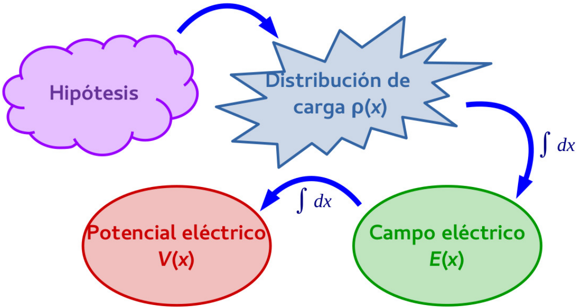
Ejercicio: Juntura PN

Enunciado

- Considere una juntura PN de silicio a $300\mathrm{K}$ con $N_A = 10^{19}\,\mathrm{cm}^{-3}$ y $N_D = 10^{17}\,\mathrm{cm}^{-3}$.
  1. Para la condición de equilibrio térmico ($V_R = 0\,\mathrm{V}$), y bajo la aproximación de vaciamiento, realice los diagramas de
     - 1.1 concentración de dopantes N_A y N_D
     - 1.2 concentración de portadores libres n_0 y p_0
     - 1.3 densidad de carga neta ρ
     - 1.4 campo eléctrico
     - 1.5 potencial electrostático
  2. Repita el punto anterior para $V_R = 5\mathrm{V}$ y $10\,\mathrm{V}$.
  3. Si el campo eléctrico máximo admitido es $E_{MAX} = 5 \times 10^5\,\mathrm{V/cm}$, ¿Cuál es el máximo valor de V_R admisible?

Metodología para la resolución



- Asumimos que las QNR's tienen neutralidad de carga
- Asumimos que las SCR estan vacias de portadores (*región de vaciamiento*)
- Transición entre SCR y QNR's abrupta

Descripción física

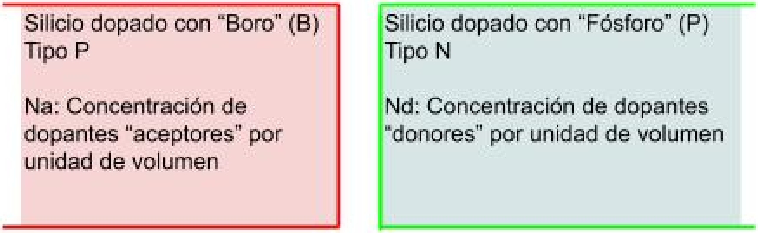


Figure: Esquema de materiales.

Concentración de dopantes N_A y N_D

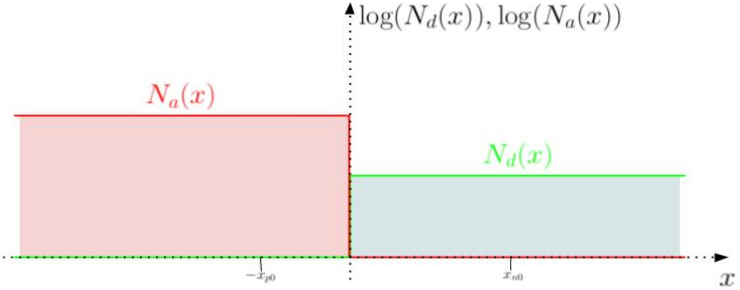


Figure: Concentración de dopantes donores (N_d) y aceptores (N_a).

Concentración de portadores libres n_0 y p_0

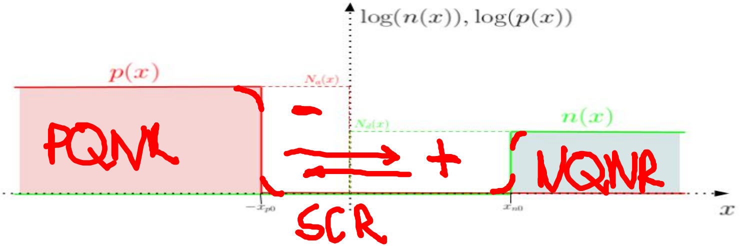
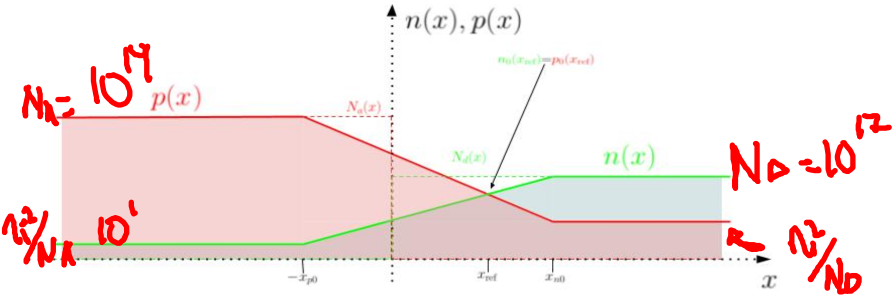


Figure: Diagrama de concentraciones de portadores libres en escala lineal.

	Hipótesis	N_A	N_D	p_0	n_0	$\rho(x)$
$x \leq x_{p0}$	HQN	10^{19}	0	$\sim N_A$ (QN)	$\frac{n_i^2}{N_A} \ll N_A$ (Min)	0 (QN)
$x_{p0} < x < 0$	VAC	10^{19}	0	~ 0 (VAC)	~ 0 (VAC)	$\sim -q \cdot N_A$
$0 \leq x < x_{n0}$	VAC	0	10^{17}	~ 0 (VAC)	~ 0 (VAC)	$\sim q \cdot N_D$
$x_{n0} \leq x$	HQN	0	10^{17}	$\frac{n_i^2}{N_D} \ll N_A$ (Min)	$\sim N_D$ (QN)	0 (QN)

Concentración de portadores libres n_0 y p_0

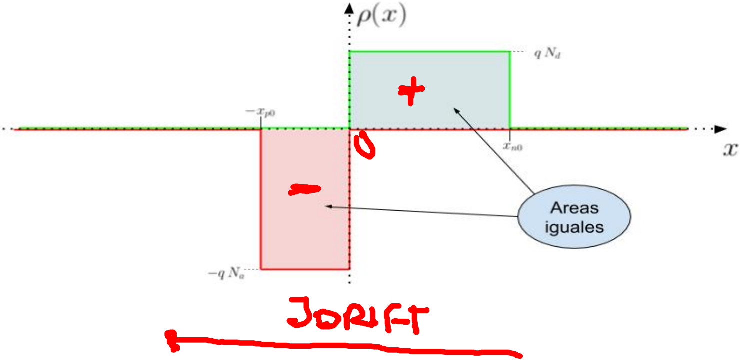
J_{dif}



10^3

Figure: Concentración de dopantes donores (N_d) y aceptores (N_a) en escala semi-logarítmica.

Densidad de carga neta $\rho(x)$



$$\rho(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq x_{p0} \\ -qN_a = 1.6\ \frac{C}{cm^3} & \text{si } x_{p0} < x < 0 \\ qN_d = 0.016\ \frac{C}{cm^3} & \text{si } 0 \leq x < x_{n0} \\ 0 & \text{si } x_{n0} \leq x \end{cases}$$

Campo eléctrico $E(x)$

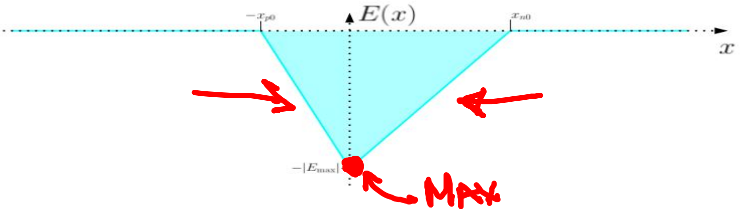


Figure: Campo eléctrico en la región de carga espacial (SCR).

$$E(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq x_{p0} \\ \frac{-qN_a}{\epsilon_s}(x + x_{po}) & \text{si } x_{p0} < x < 0 \\ \frac{qN_d}{\epsilon_s}(x - x_{no}) & \text{si } 0 \leq x < x_{n0} \\ 0 & \text{si } x_{n0} \leq x \end{cases}$$

$$\frac{-qN_a}{\epsilon_s} = -1.54 \cdot 10^{12} \frac{V}{cm^2}$$
$$\frac{qN_d}{\epsilon_s} = -15.4 \cdot 10^{9} \frac{V}{cm^2}$$

Potencial electrostático $\Phi(x)$

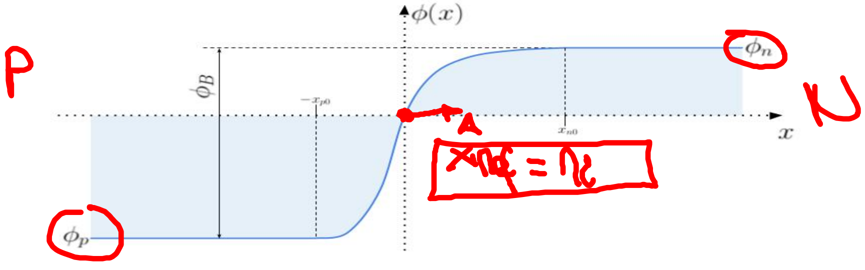


Figure: Potencial electrico en la juntura.

- en QNR-P: $p_o = N_a \;\Rightarrow \phi_p = -\frac{kT}{q}\ln\frac{N_a}{n_i} = -0.535V$
- en QNR-N: $n_o = N_d \;\Rightarrow \phi_n = \frac{kT}{q}\ln\frac{N_d}{n_i} = 0.416V$

$$\Phi(x) = \begin{cases} \phi_p & \text{si } x \leq x_{p0} \\ \frac{qN_a}{2\epsilon_s}(x + x_{po})^2 & \text{si } x_{p0} < x < 0 \\ \phi_n - \frac{qN_d}{2\epsilon_s}(x - x_{no})^2 & \text{si } 0 \leq x < x_{n0} \\ \phi_n & \text{si } x_{n0} \leq x \end{cases}$$

¿Dónde termina la SCR?

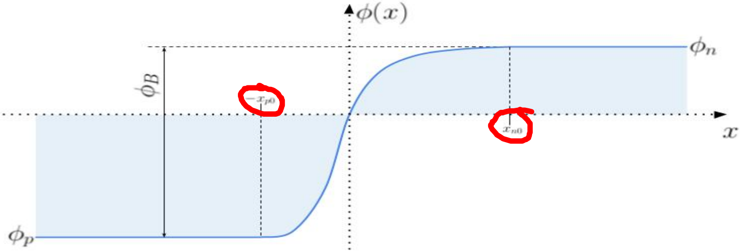


Figure: Potencial electrico en la juntura.

$$\phi_B = \phi_n - \phi_p = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} = 0.950V$$

$$x_{no} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \phi_B N_a}{q(N_a + N_d)N_d}} = 1.1 \cdot 10^{-5} [cm] \qquad x_{po} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \phi_B N_d}{q(N_a + N_d)N_a}} = 1.1 \cdot 10^{-7} [cm]$$

Casos de interés según su relación entre concentraciones

Tres casos de interés:

- Juntura simétrica: $N_a = N_d \;\Rightarrow\; x_{po} = x_{no}$
- Juntura asimétrica: $N_a > N_d \;\Rightarrow\; x_{po} < x_{no}$
- Juntura muy asimétrica:

  ej. p$^+$n juntura: $N_a \gg N_d$

$$x_{po} \ll x_{no} \simeq x_{do} \simeq \sqrt{\frac{2\epsilon_s \phi_B}{qN_d}} \propto \boxed{\frac{1}{\sqrt{N_d}}}$$

$$|E_o| \simeq \sqrt{\frac{2q\phi_B N_d}{\epsilon_s}} \propto \sqrt{N_d}$$

El lado poco dopado controla la electrostática de la juntura PN.

- Herramienta para jugar:

  `https://www.desmos.com/calculator/t5tyltuppv`

Juntura con polarización

- La formulación analítica de la electrostática de la juntura PN polarizada es idéntica a la del equilibrio térmico, solo que:

$V < 0$

$V > 0 \longrightarrow D$

$$\phi_B \longrightarrow \phi_B - V$$

$$x_n(V) = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(\phi_B - V)N_a}{q(N_a + N_d)N_d}} \downarrow \qquad x_p(V) = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(\phi_B - V)N_d}{q(N_a + N_d)N_a}} \downarrow$$

$$x_d(V) = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(\phi_B - V)(N_a + N_d)}{qN_aN_d}} \downarrow$$

$$|E|(V) = \sqrt{\frac{2q(\phi_B - V)N_aN_d}{\epsilon_s(N_a + N_d)}} \downarrow$$

Juntura con polarización

Resumen de resultados para el punto 2:

V_R	0	-5	-10	[V]
$\phi_b - V_R$	9.53E-01	5.95E+00	1.10E+01	[V]
x_n	1.11E-05	2.76E-05	3.75E-05	[cm]
x_p	1.11E-07	2.76E-07	3.75E-07	[cm]
x_d	1.12E-05	2.79E-05	3.78E-05	[cm]
E_0	1.71E+05	4.27E+05	5.79E+05	[V/cm]

Punto 3:
Sabiendo que el campo eléctrico se puede reescribir como:

$$|E|(V) = |E_o|\sqrt{1 - \frac{V}{\phi_B}} \Rightarrow V_R = \Phi_b(1 - (\frac{|E|}{|E_0|})^2) = -7.2[V]$$