

Fiches de cours :

Propriétés optoélectroniques des matériaux & Dispositifs optoélectroniques

La porte du savoir commence par un rayon de **lumière**, qui se projette sur toutes les surfaces, impliquant ainsi une **interaction entre la lumière et la matière**.

les notions essentielles des **propriétés optoélectroniques des matériaux** sont concrétisées à travers des **dispositifs optoélectroniques** tel que : les **détecteurs de lumière**, les **émetteurs de lumière** et les **fibres optiques**.

La lumière

La lumière est l'ensembles des radiations émises par le corps noir [1].

Le corps noir: C'est un objet idéal qui absorberait toutes les longueurs d'onde et qui émettrait un rayonnement électromagnétique qui ne dépend que de sa température.

Selon la loi empirique de Stefan-Boltzmann (1879) la puissance rayonnée P_r augmente proportionnellement à la puissance quatre de la température absolue du corps [1].

$$P_r = \sigma \times T^4$$

T : en K

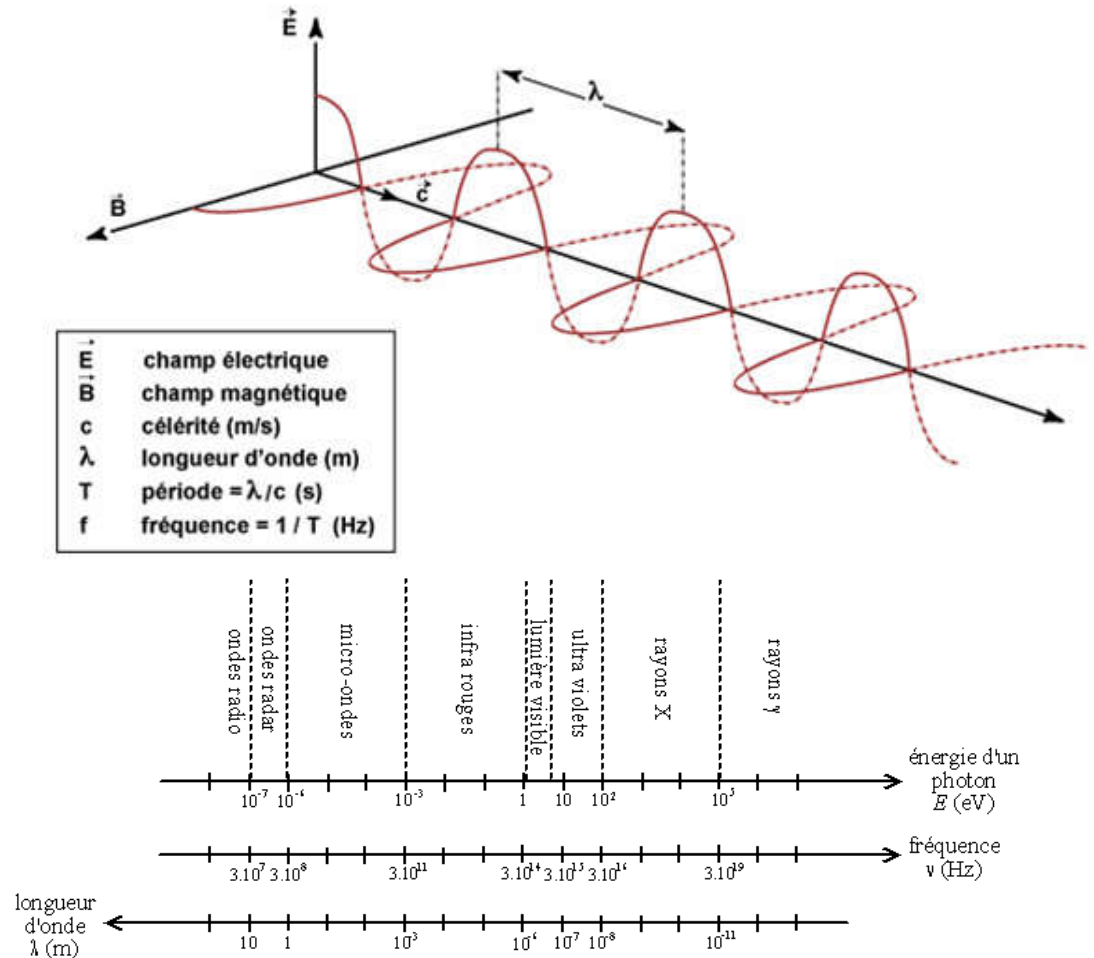
P_r : en $W.m^{-2}$.

σ : *Constante de Stefan-Boltzmann*

$$\sigma = 5,670\ 400 \times 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$$

Rayon électromagnétique

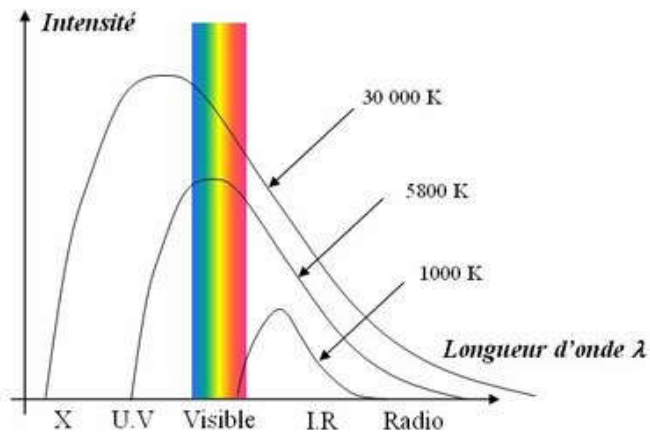
Une onde électromagnétique comporte à la fois un champ électrique et un champ magnétique oscillant à la même fréquence. Ces deux champs, perpendiculaires l'un par rapport à l'autre se propagent dans un milieu selon une direction orthogonale (figure ci-dessous). La propagation de ces ondes s'effectue à une vitesse qui dépend du milieu considéré. Dans le vide, la vitesse de propagation est égale à $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [1].



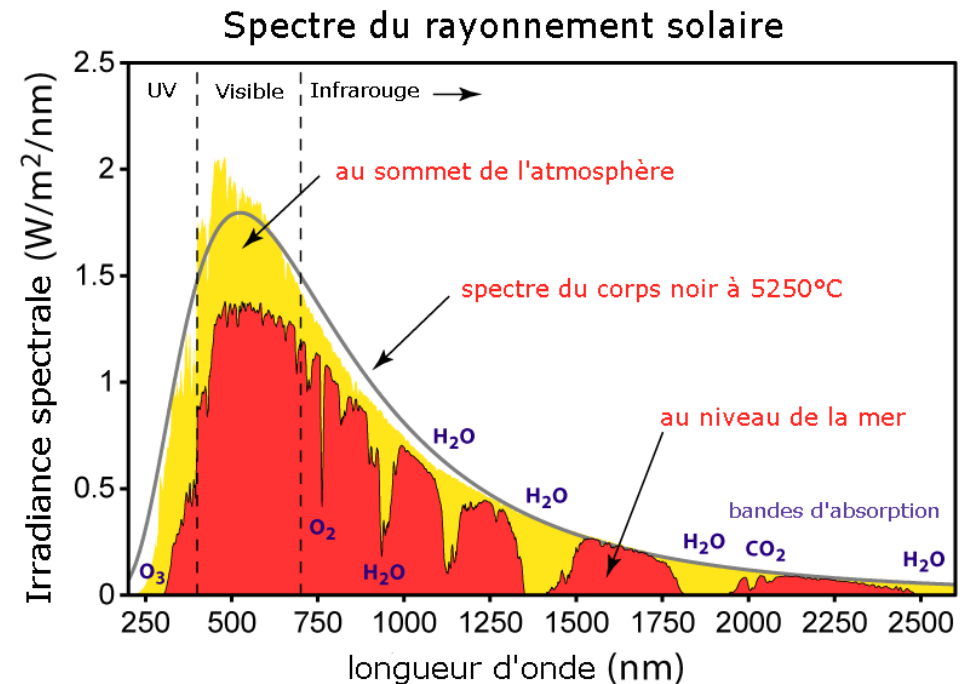
Spectre solaire

Wilhelm Wien utilisait un four hermétiquement fermé pour en étudier le rayonnement électromagnétique. Il put ainsi établir une loi empirique (1896) qui relie le spectre d'émission d'un corps noir et sa température.

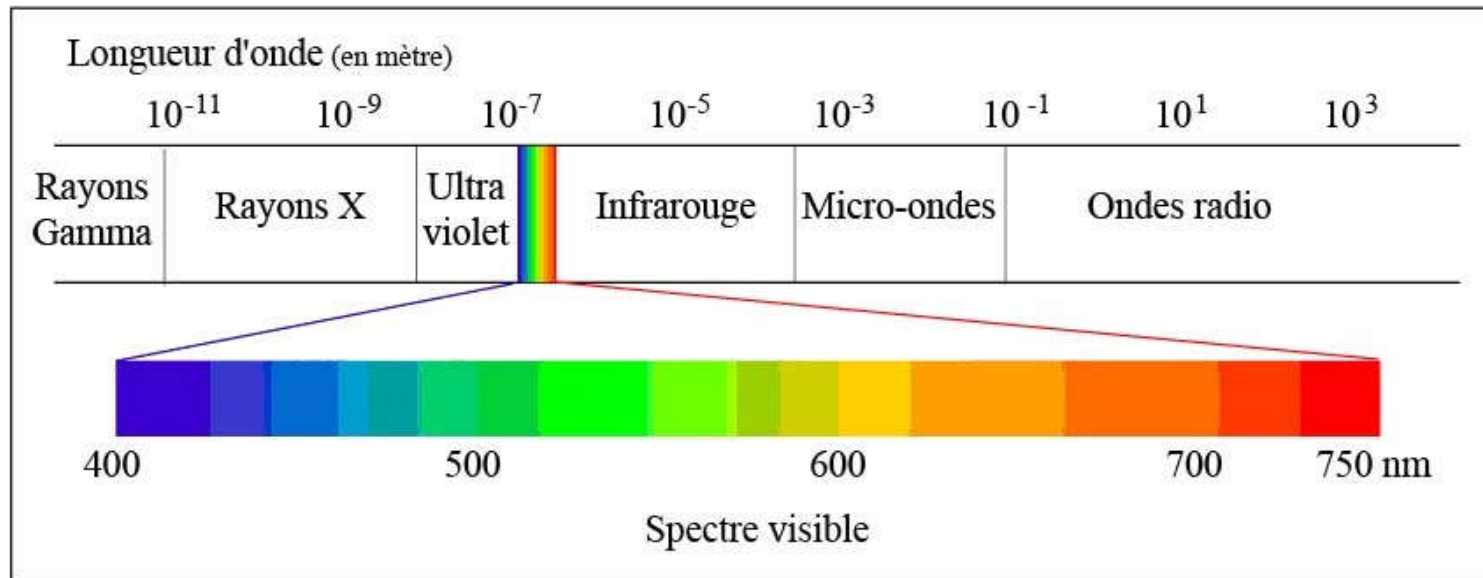
$$\lambda = 2,898 \times 10^{-3} / T$$



Considérons que le Soleil est un corps noir. Son pic d'émissivité est dans le vert ($\lambda=504$ nm). En appliquant la loi de Wien, on en déduit une température de surface de 5800 K [1].



Spectre visible



Dualité onde-corpuscule de la lumière

À chaque particule de masse m et en mouvement (vitesse v) est associée une onde de matière de longueur d'onde caractéristique λ , liée à la quantité de mouvement p ($p = mv$) de la particule par la relation de De Broglie [1]: $\lambda = \frac{h}{p}$

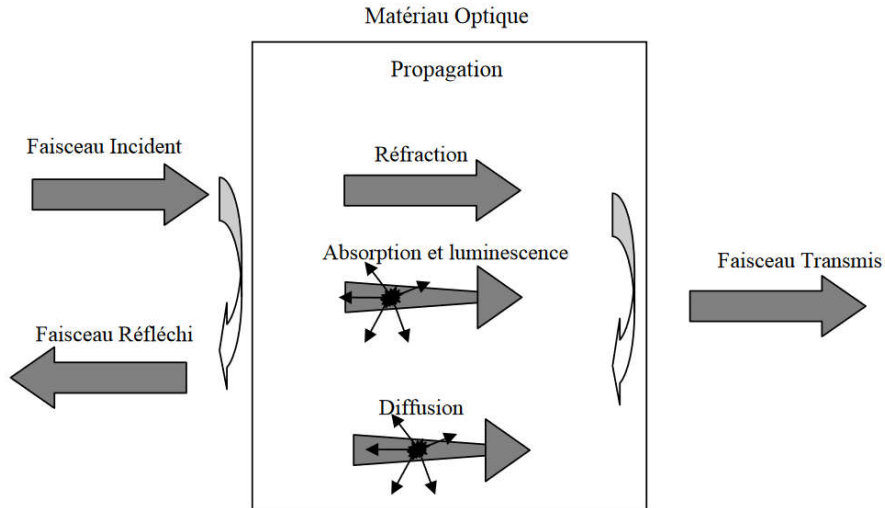
$h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ J.s. est la constante de Planck

L'énergie d'un photon est donc fonction de sa longueur d'onde λ et obéit à la relation : $E = h \nu = h c / \lambda$

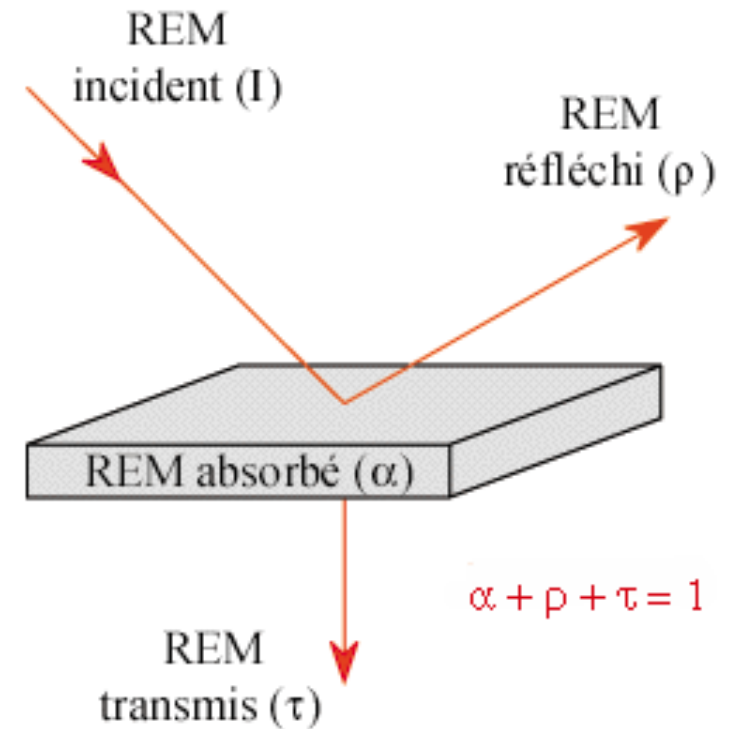


Interaction lumière matière

Tous les objets sont ainsi caractérisés par un coefficient d'absorption α , un coefficient de réflexion ρ , et un coefficient de transmission τ [2].



absorption, réflexion, transmission



Niveau d'énergie de la matière

En 1913, Niels Bohr introduit l'idée qu'un atome ne peut exister que dans certains états d'énergie bien définis, caractérisés par un niveau d'énergie.

Définitions :

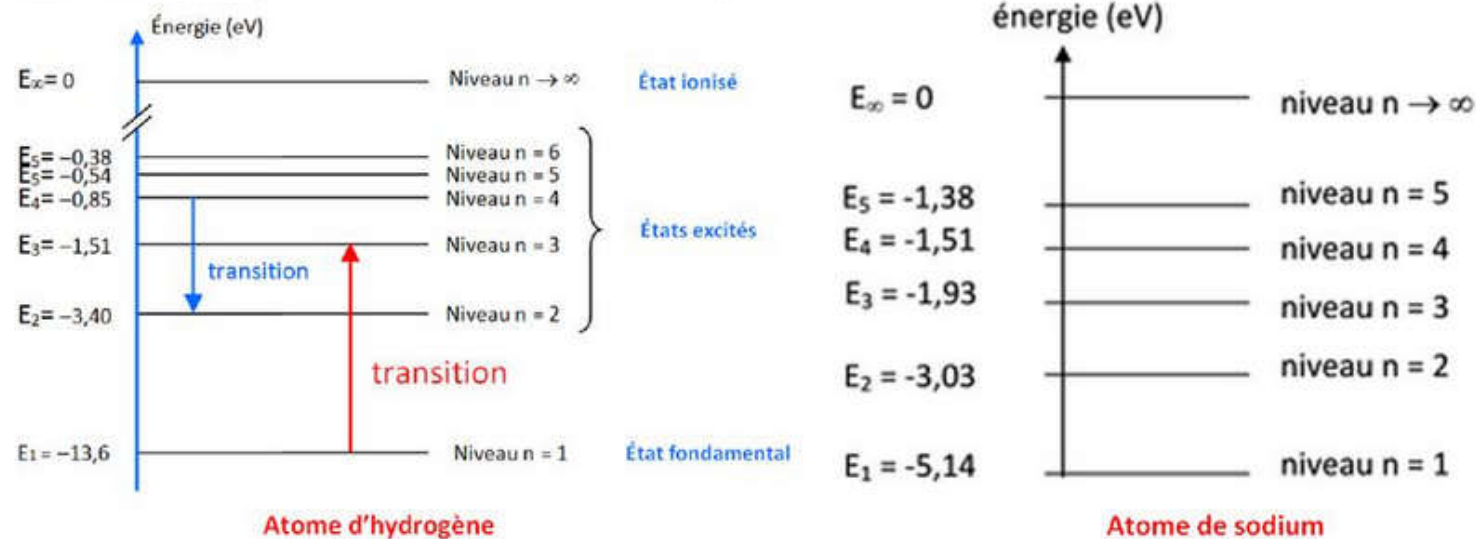
- Lorsque les électrons de l'atome sont sur les niveaux d'énergie les plus bas, on dit que l'atome est dans son état fondamental,
- Lorsque les électrons sont sur des niveaux supérieurs, on dit que l'atome est dans un état excité.

A retenir :

- A chaque répartition des électrons sur les couches électroniques, correspond un niveau d'énergie de l'atome : les niveaux d'énergie de l'atome sont quantifiés.
- Lorsqu'un électron change de niveau d'énergie, on dit qu'il réalise une transition.

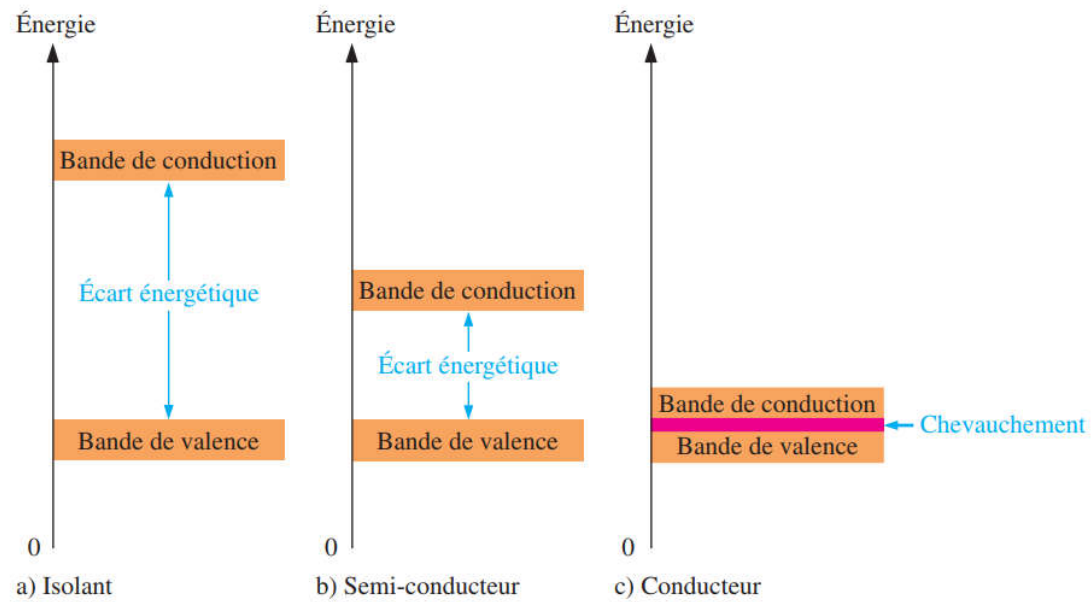
Niveau d'énergie de la matière

Exemples : diagrammes des niveaux d'énergie de 2 atomes



Remarque : Le niveau d'énergie $E_\infty = 0$ eV correspond à l'état ionisé, l'électron n'est plus attiré par le noyau, il est libéré.

Classification des matériaux



Diagrammes énergétiques pour les trois types de matériaux

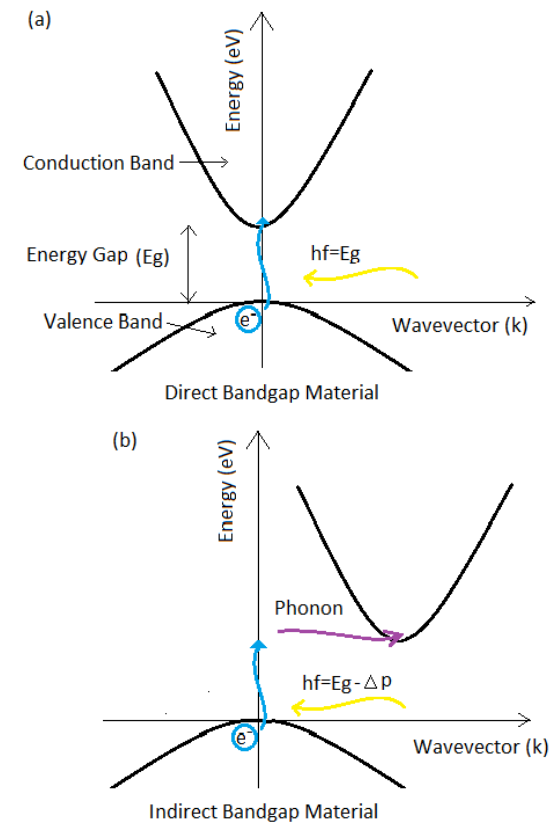
Structure de bande d'un semi-conducteur

a) Gap direct : les deux extremums correspondent au même quasi-moment (quantité de mouvement associée au vecteur d'onde dans la première zone de Brillouin).

b) Gap indirect : la différence entre les vecteurs d'onde de ces deux extremums est non nulle.

Remarque :

du point de vue optoélectronique les porteurs de charge des matériaux à gap direct passent d'une bande à l'autre en échangeant simplement un photon, tandis que les porteurs des matériaux à gap indirect doivent interagir à la fois avec un photon et avec un phonon afin de modifier leur vecteur d'onde, ce qui rend la transition bien moins probable [2].



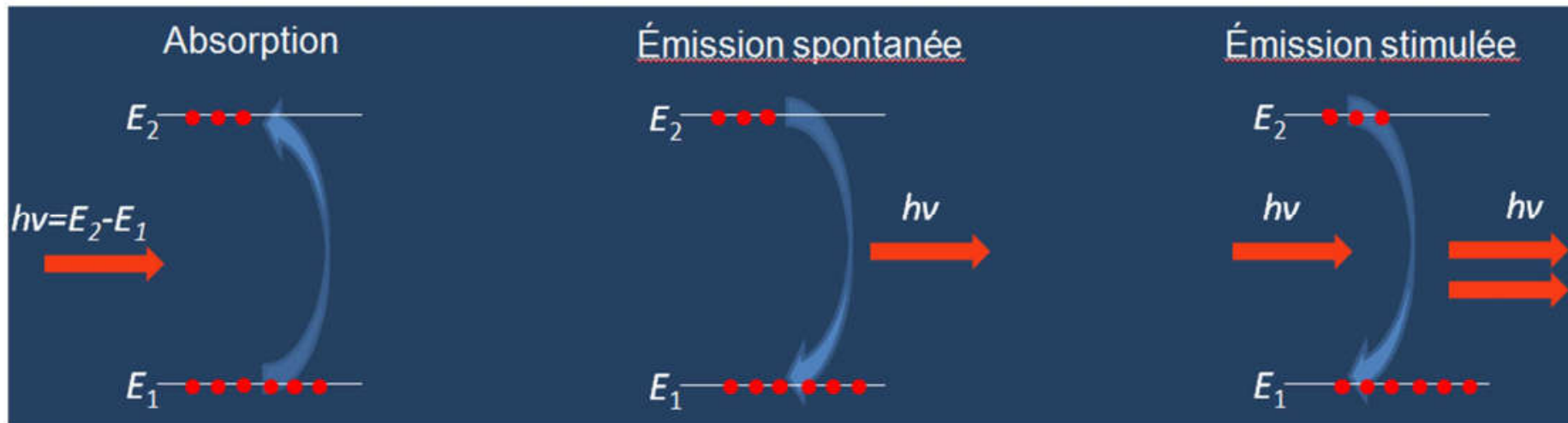
Mécanismes d'interaction

Les niveaux d'énergie sont quantifiés et sont tels qu'une lumière d'une fréquence particulière va pouvoir interagir avec la population qui se trouve sur les niveaux.

Exemple :

Considérons deux niveaux d'énergie E_1 et E_2 ($E_1 < E_2$) dont la population va pouvoir interagir avec une lumière de fréquence $h\nu = E_2 - E_1$. L'ensemble E_1 - E_2 est appelé transition radiative si le passage des atomes de E_1 à E_2 (ou de E_2 à E_1) ne peut se faire que par interaction avec la lumière.

IL existe trois mécanismes d'interaction :



Propriétés des semi-conducteurs

Notion d'équilibre thermodynamique [3]:

Un semi-conducteur en équilibre thermodynamique est caractérisé par un niveau de Fermi constant.

Par ailleurs le produit $p \times n$ est constant à l'équilibre et vaut :

$$p \times n = n_i^2$$

On peut aussi relier cette densité de porteurs avec le gap :

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{-E_g/2k_B T}$$

Semi-conducteur intrinsèque

Il s'agit d'un semi-conducteur "pur". On a autant d'électrons dans la bande de conduction que de trous dans la bande de valence [3]:

$$\begin{cases} n = n_i \\ p = n_i \end{cases}$$

La position du niveau de Fermi d'un semi-conducteur intrinsèque :

Ainsi : le niveau de Fermi d'un semi-conducteur intrinsèque est à peu près situé au milieu de la bande interdite [3].

$$E_F \approx E_i.$$

Ce qui nous permet d'écrire :

$$\begin{aligned} n &= N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{k_B T}\right) \\ &= \underbrace{N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_i}{k_B T}\right)}_{n'} \exp\left(-\frac{E_i - E_F}{k_B T}\right) \end{aligned}$$

$$n = p$$

$$N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{k_B T}\right) = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_F}{k_B T}\right)$$

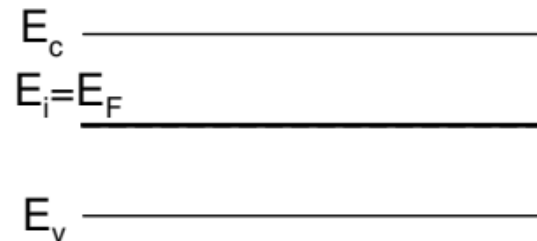
$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{k_B T}{2} \ln \frac{N_v}{N_c} \approx \frac{E_c + E_v}{2}$$

Semi-conducteur intrinsèque

puisque $E_i = E_F$: $n = n'$. Le terme n' correspond donc à la densité de porteur intrinsèque n_i [3].

Une démarche analogue peut être effectuée pour la densité de trous. Ainsi, la densité d'électrons et de trous peut s'exprimer selon les expressions suivante [3]:

$$n = n_i \exp\left(-\frac{E_i - E_F}{k_B T}\right)$$
$$p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{k_B T}\right)$$



Position du niveau de Fermi, à l'équilibre et dans un SC intrinsèque

Semi-conducteur extrinsèque

Type N

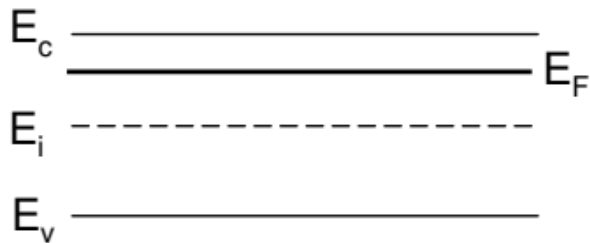
$$n = p + N_d \quad p \approx \frac{n_i^2}{N_d} \ll N_d$$

$$n \approx N_d$$

$$n > n_i \quad p < n_i \quad E_F > E_i$$

$$E_F = E_c + k_B T \ln(N_d/N_c)$$

$$= E_i + k_B T \ln(N_d/n_i)$$



Position du niveau de Fermi, à l'équilibre et dans un SC extrinsèque type N

$$pn = n_i^2$$

Type P

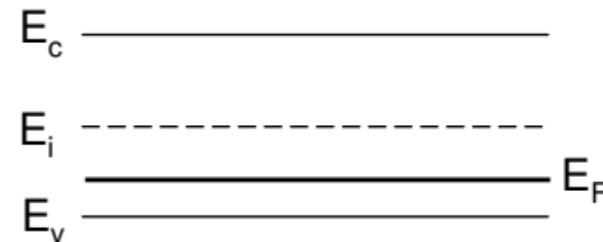
$$n + N_a = p \quad n \approx \frac{n_i^2}{N_a} \ll N_a$$

$$p \approx N_a$$

$$n < n_i \quad p > n_i \quad E_F < E_i$$

$$E_F = E_c - k_B T \ln(N_c N_a / n_i^2)$$

$$= E_i + k_B T \ln(n_i / N_a)$$



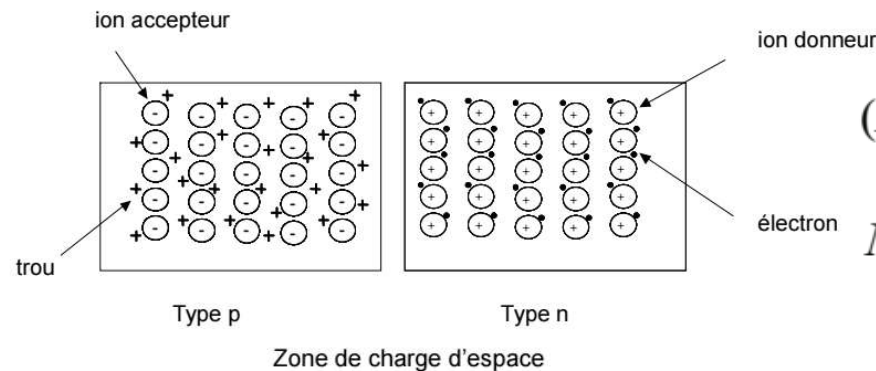
Position du niveau de Fermi, à l'équilibre et dans un SC extrinsèque type P

Jonction pn

Une jonction pn est constituée par la juxtaposition de deux régions de types différents d'un même monocristal de semi-conducteur.

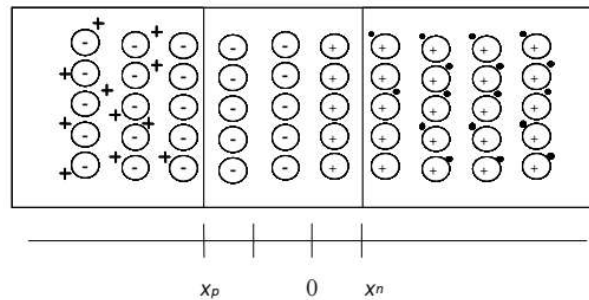
$$(N_a - N_d)_p \gg n_i$$

$$N_a = (N_a - N_d)_p$$



$$(N_d - N_a)_n \gg n_i$$

$$N_d = (N_d - N_a)_n$$



Jonction pn à l'équilibre thermodynamique

Densité des porteurs de charge dans chaque région :

$$\begin{aligned} \rho(x) &= 0 && \text{pour } x < x_p \text{ et } x > x_n \\ \rho(x) &= -e N_a && \text{pour } x_p < x < 0 \\ \rho(x) &= e N_d && \text{pour } 0 < x < x_n \end{aligned}$$

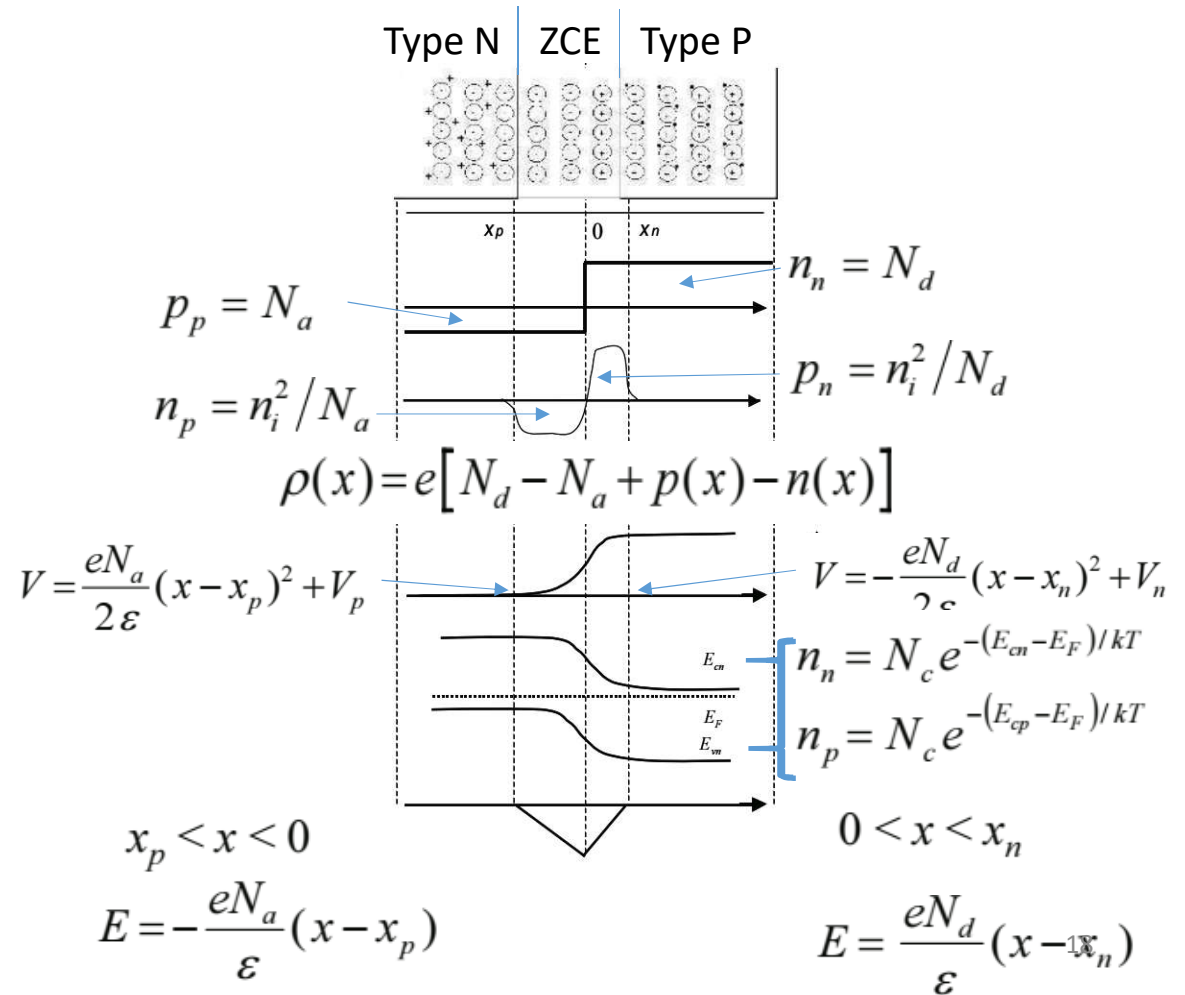
Potentiel électrique :

$$V_d = V_n - V_p = (E_{cp} - E_{cn})/e = \frac{kT}{e} \text{Ln} \frac{N_d N_a}{n_i^2}$$

Différence d'énergie :

$$E_{cp} - E_{cn} = kT \text{Ln} \frac{n_n}{n_p} = kT \text{Ln} \frac{N_d N_a}{n_i^2}$$

Champ électrique interne : $E = -dV/dx$



Principaux dispositifs optoélectroniques

Le choix d'un semi-conducteur pour la réalisation d'un composant optoélectronique est évidemment fonction du type d'utilisation du composant. Ainsi, la courbe de sensibilité de l'œil conditionne le choix des matériaux destinés à la réalisation de systèmes d'affichage, de même le spectre solaire pour les convertisseurs d'énergie, les fenêtres de transparence des fibres optiques pour les télécommunications.

Enfin les principaux types des dispositifs optoélectroniques sont présentés comme suit [4]:

1) Photo-détecteurs

[Photodiode](#)

2) Emetteurs de rayonnement à SC

[Diode électroluminescente](#) (DEL)

[Diode laser](#)

3) Fibre optique

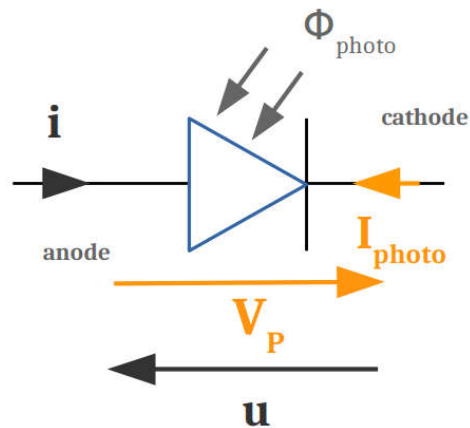
1. Photodiode

la photodiode a la capacité de détecter un rayonnement du domaine optique et de le transformer en signal électrique [4].

Elle fonctionne comme une photorésistance, dans l'obscurité totale, la résistance est très élevée et ne conduit que très peu de courant, mais lorsque la jonction PN est exposée à la lumière, la résistance interne décroît et le courant augmente.

Les photodiodes peuvent être utilisées sous deux modes [4] :

- le mode photovoltaïque où, en l'absence de polarisation, elles génèrent une tension ;
- le mode photoampérique où, utilisées en polarisation inverse à l'intérieur d'un circuit électrique, elles génèrent un courant directement proportionnel à l'intensité lumineuse.



V_P : tension de polarisation

I_{PhD} : courant proportionnel au flux lumineux

$$I_{photo} = S_{\lambda} \cdot \eta \cdot \Phi_{photo}$$

A
A/W
W

Sensibilité spectrale
Rendement quantique
Flux lumineux

1. Photodiode

En obscurité la conductivité est : $\sigma_o = ne\mu_n + pe\mu_p$

Sous éclairement, cette conductivité devient : $\sigma = \sigma_o + \Delta\sigma$ $\Delta\sigma = e(\mu_n \Delta n + \mu_p \Delta p) = e\mu_n (1 + \mu_p / \mu_n) \Delta n$

La mobilité des électrons est très supérieure à celle des trous : $\Delta\sigma = e\mu_n \Delta n$

La variation de la conductance du barreau s'écrit : $\Delta g = \int_V \Delta\sigma \frac{ds}{dy} = \int_V \Delta\sigma \frac{dx dz}{dy}$

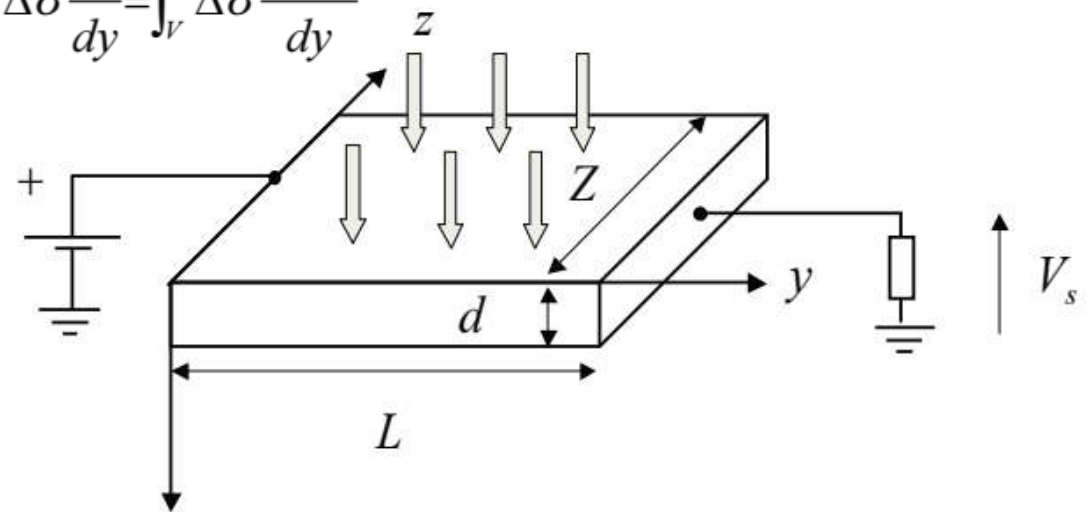
$$\Delta g = \frac{Z}{\ell} \int_0^d \Delta\sigma(x) dx = \frac{Z\mu_n e}{\ell} \int_0^d \Delta n(x) dx$$

1. Cellule épaisse, $d \gg L$ et $1/\alpha$:

$$\Delta g = \frac{Z\mu_n e}{\ell} \frac{\phi\alpha\tau}{1-\alpha^2 L^2} \left(\int_0^d e^{-\alpha x} dx - \frac{s/D+\alpha}{s/D+1/L} \int_0^d e^{-x/L} dx \right)$$

$$\Rightarrow \Delta g = \frac{Z\mu_n e}{\ell} \frac{\phi\tau}{1-\alpha^2 L^2} \left(1 - \frac{s/D+\alpha}{s/D+1/L} \alpha L \right)$$

Si la vitesse de recombinaison en surface est négligeable : $\Delta g = \frac{Z\mu_n e}{\ell} \phi\tau$



1. Photodiode

2. Cellule mince $d \ll L$ et $1/\alpha$:

Si la vitesse de recombinaison en surface peut être négligée, Δn est :
$$\Delta n = \frac{\phi \alpha \tau}{1 - \alpha^2 L^2} \left(e^{-\alpha x} - \frac{s/D + \alpha}{s/D + 1/L} e^{-x/L} \right)$$

La densité de photoporteurs est constante dans tout le volume de la cellule :

$$\Delta g = \frac{Z}{\ell} \int_0^d \Delta \sigma(x) dx = \frac{Z \mu_n e}{\ell} \int_0^d \Delta n(x) dx \Rightarrow \Delta g = \frac{Z \mu_n e}{\ell} \phi \tau \alpha d$$

Pour résumer, la variation absolue de photo-conductance et de la variation de la conductance au repos sont plus importantes dans la cellule épaisse que dans la cellule mince, de sorte qu'un choix judicieux de l'épaisseur permet d'optimiser la variation relative de conductance $\Delta g/g$. Cette variation relative s'écrit [4] :

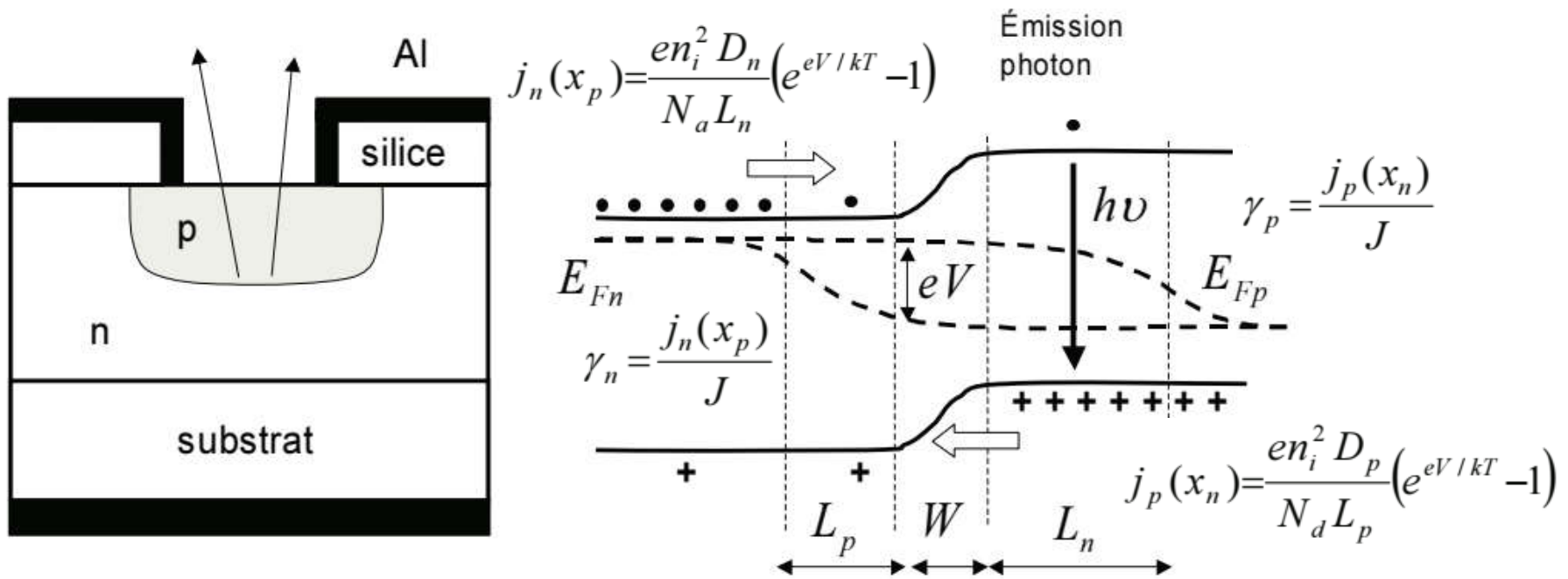
$$\text{Cellule épaisse: } \frac{\Delta g}{g} = \frac{\phi \tau}{n} \frac{1}{d} \qquad \text{Cellule mince: } \frac{\Delta g}{g} = \frac{\phi \tau}{n} \alpha$$

Dans le cas où la cellule absorbe la totalité du rayonnement, $\Delta g/g$ de la cellule épaisse augmente comme $1/d$. Mais lorsque $1/d > \alpha$, $\Delta g/g$ sature à la valeur de la cellule mince [4].

Pour optimiser $\Delta g/g \Rightarrow$ utilisation d'un matériau avec $\tau \gg$ et $\alpha \gg$ et $n \ll$, et on réalisera $d = 2$ à 3 fois $1/\alpha$ afin d'absorber la totalité du rayonnement [4].

2.1. Diode électroluminescente – (DEL)

La DEL est une jonction pn réalisée à partir de semi-conducteurs dans lesquels les recombinaisons des porteurs excédentaires sont essentiellement radiatives [4].



Le rapport des taux d'injection d'électrons et de trous est :

$$\frac{\gamma_n}{\gamma_p} = \frac{D_n L_p N_d}{D_p L_n N_a} = \sqrt{\frac{\mu_n \tau_p}{\mu_p \tau_n} \frac{N_d}{N_a}} \approx \sqrt{\frac{\mu_n N_d}{\mu_p N_a}} = \sqrt{\frac{\sigma_n}{\sigma_p}}$$

2.2. Diode laser (DL)

LASER : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

les SC utilisés pour les diodes laser sont à gap direct [4] :

GaAs, InGaAs, AlGaAs etc.

Fonctionnement du système à 4 niveaux :

Inversion de Population facile !

Il faut peupler (2) $\hat{=}$ OK

Il faut vider (1) $\hat{=}$ OK (vite dépeuplé vers (0))

Rq : Dès que le pompage est actif ($N_2 \neq 0$)

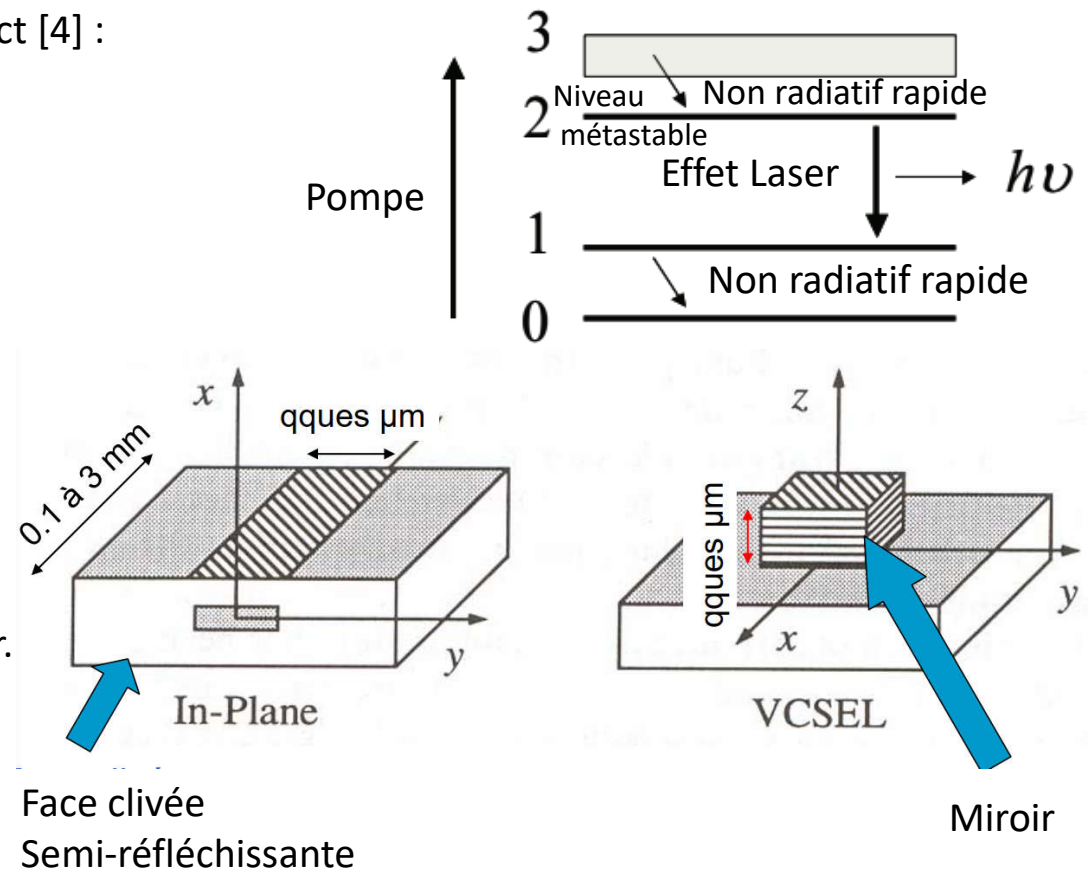
l'inversion de population est atteinte ($N_1 = 0$)

Trois éléments de base sont nécessaire :

A. source externe d'énergie : pompage.

B. puissance lumineuse émise : milieu amplificateur.

C. spectre d'émission : cavité résonante.



VCSEL : (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser) ²⁴

2.2. Diode laser (DL)

L'équation d'évolution de la population d'électrons :

Approx. $\gamma_{32} \gg K$ (désexcitation 3-2 très rapide)

Niveau 3 = intermédiaire de pompage (en regime permanent, $N_3 \ll N$)

$N = N_0 + N_1 + N_2 + N_3 \approx N_0 + N_1 + N_2$

$dN_0/dt = \gamma_{10} \cdot N_1 - W_p N_0$

$dN_1/dt = K \cdot N_2 + W \cdot (N_2 - N_1) - \gamma_{10} \cdot N_1$

$dN_2/dt = W_p \cdot N_0 - K \cdot N_2 - W \cdot (N_2 - N_1)$

γ_{ij} (s^{-1}) = proba de désexcitation non radiative de (i) vers (j)

W_p (s^{-1}) = proba d'absorption de la pompe

K (s^{-1}) = proba d'émission spontanée

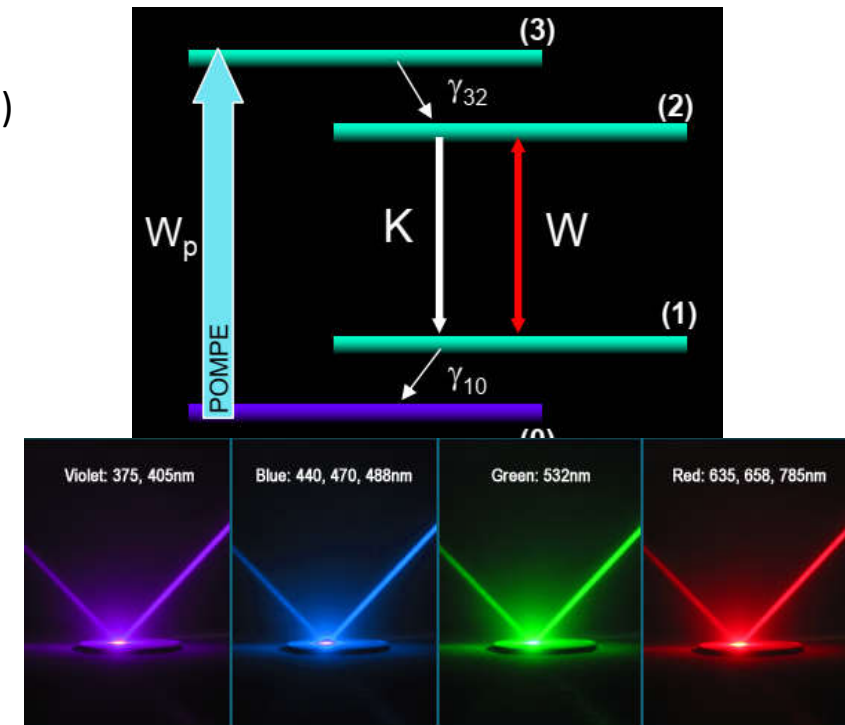
W (s^{-1}) = proba d'absorption ou d'émission stimulée

N_i (cm^{-3}) = densité d'atomes dans le niveau i

$N = N_0 + N_1 + N_2 + N_3$

R!: la longueur d'onde émise par la diode laser peut être exprimée en fonction de deux variables (la température et le courant) selon l'équation polynomiale suivante [4] :

$$\lambda(T, I) = \lambda(T_0, I_0) + \alpha_T(T - T_0) + \alpha_I(I - I_0) + \alpha_T^2(T - T_0)^2 + \alpha_I^2(I - I_0)^2 + \dots + \alpha_T^n(T - T_0)^n + \alpha_I^n(I - I_0)^n$$



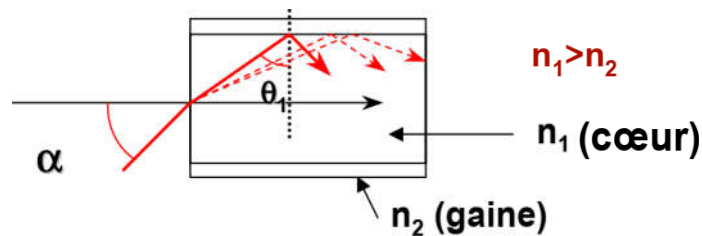
3. Fibre optique

Les paramètres essentiels d'une fibre optique [5] :

- Différence d'indice normalisé, qui donne une mesure du saut d'indice entre le cœur et la gaine : $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$
- Angle d'incidence maximal à l'entrée de la fibre, soit l'ouverture du cône d'acceptance, appelée ouverture numérique ON :

$$ON = \sin \alpha_{\max} = n_1 \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_{1\text{lim}} \right) = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}$$

- Condition de guidage dans le cœur : $\theta_1 \geq \arcsin \frac{n_2}{n_1}$



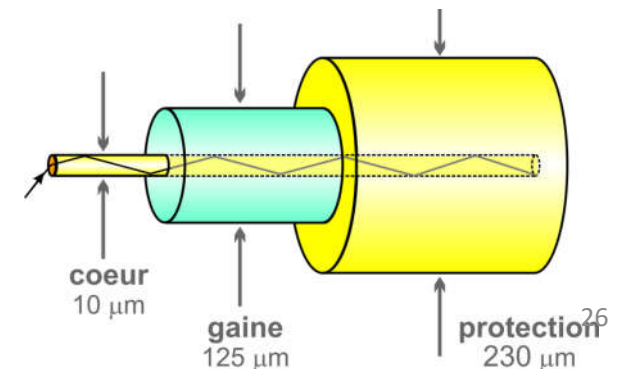
La fibre optique est un fil de verre **plus fin qu'un cheveu**...

... **insensible aux perturbations** de l'environnement...

... permettant de transporter une **grande quantité d'informations**...

... à la **vitesse de la lumière**...

... quelle que soit **la distance de son habitation au réseau**



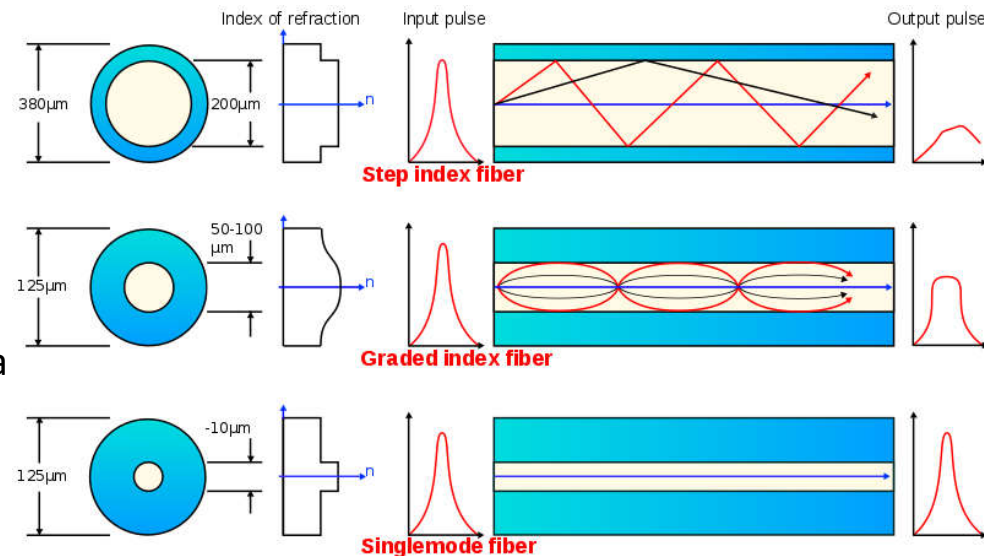
3. Fibre optique

On détermine le nombre de modes pouvant se propager dans la

fibre grâce à la fréquence normalisée $V = \frac{2\pi}{\lambda_0} a O.N.$

- **La fibre multimode** [5] :

A été la première utilisée et réservée aux courtes distances : réseaux informatiques. Si le nombre de modes est grand, il est approximativement égal à $V^2/2$ pour une fibre à saut d'indice et à $V^2/4$ pour une fibre à gradient d'indice à profil parabolique.



- **La fibre monomode** [5] : $V \leq 2,405$.

Il faut remarquer qu'une fibre de rayon a et d'ouverture numérique $O.N.$ fixés n'est monomode que pour les longueurs

d'ondes $\lambda_0 \geq \lambda_C = \frac{2\pi}{2,405} a O.N.$

Annexes

- Courant dans les SC
- Équation de continuité – Longueur de diffusion
- Équation de poisson
- Longueur de Debye

Courant dans les SC

- Courant de diffusion:

- Origine: gradient de concentration
- Diffusion depuis la région de forte concentration vers la région de moindre [].
- 1° loi de Fick:

$$n_D^x = -D_n \frac{dn}{dx}$$

nb d'e⁻ qui diffusent par unité de temps et de volume (flux)

$$p_D^x = -D_p \frac{dp}{dx}$$

nb de h⁺ qui diffusent par unité de temps et de volume (flux)

- Courant de diffusion: somme des deux contributions (électrons et trous):

$$J_{diff} = e(-n_D^x + p_D^x) = eD_n \frac{dn}{dx} - eD_p \frac{dp}{dx}$$

- Constante ou coefficient de diffusion

$$[D_{n,p}] = \text{cm}^2/\text{s}.$$

- Courant total: somme des deux contributions (si elles existent) de conduction et diffusion:

$$J_T = J_{cond} + J_{diff} = J_n + J_p$$

$$J_T = (ne\mu_n + pe\mu_p)E + e(D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx})$$

- D et μ expriment la faculté des porteurs à se déplacer. Il existe une relation entre eux: *relation d'Einstein*:

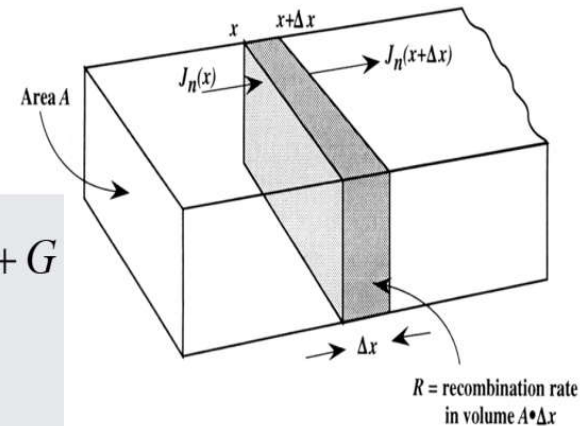
$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{e}$$

Equation de continuité – Longueur de diffusion

- G et R altèrent la distribution des porteurs donc du courant

$$A\Delta x \frac{dn(x,t)}{dt} = A \left[\frac{J_n(x+\Delta x)}{e} - \frac{J_n(x)}{e} \right] - R + G$$

$$A\Delta x \frac{dn(x,t)}{dt} \cong A \frac{dJ_n(x)}{dx} \frac{\Delta x}{e} - R + G$$



- On obtient alors les *équations de continuité* pour les électrons et les trous:

$$\frac{dn(x,t)}{dt} = \frac{1}{e} \frac{dJ_n}{dx} - r_n + g_n$$

$$\frac{dp(x,t)}{dt} = -\frac{1}{e} \frac{dJ_p}{dx} - r_p + g_p$$

Equation de continuité – Longueur de diffusion

- En régime stationnaire, les dérivées par rapport au temps s'annulent:

$$\frac{d^2(n - n_0)}{dx^2} = \frac{n - n_0}{D_n \tau_n} = \frac{n - n_0}{L_n^2}$$

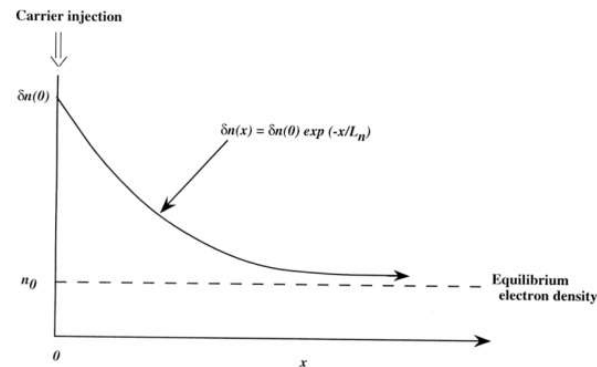
$$\frac{d^2(p - p_0)}{dx^2} = \frac{p - p_0}{D_p \tau_p} = \frac{p - p_0}{L_p^2}$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

- Solutions:

$$\Delta n(x) = (n(x) - n_0) = \Delta n(0)e^{-x/L_n}$$



Longueur de diffusion: représente la distance moyenne parcourue avant que l'électron ne se recombine avec un trou (qq microns voire qq mm)

L_n ou $L_p \gg$ aux dispo VLSI

R et G jouent un petit rôle sauf dans qq cas précis (Taur et al)

Equation de Poisson

- Elle est dérivée de la première équation de Maxwell. Elle relie le potentiel électrique et la densité de charge:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{dE}{dx} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_{sc}}$$

- Dans les SC, deux types de charges (fixes et mobiles):

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{e}{\epsilon_{sc}} \left[\underbrace{p(x) - n(x)}_{\text{Charge mobiles}} + \underbrace{N_D^+(x) - N_A^-(x)}_{\text{Charges fixes (dopants ionisés)}} \right]$$

Charge mobiles
(électrons et trous)

Charges fixes
(dopants ionisés)

Longueur de Debye

- Si on écrit l'équation de Poisson dans un type n en exprimant n en fonction de ϕ_{Fi} :

$$\frac{d^2\Phi_{Fi}}{dx^2} = -\frac{e}{\epsilon_{sc}} [N_d(x) - n_i e^{e\Phi_{Fi}/kT}]$$

en remarquant que: $V(x) = \Phi_{Fi} + cte$

- Si $N_d(x) \Rightarrow N_d + \Delta N_d(x)$, alors Φ_{Fi} est modifié de $\Delta\Phi_{Fi}$

$$\frac{d^2\Delta\phi_{Fi}}{dx^2} - \frac{e^2 N_d}{\epsilon_{sc} kT} \Delta\phi_{Fi} = -\frac{e}{\epsilon_{sc}} \Delta N_d(x)$$

- Signification physique?

- Solution de l'équation différentielle du 2° degré:

$$\Delta\phi_{Fi} = A \exp\left(-\frac{x}{L_D}\right) \quad \text{avec} \quad L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_{sc} kT}{e^2 N_D}}$$

- La « réponse » des bandes n'est pas *abrupte* mais « prend » quelques L_D (si $N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $L_D = 0.04 \mu\text{m}$). Dans cette région, *présence d'un champ électrique* (neutralité électrique non réalisée)

Bibliographie

Livres

- [1] Maxime NICOLAS, 2009, Paris, Ondes et électromagnétisme, Dunod.
- [2] S. M. Sze & Kwok K. Ng, 2006, Physics of Semiconductor Devices, WILEY.
- [3] Francis Lévy, 1995, Physique et technologie des semiconducteurs (TM volume 18), presses polytechniques et universitaires romandes.
- [4] Toffano Zéno, 2001, Composants photoniques et fibres optiques, Ellipse.
- [5] Pierre Lecoy, 2014, Communications sur fibres optiques, Eyrolles