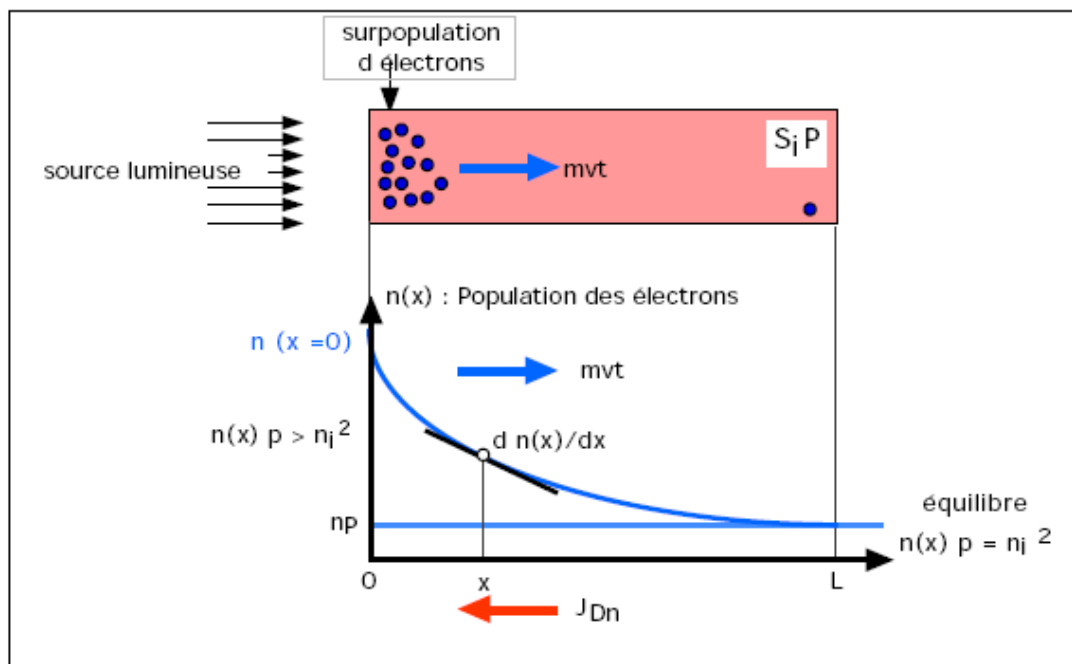


Figure J : diffusion des électrons dans le silicium P non homogène

6.2 Diffusion des trous

Considérons un barreau de S/C de type **N** soumis à une source lumineuse intense sur une de ses faces (*figure J*). Comme précédemment on obtient un phénomène de diffusion des trous excédentaires avec

$$p(x) = p(0) \exp\left(\frac{-x}{L_p}\right) \quad (I.19)$$

Avec L_p : longueur de diffusion des trous.

Conduisant à définir une densité de courant de diffusion des trous : J_{DP} proportionnelle au gradient de concentration (D_p en cm^2s^{-1} est la constante de diffusion des trous dans le silicium) :

$$J_{DP} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx} \quad \text{ou} \quad D_p = \mu_p \frac{KT}{q}$$

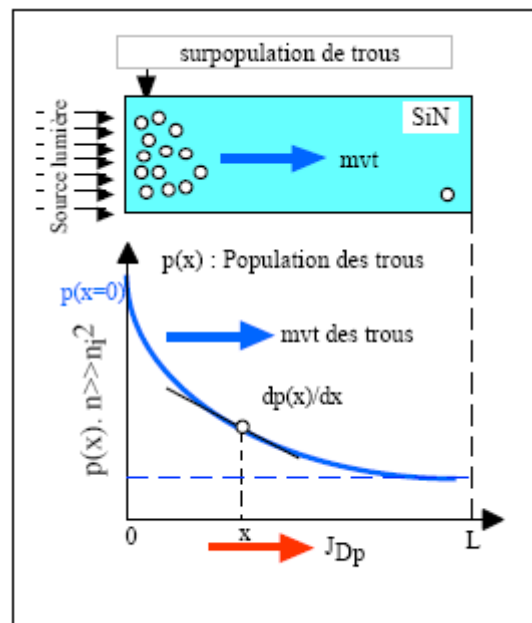
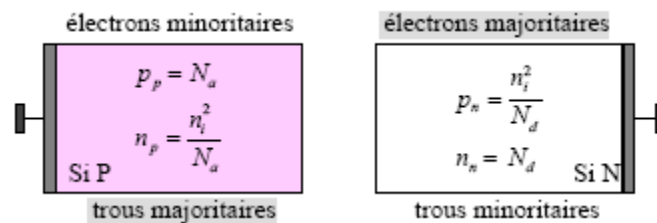


Figure K : un barreau de S/C de type N soumis à une source lumineuse intense sur une de ses faces.

7 Jonction semi-conductrice au Silicium

7.1 Formation de la jonction PN

Considérons deux barreaux de silicium : l'un dopé P au bore, l'autre dopé N au phosphore. Le bilan des porteurs libres à une température fixée est indiqué ci-dessous :



Imaginons que l'on rapproche les deux barreaux de manière à réaliser leur contact physique au niveau d'une jonction dite "métallurgique". On assisterait alors à deux phénomènes se manifestant de part et d'autre de l'interface PN :

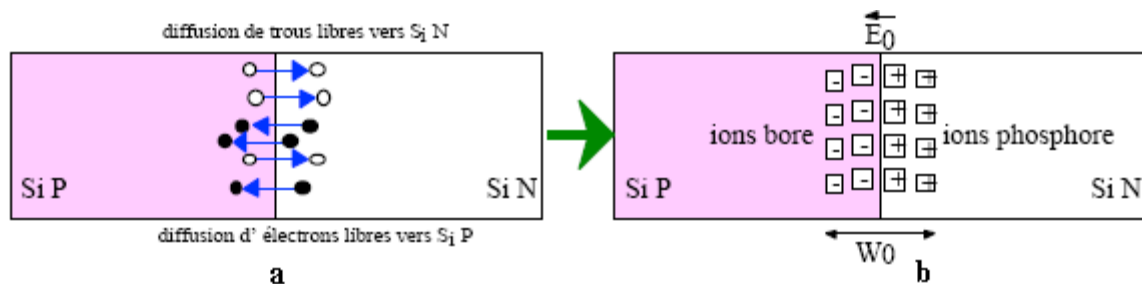


Figure L : La formation de la Jonction PN .

- Transitoire de durée très brève (*figure K.a*) à savoir diffusion des trous de la région P vers la région N . En effet comme les trous sont plus nombreux dans P que dans N , ils vont avoir tendance à diffuser pour rétablir l'équilibre (idem pour les électrons qui vont diffuser de $N \geq P$).
- Permanent (*figure K.b*), les trous qui ont envahi la région N (où ils ont disparu par recombinaison avec les électrons majoritaires dans cette région) ont laissés derrière eux des ions fixes de bore ionisés négativement. De même, les électrons de la région N qui sont passés du côté P ont laissé derrière eux des ions fixes de phosphore ionisés positivement.

Ces ions fixes de Bore et de phosphore chargés respectivement - et +, forment de part et d'autre de la jonction métallurgique, une **barrière de potentiel V** qui provoque l'apparition d'un **champ électrique interne E_0** dans une **zone de charge d'espace (Z.C.E.)** d'épaisseur W_0 .

On montre que la hauteur de barrière de potentiel V_ϕ et la largeur W_0 de la **Z.C.E.** qui s'étend principalement du côté le moins dopé sont telles que:

$$V\phi = UT \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \quad (I.20)$$

$$W_0 = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_{si}}{q} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) V\phi} \quad (I.21)$$

En effet la jonction (figure 12) est traversée par deux courants opposés qui s'annulent :

- Le courant de saturation I_S qui correspond aux porteurs minoritaires des zones N (les trous) et P (les électrons) qui se présentent en bordure de la $Z.C.E.$ et qui sont alors entraînés par le champ électrique E_0 respectivement dans les zones P et N .
- Le courant ayant pour origine les porteurs libres majoritaires de N et de P , très voisins de la $Z.C.E.$ et dont l'énergie suffisante pour sauter la hauteur de barrière $V\phi$

La population de ces porteurs, proportionnelle à $\exp\left(-\frac{V\phi}{U_T}\right)$ conduit à un courant de la forme :

$$I_0 \exp\left(\frac{V\phi}{U_T}\right) \quad \text{Le courant total étant nul, il vient que}$$

$$I_S = I_0 \exp\left(-\frac{V\phi}{U_T}\right) \quad (I.21)$$

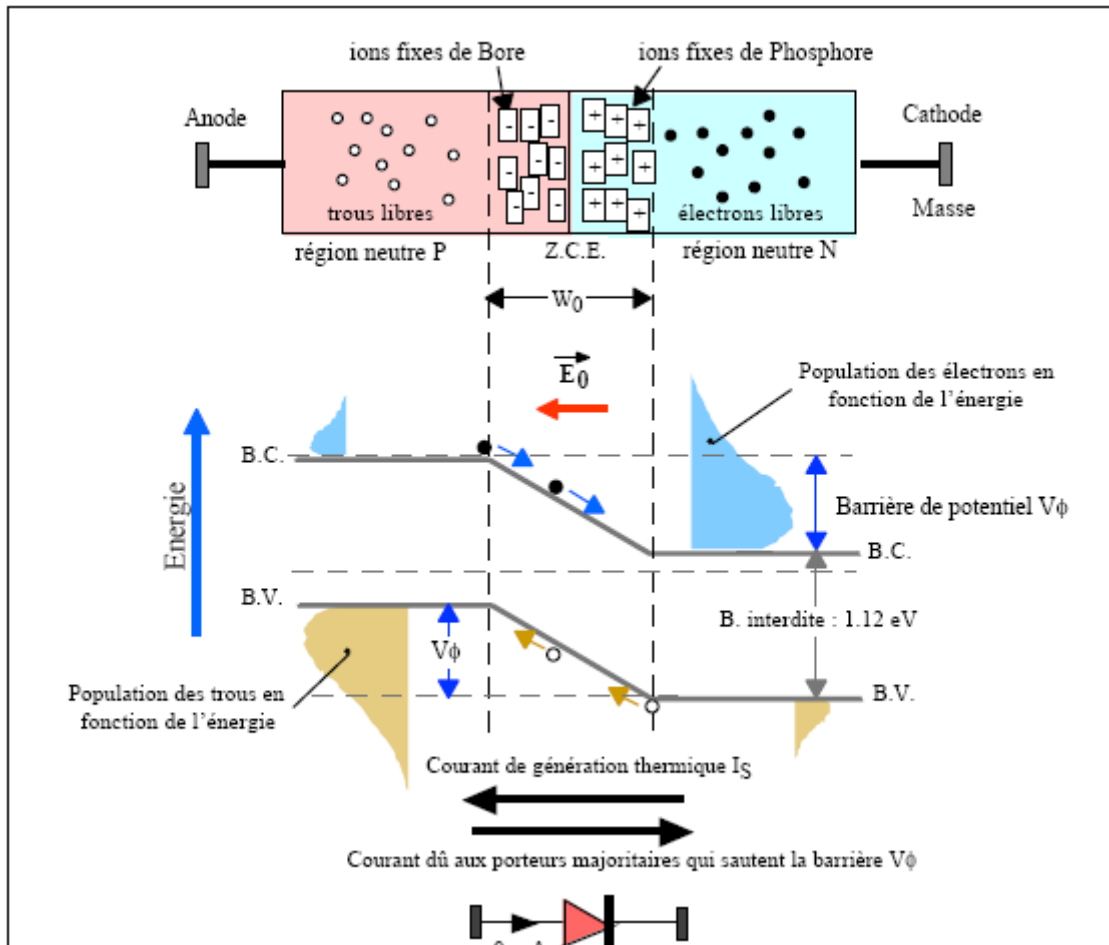


Figure M : L'origine des courants opposés circulant dans la jonction PN en court-circuit.

On montre que dans un cristal semi-conducteur non soumis à une différence de potentiel et à l'équilibre thermique, quel que soit son dopage **P** ou **N**, les niveaux de Fermi associés, E_{Fp} et E_{Fn} , restent alignés dans le schéma de bandes. La figure M, qui représente le schéma de bandes d'une jonction PN en court-circuit, illustre ce principe.

7.2 Jonction polarisée en inverse

Le semi-conducteur de type *N* étant à la masse, on relève à l'aide d'un générateur de tension V_{inv} , le potentiel du semi-conducteur de type *P* (figure N).

7.2.1 Courant inverse de saturation : Tension V_{inv} faible

La hauteur de barrière entre les régions *P* et *N* est renforcée par la tension extérieure appliquée et devient $V_\phi + V_{inv}$. Le champ électrique dans la *Z.C.E.* augmente ainsi que son étendue (*dans l'équation (1) V_ϕ devient $V_\phi + V_{inv}$*).

Les porteurs majoritaires des régions *N* et *P* n'ont pas l'énergie nécessaire pour sauter cette barrière de potentiel. La jonction est alors traversée par le très faible courant de saturation I_s . Ce courant issu du phénomène d'ionisation thermique du silicium, dépend uniquement de la température.

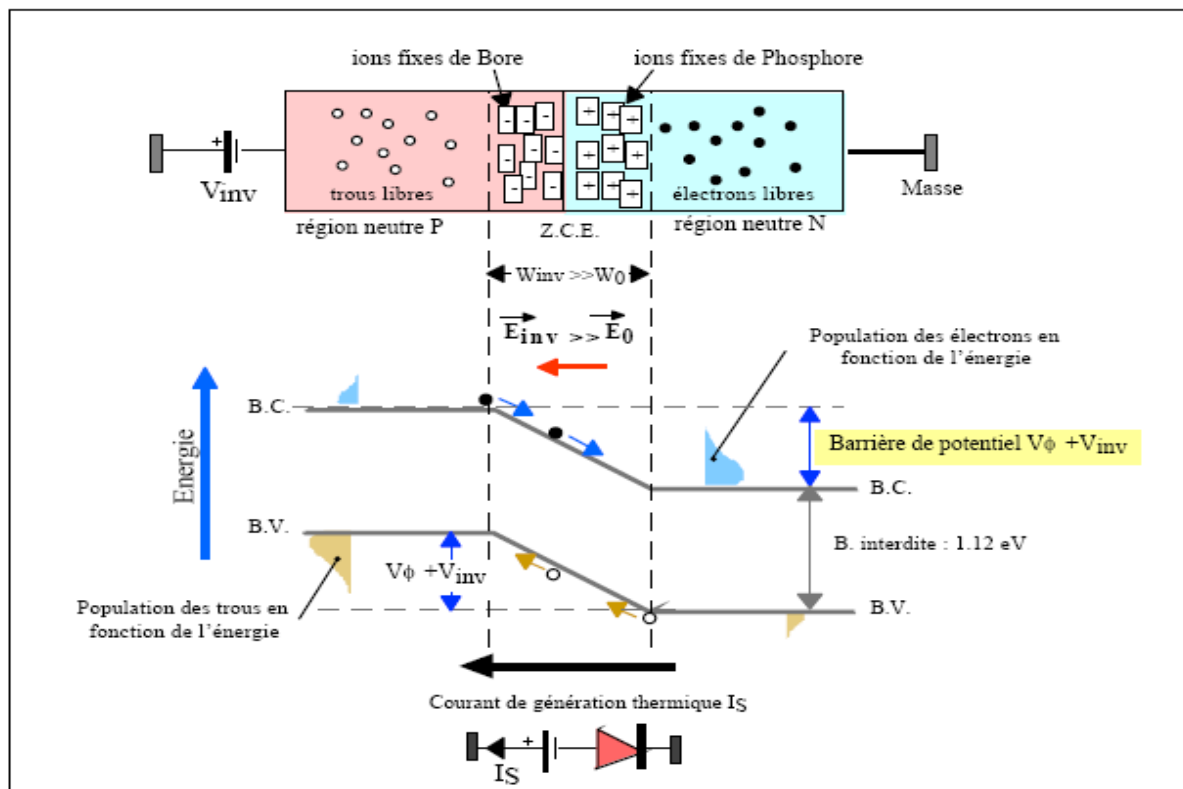


Figure O: L'origine du courant inverse de saturation I_s d'une jonction bloquée.

7.3 Jonction polarisée en direct

7.3.1 Courant direct de la jonction

Le fait de polariser la jonction sous une tension V_{direct} réduit la hauteur de barrière qui devient : $V_{\theta} - V_{direct}$ entraînant une diminution de l'épaisseur de la **Z.C.E** (dans l'équation (1) V_{θ} est remplacé par : $V_{\theta} - V_{direct}$)

De nombreux électrons de la région **N** et de trous de la région **P** peuvent alors franchir cette barrière de potentiel et, se présentant alors dans un “milieu hostile” (**P** pour électrons et **N** pour les trous), ils sont recombinaison (*figure O*). Cette recombinaison consomme près de la **Z.C.E**. Des trous dans la région **P** (des électrons dans la région **N**). Pour rétablir l'équilibre, les trous de la région neutre **P** se mettent en mouvement vers la zone où se produit la recombinaison (déficit en trous). Les électrons de la région neutre **N** sont soumis à un phénomène analogue. C'est ce phénomène de recombinaison locale qui explique la circulation du courant direct I_A dans la jonction

Ce courant s'écrit : $I_0 \exp\left(-\frac{V_{\phi} - V_{direct}}{U_T}\right)$ soit avec la relation (2).

$$I_s \exp\left(\frac{V_{direct}}{U_T}\right)$$

Sachant que le courant de saturation I_s correspondant aux porteurs minoritaires des zones **N** et **P** qui se présentent en bordure de la **Z.C.E**. on obtient le courant total qui circule dans la jonction :

$$I_A = I_s \left[\left(\frac{V_{direct}}{U_T} \right) - 1 \right] \quad (I.26)$$

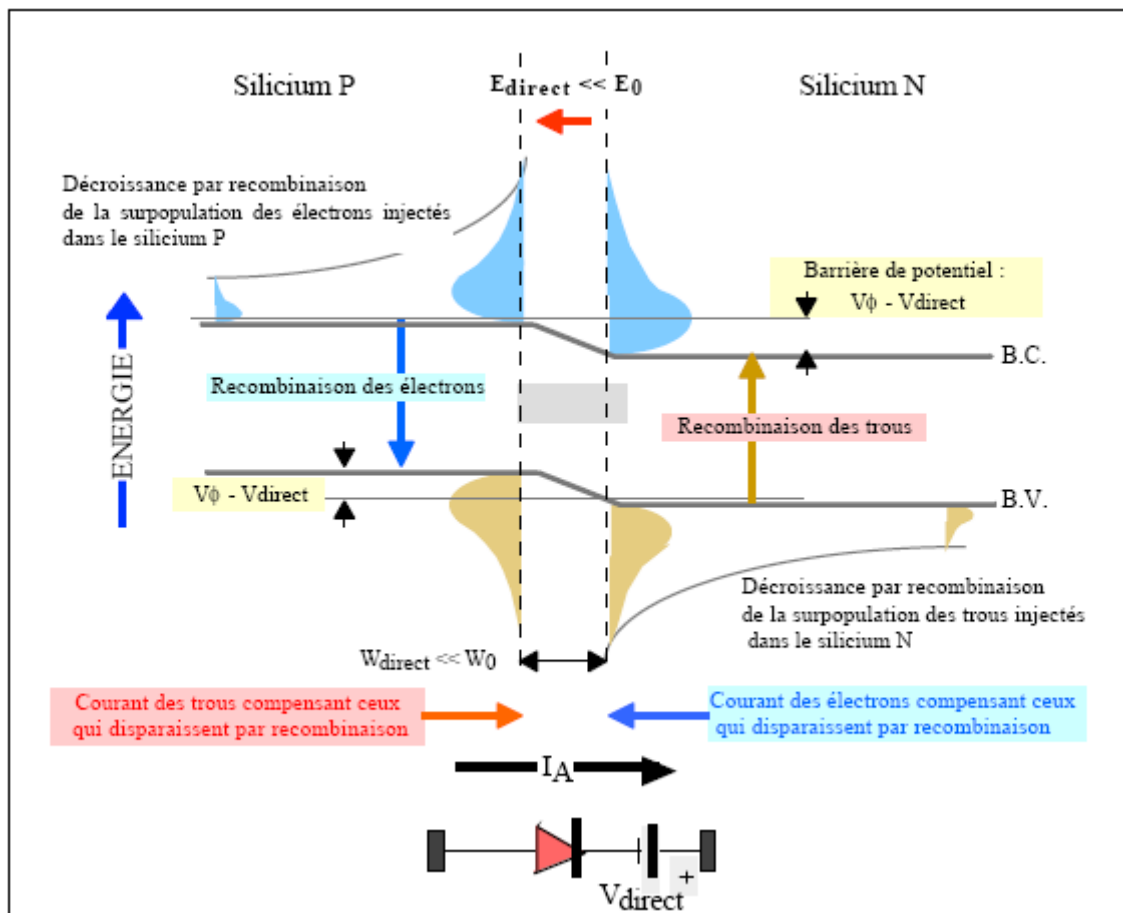


Figure P: La jonction polarisée dans le sens passant.

8 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a abordé un aperçu sur les théories de base des semi-conducteurs, ainsi que les différents types de semi-conducteur. Entre autre, on a relaté le processus de conduction des semi-conducteurs. Par la suite, on a donné des discussions sur la formation de la jonction PN avec une polarisation inverse, puis avec une polarisation directe.

Les technologies semi-conducteurs ont connus la plus forte progression industrielle des vingt dernières années, demeurent un outil essentiel de développement des économies modernes, vu les multiples applications technologiques, ils possèdent plusieurs propriétés qui peuvent être mises à profit pour des multiples applications industrielles.

Références Bibliographiques

- [1] A. Aouina. Mémoire de Magister en physique, Université Mentouri Constantine, 2007.
- [2] N. Baghdadli, Thèse de doctorat, Univ Abou Bakr Belkaid Tlemcen. 2013.
- [3] S. Ghefir, Mémoire de magister, Univ Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2013.
- [4] F. Mezrag, Thèse de doctorat, Univ Mohamed Khider Biskra, 2012.
- [5] C. Ng-Hélène Ng, physique des semi-conducteur, 3 Ed.Dunod, 2007.
- [6] N. Benahmed Ben abd allah, Mémoire de magister, Univ Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2006.
- [7] C. Kittel. physique de l'état solide. Ed. Dunod, 1983.
- [8] M. Labidi, Thèse Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2011.
- [9] A. Chovet, P.Masson. physique des semi-conducteurs, cours du département Micro-électronique et télécommunications, 2004-2005.
- [10] B.N. Brahmi, Thèse Doctorat, Univ Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2013.
- [11] https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_de_matériaux_semi-conducteurs. Consulté le 04.03.2020.

**Chapitre II : Etude de l'effet
photoélectrique, émission
stimulé et émission spontanée.**

1.Introduction :

L'opto-électronique est à la fois une branche de l'électronique et de la photonique. Elle concerne l'étude des composants électroniques, appelés aussi composants photoniques¹, qui émettent ou interagissent avec la lumière. Parmi eux, se trouvent les capteurs ou les diodes permettant la conversion de photons en charge électrique ou inversement, les systèmes permettant la gestion d'un signal optique dans les télécommunications par fibre optique ou encore les systèmes d'optique intégrée. Dans ce chapitre, nous touchons à son effet.

2. Jonction PN :

Une jonction PN est formée par la juxtaposition d'un semi-conducteur dopé type P (appelé anode) et d'un semi-conducteur dope type N (appelé cathode), tous les deux d'un même monocristal semi-conducteurs, (figure II.1). Lorsque ces deux types de semiconducteurs sont mis en contact, un régime électrique transitoire s'établit de part et d'autre de la jonction, suivi d'un régime permanent. Une jonction simple forme une diode [1].

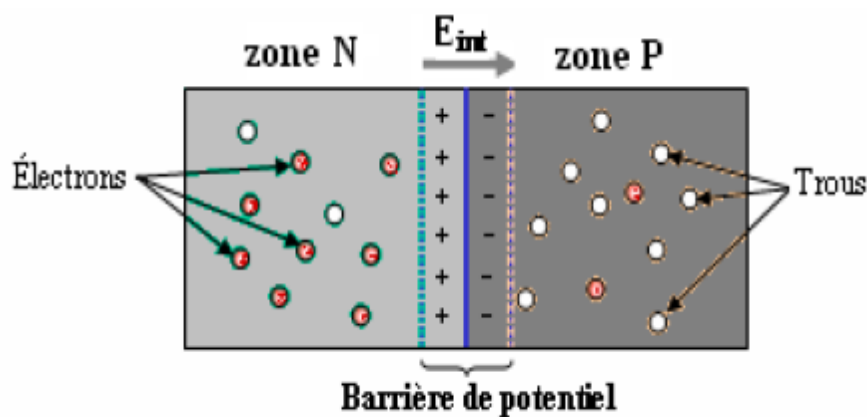


Figure II.1 :La jonction PN

2.1. Types de Jonction P-N :

Il existe deux types de jonction :

- Jonction Abrupte
- Jonction Graduelle

On s'intéressera à l'homojonction P-N abrupte

2.2. Jonction P-N Abrupte

Les électrons diffusent vers la région où ils sont minoritaires (région P) et les trous vers la région N. Il y aura donc apparition d'une zone dépeuplée de porteurs appelée zone de charge d'espace (ou zone de transition). Cette zone contient les ions des atomes dopants, donc elle sera positive dans la région N et négative dans la région P. La charge d'espace crée un champ électrique $E \rightarrow i$ (une barrière de potentiel) qui s'oppose à la diffusion des porteurs. L'équilibre thermodynamique est atteint lorsque le courant de diffusion est égal au courant dû au champ électrique interne $E \rightarrow i$.

2.3. Jonction P-N graduelle :

Dans une jonction graduelle, la concentration en impuretés est une fonction dépendante de x autour de la région de contact. C'est-à-dire, la différence $(N_d - N_a)$ dépend de x entre X_p et X_n , voir Fig.1.3. , cas d'une dépendance linéaire [2].

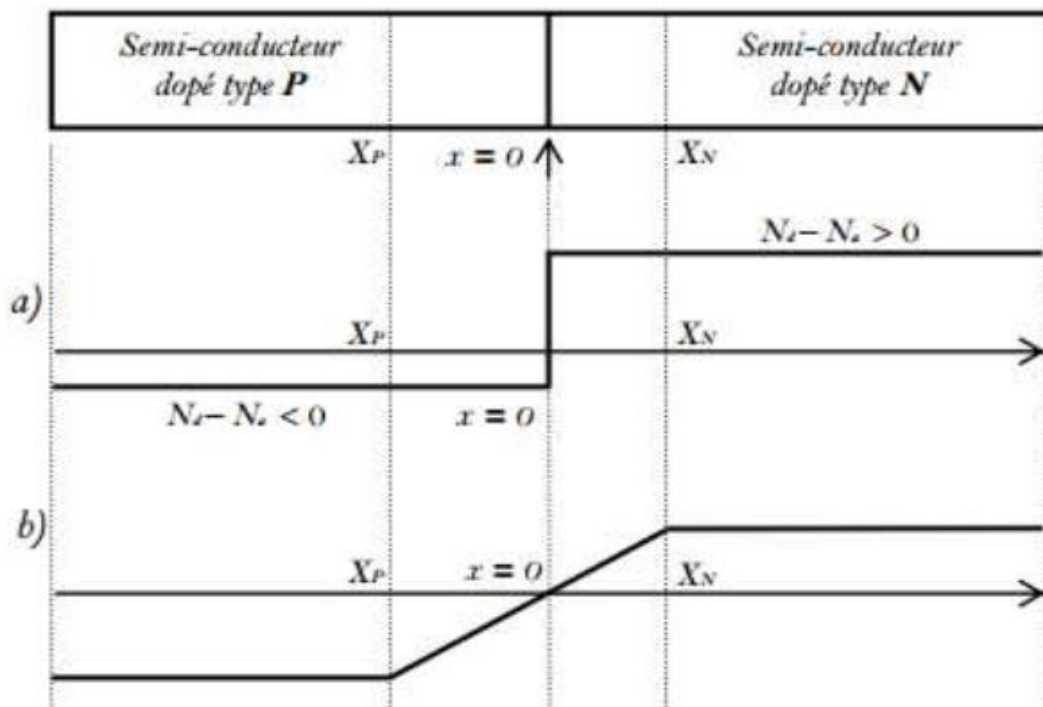


Figure II.2. Evolution de la différence ($N_d - N_a$). a) abrupte et b) graduelle

3. l'effet photovoltaïque :

Le terme photovoltaïque provient de « photo » qui signifie lumière, et de « volta » qui signifie électricité, désignant donc la production d'électricité à partir de lumière. L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons en énergie électrique à l'aide de cellules solaires [3].

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire [4].

L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur avant qu'il ne soit éclairé. Une telle barrière existe, par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différente, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet

photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives [5].

Parmi les matériaux semi-conducteurs les plus utilisés on trouve le silicium (Si), le germanium (Ge) et l'arséniure de Gallium (GaAs)...etc. [5].

3.1. Le principe de conversion photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par Alexandre Edmond Becquerel, qui se demandait pourquoi certains matériaux faisaient des étincelles lorsqu'ils étaient exposés à la lumière, il a pu démontrer qu'il s'agissait d'une conversion directe de la lumière en énergie électrique.

En 1905 Albert Einstein a écrit sur l'effet photovoltaïque en postulant que la lumière pouvait entrer à l'intérieur des atomes, et que la collision entre les photons et les atomes pouvait faire sortir des électrons de leurs orbites permettant la création d'un courant électrique [6].

L'effet photovoltaïque s'appuie principalement sur trois grands principes dont l'action combinée engendre la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique :

- . L'absorption de photons.
- . La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres.
- . La collecte de ces particules dans un circuit électrique extérieur.

De ce fait, un dispositif photovoltaïque doit être constitué :

- d'un matériau absorbant dans la gamme du spectre solaire et possédant au moins une transition possible entre deux niveaux d'énergie.
- et d'une structure de collecte, de résistance électrique la plus faible que possible.

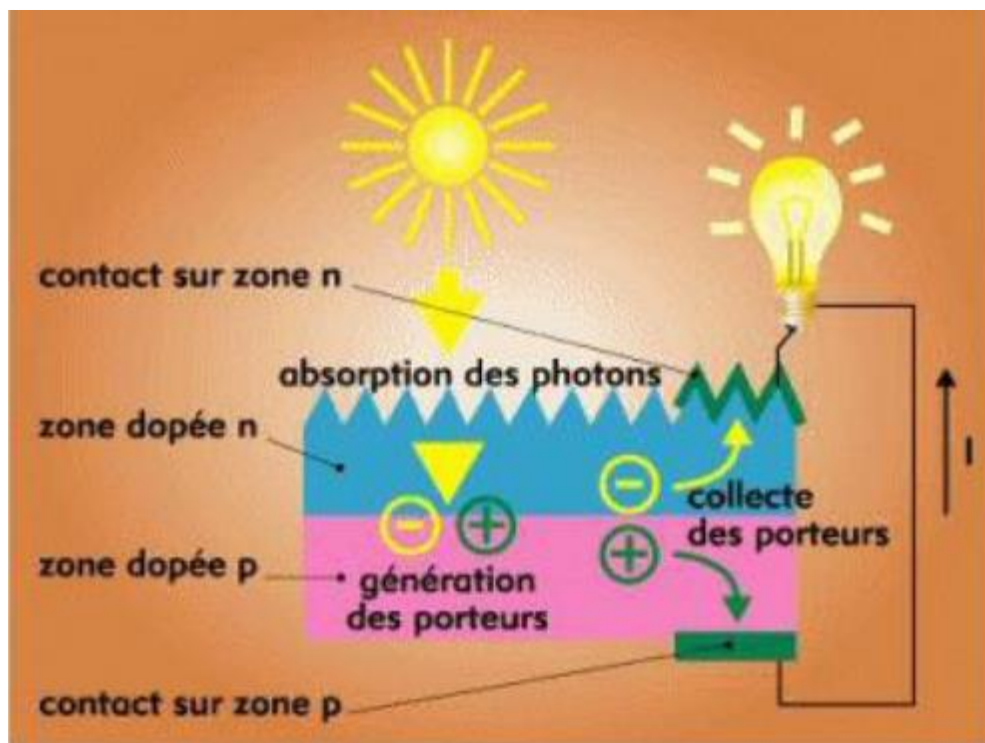


Figure II.3 : schéma de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

II.4.Émission spontanée :

L'émission spontanée est une recombinaison radiative résultant d'une transition électronique de bande à bande. Cette radiation est une émission isotrope (*i.e.* dans toutes les directions) et incohérente (l'émission est faite avec une phase arbitraire et même fluctuante). L'énergie du photon émis est celle qui correspond à l'énergie de la bande interdite. Dans les gaz, les niveaux atomiques sont bien définis et la radiation émise sera d'une énergie précise ou d'un spectre d'allure monochromatique. Par contre, dans les semiconducteurs, l'état excité de l'électron se trouve dans la bande de conduction. On a alors affaire à une distribution d'états qui produiront un spectre d'émission beaucoup plus étalé, Il y a une densité d'états dans la bande de conduction, de sorte que le spectre d'émission est en général élargi. L'émission spontanée se produit dans 10^{-8} à 10^{-9} s après l'excitation. C'est ce type d'émission qui domine dans les diodes électroluminescentes et aussi dans les diodes laser sous le seuil d'oscillation [7].

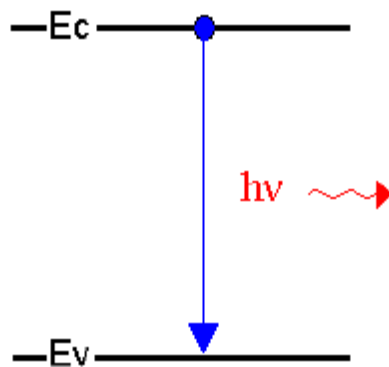


Figure II .4 :Emission spontanée

II.5.L'émission stimulée :

L'interaction entre un photon se propageant dans le semiconducteur et un électron situé dans la bande de conduction entraîne la recombinaison de la paire électron trou (Figure.II.3) et l'émission d'un photon identique (même longueur d'onde, même direction, même phase) au photon incident. Ces photons pourront à leur tour faire recombinaison des paires électrons trous Et ce phénomène, équivalent à une amplification, est une condition indispensable à l'émission laser.[\[8,9\]](#)

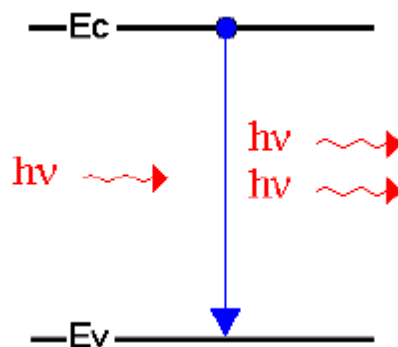


Figure II .5 :L'émission stimulée

Références bibliographiques

- [1] A. Souici. *Physique des Semi-conducteurs*. Cours de l'université de Béjaia, Algérie, 2013-2014.
- [2] H. AMEUR Rachid & D. Asmaâ. Mémoire de Master. Etude et simulation d'une jonction P-N circulaire. Université Saad DAHLAB de Blida. 2017
- [3] A.Rahmani, K.Selmani. Etude des performances d'une cellule Photovoltaïque à hétérojonctions. Master en Composants et Systèmes de télécommunication, Université de Saida, 2017.
- [4] Ed. Becquerel, C.R. Acad. Sci., 9 561. 1839.
- [5] Bali Amina. Etude comparative entre les cellules solaire de type p⁺-AlGaAs/ p-GaAs /n-GaAs et une autre de type n⁺-AlGaAs/n-GaAs/p-GaAs. Mémoire de Magister en physique. Université Mohamed Kheider Biskra. 2013.
- [6] K .Tahri, B. Benyoucef. Etude de Modélisation d'un Générateur Photovoltaïque. Journal of Scientific Research. N° 0 vol. 1, Université Abou Bakr Belkid- B.P: 119 Tlemcen 13000. 2010.
- [7] D. Dangoisse, D. Hennequin et V. Zehnlé-Dhaoui, Les lasers, Dunod, 2004.
- [8] H.C. Casey., jr. and Panish M.B. Heterostructure Lasers, Part A – Fundamental Principles. Part B Materials and operating characteristics. Academic Press, 1978.
- [9] Agrawall G.P. and Dutta N.K. Long-wavelength semiconductor Lasers. Van Nostrand. 1986.



Chapitre III : Etude analytique et interprétation

1 Introduction

L'analyse des semi-conducteurs est basée essentiellement sur les équations de continuité, les conditions aux limites et l'équation de poisson. Nous présenterons les équations de base qui décrivent les différents phénomènes ayant lieu dans une cellule solaire, diode électroluminescence et les lasers. On analyse aussi les mécanismes de transport de courants dans les différentes régions de la cellule solaire. En particulier, nous avons caractérisé la puissance de la diode électroluminescence et laser à saphir pompé par différentes puissances.

Lorsque la cellule solaire exposée au rayonnement solaire, commence à produire de l'énergie, une tension va s'établir à ces bornes dans le sens d'une polarisation directe donnant naissance à un courant d'obscurité dans la jonction. Ce dernier est opposé au courant d'éclairement. La résultante dépend des deux composantes, donc il est important d'avoir un courant d'obscurité le plus faible possible pour obtenir le meilleur rendement.

On a représenté sur la (figure III-1) les deux caractéristiques courant-tension d'une cellule solaire : dans l'obscurité en pointillés, et sous illumination en trait plein.

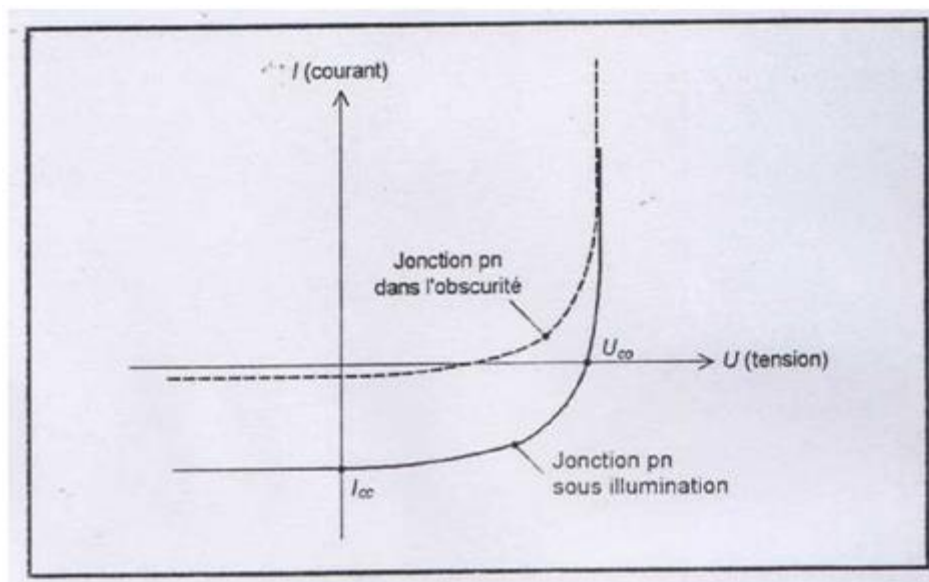


Figure III-1 : Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire dans l'obscurité et sous illumination

On remarque que la courbe sous illumination est simplement décalée par rapport à la première d'une valeur I_{cc} , qui traduit la génération constante du courant par la lumière. Cette valeur est appelée courant de court-circuit, puisque c'est le courant que génère la cellule sous lumière à tension nulle. La valeur U_{co} , à l'inverse, est la tension de circuit ouvert. Il représente en fait l'égalité du courant de génération par la lumière et du courant de consommation sans lumière.

2. Caractéristique électrique de la cellule solaire

2.1 Courant d'éclairement dans une homojonction

Lorsqu'une lumière monochromatique de longueur d'onde λ arrive sur la surface d'un matériau semi-conducteur des porteurs seront créés sous l'effet des photons et devenus libres contribuent au photo-courant. Le taux de génération des paires électron-trou $G(x, \lambda)$ à une distance x de la surface est donné par la relation (III-1) :

$$G(x, \lambda) = \alpha(\lambda)F(\lambda)[1 - R(\lambda)]\exp(-\alpha(\lambda)x) \quad (III-1)$$

À partir des équations de continuité, les trous dans le semi-conducteur de type N :

$$(1/q)(dJ_p/dx) - G_p + (P_n - P_{n0})/\tau_p = 0 \quad (III-2)$$

Dans le cas d'un matériau de type P, les minoritaires sont des électrons, l'équation de continuité s'écrit :

$$(1/q)(dJ_n/dx) - G_n + (P_p - P_{p0})/\tau_n = 0 \quad (III-3)$$

Où $J_n, J_p, G_n, G_p, \tau_n, \tau_p$ sont les densités de courants, le taux de génération et durées de vie des trous et des électrons respectivement ; p_n, n_p les densités des porteurs minoritaires générées par la lumière, et n_{p0}, p_{n0} densités des porteurs minoritaires à l'équilibre, q la charge de l'électron.

Les équations de transport nous permettent d'obtenir les densités de courants des trous et des électrons, comme suit :

$$J_p = q \mu_p p_n E - q D_p (dp_n / dx) \quad (\text{III-4})$$

$$J_n = q \mu_n n_p E - q D_n (dn_p / dx) \quad (\text{III-5})$$

E : Le champ électrique, les mobilités et les coefficients de diffusion des trous et des électrons sont respectivement : $\mu_n \mu_p D_n D_p$.

2.2 Courant dans la région quasi-neutre N

Lorsque le dopage est uniforme dans les régions neutres, le champ électronique devient nul le long de ces régions (hors la zone de charge d'espace).

Dans le cas d'une cellule N/P , où l'émetteur est de type N , et la base de type P , la combinaison des équations (III-1)-(III-2) et (III-4) permet de donner l'expression qui traduit les phénomènes de la région d'émetteur :

$$D_p \frac{d^2(p_n - p_{n0})}{dx^2} + \alpha F(1 - R) \exp(-\alpha x) - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} = 0 \quad (\text{III-6})$$

La solution générale de cette équation est :

$$p_n - p_{n0} = A \cosh(x/L_p) + B \sinh(x/L_p) \frac{-\alpha F(1-R)\tau_p}{(\alpha^2 L_p^2 - 1)} \exp(-\alpha x) \quad (\text{III-7})$$

Où L_p est la longueur de diffusion des trous $L_p = (D_p \tau_p)^{1/2}$. Avec les conditions aux limites, on peut trouver les deux constantes A, B .

- A la surface, une recombinaison se produit avec une vitesse S_p

$$D_p \frac{d(p_n - p_{n0})}{dx} = S_p (p_n - p_{n0}) ; \quad \text{à } (x = 0) \quad (\text{III-8})$$

- A la limite de la jonction, la densité des porteurs en excès est réduite à zéro par le champ électronique dans la zone de déplétion :

$$p_n - p_{n0} = 0, \quad \text{à } (x = x_j) ; \quad (\text{III-9})$$

x_j : Profondeur de jonction.

A partir de ces conditions aux limites, nous obtenons les expressions de A et B , puis nous les remplaçons dans l'équation (III-7) :

$$p_n - p_{n0} = [\alpha F(1 - R)\tau_p / (\alpha^2 L_p^2 - 1)]$$

$$\times \left[\frac{(\frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p) \sinh(\frac{x_j - x}{L_p}) + \exp(-\alpha x_j) (\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh \frac{x}{L_p} + \cosh \frac{x}{L_p})}{\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh \frac{x_j}{L_p} + \cosh \frac{x_j}{L_p}} - \exp(-\alpha x) \right]$$

(III-10)

Et la densité du photo-courant des trous à la zone de déplétion est :

$$J_p = -qD_p \left(\frac{dp_n}{dx} \right) = [qF(1 - R)\alpha L_p / (\alpha^2 L_p^2 - 1)]$$

$$\times \left[\frac{(\frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p) \exp(-\alpha x_j) (\frac{S_p L_p}{D_p} \cosh \frac{x_j}{L_p} + \sinh \frac{x_j}{L_p})}{\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh \frac{x_j}{L_p} + \cosh \frac{x_j}{L_p}} - \alpha L_p \exp(-\alpha x_j) \right]$$

(III-11)

Ceci, est la contribution de l'émetteur au photo-courant total, ce photo-courant est collecté de la région d'émetteur à une longueur d'onde donnée, Nous supposons que la durée de vie, la mobilité, et le dopage sont uniformes.

2-3 Courant dans la région quasi-neutre P

Pour trouver le photo-courant des électrons générés dans la base, les équations (III-1)-(III-3) et (III-5) sont nécessaires avec les conditions aux limites suivantes :
De même que la région de l'émetteur, au bord de la zone de déplétion, la densité des porteurs minoritaires en excès est nulle :

$$n_p - n_{p0} = 0$$

Avec : $(x = x_j + w)$ (III-12)

À la surface arrière de la cellule une recombinaison en surface prend place S_n , notons que la vitesse de recombinaison au contact arrière est très élevée.

$$S_n(n_p - n_{p0}) = -Dn \frac{d(n_p - n_{p0})}{dx} = 0 ; \quad \text{à } (x = H) \text{ (III-13)}$$

Où w l'épaisseur de la zone d'appauvrissement, H l'épaisseur totale de la cellule.

En exploitant ces conditions aux limites, et avec l'utilisation d'une expression des électrons similaire à celle des trous (III-6), on déduit alors la distribution des électrons dans la région de base :

$$n_p - n_{p0} = [\alpha F(1-R)\tau_p / \alpha^2 L_n^2 - 1] \exp[-\alpha(x_j + w)] X \cosh\left(\frac{x - x_j - w}{L_n}\right) - \exp[-\alpha(x_j + w)] - \left[\frac{\left(\frac{S_n L_n}{D_n}\right) \left[\cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right) - \exp(-\alpha H') \right] + \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \alpha L_n \exp(-\alpha H')}{\frac{S_n L_n}{D_n} \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right)} \right] \times \sinh\left(\frac{x - x_j - w}{L_n}\right) \quad (III-14)$$

La densité du photo-courant issue de la base due aux électrons collectés à la limite de la jonction est :

$$L_n = [qF(1-R)\alpha L_p / (\alpha^2 L_p^2 - 1)] \exp[-\alpha(x_j + w)] X \left[\alpha L_n - \frac{\left(\frac{S_n L_n}{D_n}\right) \left[\cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right) - \exp(-\alpha H') \right] + \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \alpha L_n \exp(-\alpha H')}{\frac{S_n L_n}{D_n} \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right)} \right] \quad (III-15)$$

Ou $H' = H - (x_j + w)$. Nous rappelons que la durée de vie, la mobilité et le dopage sont uniformes.

2.4 Courant dans la région de charge d'espace

La génération dans la zone de charge d'espace représente le siège principal du courant. Le champ électrique dans cette zone est assez élevé, les porteur créés sont accélérés en dehors de cette zone avant de se recombiner. La densité du courant produite dans cette zone est égale au nombre de photons absorbés.

$$Jdr = qF(1-R)\exp(-\alpha x_j)[1 - \exp(-\alpha w)] \quad (III-16)$$

2.5 Photo-courant total

La somme des trois composants calculés ci-dessus permet d'obtenir la densité totale du courant d'éclairement en court-circuit, en fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident, donc :

$$J(\lambda) = J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_{dr}(\lambda) \quad (\text{III-17})$$

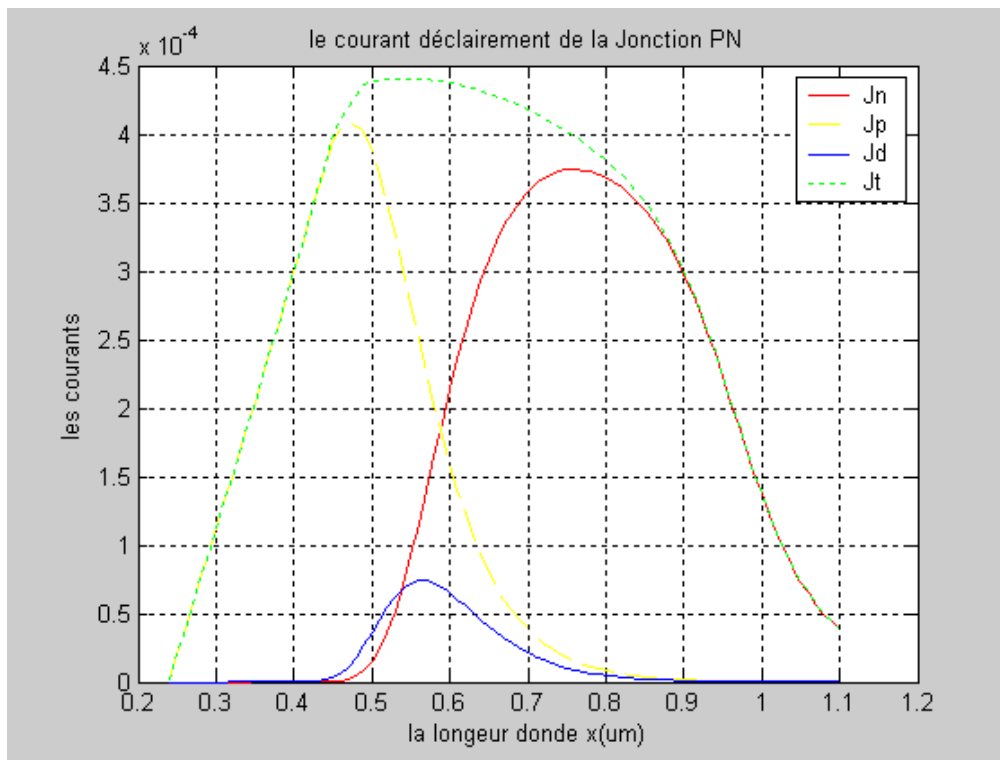


Figure III-2 : Courant d'éclairement dans une jonction PN.

Avec le même principe on trace le courant d'éclairement dans une jonction NP.

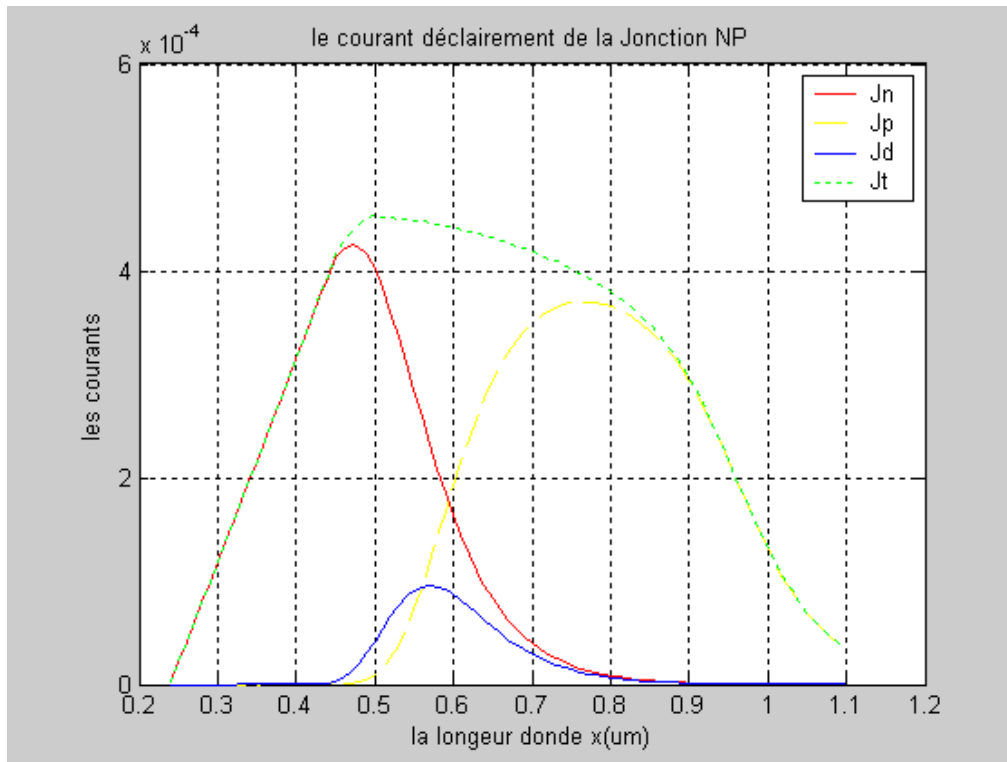


Figure III-3 : Courant d'éclairement dans une jonction NP.

2-6 Réponse spectrale

La sensibilité des cellules solaires à la lumière traduite par la réponse spectrale, chaque longueur d'onde génère un photo-courant correspond au nombre des photons incidents ayant la même énergie sur la surface. La réponse spectrale est le rapport entre la densité de courant collecté et la densité des photons incidente, pour chaque longueur d'onde du rayonnement lumineux [1-3]. La réponse spectrale dépend beaucoup plus des propriétés optiques des matériaux solaires que de la distribution spectrale de la lumière reçue, son optimisation exige une amélioration au niveau de la surface avant et même arrière.

Les deux formes de la réponse spectrale (*IQE*, *EQE*) sont fortement liées à la recombinaison en surface et en volume, à la longueur de diffusion des porteurs et à l'épaisseur de la région concernée. Cette dépendance est étudiée par M.D. Archer et al [1-3].

Ils regroupent ces paramètres en trois rapports :

- Rapport entre l'épaisseur de la région concernée et la longueur de diffusion.

- Rapport entre la vitesse de recombinaison et la longueur de diffusion par le coefficient de diffusion.
- Produit du coefficient d'absorption par la longueur de diffusion.

Supposons que le flux des photons incidents est $F(\lambda)$, une portion de ce flux se réfléchit, $R(\lambda)$ coefficient de réflexion pour la longueur d'onde λ et la partie $F(\lambda)[1 - R(\lambda)]$ pénètre dans le matériau (figure III-3).

$$\begin{aligned}
 SR(\lambda) &= \frac{J(\lambda)}{qF(\lambda)[1 - R(\lambda)]} \\
 &= \frac{J_p(\lambda)}{qF(\lambda)[1 - R(\lambda)]} + \frac{J_n(\lambda)}{qF(\lambda)[1 - R(\lambda)]} + \frac{J_n(\lambda)}{qF(\lambda)[1 - R(\lambda)]} \\
 &\quad + \frac{J_\phi(\lambda)}{qF(\lambda)[1 - R(\lambda)]}
 \end{aligned}
 \tag{III-18}$$

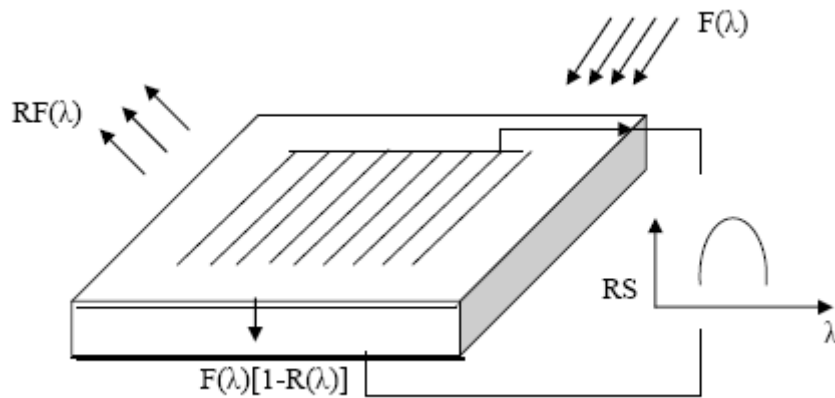


Figure III-4 : Réponse spectrale.

La réponse spectrale interne est définie comme le nombre de paires électron-trou collectés sous les conditions de court-circuit relatif au nombre de photons pénétrant dans le matériau.

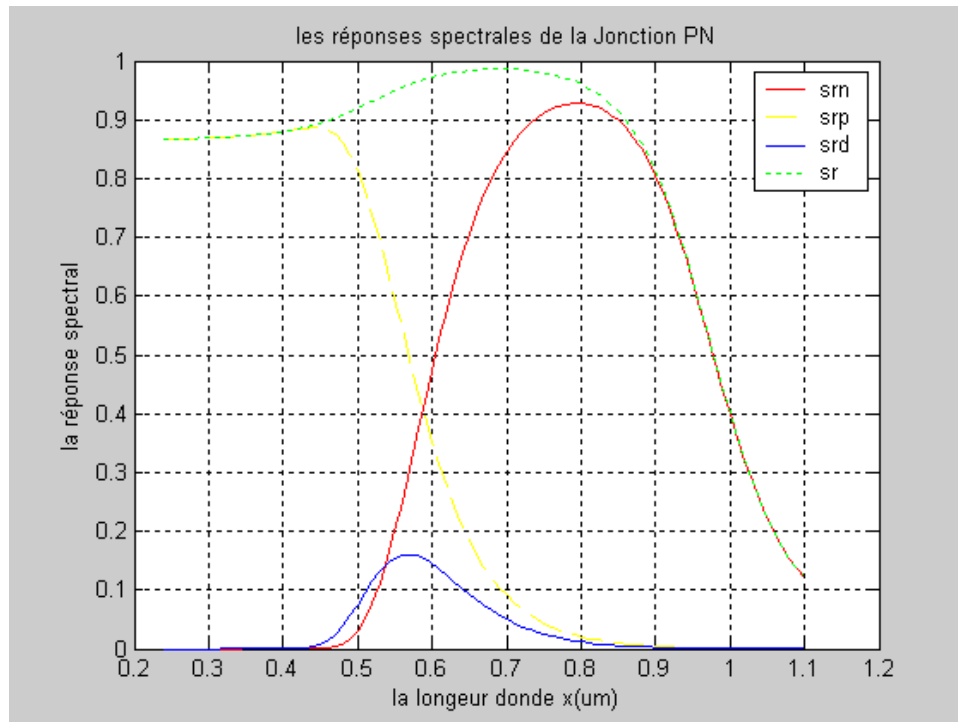


Figure III-5 :Les réponses spectrales de la jonction *PN*

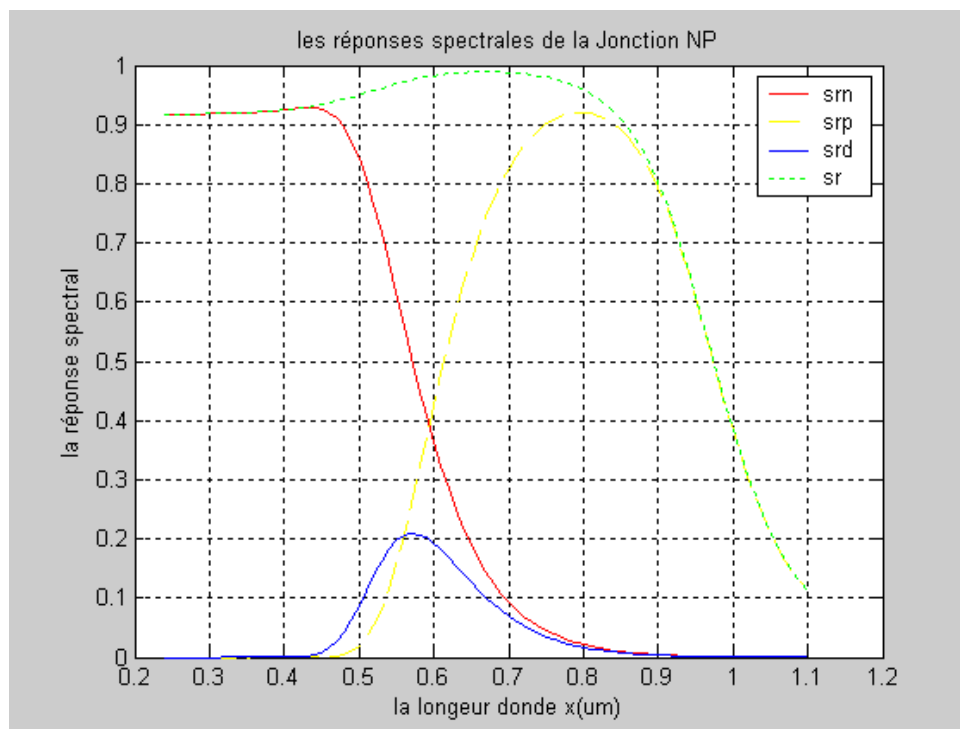


Figure III-6 :Réponse spectrale interne d'une cellule *Si NP*.

2.6 Circuit équivalent

Une cellule solaire réelle peut être schématisée par la figure (III-7). Elle comprend plusieurs éléments, le photo-courant est représenté par un générateur de courant I_{ph} opposé au courant d'obscurité de la diode polarisée en direct I_{obs} , voir figure (III-7).

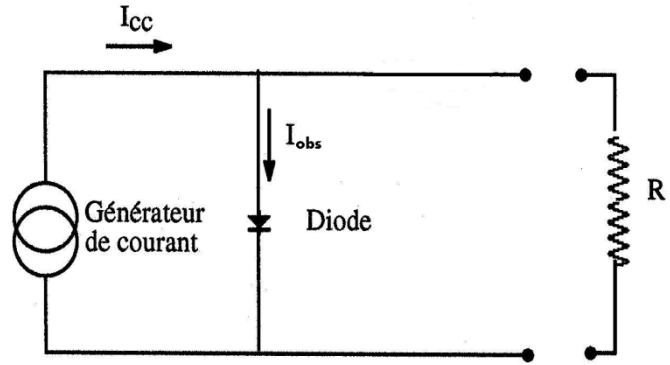


Figure III-7 :Schéma équivalent

Le courant d'obscurité I_{obs} est égal à sa densité multipliée par la surface totale de la cellule A_t . Par contre, le photo-courant est égal à la densité du photo-courant multipliée par la surface active (surface éclairée) A_a .

$$\begin{aligned} J_{obs} &= J_{obs} \cdot A_t \\ J_{ph} &= J_{ph} \cdot A_t \end{aligned}$$

A partir du schéma équivalent, on peut établir une relation entre le courant de sortie I_{out} et la tension de sortie V_{out} en utilisant tous les éléments de la cellule tels que I_{ph} , I_{obs} . Cette relation est [1-3] :

$$I_{out} = I_{ph} - I_{obs} \quad (III-19)$$

Pour obtenir les expressions déterminant les paramètres de sortie de la cellule tels que le rendement, le facteur de forme, le courant de court circuit, la tension de circuit ouvert, nous négligeons l'effet des résistances série et shunt, et le courant d'obscurité peut s'écrire [1-3] :

$$I_{obs} = I_s \left[\exp \left(\frac{qV_j}{2KT} \right) - 1 \right] \quad (III-20)$$

Où I_s : courant de saturation.

Le courant délivré par une cellule solaire éclairée à une charge s'exprime par :

$$I_{out} = I_{ph} + I_s \left[\exp \left(\frac{qV_j}{2KT} \right) - 1 \right] \quad (III-21)$$

$$I_{ph} = I_{cc} \text{ (III-22)}$$

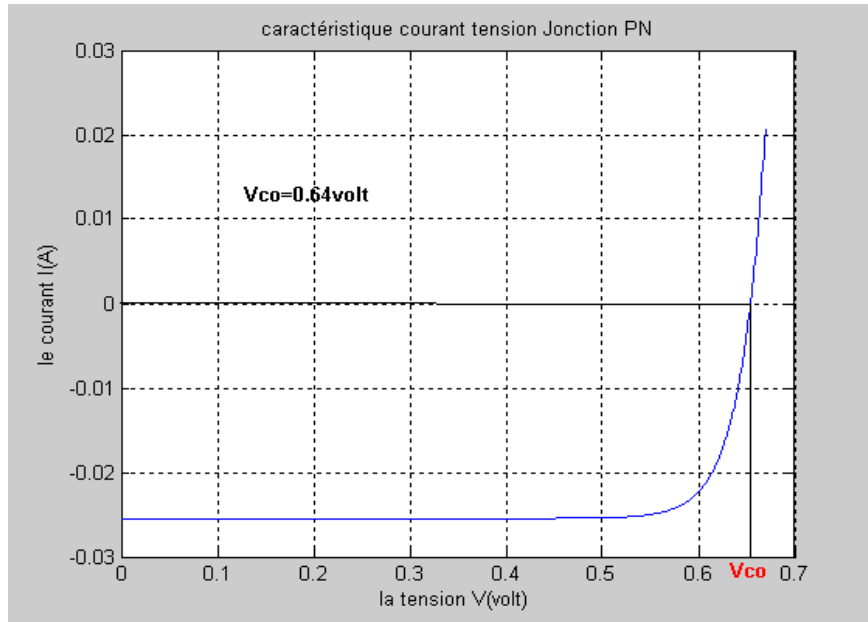


Figure III-8 : Caractéristique courant tension jonction PN

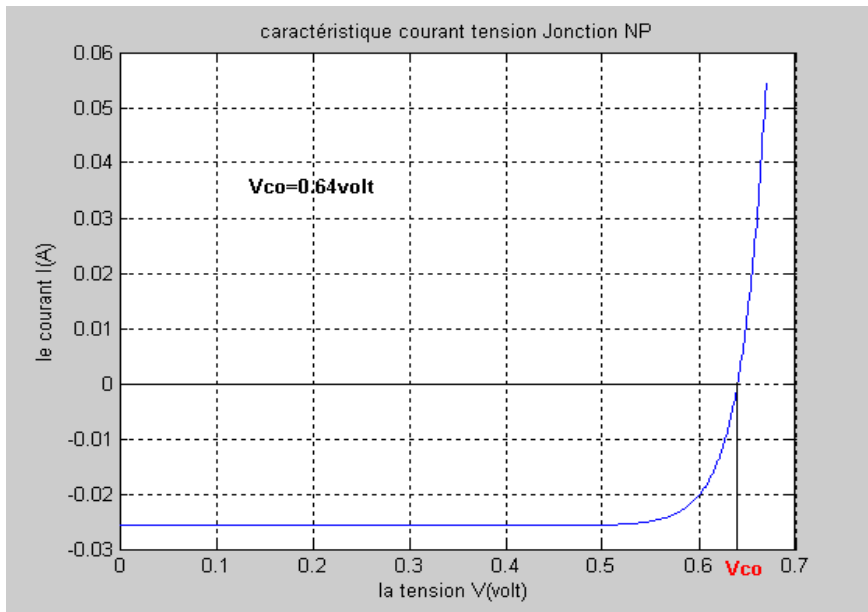


Figure III-9: Caractéristique courant tension jonction NP

L'utilisation optimale d'une cellule solaire doit être déduite de la caractéristique courant-tension (I - V) afin de déterminer la tension et le courant donnant la puissance électrique maximale. Comme la puissance de sortie P_{out} est $V_{out} \times I_{out}$, la puissance

maximale $P_{out}(\max)$ est obtenue en annulant la dérivée de la puissance par rapport à la tension (dP/dV).

2.7 Le Rendement

Le rendement photovoltaïque est un facteur très important pour les composants photovoltaïques, il se définit comme étant le taux de conversion d'énergie des piles solaires. Le rendement est aussi le pourcentage de l'énergie solaire qui est convertie en électricité par l'intermédiaire d'une cellule solaire. Il caractérise ces composants et définit leur performance.

Le rendement de conversion, pour une distribution spectrale, est donné par :

$$\eta = V_m \cdot I_m / P_{in} \text{ (III-23)}$$

Où P_{in} est la puissance incidente reçue définie comme ci-après [1-3] :

$$P_{in} = A_t \int_0^\infty f(\lambda) \left(\frac{hc}{\lambda} \right) d\lambda \text{ (III-23-a)}$$

Ou par la relation (III-23-b)

$$P_{in} = A_t \int_0^{P_{in}} f(\lambda) \left(\frac{hc}{\lambda} \right) d\lambda \text{ (III-23-b)}$$

A_t Surface totale, $F(\lambda)$ nombre de photons reçus par centimètre carré par seconde par bande passante $d\lambda$ pour chaque longueur d'onde λ , et $(h c / \lambda)$ l'énergie de chaque photon de longueur λ .

Notons que dans les expressions ci-dessus, nous avons utilisé le courant et non pas la densité de courant, en vue de prendre en compte la surface occultée par la grille métallique.

3 Caractéristique électrique d'une diode électroluminescence

Cette section sera consacrée à l'étude des caractéristiques électriques d'une LED.

3.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'une diode électroluminescence est basée sur le phénomène des transitions radiatives qui est obtenu par le passage d'un électron de

niveau énergétique supérieur E_{c1} à un niveau plus bas que le premier E_{v1} en émettant de l'énergie lumineuse sous formes de photons, suivant la formule :

$$h\gamma = E_{c1} - E_{v1} = E_{g1} \quad (\text{III-24})$$

Avec :

$$E_{g1} = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{III-25})$$

Où :

$h = 6,6 \times 10^{-34} \text{ j.s}$: Constante de Planck

$c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$: Vitesse de la lumière dans le vide

Cette relation est importante, elle permet de choisir le matériau (E_g) pour émettre la longueur d'onde voulue, la figure III-10 schématise ce principe.

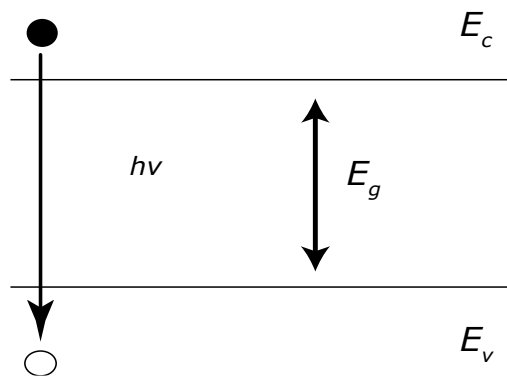


Figure III-10 :Phénomène de transition radiative.

Suivant la formule (III-24) la longueur d'onde de la lumière émise par les dispositifs à semi-conducteur est proportionnelle à la bande interdite de semi-conducteur choisi, c'est à dire pour que la diode émette de la lumière visible (longueur d'onde entre 400 et 700 nm) il est impérativement important de choisir un semi-conducteur de bande interdite autour de $E_g \approx 2 \text{ eV}$.

3.2 L'émission spontanée

La transition des électrons du niveau énergétique supérieur E_{c1} au niveau E_{v1} ce fait pas un processus de recombinaison. Ce passage des électrons émet de l'énergie qui sera dégagé soit comme lumière (dans ce cas la recombinaison est dite radiative) soit comme chaleur (une recombinaison non radiative). Pour le cas d'une recombinaison radiative l'émission de lumière appelée émission spontanée.

Le phénomène de transition radiative dans les semi-conducteurs est caractérisé par de type de transition :

A - Transition directe : Ce type de transition est plus probable pour l'émission de la lumière. Dans ce cas le passage des électrons d'un niveau à autre sans qu'il y ait modification de sa quantité de mouvement ; cette transition est observée dans les semi-conducteurs à bande interdite directe où l'électron passe directement de la bande de conduction à la bande de valence.

B - Transition indirecte : Ce type de transition est nommé aussi transition assisté pas des phonos. Cela signifie que le passage des électrons d'un niveau supérieur à un niveau inférieur ce fait par un autre niveau intermédiaire et dans ce cas il y a modification de la quantité de mouvement (vibration, phonon). Ces types de transitions sont observés dans les semi-conducteurs à bande interdite indirecte.

L'électroluminescence est le résultat de la recombinaison radiative des électrons et des trous électroniques dans un semi-conducteur. Les électrons excités libèrent leur énergie sous forme de photons (c'est-à-dire de lumière). Avant recombinaison, les électrons et les trous sont séparés les uns des autres en raison de l'induction dans le matériau pour former une jonction dans des diodes électroluminescents (LED). Une diode électroluminescente est une jonction P-N qui doit être polarisée en sens direct lorsqu'on veut émettre de la lumière. La plupart des recombinaisons sont radiatives. La face émettrice de la LED est la zone P car c'est la plus radiative. La figure III-11 montre le principe de fonctionnement d'une diode électroluminescence.

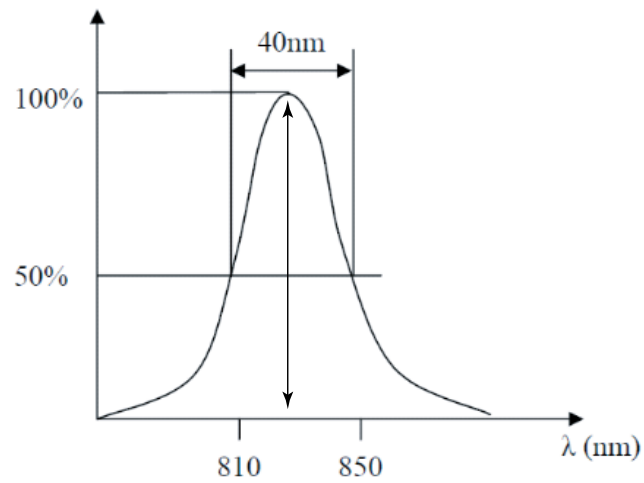


Figure III-11 : Principe de fonctionnement d'une diode électroluminescence

3.3 Longueur d'onde et largeur spectrale

Le spectre fourni par une diode électroluminescence n'est pas uniforme il est caractérisé par :

- a) La longueur d'onde du spectre(λ) : C'est la longueur d'onde correspond au maximum de flux énergétique, voir la figure III-12.
- b) largeur spectrale($\Delta\lambda$) : C'est la largeur de spectre émis relative à mi-hauteur.

La figure suivante schématise la longueur d'onde et le largeur spectral d'une diode électroluminescence.

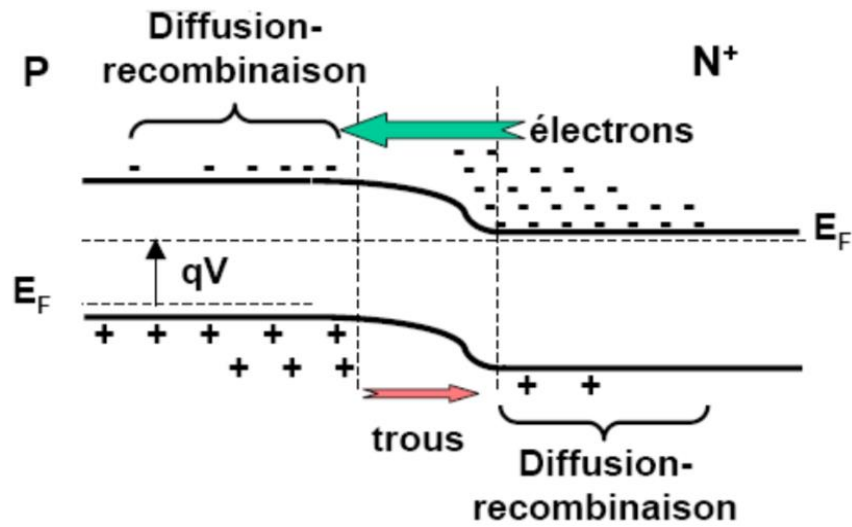


Figure III-12 : Longueur d'onde et le largeur spectral d'une diode électroluminescence.

3.4 Puissance lumineuse émise

La puissance lumineuse en fonction du courant est donnée par la formule suivante :

$$P = \frac{2}{3} \pi I \sin^3 \frac{\alpha}{2} \quad (\text{III-26})$$

Où α représente l'angle d'émission de la LED. La courbe caractéristique puissance émise en fonction du courant est de la forme suivante :

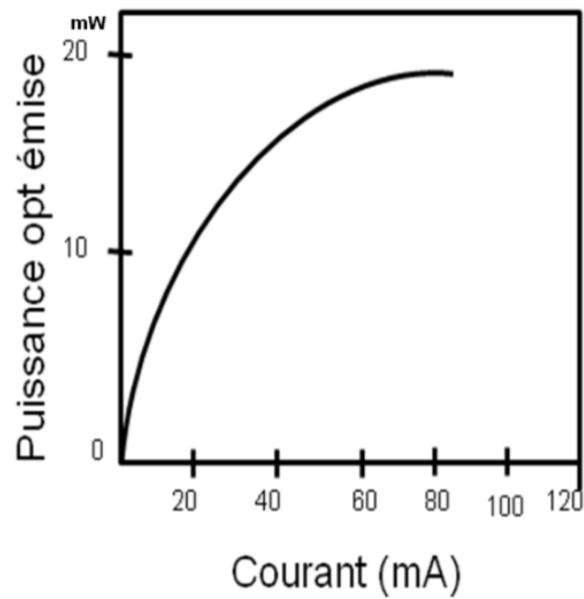


Figure III-13 :puissance émise en fonction du courant

4 Caractérisation laser

Nous avons étudié dans cette section les paramètres d'un pompage optique par un laser à saphir. En particulier, nous avons quelques résultats expérimentaux pour ce type de laser. Pour cette étude nous avons considéré la figure suivante :

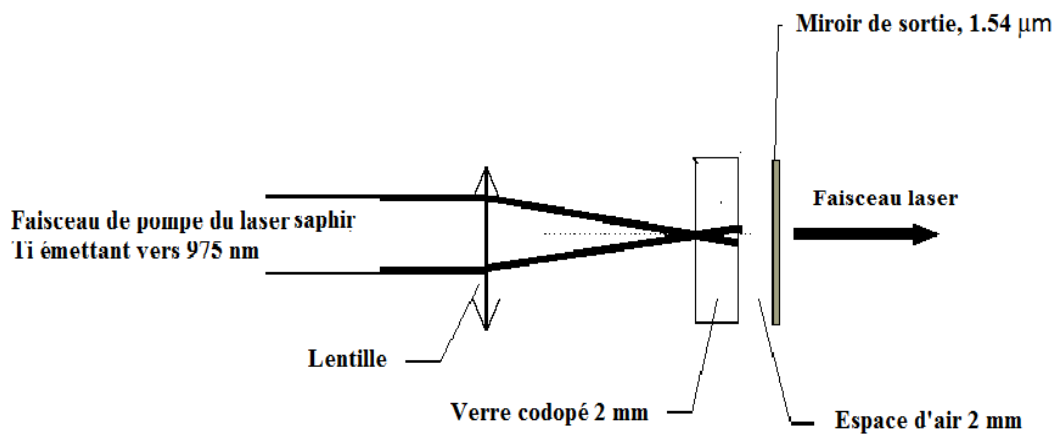


Figure III.14 : Pompage par du laser

Les phénomènes physiques et les paramètres qui caractérisent le laser de la figure sont nombreux, en effet on présente une vision décrivant les conditions sur la qualité du matériau, la puissance de sortie et le facteur de qualité du faisceau. Ces informations sont utiles pour la réalisation des analyses et la caractérisation de laser saphir pour le pompage.

2.1 Ablation laser

Dans le cas général, il est nécessaire d'utiliser une densité de puissance (ou éclairement) supérieure à un certain seuil :

$$I = \frac{E}{\tau S} \quad (\text{III.27})$$

Avec :

E : énergie de l'impulsion laser,

τ : Durée d'impulsion,

S : surface du spot laser.

Le seuil d'ablation dépend des caractéristiques de l'échantillon et des paramètres laser (longueur d'onde λ , durée d'impulsion). L'ablation est gouvernée par la capacité d'absorption du laser par le matériau, la diffusion thermique et les paramètres thermodynamiques du matériau.

Pour notre cas, la durée d'impulsion est très courte de l'ordre $\tau = 100$ ns et l'énergie est calculée pour le cas de seuil qui correspond à l'énergie de la bande interdite du matériau. En particulier, on peut calculer l'énergie de laser saphir pour l'émission 975 nm :

$$E = \frac{hc}{\lambda} = 1.27 \text{ eV} \quad (\text{III.28})$$

Donc suivant l'équation (III.27), la puissance est d'environ : $I = \frac{1.27 \times 1.6 \times 10^{-19}}{10^{-7} \times 10^{-12}}$
 $= 2.032 \text{ W/m}^2$ pour $1 \mu\text{m}^2$ de surface.

2.2 Puissance et rendement de laser

Dans le but de comparer notre simulation avec des résultats expérimentaux, nous avons utilisé l'énergie de l'impulsion laser pour différent puissance de pompe, une durée de 100 ns et lentilles de focalisation 15 mm donné par référence [1].

Energie de pompe (10^{-7}J)	0.1	0.120	0.130	0.140	0.16	0.2	0.220	0.240	0.260
Energie de l'impulsion laser (10^{-7} J)	0	0.0025	0.008	0.009	0.013	0.02	0.024	0.026	0.027
Rendement (%)	0	2.08	6.1	6.4	8.1	10	11	10.83	10.3

Tableau III.1 : La puissance d'impulsion et rendement d'un laser à saphir.

Avec ces données nous avons continué à calculer le rendement correspond à :

$$\eta = \frac{P_{imp}}{P_{pom}} \text{ (III.29)}$$

Tel que P_{imp} la puissance d'impulsion et P_{pom} la puissance de pompe.

Les valeurs de rendement, l'énergie de l'impulsion laser sont représentés sur la figure III.15

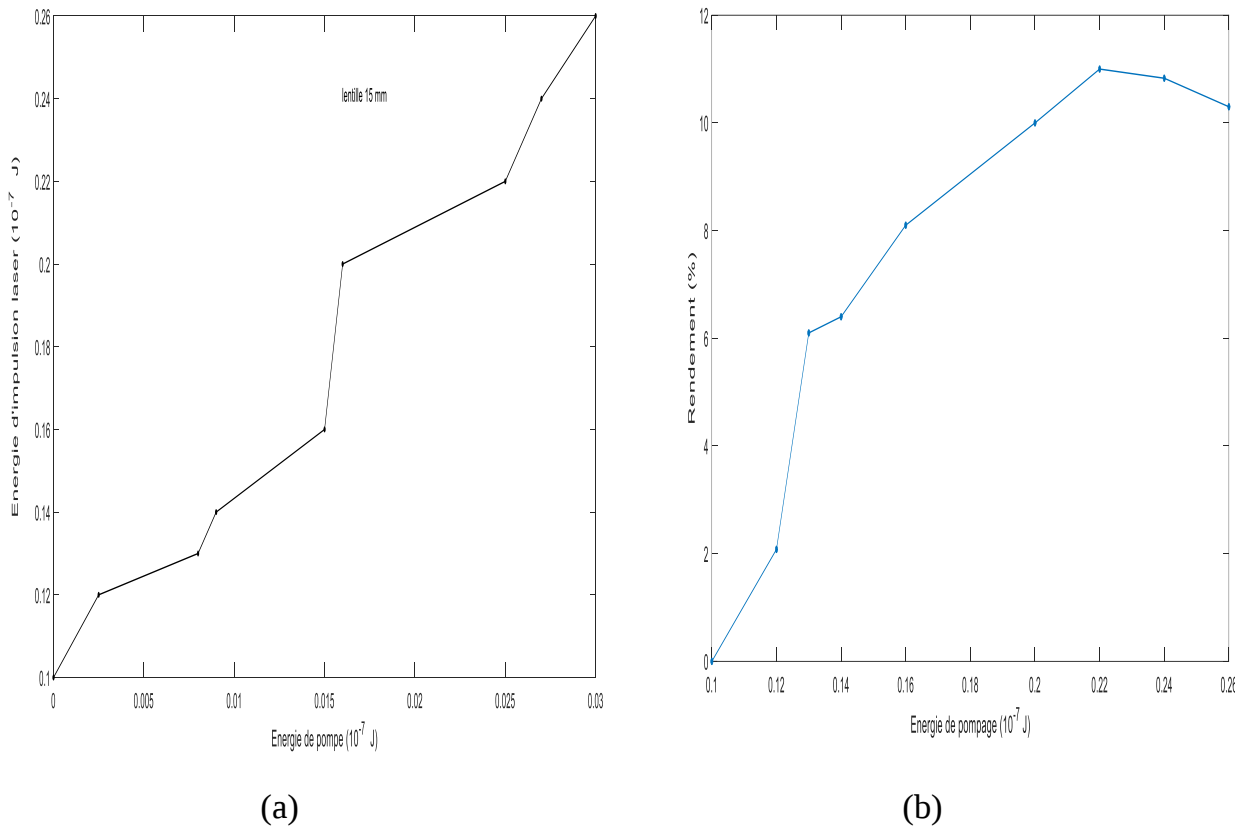


Figure III.15 : (a) L'énergie d'impulsion et (b) Rendement du laser à saphir.

Les résultats expérimentaux sont représentés sur la figure III.16

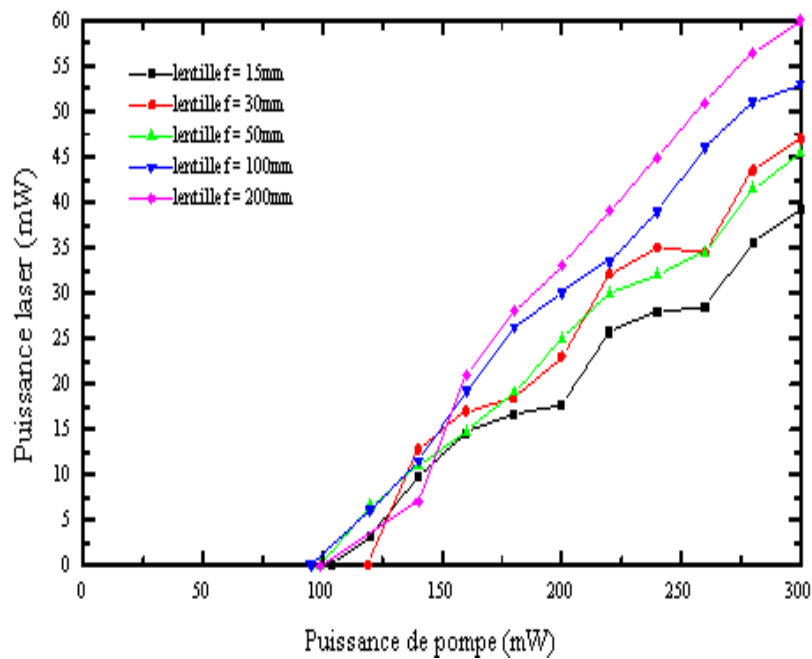


Figure III.16 : Puissance laser pour différentes lentilles de focalisation.

L'énergie d'impulsion de la figure III.15 (a) est comparable à la puissance calculée sur la figure III.16 donné par la ligne noire (pour une lentille 15 mm). Un bon accord entre les résultats de la figure III.15 (a) et la puissance de lentille 15 mm de la figure III.16. Le rendement de laser est maximal d'ordre 11% pour une puissance de pompage 0.22 W pour une lentille de focalisation 15 mm (voir la figure III.15 (b)). D'après la figure III.16, le meilleur rendement est obtenu pour une lentille de focalisation 200 mm.

2.3 Profondeur de pénétration optique

Le paramètre qui entraîne l'ablation est le chauffage du matériau. Cela provient de pénétration des photons dans le matériau caractérisée par une profondeur L . La profondeur de pénétration optique dépend de l'indice optique du milieu et peut être estimée par la loi de Beer-Lambert :

$$L = \frac{v}{\alpha} \text{ (III.30)}$$

Avec :

α : Coefficient d'absorption,

v : Fréquence optique.

Cette grandeur peut être calculée pour différent type de matériau et dépend de l'absorption liée à la bande interdite de chaque matériau. L'absorption est donnée par l'équation suivante :

$$\alpha = \alpha_0 \left(\hbar \omega - E_g \right)^{1/2} \text{ (III.31)}$$

Tel que α_0 est constant d'absorption et E_g est l'énergie de gap du matériau. Nous avons comparé sur la figure suivante entre l'absorption des matériaux $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ et GaAs . On note que ces deux matériaux sont le plus utilisé pour le domaine de haute fréquence.

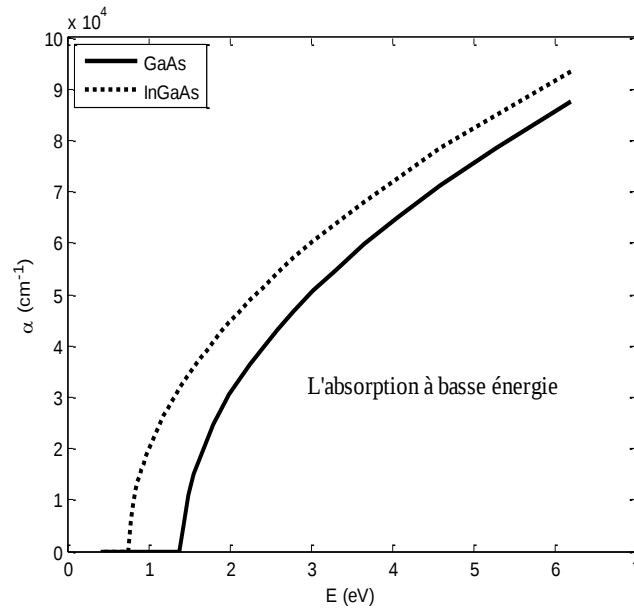


Figure III.17 : L'absorption optique d' $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ et GaAs.

Le semi-conducteur l' $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ présente une absorption élevée 10^5 cm^{-1} avec un seuil correspond à 0.75 eV où l'GaAs présente un seuil 1.42 eV et faible absorption $8 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$.

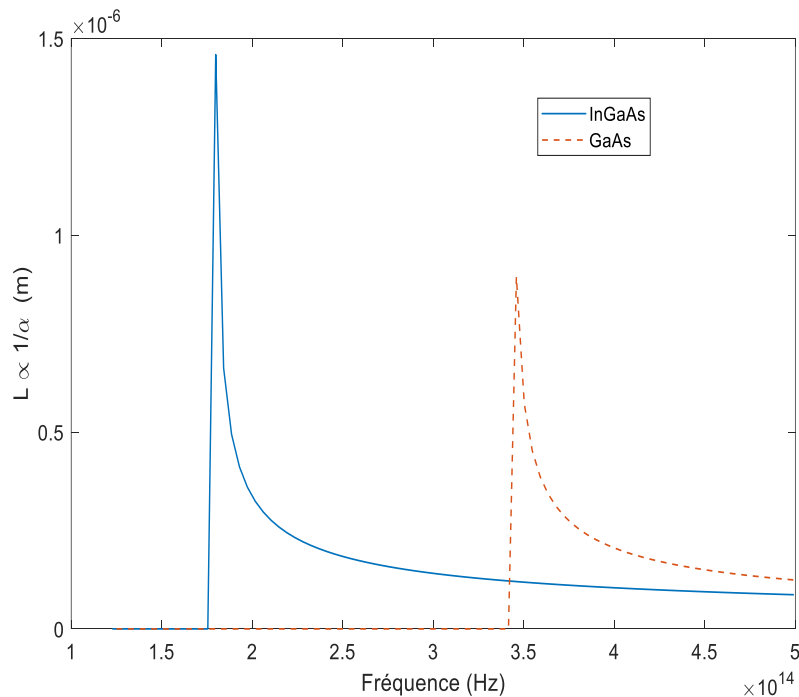


Figure III.18 : Profondeur d'absorption optique pour $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ et GaAs.

La profondeur de pénétration est inversement proportionnelle à l'absorption optique ce qui montre que les photons sont plus pénétrés dans l'GaAs que InGaAs dans les hautes fréquences. En particulier, les photons de haute fréquence peuvent pénétrer jusqu'à profondeur 1.4 μm dans le matériau InGaAs par contre la profondeur de pénétration est inférieur à 1 μm dans GaAs.

2.4 Facteur de qualité du faisceau

La position d'un faisceau sur l'axe de propagation permet de calculer le diamètre de ce faisceau [2] :

$$D(Z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{(Z-z_0)\lambda M}{\pi w_0^2} \right)^2} \quad (\text{III.32})$$

Avec w_0 : rayon du faisceau au point de focalisation

z_0 : Position sur l'axe de propagation du point de focalisation du faisceau

Z : position sur l'axe de propagation,

λ : Longueur d'onde du faisceau.

M : l'écart de divergence entre un faisceau quelconque et un faisceau unimodal

Pour notre simulation, on considère que $\square_0 = 0.2278 \text{ mm}$, $\square_0 = 26.69 \text{ nm}$ et $\square = 1.36$. Les résultats sont représentés sur la figure suivante :

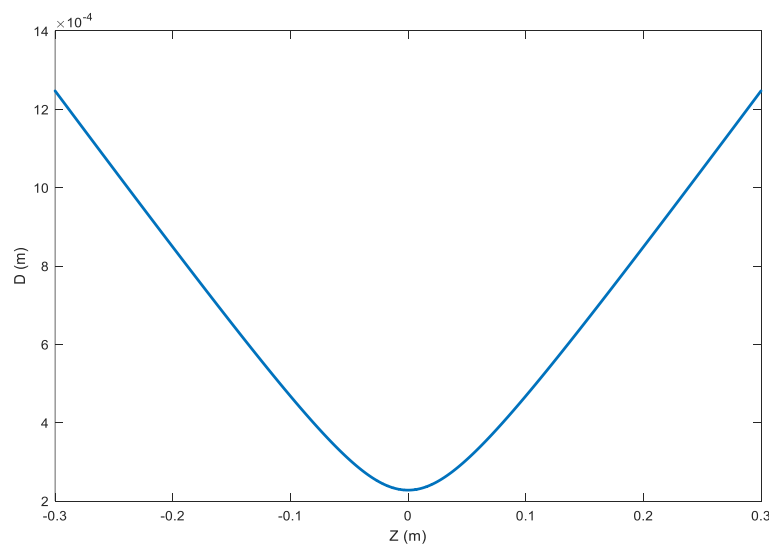


Figure III.19 : Diamètre de faisceau en fonction de position Z.

Lorsque la position de faisceau est plus loin sur l'axe de propagation, le diamètre D de faisceau augmente (voir figure III.19).

La figure III.20 présente la comparaison entre la caractérisation expérimentale et analytique du faisceau de pompe de laser à saphir. La caractérisation expérimentale est illustrée sur la référence [1].

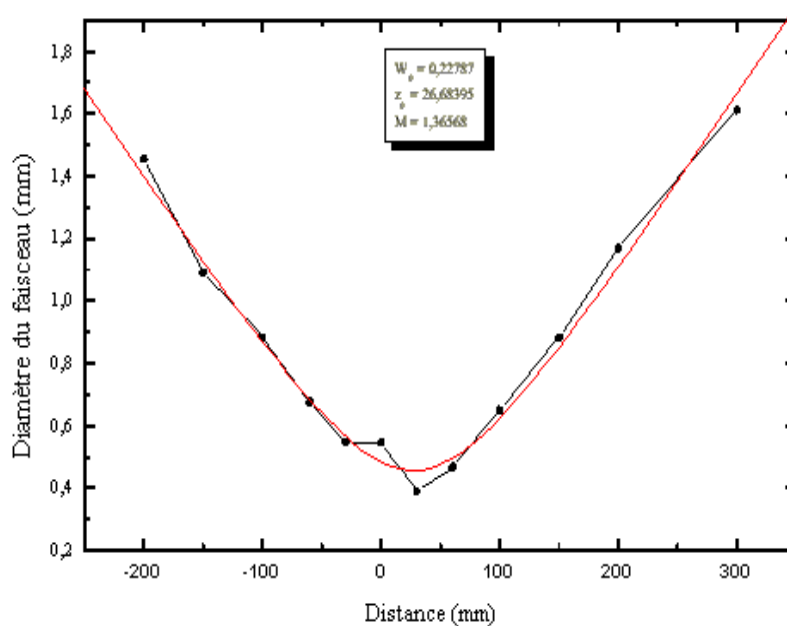


Figure III.20 : Mesure des paramètres du faisceau.

La figure III.20 présente un bon accord entre les mesures expérimentales et les résultats analytique illustrés sur la figure III.19.

5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les propriétés électriques de la cellule solaire. Le photo-courant se présente comme étant la somme des trois courants suivants : le photo-courant dû aux électrons, le photo-courant dû aux trous et celui de la région de déplétion. Ce courant nous permet de calculer la réponse spectrale qui est le rapport entre la densité du photo-courant collectée et la densité de puissance solaire émise, pour chaque longueur d'onde du rayonnement lumineux. Le circuit équivalent présente les différents courants circulant dans la cellule dans le but d'utiliser ce circuit pour prévoir les grandeurs de sortie de la cellule solaire.

La diode électroluminescence a signalée un rendement 100% pour une longueur d'onde 840 nm. Les résultats montrent qu'une puissance 20 mW émit par la diode électroluminescence lorsque le courant est de l'ordre 60 mA.

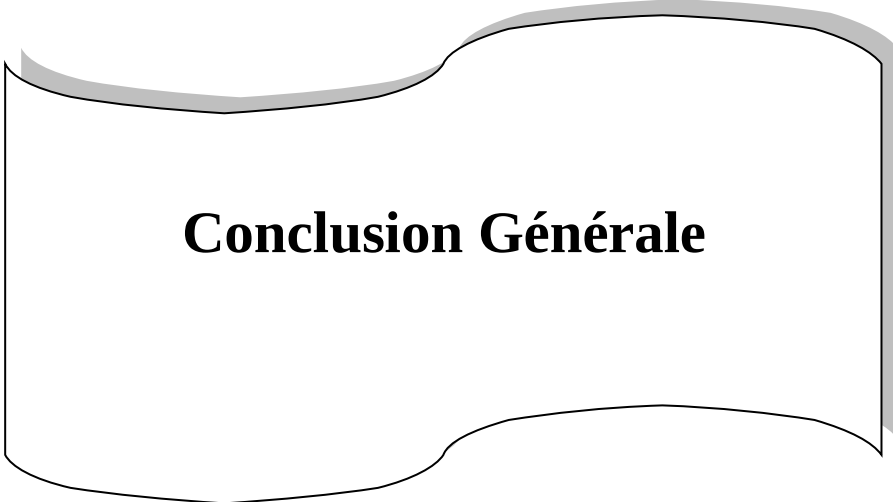
Le laser étudié dans ce chapitre présente une puissance élevée et un rendement de l'ordre 11% pour une lentille 15 mm. L'étude permet d'augmenter le rendement de laser jusqu'au 20% pour une lentille de focalisation 200 mm. Le choix du matériau dépend de profondeur de pénétration qui est reliée au coefficient d'absorption des photons. Pour cette raison, nous avons caractérisé le coefficient et la pénétration des photons dans l'GaAs et l'InGaAs car ces matériaux sont les plus utilisés dans le domaine de haute fréquence. La pénétration des photons est dans une profondeur 1.4 μm et 1 μm dans l'InGaAs et l'GaAs, respectivement. En plus, nous avons caractérisé le facteur de qualité de faisceau en particulier nous avons calculé le diamètre de faisceau pour différent position sur l'axe de propagation. Nous avons extrait que le diamètre est de l'ordre 1.2 mm pour une position 300 mm.

Références Bibliographiques

[1] Eric Tanguy. Développement d'un laser verre dopé erbium et ytterbium compact à sécurité oculaire pour des applications de télémétrie", université de Paris XI, Orsay, Soutenue le 24 septembre 1996.

[2] Arnaud, J.A. Beam and fiber optics. pp. 55-60. eBook ISBN: 9780323149242, January 1976.

[3] Madanif Fethia Samia, Caractérisation et contribution des diodes LED pour la transmission par fibreoptique dans un réseau local. Mémoire de magister, Université de l'USTO, 2011.



Conclusion Générale

Les semi-conducteurs présentent un intérêt croissant dans plusieurs domaines à cause de leurs applications vastes. En intéresse dans ce travail aux domaines photonique et optique où les applications des semi-conducteurs comme cellules solaires, les lasers et les diodes LED sont plus utilisés. Pour comprendre ces applications il est nécessaire de comprendre leurs principes de fonctionnement. Lors de la présence des photons dans les semi-conducteurs deux phénomènes apparaissent sont l'absorption d'énergie des photons et l'émission d'énergie correspond à la transition entre deux niveaux énergétiques. Ces deux phénomènes sont l'origine de fonctionnement des dispositifs présentés dans ce travail.

Pour réaliser l'étudier théorique de ces dispositifs, nous avons commencé par un résumé général sur les semi-conducteurs. En particulier, nous avons présenté quelques propriétés physiques, la technologie de fabrication et les semi-conducteurs intrinsèque et extrinsèque. Ces généralités sont présentées dans le premier chapitre et permettent de donner l'état de l'air de deuxième chapitre.

Dans le deuxième chapitre, nous avons expliqué les effets qui entre en joue dans le principe de fonctionnement des dispositifs considérés dans la thèse. En effet, les effets exposés sont l'effet photoélectrique, l'émission stimulée et l'émission spontanée. Nous avons détaillé comment ces effets prendre lieu dans le semi-conducteurs et les conséquences de ces effets. Cela permet de donner des notions de base sur le principe de fonctionnement des composants étudiés dans le dernier chapitre.

Dans le troisième chapitre, nous avons donné expliqué le principe de fonctionnement des cellules, les lasers et les diodes LED. Ainsi le chapitre expose l'intérêt de ces dispositifs pour la production dans le domaine optique. Par ce chapitre nous avons éclairé l'utilisation essentielle des semi-conducteurs où les applications interviennent les deux processus : l'absorption et l'émission.