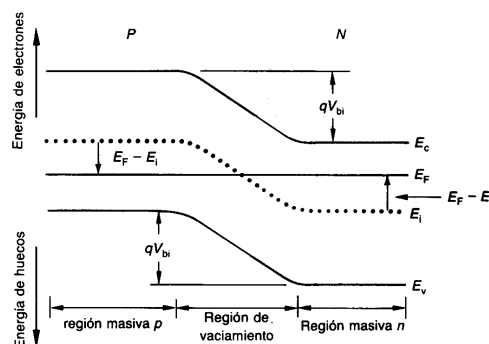


Tema 4. El Diode II: Característiques I-V

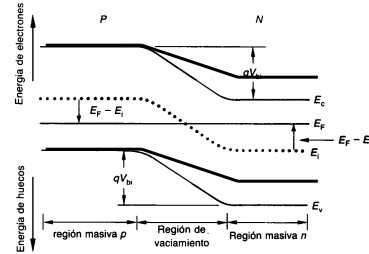
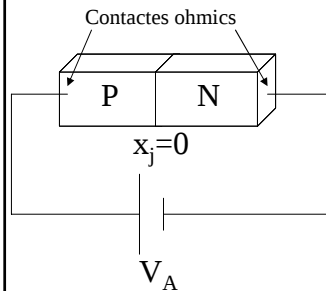
- 1. Equilibri tèrmic
- 2. Característiques I-V qualitatives
- 3. L'equació del diode ideal: pla de treball
- 4. Deducció de l'equació del diode ideal
- 5. Interpretació de resultats.
- 6. Desviacions respecte al diode ideal en inversa
 - Ruptures avalantxa i Zener
- 7. Efectes de la temperatura i aspectes dinàmics.
- 8. Model i paràmetres SPICE pel díode.

1. Equilibri tèrmic

- Punt de vista d'energia de bandes
 - Barrera de potencial
 - Densitat corrent electrons arrossegament igual a densitat de corrent electrons difusió
 - Densitat corrent forats arrossegament igual a densitat de corrent forats difusió
 - Fluxe de corrent total de forats i d'electrons nul

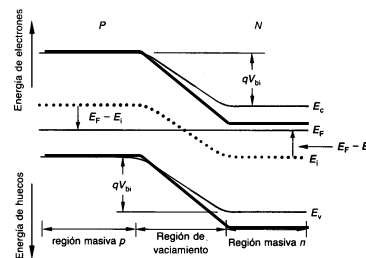
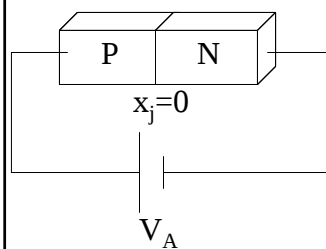


2. Característiques I-V qualitatives



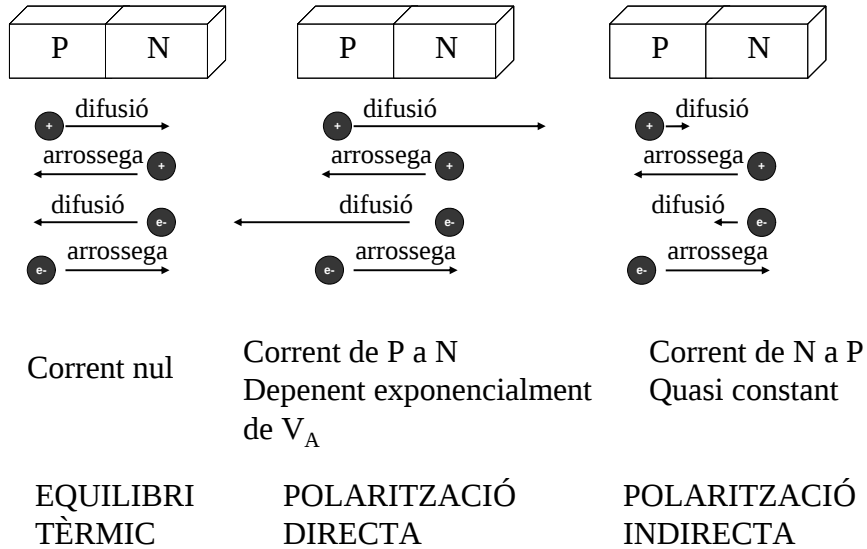
- Polarització directa $V_A > 0$
 - Pendent d'energia a zona de transició disminueix
 - Camp elèctric i barrera de potencial disminueixen
 - Augment del corrent de difusió de forats (i d'electrons)
 - Manteniment del corrent d'arrossegament de forats (igual pels e-)
 - Conclusió: augment del corrent de difusió i manteniment dels corrents d'arrossegament (respecte d'equilibri)
 - Distribució de portadors amb energia = dependència exp
 - Corrent de polarització directa serà exponencial amb V_A

2. Característiques I-V qualitatives



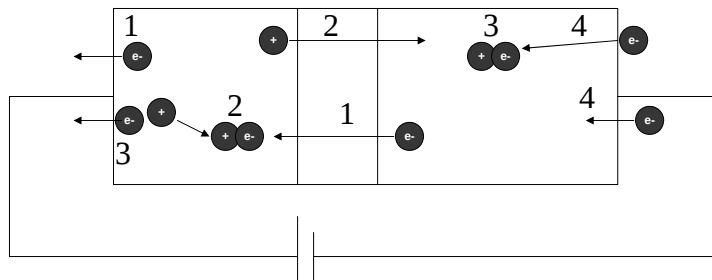
- Polarització inversa $V_A < 0$
 - Pendent d'energia a zona de transició augmenta
 - Camp elèctric i barrera de potencial augmenten
 - Disminució del corrent de difusió de forats (i d'electrons)
 - Manteniment del corrent d'arrossegament de forats (igual pels e-)
 - Conclusió: disminució del corrent de difusió i manteniment dels corrents d'arrossegament (respecte d'equilibri)
 - Notem que ara corrents en sentit contrari a polarització
 - Corrent en sentit contrari a polarització directa i de magnitud baixa bastant independent de V_A

2. Característiques I-V qualitatives



2. Característiques I-V qualitatives

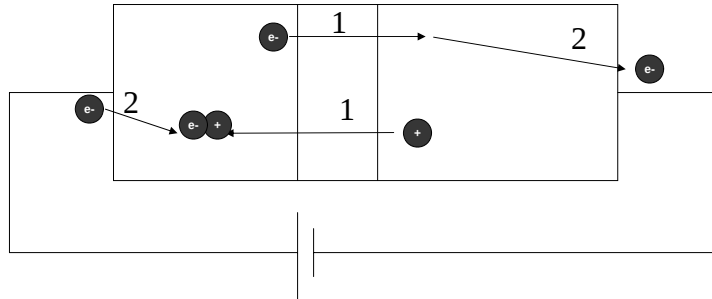
Polarització directa



- Electrons
 - 1 electró difón de N a P
 - 2 recombinació amb un forat a P, que deixa un electró lliure
 - 3 aquest electró surt de P cap al circuit
 - 4 un nou electró entra per N
- Forats
 - 1 un electró surt de P cap al circuit i deixa un forat
 - 2 el forat es difón de P a N
 - 3 el forat es recombina amb un electró de N
 - 4 es crida un nou electró del circuit cap a N

2. Característiques I-V qualitatives

Polarització inversa



- Electrons
 - 1 electró arrossegat de P a N
 - 2 electró arrossegat surt al circuit
- Forats
 - 1 forat arrossegat de N a P
 - 2 el forat es recombina amb un electró de P
 - 3 es crida un nou electró del circuit cap a P

3. Equació del diode : pla treball

- Condicions generals
 - No hi ha fonts externes de generació de portadors
 - Aproximació de buidament i unió abrupte
 - Solució estacionària, derivades respecte de t nul·les
 - A la zona de buidament no hi ha ni generació ni recombinació
 - Tot el que entra surt
 - Concentracions de portadors minoritaris sempre menors que concentracions de portadors majoritaris
 - Baix nivell d'injecció
 - Camp elèctric nul pels minoritaris a les zones massives
 - N_A i N_D constants a les zones massives

3. Equació del diode : pla treball

• Zona N

$$0 = D_p \frac{\partial^2 \Delta p_n}{\partial x^2} - \frac{\Delta p_n}{\tau_p} \quad (1)$$

$$J_p = -qD_p \frac{\partial \Delta p_n}{\partial x} \quad (2)$$

$$p_n = p_n(0) + \Delta p_n(x) \quad (3)$$

Zona P

$$0 = D_n \frac{\partial^2 \Delta n_p}{\partial x^2} - \frac{\Delta n_p}{\tau_n} \quad (4)$$

$$J_n = qD_n \frac{\partial \Delta n_p}{\partial x} \quad (5)$$

$$n_p = n_p(0) + \Delta n_p(x) \quad (6)$$

- Resolem (1) (necessitam dues condicions, una a cada extrem de la regió)
- Troban $\Delta p_n(x)$ i ho ficam a (2)
- Calculam $J_p(x)$
- Ara com dispositiu té dos terminals el corrent total pel diode ha de ser constant en tot punt, així

$$J = c \tan t = J_n(x) + J_p(x)$$

3. Equació del diode : pla treball

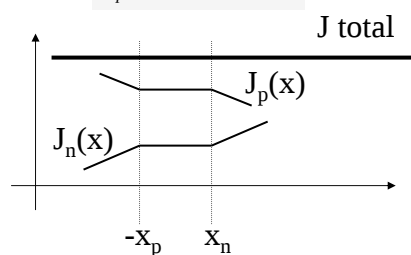
$$J = c \tan t = J_n(x) + J_p(x)$$

- Coneixent el corrent de minoritaris $J_p(x)$ a la zona N, també coneixem el de majoritaris

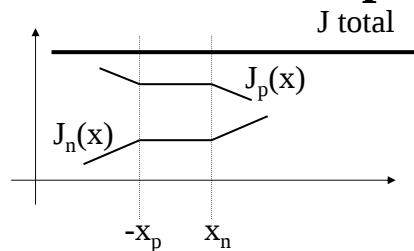
$$J_n(x) = J - J_p(x)$$

- Igualment fent el mateix a P pels electrons, coneixent $J_n(x)$ també coneixem el de majoritaris

$$J_p(x) = J - J_n(x)$$



3. Equació del diode : pla treball



- Zona buidament: tot el que entra surt, o sigui corrents constants

$$J_p \Big|_{\text{zona buidament}} = J_p(x_n) = -qD_p \frac{dp_n}{dx} \Big|_{x=x_n}$$

$$J_n \Big|_{\text{zona buidament}} = J_n(-x_p) = qD_n \frac{dn_p}{dx} \Big|_{x=-x_p}$$

$$J = J_p(x_n) + J_n(-x_p)$$

- La dependència amb V_A vendrà a les condicions de contorn

3. Equació del diode : pla treball

- Condicions de contorn a x_n i a $-x_p$

$$\Delta p_n(x_n) = p_{n0} \left(e^{\frac{qV_A}{KT}} - 1 \right)$$

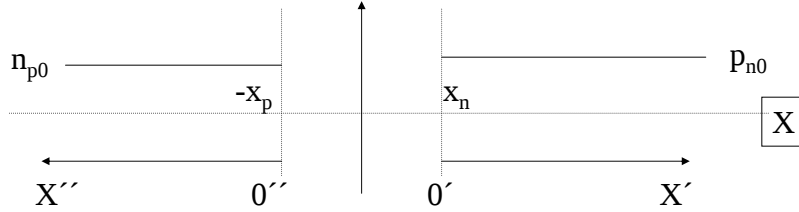
$$\Delta n_p(-x_p) = n_{p0} \left(e^{\frac{qV_A}{KT}} - 1 \right)$$

- Condicions de contorn a les zones massives

$$\Delta p_n(\infty) = 0$$

$$\Delta n_p(-\infty) = 0$$

4. Deducció de l'equació del diode

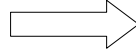


- Corrent de sistema de referència : Zona N

$$0 = D_p \frac{\partial^2 \Delta p_n}{\partial x'^2} - \frac{\Delta p_n}{\tau_p}$$

$$\Delta p_n(x') = A e^{x'/L_p} + B e^{-x'/L_p}$$

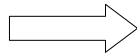
Cond
contorn



$$\Delta p_n(x') = p_{n0} \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right) e^{-x'/L_p}$$

$$p_n(x') = p_{n0} + p_{n0} \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right) e^{-x'/L_p}$$

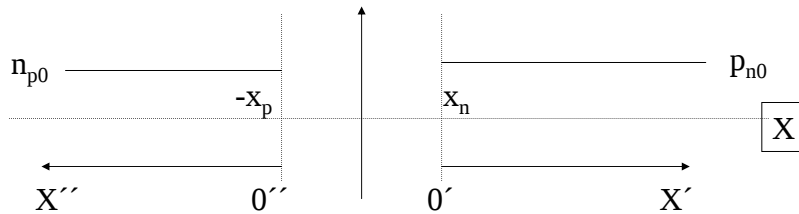
El corrent a
 $x = x_n$ (Zona N)



$$J_p(x') = -qD_p \frac{dp_n}{dx'} = -qD_p p_{n0} \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right) \left(\frac{-1}{L_p} \right) e^{-x'/L_p}$$

$$a \ x = x_n \quad (x' = 0) \quad J_p|_{\text{buidament}} = J_p(x' = 0) = q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right)$$

4. Deducció de l'equació del diode

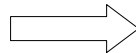


- Corrent de sistema de referència : Zona P

$$0 = D_n \frac{\partial^2 \Delta n_p}{\partial x''^2} - \frac{\Delta n_p}{\tau_n}$$

$$\Delta n_p(x'') = A e^{x''/L_n} + B e^{-x''/L_n}$$

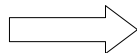
Cond
contorn



$$\Delta n_p(x'') = n_{p0} \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right) e^{-x''/L_n}$$

$$n_p(x'') = n_{p0} + n_{p0} \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right) e^{-x''/L_n}$$

El corrent a
 $x = -x_p$ (Zona P)



$$J_n(x'') = qD_n n_{p0} \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right) \left(\frac{1}{L_n} \right) e^{-x''/L_n}$$

$$a \ x = -x_p \quad (x'' = 0) \quad J_n|_{\text{buidament}} = J_n(x'' = 0) = q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right)$$

4. Deducció de l'equació del diode

- El corrent total

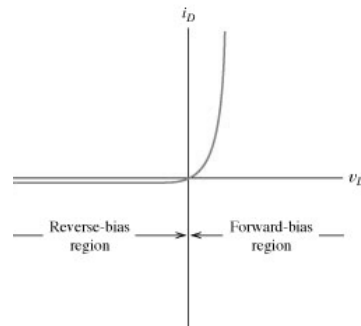
$$J_{TOTAL} = J_n(x = -x_p) + J_p(x = x_n) = q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right) + q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right)$$

$$J = q \left[\frac{D_n}{L_n} n_{p0} + q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} \right] \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right)$$

- O sigui

$$I = I_0 \left[e^{qV_A/KT} - 1 \right]$$

$$I_0 = Aq \left(\frac{D_n}{L_n} n_{p0} + q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} \right)$$



5. Interpretació de Resultats

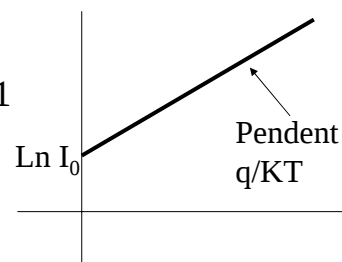
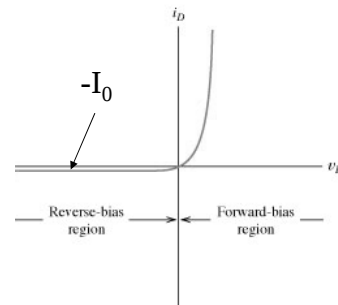
$$I = I_0 \left[e^{qV_A/KT} - 1 \right]$$

- En polarització directa, $e^{qV_A/KT} \gg 1$
 – $V_A = 0.1V$, $e^{qV_A/KT} = 50$ per tant

$$I = I_0 e^{qV_A/KT}$$

- En polarització inversa, $e^{qV_A/KT} \ll 1$
 – $V_A = -0.1V$, $e^{qV_A/KT} = 1/50$ per tant

$$I = -I_0$$



5. Interpretació de Resultats

- I_0 depèn dels dopats

$$I_0 = Aq \left(\frac{D_n}{L_n} n_{p0} + \frac{D_p}{L_p} p_{n0} \right) = Aq \left(\frac{D_n}{L_n} \frac{n_i^2}{N_A} + \frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_D} \right) = qAn_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right)$$

- Si $N_A \gg N_D$

$$I_0 = qAn_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_D} \right)$$

- Per tant corrent degut a forats injectats a la zona N

- Si $N_D \gg N_A$

$$I_0 = qAn_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_A} \right)$$

- Per tant corrent és degut a electrons injectats a la zona P

6. Desviacions en inversa: Avalantxa i Zener

- Expliquen desviacions del comportament ideal vist fins ara

- V_{BR} tensió de ruptura

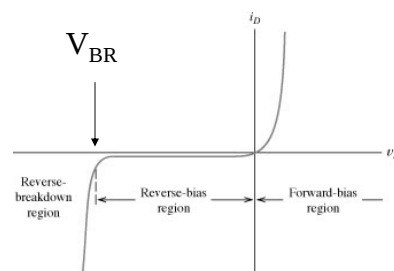
- Ruptura avalantxa

- En inversa E creix

- Si molt inversa E molt gran

- Camp crític ECR

- Portadors que travessen zona buidament són accelerats de tal manera que al xocar amb àtoms de la xarxa donen tanta energia que es pot lliberar un electró de la xarxa (generació parell-forat a la zona de buidament)
- Aquests nous portadors, també es veuen accelerats i per tant poden crear-ne de nous (EFECTE AVALANTXA)



6. Desviacions en inversa: Avalantxa i Zener

- Generació de portadors a la zona de buidament
 - Corrent que surt major que el que entra
 - Definim factor de multiplicació de corrent

$$M = \frac{I_{surt}}{I_{entra}} = \frac{|I|}{I_0}$$

- Dependència amb V_{BR} ($m=3-6$ depenent del semiconductor)

$$M = \frac{1}{1 - \left[\frac{|V_A|}{V_{BR}} \right]^m}$$

6. Desviacions en inversa: Avalantxa i Zener

- Efecte del dopat a V_{BR}

$$V_{BR} = \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \frac{K_S \epsilon_0 E_{CR}^2}{2q} - V_{bi}$$

- Si augmenta el dopat disminueix V_{BR}

- Ruptura Zener (o efecte tunel)

- Es produeix a unions PN molt dopades
- Hi ha probabilitat no nul·la de que un electró pugui passar una barrera de potencial per efecte tunel
 - Condicions probabilitat alta: 1-barrera de potencial molt estreta i 2-Molts d'electrons a una banda i molts d'estats a l'altre

7. Efectes de Temp. I dinàmics

- Efectes de la temperatura

- Augment Temperatura implica disminució V_γ lineal

$$V_\gamma(T) = V_\gamma(T_0) + K(T - T_0)$$

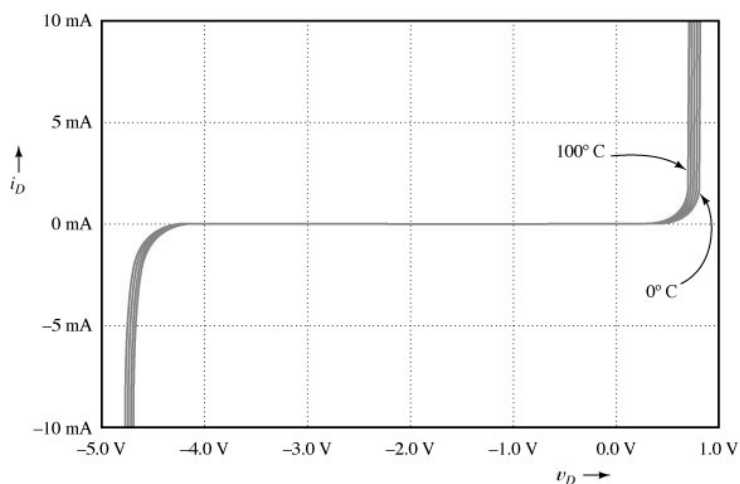
- $T_0 = 25^\circ\text{C}$, $V_\gamma(T_0)$ tensió V_γ a 25°C , i K coeficient temperatura
- Al Si, $K = -2.0 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ i $V_\gamma(T_0) = 0.7\text{V}$
- Al Ge, $K = -2.5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ i $V_\gamma(T_0) = 0.2\text{V}$

- Dependència del corrent de saturació en inversa I_0

$$I_0(T) = I_0(T_{nom}) e^{0.072(T - T_{nom})} \approx I_0(T_{nom}) 2^{\frac{T - T_{nom}}{10}}$$

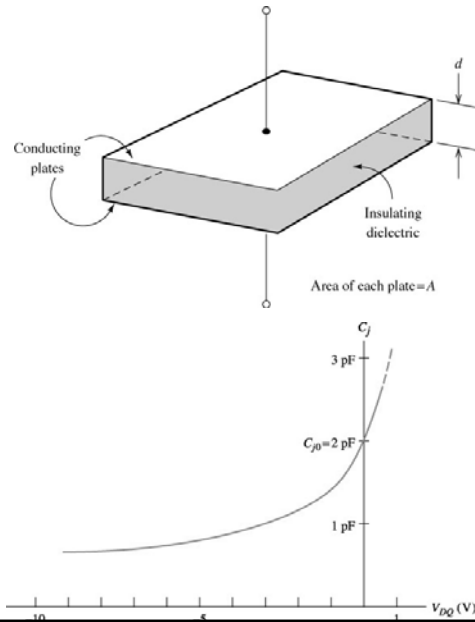
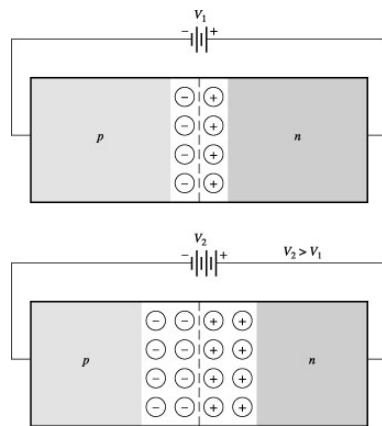
- T_{nom} (temperatura nominal de treball)
- I_0 es duplica cada vegada que la temperatura augmenta 10°C

7. Efectes de Temp. I dinàmics



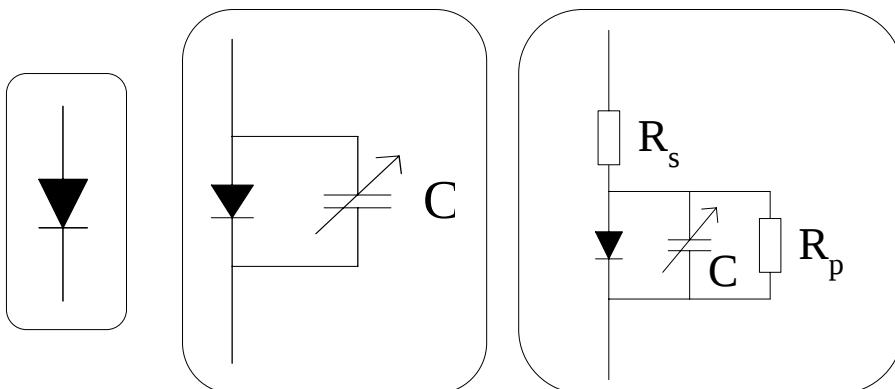
7. Efectes de Temp. I dinàmics

- Efectes dinàmics



7. Efectes de Temp. I dinàmics

- Efectes dinàmics



8. Model SPICE

- Definició de diode
Dnom v+ v- drec
.MODEL drec D (param1=..., param2=..., paramN=...)
- Paràmetres SPICE
 - IS corrent de saturació
 - equival a I_0
 - BV voltatge de ruptura en inversa
 - Equival a V_z (V_{BR})
 - IBV corrent de ruptura en inversa
 - RS resistència ohmica
 - N coeficient d'emissió
 - VJ potencial d'unió
 - Equival a V_{bi}
 - EG energia de gap
 - TT temps de trànsit
 - CJO capacitat de la unió a polarització nul.la
 - T temperatura nominal de la simulació

NOTA : Tot això s'ampliarà adequadament al guió de la pràctica corresponent

Semiconductor modeling with SPICE
Antognetti, Massobrio
Mc Graw Hill