EL3004-Circutios Electrónicos Analógicos

Clase No. 4: Semiconductores y junturas

Marcos Diaz

Departamento de Ingeniería Eléctrica (DIE)
Universidad de Chile

Septiembre, 2011

1. Repaso Clase #3
2. Semiconductores
3. Diodos de Juntura
   - Juntura pn en equilibrio sin voltaje aplicado
   - Corriente en una juntura pn con polarización inversa
4. Resumen Clase #4

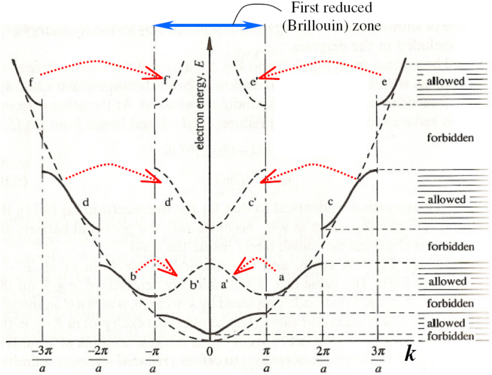
Repaso Clase #3

- Electrones en solidos
  - Teorema de Bloch
  - Modelo de Kronig-Penney
  - Interpretación de bandas de energía

Modelo de Kronig-Penney

$$P\frac{sin(\beta a)}{\beta a} + cos(\beta a) = cos(ka) \quad (84)$$

- Las energías permitidas dependen de k.
- Las soluciones tienen periodo de $cos(ka)$.
- Una forma más clara de verlo:



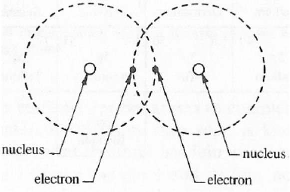
Enlaces entre átomos (Cristales)

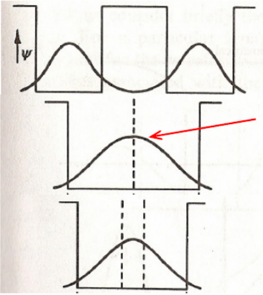
- Enlaces de gases inertes (Fuerzas de Van der Waals)
- Enlaces Ionicos (interacción electrostática)
- Enlaces covalentes (comparten electrón)
- Metales (interacción del centro iónico del átomo con los e^{-}s de conducción)

Enlaces Covalente

Los electrones de valencia son compartidos

- Se da entre átomos que tienen capas no llenas
- Un ejemplo es la molécula de Hidrógeno
- El enlace es fuerte y extremadamente direccional
- Estos materiales son duros y quebradizos





Electron tends to be between the nuclei

Enlaces Covalente

Materiales semiconductores

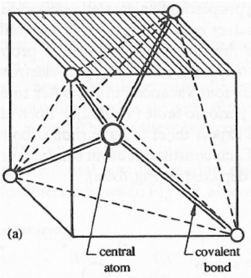
Single Elements:

Valency group	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA
	B 5 $2p$ Boron	C 6 $2p^2$ Carbon			
	Al 13 $3p$ Aluminium	Si 14 $3p^2$ Silicon	P 15 $3p^3$ Phosphorus	S 16 $3p^4$ Sulphur	
	Ga 31 $4p$ Gallium	Ge 32 $4p^2$ Germanium	As 33 $4p^3$ Arsenic	Se 34 $4p^4$ Selenium	
	In 49 $5p$ Indium	Sn 50 $5p^2$ Tin	Sb 51 $5p^3$ Antimony	Te 52 $5p^4$ Tellurium	I 53 $5p^5$ Iodine
			Bi 83 $6p^3$ Bismuth		

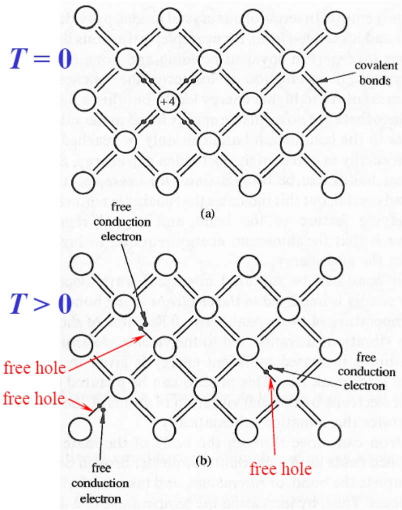
Intermetallic III-V compounds (tetravalent):

GaAs

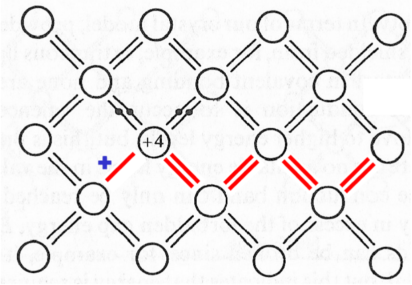
InSb



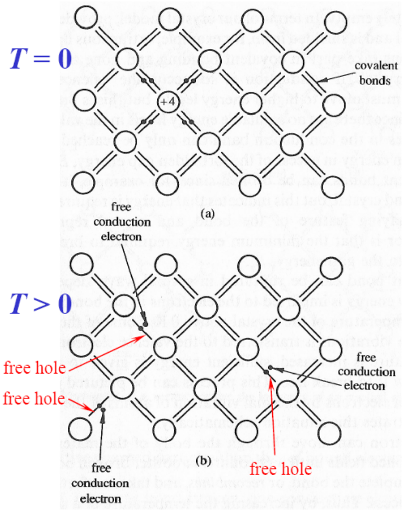
Enlaces Covalente
Movilidad de los Huecos



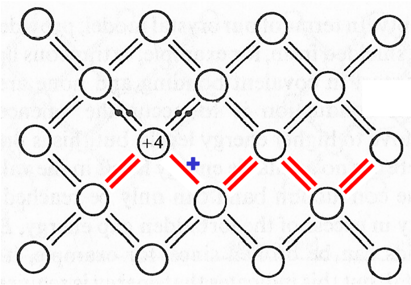
- Conducción por electrones
- Conducción por huecos



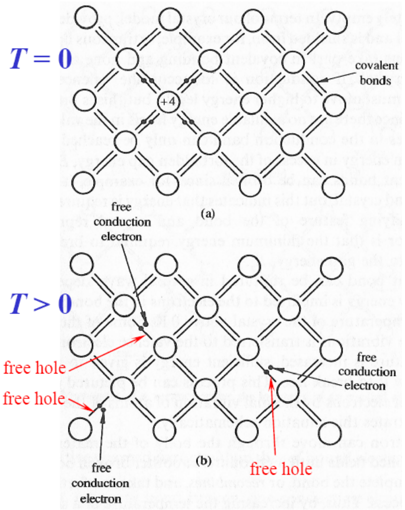
Enlaces Covalente
Movilidad de los Huecos



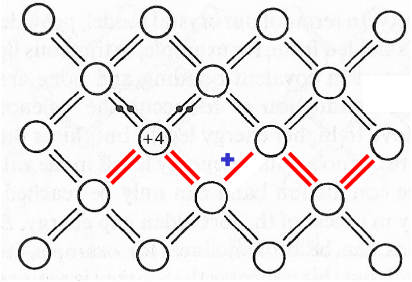
- Conducción por electrones
- Conducción por huecos



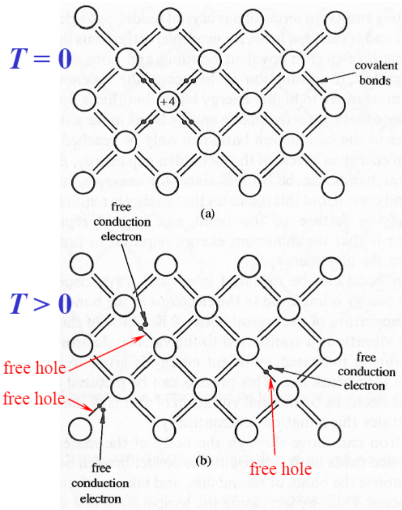
Enlaces Covalente
Movilidad de los Huecos



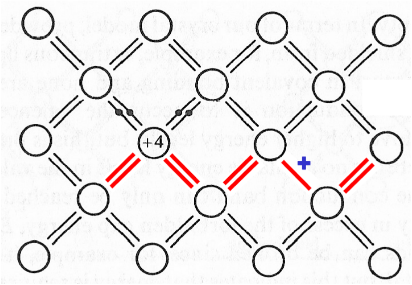
- Conducción por electrones
- Conducción por huecos



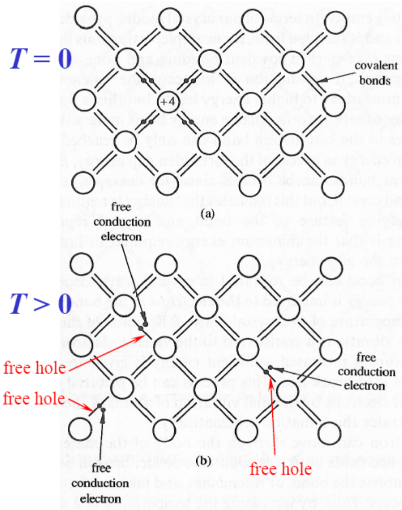
Enlaces Covalente
Movilidad de los Huecos



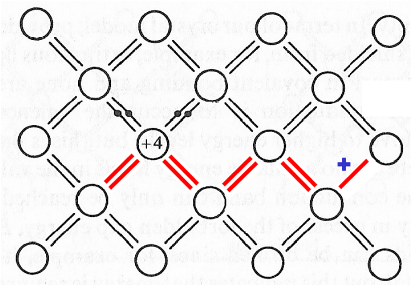
- Conducción por electrones
- Conducción por huecos



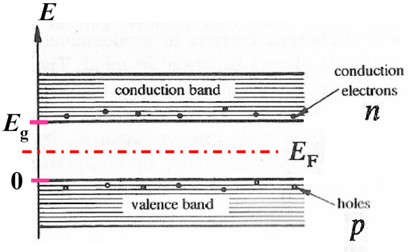
Enlaces Covalente
Movilidad de los Huecos



- Conducción por electrones
- Conducción por huecos



Semiconductores intrínsecos



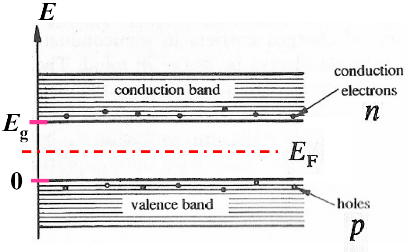
La ley de acción de masa:

$$np = n_i^2$$

donde n y p son las concentraciones de equilibrio de electrón y huecos respectivamente.

$$n_i = A_0 T^{3/2} e^{\frac{-E_g}{2k_B T}} \tag{85}$$

Semiconductores intrínsecos



La ley de acción de masa:

$$np = n_i^2$$

donde n y p son las concentraciones de equilibrio de electrón y huecos respectivamente.

$$n_i = A_0 T^{3/2} e^{\frac{-E_g}{2k_B T}} \tag{85}$$

Para el caso intrínseco

$$n = p = n_i$$

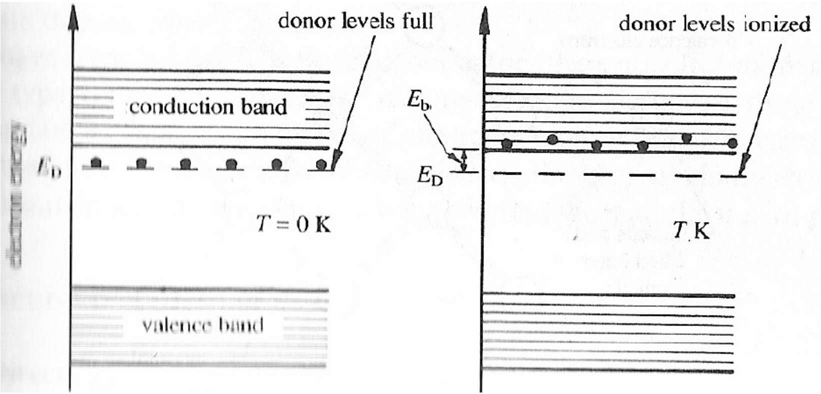
Aunque la ecuación acción de masa es valida para cualquier combinación de concentraciones, estas se pueden calcular imponiendo la neutralidad del semiconductor, la cual se debe cumplir incluso si este es dopado.

$$p + N_D = N_A + n \tag{86}$$

donde N_D es la concentración de donadores y N_A la concentración de aceptores.

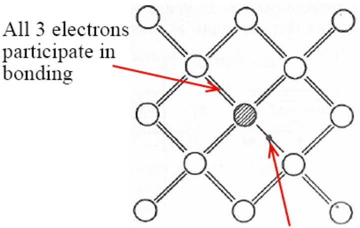
Semiconductores Extrinsicos

Tipo n (impuresas pentavalente)

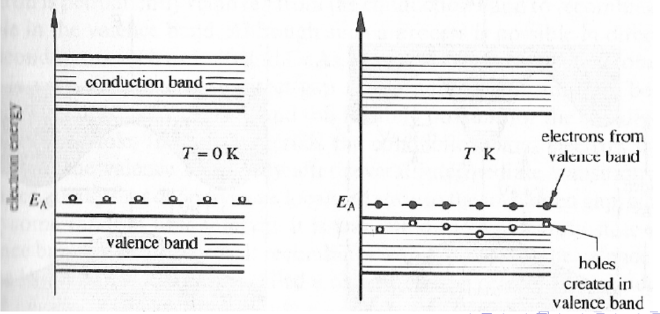


Semiconductores Extrínsicos

Tipo p (impuresas tetravalente)



The incomplete bond can, at $T > 0$, be filled creating a hole in the valence band.



Corrientes en un semiconductor
Velocidad de conducción

La velocidad de conducción depende de la aplicación de un campo eléctrico.

$$v_e = -\mu_e E$$

donde μ_e es la movilidad de los electrones.

$$i = \frac{\text{número total de cargas en el volumen Adx}}{\text{tiempo total requerido para mover las cargas a lo largo dx}} = qn\mu_e EA$$

$$J_{cond} = \frac{i}{A} = qn\mu_e E \quad (87)$$

$$J_{cond} = J_{e-cond} + J_{h-cond} = qn\mu_e E + qp\mu_e E \quad (88)$$

Corrientes en un semiconductor

Velocidad de difusión y velocidad total

La corriente de difusión depende del gradiente de la densidad de las particulas.

$$J_{dif} = J_{e-dif} + J_{h-dif} = qD_e \frac{dn}{dx} - qD_h \frac{dp}{dx} \quad (89)$$

Así la corriente total

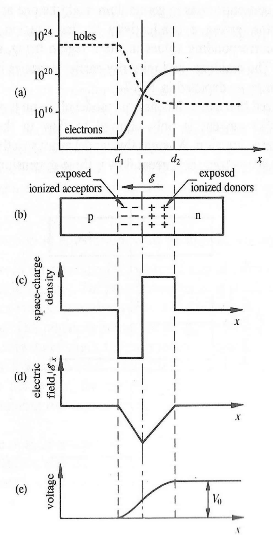
$$J_e = qn\mu_e E + qD_e \frac{dn}{dx} \quad (90)$$

$$J_h = qp\mu_h E - qD_h \frac{dp}{dx} \quad (91)$$

La relación de Einstein:

$$\frac{D_e}{\mu_e} = \frac{D_h}{\mu_h} = \frac{k_B T}{q} = V_T$$

Junturas pn
Región de Empobrecimiento



$$J_h = qp\mu_h E - qD_h \frac{dp}{dx} = 0 \tag{92}$$

$$E = \frac{D_h}{\mu_h} \frac{1}{p} \frac{dp}{dx} = \frac{k_B T}{q} \frac{1}{p} \frac{dp}{dx} \tag{93}$$

Recordando que $E = -dV(x)/dx$

$$\frac{D_h}{\mu_h} \frac{1}{p} \frac{dp}{dx} = \frac{k_B T}{q} \frac{1}{p} \frac{dp}{dx} = -\frac{dV(x)}{dx} \tag{94}$$

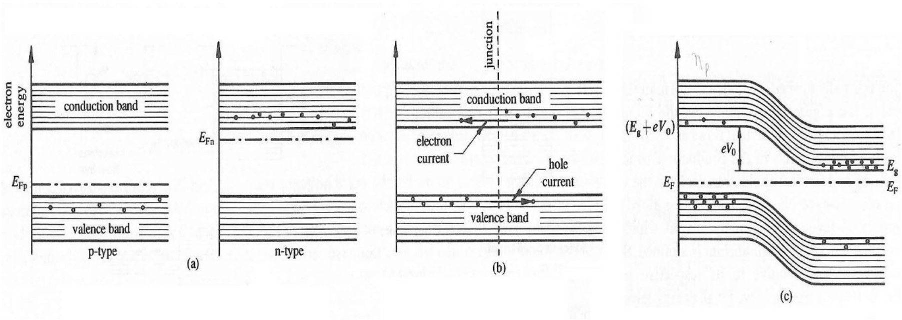
$$e(V_{d_1} - V_{d_2}) = eV_0 = -k_B T \ln\left(\frac{p_n}{p_p}\right) \tag{95}$$

$$p_p = p_n e^{\frac{qV_0}{k_B T}} \tag{96}$$

$$n_n = n_p e^{\frac{qV_0}{k_B T}} \tag{97}$$

Junturas pn

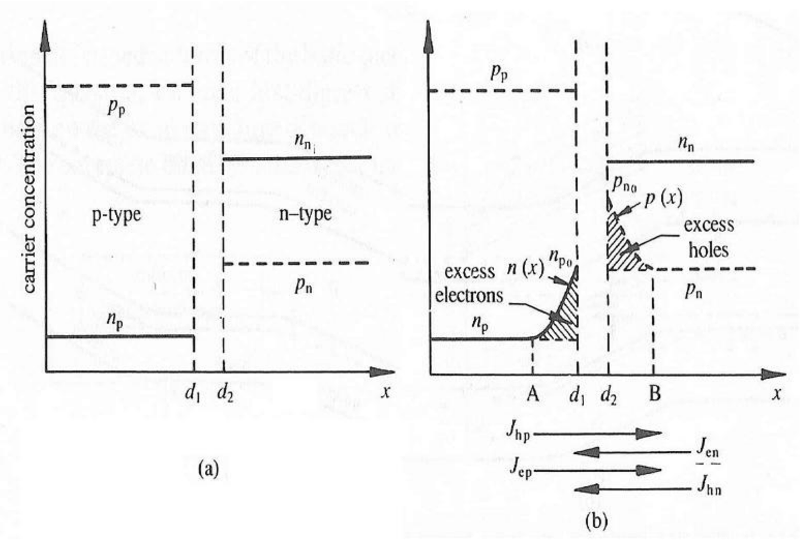
Región de Empobrecimiento



Juntura np -Videos (http://jas.eng.buffalo.edu/)

Juntura np -Videos (http://jas.eng.buffalo.edu/)

Junturas pn
Corrientes por la juntura



Junturas pn
Corriente por la juntura

Para los huecos, cuando existe un voltaje V:

$$e\,(V_0 - V) = -k_B T \ln\left(\frac{p_{n0}}{p_p}\right) \tag{98}$$

donde p_{n0} representa el exceso de concentración de huecos en el material n justo a la salida de la juntura la cual esta formada por un material tipo p a la izquierda y un material tipo n a la derecha. Reordenando:

$$p_{n0} = p_p e^{\frac{q(V-V_0)}{k_B T}} = \underbrace{p_p e^{\frac{-qV_0}{k_B T}}}_{p_n} e^{\frac{qV}{k_B T}} \tag{99}$$

$$p_{n0} = p_n e^{\frac{qV}{k_B T}} \tag{100}$$

Para los electrones:

$$n_{p0} = n_p e^{\frac{qV}{k_B T}} \tag{101}$$

Junturas pn
Corriente por la juntura

Ahora removiendo la componente de equilibrio, podemos obtener las concentraciones como condicines de borde de las cuales se parte una vez superado la región de empobrecimiento.
Para los huecos:

$$p_{n0} = p_n e^{\frac{qV}{k_B T}} - p_n = p_n \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \tag{102}$$

Para los electrones:

$$n_{p0} = n_p e^{\frac{qV}{k_B T}} - n_p = n_p \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \tag{103}$$

Solo las corrientes de difución son importantes, por lo que:

$$J_{h-dif} = -qD_h \frac{dp_{n0}(x)}{dx} = -qD_h \frac{dp_n}{dx} \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \tag{104}$$

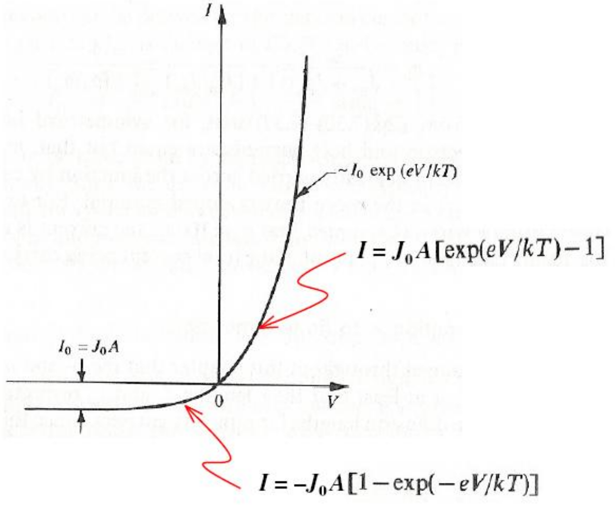
$$J_{e-dif} = qD_e \frac{dn_{p0}(x)}{dx} = qD_e \frac{dn_p}{dx} \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \tag{105}$$

Así, la densidad de corriente total es:

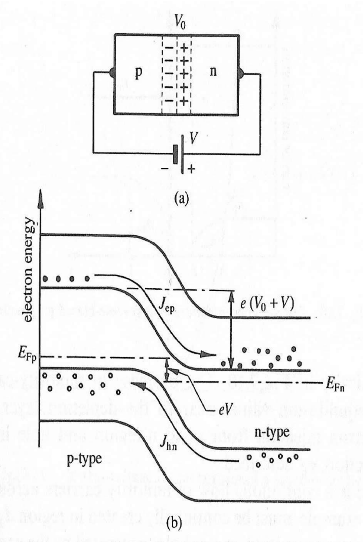
$$J_{tot} = J_0 \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \simeq J_0 e^{\frac{qV}{k_B T}} \tag{106}$$

Junturas pn

Corriente por la juntura



Junturas pn
Corriente por la juntura



Resumen Clase #4

- Bandas de energía
- Propiedades y tipos de semiconductores
- Introducción a las junturas pn
- Junturas np sin polarización
- Junturas np con polarización en directa
- Junturas np con polarización en reversa