

Département d'Electronique
Faculté des Sciences de la Technologie
Université Frères Mentouri – Constantine

MASTER « INSTRUMENTATION BIOMEDICALE »

Dispositifs Spéciaux pour l'Imagerie Médicale

Chapitre III:

Les photoémetteurs (LED et diode laser)

Année universitaire 2019-2020

I- Introduction

Les émetteurs optiques à semiconducteurs sont très utilisés du fait de leur:

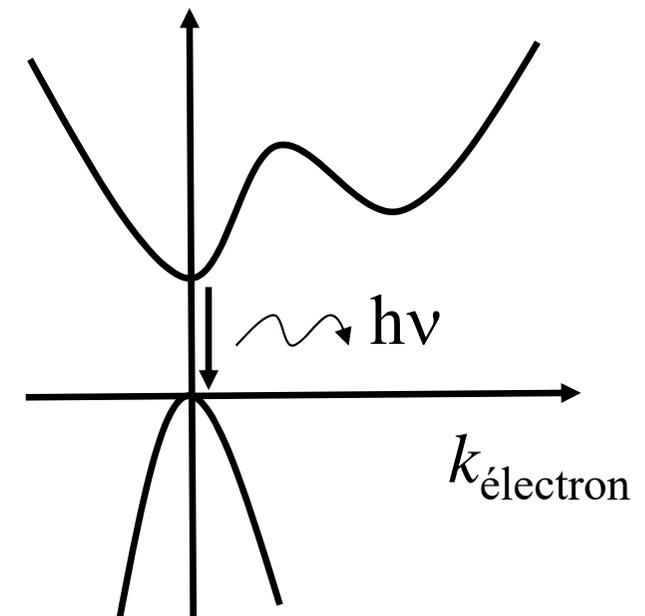
- **petite taille**
- **émission à des λ couvrant le visible et l'IR et même l'UV**
- **Bon rendement**
- **Possibilité de modulation par le courant**
- **Intégration facile.**

❖ **Les matériaux utilisés pour leur développement sont à gap direct.**

❖ **Ils sont réalisés à partir d'alliages de:**

- **2 (GaAs),**
- **3 (Ga_{1-x}Al_xAs) ou**
- **4 (Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}) éléments.**

Avec $0 \leq x \leq 1$ et $0 \leq y \leq 1$



On distingue deux types d'émetteurs à semiconducteurs:

I- les DEL qui sont les éléments les plus simples.

-Elles couvrent tous le spectre et peuvent être modulées par le courant jusqu'à 100 MHz.

-Elles produisent un rayonnement monochromatique incohérent.



Différentes LED visibles

http://www.gizmodo.fr/wp-content/uploads/2010/05/500x_leds.jpg

II- les diodes laser sont les composants essentiels dans les transmissions par fibres optiques et les lecteurs de disques optiques.

-Elles présentent un rayonnement cohérent et une bande passante de modulation de plusieurs GHz, avec une plus grande puissance optique émise .

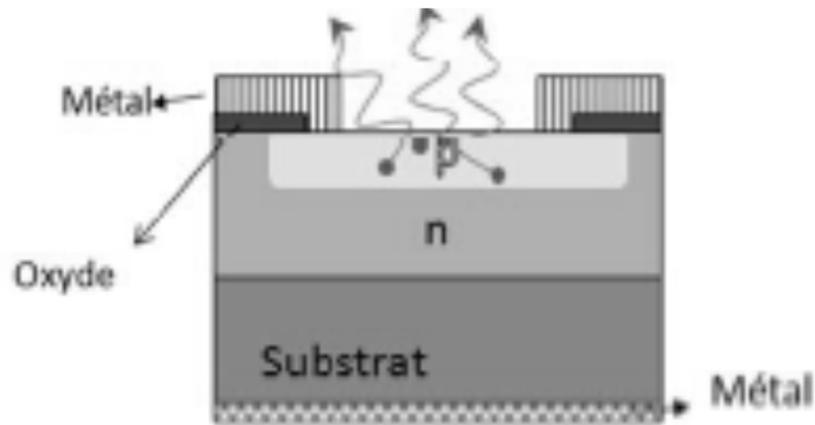


Fibre couplée à une diode laser

II- les diodes électroluminescentes "LED" ou "DEL"

❖ la DEL est une jonction PN réalisée sur un semiconducteur à recombinaisons radiatives.

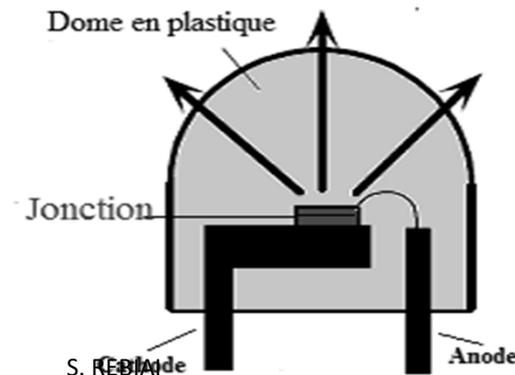
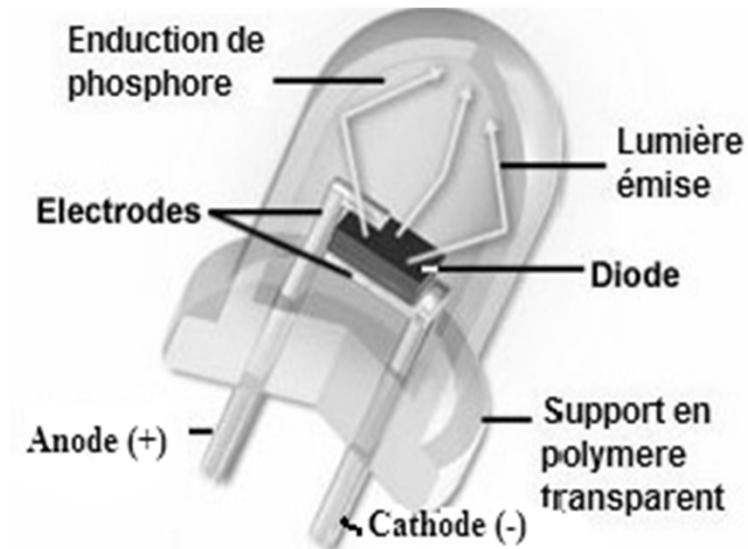
❖ La structure type de la DEL est la suivante:



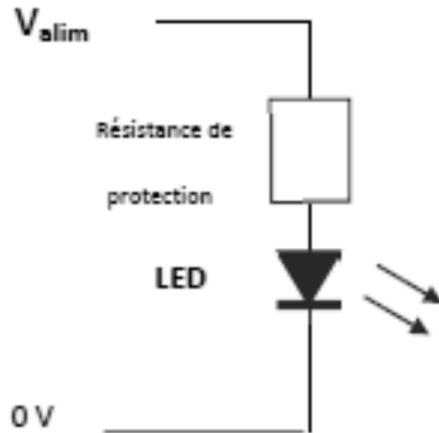
❖ Le symbole de la LED



❖ L'architecture d'une LED



❖ La LED fonctionne sous polarisation directe:

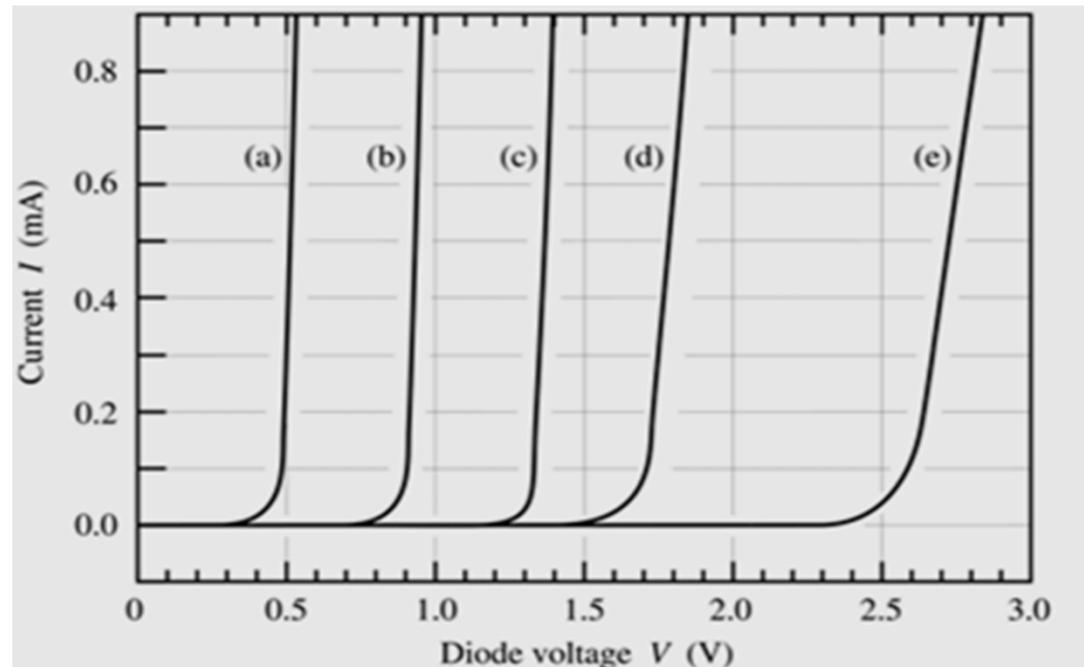


Le courant qui la traverse est donné par:

- $I = I_s(e^{eV/kT} - 1)$
- tension de seuil
 $V_{th} \approx E_g/e$

Caractéristique I(V) de la diode à base de :

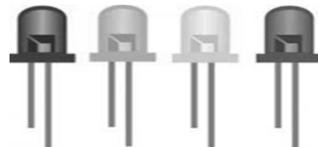
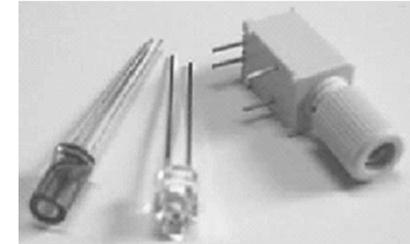
- (a) Ge,
- (b) Si,
- (c) GaAs
- (d) GaAsP,
- (e) GaInN,



[Réf : LIGHT-EMITTING DIODES, E. F. SCHUBERT, CAMBRIDGE University Press, 2003, page 58].

La tension directe appliquée à la LED doit être supérieure à V_{th} , elle :

- Est de l'ordre de 1,1 V pour les diodes à infrarouge
- Varie de 1,8 V à 2,5 V pour les LED rouge, jaune et verte



➤ **Supérieur à 3,5 V pour l'émission dans le bleu est le violet.**



Le courant nominal d'une LED est de l'ordre de 10 à 50 mA, pour les LED usuelles, suivant la couleur de la radiation

- En polarisation inverse, la LED est plus fragile qu'une diode classique.
- Elle tolère des tensions inverses de l'ordre de 4 à 5 V.

Circuits associés à la diode LED

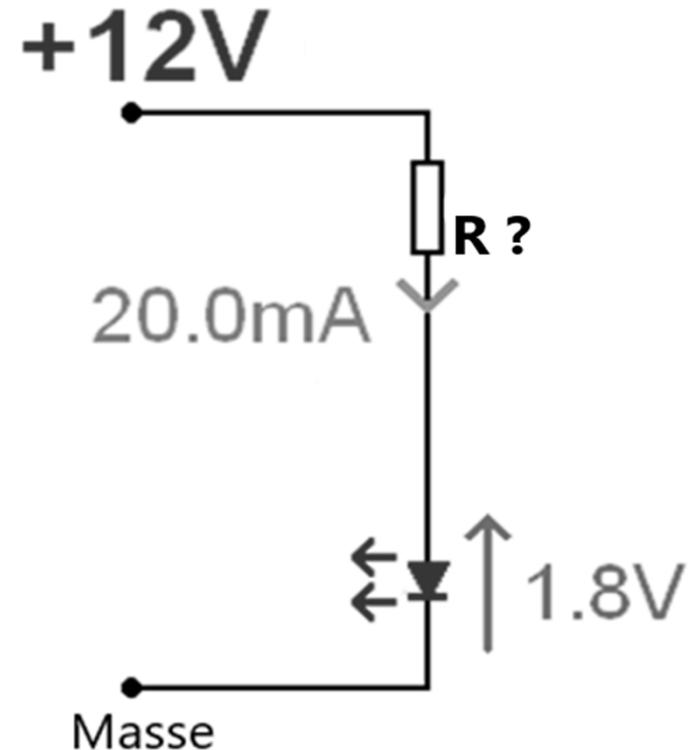
a- Cas d'une seule LED

La tension de seuil de la LED vaut 1.8V

Pour avoir un courant de 20 mA, la résistance de protection doit être de:

$$R = \frac{V_a - V_d}{I} = \frac{12 - 1,8}{20} = 510\Omega$$

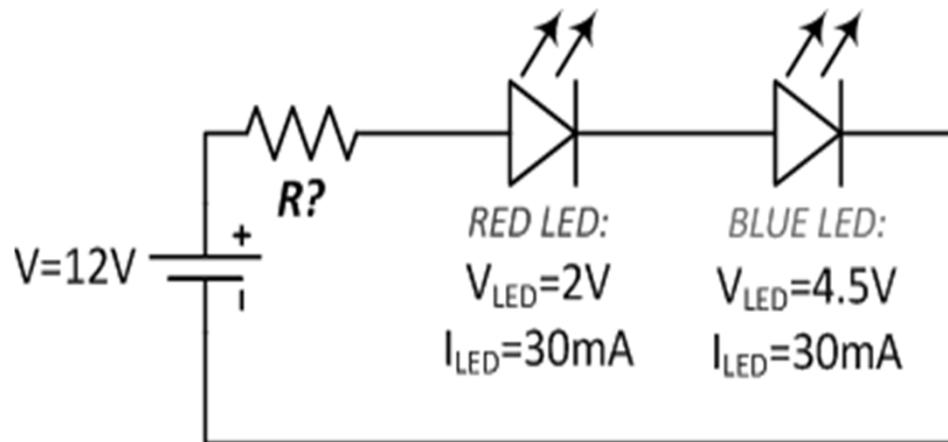
Le choix d'une valeur de la résistance supérieure à celle calculée produira un courant plus faible et par conséquent une lumière moins intense.



b- Cas de LED différentes en série

Nous considérons une LED rouge en série avec une LED bleue, Les tensions de seuil sont différentes.

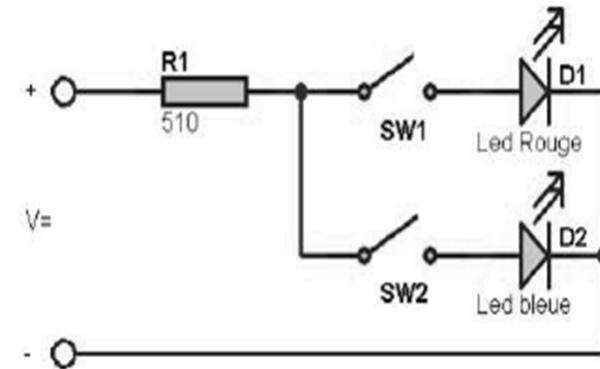
Pour un courant de 20 mA, la résistance de charge doit être de:



$$R = \frac{V_a - V_{dR} - V_{dB}}{I} = \frac{12 - 2 - 4,5}{20} = 275\Omega$$

c- Cas de LEDs différentes en parallèle

Pour deux LEDs différentes en parallèle, si nous utilisons une seule résistance de limitation de courant pour les deux LEDs, si elles sont allumées en même temps on perd un peu en luminosité.

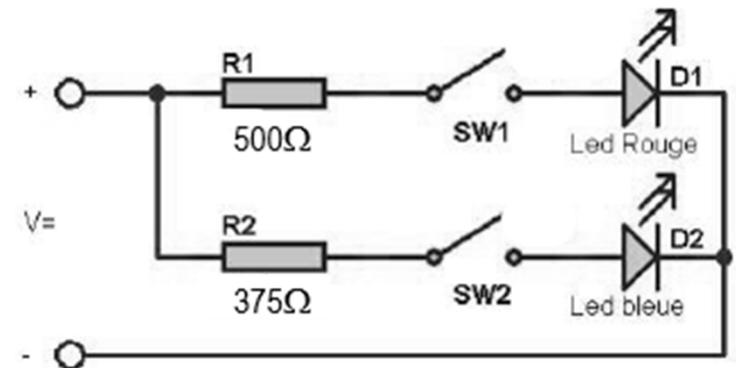


Comme les tensions de seuil sont différentes, une seule LED s'allume normalement et l'autre s'allume très faiblement, ou alors une seule des deux s'allume, et encore, un tout petit peu !

Afin de permettre un allumage correct des deux LEDs quand les deux sont activées en même temps, il faut les isoler l'une de l'autre, en leur attribuant à chacune sa propre résistance de limitation de courant.

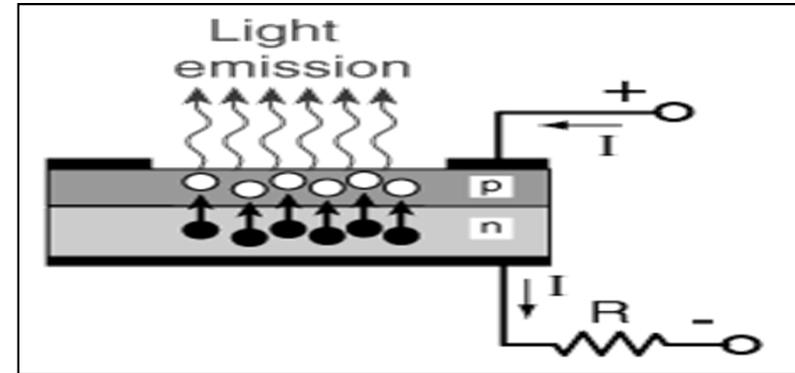
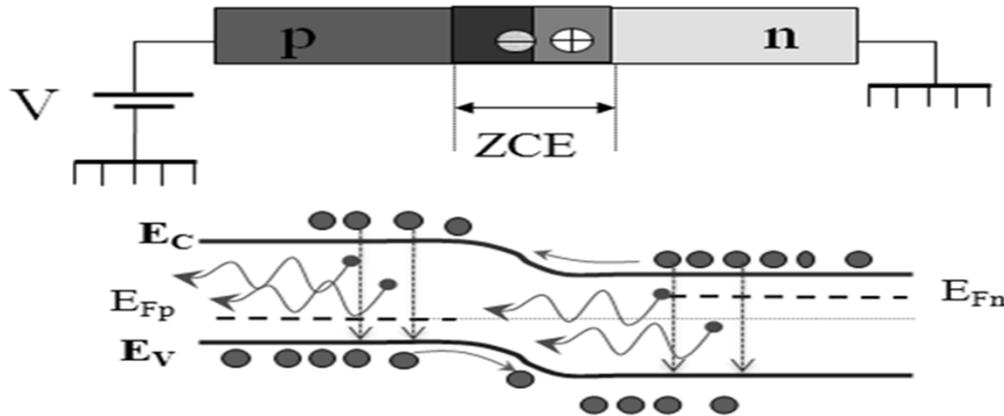
Pour avoir le même courant de 20 mA ,

$R1=500 \Omega$ et $R2= 375 \Omega$.



Lorsque la LED est polarisée:

Il y a injection d'électrons de la région n \Rightarrow la région p où ils sont minoritaires.

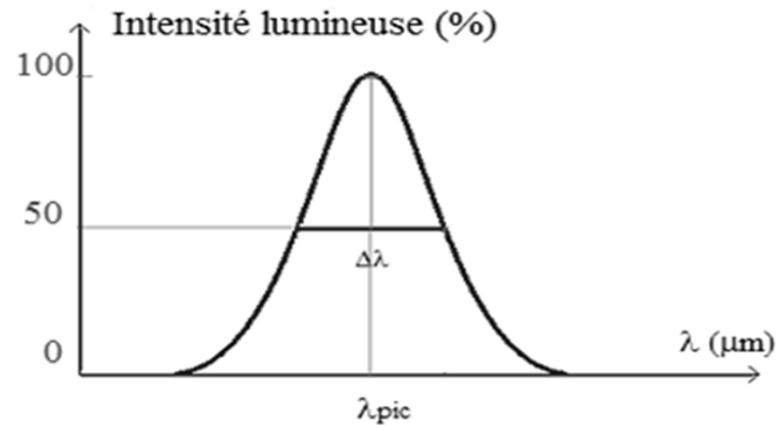


Les paires electron-trou se recombinent \Rightarrow émission de photons

La région P, au voisinage de la jonction, où a lieu la recombinaison, des porteurs est appelée « zone active ».

❖ La recombinaison, des porteurs, dans cette zone, donne lieu à une radiation de longueur d'onde λ , donc de couleur conditionnée par le gap du matériau dans lequel se produit l'essentiel des recombinaisons.

Le spectre d'émission d'une DEL (Intensité – longueur d'onde) est continu. Il est de type sensiblement gaussien et relativement large.

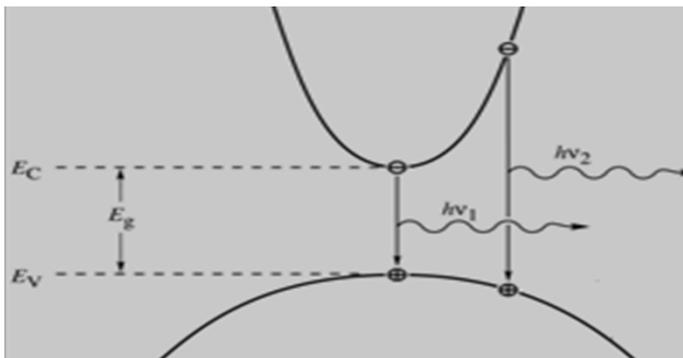


Sa largeur spectrale à mi-hauteur Δλ est de l'ordre de 40 à 100 nm.

$$\Delta\lambda = 1.45\lambda_{pic}^2 KT$$

Le maximum d'intensité est pour des photons d'énergie :

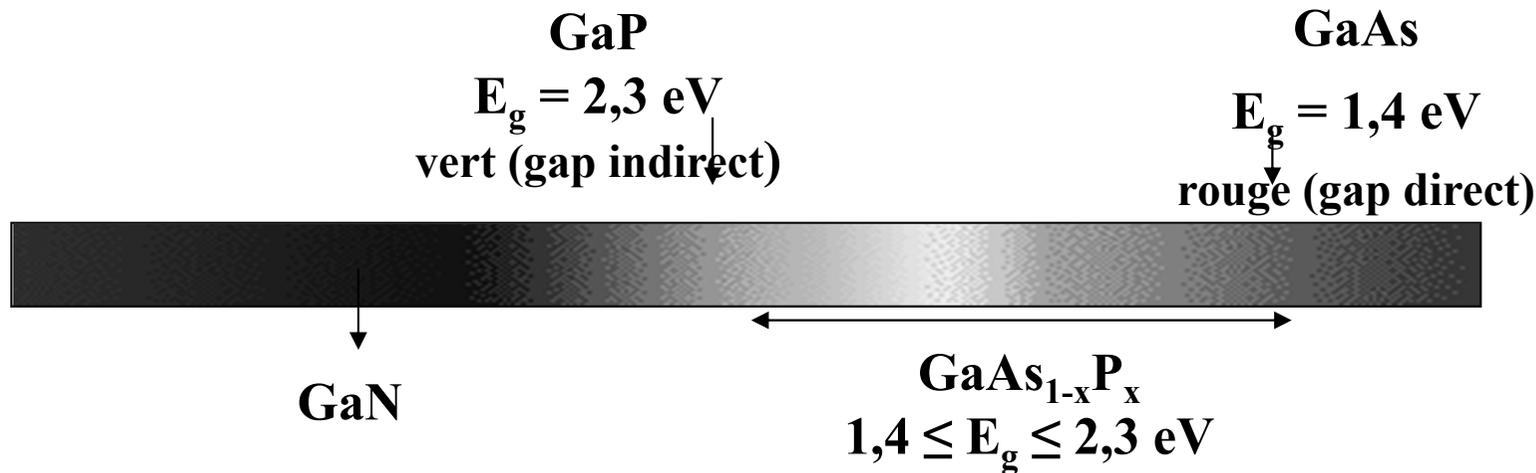
$$h\nu_{pic} \approx E_g + KT/2$$



- **Largeur de spectre relativement étroite comparé au spectre visible**
- **Pour l'œil humain LED ⇔ monochromatique**

A- Types de matériaux utilisés

□ Pour le visible, ils sont à $E_g \geq 1.8 \text{ eV}$ ($\lambda \leq 0.7 \mu\text{m}$)

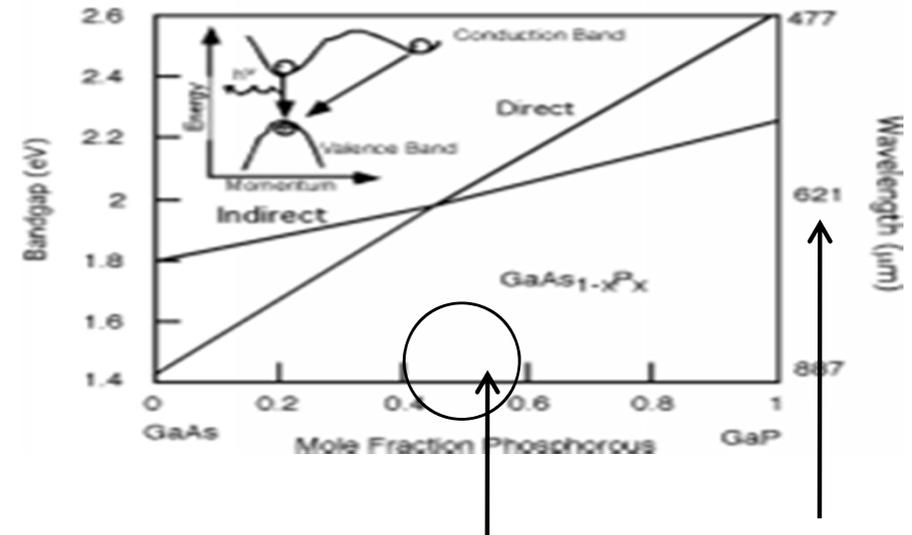


Pour les matériaux III-V comme : $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$; $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ $\longrightarrow E_g = E_g(x)$

Ce sont des alliages de type $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ (ou $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$)

Dans le cas du $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ on a :

- Une émission dans le rouge pour $x = 0.4 \Rightarrow \text{GaAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}$ (Te) (gap direct)
- Une émission dans le vert pour $x = 1 \Rightarrow \text{GaP}$ (N) (gap indirect).



la structure des matériaux $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ est à :

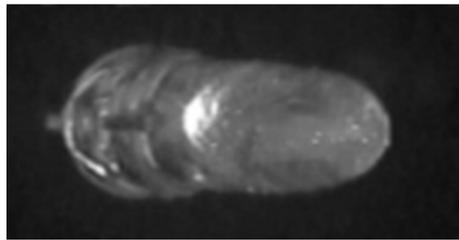
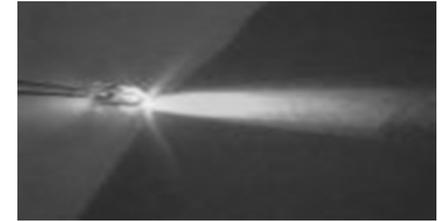
- gap directes pour $x = 0 \Rightarrow 0.45$ et,
- gap indirectes pour $x = 0.45 \Rightarrow 1$

Pour l'émission dans le bleu les matériaux utilisés sont:

- Le SiC avec des dopages en Al(p) et N(n) ($E_g \approx 2.6$ eV, $\lambda \approx 0.475$ μm), avec un rendement d'environ 0.001%
- Le GaN ($E_g \approx 2.8$ eV, $\lambda \approx 0.44$ μm) avec un rendement de 0.005%
- L'InGaN (λ : 0.45 -0.473 μm)

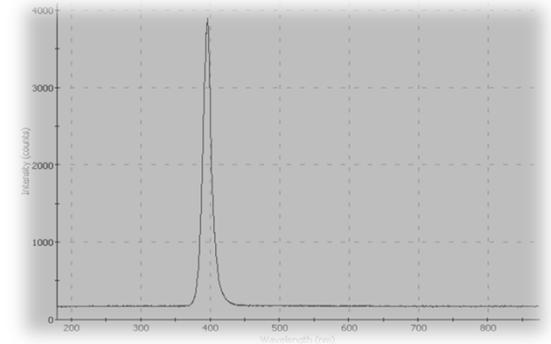
- ❖ Les grands domaines d'application de ces DEL visibles c'est :
 - l'affichage et l'éclairage
 - les feux tricolores et pour les feux de signalisation.

- ❖ Pour les DEL émettant dans l'ultraviolet, les matériaux utilisés ont un gap plus grand.
- ❖ Un des matériaux utilisé est le GaN avec λ comprise entre 370 -390 nm



En outre, ce type de LED s'abime du fait du rayonnement UV. En effet, les ultra violets attaquent la résine époxy et l'opacifie.

- ❖ Les LED UV ont l'avantage de posséder un spectre très fin , ce qui leur permet de ne pas émettre d'IR et de la chaleur.

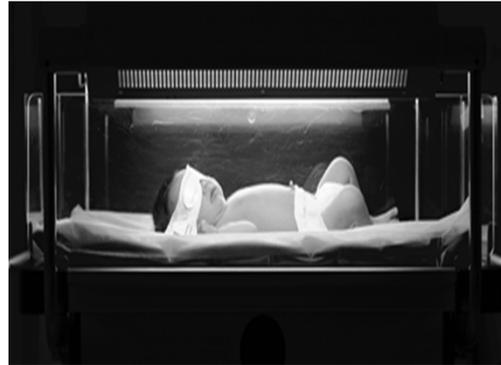


- ❖ Elles sont utilisées dans la constitution de détecteurs miniatures de faux billets, mais trouvent d'autres applications telles que la détection de substances particulières réagissant aux UV (par fluorescence par exemple).

❖ Les Diodes Electroluminescentes dans l'UV remplacent peu à peu les lampes traditionnelles en photochimie, biologie et dans les applications médicales.



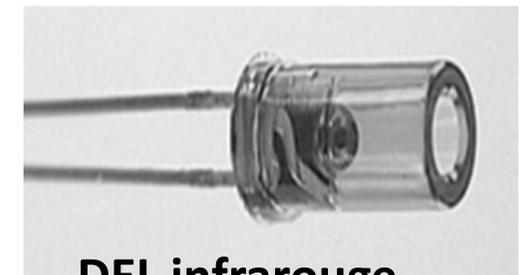
Blanchiment des dents:
400-315 nm



Luminothérapie médicale: 300 - 320 nm



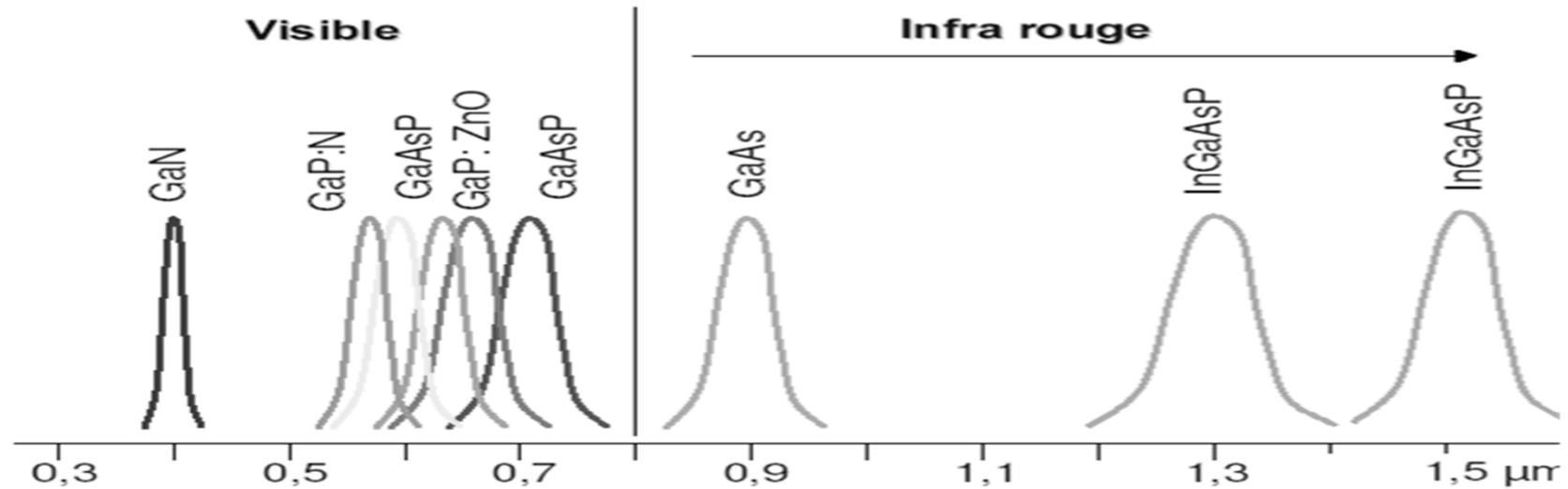
Pour l'IR les matériaux sont à gap ≤ 1.5 eV tel le GaAs pour $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$ ou le GaInAsP qui couvre la gamme allant de 1 à $1.7 \mu\text{m}$



DEL infrarouge

Les LED IR sont utilisées dans les télécommandes, les barrières de comptage de personnes, dans certaines alarmes, pour certaines transmissions d'informations dans l'air, et dans la transmission d'informations par fibre optique. Elles sont aussi utilisées sur les caméscopes permettant de "voir" la nuit

Le graphe suivant donne quelque spectres d'émission en fonction du matériau utilisé:

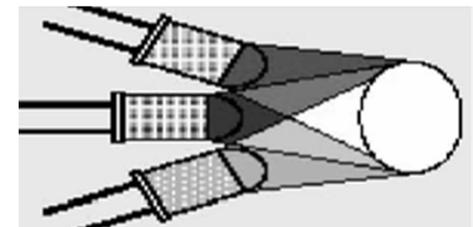
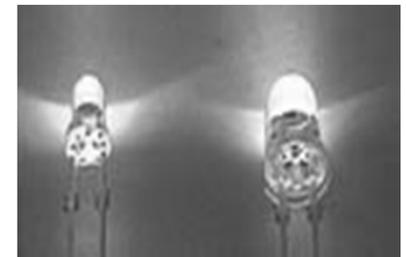


ref : Z. Toffano, « Optoélectronique, Composants photoniques et fibres optiques », Edition Ellipse, 2001,, page 160

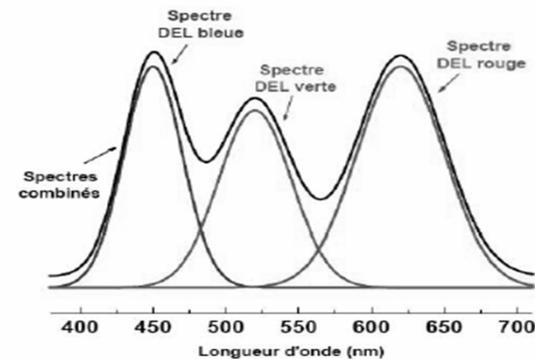
Les LED Blanches

Elles peuvent être obtenues de différentes façons , par exemple:

La première technique consiste à réunir 3 LED (rouge, verte et bleu) ensemble:



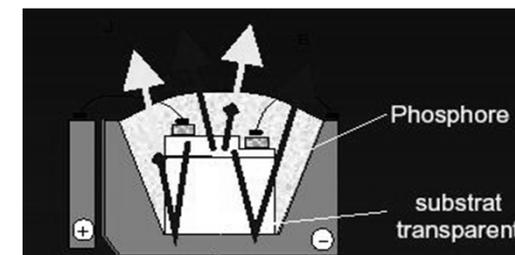
La lumière résultante est blanche son spectre couvre la gamme de longueurs d'onde comprises entre 400 et 700nm.



•La deuxième technologie consiste à fabriquer la LED en utilisant le matériau électroluminescent (InGaN ou GaN) en association avec un matériaux phosphorescent.



•Le semi-conducteur produit une lumière bleue qui, lorsqu'elle se réfléchit sur le phosphore, donne une lumière blanche dite bleutée ou "froide".



Parce que les LED ont des durées de vie élevées et une consommation électrique faible, elles servent actuellement à l'éclairage général,



Tout type d'éclairage



DSIM Veilleuse de phare CHARTRES S. REBIAI



Écrans lumineux

c- Rendement de la LED

Le rendement global de la DEL est calculé à partir de ses différents rendements.

α - Rendement quantique interne η_i

Il représente le taux de recombinaisons radiatives sur le taux global de recombinaisons.

$$\eta_i = \frac{r_r}{r} = \frac{r_r}{r_r + r_{nr}} \quad \Rightarrow \quad \eta_i = \frac{\tau_{nr}}{\tau_r + \tau_{nr}} \approx 1 \quad (\tau_{nr} \gg \tau_r \text{ SC à gap direct})$$

Il exprime l'efficacité de conversion des électrons en photons.

Ce rendement permet de déterminer la puissance lumineuse interne P_{int} émise au niveau de la jonction (zone active) :

$$P_{int} = \eta_i \cdot h\nu \cdot \frac{I_d}{q}$$

Exemple :

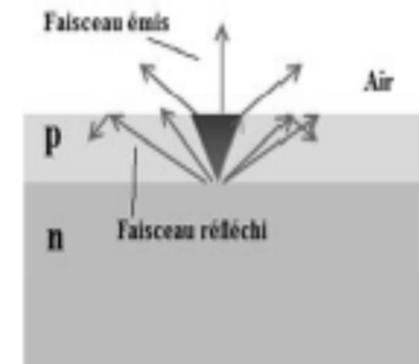
Soit une LED au GaAsP à émission dans le rouge avec $\lambda = 670$ nm et un rendement quantique interne de 0.16.

Si le courant qui la traverse est de 20 mA, la puissance optique générée dans la zone active est :

$$P_{int} = \eta_i h\nu \cdot \frac{I_d}{q} = \eta_i \frac{I_d}{\lambda(\mu m)} \cdot 1.24 \approx 6 \text{ mW}$$

β - Rendement optique η_o

η_o = nombre de photons émis à l'extérieur de la diode /
nombre de photons créés au niveau de la jonction.



- Ce ne sont pas tous les photons créés à la jonction qui sortent de la diode.
- Une fraction de ces photons est réabsorbée, souvent après réflexion à la surface du matériau \Rightarrow perte de Fresnel.

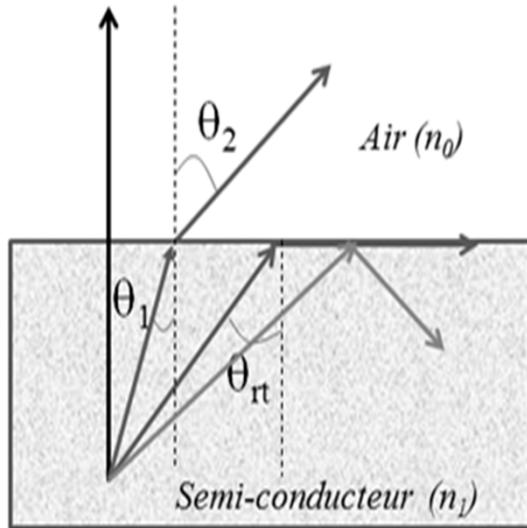
Deux phénomènes limitent l'émission de photons à l'extérieur:

- i. la valeur élevée de n , telle que pour l'incidence normale on a:

$$R = \frac{(n - 1)^2}{(n + 1)^2} \approx 30 \% \quad \text{Soit seulement } 70\% \text{ du rayonnement est transmis}$$

On améliore la valeur de T ($1-R$) en encapsulant la LED dans du plastique d'indice $n_p = 1.5$ (T passe de 70 à 82%).

ii. L'existence d'un angle de réflexion totale relativement faible



Loi de Snell-Descartes : $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

$$\sin \theta_{rt} = \frac{\sin(\pi/2)}{n} = \frac{1}{n}$$

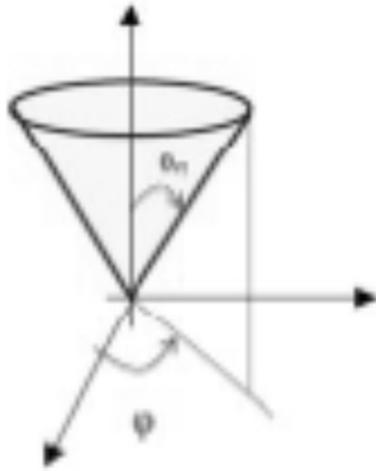
Pour $n = 3,5$ on aura $\theta_{rt} = 16^\circ$

Les photons qui arrivent à la surface avec $\theta > \theta_{rt} = 16^\circ$, sont totalement réfléchis dans le matériau.



T varie de 70% à 0 lorsque θ varie de 0 à 16°

Seuls les photons émis au niveau de la jonction, dans un cône de 16° , sortent de la diode.



✓ L'angle solide couvrant l'espace étant :

$$\Omega_0 = 4\pi$$

✓ L'angle solide sous-tendu par θ_{rt} est :

$$\Omega_{rt} = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\theta_{rt}} \sin \theta d\theta = 2\pi(1 - \cos \theta_{rt})$$

Dans la mesure où θ_{rt} est petit:

$$\cos \theta_{rt} \approx 1 - \frac{1}{2}\theta_{rt}^2 \quad \Omega_{rt} = \pi\theta_{rt}^2$$

Le rendement de sortie du rayonnement est alors donné par:

$$\eta_o = \frac{\Omega_{rt}}{\Omega_0} \bar{T} = \frac{2\pi(1 - \cos \theta_{rt})}{4\pi} \bar{T} \approx \frac{\theta_{rt}^2}{4} (1 - \bar{R})$$

Où \bar{T} et \bar{R} représentent les valeurs moyennes des coefficients pour les angles d'incidence compris entre: **0 et θ_{rt}** .

➤ En supposant R constant et égal à sa valeur sous incidence normale, on obtient:

$$\eta_o = \frac{\theta_{rt}^2}{4} \left(1 - \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \right)$$



$$\eta_o = \frac{\theta_{rt}^2 \cdot n}{(n+1)^2}$$

Dans la mesure où θ_{rt} est petit,
on a $\sin(\theta_{rt}) \approx \theta_{rt} = 1/n$

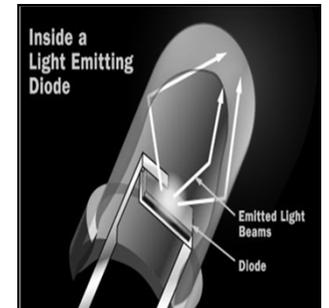
Pour $n = 3.5$  $\eta_o \approx 1.4\%$

$$\eta_o = \frac{1}{n \cdot (n+1)^2}$$

Remarque

Le rendement est faible si on considère une géométrie simple.

Pour une configuration qui n'est pas plane, qu'on obtient en plaçant, au dessus de la DEL, une hémisphère en plastique d'indice n_p inférieur à n , on diminue les réflexions.



Le plastique joue le rôle d'un traitement antireflet et il sert de lentille pour modifier le diagramme de rayonnement de la LED.

❖ Une interface transparente en plastique d'indice : $n_p = 1.5$: $T = 96\%$: $\eta_o \approx 4\%$

γ - Rendement quantique externe η_e

Il est défini comme le rapport du nombre de photons émis à l'extérieur de la diode au nombre d'électrons qui traversent la jonction. Il est donné par:

$$\eta_e = \eta_o * \eta_i \# \eta_o$$

Il peut atteindre 40-50 % à condition de jouer sur l'extraction lumineuse.

δ - Rendement global η

C'est le rapport entre la puissance lumineuse émise et la puissance électrique absorbée par le composant.

$$\eta = \frac{W_{opt.}}{W_{él.}}$$

Comme la puissance optique est donnée par: $W_{op} = N_{ph} \cdot h\nu$

Et, la puissance électrique absorbée par le composant est $W_{el} = V \cdot I$

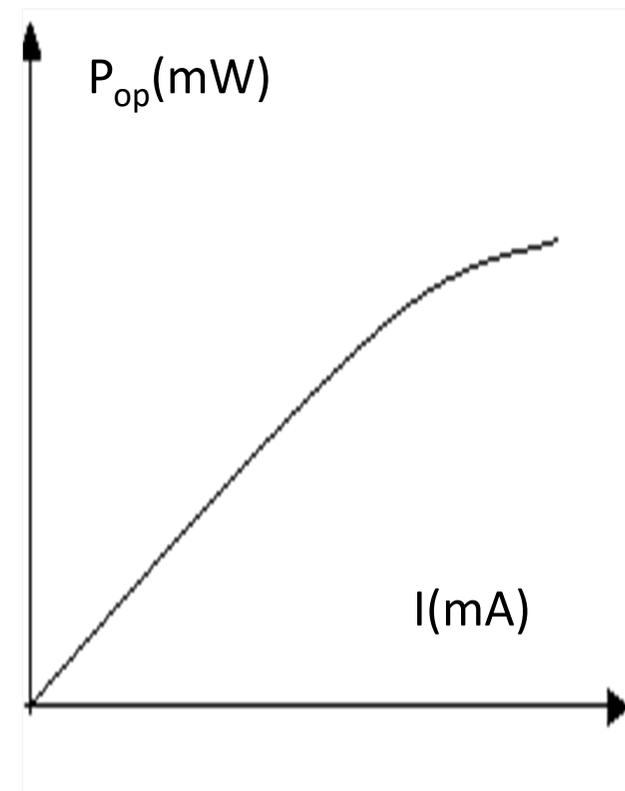
I :courant débité = eN_e et V: tension appliquée: $W_{el} = N_e \cdot e \cdot V$

$$\eta = \frac{N_{ph} \cdot h\nu}{N_e \cdot e \cdot V} \quad \text{avec} \quad h\nu \approx Eg \approx eV \quad \longrightarrow \quad \eta = \frac{N_{ph}}{N_e} = \eta_e$$

ε - caractéristique P_{op} (I)

La caractéristique puissance- courant de la LED a l'allure suivante:

- En théorie c'est une droite , mais en pratique elle dévie de la droite idéale à cause de l'échauffement.
- Elle ne présente pas de courant de seuil, la lumière est émise dès que le courant passe.
- Une LED standard émet pratiquement 3mW pour un courant de 100mA.
- Son courant max de fonctionnement est de 100 à 200mA.



d- Brillance de la LED

➤ Elle est définie comme la puissance émise par unité de surface et unité d'angle solide. Elle s'exprime en Watts/sr.cm^2 .

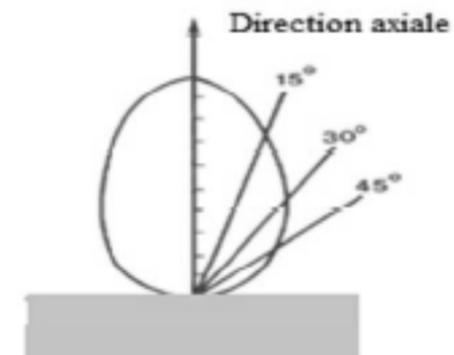
➤ La LED a une surface émettrice plane, elle émet dans un demi plan de manière non isotrope.

➤ Son diagramme d'émission est Lambertien; sa brillance dans une direction θ s'écrit:

$$B(\theta) = B_0 \cos(\theta)$$

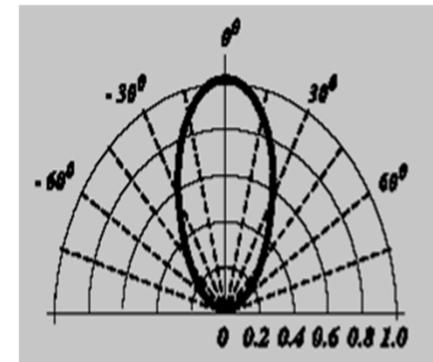
B_0 : brillance dans la direction normale à la surface

θ : angle d'émission par rapport à cette direction



Ce diagramme issu d'une LED, avec émission par la face, n'est pas bien adapté à l'injection de lumière dans une fibre optique, par exemple.

➤ Pour améliorer le faisceau de lumière, on utilise des DEL avec lentilles, le diagramme obtenu est plus étroit.



➤ Pour une surface S de la diode, le flux total de lumière émise est :

$$\phi_t = S \int_{\Omega} B(\theta) . d\Omega \quad \text{Avec} \quad d\Omega = 2\pi . \sin(\theta) . d\theta$$

➤ Le flux émis par la diode dans tous le plan :

$$\phi_t = 2\pi . S . \int_0^{\pi/2} B_0 . \cos(\theta) . \sin(\theta) . d\theta = 2\pi . S . B_0 . \int_0^1 \sin(\theta) d(\sin(\theta))$$



$$\phi_t = \pi . S . B_0$$

$$\phi_t = \pi . I_0$$

$$\text{Avec : } S . B_0 = I_0$$

intensité de lumière émise

III- Les diodes laser ou laser à Semi-conducteur

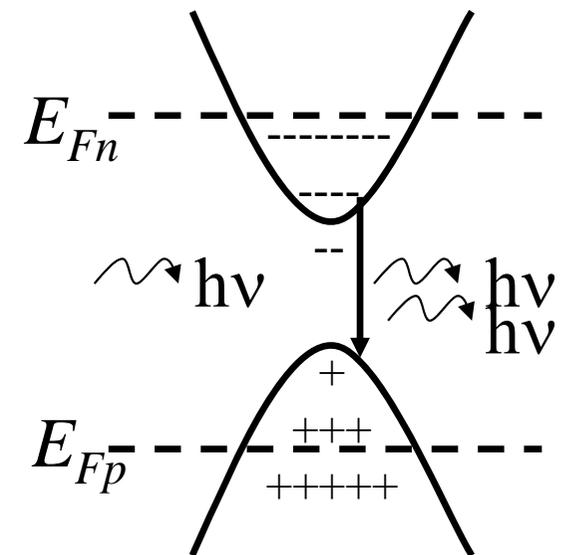
LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

□ Les laser à semiconducteurs sont des jonctions pn réalisées sur des matériaux à gap direct avec une région active où les porteurs injectés se recombinent de façon radiative, produisant une lumière cohérente issue d'émissions stimulées .

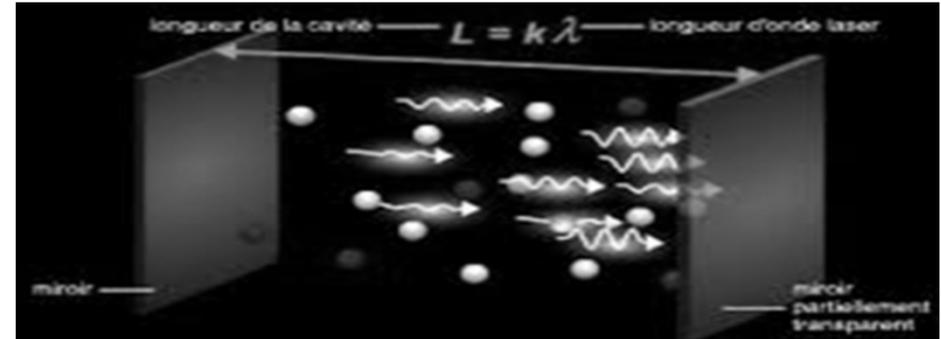
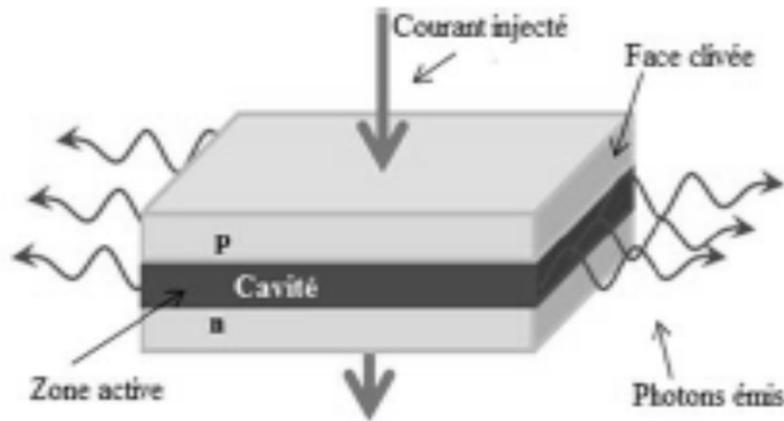


□ L'émission stimulée, qui crée une population de photons aux caractéristiques identiques (énergie et direction notamment), est donc le principe de base du laser.

□ Elle en fait des sources de lumière monochromatique, cohérente et de forte intensité.

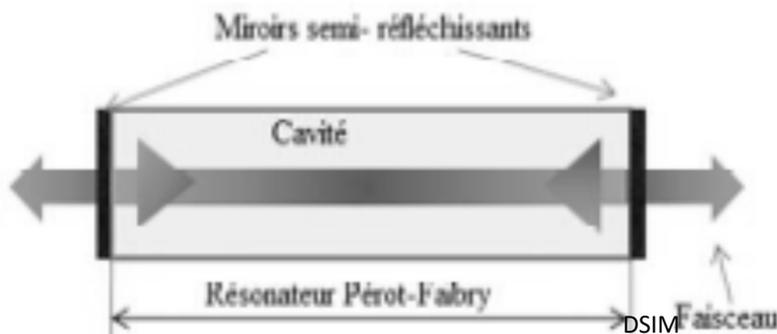


□ La région active est enfermée dans une cavité optique qui consiste en un guide d'ondes délimité par 2 miroirs semi-transparents.



La longueur de la cavité résonante est un multiple entier de $\lambda/2$ des photons créés par émission stimulée pour que les ondes réfléchies par les miroirs s'additionnent en phase pour former un signal de grande amplitude.

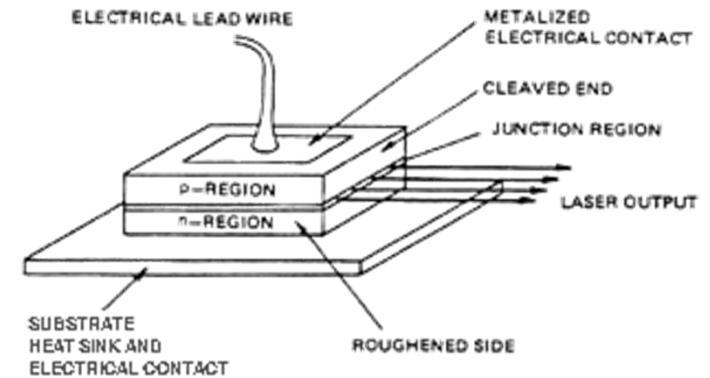
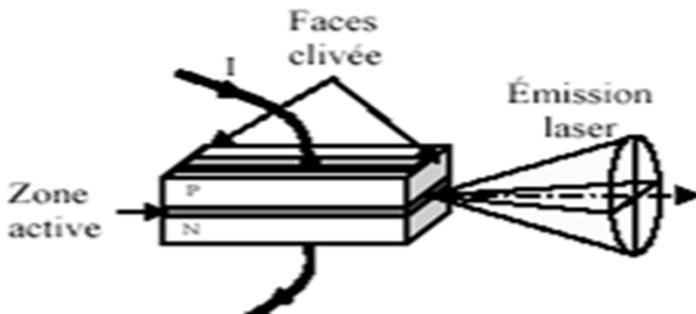
Les modes propres de la cavité sont des ondes planes. La cavité sélectionne les longueurs d'onde. La résonance est alors possible pour m modes avec:



$$L = m \frac{\lambda}{2} = m \frac{\lambda_0}{2n}$$

a- Les types de diodes laser

◆ Les premières DL étaient réalisées à base d'homojonction GaAs en 1962 sans confinement latéral, utilisées en régime impulsionnel.



Les miroirs de la cavité sont les faces clivées avec des facteurs de réflexion R (=flux réfléchi/flux incident).
et le faisceau de sortie est latéral.

l'indice de réfraction du GaAs étant de 3,6, pour une incidence normale, 30% (interface air / SC) du rayonnement est réfléchi.

Les dimensions types de la diode sont:

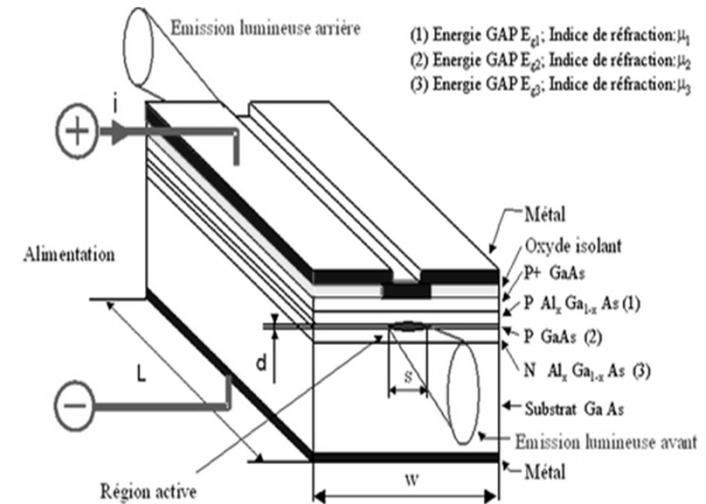
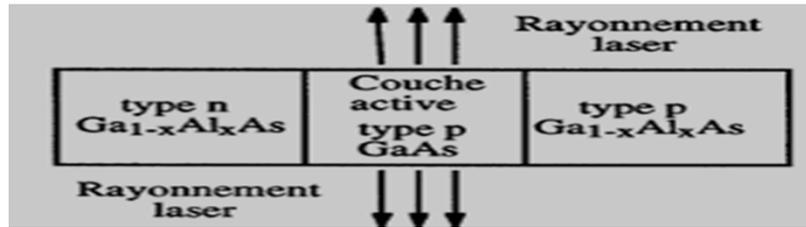
L : longueur de la diode : 200 - 500 μm

l : largeur de la diode : 100 - 300 μm

d : épaisseur de zone active : 0.1 - 0.3 μm

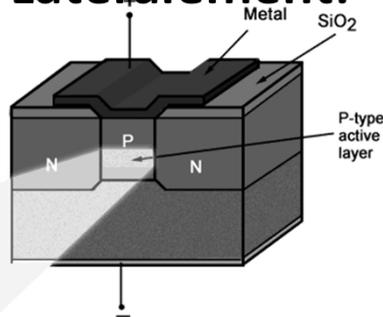
○ L'épaisseur de la zone active est limitée par la longueur de diffusion des porteurs.

◆ Les diodes Laser actuelles sont à hétérojonctions .

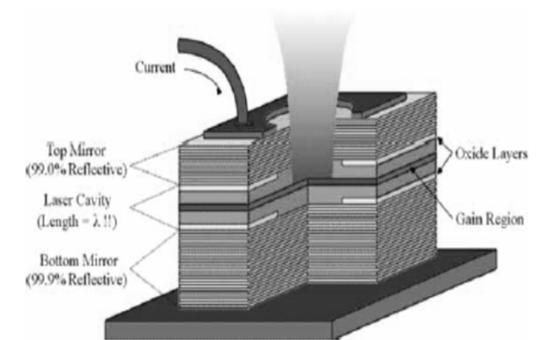


◆ L'émission se fait :

✓ Latéralement:



✓ Par la face; Laser à cavité verticale émettant par la surface (⊥ zone active) (VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser)



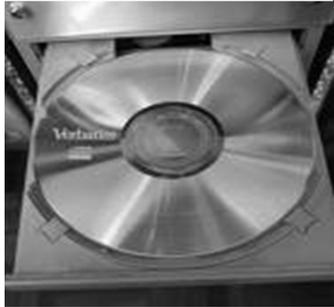
➤ Dans les VCSEL le faisceau de sortie est vertical, la réflexion se fait par des miroirs de Bragg et le confinement est à la fois électronique et optique.

➤ On peut réaliser de nombreux lasers sur un même substrat.

➤ la connexion est plus simple avec les fibres optiques

Les applications des diodes laser sont:

- Les télécommunications optiques.

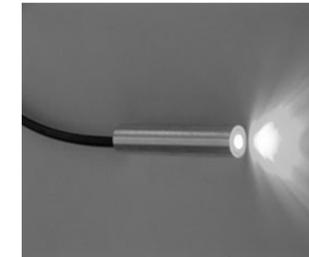


- La lecture de CD, l'holographie et le stockage de l'information dans les disques optiques (CD ou DVI)

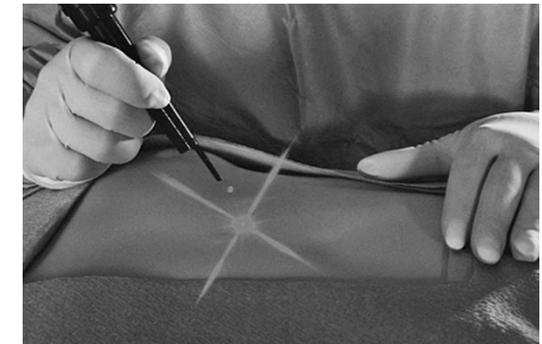
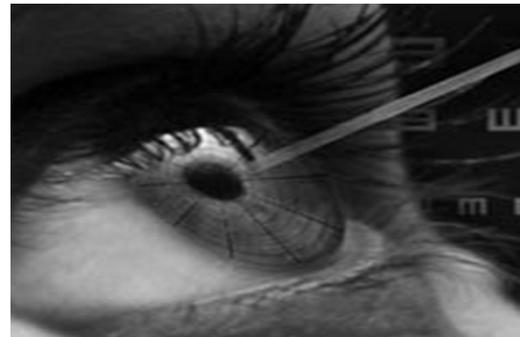
- La photocopie ou l'impression laser, les applications industrielles...(lecteurs code barre).



- Les systèmes d'interconnexion optique par fibre ou en espace libre.



- les applications médicales: : Traitement dentaire, Chirurgie, Dermatologie ...



b- Inversion de population dans les semiconducteurs

○ Tous Sc à l'équilibre est défini par ses concentrations de porteurs n_0 et p_0 , soit par un niveau de Fermi E_F .

○ Si une excitation extérieure modifie les densités $n \neq n_0$ et $p \neq p_0$, E_F , (paramètre d'équilibre) n'est plus défini.

○ Le SC est alors défini par 2 pseudo-niveaux de Fermi E_{fn} et E_{fp} caractérisant un régime de pseudo équilibre dans chaque bande.

➤ Pour favoriser l'émission stimulée, il faut avoir:

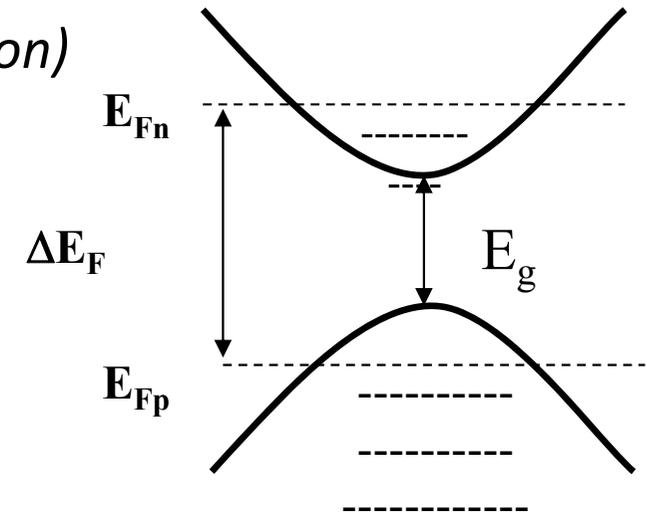
- une forte concentration d'électrons dans BC et
- une forte concentration en trous dans BV.

➤ Cette situation représente une inversion de population qui nécessite un mécanisme de pompage (polarisation directe) pour maintenir constante la population des niveaux supérieurs qui tendent naturellement à se vider par émission spontanée.

❖ Ainsi, dans un SC pour réaliser une inversion de population il faut que E_{Fn} soit dans la BC et que E_{Fp} soit dans la BV. Autrement dit, il faut avoir :

$$\Delta E_F = E_{fn} - E_{FP} > E_G \quad (\text{condition d'inversion})$$

Pour réaliser l'inversion de population dans un laser à SC, on doit considérer une jonction pn où les régions p et n sont dégénérées:



- La région p est très dopée pour qu'à l'équilibre E_{fp} soit dans la BV.
- la région n est très dopée pour que la densité d'électrons injectés dans p sous polarisation directe soit tel que E_{fn} soit dans la BC.

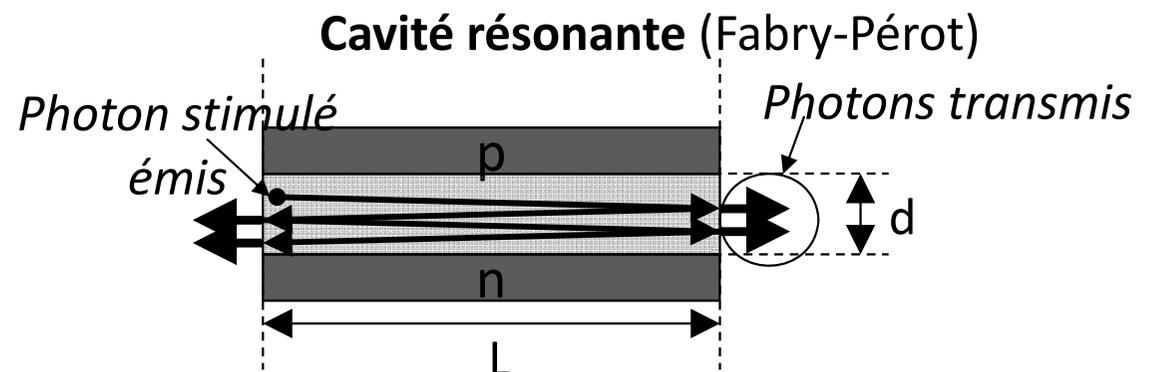
❖ Considérons la diode à l'équilibre thermique.

- Les régions n et p sont dégénérées et les niveaux de Fermi sont alignés.

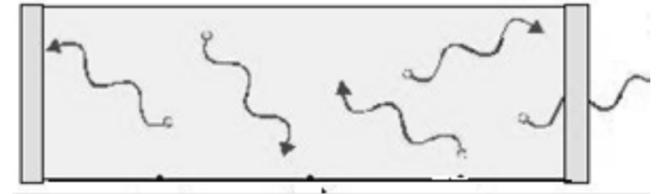
- Quand on applique une tension de polarisation directe (pompage électrique), l'injection d'électrons dans la partie n et de trous dans la partie p, déplace le niveau de Fermi de part et d'autre de la jonction.
- Enfin si on augmente la tension, l'injection de porteurs est suffisante pour obtenir une zone de largeur d , où $n_e \gg$ dans BC et $n_p \gg$ dans BV, ce qui est la condition pour une inversion de population.



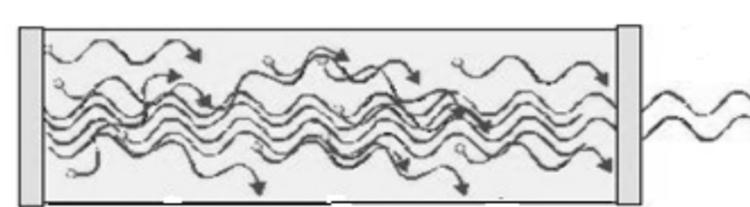
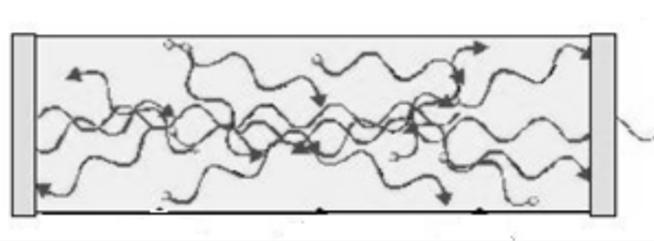
La Z A comprise entre n et p est quasi neutre. Elle est équivalente à une cavité Fabry- Pérot (cavité résonnante).



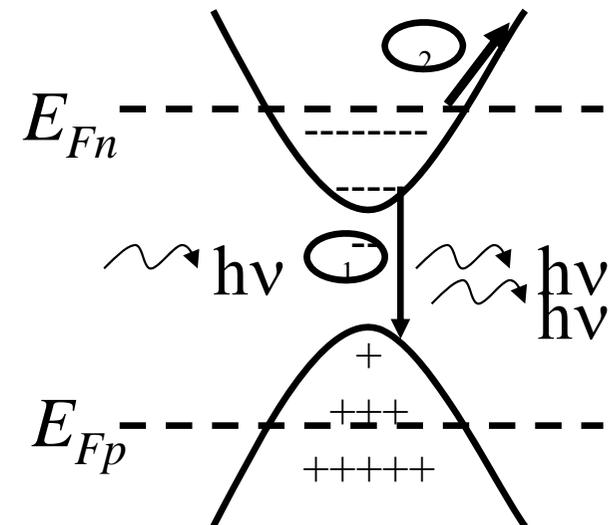
➤ On obtient dans un premier lieu un rayonnement émis de façon spontanée.



⇒ les photons qui se propagent vers les miroirs sont amplifiés par des émissions stimulées



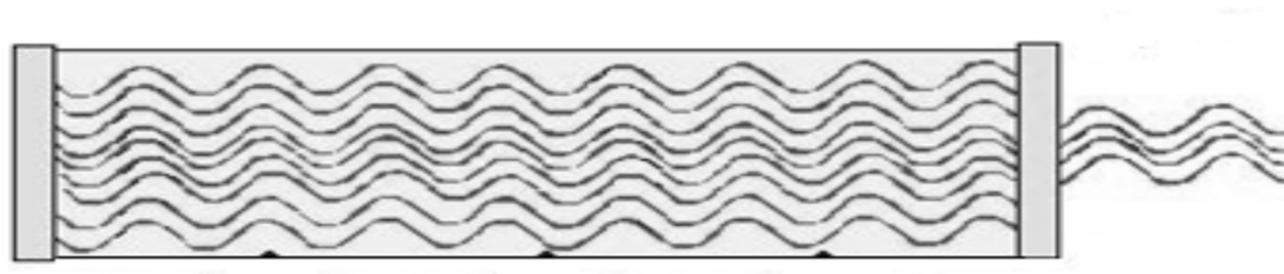
Dans le SC, le photon incident peut aussi être absorbé par un électron de la bande de conduction qui « saute » sur un niveau énergétique plus haut: c'est l'effet Auger ou pertes par absorption Auger



L'Effet LASER est donc possible si:

$$\Delta E_F > E_g \text{ et } \text{effet Auger (2)} < \text{Absorption normale (1)}$$

Dés que la lumière induite dépasse la lumière absorbée dans le milieu amplificateur (par porteurs libres (Auger) et par les défauts), l'oscillation laser commence.



Notons:

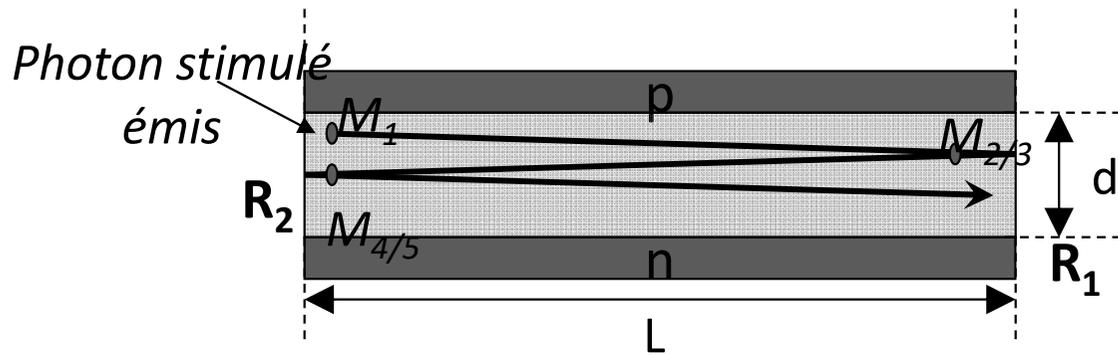
- $\alpha_p(\lambda)$: le coefficient d'absorption par porteurs libres ($\approx 100 \text{ cm}^{-1}$),
- $g(\lambda)$: le gain de la cavité par émission stimulée.

⇒ Pour que le laser oscille et l'émission laser apparaisse il faut que le gain compense les pertes par absorption

⇒ le coefficient net d'absorption $A(\lambda) = [g(\lambda) - \alpha_p(\lambda)] > 0$

La condition d'émission laser s'obtient en écrivant les conditions de résonance :

- Le gain sur un aller-retour doit être supérieur aux pertes.
- Le déphasage sur un aller-retour doit être un multiple de 2π .



Gain net : $A(\lambda) = g(\lambda) - \alpha_p(\lambda)$

Soit $\Phi(\lambda)$ le Flux émis en M_1 :

- en M_2 (*avant réflexion*) : $\Phi(\lambda) \Rightarrow$ flux: $\Phi(\lambda)e^{A(\lambda)L}$
- en M_3 (*après réflexion*) \Rightarrow flux : $R_1\Phi(\lambda)e^{A(\lambda)L}$
- en M_4 (*avant réflexion*) \Rightarrow flux : $R_1\Phi(\lambda)e^{2A(\lambda)L}$
- en M_5 (*après réflexion*) \Rightarrow flux : $R_1R_2\Phi(\lambda)e^{2A(\lambda)L}$

Résonance si : $R_1R_2\Phi(\lambda)e^{2A(\lambda)L} > \Phi(\lambda)$

Le seuil de la résonance est atteint lorsque $R_1R_2\Phi(\lambda)e^{2A(\lambda)L} = \Phi(\lambda)$

$$e^{2A(\lambda)L} = \frac{1}{R_1R_2}$$

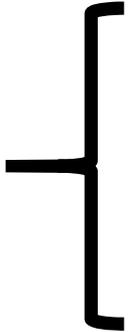
Soit au seuil de la résonance il faut avoir :

$$g_s(\lambda) = \alpha_p(\lambda) + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2}$$

Et la condition d'oscillation est : $A(\lambda) > \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2}$

g_s est le gain seuil de la cavité. C'est le gain minimal que la région active doit fournir pour que l'effet laser se produise. Dans ce cas, le gain est égal aux pertes de la cavité.

g_s est déterminé par la géométrie et les caractéristiques de la cavité. L'expression montre, par exemple, que lorsque la longueur de la cavité décroît, ce gain seuil augmente.

Lorsque: $g > g_s$ 

- La cavité est en oscillation;
- la moindre émission stimulée présente une augmentation brutale du signal lumineux
- Il apparaît une certaine directivité de l'émission (*direction la plus grande de diode*)



La diode est super radiante

Exemple :

Pour $\alpha_p = 10 \text{ cm}^{-1}$, une surface avec un coefficient de réflexion de 30% et l'autre totalement réfléchissante, déterminer le gain seuil d'une diode laser au GaAs de $300 \mu\text{m}$ de longueur.

Réponse :

$$g_s(\lambda) = \alpha_p(\lambda) + \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right) \quad \text{Donc :}$$

$$g_s = 10 + \frac{1}{2 \times 300 \cdot 10^{-4}} \ln\left(\frac{1}{1 \times 0.3}\right)$$

Soit, le gain seuil est de :

$$g_s \approx 50 \text{ cm}^{-1}$$

➤ La valeur seuil du gain g_s correspond à un courant de polarisation j_s au dessous duquel l'effet laser n'apparaît pas.

➤ dans la diode laser à homojonction, le courant seuil j_s est assez élevé:
 $3 \cdot 10^4$ à $5 \cdot 10^4$ A/cm² à 300K

➤ Cette valeur élevée impose un fonctionnement impulsionnel en raison des problèmes thermiques.

➤ Le gain seuil peut être exprimé en fonction du courant de seuil par:

$$g_s = \beta \cdot J_s$$

Avec β : Facteur de gain, constante propre au composant

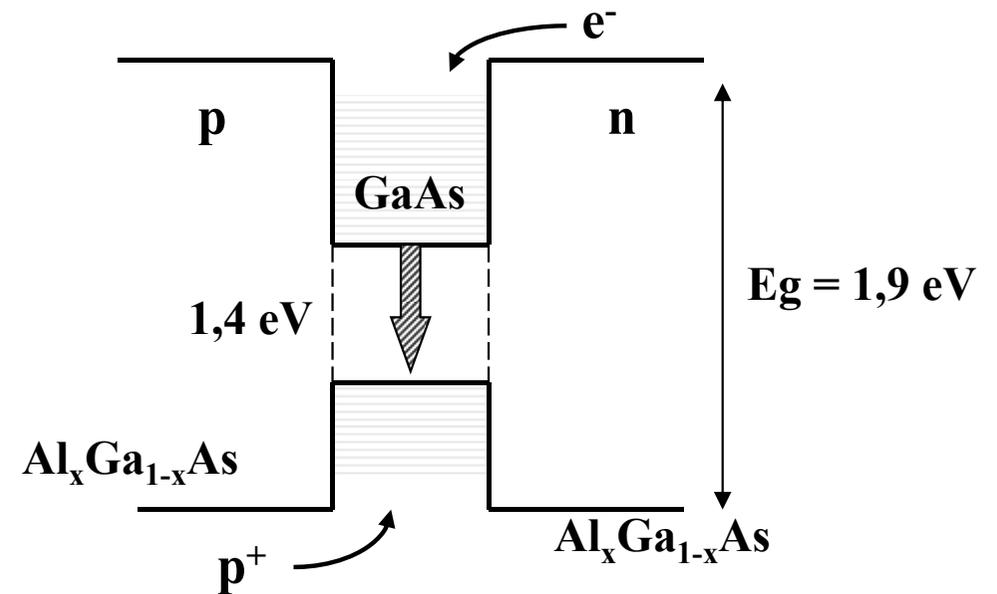
d- Le laser à double hétérojonction

Dans ces dispositifs, une couche de matériau à faible largeur de bande interdite est prise en sandwich entre deux couches de bande interdite élevée. Une paire de matériaux couramment utilisés est l'arséniure de gallium (GaAs), l'arséniure de gallium et aluminium ($\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$).

La réduction de j_s  Utilisation de l'émission laser en continu à 300K

Possible avec des structures à double hétérojonction de type:
 $\text{GaAlAs}(p)/\text{GaAs}(p)/\text{GaAlAs}(n)$

□ La double hétérostructure permet la réduction du volume de la ZA qui est parfaitement définie grâce au puits de potentiel provenant de la discontinuité des gaps.



□ Ce dispositif apporte une double propriété de confinement :

➤ Confinement des porteurs: barrières de potentiel (n)GaAlAs et (p)GaAlAs; couche active: GaAs (de l'ordre de 0,1 μm: réduction de j_s).

➤ Confinement optique: indice de GaAs > indice des barrières, donc la structure se comporte comme un guide d'ondes.

❖ En fonction de la structure de la diode laser, le gain au seuil s'exprime par:

$$g_s \text{ (DHJ)} = \frac{1}{\Gamma} \times g_s \text{ (DS)} = \frac{1}{\Gamma} \left[\alpha_p(\lambda) + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) \right]$$

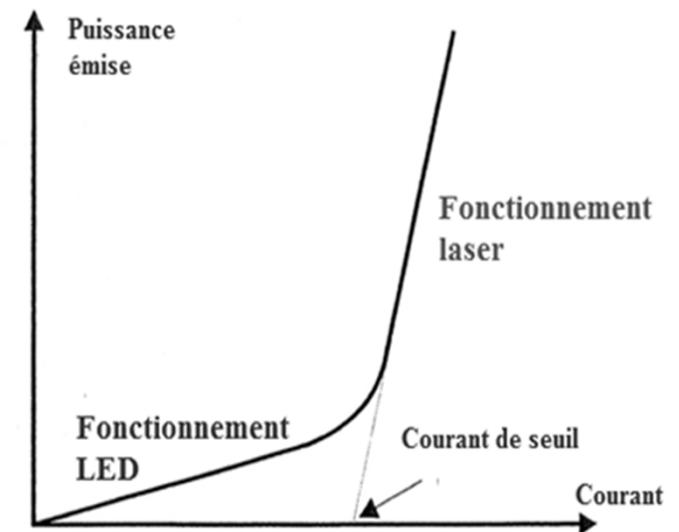
Γ est le facteur de confinement des porteurs.

Les couches de confinement permettent d'optimiser l'utilisation du courant dans la diode et d'augmenter le rendement.

e- caractéristique puissance-courant

❖ Lorsqu'un faible courant lui est appliqué, une diode laser émet de la même manière qu'une LED par émissions spontanées.

❖ $I > I_s$: l'inversion de population a lieu. Les photons émis vont générer des photons cohérents qui vont atteindre les faces clivées du laser en se multipliant.



- ❖ En régime laser la caractéristique $\Phi(I)$ est quasiment droite.
- ❖ A fort courant la courbe s'éloigne de la droite à cause de l'échauffement.
- ❖ le rendement différentiel de la diode dans ce régime est donné par:

$$\eta_{diff} = 2 \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta I} \cdot \frac{e}{h\nu} \quad (\%) = \frac{2}{E_g (eV)} \cdot \frac{\Delta\Phi (W)}{\Delta I (A)}$$

❖ il est de l'ordre de 60%

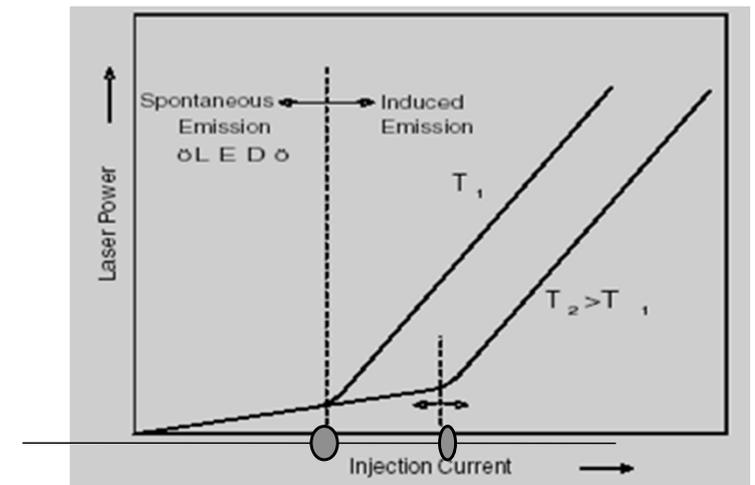
❖ le facteur 2 résulte de l'existence de deux faces émettrices.

f- Influence de la température

- Le courant de seuil augmente rapidement avec la température, il passe facilement de 15mA à 20° à 23mA à 50°.
- A même puissance lumineuse, la puissance électrique dissipée dans le laser augmente.
- le courant seuil varie suivant la loi:

$$I_s = I_{s0} \cdot \text{Exp} (T/T_0)$$

T_0 : Température caractéristique de la diode



➤ la pente de la caractéristique est plus faible et le rendement est moindre.

Exemple :

Une diode laser au GaAlAs a un coefficient de température de $T_0 = 160$ K.

Lorsqu'elle est utilisée à 20° C la densité de courant de seuil est de 2200 A/cm². Quelle est la nouvelle valeur de la densité de courant de seuil si sa température passe à 80° C

Réponse :

Nous avons :

$$J_s(T_1) = J_{s0} \cdot \text{Exp} \frac{T_1}{T_0} \quad J_s(T_2) = J_{s0} \cdot \text{Exp} \frac{T_2}{T_0}$$

Ce qui donne :

$$J_s(T_2) = J_s(T_1) \cdot \text{Exp} \frac{(T_2 - T_1)}{T_0}$$

Ainsi à 80° , la densité de courant de seuil passe à :

$$J_s(80^\circ\text{C}) = 3200 \text{ A/cm}^2$$

g- Distribution spatiale du rayonnement

➤ La zone active du laser, limitée par L, l et d joue le rôle d'un guide de lumière de surface émettrice $S= d.l$.

➤ La tache lumineuse à sa sortie est appelée champ proche et l'ouverture du faisceau est limitée par la diffraction au niveau de la surface S.

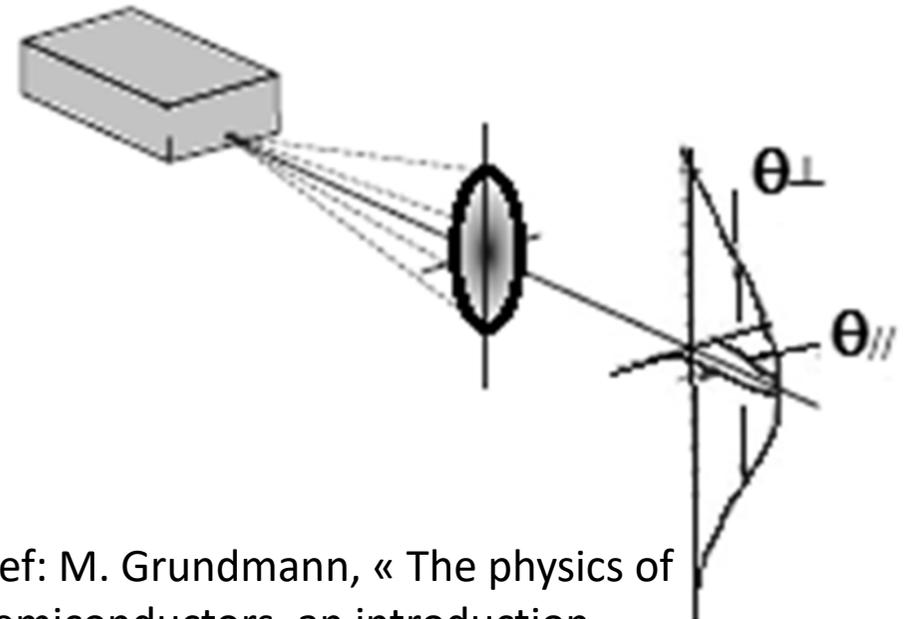
L'ouverture du faisceau émis par la diode est représentée par:

$\theta_{//}$: Dans le plan de la zone active

θ_{\perp} : dans le plan perpendiculaire à la ZA

$$\lambda = 1 \mu\text{m} \sim d \sim l$$

$$\begin{cases} \theta_{//} = \theta_1 = \frac{\lambda}{l} \approx 6 \text{ à } 10^\circ \\ \theta_{\perp} = \theta_2 = \frac{\lambda}{d} \approx 35 \text{ à } 60^\circ \end{cases}$$



Ref: M. Grundmann, « The physics of semiconductors, an introduction including nanophysics and applications », Springer, Verlag, Berlin Heidelberg 2010, ISSN 1868-4513, ISBN 978-3-642-13884-3

➤ La répartition de l'intensité en fonction des dimensions est quasi gaussienne.

g- Distribution spectrale du rayonnement

Pour chaque cavité résonnante, seules les ondes retrouvant leur phase après un aller et retour dans la cavité sont susceptibles d'être amplifiées.

Cette condition est à l'origine d'un spectre optique, des cavités Fabry-Pérot et VCSEL, composé d'un ensemble de raies spectrales individuelles avec un espacement régulier $\Delta\lambda$ appelées aussi modes longitudinaux

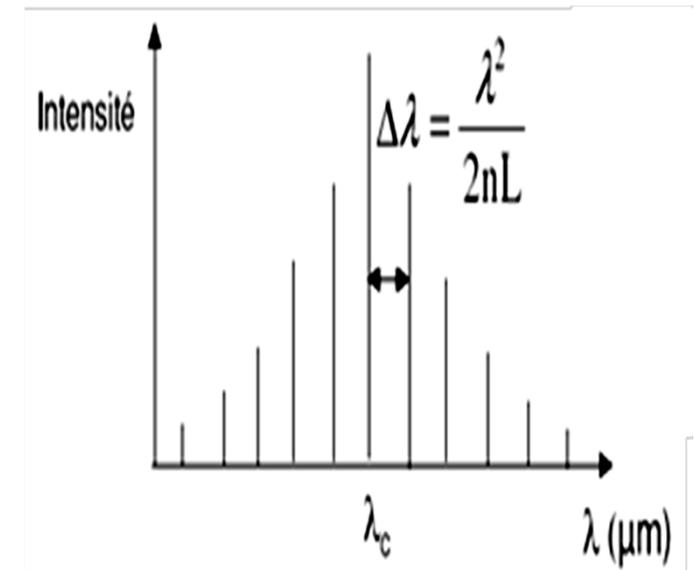
Les modes sélectionnés étant définis par $2nL = m\lambda$

L'intervalle entre deux modes successifs est alors :

$$dm = -2nL \frac{d\lambda}{\lambda^2} + 2L \frac{dn}{\lambda} = -2nL \frac{d\lambda}{\lambda^2} \left(1 - \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda} \right) = -1$$

La distance intermodale est alors :

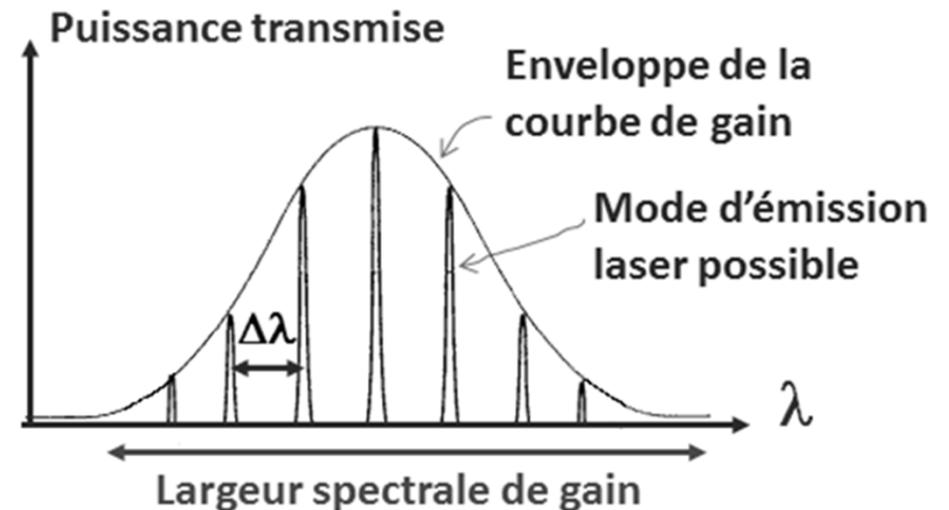
$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2L} \frac{1}{\left(n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right)} \approx \frac{\lambda^2}{2nL}$$



Ces raies sont comprises à l'intérieur d'une enveloppe plus large appelée courbe de gain.

La largeur spectrale de chaque raie dépend de nombreux facteurs, en particulier de la puissance de la diode,

La courbe de gain peut alors comprendre une seule raie; c'est le cas du laser monomode ou plusieurs raies; c'est le cas de la diode multimode,



Ainsi, pour obtenir un rayonnement monomode, l'idée de base est de réduire la longueur L de la cavité jusqu'à ce que l'espacement entre 2 modes longitudinaux ($\frac{\lambda^2}{2nL}$) soit supérieur à la largeur de la courbe de gain.

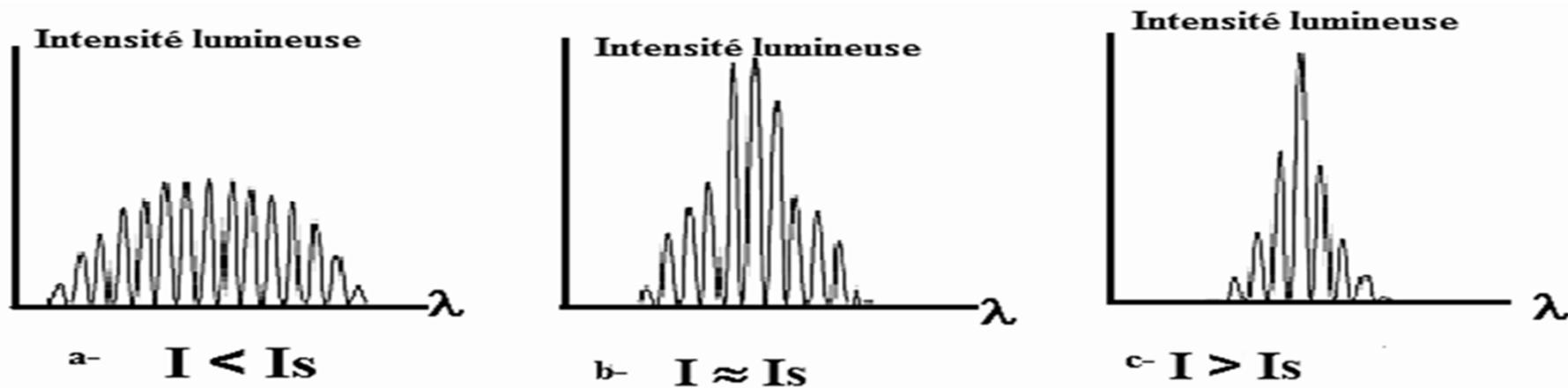
Et, la longueur d'onde de la raie centrale est donnée par l'énergie de gap du matériau de la couche active.

❖ Le spectre d'émission de la diode laser est conditionné par le gain de la cavité, donc par le courant de seuil.

➤ $I < I_s$: on obtient un spectre continu à forme gaussienne avec $\Delta\lambda \approx 20$ nm.

➤ $I \approx I_s$: l'intensité lumineuse croît rapidement faisant apparaître une série de modes séparés de quelques Å

➤ $I > I_s$: il y a concentration de la lumière sur un mode principal quasi monochromatique.

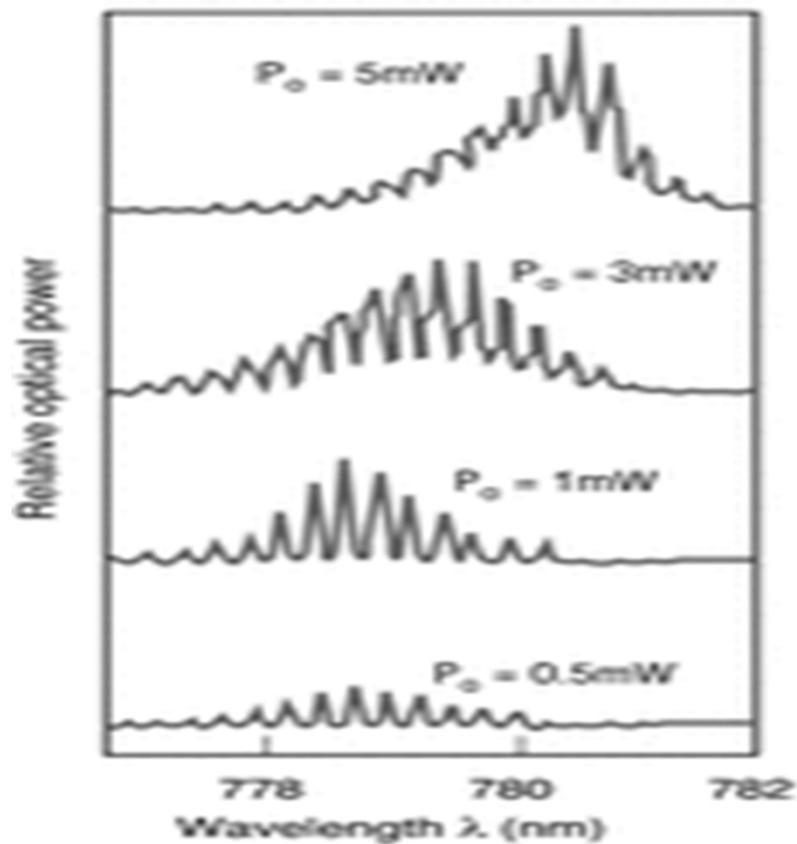


➤ La cavité donne un spectre en forme de peigne constitué d'une raie principale entourée de raies satellites.

➤ Dans certaines conditions la largeur de raie peut n'autoriser qu'un seul mode à $I = I_s$, l'émission de la diode est alors monomode.

Spectre d'émission de diodes Laser multimode et monomode

Emission multimode



Emission monomode

