

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté de génie électrique et d'informatique

Département d'électronique



MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Electronique

Option : Microélectronique

Présenté par :

M^{elle} BOUARABA Fazia

THÈME

Etude d'une LED à base d'InGaN pour l'émission de la lumière blanche

Devant le jury :

Mr MEGHERBI Mohammed	Professeur	UMMTO	Président
Mr BELKAID Mohamed Said	Professeur	UMMTO	Rapporteur
Mr OUSSALAH Slimane	Maître de recherche A	CDTA	Examineur
Mme MENOUEUR LAGHA Kahina	Maître de conférences B	UMMTO	Examinatrice

Résumé

A l'échelle mondiale, l'éclairage représente environ 25 % de la consommation totale d'énergie électrique. Dans le contexte actuel d'économie d'énergie et de lutte contre le réchauffement climatique, l'éclairage par diodes électroluminescentes (LED pour Light Emetting Diode) apparaît comme une voie très prometteuse et sans doute à terme incontournable. En effet, les LEDs à émission de lumière blanche offrent de nombreux avantages par rapport aux sources de lumière conventionnelles (longue durée de vie, faible consommation électrique et temps de réponse réduit), elles présentent une efficacité énergétique théorique 10 fois supérieure à celle des lampes à incandescence.

Après avoir récapitulé l'état de l'art des diodes électroluminescentes dont nous avons présenté les points essentiels à la compréhension de cette nouvelle source de lumière, nous nous sommes intéressés à l'étude des semiconducteurs III.N et plus précisément le nitru de d'indium de gallium (InGaN), vu les récents progrès sur ces matériaux et la maîtrise de leurs techniques d'élaboration qui ont permis l'émergence des LEDs dans le domaine de l'éclairage. Nous avons procédé à une simulation à l'aide du logiciel SILVACO des différentes étapes technologiques nécessaires pour la réalisation de la LED bleue à simple puits quantique InGaN utilisé pour la réalisation des LEDs blanches. Cette simulation nous a permis de tirer les caractéristiques de la LED, et de déterminer l'influence des paramètres tels que le taux d'indium et la tension de polarisation sur l'efficacité de la LED.

Mots clefs : LED, éclairage, nitrures III.V, InGaN, simulation, SILVACO.

Remerciements

Je remercie ALLAH le tout puissant pour m'avoir donné la force, la volonté et la patience pour mener à terme mon travail.

Je tiens à témoigner ma profonde gratitude et mes remerciements les plus vifs au professeur Mr BELKAID Mohamed Saïd, le Doyen de la Faculté de Génie Electrique et d'Informatique de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour m'avoir confié ce travail et pour ses conseils et sa disponibilité durant sa préparation, qu'il trouve ici l'expression de mon respect.

Je remercie également Mr MEGHERBI Mohammed, professeur au département d'électronique UMMTO, pour l'honneur qu'il m'a accordé en acceptant de présider le jury de mémoire.

J'adresse mes vives reconnaissances à Mr OUSSALAH Slimane Directeur adjoint de Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA) à Baba Hassen, Alger, qui a accepté de m'accueillir dans le centre et d'être parmi les membres de jury, et pour la lecture attentive de ce manuscrit et l'intérêt qu'il y a porté.

Je remercie chaleureusement Mme BENKHELFA Nabila pour l'initiation au logiciel Silvaco, pour ses explications et sa gentillesse, et de m'avoir aidée à accomplir ce travail

Mes remerciements vont également à Mme MENOUEUR LAGHA Kahina maître de conférences B à l' UMMTO pour l'honneur qu'elle m'a fait

en acceptant de jurer mon travail ainsi que M^{elle} SIDI SAID Amel pour m'avoir proposé ce sujet, et à tous mes collègues et amis du laboratoire LATAGE qui m'ont aidé de différentes manières.

Dédicaces

A

Mes parents

Mes frères

Ma sœur

Mes amies

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Etat de l'art des diodes électroluminescentes

I.1. Introduction	3
I.2. Historique	4
I.3. Contexte économique et énergétique actuel des LEDs.....	5
I.4. Caractéristique d'une source lumineuse (LED)	6
I.4.2.1. Diagramme de chromaticité	6
I.4.2.2. La notion de température de couleur	7
I.4.2.3. Indice de rendu de couleur (IRC)	8
I.5. Etude des diodes électroluminescentes (LEDs)	9
I.5.1. Classification des diodes électroluminescentes	9
I.6.1.1. Les LEDs de faible puissance	9
I.6.1.2. Les LEDs de forte puissance	10
I.5.2. Principe de fonctionnement des LEDs	12
I.5.2.1. Les LEDs à homojonction	13
I.5.2.2. Les LEDs à hétérojonction	14
I.5.2.3. Les LEDs à puits quantique	15
I.5.3. Fabrication des diodes électroluminescentes	16
I.5.3.1. Le choix du substrat	16
I.5.3.2. La croissance des différentes couches	17
I.5.3.3. Les contacts	17
I.5.3.4. L'encapsulation	20
I.5.4. Propriétés des diodes électroluminescentes	21
I.5.4.1. Propriétés physiques.....	21
I.5.4.2. Propriétés électriques	23
I.5.4.3. Propriétés optiques	26
I.6. Les Diodes électroluminescentes blanches	28
I.6.1. Les Méthodes d'obtention de la lumière blanche.....	28
I.6.1.1. Méthode 1 : synthèse RGB	28
I.6.1.2. Méthode 2 : LED bleue et phosphore jaune.....	28
I.6.1.3. Méthode 3 : LED ultra violet + phosphore	29
I.6.1.4. Diodes électroluminescentes organiques (OLEDs).....	31

I.7. Extraction de la lumière émise	33
I.8. Les paramètres affectant l'efficacité des LEDs	35
I.7.1. La température de la jonction.....	35
I.7.2. L'influence du courant d'alimentation	37
I.7.3. La géométrie de la puce	37
I.9. Les performances des LEDs	38
I.11.1. Le rendement lumineux (wall-plug efficiency)	38
I.11.2. La durée de vie.....	39
I.10. Comparaison des différentes sources de lumières	40
I.11. La dégradation des LEDs	40
I.12. Les applications des LEDs	41
I.13. Les atouts et les limites des LEDs pour l'éclairage	42
I.14. Conclusion	43

Chapitre II : Les diodes électroluminescentes blanches à base d'InGaN

II.1. Introduction	44
II.2. L'intérêt des nitrures d'élément III en optoélectronique	45
II.3. Les propriétés des nitrures.....	46
II.3.1. Propriétés cristallines	46
II.3.2. Propriétés électriques	48
II.3.3. Propriétés thermiques	50
II.3.4. Propriétés optiques	51
II.4. Les techniques d'élaboration des nitrures.....	53
II.4.1. Epitaxie en phase vapeur à partir d'hydruure (EPVH)	53
II.4.2. Epitaxie par jets moléculaires (EJM).....	53
II.4.3. Epitaxie en phase vapeur d'organométallique (EPVOM)	54
II.4.4. Croissance par reprise d'épitaxie latérale (ELO).....	55
II.5. Croissance et propriétés d'InGaN	57
II.5.1. La croissance d'InGaN	57
II.5.2. L'énergie de la bande interdite d'InGaN	57
II.5.3. Les puits quantiques InGaN/GaN	58

II.5.4. Déformations et contraintes dans les puits quantiques	59
II.5.5. Effet du champ électrique dans un puits quantique	60
II.5.6. Effets de localisation et efficacité radiative	61
II.6. Les procédés de fabrication de la LED blanche à base d'InGaN.....	62
II.6.1. Le choix du substrat	62
II.6.2. La couche tampon	64
II.6.3. Réalisation de puits quantique GaN-n/InGaN/GaN-p.....	65
II.6.4. Méthodes de dopage de GaN	66
II.6.5. La couche AlGaN.....	69
II.6.6. Réalisation des contacts.....	69
II.6.7. Le dépôt de phosphore jaune	73
II.7. Conclusion	74

Chapitre III : Simulation des procédés technologiques de réalisation de la LED

III.1. Introduction.....	75
III.2. Les simulateurs TCAD	75
III.3. Présentation du logiciel TCAD-SILVACO.....	76
III.3.1. Les outils interactifs.....	77
III.3.2. Les outils de simulation	78
III.4. Description de la structure LED simulée.....	80
III.5. Les étapes de simulation	81
III.5.1. Maillage.....	81
III.5.2. Définition du substrat	82
III.5.3. Dépôt des couches	82
III.5.4. Dépôt des contacts	85
III.5.5. La structure finale	81
III.6. Conclusion	88

Chapitre IV : Simulation des caractéristiques électriques de la LED

IV.1.Introduction	89
IV.2. Les étapes de programmation sous Atlas	89
IV.2.1. Spécification de la structure	90
IV.2.2. Spécification des matériaux et des modèles	92
IV.2.3. Sélection des méthodes numériques.....	92
IV.2.4. Spécification de solution.....	93
IV.2.5. Analyse des résultats	93
IV.3. Simulation des caractéristiques électriques de la diode électroluminescente.....	94
IV.3.1. Caractéristique courant-tension	94
IV.3.2. Caractéristique puissance-courant	95
IV.3.3. Spectre de la lumière émise.....	96
IV.3.4. Concentration des porteurs en fonction de la profondeur	97
IV.3.5. Effet de changement de taux d'indium	98
IV.3.6. Effet de tension de polarisation	100
IV.4. Conclusion	101
Conclusion générale	102
Bibliographie	
Annexe	

Introduction générale

Introduction générale

L'éclairage est un élément essentiel à l'activité économique dans notre société moderne. Cependant, cet éclairage consomme beaucoup d'électricité qui est souvent produite par des centrales thermiques polluantes. C'est pour cette raison qu'une solution permettant de réduire la consommation énergétique est souhaitable d'un point de vue économique et environnemental.

L'ampoule à incandescence est le composant dominant utilisé pour l'éclairage depuis plus d'une centaine d'années malgré une efficacité atteignant à peine 17 lumens par watt [1]. Aujourd'hui, une nouvelle source d'éclairage permettant de réduire la consommation électrique et donc la production de gaz à effet de serre est disponible ; on parle de SSL « Solid-State Lighting », autrement dit d'éclairage par source à l'état solide : Il s'agit en fait d'utiliser des composants à semiconducteur classiques de l'optoélectronique : les diodes électroluminescentes blanches à haute intensité (LEDs ou Light Emitting Diodes), leurs efficacités énergétiques, leur fiabilité et leurs durées de vie très longues comparativement aux ampoules incandescentes, sont à l'origine de leur succès.

Autrefois utilisées uniquement comme indicateurs sur des panneaux de contrôle (LED faible puissance), les LEDs (haute intensité) trouvent aujourd'hui des applications dans plusieurs domaines tels que les panneaux de signalisation routière, les phares d'automobile ou les lampes pour éclairage domestique, et cela grâce aux progrès technologiques des semi conducteurs III-V qui leur permettent désormais de produire des niveaux d'éclairage supérieurs aux modèles précédents. Dans cette famille, l'InGaN apparaît à l'heure actuelle comme le matériau le plus prometteur pour l'émission de lumière visible. L'intérêt porté à ce matériau se trouve accru depuis l'avènement des LEDs bleues à base de puits quantiques InGaN qui a permis d'ouvrir la voie à la réalisation de sources de lumière blanches de bonne efficacité lumineuse. En revanche, sources d'éclairage électronique, leur maîtrise requiert plusieurs savoir-faire allant de l'optique à l'électronique en passant par la thermique [2].

L'objectif de notre travail est l'étude de l'utilisation des LEDs pour l'émission de la lumière blanche (éclairage), et une conception par simulation en utilisant le logiciel SILVACO de la structure LED bleue à puits quantique InGaN qui représente la base pour la réalisation des LEDs blanches puissantes.

Introduction générale

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

Le premier chapitre est consacré à l'étude des diodes électroluminescentes à savoir leurs principes de fonctionnement, les caractéristiques et performances de ces sources de lumière qui les rendent attractive pour l'éclairage, ainsi que les procédés de fabrication et les méthodes d'obtention de la lumière blanche.

Le deuxième chapitre présente de manière succincte, les semiconducteurs III.N qui sont les matériaux les plus prometteurs pour les dispositifs d'illumination du fait de leurs caractéristiques, en se penchant plus particulièrement sur l'étude de GaN et InN qui constituent les composants binaires d'InGaN. Nous allons, ensuite, présenter en détail toutes les étapes de fabrication de la LED blanche la plus utilisée dans l'industrie d'éclairage à l'heure actuelle et qui est basée sur une LED bleue à simple puits quantique InGaN et d'une couche de phosphore jaune.

Dans le troisième chapitre nous présenterons le logiciel de simulation Silvaco, ses modules et outils de simulation ; nous décrirons ensuite les procédés technologiques nécessaires à la réalisation de notre structure LED bleue à base de puits quantique InGaN en utilisant l'outil de simulation « Athéna ».

Dans le quatrième chapitre, nous nous intéresserons à la simulation électrique de la structure LED présentée au chapitre précédent. Cette simulation électrique se fera au moyen de l'outil « Atlas » qui permet de prédire le comportement électrique du composant électronique.

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

Chapitre I :

Etat de l'art des diodes électroluminescentes

I.1. Introduction

Aujourd'hui, on estime que l'éclairage par diodes électroluminescentes LEDs est le plus grand bouleversement qu'ait connu la technologie de l'éclairage depuis l'invention de l'ampoule à incandescence, il y a de cela 130 ans. Il n'y a encore pas si longtemps, les LEDs (diodes émettant de la lumière) étaient considérées comme des produits de niches sur le marché de l'éclairage général et comme éléments de complément aux systèmes existants. Mais le développement des LEDs à haute brillance avec lumière blanche, il y a quelques années, a transformé le potentiel de cette technologie basée sur les semiconducteurs [3].

Dans le futur proche (les années 2020), les LEDs devraient être les sources de lumière les plus efficaces et fiables du marché. Ces LEDs ouvrent ainsi un champ d'innovations potentielles exceptionnel. D'après J. Nelson de Sandia laboratories : "si toutes les lampes à incandescence dans le monde étaient remplacées par les LEDs on pourrait économiser environ 38 centrales nucléaires». Cette perspective montre à elle seule l'importance des recherches menées dans ce domaine [4].

Les diodes électroluminescentes apparaissent aujourd'hui donc comme une solution technologique prometteuse. En effet, elles présentent des atouts considérables en termes d'efficacité énergétique, elles consomment beaucoup moins qu'une ampoule à incandescence classique, et ont une durée de vie largement supérieure, avec encore devant elles, un fort potentiel de développement.

I.2. Historique

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

Le premier brevet sur le sujet a été déposé en **1929** par un radio-technicien Russe Oleg Vladimirovich Losev .Cependant, sans explication physique du phénomène qui semblait être intermittent et capricieux, cette découverte fut rapidement oubliée. Ce n'est qu'à partir des années **1954** que les chercheurs s'intéressent aux jonctions utilisant des matériaux des groupes III-V. Ainsi, en **1961**[5], Robert Biard et Gary Pittman déposèrent le brevet de la diode électroluminescente infrarouge suite à la découverte d'émission de lumière infrarouge par un semiconducteur (GaAs) lorsqu'il est traversé par un courant électrique [6].

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

La diode bleue a été inventée en 1990 par le Dr. Shuji Nakamura [7]. Cette innovation a été suivie par la mise au point de la diode blanche, qui a permis de nouvelles applications majeures, notamment dans le domaine de l'éclairage et des écrans de télévision et d'ordinateurs. Les premières LEDs blanches sont peu à peu apparues sur le marché et les fabricants ont proposé des diodes de plus en plus puissantes.

I.3. Contexte économique et énergétique actuel des LEDs

Aujourd'hui, du point de vue énergétique, l'éclairage consomme plus de 3 418 TWh d'énergie électrique par an. Cette quantité représente approximativement 19 % de la production globale d'électricité mondiale et elle représente une facture annuelle de plus de 200 milliards d'euros pour le consommateur. La production de l'énergie électrique pour satisfaire les besoins en éclairage entraîne inévitablement une pollution de l'environnement. Ainsi, on estime que chaque année, quelque 1 900 millions de tonnes métriques de CO₂ accompagnent cette production d'énergie en contribuant à l'effet de serre [5].

Il est donc évident que l'éclairage représente un enjeu considérable à la fois énergétique et économique. Cependant, malgré tous les progrès de la science et de la technologie l'efficacité lumineuse des sources d'éclairage classiques semblent avoir atteint ses limites d'après la figure I.1. En effet, les lampes à incandescence ordinaires semblent stagner entre 10 et 15 lumens/W, les lampes fluorescentes gardent un rendement de 100 lumens/W depuis les années 70. Au contraire l'efficacité des diodes électroluminescentes n'a fait qu'augmenter avec une forte croissance. En effet Le marché des LEDs ne fait qu'augmenter depuis 1993. Il augmente de 21% par an [8]. Les LEDs possèdent une loi d'évolution qui s'appelle : la loi de Haitz, elle s'énonce que toutes les décennies, le flux lumineux d'une LED est multiplié par 30 tandis que son coût est divisé par 10. Ceci correspond à un doublement du flux lumineux tous les 24 mois et à une réduction du prix de plus de 25% par an [9].

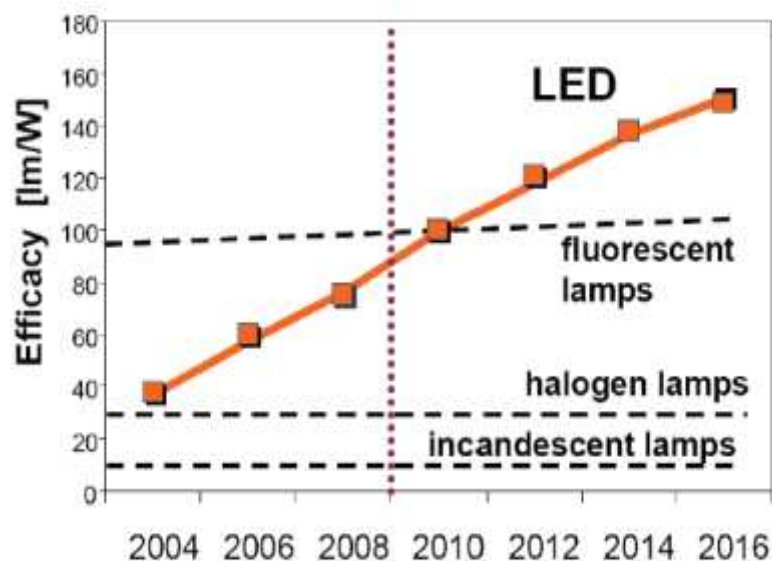


Figure I.1 : Évolution de l'efficacité quantique externe des lampes [10].

I.4. Les caractéristiques d'une source lumineuse (LED)

I.4.1. Diagramme de chromaticité

La sensibilité visuelle aux rayonnements est variable d'un individu à l'autre. La Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) a réalisé une moyenne de la perception visuelle sur des échantillons de population. A partir de cette étude, un modèle CIE XYZ est établie et sert à définir les coordonnées chromatiques. Les trois composantes X, Y et Z du modèle représentent respectivement : la teinte, la luminance et la saturation. Ces trois valeurs, dites valeurs tristimulus, qui sont fonctions du triplet : lumière, objet, observateur, sont obtenues en intégrant sur le spectre visible le produit de la réflectance de l'objet éclairé par un illuminant par la sensibilité spectrale de l'œil humain.

Ainsi, pour chaque triplet de coordonnées X, Y, Z correspond une seule et unique couleur perçue par un œil humain "standard". Afin de faciliter la définition des couleurs en termes de luminance et de chromaticité, la CIE a reformulé à partir de son modèle tridimensionnel X, Y et Z, un nouvel ensemble de coordonnées chromatiques notées x, y et z. Les valeurs x et y sont calculées à partir des trois composantes X, Y et Z. La valeur z, quant à elle, peut être déduite des deux autres, la somme $x + y + z$ étant toujours égale à 1. Cela revient à projeter la composante Z sur le plan xy. On obtient ainsi un modèle bidimensionnel appelé diagramme de chromaticité ou modèle CIE xyZ qui permet de définir précisément l'ensemble des couleurs [11].

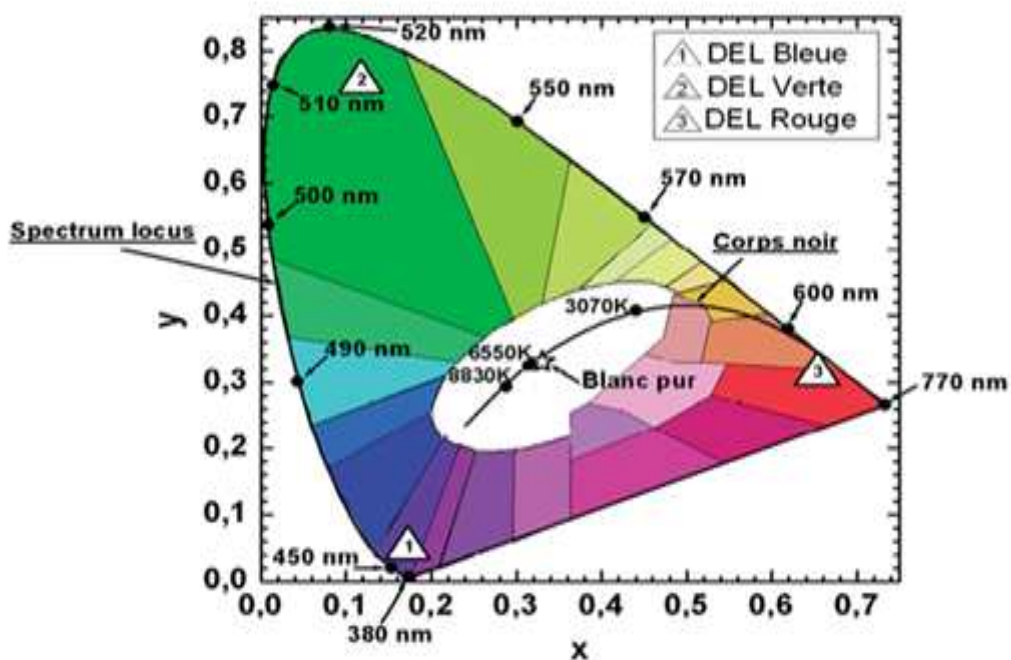


Figure I.2 : Diagramme de chromaticité [11].

Sur ce diagramme, les couleurs monochromatiques sont représentées sur les bords, la lumière blanche est localisée au centre, entre le centre et les bords, se trouvent toutes les couleurs intermédiaires visibles par l'œil humain. Selon le principe d'additivité des couleurs, on peut obtenir par mélange de deux sources, toute couleur définie sur le segment qui joint leurs représentations dans le diagramme, et par mélange de 3 sources, toute couleur située à l'intérieur du triangle qu'elles définissent. L'émission lumineuse provenant de la LED n'est pas monochromatique au strict sens physique puisqu'il existe toujours une certaine largeur spectrale, c'est pourquoi elles ne peuvent pas être représentées exactement au bord du diagramme, comme le seraient des sources purement monochromatiques [11].

I.4.2. La notion de température de couleur

La lumière peut paraître dorée ou rosée et dans ce cas nous la jugeons « chaude ». Lorsqu'elle apparaît très légèrement bleutée, nous la jugeons « froide ». Pour caractériser précisément la coloration d'une lumière blanche, les éclairagistes ont introduit l'échelle de « température de couleur ». Cette échelle reflète uniquement la couleur de la lumière, et n'informe en rien sur son spectre ou sur sa qualité.

Il s'avère que les variations de couleur de la lumière du jour sont pratiquement identiques aux variations de couleur du « corps noir », appelé aussi « radiateur de Planck ». Un corps noir est un radiateur thermique idéal qui absorbe complètement toutes les radiations incidentes quelles que soient leur longueur d'onde, leur direction. Il transforme la totalité du flux absorbé en chaleur qui est alors émise sous forme de rayonnement électromagnétique. Comme ce rayonnement est lié à sa température, il est possible de déterminer la température du corps noir, connaissant la longueur d'onde du rayonnement qu'il émet, et inversement. En établissant le parallèle entre la couleur de la lumière naturelle et la couleur que prendrait théoriquement le « corps noir » à différentes températures, il a été possible de construire une échelle de couleurs, ou de blancheur, des sources de lumière blanche [12].

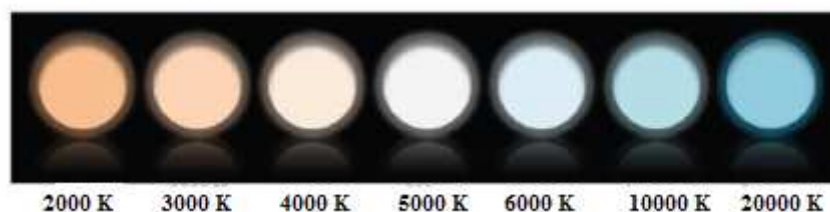


Figure I.3 : Exemple de représentation visuelle de températures de couleur [13].

I.4.3. Indice de rendu de couleur IRC

L'indice de rendu de couleur (IRC) définit la capacité d'une source lumineuse à restituer la couleur d'un objet sans en modifier la teinte. Il est compris entre 0 et 100. La lumière du jour a un IRC de 100, une lampe à incandescence a aussi un IRC proche de 100 (supérieur à 90). Pour évaluer l'IRC d'une source, on place un observateur face à un objet d'une certaine couleur, puis on illumine cet objet avec cette source. L'IRC sera évalué en fonction de la teinte que l'observateur aura perçue. Une bonne source lumineuse (IRC >90) restituera parfaitement la couleur, alors qu'une source de mauvaise qualité donnera à l'objet un aspect plus foncé ou plus clair.

IRC	Qualificatifs d'appréciations
90 - 100	Excellent rendu des couleurs
80 -90	Bon rendu des couleurs
70 - 80	Rendu des couleurs moyen
50 - 70	Mauvais rendu des couleurs
< 50	Très mauvais rendu des couleurs

Tableau I.1 : Appréciation de l'indice de rendu des couleurs [12].

I.5. Etude des diodes électroluminescentes (LEDs)

Une diode électroluminescente est un dispositif issu de la technologie des semiconducteurs, qui émet de la lumière lorsqu'un courant électrique la traverse. La diode produit une lumière quasi monochrome d'une longueur d'onde donnée dépend du semiconducteur utilisé.

Les LEDs consomment très peu d'énergie, elles ont une durée de vie importante par rapport aux sources de lumière ordinaires.

I.5.1. Classification des diodes électroluminescentes

I.5.1.1. Les LEDs de faible puissance

Ce sont les plus connues du grand public car elles sont présentées dans notre quotidien depuis des années. Ce sont elles qui jouent le rôle de voyants lumineux sur les appareils électroménagers par exemple. Celles-ci ne sont pas conçues pour les flux lumineux et les puissances élevées nécessaires pour les applications d'éclairage. La durée de vie est en outre fortement limitée, illustrée par la figure I.4.

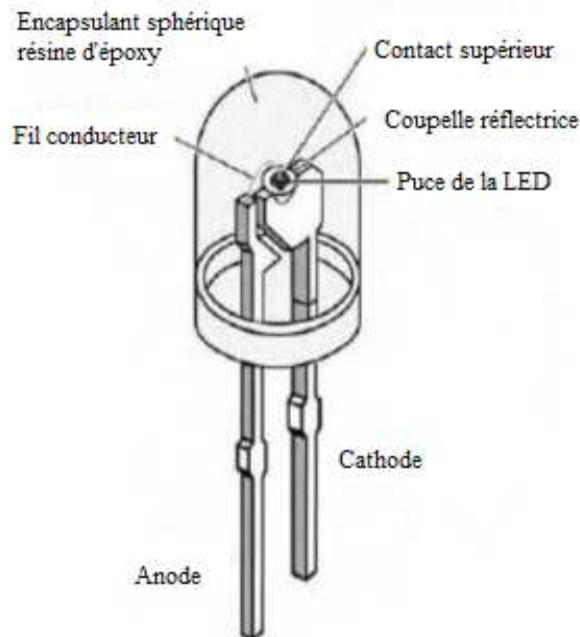


Figure I.4 : Schéma d'une LED faible puissance [14].

I.5.1.2. Les LEDs de forte puissance

Souvent méconnues du grand public, elles sont pourtant en plein essor et leurs applications sont souvent ignorées : flash des téléphones portables, éclairage domestique, etc... Le principe de base reste identique à la précédente architecture mais possèdent en plus une pièce appelé « pad thermique » qui a pour fonction l'évacuation de la chaleur générée au niveau de la puce. Pour l'éclairage, on utilise des lampes constituées de plusieurs LED de forte puissance (HB : high brightness, UHB : ultra high brightness) accolées.

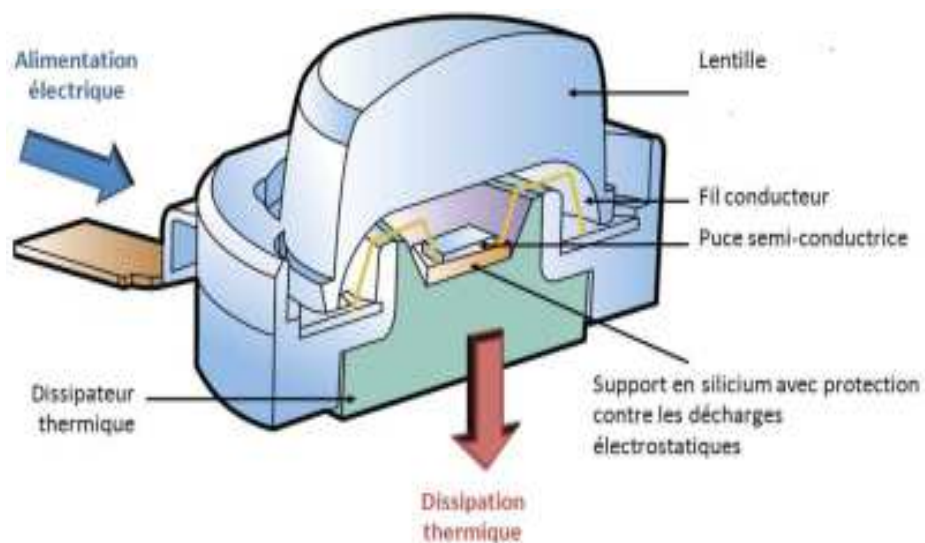


Figure I.5 : Schéma de principe d'une LED de forte puissance vue en coupe [15].

Le tableau suivant résume les caractéristiques des deux familles des LEDs :

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

Tableau I.2: Les différentes familles des diodes électroluminescentes [5].

I.5.2. Principe de fonctionnement des LEDs

La structure de base de la LED est une jonction p-n, c'est-à-dire un empilement de deux couches semiconductrices, la première de type p (trous majoritaires) et la seconde de type n (électrons majoritaires). Les porteurs majoritaires de chaque zone diffusent vers l'autre zone : les électrons de la zone « n » ont tendance à diffuser vers la zone « p », les trous suivent le chemin opposé. Ces mouvements spontanés perturbent la neutralité électrique locale du système ; ils sont à l'origine de l'apparition d'un champ de charge d'espace qui s'oppose à son tour à ces mouvements et le système s'équilibre. Par conséquent le nombre de porteurs minoritaires dans chaque zone reste extrêmement faible et la probabilité de recombinaison radiative est quasi nulle.

En appliquant maintenant à la jonction une tension de polarisation directe, la barrière de potentiel s'abaisse. Par conséquent, le courant de diffusion des porteurs majoritaires de chaque côté de la barrière vers la zone opposée augmente. Cette augmentation du courant de diffusion déséquilibre le système et aboutit à une croissance de la population des porteurs minoritaires dans chaque zone, donc la probabilité de recombinaison radiative n'est plus négligeable et des photons sont produits par la jonction.

L'émission d'une LED est dite spontanée, c'est-à-dire que ce type d'émission met en jeu uniquement la recombinaison d'un électron et d'un trou [11].

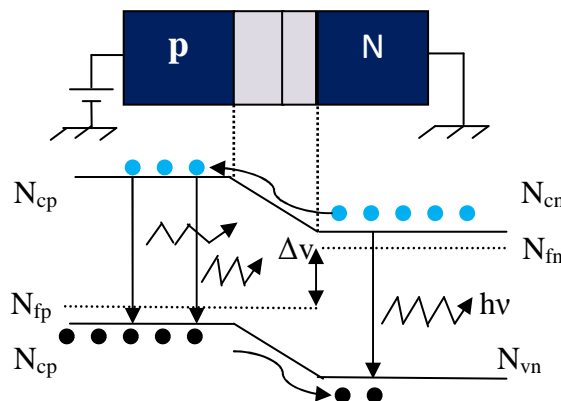


Figure I.6 : Principe de fonctionnement d'une LED.

I.5.2.1. Les LEDs à homojonction

Les homojonctions sont réalisées à partir de deux blocs de même nature mais de dopage différent pour former une jonction PN. La recombinaison des porteurs est prépondérante dans la zone « p », ce phénomène est expliqué par le fait que les trous ont une mobilité très inférieure aux 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.

La technologie d'homojonction atteint vite ses limites, car en augmentant le niveau de dopage pour améliorer l'efficacité d'injection, on augmente simultanément les impuretés qui constituent à leur tour des centres additionnels de recombinaison non radiative. Par ailleurs, dans une diode, les photons générés par le centre luminescent peuvent être réabsorbés. Ce piégeage du rayonnement augmente rapidement avec le niveau du dopage. Obtenir des diodes produisant plusieurs centaines de lumens nécessite la mise en place d'une autre technologie, celle d'hétérojonction [12].

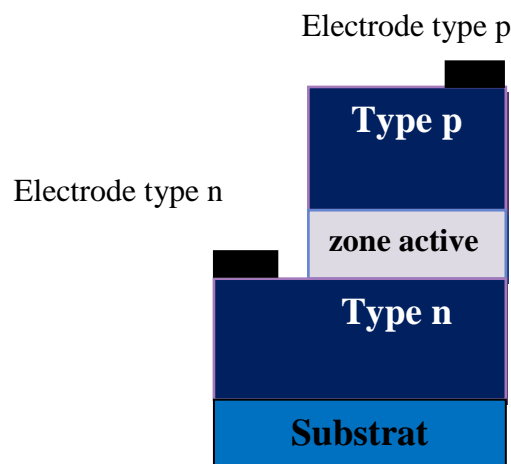


Figure I.7 : Schéma de principe d'une LED à homojonction.

I.5.2.2. Les LEDs à hétérojonction

L'idée principale de la technologie d'hétérojonction repose sur la variation spatiale de la composition du semiconducteur. Ces structures, appelées hétérostructures, sont des assemblages de semiconducteurs de différentes compositions chimiques ayant également différents « gaps » énergétiques.

Dans le cas d'une hétérostructure simple (SH), la zone « p » correspondant à la région de conduction est constituée d'un semiconducteur ayant un gap énergétique E_{g2} d'une valeur inférieure à celle du gap de la zone « n », E_{g1} . La discontinuité entre les deux structures énergétiques amplifie la barrière de potentiel visible par les trous désirant diffuser vers la région « n ». Ce décalage est égal à ΔE_V . De leur côté, les électrons voient une diminution de la barrière de potentiel égale à ΔE_C . Dans cette configuration, le rapport entre les courants I_n/I_p augmente d'un facteur proportionnel à $\exp(\Delta E/k_B T)$, où $\Delta E_V < \Delta E < \Delta E_V + \Delta E_C$.

Il est donc possible d'agir sur l'efficacité d'injection sans être obligé d'augmenter indéfiniment le niveau de dopage. L'utilisation des double hétérostructures (DH) induit des phénomènes quantiques qui modifient le spectre de l'énergie des porteurs (confinement quantique) et favorisent l'augmentation de l'efficacité de la diode. Nous parlons donc de LED à puits quantiques simples (SQW) ou multiples (MQW) [5].

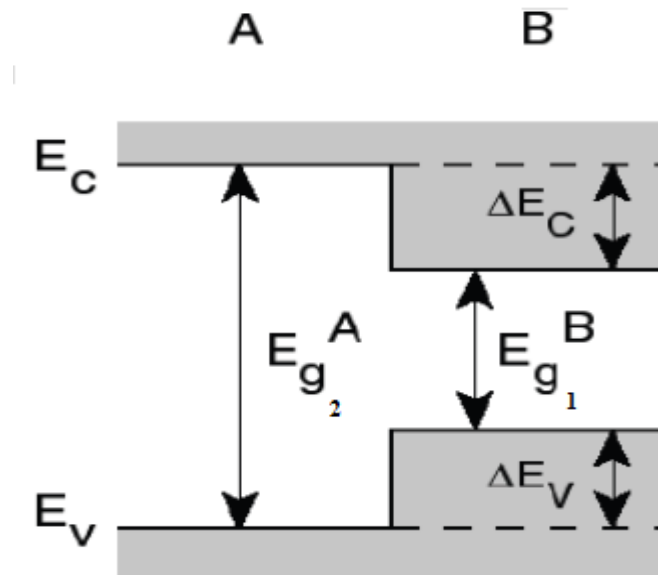


Figure I.8 : Schéma de principe d'une hétérojonction.

I.5.2.3. Les LEDs à puits quantique

Un puits quantique est obtenu en faisant croître une couche d'un matériau semiconducteur A (typiquement quelques dizaines de nanomètres) entre deux couches d'un autre matériau semiconducteur B. Ce dernier présente un gap d'énergie supérieur à celui du matériau A. La discontinuité entre les bandes d'énergie dans les deux matériaux crée une barrière de potentiel qui confine les porteurs dans le puits quantique.

La dénomination puits et barrière vient du fait que les électrons et les trous proviennent du matériau barrière à grande bande interdite vers le puits de potentiel à plus petite bande interdite. Le puits est dit quantique si ses dimensions sont suffisamment petites (de l'ordre du nanomètre) pour que les niveaux d'énergie dans celui-ci soient quantifiés. On peut alors faire varier la longueur d'onde d'émission entre l'énergie de bande interdite du puits et de la barrière, en modifiant la largeur du puits. Quand une tension électrique est appliquée sur cet empilement, les charges sont injectées dans les puits quantiques, ils se recombinent et leur différence d'énergie est relâchée sous forme d'un photon.

Le puits quantique permet d'avoir une meilleure efficacité radiative en concentrant les électrons et les trous dans un petit volume : les recombinaisons électrons-trous sont alors plus probables. Un puits quantique unique peut être saturé en porteurs, ce qui fait qu'à fort courant le nombre de photons émis reste constant à partir d'un certain seuil. Pour pallier ce problème, des structures avec des multi-puits quantiques sont fabriquées [11].

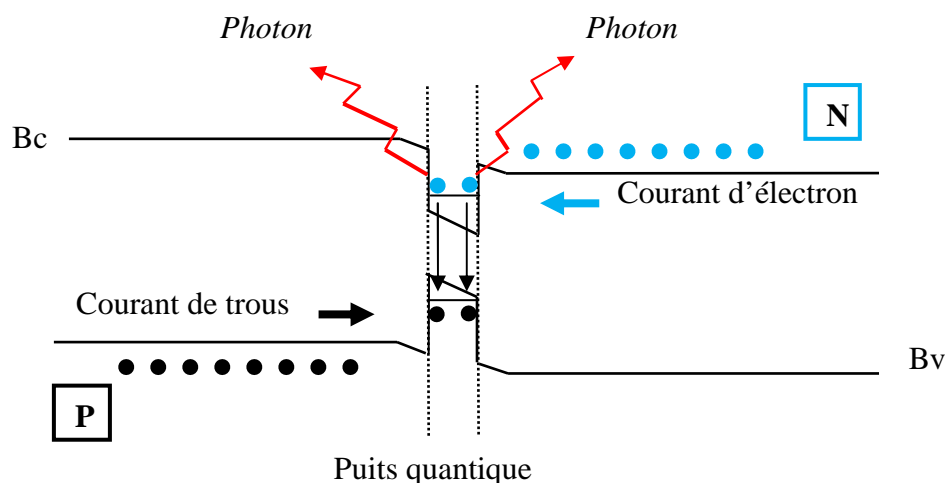


Figure I.9 : LED à puits quantique.

I.5.3. Fabrication des diodes électroluminescentes

La longueur d'onde du rayonnement émis est déterminée par la largeur de la bande interdite et dépend donc du matériau utilisé. Toutes les valeurs du spectre lumineux peuvent être atteintes avec les matériaux actuels. Le processus de fabrication des LEDs est très complexe, la figure I.10 illustre très sommairement le processus allant du substrat au composant LED :

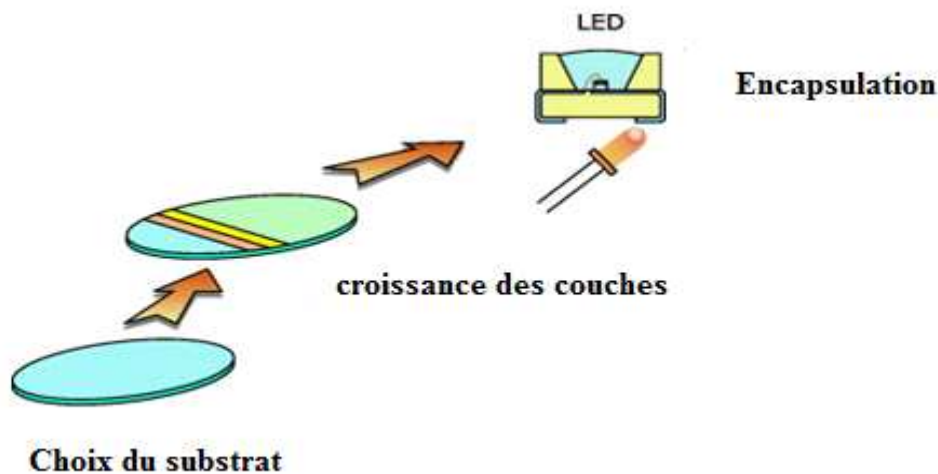


Figure I.10 : Chaîne de fabrication d'un composant LED [5].

I.5.3.1. Le choix de substrat

Avant de réaliser tout composant microélectronique, il faut définir le substrat, c'est à-dire le matériau sur lequel sera réalisé le dispositif. Les diodes électroluminescentes peuvent être fabriquées à partir de plusieurs types de substrats tels que le saphir (Al_2O_3), le carbure de silicium (SiC) et le silicium (Si) (voir chapitre II).

Le choix du substrat approprié se fait en fonction de plusieurs critères tels que : le raccordement de paramètre de maille avec le matériau épitaxié sur le substrat, l'expansion thermique, la qualité cristalline mais aussi en fonction du prix.

I.5.3.2. La croissance des différentes couches

La qualité cristalline des couches épitaxiales est un point crucial dans la fabrication de dispositifs d'optoélectronique. Cependant, il a été longtemps difficile d'obtenir un matériau présentant une épaisseur raisonnable avec une bonne qualité cristallographique. Aujourd'hui, les progrès atteints dans l'industrie de la microélectronique et l'expérience acquise dans le domaine de l'optoélectronique, ont permis le développement de procédés de croissance compatibles avec l'électronique de puissance, on cite : HVPE pour « Hydrid Vapor Phase Epitaxy », la MBE pour « Molecular Beam Epitaxy » et la MOCVD « Metal Organic Chemical Vapor Deposition ».

Les caractéristiques importantes à prendre en compte, lorsqu'on parle de croissance sur substrat, sont les paramètres de maille et les coefficients de dilatation thermique. En effet, pour maximiser les chances d'avoir un matériau avec le moins de défauts et de contraintes possibles, il est nécessaire de faire croître le matériau sur un substrat doté d'une structure cristallographique identique (homoépitaxie) ou bien la plus compatible possible (hétéroépitaxie).

1.5.3.3. Les contacts

Une fois l'épitaxie achevée, il faut déposer les contacts pour pouvoir appliquer un courant électrique aux bornes de la LED. Il s'agit de l'étape de « métallisation ». Cette métallisation, réalisée généralement par PECVD (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition) ou par technique d'évaporation. Des métaux tels que le « titane » et le « nickel » sont couramment utilisés [5].

La réalisation d'une jonction métal-semiconducteur (M-S) forme une barrière Schottky qui présente un effet redresseur, mais le niveau de potentiel de cette barrière peut être rendu pratiquement négligeable, par un choix correct du métal utilisé et un dopage suffisamment élevé du semiconducteur, on obtient alors un contact à faible résistance et de caractéristique symétrique que l'on appelle contact ohmique. Ce type de contact est un moyen de communication avec le monde extérieur. L'obtention d'un bon contact ohmique passe avant tout par la maîtrise des étapes technologiques (type de métal, épaisseur, traitement thermique) et par le design du contact en lui-même (forme du motif, dimensions).

A- Théorie du contact ohmique métal/semiconducteur

Pour obtenir un bon contact ohmique, la barrière de potentiel entre le métal et SC doit être la plus faible possible pour que les porteurs puissent librement circuler du métal vers le semiconducteur et inversement, tout en présentant une faible résistance à leur circulation. Cela se traduit alors par une caractéristique courant-tension linéaire.

Premièrement, il convient d'observer la structure énergétique de chaque matériau pris indépendamment. L'énergie potentielle des électrons dans le vide (niveau du vide ou N_V) étant la même au voisinage de tous les matériaux, elle est prise comme référence lors de l'étude théorique. Dans chacun des matériaux, le niveau du vide est situé à une énergie Φ du niveau de Fermi. Cette énergie est appelée le travail de sortie du matériau et permet pour chaque matériau de définir la position relative du niveau de Fermi [16].

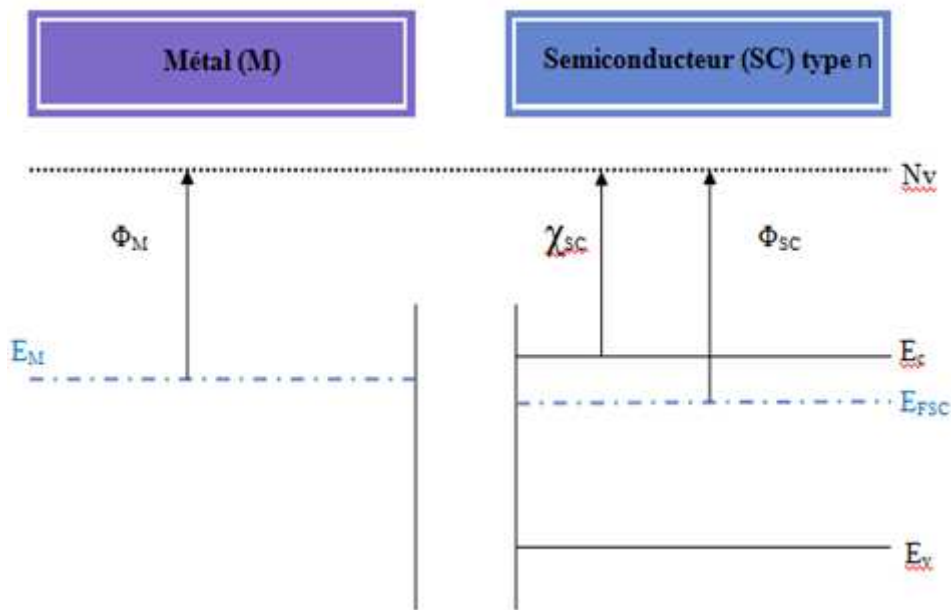


Figure I.11 : Structure métal/semiconducteur avant association.

Après la mise en contact, les électrons du matériau présentant le plus faible travail de sortie vont migrer vers le matériau présentant le plus grand travail de sortie, jusqu'à ce qu'un équilibre thermodynamique soit obtenu. Il se produit alors ce que l'on appelle l'ancrage des niveaux de Fermi à l'interface métal/semiconducteur (M-SC). La barrière de potentiel Φ_B observée est donnée par la relation suivante [17] :

$$\Phi_B = \Phi_M - \chi_{sc} \quad (I.1)$$

Ou χ_{sc} est l'affinité électronique du semiconducteur. C'est donc la différence entre les travaux de sortie du métal et du semiconducteur qui va conditionner la structure des bandes à l'interface et au voisinage de cette interface. Nous allons, aborder le cas du contact ohmique idéal dans lequel :

$$\Phi_M < \Phi_{SC} \quad (I.2)$$

B- Le contact ohmique dans le cas $\Phi_M < \Phi_{SC}$ (cas idéal)

Pour obtenir un contact ohmique sur un semiconducteur de type n, il est nécessaire d'avoir un métal ayant un travail de sortie inférieur à celui du semiconducteur, soit $\Phi_M < \Phi_{SC}$. Lors de l'association des deux matériaux dont les structures sont représentées sur la Figure I.11, l'alignement des niveaux de Fermi provoque alors la courbure des bandes d'énergie du semiconducteur à l'interface, comme le montre la figure I.12.

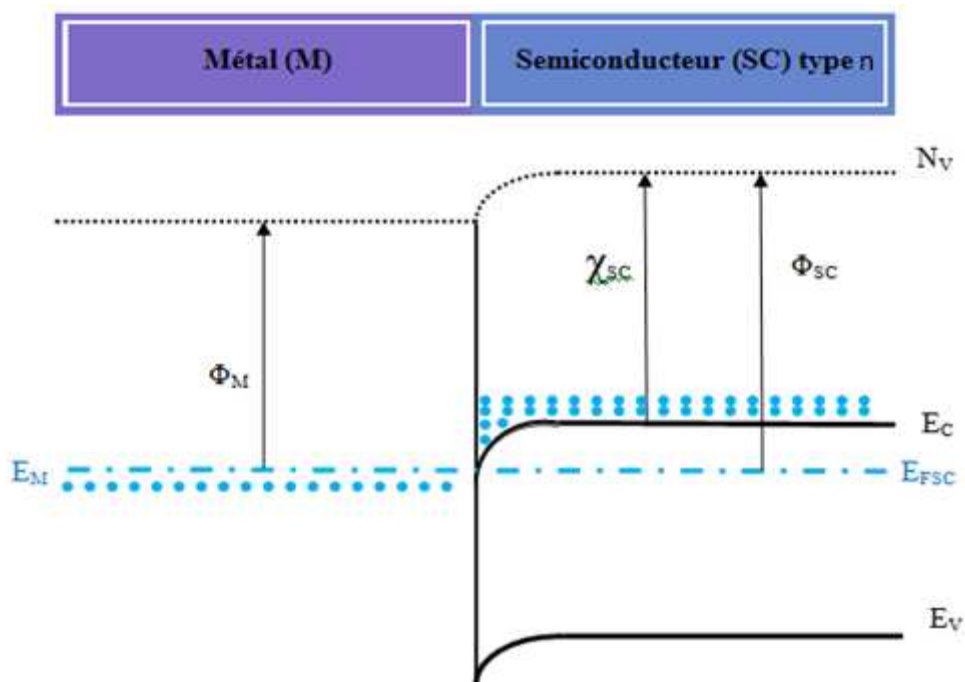


Figure I.12 : Structure métal/semiconducteur après association pour $\Phi_M < \Phi_{SC}$.

Le métal ayant un travail de sortie plus faible que celui du SC, les porteurs majoritaires vont migrer du métal vers le semiconducteur, il se produit alors une accumulation de porteurs

majoritaires à l'interface, ainsi il n'existe pas de zone de désertion à cette interface qui peut empêcher les porteurs de circuler dans la structure lorsque l'on appliquera un potentiel.

- **La résistance spécifique de contact**

La qualité d'un contact ohmique est généralement caractérisée par sa résistance spécifique (SCR pour Specific Contact Resistance), elle traduit l'homogénéité du contact.

$$\rho_c = \frac{\delta V}{\delta J} \quad \Omega \cdot \text{cm}^2 \quad (\text{I.3})$$

Où J est la densité de courant traversant la résistance et V la tension à ses bornes .

I.5.3.4. Encapsulation

Enfin, il ne faut pas oublier que la jonction n'est qu'une petite partie de la diode électroluminescente , et que l'encapsulation joue un rôle primordial pour l'efficacité et la fiabilité de cette dernière.

L'encapsulation (packaging), représente ce que l'on appelle le *Back End*, c'est-à-dire toutes les opérations à mener après réception de la puce électronique pour l'intégrer dans un système « utile ». Le *Back End* est défini par opposition au processus de fabrication et de caractérisation de la puce appelé *Front End* que nous avons exposé.

On utilise pour l'encapsulation des gels d'enrobage, les plus fréquemment utilisés, jusqu'au début des années 2000, étaient les résines époxy. Pendant plusieurs années, elles furent choisies pour leur indice de réfraction élevé (1,4), leur bonne stabilité thermique jusqu'à 120 °C et leur transmittance élevée (85 % à 90 %) dans la gamme 500 nm – 800 nm [18,19 ,20]. Cependant, de nombreux problèmes ont été soulignés avec l'essor des LEDs GaN et LEDs de puissance. Le jaunissement de ces résines a été observé lorsqu'elles sont soumises à un rayonnement dans le bleu et l'UV. Pour faire face à ces problèmes, les résines époxy ont été remplacées par des enrobages silicones. Ces huiles silicones ont été choisies pour leur transmittance élevée (> 95 %) dans le domaine du bleu, leur élasticité (< 0,5 GPa), leur excellente stabilité thermique (> 180 °C), leur indice de réfraction élevé (1,4 à 1,6). Il s'agit généralement de polymères à base de motifs méthyles et phényles comme le PDMS (Poly Diméthyle Siloxane) ou le PMPS (Poly Méthyle Phényle Siloxane) [21,22,23].

La figure 1.13 montre une comparaison entre la résine époxy et une huile silicone par un test de vieillissement en température de la transmittance en fonction de la longueur d'onde.

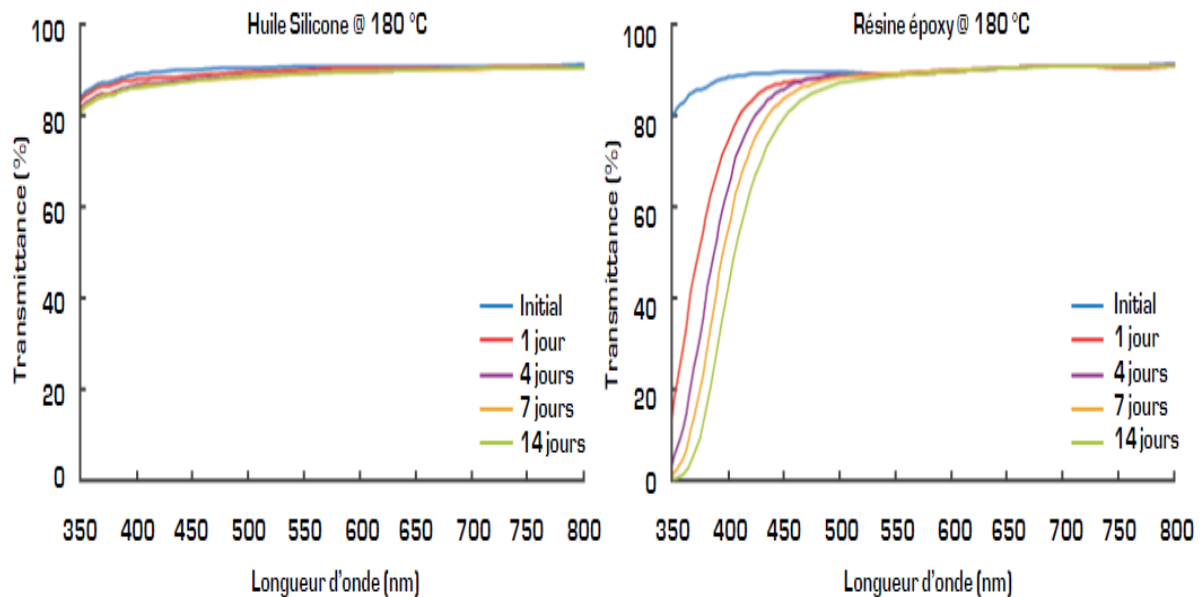


Figure 1.13 : Test de vieillissement à 180 °C de la transmittance en fonction de la longueur d'onde [20].

I.5.4. Propriétés des diodes électroluminescentes

I.5.4.1. Propriétés physiques

Les diodes électroluminescentes sont basées sur la physique des semiconducteurs, qui se différent en fonction de la couleur qu'on veut obtenir.

I.5.4.1.1. Gap (bande interdite)

La différence d'énergie entre le haut de la bande de valence et le bas de la bande de conduction s'appelle le gap ; c'est une quantité importante des matériaux semiconducteurs pour lesquels le gap conditionne un bon nombre de propriétés électroniques ou optiques.

La famille des matériaux semiconducteurs, peut être divisée en deux groupes : les matériaux à gap direct (le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction se situent à valeur voisine du vecteur d'onde k sur le diagramme $E(k)$), comme la plupart des composés issus des colonnes III et V du tableau périodique, et les matériaux à gap indirect,

(le maximum de bande de valence et le minimum de la bande de conduction se situe à des valeurs distinctes du vecteur d'onde k sur le diagramme $E(k)$).

Dans le cadre des applications en émetteur de lumière, on privilège les matériaux à gap direct ou les probabilités de recombinaisons radiatives des porteurs sont plus importantes [24].

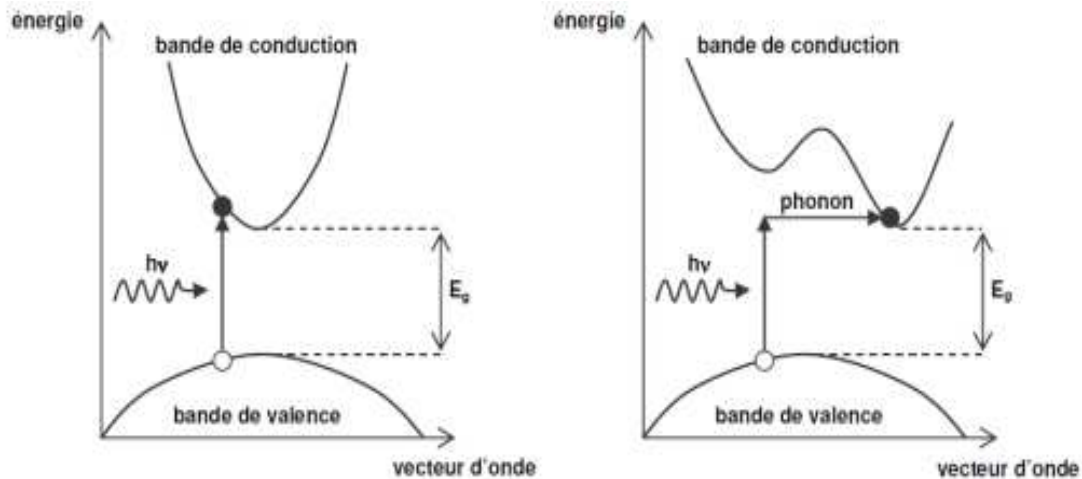


Figure I.14 : Structure de bande schématique d'un SC direct et indirecte [24].

I.5.4.1.2. Les Recombinaisons radiatives

Lorsqu'il y a recombinaison des paires électron-trou, il y a libération d'énergie. Cette énergie peut être libérée de façon radiative ou non-radiative. Dans le cas d'une recombinaison radiative, un photon est émis et la longueur d'onde, donc la couleur perçue, dépend de l'énergie de la bande interdite de semiconducteur utilisé, selon l'équation [25]:

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = E_g \quad (I.4)$$

Où h est la constante de Planck, ν est la fréquence, c est la vitesse de la lumière, λ est la longueur d'onde et E_g est l'énergie de la bande interdite.

Il existe deux types de recombinaisons radiatives provoquant l'émission de lumière à la jonction p-n des LEDs. Il y a d'abord la recombinaison spontanée, qui produit une lumière non cohérente ayant un spectre centré autour de l'énergie de la bande interdite. Le taux de recombinaison spontanée est donné par l'équation [26] :

$$R_{\text{spont}} = \beta (np - n_0p_0) \quad (I.5)$$

Où n et p sont les densités de porteurs dans la jonction, n_0 et p_0 sont les densités de porteurs à l'équilibre thermodynamique tandis que β est le coefficient de recombinaison spontanée.

C'est ce type de recombinaison qui domine dans les diodes électroluminescentes.

À la jonction p-n, il peut aussi y avoir des recombinaisons stimulées. Les photons émis dans ce cas sont alors cohérents et quasi-monochromatiques. Ce type de recombinaison est principalement présent dans les diodes laser et est très faible dans les diodes électroluminescentes.

I.5.4.1.3. Les Recombinaisons non radiatives

Il existe également à l'intérieur de la jonction deux autres types de recombinaisons qui sont dites non radiatives car l'énergie est émise sous forme de vibrations du réseau cristallin. Ces recombinaisons ne sont pas souhaitables dans une diode électroluminescente car elles diminuent l'intensité lumineuse émise pour un courant injecté donné.

Le premier type de recombinaison non radiative est appelé Shockley-Read-Hall. Elle est causée par la présence de défauts ou d'impuretés dans le cristal qui créent un état intermédiaire dans la région interdite du diagramme de bande du semiconducteur. Ces sites dans la matrice du cristal peuvent capter ou émettre des porteurs conduisant à des recombinaisons sans émission de photons

La recombinaison Auger est le deuxième type de recombinaison non radiative à la jonction du semiconducteur. Elle est particulièrement présente lorsque l'énergie de la bande interdite du semiconducteur est faible. La recombinaison Auger provient d'une capture par un électron ou un trou de l'énergie émise lors d'une recombinaison spontanée ou stimulée. Le porteur qui capte l'énergie se retrouve alors dans un état excité de la bande de conduction ou de valence avant de perdre son énergie par des interactions avec le réseau cristallin ou avec d'autres porteurs libres [14].

I.5.4.2. Propriétés électriques

Une diode électroluminescente est d'abord une jonction p-n. L'expression du courant en fonction de la tension appliquée dans une diode de largeur A est donnée par [18]:

$$I = eA \left[\sqrt{\frac{Dp}{\tau p}} N_A + \sqrt{\frac{Dn}{\tau n}} N_D \right] e^{\frac{e(V-V_D)}{kBT}} \quad (I.6)$$

où $D_{n,p}$ sont les constantes de diffusion des électrons-trous et $\tau_{n,p}$ sont les temps de vie de ces porteurs minoritaires. N_D et N_A sont respectivement les concentrations de donneurs et d'accepteurs. Le terme exponentiel fait apparaître une augmentation brusque du courant lorsque la tension V_D est atteinte, appelée tension de seuil. La valeur de V_D dépend essentiellement de l'énergie de la bande interdite du semiconducteur formant la diode. Dans son fonctionnement normal, une LED s'utilise en polarisation directe, c'est-à-dire lorsque le courant circule de l'anode vers la cathode.

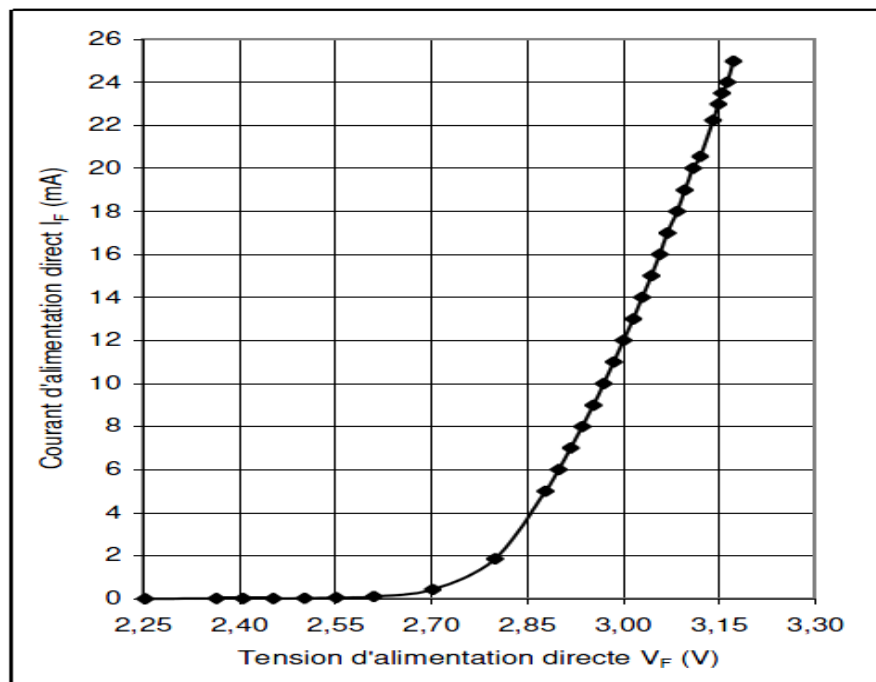


Figure I.15 : Caractéristique courant tension d'une LED [27].

I.5.4.2.1. Alimentation électrique des LEDs

Le terme anglais « driver » est souvent utilisé pour désigner l'alimentation de LED, cependant ce terme vient du monde de l'électronique tandis que dans le monde de l'éclairage, comme la Commission Internationale de l'Éclairage le recommande, il faut utiliser le terme « ballast ». La LED possède une dépendance courant-tension qui n'est pas linéaire mais exponentielle, ainsi une petite variation de tension engendre une grande variation de courant, et inversement une petite variation de courant engendre une petite variation de tension. Le flux étant quasi proportionnel au courant, donc il est préférable d'utiliser une alimentation en courant plutôt qu'en tension pour obtenir un flux stable. Néanmoins, beaucoup de circuits électroniques alimentant des LEDs fonctionnent en tension, c'est-à-dire que pour un courant

donné dans les LEDs, une résistance de régulation va être mise en série avec celles-ci et l'alimentation applique une tension aux bornes de l'ensemble. Cette méthode, peu chère, est peu efficace et surtout, ne protège en rien les LEDs contre un éventuel emballement thermique qui est responsable des défaillances prématurées des composants et peut même poser de sérieux problème d'incendie.

Il est possible de régler ce problème en utilisant un régulateur basé sur une résistance thermique positive. La résistance augmentant avec la chaleur, L'avantage de cette solution réside dans la simplicité du montage et dans sa robustesse, sachant que son rendement n'est pas optimal (autour de 75 %). Si nous cherchons à augmenter le rendement de l'alimentation il faut faire appel à des alimentations électroniques (sources de courant) que nous pouvons scinder en deux familles principales : les régulations linéaires et les régulations pulsées [5].

- **Les régulations linéaires**

Les régulateurs classiques ont des rendements faibles (70-75 %), mais en faisant appel à des systèmes à découpage, leur rendement peut atteindre 90 % (voire 95 % dans certains cas), ce qui les rend très efficaces.

- **Alimentation en courant pulsé PWM**

C'est une alimentation en courant pulsé, autrement nommée PWM (Pulse Width Modulation, moduler la largeur des impulsions de courant). Ce courant pulsé est constitué de créneaux d'amplitude fixe dont on fait varier le rapport cyclique R_c exprimé :

$$R_c = \tau / T \quad (I.7)$$

τ : la durée du pulse généré, T : la période du signal.

Le pilotage avec du PWM est surtout utilisé pour les LEDs de puissance. À l'aide du PWM on peut bien contrôler la puissance lumineuse des LEDs. En effet, le PWM peut être mis en place pour ;

- Fixer le flux lumineux d'une LED. Dans ce cas le rapport cyclique est gardé constant.
- L'effet de "Dimming" : faire varier la puissance lumineuse au cours du temps. Ici, on remarque que le rapport cyclique varie.

I.5.4.3. Propriétés optiques

I.5.4.3.1. Directivité du faisceau lumineux

Alors qu'une ampoule à incandescence classique émet dans presque tout l'espace et de façon très homogène, le faisceau d'une LED classique est beaucoup plus directif (angle d'émission de 10, 20, 30° environ). Les nouvelles LED à forte puissance possèdent des faisceaux moins directifs émettent dans des cônes d'émission d'environ 110 - 140°. On rencontre deux catégories de LED suivant la direction d'émission :

- Les LEDs à rayonnement normal, pour lesquelles l'émission se fait dans la direction perpendiculaire au plan de la jonction.
- Les LEDs à rayonnement latéral pour lesquelles l'émission se fait dans un plan parallèle à celui de la jonction [25].

I.5.4.3.1. Le binning

La matière de la puce de la LED détermine la longueur d'onde et donc la couleur. Toutefois, une variation minime des conditions de fabrication peut modifier la teinte perçue. Ces différences viennent du fait qu'il est impossible de contrôler avec précision tous les paramètres de production, comme la température du substrat, les variations au niveau atomique ou le mélange des gaz. Pour cela, un procédé de sélection est appliqué après la fabrication : on parle de BINNING (ou variation de puce à puce). Durant ce procédé, les LEDs sont regroupées en fonction de leurs propriétés communes comme le flux lumineux, le comportement électrique ou la teinte. Chaque groupe reçoit un code BIN.

On peut dire que le code BIN est la palette des couleurs des LEDs tout comme la palette RAL en peinture. La sécurité maximum que peut offrir un fabricant est l'utilisation d'un BIN unique dans tous ses modules LEDs [28].

I.5.4.3.2. Couleur de la lumière émise

La première diode électroluminescente commercialisée était rouge. Aujourd'hui, les LEDs peuvent produire toutes les couleurs, ou presque. Certaines émettent même dans l'infrarouge ou l'ultraviolet. Néanmoins, toute diode lumineuse est par nature, monochromatique et son efficacité de conversion dépend de la longueur d'onde d'émission.

Le tableau qui suit donne la tension de seuil et la longueur d'onde de la lumière émise en fonction du semiconducteur utilisé. Plus le saut d'énergie nécessaire à rendre la diode passante est élevé, et donc la tension de seuil est élevée, plus la longueur d'onde de la lumière émise par le semiconducteur est courte.

Zone du spectre électromagnétique	Longueur d'onde (nm)	Tension directe V_F	Semiconducteur utilisés
Infrarouge	$\lambda > 780$	$V_F < 2.5$	Arséniure d'aluminium de gallium (AlGaAs) Arséniure de gallium (GaAs)
Rouge	$610 < \lambda < 780$	$1.5 < V_F < 3$	Phosphore d'aluminium indium gallium (AlGaInP) Arséniure d'aluminium de gallium (AlGaAs) Arséniure phosphore de gallium (GaAsP)
Orange	$590 < \lambda < 610$	$2 < V_F < 2.5$	Arséniure phosphore de gallium (GaAsP) Phosphore de gallium (GaP) Phosphore d'aluminium indium gallium (AlGaInP)
Jaune	$570 < \lambda < 590$	$1.5 < V_F < 3$	Phosphore d'aluminium indium gallium (AlGaInP) Arséniure phosphore de gallium (GaAsP) Phosphore de gallium (GaP)
Vert	$500 < \lambda < 570$	$1.5 < V_F < 3$	Nitride de gallium indium (InGaN) Phosphore de gallium (GaP) Phosphore d'aluminium indium gallium (AlGaInP)
Bleu	$450 < \lambda < 500$	$2.5 < V_F < 4$	Nitride de gallium indium (InGaN) Séléniure de zinc (ZnSe)
Violet	$380 < \lambda < 450$	$3 < V_F < 5$	Nitride de gallium indium (InGaN) Nitride gallium (GaN)
Ultraviolet	$\lambda < 380$	$3 < V_F < 5$	Nitride de gallium indium (InGaN) Nitride gallium aluminium (AlGaN)
Blanc	$380 < \lambda < 780$	$3 < V_F < 5$	Idem que le bleu ou (l'ultraviolet)

Tableau I.3 : Différents semiconducteurs utilisés en fonction de la couleur de la lumière [12].

I.6. Les Diodes électroluminescentes blanches

I.6.1. Les Méthodes d'obtention de la lumière blanche

Il n'existe pas de semiconducteur permettant à lui seul d'émettre de la lumière blanche, donc le spectre d'une LED blanche n'est pas une radiation monochromatique comme les autres LEDs mais il est composé d'un mélange de différente longueur d'ondes.

I.6.1.1. Méthode1 : synthèse RGB

C'est la première méthode utiliser, elle consiste à mélanger les trois couleurs primaire : rouge, vert et bleu. La synthèse de ces dernières mène à la production de la lumière blanche dont la teinte et la température de couleur dépendent de la proportion de chacune des 3 composantes. Or l'obtention de ces proportions s'avère délicat pour avoir un meilleur blanc proche de la lumière du jour. Il est courant d'utiliser plus de trois sources. Ceci permet de pouvoir obtenir plus de nuances de couleurs ou encore d'être plus précis sur la couleur obtenue. On peut alors adjoindre du cyan, de l'ambre ou du rouge orangé [29].

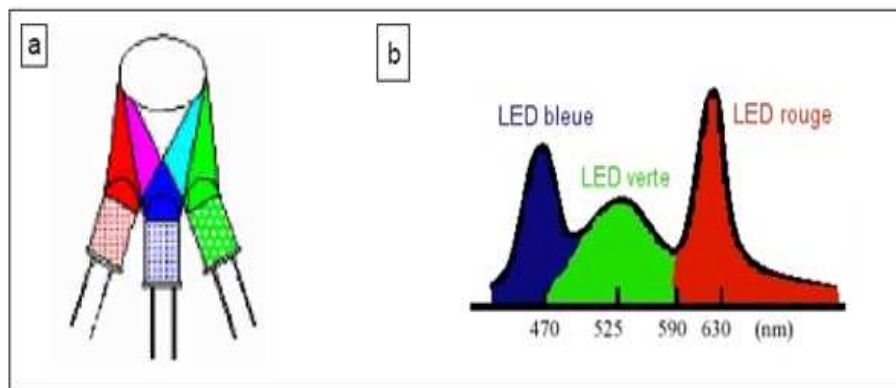


Figure I.16 : Méthode des trois couleurs RGB [29].

I.6.1.2. Méthode 2 : LED bleue + phosphore jaune

C'est la méthode la plus répandue pour la fabrication de LED blanche à haute intensité, elle consiste à combiner une diode émettant une longueur d'onde courte avec un luminophore émettant une longueur d'onde complémentaire plus longue. Cette technique repose sur le principe suivant : si deux photons de longueurs d'ondes complémentaires (λ courte et λ longue) atteignant simultanément la rétine produisent sur l'œil humain une sensation de lumière blanche. Bien qu'en théorie on puisse utiliser une infinité de combinaisons, la mise en œuvre de ce principe est réalisée par l'utilisation d'une LED bleue généralement en nitrure de gallium-indium (InGaN) recouverte d'une couches de phosphore YAG (yttrium aluminium garnet) qui a comme formule $(Y_{1-a}Gd_a)_3(Al_{1-b}Ga_b)_5O_{12}$ dopé avec de

Cérium . Au contact du phosphore, une partie de la radiation bleue (λ courte) est convertie en radiations de plus longue longueur d'onde (λ longue) jaune. Elle permet ainsi d'obtenir des LEDs blanches d'une température de couleur de l'ordre de 5500K [30].

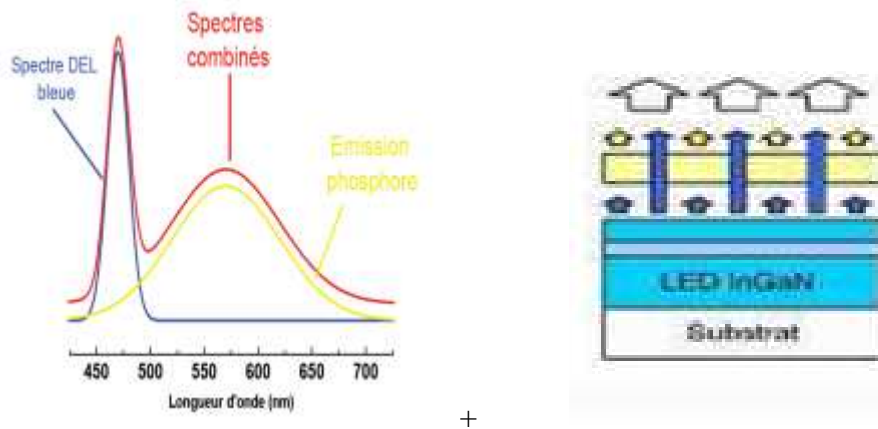


Figure I.17 : Méthode LED bleue + phosphore jaune [31].

I.6.1.3. Méthode 3 : LED ultra violet + phosphores

Elle consiste à utiliser une diode produisant une longueur d'onde courte (dans ultraviolet proche ou dans le violet) couplé à un ou plusieurs phosphores qui transforme la lumière UV en visible. Cette même technique est utilisée aujourd'hui par les lampes fluorescentes. Elle présente l'avantage de pouvoir créer de la lumière blanche au spectre complet de très bonne qualité (bon indice de rendu de couleur) le développement des diodes UV efficaces avec une longue durée de vie et une puissance suffisante représente un défi important. Cette méthode permettra de mettre sur le marché des LEDs blanches sans lumière bleue, la teinte de lumière blanche et l'indice de rendu de couleur dépendent fortement du phosphore utilisé.

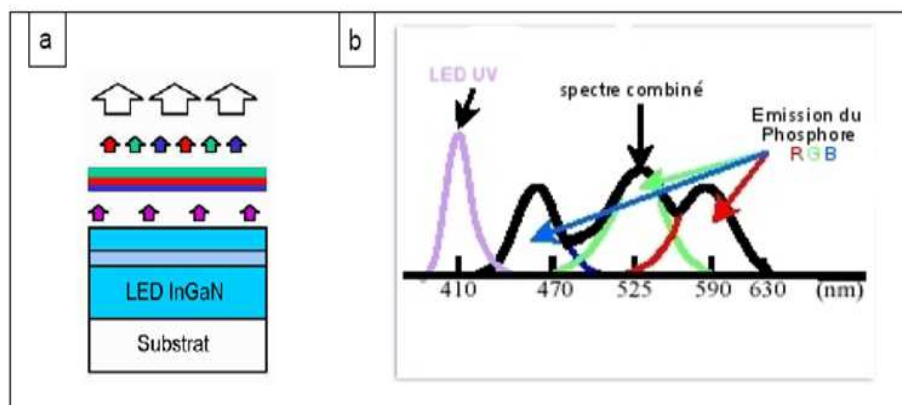


Figure I.18 : LED ultra violet multi phosphore [29]

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

Tableau I.4 : Avantages et inconvénients des différentes méthodes d'obtention de la lumière blanche [5].

I.6.1.4. Diodes électroluminescentes organiques (OLEDs)

La lumière blanche peut aussi être obtenue à partir de composants organiques, tels que les polymères. Une diode électroluminescente organique est constituée d'un film de polymère luminescent d'environ 100 nm d'épaisseur inséré entre deux électrodes de natures chimiques différentes. L'anode injecte des trous et la cathode des électrons. Ces charges migrent alors au sein du matériau polymère pour se recombiner et donner lieu à une émission lumineuse. L'une de ces deux électrodes doit être transparente pour laisser passer la lumière émise. En général, on utilise une anode en oxyde d'indium et d'étain (ITO pour *Indium Tin Oxide*) qui est un matériau conducteur, transparent [32].

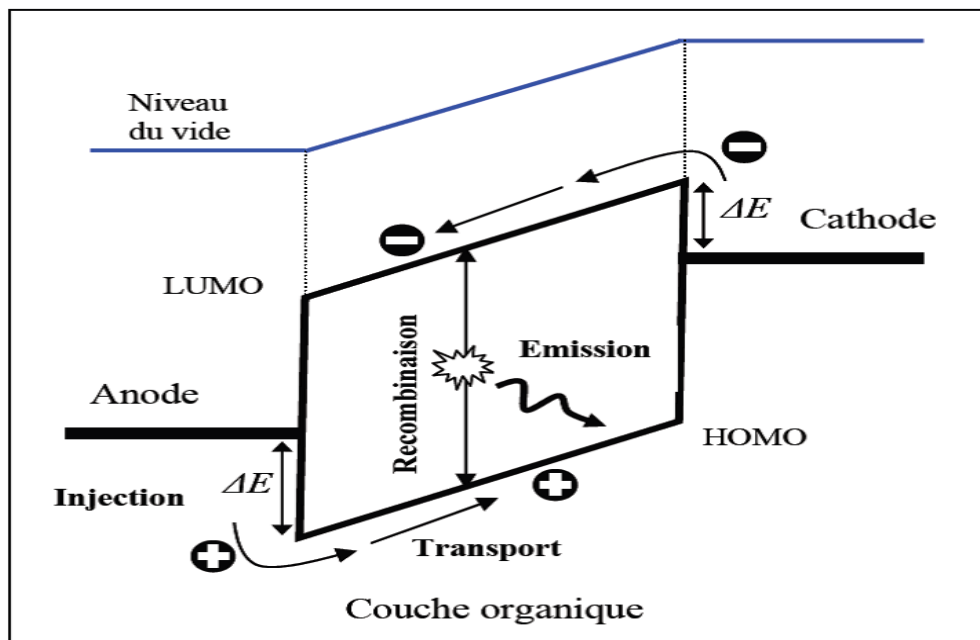


Figure I.19 : Schéma de principe d'une OLED [33].

- Le niveau de l'orbitale occupée de plus grande énergie notée HOMO (pour « Highest Occupied Molecular Orbital »).
- Le niveau de l'orbitale inoccupée de plus basse énergie notée LUMO (pour « Lowest Unoccupied Molecular Orbital »).

A- On obtient une lumière blanche à partir de composés organiques émettant dans le bleu, le vert et le rouge. La combinaison de ces trois composés donne une lumière blanche d'une efficacité lumineuse de seulement 0,5-0,6 lm/W [34,35].

B- Une autre technique pour réaliser du blanc pour l'éclairage consiste à utiliser la méthode traditionnelle utilisée pour les LEDs inorganique. Dans cette technique, deux OLEDs d'émission bleue permettent d'exciter des luminophores rouge et vert qui émettent alors à leur tour une lumière rouge et verte respectivement, et une troisième OLED bleue sans luminophore donne une lumière bleue complétant les trois couleurs primaires formant le blanc [36, 37].

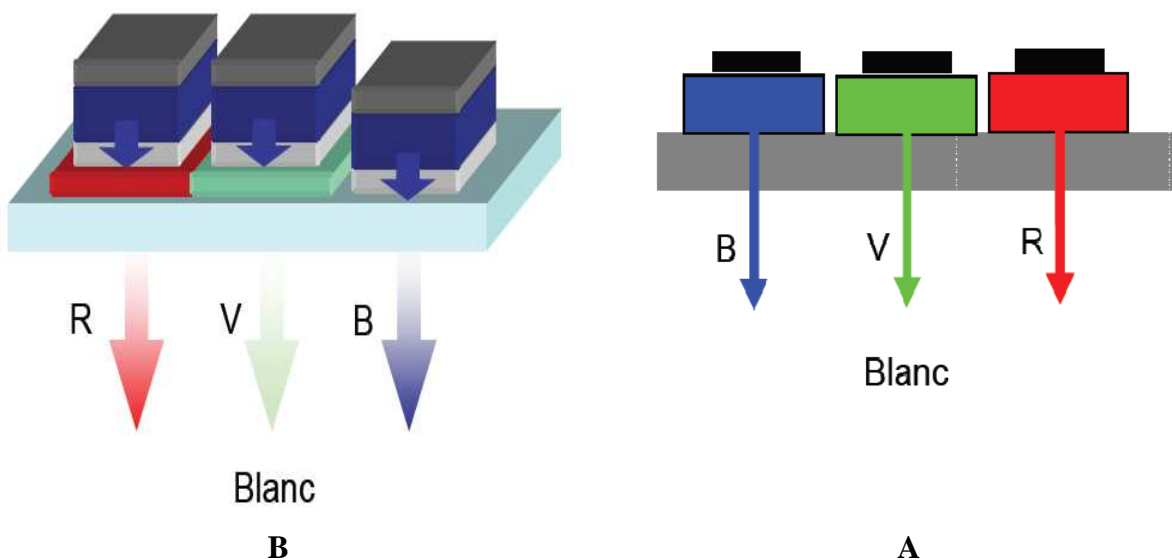


Figure I.20 : Méthodes d'obtention de la lumière blanche par les OLEDs [33].

I.7. Extraction de la lumière émise

Une des difficultés des LEDs est de parvenir à extraire à l'air libre le maximum de photons émis au sein du semiconducteur. En effet, dans un semiconducteur d'indice de réfraction n , la lumière est totalement réfléchi à l'interface semiconducteur - air si l'angle d'émission dépasse une valeur critique θ_c , donnée par la loi de Snell-Descartes [25]:

$$\theta_c = \arcsin \left(\frac{1}{n} \right) \quad (\text{I.8})$$

Ainsi, seule la lumière se trouvant à l'intérieur du cône défini par l'angle θ_c , appelé cône d'extraction, peut être extraite dans l'air. Une émission isotrope donne alors un rendement d'extraction :

$$\theta_{\text{extract}} = \frac{1}{2} (1 - \cos \theta_c) \quad (\text{I.9})$$

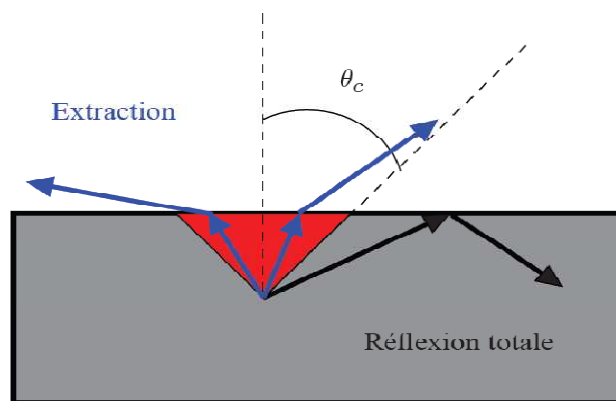


Figure I.21 : Principe d'extraction de la lumière émise [38].

Plusieurs méthodes ont été élaboré afin d'améliorer le rendement d'extraction :

- La principale méthode pour améliorer le rendement d'extraction consiste à placer la puce LED sous un dôme en époxy (on utilise aussi de la silicone). Grâce à la géométrie du dôme, les photons se présentent sous un angle par rapport à la normale de la surface, inférieur à l'angle critique, et ils sont donc transmis dans l'air. D'autre part, l'indice de l'époxy ($\approx 1,6$), donc l'angle critique à l'interface semiconducteur/époxy est plus grand qu'à l'interface semiconducteur/air [39].

- Pour pallier à cette faible extraction, une autre technique a été mise en place : il est possible de créer des LEDs dont la géométrie permet d'augmenter l'extraction des photons par réflexions multiples sur les faces. Une des formes géométriques qui donne d'excellents rendements d'extraction est la pyramide tronquée inversée. La figure I.22.A montre la photo d'une telle LED et la figure I.22.B montre le parcours des photons. D'autres formes de diodes seraient aussi performantes mais beaucoup trop coûteuses à réaliser. Notons que pour avoir le maximum d'extraction, la forme idéale serait une sphère mais cela est difficile à obtenir [40].

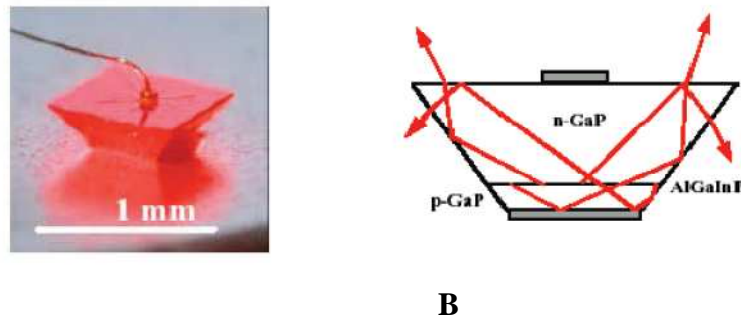


Figure I.22 : LED en forme de pyramide tronquée inversée [40].

- La texturation de la surface de la LED à l'échelle microscopique pour briser la conservation de l'angle à la réflexion.
- Une couche métallique en face arrière pour réfléchir vers le haut la lumière émise vers le bas.
- **Configuration flip-chip**

Une des premières innovations pour augmenter le rendement d'extraction des LEDs blanches est l'utilisation de la configuration « flip-chip ». L'efficacité de ce type de LED est supérieure à celle en configuration standard. La figure I.23 montre une LED en configuration « flip-chip », cette dernière est composée de la même zone active qu'une LED standard, seule la configuration change. Un contact de type p très épais et hautement réfléchissant est déposé sur le dessus de la LED, obligeant les photons à sortir par le saphir qui est transparent dans le visible. La LED est alors retournée pour que l'émission ait lieu vers le haut. Le tout est monté sur un support en silicium dans lequel est inclus un circuit de protection de décharges électrostatiques.

La configuration « flip-chip » permet d'augmenter par un facteur 2 l'efficacité d'extraction des photons par rapport à un procédé conventionnel. Cela permet aussi d'améliorer la dissipation de la chaleur [7].

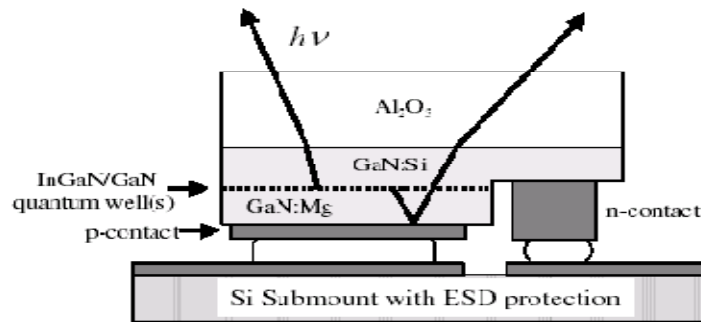


Figure I.23: LED en configuration « flip-chip » [8].

I.8. Les paramètres affectant l'efficacité des LEDs

L'efficacité des LEDs dépend de plusieurs paramètres :

- La température de la jonction.
- Le courant qui traverse la jonction.
- La géométrie de la puce.

I.8.1. La température de la jonction

Le facteur le plus crucial est la température de la jonction, les performances des LEDs diminuant rapidement avec l'augmentation de la température, ce qui influe également sur d'autres paramètres comme le flux, le spectre, et la durée de vie. La température de jonction peut difficilement être mesurée directement, contrairement au courant. Par contre, pour une LED seule, sans mécanisme de refroidissement, elle peut être évaluée avec l'équation :

$$T_j = T_a + R_j \cdot I \cdot V_j \quad (\text{I.10})$$

où T_j est la température de jonction, T_a est la température ambiante, R_j est la résistance thermique de jonction, I est le courant et V_j est la tension de jonction pour un courant I [41].

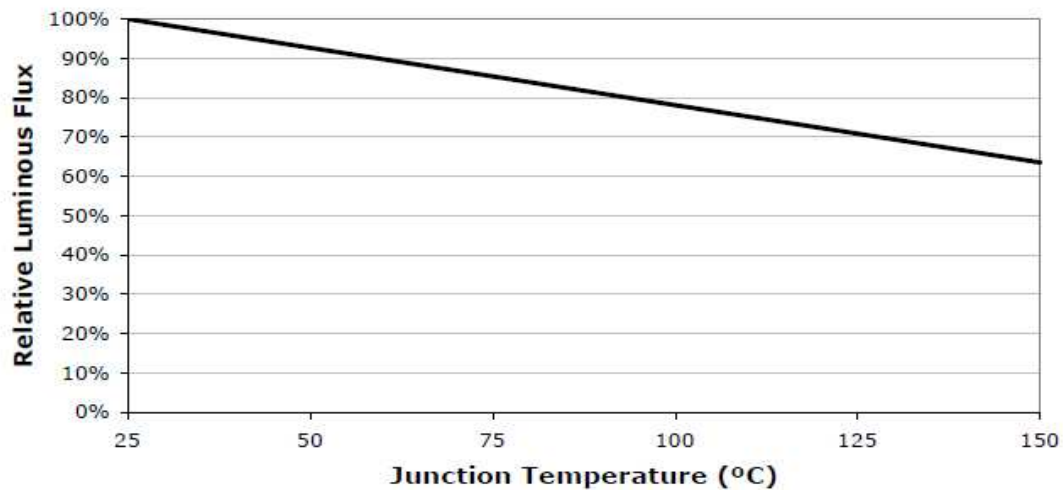


Figure I.24 : variation du flux lumineux en fonction de la température de la jonction [42].

L'augmentation de la température, s'accompagne parfois d'un décalage en longueur d'onde. Les intégrateurs doivent impérativement tenir compte de la chaleur dégagée par les LEDs et des qualités propres à ce composant à évacuer cette chaleur. Néanmoins, même avec une excellente gestion thermique des LEDs dans l'application finale, la température résultante au niveau de la jonction du semiconducteur est bien loin des 25°C .température référence de la plupart des fabricants.

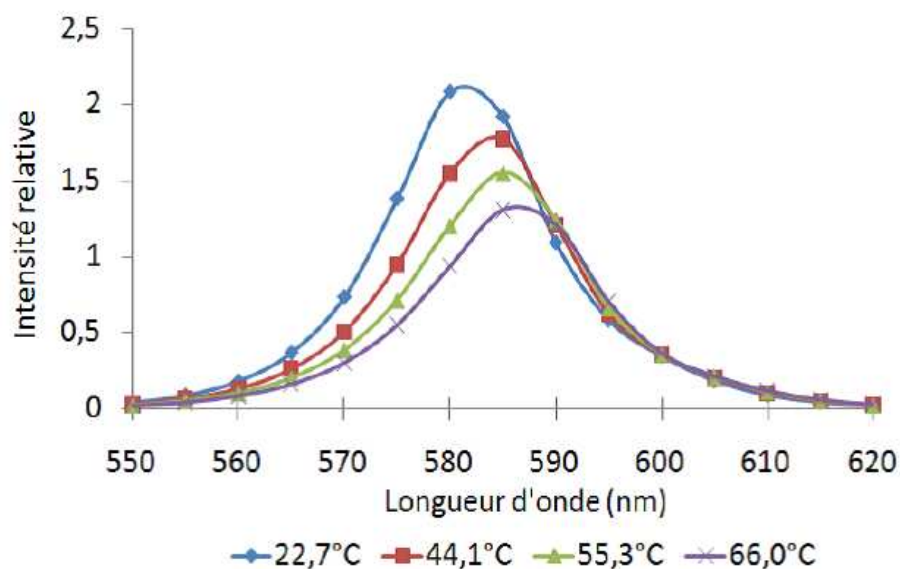


Figure I.25 : Décalage des longueurs d'onde en fonction de la température [43].

I.8.2. L'influence du courant d'alimentation

Le flux lumineux dépend directement du courant d'alimentation d'une LED. La relation flux (courant) est concave et non linéaire. Certaines LEDs acceptent des courants plus importants. Néanmoins, attention, du fait de la concavité de la relation flux (courant), une augmentation du courant n'est souvent pas la meilleure solution. La non linéarité de la relation entre le flux et le courant entraîne une baisse de l'efficacité d'une LED lorsque le courant qui la parcourt augmente. L'efficacité lumineuse, exprimée en lumen par Watt, décroît avec l'augmentation du courant.

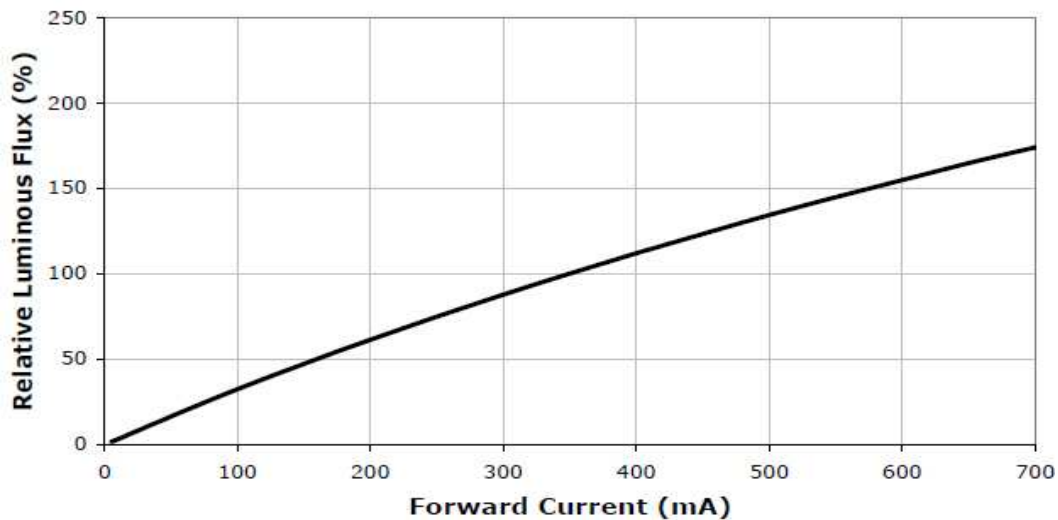


Figure I.26: Variation du flux lumineux de la LED en fonction du courant d'alimentation [42].

I.8.3. La géométrie de la puce

La recherche s'oriente aussi vers la fabrication de dispositifs pouvant fonctionner à fort courant afin d'émettre un maximum de lumens par dispositif. Il faut alors adapter la géométrie de la LED pour que la chaleur due au fort courant puisse être évacuée. Cette chaleur risque en effet de faire diminuer la durée de vie des dispositifs et aussi de changer les coordonnées de chromaticité du blanc émis. Une des possibilités pour que la LED supporte un plus fort courant est d'augmenter la taille des dispositifs. La plupart des LEDs puissantes font entre $300\mu\text{m}$ à 1mm^2 de côté. La géométrie de la puce influence directement l'extraction de la lumière et par conséquent a une incidence directe sur l'efficacité du système [8].

I.9. Les performances des LEDs

I.9.1. Le rendement lumineux (wall-plug efficiency)

C'est le rapport du flux lumineux émis par la puissance électrique consommée. Il s'exprime en lumens par Watt (lm/W). Ce paramètre permet de comparer l'efficacité de la conversion de l'énergie en lumière visible des diverses sources de lumière.

Selon les types de LED, l'efficacité lumineuse est variable. Généralement comprise entre 20 et 80 lm/W, elle dépasse parfois les 100 lm/W. Une grande disparité dans les performances est présente selon la couleur, la puissance ou encore la marque de la LED.

L'efficacité lumineuse des LEDs blanches de dernière génération est supérieure à celle des lampes à incandescence mais aussi à celle des lampes fluocompactes ou encore de certains modèles de lampes à décharge. Le spectre de la lumière émise est presque intégralement continu dans le domaine du visible [38].

Ce rendement peut être décomposé en plusieurs termes :

$$\eta_{gl} = \eta_{elec} \times \eta_{int} \times \eta_{ext} \times \eta_{pack} \times \eta_{conv} \quad (I.11)$$

- **Le rendement électrique η_{elec}** : représente la fraction d'électrons injectés qui atteignent l'hétérojonction. Une partie de l'énergie électrique peut en effet être perdue au niveau des contacts sous forme de chaleur par effet joule.
- **Le rendement quantique interne η_{int}** : caractérise l'efficacité de conversion des paires électron-trou (au niveau de la jonction) en photons par électroluminescence. Ce phénomène peut être limité par les recombinaisons non radiatives. Dans ce cas les porteurs de charge se recombinent en dissipant l'énergie sous forme de chaleur.
- **Le rendement d'extraction η_{ext}** : est le rapport entre le nombre de photons extraits hors de la LED et le nombre de photons émis.
- **Le rendement de package η_{pack}** : représente la qualité du packaging de la LED, la chaleur doit notamment être évacuée efficacement.
- **Le rendement de conversion η_{conv}** : est le rendement de transformation en lumière blanche et traduit l'efficacité des luminophores.

I.9.2. La durée de vie

La durée de vie d'une LED est un thème qui fait débat. Pour l'éclairage, il s'agit toutefois de savoir combien de temps les LEDs peuvent produire de la lumière utile de façon fiable. Pour pouvoir comparer convenablement les données fournies par les fabricants, il est nécessaire qu'ils utilisent tous la même définition de la durée de vie. Or, ce n'est absolument pas le cas. Aucune norme internationalement reconnue ne permet, actuellement, de répondre à cette problématique. Pour des applications d'éclairage général, il a été montré que les observateurs percevaient un changement de l'éclairage à partir d'une diminution d'environ 20-30% du niveau d'éclairage global. Plusieurs travaux proposent de définir un critère de durée de vie des LEDs à 70% du flux initial pour des applications d'éclairage général, dans des lieux publics par exemple. Pour des applications d'éclairage plus spécifiques, cette durée de vie peut être définie à 80% du flux initial. Pour des applications décoratives, il est proposé de définir la durée de vie à 50% du flux initial [3].

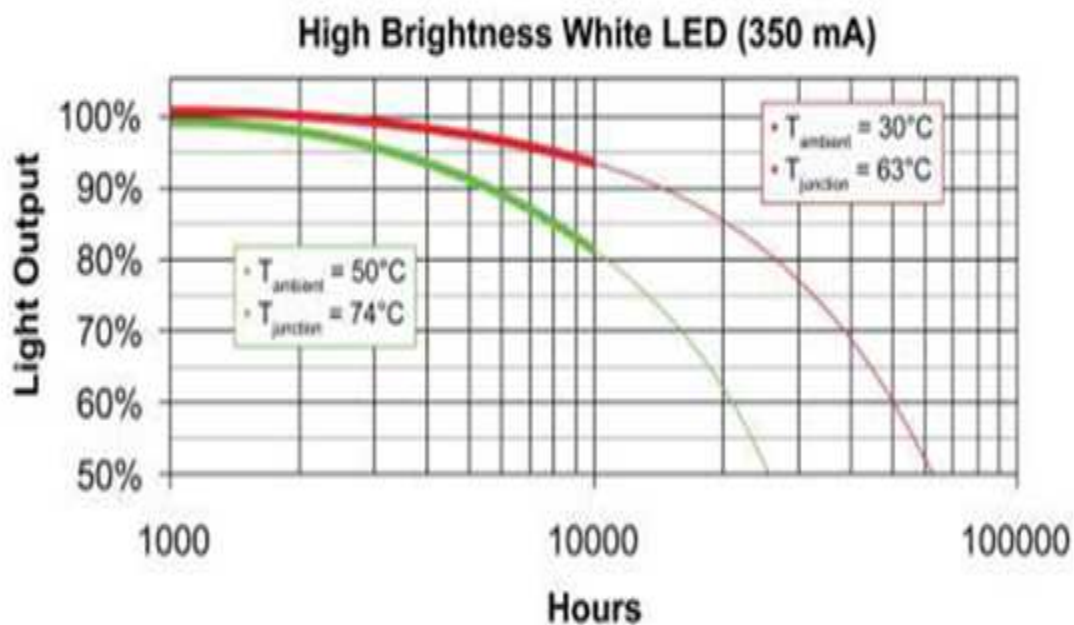


Figure 27 : La durée de vie des LEDs.

I.10. Comparaison des différentes sources de lumières

Le tableau I.5 permet de comparer l'efficacité lumineuse et la durée de vie des sources lumineuses les plus courantes. Les LEDs se démarquent facilement pour la durée de vie, leur durée de vie minimale étant plus grande que la durée de vie maximale des autres sources lumineuses. Par contre, selon ce tableau, leur efficacité lumineuse, surtout pour les LEDs ayant une couleur chaude, est plus basse que plusieurs autres technologies.

Sources lumineuses	Efficacité lumineuse (lm/w)	Durée de vie (heur)
Incandescente	10 - 18	750 - 2000
Halogène	15 - 20	3000 - 4000
Fluocompactes	35 - 60	8000 - 10000
Fluorescente	50 - 100	20000 - 30000
LED blanche couleur froide	60 - 92	35000 - 50000
LED blanche couleur chaude	27 - 54	35000 - 50000

Tableau I.5 : Caractéristiques de différentes sources de lumière [41].

I.11. La dégradation des LEDs

Comme toutes les autres sources électriques de lumière, une LED peut subir deux phénomènes affectant son émission de lumière : la rupture et la dégradation. La rupture, qui consiste à l'arrêt complet d'émission de lumière est rare et n'est pas un problème majeur pour les LEDs. En effet lorsqu'il y a rupture dans un circuit électrique, la rupture crée un court-circuit au lieu d'un circuit ouvert, comme c'est le cas des ampoules incandescentes. Il s'agit d'un avantage indéniable, car même si une LED brûle, le reste du circuit continue à fonctionner [41].

Par contre, la dégradation lumineuse, c'est-à-dire la perte d'efficacité avec le temps d'utilisation, est plus problématique. Afin de mieux comprendre cette dégradation, beaucoup de recherche se fait dans ce domaine. La plupart de ces études montrent que l'élévation de courant et de la température sont les principales causes de dégradation des LEDs blanches.

I.12. Les applications des LEDs

Le marché global des LEDs connaît un essor considérable. Il est dirigé par une demande croissante de LEDs de plus en plus fiables avec une augmentation des volumes de production pour les secteurs de l'éclairage à LEDs des écrans de télévisions (rétroéclairage TV), ordinateurs portables, téléphones mobiles et luminaires.

Quatre grands fabricants se répartissent dans le marché mondial des LEDs : Philips Lumileds (USA), Osram (USA et Allemagne), Nichia (Japon) et Seoul Semi-conducteur [8,38]. La figure I.28 indique la répartition du marché en 2010 selon les secteurs d'activités :

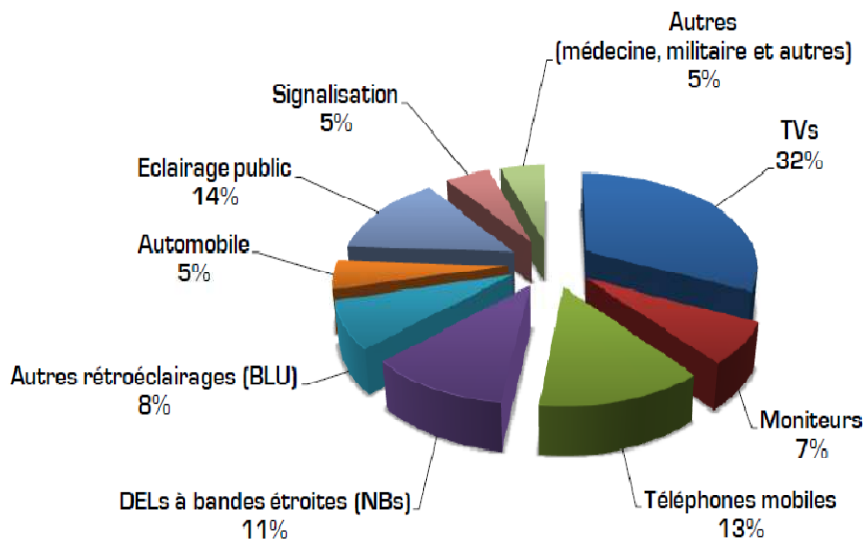


Figure I.28 : Les applications des LEDs [44].

- Les LEDs sont très utilisées pour les écrans géants que l'on trouve sur les plateaux TV ou dans les stades. Ces écrans à LED peuvent avoir des tailles impressionnantes allant du mètre à la centaine de mètres.
- Les panneaux de signalisation font aussi appel aux LEDs pour leur durée de vie et l'intensité de l'éclairage.
- Les phares de voiture : aujourd'hui on trouve les LEDs dans les feux arrière des voitures. Leur efficacité lumineuse est meilleure par rapport aux ampoules, la consommation est réduite, et le temps de réponse est aussi réduit.
- Dans les circuits électriques : la diode électroluminescente est aussi très utilisée car elle ne nécessite pas de socle, on peut la souder directement sur un circuit imprimé.

- Transmission de données : On utilise les LEDs dans les télécommandes, où on utilise la capacité à émettre des rayons infrarouges de la LED.
- Dans le secteur de la santé : La LED UV est utilisée pour la polymérisation des composites pour entre autre réparer les dents.
- Le secteur marin : L'éclairage à LED est très efficace sous l'eau, de plus les LEDs supportent mieux l'humidité.
- En biologie : Les LEDs sont utilisées dans le secteur de la recherche pour la croissance des végétaux où l'on simule un éclairage naturel pour des études de longues durées. Les LEDs émettant des ultra-violetes sont aussi intégrées dans des microscopes pour l'observation des cellules.

I.13. Les atouts et les limites des LEDs pour l'éclairage

I.13.1. Les avantages

- Ne comportent pas de pièces mobiles et sont beaucoup plus robustes et résistantes aux vibrations que les autres ampoules offertes sur le marché.
- Ont une durée de vie plus longue que les ampoules ordinaires. Certaines LED peuvent fonctionner jusqu'à 100 000 heures, selon la qualité de la diode et l'application.
- Produisent une lumière très visible et sont compactes, ce qui facilite leur utilisation dans diverses applications.
- Produisent de la lumière de couleur, ce qui élimine la nécessité d'installer un verre teinté pour obtenir la couleur souhaitée.
- Ne tombent habituellement pas brusquement en panne après la mise sous tension initiale, si une diode est défectueuse, le rendement lumineux global ne diminuera pas de façon marquée, ce qui renforce la fiabilité du produit.
- Peuvent offrir des économies supplémentaires grâce à la diminution des coûts d'entretien.
- La tension et le courant requis pour faire fonctionner des luminères LED sont tellement peu élevés que de petites piles ou des panneaux solaires peuvent être utilisés comme source d'alimentation.
- Absence de mercure ni d'autres matières toxiques, contaminants ou radioactives [38].

I.13.2. Les inconvénients

- L'intensité des LEDs a tendance à diminuer à mesure que la température autour de l'appareil d'éclairage augmente. Par ailleurs, l'intensité lumineuse diminue au fil du temps.
- La lumière est émise depuis un point très précis du matériau semi-conducteur. Cette lumière est très intense dans les LEDs blanches de haute puissance, L'observation directe par l'œil de la source dans l'axe d'émission principal peut conduire à l'éblouissement.
- L'énergie spectrale des LEDs blanches est répartie de manière non uniforme entre 380 et 780 nm avec deux composantes principales situées dans le bleu et dans le jaune pour ne prendre que la technologie la plus répandue.
- L'inconvénient majeur actuel de l'éclairage par LEDs par rapport aux sources d'éclairage traditionnelles reste le coût de fabrication par lumen, respectivement de 30 à 100 fois plus élevé que celui des tubes fluorescents et des lampes à incandescence.

I.14. Conclusion

Le remplacement des ampoules à incandescence par des LEDs dans le domaine de l'éclairage permettrait de réaliser des économies d'énergies importantes. Pour que la place de ces dispositifs soit majoritaire, les caractéristiques des LEDs doivent encore être améliorées et leur prix diminué. Dans ce chapitre nous avons représentées les points importants de cette technologie : principe de fonctionnement, Caractéristiques, étapes de fabrication, les performances, la problématique de l'extraction de lumière, ainsi que les différentes possibilités pour créer des LEDs blanches. La configuration la plus utilisée est le pompage d'un phosphore émettant dans le jaune par une LED émettant dans le bleu à base de semiconducteur III.V le InGaN dont nous détaillerons l'étude dans le chapitre II.

Chapitre II :

*Les diodes électroluminescentes blanches à base
d'InGaN*

II.1. Introduction

Les diodes électroluminescentes blanches ont pu voir le jour grâce au formidable essor des nouveaux matériaux notamment les semiconducteurs III-N. Effectivement, les propriétés physiques de ces derniers leur permettent de convertir de façon efficace l'énergie électrique en énergie lumineuse. Ces matériaux possèdent en général un gap direct relativement élevé capable de couvrir une grande partie du spectre visible et de l'UV [45].

L'intérêt croissant des semiconducteurs III-N se justifie par le fait que ces derniers sont robustes, possèdent une bonne conductivité thermique, et une large bande interdite directe. Parmi ces semiconducteurs, on trouve principalement, le nitrure de gallium (GaN) et le nitrure d'indium (InN) possédant respectivement un gap de 3.4 eV et 0.9 eV, ainsi que leur alliage ternaire le nitrure d'indium gallium (InGaN) atteint toutes les valeurs de gap entre 3.4 eV et 0.9 eV, il représente actuellement le matériau le plus prometteur pour l'élaboration des diodes électroluminescentes blanches.

Toutefois, en raison de nombreuses difficultés technologiques comme l'absence de substrat adapté en maille, la difficulté d'obtenir le dopage de type *p*, le développement des dispositifs à base des nitrures n'a pas progressé pendant plusieurs années, et c'est l'amélioration des techniques de croissance et l'avènement de la lumière bleue à base d'InGaN qui ont permis la réalisation des LEDs blanches de bonne qualité.

II.2. L'intérêt des nitrures d'éléments III en optoélectronique

La longueur d'onde émise des diodes électroluminescentes dépend de la largeur de la bande interdite du semiconducteur. Or dans le cas d'un alliage, celle-ci varie de façon continue en fonction de la composition. On peut donc choisir la longueur d'onde des LEDs lors de leur fabrication. La figure II.1 représente l'énergie de bande interdite (*le gap*) et le paramètre de maille des principaux semiconducteurs. La nature et l'énergie de bande interdite sont des données fondamentales en optoélectronique car les matériaux à *gap* direct ont une force d'oscillateur très importante et l'émission lumineuse se fait généralement à une énergie proche de celle du *gap*. On constate que les semiconducteurs nitrures ont une énergie de *gap* permettant de couvrir tous le spectre électromagnétique de proche infrarouge à l'ultraviolet. Les alliages $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ couvrent le domaine 0.9 eV – 3.4 eV ce qui en fait de ce dernier le matériau de choix pour les diodes électroluminescentes.

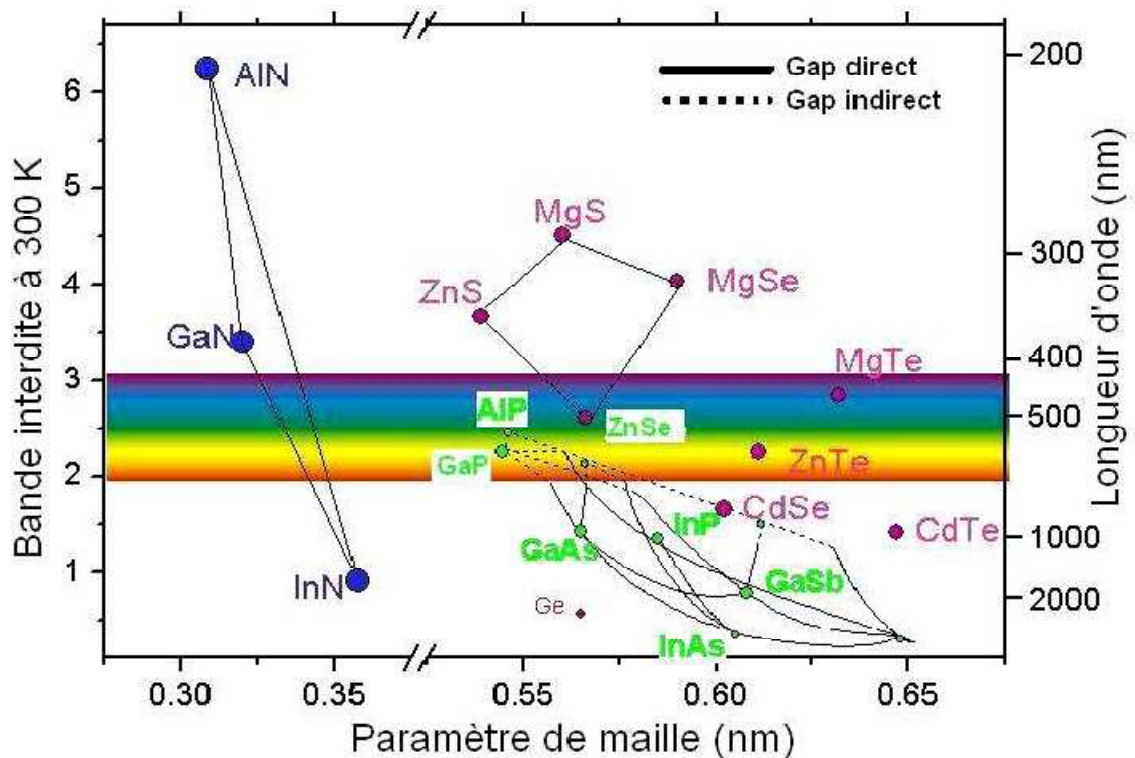


Figure II.1 : Énergie de bande interdite et paramètre de maille de divers semiconducteurs [46].

II.3. Les propriétés des nitrures

L'InGaN apparaît à l'heure actuelle comme le matériau le plus prometteur pour l'émission de la lumière visible. C'est un matériau semiconducteur 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.

Avant d'étudier l'InGaN, il convient d'étudier les propriétés essentielles de ces composants binaires qui sont l'InN et le GaN :

II.3.1. Propriétés cristallines

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 $\frac{5}{8}$ 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 quant-à 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 [47].

II.3.2. Propriétés électriques

II.3.2.1. La polarisation spontanée

L'absence de centre d'inversion dans la structure wurtzite et la forte ionicité de la liaison éléments III-N ont des conséquences majeures sur les propriétés physiques des nitrures. Dans leur état d'équilibre, ces matériaux possèdent une polarisation spontanée. Elle provient du fait que les barycentres des charges positives (les atomes de Ga, In, Al) et des charges négatives (les atomes d'azote) ne coïncident pas dans l'espace. Ainsi, il y a création d'un dipôle dans chaque maille. Ces dipôles s'ajoutent alors à travers la structure pour donner lieu à une polarisation macroscopique orientée suivant la direction de croissance c [0001].

Matériaux	GaN	InN
c/a	1.6259	1.6116
P_{sp} (C/m ²)	-0.029	-0.032

Tableau II.2 : Les valeurs de la polarisation spontanée de GaN et InN [49].

II.3.2.2. La polarisation piézoélectrique

Tous les composés III-V, étant non-centrosymétriques, sont piézoélectriques. En ce qui concerne les nitrures cette piézoélectricité est très importante car la liaison III-N est fortement polarisée, les électrons étant essentiellement localisés sur l'atome d'azote.

Toute contrainte exercée sur un solide engendre une déformation de ce solide et donc un changement de position des atomes les uns par rapport aux autres. Si ce solide est non centrosymétrique tel que le GaN, on observe une modification des moments dipolaires des liaisons Ga-N liée à la variation des distances inter atomiques. Ceci explique l'origine de la polarisation piézoélectrique qui varie en fonction de la contrainte exercée. Dans le cas des hétérostructures, les contraintes sont générées par le désaccord de maille existant entre les deux matériaux. La polarisation piézoélectrique pour des matériaux à structure wurtzite est donnée par [50] :

$$\mathbf{P}_{pz} = 2 \left[\frac{a(0) - a(m)}{a(m)} \right] * \left[\mathbf{e}_{31}(m) - \frac{e_{33}(m) c_{13}(m)}{c_{33}(m)} \right] \quad (\text{II.1})$$

Où : e_{31} et e_{33} sont les constantes piézoélectriques.

c_{13} et c_{33} sont les constantes élastiques.

$a(0)$ et $a(m)$ sont les constantes de maille latérale à l'équilibre et sous contrainte.

II.3.2.3. La mobilité

La mobilité est une caractéristique très importante du matériau, car elle traduit la capacité qu'ont les porteurs à se déplacer dans le matériau. C'est donc un facteur déterminant pour les dispositifs. Ceci est très important pour des domaines comme l'optoélectronique, ou les télécommunications. D'après la définition de la mobilité, le transport électronique dépend essentiellement de deux paramètres : la masse effective des électrons et la fréquence des interactions avec le réseau cristallin. Or, toute modification dans ce réseau, comme l'élévation de la température ou le dopage, va modifier la mobilité des porteurs notée généralement μ . Ces dépendances de la mobilité sont calculables à l'aide de la formule suivante [51] :

$$\mu = \mu_{\min} \left(\frac{T}{300} \right)^{\beta} + \frac{\mu_{\max} \left(\frac{T}{300} \right)^{\alpha} - \mu_{\min} \left(\frac{T}{300} \right)^{\beta}}{1 + \left(\frac{N_{\text{tot}}}{N_{\text{ref}}} \right)^{\gamma}} \quad (\text{II.2})$$

Où T est la température, N la concentration des porteurs, α , β et γ des paramètres propres à chaque semiconducteur. L'équation précédente nous permet de tracer l'évolution des mobilités en fonction de la concentration de porteurs pour des températures variant de 250K à 475K. Ces courbes sont représentées sur la figure II-3 :

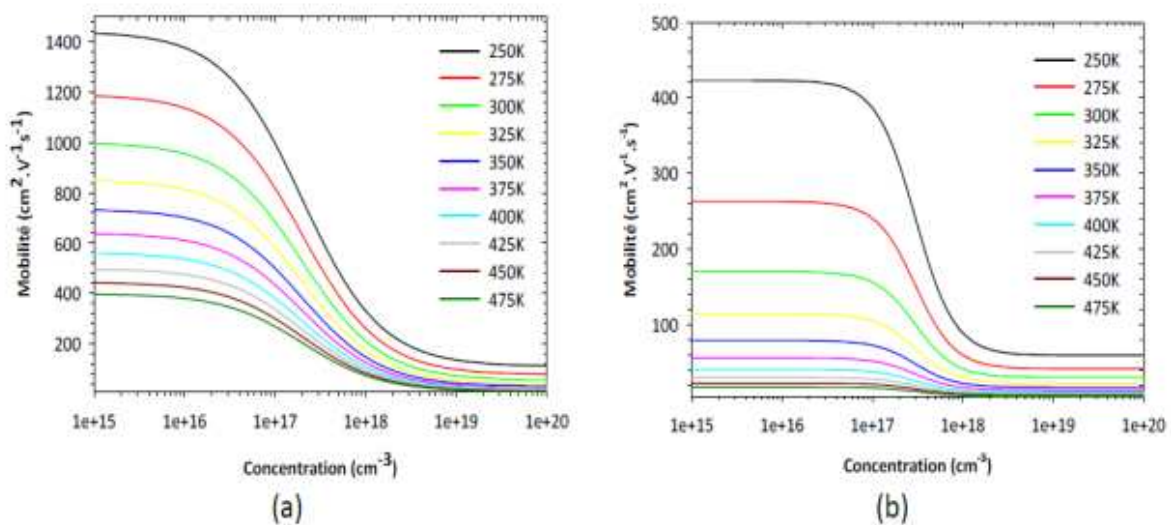


Figure II.3 : Courbes de mobilité des électrons (a) et des trous (b) en fonction de leur concentration [16].

On constate donc que plus le dopage du matériau est élevé, plus la mobilité va chuter, ce qui est le cas de tous les semiconducteurs. On constate également que l'impact de la température sur la mobilité des porteurs est important à faible concentration.

II.3.3. Propriétés thermiques

II.3.3.1. La conductivité thermique

La conductivité thermique en électronique de puissance où de fortes dissipations de chaleur sont nécessaires, représente la capacité du matériau à transférer une quantité de chaleur par unité de temps et par unité de surface sous un gradient de température. Idéalement, il faut que cette valeur soit la plus élevée possible pour les applications d'électronique de puissance, car la chaleur non dissipée va entraîner une élévation de la température du composant qui va se traduire par une diminution de la mobilité et donc des performances électriques des composants [16]. La résistance thermique (notée R_{th}) est inversement proportionnelle à la conductivité thermique :

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P} \quad (II.3)$$

Où ΔT est l'élévation la température en K, P est la puissance dissipée en W.

II.3.3.2. La dilatation thermique

La dilatation thermique est liée à la variation de densité d'un solide avec la température, les distances interatomiques se modifiant sous l'effet des vibrations. L'épitaxie d'hétérostructures composées de matériaux possédant des coefficients de dilatation différents peut engendrer des contraintes importantes au sein de l'hétérostructure qui modifient la structure de bandes.

Ainsi, il est nécessaire de connaître le coefficient de dilatation thermique non seulement lors de l'élaboration des couches hétéroépitaxiées mais aussi pour l'étude des propriétés optiques des semiconducteurs à différentes températures. Le coefficient de dilatation thermique est donné par [46]:

$$\alpha = \frac{1}{a} \frac{da}{dT} \quad (II.4)$$

Où a est le paramètre de maille du matériau.

II.3.3.3. La température de fusion

La température de fusion d'un corps représente la température à une pression donnée, à laquelle un élément pur ou un composé chimique passe de l'état solide à l'état liquide.

Les coefficients de dilatation thermique et de conductivité thermique ainsi que la température de fusion pour le nitrure de gallium et le nitrure d'indium sont répertoriés dans le tableau II.3 suivant :

	InN	GaN
Coefficient d'expansion thermique (10^{-6}K^{-1}) α_a	3.68	5.59
Coefficient d'expansion thermique (10^{-6}K^{-1}) α_c	2.56	3.17
Conductivité thermique $\text{W.cm}^{-1}\text{C}^{-1}$	0.45	1.3
Température de fusion (K)	1373	2773

Tableau II.3: Paramètres thermiques de l'InN du GaN [48].

II.3.4. Propriétés optiques

II.3.4.1. Le Gap

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

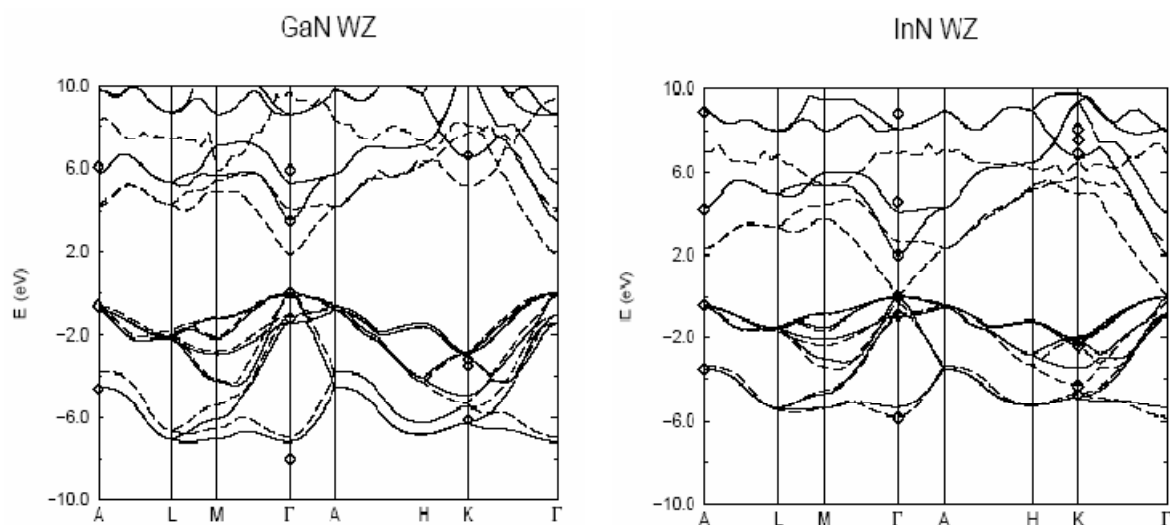


Figure II.4 : La structure de bandes de GaN et InN [52].

II.3.4.2. Variation de largeur de bande interdite avec la température

L'énergie de bande interdite varie avec la température: il a été observé expérimentalement une diminution de cette énergie lorsque la température augmente. Ceci est dû à deux phénomènes : la dilatation thermique qui modifie les distances interatomiques du réseau cristallin et l'interaction électron-phonon ; cette interaction étant l'élément prépondérant dans la modification de l'énergie de la bande interdite [53].

En effet, le gap du GaN diminue d'une valeur de l'ordre de 65 meV lorsque la température passe de 9K à 300K. L'énergie de bande interdite de l'InN n'est pas connue précisément. La valeur présentée est celle qui a été admise récemment (0.9eV).

Pour évaluer cette modification d'énergie on utilise la formule dite de Varshni permettant d'évaluer la variation de l'énergie de bande interdite en fonction de la température [54]:

$$E_G(T) = E_G(0K) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (\text{II.5})$$

Où α et β sont des constantes pour un cristal donné, Voici un tableau contenant les valeurs des paramètres de l'équation de Varshni pour le GaN et l'InN :

	$E_G(0)(\text{eV})$	$\alpha (\text{ meV/K })$	B (K)	$\Delta E_{300} (\text{eV})$
GaN	3.507	0.909	830	72.10^{-3}
InN	0.9	0.245	624	$49.9.10^{-3}$

Tableau II.4 : Paramètres de l'équation de Varshni [55].

II.4. Les techniques d'élaboration des nitrures

Pour fabriquer des dispositifs électroniques et optoélectroniques à partir des nitrures, l'élaboration de couches minces de bonne qualité est nécessaire. L'épitaxie des nitrures se fait en général par des techniques d'élaboration bien précises telles que : l'épitaxie en phase vapeur à partir d'hydrure (EPVH), l'épitaxie par jets moléculaires (EJM), épitaxie en phase vapeur organométalliques (EPVOM) et croissance par reprise d'épitaxie latérale (ELO).

II.4.1. Epitaxie en phase vapeur à partir d'hydrure (EPVH)

La technique généralement utilisée pour fabriquer les substrats de GaN destinés à l'homoépitaxie (de GaN) ou certaines couches tampons, est l'HVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy) soit l'épitaxie en phase vapeur aux hydrures. Cette technique, la plus ancienne, fait intervenir de l'ammoniac (NH_3) comme précurseur de l'élément V et pour l'élément III (Ga) un chlorure le GaCl, obtenu par passage du gallium liquide dans de l'acide chlorhydrique. Le GaCl réagit à température ambiante avec l'ammoniac pour former du GaN qui va se condenser et se déposer sur l'échantillon porté à 1100°C [53].

Cette technique de croissance plutôt rapide comparée à d'autres, est parfaitement adaptée à l'élaboration de pseudo-substrats de GaN pour l'homo-épitaxie car elle permet d'atteindre des vitesses de croissance de l'ordre de $100\mu\text{m/h}$. Il en résulte une qualité de matériau moins bonne. Par conséquent, d'autres méthodes sont utilisées.

II.4.2. Epitaxie par jets moléculaires (EJM)

La technique MBE (Molecular Beam Epitaxy) ou épitaxie par jets moléculaires est une technique de croissance sous ultravide. Elle utilise l'évaporation sous vide de matériaux sources solides portés à haute température, les quels se déposent sur un substrat à température plus faible ($700\text{-}750^\circ\text{C}$) que celles des sources et qui est mis en rotation afin de garantir l'homogénéité des couches déposées.

L'EJM présente l'avantage de pouvoir travailler avec des vitesses de croissance lentes ($0,5\text{-}2\ \mu\text{m/heure}$) afin de laisser le temps aux atomes arrivant à la surface de migrer par diffusion vers les sites cristallographiques. Ainsi, elle est particulièrement adaptée pour l'élaboration de structures multicouches constituées de couches extrêmement minces.

La figure II.5 montre le schéma synoptique général d'un bâti d'EJM destiné à la croissance de GaN. De même que pour la croissance de la plupart des autres semiconducteurs, les

sources de Gallium, d'aluminium et d'indium sont solides. La source d'azote utilisé est soit NH_3 , soit N_2 , auquel cas une source plasma RF (Radio Fréquence) ou ECR (Résonance Electron – Cyclotron) est nécessaire pour dissocier les molécules d'azote très stables. L'EJM présente l'avantage de pouvoir ainsi contrôler parfaitement l'épaisseur déposée on utilisant une sonde RHEED (Reflexion High Energy Electron Diffraction) ou diffraction des électrons de haute énergie installée dans le bâti de dépôt qui va contrôler en temps réel la quantité d'éléments incorporés [56].

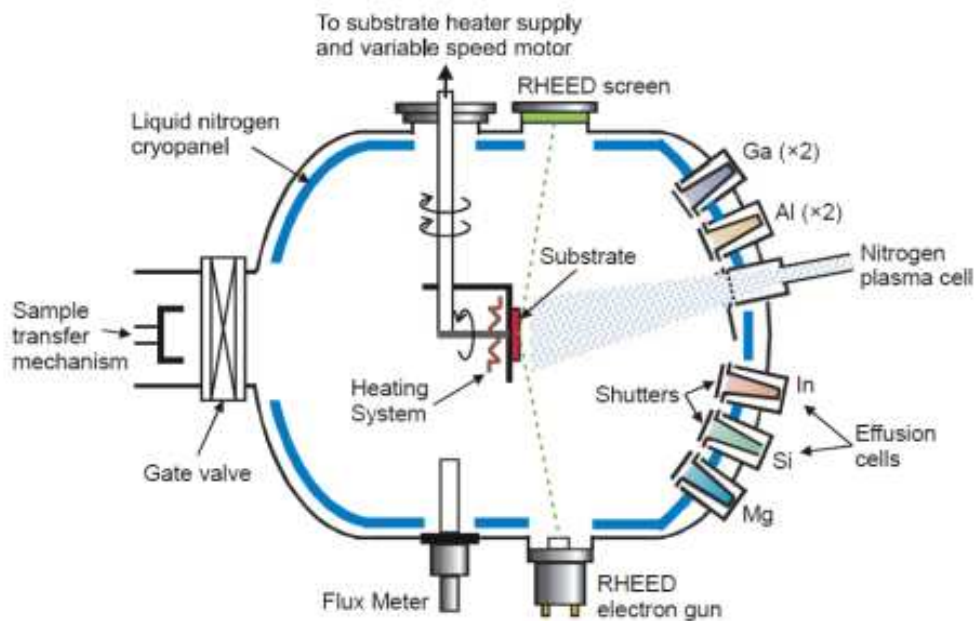


Figure II.5 : Schéma synoptique d'un bâti d'épitaxie par EJM [57].

II.4.3. Epitaxie en Phase Vapeur Organométalliques (EPVOM)

La croissance par EPVOM (MOCVD Metal Organic Chemical Vapor Deposition) résulte de la pyrolyse de composés organométalliques et d'hydrures transportés par un gaz vecteur au voisinage d'un substrat porté à haute température. L'EPVOM est la principale technique de croissance des nitrures III-V. Les vitesses de croissance sont de l'ordre de quelques $\mu\text{m/h}$. La croissance consiste en la décomposition simultanée d'organométalliques (le triéthylgallium (TEGa), triméthylaluminium (TMA), triméthylindium (TMI),

biscyclopentadiénylmagnésium (Cp_2Mg) etc . . .) et d'hydrures (NH_3 , SiH_4) qui sont transportés par un gaz vecteur (azote (N_2) et/ou hydrogène (H_2)). Les flux des sources utilisées sont stabilisés, ensuite mélangés juste avant leur introduction dans le réacteur à une seule entrée alors qu'ils se mélangent au niveau du substrat dans le cas d'un réacteur à deux entrées. L'épitaxie s'effectue en général sur un substrat Al_2O_3 placé sur un suscepteur en graphite [58].

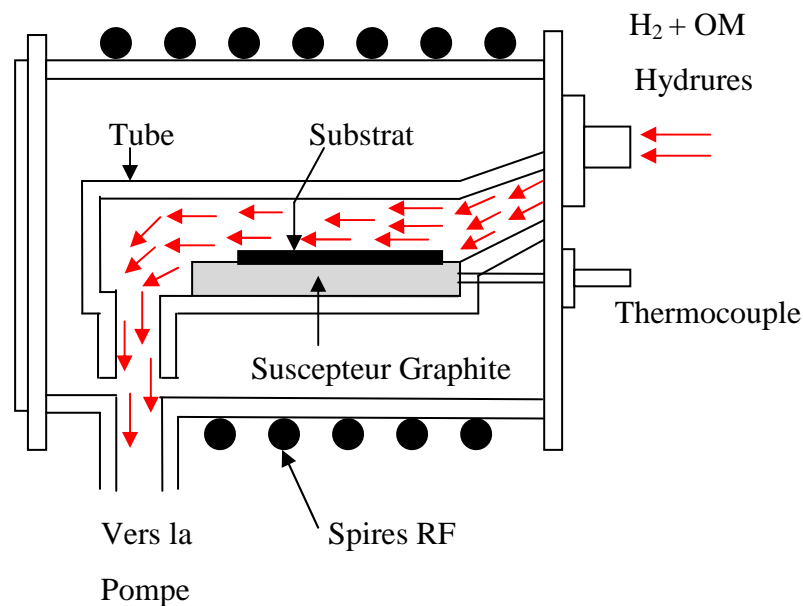


Figure II.6 : Schéma synoptique d'un bâti d'épitaxie par EPVOM [58].

II.4.4. Croissance par reprise d'épitaxie latérale (ELO)

La technique consiste à masquer partiellement le substrat par un matériau amorphe (usuellement SiO_2), puis à faire une reprise de croissance (EPVOM ou EPVH) par-dessus le masque en favorisant graduellement la direction de croissance latérale par le choix de conditions de dépôt adaptées (dans le cas de la croissance de GaN, une réduction du rapport V/III permet de passer d'un mode de croissance verticale à une croissance latérale). Les étapes de la croissance sont schématisées dans la figure II.7.

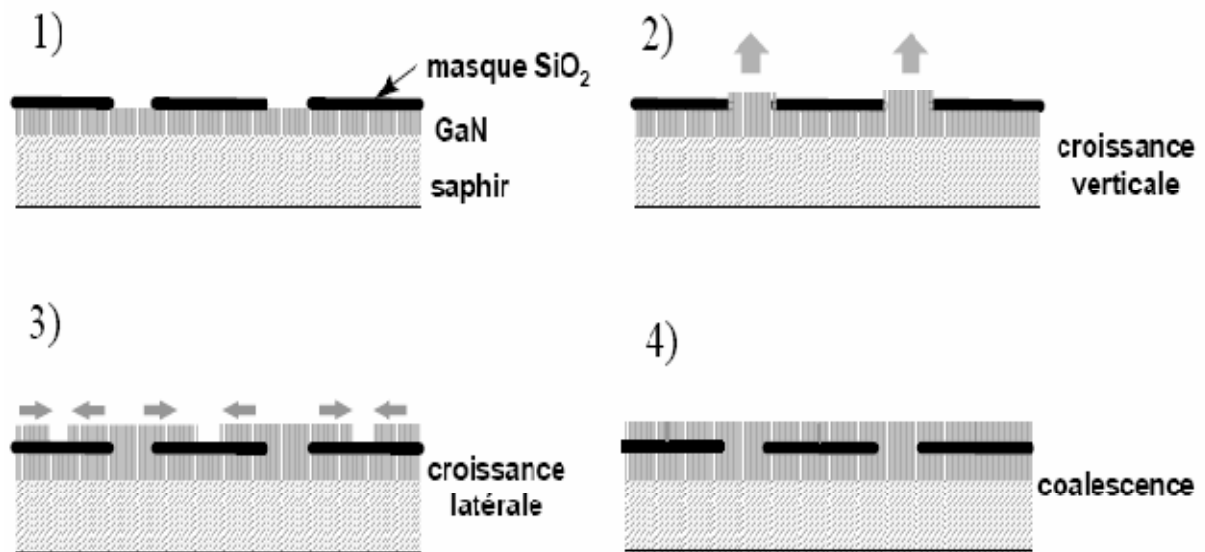


Figure II.7 : Principales étapes de la croissance par reprise d'épitaxie latérale [59].

Cette technique de dépôt s'est avérée particulièrement efficace pour améliorer la qualité du matériau. En effet, la majorité des dislocations se propageant perpendiculairement au substrat, elles sont stoppées par le masque. De plus, l'épitaxie latérale semble modifier la direction de propagation des dislocations qui s'orientent parallèlement au substrat [57]. Elles n'interviennent donc plus lors des reprises de croissance ultérieures. La concentration de dislocations a pu être réduite ainsi de trois à quatre ordres de grandeur. Cependant, les étapes de masquage et de reprise d'épitaxie rendent la réalisation relativement coûteuse.

II.5. Croissance et propriétés d'InGaN

II.5.1. La croissance d'InGaN

La croissance de couches épitaxiales d'InGaN de bonne qualité reste encore un challenge à l'heure actuelle. En effet, il est nécessaire de trouver un compromis entre une température de croissance élevée qui favorise la décomposition de l'ammoniac et la bonne cristallinité des couches et une température de croissance plus faible afin d'éviter la désorption de l'InN et donc une faible incorporation d'indium dans la couche. De plus, le désaccord de paramètre de maille entre les deux binaires GaN et InN est important, de l'ordre de 10,7% selon l'axe a et 15% selon l'axe c. Ces désaccords paramétriques importants provoquent une distorsion de la maille cristalline et donc une contrainte interne importante qui induit une tendance à la séparation de phase. Par ailleurs, cette séparation de phase est attribuée à la dissociation de l'InN à haute température et à la faible miscibilité de l'InN dans le GaN. Le désaccord paramétrique (la déformation) $\Delta a/a$ entre GaN et InN est donné par la relation[60] :

$$\Delta a/a = (a_{\text{InN}} - a_{\text{GaN}})/a_{\text{GaN}} \quad (\text{II.6})$$

Avec a_{InN} le paramètre de maille d'InN et a_{GaN} le paramètre de maille de GaN.

Le paramètre de maille a de l'alliage $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ est donné par la loi de Végard [60] :

$$a_{\text{InGaN}} = x a_{\text{InN}} + (1-x) a_{\text{GaN}} \quad (\text{II.7})$$

II.5.2. L'énergie de la bande interdite d'InGaN :

Pour étudier Certaines propriétés (Y) comme le paramètre de maille, la polarisation et les constantes piézoélectriques peuvent être déduites par interpolation linéaire suivant la loi de Vegard :

$$Y (\text{In } 1-x \text{ Ga } x \text{ N}) = (1-x) \cdot Y (\text{InN}) + x \cdot Y (\text{GaN}) \quad (\text{II.8})$$

Contrairement aux autres paramètres d'InGaN, la loi de Végard ne peut pas être utilisée pour calculer l'énergie de la bande interdite. Dans la phase hexagonale, un gap direct en fonction de la composition en indium est attendu dans les alliages $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$.

L'évolution de l'énergie de bande interdite avec la composition peut être approximée par la relation quadratique de J.C. Phillips :

$$E_G^{\text{In } 1-x \text{ Ga } x \text{ N}} = E_G^{\text{GaN}} (x) + E_G^{\text{InN}} (1-x) - bx (1-x) \quad (\text{II.9})$$

Où b est le paramètre de courbure qui est de l'ordre de 1 eV dans $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ [46].

II.5.3. Les puits quantiques InGaN/GaN

Les puits quantiques InGaN/GaN occupent une place centrale dans la recherche sur l'éclairage à source solide. Nous allons tout d'abord rappeler brièvement les points clés du fonctionnement d'une LED à puits quantique nitrure :

Les puits quantiques sont insérés à la jonction entre le GaN de type n et le GaN de type p comme le montre la figure II.8. Dans un cas idéal, les électrons venant du type n diffusent vers la bande de conduction des puits quantiques. De même, les trous venant du type p diffusent vers la bande de valence des puits quantiques. Les porteurs se localisent alors dans les puits. Comme les densités de porteurs n et p sont grandes dans les puits, la recombinaison radiative devient plus rapide que la recombinaison non-radiative, de sorte que l'efficacité du dispositif est augmentée. De plus, la force d'oscillation est grande dans un puits quantique, ce qui conduit aussi à l'augmentation du rendement de la LED en comparaison à celui d'une homojonction.

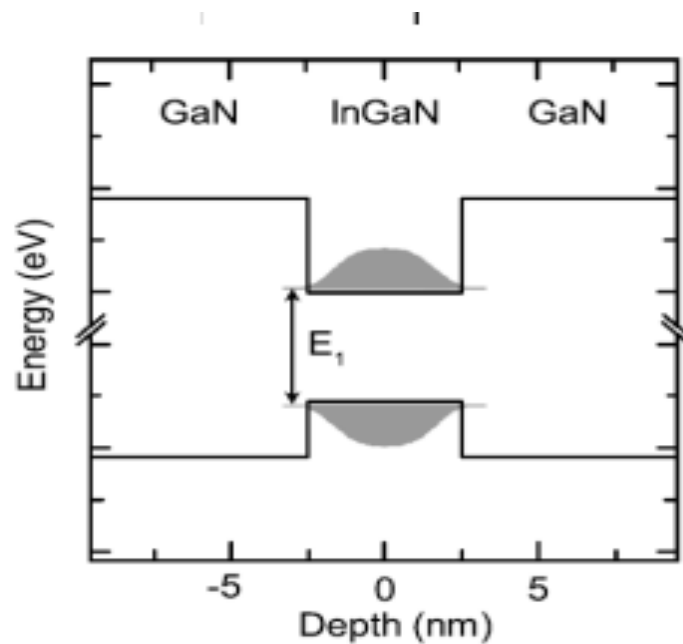


Figure II.8 : Puits quantique InGaN/GaN [61].

II.5.4. Déformations et contraintes dans les puits quantiques

Pour l'homoépitaxie, les paramètres de mailles sont naturellement accordés et il n'y a pas de contraintes à l'interface. Dans le cas de l'hétéroépitaxie, les paramètres de maille sont désaccordés et en fonction de ce désaccord, on peut distinguer trois régimes différents :

1. Si le désaccord de maille est nul, l'hétérostructure est assez semblable à celles que l'on obtient en homoépitaxie. Toutefois, les propriétés physico-chimiques (coefficient de dilatation thermique, composition chimique,...) des deux matériaux présents peuvent être différentes et influencer les propriétés structurales.
2. Quand le film et le substrat présentent un désaccord de maille non nul, les deux mailles peuvent s'adapter pour accorder leurs paramètres cristallographiques dans le plan de croissance : c'est ce que l'on appelle une croissance pseudomorphique.
3. Lorsque l'épaisseur de la couche contrainte augmente, l'énergie de contrainte augmente. La relaxation de la contrainte va avoir lieu soit par création de dislocations à l'interface (relaxation plastique), soit par formation d'îlots tridimensionnels (relaxation élastique) [46].

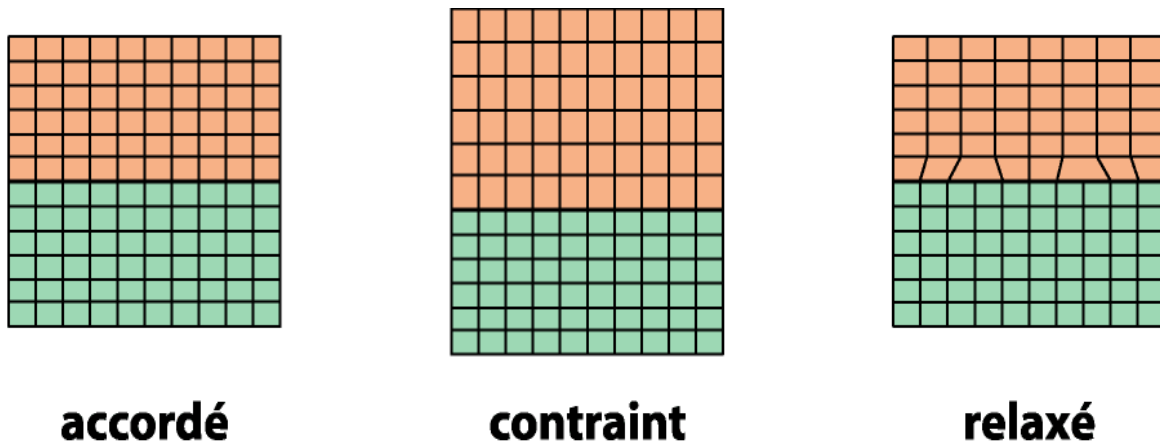


Figure II.9 : Structures d'hétéroépitaxies accordées en maille, contrainte et relaxée.

II.5.5. Effet du champ électrique dans un puits quantique

L'existence d'un champ électrique dans le puits et dans les barrières a pour effet d'incliner les bandes de conduction et de valence dans les différentes couches. Plus précisément, les énergies de transitions dans un puits quantique soumis à un champ électrique sont plus faibles que celles d'un puits quantique carré de mêmes caractéristiques. D'autre part, puisque la symétrie du potentiel est brisée et contrairement au puits carré, ce champ sépare spatialement les porteurs, diminuant ainsi la probabilité de recombinaison radiative électron-trou et par là même l'efficacité des LEDs. Elles créent à leur tour un champ électrique dans le puits qui entraîne un effet Stark, c'est-à-dire un décalage vers le rouge des transitions optiques [46].

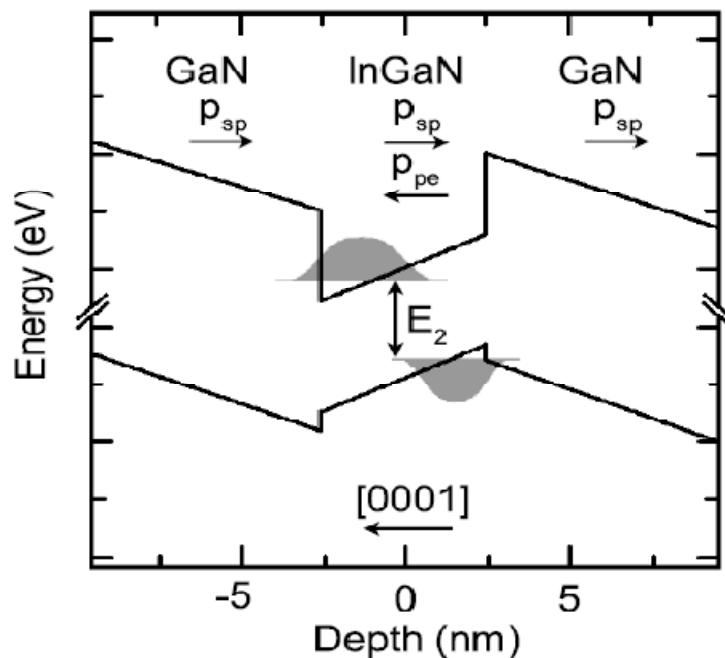


Figure II.10 : Puits quantique contraint [61].

II.5.6. Effets de localisation et efficacité radiative

Les LEDs à base d'InGaN présentent un rendement quantique externe supérieur à 20% ce qui n'est obtenu que dans les meilleures LEDs à base d'arséniures. Ce point est particulièrement surprenant quand on sait que, du fait de l'absence de substrats adaptés en paramètre de maille, la densité de dislocations traversantes dans les nitrures est très importante (10^8 à 10^{10} cm^{-2} contre 10^2 cm^{-2} dans les arséniures). Si l'on ajoute à cela l'effet du champ électrique qui diminue la probabilité de recombinaison radiative, il est difficile de justifier un si bon rendement pour un puits quantique. Par la suite, il a été clairement montré que l'exciton, au niveau du puits, est en fait localisé dans les trois directions de l'espace, ce qui l'empêche de se déplacer dans le puits et d'aller se recombiner sur des défauts non radiatifs. Si cette explication n'est pas mise en doute, l'origine de cette localisation, par contre, fait encore débat. De simples fluctuations d'épaisseur dans les puits d'InGaN pourraient être à l'origine de la localisation des porteurs dans ces hétérostructures, mais selon certains groupes elles ne seraient pas assez profondes pour expliquer le Stokes shift observé.

Plusieurs études montrent aussi que l'In n'est pas soluble dans le GaN, au-delà d'une certaine concentration, Il aurait donc tendance à se concentrer spontanément en petits amas lorsque sa concentration dépasse un certain seuil. Ces amas, ayant une bande interdite plus petite que l'environnement local, piègent les porteurs et les excitons réduisent les recombinaisons non radiatives.

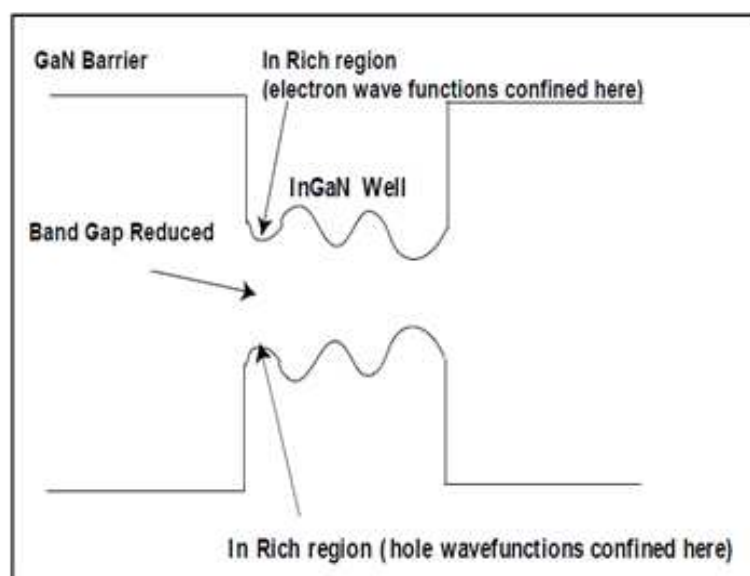


Figure II.11 : Effet de localisation [62].

II.6. Les procédés de fabrication de la LED blanche à base d'InGaN

Un gros effort industriel est consacré au développement des diodes blanches qui pourraient à terme remplacer les ampoules à incandescence et les lampes fluorescentes. La lumière blanche peut être obtenue par plusieurs méthodes (premier chapitre).

La diode électroluminescente qu'on va étudier est une diode bleue dite à simple puits quantique (SQW), réalisée sur substrat saphir suivant la direction (0001), possédant une couche active InGaN très fine insérée entre deux zones : le semiconducteur de type n (GaN dopé Si) et le semiconducteur de type p (GaN dopé Mg) et qui pompe optiquement un phosphore jaune.

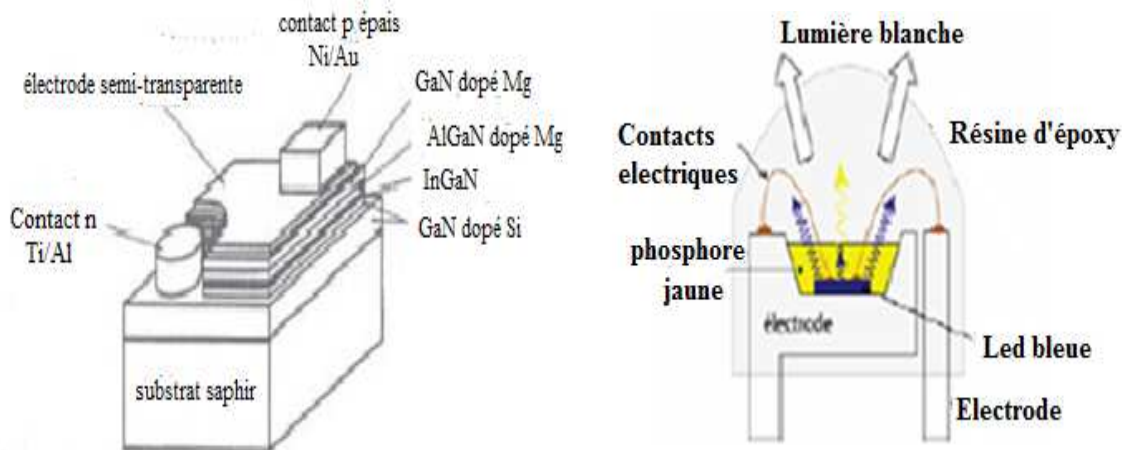


Figure II.12 : Structure de la LED blanche à base d'InGaN [63].

II.6.1. Le choix du substrat

Le choix d'un substrat est crucial dans la croissance épitaxiale puisque par sa relation cristalline et sa réactivité chimique avec la couche à déposée, il va définir les contraintes élastiques dans ce dernier, et influencer sur sa structuration. Le cas idéal serait de déposer GaN sur un substrat GaN massif présentant une bonne qualité structurale (homo-épitaxie) [56].

La difficulté à obtenir ce type de cristaux vient de son point de fusion très élevé et des fortes pressions de vapeur saturantes des composés. Des monocristaux massifs ont été élaborés avec succès à haute pression, mais la surface disponible est de 100 mm² pour 200 heures de croissance [53]. Le dépôt des couches sur des grandes surfaces nécessite par conséquent

l'utilisation des substrats différents du GaN (hetero-épitaxie), et il n'existe pas actuellement de substrat en accord de maille avec le GaN, mais les substrats actuellement utilisés sont :

II.6.1.1. Le saphir (Al_2O_3)

Le saphir (Al_2O_3 monocristallin) est le substrat le plus utilisé dans la fabrication de LED blanches [28]. Ce dernier offre l'avantage d'être disponible en quantité, à coût relativement raisonnable, d'être très stable à haute température (autour de 2000 °C), et d'être transparent dans toute la gamme spectrale utile du GaN. Cependant, du fait du large désaccord de maille entre le nitrure de gallium et le saphir (33%), et leurs coefficients d'expansion thermique différents (25% de différence), la croissance de GaN va s'accompagner de nombreux défauts cristallins. Néanmoins, le désaccord de maille se réduit à 16% grâce à une croissance désorientée de 30° dans le plan perpendiculaire à l'axe de croissance (0001) [53]. Ce saphir est obtenu par la méthode de croissance Czochralski. Les diamètres maxima des plaquettes sont de l'ordre de 6 pouces.

II.6.1.2. Le carbure de silicium SiC

Le carbure de silicium en phase hexagonale : 6H-SiC est devenu également au fil du temps un sérieux concurrent du saphir, il présente les paramètres de maille et de coefficient de dilatation thermique les plus proches de ceux du nitrure de gallium (3.5%), De plus, le SiC avance de très bonnes propriétés physiques telles qu'une excellente conductivité thermique de $4,9\text{W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ permettant une dissipation aisée de la chaleur. En revanche, ce matériau représente un coût encore élevé. De plus, la nucléation du nitrure de gallium sur ce substrat reste délicate [56].

II.6.1.3. Le silicium Si

Le silicium est lui aussi un très bon candidat, de par son faible coût et de part la maturité des technologies sur silicium à l'heure actuelle. On utilise généralement l'orientation (111) du silicium car celle-ci présente une symétrie de surface hexagonale. Cependant, la limitation en température et son fort désaccord avec le GaN (17%) rend la croissance très complexe et l'apparition d'une quantité trop importante de défauts (dislocations).

Paramètres à 300K	SiC	Si	Saphir
Paramètre de maille (Å)	4.3596	5.43102	4.765
Densité du matériau (g.cm ⁻³)	3.2	2.3290	3.98
T fusion (°C)	2793	1410	2030
Conductivité thermique λ (w.cm ⁻¹ .K ⁻¹)	3.7	1.56	0.23
Indice de réfraction n	2.7	3.42	1.75
Le gap Eg (eV)	2.36	1.12	8.1 à 8.6
La transmittance T(%)	85 à 90	50 à 55	85 à 90
Domaine de transmission (µm)	0.4 à 0.8	1.5 à 6	0.2 à 5
résistivité électrique ρ (Ω.cm)	10 ² à 10 ³	> 50.10 ³	> 10 ¹¹

Tableau II.5 : Caractéristiques cristallographiques de substrats utilisés pour la croissance [14].

II.6.2. La couche tampon

Un des paramètres déterminant pour la croissance d'une couche de bonne qualité est le départ de croissance. Ainsi d'après les travaux de Shuji Nakamura, Takashi Mukai [64], le dépôt d'une couche tampon (GaN ou AlN) appelée aussi buffer sur le substrat avant la couche de GaN améliore la qualité de cette dernière.

Cette couche sert à faire le lien entre le substrat et le composé nitruré tout en diminuant les contraintes introduites par les différences de propriétés entre les deux. En général cette couche a des propriétés structurales moyennes entre celles du substrat et de la couche épitaxiée.

II.6.2.1. Etapes de la croissance sur substrat saphir

Les étapes de la croissance sont les suivantes : le substrat saphir (0001) est tout d'abord porté à haute température au dessus de 1000°C pour 20 min, pour réorganiser et améliorer son état de surface. Il est soumis à cette température à un flux d'ammoniac produisant une "nituration" de la surface qui améliorera la nucléation de la couche tampon. Après ce traitement la couche tampon GaN ou AlN dont l'épaisseur est d'environ 250Å est déposée à une température située autour de 550°C, pendant environ 200s. Cette faible

température de croissance permet de limiter la désorption des espèces chimiques et d'améliorer leur diffusion en surface. Ceci permet d'obtenir une distribution homogène des atomes sur la surface du substrat, générant ainsi une forte densité de sites de nucléation permettant une bonne croissance latérale de la couche principale. Dans ces conditions de dépôt la couche tampon est amorphe, et ce n'est que lors de la croissance de la couche principale à plus haute température typiquement 1050 C° qu'elle va cristalliser.

Les paramètres importants à contrôler pour le dépôt de la couche tampon sont alors : la température, la vitesse de croissance, et l'épaisseur de la couche. Tous ces paramètres varient suivant les bâtis d'épitaxie. Les dispositifs commercialisés à l'heure actuelle sont élaborés sur des couches déposées par EPVOM, technique qui a donné les meilleurs résultats jusqu'à présent. Cependant, l'utilisation de températures de croissance très élevées est indispensable pour dissocier les molécules d'ammoniac [65].

II.6.3. Réalisation de puits quantique GaN-n/InGaN/GaN-p

Après le dépôt de la couche tampon les couches qui constituent le puits quantique ont été développées par MOCVD. Trimethylgallium (TMG), trimethylindium (TMI), monosilane (SiH₄), bis-cyclopentadienyl magnésium (CpzMg) et l'ammoniaque (NH₃) ont été employés comme des sources de : Ga, In, silicium Si, de magnésium Mg, et de N, respectivement :

- Une couche d'environ 4 µm de GaN dopé n par le silicium (10^{20} cm^{-3}) est déposée à la température de 1050 °C,
- La température est abaissée à 800 °C pour la croissance de la couche de In_{0.2}Ga_{0.8}N à une épaisseur de 30 Å.
- Dépôt d'une fine couche de Al_{0.2}Ga_{0.8}N dopé Mg permettant de stopper les électrons.
- Dépôt de GaN – p dopé par Mg (10^{18} cm^{-3}) [66, 67]

II.6.4. Méthodes de Dopage de GaN

La fabrication de dispositifs optoélectroniques à base de semiconducteurs nécessite le contrôle de la concentration d'impuretés ainsi que la maîtrise de l'incorporation d'impuretés spécifiques pour le dopage n et p. Le dopage s'effectue habituellement par deux techniques : l'incorporation lors de la croissance (dopage in-situ) et l'implantation ionique.

Un dopant doit être choisi grâce à son faible coefficient de diffusion pour avoir des jonctions abruptes, son existence sous forme d'un précurseur organométallique (OM) ou hydrogéné, en plus, il doit être suffisamment volatil à la température ambiante pour permettre son transport par l'hydrogène (H) qui est le gaz vecteur le plus utilisé. Toutefois des problèmes spécifiques, notamment dans le cas des nitrures font encore l'objet d'une intense recherche. En effet, la grande complexité du dopage de type p constitue un obstacle au développement des diodes électroluminescentes [53].

Nous présentons ci-dessous les deux méthodes les plus utilisées pour le dopage des nitrures d'éléments de la colonne III :

II.6.4.1. Dopage in-situ

Cette première méthode consiste à incorporer les impuretés dopantes lors de la croissance du matériau, par l'intermédiaire de sources solides ou gazeuses, suivant la technique utilisée. De manière générale, pour le dopage des nitrures, on utilise des éléments de la colonne VI en substitution des atomes de la colonne V (dopage de type n) et des atomes de la colonne II en substitution des atomes de la colonne III (dopage de type p). Ceci s'explique par la valeur des rayons atomiques, la substitution s'effectue de façon optimale lorsque les rayons atomiques du dopant et de l'atome à substituer sont proches.

Les atomes de la colonne IV, comme le silicium, sont dits amphotères car ils peuvent prendre la place des atomes de l'un ou l'autre type d'atomes, offrant un comportement soit donneur soit accepteur. Cependant, concernant le silicium, il a été montré que celui-ci, de par son rayon atomique proche du gallium, allait préférentiellement prendre la place de ce dernier.

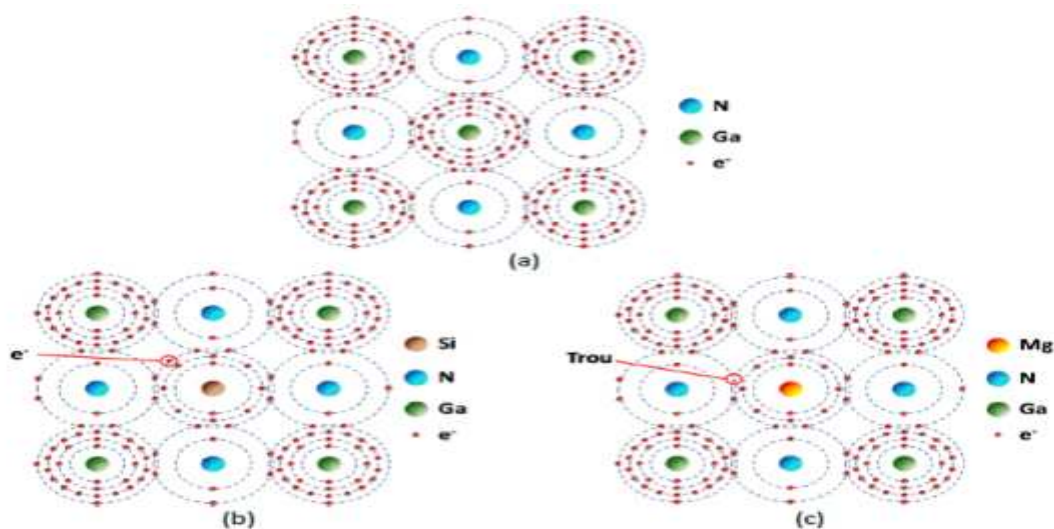


Figure II.13 : Liaisons atomiques dans le réseau cristallin du GaN (a) et position des dopants dans ce même réseau : (c) Mg, dopage de type p et (b) Si, dopage de type n [16].

II.6.4.2. Par implantation ionique

La réalisation de composants microélectroniques impose très souvent le recours à un dopage localisé par implantation ; ce type de dopage a fait l'objet de nombreux travaux et reste encore aujourd'hui assez difficile à effectuer. Les énergies nécessaires pour faire pénétrer les dopants à quelques centaines de nm sont très importantes (plusieurs centaines de KeV). De telles énergies sont nécessaires à cause de la grande densité atomique ($8,79 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ pour le GaN) et de liaisons atomiques très fortes, engendrant des pouvoirs d'arrêt très élevés et des profondeurs d'implantation de seulement quelques centaines de nanomètres.

La phase d'implantation est suivie d'un recuit qui va permettre aux espèces dopantes de se positionner en sites substitutionnels (activation) et au GaN de se recristalliser après les dégâts engendrés par le bombardement ionique. La température de ce recuit doit être suffisamment élevée ($>1000^\circ\text{C}$) pour espérer activer un pourcentage intéressant des dopants. A ce stade apparaît un des problèmes majeurs rencontrés avec le GaN. En effet, l'activation des dopants dans le GaN nécessite une température de recuit élevée. Or, la surface du GaN est très sensible à la température et devient instable dès 850°C . L'azote des couches supérieures du GaN va s'échapper entraînant la formation de gouttes de gallium et de trous augmentant considérablement la rugosité de la surface, rendant celle-ci impropre à la réalisation d'un composant.

A- Dopage de GaN type n

Le dopage de type n est plus facile à contrôler que celui de type p, vu que le dopage résiduel de GaN est de type n (de 10^{16} cm^{-3} du fait du nombre important de défauts : lacunes d'azote, présence d'impuretés).

Le Si est le dopant le plus utilisé et quasiment le seul pour les nitrures ces dernières années à cause de son efficacité à atteindre une large gamme de dopage dans GaN. En effet, plusieurs travaux ont rapporté des taux de dopage de à 10^{20} cm^{-3} avec une énergie d'ionisation de 12 à 17 meV [68].

B- Dopage de GaN type p

Le Mg est le dopant de choix pour introduire des trous dans le GaN, étant donné les états relativement peu profonds qu'il introduit dans le matériau. Sa limite d'incorporation dans le GaN est de l'ordre de 10^{18} cm^{-3} , au-delà, la morphologie du GaN se dégrade.

Cependant, lors de la croissance par MOCVD, l'omniprésence de l'hydrogène tend à passiver ce dopant en créant des complexes inactifs. L'hydrogène passivant le Mg, il est nécessaire de faire subir un traitement au p-GaN afin de l'activer, de le faire passer d'un état hautement isolant à hautement conducteur. Une découverte accidentelle à la fin des années 1980 a permis l'activation par irradiation sous faisceau électronique. Ce traitement libère l'hydrogène des complexes Mg-H, ce qui permet l'injection de trous. L'existence de cette méthode a rendu possible la réalisation de jonctions PN. Aujourd'hui, l'activation du Mg est réalisée par recuit thermique à haute température ($> 750 \text{ }^\circ\text{C}$).

Dopant	Type de dopage	Site préférentiel	Energie des niveaux (meV)
Si	n	Ga	12-17
O	n	N	29
C	n	Ga	110-140
Be	p	N	700
Mg	p	Ga	160-210
Zn	p	Ga	210-340

Tableau II.6 : Dopants les plus fréquents dans le GaN [69].

II.6.5. La couche AlGaN

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

II.6.6. Réalisation des contacts

La réalisation finale du dispositif requiert une étape de technologie qui consiste à déposer des contacts pour pouvoir appliquer un courant électrique aux bornes de la LED. Le procédé standard se fait par photolithographie et dépôt de métaux successifs par évaporation :

Etape 1 : le métal semi-transparent, par lequel une partie de l'émission de la LED se fera et, responsable de la répartition homogène du courant à la surface de la couche, est déposé (Ni : 50Å / Au : 50Å).

Etape2 : le contact de type p épais (Ni : 200Å / Au : 1000Å) est à son tour évaporé

.

Etape 3 : une partie du GaN de type p est enlevée par gravure sèche.

Etape 4 : le contact de type n épais (Ti : 150Å / Al : 750Å) est déposé sur le GaN de type n.

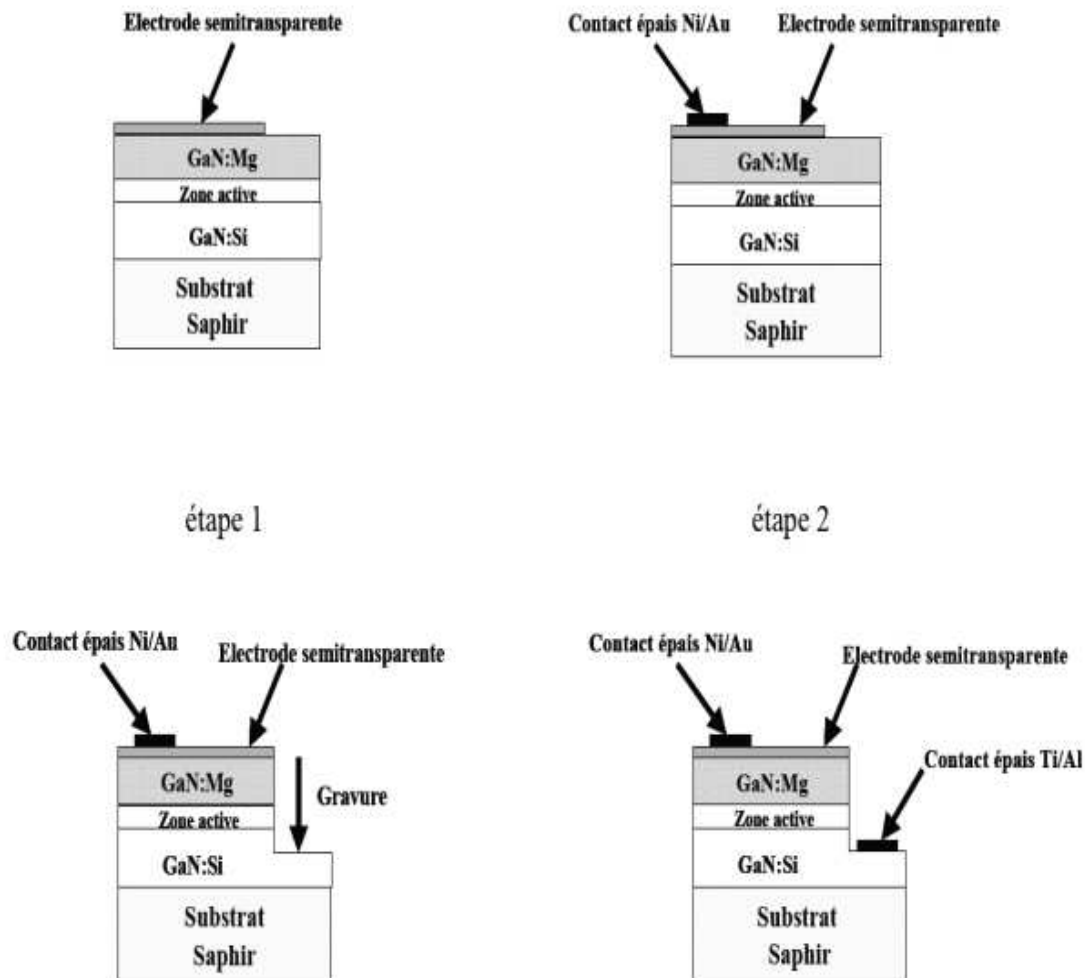


Figure II.14 : Les différentes étapes du procédé technologique standard d'une LED [8].

Le principe de la photolithographie et de la gravure cité en haut est le suivant :

II.6.6.1. La photolithographie

La photolithographie est l'opération qui consiste à graver selon un certain motif une couche mince d'un matériau donné. Le motif à graver se trouve sur un support appelé masque ; il s'agit d'une plaque de verre (quartz) comportant une couche de chrome ou de gélatine sur laquelle a été gravé le motif que l'on veut reproduire.

Cette opération consiste à déposer une résine photosensible en film mince et uniforme. Ces résines sont des composés organiques dont la solubilité est affectée par le rayonnement UV. L'opération de dépôt de la résine photosensible appelé laquage s'effectue

par une technique de centrifuge au moyen d'une tournette composée d'un système permettant la mise en rotation à grande vitesse de la plaquette à résiner, cette dernière est maintenue par aspiration à vide sur support solide de plateau en rotation. Grâce à un réglage de la vitesse de rotation et de l'accélération, la résine est uniformément étalée.

En général l'opération de la photolithographie se déroule de la façon suivante :

- Étalement de la résine par centrifugation
- Séchage de la résine
- Exposition de la résine à un rayonnement ultraviolet à travers un masque
- Développement de la résine
- La résine restante est ensuite retirée de la surface par des solvants chimiques puissants.

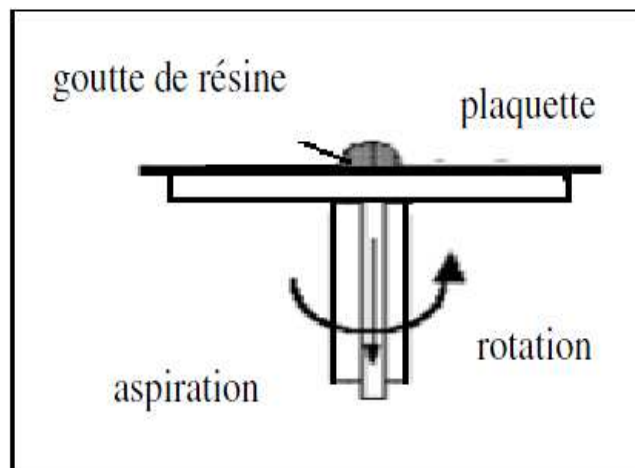


Figure II.15: Tournette pour l'étalement de la résine photosensible [70].

A- Réalisation d'un motif sur plaquette

La résine est un composé organique présente une sensibilité au rayonnement ultraviolet UV l'exposition de la résine aux rayonnements UV provoque une modification de sa structure et de ces propriétés chimiques, les zones exposées de la résine deviennent ainsi plus ou moins solubles que les zones protégées par le masque. Selon le type de résine, on peut utiliser deux types : résine positive et résine négative :

- **Résine positive** : les parties exposées aux rayons ultraviolets deviennent solubles dans l'agent de développement
- **Résine négative** : les parties exposées aux rayons ultraviolets deviennent insolubles dans l'agent de développement

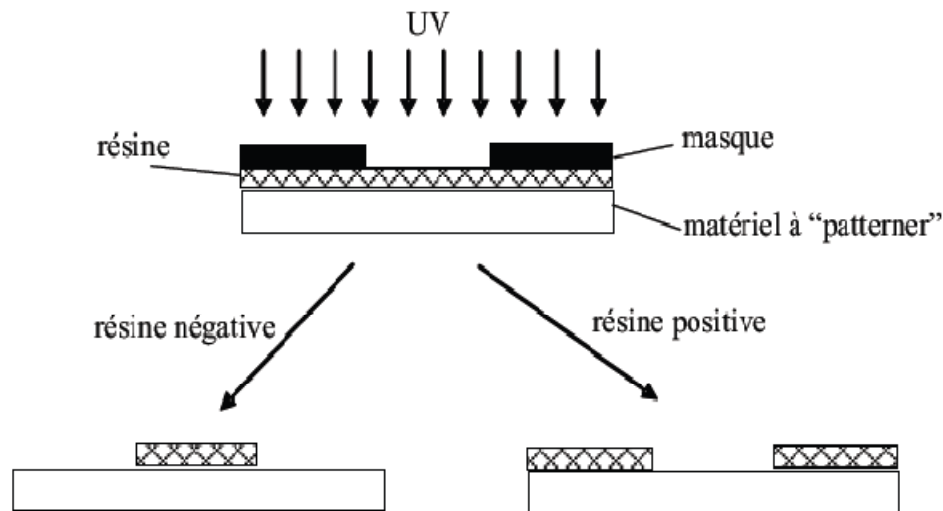


Figure II.16 : Principe de la photolithographie [70].

B- La gravure

La gravure est un procédé qui consiste à enlever partiellement ou complètement la matière dans les régions de substrat non protégées par le masque. Deux techniques sont couramment utilisées : gravure humide et gravure sèche.

- **Gravure humide ou chimique**

La gravure par voie humide se fait par attaque chimique en solution aqueuse, dans ce cas le substrat est plongé dans une solution qui va attaquer chimiquement la surface non protégée, il s'agit en générale d'un acide. La gravure humide est relativement facile à mettre en œuvre et rapide, mais elle présente un inconvénient majeur : cette gravure est fortement isotrope, c'est-à-dire que l'acide va attaquer dans toutes les directions, elle crée des attaques latérales notamment dans les zones protégées par la résine.

- **Gravure sèche ou physique**

Le principe de base est de créer un plasma contenant des ions dans une chambre à vide où se trouve l'échantillon à graver. Cet échantillon est bien sûr recouvert d'un masque obtenu par photolithographie. On utilise pour cela des gaz inertes que l'on ionise pour les envoyer ensuite vers la cible ; les ions viennent bombarder le substrat et arrachent ses atomes.

La gravure sèche présente plusieurs avantages : très anisotrope, très sélective, propre et très bien contrôlable. On lui reproche les inconvénients suivants : équipement et processus complexes et génération de défaut [70].

II.6.7. Le dépôt de phosphore jaune

Pour terminer, en ce qui concerne les technologies de LEDs blanches de puissance, l'ajout du luminophore pour la conversion de la lumière bleue émise par la puce en lumière blanche a été intensivement étudié. Différentes compositions chimiques du luminophore et de l'huile silicone, ainsi que les géométries d'assemblage ont été testées durant les dix dernières années. La composition chimique la plus répandue est celle du luminophore YAG:Ce à base de grenats d'Yttrium-Aluminium ($Y_3Al_5O_{12}$) dopés au Cérium (Ce^{3+}). Avec une longueur d'onde d'excitation à 460 nm provenant de la LED bleue [71].

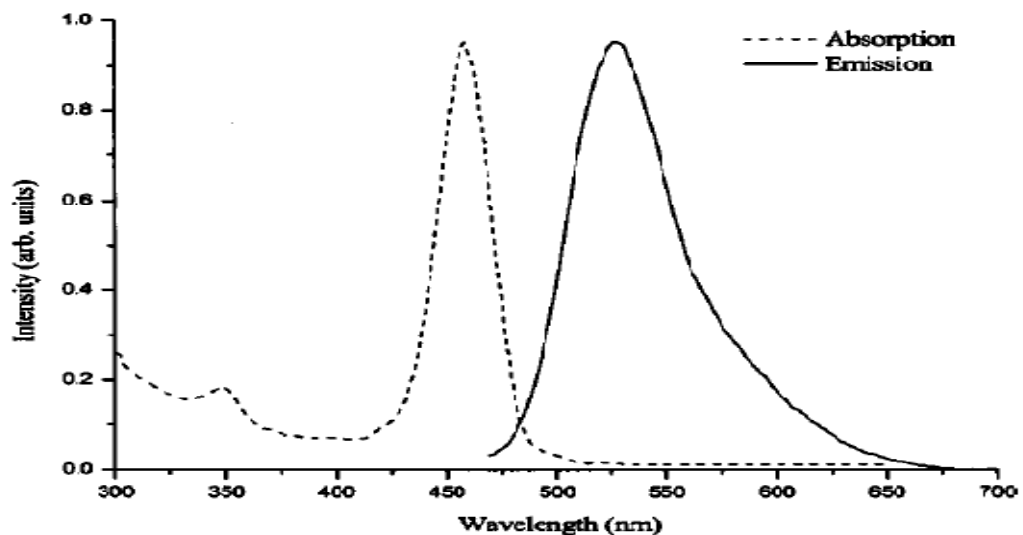


Figure II.17 : Le spectre d'absorption et d'émission de phosphore YAG [72].

La couche de phosphore employée peut se détériorer lorsqu'elle est soumise à une température élevée. En effet, celle-ci perd alors de son efficacité de conversion, ce qui modifie le spectre émis par la LED. Il a été montré que le niveau de dégradation observé dépend directement de la température utilisée. Enfin, il a été proposé que la vitesse de la dégradation de la couche de phosphore soit reliée à sa position par rapport à la jonction, en effet il est avantageux de mettre la couche de phosphore plus loin de la jonction car celle-ci dégrade alors moins rapidement.

Nom	Quantité
La formule chimique	$Y_3Al_5O_{12}$
La masse moléculaire	593.7
La température de fusion	1920 (°C)
La densité	4.55 (g/cm ³)
La chaleur spécifique	88.8 (cal.mol ⁻¹ .K ⁻¹)
L'indice de réfraction	1.836
Absorption	0.2% (cm ⁻¹)

Tableau II.7 : Les propriétés matériel d'yttrium aluminium garnet (YAG) [72].

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit dans un premier temps quelques généralités et propriétés des semiconducteurs III.N qui sont les matériaux les plus prometteurs pour la réalisation des diodes électroluminescentes de bonne qualité. Dans un deuxième temps nous avons décrit la structure de la diode électroluminescente blanche la plus utilisée en industrie d'éclairage et qui est constituée principalement d'une LED bleue à base de puits quantique InGaN/GaN et d'une couche de phosphore jaune YAG. Les étapes de fabrication de cette structure sont décrites.

Chapitre III :

*Simulation des procédés technologiques de
réalisation de la LED*

III.1. Introduction

Le simulateur TCAD (Technology Computer-Aided Design) est un ensemble complet d'outils indépendants permettant la simulation physique de dispositifs et systèmes électroniques. Il permet d'associer l'aspect conception technologique à la simulation électrique, dans le but d'économiser le temps et le coût de développement, de pouvoir envisager et optimiser des solutions pour améliorer les performances des dispositifs. Les simulateurs existants sur le marché (ISE, SYNOPSIS, SILVACO,...) ont le même principe de fonctionnement [73].

Les LEDs blanches sont basées soit sur l'association de trois LEDs (rouge, verte, bleue) soit sur l'association d'une LED bleue ou UV et d'un luminophore. La réalisation de LEDs de haute brillance bleues, apparaissait donc nécessaire à la réalisation des LEDs blanches puissantes.

La structure de la diode électroluminescente bleue à simuler est basée sur un simple puits quantique en nitrure de gallium-indium (InGaN/GaN) qui émet dans le bleu. Pour définir les paramètres technologiques nécessaires à la simulation, tels que les épaisseurs des couches (le substrat, la couche tampon, le puits quantique), la concentration de dopage, ainsi que certains paramètres électriques, nous nous sommes basés sur des valeurs trouvées dans la littérature, concernant l'étude de différentes diodes électroluminescentes.

III.2. Les simulateurs TCAD

La TCAD fait référence à une suite de logiciels permettant de simuler les processus de fabrication des composants intégrés. L'outil de calcul de cette suite résout des équations différentielles issues de la physique du composant. Deux logiciels principaux composent généralement cette suite d'outils, à savoir, le simulateur du procédé de fabrication et le simulateur des effets électriques. Le premier permet de simuler les étapes d'implantation d'ions, de dépôt, de gravure, de recuit et d'oxydation, ... Le second permet de prédire par simulation le comportement électrique du composant créé. Le composant est représenté comme une structure maillée où chaque nœud a des propriétés qui lui sont associées telles que le type de matériau, la concentration en dopant, le champ électrique, Les principaux avantages des simulateurs de composants sont tout d'abord la possibilité offerte de visualisation de phénomènes physiques difficilement accessible, et de s'appropriier au procédés de fabrication [74].

III.3. Présentation du logiciel TCAD-SILVACO

SILVACO (Silicon Valley Corporation) est un environnement de logiciels qui permet de concevoir et prévoir les performances des dispositifs à semiconducteurs. Cet outil sert à la modélisation des dispositifs à semiconducteurs avant leur fabrication.

Le TCAD SILVACO inclut de nouveaux modèles physiques qui emploient des méthodes et des algorithmes numériques efficaces et de nouvelles techniques de maillage, permettant ainsi d'obtenir des résultats de simulation très proches de celles de la pratique. L'avantage majeur de ce type de simulateur est qu'il donne la possibilité de visualiser des phénomènes physiques difficilement accessibles.

Sous SILVACO l'ensemble des outils de simulation et des outils interactifs permettant la conception et l'analyse de la plupart des dispositifs semiconducteurs s'appel VWF (Virtual Wafer Fabrication). Les composants de base de VWF sont :

1. Les outils de simulation (VWF core tools) : ces outils simulent soit leurs processus de fabrication soit leurs comportements électriques. Les outils de simulation sont Athena, Atlas et Ssuprem3.

2. Les outils interactifs (VWF interactive tools) : ces outils sont désignés pour être utilisés en mode interactif dans la construction d'un seul fichier d'entrée.

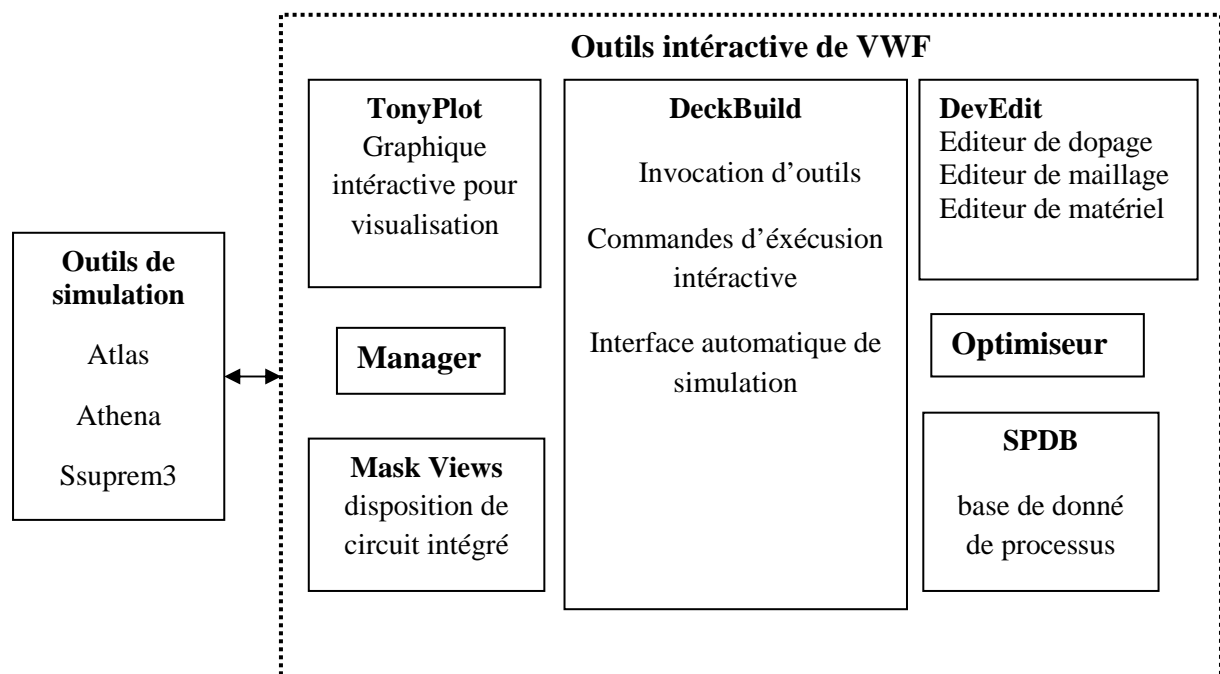


Figure III.1 : Organigramme de la structure VWF [75].

III.3.1. Les outils interactifs

- **DECKBUILD**

Le DECKBUILD est l'environnement où est défini le programme de simulation à travers des commandes spécifiques. De multiples simulateurs considérés comme des entrées peuvent être utilisés avec le DECKBUILD : ATHENA, ATLAS, SSUPREM3, sachant que chaque outil de simulation possède son propre langage de programmation.

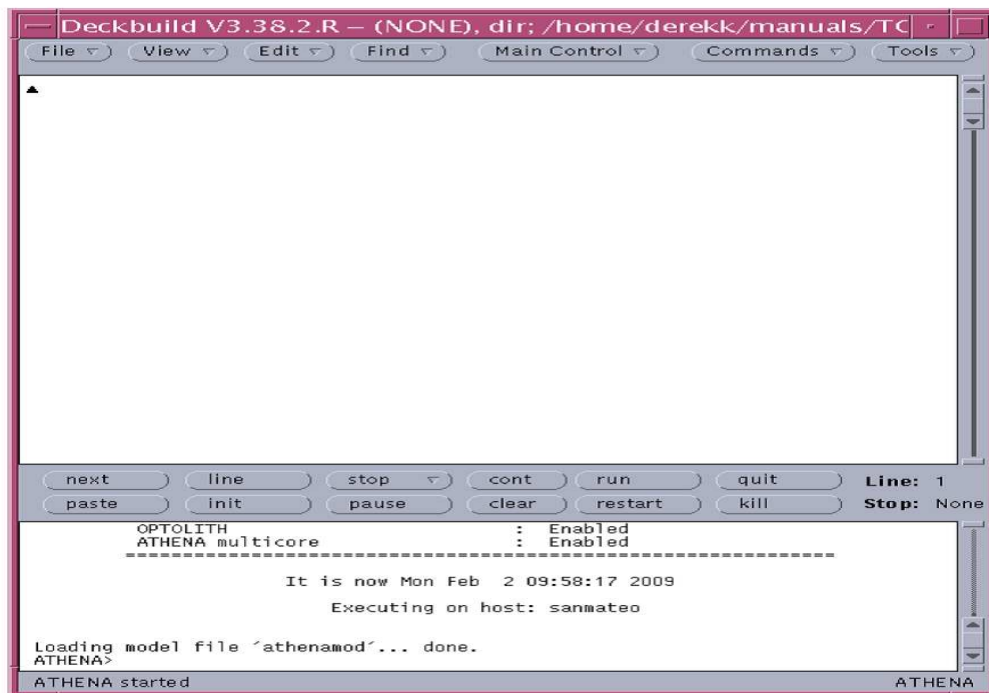


Figure III.2 : L'environnement Deckbuild [76].

- **DevEdit** : outil d'édition de structure, on peut créer des nouvelles structures ou même modifier des structures existantes, on peut définir des maillages ou raffiner les maillages existants.
- **Manager** : outil de gestion des fichiers utilisés et créés par VWF.
- **MaskViews** : outil de dessin des masques (layouts).
- **Optimiseur** : outil d'optimisation automatique.

- **TONYPLOT**

TONYPLOT est l'environnement d'outils graphiques où sont visualisés les résultats des simulations, il peut être invoqué par tous les autres outils de Silvaco. 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). Dans le cadre de notre travail, nous présenterons les résultats de la simulation en deux dimensions.

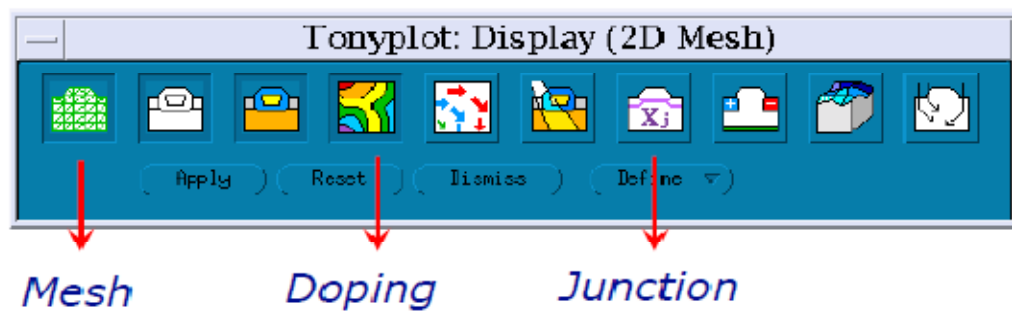


Figure III.3 : L'environnement Tonyplot [77].

III.3.2. Les outils de simulation

III.3.2.1. Module ATHENA

Le logiciel de simulation ATHENA de TCAD-SILVACO fournit des possibilités générales pour la simulation des processus utilisés dans l'industrie des semiconducteurs : diffusion, oxydation, implantation ionique, gravure, lithographie, procédés de dépôt. Il permet des simulations rapides et précises de toutes les étapes de fabrication utilisées dans l'optoélectronique et dans les composants de puissance. Le programme de simulation (défini comme entrée) des différentes étapes technologiques et les phénomènes physiques, s'établit avec le module DECKBUILD de TCAD-SILVACO, puis la visualisation de la structure de sortie s'effectue avec le module TONYPLOT [73].

III.3.2.2. Module ATLAS

Le logiciel de simulation ATLAS est un simulateur de modélisation bidimensionnelle de composants capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semiconducteurs. En plus du comportement électrique "externe", il fournit des informations sur la distribution interne de variables telles que les lignes de courant, le champ électrique ou le potentiel. Ceci est réalisé en résolvant numériquement l'équation de Poisson et les équations de continuité des électrons et des trous en un nombre fini de points formant le maillage de la structure défini par le programme [78].

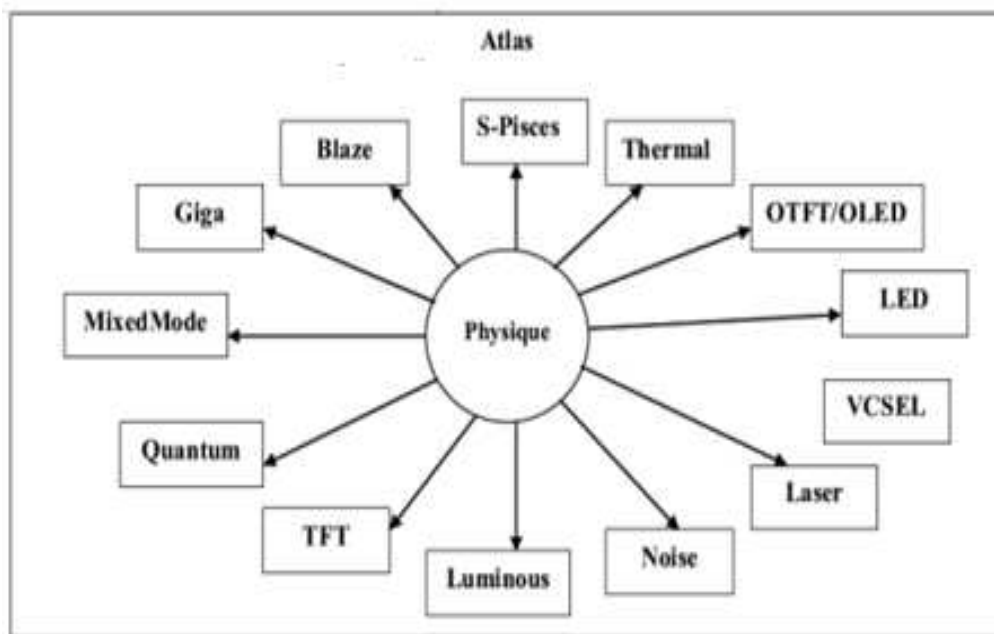


Figure III.4 : Les composants ou les modules d'ATLAS [75].

II.3.2.3. SSuprem3 : simulateur de procédé 1D avec prolongements simples de simulations des dispositifs.

III.4. Description de la structure LED simulée

Une étude bibliographique portant sur différentes structures des diodes électroluminescentes nous a permis de fixer notre choix sur la LED bleue à simple puits quantique à base de nitrure de galium d'indium InGaN. L'objectif de ce travail est de faire une conception par simulation sous ATHENA. Pour définir les paramètres technologiques nécessaires à la simulation, tels que les épaisseurs des couches, dopage ainsi que certains paramètres électriques, nous nous sommes basés sur des valeurs trouvées dans la littérature, concernant l'étude de différentes structures des diodes électroluminescentes.

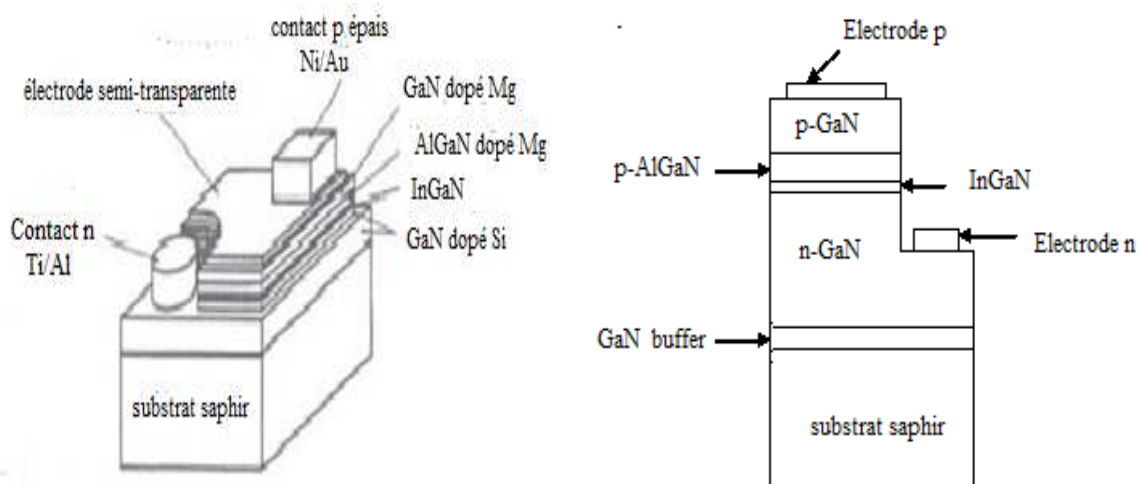


Figure III.5 : La structure de la LED simulée

III.5. Les étapes de simulation

III.5.1. Le Maillage

Le maillage joue un rôle important pour l'obtention de bonnes simulations. Celui-ci doit être fait avec la plus grande attention pour garantir la fiabilité des résultats. La méthode numérique utilisée pour résoudre les équations physiques est la méthode des éléments finis. Son principe de base est la discrétisation par éléments finis des équations à traiter. Les éléments qui définissent la maille élémentaire utilisée par le simulateur sont des prismes. Le choix de maillage doit être fait de façon à avoir un compromis entre la vitesse d'exécution et l'exactitude des résultats, tel qu'un maillage épais produit une rapide simulation, mais les résultats sont moins précis. Tandis qu'un maillage fin produit un ralentissement de la simulation, mais des résultats plus précis. Donc le maillage fin est plus intéressant de point de vue résultat dans la simulation [78,79].

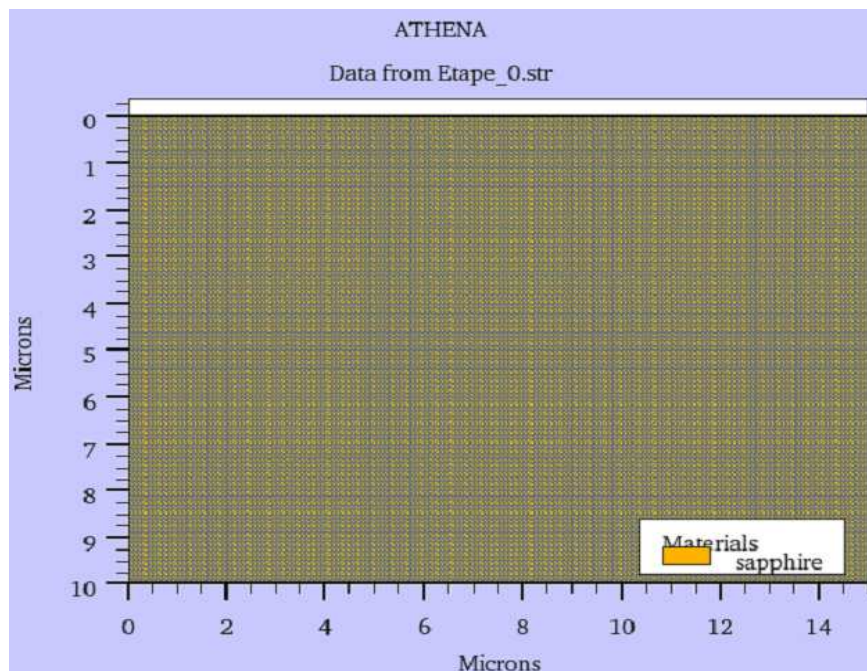


Figure III.6 : Maillage du substrat.

III.5.2. Définition du substrat

L'étape initiale est la définition du substrat de départ, nous avons choisi le substrat saphir (Al_2O_3 monocristallin) d'orientation (0001) du fait qu'il est le plus utilisé dans la fabrication des diodes électroluminescentes.

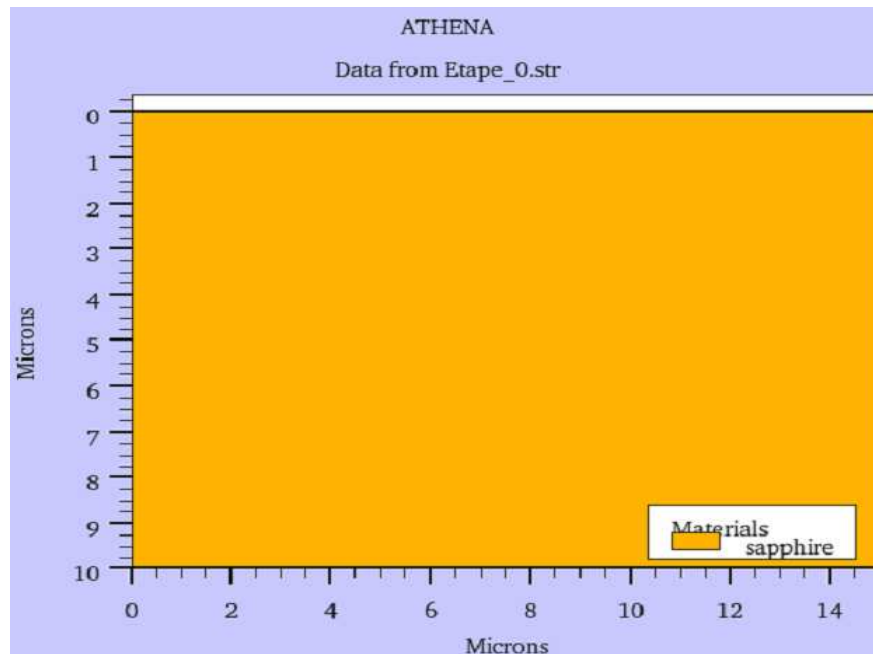


Figure III.7 : Définition de substrat.

III.5.3. Le dépôt des couches

III.5.3.1. Dépôt de la couche tampon (buffer)

La première étape est le dépôt de la couche GaN buffer d'une épaisseur de $0.03 \mu\text{m}$ non dopé par épitaxie en phase vapeur organométalliques (EPVOM), dans le but d'améliorer la qualité du substrat. La température de dépôt se situe autour de $550 \text{ }^\circ\text{C}$, cette faible température permet d'obtenir une distribution homogène des atomes sur la surface du substrat. Dans ces conditions de dépôt la couche tampon est amorphe, et ce n'est que lors de la croissance de la couche principale à plus haute température typiquement $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ qu'elle va cristalliser.

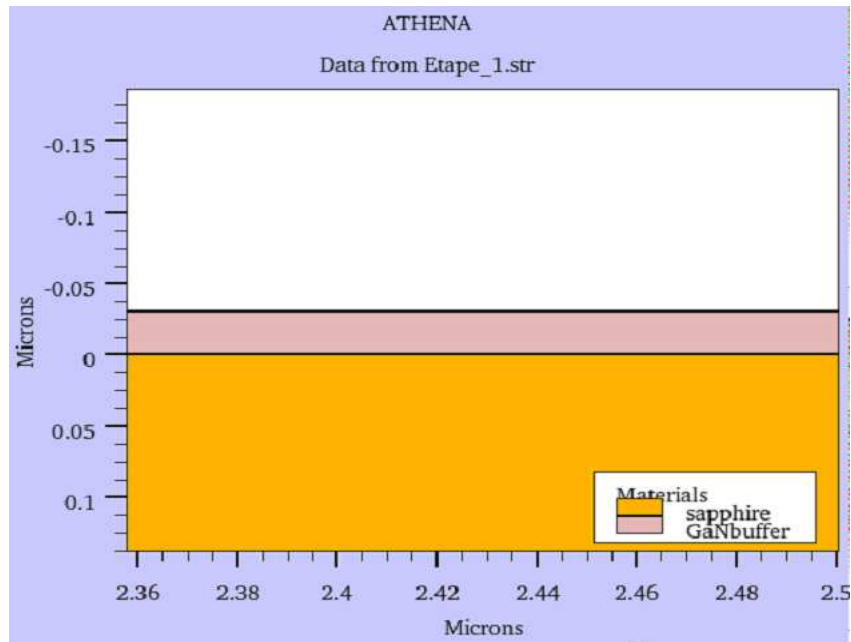


Figure III.8 : Dépôt de la couche buffer.

III.5.3.2. Dépôt de la couche GaN type N

La deuxième étape est l'épitaxie par la méthode (EPVOM) d'une couche de nitrure de gallium (GaN) dopé uniformément au silicium (Si) avec une concentration de $10^{20}/\text{cm}^3$ sous une température de 1050°C , l'épaisseur de la couche est de $4\mu\text{m}$. Ensuite une étape de gravure sèche d'une partie de GaN est nécessaire pour le dépôt des électrodes dans la phase finale.

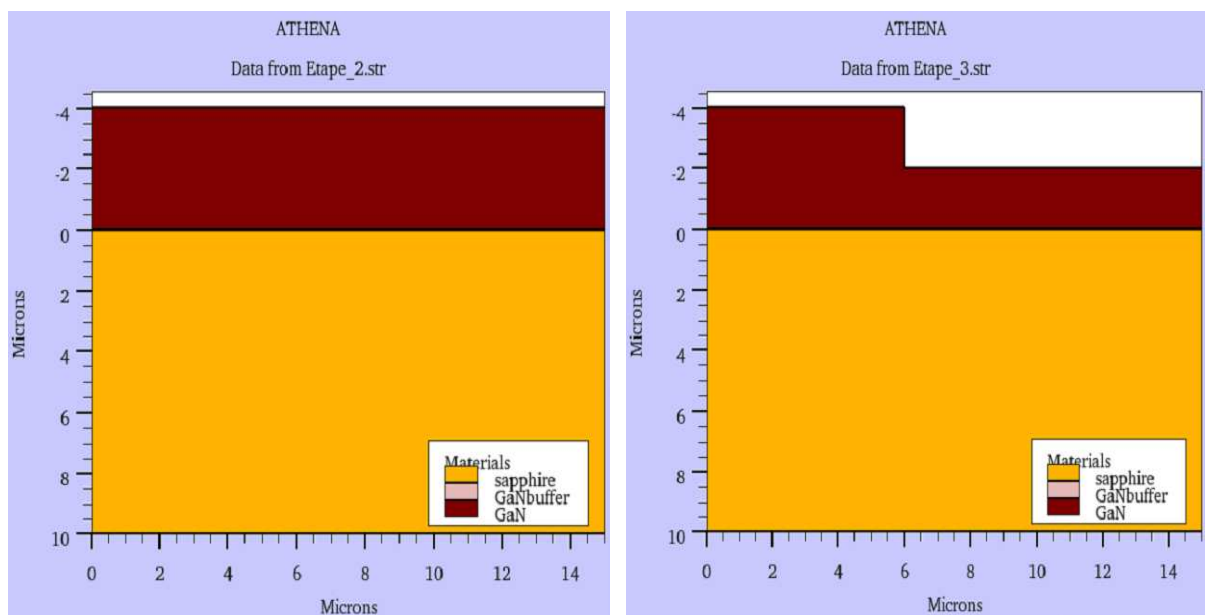


Figure III.9 : Dépôt et gravure de GaN type N.

III.5.3.3. Dépôt de la couche active InGaN

L'étape suivante est le dépôt de la couche active de la diode électroluminescente, qui consiste à une épitaxie par la méthode (EPVOM) de nitrure d'indium-gallium (InGaN) intrinsèque d'une épaisseur de 30 Å à une température de 800 °C, et avec un taux d'indium x de 25%.

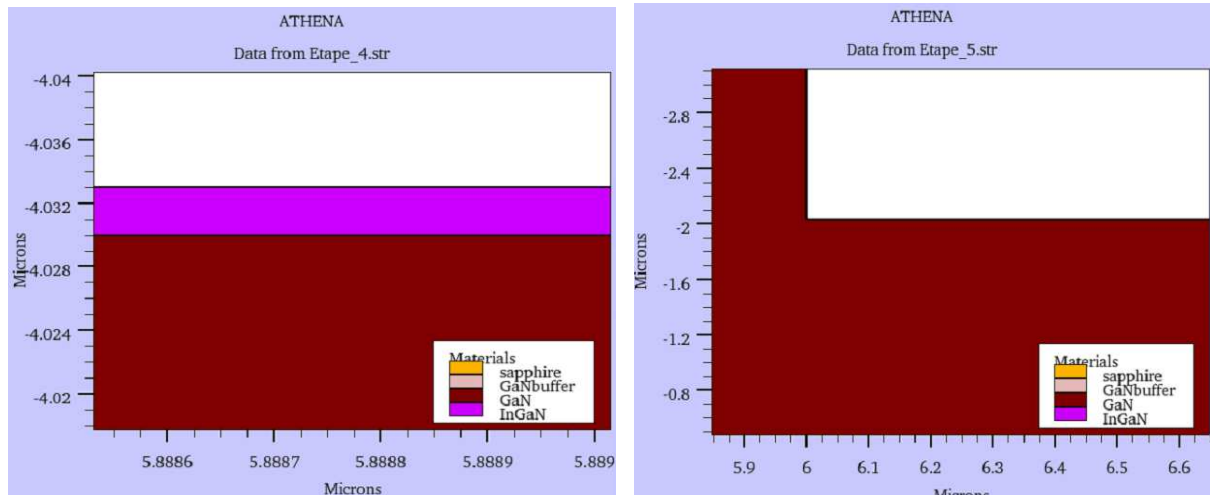


Figure III.10 : Dépôt et gravure de la couche active.

III.5.3.4. Dépôt de nitrure d'aluminium - gallium (AlGaN)

Pour limiter le problème de recombinaison des électrons dans le GaN de type p, il a été nécessaire de co-doper la couche p afin d'augmenter le taux de recombinaison dans le puits quantique ; ainsi une barrière à électrons AlGaN d'une épaisseur 0.3 μm dopée au magnésium Mg avec une concentration de $10^{18} / \text{cm}^3$ permettant de stopper les électrons est insérée entre les puits quantiques et le GaN de type p.

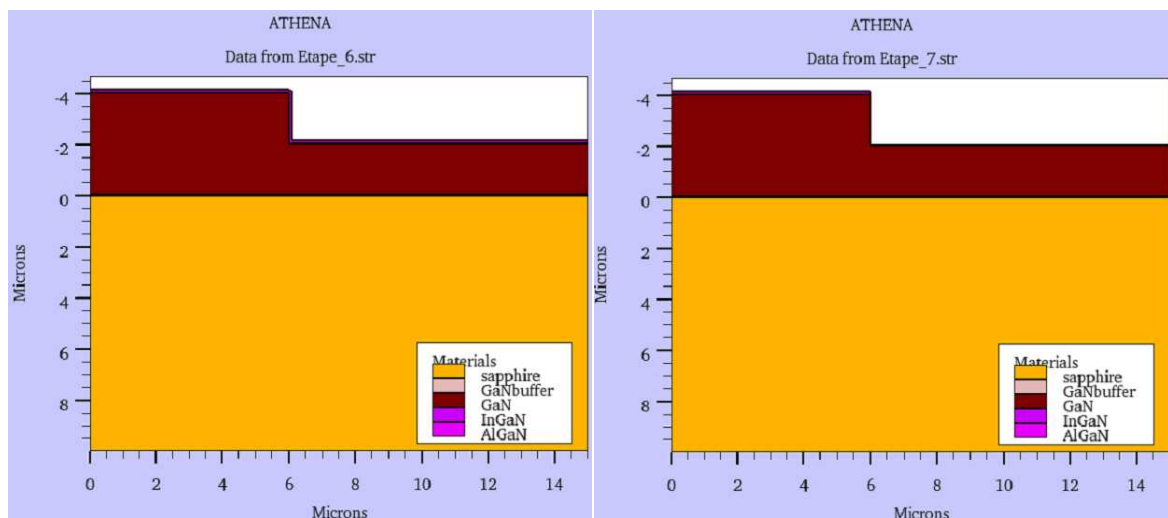


Figure III.11 : Dépôt et gravure de AlGaN.

III.5.3.5. Dépôt de GaN type P

Dans cette étape une couche de GaN est épitaxié par (EPVOM), l'épaisseur de la couche est de 0.5 μm , dopé uniformément par les atomes de magnésium Mg d'une concentration de $10^{18} / \text{cm}^3$. Lors de la croissance par EPVOM, l'omniprésence de l'hydrogène tend à passiver ce dopant en créant des complexes inactifs. Un recuit thermique à haute température (800°C) pendant 60min est nécessaire pour l'activation du Mg.

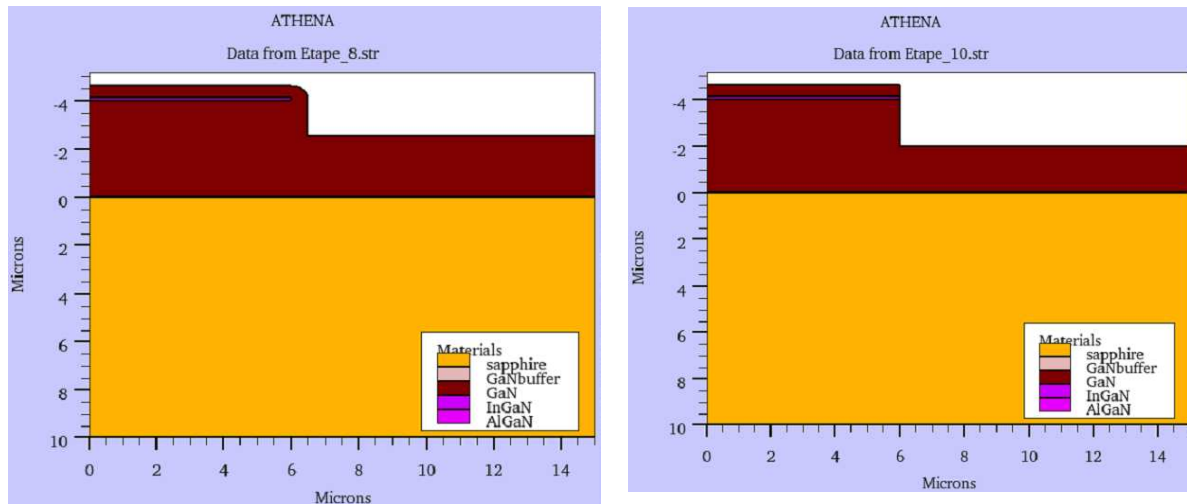


Figure III.12 : Dépôt et gravure de GaN type p.

III.5.4 Dépôt des contacts

III.5.4.1. Contact type n

La dernière étape technologique consiste à déposer des contacts pour pouvoir appliquer un courant électrique aux bornes de la LED. Le premier contact déposé et de type n (Titane : 150 \AA / Aluminium 750 \AA) par la méthode d'évaporation thermique

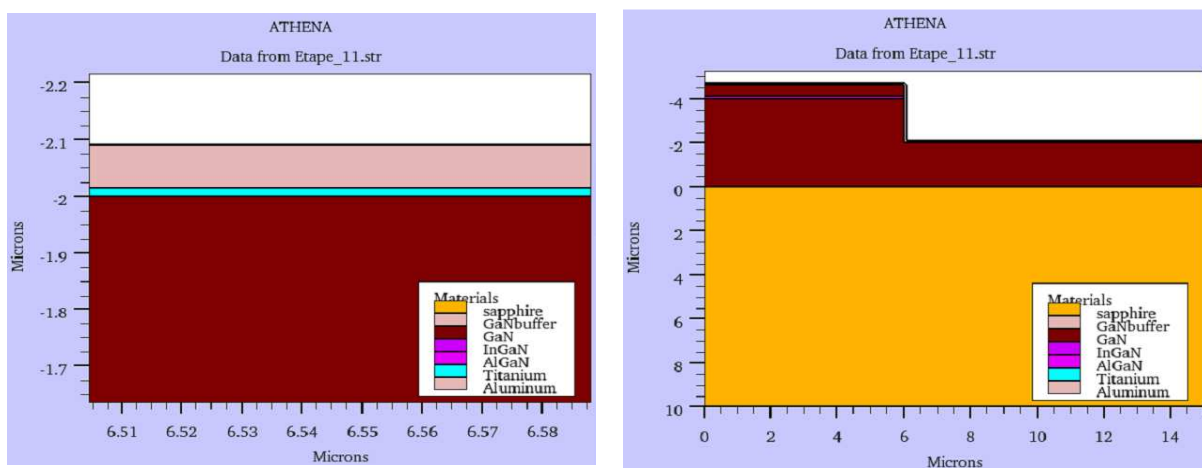


Figure III.13 : Contact type n

- **La photolithographie**

Cette opération consiste à déposer une résine photosensible en film mince et uniforme d'une épaisseur de 1.2 μm suivie d'une étape de gravure de la résine des régions qu'on ne veut pas protéger.

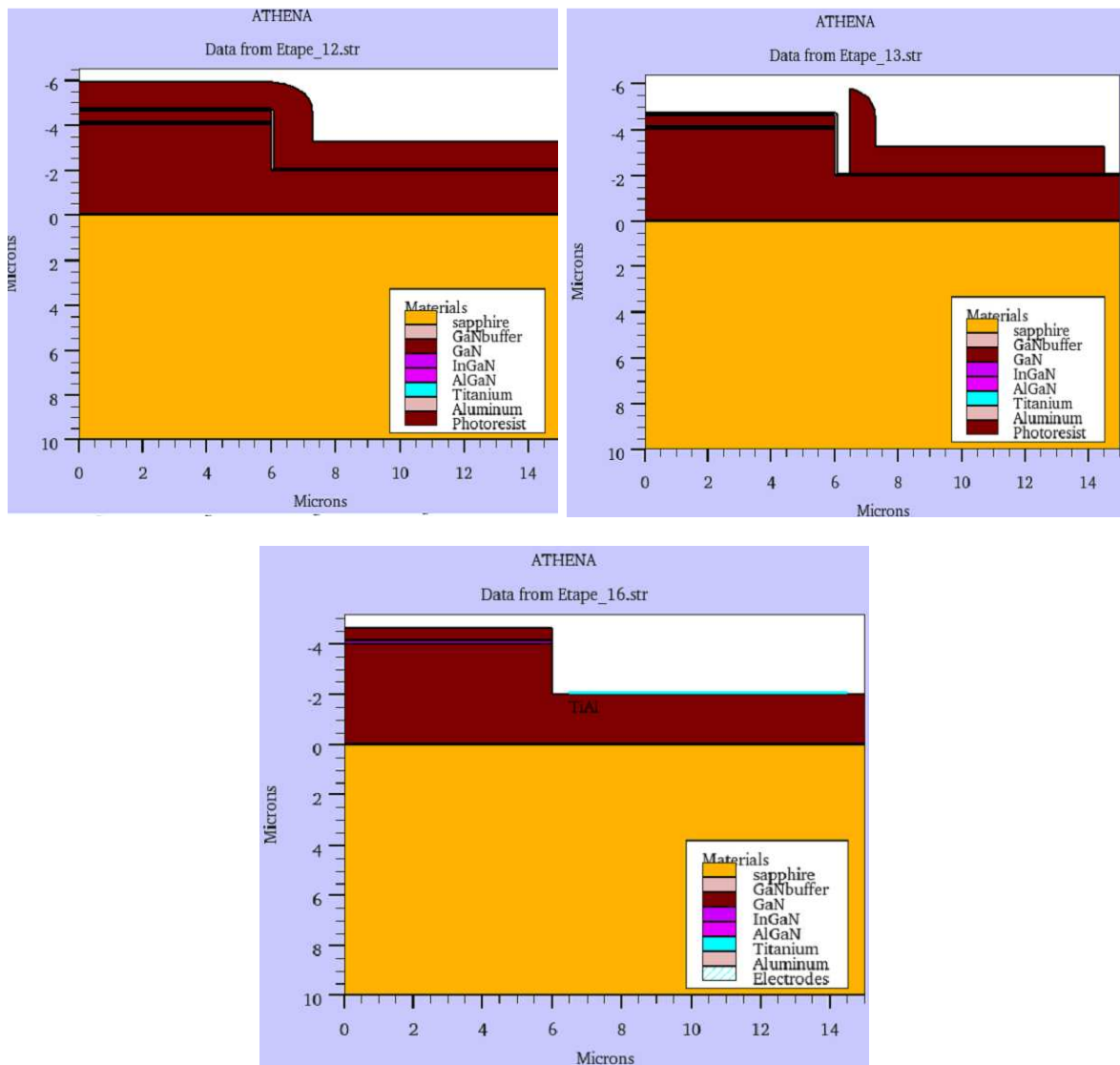


Figure III.14 : La méthode de photolithographie 1

III.5.4.2. Contact type p

Le deuxième contact qu'on va déposer et le contact type p formé de (Ni : 200Å /Au : 1000 Å) par la méthode d'évaporation thermique.

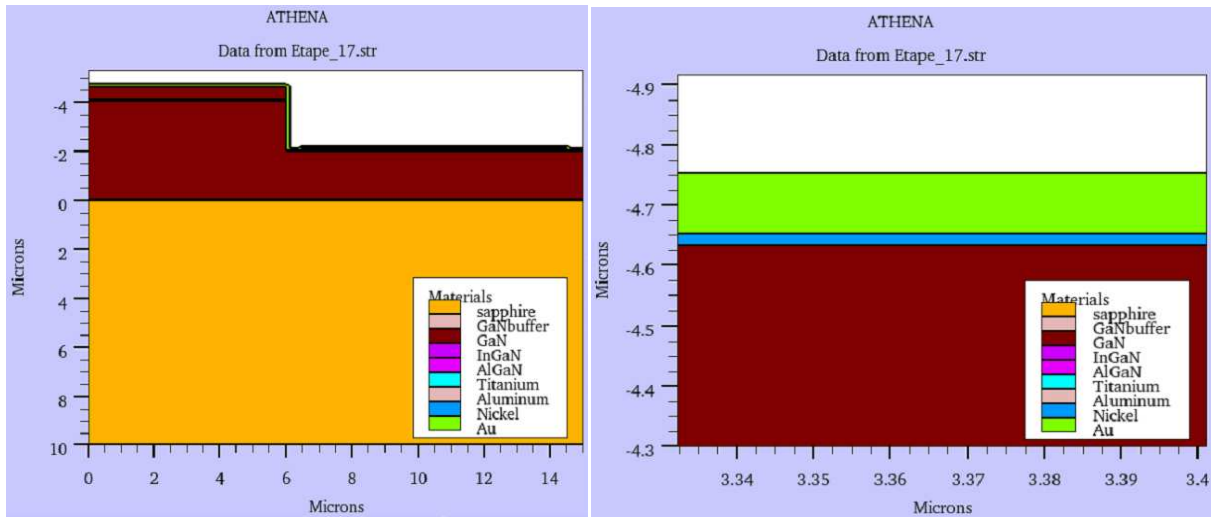


Figure III.15 : Dépôt du contact de type p

- **Photolithographie 2**

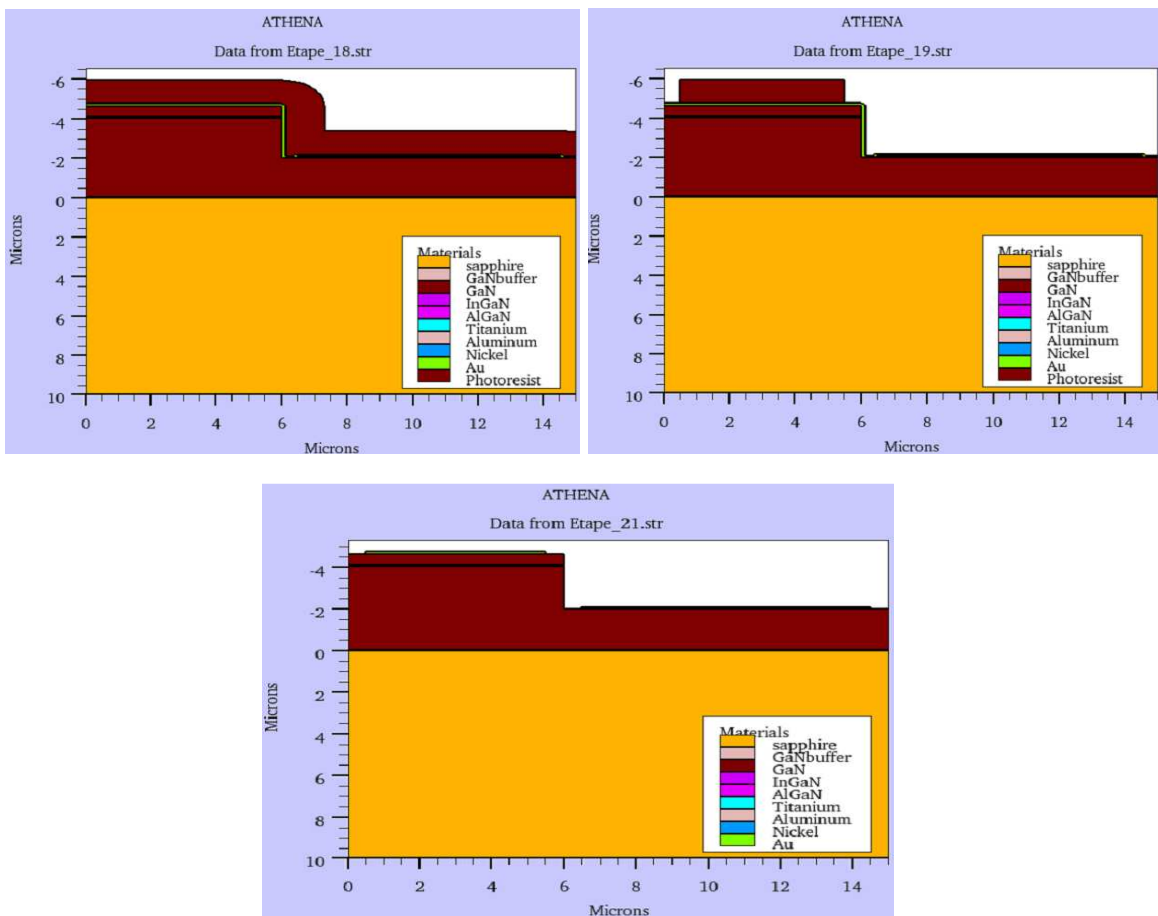


Figure III.16 : La photolithographie 2

III.5.5. La structure finale

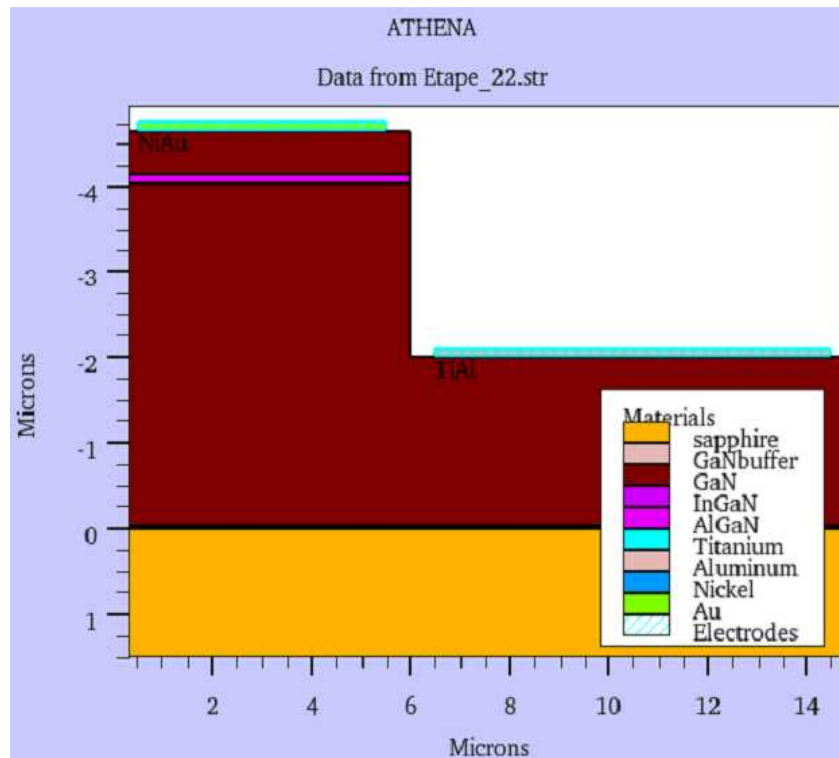


Figure III.17 : La structure finale

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le logiciel de simulation utilisé, en l'occurrence Silvaco, ses modules et outils de simulation ; nous avons procédé ensuite à une simulation des différentes étapes technologiques de réalisation de la structure LED bleue à simple puits quantique InGaN en utilisant l'outil de simulation Silvaco Athéna (2D) en fournissant les paramètres nécessaires pour sa réalisation, nous avons ainsi illustré toutes les étapes technologiques nécessaires : dépôt, gravure, évaporation, ... où nous avons traité la simulation des procédés comme étant une série d'événements successifs.

Chapitre IV :

Simulation des caractéristiques électriques de la LED

IV.1. Introduction

A fin de simuler les caractéristiques électriques et optiques de notre dispositif diode électroluminescente bleue à base de puits quantique InGaN, nous allons utiliser le logiciel « Silvaco-Atlas » en expliquant les étapes suivies pour simuler notre structure objet, et nous allons éclaircir l'influence de quelques paramètres de la diode électroluminescente comme le taux d'indium dans l'alliage InGaN .

IV.2. Les étapes de programmation

Après la présentation de la chaîne logicielle TCAD de SILVACO (chapitre III), sa composition interne et le fonctionnement d'Atlas nous allons maintenant présenter l'ordre des commandes propres à la logique de programmation d'Atlas. Ainsi il existe cinq groupes de commandes, ces groupes doivent être organisés correctement. Si l'ordre n'est pas respecté, un message d'erreur apparaît et le programme ne s'exécute pas d'une façon correcte [80].

- | |
|---|
| <p>1- Spécification de la structure</p> <ul style="list-style-type: none">• Maillage• Région• Electrode• Dopage <p>2- Spécification des matériaux et des modèles</p> <ul style="list-style-type: none">• Matériaux• Modèles• Contact• Interface <p>3- Sélection des méthodes numériques</p> <p>4- Sélection des paramètres à extraire</p> <ul style="list-style-type: none">• Log• Solve• Load• Save <p>5- Analyse des résultats</p> <ul style="list-style-type: none">• Extract• Tonyplot |
|---|

Figure IV.1: Groupes de commandes [80,81].

IV.2.1. Spécification de la structure

IV.2.1.1. Le maillage

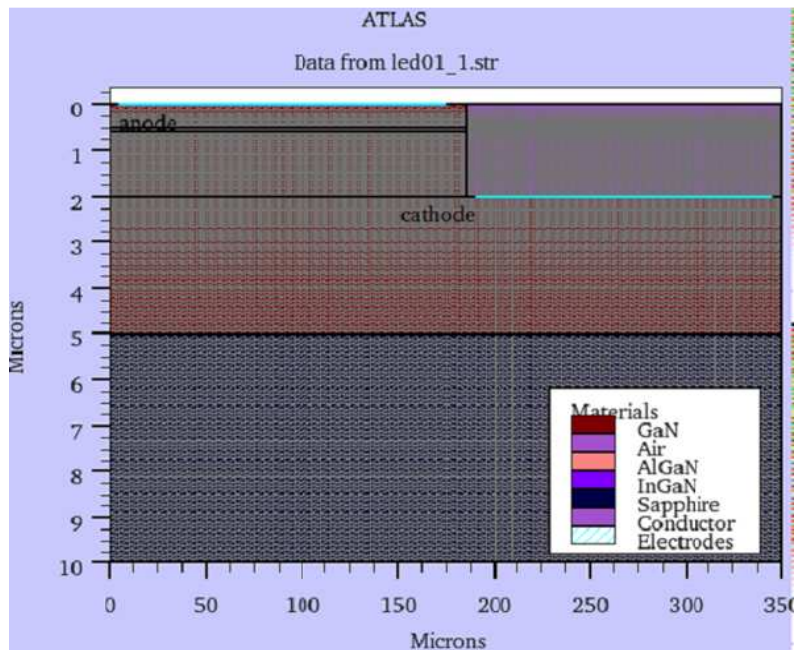


Figure IV.2 : Maillage à deux dimensions (x,y).

IV.2.1.2. Les régions

Après avoir défini le maillage, il est nécessaire de définir les régions dont le format de définition des régions est le suivant:

Region nombre = < integer > < material_type > / < position des paramètres >

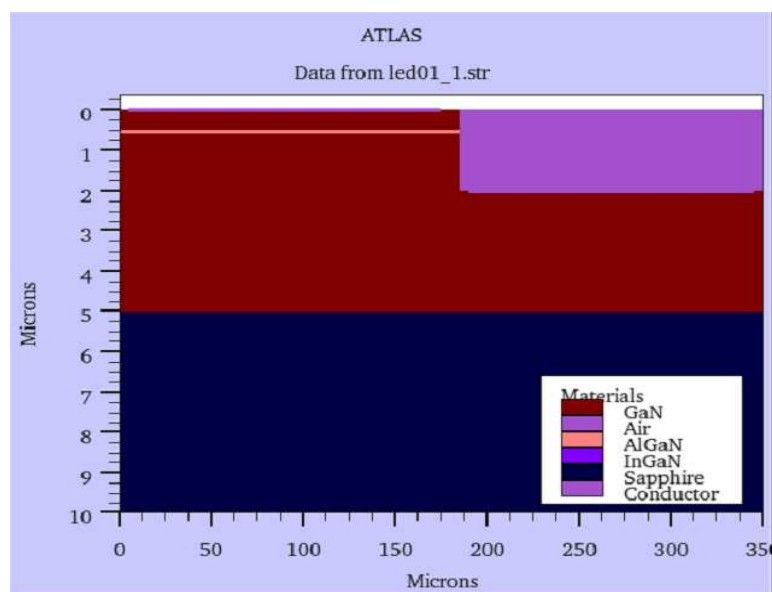


Figure IV.3: Définition des régions.

IV.2.1.3. Les électrodes

« Atlas » a une limite de 50 électrodes qui peuvent être définies. Le format de définition des électrodes est comme suit:

Electrode name = < nom de l'électrode > < position des paramètres >

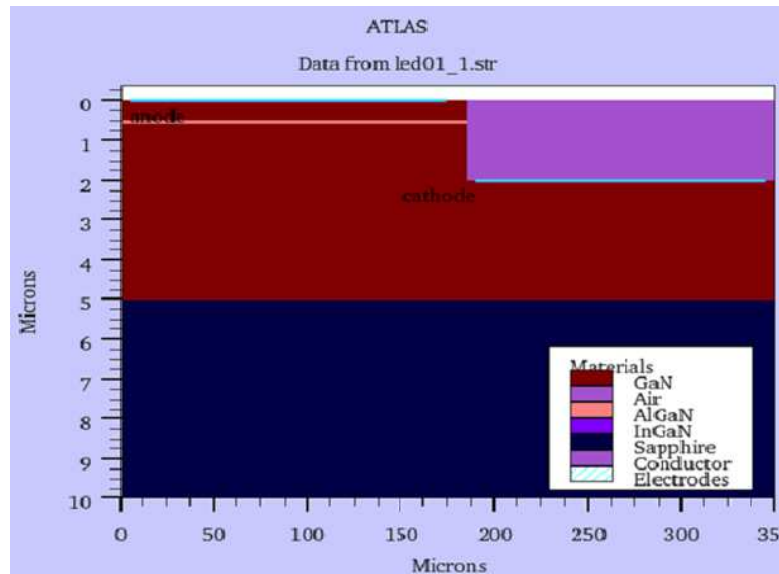


Figure IV.4: Dépôt des électrodes

IV.2.1.4. Le dopage

Le dernier aspect de la spécification de la structure qui doit être défini est le dopage.

Le format de la déclaration de dopage dans « Atlas » se présente comme suit:

DOPAGE < type de distribution > < type de dopant > / < position des paramètres >. Le dopage peut être de type N ou P. Le type de distribution peut être uniforme ou gaussienne.

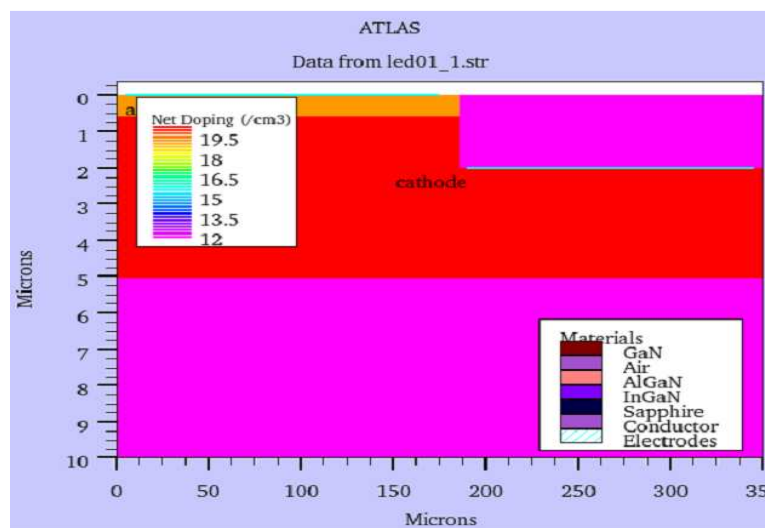


Figure IV.5 : Type de dopage.

IV.2.2. Spécification des matériaux et des modèles

IV.2.2.1. Le matériau

Le format de la déclaration du matériau est le suivant :

MATERIAL < localisation > < définition du matériau >

Plusieurs autres paramètres peuvent être définis par la déclaration « Material », comme exemples de ces paramètres : la mobilité d'électrons (MUN) et la mobilité de trous (MUP), (TAUN0) et (TAUP0) qui sont les durées de vie des électrons et des trous respectivement.

IV.2.2.2. Modèles physiques

Les modèles physiques sont classés en cinq catégories: mobilités des porteurs de charges, mécanismes de génération-recombinaison, les statistiques de transport, l'ionisation par impact et l'effet tunnel. La syntaxe de la déclaration du modèle est la suivante:

MODEL< paramètres générales > / < paramètres du modèle >

IV.2.2.3. Le contact

Le contact détermine les attributions des électrodes. La syntaxe du contact est la suivante : contact nombre = < n > | NOM = <ename>

IV.2.2.4. L'interface

Les limites du semiconducteur ou de l'isolant sont déterminées dans la déclaration d'interface. La syntaxe est la suivante: INTERFACE [<parameters>]

IV.2.3. Sélection des méthodes numériques

Après la précision du modèle de matériaux, la sélection de la méthode numérique doit être indiquée. Parmi les différentes méthodes numériques de résolution des systèmes d'équation, trois types de techniques sont utilisées dans « Silvaco-Atlas »:

- Méthode de Gummel
- Méthode de Newton
- Méthode des blocs

IV.2.4. Spécification de Solution

IV.2.4.1. Log

Log enregistre toutes les caractéristiques finales de simulation dans un fichier de données. N'importe quel type de données, générées par la commande SOLVE est sauvé après la commande LOG. Si dans le programme il y a plusieurs commandes LOG, chaque fois le fichier log qui a été ouvert avant est fermé et un nouveau fichier log est ouvert.

IV.2.4.2 Solve (Résoudre)

L'instruction SOLVE suit l'instruction LOG. Elle effectue une solution pour un ou plusieurs points de polarisation.

IV.2.4.3 Load et Save (chargement et sauvegarde)

L'instruction LOAD introduit, à partir d'un fichier existant, pour chaque point de polarisation les solutions précédentes en tant que proposition initiale.

L'instruction SAVE permet l'enregistrement de toutes les informations obtenues pour un noeud dans un fichier de sortie.

IV.2.5. Analyse des résultats

EXTRACT : les commandes de ce type sont utilisées pour extraire les valeurs bien précises des paramètres des deux types des fichiers log ou structure.

TONYPLOT : les résultats et les informations obtenues par la simulation peuvent être affichés graphiquement avec tonyplot.

IV.3. Simulation des caractéristiques électriques de la diode électroluminescente

IV.3.1. Caractéristique courant-tension (I-V)

Dans son fonctionnement normal, une LED s'utilise en polarisation directe, c'est-à-dire lorsque le courant circule de l'anode vers la cathode.

La caractéristique I-V nous indique qu'il est nécessaire d'alimenter une LED avec une tension minimale pour que celle-ci émette de la lumière appelée tension seuil V_D . On observe une augmentation brusque du courant lorsque la tension V_D est atteinte, cette tension dépend essentiellement de l'énergie de la bande interdite du semiconducteur formant la LED dans notre cas elle est de 3.5 volts.

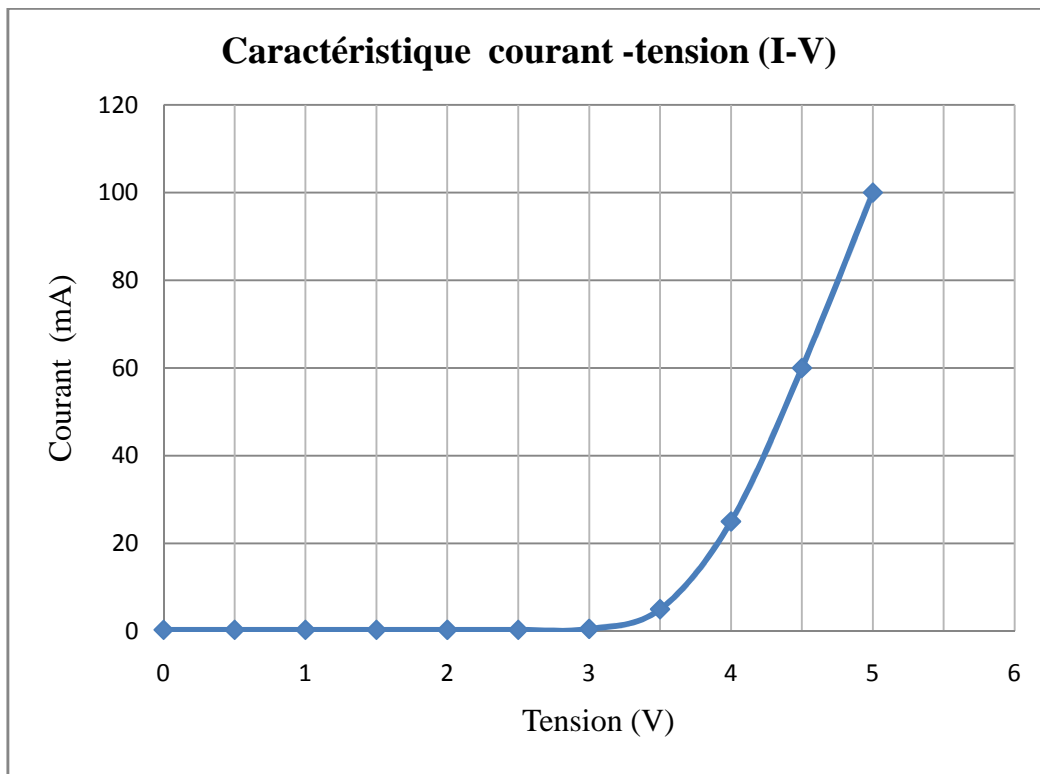


Figure IV.6 : La caractéristique courant –tension.

IV.3.2 Caractéristique puissance-courant (P-I):

A partir de la courbe courant tension (I-V) nous pouvons tracer la caractéristique puissance courant (P-I) en appliquant la formule : $P = U.I$

On observe sur la figure IV.7 une augmentation linéaire de la puissance lumineuse en fonction du courant. Néanmoins, plusieurs travaux [83] ont montré que l'augmentation du courant n'est souvent pas la meilleure solution pour augmenter l'efficacité de la LED, du fait de la non linéarité de la relation entre le flux lumineux et le courant, entraîne une baisse de l'efficacité lumineuse d'une LED lorsque le courant qui la parcourt est très grand, à cause de la grande chaleur dégagée qui n'est pas toujours contrôlable.

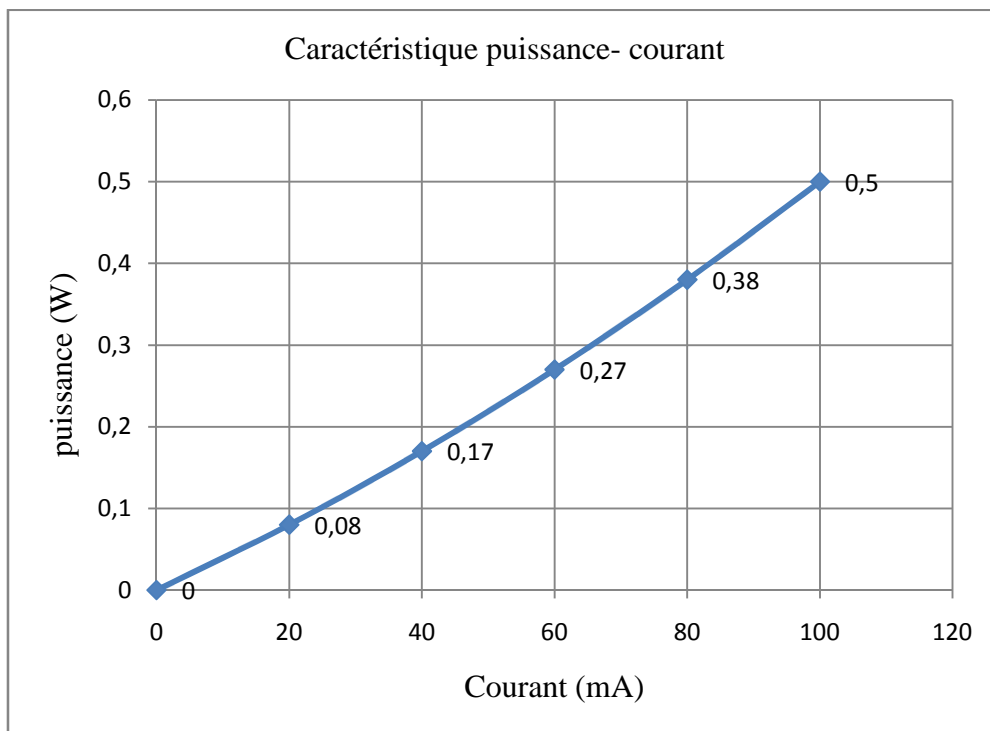


Figure IV.7 : La caractéristique puissance-courant (P-I).

IV.3.2. Spectre de la lumière émise

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

On observe sur le spectre montré sur la figure IV.8 que la longueur d'onde de la lumière émise est à 465nm, correspondant effectivement à la lumière bleue. Cette émission est obtenue avec un taux d'indium de 25% dans l'alliage InGaN d'une épaisseur de 30 Å.

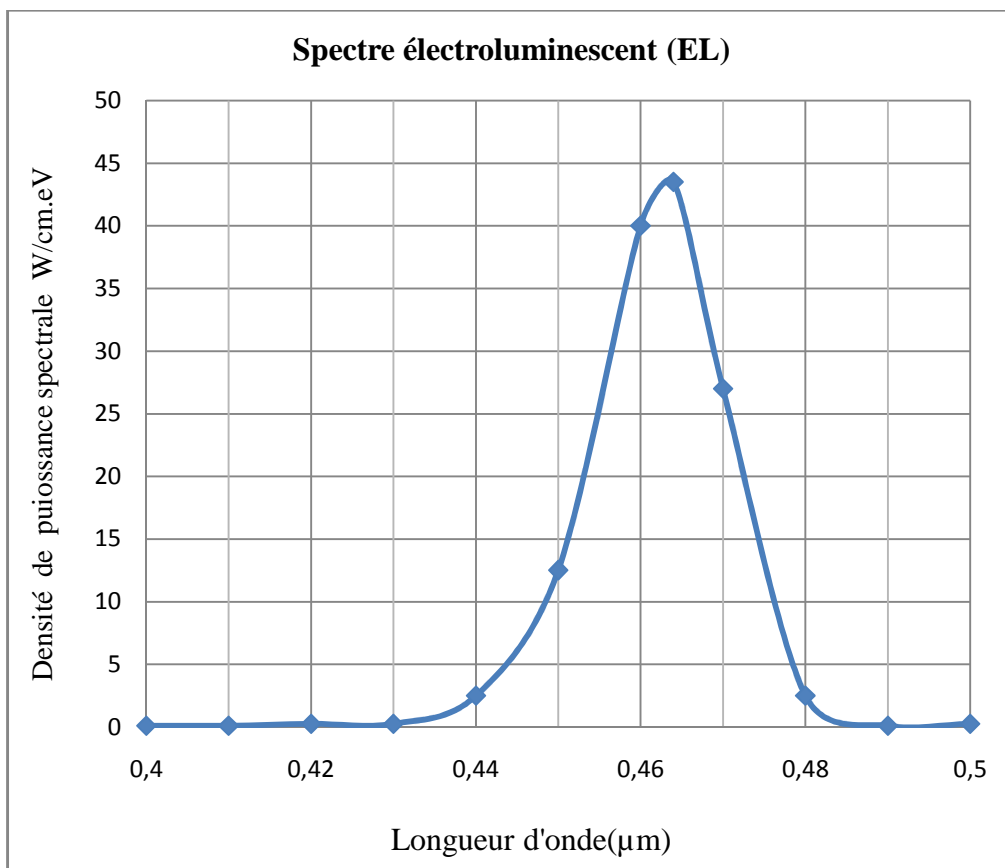


Figure IV.8 : Le spectre électroluminescent de la LED bleue.

IV.3.3. Variation de la concentration des trous et des électrons en fonction de la profondeur de la LED

La figure IV.9 nous indique les valeurs de la concentration des électrons et des trous répartie sur la profondeur de la diode électroluminescente pour différentes tensions de polarisation.

La concentration des porteurs est maximale dans la région $0.6 \mu\text{m}$, cette région correspond bien à la position du puits quantique que nous avons défini dans le programme de simulation, cette grande concentration est due au confinement des électrons et des trous dans la couche active (puits).

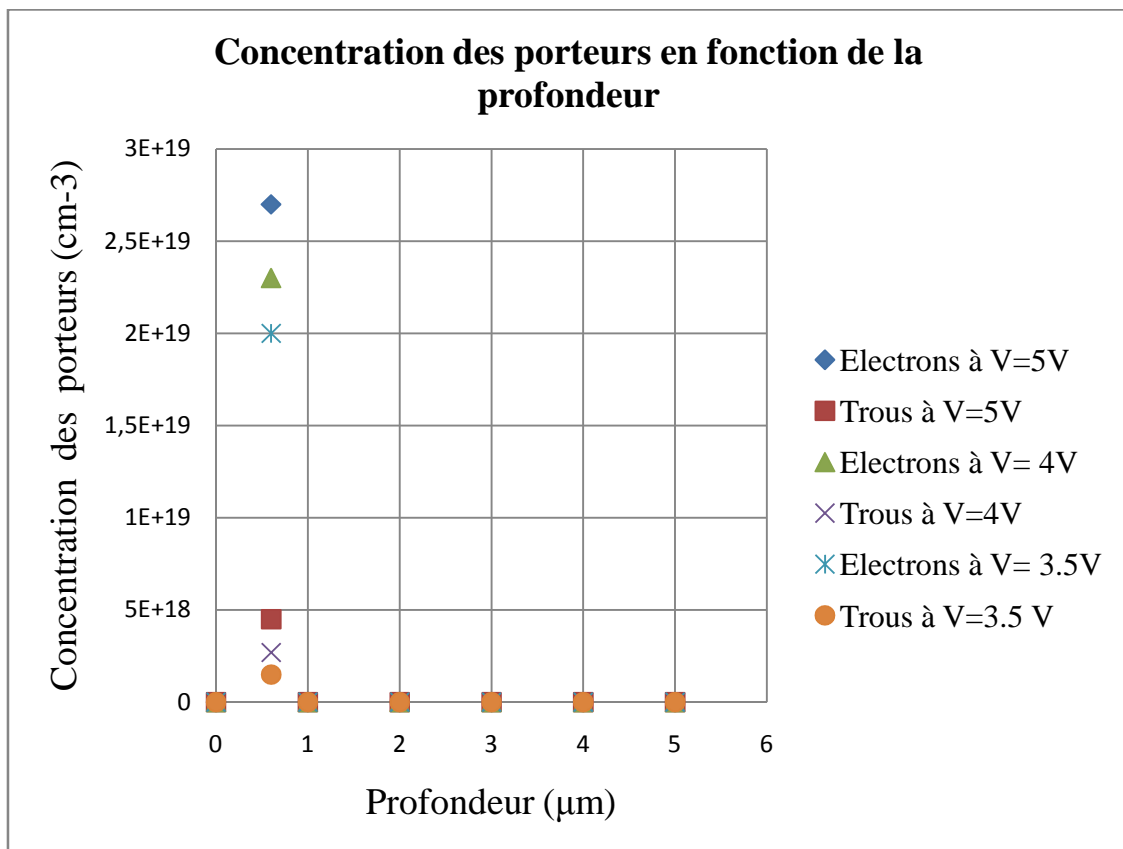


Figure IV.9 : Variation de la concentration des trous et d'électrons en fonction de la profondeur

IV.3.4. Effet du changement de taux d'indium dans l'alliage InGaN

La longueur d'onde de la lumière émise, donc la couleur, peut être changée en changeant la composition d'indium dans l'alliage du puits (InGaN).

La figure IV.10 nous montre les longueurs d'onde émises pour différents taux d'indium dans la couche active InGaN, tel que :

Pour $x=0.4$: émission dans le vert (530 nm).

Pour $x=0.05$: émission ultraviolet (375nm).

Pour $x=0.25$: émission bleue (465 nm).

La comparaison entre les différents spectres nous montre que l'intensité du spectre de la LED ultraviolet est petite par rapport aux autres, ceci est dû à la petite quantité d'indium dans la couche active (0.05), car comme on a vu dans le chapitre II, le bon rendement des LED en InGaN est dû principalement à la concentration d'indium en petits amas, lorsqu'il dépasse un certain seuil. Ces amas, ayant une bande interdite plus petite que l'environnement local, piègent les porteurs et les excitons réduisant les recombinaisons non radiatives.

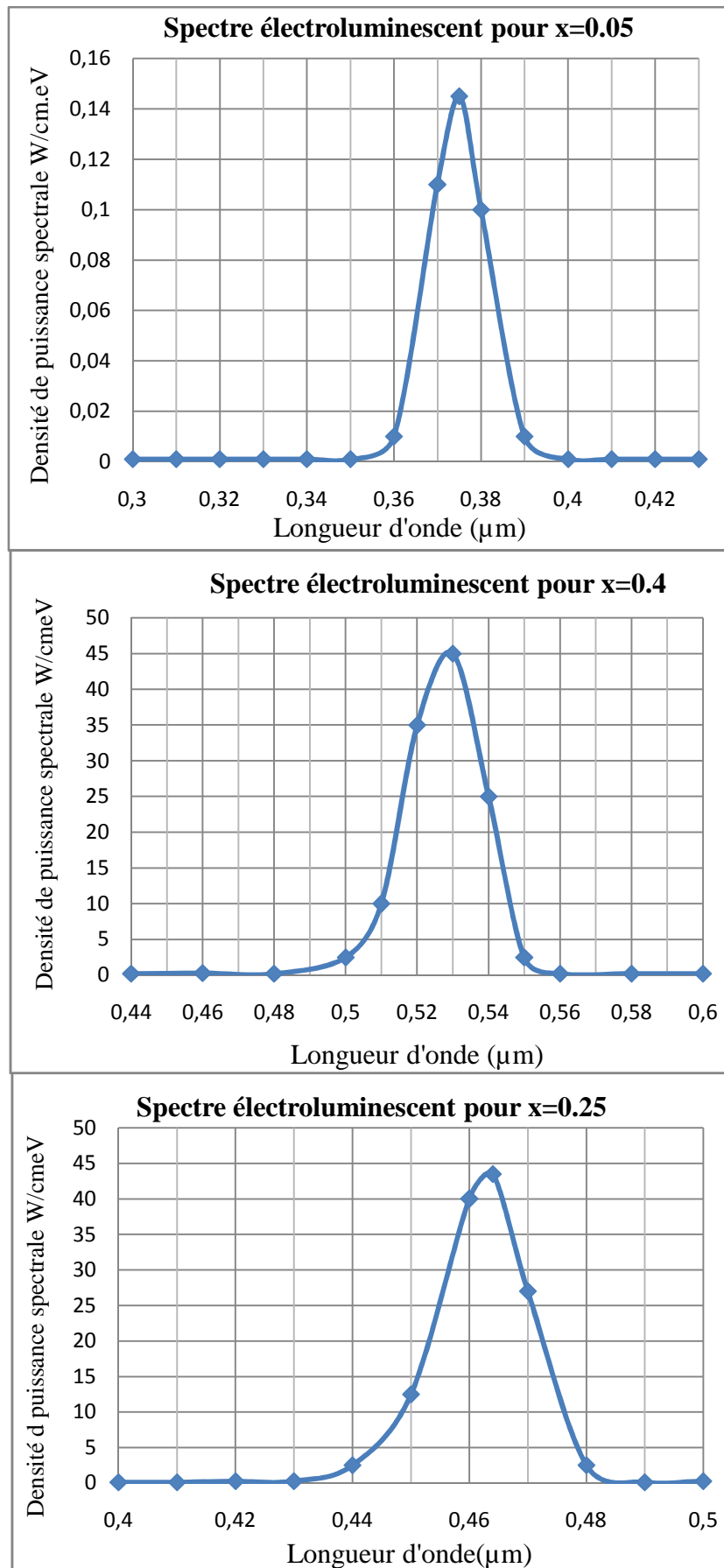


Figure IV.10 : Le spectre électroluminescent pour différents taux d'indium

IV.3.5. Effet de la tension de polarisation

La figure IV.11 montre le spectre électroluminescent émis à différentes valeurs de tension : 3.5V, 4V, 5V respectivement. On remarque que plus en augmente la tension plus on aura une importante émission, car lorsque cette dernière augmente, la barrière de potentiel entre le GaN de type n et le GaN de type p s'abaisse, ainsi le nombre de porteurs injectés dans le puits augmentent ainsi que la recombinaison radiative.

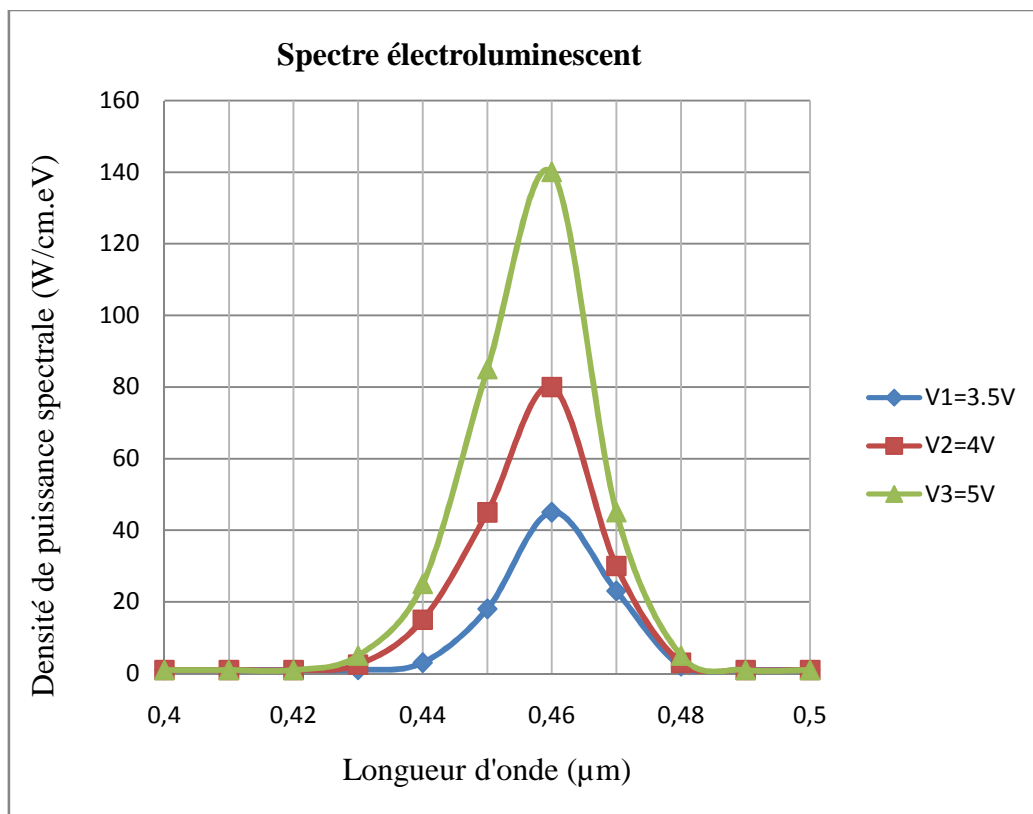


Figure IV.11 : Influence du changement de tension de polarisation

IV.4. Conclusion

La simulation électrique de la diode électroluminescente en utilisant le l'outil de simulation ATLAS nous a permis d'extraire les caractéristique électriques (I-V, P-I) de la LED ainsi que d'autre caractéristiques comme la longueur d'onde émise et la concentration des électrons et des trous en fonction de la profondeur. Nous avons aussi montré l'influence du changement de la composition x de l'indium dans la couche active sur la couleur émise ainsi que l'effet de variation de la tension de polarisation sur intensité de spectre électroluminescent émis.

Conclusion générale

Les diodes électroluminescentes représentent un potentiel important pour la lumière du futur, elles sont devenues en très peu de temps des produits incontournables grâce notamment aux systèmes LEDs optimisés, plus efficaces, plus lumineux, plus sûrs, plus faciles à utiliser et, en parallèle, avec une durée de vie plus accrue et une consommation réduite.

Dans le cadre de notre travail nous avons commencé par dresser un état de l'art des diodes électroluminescentes où nous avons représenté les points importants de cette technologie à savoir : le principe de fonctionnement des différents types de LED : homojonction, hétérojonction et puits quantique ainsi que leurs caractéristiques, toutes les étapes de fabrication des LEDs, problématique de l'extraction de lumière et les méthodes d'obtention de la lumière blanche.

Les diodes électroluminescentes blanches ont pu voir le jour grâce au formidable essor des nouveaux matériaux qui sont les semiconducteurs III-N. Effectivement, les propriétés physiques de ces derniers leur permettent de convertir de façon efficace, l'énergie électrique en énergie lumineuse. Ces matériaux possèdent en général, un gap direct relativement élevé, capable de couvrir une grande partie du spectre visible et de l'UV. D'où, l'importance de notre deuxième partie de ce mémoire, où nous avons étudié les propriétés physiques et électriques des semiconducteurs III-N, qui les rendent attractives pour l'optoélectronique. Nous nous sommes focalisés sur l'étude de l'alliage nitrure de gallium d'indium InGaN qui est le matériau le plus prometteur pour les LEDs, et retracer les principales techniques de croissance qui permettent la fabrication des matériaux de bonne qualité.

En nous appuyant sur une étude bibliographique portant sur différentes structures des diodes électroluminescentes blanches, nous avons fixé notre choix sur les LEDs blanches à simple puits quantique à base de nitrure de gallium d'indium InGaN et d'une couche de phosphore.

Nous avons ainsi dans le cadre de notre travail, effectué une conception par simulation, sous SILVACO, d'une diode électroluminescente bleue à base d'InGaN. Pour définir les paramètres technologiques nécessaires à la simulation, tels que les épaisseurs des couches, dopage ainsi que certains paramètres électriques, nous nous sommes basés sur des valeurs trouvées dans la littérature, concernant l'étude de différentes structures des diodes électroluminescentes.

La structure que nous avons simulée est une diode électroluminescente bleue à base de puits quantique InGaN dont l'épaisseur est de l'ordre de $0.003 \mu\text{m}$ prise en sandwich entre deux couches de GaN dopées respectivement n et p. Ce sandwich confine dans la région active, à la fois les électrons et les trous augmentant ainsi les recombinaisons radiatives. Nous avons ensuite décrit les procédés technologiques nécessaires à la réalisation de notre structure à l'aide du module de simulation Athéna. Enfin nous avons extrait les principales caractéristiques électriques de la LED par le logiciel de simulation Atlas.

En terme de perspectives, il nous paraît important de développer une manipulation expérimentale pour étudier le comportement de la LED simulée préalablement avec le simulateur TCAD-SILVACO en faisant varier plusieurs paramètres tels que : l'épaisseur de la couche active, la température en y insérant plusieurs puits quantiques et comparer les résultats obtenus avec ceux d'une LED comprenant un seul puits quantique. L'autre axe pouvant permettre un développement de ces composants au niveau expérimental est la possibilité d'améliorer la qualité cristalline du semiconducteur InGaN (réalisation des nonofils d'InGaN) dans le but de minimiser les défauts et les dislocations qui diminuent (actuellement) le rendement des LEDs.

Bibliographie

- [1] N. Narendran, J.D .Bullough, N. Maliyagoda: «What is useful life for white light LEDs? » Journal of the Illuminating Engineering Society, pp.57-67, 2000.
- [2] P. Mottier, P. Messaoudi: « Les LEDs: l'éclairage de futur? », Veille Technologique N° 38, pp.9-13, 18-27, 2010.
- [3] Philips: « Eclairage à diode électroluminescente LED: plus qu'une nouvelle technologie d'éclairage », 2009.
- [4] G.Wantz, thèse doctorat : « Elaboration, caractérisation et optimisation de diodes électroluminescentes à base de polymère conjugués », Université de Bordeaux I, 2008.
- [5] G. Zissis : « Diode électroluminescente pour éclairage », Cahiers Innovation IN-18 Technique de l'Ingénieur, pp.1-13, 2011.
- [6] G. Zissis : « Diode électroluminescente blanche et éclairage général », Réseau Ecrin, revue trimestrielle N°6, pp.1-8, 2007.
- [7] Comité d'Experts Spécialisés (CES), Rapport d'expertise collective : « Effets sanitaires des systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes (LED) », Anses Saisine N° 0408, pp.40-67,183-215, 2010.
- [8] A. Dussaigne, thèse de doctorat : « Diodes électroluminescentes blanches monolithiques », Université de Nice-Sophia Antipolis, 2005.
- [9] B. Monteil, J.F. Bassereau, Y. Desnouveaux: « Maîtrise des caractéristiques des diodes électroluminescentes : un enjeu majeur en éclairage général », Arts et Métiers, Paris, 2006.
- [10] Hahn: « New developments for high power LEDs »,In *FORUM LED, Lyon France*, 2009
- [11] B.Damilano, J.Brault, A.Dussaigne et J.Massies : « Diodes électroluminescentes blanches pour l'éclairage », Images de la Physique, p. 28, 2002.
- [12] N.Pousset, thèse de doctorat : « Caractérisation du rendu du des couleurs des nouvelles sources du rendu des les diodes électroluminescentes », Conservatoire national des arts et métiers, 2009.
- [13] Commission internationale de l'éclairage : « Vocabulaire international de l'éclairage», CIE, pp.4-17, 1987.
- [14] R.Baillet, thèse de doctorat : « Méthodologie d'analyse de défaillance pour l'évaluation de la fiabilité de diodes électroluminescentes GaN », Université de Bordeaux, 2011.
- [15] http://www.philipslumileds.com/pdfs/PG01_KO.PDF.

- [16] M. Olivier, thèse de doctorat : « Développement de briques technologiques pour la réalisation de diodes schottky sur nitrure de gallium », Université François – Rabelais, 2010.
- [17] H. Mathieu : « Physique des semiconducteurs et des composants électroniques », 5th ed, DUNOD, Ed. Sciences Sup, 2004.
- [18] E. Fred Schubert, livre: « Light emitting diodes » second edition Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, pp.59-84,222-236, 2006.
- [19] G. Held: « Introduction to Light Emitting Diode Technology and Applications », CRC Press, 2008.
- [20] « Silicone Material Solutions for LED Packages and Assemblies », Momentive Performance Materials, pp.1-9, 2007.
- [21] B. Riegler: « Optical Silicones for use in Harsh Operating Environments », Proceedings of Optics East, 2004.
- [22] R. Jaeger, M. Gleria: « Inorganic Polymers », 2007.
- [23] C. P. Wong, et al: « Understanding the Use of Silicone Gels for Nonhermetic Plastic Packaging », IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, vol.12, pp. 421-425, 1989.
- [24] C.Ngo, H.Ngo, livre : « Les semi conducteur de l'électron aux dispositifs » Dunod, Paris, pp. 94- 97, 179-184, 2003.
- [25] P.Mayé, livre : « Optoélectronique industrielle conception et application », Dunod, Paris, pp. 45-65, 2001.
- [26] R. Maciejko : « Optoélectronique », Presses Internationales Polytechnique, pp.196-199 2002.
- [27] N.Pousset, B. Rougié, S. Aubert, A. Razet, manuscrit : « Colorimétrie des LED incertitude et influence du courant électrique », Revue française de métrologie n° 20, Vol 4 2009.
- [28] Philips led signage partner : « Systhème LED », pp.50-52, 2005.
- [29] L.Massol : « LEDs blanches les différentes technologies », Led Engineering Développement, 2006.
- [30] S. Nakamura, G. Fasol: « The Blue Laser Diode », édition Springer, 1997.
- [31] A.Dussaigne, thèse de doctorat :« Diodes électroluminescentes blanches monolithiques », Université de Nice-Sophia Antipolis, 2005.
- [32] G.Wantz, thèse doctorat : « Elaboration, caractérisation et optimisation de diodes électroluminescentes à base de polymère conjugués », Université de Bordeaux I, 2008.

- [33] H. Choukri, thèse doctorat : « Contrôle de la couleur d'émission d'une OLED multicouche *via* la diffusion des excitons », L'université Paris 13, 2008.
- [34] H. Kanno, N.C. Giebink, Y. R. Sun, S. R. Forrest: « Stacked white organic light-emitting devices based on a combination of fluorescent and phosphorescent emitters », *Applied Physics Letters*, vol. 89, pp. 023503, 2006.
- [35] G. Parthasarathy, G. Gu, S. R. Forrest: « A full-color transparent metal-free stacked organic light emitting device with simplified pixel biasing », *Advanced Materials*, vol. 11, pp.907, 1999.
- [36] A. R. Duggal, J. J. Shiang, C. Heller, and D. F. Foust: « Organic light-emitting devices for illumination quality white light », *Applied Physics Letters*, vol. 80, pp. 3470, 2002.
- [37] H. Y. Zhen, W. Xu, W. King, Q. L. Chen, Y. H. Xu, J. X. Jiang, J. B. Peng: « White-light emission from a single polymer with singlet and triplet chromophores on the Backbone », *Macromolecular Rapid Communications*, vol. 27, pp. 2095-2100, 2006.
- [38] A.Henneghien, thèse de doctorat : « Étude et optimisation de l'émission et de l'extraction de lumière des nanofils semiconducteurs grand gap : application à des dispositifs électroluminescents », Université de Grenoble, 2010.
- [39] T. X. Lee, C. Y. Lin, S. H. Ma, and C. C. Sun: « Analysis of position-dependent light extraction of GaN-based LEDs», *Optics Express*, pp.4175-4179, 2005.
- [40] M.R.Krames, M.O. Holcomb, C. C Coman: « High power truncated-inverted-pyramid (Al_xGa_{1-x})(0.5)In_{0.5}P/GaP light-emitting diodes exhibiting > 50 percent external quantum efficiency », *Applied Physics Letters*, 75(16), pp.2365-2367, 1999.
- [41] H.Lemieux, Maître sciences (M.Sc.): « Etude et comparaison de stratégies d'alimentation électrique pour lampadaire à del », Université de Laval Québec 2011.
- [42] www-LED-fr.net : Dossiers techniques sur les LEDs - Conception d'un système équipé de LEDs, 2009.
- [43] J. Schanda, G. Schanda, K. Muray : « Light emitting diode standards 2nd CIE Expert Symposium on LED Measurements », 2001. Disponible à l'adresse internet: <http://www.knt.vein.hu/staff/schandaj/SJCV-Publ-2005/438.doc>.
- [44] J. Hsu: « LED Market Oppotunities and Challenges », IMS Research, 2010.
- [45] S.Fanget, thèse doctorat : « Matériaux et hétérostructures à base de nitrure d'élément III en phase cubique et hexagonale pour l'optoélectronique », Université Joseph Fourier Grenoble, 2002.
- [46] G. Rakotonanahary, thèse doctorat : « Spectroscopie des transitions excitoniques dans des puits quantiques GaN/AlGaN», Université Blaise Pascal Clermont II, 2011.

- [47] S.Barbet, thèse de doctorat : « Etude par microscopie à champ proche de matériaux III-V pour émetteurs électronique planaires », Université de Lille, 2008.
- [48] M.Petit, thèse doctorat : « Etude par spectroscopie éltronique de la nitruration du phosphore d'indium », 2004.
- [49] Z. Abdelaziz, mémoire magister : « Caractérisation électrique des HEKTS a base de nitrure de gallium ALGAN/GAN »,2005.
- [50] O.Manasresh, book chapter for inclusion in III-V Nitride Semiconductors: Application and Devices” université of California at Sandiego la Jolla, CA 92093-0407.
- [51] D. Caughey and R. Thomas: « Carrier mobilities in silicon empirically related to doping and field » *IEEE Proceedings*, vol. 55, no. 12, pp. 2192-2193, 1967.
- [52] S. K. Pugh, D. J. Dugdale, S. Brand, R. A. Abram: « Band-gap and k.p. parameters for GaAlN and GaInN alloys », *J. Appl. Phys.*86, 3768 1999.
- [53] Z.Benzarti, thèse de doctorat : « Qualification des nitrures de gallium pour les dispositifs optoélectroniques : application aux diodes électroluminescentes bleues », Université EL Manar de Tunis, 2006.
- [54] Y. Varshni: « Temperature dependence of the energy gap in semiconductors », *Physica*, vol. 34, no. 1, pp.149 -154, 1967.
- [55] I. Vurgaftman, J. R. Meyer: «Band parameters for nitrogen-containing semiconductors », *J. Appl. Phys*, pp.94-3675, 2003.
- [56] F.Hadjaj, mémoire de magister : « simulation des caractéristiques électriques des détecteurs d'irradiations en nitrure de gallium (GaN) », Université de Bechar, 2009.
- [57] F.Guillot, thèse doctorat : « Développement de nanostructures à base de semiconducteurs III Nitrures pour l'optoélectronique infrarouge », Université Joseph Fourier Grenoble I, 2007
- [58]N.Défrance : « Caractérisation et modélisation de dispositifs de la filière nitrure pour la conception de circuits intégrés de puissance hyperfréquences », 2007.
- [59] A.Philippe, thèse doctorat : « Caractérisation électrique et optique du nitrure de gallium hexagonal et cubique en vue de l'obtention d'émetteurs bleus », Institut National des sciences appliquées Lyon, 1999.
- [60] R.Köster, thèse doctorat: « Croissance auto-assemblée de fils de GaN sans catalyseur par épitaxie en phase vapeur d'organo-métalliques », Université Joseph Fourier, 2010.
- [61] S.Suihkonen, Doctoral dissertation: « Fabrication of InGaN quantum wells for LED applications », University of Thechnologie, 2008.
- [62] M.Grundmann, J.Haaheim, A.Moshar, J.Summers: « Blue InGaN quantum well LED fabrication », University of California, Santa Barbara 2002.

- [63] www.lightemittingdiodes.org.
- [64] S.Nakamura, T.Mukai, M.Yamada : « Characteristics of InGaN Based UV /Blue /Green /Amber /Red Light-Emitting Diodes », Japanese Journal of Applied Physics Vol.38 pp. 3976-3981 Part 1, 1999.
- [65] E.Monroy, thèse de doctorat : « Nanostructures Al(Ga) N/GaN pour l'optoélectronique intersousbande dans l'infrarouge proche et moyen », Université de Grenoble, 2010.
- [66] S. Suihkonena, T. Langa, O. Svenska, J. Sormunena: « Control of the morphology of InGaN/GaN quantum wells grown by metalorganic chemical vapor deposition », Journal of Crystal Growth vol.300, pp.324-329, Finland, 2007.
- [67] T. Mukai, M.Daisuke, S.Nakamura: « High-power UV InGaN/AlGaN double heterostructure LEDs», Journal of Crystal Growth, pp.189-190,778-781, Japan, 1998.
- [68] X.Huang, J.Ping Liu, J.Kong, Hui Yang and W. Huai-Bing: « High-efficiency InGaN-based LEDs grown on patterned sapphire substrates », Optics Express 949 Vol. 19, No. 14 China, 2011.
- [69] S. Kucheyev, J. Williams, and S. Pearton: « Ion implantation into GaN », Materials Science and Engineering R, vol. 33, no. 2-3, pp. 51-108, 2001.
- [70] C.Tahanout, mémoire de magister : « Etude, simulation d'un micro capteur de gaz à base d'oxyde semi conducteur », Université M'Hamed Bougara Boumerdes, 2010.
- [71] J.Yum, K.Seok-Soon, E.Yung-Eun: « $Y_3Al_5O_{12}:Ce_{0.05}$ phosphor coatings on a flexible substrate for use in white light-emitting diodes », Colloids and Surfaces, pp.203-207, 2004.
- [72] J.Yum, S. Soo-Yeon, L.Seonghoon, S.Yung-Eun: « $Y_3Al_5O_{12}:Ce_{0.05}$ Phosphor Coatings on Gallium Nitride for White Light Emitting Diodes», Journal of The Electrochemical Society, Vol150, 2003.
- [73] K. Bessem, mémoire magister : « Etude par TCAD-silvaco d'une structure MOS pour la réalisation de capteurs ISFET paramètres technologiques et électrique », Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [74] J.Gallière, J.Boch : « mise en œuvre de la simulation mixte électrique /TCAD pour décloisonner l'enseignement de la microélectronique », Université de Montpellier II, p.15, 2008.
- [75] R.Negru, thèse doctorat : « Conception et modélisation de pixels de Photodetection », Ecole Polytechnique, France, 2008.
- [76] P.Henry: « Guide to Using TCAD with Examples Silvaco », 2009.
- [77] Silvaco International, http://www.silvaco.com/products/device_simulation/atlas.html.

- [78] H.Michael: « Modeling of operating temperature performance of triple junction solar cells using silvaco's ATLAS », Naval School California, 2007.
- [79] S.Dehipi, mémoire magistère : « Etude de lasers à base des composés semi-conducteurs (InP, GaAs, GaP) », Université El-Hadj Lakhder de Batna, 2011.
- [80] R.Serhane : « Présentation de l'outil Atlas de SILVACO », Centre de Développement des Technologies Avancées, 2011.
- [81] Manuel Led : « Éclairer avec une nouvelle source lumineuse », 1^{ère} édition, avril 2011.
- [82] Silvaco: « Atlas User's Manual, Device Simulation Software », Silvaco International, Copyright, pp 2.5-2.64, 3.46- 3.165, 11.1-11.15, 2010.
- [83] S.Nakamura, M.Senoh, N.Iwasa, S.Nagahama : « High – brightness InGaN blue ,green and yellow light emitting diodes with quantum well structures », Japanese Journal of Applied Physics Vol.34, pp. L797-L799, Part 2, 1995.

ANNEXE

1- Le programme de simulation de procédés technologiques de LED par ATHENA

go Athena

line x loc=0 spac=0.01

line x loc=0.5 spac=0.01

line x loc=1 spac=0.5

line x loc=5 spac=0.5

line x loc=5.5 spac=0.01

line x loc=6 spac=0.005

line x loc=6.5 spac=0.01

line x loc=7 spac=0.01

line x loc=10 spac=0.01

line x loc=15 spac=0.01

line y loc=0 spac=0.1

line y loc=5 spac=0.1

line y loc=10 spac=0.1

#(0) initiation du substrat

init material="sapphire" orientation=0001 two.d

structure outfile=Etape_0.str

tonyplot Etape_0.str

(1) depot de GaN buffer

init infile=Etape_0.str

epitaxy material="GaNbuffer" thick=0.03 div=4 Temp=550 time= 200s

structure outfile=Etape_1.str

tonyplot Etape_1.str

(2) depot de GaN type N

init infile=Etape_1.str

epitaxy material="GaN" thick=4 div=4 Temp=1050 c.Silicon=1e20

structure outfile=Etape_2.str

tonyplot Etape_2.str

(3) gravure de GaN

```
init infile=Etape_2.str  
Etch material="GaN"      Start x=6    y=-4  
Etch                               Cont  x=6    y=-2  
Etch                               Cont  x=15   y=-2  
Etch                               Done  x=15   y=-4
```

```
structure outfile=Etape_3.str
```

```
tonyplot Etape_3.str
```

(4) depot de InGaN

```
init infile=Etape_3.str  
epitaxy material="InGaN" thick=0.003 div=10 Temp=800 time=100s
```

```
structure outfile=Etape_4.str
```

```
tonyplot Etape_4.str
```

(5) gravure de InGaN

```
init infile=Etape_4.str  
etch material="InGaN"  right pl.x=6
```

```
structure outfile=Etape_5.str
```

```
tonyplot Etape_5.str
```

(6) depot de AlGaN dope Mg

```
init infile=Etape_5.str  
epitaxy material="AlGaN" thick=0.1 div=4 c.Magnesium=1e18
```

```
structure outfile=Etape_6.str
```

```
tonyplot Etape_6.str
```

(7) gravure de AlGaN

```
init infile=Etape_6.str  
etch material="AlGaN" right pl.X=6
```

```
structure outfile=Etape_7.str
```

```
tonyplot Etape_7.str
```

(8) depot de GaN type P dope Mg uniforme

```
init infile=Etape_7.str  
epitaxy material="GaN" thick=0.5 div=6 c.magnesium=1e18
```

```
structure outfile=Etape_8.str
```

```

tonyplot Etape_8.str

# (9) recuit thermique pour l'activation des atomes Mg

init infile=Etape_8.str

diffus temp=800 time=60

structure outfile=Etape_9.str

tonyplot Etape_9.str

#(10) gravure de GaN

init infile=Etape_9.str

Etch material="GaN"      Start x=6      y=-4.

Etch                    Cont  x=6      y=-2

Etch                    Cont  x=15     y= -2

Etch                    Done  x=15     y=-4.

structure outfile=Etape_10.str

tonyplot Etape_10.str

# (11) contact de type n sur GaN de type N à droite Ti:150A Al:750A

init infile=Etape_10.str

Deposit Titanium thick=0.015 div=4 Temp=850

Deposit Aluminum thick=0.075 div=5 Temp=850

structure outfile=Etape_11.str

tonyplot Etape_11.str

# (12) depot de resine

init infile=Etape_11.str

deposit material="photoresist" thick=1.2 div=6

extract name="epaisseur1" thickness material= "photoresist" mat.occno=1 x.val=7

structure outfile=Etape_12.str

#tonyplot Etape_12.str

# (13) resist exposure and develop via geometrical etching

init infile=Etape_12.str

# Exctraction des ordonnees de la couche resine pour un x quelconque

extract name="y_inf" max.bound material="photoresist" x.val=6.5

extract name="y_sup" min.bound material="photoresist" x.val=5

```

```
Etch material="photoresist"      Start x=6      y="y_sup"
Etch                               Cont  x= 6      y="y_inf"
Etch                               Cont  x= 6.5    y="y_inf"
Etch                               Done  x= 6.5    y="y_sup"
```

```
Etch material="photoresist"      Start x= 14.5  y="y_sup"
Etch                               Cont  x= 14.5  y="y_inf"
Etch                               Cont  x= 15    y="y_inf"
Etch                               Done  x= 15    y="y_sup"
```

```
Etch material="photoresist" left pl.x=6
```

```
structure outfile=Etape_13.str
```

```
tonyplot Etape_13.str
```

```
# (14) gravure de AlTi
```

```
init infile=Etape_13.str
```

```
Etch Aluminum
```

```
Etch Titanium
```

```
structure outfile=Etape_14.str
```

```
tonyplot Etape_14.str
```

```
# (15) gravure de la resine
```

```
init infile=Etape_14.str
```

```
strip photoresist
```

```
structure outfile=Etape_15.str
```

```
tonyplot Etape_15.str
```

```
# (16) definition de l'electrode
```

```
init infile=Etape_15.str
```

```
Set ymilieu1= ("ymin1"+ "ymax1")/2
```

```
Extract name= "ymin1" max.bound material="Al" x.val=8
```

```
Extract name= "ymax1" min.bound material="Al" x.val=8
```

```
Set ymilieu1=("ymin1"+ "ymax1")/2
```

```
electrode name="TiAl" x=8 y="ymilieu1"
```

```
structure outfile=Etape_16.str
```

```

tonyplot Etape_16.str

# (17) contact de type p depose sur GaN de type P a gauche Ni :200A Au :1000A
init infile=Etape_16.str
Deposit material="Nickel" thick=0.02 div=4 Temp=850
Deposit material="Au" thick=0.1 div=6 Temp=850
structure outfile=Etape_17.str
tonyplot Etape_17.str

# (18) depot de resine
#init infile=Etape_17.str
deposit photoresist thick=1.2 div=12
extract name="epaisseur2" thickness material="photoresist" x.val=6
# Extraction des ordonnees de la couche resine pour un x quelconque
extract name="y_inf" max.bound material="photoresist" x.val=1
extract name="y_sup" min.bound material="photoresist" x.val=1
structure outfile=Etape_18.str
#tonyplot Etape_18.str

# (19) resist exposure and develop via geometrical etching
init infile=Etape_18.str
Etch photoresist Start x= 0 y="y_sup"
Etch Cont x= 0 y="y_inf"
Etch Cont x= 0.5 y="y_inf"
Etch Done x= 0.5 y="y_sup"

Etch photoresist Start x= 5.5 y="y_sup"
Etch Cont x= 5.5 y="y_inf"
Etch Cont x= 6 y="y_inf"
Etch Done x= 6 y="y_sup"

etch photoresist right p1.x=5.5
structure outfile=Etape_19.str
tonyplot Etape_19.str

```

```
# (20) gravure de NiAu
init infile=Etape_19.str
etch material="Au"
structure outfile=Etape_20.str
tonyplot Etape_20.str
init infile=Etape_20.str
etch material="Nickel" left p1.x=0.5
etch material="Nickel" right p1.x=5.5
structure outfile=Etape_20.str
tonyplot Etape_20.str
# (21) gravure de la resine
init infile=Etape_20.str
strip material="photoresist"
structure outfile=Etape_21.str
tonyplot Etape_21.str
# (22) definition de l'electrode NiAu
init infile=Etape_21.str
Extract name="ymin2" max.bound material="Nickel" x.val=3
Extract name="ymax2" min.bound material="Nickel" x.val=3
Extract name="ymin3" max.bound material="Au" x.val=3
Extract name="ymax3" min.bound material="Au" x.val=3
Set ymilieu2=("ymin2"+"ymax2")/2
Set ymilieu3=("ymin3"+"ymax3")/2
electrode name=NiAu x=0.5 y="ymilieu2"
electrode name=NiAu x=0.5 y="ymilieu3"
structure outfile=Etape_22.str
tonyplot Etape_22.str
quit
```

2- Programme de simulation sous ATLAS :

```
go atlas

#-----
# SECTION 2: le maillage
#-----

#Chip Size is 350 um * 350 um

x.mesh loc=0.0 spac=1

x.mesh loc=350 spac=1

y.mesh loc=0.0 spac=0.1
y.mesh loc=0.5 spac=0.01
y.mesh loc=0.55 spac=0.05
y.mesh loc=0.600 spac=0.002
y.mesh loc=0.603 spac=0.002
y.mesh loc=0.65 spac=0.05
y.mesh loc=2 spac=0.05
y.mesh loc=5.03 spac=0.1

#-----
# SECTION 2: REGIONS et ELECTRODES
#-----

region num=1 material=GaN x.min=0 x.max=185 y.max=0.5
region num=2 material=air x.min=185 y.max=0.5
region num=3 material=AlGaIn x.min=0 x.max=185 y.min=0.5 y.max=0.6 x.comp=0.2
region num=4 material=air x.min=185 y.max=0.6
region num=5 material=InGaIn x.min=0 x.max=185 y.min=0.6 y.max=0.603 x.comp=0.25
name=well qwell led calc.strain polarization polar.scale=1.0 well.ny=50
region num=6 material=air x.min=185 y.max=0.603
region num=7 material=GaN x.min=0 x.max=185 y.min=0.603 y.max=2.00
region num=8 material=air x.min=185 y.max=2
region num=9 material=GaN x.min=0 x.max=350 y.min=2 y.max=5.00
region num=10 material=GaN x.min=0 x.max=350 y.min=5.00 y.max=5.03
region num =11 substrate sapphire x.min=0 x.max=350 y.min=5.03 y.max=10
```

```

electrode name=anode x.min=5 x.max=175 y.min=0 y.max=0.015
electrode name=cathode x.min=190 x.max=345 y.min=2 y.max=2.02
#-----
# SECTION 3: le dopage
# -----
# p type is Mg
# n type is Si
doping region=1 uniform p.type conc=1e19 x.min=0 x.max=185
doping region=3 uniform p.type conc=1e19 x.min=0 x.max=185
doping region=7 uniform n.type conc=1e20 x.min=0 x.max=185
doping region=9 uniform n.type conc=1e20
#-----
# SECTION 4: les modèles physiques
#-----
material material=GaN taun0=1e-9 taup0=1e-9 copt=1.1e-8 augn=1.0e-34 augp=1.0e-34
material material=AlGaN taun0=1e-9 taup0=1e-9 copt=1.1e-8 augn=1.0e-34 augp=1.0e-34
material material=InGaN taun0=1e-9 taup0=1e-9 copt=1.1e-8 augn=1.0e-34 augp=1.0e-34
# Lorentz Broaden factor
material edb=0.080 eab=0.160
models k.p fermi incomplete consrh auger optr print
models region=5 k.p chuang spontaneous lorentz
mobility mun0=100 mup0=10
#-----
# SECTION 5: les methodes numériques
#-----
output con.band val.band band.param charge polar.charge e.mobility\
      h.mobility u.srh u.radiative u.auger permitt flowlines
method climit=1e-4 maxtrap=4

```

```
#-----  
# SECTION 6: l'initialisation  
#-----  
solve init  
solve prev  
save outf=led01_1.str  
tonyplot led01_1.str  
#-----  
# SECTION 7: polarisation et sauvgarde de spectre  
#-----  
probe name=Recombination integrate recomb  
probe name=Radiative integrate radiative rname=well  
#  
log outf=led01.log  
solve vstep=0.05 vfinal=3.5 name=anode  
save outf=led01_3p5.str  
save spectrum=led01_3p5.spc lmin=0.4 lmax=0.5 nsamp=100  
  
solve vstep=0.05 vfinal=4.0 name=anode  
save outf=led01_4p0.str  
save spectrum=led01_4p0.spc lmin=0.40 lmax=0.50 nsamp=100  
  
solve vstep=0.05 vfinal=5.0 name=anode  
save outf=led01_5p0.str  
save spectrum=led01_5p0.spc lmin=0.40 lmax=0.50 nsamp=100  
#-----  
# SECTION 8: extraction des courbes  
#-----  
# V-I Curve  
tonyplot led01.log -set led01_0.set  
# I-L Curve  
tonyplot led01.log -set led01_1.set
```

```
# EL Intensity (3.5V)
tonyplot led01_3p5.spc -set led01_2.set

# EL Intensity at 3.5V, 4.0V and 5.0V
tonyplot -overlay led01_3p5.spc led01_4p0.spc led01_5p0.spc -set led01_3.set
tonyplot led01_3p5.str led01_4p0.str led01_5p0.str -set led01_4.set
extract init infile="led01_3p5.str"
extract name="Electron" curve(depth,impurity="Electron Conc" material="All"\
  x.val=0.5) outfile="led01_3p5_Electron.dat"
extract name="Electron" curve(depth,impurity="Hole Conc" material="All"\
  x.val=0.5) outfile="led01_3p5_Hole.dat"

extract init infile="led01_4p0.str"
extract name="Electron" curve(depth,impurity="Electron Conc" material="All"\
  x.val=0.5) outfile="led01_4p0_Electron.dat"
extract name="Electron" curve(depth,impurity="Hole Conc" material="All"\
  x.val=0.5) outfile="led01_4p0_Hole.dat"

extract init infile="led01_5p0.str"
extract name="Electron" curve(depth,impurity="Electron Conc" material="All"\
  x.val=0.5) outfile="led01_5p0_Electron.dat"
extract name="Electron" curve(depth,impurity="Hole Conc" material="All"\
  x.val=0.5) outfile="led01_5p0_Hole.dat"

tonyplot -overlay led01_3p5_Electron.dat led01_3p5_Hole.dat led01_4p0_Electron.dat
led01_4p0_Hole.dat led01_5p0_Electron.dat led01_5p0_Hole.dat -set led01_3.set

quit
```