Operación Física de los Diodos

Rev. 1.5

Curso Electrónica Fundamental

Fernando Silveira

Instituto de Ingeniería Eléctrica

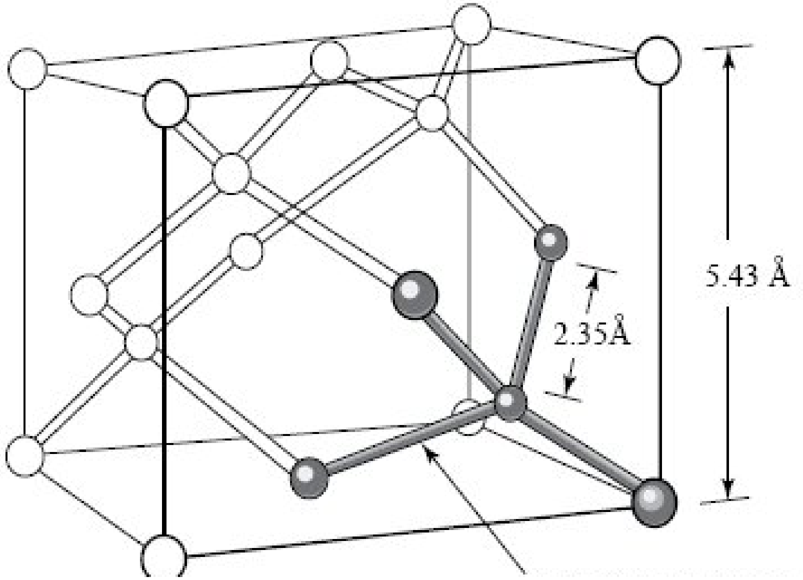
Parte I: Conceptos Básicos de Semiconductores

Materiales desde el punto de vista de conducción de corriente eléctrica

- Conducción de corriente eléctrica => existencia de partículas cargadas (**portadores**) capaces de moverse libremente a través del medio => **portadores libres**
- Tres clases de materiales:
  - **Conductores** (Ej. Aluminio, Cobre, Plata): Los electrones de la últimas capas atómicas no están ligadas a un átomo, son "compartidos por todos" => pueden moverse libremente a través del cristal.
  - **Aislantes** (Ej. Diamante (carbono)): electrones firmemente ligados a los átomos => no hay portadores libres.
  - **Semiconductores** (Silicio (Si), Germanio (Ge), Arseniuro de Galio (GaAs)): Aislantes a baja temperatura, malos conductores a temperatura ambiente.

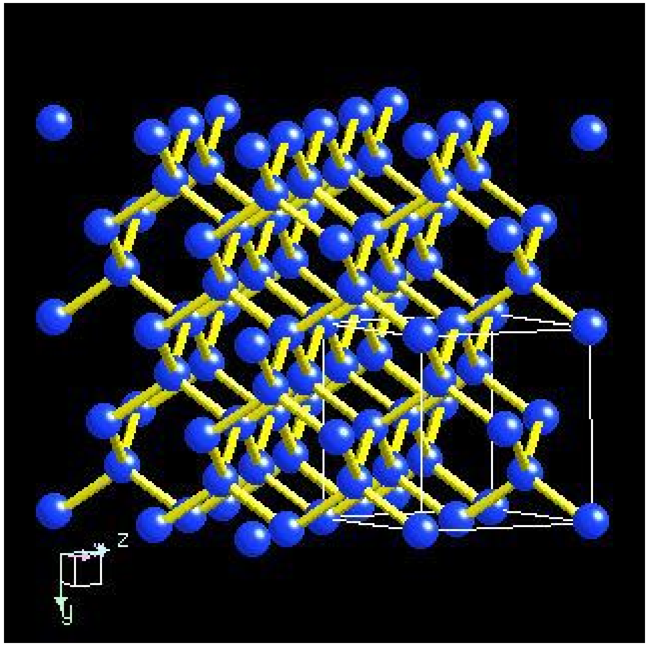
Estructura del cristal de Si puro (Si intrínseco) (1)

- El Si tiene 4 electrones de valencia.
- En el cristal cada átomo se “engancha” con otros 4 átomos por medio de enlaces covalentes: Dos átomos comparten dos electrones (uno de cada uno) de su última capa (capa de valencia).

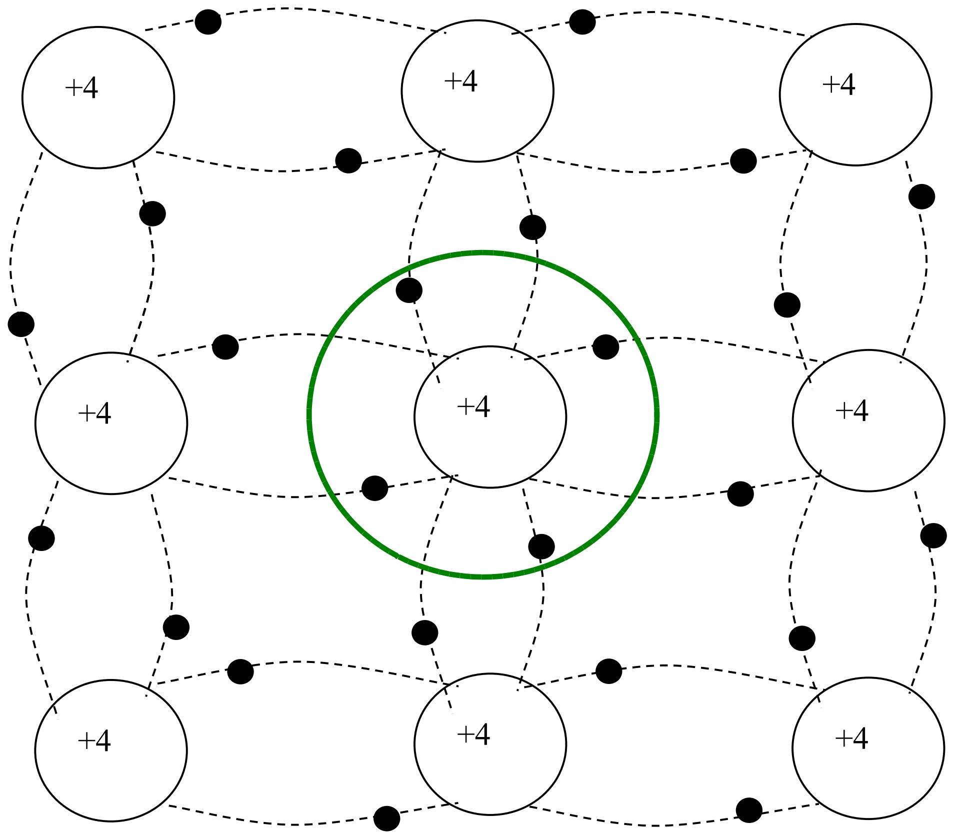


Enlace covalente

Figura tomada de curso EE105, Andreas Andreou

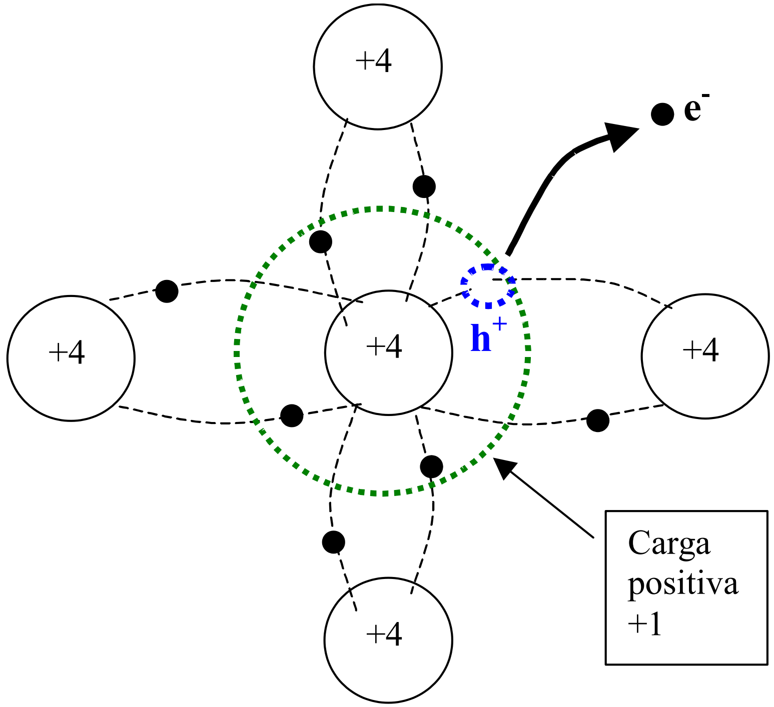


Estructura del cristal de Si puro (Si intrínseco) (2)



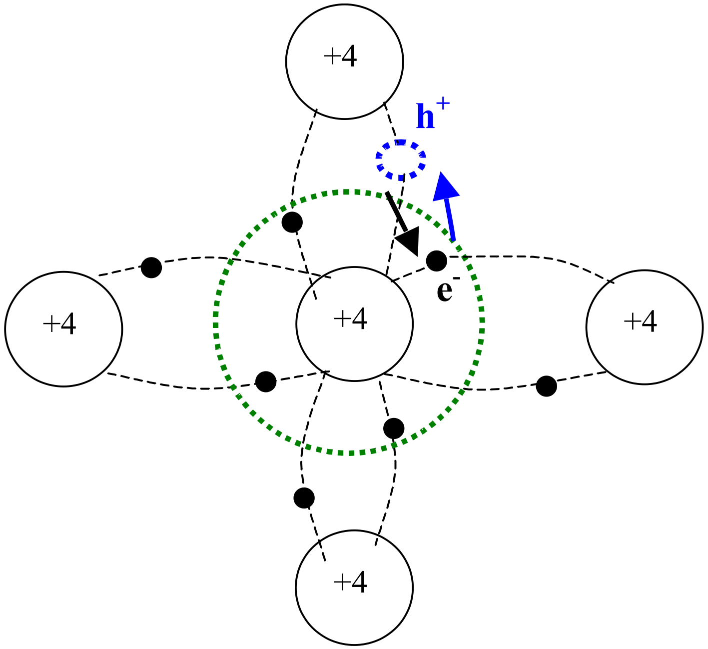
- Situación a baja temperatura: todos los electrones en enlaces covalentes => comportamiento como aislante.

Generación térmica de par electrón hueco



- Se generan dos portadores libres: un electrón y un hueco (partícula ficticia con carga positiva +1).
- Muy pocos: a temperatura ambiente un par electrón hueco cada 10^{12} átomos de Si

Movimiento de los huecos



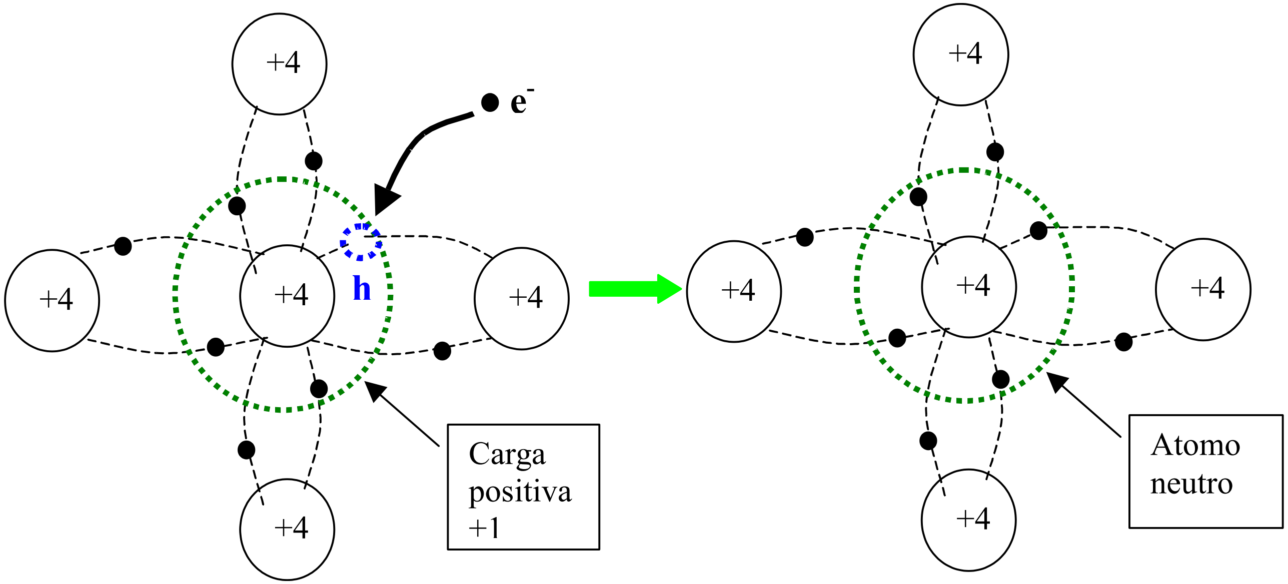
- En realidad movimiento de e^- entre enlaces covalentes, equivalente a movimiento de una partícula con carga positiva, el hueco, en sentido contrario

- Se le asigna al hueco una cierta masa, que responde a cómo se mueve y otras características
- Concepto de hueco permite tratar el fenómeno con herramientas de la física clásica

Mecanismos de generación par electrón - hueco

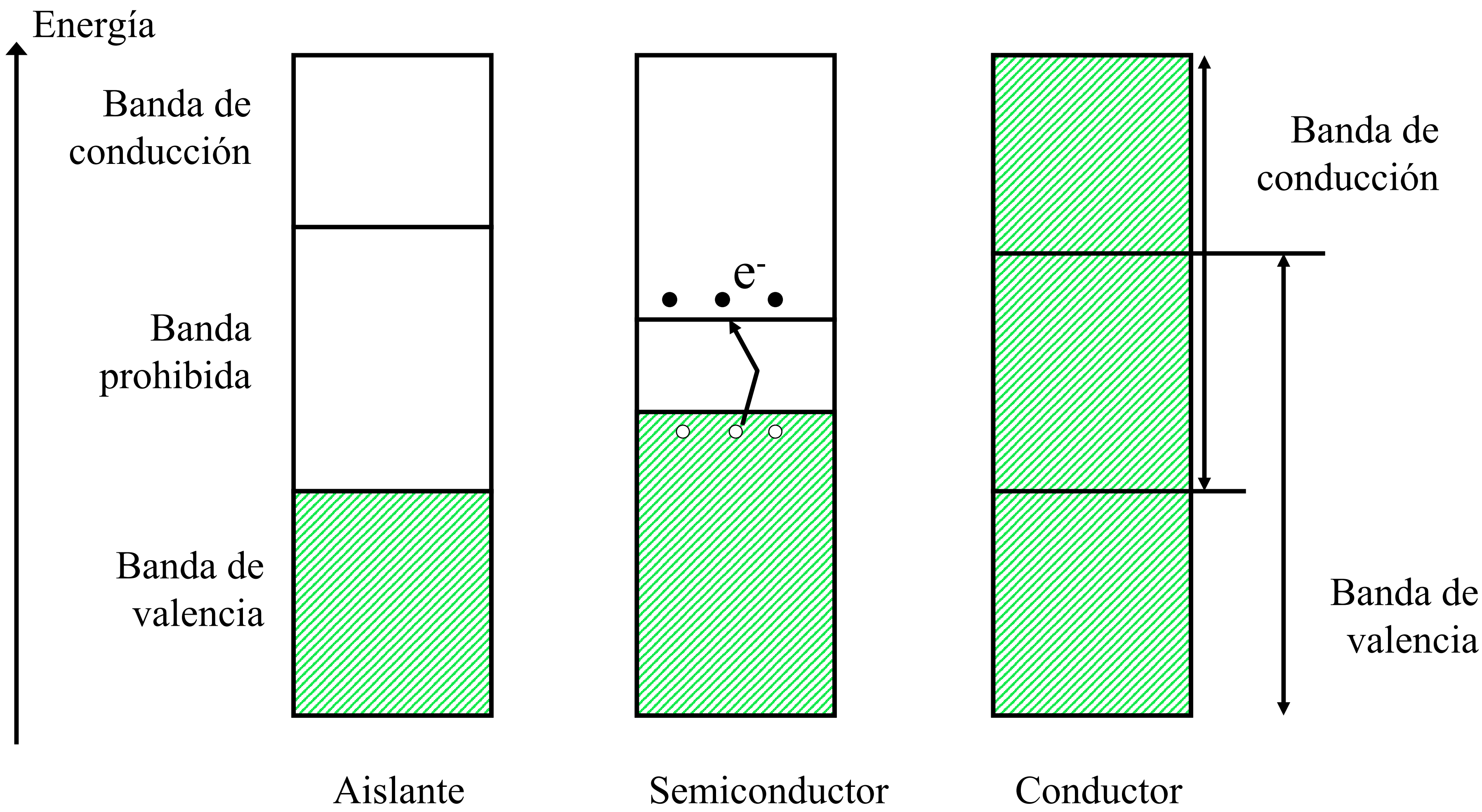
- Térmico
- Impacto
  - Electrón acelerado
    - De importancia para fenómenos de confiabilidad de componentes
  - Partículas radioactivas
    - De importancia en aplicaciones espaciales
- Efecto fotoeléctrico
  - Fotón que impacta sobre enlace covalente
    - Principio usado para la traducción de señales ópticas a eléctricas

Recombinación de par electrón hueco



- Mecanismo opuesto a la generación (libera energía)
- En algunos semiconductores se puede liberar como un fotón
  - Principio de los diodos emisores de luz (LEDs)

Formulación alternativa: Diagramas de bandas de energía



Si intrínseco y extrínseco

- n: concentración de electrones libres (e^-/unidad de volumen)
- p: concentración de huecos libres (h^+/unidad de volumen)
- Se generan siempre de a pares =

$$n = p = n_i(T)$$

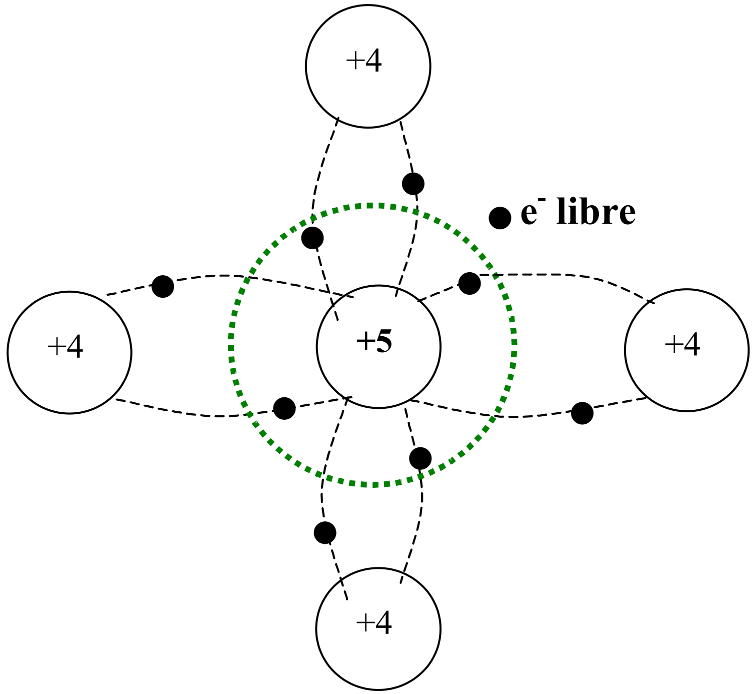
- n_i: concentración de electrones libres en Si intrínseco
  - Muy dependiente de la temperatura
  - Muy bajo a temperatura ambiente: $0.0145 \mu m^{-3} \cong 15\ e^-/1000\ \mu m^3$

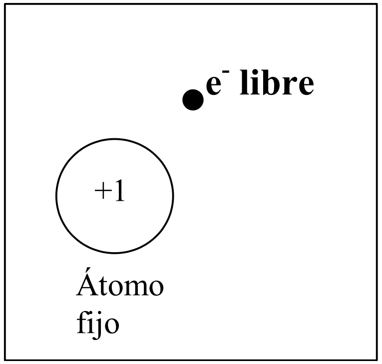
  (átomos de Si: 5.10^{10} átomos/ μm^3)

=> **Semiconductores "Dopados"**: semiconductor al que se agrega una pequeña proporción de otro elemento para aumentar número de e^- o de h^+

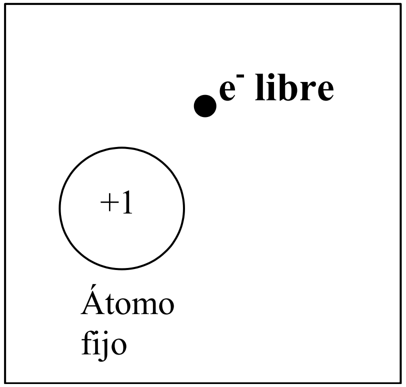
Silicio dopado con “donador” (1)

- Si se agrega elemento con 5 e^- de valencia (ej. fósforo, arsénico o antimonio) => “dona” un electrón libre





Silicio dopado con “donador” (2)



- Semiconductor tipo n:

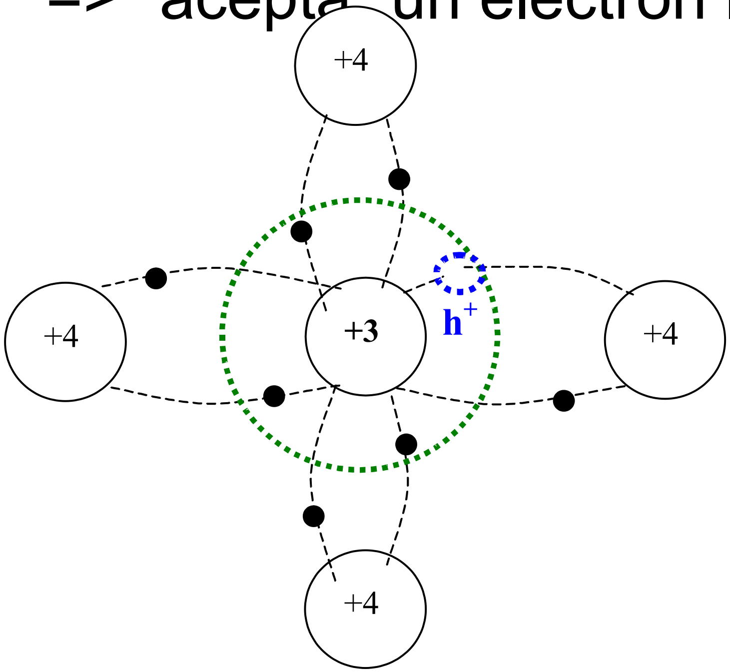
  e^-: portadores mayoritarios

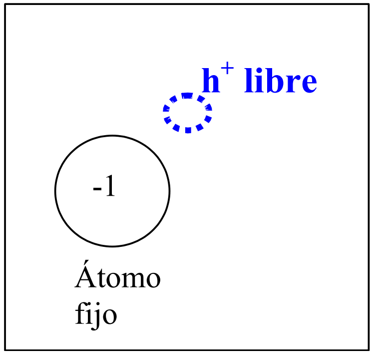
  h^+ (generados térmicamente): portadores minoritarios
- Dopajes: 1/ 10^{12} a 1/10^8 átomos de Si => el material sigue siendo silicio

Silicio dopado con “aceptor” (1)

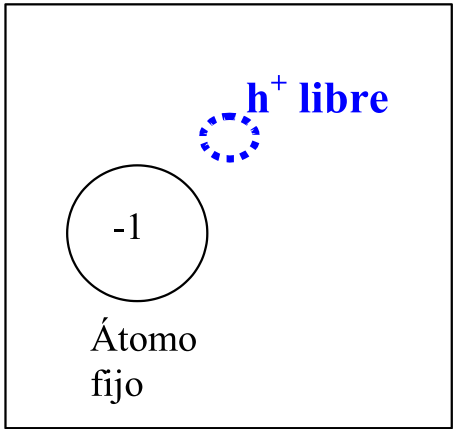
- Si se agrega elemento con 3 e^- de valencia (ej. boro, indio)

=> “acepta” un electrón libre => aporta un hueco





Silicio dopado con “aceptor” (2)



- Semiconductor tipo p:

  h^+: portadores mayoritarios

  e^- (generados térmicamente): portadores minoritarios

Si dopado tipo n, concentraciones

$$n_{n0} \cong N_D$$

- n: Concentración de e^-
- n (subíndice): En material tipo n
- 0 (subíndice): En equilibrio
- N_D: Concentración de impurezas donadoras

En equilibrio se cumple que:

$$n_{n0} \cdot p_{n0} = n_i^2(T) \Rightarrow p_{n0} \simeq \frac{n_i^2}{N_D} \underbrace{<<}_{N_D >> n_i} n_i = p_i$$

- Es decir: debido a recombinación concentración de huecos en material tipo n es mucho menor aún que en Si intrínseco.
- De todos modos los portadores minoritarios van a importar.

Si dopado tipo p, concentraciones

$$p_{p0} \cong N_A$$

Análogo al caso n

Concentración de h^+

En material tipo p

En equilibrio

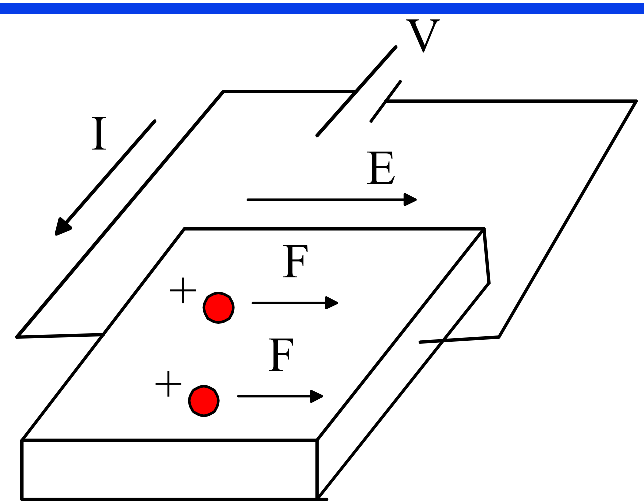
Concentración de impurezas aceptoras

En equilibrio se cumple que:

$$n_{p0} \cdot p_{p0} = n_{i^2}(T) \Rightarrow n_{p0} \simeq \frac{n_{i^2}}{N_A} \underbrace{<<}_{N_A >> n_i} n_i = p_i$$

- Es decir: debido a recombinación concentración de electrones en material tipo p es mucho menor aún que en Si intrínseco.

Mecanismos de conducción de corriente en semiconductores: Arrastre (drift) y Difusión (1)



Arrastre (Drift)

•$F = q. E$

•velocidad media portadores = μ.E, μ: movilidad,

sentido opuesto al campo si cargas negativas

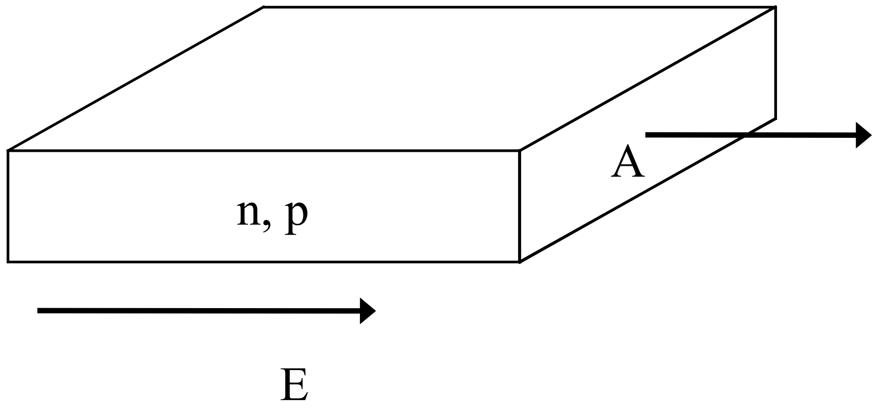
• Silicio intrínseco: Huecos: μ_p=480 cm^2/Vs

Electrones: μ_n=1350 cm^2/Vs => $\mu_n \approx 2.5\mu_p$

• La velocidad satura con campos altos (saturación de velocidad).

Drift (2)

Dados: Campo eléctrico E, concentraciones n y p, y sección A:



$$J_{drift} = \frac{I_{drift}}{A} ?$$

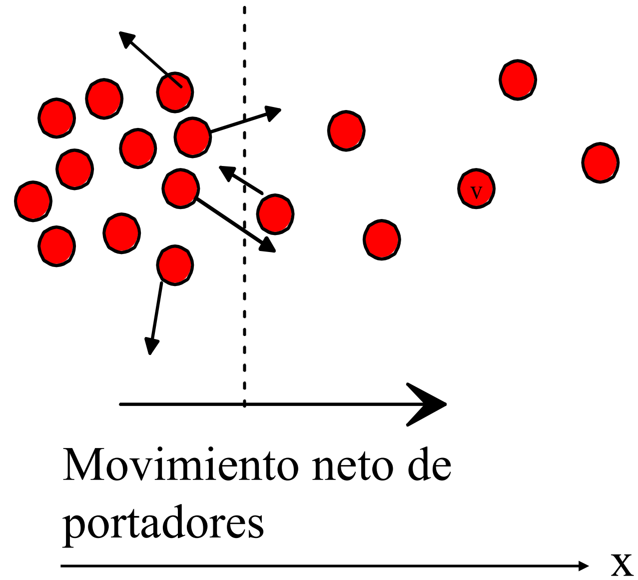
Componente de huecos: $I_{pdrift} = q \, . \, p \, . \underbrace{\mu_p \, . \, E}_{v_{drift}} . \, A \qquad J_{pdrift} = q \, . \, p \, . \underbrace{\mu_p \, . \, E}_{v_{drift}}$

Componente de electrones: $I_{ndrift} = q \, . \, n \, . \underbrace{\mu_n \, . \, E}_{v_{drift}} . \, A \qquad J_{ndrift} = q \, . \, n \, . \underbrace{\mu_n \, . \, E}_{v_{drift}}$

Densidad de corriente total: $J_{drift} = q \, . \left(n\mu_n + p\mu_p \right) E$

Difusión

•Debido a movimiento aleatorio portadores y gradiente de concentración



• I proporcional a gradiente de concentración, densidad de corriente por unidad de área perpendicular al eje x:

$$J_p = -q . D_p \frac{dp}{dx} \qquad J_n = q . D_n \frac{dn}{dx}$$

D_p, D_n: constantes de difusión

Relación de Einstein:

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = V_T = \frac{kT}{q}$$

Repaso: Leyes Básicas de Electrostática en una Dimensión

Magnitudes y constantes:

$\rho(x)$: Densidad de carga por unidad de volumen en x (C/m^3)

E(x): Campo eléctrico en x (V/m), positivo en la dirección de x

V(x): Potencial eléctrico en x con respecto a una referencia arbitraria (V)

ε: permitividad del material (F/m) = $k.\varepsilon_0$,

k: constante dieléctrica,

ε_0: permitividad del vacío ($8.854.10^{-12}$ F/m)

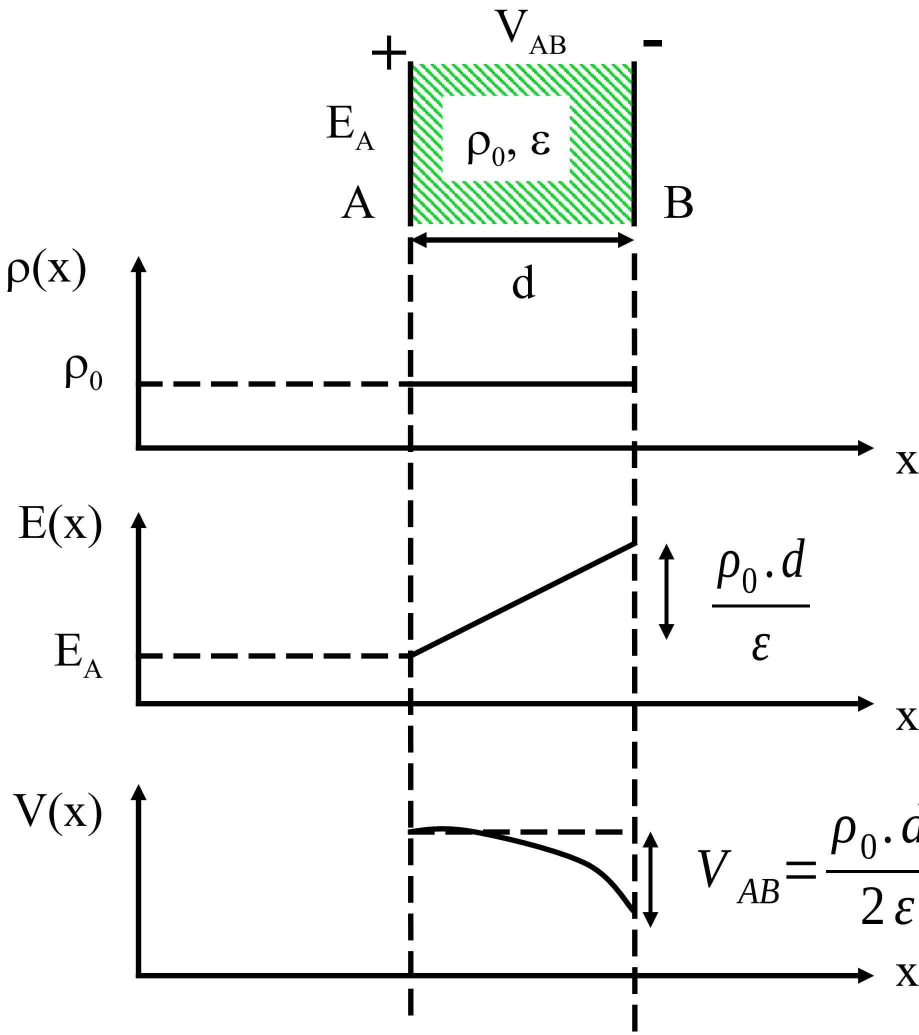
$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho(x)}{\varepsilon}$$

$$\frac{dV}{dx} = -E(x)$$

$$\frac{d^2V}{dx} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon}$$

Ecuación de Poisson

Ejemplo: Leyes Básicas de Electrostática en una Dimensión

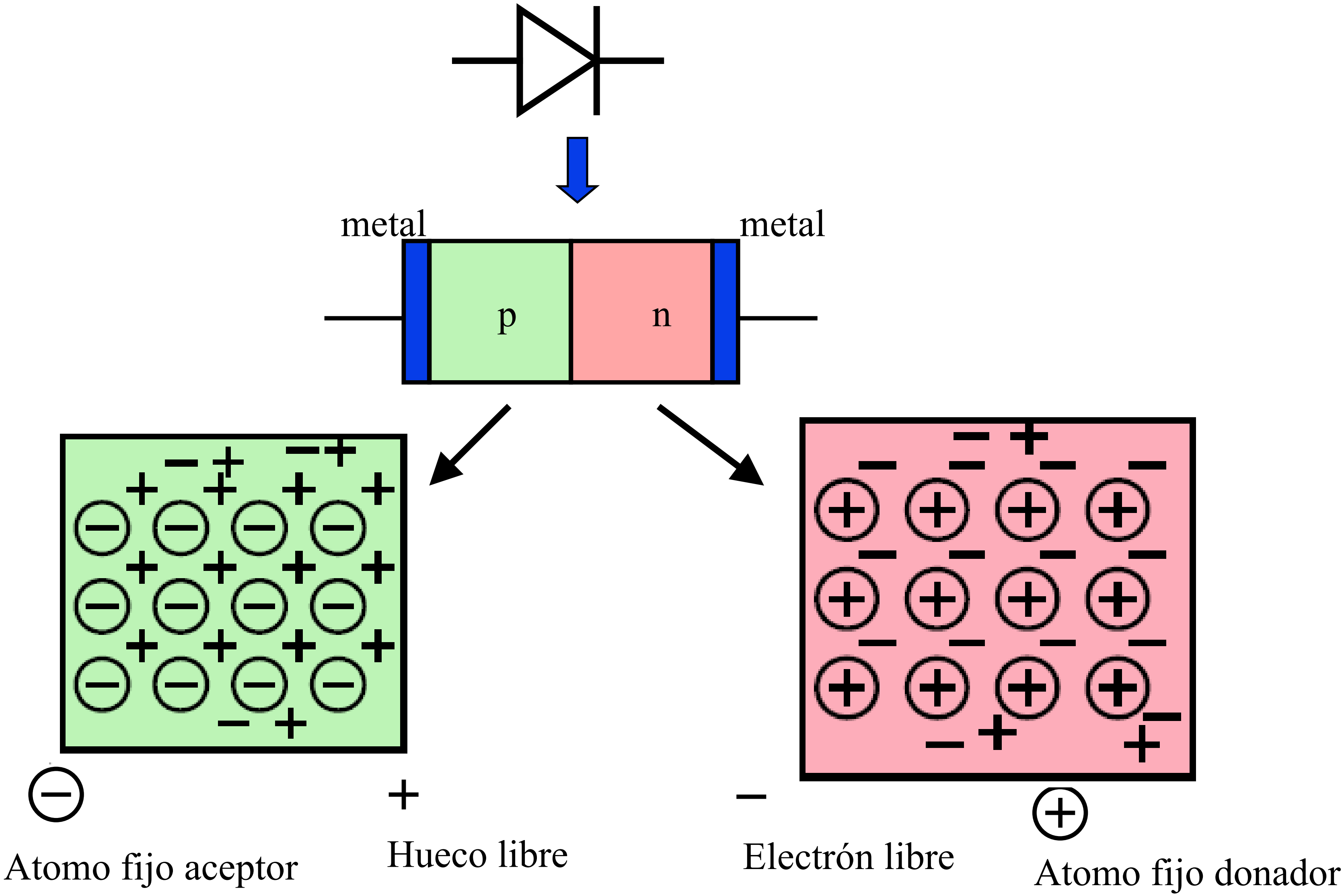


$$V_{AB} = \frac{\rho_0 . d^2}{2\,\varepsilon}$$

$$E(x) = \int \frac{\rho(x)}{\varepsilon}$$

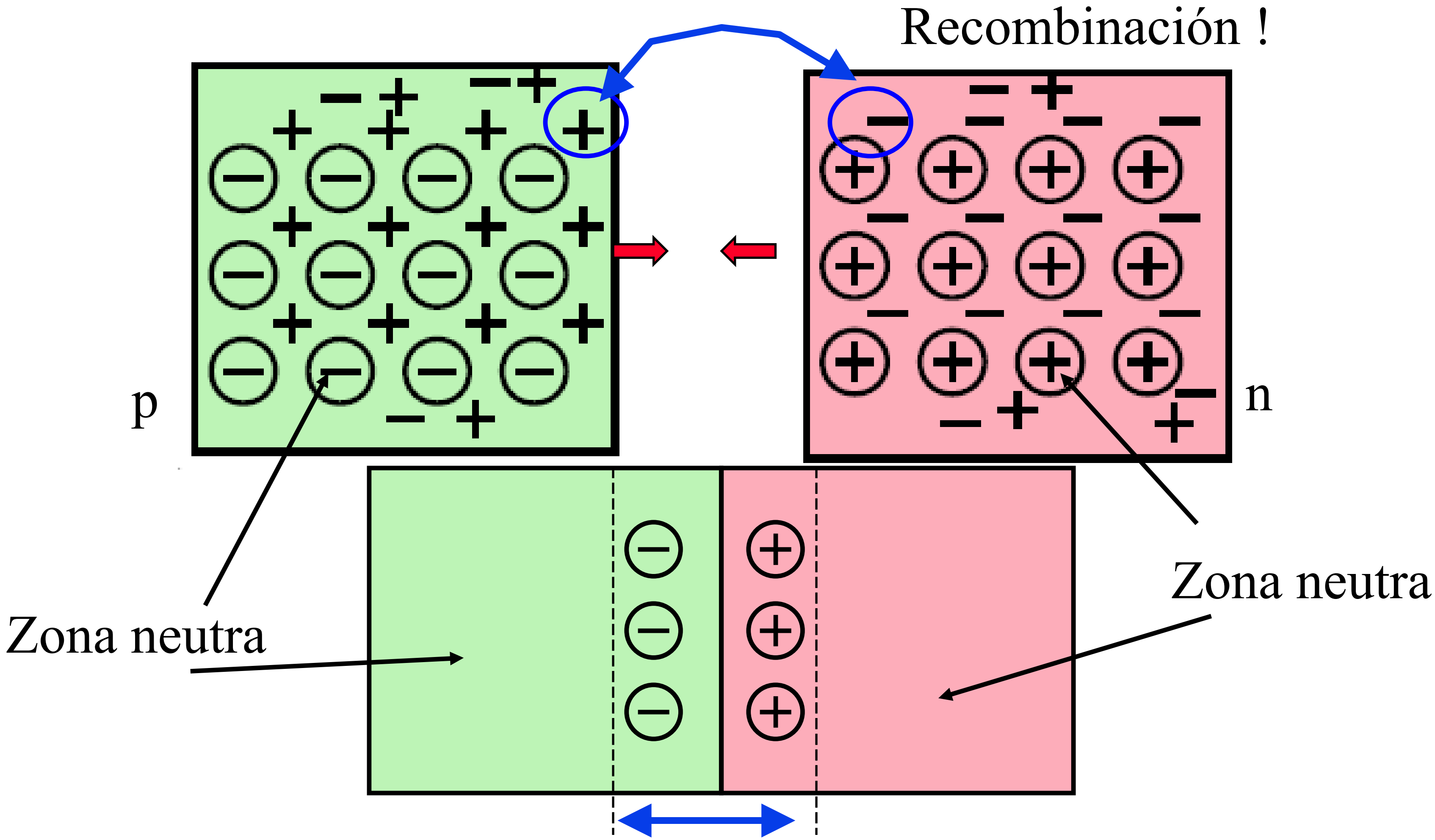
$$V(x) = -\int E(x)$$

Juntura p-n



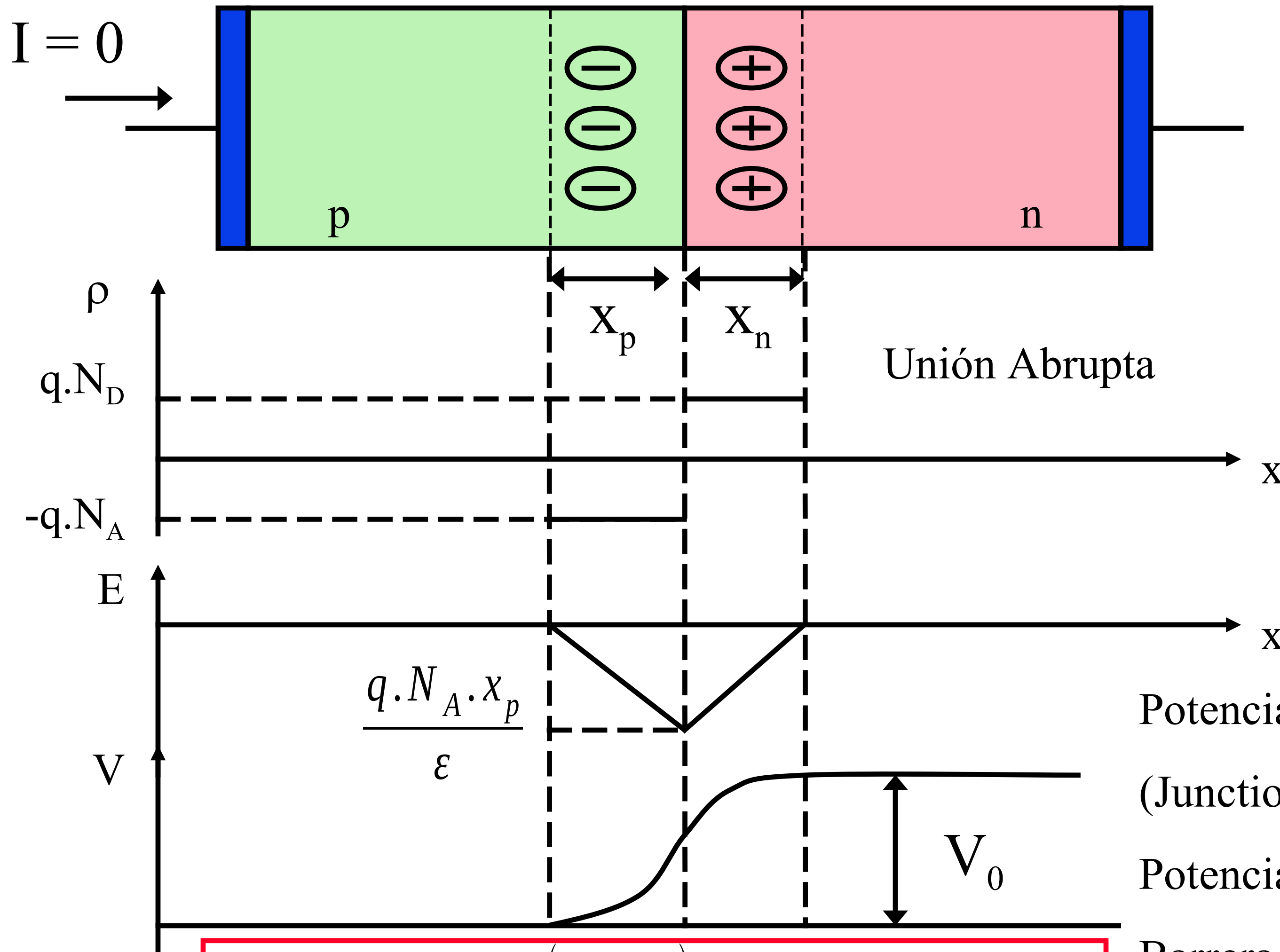
metal
metal
p
n
Atomo fijo aceptor
Hueco libre
Electrón libre
Atomo fijo donador

Juntura p-n en circuito abierto (1)



Zona de carga espacial, de vaciamiento ("depletion" o deplexión) o de cargas fijas

Juntura p-n en circuito abierto (2)



Potencial “propio” de juntura

(Junction “built-in” voltage)

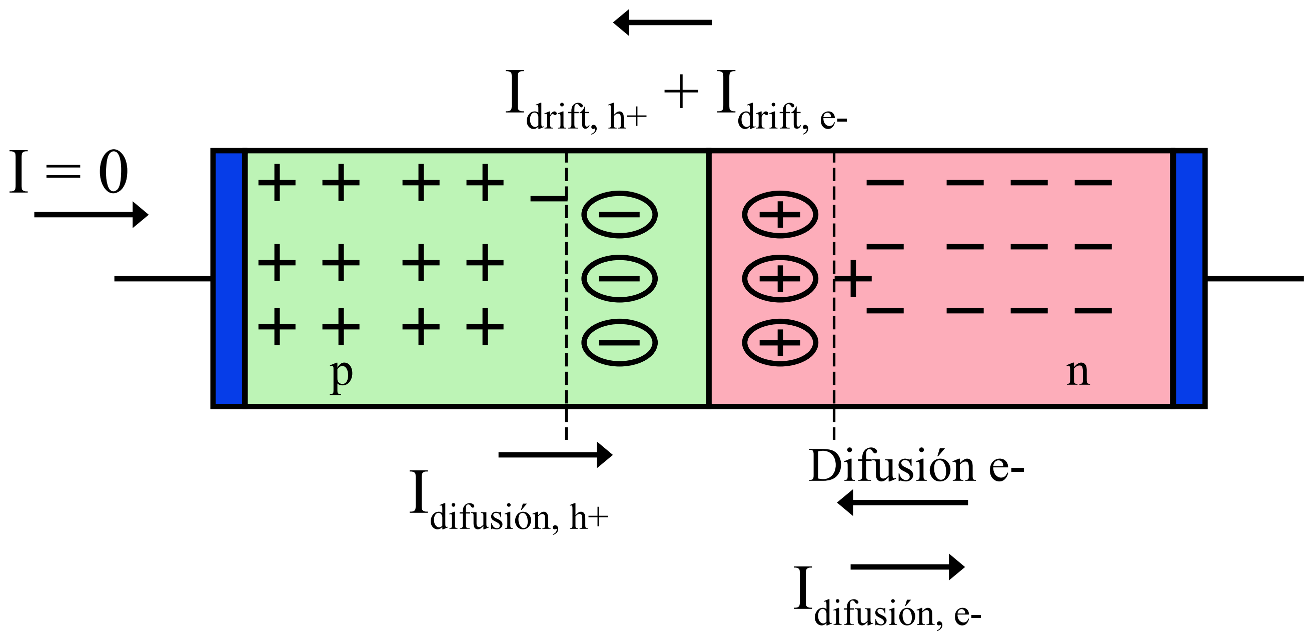
Potencial de contacto

Barrera de potencial

$$\Rightarrow V_O = \frac{q.N_A.x_p}{\varepsilon}\frac{(x_n + x_p)}{2} \quad (\text{Area del triángulo})$$

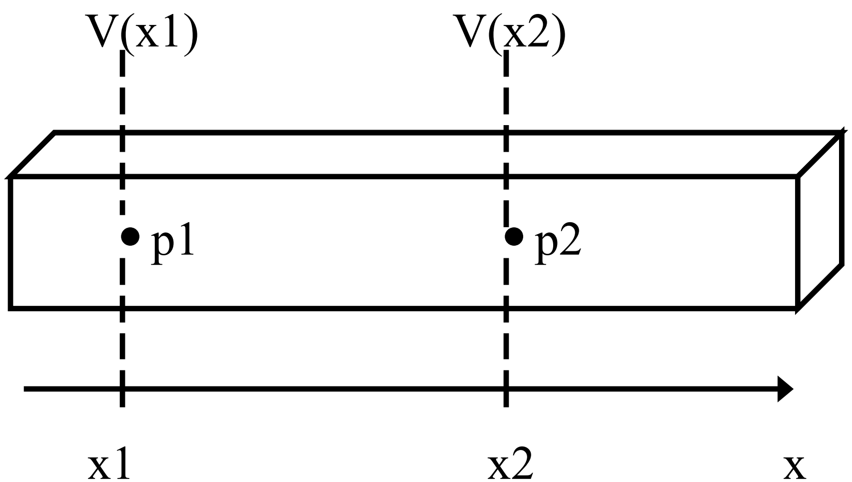
V_0: potencial de contacto

- Fenómeno análogo al usado en las termocuplas para medir temperatura.
- Su valor es tal que:
  - Cumpla las leyes de la electróstatica
  - Equilibre corrientes de difusión y drift (para electrones y huecos) en la juntura:



Consecuencia de equilibrio corrientes de difusión y arrastre

<u>Caso General:</u> Variación de Potencial en Semiconductor No Uniformemente Dopado



$\Delta V = V_{21} = V(x2)-V(x1)$? /

Corriente de arrastre de h^+ (e^-) sea igual y opuesta a corriente de difusión de h^+ (e^-)

$$J_{drift_{h^+}} + J_{diff_{h^+}} = 0$$

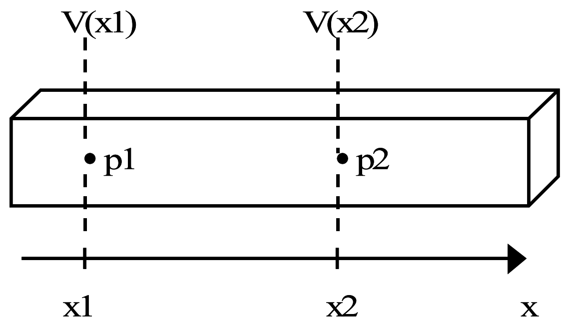
$$J_{drift_{e^-}} + J_{diff_{e^-}} = 0$$

Variación de Potencial en Semiconductor No Uniformemente Dopado (I)

$$J_{drift_{h^+}} + J_{diff_{h^+}} = 0$$

$$q.p.\mu_p.E - q.D_p \frac{dp}{dx} = 0$$

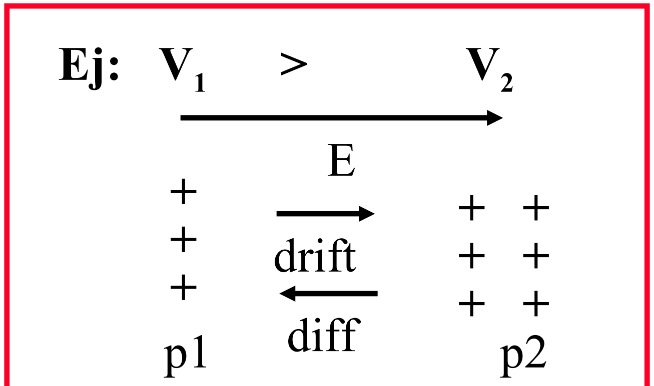
$$\Rightarrow E = \underbrace{\frac{D_p}{\mu_p}}_{V_T} \frac{1}{p}\frac{dp}{dx}, \qquad E = -\frac{dV}{dx}$$



$$\Rightarrow \frac{dV}{dx} = -V_T \frac{1}{p}\frac{dp}{dx} \underbrace{\Rightarrow}_{\text{cambio de variable}} \frac{dV}{dp} = -V_T \frac{1}{p}$$

$$\Rightarrow V_{21} = V_2 - V_1 = V_T L \frac{p1}{p2}$$

$$\Rightarrow \boxed{p_1 = p_2 . e^{V_{21}/V_T}}$$



Variación de Potencial en Semiconductor No Uniformemente Dopado (II)

huecos: $p_1 = p_2 . e^{V_{21}/V_T}$

Analogamente, electrones: $n_1 = n_2 . e^{-V_{21}/V_T}$

$\Rightarrow$ Multiplicando ambas ecuaciones:

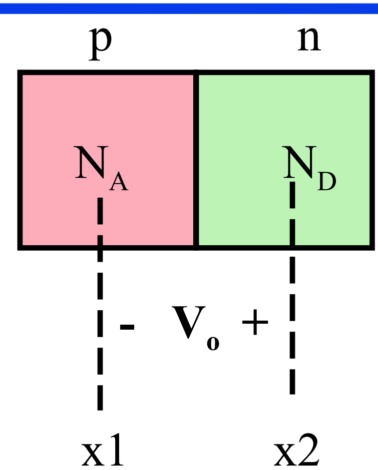
$n_1 p_1 = n_2 p_2$

Independiente de x $(\forall x)$ y por tanto independiente del dopado

$\Rightarrow np = n_i p_i = n_i^2$

$\Rightarrow \boxed{np = n_i^2 \quad \text{Ley de acción de masas}}$

Variación de Potencial en Semiconductor No Uniformemente Dopado (III): Juntura p-n



$$V_O = V_{21} = V_T \, L \frac{p_1}{p_2}$$

$$V_O = V_T \, L \frac{p_{p0}}{p_{n0}}$$

$$p_{p0} = N_A, \quad p_{n0} = \frac{n_i^2}{n_{n0}} = \frac{n_i^2}{N_D}$$

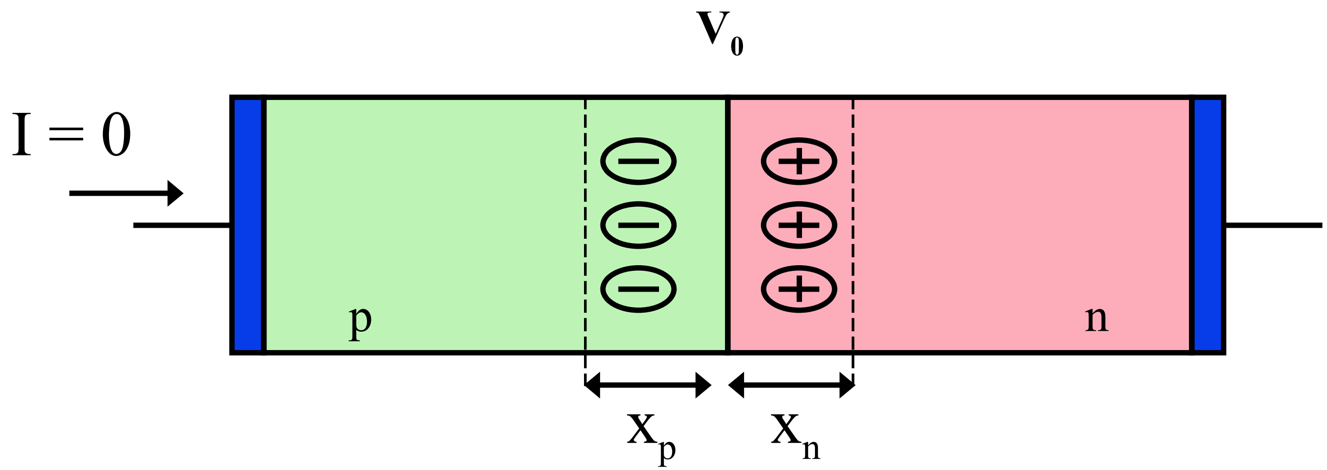
$$\boxed{V_O = V_T \, L \frac{N_A . N_D}{n_i^2}}$$

V_O a partir de equilibrio entre corrientes de difusión y arrastre

V_o Potencial de Contacto

$$V_O = V_T L \frac{N_A . N_D}{n_i^2}$$

$V_O \cong$ 0.6V ... 0.8V @ Tamb



- No se puede medir directamente con un tester se compensa con potenciales de contacto en metal – semiconductor
- Si se pudiera podríamos extraer energía de la juntura p-n (tendríamos una pila !)

Ancho de la Zona de Deplexión (I)

<u>**Se tiene igual cantidad de cargas fijas a cada lado**</u> pues:

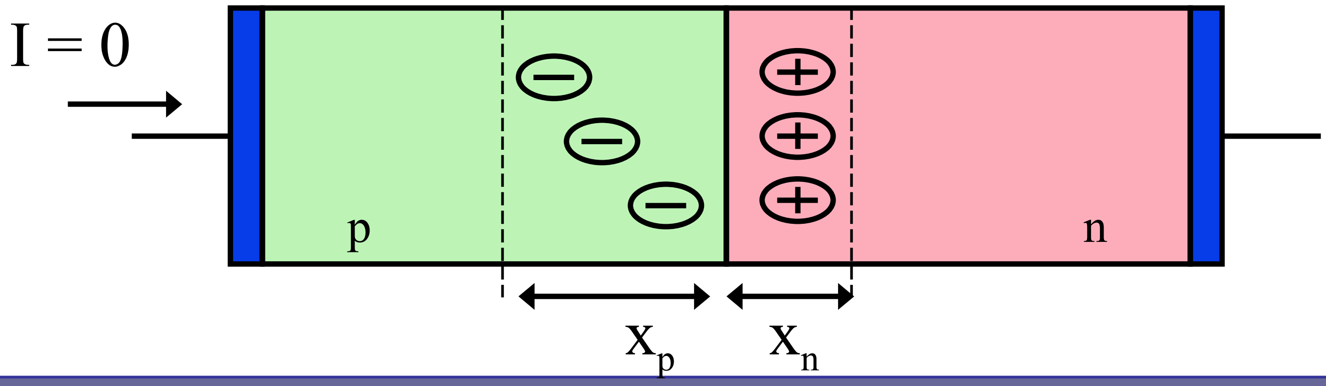
- cada carga fija del lado n corresponde a un e- que se recombinó con un h+ del lado p y dejó una carga fija descubierta del lado p.

- el total seguirá siendo neutro

$$\Rightarrow q.x_p.A.N_A = q.x_n.A.N_D$$

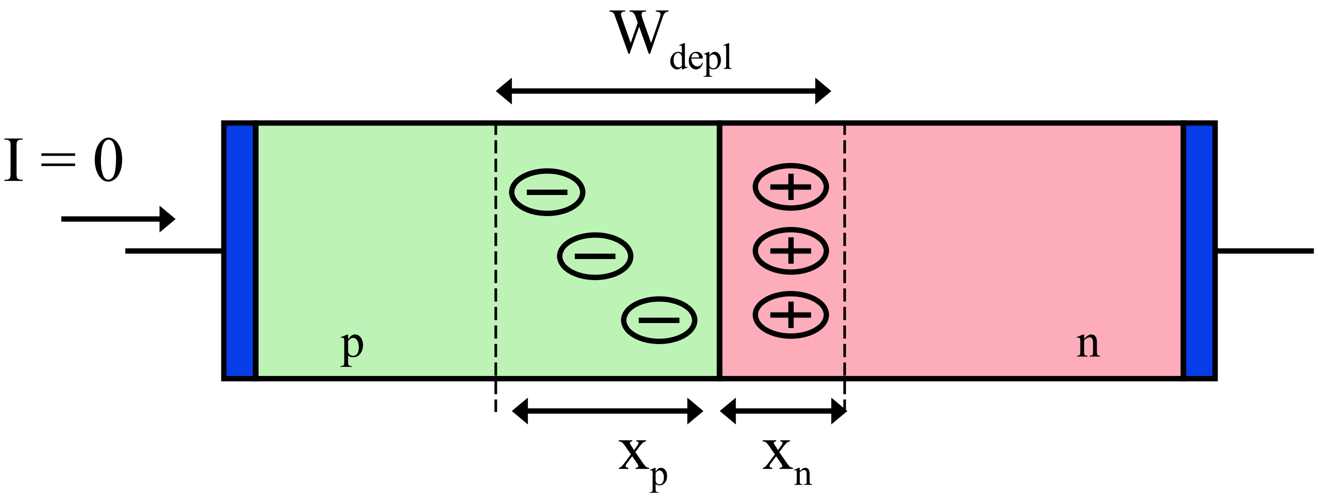
$$\Rightarrow \boxed{\frac{x_p}{x_n} = \frac{N_D}{N_A}}$$

Representación para caso $N_D > N_A$ (lado n más dopado)



Ancho de la Zona de Deplexión (II)

Representación para caso $N_D > N_A$ (lado n más dopado)



$$\frac{x_p}{x_n} = \frac{N_D}{N_A}$$

$$V_O = \frac{q.N_A.x_p}{\varepsilon}\frac{\left(x_n + x_p\right)}{2} \quad \left(\text{Electrostática}\right)$$

$$\text{con } V_O = V_T L \frac{N_A.N_D}{n_i^2}$$

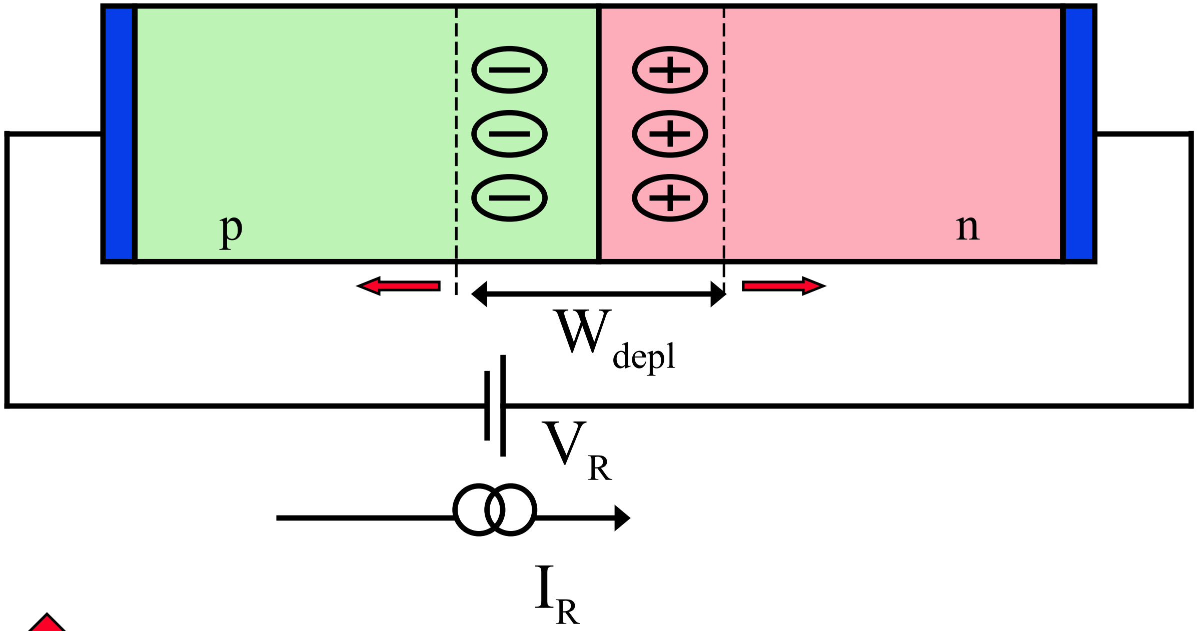
$$\left(\text{Equilibrio corrientes}\right)$$

$$\Rightarrow x_p = \sqrt{\frac{2.\varepsilon.V_O.}{q}\frac{N_D}{N_A\left(N_A + N_D\right)}}$$

$$\boxed{W_{depl} = x_p + x_n = \sqrt{\frac{2.\varepsilon.V_O.}{q}\frac{N_A + N_D}{N_A N_D}}}$$

$W_{depl} \cong 0.1\mu m \ldots 1\ \mu m$

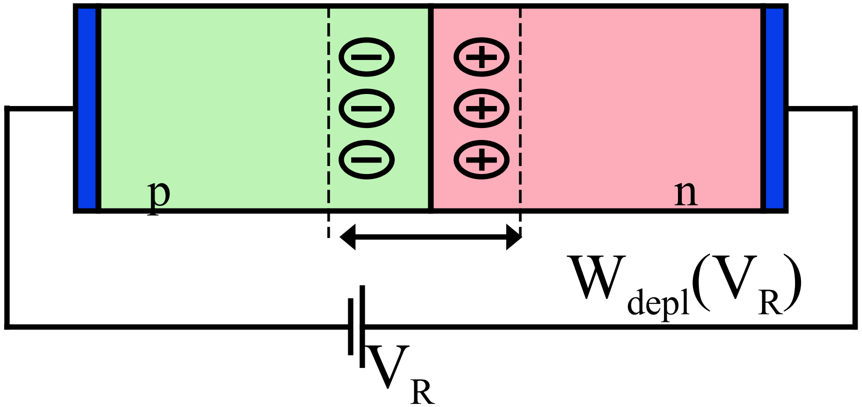
Juntura p-n en inverso



- W_{depl} ↑
- $I_{difusión}$ ↓
- I_{drift} subiría pero limitada por portadores minoritarios a ambos lados de la juntura.

$I_{drift,\ e-}=q.n.\mu_n E.A$ => limitado por e- del lado p (minoritarios)

Capacidad de Deplexión (I)



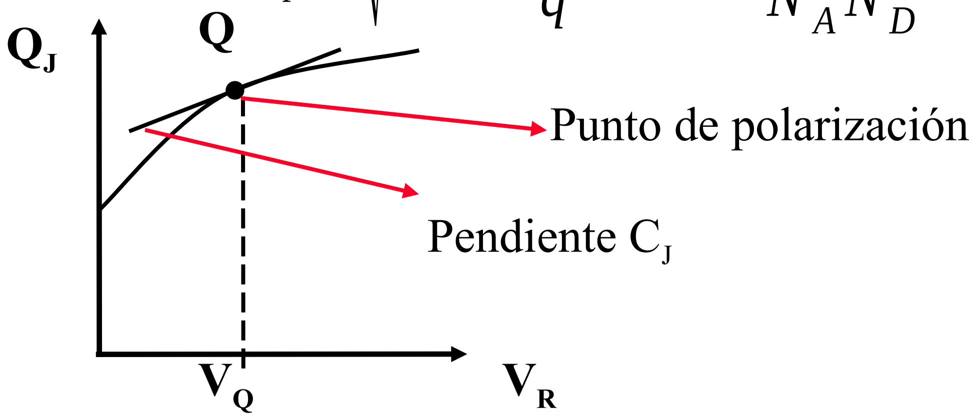
$\Rightarrow Q_J$ (carga de la juntura) $Q_J(V_R)$ => $C_J(V_R)$ (capacitor no lineal)

Importa en respuesta en frecuencia de dispositivos

Se usa como capacitor variable

$$Q_J = q . x_p . A . N_A = q . x_n . A . N_D = q . \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} A . W_{depl}$$

con $$W_{depl} = \sqrt{\frac{2 . \varepsilon . (V_O + V_R)}{q} . \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}}$$



Aproximación de pequeña señal:

$$C_J = \frac{dQ_J}{dV_R}\Big|_{V_R = V_Q}$$

Capacidad de Deplexión (II)

$$Q_J = q\,.\frac{N_A N_D}{N_A + N_D} A\,.W_{depl}, \quad W_{depl} = \sqrt{\frac{2\,.\varepsilon\,.(V_O + V_R)}{q}\,.\frac{N_A + N_D}{N_A N_D}}, \quad C_J = \frac{dQ_J}{dV_R}\Big|_{V_R = V_Q}$$

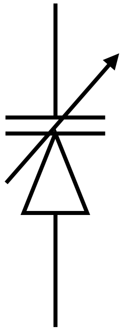
Derivando:

$$C_J = \frac{\varepsilon\,.A}{W_{depl}} \quad (\text{coincide con expresión cap. ideal de placas paralelas !!})$$

$$C_J = \frac{C_{J0}}{\sqrt{1 + \frac{V_R}{V_O}}} \qquad C_{J0} = C_J|_{V_R = 0} = A\sqrt{\frac{\varepsilon\,.q}{2}\frac{N_A . N_D}{N_A + N_D}\frac{1}{V_0}}$$

Lo anterior para juntura abrupta, para juntura gradual:

$$C_J = \frac{C_{J0}}{\left(1 + \frac{V_R}{V_0}\right)^m} \quad (\text{m: 1/3 … 1/2 …})$$



Varactor o
Varicap

C: 1 ... 100 pF