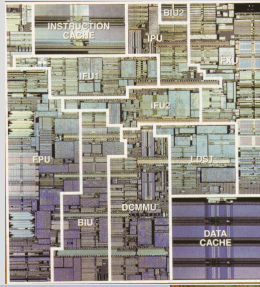
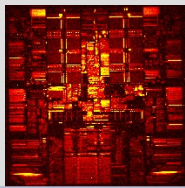
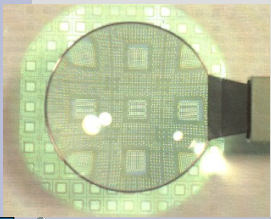
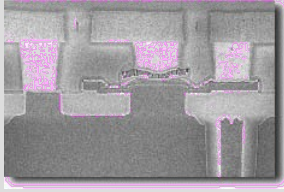


Tema 5: Propiedades eléctricas de los materiales: semiconductores



Tema 5. Semiconductores

Objetivos:

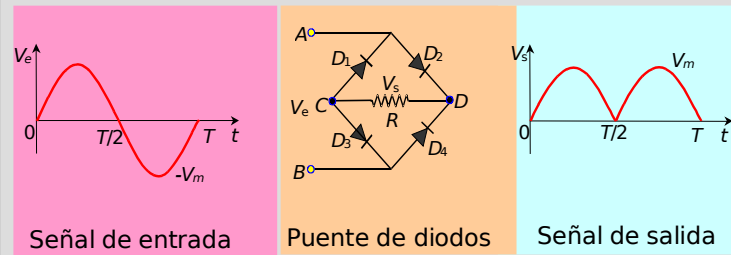
- Describir cualitativamente el comportamiento de los semiconductores.
- Justificar mediante el modelo de enlace bandas de energía las características de los semiconductores intrínsecos y extrínsecos.
- Definir portadores mayoritarios y minoritarios, impurezas donadoras yceptoras, y sus concentraciones.
- Enunciar las leyes de acción de masas y neutralidad eléctrica y aplicarlas al cálculo de concentraciones de portadores.
- Saber cuantificar las corrientes de desplazamiento y de difusión en un semiconductor.
- Relacionar los conceptos de conductividad, movilidad y concentración de portadores.
- Distinguir entre corrientes de electrones y huecos.
- Calcular la corriente total en un semiconductor.

Tema 5. Semiconductores

- 5.1 Semiconductores. Conductividad eléctrica. Efecto Hall
- 5.2 Dopaje. Configuración electrónica de los materiales semiconductores. Conducción intrínseca y extrínseca
- 5.3 Ley de acción de masas. Ley de neutralidad eléctrica.
- 5.4 Corrientes de desplazamiento y de difusión.
- 5.5 Variación de potencial en un semiconductor con dopado no uniforme.

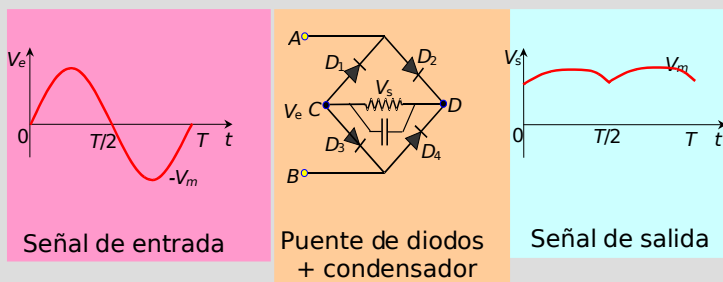
Introducción

- Rectificación de corriente alterna: puente de diodos.



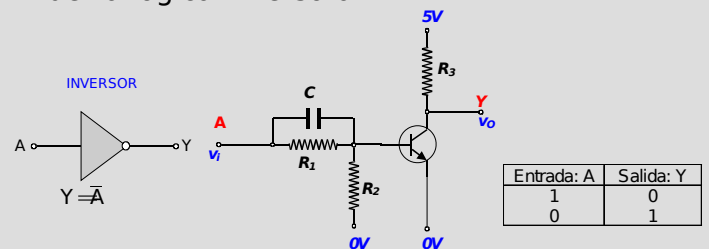
Introducción

- Rectificación de corriente alterna: puente de diodos.



Introducción

- Puerta lógica inversora:



Materiales semiconductores: Ge y Si.
 GaAs (Arseniuro de Galio), GaP, InAs, InP, InGaAs, InGaAsP,
 GaAsP, SiC, ZnSe,...

Configuración electrónica semiconductores

FFI 5.2

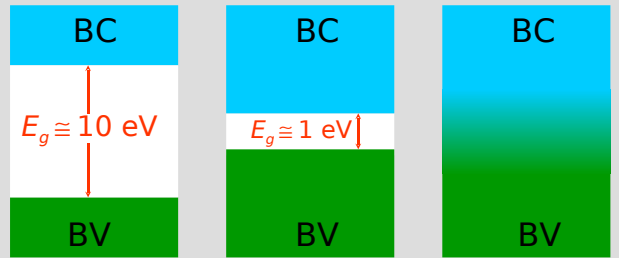
Átomos tetravalentes

Grupo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Periodo 1	1 H											5 B	6 C	7 N				2 He
Periodo 2	3 Li	4 Be										13 Al	14 Si	15 P				10 Ne
Periodo 3	11 Na	12 Mg										31 Ga	32 Ge	33 As				18 Ar
Periodo 4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	49 In	50 Sn	51 Sb				36 Kr
Periodo 5	37 Rb	38 Sr										79 Au						54 Xe
Periodo 6	55 Cs	56 Ba	*	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	101 Md	102 No					86 Rn
Periodo 7	87 Fr	88 Ra	**	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Uu	111 Uu						118 Og

Si (14 e-): $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
 Ge (32 e-): $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2$

Configuración electrónica semiconductores

FFI 5.2



Dielectric Semiconductor Conductor (aislante)

Conductividad eléctrica

FFI 5.1

$$R = \frac{L}{\sigma S}$$

$\sigma (\Omega m)^{-1}$		
$< 10^{-8}$	Aislantes	Cuarzo, plástico.
$\approx 10^{-8}$	Semiconductores puros	Silicio, Germanio.
$10^{-8} - 10^6$	Semiconductores dopados	Si y Ge dopados
$10^6 - 10^8$	Conductores	Plata, Cobre...

Conducción intrínseca

FFI 5.2

- Semiconductores intrínsecos.

Si $E_g = 1,1 \text{ eV}$
 Ge $E_g = 0,7 \text{ eV}$

$T = 0 \text{ K}$

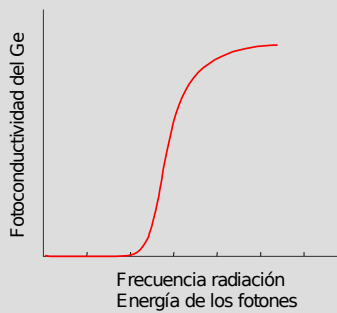
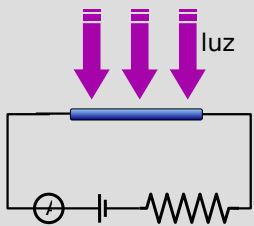
$T > 0 \text{ K}$



Conductividad eléctrica

FFI 5.1

- Variación de la conductividad con la iluminación.

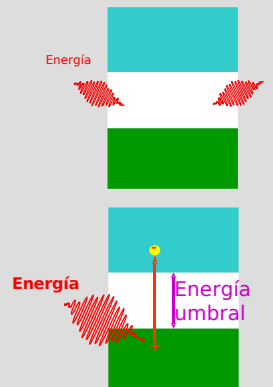
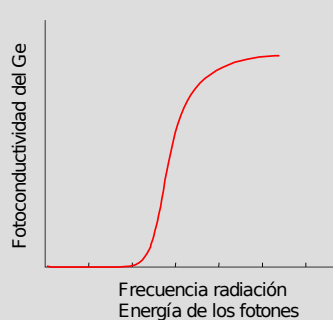


Aporte de energía

Conductividad eléctrica

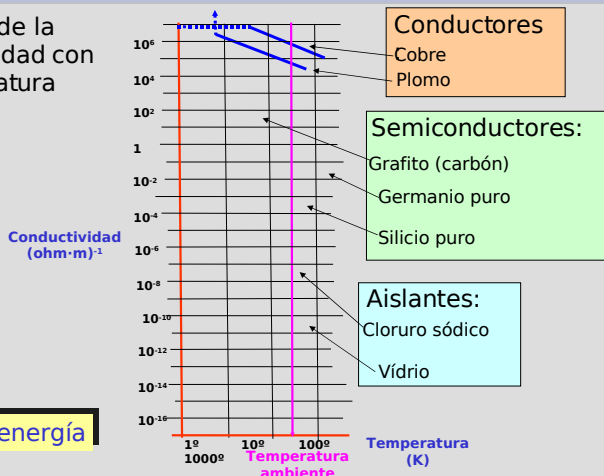
FFI 5.2

- Variación de la conductividad con la iluminación:



Conductividad eléctrica

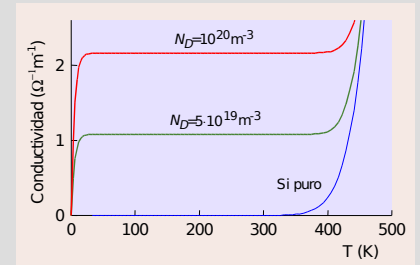
- Variación de la conductividad con la temperatura



Aporte de energía

Conductividad eléctrica

- Variación de la conductividad con la temperatura



Variación de la conductividad con la temperatura para el Si puro, y Si dopado con diferentes concentraciones de impurezas.

Aporte de energía

Dopaje

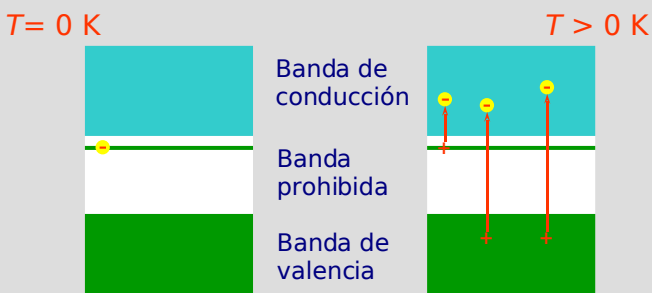
Grupo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Período 1	1												5	6	7			2
Período 2	3	4											13	14	15			10
Período 3	11	12											13	14	15			18
Período 4	19	20											31	32	33			36
Período 5	37	38											31	32	33			54
Período 6	55	56	*										49	50	51			86
Período 7	87	88	**										49	50	51			118
													81	82	83			

Dopaje

Grupo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Período 1	1												5	6	7			2
Período 2	3	4											13	14	15			10
Período 3	11	12											13	14	15			18
Período 4	19	20											31	32	33			36
Período 5	37	38											31	32	33			54
Período 6	55	56	*										49	50	51			86
Período 7	87	88	**										49	50	51			118
													81	82	83			

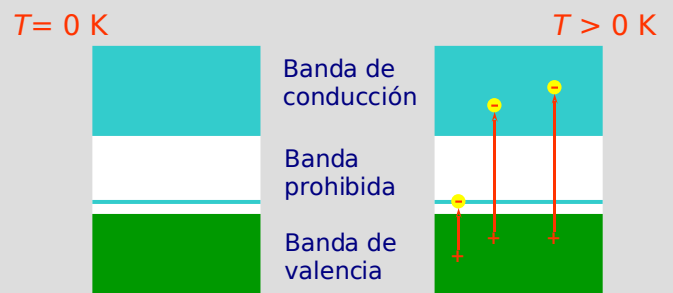
Conducción extrínseca

- Semiconductor tipo N.



Conducción extrínseca

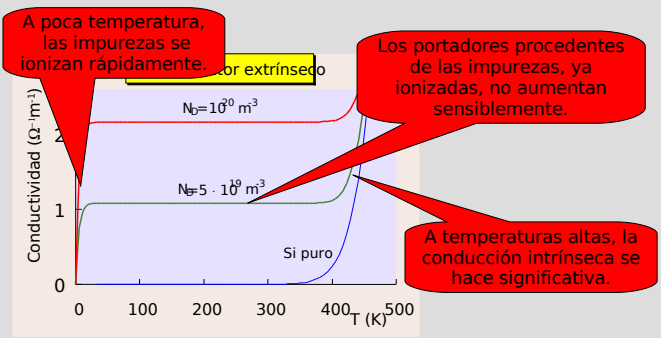
- Semiconductor tipo P.



Conducción intrínseca y extrínseca

FFI 5.2

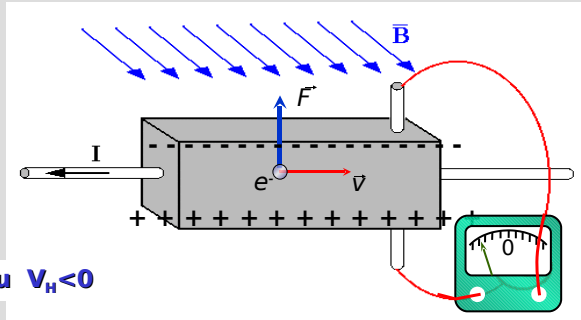
- Variación de la conductividad con la temperatura:



Efecto Hall

FFI 5.1

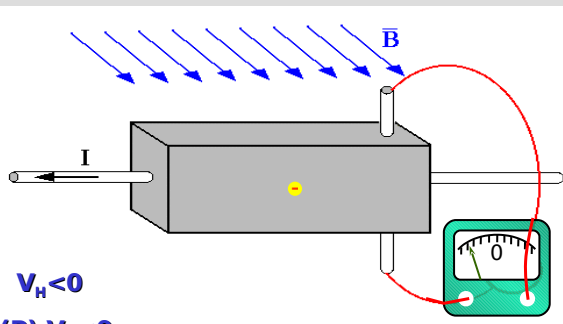
- Efecto Hall: conductor.



Efecto Hall

FFI 5.1

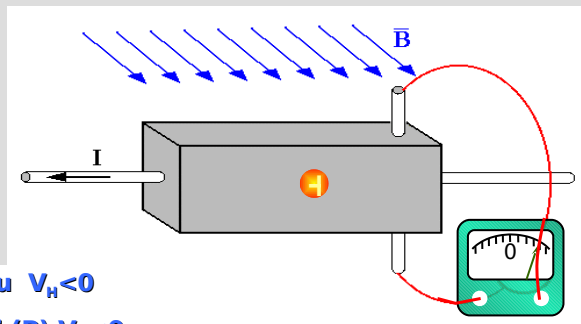
- Efecto Hall: silicio dopado con fósforo.



Efecto Hall

FFI 5.1

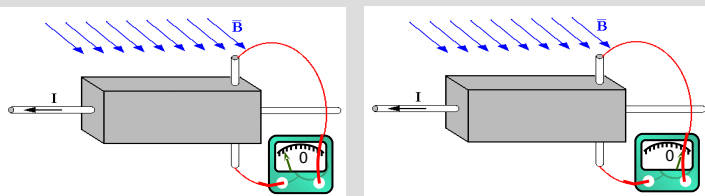
- Efecto Hall: silicio dopado con galio.



Conducción intrínseca y extrínseca

FFI 5.2

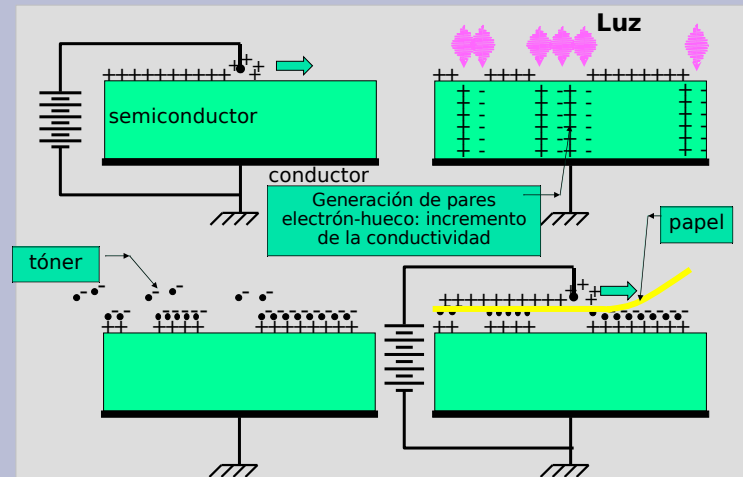
- Efecto Hall



Portadores de carga: electrones: - Portadores de carga: Huecos: +

Fotocopiadora e impresora láser

FFI



Ley de acción de masas

Banda de conducción

E_c

Banda prohibida

E_v

Banda de valencia

$$n \cdot p = n_i^2$$

n : número de e- por unidad de volumen

p : número de huecos por unidad de volumen

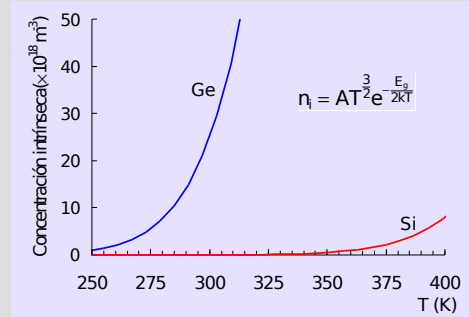
n_i : concentración intrínseca

$$n_i = AT^{3/2} e^{-E_g/2kT}$$

$$n_i(\text{Ge}; 300\text{K}) = 2,4 \cdot 10^{19} \text{ port./m}^3 \quad E_g = E_c - E_v \text{ Energía del "gap"}$$

$$n_i(\text{Si}; 300\text{K}) = 1,5 \cdot 10^{16} \text{ port./m}^3 \quad k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K constante de Boltzmann}$$

Concentración intrínseca



Ley de neutralidad eléctrica

(cargas positivas) = (cargas negativas)

$$N_D + p = N_A + n$$

Ejercicio

9. Un semiconductor extrínseco tipo n está formado por silicio con un dopado de 10^{17} átomos de antimonio/cm³. Teniendo en cuenta que la concentración intrínseca del silicio a 300 K es $n_i = 1,5 \cdot 10^{10}$ partículas/cm³ ¿Cuál es la concentración de huecos y de electrones en dicho semiconductor a 300 K?

$$n \approx 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} \approx 2,25 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

Ejercicio

Halla la concentración de electrones y huecos en el germanio en las circunstancias siguientes:

- Germanio puro a 300 K ($n_i(300 \text{ K}) = 2,36 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$)
- A 300 K dopado con antimonio en una concentración de $4 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$
- A 300 K dopado con indio en una concentración de $3 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$
- Germanio puro a 500 K ($n_i(500 \text{ K}) = 2,1 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$)
- A 500 K dopado con antimonio en una concentración de $3 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$.
- A 500 K dopado con indio en una concentración de $4 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$

a) $n \cdot p = n_i^2$ b) $n \approx 4 \cdot 10^{22}$ electrones/m³

$$n = p = n_i = 2,36 \cdot 10^{19} \text{ e-h/m}^3$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} \approx 1,39 \cdot 10^{16} \text{ huecos/m}^3$$

c) $p \approx 3 \cdot 10^{22}$ huecos/m³

$$n = \frac{n_i^2}{p} \approx 1,86 \cdot 10^{16} \text{ electrones/m}^3$$

Ejercicio

Halla la concentración de electrones y huecos en el germanio en las circunstancias siguientes:

- Germanio puro a 300 K ($n_i(300 \text{ K}) = 2,36 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$)
- A 300 K dopado con antimonio en una concentración de $4 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$
- A 300 K dopado con indio en una concentración de $3 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$
- Germanio puro a 500 K ($n_i(500 \text{ K}) = 2,1 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$)
- A 500 K dopado con antimonio en una concentración de $3 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$.
- A 500 K dopado con indio en una concentración de $4 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$

d) $n = p = n_i = 2,1 \cdot 10^{22} \text{ e-h/m}^3$

e) $N_D + p = N_A + n$
 $N_A = 0$, y $N_D = 3 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$

$$\begin{cases} p \cdot n = n_i^2 \\ n = N_D + p \end{cases}$$

$$n = 4,08 \cdot 10^{22} \text{ electrones/m}^3$$

$$p = 1,08 \cdot 10^{22} \text{ huecos/m}^3$$

f) $N_D = 0$, y $N_A = 4 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$

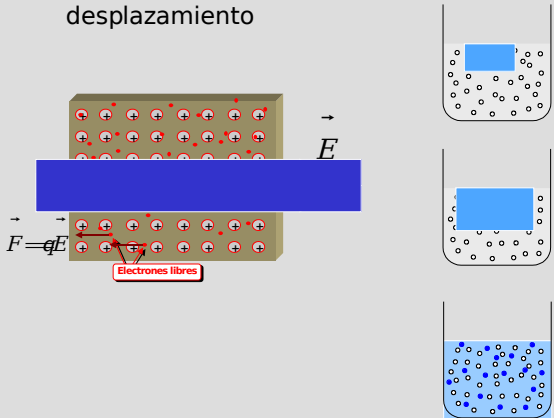
$$\begin{cases} p \cdot n = n_i^2 \\ p = N_A + n \end{cases}$$

$$p = 4,90 \cdot 10^{22} \text{ huecos/m}^3$$

$$n = 2,10 \cdot 10^{22} \text{ electrones/m}^3$$

Corrientes de desplazamiento y de difusión

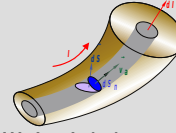
- Corrientes de desplazamiento



Corrientes de desplazamiento y de difusión

- Densidad de corriente:

Tema 2



$$\vec{j} = nq\vec{v}_a$$

- Movilidad (μ):

$$\mu = \frac{v_a}{E}$$

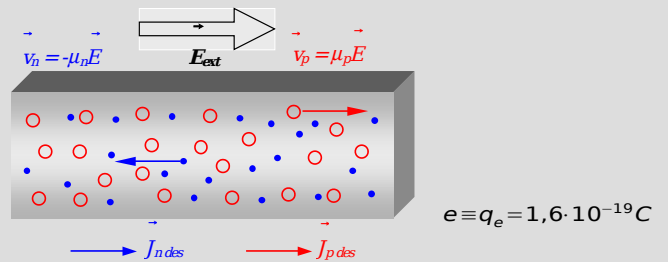
- Ley de Ohm:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad \sigma = nq\mu$$

Corrientes de desplazamiento y de difusión

$$\begin{aligned} \vec{v}_p &= \mu_p \vec{E} & \vec{v}_n &= -\mu_n \vec{E} \\ \vec{j}_p^{des} &= pe \vec{v}_p & \vec{j}_n^{des} &= n(-e) \vec{v}_n \\ \vec{j}_p^{des} &= pe\mu_p \vec{E} & \vec{j}_n^{des} &= ne\mu_n \vec{E} \\ \vec{j}^{des} &= \vec{j}_p^{des} + \vec{j}_n^{des} = e(p\mu_p + n\mu_n) \vec{E} = \sigma \vec{E} \\ e &\equiv q_e = 1,6 \cdot 10^{-19} C \end{aligned}$$

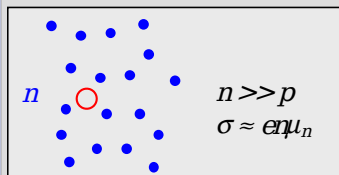
C. de desplazamiento en semiconductores



$$\begin{aligned} \vec{j}_p^{des} &= pe\mu_p \vec{E} & \vec{j}_n^{des} &= ne\mu_n \vec{E} \\ \vec{j}^{des} &= \vec{j}_p^{des} + \vec{j}_n^{des} = e(p\mu_p + n\mu_n) \vec{E} = \sigma \vec{E} \end{aligned}$$

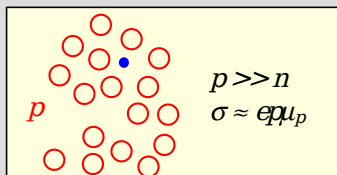
C. de desplazamiento en semiconductores

$$\vec{j}^{des} = \vec{j}_p^{des} + \vec{j}_n^{des} = e(p\mu_p + n\mu_n) \vec{E} = \sigma \vec{E}$$



$$n \gg p \\ \sigma \approx en\mu_n$$

semiconductores extrínsecos tipo n



$$p \gg n \\ \sigma \approx ep\mu_p$$

semiconductores extrínsecos tipo p

Ejercicio

Halla la resistividad del silicio en las circunstancias siguientes:

- A 300 K.
- A 300 K dopado con indio en una concentración de $5 \cdot 10^{20}$ átomos/m³
- A 500 K ($n_i(500 \text{ K}) = 3,7 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$)
- A 500 K dopado con indio en una concentración de $5 \cdot 10^{20}$ átomos/m³

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(p\mu_p + n\mu_n)}$$

$$a) \quad \rho = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,5 \cdot 10^{16} \cdot (0,05 + 0,135)} = 2252 \Omega m$$

$$b) \quad \rho \approx 5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3} \\ \rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e p \mu_p} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{20} \cdot 0,05} = 0,25 \Omega m$$

Ejercicio

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(p\mu_p + n\mu_n)}$$

c)

$$\rho = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3,7 \cdot 10^{20} \cdot (0,05 + 0,135)} = 0,09 \Omega m$$

d)

$$\left. \begin{array}{l} n \cdot p = n_i^2 \\ \rho = N_A + n \end{array} \right\} \begin{array}{l} p = 6,95 \cdot 10^{20} m^{-3} \\ n = 1,97 \cdot 10^{20} m^{-3} \end{array}$$

$$\rho = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (6,95 \cdot 10^{20} \cdot 0,05 + 1,97 \cdot 10^{20} \cdot 0,135)} = 0,1 \Omega m$$

Ejemplo 9-1

Un semiconductor intrínseco contiene $2 \cdot 10^{21}$ pares electrón-hueco por m^3 .
Calcula su resistividad, sabiendo que las movilidades son $\mu_n = 0,3 m^2/Vs$; $\mu_p = 0,09 m^2/Vs$

$$\sigma = q_e n_i (\mu_n + \mu_p)$$

$$\sigma = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{21} (0,3 + 0,09) = 125 (\Omega m)^{-1}$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = 0,008 \Omega m$$

Ejercicio

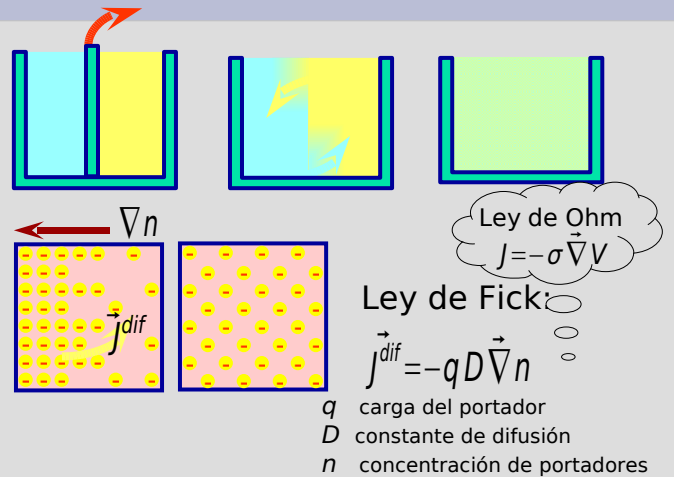
Un semiconductor intrínseco contiene 10^{20} pares electrón-hueco por m^3 .
Calcular la resistividad, sabiendo que las movilidades son $\mu_n = 0,2 m^2/Vs$; $\mu_p = 0,06 m^2/Vs$
Sol: $\rho = 0,24 \Omega m$

$$\sigma = e(p\mu_p + n\mu_n)$$

$$\sigma = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{20} (0,2 + 0,06) = 4,16 \Omega^{-1} m^{-1}$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{4,16} = 0,24 \Omega m$$

Procesos de difusión



Corrientes de difusión

• Huecos:

$$\vec{j}_p^{dif} = -eD_p \nabla p$$

$$[D] = L^2 T^{-1}$$

• Electrones:

$$\vec{j}_n^{dif} = eD_n \nabla n$$

$$e = q_e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$$

Corrientes de difusión

• Huecos: $\vec{j}_p^{dif} = -eD_p \nabla p$

• Electrones: $\vec{j}_n^{dif} = eD_n \nabla n$

• Relaciones de Einstein:

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

V_T : Potencial equivalente de temperatura:

$$V_T = \frac{kT}{e}$$

$$V_T(300 K) = 25,85 mV$$

Densidad de corriente total

- Desplazamiento:

$$\vec{j}_p^{des} = p e \mu_p \vec{E} \quad \vec{j}_n^{des} = n e \mu_n \vec{E}$$

- Difusión:

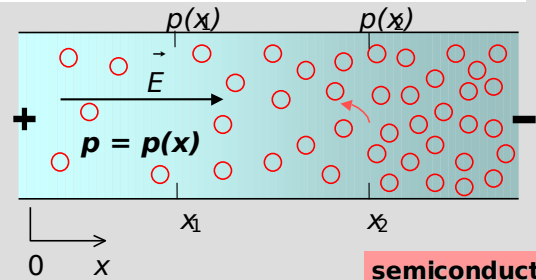
$$\vec{j}_p^{dif} = -e D_p \vec{\nabla} p \quad \vec{j}_n^{dif} = e D_n \vec{\nabla} n$$

- Densidad de corriente total:

$$\vec{j} = e(p\mu_p + n\mu_n)\vec{E} - eD_p\vec{\nabla} p + eD_n\vec{\nabla} n$$

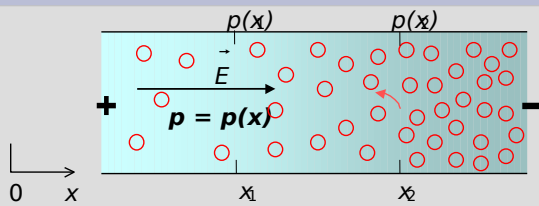
Dopado no uniforme

Los diodos y transistores son cristales de semiconductor en que el dopado no es uniforme, con zonas tipo "p" y zonas tipo "n".



semiconductor tipo "p"
 $N_A = N_A(x), p = p(x)$

Dopado no uniforme



Régimen estacionario

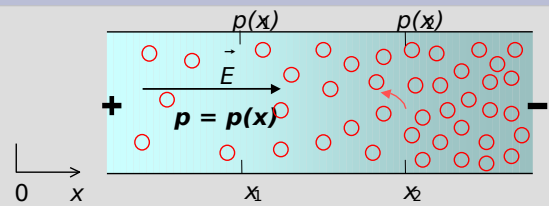
Densidad de corriente de electrones y huecos nula

$$J_p = p\mu_p e E_x - e D_p \frac{dp}{dx} = 0 \quad \Rightarrow \exists \vec{E} \neq 0$$

$$E_x = \frac{D_p}{p\mu_p} \frac{dp}{dx} = -\frac{dV}{dx}$$

$$V_2 - V_1 = V_T \ln \frac{p_1}{p_2}$$

Dopado no uniforme



$$p_1 = 10^{16} \text{ huecos/m}^3$$

$$p_2 = 10^{22} \text{ huecos/m}^3$$

$$T = 300 \text{ K (27}^\circ\text{C)}$$

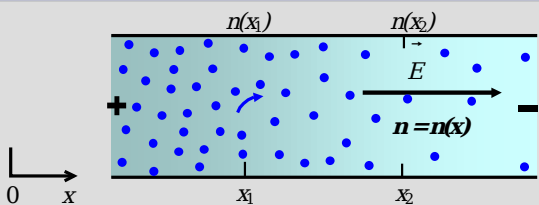
$$k = 1,4 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$V_2 - V_1 = V_T \ln \frac{p_1}{p_2} = -0,36 \text{ V}$$

$$V_T = \frac{kT}{e} = 25,85 \text{ mV}$$

Dopado no uniforme



Régimen estacionario

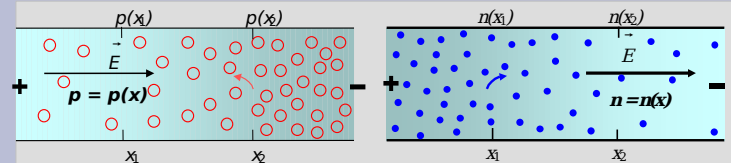
Densidad de corriente de electrones y huecos nula

$$J_n = n\mu_n e E_x + e D_n \frac{dn}{dx} = 0 \quad \Rightarrow \exists \vec{E} \neq 0$$

$$E_x = -\frac{D_n}{n\mu_n} \frac{dn}{dx} = -\frac{dV}{dx}$$

$$V_2 - V_1 = -V_T \ln \frac{n_1}{n_2}$$

Dopado no uniforme



$$V_2 - V_1 = V_T \ln \frac{p_1}{p_2}$$

$$p_1 = p_2 e^{(V_2 - V_1)/V_T}$$

$$V_2 - V_1 = -V_T \ln \frac{n_1}{n_2}$$

$$n_1 = n_2 e^{-(V_2 - V_1)/V_T}$$

$$n_1 p_1 = n_2 p_2$$