



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences de la Matière

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences de la Matière
Physique
Physique de la matière condensée

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
BASSI OUAFA

Le : 18-6-2023

Étude et simulation des propriétés optoélectroniques d'une diode électroluminescente (LED) de structure p-GaN/AlGaN/InGaN/ n-GaN à puits quantiques

Jury :

MEFTAH	AMJAD	Professeur	Université Mohamed Khider de Biskra	Présidente
LAZNEK	SAMIRA	MCB	Université Mohamed Khider de Biskra	Encadreur
LAIADI	WIDAD	MCA	Université Mohamed Khider de Biskra	Examinatrice

Année universitaire 2022/2023

REMERCIEMENTS

On remercie Dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et volonté d'entamer et de terminer ce travail. Nous remercions les membres du jury pour avoir bien voulu examiner et juger ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements et ma gratitude à l'encadreur **Dr. LAZNEK SAMIRA** pour les conseils et les orientations qu'elle m'a prodigués tout au long de mon travail sur cette note.

Nos vifs remerciements vont aussi aux membres de jury : Pr. MEFTAH AMJAD ET Dr. LAIADI WIDAD pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche, et l'honneur qu'ils ont fait en acceptant d'examiner notre travail.

J'adresse également mes remerciements et ma gratitude à tous les professeurs du Département des sciences des matériaux.

Dédicace

Je dédie le fruit de mon travail, de mes études, de mon assiduité et de ma joie, que j'ai attendu toute ma vie, à l'âme de mon père, la personne la plus précieuse de mon cœur, que Dieu ait pitié de lui, et que le paradis sois sa demeure éternelle

Je dédie également ce travail à la source de tendresse, ma chère mère, que Dieu la préserve et perpétue sa santé.

A mon deuxième père qui m'a aidé dans ma vie et soutenu dans mes études, mon beau-frère je demande à Dieu de le guérir.

A ma sœur qui était ma mère et ma sœur et qui travaillé si dur pour réaliser mon rêve

Au reste de mes frères.

A mes chers amis, en particulier ceux qui m'ont soutenu et aidé depuis le début, je demande à Dieu la santé et le bien-être pour eux.

Sommaire

Remerciements.....	
Dédicace.....	
Sommaire.....	I
Liste de Tableaux.....	IV
Liste de Figures.....	V
Résumé.....	IX
Introduction générale.....	1

Chapitre I: Généralités sur les semi-conducteurs

I.1 Introduction	3
I.2 Physique des semi- conducteurs	3
I.2.1 Structure cristalline et bandes d'énergie.....	3
I.2.2 Isolant , semi- conducteur , conducteur	4
I.2.3 La jonction PN	5
I.2.4 Emission spontanée dans un semi- conducteur à gap direct	8
I.2.5 Performance et rendements d'une LED.....	9
I.2.5.1 Recombinaison radiatives et non- radiatives : le rendement quantique interne ..	9
I.2.5.2 Le modèle ABC	11
I.2.5.3 Le phénomène de droop et les solutions proposées	12
I.2.5.4 L'extraction lumineuse et rendement quantique externe.....	16
I.2.5.5 Le rendement total WPE	18

Chapitre II : Les LEDs

II.1 Introduction	19
II.2 Définition	19
II.3 Principe de fonctionnement.....	20
II.4- Structure de base et fonctionnement	21
II.5-Différents types des LEDs.....	22
II.5.1 LED à homojonction.....	22
II.5.2 LED à hétérojonction	23
II.5.3 LED à puits quantiques.....	23
II.6 Classement selon la puissance.....	24
II.6.1 LED de faible puissance	24

II.6.2 LED de forte puissance.....	24
II.6.3 LEDs blanches	25
II.7 Utilisation des LEDs.....	27
II.8 Avantages et inconvénients des LEDs.....	27
II.8.1. Avantages des LEDs.....	27
II.8.2 Inconvénients des LEDs.....	28
II.9 Les matériaux III –V.....	28
II.9.1 Présentation des composés III-V	28
II.9.2 Propriétés cristallines des nitrures d'éléments de la colonne III.....	30
II.9.3 Nitrure de gallium GaN.....	31
II.9.3.1 Généralités.....	31
II.9.3.2 Propriétés structurales.....	31
II.9.3.3 Structure wurtzite	31
II.9.3.4 Structure blende de Zinc	32
II.9.3.5... Propriétés de l'InGaN.....	32
II.9.4 Nitrure d'aluminium AlN et ses propriétés structurales.....	33
Chapitre III : Résultats et discussion	
III.1 Introduction	34
III.2 Aperçu sur le logiciel Silvaco-Atlas... ..	34
III.2.1 ATLAS.....	35
III.2.2 ATHENA	36
III.2.3 DECKBUILD.....	36
III.2.4 TONYPLOT	36
III.2.5 Structure de fichier d'entrée.....	36
III.2.6 L'ordre des commandes dans l'ATLAS.....	37
III.2.7 Prise en compte des effets quantiques	37
III.3 Description de la structure de la LED étudiée à multi-puits quantiques (MQWs).....	38
III.4 Résultats et discussion	40
III.4.1 Effet de la taille sur les performances de la LED étudiée.....	43
III.4.2 Effet de l'épaisseur des puits quantiques sur les performances de la LED étudiée.....	45
III.4.3 Effet de l'épaisseur de la couche barrière (QB) sur les performances de la LED étudiée.....	49
III.4.4. Influence de l'épaisseur de la couche de blocage d'électron (EBL) d'AlGaIn sur les performances de la LED étudiée.....	52

III.4 .5. Influence de la concentration x_{Al} d'aluminium sur les performances de la LED étudiée	53
LIII.4 .6. Effet de la fraction molaire d'In (x_{In}) dans les puits quantiques de la zone active d' $In_{x_{In}}Ga_{(1-x_{In})}N$	56
III.4 .7. L'utilisation de l'InGaN/GaN/Sb/InGaN dans la région active de la LED à QWs de type II.....	58
III.5. Conclusion	61
Conclusion générale.....	64
Références	66

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Valeurs typiques des coefficients A , B et C de LED InGaN/GaN parues dans la littérature	12
Tableau II.1 : Les principaux éléments des groupes III, IV et V, qui constituent les semi-conducteurs.....	29
Tableau II.2 : Principaux paramètres physiques de quelques composés binaires III-V [59,60] ...	29
Tableau II.3 : Paramètres de maille des trois nitrures	29
Tableau III.1 : Paramètres des matériaux utilisés dans la simulation	39
Tableau III.2 : Modèles implémentés dans la simulation de la LED. [63].....	40
Tableau III.3 : Pic de l'émission spontanée sous l'effet de la variation de l'épaisseur des puits quantiques (QWs) de 3 à 5 et 6 nm pour une densité de courant d'injection de 40 A/cm ²	48
Tableau III.4 : Pic de l'émission spontanée sous l'effet de la variation de l'épaisseur des couches barrières (QBs) de 2 à 4 et 6 nm.....	51
Tableau III.5 : Pic de l'émission spontanée sous l'effet de la variation de l'épaisseur de la couche de blocage (EBL) d'AlGaN de 0.1 µm à 0.2 et 0.3 µm. ..	53
Tableau III.6 : Pic de l'émission spontanée sous l'effet de la variation de la composition en aluminium ($x_{Al} = 0.1, 0.2$ et 0.3) de la couche de blocage (EBL) d'AlGaN...	55

Liste des Figures

Figure I.1 : Formation des bandes d'énergie pour les électrons d'atomes de Si arrangés en mailles cristallines de type diamant.	4
Figure I.2 : Représentation des bandes d'énergie.....	5
Figure I.3 : Jonction PN à l'équilibre thermodynamique [2].....	6
Figure I.4 : Structure énergétique d'un semi-conducteur à gap direct [3].....	8
Figure I.5 : Les principales recombinaisons électron-trou [7].....	11
Figure I.6 : Courbe EQE expérimentale ajustée par le modèle ABC [9].....	12
Figure I.7 : Comparaison de l'allure du rendement d'une LED bleue réelle et d'une LED théorique [3].....	13
Figure I.8 : Influence du plan de croissance sur le rendement d'une LED [20].	14
Figure I.9 : Plan de croissance c et m, et conséquence sur la courbure des bandes [21]...	15
Figure I.10 : Influence de la polarité du plan de croissance sur les dislocations [21] : a) croissance de puits quantiques sur saphir b) croissance de puits quantiques sur GaN.	15
Figure I.11 : Rendement IQE de LED sur plan c (en rouge par électroluminescence, et bleu par photoluminescence) et sur plan m (en noir) [22]... ..	16
Figure I.12 : Loi de Descartes à l'interface GaN / air.....	16
Figure I.13 : Réflexion totale interne et cône d'extraction.....	17
Figure I.14 : Solutions pour améliorer l'extraction lumineuse dans une LED : a) texturation de surface, b) substrat patterné PSS, c) LED de forme triangulaire et d) cristaux photoniques [32]... ..	18
Figure II.1 : Jonction PN d'une diode [34].....	19
Figure II.2 : Principe de fonctionnement de LED [36].	20
Figure II.3 : Structure de base d'une diode électroluminescente LED [33].....	21
Figure II.4 : Circuit de polarisation de la LED.....	22
Figure II.5 : Schéma de principe d'une LED à homojonction.....	23
Figure II.6 : Schéma de principe d'une hétérojonction PN. [38].....	23
Figure II.7 : Schéma de principe d'un puits quantique PN.....	24
Figure II.8 : Schéma d'une LED de faible puissance[41].....	24
Figure II.9 : Schéma d'une LED de forte puissance [42].....	25
Figure II.10 : Méthode des trois couleurs [45].....	25

Figure II.11 : Méthode LED bleue + phosphore jaune [46].....	26
Figure II.12 : LED ultraviolet multi phosphore [46].....	26
Figure II.13 : Les applications des LEDs.....	27
Figure II.14 : Energie de bande interdite en fonction des paramètres de maille des semiconducteurs III–V [61].....	30
Figure II.15 : Structure cristalline du GaN hexagonal (wurtzite) [69].....	32
Figure II.16 : Structure cristalline du GaN cubique (blende de zinc) [67].....	32
Figure II.17 : Structures cristallines du nitrure d'aluminium (a) wurtzite, (b) zinc blende [66]	33
Figure III.1 : Architecture générale d'un programme de simulation des dispositifs optoélectroniques dans ATLAS.....	37
Figure III.2 : La LED étudiée : (a) Structure géométrique, (b) diagramme des bandes d'énergies	39
Figure III.3 : Structure de la LED étudiée et son diagramme de bandes d'énergie pour une densité de courant égale à 40A/cm ²	41
Figure III.4 : Profil du diagramme de bandes, des niveaux d'énergie et des fonctions d'onde des électrons (ψ_{e1}) et des trous (ψ_{hh1}) : (a) le long de la structure globale de type I : p-GaN/Al _{0,1} Ga _{0,9} N (EBL)/In _{0,2} Ga _{0,8} N (zone active à trois QWs)/ n-GaN , (b) un zoom au niveau de la zone active In _{0,2} Ga _{0,8} N à trois QWs séparés par deux couches barrières (QBs) en GaN. L'énergie de transition ($E_{(e1-hh1)}$) responsable des pics d'émission spontanés est aussi illustrée.	42
Figure III.5 : Distribution de la concentration des porteurs de charge (les électrons et les trous) dans les trois puits quantiques de la zone active In _{0,2} Ga _{0,8} N.	43
Figure III.6 : Profil de l'efficacité quantique interne (IQE) pour les deux architectures rectangulaires (100 μ m \times 100 μ m) et (200 μ m \times 200 μ m) de la LED étudiée pour différents densité du courant de la polarisation directe.	44
Figure III.7 : Spectre de l'émission spontanée pour les deux architectures rectangulaires (100 μ m \times 100 μ m) et (200 μ m \times 200 μ m) de la LED étudiée.	45
Figure III.8 : Distribution de la concentration des électrons dans les trois puits quantiques sous l'effet de la variation de l'épaisseur de ces derniers de	46

3 à 5 et 6 nm respectivement. La structure à MQWs ayant les puits quantiques les plus étroits assure le plus meilleur confinement des porteurs.

- Figure III.9** : La caractéristique densité de courant - tension $J(V)$ en polarisation directe de la LED simulée, sous l'effet de la variation de l'épaisseur des puits quantiques (QWs) de 3 à 5 et 6 nm respectivement. 47
- Figure III.10** : Efficacité quantique interne (IQE) en fonction de la densité de courant d'injection sous l'effet de la variation de l'épaisseur des puits quantiques (QWs) de 3 à 5 et 6 nm respectivement... 48
- Figure III.11** : Spectre de l'émission spontanée sous l'effet de la variation de l'épaisseur des puits quantiques (QWs) de 3 à 5 et 6 nm respectivement pour une densité de courant d'injection de 40 A/cm^2 . 49
- Figure III.12** : Effet de variation de l'épaisseur des couches barrières (QBs) en GaN (2, 4 et 6 nm) sur l'efficacité quantique interne (IQE) de la LED étudiée. 50
- Figure III.13**: Effet d'épaisseur de la couche barrière sur la caractéristique densité du courant - tension ($J(V)$). 50
- Figure III.14** : Effet d'épaisseur de la couche barrière (QB) sur le spectre de l'émission spontanée..... 51
- Figure III.15** : Effet de l'épaisseur de la couche de blocage (EBL) d'AlGaIn sur la caractéristique densité de courant – tension ($J(V)$). L'effet s'avère léger. 52
- Figure III.16** : Effet de l'épaisseur de la couche de blocage (EBL) d'AlGaIn sur le spectre de l'émission spontanée. 53
- Figure III.17** Effet de la variation de la composition en aluminium ($x_{Al} = 0.1, 0.2$ et 0.3) de la couche de blocage (EBL) d'AlGaIn sur : (a) La caractéristique ($J(V)$), (b) Le diagramme de bandes avec un zoom au niveau de la couche de blocage (EBL) et la zone active d' $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ à trois puits quantiques pour une densité de courant d'injection de 40 A/cm^2 . L'effet est considéré comme négligeable. 54

- Figure III.18** : Effet de la variation de la composition en aluminium ($x_{Al} = 0.1, 0.2$ et 0.3) de la couche de blocage (EBL) d'AlGa_N sur l'efficacité quantique interne (IQE) de la LED. L'effet est considéré comme négligeable. 55
- Figure III.19** : Effet de la variation de la composition en aluminium ($x_{Al} = 0.1, 0.2$ et 0.3) de la couche de blocage (EBL) d'AlGa_N sur le spectre de l'émission spontanée. 56
- Figure III.20** : Spectre de l'émission spontanée dans le vert pour des densités de courant d'injection allant de 10 à 20 et de 40 A/cm² dans la LED à puits quantiques ayant la fraction molaire d'In : $x_{In} = 0.45$ (In_{0.45}Ga_{0.55}N). 57
- Figure III.21** : Efficacité quantique interne (IQE) dans la LED à puits quantiques pour les deux cas de la fraction molaire d'In : $x_{In} = 0.2$ (In_{0.2}Ga_{0.8}N) et $x_{In} = 0.45$ (In_{0.45}Ga_{0.55}N). 57
- Figure III.22** : (a) Diagramme de bande d'énergie de la LED de structure de type II à puits quantique (QW) In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN_{0.96}Sb_{0.04}/In_{0.2}Ga_{0.8}N, (b) Représentation des fonctions d'onde de la première sous-bande de conduction (C1) et de la première sous-bande de valence (HH1). 59
- Figure III.23** : Spectre de l'émission spontanée de la LED de structure de type II à puits quantique (QW) In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN_{0.96}Sb_{0.04}/In_{0.2}Ga_{0.8}N pour des densités de courant d'injection allant de 10 à 20 et de 40 A/cm². 59
- Figure III.24** : Paramètres de sortie de la LED de structure type II à puits quantique (QW) In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN_{0.96}Sb_{0.04}/In_{0.2}Ga_{0.8}N : (a) Efficacité quantique externe (EQE) en fonction de la densité de courant d'injection, (b) Puissance lumineuse émise en fonction de la densité de courant d'injection, (c) Caractéristique densité de courant- tension ($J(V)$). 60
- Figure III.25** : Profil des recombinaisons Auger et SRH : (a) Dans la LED de structure type II à QW (In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN_{0.96}Sb_{0.04}/In_{0.2}Ga_{0.8}N), (b) dans la LED de structure type I à MQW (GaN/ In_{0.2}Ga_{0.8}N / GaN) . 61

Abstract

The objective of this work is to obtain efficient LEDs, with better spontaneous emission peaks and better internal quantum efficiency (IQE). Light-emitting diodes (LEDs) based on InGaN with multi-quantum wells (MQWs) present a significant loss of internal quantum efficiency (IQE) when operated at high-injected carrier densities. This efficiency degradation results from indirect Auger recombination. Using Silvaco-Atlas software, we simulated the optoelectronic properties of InGaN-based multi-quantum wells (3-wells) LED of p-GaN/AlGaIn/InGaIn/n-GaN structure by modifying their technological parameters. Without obtaining good results; we have proceeded to the insertion of a 10 Angstroms layer of GaNSb in a single InGaIn well, which was an effective solution to improve the optoelectronic properties, by affecting the wave functions of electrons and holes, with a strong hole confinement in the GaNSb layer.

Keys words: MQW LEDs, Internal quantum efficiency (IQE), spontaneous emission.

Résumé

L'objectif de ce travail est d'obtenir des LED performantes, avec de meilleurs pics d'émission spontanée et un meilleur rendement quantique interne (IQE). Les diodes électroluminescentes (LED) à base d'InGaIn à multi-puits quantiques présentent une perte significative d'efficacité quantique interne (IQE) lorsqu'elles fonctionnent à des densités de porteurs injectés élevées. Cette dégradation de l'efficacité résulte de la recombinaison Auger indirecte. En utilisant le logiciel Silvaco-Atlas, nous avons simulé les propriétés optoélectroniques d'une LED à multi-puits quantiques (3 puits) à base d'InGaIn de structure p-GaN/AlGaIn/InGaIn/n-GaN en modifiant ses paramètres technologiques. Sans obtenir des bons résultats, nous avons procédé à l'insertion d'une couche 10 angströms de GaNSb dans un seul puits de la couche d'InGaIn, qui s'est avéré une solution efficace pour améliorer les propriétés optoélectroniques, en affectant les fonctions d'onde des électrons et des trous, avec un fort confinement des trous dans la couche de GaNSb.

Mots clés : LEDs, MQWs, Efficacité quantique interne (IQE), émission spontanée.

Introduction générale

Introduction générale

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 des diodes électroluminescentes à base d'InGaN/GaN 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 LEDs bleues à base de GaN souffrent d'une diminution significative en efficacité en fonction de la température [1].

Dans ce travail nous étudierons les propriétés optoélectroniques de deux types (I et II) d'une LED de structure p-GaN/AlGaIn/n-GaN. Dans le type I ; la région d'InGaIn contient trois puits quantiques. Dans le type II ; on réduit le nombre des puits dans la région d'InGaIn à un seul puits mais une couche GaNSb est insérée au milieu de ce puits. Les propriétés optoélectroniques étudiées sont le spectre de l'émission spontanée, le rendement quantique interne (IQE) et externe (EQE), la caractéristique densité de courant – tension ($J(V)$) et la puissance lumineuse émise en fonction du courant de la polarisation directe. Les paramètres internes sont aussi visualisés comme le diagramme de bande d'énergie, les densités des électrons et des trous, les fonctions d'onde et les niveaux d'énergie. L'étude est réalisée via le logiciel de simulation Silvaco-Atlas.

Le travail est divisé en trois chapitres plus d'une introduction et une conclusion générale :

Dans le premier chapitre, nous présentons des notions générales concernant les semi-conducteurs, les phénomènes se produisant dans les semi-conducteurs à gap direct telle que la recombinaison radiative et l'émission spontanée, et d'autres phénomènes comme le phénomène de Droop, ainsi que l'extraction lumineuse et rendement quantique externe et interne.

Le deuxième chapitre est consacré à la description de la diode électroluminescente (LED), en présentant son principe de fonctionnement, ses caractéristiques, ses classifications, ses avantages et ses inconvénients, ainsi que les matériaux composés III-V et l'intérêt des nitrure d'éléments III pour l'optoélectronique.

Dans le troisième chapitre, nous présentons tout d'abord une description du logiciel Silvaco-Atlas, puis nous appliquons ce logiciel à l'étude et la simulation d'une LED de structure p-GaN/AlGaIn/InGaIn/n-GaN des deux types (I et II) mentionnés précédemment. Le calcul via Silvaco-Atlas permet de résoudre les équations de transport à savoir l'équation de Poisson et les équations de continuité ainsi que l'équation de Schrödinger qui tient en compte l'effet de l'inclusion des puits quantiques. Les résultats obtenus concernent les propriétés optoélectroniques de la LED tels que les spectres de l'émission spontanées, le rendement quantique interne (IQE) et externe (EQE), la caractéristique $J(V)$ et la puissance lumineuse émise en fonction du courant de la polarisation directe. Les paramètres internes étudiés sont le diagramme de bande d'énergie, les densités des électrons et des trous, les fonctions d'onde et les niveaux d'énergie. Les résultats ainsi présentés sont commentés et discutés. .

Chapitre I :
Généralités sur les semi-conducteurs



I.1 Introduction

Dans ce premier chapitre, nous rappelons des notions générales sur les semi-conducteurs, à savoir : leurs définitions, les types de semi-conducteurs, les types de gaps et la jonction PN. Nous décrirons après le processus d'absorption lumineuse et d'émission. En particulier ; le spectre d'émission des LED est limité par la chute brutale du rendement quantique. L'efficacité des LED, ou efficacité quantique externe (EQE) ou interne (IQE), est mesurée par le rapport entre le nombre des photons extraits de la structure et le nombre d'électrons injectés.

I.2 Physique des semi-conducteurs :

I.2.1. Structure cristalline et bandes d'énergie :

Considérons un atome de silicium Si isolé, les niveaux énergétiques de ses électrons sont discrets (voir le modèle de Bohr pour l'hydrogène). Lorsque l'on rapproche de ce dernier un atome identique, les niveaux énergétiques discrets de ses électrons se fractionnent en deux sous l'interaction réciproque des deux atomes. Plus généralement, lorsque l'on approche N atomes, les niveaux énergétiques se scindent en N niveaux. Ces N niveaux sont très proches les uns des autres et si la valeur de N est grande, ce qui le cas pour un cristal, ils forment une bande d'énergie continue. La notion de rapprochement des atomes est donnée par la distance interatomique d .

A présent considérons des atomes de silicium Si arrangés aux nœuds d'un réseau périodique, mais avec une maille très grande de telle manière que les atomes puissent être considérés comme isolés. Les deux niveaux les plus énergétiques sont repérés par E_1 et E_2 . Rapprochons homothétiquement les atomes les uns des autres, les états énergétique électronique se scindent et forment deux bandes continues appelées **bande de conduction** (BC) et **bande de valence** (BV). La figure I.1 montre la formation de ces bandes en fonction de la distance interatomique. Pour les électrons d'un cristal de silicium ($d_0 = 2.35A^0$), on constate qu'il existe deux bandes continues d'énergie (BC et BV) et que ces bandes sont séparées par une bande interdite car d'énergie inaccessible aux électrons. Cette région interdite est appelée «gap» et sa largeur E_g est caractéristique du matériau. Notons que l'énergie du bas de la bande de conduction est notée E_c et que celle du haut de la bande valence est notée E_v ainsi nous avons l'égalité $E_g = E_c - E_v$. Précisons que les bandes continues d'énergie BC et BV ne sont qu'une représentation des énergies accessibles par les électrons, ceci ne présage en rien de l'occupation effective de ces bandes par ces derniers.

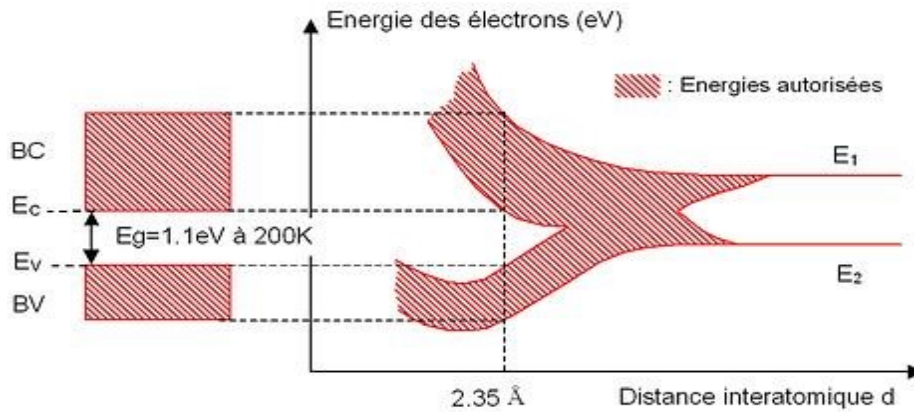


Figure I.1 : Formation des bandes d'énergie pour les électrons d'atomes de Si arrangés en mailles cristallines de type diamant

I.2.2 Isolant, semi-conducteur, conducteur :

Les matériaux solides peuvent être classés en trois groupes que sont les isolants, les semi-conducteurs et les conducteurs. On considère comme isolants les matériaux de conductivité $\sigma < 10^{-8}(S/cm)$ (diamant $10^{-14}(S/cm)$), comme semi-conducteurs les matériaux tels que $10^{-8} < \sigma < 10^3(S/cm)$ (silicium $10^{-5}(S/cm)$ à $10^3(S/cm)$) et comme conducteurs les matériaux tels que $\sigma > 10^3(S/cm)$ (argent $10^6(S/cm)$)

Les propriétés électriques d'un matériau sont fonction des populations électroniques des différentes bandes permises (Figure I.2). La conduction électrique résulte du déplacement des électrons à l'intérieur de chaque bande. Sous l'action du champ électrique appliqué au matériau l'électron acquiert une énergie cinétique dans le sens opposé au champ électrique. Considérons à présent une bande d'énergie vide, il est évident de par le fait qu'elle ne contient pas d'électrons, elle ne participe pas à la formation d'un courant électrique. Il en est de même pour une bande pleine. En effet, un électron ne peut se déplacer que s'il existe une place libre (un trou) dans sa bande d'énergie. Ainsi, un matériau dont les bandes d'énergie sont vides ou pleines est un **isolant**. Une telle configuration est obtenue pour des énergies de gap supérieures à $\sim 9eV$, car pour de telles énergies, l'agitation thermique à 300K, ne peut pas faire passer les électrons de la bande de valence à celle de conduction par cassure de liaisons électronique. Les bandes d'énergie sont ainsi toutes vides ou toutes pleines.

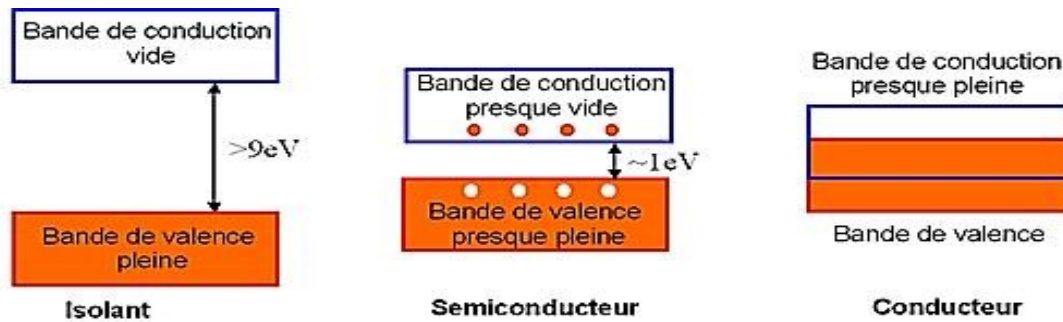


Figure I.2 : Représentation des bandes d'énergie

Un **semi-conducteur** est un isolant pour une température de 0K . Cependant ce type de matériau ayant une énergie de gap plus faible que l'isolant ($\sim 1\text{eV}$), aura de par l'agitation thermique ($T=300\text{K}$), une bande de conduction légèrement peuplée d'électrons et une bande de valence légèrement dépeuplée. Sachant que la conduction est proportionnelle au nombre d'électrons pour une bande d'énergie presque vide et qu'elle est proportionnelle au nombre de trous pour une bande presque pleine, on déduit que la conduction d'un semi-conducteur peut être qualifiée de «mauvaise».

Pour un **conducteur**, l'interpénétration des bandes de valence et de conduction implique qu'il n'existe pas d'énergie de gap. La bande de conduction est alors partiellement pleine (même aux basses températures) et ainsi la conduction du matériau est « élevée ».

I.2.3 La jonction PN :

Le dopage consiste à implanter des atomes (ou impuretés) à l'intérieur d'un semi-conducteur afin d'en modifier les propriétés électriques. Le semi-conducteur est alors dit extrinsèque. Un dopage de type P est obtenu en augmentant la densité des trous (par ajout d'accepteurs), et un dopage de type N en augmentant la densité d'électrons (par ajout de donneurs). On appelle N_d l'excédent de donneurs dans la région N et N_a l'excédent d'accepteurs dans la région P. Dans la pratique N_a et N_d sont toujours très supérieurs à n_i de sorte que les densités d'électrons et trous s'écrivent :

$$n \cong (N_d - N_a) \quad \text{et} \quad p \cong \frac{n_i^2}{(N_d - N_a)} \quad \text{dans un semi-conducteur de type N} \quad (\text{I.1})$$

$$p \cong (N_a - N_d) \quad \text{et} \quad n \cong \frac{n_i^2}{(N_a - N_d)} \quad \text{dans un semi-conducteur de type P} \quad (\text{I.2})$$

Dans chaque type de semi-conducteur, le niveau de Fermi se rapproche d'autant plus de la bande de porteurs majoritaires que le dopage est important. On exprime alors E_{Fn} et E_{Fp} les quasi-niveaux de Fermi dans les semi-conducteurs extrinsèques types N et P par les relations :

$$E_{Fn} = E_c - kT \cdot \ln\left(\frac{N_c}{N_d - N_a}\right) \tag{I.3}$$

$$E_{Fp} = E_v + kT \cdot \ln\left(\frac{N_v}{N_a - N_d}\right) \tag{I.4}$$

Une jonction PN est la juxtaposition de ces deux régions d'un même semi-conducteur. La mise en contact de ces deux types de semi-conducteur en x_0 (Figure I.3) entraîne la diffusion des électrons et des trous. Cette diffusion fait apparaître une zone de charge d'espace (ZCE) d'épaisseur W . Nous notons x_p et x_n les limites de la ZCE dans les zones P et N.

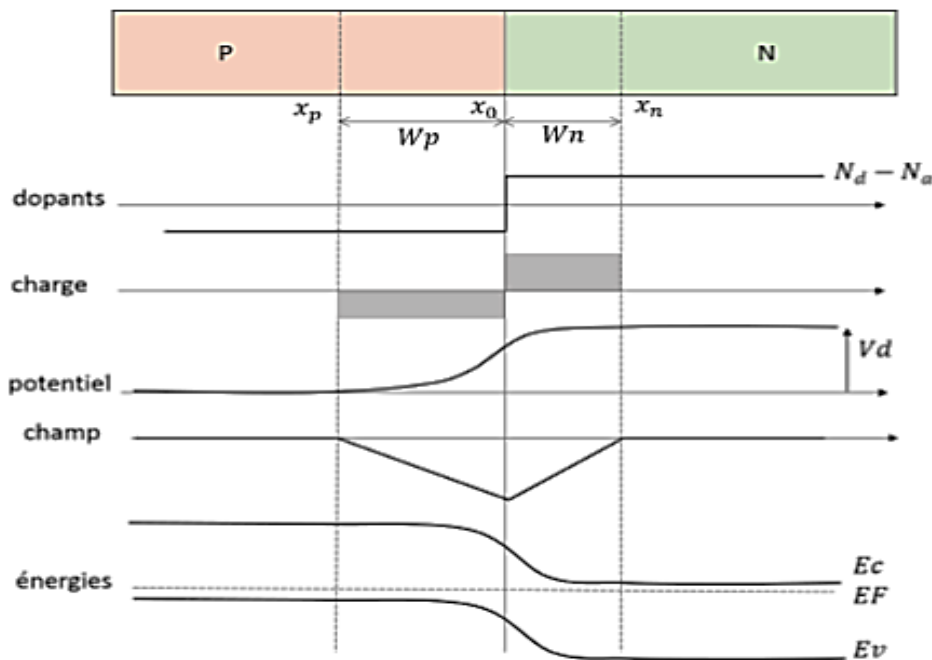


Figure I.3: Jonction PN à l'équilibre thermodynamique [2].

La charge d'espace est positive côté N et négative côté P, car elle résulte de la présence de donneurs ionisés N_d et des accepteurs ionisés N_a . En dehors de la ZCE, le semi-conducteur est neutre et la densité de charge est nulle. On peut ainsi résumer la densité de charge ρ dans les différentes régions :

$$\rho(x) = 0 \text{ pour } x < x_p \text{ et } x > x_n \quad (\text{I.5})$$

$$\rho(x) = -q \cdot N_a \text{ pour } x_p < x < x_0 \quad (\text{I.6})$$

$$\rho(x) = q \cdot N_d \text{ pour } x_0 < x < x_n \quad (\text{I.7})$$

La zone de charge d'espace s'étend dans les régions P et N (W_n et W_p) en satisfaisant l'équation :

$$N_a W_p = N_d W_n \quad (\text{I.8})$$

Cette équation traduit que la zone de charge d'espace s'étend principalement dans la région la moins dopée.

La présence de cette zone de charge d'espace entraîne l'existence d'un champ électrique et d'une variation de potentiel. La tension associée, appelée tension de diffusion, est donnée par la relation :

$$V_d = \left(\frac{k.T}{q}\right) \cdot \ln\left(\frac{N_a - N_d}{ni^2}\right) \quad (\text{I.9})$$

Le champ électrique dans la structure peut s'exprimer sous la forme :

$$E = -\frac{q \cdot N_a}{\epsilon} (x - x_p), \text{ pour } x_p < x < x_0 \quad (\text{I.10})$$

$$E = \frac{q \cdot N_d}{\epsilon} (x - x_n), \text{ pour } x_0 < x < x_n \quad (\text{I.11})$$

Enfin, l'évolution des bandes de valence et de conduction est représentée (Figure I.3). Elle résulte de l'alignement du niveau de Fermi dans toute la structure avons étudié jusqu'à présent la jonction PN à l'équilibre thermodynamique. Lorsqu'une polarisation est appliquée, la barrière de potentiel est modifiée et par conséquence une diffusion des porteurs apparaît d'une région vers l'autre. La tension appliquée, notée V, s'ajoute à la tension de diffusion V_d . Lorsque la tension appliquée est négative, la différence de potentiel aux bornes de la ZCE augmente. La diffusion des porteurs majoritaire est impossible, seuls les porteurs minoritaires, propulsés par le champ électrique, passent dans la région opposée. C'est le courant de conduction. A l'inverse, lorsque la polarisation appliquée est positive, la barrière de potentiel n'est plus suffisante pour empêcher la diffusion des porteurs. Les électrons diffusent de la région N vers la région P, et les trous de la région P vers la région N. Le courant circulant dans la jonction s'exprime alors sous la forme :

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (\text{I.12})$$

Où I_s est le courant de saturation.

I.2.4 Emission spontanée dans un semi-conducteur à gap direct :

Au zéro absolu, un semi-conducteur est isolant, avec une bande de valence pleine et une bande de conduction vide. Cependant, les électrons peuvent être excités (thermiquement, électriquement ou optiquement) de la bande de valence vers la bande de conduction. Ils laissent alors dans la bande de valence une lacune, pseudo-particule appelée trou. Une fois l'électron dans la bande de conduction, il peut se désexciter vers la bande de valence, remplissant ainsi le trou. Cette recombinaison électron-trou peut être accompagnée par l'émission d'un photon. C'est l'émission spontanée à la base du fonctionnement des LED.

Cette émission est caractérisée par la conservation de l'énergie et du moment. L'énergie du photon, dont dépend sa longueur d'onde (λ), est celle du gap du semi-conducteur (E_g).

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} = h\nu \quad (\text{I.13})$$

h est la constante de Planck et c la vitesse de la lumière dans le vide. La lumière émise par un semi-conducteur est donc intrinsèquement quasi-monochromatique et dépend du gap du matériau semi-conducteur utilisé (Figure I.4).

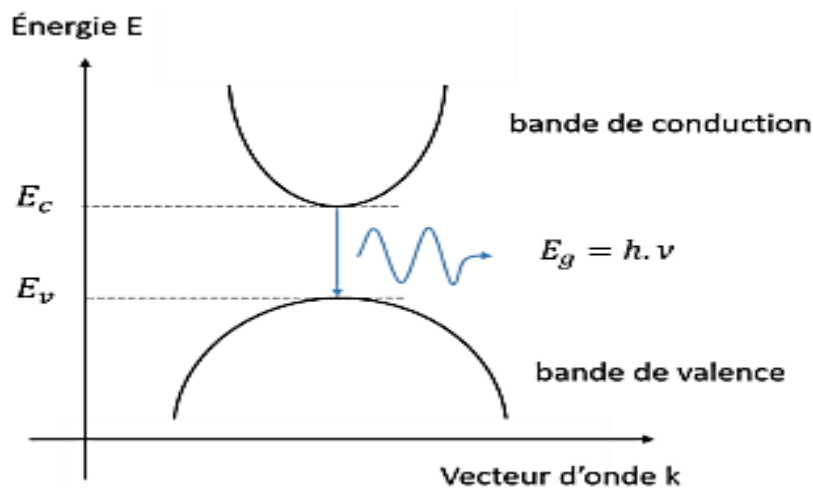


Figure I.4 : Structure énergétique d'un semi-conducteur à gap direct [3].

La jonction PN présentée auparavant a pour but d'injecter les électrons vers la région P et les trous vers la région N, créant ainsi les conditions de l'émission spontanée. En effet, la probabilité qu'un électron se recombine avec un trou est proportionnelle au produit de la concentration d'électrons et de trous. On définit alors le taux de recombinaison radiative par :

$$R_{rad} = B.n.p \quad (\text{I.14})$$

B est appelé coefficient de recombinaison biomoléculaire. Il possède des valeurs typiques de l'ordre de 10^{-11} à $10^{-9} \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour les semi-conducteurs III-V à gap direct [4].

I.2.5 Performances et rendements d'une LED :

I.2.5.1 Recombinaisons radiatives et non-radiatives : le rendement quantique interne.

Les recombinaisons électrons-trous peuvent être radiatives, c'est-à-dire accompagnées de l'émission d'un photon, ou non-radiatives, c'est-à-dire typiquement accompagnées de l'émission de phonons (vibrations du réseau).

Le rendement quantique interne (IQE : Internal Quantum Efficiency) traduit le rapport du taux de recombinaison radiative sur la somme de toutes les recombinaisons, soit :

$$IQE = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_{non-rad}} \quad (I.15)$$

Nous avons déjà vu que le taux de recombinaison radiative s'écrit sous la forme :

$$R_{rad} = B \cdot n \cdot p \quad (I.16)$$

Il existe plusieurs mécanismes par lesquels électrons et trous se recombinent de manière non radiatives ($R_{non-rad}$). Les défauts dans la structure cristalline sont les causes principales de recombinaisons non radiatives (atomes étrangers, lacunes, dislocations, etc.). Ce sont les recombinaisons SRH (Shockley-Read-Hall). Ces défauts ont des niveaux d'énergie différents des atomes qu'ils remplacent. Ils forment ainsi des niveaux d'énergie dans la bande interdite du semi-conducteur, qui sont d'efficaces centres de recombinaison, en particulier si le niveau d'énergie est proche du milieu du gap.

La statistique de ces processus fut établie en 1952 par Shockley et Read [5], et Hall [6]. Le taux de recombinaison SRH (R_{SRH}) est donnée par [6]:

$$R_{SRH} = \frac{np - n_i^2}{\tau_n(p + p_0) + \tau_p(n + n_0)} \quad (I.17)$$

τ_n et τ_p sont les durées de vie des électrons et des trous n_0 et p_0 sont les concentrations d'électrons et de trous à l'équilibre. Dans l' Eq.I.17 le niveau de Fermi coïncide avec le niveau d'énergie du piège. Considérant N_t la concentration de pièges et C_n , le coefficient de capture, il est possible d'exprimer la durée de vie des porteurs par :

$$\tau_{n,p} = \frac{1}{C_{n,p}N_t} \cong \frac{1}{A} \quad (I.18)$$

Où A est une constante traduisant le taux de recombinaisons SRH. Ce résultat indique que les recombinaisons SRH sont limitées par le taux de capture des porteurs minoritaires. Dans le cas d'un semi-conducteur dopé, où l'un des deux types de porteurs est dominant, on peut écrire le taux de recombinaison SRH sous la forme :

$$R_{SRH} = A.n \quad (I.19)$$

Ceci traduit que le taux de recombinaison SRH est proportionnel à la concentration d'électrons (n) ou de trous (p). D'autre part, d'importantes recombinaisons non-radiatives peuvent avoir lieu à la surface des semi-conducteurs. En effet, les surfaces constituent une forte perturbation de la périodicité du réseau cristallin, ce qui modifie le diagramme de bande théorique, valable dans un réseau strictement périodique et infini. De plus, les atomes à la surface n'ont pas les mêmes liaisons puisqu'il manque des atomes voisins. Ainsi, les électrons en limite du cristal ont des liaisons pendantes, c'est-à-dire des liaisons sans atomes voisins, dirigées vers le vide. Ces états électroniques peuvent être situées dans la bande interdite du semi-conducteur et agir comme centres de recombinaison, similaires aux défauts cristallins des recombinaisons SRH. Les liaisons pendantes peuvent reconstruire des liaisons de surface ou piéger des électrons de la bande de conduction. Cet appariement des liaisons pendantes, appelé reconstruction de surface, peut générer localement une nouvelle structure atomique avec des niveaux d'énergie différents de ceux du cristal. Il a ainsi été montré que des états électroniques dans la bande interdite apparaissent à la surface du semi-conducteur [4]. Le modèle de recombinaison de surface est similaire à celui des recombinaisons SRH. Nous regrouperons sous le terme recombinaison SRH l'ensemble des recombinaisons non-radiatives liés à des défauts dans la structure cristalline et liés à des recombinaisons de surface

Un autre mécanisme important de recombinaisons non-radiatives est appelé recombinaisons Auger. Dans ce cas, l'énergie disponible durant la recombinaison (environ E_g , l'énergie du gap) est dissipée par l'excitation d'un électron libre haut dans la bande de conduction, ou par un trou dans la bande de valence. Puisque deux porteurs du même type sont requis dans le procédé de recombinaison, le taux de recombinaison Auger (C) est donné par :

$$R_{Auger} = C_p.n.p^2 + C_n.n^2.p \quad (I.20)$$

Que l'on peut simplifier sous la forme :

$$R_{Auger} = C.n^3 \tag{I.21}$$

La dépendance cubique en concentration de porteurs traduit que les recombinaisons Auger ne réduisent l'efficacité lumineuse d'une LED qu'à fort courant d'injection de porteurs.

La figure I.5 résume les principales recombinaisons présentes dans une LED.

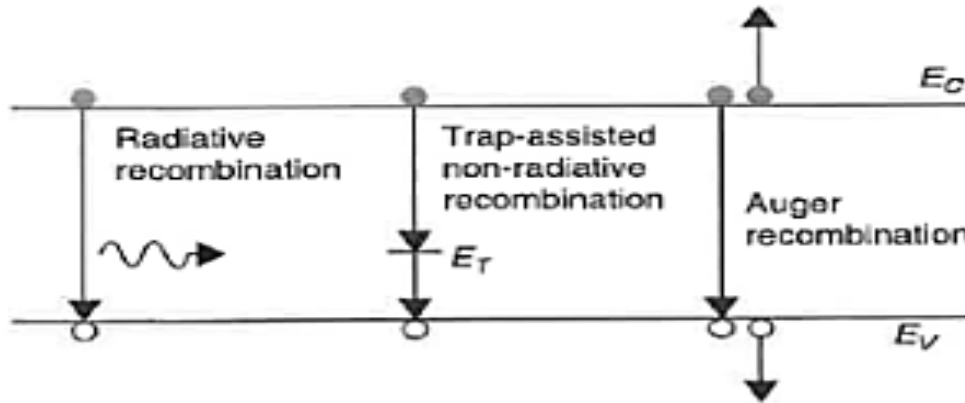


Figure I.5: Les principales recombinaisons électron-trou [7].

I.2.5.2 Le modèle ABC :

Les différents mécanismes de recombinaison présentés peuvent être résumés dans l'équation du taux de recombinaison total :

$$R = A.n + B.n^2 + C.n^3 \tag{I.22}$$

Où les coefficients A , B et C représentent respectivement les recombinaisons non-radiatives SRH, radiatives et non-radiatives Auger.

Le rendement IQE peut alors s'exprimer en fonction des paramètres A , B et C selon l'équation :

$$IQE = \frac{B.n^2}{A.n + B.n^2 + C.n^3} \tag{I.23}$$

D'autre part, le courant s'exprime par la relation :

$$I = q.V_R.(A.n + B.n^2 + C.n^3) \tag{I.24}$$

Avec V_R le volume de recombinaison.

Ces deux équations (Eqs.I.23 et I.24) sont à la base du modèle ABC, communément utilisé dans l'étude des LED à base de GaN [8]. Dans l'exemple ci-dessous, une courbe caractéristique du rendement d'une LED est ajustée à l'aide du modèle ABC [9].

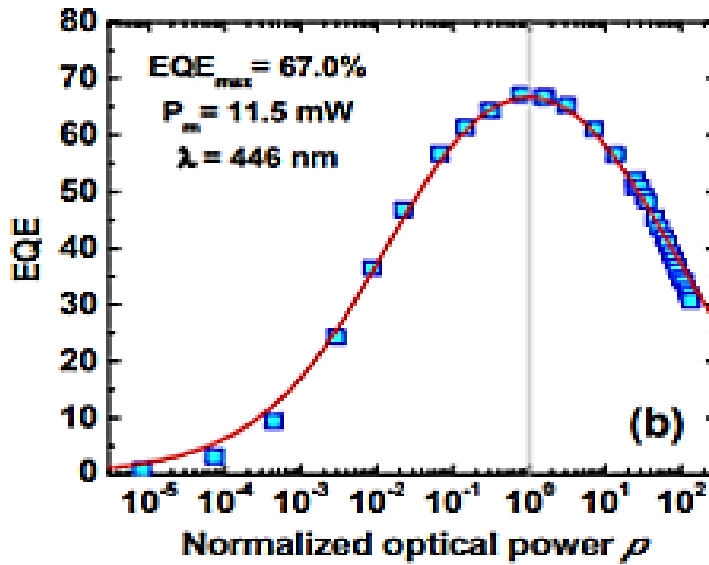


Figure I.6 : Courbe EQE expérimentale ajustée par le modèle ABC [9]

Les valeurs typiques des paramètres A , B et C pour les LED GaN/InGaN obtenues dans la littérature sont regroupées dans le tableau ci-dessous.

Tableau I.1 : Valeurs typiques des coefficients A , B et C de LED InGaN/GaN parues dans la littérature.

Année	2007[11]	2010[12]	2013[13]	2015[14]	2016[15]	2016[16]
$A(s^{-1})$	5.10^7	2.10^7		3.10^6	1.10^6	5.10^5
$B(cm^3 \cdot s^{-1})$	2.10^{-11}	7.10^{-11}	6.10^{-11}	3.10^{-12}	3.10^{-12}	10^{-12}
$C(cm^6 \cdot s^{-1})$	2.10^{-30}	1.10^{-29}	2.10^{-31}	1.10^{-31}		10^{-31}

I.2.5.3 Le phénomène de Droop et les solutions proposées :

Un des défis majeurs des matériaux III-N est celui de la performance à haute densité de courant. L'allure typique d'une courbe IQE présente un maximum de rendement à faible injection, puis décroît lorsque le courant augmente, c'est le phénomène de 'Droop'. Une illustration est donnée (Figure I.7).

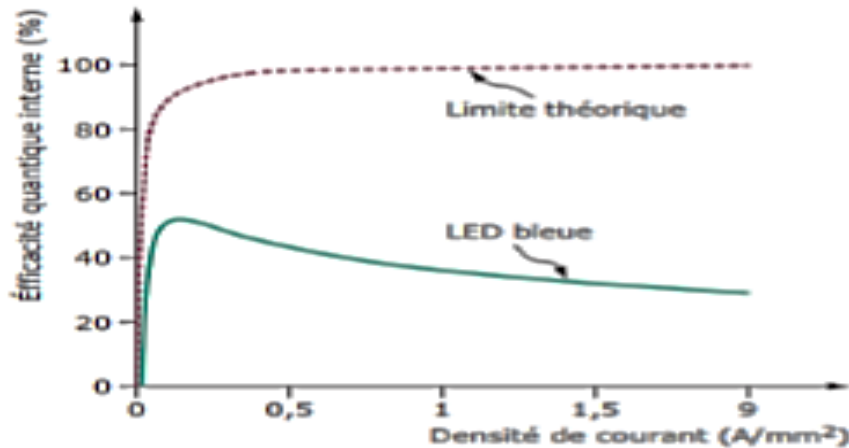


Figure I.7: Comparaison de l'allure du rendement d'une LED bleue réelle et d'une LED théorique [3].

En 2013, deux publications passent en revue les différentes causes possibles du droop et les solutions pour le réduire [17][18]. Les trois principales causes présentées sont les recombinaisons Auger, les dislocations et la fuite des électrons.

Les recombinaisons Auger, par lesquelles un électron se recombine avec un trou et transfère l'énergie ainsi créée pour exciter un troisième porteur, au lieu d'émettre de la lumière, est une piste privilégiée pour expliquer le droop de par sa dépendance cubique avec la concentration de porteurs. Bien que Iveland et al. [19] attribuent « sans ambiguïté » le droop aux recombinaisons Auger en 2013, le débat semble toujours ouvert.

La contribution des défauts cristallins au droop est aussi discutée. La forte concentration de dislocations dans les LED GaN est généralement associée aux recombinaisons SRH à faible densité de courant. Cependant, il a été proposé qu'un fort taux de dislocations puisse favoriser le droop en favorisant des mécanismes de transport non-radiatifs ou en créant une délocalisation des porteurs. Ce phénomène de délocalisation s'explique par le confinement des électrons et des trous aux minima de potentiel dans un puits quantique. Ces minima peuvent être causés par des fluctuations dans l'épaisseur des puits, dans leur composition ou par des barrières de potentiels entourant les défauts SRH. Les porteurs dans le puits sont séparés des dislocations et ont une longue durée de vie non radiative. A faible courant, la concentration de porteurs injectée est faible, et les porteurs restent confinés dans les minima de potentiel. A forte densité de courant, ces minima de potentiels sont remplis et les porteurs sont délocalisés vers des sites non-radiatifs, ce qui mène à des durées de vie non-radiative plus faibles. La hausse du droop avec l'augmentation de la concentration

d'indium semble aller en ce sens. Enfin, la fuite des électrons est la troisième cause de droop étudiée. Bien que la couche EBL ait pour rôle d'empêcher ce phénomène, son efficacité est parfois remise en cause, car elle peut entraîner une moins bonne injection des trous, ou des effets de polarisation néfastes, sans assurer pour autant un confinement complet des électrons dans la zone active.

Les LED pour applications haute-luminance sont particulièrement sujettes au droop puisqu'elles nécessitent de fonctionner à des densités de courant élevées. De nombreuses études visent à comprendre et limiter le droop. Le principal axe de recherche consiste à faire croître le GaN sur un autre substrat que le saphir, ou bien sur un plan semi-polaire ou non polaire, autre que le plan c traditionnellement utilisé. L'utilisation d'un autre substrat que le saphir a pour but de réduire le désaccord de maille et ainsi réduire le taux de dislocations. D'autre part, la croissance sur du saphir selon un plan de croissance semi-polaire ou non-polaire permet de supprimer les effets de polarisation. Ainsi, en 2010 Ling et al. [20] comparent le rendement de LED épitaxiées selon le plan c (c-LED) et le plan m non-polaire (m-LED). Selon eux, la forte polarisation des c-LED accentue la fuite des électrons et la distribution non-uniforme des trous, à l'origine du droop, tandis que le droop « négligeable » des m-LED est dû à l'absence de polarisation (Figure I.8).

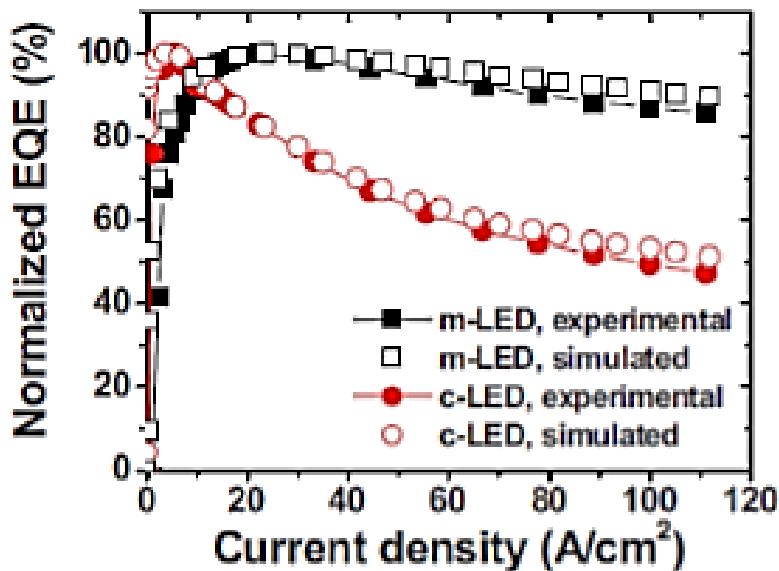


Figure I.8 : Influence du plan de croissance sur le rendement d'une LED [20].

En 2013, DenBaars et al. [14] montrent l'avantage théorique du plan de croissance m ($1\ 0\ \bar{1}\ 0$) non-polaire et donc vierge de polarisation spontanée. Les puits InGaN épitaxiés sur un GaN non polaire n'induisent pas de polarisation piézo-électrique due à la contrainte du matériau. Le recouvrement des fonctions d'ondes de l'électron et du trou est alors très bon grâce à des bandes d'énergie qui restent plates (Figure I.9).

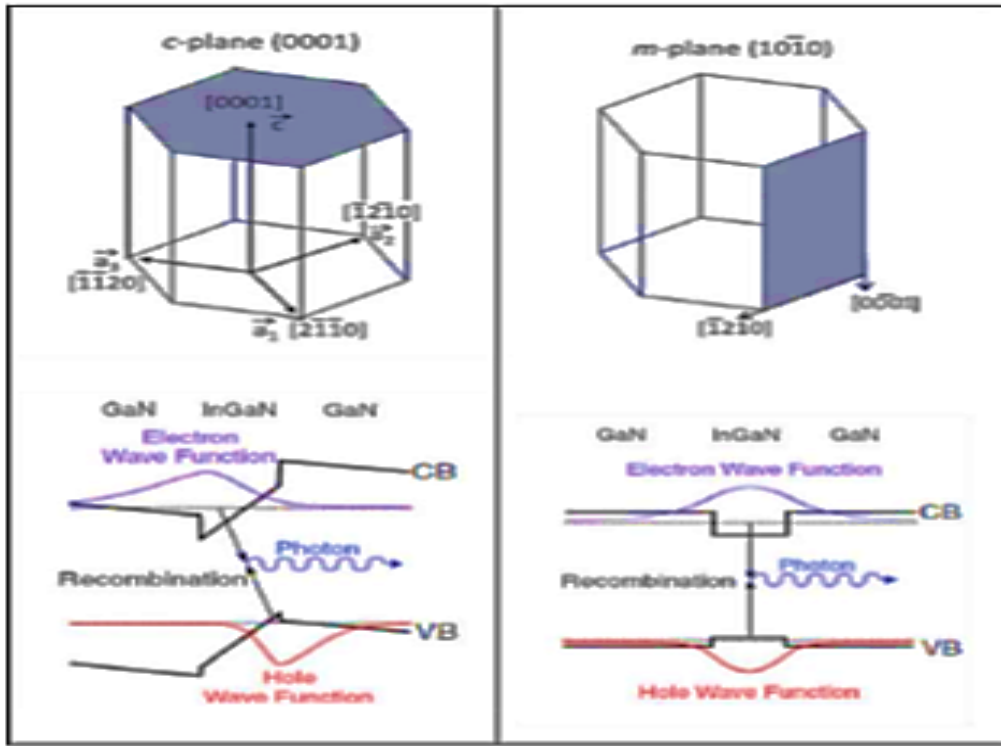


Figure I.9 : Plan de croissance c et m, et conséquence sur la courbure des bandes [21].

Dans le même article, ils présentent l’avantage d’une croissance sur du GaN plutôt que du saphir pour s’affranchir des problématiques des contraintes liées à la différence de maille, et des dislocations qui en résultent (Figure I.10). La croissance sur du GaN est cependant très chère, et les LED industrielles sont aujourd’hui réalisées en très grande majorité sur du saphir pour des raisons de coût.

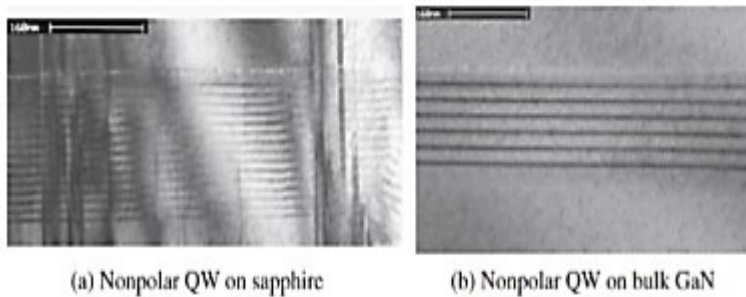


Figure I.10: Influence de la polarité du plan de croissance sur les dislocations [21] :
 a) croissance de puits quantiques sur saphir b) croissance de puits quantiques sur GaN

En 2016, Badcock et al. [22] montrent que le rendement des LED polaires suit le modèle ABC, tandis que les LED non-polaires présentent un rendement constant, indépendant de la densité de porteurs (Figure I.11).

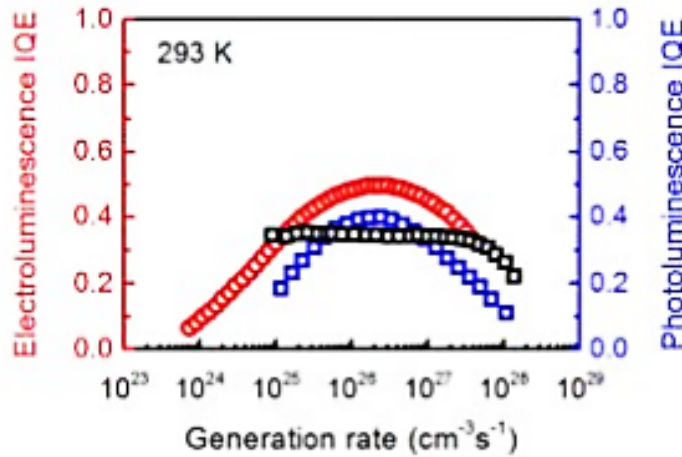


Figure I.11 : Rendement IQE de LED sur plan c (en rouge par électroluminescence, et bleu par photoluminescence) et sur plan m (en noir) [22].

I.2.5.4 L'extraction lumineuse et le rendement quantique externe:

L'extraction lumineuse est un point critique du rendement des LED. En effet, tous les photons créés dans la zone active de la jonction PN ne sont pas émis en dehors de la LED. Le rendement quantique externe (EQE : External Quantum Efficiency) traduit alors le rapport du nombre de photons émis en dehors de la LED sur le nombre de porteurs injectés, et s'exprime sous la forme :

$$EQE = IQE \times LEE \tag{I.25}$$

Où LEE est l'extraction lumineuse (Light Extraction Efficiency), rapport du nombre de photons extrait de la LED sur le nombre de photons émis dans la région à puits quantiques.

L'extraction est régie par la loi de Snell-Descartes.

$$n_{GaN} \cdot \sin\theta = n_{air} \cdot \sin\varphi \tag{I.26}$$

Où θ est l'angle d'incidence à l'interface semi-conducteur/air et φ l'angle du rayon réfracté (Figure I.12).

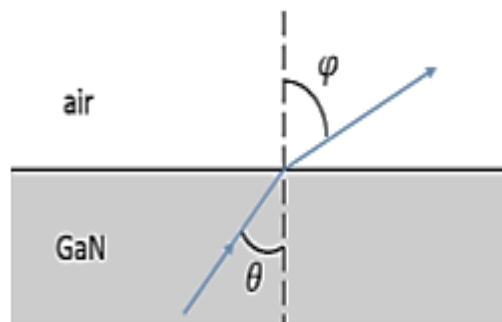


Figure I.12 : Loi de Descartes à l'interface GaN / air

L'angle critique ϕ_c pour lequel les rayons entrent en réflexion totale interne est obtenue pour $\theta = 90^\circ$, soit :

$$\phi_c = \arcsin\left(\frac{n_{air}}{n_{GaN}}\right) \quad (I.27)$$

Les rayons émis dans le cône d'extraction sont extraits, les autres entrent en réflexion totale interne (Figure I.13)

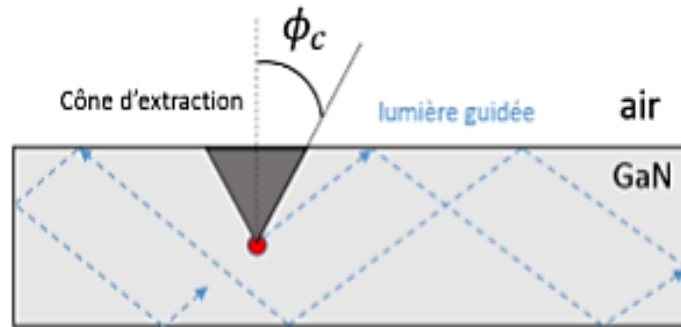


Figure I.13: Réflexion totale interne et cône d'extraction.

Dans le cas du GaN, d'indice de réfraction $n = 2.45$ à 440 nm, l'angle critique ϕ_c vaut environ 23.6° . Le pourcentage de lumière extraire vaut alors :

$$\frac{P_{extraire}}{P_{total}} = \frac{1}{2} (1 - \cos \phi_c) \quad (I.28)$$

Ainsi, environ 4.3% de lumière est extraite à l'interface GaN / air.

L'extraction lumineuse est donc un point critique dans le rendement global d'une LED et de nombreuses solutions ont été proposées pour l'améliorer. Les principales techniques sont la texturation de surface [23,24], l'utilisation de substrat patterné [25,26,27] ; l'utilisation de cristaux photoniques [28,29] et de nouvelles formes de LED (triangulaires par exemple) [30,31]. Dans tous les cas l'objectif est de rompre la symétrie du système pour favoriser l'extraction lumineuse. La Figure I.14 résume les différentes techniques actuelles permettant d'améliorer l'extraction lumineuse dans une LED.

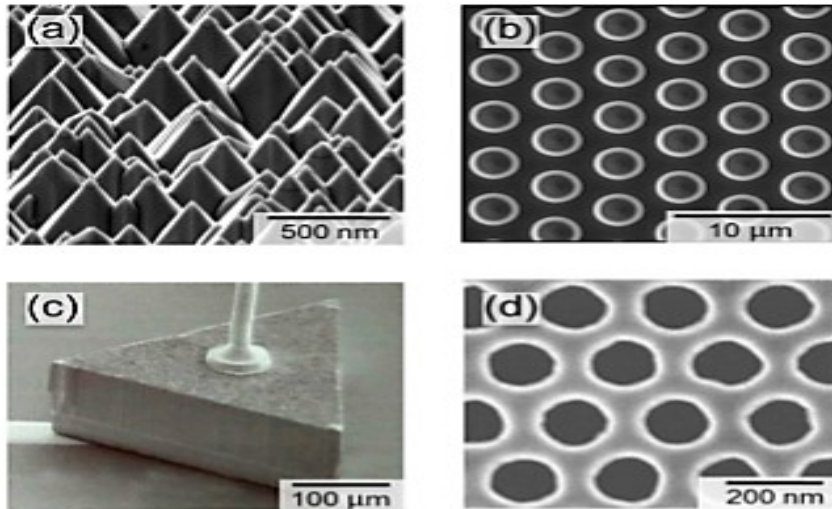


Figure I.14 : Solutions pour améliorer l'extraction lumineuse dans une LED :
 a) texturation de surface, b) substrat patterné PSS, c) LED de forme triangulaire et d) cristaux photoniques[32].

Les LED commerciales utilisent typiquement un substrat PSS, associé à un dôme en époxy afin d'obtenir une extraction lumineuse de l'ordre de 50%. L'utilisation de cristaux photoniques peut permettre d'obtenir une extraction lumineuse jusqu'à 73% [29]. Des rendements d'extraction allant jusque 90% ont été rapportés en combinant la texturation de surface et l'utilisation d'une LED triangulaire [33].

I.2.5.5 Le rendement total WPE :

Le rendement total d'une LED, ou rendement WPE (Wall-Plug Efficiency) est défini par le rapport de la puissance optique sur la puissance électrique.

$$WPE = \frac{P_{opt}}{P_{elec}} \quad (I.29)$$

Chapitre II : Les LEDs



II.1 Introduction:

Une LED 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 [33].

II.2. 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 PN telle que décrite dans la Figure II. [34]

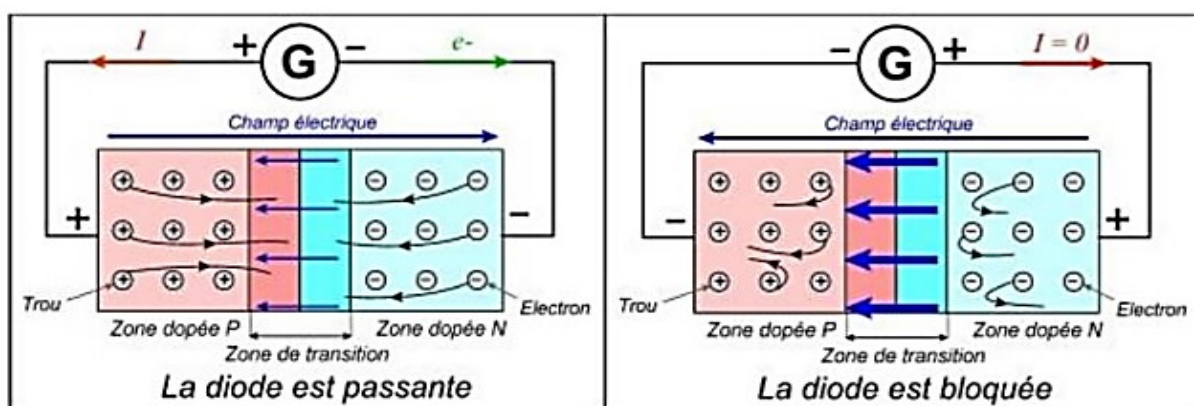


Figure II.1 : Jonction PN d'une diode [34].

II.3.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.[35]

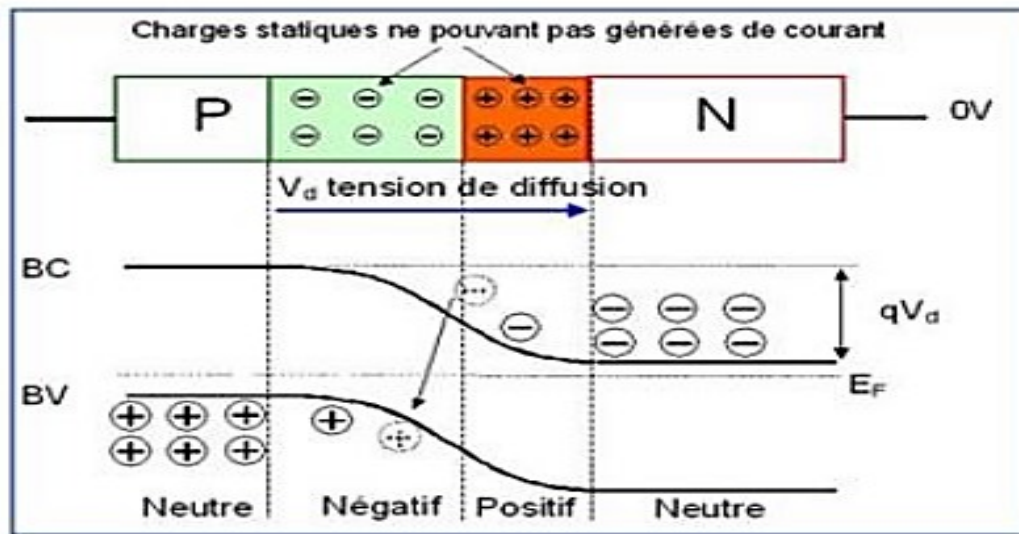


Figure II.2 : Principe de fonctionnement de LED [36].

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 [37].

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

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.4. 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 [33]. Les LEDs sont structurées pour assurer que la plupart des recombinaisons aient lieu sur la surface par deux façons.

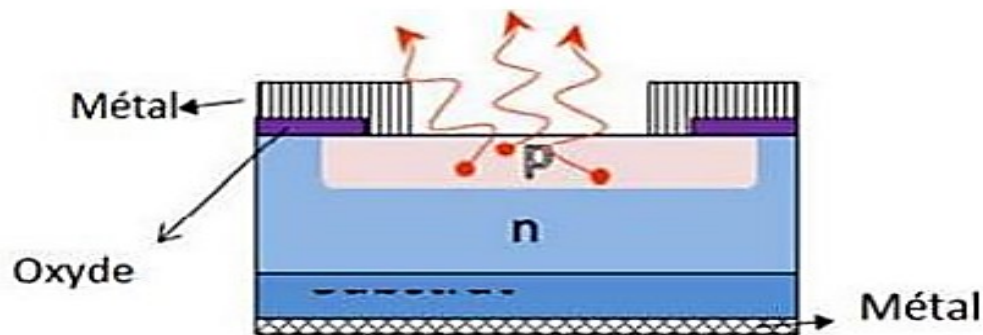


Figure II.3 : Structure de base d'une diode électroluminescente LED [33].

- En augmentant la concentration de dopage du substrat, de sorte que la plupart des porteurs de charge libres minoritaires (les électrons) se déplaçant vers le haut, se recombinent et émettent de la lumière à la surface.
- En augmentant la longueur de diffusion :

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

Où D est le coefficient de diffusion. et τ est la durée de vie.

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

La LED doit être structurée de telle sorte que les photons générés par le dispositif soient émis sans être absorbés. Une solution consiste à rendre la couche P sur la partie supérieure assez mince, pour créer une couche d'appauvrissement (Figure II.3). Il existe différentes façons de structurer le dôme pour l'efficacité d'émission.

Les LEDs sont généralement construits sur un substrat de type N, avec une électrode attachée à la couche type P déposée sur sa surface. Des substrats de type P, moins fréquents, se produisent aussi. Beaucoup de LEDs commerciales, en particulier GaN/InGaN, utilisent également des substrats en saphir [38].

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, présentée dans le circuit de la Figure II.4, ce 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 [33].

$$I = I_s \left(e^{\frac{V_d}{kT}} - 1 \right) \quad \text{II.3}$$

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.

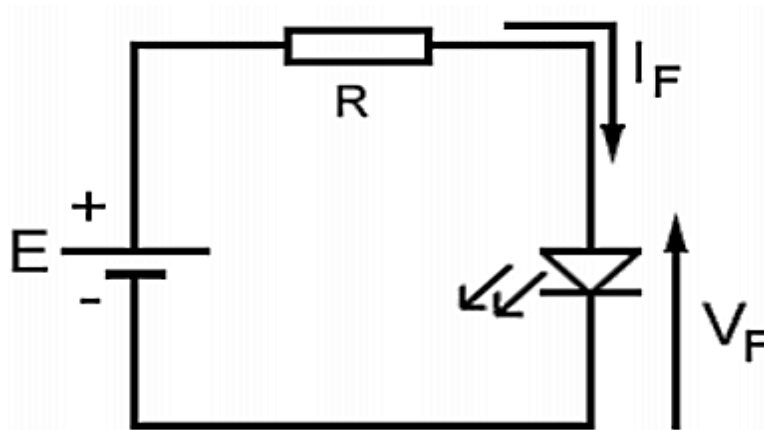


Figure II.4 : Circuit de polarisation de la LED.

II.5. Différents types des LEDs:

II.5.1 LED à homojonction:

Les homojonctions (Figure II.5) sont constituées d'un même matériau mais de dopage différent pour former une jonction PN. On peut rappeler qu'un semi-conducteur de type (p) est fabriqué en dopant un semi-conducteur intrinsèque avec des impuretés de types accepteurs ; tandis qu'un type (n) est fabriqué en dopant avec des impuretés de types donneuses. La recombinaison des porteurs est prépondérante dans la zone p : les trous ont une mobilité très inférieure à celle des électrons et se traduit par la présence d'un plus grand nombre d'électrons (porteurs minoritaires) dans la zone p que de trous (porteurs minoritaires) dans la zone n. La luminescence est donc plus importante du côté p, c'est la raison pour laquelle les LEDs sont fabriquées avec la zone p proche de la surface émettrice.

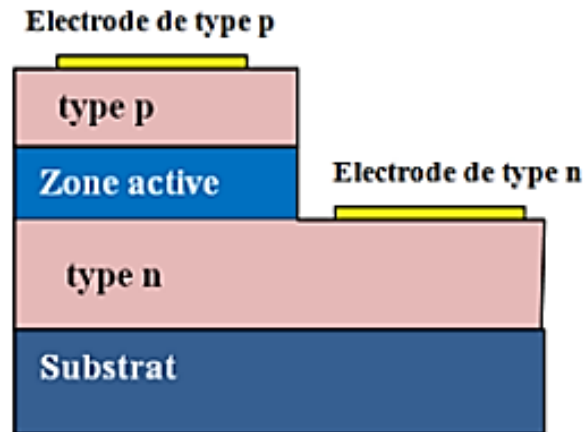


Figure II.5 : Schéma de principe d'une LED à homojonction.

II.5.2 LED à hétérojonction:

Elle se forme au contact de deux matériaux semi-conducteurs ayant des valeurs de gaps différentes (Figure II.6). Dans ce cas la barrière d'énergie dépend du gap, de l'affinité électronique et de la concentration des dopants des deux semi-conducteurs [39].

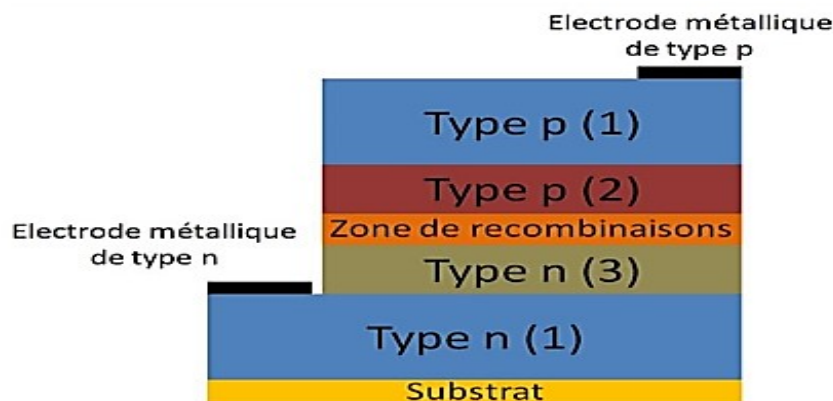


Figure II.6 : Schéma de principe d'une hétérojonction PN. [38]

II.5.3 LED à puits quantique :

Les LEDs à puits quantique sont obtenus 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, représenté dans la Figure II.7. 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 [40].

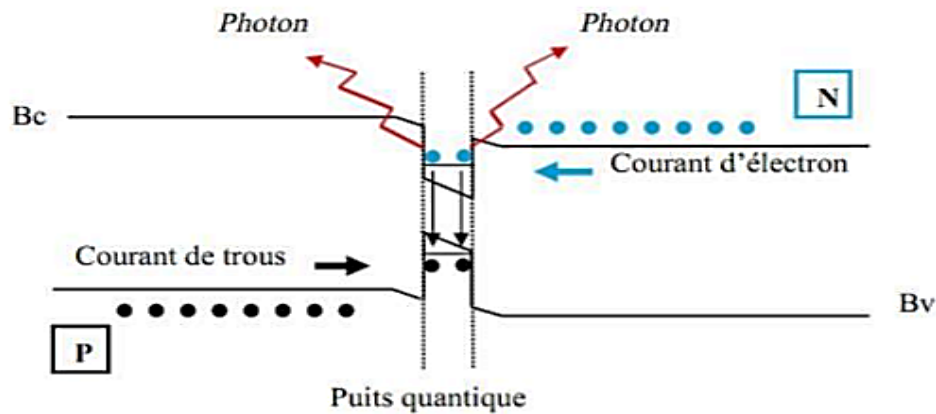


Figure II.7 : Schéma de principe d'un puits quantique PN.

II.6. Classement selon la puissance:

II.6.1 LED de faible puissance

Depuis 1970, les LEDs de faible puissance sont présentes dans notre quotidien. Elles jouent le rôle de voyants lumineux sur divers appareils. Elles ne sont pas élaborées pour les flux lumineux sur divers appareils. Elles ne sont pas élaborées pour les puissances élevées et les flux lumineux pour les applications d'éclairage. La Figure II.8 représente le schéma d'une LED de faible puissance [41].

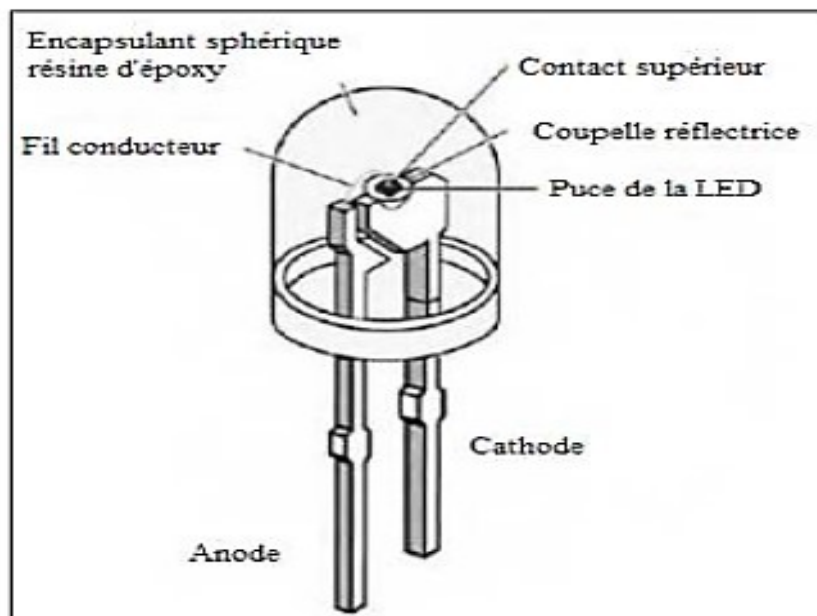


Figure II.8 : Schéma d'une LED de faible puissance[41].

II.6.2 LED de forte puissance :

Les applications actuelles des LEDs de forte puissance sont très répandues car elles trouvent un vaste domaine d'utilisation ; par exemple pour l'éclairage, on utilise des lampes à

plusieurs LED de forte puissance. Le principe de base de ces LEDs est pratiquement identique à celui des LEDs à faible puissance, la seule différence reste au niveau de la puce (prévoir un système pour évacuer la chaleur) (Figure II.9).

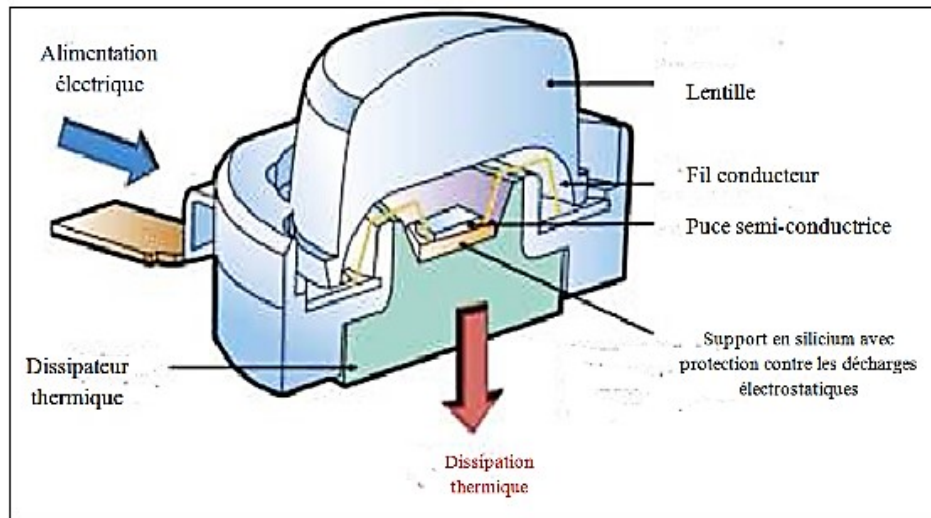


Figure II.9 :Schéma d'une LED de forte puissance [42].

II.6.3. Les LEDs blanches:

Les premières LED blanches sont peu à peu apparues sur le marché et les fabricants ont proposé des diodes plus puissantes. On a plusieurs méthodes pour avoir la lumière blanche. La première méthode consiste à mélanger trois LED : Une LED rouge, une verte et une bleue (Figure II.10) . Pour avoir une meilleure lumière blanche, il faut que ces LED soient volumineuses, et nécessitent un circuit spéciale afin d'ajuster l'intensité de chaque couleur [43, 44].

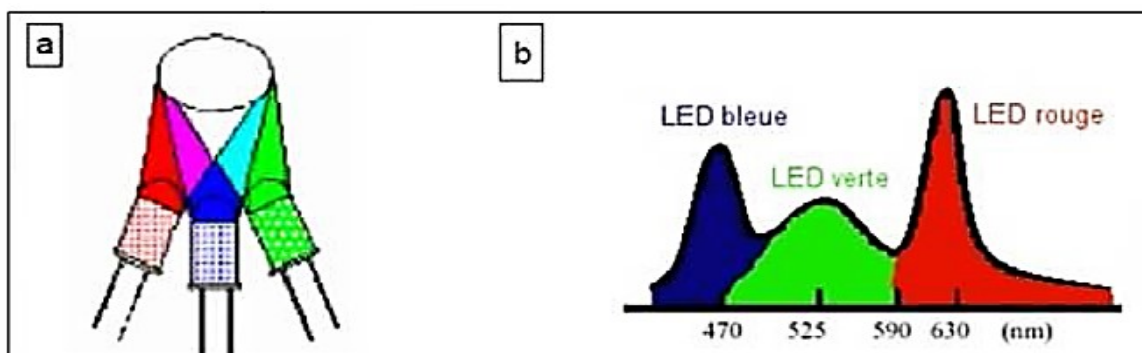


Figure II.10 : Méthode des trois couleurs [45].

La deuxième méthode consiste à utiliser une LED bleue recouverte par une couche de phosphore. Une partie de la radiation bleue de longueur d'onde courte est convertie en radiation de longueur d'onde longue jaune. La combinaison des rayonnements donne de la lumière blanche [44] (Figure II.11).

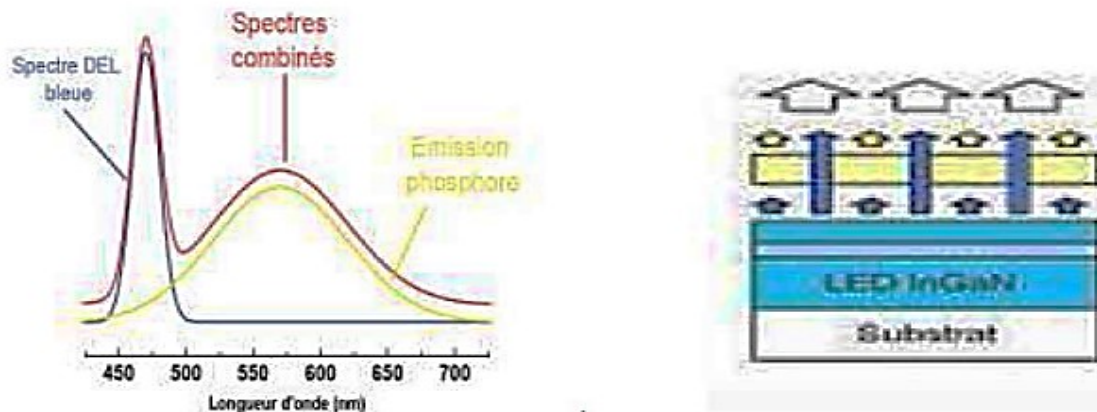


Figure II.11 : Méthode LED bleue + phosphore jaune [46].

La troisième méthode consiste à utiliser une diode émettant une longueur d'onde courte (dans l'ultraviolet proche) combinée à un ou plusieurs phosphores qui transforme la lumière UV en visible (Figure II.12). L'avantage de cette technique est de créer de la lumière blanche de bonne qualité, cette dernière permet de déposer des LED blanches sans lumière bleue sur le marché [44].

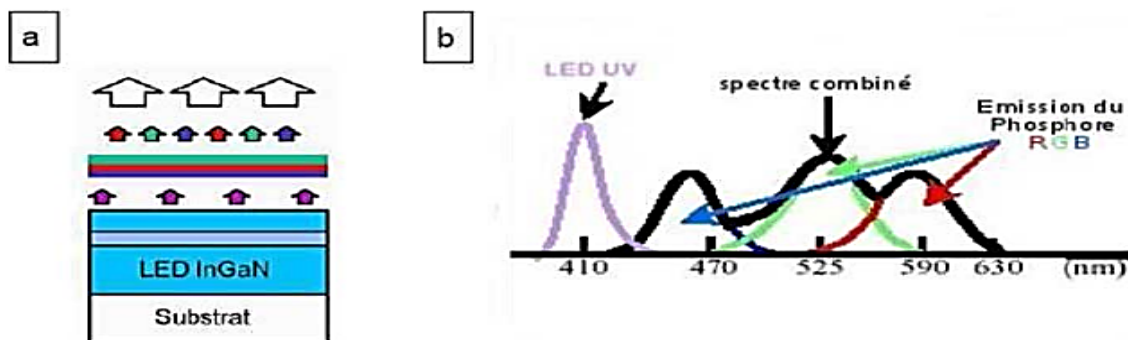


Figure II.12 : LED ultraviolet multi phosphore [46].

II.7. Utilisation des LEDs:

a- Visualisation d'information-utilisées dans les panneaux de signalisation, les écrans de communications de grandes dimensions,...).

b- Transmission d'informations-LEDs de faible puissance utilisées dans les télécommandes de divers appareils ménagers (téléviseurs, chaîne hi-fi, lecteurs DVD...)-Utilisées aussi avec les fibres optiques pour le développement des réseaux internet haut débit.

c-Eclairage :

-**Véhicules** : utilisées pour l'éclairage d'intérieur de voiture et le rétro-éclairage de tableaux de bord, utilisées dans les phares avant, en tant que feux de jour, et dans les feux arrière et les feux de stop.

-**Téléviseurs et téléphones mobiles** : utilisées dans les écrans de téléviseurs permet également de réduire l'épaisseur des écrans grâce au très faible encombrement des LED CMS (composant monté en surface).

-**Confort et décoration** : Des LEDs de faible puissance sont utilisées dans la voiture bar et des LEDs de forte puissance dans les sièges des passagers.

-**En biologie** : Les LEDs sont utilisées dans le secteur de la recherche pour la croissance des végétaux où l'on stimule un éclairage naturel pour des études de longues durées. La Figure (II.13) indique la répartition du marché global des LEDs en 2010 selon les secteurs d'activités.

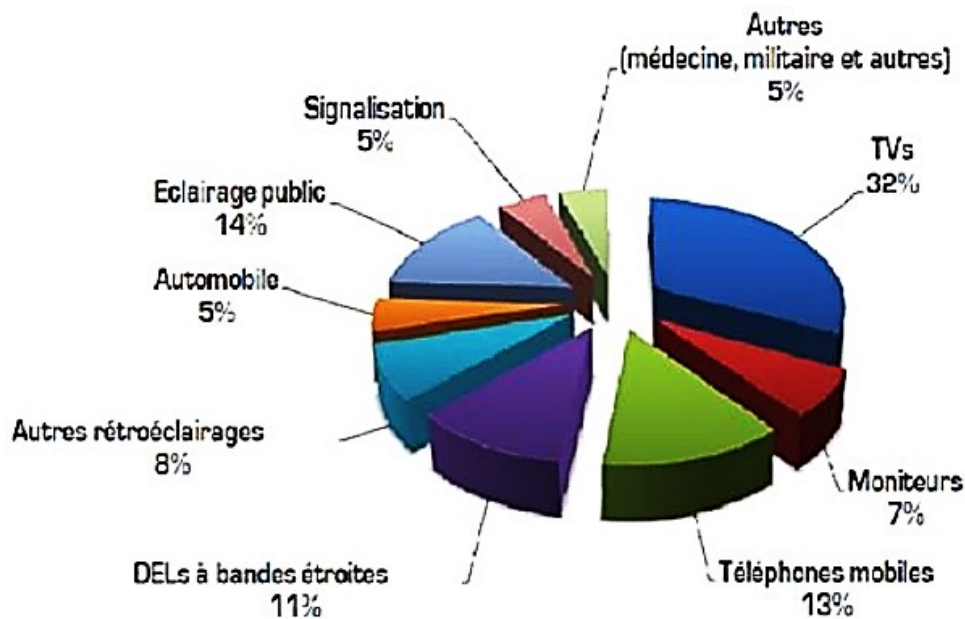


Figure II.13 : Les applications des LEDs.

II.8. Avantages et inconvénients des LEDs.

II.8.1 Avantages des LEDs:

Les LED présentent certains d'avantages :

- Les LED peuvent émettre de la lumière d'une couleur prévue sans utiliser de filtres de couleur que l'éclairage traditionnel les méthodes requises. ceci est plus efficace et peut réduire les couts initiaux.
- Les LED peuvent être minuscules (plus petites que de deux 2mm[47] et facilement fixées aux cartes de circuits imprimés.
- Les LED, qui sont des composants à semi-conducteurs, sont difficiles à endommager en cas de choc externe .Les ampoules fluorescentes et à incandescentes se brisent facilement si elles tombent sur le sol.

- Leur taille assez réduite permet de réaliser des sources de lumière ayant un bon rendement en assemblant plusieurs LED.
- Bonne résistance mécanique (chocs, écrasement, vibrations) donc transportable.

II.8.2 Inconvénients :

Malgré tous les avantages des LEDs, elles présentent certains inconvénients.

- Le rendement lumineux est plus faible
- Les LED doivent être fournies avec le courant correct. cela peut impliquer des résistances de série ou des alimentations à courant régulé.
- Utilisation en hiver : comme ils n'émettent pas plus de chaleur que les lampes à incandescence, les lampes à LED utilisées contrôler la circulation peut être bloqué par la neige, ce qui entraîne des accidents [48,49].
- Répartition non uniforme de l'énergie spectrale des LED blanches (entre 380 et 780 nm).

II.9. Les matériaux III-V :

II.9.1. Présentation des composés III-V :

Les composés III-V ont été synthétisés et étudiés depuis 1932 [50,51]. Ils ont prouvé leur importance en électronique et en optoélectronique dans les domaines spectraux qui couvrent tout le spectre visible et ultraviolet comme les diodes laser visibles [52,53], les diodes électroluminescentes [54,55], et les cellules photovoltaïques [56,57], du fait de leurs exceptionnelles propriétés électroniques, physiques et optiques ; ainsi pour les applications en électronique de puissance, haute température et haute fréquence tels que les transistors bipolaires, les transistors à effet de champ, y compris les transistors à haute mobilité électronique [58]. Les semi-conducteurs III-V sont constitués d'éléments des colonnes III et V du tableau périodique de Mendeleïev. Le tableau .1 représente les principaux éléments III, IV et V qui forment les semiconducteurs. Les chiffres en haut et en bas représentent respectivement le nombre atomique et la masse atomique, respectivement.

Tableau II.1: Les principaux éléments des groupes III, IV et V, qui constituent les semi-conducteurs.

III	IV	V
$10.81^{5}B$	$12.01^{6}C$	$14.01^{7}N$
$26.98^{13}Al$	$28.09^{14}Si$	$30.97^{15}P$
$69.74^{31}Ga$	$72.59^{32}Ge$	$74.92^{33}As$
$114.82^{49}In$	$118.69^{50}Sn$	$121.75^{51}Sb$

Dans le tableau II.2, nous classifions quelques paramètres essentiels de quelques composés binaires III-V, à 300 K [56,60].

Tableau II.2: Principaux paramètres physiques de quelques composés binaires III-V [59,60].

Composés III-V	GaN	AlN	InN	InP	BN
Bande interdite E_g (eV)	3.4	6.2	0.67	1.3	5.5
Vitesse de saturation ($\times 10^7$ cm/s)	2.5	2.1	1.8	1	..
Mobilité ($cm^2/V.s$)	1000	400	3.6	5400	200
Permittivité relative (ϵ)	9.5	9.14	15.3	12.5	6.85
Conductivité thermique(W/cm.K)	1.5	2	0.45	0.7	6

Pour les trois nitrures GaN, AlN, InN, nous préférons donner les paramètres de maille à part, dans le tableau II.3. Nous répertorions les paramètres dans la phase cubique et la phase hexagonale. Pour la phase cubique nous donnons les plus communes

Tableau II.3 : Paramètres de maille des trois nitrures.[29]

	GaN	AlN	InN
Phase cubique(ZB)	a=4.50A°	a=4.38A°	a=4.98A°
	a=4.53A°	a=4.3996A°	
	a=4.452A°	a=4.34A°	a=4.981A°
Phase hexagonale(WZ)	a=3.189A°	a=3.112A°	a=3.548A°
	c=5.185A°	c=4.982A°	c=5.760A°

Le groupe III-Nitrures sont des semi-conducteurs à large bande interdite variant de 6.2 eV (pour AlN) à 0.67 eV (pour InN), correspondant à la gamme de longueur d'onde de 200 nm (pour 6.2 eV) à 1850 nm environ (pour 0.67 eV). Cette gamme couvre un spectre optique

allant de l’ultraviolet (UV) à l’infrarouge (IR). La Figure II.14 représente la variation de la bande interdite en fonction du paramètre de maille [61].

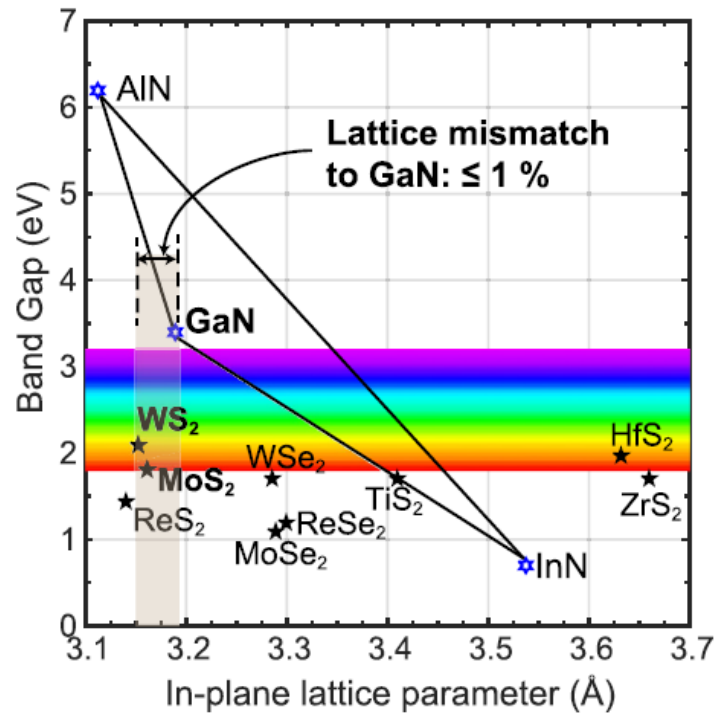


Figure II.14 : Energie de bande interdite en fonction des paramètres de maille des semiconducteurs III–V [61] .

Les énergies de bande interdite des alliages ternaires de forme $A_xB_{1-x}N$ peuvent être évaluées par loi de Vegard additionnée d’un terme non linéaire supplémentaire [62]:

$$E_g(x) = xE_g(AN) + (1 - x)E_g(BN) - b \cdot x \cdot (1 - x) \quad (II.3)$$

où x est la fraction molaire de l’élément A dans l’alliage $A_xB_{1-x}N$. Le terme b de non linéarité, appelé aussi ‘bowing’, représente une correction de la loi de Vegard. Par exemple pour les alliages ternaires $Al_xGa_{1-x}N$ et $In_xGa_{1-x}N$, la bande d’énergie interdite E_g est évaluée respectivement selon les Eqs.II.4 et II.5 [63,64]:

$$E_g(Al_xGa_{1-x}N) = xE_g(AlN) + (1 - x)E_g(GaN) - 1.3 \cdot x \cdot (1 - x) \quad (II.4)$$

$$E_g(In_xGa_{1-x}N) = xE_g(InN) + (1 - x)E_g(GaN) - 1.43 \cdot x \cdot (1 - x) \quad (II.5)$$

II.9.2. Propriétés cristallines des nitrures d’éléments de la colonne III:

Les nitrures d’éléments de la colonne III du tableau périodique de Mendeleïev, le GaN et InN se présentent essentiellement sous deux formes cristallines : la phase hexagonale « wurtzite » et la phase cubique « blende zinc ». Il existe aussi une structure « rocksalt » mais son apparition ne se fait qu’à des pressions extrêmement élevées et de ce fait, nous ne l’aborderons pas. La structure la plus stable thermodynamiquement à température ambiante et pression atmosphérique est l’hexagonale ou (structure wurtzite), cette configuration

correspond à deux réseaux hexagonaux constitués chacun d'un type d'atome et décalés de $5/8$ de la maille élémentaire suivant l'axe (c), la structure du cristal est définie par les paramètres (a,c), correspondant respectivement à la longueur du côté de la base et la hauteur de prisme, un vecteur interne u permet ensuite de caractériser la distance anion-cation selon l'axe [0001]. La deuxième structure dite blend de zinc est constitué de deux sous réseaux cubiques à faces centrées, l'un étant constitué d'un élément III et l'autre d'un élément V, les deux sous réseaux étant décalés du quart de la diagonale principale, soit $\frac{a\sqrt{3}}{4}$, « a » étant la longueur du cube. Cette structure (zinc-blende) ne peut quanta elle être obtenue que dans des conditions de croissance bien particulières, de surcroît, elle est thermodynamiquement instable. Dans les nitrures les liaisons sont de types covalents présentant des propriétés partiellement ioniques, telles que l'une des quatre liaisons reçoit deux électrons de l'élément V [65]

II.9.3.Nitrure de gallium GaN

II.9.3.1 Généralités

Le premier dépôt de nitrure de gallium (GaN) a été développé en 1969 par épitaxie en phase vapeur aux hydrures (EPVH) (hybride vapor phase epitaxy HVPE) [66]. GaN est un semi-conducteur à large gap direct (3.4 eV) ; il électroniques et optoélectroniques, allié avec d'autres composés III-V, pour réaliser divers dispositifs. Il admet une grande stabilité chimique et thermique, de très bonnes propriétés mécaniques, et des propriétés physiques très intéressantes pour opérer en haute température, haute puissance et haute fréquence.

II.9.3.2 Propriétés structurales :

Le nitrure de gallium se présente sous deux formes cristallines : la structure hexagonale ou wurtzite (h-GaN), et la structure cubique (blende de zinc : c-GaN) [67]. Celle de type wurtzite est la plus stable thermodynamiquement [68].

II.9.3.3 Structure wurtzite :

Dans la structure de type wurtzite (Figure II.15), les atomes d'azote forment un empilement hexagonal compact et les atomes de gallium occupent la moitié des sites tétraédriques. Elle est plus stable que la phase cubique en termes d'énergie de formation. Elle est constituée de deux réseaux hexagonaux, l'un avec les atomes de gallium et l'autre avec les atomes d'azote, interpénétrés et décalés entre eux suivant l'axe c de $5/8$ ème de la maille élémentaire. La structure wurtzite possède deux paramètres principaux, le paramètre de maille latéral $a_0 = 3.189 \text{ \AA}$ et le paramètre de maille vertical $c_0 = 5.185 \text{ \AA}$

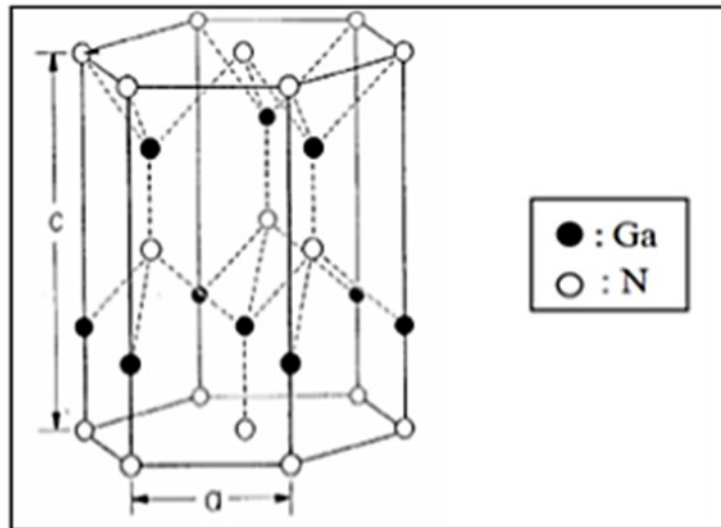


Figure II.15 : Structure cristalline du GaN hexagonal (wurtzite) [69]

II.9.3.4 Structure blende de zinc :

La structure blende de zinc est formée de deux sous réseaux cubiques à faces centrées comprenant chacun un type d'atome décalé d'un quart par rapport à la diagonale de la maille (Figure II.16). Les atomes d'azote forment un empilement cubique faces centrées dans lequel les atomes de gallium occupent la moitié des sites tétraédriques. Cette structure est thermodynamiquement instable et moins exploitée par rapport à l'autre type, la valeur de sa maille élémentaire est $a_0=4.511 \text{ \AA}$ à 300 K [67].

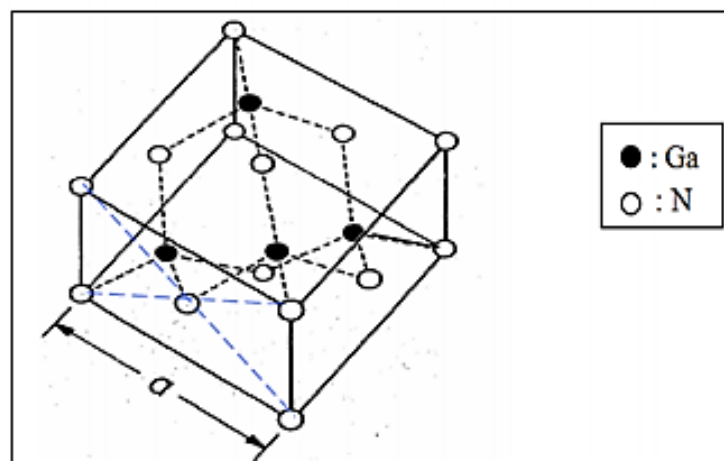


Figure II.16 : Structure cristalline du GaN cubique (blende de zinc) [67]

II.9.3.5. Propriétés de l'InGaN :

L'InGaN apparaît à l'heure actuelle comme le matériau le plus prometteur pour l'émission de la lumière visible. C'est un matériau semi-conducteur fait d'un mélange de nitrure de gallium (GaN) et nitrure d'indium (InN), c'est un ternaire groupe III/groupe V à bande interdite

directe. Son espace de bande peut être accordé en changeant la quantité d'indium dans l'alliage.

II.9.4 Nitrure d'aluminium AlN et ses propriétés structurales:

Le nitrure d'aluminium (AlN) est un semi-conducteur à large bande interdite (6.2 eV à 300 K) [70], il émet dans l'ultraviolet. L'AlN est un matériau ayant des propriétés intéressantes : une excellente conductivité thermique, une température de fusion élevée et une bonne stabilité à haute température. Il peut être utilisé pour des applications optoélectroniques (élaboration des diodes électroluminescentes). L'AlN poly cristallin est obtenu par frittage, et de façon plus marginale par des méthodes (dont la HTCVD) permettant d'obtenir directement des dépôts pour des applications de protection contre la corrosion ou l'abrasion. Il est également utilisé comme barrière de diffusion [69]. Le procédé HTCVD (High Température Chemical Vapor Deposition), spécialité d'ACERDE, est une alternative qui permet la croissance de monocristaux de très bonne qualité. L'ACERDE élabore par HTCVD des couches monocristallines d'AlN sur des substrats de 2 pouces en saphir ou SiC. Le développement de couches d'une centaine de microns est en cours. L'ACERDE a pour objectif de fournir dans les années à venir des substrats "autoportants" d'AlN monocristallin [66]. Le nitrure d'aluminium se rencontre sous deux structures cristallographiques (Figure II.17) : - hexagonale qui est thermodynamiquement stable, elle est de type wurtzite ayant des paramètres de maille $a = 3.1114 \text{ \AA}$ et $c = 4.9792 \text{ \AA}$, et - cubique qui est métastable, elle est de type zinc blende ayant un paramètre de maille $a = 4.0450 \text{ \AA}$. La structure cubique possède des propriétés relativement intéressantes : une moins grande diffusion de phonons, une conductivité thermique ainsi qu'une vitesse de propagation des ondes acoustiques plus élevées que celles de la structure wurtzite, grâce à son degré de symétrie plus élevé. [69]

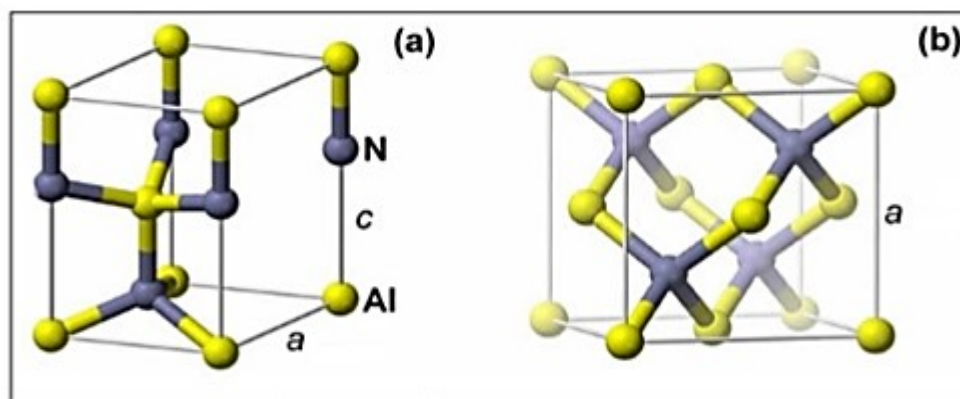


Figure II.17 : Structures cristallines du nitrure d'aluminium (a) wurtzite, (b) zinc blende [69]

Chapitre III : Résultats et discussions



III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'étude des propriétés optoélectroniques d'une LED de structure p-GaN/AlGaIn/InGaIn/n-GaN en considérant deux types (I et II). Dans le type I ; la région d'InGaIn contient trois puits quantiques. Dans le type II ; on réduit le nombre des puits dans la région d'InGaIn à un seul puits mais une couche GaNSb est insérée au milieu de ce puits. Les propriétés optoélectroniques étudiées incluent le spectre de l'émission spontanée, le rendement quantique interne (IQE) et externe (EQE), la caractéristique densité de courant – tension ($J(V)$) et la puissance lumineuse émise en fonction du courant de la polarisation directe. Les paramètres internes sont aussi analysés comme le diagramme de bande d'énergie, les densités des électrons et des trous, les fonctions d'onde et les niveaux d'énergie. Le fonctionnement de la LED étudiée est mis en œuvre en utilisant le logiciel de simulation numérique Silvaco-Atlas ; ce dernier permet de résoudre de manière itérative les équations de Schrödinger-Poisson dans les puits quantiques. Le modèle drift-diffusion (dans le volume des matériaux (bulk)) et le modèle capture-escape (dans les puits quantiques) sont utilisés pour décrire les transports des porteurs de charges. Les recombinaisons Auger et SRH sont prises en compte comme mécanismes de recombinaisons non-radiatives.

III.2 Aperçu sur le logiciel Silvaco-Atlas

Le logiciel utilisé pour l'étude via la simulation numérique de la LED est Atlas, développé par la société SILVACO (SiliconValley Corporation). C'est la société Américaine « Silvaco International » ayant son siège à Santa Clara en Californie. Elle est un des principaux fournisseurs de chaînes professionnelles de logiciels de simulation par éléments finis et de conception assistée par ordinateur pour les technologies de l'électronique TCAD (Technology Computer Aided Design). Historiquement la compagnie a été fondée en 1984 par Dr. Ivan Pesic pour répondre aux besoins des designers de circuits intégrés (IC, integrated circuits) analogiques pour des modèles SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) de plus en plus précises et linéaires. Le produit initial a été le système d'extraction des paramètres UTMOST (Universal Transistor Modeling Software) qui est devenu un standard industriel pour l'extraction des paramètres, la caractérisation des dispositifs et la modélisation. L'entrée de SILVACO dans la technologie TCAD a eu lieu en 1989, et elle a été basée sur une recherche du Département des Dispositifs Physiques de l'Université de Stanford, ainsi apparaissent dans SILVACO « Athena » comme simulateur des processus et « Atlas » comme simulateur des dispositifs (2D et 3D) [71].

TCAD SILVACO inclut de nouveaux modèles physiques qui emploient des méthodes et des algorithmes numériques efficaces, de nouvelles techniques de maillage, l'optimisation des solutions linéaires, 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 qu'il donne la possibilité de visualiser des phénomènes physiques difficilement accessibles et donc observables. Les modules de TCAD-SILVACO peuvent être utilisés pour :

- La simulation des étapes de fabrication technologique tels que, ATHENA, SSupreme3, SSupreme4, etc.
- La simulation électrique des dispositifs tels que, les Diodes, les MOSFET, les transistors bipolaires..., réalisée par le module ATLAS.
- Virtual Wafer pour automatiser la simulation de fabrication des Wafer [71].

III.2.1 ATLAS

Le logiciel de simulation ATLAS est un simulateur de modélisation bidimensionnelle de composants semi-conducteurs. Il est capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs en régime continu, transitoire ou fréquentiel [71][68]. En plus du comportement électrique, il fournit des informations sur la distribution interne des variables électrique telles que le courant ou la tension (lignes de champ). Ceci est réalisé en résolvant numériquement les équations de Poisson et de continuité des électrons et des trous (à deux dimensions) en un nombre fini de points formant le maillage de la structure défini par l'utilisateur ou par le programme [71,72].

Ce simulateur est composé de deux parties :

- Une partie de traitement numérique (méthode d'intégration, de discrétisation...),
- Une partie formée des modèles physiques des composants semi-conducteurs les plus courants : modèles de recombinaison (Schrockley Read Hall), d'ionisation par impact (Pearson et Monte Carlo), ainsi que les modèles de mobilité, et les statistiques de Fermi-Dirac et Boltzmann.

ATLAS permet de simuler le comportement électrique d'un composant semi-conducteur créé et modélisé comme par exemple une diode ou un transistor. Le composant étudié est représenté comme une structure maillée où chaque nœud a des propriétés qui lui sont associés telles que le type de matériau, le type de dopage, la concentration du dopant, etc. Ainsi, pour chaque nœud, la concentration des porteurs, le champ électrique, etc. peuvent être calculés.

Les électrodes sont représentées par des surfaces sur lesquelles les conditions aux limites sont imposées, comme par exemple, les tensions appliquées.

III.2.2. ATHENA

Le logiciel de simulation ATHENA de TCAD-SILVACO fournit des possibilités générales pour la simulation des processus utilisés dans l'industrie des semi-conducteurs (diffusion, oxydation, implantation ionique, gravure, lithographie, procédés de dépôt). Il permet des simulations rapides et précises de toutes les étapes de fabrication utilisées dans la technologie CMOS, bipolaire, SOI, optoélectronique, MEMS, et les composants de puissances. Le logiciel permet de fournir des informations importantes pour la conception et l'optimisation des procédés technologiques telles que les concentrations des porteurs, les profondeurs de jonctions, etc. [72]. ATHENA traite la simulation comme une série d'événements consécutifs, et simule généralement en simultanéité avec ATLAS.

III.2.3. DECKBUILD

DECKBUILD est l'environnement interactif d'exécution et de développement où le programme de simulation est défini à travers des commandes spécifiques, de multiples simulateurs considérés comme des entrées peuvent être utilisés avec le DECKBUILD. Sous cet environnement nous pouvons visualiser sur une fenêtre d'information appelée « Output Windows » les résultats de simulation [72].

III.2.4. TONYPLOT

C'est l'environnement où sont visualisés les résultats des simulations. Il donne des possibilités complètes pour la visualisation et l'analyse des caractéristiques de sortie (structure du composant électronique, profil de dopage, et caractéristiques électriques). Selon le programme de simulation, TONYPLOT peut donner des caractéristiques de sortie en une dimension (1D), deux dimensions (2D), ou trois dimensions (3D). Il peut aussi fonctionner en autonome ou avec d'autres outils interactifs de VWF, comme DECKBUILD [73]. Dans notre étude, les simulations sont effectuées par le module ATLAS.

III.2.5. Structure de fichier d'entrée :

Un fichier de commande ATLAS est une liste de commandes pour ATLAS à exécuter. Cette liste est stockée sous forme de fichier texte ASCII qui peut être préparé dans DECKBUILD

ou en utilisant n'importe quel éditeur de texte. La préparation du fichier d'entrée en DECKBUILD est préférée, et peut être facilitée par l'utilisation appropriée du menu Commandes de DECKBUILD. Le fichier d'entrée contient une séquence d'instructions. Chaque déclaration se compose d'un mot clé qui identifie la déclaration et un ensemble de paramètres. Le format général est :

<STATEMENT><PARAMETER>=<VALUE>

Le code écrit dans le fichier d'entrée appel « Atlas » pour fonctionner avec la commande suivante : <Go Atlas>

Suite à cette commande, le fichier d'entrée doit suivre un modèle [72].

III.2.6. L'ordre des commandes dans l'ATLAS

L'ordre dans lequel les instructions se produisent dans un fichier d'entrée Atlas est important. Il existe 5 groupes qui apparaissent dans le bon ordre, dans le cas contraire un message d'erreur apparaîtra ce qui peut provoquer une exécution incorrecte ou la fin du programme.

<i>Group</i>		<i>Statements</i>
1. Structure Specification	_____	MESH REGION ELECTRODE DOPING
2. Material Models Specification	_____	MATERIAL MODELS CONTACT INTERFACE
3. Numerical Method Selection	_____	METHOD
4. Solution Specification	_____	LOG SOLVE LOAD SAVE
5. Results Analysis	_____	EXTRACT TONYPLOT

Figure III.1 : Architecture générale d'un programme de simulation des dispositifs optoélectroniques dans ATLAS.

III.2.7. Prise en compte des effets quantiques

Dans les puits quantiques le simulateur résout l'équation de Schrödinger-Poisson de manière itérative et utilise ensuite le résultat pour calculer l'émission spontanée à partir des masses effectives du modèle k.p. La connaissance des états d'énergie liés permet à ATLAS de

calculer les recombinaisons spontanées, et en déduire par la suite le taux d'émission spontanée par unité d'énergie [74].

Afin de déterminer les états d'énergie liés des puits quantiques nous utilisons le modèle du puits quantique parabolique. La résolution de l'équation de Schrödinger donne une description quantique des états d'énergie liés dans le puits quantique [74][ref Mélanie Rolles]. Les masses effectives et les paramètres de bandes découlent alors du modèle k.p bandes pour les matériaux de type Wurtzite contraints, initialement développé par Chuang et Chang [75,76], et incrémenté dans le code de simulation par la commande wz.kp. En physique du solide, la théorie k.p est basée sur la théorie des perturbations de la mécanique quantique. C'est une méthode empirique pour calculer la structure de bande et les propriétés des solides cristallins, appliquée dans le contexte du modèle de Luttinger-Kohn et du modèle de Kane [74,77-79].

III.3. Description de la structure de la LED étudiée à multi-puits quantiques (MQWs)

La structure que nous allons simuler est une LED rectangulaire de section égale à $100 \mu m \times 100 \mu m$. Les paramètres des différentes couches et les paramètres géométriques de la LED sont mentionnés dans le tableau III.1. Comme le montre la Figure III.2 (a), la structure de la LED dispose (de bas en haut) de :

- ✓ Une région GaN dopée de type n (notée "n-GaN") de $3 \mu m$ d'épaisseur.
- ✓ Une région active composée de 3 puits quantiques (quantum wells : QWs) d'InGaN à 20% d'indium ($In_{0.2}Ga_{0.8}N$) de 3 nm d'épaisseur séparés par des couches barrières (quantum barriers : QBs) en GaN de 5 nm d'épaisseur non intentionnellement dopées.
- ✓ Une couche de blocage d'électron (EBL) en AlGaN à 10% d'aluminium ($Al_{0.1}Ga_{0.9}N$) de $0.1 \mu m$ d'épaisseur.
- ✓ Une région GaN dopée de type p (notée "p-GaN") de 200 nm d'épaisseur.

C'est une structure p-GaN/ $Al_{0.1}Ga_{0.9}N$ (EBL)/ $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ (zone active à trois QWs)/n-GaN dite de type I ; où la région active d' $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ contient trois puits quantiques séparés par des couches barrières (quantum barriers : QBs) en GaN.

Afin de tenir compte des mécanismes physiques présents dans la LED étudiée, les modèles utilisés via Silvaco- Atlas sont cités avec une brève description dans le tableau III.2.

Tableau III.1 : Paramètres des matériaux utilisés dans la simulation.

Paramètre	GaN	In _{0.2} Ga _{0.8} N	Al _{0.1} Ga _{0.9} N
Concentration de donneurs (cm ⁻³)	1 × 10 ¹⁸	-	-
Concentration d'accepteurs (cm ⁻³)	1 × 10 ¹⁹	-	1 × 10 ¹⁸
Largeur de la bande interdite (eV)	3.4	2.625	3.563
Mobilité des électrons (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	400	200	250
Mobilité des trous (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	10	10	5
Durée de vie des électrons(s)	2 × 10 ⁻⁷	2 × 10 ⁻⁷	2 × 10 ⁻⁷
Durée de vie des trous(s)	2 × 10 ⁻⁷	2 × 10 ⁻⁷	2 × 10 ⁻⁷
Coefficient de recombinaisons Auger (cm ⁻⁶ s ⁻¹)	2.4 × 10 ⁻³⁰	2.4 × 10 ⁻³⁰	2.4 × 10 ⁻³⁰

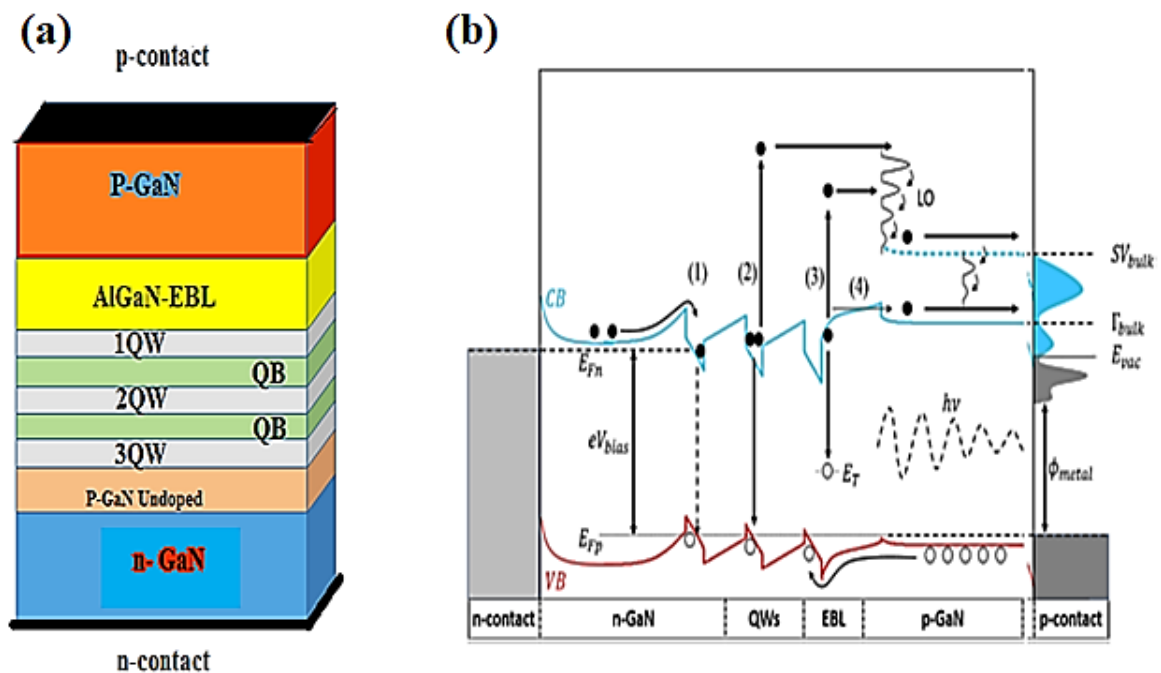


Figure III.2 : La LED étudiée : (a) Structure géométrique, (b) diagramme des bandes d'énergies.

La Figure III.2 (b) visualise les profils du diagramme des bandes qui sont la bande de valence et de conduction dans la structure LED à MQWs. Les trous se recombinent avec les électrons au niveau des puits quantiques et donnent la lumière (les photons).

Le tableau III.2 présente les différents modèles implémentés dans ATLAS pour réaliser la simulation.

Tableau III. 2 : Modèles implémentés dans la simulation de la LED [63].

Modèle	Description
fermi	Active les statistiques de Fermi-Dirac
srh	Spécifie la recombinaison SRH en utilisant des durées de vie fixes.
auger	Spécifie que le taux de recombinaison Auger est considéré
optr	Selecte le modèle de la recombinaison optique.
k.p	Active l'utilisation du modèle k.p pour les masses effectives et les énergies des bords de bandes pour la simulation drift-diffusion.
wz.three	Est spécifiée pour le modèle multiband k.p .
incompl	Active l'ionisation incomplète des impuretés dans les statistiques de Fermi-Dirac.
ni.fermi	Implique les effets des statistiques de Fermi dans le calcul de la concentration intrinsèque pour l'expression de la recombinaison SRH
qwell	Spécifie que INTTRAP est utilisé uniquement à l'interface avec une région QWELL, il est seulement actif dans le modèle Capture-Escape
spont	Active le modèle de la recombinaison spontanée
lorentz	Active l'élargissement du gain de Lorentz
capt.srh	Active la recombinaison SRH confinée quantiquement pour le modèle well.capt
capt.auger	Active la recombinaison Auger confinée quantiquement pour le modèle well.capt
well.capt	Active le modèle capture-escape du puits quantique à travers l'émission de phonon multiple.
well.inplane	Active dans le plan -2D le transport drift-diffusion des porteurs pour modèle capture-escape du puits quantique.
well.selfcon	Active l'auto-consistance de la charge pour le modèle capture- escape en assurant que les bords des bandes, vus par les porteurs de charge en 'bulk', sont modifiés pour supprimer les puits dans les régions QWELL et la densité de porteurs liée est ajoutée à l'équation de Poisson.

III.4. Résultats et discussion

La Figure III.3 illustre la structure de la LED étudiée et son diagramme de bandes d'énergie, calculés par le logiciel de simulation Silvaco-Atlas, pour une densité de courant égale à 40A/cm². Les équations de Schrödinger-Poisson sont résolues de manière itérative dans les puits quantiques, et les résultats qui incluent le diagramme de bandes, les niveaux d'énergie et les fonctions d'onde des électrons et des trous sont illustrés sur la figure III.4 pour une densité de courant égale à 40A/cm².

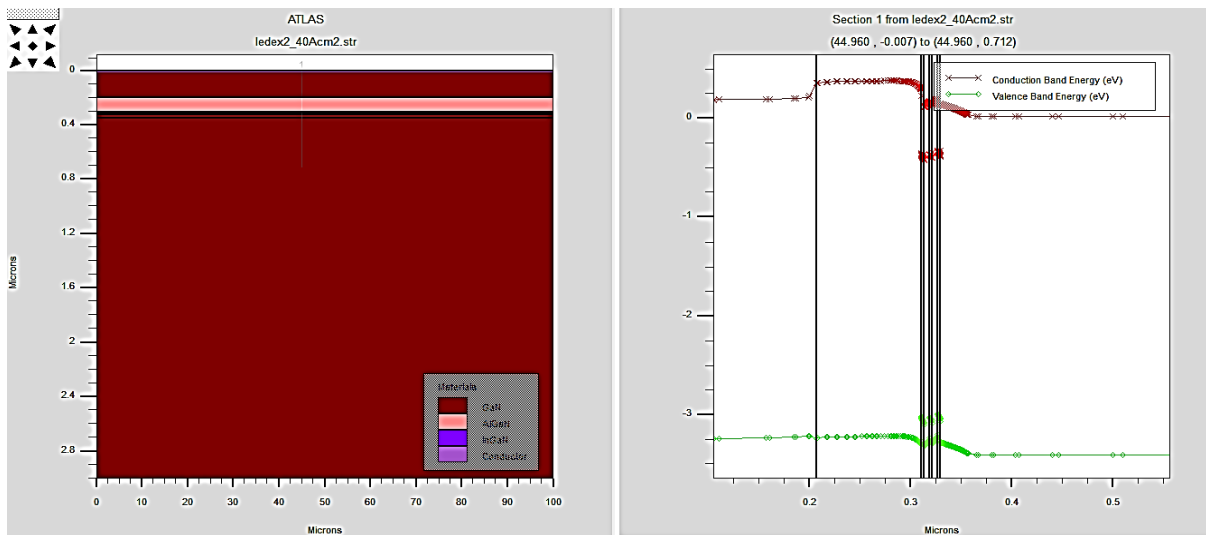


Figure III.3 : Structure de la LED étudiée et son diagramme de bandes d'énergie pour une densité de courant égale à 40A/cm².

La figure III.4 (a) montrent les profils du diagramme de bandes, des niveaux d'énergie et des fonctions d'onde des électrons (ψ_{e1}) et des trous (ψ_{hh1}) le long de la structure globale de type I: p-GaN/Al_{0,1}Ga_{0,9}N (EBL)/In_{0,2}Ga_{0,8}N (zone active à trois QWs)/n-GaN. La figure III.4 (b) fait un zoom au niveau de la zone active In_{0,2}Ga_{0,8}N à trois QWs séparés par deux couches barrières (QBs) en GaN. L'épaisseur des puits quantiques (QWs) dans la zone active est fixée à $L_w = 3 \text{ nm}$. 1e correspond aux niveaux excités de la première bande de conduction et 1hh aux niveaux excités de la bande de valence des trous lourds. Les transitions entre les niveaux d'énergie 1e et 1hh d'énergie : ($E_{(e1-hh1)}$) sont responsables des pics d'émission spontanés. Ainsi, la position du pic d'émission spontanée est entièrement déterminée par la position des niveaux d'énergie 1e et 1hh et cela explique le changement de pic d'émission spontanée.

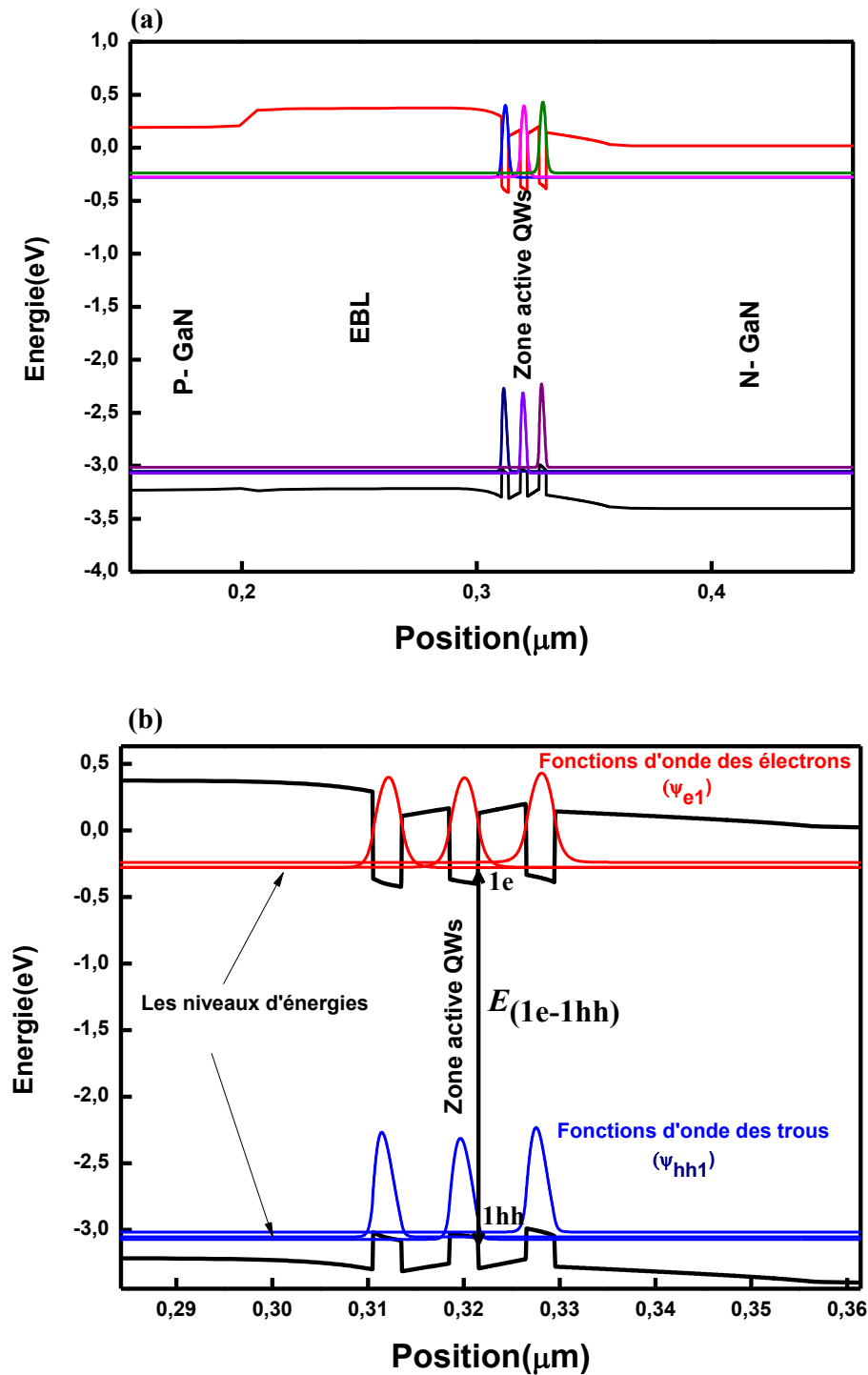


Figure III.4 : Profil du diagramme de bandes, des niveaux d'énergie et des fonctions d'onde des électrons (ψ_{e1}) et des trous (ψ_{hh1}) : (a) le long de la structure globale de type I : p-GaN/ $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ (EBL)/ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ (zone active à trois QWs)/n-GaN , (b) un zoom au niveau de la zone active $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ à trois QWs séparés par deux couches barrières (QBs) en GaN. L'énergie de transition ($E_{(e1-hh1)}$) responsable des pics d'émission spontanés est aussi illustrée.

La Figure III.5 illustre la distribution de la concentration des porteurs de charge (les électrons et les trous) dans les trois puits quantiques de la zone active ($\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}$). La concentration maximale atteinte (le pic de la concentration dans chaque puit) approuve le bon confinement des porteurs dans les puits. Cependant, la valeur des pics diffère d'un puit vers un autre.

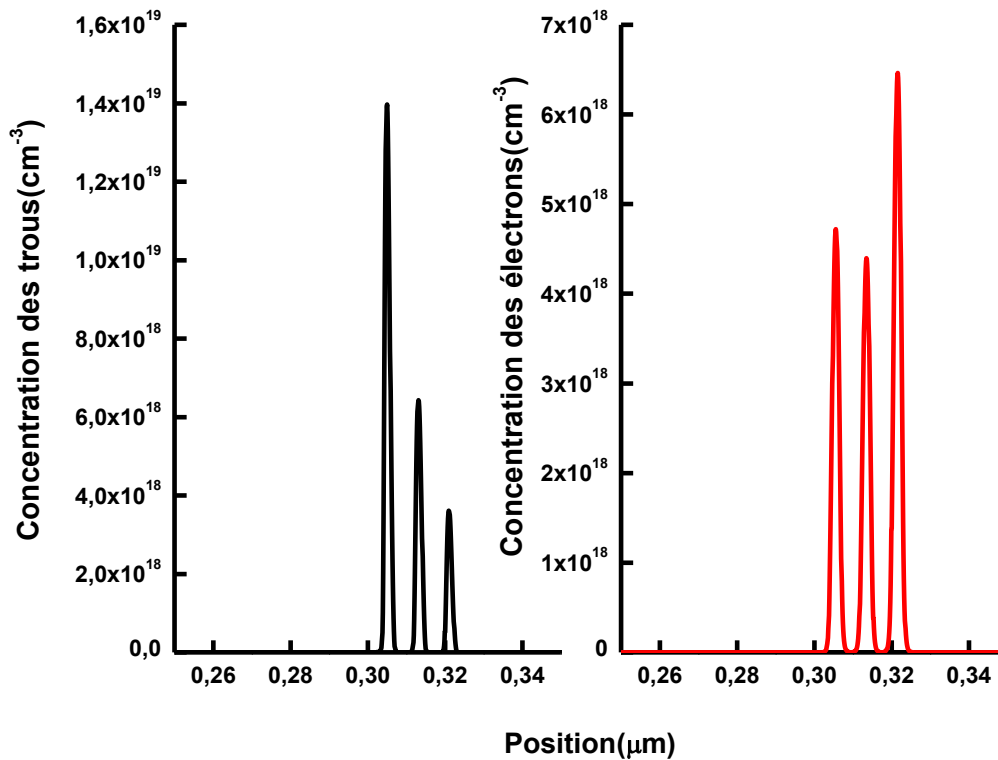


Figure III.5: Distribution de la concentration des porteurs de charge (les électrons et les trous) dans les trois puits quantiques de la zone active $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}$.

Dans les sections suivantes, nous allons étudier les effets des paramètres technologiques sur les performances de la LED étudiée de structure $\text{p-GaN}/\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}$ (EBL)/ $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}$ (à trois QWs)/ n-GaN , et nous commençons par l'effet de la taille.

III.4 .1 Effet de la taille sur les performances de la LED étudiée :

Comme nous l'avons déjà mentionné, nous examinons l'effet de la taille sur les performances de la LED étudiée en utilisant deux architectures rectangulaires de la LED qui sont : $(100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m})$ et $(200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m})$. Nous allons systématiquement étudier l'efficacité quantique interne (IQE) pour différents densité du courant de la polarisation directe et le spectre de l'émission spontanée. La Figure III.6 montre le profil de l'efficacité

quantique interne (IQE) pour les deux architectures rectangulaires ($100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$) et ($200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$) de la LED étudiée.

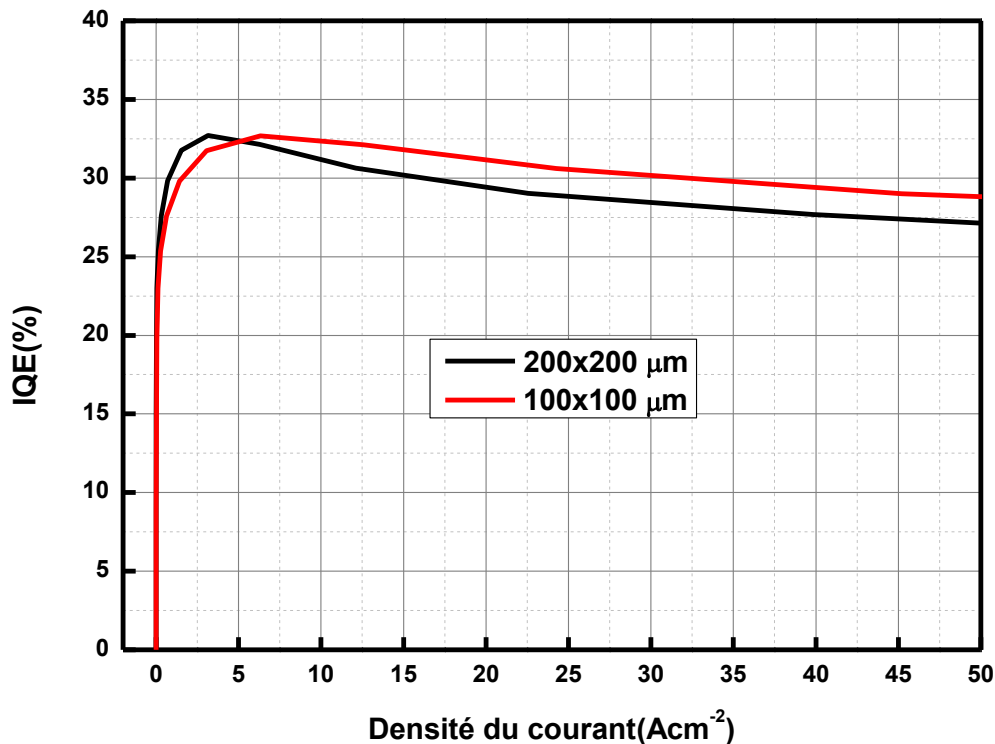


Figure III.6 : Profil de l'efficacité quantique interne (IQE) pour les deux architectures rectangulaires ($100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$) et ($200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$) de la LED étudiée pour différents densité du courant de la polarisation directe.

Nous constatons pour la taille ($200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$), un meilleur rendement quantique interne (IQE) à des densités de courant d'injection plus faibles, mais à des densités de courant plus élevées, nous remarquons une légère dégradation (loss, droop) du rendement quantique interne par rapport à celui de ($100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$) (Figure III.6).

La Figure III.7 montre le spectre de l'émission spontanée pour les deux architectures rectangulaires ($100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$) et ($200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$) de la LED étudiée. Nous constatons que la plus petite taille joue un rôle plus important et donne la meilleure émission spontanée.

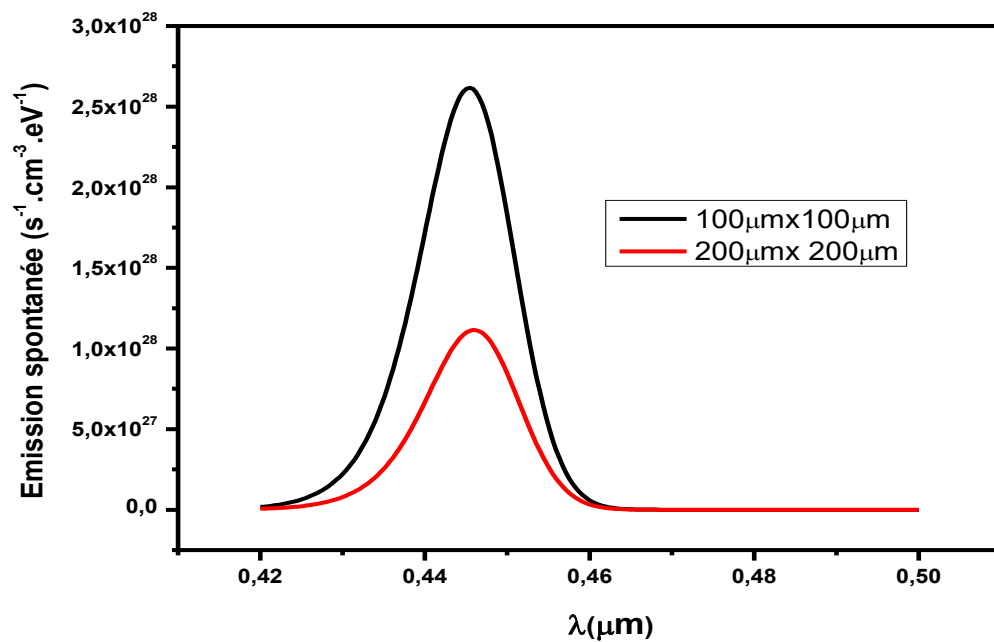


Figure III.7 : Spectre de l'émission spontanée pour les deux architectures rectangulaires ($100\mu m \times 100\mu m$) et ($200\mu m \times 200\mu m$) de la LED étudiée

III.4 .2 Effet de l'épaisseur des puits quantiques sur les performances de la LED étudiée

Dans cette section, nous présentons les résultats caractérisant la LED obtenus en faisant varier les épaisseurs des trois puits quantiques (QWs) de la zone active ($\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}$) de 3 à 5 et 6 nm respectivement. La Figure III.8 illustre la distribution de la concentration des électrons dans les trois puits quantiques sous l'effet de la variation de l'épaisseur de ces derniers de 3 à 5 et 6 nm respectivement. Nous constatons que la structure à MQWs ayant les puits quantiques les plus étroits assure le plus meilleur confinement des porteurs (schématisé pour les électrons).

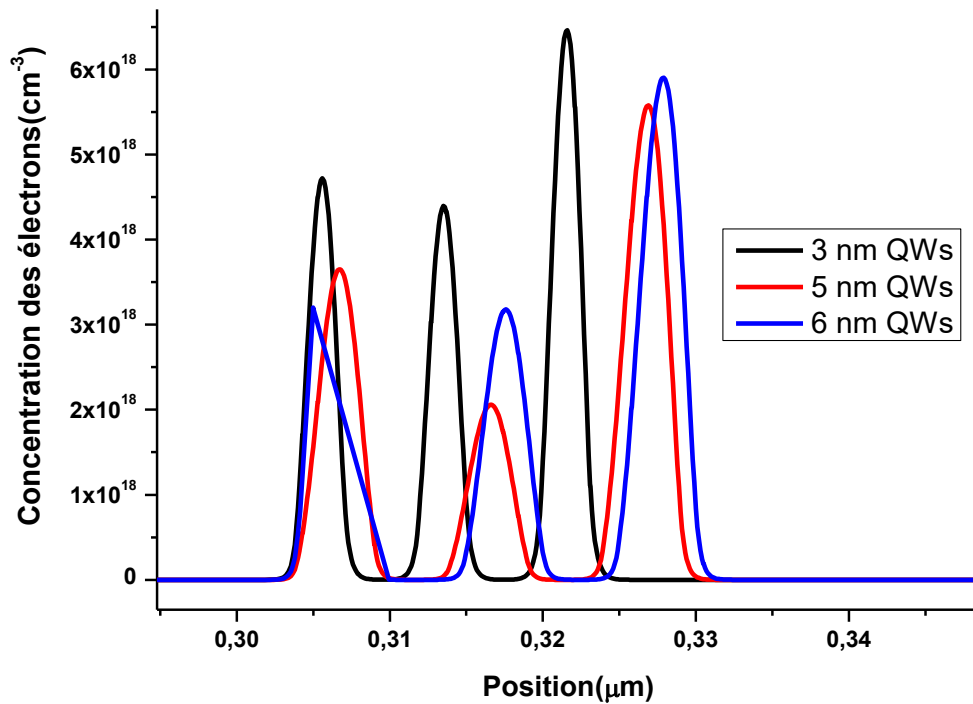


Figure III.8 : Distribution de la concentration des électrons dans les trois puits quantiques

sous l'effet de la variation de l'épaisseur de ces derniers de 3 à 5 et 6 nm respectivement. La structure à MQWs ayant les puits quantiques les plus étroits assure le plus meilleur confinement des porteurs.

La Figure III.9 illustre la caractéristique densité de courant - tension $J(V)$ en polarisation directe de la LED simulée, sous l'effet de la variation de l'épaisseur des puits quantiques (QWs) de 3 à 5 et 6 nm respectivement. Nous constatons d'après la figure que la densité de courant diminue avec l'augmentations des épaisseurs des QWs de la zone active d' $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}$.

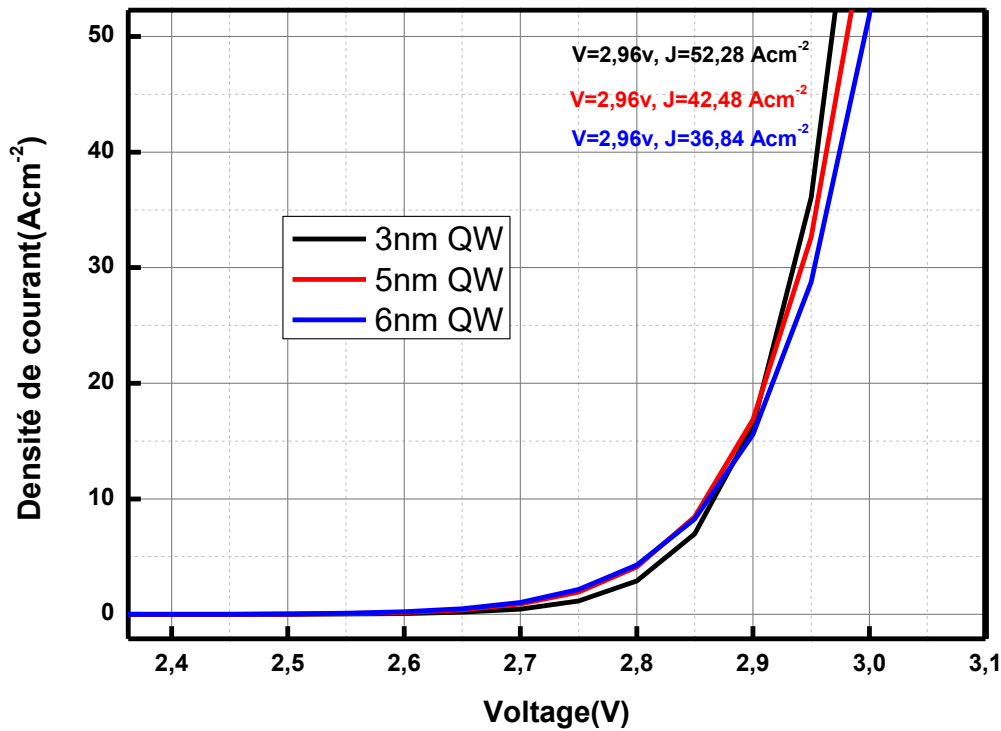


Figure III.9 : La caractéristique densité de courant - tension $J(V)$ en polarisation directe de la LED simulée, sous l'effet de la variation de l'épaisseur des puits quantiques (QWs) de 3 à 5 et 6 nm respectivement.

La figure III.10 illustre l'efficacité quantique interne (IQE) en fonction de la densité de courant d'injection sous l'effet de la variation de l'épaisseur des puits quantiques (QWs) de 3 à 5 et 6 nm respectivement. A la densité de courant d'injection de 50 A/cm^2 , l'IQE de la LED étudiée vaut 22,52%, 30,34% et 35,32%, respectivement, pour les épaisseurs 3nm, 5nm et 6nm des puits quantiques. Ce résultat montre que l'épaisseur des puits quantiques a une influence considérable sur l'IQE de la LED étudiée. En effet, L'IQE augmente avec l'augmentation de l'épaisseur des puits quantiques.

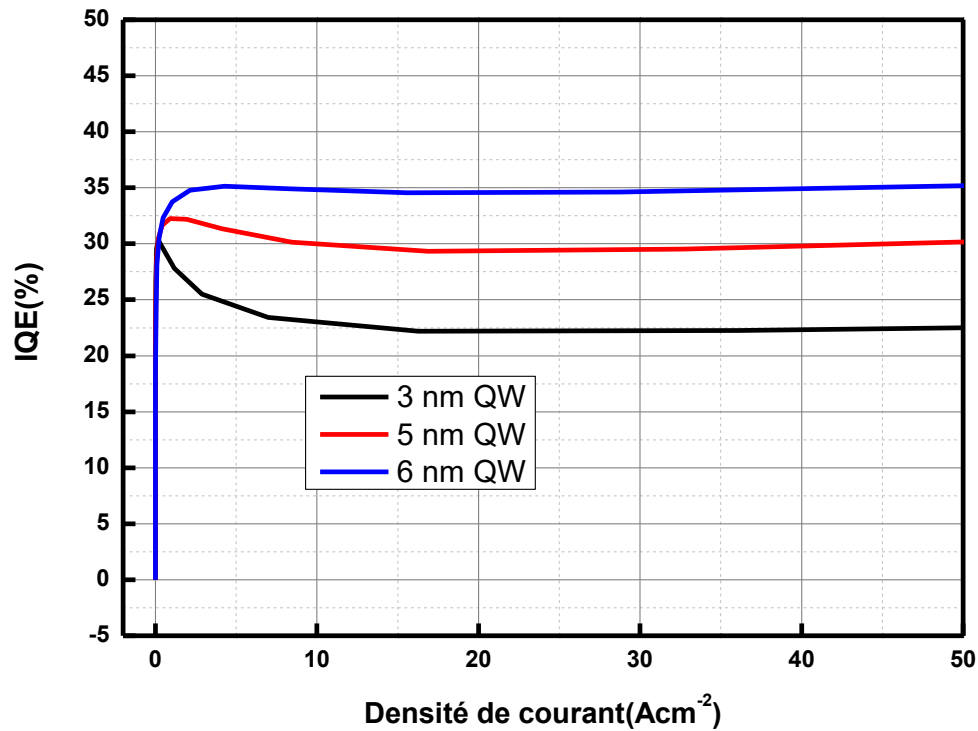


Figure III.10 : Efficacité quantique interne (IQE) en fonction de la densité de courant d'injection sous l'effet de la variation de l'épaisseur des puits quantiques (QWs) de 3 à 5 et 6 nm respectivement.

La Figure III.11 illustre le spectre de l'émission spontanée sous l'effet de la variation de l'épaisseur des puits quantiques (QWs) de 3 à 5 et 6 nm respectivement pour une densité de courant d'injection de 40 A/cm². Le pic de l'émission spontanée correspondant au cas de chaque épaisseur est indiqué dans le tableau III.3. Nous constatons d'après la figure III.11 et le tableau III.3 que la meilleure émission spontanée est réalisée par la structure à MQWs ayant les puits quantiques les plus étroits (d'épaisseur 3 nm).

Tableau III.3 : Pic de l'émission spontanée sous l'effet de la variation de l'épaisseur des puits quantiques (QWs) de 3 à 5 et 6 nm pour une densité de courant d'injection de 40 A/cm²

L'épaisseur des puits (nm)	Longueur d'onde (nm)	Le pic de l'émission spontanée (s ⁻¹ .cm ⁻³ .eV ⁻¹)
3	445	2.62×10^{28}
5	457	1.06×10^{28}
6	460	7.88×10^{27}

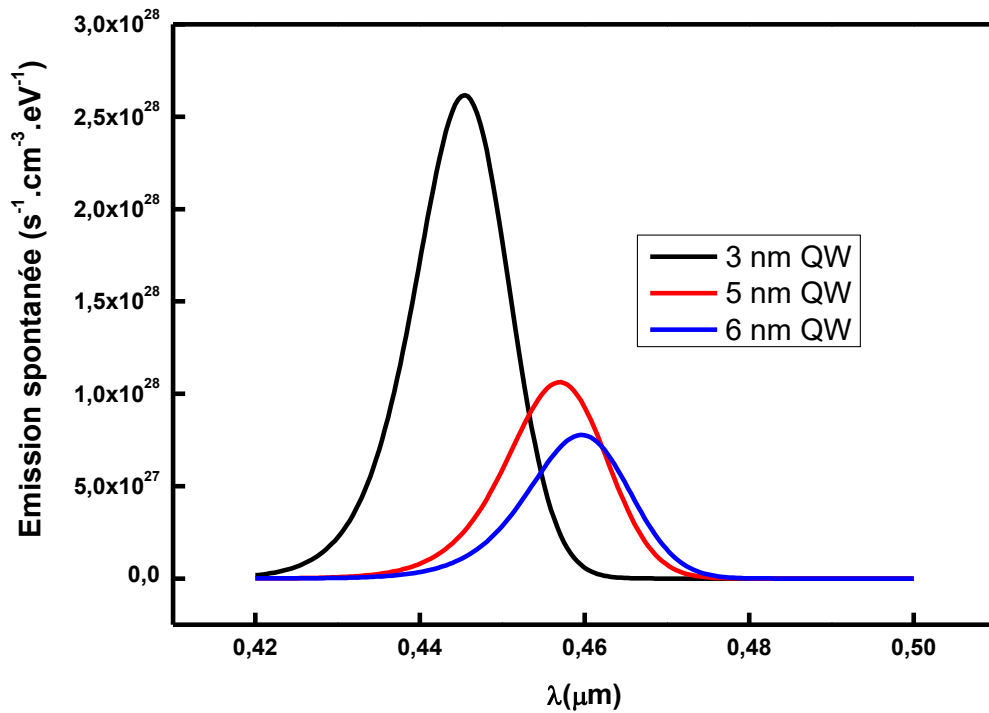


Figure III.11 : Spectre de l'émission spontanée sous l'effet de la variation de l'épaisseur des puits quantiques (QWs) de 3 à 5 et 6 nm respectivement pour une densité de courant d'injection de 40 A/cm^2 .

III.4 .3 Effet de l'épaisseur de la couche barrière (QB) sur les performances de la LED étudiée

Nous examinons dans cette section l'effet de l'épaisseur des deux couches barrières (QBs) en GaN qui sont situées comme des séparations entre les trois puits quantiques de la zone active d' $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}$. La Figure III.12 présente cet effet pour les épaisseurs 2, 4 et 6 nm de la couche barrière sur le rendement (ou efficacité) quantique interne (IQE) de la LED étudiée. Nous constatons d'après la Figure III.12 que :

- L'allure typique de la courbe IQE présente un maximum de rendement à faible injection, puis elle décroît lorsque le courant augmente, c'est le phénomène de 'droop'.
- D'après l'effet d'épaisseur de la couche barrière sur l'efficacité quantique interne on remarque que 2nm d'épaisseur donne la meilleure efficacité pour des densités de courant d'injection moins de 5 Acm^{-2} , au-delà de cette valeur, on remarque une amélioration dans l'efficacité (IQE) accompagnée d'un léger droop pour l'épaisseur la plus grande (6nm).

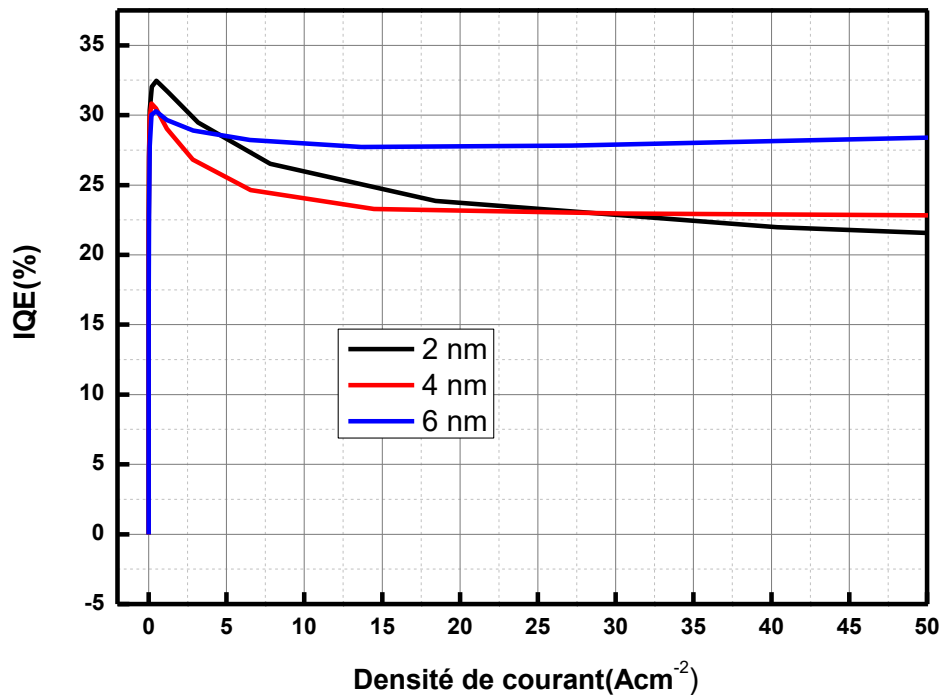


Figure III.12 : Effet de variation de l'épaisseur des couches barrières (QBs) en GaN (2, 4 et 6 nm) sur l'efficacité quantique interne (IQE) de la LED étudiée.

La Figure III.13 montre l'effet d'épaisseur de la couche barrière sur la caractéristique densité du courant - tension ($J(V)$). On constate d'après la figure III.13, une diminution dans la densité de courant avec l'augmentations des épaisseurs des QBs d'GaN.

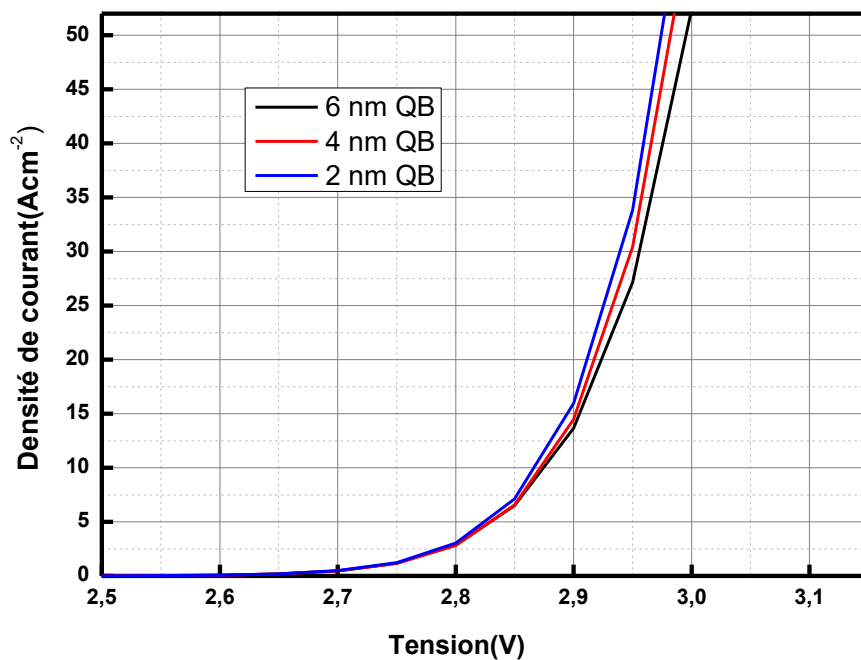


Figure III.13: Effet d'épaisseur de la couche barrière sur la caractéristique densité du courant - tension ($J(V)$).

Concernant le spectre de l'émission spontanée comme le montre la Figure III.14, l'épaisseur des couches barrière la moins large donne le meilleur pic de l'émission spontanée avec un léger décalage entre les courbes.

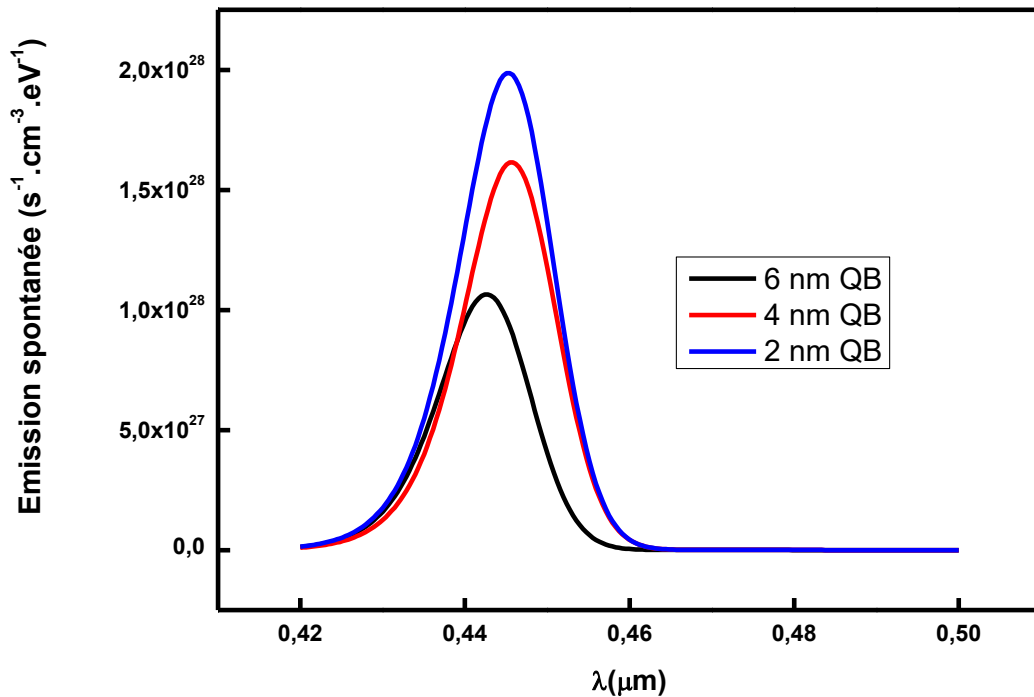


Figure III.14 : Effet d'épaisseur de la couche barrière (QB) sur le spectre de l'émission spontanée.

Le pic de l'émission spontanée correspondant au cas de chaque épaisseur (2, 4 et 6 nm) des couches barrières (QBs) est indiqué dans le tableau III.4.

Tableau III.4 : Pic de l'émission spontanée sous l'effet de la variation de l'épaisseur des couches barrières (QBs) de 2 à 4 et 6 nm.

L'épaisseur des QBs (nm)	Longueur d'onde (nm)	Le pic de l'émission spontanée (s ⁻¹ .cm ⁻³ .eV ⁻¹)
2	445	1.99 × 10 ²⁸
4	445	1.62 × 10 ²⁸
6	442	1.06 × 10 ²⁸

III.4 .4. Influence de l'épaisseur de la couche de blocage d'électron (EBL) d'AlGaIn sur les performances de la LED étudiée

Dans cette section, nous procédons à déterminer l'impact de l'épaisseur de la couche de blocage d'électron (EBL) d'AlGaIn en la faisant varier de 0.1 μm à 0.2 puis 0.3 μm tout en fixant la composition (fraction molaire) en aluminium à $x_{Al} = 0,1$ (10% d'aluminium), qui est la valeur couramment utilisée dans les couches de blocage électronique à base d'AlGaIn.

D'après la figure III.15, on remarque un léger effet de l'épaisseur de la couche de blocage (EBL) d'AlGaIn sur la caractéristique densité de courant – tension ($J(V)$).

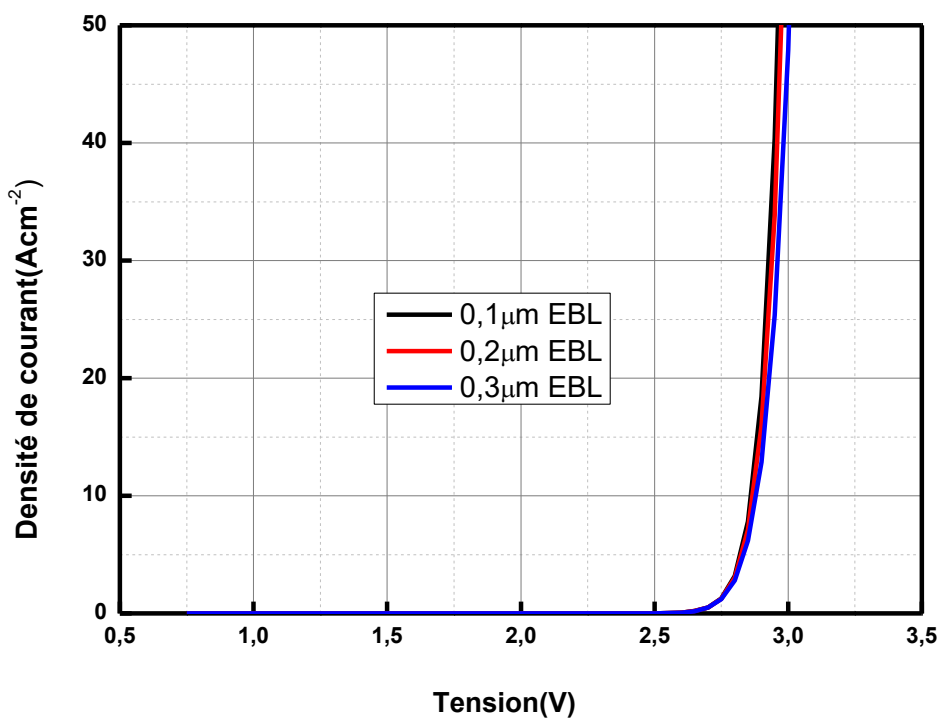


Figure III.15 : Effet de l'épaisseur de la couche de blocage (EBL) d'AlGaIn sur la caractéristique densité de courant – tension ($J(V)$). L'effet s'avère léger.

La Figure III.16 montre, cependant, que les pics de l'émission spontanée augmentent avec la diminution de l'épaisseur de la couche de blocage (EBL) d'AlGaIn. Le pic de l'émission spontanée correspondant au cas de chaque épaisseur (0.1 μm , 0.2 et 0.3 μm) de la couche de blocage (EBL) d'AlGaIn est indiqué dans le tableau III.5.

Tableau III.5 : Pic de l'émission spontanée sous l'effet de la variation de l'épaisseur de la couche de blocage (EBL) d'AlGaN de 0.1 μm à 0.2 et 0.3 μm .

L'épaisseur de la couche de blocage (EBL) d'AlGaN (μm)	Longueur d'onde (nm)	Le pic de l'émission spontanée ($\text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$)
0.1	445	2.62×10^{28}
0.2	445	2.41×10^{28}
0.3	445	2.22×10^{28}

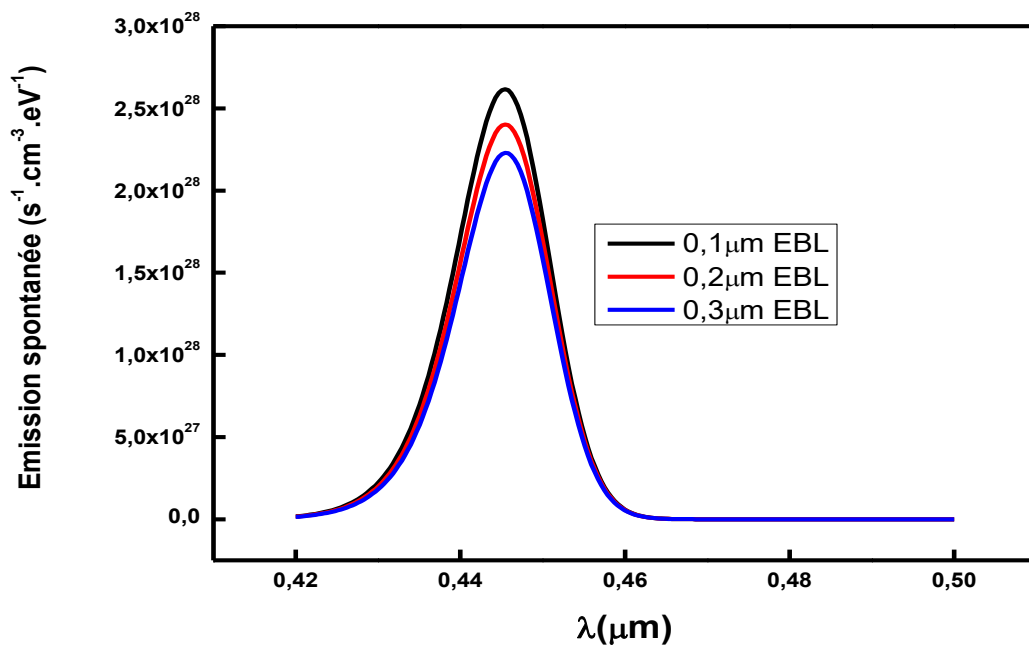


Figure III.16 : Effet de l'épaisseur de la couche de blocage (EBL) d'AlGaN sur le spectre de l'émission spontanée.

III.4 .5. Influence de la concentration x_{Al} d'aluminium sur les performances de la LED étudiée

Dans cette section ; nous faisons varier la composition en aluminium (x_{Al}) de la couche de blocage (EBL) d' $\text{Al}_{x_{Al}}\text{Ga}_{1-x_{Al}}\text{N}$, de $x_{Al} = 0.1, 0.2$ et 0.3 , tout en fixant son épaisseur à $0.1 \mu\text{m}$. La figure III.17 (a) illustre la caractéristique ($J(V)$) sous l'effet de la variation de la composition en aluminium ($x_{Al} = 0.1, 0.2$ et 0.3), qui s'avère un effet léger. La figure III.17 (b) illustre le diagramme de bandes correspondant avec un zoom au niveau de la couche de blocage (EBL) et la zone active d' $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ à trois puits quantiques pour une

densité de courant d'injection de 40 A/cm^2 , toujours pour la même variation de la composition en aluminium ($x_{Al} = 0.1, 0.2$ et 0.3). Nous constatons que l'effet de cette variation s'avère aussi négligeable au niveau des puits quantiques, ainsi que sur l'allure de l'efficacité quantique interne (IQE) comme le montre la Figure III.18.

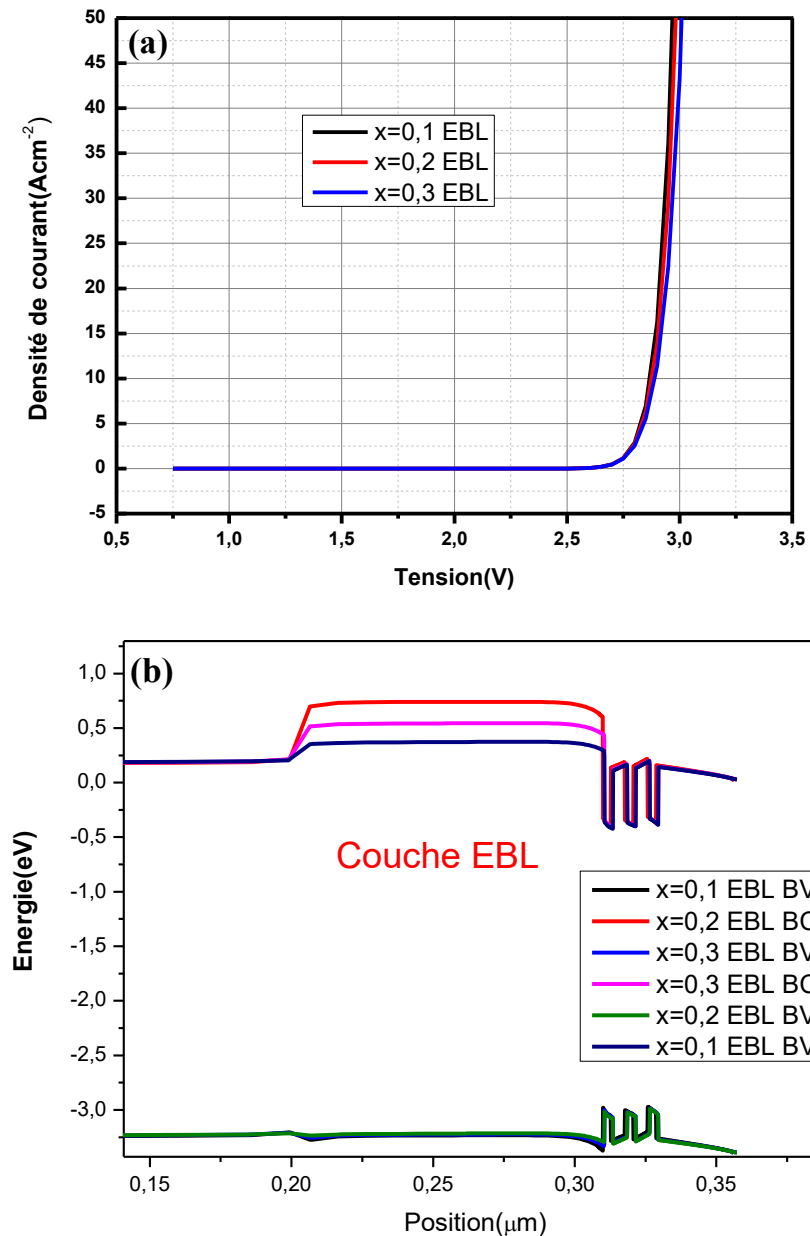


Figure III.17 : Effet de la variation de la composition en aluminium ($x_{Al} = 0.1, 0.2$ et 0.3) de la couche de blocage (EBL) d'AlGaIn sur : (a) La caractéristique ($J(V)$), (b) Le diagramme de bandes avec un zoom au niveau de la couche de blocage (EBL) et la zone active d' $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ à trois puits quantiques pour une densité de courant d'injection de 40 A/cm^2 . L'effet est considéré comme négligeable.

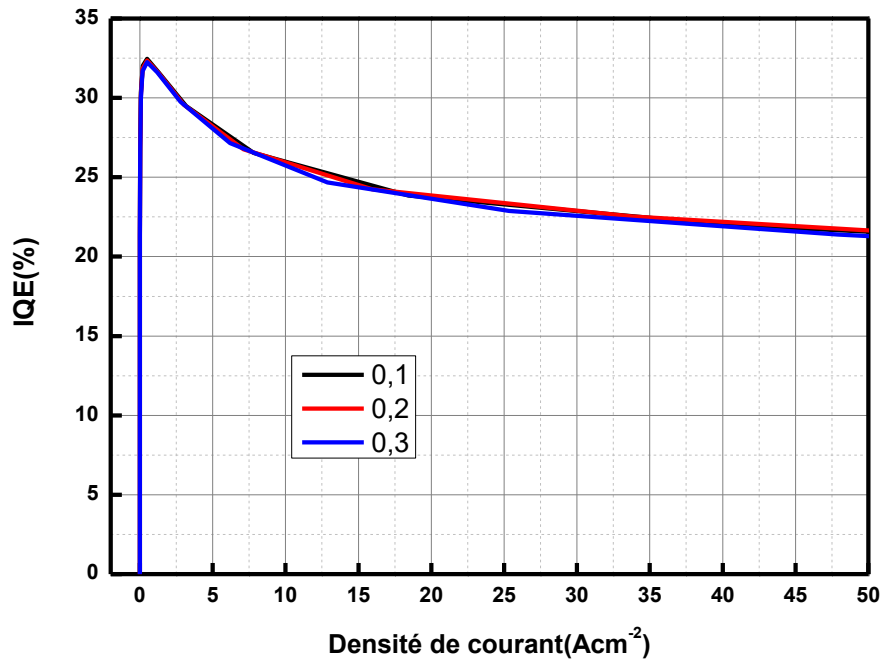


Figure III.18 : Effet de la variation de la composition en aluminium ($x_{Al} = 0.1, 0.2$ et 0.3) de la couche de blocage (EBL) d’AlGaN sur l’efficacité quantique interne (IQE) de la LED. L’effet est considéré comme négligeable.

Concernant l’émission spontanée, la fraction molaire d’aluminium ($x_{Al} = 0.1$) de la couche de blocage (EBL) d’ $Al_{xAl}Ga_{1-xAl}N$ donne le meilleur pic de l’émission spontanée sans décalage, comme il est indiqué dans le tableau III.6 et la figure III.19.

Tableau III.6 : Pic de l’émission spontanée sous l’effet de la variation de la composition en aluminium ($x_{Al} = 0.1, 0.2$ et 0.3) de la couche de blocage (EBL) d’AlGaN.

Composition aluminium molaire) (x_{Al})	en (fraction	Longueur d’onde (nm)	Le pic de l’émission spontanée ($s^{-1}.cm^{-3}.eV^{-1}$)
0.1		445	2.1×10^{28}
0.2		445	1.98×10^{28}
0.3		445	1.53×10^{28}

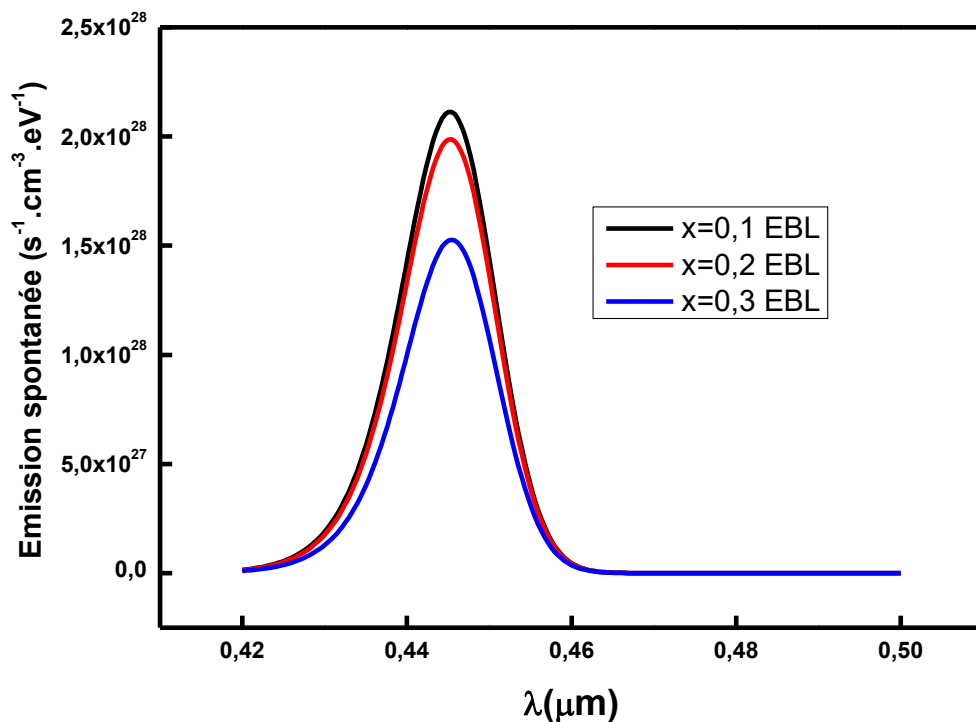


Figure III.19 : Effet de la variation de la composition en aluminium ($x_{Al} = 0.1, 0.2$ et 0.3) de la couche de blocage (EBL) d'AlGaN sur le spectre de l'émission spontanée.

III.4 .6.Effet de la fraction molaire d'In (x_{In}) dans les puits quantiques de la zone active d' $\text{In}_{x_{In}}\text{Ga}_{(1-x_{In})}\text{N}$

Les LEDs sont généralement fabriqués en utilisant des puits quantiques QWs (InGaN / GaN). Le GaN peut présenter une émission sur toute la gamme visible correspondant à l'énergie de la bande interdite allant de 0,67 à 3,42 eV en ajustant la composition de l'alliage. L'utilisation d'une haute fraction molaire en In ($x_{In} = 0.45$) dans les LEDs à QWs InGaN/GaN peut élargir la bande d'émission vers le vert comme il est présenté sur la figure III.20 pour des densités de courant d'injection allant de 10 à 20 et de 40 A/cm². Cependant, cela conduit à de grands champs de polarisation piézoélectrique et spontanée ; ce qui entraîne une réduction significative de l'efficacité ainsi qu'une séparation spatiale des fonctions d'ondes, connue sous le nom d'effet Stark, qui est responsable de la chute d'efficacité des LEDs lorsque la densité de courant d'injection augmente, comme on peut l'apercevoir sur la figure III.21.

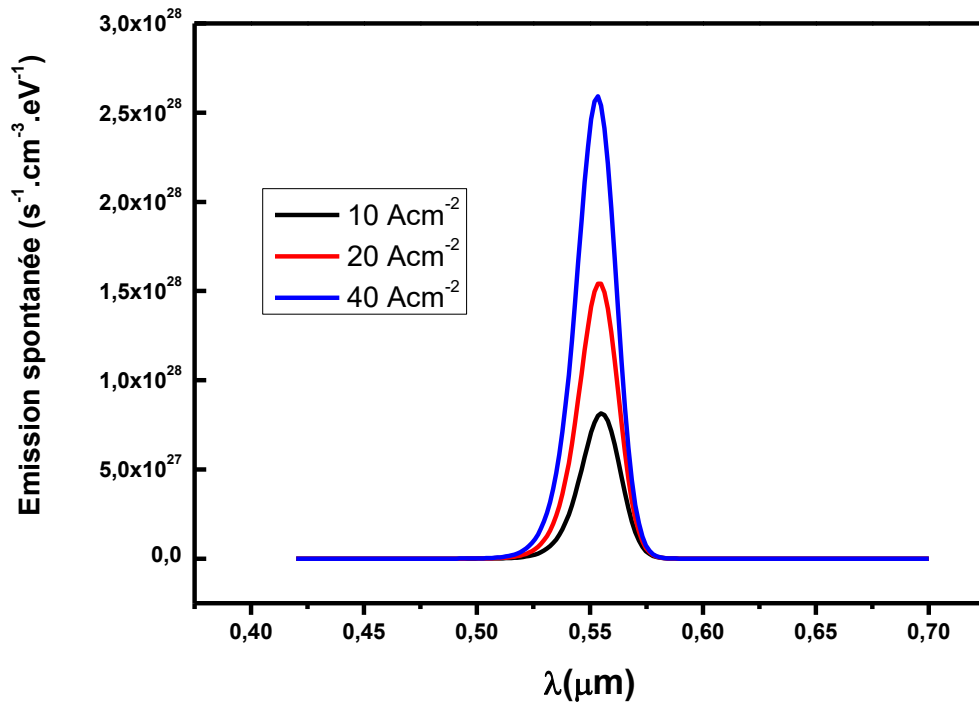


Figure III.20 : Spéctre de l'émission spontanée dans le vert pour des densités de courant d'injection allant de 10 à 20 et de 40 A/cm² dans la LED à puits quantiques ayant la fraction molaire d'In : $x_{In} = 0.45$ ($In_{0.45}Ga_{0.55}N$).

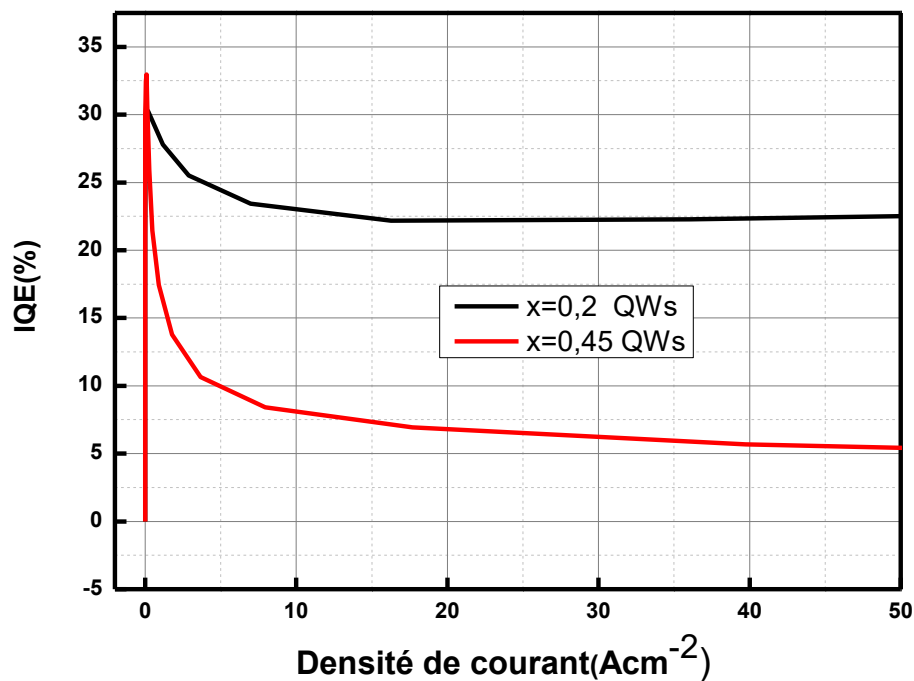


Figure III.21 : Efficacité quantique interne (IQE) dans la LED à puits quantiques pour les deux cas de la fraction molaire d'In : $x_{In} = 0.2$ ($In_{0.2}Ga_{0.8}N$) et $x_{In} = 0.45$ ($In_{0.45}Ga_{0.55}N$).

Une des solutions efficaces pour améliorer l'efficacité (IQE) est l'utilisation de l'InGaN/GaN_{Sb}/InGaN dans la région active de la LED à QWs de type II. Nous allons procéder à cette solution dans la section suivante.

III.4 .7 L'utilisation de l'InGaN/GaN_{Sb}/InGaN dans la région active de la LED à QWs de type II.

Dans cette section nous examinons l'effet d'insertion d'une couche de GaNSb au milieu d'un seul puits quantique sur les propriétés optoélectroniques de la LED qui deviendra ainsi une LED de type II . Le GaNSb est un matériau semi-conducteurs prometteur avec un gap large et direct allant de 0.75 eV (pour le GaSb) à 3.4 eV (pour le GaN). Les décalages de bande à l'hétérojonction jouent un rôle important dans les dispositifs semi-conducteurs antérieurs. Le fort confinement des trous dans la couche de GaNSb résulte d'un décalage de bande de valence élevé qui permet d'élargir l'émission dans la longueur d'onde en utilisant une fraction molaire en In plus faible dans la structure à QWs.

La figure III.22 (a) illustre le diagramme de bande d'énergie de la LED de structure de type II à puits quantique (QW) In_xGa_{1-x}N/GaN_{1-y}Sb_y/In_xGa_{1-x}N. Les fonctions d'onde de la première sous-bande de conduction (C1) et de la première sous-bande de valence (HH1) sont également représentées dans la figure III.22 (b). La largeur de puits quantique (QW) de la structure de type II est fixée à 3 nm. La somme des largeurs de puits quantiques des deux côtés gauche et droit de la structure de type II à QW InGaN/GaN_{Sb}/InGaN est également sélectionnée pour être de 3 nm. L'épaisseur et la fraction molaire en Sb de la couche de GaNSb sont fixées respectivement à 1 nm et 0,04. La fraction molaire en In dans les puits quantiques d'In_xGa_{1-x}N est prise ($x_{In} = 0.2$) pour donner une énergie de transition correspondant à une longueur d'onde de 420 nm pour la LED à QW étudiée de structure de type II. La figure III.22 (b) montre une séparation spatiale plus faible entre les fonctions d'onde des électrons et des trous que celle de la LED type I étudiée précédemment. La Figure III.23 montre pour la LED de structure type II à puits quantique (QW) In_{0,2}Ga_{0,8}N/GaN_{0,96}Sb_{0,04}/In_{0,2}Ga_{0,8}N un pic d'émission beaucoup plus important que la structure à QWs de type I conventionnelle.

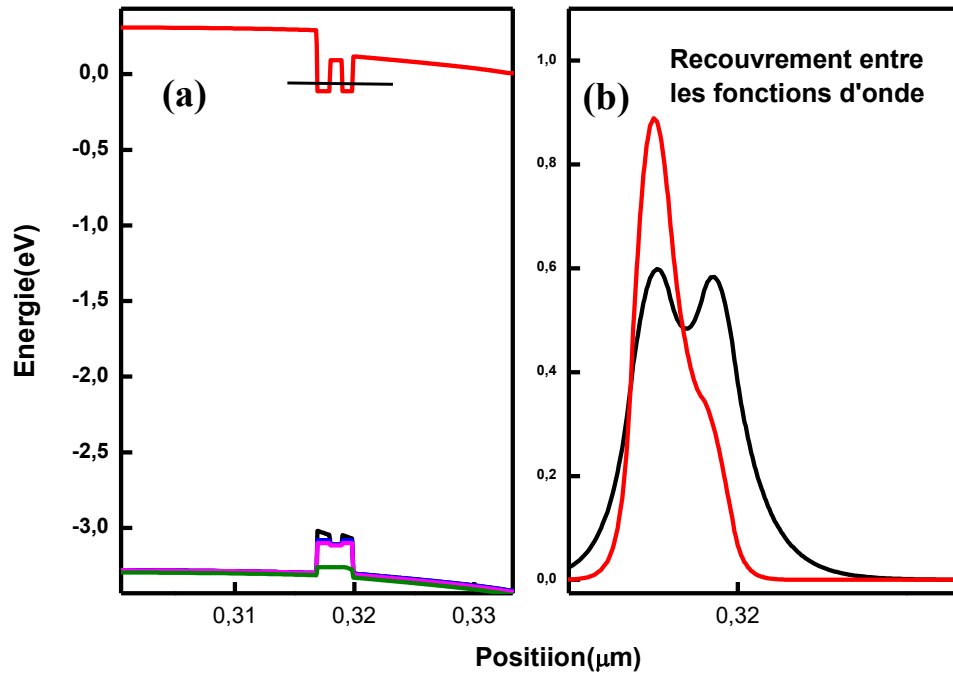


Figure III.22 : (a) Diagramme de bande d'énergie de la LED de structure de type II à puits quantique (QW) $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$, (b) Représentation des fonctions d'onde de la première sous-bande de conduction (C1) et de la première sous-bande de valence (HH1)

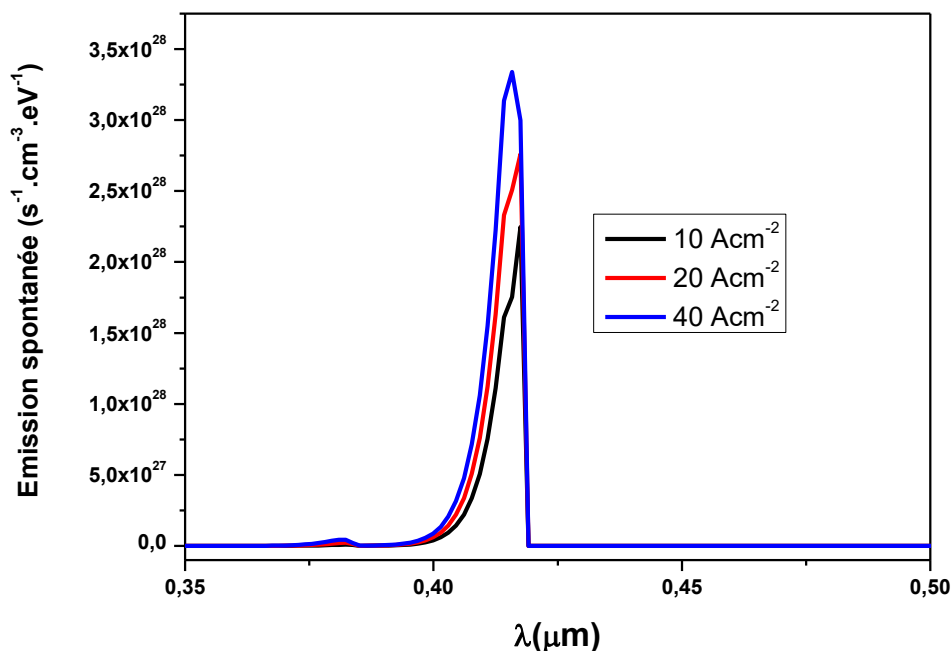


Figure III.23 : Spectre de l'émission spontanée de la LED de structure de type II à puits quantique (QW) $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ pour des densités de courant d'injection allant de 10 à 20 et de 40 A/cm^2 .

Nous remarquons également une amélioration significative pour la LED de structure de type II à puits quantique (QW) $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ dans l'efficacité quantique externe (EQE) qui atteint environ 70% pour les faibles densités de courant d'injection et environ 40% pour les densités de courant d'injection dépassant 50 A/cm^2 (Figure III.24 (a)). L'amélioration est aussi obtenue dans la puissance lumineuse émise en fonction de la densité de courant d'injection (Figure III.24 (b)), ainsi que dans la caractéristique densité de courant-tension ($J(V)$) (Figure III.24 (c)).

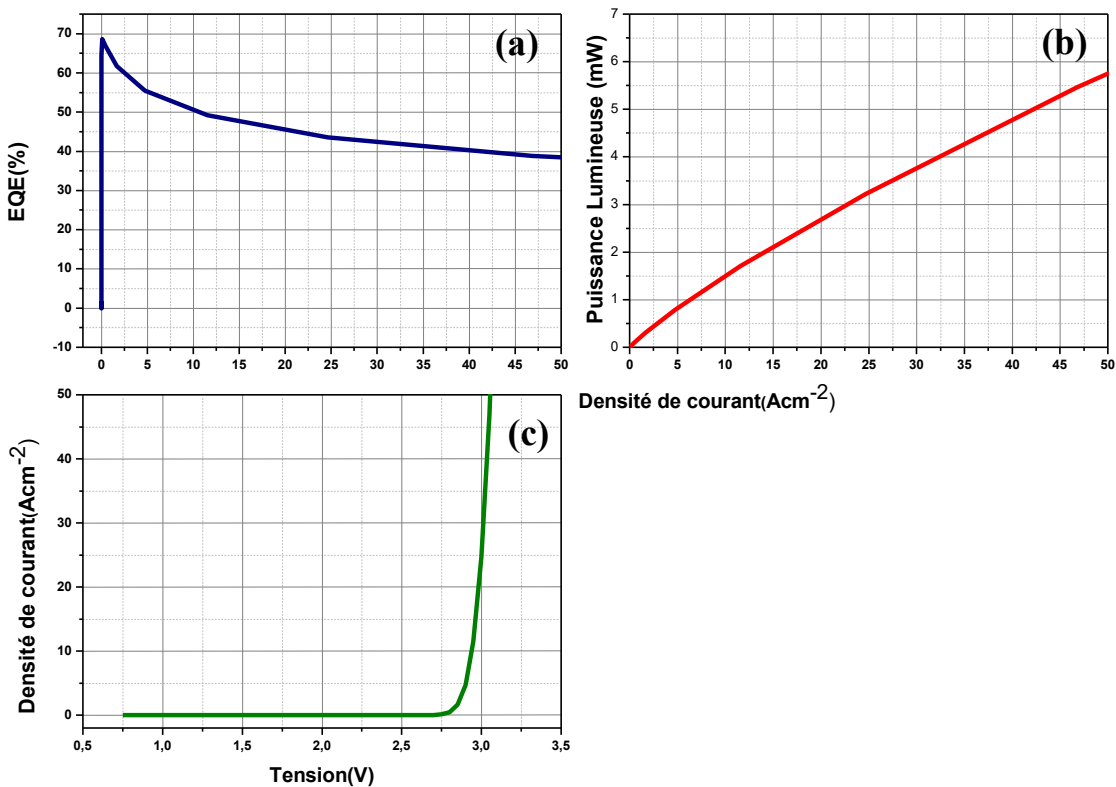


Figure III.24 : Paramètres de sortie de la LED de structure type II à puits quantique (QW) $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$: (a) Efficacité quantique externe (EQE) en fonction de la densité de courant d'injection, (b) Puissance lumineuse émise en fonction de la densité de courant d'injection, (c) Caractéristique densité de courant- tension ($J(V)$).

Cependant, la LED de structure type I à MQWs ($\text{GaN}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$) montre une perte d'efficacité significative par rapport à celle de la structure de type II à QW ($\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$) à des densités de courant injectées élevées. Le phénomène de droop provient de l'excitation de la recombinaison Auger et il a été démontré expérimentalement par J. Iveland et al [70], que cette perte d'efficacité résulte d'une valeur

plus élevée de la recombinaison Auger par couplage électron-phonon. La figure III.25 montre que l'augmentation du nombre des puits quantiques (Figure III.25 (b)) entraîne également l'augmentation de la recombinaison Auger. Cependant, l'utilisation d'un seul puits quantique (Figure III.25 (a)) réduit le nombre des recombinaisons Auger, tout en montrant sa diminution dans la région $\text{GaN}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}$.

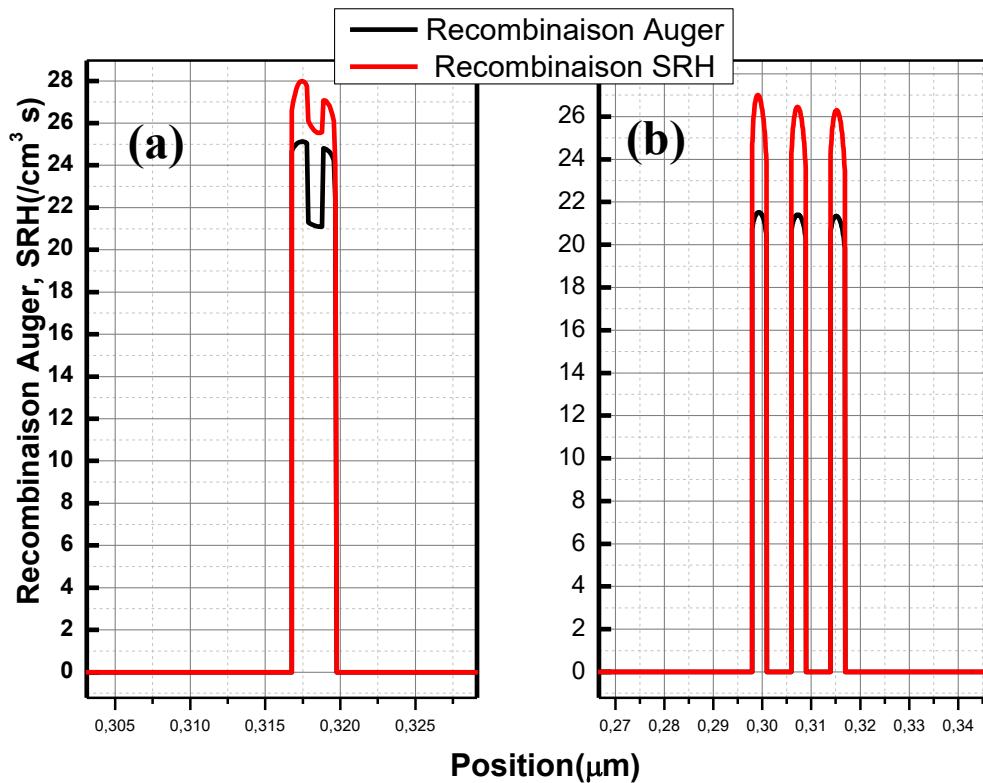


Figure III.25 : Profil des recombinaisons Auger et SRH : (a) Dans la LED de structure type II à QW ($\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$), (b) dans la LED de structure type I à MQW ($\text{GaN}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$).

III.5. Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons étudié les propriétés optoélectroniques d'une LED de structure p-GaN/AlGaN (EBL)/InGaN à QWs/n-GaN en considérant deux types de structure (I et II). Dans la structure de type I ; la région d' $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ contient trois puits quantiques (QWs) séparés par deux couches barrières (QB) en GaN . Dans la structure de type II ; on réduit le nombre des puits dans la région d' $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ à un seul puits quantique mais une couche GaNSb est insérée au milieu de ce puits en donnant le QW : ($\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$). En utilisant le logiciel de simulation numérique

Silvaco-Atlas, nous avons étudié les propriétés optoélectroniques de la LED à savoir : le spectre de l'émission spontané, l'efficacité quantique interne (IQE) et externe (EQE), la caractéristique densité de courant – tension ($J(V)$) et la puissance lumineuse émise en fonction du courant de la polarisation directe. Les paramètres internes ont été aussi analysés comme le diagramme de bande d'énergie, les densités des électrons et des trous, les fonctions d'onde et les niveaux d'énergie. En faisant varier les paramètres technologiques de la LED type I comme la taille, l'épaisseur de la couche de blocage (EBL) d' $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$, de la couche barrière (QB) du GaN, et des puits quantiques (QWs) dans la région active d' $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$, ainsi que la fraction molaire d'Al dans la couche AlGaN et la fraction molaire d'In dans la zone active InGaN, nous avons pu identifier les paramètres pouvant améliorer ou dégrader les propriétés optoélectroniques de la LED de type I. Nous avons également obtenu une amélioration significative pour la LED de structure de type II à puits quantique (QW) $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ dans l'efficacité quantique externe (EQE) qui avait atteint environ 70% pour les faibles densités de courant d'injection et environ 40% pour les densités de courant d'injection dépassant 50 A/cm^2

CONCLUSION GENERALE



Conclusions générale

Le développement de LED à base de nitrures représente un enjeu important tant sur le plan scientifique qu'industriel et sociétal. De par leur large bande interdite, les matériaux semi-conducteurs à base de nitrures d'éléments III (composés III-N) tels que le GaN et ses alliages sont de très bons candidats pour la réalisation de dispositifs optoélectroniques nouveaux. Néanmoins, ces systèmes présentent un bon nombre de limitations, principalement dues à l'évolution des propriétés de l'InGaN lorsque la concentration d'indium augmente. Les effets de contrainte et de polarisation affectent la qualité du matériau et donc l'émission spontanée de la LED en général. De plus, dans un contexte de raréfaction des ressources naturelles, l'utilisation de l'indium, matériau rare et cher, doit se faire de manière raisonnée. Or les systèmes actuels (micro-écran, dispositifs portatifs,...) requièrent des LED toujours plus puissantes et riches en Indium. Le but est aujourd'hui d'obtenir des LED haute performance, avec un bon rendu de couleurs et surtout à moindre coût en utilisant des matériaux alternatifs. Dans ce travail, nous avons étudié les propriétés optoélectroniques d'une LED de structure p-GaN/AlGaN (EBL)/InGaN à QWs/n-GaN en considérant deux types de structure (I et II). Dans la structure de type I ; la région d' $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}$ contient trois puits quantiques (QWs) séparés par deux couches barrières (QB) en GaN . Dans la structure de type II ; on réduit le nombre des puits dans la région d' $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}$ à un seul puits quantique mais une couche GaNSb est insérée au milieu de ce puits en donnant le QW : $(\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}/\text{GaN}_{0,96}\text{Sb}_{0,04}/\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N})$. En utilisant le logiciel de simulation numérique Silvaco-Atlas, nous avons étudié les propriétés optoélectroniques de la LED à savoir : le spectre de l'émission spontané, l'efficacité quantique interne (IQE) et externe (EQE), la caractéristique densité de courant – tension ($J(V)$) et la puissance lumineuse émise en fonction du courant de la polarisation directe. Les paramètres internes ont été aussi analysés comme le diagramme de bande d'énergie, les densités des électrons et des trous, les fonctions d'onde et les niveaux d'énergie. En faisant varier les paramètres technologiques de la LED type I comme la taille, l'épaisseur de la couche de blocage (EBL) d' $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}$, de la couche barrière (QB) du GaN, et des puits quantiques (QWs) dans la région active d' $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}$, ainsi que la fraction molaire d'Al dans la couche de blocage (EBL) d'AlGaN et la fraction molaire d'In dans la zone active InGaN à QWs, nous avons pu identifier les paramètres pouvant améliorer ou dégrader les propriétés optoélectroniques de la LED de

type I. Nous avons également obtenu une amélioration significative pour la LED de structure de type II à puits quantique (QW) $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ notamment dans l'efficacité quantique externe (EQE) qui avait atteint environ 70% pour les faibles densités de courant d'injection et environ 40% pour les densités de courant d'injection dépassant 50 A/cm^2 . Les principaux résultats de l'étude sont les suivants :

- La réduction de la taille de la LED type I à MQW a un effet positif sur l'efficacité quantique interne (IQE) et sur le spectre de l'émission spontanée, où l'effet est plus important.
- L'augmentation de l'épaisseur des puits quantiques a un effet positif sur l'efficacité quantique interne (IQE), mais le meilleur confinement des électrons est assuré dans les puits quantiques les plus étroits qui entraînent aussi l'augmentation du spectre de l'émission spontanée en donnant la meilleure valeur des pics.
- Les épaisseurs les moins larges des couches barrières (QBs) séparant les puits quantiques donnent des meilleurs pics du spectre de l'émission spontanée accompagné d'un léger décalage. Cependant, l'efficacité quantique interne (IQE) s'améliore avec l'augmentation des épaisseurs des couches barrières.
- On remarque un léger effet de l'épaisseur et de la composition en aluminium de la couche de blocage (EBL) d'AlGaIn sur les propriétés optoélectroniques de la LED.
- En augmentant la fraction molaire d'In dans les puits quantiques de la région active d'InGaIn, il y a une diminution significative de l'efficacité des LED.
- Concernant la LED type II, où nous avons inséré une couche 10 angströms de GaInSb dans un seul puits quantique d'InGaIn, ce procédé s'est avéré comme une solution efficace pour améliorer les propriétés optoélectroniques de la LED. En effet, les fonctions d'onde des électrons et des trous sont considérablement affectées, avec un fort confinement des trous dans la couche de GaInSb. De plus, l'efficacité maximale obtenue pour la LED dite type II est supérieure à celle de la LED standard (type I) en raison du haut taux de recouvrement entre les fonctions d'onde. Toutefois, ce résultat permet de mieux comprendre l'intérêt d'ajouter une couche de GaInSb, permettant ainsi d'obtenir des pics d'émission spontanée plus intéressants.

Références



Références:

- [1]. Shiladitya Das, «Investigation and Analysis of Thermal Performance of InGaN/GaN Light Emitting Diodes», Memoire de master, Arizona State University, (2017).
- [2] H. Mathieu and H. Fanet, *Physique des semiconducteurs et des composants électroniques cours et exercices corrigés*. Paris: Dunod, 2009.
- [3] G. Zissis and X. De Logivière, “Diodes électroluminescentes LED pour l’éclairage Panorama et tendances technologiques,” *Tech. Ing.*, p. RéférenceIN18, Nov. 2011.
- [4] E. F. Schubert, *Light-emitting diodes*, 2nd ed. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2006.
- [5] W. Shockley and W. T. Read, “Statistics of the Recombinations of Holes and Electrons,” *Phys. Rev.*, vol. 87, no. 5, pp. 835–842, Sep. 1952
- [6] R. N. Hall, “Electron-Hole Recombination in Germanium,” *Phys. Rev.*, vol. 87, no. 2, pp. 387–387, Jul. 1952.
- [7] J.-J. Huang, H.-C.Kuo, and S.-C.Shen, Eds., *Nitride semiconductor light-emitting diodes (LEDs): materials, technologies and applications*. Oxford: Woodhead Publishing, 2014.
- [8] S. Karpov, “ABC-model for interpretation of internal quantum efficiency and its droop in III-nitride LEDs: a review,” *Opt. Quantum Electron.*, vol. 47, no. 6, pp. 1293–1303, Jun. 2015.
- [9] S. Karpov, “ABC-model for interpretation of internal quantum efficiency and its droop in III-nitride LEDs,” in *Numerical Simulation of Optoelectronic Devices*, 2014, 2014, pp. 17–18.
- [10] Y. C. Shen, G. O. Mueller, S. Watanabe, N. F. Gardner, A. Munkholm, and M. R. Krames, “Auger recombination in InGaN measured by photoluminescence,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, no. 14, p. 141101, Oct. 2007.
- [11] A. David and M. J. Grundmann, “Droop in InGaN light-emitting diodes: A differential carrier lifetime analysis,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 96, no. 10, p. 103504, 2010
- [12] E. Kioupakis, Q. Yan, D. Steiauf, and C. G. V. de Walle, “Temperature and carrier-density dependence of Auger and radiative recombination in nitride optoelectronic devices,” *New J. Phys.*, vol. 15, no. 12, p. 125006, 2013.
- [13] J. Piprek, F. Römer, and B. Witzigmann, “On the uncertainty of the Auger recombination coefficient extracted from InGaN/GaN light-emitting diode efficiency droop measurements,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 106, no. 10, p. 101101, Mar. 2015.

- [14] X. Meng et al., “Study on efficiency droop in InGaN/GaN light-emitting diodes based on differential carrier lifetime analysis,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 108, no. 1, p. 013501, Jan. 2016.
- [15] T. H. Ngo, B. Gil, P. Valvin, B. Damilano, K. Lekhal, and P. D. Mierry, “Auger effect in yellow light emitters based on InGaN–AlGaIn–GaIn quantum wells,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 55, no. 5S, p. 05FG10, Apr. 2016.
- [16] J. Cho, E. F. Schubert, and J. K. Kim, “Efficiency droop in light-emitting diodes: Challenges and countermeasures,” *Laser Photonics Rev.*, vol. 7, no. 3, pp. 408–421, May 2013.
- [17] G. Verzellesi et al., “Efficiency droop in InGaN/GaN blue light-emitting diodes: Physical mechanisms and remedies,” *J. Appl. Phys.*, vol. 114, no. 7, p. 071101, Aug. 2013.
- [18] J. Iveland, L. Martinelli, J. Peretti, J. S. Speck, and C. Weisbuch, “Direct Measurement of Auger Electrons Emitted from a Semiconductor Light-Emitting Diode under Electrical Injection: Identification of the Dominant Mechanism for Efficiency Droop,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 110, no. 17, Apr. 2013.
- [19] S.-C. Ling, T.-C. Lu, S.-P. Chang, J.-R. Chen, H.-C. Kuo, and S.-C. Wang, “Low efficiency droop in blue-green m-plane InGaIn/GaN light emitting diodes,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 96, no. 23, p. 231101, Jun. 2010.
- [20] S. P. DenBaars et al., “Development of gallium-nitride-based light-emitting diodes (LEDs) and laser diodes for energy-efficient lighting and displays,” *Acta Mater.*, vol. 61, no. 3, pp. 945–951, Feb. 2013.
- [21] T. J. Badcock, M. Ali, T. Zhu, M. Pristovsek, R. A. Oliver, and A. J. Shields, “Radiative recombination mechanisms in polar and non-polar InGaIn/GaN quantum well LED structures,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 109, no. 15, p. 151110, Oct. 2016.
- [22] H.-W. Huang et al., “Investigation of InGaIn/GaN light emitting diodes with nano-roughened surface by excimer laser etching method,” *Mater. Sci. Eng. B*, vol. 136, no. 2–3, pp. 182–186, Jan. 2007.
- [23] T. Fujii, Y. Gao, R. Sharma, E. L. Hu, S. P. DenBaars, and S. Nakamura, “Increase in the extraction efficiency of GaIn-based light-emitting diodes via surface roughening,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, no. 6, p. 855, 2004.
- [24] G. Yang et al., “Investigation of light output performance for gallium nitride-based light-emitting diodes grown on different shapes of patterned sapphire substrate,” *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 33, pp. 149–153, May 2015.

- [25] Q. Zhou, M. Xu, Q. Li, and H. Wang, "Improved Efficiency of GaN-Based Green LED by a NanoMicro Complex Patterned Sapphire Substrate," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 29, no. 12, pp. 983–986, Jun. 2017.
- [26] J. H. Lee, D. Y. Lee, B. W. Oh, and J. H. Lee, "Comparison of InGaN-Based LEDs Grown on Conventional Sapphire and Cone-Shape-Patterned Sapphire Substrate," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 57, no. 1, pp. 157–163, Jan. 2010.
- [27] A. David et al., "Photonic crystal laser lift-off GaN light-emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, no. 13, p. 133514, Mar. 2006.
- [28] J. J. Wierer, A. David, and M. M. Megens, "III-nitride photonic-crystal light-emitting diodes with high extraction efficiency," *Nat. Photonics*, vol. 3, no. 3, pp. 163–169, Mar. 2009.
- [29] C.-C. Kao et al., "Light-output enhancement in a nitride-based light-emitting diode with 22° undercut sidewalls," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 17, no. 1, pp. 19–21, Jan. 2005.
- [30] W. Y. Fu, K. N. Hui, X. H. Wang, K. Wong, P. T. Lai, and H. W. Choi, "Geometrical Shaping of InGaN Light-Emitting Diodes by Laser Micromachining," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 21, no. 15, pp. 1078–1080, Aug. 2009.
- [31] C. Weisbuch, M. Piccardo, L. Martinelli, J. Iveland, J. Peretti, and J. S. Speck, "The efficiency challenge of nitride light-emitting diodes for lighting," *Phys. Status Solidi A*, vol. 212, no. 5, pp. 899–913, May 2015.
- [32] C. A. Humni et al., "Bulk GaN flip-chip violet light-emitting diodes with optimized efficiency for high-power operation," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 106, no. 3, p. 031101, Jan. 2015
- [33].https://elearn.univ-tlemce.dz/pluginfile.php/112340/mod_resource/content/1/chapitre%202%20LEDoptoelectronique.pdf.
- [34]. Mechai. Fazia, « Etude et simulation des structures photovoltaïques à base de chalcogénures de métaux de transition MX₂ (M = W, Mo; X = S, Se) », mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, (2016).
- [35]. 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).
- [36]. 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).

- [37]. H. MATHIEU, « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques », Dunod, Paris, (2009).
- [38]. Mansour Samah, «Etude et simulation des caractéristiques électriques de diode électroluminescente(LED)», mémoire de master, Université Mohammed Khider Biskra, (2016).
- [39].Nicolas POUSSET, "caracterisation du rendu des couleurs des nouvelles source: les diodes électroluminescente", these docteur, Paris 2009.
- [40].Bouaraba.F, «étude d'une LED à base d'InGaN pour l'émission de la lumière blanche», mémoire de magister université. Mouloud Memmeri. Tizi Ouazou.2012
- [41] R. Baillot, thèse de doctorat « Méthodologie d'analyse de défaillance pour l'évaluation de la fiabilité de diodes électroluminescente GaN », Université de Bordeaux, 2011.
- [42] http://www.philipslumileds.com/pdfs/PG01_KOPDF.
- [43] Hamdoune AEK. « Elaboration du nitrure de gallium ; Etude de ses propriétés et Applications ». Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2006.
- [44] Bouaraba F. « Etude d'une LED à base d'InGaN pour l'émission de la lumière blanche ». thèse de magister, Université de Tizi-Ouzou, 2012
- [45] L.Massol. « LEDs blanches les différentes technologies », Led Engineering Développement, 2006
- [46] A. Dussaigne, thèse de doctorat. « Diodes électroluminescentes blanches monolithiques », université de Nice-Sophia Antipolis, 2005.
- [47]. Daylight Micro LED SMD LED 598 SERIES Datasheet (PDF). Daylight.com. Archived from the original (PDF) on February 5, 2009.
- [48]. ELISABETH LEAMY and VANESSA WEBER, "The Potentially Fatal Winter Problem of Stoplights". ABC News. January 8, 2010.
- [49]. Stephen Markley, LED traffic lights cannot melt snow and ice, 17 December 2009
- [50] Johnson W.C., Parsons J.B., Crew M.C., J. Phys. Chem. 234 (1932) 2651.
- [51] -Dahmani Nadia, Etude des composés ternaires à base de nitrures, en utilisant la méthode de simulation de Monte Carlo. Université Abou-Bekr Belkaid–Tlemcen, faculté des sciences, 2010.
- [52] K. Nagata, K. Takeda, Y. Oshimura, K. Takehara, H. Aoshima, S. Ito, M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Kamiyama, I. Akasaki, H. Amano, H. Yoshida, M. Kuwabara, Y. Yamashita, and H. Kan, Phys. Status Solidi C 8, 2384 (2011).
- [53] H. Yoshida, Y. Yamashita, M. Kuwabara, and H. Kan, Appl. Phys. Lett. 93, 241106 (2008).

- [54] C. Pernot, S. Fukahori, T. Inazu, T. Fujita, M. Kim, Y. Nagasawa, A. Hirano, M. Ippommatsu, M. Iwaya, S. Kamiyama, I. Akasaki, and H. Amano, *Phys. Status Solidi A* 208, 1594 (2011).
- [55] H. Hirayama, S. Fujikawa, N. Noguchi, J. Norimatsu, T. Takano, K. Tsubaki, and N. Kamata, *Phys. Status Solidi A* 206, 1176 (2009).
- [56] Z. G. Shao, D. J. Chen, H. Lu, R. Zhang, D. P. Cao, W. J. Luo, Y. D. Zheng, L. Li, and Z. H. Li, *IEEE Electron Device Lett.* 35, 372, (2014).
- [57] L. H. Yang, K. R. Lai, B. H. Zhang, X. L. Fu, J. J. Wang, and W. Wei, *Phys. Status Solidi A* 212, 698 (2015).
- [58] R. J. Kaplar, A. A. Allerman, A. M. Armstrong, M. H. Crawford, J. R. Dickerson, A. J. Fischer, A. G. Baca, and E. A. Douglas, *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 6, Q3061 (2017).
- [59] T.P. Chow, V. Khemka, J. Fedison, N. Ramungul, K. Matocha, Y. Tang, R.J. Gutmann, "SiC and GaN bipolar power devices," *Solid-State Electronics*, vol. 44, no. 2, pp. 227- 301, 2000.
- [60] R.J. Trew, "SiC and GaN transistors - is there one winner for microwave power applications, " *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, no. 6, pp. 1032 - 1047, June 2002.
- [61] P. Gupta et al., 'Layered transition metal dichalcogenides: promising near-lattice-matched substrates for GaN growth', *Sci Rep*, vol. 6, no. 1, Art. no. 1, Mar. 2016, doi: 10.1038/srep23708.
- [62] A. Said, Y. Oussaifi, N. Bouarissa and M. Said, 'Electronic Properties of Wurtzite GaN, InN and their Ternary Alloys $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < X < 1$): A Comparative Study Using Different Methods', *International Journal of Optics and Photonic Engineering*, vol. 6, no. 1, Jun. 2021,
- [63] Silvaco International ATLAS User's Manual: Device Simulation Software. Silvaco International, Santa Clara, 2015.
- [64] R. Kour, S. Arya, S. Verma, A. Singh, P. Mahajan, and A. Khosla, 'Review—Recent Advances and Challenges in Indium Gallium Nitride ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$) Materials for Solid State Lighting', *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, vol. 9, no. 1, p. 015011, Nov. 2019, doi: 10.1149/2.0292001JSS.
- [65] Yim W.M., Stofko E.J., Zanzucchi P.J., Pankove J.I., Ettenberg M., Gilbert S.L., *J. Appl. Phys.* 44, (1973) 292
- [66] H. P. Maruska, "The preparation and properties of vapor-deposited single-crystal-line GaN," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 15, no. 10, p. 327, 1969.

- [67] A. Denis “ Elaboration cristallogénèse et caractérisations physico-chimiques des nitrures des éléments de la colonne III-a et en particulier le GaN”. Thèse de doctorat, université Bordeaux, 2003.
- [68] I. AKASAKI and H. AMANO, Properties of group III nitride, J. EDGAR, Publication INSPEC, Datareviewseries n°11, p3-6 1994.
- [69] BELAID A. « Simulation et optimisation d’une diode électroluminescente B(Ga,Al)N/GaN émettant dans l’ultraviolet ».Thèse de doctorat.Université Aboubakr Belkaïd –Tlemcen.
- [70] Barbet, thèse de doctorat : « Etude par microscopie à champ proche de matériaux III-V pour émetteurs électronique planaires », Université de Lille, 2008
- [71] S. Atlas Blue LED simulation, the simulation standard, vol. 79, pp. 6–13, 2016.
- [72] Silvaco, ed., ATLAS User’s Manual, (2015).
- [73] Li, C, K., Piccardo, M., Lu, L, S., Mayboroda, S., Martinelli, L., Peretti, J., Speck, J.S., Weisbuch, C., Filoche, M., Wu, Y, R., Phys. Rev. B. vol95, issue 14(2017)
- [74] M. Rolles, Etude théorique de la faisabilité des LED à base de ZnGeN₂, thèse de Doctorat, Décembre 2018, Université de Lorraine.
- [75] S. L. Chuang and C. S. Chang Phys. Rev. B, vol. 54, pp. 2491–2504, 1996.
- [76] S. L. Chuang and C. S. Chang Semiconductor Science and Technology, vol. 12, p. 252, 1997.
- [77] J. M. Luttinger and W. Kohn *Physical Review*, vol. 97, no. 4, p. 869, 1955.
- [78] J. Luttinger *Physical Review*, vol. 102, no. 4, p. 1030, 1956.
- [79] E. O. Kane *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 1, no. 4, pp. 249 – 261, 1957.