

Composants photoniques



Chapitre 4 : Lasers

4.2. Lasers à semi-conducteurs

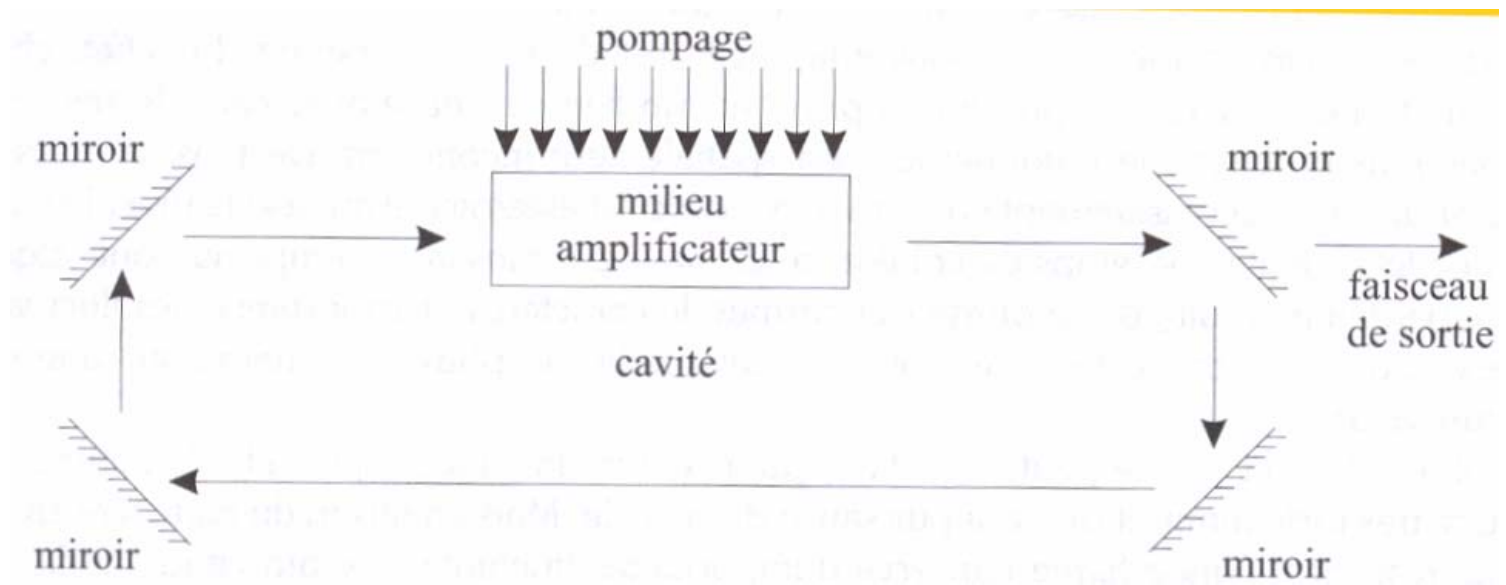
LASERS à semiconducteurs



4.2.1 Introduction

Qu'est-ce qu'un laser ?

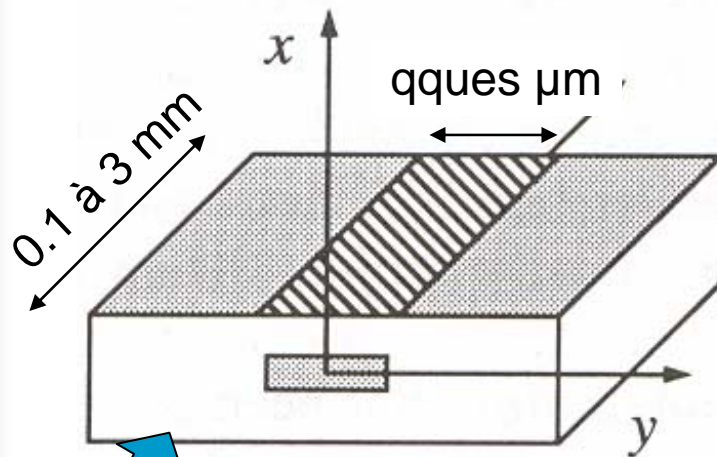
LASER = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



Laser = oscillateur optique

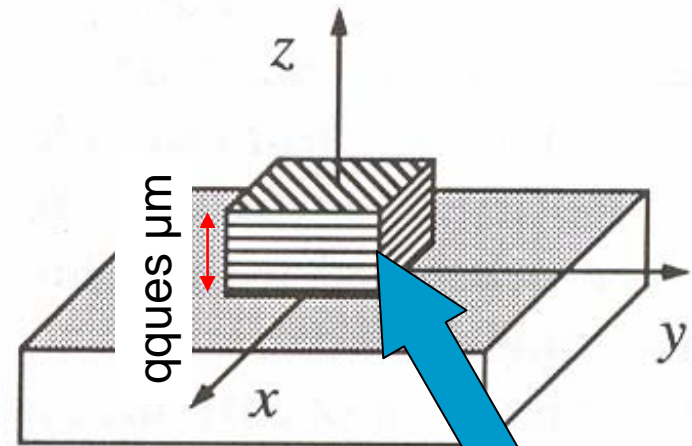
Lasers à semiconducteurs

- Milieu amplificateur: semiconducteur
- Cavité: faces clivées, miroir, cavité externe
- Pompage: injection électrique, pompage optique



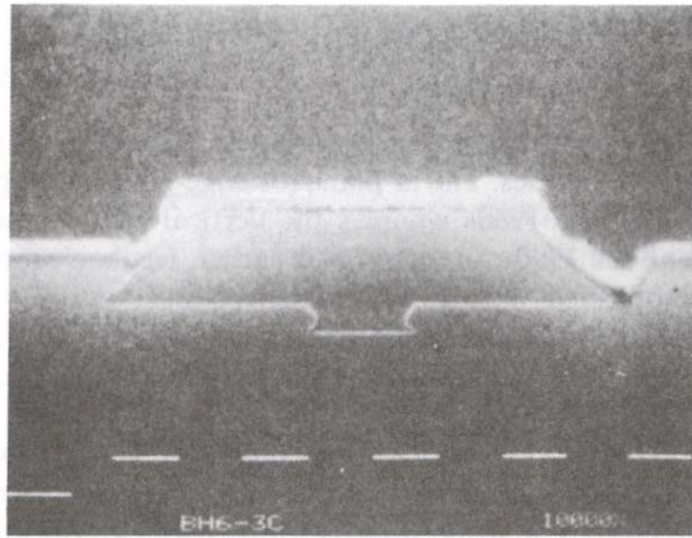
In-Plane

Face clivée
Semi-réfléchissante

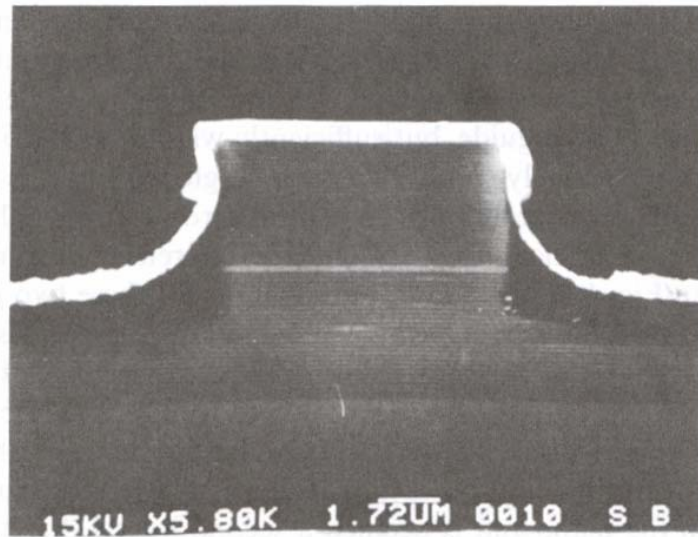


VCSEL

Mirroi

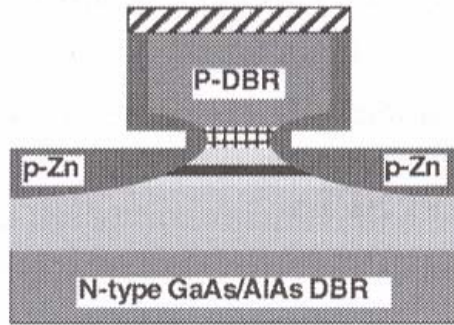


(a)

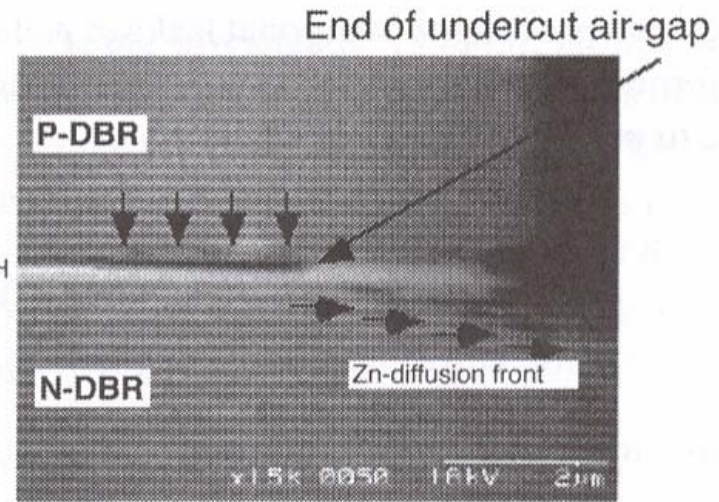


(b)

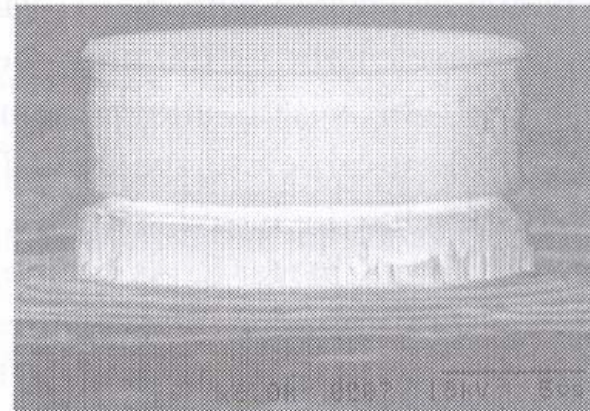
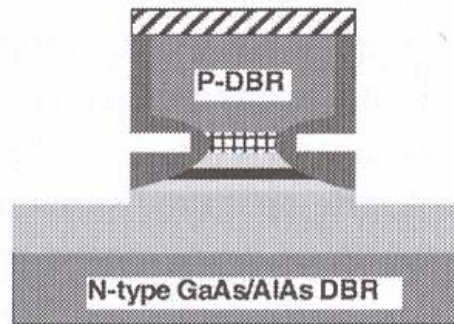
FIGURE 1.12 Cross-sectional SEMs of (a) in-plane and (b) vertical-cavity semiconductor lasers.



Active/SCH

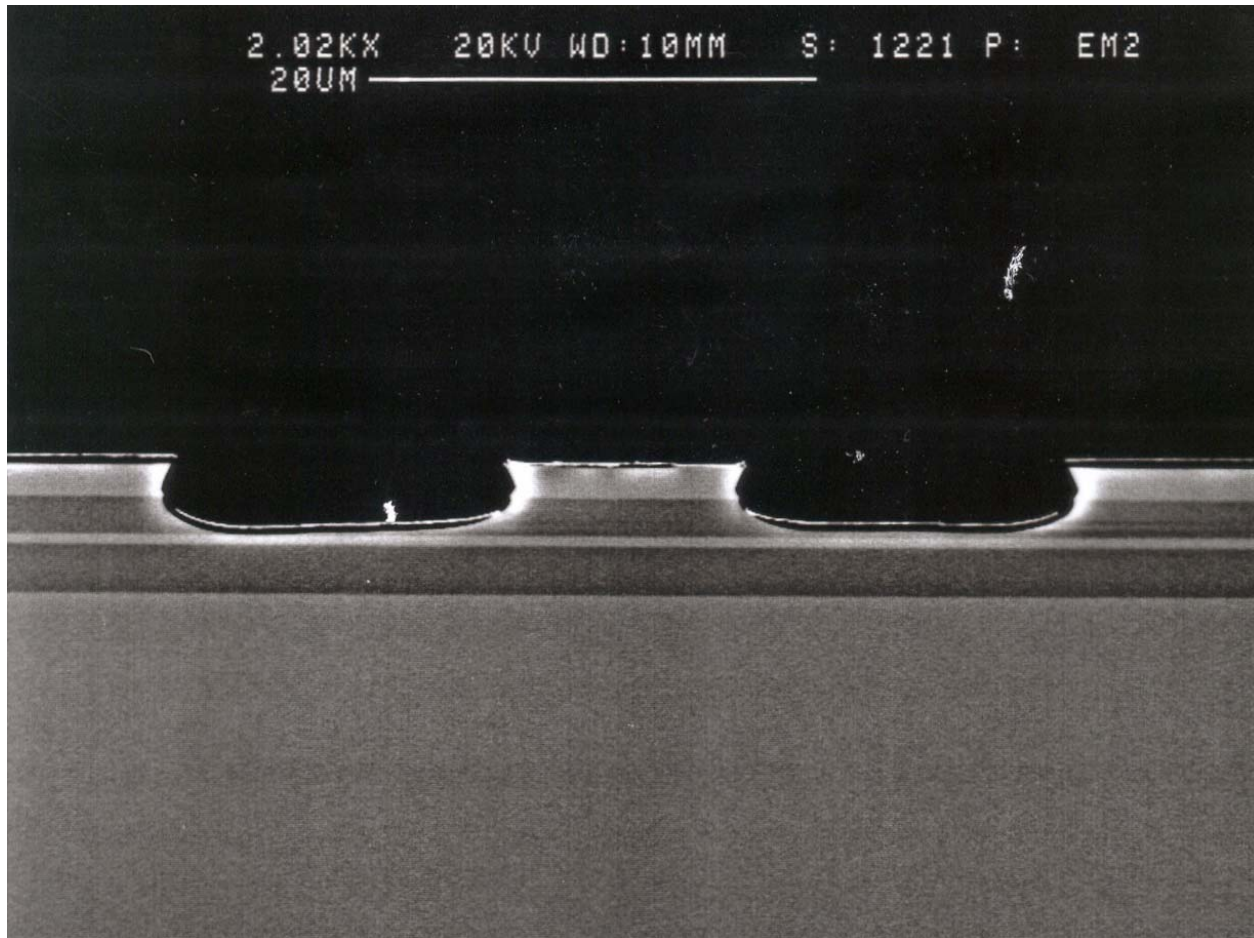


(a)



(b)

VCSEL: Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser
 Contrôle des épaisseurs à qqes Å près !!



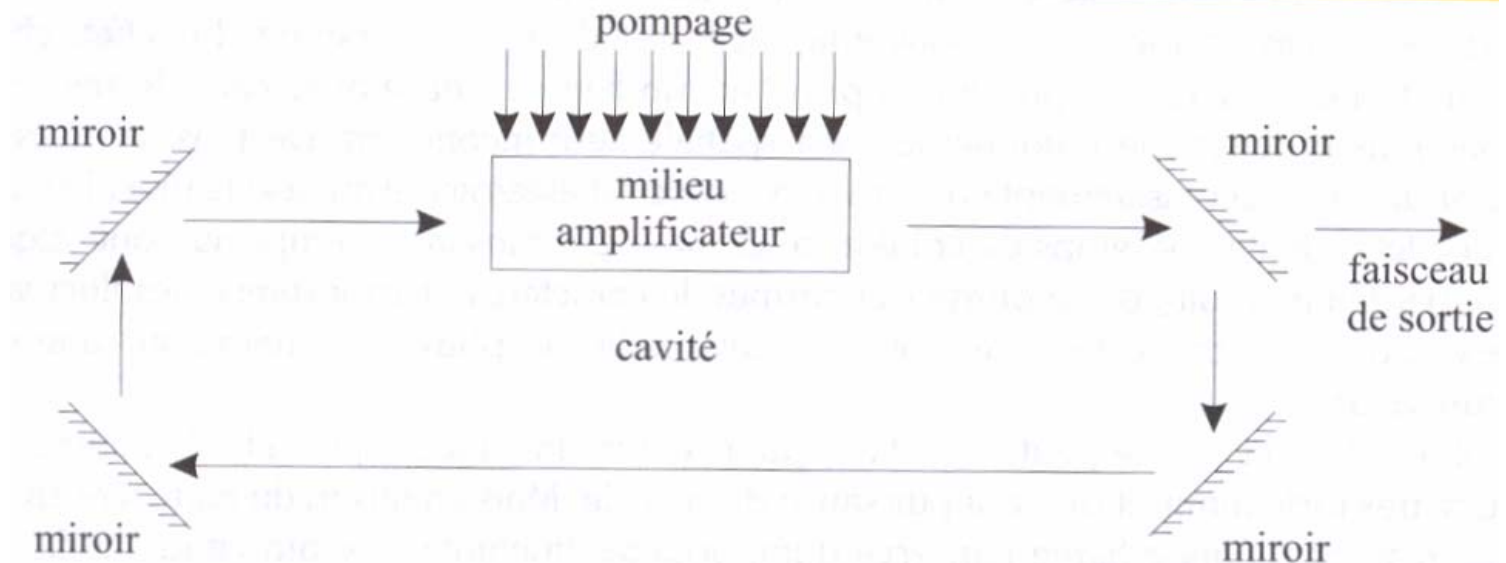
LASERS à semiconducteurs



4.2.2 Structure laser

Qu'est-ce qu'un laser ?

LASER = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



Laser = oscillateur optique

Qu'est-ce qu'un laser ?

- L'effet laser repose sur l'interaction du milieu amplificateur avec le rayonnement (avec le champ électromagnétique).
- Condition sine qua non pour avoir effet laser ?
- Inversion de population !!!

Construction d'un laser à semiconducteur

- Il faut favoriser:
 - L'accumulation de porteurs dans la zone de recombinaisons (zone active): « confinement des porteurs »
 - Objectif: inversion de population
 - Le recouvrement du champ électromagnétique et de la zone active: « confinement optique »
 - Objectif: interaction milieu / rayonnement

Lasers à semiconducteurs

- Pompage: injection électrique
 - Jonction p – i – n polarisée en direct
 - Structure type « cascade » (unipolaire)
- Recombinaisons (radiatives !) dans la zone i

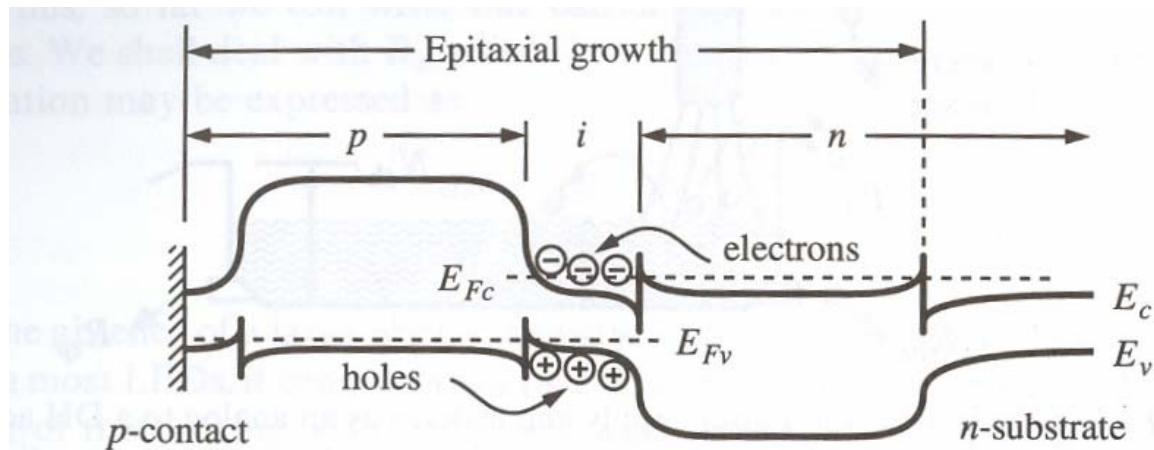


FIGURE 2.1 Band diagram of forward biased double-heterostructure diode.

Zone i = zone active

Lasers à semiconducteurs

Amplification dans la zone active si:

- Recombinaisons dans zone active:
 - Confinement des porteurs (*i.e.*, e et h) ds zone active
 - Propriété: gap
- Champ électromagnétique dans zone active:
 - Confinement des photons dans zone active
 - Propriété: indice de réfraction

Lasers à semiconducteurs – Double Hétérostructure

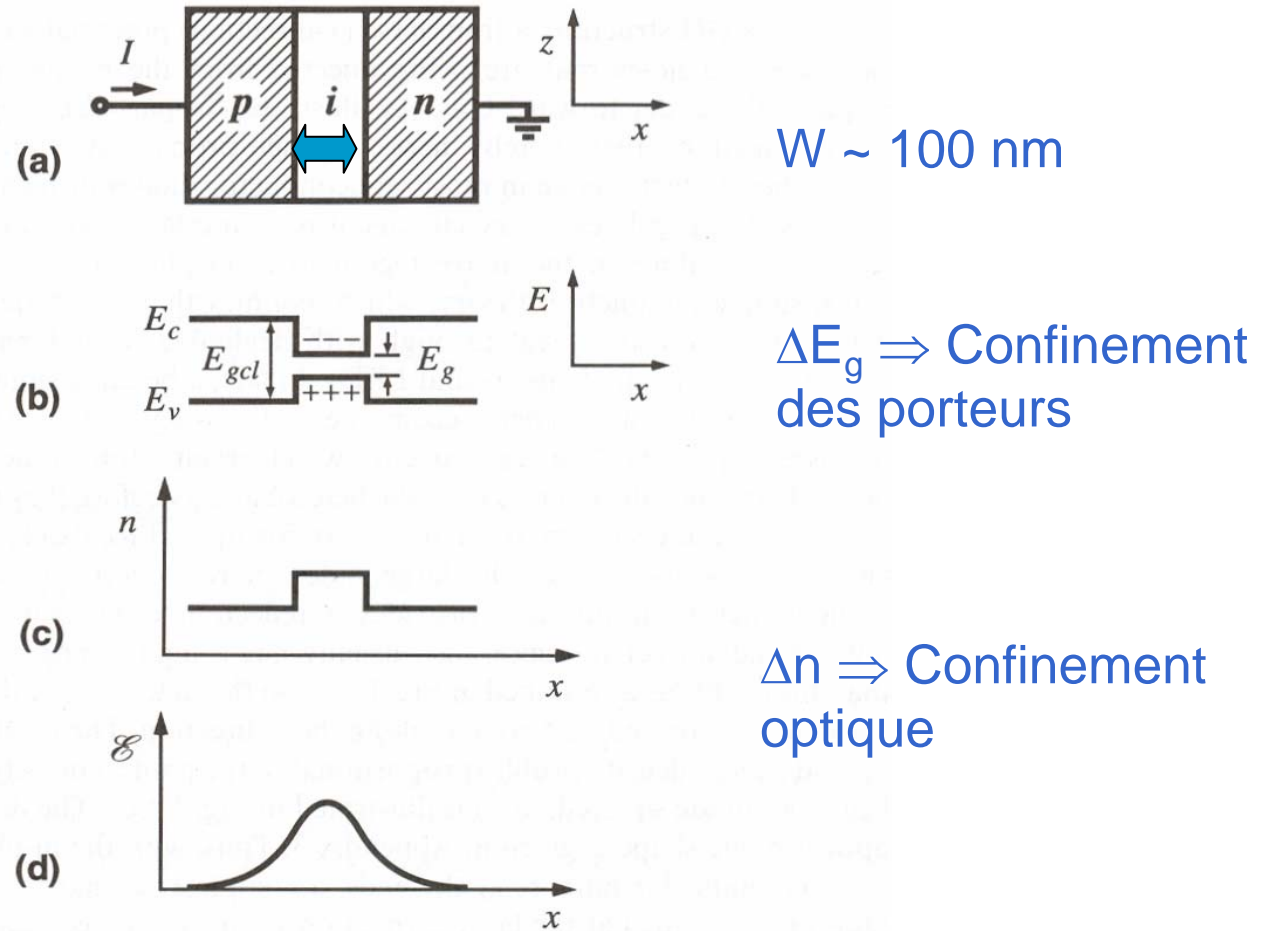
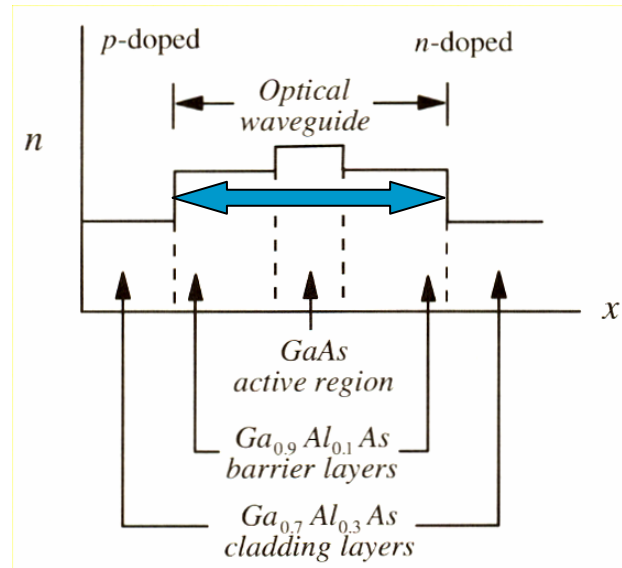
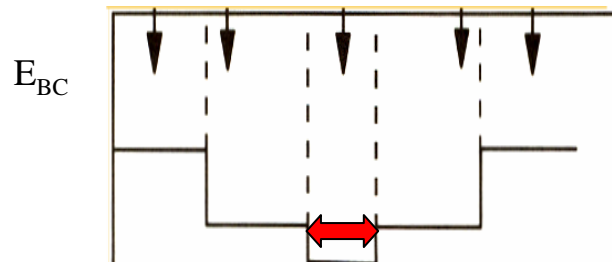


FIGURE 1.4 Aspects of the double-heterostructure diode laser: (a) a schematic of the material structure; (b) an energy diagram of the conduction and valence bands vs. transverse distance; (c) the refractive index profile; (d) the electric field profile for a mode traveling in the z -direction.

Lasers à semiconducteurs – Confinements séparés



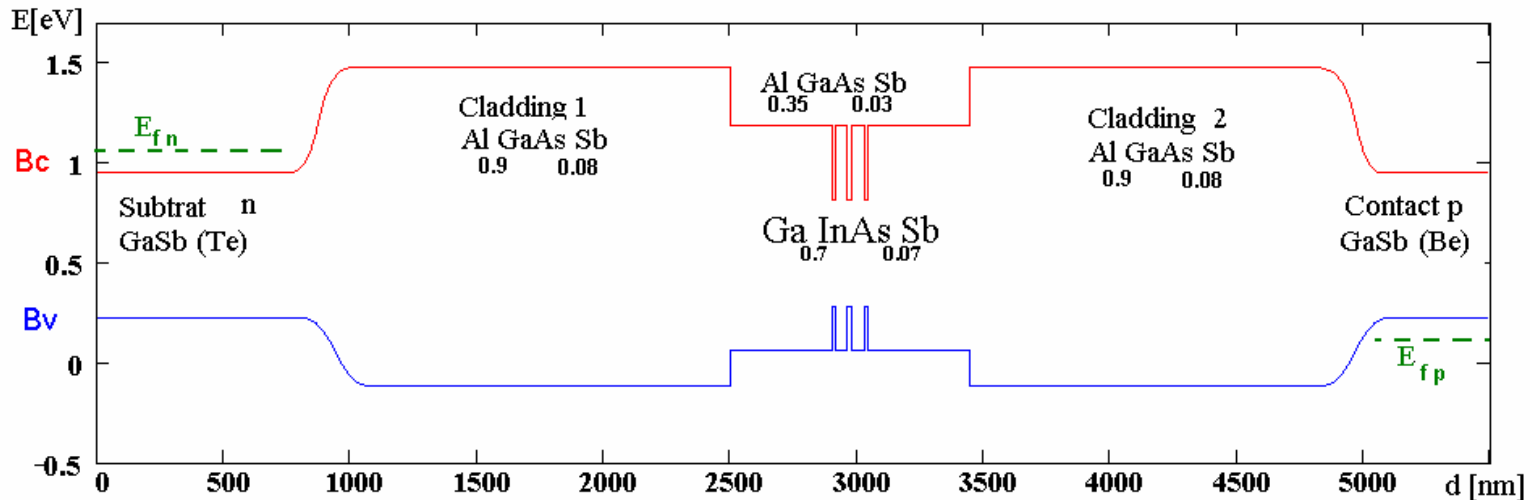
↔
Confinement optique
 $W \sim 100 \text{ nm}$



↔
Confinement porteurs
 $W \sim 10 \text{ nm}$

Structures à puits quantiques

Exemple de structure laser



- Substrat
- Couches de confinement
- Guide d'onde
- Zone active
- Couche de contact
- Grand gap
- Gap intermédiaire
- Petit gap
- Dopage facile

Chap 4.2 Notez la complexité....d'un laser simple !!

Laser à semiconducteurs ?

Composant « laser »



- Injection de courant **Pompage**
- Puissance lumineuse émise **Milieu amplificateur**
- Spectre d'émission **Cavité**

N.B.: pour certaines applications, pompage optique

Lasers à semiconducteurs – Seuil laser

- Faible pompage:
 - Absorption
 - Émission spontanée



- Diode électroluminescente... au mieux

Lasers à semiconducteurs – Seuil laser

- Fort pompage:
 - Absorption
 - Émission stimulée



- Au dessus du **seuil**: émission stimulée > absorption
- Laser !!

LASERS à semiconducteurs



4.2.3 Seuil laser

Population de porteurs

- L'équation d'évolution de la population d'électrons dans la zone active s'écrit :

$$dN/dt = G_{\text{gen}} - R$$

- G_{gen} = taux d'injection des e^- dans la zone active (composant alimenté par courant I)

- $G_{\text{gen}} = \eta_i I / qV$

- η_i **rendement quantique interne** = fraction de porteurs injectés qui atteignent la zone active.
- V = volume zone active

Population de porteurs

- $R =$ taux de recombinaison des e^-
- $R = AN + BN^2 + CN^3 + R_{st}(N)$
- L'ensemble des processus spontanés est caractérisé par **une durée de vie**, τ :
 - Si processus spontanés seuls: $dN/dt = - N/\tau$
 - Ou encore: $N/\tau = AN + BN^2 + CN^3$.

Population de porteurs

On peut donc écrire:

- $dN/dt = G_{\text{gen}} - R$
- $G_{\text{gen}} = \eta_i I / qV$
- $R = N/\tau + R_{\text{st}}$
- $R = AN + BN^2 + CN^3 + R_{\text{st}}$
- $dN/dt = \eta_i I / qV - N/\tau - R_{\text{st}}$

Seuil laser

- Sous le seuil: $R_{st} = 0$
- Régime stationnaire: $dN/dt = 0$
- $R_{rec} = AN + BN^2 + CN^3 = N/\tau$
- $0 = \eta_i I/qV - N/\tau.$

- A la limite du seuil:

$$(AN + BN^2 + CN^3)_{th} = N_{th}/\tau$$

$$\eta_i I_{th}/qV = N_{th}/\tau = (AN + BN^2 + CN^3)_{th}$$

Seuil laser

- Au seuil: $\eta_i I_{th}/qV = N_{th}/\tau = (BN^2 + AN + CN^3)_{th}$
- Expérimentalement: on injecte le courant d'intensité I
- $I_{th} = qVN_{th}/\tau\eta_i = qV(AN + BN^2 + CN^3)_{th}/\eta_i$

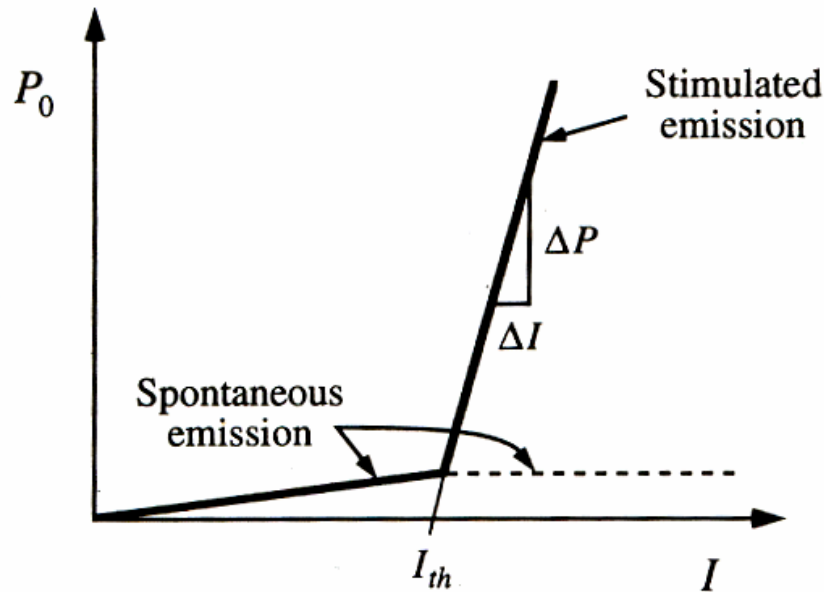
- Pour diminuer le courant de seuil il faut:
 - Augmenter la durée de vie des porteurs τ
 - Diminuer les pertes diverses
 - Qualité du matériau
 - Augmenter η_i
 - Qualité du matériau
 - Technologie du composant
 - Diminuer la densité de porteurs au seuil N_{th}
 - bandgap engineering: contrainte,...
 - Diminuer le volume de la zone active V
 - **Nanostructures !!**

LASERS à semiconducteurs



4.2.4 Puissance émise

Caractéristique Puissance - courant



$$\eta_d = \frac{q}{h\nu} \left(\frac{\Delta P}{\Delta I} \right)$$

η_d = nombre de photons émis par électron injecté
 η_d est obtenu à partir de la caractéristique P(I)

$\eta_i = \text{rendement quantique interne}$

$\alpha_i = \text{pertes internes}$

- On sait maintenant comment mesurer η_d d'après la caractéristique Puissance émise = f(courant injecté).

- Or, on peut montrer :
$$\eta_d = \eta_i \left(\frac{\alpha_{FP}}{\alpha_i + \alpha_{FP}} \right)$$

Avec $\alpha_{FP} = 1/2L \ln (1/R_1 R_2)$, $R_{1,2} = \text{réflectivités des miroirs}$.

- Donc:
$$\eta_d = \eta_i \frac{\ln\left(\frac{1}{R}\right)}{L\alpha_i + \ln\left(\frac{1}{R}\right)}$$
 (diodes planes avec $R_1 = R_2 = R$)

$\eta_i = \text{rendement quantique interne}$

$\alpha_i = \text{pertes internes}$

$$\eta_d = \eta_i \frac{\ln\left(\frac{1}{R}\right)}{L\alpha_i + \ln\left(\frac{1}{R}\right)} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{\eta_d} = \frac{\alpha_i}{\eta_i \ln\left(\frac{1}{R}\right)} L + \frac{1}{\eta_i}$$

- On peut donc calculer α_i et η_i à partir des caractéristiques $P(I)$ obtenues pour une série de diodes de longueurs différentes:
 - L'ordonnée à l'origine donne η_i
 - La pente permet alors d'obtenir α_i

Températures caractéristiques

- Les performances des lasers se dégradent quand la température augmente. On définit deux "températures caractéristiques" empiriques qui sont des critères de qualité des lasers.

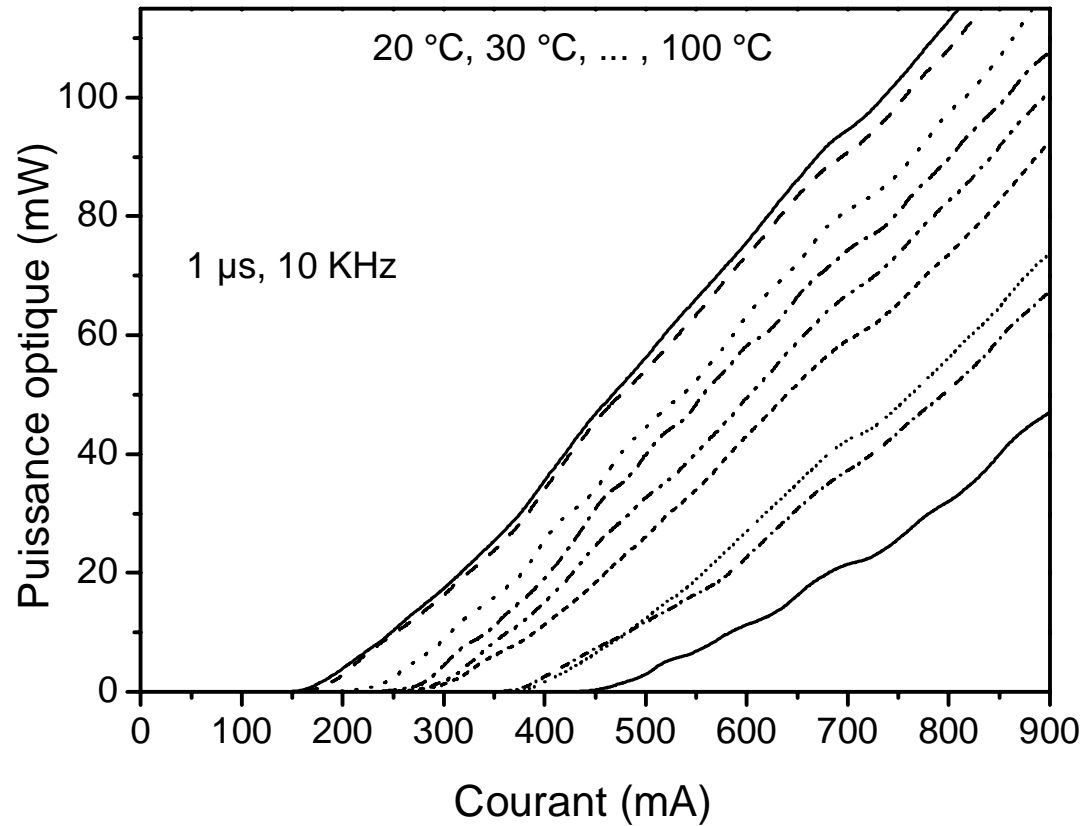
- Le seuil laser augmente avec la température

$$I_{th} = I_0 \exp(T/T_0)$$

- Le rendement différentiel externe diminue avec la température:

$$\eta_d = \eta_0 \exp(-T/T_1)$$

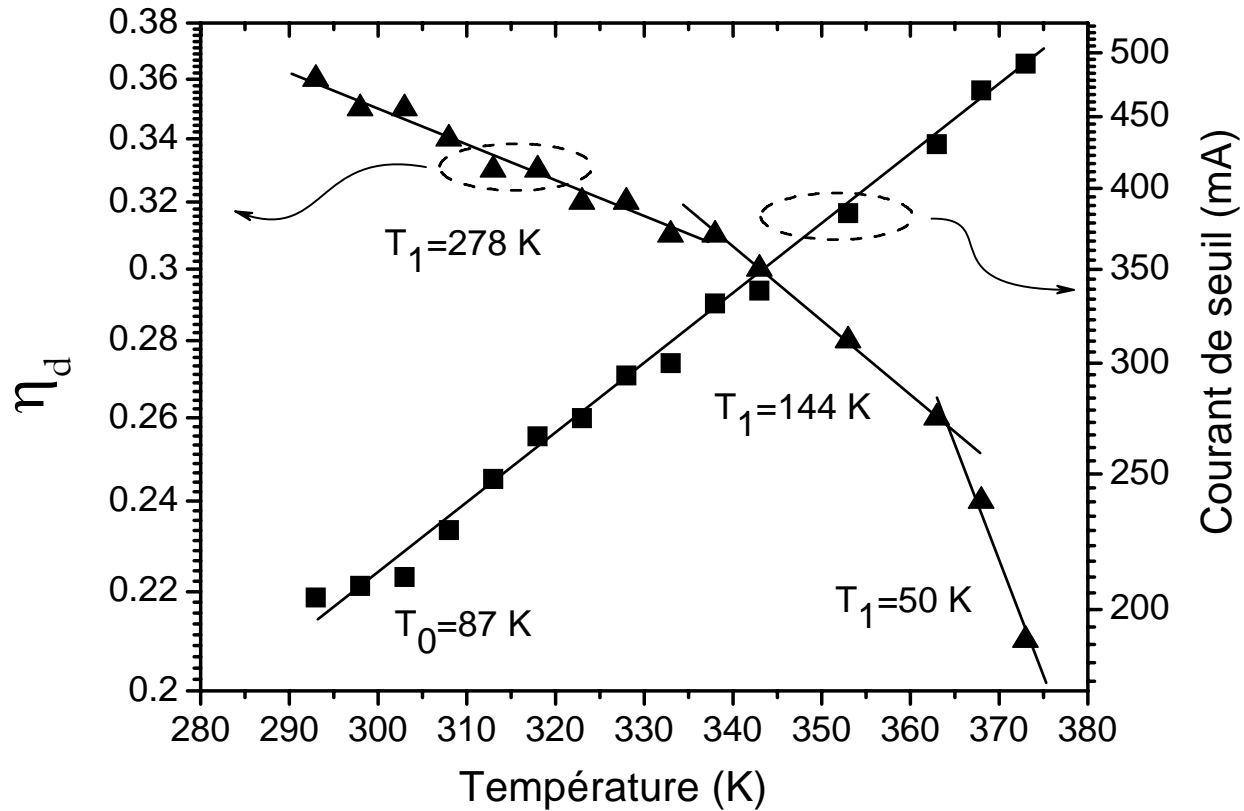
Exemple: diode laser à GaSb (CEM2)



P(I) pour différentes températures (diode : 1 mm x 100 μm)

Exemple: diode laser à GaSb (IES)

On en déduit:



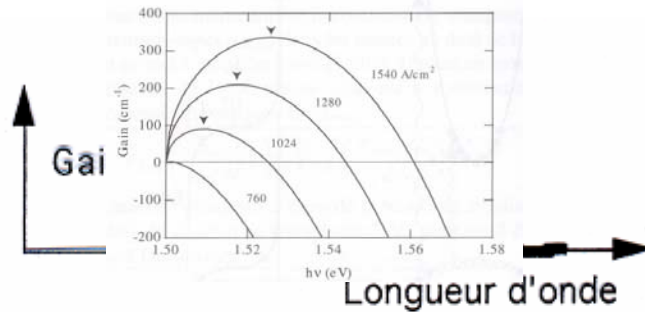
LASERS à semiconducteurs



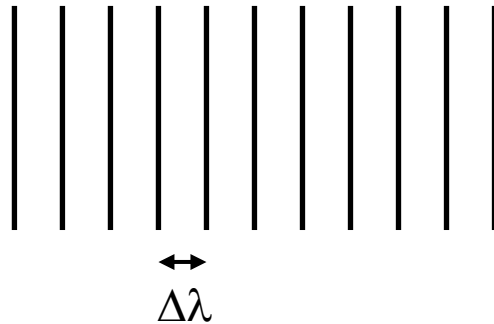
4.2.5. Spectre d'un laser Fabry-Pérot

Spectre d'un laser à cavité Fabry-Pérot

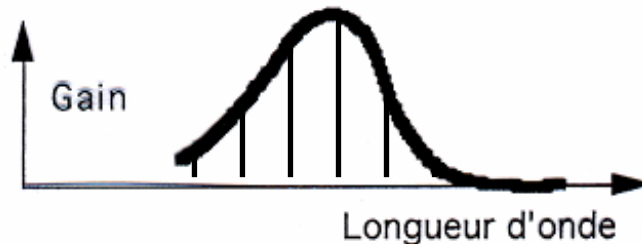
C'est le produit du gain par le peigne du Fabry-Pérot.



Milieu amplificateur

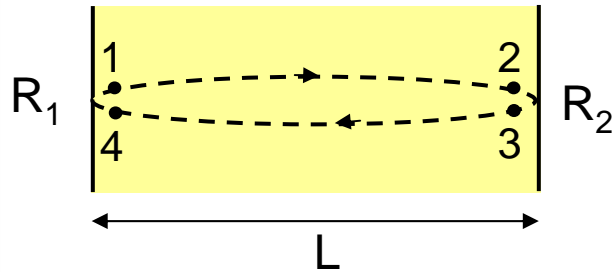


Cavité



**Milieu amplificateur
+
Cavité**

Espacement intermodes dans une cavité Fabry-Pérot



$$2nL = m\lambda_m$$

$$m = 2nL / \lambda_m$$

- Si on considère $n = \text{cste}$:

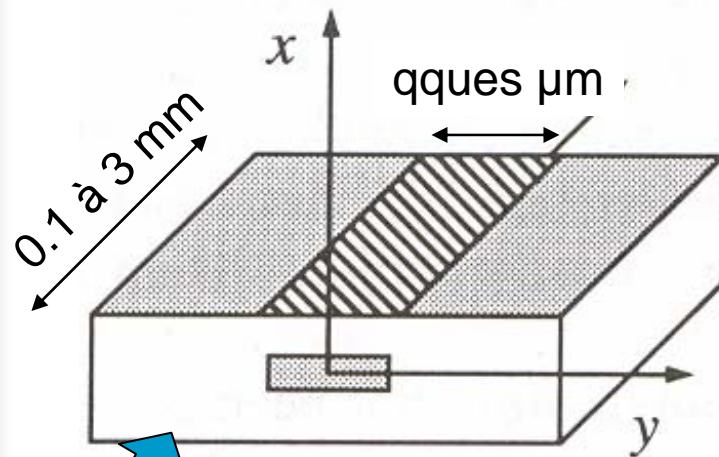
$$\lambda_m = \frac{2nL}{m} \Rightarrow d\lambda_m = -2nL \frac{dm}{m^2} \Rightarrow \frac{d\lambda_m}{dm} = -\frac{2nL}{m^2}$$

$$\frac{d\lambda_m}{dm} = -\frac{\lambda_m^2}{2nL}$$

Espacement intermodes: $\Delta\lambda = \lambda^2/2nL$

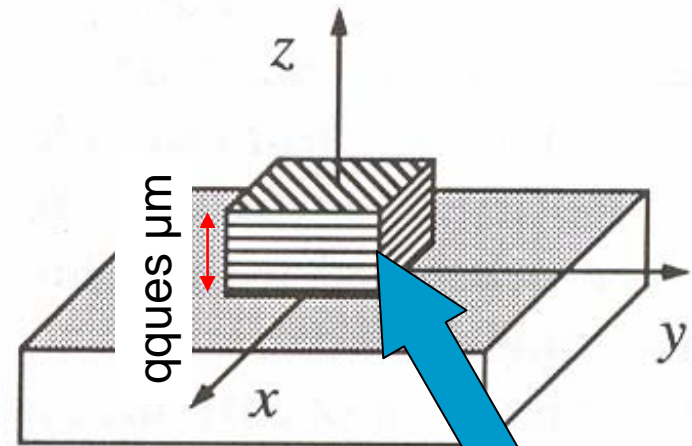
Lasers à semiconducteurs

- Milieu amplificateur: semiconducteur
- Cavité: faces clivées, miroir, cavité externe
- Pompage: injection électrique, pompage optique



In-Plane

Face clivée
Semi-réfléchissante



VCSEL

Mirroi

Modes dans une cavité Fabry-Pérot

Exemple: laser à émission par la tranche

- Valeurs typiques pour une diode laser FP à émission par la tranche: $\lambda \sim 1.2 \mu\text{m}$, $L = 400 \mu\text{m}$, $n=3$.
- Quelle est la valeur de m ?
- $m = 2000$
- Que vaut λ si m varie de ± 1 ?
- $\lambda = 1.1994 \mu\text{m}$ et $\lambda = 1.2006 \mu\text{m}$, $\Delta\lambda = \lambda^2/2nL = 0.6 \text{ nm}$
- Conclusion ?
- Le laser va émettre sur de nombreux modes très proches.

Laser FP à émission par la tranche = laser multimode

Modes dans une cavité Fabry-Pérot

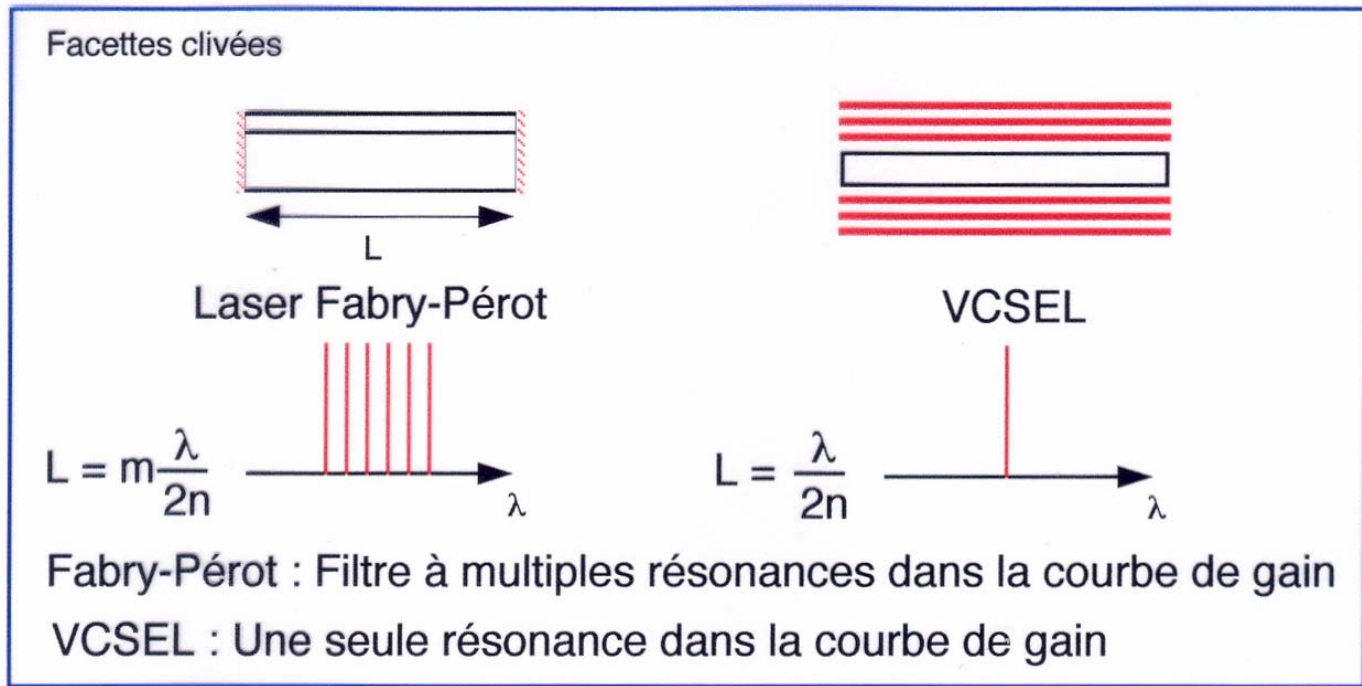
Exemple: VCSEL

- Valeurs typiques pour un VCSEL: $\lambda \sim 1.2 \mu\text{m}$, $L = 1 \mu\text{m}$, $n=3$.
- Que vaut m ?
- $m = 5$
- Que vaut λ si m varie de ± 1 ?
- $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$ et $\lambda = 1.0 \mu\text{m}$.
- Conclusion ?
- Le laser va émettre sur un seul mode de la cavité.

VCSEL=laser monomode

Spectre d'un laser à cavité Fabry-Pérot

- Laser à émission par la tranche: nombreux modes dans la courbe de gain: laser multimode.
- VCSEL: un seul mode dans la courbe de gain: laser monomode.



Spectre d'un laser à cavité Fabry-Pérot

- Laser à émission par la tranche: nombreux modes dans la courbe de gain: laser multimode.
- VCSEL: un seul mode dans la courbe de gain: laser monomode.

