

Résumé de cours M2 Microélectronique

Module : Physique des composants semi-conducteurs 3

Prof. Abdelhamid BENHAYA

Directeur du Laboratoire d'Electronique Avancée
Responsable Salle Blanche

Département d'Electronique
Faculté de Technologie
Université Batna 2

Domaines d'intérêt:

Technologie des semi-conducteurs
(Matériaux et dispositifs photovoltaïques)

e-mail: a.benhaya@univ-batna2.dz
benhaya_abdelhamid@yahoo.fr

Tel: +213 (0)7 73 87 37 84

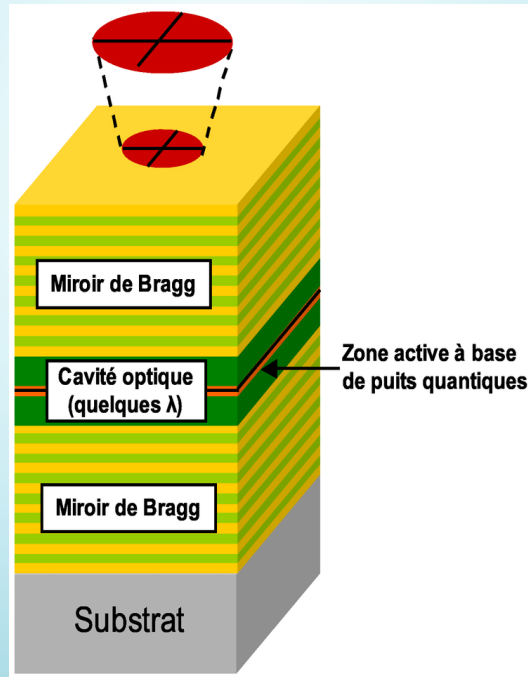
BIBLIOGRAPHIE

Langue Anglaise

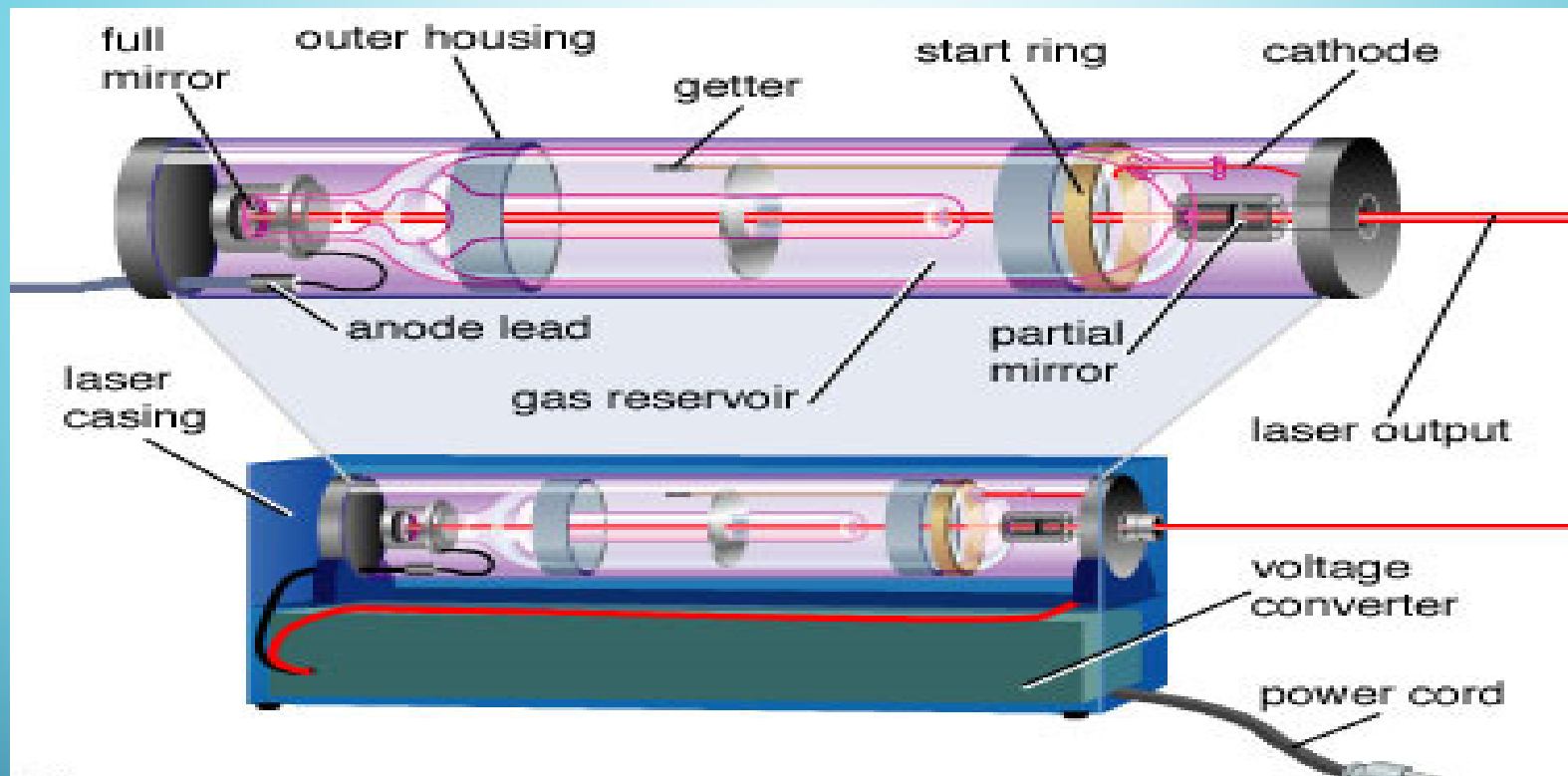
1. Marius Grundmann, The Physics of Semiconductors (Chapter 13), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
2. <https://nanohub.org/resources/5346>
3. <https://nanohub.org/courses/FON2>

Langue Française

1. H. MATHIEU, physique des semi-conducteurs et des composants électroniques (Chapitres 10 et 12) , Dunod, 2001.
2. <https://www.polytech-lille.fr/cours-atome-circuit-integre/>



LASERS À Puits QUANTIQUES



Rappel de quelques notions de base sur les lasers

RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS DE BASE SUR LES LASERS

Différentes transitions

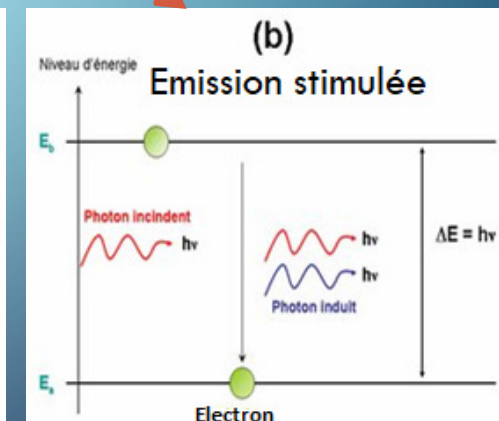
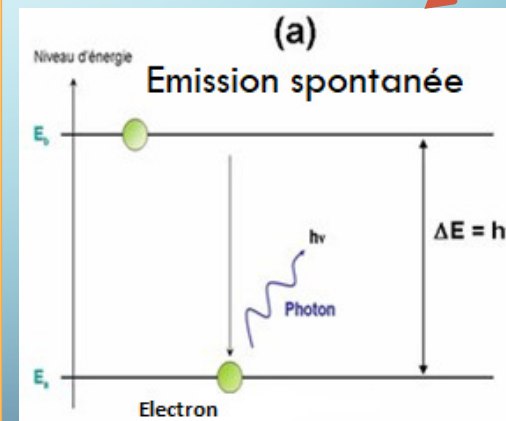
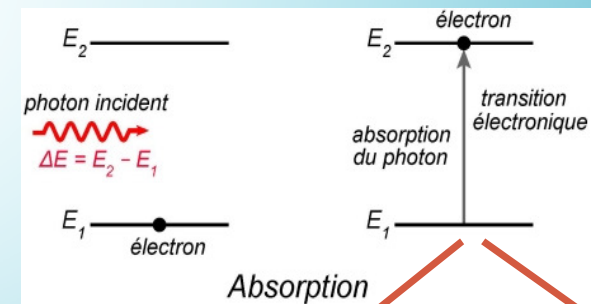
• Transitions radiatives

La restitution de l'énergie absorbée par un système est assurée par émission de photons selon les deux mécanismes:

- Emission spontanée ou fluorescence;
- Emission stimulée.

• Transitions non radiatives

(Le système ayant absorbé de l'énergie, entre en collision avec un autre système et lui cède de l'énergie sous forme cinétique).



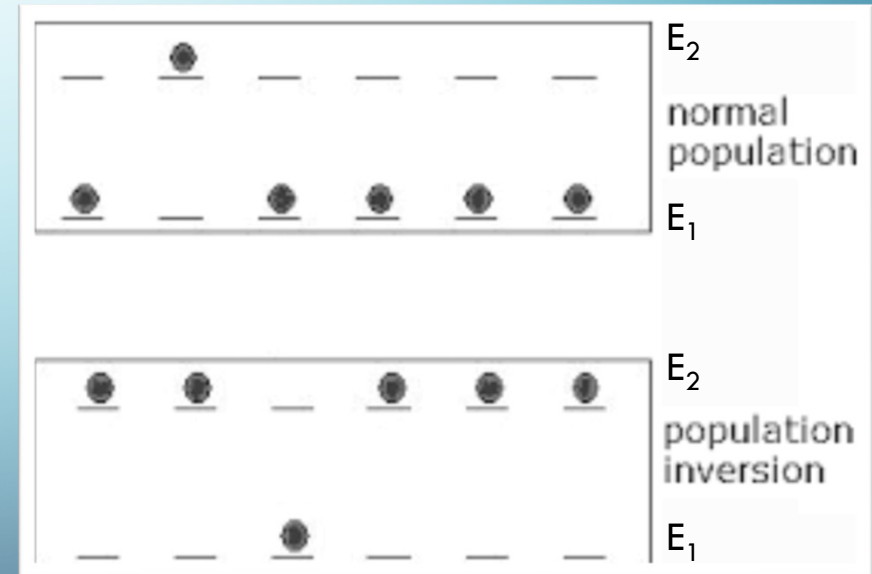
RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS DE BASE SUR LES LASERS

Rayonnement Laser

1. Définition : Le laser (en anglais, light amplification by stimulated emission of radiation) est une amplification de lumière par émission stimulée de radiation.

2. Condition d'obtention d'un laser : Pour obtenir un rayonnement laser, il faut que la **probabilité d'émission**, dans un système, soit **supérieure** à la **probabilité d'absorption**.

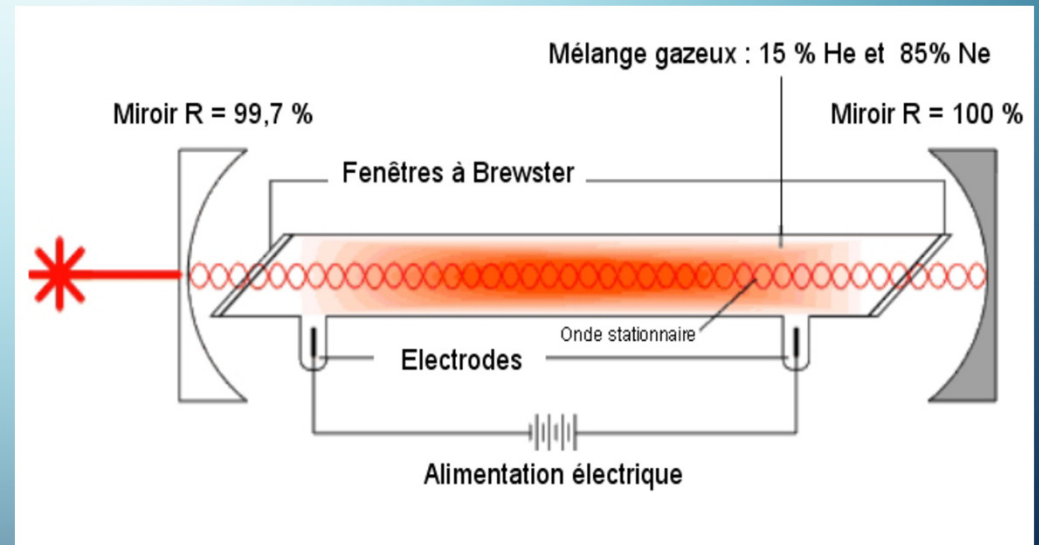
3. Inversion de population : La condition précédente ne peut être satisfaite que dans le cas où la **population du niveau supérieur E_2** soit **supérieure** à celle du **niveau inférieur E_1**



RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS DE BASE SUR LES LASERS

Dispositif laser

- 1. Milieu actif** : C'est le milieu où se produisent les opérations de **pompage** et d'**amplification**. Il peut être **solide**, **liquide** ou **gazeux**
- 2. Système de pompage** : C'est ce système qui permet d'**inverser la population**. Il peut être de nature **optique** (flash), **électrique** (champ électrique), **chimique** (énergie thermique dégagée par la réaction),...
- 3. Résonateur optique** : C'est la **cavité entourant le milieu actif** qui permet d'**amplifier le rayonnement** et de **sélectionner les fréquences** émises.



RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS DE BASE SUR LES LASERS

Sources de pompage

Les sources de pompage les plus couramment utilisées sont les suivantes:

- Pompage **optique**
- **Décharge électrique** ou excitation par électrons
- **Collisions inélastiques** atome-atome
- Pompage **thermique**
- Réaction **chimique**

Pompage optique

On utilise **la lumière** pour fournir de l'énergie au milieu laser.

Décharge électrique

On fait passer un **flux d'électrons** ou de **courant électrique** à travers un gaz, un liquide ou un solide.

Collisions inélastiques

Décharge $\Rightarrow X^*$ (état excité), $X^* \rightarrow Y \Rightarrow Y^*$

Pompage thermique

la chaleur agit comme source de pompage ou source d'énergie

Réaction chimique

$A+B \rightarrow AB^*$

RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS DE BASE SUR LES LASERS

Caractéristiques d'un faisceau laser

Un faisceau laser a quatre principales caractéristiques:

- Le faisceau laser **est directionnel**
- Le faisceau laser **est monochromatique**
- Le faisceau laser **est cohérent**
- Le faisceau laser **est** (très souvent) **polarisé**

RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS DE BASE SUR LES LASERS

CARACTÉRISTIQUES D'UN FAISCEAU LASER

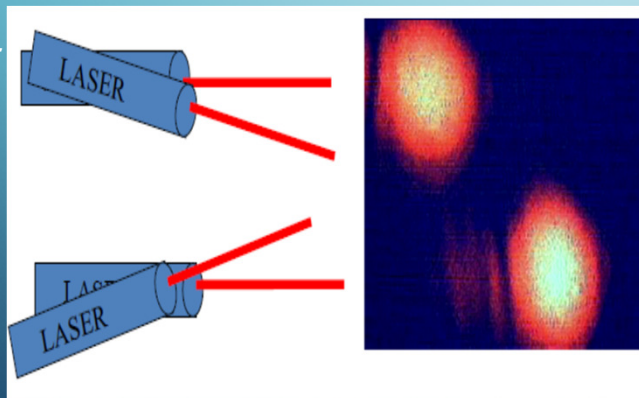
Un faisceau laser est directionnel



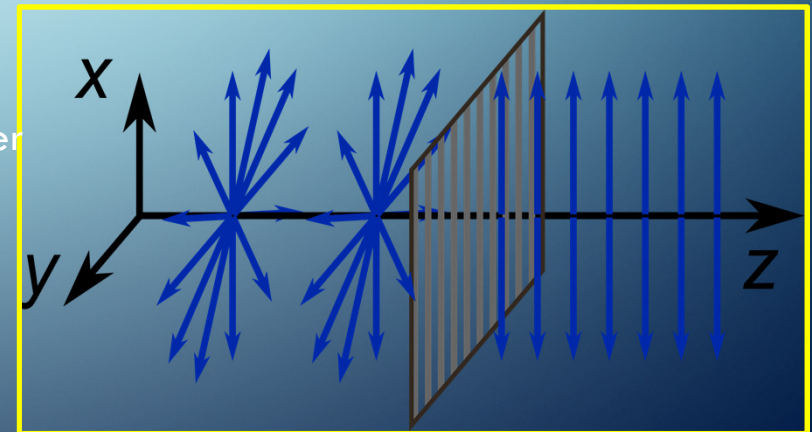
Un faisceau laser est monochromatique



Un faisceau laser est cohérent

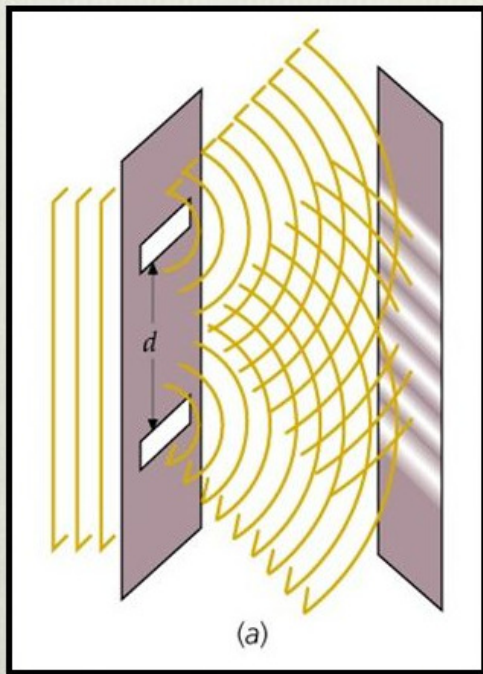


Un faisceau laser est polarisé



RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS DE BASE SUR LES LASERS PHÉNOMÈNE D'INTERFÉRENCE

L'expérience de Young



- ❖ Un dispositif à deux fentes (dispositif de Young), éclairé par un faisceau de lumière cohérente, produira une figure d'interférence formée de franges brillantes et sombres.

RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS DE BASE SUR LES LASERS

CARACTÉRISTIQUES D'UN FAISCEAU LASER

COHÉRENCE TEMPORELLE

La **cohérence temporelle** est liée à la **largeur de bande spectrale** de la source.

Une onde réellement **monochromatique** (une seule fréquence) aurait, en théorie, **un temps** ($\tau_c = 1/\Delta\nu$) et une **longueur de cohérence** ($L_c = c \tau_c$) **infinis**.

Si les **différents chemins** suivis par l'onde **diffèrent d'une longueur supérieure à L_c** , il n'y aura **pas d'interférences**.

COHÉRENCE SPATIALE

La **cohérence spatiale** est liée à la capacité de chacun **des points du front d'onde** à **interférer** avec n'importe quel autre point.

La **largeur de cohérence spatiale** de la source donne **la taille maximale permise** (taille source) pour qu'il y ait interférences.



Exemples de lasers solides classiques

Laser à semi-conducteur

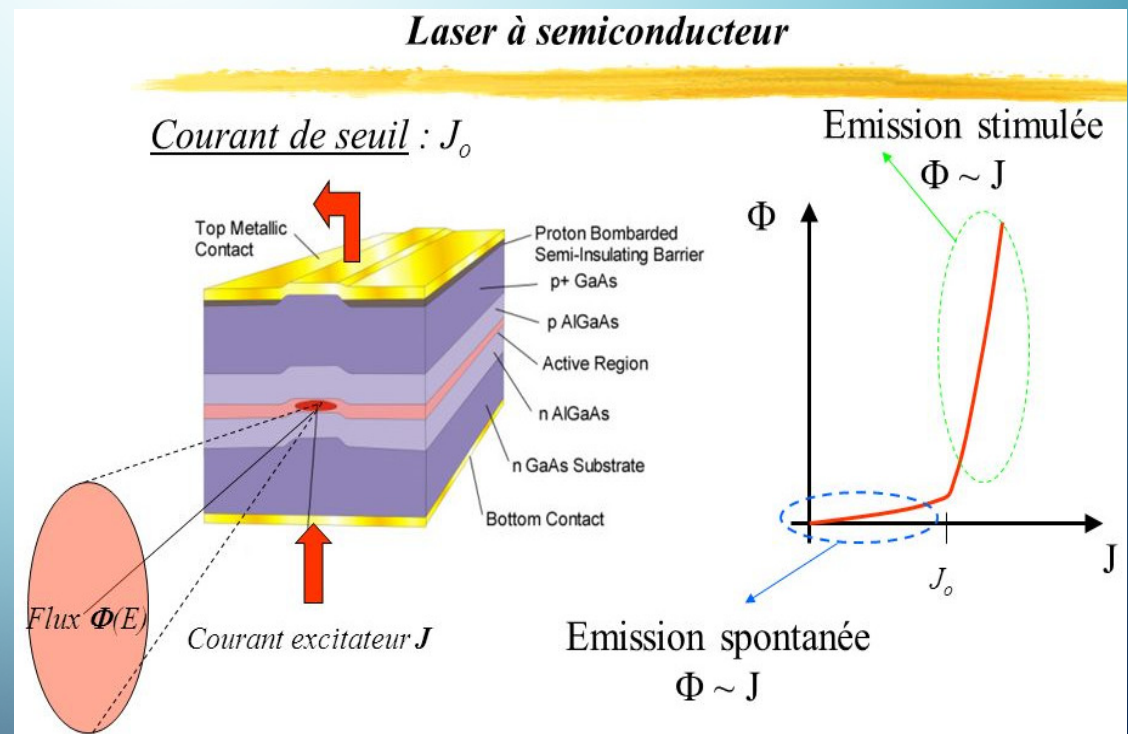
Laser à semi-conducteur

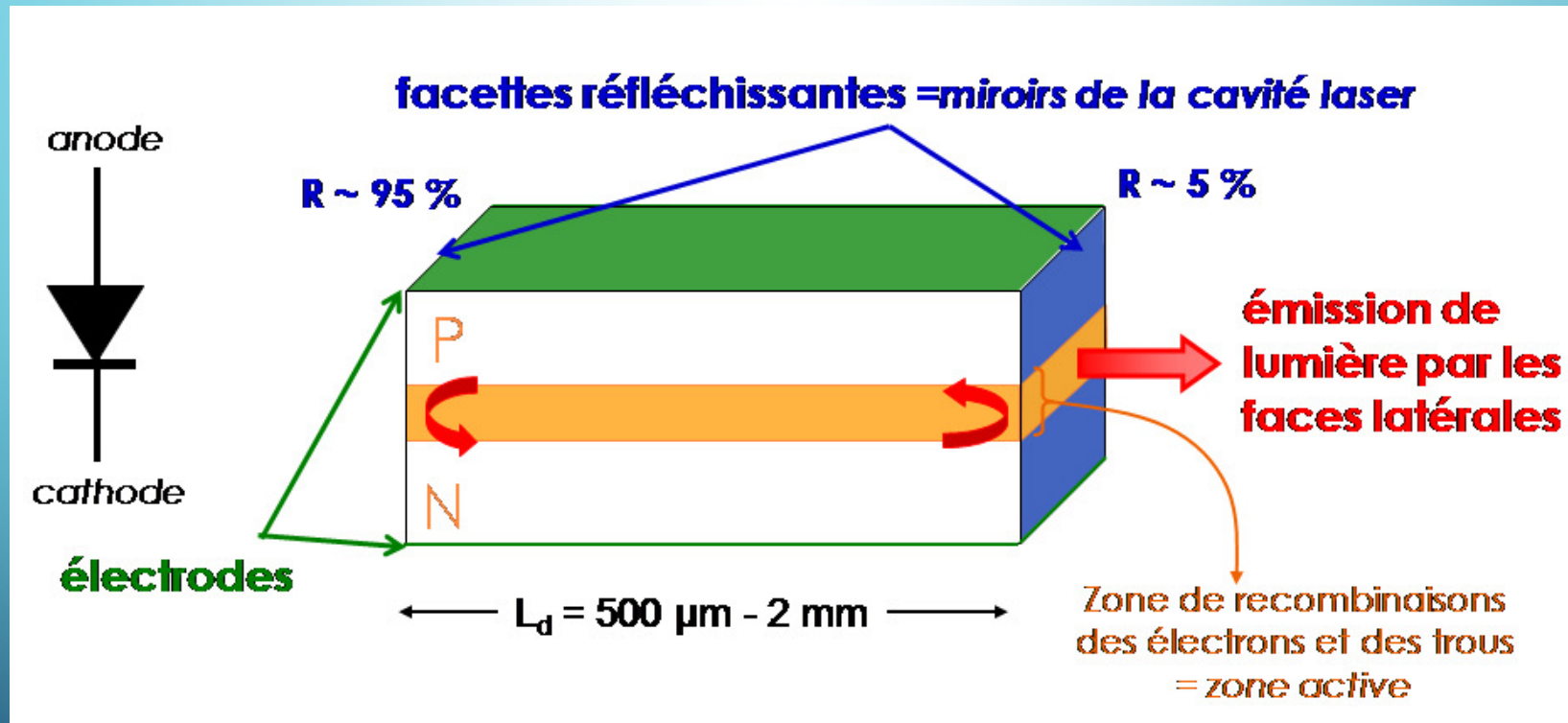
Principe de fonctionnement

Le passage d'un courant dans la jonction provoque la recombinaison électrons-trous avec apparition de photons.

La présence des miroirs fait que les photons initiaux font un va et vient à l'intérieur du semi-conducteur selon une direction et avec une fréquence bien déterminées.

Au cours de ces aller et retour, ils provoquent l'apparition de nouveaux photons. Si le gain de ce système est supérieur à un, il apparaît une réaction en chaîne qui provoque un rayonnement cohérent (phase, fréquence et direction identiques) à travers le miroir semi-réfléchissant : le rayon laser.

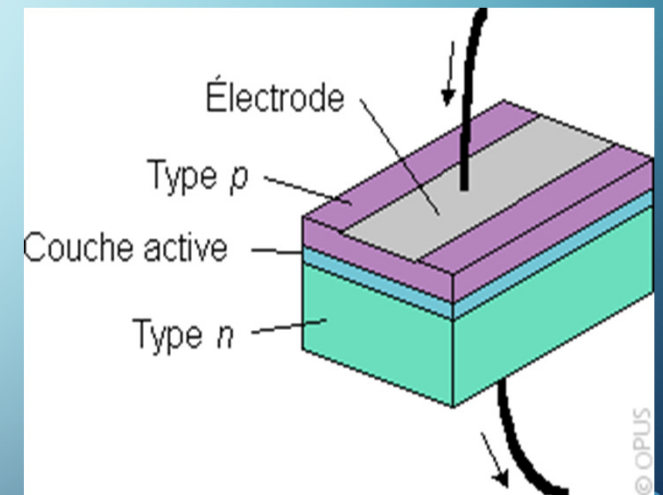




Laser à semi-conducteur

Diode laser

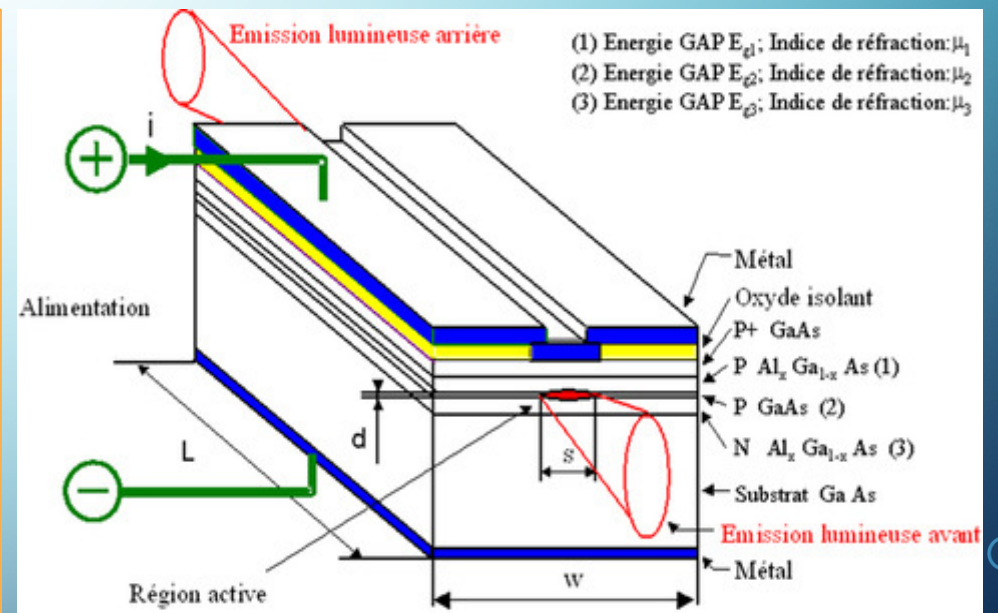
- La diode laser est fabriquée à partir de **semi-conducteurs dopés** tout comme les diodes et les transistors.
- Lorsque **le courant** traversant la jonction p-n **est faible**, l'émission est **peu directionnelle** et n'est **pas monochromatique**.
- **Au-dessus** d'un certain **courant de seuil**, la lumière devient plus **intense**, plus **directionnelle** et **monochromatique**.
- La jonction p-n, qui joue alors le rôle de milieu actif, produit un faisceau laser.
- Le faisceau a une puissance **P=1 à 100 mW** et une **divergence de 5° à 30°**,



LASER À SEMI-CONDUCTEUR LASER À HÉTÉROSTRUCTURE

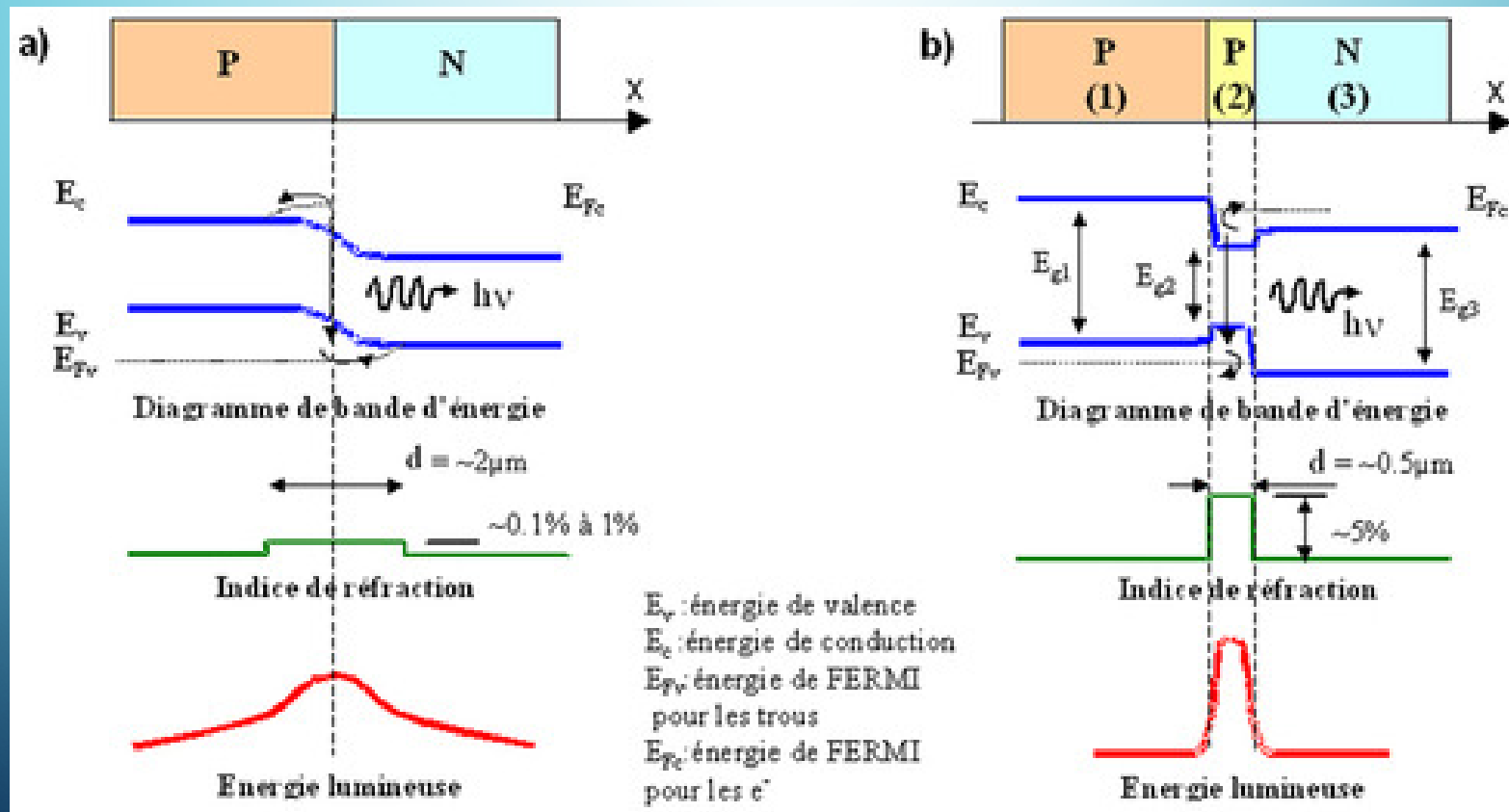
Afin d'obtenir une **émission Laser continue** et **puissante** à température ambiante, on utilise la **double hétérojonction**.

La hétérojonction présente l'**avantage** de **confiner les porteurs** par une **barrière de potentiel** électrostatique dans un **volume très réduit** $V = L \cdot d \cdot s$ appelé zone active, avec $L \sim 100$ à $500 \mu\text{m}$, $d \sim 0,1$ à $0,5 \mu\text{m}$, $s \sim 2$ à $5 \mu\text{m}$



LASER À SEMI-CONDUCTEUR

COMPARAISON ENTRE DIODE LASER ET HÉTÉROJONCTION LASER





CHAPITRE 2 COMPOSANTS QUANTIQUES

2.3. LASERS À Puits QUANTIQUES

**Spécificités des composants
quantiques**

LASERS À PUIITS QUANTIQUES

Confinement quantique

On parle du **confinement quantique** lorsque les **déplacements** des électrons ou des trous d'un semiconducteur sont **limités** dans **une** ou **plusieurs dimensions**.

Différents types de confinement

- Confinement dans **une dimension** \Rightarrow un **puit quantique**;
- Confinement dans **deux dimensions** \Rightarrow un **fil quantique**;
- Confinement dans **trois dimensions** \Rightarrow une **boite quantique**

Ordre de grandeur

Le confinement quantique apparaît **dans les semiconducteurs vers 200 nm** et **dans les métaux vers 1 nm**.

LASERS À Puits Quantiques

Effets du confinement quantique

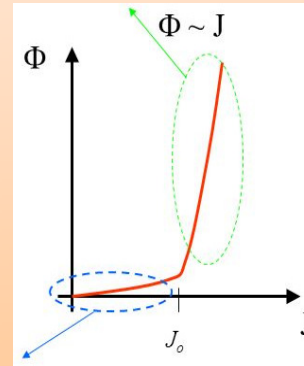
Les lasers à puits quantiques tirent profit des effets spécifiques du **confinement quantique** sur les grandeurs suivantes:

- **Fonctions d'onde** électroniques;
- Distribution énergétique (apparition de **niveaux d'énergie discrets**);
- La **nature bidimensionnelle** de la **densité d'états**.

LASERS À PUIITS QUANTIQUES

Conséquences du confinement quantique

- Engendrer un confinement des porteurs dans un **faible volume**, pour une injection donnée, permet **d'augmenter la densité de porteurs** et par suite d'accéder facilement à **l'inversion de population**.



- Améliorer les performances du laser tels que le **courant de seuil**, **l'ajustement de la longueur d'onde d'émission**, la **sensibilité du courant de seuil à la température**.



CHAPITRE 2 COMPOSANTS QUANTIQUES

2.3. LASERS À Puits QUANTIQUES

2.3.1. Effets à caractère géométrique

LASERS À Puits QUANTIQUES

EFFETS À CARACTÈRE GÉOMÉTRIQUES

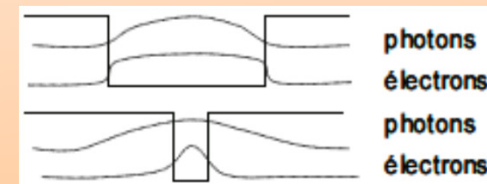
Facteur de confinement

Pour avoir un effet laser efficace, il faut avoir un bon recouvrement porteurs-photons. Ce recouvrement est mesuré par un paramètre appelé facteur de confinement des photons, noté Γ , qui mesure la proportion de la densité de rayonnement effectivement en interaction avec le milieu actif.

$$\Gamma = \int_{-L/2}^{L/2} E^2(z) dz / \int_{-\infty}^{+\infty} E^2(z) dz$$

L: est la largeur du puits de confinement des porteurs;

$E(z)$: représente la variation suivant z de l'amplitude du champ électrique du rayonnement.



LASERS À PUIITS QUANTIQUES

EFFETS À CARACTÈRE GÉOMÉTRIQUES

Condition d'oscillation de la cavité et gain modal

La **condition nécessaire au régime d'oscillation** de la cavité laser, c'est-à-dire la **condition de seuil**, s'écrit:

$$\Gamma g \geq \alpha + \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{R}\right)$$

Ou plus généralement

$$\Gamma g \geq \Gamma \alpha_i + (1 - \Gamma) \alpha_e + \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)$$

α_i, α_e : le coefficient de pertes par absorption à l'intérieur et à l'extérieur de la zone active;

g : gain volumique de la zone active

Γg : gain modal;

R_1, R_2 : les coefficients de réflexion sur les deux faces de la cavité.

LASERS À Puits Quantiques

Effets à caractère géométriques

Expression du facteur de confinement

Le calcul du facteur de confinement Γ n'est généralement pas très facile et nécessite une approche numérique.

L'expression analytique simple qui permet l'obtention de Γ avec une très bonne approximation est donnée par:

$$\Gamma = \frac{D^2}{2 + D^2} \quad \text{avec} \quad D = \frac{2\pi}{\lambda} (n_i^2 - n_e^2)^{1/2} d$$

λ : la longueur d'onde du rayonnement dans le vide;

d : l'épaisseur de la zone active;

n_i et n_e : les indices de réfraction respectivement à l'intérieur et à l'extérieur de la zone active.

LASERS À Puits Quantiques

Effets à caractère géométriques

Cas d' une structure à simple puits quantique

Dans une structure à simple puits quantique, la largeur d de la zone active est nettement inférieure à la longueur d'onde λ du rayonnement. L'épaisseur normalisée D du guide d'onde est alors très inférieure à 1 et l'expression de Γ devient:

$$\Gamma = \frac{D^2}{2 + D^2} \approx D^2/2$$

Ce qui donne:

$$\Gamma_{sp} \approx \frac{2\pi^2}{\lambda^2} (n_i^2 - n_e^2) d^2$$

LASERS À PUIITS QUANTIQUES

EFFETS À CARACTÈRE GÉOMÉTRIQUES

Ordre de grandeur

- Dans une double hétérostructure de type $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}/\text{GaAs}$ dont la zone active est de $0,1 \mu\text{m}$, $\Gamma \approx 0,4$. Ce qui nécessite, pour avoir un gain modal $\Gamma g \approx 50 \text{ cm}^{-1}$, un gain volumique net $g \approx 100 \text{ cm}^{-1}$.
- Pour un puits quantique de type $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$ d'épaisseur $d=250 \text{ \AA}$, on obtient $\Gamma \approx 0,04$. Ce qui nécessite un gain volumique net $g \approx 1000 \text{ cm}^{-1}$.

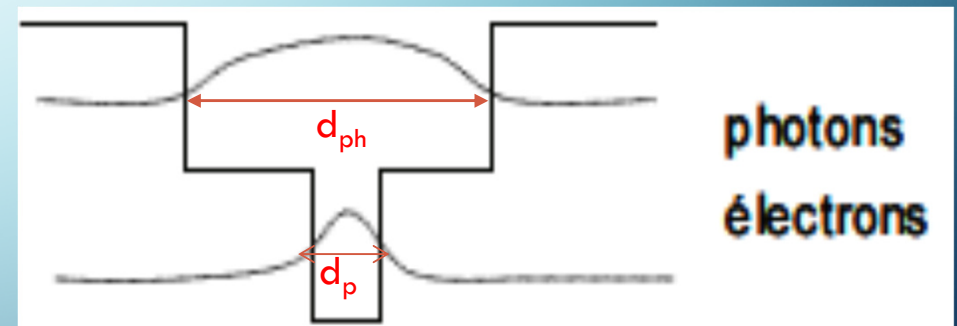
LASERS À Puits QUANTIQUES

EFFETS À CARACTÈRE GÉOMÉTRIQUES

Techniques d'amélioration du confinement

Afin d'augmenter le facteur de confinement, on réalise **des structures à confinements séparés** SCH (Separate Confinement Heterojonction).

Les porteurs sont confinés dans un puits quantique d'épaisseur d_p , les photons sont confinés dans un guide d'onde de largeur d_{ph} .



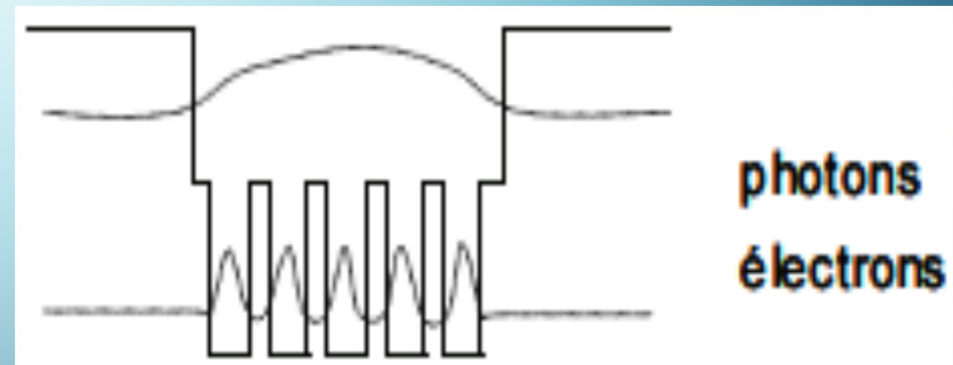
LASERS À PUIITS QUANTIQUES

EFFETS À CARACTÈRE GÉOMÉTRIQUES

Techniques d'amélioration du confinement

(Suite)

Il est encore possible d'améliorer le facteur de confinement en remplaçant le puits unique par une structure à multipuits quantiques



LASERS À PUIES QUANTIQUES

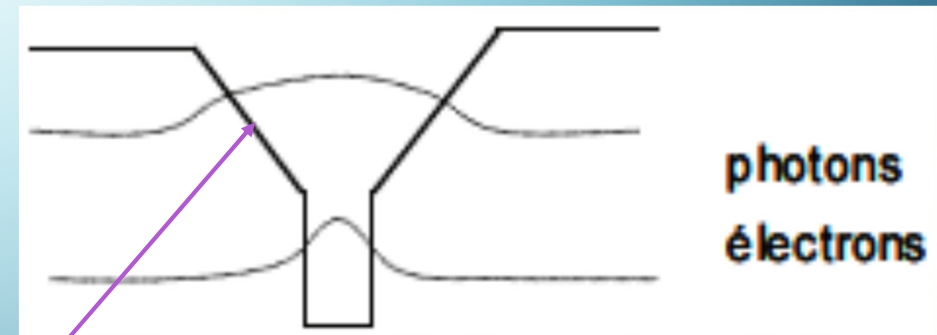
EFFETS À CARACTÈRE GÉOMÉTRIQUES

Techniques d'amélioration du confinement

(suite)

Il est plutôt souhaitable de **conserver le puits unique** en améliorant toutefois **le facteur de confinement**.

On y parvient en remplaçant **le guide optique à saut d'indice** par **un guide à gradient d'indice**.



Dans ce cas, les porteurs restent plus facilement dans le puits; ce qui réduit en particulier la sensibilité à la température.



CHAPITRE 2 COMPOSANTS QUANTIQUES

2.3. LASERS À Puits QUANTIQUES

2.3.2. Effets à caractère quantiques

LASERS À PUIITS QUANTIQUES

EFFETS À CARACTÈRE QUANTIQUES

Rappel: Densité d'états électroniques

Définition

La densité d'états électronique quantifie **le nombre d'états électroniques** possédant **une énergie donnée** dans le matériau considéré.

Plus précisément, on définit la densité d'états, noté $D(E)^*$, comme étant le nombre d'états électroniques $D(E)dE$ d'énergie comprise entre E et $E+dE$ par **unité de volume** du solide ou maille élémentaire du cristal étudié.

*On trouve aussi les notations: $N(E)$, $g(E)$, $\rho(E)$,

LASERS À PUIITS QUANTIQUES

EFFETS À CARACTÈRE QUANTIQUES

Rappel: Densité d'états électroniques

Expression de la densité d'états

$$D(E) = \frac{V}{2(\pi)^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{E}$$

Pour un système à 3 dimensions, V est le volume

$$D(E) = \frac{S}{\pi} \frac{m}{\hbar^2}$$

Pour un système à 2 dimensions, S est la surface

$$D(E) = \frac{L}{(4\pi)} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\sqrt{E}}$$

Pour un système à 1 dimension, L est la longueur

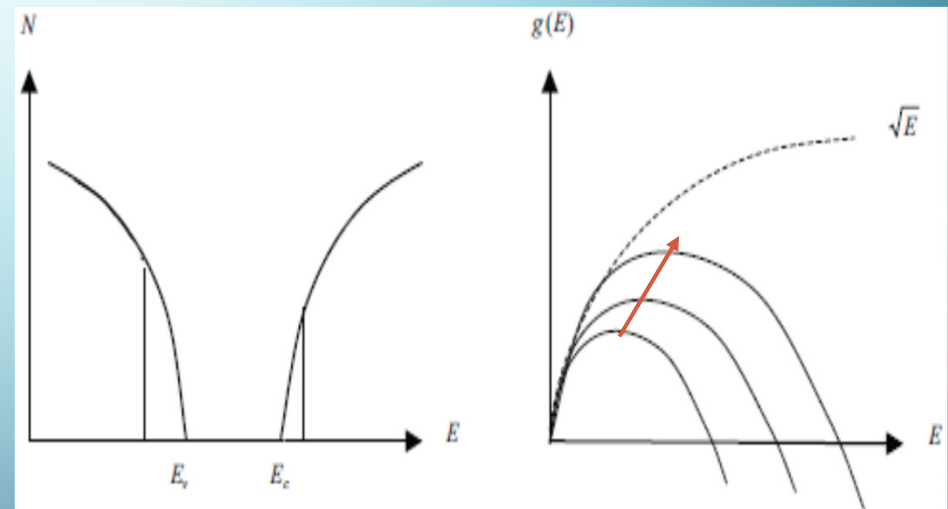
LASERS À PUIITS QUANTIQUES

EFFETS À CARACTÈRE QUANTIQUES

Gain: Cas 3D

A **trois dimensions**, la densité d'états augmente avec l'énergie comme $E^{1/2}$.

Ainsi, lorsque **l'injection augmente**, le **maximum** de la courbe de **gain** se **déplace** vers les **hautes énergies**,



LASERS À Puits Quantiques

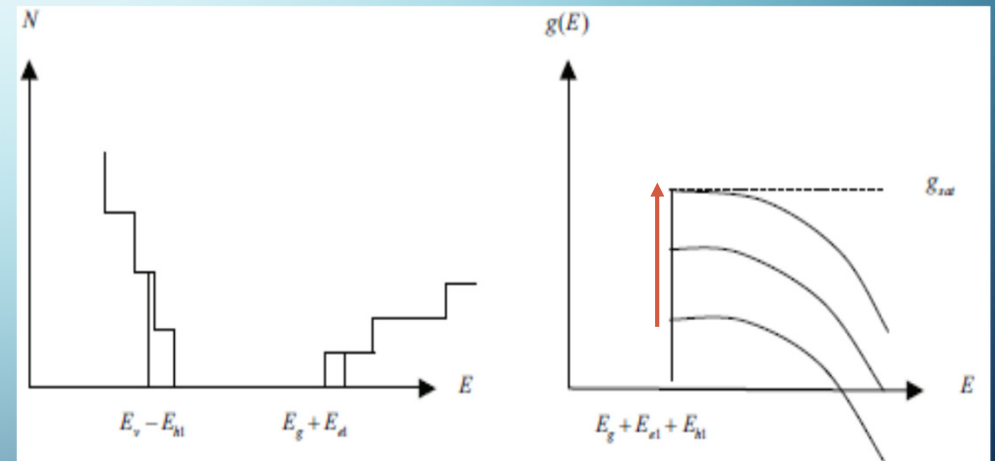
Effets à caractère quantiques

Gain: Cas 2D

Dans un puits quantique, la densité d'états est constante dans chacune des sous-bandes.

Ainsi, lorsque le pseudo-niveau de Fermi s'élève sous l'effet de l'injection, le sommet de la courbe de gain reste fixé à l'énergie du bas de la sous-bande.

Par conséquent, l'augmentation de l'injection augmente plus efficacement le gain.



LASERS À PUIITS QUANTIQUES

EFFETS À CARACTÈRE QUANTIQUES

Longueur d'onde d'émission

Si l'**inversion de population** des sous-bandes fondamentales d'électrons et de trous e_1 et h_1 , permet de **créer un gain supérieur aux pertes**, c'est-à-dire d'atteindre **le seuil d'oscillations de la cavité**, la raie d'émission du laser est donnée par:

$$\hbar\omega = E_g + E_{e1} + E_{h1}$$

Eg: le gap du matériau constituant le puits de potentiel;

E_{e1} , E_{h1} : les énergies de confinement des électrons et des trous dans ce puits.

Il est donc facile de **maîtriser**, dans une certaine gamme, **la longueur d'onde d'émission** du laser en jouant **sur la largeur du puits**

LASERS À PUIITS QUANTIQUES

EFFETS À CARACTÈRE QUANTIQUES

Longueur d'onde d'émission (suite)

Avantage du laser à puits quantique

- De ce qui précède, on déduit qu'il est facile de maîtriser, dans une certaine gamme, la longueur d'onde d'émission du laser en jouant sur la largeur du puits.
- Par contre, cette possibilité n'existe pas dans une double hétérostructure où seule la composition des matériaux permet d'ajuster la longueur d'onde.

LASERS À Puits Quantiques

Effets à caractère quantiques

Sensibilité à la température

- L'augmentation de la température entraîne un étalement énergétique de la distribution des porteurs.
- Comme le gain du seuil d'oscillation dépend de la densité de porteurs par unité d'énergie, le courant de seuil augmente avec la température.
- Dans un laser à puits quantique, la densité d'états constante réduit cet étalement et par suite rend le courant de seuil moins sensible à la température.



CHAPITRE 2 COMPOSANTS QUANTIQUES

2.3. LASERS À PUIITS QUANTIQUES

2.3.3. Laser à cavité verticale-VCSEL

LASERS À Puits Quantiques

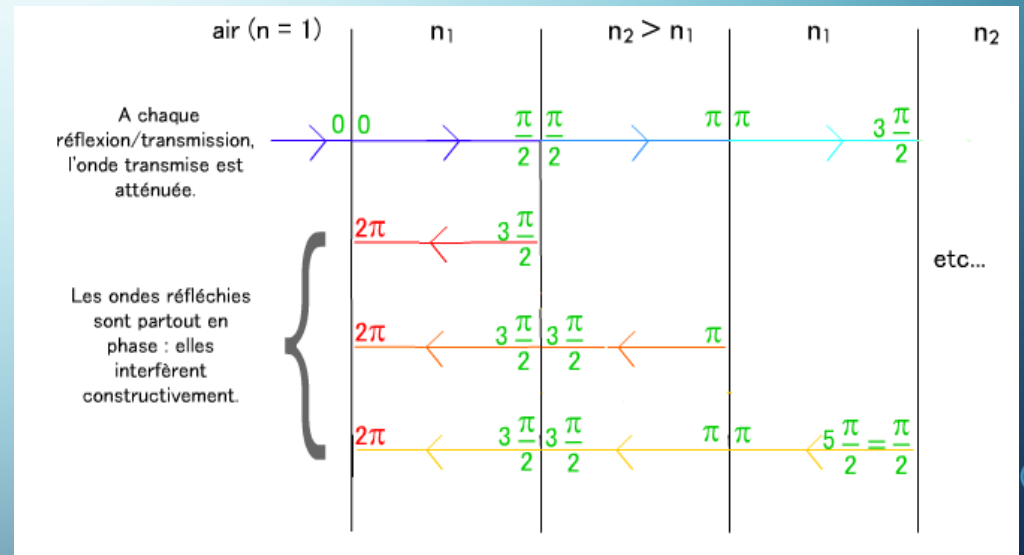
MIROIR DE BRAGG

Définition

Une **structure** simple de **miroir de Bragg** est un **empilement de plusieurs couches** d'**indices optiques différents**.

But

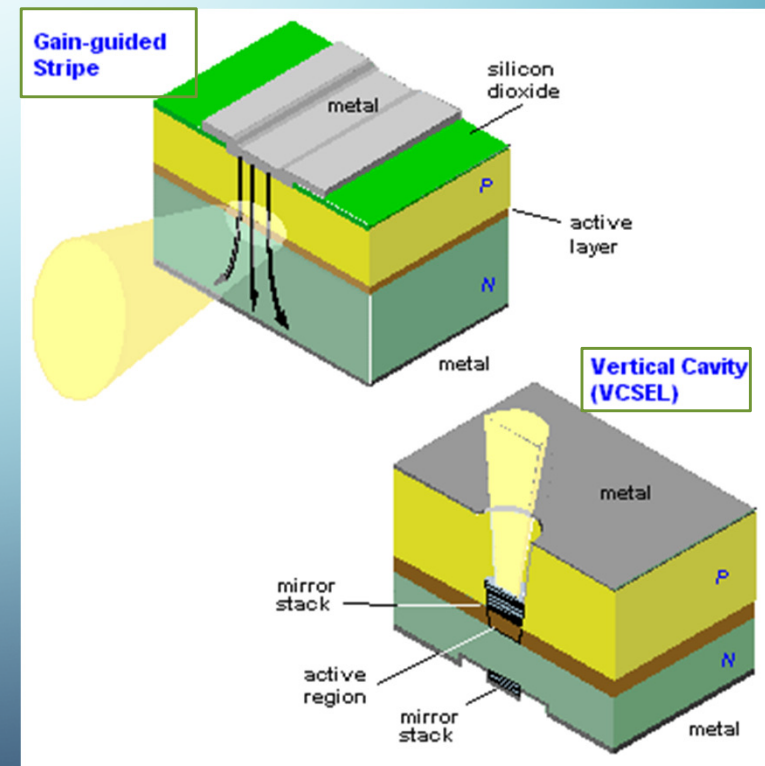
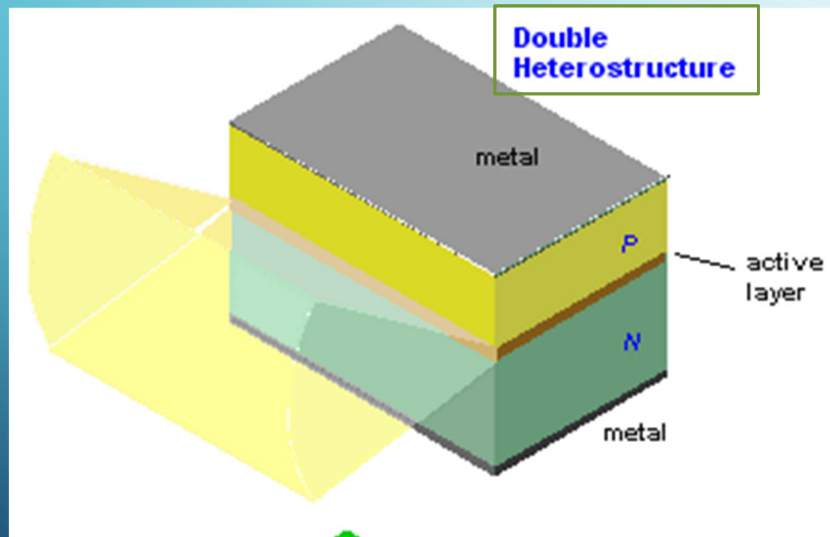
Optimiser l'interaction d'une **onde** avec le **milieu amplificateur** par le renvoi de l'onde **plusieurs fois** dans ce milieu à l'aide de **réflecteurs** (miroirs de Bragg)



L'épaisseur e_i de chaque couche d'indice n_i doit vérifier la condition: $e_i = \lambda_{\text{Bragg}} / 4 n_i$

LASERS À Puits Quantiques

DIFFÉRENTS TYPES DE LASERS



LASERS À Puits Quantiques

LASER À CAVITÉ VERTICALE-VCSEL

Définition

Le laser à cavité verticale-VCSEL (**V**ertical **C**avity **S**urface **E**mitting **L**aser, pronounced "vixel"), est un type de diode laser qui émet de la lumière depuis sa surface plutôt que son bord.

Diode



Emission latérale
(Edge emitting)

VCSEL



Emission par la surface
(Surface emitting)

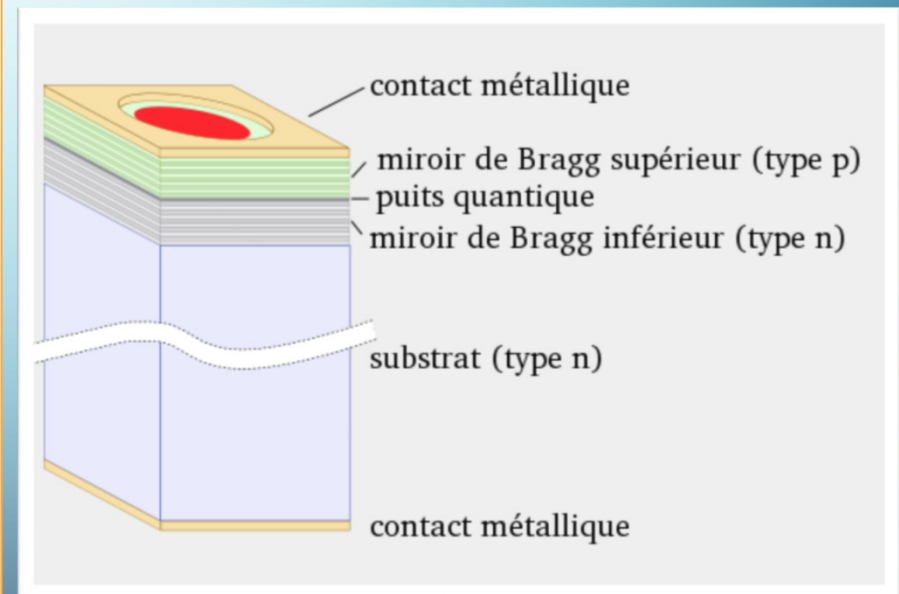
LASERS À PUIITS QUANTIQUES

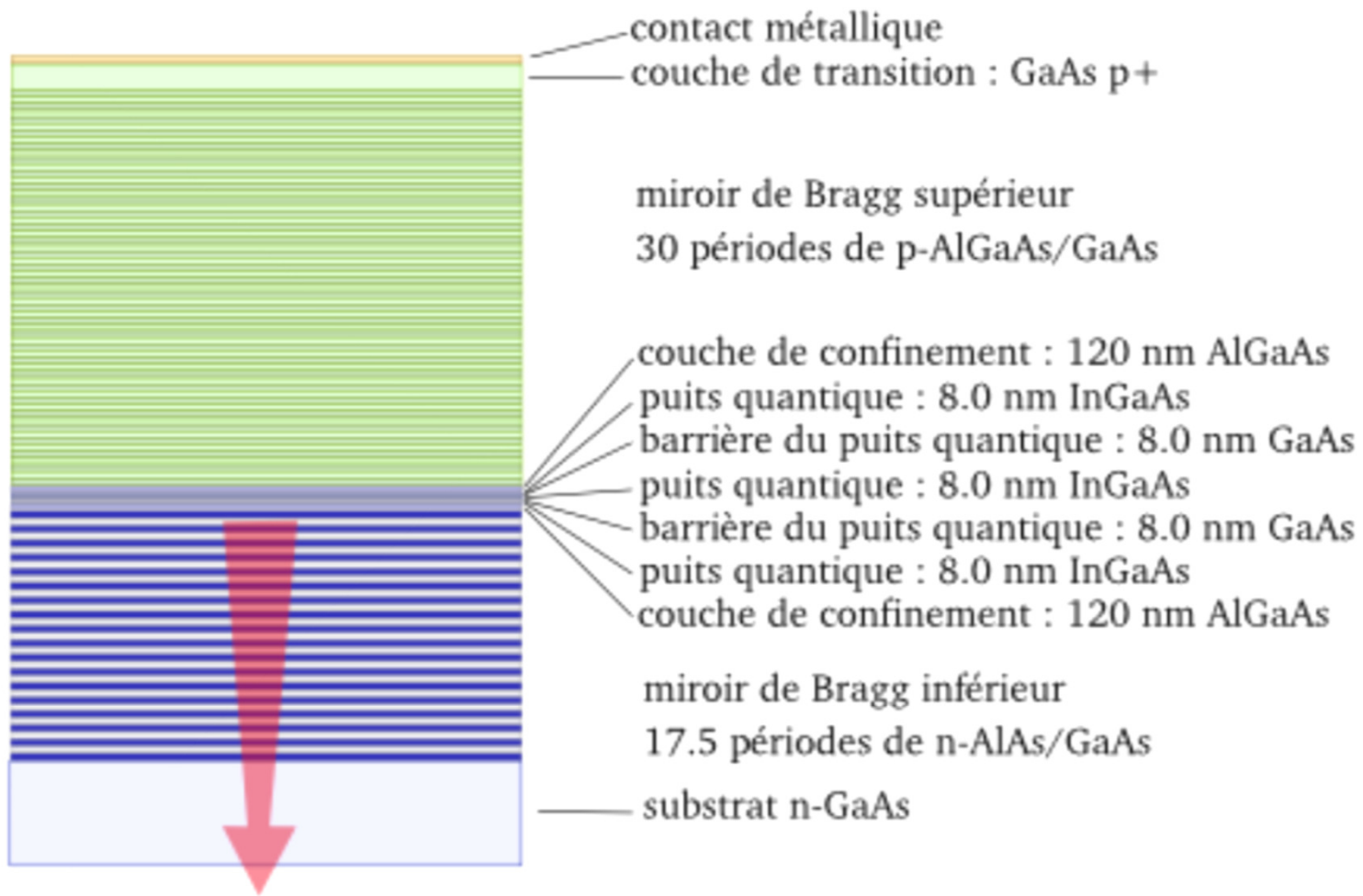
LASER À CAVITÉ VERTICALE-VCSEL

Structure du laser à cavité verticale

Les **faces réfléchissantes** de la cavité sont réalisées par **des miroirs de Bragg** situés au-dessus et au-dessous de **la région active**.

Le rayonnement est émis perpendiculairement aux couches épitaxiées, dans **un faisceau peu divergent** ($\sim 8^\circ$), de section circulaire.





LASERS À Puits Quantiques

LASER À CAVITÉ VERTICALE-VCSEL

AVANTAGES

- Ce type de structure permet de réaliser un volume actif minimum de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde du rayonnement.
- la géométrie verticale simplifie le couplage avec les fibres optiques, puisque le rayonnement est émis perpendiculairement à la surface d'épitaxie

INCONVÉNIENTS

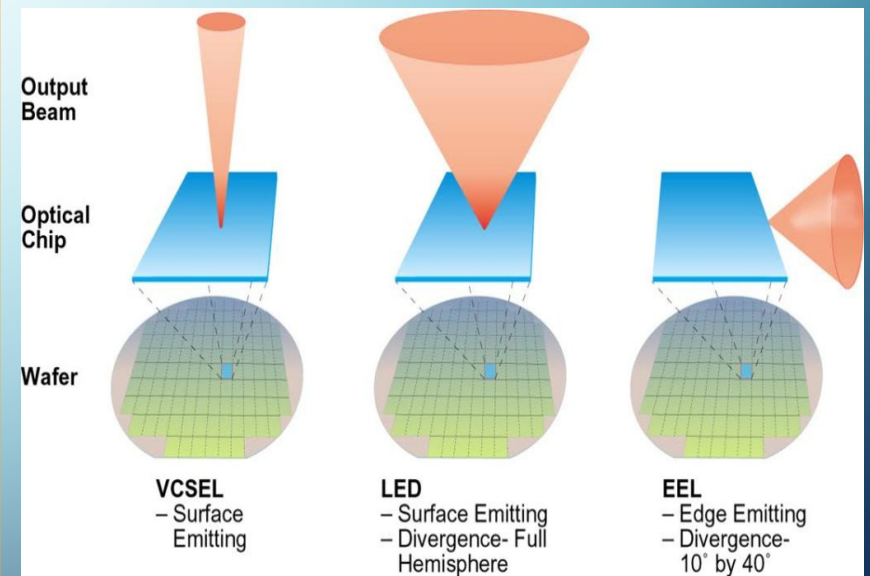
- la faible longueur de la cavité entraîne une augmentation de ses pertes (réaliser des faces réfléchissantes de fort pouvoir réflecteur, ce qui impose la réalisation de miroirs de Bragg).
- La structure ne comporte pas moins d'une centaine de couches, mais ne nécessite que des processus standards de technologie de fabrication de circuits intégrés.

LASERS À Puits Quantiques

LASER À CAVITÉ VERTICALE-VCSEL

Avantages par rapport aux lasers à émission latérale

- Les lasers à émission latérale **ne peuvent pas être testés au cours du processus de fabrication**, alors que c'est possible pour les lasers VCSEL;
- Pour les lasers VCSEL, plusieurs dizaines de milliers de diodes peuvent être fabriquées en même temps sur une plaquette;
- La fabrication des lasers VCSEL est **plus longue et plus coûteuse**, mais le **processus de fabrication étant plus facilement contrôlable**, le rendement s'en trouve amélioré,





CHAPITRE 2 COMPOSANTS QUANTIQUES

2.3. LASERS À Puits QUANTIQUES

2.3.4. Microcavité photonique Laser sans seuil

LASERS À Puits Quantiques

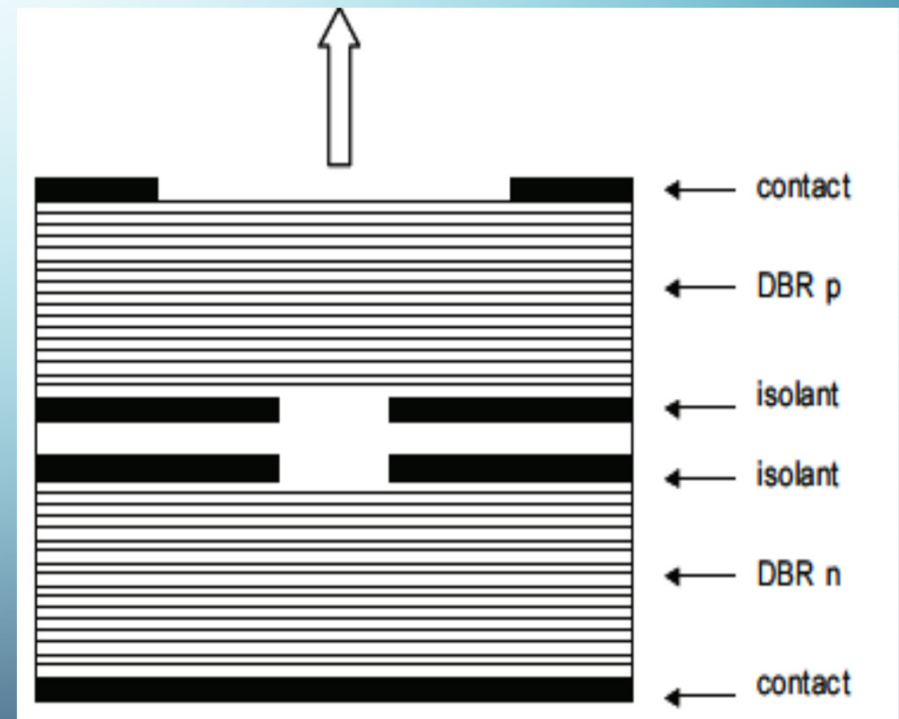
MICROCAVITÉ PHOTONIQUE - LASER SANS SEUIL-

Réalisation d'une microcavité

Il faut **réduire les dimensions latérales** de la structure à des valeurs comparables **à la longueur d'onde du rayonnement**, ce qui conduit au confinement des photons au même titre qu'une boîte quantique confine les électrons.

Avantage de la microcavité

Le confinement optique associé à la microcavité **favorise la contribution de l'émission spontanée** au mode de résonance de la cavité.



LASERS À PUIITS QUANTIQUES

MICROCAVITÉ PHOTONIQUE - LASER SANS SEUIL-

Obtention d'un laser sans seuil

Si on réalise **une microcavité** où l'unique mode de résonance **occupe tout son volume actif**, alors tout photon émis (qu'il soit stimulé ou spontané) est émis sur ce mode. Dans ce cas, le facteur d'émission spontanée $\gamma=1$ et **la caractéristique rayonnement-courant** ne présente **aucun seuil de superlinéarité**. Le laser ainsi obtenu est qualifié de **laser sans seuil**.

La caractéristique du laser **reste partout linéaire** et **l'émission change simplement de nature** lorsque le régime **d'inversion de population est atteint**.



CHAPITRE 2 COMPOSANTS QUANTIQUES

2.3. LASERS À Puits QUANTIQUES

2.3.5. Laser à cascade quantique

LASERS À PUIITS QUANTIQUES

LASER À CASCADE QUANTIQUE

LASER À JONCTION PN

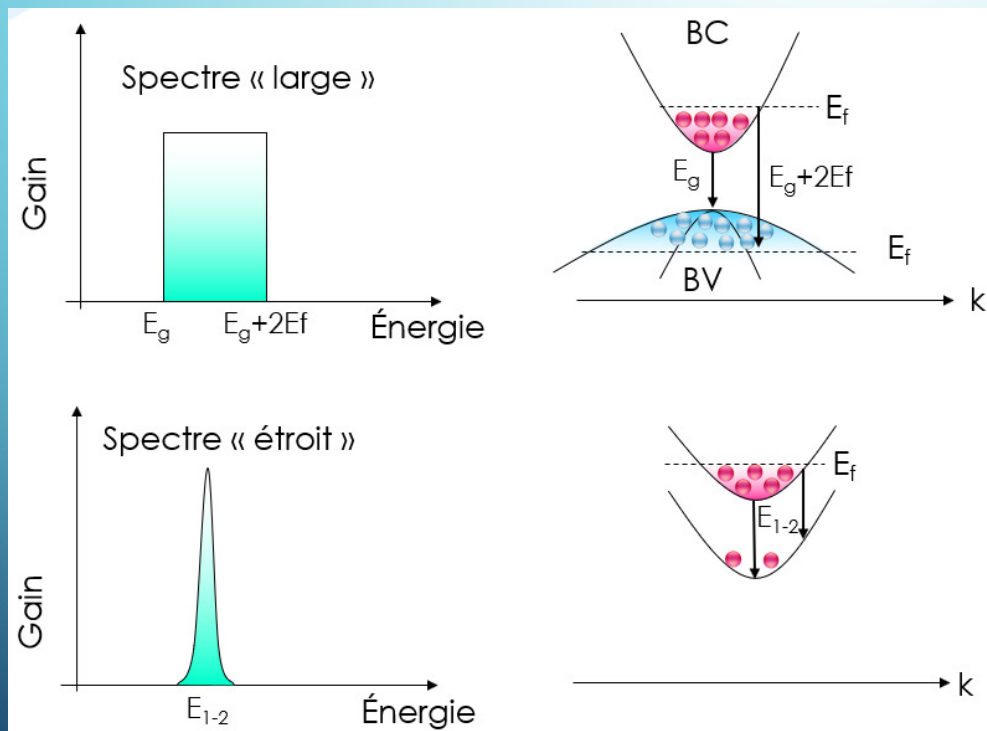
- L'amplification optique résulte de la recombinaisons radiatives entre les électrons de la bande de conduction et les trous de la bande de valence, (laser bipolaire).
- La longueur d'onde d'émission est déterminée par le gap du matériau.
- Le spectre de gain est relativement large.

LASER À CASCADE QUANTIQUE

- Il met en jeu un seul type de porteurs, on a donc un laser unipolaire.
- Il exploite les transitions électroniques entre sous-bandes résultant de la quantification de la bande de conduction dans une hétérostructure.
- La longueur d'onde d'émission est déterminée par le confinement quantique.
- Sa courbe de gain a un spectre étroit

LASERS À PUIITS QUANTIQUES

LASER À CASCADE QUANTIQUE



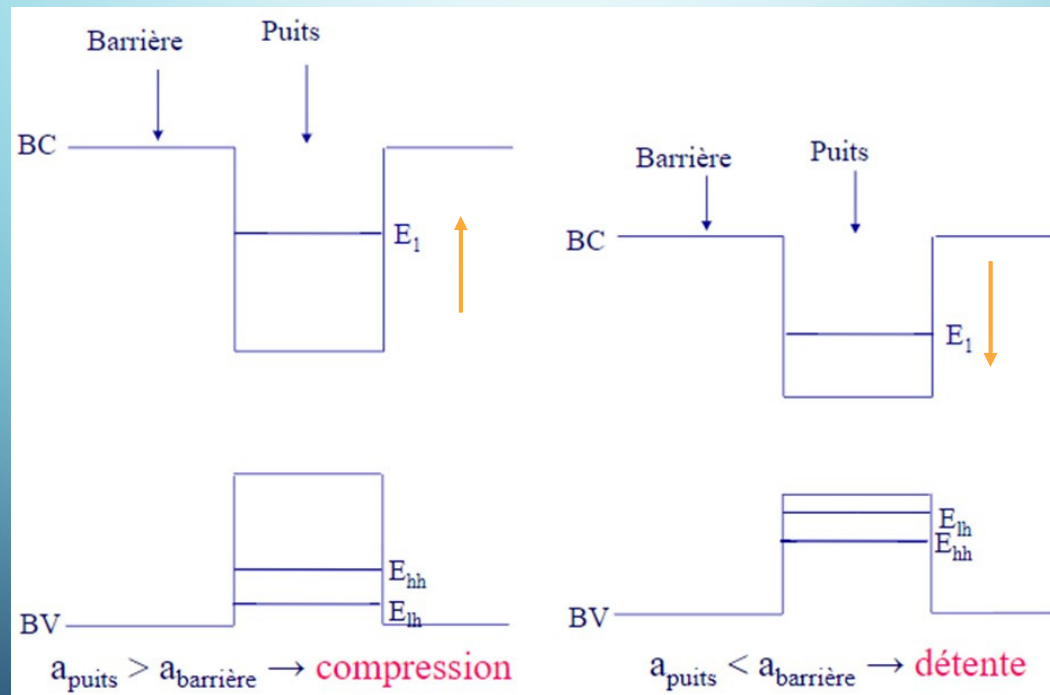
laser à jonction pn
transitions inter-bandes

laser à cascade quantique
transitions inter-sous-bandes

LASERS À PUIITS QUANTIQUES

LASER À CASCADE QUANTIQUE

Effet de la contrainte sur les sous-bandes

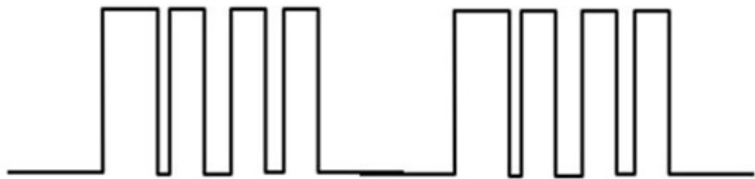


LASERS À Puits Quantiques

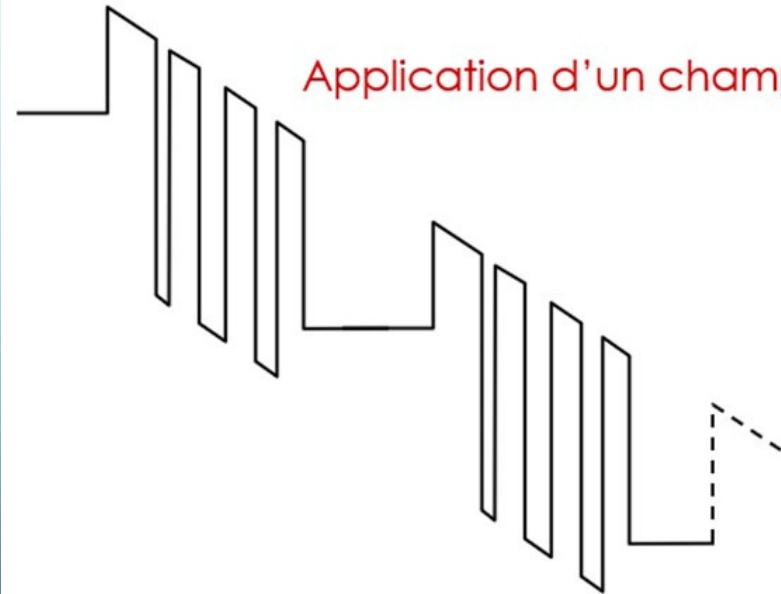
LASER À CASCADE QUANTIQUE

Effet du Champ Electrique

Multi-puits Quantiques : Sans champ



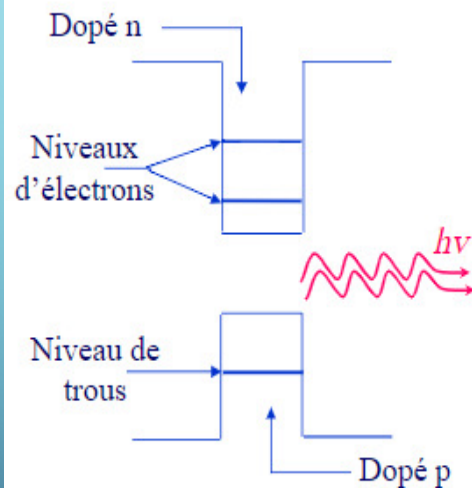
Application d'un champ \vec{E}



LASERS À Puits Quantiques

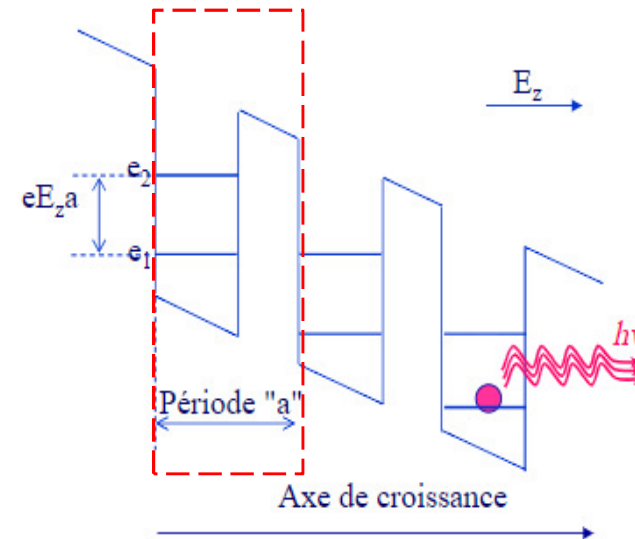
LASER À CASCADE QUANTIQUE

Lasers inter-bandes



Transition inter-bande dans une Hétérostructure de type I.

Lasers intra-bandes



Transitions intra-bandes dans une structure à Cascade Quantique

Pour le laser inter-bandes, $h\nu$ donc λ est imposé par le gap

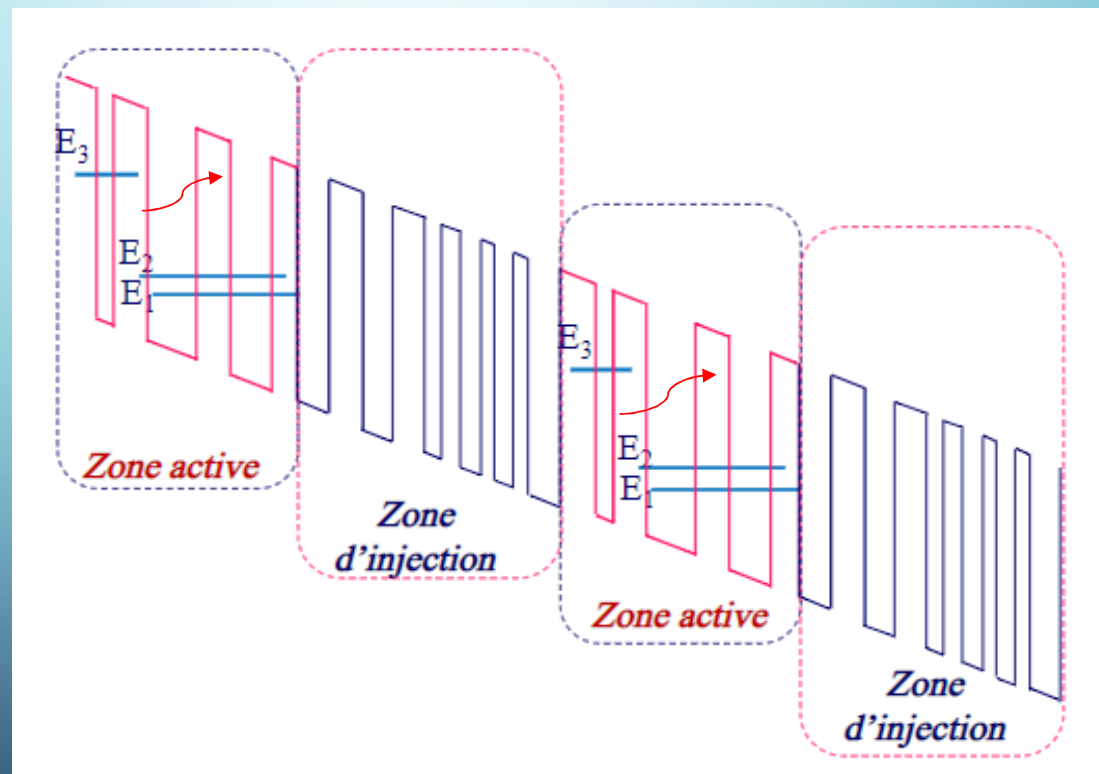
Pour le laser intra-bandes, $h\nu$ donc λ dépend de la période $a \Rightarrow$ la longueur λ maîtrisée, par les profondeur et largeur des puits et des barrières

LASERS À Puits QUANTIQUES

LASER À CASCADE QUANTIQUE

Structure d'un laser cascade quantique

Avantage: La structure est composée de **plusieurs périodes**, permet à **un électron** (partant de la gauche) d'émettre **plusieurs photons**



$E_3 \rightarrow E_2$ émission d'un **photon**

$E_2 \rightarrow E_1$ émission d'un **photon**

LASERS À PUIITS QUANTIQUES

LASER À CASCADE QUANTIQUE

Process d'émission

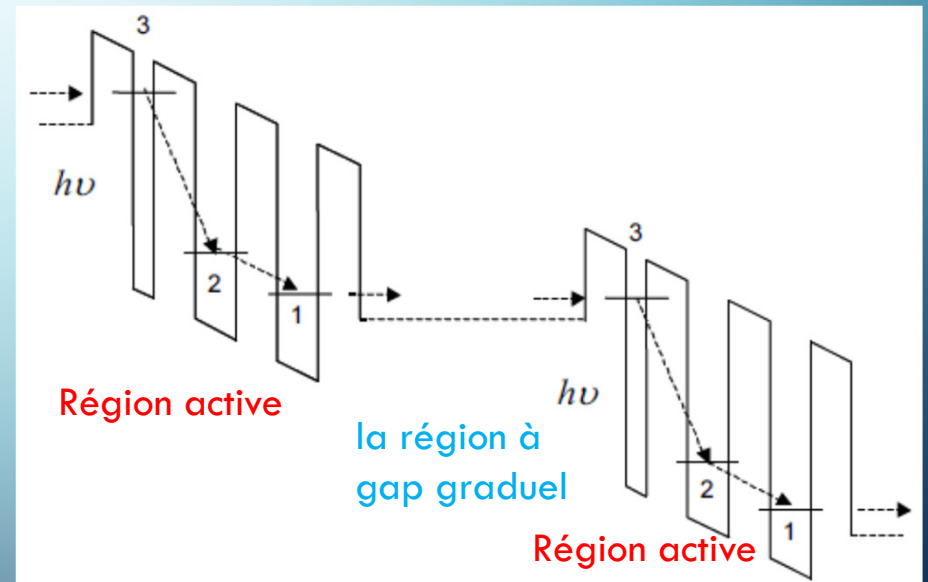
La **région active** est constituée de **puits quantiques couplés**, elle se comporte comme un **laser à 4 niveaux**.

L'**inversion de population** est réalisée entre les **deux sous-bandes** excitées $n=3$ et $n=2$.

La sous-bande 3 est **peuplée** par **injection tunnel** depuis **la région à gap graduel** qui constitue le niveau 4.

La **sous-bande 2** est vidée **par relaxation inélastique**, assistée par **phonons optiques**, dans la **sous-bande 1** qui se vide elle-même par **effet tunnel** dans la **région à gap graduel** adjacente.

L'**amplification** optique résulte de **transitions radiatives** entre les **sous-bandes 3 et 2**.

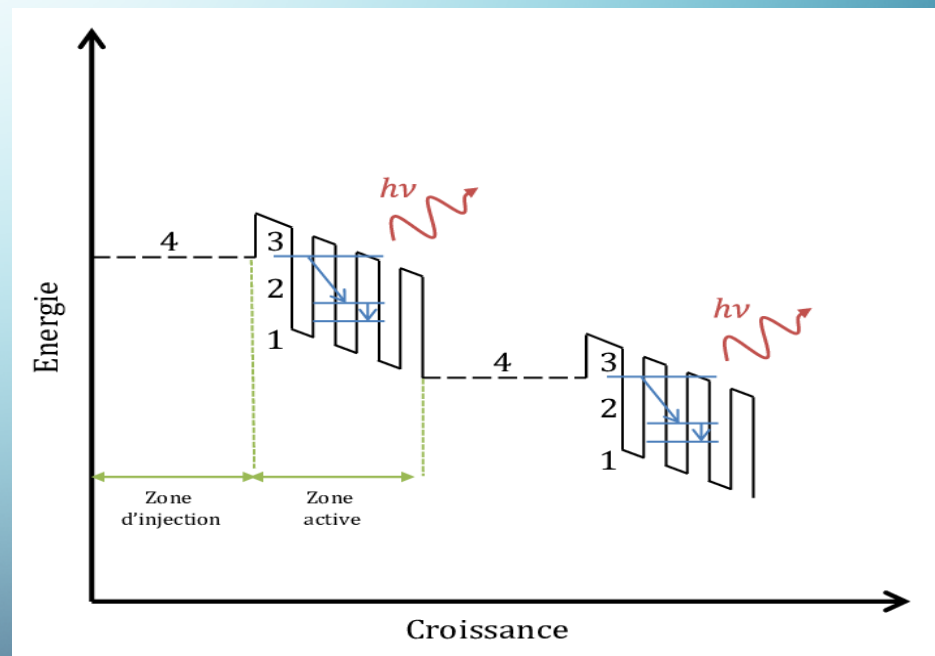


LASERS À Puits QUANTIQUES

LASER À CASCADE QUANTIQUE

Rendement quantique

- Le motif étant répété un certain nombre de fois dans la structure;
- Un même électron injecté a l'entrée peut créer plusieurs photons en cascade;
- Le rendement quantique peut de ce fait être supérieur à 1.





CHAPITRE 2 COMPOSANTS QUANTIQUES

2.3. LASERS À Puits QUANTIQUES

2.3.6. Laser à boîtes quantiques

LASERS À PUIITS QUANTIQUES

LASER À BOITES QUANTIQUES

Avantages de l'utilisation des boites quantiques

- la **densité d'états** est redistribuée sur des **niveaux discrets**, ce qui élimine la dispersion en k et augmente la sélectivité du gain;
- Le **courant de seuil** d'émission stimulée est considérablement **réduit**, d'un facteur **10 à 100**;
- Les porteurs, piégés dans des boites, sont **moins sollicités** par les centres de recombinaison;
- Le **seuil d'émission** stimulée, est pratiquement **insensible à la température**;
- Le **confinement quantique**, conditionné par la **taille des boites**, apporte un degré de liberté supplémentaire dans le **choix de la longueur d'onde** d'émission;

LASERS À PUIITS QUANTIQUES

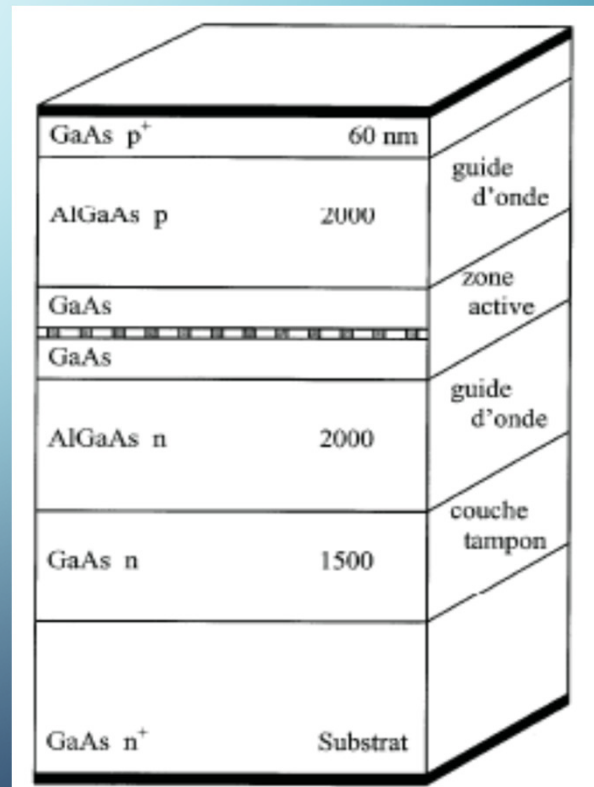
LASER À BOITES QUANTIQUES

Techniques de réalisation des boites quantiques

La réalisation de **boîtes quantiques** est obtenue par **croissance épitaxiale**, par **MBE** ou **MOCVD**, d'un matériau présentant un très **fort désaccord** de maille avec **le substrat**.

Matériaux utilisés

Les boites quantiques mises à profit actuellement dans la réalisation de lasers sont des **îlots contraints** de **InAs** épitaxiés sur des couches de **GaAs**.



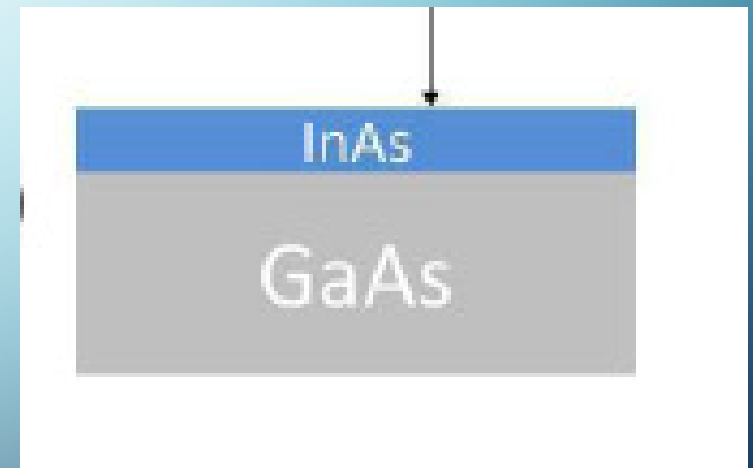
LASERS À Puits Quantiques

LASER À BOITES QUANTIQUES

Etapes de réalisation des boîtes quantiques

Etape 1

Une couche d'InAs est déposée par MBE sur un substrat de GaAs. Lorsque la **couche d'InAs est encore très mince** (< 1.7 mono-couches en moyenne), elle va avoir le **même paramètre de maille que celui de GaAs**, bien que le désaccord de maille entre les matériaux massifs soit d'environ 7%.



LASERS À Puits Quantiques

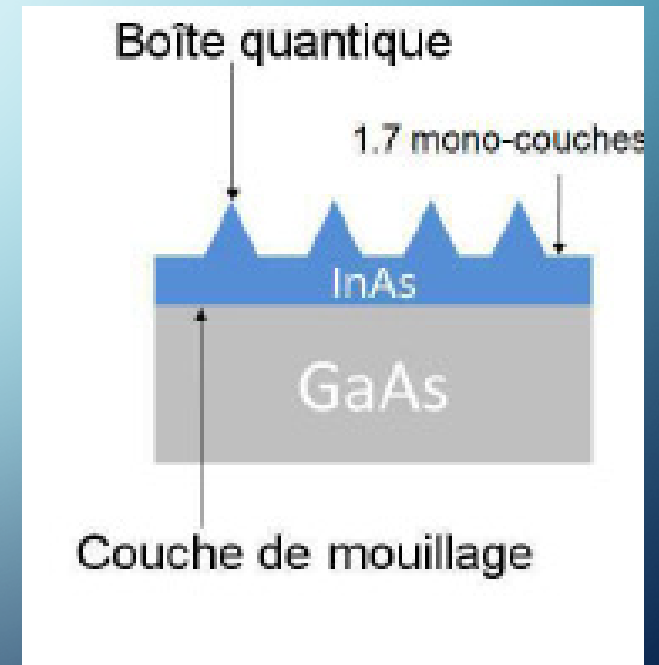
LASER À BOITES QUANTIQUES

Étapes de réalisation des boîtes quantiques

Étape 2

Quand l'épaisseur d'InAs dépasse 1.7 mono-couches, la contrainte accumulée atteint un seuil et la couche d'InAs va relaxer en formant des îlots nanométriques de forme conique.

La boîte quantique est constituée d'un îlot typique qui a un rayon de $\sim 20\text{nm}$ et une hauteur de $\sim 3\text{nm}$ avec une densité $10^9 - 10^{11}\text{cm}^{-2}$.



LASERS À Puits Quantiques

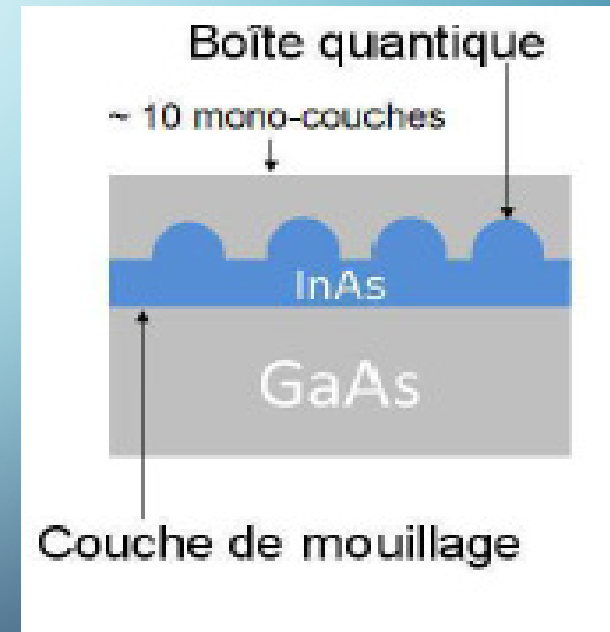
LASER À BOITES QUANTIQUES

Etapes de réalisation des boîtes quantiques

Etape 3

L'échantillon est ensuite **recouvert par une couche de GaAs** afin de **passiver la surface** du dépôt d'InAs.

L'épaisseur de cette couche de GaAs (capping layer) est de l'ordre au minimum **d'une dizaine de mono-couches**. Pendant cette croissance, les îlots d'InAs vont s'étaler et prendre une forme de lentilles aplaties.



LASERS À PUIITS QUANTIQUES

LASER À BOITES QUANTIQUES

Ordre de grandeur

- Les lasers à boites quantiques ont un **courant de seuil** de l'ordre de 11 A/cm^2 à basse température et 270 A/cm^2 à la température ambiante. Le **courant de seuil** est pratiquement indépendant de **la température** jusqu'à environ 200 K et **augmente exponentiellement** au delà.
- Ces lasers émettent un rayonnement dont la longueur d'onde est $\lambda=1,23 \mu\text{m}$ à la température de **l'azote liquide** et $\lambda=1,31 \mu\text{m}$ à la température **ambiante**.