

Tema 6: DISPOSITIVOS OPTOELECTRÓNICOS

6.1 Interacción entre los semiconductores y la luz.

Absorción de luz con generación luminosa de pares electrón-hueco. Generación de luz por recombinación radiativa de pares electrón-hueco.

6.2 Fotorresistencias.

Modulación de la conductividad del semiconductor.

6.3 Fotodiodos.

Circuito equivalente y aplicaciones.

6.4 Diodos emisores de luz.

Emisión espontánea y estimulada. Diodos LED y láser.

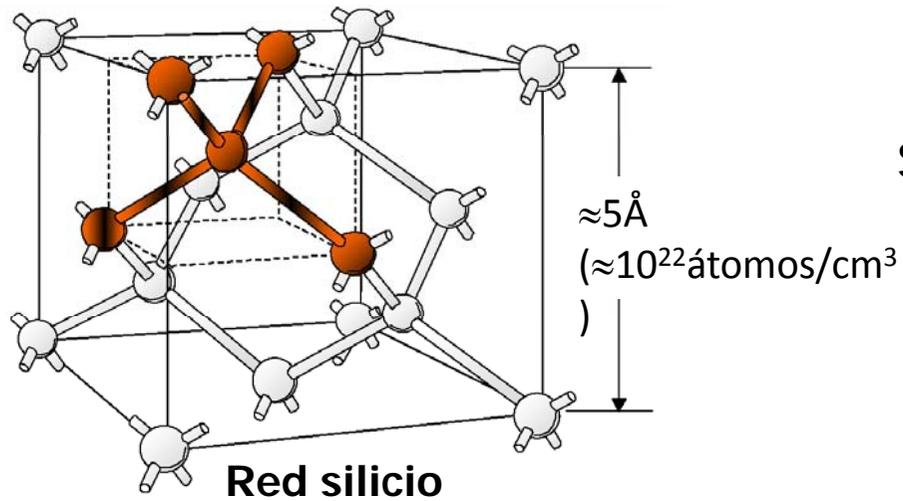
6.5 La célula solar.

Circuito equivalente y parámetros de calidad. Descripción del estado del arte. Introducción a las células avanzadas por división espectral.

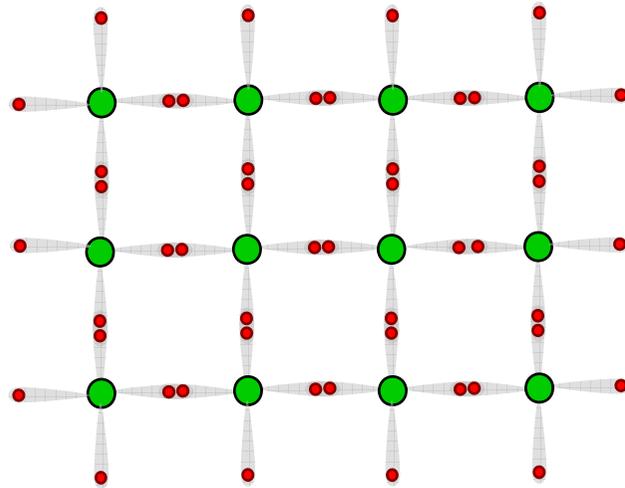
6.6 El fototransistor.

Circuito equivalente y aplicaciones.

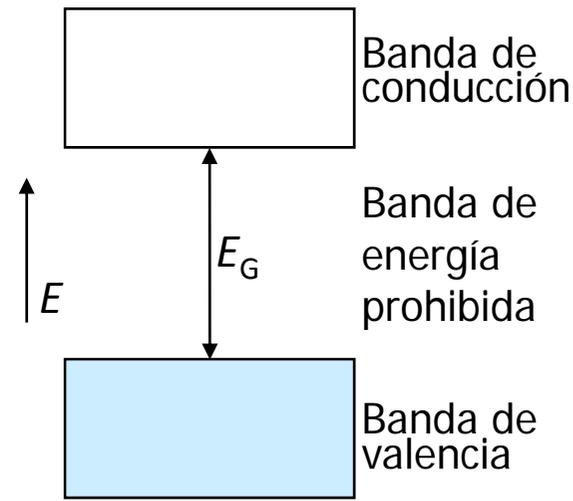
Semiconductores



Sólidos cristalinos de enlace covalente

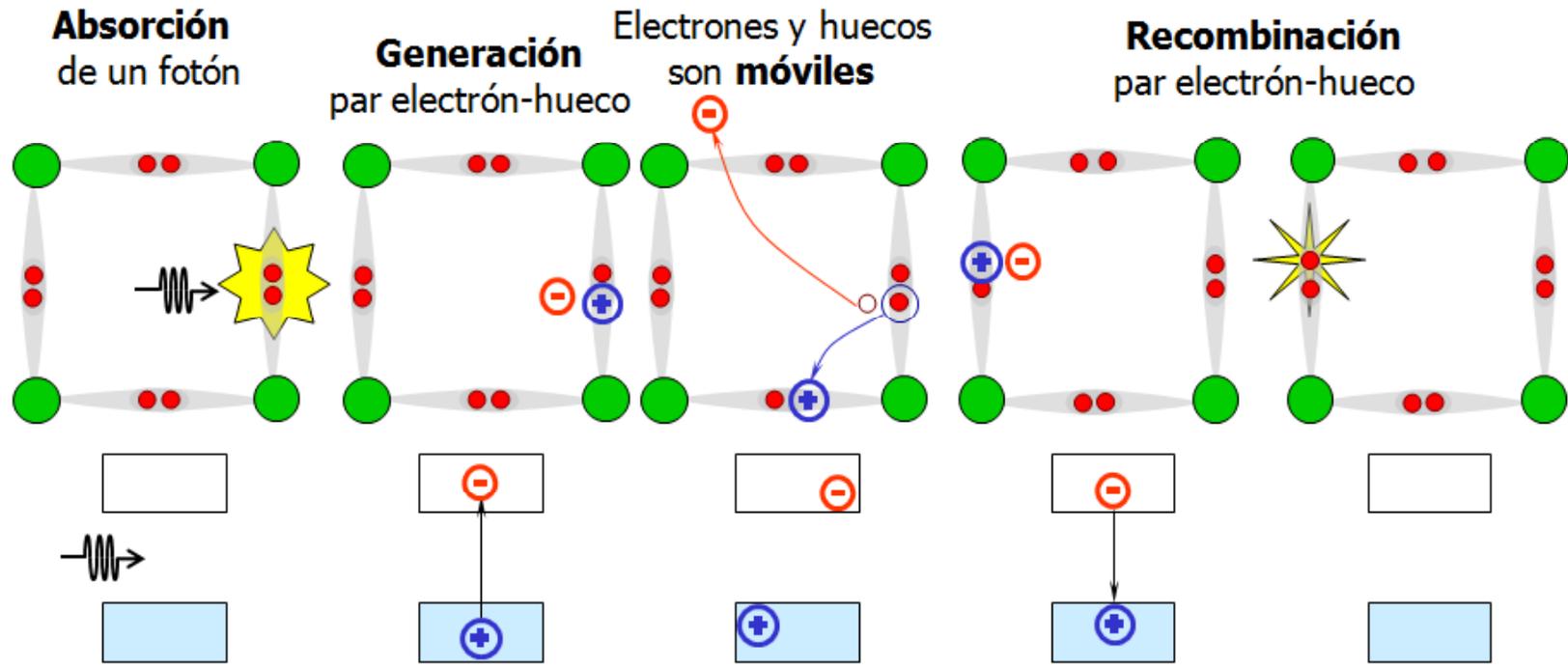


Modelo de enlaces



Modelo de bandas

Interacción de la luz con los semiconductores



$$E = h\nu \geq E_G$$

Se libera una energía E_G en forma de calor o por emisión de un fotón de energía E_G

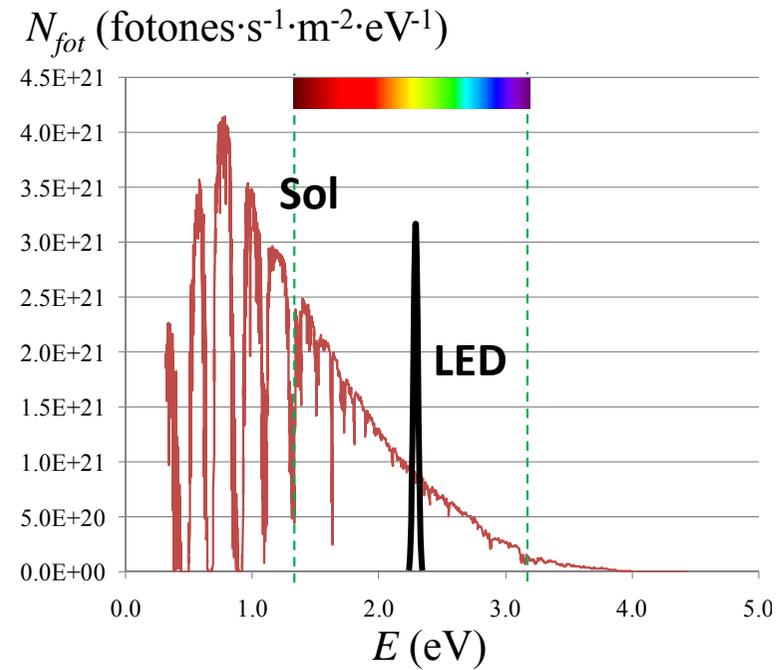
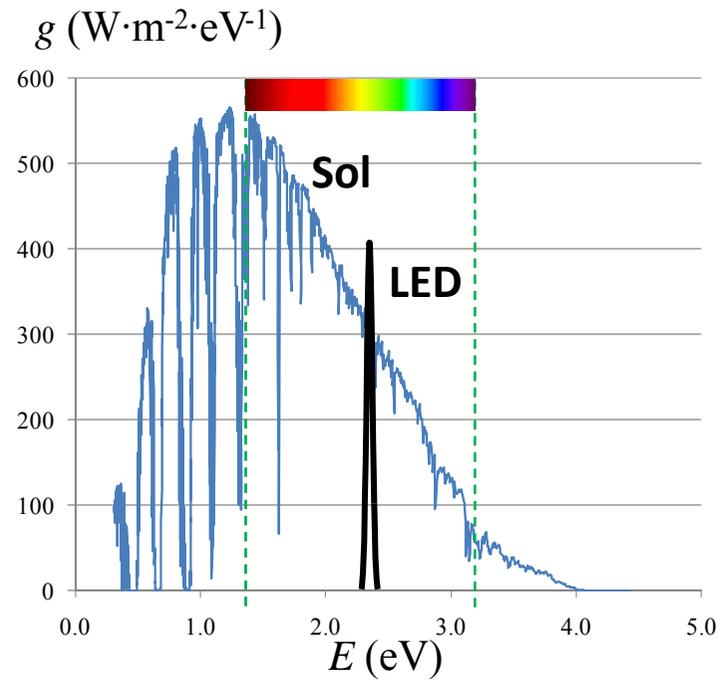
En un trozo de semiconductor homogéneo iluminado generación = recombinación. La conductividad aumenta → fotorresistencia.

Radiación

POTENCIA LUMINOSA P_L (W^2)

IRRADIANCIA potencia por unidad de área G ($kW \cdot m^{-2}$)

ESPECTRO:

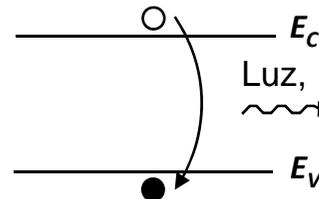
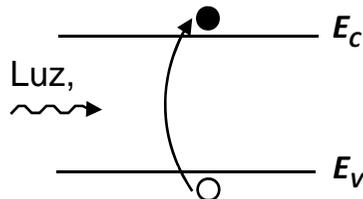
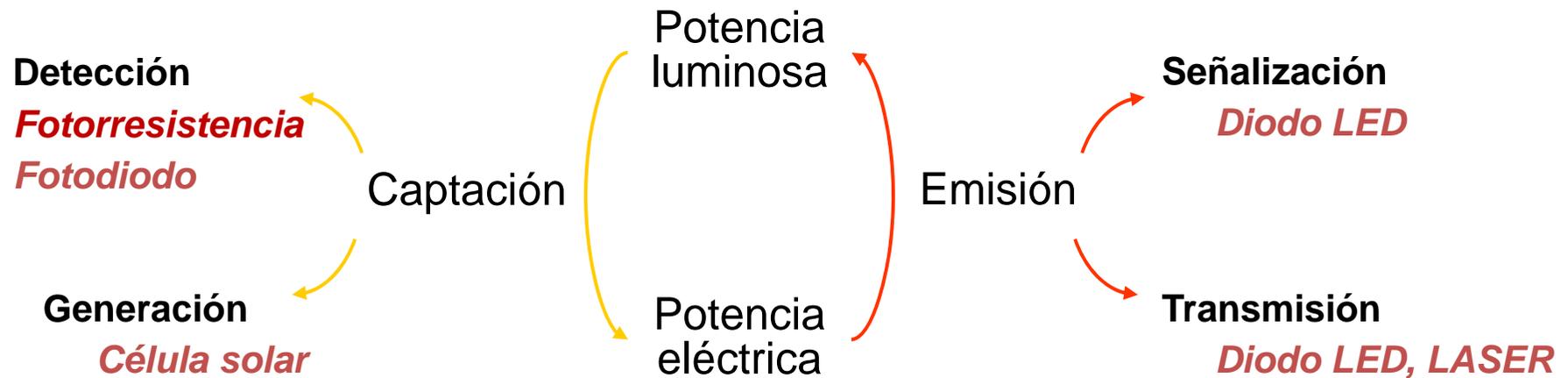


ENERGÍA DEL FOTÓN $E = h\nu = hc/\lambda$

$$P_L = \frac{N^\circ \text{ de fotones}}{\text{tiempo}} \times \text{energía del fotón}$$

Optoelectrónica

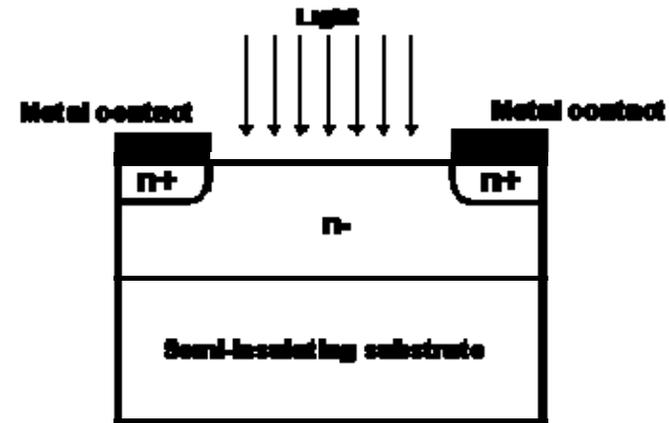
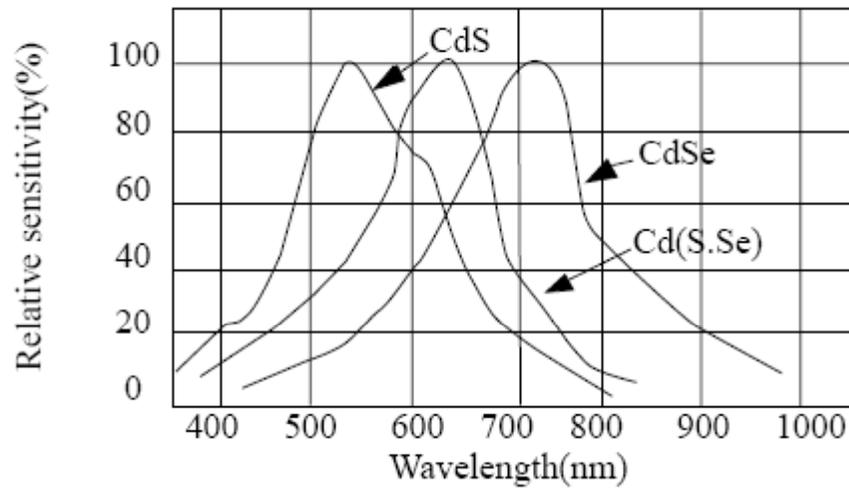
Dispositivos optoelectrónicos: aprovechan la interacción entre radiación luminosa y corriente eléctrica en materiales semiconductores



Fotorresistencias (LDR)

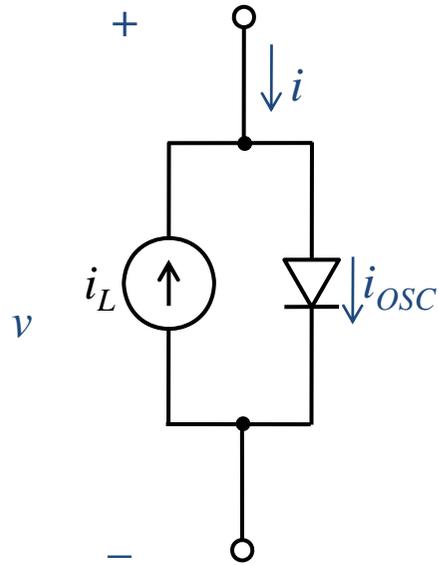
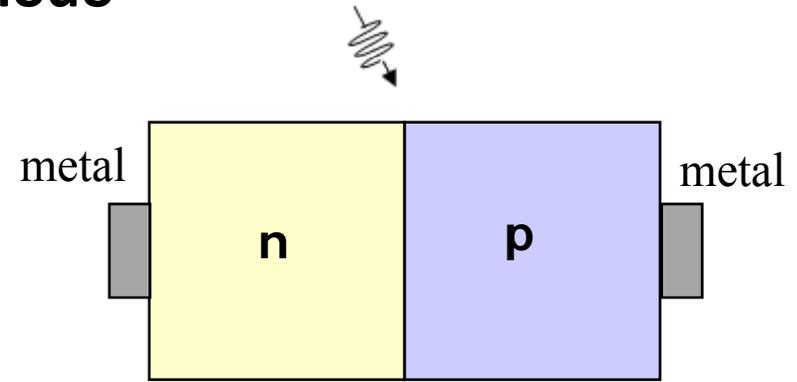
Cambio de la conductividad de un semiconductor

$$\sigma = \sigma_0 + A_1 \times G \Rightarrow R^{-1} = R_0^{-1} + A_2 \times G$$



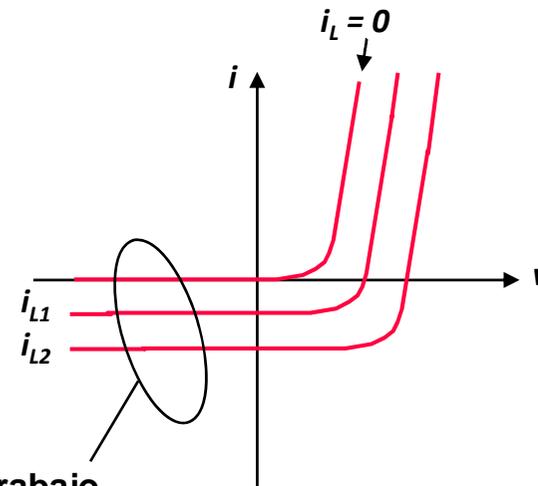
El fotodiodo

Diodo de unión pn iluminado. La no homogeneidad y los contactos metálicos permiten la separación de electrones y huecos y su circulación por un circuito externo.



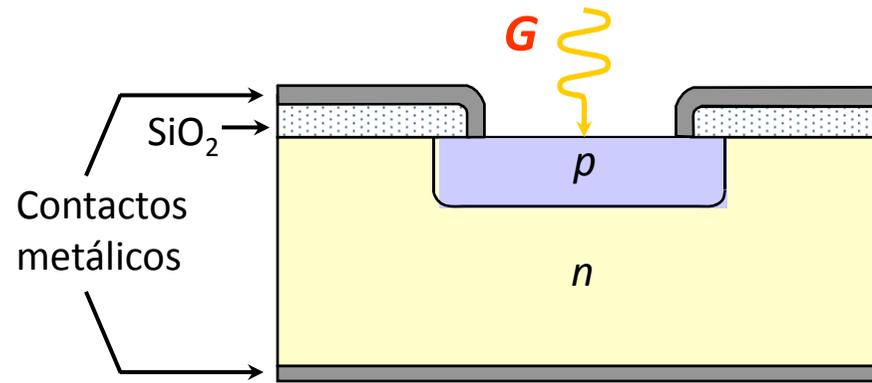
$$i = I_{SAT} \left[\exp\left(\frac{v}{V_t}\right) - 1 \right] - i_L$$

$$i_L = A \times S \times G$$

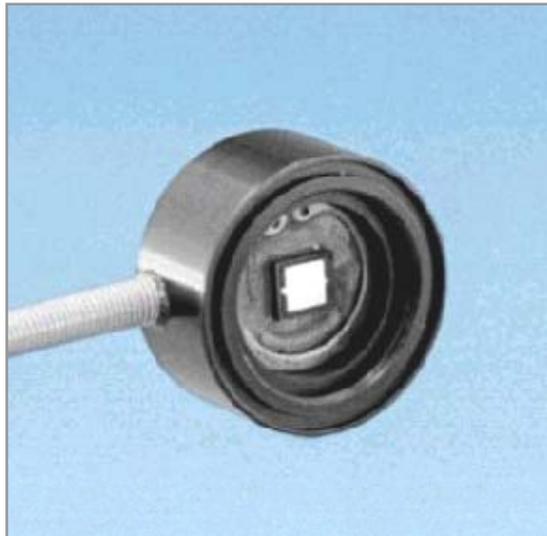
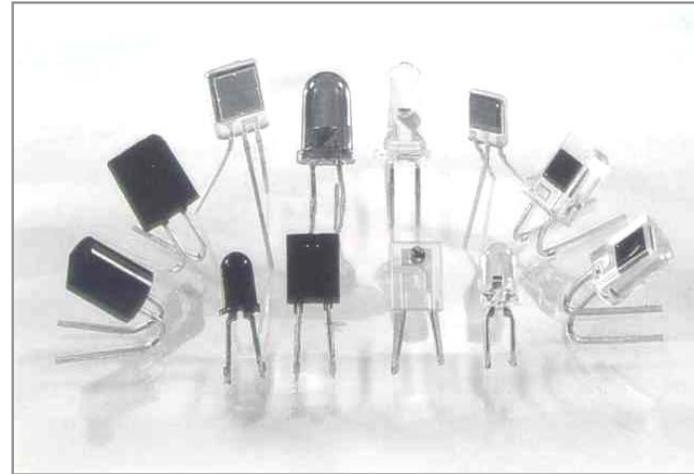
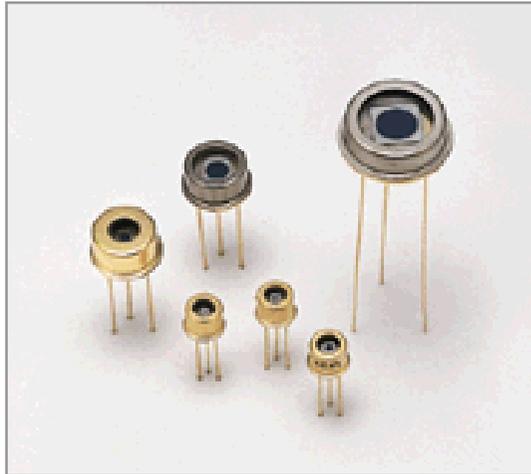


Región de trabajo habitual de fotodiodos

El fotodiodo



Fotodiodos comerciales

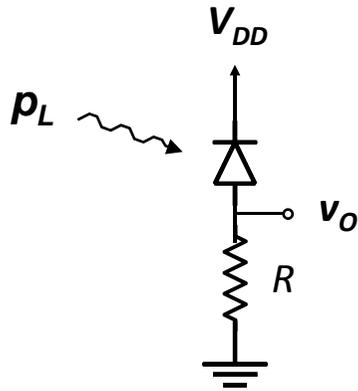


Análisis de circuitos con fotodiodos

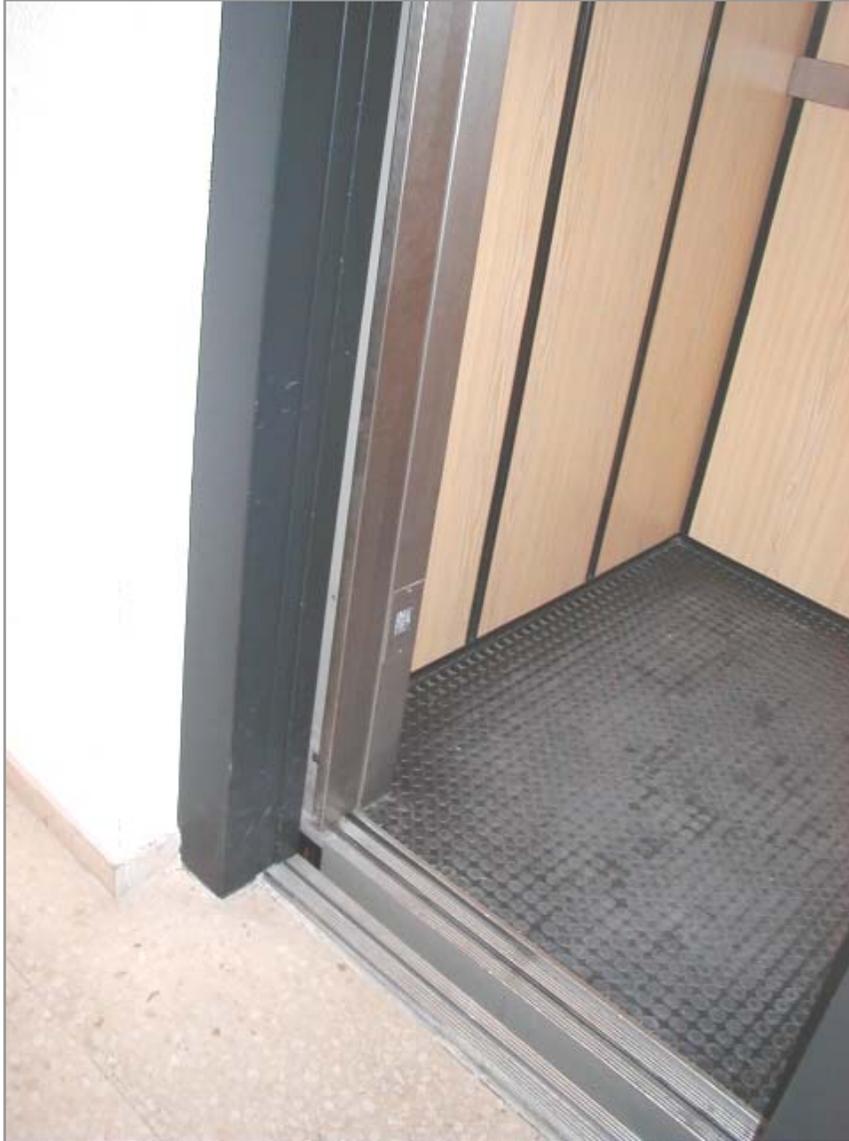
Ejercicio 1. El circuito de la figura es un circuito detector de luz, habitualmente primera etapa en aplicaciones de comunicaciones ópticas. Se pide:

- Rango de valores de R para que el diodo esté en OFF con $p_L=5$ mW
- Para $R=1$ kW , varacterística de transferencia $v_o(p_L)$
- Ganancia de pequeña señal v_o/p_l si $p_L(t)=P_L+p_l(t)$, con $P_L=5$ mW

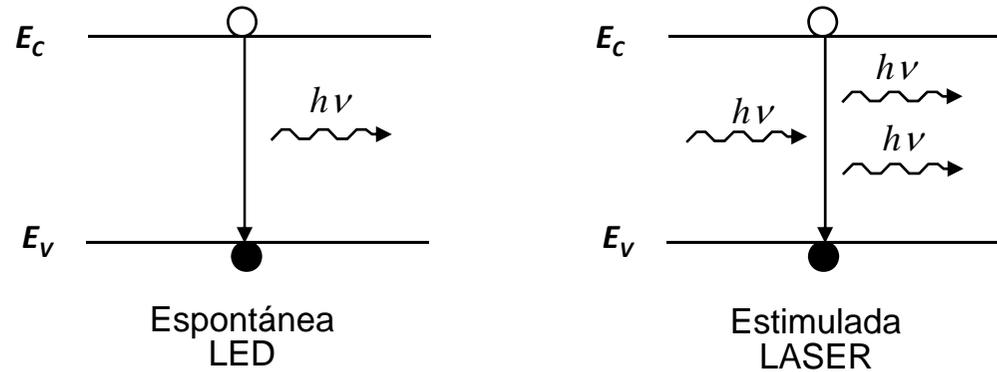
DATOS: $V_{DD}=5$ V; $V_g=0,6$ V; $|V_Z|=4$ V; $S=0,5$ A/W



Ejemplo de aplicación con fotodiodos

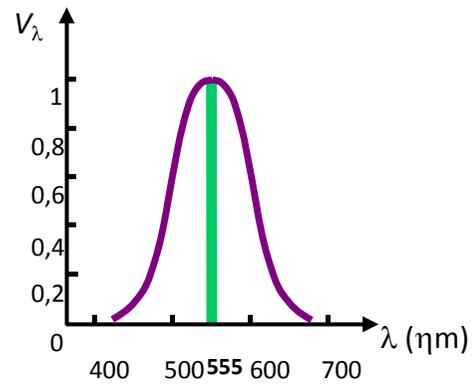


Emisión de luz

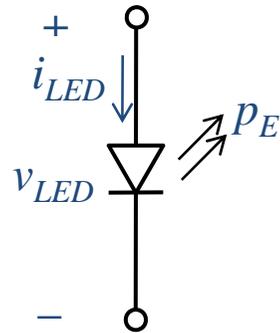


Diodo Electroluminiscente - LED: Light Emitting Diode

Diodo láser - LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



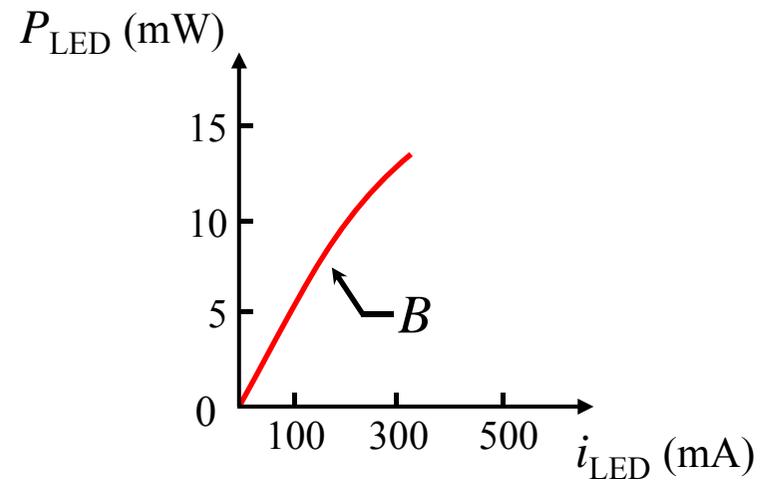
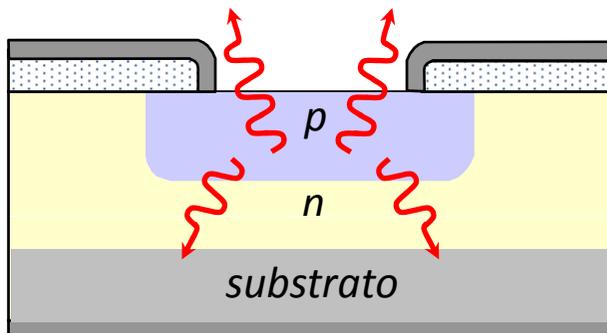
Diodo LED



$$i_{LED} = I_S \left[\exp\left(\frac{v_{LED}}{nV_t}\right) - 1 \right]$$

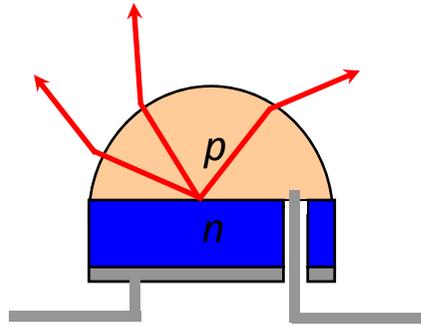
$$P_{LED} \equiv Bi_{LED} \left(= \frac{E_G}{q} \eta \times i_{LED} \right)$$

$$\eta_{energética} = \frac{P_{LED}}{i_{LED}v_{LED}} = \frac{E_G}{qv_{LED}} \eta < 1$$

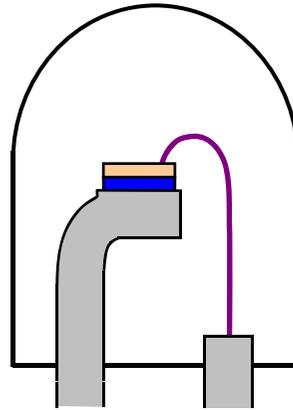


Algunas características

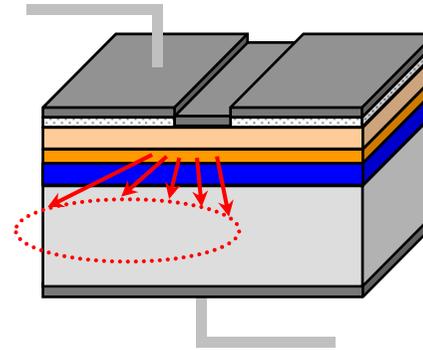
Estructuras optimizadas:



LED semiesférico



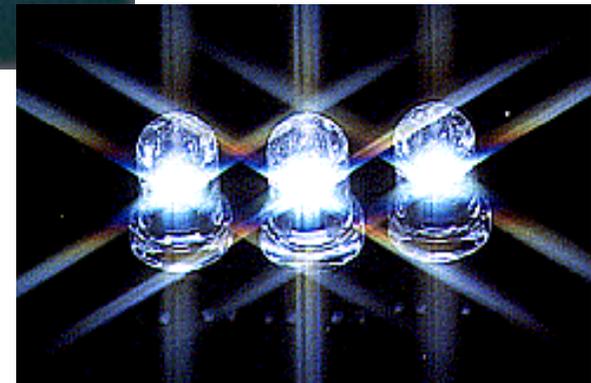
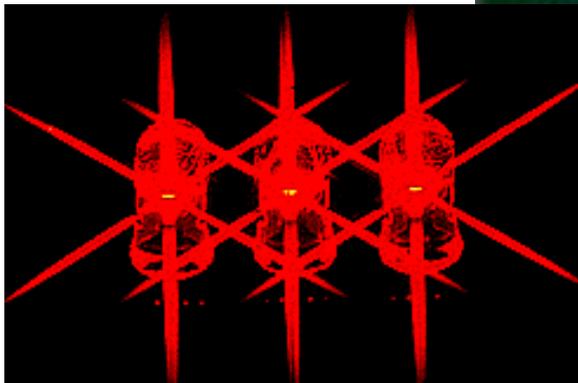
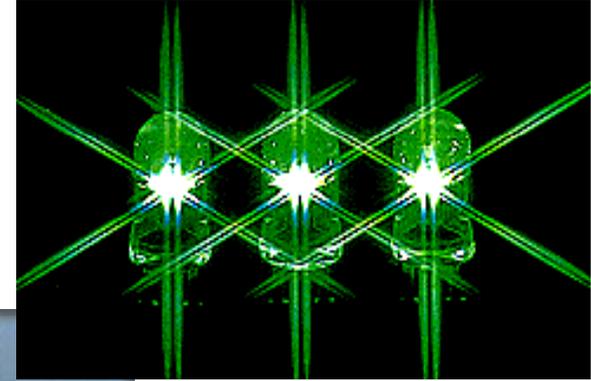
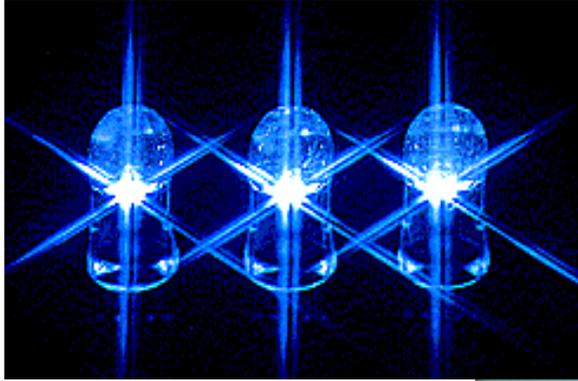
LED encapsulado



LED de emisión lateral

Semiconductores III-V {
GaAs \approx 1,4 eV Infrarrojo
GaP \approx 2,3 eV Visible (verde)
GaAs_{1-x}P_x \rightarrow Variable

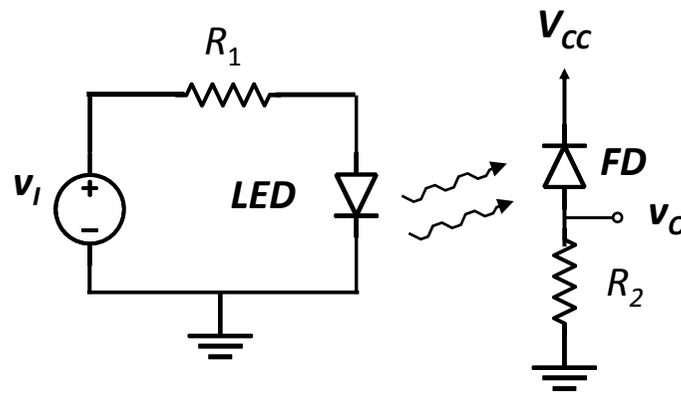
LEDs comerciales encapsulados



Análisis de circuitos con diodos LED

Ejercicio 2. Diseñe el optoacoplador de la figura de forma que una señal de entrada $v_I = 0-5$ V se reproduzca a la salida, siendo la corriente que pasa por el LED cuando emite de 10 mA.

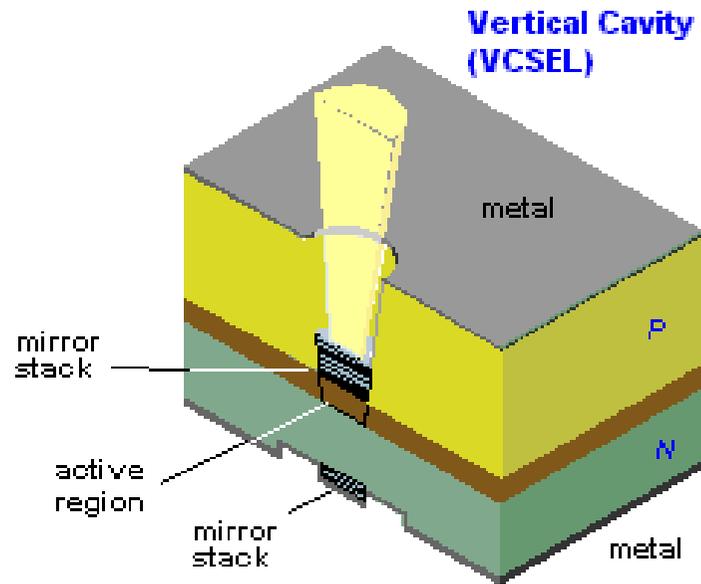
DATOS: $V_{\gamma_{LED}} = 2$ V; $B_{LED} = 0.2$ W/A; $V_{\gamma_{FD}} = 0,6$ V; $S_{FD} = 0.5$ A/W; $V_{CC} = 10$ V; Relación de transferencia $p_{FD}/p_{LED} = 1$.



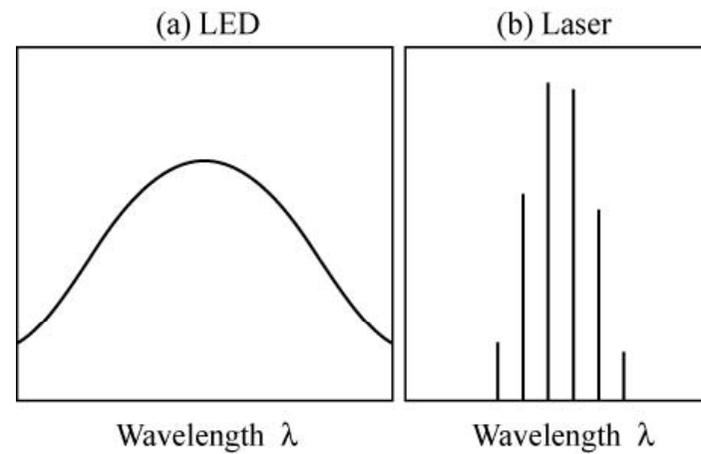
Ejemplo de aplicación con LEDs



Diodos láser



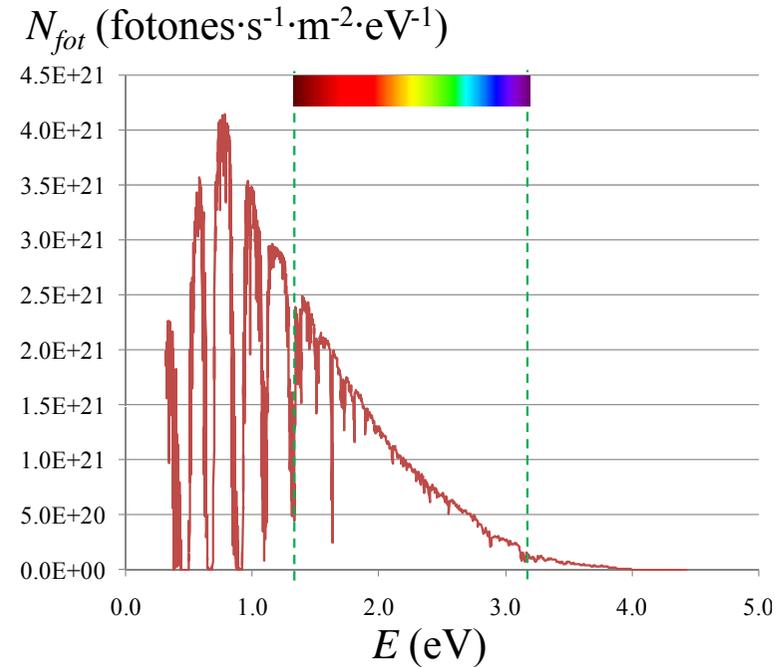
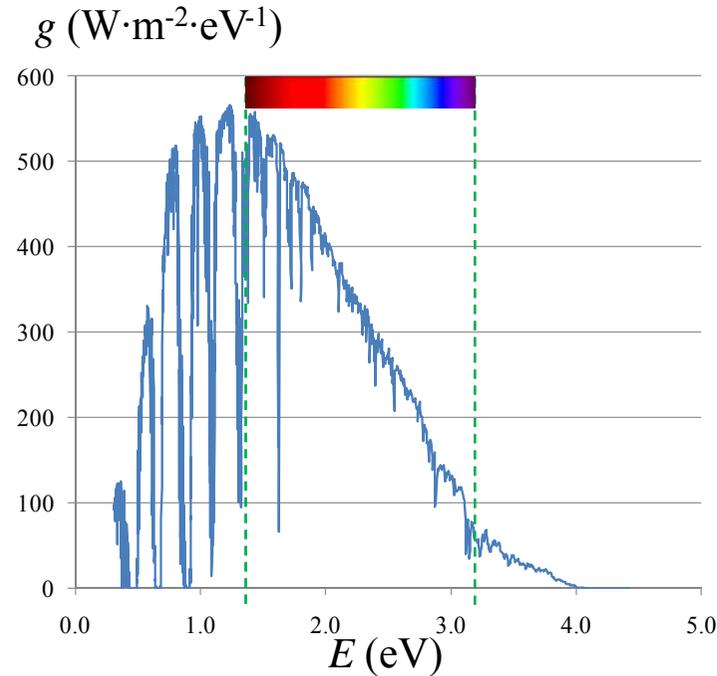
LED en una cavidad: se amplifican los modos resonantes



La energía solar

IRRADIANCIA potencia por unidad de área G ($\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$) ($\cong 1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ un día despejado a mediodía)

ESPECTRO:



ENERGÍA DEL FOTÓN $E = h\nu$

ALGUNAS CIFRAS:

En promedio, sobre la Tierra, $4 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}/\text{día}$. Con 10% de eficiencia...

Consumo de una familia: 50 m^2

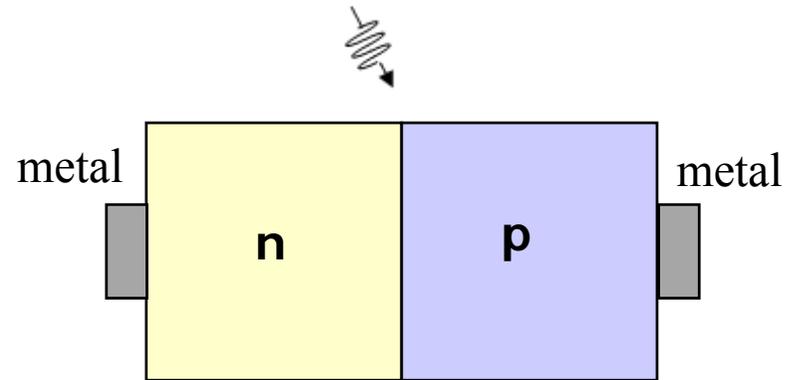
Central nuclear o de carbón de 1 GW: 60 km^2 ($7.5 \text{ km}\times 7.5 \text{ km}$)

Consumo mundial de energía: menos que el área cubierta por carreteras

El efecto fotovoltaico y la célula solar

Un trozo de semiconductor homogéneo iluminado se calienta (Generación = Recombinación).

Diodo de unión pn iluminado. La no homogeneidad y los contactos metálicos permiten la separación de electrones y huecos y su circulación por un circuito externo.



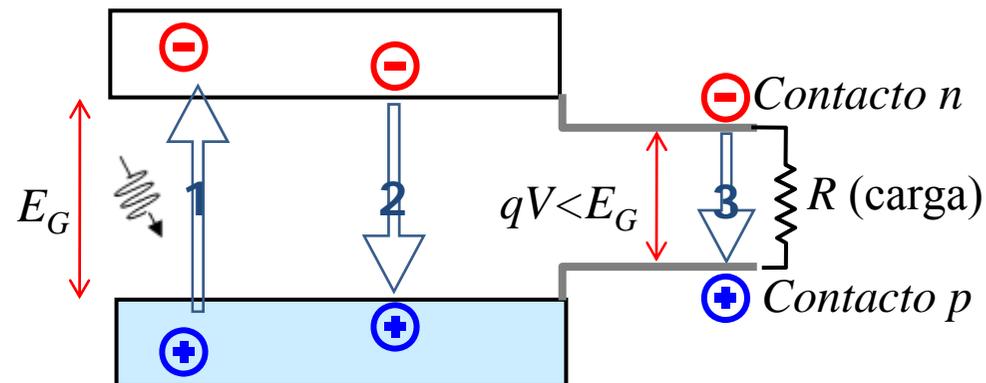
El efecto fotovoltaico consiste en la conversión directa de energía luminosa en energía eléctrica mediante los procesos que ocurren en el interior de los semiconductores

El efecto fotovoltaico y la célula solar

TRES PROCESOS:

1. GENERACIÓN. Un electrón adquiere la energía $E=h\nu > E_G$ de un fotón
2. RECOMBINACIÓN. Un electrón cede la energía E_G en forma de calor
3. CORRIENTE EXTERNA. Un electrón cede la energía $qV < E_G$ a la carga externa

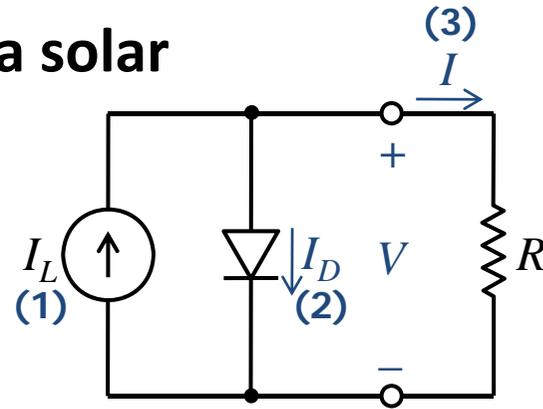
Nº de generaciones = Nº de recombinaciones + Nº de electrones por circuito externo



La célula solar

$$I = I_L - I_D = I_L - I_{SAT} \left(e^{V/V_t} - 1 \right)$$

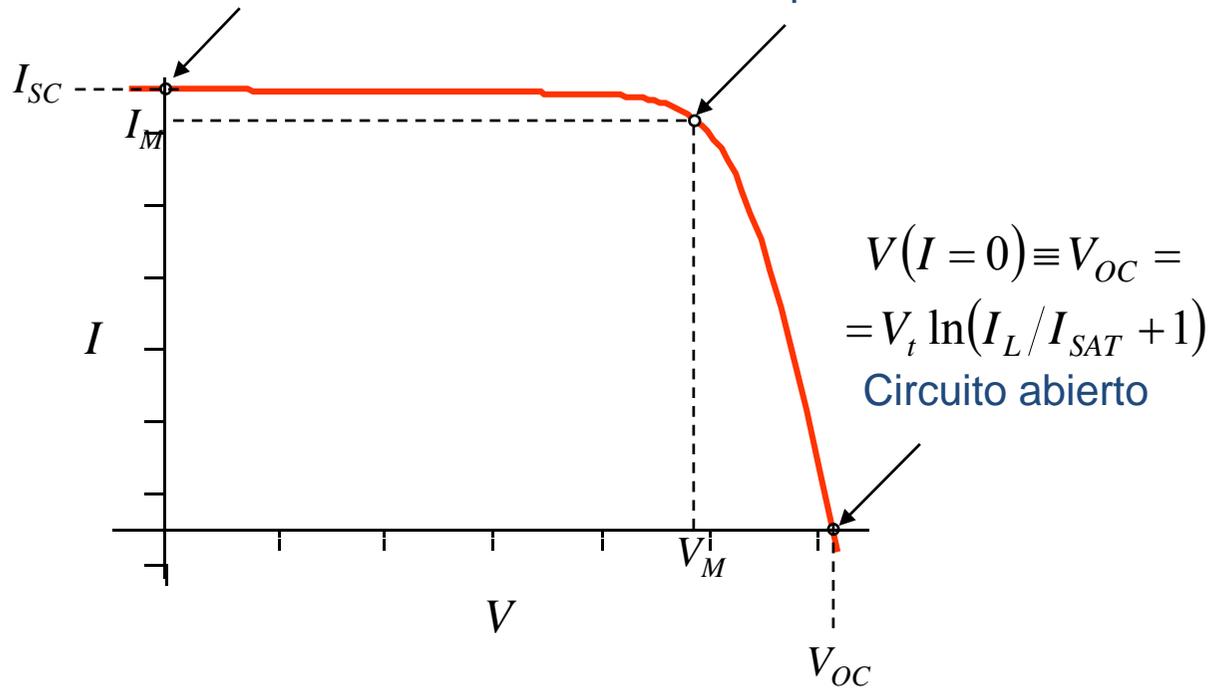
(3) (1) (2)



$$\eta = \frac{P_{\text{el\u00e9ctrica}}}{P_{\text{luminosa}}} = \frac{I_M V_M}{A \times G}$$

$I(V = 0) \equiv I_{SC} = I_L$
Cortocircuito

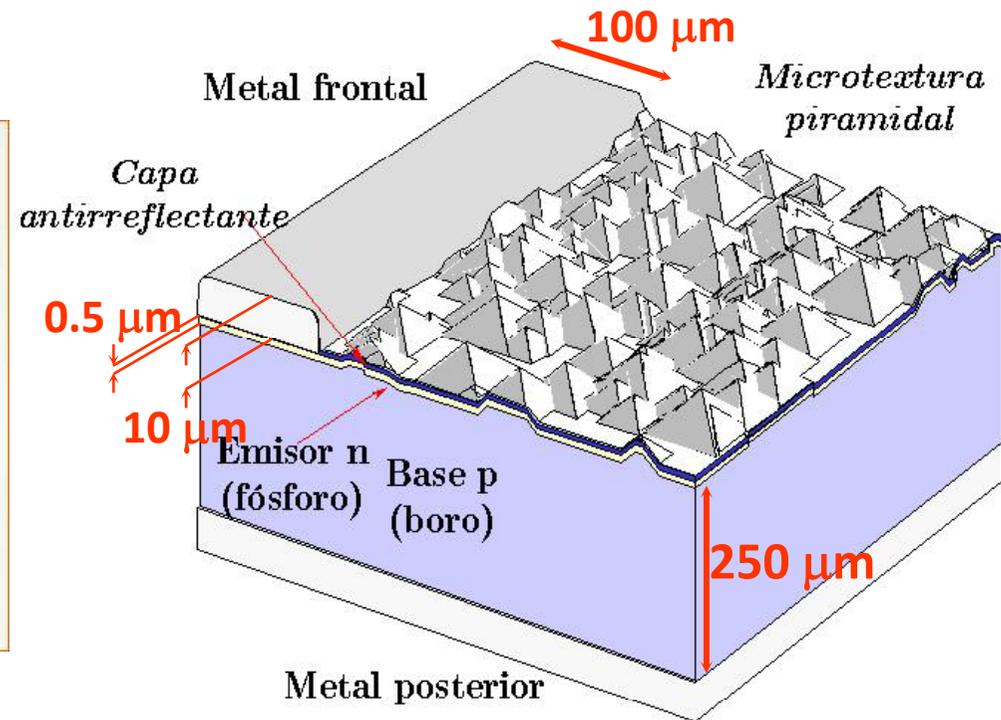
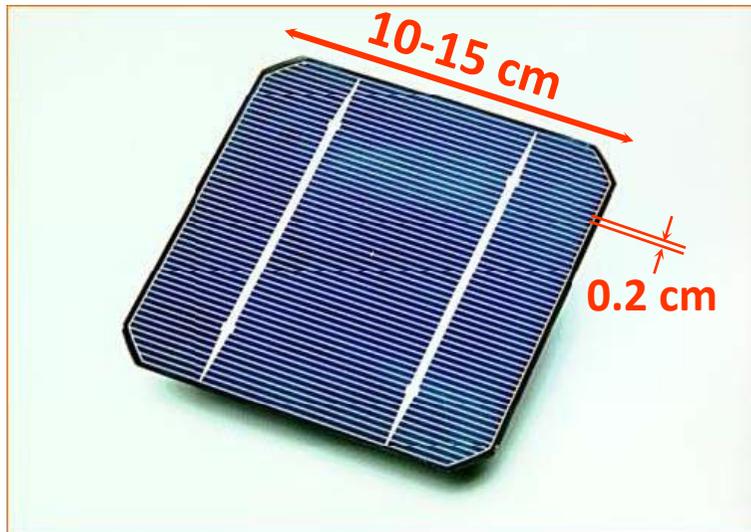
Punto de
m\u00e1xima potencia



Células solares industriales

Diodo de gran área con contacto frontal transparente

Célula de Si



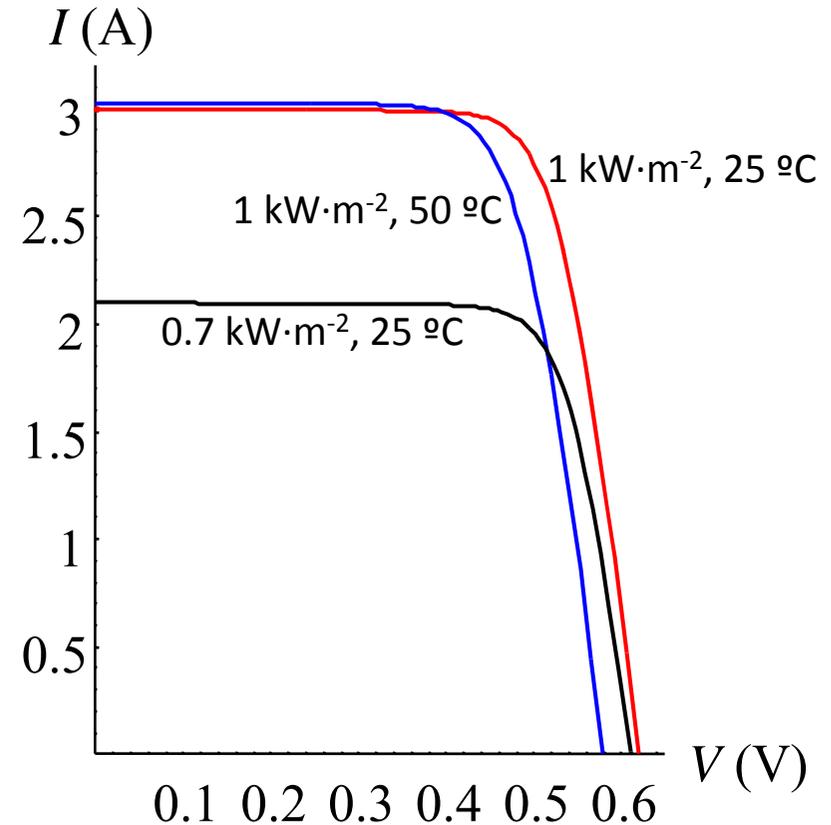
Parámetros de la célula. Condiciones estándar.

I_L es proporcional al área y la irradiancia y depende del material y el espectro: sólo contribuyen los fotones con $E=h\nu > E_G$

$$I_L = A \times S \times G = P_L \times S$$

I_{SAT} es proporcional al área y depende del material y la temperatura

V_{OC} depende del material ($<E_G/q$) y disminuye con la temperatura



Irradiancia, espectro y temperatura varían: definición de **condiciones estándar de medida**

$$G = 1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}; \text{espectro AM1.5}; T_{célula} = 25^\circ \text{C}$$

Células industriales de silicio: $I_L/A \cong 0.03 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$; $V_{OC} \cong 0.620 \text{ V}$; $\eta \cong 16\%$

Ejercicio 1. Una célula solar equivale a un diodo en paralelo con un generador de corriente I_L . El diodo se representa con un modelo lineal por tramos. En las denominadas “Condiciones estándar de funcionamiento” ($T = 25^\circ\text{C}$, $G=1\text{kW/m}^2$), se tiene $I_L = 4.5 \text{ A}$, $V_\gamma = 0.6 \text{ V}$, $R_f = 10 \text{ m}\Omega$

- a) Dibuje la característica I - V de la célula.
- b) Señale el punto correspondiente al cortocircuito en la característica ¿Cuál es la corriente de cortocircuito de la célula? ¿En qué estado se encuentra el diodo?
- c) Señale el punto correspondiente al circuito abierto en la característica ¿Cuál es el voltaje de circuito abierto de la célula? ¿En qué estado se encuentra el diodo?
- d) Calcule la potencia máxima que puede generar la célula, que se obtiene cuando el diodo trabaja en el límite entre los estados de ON y de OFF, y su eficiencia.
- e) Calcule la resistencia de carga que habría que poner en los terminales de la célula para que trabajase entregando la máxima potencia.
- f) Repita los apartados a-e si la irradiancia es de 0.8 KW/m^2 la temperatura de la célula de 50°C

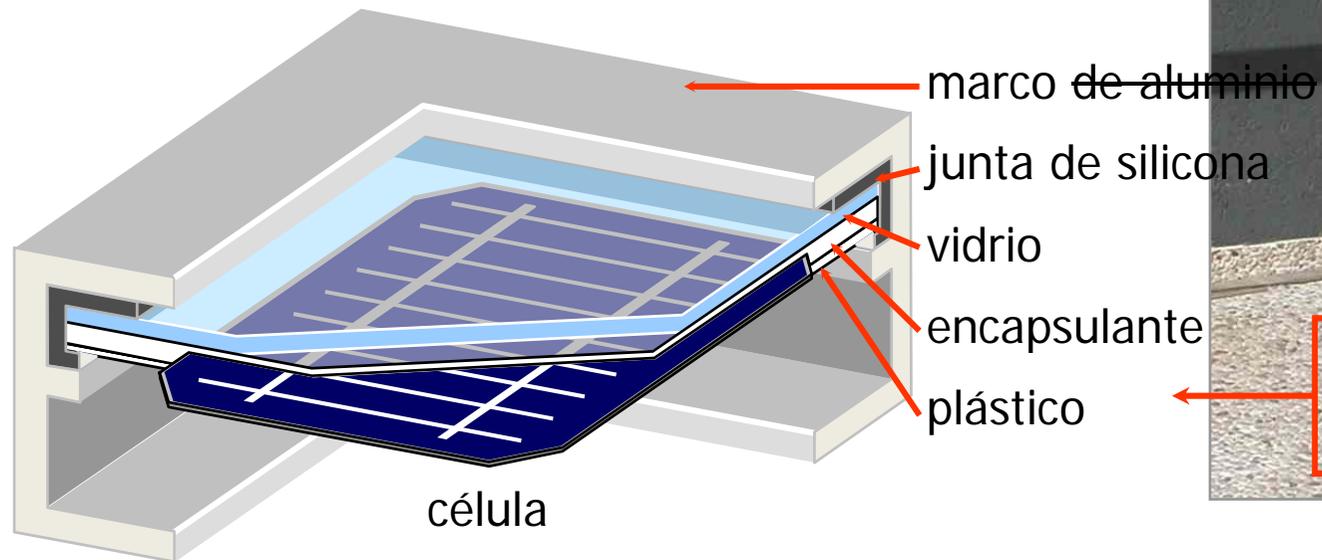
DATOS: $A = 150 \text{ cm}^2$; $dV_\gamma/dT = -2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$

El módulo fotovoltaico

Nivel adecuado de V , I y P : asociación de células **en serie y paralelo**

Protege las células de la intemperie (humedad, fatiga térmica, radiación UV, abrasión)

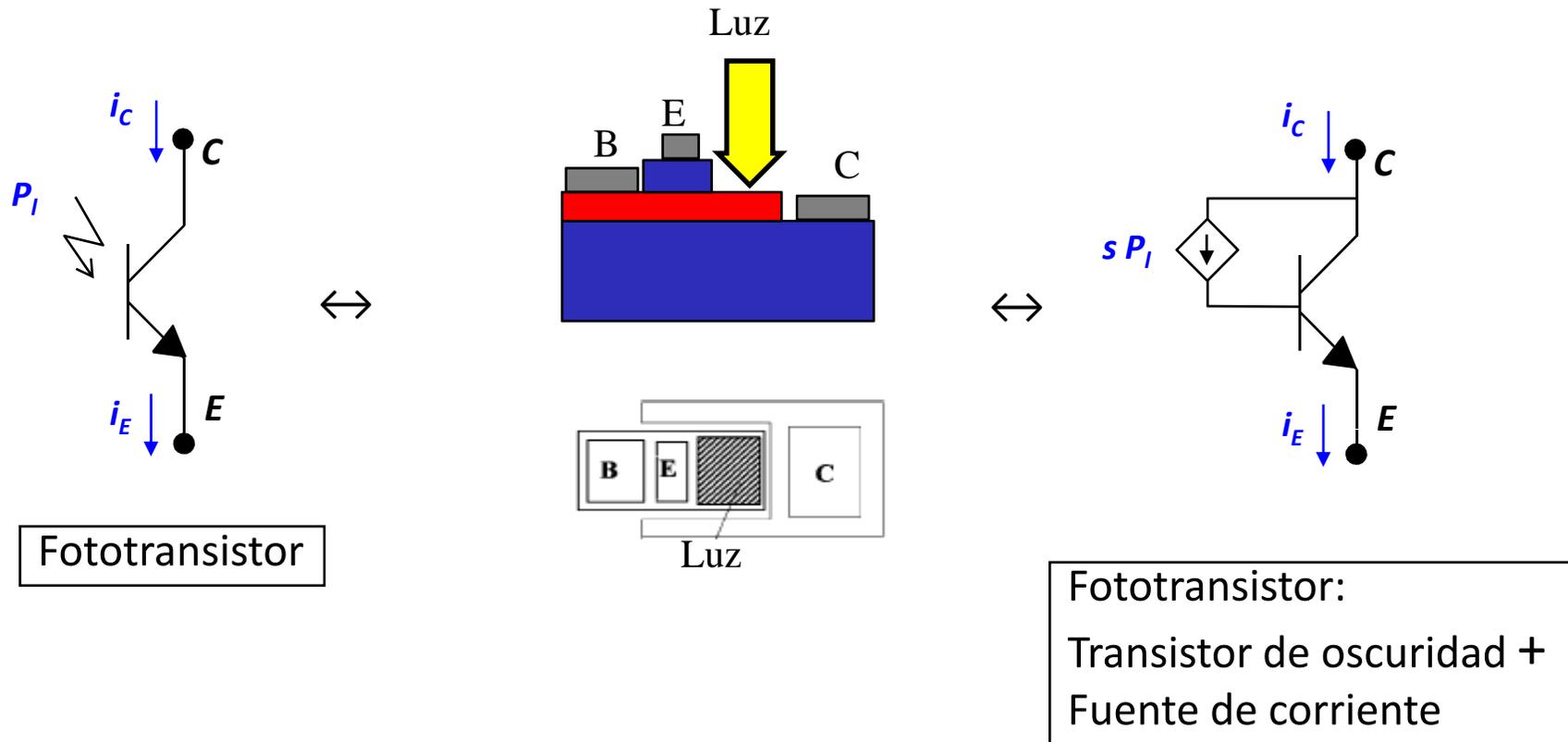
Aislamiento eléctrico y rigidez estructural



Ejercicio 2. Un módulo fotovoltaico contiene 72 células como las del ejercicio 1, conectadas en dos series de 36 y éstas a su vez en paralelo.

- a) En condiciones estándar, diga cuál es la corriente de cortocircuito, el voltaje de máxima potencia, la potencia máxima y la eficiencia del módulo y con qué resistencia de carga se obtendría. Esboce su característica $I-V$.
- b) El módulo está cargando una batería de tensión $V_{BAT}=14V$. Dibuje el circuito, represente la característica $I-V$ de la batería sobre la del módulo y calcule el valor de la corriente y la tensión de éste.
- c) ¿Cuánta carga ha entregado el módulo a la batería en tres horas de funcionamiento en condiciones estándar? ¿Cuánta energía?

Fototransistor npn

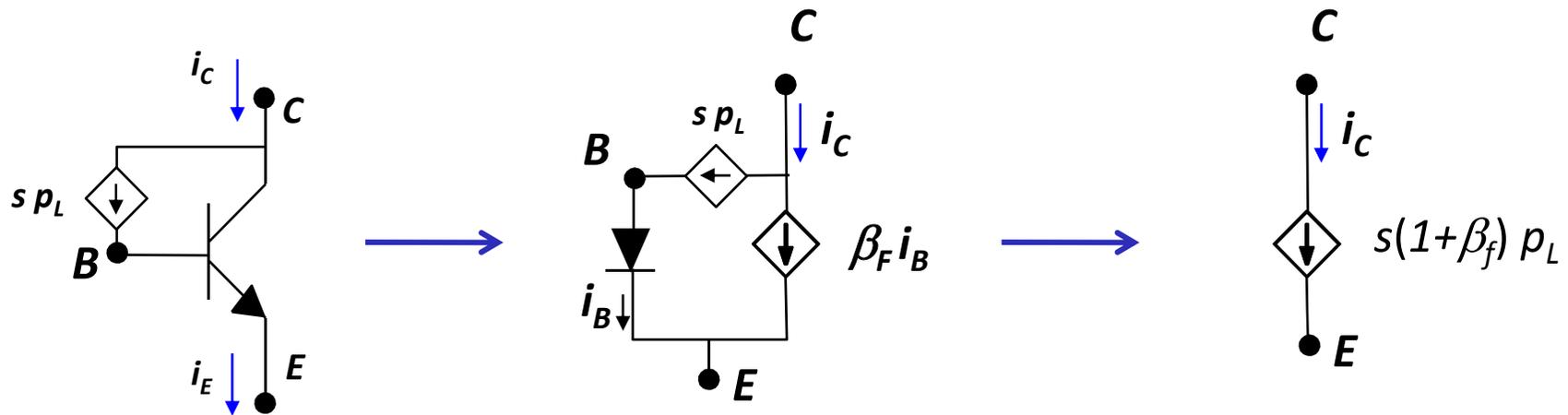


- Un fototransistor es un transistor bipolar bajo iluminación en la unión Base-Colector y anulando el terminal de base.
- La unión base colector se comporta como un fotodiodo
- El fototransistor equivale a un transistor bipolar en oscuridad con una fuente de corriente entre Base y Colector

Fototransistor

Aproximación en activa con las ecuaciones Ebers-Moll

Ejemplo: npn

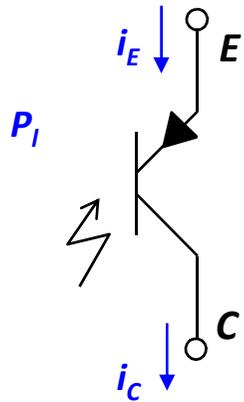


Dispositivo de dos terminales \rightarrow 1 ecuación característica:

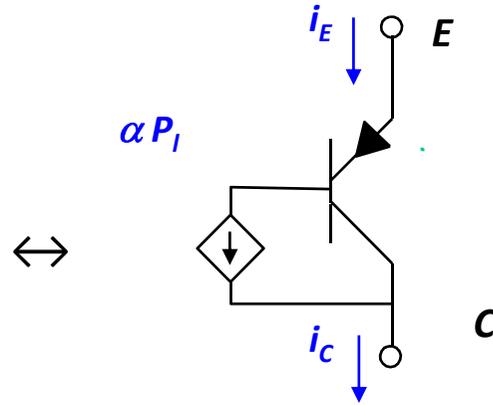
$i_C = A p_L$ donde A es una constante $A = s(1+\beta_f)$, es decir es una fuente de corriente cuyo valor depende de la potencia luminosa incidente p_L .

Se comporta como el fotodiodo en inversa con una α mayor

Fototransistor pnp

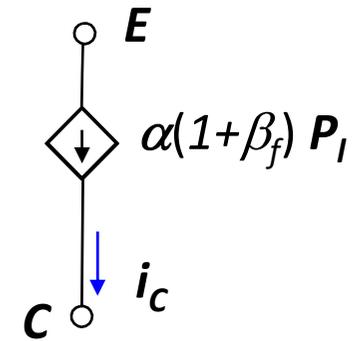


Fototransistor

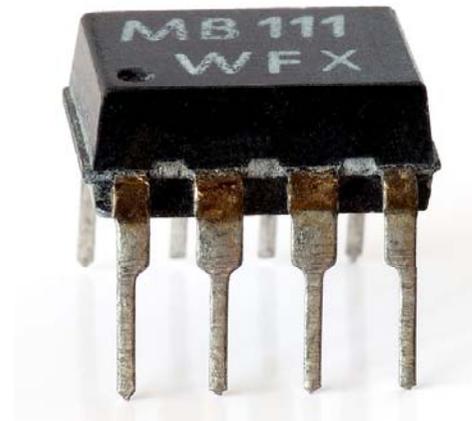
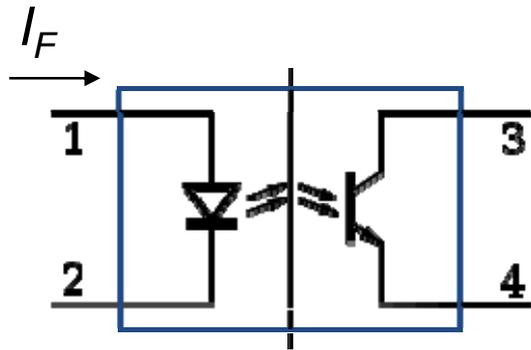


Fototransistor:
Transistor de oscuridad +
Fuente de corriente

en activa

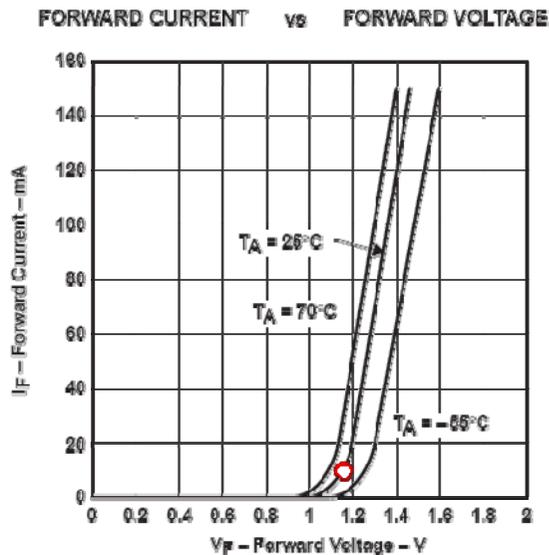


Aplicación: **optoacoplador** (también llamado *optoaislador*)

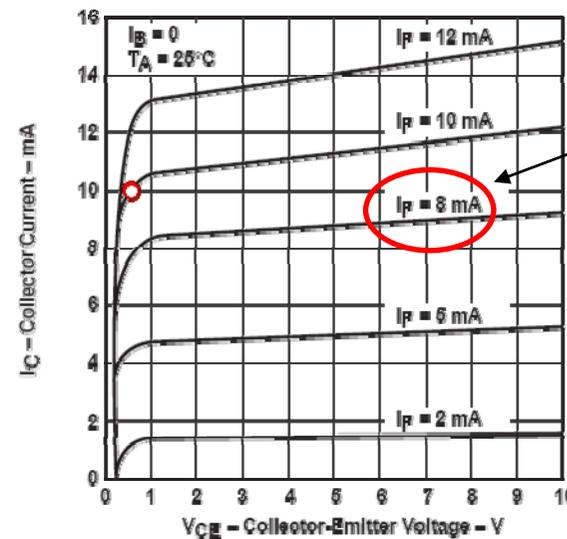


(Este empaquetado trae dos optoacopladores)

Característica de entrada
(Curva I-V del diodo LED)



Característica de salida:



Corriente del diodo LED como parámetro