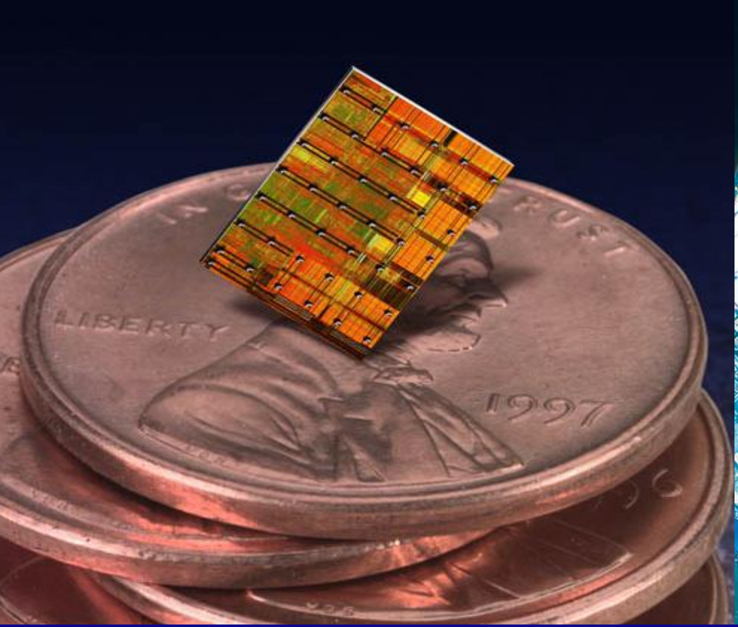
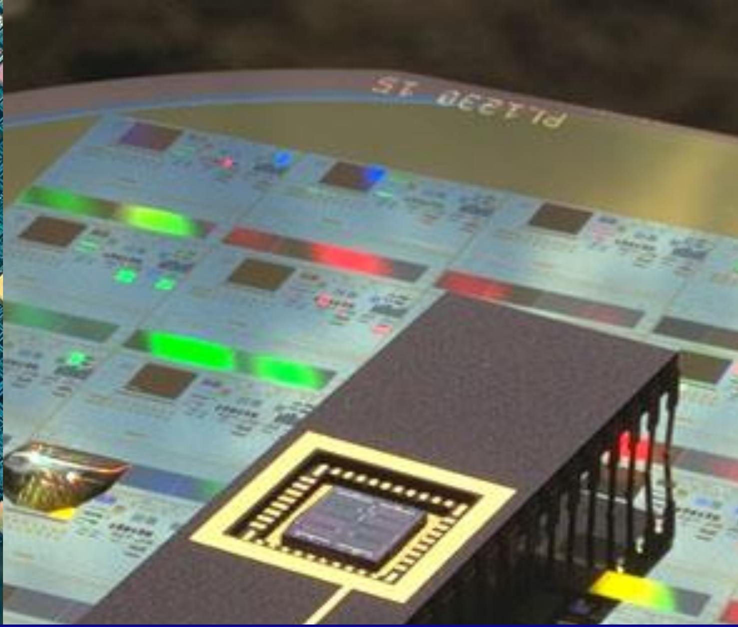
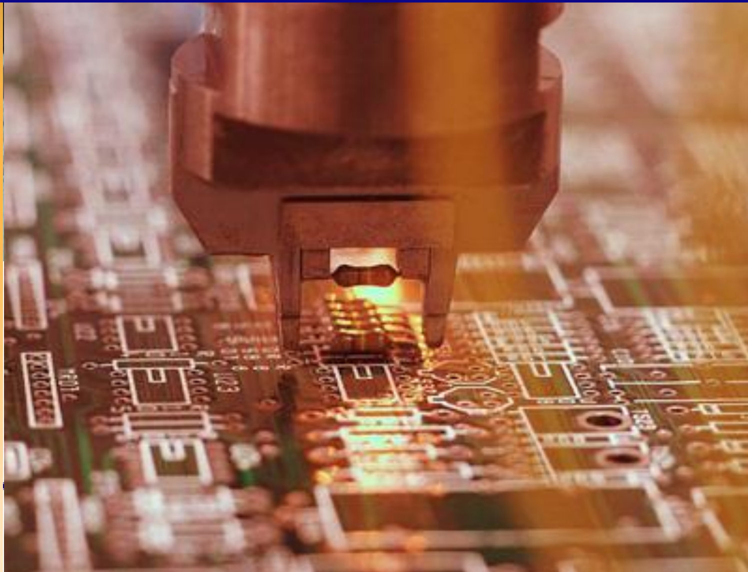


ELEMENTOS ACTIVOS
Juntura Semiconductora





Electroestática: repaso

- Leyes principales:
  - Gauss
  - Def. potencial

$$\nabla \cdot (\varepsilon E) = \rho$$

$$\nabla \phi = -E$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \dfrac{d(\varepsilon E)}{dx} & = & \rho \\ \dfrac{d\phi}{dx} & = & -E \end{cases}$$

  - Ecuación de Poisson

$$\nabla \cdot (-\varepsilon \nabla \phi) = -\varepsilon \nabla^2 \phi = \rho$$

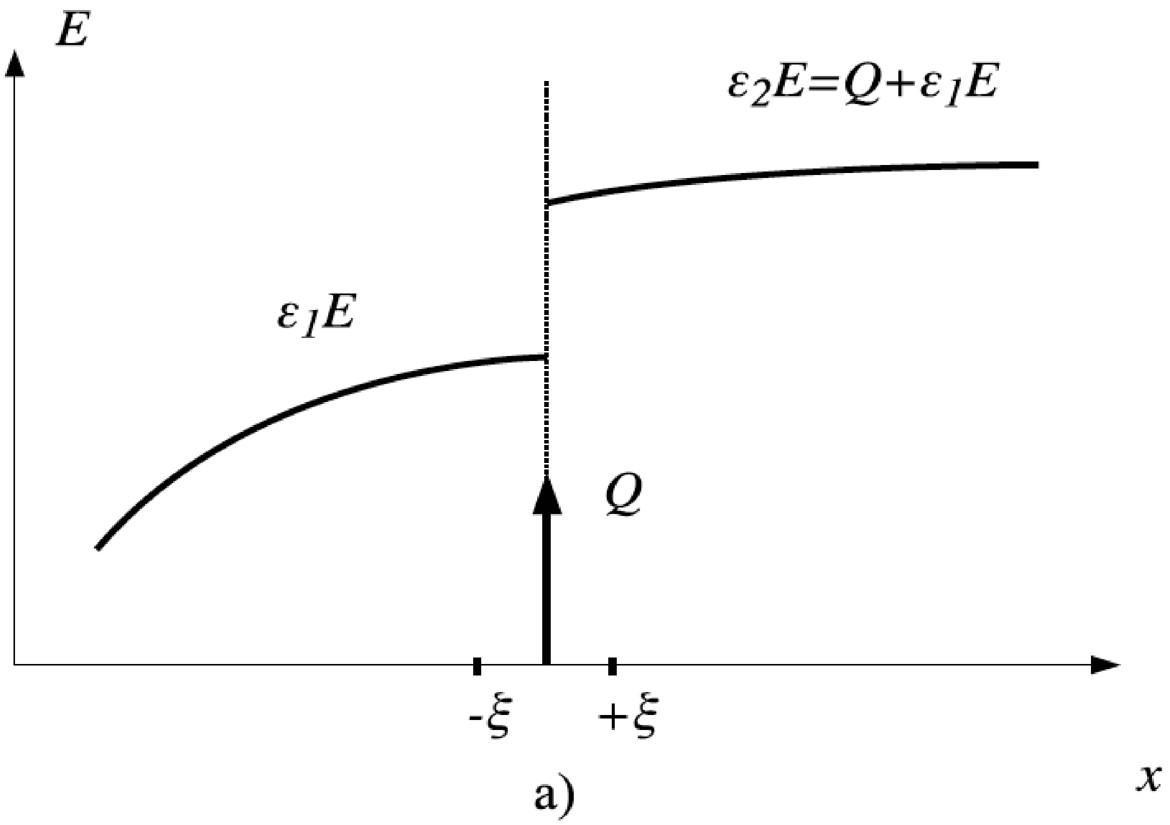
$$\varepsilon \frac{d^2\phi}{dx} = -\rho$$

Condiciones de borde: E

- Carga localizada en el espacio
  - Campo eléctrico localizado en el espacio
  - Líneas de campo comienzan en +q y terminan en –q

Condiciones de borde: E

- Interfaz entre 2 materiales



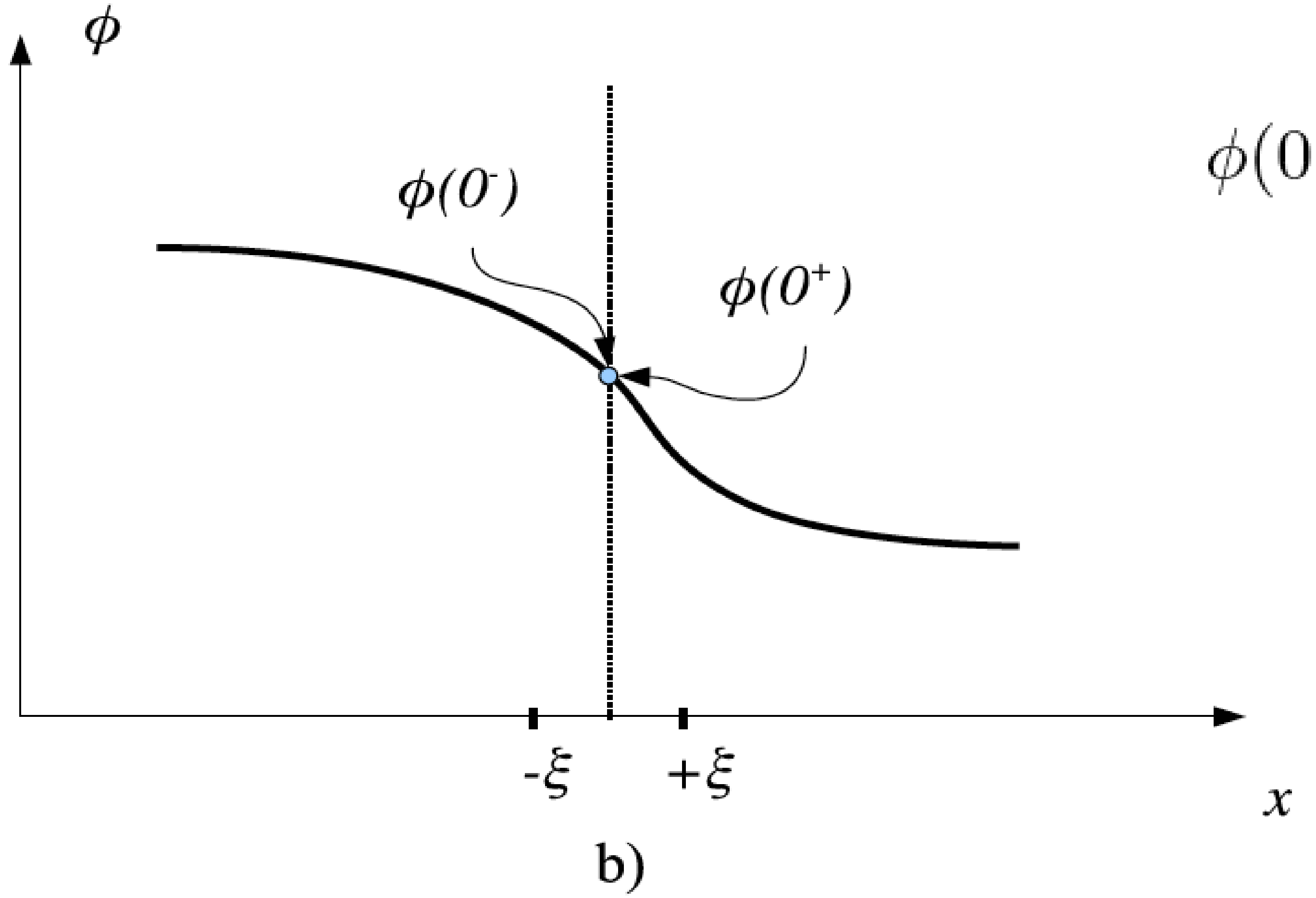
$$\int_{-\xi}^{\xi} d(\varepsilon E) = \int_{-\xi}^{\xi} \rho dx$$

$$\varepsilon_2 E_2 - \varepsilon_1 E_1 = Q$$

$$\varepsilon_2 E_2 = \varepsilon_1 E_1$$

Si Q=0

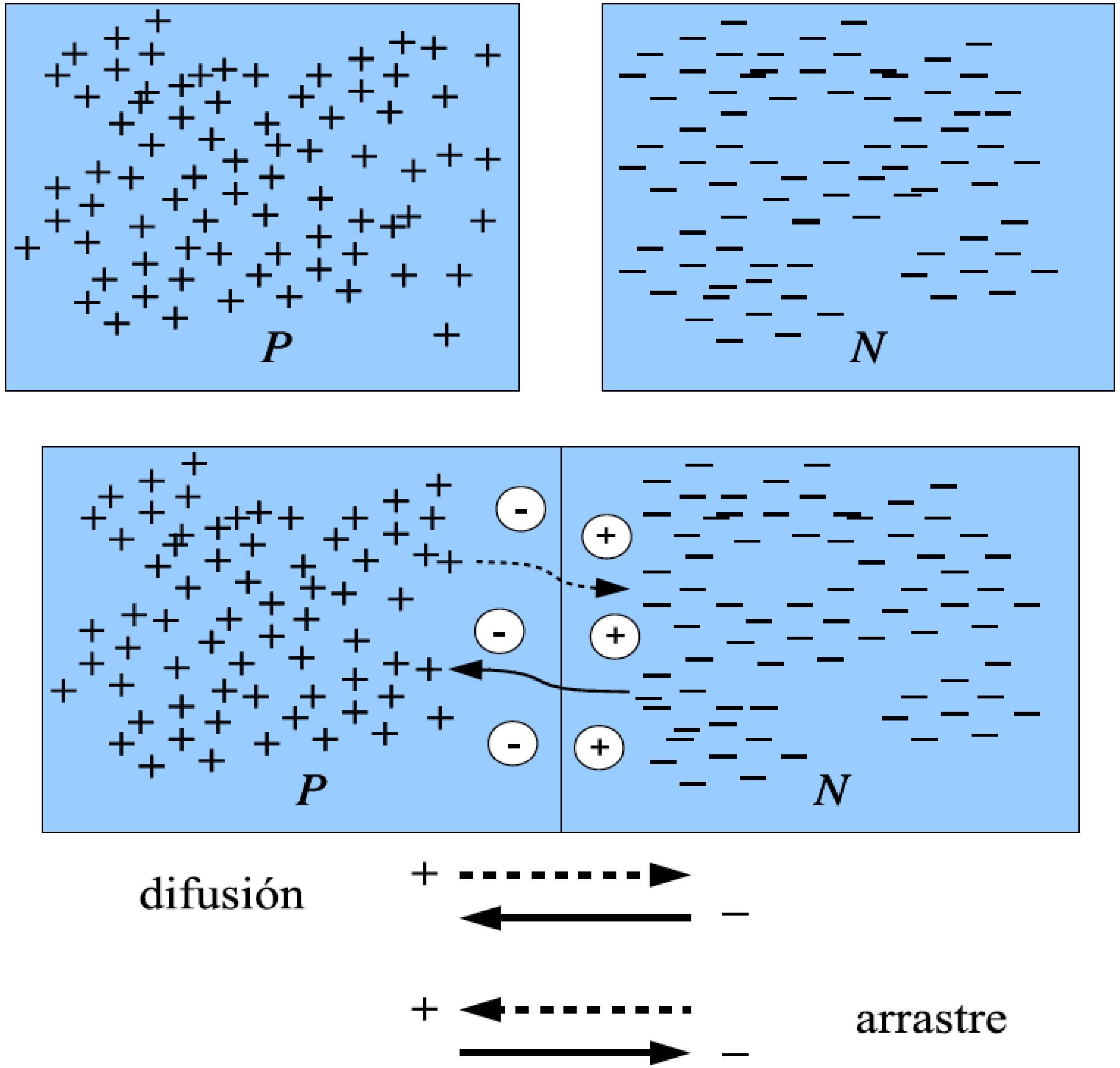
Condiciones de borde: potencial



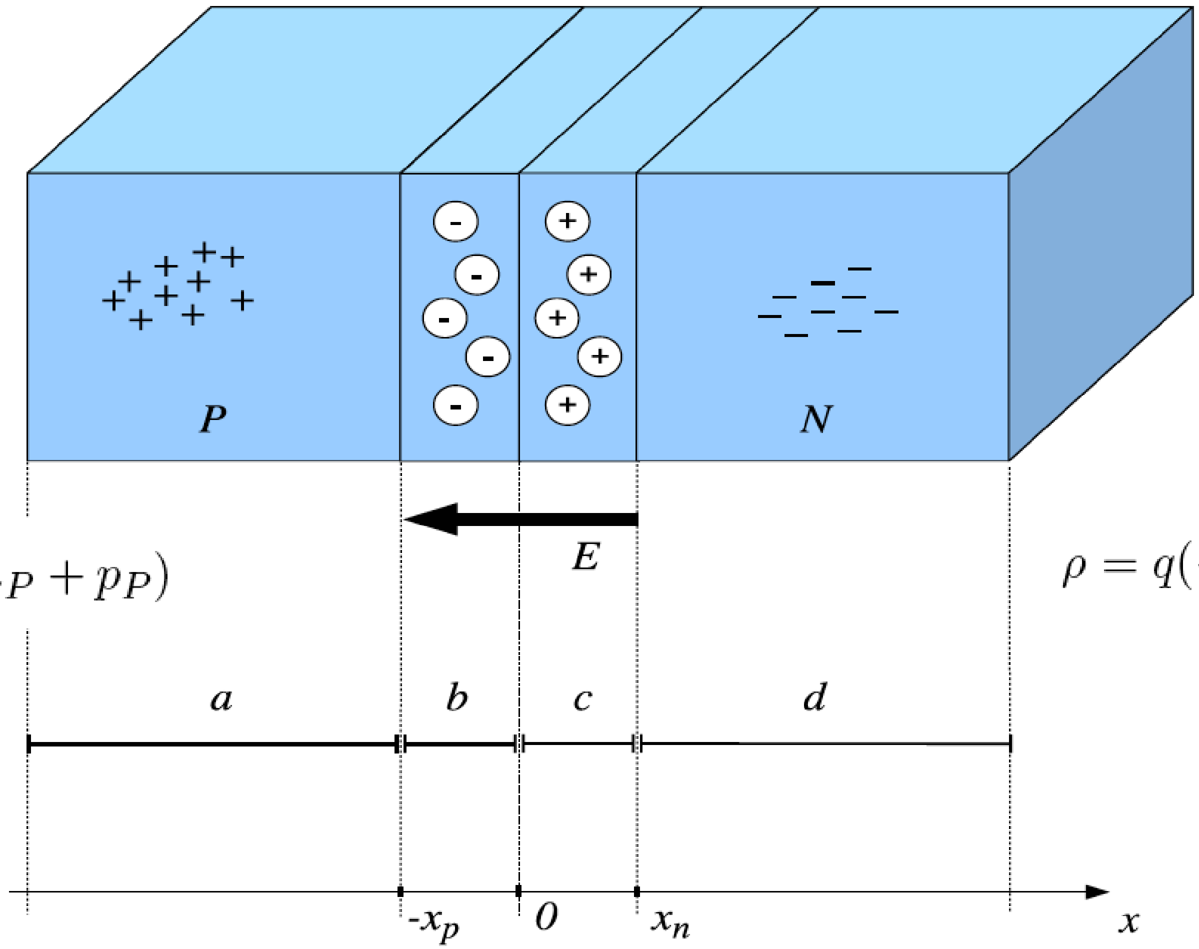
$$\phi(0^-) = \phi(0^+)$$

Juntura: Descripción cualitativa

$$\boxed{\phi_B \triangleq \phi_{n,p} = \phi_n - \phi_p}$$



Electroestática



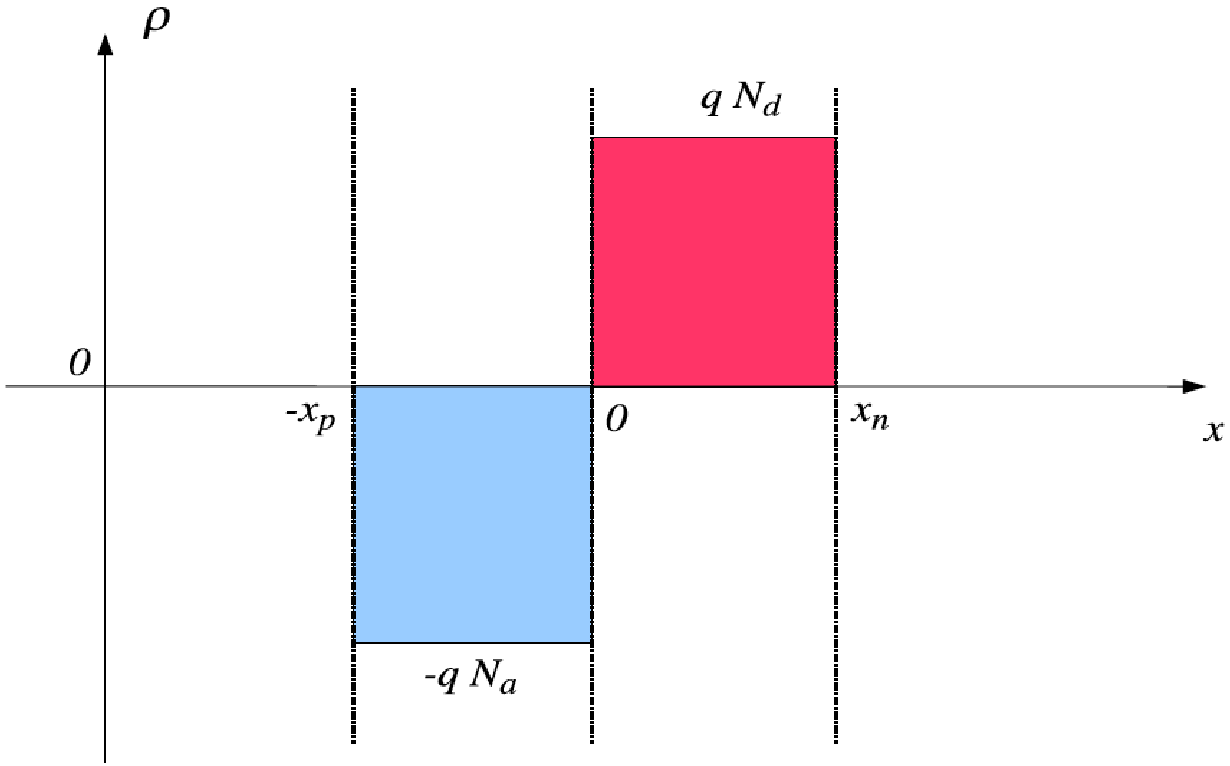
$$\rho = q(-N_a - n_P + p_P)$$

$$\rho = q(-N_d - n_N + p_N)$$

Aproximación de vaciamiento

Zona de vaciamiento: no hay portadores

$$\rho = -qN_a \qquad \rho = qN_d$$



Campo Eléctrico

- Sustrato P y N:
  - Densidad de cargas nula
  - Campo eléctrico nulo
- Región de vaciamiento P

$$E(x) = \int_{-x_p}^{x} -\frac{qN_a}{\varepsilon_{Si}} d\xi = -\frac{qN_a \xi}{\varepsilon_{Si}}\Big|_{-x_p}^{x}$$

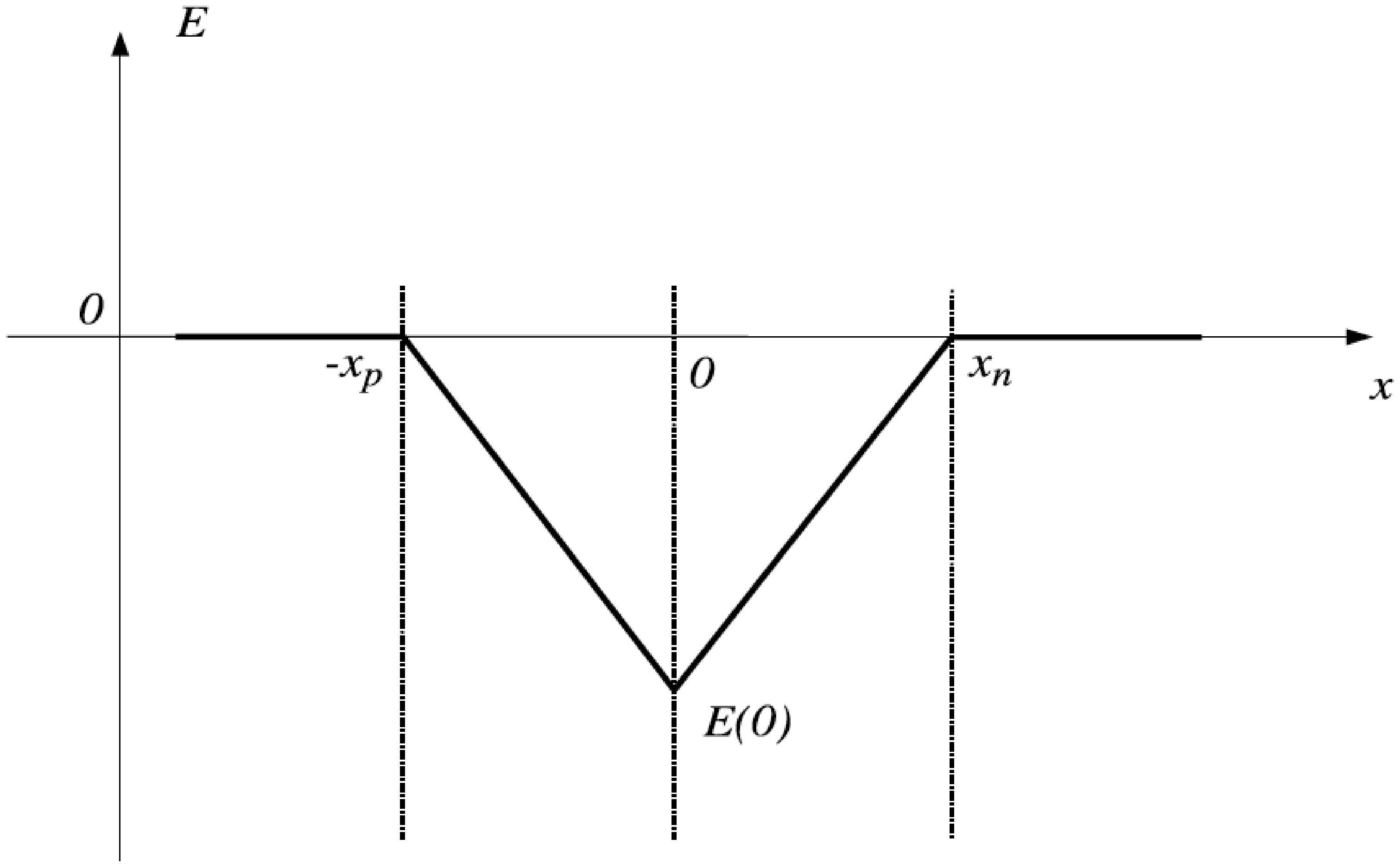
$$\boxed{E(x) = -\frac{qN_a}{\varepsilon_{Si}}(x + x_p)}$$

- Región de vaciamiento N

$$E(x) = E(0) + \int_{0}^{x} \frac{qN_d}{\varepsilon_{Si}} d\xi = E(0) + \frac{qN_d}{\varepsilon_{Si}} \xi\Big|_{0}^{x}$$

$$\boxed{E(x) = \frac{qN_d}{\varepsilon_{Si}}(x - x_n)}$$

Campo eléctrico



Campo eléctrico

- Condición de continuidad
  - No hay cambio de material
  - No hay carga laminar

$$E(0) = -\frac{qN_a}{\varepsilon_{Si}}(0 + x_p) = \frac{qN_d}{\varepsilon_{Si}}(0 - x_n)$$

  - Igualdad de cargas a ambos lados de la juntura

$$\boxed{N_a x_p = N_d x_n}$$

Potencial

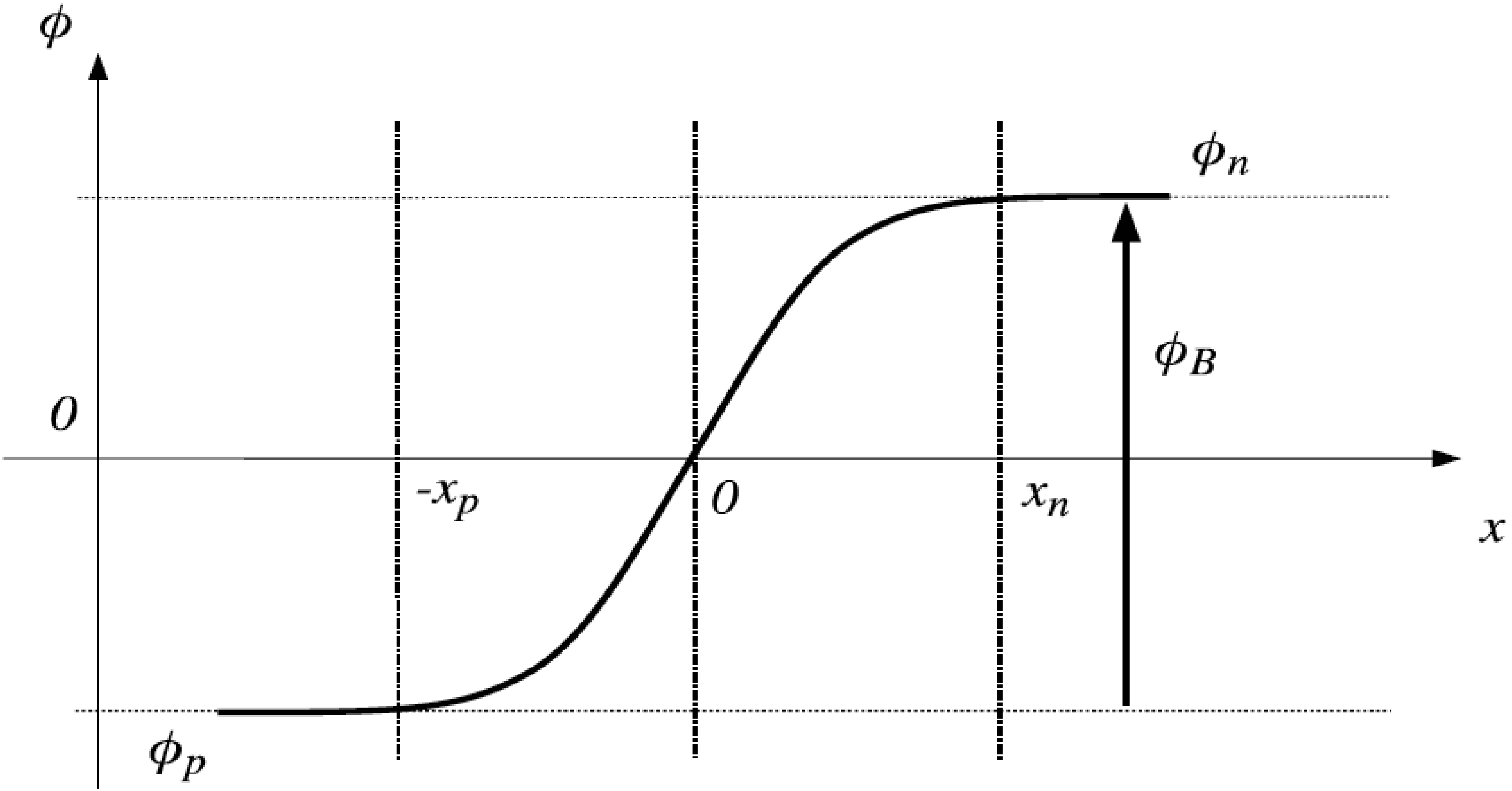
- Zona de vaciamiento P

$$\phi = \phi_0 + \int_{-x_p}^{x} \frac{qN_a}{\varepsilon_{Si}}(\xi + x_p)d\xi \qquad \boxed{\phi = \phi_p + \frac{1}{2}\frac{qN_a}{\varepsilon_{Si}}(x + x_p)^2}$$

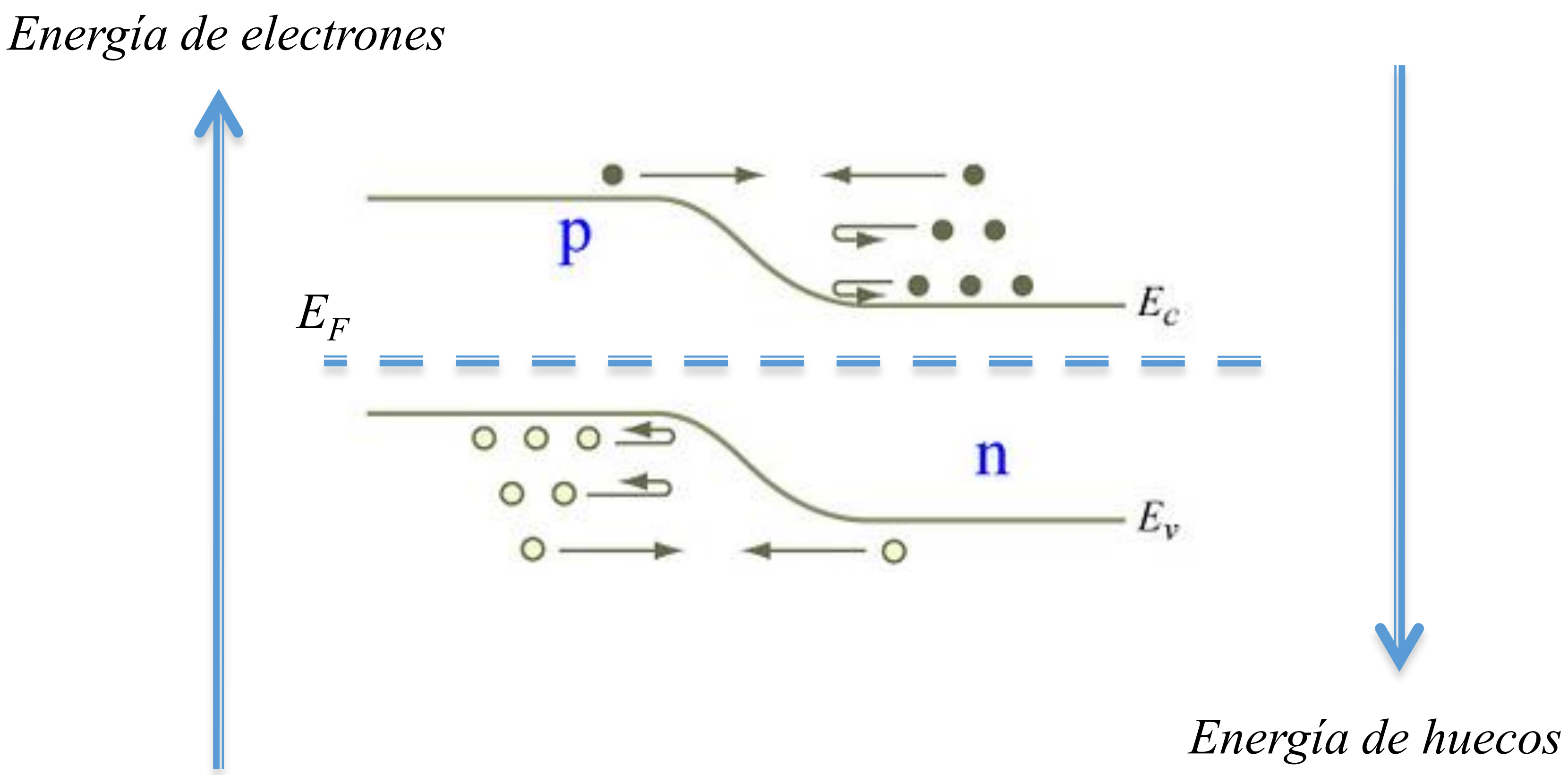
- Zona de vaciamiento N

$$\phi = \phi_0 - \int_{0}^{x} \frac{qN_d}{\varepsilon_{Si}}(\xi - x_n)d\xi \qquad \boxed{\phi = \phi_n - \frac{1}{2}\frac{qN_d}{\varepsilon_{Si}}(x - x_n)^2}$$

Potencial



Niveles de Energía



Potencial

- Continuidad
  - Igualdad en la juntura metalúrgica (x=0)

$$\phi_p + \frac{1}{2}\frac{qN_a}{\varepsilon_{Si}}x_p^2 = \phi_n - \frac{1}{2}\frac{qN_d}{\varepsilon_{Si}}x_n^2$$

- Longitudes zona de vaciamiento

$$\boxed{x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{Si}N_a\phi_B}{qN_d\left(N_a+N_d\right)}}}$$

$$\boxed{x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{Si}N_d\phi_B}{qN_a\left(N_a+N_d\right)}}}$$

Ejemplo

Ejemplo 12 *Un diodo semiconductor está dopado con* $N_a = 10 \times 10^{15}$ *y* $N_d = 10 \times 10^{16}$*. Halle la longitud de las zonas de vaciamiento en cada uno de los materiales, y la total.*

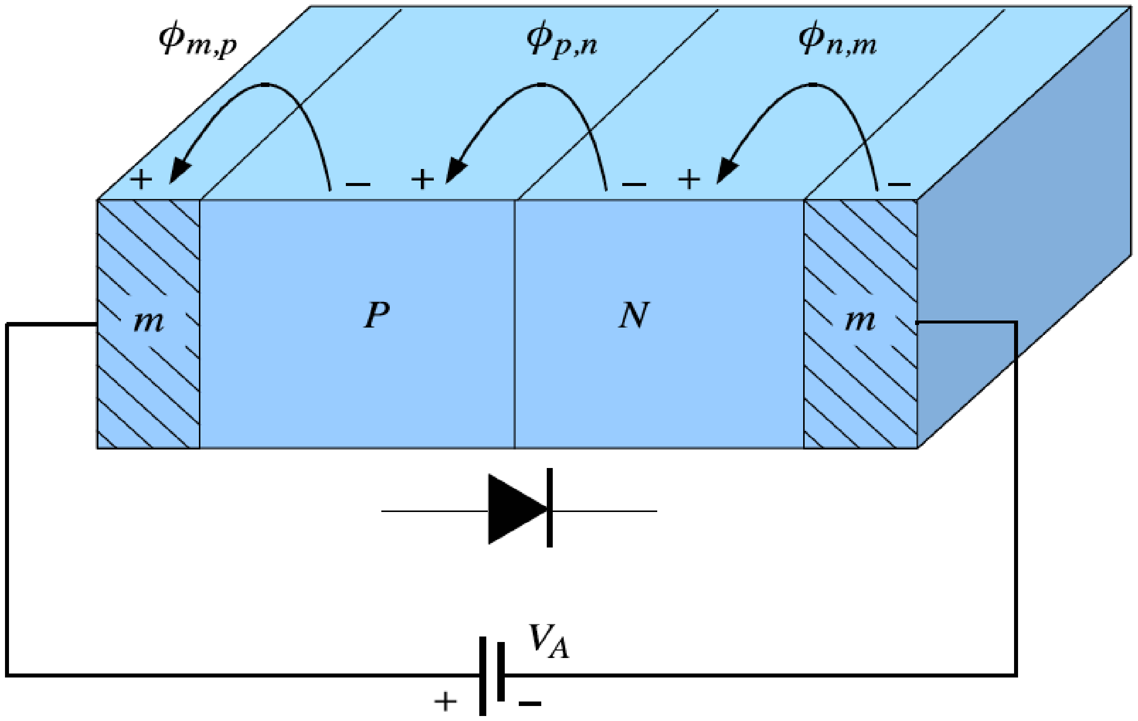
En primer lugar, por la regla de los 60mV, resulta $\phi_n = 60mV \times \log_{10}(10^6) = 360mV$, $\phi_p = -60mV \times \log_{10}(10^5) = -300mV$ *y* $\phi_B = 360mV - (-300mV) = 660mV$*. Luego, las longitudes de las zonas de vaciamiento se pueden calcular como:*

$$
\begin{aligned}
x_n &= \sqrt{\frac{2 \times 11{,}8 \times 8{,}854 \times 10^{-14} \times 10^{15} \times 660 \times 10^{-3}}{1{,}6 \times 10^{-19} \times 10^{16} \times (10^{16} + 10^{15})}} \\
&= 8{,}852 \times 10^{-6} cm = 88{,}52 nm \\
x_p &= \sqrt{\frac{2 \times 11{,}8 \times 8{,}854 \times 10^{-14} \times 10^{16} \times 660 \times 10^{-3}}{1{,}6 \times 10^{-19} \times 10^{15} \times (10^{16} + 10^{15})}} \\
&= 88{,}52 \times 10^{-6} cm = 0{,}8852 \mu m
\end{aligned}
$$

$$
x_B = 0{,}8852\mu m + 0{,}08852\mu m = 0{,}974\mu m
$$

Modelo de DC

- Objetivo: Hallar la expresión de la corriente del diodo

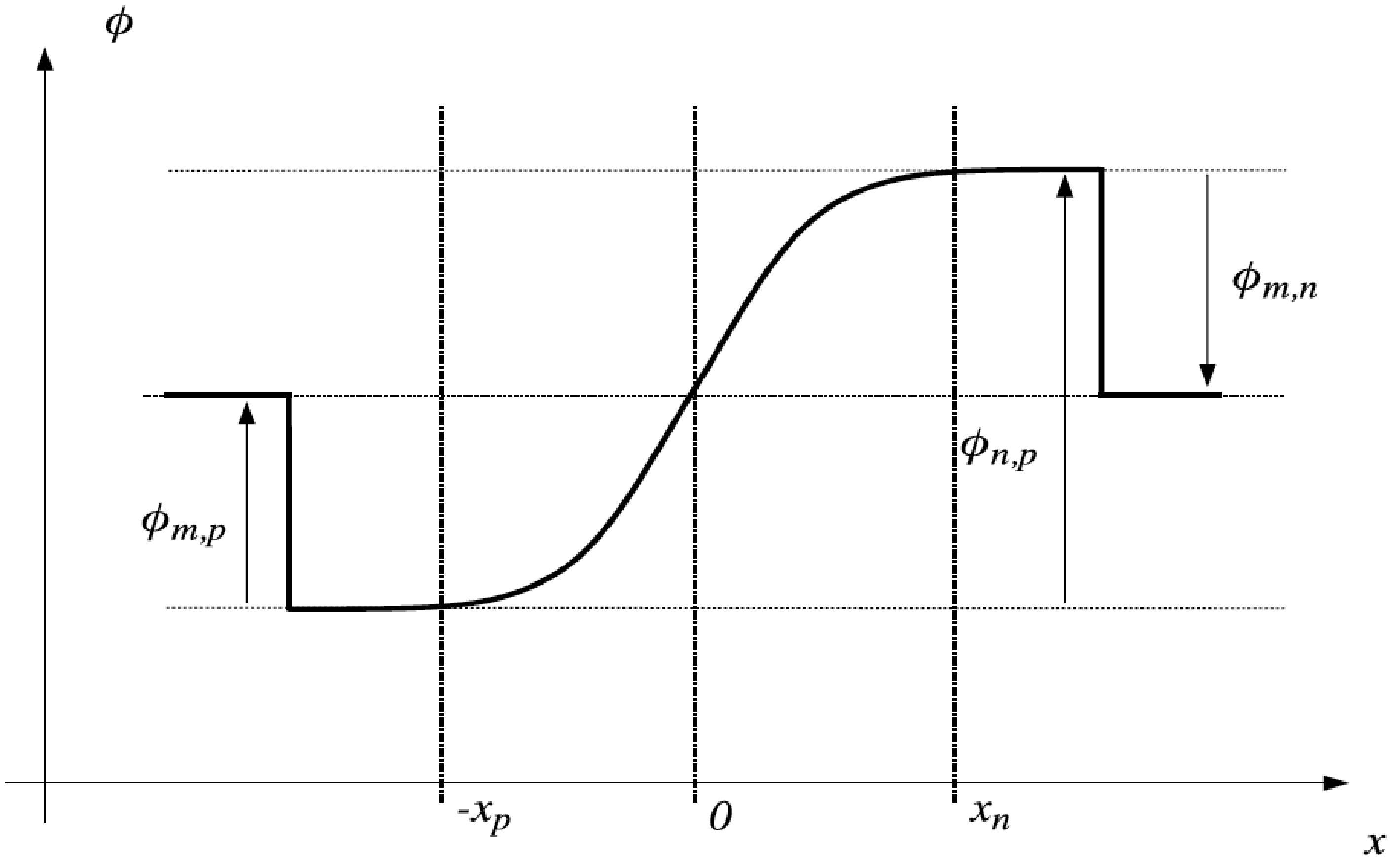


$$V_A = \phi_{m,p} + \phi_{p,n} + \phi_{n,m}$$

Modelo de DC

- Si la tensión aplicada es nula:

$$-\phi_{p,n} = \phi_B = \phi_{m,p} - \phi_{m,n}$$



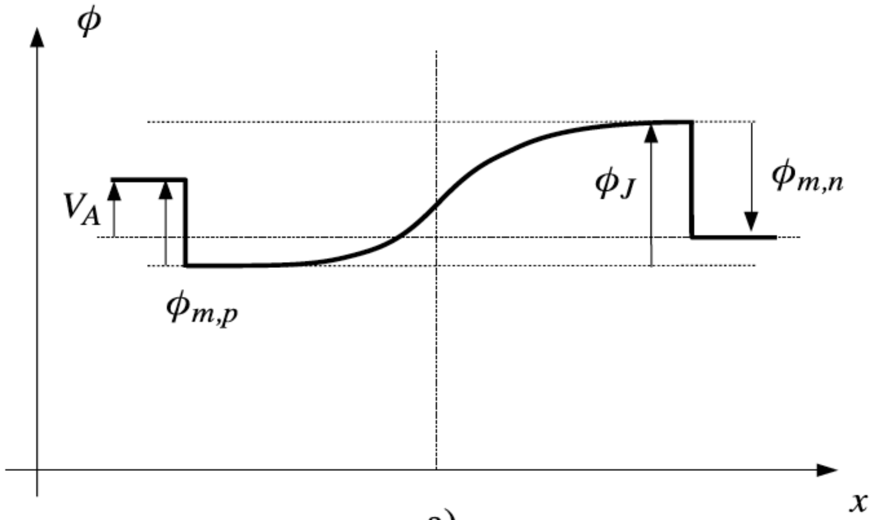
Modelo de DC

- Si se aplica tensión:

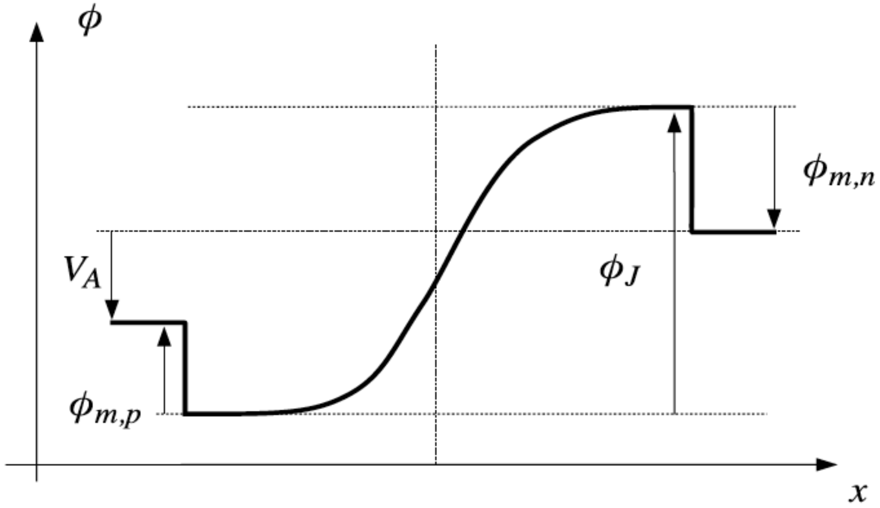
$$V_A = \phi_{m,p} - \phi_{m,n} - \phi_J$$

$$\phi_J = \phi_B - V_A$$

  - La tensión en la juntura es distinta de ϕ_B



a)



b)

Ley de la Juntura

- Relación entre portadores mayoritarios y minoritarios a ambos lados de la juntura

  - Potenciales

Restando ambos

$$\begin{aligned}\phi_p &= U_T \ln\left(\frac{n_P}{n_i}\right) \\ \phi_n &= U_T \ln\left(\frac{n_N}{n_i}\right)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\phi_B &= \phi_n - \phi_p = U_T\left(\ln\left(\frac{n_N}{n_i}\right) - \ln\left(\frac{n_P}{n_i}\right)\right) \\ &= U_T \ln\left(\frac{n_N n_i}{n_i n_P}\right) = U_T \ln\left(\frac{n_N}{n_P}\right)\end{aligned}$$

$$\boxed{n_P = N_d e^{-\phi_B/U_T}}$$

Ley de la Juntura

- Considerando los huecos

  - Potenciales

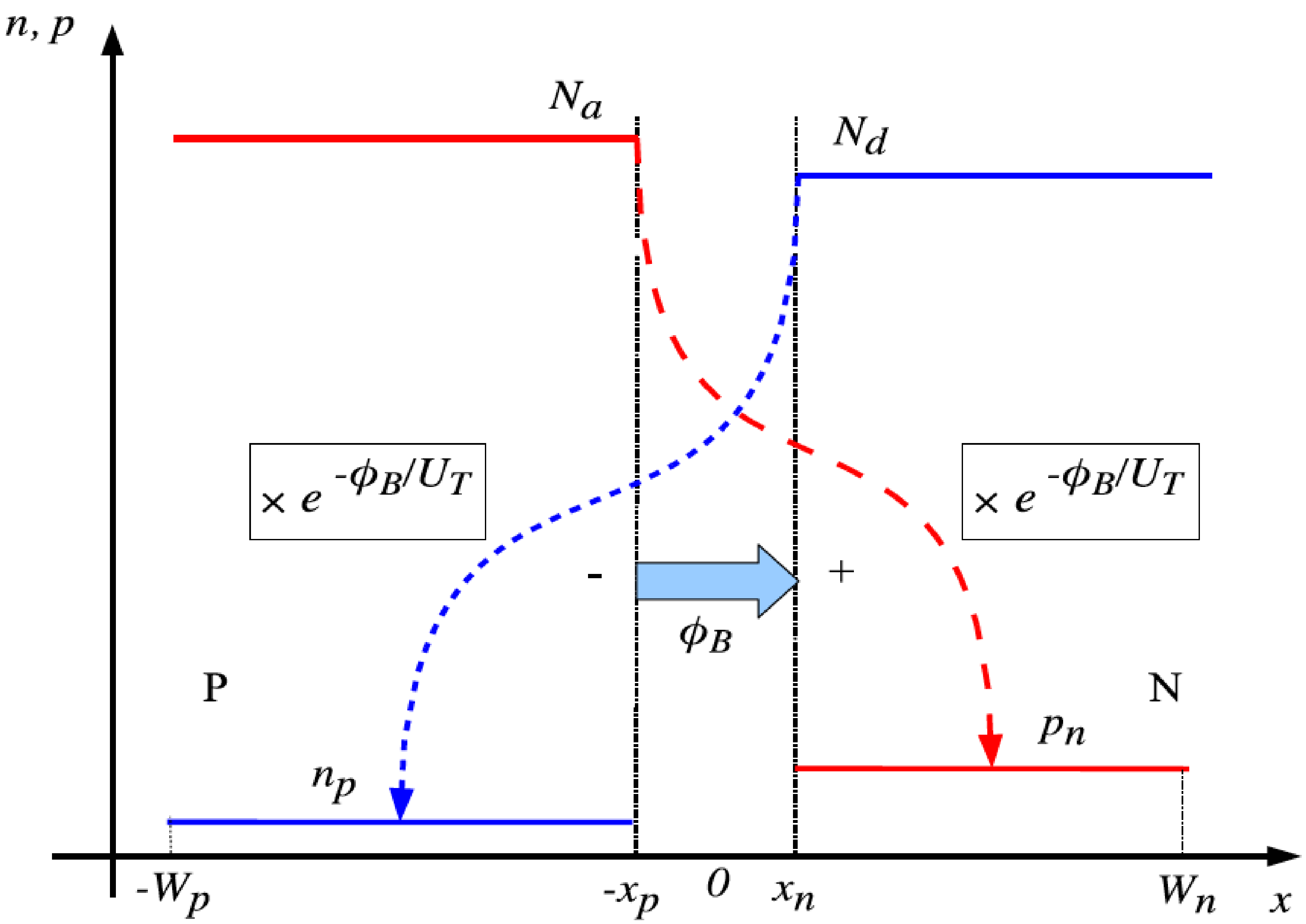
$$
\begin{aligned}
\phi_p &= -U_T \ln\left(\frac{p_P}{n_i}\right) \\
\phi_n &= -U_T \ln\left(\frac{p_N}{n_i}\right)
\end{aligned}
$$

Restando ambos

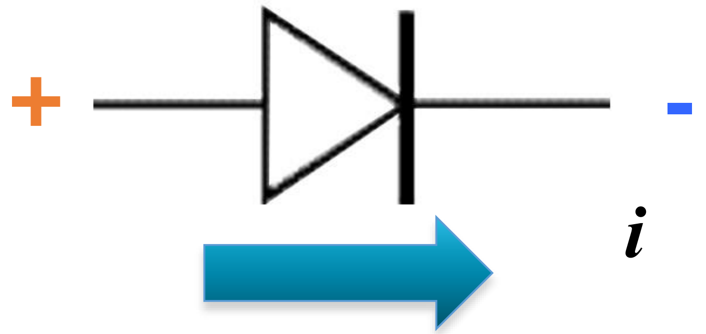
$$\phi_B = \phi_n - \phi_p = -U_T \ln\left(\frac{p_N}{p_P}\right)$$

$$\boxed{p_N = N_a e^{-\phi_B/U_T}}$$

Ley de la Juntura



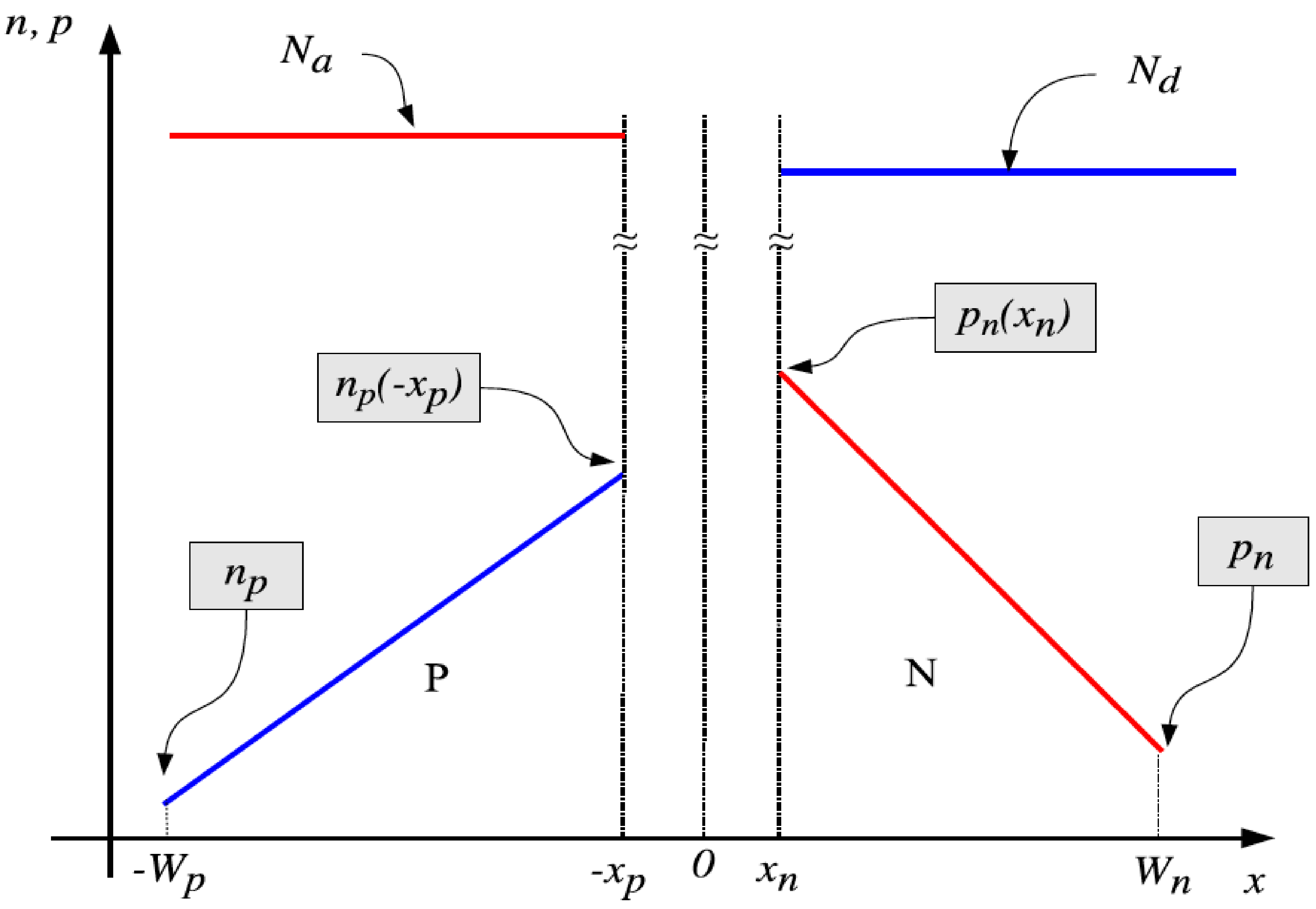
Solución en directa



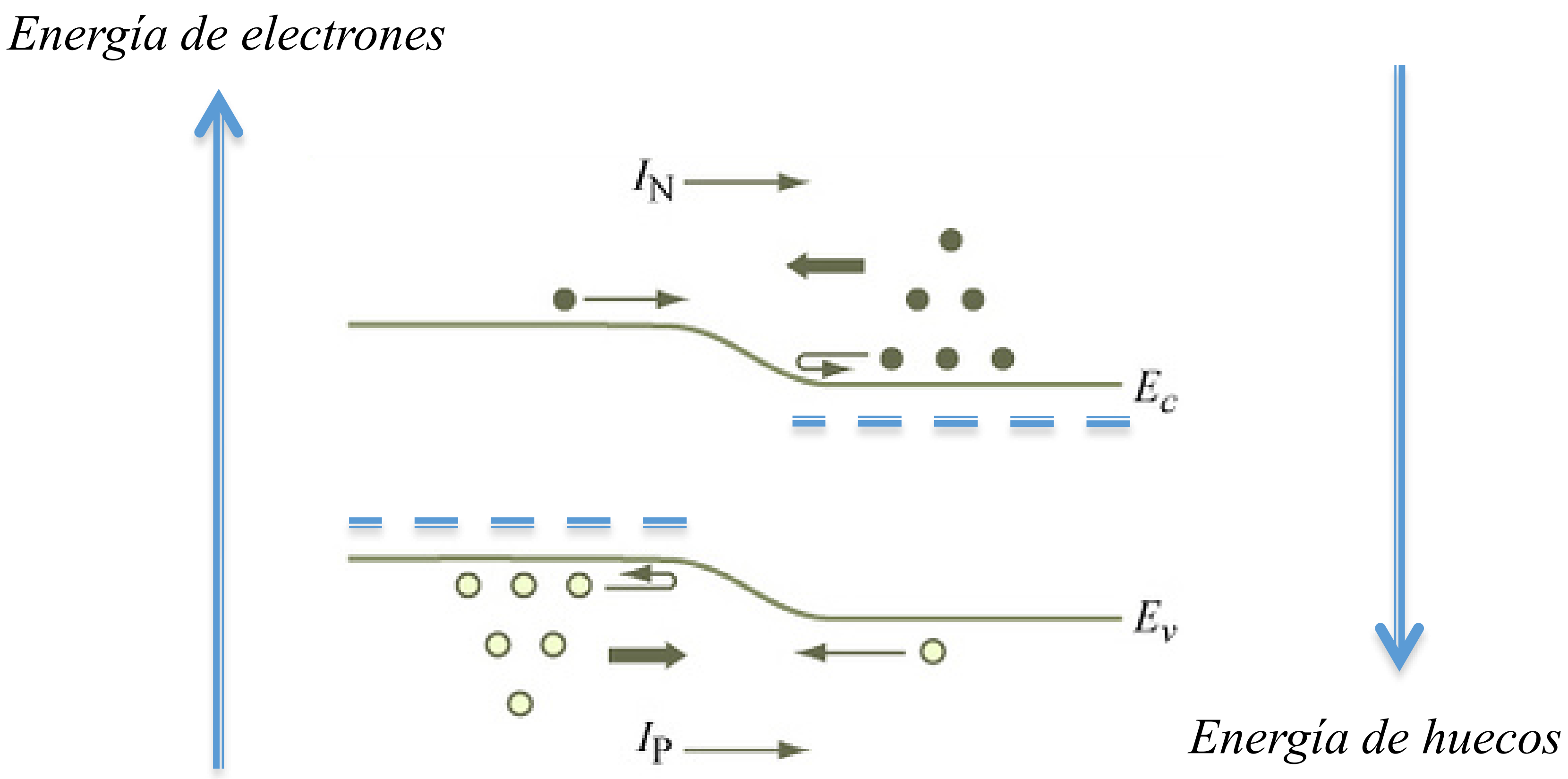
- Corriente causada por difusión
- Suposiciones
  - Longitud de la juntura corta: no hay recombinación
  - Corriente suficientemente pequeña (baja inyección de portadores)
    - Puede asumirse equilibrio térmico

$$n_P(-x_p) \ll N_a \quad p_N(x_n) \ll N_d$$

Solución en directa



Niveles de Energía



Corriente en el material P

- Difusión en el lado P

$$J_n^d = qD_n\frac{dn}{dx} = qD_n\frac{n_P(-x_p)-n_P(-W_p)}{-x_p+W_p}$$

- Considerando:

$$n_P(-x_p) = N_d e^{-\phi_J/U_T}$$

$$N_d e^{-\phi_J/U_T} = N_d e^{-\phi_B/U_T} e^{V_A/U_T} = n_P e^{V_A/U_T}$$

$$J_n^d = \frac{qD_n n_P}{W_p}\left(e^{V_A/U_T-1}\right)$$

Corriente en el material N

- Difusión en el lado N

$$J_p^d = -qD_p\frac{dp}{dx} = -qD_p\frac{p_N(W_n) - p_N(x_n)}{W_n - x_n}$$

- Considerando:

$$p_N(x_n) = N_a e^{-\phi_J/U_T}$$

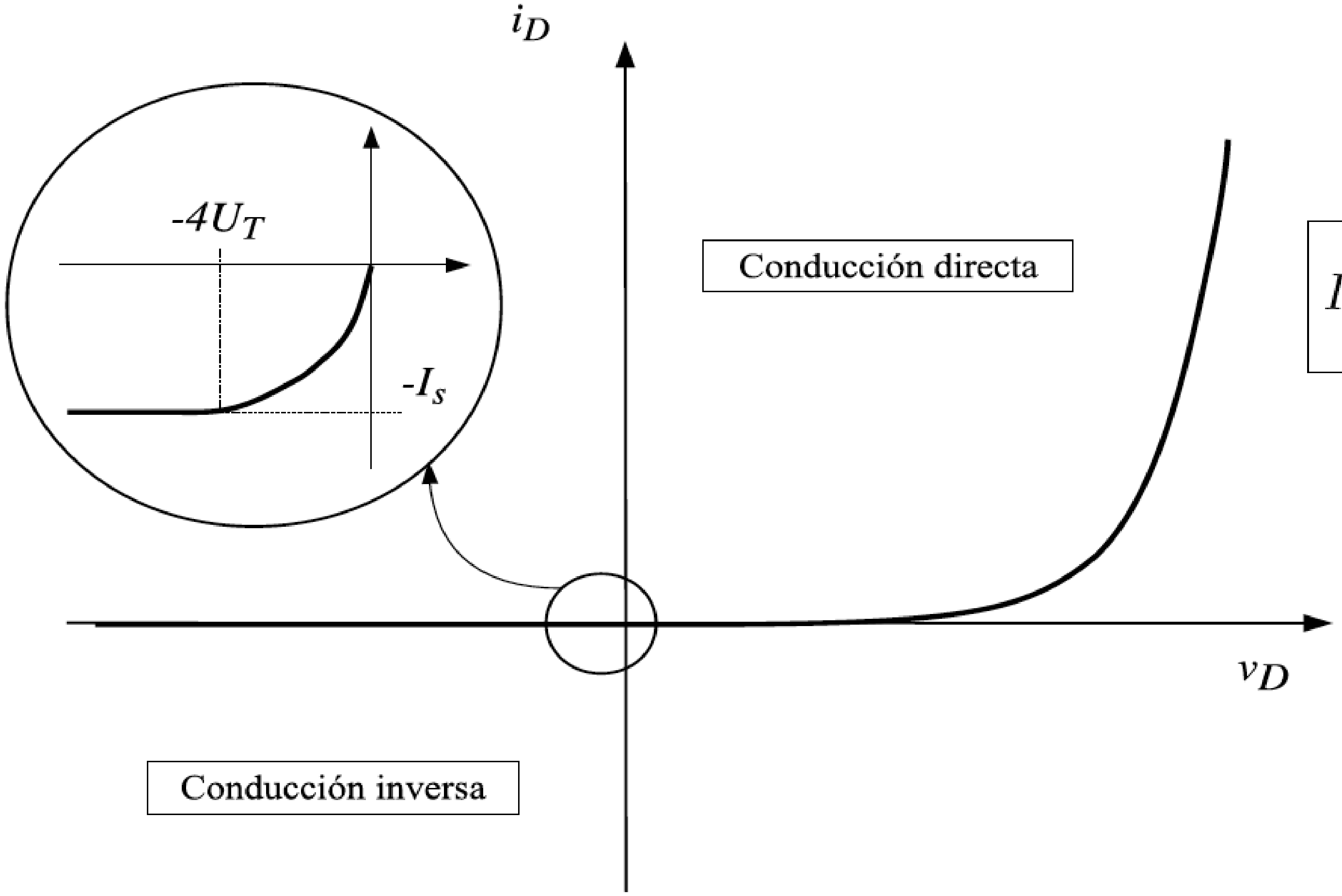
$$N_a e^{-\phi_J/U_T} = N_a e^{-\phi_B/U_T} e^{V_A/U_T} = p_N e^{V_A/U_T}$$

$$J_p^d = \frac{qD_p p_N}{W_n}\left(e^{V_A/U_T-1}\right)$$

Corriente total

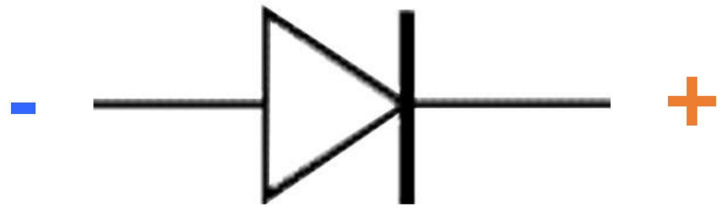
$$J_D = J_p^d + J_n^d$$

$$\boxed{i_D = I_s \left(e^{v_D/U_T} - 1 \right)}$$



$$\boxed{I_s = qA \left(\frac{D_p p_N}{W_n} + \frac{D_n n_P}{W_p} \right)}$$

Solución en inversa

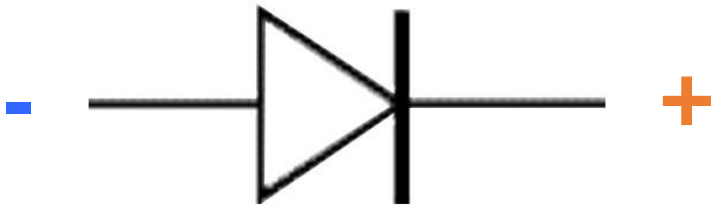


- Ecuación planteada sigue siendo válida
- Portadores:
  - Lado P

$$
\begin{aligned}
n_P(-x_p) &= N_d e^{-\phi_B/U_T} e^{V_A/U_T} \\
&= n_P e^{V_A/U_T}
\end{aligned}
$$

◦ Si Va es negativa (<-100mV) $e^{V_A/U_T} \approx 0$ $\Rightarrow$ $n_P(-x_p) = 0$

Solución en inversa

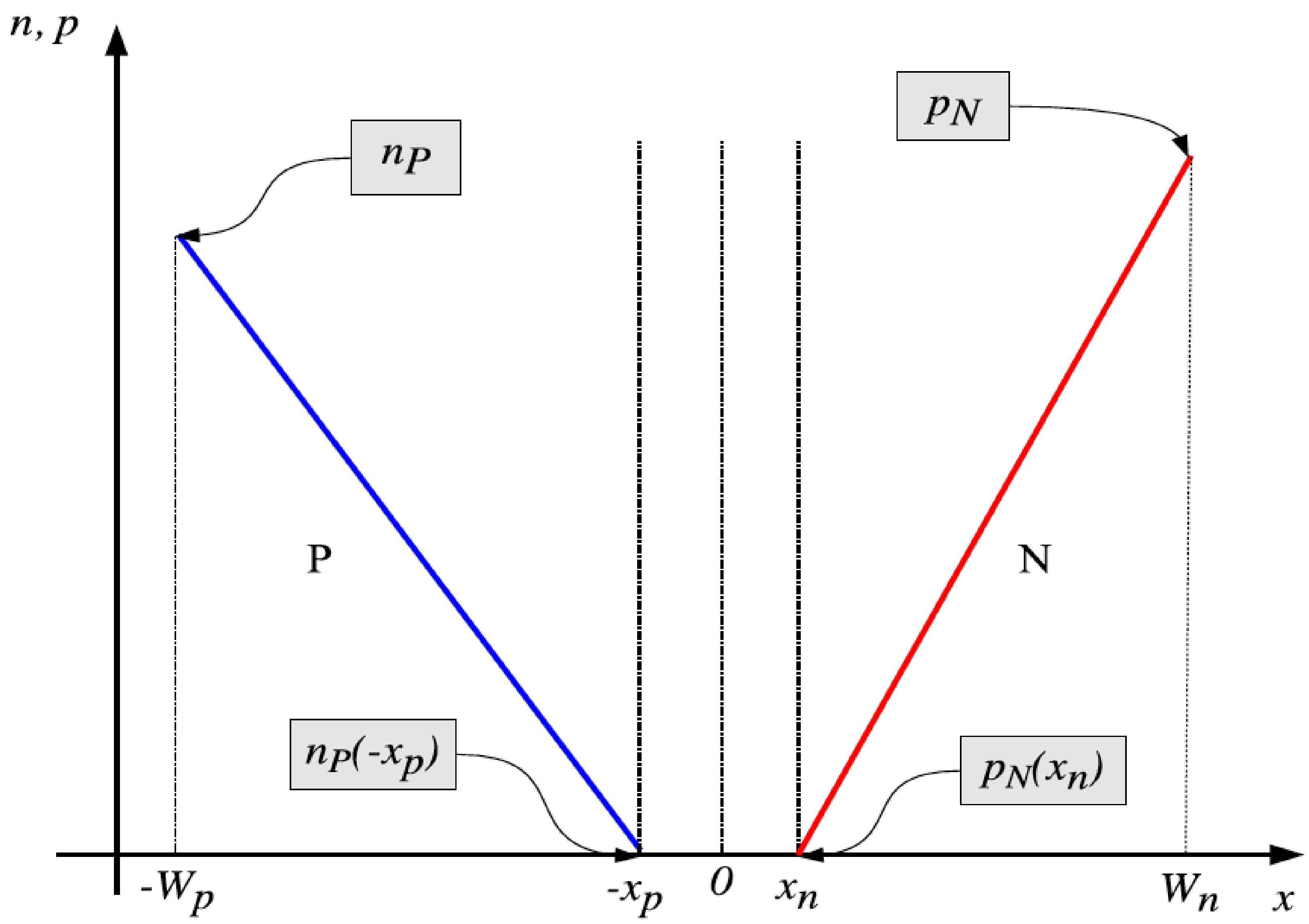


- Ecuación planteada sigue siendo válida
- Portadores:
  - Lado N

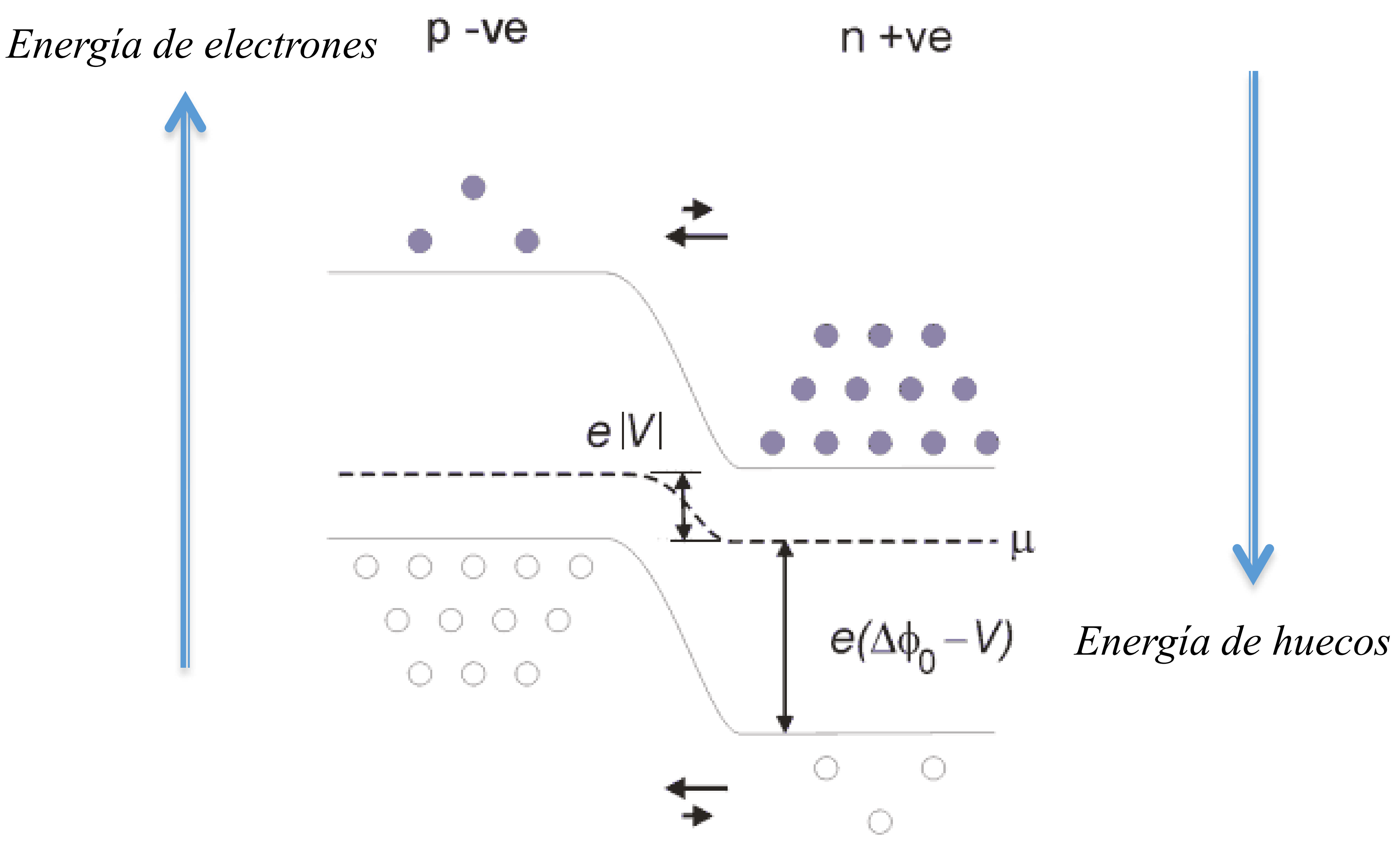
$$
\begin{aligned}
p_N(x_n) &= N_a e^{-\phi_B/U_T} e^{V_A/U_T} \\
&= p_N e^{V_A/U_T}
\end{aligned}
$$

  - Si Va es negativa (<-100mV) $e^{V_A/U_T} \approx 0$ $\Rightarrow$ $p_N(x_n)=0$

Inversa: perfil de portadores



Niveles de Energía



Inversa

- Corriente

$$\boxed{I_D = -I_s}$$

- Zonas de vaciamiento

$$x_n(V_A) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{Si} N_a(\phi_B - V_A)}{qN_d\left(N_a + N_d\right)}} \qquad x_p(V_A) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{Si} N_d(\phi_B - V_A)}{qN_a\left(N_a + N_d\right)}}$$

$$x_B(V_A) = x_p(V_A) + x_n(V_A) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{Si}(\phi_B - V_A)}{q}\left(\frac{1}{N_d} + \frac{1}{N_a}\right)}$$

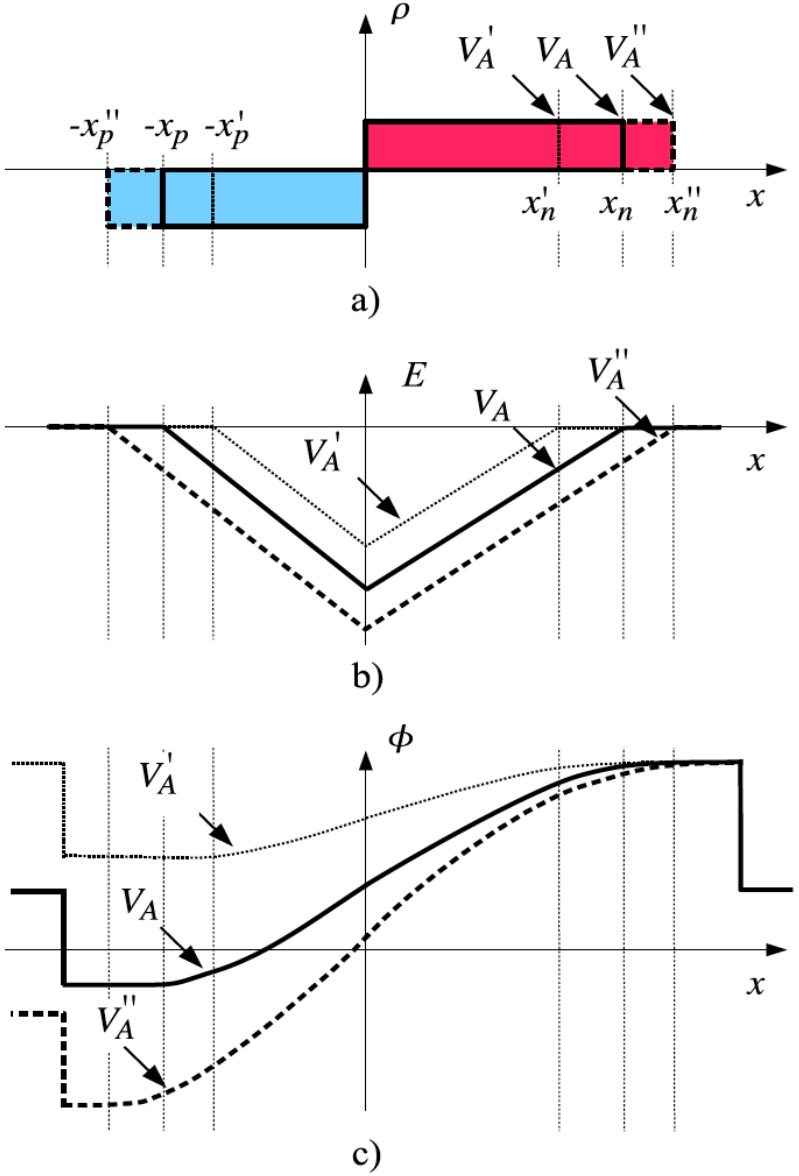
Inversa

- Zonas de vaciamiento

$$x_B(V_A) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{Si}\phi_B}{q}\left(\frac{1}{N_d}+\frac{1}{N_a}\right)(1-\frac{V_A}{\phi_B})}$$
$$= x_B(0)\sqrt{(1-\frac{V_A}{\phi_B})}$$

- Máximo campo eléctrico

$$E_{max} = E(0) = -q\frac{N_d}{\varepsilon_{Si}}x_n(V_A) = -q\frac{N_a}{\varepsilon_{Si}}x_p(V_A)$$



$V_A<0$

Dependencia con T

- La corriente de pérdida en un diodo, se duplica cada 10 grados

$$I_s \sim T^{(3/2)} \exp\frac{-E_g}{kT} \approx \exp\frac{-E_g}{kT} \quad \approx I_s\Big|_{T_a}(1+\Delta T/7)$$

- La tensión disminuye 2mV por grado

$$\begin{aligned} v_D &= v_D\Big|_{T_a} - \frac{U_T}{I_s}\Delta I_s \\ &= v_D\Big|_{T_a} - \frac{U_T}{I_s}\times\frac{I_s\Delta T}{7} = v_D\Big|_{T_a} - 3{,}5mV/^oC \times \Delta T \end{aligned}$$