

Apuntes de MIT Course 2.627 / 2.626

Fundamentals of Photovoltaics

Joan Dídac Viana Fons

December 2015

Versión 1.2

Resumen

En este documento se recogen las notas tomadas durante el curso *Fundamentals of Photovoltaics* de la plataforma MIT OpenCourseWare disponible en <http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-627-fundamentals-of-photovoltaics-fall-2013>. Cada sección corresponde con un capítulo del curso. El contenido¹² se irá actualizando hasta completar el curso.

Índice

1. PV Efficiency: Measurement & Theoretical Limits	2
1.1. Identify source(s) of record solar cell efficiencies.	2
1.2. Identify source(s) of “standard” solar spectra.	2
1.3. Describe how to simulate the solar spectrum in the lab: Describe how a solar simulator works.	2
1.4. Describe how to accurately measure & report cell efficiency, and how to avoid common pitfalls when attempting to measure cell efficiency.	3
1.5. Describe efficiency limitations of a typical solar cell	3
2. Advanced Concepts	5
2.1. Series Resistance	5
2.2. Temperature	6
2.3. Shadow	6
2.4. Mismatch	7

¹El código L^AT_EX está disponible en el repositorio https://github.com/JoanViana/OCW_MIT_PV_TEX.git.

²Esta obra está sujeta a la licencia Reconocimiento 4.0 Internacional de Creative Commons. Para ver una copia de esta licencia, visite <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

1. PV Efficiency: Measurement & Theoretical Limits

1.1. Identify source(s) of record solar cell efficiencies.

Efficiency Es posible calcular la eficiencia de un módulo en el laboratorio, con cierta desviación estándar o error.

Cunado escalamos las células fotovoltaicas, construyendo módulos o arrays tenemos una analogía con la fractura cerámica: *Cuán más grande es la probeta más probabilidad de encontrar grandes defectos y, por tanto, su tensión de rotura y su módulo de elasticidad es menor que en piezas pequeñas, donde la probabilidad de encontrar estos grandes defectos es menor.*

State of art of efficiency El número de enero de cada año de la revista *Progress in Photovoltaics* es gratuito. En él se incluyen siempre dos artículos:

- Solar cell efficiency tables: foto de la tecnología actual
- Photovoltaics literature survey

<http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/%28ISSN%291099-159X>

Historical records of efficiency Otra fuente del estado del arte en cuanto a eficiencias de módulos respecta es *L.L. Kazmerski* de NREL en el cual hace un recorrido histórico de la eficiencia de las diferentes tecnologías fotovoltaicas.

1.2. Identify source(s) of “standard” solar spectra.

- ASTM / AM0: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am0/wehrli85.txt>
- ASTM G173-03 / AM1.5: Válido para climas templados. Aquí se muestran las componentes directa y difusa. <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/ASTMG173/ASTMG173.html>

La constante solar varía de año en año. Por ejemplo el rango entre 1940 y 2010 es de $120W/m^2$.

1.3. Describe how to simulate the solar spectrum in the lab: Describe how a solar simulator works.

Para probar la eficiencia de una célula fotovoltaica se utiliza en el laboratorio un *Simulador Solar* que simula el Espectro ASTM G173-03 / AM1.5 con una fuente de luz de Xenón que reproduce la emisión solar y un filtro que intenta simular la atmósfera para que en conjunto se obtenga un output similar a dicho estándar. Realmente la lámpara de Xe produce ciertos picos en el espectro (característicos de la estructura atómica del elemento) que deben ser suprimidos por el filtro.

Según el *Standard IEC 904-9: Requirements for solar simulators for crystalline Si single-junction devices* se utilizan tres propiedades para caracterizar un Simulador Solar *Uniformity/Spectral fidelity(Match)/Temporal stability* y se le asigna un parámetro de calidad a cada una de estas propiedades *Class A/B/C*. Así un simulador puede ser *AAA*, *AAB* o *BBB*.

Otros estándares: <http://web.archive.org/web/20111018110532/http://photovoltaics.sandia.gov/docs/pvstndrds.htm>

Nota

Materiales fotosensibles: materiales que varían su eficiencia con la iluminación. Ejemplo: Si-amorfo

1.4. Describe how to accurately measure & report cell efficiency, and how to avoid common pitfalls when attempting to measure cell efficiency.

Para medir la eficiencia de nuestra célula se deben tener en cuenta todos los posibles efectos que nos desvíen de las condiciones estándar (temperatura, luminosidad...). Se utiliza además una célula calibrada. Una forma de asegurarse la calibración es utilizando la célula de NREL *FhISE* aunque se degrada fácilmente. Se puede realizar en el laboratorio siguiendo una serie de protocolos (materiales de medida, dee soporte...).

Lo más importante en lo que a medición de la eficiencia respecta es que los materiales de la célula calibrada y la nuestra sean los mismos. Si no tenemos una célula calibrada del material en cuestión (por ejemplo, porque es un nuevo material), debemos medir el espectro de nuestra fuente de luz y calcular el rendimiento cuántico a partir de este espectro: No valen comparaciones con células calibradas de distinta naturaleza (Spectral Mismatch). Se puede obtener además, certificados oficiales de rendimiento en institutos especializados como NREL.

Diferencias entre la medida del laboratorio y del campo:

- Caída de tensión por $T > 25^\circ$.
- Esquema de contacto (pérdida en soldadura)
- Espectro
- ...

1.5. Describe efficiency limitations of a typical solar cell

Blackbody (heat engine) limit : Thermodynamic limit of one object looking at another. $\approx 86\%$. Considera todo el espectro. Acerca de la energía solar.

Detailed balance photons model: Shockley-Queisser efficiency limit. Específico de la célula solar. Considera movilidad de los portadores infinita (no considera los gradientes existentes en un dispositivo real). Aquí se calcula la eficiencia cuántica teniendo en cuenta dos principales pérdidas: *non-absorption of light/thermalization of carriers*. Las hipótesis principales que toma son:

- All photons with $E > E_g$ are absorbed, and create one electron-hole pair.
- Electron and hole populations relax to band edges to create separate distributions in quasi thermal equilibrium with the lattice temperature, resulting in quasi Fermi levels separated by $D\mu$.
- Each electron is extracted with a chemical potential energy μ , such that $qV = D\mu$. Requires constant quasi Fermi levels throughout, i.e., carriers have infinite mobility.
- The only loss mechanism is radiative recombination (a.k.a., spontaneous emission).

Ver <http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/detailed-balance>

Other (realistic) considerations

- Recombination mechanisms: diferentes tipos
- Photon recycling (mainly Ga)
- Finite mobility balance: J. Mattheis et al., 2008.

Se obtiene entonces:

- Non-absorption of light ($E_{ph} < E_g$): 0.74
- Thermalization of charge carriers ($E_{ph} > E_g$): 0.67
- Thermodynamic losses: 0.64
- Fill factor losses (practical solar cell operation): 0.89

Resulting Efficiency Limit: $(0.74) \cdot (0.67) \cdot (0.64) \cdot (0.89) = 0.28$

Pero hay que tener en cuenta que los límites de eficiencia han variado con el tiempo: Nuevas tecnologías, nuevos límites.

2. Advanced Concepts

2.1. Series Resistance

El electrón del Si en la banda dopada de portadores (p) está en un estado de mínima energía (banda-orbital estable). Cuando éste se excita por absorción de un fotón con energía mayor a la energía de activación éste llega a la banda de conducción y desde aquí al ánodo (contacto metálico). De forma simultánea al desplazamiento del portador de carga se crea un hueco en p (fósforo) que pasa a n (Boro) por difusión.

El recorrido que realiza el electrón desde al ánodo hasta que ? corresponde con R_s compuesto por tres resistencias: $r_{emitter}$ (en la superficie del semiconductor hasta finger) + $r_{contact}$ (interfase semiconductor-finger) + r_{line} (conductor sobre la célula). Ésta tiene mucho que ver con la eficiencia final del módulo y su componente mayoritario es $r_{contact}$ que tiene mucho que ver con cómo se ha realizado la interfase (Apartado 2.1.2).

2.1.1. Shadow losses: $r_{emitter}$

Para reducir L , la longitud a recorrer por el electrón en la superficie P se puede pensar en aumentar las líneas busbar. Sin embargo, es necesario recordar que el busbar está sobre la célula y produce el sombreado de parte de la superficie de captación: el efecto sobre la eficiencia de la célula que tiene el sombreado que ejerce el busbar (contactos en la fase P) se estima entorno al 3 %.

- 4mm separación : $I_{sc} = 0.62A$.
- 2mm separación : $I_{sc} = 0.60A$. (Doble de contactos)

2.1.2. Contact Firing: $r_{contact}$

Respecto a la mejora del contacto tiene mucho que ver la tecnología de fabricación utilizada en el proceso. Se recogen algunos spots de algunos fabricantes de las máquinas que realizan los contactos.

- BTU : *The contact firing and metallization application is used in the manufacturing of silicon solar cells. It involves the process by which thick film conductive inks (usually silver and aluminum) are applied to the front and back side of the solar cell. The material is usually screen printed or spot printed onto the cell. The paste will be dried and subsequent layers are added using the same method. The final step is performed in the metallization furnace. The metallization furnace actually integrates four process steps into one tool: drying to remove the last solvent, burnout to remove the binder, firing to form the electrical contact, and finally the cool down. Firing is the most critical step. The solar cells are rapidly heated to a peak temperature, ranging from 780°C to 900°C followed by rapid cooling. Very fast ramp rates are required to optimize contact formation on silicon wafers. Rapid heating ensures proper fire-through to deliver excellent contact to n-Si layer and also to improve the aluminum back surface field,*

while fast cooling is required to prevent the diffusion of silver into the junction. Rapid ramp rates are constantly pushing for faster belt speed, which in turn drives the overall length of the firing furnace. Uptime, reliability, and Cost of Ownership are also becoming increasingly important. In the meantime, cell producers strive to reduce wafer thickness for higher material efficiency, which will pose more stringent requirements on next generation firing furnace.

- Smith Thermal Solutions: *Our contact firing ovens help you reduce the costs of cadmium-telluride (CdTe) solar panel production. With extremely accurate temperature control, they ensure you make the most efficient use of your raw materials. And they allow you to adjust process timing for maximum production flexibility with fewer production delays and backlogs. Moreover, the unique system design eliminates any "first panel effects". That means that after any production stoppages, the very first glass you put through the system gives you a good product out for the highest yields and lowest running costs.*

2.2. Temperature

La temperatura aumenta la probabilidad/cantidad de portadores excitados térmicamente (thermally-promoted carriers). Aumenta la corriente de saturación y disminuye el potencial.

- Band gap (eV) disminuye con la temperatura
- V_{oc} disminuye con la temperatura: $-2.2mV/^{\circ}C$ para el Si.
- I_{sc} aumenta con la temperatura: $0.6mA/^{\circ}C$ para el Si.
- FF disminuye con la temperatura: $-0.0015(^{\circ}C)^{-1}$ para el Si
- eff disminuye con la temperatura: $-0.005 = -0.5\%(^{\circ}C)^{-1}$ para el Si

Nota

En sistemas concentrados se utiliza enfriamiento forzado para evitar grandes descensos en el rendimiento debido a la temperatura.

2.3. Shadow

Cuando una célula se encuentra bajo el efecto de sombreado, la curva IV cae y la célula opera en *reverse bias*: ($I > 0, V < 0$) \rightarrow mucha intensidad a través del propio semiconductor: La corriente pasa a través de R_{sh} , es decir a través de la propia sección del semiconductor (fases p, n e interfase). Incluso con intensidades bajas, éstas pueden causar daños en la

célula. Por esta razón se protegen las células con diodos, que se polarizan (conducen la intensidad de la serie) cuando alguna célula de la serie que protege se encuentra en *reverse bias*.

Nota

R_{sh} due to manufacturing defects, rather than poor solar cell design. Low shunt resistance causes power losses in solar cells by providing an alternate current path for the light-generated current. Such a diversion reduces the amount of current flowing through the solar cell junction and reduces the voltage from the solar cell. The effect of a shunt resistance is particularly severe at low light levels, since there will be less light-generated current. The loss of this current to the shunt therefore has a larger impact. In addition, at lower voltages where the effective resistance of the solar cell is high, the impact of a resistance in parallel is large. An estimate for the value of the shunt resistance of a solar cell can be determined from the slope of the IV curve near the short-circuit current point.

2.4. Mismatch

El estudio de calidad en el sentido más profundo del término *minimizar de forma continua la variabilidad en los procesos de fabricación* es uno de los puntos clave en la industria fotovoltaica.

- Unión en Serie (top contact one cell - bottom contact other cell): match I, add V
- Unión en Paralelo (top contact one cell-top contact other cell && bottom contact one cell - bottom contact other cell): match V, add I