

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

N° :



DOMAINE: SCIENCE ET
TECHNOLOGIE

FILIERE : ELECTRONIQUE

OPTION : MICRO-ELECTRONIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: DJERRAF Sabir

AIOUAZ Abdallah

Intitulé

**Etude et simulation d'une LED par le
logiciel SILVACO**

Soutenu devant le jury composé de:

Nom et prénom Enseignant	Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA	Président
TABBAKH Moustafa	Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA	Rapporteur
.....	Université	Examineur

Année universitaire : 2020 /2021

REMERCIEMENTS

ON REMERCIE DIEU ,LE TOUT PUISSANT, POUR NOUS AVOIR DONNÉ LE COURAGE, LA PATIENCE LA VOLONTÉ ET LA FORCE NÉCESSAIRE POUR AFFRONTER TOUTES LES DIFFICULTÉS ET LES OBSTACLES, QUI SE SONT HISSÉS AU TRAVERS DE NOTRE CHEMIN, DURANT TOUTES NOS ANNÉES D'ÉTUDES. NOUS TENONS À REMERCIE TRÈS VIVEMENT D.R TABAKHE POUR LEUR GRAND AIDE.. ON REMERCIE ÉGALEMENT LES MEMBRES DE JURY POUR L'HONNEUR QU'ILS NOUS FONT ENJUGANT CE TRAVAIL

DJERAF SABIR
ABDALLAH AIOUAZ

DÉDICACES

À NOUS CHERS PARENTS À

NOUS CHÈRES SŒURS ET

CHERS FRÈRES À NOUS

AMIÉS

Résumé :

Une diode électroluminescente, plus connue sous l'appellation Del ou Led (*light-emitting diode*), désigne un composant optoélectronique qui permet l'émission de lumière monochromatique. Cette mémoire de master à l'objectif de simulé une diode électroluminescente de couleur bleu a l'aide du programme SILVACO nous démontrons également comment les modèles de recombinaison radiative Atlas peuvent être utilisés pour analyser le spectre électro-lumineux d'une LED BLEUE. Aussi comment obtenir les caractéristiques de base des LED telles que la courbe I-V-L et le spectre EL.

Summary:

A light-emitting diode, better known under the name Led (light-emitting diode), designates an optoelectronic component which allows the emission of monochromatic light. This master's thesis with the objective of simulating a blue light emitting diode using the SILVACO program we also demonstrate how Atlas radiative recombination models can be used to analyze the electro-light spectrum of a BLUE LED. Also how to get basic LED characteristics like I-V-L curve and EL spectrum.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

SOMMAIRE	
LISTE DES FIGURES.....	
LISTE DES TABLEAUX.....	
LISTE DE SYMBOLES	
INTRODUCTION GENERALE	1

CHAPITRE I

Semi-conducteur et jonction p n

I.1. Introduction :.....	3
I-2-Notions de base sur les semi-conducteurs :.....	3
I-2-1-Définition d'un semi-conducteur	3
I-2-2 Bandes d'énergie :	4
I-2-3-Les semi-conducteurs intrinsèques :	5
I-2-4 Le semi-conducteur extrinsèque.....	7
I-3-Courant dans les semi-conducteurs :.....	9
I-3-1-Courant de conduction :	9
I-3-2-Courant de diffusion :	9
I-4-La jonction P-N :.....	10
I-4-1- Polarisation de la jonction en direct :.....	12
I-4-2- Polarisation de la jonction en inverse	13
I-5-Génération et recombinaison des porteurs :	13
I-6-Conclusion.....	14
I-7-References bibliographiques :	15

CHAPITRE II

Diode électroluminescente

II-1-Introduction :.....	18
--------------------------	----

II-2- Structure de base d'une Diode électroluminescente :	19
II-3-Principe de fonctionnement :	22
II-3-1- Rendement lumineux de la diode électroluminescente :	23
II-3-2- Structure et technique de fabrication des diodes électroluminescentes :.....	24
II-3-3- Différentes familles des diodes électroluminescentes :.....	26
II-4- Avantages et inconvénients des diodes électroluminescentes :	26
II-5- Différentes utilisations des diodes électroluminescentes :	27
II-6- Références bibliographiques :.....	28

CHAPITRE III

Simulation des caractéristiques électriques de la LED

III-1- Introduction	31
III-2- Présentation SILVACO :	31
III-3- Les étapes de réalisation sur SILVACO.....	32
III-4- Simulation d'une led blue avec SILVACO	32
III-5- simulation des caractéristiques électriques de la diode électroluminescente avec le logiciel SILVACO	33
III-5-1- Caractéristique courant-tension (I-V).....	33
III-5-2- Caractéristique puissance-courant (P-I):	34
III-5-3- Spectre de la lumière émise.....	35
III-5-3- Effet de la température sur la caractéristique I-V.....	36
III-5-3- Effet de la nature du semiconducteur sur la caractéristique I-V	37
III-6- Conclusion.....	38
CONCLUSION GENERALE :.....	39

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Semi-conducteur et jonction p n

Figure I.1 structure <i>électronique</i> du Métal, Isolant et de Semi-conducteur.....	4
Figure I.2 Diagramme des bandes d'énergies des semi-conducteurs	5
Figure I.3 Représentation schématique des liaisons électroniques pour le semi-conducteur intrinsèque (Si)	6
Figure I.4 Présentation schématique du silicium dopé n.....	7
Figure I.5 Présentation schématique du silicium dopé p.....	8
Figure I.6 La jonction PN	10
Figure I.7 Représentation d'une jonction PN à l'équilibre thermodynamique [8]	11
Figure I.8 Jonction polarisée dans un sens direct.	12
Figure I.9 Jonction polarisée dans un sens inverse [9] [11].....	13

Chapitre II : Diode électroluminescente

Figure II.1 (a) diode électroluminescente à jonction p-n polarisée dans le sens direct. (b) schéma électronique correspondant.	20
Figure II.2 bandes d'énergie de la jonction en polarisée en inverse, (0) Effet tunnel (1, 2, 3) effet d'avalanche [2]	21
Figure II.3 Jonction et diagramme énergétique de la diode électroluminescente[15].....	22
Figure II.4 Diode électroluminescente orange.	24
Figure II.5 Encapsulation d'une LED.....	25

Chapitre III : Simulation des caractéristiques électriques de la

LED

Figure III.1 Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par TCADSILVACO.	31
Figure III.2 diode électroluminescente à GaN sur substrat SiC.....	32
Figure III.3 Structure d'une LED.	33
Figure III.4 La caractéristique courant-tension (I-V) avec SILVACO.	34
Figure III.5 La caractéristique puissance-courant (P-I) avec SILVACO.	34
Figure III.6 Spectre d'émission de diode électroluminescente bleue, verte et jaune à simplepuits quantique de InGaN.	35
Figure III.7 Le spectre électroluminescent de la LED bleue en utilisant SILVACO.	36

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II : Diode électroluminescente

<i>Tableau II.1</i> Diodes électroluminescentes à différents couleurs.	25
---	----

LISTE DE SYMBOLES

Si	silicium
Ge	Germanium
S-C	Semi-conducteur
Eg	Longueur de bande interdite
Ec	Niveau de la bande de conduction
Ev	Niveau de la bande de valence
σ :	Conductivité du matériau
k	Vecteur d'onde
Nc	Densité d'états des électrons de la bande de conduction
Nv	Densité d'états des électrons de la bande de valence ni: Concentration intrinsèque des porteurs
EF	Niveau de Fermi
T(°K)	Température en kelvin
Nd	Concentration des atomes donneurs
Na	Concentration des atomes accepteurs
Ti	Température intrinsèque
n	Concentration en électrons libres
p	Concentration en trous libres
B-V	Bande de valence
B-C	Bande de conduction
BI	Bande interdite
Z.C.E	Zone de charge d'espace
Is	Courant de saturation
J	Densité de courant
E	Champ électrique ρ : Résistivité du matériau
Dp	Courant de diffusion des trous
Dn	Courant de diffusion des électrons
λ	Longueur d'onde Un : Taux de recombinaison des électrons
Up	Taux de recombinaison des trous
E	Energie.
μ_n, μ_p	Mobilité des électrons et des trous respectivement.
Dn ,Dp	Constante de diffusion des électrons et des trous respectivement.

L_n, L_p	Longueur de diffusion effective des électrons et des trous respectivement.
U_n, U_p	Taux de recombinaison des électrons et des trous respectivement.
n_i	Concentration intrinsèque.
$\epsilon_0, \epsilon_r, \epsilon$	Permittivité du vide, permittivité relative et permittivité totale respectivement
C	La vitesse de la lumière dans le vide
K	Le vecteur d'onde
q	La charge de l'électron
ϕ	Le Flux lumineux
$U_t = kT/q$	Potentiel thermodynamique.
V	Tension de diffusion de la jonction
N_a	Densité des dopants accepteurs ionisés dans un matériau
N_d	Densité des dopants donneurs ionisés dans un matériau
N_c	Densité d'état au bord de la bande de conduction.
N_v	Densité d'état au bord de la bande de valance.
C_j	Capacité de jonction.
T_p	Temps de transit des trous à travers la zone intrinsèque
J_T	La densité totale de courant dans la diode Tension de diffusion de la jonction PI
η	rendement global
L_n	la longueur de diffusion des electron

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La première émission de lumière par un semi-conducteur date de 1907 et fut découverte par H. J. Round. Quelques années après, en 1927, O. V. Losev dépose le premier brevet de ce qui sera appelé, bien plus tard, une diode électroluminescente (LED). Ce n'est qu'en 1962 que la première LED rouge est créée par Nick Holonyak Jr et S. Bevacqua. Durant quelques années, les chercheurs ont cru devoir se limiter à quelques couleurs telles que le rouge, le jaune ou le vert. Dans les années 1990, les recherches, entre autres, de Shuji Nakamura (en) et Takashi Mukai de Nichia, dans la technologie des semi-conducteurs InGaN permettent la création de LED bleue, et par conséquent de LED blanches, par l'utilisation couplée de LED bleue et jaune. Cette importante avancée fut le point de départ de nouvelles applications majeures : éclairage, écrans de téléviseurs et d'ordinateurs [1]. Aujourd'hui, La diode électroluminescente est un dispositif électronique qui se retrouve dans de nombreuses applications au quotidien [2]. Dans le cas général, une LED doit être connectée à une source de tension par l'intermédiaire d'une résistance de limitation de courant.

L'objectif principale de ce travail est de crée une model d'une diode bleu et puis simulé ce model a l'aide du programme SILVACO cette étude se présente de la façon suivante :

Le premier chapitre constitue un rappel général sur les semi-conducteurs.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les fondamentaux du diode électroluminescente (LED) et ces propriétés .

Dans le dernier chapitre nous présentons notre model crée dans SILVACO avec la visualisation de la structure d'une diode LED BLEU, d'extraire les caractéristique électriques (I-V, P-I) de la LED ainsi que d'autre caractéristiques comme la longueur d'onde émise. Nous terminerons notre mémoire par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Semi-conducteur et jonction p n

I.1. Introduction :

La technologie de l'information et de communication est en évolution rapide grâce à l'industrie des semi-conducteurs. Ces derniers désignent les matériaux capables de relayer du courant électrique en ayant des propriétés physiques mi-chemin entre le métal et l'isolant.

Ce sont des éléments essentiels de l'électronique et de l'informatique modernes puisqu'ils permettent de contrôler à la fois la direction du courant et son intensité.

La famille des semi-conducteurs est très vaste puisqu'elle va des éléments de la colonne du tableau périodique IV (Si et Ge) aux composés de plusieurs colonnes tels que : binaires, ternaires et quaternaires. L'objet de ce chapitre est une présentation aussi simple que des concepts de base permettant de comprendre les propriétés électriques et structurales des semi-conducteurs.

I-2-Notions de base sur les semi-conducteurs :

I-2-1-Définition d'un semi-conducteur

Un semi-conducteur est un matériau qui est parfaitement isolant à 0 K, mais devient progressivement conducteur lorsque la température augmente ou par apport d'énergie sous une forme quelconque (lumière ou tout rayonnement électromagnétique, chauffage, etc.). Il reste cependant proche de l'isolant à température ambiante. S'il est pur on dit que le semiconducteur est intrinsèque qui est un élément chimique de valence 4. Si non on dit qu'il est extrinsèque (contient des impuretés). Exemples de semi-conducteurs purs : silicium (Si, 14), germanium (Ge, 32). Les semi-conducteurs sont spécifiés par rapport aux métaux par :

a-La conductivité : Dans un métal la conduction est assurée par un seul type de porteurs qui sont les électrons. Par contre, dans les S-C la conduction est assurée par deux types de porteurs les électrons et les trous. La conductivité croît rapidement avec la température dans les S-C. L'expression de la conductivité est la suivante :

$$\sigma(T) = q(n\mu_n(T) + p\mu_p) \quad (1)$$

Leurs bandes d'énergies se présente dans la figure suivante :

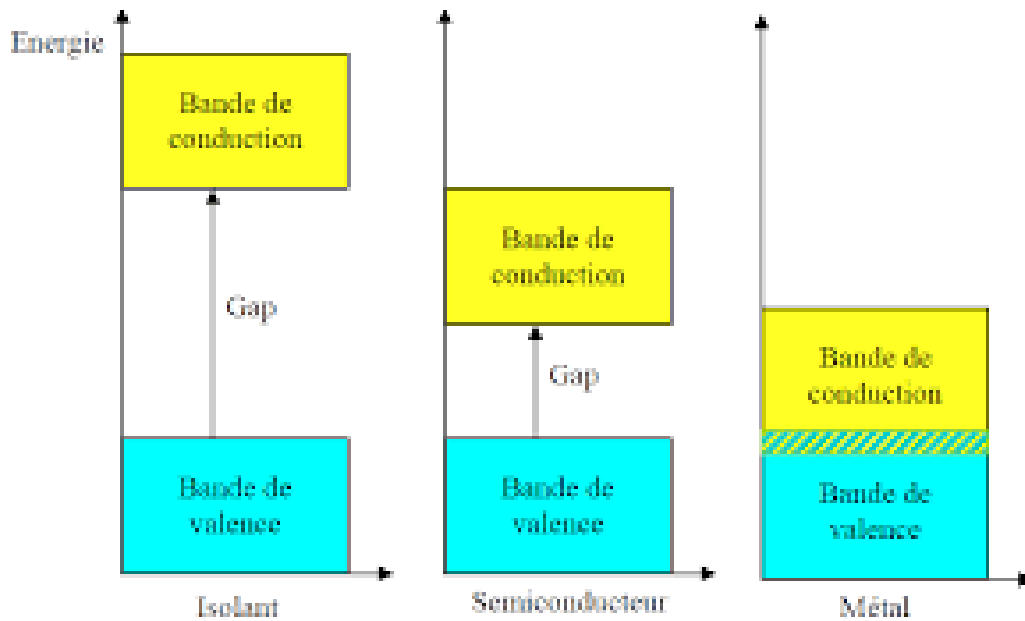


Figure I.1 structure électronique du Métal, Isolant et de Semi-conducteur.

Cette figure représente schématiquement la structure électronique pour les trois grandes familles de solides à savoir : les métaux, les isolants et semi-conducteurs.

b-photoconduction : Un semi-conducteur éclairé voit sa résistivité diminuer. Cette propriété est absente chez les conducteurs et les isolants.

c- Redressement : Un semi-conducteur n'autorise le passage du courant que dans un seul sens, cette propriété est utilisée pour le redressement du courant. Les semi conducteurs peuvent être classés en trois types :

- Les éléments simples tels que le (carbone, germanium, silicium,...).
- Des composés minéraux binaires (InSb, GaAs, CdTe, GaP,...).
- Des composés organiques très nombreux tels que les polymères organique (constituer d'atomes de carbone sur les quels sont fixés les éléments comme l'oxygène et l'hydrogène).

I-2-2 Bandes d'énergie :

Bien que les électrons d'un atome isolé aient des niveaux d'énergie permis bien définis, le comportement de ces électrons dans un réseau cristallin périodique est différent. Si la distance entre les atomes est suffisamment petite, comme dans le cas du réseau cristallin du silicium, la présence des atomes voisins génère une sorte d'interférence entre les niveaux permis de chaque atome, cela entraîne une multitude quasi continue d'états autour de chaque niveau permis de l'atome individuel. Cet ensemble d'états, très proches entre eux, est plutôt considéré alors comme une bande d'énergie permise, avec une densité d'états associée. Les niveaux d'énergie des électrons de valence et le niveau d'énergie d'ionisation génèrent ainsi deux bandes d'énergies permises particulièrement intéressantes, la bande de valence et la bande de conduction, séparées par une bande dépourvue de

niveaux permis, nommée bande interdite (Figure I.2). La particularité de ces bandes permises tient au fait que électrons peuvent circuler librement dans toute la maille cristalline et ainsi générer des courants de conduction électrique (s'agissant d'électrons partagés par les atomes du réseau cristallin).

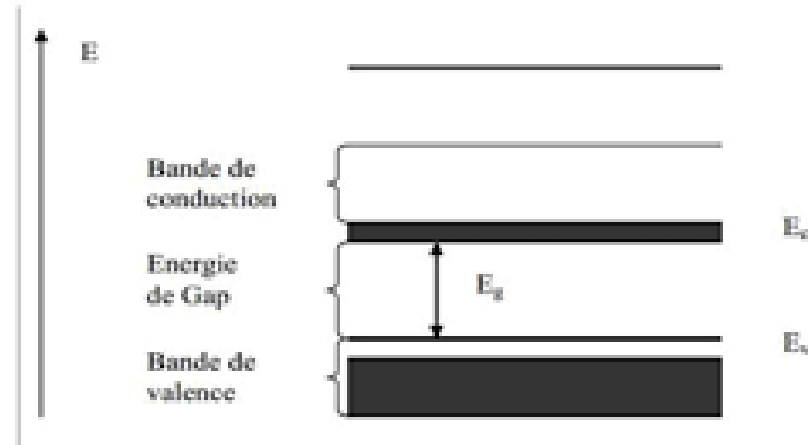


Figure I.2 Diagramme des bandes d'énergies des semi-conducteurs

A des températures très basses, la bande de conduction se trouve vide d'électrons et la bande de valence est complètement occupée, car l'énergie thermique n'est pas suffisamment importante pour ioniser les atomes du réseau cristallin. A des températures normales un bon nombre des atomes ionisés ont déjà cédé leurs électrons à la bande de conduction, dans laquelle ils participent à la conduction électrique avec une charge négative.

La valeur E_g de la bande interdite donne des caractéristiques électriques importantes à chaque semi-conducteur. Ces variations peuvent être décrites approximativement par la fonction universelle suivante [8]

$$E_g(t) = E_g(0) - \frac{aT^2}{(T+b)} \quad (2)$$

Au voisinage de chacune des limites E_c et E_v respectivement de la bande de conduction et de la bande de valence, la densité d'états permis $N(E)$ peut être estimée avec l'approximation parabolique suivante [5] :

$$\begin{aligned} N_c &= K_c(E - E_c)^{1/2} \\ N_v(E) &= K_v(E_v - E)^{1/2} \end{aligned} \quad (3)$$

K_c et K_v étant des constantes pratiquement indépendantes de la température

I-2-3-Les semi-conducteurs intrinsèques :

Des semi-conducteurs absolument purs, c'est-à-dire sans aucune impureté à l'intérieur du réseau cristallin, s'appellent intrinsèques. La caractéristique fondamentale d'un semi-conducteur pur est l'égalité absolue du nombre d'électrons libres et de trous libres à n'importe quelle température.

Ces porteurs de charge sont générés thermiquement ou optiquement (absorption d'un photon - procédé fondamental d'une cellule photovoltaïque).

Les concentrations (nombre par le volume unitaire) n des électrons libres et p des trous libres sont égaux et sont appelées la densité intrinsèque des porteurs.

$$n = n_i = p \quad (4)$$

On peut montrer que : $n_i = AT^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2KT}\right)$ avec

T : La Température

E_g : Bandgap

K : Constante de Boltzmann

A : constante

Comme on peut le voir dans l'expression ci-dessus, n_i est fortement lié à la température. En conséquence, la résistivité d'un semi-conducteur intrinsèque diminue rapidement avec l'augmentation de la température due à l'augmentation forte du nombre de paires électron-trou. À la température ambiante (300 K), la densité intrinsèque des porteurs du silicium est $n_i = 1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. On peut la considérer comme très petite comparée au nombre d'atomes dans un cristal de silicium (égal à $5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$).

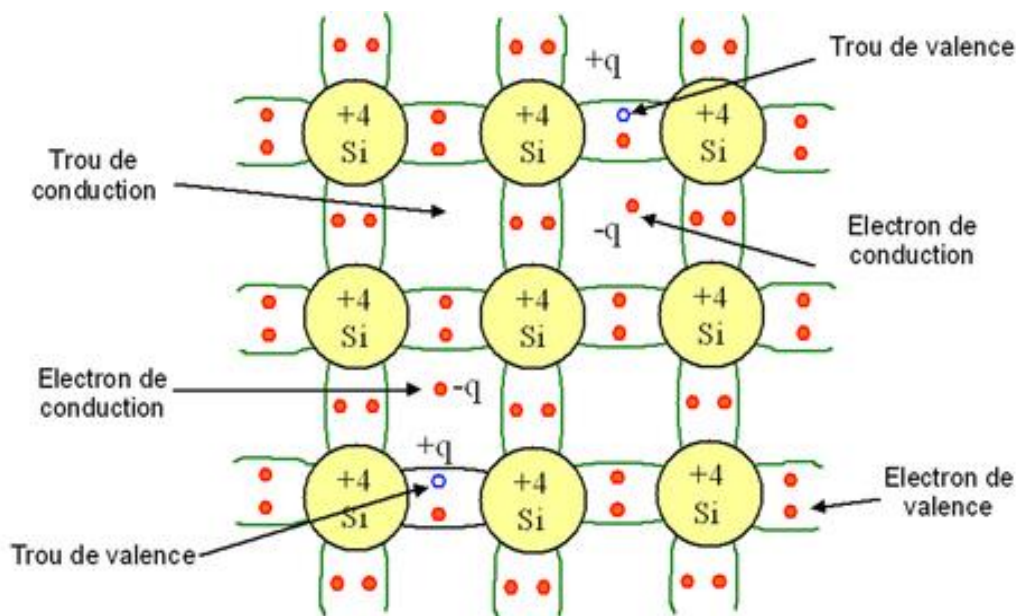


Figure I.3 Représentation schématique des liaisons électroniques pour le semi-conducteur intrinsèque (Si)

I-2-4 Le semi-conducteur extrinsèque

Un semi-conducteur extrinsèque ou semi-conducteur dopé est obtenu en introduisant des impuretés bien définies (d'une façon bien contrôlée) dans un semi-conducteur intrinsèque. Le but de ce procédé est de modifier la caractéristique électrique du semi-conducteur et c'est l'étape la plus fondamentale dans la création des dispositifs électroniques

I-2-4-1 Dopage de type n :

Supposons que nous dopions le cristal de silicium en utilisant un élément de la 5^{ème} colonne de la table périodique (par exemple, phosphore (P) ou arsenic (As)). Les atomes d'impureté se placent dans la maille cristalline en substitution d'atomes d'origine comme montré en Fig. 4:

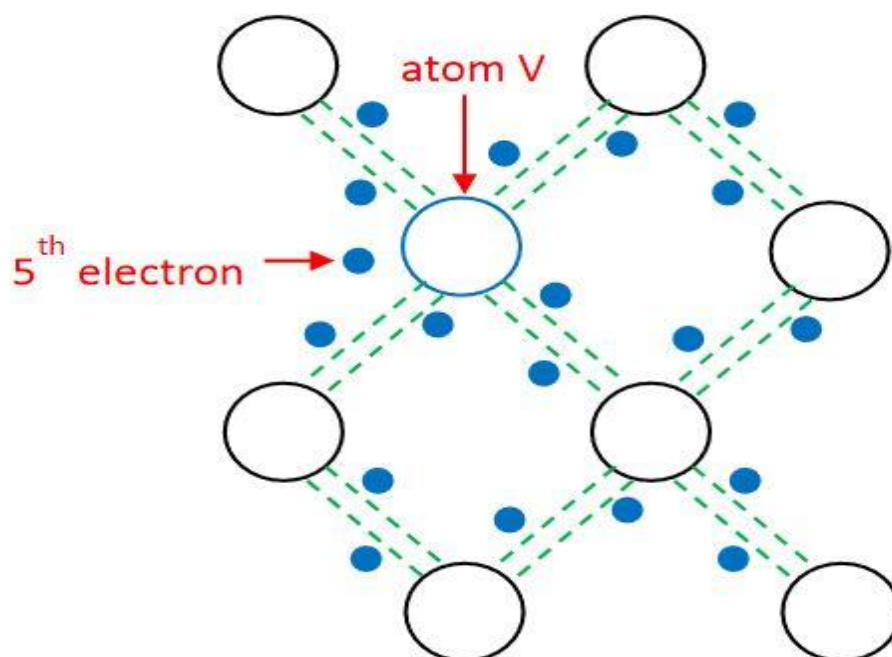


Figure I.4 Présentation schématique du silicium dopé n

Un élément de la cinquième colonne est pentavalent par nature, signifiant qu'il a cinq électrons dans sa couche externe. Quatre d'entre eux sont employés pour assurer les liaisons covalentes avec les quatre autres atomes de silicium voisins. Le 5^{ème} électron ne participe pas à la cohésion du cristal, il est seulement très faiblement lié à son atome d'origine et un très faible apport d'énergie (en grande partie thermique) suffit à le rendre libre, signifiant qu'il peut alors contribuer à la conduction de charge.

Une fois cet électron affranchi, l'atome d'impureté que l'on qualifie de donneur devient un ion fixe de charge positive.

Dans une grande plage de températures (de 150 K à 600 K), le nombre d'électrons libres est beaucoup plus grand que le nombre de trous libres. Pour cette raison, ces électrons libres s'appellent

des porteurs majoritaires et les trous les porteurs minoritaires. Le semiconducteur ainsi dopé est qualifié « type n ».

I-2-4-2 Dopage de type P :

Considérons maintenant le dopage du silicium à l'aide d'un atome de la 3ème colonne de la table périodique (par exemple le bore (B)). Ici de nouveau, les atomes de dopage se placent dans la maille cristalline en substitution d'atomes d'origine, comme illustré sur la Fig.5 :

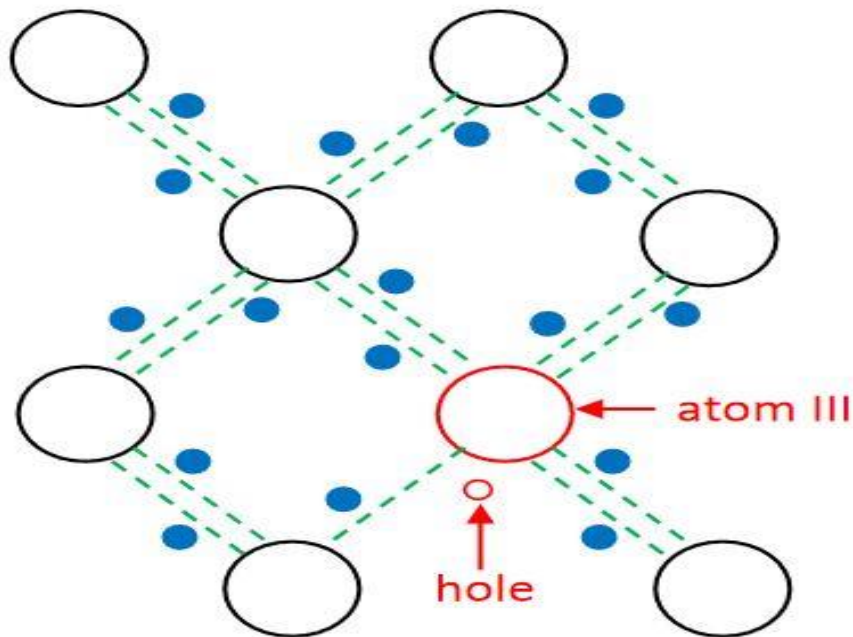


Figure I.5 Présentation schématique du silicium dopé p

Avec trois électrons périphériques sur sa couche externe, l'élément de la 3ème colonne de la table périodique (trivalent) peut seulement satisfaire trois liaisons covalentes avec ses quatre atomes voisins. La 4ème liaison n'est pas complète, il existe une lacune. Un très faible apport d'énergie permet à un électron de valence de venir combler cette lacune qui de ce fait se déplace. Un trou susceptible de participer à la conduction électrique vient d'être créé, et l'atome d'impureté qualifié d'accepteur devient un ion négatif fixé. Comme avec du matériau de type N, mais d'une façon opposée, ici le nombre de trous libres est beaucoup plus grand que le nombre d'électrons libres dans une grande plage de température. Pour cette raison, ces trous s'appellent des porteurs majoritaires et les électrons s'appellent les porteurs minoritaires. Le semi-conducteur ainsi dopé est qualifié « type p ».

I-3-Courant dans les semi-conducteurs :

Les courants dans le semi-conducteur résultent du déplacement des porteurs de charge, électrons et trous, sous l'action de différentes forces, l'origine de ces forces étant un champ électrique (courant de conduction) ou un gradient de concentration (courant de diffusion)

I-3-1-Courant de conduction :

L'application d'un champ électrique au semi-conducteur induit la conduction des deux types de porteurs, simultanément. Les électrons se déplacent au niveau de la bande de conduction, les trous (et donc les électrons liés) au niveau de la bande de valence la densité de courant totale est donc la somme des deux densités de courant. [3].

$$\begin{aligned} j_n &= e \cdot \mu_n \cdot n \cdot E \\ j_p &= e \cdot \mu_p \cdot p \cdot E \end{aligned} \quad (5)$$

Ces relations sont valables pour des champs électriques suffisamment faibles pour que la vitesse des porteurs reste proportionnelle au champ. La densité du courant dans le semi-conducteur dans lequel on a créé un champ électrique est donc donné par la contribution des électrons et des trous :

$$j_c = j_n + j_p = e(\mu_n \cdot n + \mu_p \cdot p)E = (\sigma_n + \sigma_p)E = \sigma E \quad (6)$$

μ_n, μ_p Sont respectivement la mobilité des électrons et des trous.

$\sigma_{n,p}$ La conductivité du matériau pour les électrons et les trous.

I-3-2-Courant de diffusion :

Lorsque les porteurs libres ne sont pas distribués uniformément dans le semi-conducteur ils sont soumis sous un processus général de diffusion. Leur mouvement s'effectue dans un sens qui tend à uniformiser leur distribution spatiale. Considérons un semi-conducteur dopé dont la concentration en trous varie suivant un axe x. La densité de courant de diffusion en un point d'abscisse x est :

$$j_{dp} = -eD_p \frac{dp}{dx} \quad (7)$$

Les porteurs en excès tendent à se donner une concentration uniforme. Il en est de même dans le cas des électrons de concentration n et on a :

$$j_{dn} = -eD_n \frac{dn}{dx} \quad (8)$$

Avec D_n et D_p les coefficients de diffusion (toujours positifs) pour les électrons et les trous exprimés en $\frac{cm^2}{s}$ Dans le cas d'un semi-conducteur non dégénéré, on peut exprimer ces coefficients en fonction de la mobilité des porteurs. Ces relations sont connues sous le nom de relations d'Einstein :

$$D_{np} = \mu_{np} \frac{kt}{e} \quad (9)$$

Le courant de diffusion total s'écrit comme la somme de ces deux composantes :

$$j_n = e \cdot \mu_n \cdot n \cdot E + e D_n n \frac{dn}{dx} \quad (10)$$

$$j_p = e \cdot \mu_p \cdot p \cdot E + e D_p p \frac{dp}{dx}$$

Ces équations restent valables tant que le matériau semi-conducteur reste homogène, et la température constante à travers la structure. Elles sont modifiées quand le dopage, le gap ou la température variant [8]:

$$J = j_n + j_p \quad (11)$$

I-4-La jonction P-N :

La jonction PN constitue l'élément de base de toute l'électronique, et constitue le module élémentaire dont dépend le fonctionnement d'un grand nombre de dispositifs à semiconducteurs. Les résultats obtenus trouveront leurs applications dans de nombreux composants plus complexes. Une jonction PN est constituée de deux zones respectivement dopées P et N et juxtaposées d'une façon que nous supposerons abrupte (figure I.5), c'est-à-dire que la transition de la zone P à la zone N se fait brusquement. Lorsque l'on assemble les deux régions, la différence de concentration entre les porteurs des régions P et N va provoquer la circulation d'un courant de diffusion tendant à égaliser la concentration en porteurs d'une région à l'autre. Les trous de la région P vont diffuser vers la région N laissant derrière eux des atomes ionisés, qui constituent autant de charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P laissant derrière eux des charges positives. Il apparaît aussi au niveau de la jonction une zone contenant des charges fixes positives et négatives. Ces charges créent un champ électrique E qui s'oppose à la diffusion des porteurs de façon à ce qu'un équilibre électrique s'établisse

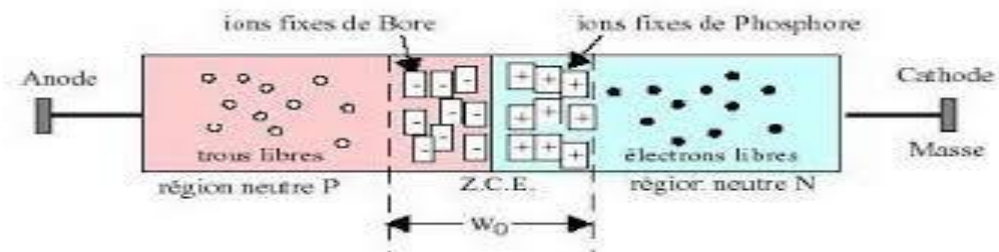


Figure I.6 La jonction PN

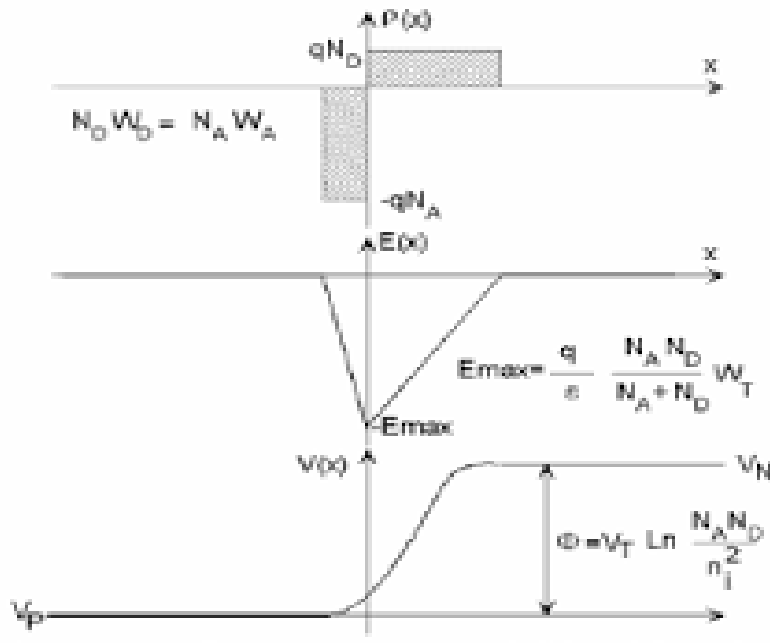


Figure I.7 Représentation d'une jonction PN à l'équilibre thermodynamique [8]

Dans ces conditions les répartitions des charges, du champ électrique et du potentiel sont représentées sur la figure (I.5). La région dépeuplée de porteurs mobiles est appelée zone de charge d'espace (ZCE). Elle a une épaisseur de l'ordre de 0,5 μm . La forme générale de la densité de charges dépend essentiellement du profil de dopage de la jonction. Dans le cas idéal représenté à la figure (I.6) on peut déduire aisément la forme du champ électrique $E(x)$ ainsi que du potentiel $V(x)$ par application des équations de l'électrostatique. 23 En effet le potentiel $V(x)$ et le champ électrique $E(x)$ s'expriment en fonction de la densité de charges $\rho(x)$ par :

La loi de Gauss s'exprime par la relation suivante :

$$\frac{dE(x)}{dx} = \frac{1}{\epsilon} f(x) \tag{12}$$

L'expression du champ électrique s'écrira :

$$E(x) = - \frac{dv(x)}{dx} \tag{13}$$

De plus la neutralité électrique globale du barreau impose la relation : $N_a W_a = N_d W_d$ On peut remarquer que conformément à la relation de Boltzmann il existe une barrière de potentiel qui constitue le potentiel de diffusion de la jonction.

La largeur de la zone de transition est donnée par :

$$W_0 = \sqrt{2 \frac{\epsilon_0 \epsilon_{si}}{q} \left(\frac{1}{N_d} + \frac{1}{N_a} \right) V_\phi} \tag{14}$$

$$V_{\phi} = U_T \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \text{ ou } U_T = \frac{Kt}{q} \quad (15)$$

I-4-1- Polarisation de la jonction en direct :

Si on polarise la jonction sous une tension V_{direct} , elle réduit la hauteur de barrière qui devient $(V_{\phi} - V_{direct})$ entraînant une diminution de l'épaisseur de la Z.C.E (dans l'équation (W_0) , V_{ϕ} est remplacé par : $V_{\phi} - V_{direct}$).

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 recombinés (figure (I.7)). 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 :

$$I_0 \exp \left(-\frac{V_{\phi} - V_{direct}}{U_T} \right) \quad (16)$$

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 :

$$I_A = I_S \left[\exp \left(\frac{V_{direct}}{U_T} \right) - 1 \right] \quad (17)$$

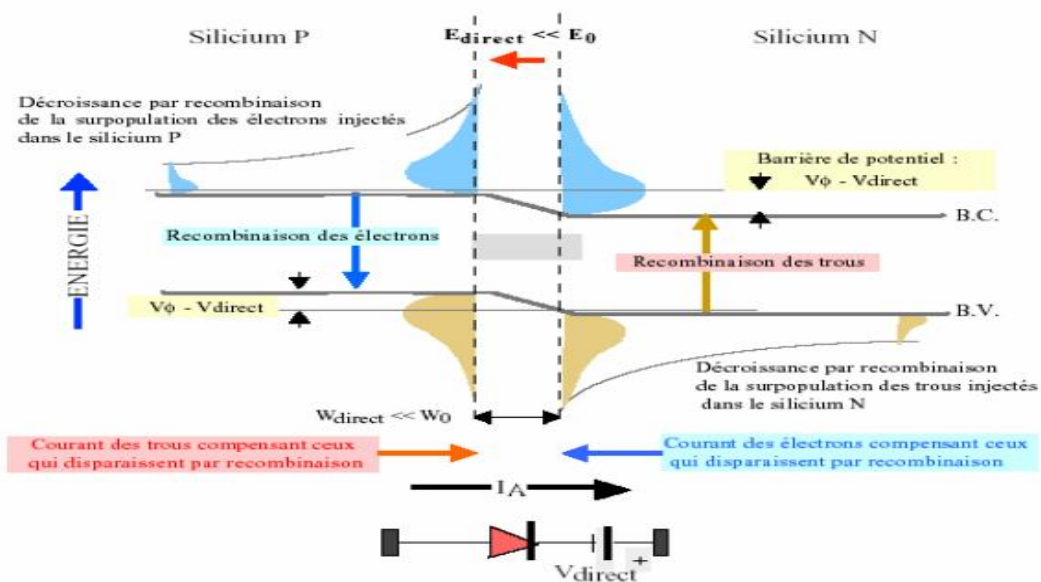


Figure I.8 Jonction polarisée dans un sens direct.

I-4-2- Polarisation de la jonction en inverse

Si on polarise la jonction en sens inverse la hauteur de barrière de potentiel entre les régions P et N est renforcée par la tension extérieure appliquée et devient : $V_{\phi} + V_{inv}$ et le champ électrique dans la zone de charge d'espace augmente.

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. La figure (I.8) nous montre l'origine du courant inverse de saturation I_S de cette jonction.

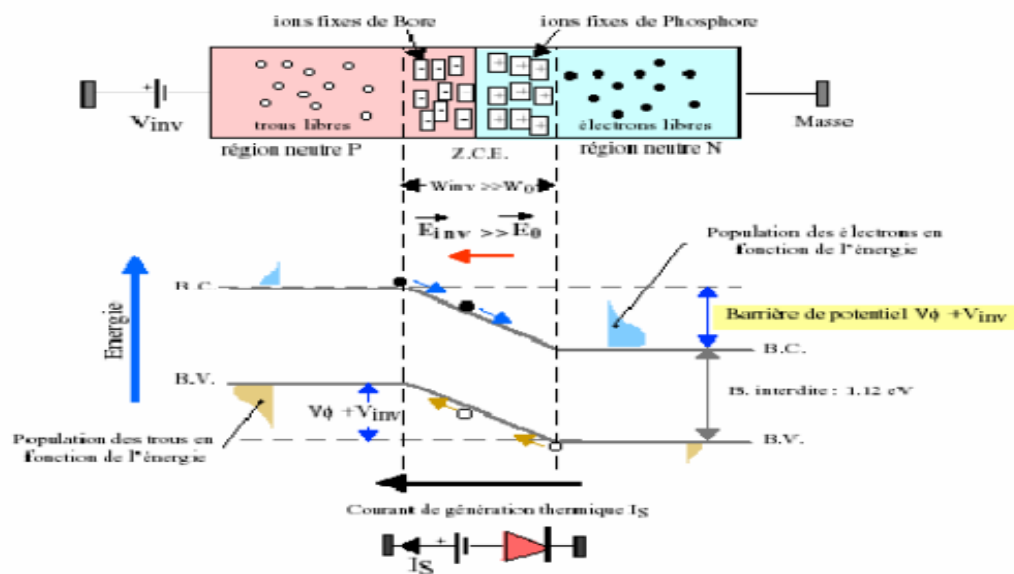


Figure I.9 Jonction polarisée dans un sens inverse [9] [11]

I-5-Génération et recombinaison des porteurs :

Si on considère un semi-conducteur à l'équilibre thermique, il se produit en permanence un processus de génération de paires électrons-trous par agitation thermique. Cependant il existe aussi le processus inverse, un électron se recombine avec un trou, c'est la recombinaison.

Dans un semi-conducteur à l'équilibre les deux processus s'équilibrent de façon à ce que la concentration en porteurs libres reste constante. 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 :

$$\lambda E_g = h \cdot c \quad (18)$$

Soit :

$$(\lambda m) E_g = \frac{1}{E_g(\text{ev})} \quad (19)$$

En sens inverse, un photon qui possède une énergie supérieure ou égale à E_g a le pouvoir de générer un paire électron trou. Quand le semi-conducteur absorbe une énergie suffisante $h\nu \geq E_g$ il engendre une paire électron-trou. En général, hors équilibre et en régime transitoire, les taux nets de recombinaison des électrons et des trous respectivement sont donnés par :

$$U_n = D_n + \Delta_n \quad (20)$$

$$U_p = D_p + \Delta_p$$

Avec :

$$U_n = \frac{n' - n}{\tau_p} \quad (21)$$

$$n' = \frac{\vartheta_n}{\vartheta_p}$$

Par définition, la recombinaison est le retour de l'électron de l'état excité à l'état initial ou de la bande de conduction vers la bande de valence, car il ne peut rester dans un état excité que pour un temps faible ($t < 10^{-8}$ s) Ce retour de l'électron de l'état excité vers l'état stable peut avoir lieu selon plusieurs façons

I-6-Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné les notions fondamentales des semi-conducteurs et la jonction PN ainsi que les différents types de recombinaison

I-7-References bibliographiques :

- [1] Henry Mathieu et Hervé Fanet, Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques (6^{ème} édition).
- [2] Cours : Professeur Olivier Bonnaud, Physique des Solides, des Semi-conducteurs et Dispositifs, Université de Rennes 1, Juin 2003.
- [3] Francis lévy, Traité des matériaux, Physique et technologie des semi-conducteurs, V18, 1995.
- [4] N.BENAHMED-BENABDALLAH, Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si Mono cristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe, thèse de Magister, université ABOU BEKR BELKAID-TLEMEN, 2006.
- [5] A.ABDELALI, Rôle du rayonnement dans l'élaboration et l'étude de nano agrégats semi conducteurs de ZnS, thèse de magister, université MENTOURI CONSTANTINE
- [6] K.DJERIOUAT, Optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à hétérojonctions GaInP/GaAs, Université Abou-Bakr Belkaïd-Tlemcen
- [7] F.BOUROUBA, Modélisation et simulation des contacts métal-semi-conducteur à Barrière inhomogène, par Faculté des Sciences, département de Physique (Sétif).
- [8] Journal of Electron Devices, Vol. 5, 2007, pp. 122-126, Etude de la jonction PN d'un semi-conducteur.
- [9] I. Sari-Ali, B. Benyoucef, B. Chikh-Bled, Etude de la jonction PN d'un semiconducteur à l'équilibre thermodynamique, Université Abou-Bakr Belkaïd, Tlemcen, Journal of Electron Devices, Vol. 5, 2007, pp. 122-126
- [10] S.M. Sze and KWOK. Ng, Physics of semiconductor devices, third edition, Wiley Interscience, 2007.
- [11] <http://membres.lycos.fr/procession/electronique/smcd06.pdf>
- [12] <http://www.unine.ch/phys/Enseignement/Cours20032004/PhysSemi/Cours/Sem/node2.html>
- [13] Propriétés <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/Si/Masses>
- [14] S.F.LIOTTA and A.MAJORANA.ITALY. "High field mobility and Diffusivity of an Electron Gas in Silicon devices".
- [15] EffectiveMasses" www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/Ge/Bandstr.htm#Masses
- [16] S. Wolf.R. Tauber. "Silicon Processing for the VLSI Era (Lattice Press. Sunset Beach, California, 1986)"
- [17] N. Chennafi, "Contribution à l'étude physique et à l'optimisation des phototransistors bipolaires à hétérojonction à l'aide d'outils de Simulation numérique : Application au

- développement d'un schéma équivalent grand signal du phototransistor”, Thèse de doctorat, CNAM-Paris, 5 juillet 1999.
- [18] C. Rumelhard, “A Model of Heterojunction Phototransistor to Design Optomicrowave Amplifiers and Mixers”, in European Microwave Week Conferences, Optical Technologies for Microwave System’s Workshop, Munich, Germany, October 1999.
- [19] J. D. Cressler, “SIGE HBT TECHNOLOGY: A NEW CONTENDER FOR SiBASED RF AND MICROWAVE CIRCUIT APPLICATIONS”, in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 46, N°5, pp. 572-589, May 1998.
- [20] D. Paul, “The Physics, Material and Devices of Silicon Germanium Technology”, in Physics World, Vol.13, N°2, pp. 27-32, February 2000.
- [21] Silicon Quantum Integrated Circuits Project, web page : www.sp.phy.cam.ac.uk/
- [22] R. Braunstein, A. R. Moore and Frank Herman, “Intrinsic Optical Absorption in Germanium-Silicon Alloys”, in Physical Review, Vol. 109, N°3, pp. 695-710, February 1958.
- [23] “Properties of strained and relaxed Silicon-Germanium”, Edited by E. Kasper, IEE Inspec, emis datareviews series N°12, 1995.
- [24] J. P. Bismukes, L. Ekstrom and R. J. Paff, “Lattice Parameter and Density in

CHAPITRE II
Diode électroluminescente

II-1-Introduction :

Les Diodes Emettrices de Lumière (LED) sont essentiellement des jonctions p-n à semi-conducteurs, qui, soumises à une tension de polarisation extérieure adéquate dans le sens direct, sont capables d'émettre vers l'extérieur, un *rayonnement lumineux spontané* dans l'Infrarouge, le visible, ou l'Ultra-violet du spectre électromagnétique.

Ce processus d'émission de lumière qui est provoqué par un champ électrique de polarisation directe de la LED est appelé *électro-luminescence*, d'où également, le nom plus générique de *diodes électroluminescentes*.

Ce processus d'émission de lumière est appelé *Luminescence* pour indiquer que la lumière est émise sans échauffement ni échange thermique, il s'agit d'une "*émission froide*" de lumière, par opposition à l'*incandescence* qui, elle, est un processus d'"*émission chaude*" de lumière, basé sur un échange d'énergie thermique.

Cette Luminescence des LED résulte d'un processus interne de création de photons à partir de l'énergie restituée lors de la recombinaison des porteurs de charges : les électrons et les trous injectés les uns vers les autres par le champ électrique de polarisation directe à travers la zone de charge d'espace située dans la zone active de la jonction p-n de la diode.

En réalité, la *luminescence* des LED est une des quatre principales formes connues d'émission de lumière avec l'*incandescence* (processus thermique que l'on retrouve dans les lampes incandescentes), la *chimio-uminescence* (réaction chimique produisant la lumière incluant la bioluminescence) et la *sonoluminescence* (vibration acoustique sonore mécanique produisant la lumière)

Les Diodes électros-luminescentes sont de deux types fondamentaux : les LED et les LASER

- Les *Diodes LASER*, acronyme de l'anglais "*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*", sont des diodes à jonction de semi-conducteurs qui produisent, amplifient et émettent un rayonnement par *émission stimulée* de photons i.e. émission induite hors équilibre. Ces Diodes Laser produisent un faisceau de photons "*identiques*" possédant

tous exactement les mêmes propriétés : même énergie ($h\nu$), même longueur d'onde (λ), même fréquence ν ou ω , même vecteur d'onde (\mathbf{k}), et surtout même phase. Il en résulte une lumière dite "*cohérente*" et hautement contrôlée: très monochromatique (très pure), très intense, très puissante, très confinée dans l'espace (non dispersée) et hautement directionnelle (non divergente), avec des densités de photons énormes et parfaitement contrôlés sur des surfaces pouvant être plus petites que le μm^2 .

- Les LED, quant à elles, produisent un rayonnement moins monochromatique et beaucoup moins intense qu'une diode Laser. En fait, le rayonnement émis par une LED est surtout "*non*

cohérent'' et obtenu à partir d'un processus d'émission spontanée, i.e. une émission à l'équilibre, de photons qui résulte de la recombinaison de paires électrons-trous injectés à travers la jonction de la diode, dans la zone active.

Une LED est caractérisée par un spectre d'émission continu avec une largeur de spectre typique de 100Å à 500Å, plus large et moins intense que celui d'une diode Laser dont la largeur de spectre est typiquement de .1Å à 1Å, mais relativement étroit et monochromatique en comparaison avec d'autres sources de lumière conventionnelles, telles les sources thermiques ou incandescentes, dont le spectre est très large, typiquement de quelques µm et discontinu avec des raies sombres alternant avec des domaines clairs.

Depuis leur invention dans les années 1960, les LED ont connu un développement intensif, avec une amélioration continue de leurs propriétés et ce, surtout durant les quinze dernières années, à compter de 1995, date à laquelle les semi-conducteurs nitrures III-V ont commencé à être utilisés, ouvrant la voie à toute une nouvelle gamme de LED très efficaces et capables de concurrencer les autres types de sources de lumière, à savoir :

- les diodes Laser, lorsque les applications ne les exigent pas spécifiquement, car elles sont réputées plus onéreuses et plus délicates que les LED, et
- les sources conventionnelles de lumière, lampes à décharge ou à incandescence, même si ces dernières sont en apparence moins chères, à l'investissement initial.

II-2- Structure de base d'une Diode électroluminescente :

Une diode électroluminescente de base est une jonction **p-n** réalisée à partir de semi-conducteurs dopés p et n respectivement et polarisée dans le sens direct (figure I-1)[14]. Le champ électrique créé par la tension appliquée favorise le passage des porteurs majoritaires : les électrons vers la région P et les trous vers la région N. Ces porteurs injectés recombinent les uns avec les autres, principalement dans la zone de charge d'espace, à l'interface entre les deux matériaux pour créer des photons. On dit qu'il y a ''annihilation'' d'une ''paire électron-trou'' et ''création'' d'un photon.

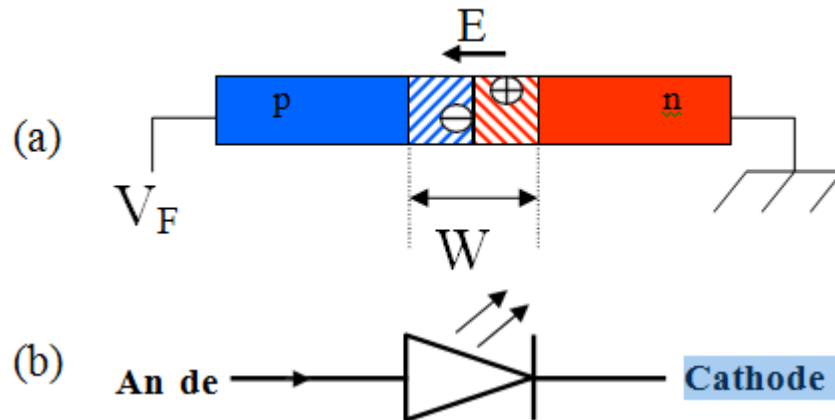


Figure II.1 (a) diode électroluminescente à jonction p-n polarisée dans le sens direct. (b) schéma électronique correspondant.

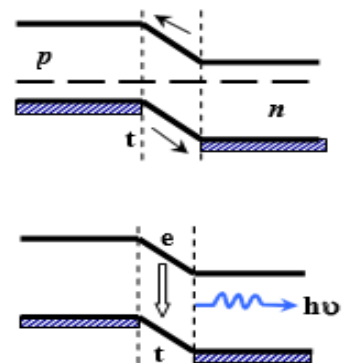
Donc on augmente la concentration des porteurs minoritaires de l'autre côté de la jonction, ce mécanisme s'appelle l'injection des porteurs minoritaires à travers la jonction.

C'est lors de la recombinaison d'un électron et d'un trou dans un semi-conducteur qu'il y a émission d'un photon.

Selon l'architecture de la diode LED, la luminescence peut être excitée de différentes manières :

• **Excitation Intrinsèque :**

Ce mécanisme est principalement provoqué par l'ionisation par impact des électrons accélérés ou l'émission de champ des électrons des centres pièges.



• **Excitation par Effet tunnel :**

L'électron est émis directement par effet tunnel à travers la ZCE Avalanche: les paires électron-trou produites par une ionisation par impact peuvent avoir comme conséquence l'émission de l'interbande (figure I-2).

• **Excitation par Injection :**

L'injection des porteurs minoritaires, que les porteurs traverse la jonction peuvent provoquer la recombinaison radiative efficace.

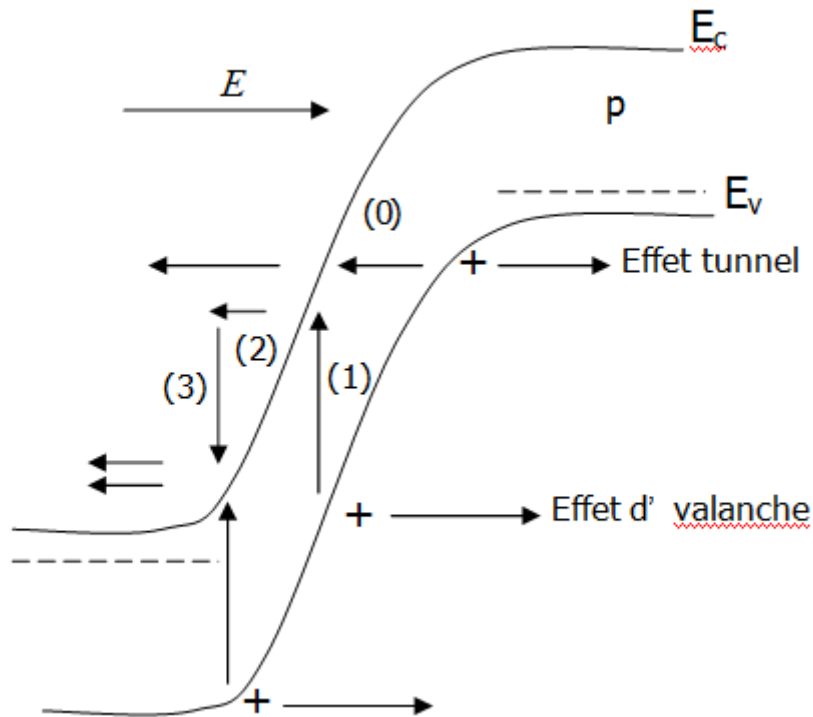
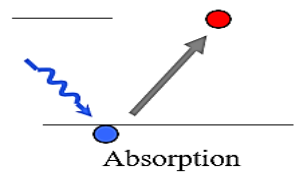


Figure II.2 bandes d'énergie de la jonction en polarisée en inverse, (0) Effet tunnel (1, 2, 3) effet d'avalanche [2]

(0) correspond à la création thermique d'une paire électron-trou, (2) les électrons accélérés par le champ électrique, (3) correspond au moment où son énergie cinétique est suffisante pour créer par choc une autre paire électron trou.

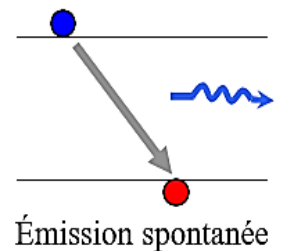
Dans les diodes LED à base de semiconducteurs, les processus opto-électroniques permettant de créer les photons sont basés sur l'interaction du rayonnement avec les électrons du semi-conducteur et qui se manifeste selon trois processus distincts :

Un électron absorbe un photon. Cet électron va effectuer "un saut" d'un état occupé de la bande de valence vers un état libre de la bande de conduction. Ce processus est appelé "processus d'absorption".



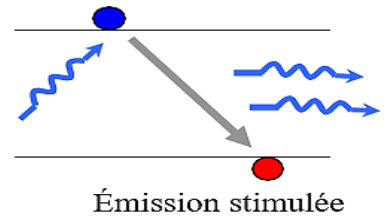
Il est utilisé dans les photo-détecteurs ou les capteurs de rayonnement.

- Un électron qui se trouve dans la bande de conduction (état excité) doit retomber, au bout d'un certain temps appelé durée de vie de l'état excité, spontanément sur la bande de valence (état fondamental) avec émission d'un photon, c'est l'émission spontanée.



Ce processus, dit " processus de recombinaison spontanée", est justement utilisé dans les émetteurs de rayonnement tels que les diodes Electro-luminescentes qui nous intéressent dans ce travail.

- La recombinaison de l'électron de la bande de conduction vers la bande de valence peut également être "induite" (provoquée) bien avant "l'expiration" de la durée de vie de l'état excité par une perturbation apportée par la seule présence d'un photon dans le semi-conducteur.



Cette recombinaison "forcée" dite "stimulée" provoque l'émission d'un deuxième photon Non seulement de même énergie que celui qui l'a induit, mais aussi de même vecteur d'onde et de même phase. C'est l'émission stimulée. Ce processus est appliqué dans les diodes lasers à semi-conducteur.

II-3-Principe de fonctionnement :

La structure type d'une diode électroluminescente et son principe de fonctionnement sont représentés sur la figure (I-3).

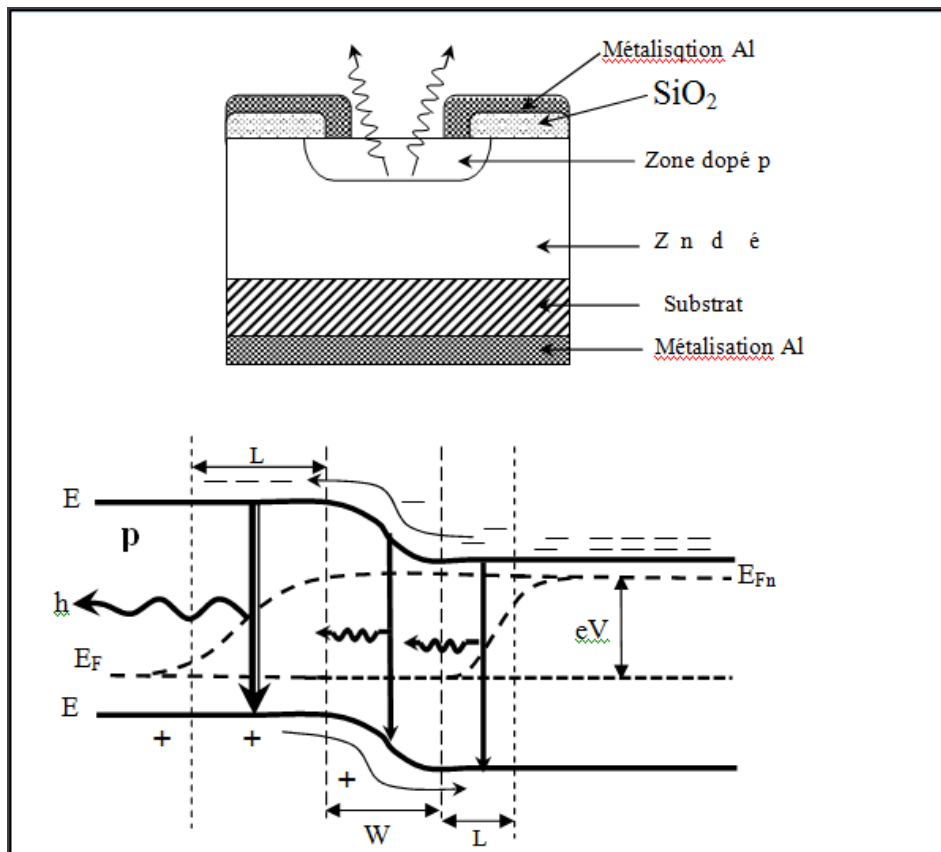


Figure II.3 Jonction et diagramme énergétique de la diode électroluminescente [15]

Une tension de polarisation directe V fixe la séparation des niveaux de Fermi. Les distributions des électrons dans la région de type p et de trou dans la région de type n, sont données par les expressions suivantes :

$$\Delta p(x) = \frac{p_n}{sh \frac{d_n}{l_p}} \left(e^{\frac{ev}{kt}} - 1 \right) sh \left(\frac{(x_c - x)}{l_p} \right) \quad (22)$$

$$\Delta n(x) = \frac{n_p}{sh \frac{d_p}{l_n}} \left(e^{\frac{ev}{kt}} - 1 \right) sh \left(\frac{(x - x_c)}{l_n} \right) \quad (23)$$

Les recombinaisons des porteurs excédentaires se manifestent dans trois régions différentes qui sont d'une part la ZCE, et d'autre part les régions neutres p et n. La mobilité des électrons est beaucoup plus grande que celle des trous, le taux d'injection d'électrons dans la région de type p est plus importante que le taux d'injection de trous dans la région de type n. Il en résulte que la région la plus radiative est la région de type p. C'est la raison pour laquelle cette région constitue la face émettrice dans la structure représentée sur la figure I-3

II-3-1- Rendement lumineux de la diode électroluminescente :

Le rendement global d'une LED est par définition le rapport de la puissance lumineuse émise sur la puissance électrique consommée. C'est donc le produit de la tension appliquée V_a par le courant traversant la jonction ; le courant étant le nombre d'électrons passant la jonction par seconde multiplié par la charge de l'électron

$$\eta = \frac{\text{puiss.lumineuse}}{\text{puiss.electrique}} = \frac{\omega h \cdot \text{Nbrede photonemis/sec}}{q \cdot v_a \cdot \text{Nbrede } \bar{e} \text{ passant la jonction/sec}} \quad (24)$$

En introduisant le nombre de photons créés en le multipliant au numérateur et au dénominateur, nous faisons apparaître le rendement interne qui n'est autre que le rapport du nombre de photons créés sur le nombre d'électrons passant dans la jonction (ce dernier étant le nombre de paires électron-trou créées). Le quotient du nombre de photons émis sur le nombre de photons créés définit le rendement optique. L'expression du rendement global d'une LED est donnée par [25] :

$$\eta = \frac{\text{puiss.lumineuse}}{\text{puiss.electrique}} = \frac{h\omega \cdot \text{Nbrede photonemis/sec}}{q \cdot v_a \cdot \text{Nbrede } \bar{e} \text{ passant la jonction/sec}} \quad (25)$$

Le rendement lumineux (ou l'efficacité lumineuse ; quantité de ce que l'œil voit (lumen) sur ce que la source lumineuse consomme (Watt). Ce rapport est exprimé en lumen par Watt (Lm/W)), selon les types de diodes, ce rendement est variable, généralement compris entre 20 et 100 Lm/W, et atteint en laboratoire les . Une grande disparité dans les performances est présente selon la couleur, la puissance. Les bleues n'excèdent pas les 30 Lm/W alors que les vertes peuvent avoir une efficacité lumineuse bien plus élevée, 100 Lm/W . Les effectués dans la recherche et développement des LED blanches leur ont permis d'être aussi efficaces.

II-3-2- Structure et technique de fabrication des diodes électroluminescentes :

Certains paramètres sont communs à tous les types d'utilisation, c'est le cas en particulier du rendement quantique interne. Un bon rendement interne passe par une grande durée de vie non radiative. Ceci nécessite la réalisation de matériaux de très bonnes qualités chimique et cristallographique, ce qui impose pratiquement la réalisation de couches épitaxiales. Pour augmenter le rendement optique d'autre part, on réalise la couche émettrice de type p en surface, avec une épaisseur optimum.

$$dp \approx 3L_n \quad (26)$$

Ou

L_n est la longueur de diffusion des électrons.

La structure interne d'une diode électroluminescente à émission orange est représentée sur (Figure II-4).

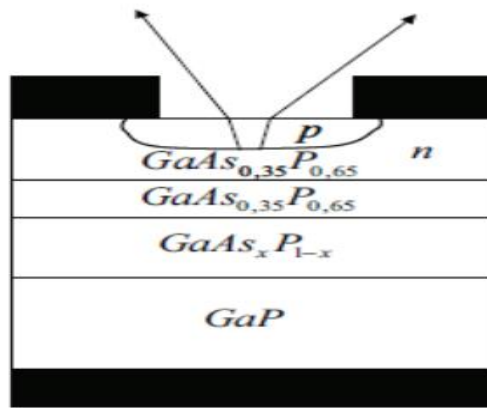


Figure II.4 Diode électroluminescente orange.

Elle est constituée d'un substrat de GaP de type N, qui sert de support à la couche active et assure de bonnes conductivités électrique et thermique, vers l'électrode métallique. Une couche de $GaAs_xP_{1-x}$ où x varie de 0 à 35 sert d'interface en réalisant l'accord de maille entre le substrat et la couche active. La couche active est réalisée par une jonction P-N au , dont la région de type P, de quelques microns d'épaisseur, constitue la face de sortie de la diode. Le contact métallique supérieur doit avoir une surface et une géométrie assurant à la fois une bonne homogénéité du courant et une surface émettrice suffisante. La structure ainsi réalisée est ensuite encapsulée dans un dôme de résine transparente ou translucide. Ce dôme a trois fonctions essentielles, il protège la structure et surtout le fil de connexion, il augmente le rendement optique en réduisant la discontinuité d'indice entre le semiconducteur et l'air extérieur, il conditionne la distribution spatiale du rayonnement émis. La résine utilisée est une résine époxy à deux composants. Les diodes sont encapsulées à partir de barrettes d'une vingtaine d'éléments et la forme du dôme est fixée par un moule de polypropylène. L'encapsulation standard consiste en un cylindre terminé par un dôme

hémisphérique jouant le rôle de lentille (figure II.4). La distribution spatiale du rayonnement émis est fonction de la hauteur du dôme par rapport à la surface active, la diode est d'autant plus directive que le dôme est éloigné [10].

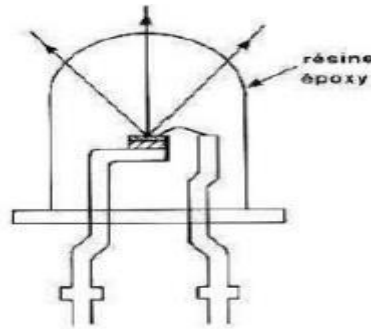


Figure II.5 Encapsulation d'une LED.

La longueur d'onde du rayonnement émis est déterminée par la largeur de la bande interdite et dépend donc du matériau utilisé. Toutes les valeurs du spectre lumineux peuvent être atteintes avec les matériaux utilisés. Pour obtenir de l'infrarouge, le matériau adapté est l'arséniure de gallium (GaAs) avec comme dopant du silicium (Si) ou du zinc (Zn). Les fabricants proposent de nombreux types de diodes aux spécificités différentes. On peut citer le type le plus répandu : les diodes à l'arséniure de gallium, ce sont les plus économiques et ont un usage général. Les diodes à l'arséniure de gallium-aluminium (AlGaAs) offrent une plus grande puissance de sortie, ont une longueur d'onde plus courte, ce qui correspond au maximum de sensibilité des détecteurs au silicium). Enfin, les diodes à double hétérojonction (DH) AlGaAs offrent les avantages des deux techniques précédentes [25].

Le tableau suivant montre les différents semi-conducteurs utilisés pour fabriquer les diodes électroluminescentes à différentes longueurs d'onde.

Couleur	Longueur d'onde (nm)	Tension de seuil (V)	Semi-conducteur utilise
Infra Rouge	$\lambda > 760$	$\Delta V < 1.63$	AlGaAs
Rouge	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < \Delta V < 2.03$	AlGaAs GaAsP
Orange	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < \Delta V < 2.10$	GaAsP
Jaune	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < \Delta V < 2.18$	GaAsP
Vert	$500 < \lambda < 570$	$2.18 < \Delta V < 2.48$	GaN GaP
Bleu	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < \Delta V < 2.76$	ZnSe InGaN SiC
Violet	$400 < \lambda$	$2.76 < \Delta V < 3.1$	
Ultraviolet	$\lambda < 400$	$\Delta V > 3.1$	AlN AlGaN

Tableau II.1 Diodes électroluminescentes à différents couleurs.

II-3-3- Différentes familles des diodes électroluminescentes :

Il existe plusieurs manières de classer les électroluminescentes, on peut citer deux classements :

A/ Classement selon la puissance : Les diodes électroluminescent de faible puissance $< 1W$, ce sont les plus connues du grand public car elles sont présentées dans notre quotidien depuis des années. Ce sont elles qui jouent le rôle de voyant lumineux sur les appareils électroménagers par exemple. Les LED de forte puissance $> 1W$, souvent méconnues du grand public, elles sont pourtant en plein essor et leurs applications sont souvent ignorées : flash de téléphones portables, éclairage domestique, éclairage de spectacle, lampe de poche ou frontales. Le principe de fonctionnement est pratiquement équivalent ; toutefois certaines différences significatives existent entre les deux familles. Elles disposent chacune d'un champ d'application spécifique [24].

B/ Classement selon le spectre d'émission : Une autre manière de les classer est de considérer la répartition de l'énergie dans la gamme de longueur d'onde couvrant le visible (longueurs d'ondes de l'ordre de 380- 780 nm) ou l'invisible (principalement l'infrarouge).

Les LED blanches : l'énergie est répartie dans le visible sur toute la gamme de longueurs d'onde 380-780 nm environ.

Les LED infrarouges : l'énergie est au-delà du spectre visible de la lumière, utilisé par exemple pour faire du positionnement (console wifi), des télécommandes, de l'éclairage pour caméra infrarouge etc.

II-4- Avantages et inconvénients des diodes électroluminescentes :

Les avantages des diodes électroluminescentes sont nombreux à savoir :

- Facilité de montage sur un circuit.
- Consommation inférieure aux lampes à incandescence et du même ordre de grandeur que les tubes fluorescents.
- Excellente résistance mécanique (chocs, écrasement, vibrations).
- Taille beaucoup plus réduite que les lampes classiques ce qui offre la possibilité de réaliser des sources de lumière très ponctuelles, de faible à très faible consommation électrique (quelque dizaine de milliwatts) et avec un bon rendement. En assemblant plusieurs LED, on peut réaliser des éclairages avec des formes novatrices.
- Durée de vie beaucoup plus longue qu'une lampe à incandescence classique ou même qu'une lampe fluorescente (20 000 à 50 000 heures environ contre 5000 à 15000 heures pour les lampes fluorescentes et 1000 heures pour les lampes à incandescence).
- Fonctionnement en très basse tension (TBT), plus de sécurité et de facilité de transport.
- Par rapport aux systèmes lumineux classiques, elles s'allument et s'éteignent en un temps

très court, ce qui permet l'utilisation en transmission de signaux à courte distance (optocoupleurs) ou longue (fibres optiques).

- Vu leur puissance, les LED classiques ne chauffent presque pas et ne brûlent pas les doigts. Pour les montages de puissance supérieure à 1W, il faut prévoir une dissipation de la chaleur pour éviter l'endommagement la diode. En effet, une diode électroluminescente convertit environ de l'énergie électrique en lumière, le reste étant dégagé sous forme de chaleur.
- Les inconvénients des diodes électroluminescentes ne sont pas nombreux, on peut citer par exemple :
 - L'existence d'effets sanitaires liés à l'usage des LED. La forte proportion de lumière bleue des LED pourrait être à l'origine de lésions oculaires.
 - Prix d'achat des LED reste plus élevé que celui des lampes classiques, à luminosité égale mais devrait baisser rapidement compte-tenu du développement rapide.
 - La LED étant un semi-conducteur, elle est affectée par la température : plus elle chauffe, plus sa tension directe de jonction décroît, et son rendement lumineux se dégrade. Cela pose des problèmes de fiabilité si une mise en œuvre thermique adéquate n'est pas réalisée (pour les modèles de puissance).

II-5- Différentes utilisations des diodes électroluminescentes :

Les trois principales utilisations des LED sont l'affichage, les photocoupleurs et les télécommunications par fibres optiques. Dans le premier cas, une émission visible de couleur déterminée, qui fixe le gap du matériau utilisé, et une surface émettrice de dimension suffisante, qui conditionne le mode d'encapsulation. Dans un photocoupleur, la diode électroluminescente est montée en regard d'un phototransistor au silicium dans un boîtier unique. Cette structure qui présente généralement une isolation électrique de l'ordre de **2000 volts** permet de transmettre des signaux variables entre deux circuits entièrement isolés l'un de l'autre. Ces photocoupleurs sont essentiellement utilisés pour la transmission à grande vitesse de signaux logiques. Dans ces systèmes, la caractéristique essentielle de la diode est évidemment un spectre d'émission compatible avec la réponse spectrale du silicium, on utilise généralement des diodes au GaAsP. Dans les télécommunications par fibres optiques, le but recherché est une émission centrée dans les fenêtres de transparence et de faible dispersion des fibres, $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ et $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$, une grande brillance c'est-à-dire une forte luminosité à partir d'une faible surface, compatible avec les dimensions des fibres, et enfin une bonne possibilité de modulation [10].

II-6- Références bibliographiques :

- [1] H.J. Round, "a note on Carborundum", *Electron World*, **19**, 309 (1907)
- [2] O.V. Losev, "Luminous Carborundum Detectors, ...", *Phil. Mag.*, **6**, 1024-1044 (1928)
- [3] O.V. Losev, "Light Relay", Soviet Patent N° 14672, 28 February 1927
- [4] N. Zheludov, "100 year history of LED", *Nature Photonics*, **Vol.1**, 189- (2007)
- [5] J.P. Gordon, H.J. Zeiger, and C.H. Townes, *Phys. Rev.* **95**, 282 (1954) [6] T.H. Maiman, *Nature*, **187**, 493 (1960)
- [6] R.N. Hall, G.E. Gener, J.D.Kingsley, T.J.Soltys, R.O. Carlson, *Phys. Rev. Letters*, **9**, 366 (1962)
- [7] N.I. Nathan, W.P. Dumke, G. Burns, F.J. Dill, G.J. Lasher, *Appl. Phys. Letters* **1**, 62 (1962)
- [8] T.M. Quist, R.H. Rediker, R.J. Keyes, W.E. Krag, B. Lax, A.L. McWorter, H.J. Zeigler, *Appl. Phys. Letters* **1**, 91 (1962)
- [9] Mémoire de fin d'étude en Master Intitulé : Caractérisation automatisée des diodes électroluminescentes
- [10] Site web www.batiweb.com
- [11] N. Oleksiy, "Simulation, Fabrication et Analyse de Cellules Photovoltaïques a contacts arrière interdigités", Thèse Doctorat, Lyon : INSA de Lyon, 2005.
- [12] Site web www.univlemans.fr/enseignements/physique/02/cours.../semicon.pdf
- [13] O. Bonnaud, "Physique des Solides, des Semiconducteurs et Dispositifs", IETR, Rennes, 2003.
- [14] N. Benhmed Benabdllah, "Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe", mémoire Magister, Université abou bekr Belkaid -Tlemcen, 2006.
- [15] H.MATHIEU, "Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques", (MASSON) Paris, 1996.
- [16] F.Lévy, "Physique et technologie des semi-conducteur", presses Polytechnique et universitaire Romandes (PPUR), Paris, 1994.
- [17] A. Ricaud, "Convertisseurs photovoltaïques", Comresse et documentation, Paris, 2007.
- [18] [19] H. MATHIEU, "Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques", Dunod, Paris, 2009.
- [19] S. Duchemin, N. Romain, "Caractérisations de couches minces de CuGaSe₂ obtenues par MOCVD", Thèse de doctorat, Science et techniques du Languedoc, Université de Montpellier II, 1999.

- [20] A. Laugier et Jean-Alain Roger, ‘‘Photopiles solaires du matériau au dispositif ‘’, technique et documentation, Paris, 1981.
- [21] A. Labouret, P. Cumunel, J. P. Braun, B. Faraggi, ‘‘Cellules solaires :Les bases de l’énergie photovoltaïque’’, ETSF, Dunod, Paris, 2010.
- [22] P-J. Ribeyron, E. Rolland, P. Roca I Cabarrocas, J. Damon-Lacoste, A.S. Gudovskikh, J.P. Kleider, Y. Veschetti, J.C. Muller: ‘‘Single polymorphous/crystalline heterojunction solar cell with industrial process on Ptype monocrystalline silicon’’. Proceeding of the European PV Solar Energy Conference, Barcelona, June 2005

CHAPITRE III
Simulation des caractéristiques
électriques de la LED

III-1- Introduction

L'étude et la simulation des procédés technologiques de réalisation de la LED ; diode électroluminescente bleue se fait en utilisant le logiciel de simulation SILVACO-ATLAS. La diode est à base de puit quantique InGaN, nous allons aussi étudier quelque caractéristique essentiel aux fonctionnement de la LED.

III-2- Présentation SILVACO :

Le SILVACO (Silicon Valley Corporation) est un logiciel qui permet de concevoir, modéliser et simuler les performances des dispositifs à semi-conducteur, avant la fabrication des prototypes d'essais. Il est très utile dans les projets de recherche-développement car il optimise le temps des essais et par conséquent réduit le coût de conception et de fabrication des dispositifs électroniques.

Le TCAD-SILVACO inclut de nouveaux modèles physiques qui utilisent des méthodes et des algorithmes numériques efficaces, de nouvelles techniques de maillage, des solutions linéaires d'optimisation, etc., tout en permettant d'obtenir des résultats de simulation très proches de celles de la pratique. L'avantage majeur de ce type de simulateur est de visualiser dans l'espace des phénomènes physiques difficilement accessibles et observables et de s'approprier de manière pédagogique les procédés de fabrication.

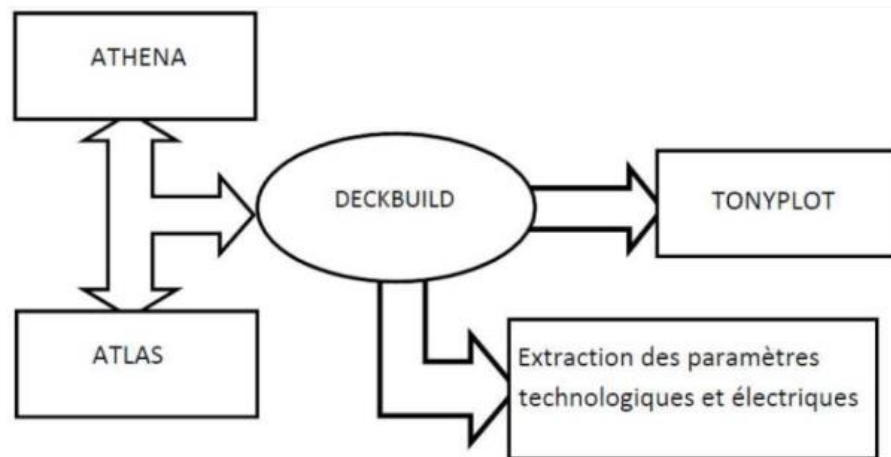


Figure III.1 Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par TCADSILVACO.

La figure III.1. présente le schéma bloc des modules utilisés dans la simulation par TCADSILVACO. Les paramètres d'entrée de simulation, définissant les différentes étapes technologiques et les phénomènes physiques, sont réalisés avec le module DECKBUILD de TCADSILVACO. La visualisation de la structure et des paramètres de sortie tels que le rendement quantique, la réponse spectrale, I(V) par exemple s'effectuent avec le module TONYPLOT.

III-3- Les étapes de réalisation sur SILVACO

La simulation en utilisant le logiciel de simulation SILVACO-ATLAS consiste dans les étapes suivantes :

Spécification de la structure

1. Maillage
2. Région
3. Electrode
4. Dopage

Spécification des matériaux et des modèles

1. Matériaux
2. Modèles
3. Contact
4. Interface

Sélection des méthodes numériques

Sélection des paramètres à extraire

1. Log
2. Solve
3. Load
4. Save

Analyse des résultats

1. Extract
2. Tonyplot
3. Groupes de commandes.

III-4- Simulation d'une led blue avec SILVACO

La structure générale d'une LED est donnée dans la figure III.2

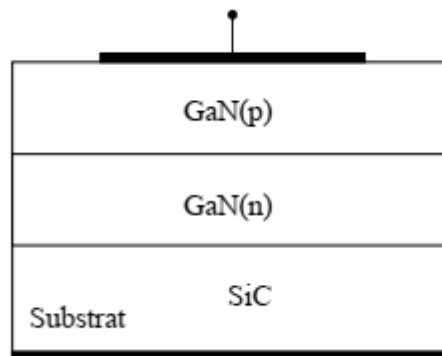


Figure III.2 diode électroluminescente à GaN sur substrat SiC

Après la spécification de la structure de la LED à travers les étapes suivante:

1. Le maillage
2. Les régions
3. Les électrodes
4. Le dopage

On obtient une structure spécifique à chaque composant cible de la simulation, ce qui nous donne dans notre cas la figure III.3.

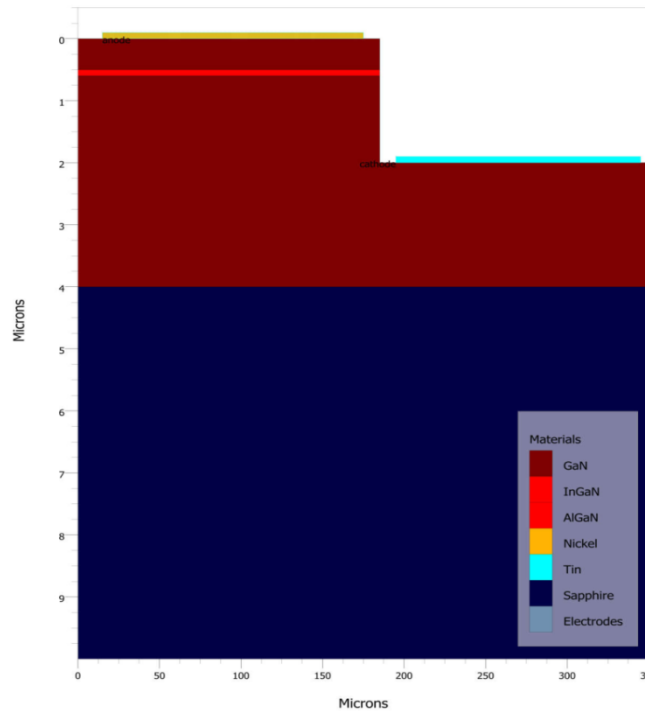


Figure III.3 Structure d'une LED.

III-5- simulation des caractéristiques électriques de la diode électroluminescente avec le logiciel SILVACO

III-5-1- Caractéristique courant-tension (I-V)

Le branchement d'une LED se fait en polarisation directe, c'est à dire que le courant se déplace de l'anode vers la cathode. La caractéristique courant-tension (I-V) indique à l'utilisateur la valeur minimum de la tension pour le fonctionnement de la LED, cette tension est appelée la tension de seuil V_d .

Sur la figure suivante, nous montrons la simulation de la variation du courant de I en fonction de la tension V. Le courant est nul jusqu'à atteindre la valeur de la tension de seuil. On observe une augmentation rapide du courant après que la tension de seuil soit dépassée. Cette tension dépend essentiellement de l'énergie de la bande interdite du semiconducteur constituant la LED. On peut observer sur la figure que $V_d=3.5V$.

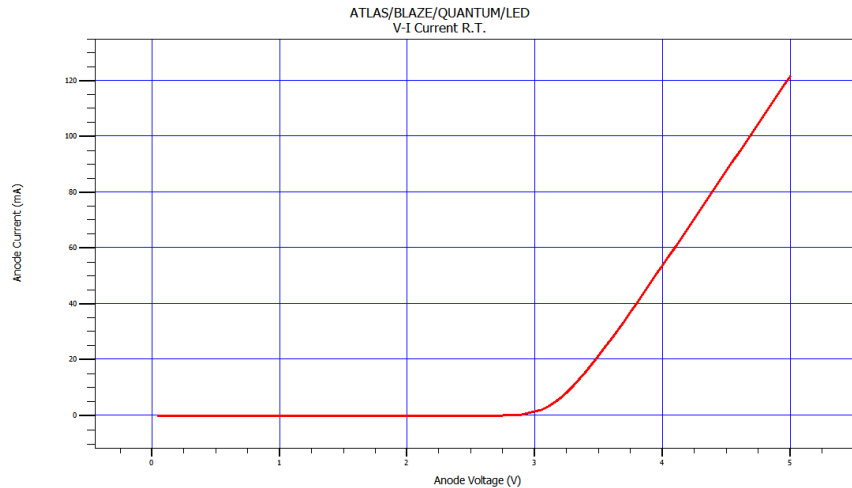


Figure III.4 La caractéristique courant-tension (I-V) avec SILVACO.

III-5-2- Caractéristique puissance-courant (P-I):

La courbe de puissance d'une LED permet de décrire la puissance émise par la LED qui est traversée par un courant continu. La caractéristique puissance-courant peut être tracer en prenant appliquant la formule de la puissance : $P = U.I$

Avec P : La puissance,

U : La tension,

I : Le courant.

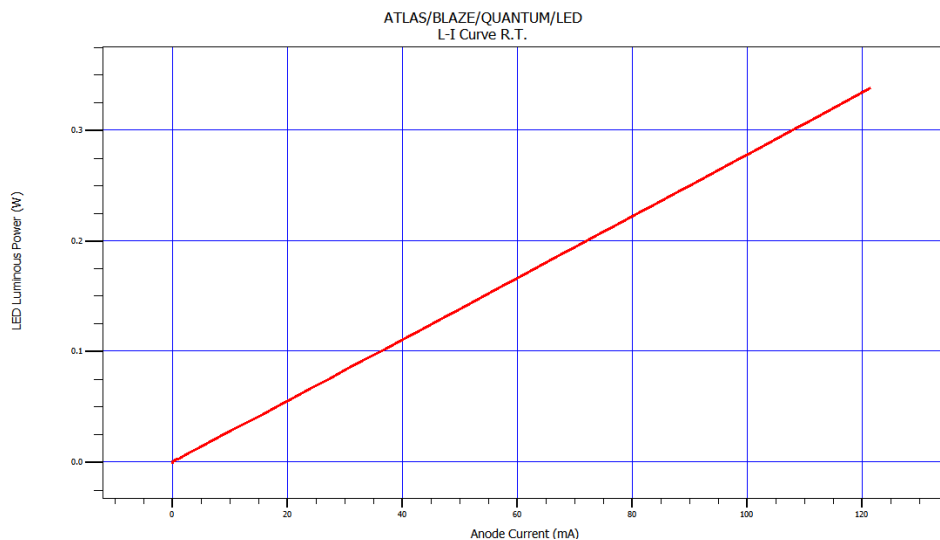


Figure III.5 La caractéristique puissance-courant (P-I) avec SILVACO.

La figure III.5. Représente les variations de la puissance P en fonction du courant I. Cette évolution est linéaire croissante (formule $P = U \cdot I$). Cette puissance est la puissance lumineuse de la diode LED.

On remarque que la LED permet d'émettre une puissance uniforme et linéaire dans le temps. L'augmentation de la puissance permettra un éclairage avec une puissance élevée. Cependant une grande valeur de courant induit une forte chaleur, ce qui rend l'efficacité de la puissance lumineuse instable.

III-5-3- Spectre de la lumière émise

Une LED est caractérisée par un spectre d'émission continu avec une largeur de spectre typique. Les spectres d'émission de ces diodes sont- représentés sur la figure III.6. pour un courant d'excitation de 20 mA. Ces spectres, qui sont obtenus par le seul changement de la composition x d'indium dans le puits, sont centrés à 450(bleu), 525(vert) et 600 nm(jaune). Quand le taux d'indium augmente la largeur de spectre augmente, probablement en raison de la plus inhomogénéité de la couche.

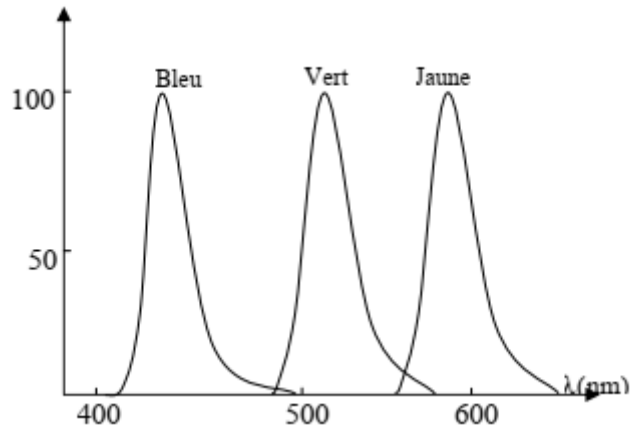


Figure III.6 Spectre d'émission de diode électroluminescente bleue, verte et jaune à simplepuits quantique de InGaN.

Le rayonnement émis par une diode électroluminescente n'est pas monochromatique mais il possède une distribution spectrale centrée sur la longueur d'onde la plus probable fixée par la largeur E_g de la bande interdite.

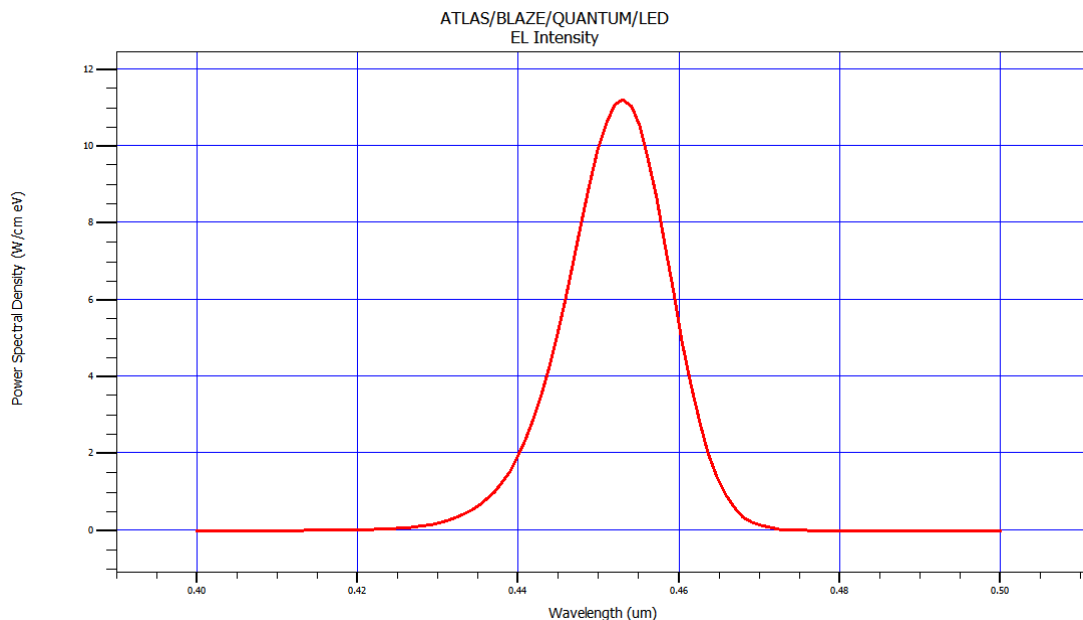
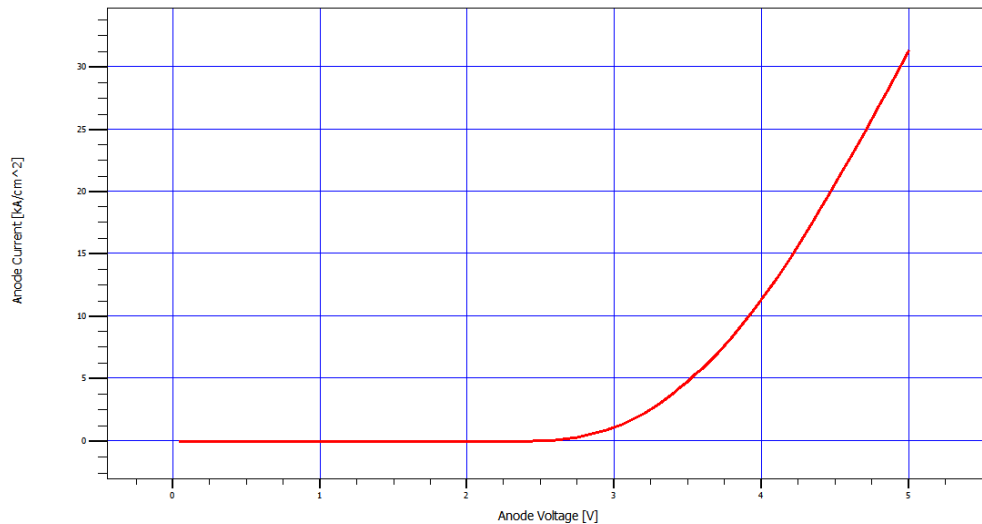


Figure III.7 Le spectre électroluminescent de la LED bleue en utilisant SILVACO.

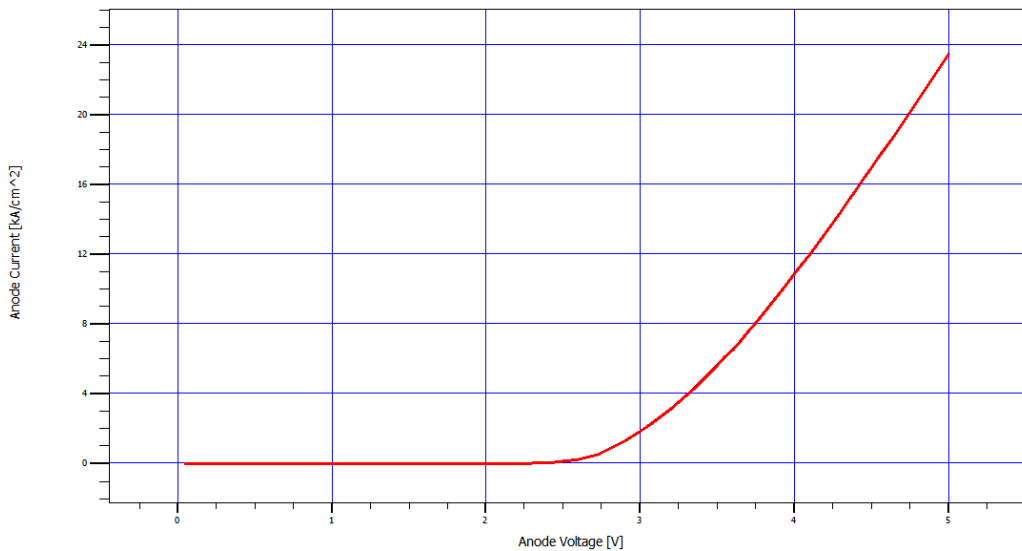
On observe sur le spectre montré sur la figure IV.8 que la longueur d'onde de la lumière émise est à 450nm, correspondant effectivement à la lumière bleue . Cette émission est obtenue avec un taux d'indium de 25% dans l'alliage InGaN d'une épaisseur de 30 Å .

III-5-4 Effet de la température sur la caractéristique courant-tension

Dans ce qui suit nous allons étudier l'influence de la grandeur température sur la caractéristique I-V de la LED. Les figures III.8 mettent en évidence l'influence que peut provoquer une augmentation de la température. Nous avons pris en compte la courbe de la figure III.4 qui est effectuée dans des conditions initiales de température 25°C, ensuite nous avons effectué notre étude pour des températures plus élevées qui sont 50°C et 150°C. Les résultats obtenus sont observés dans les figures suivantes :



a- Température de 50°C



b- Température de 150°C

Figure III.8 : Effet de la température sur la caractéristique courant-tension

Nous pouvons constater que l'influence de la température est primordiale et quasi instantanée. En effet, une augmentation de la température entraîne une diminution du courant dans les mêmes conditions de tensions. Aussi, on constate une déformation de la valeur de tension de seuil qui diminue d'une petite valeur, cela est dû à l'excitation provoquée par la chaleur sur les porteurs de charges.

III-5-5 Effet du changement de matériel semiconducteur sur les caractéristiques courant-tension

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) et il existe également des semi-conducteurs composites, binaires, ternaires, ... Dans la figure III.9 nous donnons un aperçu de l'effet de changement de la nature du semiconducteur sur la caractéristique I-V. Cette figure a été réalisé par logiciel MATLAB.

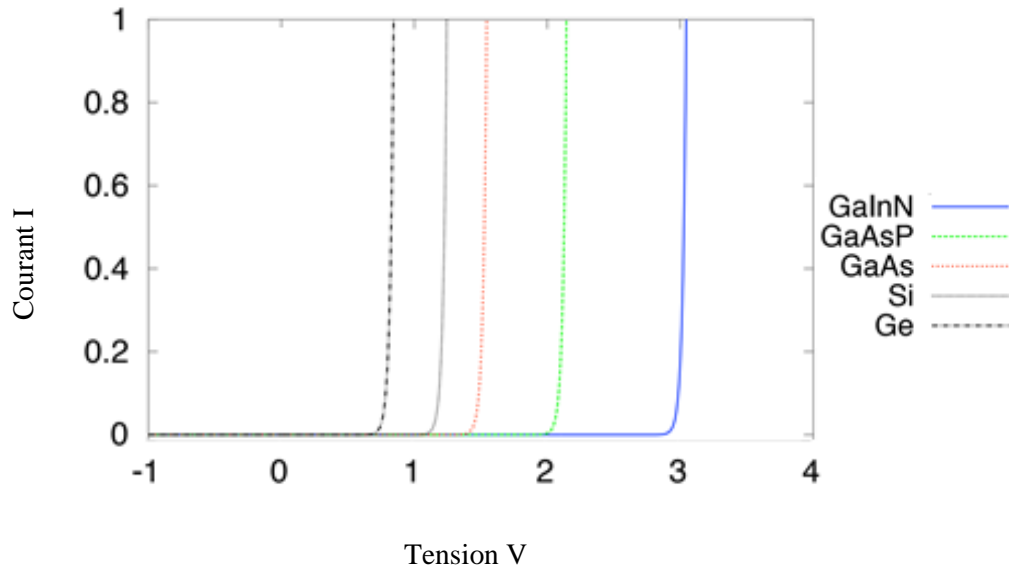


Figure III.9 : Effet du semiconducteur sur la caractéristique I-V d'une LED.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons effectué un simulation électrique de la diode électroluminescente en utilisant le l'outil de simulation ATLAS nous a permis de visualiser la structure d'une diode LED BLEU, d'extraire les caractéristique électriques (I-V, P-I) de la LED ainsi que d'autre caractéristiques comme la longueur d'onde émise. Nous avons terminer notre étude par l'analyse de l'effet de l'augmentation de la température sur la caractéristique I-V et aussi utilisé le logiciel MATLAB pour voir la caractéristiques I-V en fonction de la nature du semiconducteur.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE :

Une LED est une diode à jonction PN qui émet un rayonnement lorsqu'elle est polarisée en sens direct. Le rayonnement provient de l'émission d'un photon lors de la recombinaison électron/trou. Elle a plusieurs utilisations telles que : source de lumière dans les montages photo-électriques (LED + phototransistor); voyants et dans l'affichage numérique.

Dans ce travail, nous avons étudié les diodes émettrices de lumière LED (diodes électro-luminescentes) à base de matériaux semi-conducteurs nitrures **III-V** GaN.

Notre objectif était d'étudier la faisabilité de Diodes électro-luminescentes LED devant émettre de la lumière dans les parties visibles (bleu).

Parmi tous les matériaux permettant de réaliser de telles LED, nous avons choisi plus particulièrement aux matériaux semi-conducteurs III-V à grand gap (largeur de bande interdite E_G) que sont les nitrures III-N de la famille de *GaN*.

D'après notre étude, nous avons pu créer un bon modèle de LED à l'aide de SALVACO qui émet la longueur d'onde souhaitée qui est observable dans les courbes de caractéristiques présentées dans le chapitre précédent.

Enfin avons pu atteindre nos objectifs et espérons qu'à l'avenir nous pourrons améliorer notre modèle pour de meilleures performances.