

Résumé électronique analogique

► Comportement de l'électron

$$W = W_c + W_p$$

cinétique potentiel

$$W_c = \frac{p^2}{2m_e} \quad W_p = -q\psi$$

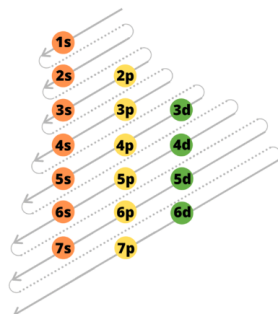
$$\psi = \frac{nq}{4\pi\epsilon_0 r}$$

charge: $q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
 $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
 ψ potentiel [V]
 n nombre particules

Pour des systèmes microscopique \rightarrow la physique quantique remplace la physique traditionnelle

► Nombre quantique et orbitale

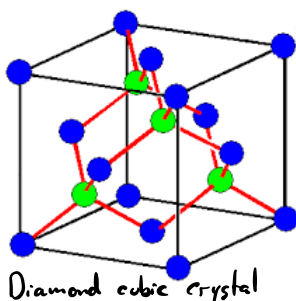
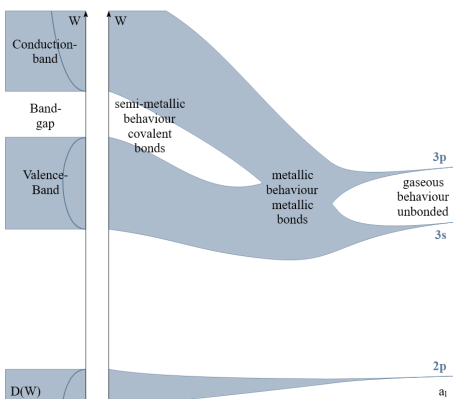
- Nbr quantique principal n
(couche) $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$
- Quantique secondaire (orbitale) $\ell = 0, 1, 2, 3$
 s, p, d, f
- Quantique magnétique m
 $m = -1, 0, +1$
- Quantique du spin s
 $s = +1/2$ ou $-1/2$



Aufbau principe

n	l	m	Orbitalbezeichnung	max. e ⁻ Zahl
1	0	0	1s	2
2	0	0	2s	2
	1	-1 0 1	2p _x 2p _y 2p _z	6
3	0	0	3s	2
	1	-1 0 1	3p _x 3p _y 3p _z	6
	2	-2 -1 0 1 2	3d _{xy} 3d _{yz} 3d _{xz} 3d ₂₂ 3d _{2-y2}	10
4	0	0	4s	2
	1	-1 0 1	4p _x 4p _y 4p _z	6
	2	-2 -1 0 1 2	4d _{xy} 4d _{yz} 4d _{xz} 4d ₂₂ 4d _{2-y2}	10
	3	-3 -2 -1 0 1 2 3	4f ₍₁₎ 4f ₍₂₎ 4f ₍₃₎ 4f ₍₄₎ 4f ₍₅₎ 4f ₍₆₎ 4f ₍₇₎	14

► Cristal



Diamond cubic crystal

Substance	W _{bg} /eV
Diamond (C)	5.5
Silicon (Si)	1.12
Germanium (Ge)	0.67
Silicon-carbide (SiC)	3.28
Indium-phosphide (InP)	1.27
Gallium-arsenide (GaAs)	1.42
Gallium-selenide (GaSe)	1.74

a : \rightarrow distance entre cristaux
 $D(W) \rightarrow$ densité d'état

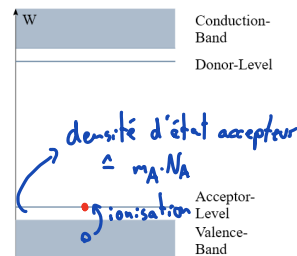
► Dopants

N_D : concentration donneur [m^{-3}]
 N_A : concentration accepteur [m^{-3}]
 m_A : nombre trou de l'atome dopant
 m_D : nombre e^- de l'atome dopant

Dopage n $\rightarrow m_D N_D > m_A N_A \Rightarrow + \text{ de } e^-$
Dopage p $\rightarrow m_D N_D < m_A N_A \Rightarrow + \text{ de trou}$

► Charges dans semi-conducteur

Un accepteur / donneur ionisé est une charge fixe
Un e^- ou trou est une charge mobile



Band-Structure of doped Semiconductor

Densité $e^- \rightarrow n [\text{m}^{-3}]$
Densité trou $\rightarrow p [\text{m}^{-3}]$

Densité charge fixe positive $m_D^+ N_D^+$
négative $m_A^- N_A^-$

► Semi-conducteur intrinsèque (non dopé)

$$n_{p0} = N_c N_v \exp\left(-\frac{\Delta W_{bg}}{k_B T}\right)$$

\hookrightarrow densité e^- effective \hookrightarrow Boltzmann $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

Concentration intrinsèque: $n_0 = p_0 = n_i$

Loi d'action de masse $\rightarrow n_0 p_0 = n_i^2$

Semi cond.	n_i / cm^{-3}
Si	$1 \cdot 10^{10}$
Ge	$2,3 \cdot 10^{13}$
SiC	$1,6 \cdot 10^{-6}$
InP	$1,3 \cdot 10^3$
GaAs	$2,1 \cdot 10^6$

► Semi-conducteur dopé nbr e^- de valence excédentaire

Dopé N \Rightarrow densité état donneur $N_D \cdot m_D [\text{m}^{-3}]$
ex: P, As $\rightarrow m_D = 7$

Dopé P \Rightarrow densité état accepteur $N_A \cdot m_A [\text{m}^{-3}]$
ex: Al, Ga $\rightarrow m_A = 1$

Le dopage n'affecte pas les densités d'états
ni le gap des bandes de cond. et valence
 \rightarrow ça modifie les niveaux accepteurs / donneurs
 \rightarrow densité d'équilibre $n_0 p_0$ reste constant $= n_i^2$

Nombre de charge mobiles
d'un semi-cond. fortement dopé

N $n_0 \approx m_D N_D - m_A N_A$
 $p_0 \approx n_i^2 / n_0$
P $p_0 \approx m_A N_A - m_D N_D$
 $n_0 \approx n_i^2 / p_0$

► Génération et recombinaison

=> Processus aléatoire et dynamique

Génération → création e^- et trou mobile

G: Taux de génération $[m^{-3}.s^{-1}]$
R: Taux de recombinaison

Génération → thermique G_0
lumineuse G_L

Recombinaison → radiative
non-radiative (via un trap dans bande interdite)

► Evolution génération et recombinaison

n_0, p_0 → densité porteurs à l'équilibre
 $n = n_0 + \Delta n$ $p = p_0 + \Delta p$

① A l'équilibre: $G_0 = R_0$

augmentation porteurs charge

$R_0 = B_r \cdot n_0 \cdot p_0 = B_r n^2$
facteur de proportionnalité $[m^3/s]$

② Déséquilibre: $\frac{\partial \Delta n}{\partial t} = \frac{\partial \Delta p}{\partial t} = G_L - B_r(n_0 \Delta p + p_0 \Delta n)$

Simplification => pour un dopage légèrement déséquilibré
 $\frac{\partial \Delta p}{\partial t} \approx -B_r n_0 \Delta p$ n doping
 $\frac{\partial \Delta n}{\partial t} \approx -B_r p_0 \Delta n$ p doping

③ Retour à l'équilibre

$\Delta p(t) \approx \Delta t_0 e^{-B_r n_0(t-t_0)}$ n doping

$\Delta n(t) \approx \Delta t_0 e^{-B_r p_0(t-t_0)}$ p doping

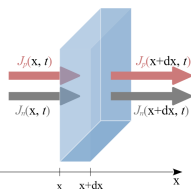
Durée de vie du porteur (τ), constante temps

$\tau_n = \frac{1}{B_r p_0}$ $\tau_p = \frac{1}{B_r n_0}$ $\tau = t - t_0$

► Equations de continuité

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} + G - R$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x} + G - R$$



augmentation porteur

densité courant entrant

génération porteurs

► Potentiel électrique et champ électrique

Energie potentielle d'une charge qui subit une diff. de potentiel:

$$\Delta W_p = Q \cdot \Delta \varphi [J] [C] \cdot [V]$$

Force Coulomb:

$$F_Q = Q \cdot E [N]$$

Champ électrique: (dérive du potentiel)

$$E = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} [\frac{V}{m}]$$

Flux électrique (Gauss)

$$\Phi_e = \frac{Q}{\epsilon} [V \cdot m]$$

Lignes de champ qui intercepte une surface

Champ électrique et densité de charge
[1C = 1A.s]

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 [F/m]$$

↳ permittivité

Densité de charge globale

$$\rho = q \{ p - n + m_D^+ N_D^+ - m_A^- N_A^- \} [C/m^3]$$

Densité charge et potentiel électrique

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = -\frac{\rho}{\epsilon}$$

Equation de Poisson

► Diffusion

Mouvement de particule causé par une différence de concentration

Loi de Fick →

$$J_{d,n} = q \cdot D_n \frac{\partial n}{\partial x}$$

$$J_{d,p} = -q \cdot D_p \frac{\partial p}{\partial x}$$

D_n, D_p coeff. de diffusion $[\frac{m^2}{s}]$

► Conduction (drift)

Mouvement particule causé par champ électrique

$$J_{c,n} = q \cdot \mu_n \cdot n \cdot E \quad J_{c,p} = q \cdot \mu_p \cdot p \cdot E$$

μ_n, μ_p mobilité des e^- et trou $[\frac{m^2}{V \cdot s}]$

Lien entre conduction et diffusion

Tension thermique: $U_T = \frac{k_B T}{q}$

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = U_T$$

$U_T(T_{amb}) = 25 mV$

$[\frac{m^2}{V \cdot s}]$

► Semi-conducteur dopé en déséquilibre

Il y a diffusion de l'excès Δn créé par illumination du semi-c.

→ courant de diffusion

$$p = p_0 \quad n = n_0 + \Delta n$$

$$J_n = q \cdot D_n \frac{\partial \Delta n}{\partial x}$$

$$\frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} = B_r p_0 \Delta n$$

$$D_n \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2} = B_r p_0 \Delta n = \frac{\Delta n}{\tau_n}$$

$$\Delta n(x=0) = \Delta n_{inj} \quad \Delta n(x \rightarrow \infty) = 0$$

Diminution exponentielle de la densité de courant

$$\Delta n(x) = \Delta n_{inj} e^{-x/L_n}$$

$$J_n(x) = -q D_n \Delta n_{inj} \frac{1}{L_n} e^{-x/L_n}$$

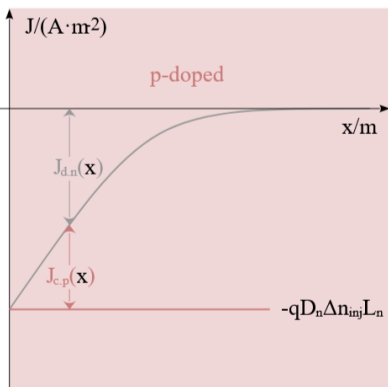
$$L = \sqrt{D_n \tau_n}$$

Courant global dans semi-conducteur

→ Le semi-conducteur complet reste neutre

$$J = -q D_n \Delta n_{inj} \frac{1}{L_n} \quad p\text{-doping}$$

$$J = q D_p \Delta p_{inj} \frac{1}{L_p} \quad n\text{-doping}$$



$J_{d,n}$ est un courant d'électron ! et $J_{c,p}$ un courant de trou

⇒ Les deux sont additionner et donne le courant conventionnel entrant et ressortant

► Lois générales du semi-conducteur

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} + G_L - B_r(np - n_i^2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x} + G_L - B_r(np - n_i^2)$$

$$J_n = -q \mu_n n \frac{\partial \varphi}{\partial x} + q D_n \frac{\partial n}{\partial x}$$

$$J_p = -q \mu_p p \frac{\partial \varphi}{\partial x} - q D_p \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$-\varepsilon \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = q\{p - n + m_D N_D - m_A N_A\}$$

Conditions de bordure (contact) du semi-c.

Equilibre locale en bordure

Densité courant J_n, J_p continu sur chaque côté du contact

Potentiel chimique $\mu = -q \cdot V$

► Semi-conducteur en équilibre thermodynamique

- Pas de transfert d'énergie

- les dérivées sont nulles

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad J_n = J_p = 0$$

$$G_L = 0 \quad \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0$$

$$n_0 p_0 = n_i^2$$

$$q D_n \frac{\partial n_0}{\partial x} = q \mu_n n_0 \frac{\partial \varphi_0}{\partial x}$$

$$q D_p \frac{\partial p_0}{\partial x} = -q \mu_p p_0 \frac{\partial \varphi_0}{\partial x}$$

permittivité semi-c.

$$-\varepsilon \frac{\partial^2 \varphi_0}{\partial x^2} = q\{p_0 - n_0 + m_D N_D - m_A N_A\}$$

► Semi-cond. dopé homogène en équilibre

$$n_0 p_0 = n_i^2$$

Pas de courant

Pas de champ électrique

$$\frac{\partial \varphi_0}{\partial x} = 0 \Rightarrow E_0 = 0$$

$$p_0 + m_D N_D = n_0 + m_A N_A$$

$$m_D N_D - m_A N_A \gg n_i \Rightarrow n_0 \approx m_D N_D - m_A N_A$$

$$p_0 \approx n_i^2 / (m_D N_D - m_A N_A) \quad \text{strong n-doping}$$

$$m_A N_A - m_D N_D \gg n_i \Rightarrow p_0 \approx m_A N_A - m_D N_D$$

$$n_0 \approx n_i^2 / (m_A N_A - m_D N_D) \quad \text{strong p-doping}$$

► Semi-cond. dopé inhomogène en équilibre

Pas de courant net, les courants de diffusion et conduction s'annulent

$$\frac{\partial n_0}{\partial x} = \frac{q}{U_T} n_0 \frac{\partial \varphi_0}{\partial x} \Rightarrow n_0 = n_i e^{+\varphi_0 / U_T}$$

$$\frac{\partial p_0}{\partial x} = -\frac{q}{U_T} p_0 \frac{\partial \varphi_0}{\partial x} \Rightarrow p_0 = n_i e^{-\varphi_0 / U_T}$$

$$-\varepsilon \frac{\partial^2 \varphi_0}{\partial x^2} = q\{n_i e^{-\varphi_0 / U_T} - n_i e^{+\varphi_0 / U_T} + m_D N_D - m_A N_A\}$$

$$U_T = \frac{k_B T}{q} \quad \text{potentiel chimique}$$

Potentiel de référence = $-\mu_0 / q$

► Semi-cond homogène déséquilibre thermodyn.

Pas de courant de diffusion.

$$\frac{\partial n}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial J_n}{\partial x} = \frac{\partial J_p}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = 0 \Rightarrow \frac{\partial E}{\partial x} = 0$$

$$J_{d,n} = J_{d,p} = 0$$

$$np = n_i^2 \quad p + m_D N_D = n + m_A N_A$$

$$J_n = q\mu_n nE$$

$$J_p = q\mu_p pE$$

$$I = \underbrace{\frac{Aq(\mu_n n + \mu_p p)}{L}}_{1/R} U$$

courant d'une barre de section A et longueur L de semi-c. dopé homogène

Symbol	Description	Unit
$n(x, t)$	Concentration of mobile electrons (variable)	m^{-3}
$p(x, t)$	Concentration of mobile holes (variable)	m^{-3}
$J_n(x, t)$	Electrons' current-density (variable)	A/m^2
$J_p(x, t)$	Holes' current-density (variable)	A/m^2
$\varphi(x, t)$	Electrostatic potential (variable)	V
$G_L(x, t)$	Rate of light-stimulated generation (source)	$m^{-3}s^{-1}$

Constantes

Planck réduite : $1,054 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

ϵ_0 : $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ m}^{-3} \text{ kg}^{-7} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$

Symbol	Description	Unit
$N_D(x)$	Donors' doping-concentration	m^{-3}
m_D	Donor-valency with respect to substrate (4)	-
$N_A(x)$	Acceptors' doping-concentration	m^{-3}
m_A	Acceptor-valency with respect to substrate (4)	-
n_i	Intrinsic carrier-concentration	m^{-3}
μ_n	Electrons' mobility	$m^2/(V\cdot s)$
μ_p	Holes' mobility	$m^2/(V\cdot s)$
D_n	Electrons' diffusion-coefficient	m^2/s
D_p	Holes' diffusion-coefficient	m^2/s
B_r	Semiconductor's recombination-coefficient	m^3/s
ϵ	Semiconductor's permittivity	$A\cdot s/(V\cdot m)$

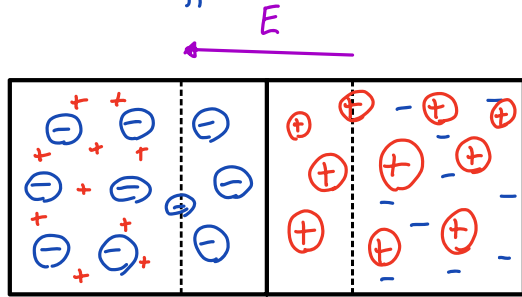
► Jonction P-N | Zone à charge d'espace

Le semi-c. reste globalement neutre

A la jonction PN → il y a diffusion des trous et électrons

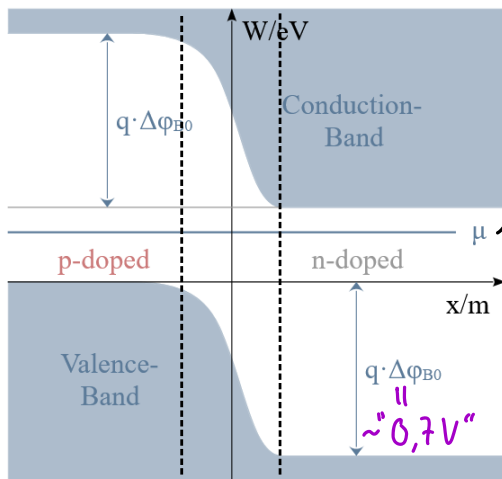
Il y a une barrière de potentiel créée par les donneurs / accepteurs ionisés

Il y a un courant de conduction qui s'oppose au courant de diffusion



P ← → N
depletion region = zone à charge d'esp.

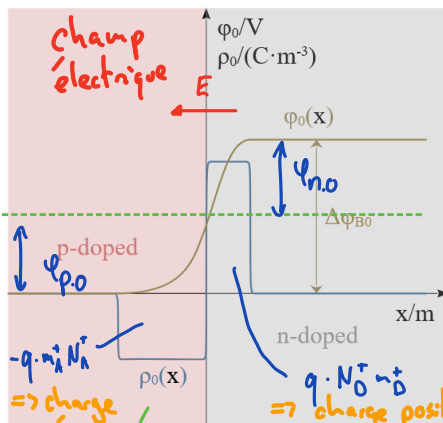
Band-diagram of PN junction



Potentiel chimique à T=0K

L'équation de Fermi décrit à quel point les états d'énergie sont occupés par des électrons

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{(E - \mu)}{k_B T}}}$$



$$n_0 = n_i \exp(+\psi_{n0}/U_T)$$

$$p_0 = n_i \exp(-\psi_{p0}/U_T)$$

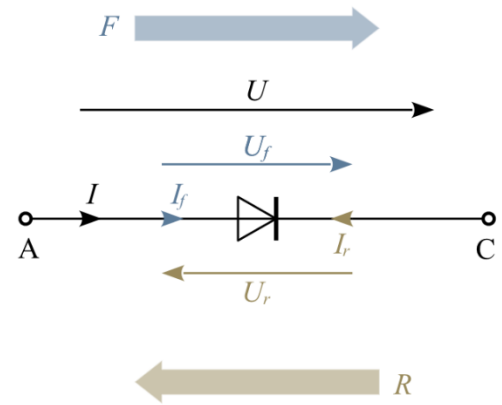
$$\Rightarrow \Delta\psi_{B0} = |\psi_{n0}| + |\psi_{p0}|$$

$$P = q \{ n_D^+ N_D^+ - n_A^- N_A^- \}$$

$$n_D^+ N_D^+ \approx n_{N0}$$

Tous les états sont ionisés à T_amb

► Diodes



► Jonction PN avec tension

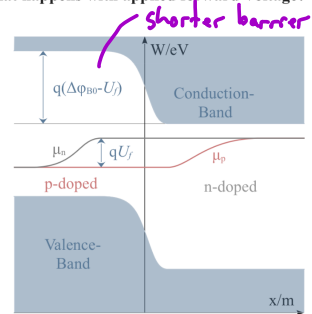
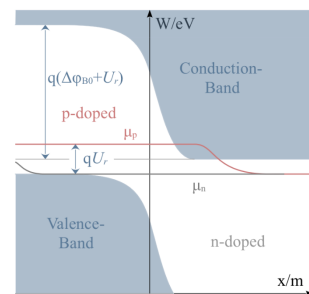
Léger déséquilibre:

$$n(x) = n_i e^{\frac{\mu_n(x) - \mu_i}{k_B T}} \quad p(x) = n_i e^{\frac{\mu_i - \mu_p(x)}{k_B T}}$$

Dopé P → minoritaire $\hat{=}$ e^-
Dopé N → minoritaire $\hat{=}$ h^+ (hole)

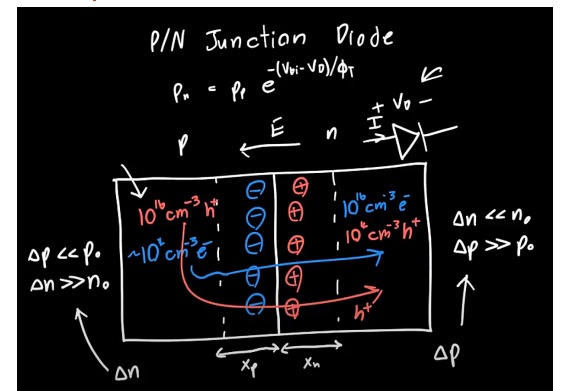
What happens with applied reverse Voltage?

What happens with applied forward Voltage?



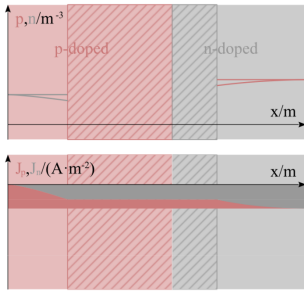
Le potentiel de barrière de la jonction est plus grand. (+U_r)

Le potentiel est réduit de U_f.



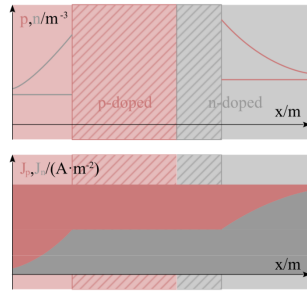
On considère le changement $\Delta p, \Delta n$ des minoritaires de chaque côté

What happens to Carriers and Currents with applied reverse Voltage?



Il y a un courant très faible de minoritaires
 => reverse saturation current
 Le courant est constant dans la zone à charge car il y a peu de recombinaison. (valable dans tous les cas)

What happens to Carriers and Currents with applied forward Voltage?



Il y a un fort courant de majoritaires qui sautent par dessus la zone à charge et se recombinent de l'autre côté.

Forward voltage and current

Densité porteurs en excès, bordure zone à charge

$$n_{p,0} = n_i e^{\frac{\mu - \mu_i}{k_B T}}$$

$$n_p(-x_p) = n_i e^{\frac{\mu + qU - \mu_i}{k_B T}}$$

$$\Delta n_p(-x_p) = n_p(-x_p) - n_{p,0}$$

$$= n_{p,0} (e^{U/U_T} - 1)$$

$$p_{N,0} = n_i e^{\frac{\mu_i - \mu}{k_B T}}$$

$$p_N(x_N) = n_i e^{\frac{\mu_i + (\mu - qU)}{k_B T}}$$

$$\Delta p_N(x_N) = p_N(x_N) - p_{N,0}$$

$$= p_{N,0} (e^{U/U_T} - 1)$$

Current-density of diffusion:

$$J_{n,d}(-x_p) = \frac{qD_n}{L_{n,p}} \Delta n_p(-x_p)$$

$$= \frac{qD_n}{L_{n,p}} n_{p,0} (e^{U/U_T} - 1)$$

$$J_{p,d}(x_N) = \frac{qD_p}{L_{p,n}} \Delta p_N(x_N)$$

$$= \frac{qD_p}{L_{p,n}} p_{N,0} (e^{U/U_T} - 1)$$

↳ longueur de diffusion des h⁺ côté N.

What about the overall Diode's Current?

The overall current-density J through the junction equals the sum of contributions of the two bipolar transports caused by minority-carrier-injection at the two space-charge-zone-boundaries as function of applied direct voltage U :

$$J = J_{n,d}(-x_p) + J_{p,d}(x_N)$$

$$= q \left(\frac{D_n n_{p,0}}{L_{n,p}} + \frac{D_p p_{N,0}}{L_{p,n}} \right) (e^{U/U_T} - 1)$$

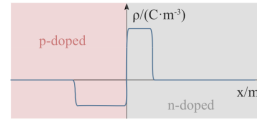
The overall bipolar diode-current I_J as function of direct voltage U applied:

$$I_J(U) = I_{SJ} \cdot \left(e^{\frac{U}{m_j k_B T}} - 1 \right)$$

Parameters of this equations are the **reverse saturation-current** (de: Sättigungssperrestrom, fr: courant inverse de saturation) I_{SJ} , the emission-coefficient (de: Emissionskoeffizient, fr: coefficient d'émission) m_j

Junction capacitance

C_S : space charge capacitance
 C_D : diffusion capacitance



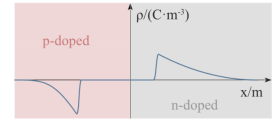
Charge-Density of Space-Charge-Zone

The space-charge-capacitance C_S and the current I_{CS} through it depend as follows on direct voltage U :

$$C_S(U) = \frac{C_{S0}}{(1 - U/\Delta\phi_{B0})^{m_C}}$$

$$I_{CS}(U) = C_S(U) \cdot \dot{U}$$

Parameters are the equilibrium-space-charge-capacitance C_{S0} , the equilibrium-potential-barrier $\Delta\phi_{B0}$ and the dimensionless parameter m_C with $0.3 < m_C < 0.5$



Charge-Density of Diffusion-Zones

The diffusion-capacitance C_D and the current I_{CD} through it depend as follows on direct voltage U :

$$C_D(U) = \tau_T \cdot \frac{I_J(U)}{m_j U_T} = \frac{\tau_T I_S}{m_j U_T} \left(e^{\frac{U}{m_j U_T}} - 1 \right)$$

$$I_{CD}(U) = C_D(U) \cdot \dot{U}$$

The parameter τ_T is called transit-time.

How is the Diode's Interaction with Light modeled?

What happens if a Diode is illuminated?

Illumination stimulates **carrier-generation** in the **space-charge-zone**.

Electron-hole-pairs generated in the space-charge-zone are **accelerated** by its **electric field**, transported to the space-charge-zone's boundaries, **injected** into the neutral zones and produce a **reverse photo-current**.

The light-stimulated **generation-rate** is **proportional to light intensity** and depends on **wavelength**, the same is same true for photo-current I_{ph} .

$$-I_{phA} = \alpha_{phA} E_e$$

E_e is the **irradiance** (de: Bestrahlungsstärke, fr: éclairement énergétique) in W/m^2 whereas α_{phA} is a

photocurrent-coefficient in $A \cdot m^2/W$.

How does a Diode emit Light?

Radiant recombination of carriers occurs in the neutral zones on both sides of the space-charge-zone of a junction-diode made of direct-bandgap-semiconductor, mostly **III-V-compounds** such as GaAs or **II-VI-compounds** such as ZnS.

The optical frequency ν of the photons emitted is determined by the bandgap-energy of the semiconductor used according to Planck's law $\Delta W_{BG} = h \cdot \nu$.

The **rate** of radiant recombination is **proportional to forward diode-current**, the same true for emitted light-intensity (de: Strahlstärke, fr: Intensité énergétique) I_e in W/sr .

$$I_e = \alpha_{phE} I_J$$

I_J is the junction's forward-current, α_{phE} is a **light-emission-coefficient** in $W/(A \cdot sr)$.

What is **Avalanche-Breakdown** and how is it modeled?

With **strong reverse voltage** applied to the junction, **covalent bonds** may **break** and free **valence-electrons** which are **strongly accelerated** by the **electric field** of the space-charge-zone and may, in turn, **break further covalent bonds** freeing more electrons and creating an **avalanche effect** (de: Lawinendurchbruch, fr: effet avalanche).

The avalanche-effect creates a **reverse current** increasing **exponentially** with reverse voltage.

$$I_{BA}(U) = -I_{SA} \left(e^{\frac{U_A - U}{m_A U_T}} - 1 \right)$$

How does the Diode depend on Temperature?

The diode's reverse saturation-current I_{SJ} and the thermal voltage U_T depend on the temperature according to the following law:

$$U_T = \frac{k_B T}{q}$$

$$I_{SJ}(T) = I_{SJ}(T_0) \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{x/m_j} \cdot e^{\left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) \frac{\Delta W_{BG}}{m_j k_B T}}$$

What is **Zener-Breakdown** and how is it modeled?

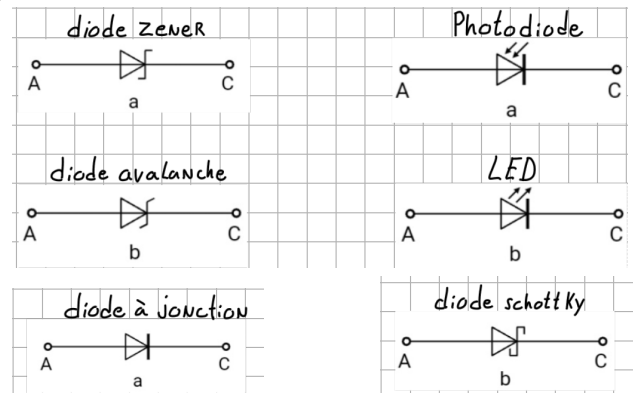
With **strong reverse voltage** applied to the junction, majority-holes of the p-doped zone and majority-electrons of the n-doped zone may traverse the space-charge-zone by the quantum-physical **tunnel-effect** (de: Tunneleffekt, fr: effet tunnel) creating a so-called **Zener-breakdown** (de: Zenerdurchbruch, fr: claquage par effet Zener) characterised by a reverse current increasing exponentially with reverse voltage.

$$I_{BZ}(U) = -I_{SZ} \left(e^{\frac{U_Z - U}{m_Z U_T}} - 1 \right)$$

How big is a Diode's Noise?

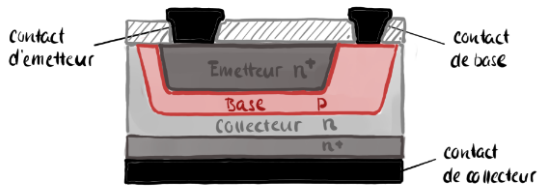
The Brownian thermal movement of electrons and holes traversing the pn-junction causes a **noise-current** i_n to be added to the junction-current. The normalized spectral power-density $\Phi(i_n)$ in A^2/Hz of the diode's noise-current is proportional to the diode's quiescent junction-current I_J . The **shot-noise** mechanism causing the noise is called **shot-noise** (de: Schrotrauschen, fr: bruit de grenaille)

Symboles

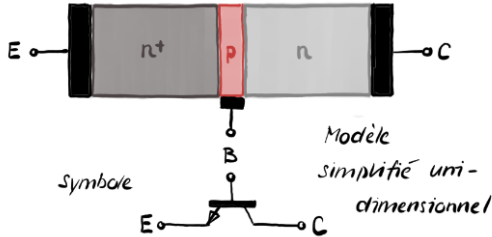


► Transistor bipolaire

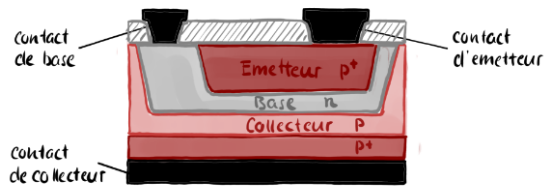
Transistor bipolaire npn



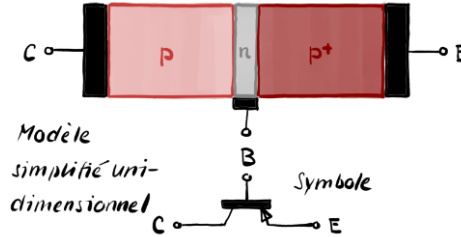
Vue de coupe d'un transistor bipolaire npn
épitaxial planaire



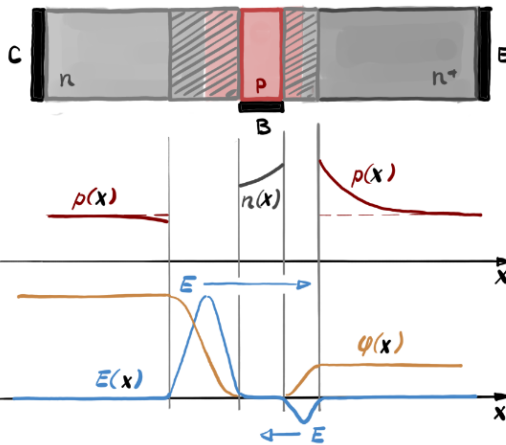
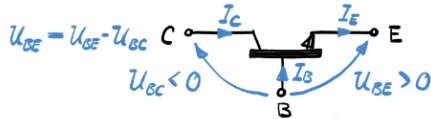
Transistor bipolaire pnp



Vue de coupe d'un transistor bipolaire pnp
épitaxial planaire

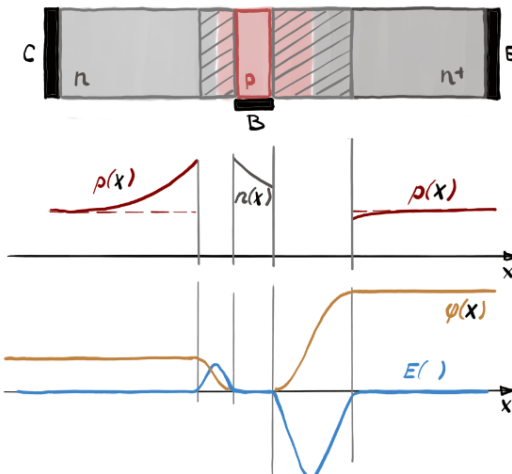
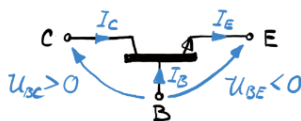


Transistors bipolaires II : Mode de conduction directe



- La jonction base-émetteur est passante, la jonction base-collecteur est bloquée.
- La base étant étroite, la majorité des électrons (porteurs minoritaires) ne recombinaient pas dans la base et apparaissent ainsi au bord de la jonction base-collecteur.
- Electrons excédentaires au bord de la jonction base-collecteur sont transportés à travers la jonction au collecteur par le champ électrique fort de la jonction bloquée.
- Une petite fraction des électrons injectés recombinaient dans la base. Le courant des trous qui remplacent les trous recombinaient dans la base constitue le courant de base.
- La tension de jonction base-émetteur contrôle le courant du collecteur vers l'émetteur.
- Le courant base-émetteur amplifié par le gain direct en

Transistors bipolaires III : Mode de conduction inverse



- La jonction base-collecteur est passante et la jonction base-émetteur est bloquée.
- En mode de conduction inverse la fraction d'électrons injectés dans la base qui est recombinaison est plus grande qu'en mode de conduction directe.
- Electrons en excès au bord de la jonction base-émetteur sont transportés à travers la jonction à l'émetteur par le champ électrique fort de la jonction base-émetteur bloquée.
- Le courant de base en mode de conduction inverse est relativement plus grand qu'en conduction directe à cause de la recombinaison plus importante.
- La tension de jonction base-collecteur contrôle le courant de l'émetteur vers le collecteur ($I_C, I_E < 0$)
- Le gain en courant inverse est plus bas en mode 3/6 inverse qu'en mode direct.