

ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA: CÉLULA SOLAR

OSCAR PERPIÑÁN LAMIGUEIRO

ÍNDICE

- 1 TEORÍA DE SEMICONDUCTORES
- 2 UNIÓN P-N ILUMINADA
- 3 CARACTERÍSTICA I-V
- 4 FABRICACIÓN

MODELO DE BANDAS DE ENERGÍA

Supongamos una red cristalina formada por átomos. Según los postulados de la Mecánica Cuántica, los **electrones de un átomo aislado** pueden existir **únicamente en determinados estados de energía**. A medida que disminuye la distancia interatómica comienza a observarse la **interacción mutua entre los átomos** hasta formarse un sistema electrónico único. Las **fuerzas de repulsión y atracción** entre los átomos encontrarán su **equilibrio** cuando los átomos estén separados por la **distancia interatómica típica del cristal** que se trate. La separación real entre átomos en el cristal será aquella para la cual la **energía del sólido sea mínima**.

MODELO DE 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.

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.
 - Para el silicio $E_g = 1,12 \text{ eV}$.

ROTURA DE ENLACES

- Cuando se rompe un enlace, un electrón y un hueco quedan libres para moverse por el material (conducción intrínseca).
- La **densidad intrínseca de huecos y electrones es idéntica**. Esta densidad depende de la temperatura y de E_g .
- Esta **circulación es aleatoria**, sin una dirección predeterminada.

RECOMBINACIÓN DE UN PAR ELECTRÓN-HUECO

- Por tanto, se producen **encuentros electrón-hueco** que restablecen un enlace con liberación de energía (E_g) en forma de calor.
 - Las impurezas del cristal favorecen la recombinación.
 - El tiempo de vida de portadores mide cuánto tarda en producirse el proceso de recombinación.
 - La longitud de difusión de portadores mide la distancia media que puede recorrer un portador antes de ser recombinado.
- Esta **conducción intrínseca no es aprovechable** en un circuito externo.
- Para evitar la recombinación **es preciso dirigir el movimiento** de electrones y huecos mediante un campo eléctrico.

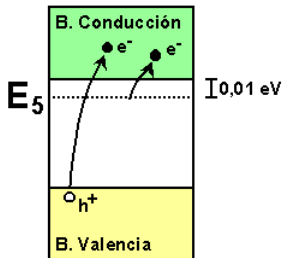
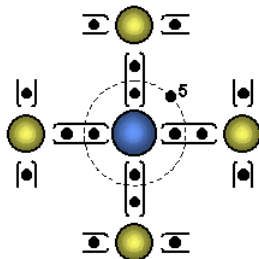
DOPAJE DE SEMICONDUCTORES

TIPO N

- El **dopaje de semiconductores** consiste en introducir de forma controlada impurezas en el cristal.
- 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 es superior a la de huecos**
 - Semiconductor **tipo n**.
 - El **portador mayoritario** es el **electrón**.

DOPAJE DE SEMICONDUCTORES

TIPO N



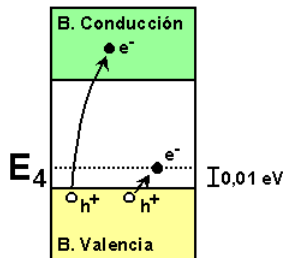
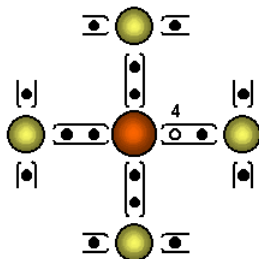
DOPAJE DE SEMICONDUCTORES

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 es superior a la de electrones**
 - Semiconductor **tipo p**.
 - El **portador mayoritario** es el hueco.

DOPAJE DE SEMICONDUCTORES

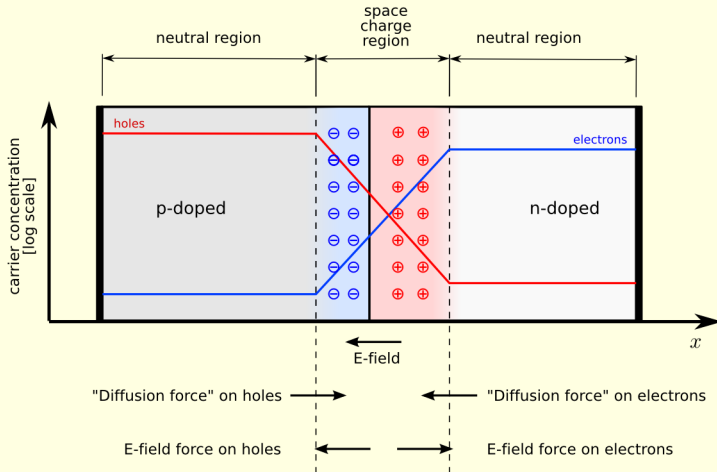
TIPO P



UNIÓN P-N

- Al unir un semiconductor tipo p con otro tipo n, se produce un **desequilibrio**
- **Difusión de portadores mayoritarios**
 - Hay un movimiento de huecos desde cristal p a cristal n, quedando cargado negativamente.
 - Hay un movimiento de electrones desde cristal n a cristal p, quedando cargado positivamente.
- Este proceso de difusión también **desequilibra** las densidades de portadores en los cristales.
- **Proceso de arrastre:** Este desequilibrio **crea un campo eléctrico** (sentido del cristal n al cristal p) en contra del proceso de difusión.
- El **equilibrio** se alcanza al **compensarse los movimientos de difusión y de arrastre**.

UNIÓN P-N



UNIÓN P-N

- Los **portadores minoritarios** que atraviesan la unión se **recombinan**:
 - Electrones de cristal n con huecos en cristal p.
 - Huecos de cristal p con electrones en cristal n.
- Esta recombinación deja **iones cargados ligados a la red** (incapaces de conducir)
- Esta recombinación se produce en **zonas cercanas a la unión** (zona de carga de espacio)
 - Despoblada de portadores
 - Los **iones fijos** generan un campo eléctrico de arrastre.

UNIÓN P-N

POLARIZACIÓN EN DIRECTA

- Para conseguir corriente es necesario romper el equilibrio alcanzado y reducir el valor del potencial termodinámico.
- 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.
- Aparecen dos corrientes en sentidos contrarios pero de partículas de diferente signo: **corriente total aprovechable**.
- Convenio: la corriente entra por zona p y sale por zona n.

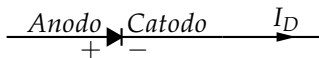
UNIÓN P-N

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**.

DIODO

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.



ECUACIÓN DEL DIODO

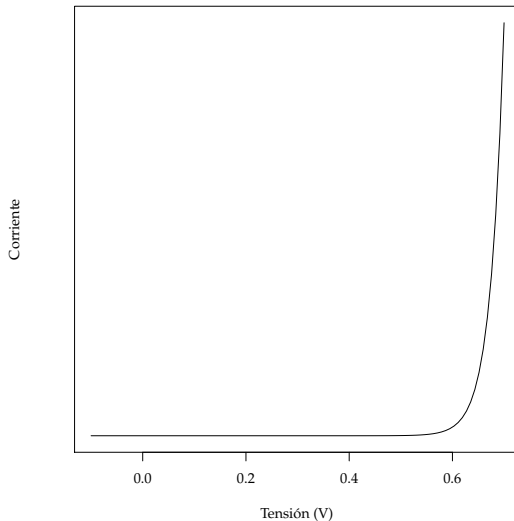
$$I_D = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{V}{m \cdot V_T}\right) - 1 \right]$$

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.

ECUACIÓN DEL DIODO



ÍNDICE

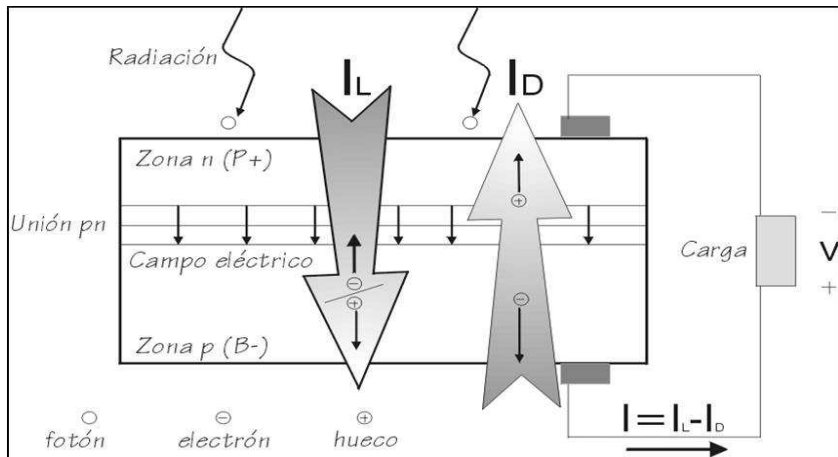
- 1 TEORÍA DE SEMICONDUCTORES
- 2 UNIÓN P-N ILUMINADA
- 3 CARACTERÍSTICA I-V
- 4 FABRICACIÓN

EFEECTO 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*).

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

UNIÓN P-N ILUMINADA



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**
- 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 generados se recombinan dentro del dispositivo: **pérdidas por recombinación**

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

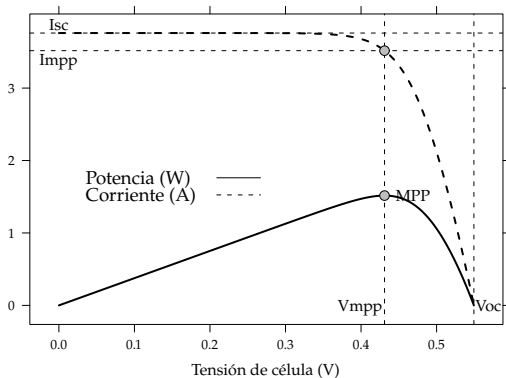
ÍNDICE

- 1 TEORÍA DE SEMICONDUCTORES
- 2 UNIÓN P-N ILUMINADA
- 3 CARACTERÍSTICA I-V
- 4 FABRICACIÓN

CARACTERÍSTICA I-V DE ILUMINACIÓN

$$I = I_L - I_D$$

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



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

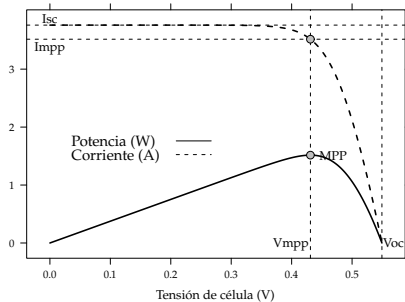
$$I = I_{sc} \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{e \cdot (V_{oc} - V)}{m \cdot k \cdot T_c} \right) \right]$$

PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA

$$\frac{dP}{dV} = 0$$

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

PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA



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

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

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

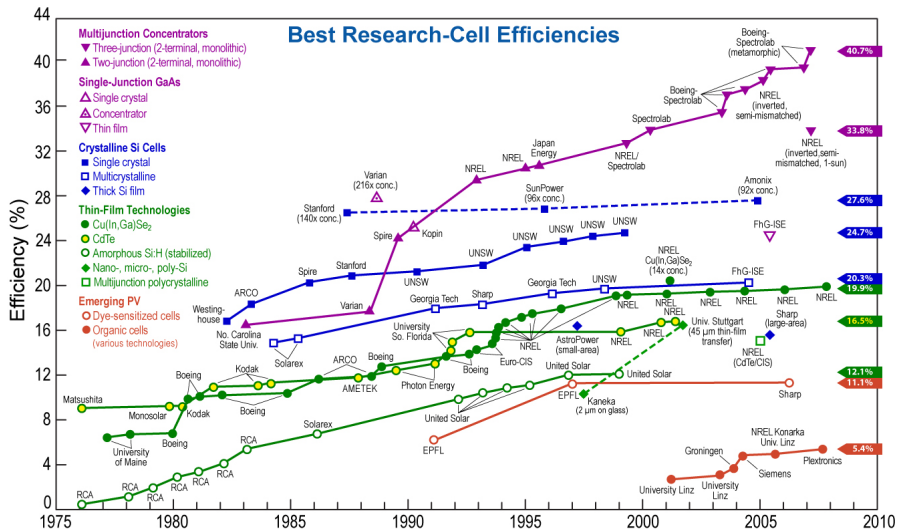
FACTOR DE FORMA Y EFICIENCIA

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

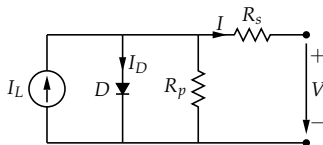
$$P_{mpp} = FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}$$

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

EFICIENCIA DE CÉLULAS



CIRCUITO EQUIVALENTE DE LA CÉLULA



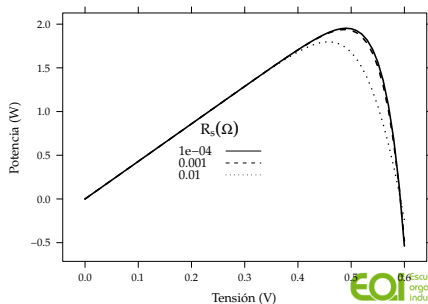
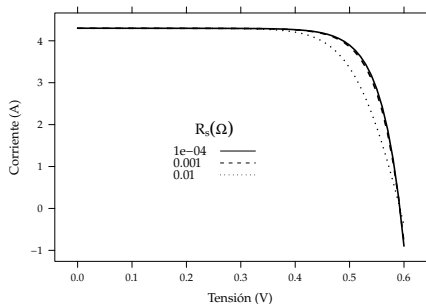
$$I = I_L - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{m \cdot V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p}$$

ECUACIÓN SIMPLIFICADA

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

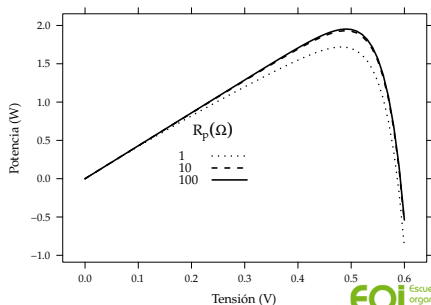
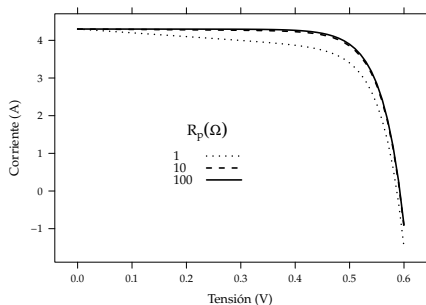
RESISTENCIA SERIE

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



RESISTENCIA PARALELO

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



INFLUENCIA DE FACTORES EXTERNOS

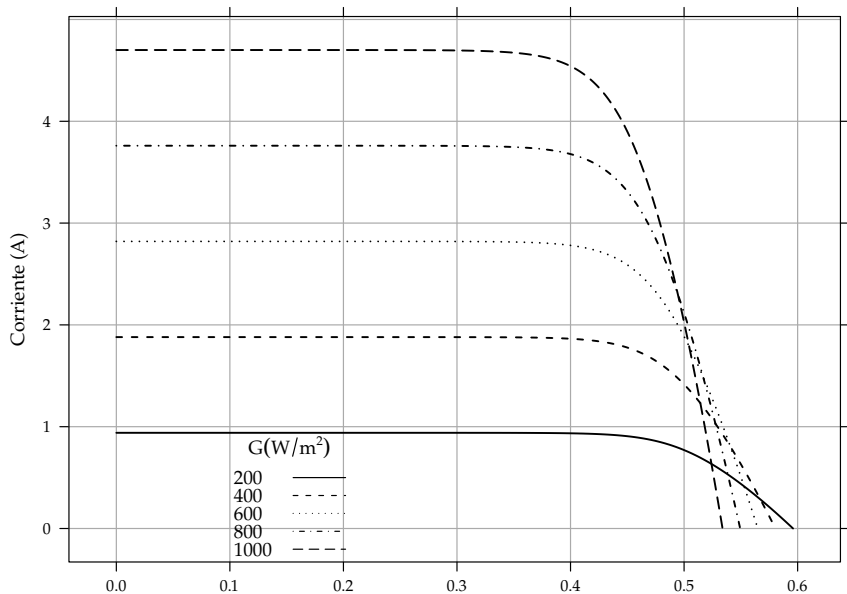
● Temperatura

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

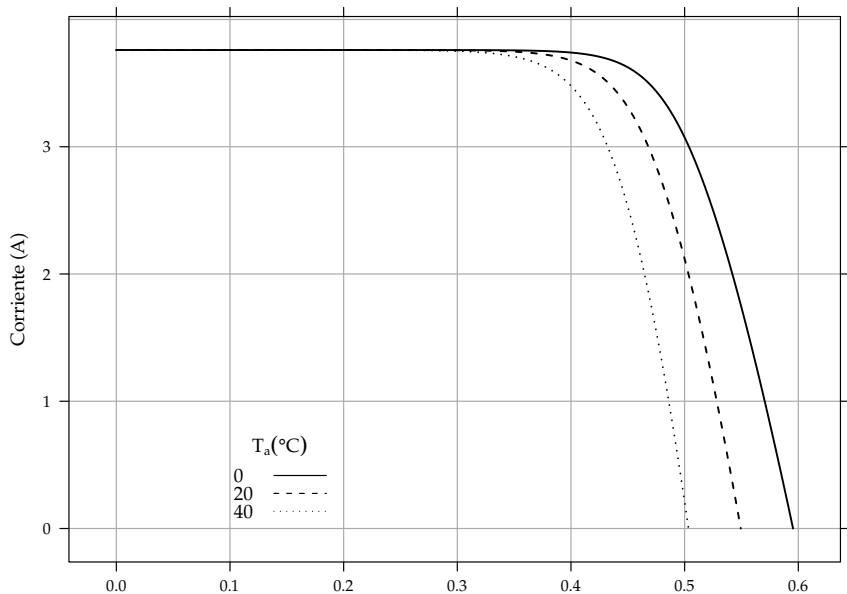
● Iluminación

- 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



INFLUENCIA DE TEMPERATURA



CONDICIONES ESTÁNDAR DE MEDIDA

- Irradiancia: $G^* = 1000 \text{ W/m}^2$ con incidencia normal.
- Temperatura de célula: $T_c^* = 25^\circ\text{C}$.
- Masa de aire: $AM = 1,5$

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

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

CÁLCULO DE PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA

MÉTODO DE J.M. RUIZ

NORMALIZACIÓN

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

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

MPP

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

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

$$p_{mpp} = FF$$

CÁLCULO DE PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA

MÉTODO DE J.M. RUIZ

RESISTENCIA SERIE Y FF

$$r_s = \frac{R_s}{(V_{oc}/I_{sc})}$$
$$ff = v_{mpp} \cdot i_{mpp} = FF$$

TENSIÓN TÉRMICA

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

CÁLCULO DE PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA

MÉTODO DE J.M. RUIZ

APROXIMACIÓN PARA MPP

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

$$D_M = D_{M0} + 2 \cdot r_s \cdot D_{M0}^2$$
$$D_{M0} = \frac{k_{oc} - 1}{k_{oc} - \ln k_{oc}}$$

CÁLCULO DE PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA

MÉTODO DE J.M. RUIZ

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} .

CÁLCULO DE PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA

FACTOR DE FORMA CONSTANTE

$$FF = FF^*$$

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

CÁLCULO DE PARÁMETROS

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 $G = 800 \text{ W/m}^2$.

ÍNDICE

- 1 TEORÍA DE SEMICONDUCTORES
- 2 UNIÓN P-N ILUMINADA
- 3 CARACTERÍSTICA I-V
- 4 FABRICACIÓN

FABRICACIÓN DE CÉLULAS DE SILICIO

- 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^{-10} , 9 nueves).
- Para las células solares puede utilizarse silicio de grado solar (nivel de impureza algo mayor).
- 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)

FABRICACIÓN DE CÉLULAS DE SILICIO

- 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.

FABRICACIÓN DE CÉLULAS DE SILICIO

- 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).