



Fundamentos de Electricidad y Electrónica

Alberto Rivera Calzada
alberto.rivera@ucm.es

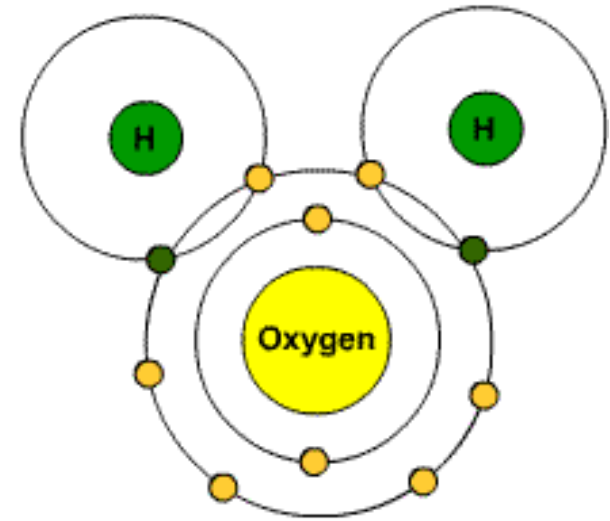
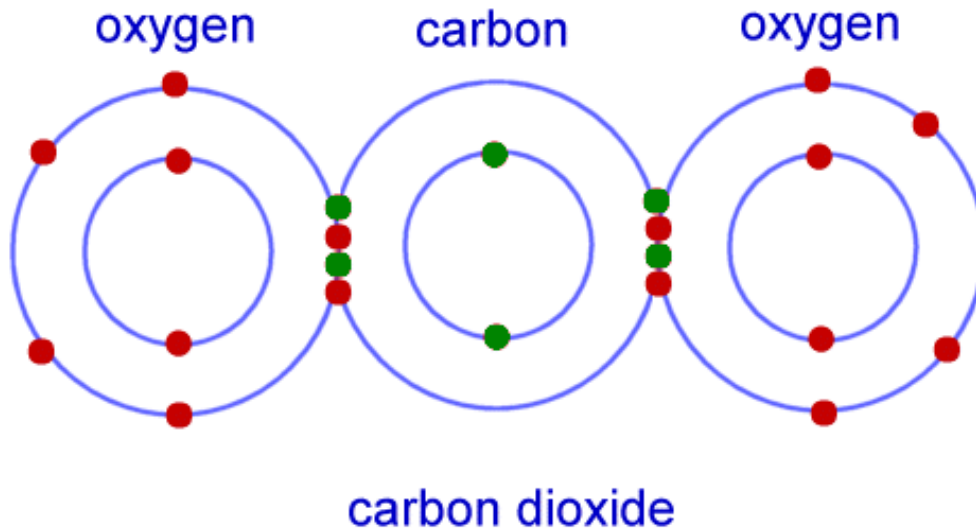
Tema 4. Dispositivos de unión de dos terminales.

1. Introducción a los semiconductores: dopado, conductividad, iluminación.
2. La unión PN: polarización y curva característica.
3. La unión PN como diodo en circuitos: punto de trabajo y recta de carga, circuitos.
4. Dispositivos optoelectrónicos: El diodo emisor de luz, la célula solar (cultura general)

VER VIDEO EXPLICATIVO EN CV ANTES DE CONTINUAR

1 Semiconductores

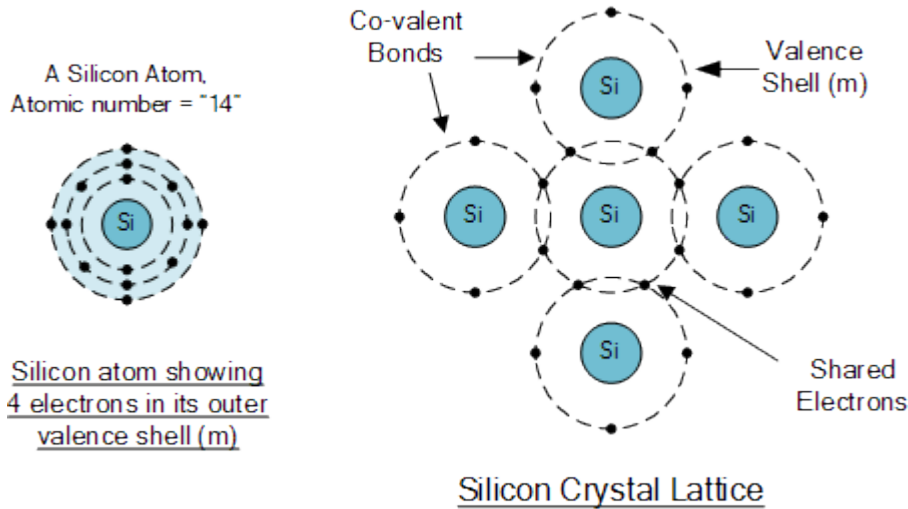
Se caracterizan por tener **enlace covalente**



En el enlace covalente los átomos comparten los electrones para tener la configuración estable de gas noble (2 u 8 electrones en la ultima capa). Los orbitales compartidos forman **orbitales híbridos** con una geometría diferente a los orbitales individuales, y con una probabilidad de ocupación preferente en la región entre los núcleos. Los electrones no están deslocalizados pero tampoco totalmente localizados, situación intermedia.



1 Semiconductores

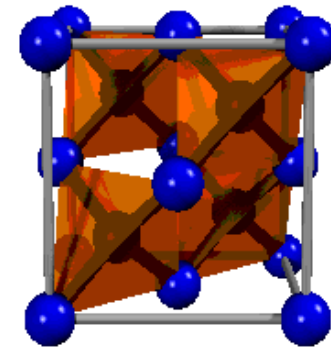
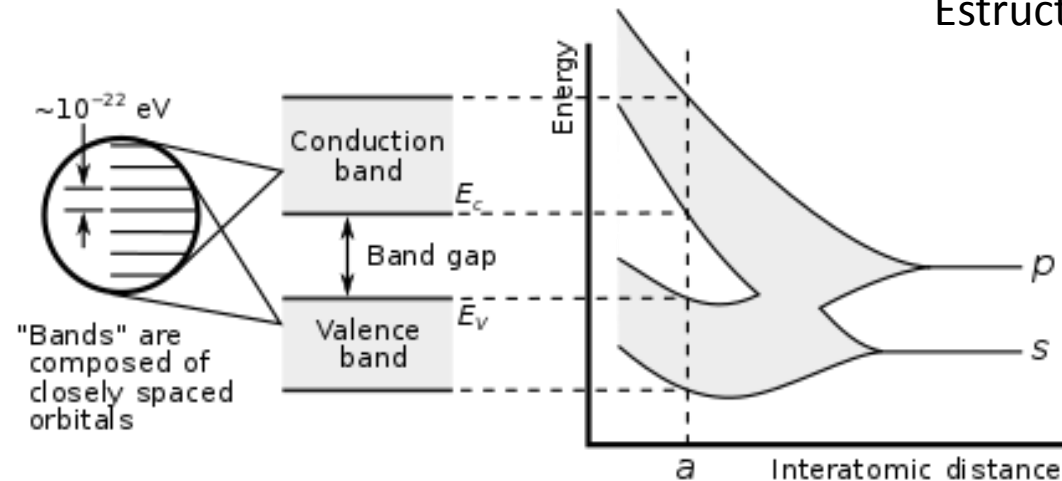


El mejor ejemplo es el **SILICIO**

Debido al enlace covalente aparecen bandas con estados accesibles y prohibidos en la estructura electrónica del material, 2 últimas bandas:

Banda conducción, vacía a $T=0K$, con n electr., e^-
GAP 1.17 eV

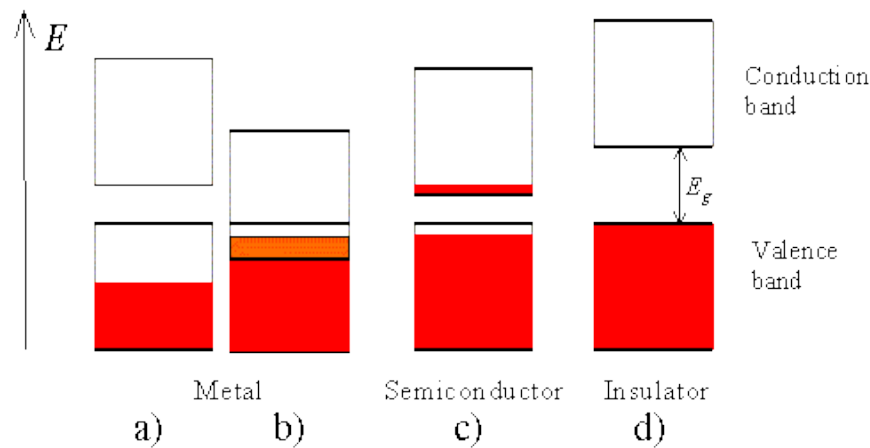
Banda Valencia, llena a $T=0K$, con p huecos h^+
Estructura diamante, sp^3 , tetraedros



1 Semiconductores

La separación de la banda de conducción y la de valencia, el **valor del GAP E_g** , da las propiedades de transporte eléctrico, en semiconductores es salvable, en aislantes no. Valores aproximados:

Metales:	$0.01 \mu\Omega\text{m} - 0.1\Omega\text{m}$	BC y BV solapan
Semiconductores:	$10 \Omega\text{m} - 1\text{M}\Omega\text{m}$	BC cerca de BV
Aislantes:	$1\text{M}\Omega\text{m} - 1\text{T}\Omega\text{m}$	BC lejos de BV



1 Semiconductores

Ejemplos

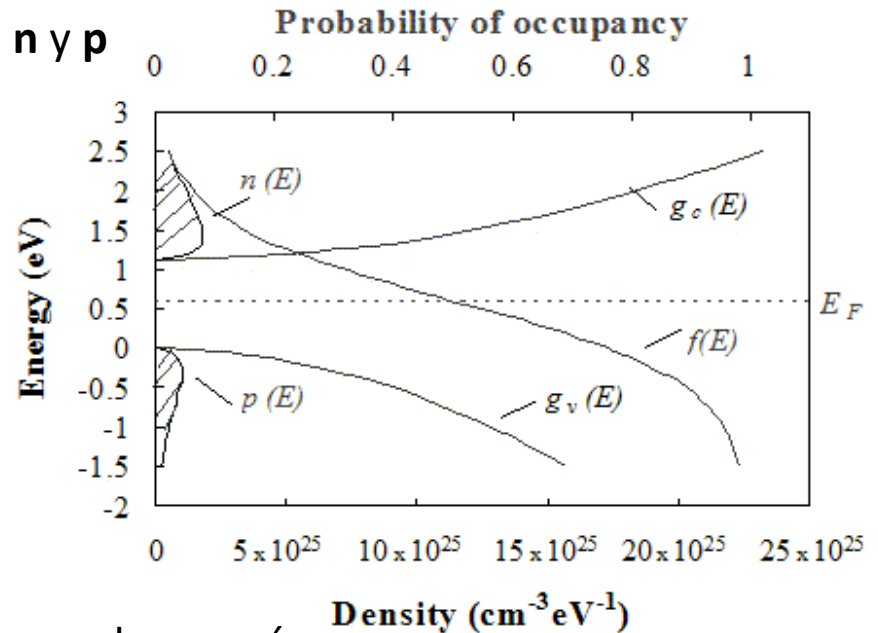
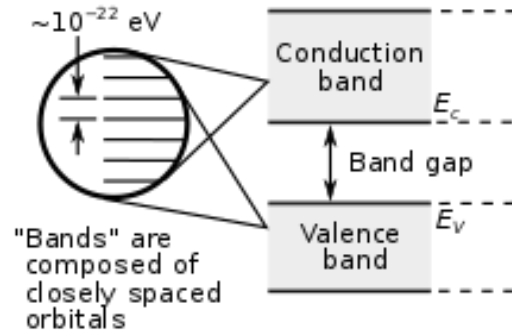
Material	Resistividad [Ωm] a 20 °C
Aire	$1.3 \times 10^{16} - 3.3 \times 10^{16}$
Carbono (diamante)	1×10^{12}
Carbono (grafeno)	1×10^{-8}
Cobre	1.68×10^{-8}
H ₂ O potable	20 – 2000
Cuarzo fundido	7.5×10^{17}
vidrio	$1 \times 10^{10} - 10 \times 10^{14}$

Material	Resistividad [Ωm] a 20 °C
Au	2.44×10^{-8}
Fe	1×10^{-7}
Pb	2.2×10^{-7}
Hg	9.8×10^{-7}
PET	1×10^{20}
H ₂ O marina	0.2
Si	640
Teflón	1×10^{22}
Ti	4.2×10^{-7}
W	5.6×10^{-8}
Madera húmeda	1000 – 10000
Madera seca	$1 \times 10^{14} - 1 \times 10^{16}$



1 Semiconductores

Concentración de portadores en las bandas, **n** y **p**



Distribución exponencial del n. de electrones con la energía:
Los electrones son fermiones, 2 no pueden ocupar el mismo estado, estadística de Fermi-Dirac. Si no estamos muy cerca de **E_c** o **E_v**, aproximado por Maxwell-Boltzmann.

Nivel de Fermi, nivel de referencia, probab. ocupación 0.5

$$n_i = n_o|_{(E_F=E_i)} = N_c e^{(E_i - E_c)/kT}$$

$$n_i = p_o|_{(E_F=E_i)} = N_v e^{(E_v - E_i)/kT}$$

Semiconductor intrínseco
(sin impurezas dopantes)

$$n=p=n_i$$

E_F en mitad de E_g

<http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/toc2.htm>



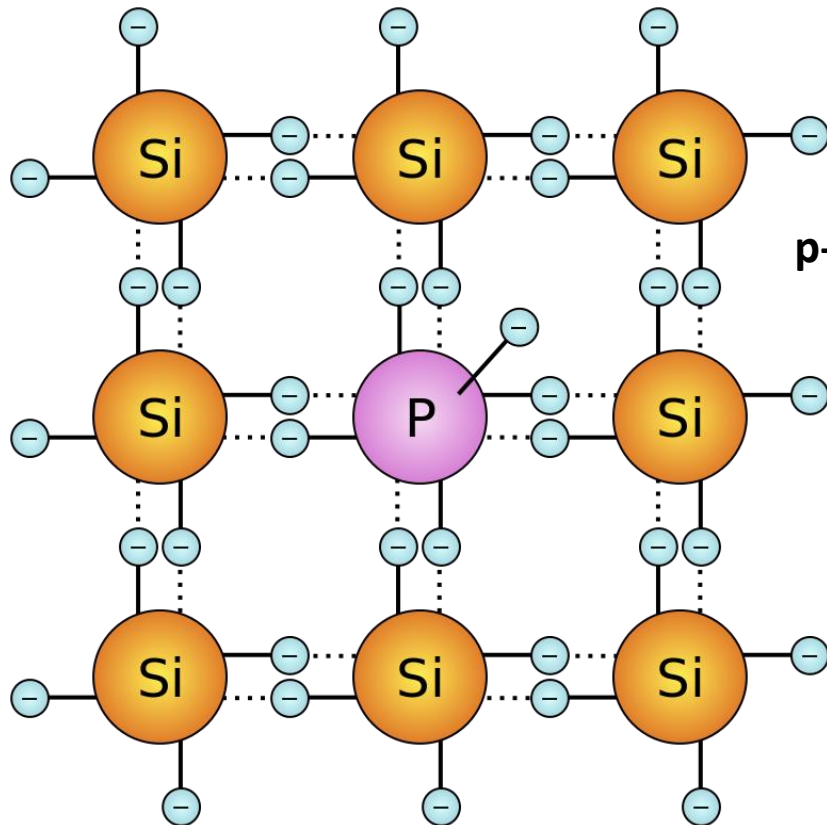
1 Semiconductores

Intrínseco: semiconductor puro

Extrínseco: semiconductor dopado, dos tipos

Tipo N

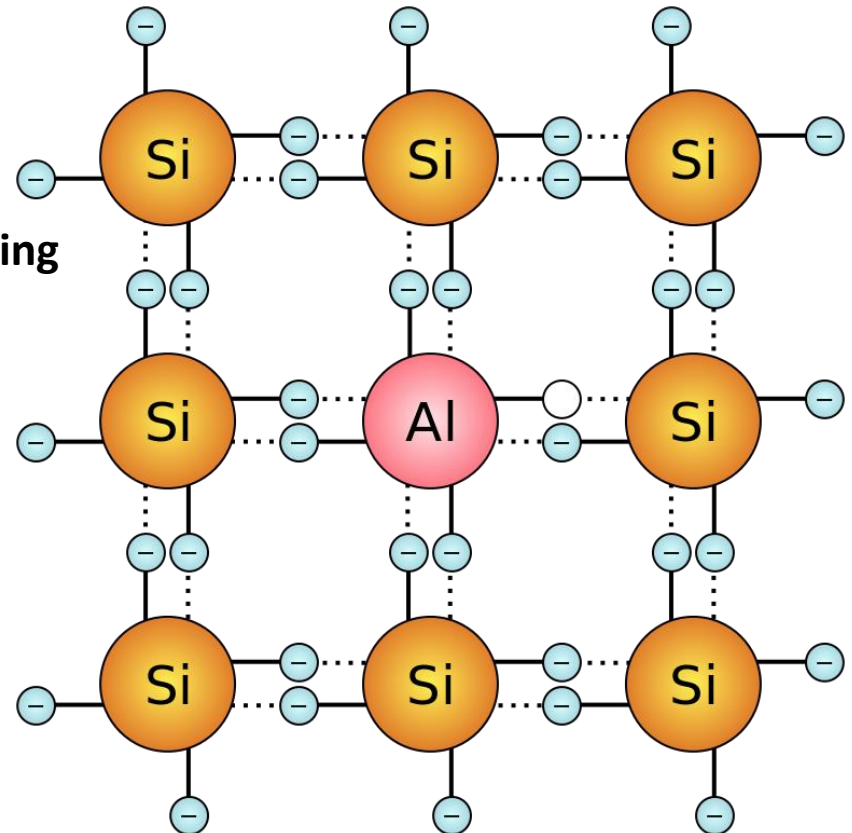
e^- extra en BC



p-doping

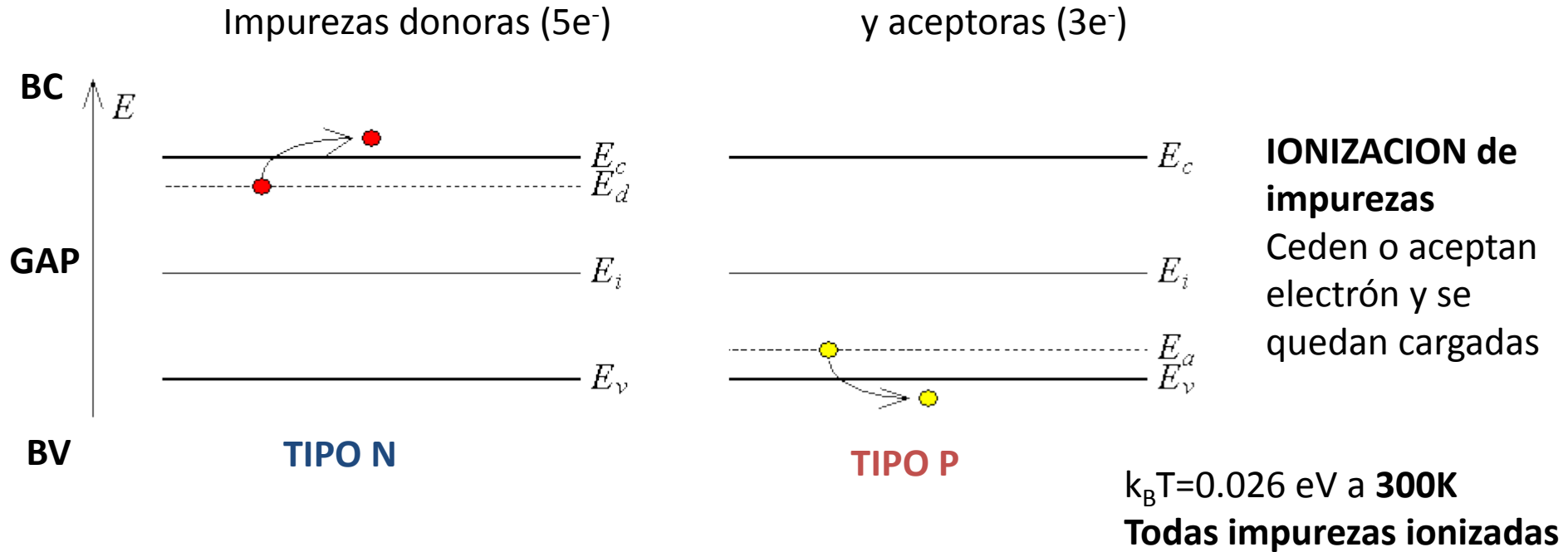
Tipo P

e^- de menos, h^+ extra en BV



1 Semiconductores dopados

Posición en energía de las impurezas dopantes



$$n_0 \cong N_d^+ = N_d$$

$$p_0 \cong N_a^- = N_a$$

EQUILIBRIO, Ley acción de masas: $n_0 \cdot p_0 = N_c N_v e^{(E_v - E_c)/kT} = n_i^2$

Generación de portadores **G** ~ Gen. en SC intrínseco ~ $k n_i p_i$

Recombinación de portadores **R** = $k n p$

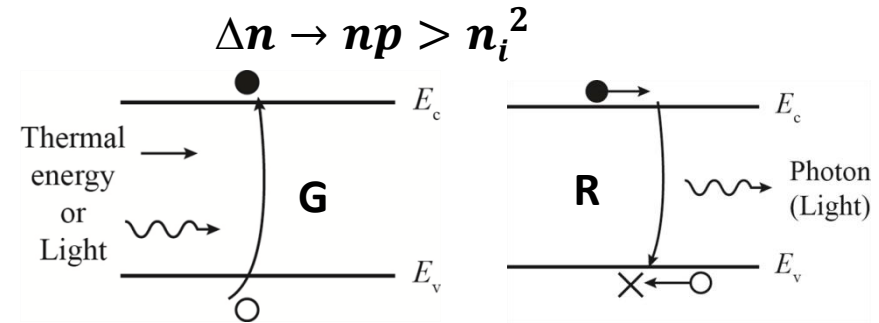
$$np = n_i^2$$



1 Semiconductores dopados

El número de portadores es estable en entorno de temperatura ambiente.

El GAP permite procesos de **generación G** y **recombinación R** de portadores con luz de la energía adecuada $E = h\nu \geq E_g$



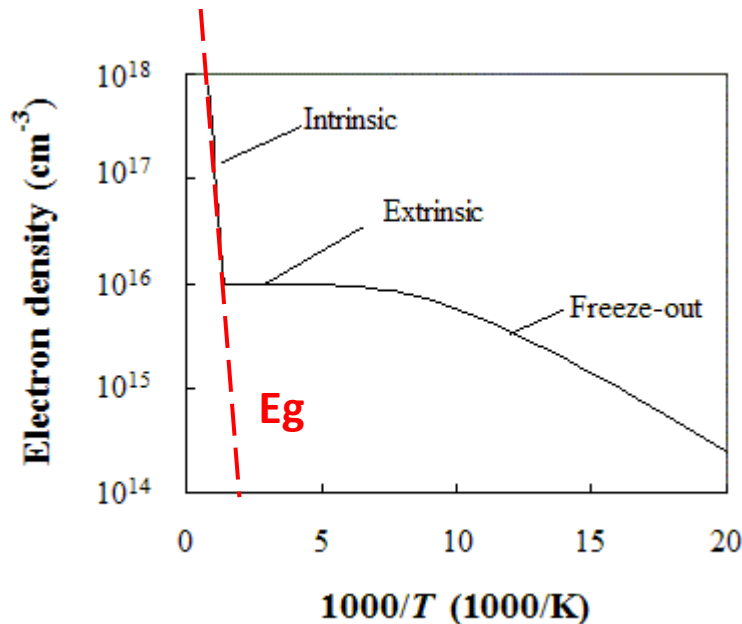
$$n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{-E_g/2k_B T}$$

Transporte **bipolar**, e^- y h^+

Puede haber acumulacion de portadores:
J de arrastre campo \mathbf{E} y J de difusión $\mathbf{n(x)}$

$$J = J_A + J_D \begin{cases} J_A = (\sigma_n + \sigma_p)E \\ J_D = q(D_n \frac{dn}{dx} + \frac{dp}{dx} D_p) \end{cases}$$

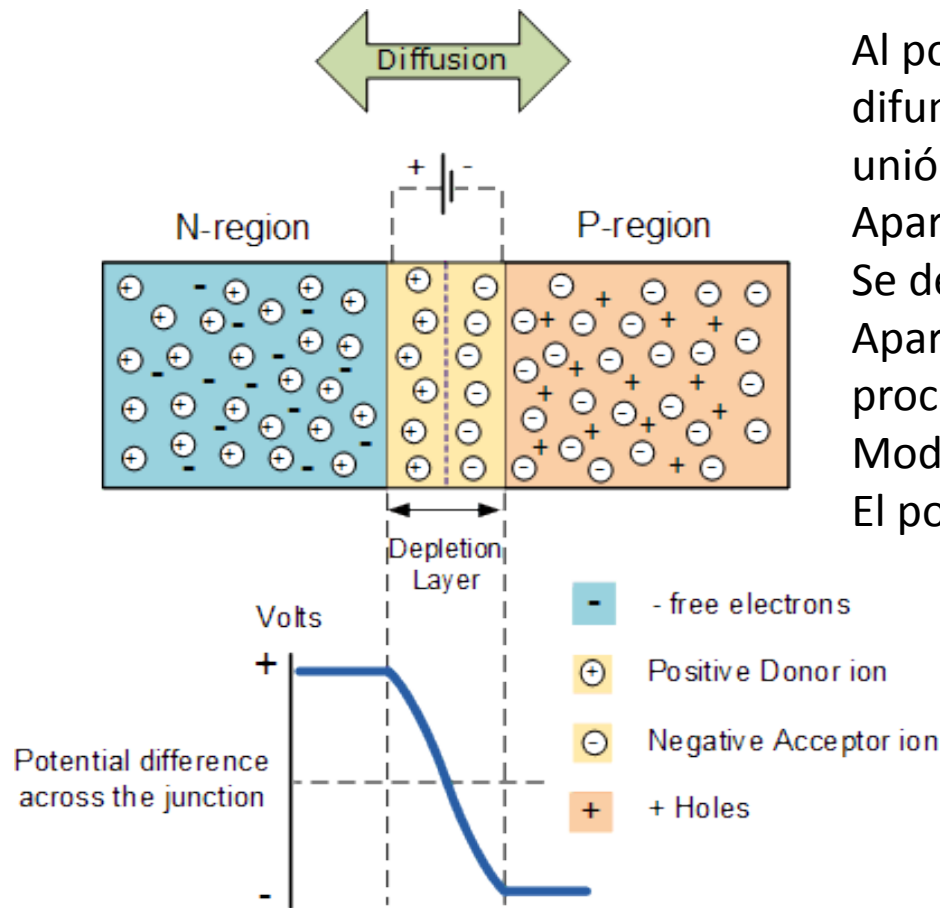
$$J = (qn\mu_n + qp\mu_p)E + q(D_n \frac{dn}{dx} + \frac{dp}{dx} D_p)$$



© Bart Van Zeghbroeck 2007



2 Unión PN



Al poner en contacto **semiconductor N con P** se difunden y recombinan los portadores cerca de la unión

Aparece **Zona de Carga Espacial**, sin portadores

Se descompensa la carga de las impurezas ionizadas

Aparece **campo eléctrico en la unión**, que frena el proceso de difusión de e^- en P y h^+ en N.

Modelo de 1D perpendicular a la unión,

El potencial ψ y el campo E dado por la Ec. Poisson

$$-\frac{d^2\psi}{dx^2} = \frac{dE}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_s}, W_{Dp}N_A = W_{Dn}N_D,$$

$$\Phi_0 = E_{Fn} - E_{Fp} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}$$

https://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_2.html



2 Unión PN

Modelo de 1D perpendicular a la unión:

Neutralidad de carga

Ecuación de Poisson, carga=impurezas=cte(x)

$$-\frac{d^2\psi}{dx^2} = \frac{dE}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_s}, \quad W_{Dp}N_A = W_{Dn}N_D,$$

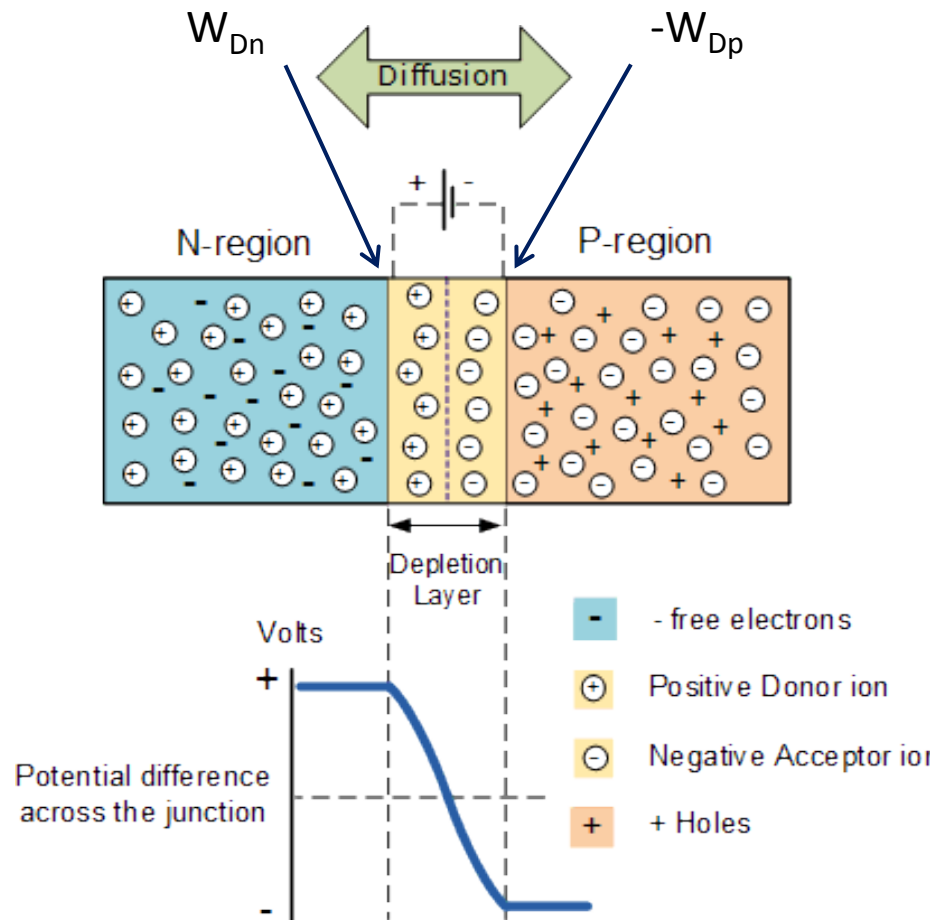
$$E_p(x) = -\frac{qN_A(x + W_{Dp})}{\epsilon_p}, \quad \text{for } -W_{Dp} \leq x \leq 0$$

$$E_n(x) = -\frac{qN_D(W_{Dn} - x)}{\epsilon_n}, \quad \text{for } 0 \leq x \leq W_{Dn}$$

$$\psi_p(x) = \frac{qN_A(x + W_{Dp})^2}{2\epsilon_p} \quad \text{for } -W_{Dp} \leq x \leq 0$$

$$\psi_n(x) = \psi_p(0) + \frac{qN_D(W_{Dn} - x/2)x}{\epsilon_n} \quad \text{for } 0 \leq x \leq W_{Dn}$$

$$\psi_p(W_{Dp}) = 0, \quad \psi_p(0) = \psi_n(0),$$



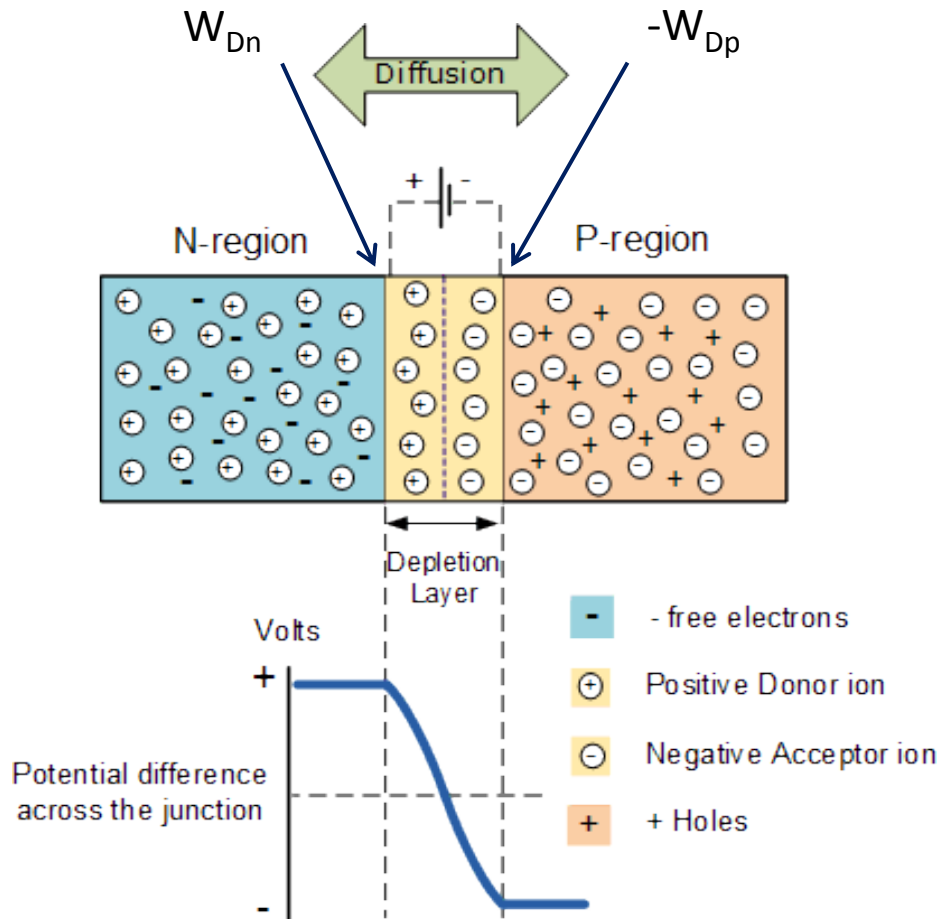
2 Unión PN

Caída de potencial al atravesar la unión:
Potencial de contacto V_0 (V_{bi})

$$V_{bi} = \psi_{bi} = \psi_n(W_{Dn}) - \psi_p(-W_{Dp})$$

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}$$

Si lo supero los portadores pueden volver a pasar por la unión, ¡ grande



Anchura total de la zona de carga espacial:

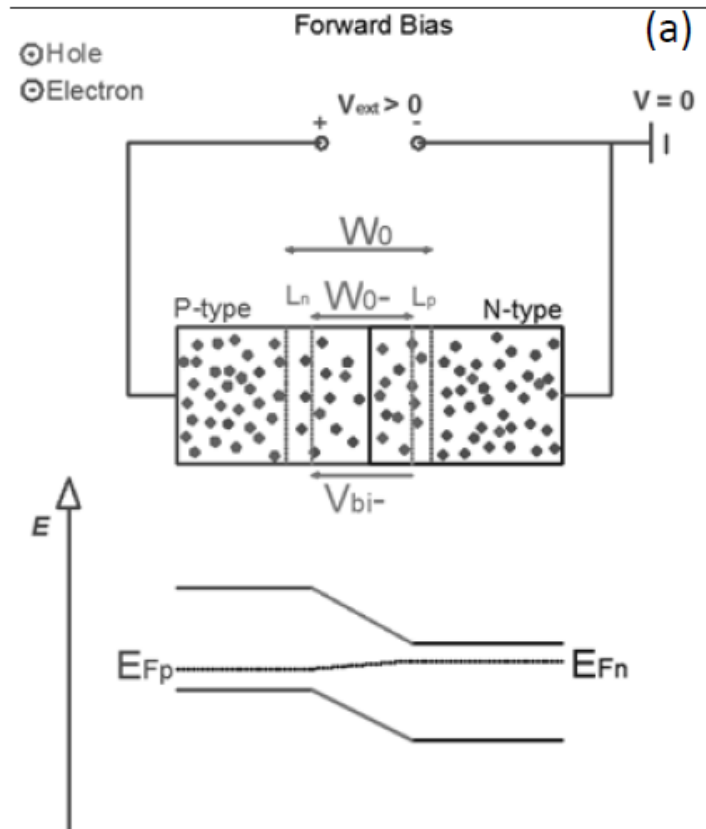
$$W_0 = W_{nP} + W_{nD} = \sqrt{\frac{2V_{bi}\epsilon_p\epsilon_n}{q(\epsilon_n N_D + \epsilon_p N_A)}} \left(\sqrt{\frac{1}{N_A}} + \sqrt{\frac{1}{N_D}} \right)$$

$$V_{bi} = \frac{q}{2\epsilon} (N_d W_{Dn}^2 + N_a W_{Dp}^2)$$



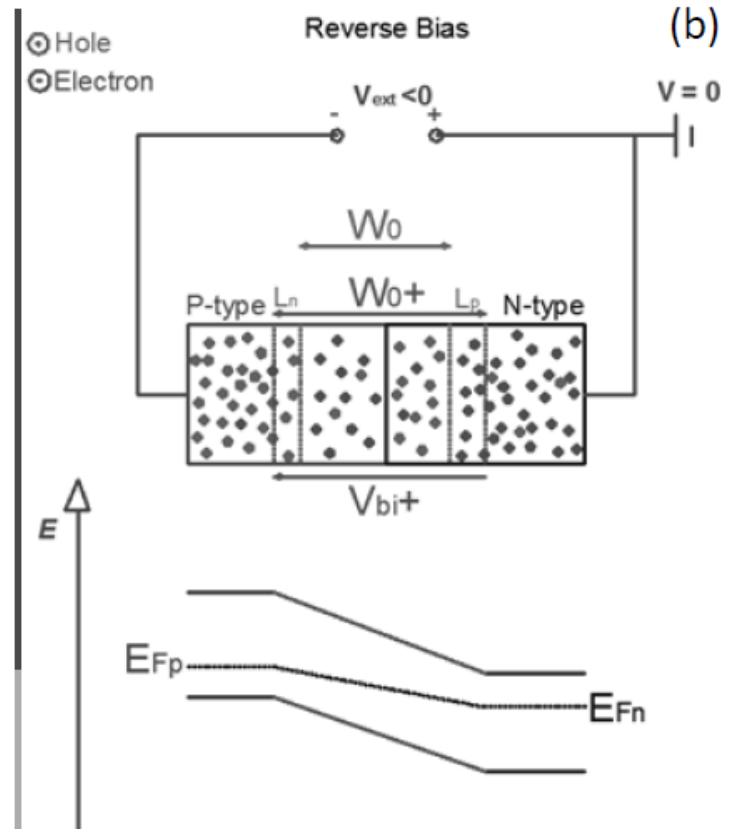
2 Unión PN

Polarización directa: E_{externo} disminuye **ZCE**



Corriente elevada de portadores mayoritarios
 $N, I \sim \exp(V_{\text{bias}})$

Polarización inversa: E_{externo} aumenta **ZCE**

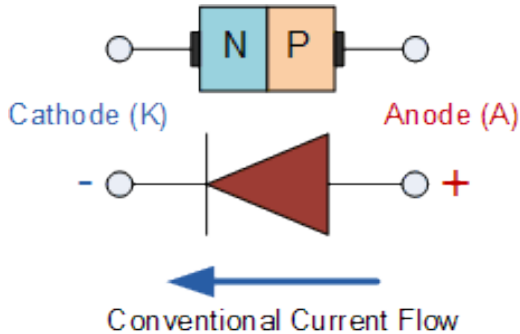


No hay corriente $I \cong 0$

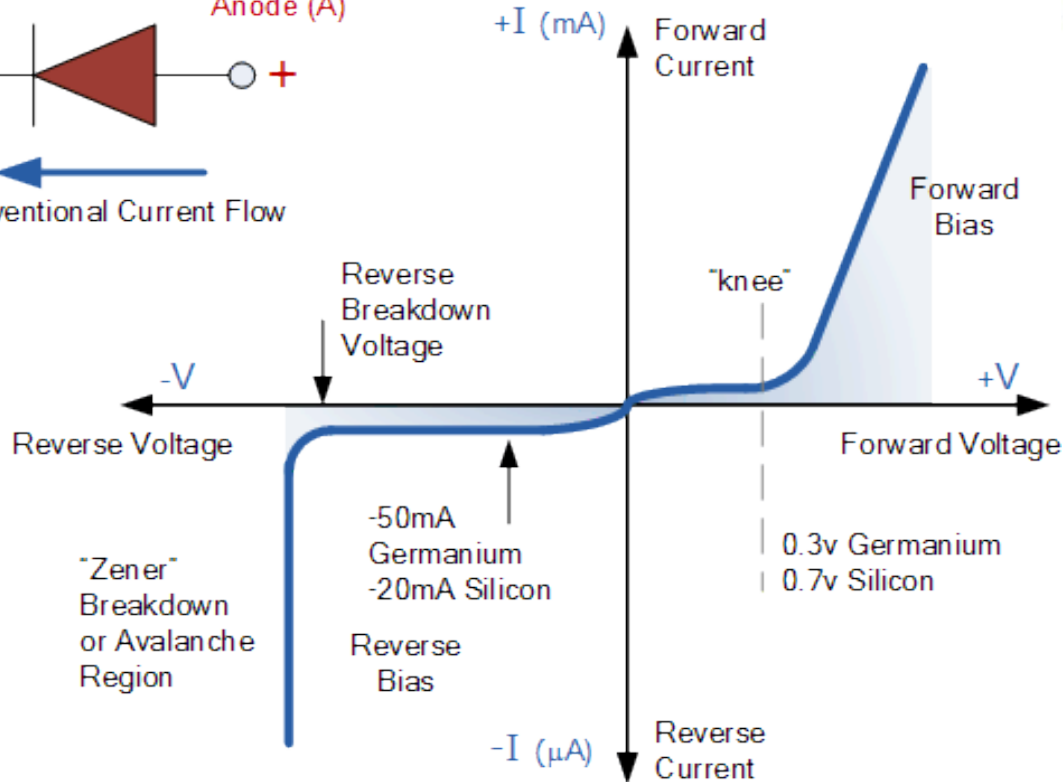


2 Unión PN, o diodo

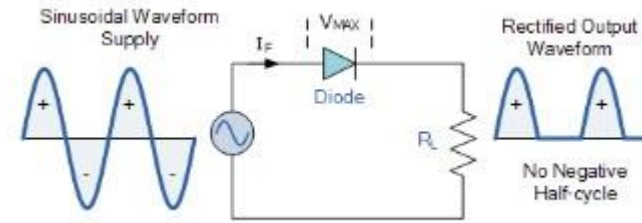
Símbolo



Curva característica del diodo I-V:



Rectificación señal AC



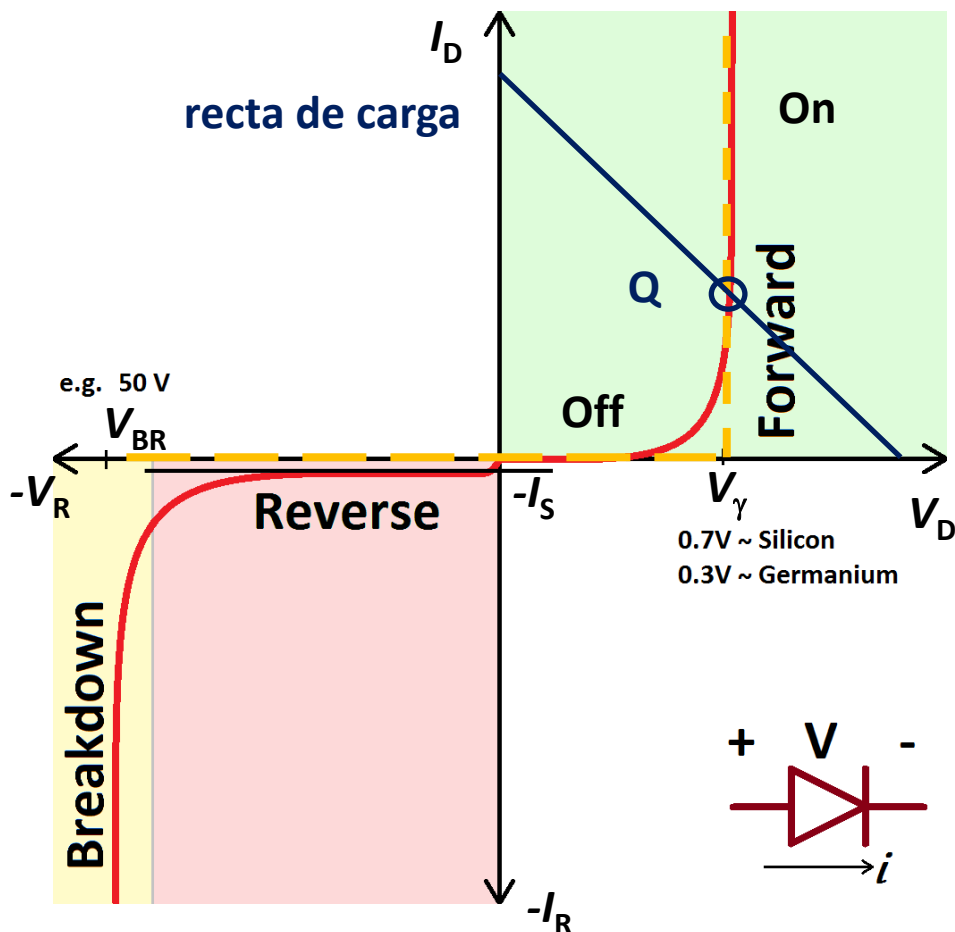
$$I = I_0 (e^{qV/NkT} - 1)$$

N factor de idealidad, para Si ~ 1
k es la cte de Boltzmann
($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

https://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_2.html

3 Circuitos con diodos

Característica corriente voltaje I-V del diodo



Modelo de tensión de codo

Directa (forward), ON

El voltaje en el lado P respecto de N, V_{PN} es mayor que el voltaje de codo V_γ , la corriente esta delimitada por el resto del circuito, **recta de carga y punto de trabajo Q**.

Inversa (reverse), OFF

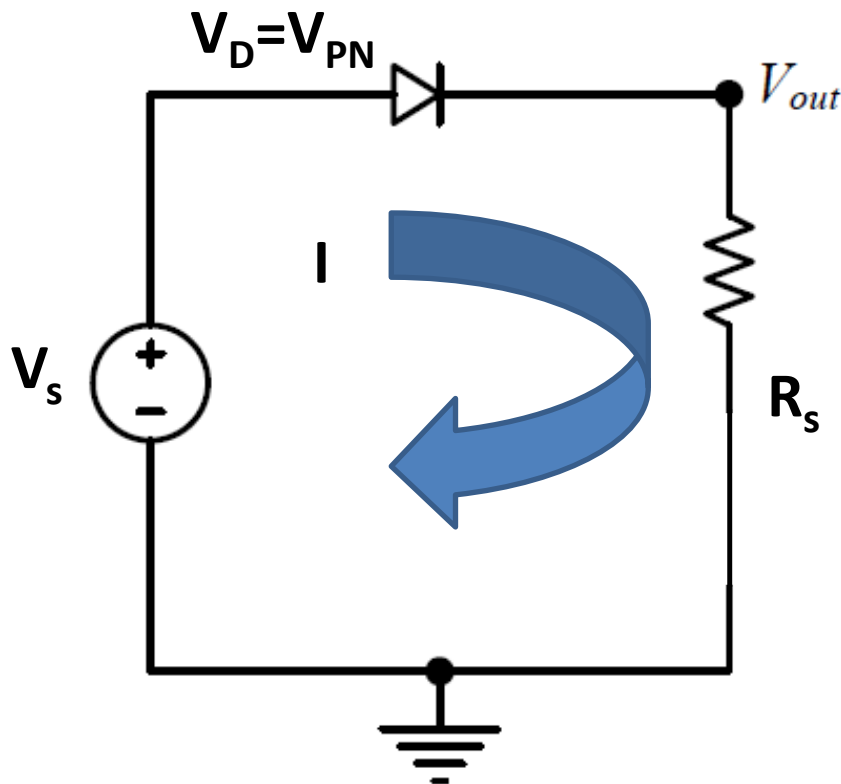
El voltaje V_{PN} es menor que V_γ , el diodo no conduce, tiene una corriente residual despreciable, $I_D \cong 0$

La corriente solo pasa en el **sentido PN**
En inversa el diodo es un **circuito abierto**

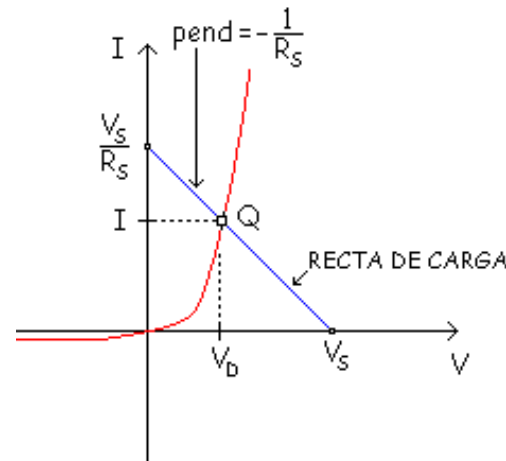
3 Circuitos con diodos

$$\left. \begin{aligned} V_S &= V_D + V_R \\ V_R &= IR_S \end{aligned} \right\} I = \frac{V_S - V_D}{R_S}$$

Recta de carga que junto con la ecuación del diodo nos da el punto de trabajo Q



$$I = I_0(e^{qV_D/NkT} - 1)$$



Los puntos de corte:

$V_D = 0 \rightarrow I = \frac{V_S}{R_S}$ Punto de corte con el eje y

$I = 0 \rightarrow V_D = -V_S$ Punto de corte con el eje x

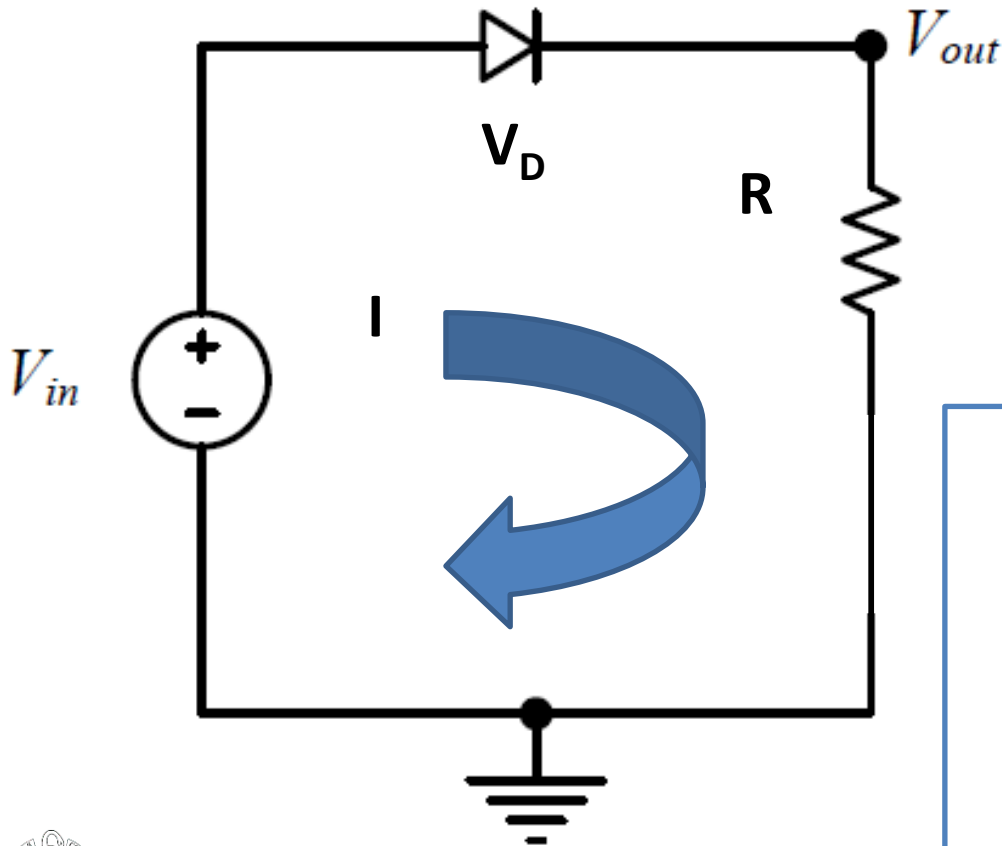
Para la resolución de circuitos usaremos el modelo de tensión de codo, con $V_\gamma = 0.7V$



3 Circuitos con diodos

Resolvemos el circuito para saber condiciones ON y OFF

$$\left. \begin{array}{l} V_{in} = V_D + V_R \\ V_R = IR \end{array} \right\} I = \frac{V_{in} - V_D}{R}$$



ON

$$I = \frac{V_{in} - V_D}{R} > 0; V_{in} > V_\gamma = 0.7V$$

$$\Rightarrow V_{in} > V_\gamma$$

OFF

$$I = \frac{V_{in} - V_D}{R} = 0;$$

Límite $V_{in} = V_\gamma (0.7V)$,

Si $V_{in} < V_\gamma$ diodo en inversa, $I=0$ y $V_R=IR=0$

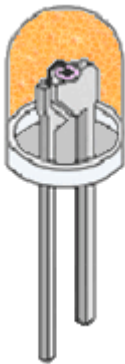
$$V_D = V_{in} < V_\gamma$$



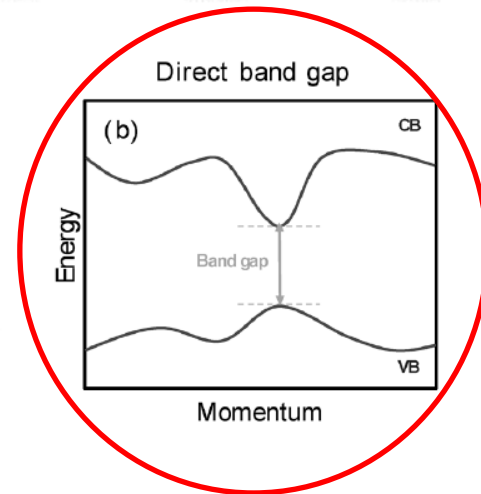
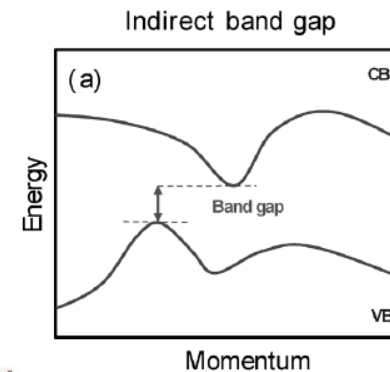
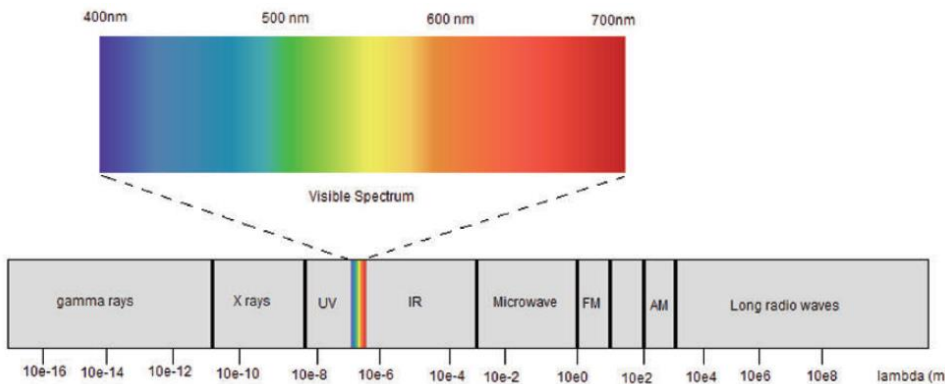
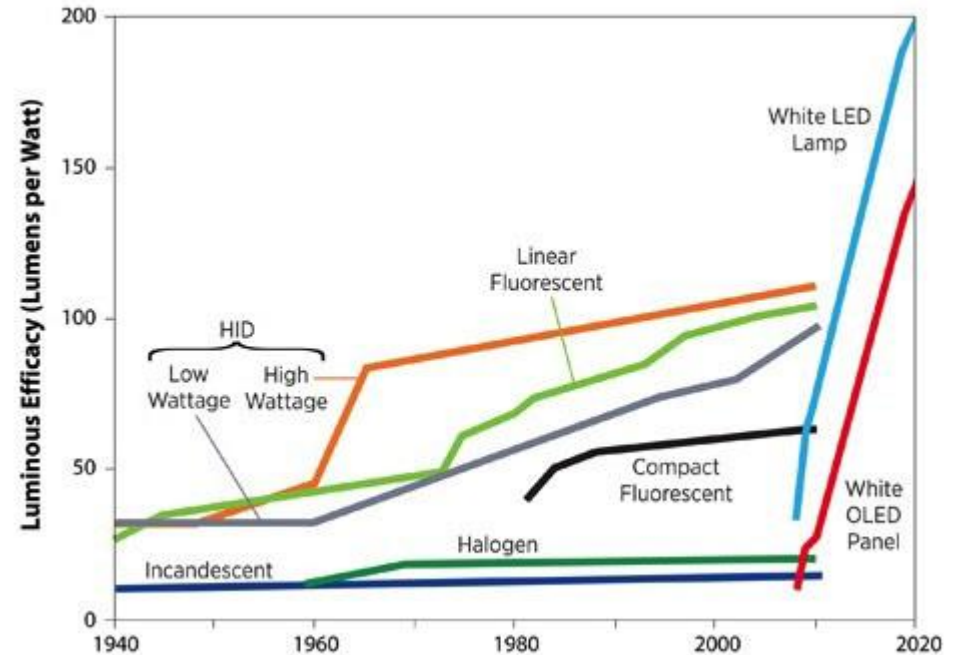
4 Light Emitting Diode (no entra)

Consiste en un diodo optimizado para emitir la luz que se genera en directa,
Encapsulado transparente

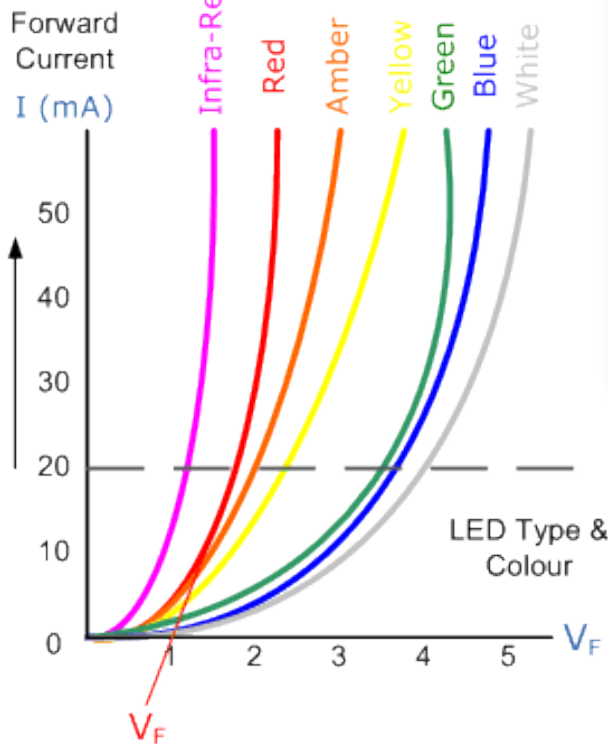
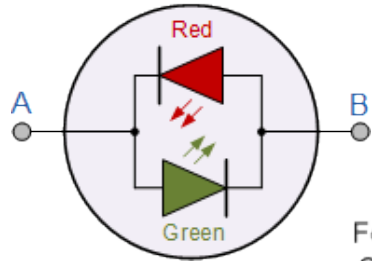
Recombinación de portadores



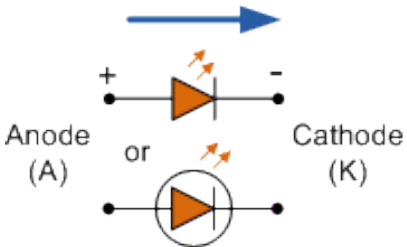
$$E = h\nu = hc/\lambda$$



4 Light Emitting Diode (no entra)



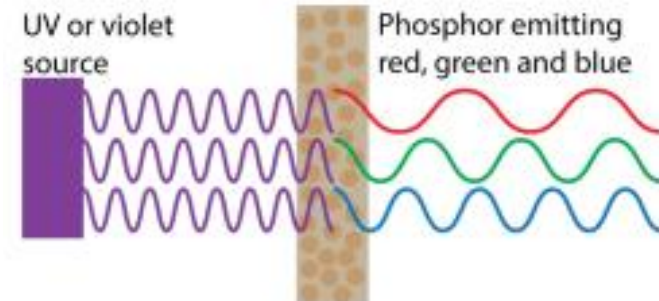
Conventional Current Flow



LED and its
I-V Characteristics

Typical LED Characteristics			
Semiconductor Material	Wavelength	Colour	V_F @ 20mA
GaAs	850-940nm	Infra-Red	1.2v
GaAsP	630-660nm	Red	1.8v
GaAsP	605-620nm	Amber	2.0v
GaAsP:N	585-595nm	Yellow	2.2v
AlGaP	550-570nm	Green	3.5v
SiC	430-505nm	Blue	3.6v
GaN	450nm	White	4.0v

Premio Nobel 2014 al LED azul, RGB



LED blanco { Combinar RGB
Violeta + fosforescencia amarilla



4 Iluminación eficiente con LEDs



Here is what you need to know:

	LEDs	CFLs	
ENERGY USE ENERGY COST PER YEAR	19 w \$2.54/yr (limited availability)	20 w \$2.67/yr	1600 lumens
ENERGY USE ENERGY COST PER YEAR	15 w \$2.00/yr	16 w \$2.14/yr	1100 lumens
ENERGY USE ENERGY COST PER YEAR	10 w \$1.34/yr	13 w \$1.74/yr	800 lumens
ENERGY USE ENERGY COST PER YEAR	5 w \$0.67/yr	10 w \$1.34/yr	450 lumens
	TYPICAL LIFE: 15-25+ YEARS	TYPICAL LIFE: 10 YEARS	



Energy Efficiency:

Incandescent vs Fluorescent Tubes vs LED



Incandescent

10% Light
90% Heat



Fluorescent

20% Light
80% Heat



LED

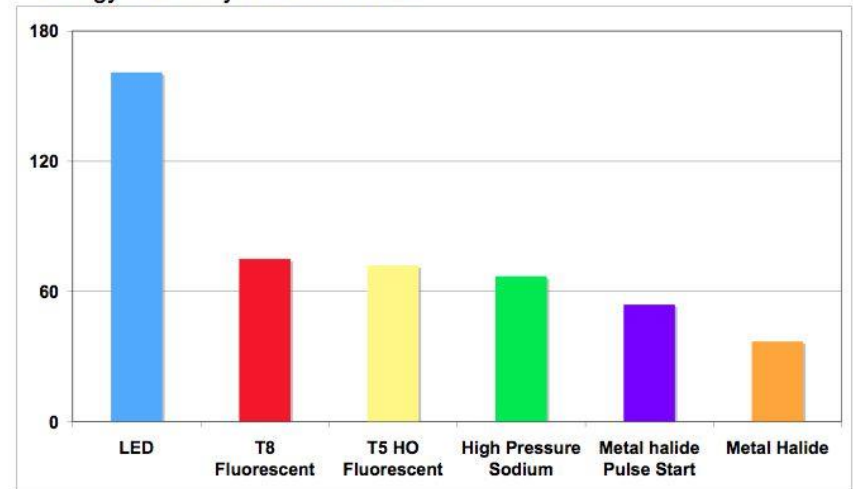
80% Light
20% Heat

Características:

- Son mucho más eficientes, conversión directa corriente en luz.
 - Direccionalidad: emiten luz en una dirección específica, no hay necesidad de reflectores y difusores, menos pérdidas, más **eficientes**. Con otros tipos de iluminación más de la mitad de la luz se pierde en otras direcciones.
 - Calor: los LED emiten muy poco calor, 10-20%.
- En comparación, las bombillas incandescentes liberan el 90% de su energía en forma de calor y las *Compact Fluorescent Lights* liberan el 80% (IR).

Energy Efficient Lighting

Energy Efficiency: Lumens / Watt



Source: Paragon Lighting and Green Econometrics research

Energy efficient lighting fixtures such as LED are provide twice the lumens per watt of electricity than legacy metal halide fixtures.

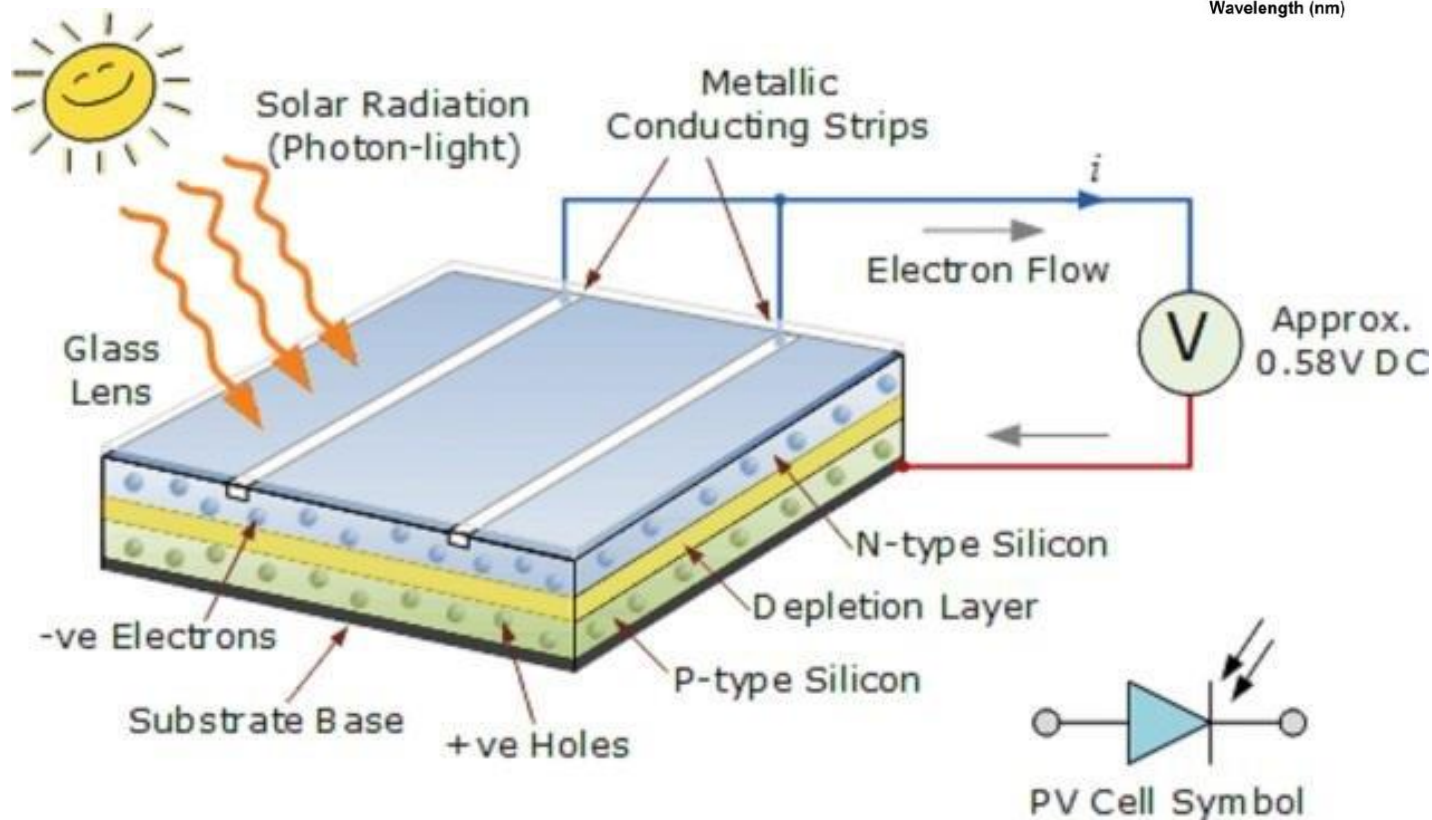
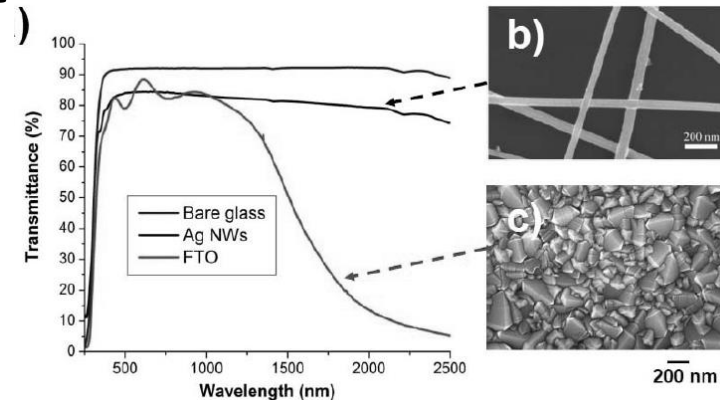


4 Célula solar (no entra)

Unión PN

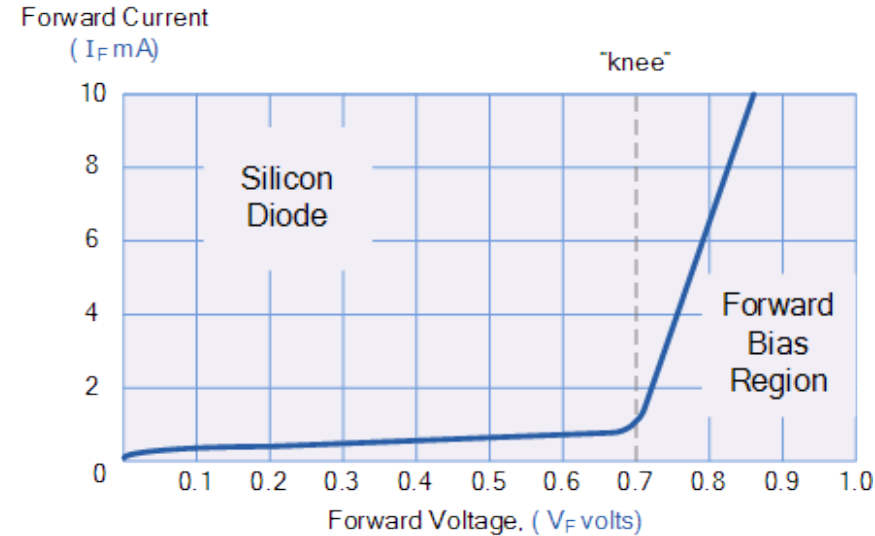
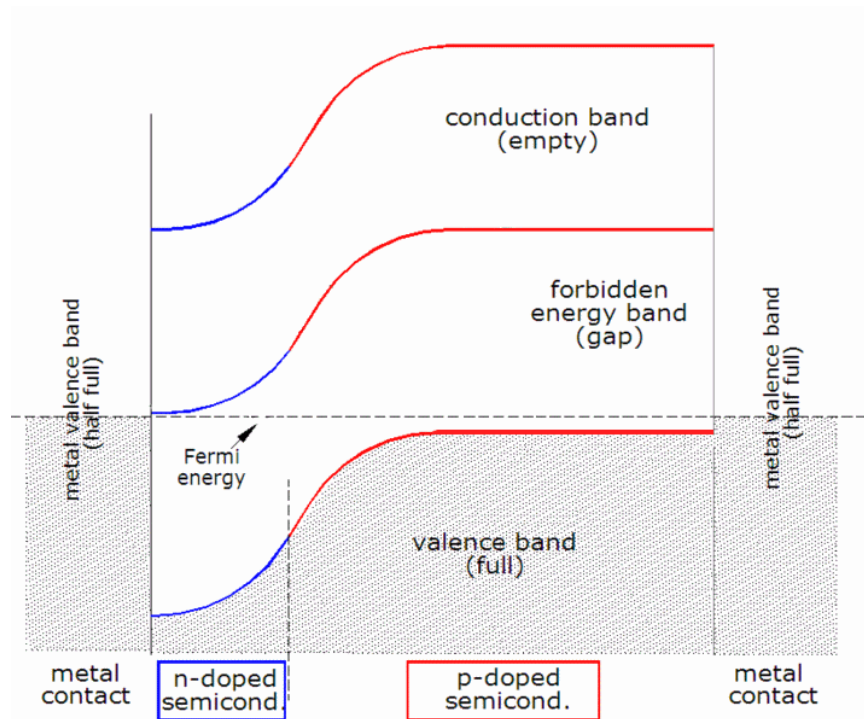
Diseño para maximizar el área expuesta a la iluminación:

- Electrodos con poca área, tipo rejilla.
- Electrodos transparentes ITO, $90\% \text{In}_2\text{O}_3 + 10\% \text{SnO}_2$

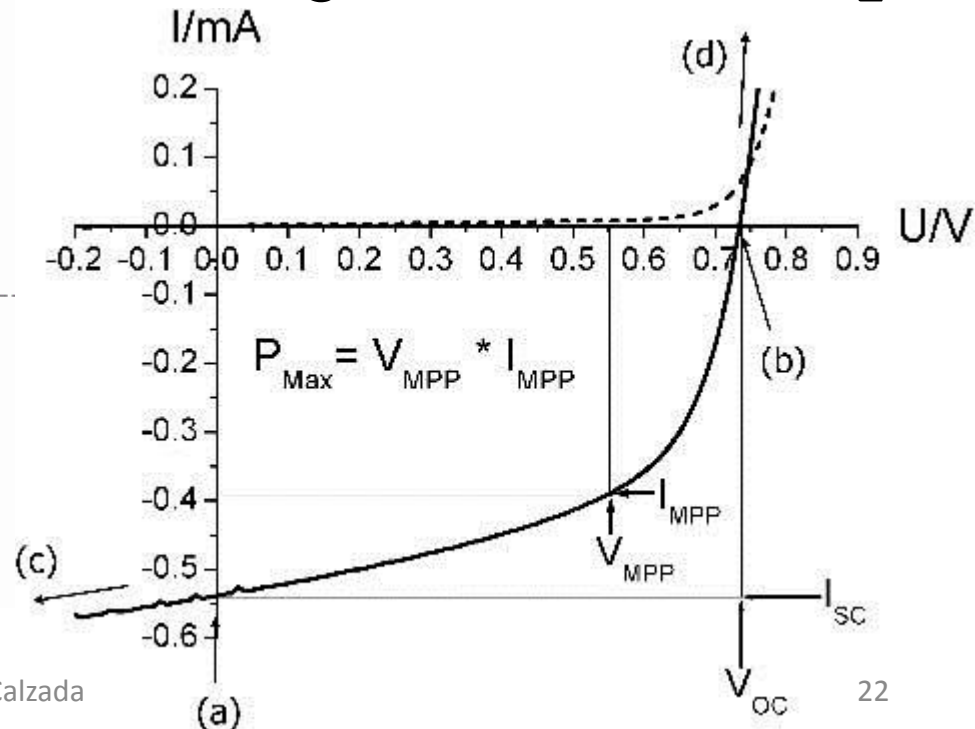


4 Célula solar

Si incidimos con radiación de energía mayor que el GAP en la unión, se generan pares e-hueco que se mueven por el campo de la ZCE. Aparece corriente fotovoltaica.



$$I = I_s(e^{qV/NkT} - 1) - I_L$$



4 Célula solar, parámetros (no entra)

El desempeño de una célula fotovoltaica se puede evaluar mediante una serie de parámetros:

Voltaje de circuito abierto **V_{oc}**, voltaje máximo generado por la célula solar

Corriente en circuito cerrado **I_{sc}**, corriente generada por la luz incidente

Potencia producida **P = V I**

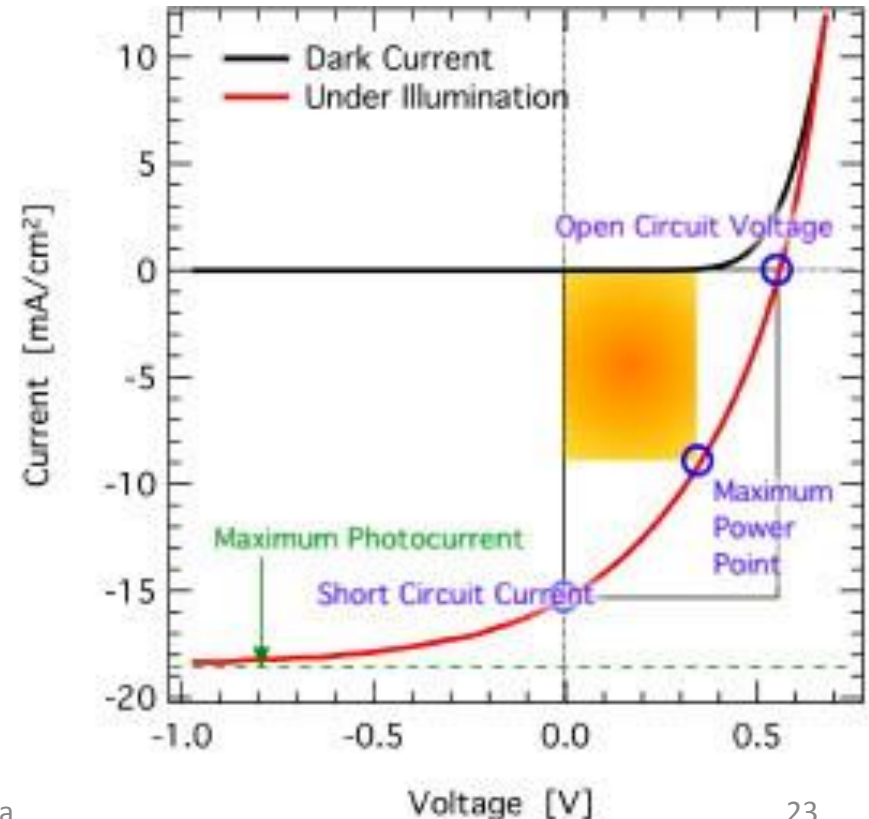
Potencia máxima **P_{max} = V_{max} I_{max}**

Factor de llenado **FF = P_{max}/I_{sc}V_{oc}**

Eficiencia o *Power Conversion Efficiency*

$$\eta = P_{\text{ele}} / (P_{\text{inc}})$$

$$\eta = (I_{\text{max}} * V_{\text{max}}) / P_{\text{in}} = FF * (V_{\text{oc}} * I_{\text{sc}}) / P_{\text{in}}$$



RESUMEN Tema 4. Dispositivos de unión de dos terminales.

1. Introducción a los semiconductores: dopado, conductividad, iluminación.
2. La unión PN: polarización y curva característica.
3. La unión PN como diodo en circuitos: punto de trabajo y recta de carga, circuitos.

Enlace covalente

Banda conducción, vacía a $T=0K$, con n electrones

GAP zona de energías prohibidas para los portadores, salvable con temperatura o luz

Banda Valencia, llena a $T=0K$, con p huecos

El GAP permite procesos de **generación G** y **recombinación R** de portadores con luz de la energía adecuada $E=h\nu \geq E_g$

Intrínseco: semiconductor puro

Extrínseco: semiconductor dopado, **tipo P y N**

$$np = n_i^2$$

Al unirlos **unión PN**, **potencial de contacto V_0** :

- **Directa**: corriente elevada de portadores mayoritarios, $N, I \sim \exp(V_{bias})$
- **Inversa**: corriente despreciable de portadores minoritarios, $I \cong 0$

$$I = I_0(e^{qV/NkT} - 1)$$

Elemento de circuito **diodo**, caracterizado por

Solo permite paso de corriente en un sentido, rectifica

Circuitos con diodos:

modelo de tensión de codo V_γ , recta de carga, **ejercicios**.

