



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des sciences exactes et sciences de la nature et de la vie
Département des sciences de la matière

MÉMOIRE DE MASTER

Département des Sciences de la matière
Filière de physique
Spécialité: Physique énergétique et énergies renouvelables

Réf.:Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par:

- Hamida Zineb
- Hamdi Nour

Le:04/07/2021

Simulation des diodes électroluminescentes: Effet de la température

Jury:

Dr.	M. Hadar	MCB	Université de Biskra	Président
Dr.	T. Tibermacine	MCA	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	N. Sengouga	Prof	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire: 2020/2021

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et
miséricordieux, qui il m'a donné la force et la patience d'accomplir
Ce travail.

En second lieu, je tiens à remercier mon encadreur : *Mr.*
T. Tibermacine pour ses précieux conseils et son aide durant
Toute la période du travail.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury,
Pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant
d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.
Comme je tiens à remercier toutes les travailleurs du département
du Sciences de la Matière, université de Biskra.

Je tiens également à remercier toute personne ayant participé
de près ou de loin à la réalisation de ce travail et à tous mes
Collègues de notre promotion.

Finel & Nouir

Dédicaces

A

Mes parents

Mes frères

Mes sœurs

Mes amies

RÉSUMÉ

Dans ce travail, nous avons étudié et simulé une diode électroluminescente à un seul puits quantique basé sur le matériau InGaN à l'aide du logiciel SILVACO-ATLAS. Cette simulation nous a permis de tirer les caractéristiques de la LED, et de déterminer l'influence de la température sur les taux de recombinaisons radiatives, la caractéristique courant-tension (I-V), la caractéristique puissance optique-courant (P-I), la puissance spectral, l'efficacité quantique interne et externe. Nous avons trouvé que chaque fois la température augmente les recombinaisons, le courant et la largeur des spectres augmente et chaque fois la température augmente la puissance optique et l'efficacité quantique diminue.

Mots clés: Diodes électroluminescentes, InGaN/GaN, Puits quantiques, Température, Simulation, SILVACO-ATLAS,

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Sommaire

Liste des Tableaux

Liste des Figures

Introduction générale **1**

Chapitre I: Généralités sur les semi-conducteurs III-V

I.1.Introduction	4
I.2.Différents types des matériaux solides	4
I.2.1.Conducteurs	4
I.2.2.Isolants	4
I.2.3.Semi-conducteurs	5
I.3.Différents groupes des semi-conducteurs	5
I.4.Dopage des semi-conducteurs	6
I.4.1.Semi-conducteur type N	6
I.4.2.Semi-conducteur type P	6
I.5.Matériaux de semi-conducteurs III-V	7
I.5.1.Composés binaires	8
I.5.2.Composés ternaires et quaternaires	9

I.6.Mécanismes de recombinaison	9
I.6.1.Recombinaison radiative	9
I.6.2.Recombinaison Auger	10
I.6.3.Recombinaison Shockley-Read-Hall	10
I.6.4.Recombinaison en surface	11
1.7.Structure cristallographique	12
I.8.Bande interdite de GaN	13
I.9.Description de InGaN	14
I.10.Couche de AlGaN	15
I.11.Puits quantiques InGaN/GaN	15
 Chapitre II: Notions fondamentales sur les diodes électroluminescentes	
II.1.Introduction	17
II.2.Historique	17
II.3.Diodes électroluminescentes	18
II.3.1.Définition	18
II.3.2.Principe de fonctionnement	19
II.3.3.Structure de base et fonctionnement	20
II.3.4.Caractéristique courant-tension des diodes électroluminescentes	22
II.4.Classification des diodes électroluminescentes	23
II.4.1.Classement selon la structure	23
II.4.1.1.Diodes électroluminescentes à homojonction	23

II.4.1.2.	Diodes électroluminescentes à hétérojonction	23
II.4.1.3.	Diodes électroluminescentes à puits quantique	24
II.4.2.	Classement selon la puissance	25
II.4.2.1.	Diodes électroluminescentes de faible puissance	25
II.4.2.2.	Diodes électroluminescentes de forte puissance	25
II.4.3.	Classement selon le spectre d'émission	27
II.4.3.1.	Diodes électroluminescentes chromatiques	27
II.4.3.2.	Diodes électroluminescentes blanches	27
II.4.3.3.	Diodes électroluminescentes infrarouges	28
II.5.	Rendement lumineux des diodes électroluminescentes	29
II.6.	Avantages et inconvénients des diodes électroluminescentes	29
II.6.1.	Avantages	29
II.6.2.	Inconvénients	30

Chapitre III: SILVACO et Résultats de simulation

III.1.	Introduction	32
III.2.	Présentation du logiciel de simulation SILVACO	32
III.2.1.	ATLAS	33
III.2.1.1.	Deckbuild	34
III.2.1.2.	Tonyplot	35
III.2.2.	Equations de base de Semi-conducteur en ATLAS-SILVACO	36
III.2.3.	Syntaxe d'un programme dans ATLAS	37

III.2.3.1.Mesh	37
III.2.3.2.Région	37
III.2.3.3.Electrode	38
III.2.3.4.Doping	39
III.2.4.Spécification des paramètres des matériaux et modèles physique	39
III.2.4.1.Matériaux	39
III.2.4.2.Modèles	40
III.2.5.Sélection de la méthode numérique	40
III.2.6.Spécification de Solution	40
III.2.6.1.Log	40
III.2.6.2.Solve	41
III.2.6.3.Save	41
III.2.7.Analyse des résultats	41
III.2.7.1.EXTRACT	41
III.2.7.2.TONYPLOT	41
III.3.Résultats de la simulation	42
III.3.1.Représentation de la structure simulée	42
III.3.2.Structure de bande d'énergie	43
III.3.3.Recombinaison Auger	43
III.3.4.Recombinaison Shockley-Read-Hall	44
III.3.5.Recombinaison radiative	45

III.3.6.Caractéristique courant-tension	47
III.3.7.Puissance spectrale	49
III.3.8.Caractéristique puissance optique-courant	50
III.3.9.Efficacité quantique interne	51
III.3.10.Efficacité quantique externe	53
Conclusion générale	55
Bibliographie	
Résumés	

Liste de figures

Figure I.1: Bandes d'énergies pour les matériaux Isolant, Semi-conducteur et Conducteur.	5
Figure I.2: Semi-conducteurs type N et type P.	7
Figure I.3: Processus de recombinaison radiative: (a) directe, (b) indirecte.	9
Figure I.4: Processus de recombinaison Auger: (a) directe, (b) indirecte.	10
Figure I.5: Processus de recombinaison Shockley-Read-Hall.	10
Figure I.6: Processus de recombinaison en surface.	11
Figure I.7: Maille unitaire Wurtzite du GaN.	13
Figure I.8: Gap énergétique et spectre visible par rapport à la constante de réseau pour divers semi-conducteurs, y compris les matériaux à large bande interdite.	14
Figure I.9: Puits quantiques InGaN/GaN.	15
Figure II.1: Jonction P-N d'une diode.	18
Figure II.2: Principe de fonctionnement de LED.	19
Figure II.3: Structure de base d'une diode électroluminescente LED.	21
Figure II.4: Circuit de polarisation de la LED.	22
Figure II.5: Caractéristique courant-tension de la diode à base de: (a) Ge, (b) Si, (c) GaAs, (d) GaAsP.	22
Figure II.6: Schéma de principe d'une LED à homojonction.	23
Figure II.7: Schéma de principe d'une hétérojonction PN.	24
Figure II.8: Schéma de principe d'un puits quantique PN.	24
Figure II.9: Schéma de principe d'une LED de faible puissance.	25
Figure II.10: Schéma de principe d'une LED de forte puissance.	27
Figure III.1: Organigramme de la structure VWF.	32
Figure III.2: Entrées et sorties d'ATLAS.	34
Figure III.3: Environnement Deckbuild.	35
Figure III.4: Fenêtre de Tonyplot.	35
Figure III.5: Exemple démaillage d'une diode électroluminescente.	37
Figure III.6: Régions avec les matériaux définis.	38
Figure III.7: Définition des électrodes.	38
Figure III.8: Distribution du dopage dans les régions.	39
Figure III.9: Schéma de la structure simulée.	42

Figure III.10: Structure de bande d'énergie à l'équilibre thermique.	43
Figure III.11: Recombinaison Auger pour plusieurs températures.	44
Figure III.12: Recombinaison Shockley-Read-Hall pour plusieurs températures.	45
Figure III.13: Recombinaison radiative pour différentes températures.	46
Figure III.14.a: Caractéristique courant-tension de la LED simulée en échèle linéaire à différents températures.	47
Figure III.14.b: Caractéristique courant-tension de la LED simulée en échèle semi-logarithmique pour 200K, 300K et 400K.	48
Figure III.15: Puissance spectrale pour différentes températures.	49
Figure III.16: Caractéristique puissance optique-courant de la LED simulée pour différentes températures.	50
Figure III.17.a: Efficacité quantique interne pour différentes températures.	52
Figure III.17.b: Recombinaison radiative pour différentes températures.	52
Figure III.18: Efficacité quantique externe de la LED simulée pour sept températures.	54

Liste de Tableaux

Tableau I.1: Extrait de la classification périodique des éléments.	7
Tableau I.2: Paramètres des principaux composés binaires (III-V).	8
Tableau II.1: Différentes familles des diodes électroluminescentes.	26
Tableau II.2: Comparaison des différentes méthodes pour obtenir de la lumière blanche par les LED.	28
Tableau III.1: Paramètres des matériaux utilisés dans les simulations.	42

INTRODUCTION GENERALE

La technologie d'éclairage par les diodes électroluminescentes (LED) devient rapidement la source d'éclairage dominante dans le monde moderne. Les facteurs principaux qui stimulent la croissance de la technologie d'éclairage à LED sont la consommation d'énergie électrique plus basse, durée de vie plus longue, non-toxicité et durabilité plus élevée.

Au cours des deux dernières décennies, il y a eu des progrès remarquables dans le développement d'InGaN/GaN à base de diodes électroluminescentes destinées à être utilisées dans des applications d'éclairage et d'affichage à semi-conducteurs en raison à leur haute efficacité et à leur respect de l'environnement. Bien que des rendements élevés aient été atteints à des densités de courant relativement faibles, les LED bleues à base de GaN souffrent d'une diminution significative en efficacité en fonction de la température [1].

Dans ce travail, nous allons étudier l'effet de la température sur une diode électroluminescente à puits quantique à l'aide d'un logiciel de simulations SILVACO-ATLAS.

Ce manuscrit est donc constitué de trois chapitres, il est organisé comme suit:

Le premier chapitre présente de manière succincte les semi conducteurs III-V ainsi que les Mécanismes de recombinaison et puits quantique du nitride d'Indium-Gallium.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des diodes électroluminescentes à savoir leur principe de fonctionnement, leurs caractéristiques, ses classifications et comparaison avec des différentes sources de lumières et en plus avantages et inconvénients de diode électroluminescente.

Le troisième chapitre contient deux parties, la première partie nous présenterons le logiciel de simulation SILVACO, ses modules et outils de simulation; nous décrirons ensuite les procédés technologiques nécessaires à la réalisation de notre structure LED bleue à base de puits quantique InGaN en utilisant présentation du logiciel de simulation SILVACO et dans la deuxième partie nous intéresserons à étudier par simulation l'effet de température sur les caractéristiques électriques et optiques de la structure LED à d'un seul puits quantique InGaN.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale où seront rassemblés nos principaux résultats et les perspectives du travail que nous avons effectué.

Chapitre I:
Généralités sur les semi-
conducteurs III-V

I.1.Introduction

Les alliages semi-conducteurs sont des matériaux qui donnent la possibilité de moduler l'amplitude du gap et d'autres paramètres physiques du matériau afin d'optimiser et d'élargir leurs applications microélectroniques et optoélectroniques. La technologie actuelle s'intéresse beaucoup à cette famille de matériaux, c'est la raison pour laquelle la théorie des alliages est devenue un sujet de recherche important. Plus récemment, des études avancées sur une nouvelle classe des alliages binaires, ternaires et quaternaires III-V à base de nitrure ont été élaborées vu leurs propriétés structurales et électroniques importantes en vue de la fabrication des dispositifs optoélectroniques qui présentent des performances exceptionnelles, malgré une densité de dislocations très élevée ($>10^{18} \text{ cm}^{-1}$) [2].

I.2.Différents types des matériaux solides

Les matériaux sont des substances naturelles, artificielles ou synthétiques, on peut distinguer plusieurs types de matériaux: solides (cristallin, amorphe), liquides (visqueux, non visqueux) ou gaz (parfait, réel). Les matériaux solides peuvent être classés en trois groupes qui sont: les isolants, les semi-conducteurs, et les conducteurs. On distingue ces types de matériaux en fonction de leur résistivité ρ [3].

I.2.1.Conducteurs

Une partie des électrons possède une énergie suffisante pour se libérer presque totalement des forces d'interaction avec le réseau. La présence des électrons libres dans la couche périphérique est à l'origine de la conductivité électrique. Leur niveau d'énergie est situé dans la bande de conduction comme le montre la figure (I.1) [3].

I.2.2.Isolants

Tous les électrons sont fortement liés aux atomes du cristal. L'énergie nécessaire pour les libérer est très élevée en particulier devant l'énergie thermique ou électrostatique qu'on peut fournir en élevant la température ou en appliquant un champ électrique. Leur mobilité est nulle, voir la figure (I.1) [3].

I.2.3.Semi-conducteurs

Ils ont une résistivité intermédiaire entre les conducteurs et les isolants et sont isolants au zéro absolu. Les électrons libres et les trous mobiles sont les porteurs de charges responsables de la conductivité électrique. Les matériaux qui nous intéressent sont les semi-conducteurs. Dans ces matériaux, la distance séparant la bande de valence de la bande de conduction est beaucoup plus petite que dans le cas d'isolants. Pour transférer un électron de la bande de valence à la bande de conduction, il faut fournir une énergie supérieure à seulement 1-3eV, la figure (I.1) représente les bandes d'énergies pour les matériaux Isolant, Semi-conducteur et Conducteur [3].

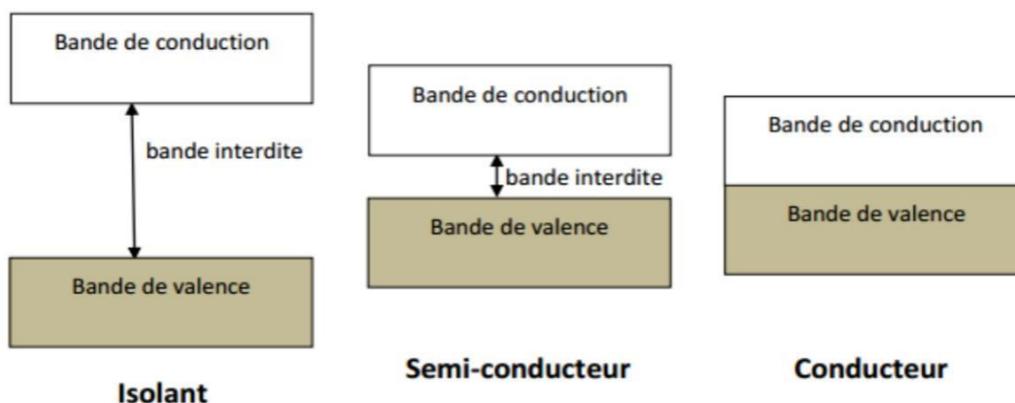


Figure I.1: Bandes d'énergies pour les matériaux Isolant, Semi-conducteur et Conducteur [3].

I.3.Différents groupes des semi-conducteurs

La recherche sur les matériaux semi-conducteurs a commencée au début du 19^{ème} siècle. Au fil des années de nombreux semi-conducteurs ont été étudiées. Parmi les plus célèbres, nous trouvons Le silicium *Si* et le germanium *Ge* de la colonne IV du tableau périodique. Ces deux semi- conducteurs sont composés d'atomes identiques, mais d'autres, semi-conducteurs comme l'arséniure de Gallium *GaAs* (III-V) sont composés d'atome d'éléments différents: *Ga* (III) et *As* (V). La Composition de semi-conducteurs permet d'accéder à des propriétés électriques et optiques que n'ont pas les semi-conducteurs purs [3].

I.4. Dopage des semi-conducteurs

Afin d'améliorer la conduction d'un semi-conducteur, Le dopage est indispensable. Ce dernier est défini par la substitution d'atomes du cristal semi-conducteur par des atomes contenant un nombre d'électrons de valence immédiatement supérieur ou inférieur.

Il existe deux types de dopage [4]:

- Le dopage de type N, qui consiste à produire un excès d'électrons, qui sont négativement chargés.
- Le dopage de type P, qui consiste à produire une carence en électrons, donc un excès de trous, considérés comme positivement chargés.

I.4.1.Semi-conducteur type N

Le Silicium ou le Germanium cristallise dans une structure où chaque atome est relié à 4 atomes voisins par des liaisons covalentes impliquant deux électrons pour chaque liaison.

Si on introduit un atome ayant 5 électrons de valence (Phosphore, Arsenic), cet atome prend la place d'un atome du cristal, 4 des électrons de l'impureté participeront aux 4 liaisons avec les 4 atomes voisins du cristal, le 5^{ème} électron restera célibataire. A cet atome d'impureté est associé un niveau d'énergie appelé niveau donneur qui se situe juste en dessous de la bande de conduction figure (I.2). L'écart entre ce niveau et la bande de conduction étant faible, un électron d'un niveau donneur peut facilement passer dans la bande de conduction sous l'action de l'agitation thermique et augmenter la conductivité électrique. A température ambiante, presque toutes les impuretés sont ionisées et la conductivité devient une conductivité de type N lorsqu'on augmente le dopage [4].

I.4.2.Semi-conducteur type P

Si on introduit un atome d'impureté trivalent (Bore, Aluminium ou Gallium), cet atome en se plaçant dans le réseau ne peut saturer que 3 liaisons sur 4. Il manque donc une liaison par atome d'impureté auquel correspond un niveau d'énergie situé juste au dessus de la bande de valence. Ce niveau est appelé niveau accepteur. A $T=0K$, les niveaux accepteurs sont vides figure (I.2). Lorsqu'on augmente la température, ils peuvent être occupés par des électrons provenant de la bande de valence. Les niveaux libres de cette

dernière engendrent des trous et la conductivité devient de type P lorsqu'on augmente le dopage [4].

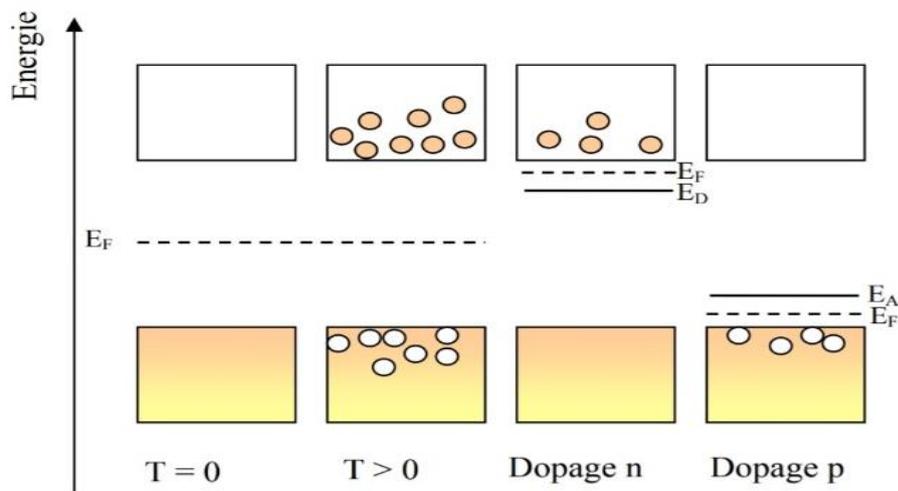


Figure I.2: Semi-conducteurs type N et type P [4].

I.5. Matériaux semi-conducteurs III-V

Les semi-conducteurs III-V sont des matériaux composés d'éléments de la colonne III et de la colonne V du tableau périodique de Mendeleïev. Parmi tous les composés possibles, les composés les plus légers comme le bore, l'aluminium ou l'azote présentent une structure de bandes à large bande interdite. A l'autre extrémité, les éléments lourds comme le thallium ou le bismuth donnent des composés à caractère métallique [2].

Le tableau (I.1) regroupe un extrait de cette classification (les chiffres en haut et bas représentent respectivement le nombre atomique et la masse atomique).

Tableau I.1: Extrait de la classification périodique des éléments [5].

III	IV	V
$10.81^{5}B$	$12.01^{6}C$	$14.01^{7}N$
$26.98^{13}Al$	$28.09^{14}Si$	$30.97^{15}P$
$69.73^{31}Ga$	$72.59^{32}Ge$	$74.92^{33}As$
$114.82^{49}In$	$118.69^{50}Sn$	$121.75^{51}Sb$

I.5.1. Composés binaires

Les composés binaires possibles n'ont pas le même intérêt potentiel. L'étude de leurs propriétés, et en particulier de la structure de bandes montre que les éléments les plus légers donnent des composés dont lesquels la bande interdite est large et indirecte, et dans lesquels la masse effective des électrons est élevée. Les composés contenant du bore, de l'aluminium ou de l'azote entrent dans cette catégorie. Ils ont en général peu d'intérêt pour l'électronique rapide, qui demande des semi-conducteurs à forte mobilité de porteurs ou pour l'optoélectronique où une structure de bande directe est nécessaire pour que les transitions optiques soient efficaces. A l'autre extrémité, les éléments lourds comme le thalium (${}_{81}Ti$) ou le bismuth (${}_{83}Bi$) donnent des composés à base de Galium (GaAs, GaSb) ou d'indium (InP, InAs, InSb) dont les propriétés sont les plus intéressantes [4].

Le tableau (I.2) résume quelques paramètres pour différents matériaux de la famille III-V:

Tableau I.2: Paramètres des principaux composés binaires (III-V) [2].

Binaires III-V	E_g (eV)	m^*/m_0	μ (cm ² /VS)	a (Å°)
BN	7,5			3,6150
AlP	2,45			5,4510
AlAs	2,16			5,6605
AlSb	1,58	0,12	200	6,1355
BP	2,0			4,5380
GaN	3,36	0,19	380	3,189
GaP	2,26	0,82	110	5,4512
GaAs	1,42	0,067	8500	5,6533
GaSb	0,72	0,042	5000	6,0959
InP	1,35	0,077	4600	5,8686
InAs	0,36	0,023	33000	6,0584
InSb	0,17	0,0145	80000	6,4794

I.5.2. Composés ternaires et quaternaires

L'intérêt pratique des semi-conducteurs III-V est encore considérablement renforcé par la possibilité de réaliser des alliages par substitution partielle de l'un des éléments par un autre élément de la même colonne. On sait par exemple obtenir des alliages ternaires du type $In_{1-x}Mn_xP$ ou quaternaire comme $G_{x(1-x)}P_{y(1-y)}$ [3].

I.6. Mécanismes de recombinaison

Nous présentons dans ce paragraphe les trois mécanismes les plus courants pour la Recombinaison de porteurs excédentaires [6]:

I.6.1. Recombinaison radiative

C'est une transition d'un électron de la bande de conduction à la bande de valence accompagnée de l'émission d'un photon figure (I.3.a). La recombinaison radiative peut aussi se produire par l'intermédiaire de niveaux profonds figure (I.3.b) [6].

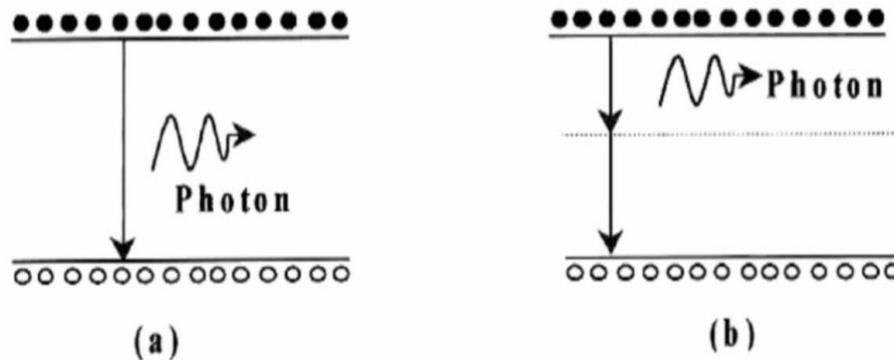


Figure I.3: Processus de recombinaison radiative: (a) directe, (b) indirecte [6].

Le taux de recombinaison est proportionnel à la fois au nombre d'électron et au nombre de trous [7,8]:

$$R_d = B(p n - n_i^2) \quad (\text{I.1})$$

Avec:

B est le coefficient de recombinaison radiative, sa valeur est égale à $9,5 \times 10^{-5} \frac{cm^{-3}}{s}$.

I.6.2. Recombinaison Auger

Dans ce mécanisme un électron se recombine avec un trou de la bande de valence et l'énergie dissipée est gagnée par un troisième porteur. La recombinaison Auger peut être directe figure (I.4.a) ou indirecte figure (I.4.b). La recombinaison Auger indirecte peut se produire lorsque le semi-conducteur est fortement dopé [6].

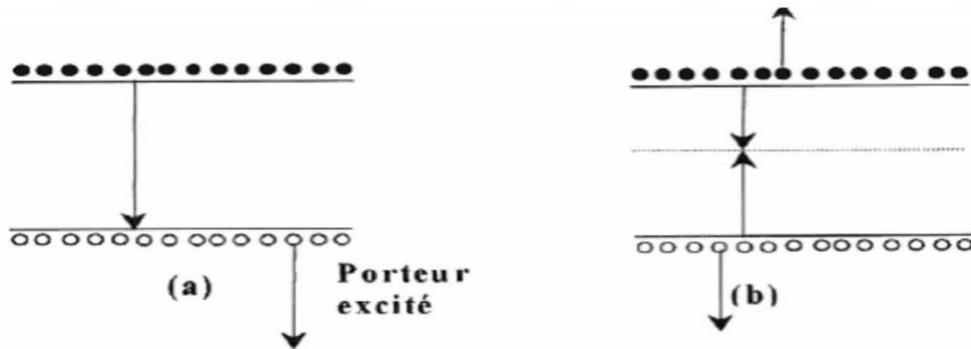


Figure I.4: Processus de recombinaison Auger: (a) directe, (b) indirecte [6].

Le taux de recombinaison est donné par la relation [7,8]:

$$R_{Auger} = C_{Aug.n}(pn^2 - nn_i^2) + C_{Aug.p}(np^2 - pn_i^2) \quad (I.2)$$

Avec:

$C_{Aug.n}$ et $C_{Aug.p}$ sont les coefficients Auger pour les électrons et les trous.

I.6.3. Recombinaison Shockley-Read-Hall

Ce processus de recombinaison (SRH) est indirect figure (I.5). En effet, il se produit par l'intermédiaire de niveaux profonds E_t situés dans la bande interdite et s'accompagne de vibrations de réseau (émission de phonons) [6].

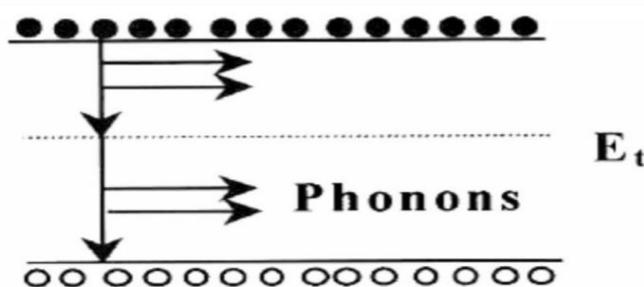


Figure I.5: Processus de recombinaison Shockley-Read-Hall [6].

Ils est donnée par la relation suivante [7]:

$$R_{RSH} = \frac{p n - n_i^2}{\tau_n \left(p + n_{ie} e^{-\frac{E_t}{KT}} \right) + \tau_p \left(n + n_{ie} e^{\frac{E_t}{KT}} \right)} \quad (\text{I.3})$$

Où:

E_t représente l'énergie du niveau piège proche du milieu de la bande interdite,

E_i est le niveau de Fermi dans le semi-conducteur intrinsèque,

τ_n et τ_p sont respectivement la durée de vie pour les électrons et les trous, donnée par la relation suivante:

$$\tau_n = \frac{1}{C_n N_T}; \tau_p = \frac{1}{C_p N_T} \quad (\text{I.4})$$

n_{ie} est la concentration intrinsèque effective donnée par la relation suivante:

$$n_{ie}^2 = p \cdot n \cdot \exp\left(\frac{\Delta E g_n + \Delta E g_p}{KT}\right) \quad (\text{I.5})$$

Elle est due au rétrécissement de la bande interdite pour un semi-conducteur fortement dopé $\Delta E g_n$ et $\Delta E g_p$ présentent le rétrécissement de la bande interdite.

I.6.4. Recombinaison en surface

L'ensemble des mécanismes précédents constitue des recombinaisons ayant lieu en volume du matériau. Il faut également considérer les recombinaisons en surface dont le mécanisme est représenté sur la figure (I.6). Le formalisme du mécanisme de recombinaison (SRH) peut être reformulé dans ce cas, avec des recombinaisons par unité de surface plutôt que par unité de volume [6].

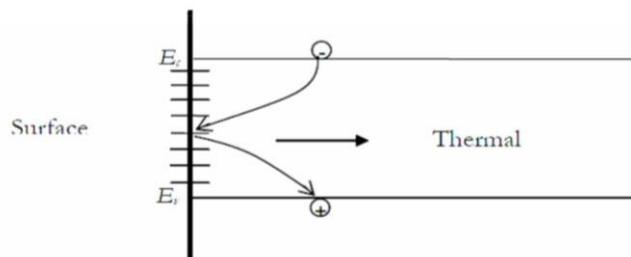


Figure I.6: Processus de recombinaison en surface [6].

Ils est donnée par la relation suivante [9]:

$$R_{Surf} = \frac{n_s p_s - n_i^2}{\tau_p \left(n_s + n_{ie} e^{\frac{E_t}{kT}} \right) + \tau_n \left(p_s + n_{ie} e^{-\frac{E_t}{kT}} \right)} \quad (I.6)$$

Avec:

n_s et p_s sont les concentrations de porteurs à la surface.

1.7. Structure cristallographique

Les nitrures d'éléments III sont formés par l'association d'un ou plusieurs éléments de la colonne III du tableau périodique (Aluminium (Al), Gallium (Ga) et Indium (In)) avec l'élément Azote (N) de la colonne V. Ces semi-conducteurs cristallisent majoritairement sous la forme d'une structure de type Wurtzite (WZ ou phase- α), stable à température ambiante. D'autres formes sont également possibles, c'est le cas de la structure Sphalérite (Zinc-Blende ou phase- β) moins courante ou de la phase Halite (NaCl ou phase- β) que l'on retrouve à très haute pression.

Dans la suite de ce manuscrit seule la structure Wurtzite sera étudiée. La structure Wurtzite idéale est hexagonale et comprend deux réseaux hexagonaux formés chacun d'atomes d'azote ou de métal, décalés d'une distance $u = 3/8$ dans la direction [0001]. Le groupe d'espace est $P6_3mc$ et le groupe ponctuel du cristal est $\frac{6}{m}$ mm. L'absence de symétrie est responsable de la polarité de la structure. Nous détaillerons cette spécificité dans le paragraphe suivant. La figure (I.7) représente la maille unitaire du GaN type Wurtzite (WZ).

La maille élémentaire WZ est définie dans la base hexagonale (\vec{a} , \vec{b} , \vec{c}) avec $a = b \neq c$ et $\alpha = \beta = 90^\circ$ et $\gamma = 120^\circ$ [9].

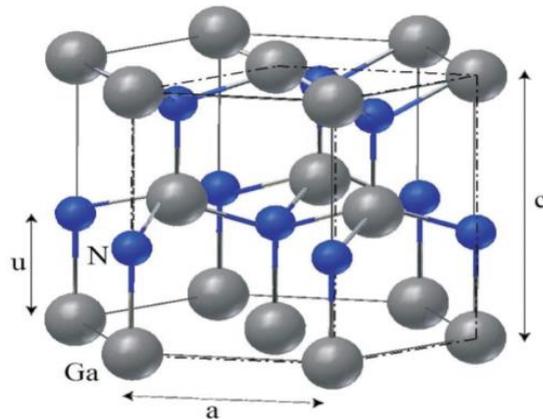


Figure I.7: Maille unitaire Wurtzite du GaN [9].

I.8. Bande interdite de GaN

Comme nous l'avons déjà signalé, l'intérêt majeur des nitrures du groupe III réside dans leur large bande interdite directe. Le minimum de la bande de conduction (BC) et le maximum de la bande de valence (BV) se trouvent aligner dans l'espace des K. En effet, le gap présenté par ces semi-conducteurs est assez grand pour que lorsqu'un électron se déplace de la bande de conduction à la bande de valence, le photon libéré possède une énergie correspondante à la valeur du gap [10].

A 300K, le gap de GaN est de 3.4eV, ce qui correspond à une longueur d'onde dans la région proche ultraviolette (UV) du spectre optique. L'ajout d'In ou Al permet de réaliser des alliages ternaires d'InGaN ou d'AlGaN. En fonction de la concentration d'Al ou In, on peut faire varier l'énergie de la bande interdite de $\sim 0.7\text{eV}$ (pour l'InN) à $\sim 6.3\text{eV}$ (pour l'AlN). Ceci permet de couvrir presque la totalité de la gamme spectrale allant du rouge aux UV profonds. La figure (I.8) montre la variation possible de la largeur de la bande interdite de GaN par la réalisation d'alliages ternaires InGaN et AlGaN [11].

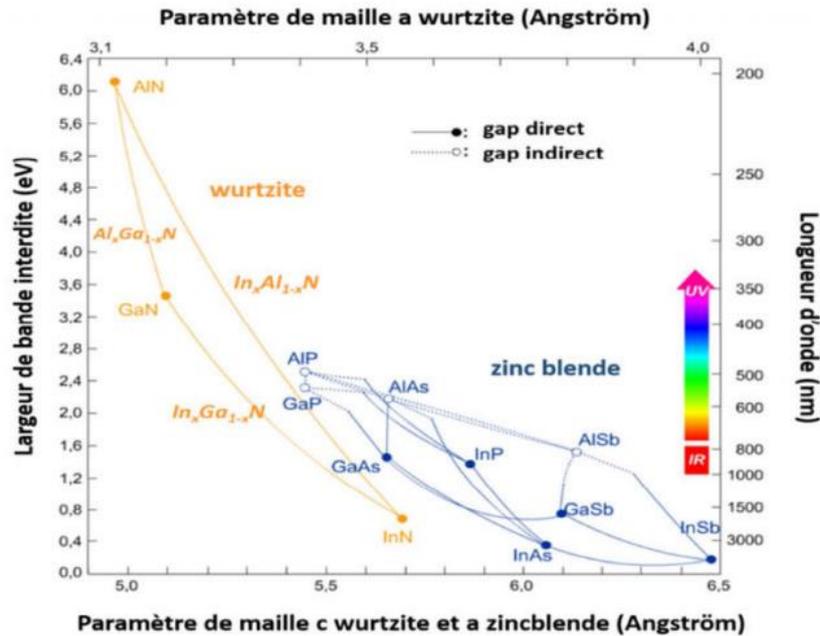


Figure I.8: Gap énergétique et spectre visible par rapport à la constante de réseau pour divers semi-conducteurs, y compris les matériaux à large bande interdite [11].

Dans les années 90, on a vu l'apparition des premières LED bleues réalisées sur des couches de nitrure de gallium déposées par épitaxie sur des substrats saphir ou SiC. Par adjonction d'un matériau luminophore, il est possible d'étendre le spectre bleu et d'obtenir une émission sur plusieurs longueurs d'onde, aboutissant à la lumière blanche.

I.9. Description de InGaN

L'InGaN est un semi-conducteur faisant partie des composés III-N, c'est-à-dire, composés d'azote et d'un ou plusieurs éléments de la colonne III (bore, gallium, aluminium, indium, etc.) du tableau périodique de Mendeleïev. C'est un alliage entre le nitrure d'indium (InN) et le nitrure de gallium (GaN). Il apparaît à l'heure actuelle comme le matériau le plus prometteur pour les applications photovoltaïques. Il est activement étudié parce qu'il représente une nouvelle catégorie de matériaux possédant des propriétés uniques.

Un large gap d'énergie interdite direct, lui permettant une large couverture spectrale, de fortes liaisons interatomiques ou encore une forte conductivité thermique. Son gap est modulable avec le taux de substitution de l'Indium dans l'alliage.

Les propriétés du composé ternaire InGaN sont fortement liées à celles de ses composés binaires, il convient donc de décrire les propriétés de ces deux semi-conducteurs binaires, pour ensuite décrire les propriétés de l'alliage ternaire résultant [12].

I.10. Couche de AlGaN

Dans le cas des LEDs nitrures à puits quantiques, un problème majeur se pose qu'est la faible concentration en trous du type P comparée à la concentration en électrons du type N. Les électrons ont alors tendance à sortir des puits quantiques et à aller se recombiner dans le GaN de type P. Pour limiter ce problème, il a été nécessaire de co-doper la couche P afin d'augmenter le taux de recombinaison dans le puits quantique ainsi une barrière à électrons AlGaN est insérée entre les puits quantiques et le GaN de type P [11].

I.11. Puits quantique InGaN/GaN

Les puits quantique InGaN/GaN occupant une place centrale dans l'éclairage à solide. Les puits quantiques sont insérés à la jonction entre le GaN de type N et le GaN de type P comme le montre la figure (I.9). Dans un cas idéal, les électrons venant du type N diffusent vers la bande de conduction des puits quantique, de même, les trous venant du type P diffusent vers la bande de valence des puits quantiques. Les porteur se localisent alors dans les puits comme les densités de porteurs N et P sont grandes dans les puits, la recombinaison radiative devient plus rapide que la recombinaison non radiative, de sorte que l'efficacité du dispositif est augmentée de plus, la force d'oscillation est grande dans un puits quantiques [5].

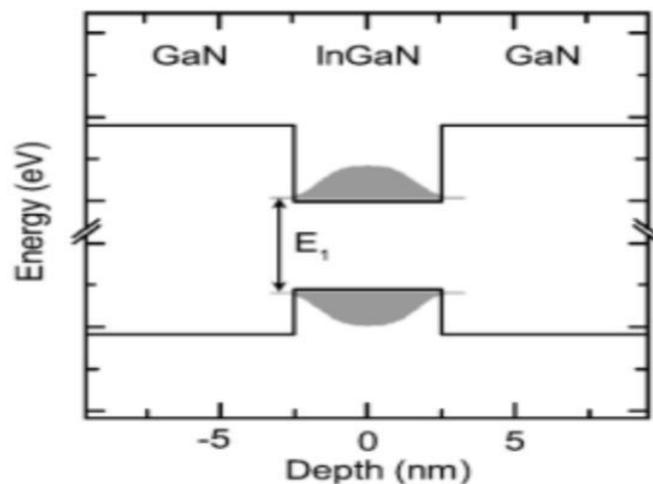


Figure I.9: Puits quantiques InGaN/GaN [5].

Chapitre II:
Notions fondamentales sur
les diodes
électroluminescentes

II.1.Introduction

Une diode électroluminescente est un dispositif optoélectronique capable d'émettre de la lumière lorsqu'il est parcouru par un courant électrique. Une diode électroluminescente ne laisse passer le courant électrique que dans un seul sens et produit un rayonnement monochromatique ou polychromatique non cohérent à partir de la conversion d'énergie électrique lorsqu'un courant la traverse.

En raison de leur rendement lumineux, les LED pourraient représenter 75% du marché de l'éclairage domestique et automobile. Elles sont aussi utilisées dans la construction des écrans plats de télévision : pour le rétro éclairage des écrans à cristaux liquides ou comme source d'illumination principale dans les télévisions à OLED [13].

II.2.Historique

L'émission de lumière par les semi-conducteurs est un phénomène connu depuis plus de 100 ans. Pendant l'investigation du passage asymétrique du courant au travers d'un contact de carborundum (SiC), le phénomène suivant a été observé: en appliquant une différence de potentiel de 10V entre deux points du cristal de carborundum, ce dernier a émis une lumière jaunâtre...». C'est ainsi qu'en 1907, le capitaine Henry Joseph Round rapporta la première émission de lumière par un cristal semi-conducteur.

Le premier brevet sur le sujet a été déposé en 1929 par un radio-technicien Russe Oleg Vladimirovich Losev. Cependant, sans explication physique du phénomène qui semblait être intermittent et capricieux, cette découverte fut rapidement oubliée. Ce n'est qu'à partir des années 1954 que les chercheurs s'intéressent aux jonctions utilisant des matériaux des groupes III-V. Ainsi, en 1961, Robert Biard et Gary Pittman déposèrent le brevet de la diode électroluminescente infrarouge suite à la découverte d'émission de lumière infrarouge par un semi-conducteur (GaAs) lorsqu'il est traversé par un courant électrique.

En 1962, Nick Holonyak et S.F. Bevacqua, consultants à General Electric signent « l'acte officiel » de naissance de la diode électroluminescente émettant dans le rouge (une jonction faite d'un alliage GaAs et GaP). En 1972, George Craford invente la LED jaune qui est 10 fois plus brillante que les LEDs rouges orange existantes.

La diode bleue a été inventée en 1990 par le Dr. Shuji Nakamura. Cette innovation a été suivie par la mise au point de la diode blanche, qui a permis de nouvelles applications majeures, notamment dans le domaine de l'éclairage et des écrans de télévision et d'ordinateurs. Les premières LEDs blanches sont peu à peu apparues sur le marché et les fabricants ont proposé des diodes de plus en plus puissantes [14].

II.3. Diodes électroluminescentes

II.3.1. Définition

La LED est assez proche des diodes électroniques classiques. Ainsi elle nécessite des techniques de conception technologiques et des matériaux semi-conducteurs identiques. Son comportement, pouvant être tantôt isolant, tantôt conducteur électrique s'explique par la théorie des bandes d'énergie. Ce comportement sera influencé par la topologie employée, le taux de dopage du semi-conducteur et des dimensions mises en œuvre.

En première approche, une LED peut être définie comme un composant électronique constitué par la juxtaposition de deux matériaux semi-conducteurs. Cette association se comporte ensuite comme la jonction P-N d'une diode. Pour cela, et encore une fois comme pour une diode, l'un des matériaux doit être dopé fortement en porteurs positifs, reproduisant ainsi la zone P, et le second en porteurs négatifs, reproduisant la zone N. L'association des deux donne donc une jonction P-N telle que décrite dans les figures (II.1) suivantes [15]:

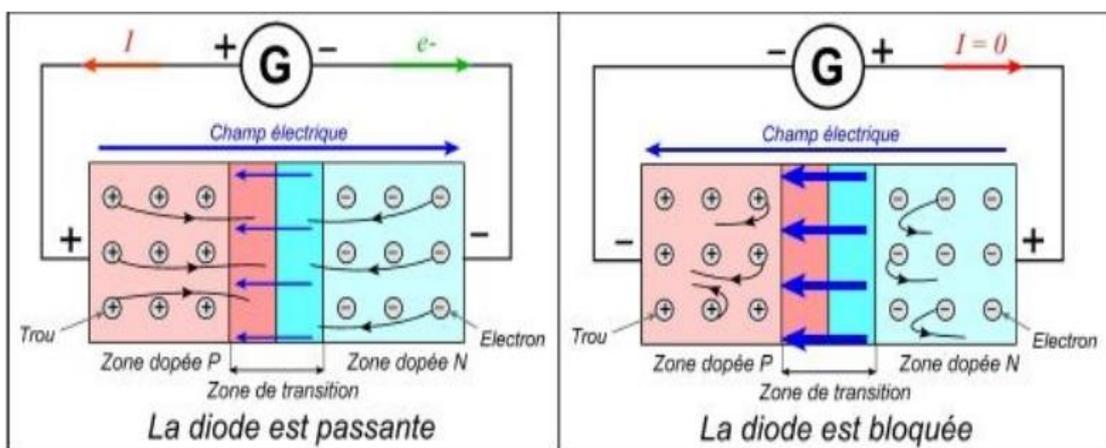


Figure II.1: Jonction P-N d'une diode [15].

II.3.2.Principe de fonctionnement

Lorsqu'une jonction P-N est polarisée dans le sens direct, les électrons, qui sont majoritaires dans la région de type N, sont injectés dans la région de type P où ils se recombinent avec les trous. Inversement pour les trous. La structure de base d'une diode électroluminescente, est une jonction P-N réalisée à partir de semi-conducteurs dans lesquels les recombinaisons des porteurs excédentaires sont essentiellement radiatives. La structure type d'une diode électroluminescente et son principe de fonctionnement sont représentés sur la figure (II.2) [16]:

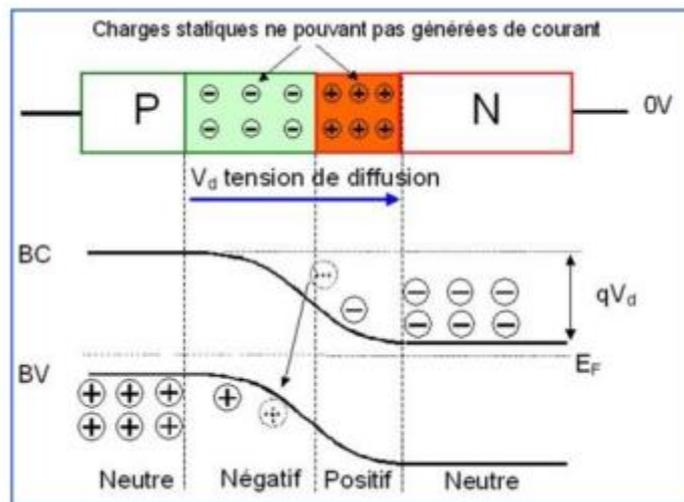


Figure II.2: Principe de fonctionnement de LED [17].

Les recombinaisons des porteurs excédentaires se manifestent dans trois régions différentes qui sont d'une part la zone de charge d'espace, et d'autre part les régions neutres N et P. Dans chacune de ces dernières, la zone émettrice est limitée à la longueur de diffusion des porteurs minoritaires. La zone de charge d'espace joue quant à elle un rôle mineur dans la mesure où elle est pratiquement inexistante en raison du fait que la jonction est fortement polarisée dans le sens direct. 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. En effet, la transition d'un électron entre la bande de conduction et la bande de valence peut se faire avec la conservation du vecteur d'onde d'un photon. Dans une transition émissive, l'énergie du photon créée est donnée par la différence des niveaux d'énergie avant (E_i) et après (E_f) la transition [18]:

$$h\nu = E_i - E_f \text{ (eV)} \quad (\text{II.1})$$

La face émettrice de la LED est la zone P car c'est la plus radiative du fait qu'elle contient la zone de recombinaison.

II.3.3. Structure de base et fonctionnement

La diode électroluminescente LED est une diode à jonction P-N réalisée sur un matériau semi-conducteur, fortement dopé, à recombinaisons radiatives. Une structure type de la diode électroluminescente est illustrée sur la figure (II.3). La LED émet un rayonnement incohérent issu d'émissions spontanées de photons [13]. Les LEDs sont structurées pour assurer la plupart des recombinaisons à lieu sur la surface par deux façons.

- En augmentant la concentration de dopage du substrat, de sorte que plus les charges libres minoritaires porteurs d'électrons se déplacent vers le haut, se recombinent et émettent de la lumière à la surface.
- En augmentant la longueur de diffusion:

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (\text{II.2})$$

Avec:

D est le coefficient de diffusion,

τ est la durée de vie.

Mais quand elle est augmentée au-delà d'une longueur critique il y a une chance de réabsorption des photons dans le dispositif.

La LED doit être structuré de telle sorte que les photons générés par le dispositif sont émis sans être absorbé. Une solution consiste à rendre la couche P sur la partie supérieure mince, assez pour créer une couche d'appauvrissement. Dans la figure suivante structure en couches. Il existe différentes façons de structurer le dôme pour l'efficacité d'émission.

Les LED sont généralement construits sur un substrat de type N, avec un électrode attachée au type P couche déposée sur sa surface. De type P substrat, tandis que moins fréquentes, se produisent aussi bien. Beaucoup des LEDs commerciales, en particulier GaN/InGaN, utilisent également un substrat en saphir [5].

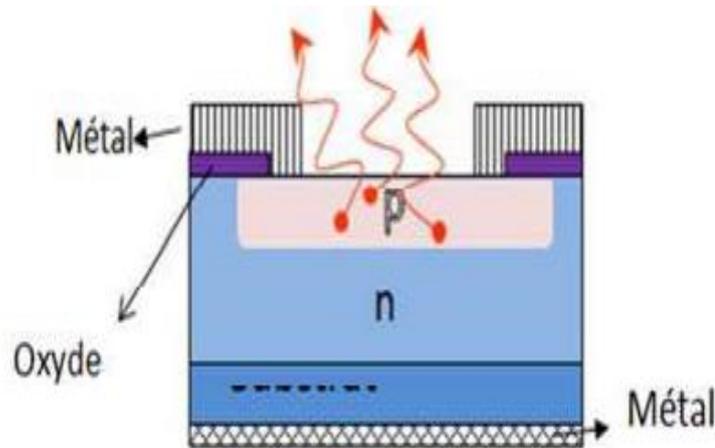


Figure II.3: Structure de base d'une diode électroluminescente LED [13].

La diode électroluminescente fonctionne sous polarisation directe. Lorsque la tension d'alimentation est assez importante, la LED doit être protégée par une résistance pour limiter le courant qui la traverse à des valeurs inférieures à l'intensité maximale de courant tolérée. Ainsi, l'alimentation de la LED se fait plutôt en courant qu'en tension, et ceci à travers la résistance, présente dans le circuit figure(II.4), qui permet de fixer ou limiter la valeur du courant ainsi que celle de la puissance lumineuse émise. Le courant qui traverse la jonction est donné par l'expression [13].

$$I = I_s (e^{V_d/KT} - 1) \quad (\text{II.3})$$

I_s : Le courant de saturation de la diode,

K : La constante de Boltzmann,

T : La Température,

V_d : La tension aux bornes de la diode.

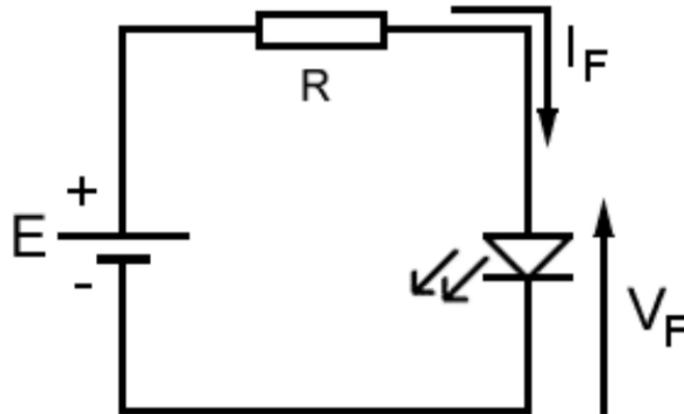


Figure II.4: Circuit de polarisation de la LED.

II.3.4. Caractéristique courant-tension des diodes électroluminescentes

La caractéristique (I-V) de la LED, illustrée sur la figure(II.5), est semblable à celle d'une diode au silicium avec une tension de seuil V_{th} assez élevée, puisqu'en relation directe avec l'énergie du photon émis [19].

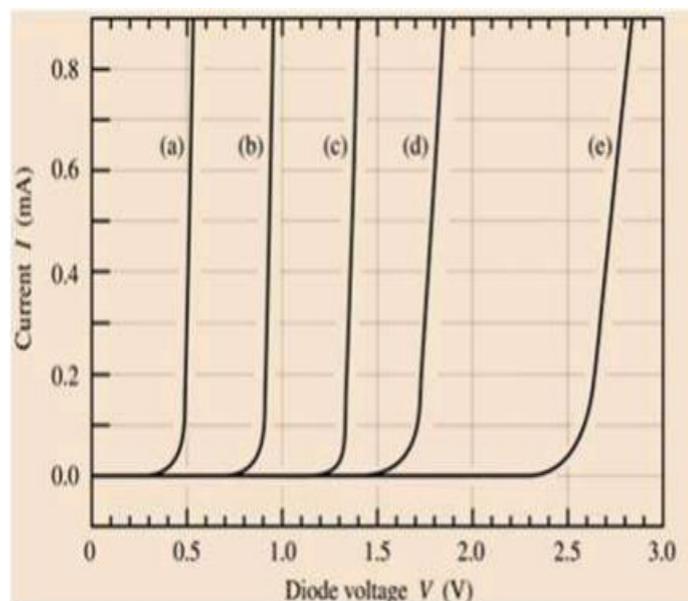


Figure II.5: Caractéristique courant-tension de la diode à base de: (a) Ge, (b) Si, (c) GaAs, (d) GaAsP [13].

La tension directe appliquée à la LED:

- Est de l'ordre de 1,1V pour les diodes à émission dans l'infrarouge,
- Varie de 1,8V à 2,5V pour les LED à émission dans le rouge, le jaune et le vert,
- Supérieur à 3,5V pour l'émission dans le bleu et le violet,
- Le courant nominal d'une diode électroluminescente est de l'ordre de 10 à 50mA.

II.4. Classification des diodes électroluminescentes

II.4.1. Classement selon la structure

II.4.1.1. Diodes électroluminescentes à homojonction

Elle est constituée du même semi-conducteur pour les deux régions dopées de type P et N. Elle résulte de la juxtaposition dans un même matériau semi-conducteur de deux zones: une de type P et l'autre de type N. Cette juxtaposition entraîne des courants de diffusion d'électrons et de trous au voisinage de la jonction. Une barrière de potentiel est alors créée. Elle s'oppose aux courants de diffusion des porteurs majoritaires de chaque zone. Cette barrière ne dépend que des travaux de sortie des deux régions (V_{bi} est déterminée par la différence entre les niveaux de Fermi) [5].

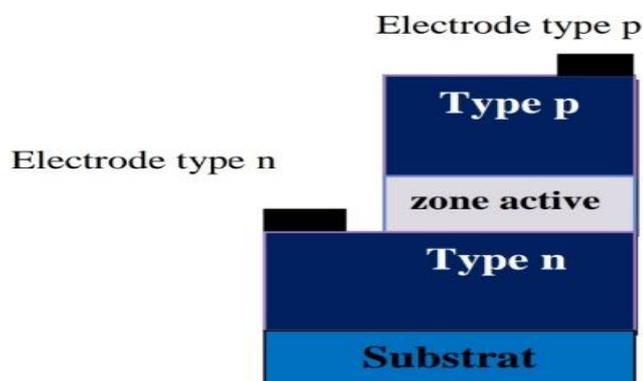


Figure II.6: Schéma de principe d'une LED à homojonction [11].

II.4.1.2. Diodes électroluminescentes à hétérojonction

Elle se forme au contact de deux matériaux semi-conducteurs ayant des valeurs de gaps différentes. On remarque sur la figure(II.7), contrairement à l'homojonction, l'apparition d'un pic qui peut également apparaître dans la bande de valence selon la nature et le dopage des deux semi-conducteurs. Dans ce cas la barrière d'énergie dépend du gap, de l'affinité électronique et de la concentration des dopants des deux semi-conducteurs [5].

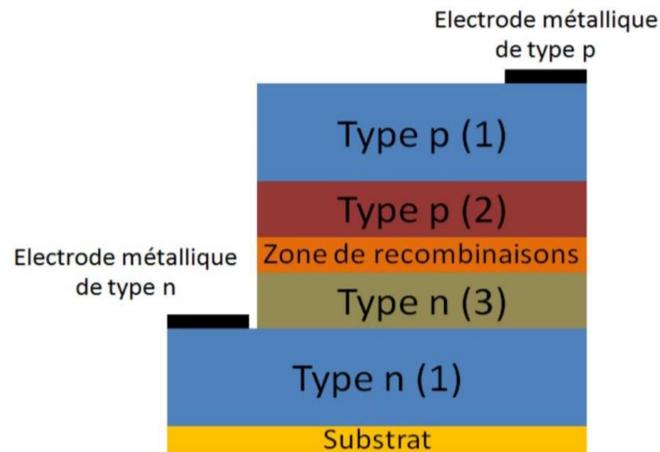


Figure II.7: Schéma de principe d'une hétérojonction PN [5].

II.4.1.3. Diodes électroluminescentes à puits quantique

Elle est obtenue en faisant croître une couche d'un matériau semi-conducteur A (typiquement quelques dizaines de nanomètres) entre deux couches d'un autre matériau semi-conducteur B. ce dernier présente un gap d'énergie supérieur à celui du matériau A. la discontinuité entre les bandes d'énergie dans les deux matériaux crée une barrière de potentiel qui confine les porteurs dans le puits quantique.

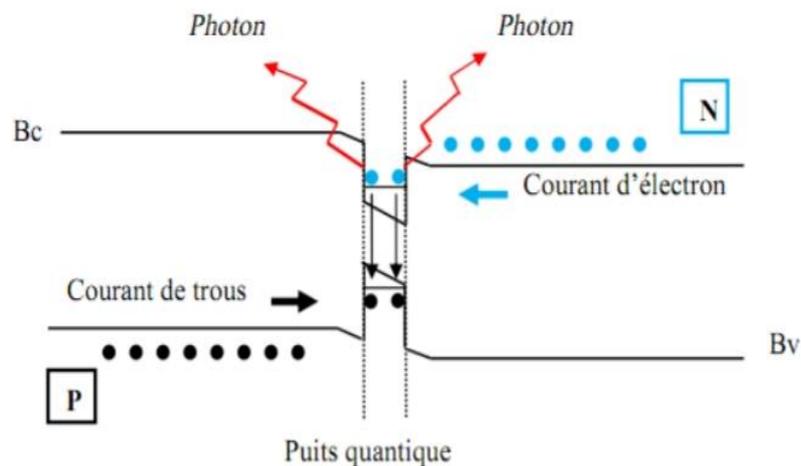


Figure II.8: Schéma de principe d'un puits quantique PN [11].

II.4.2. Classement selon la puissance

II.4.2.1. Diodes électroluminescentes de faible puissance

Les diodes électroluminescentes de faible puissance 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. Possède un dôme en époxy qui n'a pas de symétrie de révolution autour de son axe central, mais possède un bord plat du côté de la cathode. Cette caractéristique permet à l'utilisateur de pouvoir distinguer l'anode de la cathode lorsque l'identification de la longueur des pattes de la LED n'est plus possible. Ce dôme a pour rôles, d'une part, de protéger la puce semi-conductrice (jonction P-N) de l'environnement extérieur, et d'autre part, de servir de lentille optique permettant l'extraction de la lumière émise [5].

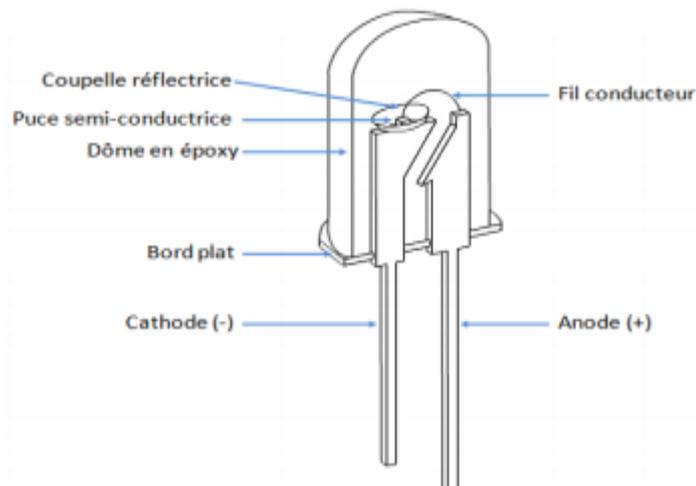


Figure II.9: Schéma de principe d'une LED de faible puissance.

II.4.2.2. Diodes électroluminescentes de forte puissance

Le principe de base reste identique à la précédente architecture. L'alimentation de la puce semi-conductrice est assurée par deux électrodes reliées par deux fils conducteurs. Contrairement à l'architecture précédente, dans celle-ci il y a une dissociation du chemin de l'alimentation électrique et de la dissipation thermique. La dissipation thermique se faisant sous le composant.

Il peut être résumé dans ce Tableau (II.1):

Tableau II.1: Les différentes familles des diodes électroluminescentes [11].

LEDs	Paramètres
LED conventionnelles (faible puissance)	Surface de la jonction : $350 \times 350 \mu\text{m}^2$ Alimentation : 30mA, 3,5V
Domaine d'application privilégié: applications nomades et signalisation	Puissance < 200mW Flux lumineux : 1-3lumens Efficacité lumineuse (pour diodes blanches) 20 lm/W Encapsulation époxy (en dôme)
HB-LED forte luminosité (forte puissance)	Surface de la jonction : $1 \times 1 \text{mm}^2$ Alimentation : 350mA, 3,5V
Domaine d'application privilégié: rétro-éclairage, automobile, éclairage	Puissance maximale 1W Flux lumineux 5-30lumens Efficacité lumineuse (pour diodes blanches) > 30lm/W Encapsulation spécifique (silicone)
UHB-LED très forte luminosité	Surface de la jonction : $2 \times 2 \text{mm}^2$ Densité surfacique de courant > 50A/cm^2
Domaine d'application privilégié: éclairage général	Puissance maximale 5W Flux lumineux > 100lumens Efficacité lumineuse (pour diodes blanches) 50lm/W Encapsulation spécifique (silicone)

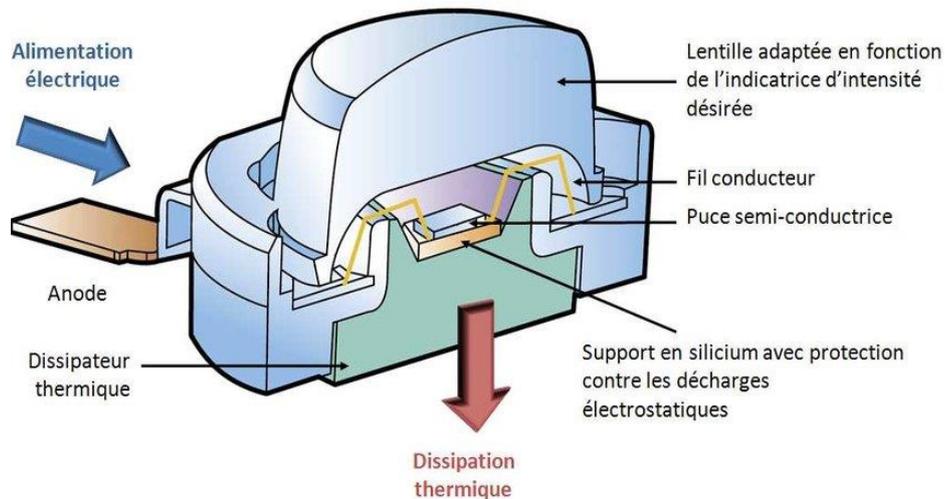


Figure II.10: Schéma de principe d'une LED de forte puissance [20].

II.4.3. 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 380-780nm) ou l'invisible (principalement l'infrarouge). La raison de la distinction réside dans le fait que certaines diodes peuvent servir à éclairer, ce qui est l'une des applications phares du futur (proche) [5]:

II.4.3.1. Diodes électroluminescentes chromatiques

L'énergie est concentrée sur une plage étroite de longueur d'onde (20 à 40nm). Ces sources ont un spectre quasiment monochromatique.

II.4.3.2. Diodes électroluminescentes blanches

L'énergie est répartie dans le visible sur toute la gamme de longueurs d'onde (380 à 780nm) environ.

Tableau II.2: Comparaison des différentes méthodes pour obtenir de la lumière blanche par les LED [11].

Méthodes	Avantages	Inconvénients
synthèse RGB	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne efficacité lumineuse. - Contrôle de la qualité de la lumière. - La minimisation des pertes électriques. - Permet de faire varier le blanc suivant les désirs de l'utilisateur. 	<ul style="list-style-type: none"> -Taille du package plus importante -Contrôle individuel de chaque LED -Il faut inclure dans un unique boîtier trois puces possédant chacune leur propre valeur de courant d'alimentation. -Le vieillissement n'est pas identique le rouge se détériore plus rapidement que le bleu ce qui provoque également une évolution de la qualité de la lumière.
LED bleue + Phosphore jaune	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne efficacité lumineuse. - Produire de la lumière blanche à partir d'une seule LED bleue. - Technologie maîtrisée et économique. 	<ul style="list-style-type: none"> -La lumière blanche obtenue est dite "froide". Pour obtenir un blanc plus chaud, une couche de phosphore qui produit un rayonnement rouge doit être ajoutée mais cette couche réduit fortement le rendement. -Mauvais IRC environ 75%. - Phénomène de « halo » coloré.
LED ultra violet + phosphores	<ul style="list-style-type: none"> -Bonne uniformité (pas de phénomène de « halo »). -Bon indice de rendu de couleurs. -Large gamme de blancs. 	<ul style="list-style-type: none"> -Rendement lumineux inférieur à la méthode bleu + phosphore(s). L'émission d'UV détériore le package, ce qui réduit la durée de vie et opacifie le boîtier. -Combiner la fabrication de LEDs avec celle des phosphores.

II.4.3.3. Diode électroluminescente infrarouges

L'énergie est émise hors du spectre de la lumière visible, au-delà de 700nm de longueur d'onde. Elles sont utilisées pour transmettre des signaux de télécommandes ou

pour de la télémétrie exploités par exemple dans la détection de position des consoles de jeux telles que la Wii, ou servir d'éclairage pour les caméras infrarouge, etc [5].

II.5. Rendement lumineux des diodes électroluminescentes

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.

$$\eta = \frac{\text{Puiss. lumineuse}}{\text{Puiss. électrique}} = \frac{\hbar\omega \cdot \text{Nbredphotonsémis/sec}}{eV_a \cdot \text{Nbred'e}^- \text{passant la jonction/sec}} \quad (\text{II.4})$$

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 [13].

$$\eta = \underbrace{\frac{\hbar\omega \cdot \text{Nbredphotonsémis/sec}}{eV_a \cdot \text{Nbredphotons créés/sec}}}_{\eta_{\text{optique}}} \underbrace{\frac{\text{Nbredphotons créés/sec}}{\text{Nbred'e}^- \text{ passant/sec}}}_{\eta_{\text{interne}}} \quad (\text{II.5})$$

L'expression du rendement d'une LED est donc la suivante:

$$\eta = \frac{\hbar\omega}{eV_a} \eta_{\text{opt}} \eta_{\text{int}} \quad (\text{II.6})$$

II.6. Avantages et inconvénients des diodes électroluminescentes

II.6.1. Avantages

Les avantages des diodes électroluminescentes sont nombreux à savoir:

- Excellente résistance mécanique (chocs, écrasement, vibrations) donc transportable.
- Très faible consommation électrique (quelques dizaines de milliwatts) grâce à un très bon rendement.
- Durée de vie beaucoup plus longue qu'une lampe à incandescence classique ou même qu'une lampe fluorescente. Néanmoins, les diodes bleues ont une durée de vie 3 fois inférieure aux autres couleurs de diodes rouge-vert-jaune

- Taille beaucoup plus petite que les lampes classiques. En assemblant plusieurs LED, on peut réaliser des éclairages avec des formes novatrices.
- Fonctionnement en très basse tension (TBT), gage de sécurité et de facilité de transport.
- Atout non négligeable en matière de sécurité, par rapport aux systèmes lumineux classiques, leur inertie lumineuse est quasiment nulle. Elles s'allument et s'éteignent en un temps très court.
- Vu leur puissance, les LED classiques 5mm 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 sans quoi la diode sera fortement endommagée voire détruite du fait de l'échauffement. En effet, une diode électroluminescente convertit environ 20% de l'énergie électrique en lumière, le reste étant dégagé sous forme de chaleur.

II.6.2. Inconvénients

- Le rendement lumineux est plus faible.
- Les LED bleues ainsi que les blanches contiennent un spectre bleu de forte intensité dangereux pour la rétine si leur rayonnement entre dans le champ de vision, même périphérique.
- 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.
- En mode photothérapie dynamique, la réaction chimique provoque une sensation de brûlure intense souvent mal supportée surtout pour de grandes surfaces traitées.
- Risques oculaires. Il a été clairement démontré que les LEDs bleues détruisaient définitivement les cellules rétinienne [21].

Chapitre III:
SILVACO et Résultats de
simulation

III.1.Introduction

Le simulateur TCAD (Technology Computer-Aided Design) est un ensemble complet d'outils indépendants permettant la simulation physique de dispositifs et systèmes électroniques. Il permet d'associer l'aspect conception technologique à la simulation électrique. Ce ci dans le but d'économiser le temps et le coût de développement, de pouvoir envisager et optimiser des solutions pour améliorer les performances des dispositifs.

Dans ce chapitre, nous présenterons le logiciel de simulation TCAD-SILVACO (ATLAS), la structure que nous avons simulée ainsi que les résultats obtenus.

III.2.Présentation du logiciel de simulation 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 [22].

Sous SILVACO, l'ensemble des outils de simulation et des outils interactifs permettant la conception et l'analyse de la plus part des dispositifs semi-conducteurs s'appelle VWF (Virtual Wafer Fab). Les composants de base de VWF sont illustrés sur la figure (III.1) [23].

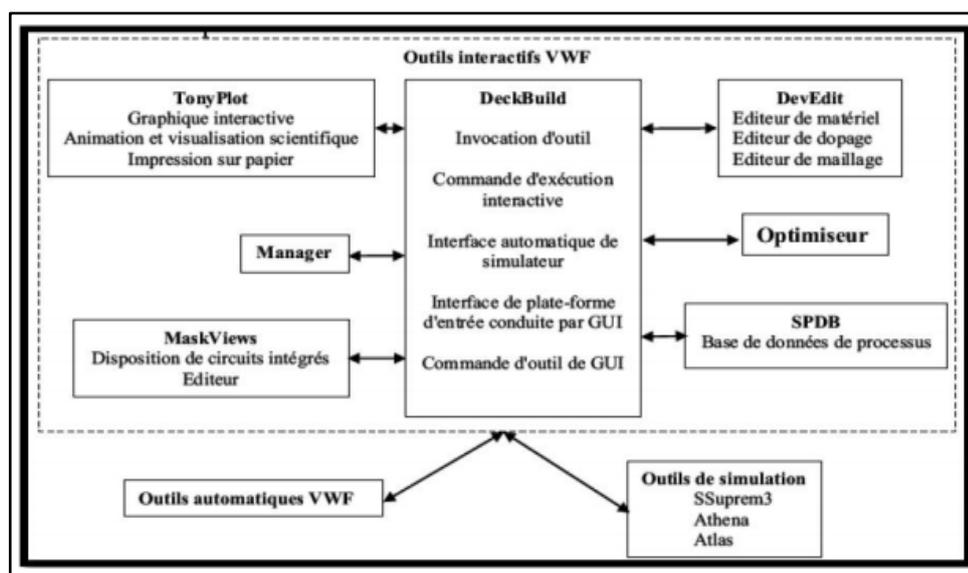


Figure III.1: Organigramme de la structure VWF.

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 simulateurs est de visualiser dans l'espace des phénomènes physiques difficilement accessibles et observables et de s'approprier de manière pédagogique les procédés de fabrication. Les modules de TCAD-SILVACO peuvent être utilisés pour:

- La simulation des étapes de fabrication technologique (ATHENA, Supreme3, etc.).
- La simulation électrique des dispositifs tels que, les diodes, les MOSFET, les transistors bipolaires, etc. (ATLAS).
- Virtual Wafer Fab pour automatiser la simulation de fabrication des Wafers [22].

Dans notre étude, les simulations sont effectuées par le module ATLAS.

III.2.2.ATLAS

ATLAS est un simulateur 2D ou 3D des dispositifs basés sur la physique de semi-conducteurs. Il prédit le comportement électrique de dispositifs à base de semi-conducteurs et fournit des informations sur les mécanismes physiques internes associés au fonctionnement des dispositifs.

Dans le schéma de la figure (III.2) nous voyons les types d'informations qui circulent en entrée et en sortie d'ATLAS. La plupart des simulations réalisées par ATLAS utilisent deux fichiers d'entrée. Le premier fichier est un fichier script contenant les commandes pour qu'ATLAS s'exécute (représente par fichier de commande). Le second fichier est un fichier de structure qui définit la structure qui va être simulée. A la sortie d'ATLAS, nous avons trois types de fichiers. Le premier de ces fichiers est la sortie "Runtime" qui donne la progression, les erreurs et les messages d'avertissements pendant la simulation. Le deuxième type de fichier est le fichier " log " qui stocke toutes les valeurs de tensions et des courants provenant de l'analyse du dispositif simulé (c'est le fichier du comportement électrique). Le troisième fichier de sortie est le fichier de solution, ce fichier stocke les données 2D ou 3D concernant les valeurs des variables solutions dans le dispositif en un point donné (c'est le fichier physique, il contient la structure dans un état particulier). Les deux derniers fichiers sont traités par l'outil de visualisation TONYPLOT.

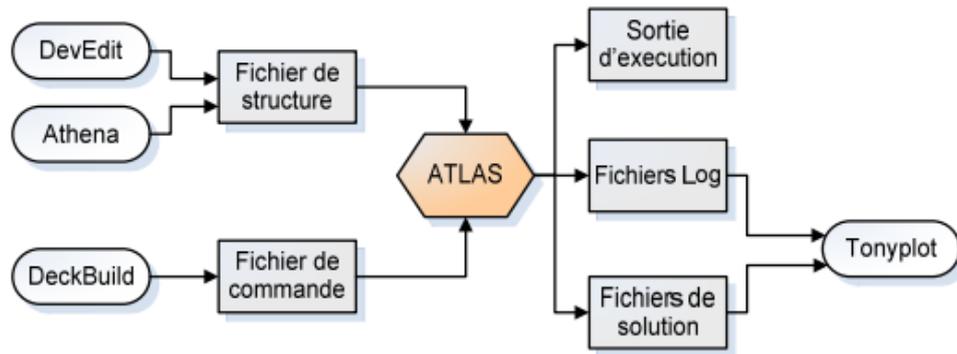


Figure III.2: Entrées et sorties d'ATLAS.

ATLAS calcule les distributions internes des paramètres physiques et prédit le comportement électrique des dispositifs en régime permanent ou transitoire. Il peut donc simuler la distribution des potentiels, des champs électriques, des porteurs et des courants, modéliser les courbes (I-V) et (C-V), les réponses en alternatif et les caractéristiques en régime transitoire.

La structure du dispositif à simuler peut être complètement arbitraire. Une fois celle-ci réalisée, elle est découpée en éléments finis, formant ainsi ce qu'on appelle un maillage. Le potentiel électrostatique et les concentrations de porteurs en fonction de l'espace et du temps sont alors calculés à chaque nœud du maillage à partir de la résolution de l'équation de Poisson et des équations de continuité.

III.2.2.1. Deckbuild

Deckbuild est un outil d'environnement d'exécution puissant qui permet à l'utilisateur de manière transparente d'aller de la simulation de processus à la simulation de dispositifs à l'extraction de modèles SPICE. Il est facile d'utiliser l'environnement de l'exécution pour exécuter des simulateurs de base tels qu'ATLAS. Deckbuild contribue à créer des fichiers d'entrée à ATLAS. Plusieurs fenêtres fournissent des ponts d'entrées à base de menus ou à base de textes pour les informations saisies. Il comprend également un grand nombre d'exemples pour tous les types de technologies. Autres outils de simulation, tels que Tonyplot, DEVEDIT et MASKVIEW peuvent également être invoqués à partir de Deckbuild. Les optimiseurs de Deckbuild contribuent à l'optimisation des cibles comme les dimensions structurelles et les paramètres des dispositifs après des tests électriques compliqués et des outputs intermédiaires [24].

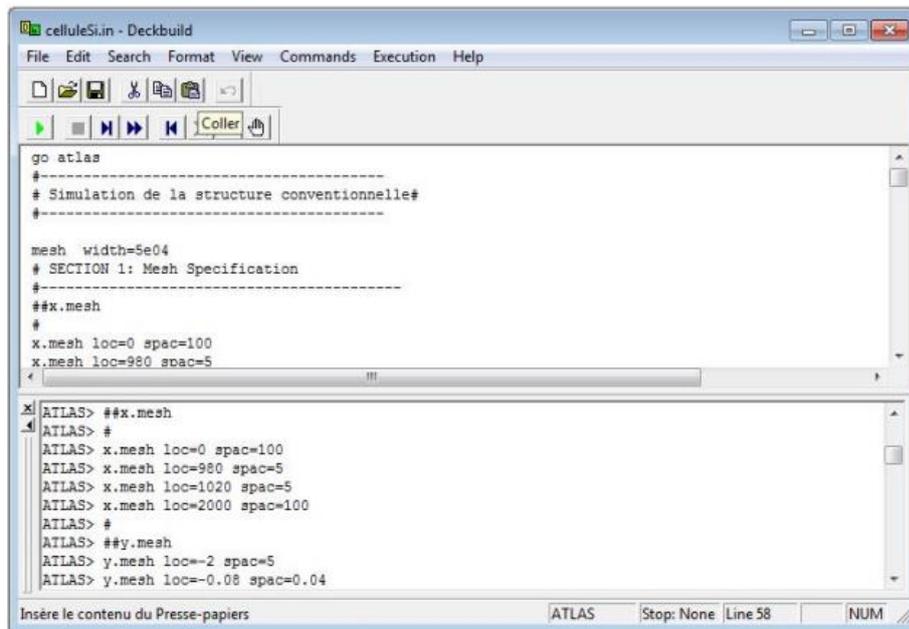


Figure III.3: Environnement Deckbuild.

III.2.2.2. Tonyplot

Tonyplot est un outil de traitement graphique utilisé avec tous les simulateurs SILVACO et fait partie intégrante des VWF (figure (III.4)). Il donne des possibilités complètes pour la visualisation et l'analyse des caractéristiques de sortie (structure du composant électronique, profil du dopage, et caractéristiques électriques). Tonyplot peut fonctionner en autonome ou avec d'autres outils interactifs de VWF, comme Deckbuild ou SPDB [25].

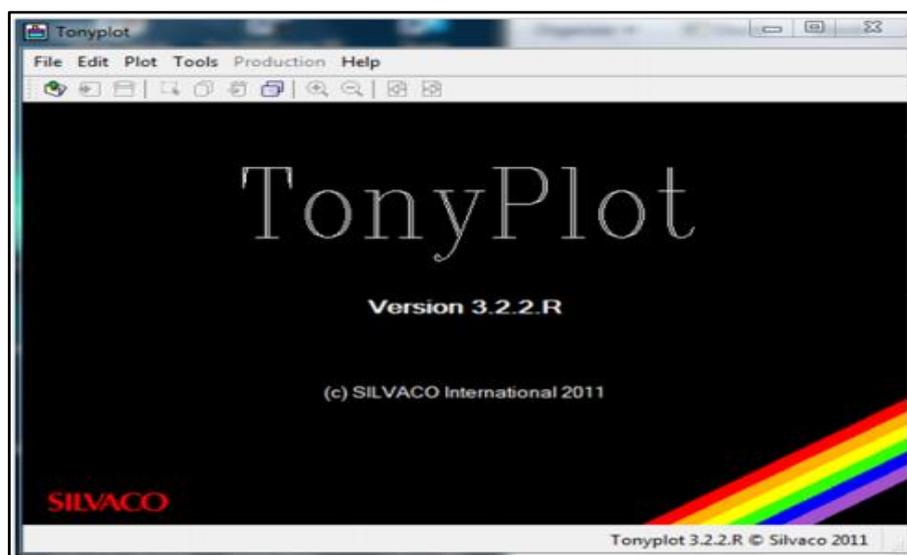


Figure III.4: Fenêtre de Tonyplot.

III.2.3. Equations de base des semi-conducteurs en ATLAS-SILVACO

De façon très succincte, nous pouvons dire que ce simulateur de dispositifs est basé sur la résolution simultanée de l'équation de Poisson et de l'équation de continuité. Il calcule à chaque instant et en tout point de l'espace en une suite d'éléments finis, la concentration des électrons et des trous et la valeur du potentiel électrostatique. L'équation de Poisson montre une relation entre le potentiel et la densité des porteurs [22]:

$$\text{div} (\epsilon \nabla V) = q (n - p - N_d^+ + N_a^-) \quad (\text{III.1})$$

Où:

ϵ est la constante diélectrique,

V est le potentiel,

q est la charge élémentaire d'électrons,

n et p sont les densités des électrons et des trous,

N_d^+ et N_a^- sont les densités de donneurs et d'accepteurs ionisés.

L'évolution temporelle des densités de porteurs obéit aux équations de continuité pour les électrons et les trous:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - R_n + \frac{1}{q} \text{div} \overrightarrow{J_n} \quad (\text{III.2})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - R_p + \frac{1}{q} \text{div} \overrightarrow{J_p} \quad (\text{III.3})$$

Où:

G et R sont respectivement les taux de génération et de recombinaison des porteurs,

$\overrightarrow{J_n}$ et $\overrightarrow{J_p}$ sont respectivement les densités de courant des électrons et des trous.

Les dérivations basées sur la théorie de transport de Boltzmann ont prouvé que la densité des courants dans les équations de continuité peut être définie par le modèle d'entraînement diffusion. Les densités de courants sont exprimées en deux termes. Le

premier correspond à l'entraînement des charges par le champ électrique, le second correspond à la diffusion des porteurs.

$$\vec{J}_n = q n \mu_n \vec{E} + q D_n \overrightarrow{\text{grad } n} \quad (\text{III.4})$$

$$\vec{J}_p = q p \mu_p \vec{E} + q D_p \overrightarrow{\text{grad } p} \quad (\text{III.5})$$

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad } V} \quad (\text{III.6})$$

III.2.4. Syntaxe d'un programme dans ATLAS

III.2.4.1. Mesh

Le programme met une grille sur la structure, où il joue un rôle important pour obtenir une bonne simulation, qui est un ensemble de lignes horizontales et verticales. Dans notre étude, nous utilisons une grille bidimensionnelle et donc seuls les arguments x et y sont définis. Nous avons utilisé le maillage représenté sur la figure (III.5).

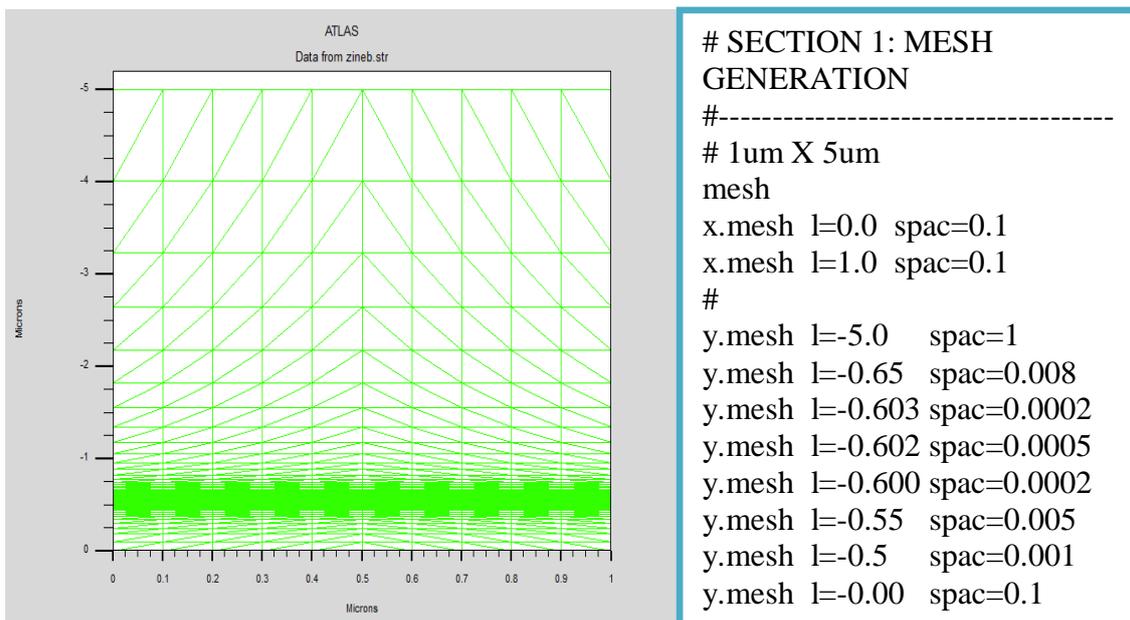


Figure III.5: Exemple de maillage d'une diode électroluminescente.

III.2.4.2. Region

Après l'opération du maillage, vient l'étape de définition des régions. Ces dernières déterminent les différentes couches formant la diode électroluminescente. La figure (III.6) montre les zones avec les matériaux utilisés dans cette étude.

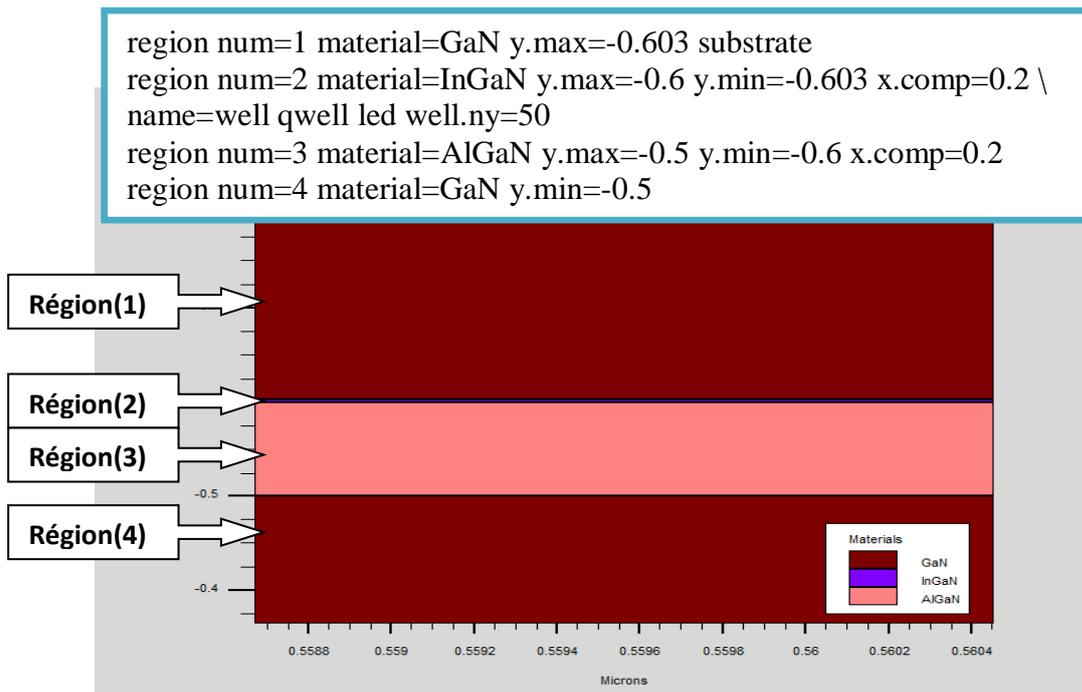


Figure III.6: Régions avec les matériaux définis.

III.2.4.3. Electrode

Une fois les régions et les matériaux sont spécifiés, l'étape suivante est la définition des électrodes. Dans cette simulation, nous n'avons utilisé que deux électrodes, une anode et une cathode. La figure (III.7) présente les électrodes utilisées dans cette étude.

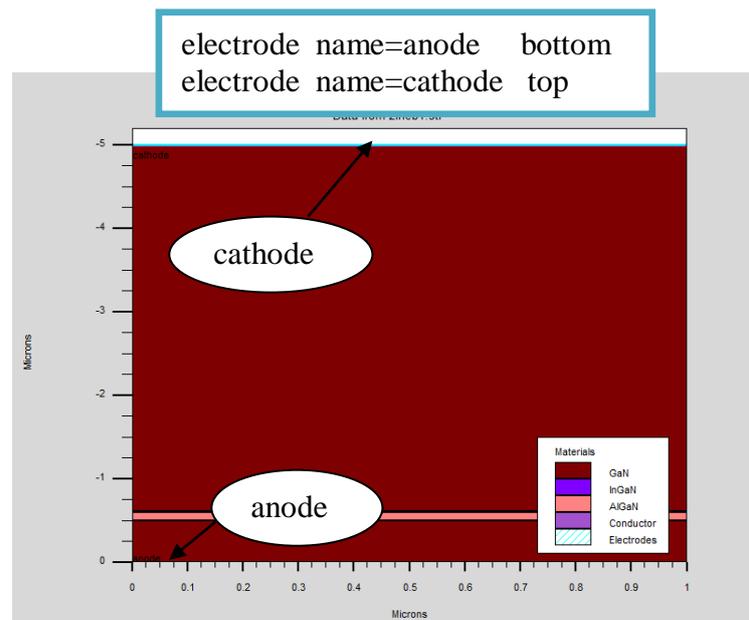


Figure III.7: Définition des électrodes.

III.2.4.4. Doping

C'est le dernier médiateur de la structure, et il est d'un type N ou P. Sa distribution est également uniforme. La figure (III.8) représente la distribution du dopage dans les différentes régions.

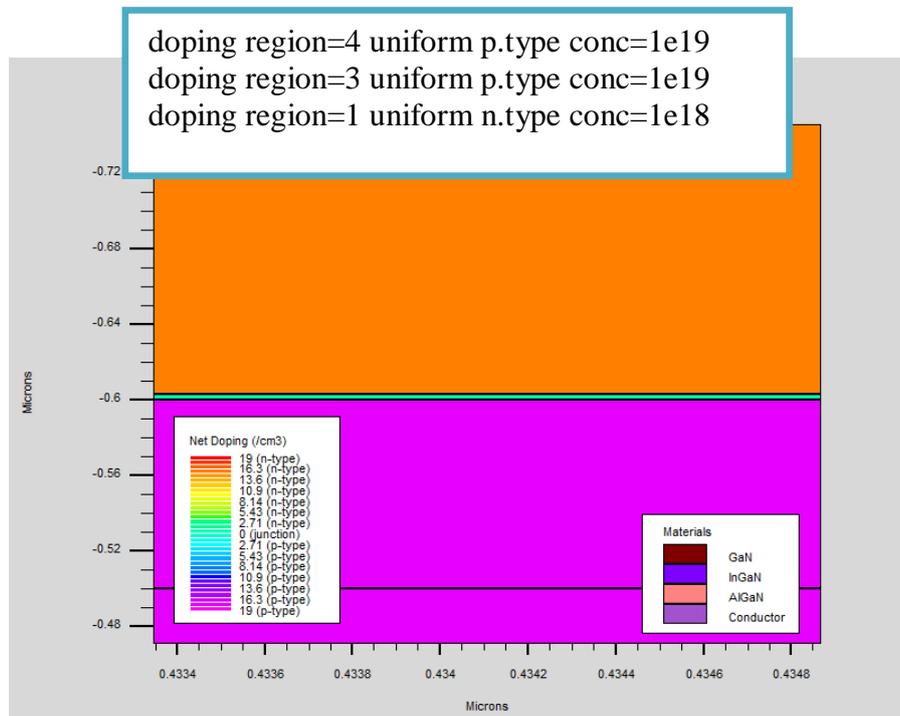


Figure III.8: Distribution du dopage dans les régions.

III.2.5. Spécification des paramètres des matériaux et modèles physique

Après la définition de la structure, il faut spécifier les matériaux et les modèles adaptés.

III.2.5.1. Matériaux

Le format de la déclaration d'Atlas pour les matériaux est comme suit [5]:

MATERIAL <identification> <material_parameters>

Exemple:

Material material=GaN taun0=1e-9 taup0=1e-9 copt=1.1e-8 augn=1.0e-34 augp=1.0e-34.

III.2.5.2.Modèles

Les modèles physiques se répartissent en cinq catégories: la mobilité, la recombinaison, les statistiques des transporteurs, l'impact ionisation, et l'effet tunnel. La syntaxe de la déclaration des modèles et comme suit [26]:

MODEL< paramètres généraux > / < paramètres du modèle >

Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation. L'exemple suivant montre les modèles étudiés dans cette simulation:

Models region=2 k.p chuang spontaneous lorentz.

III.2.6.Sélection de la méthode numérique

Après la définition des matériaux et la précision du modèle choisi, la sélection de la méthode numérique doit être indiquée. Parmi les différentes méthodes numériques de résolution des systèmes d'équation, trois types sont utilisée dans «SILVACO-ATLAS»:

Méthode de Gummel

Méthode de Newton

Méthode des blocs

La méthode numérique utilisée dans cette simulation pour calculer les solutions est la méthode de blocs Newton.

III.2.7.Spécification de la solution

Après avoir terminé la sélection de la méthode numérique, la prochaine étape est la spécification de la solution. Elle se décompose en ces déclarations: Log, Solve, et Save.

III.2.7.1.Log

Log enregistre toutes les caractéristiques terminales dans un fichier de données. L'exemple suivant montre un exemple d'utilisation de l'instruction Log [26]:

Log outf=led320.log

L'exemple montre l'enregistrement de données dans le fichier led320.log.

III.2.7.2.Solve

La déclaration Solve suit la déclaration Log. Solve effectue une solution pour un ou plusieurs points de polarisation. Cette déclaration a le format de base suivant [26]:

```
SOLVE «bias_points»
```

Exemple:

```
Solve vstep=0.1 vfinal=5.5 name=anode
```

III.2.7.3.Save

L'instruction Save sauvegarde toutes les informations d'un point nœud du maillage dans un fichier de sortie (les fichiers de sortie sont de type structure). Les informations sauvegardées correspondent à un état électrique bien précis. L'instruction pour Save est [26]:

```
Save outf=ledex1_5p5.str
```

III.2.8.Analyse des résultats**III.2.8.1.Extract**

Les commandes de ce type sont utilisées pour extraire les valeurs bien précises des paramètres des deux types des fichiers Log ou structure [27].

Exemple:

```
Extract name="Electron" curve (depth,impurity="Electron Conc" material="All" \  
x.val= 0.5) outfile= "ledex01_3p5_Electron.dat"
```

III.2.8.2.Tonyplot

Démarre le programme «Tonyplot» permettant une représentation graphique des données [27].

Exemple:

```
Tonyplot led320.log
```

III.3. Résultats de la simulation

III.3.1. Représentation de la structure simulée

La structure simulée est une diode électroluminescente à base de puits quantique.

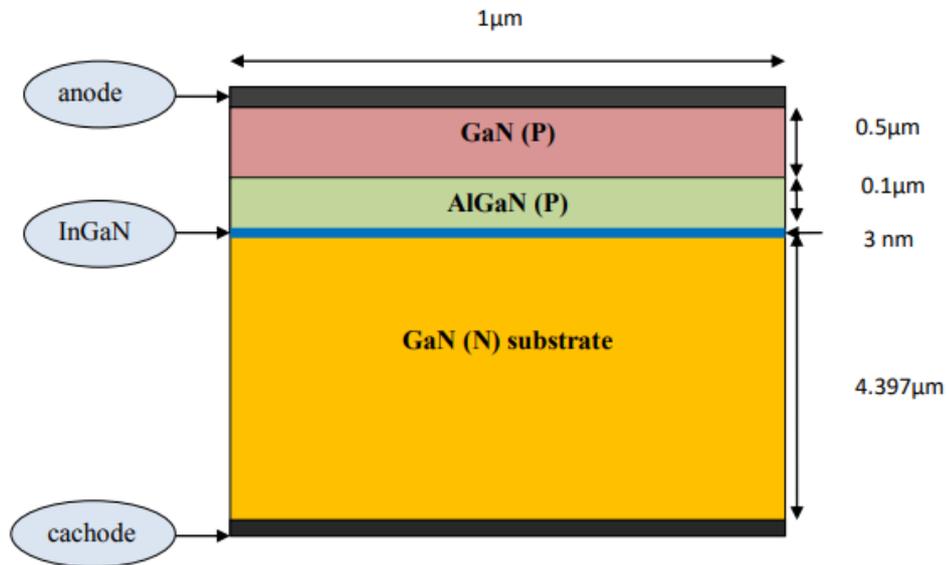


Figure III.9: Schéma de la structure simulée.

Le tableau suivant donne les valeurs des paramètres utilisés en simulation.

Tableau III.1: Paramètres des matériaux utilisés dans les simulations.

Matériaux	Type N ou P	Epaisseur (nm)	Dopage (cm^{-3})	Mobilité ($cm^2/V.s$)
GaN	P	500	10^{19}	10
GaN (substrat)	N	100	10^{18}	100
$In_{0.2}Ga_{0.8}N$	-	3	-	100
$Al_{0.2}Ga_{0.8}N$	P	4397	10^{19}	10

III.3.2. Structure de bande d'énergie

La figure (III.10) représente la structure de bande d'énergie à l'équilibre thermique ($V=0V$) d'une LED à base de puits quantique.

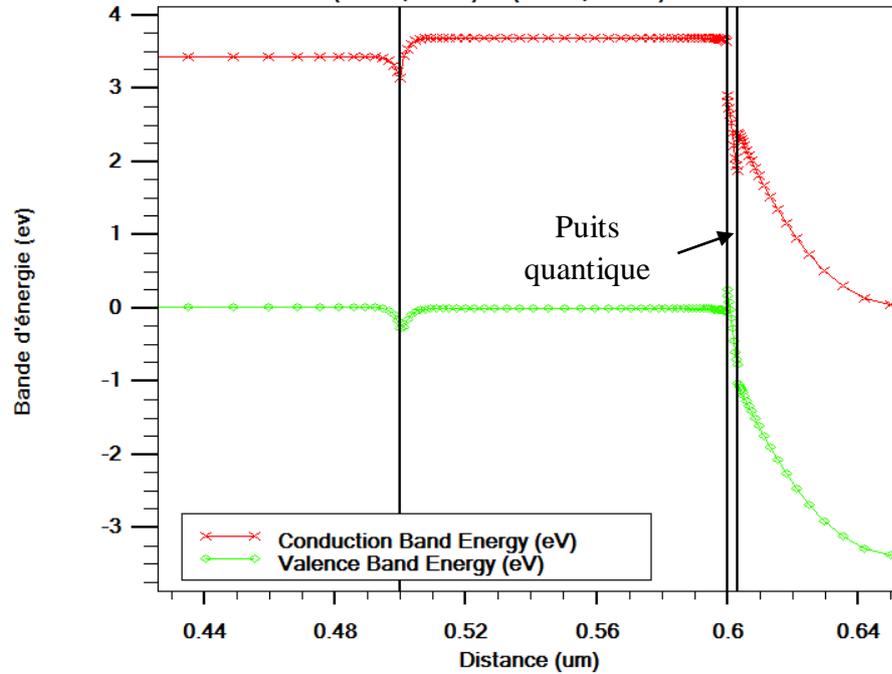


Figure III.10: Structure de bande d'énergie à l'équilibre thermique.

III.3.3. Recombinaison Auger

La figure (III.11) montre la recombinaison Auger pour plusieurs températures (200K, 220K, 240K, 260K, 300K, 320K et 400K) avec une tension de polarisation de 3.5V appliquée entre l'anode et la cathode de la diode électroluminescente.

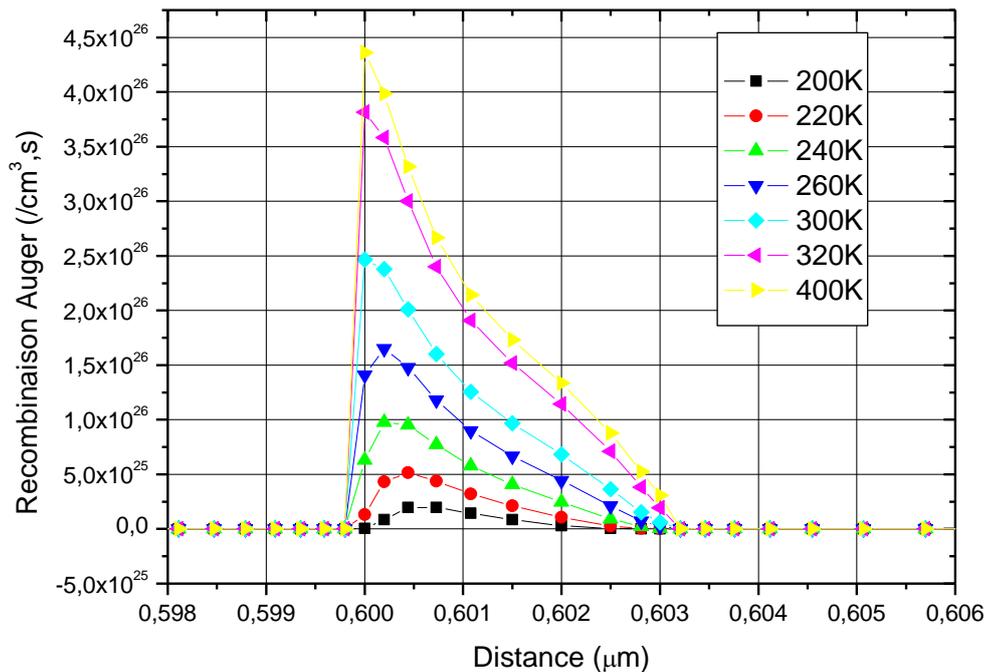


Figure III.11: Recombinaison Auger pour plusieurs températures.

Le taux de recombinaison Auger hors du puits quantique est négligeable par rapport au taux de recombinaison à l'intérieur du puits. Son distribution est non-uniforme et son maximum varie à peu près entre $10^{25} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ et $10^{26} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ pour des températures allant de 200K à 400K. On constate que, chaque fois la température augmente la valeur maximale de la recombinaison Auger augmente et la position de sa pic décale vers la limite inférieure du puits quantique.

III.3.4. Recombinaison Shockley-Read-Hall

La figure (III.12) nous présente la recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH) pour différentes températures avec une tension de polarisation de 3.5V appliquée entre l'anode et la cathode de la diode.

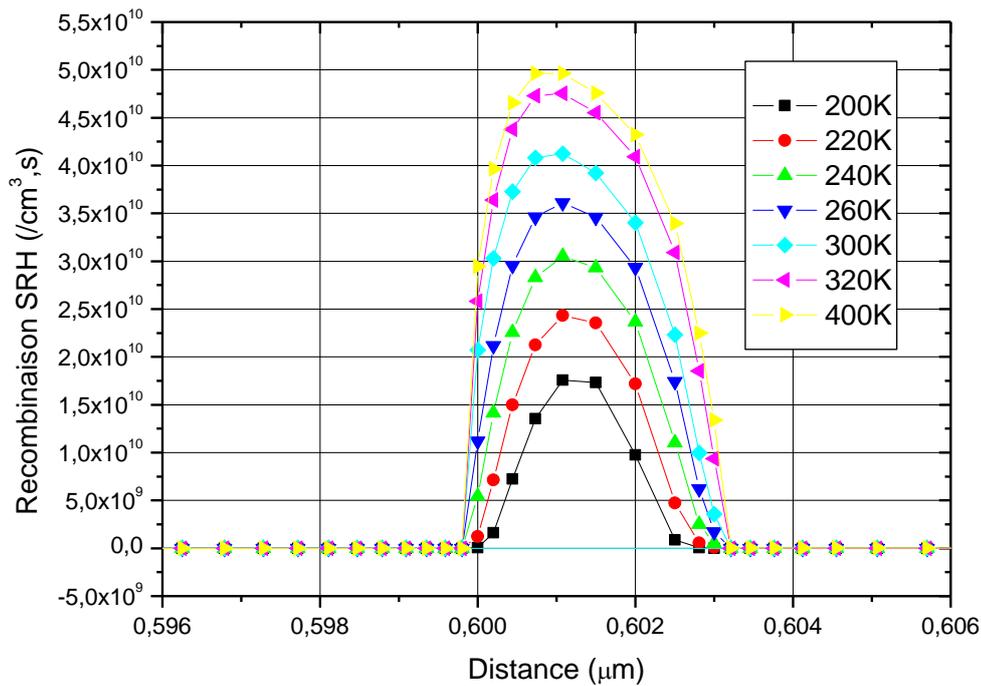


Figure III.12: Recombinaison Shockley-Read-Hall pour plusieurs températures.

Le taux de recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH) suit une distribution spatiale gaussienne non-uniforme à l'intérieur du puits. Son maximum varie à peu près entre $1,25 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ et $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, pour des températures allant de 200K à 400K. On constate que le taux de recombinaison (SRH) hors du puits quantique est négligeable par rapport au taux de recombinaison à l'intérieur du puits et qu'à chaque fois que la température augmente, la valeur maximale de la recombinaison Shockley-Read-Hall augmente.

III.3.5. Recombinaison radiative

La figure (III.13) illustre le taux de recombinaisons radiatives pour sept températures, obtenues dans les différentes couches de la diode électroluminescente LED, avec une tension de polarisation directe de 3.5V.

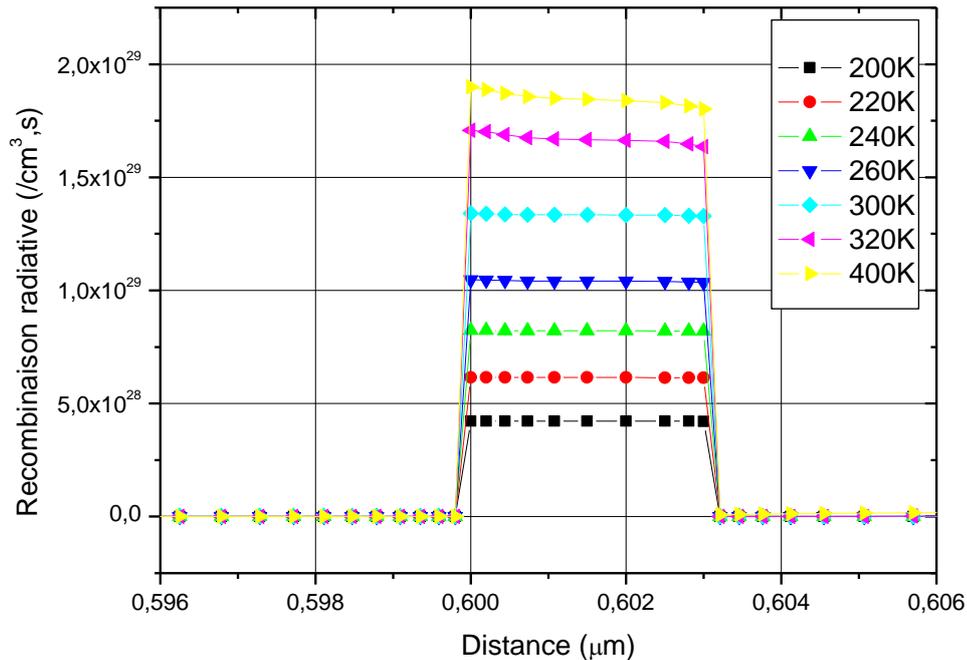


Figure III.13: Recombinaison radiative pour différentes températures.

Premièrement, on constate nettement la distribution uniforme du taux de recombinaison radiative à l'intérieur du puits quantique formé par la couche émissive InGaN. Deuxièmement, on voit clairement que les valeurs du taux de recombinaison radiative à l'intérieur du puits quantique sont supérieures à celles du taux de recombinaison Auger et SRH. On observe troisièmement, qu'à chaque fois que la température augmente, la valeur maximale de la recombinaison radiative augmente.

Les taux de recombinaison radiative dans le puits quantique varient en fonction de la température comme suit:

- Pour $T=200\text{K}$, le taux de recombinaison radiative est égal à $4.2 \times 10^{28} \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Pour $T=220\text{K}$, le taux de recombinaison radiative est égal à $6.14 \times 10^{28} \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Pour $T=240\text{K}$, le taux de recombinaison radiative est égal à $8.21 \times 10^{28} \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Pour $T=260\text{K}$, le taux de recombinaison radiative est égal à $1.04 \times 10^{29} \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Pour $T=300\text{K}$, le taux de recombinaison radiative est égal à $1.33 \times 10^{29} \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Pour $T=320\text{K}$, le taux de recombinaison radiative est égal à $1.63 \times 10^{29} \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Pour $T=400\text{K}$, le taux de recombinaison radiative est égal à $1.89 \times 10^{29} \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$.

L'émission lumineuse obtenue avec cette diode électroluminescente simulée est donc très bien répartie dans le puits quantique de la diode. Cette bonne répartition de l'émission

lumineuse dans la diode est due à une répartition homogène des charges, et notamment des trous, dans le puits quantique car le taux de recombinaison radiative dans les puits quantiques est directement proportionnel au produit de la concentration des trous et des électrons dans les puits quantiques.

III.3.6. Caractéristique courant-tension

La figure (III.14.a) représente la caractéristique électrique courant-tension (I-V) en échelle linéaire, qui a été simulée pour une diode électroluminescente à un seul puits quantique. On a varié la tension de polarisation de 0V à 5.5V pour sept températures à savoir : 200K, 220K, 240K, 260K, 300K, 320K et 400K.

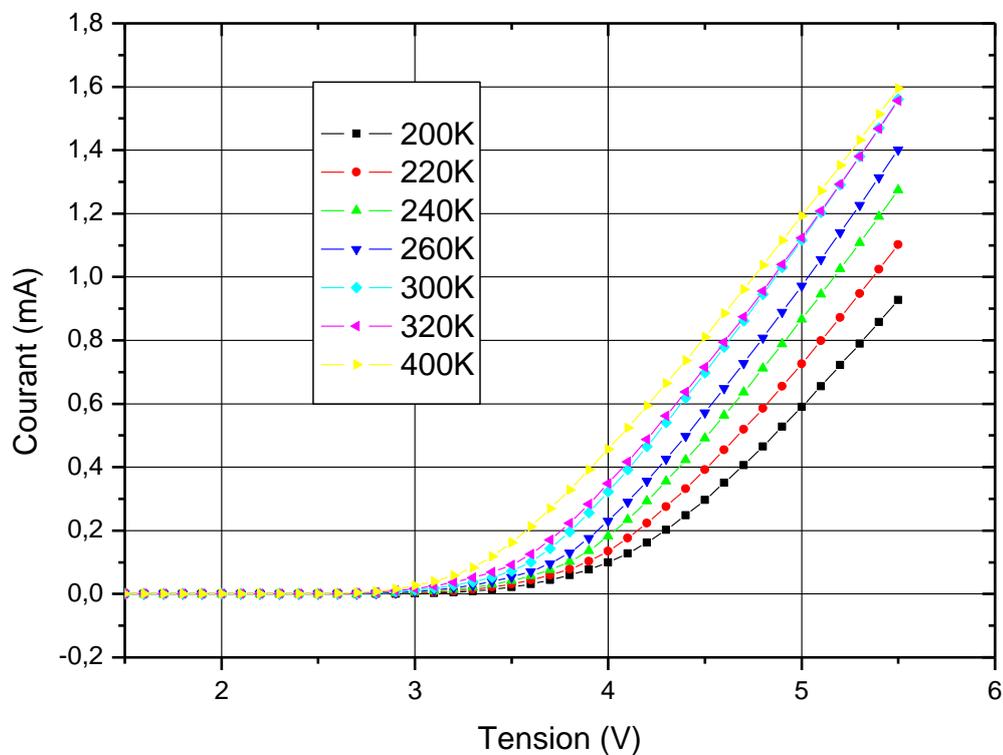


Figure III.14.a: Caractéristique courant-tension de la LED simulée en échelle linéaire à différentes températures.

Nous constatons que pour une tension donnée, le courant augmente au fur et à mesure que la température augmente. Nous constatons aussi que la tension de seuil diminue chaque fois que la température augmente.

À des températures plus élevées, la valeur de la densité effective des états augmentent, ce qui augmente la valeur de la concentration intrinsèque de porteurs et provoquant une baisse du potentiel qui conduit finalement à une augmentation de la

concentration des porteurs. Cela provoque, pour une tension donnée, une augmentation du courant lorsque la température augmente.

La figure (III.14.b) représente la caractéristique électrique courant-tension (I-V) de la même LED en échelle semi-logarithmique pour trois températures à savoir: 200K, 300K et 400K.

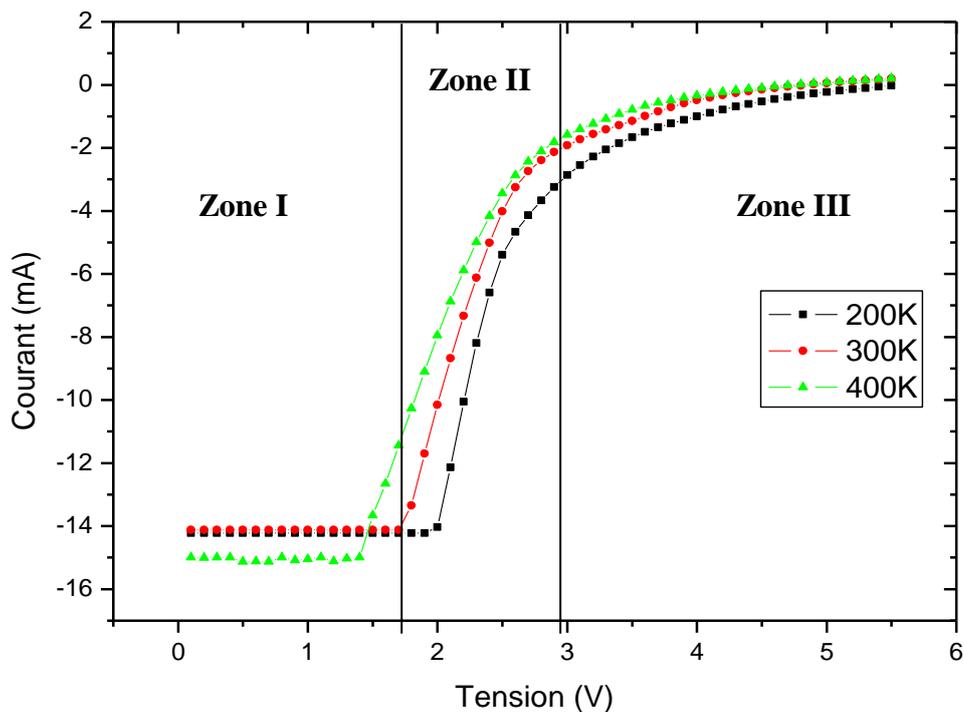


Figure III.14.b: Caractéristique courant-tension de la LED simulée en échelle semi-logarithmique pour 200K, 300K et 400K.

On remarque qu'il existe trois zones différentes et qui sont pour la température 300K à titre d'exemple:

Zone I: La première zone correspond à des tensions inférieures à peu près à 1,4V. Dans la littérature, ce premier régime correspondant au premier régime décrit par Hirsch et Barrière. Pour de très faibles tensions, le courant est assimilable à un courant de fuite dans une résistance [28].

Zone II: La deuxième zone où la tension est supérieure à peu près à 1,4V, correspond au deuxième régime décrit par Hirsch et Barrier [28]. Dans ce régime, la densité de courant est une fonction exponentielle de la tension. Sur l'échelle semi-logarithmique, la pente de la caractéristique dans la zone II est de $1/2 K_B T$.

Zone III: Cette zone correspond aux fortes tensions. La caractéristique n'est plus une fonction exponentielle de la tension appliquée mais semble atteindre un régime de saturation. Ce domaine correspond au troisième régime introduit par Hirsch et Barrière [28].

III.3.7. Puissance spectrale

La puissance spectrale de la structure simulée pour différentes températures est montrée sur la figure (III.15).

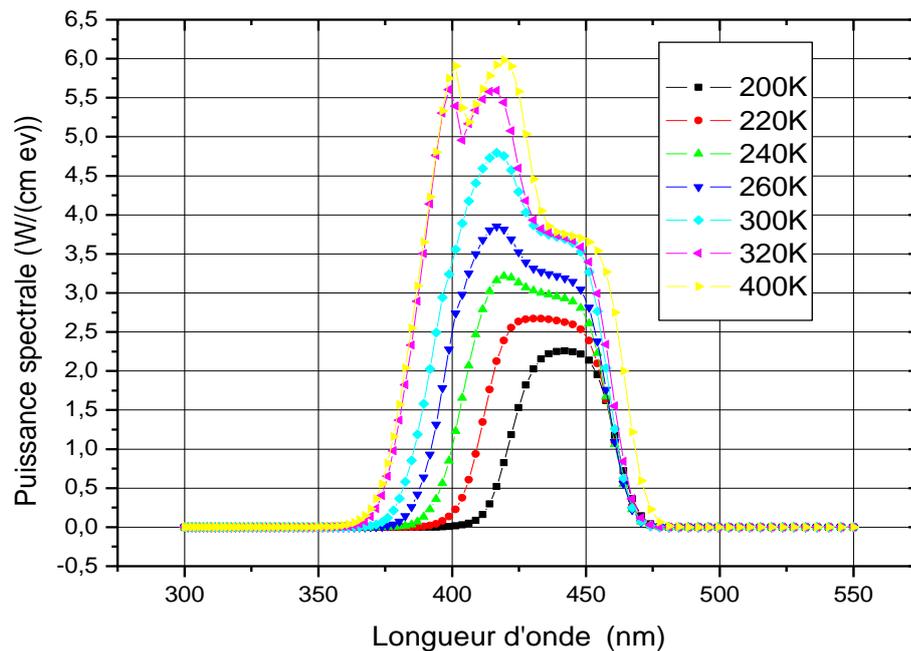


Figure III.15: Puissance spectrale pour différentes températures.

Cette courbe montre une émission lumineuse maximale à une température égale à 400K. La valeur de la longueur d'onde du pic du spectre d'émission nous indique à laquelle est émis la plus importante partie du rayonnement. La figure (III.15), nous montre les longueurs d'onde émises pour différents températures à savoir:

- Pour $T=200K$, l'émission maximale se produit à la longueur d'onde 442nm.
- Pour $T=220K$, l'émission maximale se produit à la longueur d'onde 430nm.
- Pour $T=240K$, l'émission maximale se produit à la longueur d'onde 419nm.
- Pour $T=260K$, l'émission maximale se produit à la longueur d'onde 417nm.
- Pour $T=300K$, l'émission maximale se produit à la longueur d'onde 417nm.

- Pour $T=320\text{K}$, l'émission maximale se produit à la longueur d'onde 399nm jusqu'à 417nm.
- Pour $T=400\text{K}$, l'émission maximale se produit à la longueur d'onde 401nm jusqu'à 419nm.

Comme, on le constate, le spectre d'émission de la diode LED est relativement étroit. La comparaison entre les différents spectres, nous montre que la différence entre les intensités des spectres d'émission de la LED pour différentes températures est importante. Nous remarquons aussi, d'après la figure (III.15), que plus la température augmente plus la largeur des spectres s'élargie.

III.3.8. Caractéristique puissance optique-courant

La caractéristique puissance-courant (P-I) est présentée sur la figure (III.16) pour sept températures.

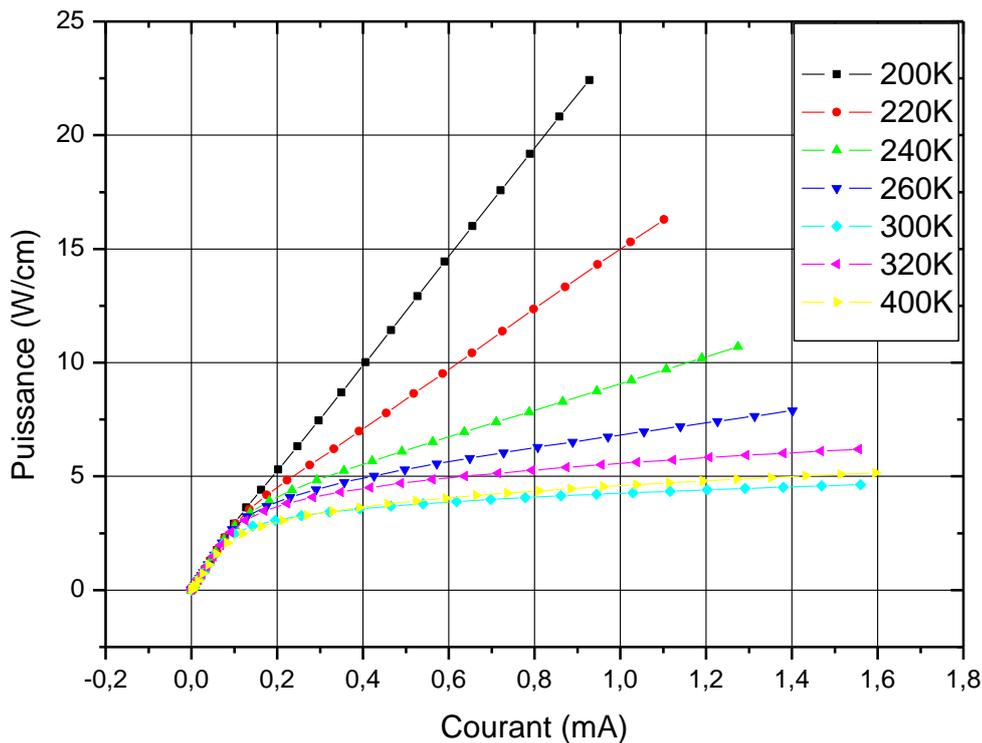


Figure III.16: Caractéristique puissance optique-courant de la LED simulée pour différentes températures.

La courbe de puissance optique-courant de la LED simulée pour différentes températures peut être divisée en partie linéaire et non-linéaire. La partie linéaire commence à partir de 0.2mA. Elle est le résultat de la prédominance du taux de recombinaison radiative dans la région active de la LED pour des tensions élevées. Dans la partie non-linéaire entre 0 et 0.2mA, la puissance optique varie d'une manière quadratique au fur et à mesure le courant direct augmente [29].

Nous observons aussi sur la figure (III.16):

- Pour des températures inférieures à 300K, la pente de la caractéristique puissance optique-courant tend à croître quand la température diminue.
- Pour des températures supérieures à 300K, la pente de la caractéristique puissance optique-courant tend à croître quand la température augmente sauf pour la température de 400K.

III.3.9.Efficacité quantique interne

L'efficacité quantique interne *IQE* (Internal Quantum Efficiency, en anglais) est donnée par la formule (III.7) suivante [8,28]:

$$IQE = \frac{\text{Recombinaison radiative}}{\text{Recombinaison totale}} \quad (III.7)$$

Les figures (III.17.a) et (III.17.b) illustrent l'efficacité quantique interne (IQE) et la recombinaison radiative pour sept températures respectivement.

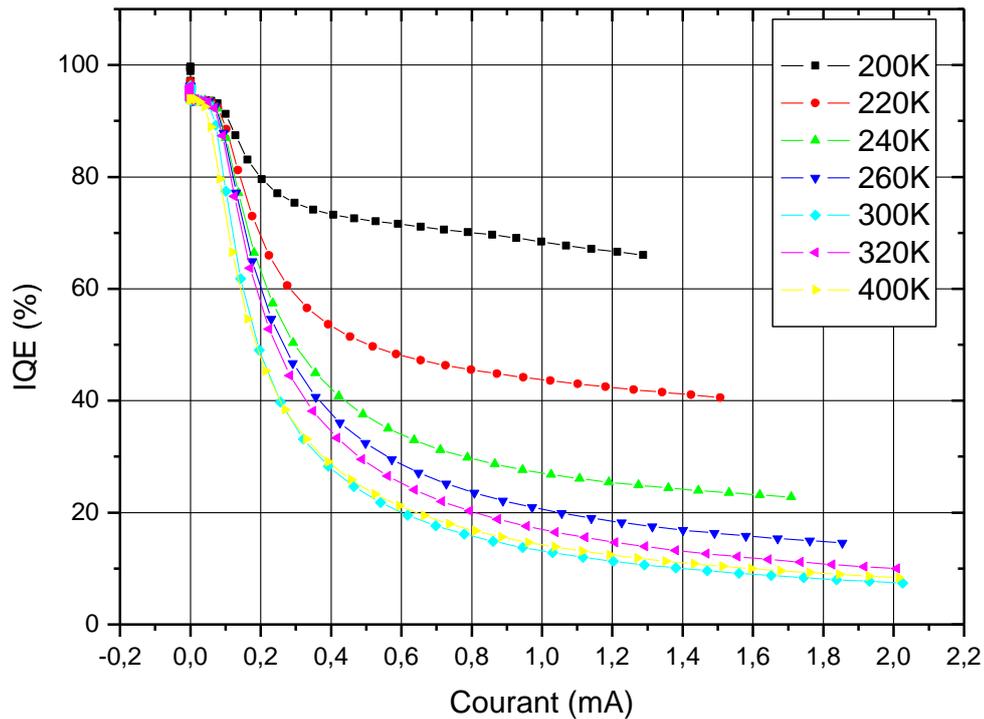


Figure III.17.a: Efficacité quantique interne pour différentes températures.

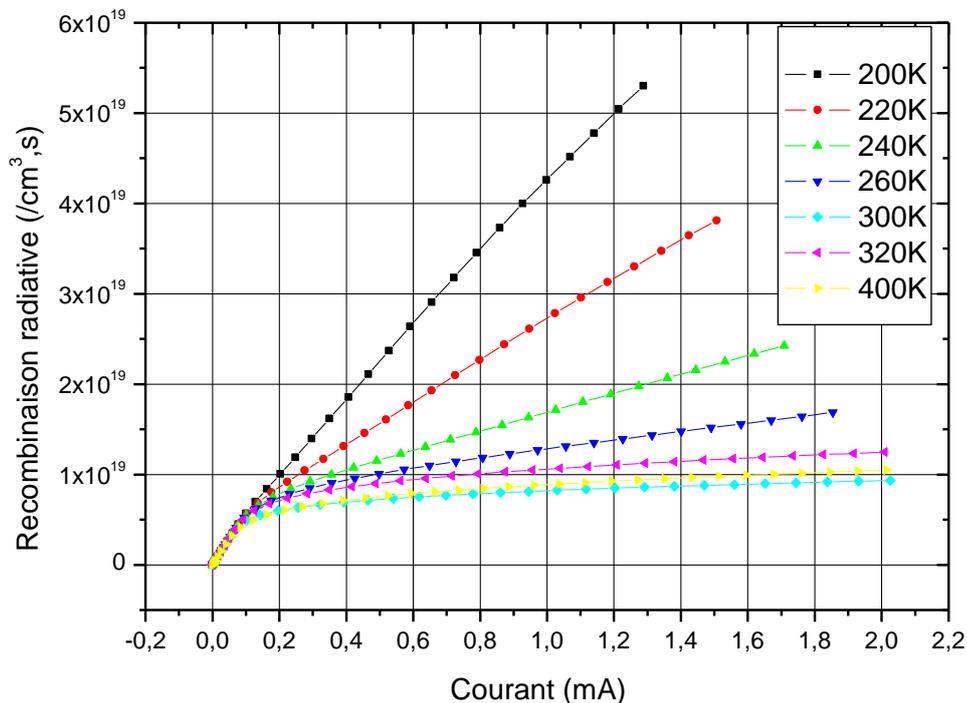


Figure III.17.b: Recombinaison radiative pour différentes températures.

On remarque, dans la figure (III.17.a), que l'efficacité quantique interne pour les différentes températures tend à être constante au fur et à mesure que le courant de la LED est élevé. En outre, on constate que l'efficacité quantique interne, pour un courant

électrique donné, diminue chaque fois la température augmente. Ce ci est du, comme on le remarque dans la figure (III.17.b), au taux de recombinaison radiative qui lui-même suit le même comportement en fonction du courant électrique que l'efficacité quantique interne. L'équation (III.7) confirme ces dernières remarques.

III.3.10. Efficacité quantique externe

L'efficacité quantique externe EQE (External Quantum Efficiency, en anglais) est définie par le rapport [8,28]:

$$EQE = \frac{\text{Nombre de photons sortant de la LED pas seconde}}{\text{nombre d'électrons injectés dans la LED par seconde}} = \frac{P/(h\nu)}{I/q} \quad (\text{III.8})$$

L'efficacité quantique externe peut être décomposée en deux termes [28]:

$$EQE = IQE \cdot \eta_{\text{Extraction}} \quad (\text{III.9})$$

Où:

$\eta_{\text{Extraction}}$ est l'efficacité d'extraction de la LED

La figure (III.18) représente l'efficacité quantique externe de la LED pour plusieurs températures. Dans ce travail et conformément à ce que nous pouvons trouver dans la littérature, l'efficacité d'extraction des LED est supposée constante égale à 80%. L'efficacité quantique externe des LED simulées sera donc égale à [28]:

$$EQE = 0,8 \times IQE \quad (\text{III.10})$$

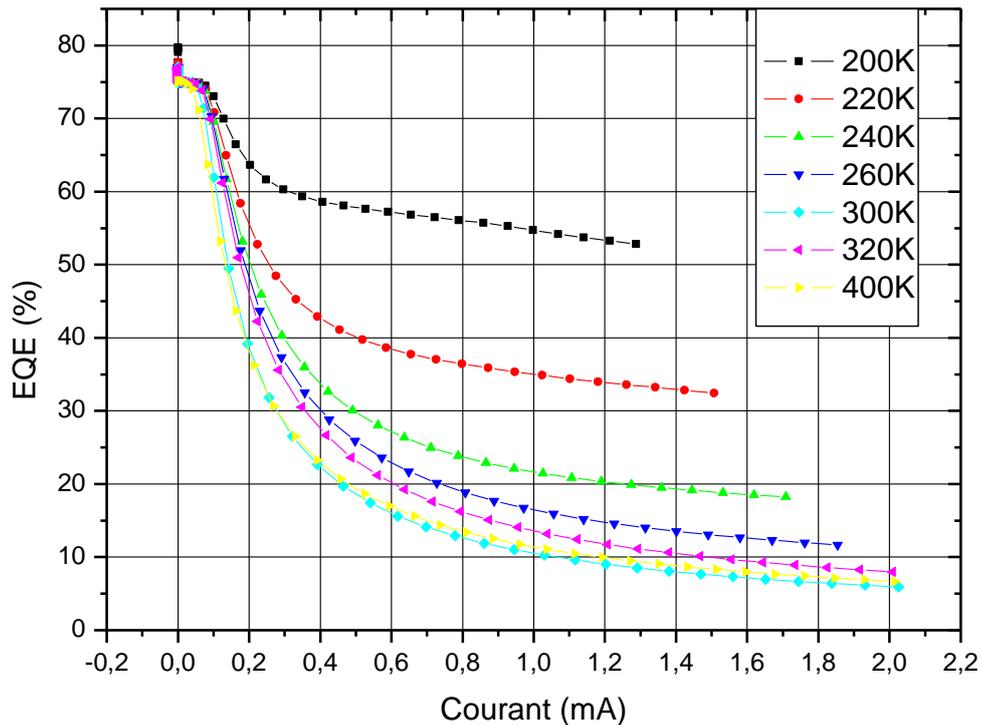


Figure III.18: Efficacité quantique externe de la LED simulée pour sept températures.

On remarque dans la figure (III.18), que l'efficacité quantique externe pour les différentes températures tend à diminuer puis à être constante au fur et à mesure que le courant de la LED est élevé. La diminution de l'efficacité quantique externe pour les faibles courants est due à l'augmentation des taux de recombinaison non-radiative. En revanche, la constance de l'efficacité quantique externe pour les courants élevés est due à la constance des taux de recombinaison radiative d'une part et à la réduction des taux de recombinaison non-radiative de l'autre part.

CONCLUSION

Le marché de l'éclairage évolue car les besoins ont changé. Nous souhaitons, par exemple, aujourd'hui réduire la consommation électrique, ou avoir des éclairages plus flexibles. Les diodes électroluminescentes garantissent ces besoins et elles sont en continuelle croissance depuis une vingtaine d'années.

Les diodes électroluminescentes même avec leur durée de vie plus longue, leur construction robuste et leur faible puissance consommation, elles souffrent de certains problèmes causés essentiellement par la variation de la température [1]. Nous savons maintenant que les LED sont très efficaces pour produire de la lumière et émettre une faible chaleur. Mais cela ne signifie pas que leur efficacité ne peut pas être affectée par le changement incontrôlé de la température. La chaleur élevée et faible ont des effets indésirables sur les caractéristiques des LEDs.

Dans ce but, nous avons simulé une diode électroluminescente à base de puits quantique InGaN dont l'épaisseur est de l'ordre de 3nm prise en sandwich entre deux couches de GaN dopées respectivement N et P. Ce sandwich confine dans la région active, à la fois les électrons et les trous augmentant ainsi les recombinaisons radiatives. Nous avons étudié l'effet de la température sur les différents mécanismes de recombinaison, la caractéristique courant-tension (I-V), la puissance spectrale, la caractéristique puissance optique-courant (P-I), l'efficacité quantique interne et externe pour cette diode en utilisant le logiciel de simulation SILVACO-ATLAS.

Nous pouvons conclure notre travail selon les points suivants:

- Chaque fois la température augmente la valeur maximale des recombinaisons Auger, Shockley-Read-Hall et radiative augmente à l'intérieur du puits quantique d'une manière inégale et non-identique,
- Le courant augmente pour une tension donnée avec la température,

Conclusion générale

- Nous avons remarqué que, plus la température augmente plus la largeur de la puissance spectrale s'élargie,
- Une augmentation linéaire de la puissance lumineuse en fonction du courant pour les sept températures,
- Concernant l'efficacité quantique interne et externe, nous avons constaté que plus la température est élevée, plus l'efficacité quantique est faible.

Nous souhaitons que les futurs étudiants modifient d'autres paramètres par exemple insérer plusieurs puits quantique, varier l'épaisseur de la couche active, et comparer les résultats obtenus avec ceux d'une LED à un seul puits quantique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]. Shiladitya Das, «Investigation and Analysis of Thermal Performance of InGaN/GaN Light Emitting Diodes», Memoire de master, Arizona State University, (2017).
- [2]. Berber Mohamed, «Etude des nanostructures lasers à base de nitrures d'antimoniures GaNSb/AlGaInNSb », thèse doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abass, (2014).
- [3]. Aid. Amina, «Etude de quelques propriétés physiques de L'alliage $BxIn_{1-x}Sb$ en utilisant les méthodes de premiers principes», mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf M'sila, (2019).
- [4]. Terkhi Sabria, « Modélisation de L'influence de la composition chimique «x» des matériaux arsenic Sur les propriétés de transport électronique», Thèse de doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, (2013).
- [5]. Mansour Samah, «Etude et simulation des caractéristiques électriques de diode électroluminescente(LED)», mémoire de master, Université Mohammed Khider Biskra, (2016).
- [6]. Z. Kamal, «Simulation des caractéristiques courant-tension à base d'une diode Schottky en Phosphore d'indium InP», mémoire de magister, Université Mohamed Khider Biskra, (2014).
- [7]. J. Dziewior and W. SCHMID, « Auger coefficient for highly doped and highly excited silicon », Appl Phys Lett, 1977, Vol 31, p 346-348.
- [8]. E. Fred Schubert, Light-Emitting Diodes, Second Edition, (2006).
- [9]. Mélanie Rolles, « Étude théorique de la faisabilité des LED à base de $ZnGeN_2$ », Thèse de doctorat, Université De Lorraine, (2018).
- [10]. Bouraba Fazia, «d'une LED à base d'InGaN pour l'émission de la lumière blanche», mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, (2012).
-

Bibliographie

- [11]. Faycal Bouzid, « Simulation des propriétés électriques d'une jonction à base de nitrure de gallium. Application au détecteur de rayonnement », thèse de doctorate, Université Mohamed Khider Biskra, (2018).
- [12]. Marouf. Yacine, « Etude et simulation des cellules solaires multi-jonctions à base de matériaux semi-conducteurs III-V », thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, (2019).
- [13]. https://elearn.univ-tlemcen.dz/pluginfile.php/112340/mod_resource/content/1/Chapitre%202%20LEDopto%20électronique.pdf.
- [14]. Mechai. Fazia, « Etude et simulation des structures photovoltaïques à base de chalcogénures de métaux de transition MX_2 ($\text{M} = \text{W}, \text{Mo}$; $\text{X} = \text{S}, \text{Se}$) », mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, (2016).
- [15]. C.CATALANO, « couplage entre les lasers solides émettant dans le bleu et les luminophores jaunes pour l'obtention de la lumière blanche pour l'éclairage », thèse de doctorat, GEET, (2020).
- [16]. Tabbi. Hadjer, « Caractérisation automatisée des diodes électroluminescentes », mémoire de master, Université Med Khider Biskra, (2014).
- [17]. Angel. barroso, « Optimisation des systèmes d'éclairage des bâtiments de l'université paul sabatier basé sur un réseau novateur de type bus continu/basse tension », thèse de doctorat, UT3 paul sabatier, (2017).
- [18]. H. MATHIEU, « Physique des semi conducteurs et des composants électroniques », Dunod, Paris, (2009).
- [19]. A. Haddoud, « Simulation par MATLAB des diodes électroluminescentes », mémoire de master, Université Med Khider Biskra, (2018).
- [20]. P. Nicolas, « Caractérisation du rendu des couleurs des nouvelles sources: les diodes électroluminescentes », thèse de doctorat, (2009).
- [21]. H. Cartier, A. Le Pillouer-Prost, C. Grogard, « Diodes électroluminescentes (DEL) », Annales de dermatologie, 136 (2009).
-

Bibliographie

- [22]. Dahmane. K, «Étude et simulation d'un transistor AlGa_N/Ga_N HEMT », mémoire de master, Université Mohammed Khider Biskra,(2014).
- [23]. B. Lamia et B. Ounissa, « Simulation d'une diode électroluminescente organique sous ATLAS-SILVACO », mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, (2018).
- [24]. Mancer. Mansoura, « Simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire à double jonction en (AlGaAs/GaAs) », Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider Biskra, (2012).
- [25]. M. Dilmi, « étude des performances de la cellule InGaP/GaAs/Ge par simulation », mémoire de Master, Université Mohammed Boudhief de faculté de technologie électronique, (2016).
- [26]. Baldomero Garcia. Jr, «Indium Gallium nitride multijunction solar cell simulation using silvaco Atlas », thèse de doctorat, Naval postgraduate school, Monterey california, (2007).
- [27]. Makhoulf. Z, « Étude classique et quantique de l'hétérojonction AlGaAs/GaAs », mémoire de master, Université Mohammed Khider Biskra, (2013).
- [28]. Mélanie. R, «Etude théorique de la faisabilité des LED à base de ZnGeN₂», Thèse de doctorat, Doctorat de l'Université de Lorraine, (2018).
- [29]. K. C. Yung, H. Liem, H. S. Choy, and W. K. Lun, «Degradation mechanism beyond device self-heating in high power light-emitting diodes», Journal of applied physics 109, 094509 (2011).
-

ملخص

في هذا العمل قمنا بدراسة ومحاكاة الصمام الثنائي الباعث للضوء ذا بئر كمي أحادي يستند على مادة InGaN باستخدام برنامج SILVACO-ATLAS. سمحت لنا هذه المحاكاة باستخراج خصائص LED، ودراسة تأثير درجة الحرارة على كل من الإلتحامات، خاصية تيار-جهد (I-V)، خاصية الإستطاعة الضوئية-تيار (P-I)، الإستطاعة الطيفية، و معامل الكفاءة الكمية الداخلية والخارجية. وجدنا أنه في كل مرة تزيد فيها درجة الحرارة يزداد كل من معدل الإلتحامات، التيار، و عرض الإستطاعة الطيفية، بينما تنخفض الإستطاعة الضوئية و معامل الكفاءة.

الكلمات المفتاحية: الثنائيات الباعثة للضوء، InGaN/GaN، الآبار الكمومية، درجة الحرارة، محاكاة، SILVACO-ATLAS.

ABSTRACT

In this work, we studied and simulated a single quantum well light emitting diode based on the material InGaN using the SILVACO-ATLAS software. This simulation allowed us to derive the characteristics of the LED, and to determine the influence of temperature on the radiative recombination rates, current-voltage characteristic (I-V), optical power-current characteristic (P-I), spectral power, internal and external quantum efficiency. We have found that each time the temperature increases the radiative recombination rate, electrical current and width of the spectra increases and each time the temperature increases the light power and the efficiency decreases.

Keywords: Light-emitting diodes, InGaN/GaN, Quantum wells, Temperature, Simulation, SILVACO-ATLAS.

RÉSUMÉ

Dans ce travail, nous avons étudié et simulé une diode électroluminescente à un seul puits quantique basé sur le matériau InGaN à l'aide du logiciel SILVACO-ATLAS. Cette simulation nous a permis de tirer les caractéristiques de la LED, et de déterminer l'influence de la température sur les taux de recombinaisons radiatives, la caractéristique courant-tension (I-V), la caractéristique puissance optique-courant (P-I), la puissance spectral, l'efficacité quantique interne et externe. Nous avons trouvé que chaque fois la température augmente les recombinaisons, le courant et la largeur des spectres augmente et chaque fois la température augmente la puissance optique et l'efficacité quantique diminue.

Mots clés: Diodes électroluminescentes, InGaN/GaN, Puits quantiques, Température, Simulation, SILVACO-ATLAS,