

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

*MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE*

**UNIVERSITE ABDREHMAN MIRA BEJAIA**



جامعة بجاية  
Tasdawit n Bgayet  
Université de Béjaïa

Faculté de technologie

Département de Génie Electrique.

## **Mémoire de fin d'études**

En vue de l'obtention du diplôme de Master télécommunication.

Option : systèmes des télécommunications.

Thème :

**ETUDE ET SIMULATION DE LA CARACTÉRISTIQUE  
ÉLECTRONIQUE D'UNE DIODE LASER.**

Présenté par :

DEHAS Youghourta.

TEMERICHT Imane.

Soutenu le 08/10/2020, devant le jury composé de :

Mr. Alliche                      Président

Mme. Hemzaoui              Examinatrice.

M<sup>elle</sup> L.Achour              Encadreur.

« ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2019/2020 »

# **REMERCIEMENTS**

Nous remercions tout d'abord dieu qui nous a procuré courage, volonté et patience pour réaliser ce présent travail.

Nous souhaitons assurer l'expression de notre gratitude et nos sincères remerciements à notre promotrice Melle Achour pour son encadrement, sa disponibilité et le suivie qu'elle nous a accordé durant la conception de la rédaction de ce mémoire.

Nos vifs remerciements vont aussi aux membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche, et l'honneur qu'ils ont fait en acceptant d'examiner notre travail.

Enfin on ne remerciera jamais assez nos parents, puisque ce travail n'est que le fruit de leur bonne éducation et leur soutien. Nous remercions aussi tous les membres de notre familles, nos amis et tous ceux qui ont participé à la réalisation de ce mémoire ainsi que l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation.

On aurait souhaité assurer chacun en particulier de notre reconnaissance, mais ces quelques lignes n'auraient pas suffi.

***Merci.***

## *Dédicace :*

*Je dédie ce présent travail :*

*A celle qui m'a arrosée de tendresse et d'espoir, à la mère des sentiments qui m'a bénie par ses prières... Ma mère.*

*Tout ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance que je te porte.*

*A l'épaule solide, l'œil attentif, compréhensif et la personne la plus digne de mon respect... Mon père.*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer ma gratitude et mon affection.*

*A ma grand-mère, qui a toujours porté un intérêt certain pour ma réussite.*

*A ma chère sœur, mon support dans la vie. Que dieu te bénisse et te protège là où tu es.*

*A mes frères, pour leur amour et leur soutien, qu'ils trouvent ici l'expression de ma haute gratitude.*

*A mon binôme, ami et compagnon de galère.*

*A mes cousins, mes cousines, mes amis et à toute personne qui de loin ou de près a été là pour moi.*

*À tous ceux qui ont un jour partagé un bout du long chemin vers cet accomplissement, dont l'oubli du nom n'est pas celui du cœur.*

*En guise de remerciement,*

*Je leur dédie ce modeste travail en témoignage de mon amour et de ma sincère reconnaissance.*

*Imane.*

## Dédicace

*Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut...*

*Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude,*

*L'amour, le respect, la reconnaissance.*

*Aussi, c'est tout simplement que :*

*Je dédie ce mémoire*

### *À MES CHERS PARENTS ;*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, Mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon*

*Instruction et mon bien être.*

*Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.*

*Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.*

*Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.*

### *A Ma très Chère Sœur ;*

*Aucune dédicace ne peut exprimer mon amour et ma gratitude de t'avoir comme sœur.*

*Je ne pourrais jamais imaginer la vie sans toi, tu comptes énormément pour moi, tu es la sœur qui assure sone rôle comme il faut, je n'oublierais jamais ton encouragement et ton soutien le long de mes études, je t'estime beaucoup et je t'aime beaucoup.*

*Je te souhaite beaucoup de succès, de prospérité et une vie pleine de joie et de bonheur.*

### *A Ma Binôme ;*

*En souvenir des moments heureux passés ensemble, avec mes vœux sincères de réussite, bonheur, santé et de prospérité.*

*A tous mes véritables ami(e)s.*

*Au K02 et E310 ainsi Au long moment partager en salle de lecture avec mes amis.*

*youghorta*



<b>Table de matières.....</b>	<b>i</b>
<b>Table de figures.....</b>	<b>iv</b>
<b>Liste de tableaux.....</b>	<b>vi</b>
<b>Liste des acronymes.....</b>	<b>vii</b>
<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>1. CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SEMI-CONDUCTEURS.</b>	
1.1. Introduction .....	3
1.2. Introduction aux milieux matériaux.....	3
1.2.1. Théorie de bandes.....	3
1.2.2. Conduction électrique.....	4
1.3. Type de semi-conducteurs.....	4
1.3.1. Semi-conducteurs intrinsèques .....	5
1.3.2. Semi-conducteurs extrinsèques.....	6
1.3.2.1. Semi-conducteur de type n.....	7
1.3.2.2. Semi-conducteur de type p .....	7
1.4. Jonction PN.....	8
1.4.1. Définition .....	8
1.4.2. Polarisation de la jonction PN .....	9
1.4.2.1. Polarisation directe.....	9
1.4.2.2. Polarisation inverse :.....	9
1.5. Gap direct et indirect .....	10
1.5.1. SC à gap direct .....	10
1.5.2. SC à gap indirect.....	11
1.6. Les différents groupes des semi-conducteurs .....	12
1.6.1. Semi-conducteurs IV :.....	12
1.6.2. Les semi-conducteurs II-VI .....	12
1.6.3. Semi-conducteur III-V :.....	12
1.7. Les alliages semi-conducteurs .....	14
1.8. Structure cristalline .....	15

1.8.1. Systèmes cubiques .....	15
1.8.1.1. Structure diamant .....	16
1.8.1.2. Structure zinc blende .....	17
1.9. Hétérostructures .....	17
1.9.1 Définition .....	17
1.10. Conclusion.....	19
<b>2. CHAPITRE 2 : LES LASERS.</b>	
2.1. Introduction .....	20
2.2. Interaction matière-lumière :.....	20
2.2.1. Absorption .....	20
2.2.2.Émission spontanée .....	21
2.2.3. Emission stimulée .....	21
2.3 Principe de fonctionnement du laser .....	22
2.3.1. Inversion de population .....	23
2.3.2. Fonctionnement de la cavité résonnante .....	24
2.3.3. Condition d'oscillation .....	25
2.3.3.1. Condition sur le gain .....	26
2.3.3.2. Condition sur la phase .....	26
2.4. Caractéristique de la lumière lase.....	27
2.4.1. Unidirectionnel.....	27
2.4.2. Intense.....	27
2.4.3. Monochromatique .....	27
2.4.4. Cohérent .....	27
2.5. Laser à semi-conducteur .....	27
2.5.1. Diode laser à homojonction .....	28
2.5.2. Diode laser à double hétérojonction .....	29
2.5.3. Laser à semi-conducteurs à double hétérojonction <i>InGaAsP/InP</i> .....	30
2.6. Laser a puits quantique.....	31
2.7. Caractéristiques d'une diode laser .....	32
2.7.1. Facteur de confinement.....	32

2.7.2. Taux de recombinaison radiative .....	33
2.7.2.1. Recombinaison radiative .....	33
2.7.2.2. Recombinaison non radiative .....	33
2.7.3. Le gain .....	34
2.7.4. La caractéristique puissance-courant.....	34
2.7.4.1. Influence de la température .....	35
2.7.4.2. Rendement de la puissance.....	35
2.7.5. Variation de la longueur d'onde.....	36
2.7.6. Temps de réponse d'un laser .....	36
2.7.7. Distribution spectrale du rayonnement de la diode laser.....	36
2.8. Conclusion.....	38

### **3. CHAPITRE 3 : CONCEPTION ET MODELISATION D'UNE DIODE LASER PAR SILVACO-TCAD**

3.1. Introduction .....	39
3.2. Présentation de la technologie TCAD .....	39
3.3. Présentation du simulateur Silvaco (Silicon Valley).....	40
3.3.1. ATLAS .....	41
3.3.2. ATHENA .....	41
3.3.3. DECKBUILD.....	42
3.3.4. TONYPLOT .....	42
3.4. Structure de fichier d'entrée .....	42
3.5. L'ordre des commandes dans l'ATLAS .....	43
3.6. Principe de simulation du laser .....	43
3.6.1. Spécification de la structure étudiée .....	43
3.6.1.1. Spécification de maillage .....	44
3.6.1.2. Spécification de regions.....	45
3.6.1.3. Spécification des électrodes .....	46
3.6.1.4. Dopage .....	46
3.6.2. Spécification du modèle et du matériau .....	47
3.6.2.1. Matériau :.....	47
3.6.2.2. Modèles .....	48
3.6.2.3. Contact .....	48

## *Table de matières*

---

3.6.2.4. Interface .....	49
3.6.3. Méthodes numérique à sélectionner .....	49
3.6.3.1. Les équations de base dans les semi-conducteurs .....	49
3.6.4. Spécification de la solution .....	51
<b>3.7. Résultats et discussions.....</b>	<b>52</b>
3.7.1. Variation du gain en fonction de la tension.....	52
3.7.2. Variation de la puissance en fonction de la tension .....	53
3.7.3. Variation de la densité de photons en fonction de l'énergie du photon.....	54
<b>3.8. Conclusion .....</b>	<b>55</b>
<b>Conclusion général .....</b>	<b>56</b>
<b>Références bibliographiques</b>	

## Table de figures

<b>Figure 1.1</b> : Diagramme des bandes d'énergie .....	04
<b>Figure 1.2</b> : semi-conducteur intrinsèque à base de silicium .....	06
<b>Figure 1.3</b> : semi-conducteur extrinsèque type n.....	07
<b>Figure 1.4</b> : semi-conducteur extrinsèque type p.....	08
<b>Figure 1.5</b> : jonction PN.....	09
<b>Figure 1.6</b> : Jonction PN polarisée .....	10
<b>Figure 1.7</b> : S-C à gap direct .....	11
<b>Figure 1.8</b> : S-C à gap indirect.....	12
<b>Figure 1.9</b> : les différents réseaux du système cubique.....	16
<b>Figure 1.10</b> : structure du diamant. ....	16
<b>Figure 1.11</b> : Structure du Zinc Blende.....	17
<b>Figure 1.12</b> : Les trois types d'hétérojonctions de semi-conducteurs organisés par l'alignement de la bande.....	18
<b>Figure 2.1</b> : Schéma de l'excitation d'un atome par absorption d'un photon.....	21
<b>Figure 2.2</b> : Schéma de la désexcitation spontanée d'un atome et de l'émission d'un photon.....	21
<b>Figure 2.3</b> : schémas de l'émission stimulée d'un atome.....	22
<b>Figure 2.4</b> : schéma d'un système laser.....	22
<b>Figure 2.5</b> : Diagramme schématique du pompage optique sur deux niveaux.....	24
<b>Figure 2.6</b> : la cavité résonante.....	25
<b>Figure 2.7</b> : Structure d'un laser à semi-conducteur à homojonctions.....	28
<b>Figure 2.8</b> : Diagramme de bandes d'énergies d'une structure à homojonctions.....	29
<b>Figure 2.9</b> : Structure d'une diode double hétérojonction.....	30
<b>Figure 2.10</b> : structure d'une diode laser à double hétérojonction <i>InGaAsP/InP</i> .....	31
<b>Figure 2.11</b> : zone active d'une diode laser à puit quantique.....	32
<b>Figure 2.12</b> : Caractéristique puissance-courant de la diode laser .....	35

<b>Figure 2.13</b> : Spectre d'émission d'une diode laser.....	37
<b>Figure 3.1</b> : Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par TCAD SILVACO.....	40
<b>Figure 3.2</b> : Groupes de commandes Atlas dans l'ordre exigé avec les instructions principales de chaque groupe.....	43
<b>Figure 3.3</b> : Structure du laser.....	44
<b>Figure 3.4</b> : maillage de la structure laser.....	45
<b>Figure 3.5</b> : dopage de la structure laser.....	47
<b>Figure 3.6</b> : variation du gain en fonction de la tension.....	52
<b>Figure 3.7</b> : variation de la puissance en fonction de la tension.....	53
<b>Figure 3.8</b> : Variation de la densité de photon en fonction de l'énergie du photon.....	54

## Liste de tableaux :

Tableau I.1 : Extrait du tableau périodique.....	13
Tableau I.2 : Exemples de semi-conducteurs.....	14
Tableau I.3 Applications commerciales pour les dispositifs optoélectroniques.....	15

## Liste des acronymes :

BC	Bande de Conduction
BI	Bande Interdite
BV	Bande de Valence.
cc	Cubique centré
cfc	Cubique faces centrées
cs	Cubique simple
HBT	Transistors Bipolaires a Hétérojonction
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
SC	Semi-Conducteur
SHR	Shockle-Hall-Read
SILVACO	Silicon VALley Corporation
TCAD	Technology Computer-Aided Design
VCSEL	Vertical Cavity Surface Emitting Laser



# *Introduction Générale*

---

## Introduction générale

Il y a longtemps, les scientifiques ont divisé les matériaux en deux catégories en fonction de leur conductivité électrique : les isolants (diélectriques) et les conducteurs. Cependant, vers 1833, M. Faraday a remarqué que certains matériaux ne pouvaient pas être classés dans ces deux catégories. Ces matériaux sont à la fois de mauvais conducteurs et de mauvais isolants à l'état pur et leurs propriétés électriques, particulièrement leur conductivité, varient de manière différente en fonction de la température, la pression et la lumière. Par exemple une augmentation de la température induit une diminution de la conductivité pour les conducteurs. En revanche, une augmentation de la température induit une augmentation de la conductivité pour cette nouvelle classe de matériaux. Et puisque leur conductivité est intermédiaire entre les conducteurs et les isolants, ils ont été nommés matériaux semi-conducteurs [1].

La découverte des matériaux semi-conducteurs par M. Faraday a été suivie la même année par la découverte de l'effet photovoltaïque par E. Becquerel, en constatant la différence de potentiel créée par l'éclairement d'un point de contact entre un électrolyte et un conducteur. Mais ce n'est qu'en 1931 que les bases de la théorie moderne de la physique des matériaux semi-conducteurs, ont été élaborées par A. H. Wilson qui considéra ces matériaux comme des isolants à faible bande interdite et introduisit la notion de trou [1].

Les semi-conducteurs ont connus une importante croissance au niveau mondial, qui est liée au fait que ces matériaux forment la base de la révolution technologique de ces quarante dernières années dans le domaine de l'électronique. Au sens large, ces matériaux représentent le marché mondial le plus important à l'heure actuelle, en même temps que celui qui bénéficie de la croissance la plus rapide. Les semi-conducteurs interviennent principalement en microélectronique, dans les domaines radiofréquences et hyperfréquences, en applications militaires et spatiales ainsi qu'en optoélectronique. L'activité de recherche concernant la microélectronique, est importante et porte sur la recherche de nouveaux matériaux, de nouveaux procédés et de nouvelles architectures pour répondre à des besoins différents [2].

Les travaux d'Albert Einstein qui posèrent les lois théoriques pour la réalisation des lasers datent de plus de 80 ans. En effet, c'est en 1917 qu'il a publié ses fameux travaux sur l'absorption et l'émission de lumière où il mentionne les différences entre émission spontanée et émission stimulée [3]. Cela a permis le développement de nombreuses techniques de

production de lumière cohérente. Une de ces techniques fut le développement des diodes laser, en particulier celles à semi-conducteurs. Cela a été le fruit d'un travail qui a commencé en 1887.

La théorie du laser à semi-conducteurs est relativement complexe car elle fait intervenir des notions de physique du solide, d'électromagnétisme et d'optique guidée. D'un point de vue pratique, un laser à semi-conducteur est essentiellement un dispositif à semi-conducteur ayant la capacité d'émettre une lumière cohérente

Le développement dans le domaine de l'informatique a connu le même essor que l'optoélectronique, le coût exorbitant lors de la fabrication de nouveaux composants a poussé les chercheurs à utiliser la simulation pour mieux comprendre les phénomènes physiques et pour proposer des pistes d'amélioration des structures et de nouvelles architectures de dispositifs à moindre coût. Aujourd'hui les logiciels de simulation jouent un rôle très important [4]. En effet, avant la fabrication d'un composant électronique, on procède à une simulation qui est définie dans le cas général comme une technique permettant de reproduire d'une façon virtuelle le comportement d'un phénomène réel, et dans ce cas, les résultats obtenus sont très satisfaisants, car la simulation gagne en termes de coût et de temps par rapport à la fabrication. Principalement deux sociétés internationales se partagent le marché mondial de la simulation de composants : SILVACO et SYNOPSIS.

Malgré les progrès réalisés dans le domaine de l'optoélectronique, l'homme aspire toujours à de meilleures performances en fabriquant des composants qui génèrent des puissances importantes tout en injectant des courants faibles. Pour cela, nous allons étudier et simuler une diode laser avec le logiciel SILVACO-TCAD, en se focalisant sur les différents paramètres caractérisant cette diode.

Dans notre travail, le premier chapitre traite de la généralité des semi-conducteurs. Le deuxième chapitre est consacré au laser et à son principe de fonctionnement, notamment un laser à semi-conducteur. Dans le chapitre trois, nous présentons d'abord le logiciel "SILVACO-TCAD", puis nous continuons à concevoir et simuler une diode à l'aide de ce logiciel, nous discuterons ensuite les résultats obtenus, et on termine par une conclusion.

# *Chapitre 1*

---

## 1.1. Introduction

Les semi-conducteurs ont acquis une importance considérable dans notre société. Ils sont à la base de tous les composants électroniques et optoélectroniques qui entrent dans les dispositifs informatiques, de télécommunications, de télévision, dans l'automobile et les appareils électroménagers, etc.

Dans ce chapitre, nous allons présenter des généralités sur les semi-conducteurs, leurs définitions, les types des semi-conducteurs, les types de gap, leurs alliages...etc.

## 1.2. Introduction aux milieux matériau :

### 1.2.1. théorie de bandes :

Les propriétés électriques d'un matériau sont déterminées par la distribution de la charge dans celui-ci. La conduction dépend de l'occupation des électrons dans leur bande d'énergie.

Il existe 3 bandes d'énergie qui décrivent le comportement d'un matériel et désigne son type [1] :

- La première bande dite bande à faible énergie qui correspond à des électrons au maintien de la structure cristalline, ce sont les électrons dit de valence et qui ne sont pas libres, c'est pour cela que cette bande est appelée « bande de valence » BV.
- La deuxième bande est la bande à haute énergie qui correspond à des électrons quasi libre de se détacher de la structure et qui par conséquent peuvent participer à une conduction électrique, cette bande est appelée « bande de conduction » BC.
- La troisième bande s'appelle « la bande interdite » BI et c'est la bande qui se situe entre le haut de la bande de valence et le bas de la bande de conduction. Elle est uniquement définie dans le cas des semi-conducteurs.

On distingue « isolant » ou « conducteur » par la largeur de la bande interdite qui est la différence d'énergie entre la bande de conduction et la bande de valence qui est appelée GAP.

[5]

$$E_g = E_c - E_v$$

### 1.2.2. Conduction électrique :

A partir des bandes d'énergie citées précédemment, on arrive à définir 3 types de matériaux et qui sont les suivants :

- **Conducteurs** : tel que le fer, le cuivre, l'or, l'argent et l'aluminium sont des conducteurs de courant électrique de manière facile. Ces matériaux correspondent à la bande haute d'énergie appelée aussi conductrice. Dans ces derniers la bande de conduction et la bande de valence se chevauchent, les électrons peuvent donc passer directement de la bande de valence à la bande de conduction et circuler dans tout le solide.
- **Isolant** : les isolants sont des matériaux non conducteurs de courant électrique tel que le verre, le mica, la silice et le charbon. Les électrons dans ces métaux ne sont pas libres, ils sont fortement attachés à l'atome. Ils correspondent à la bande de valence, la bande de conduction dans ces métaux est habituellement vide.
- **Les semi-conducteurs** : un semi-conducteur est un matériel qui n'est ni tout à fait conducteur ni tout à fait isolant, comme il peut être soit l'un ou l'autre selon divers condition [1].

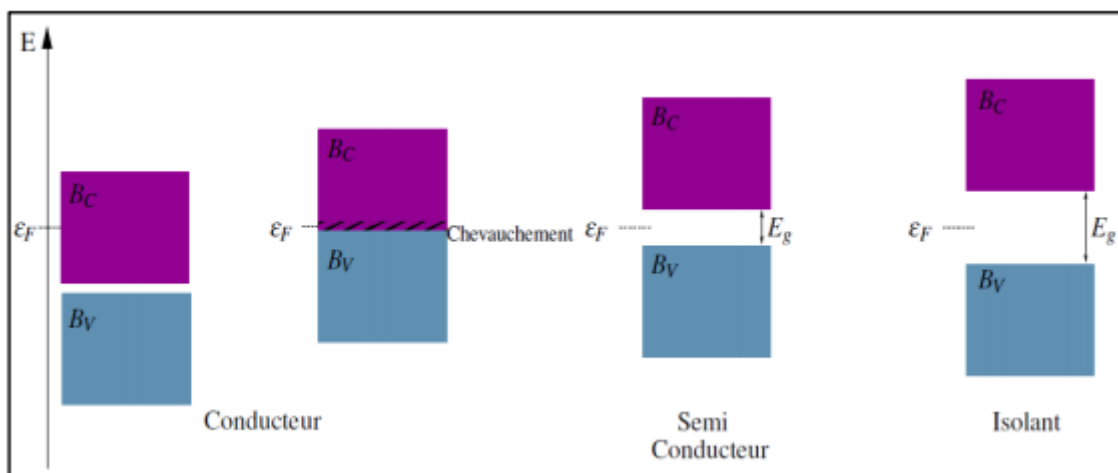


Figure 1.1 : diagramme des bandes d'énergie [1].

### 1.3. Types de semi-conducteurs

Les semi-conducteurs se différencient selon leur densité de trous et d'électron qui peut varier selon divers paramètres. La température est déterminante pour certains semi-conducteurs, alors qu'elle l'est moins pour d'autres.

Les types de semi-conducteur sont les suivant :

### 1.3.1. Semi-conducteur intrinsèque

Un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur complètement pur, non dopé, c'est-à-dire qui ne contient pas d'atomes étrangers. Par exemple le semi-conducteur de germanium intrinsèque ne contient que des atomes de germanium Ge.

A de très basses températures ces matériaux se comportent comme des isolants, leurs conductivités augmentent avec l'augmentation de cette dernière, car grâce à la température, quelques électrons qui se trouve dans la bande de valence, s'excitent et quittent la liaison vers la couche de conduction en laissant derrière eux des trous. [5]

Dans les semi-conducteurs intrinsèques le nombre d'électrons excités ( $n$ ), le nombre de trous ( $p$ ) et la densité de porteur intrinsèque ( $n_i$ ) sont égaux.

$$n = p = n_i \quad (1.1)$$

Avec :

$$n = N_c \cdot e^{-\left(\frac{E_c - E_F}{K_B T}\right)} \quad (1.2)$$

$$p = N_v \cdot e^{-\left(\frac{E_F - E_v}{K_B T}\right)} \quad (1.3)$$

$n$  : Nombre d'électrons dans la bande de valence.

$p$  : Nombre de trous dans la bande de valence.

$N_c$  : Densité effective des électrons dans la bande de conduction.

$N_v$  : Densité effective des trous dans la bande de conduction.

$E_F$  : Niveaux de Fermi.

$T$  : Température (K).

$K_B$  : La constante de Boltzmann  $K_B = 1,380650 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ .

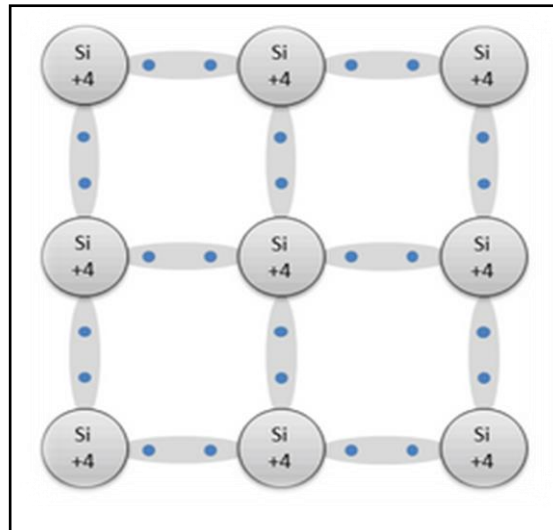
De même on déduit la densité du porteur intrinsèque noté  $n_i$  :

On a :  $n_i = p = n \longrightarrow n_i^2 = p \cdot n$

$$\longrightarrow n_i = \sqrt{N_c \times N_v} \cdot e^{-\left(\frac{E_g}{2k_B T}\right)} \quad (1.4)$$

$E_g$  : Energie du gap.

Les semi-conducteurs intrinsèques ne sont pas considérés bon conducteurs ni bon isolant.



**Figure 1.2** : semi-conducteur intrinsèque à base de silicium [6].

### 1.3.2. Semi-conducteurs extrinsèques

Les semi-conducteurs extrinsèques sont des semi-conducteurs impures, qui ont été intentionnellement dopés en leur ajoutant des impuretés, dans le but d'améliorer leurs conceptions.

Ce processus d'ajout d'impureté s'appelle le dopage, lors de ce dernier les impuretés vont se lier chimiquement aux atomes du semi-conducteur.

- On retrouve le niveau de dopage comme suit :

$$\text{niveau de dopage} = \frac{\text{nombre d'impuretés}}{\text{nombre de puretés}}$$

Il existe deux types de semi-conducteurs extrinsèques :



### 1.3.2.1. Semi-conducteur de type n

Dans ce type les impuretés sont des atomes de la 5<sup>ème</sup> colonne de la classification périodique des éléments. Les éléments les plus utilisés dans le dopage sont l'arsenic (As) et le phosphore (P), ces éléments contiennent 5 électrons dans la couche externe.

Les atomes de silicium ou de germanium cristallisent dans une structure où chaque atome est relié à 4 atomes voisins par des liaisons covalentes impliquant 2 électrons pour chaque liaison. Si on introduit le phosphore qui est un atome ayant 5 électrons de valence, cet atome prend la place d'un atome du cristal. 4 des électrons de l'impureté participeront aux 4 liaisons avec les 4 atomes voisins du cristal, le 5<sup>ème</sup> électron restera célibataire. A cet atome d'impureté est associé un niveau d'énergie appelé niveau donneur qui se situe juste en dessous de la bande de conduction. L'écart entre ce niveau et la bande de conduction étant faible, un électron d'un niveau donneur peut facilement passer dans la bande de conduction sous l'action de l'agitation thermique et augmenter la conductivité électrique.

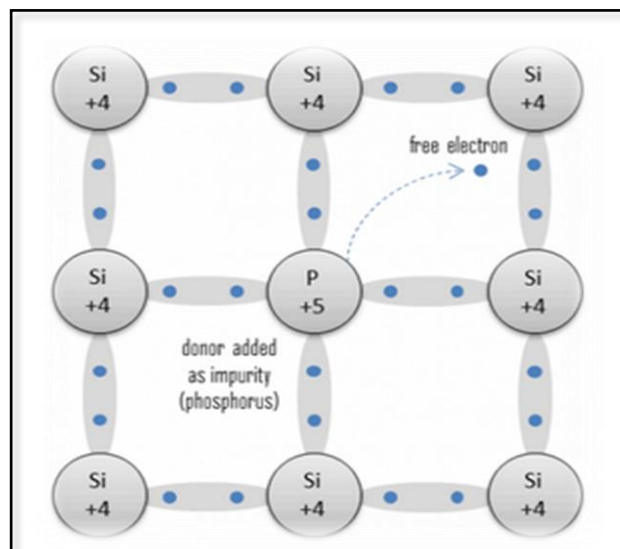


Figure 1.3 : semi-conducteur extrinsèque type n [6].

### 1.3.2.2. Semi-conducteur de type P

Les impuretés de ce type sont des atomes de la 3<sup>ème</sup> colonne de la classification périodique des éléments. Les éléments les plus utilisés sont le Bore (B) et le gallium (Ga).

Dans ce type de semi-conducteurs, les impuretés sont plus pauvres en électrons que les atomes du solide, il manque alors un électron suite au dopage ce qui donne un trou.

Le bore par exemple à savoir qu'il peut partager 3 électrons, ce qui veut dire qu'il peut saturer 3 liaisons sur 4. Il manque donc une liaison par atome d'impureté auquel correspond un niveau d'énergie situé juste au-dessus de la bande de valence. Ce niveau est appelé niveau accepteur. Au zéro absolu, ces niveaux accepteurs sont vides ; lorsqu'on augmente la température, ils peuvent être occupés par des électrons provenant de la bande de valence. Les niveaux libres de cette dernière engendrent des trous et la conductivité devient de type p lorsqu'on augmente le dopage [5].

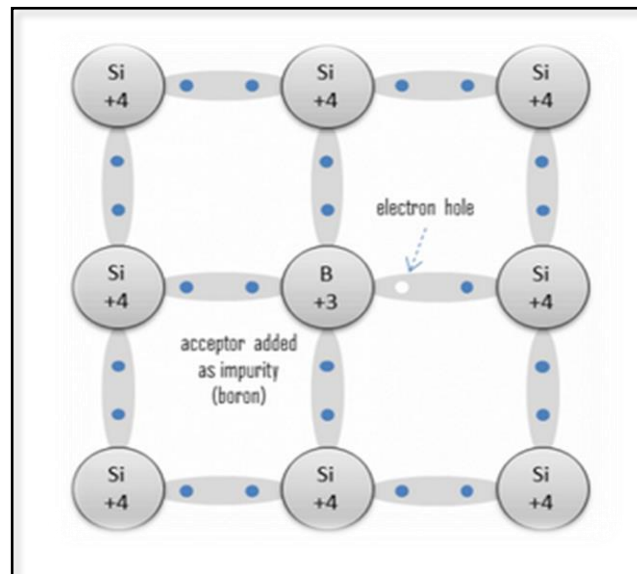


Figure 1.4 : semi-conducteur extrinsèque type P [6].

## 1.4. Jonction p-n

### 1.4.1. Définition

Une jonction **p-n** est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur dopé **n** et un semi-conducteur dopé **p**. Les électrons en excès dans la zone **n** (qui contient des électrons libres comme porteurs majoritaires) ont tendance à migrer au bord de la zone dopé **p** (qui contient des trous comme porteurs majoritaires) sous l'agitation thermique. En même temps, toujours sous la poussée de l'agitation thermique, une partie des trous de la zone **p** se propage dans la zone **n**.

Lorsque les électrons qui sortent de la zone **n** entrent dans le réseau de la zone **p** et que les trous sortant de la zone **p** se propagent dans le réseau de la zone **n**, il se produit aux extrémités des deux réseaux en contact, deux nouveaux états électriques. En effet, sur l'extrémité de la zone **n**, il se forme une accumulation d'électricité positive, due à la perte d'électrons et à l'acquisition de trous, tandis qu'à l'extrémité de la zone **p**, nous trouvons une accumulation d'électricité négative, due à la perte de trous et à l'acquisition d'électrons. Puis il

apparaît au niveau de la jonction une zone de déplétion contenant des charges positives et négatives appelée la zone de charge d'espace (ZCE), on aura ainsi création d'un champ électrique interne dirigé de **n** vers **p**.

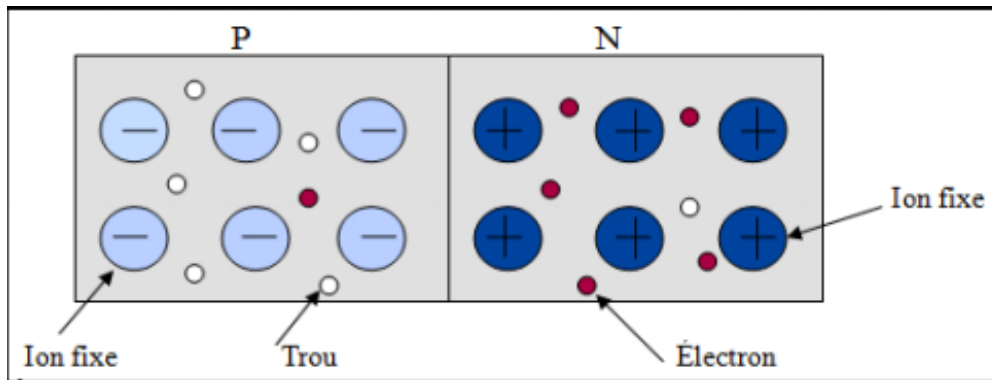


Figure 1.5 : jonction pn.

#### 1.4.2. Polarisation de la jonction p-n

La polarisation de la jonction P-N c'est-à-dire lorsque la tension délivrée par une source d'alimentation continue est appliquée aux deux zones du cristal.

La tension peut être appliquée dans deux sens ce qui explique l'existence de deux types de polarisation [7] :

##### 1.4.2.1. Polarisation directe

On applique un champ électrique externe à la jonction, le pôle négatif (-) du générateur est relié à la zone N et le pôle positif (+) est relié à la zone P.

Le champ électrique extérieur  $E_{ext}$  appliqué par le générateur s'oppose au champ interne de la jonction  $E_{in}$ . Si  $|E_{ext}| > |E_{in}|$  un courant important peut traverser la jonction.

##### 1.4.2.2. Polarisation inverse

On applique un champ électrique externe à la jonction, le pôle positif (+) du générateur est relié à la zone N et le pôle négatif (-) est relié à la zone P.

Le champ électrique extérieur  $E_{ext}$  appliqué par le générateur s'oppose au champ interne de la jonction  $E_{in}$ . On aura un très faible courant qui va circuler et qui est dû aux électrons minoritaires du côté P et aux trous minoritaires dans le côté N.

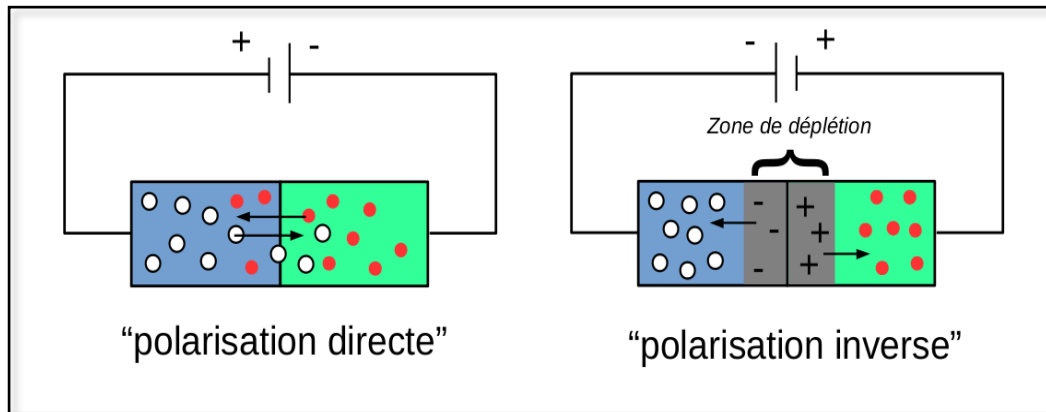


Figure 1.6 : Jonction pn polarisée.

## 1.5. Gap direct et indirect

Considérons le gap des différents semi-conducteurs. Le gap est par définition la largeur de la bande interdite, c'est à dire la différence d'énergie entre le minimum absolu de la bande de conduction et le maximum absolu de la bande de valence. Les structures de bande font apparaître deux cas fondamentaux de semi-conducteur.

### 1.5.1. S-C à gap direct

Dans les semi-conducteurs à gap direct le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction sont au même point (même vecteur d'onde  $\vec{k}$ )

La transition électronique entre le haut de la bande de valence BV et le bas de la bande de conduction BC conserve le vecteur d'onde  $\Delta\vec{k} = \vec{0}$  [8].

$$\text{Dans ce cas : } \Delta\vec{p} = h\Delta\vec{k} = \vec{0}$$

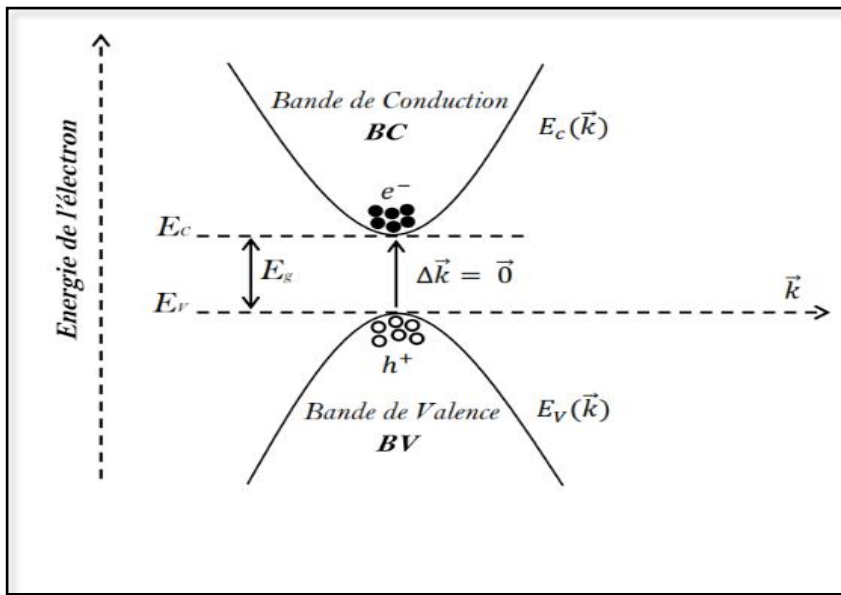


Figure 1.7 : S-C à gap direct [8].

$\vec{k}$  Est le vecteur d'onde associé à l'électron.

$\vec{p} = h \vec{k} = m \vec{v}$  : La quantité de mouvement.

$E_c(\vec{k})$  et  $E_v(\vec{k})$  sont respectivement les relations de dispersion dans la bande de conduction et la bande de valence.  $E_c$  et  $E_v$  sont respectivement l'énergie minimum de la bande de conduction et l'énergie maximum de la bande de valence.

### 1.5.2. S-C à gap indirect

Dans le cas des semi-conducteurs à gap indirect le minimum de la bande conduction est situé à une distance  $\Delta \vec{k} \neq \vec{0}$  du maximum de la bande de valence

La transition électronique entre le haut de la bande de valence (BV) et le bas de la bande de conduction (BC) est accompagnée par le changement de la quantité de mouvement  $\Delta \vec{p}$  c'est-à-dire le vecteur d'onde n'est pas conservé  $\Delta \vec{k} \neq \vec{0}$  et  $\Delta \vec{p} = h \Delta \vec{k} \neq 0$

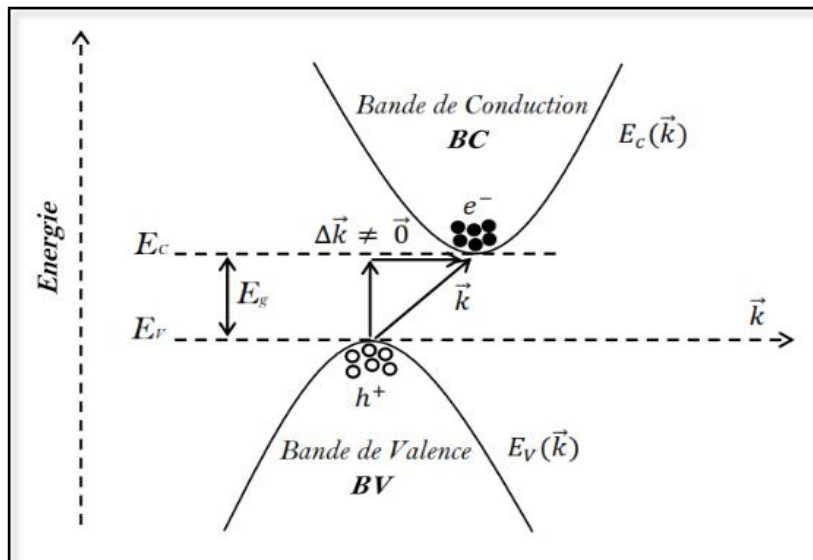


Figure 1.8 : S-C à gap indirect [8].

## 1.6. Les différents groupes des semi-conducteurs

### 1.6.1. Semi-conducteurs IV

Ils sont constitués d'un seul élément tels que les semi-conducteurs de la colonne IV de la classification périodique par exemple ; silicium (Si) et de germanium (Ge). C'est un semi-conducteur pur sans défauts structurels, ses propriétés électriques ne dépendent que de sa structure [9].

### 1.6.2. Semi-conducteurs II-VI

Ils sont constitués de deux éléments. Les éléments de la colonne II en tant que cations et d'autres de la colonne VI comme des anions en échangeant deux électrons. Ils ont un grand gap présentant un grand intérêt pour la réalisation des dispositifs électroluminescents. Grâce à la largeur de leur bande interdite et leur gap direct, ils peuvent émettre de la lumière visible avec une efficacité d'émission élevée [9].

### 1.6.3. Semi-conducteur III-V

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont des corps formés à partir d'un ou plusieurs éléments de la IIIème colonne et d'un ou plusieurs éléments de la Vème colonne de la classification périodique de Mendeleïev tel que azote, phosphore, arsenic, antimoine, etc... Ils présentent un grand intérêt en raison de leurs propriétés :

- Ils sont robustes.
- Ils possèdent une conductivité thermique élevée.
- Leur point de fusion est élevé.
- Ils ont une bande interdite directe.

Les semi-conducteurs III-V sont rapidement apparus comme les matériaux de choix pour des applications spécialisées. Notamment, GaAs et InP se sont distingués par leur grande mobilité électronique, qui permet d'obtenir des dispositifs à haute rapidité de commutation en électronique, et aussi leur bande interdite directe qui favorisent les transitions optiques. Ces propriétés, leurs permettent d'être des matériaux prometteurs, surtout dans le domaine des télécommunications tels que les lasers. En électronique rapide et en optoélectronique, les composés semi-conducteurs III-V sont préférables que d'autres.

La filière des composés III-V est la seule filière hyperfréquence dont la technologie soit actuellement mature pour des réalisations au niveau industriel. Cette maturité et son développement ont donc permis d'aboutir à des coûts de production abordables, qui restent cependant largement supérieurs à ceux de la filière silicium, les composants à base de ce dernier sont actuellement limités à une fréquence inférieure à quelque Giga Hertz. Les composés III-V sont donc parfaitement appropriés à la réalisation de circuits hyperfréquences [10].

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

<b>III</b>	<b>IV</b>
5 <b>B</b> 10.81	7 <b>N</b> 14.01
13 <b>Al</b> 26.98	15 <b>P</b> 30.97
31 <b>Ga</b> 69.74	33 <b>As</b> 74.92
49 <b>In</b> 114.82	51 <b>Sb</b> 121.75

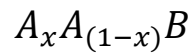
**Tableau 1.1** : Extrait du tableau périodique [9].

### 1.7. Les alliages semi-conducteurs

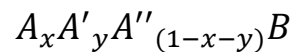
Les alliages semi-conducteurs sont répartis par rapports au nombre de matériaux présent dans leur composition en alliages binaires qui est la combinaison de deux atomes de différentes colonnes. Mais également les alliages ternaires et quaternaires qui en découlent, présentent des propriétés très intéressantes pour les applications hyperfréquences. Ces alliages ternaires et quaternaires sont réalisés par substitution partielle de l'un des éléments par un élément de la même colonne.

Les alliages ternaires et quaternaires sont identifiés de la façon suivante [11] :

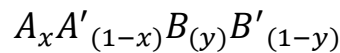
- **Ternaires** : S'il y a substitution de 2 atomes sur l'un des sous réseaux soit :



- **Quaternaires 1+3** : S'il y a substitution de 3 atomes sur des sous réseaux soit :



- **Quaternaires 2+2** : S'il y a substitution de 2 atomes sur chacun des deux sous réseaux, soit :



Le tableau suivant donne des exemples de matériaux ou de composés semi-conducteurs en fonction des éléments qui les constituent :

Colonne	Alliage	Semi-conducteur
IV	(pas d'alliages)	<i>Ge, Si</i>
II-VI	Binaire	<i>CdS, HgTe, CdTe, ZnTe, ZnS</i>
	Ternaire	<i>Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te</i>
III-V	Binaire	<i>GaAs, GaP, GaSb, InAs, InP, InSb</i>
	Ternaire	<i>Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As, GaAs<sub>y</sub>P<sub>1-y</sub></i>
	Quaternaire	<i>Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As<sub>y</sub>P<sub>1-y</sub></i>

**Tableau 1.2** : Exemples de semi-conducteurs. [12].



Le tableau I.3 représente les matériaux semi-conducteurs III-V importants pour l'optoélectronique et leurs applications :

Matériaux	Dispositifs	Application
GaAs	Détecteurs, LEDs infrarouges, laser	Télécommande de Tv, Communication par Fibre optique
In	Cellules solaires	Pour les Satellites (cellule solaires spatiales)
InP/InGaP	LEDs infrarouges, laser	Communication par fibre Optique.
InGaAs	Détecteurs	Communication par fibre Optique.
InGaAlAs	Détecteurs	Application militaire, médecine
GaSb/TnSb	Détecteurs de Grande ondes	Image infrarouge, application militaire

Tableau 1.3 : Applications commerciales pour les dispositifs optoélectroniques

## 1.8. Structure cristalline

Un cristal peut être représenté à partir d'une cellule de base qui est répétée périodiquement, formant ainsi le réseau cristallin. Selon la nature des opérations de symétrie qui laissent la structure cristalline invariante, on est amené à définir sept systèmes cristallins, parmi lesquels le système cubique [12].

### 1.8.1. systèmes cubiques

La plupart des semi-conducteurs cristallisent selon un système cubique. Ce dernier comprend trois réseaux différents possibles, selon la disposition des atomes comme l'indique la figure [12] :

- Cubique simple : des atomes sont aux sommets du cube.
- Cubique centré : des atomes sont aux sommets du cube avec un atome au centre du cube.

- cubique face centrée : des atomes sont aux sommets du cube avec un atome au centre de chaque face.

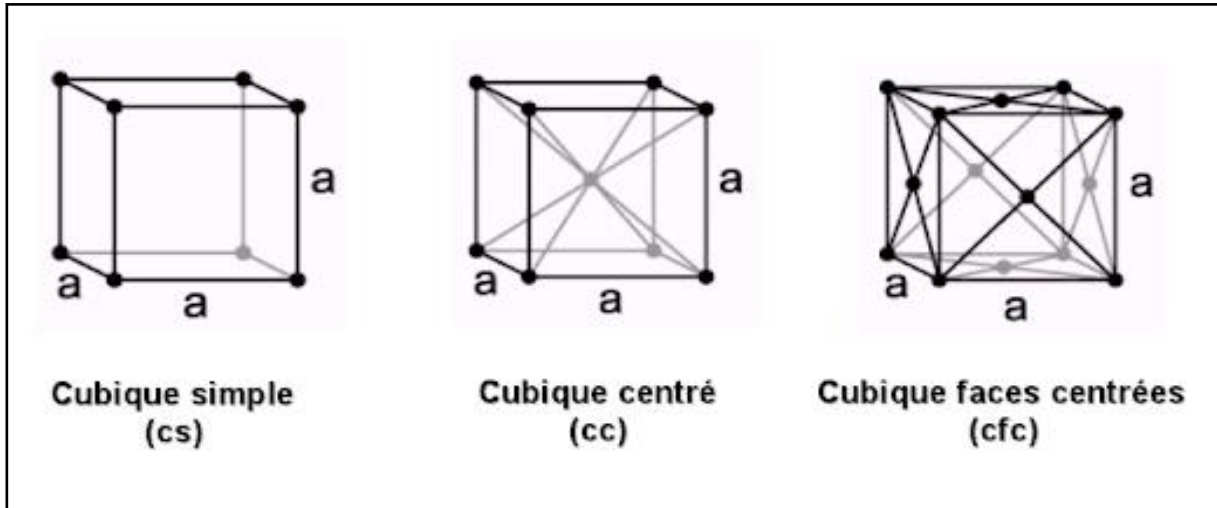


Figure 1.9 : les différents réseaux du système cubique.

#### 1.8.1.1. Structure diamant

Le système cubique dans lequel va cristalliser le Silicium, le Germanium est le réseau diamant constitué de deux réseaux cubiques faces centrées imbriqués (décalés du quart de la diagonale principale du cube)

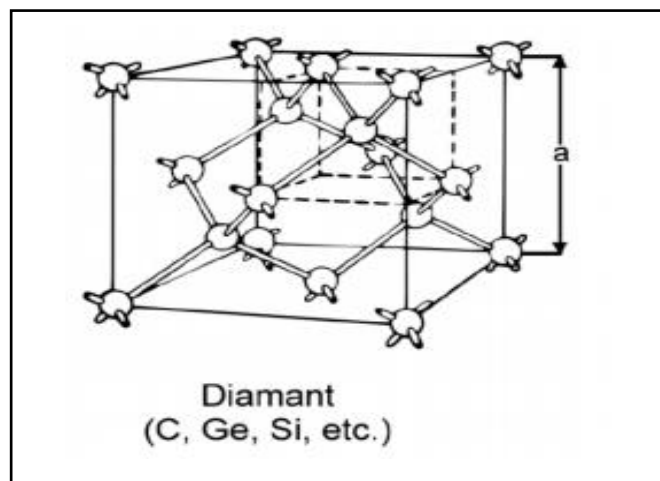


Figure 1.10 : structure du diamant [13].

### 1.8.1.2. Structure zinc blende

La plupart des matériaux III-V (ou II-VI) cristallisent dans la structure sphalérite dite "Zinc Blende" présentée sur la figure 1.11. Cette structure, qui s'apparente à celle du diamant est constituée de deux sous-réseaux cubique face centrée (cfc), l'un d'éléments III et l'autre d'éléments V, décalés l'un par rapport à l'autre du quart de la diagonale principale, c'est-à-dire de  $a\sqrt{3}/4$  [100] où  $a$  représente le paramètre de maille du matériau [2].

La structure est illustrée sur la figure ci-dessous. :

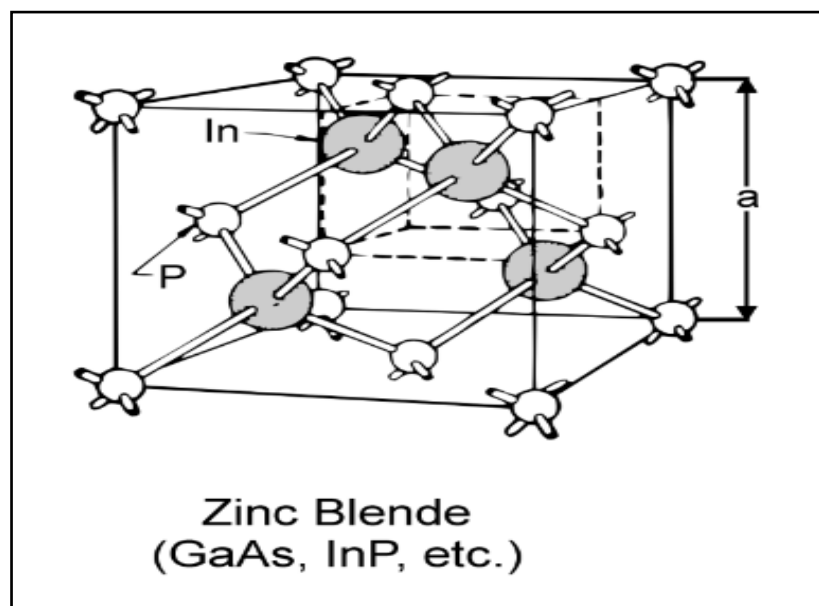


Figure 1.11 : Structure du Zinc Blende [13].

## 1.9. Hétérostructures

### 1.9.1. Définition

L'hétérostructure appelée aussi hétérojonction est constituée de deux semi-conducteurs différents.

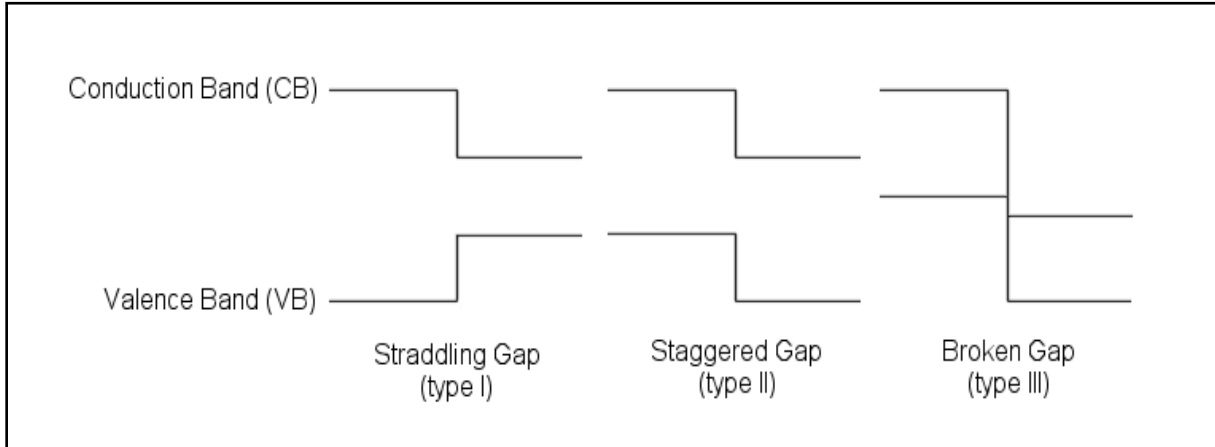
Sa réalisation s'effectue en faisant croître une couche épitaxiale d'un semi-conducteur sur un autre semi-conducteur. Pour cela il faut que les deux semi-conducteurs aient les mêmes symétries cristallines (dans le plan de l'interface), des paramètres cristallins voisins et des

coefficients de dilatations proches puisque l'épitaxie se réalise à température élevée. Selon le type de dopage utilisé pour les semi-conducteurs, deux hétérojonctions se distinguent [14] :

- Les premières sont les hétérojonctions isotypes, pour lesquelles les deux semi-conducteurs sont de même type de dopage.
- Les secondes sont les hétérojonctions anisotypes, pour lesquelles les deux semi-conducteurs sont dopés différemment.

Les bandes interdites des deux semi-conducteurs étant différentes, le diagramme d'énergie de l'hétérojonction présente des discontinuités (offsets) de jonction des bandes de conduction ou de valence c'est-à-dire des sauts de potentiel.

Le comportement d'une jonction semi-conductrice dépend essentiellement de l'alignement des bandes d'énergie à l'interface. Les interfaces de semi - conducteurs peuvent être organisées en trois types de hétérojonctions : écart chevauchant comme on le voit sur la figure (type I), l'écart en quinconce (type II) ou l'écart cassé (type III). Loin de la jonction, la courbure de la bande peut être calculée en fonction de la procédure habituelle de résoudre l'équation de Poisson [15].



**Figure 1.12** : Les trois types d'hétérojonctions de semi-conducteurs organisés par l'alignement de la bande [15].

## **1.10. Conclusion**

Les semi-conducteurs occupent une place importante et dominante dans le domaine de l'électronique or que Plusieurs composants, dont les plus connus restent les transistors et les diodes, fonctionnent grâce aux propriétés particulières de ces matériaux.

Dans ce chapitre on a présenté de façon générale les propriétés électronique et optique des semi-conducteurs et on a pu déduire que l'utilisation des matériaux composés (SC III-V) apporte de nombreux avantages en termes de propriétés des matériaux et leurs améliorations.

Les hétérojonctions permettent de créer des composants à semi-conducteurs plus performants que leurs équivalents à homojonctions. En effet, l'hétérojonction est la base des composants HBT (Transistors Bipolaires a Hétérojonction) utilisés dans le domaine des télécommunications longue distance, des lecteurs CD ou DVD, des appareils photo numériques...

Dans les chapitres suivant nous allons présenter les lasers à base de semi-conducteurs.

# *chapitre 2*

---

## 2.1. Introduction

De nos jours les lasers sont largement utilisés dans divers domaines : en astronomie, en médecine, dans l'industrie, dans la recherche scientifique et notamment en télécommunications.

Le mot LASER est formé par les initiales de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation ; ce qui correspond en français à une amplification lumineuse par l'émission stimulée des rayonnements électromagnétiques [16], c'est -dire une sorte de focalisateur de photons. L'amplification de la lumière par émission stimulée de photons produit une lumière qui est monochromatique, directionnelle, cohérente et de haute intensité. De différentes sortes de lasers existent. Ils comprennent tous trois éléments nécessaires qui sont : le milieu émetteur, l'excitation et l'amplification. Parmi ces lasers nous distinguons le laser à semi-conducteur ou la diode laser.

Dans ce chapitre nous allons tout d'abord décrire le processus d'absorption et d'émission. Puis nous allons expliquer le principe de fonctionnement de laser. Et on termine par la description des lasers à semi-conducteurs et leurs types.

## 2.2. Interaction matière-lumière

On considère deux niveaux particuliers 1 et 2 d'un atome, dont les énergies respectives  $E_1$  et  $E_2$ .

On peut distinguer trois phénomènes principaux d'interaction entre la lumière et la matière :

### 2.2.1. Absorption

Lors de l'absorption, un photon incident est absorbé par un électron de la bande de valence qui passe alors à la bande de conduction. Pour que ce phénomène se produise, il faut que le photon incident ait une énergie supérieure à la bande interdite.

Ce qui fait que la transition de l'état  $E_1$  à l'état  $E_2$  (par l'électron) se fait par l'absorption d'un photon d'énergie [17].

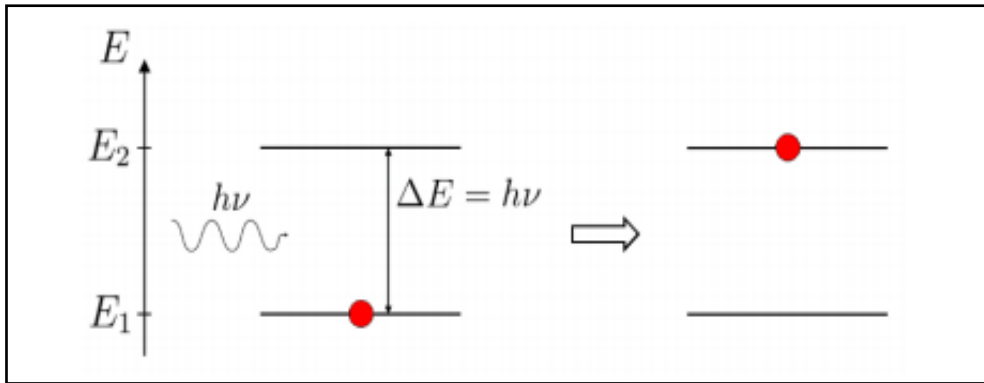
$$E_2 - E_1 = h\nu \quad (2.1)$$

Avec :

$h$  : Constante de Planck  $\approx 4,135\ 667\ 662 \times 10^{-15}$  eVs

$\nu$  : La fréquence du photon.

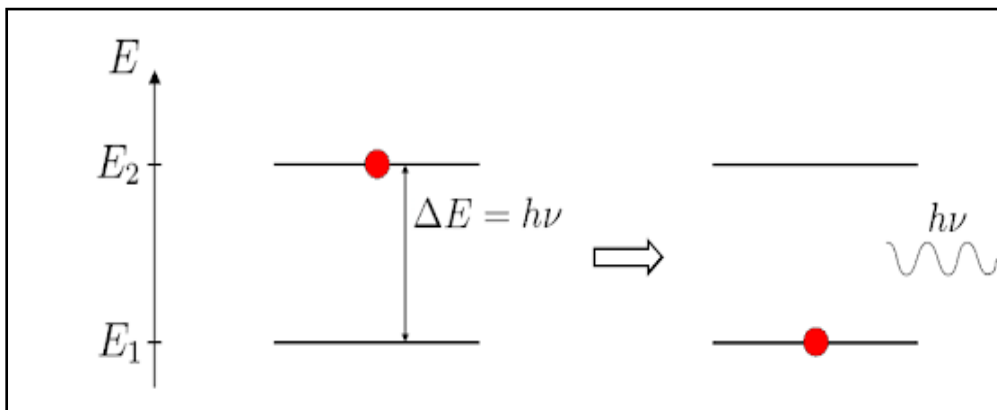
Sachant que  $E_1$  est l'énergie du niveau inférieur et  $E_2$  est l'énergie du niveau supérieur.



**Figure 2.1** : Schéma de l'excitation d'un atome par absorption d'un photon.

### 2.2.2. Émission spontanée

C'est la situation inverse. Un électron excité qui se trouve à un niveau d'énergie supérieur transite spontanément à un niveau d'énergie inférieur en émettant un photon qui a une direction et une phase aléatoire.

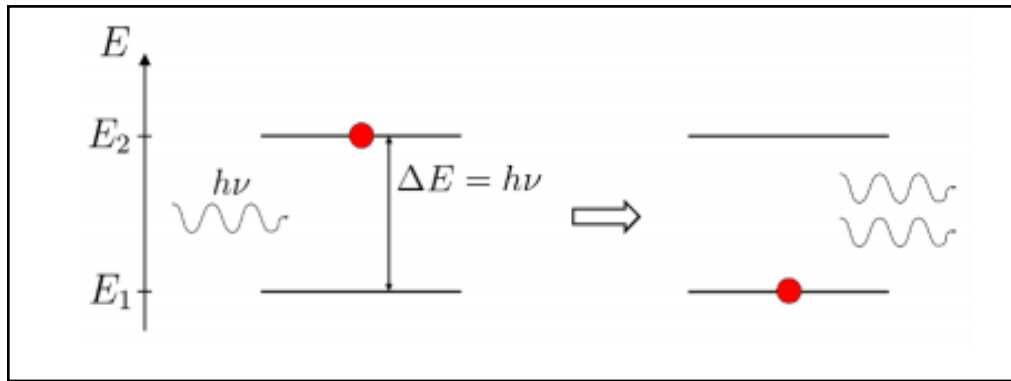


**Figure 2.2** : Schéma de la désexcitation spontanée d'un atome et de l'émission d'un photon.

### 2.2.3. Emission stimulée

Lorsqu'un électron excité reçoit un photon dont la longueur d'onde aurait permis de l'exciter s'il avait été dans son état fondamental, ce photon peut déclencher la désexcitation de l'électron. L'électron va alors émettre un deuxième photon, de même longueur d'onde que celui qu'il a reçu, mais aussi dans la même direction et avec la même phase que le premier. L'électron excité joue alors le rôle de photocopieuse à photons [18].





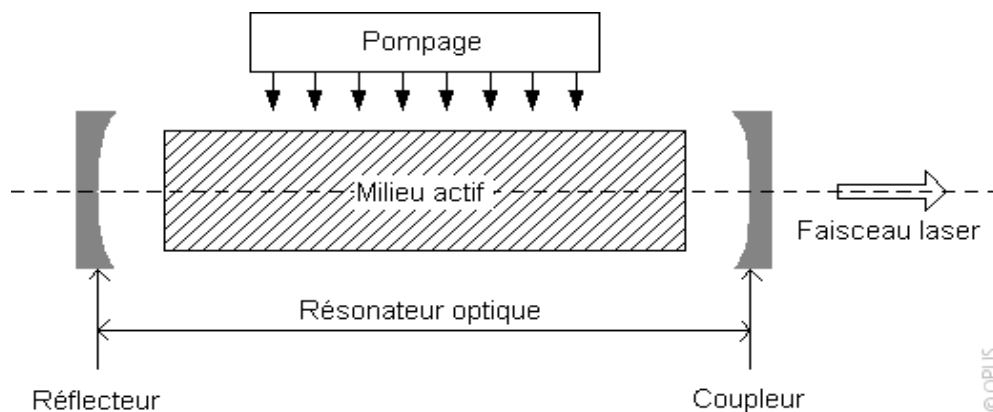
**Figure 2.3 :** schémas de l'émission stimulée d'un atome.

L'absorption et l'émission stimulées sont des interactions cohérentes. Par contre dans les sources de lumière thermique (lampes à incandescence, lampes à arc, etc.), qui sont basées sur l'émission spontanée, les radiations sont incohérentes [11].

Pour une transition radiative, les trois mécanismes sont toujours présents en même temps. Pour faire un milieu laser, il faut donc trouver des conditions qui permettent de privilégier l'émission stimulée au détriment de l'absorption et de l'émission spontanée. Il y a donc une nécessité de sélectionner dans la nature les milieux qui pourront effectivement servir en tant que milieux laser. Il faudra également veiller à mettre le milieu dans de bonnes conditions pour que l'effet laser ait lieu [19].

### 2.3. Principe de fonctionnement du laser

Un laser est constitué de trois composants essentiels à son fonctionnement ; à savoir le milieu amplificateur ou actif, un système d'excitation du milieu amplificateur ou système de pompage et une cavité résonante ou résonateur optique.



**Figure 2.4 :** schéma d'un système laser. [20]

- **Milieu amplificateur** : Le milieu actif est composé de particules que l'on veut exciter (atomes, molécules, ions, etc.) et il peut être solide, liquide ou gazeux. Il se trouve en état d'inversion de population grâce au dispositif de pompage, ce qui amplifie l'onde qui le traverse par émission stimulée [23].
- **Un système d'excitation du milieu amplificateur ou système de pompage** : permet de créer les conditions d'une amplification lumineuse en apportant l'énergie nécessaire au milieu.  
Le système de pompage peut être de différentes natures : pompage optique (LED, lampes flash, lampes à arc continues ou lampes à filament de tungstène, diodes laser ou autres lasers ...), électrique (décharges dans des tubes de gaz, courant électrique dans des semi-conducteurs ... etc.) [23].
- **Une cavité résonante ou un résonateur optique** : c'est le dispositif qui permet à la lumière de passer plusieurs fois dans le milieu actif, afin que les atomes soient de plus en plus excités.  
Ce système est composé de deux miroirs parallèles, entre lesquelles est placé le milieu actif. L'un des miroirs réfléchit tous les photons, et l'autre laisse passer 1 à 10 % des rayons et réfléchit le reste.

### 2.3.1. Inversion de population

L'émission stimulée d'un atome ou d'une molécule produit un nouveau photon qui a exactement la même fréquence, phase et direction que le photon incident. Dans un laser, cela se fait à grande échelle, sur un très grand nombre d'atomes ou molécules identiques. C'est pourquoi un laser a la particularité d'émettre une onde lumineuse intense dont la direction, la fréquence et la phase sont bien déterminées.

Mais pour obtenir un effet d'émission stimulée sur un grand nombre d'atomes ou molécules, il faut fournir de l'énergie au milieu matériel afin que ses atomes ou molécules soient pour la plupart dans un niveau d'énergie excité  $E_2$ , et non dans leur niveau fondamental  $E_1$ . C'est ce qu'on appelle : effectuer une inversion de population, car à l'équilibre thermodynamique la majorité des atomes se trouvent dans l'état d'énergie le plus bas. [11]

On définit les populations des niveaux d'énergies  $E_1$  et  $E_2$  par  $N_1$  et  $N_2$  respectivement qui sont les densités volumiques d'atomes dans chacun de ces niveaux.

À l'équilibre thermodynamique, la répartition des populations sur les niveaux est donnée par la loi de Boltzmann [21] :

$$N_2 = N_1 e^{\left(\frac{E_2 - E_1}{kT}\right)} \quad (2.2)$$

L'inversion de population est obtenue par un dispositif dit « pompage » qui fait passer les atomes du niveau d'énergie  $E_1$  à des niveaux d'énergies supérieurs à ce dernier.

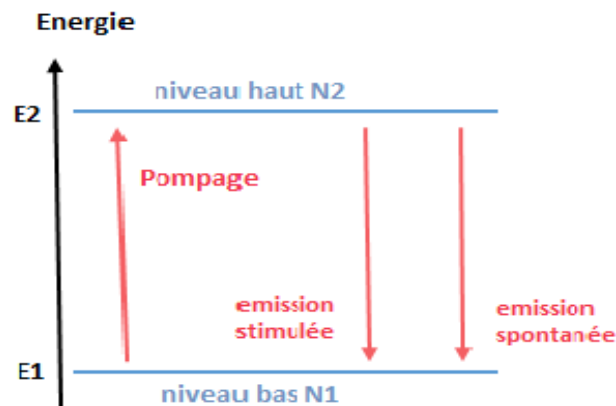


Figure 2.5 : Diagramme schématisant le pompage optique sur deux niveaux.

### 2.3.2. Fonctionnement de la cavité résonnante

Avoir une inversion de population positive n'est pas suffisant pour générer un effet laser. En effet, il ne faut pas oublier que les mécanismes d'émission stimulée et d'émission spontanée sont en compétition. C'est la cavité qui va créer les conditions favorables pour que l'émission stimulée devienne prédominante par rapport à l'émission spontanée [19].

La cavité laser la plus simple est constituée de deux miroirs se faisant face. On parle de cavité « Fabry-Perot ». Dans une telle cavité, l'un des miroirs réfléchit totalement la lumière à la longueur d'onde considérée. L'autre, le miroir de sortie, transmet une petite fraction de la puissance lumineuse présente dans la cavité ; l'onde transmise constitue le faisceau laser [22].

La lumière réfléchiée successivement par les deux miroirs, fait des allers-retours dans la cavité. Pour que la lumière vienne, à chaque passage dans l'amplificateur, renforcer l'onde lumineuse qui circule dans le laser, il faut que ces ondes soient en phase. Le chemin optique

dans la cavité correspondant à un aller-retour, doit être égal à un multiple de la longueur d'onde. C'est la condition de résonance [22] :

$$2L = P\lambda \longrightarrow L = \frac{P\lambda}{2} \quad (2.3)$$

Ou :

L : la distance séparant les deux miroirs.

$\lambda$  : La longueur d'onde de la lumière.

P : nombre entier.

Pour une longueur L fixée, seules les longueurs d'onde vérifiant la relation ci-dessus pourront donc être présentes dans le faisceau laser.

Au bout de plusieurs dizaines de milliers d'aller-retours, la quantité de photons générée dans l'axe de la cavité par émission stimulée va être égale à celle qui est perdue (en particulier via le miroir de sortie). Il va donc y avoir un état stationnaire pour lequel un rayonnement dit rayonnement laser sort de façon continue par le miroir de sortie.

On dit alors que le laser oscille : c'est à dire que le laser émet en continu un rayonnement majoritairement issu de l'émission stimulée filtré par la cavité. [23]

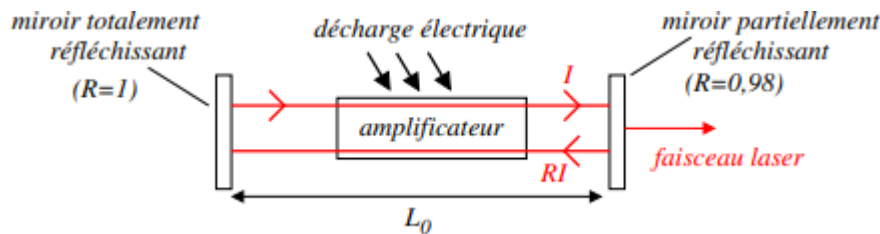


Figure 2.6 : la cavité résonante.

### 2.3.3. Condition d'oscillation

Le gain d'un amplificateur optique peut s'écrire comme le rapport de l'intensité optique de sortie ( $I_s$ ) sur l'intensité optique entrant ( $I_e$ ) :

$$G = \frac{I_s}{I_e} = \exp(gl) \quad (2.4)$$

Avec :

$g$  : Le gain matériau,

$l$  : La longueur de l'amplificateur.

Un dispositif laser contenant une certaine densité de population inversée agit donc comme un amplificateur. Ainsi, il s'agit de lui réinjecter le signal amplifié à son entrée par une contre-réaction optique pour obtenir l'oscillation laser [24].

### 2.3.3.1. Condition sur le gain

Il existe donc une condition de gain à partir de laquelle le laser se met à osciller spontanément. Ce gain est défini par [24] :

$$G = \alpha_{int} + \frac{1}{2l} \ln\left(\frac{1}{|r_1 r_2|}\right) \quad (2.5)$$

Avec :

$\alpha_{int}$  : Coefficient d'atténuation en intensité (pertes internes).

$r_1$  et  $r_2$  : Réflectivités des faces du laser.

Le terme  $\left[ \frac{1}{l} \ln\left(\frac{1}{|r_1 r_2|}\right) \right]$  représente les pertes miroirs de la cavité.

### 2.3.3.2. Condition sur la phase

La seconde condition pour obtenir l'oscillation laser concerne l'accord de phase de l'onde dans le milieu actif. Au cours d'un aller-retour, le déphasage accumulé doit être un multiple de  $2\pi$ . [25]

## 2.4. Caractéristique de la lumière laser

Un faisceau laser est unidirectionnel, intense, monochromatique et cohérent [11].

### 2.4.1. Unidirectionnel

Le faisceau se dirige dans une direction unique. Cependant, il peut y avoir une divergence de 1 degré d'arc provoquée par la diffraction lorsque le faisceau se propage dans un milieu, ainsi le diamètre du faisceau peut augmenter jusqu'à 1mm par mètre parcouru.

### 2.4.2. Intense

Les lasers émettent une lumière très intense, bien que certains laser semble peu puissant (quelque milliwatts) leur lumière est concentrée sur une toute petit surface parfois d'à peine quelques millimètres carrés. C'est pourquoi il est très important de ne jamais recevoir un faisceau directement dans les yeux, ce qui pourrait provoquer une cécité permanente en endommageant la rétine.

### 2.4.3. Monochromatique

Contrairement à la lumière émise par le soleil ou par une ampoule à incandescence qui est polychromatique ; la lumière produite par un laser est monochromatique. Elle contient très peu de longueurs d'onde.

### 2.4.4. Cohérent

La lumière produite par un laser est ordonnée dans le temps et dans l'espace. Ainsi, chaque photon qui la compose oscille en même temps de la même manière. La directivité de la lumière laser est d'ailleurs une conséquence de sa cohérence.

## 2.5. Laser à semi-conducteur

Le milieu actif dans ces diodes laser est un cristal semi-conducteur constitué d'atomes neutres arrangés dans le réseau cristallin correspondant au matériau considéré.

Les diodes lasers à semi-conducteur fonctionnent sur un principe qui est totalement différent par rapport à d'autres types de diodes lasers. Les états excités ne sont pas indépendants les uns des autres et conduisent à la notion de bandes d'énergie. Un électron se désexcite depuis la bande de conduction vers la bande de valence, il peut être interprété comme une recombinaison d'un électron avec un trou, et c'est précisément cette recombinaison qui donne lieu à une émission de photon de caractéristiques strictement identiques au photon incident. Et c'est cette lumière qui est appelée émission par recombinaison et se situe dans le visible ou le proche de l'infrarouge. En augmentant le nombre d'électrons et de trous, on augmente la densité de porteur donc l'intensité du laser [17].

Pour un laser à semi-conducteur comme pour tout autre laser, il est nécessaire de produire une inversion de population. La pompe dans ce type de laser est remplacée par une injection de courant dans la zone active du milieu. Ceci revient donc à créer une situation où il y a beaucoup d'électrons dans la bande de conduction et beaucoup de trous dans la bande de

valence. On peut alors stimuler leur recombinaison et produire ainsi une émission lumineuse [26]. La densité d'inversion de population étant importante, le gain est très grand et les dimensions de la cavité diminuent (moins de un millimètre)

### 2.5.1. Diode laser à homojonction

C'est un laser réalisé par une jonction P-N constituée de la juxtaposition de deux semi-conducteurs de même nature mais dopés différemment.

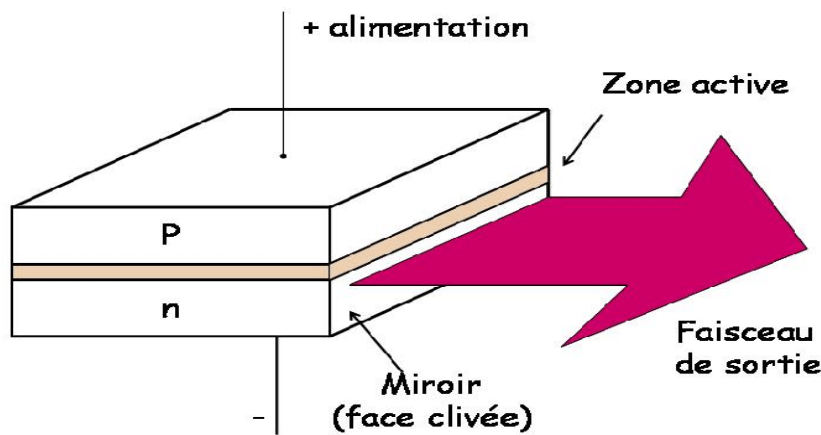


Figure 2.7 : Structure d'un laser à semi-conducteur à homojonction [27].

En appliquant une polarisation directe à la jonction P-N d'un semi-conducteur à transition directe par l'alimentation avec un courant électrique  $I$ , les électrons injectés dans la région P vont diffuser sur une longueur de l'ordre de la longueur de diffusion des électrons. Dans de la zone active, on a des recombinaisons radiatives des paires (électron – trous). On peut donc concevoir un laser à semi-conducteur pour lequel l'inversion de population est créée par injection d'un courant dans une jonction [21].

Pour avoir l'effet laser il faut que la densité de courant de seuil soit liée à la densité d'électrons injectés par cette relation :

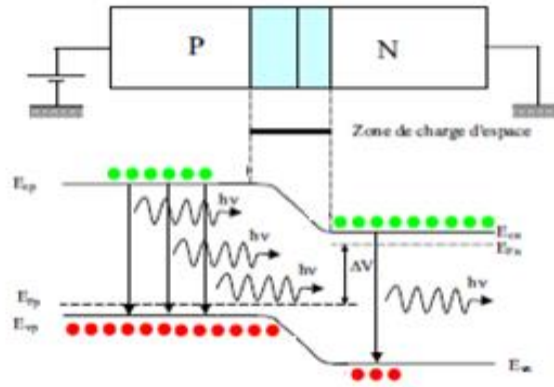
$$J_s = \frac{e \cdot d}{\tau} \Delta N \quad (2.6)$$

$e$  : Charge de l'électron.

$d$  : Épaisseur de la zone active (zone de recombinaisons radiatives).

$\tau$  : Durée de vie des électrons.

$\Delta N$  : La densité d'électrons injectés.



**Figure 2.8 :** Diagramme de bandes d'énergie d'une structure à homojonction [21].

L'inconvénient majeur des lasers à homojonctions c'est que la densité de porteurs est fortement limitée et le courant de seuil est très élevé ce qui résulte un échauffement qui influe sur le fonctionnement du composant.

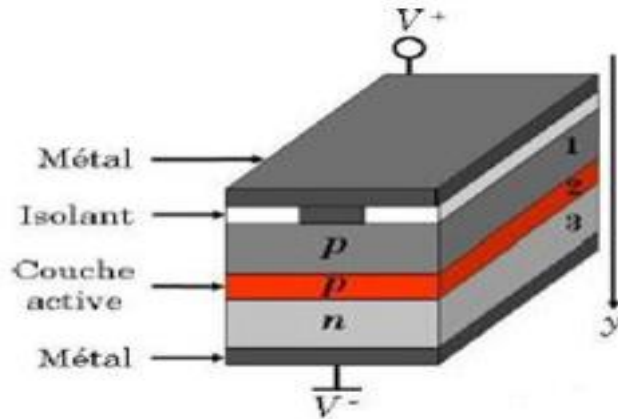
### 2.5.2. Diode laser à double hétérojonction

Le laser à semi-conducteur est devenu accessible pour les applications grâce à l'invention de la double hétérojonction. La structure en double hétérojonction crée une double barrière de potentiel pour les porteurs minoritaires injectés [28]. Elle est constituée de trois couches de matériaux semi-conducteurs différents.

On a au centre, une couche d'un matériau 1 qui est la zone active et qui est placée entre deux couches d'un autre matériau 2. Ces matériaux sont caractérisés par des indices de réfraction et des largeurs de bande interdite  $E_g$  différents.

Cette zone active présente un indice de réfraction plus élevé que celui des couches de confinement qui l'entourent, grâce à sa bande interdite plus étroite. Cette différence d'indices de réfraction lui donne la propriété d'un guide d'onde optique avec un nombre de modes de propagation optique fixé en contrôlant son épaisseur qui peut devenir encore plus étroite en utilisant des structures à puits quantiques plutôt que du matériau massif [21].





**Figure 2.9** : Structure d'une diode double hétérojonction.

Le choix des deux semi-conducteurs doit vérifier l'égalité de paramètre de maille cristalline, pour éliminer toute contrainte aux interfaces, qui entraînent par exemple des dislocations, la formation de précipités, d'où diminution du rendement quantique.

### 2.5.2.1. Laser à semi-conducteurs à double hétérojonction *InGaAsP/InP*

La diode laser à double hétérojonction *InGaAsP/InP* est la plus utilisée car elle peut facilement être dopée n ou p, et le composé ternaire *InGaAsP* assure un accord de maille (0.1%) presque parfait avec le *InP* quel que soit la composition x.

Sa structure est obtenue par la juxtaposition de trois couches : une couche active type p de faible épaisseur du matériau *InP* à petit gap est placée entre deux couches à grand gap et de plus faible indice de réfraction (couche d'injection type n et couche de confinement de type p) du matériau.

Couche de confinement <b>InP- P</b>
Couche de confinement <b>InGaAsP- P</b>
Couche active <b>InP- P</b>
Couche d'injection <b>InGaAsP- N</b>
Substrat <b>InP- N</b>

**Figure 2.10** : structure d'une diode laser à double hétérojonction *InGaAsP/InP*

Lorsqu'on applique une polarisation directe aux couches latérales n et p, la différence du gap entre les matériaux *InGaAsP/InP* forme un puits de potentiel, dans lequel les porteurs peuvent s'accumuler et se recombiner radiativement. Le guidage des photons dans la couche active se fait à cause de la valeur élevée de l'indice de réfraction. Ces photons se déplacent parallèlement au plan des couches, l'émission laser apparaît à partir d'un certain seuil de densité de courant notée  $J_s$ , au-delà du seuil le gain d'émission stimulée dans la cavité est supérieur aux pertes totales.

## 2.6. Laser à puits quantique

La réduction de volume de la zone d'inversion est obtenue par la réalisation de lasers à puits quantiques [31]. Un puits quantique simple, est constitué d'une fine couche d'un matériau semi-conducteur de faible gap, entourée de matériau de plus grand gap qui crée un puits de potentiel de taille quantique pour les électrons et les trous. Ces derniers vont se confiner sur des niveaux d'énergies discrets pour une injection donnée. Il permet d'augmenter la densité de porteurs et d'atteindre l'inversion de population [21].

Outre la diminution du courant de seuil, l'utilisation d'une zone active à puits quantiques permet de limiter les transitions possibles entre les deux bandes grâce à la quantification des niveaux permis, et de sélectionner leur énergie par l'utilisation d'une géométrie adéquate du puits. Ceci réduit fortement la largeur du spectre d'émission. D'autre part il y a un meilleur recouvrement entre la zone d'accumulation des porteurs et la zone de gain. De ce fait, l'efficacité de pompage est améliorée : plus de porteurs contribuent à l'émission stimulée. En contrepartie, le facteur de confinement  $\Gamma$  est beaucoup plus faible que dans les lasers classiques, compte tenu des faibles dimensions de la zone active [30].

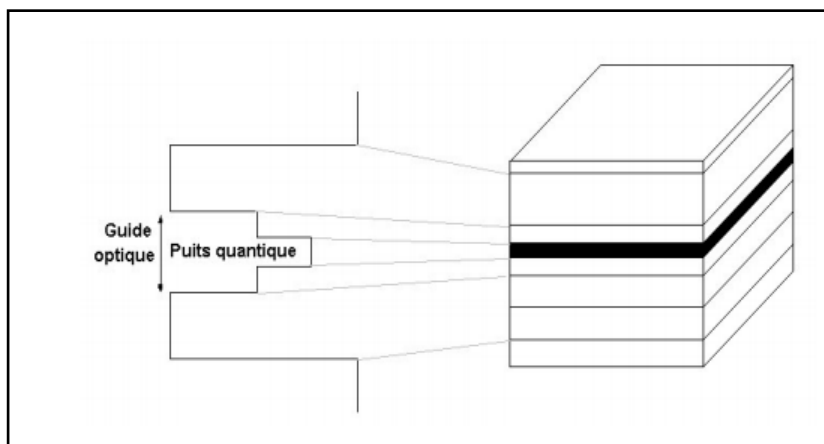


Figure 2.11 : zone active d'une diode laser à puit quantique.

Il faut en outre noter que le rayonnement émis par un laser à puits quantique est déplacé vers les courtes longueurs d'onde par rapport au rayonnement émis par un laser équivalent à double hétérostructure. Ce déplacement est dû aux énergies de confinement des porteurs. Enfin le simple puits quantique peut être remplacé par des multi puits quantiques dans le but d'augmenter le facteur de confinement [31].

## 2.7. Caractéristiques d'une diode laser

Il existe de nombreuses caractéristiques de fonctionnement des diodes laser qui sont d'une importance primordiale dans son application en tant que source de signal dans une liaison par fibres optiques [29]. Ces caractéristiques sont :

### 2.7.1. Facteur de confinement

La structure à double hétérojonction forme un guide diélectrique de longueur  $L$  assurant un confinement électronique et optique qui est défini par la différence entre les indices de réfractions des couches de confinements N et P. La couche active permet à la structure d'être un guide d'onde plane qui permet la propagation des ondes par réflexion totale. Pour certaines valeurs de l'incidence, chaque valeur de  $m$  (le mode) définit un mode de propagation.

Étant donné la très faible épaisseur ( $d$ ) de la couche active, seul le mode fondamental ( $m = 0$ ) peut se propager

Il y a une présence d'une onde dans les couches de confinements, qui est caractérisée par une décroissance exponentielle du champ à l'extérieur du guide [21].

Le facteur de confinement ou le facteur d'amélioration de gain, qui décrit la quantité d'énergie guidée dans la zone active est le suivant [25] :

$$\Gamma = \frac{L \int_d |E_x|^2 dx}{d \int_L |E_x|^2 dx} \quad (2.7)$$

## 2.7.2. Taux de recombinaison radiative

### 2.7.2.1. Recombinaison radiative

L'énergie de cette recombinaison est libérée sous forme de photons. La recombinaison bande à bande entre un électron de la bande de conduction et un trou de la bande de valence, est la recombinaison radiative la plus dominante [29].

$$R_r = B \cdot N^2 \quad (2.8)$$

$B$  : Coefficient de recombinaison radiative.

$N$  : Concentration des porteurs injectés.

### 2.7.2.2. Recombinaison non radiative

- **Les recombinaisons Shockley-Hall-Read (SHR)** : Dans lesquelles les impuretés jouent un rôle essentiel, un électron est d'abord capturé sur une impureté et ensuite un trou est capturé sur la même impureté, ce qui entraîne la disparition d'une paire électron-trou [29].

$$R_{SHR} = A \cdot N \quad (2.9)$$

$A$  : Taux de recombinaison non-radiative.

- **Les recombinaisons Auger** : Dues à l'interaction électron – électron, dans laquelle un électron se recombine avec un trou en transférant l'énergie ainsi gagnée à un autre électron (ou trou) sous forme d'énergie cinétique. Ce processus est intrinsèque et ne nécessite pas la participation de défauts ou d'impuretés [29].

$$R_a = C \cdot N^3 \quad (2.14)$$

$C$  : coefficient de recombinaison Auger.

## 2.7.3. Le gain

Le gain ou coefficient de d'amplification est défini comme le coefficient d'absorption par la variation relative de la densité de rayonnement par unité de longueur [31] :

$$g(E) = \frac{1}{\phi(E)} \frac{d\phi(E)}{dx} \quad (2.15)$$

Avec  $\phi(E)$  représente le flux de photon.

Le gain est lié au taux d'émission stimulé qui est le nombre de photon crée par l'émission stimulée par unité de volume et unité de temps.

$$r_{st}(E) = \frac{d\phi(E)}{dx} \quad (2.16)$$

Ainsi :

$$g(E) = \frac{r_{st}}{\phi(E)} \quad (2.17)$$

Donc le gain est directement proportionnel au taux d'émission stimulée, de sorte que  $g(E)$  est positif si la condition d'inversion de population est réalisée. Mais cette condition n'est pas suffisante pour obtenir une réelle amplification, il faut non seulement que le gain soit positif mais de plus supérieur aux pertes.

#### 2.7.4. La caractéristique puissance-courant

Elle représente la variation de la puissance émise par la diode laser en fonction de son courant de polarisation. Cette caractéristique dépend fortement du courant de seuil qui correspond au seuil de l'émission laser et de la température de fonctionnement du composant [29].

- A faible injection l'inversion de population n'est pas réalisée ou insuffisante pour compenser les porteur libre. L'émission est alors spontanée. Elle émit dans toutes les directions de l'espace, la diode laser donc se comporte comme une diode électroluminescente.
- Lorsque le courant qui traverse la jonction devient supérieur au courant seuil, l'inversion de population a lieu. Les photons émis vont générer des photons cohérents qui vont atteindre les faces clivées du laser en se multipliant par émissions stimulées. Le gain à cette énergie devient alors supérieur aux pertes par porteurs libres et la diode amplifie le rayonnement spontané d'énergie E.

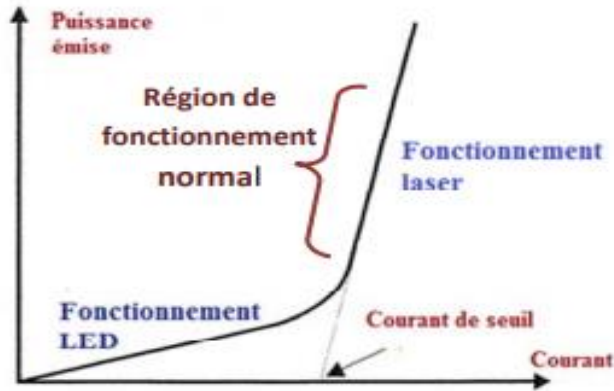


Figure 2.12 : Caractéristique puissance-courant de la diode laser.

#### 2.7.4.1. Influence de la température :

Le courant de seuil augmente rapidement avec la température. A la même puissance lumineuse, la puissance électrique dissipée dans le laser augmente. Ce décalage du courant de seuil est dû à la dépendance à la température de la concentration de porteurs dans la couche active et également à la possibilité d'augmentation des processus de recombinaisons non radiatives [29].

Le courant seuil varie, avec la température, suivant la loi :

$$I_s(T) = I_{s0} \cdot \exp \frac{T}{T_0} \quad (2.18)$$

Où  $T_0$  est la température caractéristique de la diode et  $I_{s0}$  est le courant correspondant à la température  $T_0$ .

#### 2.7.4.2. Rendement de la puissance

Le rendement de la puissance est défini par le rapport entre la puissance totale émise et la puissance totale injectée :

$$R_p = \frac{P_e}{VI} \quad (2.19)$$

$P_e$  : Puissance totale émise.

$VI$  : Puissance totale injectée.

### 2.7.5. variation de la longueur d'onde

Une autre caractéristique importante des diodes laser est que la longueur d'onde d'émission, dépend de la température du semi-conducteur.

La longueur d'onde d'émission d'une diode laser, augmente avec la température du semi-conducteur. Cela est dû au fait qu'en augmentant la température, la longueur de la zone active augmente à son tour.

Au-dessus d'une certaine température, il devient difficile à un mode donné d'osciller dans le résonateur. Par contre il y'aura oscillation d'un mode différent pour lequel les conditions sont plus favorables. Si on réduit ensuite la température, le laser tend à retourner vers sa longueur d'onde initiale [32].

### 2.7.6. Temps de réponse d'un laser

La réponse temporelle d'un laser dépend du temps de vie des électrons (temps de recombinaison),  $\tau_r$

$$T_{laser} = \tau_r \cdot \ln\left(\frac{I}{I - I_S}\right) \quad (2.20)$$

### 2.7.7. Distribution spectrale du rayonnement de la diode laser

Pour chaque cavité résonnante, seules les ondes récupérant leur phase après un aller-retour dans la cavité sont susceptibles d'être amplifiées. Cette condition est à l'origine d'un spectre optique des cavités Fabry-Pérot et VCSEL composé d'un ensemble de raies spectrales individuelles avec un espacement régulier  $\Delta\lambda$  et également appelés modes longitudinaux. La largeur spectrale de chaque raie dépend de nombreux facteurs, en particulier de la puissance de la diode laser. Ces raies sont comprises à l'intérieur d'une enveloppe plus large appelée courbe de gain [19], comme le montre la figure suivante :

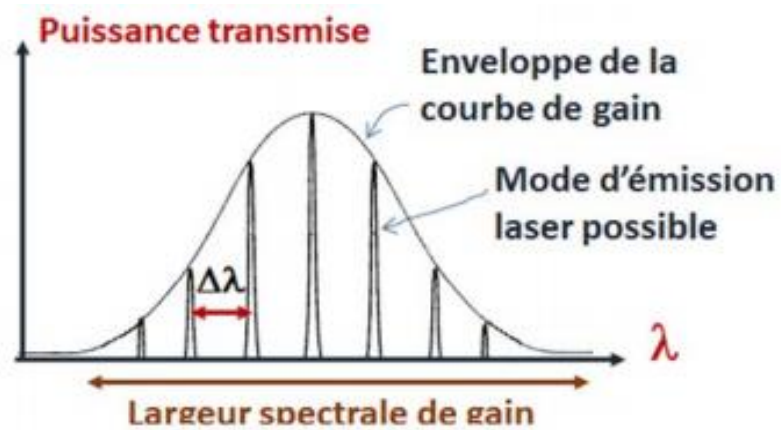


Figure 2.13 : Spectre d'émission d'une diode laser [19].

Le spectre d'émission de la diode laser est conditionné par le gain de la cavité, donc par le courant de seuil. La répartition des modes varie avec le courant de polarisation et présente un décalage vers les longueurs d'onde les plus élevées quand le courant augmente.

La distance intermodale est alors donnée par :

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2nl} \quad (2.21)$$

$nl$  : Longueur optique.



## **2.8. Conclusion**

Dans ce chapitre on a vu les différents mécanismes physiques intervenants dans l'émission de la lumière, en particulier la manière d'avoir une lumière monochromatique et cohérente grâce à l'exploitation de l'émission stimulée et des propriétés d'une cavité laser. Ainsi que le principe de fonctionnement de ce dernier.

L'étude a ensuite été plus spécifique en considérant seulement le cas des diodes lasers à semi-conducteurs. Elles sont l'exemple type de conversion directe d'énergie électrique en énergie optique. Les diodes laser ont des caractéristiques qui les différencient des lasers conventionnels.

Dans le chapitre suivant nous ferons l'étude et la simulation de certaines de ces caractéristiques.

# *chapitre 3*

---

### **3.1. Introduction**

Les micro-ordinateurs sont actuellement des plates formes privilégiées pour les applications de simulation, ils offrent en effet une très grande variété d'outils logiciels pour le développement des programmes de simulation et de traitement de données. Afin de simuler les caractéristiques électriques et optiques de notre dispositif LASER objet, on a utilisé le logiciel « Silvaco » qui est un outil de fabrication virtuelle de plaquettes. Il propose une variété d'outils logiciels puissants.

Dans le présent chapitre, nous allons parler du logiciel de simulation « Silvaco-Atlas », en expliquant les étapes suivies pour simuler notre structure objet et tracer les caractéristiques de cette dernière.

### **3.2. Présentation de la technologie TCAD**

La technologie TCAD (Technology Computer-Aided Design) fait référence à une suite de logiciels permettant de simuler les processus de fabrication des composants intégrés ainsi que la modélisation du comportement physique et électrique d'un composant électronique, dans le but d'économiser le temps et le coût de développement, et ainsi de pouvoir envisager et optimiser des solutions pour améliorer les performances des dispositifs [33].

Cette technologie est aussi utilisée pour [25] :

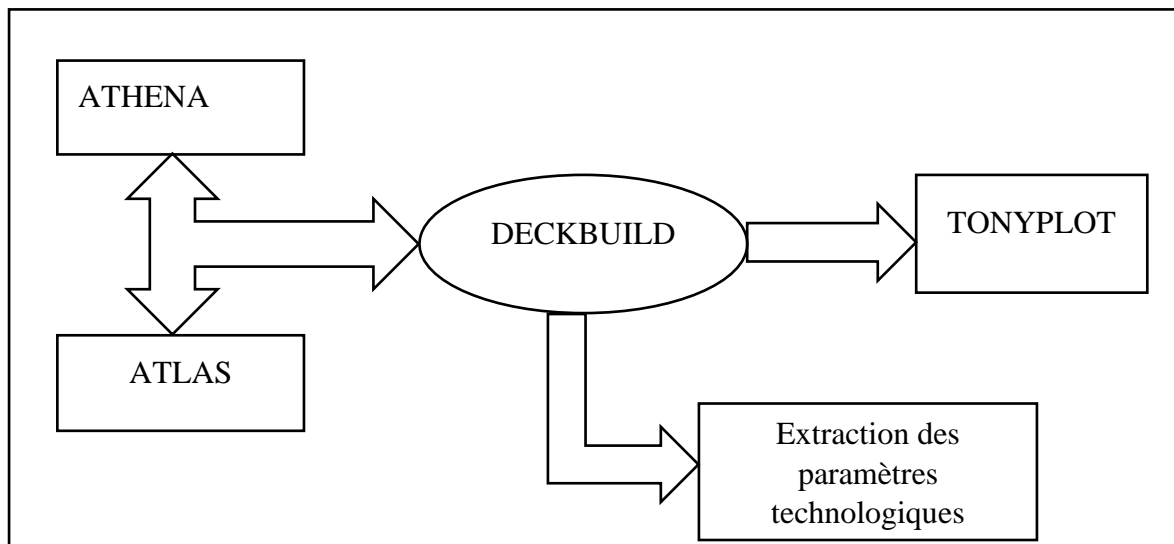
- La conception assistée par ordinateur de dispositifs semi-conducteurs.
- La conception et le développement de procédés de fabrication.
- La caractérisation technologique pour la conception de circuits.
- L'optimisation du rendement de fabrication
- on et le centrage de processus.
- L'optimisation et la prédiction des performances et des comportements des appareils.
- La réduction de temps de mise sur le marché.
- Eviter la sur-conception.
- Réduction des coûts élevés du processus de conception.

Les simulateurs existants sur le marché (SYNOPSIS, SILVACO, CROSSLIGHT TIBERLAB AENEAS...) ont le même principe de fonctionnement. Dans le cadre de notre travail, nous avons utilisé la simulation comme outil de prédiction en utilisant le simulateur SILVACO.

### 3.3. Présentation du simulateur Silvaco (Silicon Valley Corporation)

SILVACO (Silicon Valley Corporation) est un environnement de logiciels qui permet de concevoir et prévoir les performances des dispositifs à semi-conducteur. Cet outil sert à la modélisation des dispositifs à semi-conducteur avant leur fabrication [34]. Il est très utile dans le développement de beaucoup de projets de recherches. Le TCAD SILVACO inclut de nouveaux modèles physiques qui emploient des méthodes et des algorithmes numériques efficaces, de nouvelles techniques de maillage, l'optimisation des solutions linéaires, etc. Tout en permettant d'obtenir des résultats de simulation très proches de celles de la pratique. L'avantage majeur de ce type de simulateurs est qu'il donne la possibilité de visualiser des phénomènes physiques difficilement accessibles et donc observables. Les modules de TCAD-SILVACO peuvent être utilisés pour :

- La simulation des étapes de fabrication technologique tels que, ATHENA, SSupreme3, SSupreme4, etc.
- La simulation électrique des dispositifs tels que, les Diodes, les MOSFET, les transistors bipolaires..., réalisée par le module ATLAS.
- Virtual Wafer pour automatiser la simulation de fabrication des Wafer [35].



**Figure 3.1 :** Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par TCAD SILVACO.

### **3.3.1. ATLAS**

Le logiciel de simulation ATLAS est un simulateur de modélisation bidimensionnelle de composants semi-conducteurs. Il est capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs en régime continu, transitoire ou fréquentiel [34].

En plus du comportement électrique, il fournit des informations sur la distribution interne des variables électrique telles que le courant ou la tension (lignes de champ). Ceci est réalisé en résolvant numériquement les équations de Poisson et de continuité des électrons et des trous (à deux dimensions) en un nombre fini de points formant le maillage de la structure défini par l'utilisateur ou par le programme [36].

Ce simulateur est composé de deux parties :

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

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

### **3.3.2. ATHENA**

Le logiciel de simulation ATHENA de TCAD-SILVACO fournit des possibilités générales pour la simulation des processus utilisés dans l'industrie des semi-conducteurs (diffusion, oxydation, implantation ionique, gravure, lithographie, procédés de dépôt). Il permet des simulations rapides et précises de toutes les étapes de fabrication utilisées dans la technologie CMOS, bipolaire, SOI, optoélectronique, MEMS, et les composants de puissances. Le logiciel permet de fournir des informations importantes pour la conception et l'optimisation des procédés technologiques telles que les concentrations des porteurs, les profondeurs de jonctions, etc. [37]

ATHENA traite la simulation comme une série d'événements consécutifs, et simule généralement en simultanéité avec ATLAS.

### **3.3.3. DECKBUILD**

DECKBUILD est l'environnement interactif d'exécution et de développement où le programme de simulation est défini à travers des commandes spécifiques, de multiples simulateurs considérés comme des entrées peuvent être utilisés avec le DECKBUILD

Sous cet environnement nous pouvons visualiser sur une fenêtre d'information appelée « Output Windows » les résultats de simulation [36].

### **3.3.4. TONYPLOT**

C'est l'environnement où sont visualisés les résultats des simulations. Il donne des possibilités complètes pour la visualisation et l'analyse des caractéristiques de sortie (structure du composant électronique, profil de dopage, et caractéristiques électriques). Selon le programme de simulation, TONYPLOT peut donner des caractéristiques de sortie en une dimension (1D), deux dimensions (2D), ou trois dimensions (3D). Il peut aussi fonctionner en autonome ou avec d'autres outils interactifs de VWF, comme DECKBUILD [36].

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

## **3.4. Structure de fichier d'entrée**

Un fichier de commande ATLAS est une liste de commandes pour ATLAS à exécuter.

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

<STATEMENT> <PARAMETER>=<VALUE>

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

Suite à cette commande, le fichier d'entrée doit suivre un modèle [38].

### 3.5. L'ordre des commandes dans l'ATLAS

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

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

**Figure 3.2.** : Groupes de commandes Atlas dans l'ordre exigé avec les instructions principales de chaque groupe [38].

### 3.6. Principe de simulation du laser

La structure traitée dans notre travail est la diode laser réalisée à base de InP/InGaAsp. En effet, les contacts sur InP ont d'une part un intérêt technologique pour la réalisation de dispositifs électroniques rapides et d'autre part jouent un rôle dans la compréhension physique des phénomènes.

#### 3.6.1 Spécification de la structure étudiée

La spécification de la structure est effectuée en définissant le maillage, les régions, les électrodes et le niveau de dopage.

La simulation du laser InP/InGaAsP sur ATLAS-Silvaco nous a permis d'avoir structure étudié et qui est la suivante :

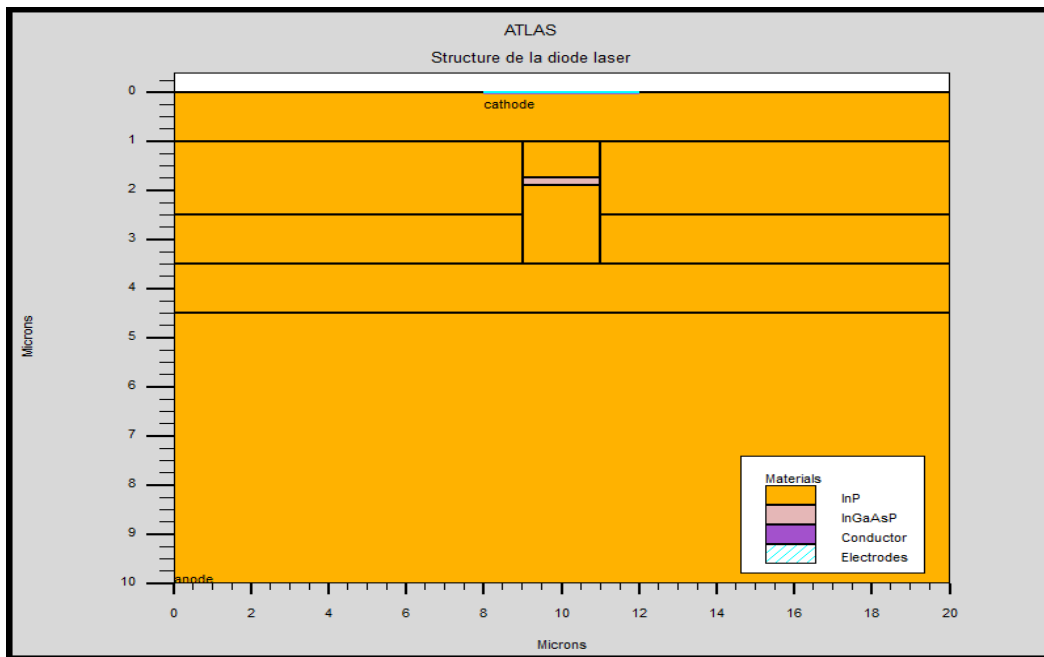


Figure 3.3 : Structure du laser

### 3.6.1.1. Spécification de maillage

La première étape dans la construction d'un dispositif après la déclaration go atlas, est de définir le maillage. Le maillage est une grille qui recouvre la zone physique dans lequel le dispositif est construit et simulé. Le maillage est simplement réalisé par une série de lignes horizontales et verticales définies par l'utilisateur avec un espacement entre eux [39].

Il 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 [34]. Le choix de maillage doit être fait de façon à avoir un compromis entre la vitesse d'exécution et l'exactitude des résultats.

Dans notre étude, le maillage utilisé est à deux dimensions, par conséquent, seuls les paramètres x et y sont définis.

L'emplacement est spécifié par le paramètre LOCATION en microns. L'espacement est défini par le paramètre SPACING, également exprimé en microns.

- La première commande doit être :



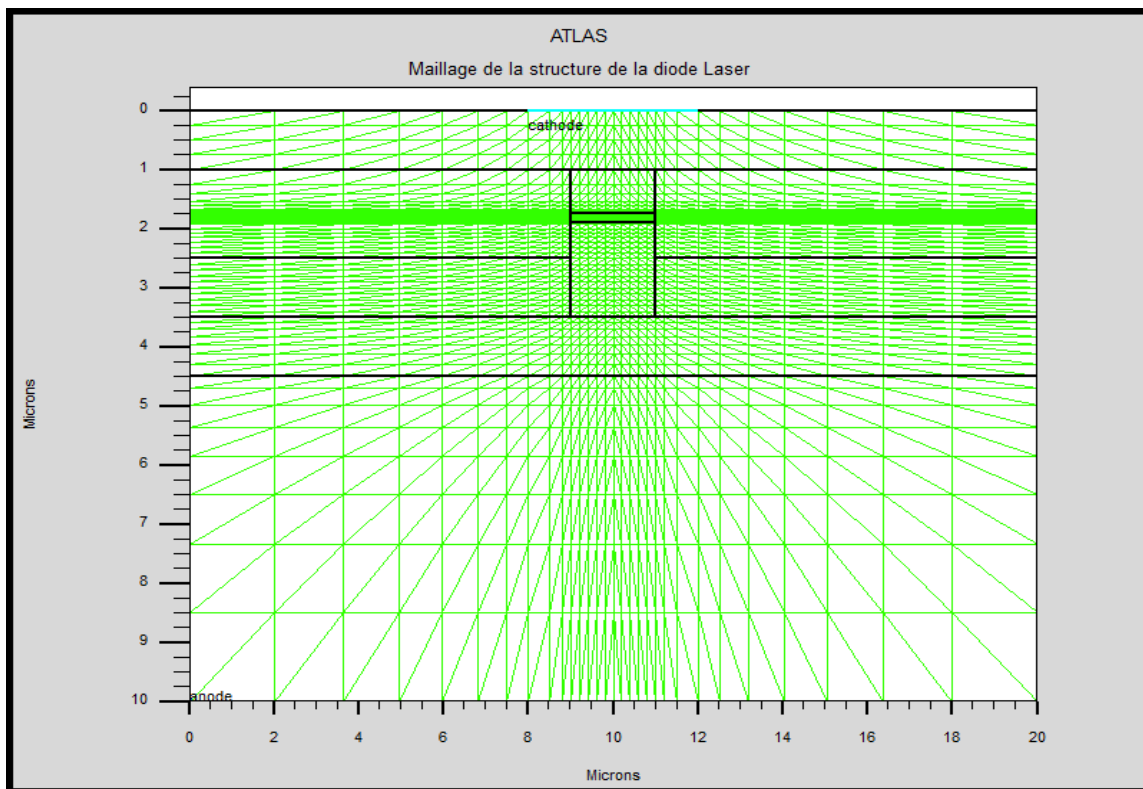
```
mesh      space.mult=1.0
```

- Et sera suivie par:

```
x.mesh    loc=<valeur> spac=<veleur>
```

```
y.mesh    loc=<valeur> spac=<veleur>
```

La précision de la simulation dépend de l'état de la maille. 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 [36].



**Figure 3.4 :** maillage de la structure laser

### 3.6.1.2. Spécification des régions

La déclaration de la région est utilisée pour séparer l'instruction du maillage initial en blocs distincts et définit les paramètres matériels initiaux qui peuvent être désignés plus tard par des numéros de région. Tous les domaines maillés d'une structure doivent être assignés à

une région et les régions doivent être ordonnées de la plus basse vers la plus élevée. Par exemple, la région 5 ne peut pas être définie avant la région 4 [39].

Elles sont spécifiées par l'instruction REGION dans laquelle la composition du matériau est spécifiée par le paramètre MATERIAL dont les valeurs sont les noms des matériaux.

Le format de définition des régions est le suivant :

```
Region num=<valeur> material=<type de materiel>/ <position des paramètres>
```

### **3.6.1.3. Spécification des électrodes**

La définition des électrodes permet de réaliser les contacts Grille, Anode et Cathode. Cependant, SILVACO ATLAS a une limite de 50 électrodes qui peuvent être définies. Le format de définition d'électrodes est comme suit :

```
ELEC NAME = < nom de l'électrode > < position des paramètres >
```

Les paramètres de position sont spécifiés par les instructions X.MIN, X.MAX, Y.MIN et Y.MAX.

On peut également utiliser certains raccourcis lors de la définition d'une électrode en utilisant les commandes suivantes :

RIGHT : La position de l'électrode se situe à la droite de la structure.

LEFT : La position de l'électrode se situe à gauche de la structure.

TOP : La position de l'électrode est en haut de la structure.

BOTTOM : La position de l'électrode est en bas de la structure.

NUMBER : Attribution des électrodes à un nombre.

NAME : Donner un nom aux électrodes.

### **3.6.1.4. Dopage**

Le dernier aspect de la construction de la structure est le dopage. Le dopage peut être de type n ou p, aussi la distribution peut être uniforme, gaussien,

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

```
Doping uniform region=num <type de dopage> <conc=valeur>
```

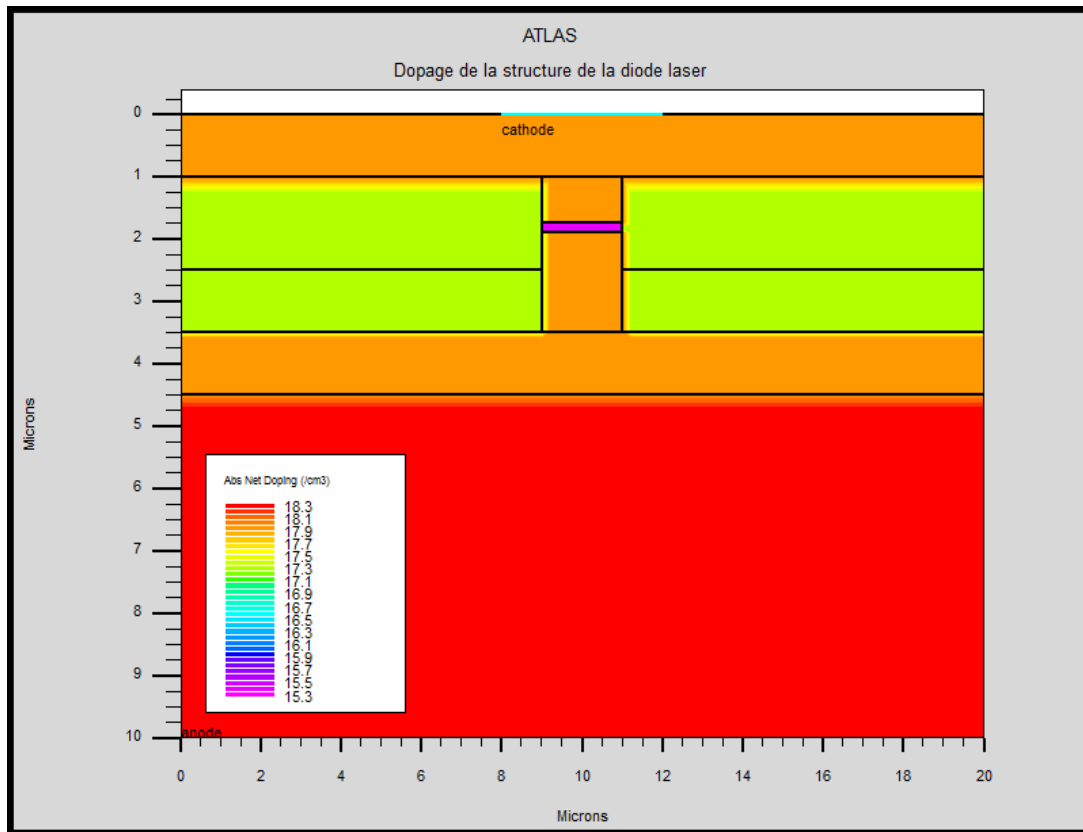


Figure 3.5 : dopage de la structure laser.

### 3.6.2. Spécification du modèle et du matériau

Après la définition de la structure, il faut spécifier les modèles des matériaux, elle se compose de quatre parties : matériau, modèles, contact et interface.

#### 3.6.2.1. Matériau :

La déclaration matérielle permet la spécification de certains paramètres de base. Ces valeurs peuvent s'appliquer à un matériau ou à une région.

La capacité la plus importante que les déclarations matérielles permettent est la création des matériaux définis par l'utilisateur. L'utilisateur peut utiliser arbitrairement n'importe quel matériau lors de la définition d'une structure, puis modifier l'ensemble de ses propriétés pour correspondre à celle d'un matériau désiré. Bien que le matériel porte le nom du matériau choisi, il agira fonctionnellement comme n'importe quel matériau l'utilisateur le désire [39].

Le format de la déclaration du matériau est le suivant :

MATERIAL < localisation > < définition du matériau >

Exemple :

```
material material=InP      taun0=2.e-9  taup0=2.e-9  copt=1.5e-10 \  
mun=2400.0  mup=80.0  align=0.6
```

Dans cet exemple « Material » apparaît deux fois, le premier est considéré comme la déclaration du matériau et le second est considéré comme un paramètre de localisation.

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 d'électrons et de trous respectivement.

### 3.6.2.2. Modèles

Les modèles physiques se répartissent en cinq catégories : la mobilité, la recombinaison, les statistiques des porteurs, l'ionisation par impact, et l'effet tunnel.

Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation. L'exemple ci-dessous active plusieurs modèles.

Exemple : SRH FLDMOB CONMOB

SRH est le modèle de Shockley-Read-Hall.

CONMOB est le modèle dépendant de la concentration

FLDMOB est le modèle dépendant du champ électrique parallèle.

La syntaxe de la déclaration du modèle est la suivante :

```
MODEL< paramètres générales > / < paramètres du modèle >
```

### 3.6.2.3. Contact

Indique les attributs physiques d'une électrode (résistivité, travail de sortie,...)

La syntaxe du contact est la suivante :

```
Contact nombre = < n > | NOM = <ename> | ALL
```

#### 3.6.2.4. Interface

L'interface indique les paramètres d'interface aux frontières des semi-conducteurs ou des isolants. Tous les paramètres s'appliquent seulement aux nœuds de frontière exceptés là où ils sont déjà indiqués.

La syntaxe est la suivante :

INTERFACE [<paramètres>]

### 3.6.3. Méthodes numérique à sélectionner

#### 3.6.3.1. Les équations de base dans les semi-conducteurs

ATLAS contient plusieurs méthodes numériques pour calculer les solutions aux problèmes de dispositif à semi-conducteur. Il existe trois principaux types de méthodes numériques [39].

Des années de recherche sur la physique des dispositifs ont abouti à un modèle mathématique qui fonctionne sur tout dispositif à semi-conducteur.

Ce modèle est constitué d'un ensemble d'équations fondamentales, qui relient ensemble le potentiel électrostatique et les densités de porteurs, dans certains domaines de simulation.

Ces équations, qui sont résolues à l'intérieur de tout appareil à usage général simulateur, ont été dérivées des lois de Maxwell et consistent en l'équation de Poisson, les équations de continuité et les équations de transport, et sont données sous les formes suivantes [25] :

- **Equations de courant :**

$$J_n = q n(x) \mu_n E(x) + q D_n \frac{dn}{dx} \quad (3.1)$$

$$J_p = q p(x) \mu_p E(x) + q D_p \frac{dp}{dx} \quad (3.2)$$

- **Equation de poisson :**

Relie les variations du potentiel électrostatique à la charge locale, qui est la somme des contributions de toutes les charges mobiles et fixes, y compris les électrons, trous et impuretés ionisées.

$$\text{div}(\epsilon \nabla V) = -\rho = -q(p - n + N_D - N_A) \quad (3.3)$$

- **Equation de continuité :**

Le flux des charges électriques est gouverné par les équations de continuité qui indiquent qu'il n'y a pas d'accumulation de charges, ni spatiale ni temporelle. Ils décrivent la direction d'évolution des densités des électrons et des trous comme un résultat de trois processus : processus de transport, de génération et de recombinaison.

Pour les électrons :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla J_n + U_n \quad (3.4)$$

Pour les trous :

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \nabla J_p + U_p \quad (3.5)$$

Avec :

$n(x)$ : La densité des électrons à une dimension.

$p(x)$ : La densité des trous à une direction.

$\mu_n$ : La mobilité des électrons.

$\mu_p$ : La mobilité des trous.

$D_n$ : Le coefficient de diffusion des électrons.

$D_p$ : Le coefficient de diffusion des trous.

$N_D$ : La densité des pièges donneurs vides.

$N_A$ : La densité des pièges accepteurs occupés

$U_n = G_n - R_n$ : Le taux de génération recombinaison net ( $G_n$  est le taux de génération et  $R_n$  est le taux de recombinaison).

Pour résoudre les systèmes des équations étudiés, deux méthodes itératives sont proposées par l'analyse numérique :

La première méthode, qui est celle de Gummel et qui est une méthode coûteuse en nombre d'itérations et qui est utile lorsque le système d'équations est faiblement couplé mais a seulement la convergence linéaire.

La deuxième méthode est celle de Newton qui nécessite moins d'itérations, et qui est utile lorsque le système d'équation est fortement couplé et a convergence quadratique. Cette méthode prend plus de temps pour résoudre les quantités qui sont essentiellement constante ou faiblement couplées et exige également une estimation initiale plus précise du problème pour obtenir la convergence.

#### **3.6.4. Spécification de la solution**

Cette section de la plate-forme d'entrée est où la simulation fait ses calculs à résoudre pour le dispositif spécifié. Elle est divisée en quatre parties : Log, Solve, Load, and Save.

- **Log** : enregistre toutes les caractéristiques terminales dans un fichier de données. L'exemple suivant montre un exemple d'utilisation de l'instruction LOG.
- **Solve (résoudre)** : L'instruction SOLVE suit l'instruction LOG. Elle effectue une solution en calculant les informations relative à un ou plusieurs points de polarisation.
- **Save (enregistrement)** : permet l'enregistrement de toutes les informations obtenues pour un nœud dans un fichier de sortie.
- **Load (téléchargement)** : introduit, à partir d'un fichier existant, pour chaque point de polarisation les solutions précédentes en tant que proposition initiale pour pouvoir récupérer les informations stockées.

Les instructions Save et Load sont utilisées ensemble pour aider à créer de meilleures estimations initiales pour les points de polarisation.

Une fois qu'une solution est trouvée pour le problème du dispositif, l'information peut être visualisée graphiquement avec TONYPLOT. Elle s'écrit comme suit :

```
solve istep= ifinal= name=  
save outfile= <nom du fichier>.str
```

```
Tonyplot <nom du fichier>.log -set <nom du fichier>_log.set
```

A la fin du programme, on introduit l'instruction QUIT, les résultats obtenus seront alors affichés immédiatement sous TONYPLOT.

### 3.7. Résultats et discussions

Dans cette section nous allons présenter les principaux résultats caractérisant la diode laser obtenue suite à la simulation et qui sont affichés graphiquement avec « TONYPLOT »

#### 3.7.1. Variation du gain en fonction de la tension

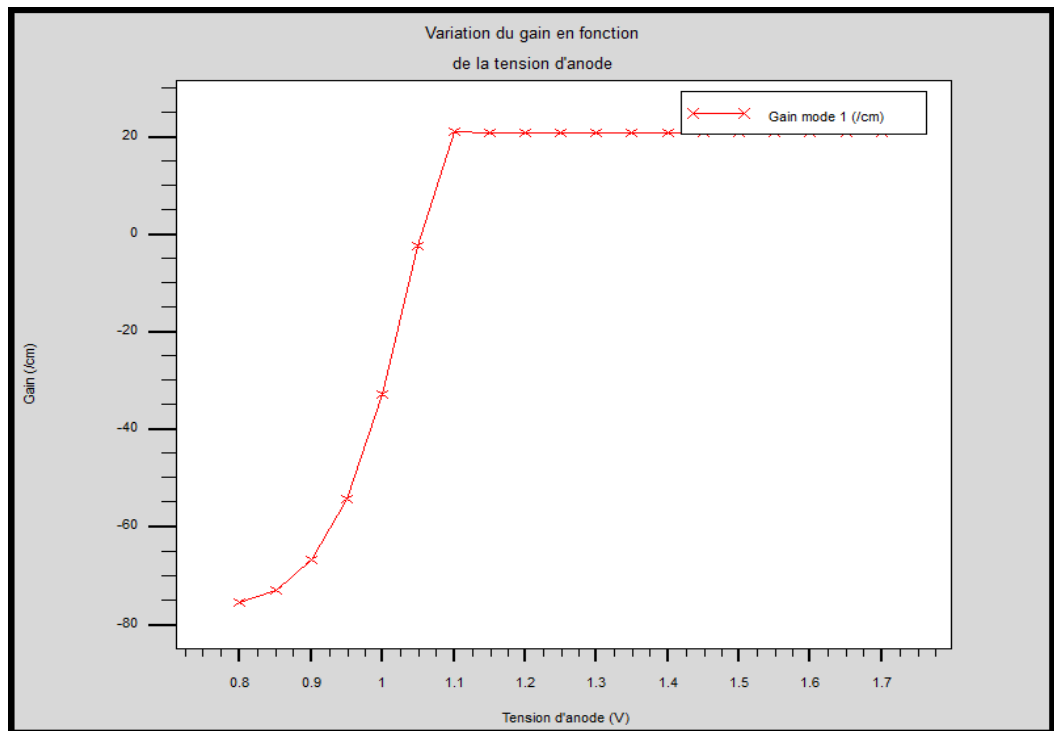


Figure 3.6 : variation du gain en fonction de la tension.

La figure la dessus (3.6) représente la variation du gain en fonction de la tension, on remarque que pour des tensions inférieures à 1V les valeurs du gain sont négatives ce qui traduit l'absence de l'émission de laser. Mais au-delà de cette valeur ( $> 1V$ ) le gain devient positif ce qui traduit l'apparition de l'émission laser.



Cela est appliqué par le fait qu'en absence de polarisation ou bien si la polarisation est faible, une densité très faible de porteurs arrive à la région active de très petites dimensions, mais elle est insuffisante pour l'émission LASER. Par contre, lorsque la diode laser est polarisée en direct les électrons et les trous sont injectés dans la population de la région active du dispositif où la recombinaison se produit souvent. Ces électrons et les trous se recombinent pour émettre des photons.

Lorsque la tension de polarisation atteint une certaine valeur (1.1V) le gain reste constant, c'est le phénomène de saturation.

### 3.7.2. Variation de la puissance en fonction de la tension

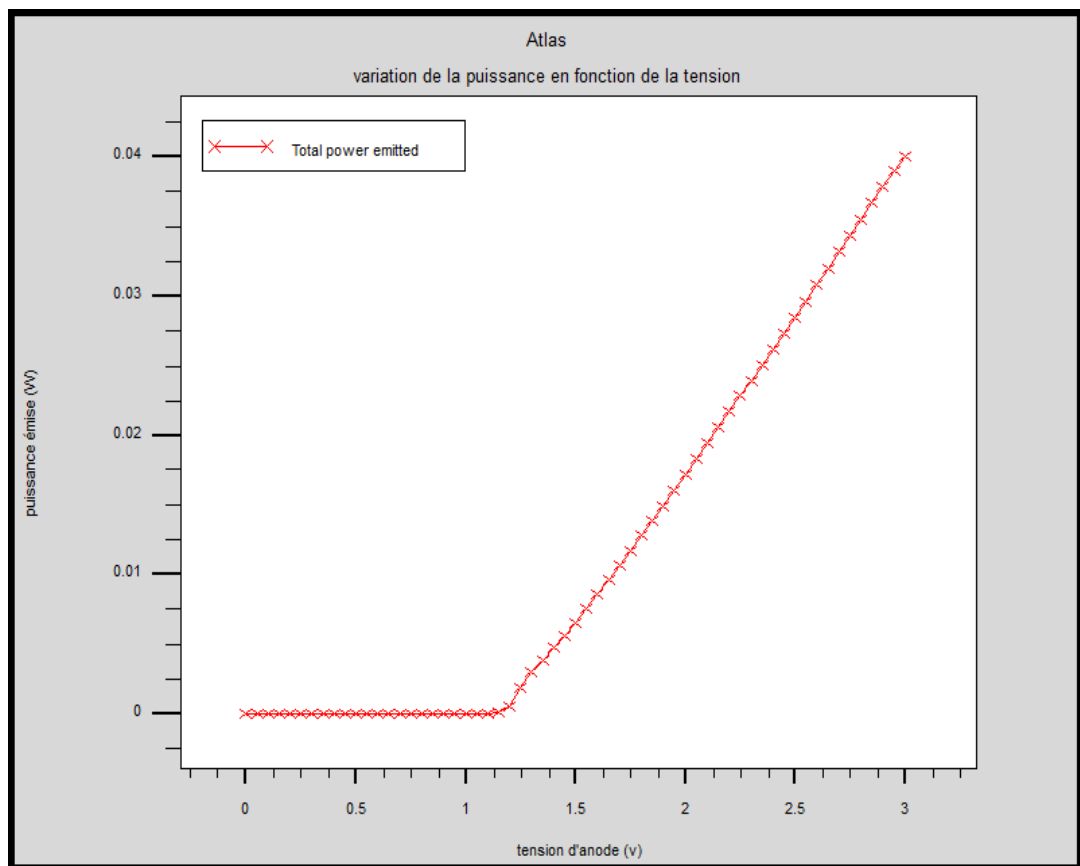


Figure 3.7 : variation de la puissance en fonction de la tension.

La figure en dessus représente la variation de la puissance en fonction de la tension. On remarque qu'après la polarisation la puissance émise est nulle avant qu'on atteigne 1.2V. On parle de l'émission spontanée, c'est à dire le courant n'arrive pas à réaliser l'inversion de

population. Lorsque  $V > 1.2$  on voit que la pente de la courbe augmente brusquement et la puissance émise atteint rapidement des valeurs plus élevées.

L'endroit où la pente augmente brusquement correspond au seuil d'oscillation qui est nécessaire pour réaliser l'inversion de population c'est-à-dire l'émission stimulée.

### 3.7.3. Variation de la densité de photons en fonction de l'énergie du photon

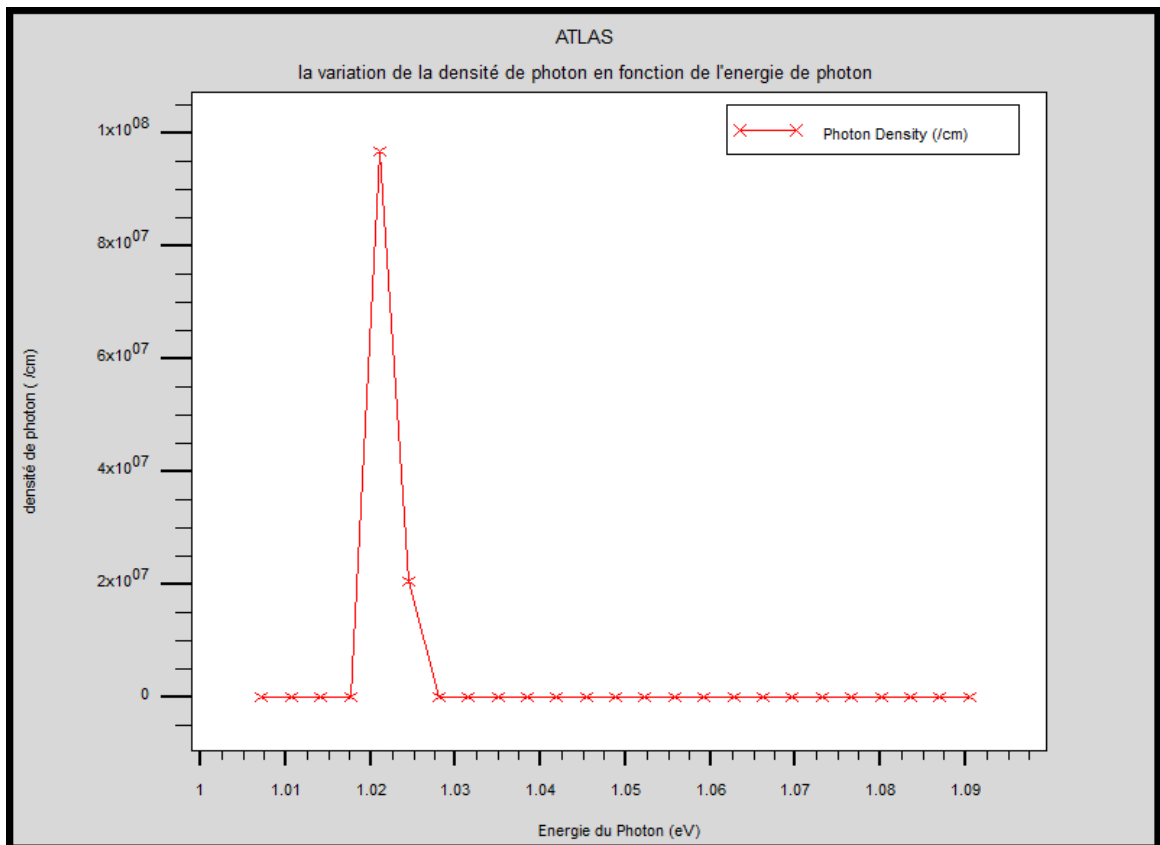


Figure 3.8 : Variation de la densité de photon en fonction de l'énergie du photon.

La figure en dessus représente la variation de la densité de photon en fonction de l'énergie du photon. On voit bien que la densité de photon commence à augmenter à partir d'une certaine valeur d'énergie qui correspond à l'énergie du gap. Le phénomène observé est l'émission stimulée. Après on observe une diminution de la densité de photons. Tous les électrons de la zone active ont rejoint la bande de valence ce qui fait qu'on a basculé dans le phénomène d'absorption. D'après ce qu'on a dit tous les photons seront absorbés et on obtient une densité nulle.

### **3.8. Conclusion :**

Dans ce chapitre, en premier lieu nous avons présenté le logiciel de simulation TCAD-SILVACO, son principe de fonctionnement, et ces modules de simulation : ATHENA pour la simulation des processus technologiques, et ATLAS pour la simulation du comportement électrique des composants.

En deuxième lieu nous avons présenté l'ensemble de résultats de simulation d'une diode laser. Nous avons simulé une diode laser à base de InP/InGaAsP en donnant sa structure et ses caractéristiques puissance-tension et gain-tension.

# *Conclusión Générale*

---

## Conclusion générale

---

Les composants électroniques à base des jonctions, telles que les diodes laser et les cellules photovoltaïques, connaissent une grande focalisation scientifique et technique dans les dernières années, car elles présentent un grand intérêt économique, énergétique et environnemental.

Les lasers à semi-conducteur jouent un rôle si important en télécommunications optique. Ils ont été largement déployés dans la transmission optique par rapport aux critères de directivité, de mono chromaticité et de rendement énergétique. Le laser à semi-conducteur est sans conteste le dispositif le plus performant que l'homme ait pu réaliser dans sa quête vers la maîtrise de la lumière.

Actuellement, un effort très important de recherche est mené sur l'exploitation de la double hétérojonction à plus fort degrés de confinement des porteurs par la structure de bandes à niveaux discrets de ces nanostructures pour ce qui concerne les lasers à semi-conducteurs, cette propriété permettrait en théorie d'améliorer leurs performances en terme de gain et courant de seuil.

La structure traitée dans notre travail est la diode laser réalisée sur un substrat InP : InP/InGaAsP. Les contacts sur InP sont importants pour la réalisation de dispositifs électroniques rapides et pour la compréhension physique des phénomènes.

L'obtention des résultats par simulation en utilisant Silvaco-TCAD, passe par la résolution d'un système d'équations non-linéaires, qui se compose de l'équation de Poisson et des équations Drift-Diffusion, en utilisant les méthodes numériques de Gumel et de Newton.

Après simulation, on a pu extraire quelques caractéristiques de la diode laser, dont le gain qui varie en fonction de la tension. Pour des tensions inférieures à (1v) les valeurs du gain sont négative cela a été traduit par l'absence de l'émission de laser, une fois que la tension dépasse le (1v) le gain devient positif, c'est-à-dire l'apparition de l'émission du laser. C'est le même principe pour ce qui est de la variation de la puissance en fonction de la tension, avant (1.2v) la puissance émise est nulle, au-delà de cette valeur elle commence à augmenter, cette augmentation est traduite par l'apparition de l'émission stimulée.

En termes de perspective, il serait très intéressant d'étudier les caractéristiques électroniques de la diode laser dans d'autres structures que Au/InP.

## Référence bibliographique

- [1] Basil Salam. « mesure des charges dans les matériaux Semi-conducteurs et les métaux avec une méthode elasto-statique ». Thèse de doctorat en science mécanique, acoustique, électronique et robotique, université pierre et Marie curie. Paris. France. 2015.
- [2] Karazoune Abdelkrim Rachid. « Analyse du transport électronique dans les dispositifs micro-électronique par les matériels particuliers Monte-Carlo : Application aux matériaux InSB et Sic », mémoire de magister en physique énergétique et matériaux. Université de Tlemcen, 2009.
- [3] Florent Amoravin, Yann Maillard-Salu David Perrin. « Les lasers principes, fonctionnement et applications ». Cours, université de Technologie de Belfort Montbéliard. France.
- [4] El ouchdi Ahmed Amine, « Caractéristique du phénomène de transport électronique dans les matériaux composés ternaires : Application au matériau  $[Ga_xIn_{1-x}Sb]$  » Mémoire de registre en Microélectronique, Université de Tlemcen, 2011.
- [5] Tararbit Abderrahmane, « Etude sur les différentes propriétés des Semi-conducteurs (Si, Ge, SiC, GaAs, NGe) » Rapport Mater 1 en Génie Microelectro, Université de Tizi Ouzou. consulté le [24/04/202].
- [6] Qu'est ce que un semi-conducteur intrinsèque et extrinsèque .consulter le (14/05/2020) [en ligne] [www.radiation-dosimetry.org](http://www.radiation-dosimetry.org)
- [7] Les semi-conducteurs à jonction PN. école national supérieur d'ingénieur de limoges. [ligne] [https://www.unilim.fr/pages\\_perso/valerie.madrangas/Jonction-P-N.pdf](https://www.unilim.fr/pages_perso/valerie.madrangas/Jonction-P-N.pdf)
- [8] Dr .AH. Souici Cours « physique des Semi-conducteurs » Université de Bejaia, 2013/2014.
- [9] Melouka Bouanami, « Prédiction des propriétés structurales et électroniques de phosphore d'indium dopé en manganèse », Mémoire de master en spectroscopie-moléculaire. Université de Saida, 2017.
- [10] Bekhtari Abdalilah et Chouaou Yasmine Etude et simulation des nanostructures à base de nouveaux matériaux pour l'optoélectronique InASb/GaAs et InASb /Inp. Mémoire de master université de Blida, 2013/2014.
- [11] Benatmane Kaled, « Etude de lasers à base de Semi-conducteur III-V » Magister en électronique. Université de Batna, 2011.
- [12] A. Chovet et P. Masson « Physique des Semi-conducteurs » cours de première année. microélectronique et Telecom. Ecole polytechnique Université de Marseille. 2004/2005.

## Référence bibliographique

---

- [13] Louazani Ahmed « Etude des propriétés Structurales élastiques et électroniques des S.C III-V GaAs-InP », 2015.
- [14] Hemroune Amine, « Transistor bipolaire a hétérojonction (HBT) AlGaIn/GaN modélisation et simulation des performances » Mémoire de magister en Nano physique et nanotechnologie, Université de Tlemcen, 2011.
- [15] Article de Wikipédia, l'encyclopédie libre (consulté le 13/7/2020) [en Ligne] <https://fr.qwe.wiki/wiki/Heterojunction>
- [16] Gibert Monthon, Pierre Ravussin, « introduction aux lasers » Note de cours. Ecole nationale vétérinaire d'Alfort, 2016.
- [17] Boubaya Nabil « Etude et simulation de la diode laser à base de semi-conducteur III-V (InGAsp-InP) » Mémoire de master académique, Université de Blida, 2016/2017.
- [18] Jérôme Kasparian, « Le principe de laser .Dossier les lasers de puissance a impulsion ultracourtes », 2015.
- [19] Amour Yazid et Tahraoui Fares « Etudes des lasers à semi-conducteur et applications au micro-usinage de matériaux », mémoire de fin d'étude 2017/2018.
- [20] Amel Belaisaoui « Résolution de l'équation de l'Helmholtz pour déterminer les paramètres d'un faisceau laser », Mémoire de magister en physique, Université de Constantine, 2009.
- [21] Mekfoudji Saliha et Ait Mbarek Toufik, « Etude et Simulation du laser a semi-conducteur à double hétérojonction GaAlAs/GaAs », Mémoire de master en électronique, Université de Blida, 2017.
- [22] Catherine Schwob et Lucile Julien le laser : principe de fonctionnement.
- [23] Un laser, c'est quoi- Optique pour l'ingénieur. (30 /08/2020) [En ligne] [http://optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI\\_fr\\_M01\\_C01/co/Contenu\\_04.html](http://optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M01_C01/co/Contenu_04.html)
- [24] Charles cayron, « Etude théorique et expérimentale de la diode lasers pour horloges rubidium et césium, refroidissement d'atome et capteur inertiels », Thèse de doctorat en optronique. Université de Pierre et Marie curie. Paris, 2011.
- [25] Bouncer khaled et bouzid ferhat, « Modélisation d'un émetteur optique avec Silvaco-TCAD » mémoire master en électronique, université de Bejaia, 2018.
- [26] Dehimi said, « Etude de laser a base des composés semi-conducteurs (InP, GaAS, GaP) », Mémoire magister en physique, Université de Batna, 2011.
- [27] [https://www.researchgate.net/figure/Schema-de-base-dun-laser-homojonction-lineaire-devient-superieur-aux-pertes-de-la\\_fig17\\_280682441](https://www.researchgate.net/figure/Schema-de-base-dun-laser-homojonction-lineaire-devient-superieur-aux-pertes-de-la_fig17_280682441) (consulté le 23/09/2020).

## Référence bibliographique

---

- [28] Marc Haelterman Cours « physique des semi-conducteurs », Université libre Bruxelles, février 1998.
- [29] Pr. Rebai Benahmed saida. Cours « composants optoélectroniques » (consulté le 24/04/2020)
- [30] Angélique Rissons, « caractérisation et modélisation optoélectronique de diode laser a cavité verticale émettant par la surface (VCSEL) » thèse en Optoélectronique et Hyperfréquence, école nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace. 2013
- [31] Henry Mathieu Hervé Fanet Livre « physique des semi-conducteurs et des composants électroniques » Paris, 2009.
- [32] B. Amana, CH. Richter et O. Heckmann. Laser à semi-conducteur- cours master 1 physique. Université de Cergy- Pontoise.
- [33] Synopsys Inc. (Consulté le 13/05/2018). Synopsys. [en ligne], <https://www.synopsys.com/silicon/tcad.htm>
- [34] Bouaraba Fazia, « étude d'une LED à base d'InGaN pour l'émission de la lumière, blanche ». mémoire de master en électronique, Université de Tizi-Ouzou, 2012.
- [35] Benouadfel Yasmine, « caractéristique et simulation des diodes a bassiere Shottley sous environnement Silvaco », mémoire de master en physique, université Bejaia, 2013.
- [36] Ghachamie Samali, « caractéristique électrique d'une diode a barriere de shottley (SDB) avec et sans couche isolante si O2 a la temperature ambiante (300k) », mémoire de master en electronique, Université de Biskra, 2014.
- [37] Kibeche Mohammed, « initialisation a la simulation bidimensionnelle environnement TCAD-Silvaco » TP master 1 Biomédicale Université constantine, 2013.
- [38] Atlas user's manual device simulator of ware. Silvaco international, santa clara, 2015, [www.silvaco.com](http://www.silvaco.com)
- [39] Bale Amina, « Etude comparative entre les cellules Solaire de Type  $P^+$ - AlGaAs/P-GaAs/n-GaAs et un autre de type  $n^+$  -A Al GaAs/n-GaAs/p-GaAs », mémoire de magister en physique, université de Biskra, 2013.



## Résumé

Les semi-conducteurs ont connus une importante croissance au niveau mondial, qui est liée au fait que ces matériaux forment la base de la révolution technologique de ces quarante dernières années dans le domaine de l'électronique et de l'optoélectronique.

Dans notre travail on décrit brièvement les différentes propriétés des semi-conducteurs et les phénomènes physiques entrant dans l'émission de la lumière laser, notamment l'émission stimulée.

**Mots clés :** les semi-conducteur, les lasers, les diodes lasers.

Pour faire l'étude de la diode laser on a simulé ses caractéristiques électroniques en utilisant le logiciel Silvaco-TCAD à base de InP/InGaAsp. En effet, les contacts sur InP ont d'une part un intérêt technologique pour la réalisation de dispositifs électroniques rapides et d'autre part jouent un rôle dans la compréhension physique des phénomènes.

## Abstract

Semiconductors have experienced significant growth worldwide, which is linked to the fact that these materials form the basis of the technological revolution of the last forty years in the field of electronics and optoelectronics.

In our work, we briefly describe the different properties of semiconductors and the physical phenomena involved in the emission of laser light, in particular the stimulated emission.

To study the laser diode, its electronic characteristics were simulated using the Silvaco-TCAD software based on InP / InGaAsp. Indeed, contacts on InP have on the one hand a technological interest for the realization of fast electronic devices and on the other hand play a role in the physical understanding of the phenomena.

**Keywords :** semiconductors, lasers, laser diodes.