



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université KASDI-MERBAH Ouargla

FACULTE DES NOUVELLES TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION ET DE LA
COMMUNICATION

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE ET DE TELECOMMUNICATIONS

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electronique

Spécialité : Electronique des Systèmes Embarqués

Présente par :

Elaggoun Mohammed et Bechoua Nacer Eddine

***Simulation d'un laser à puit quantique à base
de InGaAsP/InP***

Soutenu publiquement 20/06/2023 Devant le jury composé de :

Mr. Rachedi Mohamed Yacine	MCB	UKMO	Président
Mr. Benathmane Khaled	MAA	UKMO	Encadreur
Mr. Kadri Salim	MAA	UKMO	Examineur

Année universitaire: 2022/2023

Remerciements

Louange à Allah et prières soient sur Son Prophète, Je dédie mon succès:

Ceux qui ont donné et récompensé par leur don, ils ont donc été mon soutien et une bougie allumée pour illuminer mon chemin, à ceux dont le rêve était de me voir le jour où je porte mon certificat de fin d'études.

Cher est l'exemple de la virilité et de la paternité, à l'esprit de mon père qui ne m'a pas vu atteindre ce degré de succès, comme je souhaite que vous soyez à mes côtés dans ces beaux moments de ma vie, que Dieu ait pitié de vous et illumine votre tombe, O soutien le plus précieux et le père le plus précieux qui a quitté le monde. Au bien-aimé Le genre est un symbole de lutte, de sacrifice, d'amour, de convivialité, de gentillesse et de tendresse, ma chère mère, qui a toujours été mon ange gardien et mon soutien par ses prières et ses supplications, que Dieu prolonge votre vie, ma chérie.

Et à ceux dont Dieu m'a donné la présence dans ma vie, et dont l'amour a été dans mes veines et la joie de me souvenir de mon cœur, au phare de la vie, à mes frères et sœurs et à tous ceux qui ont une place dans mon cœur.

Et à ceux qui étaient mon soutien, mon oubli, mon encouragement, mon aide et mon soutien quand j'étais faible.

Au professeur qui supervise l'achèvement de ce travail, le Dr Khaled Ben athmane, merci à lui et sa gratitude pour son soutien, sa fatigue, sa vigilance et son ardeur à mener à bien ce travail. Priez donc Allah de lui accorder le succès, de guider ses pas, d'accomplir ses souhaits et de le récompenser avec la meilleure récompense.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à

- Ma très chère mère
- Mon très cher père

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à

- Ma très chère mère
- Mon très cher père

Elaggoun Mohammed

Résumé

L'objectif de cette étude est d'explorer les lasers basés sur des hétérojonctions de semi-conducteurs III-V. L'étude porte sur un dispositif à hétérojonction de semi-conducteurs III-V (InGaAsP-InP) dans le cadre des hypothèses simplificatrices, se limitant au régime stationnaire de la cavité laser. La simulation réalisée à l'aide du logiciel de programmation MAPLE 14 a permis de clarifier l'influence de certains paramètres du laser étudié, tels que le facteur d'émission spontanée β , la densité optique des photons et la puissance.

Mot clés:

Laser, hétérojonction, émission stimulée, émission spontanée, facteur d'émission spontanée.

Abstract

The goal of this work is the study of lasers based on III-V semiconductor heterojunctions. The study of a III-V semiconductor heterojunction device (InGaAsP-InP) under the conditions of the simplifying which is limited to the steady state of the laser cavity has been presented..

The simulation by the programming software MAPLE 14, made it possible to clarify the influence of some parameters of the studied laser, like the spontaneous emission factor β , the optical density of photons and the power.

Key words:

Laser, heterojunction, stimulated emission, spontaneous emission, spontaneous emission factor.

Sommaire

Introduction générale

Chapiter01 les alliages semi-conducteurs III-V

1. Introduction.....	2
2. Importance technologique des alliages semi-conducteurs III-V.....	2
3. Alliages des semi-conducteurs III-V.....	3
3.1. Composés binaires.....	3
3.2. Composés ternaires et quaternaires.....	4
4. Structure cristalline.....	5
5. Propriétés des semi-conducteurs III-V.....	6
5.1. Paramètres de réseau.....	6
5.2. Propriétés électroniques.....	6
5.3. Propriétés optiques.....	8
5.3.1. Indice de réfraction.....	8
5.3.2. Réflectivité.....	9

chapitre 02 laser à semi-conducteur théorie et caractérisations

1. Introduction.....	11
2. Partie théorique.....	11
2.1. Guide optique.....	11
2.2. Facteur de confinement optique.....	12
2.3. Les mécanismes de recombinaisons.....	12
2.4. Le gain du milieu amplificateur.....	13
3. Equations de conservation des porteurs et des photons.....	14
4. Techniques de caractérisations.....	14
5. La structure	15

chapitre 03 Résultats et interprétations

1. Introduction.....	17
----------------------	----

2. L'évolution pour les porteurs des lasers InGaAsP.....	18
2-1. cas du laser a la longueur d'émission $\lambda=1.3\mu\text{m}$	18
2 -2. cas du laser a la longueur d'émission $\lambda=1.55\mu\text{m}$	19
2 3. la mesure en la densité de courant de seuil.....	19
3. La puissance émise.....	19
3-1. La puissance émise pour $\lambda=1.3\mu\text{m}$	20
3-2 .La puissance émise pour $\lambda=1.55\mu\text{m}$...	21
4. évolution du rendement quantique.....	21
4-1. Variation de rendement quantique externe en fonction de rendement quantique interne.....	21
Conclusion générale.....	22

Liste des figures

Figure 1.1.Structure cristalline zinc-blende.....	5
Figure 1.2.structure de bande a)gap directe b) gap indirecte.....	7
Figure 2.1.schéma de guide d'onde.....	12
Figure 2.2.représentation schématique d'une structure p/n DH.....	15
Figure 2.3.coupe transverse d'un laser p/n DH (photo MEB).....	15
Figure. III.1:fenêtre de départ du logiciel Maple.....	17
Figure. III.2:courbe de la densité de porteurs n_a dans la région active.....	18
Figure. III.-2-1: courbe de la densité de porteurs n_a dans la région active en fonction de la densité de courant J injectée pour deux valeurs de facteur d'émission spontanée β pour $1.3\mu\text{m}$	18
Figure.III.3:densité de porteurs n_a dans la région active en fonction de la densité de courant J injectée pour deux valeurs de facteur d'émission spontanée β Pour $1.55\mu\text{m}$	19
Figure. III.4:la puissance en fonction de la densité de courant pour $\lambda =1.3\mu\text{m}$	20
Figure. III.5:la puissance émise en fonction de la densité de courant pour $\lambda=1.55\mu\text{m}$	20
Figure. III.6 : rendement quantique externe en fonction rendement quantique inter.....	21
Figure. III.7 : rendement externe en fonction de la longueur de cavité laser.....	22

Liste de tableaux

Tableau. 1.1. Extrait de la classification périodique des éléments.....3

Tableau 1.2. Résumé quelques paramètres pour différents matériaux de la famille III-V.....4

Introduction générale

L'objectif de notre étude était de simuler et d'analyser le comportement de l'injection de densité de courant dans la région active d'un laser à structure non homogène basé sur des semi-conducteurs du troisième au cinquième groupe. Pour mener à bien cette recherche, nous avons employé le logiciel de simulation MAPLE 14.

Initialement, nous avons constaté que les semi-conducteurs ont bénéficié d'une expansion significative de leur champ d'application grâce aux progrès récents et à une compréhension accrue de leur physique. Ces matériaux sont largement utilisés dans les diodes électroluminescentes et les diodes laser, notamment dans les gammes infrarouge et visible. En raison de leur rendement lumineux élevé et de leur longue durée de vie, ils se sont positionnés comme une alternative économique aux diodes conventionnelles, réduisant ainsi les coûts d'exploitation et de maintenance des sources lumineuses.

Notre travail a également exploré les notions fondamentales sur les semi-conducteurs, en définissant ces matériaux et en présentant les divers types de composés existants. Le deuxième chapitre s'est concentré sur les lasers en général, mettant l'accent sur les lasers à semi-conducteurs et décrivant leurs caractéristiques et leurs principes de fonctionnement.

Enfin, dans le dernier chapitre, nous avons effectué des simulations à l'aide de MAPLE 14. Ce logiciel nous a permis de résoudre le système d'équations d'évolution pour la densité des photons et la densité des porteurs dans la région active du laser. Il est important de noter que notre étude s'est limitée aux lasers monomodes, et nous avons utilisé la méthode des approximations successives pour résoudre ce problème complexe. Nous avons ensuite présenté les résultats obtenus ainsi que leurs interprétations finales. Le mémoire se compose de trois chapitres comme suit :

- Dans le premier chapitre : Les alliages semi-conducteurs III-V
- Deuxième chapitre : laser à semi-conducteur théorie et caractérisation.
- Le troisième chapitre : Résultats et interprétation

Chapitre 01

Les alliages semi-conducteurs III-V

1. introduction

Les alliages semi-conducteurs sont des matériaux qui donnent la possibilité de moduler la largeur du gap et d'autres paramètres physiques du matériau afin d'optimiser et d'élargir leurs applications microélectroniques et optoélectroniques. La technologie actuelle s'intéresse beaucoup à cette famille de matériau, c'est la raison pour laquelle la théorie des alliages est devenue un sujet de recherche important. Plus récemment, des études avancées sur une nouvelle classe des alliages binaires, ternaires et quaternaires III-V ont été élaborées vu leurs propriétés structurales et électroniques importantes en vue de la fabrication des dispositifs optoélectroniques qui présentent des performances exceptionnelles. Les différents phénomènes physiques mis en jeu dans ces matériaux sont illustrés par les propriétés optiques de puits et de boîtes quantiques.

2. Importance technologique des alliages semi-conducteurs III-V

Le rythme très rapide de développement dans le domaine de l'électronique, en particulier l'optoélectronique, est largement attribuable à l'avènement des dispositifs et des circuits intégrés à semi-conducteurs, qui sont directement liés aux matériaux utilisés dans ces technologies de fabrication.

Les alliages semi-conducteurs III-V ont été l'objet de nombreuses études, impliquant diverses méthodes de croissance cristalline telles que l'épitaxie à partir de phases vapeur ou liquide, ainsi que plus récemment les techniques de dépôt par jets moléculaires (EJM)

Les alliages ternaires et quaternaires III-V de la filière des antimoniures (comme GaSb, GaAlSb, GaAlAsSb) ont émergé comme ayant un potentiel d'application en optoélectronique dans des domaines de longueurs d'onde où les dispositifs à base de silicium ou de GaAs/GaAlAs ne sont pas appropriés.

L'apparition des fibres optiques en silice à très faible absorption a favorisé un accroissement significatif des recherches sur les composés ternaires et quaternaires des alliages III-V. L'objectif principal est d'assurer une compatibilité optimale entre les dispositifs optoélectroniques et les propriétés de ces fibres optiques.

Le développement des fibres optiques en silice présentant des caractéristiques de dispersion et d'atténuation intéressantes dans la plage de longueurs d'onde centrées autour de 1.3 μm et 1.55 μm nécessite l'utilisation de composants d'extrémité (émetteur et détecteur de lumière) fabriqués à partir des alliages III-V tels que $Ga(1-x)InxA_s$ et $Ga(1-x)InxA_s(1-y)P_y$; $Ga(1-x)AlxSb$ et $Ga(1-x)AlxAs(1-y)Sby$. [1]

Alliages semi-conducteurs III-V

Après les spectaculaires résultats enregistrés dans la technologie Silicium dans le domaine de la microélectronique, la recherche de composants électroniques présentant des propriétés de transport supérieures à celles du Silicium, conduit la plupart des grands laboratoires de recherches à s'intéresser à des nouveaux matériaux et en particulier les composés semi-conducteurs III-V.

Les semi-conducteurs III-V sont des composés formés à partir d'un élément de la colonne III et d'un élément de la colonne V de la classification périodique de Mendeleïev. Le tableau I-1 présente un extrait de cette classification, avec les chiffres en haut et en bas représentant respectivement le numéro atomique et la masse atomique. Ainsi, de nombreux composés binaires peuvent être obtenus. [2].

III	IV	V
B (5)	C (6)	N (7)
Al (13)	Si (14)	P (15)
Ga (31)	Ge (32)	As (33)
In (49)	Sn (50)	Sb (51)
Tl (81)	Pb (82)	Bi (83)

Tab. 1.1. Extrait de la classification périodique des éléments.

3.1. Composés binaires

Il est possible de fabriquer des matériaux semi-conducteurs III-V en combinant des éléments de la colonne III et des éléments de la colonne V du tableau périodique de Mendeleïev, à raison d'un atome de la colonne III pour un atome de la colonne V. Cela permet la création de semi-conducteurs composés III-V. Le tableau 1.2. Résume quelques paramètres pour différents

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

matériaux de la famille III-V. [2]

3.2. Composés ternaires, quaternaires

L'utilité pratique des semi-conducteurs III-V est grandement amplifiée par la capacité de former des alliages grâce à la substitution partielle d'un élément par un autre de la même colonne. Par exemple, il est possible d'obtenir des alliages ternaires ou quaternaires, qui sont caractérisés comme suit :

✚ **Alliages ternaires:** nous avons deux types :

✚ Alliage ternaire anionique : $A^{III} B^V_x C^V_{1-x}$. substitution d'un atome de la colonne III et deux atomes de la colonne V

✚ Alliage ternaire cationique : $A^{III}_x B^{III}_{1-x} C^V$. substitution de 2 atomes sur la colonne III et un atome de la colonne V

✚ **Alliages quaternaires :** $A^{III}_{1-x} B^{III}_x C^V_y D^V_{1-y}$ on distingue :

$A^{III} B^V_x C^V_y D^V_{1-x-y}$. substitution d'un atome de la colonne III et trois atomes de la colonne V
AlN_xPySb_{1-x-y}

$A^{III}_x B^{III}_y C^{III}_{1-x-y} D^V$. Substitution de trois atome de la colonne III et un atome de la colonne V
V Al_xGa_yIn_{1-x-y}Sb.

La majorité des alliages solides ainsi fabriqués sont homogènes, et la loi de Vegard (qui établit une relation linéaire entre le paramètre de réseau et la composition) est généralement respectée de manière approximative. On constate également une progression continue et uniforme des

propriétés, y compris la largeur de la bande interdite et les paramètres cristallins, en fonction du taux de substitution.

3. Structure cristalline

Les semi-conducteurs III - V cristallisent dans la structure zinc-blende. Ce réseau est constitué de deux sous réseaux cubiques à faces centrées (cfc) interpénétrés, l'un étant formé par les éléments III et l'autre par les éléments V.

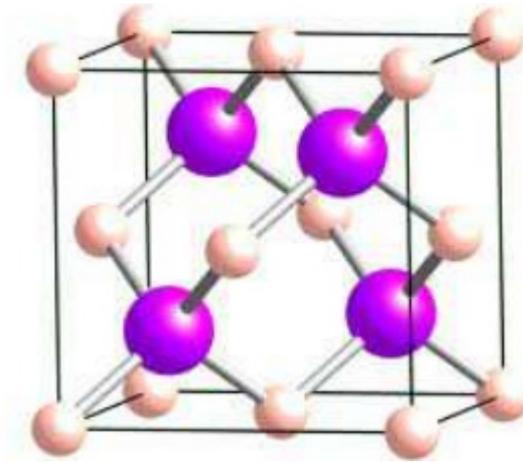


Figure. 1.1. Structure cristallin Zinc-blende

Les deux sous-réseaux sont positionnés de manière décalée l'un par rapport à l'autre le long de la diagonale du cube selon un vecteur $(a_0/4, a_0/4, a_0/4)$, où a_0 représente le paramètre cristallin. Chaque atome est situé au centre d'un tétraèdre régulier, avec les sommets occupés par un atome de l'autre espèce. La maille élémentaire de cette structure de type zinc-blende est illustrée dans la figure 1.1.

Le paramètre de maille d'une telle structure est influencé par les éléments chimiques impliqués. Plus les éléments constitutifs ont un numéro atomique élevé, plus la maille cristalline est grande. Par exemple, dans le cas d'une structure ternaire telle que $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, l'introduction d'indium dans la maille cristalline de GaAs entraîne une augmentation du paramètre de maille a de l'alliage. En général, pour $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, cette variation est souvent considérée comme quasi-linéaire, suivant la loi de Vegard. [3].

$$a_{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}} = a_{\text{GaAs}} + x(a_{\text{InAs}} - a_{\text{GaAs}}) \quad \left[1 \right]$$

4. Propriétés des semi-conducteurs III-V

4.1. Paramètres de réseau

Les dimensions de la maille élémentaire sont représentées par les paramètres de maille. Dans le cas le plus complexe, celui du réseau triclinique, il y a 6 paramètres : les dimensions a , b et c , ainsi que les angles α , β et γ . Pour le réseau cubique, seul un paramètre de maille, a , est mentionné, car $a = b = c$, et les angles α , β et γ sont tous égaux à 90° . Dans le cas orthorhombique, seuls trois paramètres sont cités : a , b et c , car les angles α , β et γ sont également de 90° . Dans le cas de la structure hexagonale, trois paramètres sont également mentionnés : a , c et γ , où $a = b$, et les angles α et β sont égaux à 90° , tandis que γ est de 120° .

4.2. Propriétés électroniques

Le comportement des semi-conducteurs, comme celui des métaux et des isolants est décrit via la théorie des bandes. Ce modèle stipule qu'un électron dans un solide ne peut que prendre des valeurs d'énergie comprises dans certains intervalles que l'on nomme « bandes », plus spécifiquement bandes permises, lesquelles sont séparées par d'autres « bandes » appelées bandes d'énergie interdites ou bandes interdites. Deux bandes d'énergie permises jouent un rôle particulier:

- la dernière bande complètement remplie, appelée « bande de valence »
- la bande d'énergie permise suivante appelée « bande de conduction »

La bande de valence est riche en électrons mais ne participe pas aux phénomènes de conduction (pour les électrons). La bande de conduction, quant à elle, est soit vide (comme aux températures proches du zéro absolu dans un semi-conducteur) soit semi-remplie (comme dans le cas des métaux) d'électrons. Cependant c'est elle qui permet aux électrons de circuler dans le solide. Dans les conducteurs (métaux), 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. Dans un semi-conducteur, comme dans un isolant, ces deux bandes sont séparées par une bande interdite, appelée couramment par son équivalent anglais plus court « gap ». L'unique différence entre un semi-conducteur et un isolant est la largeur de cette bande interdite, largeur qui donne à chacun ses propriétés respectives. Dans un isolant cette valeur est si grande (aux alentours de 6 eV pour le diamant par exemple) que les électrons ne peuvent passer de la bande valence à la bande de conduction: les électrons ne circulent pas dans le solide.

Dans les semi-conducteurs, cette valeur est réduite (1,12 eV pour le silicium, 0,66 eV pour le germanium, 2,26 eV pour le phosphore de gallium). Lorsqu'une énergie égale ou supérieure à cette valeur est fournie aux électrons, par exemple en chauffant le matériau, en lui appliquant un champ électromagnétique, ou parfois en le soumettant à une illumination, les électrons peuvent alors passer de la bande de valence à la bande de conduction. En conséquence, ils deviennent capables de circuler à travers le matériau.

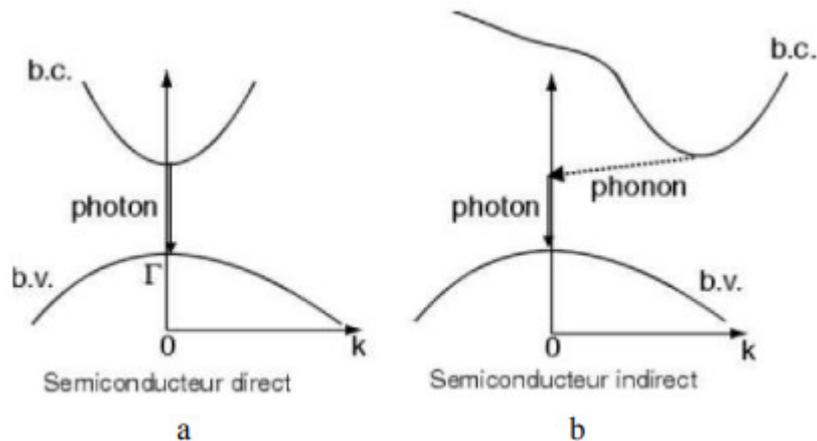


Figure. 1.2. Structure de bande a) gap direct b) gap indirect

La distinction entre gap direct et indirect est associée à la représentation de la dispersion énergétique d'un semi-conducteur à travers le diagramme Énergie (E) - Vecteur d'onde (k). Ce diagramme offre une visualisation spatiale des points extrêmes des bandes de conduction et de valence. Ces points extrêmes représentent, dans un semi-conducteur à l'équilibre, des régions énergétiques où la densité de porteurs de type p pour la bande de valence et de type n pour la bande de conduction est significative.

Lorsque le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction se trouvent à des valeurs proches du vecteur d'onde k sur le diagramme E(k), on qualifie le semi-conducteur de "gap direct". En revanche, on désigne un semi-conducteur comme "gap indirect" lorsque le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction se situent à des valeurs différentes du vecteur d'onde k sur le diagramme E(k).

Dans le cadre des applications en émetteur de lumière (interaction lumière/matière), on privilégie les matériaux à gap direct. En effet, les extrema de bandes étant situés à des valeurs de k semblables, la probabilité de recombinaison radiative des porteurs (rendement quantique interne) est supérieure grâce à la conservation de la quantité de mouvement (même vecteur d'onde k).

4.3. Propriétés optiques

L'explication des caractéristiques optiques des semi-conducteurs vise principalement à comprendre comment la lumière interagit avec la matière. Cette étude se divise généralement en deux aspects:

- ✚ Premièrement, elle cherche à quantifier la manière dont la lumière se propage à travers le matériau solide et examine ses applications pratiques.
- ✚ Deuxièmement, elle permet de confronter les résultats expérimentaux avec les modèles théoriques, offrant ainsi la possibilité de valider ou d'ajuster ces modèles.

D'un autre côté, l'importance technologique que porte les hétéro-structures qui sont réalisées à base des semi-conducteurs est leur utilisation comme des sources de lumières et des détecteurs.

5.3.1. L'indice de réfraction

L'indice de réfraction, souvent noté n , est une grandeur sans dimension caractéristique d'un milieu, décrivant le comportement de la lumière dans celui-ci ; il dépend de la longueur d'onde de mesure mais aussi des caractéristiques de l'environnement dans lequel se propage la lumière. L'indice de réfraction est parfois appelé « constante optique » d'un matériau, ce qui est un abus de langage, cette grandeur étant à la fois variable et liée aux propriétés optiques, cristallographiques ou encore diélectriques de la matière.

La mesure de l'indice de réfraction des matériaux, des gaz, et notamment de l'air, est un enjeu important pour de multiples applications. La précision nécessaire sur ces mesures dans le domaine de la physique et des matériaux demande l'utilisation d'instruments précis tels que les interféromètres. Le domaine de la mesure de l'indice de réfraction se nomme la réfractométrie.

Connaissant $\epsilon_1(\omega)$ et $\epsilon_2(\omega)$, on peut alors décrire l'indice de réfraction N :

$$N = n + ik = [\epsilon_1(\omega) + i \cdot \epsilon_2(\omega)]^{1/2} \quad (2)$$

7.3.2. Réflectivité

En théorie électromagnétique de la lumière, il est établi que le coefficient de réflexion d'un faisceau incident normal peut être exprimé en fonction de l'indice de réfraction par :

$$R = \left| \frac{N - 1}{N + 1} \right|^2 \quad (3) ; \text{ La mesure du coefficient } R \text{ permet de déterminer } k, n.$$

Chapitre 02

Laser à semi-conducteur : Théorie & Caractérisations

1. introduction

Dans ce chapitre nous décrivons le fonctionnement des lasers à semi-conducteurs à travers quelques rappels théoriques en termes de guidage de l'onde, de gain, de pertes internes, de condition d'oscillation laser. Nous rappelons brièvement les caractéristiques du mode laser.

2. partie théorique

L'effet laser est obtenu grâce à la présence de deux contributions [4]:

- La première est l'existence d'un milieu amplificateur qui présente du gain, c'est-à-dire la possibilité d'avoir une inversion de population. La densité d'atomes actifs de l'état excité doit être supérieure à celle de l'état fondamental. Cette inversion de population est obtenue dans le cas des lasers à semi-conducteurs par un pompage électrique à travers une double hétérojonction (InP dopé p – InGaAsP – InP dopé n).

- La seconde est le mécanisme de contre-réaction optique qui permet une oscillation de la lumière. Cette dernière est obtenue dans le cas des lasers à semi-conducteur par clivage des facettes du laser qui forment ainsi une cavité Fabry-Perot dont la réflectivité en intensité des miroirs est voisine de 30%.

2.1. Guide optique

Considérons un laser à semi-conducteurs de double hétérostructure de longueur L . Les réflectivités en amplitude des miroirs à l'entrée et à la sortie sont r_1 et r_2 respectivement. Le milieu amplificateur, composé de puits quantiques, possède un gain g et des pertes internes α_i , exprimés en cm^{-1} . Cette configuration constitue un guide d'onde, comme illustré dans la figure 2.1. Le guide actif a un indice optique (n_2) supérieur à celui de la couche d'InP environnante (n_1), étant donné que la structure est enterrée. En conséquence, les ondes électromagnétiques sont confinées dans la région amplificatrice, où l'indice est plus élevé. Ce type de guide d'onde peut soutenir plusieurs modes transverses, mais pour assurer un bon couplage avec une fibre optique, il est nécessaire que notre structure soit monomode transverse. La largeur typique du

guide d'onde, utilisé dans la simulation est de $W=3 \mu\text{m}$ et l'épaisseur de la structure active est de $d=0.2 \mu\text{m}$.

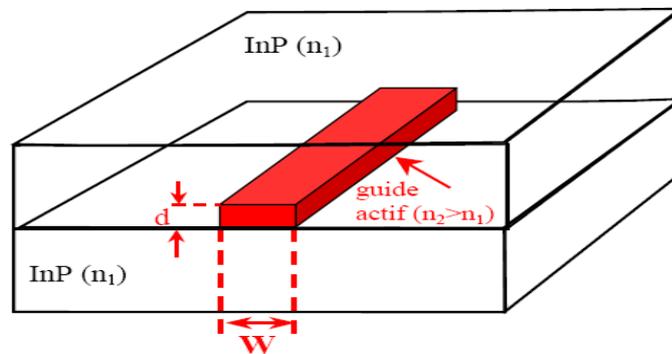


Figure 2.1. Schéma du guide d'onde.

2.2. Facteur de confinement optique

La proportion de l'énergie qui est effectivement présente dans la partie amplificatrice est par définition le facteur de confinement Γ . Il est donné par l'équation suivante:

$$\Gamma = \frac{\int_{-d/2}^{+d/2} \int_{-w/2}^{+w/2} |E(x,y)|^2 dx dy}{\iint |E(x,y)|^2 dx dy} \quad (4)$$

Où d est l'épaisseur de zone active, W la largeur de ruban et E le champ électromagnétique.

2.3. Les mécanismes de recombinaisons

Les porteurs injectés dans le laser sont épuisés à travers divers processus de recombinaison.[5]

- Le premier effet est de loin le plus crucial, impliquant la recombinaison radiative des porteurs par émission spontanée. Ce taux est directement lié à la densité d'électrons dans la bande de conduction et à celle des trous dans la bande de valence (BN^2), où B représente le coefficient de recombinaison radiative ou biomoléculaire et N la densité de porteurs.
- Recombinaison non radiative sur les défauts situés dans la lacune énergétique : les porteurs sont capturés par un défaut, et la recombinaison ne concerne qu'un porteur libre. Ce mécanisme est donc proportionnel à la densité de porteurs (AN), où A dépend de la quantité de défauts et est désigné comme le coefficient de recombinaison linéaire.
- Recombinaison non radiative Auger. Cela implique la transition d'un électron de la bande de conduction vers la bande de valence, souvent entre deux valeurs de vecteur d'onde différentes. Dans ce processus, deux électrons et un trou participent, donc le taux de

recombinaison est proportionnel à la densité de porteurs au cube (CN^3), où C représente le coefficient Auger.

Alors le taux total de recombinaison des porteurs s'écrit comme suite:

$$R(N) = AN + BN^2 + CN^3 = \frac{N}{\tau_{rec}} \quad (5)$$

Où τ_{rec} est le temps de recombinaison des porteurs

2.4. Le gain du milieu amplificateur

le gain du milieu amplificateur doit compenser les diverses pertes de la cavité (transmission des miroirs, pertes internes...), Il existe donc un seuil de gain, g_{th} , au-dessus duquel le milieu se met à osciller spontanément. Ce seuil est donné par :

$$g_{th} = \frac{1}{r} \left(\alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \right) = \frac{1}{r} (\alpha_i + \alpha_m) \quad (6)$$

où R1 et R2 sont les réflectivités des miroirs

On définit: $\alpha_m = \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2}$ les pertes miroirs.

Les pertes internes (α_i) sont données par:

$$\alpha_i = \Gamma_{InP(p)} \alpha_{InP(p)} + \Gamma_{InP(n)} \alpha_{InP(n)} + \Gamma_{IVBA_QW} K_{IVBA_QW} N \quad (7)$$

où $\Gamma_{InP(p)}$ est le confinement dans l'InP dopé p, $\Gamma_{InP(n)}$ est le confinement dans l'InP dopé n, $\alpha_{InP(p)}$

et $\alpha_{InP(n)}$ sont les pertes dans l' InP dopé p et l' InP dopé n, K_{IVBA_QW} est le coefficient de pertes

IVBA dans les puits quantiques et N la densité de porteurs.

NB:IVBA: Inter-Valence Band Absorption

On définit aussi le rendement quantique interne η_i qui représente la quantité de porteurs libres injectés convertis en photons par recombinaison stimulée:

$$\eta_i = \frac{R_{Stim}}{R_{SRH} + R_{Spon} + R_{Aug} + R_{Stim}} \quad (8)$$

on ne tient pas compte des fuites électriques dans cette définition.

Alors le rendement externe est défini comme suite:

$$\eta_{ext} = \eta_i \frac{h\nu}{q} \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \alpha_i} \quad (9)$$

où ν la fréquence d'émission laser, h la constante de Planck et q la charge de l'électron.

3.Équations de conservation des porteurs et des photons

Nous présentons ici les équations couplées de la cavité laser.

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{qd} - (AN + BN^2 + CN^3) - v_g g(N)S \quad [10]$$

$$\frac{dS}{dt} = v_g g(N)S - v_g (\alpha_i + \alpha_m)S + \beta BN^2 \quad [11]$$

Où J est la densité de courant, d est l'épaisseur de couche active (puits quantiques), v_g est la vitesse de groupe et β est le coefficient d'émission spontanée.

4. Techniques de Caractérisations

Différentes grandeurs physiques doivent être déterminées pour rendre compte du fonctionnement laser, à savoir :

- la puissance, P ; $P_{TOT} = (h\omega)(v_g \alpha_{miroirs})$
- le courant injecté, I ou bien la densité de courant;
- le spectre en longueur d'onde, $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ dans notre cas.
- le rendement externe, η_{ext}
- les pertes internes, α_i
- le rendement quantique interne, η_i
 - Évolution du rendement externe en fonction de la longueur du laser.

$$\frac{1}{\eta_{ext}} = \frac{q}{\eta_i h \nu} \left(1 + \frac{2\alpha_i}{\ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)} L \right) \quad [12]$$

Comme nous le verrons, dans le chapitre suivant nous permettra de déterminer différents paramètres, comme le courant de seuil, le rendement externe, les pertes dans la cavité, le rendement quantique interne, le gain matériau...

5. La structure

Comme présenté dans les objectifs de notre mémoire, pour conserver les briques de bases technologiques des composants déjà existants, nos structures sont toutes de type p/n-DH. Nous présentons ici la structure p/n-DH.

La structure p/n-DH est donnée figure 2.2. Elle présente le buffer InP dopé n, la couche active, la localisation des jonctions bloquantes ainsi que la partie concernant le contact électrique.

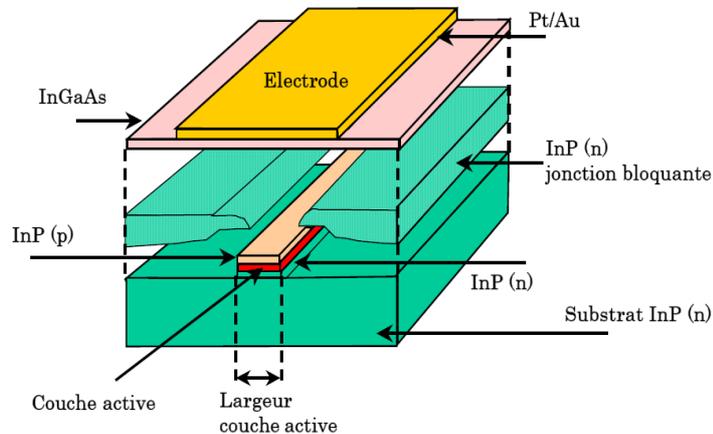


Figure 2.2. Représentation schématique d'une structure p/n-DH

La figure 2.3 ci-dessous représente la coupe transverse d'un laser p/n-DH avec les différentes régions caractéristiques.

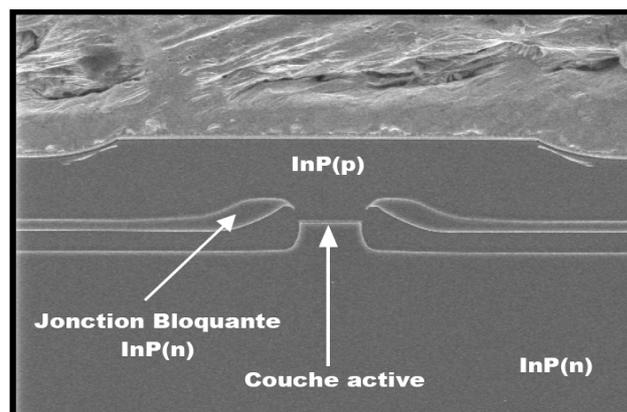


Figure 2.3. Coupe transverse d'un laser p/n-DH (Photo MEB).

Résultats et interprétation

1. Introduction

Dans cette partie, nous commençons tout de faire un programme de simulation numérique pour résoudre le système d'équation d'évolution couplée pour la densité des photons et la densité des porteurs. En principe, nous devons considérer que ces équations seront utilisées en régime stationnaire de la cavité laser.

Notre travail basé sur des lasers à un seul mode, la méthode des approximations successives. Cette méthode est satisfaisante pour un laser monomode car la difficulté du système à résoudre. Pour cela nous allons traiter le problème posé par un programme de simulation numérique, qui s'écrit en Maple (voir figure III.1).

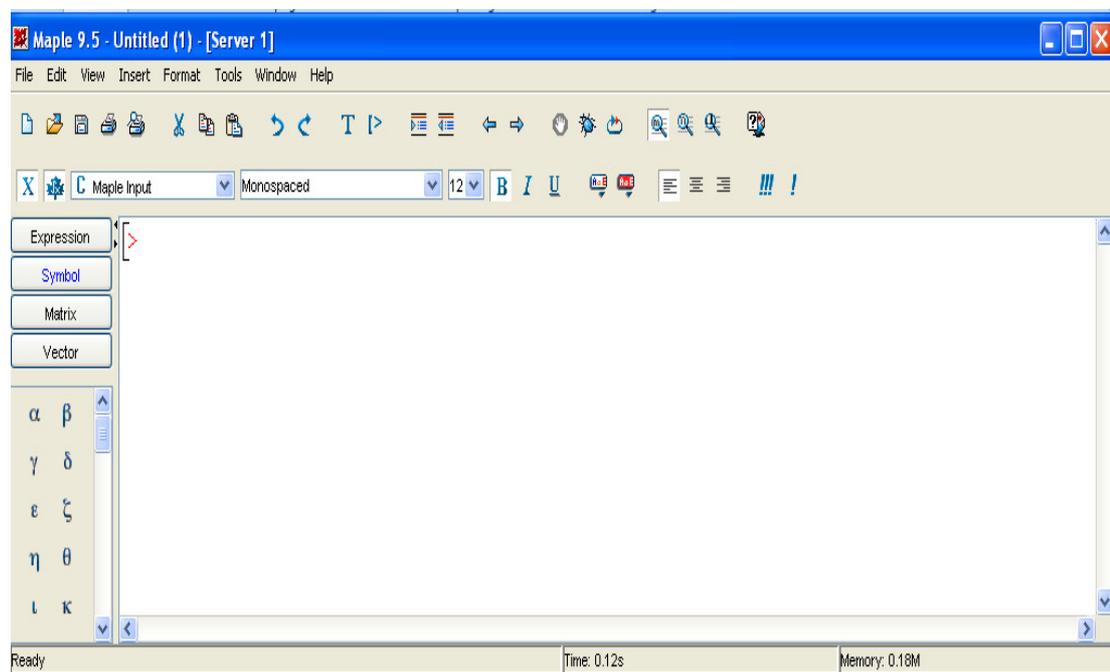


Figure III.1 : fenêtre de départ du logiciel Maple

Notre simulation prendra deux longueurs d'onde d'émission sont $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ et $\lambda = 1.55\mu\text{m}$, pour un système quaternaire (InGaAsP/InP) de faible atténuation. Tous les calculs sont fait grâce au logiciel Maple14.

Maple est un logiciel conçu par l'Université de Waterloo au Canada, qui permet de manipuler des expressions mathématiques de manière symbolique ou numérique. L'établissement d'un dialogue avec une machine pour discuter de mathématiques nécessite un langage de communication spécifique. En plus de la notion de base de nombre, ce langage doit être capable de comprendre des concepts plus abstraits tels que l'infini, les fonctions, les dérivées et les intégrales, les intervalles, les limites, la continuité, etc. Maple, en tant que programme

informatique, doit manipuler ces objets à travers des algorithmes pour résoudre les problèmes posés.

Nous avons cherché les meilleurs paramètres de laser pour obtenir une bonne qualité de laser.

2. L'évolution pour les porteurs des lasers InGaAsP

2.1 Pour $\lambda = 1.3\mu\text{m}$

En régime stationnaire. On remarque à la figure III.2. que la variation de la densité de porteurs n_a en fonction de la densité de courant injectée J , présentent une brisure; à $J = J_s$, la densité de courant de seuil, sont égales respectivement à 0.9 kA/cm^2 et $1.8 - 2\text{ kA/cm}^2$.

Pour des valeurs de courant (J) inférieures à J_s , la densité de porteurs augmente rapidement dans la région active, tandis que pour des valeurs de courant supérieures à J_s , l'augmentation de la densité de porteurs dans la région active se produit plus lentement. Lorsque le seuil est atteint, le gain dans la région active devient suffisamment élevé pour compenser les pertes, et une injection supplémentaire de courant conduit à l'émission stimulée.

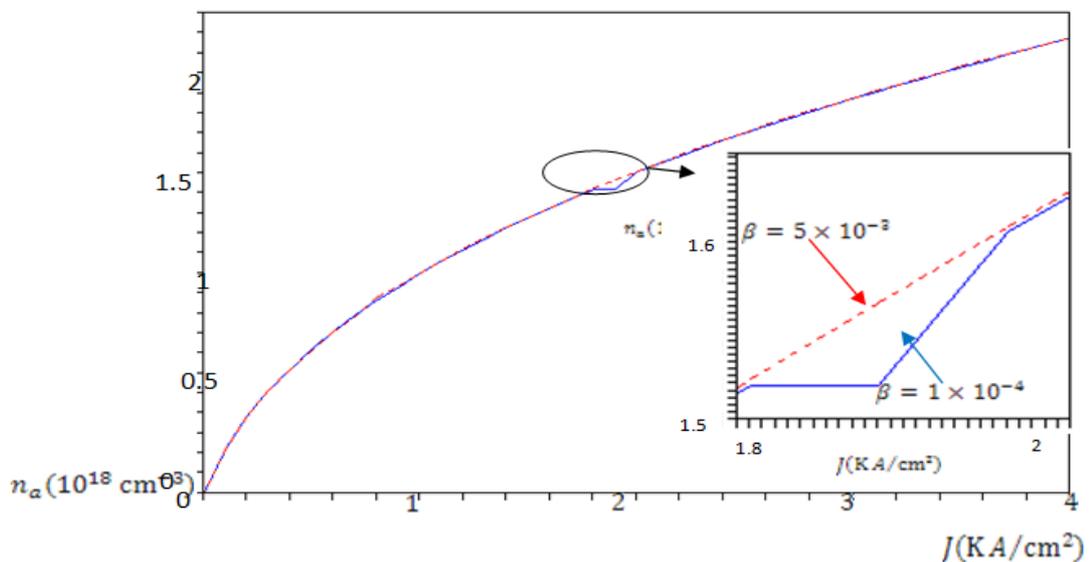


Figure III.2 : La dépendance de n_a par rapport à la densité de courant J appliquée est examinée pour deux valeurs différentes du facteur d'émission spontanée β à une longueur d'onde de $1,3\mu\text{m}$.

2.2. Pour $\lambda = 1.55\mu\text{m}$

Dans la longueur d'onde d'émission laser $1.55\mu\text{m}$ l'évolution de porteurs en fonction de courant injectée, on remarque à la figure III.3. N'pas de différences pour les deux courbes de facteur d'émission spontanée et la densité de porteurs dans la région active diminue par rapport à la densité de porteurs de la longueur d'onde $1.3\mu\text{m}$ par la valeur $0.65 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$

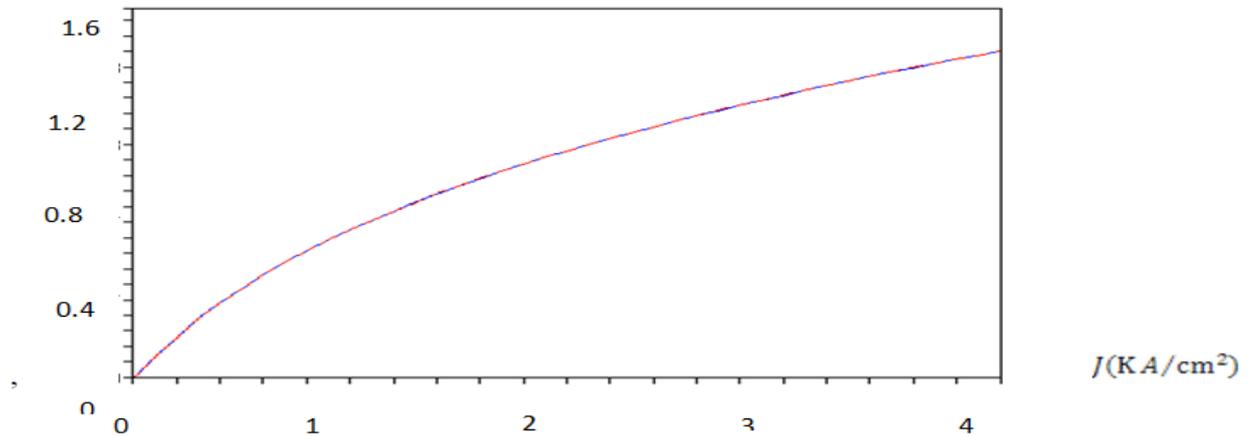


Figure III.3 : La dépendance de n_a par rapport à la densité de courant J appliquée est examinée pour deux valeurs différentes du facteur d'émission spontanée β à une longueur d'onde de $1,55 \mu\text{m}$.

3. puissance émise

On démontre que pour que le gain puisse surpasser les pertes et atteindre l'émission stimulée, le courant d'injection doit dépasser un seuil spécifique. En deçà de ce seuil, l'émission est principalement spontanée. L'une des propriétés fondamentales d'un laser à semi-conducteur réside dans sa relation entre l'intensité lumineuse et le courant électrique, également appelée courbe lumière-courant, qui représente la puissance optique émise (en mW) en fonction de la densité du courant d'injection (en $\text{kA}/(\text{cm}^2)$) (voir figure III.4 et III.5).

3.1 Puissance émise pour $\lambda = 1.3\mu\text{m}$

On observe que lorsque $J > J_s$, la densité de photons est très faible en raison de la prédominance de l'émission stimulée. En revanche, lorsque $J < J_s$, la puissance émise augmente rapidement. Une fois le seuil atteint, le gain dans la région active devient suffisamment élevé pour compenser

les pertes, et une injection supplémentaire de courant conduit à l'émission stimulée.

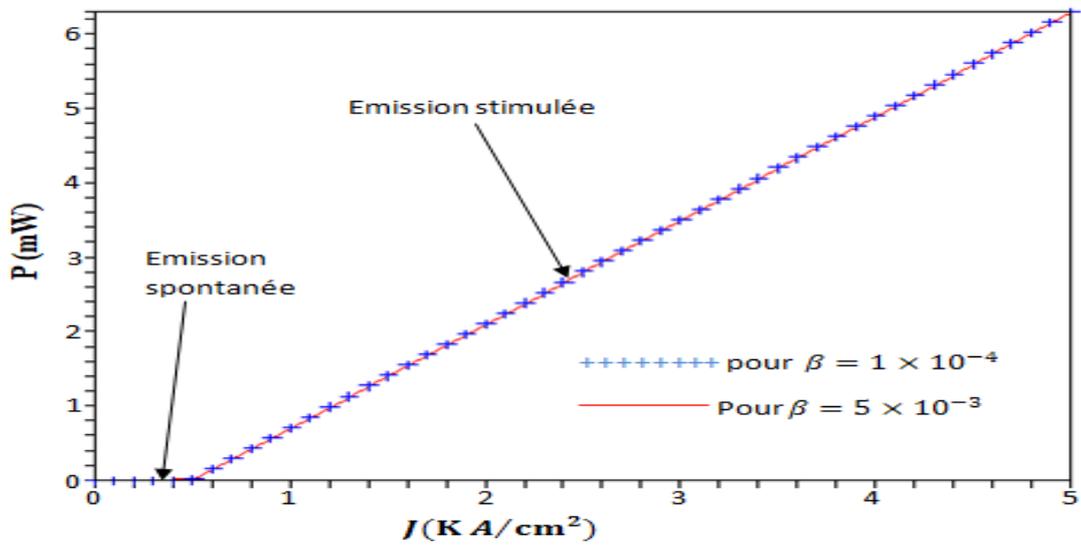


Figure III.4 : la variation de la puissance émise en fonction de la densité de courant pour $1.3 \mu\text{m}$.

3.2 Puissance émise pour $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$

Au seuil en voie la différence entre les deux courbes de la figure III.5. On remarque que le facteur d'émission spontanée 5×10^{-3} est le premier qui déclenche l'émission laser.

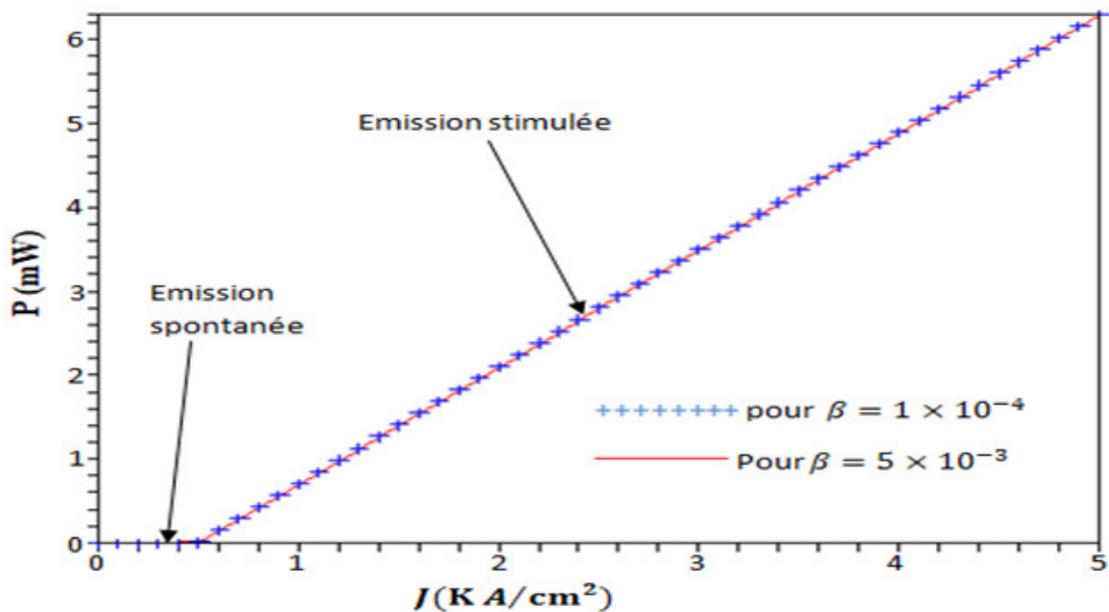


Figure III.5 : la puissance émise en fonction de la densité de courant pour $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$.

4. Rendement quantique

4.1. Variation de rendement quantique externe en fonction de rendement quantique interne :

En prendre deux dispositifs différents, pour la figure III.6.a Sa longueur d'onde est $1.3\mu\text{m}$, la figure III.6.b.sa longueur d'onde $1.55\mu\text{m}$.

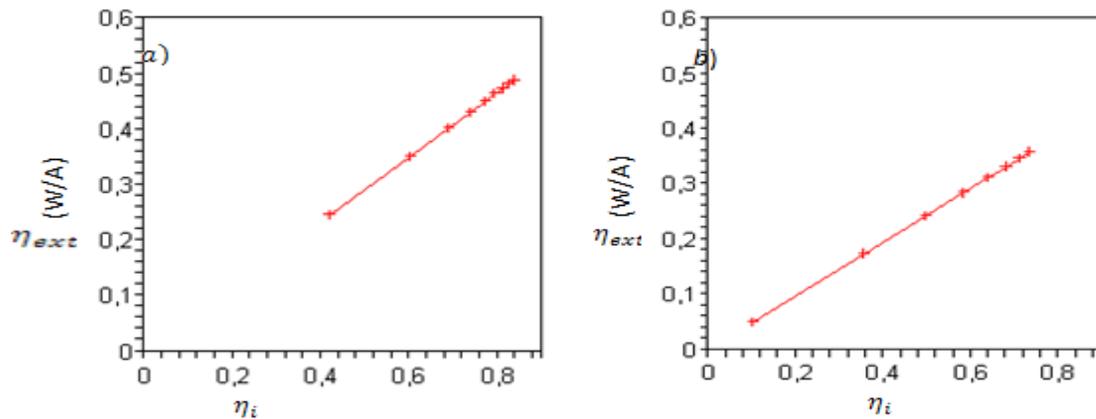


Figure III.6 : rendement quantique externe en fonction de rendement quantique interne.

4.2 Rendement quantique externe inverse en fonction de la longueur du laser :

Nous avons donc tracez le rendement externe pour différentes longueurs de composants.

En représentant graphiquement $(1/\eta_{ext})$ par rapport à L , comme illustré dans la Figure III.7, le point d'intersection avec l'axe des ordonnées permet de calculer le rendement quantique interne (η_i), tandis que la pente de la courbe donne des informations sur les pertes internes (α_i). Il est fréquent, lors de la caractérisation des technologies de laser à semi-conducteur, de tracer la caractéristique η_{ext}^{-1} en fonction de la longueur de la cavité du laser, L .

$$\lambda = 1.55 \mu\text{m} \alpha_i = 30 \text{ cm}^{-1}$$

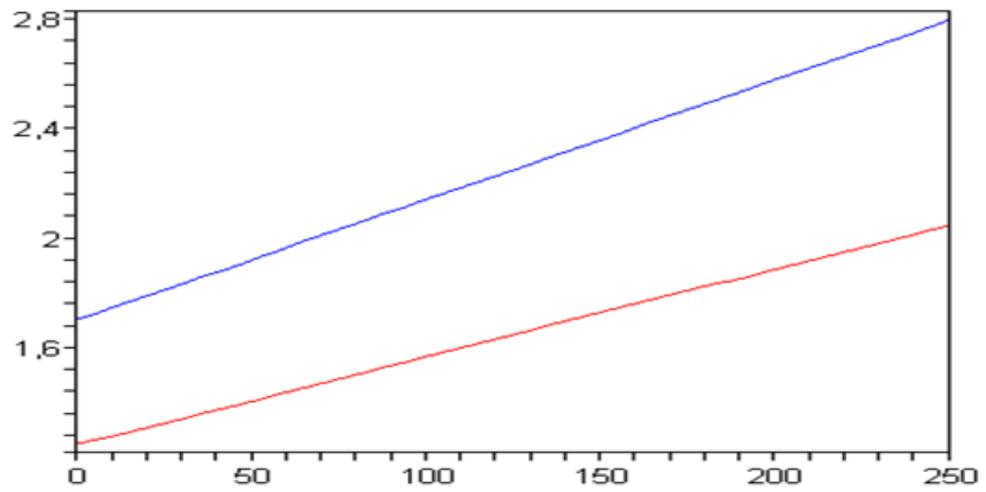


Figure III.7 : variation du rendement externe en fonction de la longueur de cavité laser.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de cette étude consistait à effectuer une simulation et à analyser le comportement de la densité de courant injectée (à proximité du courant seuil) dans la région active d'un laser à hétérostructure à base de semi-conducteur III-V. La simulation a été réalisée en utilisant le logiciel MAPLE 14. Les caractéristiques électriques du laser sont déterminées par l'équation de Poisson et l'équation de continuité, qui régissent la distribution des densités de courant à l'intérieur du dispositif. De plus, les propriétés optiques du laser sont simulées en utilisant l'équation d'évolution de la densité de photons, ce qui permet de calculer la puissance émise par le laser.

Cette étude s'appuie sur un modèle proposé par Alain C. [6.7], qui offre une description complète des propriétés électriques et optiques des lasers à semi-conducteurs. Pour comparer les résultats obtenus, deux longueurs d'onde ont été sélectionnées, à savoir 1,55 μm et 1,3 μm . L'impact du facteur d'émission spontanée β ($\beta_1 = 1,10^{-4}$ et $\beta_2 = 5,10^{-3}$) sur la densité de porteurs, la densité optique de photons, ainsi que la puissance, a été étudié dans la région du courant seuil du laser.

Bibliographie

- [1] M. Weyers, M. Sato and H. Ando, *Jpn. J. Appl. Phys.* 31 L853 (1992).
- [2] C. Kittel, *Introduction a la physique de l'état solide*, (Dunode, 1972).
- [3] L. Vegard, *Z. Phys.* 5, 17 (1921)
- [4] Duan, G.H.: 'Physique des lasers', Cours à l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris, 2000.
- [5] Rosencher, E., Vinter, B.: 'Optoélectronique', Enseignement de la physique, Editions Masson, ISBN 2-225-82935-7, 2000.
- [6] Ali Guermache, étude et réalisation de lasers de pompe 1480 nm pour l'amplification Raman, thèse doctoral, école nationale supérieure des Télécommunications, PARIS, 2005.
- [7] J. I. Pankove, E. A. Miller, and J. E. Berkeyheiser. *RCA Review*, 32, 383, (1971).
- [7] Alain Champagne, Modélisation des lasers InGaAsP-InP à double hétérostructure et à double region active, Thèse Ph.D., Université de
- [8] J. I. Pankove. *Journal of Luminescence*, 7, 114 (1973).
- [9] R. Dingle, D. D. Sell, S. E. Stokowski, M. Ilegems, *Phys. Rev. B*, 4, 1211 (1971).
- [10] M. Ilegems, R. Dingle, R. A. Logan, *J. Appl. Phys.* 43, 3797 (1972).
- [11] J. I. Pankove, E. A. Miller and J. E. Berkeyheiser, *Journal of Luminescence*, 5, 84, (1972).
- [12] J. I. Pankove, *Journal of Luminescence*, 5, 482 (1972).
- [13] Thèse de doctorat (émission et modulation intersousbande dans les nanostructures de nitrides), Laurent Nevou. 2008.
- [14] W. H. Balmain. *Journal of Praktical Chemistry*, 27 :422, 1842.
- [15] J. Huang ; Y. T. Zhu. *Advances in the synthesis and characterization of boron nitride. Defect and diffusion Forum*, 186-187 :1, 2000.
- [16] Bundy F. P. ; Wentorf R. H., *J. Chem. Phys.* 1963, 38, 1144-1149
- [17] Solozhenko V. L. ; Leonidov V. Y., *Russ. J. Phys. Chem.* 1988, 62, 1646-1647
- [18] Fukunaga O., *Diamond Related Mater.* 2000, 9, 7-12
- [19] Gardinier C.F., *Ceram. Bull.* 1988, 67, 1006
- [20] thèse : Préparation de revêtements de nitrure de bore (BN) par voie polymère précéramique. Etude des paramètres d'élaboration. Caractérisations physico-chimiques, Hussein TERMOSS, Soutenu le : 28/09/2009.

