



***Facultad
de
Ciencias***

**MEDIDA DE LA EFICIENCIA DE CÉLULAS
SOLARES RECUBIERTAS POR
CONCENTRADORES DIELÉCTRICOS**
(Efficiency measurement of solar cells coated
by dielectric concentrators)

Trabajo de Fin de Grado
para acceder al

GRADO EN FÍSICA

Autor: Pablo Redondo Llano

Director: Fernando Rodríguez González

Julio – 2016

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| AGRADECIMIENTOS..... | 4 |
| RESUMEN | 5 |
| ABSTRACT..... | 5 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 6 |
| 1.1 TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA | 6 |
| 1.2 SEMICONDUCTORES..... | 7 |
| UNIÓN PN..... | 7 |
| 1.3 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS..... | 9 |
| CURVA CARACTERÍSTICA | 11 |
| EFICIENCIA | 12 |
| 2. TÉCNICAS EXPERIMENTALES | 13 |
| 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS | 14 |
| 3.1 CARACTERIZACIÓN CÉLULA SOLAR | 14 |
| MEDIDAS EN OSCURIDAD | 14 |
| MEDIDAS BAJO ILUMINACIÓN | 16 |
| 3.2 EFICIENCIA..... | 19 |
| 3.3 DETECTOR DE LUZ | 20 |
| 3.4 PROTECCIÓN DE PANELES: USO DE VIDRIOS FOTOACTIVOS | 21 |
| VIDRIOS IMPLEMENTADOS | 22 |
| MEDIDA DE LA EFICIENCIA | 24 |
| 4. CONCLUSIONES | 27 |
| 5. BIBLIOGRAFÍA | 28 |
| ANEXOS | 29 |
| ANEXO I: ERRORES | 30 |
| ANEXO II: IMÁGENES..... | 31 |
| ANEXO III: HOJA DE CARACTERÍSTICAS DE LA CÉLULA..... | 33 |
| ANEXO IV: VALORES NUMÉRICOS DE LA EFICIENCIA (figura 14) | 37 |

*“Nunca consideres el estudio como una obligación,
sino como una oportunidad para penetrar
en el bello y maravilloso mundo del saber”*

Albert Einstein

AGRADECIMIENTOS

Primero de todo quería darle las gracias a mi director de proyecto Fernando por toda la ayuda que me ha dado y que haya estado siempre a mi disposición, y también por haberme propuesto este trabajo y haberme permitido realizarlo. Agradecerle su implicación total desde el principio.

También darles las gracias a todos los profesores y alumnos con los que he compartido laboratorio por su ayuda y compañía, en especial a Toño y a Susana.

Y, por último, pero no por ello menos importante, a mi familia y amigos por animarme en los momentos que pensaba que no llegaba.

Mi agradecimiento a todos ellos es igual que la gran satisfacción que siento por haber terminado de manera exitosa la carrera.

RESUMEN

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es el montaje de un dispositivo experimental para la medida de la eficiencia de células fotovoltaicas y su aplicación al estudio del efecto de diversos recubrimientos protectores de vidrios de alta transmitancia. El trabajo comprende el montaje y su validez mediante una célula de silicio monocristalino. Una vez validado el sistema y caracterizada la célula fotovoltaica empleada, se aplicará a investigar el efecto que sobre la eficiencia fotovoltaica produce el uso de dichos recubrimientos de vidrio. Se estudiará igualmente los efectos de incorporar colorantes en el interior del vidrio, y como ello afecta a la eficiencia fotovoltaica.

ABSTRACT

Project is develop an experimental setup to measure the efficiency of a photovoltaic cell and its application to the study of the effects produced by the introduction of various protective coatings of high transmittance glasses. Labour includes the assembly of the device and its validity using a monocrystalline silicon cell. Once validated the system and characterized the photovoltaics cell used, this setup will be used to study the effects on the cell efficiency of different protective coatings based on high transmitting glasses. It will also examine the effects of incorporating dyes (doping) in the the glass, and how this affects the photovoltaic efficiency.

Palabras clave: energía fotovoltaica, semiconductores, eficiencia, célula fotovoltaica, vidrios protectores.

Key words: photovoltaics energy, semiconductors, efficiency, photovoltaics cell, protective glasses.

1. INTRODUCCIÓN

La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía eléctrica renovable obtenida directamente a partir de los fotones procedentes de la radiación solar mediante el uso de placas fotovoltaicas [2]. Este tipo de energía está adquiriendo cada vez más importancia, debido a la necesidad del uso de energías limpias que permitan un desarrollo sostenible. Como ejemplo, cabe destacar la instalación en el año 2015 de 51.000MW de potencia fotovoltaica en todo el mundo, superando todos los registros anteriores. [5]

El desarrollo de la energía fotovoltaica requiere conseguir que los diferentes elementos que configuran sus instalaciones, alcancen unos rendimientos energéticos elevados, dentro de unos costes razonables. Este punto es el que se tratará a lo largo de este trabajo, la medida de la eficiencia de una célula fotovoltaica.

El Sol es el origen, tanto directo como indirecto, de todas las fuentes de energía renovables (solar, eólica, mareomotriz, etc.). En el caso de la energía solar, se aprovecha directamente la energía que el Sol envía sobre la Tierra, aproximadamente (ya que depende de las condiciones atmosféricas y climatológicas) unos 1000 W/m^2 en la superficie de la Tierra (unidad: 1 Sol) [10]. Se dan dos tipos distintos de energía solar, la fotovoltaica y la térmica. La fotovoltaica utiliza la radiación solar para generar electricidad aprovechando las propiedades físicas de determinados materiales, principalmente semiconductores; la térmica utiliza la radiación solar para calentar razonablemente un fluido [2].

Hoy en día, la tecnología empleada para la producción de energía eléctrica por vía fotovoltaica, está basada en el uso de células fotovoltaicas de semiconductores, principalmente de silicio (mono o policristalino).

1.1 TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA

En 1839, el científico francés Alexandre-Edmond Becquerel (padre de Henri Becquerel) observó que ciertos materiales producían una corriente eléctrica al ser expuestos a la luz. Actualmente este fenómeno se conoce como efecto fotovoltaico (efecto fotoeléctrico), en el cual se basan las células solares. Estos materiales son los semiconductores, que se comportan como aislantes a bajas temperaturas y como conductores cuando se les proporciona energía o calor, pero debidamente configurado en una unión PN presenta propiedades fotovoltaicas. El semiconductor más ampliamente utilizado para este propósito hasta el momento es el silicio, elemento muy abundante en el planeta, por lo que es relativamente barato para la construcción de estos dispositivos.

Las primeras células solares de selenio fueron desarrolladas en 1880. Pero no fue hasta 1950 cuando se empezaron a fabricar las células de silicio monocristalino que dominan la industria fotovoltaica actual. Las primeras células tenían una eficiencia de

conversión de energía solar de un 1%, mientras que a día de hoy tienen una eficiencia media de 16% [4]. Existen también las células multicapa (multigap), que pueden llegar a alcanzar eficiencias del 30%. En laboratorio se ha conseguido superar una eficiencia del 46% en células experimentales. Estos importantes avances tecnológicos hacen posible un uso amplio y económico, en un futuro, de la energía solar.

1.2 SEMICONDUCTORES

En muchos sólidos cristalinos existen dos bandas de energía que describen los electrones de valencia, responsables de la estabilidad del sólido. Dichas bandas se denominan banda de valencia, a la de menor energía, y banda de conducción, desocupada, de mayor energía. Estas bandas pueden solaparse, como es en el caso de los conductores; estar muy separadas, como en los aislantes; o con una pequeña separación, caso de los semiconductores como el silicio. A la separación entre bandas se le conoce como *gap* de energía. Este modelo de bandas describe el comportamiento eléctrico de los diferentes tipos de materiales (aislantes, conductores y semiconductores) en términos de niveles de energía [1].

Los electrones de los enlaces covalentes del material tienen energías que se agrupan en la banda de valencia. Mientras la denominada banda de conducción está desocupada, pero su ocupación parcial origina cambios notables en las propiedades eléctricas. El intervalo prohibido de energías (*gap*) corresponde al mínimo de energía necesaria para arrancar un electrón de la banda de valencia y llevarlo al mínimo de la banda de conducción, donde puede moverse libremente y generar una corriente. Cabe destacar que los *huecos* que dejan los electrones en la banda de valencia al pasar a la de conducción también contribuyen a la corriente eléctrica [1].

Cuando la luz solar incide sobre un material semiconductor, si la energía de los fotones es mayor que el *gap*, induce transiciones electrónicas desde la banda de valencia a la banda de conducción, produciendo un par electrón-*huevo* (e-h). Este par tiende a recombinarse perdiendo su actividad. Para que no se de esta recombinación y estos portadores de carga den lugar a una corriente se debe crear en el interior del semiconductor un campo eléctrico que se consigue a través de la unión PN [2].

La luz incidente sobre la célula puede reflejarse en ella (reflexión), atravesarla (trasmisión), o ser absorbida (absorción). Esta última es la responsable de hacer saltar electrones de la banda de valencia a la banda de conducción del semiconductor, creando pares e-h. Estos pares e-h crean una corriente proporcional a la radiación incidente, corriente que se forma a través del uso de una unión PN.

UNIÓN PN

Una unión PN consiste en unir dos semiconductores, uno tipo N (exceso de electrones o cargas negativas en la BC) y otro tipo P (exceso de huecos o "cargas

positivas”, ausencia de electrones en la BV). Aunque, en realidad, se trata de un mismo material semiconductor dopado con impurezas tipo P por un lado e impurezas de tipo N por el otro. Para obtener un semiconductor de cualquiera de estos dos tipos, el material semiconductor inicial está dopado. Este proceso consiste en introducir átomos en la red del semiconductor original: con un electrón de valencia más, para obtener semiconductores dopados tipo N (con exceso de electrones); o con un electrón de valencia menos, para obtener semiconductores dopados tipo P (con exceso de “huecos” o defecto de electrones). En el caso de redes de silicio, se suele emplear el boro para dopar positivamente (tipo P) y el fósforo para dopar negativamente (tipo N).

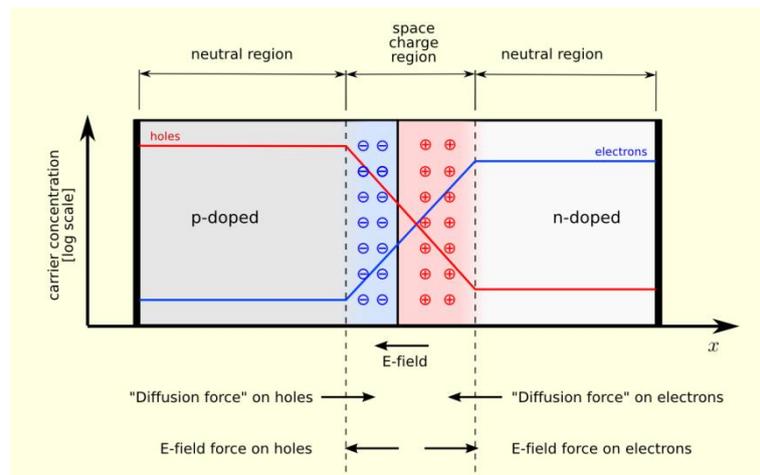


Figura 1: esquema de una unión PN [11].

Al juntarse estos dos tipos de semiconductores, en la zona de contacto fluyen, por difusión, los huecos extras del material tipo P hacia el tipo N, y los electrones del tipo N al tipo P. De esta manera se crea un campo eléctrico en la zona de unión PN, desde el material tipo N hacia el tipo P, y un potencial de contacto. Si se aplica a la unión un determinado potencial, con la polarización adecuada, se puede conseguir reducir el efecto del campo eléctrico. Es en este punto donde el campo eléctrico no puede impedir el movimiento de electrones y huecos, produciéndose una corriente eléctrica. Esta corriente aumenta exponencialmente al voltaje aplicado, siguiendo la expresión de Shockley (1) [1].

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

Donde I_0 es la intensidad de corriente de saturación, T es la temperatura absoluta de la unión, V es la diferencia de potencial aplicada, n es el factor de idealidad y el resto son constantes.

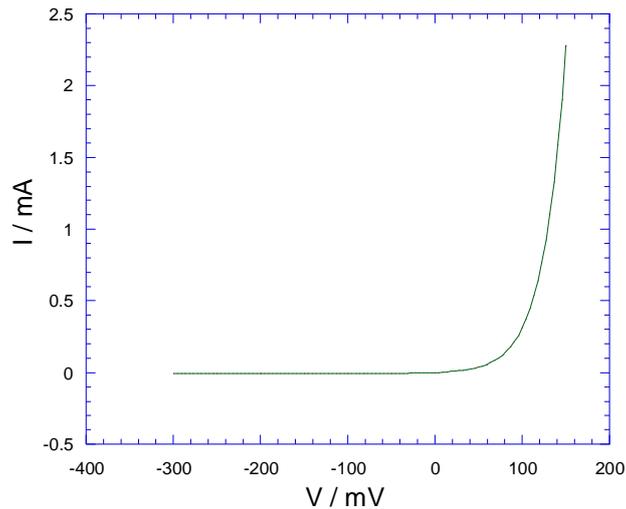


Figura 2: Curva característica $I(V)$ de una unión PN según el modelo de *Shockley* con $I_0 = 6\mu A$.

En resumen, cuando un fotón incide sobre la zona de unión PN, o zona de carga espacial, se produce un par electrón-hueco mediante efecto fotoeléctrico, que son separados por el campo eléctrico existente en la región, produciendo una corriente eléctrica proporcional a la intensidad de iluminación [6], tal y como se describe en la figura 3.

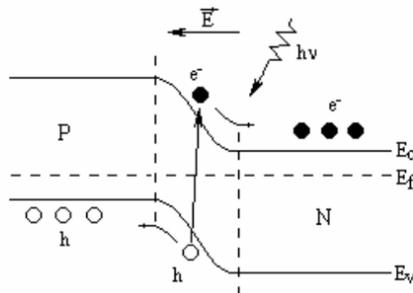


Figura 3: Unión PN

1.3 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Conocidas también como células solares son dispositivos materiales cuya función es transformar la energía solar (fotones) en eléctrica (electrones) mediante el efecto fotovoltaico.

Las células fotovoltaicas más utilizadas son uniones PN de semiconductores, normalmente silicio (monocristalino, policristalino o amorfo). Si la célula no está iluminada, se comporta como un diodo, siguiendo el modelo matemático de *Shockley* (1). Sin embargo, cuando se ilumina la célula se debe incluir a dicha expresión un nuevo término correspondiente a la corriente fotogenerada: I_L .

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] - I_L \tag{2}$$

La corriente fotogenerada es debida a que, al iluminar la célula, los fotones que posean una energía mayor que el ancho de banda prohibida, generan pares electrón-hueco, que al estar sometidos a un campo eléctrico son separados, y no se recombinan. Los electrones se mueven hacia el lado tipo N, y los huecos hacia el tipo P (figura 3). Esta corriente fotogenerada desplaza la curva $I(V)$ hacia el cuarto cuadrante de la representación $I(V)$, donde se genera energía, siendo la responsable de que el modelo de una célula fotovoltaica sea una fuente de corriente [1].

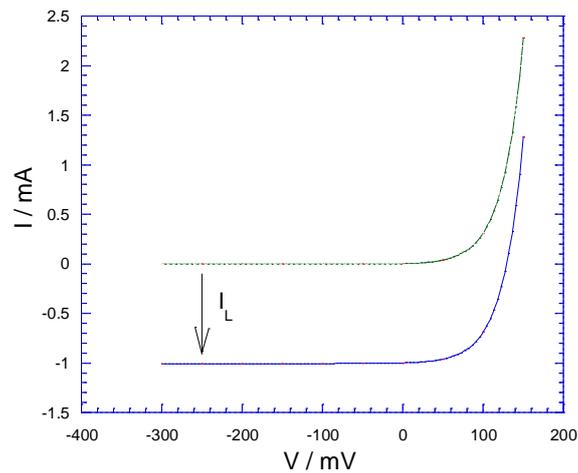


Figura 4: Curva característica $I(V)$ de una célula fotovoltaica iluminada

En el modelo real de la célula fotovoltaica se tiene en cuenta también la resistencia en serie R_S , y la resistencia en paralelo, o *shunt* R_{SH} . La resistencia en serie es debida a las interconexiones, a los contactos metálicos, a la resistencia de carga del semiconductor y a la resistencia de carga entre los contactos y el semiconductor. La resistencia *shunt* es debida a las no idealidades de la unión, así como a las impurezas que puedan existir cerca de la unión PN [1].

En la figura 5 se muestra un esquema del modelo de una célula fotovoltaica.

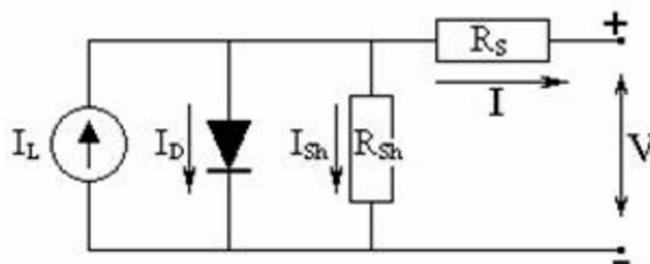


Figura 5: Esquema del circuito eléctrico real de una célula fotovoltaica. [7]

Ambas resistencias reducen las prestaciones de la célula, y modifican su curva $I(V)$ [1]. La expresión que relaciona la intensidad I a la salida de la unión PN con el voltaje aplicado es de la forma:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V+IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{SH}} \quad (3)$$

CURVA CARACTERÍSTICA

Existe una representación estandarizada para las células fotovoltaicas, se trata de la curva característica corriente-tensión $I(V)$. Esta curva característica sigue la ecuación (3). Normalmente esta representación se hace en el primer cuadrante, trasladando la curva del cuarto cuadrante al primero, invirtiendo el signo de la corriente. La curva muestra los valores que adquiere la corriente para determinados valores del potencial aplicado, para un dispositivo fotovoltaico, bajo unas condiciones ambientales determinadas (radiación incidente y temperatura). El punto de trabajo en el cual la célula fotovoltaica se encuentra, vendrá dado por la carga a la que esté conectada.

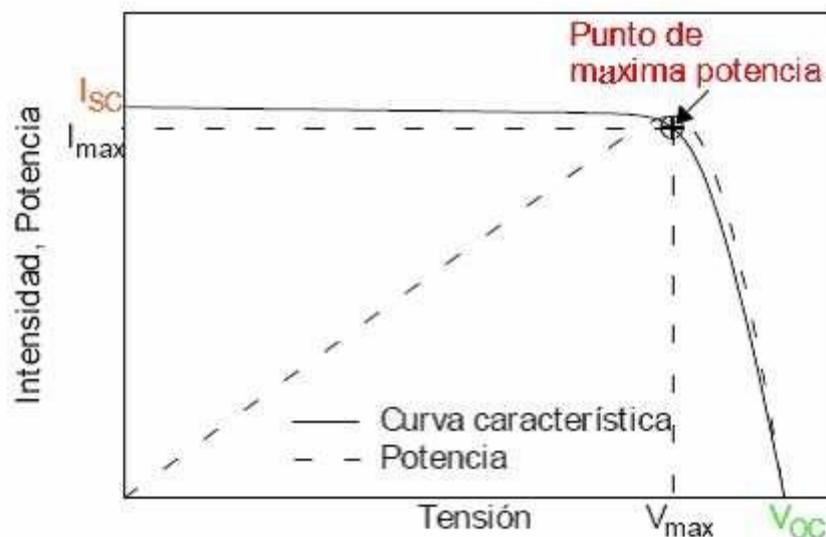


Figura 6: Curva $I(V)$ de una célula fotovoltaica y parámetros característicos [8].

Los principales parámetros de esta curva característica son los siguientes [2]:

- **Corriente de cortocircuito:** I_{SC} . Es la máxima corriente que proporcionará el circuito bajo unas condiciones de iluminación y temperatura, para un potencial nulo, $V = 0$.
- **Voltaje de circuito abierto:** V_{OC} . Máximo voltaje del circuito bajo unas condiciones de iluminación y temperatura, correspondiente a una corriente nula, $I = 0$.
- **Potencia máxima:** P_{max} . Máxima potencia que puede producir el dispositivo bajo unas condiciones de iluminación y temperatura. Corresponde al par máximo $I - V$.
- **Corriente máxima:** I_{max} o I_{pmp} . Valor de la corriente correspondiente para la P_{max} bajo unas condiciones de iluminación y temperatura.
- **Voltaje máximo:** V_{max} o V_{pmp} . Valor del voltaje correspondiente para la P_{max} bajo unas condiciones de iluminación y temperatura.

- Factor de forma: FF . Valor correspondiente al cociente entre la P_{max} y el producto resultado de multiplicar V_{OC} y I_{SC} . Se puede expresar en tanto por ciento o en tanto por uno, siendo el 100% el valor correspondiente a una curva característica ideal, que sería un perfil cuadrado. Por lo tanto, este factor de forma nos da una idea de la calidad del dispositivo fotovoltaico, siendo de mayor calidad cuanto mayor sea dicho factor de forma [3].

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{SC}V_{OC}} \quad (4)$$

EFICIENCIA

La eficiencia de un dispositivo fotovoltaico es la manera de definir su calidad. Esta sería el cociente entre la energía que produce el dispositivo y la energía solar total que incide sobre él. Sin embargo, a la hora de definir la eficiencia existen varias maneras dependiendo del área que se tenga en cuenta. De esta manera, se puede encontrar en los catálogos de fabricantes y en bibliografías de referencia las eficiencias definidas a continuación. En nuestro caso, se aplicarán estas definiciones de eficiencias de placas fotovoltaicas sobre una única célula fotovoltaica.

- Eficiencia con respecto al área total:

Esta definición de eficiencia relaciona la potencia máxima generada por el dispositivo y la cantidad de radiación solar incidente en el área total del mismo. Entendiendo por área total, el área de las células, espacio intercelular, los contactos y el marco.

$$\eta_{at} = \frac{P_{max}}{A_T E_T} \quad (5)$$

Donde η_{at} es la eficiencia con respecto al área total, P_{max} es la máxima potencia que puede generar el dispositivo en W , A_T es el área total del dispositivo en m^2 y E_T es la radiación solar total incidente en W / m^2 [3].

- Eficiencia con respecto al área de la célula:

Es una versión modificada de la anterior. Solo se considera en este caso el área de las células, ignorando el marco y el área intercelular. Así se consigue ignorar el efecto de marcos grandes, ya que estos no afectan en realidad a la calidad del dispositivo.

La expresión matemática para su cálculo es semejante a la expresión (5), sustituyendo el área total A_T por el área de las células, A_C .

- Eficiencia con respecto al área activa de la célula:

En este caso, implica el cálculo de la eficiencia basada únicamente en el área del dispositivo que está expuesta a la luz incidente. No se incluyen aquí las áreas sombreadas por las rejillas de la célula o por los contactos. Esta eficiencia nos ofrece siempre un valor mayor. Esta definición de eficiencia suele utilizarse solo para células individuales, mientras que las anteriores son utilizadas en dispositivos fotovoltaicos completos, comerciales. Esta definición se utiliza mucho en el laboratorio.

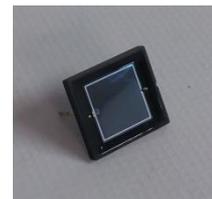
2. TÉCNICAS EXPERIMENTALES

Para la realización de las medidas sobre la célula fotovoltaica se tiene acceso a los laboratorios del Grupo de Altas Presiones y Espectroscopía de la Universidad de Cantabria, dedicados a la caracterización de materiales.

Se trabajará a temperatura ambiente, la cual es de 20°C, y en un habitáculo preparado para evitar, en todo lo posible, la penetración de radiación lumínica externa, minimizando en ello el ruido en las medidas (anexo II).



La célula que se va a utilizar en este trabajo es un fotodiodo de Si de la serie S1337 de la casa *Hamamatsu*, concretamente el modelo 1010BR. La hoja de características de este dispositivo se encuentra en el anexo III.



Se utilizarán para la toma de medidas los siguientes instrumentos (anexo II):

- Voltímetro: *616 Digital Electrometer, Keithley*
- Amperímetro: *34401A Multimeter, HP Hewlett Packards*
- Fuente de alimentación: *PL330 32V-3A PSU, TTI Thurlby Thandar Instruments*
- Fuente de iluminación: *Ultra-Vitalux 300W, Osram*. Lámpara de filamento irradiando a una temperatura de 5750 K.

Cabe destacar que la fuente de iluminación utilizada produce una simulación de la luz del Sol (mismo espectro). Este hecho es importante para el estudio de la célula, ya que lo interesante es conocer su comportamiento bajo condiciones de iluminación solar.

Para interconectar todos los dispositivos se utilizarán cables de conexión comunes de cobre. De tal manera que es posible la realización de un circuito eléctrico simple.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 CARACTERIZACIÓN CÉLULA SOLAR

La primera tarea que se va a llevar a cabo es la caracterización de la célula solar. Esta consiste en obtener la curva característica $I(V)$ de la célula y a partir de ella conocer los valores de los parámetros característicos que intervienen en la expresión Ec.(3).

Se tomarán pares de medidas de intensidad y voltaje en oscuridad, y bajo unas condiciones de iluminación determinadas.

MEDIDAS EN OSCURIDAD

En oscuridad, la célula se comporta como un diodo, y con estos datos se podrán obtener los parámetros I_0 , n , R_s y R_{SH} , que definen las características de una célula, según el modelo teórico. En la figura 7 se representa el esquema del montaje experimental puesto a punto en este trabajo. Los contactos PN de la célula se conectan a los extremos de una resistencia variable cuyos extremos se conectan a su vez con una fuente de alimentación continua regulable. La intensidad y voltaje se miden en serie a la salida del conector P y entre los contactos P y N de la célula, respectivamente.

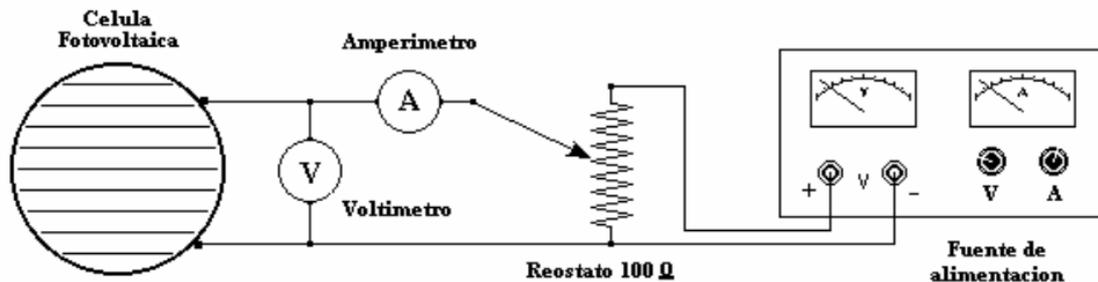


Figura 7: circuito empleado para la toma de medidas en oscuridad [7]

Es posible simplificar el modelo teórico para voltajes pequeños. En estas condiciones se puede despreciar la parte exponencial que describe el comportamiento del diodo ($V \approx 0$). Así como el término IR_s / R_{SH} ($I \approx 0$). De tal manera que se obtiene la siguiente expresión a partir de la Ec.(3):

$$I = I_0 - \frac{1}{R_{SH}} V \quad (6)$$

A partir del comportamiento lineal de $I(V)_{V \rightarrow 0}$ es posible, mediante el ajuste por mínimos cuadrados de las parejas de datos obtenidos en la región de voltajes pequeños, obtener la ordenada en el origen I_0 , y la inversa de la pendiente R_{SH} (figura 8).

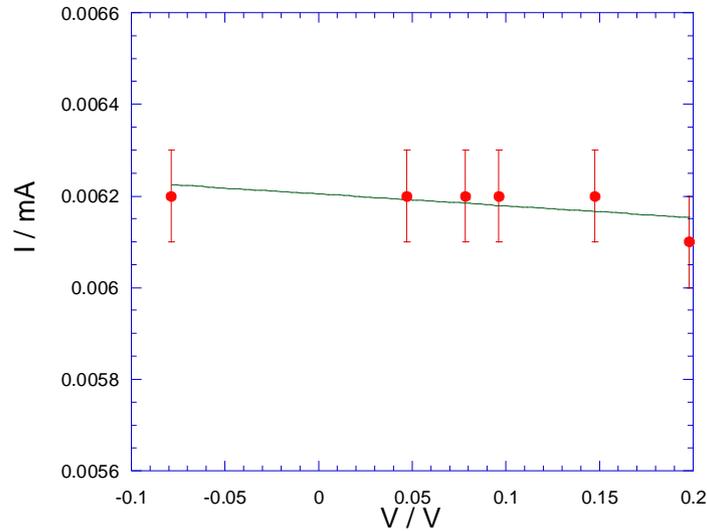


Figura 8: representación de la parte lineal de la pareja de datos $I - V$ en la región de potenciales pequeños. Dichos valores siguen la ecuación Ec.(6). $I_0=6.20\pm 0.02 \mu A$; $R_{SH}=1.8\pm 0.5 M\Omega$.

Una vez obtenidos dichos valores, se pueden determinar los demás parámetros de la Ec.(3) (n, R_s) tomando todos los pares de puntos $I - V$ y realizando un ajuste no lineal.

El ajuste obtenido se muestra en la figura 9. En este ajuste se fijan los parámetros I_0 y R_{SH} calculados con anterioridad en el entorno $V \rightarrow 0$. La tabla 1 recoge los valores obtenidos de los parámetros mediante el ajuste de la expresión Ec.(3).

Cabe destacar que el valor del coeficiente n debería ser 1 si la célula solar fuera ideal. En células solares comerciales es habitual dejar variable dicho coeficiente y determinarlo a partir del ajuste de los datos $I(V)$ a la Ec.(3).

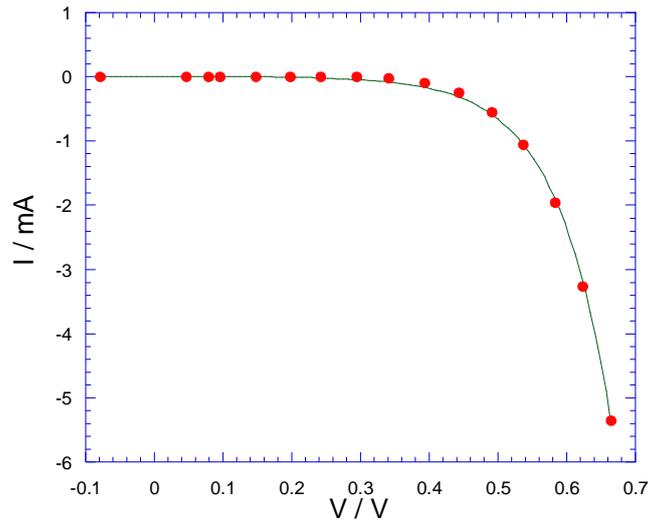


Figura 9: Curva $I - V$ sin iluminar.

Los parámetros obtenidos de la Ec.(3) mediante el ajuste de los puntos $I(V)$ con condiciones de oscuridad se muestran en la tabla 1. Como en este caso la célula esta sin iluminar, se supone $I_L=0$.

| | |
|----------|-----------------------|
| I_0 | $6.20 \pm 0.02 \mu A$ |
| R_{SH} | $1.8 \pm 0.5 M\Omega$ |
| R_s | $26.4 \pm 1.3 \Omega$ |
| n | 3.12 ± 0.04 |

Tabla 1: Valores de los parámetros de la Ec.(3)

MEDIDAS BAJO ILUMINACIÓN

El trabajo bajo iluminación permitirá valorar el funcionamiento de la célula bajo las condiciones de iluminación establecidas. Servirá para determinar el único parámetro de la Ec.(3) que refleja el efecto de la iluminación, I_L . El valor de este parámetro dependerá exclusivamente de la intensidad de luz que llega a la célula. Lo que más importante en la realización de este proyecto es que la determinación de I_L permitirá el estudio de la eficiencia de la célula.

Se han realizado medidas bajo distintas condiciones de iluminación. Para variar dichas condiciones hemos colocado la célula solar a diferentes distancias de la fuente de iluminación: $41.1 \pm 0.1 \text{cm}$, $34.0 \pm 0.1 \text{cm}$ y $26.6 \pm 0.1 \text{cm}$. De esta manera hemos podido observar también el comportamiento de la célula al variar la intensidad de luz incidente. Hemos comprobado que este comportamiento es lineal con la potencia de luz incidente. Es decir, si la célula es iluminada con el doble de intensidad, la corriente de cortocircuito (I_{sc}) se duplica. Estas medidas obtenidas bajo determinadas condiciones de iluminación, se pueden utilizar para determinar la potencia irradiada por una fuente problema

(detector de luz). En general la irradiancia afecta a la corriente de cortocircuito, manteniéndose prácticamente constante la tensión en circuito abierto. De tal manera que esta intensidad es proporcional a la irradiancia:

$$I_{sc}(E_2) = I_{sc}(E_1) \frac{E_2}{E_1} \quad (7)$$

Donde $I_{sc}(E_n)$ es la corriente de cortocircuito para un nivel de irradiancia E_n .

El circuito empleado para la realización de las medidas bajo iluminación es muy similar al de las medidas en oscuridad, pero en este caso la resistencia variable hace la función de resistencia de carga y no de divisor de tensión.

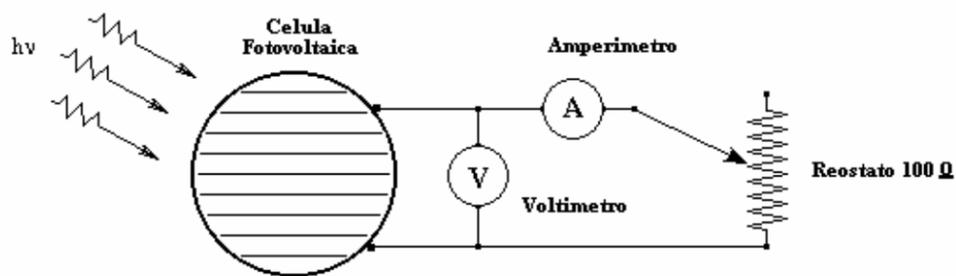


Figura 10: Circuito empleado en las medidas bajo iluminación.

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 11, donde se puede observar que las curvas $I - V$ bajo las determinadas condiciones de iluminación no son exactamente las esperadas. Teóricamente se espera que bajo iluminación la curva característica de la célula sea exactamente igual que sin iluminar, pero trasladada un valor de corriente, I_{sc} , que depende de la irradiancia de la célula.

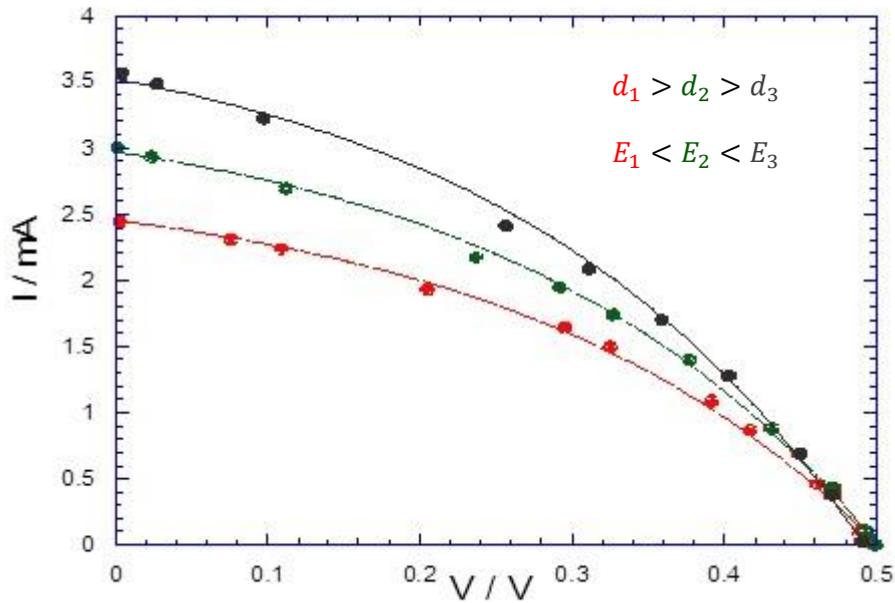


Figura 11: Efecto de la irradiancia sobre la curva característica $I(V)$ de una célula fotovoltaica.

$$d_1=41.1\pm 0.1\text{cm}; d_2=34.0\pm 0.1\text{cm}; d_3=26.6\pm 0.1\text{cm}$$

Como se puede observar, la forma de la curva sin iluminar (figura 9) y la de la curva bajo unas condiciones determinadas de iluminación (figura 11) no es la misma. Tras la realización de un ajuste de estas curvas, se ha obtenido un valor del factor de idealidad n de 9.5 ± 0.7 , muy dispar del obtenido anteriormente (tabla 1). El valor de este factor de idealidad varía principalmente debido al aumento de temperatura producido por la iluminación y otros factores no identificados. El hecho es que al aumentar la temperatura también varía I_0 en la expresión Ec.(3), ya que tiene una dependencia cúbica con la temperatura. Es por ello, que una variación pequeña en la temperatura, produce una variación grande en el factor de idealidad. Del mismo modo, también varía el valor de R_s con respecto a la irradiancia. Esta variación es debida principalmente a que, como se ha explicado anteriormente, R_s es debida a las interconexiones, los contactos metálicos, la resistencia de carga del semiconductor y a la resistencia de carga entre los contactos y el semiconductor, y estos parámetros varían con la irradiancia. Estas variaciones los fabricantes suelen introducirlas fenomenológicamente en el factor q de la expresión Ec.(3), modelo de carga efectiva, y no el valor exacto de la carga del electrón, pero dejando fijos el resto de los parámetros del diodo.

El voltaje en circuito abierto, V_{oc} no depende de la irradiación sobre la célula, como muestra la figura 11. En este caso este valor está en torno a 0.5V. El valor del V_{oc} varía con la temperatura. Al aumentar la temperatura a la cual se realizan las medidas, el voltaje en circuito abierto disminuye.

A partir de estas curvas se obtiene la intensidad en cortocircuito ($V = 0$), I_{sc} ; y el potencial en circuito abierto ($I = 0$), V_{oc} ; para cada una de las diferentes condiciones de iluminación. Usando estos valores, los datos experimentales de potencia máxima que se muestran en la figura 12 y utilizando la expresión Ec.(4) se calcula el factor de forma, FF, de las curvas.

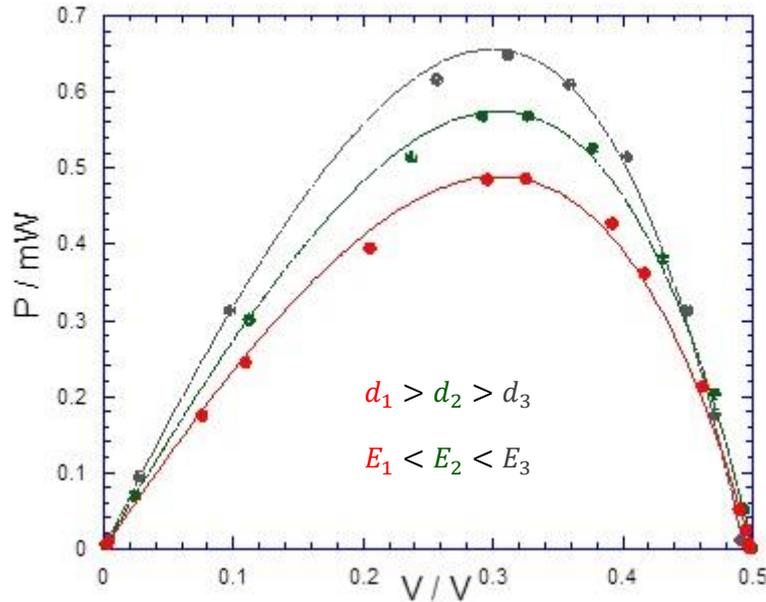


Figura 12: Variación de la potencia de la célula en función del voltaje. $d_1=41.1\pm 0.1\text{cm}$; $d_2=34.0\pm 0.1\text{cm}$; $d_3=26.6\pm 0.1\text{cm}$

| Condiciones de iluminación | I_{sc} / mA | V_{oc} / V | I_{max} / mA | V_{max} / V | P_{max} / mW | FF |
|----------------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|
| E_1 | 2.45 ± 0.01 | 0.500 ± 0.001 | 1.565 ± 0.001 | 0.305 ± 0.001 | 0.4889 ± 0.0016 | 0.390 ± 0.002 |
| E_2 | 2.97 ± 0.01 | 0.501 ± 0.001 | 1.883 ± 0.001 | 0.306 ± 0.001 | 0.5747 ± 0.0019 | 0.387 ± 0.002 |
| E_3 | 3.52 ± 0.01 | 0.492 ± 0.001 | 2.247 ± 0.001 | 0.297 ± 0.001 | 0.656 ± 0.002 | 0.3853 ± 0.0019 |

Tabla 2: Valores de los parámetros más representativos de las curvas características y de potencia (figuras 11 y 12).

Los valores de la tabla 2 nos muestran el bajo factor de forma de las curvas características de las figuras 11 y 12. El caso ideal sería la unidad, por lo que cuanto más se acerca el FF a este valor mejor será la célula. El FF de esta célula se encuentra en torno a 0.4. La discrepancia entre los tres valores del FF es muy poco significativa, aunque este factor disminuye con la potencia de irradiancia.

3.2 EFICIENCIA

Conociendo ahora la potencia que genera la fuente de luz utilizada y los valores de la tabla 2 hemos determinado la eficiencia de la célula, mediante la expresión Ec.(5). La hoja de características de la célula (anexo III) proporciona la relación entre irradiancia e intensidad de cortocircuito I_{sc} como: $I_{sc} = 0.95E$ siendo I_{sc} la intensidad de

cortocircuito en μA y E la irradiancia en lx . Conociendo este valor, y el de las corrientes de cortocircuito para las diferentes condiciones de iluminación se puede calcular el valor de la irradiancia para cada condición.

Para obtener las eficiencias hemos determinado en primer lugar la potencia en W incidente sobre la célula. Para convertir lx en W existe una dependencia con el tipo de luz del que se trate, ya que depende de la longitud de onda. En el caso de luz solar, el factor de conversión es de $0.0079 W / m^2$ por cada lx [9]. Como la lámpara utilizada en las medidas produce una simulación de la luz solar se utilizará dicho factor de conversión. Utilizando este factor y los valores de la irradiancia incidente sobre la célula, así como la potencia máxima generada, se puede determinar la eficiencia de la misma utilizando la expresión Ec.(5). Los resultados obtenidos para las distintas condiciones de iluminación se muestran en la tabla 3.

| Condición de iluminación | Irradiancia / lx | Irradiancia / mW | Irradiancia / Soles | $\eta_{At} / \%$ |
|--------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|------------------|
| E_1 | 2579 ± 11 | 5.04 ± 0.02 | $(2.037 \pm 0.009) * 10^{-2}$ | 9.70 ± 0.05 |
| E_2 | 3126 ± 11 | 6.11 ± 0.02 | $(2.470 \pm 0.009) * 10^{-2}$ | 9.41 ± 0.04 |
| E_3 | 3705 ± 11 | 7.24 ± 0.02 | $(2.927 \pm 0.009) * 10^{-2}$ | 9.07 ± 0.04 |

Tabla 3: Resultados de la eficiencia de la célula fotovoltaica para tres condiciones diferentes de iluminación. Equivalencia: $1000W/m^2 \equiv 1$ Sol

Como se muestra en la tabla 3, la eficiencia de la célula varía ligeramente con respecto a la iluminación incidente. Obtenemos un valor de eficiencia de en torno al 9-10% que concuerda con los valores de eficiencias actuales de las células solares fotovoltaicas de Silicio, que oscila entre el 6 y el 22% [12].

3.3 DETECTOR DE LUZ

Una vez determinada la eficiencia de la célula, esta puede utilizarse como un detector de luz. Dicho valor de la eficiencia permite emplear la célula como detector cuando la temperatura de trabajo sea de unos $20^\circ C$, ya que a temperaturas distintas los valores de eficiencia varían.

Si se quiere utilizar como detector de luz solar, o de luz generada por lámparas, (como es el caso de la fuente de iluminación utilizada en esta práctica) la expresión que proporciona la irradiancia en función de la intensidad de cortocircuito es:

$$E (lx) = 1052.6 I_{sc}$$

Donde la corriente de cortocircuito se expresa en mA y se obtiene la irradiancia en lx .

Si conocemos el factor de conversión del tipo de luz irradiada, podemos determinar la irradiancia incidente en W/m^2 . En el caso de la irradiancia solar dicho factor equivale a $0.0079W/m^2$ por cada lx . De esta manera la expresión anterior se convierte en:

$$E (W / m^2) = 8.3158 I_{sc}$$

En la figura 13 se muestra el comportamiento lineal que presenta la corriente de cortocircuito I_{sc} en función de la irradiancia que llega a la célula, Ec.(7). De esta manera, midiendo el valor de dicha corriente se puede obtener la irradiancia incidente sobre la célula, y se dispone con ello de un detector de luz.

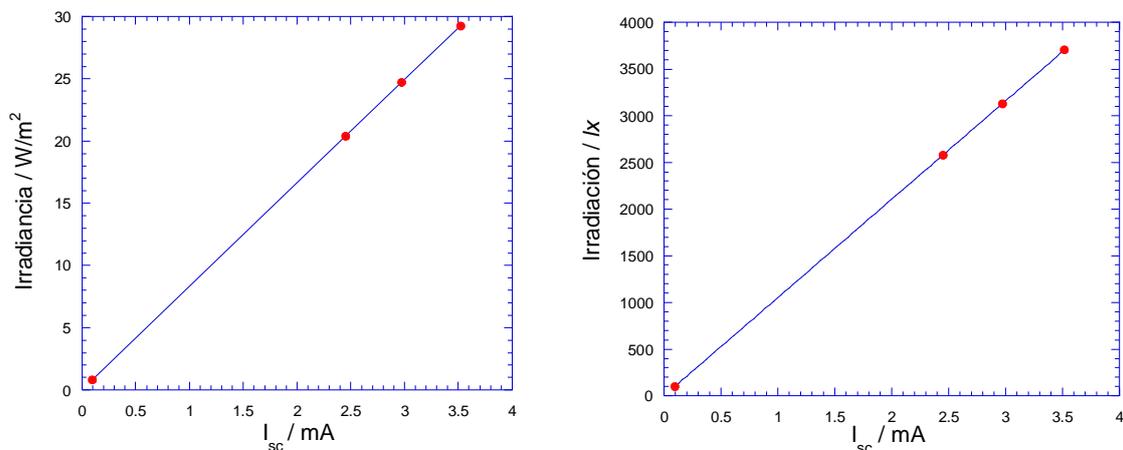


Figura 13: Relación entre la irradiancia solar a la célula y la corriente de cortocircuito que esta genera a $T=20^{\circ}C$. A la izquierda en W / m^2 , valida solo cuando la luz tiene un espectro similar al solar; y a la derecha en lx para cualquier tipo de irradiación, cualquier espectro.

3.4 PROTECCIÓN DE PANELES: USO DE VIDRIOS FOTOACTIVOS

Para proteger los paneles fotovoltaicos de los factores climatológicos y externos, como por ejemplo la lluvia, suciedad, irradiación, etc. se colocan unos vidrios protectores delante del panel fotovoltaico. De esta manera se permite el paso de luz hasta la célula, evitando el paso de sustancias que puedan ocasionar un mal funcionamiento de la misma.

La introducción de estos vidrios lleva acarreado una disminución de la eficiencia de la célula debido a la reflexión que sufre la luz en ellos y a la absorción de parte del espectro solar. Este hecho nos lleva al punto importante en la evolución de la tecnología fotovoltaica actual, encontrar un vidrio con las características ópticas óptimas para reducir cuanto sea posible la perdida de eficiencia en la trasformación de energía lumínica en eléctrica.

Uno de los principales problemas que se dan en las células expuestas a radiación solar sin protección es la solarización. Esta es debida fundamentalmente a la radiación ultravioleta del espectro, y produce un deterioro progresivo del material y con ello una

pérdida en las características de la célula. Por lo tanto, la instalación de un vidrio protector que absorba la zona ultravioleta del espectro, y permita pasar el resto, podría reducir este problema. Debido a que la zona ultravioleta del espectro no es eficiente desde el punto de vista fotovoltaico en células de silicio, en principio, no se pierde eficiencia en la célula.

VIDRIOS IMPLEMENTADOS

En este trabajo hemos investigado el efecto de 11 muestras de diferentes vidrios sobre la eficiencia de una célula de silicio fotovoltaica. La gran mayoría son vidrios de alta transmitancia y cada uno con una composición diferente. Los vidrios investigados se describen a continuación. Los nombres de las muestras responden a aquellos asignados durante el proceso de síntesis.

- **Muestra Referencia:** Es un vidrio cuadrado, con una de sus partes lisas y la otra rallada. Es un vidrio comercial de la empresa *St. Gobain* con prestaciones de alta transmitancia lumínica. No contiene impurezas y tiene un grosor de 3.1mm.



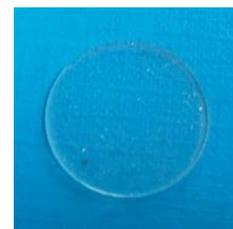
- **Muestra Diamant:** Vidrio comercial de la compañía *Guardian* de alta transmitancia y de forma rectangular con un grosor de 3.83mm. Se trata también de un vidrio de referencia sin impurezas.



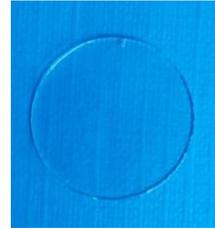
- **Muestra 18:** Se trata de una muestra prototipo sintetizada en el laboratorio de la UC (14/11/08). Tiene una composición de 1% de CeO_2 y 1% de Bi_2O_3 . Durante su fabricación estuvo 14 horas a 1100 °C. Es una muestra con forma circular, aunque con muchas rupturas. Tiene un espesor de 0.94mm y es la muestra con mayor contenido de impurezas de las que se dispone.



- **Muestra 21:** Se trata de un vidrio prototipo fabricado en el laboratorio de la UC (1/12/08). Tiene una forma circular y un espesor de 1mm. Es similar a la muestra 18 pero con otra composición, 1% de CeO_2 y 0.5% de Bi_2O_3 . Durante su fabricación estuvo 15 horas y 30 minutos a 1100 °C.



- *Muestra CeBiEu 1*: Se trata de otro prototipo creado en el laboratorio de la UC (22/11/10). Tiene la misma forma que la anterior, pero en este caso un espesor menor, 0.82mm. Está impurificada por 0.5% de CeO_2 , 1% de Bi_2O_3 y 0.5% de Eu_2O_3 . En este caso estuvo 14 horas a 1100 °C durante su fabricación.



- *Muestra CeBiEu 2*: Es una muestra similar a la anterior, pero con diferente contenido de impurezas: 0.75% de CeO_2 , 0.75% de Bi_2O_3 y 0.5% de Eu_2O_3 . El espesor es de 0.8mm. Cabe destacar en esta muestra que estaba rota, no tenía forma circular, y no llegaba a cubrir toda la superficie de la célula.



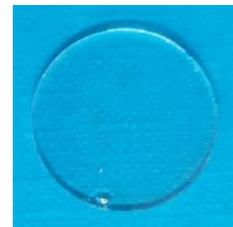
- *Muestra CeBiEu 3*: Otro prototipo de muestra similar a las dos anteriores, pero con unas impurezas diferentes: 1% de CeO_2 , 0.5% de Bi_2O_3 y 0.5%. Es la más fina, con un espesor de 0.78mm y forma circular, con una pequeña muesca, aunque cubre por completo la célula.



- *Muestra con nanoparticulas*: se trata de un prototipo de vidrio en el cual se han introducido nanoparticulas, 3% de *Eu* y 7% de *Bi*. Está fabricado por la UC (3/3/16) a partir de vidrio reciclado y durante su fabricación ha estado a 800 °C durante 10 horas. Tiene forma circular, aunque con varias muescas.



- *Muestra 1*: es un vidrio de sintetizado fabricado por la UC (1/10/07). Tiene forma circular también, y un espesor de 0.105cm. Al ser un vidrio de referencia no contiene impurezas ópticamente activas.



- *Muestra con Cu*: vidrio fabricado por *St. Gobain* con un alto porcentaje de cobre en su composición, dotándole de un color azulado intenso. Tiene una forma rectangular y un grosor de 4mm.



- *Muestra portamuestras:* portamuestras de vidrio comercial utilizado en microscopios ópticos. Forma rectangular y espesor similar a los anteriores, en torno a 1mm.



En todos los casos el contenido de impurezas se expresa en % del peso total de la muestra.

MEDIDA DE LA EFICIENCIA

Para ver cómo afecta la introducción de vidrios en el panel fotovoltaico hemos medido las curvas $I(V)$ en la célula fotovoltaica con y sin vidrio. La toma de medidas la hemos realizado para dos condiciones de iluminación diferentes (E_1 y E_2 anteriores).

Lo que realmente es interesante en la toma de estas medidas es el valor de la corriente de cortocircuito I_{sc} con y sin vidrio. Hemos comprobado que la inclusión del vidrio como cabe esperar produce una disminución en dicha corriente. Esta disminución es debida a que, como hemos explicado anteriormente, a la célula llega menos intensidad luminosa, ya que parte se refleja en las caras del vidrio y parte se absorbe dentro de él.

De esta manera, y normalizando a la corriente de cortocircuito sin colocar el vidrio, se puede obtener la variación de eficiencia de interponer un vidrio entre la radiación solar y la célula. Esta variación de eficiencia hemos comprobado que es independiente de las condiciones de iluminación. De esta manera al realizar las medidas para dos condiciones diferentes de iluminación nos ha permitido estimar el error de las medidas con mayor fiabilidad y solidez.

La figura 14 muestra los valores de la eficiencia que hemos determinado experimentalmente para cada muestra de vidrio siguiendo la metodología expuesta. La eficiencia está normalizada a la unidad, de manera que la célula desnuda tiene una eficiencia de 1.

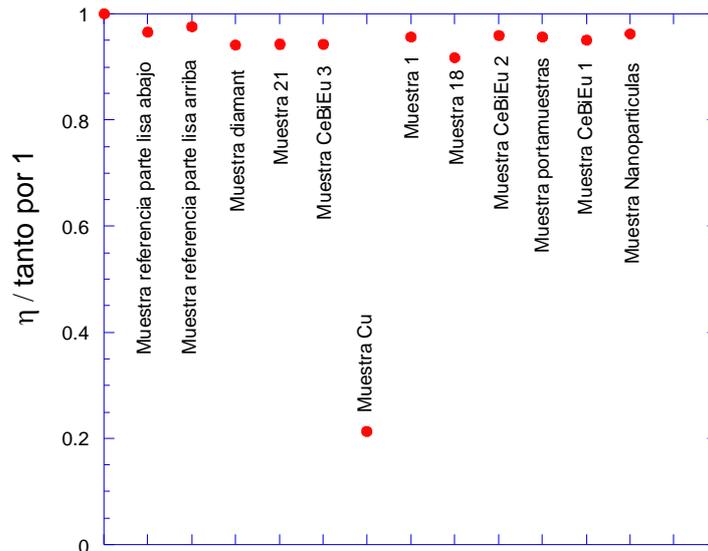


Figura 14: variación de la eficiencia normalizada en función del vidrio muestra implementado.

Como se puede observar en la figura 14, la gran mayoría de los vidrios son de alta transmitancia y no reducen mucho la eficiencia de la célula; las variaciones oscilan en torno a 1-3 %. Sin embargo, en la muestra de *Cu*, la eficiencia se reduce de manera muy considerable. Esta muestra tiene un color azulado, debido a que tiene una fuerte absorción en el espectro del visible, reduciendo de esta manera la cantidad de luz capaz de producir corriente en la célula. Además, el máximo de absorción se produce en la región en torno a 800nm [15], que es una región espectral de gran rendimiento fotovoltaico para células de silicio, lo que hace disminuir notablemente la eficiencia de la célula.

Hoy en día las empresas fabricantes de estos tipos de vidrios de protección fotovoltaica están investigando la manera de mejorar su eficiencia en valores en torno a un 1%. Por lo que si se muestra ahora aumentado la parte de la gráfica de los vidrios de alta transmitancia se distinguirá mejor la calidad de los vidrios. Los valores numéricos de la figura 14 se muestran en el anexo IV.

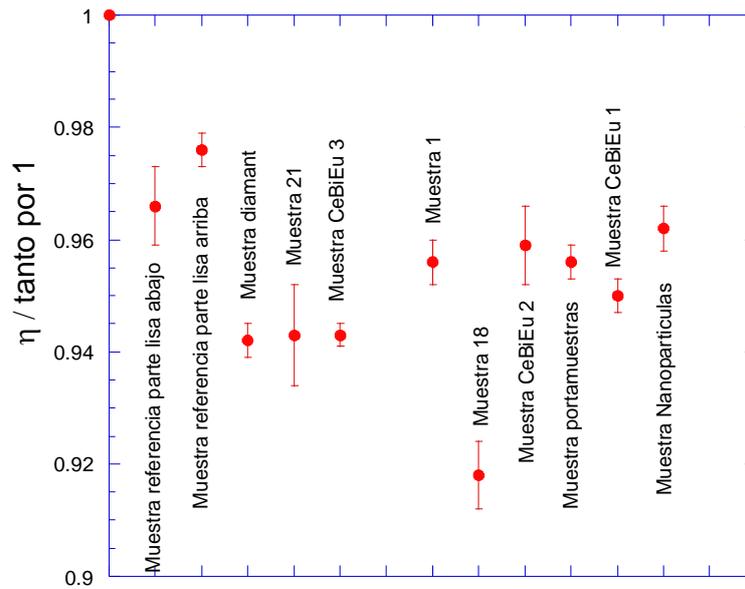


Figura 15: Ampliación de la figura 14 con los valores de la eficiencia normalizada según el vidrio muestra de alta transmitancia implementado, con sus barras de error.

Como se muestra en la figura 15, la gran mayoría de las muestras tienen un comportamiento similar respecto a la eficiencia que presentan, entre 0.92 y 0.98. Destaca claramente una muestra con la menor eficiencia de entre los vidrios de alta transmitancia que es la muestra 18 ($\eta=0.92$). Esta diferencia con respecto al resto de la serie de alta transmitancia es debida al gran número de impurezas e imperfecciones que tiene la muestra, que son un foco de dispersión de la luz y por tanto de atenuación de la radiación incidente sobre la célula. También hay que destacar que, aunque por poco, la muestra con mayor eficiencia es la muestra referencia, como era de esperar al tratarse de una muestra completamente sin impurezas. Es curioso que es más eficiente colocando la parte lisa de la muestra arriba, es decir con la parte rallada en contacto con la célula contrariamente a como se instala en los paneles solares.

Otro valor curioso es el obtenido para la muestra del portamuestras. Hemos constatado que estos vidrios tienen un nivel de eficiencia similar al de las demás muestras, como corresponde a un portamuestras de microscopio que ha de presentar la máxima transmitancia posible para aumentar la calidad de la imagen.

Con respecto a la muestra de *CeBiEu 2* conviene recordar que no cubría por completo la célula por lo que el valor de eficiencia que se obtiene es engañoso, y su valor real debería ser menor.

Y por último también resaltar el valor obtenido en el caso de la muestra impregnada de nanoparticulas, presenta una eficiencia destacable, que es similar, o incluso superior, a los vidrios de referencia. En todo caso, la activación del vidrio con impurezas ópticamente activas presenta eficiencias comparables en algunos casos a los vidrios de referencia *St. Gobain*, y superiores a los de referencia de *Guardian*. Este efecto

es particularmente notable en los vidrios de *CeBiEu 2* y en la muestra de nanopartículas. En el primer caso además del mantenimiento de la alta eficiencia, tiene la ventaja de incorporar unos aditivos que absorben la luz UV, protegiendo a la célula y minimizando los efectos de la solarización (envejecimiento) del propio vidrio, aumentando con ello su tiempo de vida útil.

4. CONCLUSIONES

1) En primer lugar, destacar el alto valor del factor de idealización obtenido a partir de las curvas $I(V)$ en la caracterización de la célula fotovoltaica. cuyo valor de idealización debía estar comprendido entre 1 y 2. Esta desviación con respecto a su valor esperado es explicada por la introducción de una carga efectiva, en lugar de la carga real del electrón en la expresión Ec.(3). Como en nuestro caso se tomó la carga real del electrón el valor del factor de idealización no se encuentra entre sus valores esperados.

2) Hemos comprobado que la célula investigada presenta un el bajo factor de forma en torno al 0.4, con una variación significativa dependiendo de las condiciones de iluminación.

3) La introducción de vidrios fotoactivos protectores afecta de distinta forma a la eficiencia de la célula dependiendo de la composición del vidrio y sobre todo del contenido de impurezas ópticamente activas. Destacar, como se ha hecho anteriormente, la muestra de *Cu*, que reduce drásticamente la eficiencia.

4) Hemos comprobado que la función primordial de los vidrios protectores de las células solares investigados es la de protección de la célula, sin perder de vista la eficiencia fotovoltaica. Se trata de vidrios que permiten el paso de luz de interés fotovoltaico sin mayores pérdidas que las producidas debido a las reflexiones de las caras del vidrio, evitando la absorción dentro del vidrio.

5) La incorporación de aditivos en los vidrios que absorban la luz UV permite minimizar los efectos de la solarización (envejecimiento) tanto en la célula como en el propio vidrio, aumentando así la vida útil de los mismos. Es el caso de las muestras de *CeBiEu*.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Applied photovoltaics*. S.R. Wenham, M.A. Green, M.E. Watt y R. Corkish. Earthscan
- [2] *Energía Solar Fotovoltaica*. Javier María Mendez Muñiz y Rafael Cuervo García. FC Editorial
- [3] *Energy Materials*. D.W. Bruce, D. O'Hare y R. I. Walton. Wiley
- [4] *Physics of Semiconductors*. B. Sapoval y C. Hermann. Springer-Verlag
- [5] <http://unef.es/2016/02/espan%CC%83a-instala-solo-49mw-fotovoltaicos-en-2015/>
- [6] <http://electronica.ugr.es/~amroldan/devte/cap02.htm>
- [7] <http://web.uam.es/docencia/texpIV/CelulasSolares3b.htm>
- [8] http://orff.uc3m.es/bitstream/handle/10016/6037/PFC_Julio_Fernandez_Ferichola.pdf?sequence
- [9] <http://physics.stackexchange.com/questions/135618/lux-and-w-m2-relationship>
- [10] *General Energetics: Energy in the Biosphere and civilization*. Vaclav Smil. Wiley-Interscience.
- [11] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d6/Pn-junction-equilibrium.png>
- [12] *Photovoltaics Report*. Fraunhofer ISE. Jul 28, 2014
- [13] *Caracterización de minipaneles fotovoltaicos para aplicaciones inalámbricas*. Gerard Herrera Prat. TFG Septiembre 2010. UPC
- [14] *Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil*. Pedro José Débora. TFG Univ. Carlos III.
- [15] *Spectroscopic study of Cu^{2+} / Cu^{+} doubly doped and highly transmitting glasses for solar spectral transformation*. S. Gómez, I. Urra, R. Valiente y F. Rodríguez. Volumen número 95, Agosto del 2011, Solar Energy Materials and Solar Cells.

ANEXOS

ANEXO I: ERRORES

Los errores que acompañan a los valores de las diferentes magnitudes que se han medido directamente en el laboratorio (I, V) vienen dados por la precisión del instrumental usado para medir dichos valores, o de la oscilación de estos instrumentos al realizar la medida.

Por su parte, las magnitudes medidas indirectamente, es decir, calculadas a partir de los valores de las magnitudes medidas directamente, como puede ser la potencia, por ejemplo, se calculan mediante propagación de errores. Esta propagación consiste en que si tenemos una magnitud Z que es función de otras, $Z = f(A, B, C, \dots)$, las cuales tienen un error absoluto en la medida $\Delta A, \Delta B, \Delta C, \dots$. Este error será propagado a el valor de Z de la siguiente manera:

$$\Delta Z^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial A}\right)^2 \Delta A^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial B}\right)^2 \Delta B^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial C}\right)^2 \Delta C^2 + \dots$$

Donde $\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)$ es la derivada parcial de la función f , la cual define Z , con respecto a la variable x .

ANEXO II: IMÁGENES



Voltímetro: 616 Digital Electrometer, Keithley



Amperímetro: 34401A Multimeter, HP



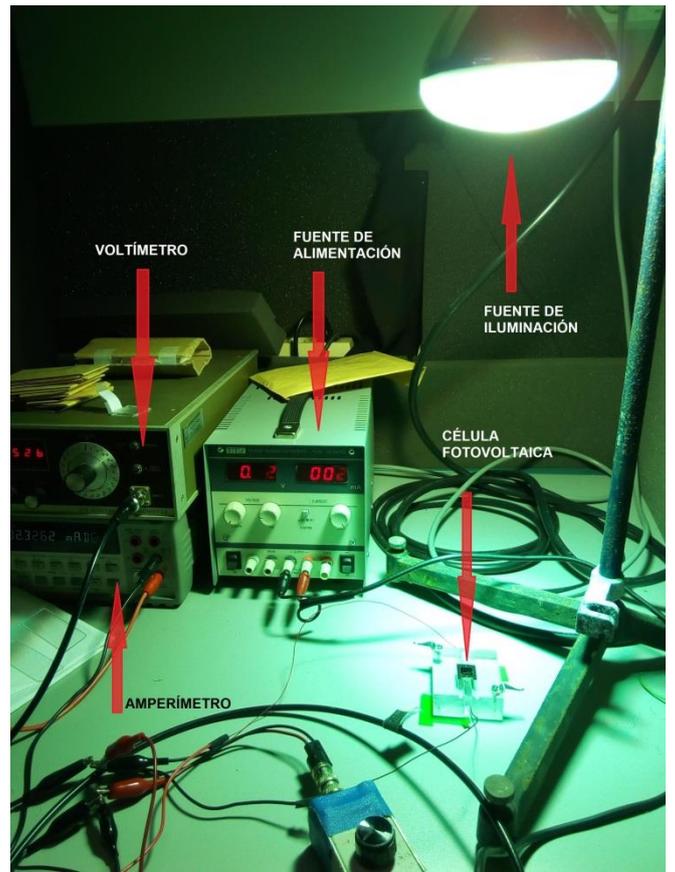
Fuente de alimentación: PL330 32V-3A PSU, TTI



Lugar de toma de medidas



Fuente de iluminación: *Ultra-Vitalux* 300W



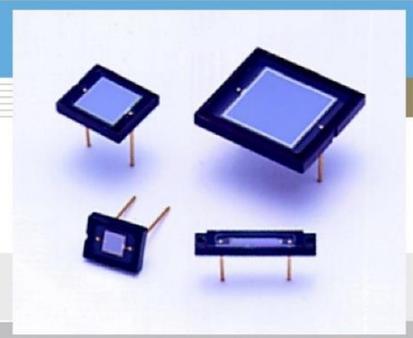
Zona de trabajo.

ANEXO III: HOJA DE CARACTERÍSTICAS DE LA CÉLULA

PHOTODIODE

Si photodiode S1337 series

For UV to IR, precision photometry



Features

- High UV sensitivity: QE 75 % (λ = 200 nm)
- Low capacitance

Applications

- Analytical equipment
- Optical measurement equipment

General ratings / Absolute maximum ratings

| Type No. | Dimensional outline/ Window material * | Package (mm) | Active area size (mm) | Effective active area (mm ²) | Absolute maximum ratings | | |
|--------------|---|-----------------|--------------------------|---|---|---|---|
| | | | | | Reverse voltage V _R Max. (V) | Operating temperature T _{opr} (°C) | Storage temperature T _{stg} (°C) |
| S1337-16BQ | /Q | 2.7 × 15 | 1.1 × 5.9 | 5.9 | 5 | -20 to +60 | -20 to +80 |
| S1337-16BR | /R | | | | | | |
| S1337-33BQ | /Q | 6 × 7.6 | 2.4 × 2.4 | 5.7 | | | |
| S1337-33BR | /R | | | | | | |
| S1337-66BQ | /Q | 8.9 × 10.1 | 5.8 × 5.8 | 33 | | | |
| S1337-66BR | /R | | | | | | |
| S1337-1010BQ | /Q | 15 × 16.5 | 10 × 10 | 100 | | | |
| S1337-1010BR | /R | | | | | | |

Electrical and optical characteristics (Typ. T_a=25 °C, unless otherwise noted)

| Type No. | Spectral response range (nm) | Peak sensitivity wavelength P (nm) | Photo sensitivity S (A/W) | | | | Short circuit current I _{sc} 100 lx | | Dark current I _D V _R =10 mV Max. (pA) | Temp. coefficient of I _D T _{CID} (times/°C) | Rise time t _r V _R =0 V R _L =1 k (μs) | Terminal capacitance C _t V _R =0 V f=10 kHz (pF) | Shunt resistance R _{sh} V _R =10 mV | | NEP (W/Hz ^{1/2}) | |
|--------------|---------------------------------|--|---------------------------|--------|------|--------------------|--|-----------|---|---|---|---|--|----------|----------------------------|----------|
| | | | p | 200 nm | | He-Ne laser 633 nm | GaAs LED 930 nm | Min. (μA) | | | | | Typ. (μA) | Min. (G) | | Typ. (G) |
| | | | | Min. | Typ. | | | | | | | | | | | |
| S1337-16BQ | 190 to 1100 | 960 | 0.5 | 0.10 | 0.12 | 0.33 | 0.5 | 4.0 | 5.3 | 1.15 | 0.2 | 65 | 0.2 | 0.6 | 1.0 × 10 ⁻¹⁴ | |
| S1337-16BR | 320 to 1100 | | 0.62 | - | - | 0.4 | 0.6 | 4.4 | 6.2 | | | | 8.4 × 10 ⁻¹⁵ | | | |
| S1337-33BQ | 190 to 1100 | | 0.5 | 0.10 | 0.12 | 0.33 | 0.5 | 4.0 | 5.0 | | 0.2 | 65 | 0.3 | 1 | 8.1 × 10 ⁻¹⁵ | |
| S1337-33BR | 320 to 1100 | | 0.62 | - | - | 0.4 | 0.6 | 4.4 | 6.2 | | | | | | 6.5 × 10 ⁻¹⁵ | |
| S1337-66BQ | 190 to 1100 | | 0.5 | 0.10 | 0.12 | 0.33 | 0.5 | 20 | 27 | | 1 | 380 | 0.1 | 0.4 | 1.3 × 10 ⁻¹⁴ | |
| S1337-66BR | 320 to 1100 | | 0.62 | - | - | 0.4 | 0.6 | 22 | 33 | | | | | | 1.0 × 10 ⁻¹⁴ | |
| S1337-1010BQ | 190 to 1100 | | 0.5 | 0.10 | 0.12 | 0.33 | 0.5 | 65 | 78 | | 3 | 1100 | 0.05 | 0.2 | 1.8 × 10 ⁻¹⁴ | |
| S1337-1010BR | 320 to 1100 | | 0.62 | - | - | 0.4 | 0.6 | 70 | 95 | | | | | | 1.5 × 10 ⁻¹⁴ | |

* Window material Q: quartz glass, R: resin coating

SOLID STATE DIVISION

HAMAMATSU

Spectral response

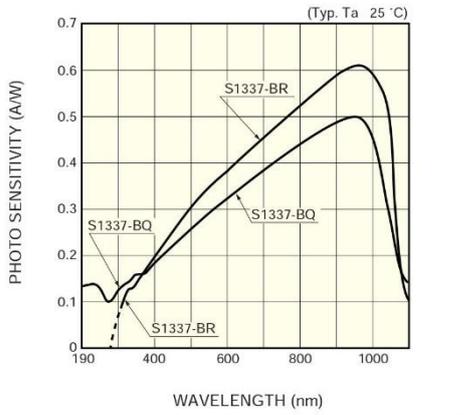
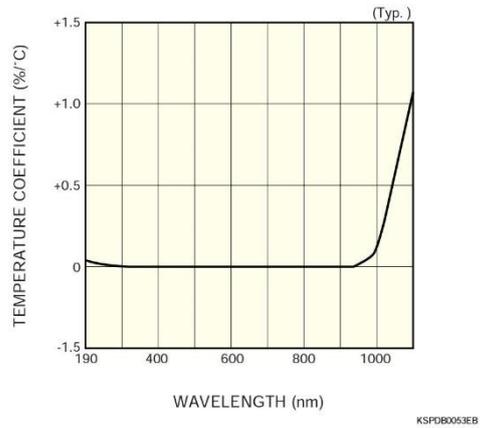
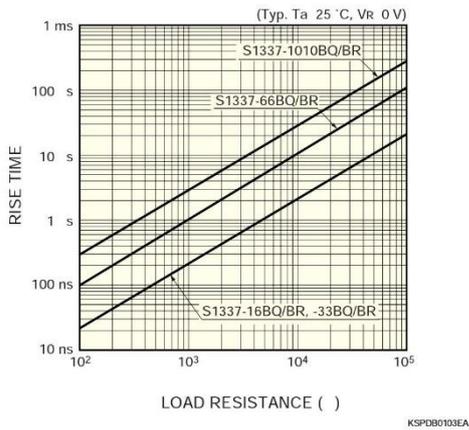


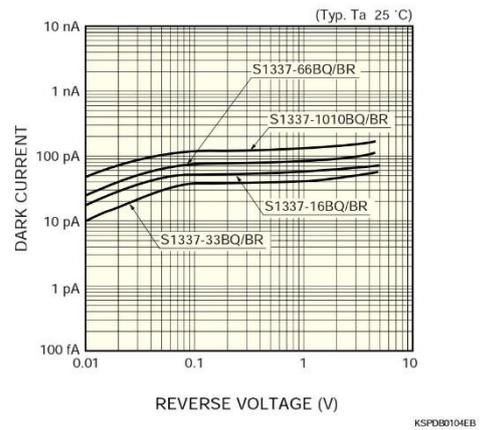
Photo sensitivity temperature characteristic



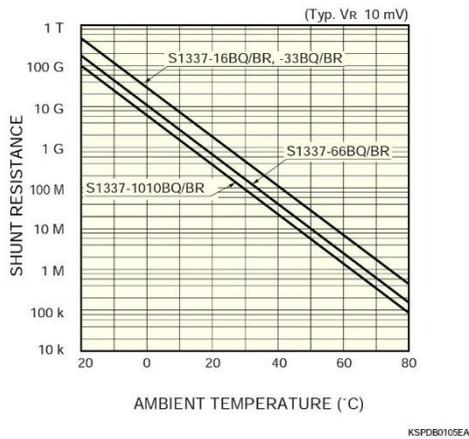
Rise time vs. load resistance



Dark current vs. reverse voltage

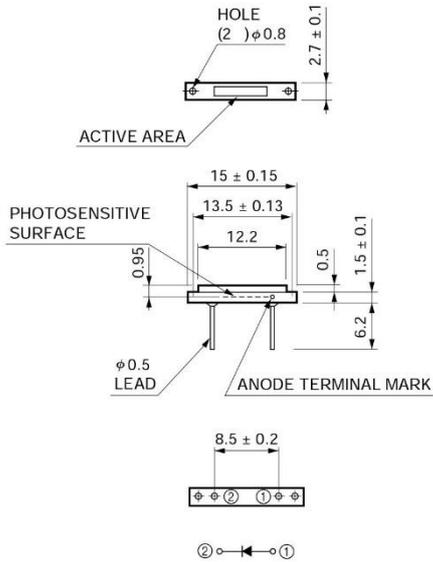


Shunt resistance vs. ambient temperature



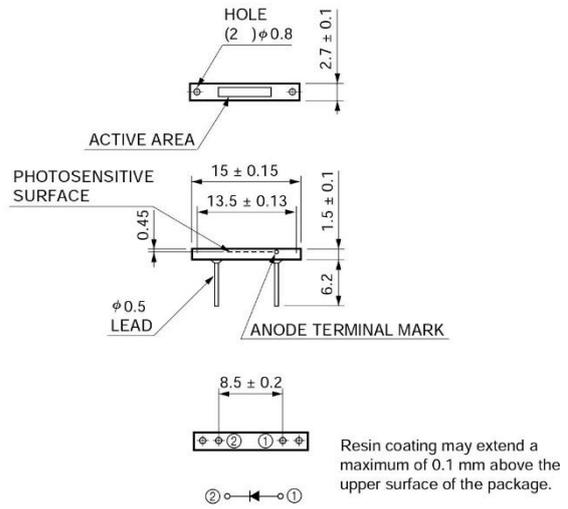
Dimensional outlines (unit: mm)

S1337-16BQ



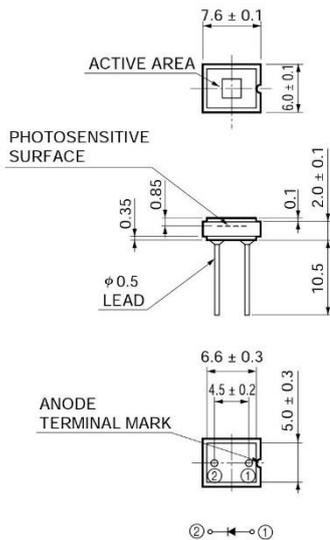
KSPDA0106EA

S1337-16BR



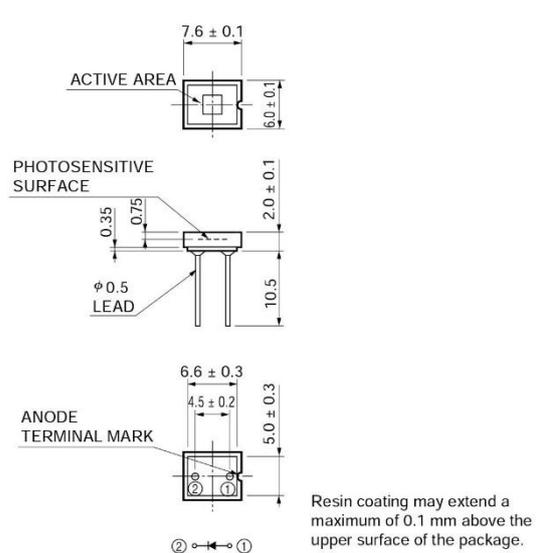
KSPDA0106EA

S1337-33BQ



KSPDA0107EA

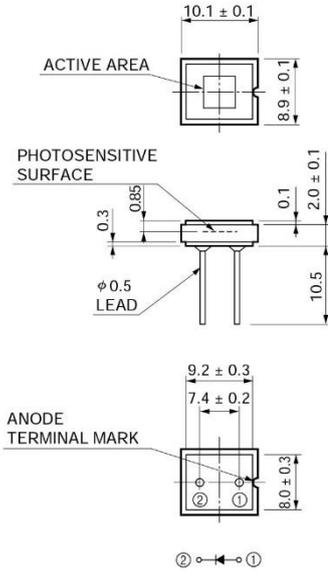
S1337-33BR



KSPDA0108EA

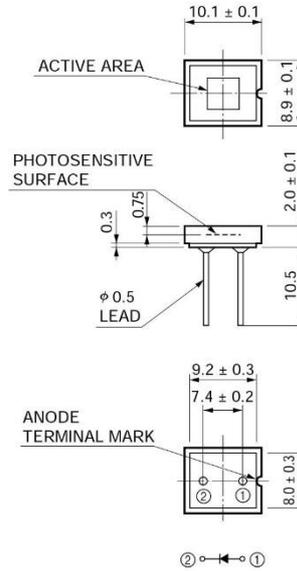
Si photodiode **S1337 series**

S1337-66BQ



KSPDA0109EA

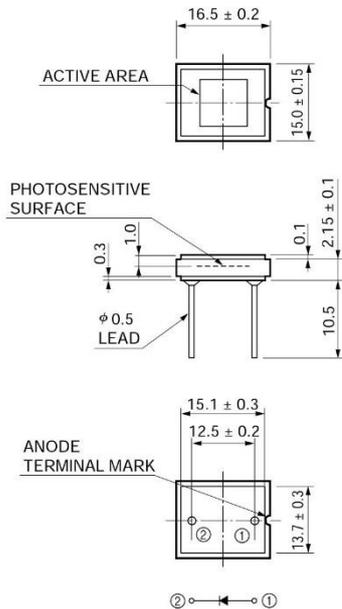
S1337-66BR



KSPDA0110EA

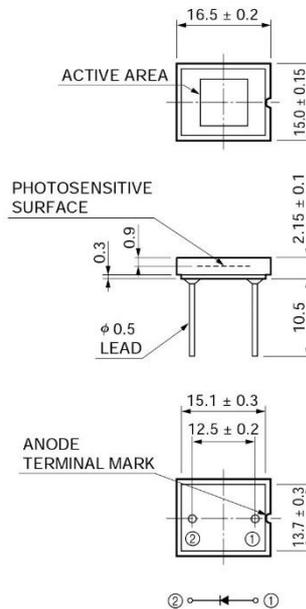
Resin coating may extend a maximum of 0.1 mm above the upper surface of the package.

S1337-1010BQ



KSPDA0111EA

S1337-1010BR



KSPDA0112EA

Resin coating may extend a maximum of 0.1 mm above the upper surface of the package.

HAMAMATSU

Information furnished by HAMAMATSU is believed to be reliable. However, no responsibility is assumed for possible inaccuracies or omissions. Specifications are subject to change without notice. No patent rights are granted to any of the circuits described herein. ©2004 Hamamatsu Photonics K.K.

HAMAMATSU PHOTONICS K.K., Solid State Division

1126-1 Ichino-cho, Hamamatsu City, 435-8558 Japan, Telephone: (81) 053-434-3311, Fax: (81) 053-434-5184, <http://www.hamamatsu.com>

U.S.A.: Hamamatsu Corporation: 360 Foothill Road, P.O.Box 6910, Bridgewater, N.J. 08807-0910, U.S.A., Telephone: (1) 908-231-0960, Fax: (1) 908-231-1218

Germany: Hamamatsu Photonics Deutschland GmbH: Arzbergerstr. 10, D-82211 Herrsching am Ammersee, Germany, Telephone: (49) 08152-3750, Fax: (49) 08152-2658

France: Hamamatsu Photonics France S.A.R.L.: 8, Rue du Saule Trappu, Parc du Moulin de Massy, 91882 Massy Cedex, France, Telephone: 33-(1) 69 53 71 00, Fax: 33-(1) 69 53 71 10

United Kingdom: Hamamatsu Photonics UK Limited: 2 Howard Court, 10 Tewin Road, Welwyn Garden City, Hertfordshire AL7 1BW, United Kingdom, Telephone: (44) 1707-294888, Fax: (44) 1707-325777

North Europe: Hamamatsu Photonics Norden AB: Smidesvägen 12, SE-171 41 Solna, Sweden, Telephone: (46) 8-509-031-00, Fax: (46) 8-509-031-01

Italy: Hamamatsu Photonics Italia S.R.L.: Strada della Moia, 1/E, 20020 Arese, (Milano), Italy, Telephone: (39) 02-935-81-733, Fax: (39) 02-935-81-741

Cat. No. KSPD1032E03
Jul. 2004 DN

ANEXO IV: VALORES NUMÉRICOS DE LA EFICIENCIA (figura 14)

| Muestra | Eficiencia / tanto por 1 | Error |
|------------------------------|--------------------------|-------|
| Referencia parte lisa abajo | 0.966 | 0.007 |
| Referencia parte lisa arriba | 0.976 | 0.003 |
| Diamant | 0.942 | 0.003 |
| 21 | 0.943 | 0.009 |
| <i>CeBiEu 3</i> | 0.943 | 0.002 |
| <i>Cu</i> | 0.214 | 0.006 |
| 1 | 0.956 | 0.004 |
| 18 | 0.918 | 0.006 |
| <i>CeBiEu 2</i> | 0.959 | 0.007 |
| Portamuestras | 0.956 | 0.003 |
| <i>CeBiEu 1</i> | 0.950 | 0.003 |
| Nanopartículas | 0.962 | 0.004 |

Tabla 4: Valores numéricos de la eficiencia normalizada representada de la figura 14.