



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

Desarrollo de un sistema de caracterización de obleas y células solares de Silicio multicristalino mediante la adquisición de imágenes de fotoluminiscencia usando un detector de InGaAs

Autor:

Redondo Hernando, Daniel

Tutores:

Martínez Sacristán, Oscar

Rodríguez Conde, Sofía

Dpto. Física de la Materia Condensada

Valladolid, mayo de 2017





Agradecimientos

La realización de este proyecto, no habría sido posible sin todas aquellas personas que, de alguna forma, han colaborado y han sido partícipes de este trabajo. A todas ellas van dirigidos mis agradecimientos.

A mis TUTORES, Dr. Oscar Martínez Sacristán y Dra. Sofía Rodríguez Conde por su apoyo y dedicación recibidos durante la elaboración del proyecto, ya que sin ellos no habría sido posible su realización. Así mismo agradecerles la oportunidad de realizar el propio proyecto, el cual ha sido una fuente continúa de conocimientos.

Al Grupo de Semiconductores Optronlab, por el buen trato recibido y por ayudarme en la realización del proyecto de forma desinteresada.

A las empresas NOVADEP y FASTEN SISTEMAS, por llevar a cabo la materialización del equipo aquí presentado en sus instalaciones.

A mi FAMILIA, en concreto a mis padre Fernando Redondo, a mi madre M^a Begoña Hernando y a mi Hermana Nuria Redondo, por su apoyo moral recibido sin el que habría sido imposible la consecución de este trabajo.

A mi NOVIA, Eva López, ya que ha sido un pilar fundamental para llevar a cabo este TFG.

A mis AMIGOS de por interesarse en todo momento en la evolución de mí trabajo.

Y en general a todo aquel que de una manera u otra ha participado en el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado.





Índice

1.- Resumen y palabras clave	7
2.- Introducción y objetivos.....	9
3.- Fundamentos teóricos.....	13
3.1. Células solares.....	13
3.1.1. Introducción a las células solares	13
3.1.2 Funcionamiento físico de una célula solar	13
3.1.3 Estructura general de una célula solar	19
3.1.4 Parámetros fundamentales de una célula solar	20
3.1.5. Fabricación de una célula solar de silicio	22
3.2 Caracterización mediante luminiscencia	25
3.2.1 Imagen de fotoluminiscencia (PLi).....	26
3.2.2 Imagen de Electroluminiscencia (ELi).....	28
3.3. Dispositivos para captación de imágenes de luminiscencia.....	31
Cámara con sensor de silicio	32
Cámara con sensor de InGaAs.....	32
4.- Equipo EL/PL antiguo	35
4.1 Características y componentes.....	35
4.2 Toma de medidas	41
4.2.1 Medidas en células solares.....	42
4.2.2 Medidas en obleas de Silicio	44
4.3 Mejoras introducidas en el equipo EL/PL antiguo	45
4.3.1 Bandeja para células y obleas.....	45
4.3.1.1 Motivaciones	45
4.3.1.2 Diseño y características	47
4.3.2 Soporte cámara CCD	53
4.3.2.1 Motivaciones	53
4.3.2.2 Diseño y características	54
5.- Equipo EL/PL nuevo	57
5.1 Motivación.....	57



5.2 Estructura física y componentes	58
5.2.1 Zona exterior del equipo.....	60
5.2.2 Zona interior del equipo	62
5.3 Funcionamiento del equipo	71
5.3.1 Captación de luminiscencia	71
5.3.1.1 Disposición en reflexión	71
5.3.1.2 Disposición en transmisión	72
6.- Conclusiones	75
7.- Trabajo futuro	77
8. Bibliografía.....	79



1.- Resumen y palabras clave

Resumen

El estudio de células solares y obleas de silicio a través de sus imágenes de luminiscencia (tanto electroluminiscencia como fotoluminiscencia), es una técnica de caracterización de gran aplicación en la industria fotovoltaica actual. Mediante el uso de tecnologías específicas para la captación de imágenes, como son cámaras CCD de silicio o cámaras PDA de InGaAs, se pueden llegar a obtener resultados muy precisos en los procesos de caracterización.

Resulta muy útil para las empresas y grupos de investigación disponer de un equipo completo con el que poder realizar estos ensayos. En el presente Trabajo Fin de Grado se exponen las modificaciones realizadas en un equipo de caracterización de células y obleas disponible en el laboratorio del grupo "Gds Optronlab" (perteneciente al Departamento de Física de la Materia Condensada), así como el diseño de un nuevo equipo que sustituye al anterior debido a las nuevas necesidades en los procesos de medición.

Palabras clave

Fotoluminiscencia, electroluminiscencia, InGaAs, CCD de silicio, célula solar, oblea de silicio.



2.- Introducción y objetivos

La obtención de imágenes mediante luminiscencia como método de caracterización de células solares, es una técnica que se ha desarrollado de manera considerable en los últimos años. Esto se debe a que es un método no destructivo, conlleva bajo coste y la instrumentación necesaria es simple.

La información obtenida permite localizar las zonas de defectos en el material de partida (obleas) y detectar fallos adicionales en los dispositivos finales (células solares). Por ello, conseguir implementar el método en tiempo real en diferentes etapas de los procesos de fabricación permitiría mejorar los procesos de producción de obleas y células solares, obteniendo así un producto final de mejor calidad.

En la figura 2.1 se muestran los principales componentes de un equipo de obtención de imágenes de luminiscencia. El proceso consiste en excitar la muestra para que emita luz y captar esta mediante una cámara con un sensor adecuado. La cámara envía la imagen a un ordenador donde posteriormente se procesa. La excitación se puede provocar mediante una fuente de alimentación (electroluminiscencia, EL), o bien a través de una fuente de luz (fotoluminiscencia, PL).

Para realizar un análisis cuantitativo y extraer parámetros físicos es necesario realizar operaciones aritméticas entre imágenes capturadas bajo diferentes condiciones operativas. Por esta razón, una buena relación señal/ruido es esencial para obtener imágenes de alta calidad. Con el fin de cumplir estos requisitos, es de máxima importancia la elección de la cámara más adecuada, así como la optimización de los parámetros de funcionamiento del resto de componentes.

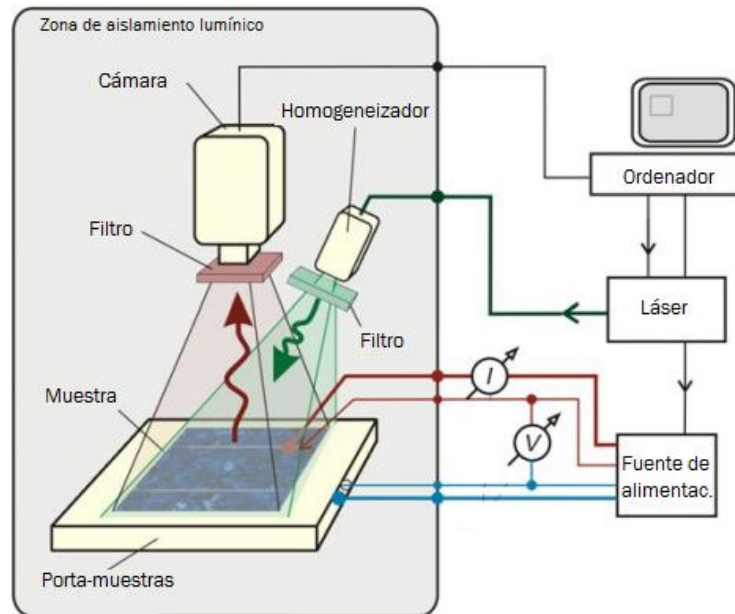


Figura 2.1 Equipo de obtención de imágenes de luminiscencia.

Resulta especialmente conveniente que todos los elementos se dispongan en un equipo compacto, para que el entorno de trabajo sea el más adecuado y el proceso de obtención de imágenes se realice de manera ágil y cómoda.

Uno de los objetivos del presente trabajo es la introducción de una serie de mejoras en un prototipo de un equipo de caracterización por luminiscencia de obleas y células solares desarrollado previamente por el grupo GdS-Optronlab, del Departamento de Física de la Materia Condensada de la Universidad de Valladolid. Este equipo ("Equipo EL/PL antiguo"), diseñado y fabricado por otro alumno en su Trabajo Fin de Grado, requería de una serie de mejoras debido a las necesidades cambiantes del grupo. Una de las principales mejoras introducidas por el grupo de investigación ha consistido en la adquisición de una cámara de InGaAs, que complementase la cámara de Silicio existente. Las modificaciones objeto de este TFG se han realizado con la idea de adecuar este nuevo detector y de efectuar las medidas de luminiscencia de forma más ágil y precisa, sin que supusieran una alteración estructural del equipo.

A pesar de las modificaciones realizadas en este equipo de caracterización, la rápida evolución del grupo en cuanto a la técnica de medida de luminiscencia ha hecho que éste quede algo obsoleto, precisando de esta manera el diseño y fabricación de un nuevo equipo que solventase las nuevas necesidades. En este TFG se abordan también todos los aspectos referidos al diseño de un nuevo equipo ("Equipo EL/PL nuevo"), focalizando el esfuerzo especialmente en el diseño estructural del mismo. En concreto, y con el fin de satisfacer las

nuevas necesidades técnicas, se ha diseñado un equipo que cumpla las siguientes premisas:

- La estructura principal ha de ser compacta, ligera y fácilmente desplazable.
- La excitación de las muestras en las medidas de fotoluminiscencia debe ser homogénea.
- La posición de la cámara y de la fuente de excitación óptica deben ser fácilmente ajustables.
- Debe ofrecer suficiente versatilidad en las medidas, permitiendo realizar medidas de PL y EL, con la posibilidad de operar en reflexión o transmisión, dependiendo del tipo de muestra, Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Opciones de medida del Nuevo equipo EL/PL.

CÉLULA SOLAR		OBLEA DE SILICIO	
ELi	PLi	PLi	
Medida por reflexión		Medida por reflexión	Medida por transmisión



3.- Fundamentos teóricos

3.1. Células solares

3.1.1. Introducción a las células solares

Para entender el funcionamiento de una célula solar es importante conocer las características de los semiconductores, ya que son este tipo de materiales los que determinan la manera en la que trabaja el dispositivo. Los semiconductores son elementos que a bajas temperaturas se comportan como aislantes, pero a medida que se eleva la temperatura o bien por la adición de determinadas impurezas pueden comportarse como conductores. La unión de dos semiconductores de tipo opuesto, uno tipo p y otro tipo n (unión p-n) se denomina diodo, siendo éste un dispositivo electrónico que permite la circulación de corriente sólo en un sentido. Una célula solar es básicamente un diodo semiconductor que ha sido específicamente diseñado para absorber y convertir, de manera eficiente, la energía de la luz proveniente del Sol en energía eléctrica (fotodiodo) (1), basándose en el efecto fotovoltaico (FV).

3.1.2 Funcionamiento físico de una célula solar

Las células solares pueden ser fabricadas con varios tipos de semiconductores, como el silicio (Si), arseniuro de galio (GaAs), fosforo de indio y galio (GaInP), etc. No obstante, el mercado FV actual a nivel terrestre está dominado por las células solares de silicio, figura 3.1. Esto se debe a que, aunque sus características de absorción no son las mejores, el silicio es muy abundante en la Tierra, y por tanto económico, y a que su tecnología está muy avanzada (1).



Figura 3.1 Célula solar de Si (izquierda) y planta de producción de energía FV o huerto solar (derecha).

Para comprender el funcionamiento de una célula fotovoltaica de silicio es necesario explicar brevemente las propiedades de los semiconductores, en particular del Si.

Los electrones de un átomo no sienten todos la misma fuerza electrostática. Los más externos (denominados electrones de valencia) se encuentran orbitando alrededor del core central del átomo (formado por el núcleo y los electrones internos). Los electrones de valencia sólo pueden tener unos valores determinados de energía, denominados niveles energéticos. El Si, en concreto, posee catorce electrones, de los cuales diez se encuentran fuertemente ligados al núcleo, mientras que los cuatro restantes son capaces de interactuar con los átomos vecinos.

Cuando los átomos de Si se unen entre sí, comparten los electrones de las últimas capas formando enlaces covalentes. Así, cada átomo de Si comparte uno de sus cuatro electrones de valencia con uno de los cuatro átomos colindantes, figura 3.2. Estas uniones se producen de forma ordenada y dan lugar a un sólido de estructura cristalina bien determinada.

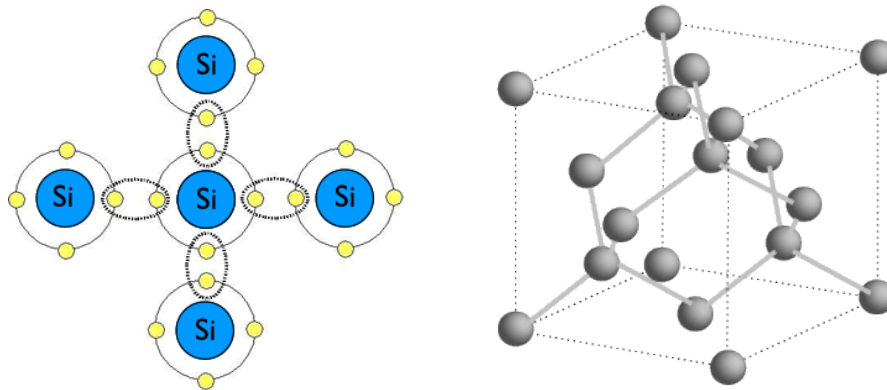


Figura 3.2 Enlaces entre átomos de Si (izquierda) y estructura cristalina del Si (derecha).¹

El número de átomos en un sólido es tan elevado que los niveles de energía pasan a formar bandas continuas de energía. Estas bandas definen las propiedades electrónicas de un cristal.

La banda de mayor energía completamente ocupada se denomina banda de valencia, y la siguiente, parcialmente ocupada, se conoce como banda de conducción. Ambas bandas aparecen separadas entre sí por un intervalo que representa la cantidad de energía necesaria para que un electrón de valencia

¹ Hiperphysics. [Citado: 13 de enero de 2017]
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/>

pueda romper el enlace que lo liga al átomo. Este salto energético se llama *banda prohibida* o *gap de energía* (E_G), y su anchura determina el tipo de material (conductor, semiconductor o aislante), como se puede ver en la figura 3.3. Algunos valores del gap de energía para distintos materiales son $E_G(\text{Si})= 1,12 \text{ eV}$, $E_G(\text{Ge})=0,66 \text{ eV}$ y $E_G(\text{GaAs})=1,42 \text{ eV}$ (2).

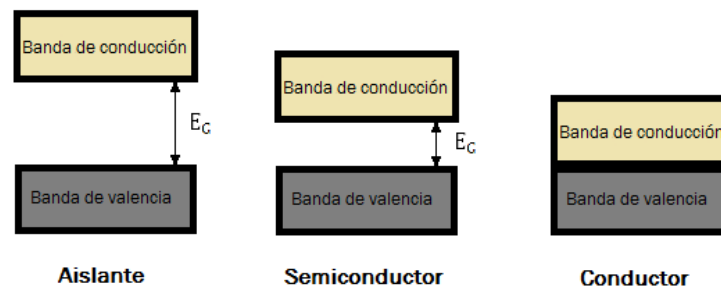


Figura 3.3 Modelo de bandas y carácter aislante, semiconductor o conductor de un material.

Este modelo de bandas permite explicar la conductividad eléctrica de los materiales. Para el caso de los semiconductores, a 0 K la totalidad de sus electrones de valencia se encuentra en la banda de valencia, por lo cual se comportarán como materiales aislantes; sin embargo, al incrementar la temperatura, o al dopar el material, aumenta la presencia de electrones en la banda de conducción.

Para conseguir que un semiconductor trabaje como una célula fotovoltaica es necesario crear una unión p-n, lo que se consigue dopando el material. Para ello, se agrega de manera controlada una cierta cantidad de impurezas al semiconductor (dopantes), generando así un cambio en sus propiedades eléctricas.

El número de átomos dopantes necesarios para crear una diferencia en las capacidades conductoras de un semiconductor es muy pequeño. A los semiconductores con dopajes ligeros y moderados se los conoce como extrínsecos. Un semiconductor altamente dopado, que actúa más como un conductor que como un semiconductor, se denomina degenerado.

Las impurezas pueden ser de dos tipos:

- Donoras: en su última capa tienen un electrón más que los átomos que constituyen la red, por ejemplo fósforo (P) en el caso del Si, figura 3.4 izq.
- Aceptoras: en su última capa tienen un electrón menos que los átomos que constituyen la red, por ejemplo boro (B) en el caso del Si, figura 3.4 dcha.

Los semiconductores **tipo n** son aquellos en los que las impurezas que se introducen son donoras, por lo tanto tienen mayor concentración de electrones que de huecos. Se dice entonces que los electrones son los portadores mayoritarios y los huecos los portadores minoritarios. Por ejemplo, al introducir una impureza de fósforo o arsénico (cinco electrones de valencia) en el silicio (cuatro electrones de valencia), el quinto electrón no queda bien ligado a la red (figura 3.4 izq.), por lo que la densidad de electrones es superior a la de huecos. La rotura de este enlace se produce con baja aportación energética. De manera similar, si se introduce en una red de silicio una impureza aceptora, como aluminio o boro (tres electrones de valencia), hay un enlace sin cubrir (hueco), por lo que la densidad de huecos será mayor que la de electrones (figura 3.4 dcha.), siendo los portadores mayoritarios los huecos. Este tipo de semiconductores son denominados **tipo p** (3).

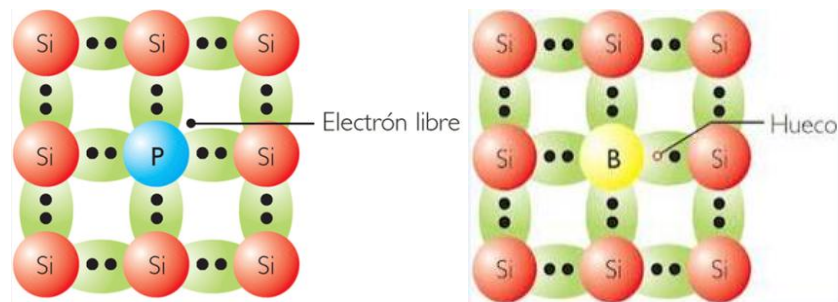


Figura 3.4 Efecto de introducir una impureza de fósforo (izquierda) o de boro (derecha) en la red cristalina del silicio.²

En la fabricación de células solares se busca crear una capa con impurezas donoras junto a otra capa con impurezas aceptoras, denominada unión p-n. En la zona de la unión p-n los electrones libres de la zona n se recombinan con los huecos libres de la zona p, de forma que se produce una zona de vaciamiento de carga donde solo quedan los iones fijos de la red cristalina (átomos que han cedido y ganado electrones). Por tanto la región frontera entre la zona de tipo n (cargada negativamente) y la zona de tipo p (cargada positivamente) posee iones fijos de carga eléctrica opuesta, lo que provoca que aparezca un campo eléctrico, figura 3.5.

² Principios eléctricos. [Citado: 23 de enero de 2017]
<http://principioselectricosits.16mb.com/1-3-1-3-Materiales-tipo-P-y-tipo-N/>

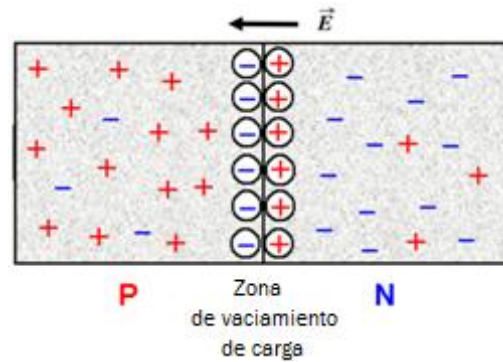


Figura 3.5. Unión p-n y campo eléctrico creado debido a la zona de vaciamiento de carga.

Cuando un fotón con una energía E_f interactúa con un cristal, puede ser absorbido o no por un electrón perteneciente a la banda de valencia. Si la energía incidente es mayor que E_G , el electrón saltará a la banda de conducción, dejando un hueco en la banda de valencia (proceso de absorción), como se puede ver en la figura 3.6 (creación de un par electrón-hueco). El electrón excitado, al interactuar con la red del sólido, perderá rápidamente su energía, cayendo a la base de la banda de conducción (relajación). Si los electrones no son recolectados y conducidos a un circuito externo, regresarán a la banda de valencia emitiendo un fotón de energía E_G . Este fenómeno se denomina recombinación de un par electrón-hueco. Por otra parte, la presencia de impurezas en el cristal da lugar a niveles energéticos dentro de la banda prohibida y a posibles recombinaciones, tanto radiativas como no radiativas (2). En el caso de una célula solar, el campo eléctrico que aparece en la unión p-n permite la separación de los pares e-h. En todo caso, en una célula solar, dado que el objetivo es mantener la existencia de la corriente eléctrica y aprovecharla externamente, es necesario evitar al máximo los procesos de recombinación de los portadores fotogenerados.

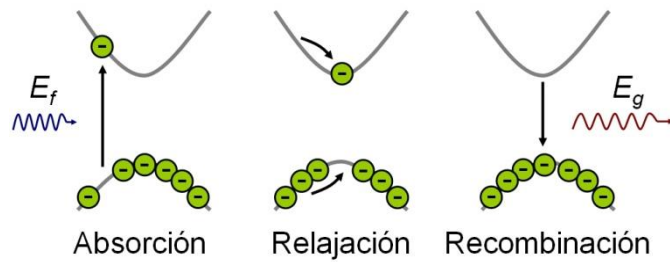


Figura 3.6 Procesos sufridos por los electrones y huecos en los mecanismos de absorción, relajación y recombinación.³

Así, tal y como se ha descrito, la absorción de la radiación luminosa al iluminar una célula solar crea pares electrón-hueco. El campo eléctrico debido a la unión p-n arrastra los electrones y huecos. Existe además otra corriente provocada por los mecanismos de difusión. La corriente neta en una célula resulta del balance de estas dos corrientes y de la tasa de recombinación y generación de portadores de carga. Por lo tanto, el efecto fotovoltaico en una célula consta de dos procesos básicos: la generación de portadores al absorber la radiación luminosa y el desplazamiento de los portadores hasta la zona donde son recolectados (contactos metálicos), figura 3.7.

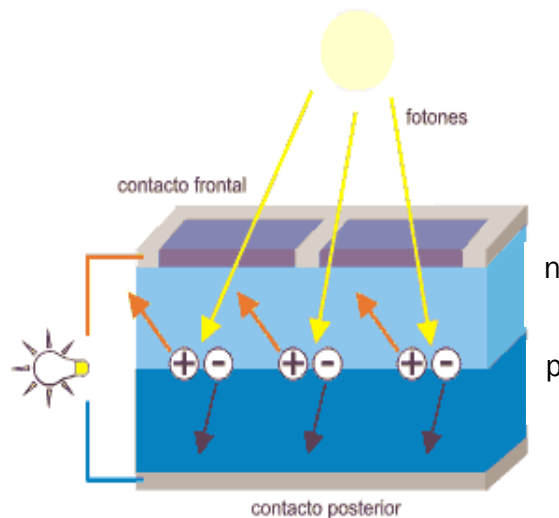


Figura 3.7. Principio de funcionamiento de una célula solar (efecto fotovoltaico)

Como se ha mencionado, la presencia de impurezas en el cristal da lugar a la aparición de procesos de recombinación, radiativos y no radiativos. En este sentido, un parámetro básico de una célula solar es el **tiempo de vida** medio de los portadores minoritarios, directamente proporcional a la denominada

³ The Túzaro [Citado: 14 de enero de 2017]
<https://thetuzaro.wordpress.com/tag/recombinacion-electron-hueco/>.

longitud de difusión de los portadores minoritarios, que es la distancia promedio que un portador minoritario puede moverse desde el punto de generación hasta que se recombina. La longitud de difusión dependerá fuertemente del número de defectos presentes en el material, de forma que una elevada longitud de difusión (mayor tiempo de vida) es indicativa de materiales con mejores calidades, y por tanto está relacionada con mayores eficiencias en las células solares.

Por lo general, el diseño de una célula solar eficiente tendrá dos objetivos: minimizar la recombinación a través del dispositivo debida a defectos y maximizar la absorción de fotones con energía $E > E_G$ (1).

3.1.3 Estructura general de una célula solar

En la figura 3.8 se puede ver la estructura de una célula convencional (también denominada de primera generación) (2).

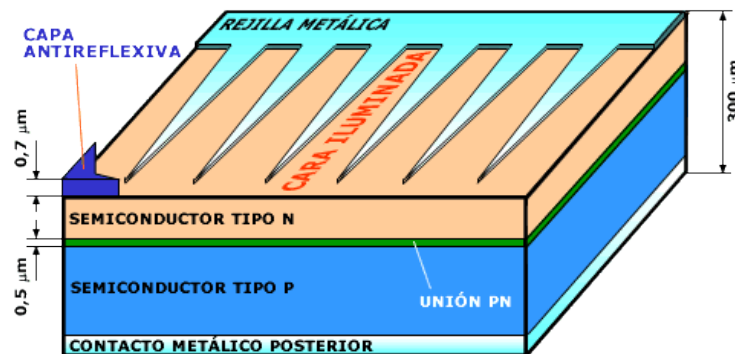


Figura 3.8 Estructura básica de una célula solar.

Los componentes estructurales que forman el conjunto de la célula son:

- *Capa antirreflexiva*: su objetivo principal es reducir lo máximo posible las pérdidas debidas a la reflexión. Para ello la capa superior de la célula se texturiza, creando surcos o micro-pirámides en su superficie.
- *Rejilla metálica*: éste elemento de la célula tiene como función recoger la carga generada por el dispositivo, evitando al mismo tiempo aumentar la resistencia eléctrica de la célula. De igual forma, esta malla metálica debe dejar pasar la mayor cantidad de luz posible hacia el interior de la célula, por lo que el área ocupada por la malla debe ser

el mínimo posible. La relación entre el área ocupada por la rejilla y el área total de la célula se conoce como factor de sombra.

- Capas de material semiconductor: como se ha explicado, se trata de dos capas, una tipo n y otra tipo p (que en ocasiones pueden aparecer depositadas sobre un sustrato más grueso para aportar mayor resistencia mecánica al dispositivo). Estas capas se colocan para formar una unión p-n, siendo por lo general una capa mucho más gruesa (encargada de absorber la luz, denominada base), que la otra (denominada emisor), pudiendo ser la base tipo p y el emisor tipo n, o viceversa. Tanto el espesor de estas capas como la concentración de impurezas presentes en ellas influirán en el rendimiento de la célula.
- Contacto metálico posterior: se trata de una fina capa metálica que ocupa toda la superficie posterior de la célula con la función de recoger la carga generada.

3.1.4 Parámetros fundamentales de una célula solar

- Curva Intensidad – Voltaje (I-V)

Una célula solar en oscuridad funciona de manera análoga a un diodo, por lo que su curva I-V será como la que se muestra en la figura 3.9, donde se observa que se tiene corriente solamente en un sentido. Por otro lado, en condiciones de iluminación, la respuesta I-V cambia, debido a los pares electrón hueco fotogenerados, como se muestra también en la figura 3.9.

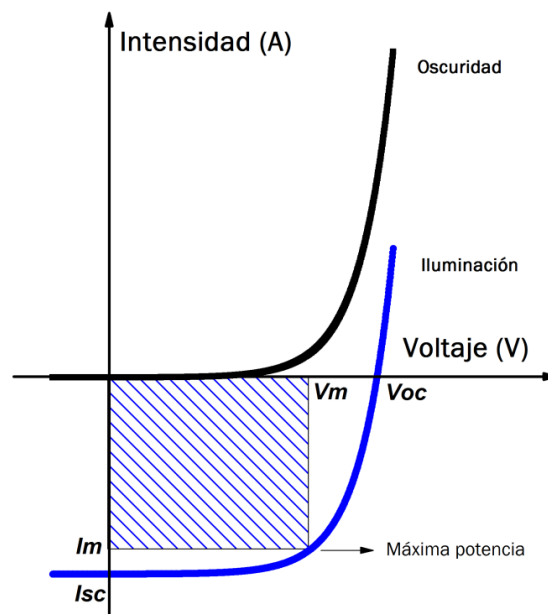


Figura 3.9 Curvas I-V de una célula en oscuridad (negra) e iluminación (azul).

La figura 3.10 representa la curva I-V característica de una célula solar de Si en condiciones estándar de medida (temperatura de la célula 25°C, irradiancia 1000 W/m²).

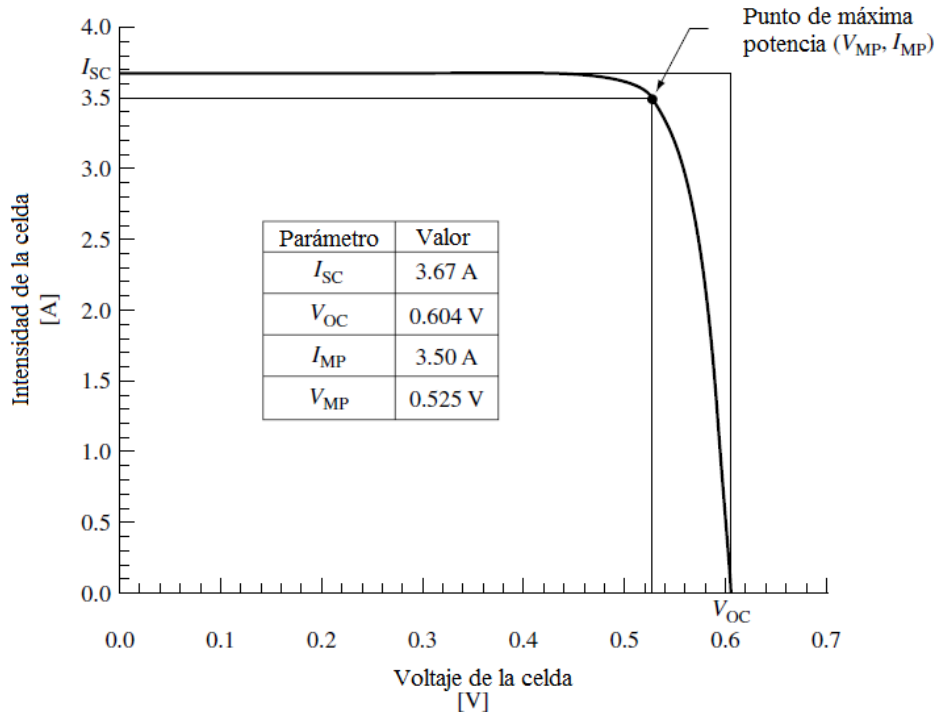


Figura 3.10 Curva I-V de una célula solar típica. (1)

A través de la curva I-V de la célula solar es posible obtener tres de sus parámetros fundamentales más importantes:

- La corriente de cortocircuito (I_{SC}): es el mayor valor de corriente que puede obtenerse del dispositivo como generador.
- La tensión de circuito abierto (V_{OC}): es la mayor tensión que polariza el dispositivo funcionando como generador.
- El punto de máxima potencia ($P_M = I_{MP} \cdot V_{MP}$, donde I_{MP} es la corriente de máxima potencia y V_{MP} el voltaje de máxima potencia): es el punto en el que la potencia entregada por la célula es máxima (2).

Otro factor fundamental usado para cuantificar la curva característica es el factor de forma (FF), que representa el tanto por ciento de área bajo el rectángulo definido por el punto de máxima potencia frente al área total bajo la curva I-V:

$$FF = \frac{P_M}{I_{SC} \cdot V_{OC}} \quad [1]$$

- Eficiencia de una célula solar

La eficiencia de una célula solar se define como la relación entre la potencia eléctrica máxima (P_{MP}) y la potencia solar incidente (P_{in}):

$$\eta = \frac{P_{MP}}{P_{in}} = \frac{FFV_{OC}I_{SC}}{P_{in}} \quad [2]$$

donde se ha hecho uso de la ecuación [1], poniéndose así de manifiesto la relación entre la η y los parámetros V_{oc} , I_{sc} y FF .

De la ecuación [2] se deduce que una célula solar eficiente será aquella que posea una alta corriente de cortocircuito, alto voltaje de circuito abierto y un factor de forma lo más cercano posible a la unidad.

3.1.5. Fabricación de una célula solar de silicio

El silicio es el segundo elemento más abundante en la superficie terrestre. Por esta razón y por sus buenas propiedades como semiconductor, se trata de un material de elevado interés en la industria electrónica.

El silicio no existe en estado libre, sólo se encuentra en forma de dióxido de silicio y silicatos, por lo que es necesario someterlo a un proceso de purificación. Esta purificación se realiza en hornos a 1800°C , donde se produce una reducción del cuarzo mediante carbón, obteniendo silicio de grado metalúrgico (UGM) y monóxido de carbono. Este silicio tiene una pureza de más del 99% (1000 ppm) y se utiliza en la industria metalúrgica para crear aleaciones especiales, pero no es útil en la industria electrónica, ya que requiere mayor pureza (la industria fotovoltaica requiere una pureza del orden de 10 ppm) (5).

Para conseguir este orden de pureza se hace reaccionar el silicio de grado metalúrgico con ácido clorhídrico, obteniendo triclorosilano. Este se hace pasar por columnas de destilación y finalmente se hace reaccionar con hidrógeno dando lugar a silicio de grado electrónico ultrapuro, denominado polisilicio, siendo este habitualmente la materia prima utilizada en la fabricación de obleas y células solares (6).

Una vez obtenidas las piedras de polisilicio, se realiza la cristalización del mismo. Dependiendo de su modo de cristalización se obtendrá silicio multicristalino (mc-Si) o monocristalino (c-Si). Actualmente, el mc-Si es el más utilizado en la industria solar.

El c-Si se obtiene básicamente mediante el denominado proceso Czochralski, que consiste en la utilización de una semilla de cristal para hacer crecer Si a muy alta temperatura. Del proceso de cristalización del Si se obtiene un lingote de material cilíndrico macizo (su diámetro puede variar entre 100 mm y 150 mm y su longitud entre 40 cm y 150 cm) que posteriormente se mecaniza en forma cuadrangular y finalmente se corta para obtener obleas de 200 - 500 μm de espesor, figura 3.11.

Para la fabricación de mc-Si, se utiliza generalmente el proceso de *block-casting*. En este se usa un crisol donde se depositan las piedras de polisilicio, fundiéndolas a continuación en un horno a elevada temperatura y dejando enfriar a continuación el fundido (1). De la cristalización del mc-Si se obtiene un lingote de grandes dimensiones (70 cm x 70 cm) que se divide en *bricks* (prismas rectangulares con un tamaño acorde a la célula que se quiere fabricar después) y este, a su vez, se lamina en cientos de obleas, figura 3.11.



Figura 3.11 Proceso de fabricación de una célula a partir de silicio monocristalino y multicristalino.

El enfriamiento del fundido en el procesado del mc-Si provoca que el material se fragmente, formándose multitud de cristales orientados aleatoriamente. Esto provoca que las propiedades de las obleas no sean tan homogéneas como en el caso de las monocristalinas, que presentan un grano único con características uniformes. Sin embargo, la simplicidad en el proceso de fabricación del mc-Si implica un menor coste. El balance entre coste y pérdida de eficiencia es favorable en el mc-Si, razón por la que hoy en día es el material más utilizado en la fabricación de células solares a nivel terrestre, frente al c-Si.

Una vez obtenida la oblea de silicio (usualmente dopada tipo p con boro), se procede de la siguiente forma hasta obtener la célula solar final (ver figura 3.12):

1. Limpieza y texturización de las obleas mediante inmersión en solución ácida.
2. Dopado mediante fósforo (dopante tipo-n).
3. Aislamiento de la región tipo-n.
4. Aplicación de la capa antirreflejante.
5. Serigrafiado y secado en horno de infrarrojos de la cara delantera
6. Serigrafiado y secado en horno de infrarrojos de la cara trasera.
7. Cocción a alta temperatura de los contactos metálicos.
8. Pruebas y clasificación mediante la curva I-V obtenida con luz artificial.

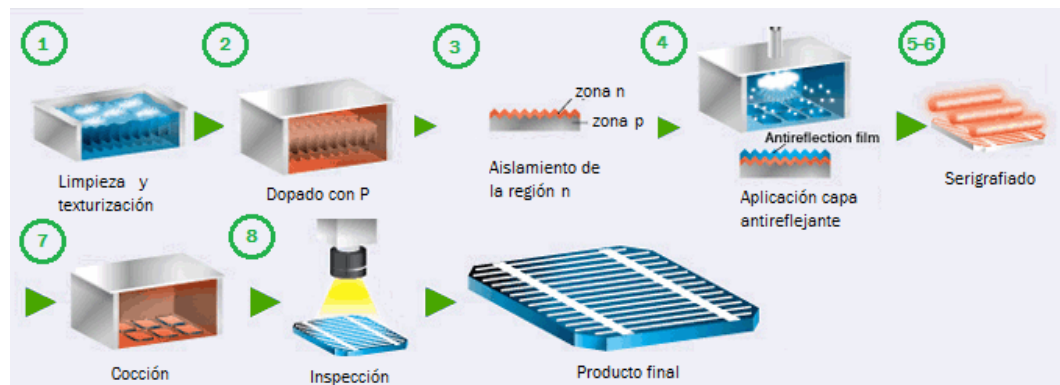


Figura 3.12 Etapas de fabricación de una célula solar de Si

Las células solares de c-Si basan su eficiencia en la cristalinidad del material (existencia de un único grano). Sin embargo, las células mc-Si presentan un elevado número de granos, cuyo tamaño no supera el centímetro cúbico. Esto da lugar a un elevado número de defectos cristalográficos, en particular fronteras de grano, aunque también existen numerosos defectos intra-grano como clusters de dislocaciones, impurezas, precipitados, etc. Dado que el crecimiento de los lingotes se realiza haciendo uso de crisoles con elementos de cuarzo y grafito, las principales impurezas son átomos de oxígeno y carbono (aunque también otros elementos como Fe, Cu, etc.) que se introducen en cantidades variables. Todos estos defectos se pueden convertir en centros de captura de carga de los portadores fotogenerados, disminuyendo de esta forma la longitud de difusión de los portadores minoritarios y por tanto la eficiencia de las células. Además, pueden afectar

también a las propiedades mecánicas de las obleas e incluso las propiedades de la unión p-n de las células, si los defectos penetran hasta la región de carga espacial. De esta forma, las células de mc-Si contienen un elevado número de defectos, cuya naturaleza, densidad y capacidad de captura de carga varían notablemente de unas zonas a otras. La tabla 3.1 compara eficiencias, voltaje de cortocircuito, factor de forma y densidad de corriente en células de c-Si y mc-Si (7).

Tabla 3.1 Mayores eficiencias registradas en condiciones estándar (1000 W/m² y 25°) en células de c-Si y mc-Si.

Material	Eficiencia (%)	Área (cm ²)	V _{oc} (V)	FF (%)	J _{sc} (mA/m ²)
c-Si	26,3 ±0,5	180,43	0,7438	83,8	42,25
mc-Si	21,3±0,4	242,74	0,6678	80,0	39.8

A pesar de las ventajas del c-Si, la tendencia en la fabricación de células solares basadas en silicio se ha invertido en muy pocos años: las células solares basadas en c-Si, con una eficiencia de hasta un 27%, han dominado el mercado en la pasada década. Sin embargo, las condiciones experimentales para la preparación del c-Si y sobre todo la velocidad de crecimiento en torno a 1-3 μm/seg, han reducido la producción de c-Si a favor de células de mc-Si, que con velocidad de crecimiento de 30-50 μm/seg dan eficiencias ya del orden del 21% con costes de fabricación sustancialmente menores, por lo que están emergiendo como el principal actor en el mercado fotovoltaico (FV). En la actualidad el mercado de las células FV a nivel terrestre procede en ~ 60-65% de mc-Si, mientras que la producción mediante c-Si se ha reducido drásticamente a un 35-40% y estando en franco retroceso.

3.2 Caracterización mediante luminiscencia

Debido a la cada vez más alta demanda de producción y a que el proceso de cristalización da lugar a un material con un elevado número de defectos (granos, fronteras de grano etc.), se hace necesario controlar los procesos de

producción para obtener células lo más reproducibles posibles y que posean la máxima eficiencia posible (8).

Para la caracterización de muestras de silicio, una de las técnicas más rápidas y con mejores resultados es la obtención de imágenes mediante luminiscencia. La luminiscencia se basa en la capacidad que tienen ciertos materiales de emitir radiación electromagnética al ser excitados con una fuente de energía. Para la obtención de imágenes mediante esta técnica, toda la superficie de la muestra es excitada con el objetivo de emitir luminiscencia. La utilización de una cámara lo suficientemente sensible permite la captura de las imágenes de luminiscencia correspondientes. Por lo general en el sector fotovoltaico se utilizan cámaras con sensores CCD (charged-coupled device) de silicio o bien cámaras con detectores InGaAs (indio-galio-arsénico), las cuales se describirán más adelante en la sección 3.3.

En este trabajo se describen dos métodos de obtención de imágenes mediante luminiscencia: la electroluminiscencia (EL) y la fotoluminiscencia (PL).

3.2.1 Imagen de fotoluminiscencia (PLi)

En la técnica de la fotoluminiscencia (PL) se excita una muestra con luz, usando fotones con energía suficiente para vencer la energía de la banda prohibida y así elevar un electrón a la banda de conducción, creando pares electrón-hueco. La posterior recombinación de los pares electrón-hueco produce la emisión de un fotón (ver figura 3.5) (12).

En la técnica de imagen de fotoluminiscencia (PLi) se excita la muestra y se recoge la luminiscencia de toda la oblea o célula solar mediante el uso de un detector adecuado, figura 3.13. En algunos casos, el sistema de iluminación que se usa se compone de una lámpara halógena o de xenón con un filtro monocromático. Otra opción es usar láseres de diferentes longitudes de onda (de helio-neón, argón, etc.).

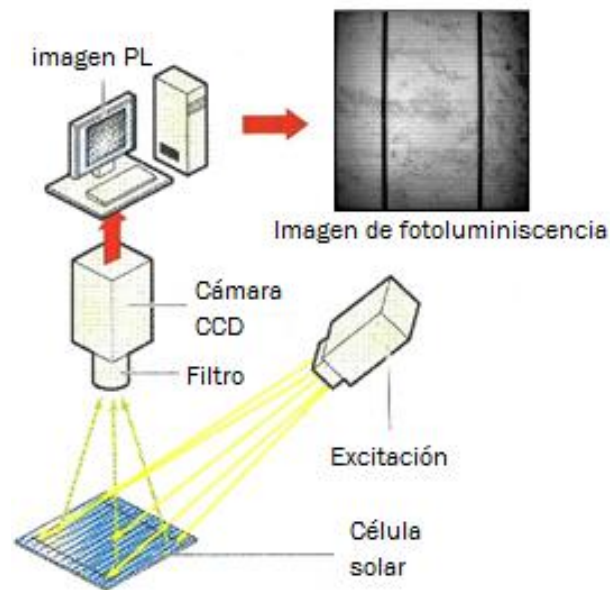


Figura 3.13 Equipo de caracterización mediante PLi

La emisión provocada al excitar las muestras de silicio tendrá una banda centrada en el valor de E_G , 1.12 eV (1140 nm), y por tanto en el IR, como se ve en la figura 3.14 (13).

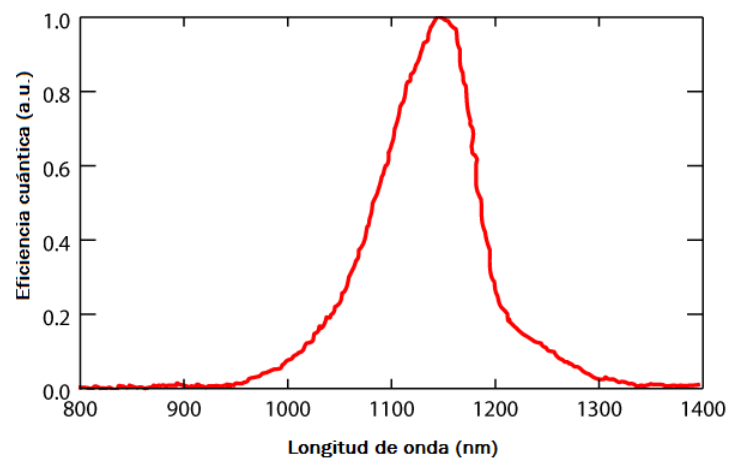


Figura 3.14 Espectro de emisión del silicio

La distribución de la intensidad de la luminiscencia emitida está relacionada con la presencia de defectos en el material (ya que por lo general estos dan lugar a procesos de recombinación no radiativa), y por tanto, con el mapa de longitudes de difusión de los portadores minoritarios (10). De este modo, en el caso de las obleas y células de mc-Si, los mapas de PLi permiten visualizar las inhomogeneidades causadas por defectos tales como dislocaciones,

fronteras de grano, acumulación de impurezas, etc. La figura 3.15 muestra dos imágenes de PLi de obleas de mc-Si. La imagen de la izquierda corresponde a una oblea con una elevada concentración de defectos o impurezas, mientras que la imagen de la derecha corresponde con una oblea con una elevada cantidad de defectos extendidos (fronteras de grano y redes de dislocaciones).

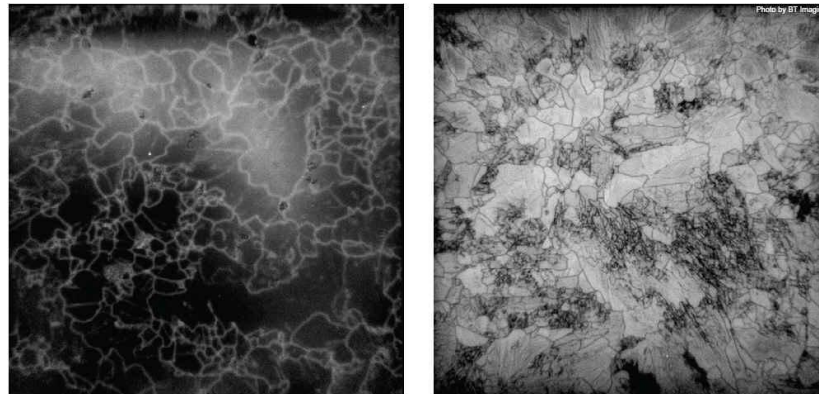


Figura 3.15 Imagen de PL de una oblea con alta concentración de impurezas (izquierda) y de una oblea con alta concentración de dislocaciones (derecha).⁴

En el caso del mc-Si, la calidad del material está muy relacionada con la zona del lingote del cual se ha obtenido la oblea. Las obleas de las partes superior o inferior del lingote contienen muchos más defectos que las obtenidas de la parte centrales del lingote, lo que se suele traducir en una pérdida de eficiencia de las células solares correspondientes (8).

3.2.2 Imagen de Electroluminiscencia (ELi)

La electroluminiscencia es un fenómeno óptico y eléctrico en el cual una unión p-n emite luz cuando se le inyecta carga. Este fenómeno resulta muy útil para el estudio de células solares, como se describe a continuación.

Si se polariza una célula solar en directa, los huecos de la zona p se mueven a la zona n, donde son portadores minoritarios, y los electrones presentes en la zona n lo hacen hacia la zona p. Este exceso de portadores minoritarios da lugar a la recombinación con los portadores mayoritarios, dando lugar a la emisión de un fotón. Los fotones emitidos en las zonas activas de la unión p-n

⁴Inter PV. [Citado: 12 de diciembre de 2016]
http://www.interpv.net/market/market_view.asp?idx=310&part_code=05&page=2.

se desplazan hacia el exterior, pero no todos lo consiguen, ya que pueden ser reabsorbidos por el material o reflejados por la intercara de la célula solar, como se ilustra en la figura 3.13. Los fotones que consiguen llegar al exterior son los que capta el detector y los que permiten obtener la imagen de electroluminiscencia (ELi) (9).

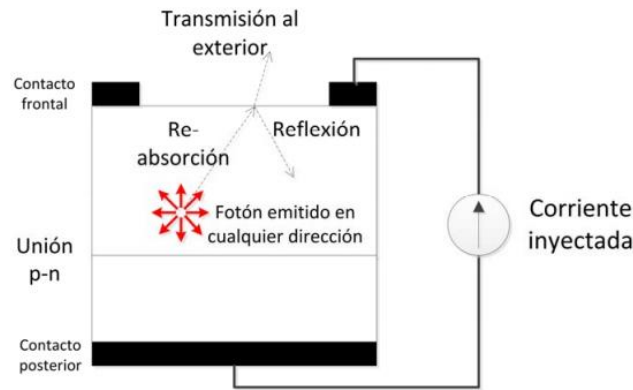


Figura 3.13 Efecto de la inyección de carga en una célula solar y procesos que sufren los fotones generados en su camino hacia el exterior.

La utilización de la técnica ELi para caracterización de células solares resulta un método muy adecuado debido a la simplicidad del mismo. Un factor importante que hace muy interesante el uso de esta técnica es el tiempo. La adquisición de la imagen de EL depende fundamentalmente de la cámara que se use. En general, la duración de la medida se encuentra en el orden de milisegundos.

En la figura 3.14 se puede observar un equipo típico utilizado en la caracterización de células mediante ELi. Este consta de:

- Una fuente de alimentación para la excitación de la célula.
- Una cámara CCD para captar la luminiscencia emitida.
- Un dispositivo (ordenador) conectado a la cámara CCD para visualizar la imagen obtenida.

Tanto la célula como la cámara deben estar en un espacio aislado lumínicamente.

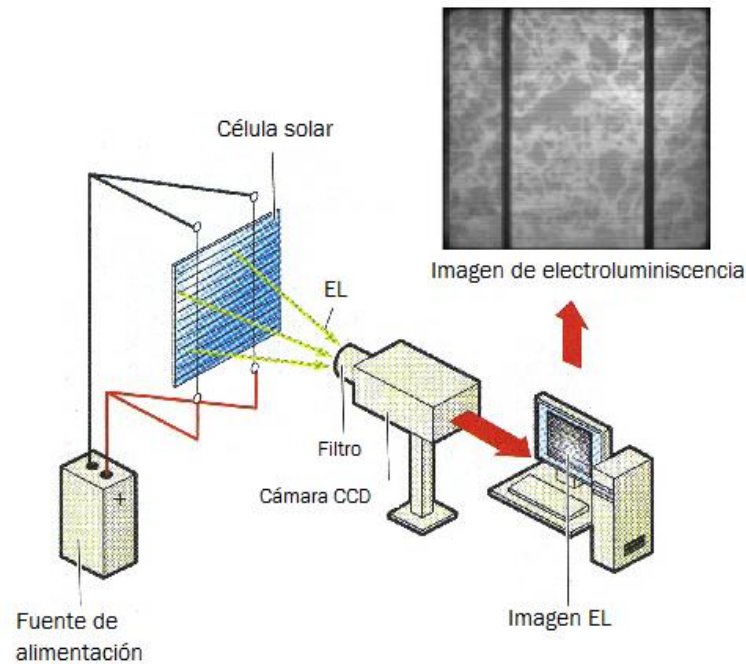


Figura 3.14 Equipo para caracterización de obleas mediante electroluminiscencia

Al excitar la célula con un voltaje de polarización adecuado, ésta emitirá luminiscencia, que será captada por la cámara, figura 3.15. En el caso de las células de Silicio esta emisión cae en el infrarrojo, con una longitud de onda centrada en 1110 nm, como ya se ha comentado.

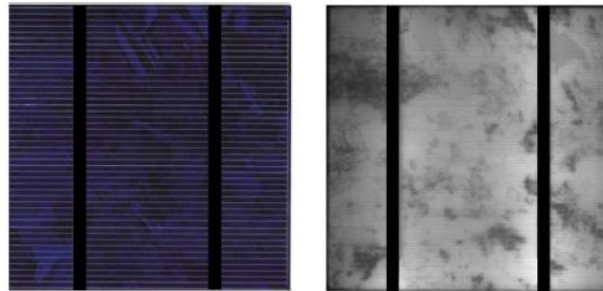


Figura 3.15 Imagen de una célula solar (izda.) e imagen de electroluminiscencia de la misma célula (dcha.)

En el caso de las imágenes de ELi, las zonas oscuras pueden estar relacionadas con dos tipos de defectos (11):

1. Roturas en el conjunto de la célula o deterioro de un contacto que provocan el aislamiento de una parte de la célula (figura 3.16).
2. Variación local de propiedades ópticas o electrónicas en la célula, como por ejemplo la baja longitud de difusión de portadores minoritarios en zonas cercanas a dislocaciones o

bordes de grano. Igualmente la velocidad de recombinación es más alta en los contactos metálicos que en partes de la superficie trasera que se encuentran pasivadas (técnica que permite reducir la recombinación de portadores mediante el recubrimiento con una capa generalmente de alúmina o carburo de silicio).

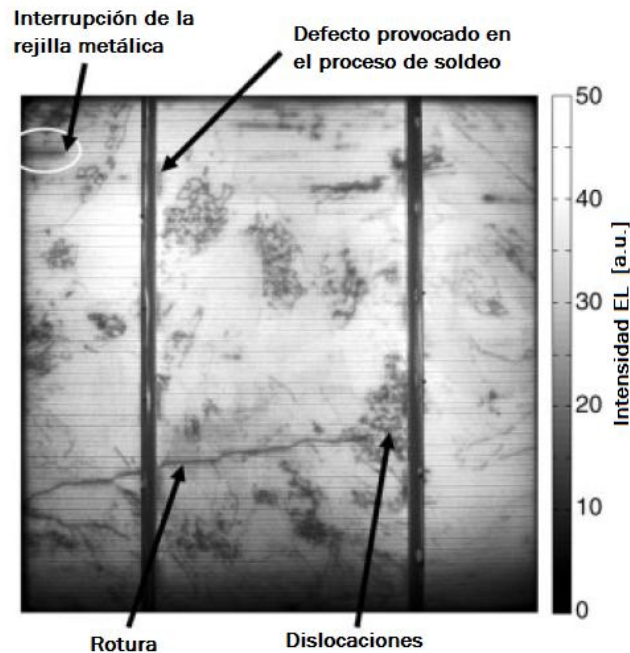


Figura 3.16 Imagen de EL de una célula, las discontinuidades aparecen como zonas oscurcidas debido a que la intensidad de electroluminiscencia es muy baja. De esta manera resulta sencillo identificarlas en una imagen.

La utilización de la técnica de electroluminiscencia es muy útil en el proceso de caracterización de células solares ya fabricadas. Sin embargo, la fotoluminiscencia presenta algunas ventajas en la caracterización de obleas y células solares, ya que no es necesario hacer ningún tipo de contacto eléctrico sobre la muestra y además, se puede aplicar en cualquier etapa del procesado, lo que resulta muy útil si se pretende monitorizar el proceso de fabricación de células solares.

3.3. Dispositivos para captación de imágenes de luminiscencia

Los dispositivos o cámaras para la captación de imágenes de luminiscencia se van a distinguir principalmente por el tipo de sensor, en nuestro caso de

silicio o de InGaAs. La sensibilidad de estos viene determinada por su curva de eficiencia cuántica (cantidad de fotones que deben incidir sobre su superficie para producir determinada carga eléctrica). En el estudio de la luminiscencia del silicio hay que tener en cuenta la curva de emisión del mismo para seleccionar la mejor opción.

Cámara con sensor de silicio

Las cámaras basadas en sensores de silicio presentan como ventaja su elevada resolución de imagen (en algunos casos se supera el megapíxel). En cuanto a eficiencia cuántica, este tipo de cámaras presenta valores altos para longitudes de onda comprendidos entre los 400 nm y los 1000 nm aproximadamente. Esto, en el caso de captura de imágenes de luminiscencia del silicio, resulta un inconveniente, ya que tiene su pico de emisión en torno a 1140 nm, por lo que estas cámaras sólo permiten captar la cola de la luminiscencia emitida.

La cámara utilizada por el grupo GdS-Optronlab es una cámara CCD (Charged Couple Device) de silicio "Pco.1300 solar", figura 3.20. Esta cámara tiene un rango espectral de medida entre 290 nm y 1200 nm, con valores de eficiencia relativamente altos para longitudes de onda entre 400 nm y 1000 nm. Ofrece una resolución de 1424 x 1060 pixels. El resto de características técnicas de esta cámara se presentan en el Anexo 1.



Figura 3.20 Cámara CCD de Si (pco.1300 solar).

Cámara con sensor de InGaAs

Otro dispositivo capaz de captar luminiscencia son las cámaras equipadas con sensores de InGaAs. La principal ventaja de este tipo de cámaras es su alta eficiencia cuántica en el rango espectral del silicio. Como desventaja,

estos dispositivos tienen una resolución menor que los equipados con sensores de silicio.

El grupo GdS-Optronlab también dispone de una cámara con sensor de InGaAs fabricada por Hamamatsu Photonics, modelo C12741-03, figura 3.21 (en el Anexo 4 aparecen los costes relativos a este componente). Esta cámara tiene sensibilidad en un rango espectral que va de los 950 nm a los 1700 nm, por lo que es capaz de captar el pico de emisión del silicio en su rango de máxima eficiencia cuántica. La resolución que ofrece es de 640 x 512 pixels. El resto de características técnicas se presentan en el Anexo 2.



Figura 3.21 Imagen de la cámara de InGaAs (Hamamatsu C12741-03) disponible en el laboratorio.

La figura 3.22 muestra la representación genérica de la eficiencia cuántica de ambas cámaras. Como se puede observar, la cámara con sensor de silicio sólo capta la cola de emisión del silicio con una eficiencia relativamente baja, mientras que la cámara equipada con sensor de InGaAs capta el pico de emisión del silicio en su zona de máxima eficiencia.

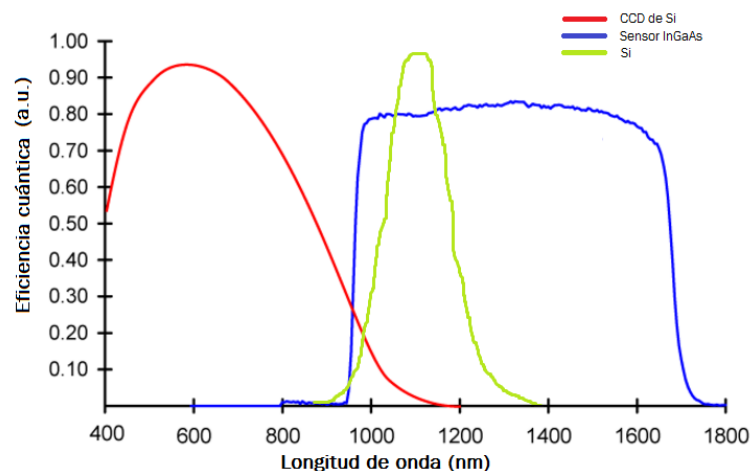


Figura 3.22 Representación gráfica de la eficiencia cuántica vs longitud de onda de un sensor CCD de Si frente a uno fabricado con InGaAs. Se muestra también la banda de emisión del Si.



4.- Equipo EL/PL antiguo

El proyecto que se presenta en esta memoria surge de la necesidad de fabricación de un equipo para medidas de electroluminiscencia y fotoluminiscencia en el laboratorio del grupo Optronlab, del Departamento de Física de la Materia Condensada de la Universidad de Valladolid.

Anteriormente, estas medidas se han realizado gracias a un prototipo diseñado por un alumno en su Trabajo Fin de Grado⁵: "Equipo EL/PL antiguo". Este equipo permite trabajar tanto con obleas como con células fotovoltaicas recogiendo electro y fotoluminiscencia y pudiendo realizar medidas con CCD de silicio en transmisión o reflexión.

En este capítulo se describirán las principales características y el funcionamiento de este equipo así como una serie de mejoras que se han realizado sobre el mismo con el objetivo de conseguir medidas más precisas y reproducibles.

4.1 Características y componentes

El equipo de medida está fabricado mediante perfiles angulares agujereados, de acero, que dan forma al esqueleto principal. El recubrimiento de la estructura se compone de planchas de acero de 1 mm de espesor. Toda la estructura se coloca sobre una base desmontable consistente en la utilización de pares de tubos cuadrangulares que se insertan en la propia estructura, proporcionando así estabilidad al equipo. En la figura 4.1 se pueden observar las principales partes que forman el equipo.

⁵ Martínez González, M. *Puesta en práctica y elaboración de un sistema de caracterización de células fotovoltaicas mediante electro y fotoluminiscencia*. Universidad de Valladolid. 2015

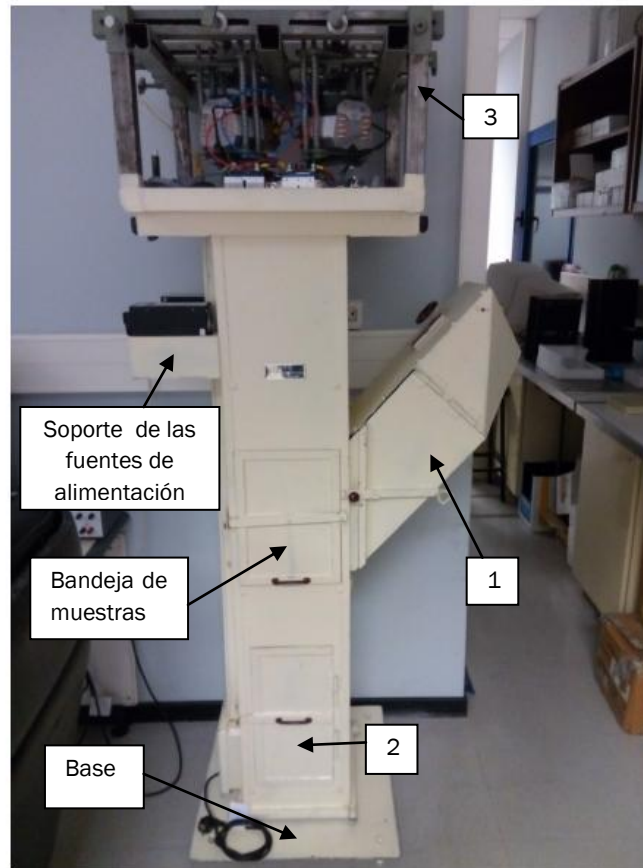


Figura 4.1 Principales partes del equipo EL/PL antiguo: armazón del sistema de medida por reflexión (1), armazón del sistema de medida por trasmisión (2), soporte de los láseres (3).

Como se aprecia en la figura 4.1 el cuerpo principal del equipo está compuesto por tres elementos principales: el armazón del sistema de medida por reflexión (1), el armazón de medida por trasmisión (2) y el soporte para los láseres (3), donde van colocados también sus sistemas de refrigeración, las tarjetas de adquisición de datos y los drivers de control. Tanto el armazón del sistema de medida por trasmisión como el de medida por reflexión están aislados lumínicamente, debido a que en su interior se posiciona la cámara y sería indeseable cualquier perturbación lumínica procedente del exterior.

Los diferentes componentes presentes en el equipo son:

- **Láseres de diodo.** Para conseguir iluminar toda la superficie de una oblea o célula (156 mm x 156 mm) se utilizan como fuente de iluminación varios láseres de diodo, figura 4.2 izq. En concreto, el sistema se compone de cuatro láseres de diodo (AlGaAs) montados en configuración cs-mount. Su longitud de onda es de 808 nm y la potencia de cada uno es 20 W, ver tabla 4.1.

Tabla 4.1 Características técnicas de los láseres de diodo usados en el equipo.

Empaquetamiento	CS-MOUNT
Potencia óptica de salida en continuo	20 W
Anchura de las barras	1 cm
Área de emisor	150 x 1 μ m
Número de emisores	19
Longitud de onda central	808 \pm 3 nm
Anchura espectral	< 3 nm
Pendiente de eficiencia	> 0.9 W/A
Corriente umbral	< 10 A
Corriente de operación	< 32 A
Temperatura de funcionamiento	+10...+40 °C

- **Fuentes de alimentación.** Para alimentar los láseres de diodo se requieren fuentes capaces de proporcionar gran amperaje y estabilidad tanto en la tensión como en la corriente de salida. Las fuentes de alimentación de ordenadores personales poseen estas características ya que alcanzan potencias cercanas a los 400 W y son muy estables. En este caso, las dos fuentes que alimentan el sistema de iluminación son dos fuentes de este tipo, concretamente VANTEC modelo VAN420A y Thermaltake Purepower-560APD.

- **Drivers electrónicos del láser.** Resulta muy conveniente controlar la corriente que pasa a través de los diodos, principalmente por dos motivos: primero porque el láser no siempre va a funcionar en su máximo de potencia y segundo porque es necesario controlar los picos y posibles transitorios de tensión o de corriente a través de los láseres (para evitar lo máximo posible su degradación). Por esto, los drivers electrónicos actúan de nexo entre la fuente de alimentación y los diodos de alta potencia, adaptando el voltaje y controlando la corriente que se les suministra. En concreto, en este caso, adapta 5 V de salida de la fuente de alimentación al voltaje del láser, 1.8 V aproximadamente.

En la tabla 4.2 se muestran las características del driver utilizado, modelo LDP-C 40-05 de PICOLAS, figura 4.2 dcha.

Tabla 4.2 Características técnicas del driver electrónico

Corriente de Salida	1 - 40 A
Rizado de Corriente	< 400 mA
Frecuencia de Rizado	> 200 kHz
Tiempo de Establecimiento de Corriente	< 60 μ s
Sobrepico de Corriente	< 1 %
Voltaje de Entrada	4 - 6 V
Temperatura de Funcionamiento	0 - +55 °C
Potencia Máxima de Disipación	30 W
Dimensiones	60.9 x 57.8 x 54 mm
Peso	194 g

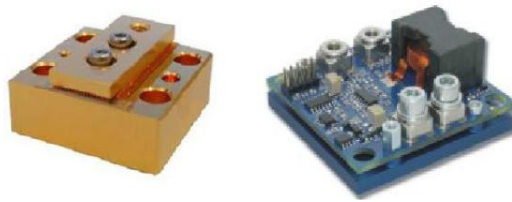


Figura 4.2 Láser de diodo (izq.) y driver electrónico (dcha.)

Además, el sistema se complementa con un sistema BOB (Break Out Board, modelo LDP-C-BOB de PICOLAS) utilizado para gobernar los drivers, controlando manualmente la corriente que circula a través del diodo (mediante un potenciómetro) o automáticamente (a través de una salida analógica externa).

- **Sistema de refrigeración de los láseres.** Los láseres pueden operar durante los procesos de medida con corrientes de hasta 25 A. Al circular una cantidad de corriente tan elevada el diodo puede sobrecalentarse provocando que se dañe o no funcione correctamente. Para evitar estos problemas se utiliza para cada láser un sistema de refrigeración Artic Freezer 13, formado por un disipador y un ventilador, figura 4.3 izq. En la tabla 4.3 se muestran las características básicas del conjunto.

Tabla 4.3 Características técnicas del sistema de refrigeración

Capacidad de Refrigeración Máx	200 W
Dimensiones	123 x 96 x 130 mm
Velocidad del Ventilador	60 - 200 rpm
Nivel de Ruido	0.5 Sone a 2000 rpm
Corriente Nominal	0.18 A
Voltaje Nominal	12 V
Potencia Consumida	2.28 W
Peso	0.695 Kg
Estructura	Aletas de aluminio 45x0.5 mm

- **Tarjeta de adquisición de datos.** Para poder automatizar el proceso de toma de medidas se han utilizado dos tarjetas de adquisición de datos, una

DT9804 y una DT9802. Estas permiten monitorizar y controlar las variables de los láseres, ver tabla 4.4 y figura 4.3 dcha.



Figura 4.3 Sistema de refrigeración de los láseres (izq.) y tarjeta de adquisición de datos (dcha.).

Tabla 4.4 Características técnicas de las tarjetas de adquisición de datos

	Modulo	DT9802	DT9804
Entradas analógicas	Canales	16 modo común/8 diferenciales	16 modo común/8 diferenciales.
	Resolución	12 bits	16 bits
	Rango de Entrada	± 1.25 , ± 2.5 , ± 5 , ± 10 , $0-1.25$, $0-2.5$, $0-5$ y $0-10$ V	± 1.25 , ± 2.5 , ± 5 y ± 10 V
	Rendimiento	100 kS/s	100 kS/s
Salidas analógicas	Canales	2	2
	Resolución	12 bits	16 bits
	Rango de Salida	± 5 , ± 10 , $0-5$ y $0-10$ V	± 10 V
	Frecuencia de Salida	50 Hz	50 Hz
E/S Digitales	Líneas de E/S	16	16
	Contadores/Temp.	2	2

- **Soporte para la cámara en medidas por reflexión.** En el interior del armazón del sistema de medidas por reflexión se encuentra entre otros el soporte para la cámara, ver figura 4.4. El acceso a este soporte es una puerta lateral a través de la cual se introduce la cámara. Para poder ajustar la posición de ésta de forma correcta el soporte permite variar su altura e inclinación mediante la manipulación de varillas roscadas. Una vez colocada la cámara en la posición deseada se cierra la puerta quedando el interior del armazón totalmente aislado lumínicamente.



Figura 4.4 Soporte para cámara en reflexión

- **Soporte para cámara en medidas por transmisión.** Análogamente, en el armazón de medidas en trasmisión existe un soporte para la cámara, figura 4.5. Este soporte se utiliza para colocar la cámara en posición vertical. Este componente está formado por una plataforma horizontal acolchada sobre la que apoya la cámara, que a su vez va montada sobre un sistema elevador que permite el desplazamiento en el eje vertical.

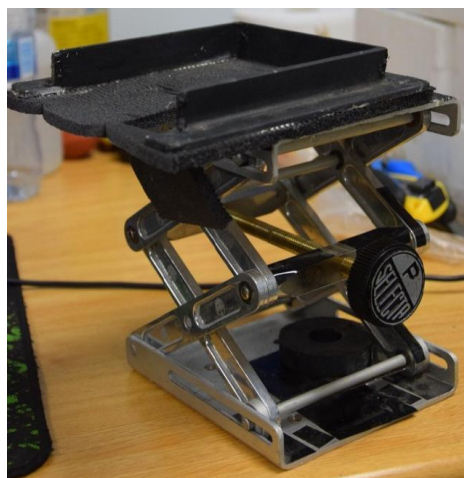


Figura 4.5 Soporte para cámara en trasmisión.

El posicionamiento de la cámara en el plano horizontal se consigue moviendo manualmente el soporte a la posición deseada. Para anclar la cámara de forma segura al conjunto del soporte se utilizan gomas elásticas.

- **Bandeja para muestras.** Sobre este elemento, figura 4.6, va colocada la célula u oblea que se desea analizar. Esta bandeja está diseñada de tal forma que es posible su extracción parcial o total del equipo mediante unas guías correderas, lo cual permite retirar y colocar las muestras de manera ágil. En el centro de la bandeja existe una cavidad de forma cuadrangular donde va posicionada la muestra.

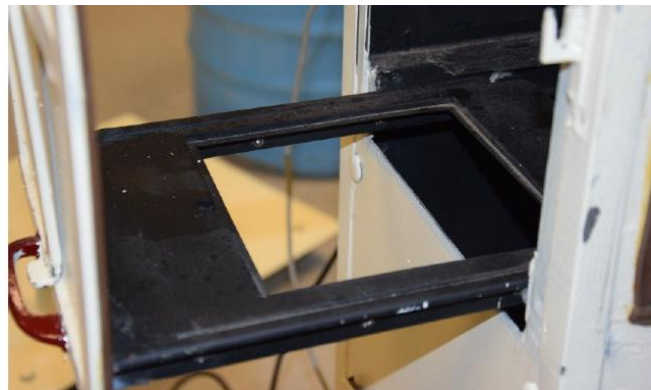


Figura 4.6 Bandeja para muestras

4.2 Toma de medidas

Como ya se ha comentado anteriormente, con este equipo se pueden caracterizar tanto obleas (en transmisión y reflexión) como células (sólo en reflexión).

El proceso de medición de imágenes de fotoluminiscencia tanto para obleas como para células es similar:

1. En primer lugar se coloca la muestra a analizar en la bandeja de muestras.
2. Con la muestra ya colocada se procede al posicionamiento y enfoque de la cámara en el lugar preciso, de forma que se obtenga una imagen lo más nítida y centrada posible.
3. Por último, se conectan los láseres. La señal de fotoluminiscencia emitida por la muestra (excitada con la luz) es recogida por la cámara, la cual envía en tiempo real la imagen a un ordenador.
4. Se procesa la imagen con el software adecuado.

Para el caso de medidas de electroluminiscencia el proceso es prácticamente idéntico al anterior, exceptuando que en este caso la excitación de la muestra se consigue conectando la célula a una fuente de alimentación, figura 4.7.

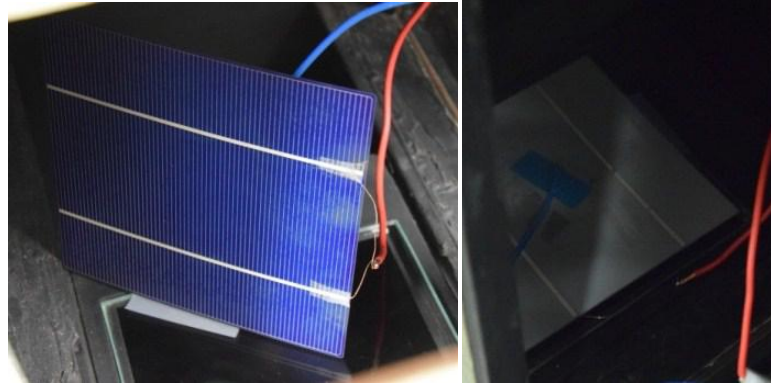


Figura 4.7 Contactos eléctricos para la medida de electroluminiscencia en una célula solar

A continuación se describen con detalle algunos resultados de medidas de PLi y ELi en obleas y células solares hechas por el grupo Optronlab.

4.2.1 Medidas en células solares

Fotoluminiscencia en célula solar

Las imágenes de fotoluminiscencia en célula se toman en reflexión ya que la capa metálica de la cara posterior no permite medidas en transmisión. Esta configuración consiste en situar la fuente de iluminación y la cámara en la zona superior de la bandeja porta-muestras, tal y como indica el esquema de la figura 4.8.

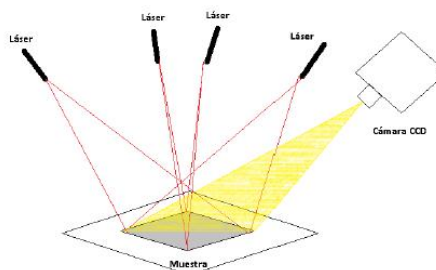


Figura 4.8 Disposición de los elementos en medidas por reflexión

En la figura 4.9 (arriba) se observan imágenes de PLi de la misma célula solar pero obtenidas con las cámaras mencionadas, una con sensor de Si y otra

con sensor de InGaAs. Como se puede observar, algunas zonas están mejor enfocadas en comparación con otras. Esto se debe a que la cámara forma cierto ángulo con la normal al plano que contiene la célula. Sin embargo, estos inconvenientes son fáciles de corregir con el software de tratamiento de imagen adecuado, como por ejemplo ImageJ. En la parte de abajo de la figura 4.9 se muestran las imágenes corregidas.

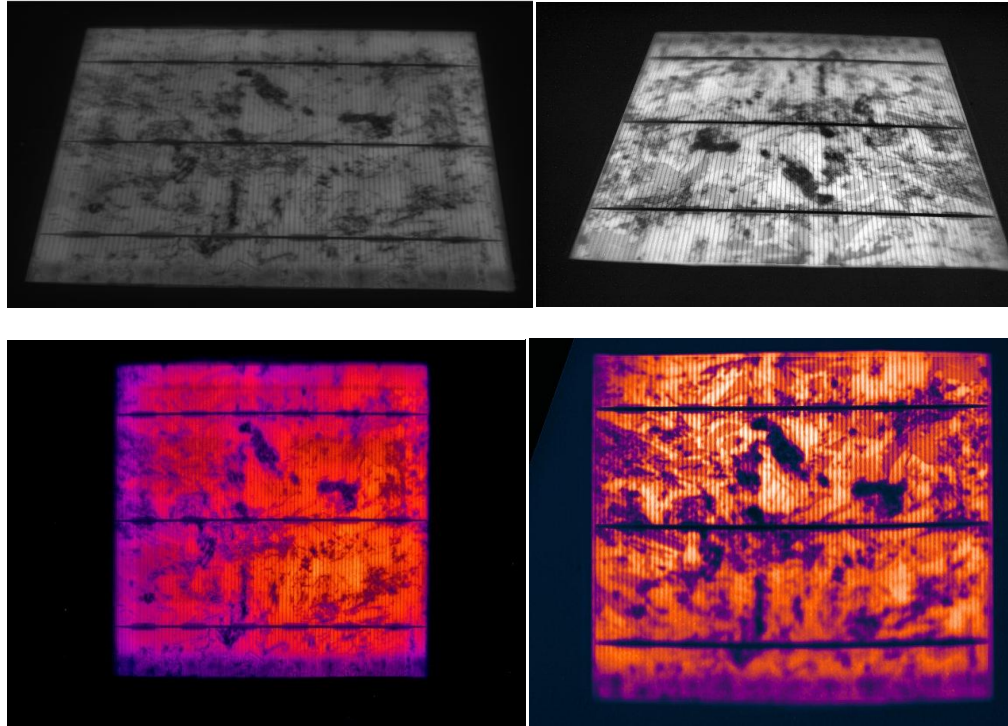


Figura 4.9 Arriba: Imagen de PL obtenida con la cámara de silicio (izq.) e Imagen de PL obtenida con la cámara de InGaAs (dcha.). Abajo: corrección de la perspectiva de la imagen (dcha.) y corrección de brillo y contraste mediante ImageJ (izq.)

En las imágenes corregidas de la figura 4.9 se observan mejor algunas zonas más oscuras, e incluso completamente negras. En estas se localizan las zonas con más alta densidad de defectos de la célula. Este método permite cuantificar de una manera rápida la cantidad de defectos presentes con un primer análisis visual.

Electroluminiscencia en célula solar

En cuanto al análisis de electroluminiscencia, la metodología seguida para realizar las medidas será la misma. En la figura 4.10 se muestra una imagen de electroluminiscencia de una célula captada con la cámara de silicio. De la misma manera que se hace en medidas de fotoluminiscencia, las imágenes se tratan posteriormente con el software específico (ImageJ).

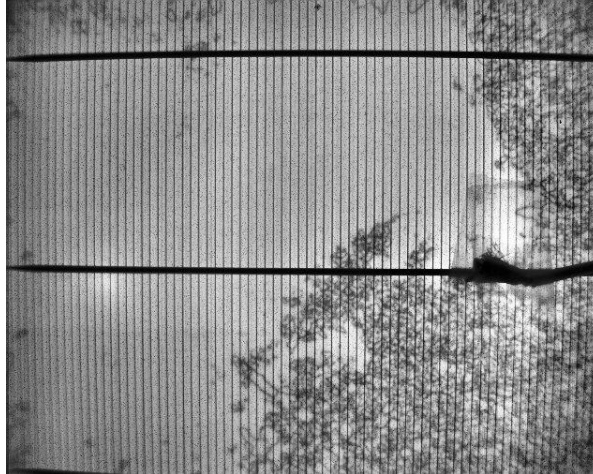


Figura 4.10 Imagen de electroluminiscencia de una célula solar obtenida con la cámara pco.1300.

4.2.2 Medidas en obleas de Silicio

La toma de imágenes de obleas utilizando fotoluminiscencia se hace de manera muy parecida a la vista anteriormente para el caso de células.

Sin embargo, en este caso se trabaja en transmisión (figura 4.12) ya que en las medidas en reflexión el láser reflejado no se consigue eliminar y, por lo general, no permite discernir la luminiscencia.

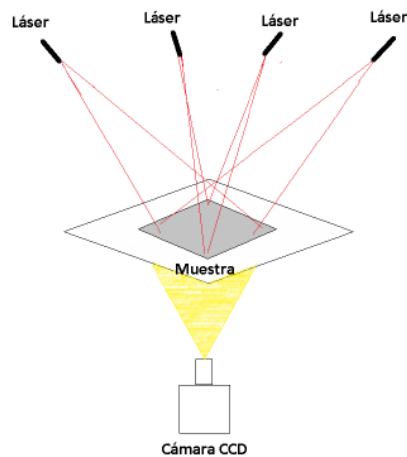


Figura 4.12 Disposición de los elementos en medidas por trasmisión

La figura 4.11 muestra la imagen obtenida en un ensayo de fotoluminiscencia en transmisión realizado con la cámara de silicio en una oblea de mc-Si.

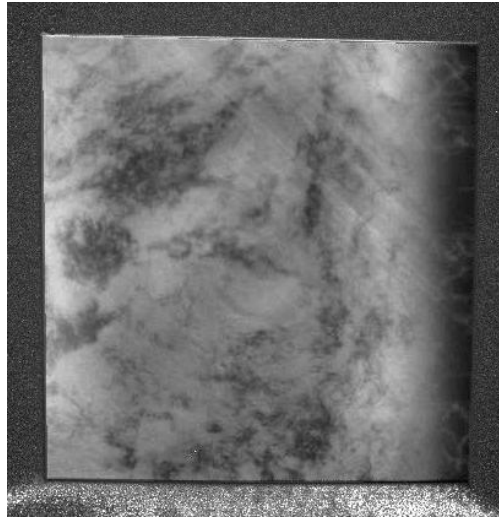


Figura 4.11 Imagen de fotoluminiscencia de una oblea de mc-Si obtenida con la CCD de Silicio.

4.3 Mejoras introducidas en el equipo EL/PL antiguo

El “Equipo EL/PL antiguo” se iba quedando cada vez más obsoleto a medida que el grupo GdS Optronlab evolucionaba en la técnica de medida de luminiscencia. Esto creó la necesidad de añadir algunos cambios en dicho equipo, tratando de conseguir algunas mejoras en la ergonomía del sistema antes de dar paso al diseño del sistema final que se detallará en la sección 5.

4.3.1 Bandeja para células y obleas

4.3.1.1 Motivaciones

En el diseño del “Equipo EL/PL antiguo” se puede observar que en la superficie de la bandeja porta-muestras se ha mecanizado un reborde para poder colocar la oblea o célula, dejando un hueco suficiente para realizar mediciones en transmisión, figura 4.13.

El corte efectuado en la bandeja para crear el hueco no es preciso, debido seguramente a que ha sido realizado con una herramienta de corte como una radial o similar, lo que provoca que la muestra no quede posicionada de manera totalmente horizontal en la bandeja. Este hecho afecta directamente a la calidad de la imagen de luminiscencia recogida, que estará descuadrada.

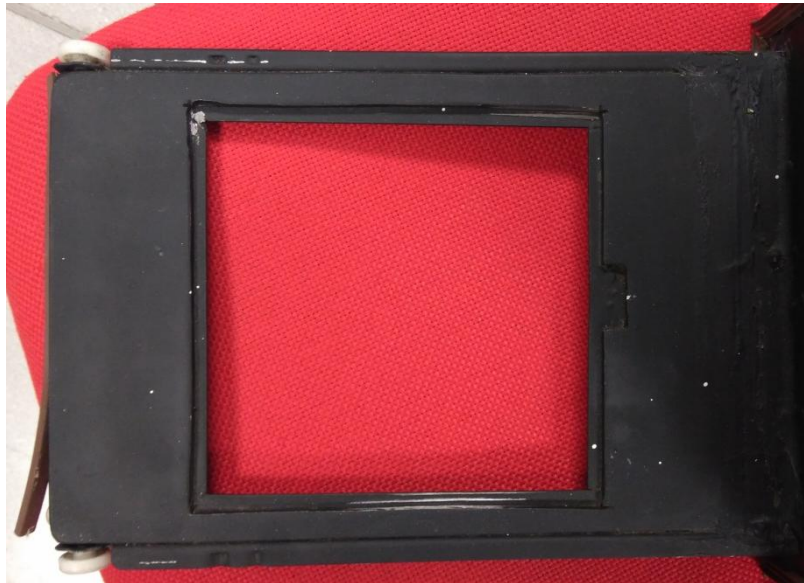


Figura 4.13 Mecanizado en la bandeja para muestras

Otra de las desventajas que presenta esta bandeja aparece a la hora de hacer pruebas de electroluminiscencia en células. Los contactos eléctricos para hacer electroluminiscencia se hacen sobre la superficie de la propia célula, un terminal se pega mediante cinta adhesiva a la cara superior de la célula para no dañarla mientras que el otro se suelda con estaño o se pega a la cara posterior (figura 4.7).

Este método de contactos para electroluminiscencia puede resultar eficaz para el caso de que solo se quiera estudiar una muestra, pero si se quiere analizar un gran número de muestras no resultará adecuado, debido a que se requieren varios minutos para realizar los dos contactos correctamente. Asimismo, la excesiva manipulación de las muestras al realizar los contactos puede conllevar problemas de rotura, debido a la extrema fragilidad de las mismas.

Además, como se puede observar en la figura 4.14, los contactos están dentro del campo que capta la cámara, lo cual afecta a la imagen de luminiscencia, apareciendo zonas con brillo excesivo debido a dichos contactos.

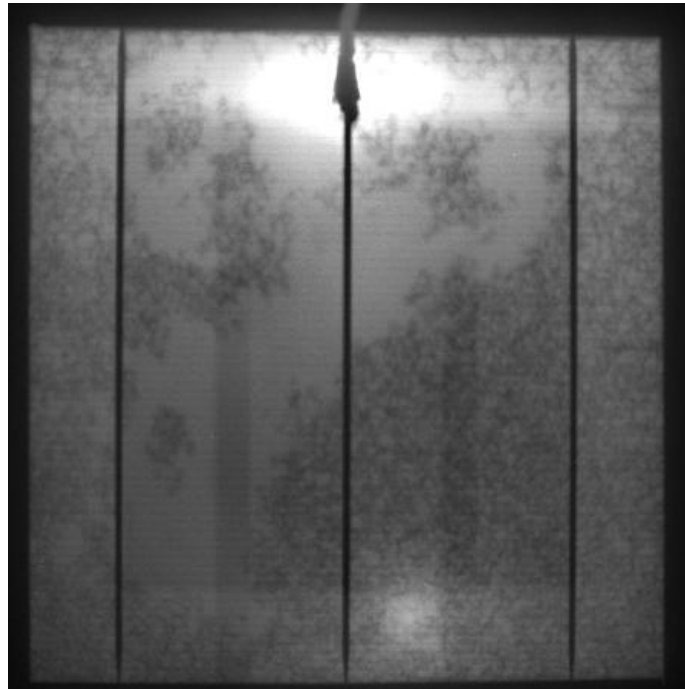


Figura 4.14 Imagen de electroluminiscencia de una célula solar.

Las desventajas aquí descritas motivaron al diseño de una nueva bandeja basada en la anterior, de forma que no hubiera que realizar grandes cambios en el conjunto del equipo.

Los dos objetivos principales que debe cumplir la nueva bandeja para obleas y células son:

- Asegurar que las muestras queden colocadas siempre en la misma posición.
- Conseguir que los contactos eléctricos (necesarios para las pruebas de electroluminiscencia) no interfieran en el campo de la imagen y resulte sencilla su manipulación.

4.3.1.2 Diseño y características

Cumpliendo las premisas anteriormente comentadas, se decidió diseñar una pieza que fuera colocada encima de la antigua bandeja para muestras y así poder reutilizar tanto la base para colocarla como el sistema de extracción tipo guía lineal que ya existía en el equipo.

Todas las piezas que aparecen en la memoria, han sido diseñadas mediante el programa de diseño 3D CAD “CATIAV5”.

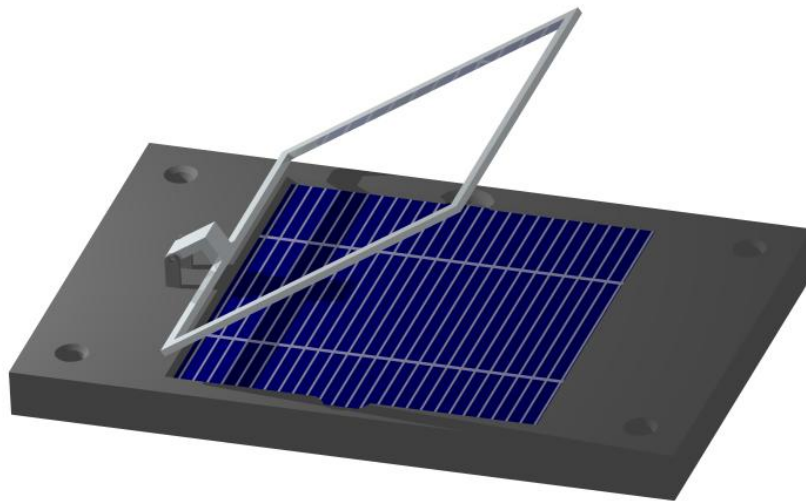


Figura 4.15 Primer diseño realizado de la bandeja. Ambas piezas van unidas por una pieza con un tornillo que permite levantar la ventana superior para la extracción o cambio de la muestra.

El primer diseño que se modeló consiste en una bandeja rectangular, base para apoyar la muestra, y otra pieza metálica que hará la función de contacto superior. La bandeja, figura 4.15, posee un mecanizado que forma un reborde para que la muestra quede perfectamente ajustada y a la vez sobre este reborde se pueda colocar una pieza de material conductor que asegure el contacto posterior.

Este primer diseño fue modificado en parte debido a que la pieza de contacto superior podría no ser lo suficientemente resistente debido a su pequeño espesor. Además al tener que hacer contacto superficial en un área plana de unos 15 cm^2 éste contacto podría ser poco uniforme.

Por este motivo, se propuso el diseño que aparece en la figura 4.16. Como se puede observar, consta (a parte de la base anteriormente mencionada) de dos pinzas simétricas enfrentadas que permiten sujetar y hacer el contacto superior en la célula solar.

Este conjunto se fabricó en la empresa “Martina 3d” mediante impresión láser, suponiendo un coste total de 190 €. Los planos detallados se pueden consultar en el Anexo 5.

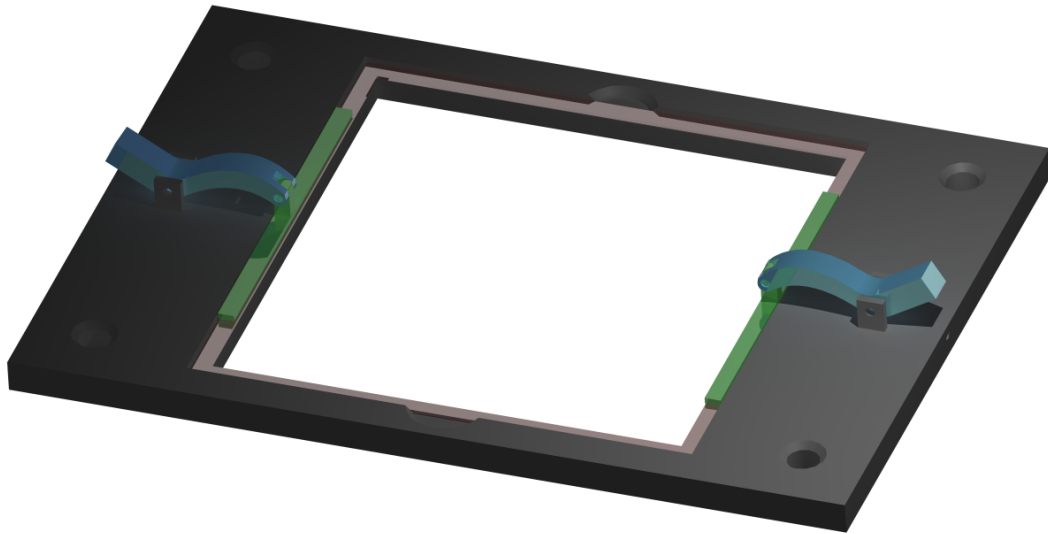


Figura 4.16 Diseño final de la bandeja para muestras

Se describen a continuación algunos aspectos del diseño y fabricación de cada uno de los componentes de este conjunto.

Base de la bandeja

Es la parte fundamental del conjunto sobre la que se apoyan las demás piezas. Su forma es rectangular y sus medidas coinciden con las de la bandeja antigua del equipo. Esto permite colocar una encima de la otra. Como se puede ver en la figura 4.17 se han dispuesto cuatro orificios en las esquinas por los que se introducen sendos tornillos con los que se sujeta la nueva base a la bandeja antigua. Además, en la parte central dispone de un hueco con un reborde donde se coloca el marco metálico sobre el que apoya la muestra.

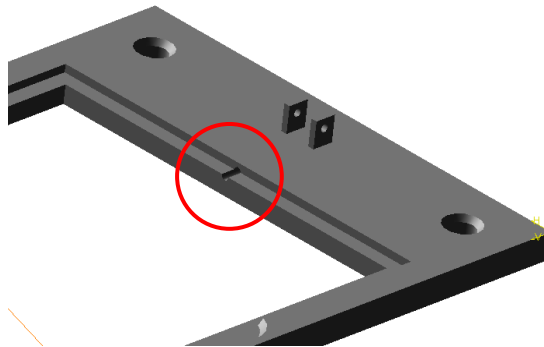


Figura 4.17 Detalle del agujero pasante y las lengüetas

Para poder retirar la muestra de la bandeja con facilidad se han mecanizado dos cavidades con forma semicircular a ambos lados del reborde. La bandeja dispone de un agujero pasante en el plano horizontal que permite pasar el cable para hacer el contacto eléctrico del marco metálico. En esta imagen también se pueden observar las lengüetas verticales que sujetan las pinzas.

Marco metálico

La primera versión que se pensó para el marco metálico se fabricó soldando cuatro piezas distintas de cobre, figura 4.18. La principal limitación de esta opción era que el contacto no era del todo fiable, ya que la muestra no contactaba uniformemente con la superficie del marco.



Figura 4.18 Primera versión del marco metálico

En la siguiente versión del marco, este va pegado encima del reborde que tiene la bandeja para este fin. Está fabricado en cobre mediante corte láser, lo que garantiza un buen contacto posterior a la hora de hacer electroluminiscencia en célula. La figura 4.19 muestra cómo queda la bandeja (base y marco metálico) en una situación real en su posición de trabajo.



Figura 4.19 Bandeja en su posición de trabajo. El color negro evita la aparición de reflejos de luz en el interior de la cavidad.

Pinzas

Para hacer el contacto eléctrico superior se han diseñado dos pinzas articuladas situadas en los extremos de la base. Como se puede ver en la figura 4.20, la pinza está compuesta por dos piezas: una sobre la que se presiona para posicionarla y una especie de palpador de cobre, articulado con la anterior y encargado de realizar el contacto. Para que estas ejerzan presión sobre la muestra correspondiente, se han colocado unos pequeños muelles entre el cuerpo de la pinza y la base de la bandeja. En la imagen de la derecha se puede observar un mecanizado realizado en la parte inferior de la pieza para alojar dicho muelle.

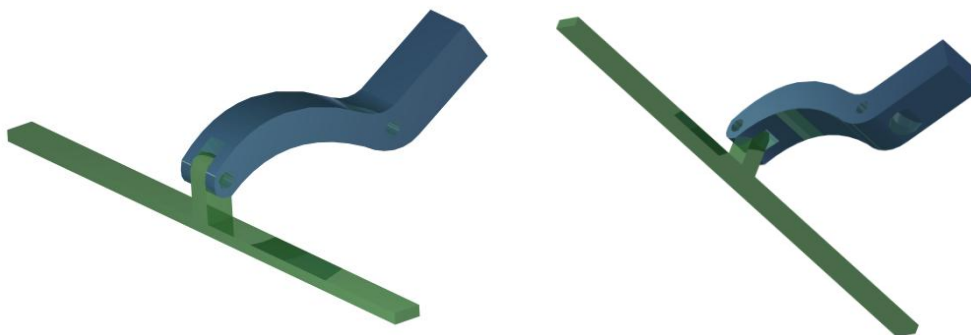


Figura 4.20 Imagen de la pinza vista desde arriba (izq) y pinza vista desde abajo (dcha.).

Durante el proceso de impresión se realizaron modificaciones del diseño inicial: se añadió más superficie de contacto al cuerpo de la pinza y el palpador, que originalmente iba a ser todo de una pieza metálica de cobre, se imprimió en plástico y se le pegó una lámina de cobre en la zona de contacto, con el objetivo de abaratar costes, ver figura 4.21. Para la unión de estas dos piezas y del cuerpo de la pinza a la base se han usado pasadores, que posteriormente han sido reemplazados por tornillos con tuerca, con la idea de poderlos dejar fijos si se requiere.



Figura 4.21 Pinza y componentes que la forman.

El resultado final de la pieza impresa en 3D se muestra en la figura 4.22.



Figura 4.22 Resultado final de la fabricación de la bandeja

4.3.2 Soporte cámara CCD

4.3.2.1 Motivaciones

Como se ha comentado previamente, la fijación de la cámara para la toma de imágenes de PLi en reflexión se hacía de manera manual, utilizando un soporte realizado con elementos disponibles en el laboratorio, tal como se muestra en la figura 4.23. La utilización de este soporte no es la más adecuada, debido a que es difícil tener reproducibilidad en las medidas tomadas, ya que resulta muy complejo colocar la cámara dentro del equipo siempre en la misma posición.



Figura 4.23 Soporte para la cámara en reflexión

Para tratar de corregir estas deficiencias en el equipo, se ha diseñado un nuevo soporte para realizar medidas en transmisión que permita además utilizar cualquier modelo de cámara.

4.3.2.2 Diseño y características

La idea inicial de este diseño se basa en crear un nuevo soporte que permita desplazar la cámara en dos ejes, perpendiculares entre sí, en el plano de la base del equipo.

Una de las primeras propuestas fue crear el soporte mediante la utilización de dos carriles guía con varillas de acero y una serie de engranajes con correas dentadas que permitieran mover el soporte manualmente. Sin embargo, debido al alto precio de los componentes, esta opción fue desestimada.

Otra de las opciones fue intentar aprovechar recursos sustituyendo el soporte de la base por otro de un equipo existente en el laboratorio, procedente de un microscopio de precisión. Este equipo consiste en una base motorizada en dos de sus ejes mediante sendos motores paso a paso. La idea era colocar este equipo de forma que la cámara se colocase sobre él y así poder controlar desde el exterior de manera automática los motores, y, en consecuencia, la posición de la cámara.

El problema que surge en este punto está relacionado con el tamaño de la cavidad en la que va insertado el soporte. El espacio disponible es muy reducido, sólo de 20 cm². Para poder posicionar de forma adecuada la base motorizada sería necesario, debido a su tamaño, realizar una serie de cortes en los cerramientos de la estructura. Esto es inviable ya que modificaría la estabilidad, el comportamiento mecánico del equipo y su aislamiento lumínico.

Finalmente se decidió realizar la base a partir de otro componente presente en el laboratorio: un posicionador de microscopio, figura 4.24. Esta vez, el control en vez de ser motorizado es manual, lo que permite disponer de un componente de menor tamaño.



Figura 4.24 Posicionador manual existente en el laboratorio

Como se puede apreciar en la figura 4.24, este posicionador cuenta con desplazamiento en dos ejes perpendiculares. La posición de los dos ejes se controla mediante un mando manual que se encuentra en la parte inferior.

Debido a que el mando de control de los dos ejes sobresale de la base respecto del resto de la pieza ha sido necesario diseñar, y posteriormente construir, un soporte adicional para sujetar la pieza al equipo de medida.

El soporte, que se muestra en la imagen 4.25 ha sido fabricado usando cuatro patas de acero de sección cuadrada de 12 cm de longitud soldadas a una lámina delgada de acero. Para que la unión entre la base y la pieza con los ejes sea precisa, se han doblado los bordes de la pletina consiguiendo así que las dos piezas encajen entre sí, en el Anexo 5 se puede consultar el plano referente a esta pieza. La base ha sido pintada en negro para evitar que se produzcan reflejos no deseados.



Figura 4.25 Soporte diseñado en CATIA V5 (izq.) y soporte de apoyo del posicionador (dcha.).

Para asegurar que no exista juego posible entre las dos piezas, se ha mecanizado una pequeña ranura en la pletina de acero que permite fijar ambas piezas entre sí mediante un tornillo roscado que posee el posicionador, figura 4.26.



Figura 4.26 Detalle de la unión del posicionador a la base

Para anclar la cámara sobre el posicionador se ha diseñado una pieza de acero en forma de L, ver figura 4.27. Esta pieza será la que posea el movimiento en las dos direcciones y por tanto la que hace posible colocar la cámara en el punto deseado. Para fijar la base de la L al posicionador se han utilizado dos tornillos, con la cabeza moleteada para facilitar su manipulación. La cámara va fijada en la parte frontal de la L mediante un tornillo. En la figura 4.28 se observa el montaje final de los componentes en su posición de trabajo, incluyendo la cámara InGaAs.

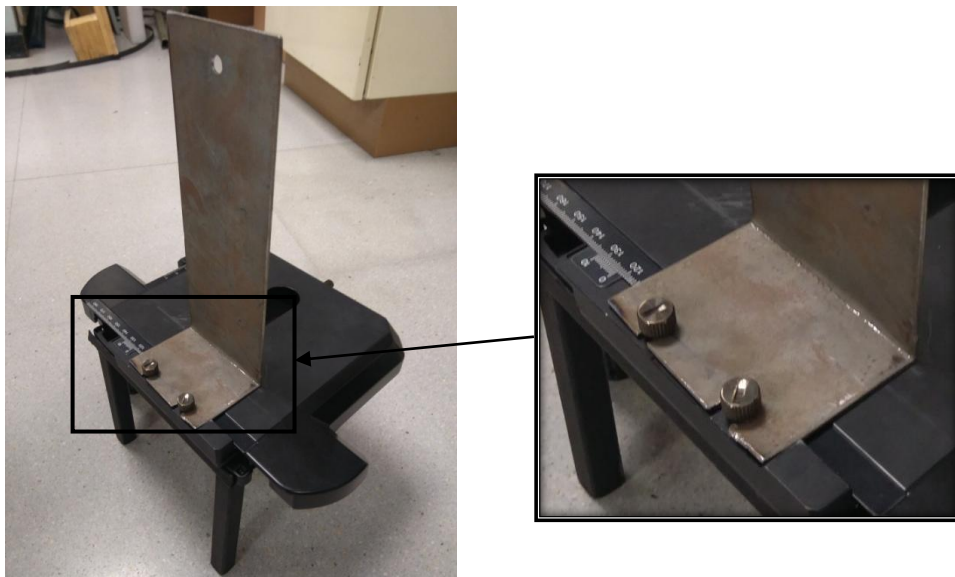


Figura 4.27 Pletina angular montada sobre el soporte y detalle de la fijación



Figura 4.28. Conjunto de los componentes colocados en su posición de trabajo.

5.- Equipo EL/PL nuevo

A pesar de todas las modificaciones que se han añadido al equipo de medida (equipo EL/PL antiguo), estas no han sido suficientes para dar solución a múltiples problemas que se iban planteando. Las necesidades del equipo han ido evolucionado con el tiempo, llegando a precisar un sistema más sofisticado y versátil. En este apartado se describe con detalle una nueva versión del equipo, llamado “Equipo EL/PL nuevo” y que trata de solventar todas las mejoras demandadas.

5.1 Motivación

Existen una serie de motivos que han hecho que el equipo EL/PL antiguo no pueda satisfacer las necesidades técnicas de las medidas que el grupo GdS Optronlab precisa hacer. En concreto:

- **Estructura física del sistema.** Como se ha visto en el apartado 4.1, el equipo antiguo se sustenta sobre un esqueleto de perfiles de acero, y a su vez los revestimientos están fabricados con planchas de este mismo material. El uso de acero hace que el equipo resulte muy pesado, y por lo tanto, difícil de desplazar si se requiere.
- **Excitación de las muestras en fotoluminiscencia.** En el anterior equipo para excitar las muestras en medidas de fotoluminiscencia se utilizan cuatro láseres (ver figura 4.3). Cada uno de estos láseres incide sobre una esquina de la muestra. Esto, junto a otros factores como la degradación de los láseres, hace que haya zonas de la célula en las que el nivel iluminación sea mayor que en otras, como se puede apreciar en la figura 5.1.

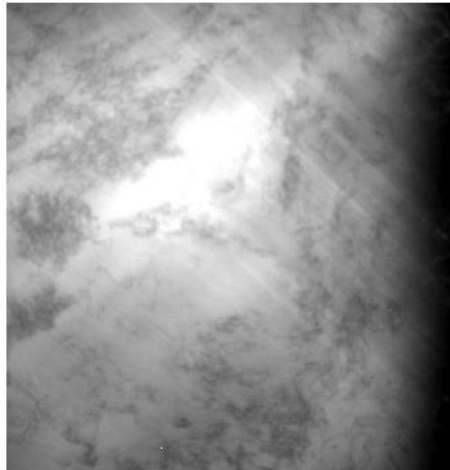


Figura 5.1 Imagen de fotoluminiscencia de una oblea en la que se pueden observar zonas diagonales de más brillo correspondientes a inhomogeneidades en la iluminación de los láseres.

- **Ajuste de la posición de la cámara.** Aún con las mejoras realizadas en el soporte para medidas en transmisión (epígrafe 4.3.2), el posicionamiento y ajuste de la cámara puede llevar algunos minutos. Por esta razón, es necesario diseñar un equipo en el cual sea sencillo y rápido tanto colocar la cámara, como cambiar su disposición para realizar medidas en transmisión o reflexión.
- **Versatilidad del equipo.** El equipo EL/PL antiguo está específicamente diseñado para medir luminiscencia tanto en transmisión como reflexión, pero resulta difícil, por el propio diseño del equipo, incorporar nuevos elementos que permitan ampliar las posibilidades de estudio sobre obleas o células.

En los siguientes apartados se analiza con detalle la estructura física y componentes del nuevo sistema desarrollado, así como su modo de funcionamiento a la hora de realizar las medidas en obleas y células.

5.2 Estructura física y componentes

La función principal de este equipo debe ser la obtención de imágenes de la luminiscencia emitida por la muestra, usando para ello un detector adecuado. El equipo ofrece la posibilidad de realizar medidas tanto en transmisión como en reflexión, excitando la muestra mediante luz o corriente, para recoger fotoluminiscencia o electroluminiscencia respectivamente. Los aspectos

relacionados con el funcionamiento y al proceso de toma de medidas con el nuevo equipo se tratan en la siguiente sección.

En la figura 5.2 se muestra una imagen desde el exterior del equipo tanto del diseño realizado con CATIA V5, como de la estructura real fabricada en “Fasten sistemas”. En el Anexo 4 aparece el coste presupuestado que supone la fabricación de los componentes por dicha empresa. Como se aprecia en la figura el equipo consta de una zona exterior (en la que van colocados elementos como la caja eléctrica y el estante) y de una zona interior, a su vez subdividida en dos partes (superior e inferior) a las que se accede a través de dos puertas, que se encuentran separadas entre sí por un cajón.



Figura 5.2 Vista del equipo diseñado en CAD (izq.), y equipo fabricado por “Fasten sistemas” (dcha.).

A continuación, se analizan en detalle cada uno de los componentes que forman el conjunto del equipo. Estos se presentan en dos apartados diferentes, según estén situados en el interior o exterior del equipo.

5.2.1 Zona exterior del equipo

▪ Estructura principal

Para la realización de toda la estructura (que sirve de soporte de los componentes del equipo) se han utilizado perfiles de aluminio anodizado de de sección 40 mm x 40 mm, figura 5.3 izquierda. La elección de este material se debe a la buena relación que presenta entre su peso y resistencia, lo que permite construir una estructura ligera y a la vez compacta y resistente. Además de sus buenas propiedades mecánicas, este tipo de perfiles son sencillos de ensamblar entre sí, figura 5.3 derecha, y ofrecen gran versatilidad a la hora de acoplar cualquier tipo de elemento sobre ellos. Esto hace posible crear un equipo modular en el que se pueden realizar modificaciones de manera sencilla.

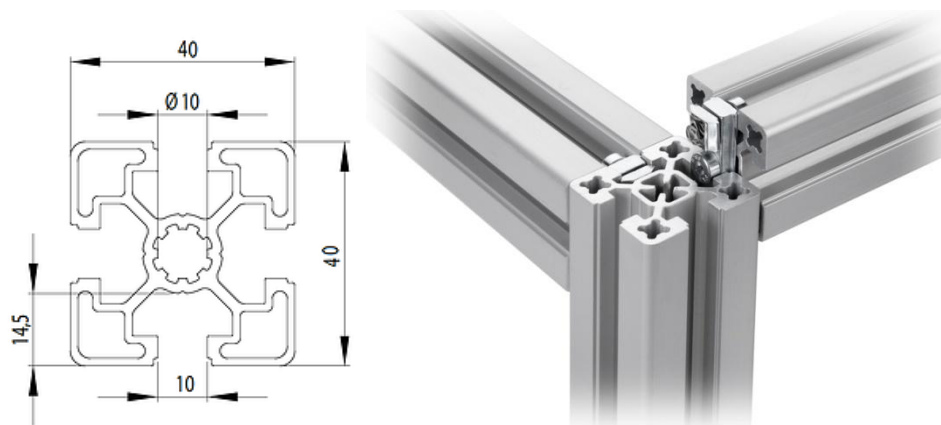


Figura 5.3 Perfil estándar de aluminio de 40 mm x 40 mm (izq.) y ensamble entre dos perfiles (dcha.).⁶

El esqueleto exterior de la estructura total presenta medidas de 1800 mm de alto, 600 mm de ancho y 500 mm de profundidad. El resto de medidas se pueden consultar con más detalle en los planos (Anexo 5).

▪ Cerramientos

El interior del equipo está completamente aislado del exterior mediante paneles de PVC, figura 5.2. Se colocan insertados en la propia ranura del perfil de aluminio, figura 5.4, con el objetivo de que el interior del equipo quede totalmente aislado lumínicamente. Los paneles tienen una tonalidad negra para evitar que se produzcan reflejos, ya que podrían alterar el resultado de las imágenes recogidas.

⁶ item industrietechnik gmbh. [Citado: 9 de febrero de 2017]
<http://product.item24.es/es/pagina-de-inicio/productos/catalogo-de-productos>.

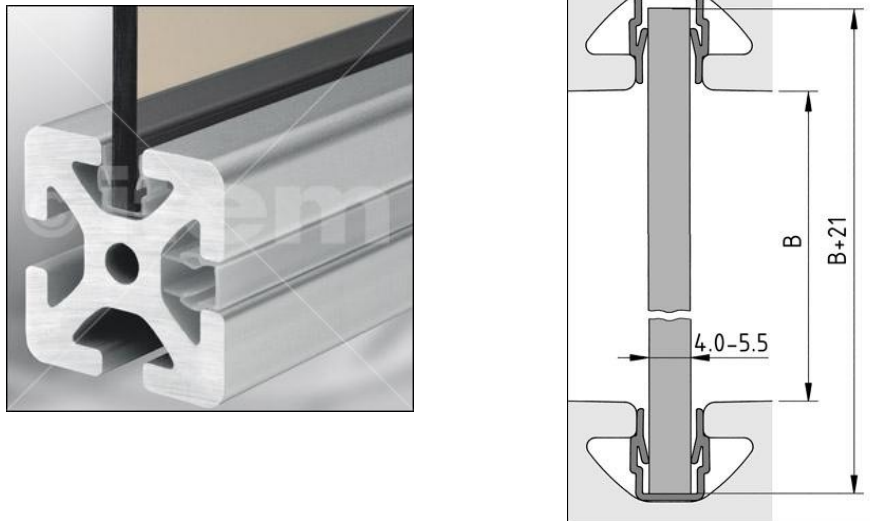


Figura 5.4 Sistema de panelado en el interior de la ranura del perfil.

Las dos puertas se han diseñado con marco de perfil de aluminio y se han panelado al igual que el resto de los cerramientos. Debido al elevado valor de los componentes alojados en el interior del equipo, en ambas puertas se ha incluido una cerradura. También se han colocado dos cierres magnéticos en la zona de contacto con la estructura para evitar que las puertas se abran por sí solas.

▪ *Ruedas*

Todo el equipo está sustentado sobre cuatro ruedas de 80 mm de diámetro fabricadas en goma inyectada. Su objetivo es permitir que el equipo pueda desplazarse de forma ágil y sin que suponga un gran esfuerzo. Cada una de estas ruedas posee freno propio, que ayuda a posicionar el equipo de forma totalmente estática y segura.

▪ *Estante horizontal*

En la zona exterior derecha del equipo se ha dispuesto de un estante que sirve como superficie de apoyo para el sistema de control y refrigeración del láser, así como para la colocación de otros elementos auxiliares al equipo que puedan ser necesarios.

▪ *Caja eléctrica*

En la parte exterior izquierda del equipo se han colocado dos perfiles de aluminio horizontales para atornillar sobre ellos la caja eléctrica. En ella se aloja todo lo relacionado con el cuadro eléctrico del equipo. De esta manera, esta caja actúa como sistema de protección eléctrica, así como almacén de

los elementos necesarios para el funcionamiento del mismo (toma de corriente, regleta de enchufes, botones de encendido/apagado, parada de emergencia, etc.).

5.2.2 Zona interior del equipo

En la figura 5.5 se muestran los elementos que componen la parte interior del equipo (los cerramientos aparecen ocultos para una mejor visualización del interior).

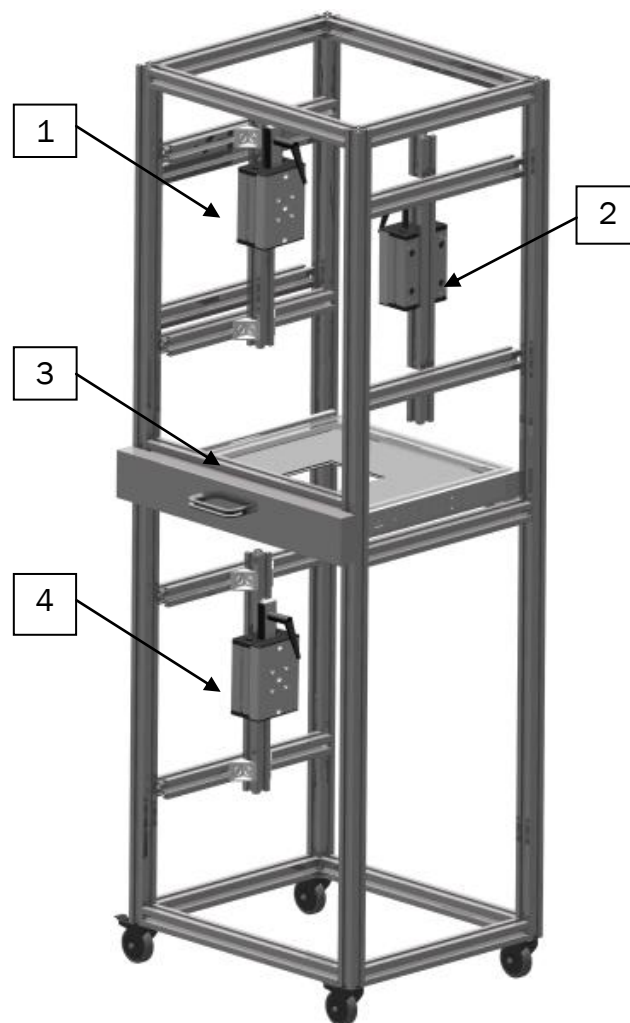


Figura 5.5 Elementos internos del equipo: sistema de sujeción de la cámara para reflexión (1), sistema de sujeción de la cámara en transmisión (4), sistema de sujeción del equipo de iluminación láser y bandeja porta-muestras (3).

▪ Sistema de sujeción de la cámara para medidas en reflexión

Situado en la parte superior izquierda del equipo se encuentran un conjunto de tres perfiles de aluminio que sirven de soporte para apoyar la cámara en la estructura principal. En la figura 5.6 se puede observar este sistema de forma aislada.



Figura 5.6 Sistema de sujeción de la cámara en reflexión (izq.) e imagen real de la zona superior del equipo en la que va colocado el soporte (dcha.).

El sistema consta de dos perfiles horizontales que se unen al esqueleto de la estructura principal. Estos no poseen ningún movimiento relativo respecto de la estructura. Unido a ellos perpendicularmente, existe otro perfil donde la unión en este caso se realiza mediante escuadras atornilladas. Estas escuadras permiten deslizar el perfil de manera sencilla, siendo necesario únicamente aflojar los tornillos para desplazarlo horizontalmente. El perfil vertical sirve de guía para la colocación de un carro que desliza mediante rodamientos de bolas sobre un perfil guía. Todos los carros utilizados en el equipo son marca HIWIN modelo HG series, figura 5.7.

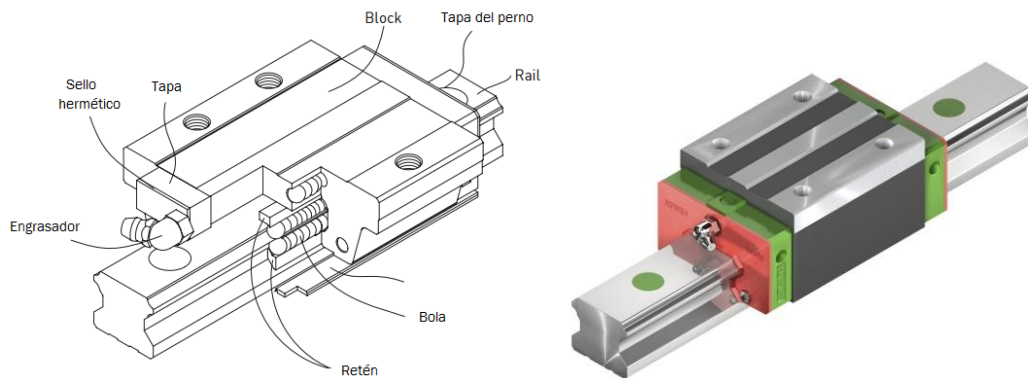


Figura 5.7 Sección del carro deslizante montado sobre el raíl (izq.) e imagen real del carro (dcha.).⁷

Para controlar la posición del carro y poder fijarlo a la altura requerida, se coloca un freno manual. Este dispone de una empuñadura que al girarla sobre si misma fija de manera totalmente rígida el carro al perfil.

Como se aprecia en la figura 5.7 izquierda, el carro dispone de orificios en su superficie sobre los que es posible fijar cualquier tipo de pieza. Sobre estos taladros se atornilla una pieza separadora especialmente diseñada para posicionar la cámara en el centro del equipo. En la figura 5.6 se muestra la disposición del soporte con todos los elementos que lo componen (la pieza separadora y la cámara se han dibujado de forma simplificada).

▪ Sistema de sujeción de la cámara para medidas en transmisión

En la parte inferior del equipo se ha colocado un soporte para la cámara, idéntico al anteriormente visto para reflexión, figura 5.8. Este soporte será utilizado cuando sea necesario realizar medidas en transmisión. Consta de los mismos componentes que el descrito antes: perfiles horizontales, perfil vertical y sistema carro-freno. Para minimizar costes, la pieza separadora será la misma del soporte de reflexión.

⁷ HIWIN Motion control and system technology. [Citado: 28 de febrero de 2017]
<http://motioncontrolsystems.hiwin.com/configurator/hg-series---interchangeable-type---block>.

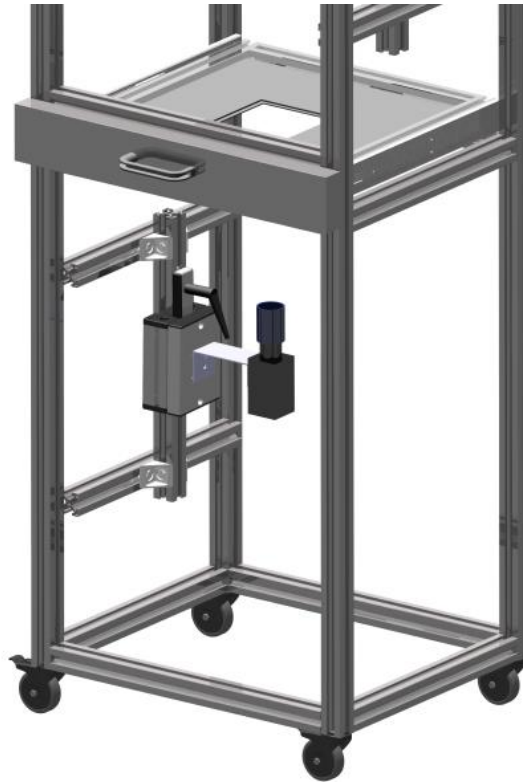


Figura 5.8 Sistema de sujeción de la cámara para transmisión

▪ **Sistema de sujeción del equipo de iluminación láser**

El sistema de sujeción del láser es idéntico al utilizado para colocar las cámaras. La única diferencia es que en este caso se atornilla un soporte direccional en la superficie del carro, figura 5.9. A este soporte va unida la fibra óptica del láser, permitiendo dirigir el haz a la zona que se desee.

Análogamente al caso anterior, también es posible el movimiento de la cámara en dos ejes perpendiculares. Además, el soporte direccional añade un par rotacional a la fibra del láser. En la figura 5.9 se aprecia el sistema completo (dibujado de manera simplificada).

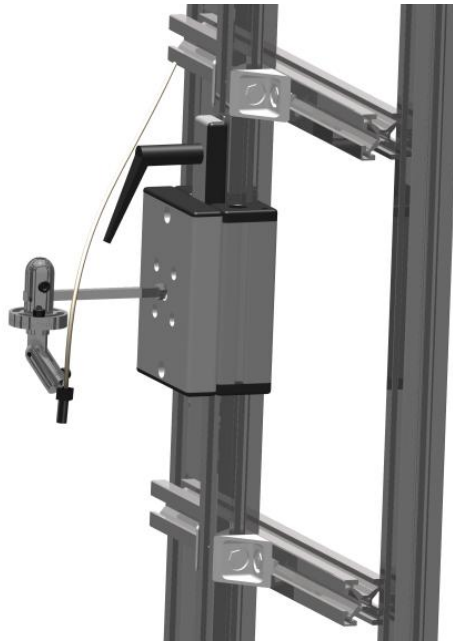


Figura 5.9 Sistema de sujeción del equipo de iluminación láser

▪ *Bandeja porta muestras*

En la zona central del equipo se encuentra la bandeja porta muestras, sobre la que se coloca las muestra a la hora de realizar las medidas. Su estructura está formada por una lámina (con un mecanizado interior que sirve de apoyo para la muestra) insertada en perfiles de aluminio. Dicho mecanizado tiene la forma exacta de la oblea y célula, y posee un rebaje sobre el que se coloca un marco metálico, figura 5.10. El marco sirve para realizar el contacto eléctrico con la célula para las medidas de electroluminiscencia.

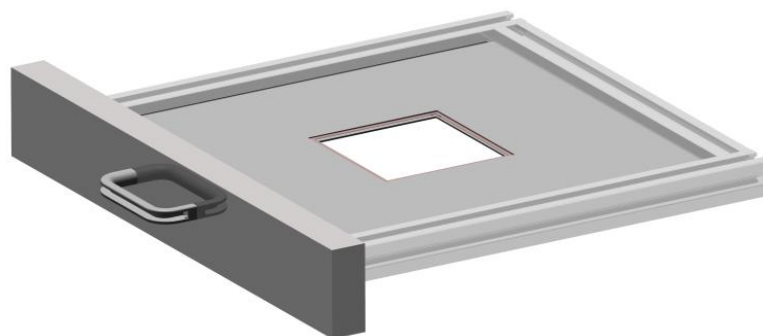


Figura 5.10 Bandeja porta muestras

Para facilitar la colocación y extracción de las muestras, se ha unido la bandeja al cuerpo de la estructura con un sistema de guías lineales. Este sistema permite extraer la bandeja sin necesidad de abrir ninguna de las dos puertas, evitando de esta manera que el operario quede expuesto al haz láser.

▪ Cámara de captación de luminiscencia

En el apartado 3.3 se han especificado las dos cámaras de que se dispone en el laboratorio, así como detalles técnicos de las mismas.

▪ Sistema láser

Para excitar las obleas o células en medidas de fotoluminiscencia se ha equipado a la estructura con un sistema de láser de diodo de la marca BWT, en concreto el modelo DS3-11312, figura 5.11; en el Anexo 4 se puede consultar el presupuesto referente a este equipo. Se trata de un láser de diodo de 808 nm y 50 W de potencia. El sistema se refrigera por aire y cuenta con control de temperatura, corriente y anchura de pulso. El control del mismo se puede realizar mediante el panel frontal o por software, mediante una salida RS 232. El resto de características técnicas del sistema láser se encuentran en el Anexo 3.



Figura 5.11 Sistema de control del láser de diodo utilizado en el equipo.

Este modelo de láser está equipado con una fibra óptica de dos metros de longitud que permite tener el sistema de control del láser en el exterior independiente de la cabeza de la fibra que va en el interior de la estructura. La fibra ofrece mucha flexibilidad y poca pérdida de espacio, en gran parte debido a su pequeño diámetro (400 μm) y permite por ello gran flexibilidad para dirigir el haz láser en cualquier dirección.

En la salida del haz es necesario colocar un difusor/homogeneizador que permita que la luz incida de manera totalmente homogénea sobre la superficie de la oblea o célula.

Debido a la forma cuadrada de las muestras el homogeneizador más adecuado es el que proyecta un haz de luz con esta forma, figura 5.12. Los parámetros de dimensionamiento y selección del difusor utilizado en el equipo se muestran en la tabla 5.1. Este componente ha sido adquirido a la empresa “HOLOOR”.

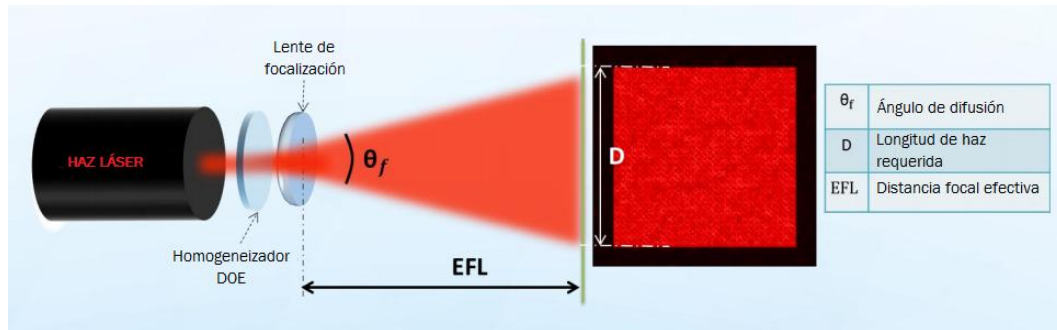


Figura 5.12 Esquema y parámetros principales de un homogeneizador cuadrado.⁸

Tabla 5.1 Parámetros de selección del homogeneizador.

<i>Parámetros de entrada</i>	
Longitud de onda [nm]	808
Mínimo diámetro del haz [mm]	>1
<i>Parámetros del elemento</i>	
Tipo de elemento	Ventana
Material	Sílice fundida
Diámetro (D) [mm]	10x10
Apertura [mm]	9x9
Espesor (CT) [mm]	0,95
Revestimiento	Antirreflejante
<i>Parámetros de salida y rendimiento</i>	
Forma de salida	Cuadrado
Ángulo de difusión [deg]	10,24x10,24
Eficiencia de transmisión	Cercana al 100%
Eficiencia conjunta	78%

⁸ Holoor. [Citado: 28 de febrero de 2017]
http://www.holoor.co.il/Diffractive_Optics_Products/Diffractive_Beam_Homogenizers/homogenizer-diffuser.php.

▪ Sistema de puntas para aplicar tensión en la célula

Para las medidas de electroluminiscencia en células es necesario excitar la muestra con una corriente eléctrica, normalmente 8 A y 0,7 V. Para ello se utiliza una fuente de alimentación típica. Para realizar la conexión física entre la fuente de alimentación y la célula solar se han utilizado unas puntas de precisión colocadas en un microposicionador, ambos adquiridos en “Rera solutions”, figura 5.13. Estas se conectan en los terminales correspondientes de la fuente, mientras que el contacto con la célula es superficial.

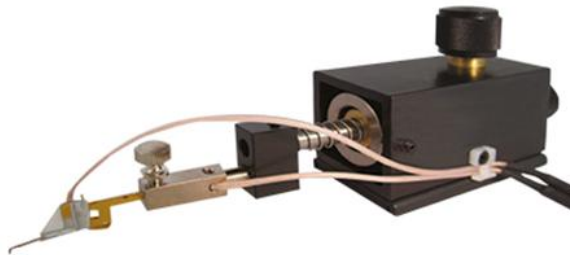


Figura 5.13 Conjunto punta-microposicionador encargado de realizar el contacto en la célula.⁹

▪ Instalación eléctrica

Para un correcto funcionamiento del equipo y los componentes que lo forman, se ha realizado el cableado de forma que este interfiera lo mínimo posible en los procesos de medida. Además, se ha dotado al equipo con una serie de elementos que mejoran tanto el entorno de trabajo como la seguridad del propio operario:

- *Interruptor de seguridad.* Tanto en la puerta superior como en la inferior se ha colocado un actuador de este tipo, figura 5.14 izq. Estos actuadores van conectados al sistema de iluminación láser, de tal forma que cuando se abre alguna de las dos puertas, el interruptor abre el circuito, evitando así que el haz láser pueda incidir directamente sobre el operario.
- *Pulsador parada de emergencia.* En el lateral izquierdo de la caja eléctrica, figura 5.14 centro, se ha colocado este pulsador de manera que sea fácilmente accesible durante la manipulación del equipo. Este dispositivo, permite desconectar todos los equipos de manera segura ante cualquier imprevisto que surja durante el proceso de medida.

⁹ Rera solutions. [Citado: 2 de marzo de 2017]

<https://www.rerasolutions.com/product/solar-cell-probe-high-res/>.

- *Baliza de señalización.* Este elemento, situado sobre la caja eléctrica, indica (emitiendo un destello) si el equipo se encuentra en proceso de medición o no, figura 5.14 dcha. De este modo se pretende que cualquier persona sepa si el equipo está en funcionamiento, y evitar la interrupción o perturbación en las medidas.
- *Tube fluorescente.* Ha sido instalado en la parte interior del equipo para mejorar la visibilidad del operario a la hora de manipular los componentes. Se ha elegido este tipo de lámpara para evitar interferir térmicamente en las medidas.
- *WebCam.* Se ha instalado una pequeña cámara dentro del equipo para observar, en tiempo real, lo que ocurre en su interior durante el proceso de medición.

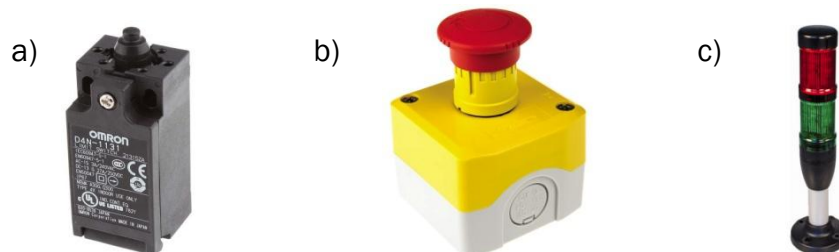


Figura 5.14 Dispositivos de seguridad instalados en el equipo: interruptor de seguridad (izq), pulsador parada de emergencia (centro) y baliza de señalización (dcha.).¹⁰

La instalación eléctrica, así como todos los elementos de seguridad ha sido llevada a cabo por “NOVADEP”. En el Anexo 4 aparece el coste presupuestado que supone esta instalación.

¹⁰ RS components. [Citado: 28 de febrero de 2017.]
<http://es.rs-online.com/web/>

5.3 Funcionamiento del equipo

Como ya se ha comentado anteriormente, el objetivo principal del equipo es la caracterización, tanto de obleas de silicio como de células solares mediante la captación de imágenes de luminiscencia.

A continuación se detalla el procedimiento general de captación de luminiscencia usando el equipo EL/PL nuevo, válido para cualquiera de las opciones mencionadas.

5.3.1 Captación de luminiscencia

Al excitar las muestras, estas emiten luminiscencia tanto por su superficie superior como por la posterior. El diseño del equipo nos permite aprovechar esta circunstancia, pudiendo situar la cámara en la zona superior (medidas en reflexión) o inferior (medidas en transmisión).

5.3.1.1 Disposición en reflexión

En la figura 5.15 se observa de manera esquemática la disposición de los elementos que intervienen en la obtención de imágenes para medidas de luminiscencia en reflexión. El proceso es idéntico independientemente de si la muestra es una oblea o una célula.

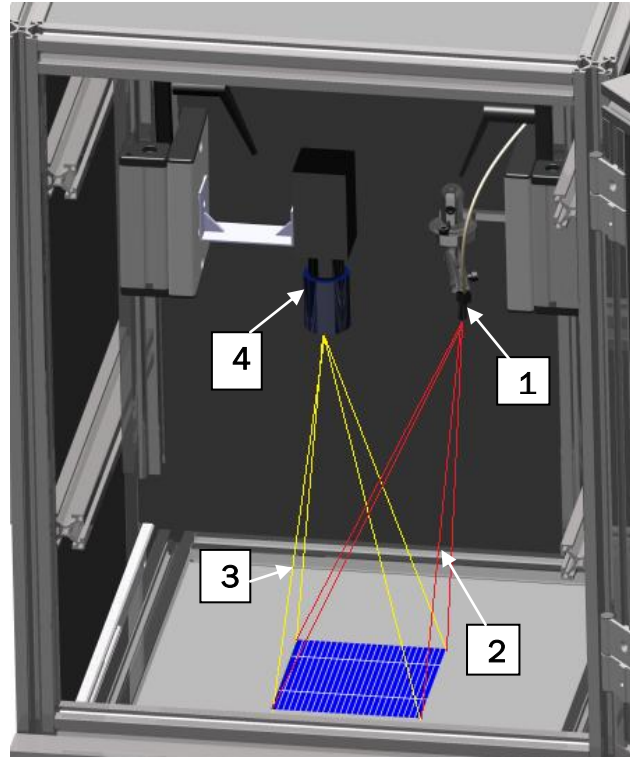


Figura 5.15 Disposición del equipo para medidas de luminiscencia en reflexión. Cabezal láser (1), haz del láser (2), luminiscencia emitida por la muestra (3) y cámara (4).

En medidas de reflexión, la cámara se coloca en el soporte superior del equipo. Gracias a esta nueva estructura, la cámara se sitúa perfectamente centrada respecto de la muestra, y la altura se puede regular de forma que sea la adecuada para obtener el enfoque óptimo de la imagen. Una vez que se capta la imagen, esta se envía directamente al ordenador donde posteriormente será tratada mediante el software correspondiente.

5.3.1.2 Disposición en transmisión

El modo de funcionamiento del equipo para medidas de luminiscencia en transmisión es similar al visto anteriormente para medidas en reflexión, la única diferencia radica en la ubicación de la cámara, que se coloca en el soporte inferior del equipo con el objetivo dirigido a la cara inferior de la muestra a analizar. En la figura 5.16 se muestra la disposición de los componentes para este tipo de medidas.

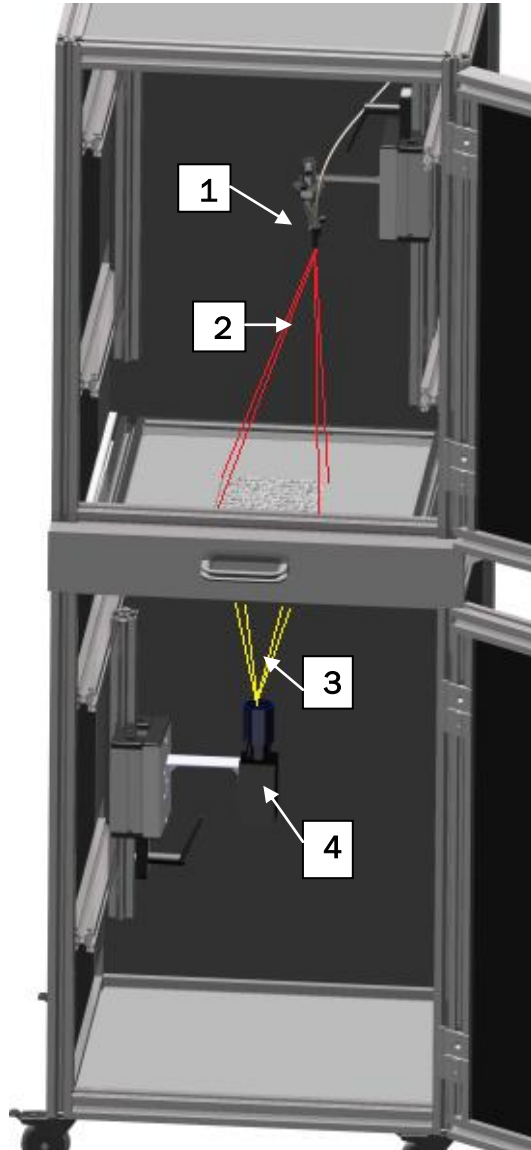


Figura 5.16 Disposición del equipo para medidas de luminiscencia en trasmisión. Cabezal láser (1), haz láser (2), luminiscencia emitida por la muestra (3) y cámara (4).



6.- Conclusiones

Uno de los objetivos de este trabajo es realizar una serie de modificaciones en el Equipo EL/PL antiguo, que ayuden a que la toma de imágenes sea más precisa y rápida. Después de materializar los elementos diseñados para tal fin, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- Gracias a su nuevo diseño, la nueva bandeja porta muestras permite que las obleas y células queden centradas dentro de la estructura, y en consecuencia, también lo estén en la imagen final obtenida por la cámara. Al haber sido construida por impresión 3D, las medidas de la bandeja son exactas. Lo que evita que la muestra se quede enganchada o se rompa al extraerla como sucedía anteriormente. Además, este diseño permite realizar contacto eléctrico superficial en medidas de electroluminiscencia sin necesidad de manipular la célula, lo que supone un ahorro de tiempo a la hora de hacer las medidas.
- El nuevo soporte para medidas en transmisión solventa los problemas que presentaba el anterior. Su robustez y estabilidad bloquea los posibles movimientos indeseados de la cámara. Asimismo, gracias a su movimiento en el plano paralelo a la muestra, permite posicionar la cámara en su punto de trabajo de manera sencilla.

El otro objetivo principal de este trabajo es el diseño de un equipo de caracterización de obleas y células solares que sustituya al existente en el laboratorio. Una vez diseñado y materializado el equipo se extraen las conclusiones que se explican a continuación:

- La estructura del equipo, al estar fabricada mediante perfilera de aluminio, es resistente a la vez que ligera. Así mismo, la inclusión de las ruedas en la base permite desplazar el equipo con facilidad.
- Se ha conseguido que la excitación de fotoluminiscencia sea homogénea, gracias al conjunto sistema de diodo láser / homogeneizador.
- El diseño de los soportes de la cámara y los del cabezal del láser, permiten posicionarlos de manera precisa gracias a la utilización de conjuntos guía-carro. Además, al estar fabricados mediante perfiles de aluminio son fácilmente desmontables.
- El equipo diseñado ofrece una gran versatilidad, pudiendo realizar todo tipo de medidas en luminiscencia (ELi y PLi, reflexión y transmisión, obleas y células). Asimismo, el propio diseño del equipo permite incorporar nuevos elementos que amplíen las posibilidades de estudio sobre células y obleas.



- El equipo se ha diseñado incluyendo una instalación eléctrica que mejora tanto el entorno de trabajo como la seguridad del propio operario.

7.- Trabajo futuro

El sector fotovoltaico se encuentra en continua evolución, por lo tanto resulta imprescindible adaptar el equipo a las necesidades del mercado para que este no quede obsoleto en un corto periodo de tiempo. A continuación se presentan una serie de líneas futuras de trabajo para el Equipo EL/PL nuevo cuya implementación permitiría optimizar el funcionamiento del mismo.

- **Instalación de un armario para muestras.** Debido a que en el equipo se ensayan un número elevado de muestras, se hace necesario disponer de un lugar para su almacenamiento. Se puede añadir un pequeño habitáculo contiguo al equipo donde se podría instalar una estructura de almacenamiento para muestras como las que se presentan a modo de ejemplo en la figura 7.1.



Figura 7.1 Sistemas de almacenamiento de células solares u obleas de silicio.

- **Instalación de un sistema automático de alimentación de muestras.** Para que sea posible instalar el Equipo EL/PL nuevo en un sistema de producción en línea, puede resultar interesante incorporar un sistema que introduzca de manera automática las muestras en el equipo. De este modo, se pueden realizar ensayos de fotoluminiscencia (se

recuerda que no es necesario realizar ningún tipo de contacto en la oblea o célula para este tipo de ensayos) a un elevado número de muestras en un espacio de tiempo reducido.



Figura 7.2 Ejemplo de sistema de transporte automático para células solares.

- **Sistema de iluminación LED.** Se ha comentado anteriormente, que la fuente de excitación óptica de las muestras en el estudio de imagen de fotoluminiscencia es un láser de diodo. Esta fuente puede sustituirse por otro sistema de iluminación, como por ejemplo, un sistema LED.

Esta serie de avances y mejoras en las técnicas de medida se pueden materializar sin tener que modificar en gran medida el nuevo Equipo EL/PL. Esto se debe a su diseño modular, pensado precisamente para este tipo de modificaciones.



8. Bibliografía

1. Luque, A., Hegedus, S. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. s.l. : John Wiley & Sons Ltd, 2003.
2. Balenzategui Manzanares, J L. *Fundamentos de la conversión fotovoltaica: la célula solar*. s.l. : Escuela de Organización Industrial, 2007.
3. SFV. *Fundamentos de células solares*.
4. Perpiñán Lamingueiro, O. *Energía solar fotovoltaica*. s.l. : Creative Commons, 2012.
5. Anta Fernández, J. *El silicio solar*. s.l. : Asociación de la energía fotovoltaica, 2005.
6. Ponce Alcántara, S. *Células solares de silicio: Fundamentos y Aplicaciones*. 2008.
7. Martin A. Green, et. al. *Solar cell efficiency tables (version 49)*. 2016. Vol. 10.1002/pip.2855. *Progress in Photovoltaics*, pp. 3-13.
8. Trupke, T., Nyhus, J., Haunschild J. *Luminescence imaging for inline characterisation in silicon photovoltaics*. 2011. *Physica status solidi (rrl)*, pp. 131-137.
9. Aroca Peinado, E. *Sistema de medida de mapa de electroluminiscencia para células solares de concentración*.
10. Fuyuki, T., Kitikayan, A. *Photographic diagnosis of crystalline silicon solar cells utilizing electroluminescence*. 2008. *Applied Physics A*, pp. 189-196.
11. Bou-Ras, D., Kirchartz, T., Rau, U. *Advanced Characterization Techniques for Thin Film Solar Cells*. s.l. : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., 2011.
12. Moretón Fernández, A. *Estudio de la fotoluminiscencia en obleas y células solares de Silicio*. s.l. : Universidad de Valladolid, 2016.
13. Bardos, T. Trupke and R. A. *Photoluminescence imaging of silicon wafers*. 2008. *Applied Physics letters*.

