

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

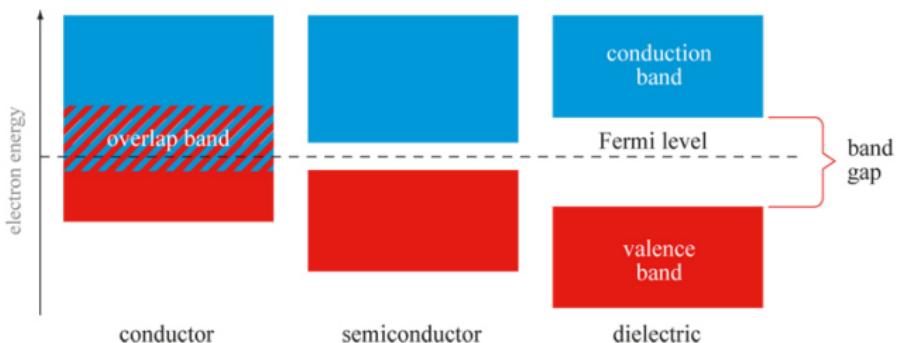
Funcionamiento
de una célula solar

Fabricación

Bandas de energía

Célula Solar

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



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.

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
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.

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} cm^{-3}
- ▶ Aislante: 10 cm^{-3}
- ▶ Semiconducto: 10^{10} 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

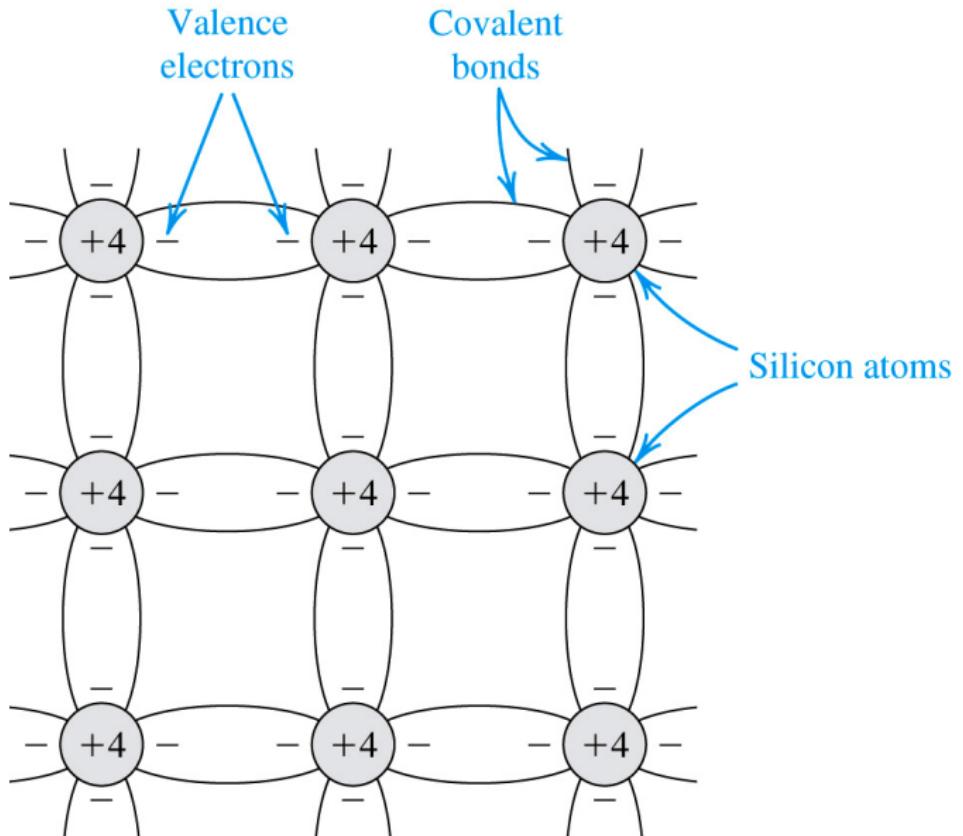
Unión P-N iluminada

Funcionamiento de una célula solar

Fabricación

Red cristalina de Si ($T = 0\text{ K}$)

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

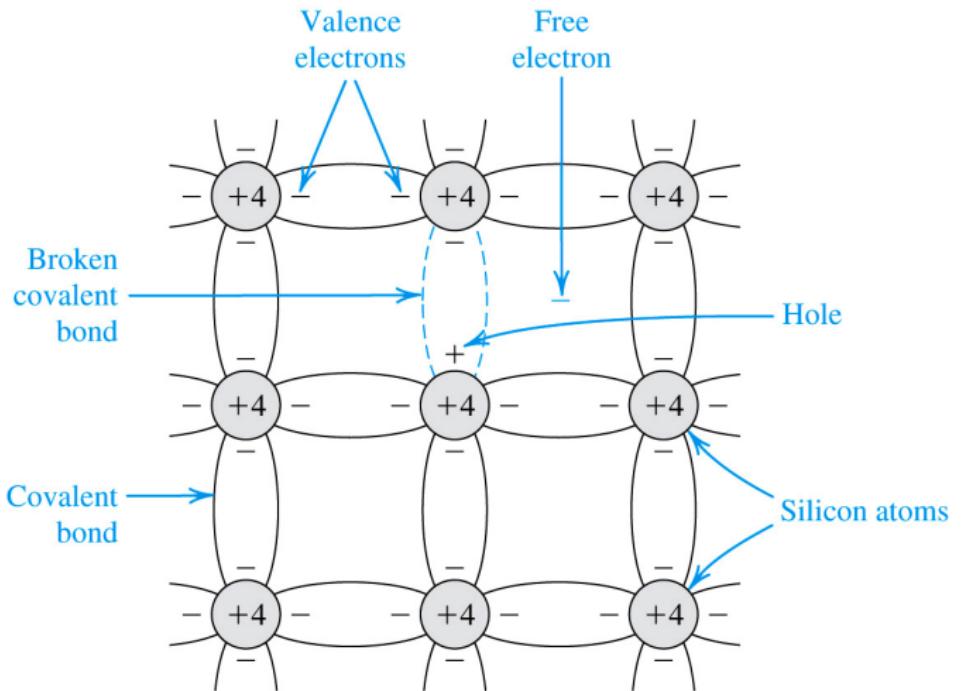
Funcionamiento
de una célula solar

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

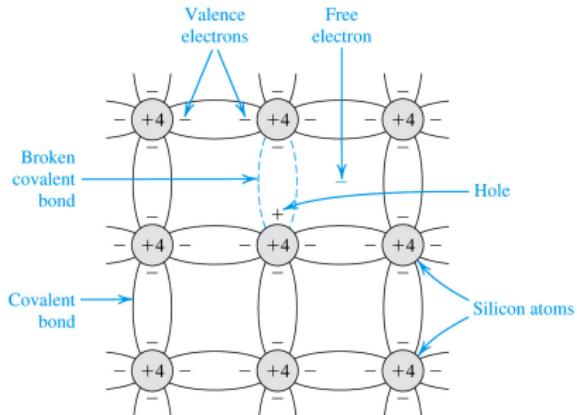
Unión P-N
iluminada

Funcionamiento
de una célula solar

Fabricación

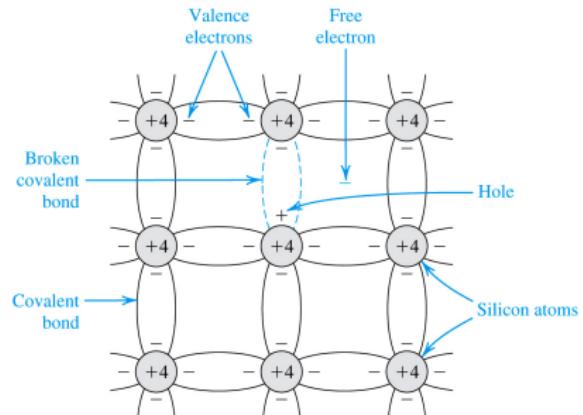
Generación de electrón-hueco

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



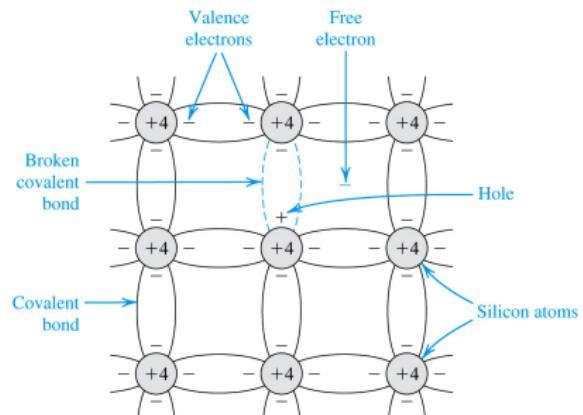
Generación de electrón-hueco

- ▶ 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.



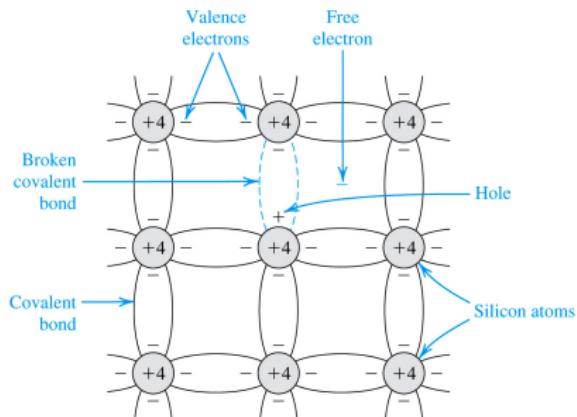
Generación de electrón-hueco

- ▶ 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).



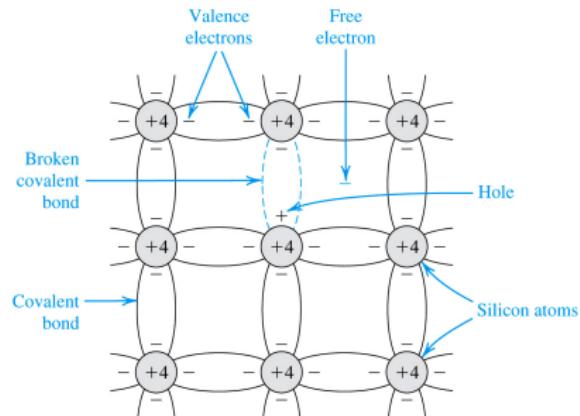
Recombinación de un par electrón-hueco

- 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

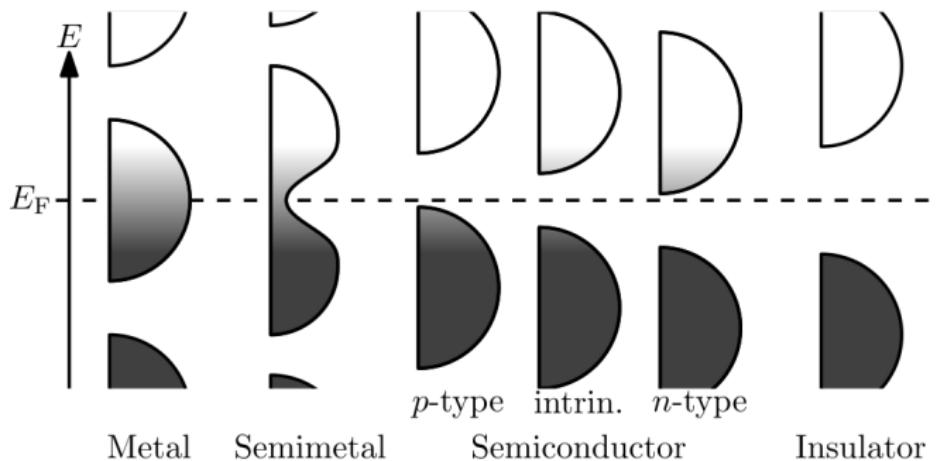
Unión P-N iluminada

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

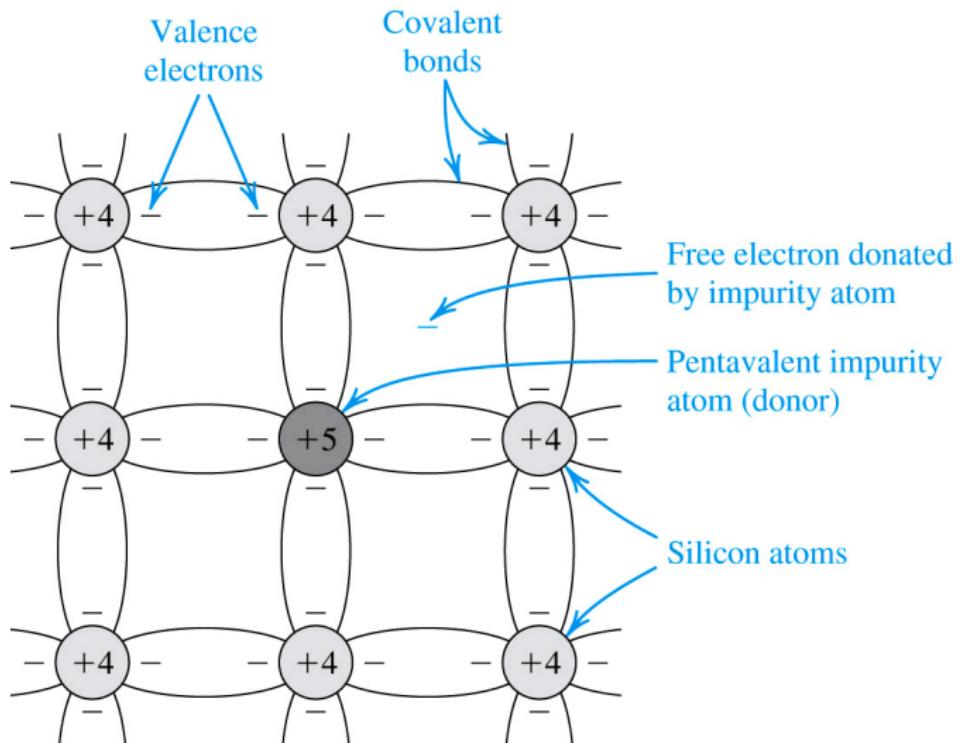
Unión p-n

Diodo

Unión P-N
iluminada

Funcionamiento
de una célula solar

Fabricación



Teoría de
Semiconductores

Conducción eléctrica

Semiconductores

Dopaje de semiconductores

Unión p-n

Diodo

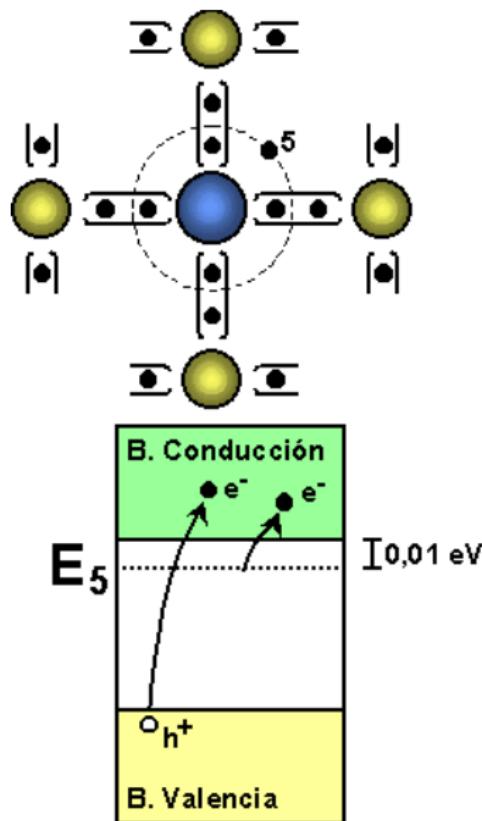
Unión P-N
iluminada

Funcionamiento
de una célula solar

Fabricación

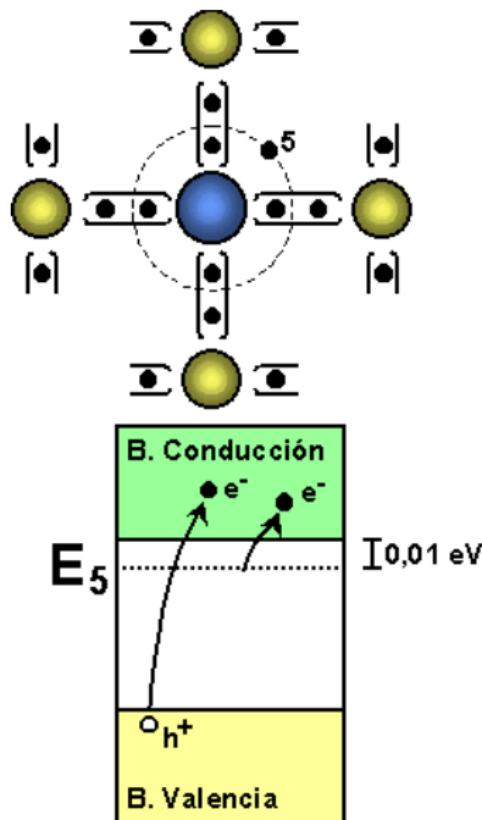
Tipo n

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



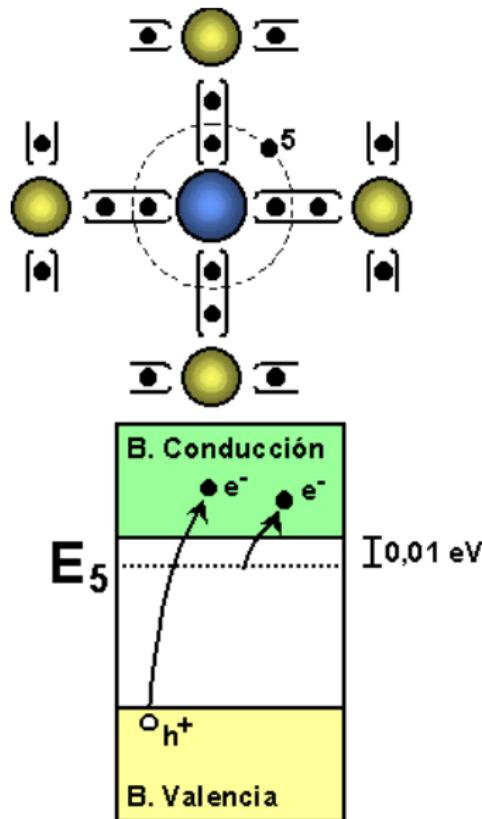
Tipo n

- ▶ 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.



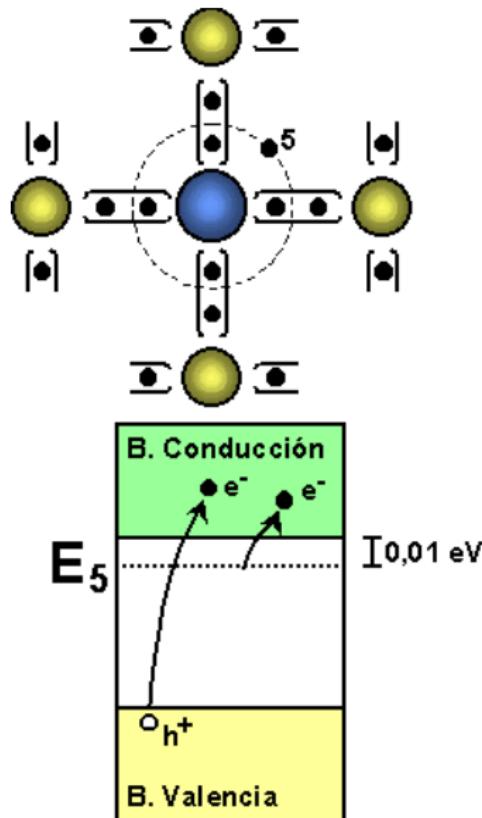
Tipo n

- ▶ 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).



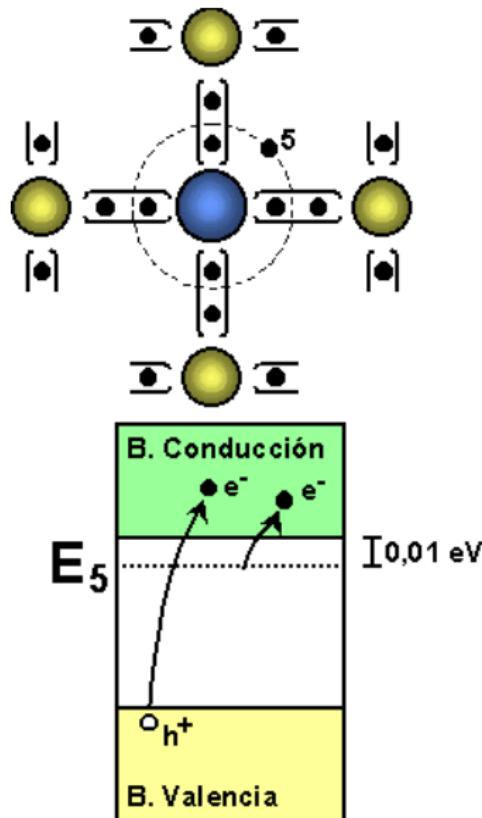
Tipo n

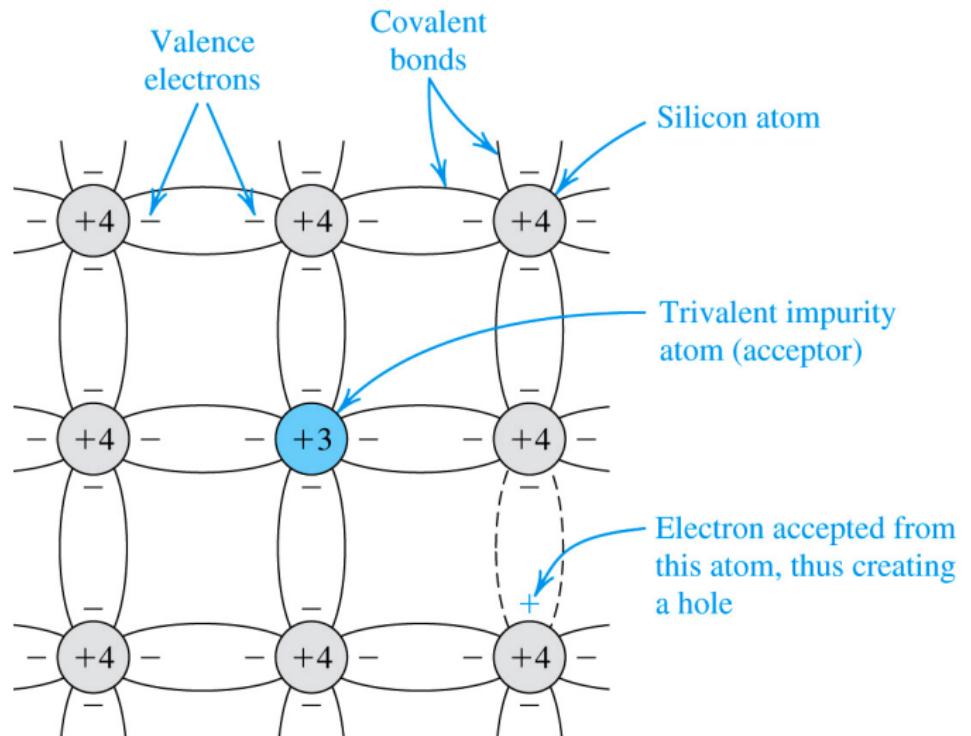
- ▶ Los átomos de **Fósforo** tienen cinco electrones de valencia (uno más que el silicio).
- ▶ Al impurificar un cristal de Silicio con átomos de Fósforo, el quinto electrón no queda bien integrado en la red.
- ▶ La rotura de este enlace se produce con **baja aportación energética** (menor que E_g).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

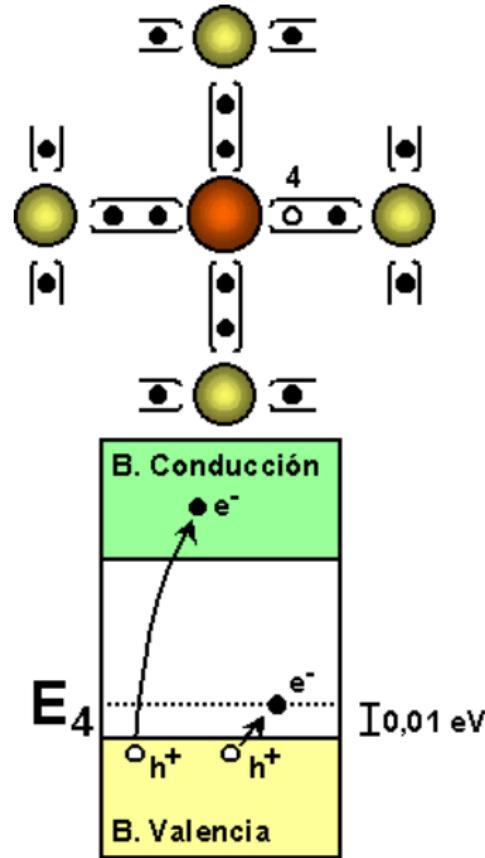
Unión P-N
iluminada

Funcionamiento
de una célula solar

Fabricación

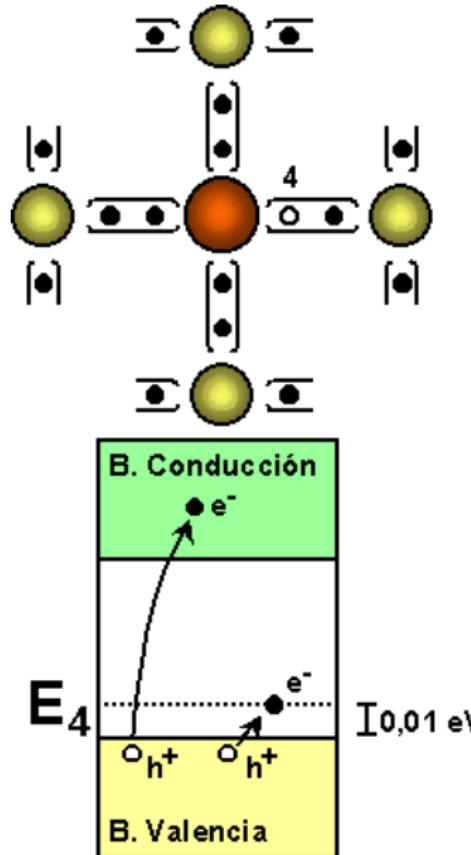
Tipo p

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



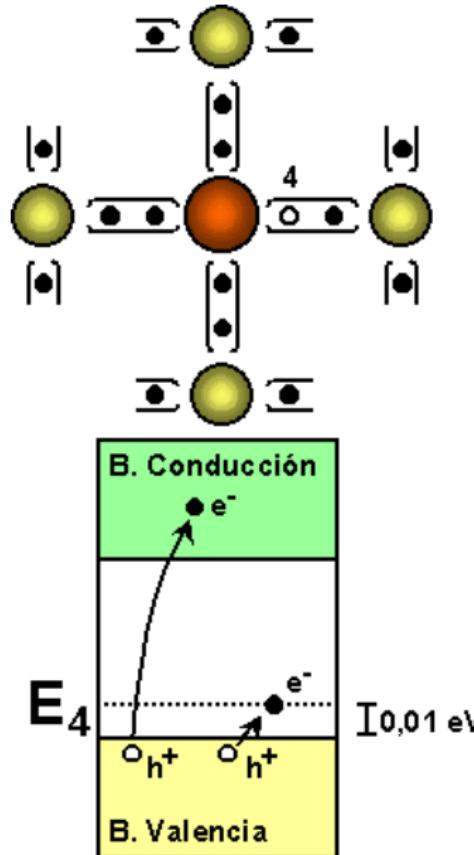
Tipo p

- ▶ 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).



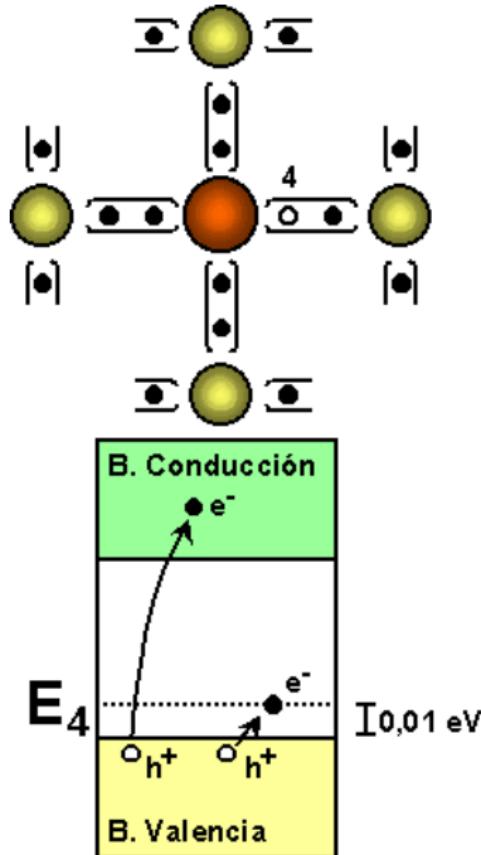
Tipo p

- ▶ 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).



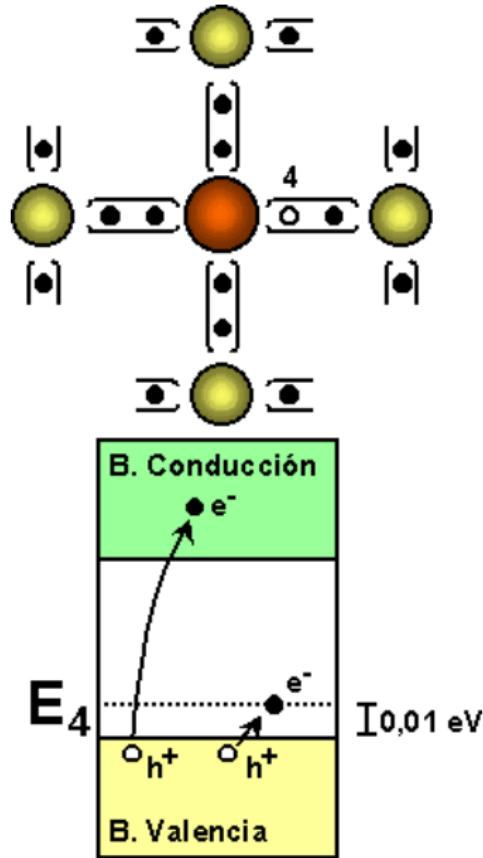
Tipo p

- ▶ 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

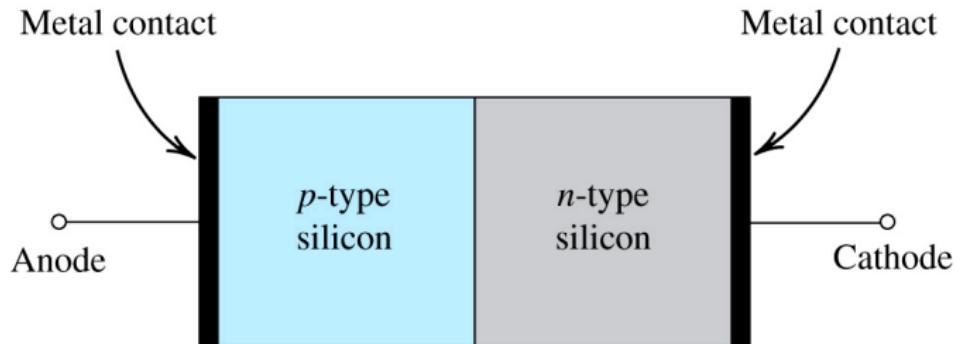
Funcionamiento de una célula solar

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

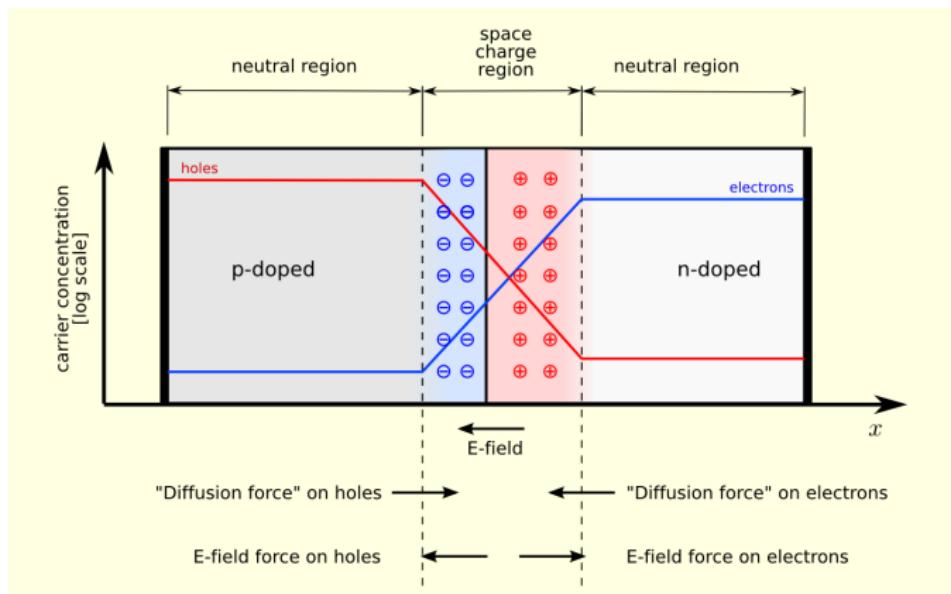
Fabricación

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



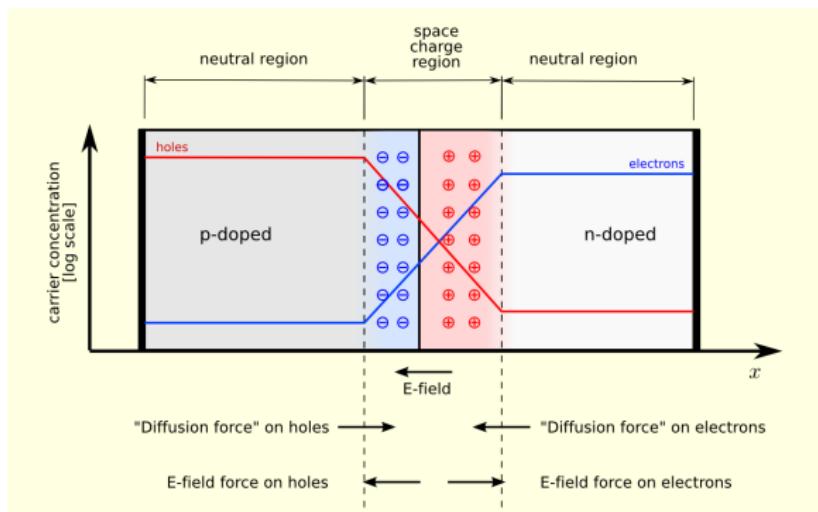
Corriente de Difusión

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.

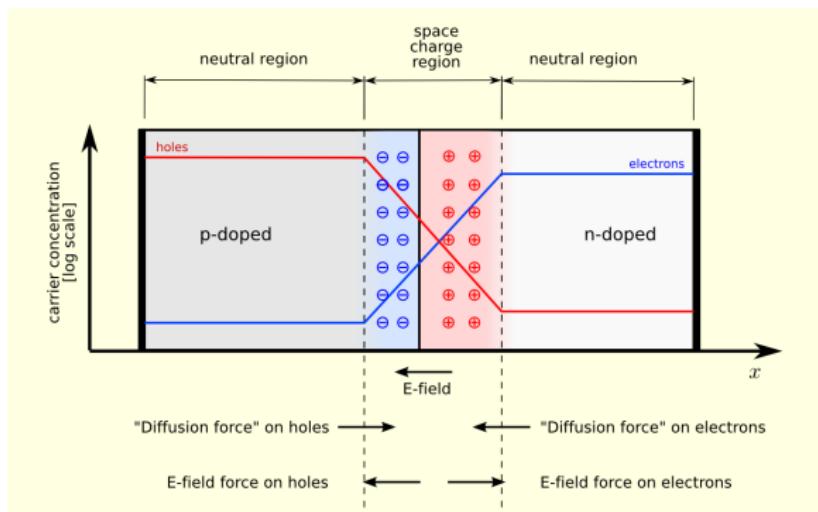


Corriente de Difusión

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

► Difusión de portadores mayoritarios

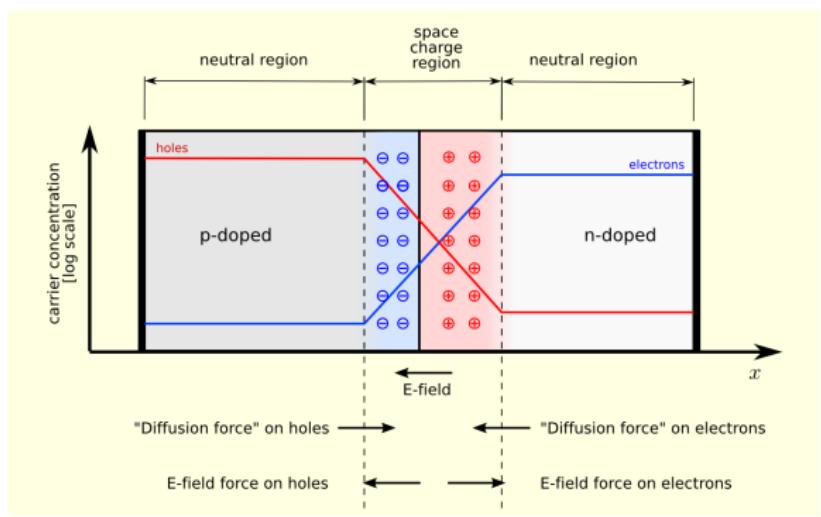
- Movimiento de huecos desde cristal p a cristal n, dejando iones con carga negativa.
 - Movimiento de electrones desde cristal n a cristal p, dejando iones con carga positiva.



Corriente de Arrastre

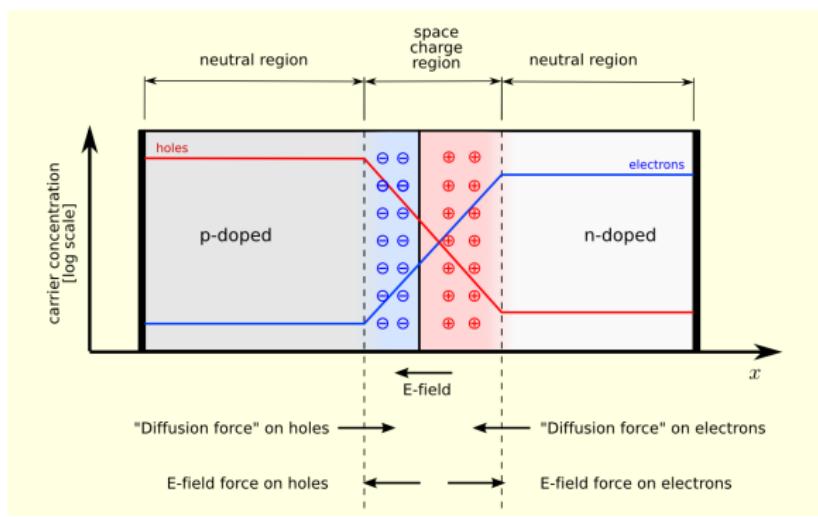
Célula Solar

- ▶ 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** des poblada de portadores y con iones cargados ligados a la red.



Teoría de
Semiconductores

Conducción eléctrica

Semiconductores

Dopaje de semiconductores

Unión p-n

Diodo

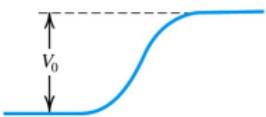
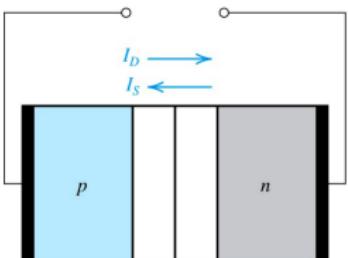
Unión P-N
iluminada

Funcionamiento
de una célula solar

Fabricación

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

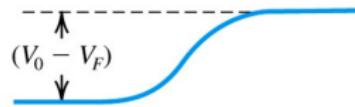
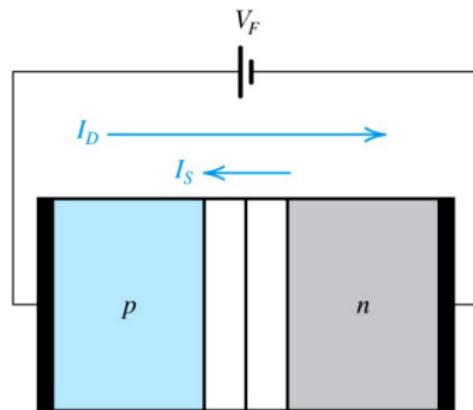
Unión P-N
iluminada

Funcionamiento
de una célula solar

Fabricación

Polarización en directa

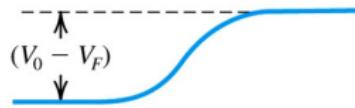
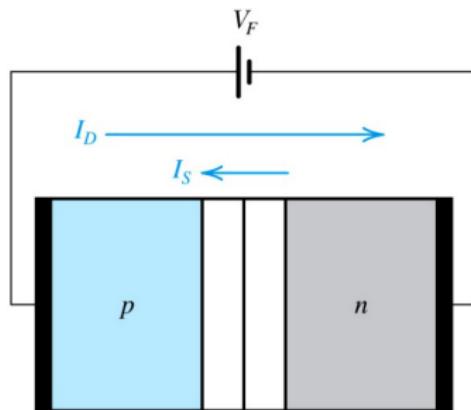
- Para conseguir corriente es necesario romper el equilibrio alcanzado y reducir la barrera de potencial.



(c) Forward Bias

Polarización en directa

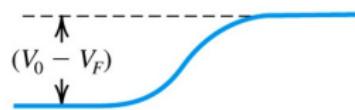
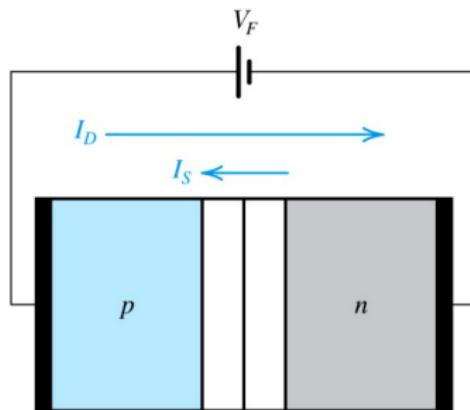
- ▶ Para conseguir corriente es necesario romper el equilibrio alcanzado y reducir la barrera de potencial.
- ▶ Diferencia de potencial con lado p positivo respecto al lado n: unión p-n está polarizada en directa.



(c) Forward Bias

Polarización en directa

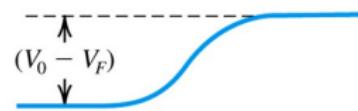
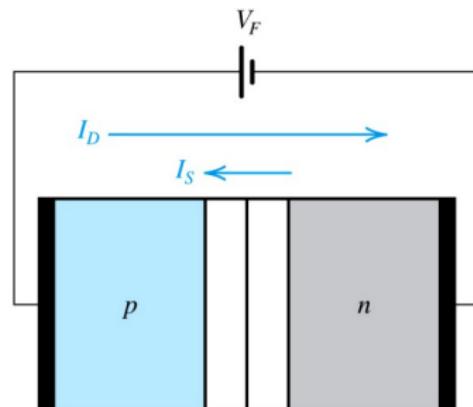
- ▶ Para conseguir corriente es necesario romper el equilibrio alcanzado y reducir la barrera de potencial.
- ▶ Diferencia de potencial con lado p positivo respecto al lado n: unión p-n está polarizada en directa.
- ▶ En estas condiciones se reduce la barrera de potencial y, en consecuencia el valor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



(c) Forward Bias

Polarización en directa

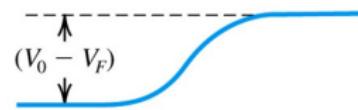
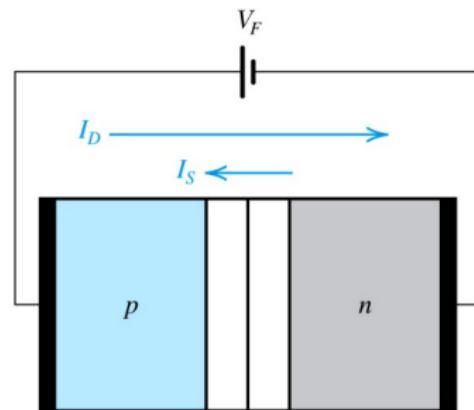
- ▶ Para conseguir corriente es necesario romper el equilibrio alcanzado y reducir la barrera de potencial.
- ▶ Diferencia de potencial con lado p positivo respecto al lado n: unión p-n está polarizada en directa.
- ▶ En estas condiciones se reduce la barrera de potencial y, en consecuencia el valor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

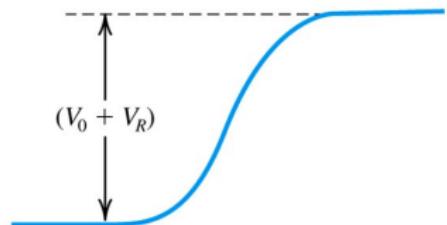
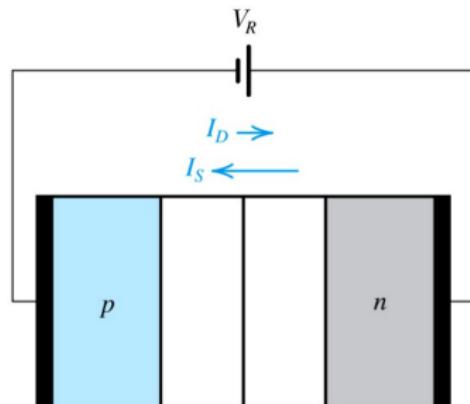
- ▶ Para conseguir corriente es necesario romper el equilibrio alcanzado y reducir la barrera de potencial.
- ▶ Diferencia de potencial con lado p positivo respecto al lado n: unión p-n está polarizada en directa.
- ▶ En estas condiciones se reduce la barrera de potencial y, en consecuencia el valor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

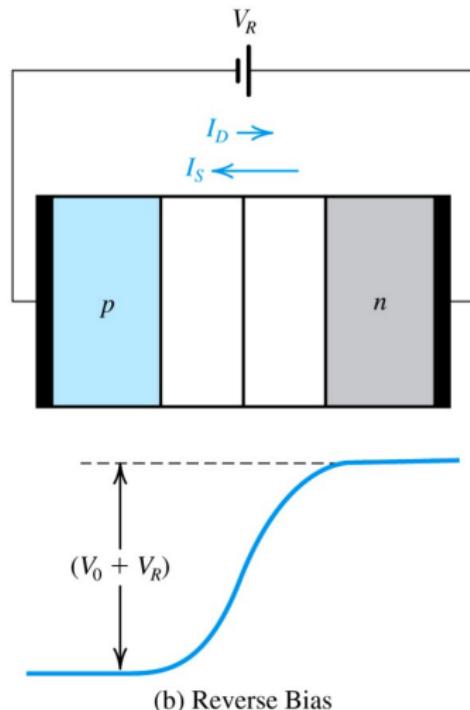
- ▶ Si la diferencia de potencial aplicada consigue que la **zona p esté a menor tensión que la zona n**, la unión queda polarizada en inversa.



(b) Reverse Bias

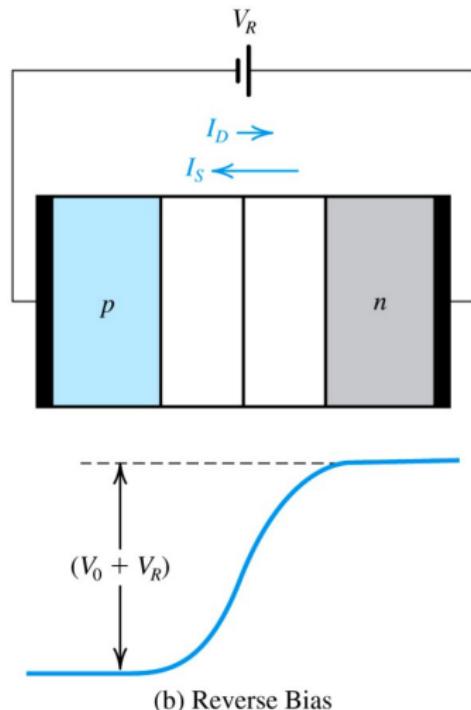
Polarización en inversa

- ▶ 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

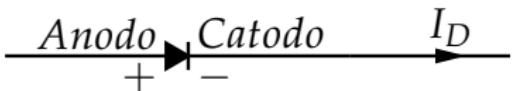
Funcionamiento de una célula solar

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

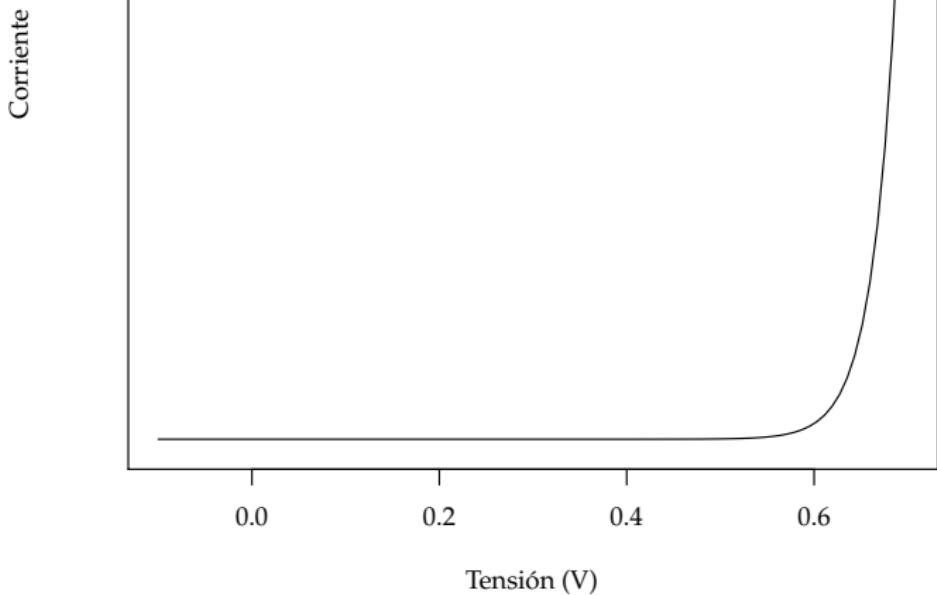
Unión p-n

Diodo

Unión P-N
iluminada

Funcionamiento
de una célula solar

Fabricación



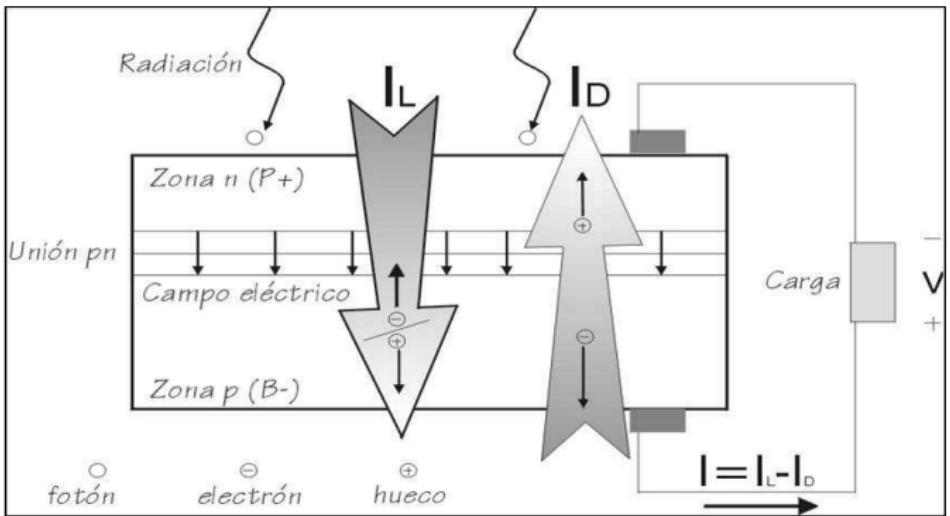
Teoría de Semiconductores

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**

$$I_L < e \cdot A \cdot \int_{E_G}^{\infty} S(E) dE$$

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 $E_f > E_g$:

$$I_L < e \cdot A \cdot \int_{E_G}^{\infty} S(E) dE$$

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**

$$I_L < e \cdot A \cdot \int_{E_G}^{\infty} S(E) dE$$

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**

$$I_L < e \cdot A \cdot \int_{E_G}^{\infty} S(E) dE$$

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**

$$I_L < e \cdot A \cdot \int_{E_G}^{\infty} S(E) dE$$

Teoría de Semiconductores

Unión P-N iluminada

Funcionamiento de una célula solar

Fabricación

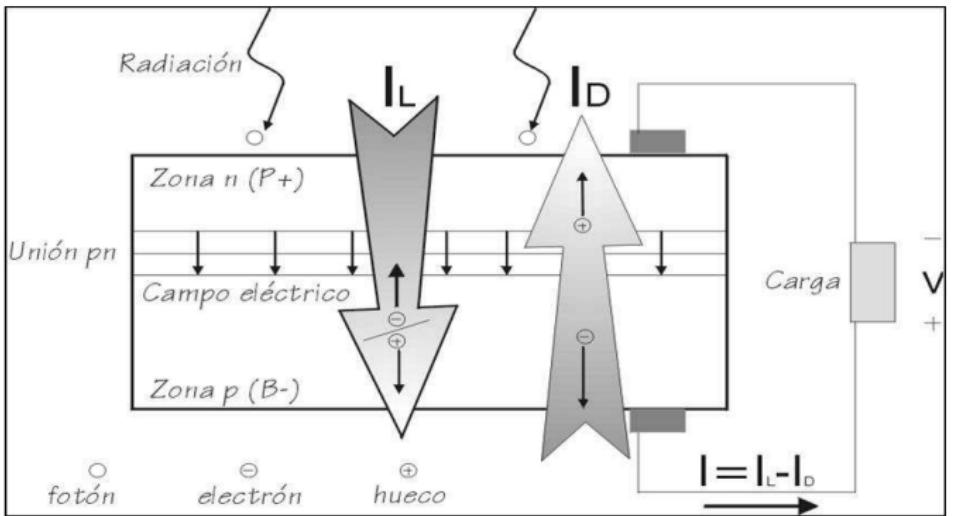
Funcionamiento de una célula solar

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

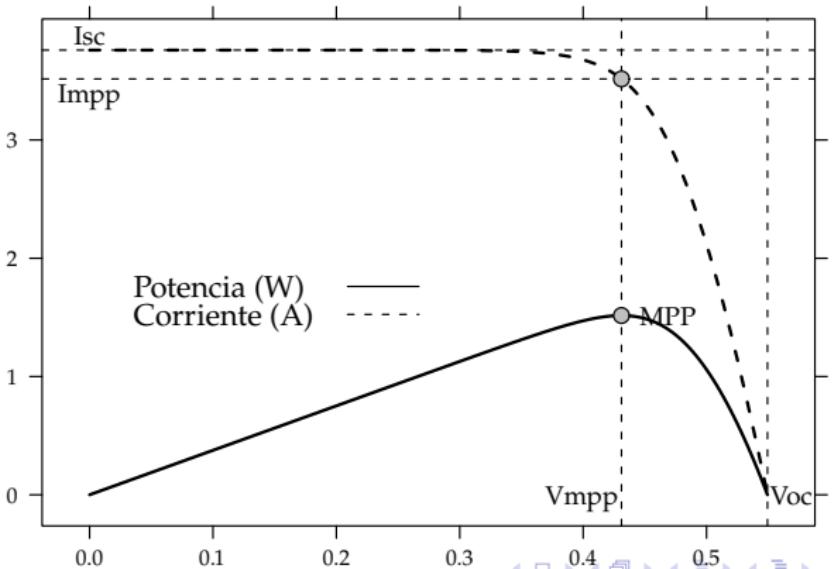
Cálculo del MPP

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 Semicondutores

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](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

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

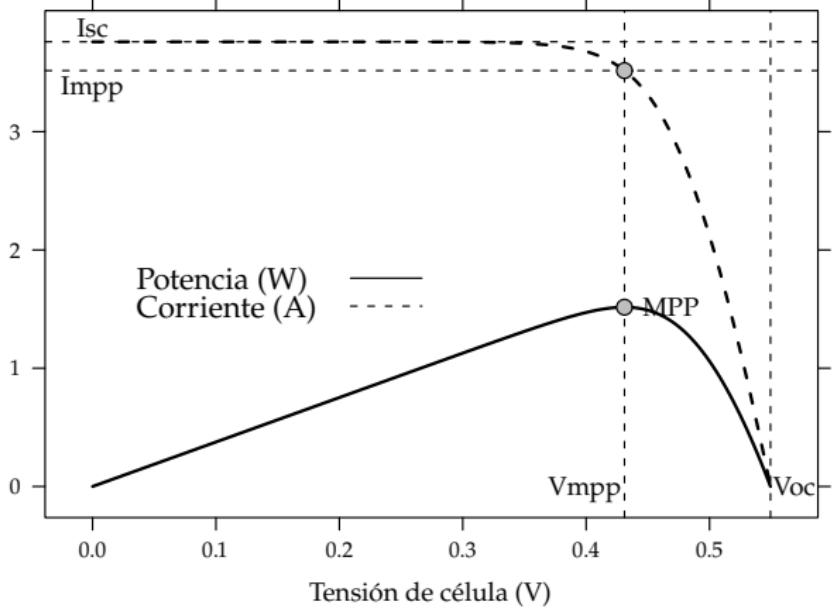
Fabricación

$$\frac{d(I \cdot V)}{dV} = V \cdot \frac{dI(V)}{dV} + I \cdot \frac{dV}{dV} \Rightarrow dP = V \cdot dI + I \cdot dV$$

Punto de máxima potencia

Célula Solar

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



$$V = V_{mpp} : \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$$

$$0 < V < V_{mpp}: \frac{dP}{dV} > 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}$$

$$V_{mpp} < V < V_{oc}: \frac{dP}{dV} < 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}$$

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

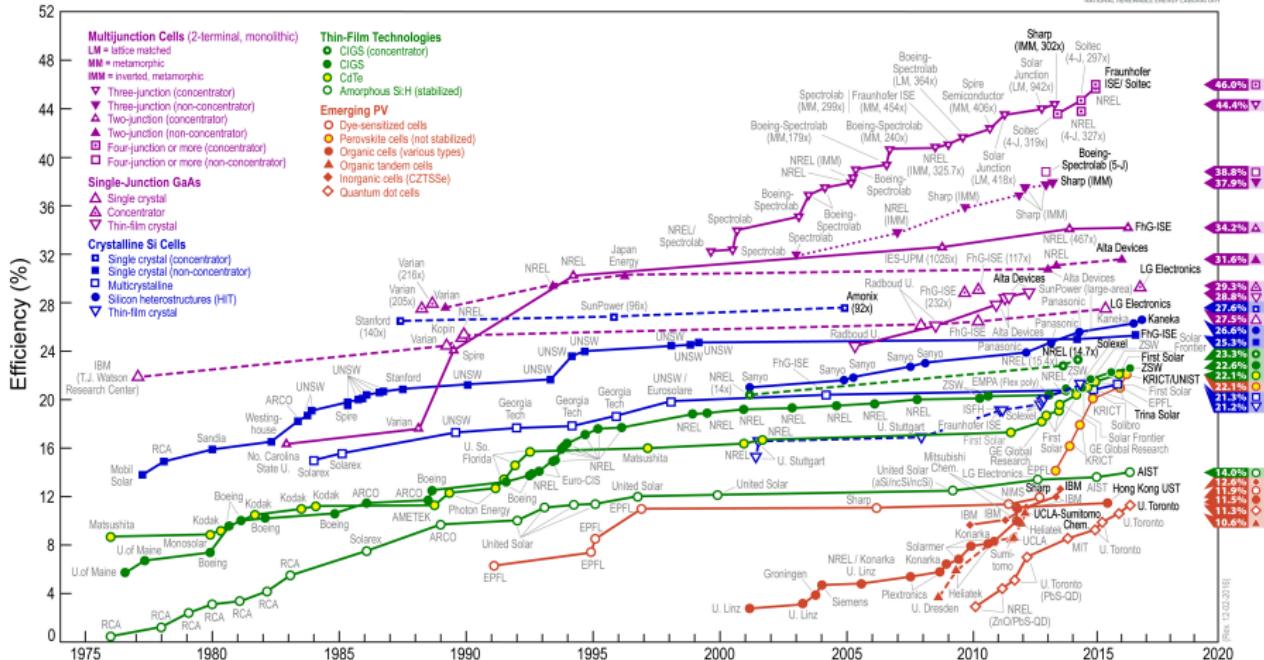
Cálculo del MPP

Fabricación

Eficiencia de células

Best Research-Cell Efficiencies

NREL
NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY



<http://www.nrel.gov/ncpv/>

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

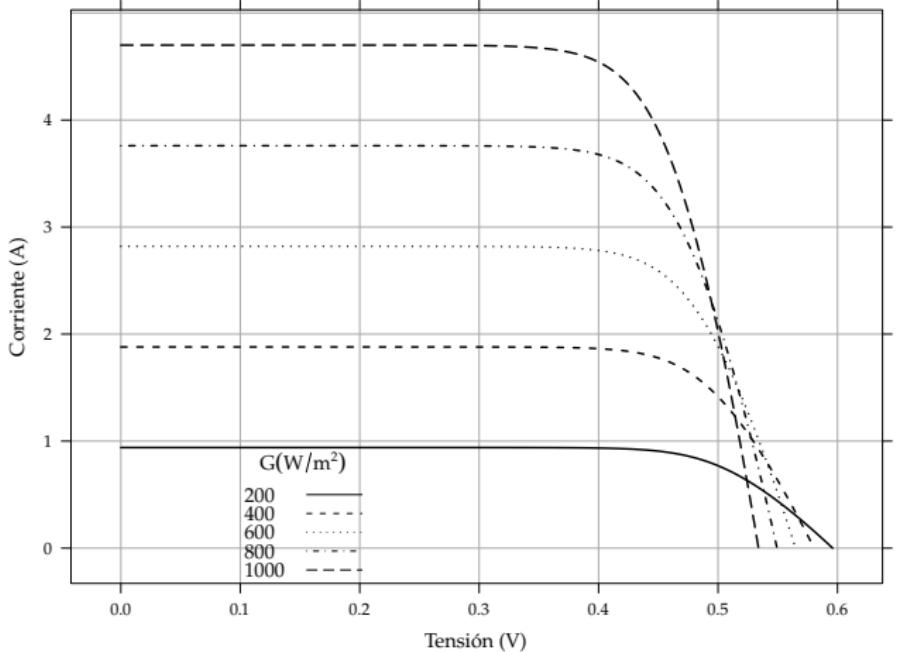
Fabricación

- ▶ **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

Círcuito 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

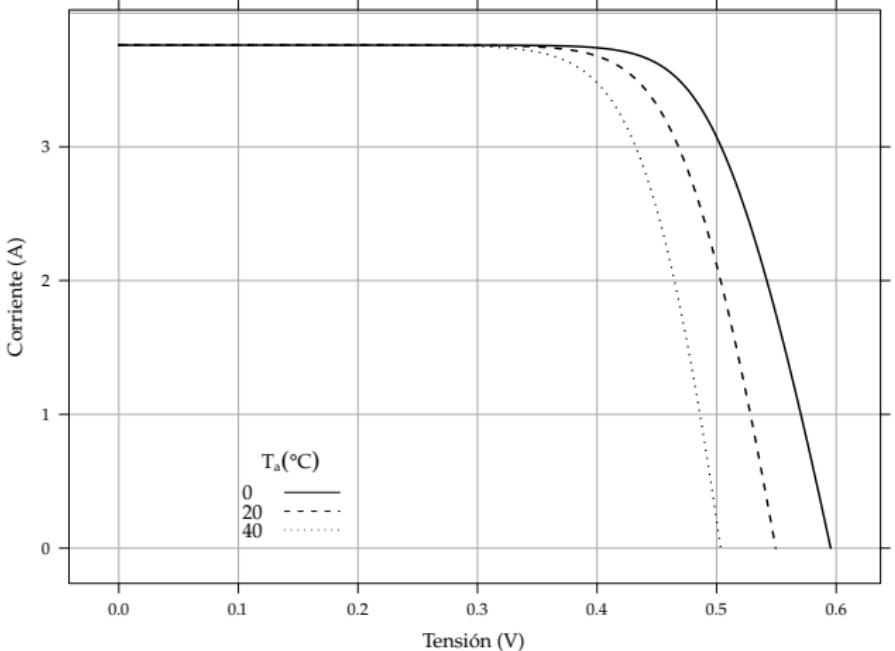
Curva IV y Puntos
Característicos

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

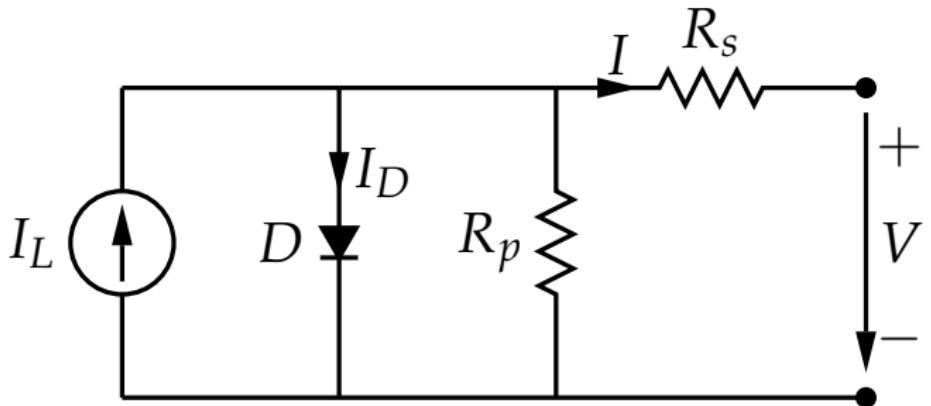
Curva IV y Puntos Característicos

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

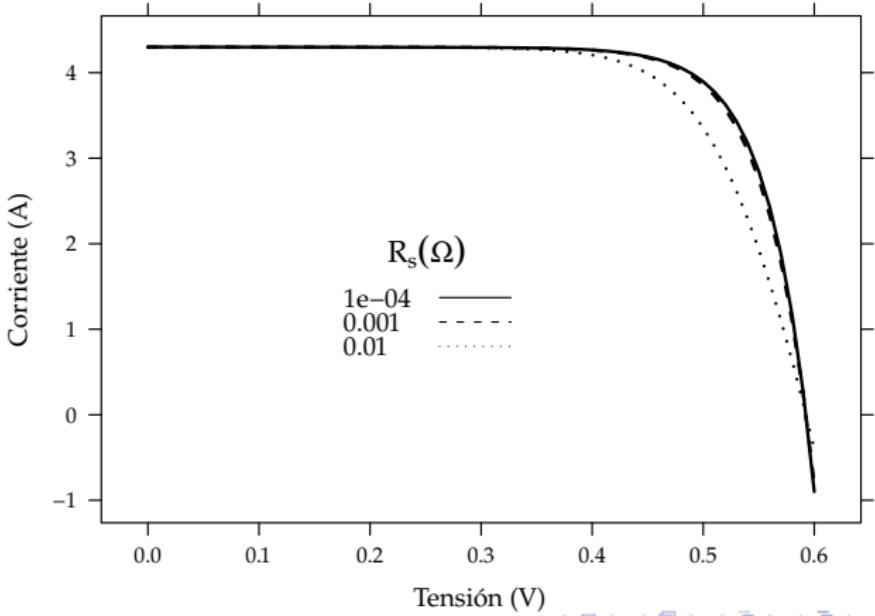
Curva IV y Puntos
Característicos

Influencia de Temperatura y
Radiación

Círculo equivalente de la
célula

Cálculo del MPP

Fabricación

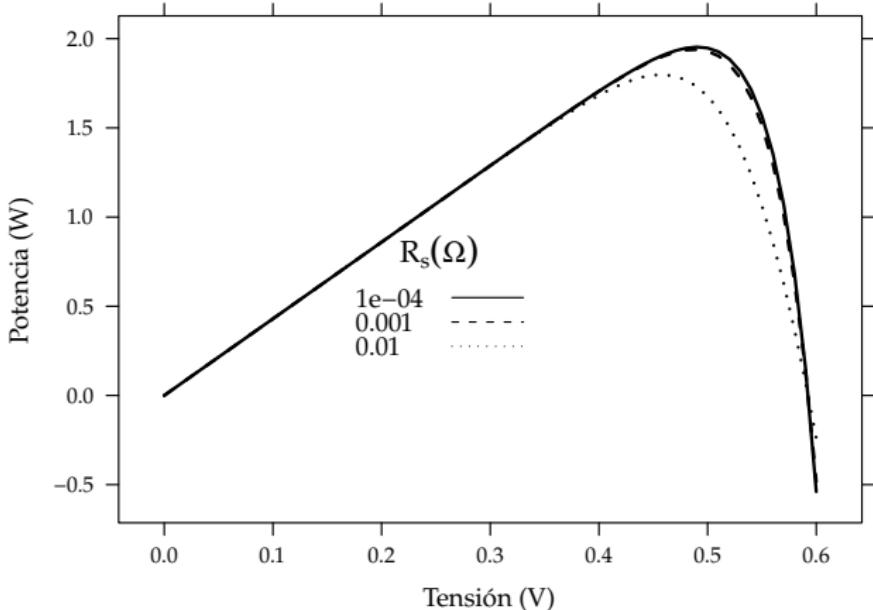


Resistencia Serie: Curva PV

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

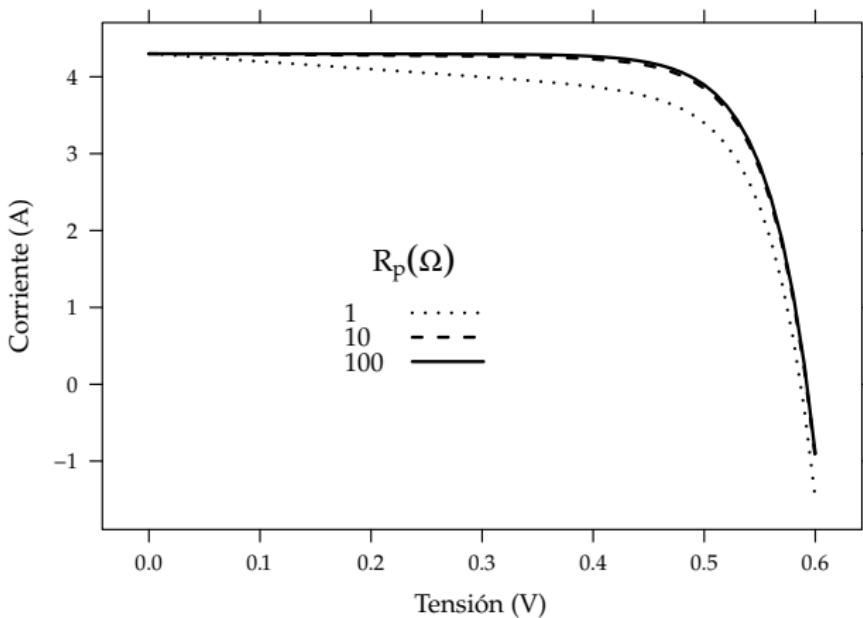
Curva IV y Puntos
Característicos

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

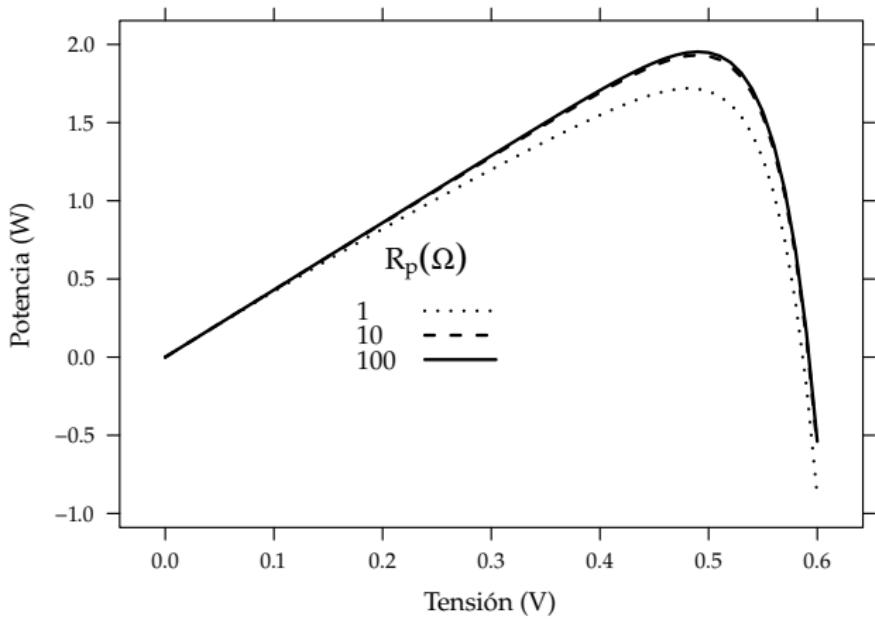
Curva IV y Puntos
Característicos

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 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^* , η^*
- ▶ 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

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)

Teoría de
Semiconductores

Unión P-N
iluminada

Funcionamiento
de una célula solar

Fabricación

- ▶ 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.

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