

Résumé de cours M1 Microélectronique

Module : Physique des composants semi-conducteurs 2

Dispositifs photoniques

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

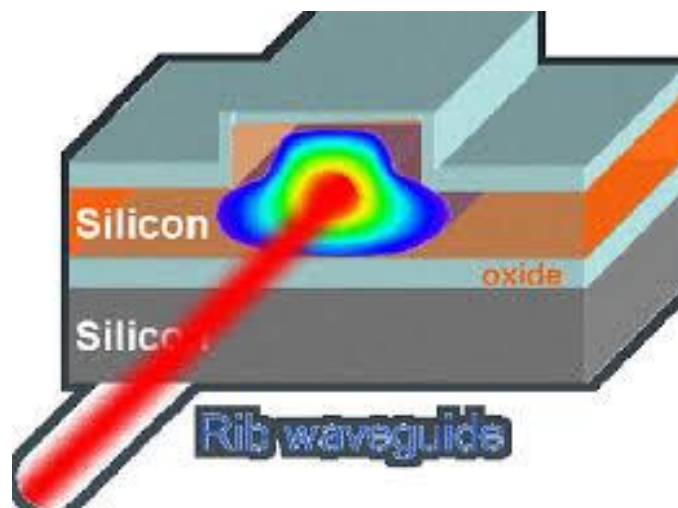
1. Marius Grundmann, The Physics of Semiconductors, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
2. S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, JOHN WILEY & SONS, 2007.
3. <http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/contents.htm>

Langue Française

1. A. Vapaille et R. Castagné, Dispositifs et circuits semi-conducteurs, Physique et technologie, Dunod, 1987.
2. CHRISTIAN ET HELENE NGÖ, Introduction à la physique des semi-conducteurs, Dunod, 1998.
3. H. MATHIEU, physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, Dunod, 2001.
4. <https://www.polytech-lille.fr/cours-atome-circuit-integre/>
5. <http://koeniguer.perso.cegetel.net/ips/ips.html>

<https://youtu.be/m59awXHk5K0>

Dispositifs Photoniques



Dispositifs Photoniques

Plan

- Partie I: Rayonnement électromagnétique
- Partie II : Aperçu sur l'Effet Photoélectrique
- Partie III : Généralités sur les dispositifs photoniques
- Partie IV : Diode Electroluminescente
- Partie V : Rayonnement laser

Dispositifs photoniques

Partie I

Rayonnement Electromagnétique

Rayonnement Electromagnétique

Sources du rayonnement électromagnétique

Le **rayonnement électromagnétique** correspond à l'ensemble **des radiations émises** par une **source** qui peut être:

- le soleil;
- la surface terrestre ou océanique;
- l'atmosphère;
- Autres (lampes, LEDs,...)

Rayonnement Electromagnétique

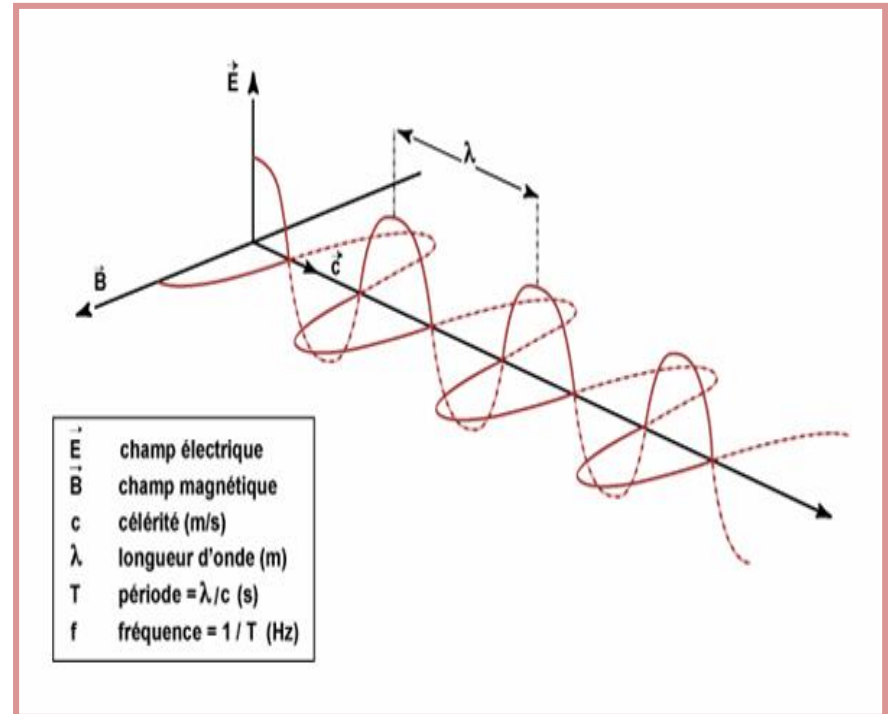
Nature et propagation

Une onde électromagnétique comporte à la fois un **champ électrique** et un **champ magnétique** oscillant à la **même fréquence**.

Ces deux champs, **perpendiculaires l'un par rapport à l'autre**, se propagent dans un milieu selon une **direction orthogonale**.

La propagation de ces ondes s'effectue à une **vitesse qui dépend du milieu considéré**.

Dans **le vide**, la vitesse de propagation est égale à **$c=3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$** .



Rayonnement Electromagnétique

Equations de Maxwell

Le **champ électrique E** et le **Champ magnétique H** satisfont aux **équations de Maxwell** qui s'écrivent dans un milieu **non magnétique, isotrope et non chargé**:

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

$$\text{div } \mathbf{E} = 0$$

$$\text{div } \mathbf{H} = 0$$

Solutions des équations est de la forme: $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp j(\omega t - kr)$

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp j 2\pi(t/T - r/\lambda)$$

ω : pulsation:
Vitesse lumière dans le milieu
 c : vitesse lumière dans le vide

$$c = 1/\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon_r}$$

n : indice refraction

$$n = \sqrt{\varepsilon_r}$$

μ_0 : perméabilité magnétique du vide

ε : Permittivité du milieu

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

ε_0 : permittivité du vide

ε_r : permittivité relative du milieu

(constante diélectrique du milieu)

Rayonnement Electromagnétique

Equations de Maxwell (cas général)

Maxwell's Equations	Maxwell's Equations
Differential form	Integral form
$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{a} = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0}$
$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{a}$
$\nabla \cdot \vec{B} = 0$	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{a} = 0$
$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{enc} + \mu_0 \epsilon_0 \int \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{a}$

Equation de Maxwell-Gauss

Equation de Maxwell-Faraday

Equation de Maxwell-Faraday

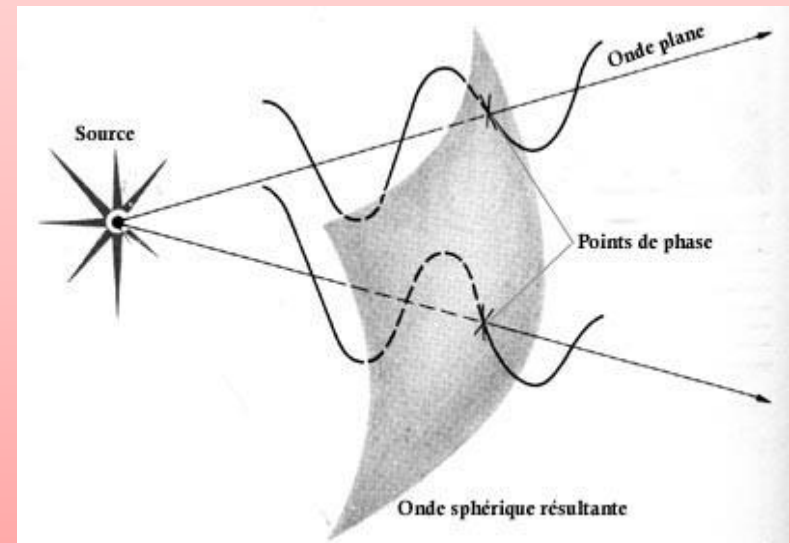
Rayonnement Electromagnétique

Surface d'onde

Le terme $(\omega t - k \cdot r)$ est la phase de l'onde.

A un instant t donné, l'ensemble des points de l'espace correspondant à une même phase constitue une surface d'onde

Le **front d'onde** ou la **surface d'onde** est une **surface** d'égale phase d'une **onde**, c'est-à-dire que **ces points** ont mis **le même temps de parcours** .



Rayonnement Electromagnétique

Vitesse de phase

Lorsque le temps s'écoule, les surfaces d'onde se déplacent avec la vitesse:

$$v = \omega / k$$

que l'on appelle **vitesse de phase**,

Vitesse de groupe

Contrairement à l'onde parfaitement monochromatique, qui est étendue dans tout l'espace, l'onde réelle est constituée de paquets d'ondes qui se propagent avec une vitesse:

$$V_g = d\omega / dk$$

que l'on appelle **vitesse de groupe**.

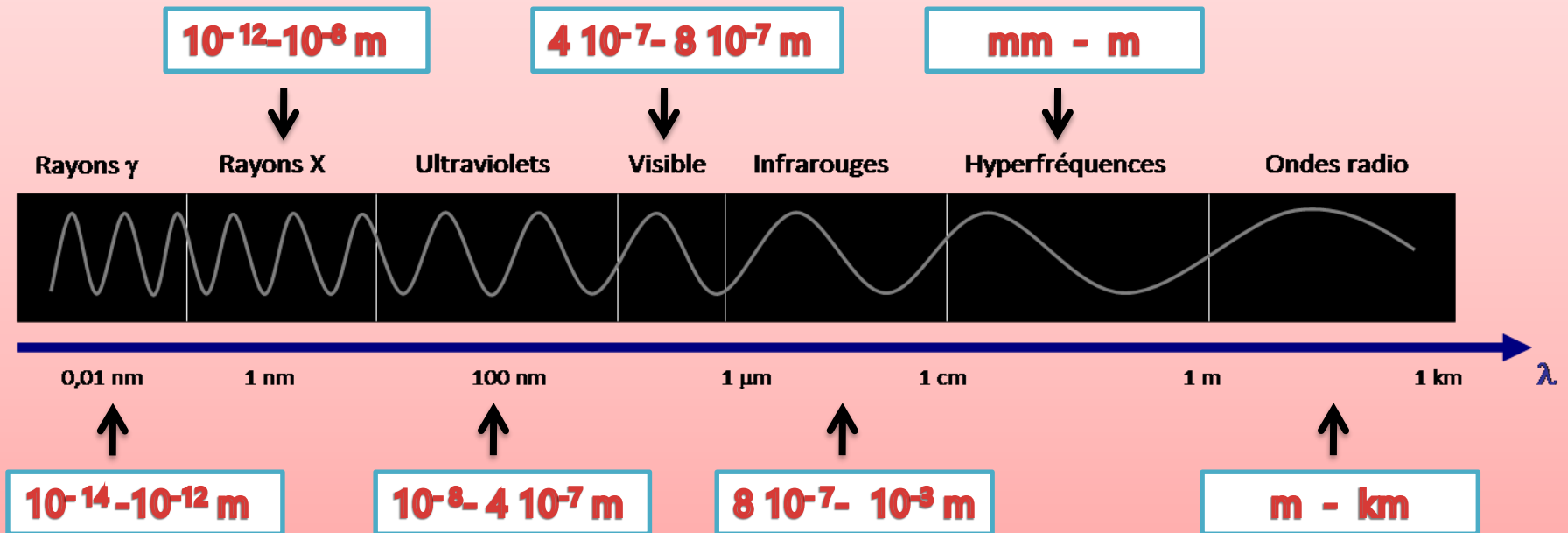
Rayonnement Electromagnétique

Relations utiles

1. Fréquence-Période: $\nu=1/T$
2. Longueur d'onde-Vitesse (vide): $\lambda_0=c.T$
3. Longueur d'onde-Vitesse (milieu): $\lambda=V.T$
4. Vitesse dans le vide-vitesse dans un milieu: $V=c/n$ (n indice de réfraction)
5. Longueur d'onde-fréquence:
 $\lambda_0=c/\nu$ (vide),
 $\lambda=V/\nu$ (milieu)
6. Energie-fréquence : $E=h \nu$

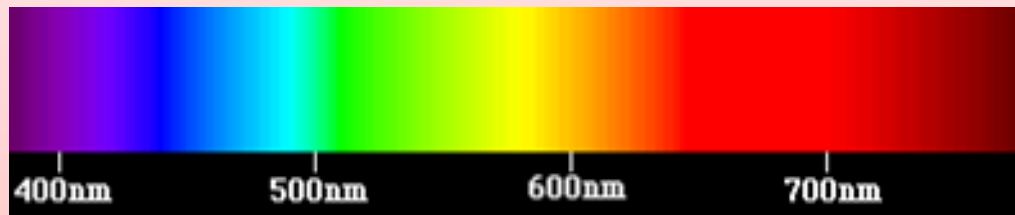
Rayonnement Electromagnétique

Spectre électromagnétique

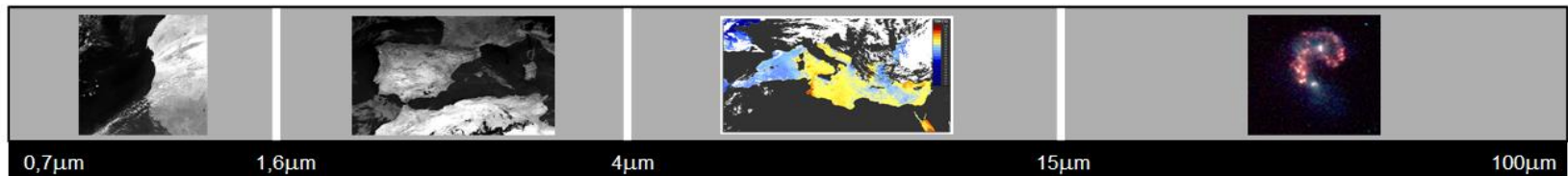


Rayonnement Electromagnétique

Domaine visible



Domaine IR



PIR

IRm

IR therm

IR lointain

IR Proche

IR moyen

IR thermique

IR lointain

Rayonnement Electromagnétique

Correspondance couleurs, longueurs d'onde et énergie

Couleur	Longueur d'onde (nm)	Energie des photons (eV)
Ultra Violet	< 390	> 3,18
Violet	390-455	2,72-3,18
Bleu	455-490	2,53-2,72
Cyan	490-515	2,41-2,53
Vert	515-570	2,18-2,41
Jaune	570-600	2,06-2,18
Orange	600-625	1,98-2,06
Rouge	625-720	1,72-1,98
Infra Rouge	> 720	< 1,72

Rayonnement Electromagnétique

Interaction rayonnement-Matière

Lorsqu'un rayonnement électromagnétique atteint un objet, Il subit les interactions suivantes:

- Une **partie** (certaines longueurs d'onde) est **absorbée par l'objet**;
- Une **partie** est **réfléchi**e par l'objet;
- Une **partie** du rayonnement est **transmise** à travers l'objet

(si celui-ci est plus ou moins transparent).

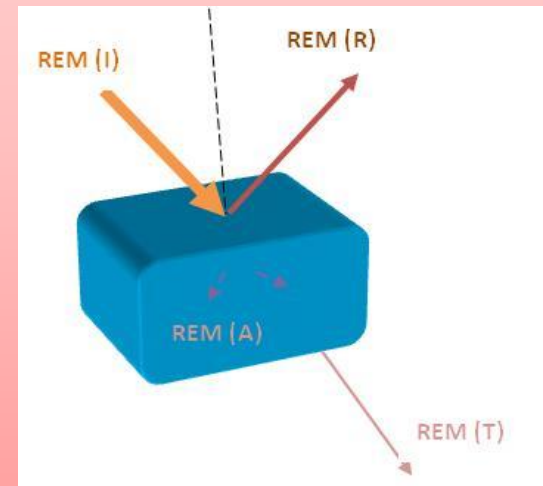
Remarque: Il est évident que:

$$R+A+T=1$$

R: coefficient de réflexion

A: coefficient d'absorption

T: Coefficient de transmission



Rayonnement Electromagnétique

Interaction rayonnement-Matière-cas particuliers- :

- **Corps totalement opaque:** Dans ce cas, le corps ne transmet pas le rayonnement, qui est en partie absorbé et en partie réfléchi.

$$R+A=1 \quad T=0$$

- **Corps parfaitement transparent:** le corps ne réfléchit pas le rayonnement, mais en absorbe et en transmet une partie.

$$A+T=1 \quad R=0$$

Rayonnement Electromagnétique

Réflexion d'un rayonnement

La réflexion se définit comme un **changement de direction** du rayonnement électromagnétique quand celui-ci atteint une surface.

La direction du rayonnement réfléchi **peut varier**, elle dépend de **la rugosité des surfaces** naturelles.

On distingue ainsi trois types de réflexion :

- Réflexion spéculaire;
- Réflexion diffuse;
- Réflexion de volume.

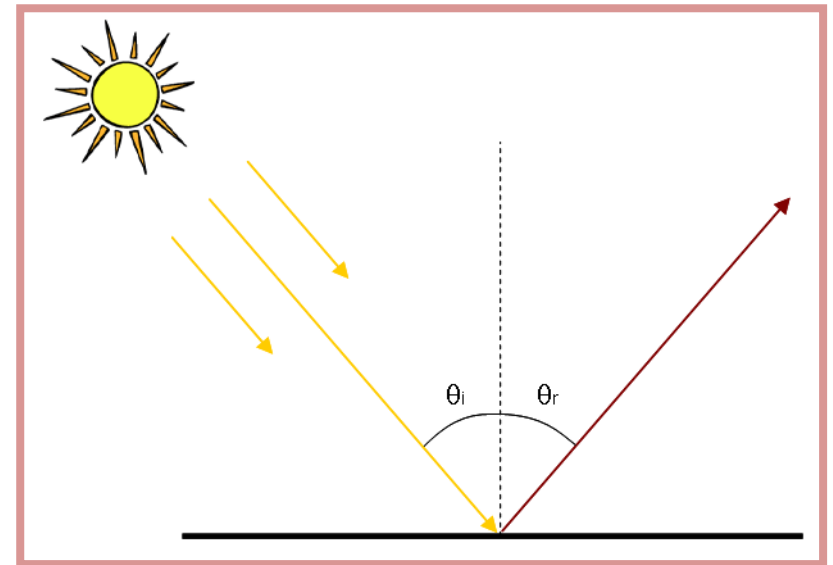
Rayonnement Electromagnétique

Réflexion spéculaire

La réflexion est dite **spéculaire** lorsque le rayonnement réfléchi par la surface l'est **dans une seule et même direction**.

Ce type de réflexion est régi par les lois de Descartes (**$\theta_i = \theta_r$**)

La réflexion spéculaire se produit uniquement sur **des surfaces lisses**, dont **les aspérités** ont une **taille inférieure** à la **longueur d'onde** du rayonnement incident.

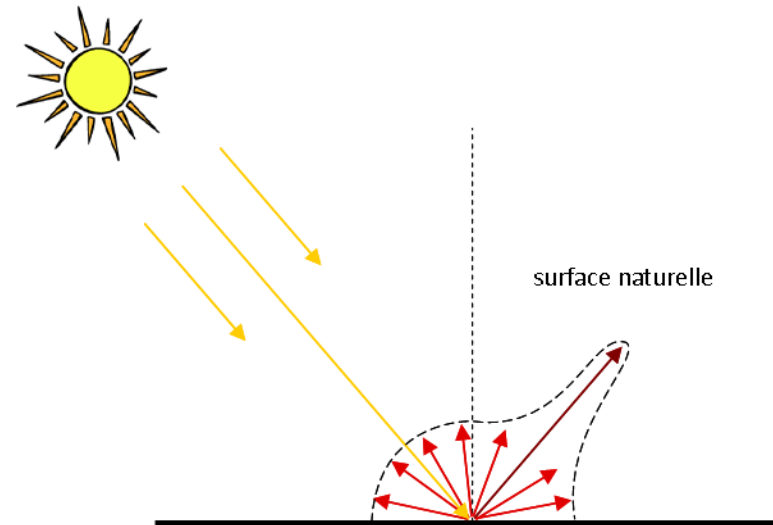


Rayonnement Electromagnétique

Réflexion diffuse

Lorsque les **surfaces** sont **rugueuses**, qu'elles présentent des **aspérités dont la taille est supérieure à la longueur d'onde** du rayonnement incident, **la réflexion est diffuse**.

Le rayonnement est réfléchi dans toutes les directions à cause des hétérogénéités du milieu, **avec généralement une direction privilégiée** pour laquelle la réflexion est plus importante

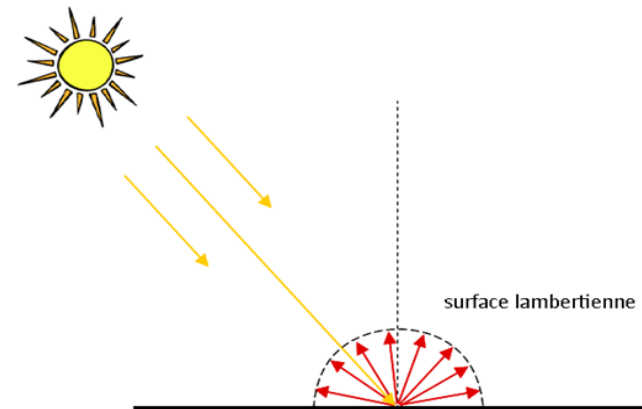
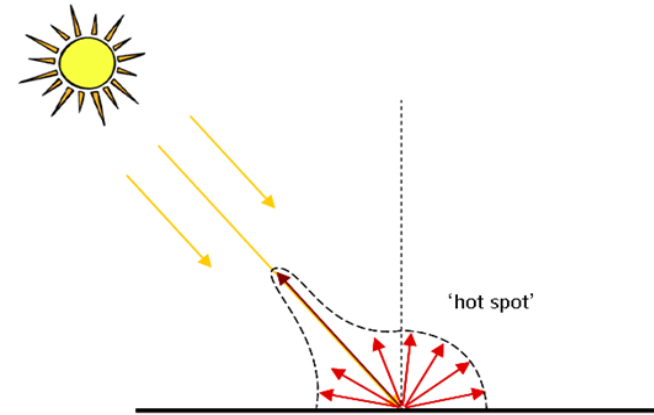


Rayonnement Electromagnétique

Réflexion diffuse

Lorsque les **directions d'observation** (capteur) et d'éclairement (soleil) **coïncident**, la quantité de lumière réfléchie par une surface rugueuse présente un maximum. Ce phénomène, connu sous le nom de **hot spot**.

Dans le cas où l'intensité du rayonnement réfléchi est la même dans toutes les directions, on parle de **réflexion Lambertienne**



Rayonnement Electromagnétique

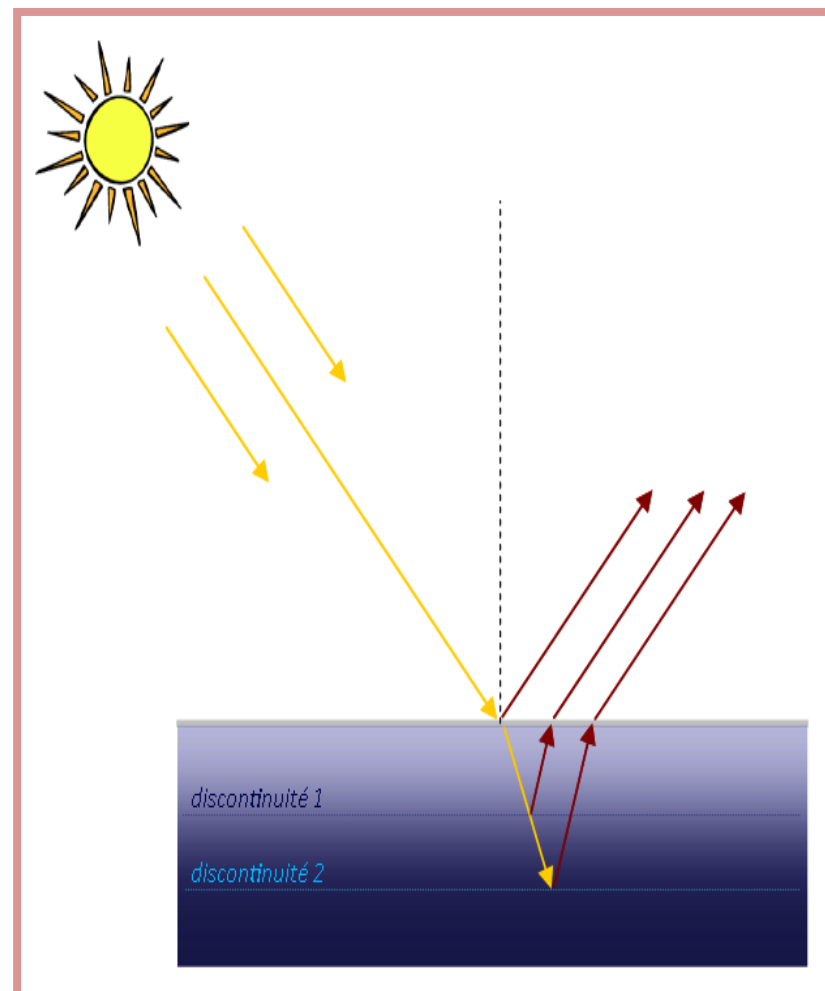
Réflexion de volume

La **réflexion de volume** peut être considérée comme la **somme de plusieurs réflexions de surface**.

Elle se produit lorsque une partie du rayonnement incident est transmise dans un milieu. Le **rayonnement est alors réfléchi** par les **différentes discontinuités de la couche** traversée.

Remarque

En réalité, le rayonnement total réfléchi par les surfaces naturelles est la somme de la **réflexion spéculaire**, de la **réflexion diffuse** et de la **réflexion de volume**.



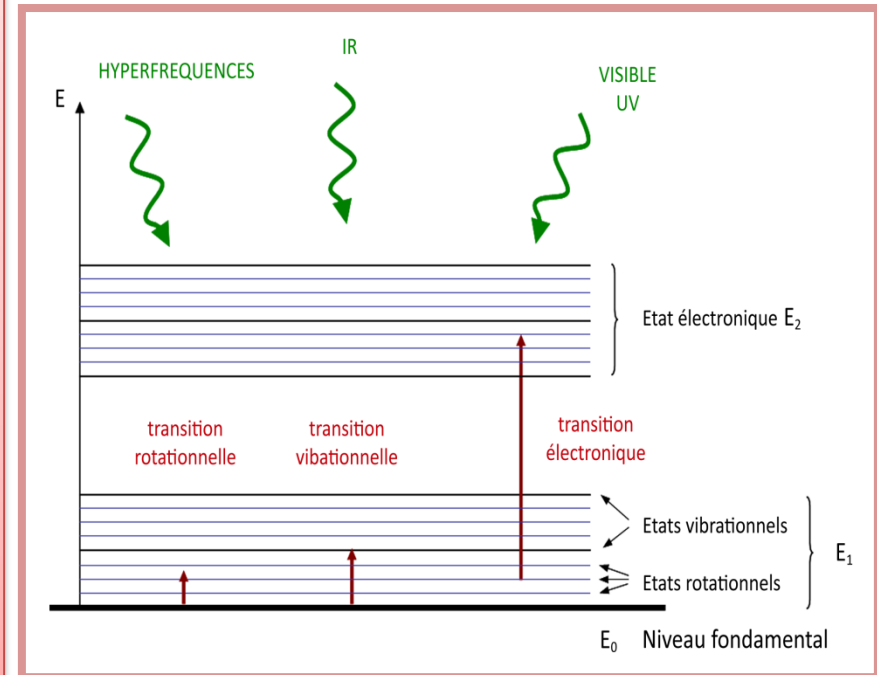
Rayonnement Electromagnétique

Absorption et transmission atmosphériques

Lorsque le rayonnement **traverse la couche atmosphérique**, il entre en **collision** avec **les molécules et les particules** présentes dans l'atmosphère.

Il peut être **dévié de sa trajectoire** ou bien être en **totalité** ou en **partie absorbé**.

Dans ce dernier cas, **il y a transfert d'énergie** entre **le rayonnement** et **les molécules** avec lesquelles il entre en collision.



Dispositifs photoniques

Partie II

Aperçu sur l'Effet Photoélectrique

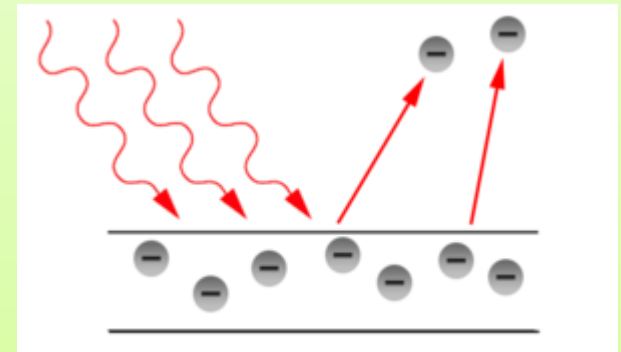
Effet photoélectrique

Introduction

Définition

L'effet photoélectrique (EPE) est l'émission d'électrons par un matériau, généralement métallique, lorsque celui-ci est exposé à la lumière ou un rayonnement électromagnétique de fréquence suffisamment élevée, qui dépend du matériau.

N.B: En plus de l'EPE, le matériau est le siège d'une augmentation de la conductivité du matériau (Photoconductivité), et de l'effet photovoltaïque



Effet photoélectrique et la Physique

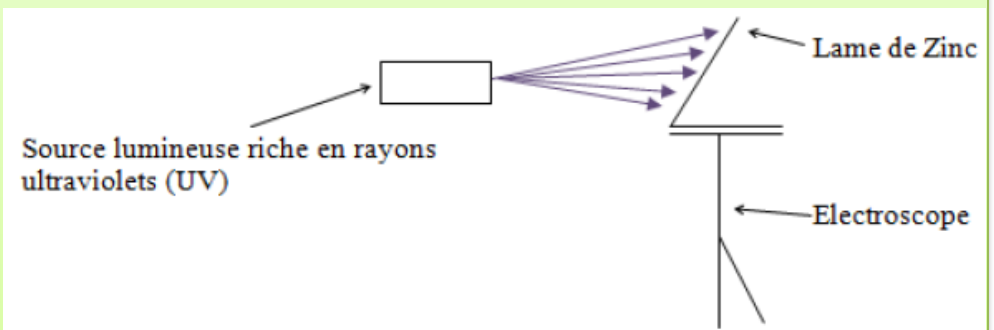
- L'effet photoélectrique a été découvert par Hertz lors de ses recherches sur les ondes électromagnétiques.
- Bien que la mise en évidence des ondes électromagnétiques a validé de façon éclatante la théorie de Maxwell, l'effet photoélectrique était rebelle à toute interprétation maxwellienne.
- Tandis que les ondes électromagnétiques contenaient les germes de la relativité restreinte, l'effet photoélectrique contenait ceux de la mécanique quantique !

Effet photoélectrique

Expérience de Hertz

- La lame de zinc est posée sur **l'électroscope chargé négativement**.
- Lorsqu'on l'éclaire avec une source **riche en UV**, la **feuille de l'électroscope tombe**, i.e. **l'électroscope se décharge**
- Lorsqu'on répète la même expérience avec **l'électroscope chargé positivement**, **aucune modification n'est observée**.
- Si on répète la même expérience avec **l'électroscope chargé négativement** mais en **interposant entre la plaque de zinc et la source UV une lame de verre** qui a la propriété d'absorber les UV: On constate que **la décharge n'a pas lieu**.

Conclusion: Les UV ont expulsés les électrons libres du zinc, ce qui a conduit à la migration des électrons de l'électroscope vers la lame de zinc

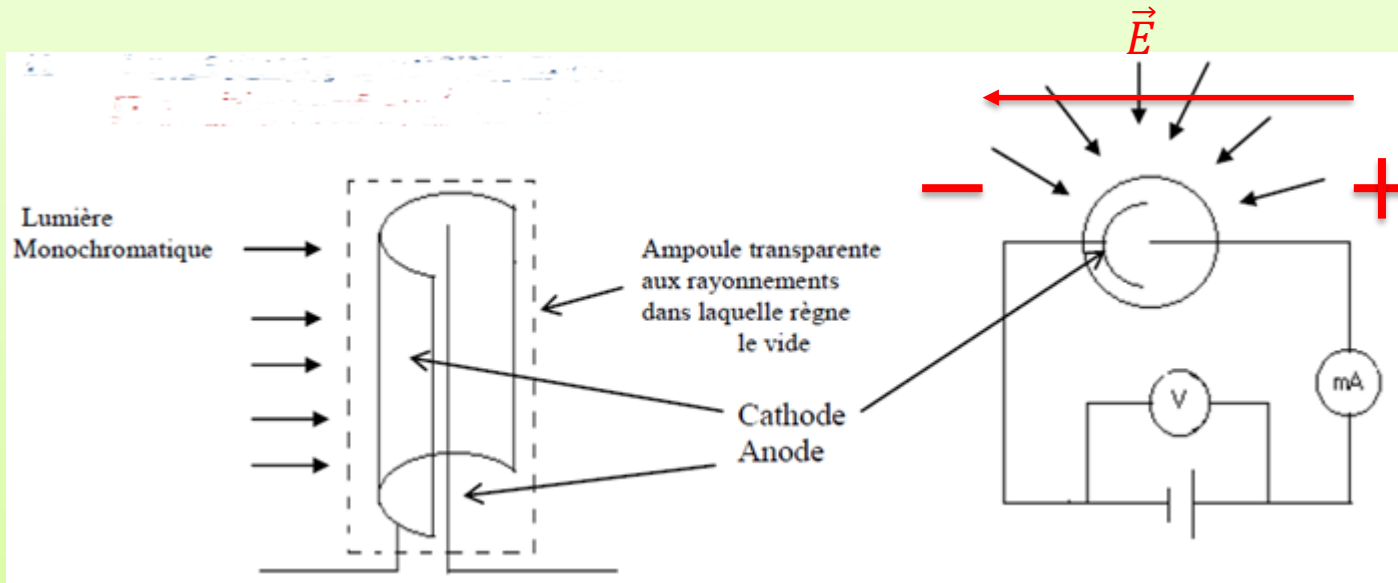


Effet photoélectrique

La cellule photoélectrique

Lorsque la cathode, recouverte d'un métal photoémisif, est éclairée par une lumière UV, elle émet des électrons;

L'anode, portée à un potentiel supérieur à celui de la cathode, capte les électrons émis par la cathode. Il résulte donc un courant électrique qui parcourt le circuit.



Effet photoélectrique

Constatations expérimentales

- Les UV n'arrivent pas à arracher des électrons que lorsque leur fréquence atteint une certaine valeur (**effet seuil**);
- L'énergie cinétique des électrons **augmente** quand la fréquence de la lumière incidente **augmente**;
- Le nombre d'électrons arrachés est proportionnel à l'intensité lumineuse;
- L'énergie cinétique des électrons est indépendante de l'intensité lumineuse.

Effet photoélectrique

Notions de photons

Interprétation d'Einstein

Einstein, en se basant sur les travaux de Max Planck, a introduit **la notion de photon** qui stipule qu'un **rayonnement électromagnétique de fréquence ν** est constitué de **grains d'énergie** appelés **photons** et transportant chacun une **énergie $h\nu$** où h est la constante de Planck ($h=6.62 \cdot 10^{-34}$ J.s).

Travail d'extraction

Pour qu'un électron soit expulsé d'un métal par un rayonnement, ce dernier doit lui céder **une énergie rayonnante W minimale** égale à un travail ϕ appelée **travail d'extraction**.

Energie cinétique

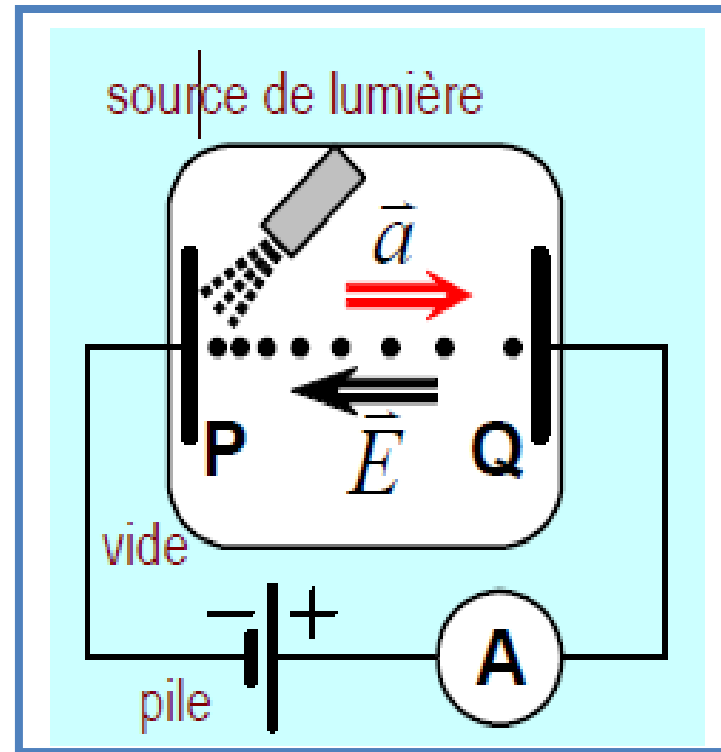
Si l'énergie w cédée à l'électron est supérieur au travail d'extraction ϕ , l'excédent d'énergie se trouve dans l'énergie cinétique de l'électron expulsé.

$$E_c = (1/2) mV^2 = W - \phi \quad \text{ou} \quad h\nu = (1/2) mV^2 + \phi$$

Effet photoélectrique

Evaluation de la fréquence de seuil

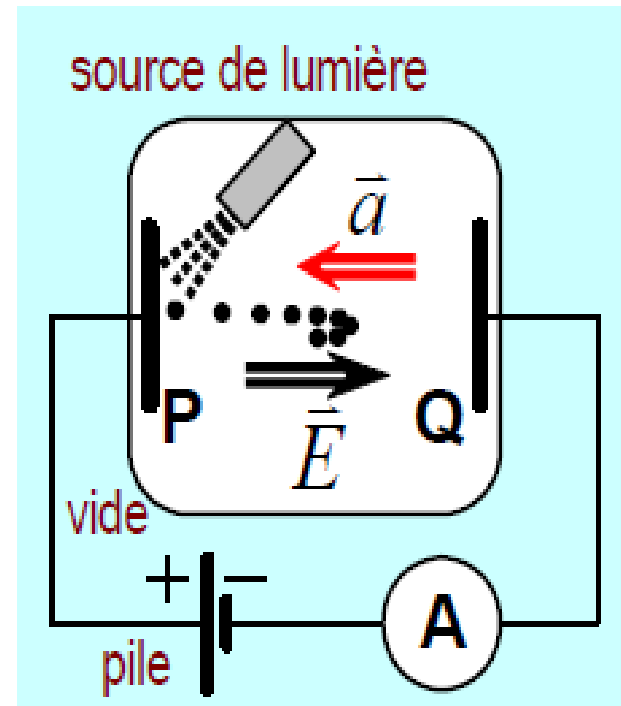
- Si $\nu_{\text{photon}} < \nu_{\text{seuil}}$:
Aucun électron éjecté.
Ampèremètre indique **0 A.**
- Si $\nu_{\text{photon}} \geq \nu_{\text{seuil}}$:
 - **Électrons éjectés.**
 - Ampèremètre indique un **courant non nul**



Effet photoélectrique

Evaluation de l'énergie cinétique

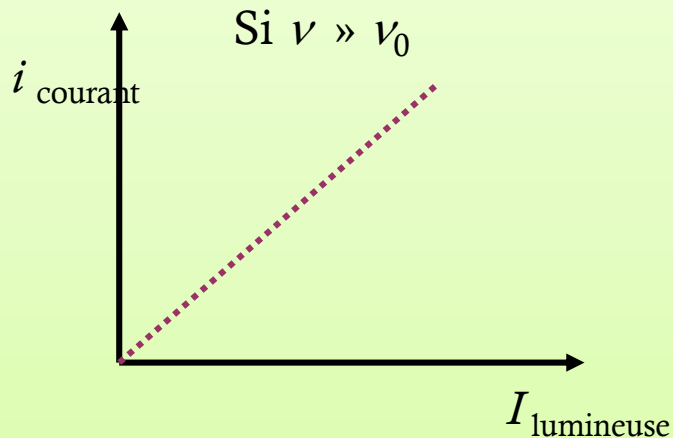
- Si $\nu_{\text{photon}} < \nu_{\text{seuil}}$:
 - Aucun électron éjecté.
 - Ampèremètre indique 0 A.
- Si $\nu_{\text{photon}} \geq \nu_{\text{seuil}}$ et $h\nu_{\text{photon}} < eV$:
 - Électron éjecté, mais ne se rend pas à la plaque Q.
 - Ampèremètre indique 0 A.
- Si $\nu_{\text{photon}} \geq \nu_{\text{seuil}}$ et $h\nu_{\text{photon}} > eV$:
 - Électron éjecté et se rend à la plaque Q.
 - Ampèremètre indique un courant non nul.



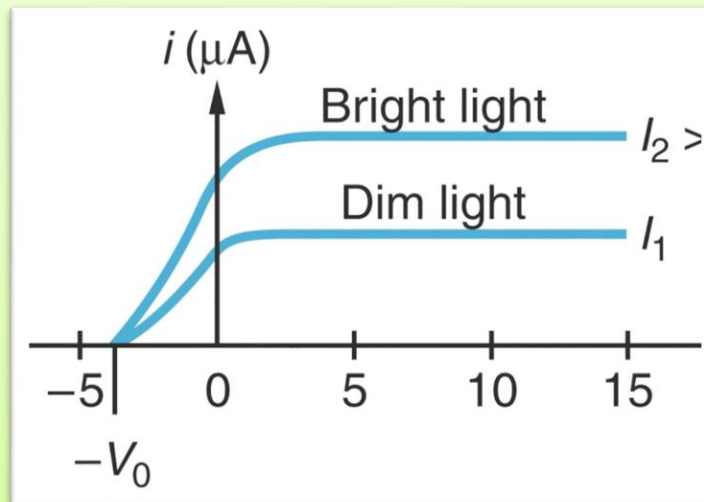
Effet photoélectrique

Résultats des Constatations expérimentales

Le courant photoélectrique est proportionnel à l'intensité lumineuse de la source



Si on augmente davantage V , le courant demeure constant. Cependant, la valeur maximale du courant est proportionnelle à l'intensité lumineuse



Effet photoélectrique

Applications de l'effet Photoélectrique

Les principales applications sont:

- **Cellule photoélectrique** utilisée comme **dispositif de commande** pour mettre en marche un escalier roulant, l'ouverture automatique d'une porte ou le déclenchement d'un système d'alarme;
- **Cellule photovoltaïque** qui transforme l'énergie solaire en énergie électrique
- Photorésistance, Phototransistor, photodiode,...etc

Dispositifs photoniques

Partie III Généralités

Dispositifs photoniques

Définition

Les dispositifs pour lesquels le photon joue un rôle majeur sont appelés dispositifs photoniques.

Exemples de dispositifs photoniques

- LEDs
- Diodes lasers
- Photodétecteurs
- Cellules solaires

Dispositifs Photoniques

Rôles des dispositifs photonique de base

LEDs: Elles **émettent un rayonnement** suite à une **polarisation électrique**,

Lasers: Conversion de **l'énergie électrique** en **énergie optique**;

Photodétecteurs: Ils **détectent les signaux optiques** après les avoir **convertis en signaux électriques**;

Cellules solaires: Elles convertissent **l'énergie optique** en **énergie électrique**.

Dispositifs photoniques

Einstein et le photon

Einstein a suggéré que l'énergie du rayonnement n'était pas étalée dans tout l'espace mais concentrée dans certaines régions se propageant comme des particules qu'il a appelées des photons.

Quantité de mouvement du photon

$$p = \hbar k$$

Energie du photon:

$$E = hv = \hbar\omega = \frac{\hbar c}{\sqrt{\epsilon_r}} k$$

Louis de Broglie et l'électron

Louis de Broglie a proposé, en 1924, qu'à une particule matérielle d'énergie E et de quantité de mouvement p , on devait associer

- Une onde de fréquence:

$$\nu = E/h$$

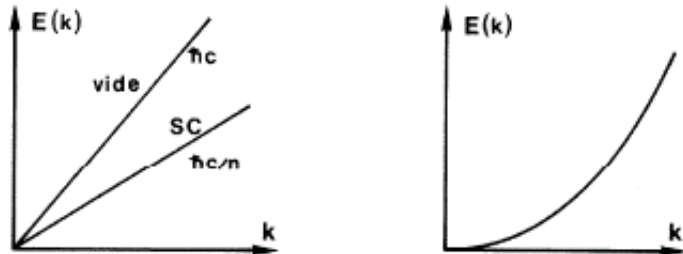
- Une longueur d'onde:

$$\lambda = h/p.$$

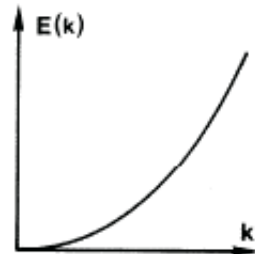
- Relation de dispersion:

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$$

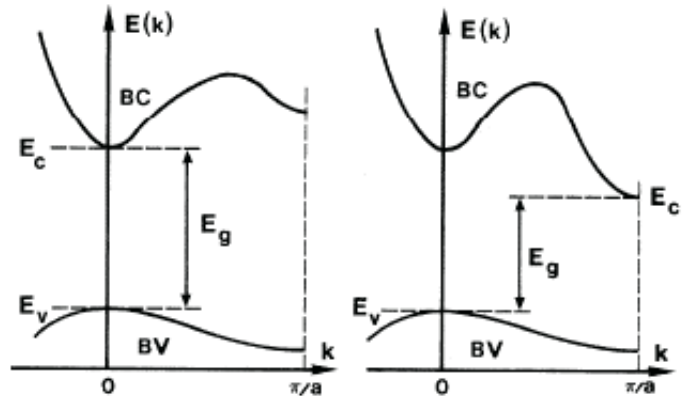
Dispositifs photoniques



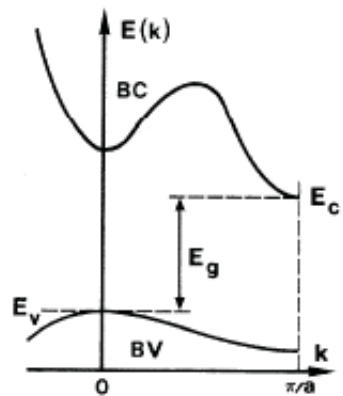
(a)



(b)



(c)



(d)

Courbes de dispersion

(a) Photon dans le vide et dans un semi-conducteur

(b) Electron dans le vide

(c) Electron dans un semi-conducteur à gap direct

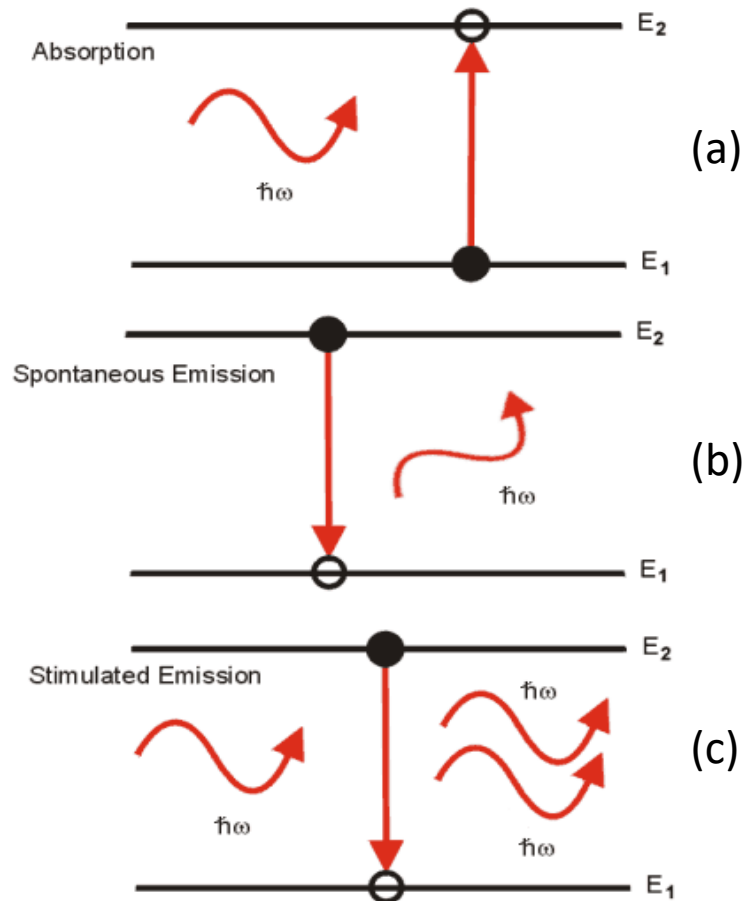
(d) Electron dans un semi-conducteur à gap indirect

Dispositifs photoniques

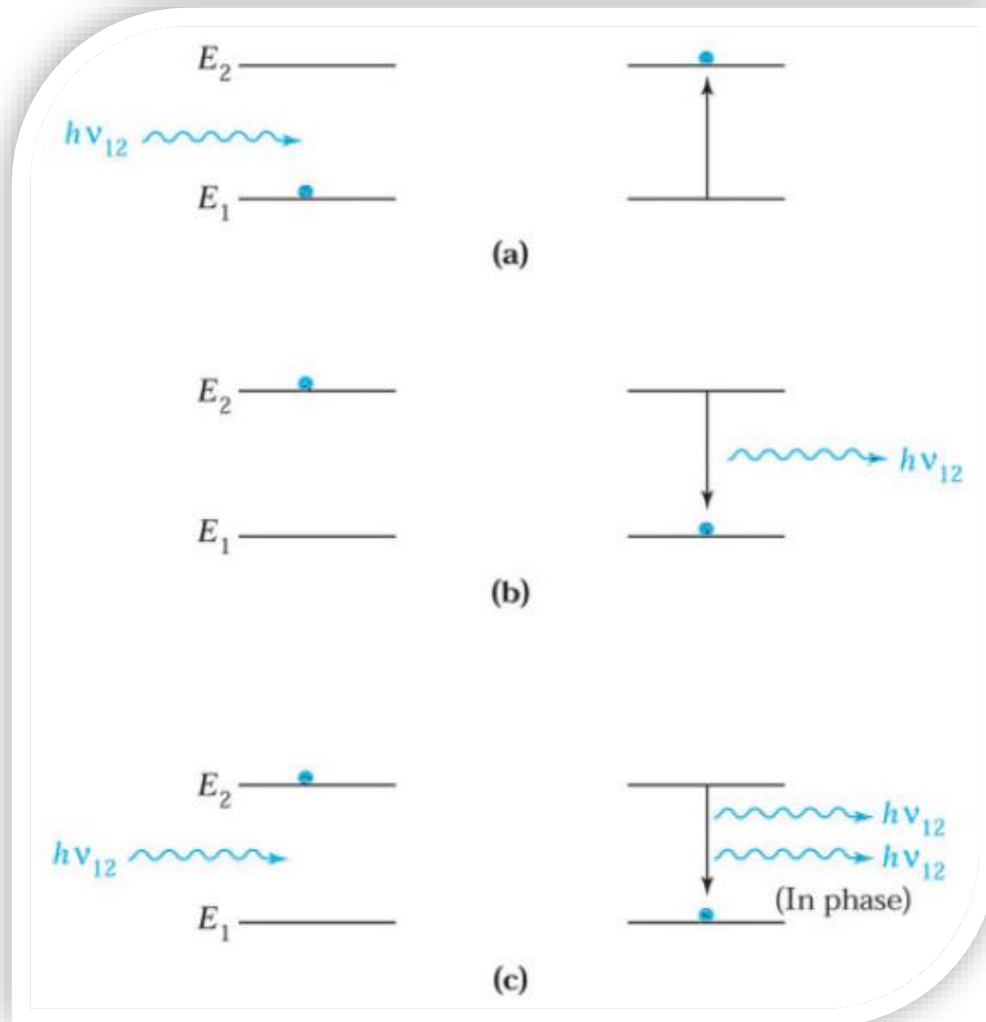
Transitions radiatives

Lorsqu'un photon frappe un matériau, il se produit l'une des transitions électroniques suivantes:

- Absorption Fig.(a);
- Emission spontanée Fig.(b);
- Emission stimulée Fig.(c).



Dispositifs photoniques



Absorption

Emission spontanée

Emission stimulée

Dispositifs photoniques

Prédominance des transitions radiatives

- L'absorption domine dans les cas des cellules solaires et les photodétecteurs;
- L'émission spontanée domine dans le cas des LEDs;
- L'émission stimulée domine dans le cas du laser.

Dispositifs photoniques

Population à l'équilibre thermique

La population instantanée du niveau de base E_1 est n_1 ;

La population instantanée du niveau excité E_2 est n_2 .

A l'équilibre thermique et sous la condition $E_2 - E_1 > 3kT$, le rapport entre les deux populations est donnée par la distribution de Boltzmann:

$$n_2/n_1 = \exp(-(E_2 - E_1)/kT) = \exp(-h\nu_{12}/kT)$$

N.B.: Le signe $-$ dans l'expression précédente indique qu'à l'équilibre thermodynamique, la population n_2 du niveau E_2 est inférieure à la population n_1 du niveau E_1 .

Dispositifs photoniques

Bilan des transitions

Dans le régime permanent, on a:

Taux d'émission stimulée+taux d'émission spontanée = taux d'absorption

$$B_{21}n_2\rho(h\nu_{12})+A_{21}n_2=B_{12}n_1\rho(h\nu_{12})$$

Avec:

B_{21} , A_{21} et B_{12} sont des constantes.

$\rho(h\nu_{12})$: densité d'énergie

Dispositifs photoniques

Conditions pour favoriser l'émission stimulée sur l'émission spontanée

D'après l'équation précédente, on a:

$$(\text{Taux d'émission stimulée})/(\text{taux d'émission spontanée}) = (B_{21} / A_{21})\rho(h\nu_{12})$$

Pour améliorer l'émission stimulée sur l'émission spontanée, il faut avoir une grande densité d'énergie $\rho(h\nu_{12})$.

Pour avoir cette grande densité d'énergie, il faut utiliser **une cavité résonnante**.

Dispositifs photoniques

Conditions pour favoriser l'émission stimulée sur l'absorption

D'après l'équation précédente, on a :

$$(\text{Taux d'émission stimulée}) / (\text{taux d'absorption}) = (B_{21} / B_{12})(n_2 / n_1)$$

Pour **améliorer l'émission stimulée** sur l'absorption de photons, il faut avoir **une grande densité électronique** sur le **niveau excité** que sur le niveau fondamental.

Pour satisfaire cette condition, il faut réaliser **l'inversion de population**.

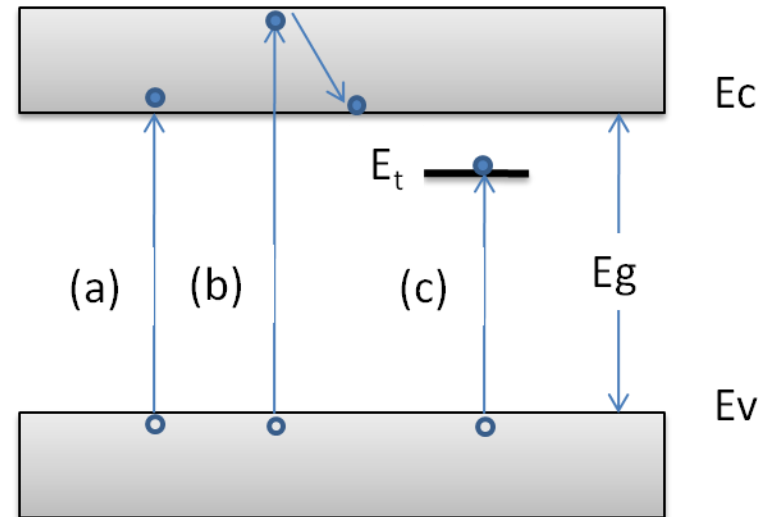
Dispositifs photoniques

Types de transitions

Transitions bande à bande ou intrinsèques

Si l'énergie $h\nu$ du photon est égale à l'énergie du gap E_g , une paire électron-trou est créée **(a)**.

Si l'énergie $h\nu$ du photon est supérieure au gap, il y a aussi création d'une paire électron-trou et l'excès d'énergie est perdu sous forme thermique **(b)**.

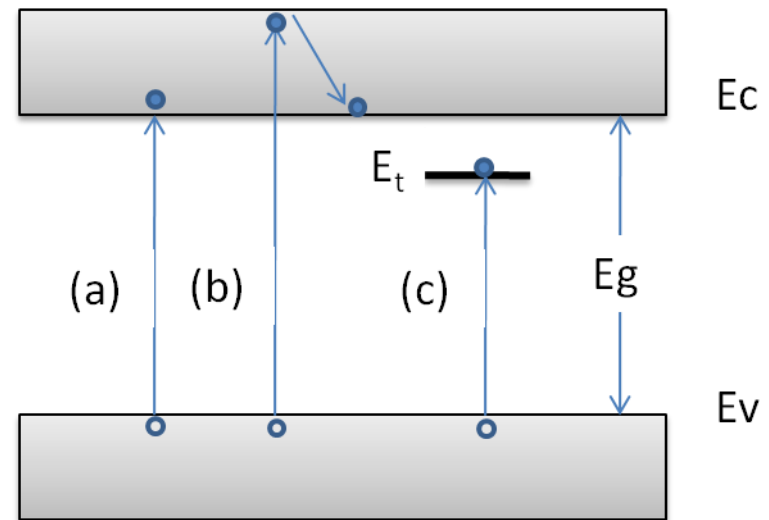


Dispositifs photoniques

Types de transitions

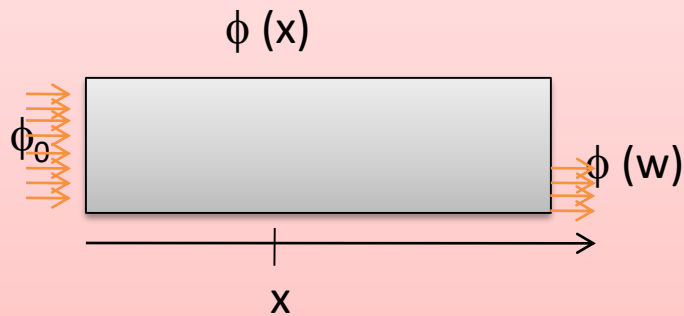
Transitions extrinsèques

Si l'énergie $h\nu$ du photon est inférieure à l'énergie du gap E_g , un électron absorbe cette énergie **seulement dans le cas où il y a des états dans la bande interdite dus aux impuretés chimiques ou à des défauts physiques (c).**



Dispositifs photoniques

Coefficient d'absorption



$$\phi(x) = \phi_0 \exp(-\alpha x)$$

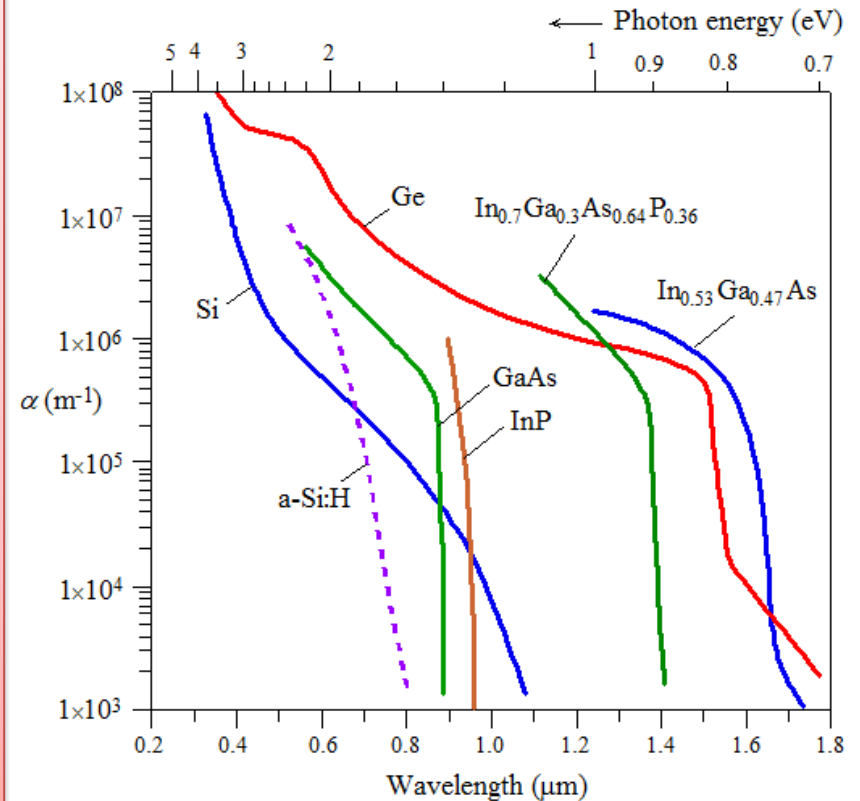
$$\phi(w) = \phi_0 \exp(-\alpha w)$$

Avec:

α : coefficient d'absorption

ϕ_0 : Flux incident sur la face d'entrée

$\phi(x)$: Flux à la distance x



Coefficient d'absorption pour les semi-conducteurs les plus courants

Dispositifs photoniques

Profondeur de pénétration

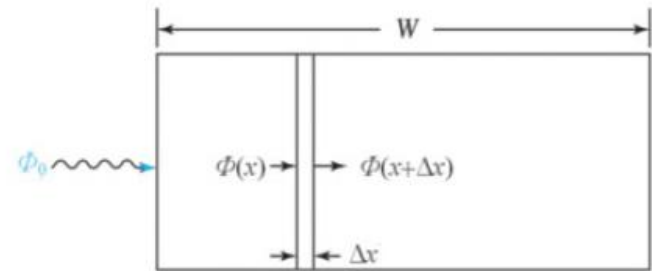
C'est l'épaisseur W pour laquelle 63 % du flux incident ϕ_0 est absorbé,

$$\phi_0 - \phi(w) = \phi_0 [(1 - \exp(-\alpha w)) = 0,63\phi_0$$

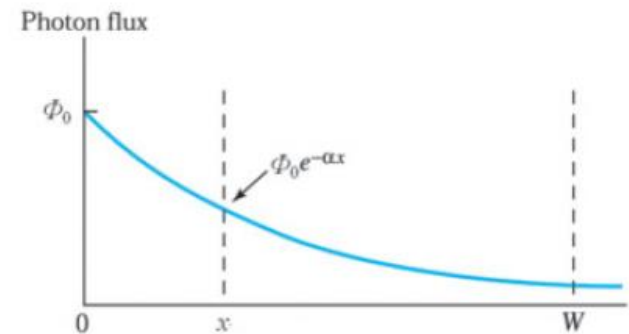
Ce qui donne:

$$\alpha w = 1$$

La grandeur $\delta = 1/\alpha$, qui a les dimension d'une longueur est appelé la profondeur de pénétration.



(a)



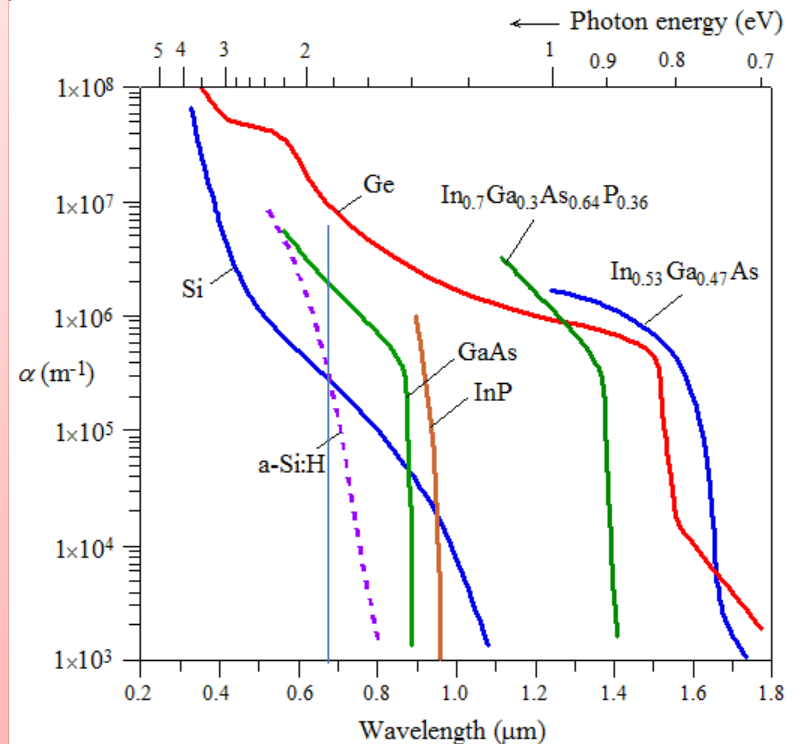
(b)

Dispositifs photoniques

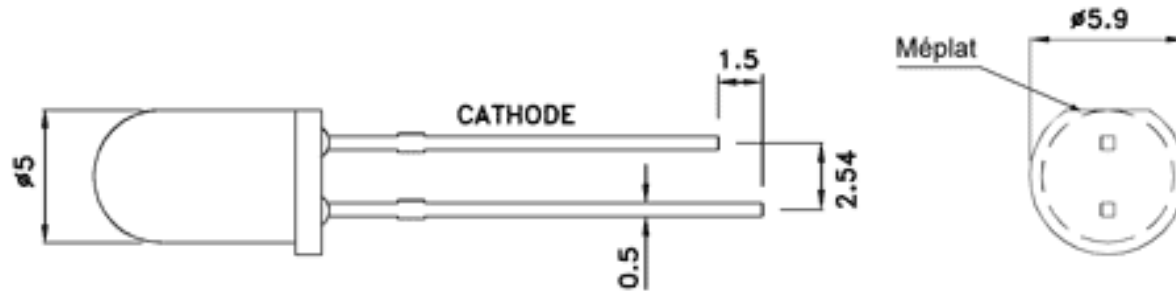
Effet de la nature du gap

Le coefficient d'absorption augmente brusquement lorsque la longueur d'onde décroît en dessous de la longueur d'onde critique λ_c pour les matériaux à gap direct et augmente lentement pour les matériaux à gap indirect, car l'absorption des photons nécessite l'absorption et l'émission des phonons pendant le processus d'absorption selon l'équation:

$$h\nu = E_g \pm h\omega$$



$h\nu$ est l'énergie d'absorption,
 $h\omega$ est l'énergie du phonon



Dispositifs photoniques

Partie IV

Diode Electroluminescente

Dispositifs photoniques

Diodes électroluminescentes

Définition

Les **diodes électroluminescentes** ou **LEDs** (LED=Light-emitting diode) sont des **jonctions p-n** qui peuvent **émettre un rayonnement spontané** dans les différents domaines spectraux (UV, VIS, IR).

Intérêts pratiques

- ❑ La **LED visible** a une multitude d'applications dans le **domaine d'affichage**
- ❑ La **LED infrarouge** est utile dans **les opto-isolateurs** et pour **la communication par fibre optique**.

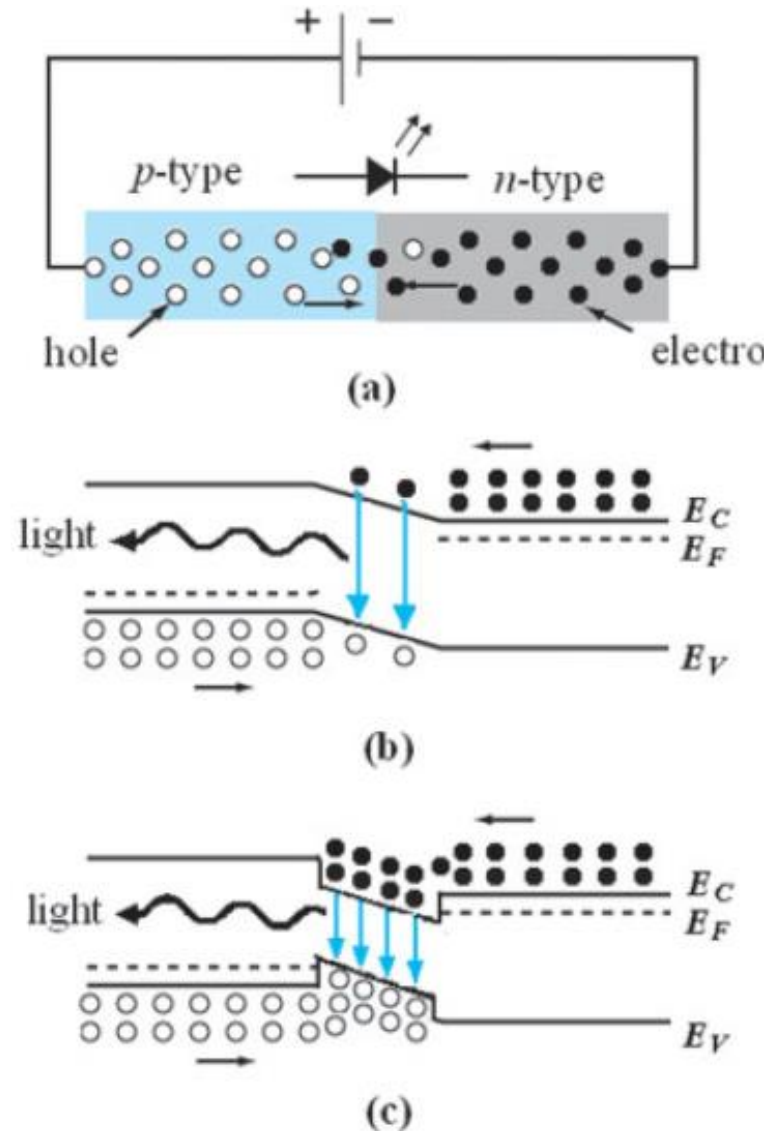
Dispositifs photoniques

Diodes électroluminescentes

Structure d'une LED

Une LED est une **homjonction** ou une **hétérojonction** polarisée en direct.

Remarque: L'efficacité est importante dans le cas de l'hétérojonction à cause du **confinement des porteurs** de charge dans la région centrale (ZCE) notamment lorsque cette région est **mince** (de l'ordre de **10 nm**),



Dispositifs photoniques

Diodes électroluminescentes

Caractéristiques optique d'une LED

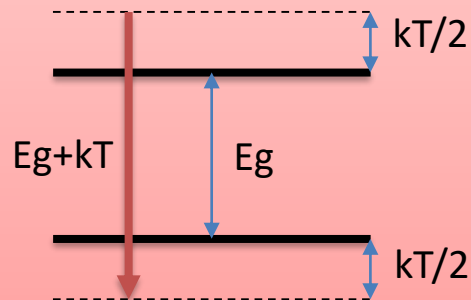
1. Energie d'une recombinaison bande à bande

L'énergie associée à une recombinaison bande à bande est de l'ordre:

$$h\nu = E_g + kT$$

Comme $kT \ll E_g$, on retient l'approximation:

$$h\nu \approx E_g$$



Dispositifs photoniques

Diodes électroluminescentes

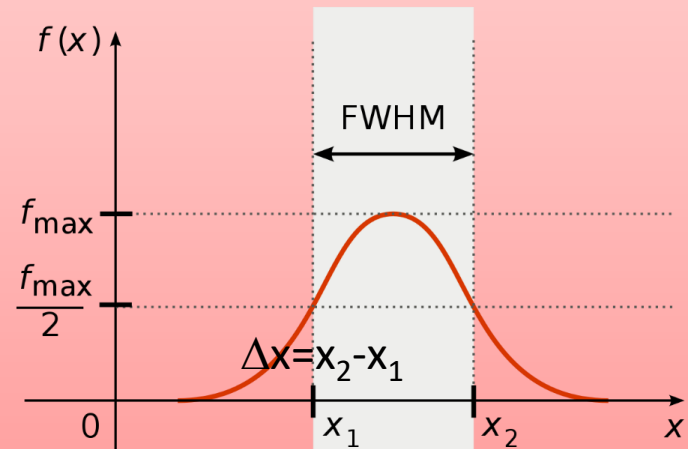
Caractéristiques optique d'une LED

Longueur d'onde du pic d'émission: Elle indique la longueur d'onde à laquelle est émise la plus importante partie du rayonnement pour une intensité de courant de polarisation directe I_F .

Largeur spectrale: Elle est donnée par la largeur totale à la moitié de l'intensité maximale et elle est donnée par $2\Delta\lambda$ avec :

$$\Delta\lambda \approx \frac{1}{hc} \lambda^2 \Delta E$$

ΔE est donné par kT ,



Dispositifs photoniques

Diodes électroluminescentes

Spectres de quelques LEDs

Matériaux	Rayonnement	Longueur d'onde
InAs	UV	315 nm
InP	IR	910 nm
GaAs _{0.6} P _{0.4}	Rouge	660 nm
GaP	Vert	560 nm
GaN	Bleu	440 nm

Dispositifs photoniques

Diodes électroluminescentes

Réponse fréquentielle

La largeur de **la bande de modulation Δf** est définie comme la fréquence à laquelle **la puissance lumineuse est réduite à 1/2** par rapport à **celle de $\omega = 0$** , c'est-à-dire:

$$\Delta f \equiv \frac{\Delta\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\tau}.$$

Où la **durée de vie globale des porteurs τ** est liée aux durées de vie **radiative (τ_r)** et **non radiante (τ_{nr})** par :

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}}.$$

Dispositifs photoniques

Diodes électroluminescentes

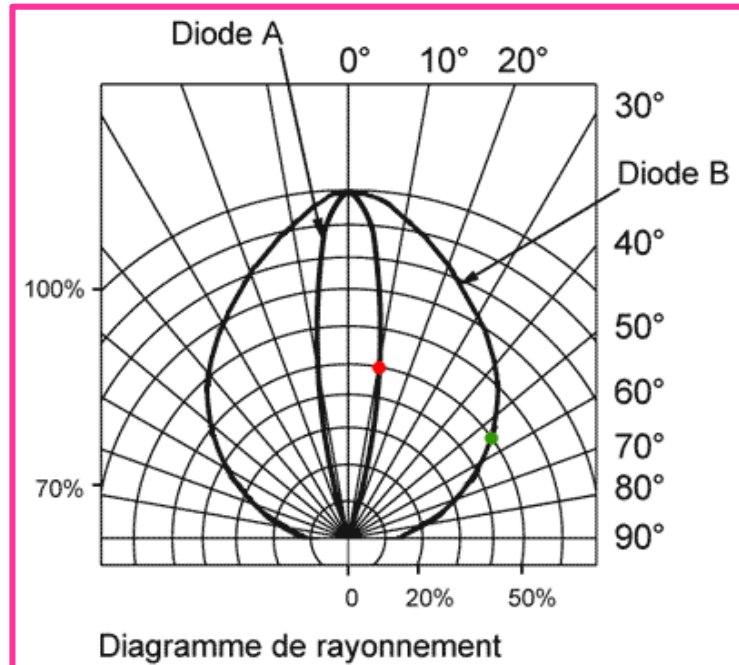
Diagramme de rayonnement

Le flux lumineux n'est pas homogène tout autour de la LED.

La répartition spatiale de la puissance émise dépend de :

- forme de la partie émissive (point, trait...);
- avec lentille de concentration ou sans;
- diffusante ou non.

Le diagramme de rayonnement représente la répartition angulaire de l'intensité relative émise.



Dispositifs photoniques

Diodes électroluminescentes

Rendement quantique interne

C'est l'efficacité de conversion des porteurs injectés en photons émis. Il est donné par le rapport:

$$\eta_i = \frac{\text{Nombre de photons émis à l'intérieur de la LED}}{\text{Nombre de porteurs traversant la jonction}}$$

$$\eta = \frac{R_r}{R}$$
$$\frac{1/\tau_R}{1/\tau} = \frac{1/\tau_R}{1/\tau_R + 1/\tau_{nr}}$$

Où R_r et R sont respectivement les vitesses de recombinaison radiative et totale.

Remarque: Pour avoir une grande efficacité radiative, il faut que τ_r soit très petite.

Dispositifs photoniques

Diodes électroluminescentes

Niveau d'injection et durée de vie

Dans le cas **d'une faible injection**, la durée de vie **radiative** τ_r est liée au **coefficient de recombinaison** par:

$$\tau_r = \frac{\Delta n}{R_r} = \frac{1}{R_{ec} N_A}$$

R_{ec} , Δn et N_A sont respectivement le coefficient de recombinaison, la densité de porteurs en excès et la densité des accepteurs, $R_{ec} \approx 10^{-10} \text{ cm}^{-3}$ pour les **semiconducteur à gap direct** et 10^{-15} cm^{-3} pour les **semiconducteur à gap indirect**.

Dispositifs photoniques

Diodes électroluminescentes

Niveau d'injection et durée de vie

Dans le cas d'une **forte injection**, la durée de vie radiative τ_r est **très faible** devant la durée de vie non radiative τ_{nr} , car τ_r **diminuerait avec l'augmentation de Δn** en raison de la **plus grande probabilité de recombinaison** des porteurs.

La **durée de vie non radiante** est généralement attribuée à **des pièges** ou des **centres de recombinaison** de densité N_t et elle est donnée par:

$$\tau_{nr} = \frac{1}{\sigma V_{th} N_t}$$

σ : la section efficace de capture;

V_{th} : la vitesse thermique moyenne;

N_t : densité des pièges ou des centres de recombinaison.

Dispositifs photoniques

Diodes électroluminescentes

Rendement quantique externe

Pour les applications à base de LEDs, **ce qui compte**, c'est la **lumière émise à l'extérieur** du dispositif qu'on mesure par ce qu'on appelle le **rendement optique η_{op}** , parfois appelé efficacité d'extraction.

Le **rendement quantique externe** est défini par:

$$\eta_{ex} = \frac{\text{Nombre de photons émis à l'extérieur de la LED}}{\text{Nombre de porteurs traversant la jonction}} = \eta_{in}\eta_{op}$$

Remarque: Pour avoir **une grande efficacité radiative**, il faut que **τ_r soit très petite**.

Dispositifs photoniques

Diodes électroluminescentes

Origine des pertes dans les LEDs

- Absorption dans le matériau de la LED qui peut être minimisée en plaçant la jonction plus près de la surface émettrice.
- Absorption dans le substrat qui peut être minimisée avec un substrat plus mince. Cependant, un substrat trop mince perdra sa résistance mécanique (après fabrication, amincir le substrat à une épaisseur $\approx 100\mu\text{m}$),

Dispositifs photoniques

Diodes électroluminescentes

Origine des pertes dans les LEDs

- Perte par réflexion de Fresnel à l'interface LED-air avec un coefficient de réflexion associé aux différents indices de réfraction donné par l'expression:

$$R = \left(\bar{n}_1 - \bar{n}_2 \right)^2 / \left(\bar{n}_1 + \bar{n}_2 \right)^2 ,$$

- n_1 indice de réfraction air et n_2 celui du matériau LED

Cette perte optique par réflexion peut être minimisée par un revêtement antireflet sur la surface de la LED.

Dispositifs photoniques

Diodes électroluminescentes

Origine des pertes dans les LEDs

- Perte de réflexion interne totale due à la lumière incidente à un angle supérieur à l'angle critique θ_c défini par la loi de Snell sera totalement réfléchi vers le semi-conducteur

$$\sin \theta_c = \frac{\bar{n}_1}{\bar{n}_2}$$

- La réflexion interne totale peut être minimisée par la texturisation de la surface

Dispositifs photoniques

Diodes électroluminescentes

Composantes du courant dans une LED

La caractéristique **I(V) directe d'une LED** est similaire à celle d'une **jonction p-n** constitué du même matériau.

À **basse tension**, le courant de diode est dominé par le **courant de recombinaison non radiatif** dû principalement à **la recombinaison de surface** près du périmètre de la puce LED.

À **des tensions plus élevées**, le courant de diode est dominé **par le courant de diffusion radiatif**.

À **des tensions encore plus élevées**, la **résistance série limitera** le courant de la diode.

$$I = I_d \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{KT} \right] + I_r \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{2KT} \right]$$

Pour **augmenter la puissance** de sortie de la LED, nous devons **réduire Ir et Rs**.

Dispositifs photoniques

Diodes électroluminescentes

Différents types de LEDs

1) Selon la longueur d'onde

- LEDs **Visibles** utilisées dans l'affichage;
- LEDs **IR** utilisées dans la communication par fibre optique;
- LEDs **UV** utilisées pour les nouvelles lampes (purification de l'eau).

2) Selon les matériaux

- LEDs à base de matériaux semi-conducteurs III-V comme $\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$;
- OLEDs à base de semi-conducteurs organiques;
- PLEDs à base de matériaux polymères,

N.B.: Les OLEDs sont fabriquées à partir de petites molécules alors que les PLEDs sont fabriquées à partir de macromolécules ($m > 10\,000$ uma).

Dispositifs photoniques

Diodes électroluminescentes

Fonctionnement des LEDs

Une LED **se comporte électriquement** comme **une diode**.

Pour émettre, elle doit être **polarisée en direct**.

Ordre de grandeur (à 25 °C)

I_F : 10 à 20 mA;

V_F : 1.5 à 2V (voire plus pour certaines LEDs);

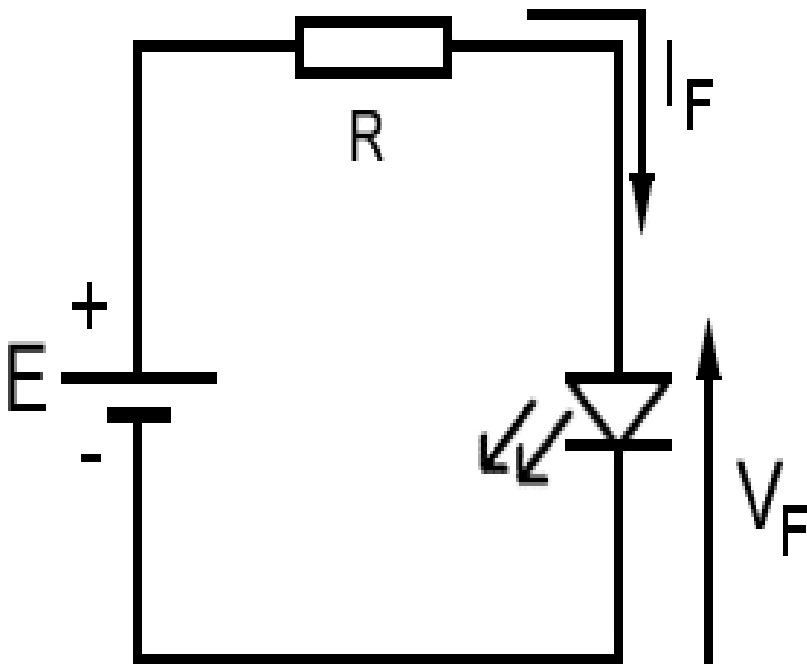
V_R : -3 à -5 V (La diode est éteinte ; elle n'émet plus d'intensité lumineuse);

Température de fonctionnement max (T_{jonction}): **< 125 °C**

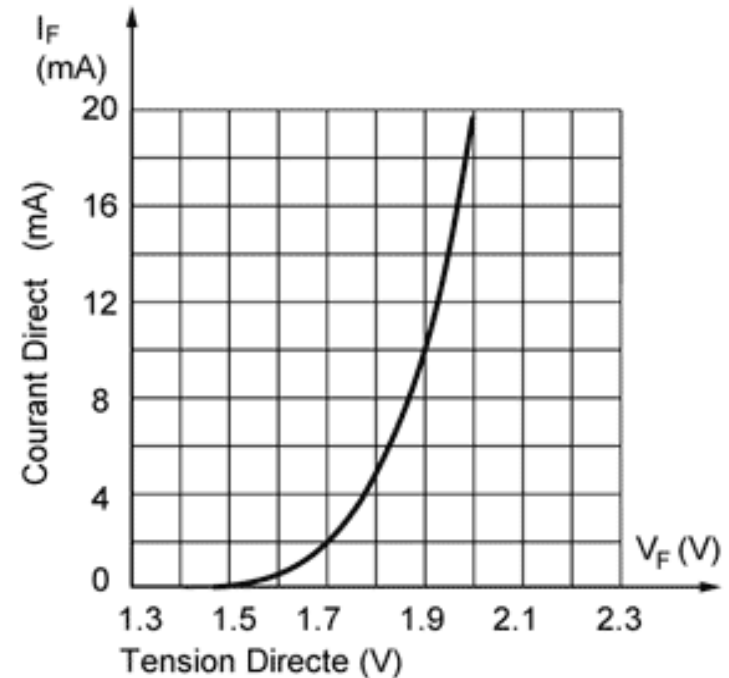
Dispositifs photoniques

Diodes électroluminescentes

Polarisation en direct



Caractéristique $I(V)$



Dispositifs photoniques

Partie V

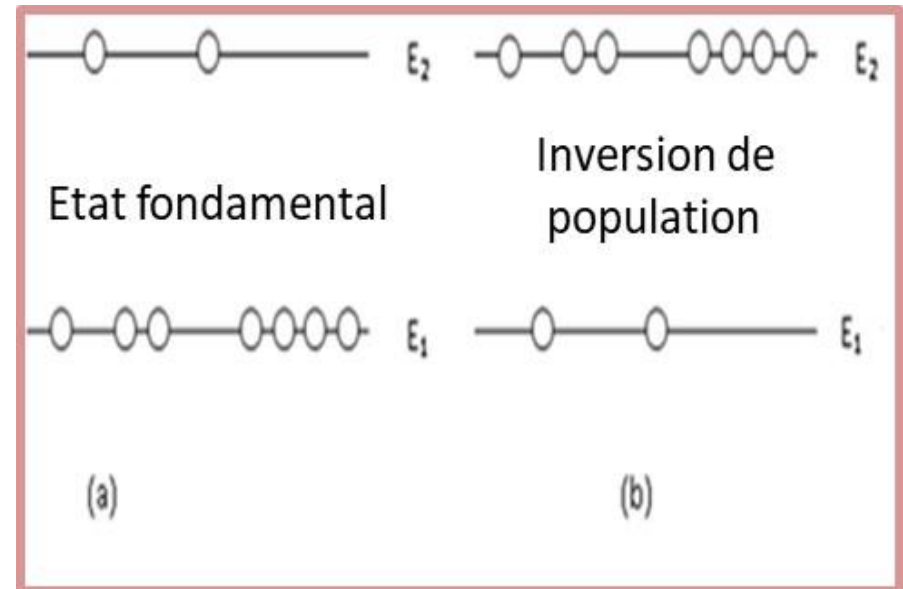
Rayonnement laser

Dispositifs photoniques

Rayonnement Laser

Rayonnement Laser

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



Dispositifs photoniques

Rayonnement Laser

Maser

- **1. Définition** : Le maser (en anglais, **microwave amplification by stimulated emission of radiation**) est une amplification d'un **rayonnement radiofréquence** par émission stimulée de radiation.
- **2. Condition d'obtention d'un maser** : L'obtention d'un rayonnement maser, obéit aux **mêmes conditions d'obtention d'un laser**. La différence **réside dans le domaine spectral** auquel appartient chaque rayonnement (**Laser** dans le **visible** et **IR proche**, **Maser** dans le **domaine RF**).

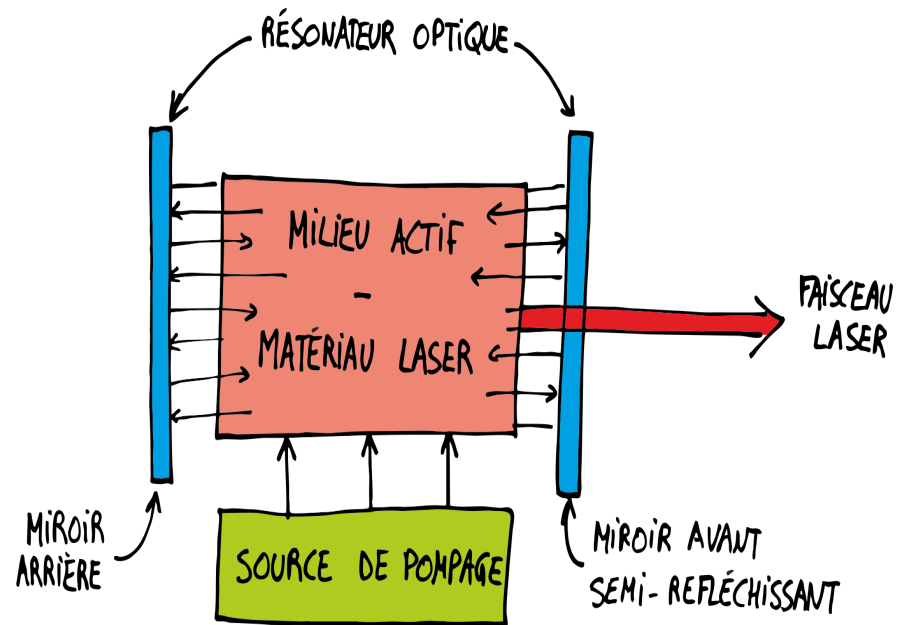
N.B.: Pour obtenir les fréquences RF, on exploite les niveaux obtenus par décomposition d'un niveau fondamental dans un champ magnétique.

Dispositifs photoniques

Rayonnement Laser

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.



Dispositifs photoniques

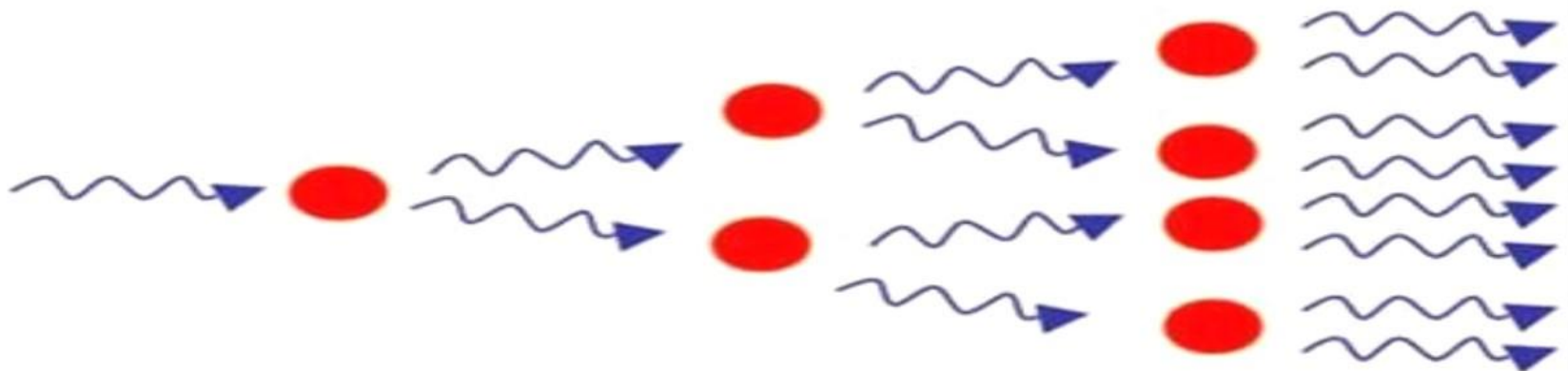
Rayonnement Laser

schéma de l'amplification des photons

L'émission stimulée « photocopie » les photons

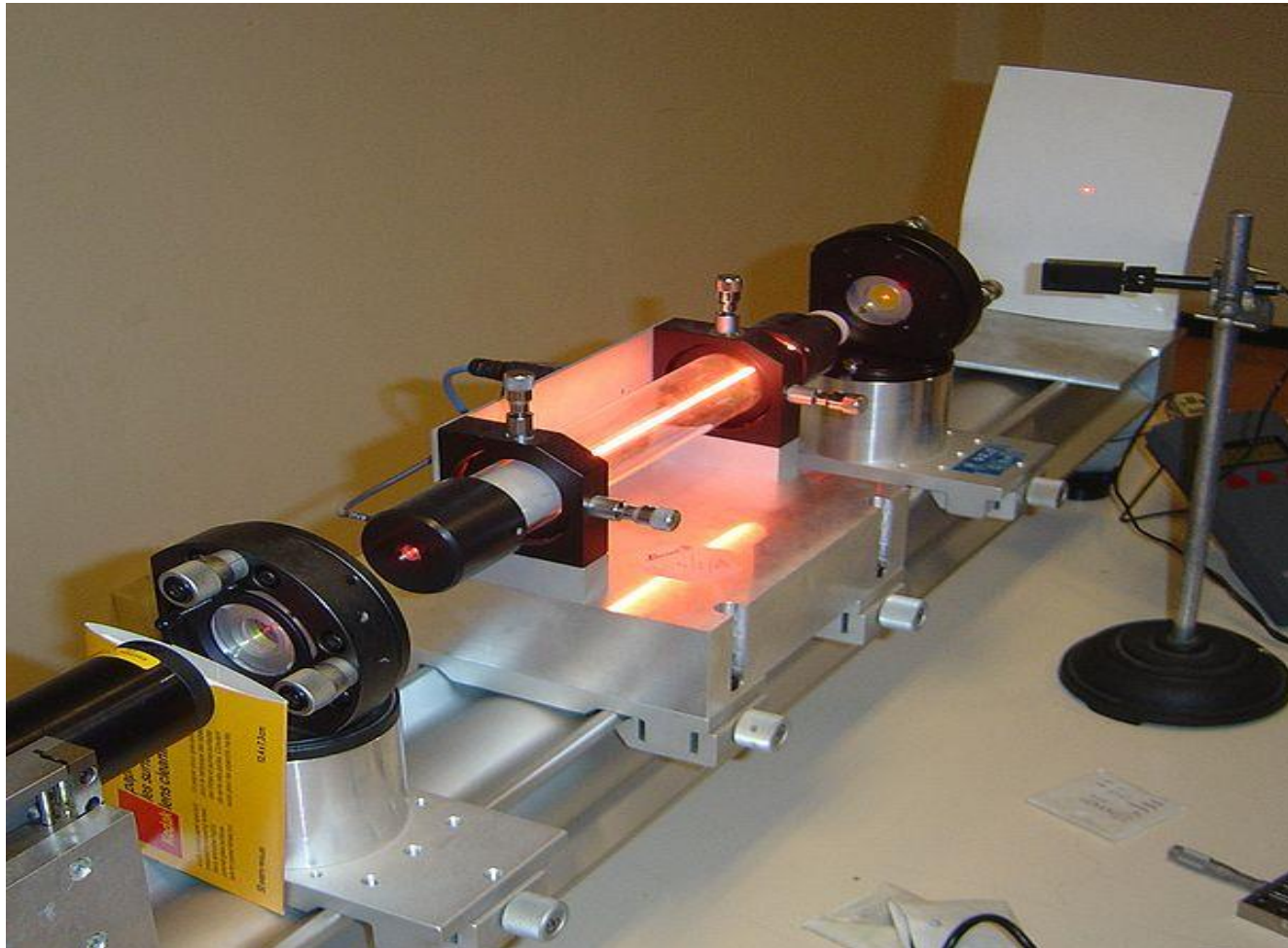


Amplification par l'émission stimulée



Dispositifs photoniques

Rayonnement Laser



Dispositifs photoniques

Rayonnement Laser

Différents types de lasers

Il y a **3 types** de lasers, à savoir:

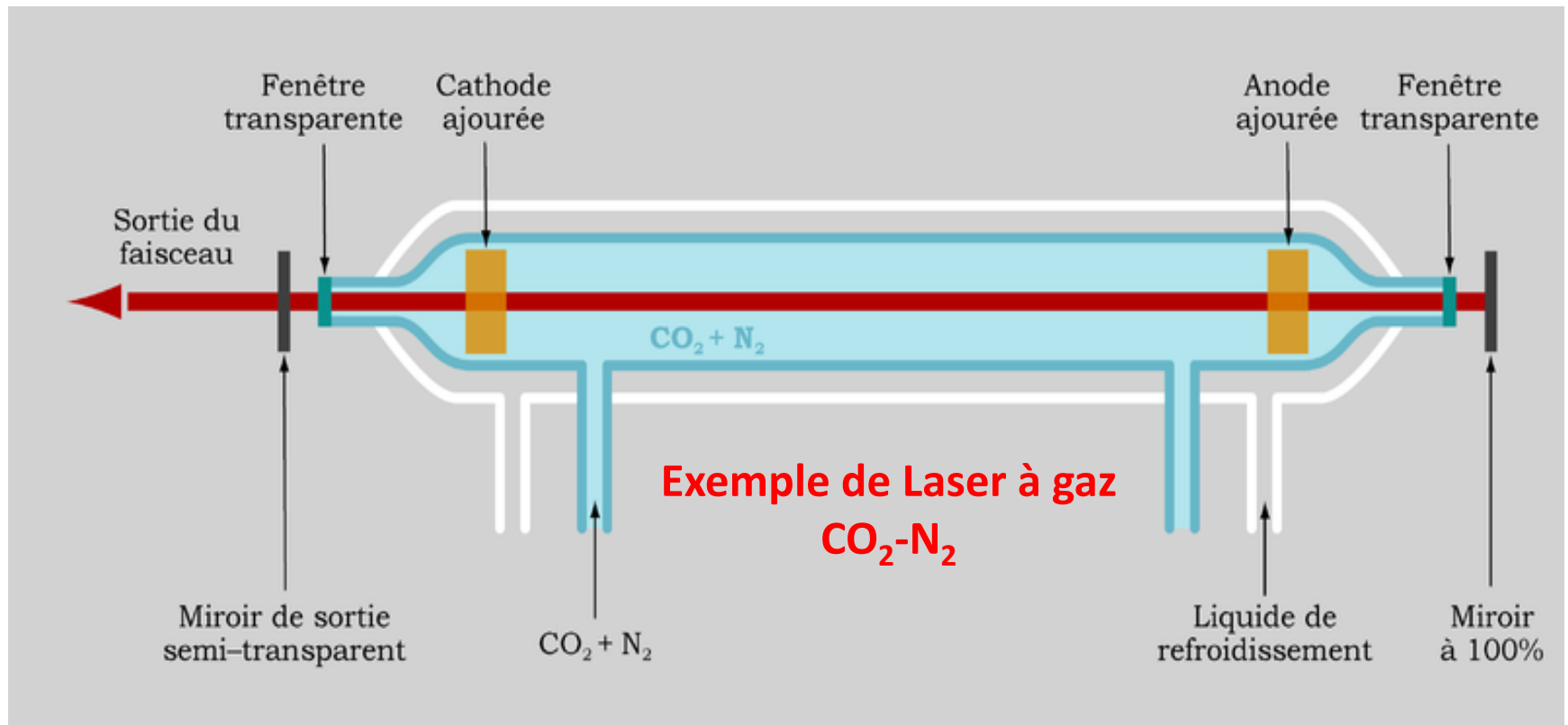
- Le laser à **solide** tel que les lasers à rubis et à semi-conducteurs;
- Le laser à **gaz** tel que le laser à He-Ne ou CO₂-N₂;
- Le laser à **liquide** tel que le laser à colorant.

Modes de fonctionnement

- Mode **continu**;
- Mode **pulsé**.

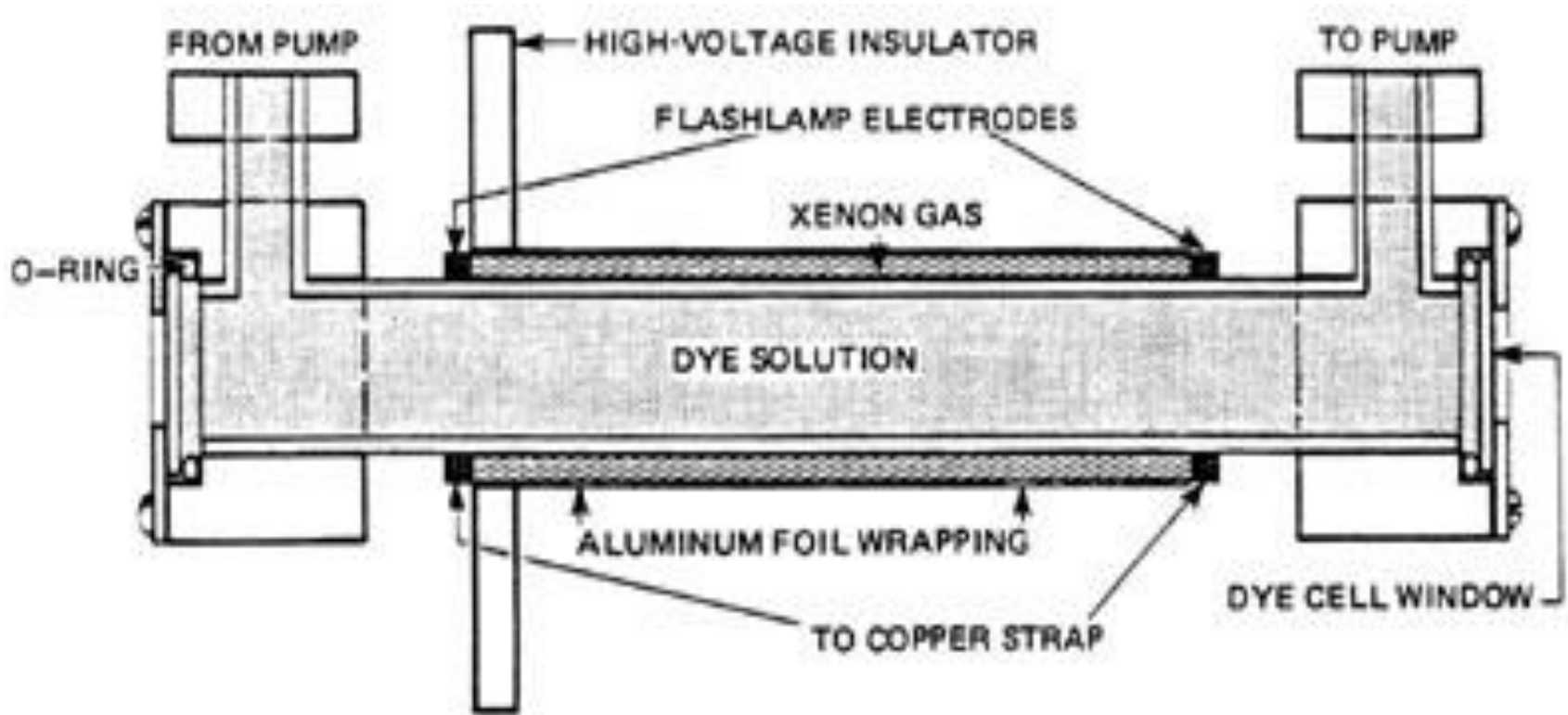
Dispositifs photoniques

Rayonnement Laser



Dispositifs photoniques Rayonnement Laser

Exemple d'un laser à liquide



Dispositifs photoniques

Rayonnement Laser

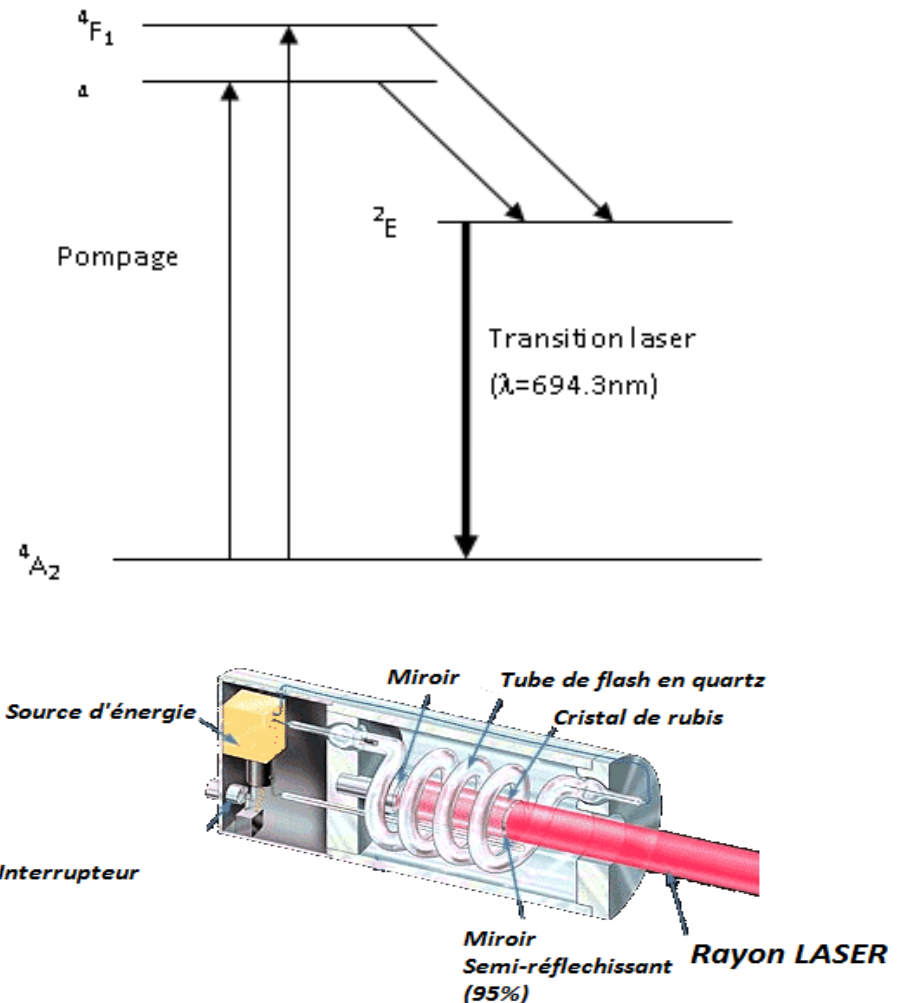
Laser à rubis

C'est un laser où le milieu actif est un **cristal de rubis** (cristal Al_2O_3 dopé avec les ions Cr^{3+} où $[\text{Cr}^{3+}] = 0.05\%$).

Les niveaux d'énergie des ions Cr^{3+} sont représentés sur la figure ci-contre.

Lorsqu'on **active** l'opération de **pompage**, les ions Cr^{3+} passent **vers les états excités F** (4F_1 et 4F_2).

Ces derniers **changent** leurs **distributions électroniques** et se transforment en **l'état 2E** . Le retour de l'état 2E vers **l'état fondamental** donne **une transition laser** dont la longueur d'onde est $\lambda = 694.3\text{nm}$



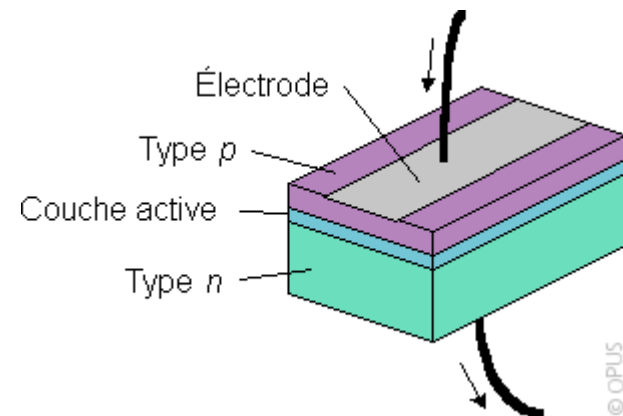
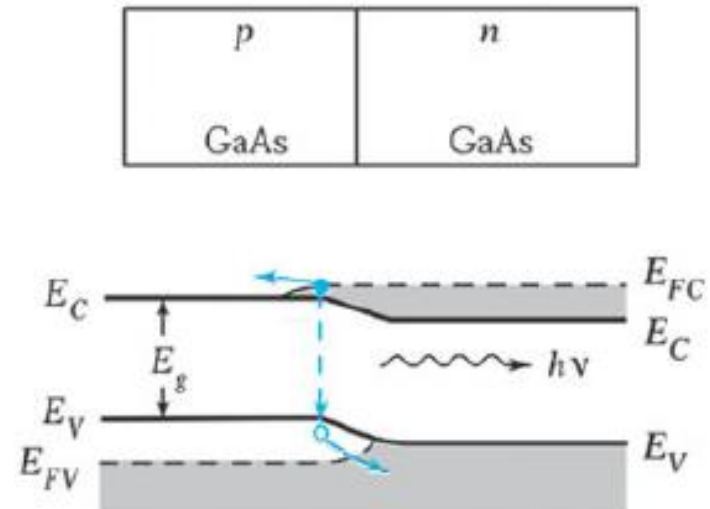
Dispositifs photoniques

Rayonnement Laser

Laser à semi-conducteur

Il peut être une jonction pn polarisée en direct.

- Le milieu actif est la région de transition du type p vers le type n.
- le système de pompage est le champ électrique
- la cavité est formée par l'échantillon lui-même grâce au polissage des faces du cristal

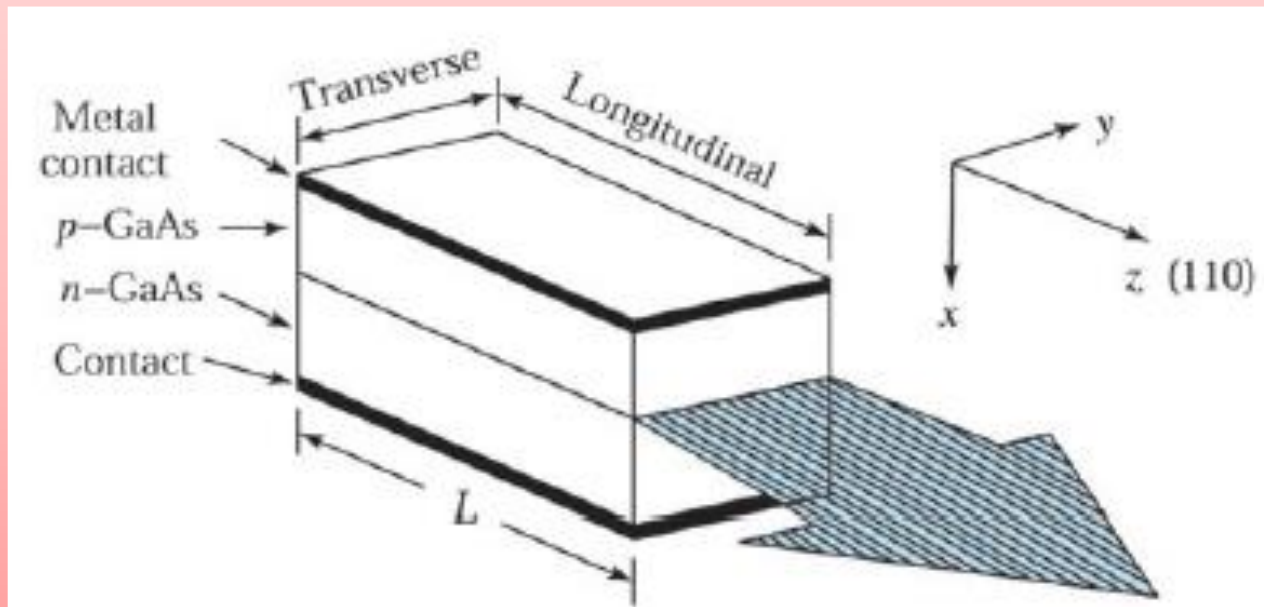


Dispositifs photoniques

Rayonnement Laser

Laser à semi-conducteur (suite)

Cette 1^{ère} structure à base d'une jonction pn est appelée **cavité de Fabry-Perot**, avec une **longueur** de cavité typique $L \approx 300 \mu\text{m}$.



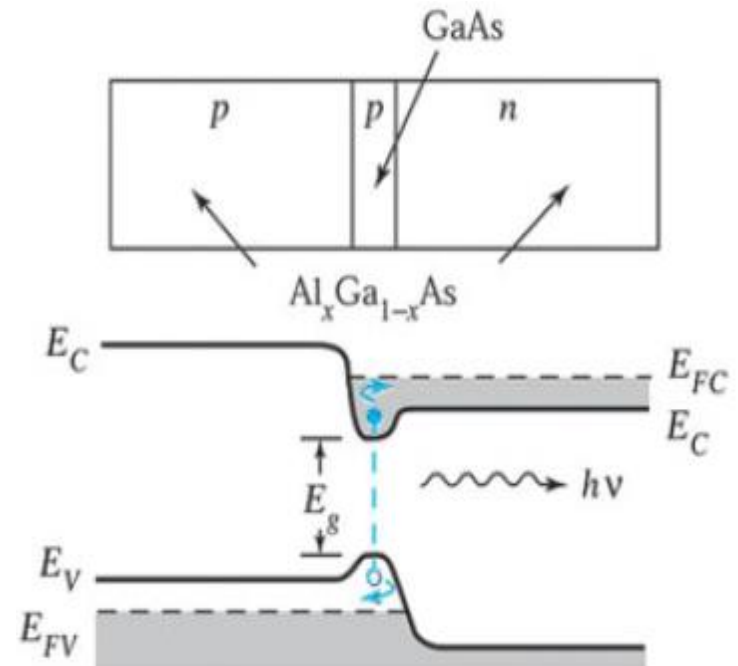
Dispositifs photoniques

Rayonnement Laser

Laser à semi-conducteur (suite)

Il peut être une double hétérojonction polarisée en direct.

- Le **milieu actif** est la région de type p.
- le **système de pompage** est le champ électrique
- la **cavité** est formée par l'échantillon lui-même grâce au polissage des faces du cristal

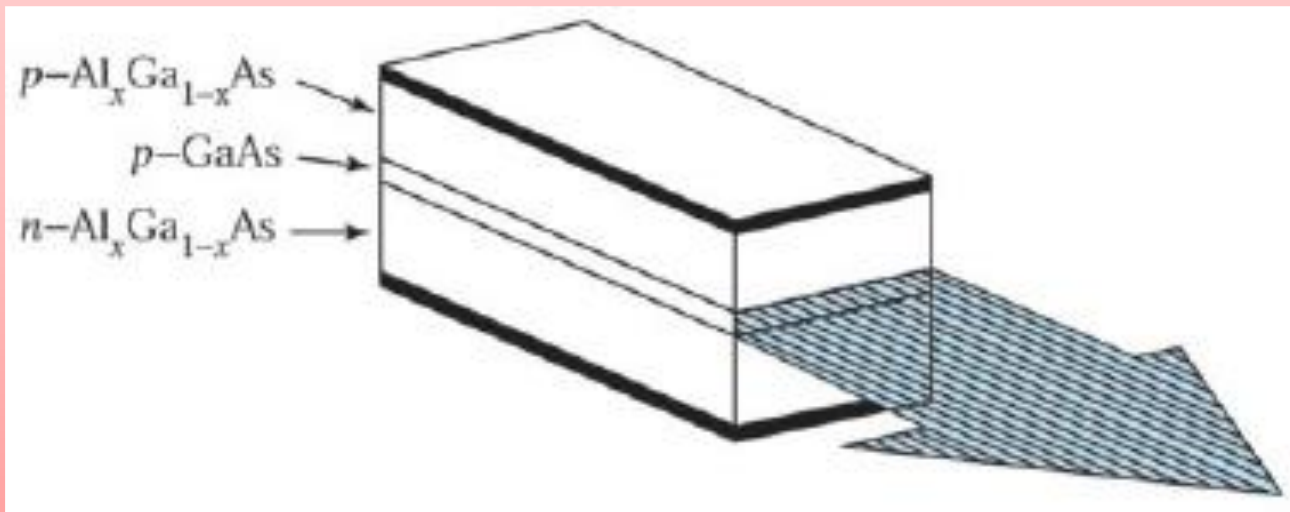


Dispositifs photoniques

Rayonnement Laser

Laser à semi-conducteur (suite)

Cette 2^{ème} structure à base d'une DH dans lequel une couche mince d'un semi-conducteur (par exemple GaAs) est prise en sandwich entre des couches d'un semi-conducteur différent (par exemple, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$).

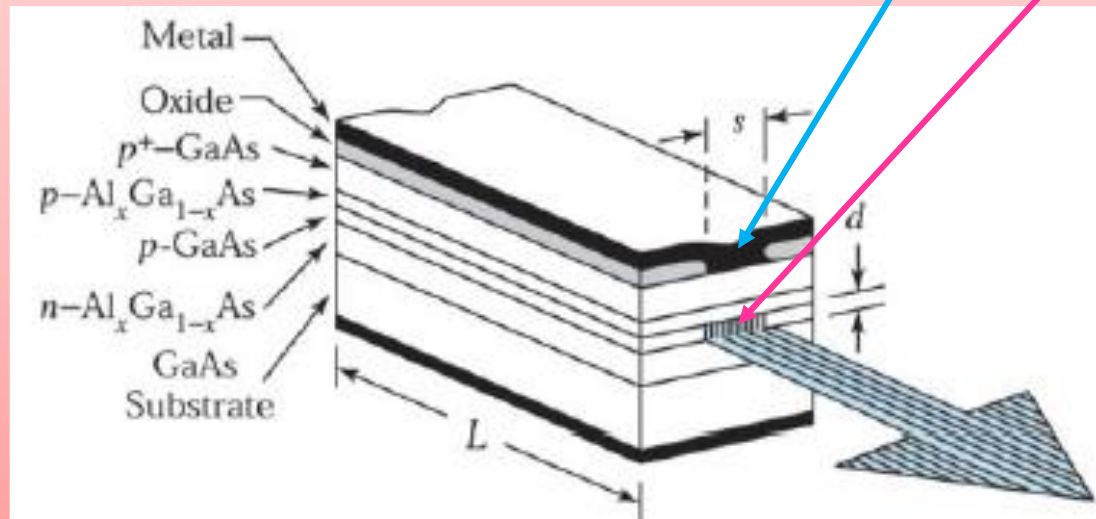


Dispositifs photoniques

Rayonnement Laser

Laser à semi-conducteur (suite)

Cette 3^{ème} structure laser à DH avec une géométrie de bande où la couche d'oxyde isole tout sauf le contact de la bande; par conséquent, la zone d'effet laser est limitée à une région étroite sous le contact (la largeur **typique S** est de **5 à 30 μm**).



Dispositifs photoniques

Rayonnement Laser

Facteur de confinement

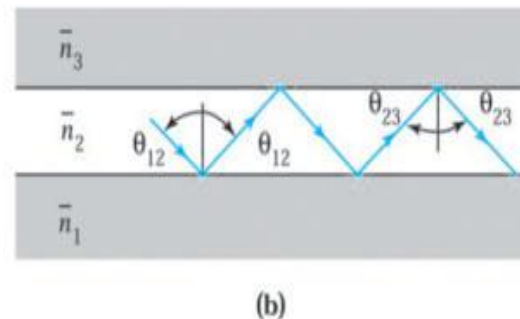
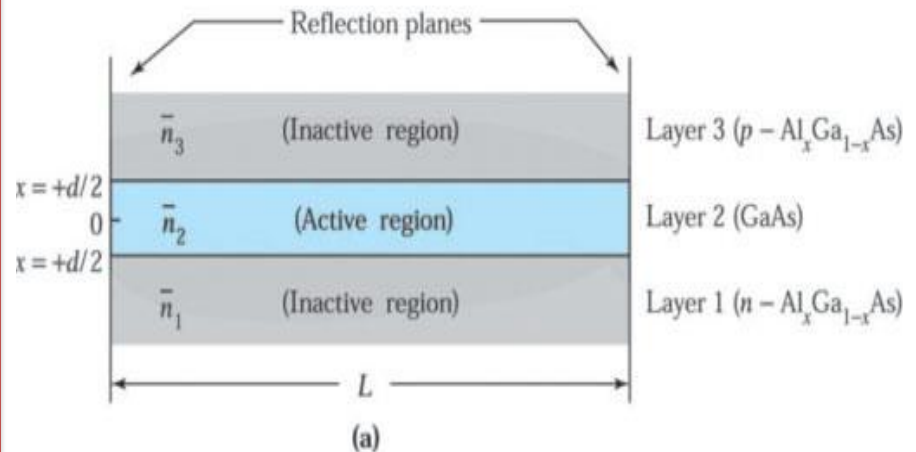
Le **facteur de confinement Γ** est le **rapport** entre **l'intensité de la lumière dans la couche active** et la **somme de l'intensité de la lumière à l'intérieur et à l'extérieur de la couche active** et est donné par:

$$\Gamma \cong 1 - \exp(-C\Delta\bar{n}d)$$

C: est une constante;

Δn : différence de l'indice de réfraction,

d: épaisseur de la couche active,



Dispositifs photoniques

Rayonnement Laser

Caractéristiques du laser à semi-conducteur

- Longueur d'onde de 100 à 500 nm;
- La couche active a une épaisseur entre 0,1 et 2 μm ;
- Efficacité très appréciable d'environ 50 %;
- Le faisceau résultant est peu directionnel, ayant une divergence de 5° à 30° , parce qu'il est émis par une petite surface de moins de 20 μm de côté;
- Puissance : entre 1 et 100 mW;
- Facilement modulé aux hautes fréquences par simple modulation du courant de polarisation;
- Spectroscopie de gaz à haute résolution et surveillance de la pollution atmosphérique.

Dispositifs photoniques

Rayonnement Laser

Utilisation des lasers à semi-conducteurs

Les lasers à semi-conducteurs sont notamment utilisés pour:

- **Imprimantes laser;**
- **Lecteurs de disques compacts;**
- **Source lumineuse pour la fibre optique;**
principalement à cause de leur petite taille;
- **Pointeurs laser.**

Dispositifs photoniques

Rayonnement Laser

Condition sur la longueur de la cavité

Pour avoir **une émission stimulée**, la **longueur L de la cavité** doit satisfaire **la condition**:

$$m\lambda = 2nL$$

m: nombre entier;

L: longueur de la cavité;

λ : longueur d'onde de la radiation laser;

n: indice de réfraction du milieu actif

Dispositifs photoniques

Rayonnement Laser

Espacement des modes

La **séparation $\Delta\lambda$** entre les **modes autorisés** dans la direction **longitudinale** est la **différence entre les longueurs d'onde** correspondant à **m** et **$m + 1$** donnée par:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2 \Delta m}{2\bar{n}L[1 - (\lambda / \bar{n})(d\bar{n} / d\lambda)]}$$

Pour de très **faible changement de longueur d'onde** entre modes adjacents, **$dn/d\lambda$** est très **petit**, et donc **une bonne approximation**, l'espacement de mode λ est donné (pour $m = 1$) par:

$$|\Delta\lambda| \cong \frac{\lambda^2}{2\bar{n}L}.$$

Dispositifs photoniques

Rayonnement Laser

Courant seuil

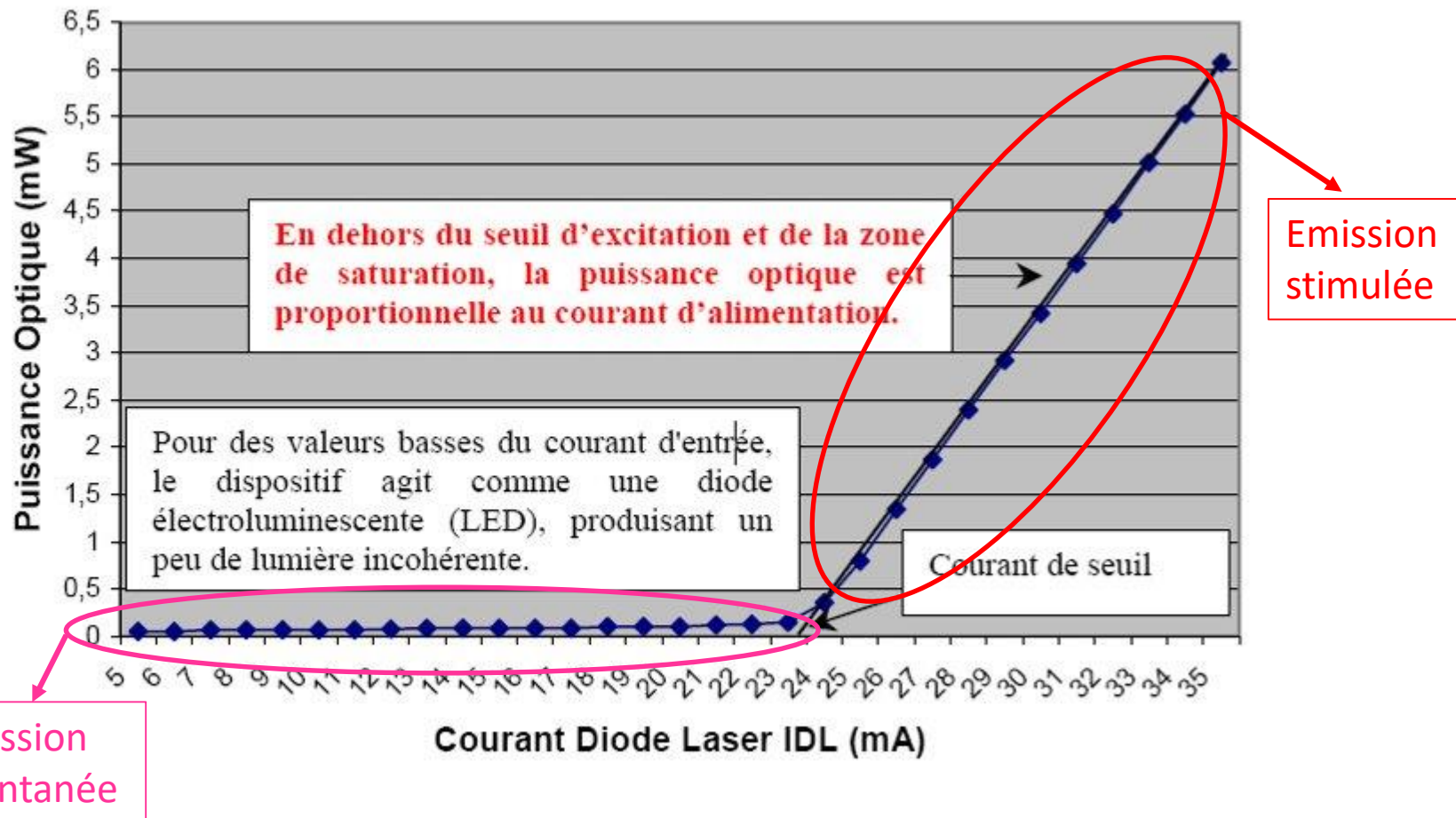
Définition: Courant minimal pouvant donner lieu à l'effet laser.

- Pour de **faibles courants**, c'est **l'émission spontanée** qui **prédomine** et le rayonnement émis a une **large distribution spectrale**.
- Pour des **courants proche du courant seuil**, le gain optique peut être **assez élevé** pour l'amplification de sorte que **les pics d'intensité commencent à apparaître**. Cependant, **le rayonnement émis** reste encore **incohérent**.
- Lorsque **la polarisation atteint le courant de seuil**, les spectres d'émission laser deviennent soudainement **beaucoup plus étroits** ($< 1 \text{ \AA}$) et **la lumière est cohérente** et beaucoup plus **directionnel**.

Dispositifs photoniques

Rayonnement Laser

Courant seuil d'un laser



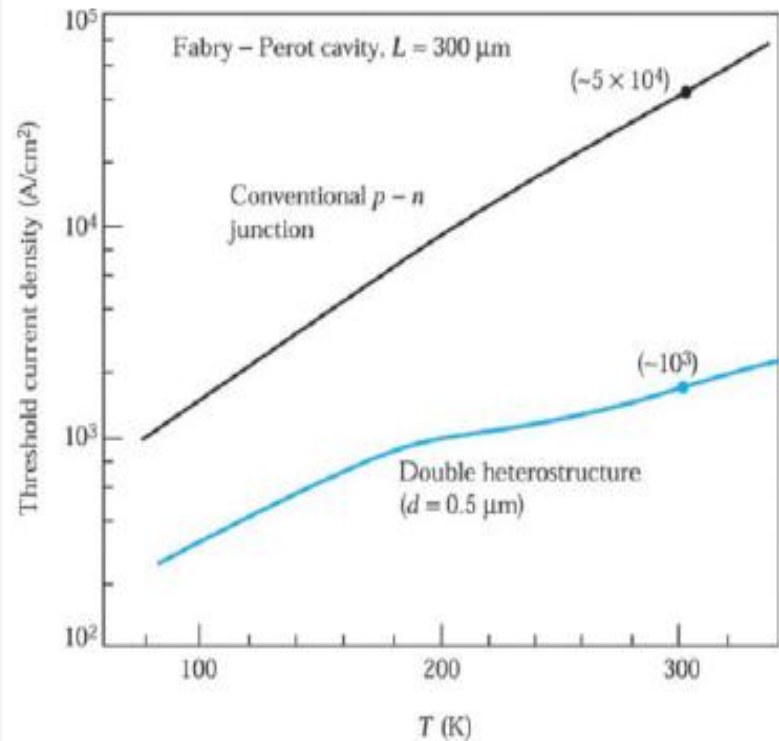
Dispositifs photoniques

Rayonnement Laser

Effet de la température sur le courant seuil

La température a **moins d'influence** sur le courant de seuil **d'une double hétérostructure (DH)** que sur celui d'une **simple jonction pn**, **le laser à DH** peut donc fonctionner **en mode continu** à température ambiante.

Conséquence: Large utilisation du laser à semi-conducteur dans les systèmes de communications par fibre optique.



Dispositifs photoniques

Rayonnement Laser

Courant nominal

Le courant nominal est défini, pour une efficacité quantique unité ($\eta=1$), comme étant le courant nécessaire pour exciter uniformément une couche active d'épaisseur $1\mu\text{m}$ et est donné par l'expression:

$$J = \frac{J_{nom}d}{\eta}$$

Où d est l'épaisseur de la couche active.

Dispositifs photoniques

Rayonnement Laser

Gain optique

Le gain optique, défini comme étant l'augmentation du flux de la puissance optique par unité de longueur, est donné par:

$$g = \left(\frac{g_0}{J_0} \right) (J_{nom} - J_0)$$

$$g_0/J_0 = 5 \times 10^{-2} \text{ cm-}\mu\text{m/A}$$

$$J_0 = 4.5 \times 10^3 \text{ A/ cm-}\mu\text{m.}$$

Dispositifs photoniques

Rayonnement Laser

Gain optique et condition effet laser

Lorsque la densité de courant augmente, le gain augmente jusqu'à ce que le seuil d'émission laser soit atteint, c'est-à-dire jusqu'à ce que le gain satisfasse à la condition qu'une onde lumineuse effectue une traversée complète de la cavité sans atténuation. Dans ce cas on a:

$$\Gamma g(\text{threshold gain}) = \alpha + \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{R}\right)$$

Γ : Facteur de confinement;

α : Perte par unité de longueur de l'absorption et d'autres mécanismes de diffusion;

L: est la longueur de la cavité;

R: est le facteur de réflexion des extrémités de la cavité.

Dispositifs photoniques

Rayonnement Laser

Expression du courant seuil

En supposant que **R** est **identique pour les deux extrémités**, la densité de courant de seuil est donnée par:

$$J_{th} (\text{A} / \text{cm}^2) = \frac{J_0 d}{\eta} + \left(\frac{J_0 d}{g_0 \eta \Gamma} \right) \left[\alpha + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{R} \right) \right]$$

$(J_0 d / g_0 \eta \Gamma)$: ce terme est souvent noté $1/\beta$;

β : est ce qu'on appelle le facteur de gain,

