

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

# Célula Solar

## Energía Solar Fotovoltaica

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación

Oscar Perpiñán Lamigueiro  
<http://oscarperpinan.github.io>

# Teoría de Semiconductores

Unión P-N iluminada

Funcionamiento de una célula solar

Fabricación

Teoría de Semiconductores  
Conducción eléctrica  
Semiconductores  
Dopaje de semiconductores  
Unión p-n  
Diodo

Unión P-N iluminada

Funcionamiento de una célula solar

Fabricación

# Bandas de energía

- En un **sólido** el número de átomos es tan elevado que los niveles de energía forman **bandas continuas de energía**.

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Teoría de  
Semiconductores

Conducción eléctrica

Semiconductores

Dopaje de semiconductores

Unión p-n

Diodo

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación

# Bandas de energía

- ▶ En un **sólido** el número de átomos es tan elevado que los niveles de energía forman **bandas continuas de energía**.
- ▶ Los **electrones** asociados a los átomos del sólido **llenan estas bandas en orden ascendente**.

Teoría de  
Semiconductores

Conducción eléctrica

Semiconductores

Dopaje de semiconductores

Unión p-n

Diodo

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación

# Bandas de energía

- ▶ En un **sólido** el número de átomos es tan elevado que los niveles de energía forman **bandas continuas de energía**.
- ▶ Los **electrones** asociados a los átomos del sólido **llenan estas bandas en orden ascendente**.
- ▶ La banda de mayor energía completamente ocupada se denomina **banda de valencia** (*electrones ligados a átomos*).

Teoría de  
Semiconductores

Conducción eléctrica

Semiconductores

Dopaje de semiconductores

Unión p-n

Diodo

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación

# Bandas de energía

- ▶ En un **sólido** el número de átomos es tan elevado que los niveles de energía forman **bandas continuas de energía**.
- ▶ Los **electrones** asociados a los átomos del sólido **llenan estas bandas en orden ascendente**.
- ▶ La banda de mayor energía completamente ocupada se denomina **banda de valencia** (*electrones ligados a átomos*).
- ▶ La siguiente banda, parcialmente ocupada o vacía, se denominada **banda de conducción** (*electrones desligados de átomos*).

Teoría de  
Semiconductores

Conducción eléctrica

Semiconductores

Dopaje de semiconductores

Unión p-n

Diodo

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación

# Bandas de energía

- ▶ En un **sólido** el número de átomos es tan elevado que los niveles de energía forman **bandas continuas de energía**.
- ▶ Los **electrones** asociados a los átomos del sólido **llenan estas bandas en orden ascendente**.
- ▶ La banda de mayor energía completamente ocupada se denomina **banda de valencia** (*electrones ligados a átomos*).
- ▶ La siguiente banda, parcialmente ocupada o vacía, se denominada **banda de conducción** (*electrones desligados de átomos*).
- ▶ Estas bandas pueden estar separadas por otra banda de energías que corresponde a **estados no permitidos (banda prohibida)**, o **pueden estar solapadas** permitiendo una transición fácil de una a otra.

Teoría de  
Semiconductores

Conducción eléctrica

Semiconductores

Dopaje de semiconductores

Unión p-n

Diodo

Unión P-N  
iluminada

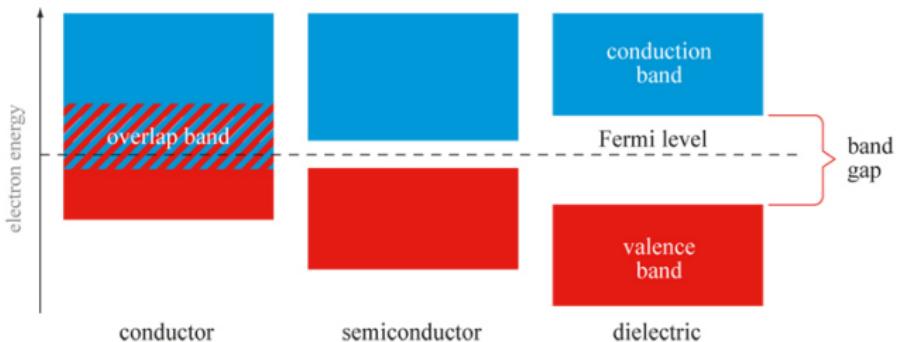
Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación

# Bandas de energía

## Célula Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)



## Conducción eléctrica

Diode

# Conductores, aislantes y semiconductores

Las **propiedades eléctricas** del sólido dependen de esta **posición relativa entre bandas**.

- ▶ En un **conductor** la  $E_g$  es muy baja y los electrones circulan fácilmente por la banda de conducción.

Teoría de  
Semiconductores

Conducción eléctrica

Semiconductores

Dopaje de semiconductores

Unión p-n

Diodo

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación

# Conductores, aislantes y semiconductores

Las **propiedades eléctricas** del sólido dependen de esta **posición relativa entre bandas**.

- ▶ En un **conductor** la  $E_g$  es muy baja y los electrones circulan fácilmente por la banda de conducción.
- ▶ En un **aislante** se necesita una cantidad de energía muy alta para que los electrones puedan acceder a la banda de conducción ( $E_g > 5\text{ eV}$ )

Teoría de  
Semiconguctores

Conducción eléctrica

Semiconguctores

Dopaje de semiconductores

Unión p-n

Diodo

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación

# Conductores, aislantes y semiconductores

Las **propiedades eléctricas** del sólido dependen de esta **posición relativa entre bandas**.

- ▶ En un **conductor** la  $E_g$  es muy baja y los electrones circulan fácilmente por la banda de conducción.
- ▶ En un **aislante** se necesita una cantidad de energía muy alta para que los electrones puedan acceder a la banda de conducción ( $E_g > 5\text{ eV}$ )
- ▶ En un **semiconductor** la  $E_g$  es baja ( $E_g < 5\text{ eV}$ ): los electrones pueden «saltar» a la banda de conducción con un aporte energético.

Teoría de  
Semiconductores

Conducción eléctrica

Semiconductores

Dopaje de semiconductores

Unión p-n

Diodo

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación

# Conductores, aislantes y semiconductores

Las **propiedades eléctricas** del sólido dependen de esta **posición relativa entre bandas**.

- ▶ En un **conductor** la  $E_g$  es muy baja y los electrones circulan fácilmente por la banda de conducción.
- ▶ En un **aislante** se necesita una cantidad de energía muy alta para que los electrones puedan acceder a la banda de conducción ( $E_g > 5\text{ eV}$ )
- ▶ En un **semiconductor** la  $E_g$  es baja ( $E_g < 5\text{ eV}$ ): los electrones pueden «saltar» a la banda de conducción con un aporte energético.
  - ▶  $E_g(\text{Si}) = 1,12\text{ eV}$

Teoría de  
Semiconductores

Conducción eléctrica

Semiconductores

Dopaje de semiconductores

Unión p-n

Diodo

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación

# Conductores, aislantes y semiconductores

Las **propiedades eléctricas** del sólido dependen de esta **posición relativa entre bandas**.

- ▶ En un **conductor** la  $E_g$  es muy baja y los electrones circulan fácilmente por la banda de conducción.
- ▶ En un **aislante** se necesita una cantidad de energía muy alta para que los electrones puedan acceder a la banda de conducción ( $E_g > 5\text{ eV}$ )
- ▶ En un **semiconductor** la  $E_g$  es baja ( $E_g < 5\text{ eV}$ ): los electrones pueden «saltar» a la banda de conducción con un aporte energético.
  - ▶  $E_g(\text{Si}) = 1,12\text{ eV}$
  - ▶  $E_g(\text{AsGa}) = 1,4\text{ eV}$

Teoría de  
Semiconductores

Conducción eléctrica

Semiconductores

Dopaje de semiconductores

Unión p-n

Diodo

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación

# Conductores, aislantes y semiconductores

La conductividad de los materiales depende de la **concentración de electrones libres (n)** presentes en la banda de conducción

## Valores típicos de n

- ▶ Metal:  $10^{22} \text{ cm}^{-3}$
- ▶ Aislante:  $10 \text{ cm}^{-3}$
- ▶ Semiconducto:  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$  a  $T = 300 \text{ K}$

Teoría de  
Semiconductores

Conducción eléctrica

Semiconductores

Dopaje de semiconductores

Unión p-n

Diodo

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación

# Teoría de Semiconductores

Conducción eléctrica

Semiconductores

Dopaje de semiconductores

Unión p-n

Diodo

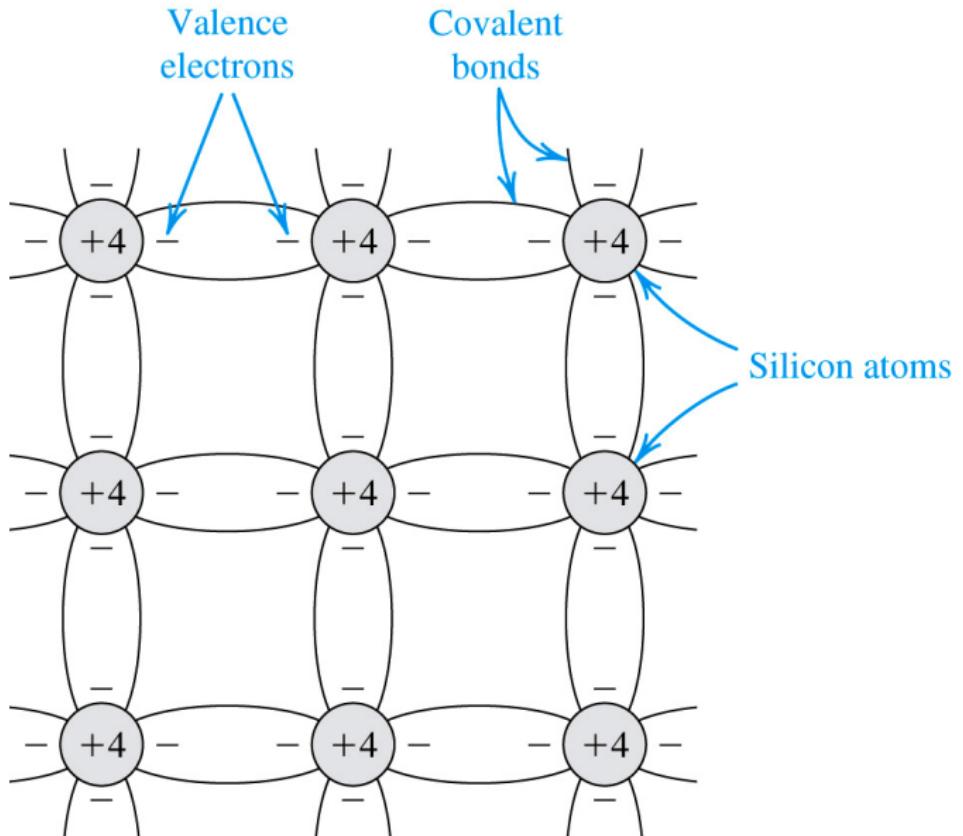
Unión P-N iluminada

Funcionamiento de una célula solar

Fabricación

# Red cristalina de Si (T = 0 K)

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)



Teoría de  
Semiconductores

Conducción eléctrica

Semiconductores

Dopaje de semiconductores

Unión p-n

Diodo

Unión P-N  
iluminada

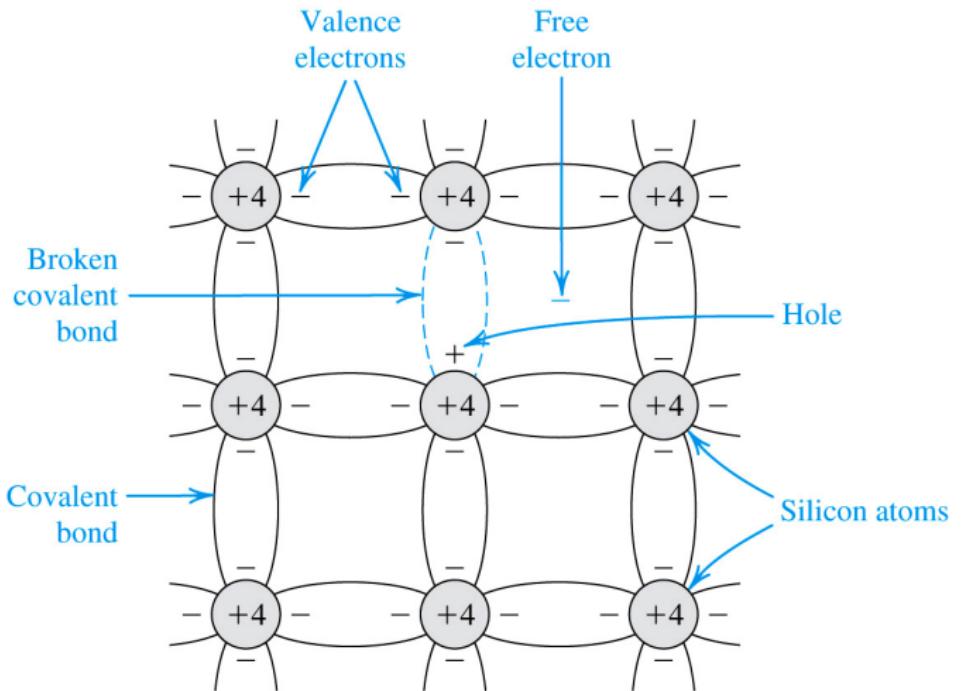
Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación

# Generación de electrón-hueco ( $T > 0$ K)

Célula Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)



Teoría de  
Semiconductores

Conducción eléctrica

Semiconductores

Dopaje de semiconductores

Unión p-n

Diodo

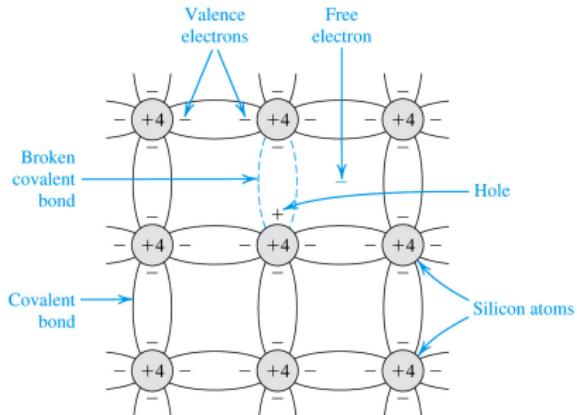
Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación

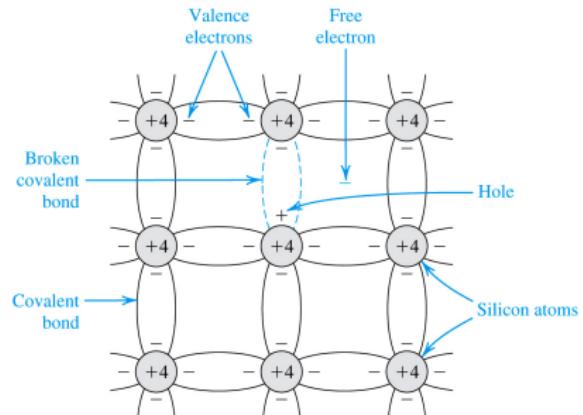
# Generación de electrón-hueco

- ▶ Cuando se **rompe un enlace**, un electrón y un hueco quedan libres para moverse por el material (conducción intrínseca).



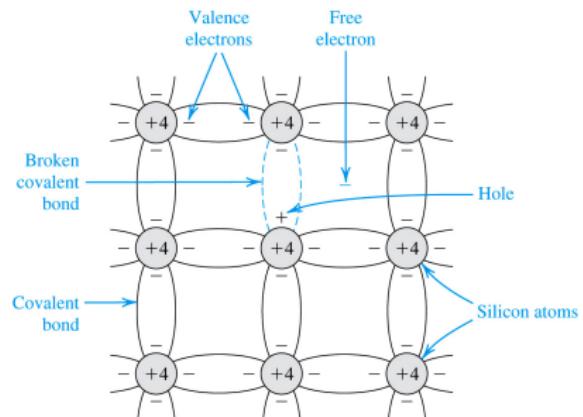
# Generación de electrón-hueco

- ▶ Cuando se **rompe un enlace**, un electrón y un hueco quedan libres para moverse por el material (conducción intrínseca).
- ▶ Esta **circulación es aleatoria**, sin una dirección predeterminada: **no es aprovechable** en un circuito externo.



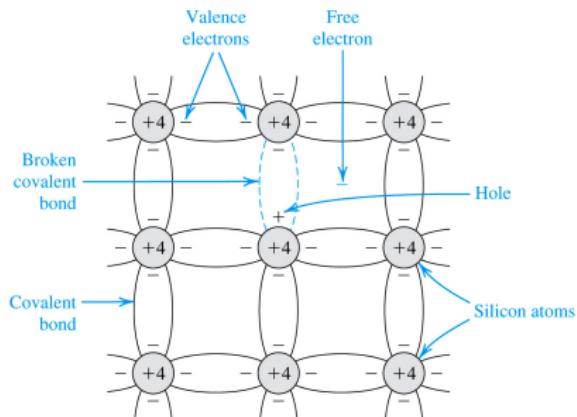
# Generación de electrón-hueco

- ▶ Cuando se **rompe un enlace**, un electrón y un hueco quedan libres para moverse por el material (conducción intrínseca).
- ▶ Esta **circulación es aleatoria**, sin una dirección predeterminada: **no es aprovechable** en un circuito externo.
- ▶ La **densidad intrínseca de huecos y electrones es idéntica** (depende de la temperatura y de  $E_g$ ).



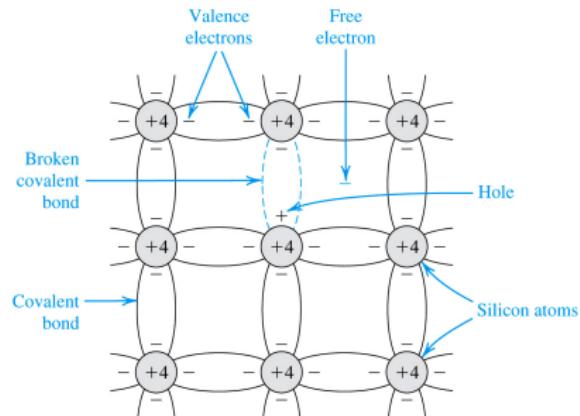
# Recombinación de un par electrón-hueco

- Se producen **encuentros electrón-hueco** que restablecen un enlace con **liberación de energía ( $E_g$ )** en forma de calor.



# Recombinación de un par electrón-hueco

- ▶ Se producen **encuentros electrón-hueco** que restablecen un enlace con **liberación de energía ( $E_g$ )** en forma de calor.
- ▶ Para evitar la recombinación **es preciso dirigir el movimiento** de electrones y huecos mediante un campo eléctrico.



## Teoría de Semiconductores

Conducción eléctrica

Semiconductores

Dopaje de semiconductores

Unión p-n

Diodo

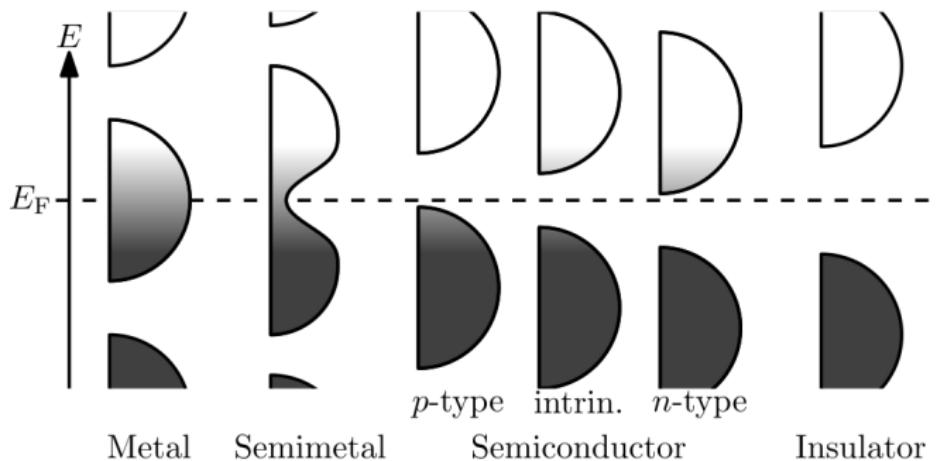
Unión P-N iluminada

Funcionamiento de una célula solar

Fabricación

# Definición

El **dopaje de semiconductores** consiste en introducir de forma controlada impurezas en el cristal para alterar las bandas de energía.



Teoría de  
Semiconductores

Conducción eléctrica

Semiconductores

Dopaje de semiconductores

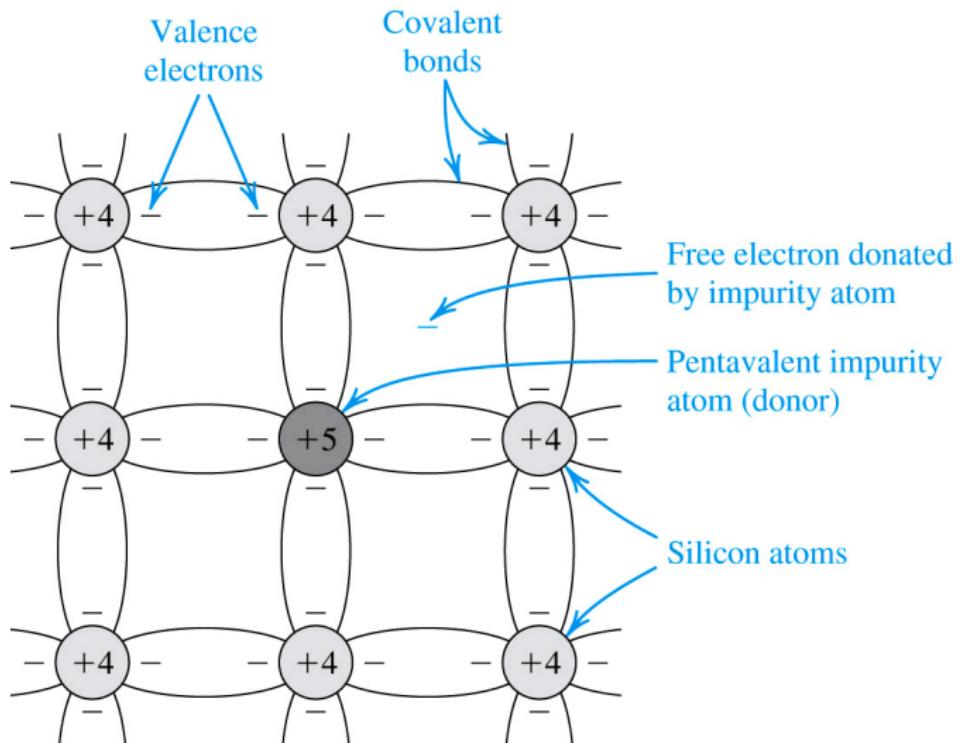
Unión p-n

Diodo

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación



Teoría de  
Semiconductores

Conducción eléctrica

Semiconductores

Dopaje de semiconductores

Unión p-n

Diodo

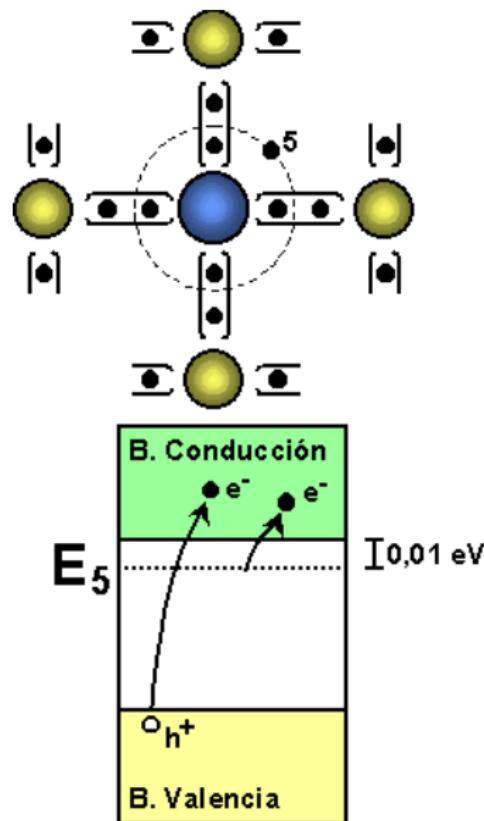
Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación

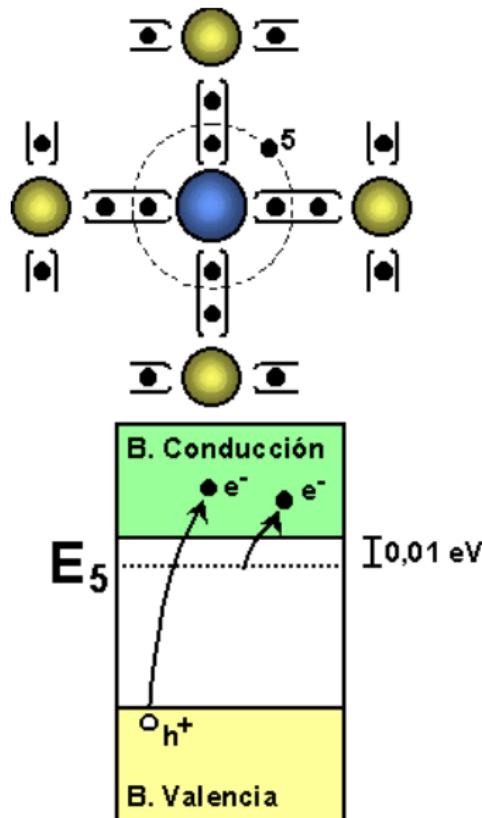
## Tipo n

- ▶ Los átomos de **Fósforo** tienen cinco electrones de valencia (uno más que el silicio).



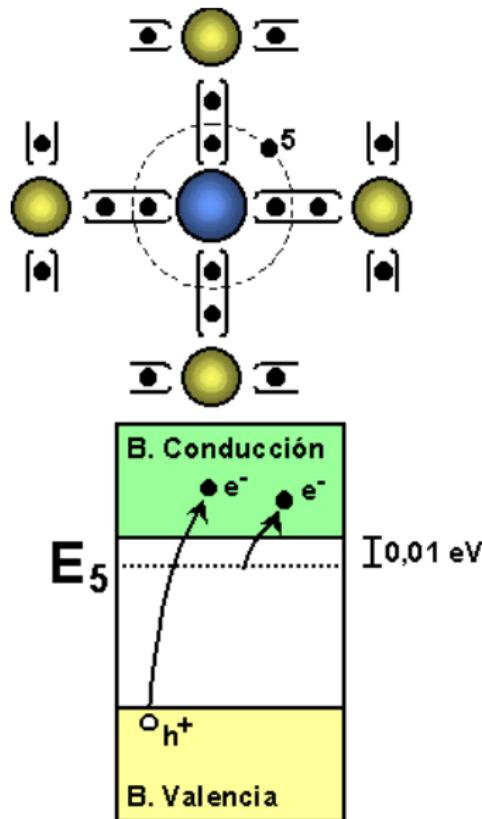
## Tipo n

- ▶ Los átomos de **Fósforo** tienen cinco electrones de valencia (uno más que el silicio).
- ▶ Al impurificar un cristal de Silicio con átomos de Fósforo, el quinto electrón no queda bien integrado en la red.



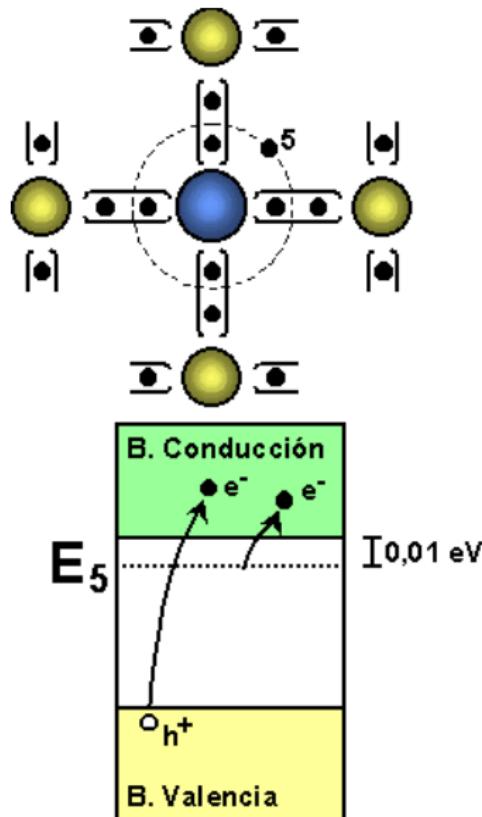
## Tipo n

- ▶ Los átomos de **Fósforo** tienen cinco electrones de valencia (uno más que el silicio).
- ▶ Al impurificar un cristal de Silicio con átomos de Fósforo, el quinto electrón no queda bien integrado en la red.
- ▶ La rotura de este enlace se produce con **baja aportación energética** (menor que  $E_g$ ).



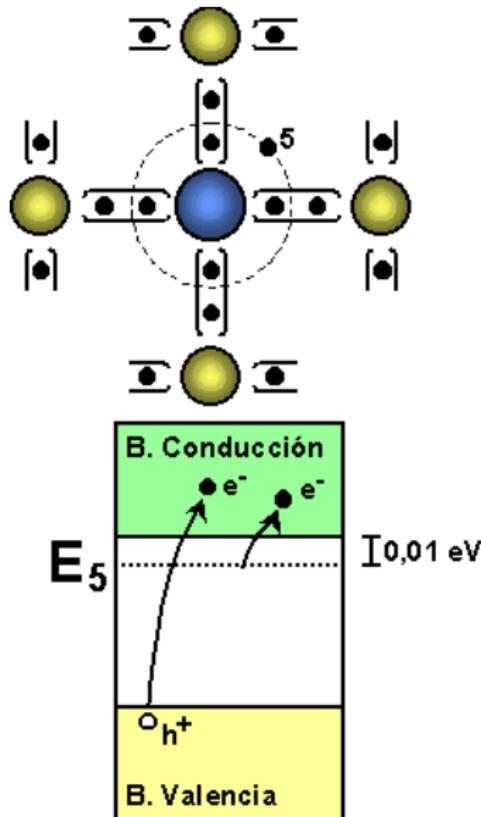
## Tipo n

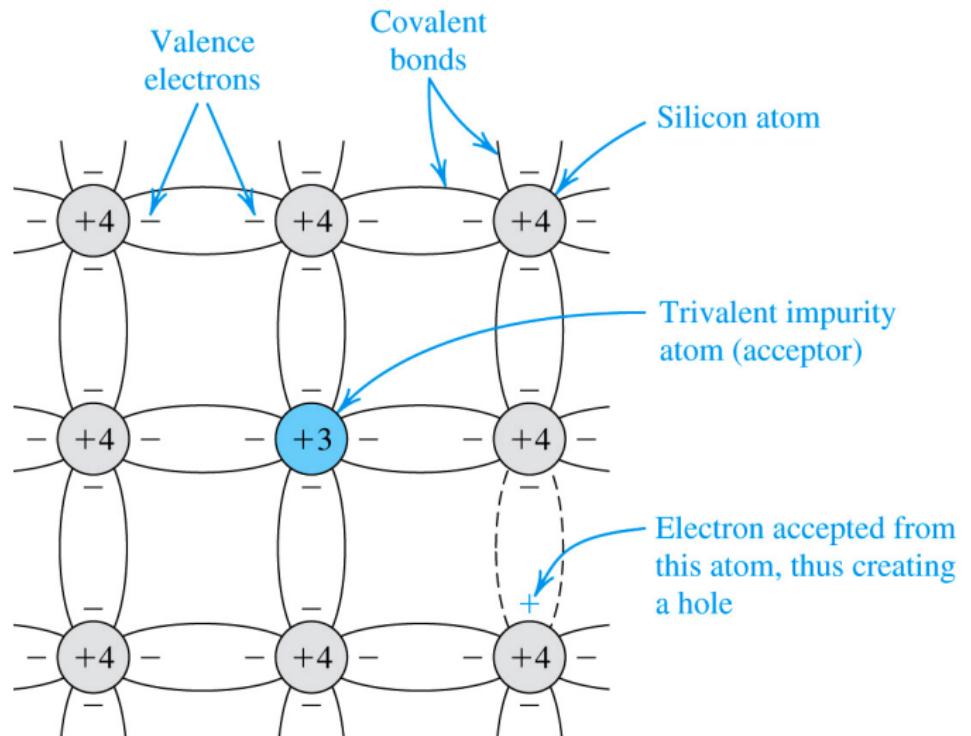
- ▶ Los átomos de **Fósforo** tienen cinco electrones de valencia (uno más que el silicio).
- ▶ Al impurificar un cristal de Silicio con átomos de Fósforo, el quinto electrón no queda bien integrado en la red.
- ▶ La rotura de este enlace se produce con **baja aportación energética** (menor que  $E_g$ ).
- ▶ El **quinto electrón queda libre** pero la carga positiva (**ión  $P^+$** ) está **ligada** a la red cristalina.



## Tipo n

- ▶ Los átomos de **Fósforo** tienen cinco electrones de valencia (uno más que el silicio).
- ▶ Al impurificar un cristal de Silicio con átomos de Fósforo, el quinto electrón no queda bien integrado en la red.
- ▶ La rotura de este enlace se produce con **baja aportación energética** (menor que  $E_g$ ).
- ▶ El **quinto electrón queda libre** pero la carga positiva (**ión  $P^+$** ) está **ligada** a la red cristalina.
- ▶ La **densidad de electrones** (portador mayoritario) es **superior a la de huecos**





Teoría de  
Semiconductores

Conducción eléctrica

Semiconductores

Dopaje de semiconductores

Unión p-n

Diodo

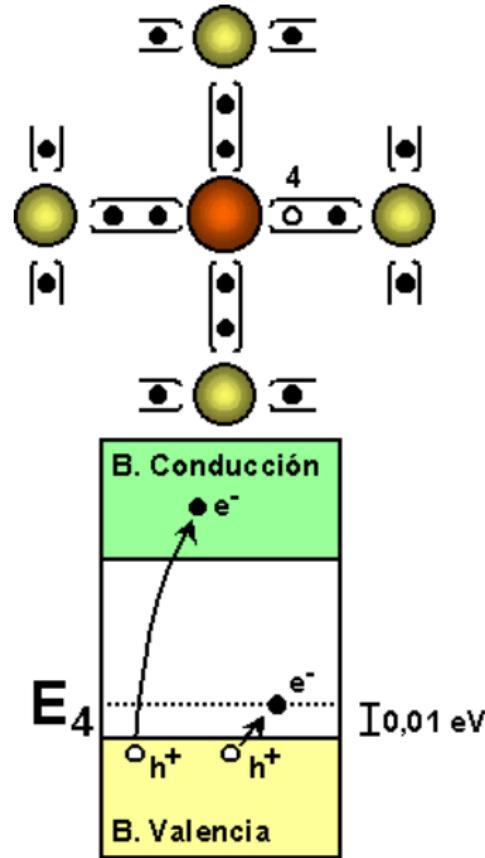
Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación

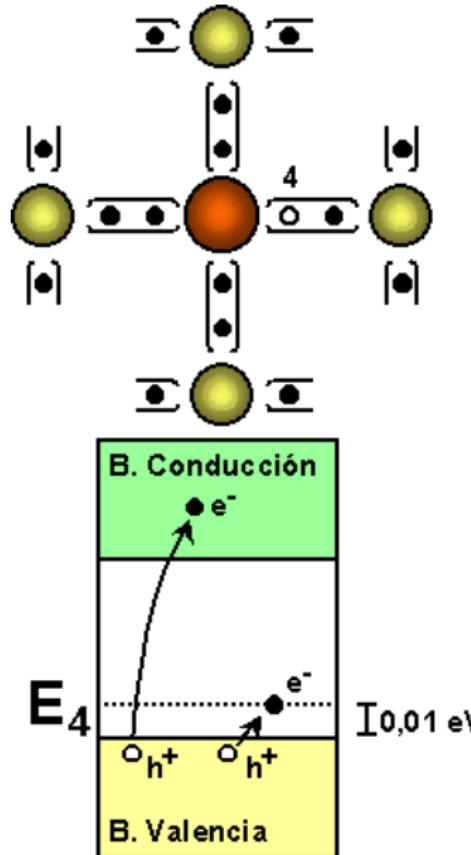
## Tipo p

- ▶ Los átomos de **Boro** tienen tres electrones de valencia (uno menos que el silicio).



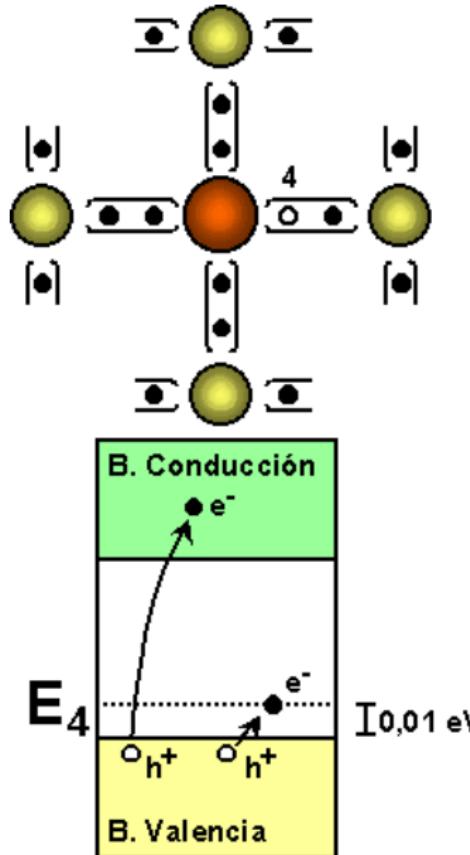
## Tipo p

- ▶ Los átomos de **Boro** tienen tres electrones de valencia (uno menos que el silicio).
- ▶ Al impurificar un cristal de Silicio con átomos de Boro, hay un enlace sin cubrir (hueco).



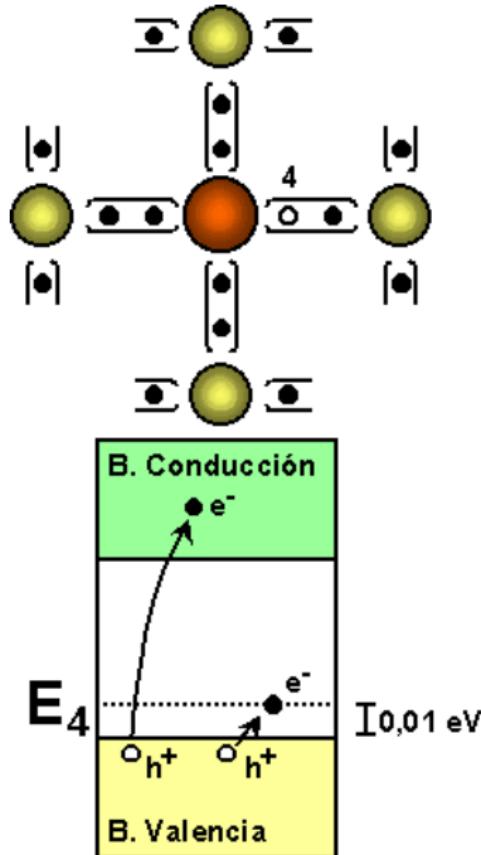
# Tipo p

- ▶ Los átomos de **Boro** tienen tres electrones de valencia (uno menos que el silicio).
- ▶ Al impurificar un cristal de Silicio con átomos de Boro, hay un enlace sin cubrir (hueco).
- ▶ La rotura de este enlace se produce con **baja aportación energética** (menor que  $E_g$ ).



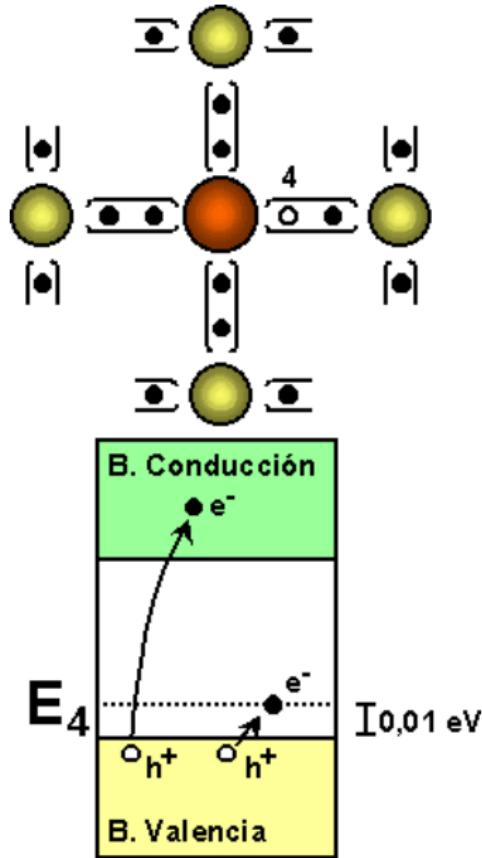
## Tipo p

- ▶ Los átomos de **Boro** tienen tres electrones de valencia (uno menos que el silicio).
- ▶ Al impurificar un cristal de Silicio con átomos de Boro, hay un enlace sin cubrir (hueco).
- ▶ La rotura de este enlace se produce con **baja aportación energética** (menor que  $E_g$ ).
- ▶ El **hueco queda libre** pero la **carga negativa (ión  $B^-$ )** está ligada a la red cristalina.



## Tipo p

- ▶ Los átomos de **Boro** tienen tres electrones de valencia (uno menos que el silicio).
- ▶ Al impurificar un cristal de Silicio con átomos de Boro, hay un enlace sin cubrir (hueco).
- ▶ La rotura de este enlace se produce con **baja aportación energética** (menor que  $E_g$ ).
- ▶ El **hueco queda libre** pero la **carga negativa (ión  $B^-$ )** está ligada a la red cristalina.
- ▶ La **densidad de huecos** (portador mayoritario) es **superior a la de electrones**



## **Teoría de Semiconductores**

Conducción eléctrica

Semiconductores

Dopaje de semiconductores

**Unión p-n**

Diodo

Unión P-N iluminada

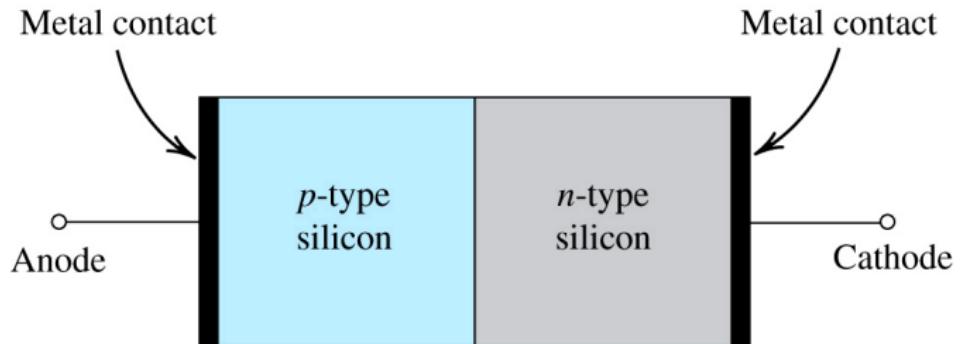
Funcionamiento de una célula solar

Fabricación

# Unión p-n

Célula Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)



Teoría de  
Semiconductores

Conducción eléctrica

Semiconductores

Dopaje de semiconductores

Unión p-n

Diodo

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

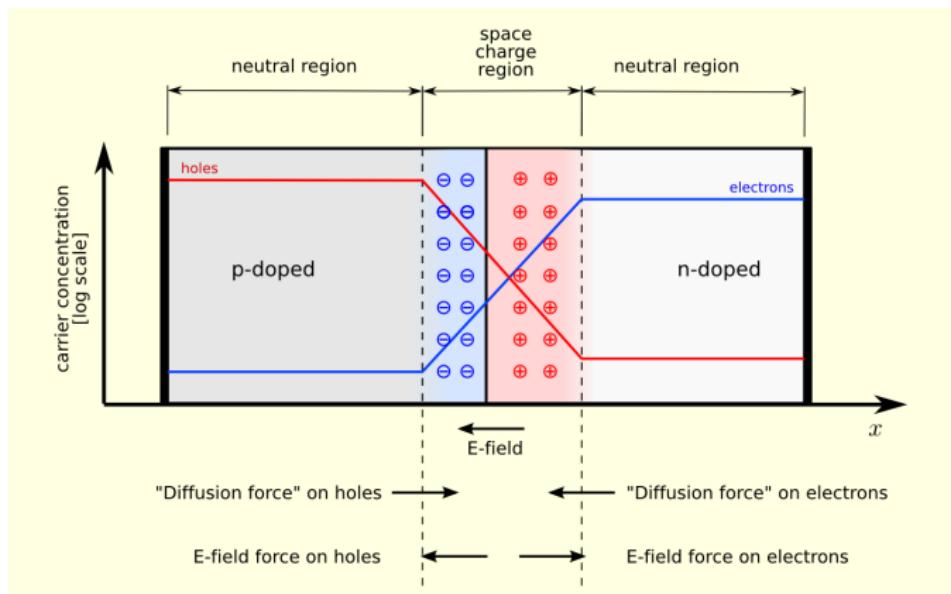
Fabricación

## Conducción en una unión p-n

## Célula Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

- ▶ Al unir un semiconductor tipo p con otro tipo n, se produce un desequilibrio:
    - ▶ Corriente de Difusión
    - ▶ Corriente de Arrastre



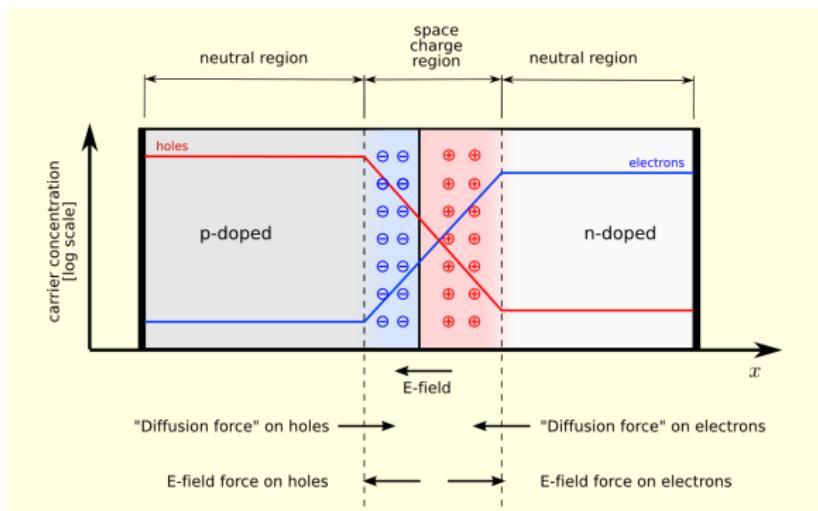
# Corriente de Difusión

## Célula Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

#### ► Difusión de portadores mayoritarios

- ▶ Movimiento de huecos desde cristal p a cristal n, dejando iones con carga negativa.

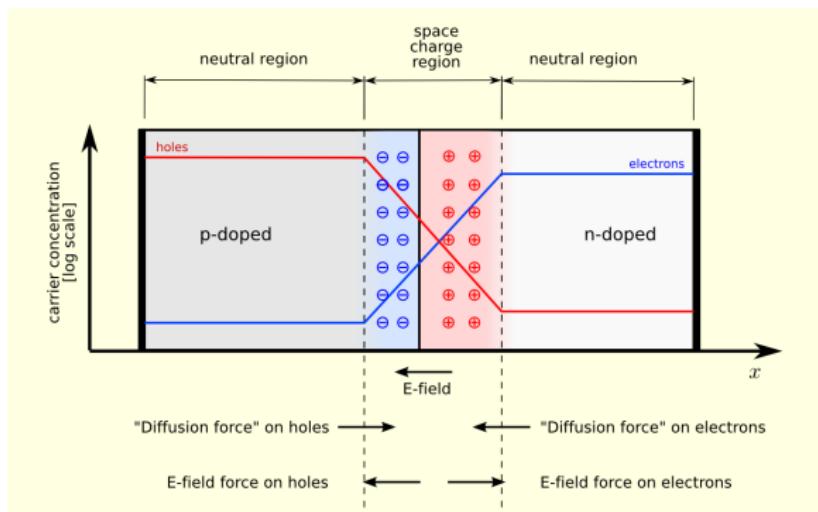


# Corriente de Difusión

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

#### ► Difusión de portadores mayoritarios

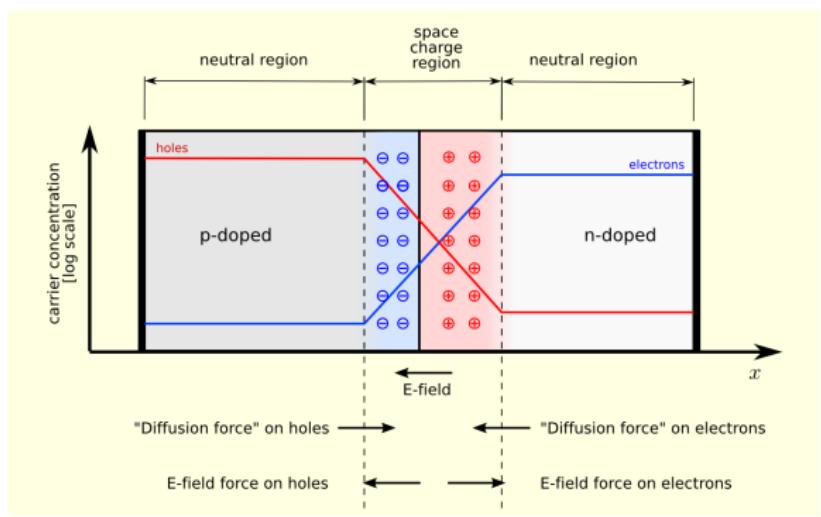
- Movimiento de huecos desde cristal p a cristal n, dejando iones con carga negativa.
  - Movimiento de electrones desde cristal n a cristal p, dejando iones con carga positiva.



# Corriente de Arrastre

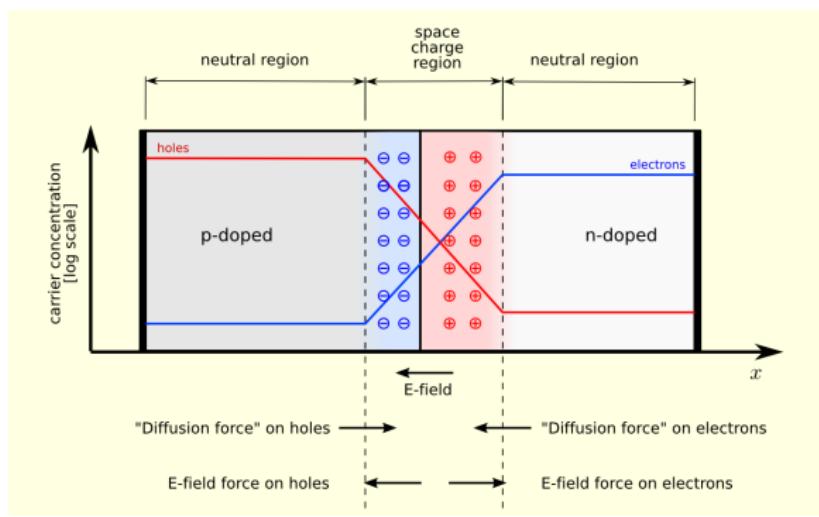
## Célula Solar

- ▶ Los iones fijos cercanos a la unión generan un campo eléctrico de arrastre en sentido opuesto a la difusión: barrera de potencial



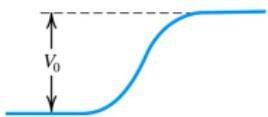
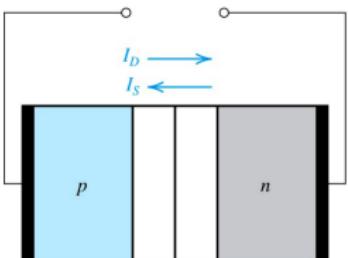
# Corriente de Arrastre

- ▶ Los iones fijos cercanos a la unión generan un campo eléctrico de arrastre en sentido opuesto a la difusión: barrera de potencial
  - ▶ Los portadores minoritarios que atraviesan la unión se recombinan en la zona cercana a la unión despoblada de portadores y con iones cargados ligados a la red.



# Equilibrio en una unión p-n

- El **equilibrio** se alcanza al **compensarse los movimientos de difusión y de arrastre**.



(a) Open-circuit  
(Equilibrium)

Teoría de  
Semiconductores

Conducción eléctrica

Semiconductores

Dopaje de semiconductores

Unión p-n

Diodo

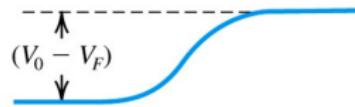
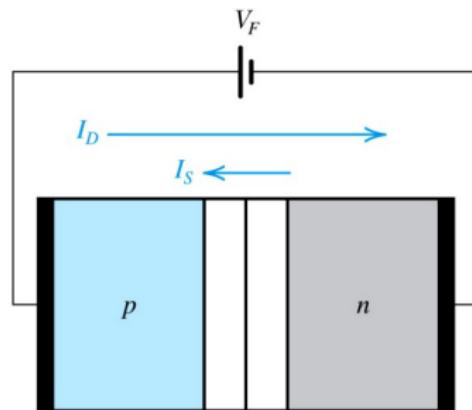
Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación

# Polarización en directa

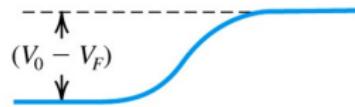
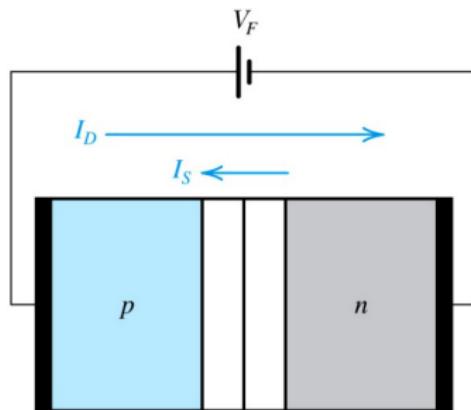
- Para conseguir corriente es necesario romper el equilibrio alcanzado y reducir la barrera de potencial.



(c) Forward Bias

# Polarización en directa

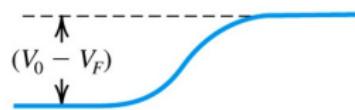
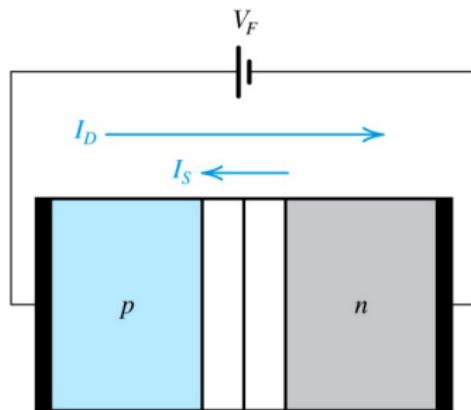
- ▶ Para conseguir corriente es necesario romper el equilibrio alcanzado y reducir la barrera de potencial.
- ▶ Diferencia de potencial con lado p positivo respecto al lado n: unión p-n está polarizada en directa.



(c) Forward Bias

# Polarización en directa

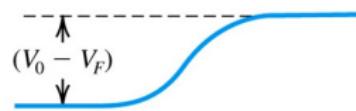
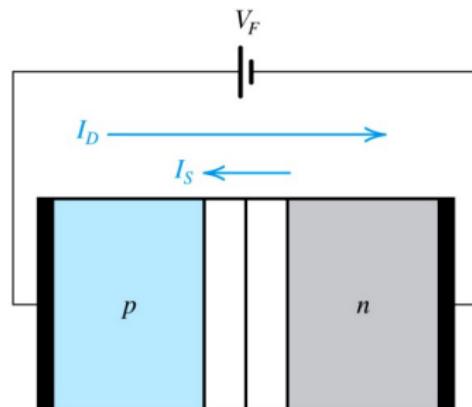
- ▶ Para conseguir corriente es necesario romper el equilibrio alcanzado y reducir la barrera de potencial.
- ▶ Diferencia de potencial con lado p positivo respecto al lado n: unión p-n está polarizada en directa.
- ▶ En estas condiciones se reduce la barrera de potencial y, en consecuencia el valor del campo eléctrico de la zona de unión.



(c) Forward Bias

# Polarización en directa

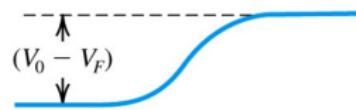
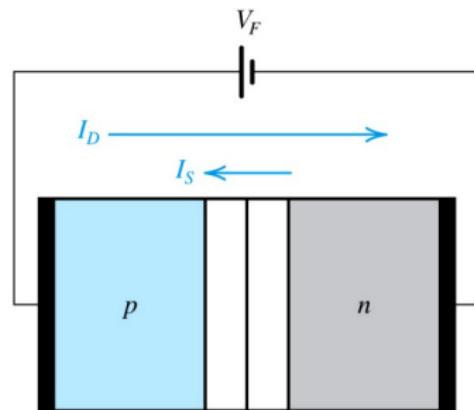
- ▶ Para conseguir corriente es necesario romper el equilibrio alcanzado y reducir la barrera de potencial.
- ▶ Diferencia de potencial con lado p positivo respecto al lado n: unión p-n está polarizada en directa.
- ▶ En estas condiciones se reduce la barrera de potencial y, en consecuencia el valor del campo eléctrico de la zona de unión.
- ▶ La corriente de arrastre disminuye y no puede compensar la corriente de difusión.



(c) Forward Bias

# Polarización en directa

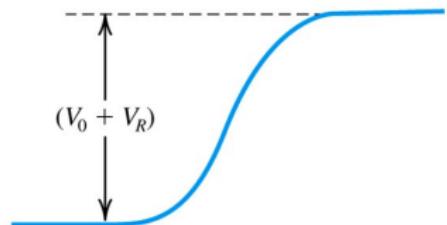
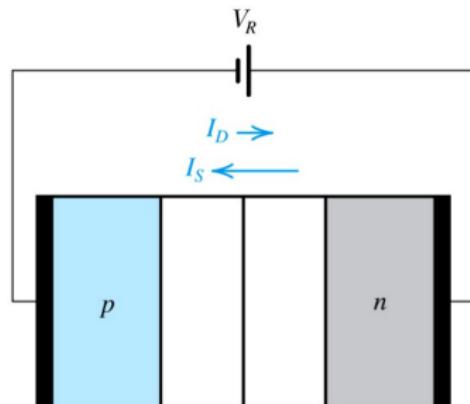
- ▶ Para conseguir corriente es necesario romper el equilibrio alcanzado y reducir la barrera de potencial.
- ▶ Diferencia de potencial con lado p positivo respecto al lado n: unión p-n está polarizada en directa.
- ▶ En estas condiciones se reduce la barrera de potencial y, en consecuencia el valor del campo eléctrico de la zona de unión.
- ▶ La corriente de arrastre disminuye y no puede compensar la corriente de difusión.
- ▶ Convenio: la corriente entra por zona p y sale por zona n.



(c) Forward Bias

# Polarización en inversa

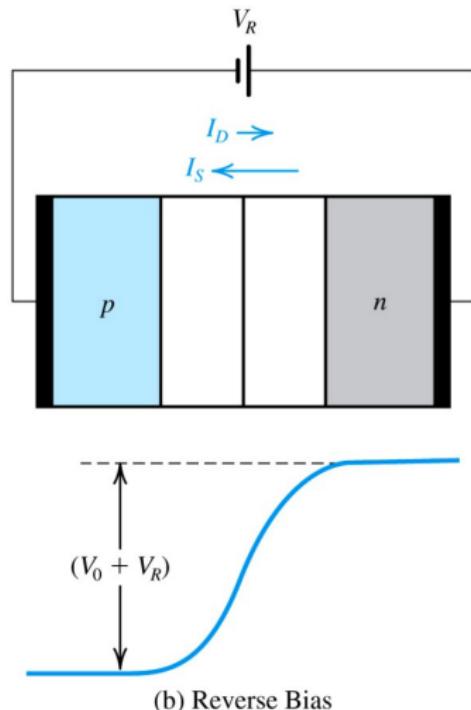
- ▶ Si la diferencia de potencial aplicada consigue que la **zona p esté a menor tensión que la zona n**, la unión queda polarizada en inversa.



(b) Reverse Bias

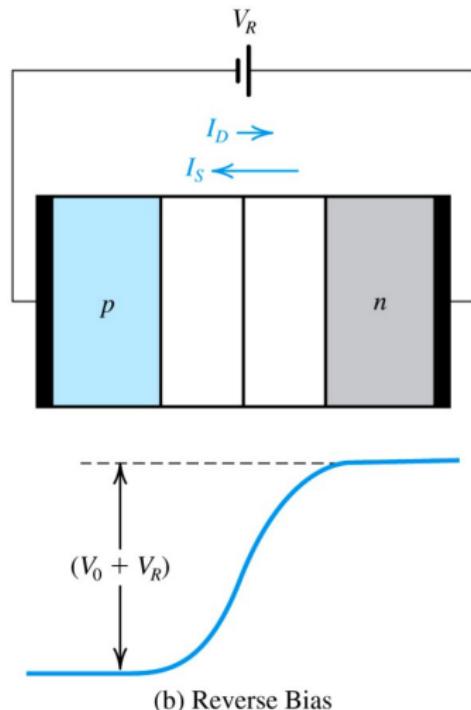
# Polarización en inversa

- ▶ Si la diferencia de potencial aplicada consigue que la **zona p esté a menor tensión que la zona n**, la unión queda polarizada en inversa.
- ▶ En estas condiciones **la barrera de potencial en la unión queda reforzada** y el paso de portadores de una a otra zona queda aún más debilitado.



# Polarización en inversa

- ▶ Si la diferencia de potencial aplicada consigue que la **zona p esté a menor tensión que la zona n**, la unión queda polarizada en inversa.
- ▶ En estas condiciones **la barrera de potencial en la unión queda reforzada** y el paso de portadores de una a otra zona queda aún más debilitado.
- ▶ La **corriente que atraviesa la unión en polarización inversa es de muy bajo valor**.



# Teoría de Semiconductores

Conducción eléctrica

Semiconductores

Dopaje de semiconductores

Unión p-n

Diodo

Unión P-N iluminada

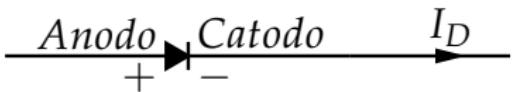
Funcionamiento de una célula solar

Fabricación

# Definición

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

- ▶ El dispositivo electrónico basado en una unión p-n se denomina diodo.
- ▶ La zona p del diodo es el ánodo y la zona n es el cátodo.



Teoría de  
Semiconductores

Conducción eléctrica

Semiconductores

Dopaje de semiconductores

Unión p-n

Diodo

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación

# Ecuación del Diodo

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)



$$I_D = I_0 \cdot [\exp\left(\frac{V}{m \cdot V_T}\right) - 1]$$

donde  $I_0$  es la corriente de saturación en oscuridad del diodo,  $V$  la tensión aplicada al diodo y  $m$  el factor de idealidad del diodo.

- ▶ Para una temperatura ambiente de 300 K,

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

donde  $k$  es la constante de Boltzmann,  $T$  la temperatura del diodo (en grados Kelvin), y  $e$  es la carga del electrón.

Teoría de  
Semiconductores

Conducción eléctrica

Semiconductores

Dopaje de semiconductores

Unión p-n

Diodo

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación

Teoría de  
Semiconductores

Conducción eléctrica

Semiconductores

Dopaje de semiconductores

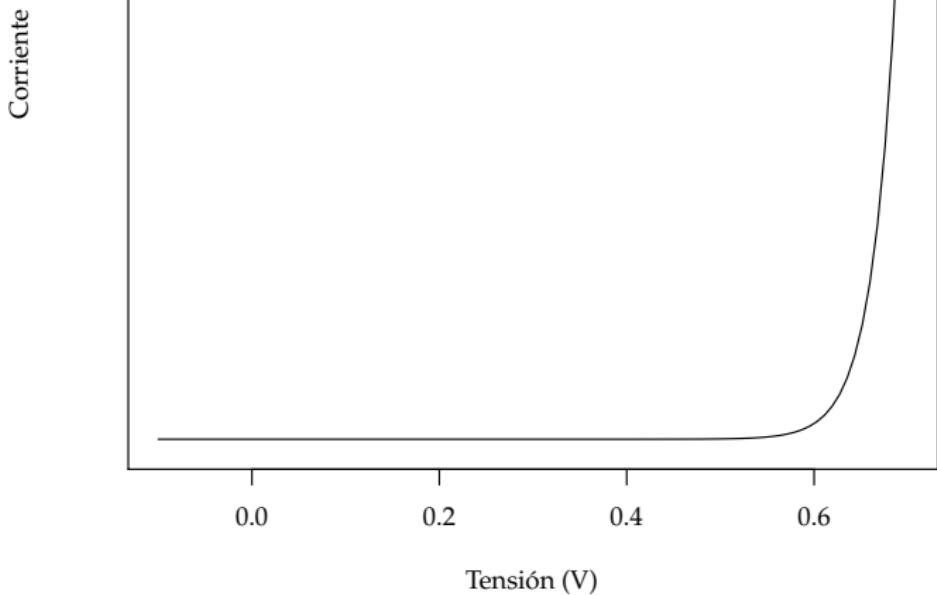
Unión p-n

Diodo

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación



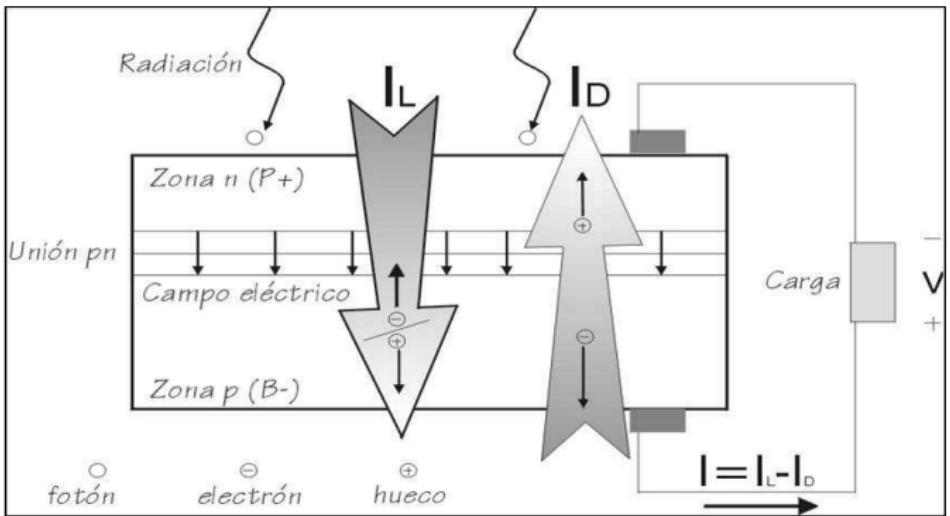
Teoría de Semiconductores

**Unión P-N iluminada**

Funcionamiento de una célula solar

Fabricación

## Unión P-N iluminada



# Efecto fotoeléctrico

- Efecto fotoeléctrico: **los electrones se desplazan a la banda de conducción por el aporte energético de fotones ( $E_f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ )**.

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación

# Efecto fotoeléctrico

- ▶ Efecto fotoeléctrico: **los electrones se desplazan a la banda de conducción por el aporte energético de fotones** ( $E_f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ ).
- ▶ Al **iluminar una unión p-n**, el **campo eléctrico** de la unión conduce los portadores y **dificulta la recombinación**.

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación

# Efecto fotoeléctrico

- ▶ Efecto fotoeléctrico: **los electrones se desplazan a la banda de conducción por el aporte energético de fotones** ( $E_f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ ).
- ▶ Al **iluminar una unión p-n**, el **campo eléctrico** de la unión conduce los portadores y **dificulta la recombinación**.
- ▶ La **fotocorriente** es ahora **aprovechable** por un circuito externo (*corriente de iluminación, corriente de generación*)

# Efecto fotoeléctrico

- ▶ Efecto fotoeléctrico: **los electrones se desplazan a la banda de conducción por el aporte energético de fotones** ( $E_f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ ).
- ▶ Al **iluminar una unión p-n**, el **campo eléctrico** de la unión conduce los portadores y **dificulta la recombinación**.
- ▶ La **fotocorriente** es ahora **aprovechable** por un circuito externo (*corriente de iluminación, corriente de generación*)
- ▶ La presencia de **tensión en los terminales** de la unión (por ejemplo, caída de tensión en una resistencia alimentada por la fotocorriente) **favorece la recombinación** (*corriente de oscuridad o corriente de diodo*).

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Teoría de  
Semicongductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación

# Absorción de luz y generación de portadores

- ▶ Si el fotón es poco energético ( $E_f < E_g$ ) **no interactúa con el semiconductor** (como si fuese transparente)

# Absorción de luz y generación de portadores

- ▶ Si el fotón es poco energético ( $E_f < E_g$ ) **no interactúa con el semiconductor** (como si fuese transparente)
  - ▶ Fotones en el espectro visible ( $400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$ ) y ultravioleta ( $\lambda < 400 \text{ nm}$ ) rompen enlaces.

# Absorción de luz y generación de portadores

- ▶ Si el fotón es poco energético ( $E_f < E_g$ ) **no interactúa con el semiconductor** (como si fuese transparente)
  - ▶ Fotones en el espectro visible ( $400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$ ) y ultravioleta ( $\lambda < 400 \text{ nm}$ ) rompen enlaces.
  - ▶ Si  $\lambda > 1100 \text{ nm}$  (infrarrojo) el fotón no interactúa.

# Absorción de luz y generación de portadores

- ▶ Si el **fotón es poco energético** ( $E_f < E_g$ ) **no interactúa con el semiconductor** (como si fuese transparente)
  - ▶ Fotones en el espectro visible ( $400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$ ) y ultravioleta ( $\lambda < 400 \text{ nm}$ ) rompen enlaces.
  - ▶ Si  $\lambda > 1100 \text{ nm}$  (infrarrojo) el fotón no interactúa.
- ▶ Los **fotones más energéticos** (baja longitud de onda) son **absorbidos en la superficie**.

# Absorción de luz y generación de portadores

- ▶ Si el **fotón es poco energético** ( $E_f < E_g$ ) **no interactúa con el semiconductor** (como si fuese transparente)
  - ▶ Fotones en el espectro visible ( $400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$ ) y ultravioleta ( $\lambda < 400 \text{ nm}$ ) rompen enlaces.
  - ▶ Si  $\lambda > 1100 \text{ nm}$  (infrarrojo) el fotón no interactúa.
- ▶ Los **fotones más energéticos** (baja longitud de onda) son **absorbidos en la superficie**.
- ▶ Los **fotones menos energéticos** (alta longitud de onda) penetran en el interior hasta **romper un enlace**.

# Absorción de luz y generación de portadores

- ▶ Los fotones con  $E_f < E_g$  atraviesan el cristal sin ser absorbidos: **pérdidas de no-absorción**

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación

# Absorción de luz y generación de portadores

- ▶ Los fotones con  $E_f < E_g$  atraviesan el cristal sin ser absorbidos: **pérdidas de no-absorción**
- ▶ Fotones con  $E_f > E_g$ :

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación

# Absorción de luz y generación de portadores

- ▶ Los fotones con  $E_f < E_g$  atraviesan el cristal sin ser absorbidos: **pérdidas de no-absorción**
- ▶ Fotones con  $E_f > E_g$ :
  - ▶ Debido a anchura del semiconductor y coeficiente de absorción del material parte no son absorbidos:  
**pérdidas de transmisión**

# Absorción de luz y generación de portadores

- ▶ Los fotones con  $E_f < E_g$  atraviesan el cristal sin ser absorbidos: **pérdidas de no-absorción**
- ▶ Fotones con  $E_f > E_g$ :
  - ▶ Debido a anchura del semiconductor y coeficiente de absorción del material parte no son absorbidos:  
**pérdidas de transmisión**
  - ▶ Debido a diferencia de índices de refracción:  
**pérdidas de reflexión**

# Absorción de luz y generación de portadores

- ▶ Los fotones con  $E_f < E_g$  atraviesan el cristal sin ser absorbidos: **pérdidas de no-absorción**
- ▶ Fotones con  $E_f > E_g$ :
  - ▶ Debido a anchura del semiconductor y coeficiente de absorción del material parte no son absorbidos: **pérdidas de transmisión**
  - ▶ Debido a diferencia de índices de refracción: **pérdidas de reflexión**
  - ▶ Parte de los portadores generadores se recombinan dentro del dispositivo: **pérdidas por recombinación**

Teoría de Semiconductores

Unión P-N iluminada

Funcionamiento de una célula solar

Fabricación

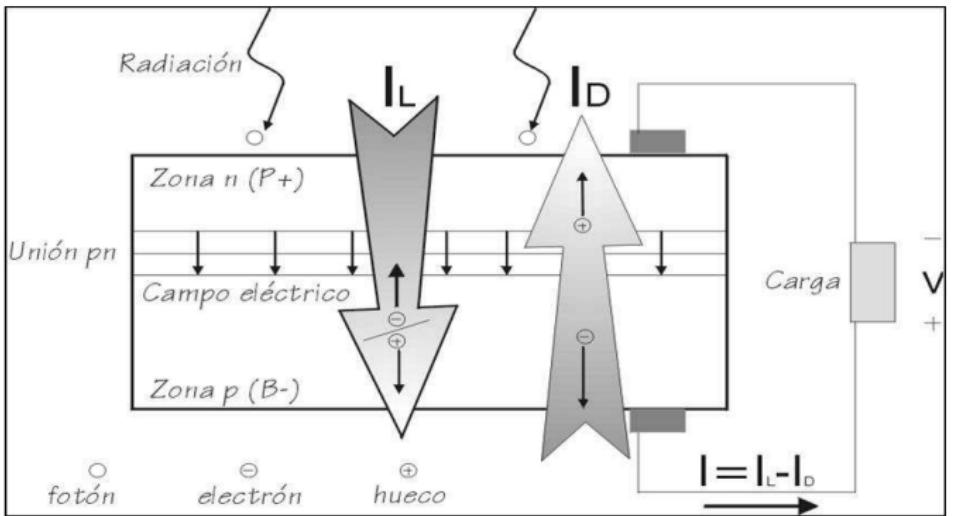
## Funcionamiento de una célula solar

## Curva IV y Puntos Característicos

## Influencia de Temperatura y Radiación

Círculo equivalente de la célula

## Cálculo del MPP



# Teoría de Semiconductores

## Unión P-N iluminada

Funcionamiento de una célula solar

Curva IV y Puntos Característicos

Influencia de Temperatura y Radiación

Circuito equivalente de la célula

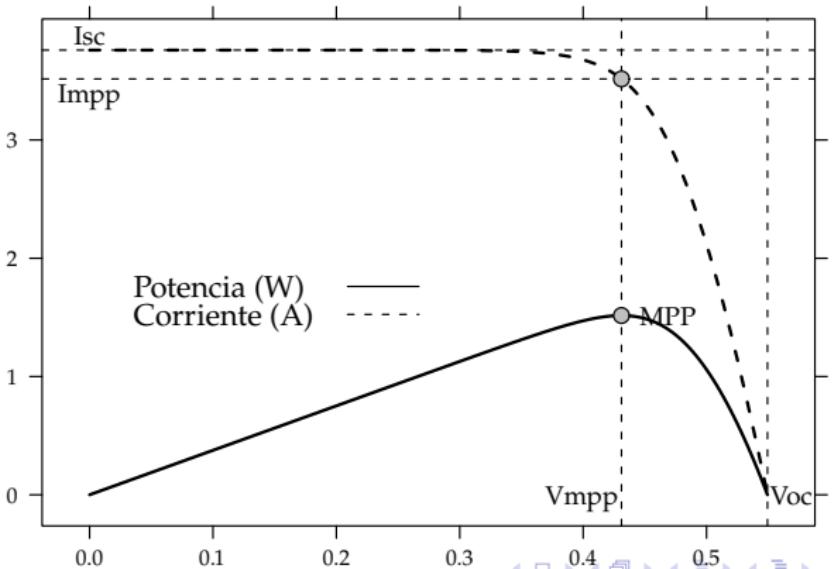
Cálculo del MPP

## Fabricación

# Característica I-V de iluminación

$$I = I_L - I_D$$

$$I_D = I_0 \cdot \left[ \exp \left( \frac{e \cdot V}{m \cdot k \cdot T_c} \right) - 1 \right]$$



Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
<http://oscarperpinan.github.io>

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Curva IV y Puntos  
Característicos

Influencia de Temperatura y  
Radiación

Círcuito equivalente de la  
célula

Cálculo del MPP

Fabricación

# Isc y Voc

## Corriente de Cortocircuito

$$I_{sc} = I(V = 0) \Rightarrow I_D = 0 \Rightarrow I = I_L$$

## Tensión de Circuito Abierto

$$V_{oc} = V(I = 0) \Rightarrow I_L = I_D \Rightarrow V_{oc} = m \cdot \frac{k \cdot T_c}{e} \cdot \ln \left( \frac{I_L}{I_0} + 1 \right)$$

## Ecuación general

$$I = I_{sc} \cdot \left[ 1 - \exp \left( \frac{e \cdot (V_{oc} - V)}{m \cdot k \cdot T_c} \right) \right]$$

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
<http://oscarperpinan.github.io>

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Curva IV y Puntos  
Característicos

Influencia de Temperatura y  
Radiación

Círculo equivalente de la  
célula

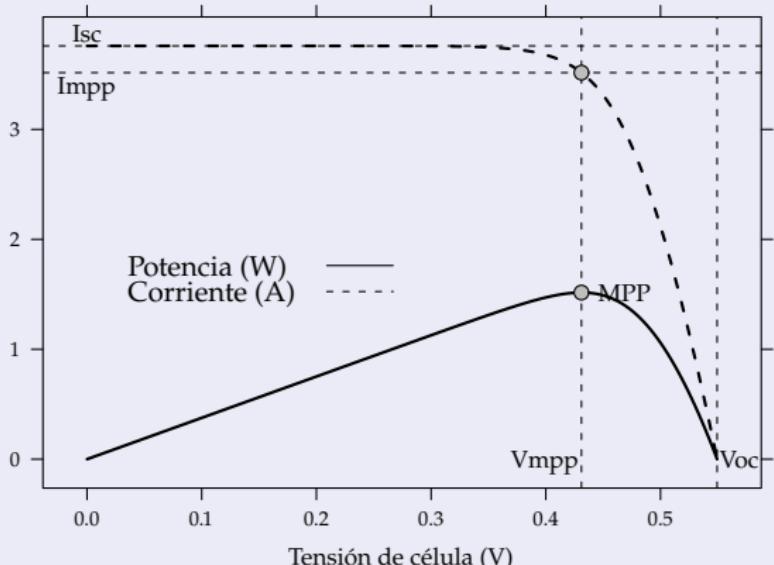
Cálculo del MPP

Fabricación

# Punto de máxima potencia

$$0 < V < V_{mpp}$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}$$



Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
<http://oscarperpinan.github.io>

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Curva IV y Puntos  
Característicos

Influencia de Temperatura y  
Radiación

Circuito equivalente de la  
célula

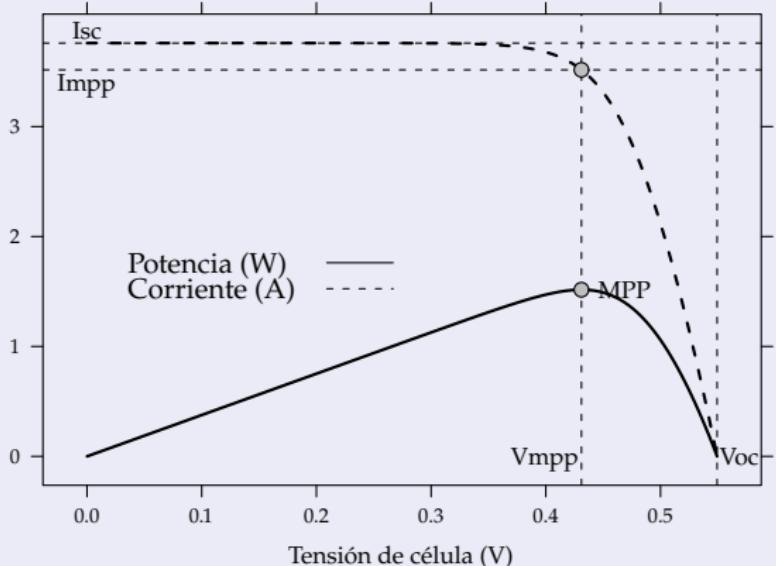
Cálculo del MPP

Fabricación

# Punto de máxima potencia

$$V = V_{mpp}$$

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$$



Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
<http://oscarperpinan.github.io>

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Curva IV y Puntos  
Característicos

Influencia de Temperatura y  
Radiación

Círcuito equivalente de la  
célula

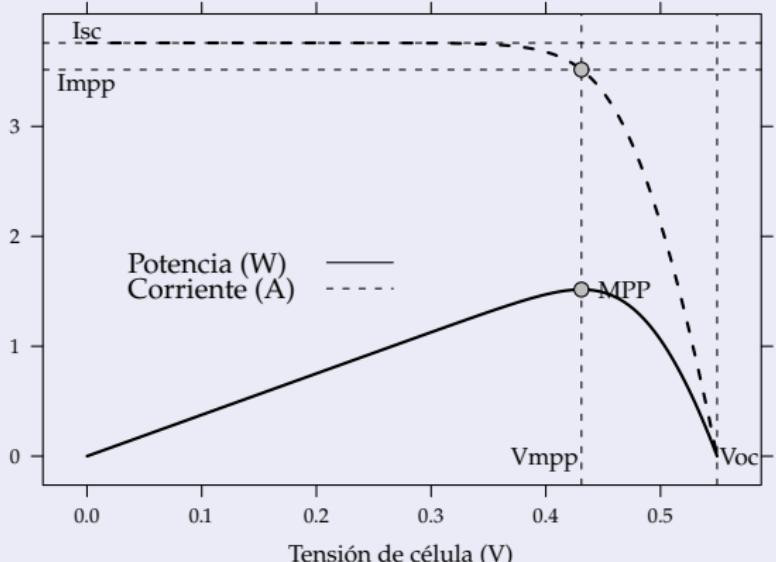
Cálculo del MPP

Fabricación

# Punto de máxima potencia

$$V_{mpp} < V < V_{oc}$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}$$



Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
<http://oscarperpinan.github.io>

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Curva IV y Puntos  
Característicos

Influencia de Temperatura y  
Radiación

Circuito equivalente de la  
célula

Cálculo del MPP

Fabricación

# Factor de forma y Eficiencia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

## ► Factor de Forma

$$FF = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{I_{sc} \cdot V_{oc}}$$

$$P_{mpp} = FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}$$

## ► Eficiencia

$$\eta = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{P_L}$$

$$\eta = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{A \cdot G}$$

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Curva IV y Puntos  
Característicos

Influencia de Temperatura y  
Radiación

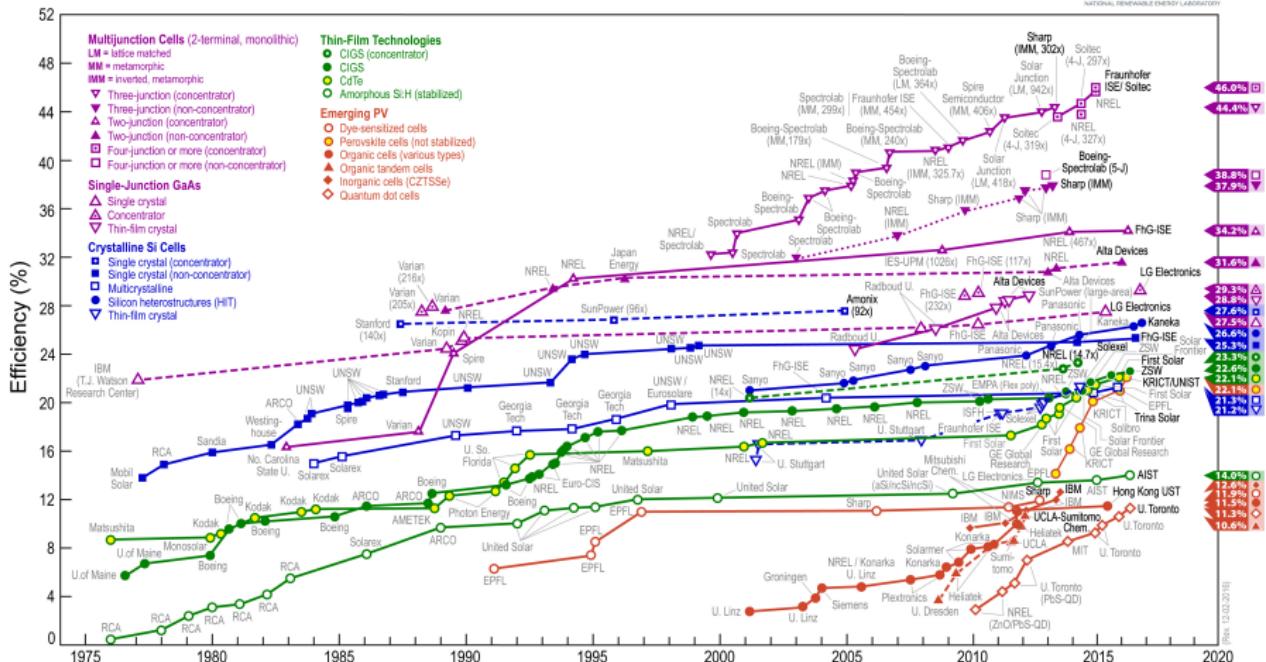
Circuito equivalente de la  
célula

Cálculo del MPP

Fabricación

# Eficiencia de células

## Best Research-Cell Efficiencies



# Teoría de Semiconductores

## Unión P-N iluminada

### Funcionamiento de una célula solar

Curva IV y Puntos Característicos

Influencia de Temperatura y Radiación

Circuito equivalente de la célula

Cálculo del MPP

## Fabricación

# Radiación

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Curva IV y Puntos  
Característicos

Influencia de Temperatura y  
Radiación

Circuito equivalente de la  
célula

Cálculo del MPP

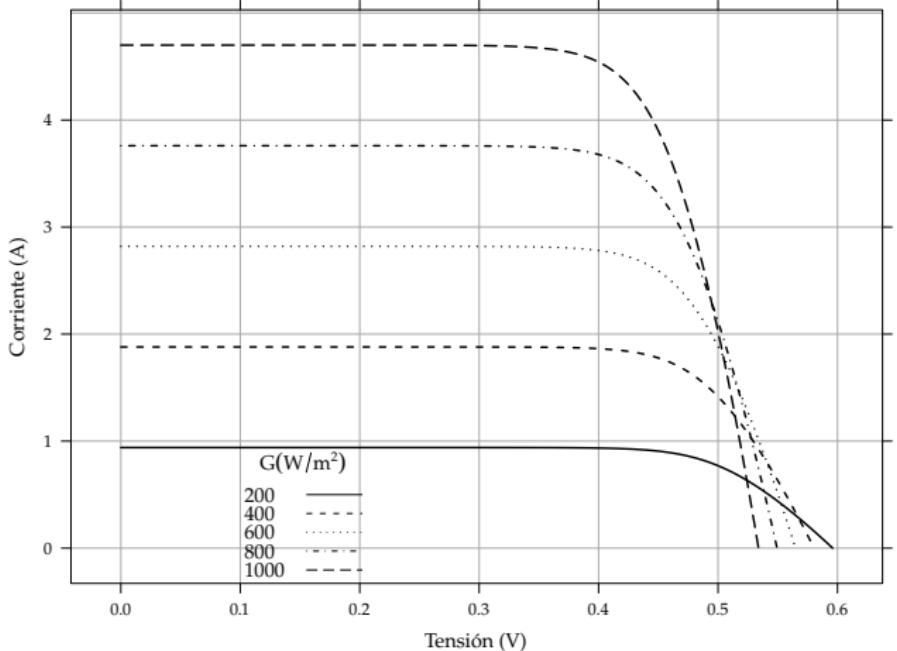
Fabricación

- ▶ **Fotocorriente proporcional a intensidad de radiación**
- ▶ Relación logarítmica con tensión de circuito abierto:  
$$V_{oc} = V_{oc1} + \frac{mkT}{e} \cdot \ln(X)$$
- ▶ El factor de forma aumenta ligeramente
- ▶ La eficiencia crece de forma logarítmica hasta determinado nivel.

# Influencia de la Radiación

Célula Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)



Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Curva IV y Puntos  
Característicos

Influencia de Temperatura y  
Radiación

Círculo equivalente de la  
célula

Cálculo del MPP

Fabricación

# Temperatura

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Curva IV y Puntos  
Característicos

Influencia de Temperatura y  
Radiación

Círculo equivalente de la  
célula

Cálculo del MPP

Fabricación

- ▶ Se estrecha el salto entre banda de valencia y conducción: aumenta *ligeramente* la fotocorriente
- ▶ **Disminuye linealmente la tensión de circuito abierto:**  $dV_{oc}/dT_c = -2,3 \text{ mV } ^\circ\text{C}^{-1}$
- ▶ Disminuye el factor de forma y la eficiencia:  
 $d\eta/dT_c = -0,4 \% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

# Influencia de Temperatura

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

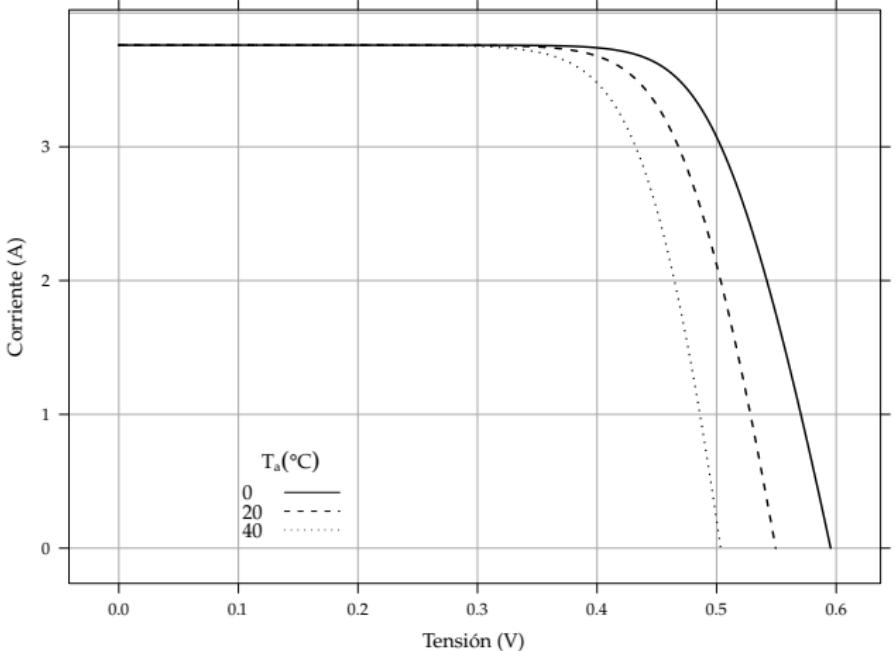
Curva IV y Puntos  
Característicos

Influencia de Temperatura y  
Radiación

Círcuito equivalente de la  
célula

Cálculo del MPP

Fabricación



# Condiciones Estándar de Medida

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

- ▶ Irradiancia:  $G^* = 1000 \text{ W m}^{-2}$  con incidencia normal.
- ▶ Temperatura de célula:  $T_c^* = 25^\circ\text{C}$ .
- ▶ Masa de aire:  $AM = 1.5$

$$P_{mpp}^* = I_{mpp}^* \cdot V_{mpp}^*$$

$$\eta^* = \frac{I_{mpp}^* \cdot V_{mpp}^*}{A \cdot G^*}$$

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Curva IV y Puntos  
Característicos

Influencia de Temperatura y  
Radiación

Círcuito equivalente de la  
célula

Cálculo del MPP

Fabricación

# Teoría de Semiconductores

## Unión P-N iluminada

### Funcionamiento de una célula solar

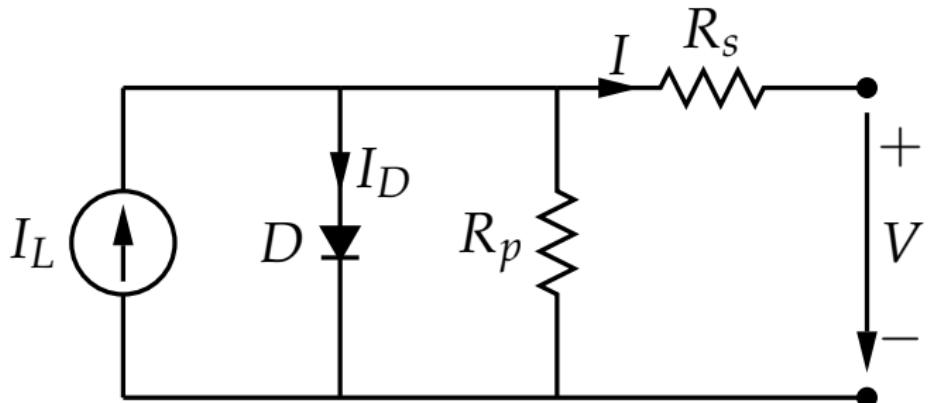
Curva IV y Puntos Característicos

Influencia de Temperatura y Radiación

Círculo equivalente de la célula

Cálculo del MPP

## Fabricación



► Ecuación general

$$I = I_L - I_0 \cdot [\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{m \cdot V_T}\right) - 1] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p}$$

► Ecuación simplificada

$$I = I_{sc} \left[ 1 - \exp\left(\frac{V - V_{oc} + I \cdot R_s}{m \cdot V_t}\right) \right]$$

# Resistencia Serie: Curva IV

- ▶ Resistencia de contactos metálicos con el semiconductor
- ▶ Resistencia de capas semiconductoras
- ▶ Resistencia de malla de metalización

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

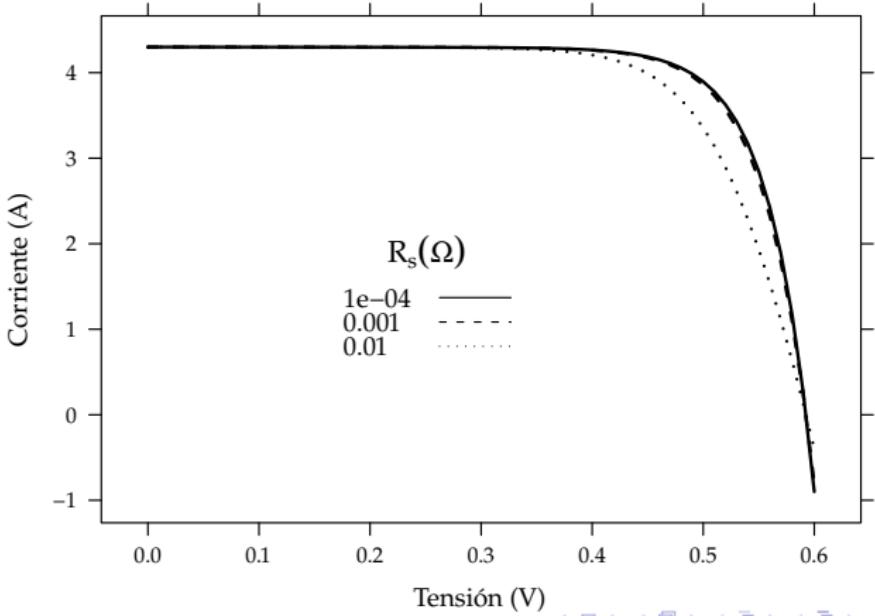
Curva IV y Puntos  
Característicos

Influencia de Temperatura y  
Radiación

Círculo equivalente de la  
célula

Cálculo del MPP

Fabricación

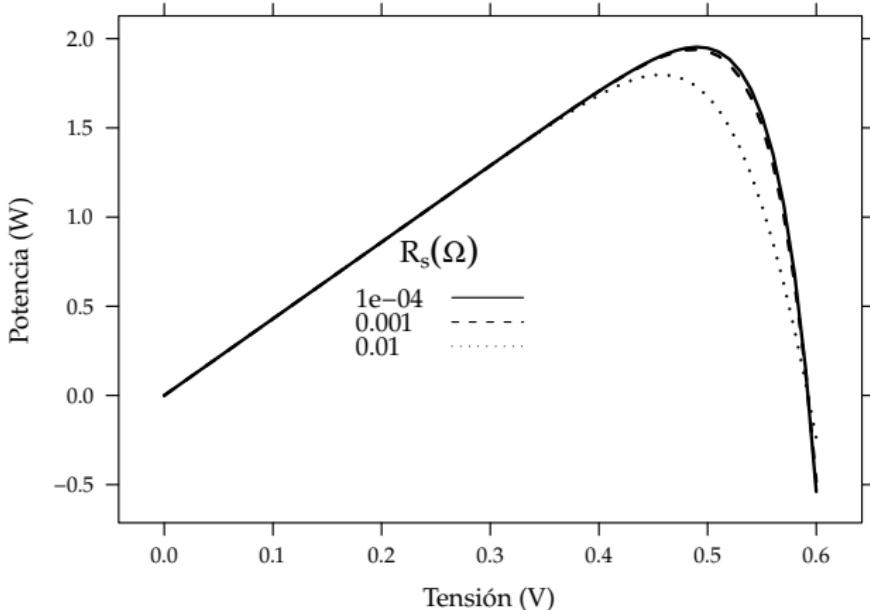


## Resistencia Serie: Curva PV

## Célula Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

- ▶ Resistencia de contactos metálicos con el semiconductor
  - ▶ Resistencia de capas semiconductoras
  - ▶ Resistencia de malla de metalización



# Resistencia paralelo: Curva IV

- ▶ Fugas de corriente en bordes de célula
- ▶ Cortocircuitos metálicos
- ▶ Caminos de difusión en fronteras de grano

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

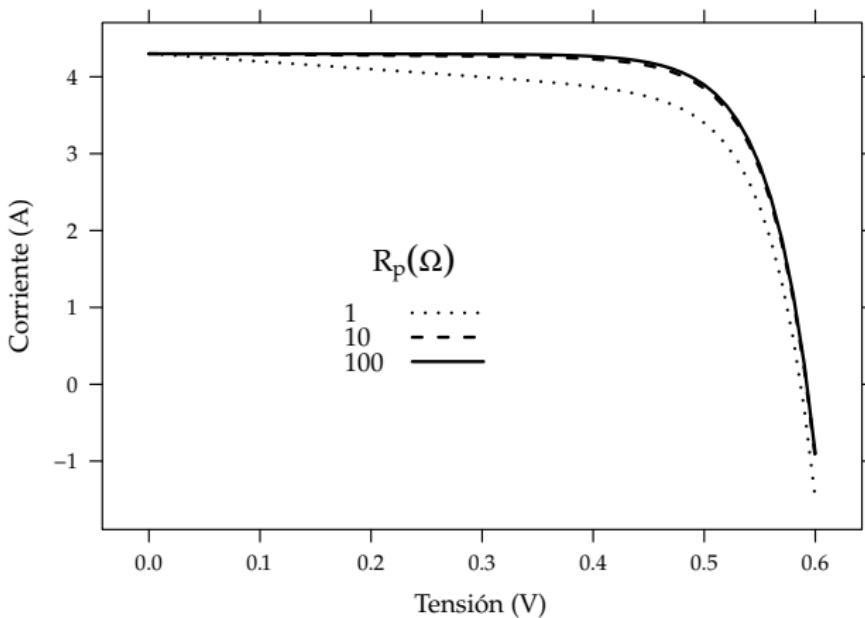
Curva IV y Puntos  
Característicos

Influencia de Temperatura y  
Radiación

Círculo equivalente de la  
célula

Cálculo del MPP

Fabricación



# Resistencia paralelo: Curva PV

- ▶ Fugas de corriente en bordes de célula
- ▶ Cortocircuitos metálicos
- ▶ Caminos de difusión en fronteras de grano

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

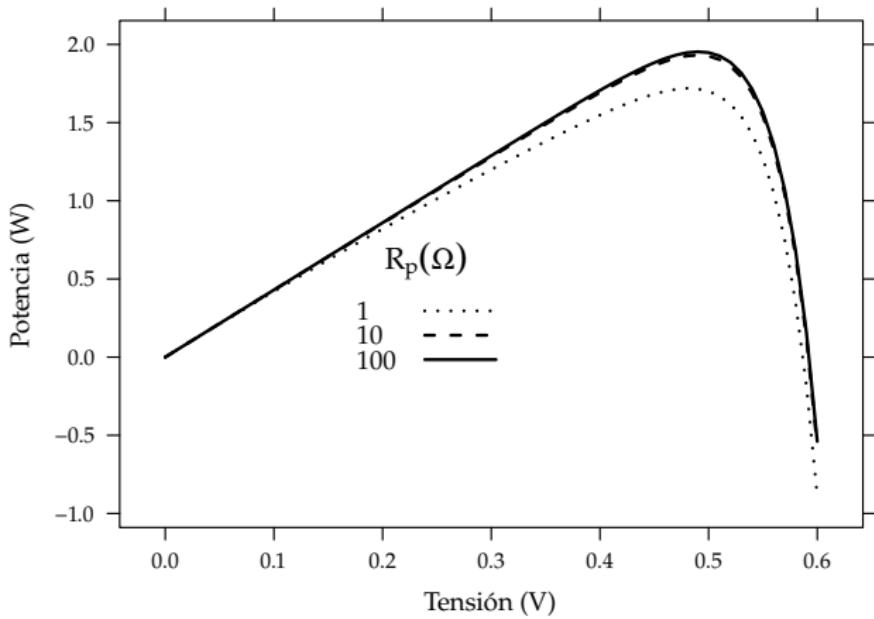
Curva IV y Puntos  
Característicos

Influencia de Temperatura y  
Radiación

Círculo equivalente de la  
célula

Cálculo del MPP

Fabricación



# Teoría de Semiconductores

## Unión P-N iluminada

### Funcionamiento de una célula solar

Curva IV y Puntos Característicos

Influencia de Temperatura y Radiación

Círculo equivalente de la célula

Cálculo del MPP

## Fabricación

# Método de J.M. Ruiz

## ► Normalización

$$v = \frac{V}{V_{oc}}$$

$$i = \frac{I}{I_{sc}}$$

## ► MPP

$$v_{mpp} = \frac{V_{mpp}}{V_{oc}}$$

$$i_{mpp} = \frac{I_{mpp}}{I_{sc}}$$

$$p_{mpp} = FF$$

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
<http://oscarperpinan.github.io>

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Curva IV y Puntos  
Característicos

Influencia de Temperatura y  
Radiación

Círculo equivalente de la  
célula

Cálculo del MPP

Fabricación

# Método de J.M. Ruiz

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

## ► Resistencia Serie y FF

$$r_s = \frac{R_s}{(V_{oc}/I_{sc})}$$

$$ff = v_{mpp} \cdot i_{mpp} = FF$$

## ► Tensión térmica

$$k_{oc} = \frac{V_{oc}}{V_t}$$

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Curva IV y Puntos  
Característicos

Influencia de Temperatura y  
Radiación

Circuito equivalente de la  
célula

Cálculo del MPP

Fabricación

# Método de J.M. Ruiz

Célula Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

## ► Aproximación para MPP

$$i_{mpp} = 1 - \frac{D_M}{k_{oc}}$$

$$v_{mpp} = 1 - \frac{\ln(k_{oc}/D_M)}{k_{oc}} - r_s \cdot i_{mpp}$$

$$D_M = D_{M0} + 2 \cdot r_s \cdot D_{M0}^2$$

$$D_{M0} = \frac{k_{oc} - 1}{k_{oc} - \ln k_{oc}}$$

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Curva IV y Puntos  
Característicos

Influencia de Temperatura y  
Radiación

Círculo equivalente de la  
célula

Cálculo del MPP

Fabricación

# Método de J.M. Ruiz

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

## ► Itinerario

- ▶ Obtener los valores de  $I_{sc}$  y  $V_{oc}$  en las condiciones de temperatura y radiación deseadas
- ▶ Obtener resistencia serie (supondremos  $R_s = R_s^*$ )

$$R_s^* = \frac{V_{oc}^* - V_{mpp}^* + m \cdot V_t \cdot \ln\left(1 - \frac{I_{mpp}^*}{I_{sc}^*}\right)}{I_{mpp}^*}$$

donde se debe emplear el valor de  $V_t$  para  $T_c = 25^\circ\text{C}$ .

- ▶ Calcular  $r_s$  y  $k_{oc}$ , y con ellos  $D_{M0}$  y  $D_M$ .
- ▶ Calcular  $i_{mpp}$  y a continuación  $v_{mpp}$ .
- ▶ Deshacer la normalización para obtener  $I_{mpp}$  y  $V_{mpp}$ .

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Curva IV y Puntos  
Característicos

Influencia de Temperatura y  
Radiación

Círcuito equivalente de la  
célula

Cálculo del MPP

Fabricación

# Simplificado: Factor de Forma Constante

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Curva IV y Puntos  
Característicos

Influencia de Temperatura y  
Radiación

Círculo equivalente de la  
célula

Cálculo del MPP

Fabricación

$$FF = FF^*$$

$$\frac{I_{mpp}}{I_{sc}} = \frac{I_{mpp}^*}{I_{sc}^*}$$

$$\frac{V_{mpp}}{V_{oc}} = \frac{V_{mpp}^*}{V_{oc}^*}$$

# Ejercicio de Cálculo

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Curva IV y Puntos  
Característicos

Influencia de Temperatura y  
Radiación

Círcuito equivalente de la  
célula

Cálculo del MPP

Fabricación

De una célula de  $100 \text{ cm}^2$  y  $I_{sc}^* = 3 \text{ A}$ ,  $I_{mpp}^* = 2.7 \text{ A}$ ,  
 $V_{oc}^* = 0.6 \text{ V}$ ,  $V_{mpp}^* = 0.48 \text{ V}$ , calcular suponiendo factor de  
forma constante:

- ▶  $P_{mpp}^*$ ,  $FF^*$ ,  $\eta^*$
- ▶  $I_{mpp}$ ,  $V_{mpp}$  cuando  $T_c = 60^\circ\text{C}$  y  $G = 800 \text{ W/m}^2$ .

Teoría de Semiconductores

Unión P-N iluminada

Funcionamiento de una célula solar

Fabricación

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación



[https://www.youtube.com/watch?v=fZ1SC-vUe\\_I](https://www.youtube.com/watch?v=fZ1SC-vUe_I)

# Purificación de silicio

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación

- ▶ El silicio puede extraerse de la cuarzita obteniendo Silicio de grado metalúrgico (98% pureza).
- ▶ Para la industria de la electrónica se necesita silicio de grado electrónico (nivel de impureza por debajo de  $10^{-9}$ , 9 nueves).
- ▶ Para las células solares puede utilizarse silicio de grado solar (nivel de impureza algo mayor,  $10^{-5}$ , 5 nueves).
- ▶ Al mezclar silicio con ácido clorhídrico se produce triclorosilano, que es destilado para eliminar impurezas.
- ▶ Al unir silano de cloro con hidrógeno se obtiene de vuelta silicio, válido para células policristalinas (varios cristales en cada célula)

# Formación de obleas

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

- ▶ Para obtener mayor pureza se emplea el silicio monocristalino (un sólo cristal) obtenido mediante el proceso de Czochralski o similar (se utiliza una semilla de cristal para crecer silicio a muy alta temperatura).
- ▶ El lingote resultante debe ser cortado en obleas de  $200 - 500 \mu m$ .
- ▶ Las obleas son sometidas a limpieza para eliminar impurezas por el cortado.
- ▶ A continuación, son dopadas con Fósforo y Boro para crear la unión p-n.
- ▶ Se limpian los bordes para evitar la formación de cortocircuitos entre las zonas p y n.

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación

# Formación de células

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

- ▶ Se añaden los contactos posterior (alto recubrimiento) y anterior (optimización para obtener baja  $R_s$  y poco sombreado) empleando aleaciones de plata y aluminio.
- ▶ Para reducir las pérdidas por reflexión se añade una capa antireflectante con (p.ej) óxido de Titanio (color azulado).
- ▶ Si es posible, se textura la superficie (creación de mini pirámides).

Teoría de  
Semiconductores

Unión P-N  
iluminada

Funcionamiento  
de una célula solar

Fabricación