

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira
Faculté de la Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Électronique

Projet de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Télécommunications.

Spécialité : Réseaux et télécommunications.
Systèmes des télécommunications.

Thème

Analyse numérique de l'effet de la température sur l'efficacité quantique des lasers à émission de surface à cavité verticale (VCSEL).

Préparé par :

SLAMANI Mohand Amine

ZEMMA Imene

Dirigé par :

Mme L.ACHOUR

Mme L.BENBAHOUCHE

Examiné par :

Président : M M.SADJI

Examinatrice : Mme R.BENDJELOUL

Année universitaire : 2023/2024

Remerciement

Tout d'abord nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir donné la volonté, le courage et la patience pour réaliser ce travail.

Nous souhaitons également adresser nos plus sincères remerciements à notre directrice de mémoire, **Mme L. ACHOUR.** Votre expertise, votre patience et vos conseils précieux ont été essentiels à la réalisation de ce travail. Merci pour votre soutien constant et votre encouragement tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons aussi à adresser nos profonds remerciements à notre co-promotrice, **Mme L. BENBAHOUCHE** Votre contribution et vos critiques constructives ont grandement enrichi ce mémoire. Nous sommes reconnaissants pour votre dévouement et votre disponibilité.

Nous tenons à remercier chaleureusement les membres du jury, pour l'intérêt porté à ce travail.

À notre famille, Vos sacrifices, votre amour inconditionnel et votre soutien moral nous ont donné la force de persévérer. Merci pour votre confiance en nous et pour avoir toujours cru en nos capacités.

Enfin, nous remercions tous ceux qui nous ont encouragé et soutenu de près et de loin

Dédicace

À ma maman, pour ton amour inconditionnel et ton soutien indéfectible, sans lesquels je n'aurais jamais pu accomplir ce parcours.

À mon papa, pour ta sagesse et tes conseils précieux qui m'ont guidé tout au long de ces années.

À mon petit frère Aris, pour sa joie de vivre contagieuse et son enthousiasme.

À ma grand-mère, partie trop tôt mais dont la mémoire et les valeurs continuent de m'inspirer chaque jour.

À mes amis de toujours, ceux de mon enfance, qui ont toujours cru en moi et m'ont soutenu à chaque étape de ma vie, Massi, Moho, Nani. Votre amitié est un trésor inestimable.

À mes amis rencontrés au fil de mon parcours scolaire, avec qui j'ai partagé les moments les plus difficiles et les plus joyeux. Babline, Chachi, Celia, Ouarda. Vos rires, vos conseils et votre soutien ont fait de cette expérience un voyage inoubliable.

À mon binôme Imene et à son fiancé, qui est également un ami. Merci pour votre complicité, votre soutien mutuel et les moments partagés.

À tous ceux que j'aime et qui m'aiment, pour votre affection et votre encouragement, qui ont été ma force tout au long de ce voyage.

Merci à vous tous, de tout cœur.

SLAMANI Mohand Amine

Dédicace

À mes chers parents,

Votre amour inconditionnel, votre soutien constant et vos encouragements ont été ma force motrice tout au long de ce parcours. Merci pour tout ce que vous avez fait pour moi. Je vous dédie ce travail avec toute ma gratitude et mon amour.

À mes frères Rabah, Abderrahmane et ma sœur Rania,

Votre soutien, vos encouragements et vos moments de complicité ont été une source de réconfort et de motivation. Je vous dédie ce travail en signe de reconnaissance pour tout ce que vous représentez pour moi.

À mon fiancé Amine,

Ta présence, ta patience et ta compréhension ont été des piliers essentiels dans cette aventure. Merci d'avoir toujours cru en moi et de m'avoir soutenu dans les moments difficiles.

À mes beaux-parents,

Votre accueil chaleureux, votre présence bienveillante et votre soutien ont été d'une grande aide dans ce voyage académique. Je vous remercie et je vous dédie ce travail avec toute ma reconnaissance.

À mes professeurs,

Votre sagesse, vos conseils et votre patience ont guidé mes pas tout au long de ce parcours. Merci pour votre dévouement et votre enseignement. Je vous dédie ce travail en signe de gratitude et de respect.

À mes amies, Ouarda, Hanane, Kenza, Saliha,

Votre amitié, vos encouragements et les moments de détente partagés ont rendu ce voyage plus agréable et supportable. Merci pour votre présence constante. Je vous dédie ce travail en témoignage de notre belle amitié.

À mon binôme Mohand Amine,

Travailler ensemble sur ce projet a été une expérience enrichissante et mémorable. Merci pour ton engagement, ta collaboration et ton amitié. Je te dédie ce travail en signe de notre réussite commune.

ZEMMA Imene

Table de matière

Remerciement.....	i
Dédicace.....	ii
Dédicace.....	iii
Table de matière	iv
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	viii
Liste des acronymes	x
Introduction générale	1
CHAPITRE I.....	1
GENERALITES SUR LES LASERS.....	1
I CHAPITRE I GENERALITES SUR LES LASERS	2
I.1 INTRODUCTION.....	2
I.2 HISTOIRE DES LASERS.....	2
I.3 ELEMENTS FONDAMENTAUX DES LASERS	3
I.4 PRINCIPE DE L'ÉMISSION ET DE L'ABSORPTION.....	4
I.4.1 Absorption.....	4
I.4.2 Émission.....	4
I.4.2.1 Émission spontanée.....	5
I.4.2.2 Émission stimulée.....	5
I.5 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES LASERS	6
I.6 PROPRIÉTÉS DES LASERS.....	7
I.7 TYPE DE LASERS	8
I.7.1 Laser à gaz.....	8
I.7.2 Les lasers à colorant.....	8
I.7.3 Laser à solide.....	8
I.8 APPLICATIONS DES LASERS.....	9
I.9 SEMI-CONDUCTEUR	10
I.9.1 Théorie des bandes.....	10
I.9.2 Dopage.....	11
I.9.2.1 Semi-conducteur de type n.....	11
I.9.2.2 Semi-conducteur de type p.....	12
I.10 LASER A SEMI-CONDUCTEUR.....	13
I.10.1 Différents types des lasers à semi-conducteur.....	13
I.10.1.1 Laser à homo-jonction.....	13
I.10.1.2 Laser à hétérojonctions	14
I.10.1.3 Laser à puits quantiques:	16
I.10.1.4 Lasers à cavité Fabry-Pérot (F-P).....	18
I.10.1.5 Diodes DBR et DFB	18
I.10.1.6 Diodes à émission par la surface	19
I.11 CONCLUSION.....	19
CHAPITRE II	4
ETAT DE L'ART SUR LA VCSEL.....	4
II CHAPITRE II : ETAT DE L'ART DE VCSEL	20
II.1 INTRODUCTION SUR VCSEL	20
II.2 BREF HISTORIQUE DU VCSEL.....	20
II.3 PRINCIPE DU VCSEL	21
II.4 AVANTAGES ET COMPARAISON AUX ÉMETTEURS PAR LA TRANCHE	22
II.5 APPLICATIONS DE VCSEL	23

II.6	ZONE ACTIVE	24
II.6.1	<i>Puits quantiques</i>	24
II.6.2	<i>Fonctionnement de la Zone Active</i>	25
II.6.3	<i>Matériaux pour la zone active</i>	25
II.7	MIROIRS DE BRAGG	26
II.7.1	<i>Définition</i>	26
II.7.2	<i>Principe</i>	27
II.7.3	<i>Matériaux pour les miroirs de Bragg</i>	28
II.8	CONFINEMENT DANS UN VCSEL	29
II.8.1	<i>Confinement Électrique</i>	29
II.8.2	<i>Confinement optique</i>	30
II.9	VCSELS AUX LONGUEURS D'ONDE TÉLÉCOMS.....	31
II.9.1	<i>Intérêt de la longueur d'onde 1300 nm</i>	31
II.9.2	<i>Intérêt de la longueur d'onde 1500 nm</i>	32
II.10	IMPACT DE LA TEMPÉRATURE SUR LES VCSELS	34
II.10.1	<i>Gain</i>	35
II.10.2	<i>Courant de seuil</i>	35
II.11	CONCLUSIONS	36
CHAPITRE III.....		20
SIMULATION DE LA VCSEL SOUS STRESS THERMIQUE ET DISCUSSION DE SES PERFORMANCES		20
III CHAPITRE III : SIMULATION DE LA VCSEL SOUS STRESS THERMIQUE ET DISCUSSION DE SES PERFORMANCES		37
III.1	INTRODUCTION	37
III.2	PRÉSENTATION DU SIMULATEUR SILVACO	37
III.3	OUTILS DE SIMULATION DE SILVACO	38
III.3.1	<i>Athena</i>	38
III.3.2	<i>Atlas</i>	39
III.3.3	<i>Structure d'entrées et de sortie Atlas</i>	39
III.4	DESCRIPTION DE LA VCSEL	42
III.5	SIMULATION ET ÉTUDE DES PERFORMANCES DE LA VCSEL AVEC LE SILVACO ATLAS.....	42
III.5.1	<i>Validation du modèle développé</i>	42
III.5.2	<i>Résultats de Simulation d'une VCSEL</i>	45
III.5.3	<i>Résultats de Simulation d'une VCSEL sous un stress thermique</i>	52
III.5.4	<i>Résultats de Simulation d'une VCSEL sous basse température</i>	53
III.5.5	<i>Résultats de Simulation d'une VCSEL sous haute température</i>	62
III.6	INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	69
III.7	CONCLUSION.....	71
Conclusion générale.....		72

Listes des figures

Figure I. 1 structure d'un laser a rubis[3].....	2
Figure I. 2 Schéma d'un oscillateur laser	3
Figure I. 3 Diagramme d'énergie d'un atome (a) :au repos; (b) excité.	4
Figure I. 4 (a) Atome excité (état initial), (b) Atome au repos (état final).	5
Figure I. 5 Atome excité (état initial), (b) Atome au repos (état final).....	5
Figure I. 6 Principe de transformation d'un amplificateur en oscillateur. [5]	6
Figure I. 7 Diagramme de bande d'énergie d'un isolant, d'un semi-conducteur et d'un métal .	10
Figure I. 8 semi-conducteur de type n	12
Figure I. 9 semi-conducteur de type p	12
Figure I. 10 Schéma d'une structure de puits quantique	14
Figure I. 11 structure a hétérojonction.....	14
Figure I. 12 structure a double-hétérojonction	16
Figure I. 13 Schéma d'une structure de puits quantique	17
Figure I. 14 structure d'un laser classique Fabry-Pérot [15].....	18
Figure I. 15 Schéma de principe d'une diode DFB, DRB [15].....	19
Figure II. 1 Conception du premier VCSEL par Iga en 1977 (photo de son cahier de labo).	20
Figure II. 2 Schéma d'un VCSEL à diagramme d'oxyde.....	22
Figure II. 3 Longueurs d'onde disponibles pour les VCSEL.....	25
Figure II. 4 <i>Interférences constructives dans un miroir de Bragg</i>	27
Figure II. 5 Structure sans confinement des porteurs	30
Figure II. 6 Structure des VCSELS émettant autour de 1300 nm	31
Figure II. 7 Atténuation dans une fibre optique en fonction de la longueur.....	32
Figure II. 8 Performances d'une transmission utilisant un VCSEL à 1,55µm	33
Figure III. 1 Schéma représentant du logiciel SILVACO [42].....	38
Figure III. 2 Ordre des groupes de déclaration [43].....	41
Figure III. 3 Structure de la VCSEL étudiée.....	43
Figure III. 4: Zoom sur la structure VCSEL	44
Figure III. 5 (a) Maillage de la VCSEL, (b) Zoom du maillage raffiné de la VCSEL	44
Figure III. 6 BC BV pour T=300°K.....	45
Figure III. 7 Potentiel T=300K	46
Figure III. 8 Caractéristique I-V	46
Figure III. 9 Densité du courant de conduction	47
Figure III. 10 Caractéristique P-V à T=300°K.....	48
Figure III. 11 Intensité lumineuse à T=300°K.....	48
Figure III. 12 Variation du Gain	49
Figure III. 13 la puissance en fonction de lambda	50
Figure III. 14 Coefficient d'absorption.....	51
Figure III. 15 Coefficient de réflectivité	51
Figure III. 16 Coefficient de transmission T=300°K	52
Figure III. 17 Densité de conduction de courant sous basse température	53
Figure III. 18 BV BC sous basse température	54
Figure III. 19 Energie du gap sous basse température	55
Figure III. 20 Champ électrique sous basse température	56

Figure III. 21	Température de maille sous basse température	57
Figure III. 22	Intensité lumineuse sous basse température	58
Figure III. 23	Gain optique sous basse température.....	59
Figure III. 24	Potentiel sous basse température	60
Figure III. 25	Taux de recombinaison radiative sous basse température.....	61
Figure III. 26	Densité du courant de conduction sous haute température.....	62
Figure III. 27	BV BC sous haute température	63
Figure III. 28	Énergie du gap sous haute température	64
Figure III. 29	Champ électrique sous haute température	64
Figure III. 30	Température de maille sous haute température	65
Figure III. 31	Intensité lumineuse sous haute température	66
Figure III. 32	Gain optique sous haute température.....	67
Figure III. 33	Potentiel T=300K sous haute température.....	67
Figure III. 34	Taux de recombinaison radiative sous haute température	68

Liste des tableaux

Tableau I. 1 les types de laser les plus courant et leur applications.	9
Tableau I. 2 Matériaux utilisés pour les zones actives et de confinement des émetteurs.....	16
Tableau II. 1 Domaines d'application des VCSELs et systèmes photoniques correspondants .	23
Tableau II. 2 <i>Principaux matériaux mise en oeuvre dans les VCSEL pour couvrir la bande spectrale visible et infrarouge.</i>	29
Tableau II. 3 Longueurs d'ondes émises en fonction des alliages III-V.....	33
Tableau II. 4 Comparaison entre les deux longueurs d'onde	34

Liste des acronymes

Al : Aluminium.

AlAs : Arséniure d'Aluminium.

AlGaAs / GaAlAs : Phospho-Arséniure de Gallium.

Ar : Argon.

As : Arsenic

B : Bore.

BC : Bande de conduction.

BER : Bit Error Rate / taux d'erreur binaire.

BI : Bande interdite.

BV : Bande de valence.

CO₂ : Oxyde de carbone

DBR : Distributed Bragg reflector / Réflecteur de Bragg distribué.

DFB : Distributed feedback / Rétroaction distribuée.

E_c : Energie de bande de conduction

EEL : Edge-Emitting Lasers / Lasers à émission latérale.

E_g : Energie du gap.

E_v : Energie de bande de valence

Ga : Gallium.

GaAs : Arséniure de Gallium.

He Ne : Hélium-néon

In: Indium.

Inf: Borne inférieure

InP: Phosphor D'indium.

InAlGaAs : Indium Aluminium Gallium Arsenide.

InGaAsP : Indium Gallium Arsenide Phosphide.

InGaNAs : Indium Gallium Azote Arsenide.

K : Kelvin.

K_r : Krypton.

LASER : Light amplification by stimulated emission of radiation / Amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement.

LED : Light-emitting diode / Diode électroluminescente.

MASER : Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation

MQW : Multi-quantum Well / Multi puits quantiques.

N : Azote.

Optiwave : Optical Communication System Design Software.

P : Phosphore.

Silvaco : Silicon Valley Company / Société de la Silicon Valley.

TCAD : Technology Computer-Aided Design / Conception assistée par ordinateur.

VCSEL : Vertical Cavity Surface Emitting Lasers / Diode laser à cavité verticale émettant par la surface.

WDM : Wavelength Division Multiplexing / Multiplexage en longueur d'onde

Introduction générale

Introductions générale

Les lasers, depuis leur invention il y a plus d'un demi-siècle, ont captivé l'imagination collective et transformé notre façon de percevoir et d'utiliser la lumière. Que ce soit pour mesurer la distance de la terre à la lune, pour transmettre des quantités incroyables d'informations à travers une fibre optique d'un diamètre inférieur à un cheveu humain, chaque fois le laser joue un rôle primordial[1]. Parmi les nombreuses catégories de lasers, les lasers à semi-conducteurs occupent une place particulière pour les technologies basées sur la photonique.

Dans les télécommunications, les VCSELs « Diode laser à cavité verticale émettant par la surface » sont particulièrement précieux en raison de leur capacité à offrir des performances élevées avec une faible consommation d'énergie, une modulation rapide et une longue durée de vie. Cependant, comme tout dispositif à semi-conducteurs, leurs performances sont fortement influencées par les conditions environnementales, notamment la température. Comprendre et maîtriser l'impact de la température est donc essentiel pour optimiser les performances des VCSELs dans les applications de télécommunications.

Ce mémoire vise à explorer l'effet de la température sur les VCSELs, Le chapitre 1 introduit les spécificités des lasers en général, en commençant par leur principe de fonctionnement et en présentant les structures les plus courantes. Nous aborderons ensuite les lasers à semi-conducteurs en particulier, en discutant de leurs caractéristiques et de leur importance dans les dispositifs laser.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des lasers à cavité verticale à émission par la surface (VCSELs). Nous retracerons l'histoire de ces dispositifs, passerons en revue leur développement et leurs applications croissantes. Une étude détaillée de la structure des VCSELs et des technologies clés qui permettent leur réalisation et leur fonctionnement sera présentée.

Dans le troisième chapitre, nous simulerons une diode laser VCSEL à l'aide du logiciel Silvaco-Atlas pour analyser leurs performances sous stress thermique. Nous examinerons comment la température affecte ces dispositifs. Enfin nous terminerons avec une conclusion.

Chapitre I
Généralités sur les LASERS

I.1 Introduction

Le laser est probablement l'invention qui a révolutionné le plus profondément l'optique moderne. Ce chapitre explore en détail l'histoire, les principes de fonctionnement, les propriétés, les types et les nombreuses applications des lasers, avec une attention particulière sur les lasers à semi-conducteur.

I.2 Histoire des lasers

L'histoire du laser débute en 1917 lorsque "Einstein" introduit pour la première fois le phénomène d'émission stimulée; Cette découverte permit beaucoup plus tard en 1951 à Townes et Bassov et Prokhorov d'amplifier les hyperfréquences et de réaliser les premiers MASER "Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation", et à partir de 1958 "Gordon Gould Schawlow et Townes ont pu atteindre les longueurs d'ondes visibles et ainsi le LASER "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation". [2]

Le premier laser à rubis a été fabriqué en 1960 par Maiman, rapidement suivi par l'utilisation des semi-conducteurs en 1962 les premiers lasers à homo-jonction à base de GaAs par Holonyak, puis les premiers lasers semi-conducteurs modernes utilisant des hétérostructures de GaAs/AlGaAs, au niveau de la jonction p-n, permit en 1975 par van der Zeil [3].

La figure I.1 montre la structure d'un laser à rubis.

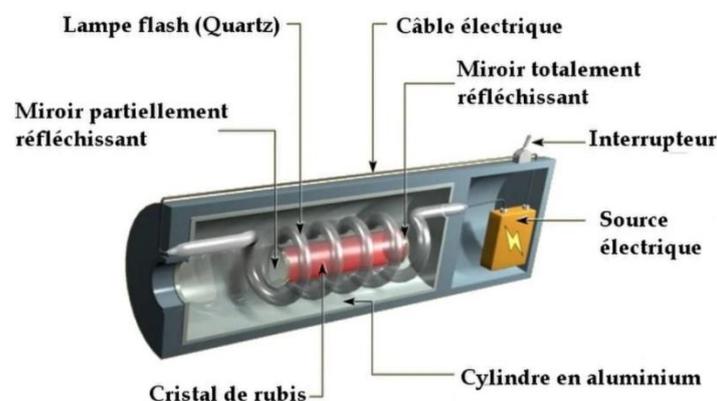


Figure I. 1 structure d'un laser à rubis [3].

I.3 Eléments fondamentaux des lasers

Un laser est un appareil qui émet un faisceau de lumière cohérente par l'intermédiaire d'un processus d'amplification optique. Tout laser est constitué de trois éléments [3] :

- **Milieu amplificateur** : c'est un milieu optiquement actif qui transforme en photons l'énergie injectée par le pompage et dans lequel il y a du gain.
- **Cavité résonante** : elle est constituée d'une cavité formée de deux miroirs parfaitement parallèles (faces clivées contenant l'amplificateur). Elle permet la rétroaction d'une partie de ces photons sur le milieu qui les a émis.
- **Source de pompage** : Il existe trois types de pompage :
 - Pompage optique où le matériau laser est pompé par une excitation optique.
 - Pompage par injection électrique : c'est une technique standard utilisée dans les diodes lasers.
 - Pompage chimique où une réaction chimique exothermique fournit l'énergie nécessaire pour exciter le milieu actif du laser

Le système de pompage peut être utilisé seul pour amplifier une lumière déjà existante. Cependant, l'amplificateur est inséré dans un résonateur optique dont la fonction est de produire un rayonnement lumineux aux propriétés très particulières « oscillateur laser » ; constituant des miroirs réfléchissants et des miroirs d'extraction qui sont semi réfléchissants ; l'oscillateur laser peut être schématisé par la figure I.2 avec ses éléments fondamentaux : le milieu amplificateur, le système de pompage, et les miroirs formant la cavité, dont le miroir de sortie.

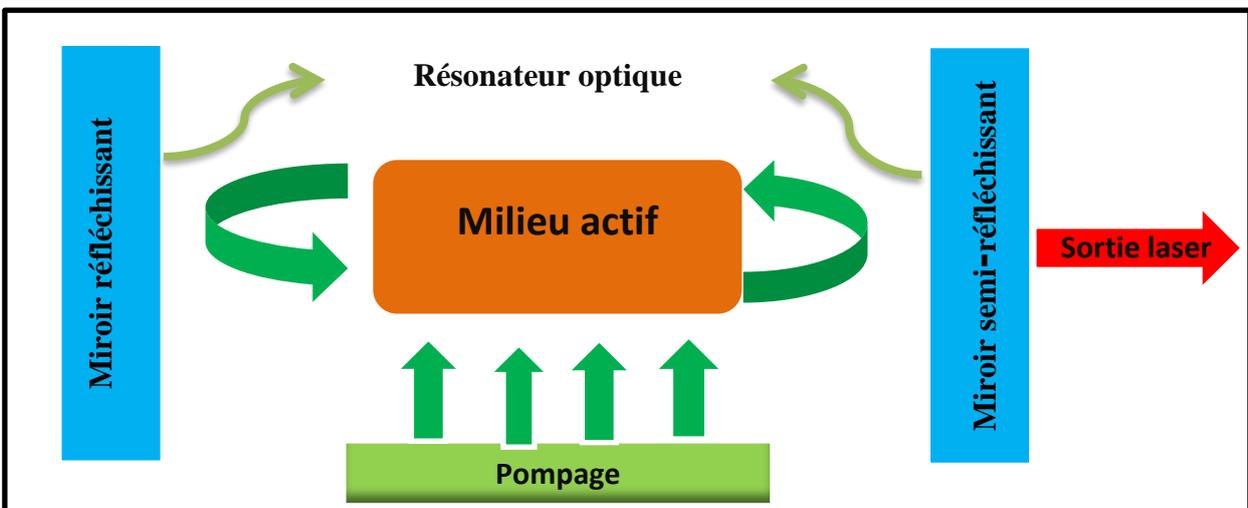


Figure I. 2 Schéma d'un oscillateur laser

I.4 Principe de l'émission et de l'absorption

La théorie quantique montre que les électrons occupent un certain nombre de niveaux d'énergies. Le comportement d'un atome peut être connu grâce aux électrons contenus dans les deux dernières bandes d'énergie :

- La bande de valence, d'énergie E_v
- La bande de conduction, d'énergie E_c

La différence d'énergie entre ces deux bandes représente la bande interdite (GAP) laquelle caractérise les différents constituants de la matière.

L'absorption et l'émission d'énergie sont obtenues à partir de la transition des électrons d'un niveau d'énergie vers un autre niveau. [4]

I.4.1 Absorption

Considérons un photon qui se propage vers un électron situé dans la bande de valence E_v . Dans le cas où ce photon possède suffisamment d'énergie (supérieure ou égale au GAP), l'électron absorbe cette énergie et passe dans la bande de conduction. La figure I.3 montre le diagramme d'énergie d'un atome dans son cas de repos et d'excitation.

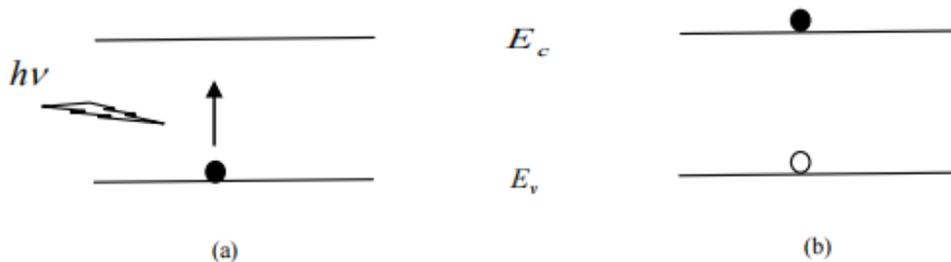


Figure I. 3 Diagramme d'énergie d'un atome (a) : au repos; (b) excité[4].

I.4.2 Émission

Un électron excité situé dans la bande de conduction peut passer à un niveau d'énergie plus bas en émettant un photon dont la fréquence ν est donnée par [4] :

$$\nu = \frac{E_c - E_v}{h} \quad (\text{I.1})$$

Avec « h » est la constante de Planck = 6.626×10^{-34} (J.s).

Nous distinguons deux types d'émissions

I.4.2..1 Émission spontanée

L'émission spontanée se fait de façon aléatoire et donne naissance à des radiations incohérentes. Les photons ainsi créés ne sont liés par aucune relation de phase.

Ce principe est représenté sur la Figure I-4.

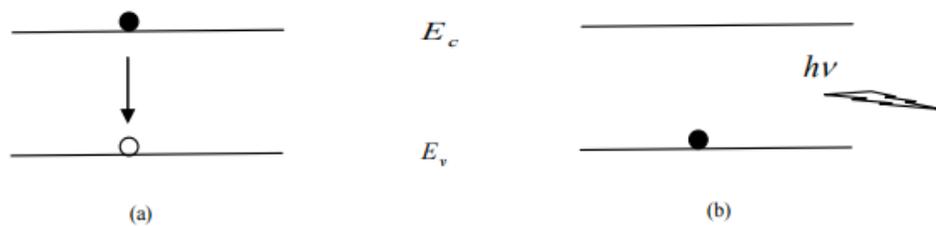


Figure I. 4 (a) Atome excité (état initial), (b) Atome au repos (état final) [4].

I.4.2..2 Émission stimulée

Un photon incident peut provoquer la désexcitation d'un électron (situé dans la bande de conduction) et entraîner l'émission d'un autre photon de même phase. Figure I-5 représente le principe de l'émission stimulée.

Ces deux photons peuvent à leur tour déclencher d'autres émissions synchrones et provoquer un effet d'avalanche. Il y a donc, pour ce type d'émission apparition de gain.

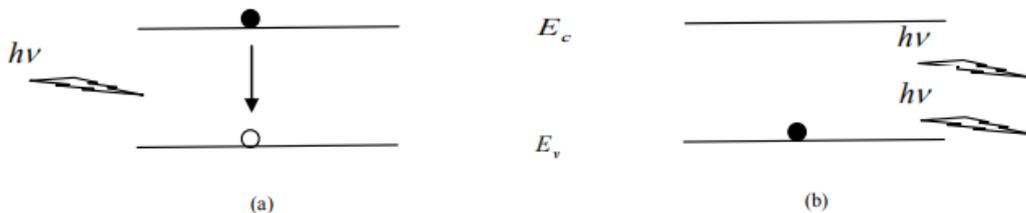


Figure I. 5 Atome excité (état initial), (b) Atome au repos (état final)[4].

I.5 Principe de fonctionnement des lasers

Grâce à l'émission stimulée, il est possible par pompage de réaliser une inversion de population, de sorte que les atomes amplifient la lumière. Cependant, un laser est une source de lumière et non pas un amplificateur.

Pour réaliser un laser, il faut donc transformer notre amplificateur de lumière en oscillateur. Il faut renvoyer la lumière dans le milieu amplificateur grâce à un jeu de miroirs, en réalisant une cavité optique. La Figure I-6 représente le cas d'une cavité en anneau, constituée de quatre miroirs.

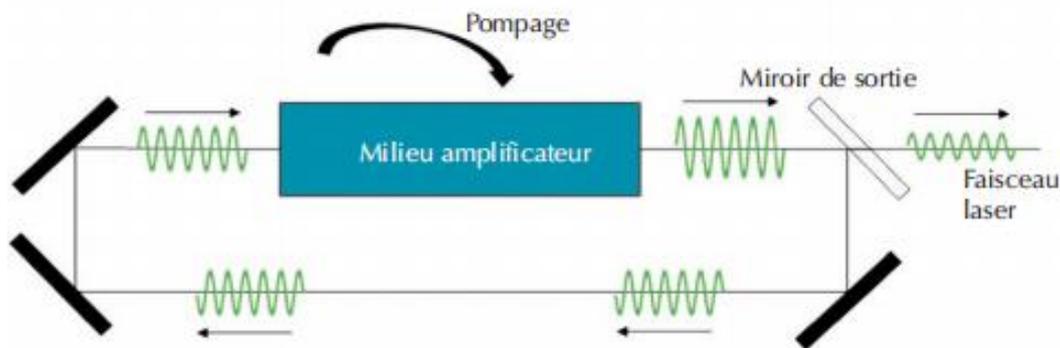


Figure I. 6 Principe de transformation d'un amplificateur en oscillateur. [5]

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.

La lumière, réfléchié 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 nombre entier de fois la longueur d'onde. C'est la condition de résonance : [3]

$$2L = p\lambda \quad (\text{I.2})$$

- L est la distance séparant les deux miroirs
- λ la longueur d'onde de la lumière
- p un nombre entier

I.6 Propriétés des lasers

Les lasers possèdent des propriétés uniques qui les distinguent des autres sources de lumière, telles que [6] :

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 1 mm par mètre parcouru.

2. Intense

Les lasers émettent une lumière très intense. Bien que certains lasers semblent peu puissants (quelques milliwatts), leur lumière est concentrée sur une toute petite surface, parfois d'à peine quelques millimètres carrés. C'est pourquoi il est très important de ne jamais recevoir un faisceau laser directement dans les yeux. Comparaison de la puissance et de l'intensité de différentes sources lumineuses

3. Monochromatique

Contrairement à la lumière émise par le Soleil ou par une ampoule à incandescence qui est polychromatique (constituée de plusieurs longueurs d'onde), la lumière produite par un laser est monochromatique (\approx). Elle contient très peu de longueurs d'onde, lesquelles sont confinées très près de la longueur d'onde d'opération du laser. Par exemple, pour un laser fonctionnant dans un régime continu et émettant à une longueur d'onde de 500 nm, la largeur spectrale est de moins de 0,001 nm.

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.

I.7 Type de lasers

Les lasers se déclinent en plusieurs types fondamentaux, chacun caractérisé par son milieu actif unique [7]:

I.7.1 Laser à gaz

Les lasers à gaz ont pour point commun de partager la même source de pompage l'électricité. Les espèces gazeuses sont portées dans l'état excité de façon directe par collision avec des électrons ou de façon indirecte par collision avec d'autres gaz, eux-mêmes excités électriquement.

Les lasers à gaz couvrent tout le spectre optique, depuis l'ultraviolet jusqu'à l'infrarouge lointain. Cependant, le spectre n'est pas couvert continûment : les lasers à gaz émettent des raies très fines spectralement. Les exemples les plus connus sont les lasers à hélium-néon et laser CO₂.

Les lasers à CO₂ sont les seuls à être vraiment efficaces (rendement de 15 % à 20 %). Ils sont utilisés dans l'industrie pour le traitement des matériaux. Quant aux autres, Le rendement est largement inférieur à 1%.

I.7.2 Les lasers à colorant

Les lasers colorant utilisent des molécules organiques émettant en général dans le visible. Ces molécules sont diluées dans un solvant.

Le pompage des lasers à colorant est optique : soit par des lampes à arc, soit, dans la majorité des cas par d'autres lasers (lasers à gaz ou laser à solide).

Le spectre couvert est l'intégralité du visible. En effet, les colorants sont des molécules organiques complexes qui possèdent une multitude de niveaux d'énergie. Les niveaux sont tellement serrés qu'on parle plutôt de bande d'énergie. Une molécule de colorant couvre en général continûment une région du visible de l'ordre d'une cinquantaine de nanomètres. Les lasers à colorant sont les seuls lasers à couvrir entièrement le spectre visible.

I.7.3 Laser à solide

Le milieu amplificateur est un solide. Dans ces lasers, on distingue les lasers à semi-conducteur pompés électriquement, optiquement, des solides à matrice cristalline ou vitreuse.

I.8 Applications des lasers

Les lasers ont une multitude d'applications dans divers domaines. Le tableau I.1 ci-joint présente les différents types des lasers et leur matériau, longueur d'onde, type d'émission ainsi leurs applications

Type de laser	Matériaux	Longueur d'onde (nm)	Type d'émission	Applications
Laser a gaz	Argon (Ar)	488(bleu) 514(vert)	Continue	Médecine, spectacles, photogravure
	Krypton (Kr)	476(bleu) 528(vert) 568(jaune) 647(rouge)	Continue	Holographie, spectroscopie, télémétrie
	HéliumNéon (HeNe)	633(rouge)	Continue	Médecine, alignement, construction, lecteur de code-barres
	Dioxyde de carbone (CO ₂)	10600(infrarouge éloigné)	Continue ou impulsionnel	Découpage, perçage, marquage, soudage, traitement thermique
Laser à solide	Rubis	694(rouge)	impulsionnel	Micro usinage, télémétrie, holographie
	YAG : Nd	1064(infrarouge proche) 532(vert)	Impulsionnel ou continue	Soudage, perçage, nettoyage, gravure
Laser a diode	GaAs	904(infrarouge)	Train d'impulsions	transmission de la voix et donnés), imprimante laser lecteur CD,
	GaAlAs	840(infrarouge proche)	Train d'impulsions	détecteur de fumée
Laser à liquide	Rhodamine6 G	Ajustable570-650	Continue	Spectroscopie, recherche biomédicale

Tableau I. 1 les types de laser les plus courant et leur applications. [8]

I.9 Semi-conducteur

Un semi-conducteur, est un type de matériau qui se situe entre les conducteurs et les isolants en termes de conductivité électrique. Il peut être soit l'un, soit l'autre selon diverses conditions. Cette polyvalence fait que les semi-conducteurs jouent un rôle central dans de nombreuses applications.

I.9.1 Théorie des bandes

La capacité d'un matériau à conduire ou isoler dépend de la disposition des électrons autour du noyau atomique : chaque élément du tableau périodique possède un certain nombre d'électrons qui sont agencés autour d'un noyau. C'est cet agencement sous la forme de couches d'électrons, différent selon les éléments, qui est responsable de la conductivité électrique. Les électrons d'un atome peuvent avoir plusieurs rôles au sein d'une structure d'atomes :

- **électrons de valence** : ceux-ci sont sur les couches externes de l'atome et permettent de créer des liaisons interatomiques et de former les molécules ;
- **électrons de conduction** : ceux-ci sont responsables de la circulation du courant électrique.

On peut schématiser l'ensemble sous la forme de couches. Sur la figure I-7 on a représenté les couches d'électrons de valence et d'électrons de conduction [4] :

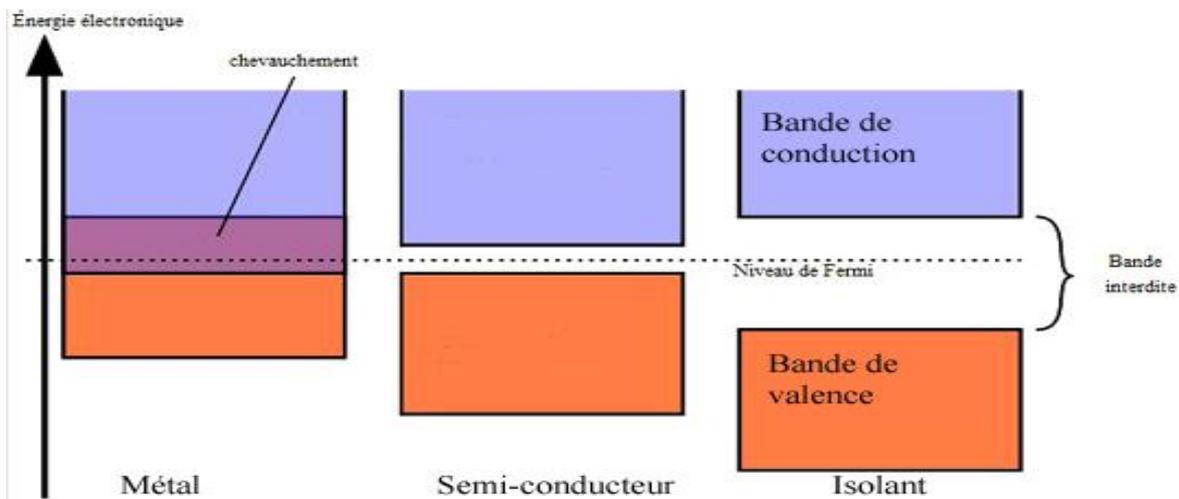


Figure I. 7 Diagramme de bande d'énergie de valence et de conduction [4].

On voit que dans un métal, certains électrons sont à la fois dans la bande de valence et dans la bande de conduction. Cela signifie qu'un métal peut conduire le courant sans autre forme de traitement physico-chimique.

Dans un isolant, par contre, les deux bandes sont séparées par un espace appelé bande interdite « BI », cela signifie que les électrons ne peuvent pas s'y trouver. Les électrons externes sont tous dans la bande de valence et aucun ne se trouve dans la bande de conduction, ces matériaux ne peuvent donc pas conduire électricité.

Enfin, dans le cas des semi-conducteurs, au milieu, il existe une bande interdite aussi, mais ce dernier est très fine. Il suffit d'un petit quelque chose pour que les électrons de valence puissent passer dans la bande de conduction et ainsi rendre le semi-conducteur donc conducteur. On parvient à faire ça en donnant de l'énergie aux électrons, en les excitants.

I.9.2 Dopage

Dans l'objectif de modifier les propriétés électriques des semi-conducteurs, on peut les soumettre à un traitement spécifique appelé le dopage. Cette approche consiste à incorporer délibérément des impuretés dans la structure cristalline du semi-conducteur.

Le dopage peut être de deux types : dopage de type n et dopage de type p.

I.9.2..1 Semi-conducteur de type n

Pour un tel matériau, des atomes pentavalents de la colonne V de la classification périodique des éléments sont introduits (en général en faible quantité), afin de privilégier la conduction par électrons.

La Figure I-8 représente une matrice Si dopée au p. L'atome p possède 5 électrons de valence, quatre d'entre eux entrent en liaison avec les quatre électrons des atomes de Si voisins; Un faible apport d'énergie (0.04eV), par exemple dû à une température différente de 0K , peut libérer le cinquième électron, qui ne trouve pas sa place dans la liaison formée, et qui se retrouve plongé dans le champ positif de l'ion P^+ . De ce fait il devient un électron libre et l'atome pentavalent est appelé 'atome donneur'. [9]

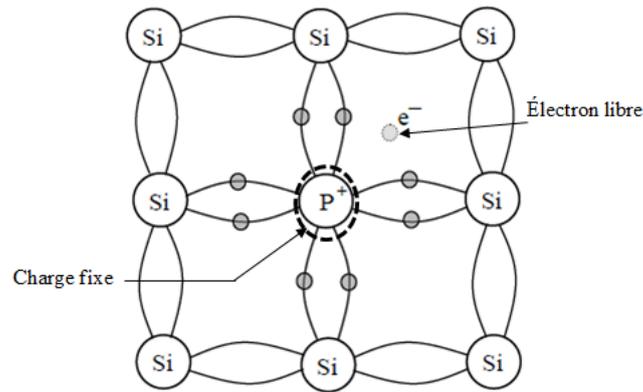


Figure I. 8 semi-conducteur de type n [9].

I.9.2..2 Semi-conducteur de type p

Cette fois-ci, les impuretés sont de type accepteur ce qui correspond aux atomes de la colonne III de la classification périodique des éléments. Les éléments les plus utilisés dans le dopage sont le bore (B) et le gallium (Ga).

La Figure I-9 représente une matrice Si dopée au B. L'association avec ses quatre voisins confère à l'atome B sept électrons sur la couche externe ce qui est insuffisant pour le rendre stable et il est alors tenté d'en subtiliser un à un proche voisin. Le B se retrouve donc ionisé négativement (B^-) et on assiste au déplacement d'un trou libre d'atome en atome [9].

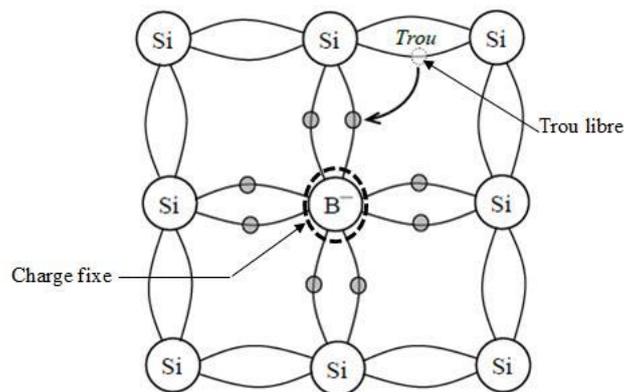


Figure I. 9 semi-conducteur de type p [9].

I.10 Laser à semi-conducteur

Le laser à semi-conducteur, incarne une convergence innovante entre les technologies des semi-conducteurs et des lasers. Contrairement aux lasers traditionnels qui utilisent des milieux actifs tels que des cristaux ou des gaz, les diodes laser exploitent les propriétés électroluminescentes des semi-conducteurs pour générer un faisceau de lumière cohérente et intense.

I.10.1 Différents types des lasers à semi-conducteur

I.10.1.1 Laser à homo-jonction

C'est un laser réalisé par une jonction p-n constituée de la juxtaposition de deux semi-conducteurs dopés différemment. La Figure I-10 représente Schéma d'une structure de puits quantique

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 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 : [10]

$$J_{TH} = \frac{e \cdot d}{\tau} \cdot \Delta N \quad (I.3)$$

J_{TH} : Courant de seuil

e : charge de l'électron.

d : épaisseur de la zone active (zone de recombinaisons radiatives).

τ : Durée de vie des électrons.

ΔN : la densité d'électrons injectés.

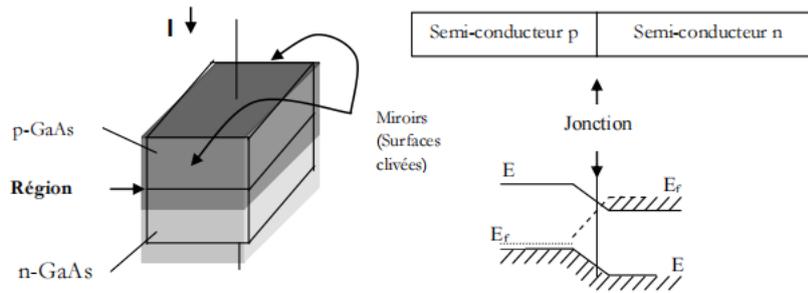


Figure I. 10 Schéma d'une structure de puits quantique [10].

L'inconvénient majeur de 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 de composant. La lumière doit être amplifiée pour augmenter l'efficacité du laser. La cavité est obtenue par clivage perpendiculairement au plan de la jonction. Le rôle de miroir est joué par les faces du cristal (indices élevés) [12].

I.10.1.2 Laser à hétérojonctions

C'est un laser réalisé par une jonction p-n qui se compose de matériaux de types différents, on dit que l'hétérojonction est anisotype, Figure I-11 montre la structure a hétérojonction lorsque les deux semi-conducteurs n'ont pas une conductivité du même type pour laquelle les deux semi-conducteurs sont de type de dopage différemment, dans le cas contraire elle est isotype pour laquelle les deux semi-conducteurs sont de même dopage [11] .

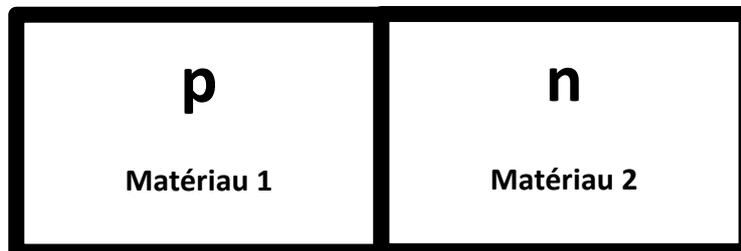


Figure I. 11 structure à hétérojonction.

a. Simple hétérojonction:

Pour diminuer le plus possible le courant de seuil, il faut agir sur l'épaisseur de la zone active "d". On y arrive en ajoutant une barrière de potentiel empêchant les électrons injectés de trop pénétrer dans la zone n. C'est ce qu'on appelle le confinement électronique[11].

Une simple hétérojonction est une jonction réalisée par deux semi-conducteurs de nature fortement dissemblable. La présence de part et d'autre de la jonction de deux matériaux différents permet la conception de dispositifs radiatifs. Ces derniers résultent de l'existence de deux bandes interdites de largeur différente, avec une différence en indices de réfraction. Lorsque la jonction est polarisée en sens direct, la discontinuité de la largeur de bande interdite à la jonction permet un confinement des porteurs de charge à l'interface, On arrive ainsi à augmenter le taux de recombinaison. La propagation de la lumière dans le milieu où elle est moins atténuée due à la différence d'indice de réfraction entre les régions p et n. par conséquence, il y a une amélioration du rendement global pour l'énergie rayonnée.

b. Double heterojunctions

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 « BI » différents qui associe l'effet de confinement optique. Comme présenté sur la figure I-12.

En plus 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. Les matériaux utilisés pour les zones actives et de confinement des émetteurs à 0.8 μm , 1.3 μm et 1.55 μm sont rassemblés dans le Tableau I.2 [10]

Longueur d'onde	0.8	1.3	1.55
Substrat	GaAs	InP	InP
Couche active	GaAs	Ga_{0,8} In_{0,72}As_{0,6} P_{0,4}	Ga_{0,2} In_{0,8} As_{0,9} P_{0,1}
Couche de confinement	Ga_{0,6}Al_{0,4}As	InP	InP

Tableau I. 2 Matériaux utilisés pour les zones actives et de confinement des émetteurs [10]

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. [10]

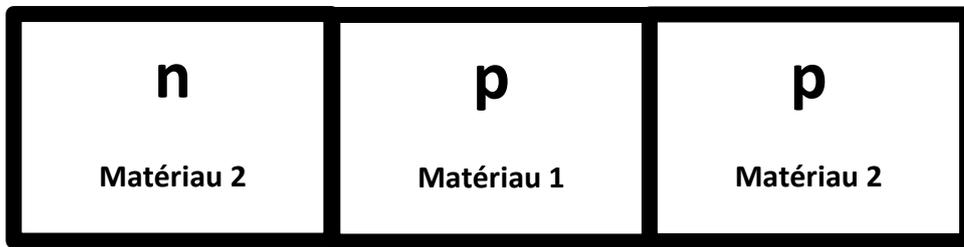


Figure I. 12 structure à double-hétérojonction .

Lorsque la zone active a une épaisseur inférieure à 10 nm, on a alors un autre type de laser qui est le laser à puits quantique.

I.10.1.3 Laser à puits quantiques:

Un puits quantique simple est constitué à partir d'une fine couche (quelques nm) d'un matériau semi-conducteur de faible gap entourée de matériau de plus grand gap créent un puits de potentiel de taille quantique pour les électrons et les trous qui 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. La Figure I-13 représente un schéma de structure des puits quantiques.

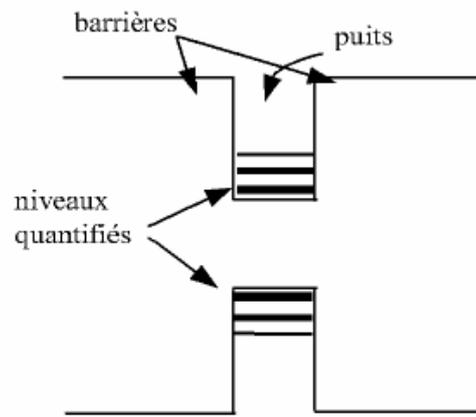


Figure I. 13 Schéma d'une structure de puits quantique [13].

a. Puits quantique de type I

Les électrons et les trous sont confinés dans le même matériau qui forme le puits ; l'énergie du photon émis dépend des énergies de confinement des électrons et des trous et du gap du matériau de puits.

b. Puits quantiques de type II

Les porteurs (les électrons et les trous) sont confinés dans les deux matériaux qui constituent les puits et les barrières respectivement. Dans ce cas l'énergie du photon dépend des énergies de confinement des porteurs mais aussi des gaps des deux matériaux semi-conducteurs qui forment l'hétéro-structure.

c. Puits quantiques de type III

Le bas de la bande de conduction est situé en dessous du haut de la bande de valence. Dans cette configuration qui aussi trouvée sous le nom de configuration semi-métalliques, l'énergie du photon émis n'est fonction que des énergies de confinement des porteurs c'est-à-dire l'épaisseur des couches puits-barrières. [13].

I.10.1.4 Lasers à cavité Fabry-Pérot (F-P)

L'effet laser dans les semi-conducteurs, comme dans tous les lasers, est rendu possible par l'existence d'un milieu à gain et d'un résonateur optique. Dans le cas de la diode laser Fabry-Pérot, la cavité résonante est formée par les facettes clivées du bord de la structure. Le milieu à gain incorpore des puits quantiques qui diminuent drastiquement les courants de seuils de fonctionnement et augmentent l'efficacité des systèmes. De plus, compte tenu de la largeur du spectre de gain (10 à 20 nm), du nombre important de modes longitudinaux dans cette gamme spectrale, et en l'absence d'un quelconque contrôle spectral, ces diodes laser ne sont pas monomodes longitudinales et leur spectre s'étale sur typiquement un nanomètre [14]. Ci-joint la Figure I-14 qui illustre la structure d'un laser classique Fabry-Pérot.

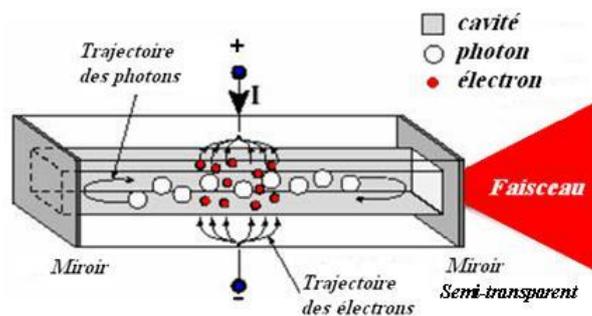


Figure I. 14 structure d'un laser classique Fabry-Pérot [15]

I.10.1.5 Diodes DBR et DFB

Les diodes DBR "Distributed Bragg Reflector" et DFB "Distributed FeedBack" sont des diodes lasers de type diodes Fabry Pérot dans lesquelles un réseau de diffraction a été gravé par modulation de l'indice de réfraction comme présente la Figure I-14. Ce réseau de diffraction, appelé aussi miroir de Bragg, peut remplacer un des miroirs de la cavité des diodes Fabry Pérot, on parle alors de diodes DBR ; il peut également être réparti le long de la zone active de la diode laser, on parle dans ce cas de diodes DFB. Dans les deux cas, la longueur totale du miroir de Bragg et le pas du réseau sont calculés pour obtenir une réflectivité élevée à la longueur d'onde d'émission λ_0 . Le miroir de Bragg est alors un filtre spectral d'un ou deux nanomètres de large centré sur la longueur d'onde laser d'émission désirée λ_0 qui favorise la sélection d'un seul mode longitudinal et le fonctionnement mono-fréquence du laser [15].

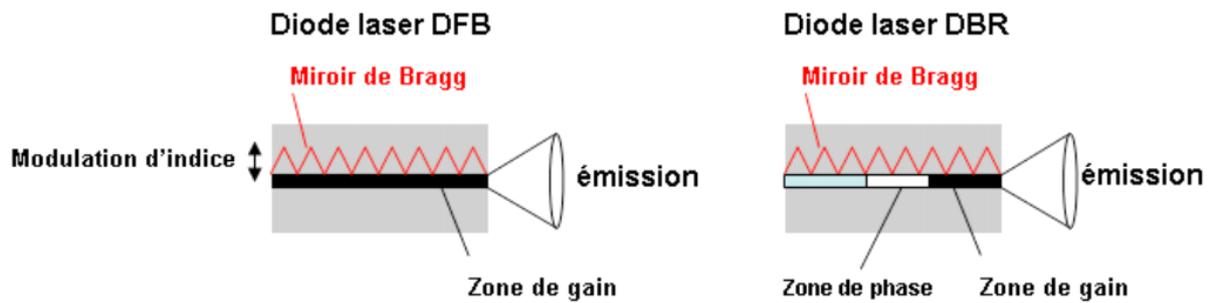


Figure I. 15 Schéma de principe d'une diode DFB, DRB [15]

I.10.1.6 Diodes à émission par la surface

Dans les diodes à émission par la surface, l'émission laser se fait suivant l'axe de croissance de la structure, c'est-à-dire l'axe perpendiculaire au plan des couches épitaxiales. Ce point sera abordé en détail dans le chapitre suivant.

I.11 Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons eu un aperçu complet des lasers, couvrant leur histoire, leurs principes de fonctionnement, ainsi que leurs différents types. En transition vers le chapitre suivant, nous allons nous concentrer sur un type spécifique de laser : les VCSEL qui se distinguent par leur architecture unique et leurs performances exceptionnelles.

Chapitre II

Etat de l'art sur la VCSEL

II.1 Introduction sur VCSEL

Ce second chapitre est consacré à l'étude des lasers à cavité verticale émettant par la surface connus sous l'acronyme VCSEL qui présentent de grands intérêts pour des applications variées (télécommunication, capteurs, ..),

Tout d'abord, nous commençons par dresser un historique et faire un tour d'horizon de son évolution et ses applications de plus en plus nombreuses. Ensuite nous présentons le VCSEL à travers une étude détaillée de sa structure et des briques technologiques qui permettent sa réalisation et son fonctionnement. Enfin, les problématiques des modes de dégradation de ce genre de composant et les études de fiabilité sont également abordées

II.2 Bref historique du VCSEL

En 1962 apparait le premier laser à hétérostructure à base de semi-conducteurs émettant par la tranche [17], puis en 1977 IGA propose un nouveau concept basé sur une structure laser du même type, mais à cavité verticale, émettant verticalement par la surface (la figure suivante montre la Conception du premier VCSEL par IGA en 1977 (photo de son cahier de labo). [18].

Une année plus tard, son équipe démontre un effet laser à $T=77k$ en régime pulsé dans un composant en GaInAsP basé sur ce concept [18]

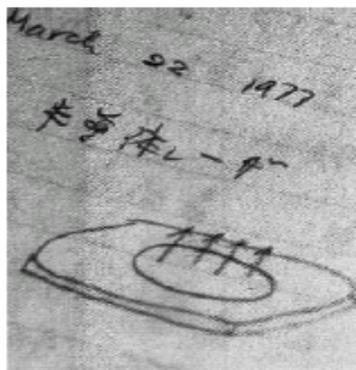


Figure II. 1 Conception du premier VCSEL par IGA en 1977 (photo de son cahier de labo) [18].

Une amélioration majeure a par la suite consisté à utiliser des puits quantiques dans la cavité avec l'obtention en 1989 d'un composant à base de puits quantiques de Ga_{0.8}In_{0.2}As sur GaAs fonctionnant à température ambiante [19].

A partir de 1994, les recherches se sont focalisées sur l'obtention de composants à injection électrique grâce à deux avancées marquantes : d'une part la réduction des résistances séries dans les réflecteurs de Bragg distribués (DBRs) grâce aux travaux sur l'ingénierie de diagramme de bandes (Coldren) [20] [21] et d'autre part l'amélioration du confinement électro-optique transverse par l'insertion d'un diaphragme d'oxyde enterré près de la cavité (Huffaker) [21]. Cette innovation décisive a permis d'atteindre des seuils de fonctionnement sub-mA avec une émission monomode transverse (1995) [21] ainsi que des performances accrues en termes de rendement et de fiabilisation du composant, ce qui a autorisé par la suite un transfert industriel de la fabrication de ce composant pour les communications optiques.

II.3 Principe du VCSEL

Une VCSEL est constituée d'une zone active de faible épaisseur, contenant des puits quantiques et prise en sandwich entre deux miroirs de Bragg. Le miroir supérieur est dopé p et le miroir inférieur est dopé n, formant ainsi une diode PIN. En polarisant la VCSEL en direct, les électrons et les trous vont pouvoir pénétrer la zone active où ils seront piégés dans les puits quantiques. Ils se recombinent ensuite en générant des photons qui effectuent des allers-retours verticaux dans la cavité.

La génération de photons est obtenue sur une très courte distance. Avoir un gain élevé nécessite une multiplication des photons par un nombre conséquent d'aller-retours dans la cavité. Ceci ne peut être possible que si la réflectivité des miroirs est très élevée et qu'elle atteint une valeur supérieure à 99% pour permettre aux photons d'effectuer plusieurs passages avant de s'échapper de la cavité.

Les miroirs de Bragg sont constitués d'un empilement périodique de deux couches à fort et à faible indice de réfraction, l'épaisseur de chaque couche est du quart de la longueur d'onde du laser de fonctionnement de telle façon que les ondes réfléchies interfèrent d'une façon constructive.

Une électrode annulaire est déposée au-dessus du miroir supérieur pour polariser la structure. Le courant électrique est injecté verticalement jusqu'à la zone active, c'est pour cela que les miroirs supérieur sont souvent élaborés à partir d'un matériau semi-conducteur dopé.

Enfin, le faisceau laser est émis verticalement à travers le miroir supérieur de type p car elle possède une réflectivité légèrement inférieure à celle du miroir inférieur de type n. [23]

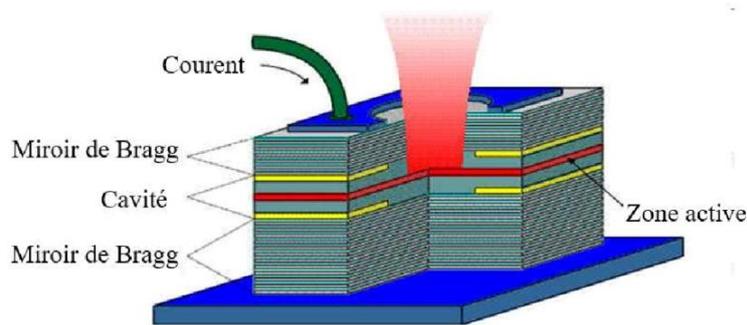


Figure II. 2 Schéma d'un VCSEL [23].

II.4 Avantages et comparaison aux émetteurs par la tranche

La géométrie spécifique des VCSELs leur confère des avantages majeurs Comparé à une diode laser conventionnelle émettant par la tranche EELs (EELs : Edge Emitting Lasers) [24] :

- un courant de seuil très faible grâce au faible volume de cavité.
- le courant de seuil et la longueur d'onde sont relativement peu sensibles aux variations de température, comparés aux EELs.
- la longueur de cavité étant de l'ordre de la longueur d'onde, leur comportement est monomode longitudinal.
- une fréquence de modulation élevée (>10GHz) grâce au faible volume de la cavité.
- une durée de vie importante, due à la zone active enterrée et à la passivation des surfaces.
- un faisceau laser de sortie circulaire et faiblement divergent, lui conférant un couplage facilité avec les fibres optiques.
- un faible coût grâce à sa production en série et la possibilité de les tester directement sur le wafer.

- Possibilité de réaliser des matrices de ces composants pour des applications d'interconnexions parallèles et de multiplexage en longueur d'onde.

II.5 Applications de VCSEL

Les atouts nombreux et uniques que nous venons de présenter expliquent le nombre croissant des applications qui utilisent les VCSELS dans des domaines aussi variés, tableau II.1 démontre le domaine d'application des VCSEL et leur systèmes photonique correspondants.

VCSELS : Domaines d'application	Systèmes photonique correspondants
Télécommunications optiques	Réseaux LAN, liens mobiles
Liens optiques	Liens cartes processeurs, transfert de données haut débit, stockage de l'information
Mémoires optiques	CD, DVD
Equipement optoélectronique	Imprimante, pointeur laser, outils mobiles
Traitement optique de l'information	Processeurs optiques, traitement parallèle
Détection optique	Détection de gaz, Détection fibrée, lecteurs de codes-barres, souris optiques
Ecrans	Matrices de sources lumineuses, TV par projection
Eclairage	Micro-illuminateurs à intensité ajustable
Instrumentation	Téléométrie, Horloge atomique
Systèmes automobiles	Contrôle et transfert des données, téléométrie laser

Tableau II. 1 Domaines d'application des VCSELS et systèmes photoniques correspondants [25]

II.6 Zone active

La zone active dans un VCSEL est la région du dispositif où les porteurs (électrons et trous) se recombinent pour émettre de la lumière. C'est l'élément central du fonctionnement du laser, et elle joue un rôle crucial dans la détermination des caractéristiques et des performances du VCSEL.

II.6.1 Puits quantiques

Les puits quantiques jouent un rôle crucial dans la zone active des VCSEL, en apportant plusieurs améliorations significatives aux performances du laser : [26] [27] [28]

Ils confinent les électrons et les trous dans une région très restreinte, augmentant ainsi la probabilité de recombinaison radiative et donc l'efficacité globale du VCSEL. Ce confinement spatial accru permet une meilleure conversion de l'énergie électrique en lumière émise.

- Ils réduisent le courant seuil nécessaire pour initier l'émission laser. Cela signifie que le VCSEL peut fonctionner à des courants plus faibles, ce qui réduit la consommation d'énergie et améliore la performance du laser en termes de rapidité et de fiabilité. En abaissant le seuil de courant, les puits quantiques permettent également une opération plus stable du laser.
- Ils permettent aussi de contrôler précisément la longueur d'onde de la lumière émise. Grâce à la personnalisation de la composition et de l'épaisseur des puits, il est possible d'adapter les VCSEL à des applications spécifiques, telles que les télécommunications ou les capteurs optiques. Ce contrôle précis contribue également à la stabilité de la longueur d'onde malgré les variations de température et de courant.
- En réduisant les pertes non radiatives, les puits quantiques augmentent encore l'efficacité du laser. Les matériaux de haute qualité utilisés dans les puits minimisent les défauts dans la zone active, améliorant ainsi la pureté et l'efficacité de l'émission lumineuse.
- les puits quantiques aident à maintenir les performances du VCSEL à des températures élevées, en réduisant les effets négatifs de la chaleur sur la recombinaison radiative. Bien que les puits quantiques améliorent l'efficacité, il est également crucial de concevoir la zone active pour une dissipation thermique efficace afin d'éviter la surchauffe et d'assurer une performance stable.

II.6.2 Fonctionnement de la Zone Active

Lorsque le courant électrique est injecté dans le VCSEL, les électrons sont excités dans la bande de conduction et les trous dans la bande de valence. Dans la zone active, ces porteurs se recombinent, émettant des photons (lumière) dans le processus. Cette lumière est ensuite amplifiée par la cavité résonante formée par les miroirs de Bragg distribués (DBR). [29]

II.6.3 Matériaux pour la zone active

La zone active d'un Laser à semi-conducteur est constitué de différents matériaux pour confiner les porteurs et les faire se recombiner dans une région à faible énergie de gap, appelés les puits quantiques. Parmi l'éventail de matériaux disponibles pour les puits et les barrières, seuls certains sont compatibles, c'est-à-dire en accord de maille ou faiblement contraints.

L'obtention de lasers performants à une longueur d'onde est donc tout d'abord liée au choix des matériaux et à la technique possible de croissance de couples puits quantiques/barrières.

Ci-joint on trouve la figure qui résume les longueurs d'onde disponible pour la VCSEL.

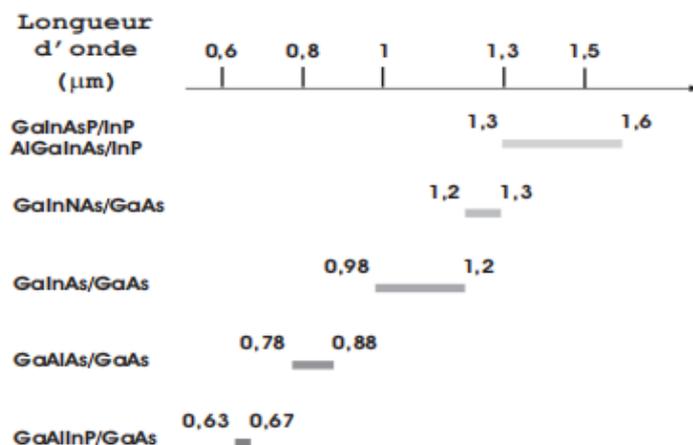


Figure II. 3 Longueurs d'onde disponibles pour les VCSEL [29].

En faisant varier la proportion des composants des éléments ternaires, on modifie le gap d'énergie du constituant. On obtient ainsi pour chaque couple de matériaux, une bande de longueurs d'onde possibles. [30]

II.7 Miroirs de Bragg

II.7.1 Définition

Le miroir de Bragg mis au point par William Lawrence Bragg (lauréat du prix Nobel de physique en 1915), est défini comme une succession de surfaces planes transparentes d'indices de réfraction différents. Cela lui permet de réfléchir grâce à des phénomènes d'interférences constructives, 99,5 % de l'énergie incidente. La fabrication des VCSELs nécessite la réalisation des miroirs de Bragg performants pour que le seuil de la résonance soit atteint.

Par ailleurs, le principe de fonctionnement d'un miroir de Bragg, basé sur les interférences constructives et destructives induit, des phénomènes parasites tels que la pénétration de l'onde optique dans les couches qui le constituent.

Les miroirs ou réflecteurs de Bragg sont utilisés dans les VCSELs car ils sont les seuls permettant d'atteindre des pouvoirs réflecteurs (coefficient de réflexion) supérieurs à 99,5%, ces empilements de couches d'épaisseur quart d'onde ont la propriété d'atteindre des pouvoirs réflecteurs aussi élevés que 99,999%. Les couches constitutives sont en alternance, un matériau de fort indice de réfraction et un autre de faible indice.

Les composés III-V les plus développés sont GaAs et AlAs constituent actuellement les meilleurs miroirs de Bragg semi-conducteurs, et ont largement prouvé leurs potentialités dans les VCSELs.

Le plus gros avantage des miroirs composés de matériaux semi-conducteurs est de pouvoir assurer un bon transport électrique à travers la structure afin d'amener les porteurs jusqu'à la couche active du laser. [31][32]

II.7.2 Principe

Le principe du miroir de Bragg est basé sur la réalisation à une longueur d'onde donnée, permettant l'obtention des interférences constructives. Les points essentiels à connaître sur leurs fonctionnements :

- Une onde traversant un milieu d'épaisseur « d » et d'indice « n » subit un déphasage [32] :

$$\delta = 2\pi \cdot n \cdot \frac{d}{\lambda} \quad (\text{II .4})$$

Alors pour un déphasage $\varphi = \frac{\pi}{2}$, l'épaisseur de la couche est $d = \frac{\lambda}{4n}$

-Le passage d'une onde d'un milieu de faible indice n_L vers un milieu de haut indice n_H introduit un déphasage de π , tandis que l'inverse (l'autre sens de propagation) n'introduit pas de déphasage.

- Si l'épaisseur des couches est un multiple du quart de la longueur d'onde, toutes les ondes réfléchies sont en phase et les intensités peuvent s'additionner à chaque réflexion, comme illustre la figure II-4.

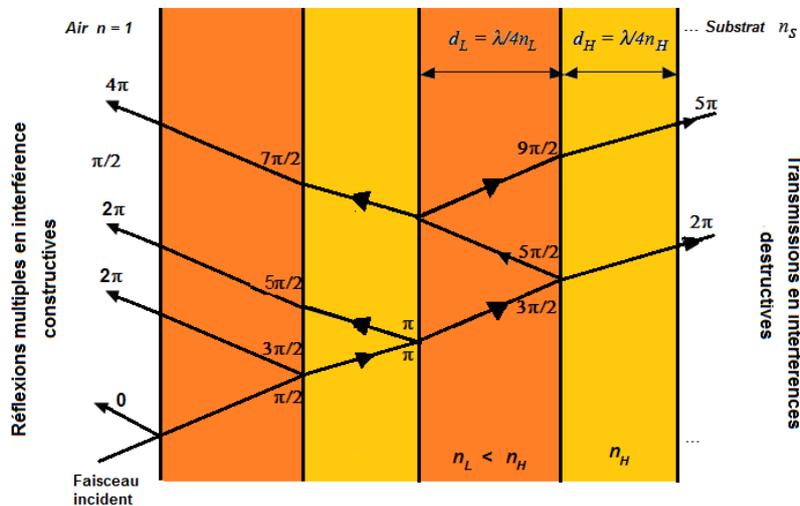


Figure II. 4 Interférences constructives dans un miroir de [32].

Alors pour les deux couches de haut et bas indice de réfraction, la longueur d'onde de résonance doit vérifier la relation suivante : [32]

$$n_H \cdot d_H = n_L \cdot d_L = \frac{\lambda}{4} \quad (\text{II .5})$$

L'influence de la partie imaginaire est négligé car les ondes sont strictement en phase grâce au choix d'épaisseur en quart d'onde qui engendre des interférences constructives en réflexion et destructives en transmission. A ces conditions le pouvoir réflecteur à une interface est

$$R = \frac{(n_H - n_L)^2}{(n_H + n_L)^2} \quad (\text{II .6})$$

Nous remarquons intuitivement que le pouvoir réflecteur de l'ensemble sera d'autant plus fort que le nombre de bicouche sera important et que l'écart d'indice entre n_H et n_L sera plus élevé.

La conception et l'optimisation des miroirs de Bragg nécessite la connaissance réaliste de la valeur absolue et de la dispersion des indices des alliages III-V, et ce jusqu'à des longueurs d'ondes proches de la longueur d'onde de coupure. [32]

II.7.3 Matériaux pour les miroirs de Bragg

L'optimisation des miroirs de Bragg est un point majeur, car les propriétés des miroirs déterminent l'onde qui propage dans la cavité mais également les résistivités électriques et thermiques. Les matériaux doivent permettre d'obtenir, pour la longueur d'onde laser considérée, une grande réflectivité et un déphasage en réflexion de 0 ou Π .

On cherche également des matériaux ayant une bonne conductivité thermique pour éviter une trop forte hausse de température de la zone active. En effet, une résistance électrique trop élevée conduira à une dissipation d'énergie inutile et à un échauffement de la zone active ; cette résistance thermique diminue l'émission en régime continu. Le tableau II. 2 donne un bref aperçu des principaux matériaux [33] :

Longueur d'onde	Matériaux des miroirs	Substrat
1.55 μ m	DBR sup : GaAs/AlAs, DBR inf : InP/InGaAsP	InP
1.55 μ m	Al ₁₅ Ga ₈₅ As ₅₈ Sb ₄₂ / AlAs ₄₆ Sb ₄₄	InP
1.3 μ m	DBR sup. Si/SiO ₂ , DBR inf : AlAs/GaAs	GaAs
1.3 μ m	DBR sup. Si/SiO ₂ , DBR inf : AlAs/GaAs	GaAs
850nm	Al ₂₀ Ga ₈₀ As/ Al ₉₀ Ga ₁₀ As	GaAs
700nm	Al ₄₀ Ga ₆₀ As/ Al ₉₆ Ga ₄ As	GaAs
680nm	Al ₅₀ Ga ₅₀ As/ AlAs	GaAs
484nm	Diélectriques, SiO ₂ /TiO ₂	GaAs gravé

Tableau II. 2 Principaux matériaux mise en oeuvre dans les VCSEL pour couvrir la bande spectrale visible et infrarouge.[33]

II.8 Confinement dans un VCSEL

II.8.1 Confinement Électrique

Le confinement électrique vise à restreindre les porteurs de charge (électrons et trous) dans la zone active du VCSEL, favorisant ainsi la recombinaison radiative et l'émission de photons, il est réalisé grâce aux puits quantiques et aux barrières de confinement :

- Les puits quantiques confinent spatialement les porteurs de charge dans des dimensions très réduites. Ce confinement empêche les porteurs de charge de diffuser trop loin, augmentant ainsi la probabilité de recombinaison radiative où les porteurs perdent de l'énergie sous forme de photons, assurant ainsi une efficacité lumineuse accrue du VCSEL.
- Les barrières de confinement sont des couches de matériaux semi-conducteurs avec un potentiel élevé qui empêchent les porteurs de charge de s'échapper de la zone active. Ces barrières jouent un rôle crucial en concentrant les porteurs de charge dans les puits

quantiques, facilitant ainsi la recombinaison radiative et réduisant les pertes non radiatives. Cela contribue à l'efficacité globale du VCSEL en augmentant le rendement de conversion de l'énergie électrique en lumière émise [34]. La figure suivante illustre la structure sans confinement des porteurs.

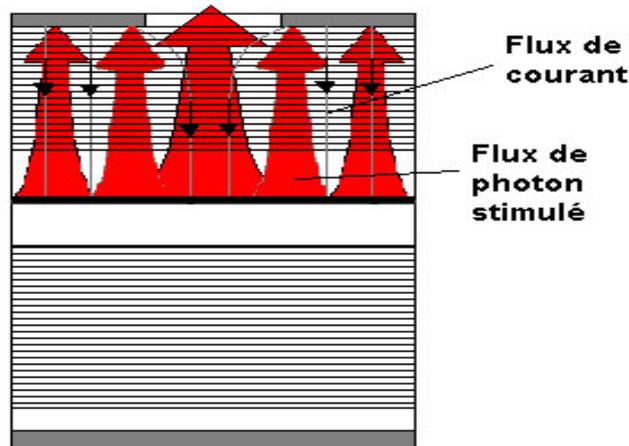


Figure II. 5 Structure sans confinement des porteurs[34].

II.8.2 Confinement optique

Le confinement optique vise à restreindre les photons dans une cavité résonante afin d'amplifier la lumière émise de manière cohérente, il est assuré par les miroirs de Bragg distribués :

- les miroirs permettent de créer une cavité optique résonante où les photons émis par recombinaison radiative sont réfléchis entre les miroirs à plusieurs reprises. Les couches de haute et basse réflectivité des DBR assurent une réflexion quasi-totale des photons dans la cavité, permettant ainsi l'amplification cohérente de la lumière et la génération du faisceau laser. Lorsque les photons sont réfléchis entre les miroirs, ils stimulent davantage de recombinaisons radiatives, augmentant l'intensité de la lumière jusqu'à ce que le seuil de l'émission laser soit atteint. Ce processus garantit une sortie de lumière laser stable et directionnelle, adaptée à une large gamme d'applications optoélectroniques avancées. [35]

II.9 VCSELS aux longueurs d'onde télécoms

La fabrication des VCSELS émettant à de grandes longueurs d'onde, telles que 1,3 μm et 1,55 μm , n'a pas progressé aussi rapidement que celle des diodes lasers à courtes longueurs d'onde (850 nm et 980 nm) en raison de diverses contraintes technologiques. En effet, les composés ternaires et quaternaires utilisés pour ces longueurs d'onde sont généralement fabriqués sur substrat de phosphure d'indium (InP). Cela introduit des limitations, notamment un faible contraste d'indice pour les miroirs de Bragg distribués (DBR) et une faible conductivité thermique, ce qui réduit la plage de température de fonctionnement. De plus, de nouveaux phénomènes physiques apparaissent en raison de la faible largeur de bande interdite, compliquant ainsi leur développement. [36]

II.9.1 Intérêt de la longueur d'onde 1300 nm

Le faible coût de fabrication des VCSELS et leurs performances ont su séduire les industriels, mais leur longueur d'onde d'émission trop faible est restée pendant plusieurs années un handicap pour une utilisation en télécommunication.

La difficulté de développer des composants émettant à 1,3 μm réside dans les matériaux utilisés pour les puits quantiques, qui déterminent la longueur d'onde des photons oscillant dans la cavité, ainsi que dans les miroirs de Bragg dont la sélectivité pourrait entraver la sortie de l'onde optique de la cavité.

Infineon a conçu, depuis octobre 2002, une structure de VCSELS émettant à 1300nm, une note descriptive a été rendue publique en mars 2003 apparue sur le site du fabricant. Comme l'indique la figure II-6; la zone active est à base de GaInNAs. [37]

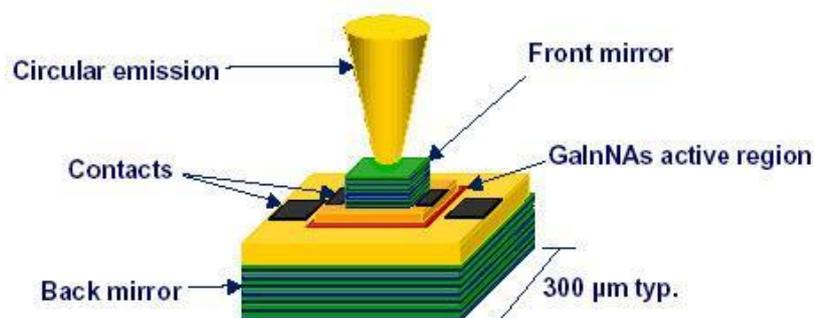


Figure II. 6 Structure des VCSELS émettant autour de 1300 nm [37].

Les VCSELS à 1,3 μm fabriqués à partir d'alliages déposés sur GaAs, destinés à émettre dans la plage spectrale de 780 nm à 1310 nm, ont réussi à optimiser le couplage entre gain et mode optique ainsi qu'à assurer un contrôle modal efficace grâce à l'introduction d'une fenêtre d'oxyde Al_xO_y . Cette fenêtre, dont l'épaisseur de quelques dizaines de nanomètres est définie latéralement par oxydation, permet un confinement à la fois optique et électrique. L'indice plus faible de l'oxyde favorise un fort guidage par l'indice au centre de la cavité, tandis que ses propriétés isolantes assurent une injection efficace des porteurs. Cette approche technologique explique le succès de sa mise en œuvre dans pratiquement tous les processus de fabrication des VCSELS sur substrat GaAs.

II.9.2 Intérêt de la longueur d'onde 1500 nm

À la longueur d'onde de 1,55 μm , l'atténuation est minimale comme le montre la figure II-7. Avec l'augmentation de l'utilisation des fibres optiques, il devient essentiel de trouver des sources capables de transmettre des données à des débits de plus en plus élevés sur ce support. Les lasers à semi-conducteurs, en raison de leur compacité et de leur faible coût de production en grande série, sont des candidats privilégiés pour ces applications. La longueur d'onde de 1,55 μm est particulièrement avantageuse car elle assure les pertes de transmission les plus faibles.

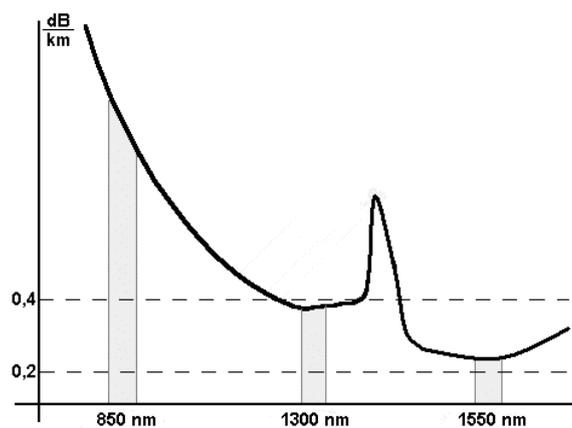


Figure II. 7 Atténuation dans une fibre optique en fonction de la longueur [38].

Pour les VCSELS à 1,55 μm , la difficulté d'obtenir des matériaux oxydables dans la famille des alliages ternaires et quaternaires (InAsP-InGaAsP ou InAlAs-AlGaInAs) qui peuvent être

déposés sur InP ainsi que les fortes pertes optiques par absorption dans les couches d'InP, posent le problème du confinement électrique dans cette classe de dispositifs.

Les deux questions ont été résolues par l'introduction des jonctions tunnels. Une jonction tunnel n'est rien d'autre qu'une diode p-n fortement dopée et polarisée en inverse. Tout d'abord, la structure permet la conversion des électrons injectés par le contact p en des trous qui sont ramenés au cœur de l'hétérostructure active montré sur la figure suivante

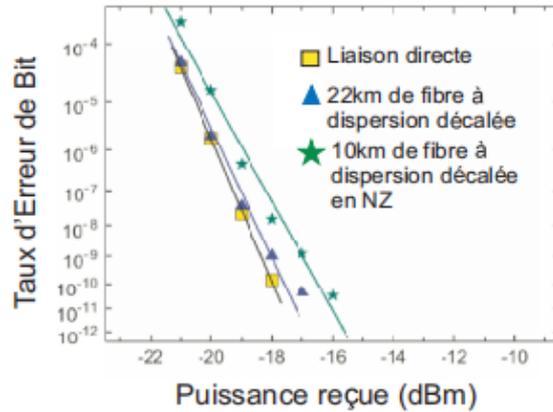


Figure II. 8 Performances d'une transmission utilisant un VCSEL à 1,55 μ m [38].

Afin de maximiser le couplage entre l'amplification optique et le mode optique de la cavité, la jonction tunnel doit être confinée latéralement pour pouvoir acheminer les porteurs provenant de contacts vers le cœur du milieu à gain. Deux approches ont été visées: les jonctions tunnels gravées latéralement, et les jonctions tunnels confinées par implantation de protons [38].

Ce tableau montre les différentes longueurs d'ondes émises en fonction des alliages III-V [39]:

Alliage	λ (nm)	Applications
AlGaAs / GaAs	680 → 890	Datacom (850nm) Diode de pompe pour lasers solides, Lecteurs, graveurs CD
InGaAs / GaAs	950 → 1100	Diode de pompe pour amplificateurs à fibre dopée Erbium
InGaAs / InP	1000 → 1700	Télécom (1330nm, 1550nm)
AlGaInP/ GaAs	600 → 700	Applications visibles Fibres polymères courtes distances

Tableau II. 3 Longueurs d'ondes émises en fonction des alliages III-V [39].

Pour finir une comparaison entre les deux longueurs d'onde est résumée dans le tableau suivant [39] :

Caractéristique	VCSEL à 1330 nm	VCSEL à 1550 nm
Dispersion Chromatique	Faible, avantage pour les distances intermédiaires	Modérée, nécessitant une gestion pour les très longues distances
Atténuation dans la Fibre	Modérée	Très faible
Distance de Transmission	Moyenne (jusqu'à 40 km sans amplification)	Longue (plusieurs centaines de km avec amplification)
Applications Typiques	Réseaux métropolitains, interconnexions de centres de données	Réseaux de transport à longue distance, réseaux dorsaux
Efficacité Énergétique	Élevée, faible courant de seuil	Élevée, adaptée aux longues distances
Stabilité Température	Bonne, stable sur une large plage de températures	Bonne, avec des techniques de gestion thermique adaptées

Tableau II. 4 Comparaison entre les deux longueurs d'onde [39].

II.10 Impact de la Température sur les VCSELs

Les performances des VCSELs sont fortement influencées par la température, elle affecte des paramètres clés tels que le courant de seuil et le gain optique, souvent entraînant une dégradation des performances à des températures élevées.

II.10.1 Gain

Le gain optique dans les VCSELS est un paramètre critique qui détermine l'efficacité de l'amplification de la lumière dans la cavité laser. À mesure que la température augmente, le gain optique des matériaux semi-conducteurs diminue. Cela est dû à l'augmentation des recombinaisons non radiatives et à la réduction de l'efficacité quantique interne.

Le gain dans un VCSEL peut être exprimé en fonction de la température par une relation empirique qui intègre plusieurs facteurs thermiques. Une forme simplifiée de cette relation est donnée par : [40]

$$g(T) = g_0 e^{\left(-\frac{T}{T_0}\right)} \quad (\text{II .7})$$

- g_0 est le gain initial à une température de référence.
- T_0 est une constante caractéristique de la température, représentant la sensibilité thermique du gain.

II.10.2 Courant de seuil

La température affecte le courant de seuil (J_{th}) des VCSELS, qui est la quantité minimale de courant nécessaire pour déclencher l'émission laser. À des températures plus élevées, le courant de seuil augmente. Cela est dû à la réduction de l'efficacité quantique interne et à l'augmentation des pertes non radiatives à des températures élevées.

Le courant seuil varie, avec la température, suivant la loi : [41]

$$J_{th} = J_{th0} e^{\frac{T}{T_0}} \quad (\text{II .8})$$

- T_0 est la température caractéristique de la vcsel. Sa valeur varie de 120 à 230 K Pour les diodes laser à base de GaAlAs et de 60 à 80 K pour les lasers à base de GaInAsP.
- J_{th} est le courant de seuil .

II.11 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons exploré en détail les aspects clés des VCSELS, y compris leur historique, principe de fonctionnement, avantages, applications, et composants essentiels tels que la zone active et les miroirs de Bragg. Nous avons également discuté de l'impact de la température sur leur performance.

Le prochain chapitre se concentrera sur la modélisation et la simulation des effets thermiques sur les VCSELS à l'aide du logiciel Silvaco-Atlas.

Chapitre III

Simulation de la VCSEL sous stress thermique et discussion de ses performances

III.1 Introduction

Comme tout composant électronique, la VCSEL est fortement influencée par la température, un paramètre crucial pour ses performances. Dans ce contexte, le but de ce Chapitre III est de simuler une VCSEL sous stress thermique, en mettant en évidence l'effet de la température sur ses performances électriques et optiques.

Notre démarche s'articule autour de plusieurs étapes clés. Tout d'abord, nous présenterons le logiciel Silvaco utilisé pour nos simulations, en soulignant son intérêt pour notre étude. Ensuite, nous détaillerons le modèle de notre VCSEL dans Silvaco Atlas. Une fois ce modèle développé et validé, nous soumettrons la VCSEL à des conditions de stress thermique afin d'évaluer ses performances et sa capacité à résister à ce stress et pourquoi pas suggérer des pistes d'amélioration de ses performances.

III.2 Présentation du simulateur Silvaco

Silicon Valley Corporation appelée SILVACO 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. 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 Fab pour automatiser la simulation de fabrication des Wafers. Dans notre étude, les simulations sont effectuées par les deux outils ATHENA, et ATLAS [42].

III.3 Outils de simulation de Silvaco

La Figure III-1 illustre les outils de simulation du logiciel SILVACO.

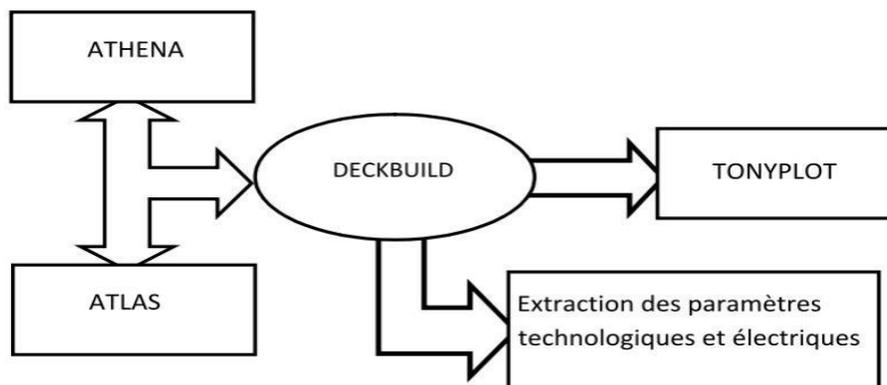


Figure III. 1 Schéma représentant du logiciel SILVACO [42].

III.3.1 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. Là aussi, 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. Le programme de simulation (défini comme entrée) des différentes étapes technologiques et les phénomènes physiques, s'établit avec le module DECKBUILD de TCAD-SILVACO, puis la visualisation de la structure de sortie s'effectue avec le module TONYPLOT.

III.3.2 Atlas

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

- une partie 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.

III.3.3 Structure d'entrées et de sortie Atlas

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>

Quelques points à respecter sur la structure appropriée des déclarations sont énumérés ci-dessous:

- La déclaration doit venir en premier, mais après cela, l'ordre des paramètres dans une instruction n'est pas important.
- Il est seulement nécessaire d'utiliser suffisamment de lettres de n'importe quel paramètre pour le distinguer de tout autre paramètre sur la même déclaration. Ainsi, le paramètre Concentration peut-être raccourci à Conc. Cependant, le paramètre Région ne peut pas être réduit à R car il y'a également le paramètre RATIO associé à la déclaration du dopage.
- Toute ligne commençant par # est ignorée. Ces lignes sont utilisées comme des commentaires.
- ATLAS peut lire jusqu'à 256 caractères sur une ligne. Cependant, il est préférable de répartir les longues déclarations d'entrée sur plusieurs lignes pour rendre le fichier d'entrée plus lisible. Le caractère \ à la fin d'une ligne indique la continuation.

L'ordre dans lequel les déclarations se produisent dans un fichier d'entrée d'ATLAS est important. Il y a cinq groupes de déclarations, et ceux-ci doivent se produire dans l'ordre correct. Ces groupes sont indiqués dans La figure III-2.

Chaque fichier d'entrée doit contenir ces cinq groupes en ordre. Sinon, cela entraînera généralement un message d'erreur et la fin du programme, mais il pourrait également conduire à un mauvais fonctionnement du programme. Par exemple, les paramètres matériels ou modèles figurant dans le mauvais ordre ne peuvent pas être utilisés dans les calculs. L'ordre des déclarations dans la définition du maillage, la définition structurelle, et les groupes de la solution est également important [43].

Group		Statements
1. Structure specification	_____	MESH REGION ELECTRODE DOPING
2. Material models specification	_____	MATERIAL MODELS CONTACT INTERFACE
3. Numerical method selection	_____	METHOD
4. Solution specification	_____	LOG SOLVE LOAD SAVE
5. Results analysis	_____	EXTRACT TONYPLOT

Figure III. 2 Ordre des groupes de déclaration [43].

- **DeckBuild**

Le DeckBuild est l'environnement où est défini le programme de simulation à travers des commandes spécifiques. De multiples simulateurs considérés comme des entrées peuvent être utilisés avec tel que : ATHENA, ATLAS, SSUPREM3.

- **TonyPlot**

TonyPlot est un outil de traitement graphique utilisé avec tous les simulateurs SILVACO et fait partie intégrante des VWF, Il donne des possibilités complètes pour la visualisation et l'analyse des caractéristiques de sortie (structure du composant électronique, profil du dopage, et caractéristiques électriques). TONYPLOT peut fonctionner en autonome ou avec d'autres outils interactifs de VWF, comme DECKBUILD, VWF ou SPDB (voir le figure III-4) [44].

III.4 Description de la VCSEL

La VCSEL se compose d'une cavité formée par deux miroirs réfléchissants dans la direction verticale composés d'empilements de basses et hautes réflexions alternées. Les réflecteurs de Bragg sont les structures les plus réfléchissantes, ses couches doivent d'une épaisseur d'un quart d'onde.

III.5 Simulation et étude des performances de la VCSEL avec le SILVACO ATLAS

III.5.1 Validation du modèle développé

Avant d'aboutir à notre objectif visé dans ce mémoire qui est la simulation d'une VCSEL sous un stress thermique par l'évaluation de l'effet de la température sur ses caractéristiques électriques et optique, notre approche repose en premier lieu sur la validation du modèle développé et implantée dans le logiciel Silvaco Atlas. Par la suite une série de résultats de simulation de la diode VCSEL exposée à une température de 300°K sera présentée tels que : Calcul des caractéristiques électriques et optiques du laser VCSEL, afin d'analyser son comportement électrique et optique et évaluer ainsi ses performances :

- Caractéristiques des diodes DC IV
- Puissance lumineuse versus polarisation électrique
- Gain optique versus polarisation électrique
- Intensité lumineuse répartie sur la structure
- Température de l'appareil local dans les fichiers de structure ou Température maximale de l'appareil par rapport à la polarisation électrique dans les fichiers journaux

La Figure III-3 illustre la structure VCSEL étudiée dont la région active se compose de six 5,5 nm d'épaisseur $\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}_{0.82}\text{P}_{0.18}$ puits quantiques et 8 nm d'épaisseur $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{As}_{0.82}\text{P}_{0.18}$ barrières. Les MQW sont intégrés dans des couches d'espacement InP qui ont été prolongé par de fines couches de GaAs au-dessus de chaque miroir pour augmenter la longueur d'onde d'émission.

Les miroirs DBR utilisés dont la direction verticale sont constitués d'une alternance de couches à indice de réfraction élevé et faible de GaAs/ $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ formant le miroir supérieure de type p à 30 périodes DBR alors que le miroir DBR inférieur de type n est formé de 28 périodes de couches GaAs/AlAs alternées.

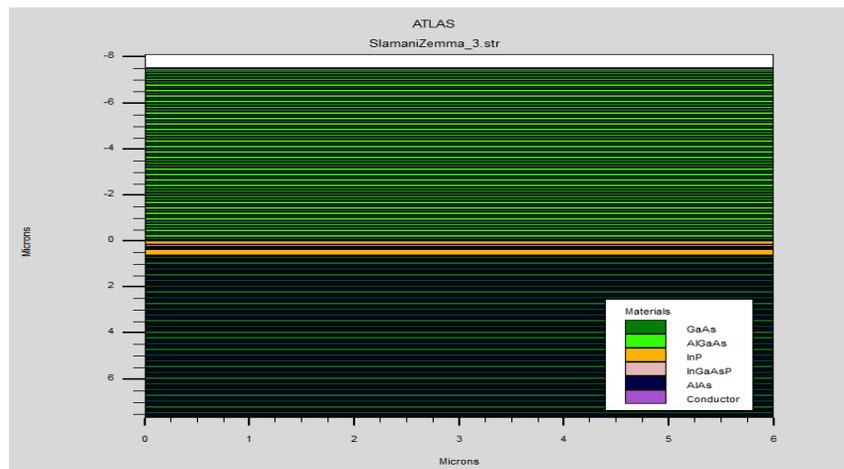


Figure III. 3 Structure de la VCSEL étudiée

Un Zoom sur la structure VCSEL étudiée est appliqué sur le miroir supérieur, sur la région active illustrant MQW et le miroir inférieur (Figure III-4).

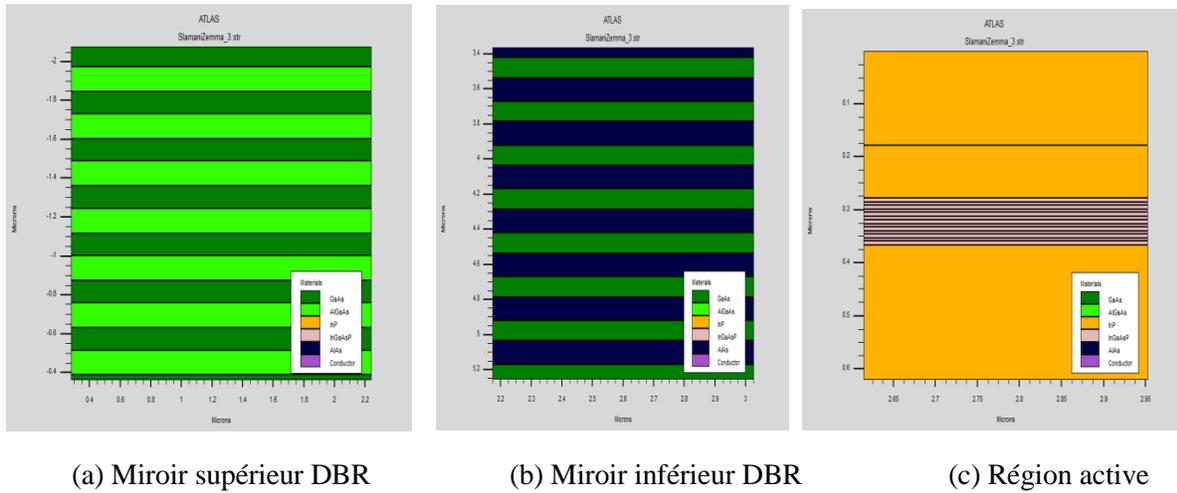


Figure III. 4: Zoom sur la structure VCSEL

De plus, un choix judicieux du maillage est appliqué dans tous nos simulation : un maillage cylindrique raffiné dans la zone active et en particulier à la jonction p-n pour assurer une bonne précision des résultats obtenus. En revanche, un maillage moins dense dans les zones telles que miroirs de Bragg supérieures et inférieures. Ce choix nous permet de bénéficier d'une réduction du temps d'exécution du programme, d'assurer la précision tout en optimisant l'efficacité computationnelle et la résolution du problème de convergence (Voir Figure III-5).

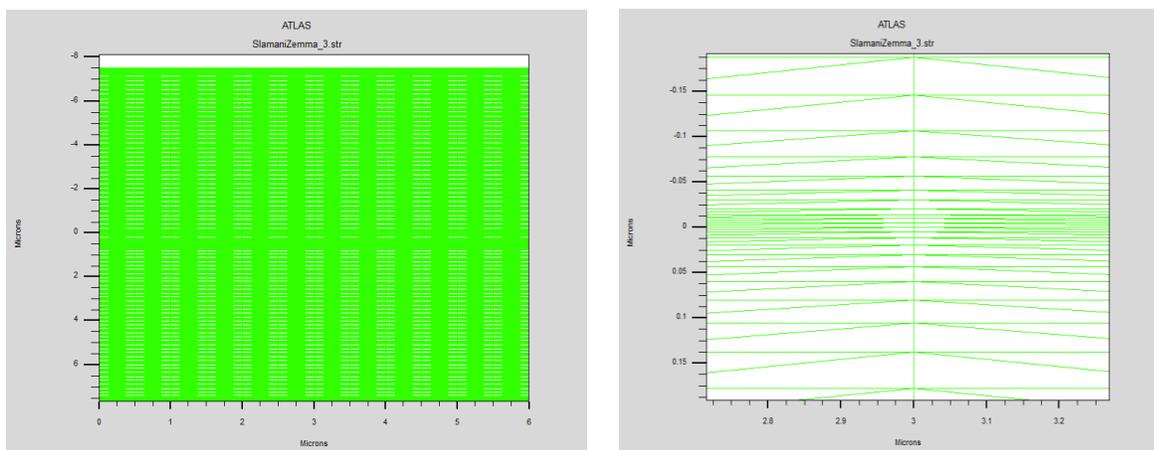


Figure III. 5 (a) Maillage de la VCSEL, (b) Zoom du maillage raffiné de la VCSEL

III.5.2 Résultats de Simulation d'une VCSEL

Dans cette simulation, nous allons d'une part valider le modèle développé et d'autre part présenter les caractéristiques électriques et optiques d'une VCSEL exposée à une température ambiante de 300°K.

Une série de résultats de simulation est présentée pour notre VCSEL étudiée dont l'une est obtenue à partir des fichiers.str et d'autre à partir des fichier.log.

La Figure III-6 représente les bandes de conduction BC et de valence BV ainsi que la figure III-7 montre le potentiel obtenu en produisant un cutline vertical le long de la structure afin de suivre l'évolution et le déplacement des porteurs au sein de notre VCSEL

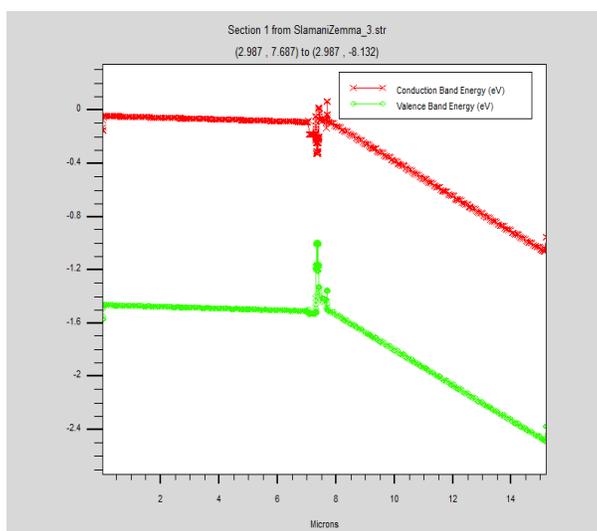


Figure III. 6 Energie pour T=300°K

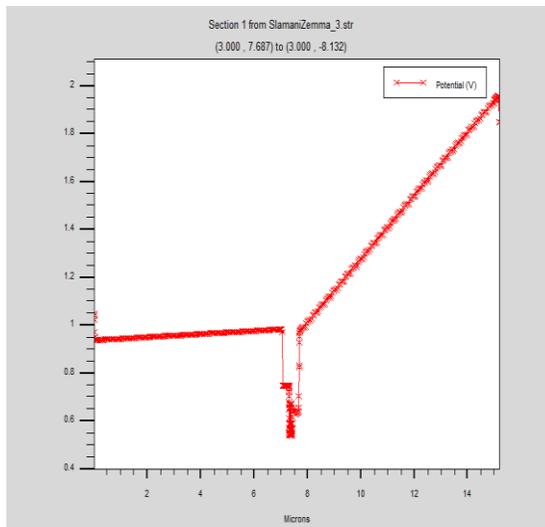


Figure III. 7 Potentiel T=300K

La bande interdite énergétique pour le puits quantique et le matériau barrière est de 0,74 eV et 1,14 eV respectivement

La Figure III-8 illustre la variation du courant en fonction de la tension pour une structure VCSEL exposée à une température de 300 K.

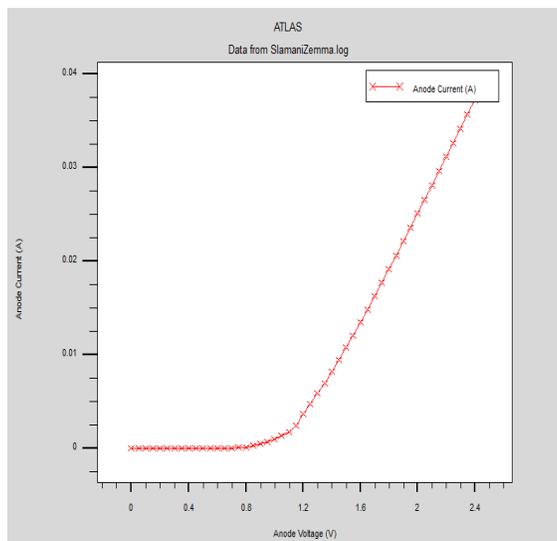


Figure III. 8 Caractéristique I-V

La figure III-9 illustre la densité de la conduction de courant à 300 K.

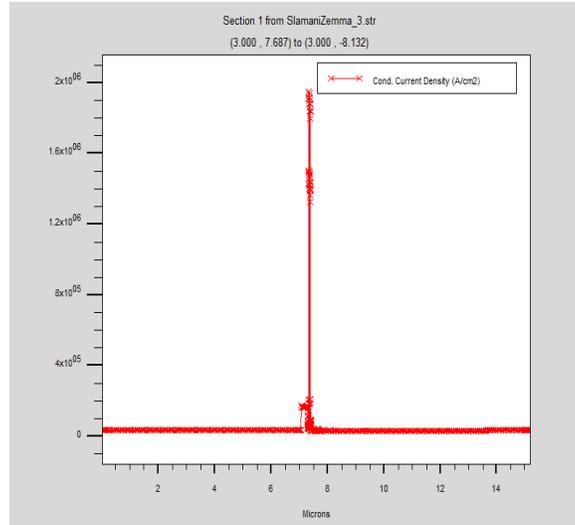


Figure III. 9 Densité du courant de conduction

D'après les caractéristiques obtenues, la diode laser commence à fonctionner à partir d'une tension seuil d'environ 0,8 V, qui vérifie la relation décrivant son fonctionnement représenté dans la littérature par l'équation :

$$V = V_{\text{seuil}} + R_S * I$$

Où V_{seuil} : est la tension de seuil (équivalent à $\sim 0,8$ V),

R_S : désigne la résistance série différentielle.

En outre, la densité du courant de conduction atteint une valeur maximale de 2×10^6 A/cm² dans la région active, ce qui favorise un taux élevé de génération de porteurs.

La Figure III-10 représente la variation de la puissance optique en fonction de la tension appliquée au dispositif.

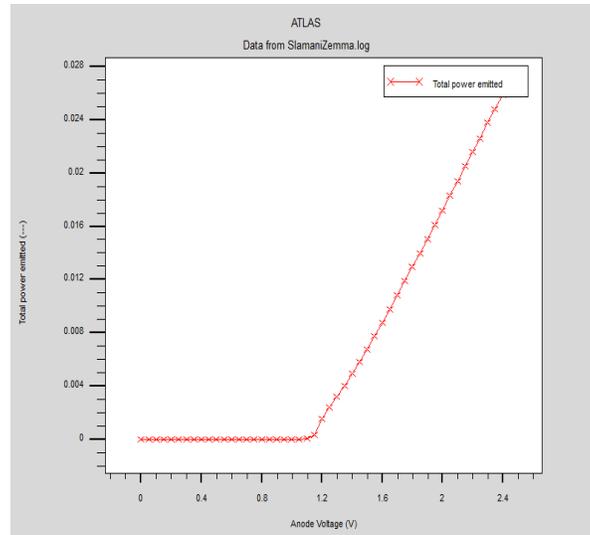


Figure III. 10 Caractéristique P-V à T=300°K

La Figure III-11 représente l'intensité lumineuse a T=300K

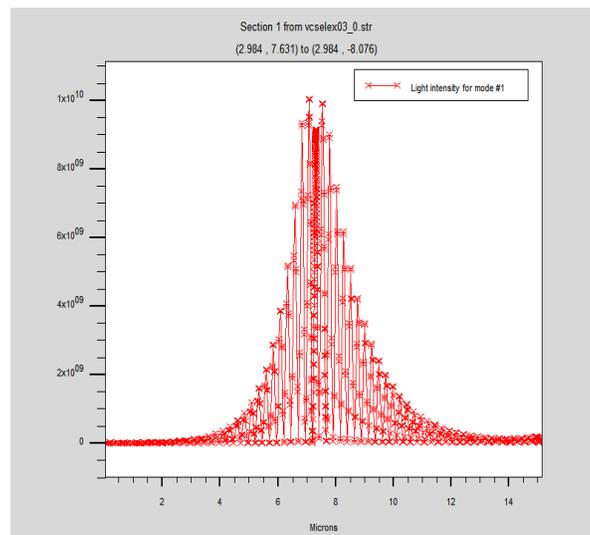


Figure III. 11 Intensité lumineuse à T=300°K

L'émission de lumière commence à partir d'une tension d'environ 0,8 V. L'augmentation de la puissance est le résultat de l'effet laser, qui se manifeste par la recombinaison d'une grande densité de porteurs de charge dans la zone active. En dessous de cette tension de seuil, aucune émission laser n'est observée.

De plus, nous constatons que l'intensité lumineuse est particulièrement accentuée au centre de la région active, atteignant une valeur d'environ $8,7 \times 10^9$.

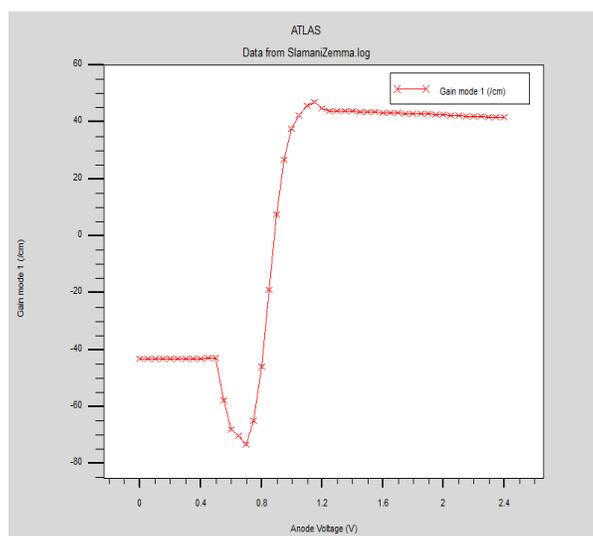


Figure III. 12 Variation du Gain

La Figure III.12 représente la variation du gain en fonction de la tension. Nous observons qu'aux valeurs de tension inférieures à 0.8V, le gain est négatif ce qui traduit l'absence d'une émission laser. Par contre aux valeurs de tension supérieures à 0.8V le gain est positif ce qui favorise le début d'une émission laser et a une certaine valeur de tension supérieure (1.1V), le gain se sature.

Ces régimes d'évolution illustrent le mécanisme du gain dans la cavité de la manière suivante :

1. La stabilité du gain est due à la présence simultanée des phénomènes d'absorption et d'émission spontanée, se produisant avec la même probabilité.
2. La chute du gain à des valeurs négatives est due aux pertes internes de la cavité au début de la polarisation, c'est-à-dire que le phénomène d'absorption prédomine sur celui de l'émission spontanée
3. La croissance rapide du gain s'explique par la réaction en chaîne induite par le phénomène de l'émission stimulée.
4. le gain atteint son seuil de saturation à la valeur de tension de seuil. À cette tension maximale, la production d'émission stimulée compense les pertes de la cavité. En d'autres termes, à ce point, tous les électrons ont rejoint l'état fondamental, ce qui explique l'observation de la stabilité du gain.

Figure III-13 illustre la variation de puissance totale émise en fonction de longueur d'onde.

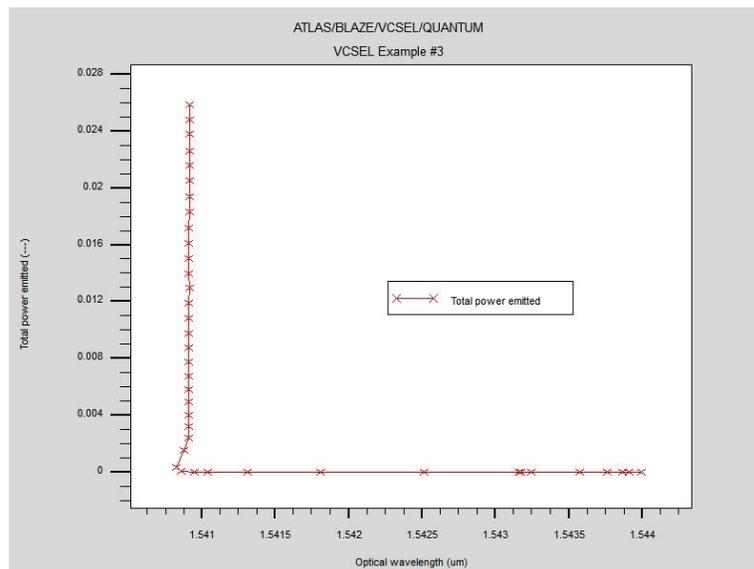


Figure III. 13 la puissance en fonction de lambda

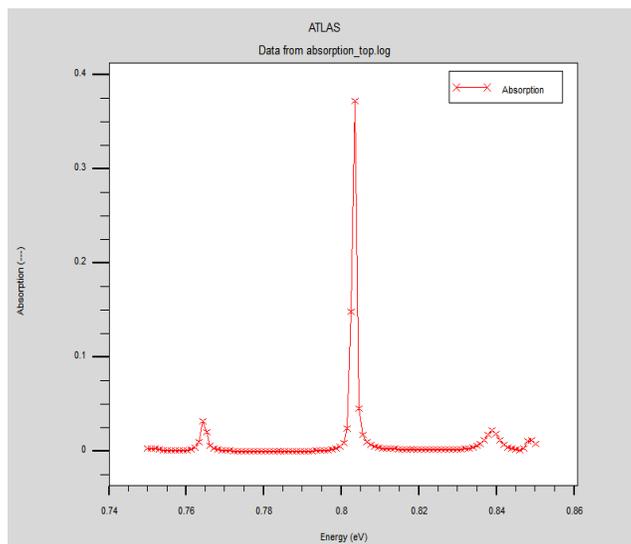


Figure III. 14 Coefficient d'absorption

D'après la Figure III-14 nous constatons que l'absorption est particulièrement élevée pour une plage d'énergie photonique variant entre 0,804 eV et 0,806 eV, ce qui suggère une utilisation efficace d'une grande partie de l'énergie produite.

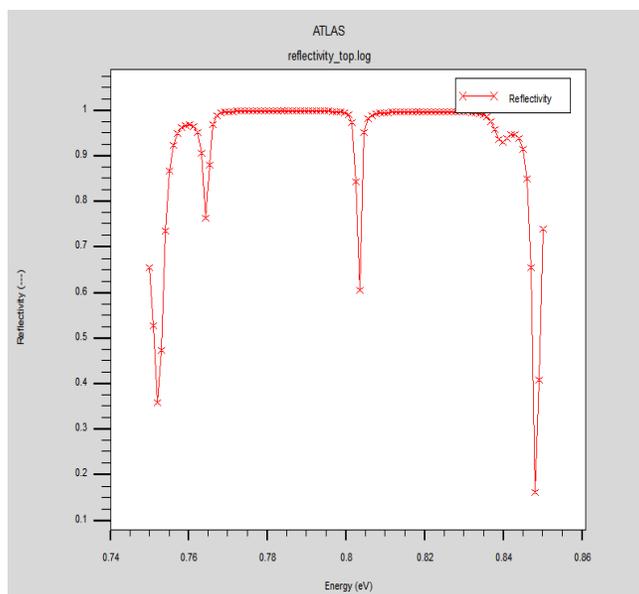


Figure III. 15 Coefficient de réflectivité

En revanche, en examinant la Figure III-15 nous remarquons que la réflectivité pour une énergie photonique de 0,805 eV atteint seulement 0,68%

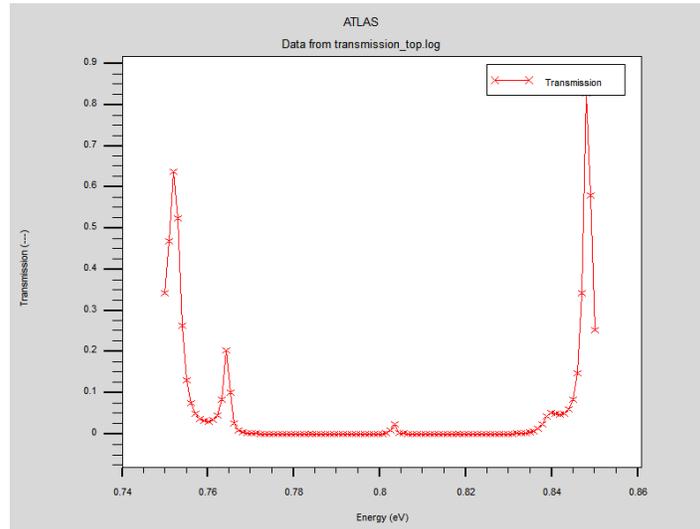


Figure III. 16 Coefficient de transmission T=300°K

D'après la Figure III-16 la valeur de la transmission correspondant à une énergie photonique de 0,805 eV est de 0,025, soit 2,5%.

III.5.3 Résultats de Simulation d'une VCSEL sous un stress thermique

Dans cette partie de notre étude, nous allons analyser l'impact de la variation de la température sur les performances d'un VCSEL. Pour cela, nous utilisons une méthodologie qui consiste à exposer notre VCSEL à des températures basses ($T < 300^{\circ}\text{K}$) et élevées ($T > 300^{\circ}\text{K}$), puis à analyser l'effet de cette variation sur ses caractéristiques électriques et optiques. Cette approche nous permettra d'améliorer la conception et l'optimisation des VCSEL pour des applications spécifiques telles que la communication optique ou les capteurs optiques

III.5.4 Résultats de Simulation d'une VCSEL sous basse température

Nous allons étudier et évaluer dans cette partie l'impact de l'exposition de notre VCSEL à des basses températures, de 150°K à 290°K, sur ses performances.

a) Densité de conduction de courant

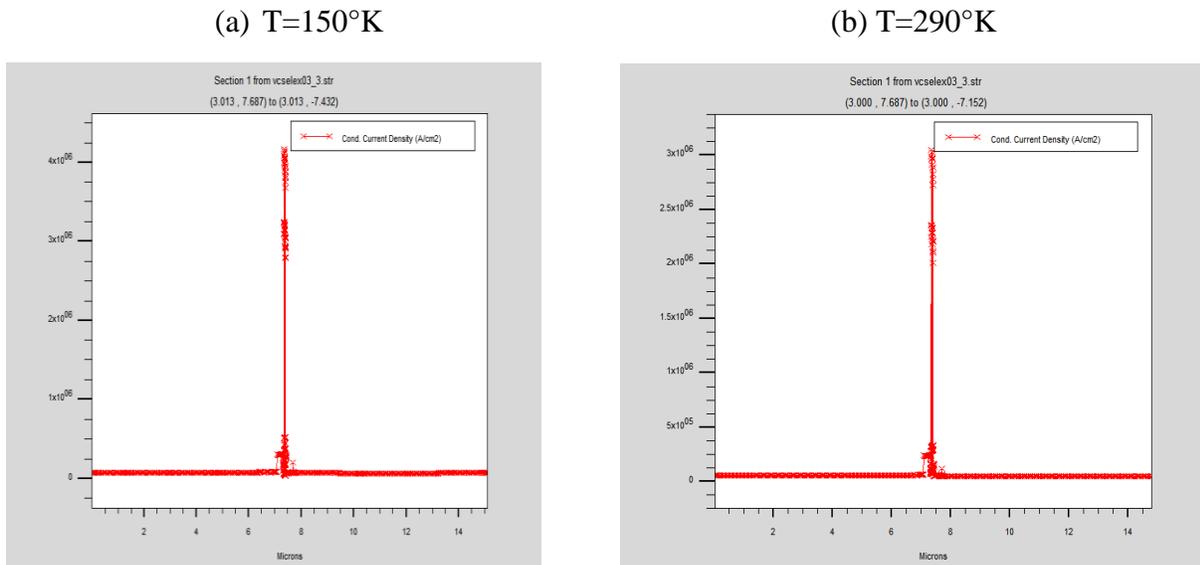


Figure III. 17 Densité de conduction de courant sous basse température

À T=150°K (a)

- (a) La densité de courant de conduction atteint une valeur de pointe d'environ $4,25 \times 10^6$ A/cm² au centre de la région active.
- (b) En dehors de cette région centrale, la densité de courant est négligeable, se situant autour de 0 A/cm².

À $T=290^{\circ}\text{K}$ (b)

(c) La densité de courant de conduction atteint une valeur de pointe légèrement inférieure, autour de $3,15 \times 10^6$ A/cm² au centre de la région active.

(d) Comme pour $T=150^{\circ}\text{K}$, en dehors de la région centrale, la densité de courant est également négligeable, se situant autour de 0 A/cm².

b) Bande de valence et bande de conduction

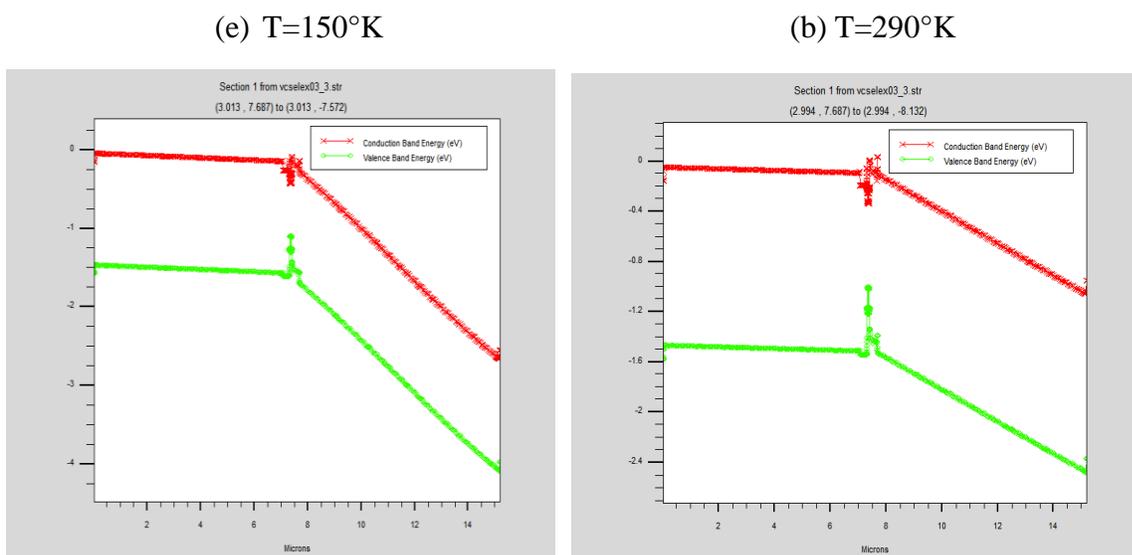


Figure III. 18 Energie sous basse température

Température de 150°K (a)

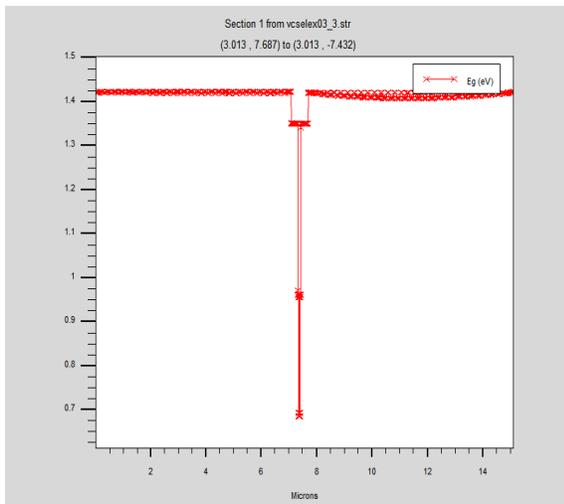
- **Énergie de bande de conduction (rouge)** : La courbe commence à environ 0 eV, diminue brusquement vers environ -0,8 eV aux environs de 7 microns, puis continue à descendre jusqu'à environ -2,5 eV aux environs de 14 microns.
- **Énergie de bande de valence (vert)** : La courbe commence à environ -1.5 eV, baisse légèrement aux alentours de 7 microns, puis continue à descendre graduellement pour atteindre environ -4 eV à 14 microns.

Température de 290°K (b)

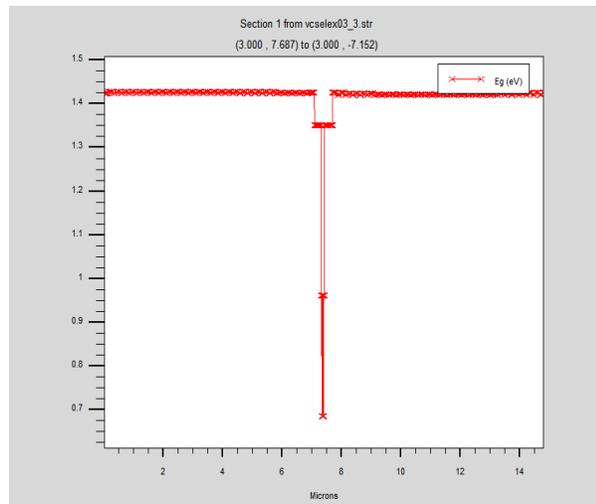
- **Énergie de bande de conduction (rouge)** : La courbe commence à environ 0 eV, diminue brusquement à environ -0,4 eV autour de 4 microns, puis continue à descendre jusqu'à environ -1 eV à 14 microns.
- **Énergie de bande de valence (vert)** : La courbe commence à environ -1.5 eV, baisse légèrement autour de 4 microns, puis continue à descendre graduellement pour atteindre environ -2,5 eV à 14 microns.

c) Énergie du gap

(a) T=150°K



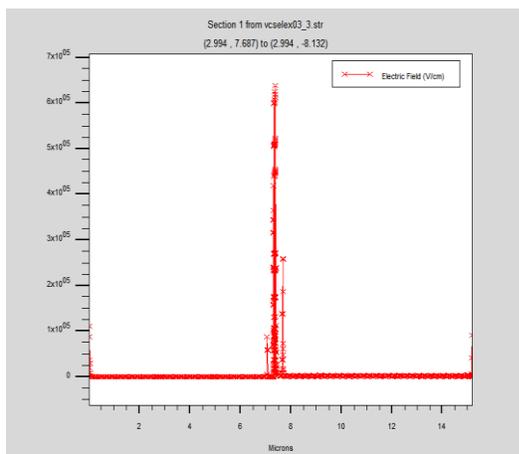
(b) T=290°K

**Figure III. 19** Energie du gap sous basse température

Les graphiques montrent que l'énergie du gap est globalement constante à environ 1,4 eV pour les deux températures.

d) Champ électrique :

(a) $T=150^{\circ}\text{K}$



(b) $T=290^{\circ}\text{K}$

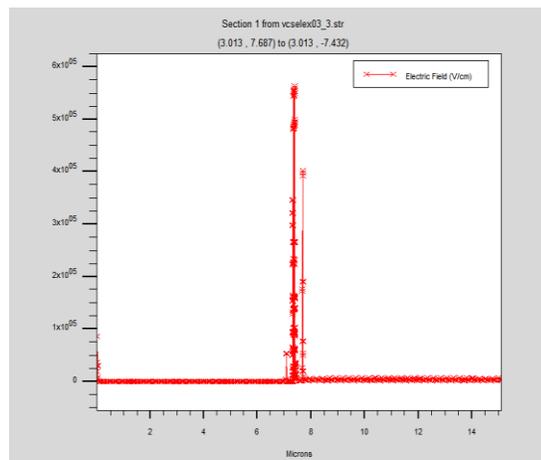


Figure III. 20 Champ électrique sous basse température

En analysant l'intensité maximale du champ électrique, on constate une légère différence entre les deux températures. À 150°K , l'intensité atteint environ 6.5×10^5 V/m, tandis qu'à 290°K , elle est légèrement inférieure, atteignant environ $5,5 \times 10^5$ V/m. Cela suggère que l'intensité maximale du champ électrique est légèrement plus élevée à des températures plus basses.

e) Température de mailles

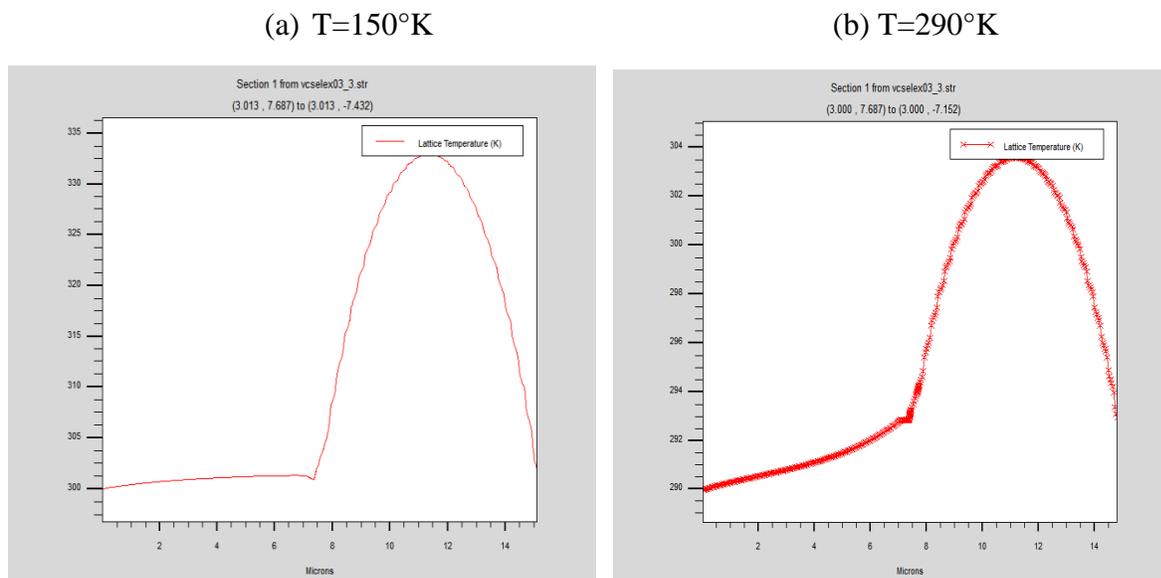


Figure III. 21 Température de maille sous basse température

À 150°K , la courbe montre une augmentation progressive de la température de maille jusqu'à environ 10 microns, où elle atteint un pic d'environ 333K. Ensuite, la température de maille diminue progressivement jusqu'à environ 14 microns, où elle revient à une valeur proche de la température initiale.

À 290°K , la courbe montre une tendance similaire. La température de maille augmente progressivement jusqu'à environ 10 microns, atteignant un pic légèrement inférieur à celui observé à 150°K , environ 303K. Ensuite, la température de maille diminue progressivement jusqu'à environ 14 microns, où elle se stabilise à une valeur proche de la température initiale.

Bien que la forme des courbes soit similaire à des températures initiales différentes, la température de maille maximale atteinte est légèrement plus élevée à une température initiale plus basse. Cela suggère que la température initiale influence la température de maille maximale atteinte dans le dispositif.

f) Intensité lumineuse

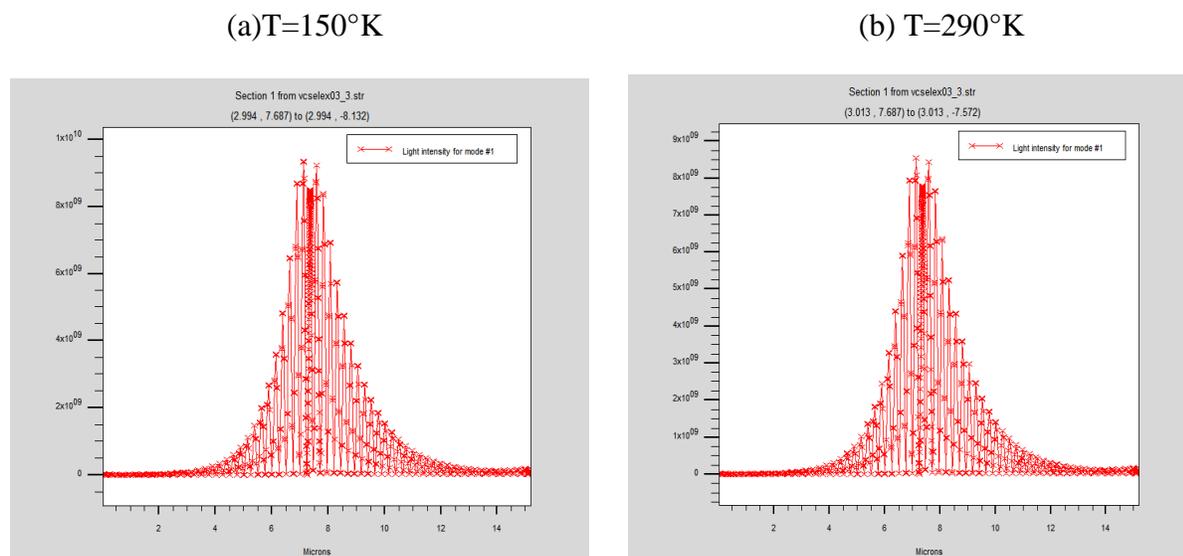
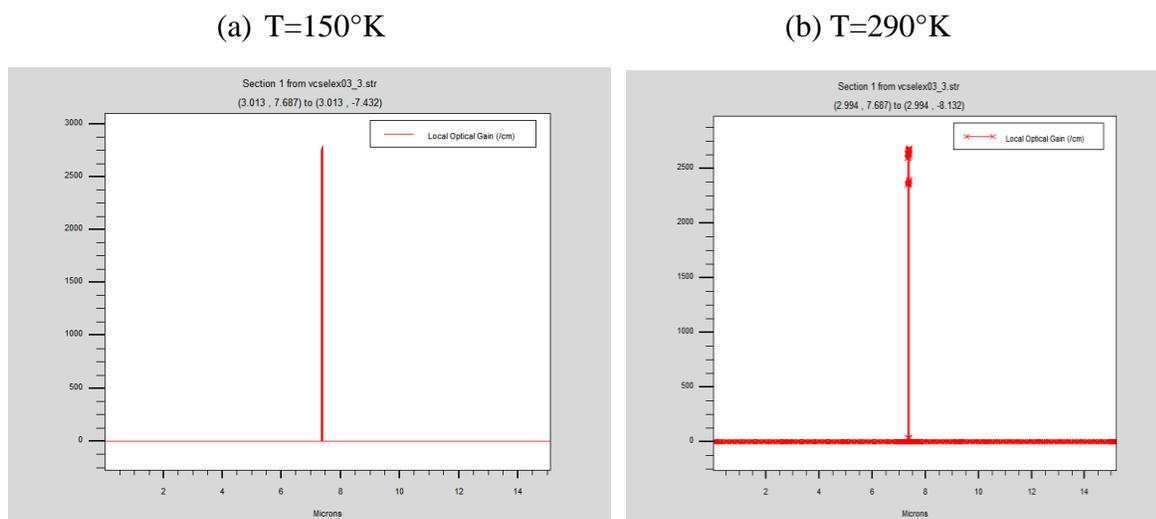


Figure III. 22 Intensité lumineuse sous basse température

À 150°K, l'intensité lumineuse atteint un pic d'environ $9,5 \times 10^9$ W/m² autour de 8 microns. La courbe montre une augmentation progressive de l'intensité lumineuse jusqu'à ce pic, suivie d'une diminution symétrique de l'intensité lumineuse après le pic. L'intensité lumineuse est concentrée autour du pic, avec des valeurs très faibles en dehors de cette zone centrale.

À 290°K, l'intensité lumineuse suit une tendance similaire. Le pic est légèrement inférieur, atteignant environ $8,5 \times 10^9$ W/m², également autour de 8 microns. La courbe montre une augmentation progressive de l'intensité lumineuse jusqu'au pic, suivie d'une diminution symétrique après le pic. Comme à 150°K, l'intensité lumineuse est concentrée autour du pic, avec des valeurs très faibles en dehors de cette zone centrale.

L'intensité maximale atteinte est légèrement plus élevée à 150°K qu'à 290°K. Cela indique que la température initiale plus basse permet une plus grande augmentation de l'intensité lumineuse avant d'atteindre le pic.

g) Gain optique**Figure III. 23** Gain optique sous basse température

(a) 150°K : Le gain optique est concentré en un pic très fin et élevé à 2750 autour de 8 microns.

(b) 290°K : Le gain optique présente également un pic élevé à 2650 autour de 8 microns, mais le pic est moins élevé et plus large comparé au graphique (a). De plus, il y a une légère fluctuation visible autour de la ligne de base dans l'ensemble du graphique.

Donc à 150°K , le pic de gain optique est beaucoup plus net et prononcé, ce qui indique une meilleure performance optique sous cette température. Comparer à 290°K , le pic est moins prononcé et plus diffus, suggérant une dégradation des performances optiques.

h) Potentiel

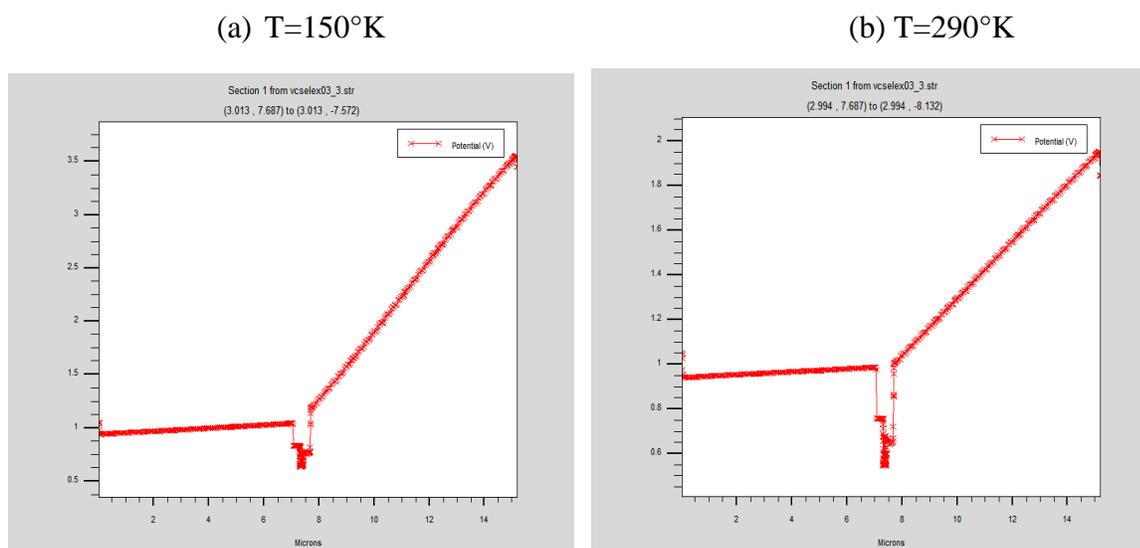


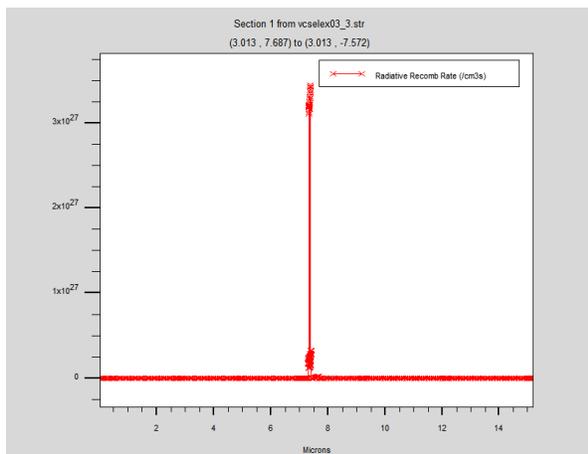
Figure III. 24 Potentiel sous basse température

- (a) 150°K : Le potentiel commence autour de 0.9 V, reste stable jusqu'à environ 6 microns, puis augmente fortement jusqu'à environ 3.5 V à 15 microns.
- (b) 290°K : Le potentiel commence autour de 0.8 V, reste stable jusqu'à environ 6 microns, puis augmente progressivement jusqu'à environ 1.95 V à 15 microns.

Donc à 150°K , le potentiel initial est plus élevé et l'augmentation du potentiel est plus abrupte et atteint une valeur plus élevée. Par contre à 290°K , le potentiel initial est plus bas et l'augmentation du potentiel est plus graduelle, atteignant une valeur maximale plus basse.

i) Taux de recombinaison

(a) T=150°K



(b) T=290°K

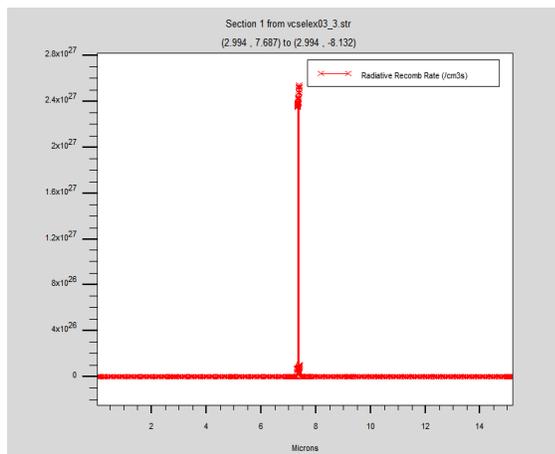


Figure III. 25 Taux de recombinaison radiative sous basse température

- 150°K : Le taux de recombinaison radiative présente un pic très élevé et étroit de 3.5×10^{27} autour de 8 microns.
- 290°K : Le taux de recombinaison radiative présente également un pic de 2.5×10^{27} autour de 8 microns, mais ce pic est légèrement plus large et moins élevé comparé au graphique (a).

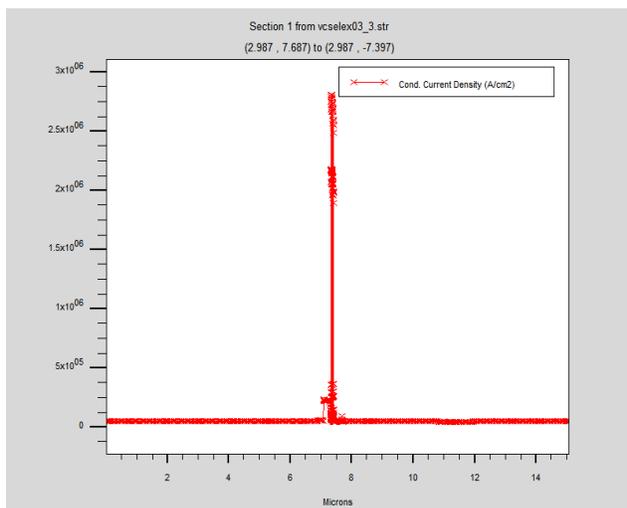
Donc à 150°K, le pic de recombinaison radiative est plus élevé et plus concentré, indiquant une recombinaison radiative plus efficace à cette température. Par contre à 290°K, bien que le pic de recombinaison radiative soit encore présent, il est moins élevé et plus large, ce qui suggère une recombinaison radiative légèrement moins efficace à température ambiante.

III.5.5 Résultats de Simulation d'une VCSEL sous haute température

Nous allons étudier et évaluer dans cette partie l'impact de l'exposition de notre VCSEL à des températures élevées, à 305°K et 310°K, sur ses performances.

a) Densité de conduction de courant

(a) T=305°K



(b) T=310°K

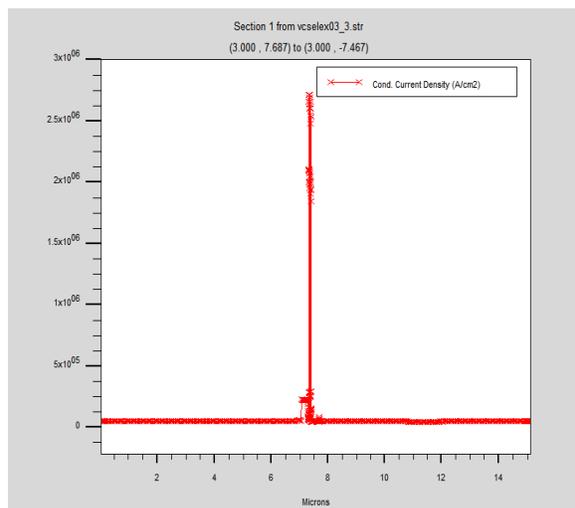
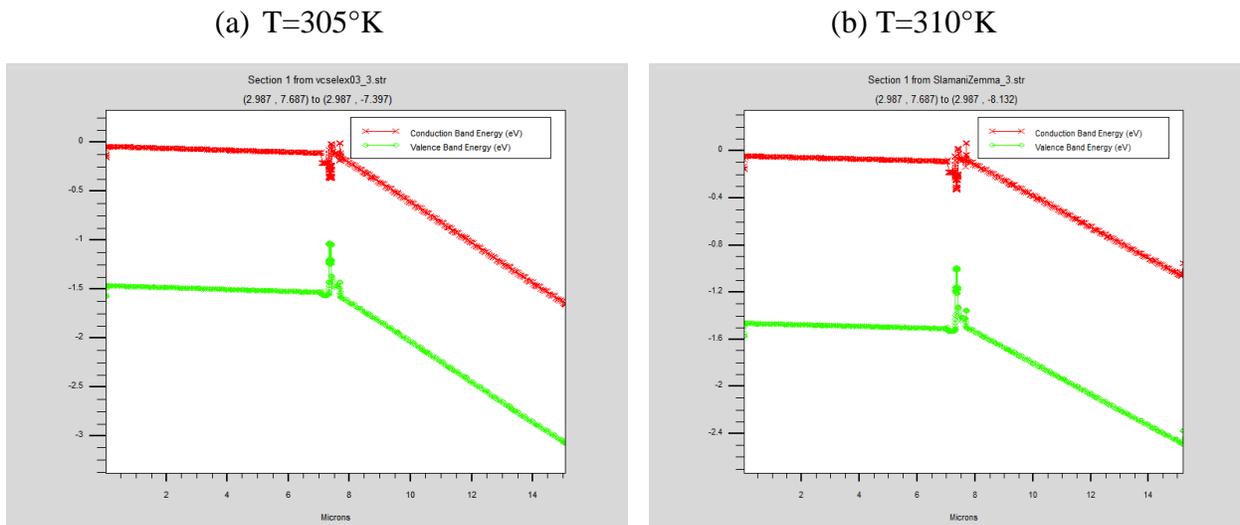


Figure III. 26 Densité du courant de conduction sous haute température

- Amplitude du pic : Les deux températures montrent un pic de densité de courant de conduction atteignant $2,75 \times 10^6$ A/cm².
- Position du pic : Le pic se produit à la même position sur les deux graphiques (au centre),
- Largeur du pic : La largeur du pic reste constante entre les deux températures.

b) bande de conduction et de valence**Figure III. 27** Energie sous haute température

Les deux graphiques montrent des comportements très similaires pour les énergies de bande de conduction et de valence, avec des discontinuités à environ 7,5 microns

c) Énergie du gap

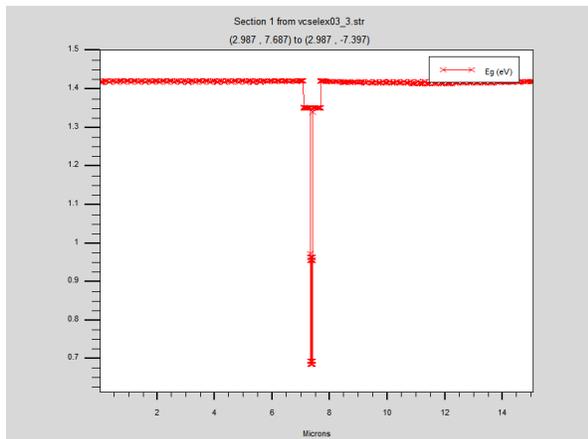
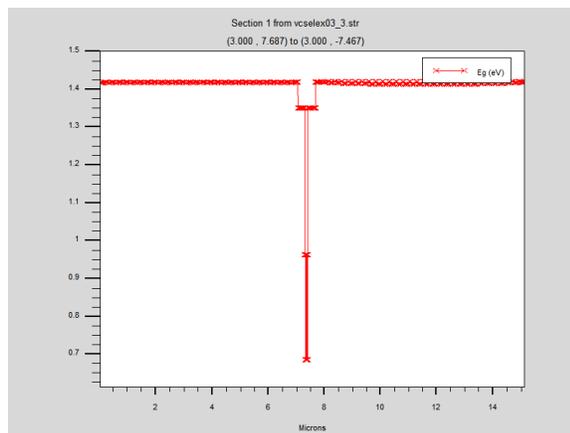
(a) $T=305^{\circ}\text{K}$ (b) $T=310^{\circ}\text{K}$ 

Figure III. 28 Énergie du gap sous haute température

Les deux graphiques montrent une constance remarquable dans l'énergie du gap à 1,45 eV pour la majorité de la structure, avec une chute notable à environ 7,3 microns.

d) Champ électrique

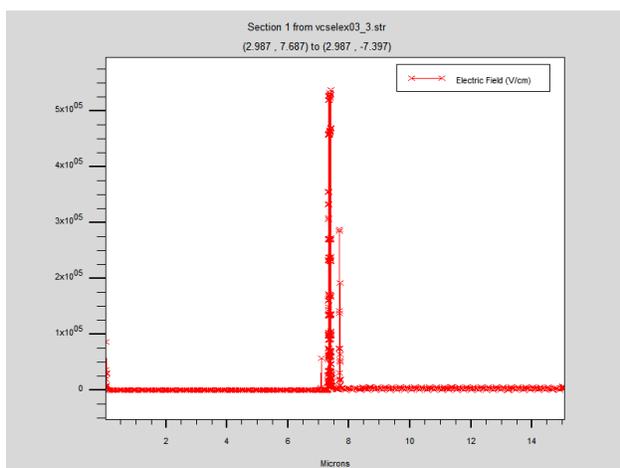
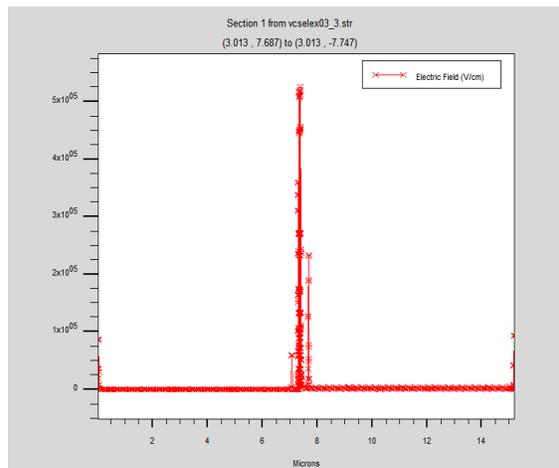
(a) $T=305^{\circ}\text{K}$ (b) $T=310^{\circ}\text{K}$ 

Figure III. 29 Champ électrique sous haute température

Les valeurs maximales du champ électrique sont similaires dans les deux cas, atteignant environ 5.4×10^5 V/cm au centre de la région active.

e) température de maille

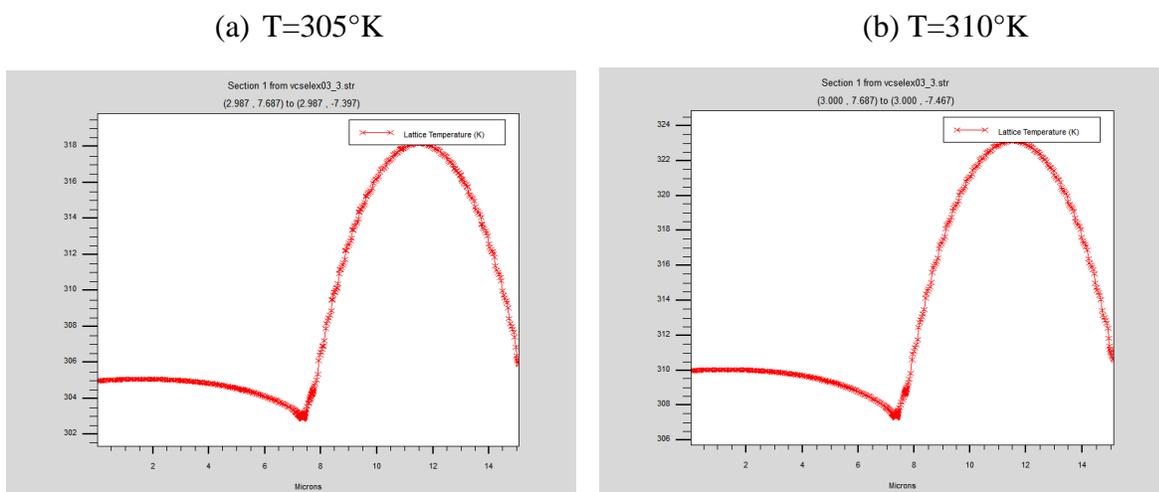
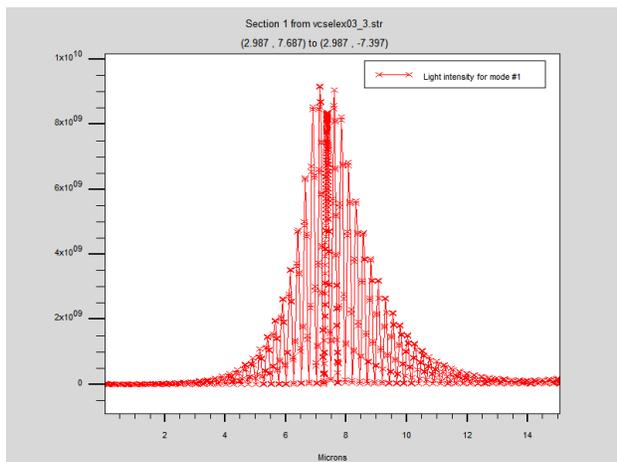
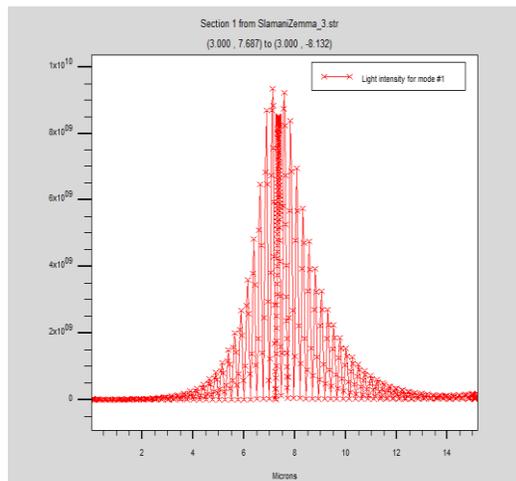


Figure III. 30 Température de maille sous haute température

- À $T=305$ K (figure a), la température de maille varie d'environ 302 K à environ 316 K.
- À $T=310$ K (figure b), la température de maille varie d'environ 306 K à environ 324 K.

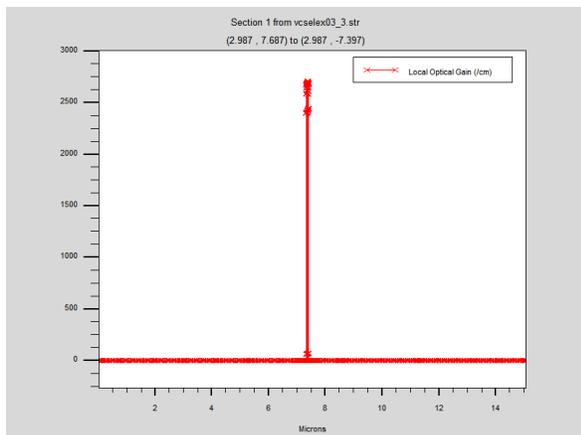
La forme des courbes reste similaire, mais les valeurs maximales augmentent avec la température. L'augmentation de la température donc entraîne une augmentation proportionnelle de la température de maille.

f) Intensité lumineuse(a) $T=305^{\circ}\text{K}$ (b) $T=310^{\circ}\text{K}$ **Figure III. 31** Intensité lumineuse sous haute température

- À 305 K et à 310 K, l'intensité lumineuse de pointe atteint environs 9 w/m^2 , indiquant une intensité maximale similaire.
- Les deux graphiques montrent une distribution symétrique de l'intensité centrée autour de la même position

g) Gain optique

(a) $T=305^{\circ}\text{K}$



(b) $T=310^{\circ}\text{K}$

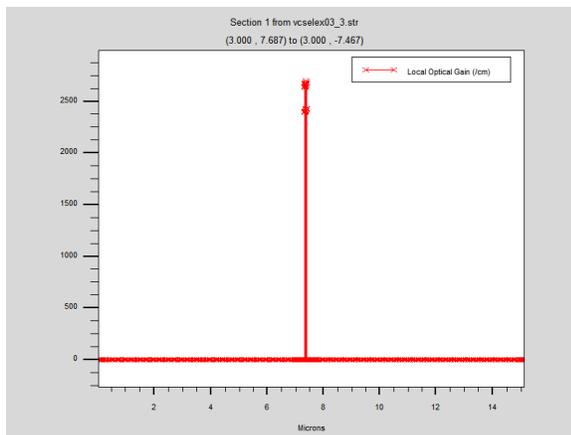
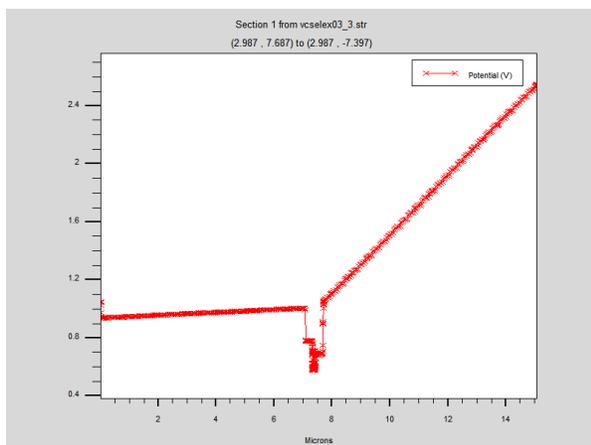


Figure III. 32 Gain optique sous haute température

Les deux graphiques montrent que le gain optique sous haute température reste concentré dans une région très étroite, avec une amplitude de pic de 2700.

h) potentiel

(a) $T=305^{\circ}\text{K}$



(b) $T=310^{\circ}\text{K}$

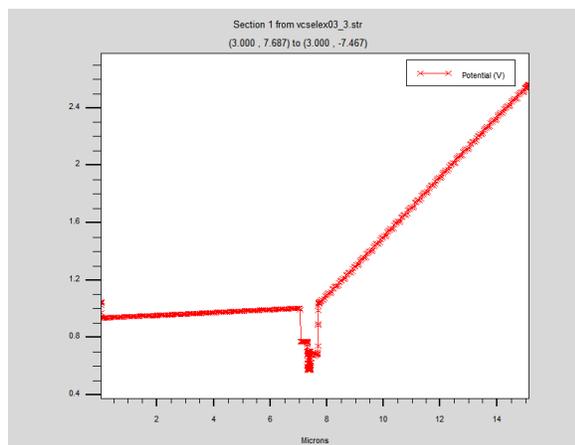
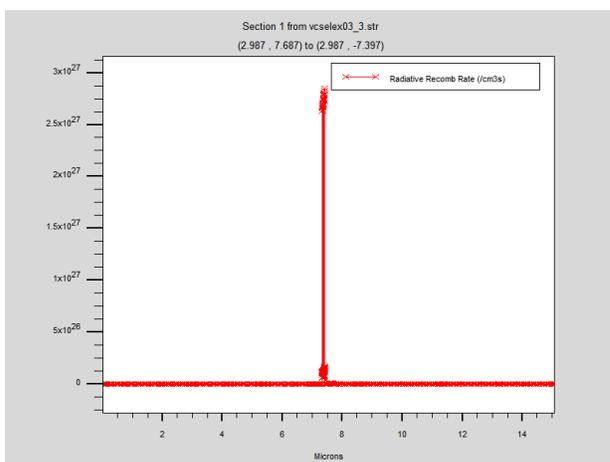


Figure III. 33 Potentiel $T=300\text{K}$ sous haute température

Les deux graphiques montrent un comportement similaire du potentiel sous haute température, avec une valeur constante de 0,8 V jusqu'à environ 8 microns, suivie d'une augmentation soudaine à environ 2,4 V.

i) Taux de recombinaison radiative

(a) T=305°K



(b) T=310°K

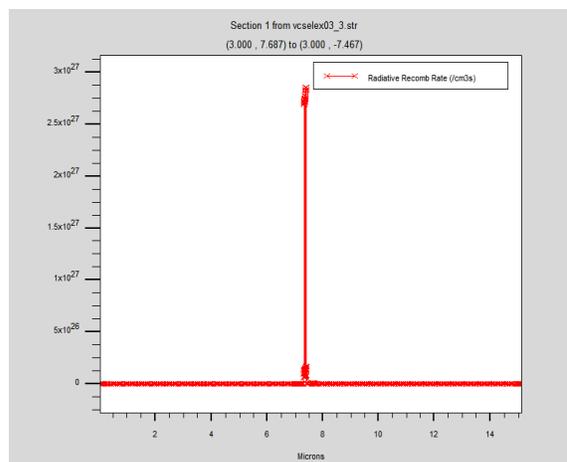


Figure III. 34 Taux de recombinaison radiative sous haute température

Les deux graphiques montrent que le taux de recombinaison radiative sous haute température reste concentré dans une région très étroite, avec une amplitude de pic de 3×10^{27} .

- **Remarque :** L'augmentation de la température de 305 K à 310 K n'entraîne pas de changement significatif. Cela pourrait indiquer une certaine stabilité des propriétés optiques du matériau dans cette plage de températures vu qu'elles se rapprochent.

III.6 Interprétation des résultats

Les résultats montrent clairement que les VCSELs fonctionnent mieux à basse température. Les hautes températures entraînent une dégradation des performances en raison de plusieurs facteurs thermiques :

- **Densité du courant de conduction** : À basse température, la densité du courant de conduction est plus uniforme et stable. Cela signifie une meilleure injection de courant dans la cavité laser, ce qui est essentiel pour une performance optimale du VCSEL. À haute température, la densité du courant de conduction devient plus irrégulière, entraînant une augmentation des pertes de courant.
- **bande de conduction et de valence** : Souvent plus basse à haute température, donc cette dernière affecte les énergies de bande en modifiant les niveaux d'énergie accessibles aux électrons et aux trous. À basse température, les transitions sont généralement plus efficaces et les pertes énergétiques sont minimisées, tandis qu'à haute température, les transitions non radiatives deviennent plus prédominantes, réduisant l'efficacité globale des dispositifs optoélectroniques.
- **Champs électrique** : les variations de l'intensité maximale du champ électrique entre hautes et basses températures sont principalement dues aux changements dans la mobilité des porteurs de charge et à la conductivité du matériau. À basse température, ces facteurs favorisent une meilleure réponse au champ électrique, conduisant à une intensité maximale plus élevée, tandis qu'à haute température, une mobilité réduite et une conductivité diminuée limitent cette intensité.
- **La température de la maille** : À des températures initiales plus basses, la résistance thermique est plus élevée. Cela signifie que la chaleur générée du VCSEL peut s'accumuler plus facilement à l'intérieur du dispositif, conduisant à une augmentation plus rapide de la température de maille.

- **Intensité lumineuse :** À basse température, l'intensité lumineuse est favorisée par une mobilité accrue des porteurs de charge, permettant une meilleure réponse au champ électrique et une émission de lumière plus efficace. Moins d'agitation thermique réduit également les pertes d'énergie, favorisant une conversion plus efficace de l'énergie électrique en lumière. De plus, la réduction des processus de relaxation non radiatifs améliore l'efficacité lumineuse globale.
- **gain optique :** Le gain optique est plus élevé à basse température. Cela est dû à la réduction des collisions photoniques, qui autrement dissiperaient l'énergie des porteurs de charge sous forme de chaleur plutôt que de lumière. A haute température il diminue en raison de l'élargissement spectral et de la diminution de la population inversée. Un gain optique réduit signifie une moins bonne amplification du signal optique.
- **Le potentiel :** À haute température, le potentiel électrique initial est généralement plus bas et son augmentation est plus graduelle à cause d'une mobilité réduite des porteurs de charge et à une conductivité diminuée, résultant en une réponse moins dynamique au champ électrique appliqué. En revanche, à basse température, le potentiel électrique initial est plus élevé et son augmentation est souvent plus abrupte. La mobilité accrue des porteurs de charge et une meilleure conductivité, permettent une réponse plus rapide et plus efficace au champ électrique, conduisant à des valeurs de potentiel plus élevées.
- **Taux de recombinaison radiative :** Le taux de recombinaison radiative est plus élevé à basse température, ce qui augmente l'efficacité lumineuse du VCSEL. En revanche, à haute température, ce taux diminue, entraînant une augmentation des recombinaisons non radiatives et une réduction de l'efficacité lumineuse du VCSEL.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons en détail le logiciel Silvaco ATLAS ainsi que ses différentes interfaces utilisées. Nous utilisons une méthodologie spécifique pour simuler notre diode VCSEL sans stress thermique, c'est-à-dire à une température ambiante de 300°K. Ensuite, nous étudions l'impact du stress thermique en évaluant comment la variation de la température affecte ses performances, en explorant deux plages de températures : basse et haute.

Comme tout composant électronique, il est confirmé que la température affecte considérablement le fonctionnement de cette diode, notamment le gain, le taux de recombinaison radiative, le potentiel, les bandes de conduction et de valence, ainsi que l'intensité lumineuse émise.

Conclusion générale

Conclusions générale

Ce mémoire a exploré en profondeur le domaine des lasers, avec un accent particulier sur les VCSEL et l'impact de la température sur leurs performances, en utilisant le simulateur Silvaco Atlas. À travers les trois chapitres, nous avons développé une compréhension globale des principes fondamentaux des lasers, des spécificités des VCSEL, et des défis thermiques associés à leur fonctionnement.

Dans le premier chapitre, nous avons posé les bases en présentant les principes fondamentaux des lasers. Nous avons exploré les mécanismes de l'émission stimulée, la structure des lasers, et les différentes catégories de lasers, soulignant leur importance dans diverses applications industrielles et scientifiques.

Le deuxième chapitre s'est concentré sur les VCSEL, une classe particulière de lasers à cavité verticale émettant en surface. Nous avons détaillé leur conception, leur fonctionnement, et leurs avantages par rapport aux lasers traditionnels.

Le troisième chapitre a mis en lumière l'importance de la gestion thermique dans les VCSEL. À l'aide du logiciel de simulation Silvaco Atlas, nous avons étudié les effets de la température sur les performances des VCSEL.

Les résultats montrent clairement que les VCSEL fonctionnent mieux à basse température et que les hautes températures entraînent une dégradation des performances telles que le potentiel, l'intensité de la lumière, le gain, les bandes de conduction et de valence, etc. La température joue donc un rôle significatif dans la modulation de ces paramètres, affectant ainsi directement l'efficacité et la stabilité des VCSEL. Ces observations laissent place à de futures recherches pour optimiser les performances des VCSEL à haute température.

Références

- [1] **Hecht, J.** *"Laser: The Inventor, the Nobel Laureate, and the Thirty-Year Patent War"*. Oxford University Press, 2010.
- [2] **Hecht, J.** *"Laser Pioneers"*. Springer, 2010.
- [3] **Siegman, A.E.** *"Lasers"*, University Science Books, 1986.
- [4] **Sze, S.M., & Ng, K.K.** *"Physics of Semiconductor Devices"* (3ème éd.), Wiley, 2007.
- [5] <https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2010/04/refdp201021p12.pdf>, consulté le 30/04/2024
- [6] **Hecht, J.** *"Understanding Lasers: An Entry-Level Guide"* (3ème éd.), Wiley-IEEE Press, 2008.
- [7] **Saleh, B.E.A., & Teich, M.C.** *"Fundamentals of Photonics"* (2ème éd.), Wiley, 2007.
- [8] **Svelto, O.** *"Principles of Lasers"*, Springer, 2010
- [9] https://www.unilim.fr/pages_perso/valerie.madrangas/Jonction-P-N.pdf, Consulté le 07/06/2024
- [10] **Ammi Sofiane.** *"Étude d'un guide de lumière à deux dimensions."* Thèse de doctorat.
- [11] **Kouch, Nawel.** *"Étude d'une structure laser à semi-conducteur pour application dermatologiques."* Thèse de doctorat, Université d'Oran, 2015.
- [12] **Selmane, Djamel.** *"Modélisation et optimisation des lasers à puits quantiques à base des hétérostructures de l'ordre de l'angstroms."* Thèse de doctorat, Université Hassiba Benbouali Chlef, 2009.
- [13] **Teissier, R., Christof, P., & Jouillé, A.** *"Nouveau laser à semi-conducteur pour le moyen infra rouge."*, Quanta et Photon, 2005.
- [14] **Mukai, T.** *"Semiconductor Laser"*, Kluwer Academic, 2ème éd., 1993.
- [15] **Signoret, P.** *"Analyse des bruits optique-électrique et étude de leur corrélation - Application à une tête optique d'émission laser à réaction répartie."* Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 1994.
- [16] **Klehr, A., Wenzel, H., Brox, O., Bugge, F., Erbert, G., Nguyen, T.-P., & Tränkle, G.** *"High power DFB lasers for D1 and D2 caesium absorption spectroscopy and atomic clocks."* Proc. of SPIE, 6909, 69091E, 2008.

- [17] **Kishino, K., Ünlü, M. S., Chyi, J.-I., Reed, J., Arsenault, L., & Morkoc, H.** *"Resonant cavity-enhanced (RCE) photodetectors."* IEEE Journal of Quantum Electronics, 27(8), 1991, pp. 2025-2034.
- [18] **Ünlü, M. S., & Strite, S.** *"Resonant cavity enhanced photonic devices."* J. Appl. Phys., 78, 1995, pp. 607-639.
- [19]. **Averseng, L., Bardinal, V., Dubreuil, P., Van Dijk, F., Camps, T., & Muñoz-Yagüe, A.** *"Conception et Réalisation de photodétecteurs à microcavité verticale."* Communication, 20èmes Journées Nationales d'Optique Guidée (JNOG'2000), Toulouse.
- [20] **Rosinski, B., Chi, J., Boucher, Y., & Le Bihan, J.** *"Photodetection with VCSEL."* Communication, IEE SIOE Conference, Cardiff, UK, avril 1996.
- [21] **Kosaka, H., Kurihara, K., Sugimoto, M., & Kasahara, K.** *"Detector characteristics of a vertical cavity surface emitting laser."* Jpn J. Appl. Physics, 30(7A), 1991, pp. L1172-74.
- [22] **Geib, K.M., Choquette, K.D., Allerman, A., Hindi, J.J., Nevers, J., & Hammous, B.E.** *"Monolithically integrated VCSELS and photodetectors for microsystem applications."* Communication, Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, LEOS '98, IEEE, vol. 2, 1998, pp. 3-4.
- [23] **Michalzik, R. (Ed.).** *"VCSELS: Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers."* Springer Series in Optical Sciences, vol. 166, Springer, 2013.
- [24] **Abbal, L.** *"Analyse vectorielle des réseaux étendue aux composants optiques et optoélectroniques."* Thèse de doctorat, Supaero, Toulouse, 2002.
- [25] **Bardinal, V., Legros, R., & Fontaine, C.** *"Precision Bragg Reflectors Obtained by Molecular Beam Epitaxy under in situ Tunable Dynamic Optical Reflectometry Control."* Applied Physics Letters, 67(23), 1995, pp. 3390-3392.
- [26] **Dingle, R., Weigmann, W., & He, C.H.** *"ry."* Article, Phys. Rev. Lett. 33, American Physical Society, 1974.
- [27] *"Centered polymer microlenses deposited on SU-8 patterned surfaces by means of a cantilever-based spotter."* Communication, European Optical Society (EOS) Annual Meeting 2008, Paris Villepinte, 29 sept-2 oct. 2008.

- [28] **Georgeon, L.** "*Conceptions et caractérisations de laser à cavité verticale.*" Thèse de doctorat, Optique-Optoélectronique et Micro-Onde, Institut Polytechnique, Grenoble, octobre 1997.
- [30] **Guilhem.** "*Étude et réalisation de laser à cavité vertical à 1,55 μ m sur GaSb.*" Thèse de doctorat.
- [31] **Sale, T. E.** "*Vertical Cavity Surface Emitting Lasers.*" Taunton: Research Studies Press, 1995.
- [32] **Miller, A., Ebrahimzadeh, M., Ebrahimzadeh, M., & Finlayson, D. M.** "*Semiconductor Quantum.*" Année et maison d'édition non spécifiées.
- [33] **Yariv, A., & Yeh, P.** "*Optical Waves in Crystals: Propagation and Control of Laser Radiation.*" Wiley-Interscience, 2007.
- [34] **Yariv, A., & Yeh, P.** "*Optical Waves in Crystals: Propagation and Control of Laser Radiation.*" Wiley-Interscience, 2007.
- [35] **Michalzik, R. (Ed.).** "*VCSELs: Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers*" (Springer Series in Optical Sciences). Livre, Springer, 2012.
- [36] **Rissons, Angélique.** "*Caractérisation et modélisation optoélectronique de diodes laser à cavité verticale émettant par la surface (VCSEL).*" Thèse de doctorat.
- [37] **Y. Ohiso, H. Okamoto, R. Iga, K. Kishi, & C. Amano.** "*Single Transverse Mode Operation of 1.55 μ m Buried Heterostructure Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser.*" IEEE Photonics Technology Letters, vol. 14, no. 6, juin 2002.
- [38] **Sze, S. M., & Ng, K. K.** "*Physics of Semiconductor Devices*" (3ème éd.). Wiley-Interscience, 2006.
- [39] **Ghatak, A., & Thyagarajan, K.** "*Introduction to Fiber Optics.*" Cambridge University Press, 2009.
- [40] **Coldren, L. A., Corzine, S. W., & Mashanovitch, M. L.** "*Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits*" (2ème éd.). Wiley-Interscience, 2012.
- [41] **Choquette, K.D., & Hou, H.Q. (Eds.).** "*Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers: Technology and Applications.*" Springer, 2003.
- [42] **BOCH, Jérôme, & GALLIERE, JeanMarc.** "*TP SILVACO (VWF Interactive Tools).*" Polytechnique Montpellier.

[43] **TAHRI, K., & BENYOUCE, B.** *"Étude de Modélisation d'un Générateur Photovoltaïque."* Journal of Scientific Research, n° 0, vol. 1, Université Abou Bakr Belkid, Tlemcen, 2010.

[44] **Thuillier, B.** *"Caractérisation Structurale des Contacts Ohmiques Réalisés à Partir d'Encres Métalliques sur Cellules Photovoltaïques en Silicium Multicristallin."* Thèse de doctorat, École Doctorale Matériaux de Lyon, 2001.