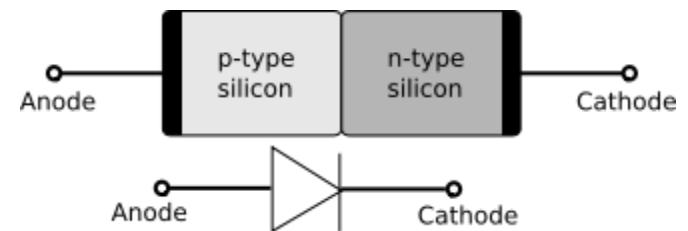
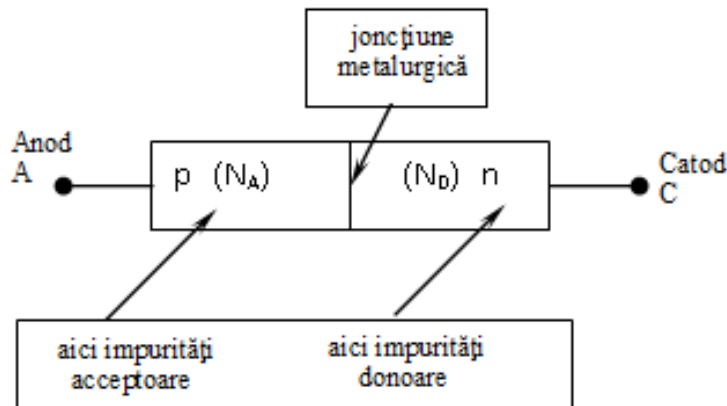


Chapitre III. La Jonction pn. Diode semiconductrice.

- 3.1. Notations, définitions
- 3.2. Jonction pn non polarisée et polarisée
- 3.3. Caractéristiques statiques de la jonction pn
- 3.4. Régime de claquage de la jonction pn
- 3.5. Régime dynamique de la jonction pn
- 3.6. Diode semiconductrice

3.1. Notations, définitions

Définition: jonction pn = structure semic. physique. par 2 reg. sc. n et p, séparé par la jonction métallurgique.



3.1. Notations, définitions

- **Les flèches** sur les symboles électroniques sont de zone p à zone n (**p→n**).
- Jonctions Symétrique
- Jonctions Disymétrique ou Asymétrique
- Approximation de profil abrupt
- Jonctions linéairement calibrés

3.2. Jpn non-polarisée et polarisée

3.2.1. Jonction non-polarisée

3.2.1.1. Phénomènes physiques

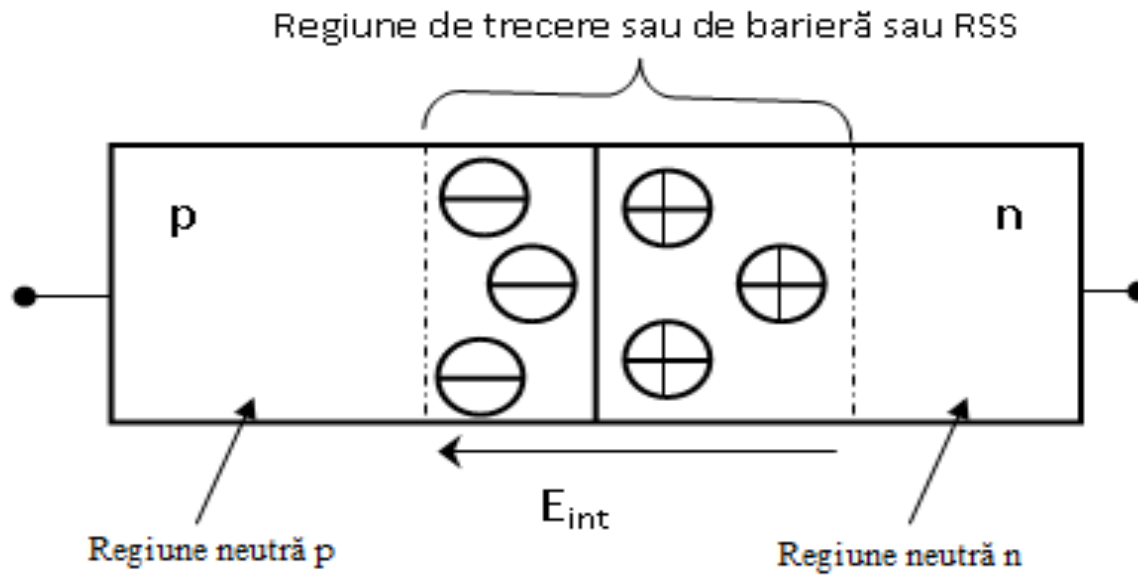
Si JPN pas polarisé électriquement et donc il est entendu que pas d'autres stimuli comme champ magnétique, lumière, etc, n'existe pas → **jpn** est a **équilibre thermique**.

En jpn non polarisée **existe** champ électrique interne, $\mathcal{E}_{\text{int}} \neq 0$, afin, différence interne de potentiel, $\phi_{B0} \neq 0$; toutefois $I_A = 0$!

Cela ne pouvait pas être atteint dans un conducteur.

3.2.1.1. Phénomènes physiques

- Def. Zone de charge d'espace ZCE. (region vidée de porteurs) sau RSS (Rom)

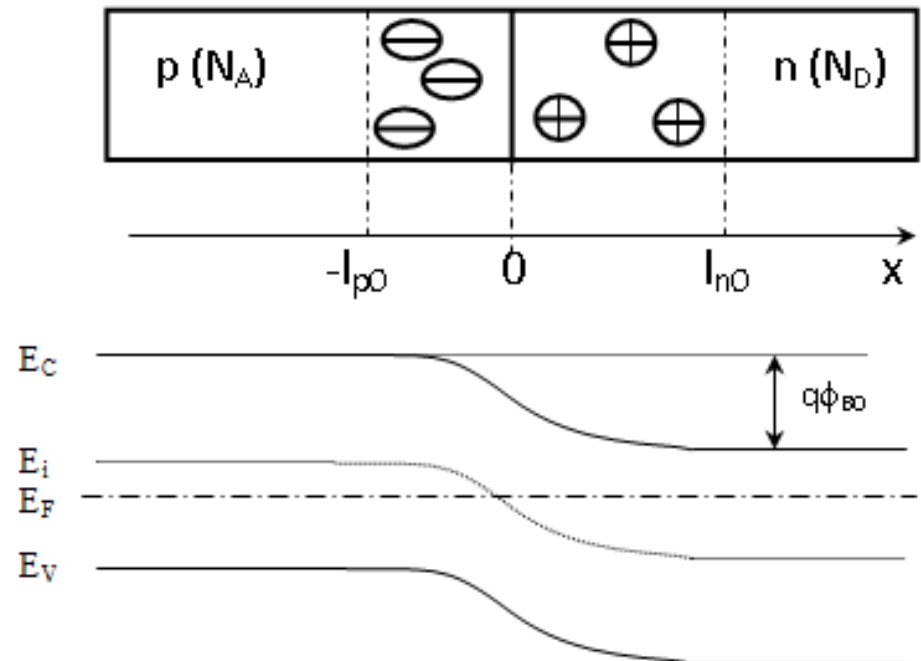


3.2.1.1. Phénomènes physiques

- Explications qualitatives et quantitatives de l'apparition ϕ_{B0} .
- Schéma Énergetique pour JPN non polarisée

$$q\phi_{B0} = E_i(-l_{p0}) - E_i(l_{n0})$$

- (*)



3.2.1.1. Phénomènes physiques

- Relation Energy - Potentiel : $E = -qV$.

$$p(-l_{p0}) = N_A = n_i \cdot \exp \frac{E_i(-l_{p0}) - E_F}{kT}$$

$$n(l_{n0}) = N_D = n_i \cdot \exp \frac{E_F - E_i(l_{n0})}{kT}$$

- Remplaçant p et n dans la page précédente:

$$\phi_{B0} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

3.2.1.2. La distribution de charge, champ et potentiel

Distribution de charge:

$$\rho_v(x) = \begin{cases} -qN_A, & \text{daca } x \in (-l_{p0}, 0) \\ +qN_D, & \text{daca } x \in (0, l_{n0}) \\ 0, & \text{in rest} \end{cases}$$

De l'équation du Poisson :

$$\mathcal{E}(x) = \int \frac{\rho_V(x)}{\varepsilon} dx$$

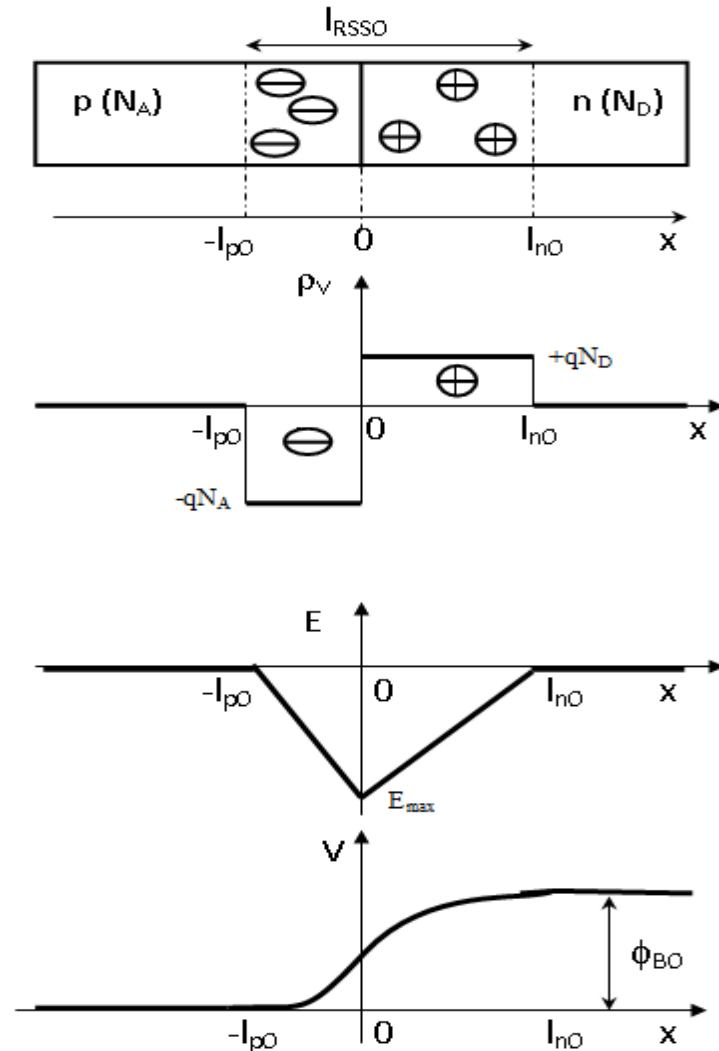
$$\mathcal{E}(x) = \begin{cases} -\frac{qN_A}{\varepsilon}(x+l_{p0}), & \text{daca } x \in (-l_{p0}, 0) \\ +\frac{qN_D}{\varepsilon}(x-l_{n0}), & \text{daca } x \in (0, l_{n0}) \\ 0, & \text{in rest} \end{cases}$$

3.2.1.2. La distribution de charge, champ et potentiel

Déduisez les constantes d'intégration des conditions aux limites suivantes :

$$\mathcal{E}(-l_{p0}) = \mathcal{E}(l_{n0}) = 0$$

$$V(-l_{p0}) = 0, V(l_{n0}) = \phi_{B0}$$



3.2.1.2. La distribution de charge, champ et potentiel

- Par l'intégration du champ électrique :

$$V(x) = \begin{cases} 0, & \text{pour } x \leq -l_{p0} \\ \frac{qN_A}{2\varepsilon} (x + l_{p0})^2, & \text{pour } x \in (-l_{p0}, 0) \\ \phi_{B0} - \frac{qN_D}{2\varepsilon} (x - l_{n0})^2, & \text{pour } x \in (0, l_{n0}) \\ \phi_{B0}, & \text{pour } x \geq l_{n0} \end{cases}$$

3.2.1.2. La distribution de charge, champ et potentiel

- De la condition de continuité
 - champ électrique en $x=0$:
 - potentiel en $x=0$:
- $$\left[\begin{array}{l} N_A l_{p0} = N_D l_{n0} \\ \frac{qN_A}{2\varepsilon} l_{p0}^2 = \phi_{B0} - \frac{qN_D}{2\varepsilon} l_{n0}^2 \end{array} \right] (*)$$

- On résout le système (*) avec inconnues l_{n0} , l_{p0} . En additionnant $\rightarrow l_{RSS0}$:

$$l_{RSS0} = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \cdot \phi_{B0}}$$

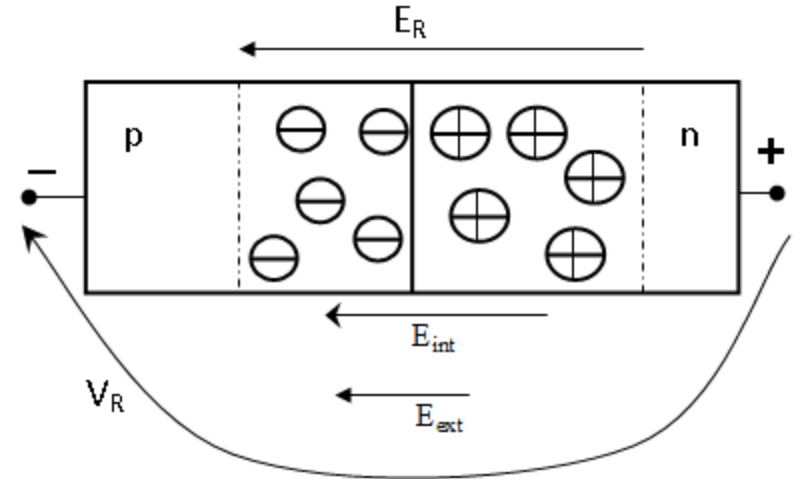
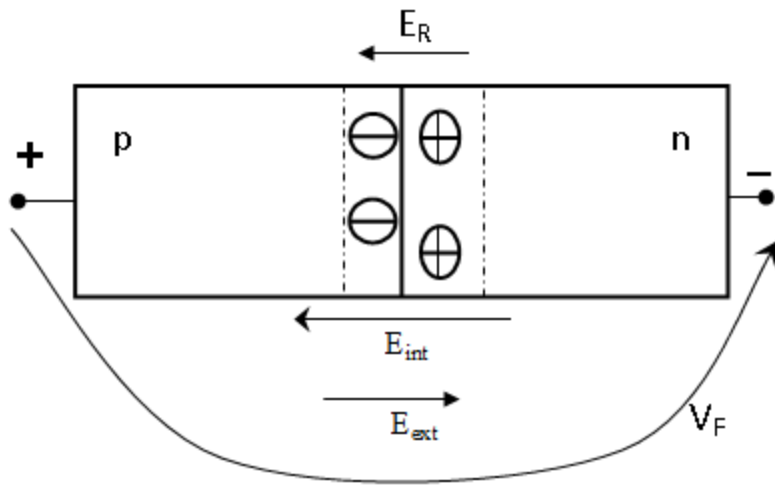
- Case – jonction pn disymétrique $\rightarrow l_{RSS0} \cong \sqrt{\frac{2\varepsilon}{qN_D} \cdot \phi_{B0}}$

3.2.2. Jonction pn polarisée

3.2.2.1. Phénomènes physiques

- Polarisation Directe (Forward)
- Polarisation Inverse (Reverse)

\rightarrow
 E_{ext}



- PD: *injection de porteurs – recombinaison = prédominante*

3.2.2.3. Approximation de faibles (petites) niveaux d'injection

- Approximation permettre recombinaison avec des temps de vie de porteurs en excès.

$$\begin{cases} n(-l_p) \ll p_{p0} \cong N_A \\ p(+l_n) \ll n_{n0} \cong N_D \end{cases}$$

3.2.2.3. Approximation de quasi-équilibre

- L'équilibre thermique était: $p_0 n_0 = n_i^2$.
- Maintenant, pour la tension V_A , on a:

$$p \cdot n = n_i^2 \cdot \exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right)$$

- Explication: Les excès de porteurs minoritaires dans les régions neutres produisent E_{Fermi} fractionnement en E_{fn} et E_{fp} avec une quantité proportionnel à cause qui a produit la division

$$E_{Fn} - E_{Fp} = qV_A$$

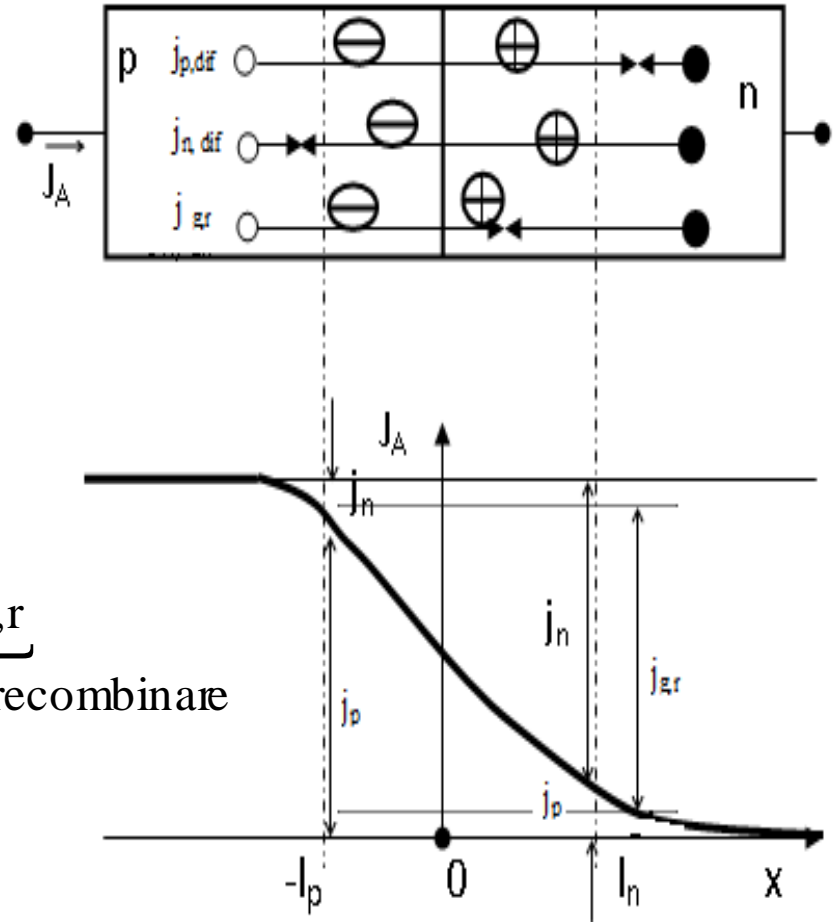
3.3. Les caractéristiques statiques de la jonction pn

- Soit une jpn polarisée à une tension ct. V_A , traversé par un courant I_A .
- La détermination de la caractéristique statique revient à déterminer la fonction : $I_A = I_A(V_A)$.
- On définira les trois composantes du courants:
 - - Courant de diffusion de trous, $I_{p,dif}$
 - - Courant de diffusion d'électrons, $I_{n,dif}$
 - - Courant de génération-recombinaison, $I_{g,r}$

3.3. Les caractéristiques statiques de la jonction pn

La densité de courant est calculée par superposition :

$$j_A = \underbrace{j_p(l_n) + j_n(-l_p)}_{j\text{-difuzie}} + \underbrace{j_{g,r}}_{j\text{-generare-recombinare}}$$



3.3.1. Le calcul des courants de diffusion

- Nous commençons avec équations de cont. pour électrons et trous, en reg. statique: $(\partial/\partial t = 0)$

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} + \frac{1}{q} \cdot \frac{\partial j_n}{\partial x} = 0 \\ -\frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} - \frac{1}{q} \cdot \frac{\partial j_p}{\partial x} = 0 \end{array} \right. \quad \text{et} \quad \left\{ \begin{array}{l} \vec{j}_n = qD_n \nabla n \\ \vec{j}_p = -qD_p \nabla p \end{array} \right.$$

Ou $L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \longrightarrow \frac{\partial^2 (p_n - p_{n0})}{\partial x^2} - \frac{p_n - p_{n0}}{L_p^2} = 0$

Ec. Caract. $r^2 - \frac{1}{L_p^2} = 0 \longrightarrow p_n(x) - p_{n0} = C_1 \cdot \exp\left(\frac{x}{L_p}\right) + C_2 \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right)$

Approx. de quasi-équilibre $\longrightarrow p_n(l_n) \cdot n_n(l_n) = n_i^2 \cdot \exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right)$

3.3.1. Le calcul des courants de diffusion

- Ct $C_{1,2}$ sont determine par conditions aux limites :

$$\begin{cases} p_n(\infty) = p_{n0} \\ p_n(l_n) = p_{n0} \cdot \exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) \end{cases}$$

- Pour $x \rightarrow \infty \rightarrow C_1 = 0$
- Pour $x = l_n \rightarrow C_2$.
- Ramplacant $C_{1,2}$ résulte:

$$p_n(x) = p_{n0} + p_{n0} \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right] \cdot \exp\left(\frac{-x + l_n}{L_p}\right)$$

3.3.1. Le calcul des courants de diffusion

- La densité de courant de trous a $x = l_n$:

$$j_p(l_n) = -qD_p \left. \frac{\partial p_n}{\partial x} \right|_{x=l_n} = q \frac{D_p p_{n0}}{L_p} \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right]$$

- La densité de courant d'électrons a $x = -l_p$:

$$j_n(-l_p) = qD_n \left. \frac{\partial n_p}{\partial x} \right|_{x=-l_p} = q \frac{D_n n_{p0}}{L_n} \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right]$$

- Par superposition :

$$I_{A,dif} = qA_j \cdot \left(\frac{D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{D_n n_{p0}}{L_n} \right) \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$I_{0,dif} = qA_j \cdot \left(\frac{D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{D_n n_{p0}}{L_n} \right)$$

3.3.2. Courants génération-recombinaison

- Courants génération-recombinaison.
- Pair electron-trou en **ZCE**. Après calculles:

$$I_{A,gr} = qA_j \cdot \frac{n_i l_{RSS}}{2\tau_0} \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_A}{2kT}\right) - 1 \right]$$

- Ou:

$$I_{0gr} = qA_j \cdot \frac{n_i l_{RSS}}{2\tau_0}$$

- Crt I_{gr} dépend exponentiellement de la tension V_A , mais l'argument est $qV_A/2kT$.

3.3.3. Le courant total par jpn

- Par superposition résulte le modèle physique de la caractéristique statique :

$$I_A = I_{Adif} + I_{Agr} = I_{0d} \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right] + I_{0gr} \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_A}{2kT}\right) - 1 \right]$$

- Obs:
- 1. En PI: ($V_A < 0$) $I_A \cong -I_{0d} - I_{0gr} \stackrel{\text{not}}{=} I_0$
- 2. En PD: ($V_A > 0$) $I_A \cong I_{0d} \cdot \exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) + I_{0gr} \cdot \exp\left(\frac{qV_A}{2kT}\right)$

3.3.3. Le courant total par jpn

- Le model empirique:

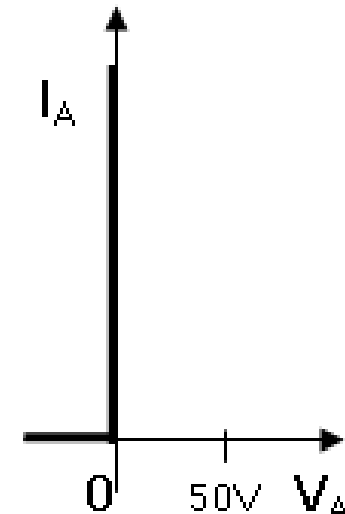
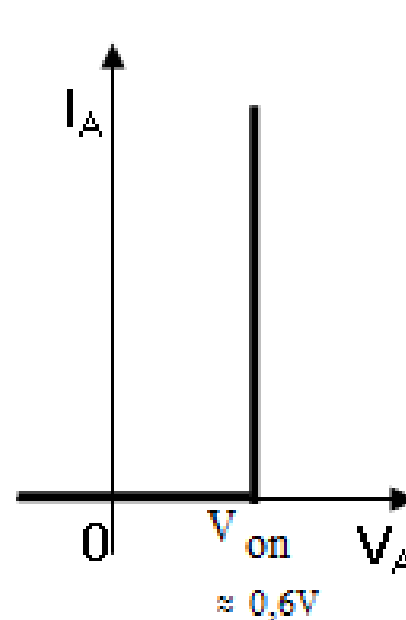
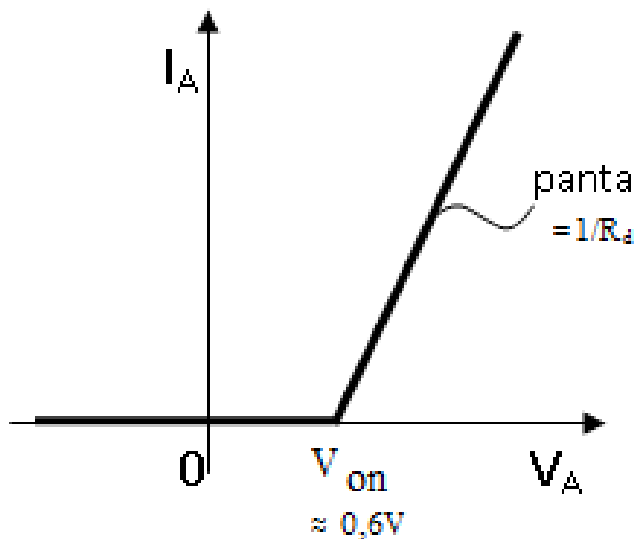
$$I_A = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_A}{nkT}\right) - 1 \right]$$

- I_0 est courant de saturation et n est le facteur d'idéalité.
- Par logarithme on a :

$$\ln I_A = \ln I_0 + \frac{q}{nkT} V_A$$

3.3.4. Modèle simplifié des caractéristiques statiques

- Modèles simplifiés successives:



3.4. Regime de claquage de la jpn

- En PI, pour $V_A = -V_{BR} < 0 \rightarrow I_A$ croît très fort.
- **Mécanismes de claquage:**
 1. *Multiplication en Avalanche des portteurs (ionisation par choc ou impact)*
 2. *Effet Zener. J p⁺n⁺ - rupture des liaisons covalente sur champ electric forte.*

3.4. Regime de claquage de la jpn

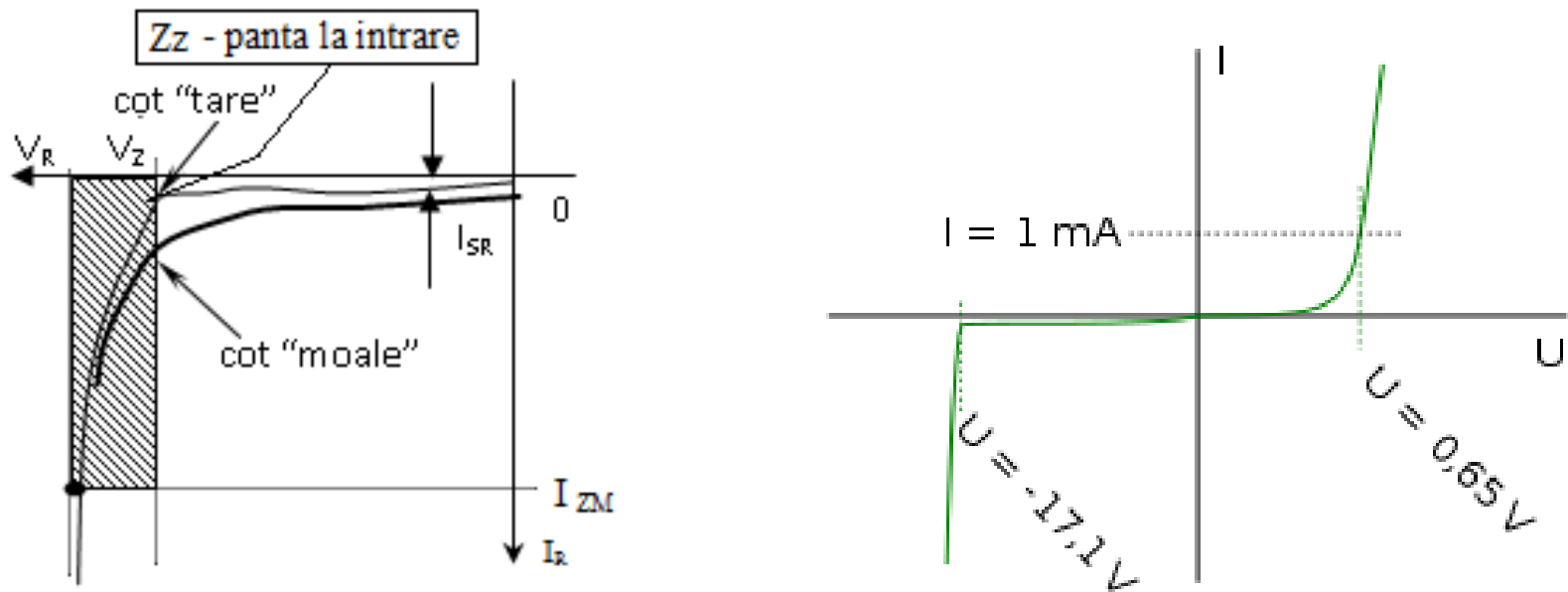
- Formule pour V_{BR} (X):

$$V_{BR} = \frac{\epsilon_S \mathcal{E}_{cr}^2}{2qN_D}$$

Materialul	Ge	Si	SiC (-4H)	C (Diam)	SiO2
\mathcal{E}_{cr} (V/cm)	10^5	4×10^5	3×10^6	2×10^7	1.1×10^7
ϵ_r	14	11.9	9.7	5.5	3.9

3.4. Regime de claquage de la jpn

- Applications: stabilisateur de la tension.



- Crt varie dans une large gamme : de $1nA$ a I_{ZM} ($\sim 200mA$... $10A$), mais V sur diode = ct (stabilise): $V_R \approx V_Z$.

3.5. Régime dynamique pour jpn

3.5.1. Circuit équivalent de petit signal et basse fréquence

- Régime dynamique - $v_a(t)$ plus V_A :

$$v_A = V_A + v_a(t) = V_A + V_a \sin(\omega t)$$

- Condition du petit signal : $V_a \ll \frac{nkT}{q}$

- cette hypothèse va permettre négligence V_a^2 , V_a^3, \dots en série du Taylor.

3.5.1. Circuit équivalent de petit signal et basse fréquence

- Condition de *basse freq.* fournit une fréquence f , telle que le courant $i_A(t)$ peut suivre les variations de la tension sur jonction $v_A(t)$:

$$i_A(t) = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{q v_A(t)}{nkT}\right) - 1 \right] = I_0 \cdot \left[\underbrace{\exp\left(\frac{q V_A}{nkT}\right) \cdot \exp\left(\frac{q v_a(t)}{nkT}\right)}_{f(v_a)} - 1 \right]$$

- Par développer en serie Taylor la fonction $f(v_a)$ en voisinage du point $v_a=0$ jusque a I term:

3.5.1. Circuit équivalent de petit signal et basse fréquence

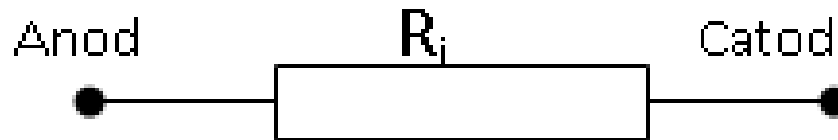
$$i_A(t) = \underbrace{I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_A}{nkT}\right) - 1 \right]}_{I_A} + \underbrace{I_0 \cdot v_a(t) \cdot \frac{q}{nkT} \exp\left(\frac{qV_A}{nkT}\right)}_{i_a(t)}$$

- On va définir la résistance interne de la jonction:

$$R_i = \frac{v_a}{i_a} \approx \frac{nkT/q}{I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_A}{nkT}\right) - 1 \right]} = \frac{nkT}{qI_A}$$

3.5.1. Circuit équivalent de petit signal et basse fréquence

- Dans ce cas, le circuit équivalent est constituée uniquement de la résistance interne R_i :



- Quelle est la différence et quelle communion entre R_i et R_s ?

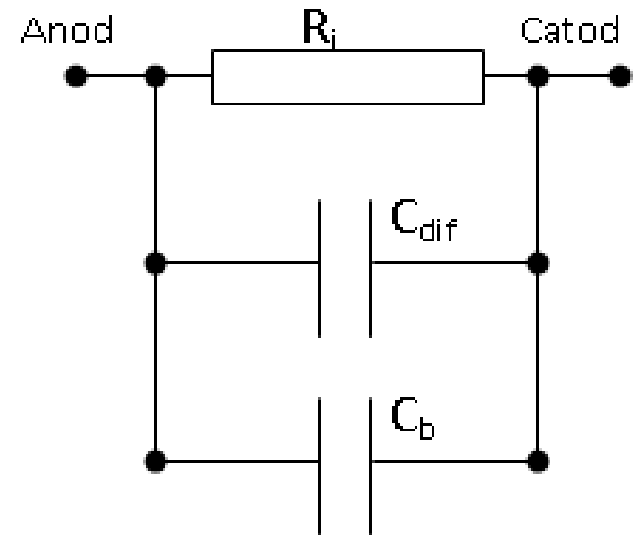
3.5.2. Circuit équivalent de petit signal et toutes fréquences

Les éléments sont les suivants:

- Résistance interne R_i calculé par la même formule.
- La capacité de diffusion, C_{dif} , qui modèle charge mobile.

$$C_{dif} = \frac{\tau_0}{2R_i}$$

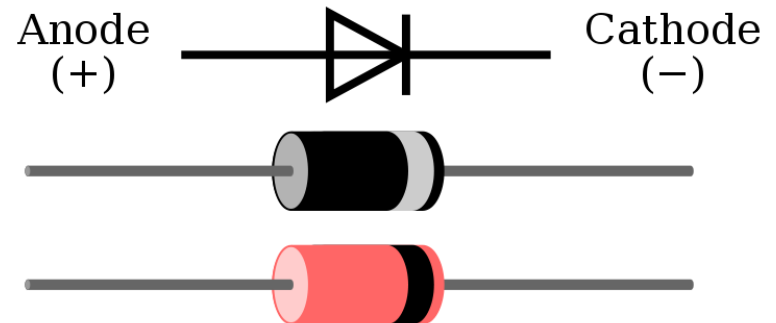
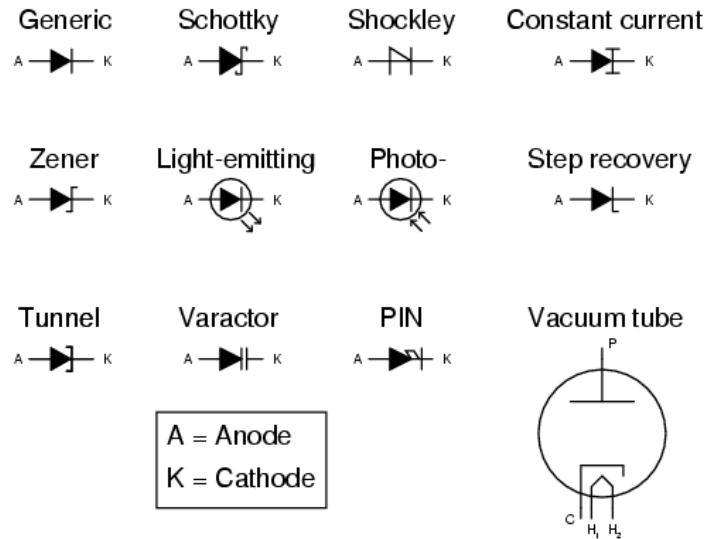
- La capacité de la barrière C_b , qui modèle charge fixe de RSS.



$$C_b = \frac{C_{b0}}{\left(1 - \frac{V_A}{\phi_{B0}}\right)^m}$$

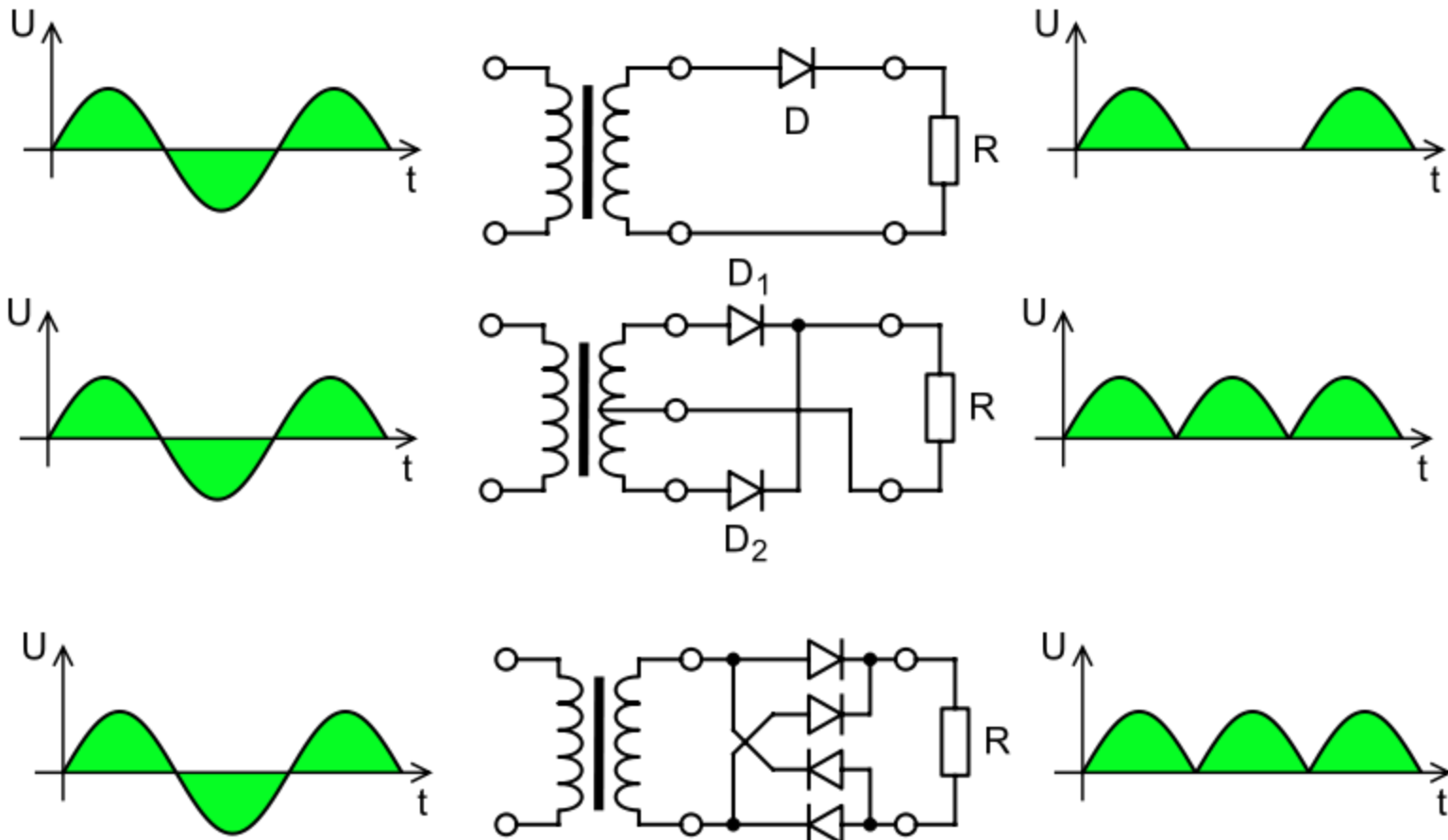
3.6. Diodes semiconductrice

Diodes semiconductrice ont de nombreuses applications.



3.6.1. Diode redresseur

- Rectifier mono-et bi-alternance.



3.6.2. Diodes stabilisateurs

- Ex. diode stab.
10DZ180 a
 $P_{DM}=10W$,
 $V_Z=180V$.
- Resulte $I_z=18A$.
- Diodes Zener ont
 $V_Z=1...200V$.



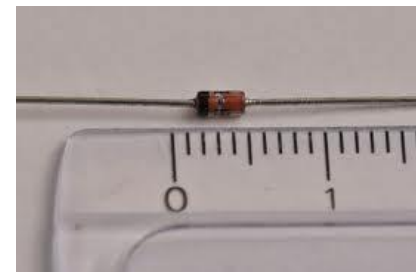
Dioda Zener



Sensul curentului, in PD
de la p spre n



Sensul curentului in PI,
in regimul de stabilizare



3.6.3. Diode Varicap



- Diode **V**ARIABLE **C**APacitor utilise : $C_{\text{tot}} - V_R$.
- Term echiv.: varicap diode, varactor diode, variable capacitance diode, variable reactance diode or tuning diode.
- Travaux dans Pol.Inv; crt I_A - null (résiduel \sim nA);
- C_{tot} varie sur une large gamme de V_R .



- **Devoir.** Expliquer le fonctionnement, conformément à la formule :

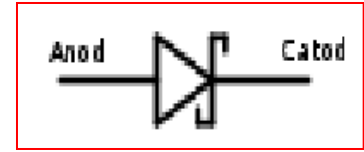
$$C_b = \frac{C_{b0}}{\left(1 - \frac{V_A}{\phi_{B0}}\right)^m}$$

3.6.4. Diode de commutation

- Ex. 1n4151: a **$t_{rr}=2ns$** .
(ver 8...10ns).
- Le contrôle du trr est realise par éléments d'impureté de type Fe, Au, qui introduisent des niveaux profonds en BI
→ vitesse de recombinaison augmente
→ temp decrois



3.6.5. Diode Schottky (CMS)



- Il est basé sur le contact direct du métal sur un semi-conducteur n (CMS).
- De ex. Pt sur Si-n, dopee a 10^{16}cm^{-3} assure un contact redresseur.
- Fonctionne uniquement avec les porteurs majoritaire -> évite des processus de recombinaison - qui prennent beaucoup de temps -> sont plus rapides (sub-nanosec).