

## Chapitre 4 : sources optiques (SO)

- Sources optiques à spectre large (Lampes à incandescence)

$\sigma_\lambda$  plus grande  $\implies$  Dispersion (chr) plus grande  $\implies$  Bande passante plus faible

- Sources optiques à spectre étroit (diodes laser ou diodes LED)

$\sigma_\lambda$  plus faible  $\implies$  Dispersion (chr) plus faible  $\implies$  Bande passante plus grande

### Exigences imposées aux sources optiques

La Source Optique doit émettre à la longueur d'onde  $\lambda$  où la fibre présente un minimum d'atténuation et de dispersion .

Pour la fibre en silice ( $\text{SiO}_2$ ), il existe trois fenêtres de transmission :  $\lambda = 0,85 ; 1,3$  et  $1,55 \mu\text{m}$ .

### Puissance de sortie

- Pour augmenter la portée d'une liaison optique, on doit émettre la plus grande puissance possible sans dépasser un certain seuil au-delà duquel la fibre se comporte comme un élément non linéaire.

- le seuil de non linéarité de la fibre est définie par la DBS (Diffusion Brillouin Stimulée).

- Pour la fibre en silice ( $\text{SiO}_2$ ), la D.B.S =  $20 \text{ KWatt/cm}^2$ .

**Exemple :** Déterminer les puissances seuil à partir desquelles le comportement des fibres suivantes devient non linéaire :

- Fibre monomode avec un diamètre de cœur =  $10 \mu\text{m}$ .

- Fibre multimode avec un diamètre  $\emptyset = 50 \mu\text{m}$ .

### Solution :

Pour la fibre monomode  $\emptyset = 10 \mu\text{m}$ .

$$S = \frac{\pi \emptyset^2}{4} = \frac{\pi (10 * 10^{-4})^2}{4} = 7,85 * 10^{-7} \text{ c. }^2$$

$$P_{\text{seuil}} = \frac{7,85 * 10^{-7} * 2 * 10^8}{1} = 15,7 \text{ m}$$

$P_{\text{seuil}} = 15,7 \text{ m} = 12 \text{ dBm}$ .

Pour la fibre multimode,  $P_{\text{seuil}} = 392 \text{ mW} = 16 \text{ dBm}$

### **Dimensions :**

Doivent être comparables à celles de la fibre.

### **Effet de concentration énergétique**

Le diagramme de rayonnement de la source optique doit être le plus directif possible pour un meilleur couplage entre la source et la fibre.

### **Largeur spectrale**

Pour augmenter la bande passante de la fibre  $\implies$  diminuer la dispersion chromatique  $\implies$

Source optique à faible largeur spectrale  $\sigma_\lambda$ .

### **Linéarité**

Pour la modulation analogique afin d'éviter la création d'harmoniques

### **Temps de montée**

Il doit être le plus faible dans le cas de la transmission numérique.

### **Choix du matériau**

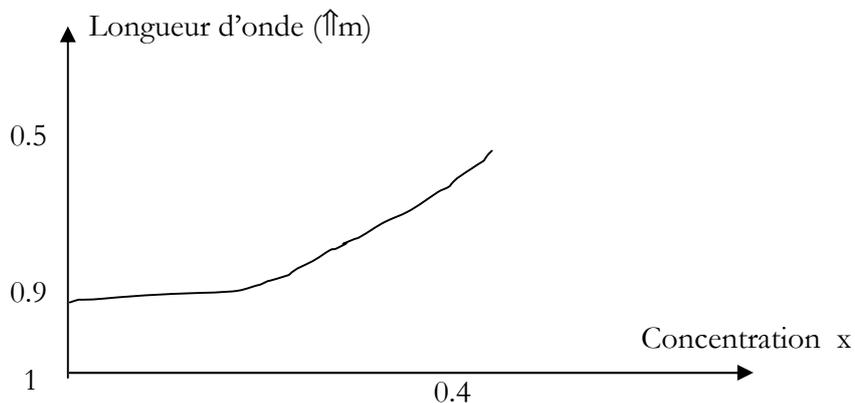
Lors de la conception des sources optiques, il faut toujours rechercher le matériau qui produit les meilleurs rendements quantiques (SC à bande directe) et un GAP correspondant à la longueur d'onde souhaitée.

Les matériaux semi-conducteurs utilisés dans les dispositifs optoélectroniques peuvent être classés en :

- Composés primaires : Ge, Si
- Composés binaires : GaAs, InP
- Composés ternaires :  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ , GaInAs
- Composés quaternaires :  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_{1-y}\text{As}_y$  avec  $0 \leq x, y \leq 1$

Tous ces composés se différencient par la largeur de la bande interdite (GAP) qui fixe la longueur d'onde du signal créé. Il est à noter qu'il est très rare de disposer d'un matériau répondant à une utilisation souhaitée. Il est par contre possible d'ajuster le GAP en agissant sur la concentration des dopants.

C'est ce qui se fait avec les composés ternaires et quaternaires (les indices  $x, y$  sont  $< \hat{a}1$ ).



**Fig :** Évolution en fonction de x de la longueur d'onde créée par un semi-conducteur ternaire ( $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ).

Composé	GAP	$\lambda$ (~m)	Type	Observation
Si	1,1	1,13	Primaire	Indirecte
Ge	0,72	1,72	Primaire	Indirecte
GaP	2,26	0,55	Binaire	Indirecte
GaAs	1,43	0,87	Binaire	Directe
GaSb	0,72	1,70	Binaire	Directe
InP	1,25	0,99	Binaire	Directe
AlAs	2,16	0,58	Binaire	Directe
$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$	1,43-0,36	0,87-3,44	Ternaire	Directe
$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_{1-y}\text{As}_y$	1,36-0,36	0,92-3,44	Quaternaire	Directe

### Exemple :

Pour une source optique qui doit fonctionner à  $\lambda = 1,70 \text{ } \mu\text{m}$ .

Quel matériau utiliser ?

**Solution :**

- Calculons le GAP :  $\delta = E_c - E_v = \frac{hc}{\lambda} = G = \frac{1,2}{\lambda}$

GAP = 0.72eV

Nous avons deux matériaux : Ge et le GaSb.

Puisque le GaSb est un matériau direct, il sera choisi.

### Classification des jonctions PN

Les S-O utilisés dans le domaine des télécommunications sont réalisés à partir des jonctions PN polarisées en directe.

La mise en contact de deux semi-conducteurs permet de réaliser une jonction (PN, NN, ou PP) pouvant être classée en :

- Homo-jonction
- Hétérojonction

Dans le premier cas, les S-C sont réalisés à partir du même matériau (même GAP). Le deuxième type de jonction est réalisé quant à lui, à partir de S-C différents (GAP différents)

Nous Distinguons :

- Les hétérojonctions anisotypes (P-N)
- Les hétérojonctions isotypes (N-N ou P-P)

Il est à noter que les dispositifs réalisés à partir de telles jonctions sont des hétérostructures.

## Laser

### Principe de fonctionnement

LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) .

Le principe de fonctionnement du Laser repose sur deux éléments essentiels :

- Un amplificateur d'onde lumineuse.
- Une bande de contre réaction formant un résonateur.

L'amplification utilise le principe de l'émission stimulée dans une jonction PN polarisée en direct.

Le résonateur « Fabry-Pérot » est constitué d'une cavité formée de deux miroirs parfaitement parallèles (faces clivées contenant l'amplificateur).

L'injection des porteurs majoritaires (à l'aide du courant de polarisation direct de la jonction) dans la jonction PN produit une inversion de population et provoque :

- Une émission spontanée
- Une émission stimulée.

L'introduction de cette jonction dans une cavité permet d'obtenir au dessus d'un certain seuil de polarisation, un gain supérieur aux pertes de la cavité.

Notons que les parois de la cavité (conditions aux limites) imposent une quantification de l'énergie.

### L'inversion de la population

Dans les conditions d'équilibre thermique, le niveau d'énergie le plus bas ( $E_v$ ) contient plus d'électrons que le niveau supérieur. L'inversion de la population est obtenue lorsqu'on crée un déséquilibre de la distribution des électrons de façon à ce que la population du niveau d'énergie le plus bas devienne plus faible que celle du niveau le plus élevé.

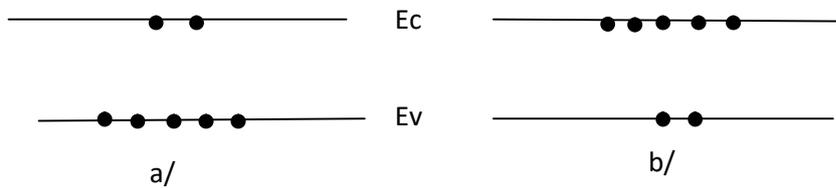


Fig : Niveaux d'énergie a) Distribution normale (équilibre thermique) b) Inversion de population.

Pour provoquer l'inversion de population, il est nécessaire d'exciter l'atome à l'aide d'une source extérieure appelée « pompe ».

La transition des électrons vers le niveau supérieur doit avoir une durée de vie suffisante de façon à pouvoir stocker suffisamment d'électrons et réaliser ainsi l'inversion de population désirée.

**L'amplification optique :**

L'amplification lumineuse dans le laser se produit lorsqu'un photon heurte un atome dans un état excité créant l'émission d'un deuxième photon. Ces deux photons créent à leur tour deux autres photons. La continuation de cet effet crée une multiplication par effet d'avalanche.

Pour que cette amplification ait lieu, il faudrait que les photons créés soient en phase et se propagent suivant la même direction (cohérence spatiale).

Pour achever l'effet laser, il est nécessaire de concentrer les photons dans un milieu qui permet de maintenir cette cohérence, ceci peut être obtenu en plaçant un miroir à chaque extrémité du milieu amplificateur.

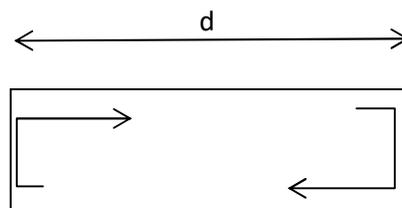


Fig. Propagation de l'onde lumineuse  
Dans un milieu amplificateur  
contenu dans la cavité optique

Le signal optique est amplifié à chaque fois qu'il traverse dans le milieu constituant la cavité (Fabry-pérot). Après plusieurs aller-retour, un effet de saturation se produit et l'oscillateur optique devient stable.

Une ouverture optique est ménagée dans chaque miroir, permettant de disposer d'un faisceau lumineux que l'on peut utiliser sur les deux faces. Le premier faisceau est couplé à la fibre tandis que l'autre est utilisé pour contrôler le niveau de puissance émise.

## Le résonateur

Dans le résonateur, il s'établit des modes de résonance que l'on détermine à partir des conditions aux limites imposées par les parois. Le champ électrique s'écrit :

$$E(z) = A \cdot e^{j(\omega - \tau \cdot z)} + B e^{j(\omega + \tau \cdot z)}$$

Les conditions aux limites imposent un champ nul aux extrémités de la cavité de longueur d. le champ résultant s'écrit :

$$E(z) = A \cdot \sin(B_p \cdot d)$$

Sachant que  $B_p = \frac{2\pi}{\lambda}$   $\rightarrow f_p = \frac{c}{n \cdot \lambda}$

$$f_p = \frac{c}{2 \cdot d} \cdot \frac{p}{n}$$

p : entier caractéristique du mode de résonance.

n : indice de réfraction du milieu contenu dans la cavité.

d : longueur de la cavité.

c : vitesse de la lumière.

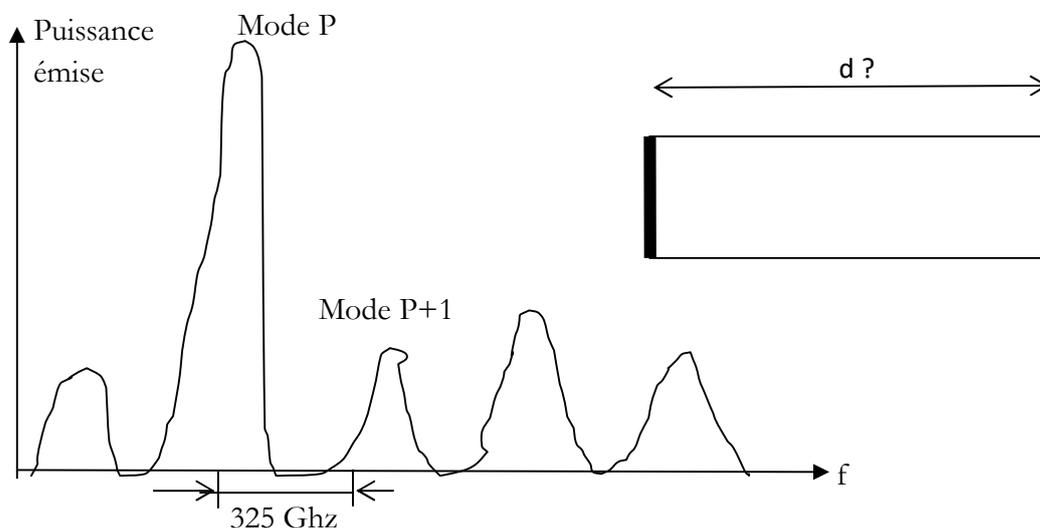
On définit l'intervalle spectral libre comme  $\Delta f = f_{p+1} - f_p = \frac{c}{2d}$

(FSR : Free Spectral Range)

### Exercice :

Soit une source laser en GaAs qui possède un indice de réfraction 3,6. Sachant que les modes longitudinaux du laser sont espacés de 325GHz. Déterminer la longueur de la cavité optique avec le mode principal.

On suppose que le milieu est sans perte et le champ varie en sinus.



**Solution :**

$$\Delta f = \frac{c}{2d} \quad , \quad d = \frac{c}{2n\Delta f} = \frac{3 * 10^8}{2 * 3.6 * 325 * 10^9} \quad , \quad d = 128 \mu m$$

Puisque on utilise GaAs, alors  $\lambda_0 = 0.87 \mu m$

La longueur d'onde dans le matériau Sc est donc  $\lambda_p = \frac{\lambda_0}{n} = 0.24 \mu m$

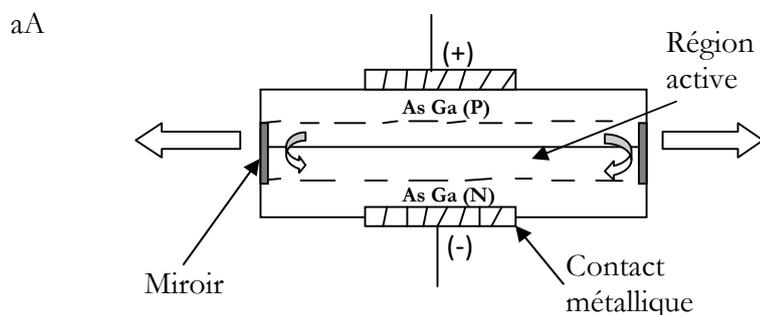
Déterminons maintenant l'ordre p du mode principal

$$f = \frac{c}{2d} = \frac{c}{n\lambda} \quad , \quad p = \frac{c.z.d.n}{c.n\lambda} \quad p \rightarrow \frac{2 * 1 * 1 * 10^8}{0.2 * 1 * 10^8} = 1058$$

**Différentes types de Laser:**

- **Laser à homojonction :**

La première génération de laser a été à partir de homojonction PN à base d'AsGa fonctionnant à une longueur d'onde voisine de 0.85 $\mu m$ .



Ce type de laser présente des courants de seuil important (>10 A) provoquant un échauffement important de la jonction entraînant vite sa détérioration ( il est inutilisable en fonctionnement en continu mais plutôt en impulsion).

- **Laser à double hétérojonction**

Il permet le confinement optique de part et d'autre de la jonction. C'est la raison pour laquelle ce type est appelé laser à guidage par l'indice.

Afin de faciliter la métallisation et diminuer la résistance de connexion on réalise de part et d'autre de la double hétérojonction deux couches fortement dopées d'AsGa (N<sup>+</sup>) et d'AsGa (P<sup>+</sup>).

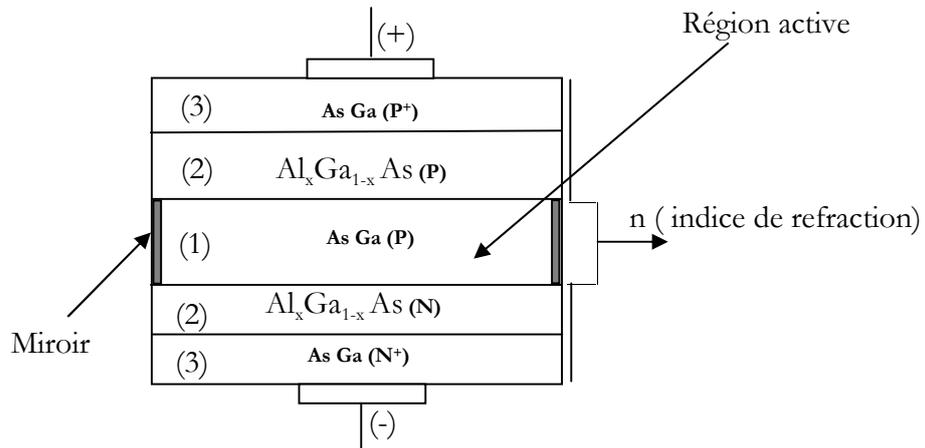


Fig. Structure d'un laser à double hétérojonction,

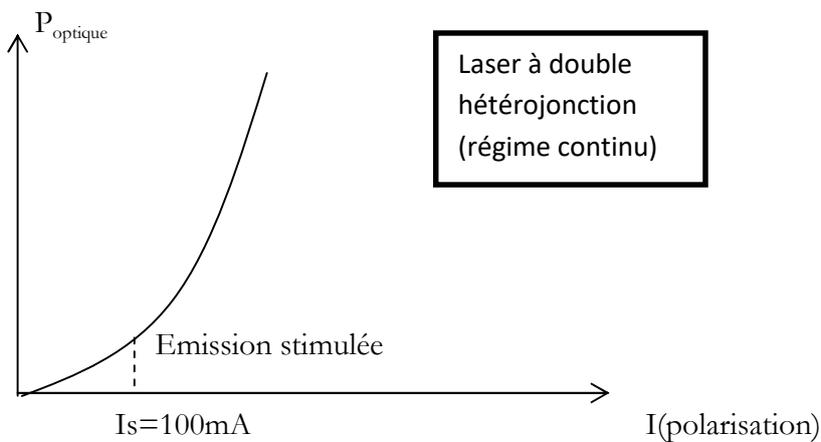
- (1) Bande active
  - (2) Bande de confinement
  - (3) Couche pour la métallisation
- $N^+$ ,  $P^+$  : fortement dopée

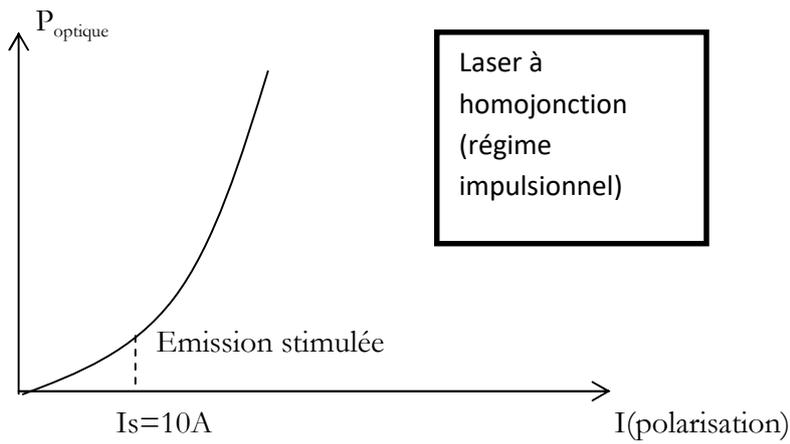
Cette structure a l'avantage d'abaisser le courant de seuil et de permettre au laser d'avoir une utilisation en contenu et à température ambiante.

**Caractéristiques principales :**

**Caractéristique en puissance :**

L'évolution de la puissance optique fournie par le laser en fonction de son courant polarisation ne présente pas une bonne linéarité. Cette non linéarité rend délicate l'utilisation de ce type de source en transmissions analogique.

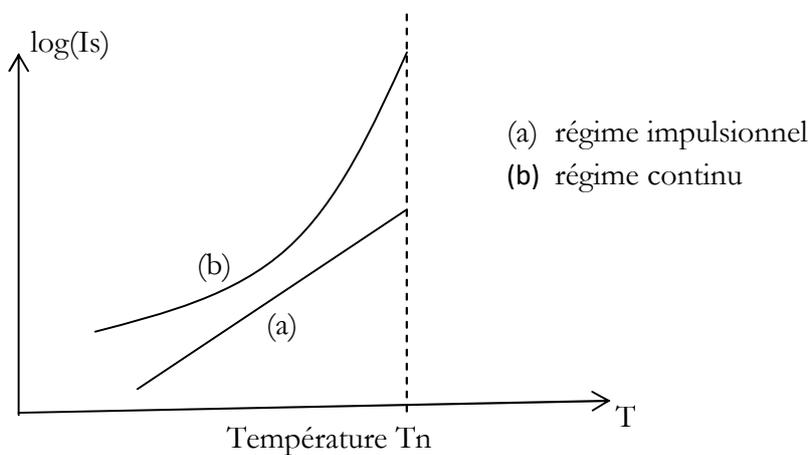
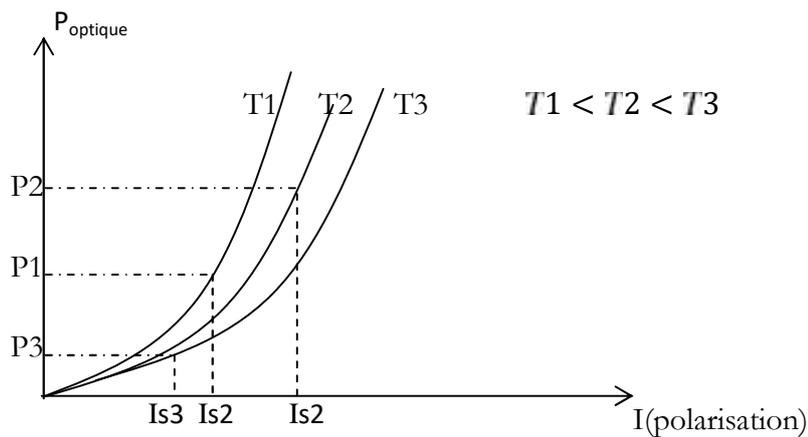




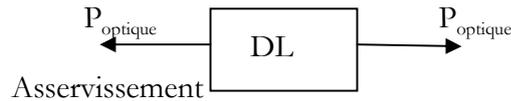
Le courant de seuil est très sensible à la température.

$I_s = I_0 \cdot e^{(T/T_0)}$  où  $T$  et  $T_0$  représentent la température de fonctionnement et la température absolue ( $T_0 = 120^\circ\text{K}$ )

L'augmentation de la température  $T$  entraîne une modification du courant de polarisation, d'où la nécessité d'utiliser un dispositif de régulation.



Si  $T$  varie de  $T_1$  à  $T_2$ ,  $I_s$  varie de  $I_{s2}$  à  $I_{s3}$  et la puissance optique de  $P_1$  à  $P_2$  pour garder  $P_2$  constante même si  $T$  varie, on doit diminuer le courant de polarisation.



### Diagramme de rayonnement :

Le rayonnement de l'onde optique issue des ouvertures réalisées dans les miroirs concerne les modes longitudinaux.

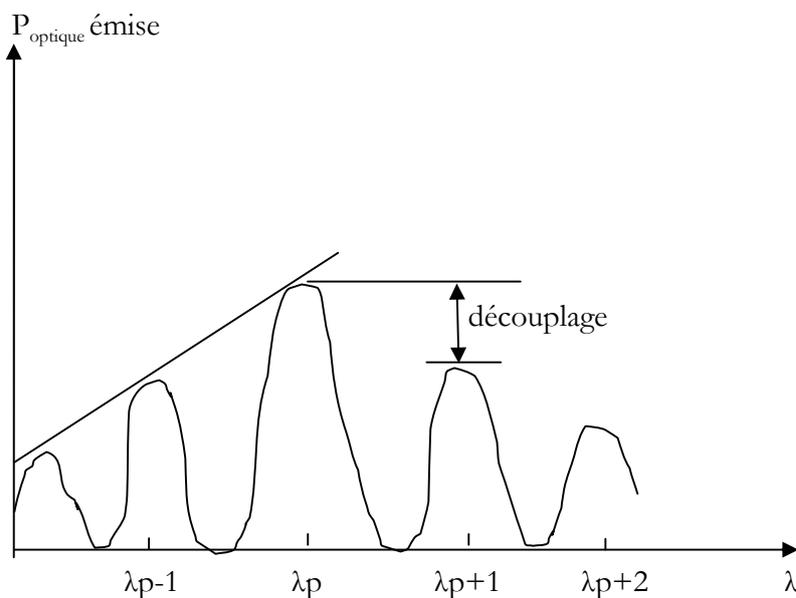
Lors de l'étude du diagramme de rayonnement, on s'intéresse à deux plans :

- Le plan contenant la jonction (plan parallèle)
- Le plan perpendiculaire à la jonction.

Pour chaque plan de polarisation, on définit un angle d'ouverture (par rapport à la surface du miroir).

### Spectre d'émission du laser

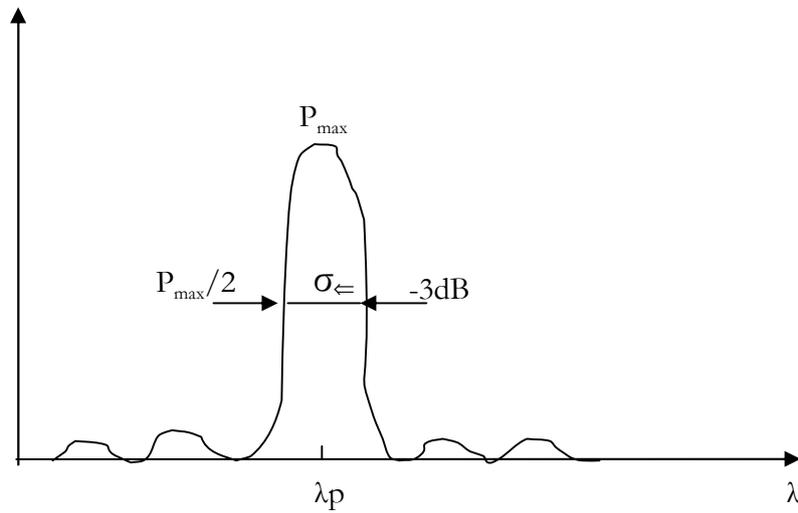
Toutes les fréquences  $f = \frac{c}{2d} \cdot \frac{p}{n}$  sont excitées. Le laser émet ces fréquences avec des puissances différentes.



avec  $\lambda_p = \frac{2d}{p}$

La différence entre le niveau du lobe principal et le niveau du premier lobe secondaire (le plus important) s'appelle le découplage. Il est exprimé en dB.

Si le découplage est  $> 20$  dB, le laser est monomode.



La largeur spectrale (au mode fondamentale) du laser  $\sigma_{\lambda} = 2$  à  $4$  nm

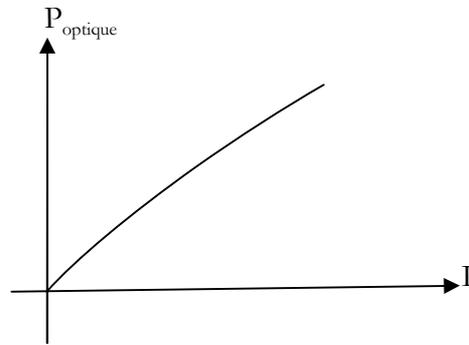
## SOURCE DEL

- Emission spontanée.
- PN polarisée en direct.
- Diagramme de rayonnement moins directif.
- Faible dépendance en température (stable).
- Alimentation simple (pas de seuil).
- Cout faible.

### Caractéristique courant-tension



### Caractéristique puissance optique-courant de polarisation



- ) Pas de courant de seuil
- ) Linéaire (utilisée en transmission analogique)

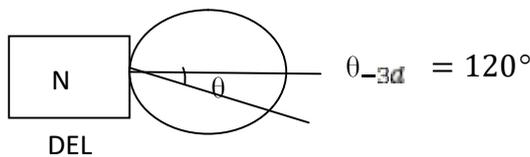
Rendement quantique

$$\tau = \frac{\text{nombre de photons créés}}{\text{nombre d'électrons injectés}}$$

- DEL à homojonction  $\tau \leq 50\%$
- DEL à double hétérojonction  $60\% \leq \tau \leq 80\%$

Rendement de couplage

Les DEL sont en général des sources peu directives et ont en général un rayonnement Lambertien (en cos  $\theta$ ). La puissance émise peut alors s'écrire  $P(\theta) = P(0) \cdot \cos \theta$



Le rendement de couplage est défini de la manière suivante :

$$\tau_c = \frac{\text{Puissance injectée dans la fibre}}{\text{Puissance totale délivrée par la source}}$$

$$\tau_c = \frac{\int_{\Omega'} P(\theta) \cdot \cos \theta \, d\Omega}{\int_{\Omega} P(\theta) \cdot \cos \theta \, d\Omega}$$

où  $\Omega$  : angle solide dans lequel toute la puissance est émise par la source et

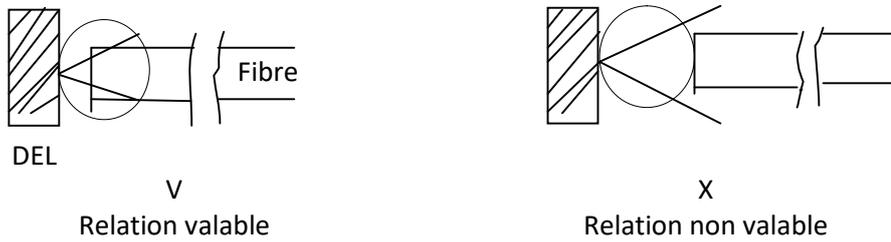
$\Omega'$ : angle solide correspondant à l'angle d'acceptance de la fibre.

On peut écrire finalement :

$$\tau_c = \frac{\int_0^{\theta_{3dB}} P(\theta) \cdot \cos \theta \, d\theta}{\int_0^{\pi/2} P(\theta) \cdot \cos \theta \, d\theta}$$

Tout calcul fait, on obtient :  $\tau_c = \sin^2 \theta_a = ON^2$

Cette relation est valable pour des sources Lambertiennes placées à proximité de la fibre dont le cœur est plus grand que le diamètre de la source.



Pertes de couplage (insertion)

$$\alpha_c(\text{dB}) = P_{\text{totale}} + P_{\text{injectée}}$$

$\downarrow$                        $\downarrow$   
 Source                  Fibre

Pour augmenter  $\tau_c$ , il faut augmenter ON.

⇒ Problème : Dispersion modale ↗ ⇒ Bp ↘

Solution : choisir une source telle que  $\theta_{-3\text{dB}} \leq \theta_{\text{acc}}$  ⇒ un autre diagramme de rayonnement.

Largeur spectrale :

La largeur spectrale de la source est déterminée à mi-puissance (-3dB), elle est fonction de la longueur d'onde de fonctionnement.

Ordre de grandeur :

\*  $\sigma_\lambda$  varie de 25 à 40 nm dans la bande 0,8 à 0,9  $\mu\text{m}$ .

\*  $\sigma_\lambda$  varie de 50 à 100 nm dans la bande 1,1 à 1,7  $\mu\text{m}$ .

La bande de conduction d'un semi conducteur est rempli d'électrons injectés grâce à un courant de polarisation directe. Un photon est créé lorsqu'un électron se recombine avec un trou dans la bande de valence. L'énergie émise est égale à l'énergie de la bande interdite du matériau semi conducteur. Tous les photons émis ont une phase aléatoire et une direction quelconque. La diode DEL qui est une jonction PN polarisée en direct est une source incohérente (spatialement). Elle utilise le principe de l'émission spontanée et émet plusieurs modes optiques. Elle peut être considérée comme une source multimodes et est surtout utilisée avec les fibres multi modes (rayon du cœur assez important).

Comparée au laser, le DEL présente :

- Une puissance optique couplée plus faible.
- Une faible fréquence de modulation (50Mhz).
- Une facilité de fabrication (pas de miroir).
- Une meilleure fiabilité.
- Une faible dépendance en température.

La DEL n'est pas un dispositif à seuil, elle nécessite un circuit d'alimentation simple sans système de compensation en température.

## Différents types de DEL à double hétérojonction

### Rappel de la double hétérojonction

Elle consiste en un semi-conducteur AsGa de type P mis sandwich entre deux couches d'AlGaAs de type N et de type P. La couche centrale constituée par AsGa possède un GAP inférieur à celui des couches d'AlGaAs.

Lorsqu'un courant de polarisation directe est appliqué à la diode, nous observons les phénomènes suivants :

- Les électrons de l'AlGaAs de type N sont injectés dans l'AsGa où ils sont minoritaires.
- Les trous de l'AlGaAs de type P se déplacent vers l'AsGa où ils sont majoritaires.
- La combinaison des électrons et des trous dans l'AsGa produit des photons dont l'énergie dépend du GAP de l'AsGa.

### Différents types de structure :

Selon le rayonnement émis est perpendiculaire à la jonction ou bien dans le plan de la jonction, nous distinguons :

- Les LED émettrices par la surface.
- Les LED émettrices par la tranche.