École des Mines de Paris

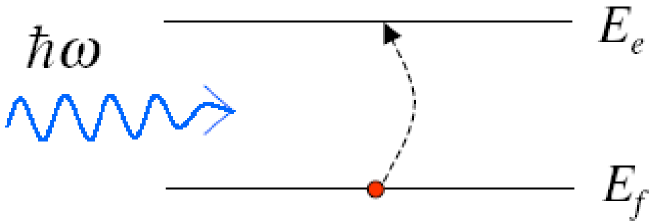
Propriétés opto-électroniques des semiconducteurs : La photodiode

Arnaud Dubois et Nicolas Blanc

Cours de Physique des Solides 22 Mai 2006

Absorption d'un photon par un atome

Système à deux niveaux



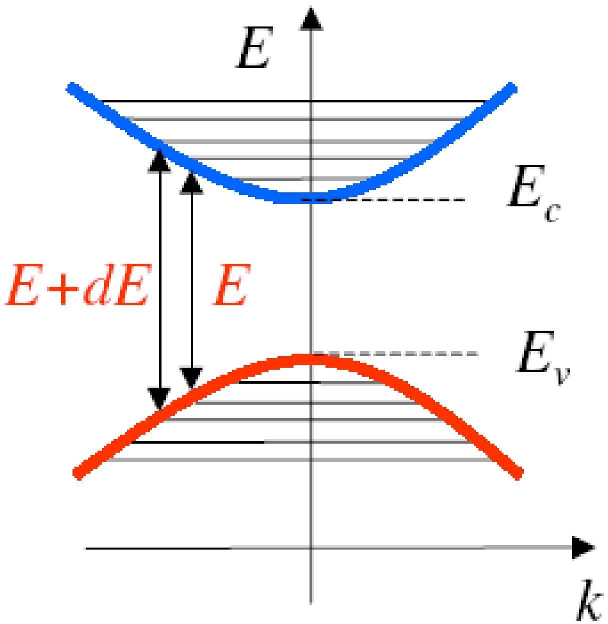
Probabilité d'absorption P_a

$$P_a = B \,.\, n(\omega) \,.\, f_f \,.\, (1 - f_e)$$

- -n(ω) : nombre de photons à ω
- -f : probabilité que l'état considéré soit occupé
- -B: probabilité de transition $B \propto \left| \langle i | W_{DE} | f \rangle \right|^2$ (règle d'or de Fermi)

W_{DE} : transition dipolaire électrique $W_{DE} \propto \vec{r} \cdot \vec{E}$

Absorption dans les Semi-conducteurs



Taux d'absorption par unité d'énergie : r_a

$$r_a dE = \sum_{E<(E_e-E_f)<E+dE} P_a$$

$$r_a dE = \sum_{E<(E_e-E_f)<E+dE} B\rho(\omega) f_f (1-f_e)$$

Densité spectrale de photons

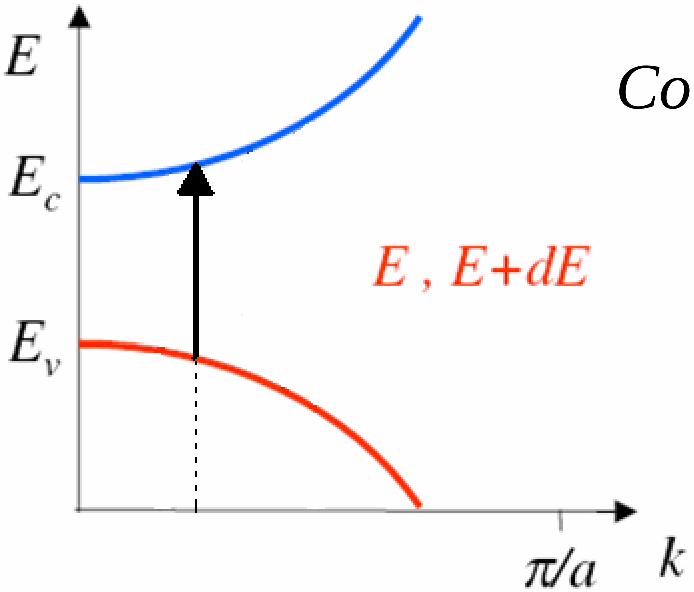
Hypothèses : •B=cst

• $f_f = f_v \,;\; f_e = f_c$

Distributions de Fermi uniformes dans les bandes

$$r_a dE = B\rho(\omega) f_v (1-f_c) \underbrace{\sum_{E<(E_e-E_f)<E+dE} 1}_{dNt}$$

nb de transitions d'énergie entre *E* et *E+dE*

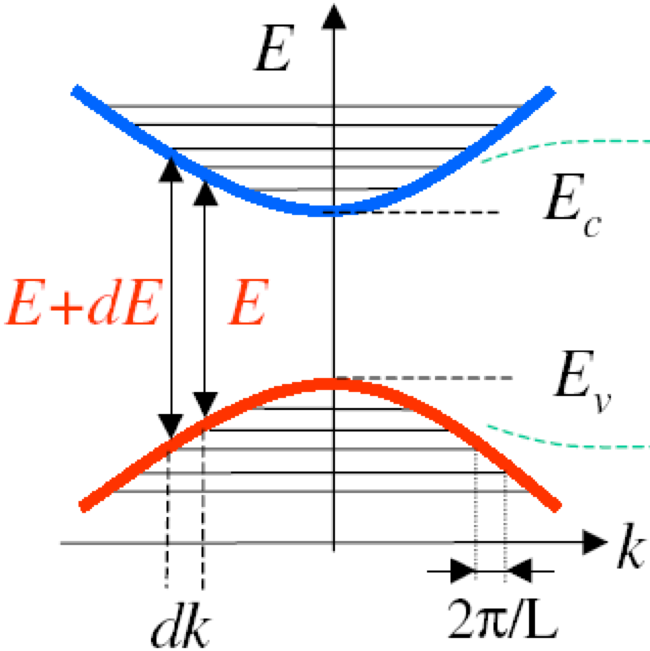


$$Conservation\ de\ la\ quantité\ de\ mvt : \hbar k = const$$

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{e^-} \approx \dfrac{\pi}{a} \approx 10^{10}\, m^{-1} \\ k_p \approx \dfrac{2\pi}{\lambda} \approx 10^{6}\, m^{-1} \end{array} \right. \Longrightarrow \underbrace{k'_{e^-} = k_{e^-} + k_p \approx k_{e^-}}_{\text{Règle de « sélection »}}$$

$$g(E)dE = 2g(k)dk \Rightarrow g(E) = \frac{2g(k)}{dE/dk}$$

$$\boxed{\begin{array}{l} g(k)dk = \dfrac{1}{(2\pi)^3} \cdot 4\pi^2 k^2 dk \Rightarrow g(k) = \dfrac{k^2}{2\pi^2} \\ \Rightarrow dN_t = \dfrac{k^2}{\pi^2} dk \end{array}}$$



$$E_e = E_c + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_c}$$

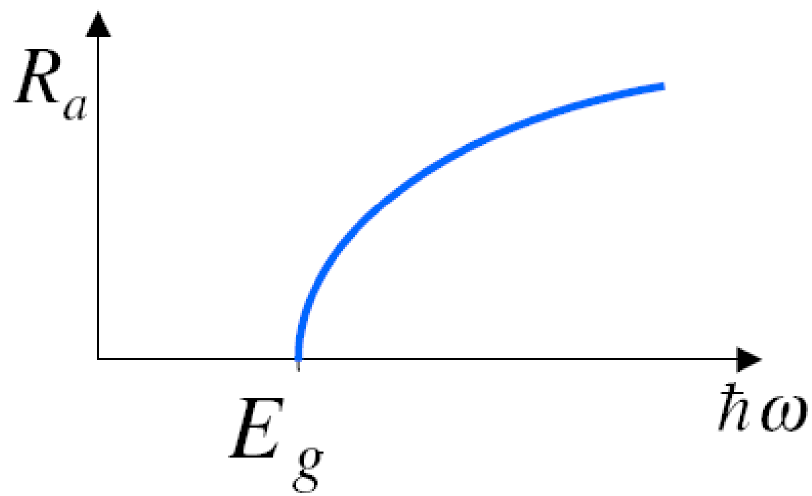
$$E_f = E_v - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_v}$$

$$\begin{cases} E = E_g + \dfrac{\hbar^2 k^2}{2m^*} \\[2ex] \dfrac{1}{m^*} = \left(\dfrac{1}{m_c} + \dfrac{1}{m_v}\right) \end{cases}$$

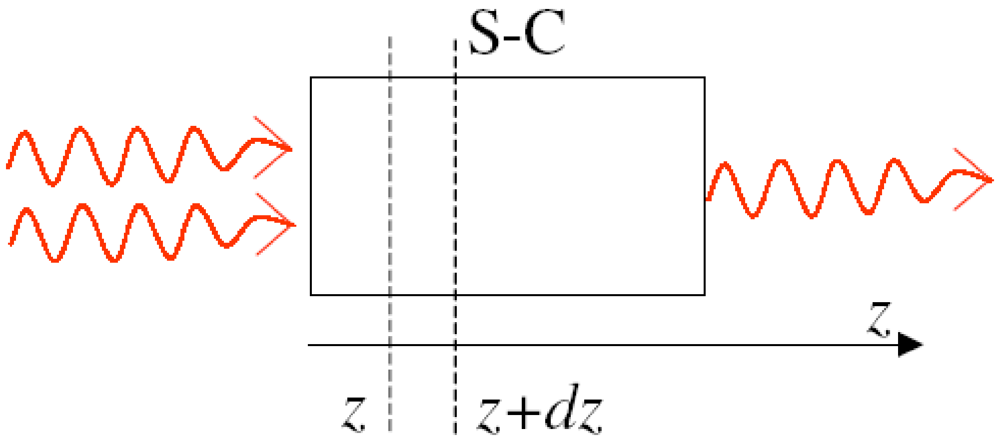
$$\boxed{dk = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2 (E - E_g)}}\ dE}$$

$$\boxed{r_a = B\ \rho(\omega)\ f_v (1 - f_c)\ \rho_t(\omega)}$$

$$\rho_t(E) = \frac{1}{2\pi^2}\frac{(2m^*)^{3/2}}{\hbar^3}\sqrt{E - E_g}$$



Coefficient d'absorption α



$$\frac{dn_{ph}}{dt} = -\int r_a(\hbar\omega')\, d\hbar\omega' = -R_a(\omega)$$

$$R_a = Bn_\omega f_v(1-f_c)\rho_t(\omega)$$

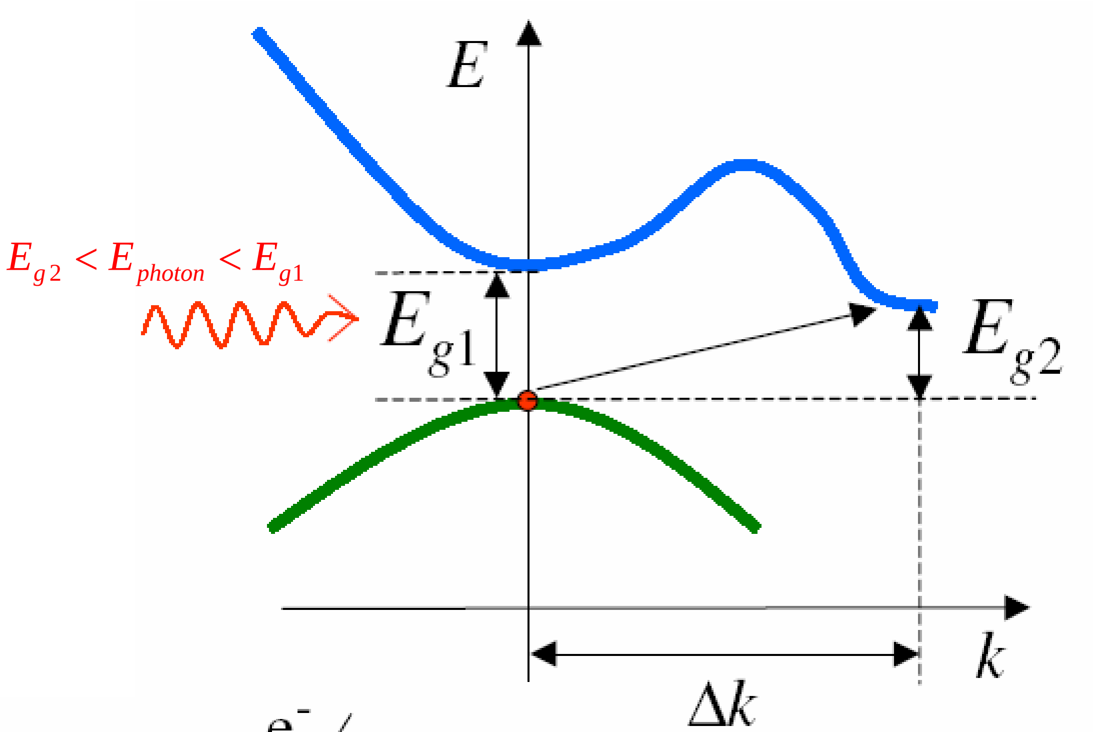
(faisceau monochromatique)

$$\boxed{\frac{dn_\omega}{dz} \equiv -\alpha\, n_\omega}$$

$$\boxed{\alpha = \frac{1}{v} B\, f_v(1-f_c)\,\rho_t(\omega)}$$

coefficient d'absorption

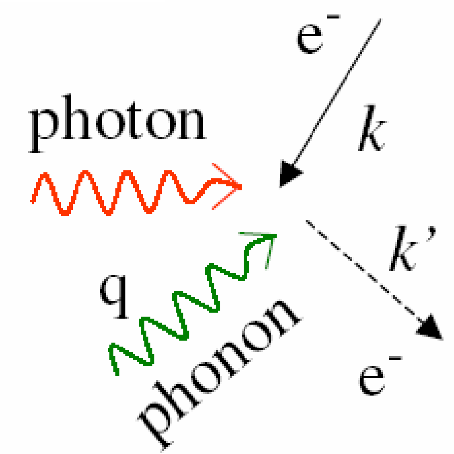
Cas du Semi-conducteur à gap indirect



Les électrons échangent :

•leur énergie avec les photons

•leur qté de mouvement avec un phonon

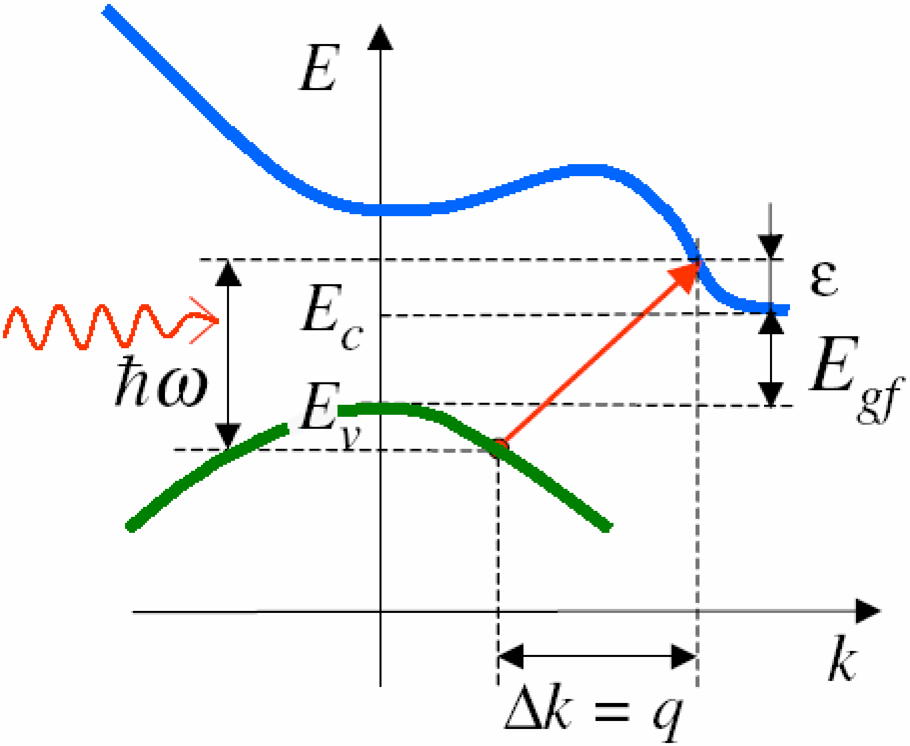


$$\boxed{k' = k + q}$$

Plus de règle de sélection

Toutes les transitions sont permises

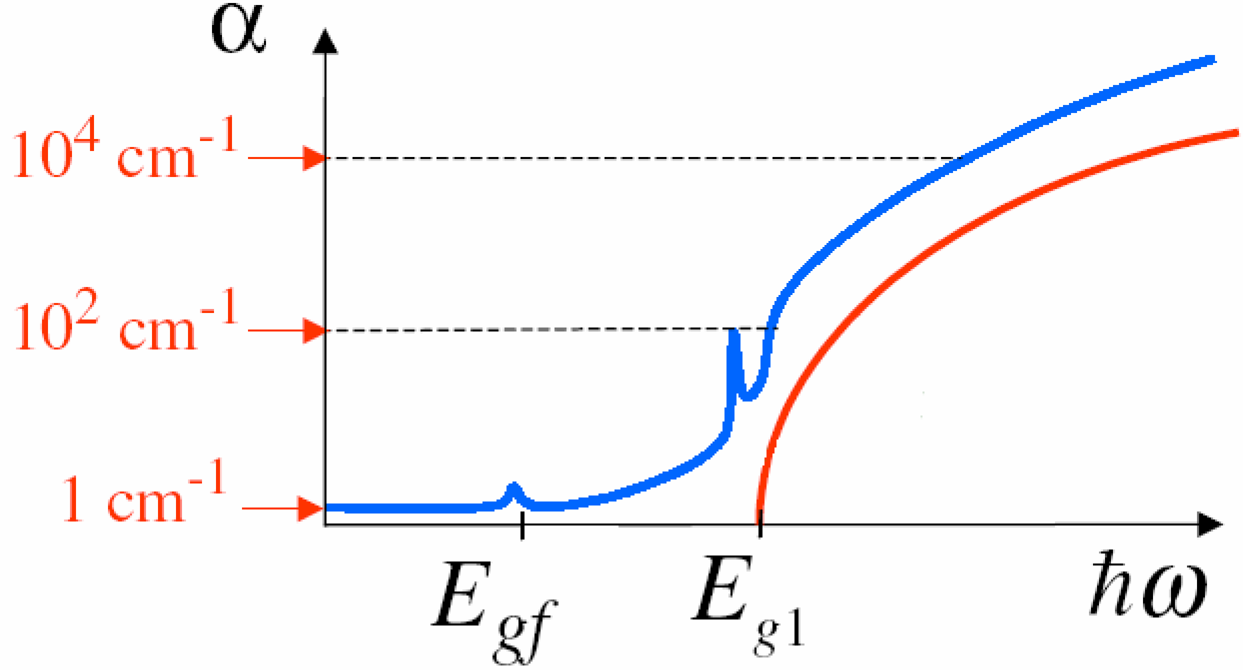
$$p_t \propto \rho_c \times \rho_v$$



On a : $\rho = \frac{1}{2\pi^2}\left(\frac{2m}{\hbar^2}\right)^{3/2}\sqrt{E}$

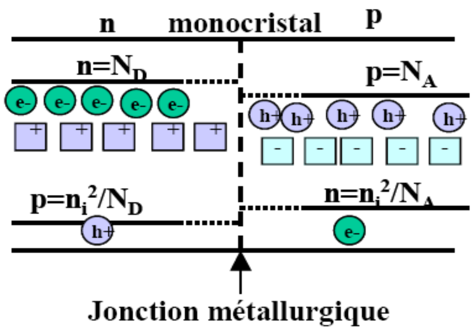
$$\Rightarrow \begin{cases} \rho_c = \frac{1}{2\pi^2}\left(\frac{2m_c}{\hbar^2}\right)^{3/2}\sqrt{\varepsilon} \\ \rho_v = \frac{1}{2\pi^2}\left(\frac{2m_v}{\hbar^2}\right)^{3/2}\sqrt{\hbar\omega - E_{gf} - \varepsilon} \end{cases}$$

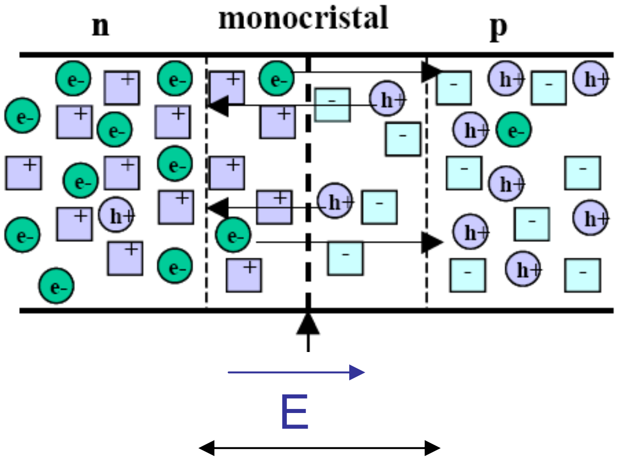
$$\Rightarrow \boxed{\rho_t(\hbar\omega) \propto \int_0^{\hbar\omega - E_{gf}} \sqrt{\varepsilon \cdot \left(\hbar\omega - E_{gf} - \varepsilon\right)}dE = \frac{\pi}{8}\left(\hbar\omega - E_{gf}\right)^2}$$


α
10^4 cm^{-1}
10^2 cm^{-1}
1 cm^{-1}
E_{gf}
E_{g1}
$\hbar\omega$

La jonction PN

- Région n
  - Électrons porteurs majoritaires $n_{no} = N_D$
  - Trous porteurs minoritaires $p_{no} = n_i^2/N_D$
- Région p
  - Trous porteurs majoritaires $p_{po} = N_A$
  - Électrons porteurs minoritaires $npo = n_i^2/N_A$
- État d’équilibre entre
  - Diffusion
  - Champ électrique





Zone de charge d’espace

Zone de charge d'espace

$Q_+ = q\ S\ N_D\ x_n$

$Q_- = -q\ S\ N_A\ x_p$

- $N_D x_n = N_A x_p$
- Équilibre diffusion/champ électrique

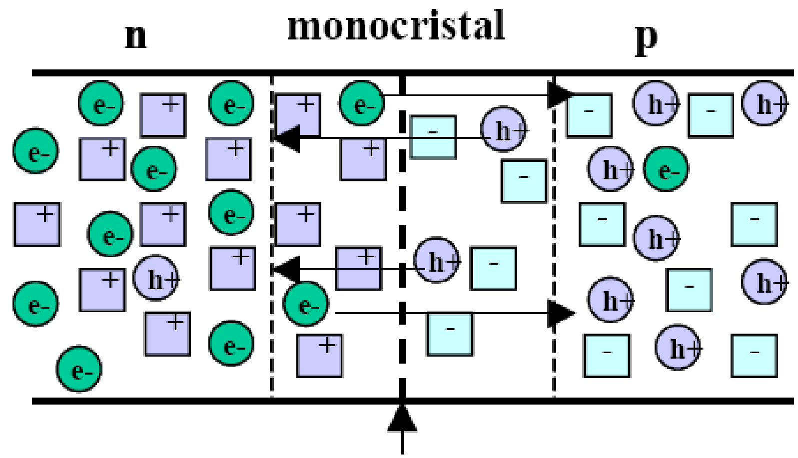
$$j_n = +qD_n \frac{dn}{dx} + qn\mu_n.E = 0$$

$$j_p = -qDp \frac{dp}{dx} + qp\mu_p.E = 0$$

- Tension de contact

$$\frac{dn}{n} = \frac{\mu_n}{D_n}(-\xi.dx) = \frac{\mu_n}{D_n}.dV$$

$$|V_D| = V_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$



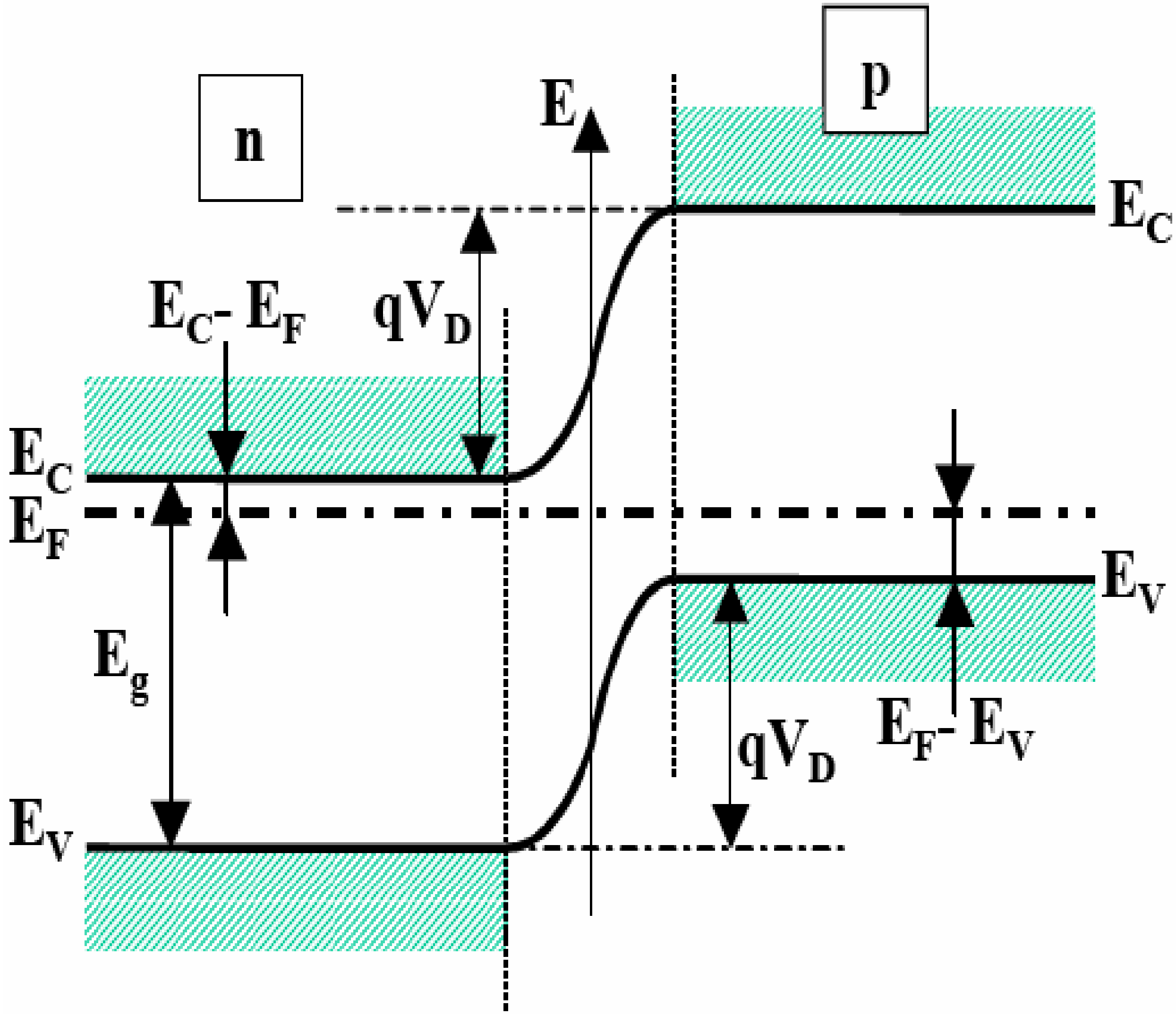
Zone de charge d'espace

Relation d'Einstein :

$$V_T = \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{k_b T}{q}$$

Diagramme d'énergie

- E_F plat
- Barrière de potentiel



Taille de la ZCE

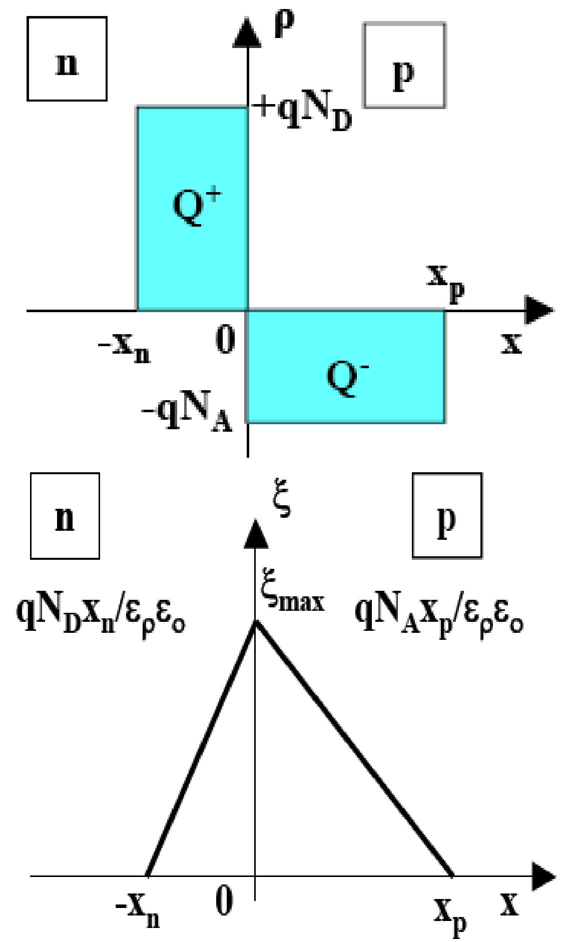
- Approximation de Schockley
- Équation de Poisson

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_r \varepsilon_o}$$

- Côté n $\xi(x) = +\frac{qN_D}{\varepsilon_r \varepsilon_o}(x + x_n)$
- Côté p $\xi(x) = -\frac{qN_A}{\varepsilon_r \varepsilon_o}(x - x_p)$
- ξ_{max} -> taille de la ZCE

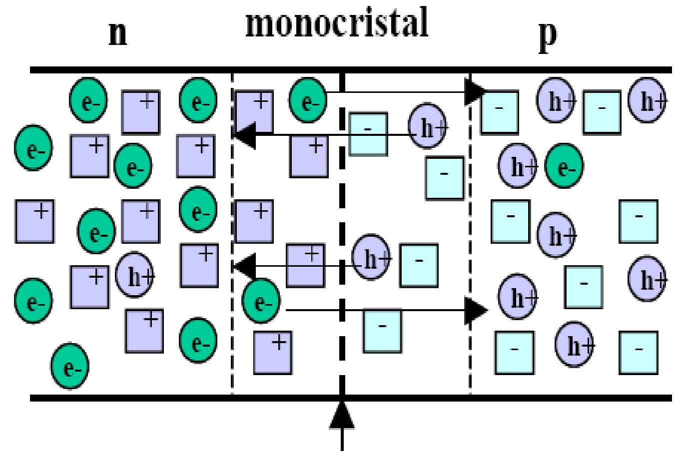
$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_r \varepsilon_o}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A . N_D} |V_D|}$$

- Niveau de dopage entre 10^{14} et 10^{20} cm^{-3} : W entre qques centaines d'Angström et qques microns



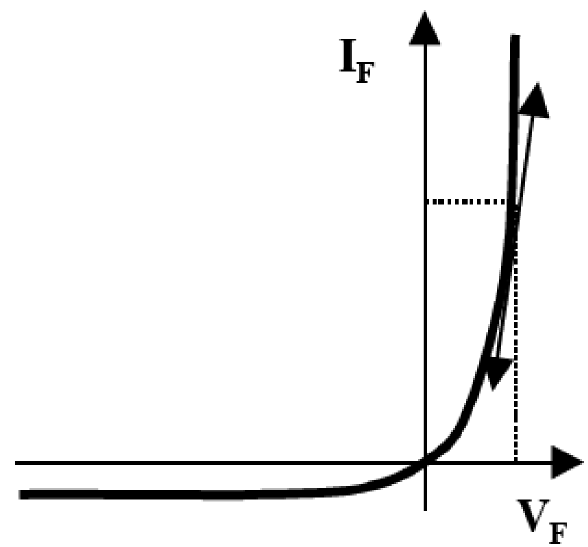
Jonction PN polarisée

- Idée du calcul :
  - Approximation de Boltzmann
  - Potentiel
  - Concentrations en électrons
  - Densités de courant



$$I = I_0\left(e^{eV/k_BT} - 1\right)$$

$$I_0 = qS\left(D_n\frac{n_i^2}{W_pN_A} + D_p\frac{n_i^2}{W_nN_D}\right)$$



Interaction avec un photon

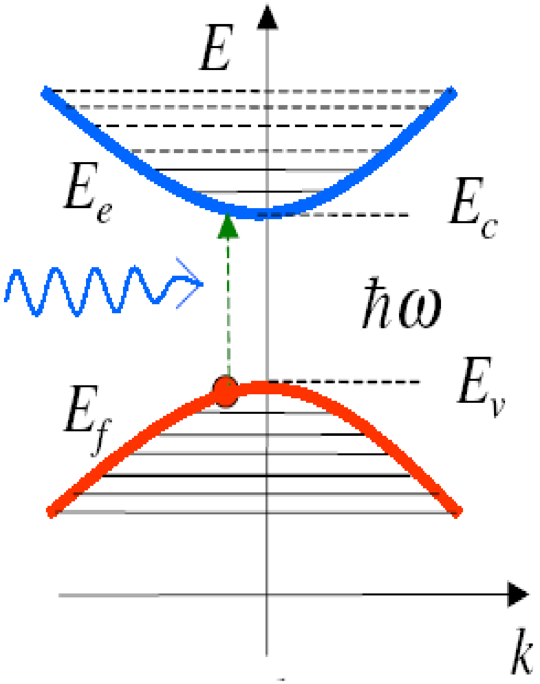
- Création d'une paire électron-trou si

$$\hbar\omega = \frac{hc}{\lambda} > E_g = E_c - E_v$$

- Sensibilité $R = \dfrac{e \times N_{e^- générés/s}}{\hbar\omega \times N_{photons/s}}$

$$R = \frac{e}{\hbar\omega}\frac{P_{lum} - P_{trans}}{P_{lum}} = \frac{e}{\hbar\omega}\left(1 - e^{-\alpha W}\right)$$

- Importance de α



Photodiode

- Accélération des porteurs
- Rendement quantique η' :

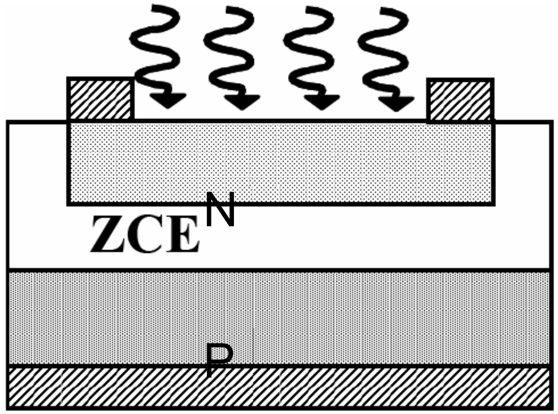
$$R = \eta' \frac{e}{\hbar\omega}\left(1 - e^{-\alpha W}\right)$$

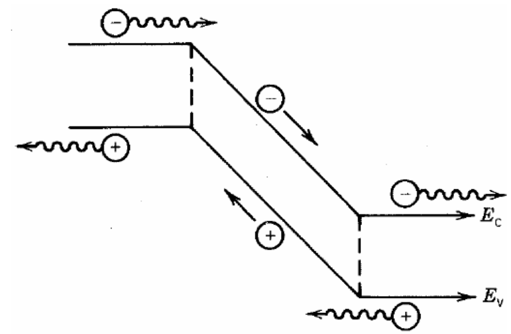
- Sensibilité maximale théorique

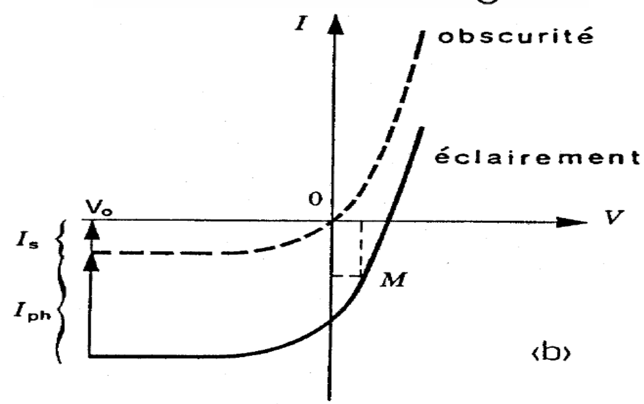
  2eV -> 0,5 A/W

- Relation I/V :

$$I = I_0 \left(e^{eV/k_B T} - 1\right) - I_p$$







En pratique

- Temps de réponse $\tau_{tr} = W / v_s$
- Dans la ZCE : $W \approx 1 \mu m$ $\quad \tau_{tr} \approx 10\, ps$

  $v_s \approx 10^7\, cm/s$
- $v_s = 10^5$ m/s en zone neutre : distorsions
  - Doit être petite
  - α ne doit pas trop grand
- Photodiodes p-i-n
- Choix du semiconducteur d'après la valeur du gap et de α.

Bibliographie

- Fox Mark. 2001. « Optical Properties of Solids ». Oxford : Oxford Press.

- Goudet G., et C. Meuleau. 1957. « Les semiconducteurs. Diodes, transistors et autres applications ». Paris : Eyrolles.

- Haelterman, Marc. 1998. « Physiques des semiconducteurs II. Applications spéciales ». Université libre de Bruxelles, Faculté des Sciences Appliquées. www.ulb.ac.be/prog/polytech/resumes/PHYS_233.html

- Bonnaud, Olivier. 2003. « Physique des Solides, des Semiconducteurs et Dispositifs ». Université de Rennes 1, Groupe Microélectronique/IETR. http://e-mecatronique.bretagne.ens-cachan.fr/file.php/35/DocPedagogiques/PhysiqueSC_Bonnaud2003.pdf