



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Eléctrica

Estudio de la fotoluminiscencia en obleas y células solares de Silicio

Autor:

Moretón Fernández, Ángel

Tutor:

**González Rebollo, Miguel Ángel
Física de la Materia Condensada,
Cristalografía y Mineralogía**

Valladolid, Julio de 2016.



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 mi TUTOR, Dr. Miguel Ángel González Rebollo, por su apoyo y dedicación recibidos durante todo el proceso de elaboración de este proyecto así como por darme la oportunidad de realizar este proyecto con el que tanto he disfrutado.

Al Grupo de Semiconductores Optronlab, en particular a Dr. Oscar Martínez que junto con mi tutor han sido las personas que más me han ayudado en la elaboración del proyecto y, en general a todos los miembros del laboratorio: Miguel, Jose Luis, Jorge, Carmelo, Alfredo y Juan por lo fácil que ha sido la integración en este grupo de trabajo y por toda la ayuda recibida.

A la empresa NOVADEP y en concreto a Eusebio Solorzano que ha sido una fuente constante de conocimiento y de respuestas a todas las dudas y problemas que me han ido surgiendo a lo largo del trabajo.

Al Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid por prestar su trabajo y sus equipos en la caracterización eléctrica de una de las series de células solares.

A mi FAMILIA, a mi madre M^a Eva Fernández, a mi padre Felipe Moreton y a mi hermana Ana Moreton, por hacer posible la consecución, no solo de este TFG, sino de toda mi carrera en la universidad a lo largo de estos años.

A mis AMIGOS, a todos ellos a los que estando más cerca o estando más lejos, siempre han tenido, tienen y tendrán las palabras de apoyo necesarias que le hacen a uno seguir hacia delante.

Y en general a todos aquellos que de alguna manera me han ayudado.



Índice general

Lista de figuras	VII
Lista de tablas	XI
1. Resumen y palabras clave	1
2. Introducción y objetivos	3
3. Fundamento teórico	5
3.1. Conceptos elementales de la teoría de semiconductores	5
3.2. Efecto fotoeléctrico	6
3.3. Luminiscencia	7
4. La célula solar: estructura y parámetros característicos	9
4.1. Estructura de una célula fotovoltaica	9
4.2. Parámetros característicos	10
4.3. Otras características y propiedades de las células fotovoltaicas	12
4.3.1. Propiedades opto-electrónicas de las células	12
4.3.2. Mecanismos adicionales de pérdidas y la ecuación real de la célula solar	14
4.3.3. Influencia de la irradiancia y la temperatura	15
5. Tecnología CCD de silicio y InGaAs	19
5.1. Cámaras CCD	19
5.2. Características principales de los detectores CCD de Silicio e InGaAs	21
5.2.1. Linealidad y saturación	21
5.2.2. La curva de sensibilidad	22
5.2.3. Ganancia y rango dinámico	23
5.2.4. Señal y Ruido	23
5.3. Tratamiento básico de las imágenes	25
5.3.1. La corriente de oscuridad y su eliminación	26
5.3.2. El aplanamiento de campo	26
6. Equipo utilizado	29
6.1. Equipo de caracterización de células fotovoltaicas	29
6.1.1. Equipo existente	29

6.1.2. Mejoras realizadas	34
6.2. Cámara CCD de silicio	35
6.3. Cámara CCD de InGaAs	35
6.4. Objetivo	35
6.5. Software cámara CCD de silicio	38
6.5.1. Opciones generales del programa	38
6.5.2. Ajustes de adquisición de imágenes	39
6.5.3. Grabación de imágenes	39
6.5.4. Ajuste de las imágenes	41
6.5.5. Otras funciones del programa	41
6.6. Software cámara CCD de InGaAs	42
7. Modo de ensayo PL	45
7.1. Justificación del ensayo	45
7.2. Disposición de los equipos	46
7.2.1. Ensayo en transmisión	47
7.2.2. Ensayo en reflexión	48
7.3. Procedimiento	48
7.4. Fiabilidad y seguridad	50
8. Tratamiento de las imágenes adquiridas	53
8.1. Reducción del ruido y ajuste del contraste	54
8.2. Cambio de perspectiva	56
8.3. Aplicación de LUTs	56
8.4. Corrección de la corriente de oscuridad	57
8.5. Corrección de la no uniformidad en la fuente de luz	58
9. Muestras analizadas	61
10. Análisis cualitativo de las imágenes de fotoluminiscencia	65
10.1. Análisis cualitativo de la fotoluminiscencia en células solares	66
10.2. Análisis cualitativo de la fotoluminiscencia en obleas de silicio	70
10.2.1. Obleas monocristalinas	70
10.2.2. Multicristalinas	71
10.2.3. Cuasimonocristalinas	71
11. Análisis cuantitativo de las imágenes de fotoluminiscencia en células so-	
lares	75
11.1. Nivel de luminiscencia frente a eficiencia eléctrica	77
12. Sensores CCD para fotoluminiscencia en células solares: CCD de silicio	
frente a CCD de InGaAs	81
13. Fotoluminiscencia en obleas de silicio multicristalino de distintas resis-	
tividades	85

ÍNDICE GENERAL

14. Conclusiones y trabajo futuro	89
A. Abstract EXMATEC 13	91
B. Póster EXMATEC 13	95



Índice de figuras

3.1.	A la izquierda la estructura de bandas en un semiconductor: el nivel energético inferior de la banda de conducción, E_c , y el nivel energético superior de la banda de valencia, E_v , están separados por un <i>gap</i> de energía E_G característico de cada semiconductor. A la derecha, la generación de electrones y huecos: Cerca del cero absoluto de temperatura, los electrones de valencia están atrapados en sus átomos. Al incrementarse la temperatura, algunos electrones adquieren suficiente energía para romper los enlaces y promocionar a la banda de conducción. Los electrones de valencia también pueden liberarse si el dispositivo es iluminado con fotones con energía $E > E_G$	6
3.2.	Explicación del efecto fotoeléctrico	7
4.1.	Estructura simplificada y fotografía de una célula solar fotovoltaica.	9
4.2.	Curva característica $I - V$ de una célula fotovoltaica en iluminación, con indicación de algunos de sus parámetros principales. La curva punteada representa la potencia, $P(V)$	11
4.3.	Coefficiente de absorción α en función de la energía para distintos materiales fotovoltaicos. La línea punteada muestra la distribución espectral $AM1,5$ como referencia.	13
4.4.	Circuito equivalente de una célula solar real, con incorporación de las resistencias serie y paralelo.	15
4.5.	Respuesta espectral de células basadas en distintos materiales fotovoltaicos.	16
5.1.	Proceso de captación de electrones de un sensor CCD de silicio	19
5.2.	Proceso de lectura de un detector CCD	20
5.3.	Imagen con columna de píxeles saturados	21
5.4.	Espectros electromagnéticos de los distintos sensores CCD empleados en los ensayos de fotoluminiscencia y banda de emisión del silicio.	22
5.5.	Ejemplo de una imagen de darkfield	26
5.6.	Ejemplo de una imagen de flatfield	27
6.1.	Fotografía del equipo de medición visto desde su vista frontal	30
6.2.	Características de los láseres de diodo del equipo	31
6.3.	Soporte de la cámara en la posición superior	31
6.4.	Soporte de la cámara en la posición inferior	31
6.5.	Bandeja extraíble para la colocación de las muestras	32

6.6.	Características del disipador y del ventilador, proporcionadas por el fabricante. Aspecto físico del conjunto disipador de calor Artic Freezer 13 utilizado.	33
6.7.	Características del driver electrónico y el aspecto físico del dispositivo LDP-C 40-05.	33
6.8.	Características del sistema BOB y el aspecto físico del dispositivo.	34
6.9.	Principales características del dispositivo (arriba), eficiencia cuántica en función del modo de funcionamiento (abajo-izquierda) y aspecto físico de la cámara 1300.solar PCO (abajo-derecha).	36
6.10.	Principales características, eficiencia cuántica y aspecto físico del dispositivo CCD de InGaAs.	37
6.11.	Características del objetivo acoplado a la cámara y aspecto físico del mismo.	37
6.12.	Ventanas de visualización en el entorno del software CAMWARE.	38
6.13.	Opciones generales del software CAMWARE.	39
6.14.	Menú de ajustes de grabación del software CAMWARE.	40
6.15.	Menú de control de los parámetros de la cámara del software CAMWARE.	40
6.16.	Ajuste del contraste con el software CAMWARE.	41
6.17.	A la izquierda, opción <i>live</i> del menú <i>acquisition</i> del software Hi Pic, a la derecha opción <i>analogic integrator</i> del mismo software.	42
6.18.	menus de corrección de <i>background</i> y <i>shading</i> en el software Hi Pic.	43
7.1.	Fotoluminiscencia de una célula solar de silicio multicristalino (mc-Si) captada con una cámara CCD de InGaAs.	45
7.2.	Fotoluminiscencia de una oblea de silicio multicristalino (mc Si) captada con una cámara CCD de Silicio.	46
7.3.	Esquema de la disposición de los equipos en el ensayo de fotoluminiscencia en transmisión.	47
7.4.	Esquema de la disposición de los equipos en el ensayo de fotoluminiscencia en reflexión.	48
7.5.	Luz de excitación reflejada en una oblea de silicio, eclipsando la luminiscencia de esta.	49
7.6.	Célula fotovoltaica fracturada debido a una mala manipulación de la misma	50
7.7.	Equipos de seguridad empleados en la realización de los ensayos de fotoluminiscencia	51
8.1.	Ventana principal de control del software para tratamiento de imágenes <i>Fiji</i> .	53
8.2.	Menú de ajuste del brillo y el contraste en el software <i>Fiji</i> .	54
8.3.	Arriba: imagen de una célula solar con el brillo y el contraste ajustados de forma automática. Abajo: imagen de una célula solar con el brillo y el contraste ajustados de forma manual.	55
8.4.	A la izquierda se puede apreciar una imagen de una oblea de silicio afectada por el ruido impulsional. A la derecha se muestra la misma imagen corregida. En el centro se muestra una captura de la ventana del menú <i>Remove outliers</i> .	55
8.5.	Cambio de perspectiva realizado sobre una imagen de luminiscencia de una célula solar.	56

8.6. Diferentes <i>Look Up Tables</i> aplicadas sobre la imagen de fotoluminiscencia de una célula solar.	57
8.7. <i>Darkfield</i> de una oblea de silicio monocristalina.	58
8.8. Resultado de la corrección de <i>flatfield</i> en una oblea de silicio monocristalina.	59
10.1. Diferentes tipos de micro roturas, de izquierda a derecha: sin rotura, dendrítica, varias direcciones, 45 grados, -45 grados, paralela al embarrado, perpendicular al embarrado, dendrítica 2.	66
10.2. Imagen de la fotoluminiscencia en la célula solar numero 6 de la serie B, una vez aplicadas todas las correcciones.	68
10.3. Resultado del ensayo de luminiscencia y el tratamiento de imágenes en una célula de la serie A.	68
10.4. Resultado del ensayo de luminiscencia y el tratamiento de imágenes en una célula de la serie B.	69
10.5. Resultado del ensayo de luminiscencia y el tratamiento de imágenes en una célula de la serie C.	69
10.6. Fotoluminiscencia de una oblea de silicio monocristalino.	70
10.7. Fotoluminiscencia de una oblea de silicio multicristalino.	72
10.8. Fotoluminiscencia de una oblea de silicio cuasimonocristalina.	72
10.9. A la izquierda: imagen de fotoluminiscencia de una oblea de silicio cuasimonocristalina con un alto grado de cristalinidad. A la derecha: imagen de fotoluminiscencia de una oblea cuasimonocristalina con una baja cristalinidad.	73
11.1. Imagen binaria de la luminiscencia de una célula solar, en negro: la muestra. En blanco: partes del equipo de medida visibles en la imagen.	76
11.2. Histogramas de una imagen de luminiscencia de una célula solar, el de la izquierda corresponde a la imagen completa, el de la derecha se han eliminado los pixeles no correspondientes a la célula solar.	77
11.3. Nivel de luminiscencia frente a eficiencia de las células solares de las series B y C.	78
11.4. Nivel de luminiscencia frente a eficiencia de las células solares de las series B y C por separado.	79
12.1. Ala izquierda: imagen de fotoluminiscencia de una célula solar tomada con una cámara CCD de InGaAs. A la derecha: imagen de fotoluminiscencia de la misma célula solar tomada en este caso con una cámara CCD de silicio.	83
13.1. Histogramas de dos imagenes de luminiscencia de obleas de silicio multicristalino, el de la izquierda corresponde a una de baja resistividad y el de la derecha a una de alta resistividad	85
13.2. La gráfica representa el nivel de luminiscencia medido con la cámara CCD de silicio frente a la resistividad de las obleas multicristalinas de silicio.	86
13.3. Fotografías tomadas a una oblea de silicio multicristalino de baja resistividad con diferentes tipos de cámaras.	87
13.4. Fotografías tomadas a una oblea de silicio multicristalino de alta resistividad con diferentes tipos de cámaras.	88



Índice de cuadros

7.1. Tiempos de exposicion empleados en función del tipo de muestra y del tipo de CCD	49
9.1. Parametros característicos de las células de la serie B	62
9.2. Parametros característicos de las células de la serie C	62
9.3. Parámetros característicos de las células de la serie A	63
9.4. Clasificación de las obleas de silicio estudiadas segun su Resistividad.	63
9.5. Clasificación de las obleas de silicio estudiadas segun su Cristalinidad.	64
12.1. Niveles de luminiscencia de las células de la serie B tomados con la cámara CCD de silicio y la cámara CCD de InGaAs	82



Capítulo 1

Resumen y palabras clave

Resumen

El estudio de las imágenes de fotoluminiscencia (PL imaging) en células solares, es uno de los métodos de caracterización de células solares más destacado en la actualidad. Este proyecto pretende a través del PL imaging poder establecer una correlación entre el rendimiento eléctrico de un grupo de muestras de células solares, y el nivel de fotoluminiscencia de estas muestras.

Las distintas tecnologías existentes en las cámaras CCD (silicio, InGaAs, etc) ofrecen resultados muy dispares a la hora de la captar la luminiscencia. En este TFG se comparan los resultados obtenidos por una cámara CCD de InGaAs y una cámara CCD de silicio en ensayos de fotoluminiscencia sobre células solares de distintos rendimientos eléctricos y sobre obleas de silicio de diferentes resistividades.

En el presente Trabajo Fin de Grado se expone con detalle tanto los equipos empleados en las medidas, así como la metodología de trabajo usada para la adquisición de imágenes y el proceso de análisis de los resultados obtenidos.

Palabras clave

Fotoluminiscencia, silicio, InGaAs, célula solar, CCD, caracterización y rendimiento.



Capítulo 2

Introducción y objetivos

La fotoluminiscencia como método para la caracterización de células solares, nace en 2005 en la Universidad de Nueva Gales del Sur en Australia, y en 11 años se ha convertido junto a la electroluminiscencia y la termografía en los principales métodos de caracterización de células fotovoltaicas debido a las ventajas que ofrecen sobre otros métodos [11]. La rapidez en la caracterización de las células solares es una de sus principales ventajas. En muy cortos espacios de tiempo se pueden obtener, mediante cámaras de tecnología CCD, imágenes de alta resolución que permiten caracterizar la muestra y visualizar posibles defectos.

Otra de las ventajas de la luminiscencia como método de caracterización de células solares es que no es necesario ningún tipo de contacto con la célula, al contrario de lo que ocurre cuando se quiere caracterizar la célula mediante sus parámetros eléctricos (tensión de vacío, intensidad de cortocircuito, factor de forma, etc).

Estas y otras razones hacen del estudio de imágenes de luminiscencia (PL y EL imaging) un método óptimo de caracterización de las células solares en todo su proceso productivo, desde el comienzo con las obleas de silicio, al final una vez instalados los paneles fotovoltaicos en los parques solares, donde estas técnicas se usan para la revisión de los mismos. La caracterización de las células fotovoltaicas mediante métodos de luminiscencia también presenta ciertas limitaciones. La primera de esas limitaciones es la falta de una normativa que recoja las condiciones de ensayo así como los equipos mínimos necesarios para la realización del ensayo. Otros factores como la necesidad de realizar los ensayos en oscuridad debido a la interferencia de la luz solar con la luz de luminiscencia son limitaciones que deben superarse para la expansión de este método de caracterización de células solares fotovoltaicas a nivel industrial y comercial.

La metodología de ensayo ha sido descrita con detalle para conseguir robustez en los resultados obtenidos del ensayo de distintas muestras. Para conseguir esto se han descrito con detalle los pasos a seguir así como las precauciones que han de tomarse para la realización de ensayos de fotoluminiscencia fiables y seguros.

Mediante un análisis cualitativo de las imágenes de luminiscencia se pueden detectar diversos tipos de defectos en las células solares. El análisis de la fotoluminiscencia puede complementarse con un análisis de electroluminiscencia y uno de termografía, cada uno de estos métodos aportara una información distinta relativa al estado de las células solares caracterizadas. Mas en concreto, mediante un análisis cualitativo de las imágenes

de fotoluminiscencia se pueden apreciar defectos como microroturas, áreas inactivas en las células, bajas impedancias en paralelo o degradación inducida por el potencial eléctrico. Mediante un análisis de las imágenes de electroluminiscencia y termografía se podrán apreciar otros tipos de defectos como pueden ser disyunciones en los interconectores de la célula o pérdidas ohmicas.

Este trabajo surge como continuación al TFG : "PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA"[8] en el que se construyó el sistema de caracterización de células solares y obleas de silicio. Se busca mediante la experimentación, llegar a resultados que permitan establecer una relación entre el rendimiento eléctrico de las células solares y la cantidad de luz que emiten estas por luminiscencia. Los datos de rendimiento eléctrico, han sido proporcionados por la empresa donadora de las células y la cantidad de luz emitida por fotoluminiscencia será obtenida usando el sistema de caracterización de células solares del laboratorio mediante una cámara CCD.

Además de buscar la relación presente entre el nivel de luminiscencia y el rendimiento eléctrico de las muestras, se ha detallado como un análisis cualitativo de las imágenes de luminiscencia sirve para detectar distintos defectos presentes en las células solares.

Otro de los objetivos de este TFG es comparar las distintas tecnologías empleadas en los sensores de las cámaras CCD. Estos distintos tipos de sensores arrojan resultados significativamente distintos en los ensayos de fotoluminiscencia sobre células solares u obleas de silicio. Mediante pruebas realizadas sobre células solares de distintos rendimientos eléctricos y obleas de silicio de distintas resistividades y cristalinidades, con una cámara CCD de silicio y una cámara CCD de InGaAs se han comparado estos dos tipos de sensores CCD, estudiando posteriormente cual es la más recomendable para la caracterización de cada tipo de muestra.



Capítulo 3

Fundamento teórico

En este apartado se expone información sobre los fenómenos físicos que se producen cuando sobre una célula solar o a un oblea de silicio se proyecta un haz de luz como es el efecto fotoeléctrico. Procesos que intervienen en la caracterización de las células fotovoltaicas. Además se exponen los algunos conceptos fundamentales de la teoría de semiconductores que afectan a las células solares y a las obleas de silicio.

3.1. Conceptos elementales de la teoría de semiconductores

El silicio es un material semiconductor, por lo que se comporta como un conductor o como un aislante dependiendo de diversos factores, como por ejemplo el campo eléctrico o magnético, la presión, la radiación que le incide, o la temperatura del ambiente en el que se encuentre. En el caso de la radiación incidente la energía de los fotones incidentes sobre el semiconductor es absorbida por los electrones de valencia, que pueden romper el enlace con sus átomos y quedar libres para desplazarse en el seno del material. La densidad de electrones libres creados por la absorción de la luz incidente representa una población en exceso respecto a la concentración existente en equilibrio térmico, siendo ésta última estable y característica a una temperatura dada. [1]

La ausencia de un electrón en el enlace atómico roto se denomina hueco, y su comportamiento se asimila al de una partícula de carga positiva, que puede desplazarse de un átomo a otro en el seno de la red cristalina. Las propiedades de conducción eléctrica de un material semiconductor deben entenderse como debidas a la contribución de ambos tipos de cargas (electrones y huecos), aspecto que los diferencia respecto al comportamiento de materiales conductores y aislantes. A electrones y huecos se le engloba normalmente con la denominación más genérica de portadores de carga. Es importante observar que la concentración de electrones y de huecos en un material puro o intrínseco será la misma, puesto que ambos tipos de portadores se crean simultáneamente, en el mismo instante. En la Figura 3.1 se han ilustrado los procesos de absorción y la creación de electrones y huecos a pares.

En este modelo, los niveles de energía permitidos para los electrones más alejados del núcleo atómico (electrones de valencia) de los átomos que conforman una red cristalina se agrupan en dos rangos o bandas de energía. El rango o banda inferior de estados permitidos se denomina banda de valencia y representa el conjunto de valores energéticos posibles

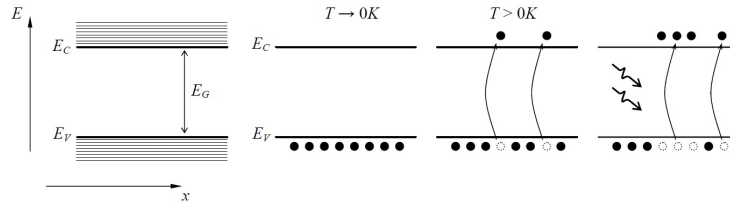


Figura 3.1: A la izquierda la estructura de bandas en un semiconductor: el nivel energético inferior de la banda de conducción, E_c , y el nivel energético superior de la banda de valencia, E_v , están separados por un *gap* de energía E_G característico de cada semiconductor. A la derecha, la generación de electrones y huecos: Cerca del cero absoluto de temperatura, los electrones de valencia están atrapados en sus átomos. Al incrementarse la temperatura, algunos electrones adquieren suficiente energía para romper los enlaces y promocionar a la banda de conducción. Los electrones de valencia también pueden liberarse si el dispositivo es iluminado con fotones con energía $E > E_G$.

para electrones de valencia que aún permanecen ligados a los átomos de la red. La banda superior se denomina banda de conducción y engloba los valores de energía posibles para electrones que han roto su enlace y pueden moverse libremente en el seno del material. Ambas bandas aparecen separadas entre sí por un intervalo que representa la cantidad de energía necesaria para que un electrón de valencia pueda romper el enlace. Este salto energético se llama banda prohibida o *gap* de energía, E_G y su anchura es característica de cada material semiconductor (ejemplo: $E_G = 1,12$ eV para el Si; 0,66 eV para el Ge; 1,42 eV para el GaAs).

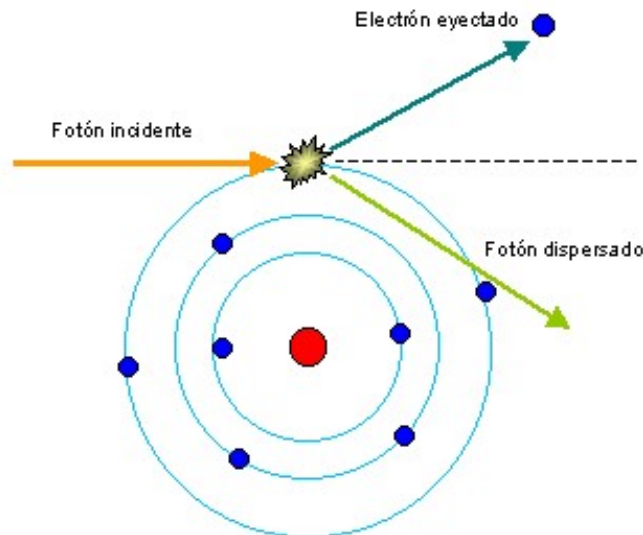
3.2. Efecto fotoeléctrico

Fue descubierto en 1887 por Heinrich Hertz al observar que el arco eléctrico que se crea entre dos electrodos conectados a alta tensión, alcanza distancias mayores cuando se ilumina con luz ultravioleta que en la oscuridad. Posteriormente Albert Einstein en 1905 dio una explicación teórica a este proceso, por la cual fue condecorado en 1921 con el premio Nobel de física. Más tarde Robert Andrews Millikan demostró experimentalmente la teoría de Einstein, lo que le llevó a recibir el Nobel de física en 1923.

El efecto fotoeléctrico se define como la emisión de electrones de un material resultado de la interacción de una radiación electromagnética, como la luz del sol, con dicho material [7]. Una radiación electromagnética se puede definir como una composición de partículas denominadas fotones, los cuales son los encargados de transportar la energía de la radiación electromagnética. Los fotones se caracterizan por tener forma de onda, por lo que se definen mediante su longitud de onda, λ , que determinara la cantidad de energía que transporta el fotón, E_f . La longitud de onda y la energía del fotón se relacionan de la siguiente manera:

$$E_f = hc/\lambda \quad (3.1)$$

Donde h es la constante de Planck y c es la velocidad de la luz en el vacío. Solamente los fotones cuya energía sea superior a la de la banda prohibida serán capaces de formar un par electrón-hueco.

**Figura 3.2:** Explicación del efecto fotoeléctrico

Los semiconductores a diferencia de los metales muestran una mayor absorción de luz para determinadas longitudes de onda por encima de la banda prohibida. Esta luz es absorbida casi por completo dependiendo del grosor del material. La banda prohibida nos dará para cada material un valor de longitud de onda para el cual el material se comportaría como un material transparente. Estas longitudes de onda, a temperatura ambiente, son por ejemplo: para el germanio: $\lambda=0.66 \mu\text{m}$, para el Carburo de silicio $\lambda=2.86 \mu\text{m}$ y para el silicio $\lambda=1.11 \mu\text{m}$.

El proceso de creación de pares electrón-hueco mediante la absorción de energía de los fotones es básico en el funcionamiento de las células solares fotovoltaicas. La excitación de un electrón directamente desde la banda de valencia, en la que se encuentra el hueco a la banda de conducción se denomina absorción fundamental.

3.3. Luminiscencia

Es el fenómeno de emisión de luz por sólidos o moléculas los cuales se encuentran excitados por una fuente externa, dicha excitación eleva a los electrones a estados de excitación los cuales al volver a su estado de equilibrio emiten luz [12].

En lo que a los semiconductores respecta, el efecto de luminiscencia se produce por la recombinación radioactiva de pares electrón-hueco. Existen dos tipos de espectros de luminiscencia: emisión intrínseca o fundamental y emisión extrínseca o característica. La emisión intrínseca aparece como una banda de energías de distribución casi normal a temperatura ambiente, con el foco de intensidad para la energía de banda prohibida $h\nu = E_g$, esto es debido a la recombinación de electrones de la banda de conducción y de huecos en la banda de valencia, siendo por tanto una propiedad intrínseca del material. La emisión extrínseca depende de las impurezas, por ende no son intrínsecos a la naturaleza del semi-

conductor. Estas bandas de emisión se activan por átomos de impurezas y otros defectos, la emisión será característica de la propia impureza.

Dependiendo del tipo de excitación, existen varias formas de luminiscencia, como son: fotoluminiscencia, electroluminiscencia, termoluminiscencia, quimioluminiscencia, triboluminiscencia entre otras. Las que afectan a las células solares son la fotoluminiscencia y la electroluminiscencia:

- **Fotoluminiscencia:** La Fotoluminiscencia es un tipo de luminiscencia en la que el agente excitador de los pares electrón-hueco es un fotón con energía suficiente para vencer la energía de banda prohibida y así elevar un electrón a un estado de excitación mayor. Una vez en ese estado de excitación mayor se produce la recombinación radiactiva de un par electrón-hueco y se emite un fotón. Ese fotón es lo que denominaremos fotoluminiscencia.
- **Electroluminiscencia:** Es un tipo de luminiscencia en la que la excitación necesaria para elevar un electrón desde la banda de valencia a la banda de conducción se efectúa inyectando portadores mediante una corriente eléctrica. Cuando se el par electrón-hueco se recombina de forma radiactiva emite luminiscencia, la cual denominaremos electroluminiscencia.



Capítulo 4

La célula solar: estructura y parámetros característicos

4.1. Estructura de una célula fotovoltaica

La estructura simplificada de una célula fotovoltaica se muestra en la Figura 4.1 y en ella podemos apreciar los principales elementos o secciones que la conforman. A continuación se da una breve definición de cada uno de estos elementos [1]:

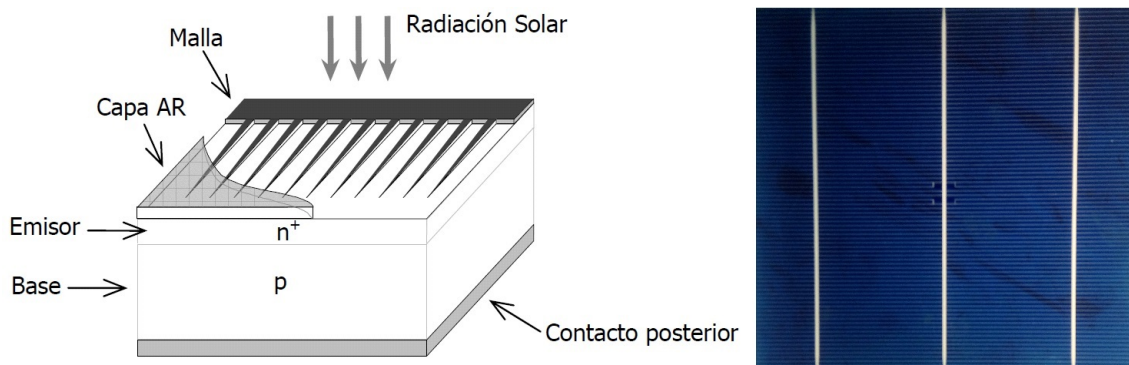


Figura 4.1: Estructura simplificada y fotografía de una célula solar fotovoltaica.

- Una capa antirreflexiva (capa *AR*), diseñada para reducir al máximo las pérdidas por reflexión superficial. El espesor y el índice de refracción de esta capa se diseñan de forma que la reflectancia sea mínima para ciertas longitudes de onda y en un intervalo lo más amplio posible del espectro solar. Además de estas capas, muchas células presentan superficies dotadas de surcos, micropirámides y otras texturas creadas para reducir aún más las pérdidas por reflexión.
- Una malla de metalización, representada en forma de peine en la Figura 4.1, pero que puede presentar formas diversas. El diseño de esta malla de metalización es crítico puesto que debe garantizar una colección adecuada de los electrones del dispositivo,

sin introducir una resistencia eléctrica elevada, pero al mismo tiempo debe dejar pasar la mayor cantidad de luz posible al interior del dispositivo. Su parámetro más característico es el factor de sombra, F_s , que mide la cantidad de superficie ocupada por los dedos metálicos respecto al área total del dispositivo.

- Las capas activas de material semiconductor, en el que distinguimos entre las dos regiones que forman la unión $p - n$. Habitualmente, estas capas activas aparecen depositadas o crecidas sobre un sustrato más grueso que confiere mayor resistencia mecánica al conjunto. Además del tipo y la calidad del semiconductor empleados, el espesor de las capas y la densidad o concentración de impurezas influyen notablemente en el rendimiento final de la célula.
- El contacto metálico posterior, que suele realizarse metalizando toda la superficie del dispositivo cuando no existe el requisito de que ésta reciba luz por su parte posterior.

A partir de esta estructura básica, las células solares han sufrido numerosas modificaciones e innovaciones con el fin de conseguir mayores eficiencias de conversión. Por ejemplo, el caso de algunas células de concentración o algunas realizadas con tecnologías de lámina delgada, dispositivos más sofisticados pueden presentar más de una unión en su estructura (dispositivos tandem o multiunión), o una o varias uniones p-n formadas por distintos materiales semiconductores (dispositivos de heterounión). Aparecen además capas adicionales para mejorar el crecimiento de las secciones activas sobre un sustrato, acoplar constantes de red entre distintos materiales, permitir el crecimiento de unas células sobre otras, transferir portadores de carga de una a otra sección sin pérdidas, etc [5].

4.2. Parámetros característicos

Cuando se ilumina un dispositivo como el de la Figura 4.1 mientras está conectado a una carga externa, éste funciona como generador de energía y exhibe unos valores de corriente y tensión que son variables en función de las condiciones de operación (temperatura, irradiancia) y del punto de trabajo que impone la carga. La curva característica de una célula solar operando en CEM (Condiciones Estándar de Medida, definidas por 1000 W/m² de irradiancia con distribución espectral $AM1,5G$ y 25°C de temperatura) tiene la forma aproximada que se muestra en la Figura 4.2 y responde a la Ecuación 4.1, ecuación ideal conocida como el modelo de una exponencial de la célula. La Ecuación 4.1 está basada en considerar como válido el principio de superposición, según el cual, la corriente de la célula resulta del balance de la corriente producida por la luz incidente y la correspondiente al diodo de unión p-n que forma su núcleo [14].

$$I = I_L - I_D = I_L - I_0 \left(\exp \left(\frac{qV}{mkT} \right) - 1 \right) \quad (4.1)$$

Donde I_L es la corriente fotogenerada e I_D es la corriente de oscuridad o corriente de diodo. En la expresión de ésta última, I_0 se denomina corriente inversa de saturación del diodo, q es la carga del electrón, m es el llamado factor de idealidad del diodo (un parámetro adimensional con valores típicos entre 1 y 2), k es la cte. de Boltzmann, y T es la temperatura absoluta. Al término $\frac{kT}{q}$ se le llama habitualmente voltaje térmico.

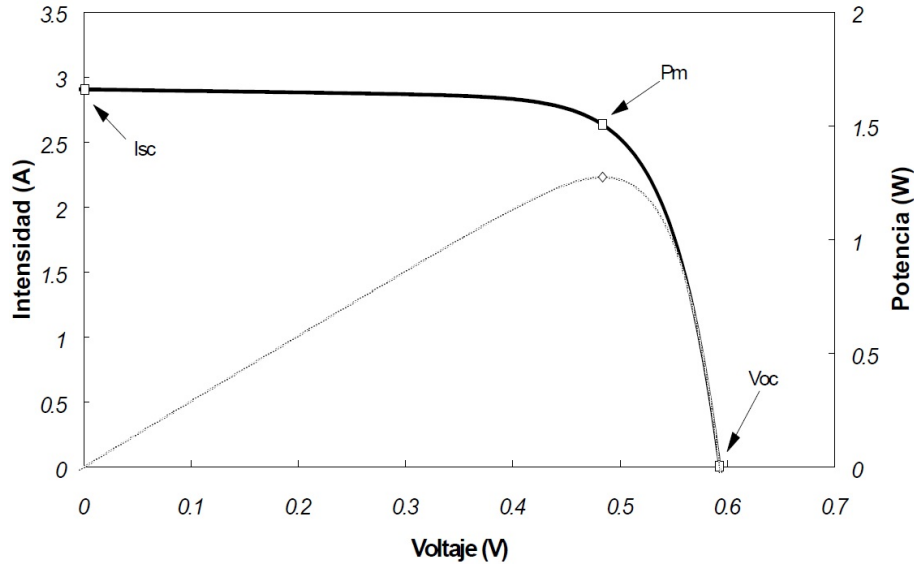


Figura 4.2: Curva característica $I - V$ de una célula fotovoltaica en iluminación, con indicación de algunos de sus parámetros principales. La curva punteada representa la potencia, $P(V)$.

En la Figura 4.2 se han señalado los tres parámetros fundamentales para describir el comportamiento de la célula solar, a continuación se definen brevemente [1]:

- La corriente de cortocircuito (I_{SC}) es el mayor valor de la corriente que puede obtenerse del dispositivo como generador, y que se produce cuando $V = 0$. Introduciendo estos parámetros en la Ecuación 4.1, da como resultado la Ecuación 4.2.

$$I_{SC} = I(V = 0) = I_L \quad (4.2)$$

- La tensión de circuito abierto (V_{OC}) es la mayor tensión que polariza el dispositivo cuando trabaja como generador, dada para $I = 0$. Aplicando esta condición en la Ecuación 4.1, queda la Ecuación 4.3.

$$V_{OC} = m \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (4.3)$$

- El punto de máxima potencia (P_M) es un punto de trabajo en el que la potencia entregada por la célula a la carga externa es máxima. Para una carga resistiva, la potencia P entregada viene dada por el producto: $P = V * I$, y es la que se ha representado en la la Figura 4.2. El punto de trabajo correspondiente (V_M, I_M) define los valores nominales de la tensión y la corriente en el punto de máxima potencia (no confundir con tensión y corriente máximas), de forma que: $P_M = V_M * I_M$.

Junto a estos parámetros de operación, existen otros dos de enorme importancia:

- El factor de forma (FF) es la relación entre la potencia máxima (o el producto de la corriente y la tensión en el punto de máxima potencia) y el producto entre I_{SC} y V_{OC} como se puede ver en la Ecuación 4.4.

$$FF = \frac{P_M}{I_{SC}V_{OC}} = \frac{I_M V_M}{I_{SC}V_{OC}} \quad (4.4)$$

Se usa para cuantificar la forma de la curva característica. Aunque en la práctica es siempre menor que la unidad, su valor es más alto cuando el codo de la curva es más prominente o agudo. Por lo general, un valor bajo de FF está asociado con la existencias de pérdidas en el dispositivo mientras que una célula de buena calidad suele tener valores de FF elevados ($FF > 0.70$).

- La eficiencia de conversión energética (λ), expresada como un porcentaje, viene dada por la relación entre la potencia eléctrica que puede entregar la célula y la potencia P_L de la radiación que incide sobre ella, como muestra la Ecuación 4.5.

$$\eta = \frac{P_M}{P_L} = \frac{I_M V_M}{P_L} = \frac{FF \cdot I_{SC} V_{OC}}{P_L} \quad (4.5)$$

Como indicación de carácter general, puede apreciarse cómo un aumento de la corriente de cortocircuito I_{SC} o de la tensión de circuito abierto V_{OC} de la célula conducen (siempre que no se perjudiquen otros parámetros de funcionamiento) a una mayor eficiencia del dispositivo.

4.3. Otras características y propiedades de las células fotovoltaicas

4.3.1. Propiedades opto-electrónicas de las células

En el Capítulo 3 se ha hablado de la capacidad del semiconductor de absorber de forma eficiente los fotones incidentes sobre su superficie. En principio, esto es cierto para aquellos fotones que tienen una energía, E , igual o superior al gap de energía E_G del material. Aquellos fotones con energía $E < E_G$ no son absorbidos y pueden atravesar el dispositivo como si este fuera transparente (excepto si existen mecanismos de absorción adicionales que no provocan la generación de electrones y huecos).

Cada material semiconductor está caracterizado por un valor particular de la energía de la banda prohibida, que nos indica la energía mínima (o la longitud de onda máxima) de la radiación que es capaz de absorber. El valor de E_G del material determina además el límite superior teórico para la tensión de circuito abierto V_{OC} de una célula basada en dicho material.

Los fotones con energía sensiblemente superior al valor de E_G se absorben apenas con unas décimas de micras de material, y la energía en exceso se pierde rápidamente por choques de los electrones libres con los iones de la red (proceso de termalización), siendo este un mecanismo de pérdidas inevitable (excepto para conceptos de célula muy avanzados, actualmente en fase de investigación) [1].

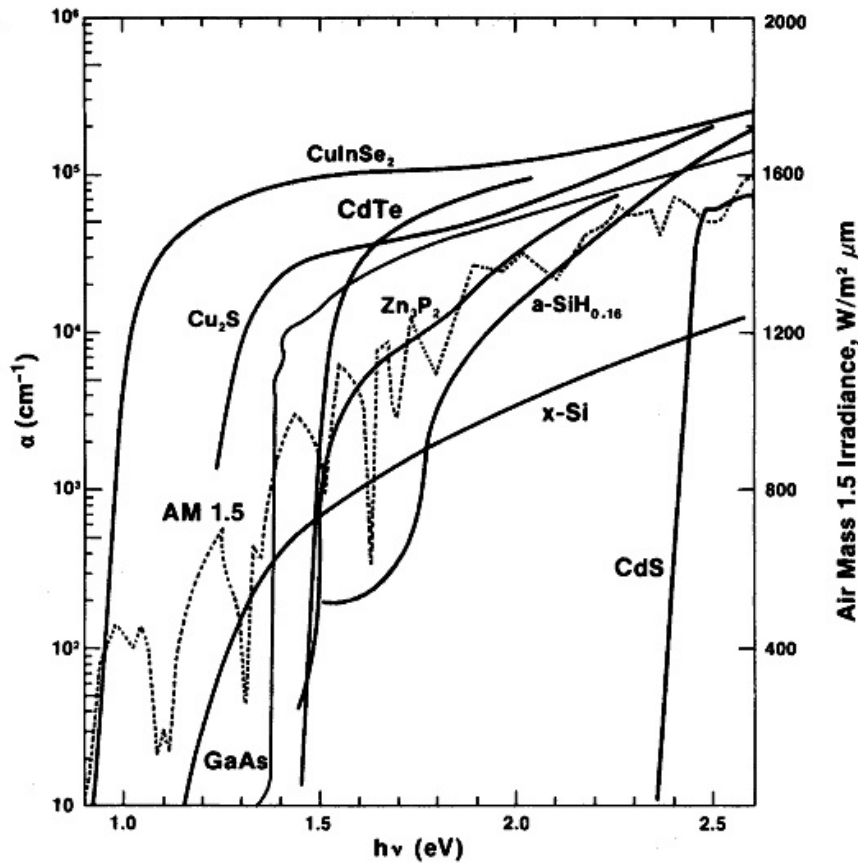


Figura 4.3: Coeficiente de absorción α en función de la energía para distintos materiales fotovoltaicos. La línea punteada muestra la distribución espectral AM1,5 como referencia.

Pero además, cada semiconductor presenta una capacidad de absorción diferente para fotones de distintas energías, que se mide mediante su coeficiente de absorción, $\alpha(\lambda)$. Este coeficiente nos indica la cantidad de fotones que se absorben por unidad de longitud de material atravesado por la radiación a cada longitud de onda, λ . En la Figura 4.3 se muestran los coeficientes $\alpha(\lambda)$ de distintos semiconductores. Algunos materiales son muy absorbentes y permiten que las capas activas que conforman la célula sean muy delgadas (del orden de algunas micras, como en el GaAs) mientras que otros materiales requieren de mayores espesores al tener coeficientes de absorción más bajos (caso del silicio cristalino, por ejemplo).

Por otro lado, no sólo es necesario que el material sea capaz de absorber fotones y producir pares e^-/h^+ sino que estos portadores de carga deben extraerse de la célula para verter la energía en el circuito externo. La fracción de portadores que es finalmente extraída del dispositivo se denomina eficiencia de colección, η_C , y depende de las propiedades electro-ópticas del material y de la estructura de la célula. Por ejemplo, el valor de I_0 , la corriente inversa de saturación del diodo, está directamente relacionado con el grado de recombinación en la célula. Obsérvese también que en la Ecuación 4.1, la corriente

del diodo I_D representa en esencia la recombinación inducida en el dispositivo y que ésta depende exponencialmente de la tensión de operación V , por lo que a mayor tensión, mayor recombinación y, por tanto, mayores pérdidas y menor corriente. Precisamente la tensión de circuito abierto V_{OC} corresponde a la situación en la que el número de procesos de recombinación iguala al número de procesos de generación, lo que impide que circule corriente al exterior del dispositivo. Incluso en condiciones de cortocircuito ($V = 0$), los procesos de recombinación no se anulan enteramente.

4.3.2. Mecanismos adicionales de pérdidas y la ecuación real de la célula solar

Existen diversos mecanismos de pérdidas que es importante conocer y controlar en la medida de lo posible. Además de los procesos de recombinación que se han mencionado, una de las principales fuentes de pérdidas se debe a la existencia de una resistencia serie R_S en el dispositivo. Esta resistencia tiene distintas contribuciones, presenta un carácter distribuido en el dispositivo y, además, no siempre mantiene un valor constante. En primer lugar, el propio material semiconductor ofrece una cierta resistencia al paso de la corriente, por lo que lo ideal sería fabricar células muy delgadas (pero sin que esto suponga reducir la capacidad de absorción, evidentemente). La base y el emisor de la célula suelen presentar distintos valores de R_S debido a las direcciones en que fluyen los portadores y las distintas concentraciones de impurezas. Los contactos entre metal y semiconductor también introducen caídas resistivas, por lo que se tiende a dopar en mayor proporción las zonas de contacto. Y finalmente, la propia malla de metalización frontal es uno de los principales contribuyentes. Una malla de metalización excesivamente fina (pequeña sección de conductor) introduce caídas resistivas grandes aunque permite una mejor captación de radiación. Por el contrario, reducir su resistencia serie implica utilizar dedos de metalización más gruesos a costa de aumentar el factor de sombra y reducir la eficiencia de la célula. De ahí lo importante de su diseño [1].

Por otro lado, existen también una serie de fugas de corriente adicionales que pueden producirse por diversas causas (imperfecciones de la unión $p - n$ o defectos en la estructura cristalina como dislocaciones, fronteras de grano, etc, por conducción por la superficie de los bordes de la célula o por pequeños cortocircuitos locales). Estas fugas de corriente suelen caracterizarse como una resistencia en paralelo R_P con el dispositivo. Sin embargo, esta resistencia R_P suele tener un valor equivalente muy elevado y no tiene apenas importancia en el funcionamiento normal de muchos tipos de células y menos si operan bajo luz concentrada.

La incorporación de todos estos efectos mediante elementos discretos de un circuito (resistencias) hace que se pueda representar un circuito equivalente de una célula fotovoltaica, como se ve en la Figura 4.4 y que podamos introducir una ecuación real de la célula que incorpore las pérdidas de corriente asociadas, mostrada en la Ecuación 4.6.

$$I = I_L - I_0 \left(\exp \left[\frac{q(V + IR_S)}{mkT} \right] - 1 \right) - \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (4.6)$$

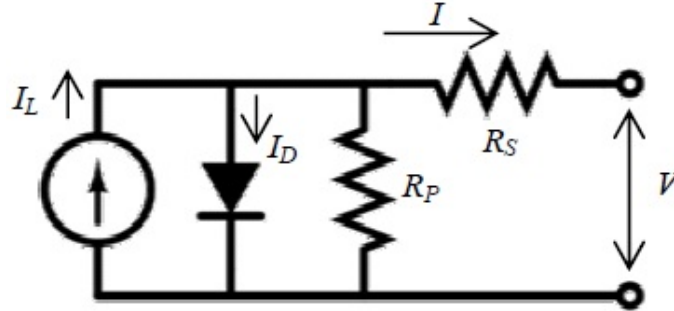


Figura 4.4: Circuito equivalente de una célula solar real, con incorporación de las resistencias serie y paralelo.

4.3.3. Influencia de la irradiancia y la temperatura

Una forma de caracterizar o diagnosticar si la célula está recolectando adecuadamente fotones de distintas longitudes de onda es mediante la medida de la eficiencia cuántica del dispositivo [1]. La eficiencia cuántica $Q_E(\lambda)$ es el cociente entre el número de electrones extraídos del dispositivo (con la célula en cortocircuito) y el número de fotones incidente sobre el mismo para cada valor de λ , dando como resultado la Ecuación 4.7.

$$Q_E(\lambda) = \alpha(\lambda) \cdot \eta_C(\lambda) \quad (4.7)$$

Habitualmente, la eficiencia cuántica se calcula de forma simultánea a la respuesta espectral $S_R(\lambda)$ del dispositivo, que expresa el mismo concepto en términos de corriente extraída de la célula por unidad de potencia luminosa incidente. Así, ambas magnitudes están relacionadas por la Ecuación 4.8.

$$S_R(\lambda) = \frac{q\lambda}{hc} Q_E(\lambda) \quad (4.8)$$

Siendo h la constante de Planck y c la velocidad de la luz.

La respuesta espectral de células basadas en distintos materiales se muestra en la Figura 4.5. Ambas magnitudes, S_R y Q_E , permiten identificar problemas y defectos en la célula y además dónde se están produciendo. También son importantes en la calibración y en la medida de las propiedades de la célula trabajando bajo distintos espectros, puesto que la corriente fotogenerada viene dada por la Ecuación 4.9.

$$I_L(G) = A \int_0^\infty S_R(\lambda) G(\lambda) d\lambda \equiv eA \int_0^\infty Q_E(\lambda) G(\lambda) \frac{\lambda}{hc} d\lambda \quad (4.9)$$

Siendo $G(\lambda)$ la distribución espectral de la radiación incidente y A el área del dispositivo. Observe que, a partir de la Ecuación 4.6, un dispositivo fotovoltaico de buena calidad (con valores adecuados de las resistencias serie y paralelo), debe cumplir: $I_{SC} \simeq I_L$. Por tanto, si se considera que S_R es constante e invariante con el nivel de irradiancia, la corriente de cortocircuito debe presentar, en un amplio rango de trabajo, una dependencia lineal con la concentración luminosa X , como se demuestra en la Ecuación 4.10.

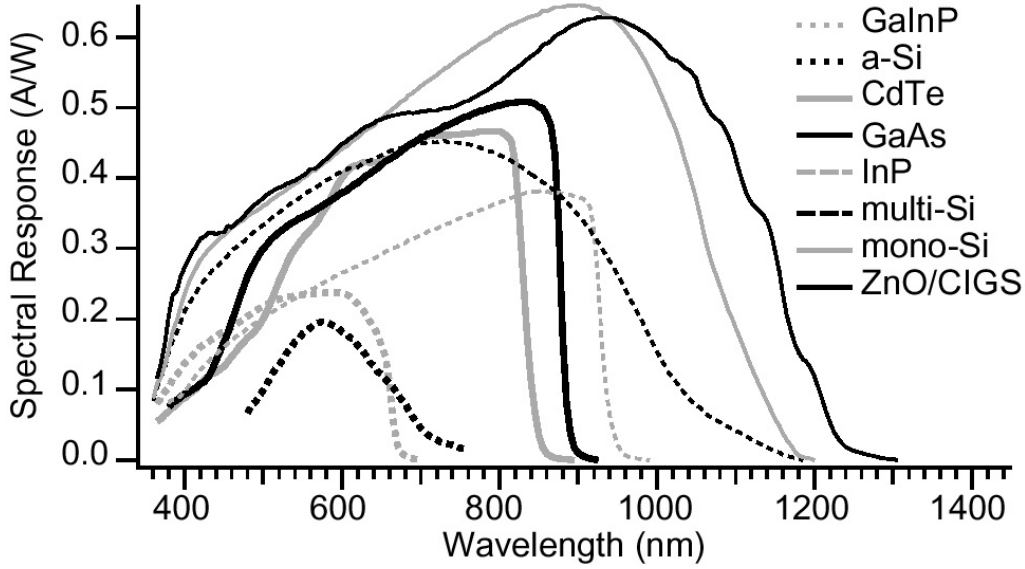


Figura 4.5: Respuesta espectral de células basadas en distintos materiales fotovoltaicos.

$$I_L(G) = I_L(G_0) \frac{G}{G_0} = X \cdot I_L(G_0) \rightarrow I_{SC}(G) = X \cdot I_{SC}(G_0) \quad (4.10)$$

Siendo G la irradiancia en unas condiciones dadas de trabajo y G_0 un valor de referencia (por ejemplo, las de STC , que en el ámbito fotovoltaico se denominan como “1 sol”). La tensión de circuito abierto muestra, en cambio, una dependencia logarítmica con la concentración luminosa como se muestra en la Ecuación 4.11, que puede deducirse a partir de la Ecuación 4.3.

$$V_{OC}(G) = V_0 + m \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{G}{G_0} \right) = V_0 + m \frac{kT}{q} \ln(X) \quad (4.11)$$

Siendo V_0 el valor de V_{OC} a las condiciones de referencia dadas por G_0 . Por otro lado, la variación de la corriente de cortocircuito y la tensión de circuito abierto de la célula con la temperatura tiene, además de las dependencias explícitas que aparecen en las Ecuaciones 4.3 y (4.6, otras dependencias implícitas (por ejemplo, a través de la variación del gap del material, o de la corriente fotogenerada). La principal de estas dependencias se produce por medio del parámetro I_0 , que depende fuertemente de la temperatura como se muestra en la Ecuación 4.12.

$$I_0 = K \cdot T^3 \exp \left(-\frac{E_{G0}}{kT} \right) \quad (4.12)$$

Siendo K y E_{G0} dos constantes. En la práctica y para un rango amplio de temperaturas de operación, el resultado final es una variación lineal de I_{SC} y V_{OC} con T , que se representa mediante dos coeficientes de temperatura en la forma que se muestra en las Ecuaciones

4.13 y 4.14.

$$I_{SC}(T) = I_{SC}(T_R) + \alpha \cdot (T - T_R) \quad (4.13)$$

$$V_{OC}(T) = V_{OC}(T_R) + \beta \cdot (T - T_R) \quad (4.14)$$

Donde T_R es una temperatura de referencia. Para niveles medios o altos de irradiancia, el coeficiente α es positivo (no confundirlo con el coeficiente de absorción) mientras que el coeficiente β es negativo, reflejando el hecho de que la I_{SC} aumenta con la temperatura mientras que V_{OC} disminuye al aumentar T (en términos relativos, el aumento de I_{SC} es mucho menos significativo que la reducción de V_{OC}). El factor de forma FF también disminuye ante un incremento de la temperatura, sobre todo debido al incremento de I_0 y a la disminución de la V_{OC} . Como resultado de todas estas dependencias, la eficiencia de una célula fotovoltaica decrece con la temperatura (del orden del 0.5 % por grado para el Si, y de 0.3 % por grado para el GaAs).



Capítulo 5

Tecnología CCD de silicio y InGaAs

5.1. Cámaras CCD

Los sensores CCD fueron una revolución en el mundo de la fotografía debido a la impresionante sensibilidad a la luz que ofrecían en comparación con los fotomultiplicadores. Más concretamente los fotomultiplicadores más sensibles son capaces de detectar un 10 % de los fotones que reciben mientras que los sensores CCD detectan entre un 50 % y un 75 % de los fotones que inciden sobre ellos. El CCD se inventó a finales de los 60 por investigadores de Bell Laboratories. Originalmente se concibió como un nuevo tipo de memoria de ordenador pero pronto se observó que tenía muchas más aplicaciones potenciales, tales como el proceso de señales y sobretodo la captación de imagen, esto último debido a la sensibilidad a la luz que presentan los semiconductores [10].

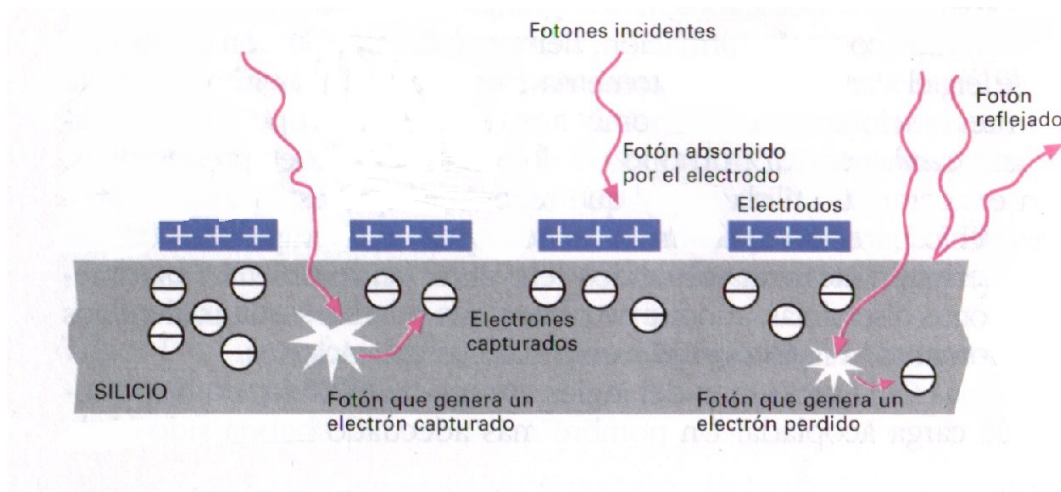


Figura 5.1: Proceso de captación de electrones de un sensor CCD de silicio

Las siglas CCD provienen del inglés charge-coupled device, dispositivo de carga acoplada. Es una superficie sólida sensible a la luz, dotada de unos circuitos que permiten leer y almacenar electrónicamente las imágenes que se proyectan sobre ella. El funcionamiento de los CCD se basa en el fenómeno físico del efecto fotoeléctrico antes explicado (ciertas sustancias tienen la propiedad de absorber cuantos de luz, o fotones, y liberar un electrón). Para la fabricación de los detectores CCD se utilizan materiales semiconductores como el silicio, el InGaAs, o el InSb. Una de las caras de una placa del material semiconductor se recubre con una red de electrodos microscópicos cargados positivamente. En virtud del efecto fotoeléctrico, la luz incidente genera electrones, de carga negativa, que son atraídos por los electrodos y se acumulan a su alrededor. La imagen final captada por el detector CCD es un mosaico formado por tantos elementos, o teselas, como electrodos hay en la placa de silicio. Se suele llamar píxeles a las teselas de los mosaicos digitales. En la Figura 5.1 se puede ver el proceso de captación y acumulación de luz en un sensor CCD.

Para una cámara CCD, el detector se coloca en el plano focal de un objetivo. A continuación se abre el obturador y se permite que la luz incida sobre la superficie del detector CCD durante un cierto tiempo. Los fotones se convierten en electrones que se van acumulando alrededor de los minúsculos electrodos. Cuando la exposición ha acabado, la imagen está latente, convertida en electrones, en el interior del CCD. El siguiente paso necesario es su lectura y almacenamiento [10]. En la Figura 5.2 se puede ver el proceso de lectura de un detector CCD.

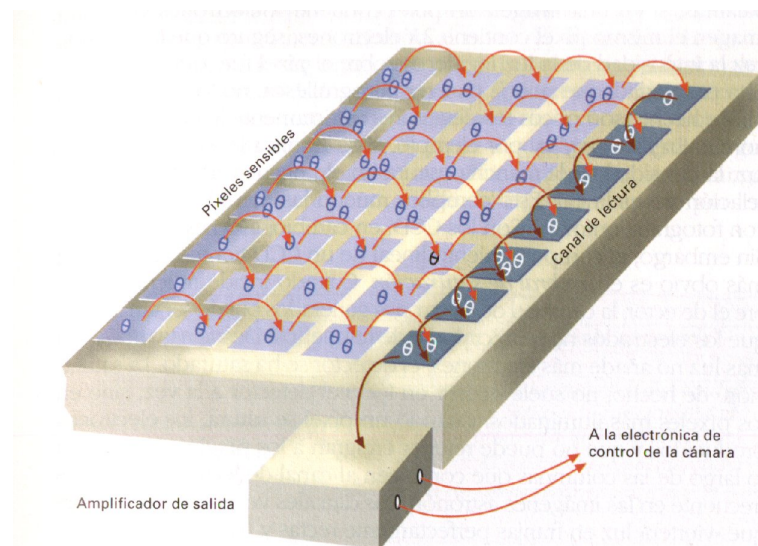


Figura 5.2: Proceso de lectura de un detector CCD

En uno de los laterales del detector hay siempre una hilera de electrodos que no recibe luz y que se emplea para el proceso de lectura de las imágenes. Esta hilera se llama canal de lectura. El voltaje de los electrodos se altera simultáneamente y de manera adecuada para que cada uno de ellos traspase a su vecino inmediato los electrones que tiene acumulados.

Los electrodos contiguos al canal de lectura le transfieren su contenido. Después, se envía al canal de lectura la instrucción de ir pasando por orden, uno a uno, los contenidos de sus electrodos a un amplificador de salida. Allí la electrónica de la cámara va haciendo el recuento de electrones. Esta operación de traspaso de electrones del detector al canal de lectura y del canal de lectura al amplificador de salida se repite tantas veces como sea necesario, hasta que todos los píxeles de la imagen hayan sido evaluados. Entonces la imagen está codificada numéricamente en la memoria del ordenador que controla la cámara CCD, y puede ser representada en el monitor.

5.2. Características principales de los detectores CCD de Silicio e InGaAs

Los sensores CCD presentan algunas características especiales que los diferencian de los captadores de luz tradicionales. A continuación se exponen las principales de estas características [4].

5.2.1. Linealidad y saturación

Los detectores CCD de silicio e InGaAs presentan un carácter detector lineal. Esto quiere decir que la intensidad registrada en cada píxel en forma de electrones es proporcional a la luz incidente. Sin embargo, este comportamiento lineal tiene sus límites. El más obvio es el umbral de saturación.

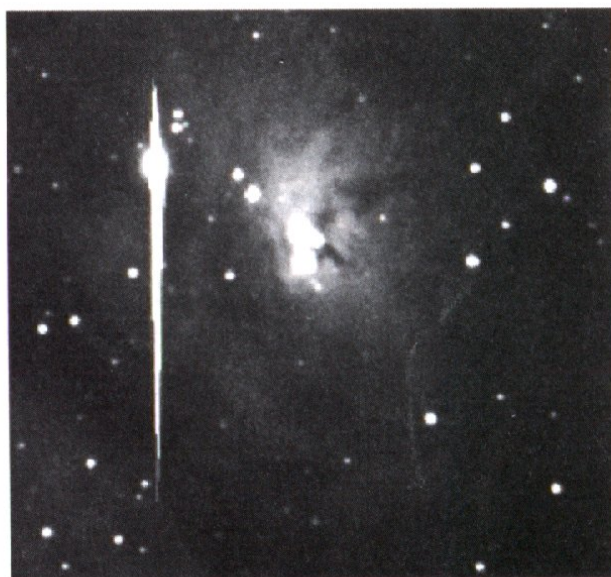


Figura 5.3: Imagen con columna de píxeles saturados

Cuando incide mucha luz sobre el detector, la cantidad de electrones generados puede ser tan grande que los electrodos no sean capaces de retenerlos. Desde ese momento más luz no añade más electrones: el detector se satura. La saturación, de hecho, no suele ocurrir en todo el detector a la vez, sino en los píxeles más iluminados. Cuando un píxel se satura, los electrones producidos y que no puede retener emigran a los píxeles contiguos a lo largo de las columnas que conducen al canal de lectura dando como resultado una columna de píxeles saturados. En la Figura 5.3 se puede ver un ejemplo de una imagen con una columna de píxeles saturados.

Por lo general, los detectores de InGaAs son capaces de retener más electrones por cada electrodo, por lo que saturan a valores niveles mayores de luz, obteniendo así mejores imágenes.

5.2.2. La curva de sensibilidad

Al incidir los fotones en la placa semiconductor de un detector CCD de silicio o InGaAs, sólo son detectados si provocan la excitación de al menos un electrón que, además, debe ser captado por un electrodo cercano. El rendimiento con que ocurre este proceso determina la sensibilidad a la luz de un detector, y es una de las características principales de este tipo de cámaras. Este parámetro se mide mediante la cantidad llamada eficiencia cuántica. Un detector que registra la totalidad de los fotones incidentes tiene una eficacia cuántica del 100 %, mientras que uno muerto no detecta nada, y tiene entonces, una eficiencia cuántica del 0 %. La gráfica que describe la eficacia cuántica de un detector como función de la longitud de onda de la luz incidente, se llama curva de sensibilidad.

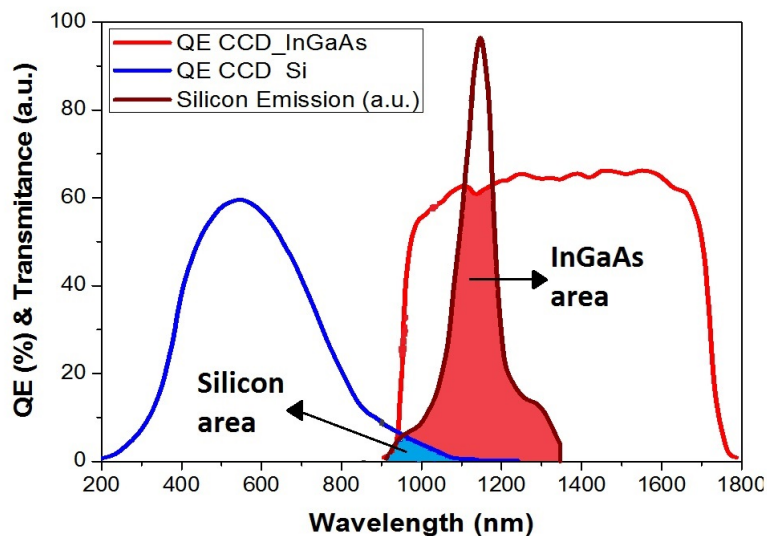


Figura 5.4: Espectros electromagnéticos de los distintos sensores CCD empleados en los ensayos de fotoluminiscencia y banda de emisión del silicio.

La curva de sensibilidad de un CCD de InGaAs, es totalmente distinta a la de un CCD de silicio. En concreto, a la longitud de onda en la que el silicio, y por lo tanto las células solares estudiadas, emiten luminiscencia (1100 nm) la eficiencia cuántica del sensor CCD de InGaAs es notablemente superior a la del sensor CCD de silicio. En la Figura 5.4 se muestra un gráfico del espectro electromagnético de cada tipo de sensor y el de emisión de el silicio, frente a la eficiencia cuántica.

En la Figura 5.4 se puede apreciar como el área del espectro de emisión del silicio captado por el sensor de InGaAs, es mucho mayor que el captado por el sensor de silicio. Además la eficiencia del sensor de InGaAs en la banda de emisión del silicio ronda el 60 % mientras que el CCD silicio apenas llega al 10 %.

5.2.3. Ganancia y rango dinámico

La imagen digital consta de una serie de números, uno por píxel. Pero los números almacenados no significan la cantidad de electrones hallados en cada electrodo. La cantidad de electrones en un electrodo puede llegar a decenas o centenares de miles, y reservar espacio para un número tan grande por cada píxel haría que los archivos informáticos resultantes fueran demasiado grandes. Lo que se hace es dividir la cantidad de electrones entre un cierto número, llamado ganancia de la cámara. Así, lo registrado en el archivo no es la cantidad de electrones, sino el número de cuentas resultante de hacer la división.

Las cuentas se almacenan como números enteros. Cada modelo de cámara asigna un número máximo al nivel de saturación. Las más sencillas admiten cuentas entre cero y 255. Las cámaras profesionales suelen registrar intensidades de cero a 65535 cuentas. Este intervalo de valores se conoce como rango dinámico de la cámara y equivale al número de tonos de gris que es capaz de distinguir. Para alcanzar la mayor precisión fotométrica interesa un gran rango dinámico, pero esto incrementa mucho el espacio ocupado por los archivos imágenes. Factores como el tamaño del sensor CCD o el tamaño de cada píxel limitaran la ganancia y el rango dinámico que pueda tener una cámara CCD.

5.2.4. Señal y Ruido

En el caso de la fotografía con cámaras CCD, se considera que la señal son los electrones acumulados en el detector por efecto de los fotones que provienen del objeto que se desea fotografiar. Pero los sensores CCD no sólo registran datos provenientes del objeto deseado sino también de otras fuentes no deseadas. A estas señales no deseadas y que también quedan registradas, bien en el sensor durante la exposición, bien durante el proceso de lectura y conversión analógico-digital o durante el procesado de las imágenes, se les llama ruido.

Cuando la cantidad de señal recibida es muy grande esta destaca por encima del nivel del ruido y es fácil de distinguir. En el caso de la luminiscencia de las células solares, la señal es muy alta por lo que el ruido queda muy empujado en términos relativos y resulta difícil de percibir, se dice entonces que la relación señal ruido (SNR, signal-to-noise ratio) es alta. En la toma de imágenes de luminiscencia en obleas de silicio ocurre lo contrario, la señal es débil y por tanto la relación señal ruido (SNR, signal-to-noise ratio) con frecuencia es baja. Esto sucede porque durante la detección señal y ruido tienen exactamente la misma naturaleza: ambos producen electrones, por lo que si se dan en cantidades parecidas

se entremezclan y son difíciles de distinguir entre sí. Además el ruido da siempre lugar a incertidumbre en la medida de la señal: cada lectura es diferente y no se sabe cual es la "verdadera". Cuando esto sucede, el ruido se define matemáticamente como el valor de una desviación estándar de los valores obtenidos en las diferentes mediciones efectuadas. Cuando el ruido es estadísticamente aleatorio, lo que también se llama ruido estocástico, la incertidumbre en la medición de la señal tiene una importante propiedad y es que sigue una distribución de probabilidades que se conoce como distribución de Poisson. En una distribución de Poisson la desviación estándar es igual a la raíz cuadrada de la media de los valores obtenidos, por lo que el ruido (N), es proporcional a la raíz cuadrada de la señal (S).

$$N = \sqrt{S} \quad (5.1)$$

Esta propiedad de la distribución de Poisson tiene importantes aplicaciones prácticas. Entre otras, permite recurrir a métodos estadísticos para aumentar la relación señal ruido como por ejemplo usando una combinación de varias exposiciones. La razón por la que esto se puede hacer es que, como se ha dicho ya, determinados tipos de ruido son puramente aleatorios mientras que la señal no lo es. al combinar varias exposiciones la señal aumenta de forma proporcional al número de exposiciones mientras que el ruido lo hace de forma proporcional a la raíz cuadrada del número de exposiciones, lo que explica porque la relación señal ruido aumenta. Las tres fuentes más importantes de ruido son: Ruido Fotónico (Photon Noise, P_n), Ruido de Corriente Oscura o ruido térmico (Dark Current Noise, D_n) y Ruido de Lectura (Read-out Noise, R_n).

- **Ruido Fotónico (Photon Noise, P_n):** La señal detectada por el CCD depende del flujo de fotones que llega al sensor procedentes del objeto que se quiere ver (E_{obj}) y del fondo de la imagen (E_{fondo}), de la eficiencia cuántica (QE) y del tiempo (t) que dura la exposición. El ruido se produce porque el flujo de fotones que llega al CCD proveniente del objeto y del fondo no es constante sino que está sometido a pequeñas variaciones. Esta variación, que se debe a la naturaleza cuántica de la luz, sigue una distribución de Poisson por lo que el ruido fotónico de la señal del objeto (también denominado ruido de disparo, *shotnoise*) recogida en un pixel sería:

$$P_N = \sqrt{E_{obj} \cdot QE \cdot t} \quad (5.2)$$

Donde: E_{obj} = flujo fotónico del objeto en fotones/segundo, QE = eficiencia cuántica y t = tiempo en segundos. En el caso de la señal del fondo (E_{fondo}) el ruido fotónico (Fon_N) en un pixel sería:

$$Fon_N = \sqrt{E_{fondo} \cdot QE \cdot t} \quad (5.3)$$

Donde: E_{fondo} = flujo fotónico del fondo de cielo en fotones/segundo QE = eficiencia cuántica t = tiempo en segundos.

- **Ruido de Corriente Oscura (Dark Current Noise, D_n):** A temperaturas superiores a los 0 Kelvin ($-273^\circ C$) todos los sensores CCD producen cargas electrónicas

en los píxeles de forma espontánea, sin que haya señal. Cuanto mayor es la temperatura del sensor y el tiempo que permanece polarizado más electrones se producen por el calor. A este fenómeno se le denomina corriente oscura (Dark Current, D_c). La corriente oscura de un mismo pixel varía ligeramente de una exposición a otra. Esta variación de la corriente oscura es la que da lugar lugar al Ruido de Corriente Oscura (Dark Current Noise, D_n). Al igual que ocurre con el ruido fotónico, el ruido de corriente oscura también sigue la distribución de Poisson por lo que:

$$D_N = \sqrt{D_c \cdot t} \quad (5.4)$$

Donde: D_N = ruido de corriente oscura en electrones, D_c = corriente oscura en electrones/segundo y t = tiempo en segundos. Las exposiciones prolongadas, en ausencia de refrigeración activa, incrementan la temperatura del sensor por lo que aumenta la corriente oscura y el ruido de corriente oscura. La mejor forma de combatir el ruido de corriente oscura es enfriar el sensor durante la adquisición.

El control de este tipo de ruido es un problema importante en las cámaras no refrigeradas, donde la duración de máxima de la exposición puede estar limitada por la corriente oscura que va aumentando a lo largo de la exposición, dado que durante la exposición la temperatura del sensor aumenta de forma progresiva.

- **Ruido de Lectura (Read-out Noise, Ron):** El Ruido de Lectura (Ron) tiene su origen en las variaciones que la cámara introduce durante el recuento de la señal una vez finalizada la exposición y en la conversión analógica-digital. El ruido se produce porque diferentes lecturas de la misma carga de electrones no dan el mismo valor, lo que introduce una incertidumbre en cada lectura. Estas diferencias se producen por muchas razones, entre otras están la tolerancia y calidad de los componentes electrónicos utilizados y el diseño de los circuitos de la cámara. El hecho de que la señal tenga que ser amplificada antes de la conversión AD y el ruido térmico que produce el propio preamplificador también contribuyen a incrementar el ruido de lectura.

El ruido de lectura del sistema es uno de los parámetros más importantes de una cámara CCD, cuanto más bajo sea el ruido de lectura mayor será el rango dinámico de la cámara lo que permitirá una mayor riqueza de matices en la señal dado que el intervalo dinámico de la cámara representa el número de niveles que esta puede distinguir.

5.3. Tratamiento básico de las imágenes

Dicho tratamiento comprende al menos dos tareas: la sustracción de la corriente de oscuridad (eliminación del ruido térmico) y la homogeneización de la sensibilidad del detector (aplanamiento del campo) [10].

5.3.1. La corriente de oscuridad y su eliminación

El ruido térmico, antes mencionado, surge de lo que se conoce como corriente de oscuridad. La producción de termoelectrones crece de forma exponencial con la temperatura desde el 0 absoluto. Por eso a temperatura ambiente esta señal tiene un peso importante en la imagen, para limitarla es necesario refrigerar la cámara CCD tanto como sea posible. La corriente de oscuridad es la señal parásita de mayor importancia. Es una señal de origen térmico que se superpone a la verdadera señal real. Podemos expresar esto como se muestra en la 5.5.

$$\text{Imagen adquirida} = \text{Señal real} + \text{Corriente : de oscuridad} \quad (5.5)$$

La manera usual de eliminar la corriente de oscuridad restante aun con la refrigeración consiste en realizar tomas sin iluminación, los denominados “cuadros oscuros” o “tomas oscuras” (*darkfields*). La corriente de oscuridad crece con la temperatura del detector y se acumula con el tiempo, por lo que su contribución es diferente para tomas de exposición distinta. Sustrayendo a una imagen una toma oscura del mismo tiempo de exposición, la corriente de oscuridad desaparece de forma muy eficaz.. En la Figura 5.5 se puede ver el aspecto habitual de un *darkfield*.



Figura 5.5: Ejemplo de una imagen de darkfield

5.3.2. El aplanamiento de campo

Los detectores CCD de silicio e InGaAs deben contemplarse, más que como un único detector, como un conjunto de ellos agrupados. Cada píxel tiene una respuesta a la luz (y una corriente de oscuridad) ligeramente distinta a la de sus vecinos, tanto en lo referente a constante de linealidad como a curva de sensibilidad. Como consecuencia, un mismo punto de una célula solar registrado en condiciones idénticas pero sobre regiones diferentes del detector, tendrá un número diferente de cuentas totales. Dicho con otras palabras, al iluminar uniformemente el detector, la imagen digital registrada no será uniforme, y esto incluso después de la eliminación de ruido térmico. Estas no uniformidades ajenas al ruido



Figura 5.6: Ejemplo de una imagen de flatfield

térmico son provocadas por el ruido de lectura, su proceso de evaluación y corrección se conoce como aplanamiento del campo (*flat-fielding*). Se basa en el análisis de tomas planas o cuadros planos (*flatfields, o flats*): imágenes obtenidas con la cámara apuntando a una superficie iluminada uniformemente. Estas imágenes también deben ser corregidas de corriente de oscuridad. La Figura 5.6 muestra un *flatfield* procesado para acentuar los detalles.



Capítulo 6

Equipo utilizado

Para la realización de la toma de imágenes de fotoluminiscencia, se ha empleado el equipo de caracterización de obleas de silicio y células fotovoltaicas del laboratorio, así como cámaras CCD para la toma de imágenes. En lo referente al software, la captura de imágenes se ha realizado con el software CAMWARE 4.0 y el software Hi Pic 9.

6.1. Equipo de caracterización de células fotovoltaicas

6.1.1. Equipo existente

El sistema existente está preparado para caracterizar tanto obleas de silicio como células fotovoltaicas. El problema es que las características de las obleas de silicio y de las células ya montadas no son las mismas y hay que adaptar el ensayo de manera que se adapte a las características de ambas. Además aprovechando que el entorno de pruebas de la fotoluminiscencia y la electroluminiscencia son parecidos (entornos de poca luz ambiental), se pueden realizar ensayos tanto de uno como de otro variando únicamente el sistema de excitación.

Para el caso de excitación mediante fotoluminiscencia, esta se ha conseguido mediante la utilización de una fuente de luz monocromática compuesta por 4 láseres. Dicha luz habrá de incidir homogéneamente sobre la muestra (células solares de 156 X 156 mm). En la parte superior del equipo tal y como se puede apreciar en la Figura 6.1, van colocados los cuatro láseres con sus sistemas de refrigeración, las fuentes de alimentación, sus drivers de control y las tarjetas de adquisición de datos. La parte inferior del equipo consiste en un espacio cerrado, aislado de cualquier señal lumínica, en el que se sitúa la cámara así como la muestra a ensayar. A continuación se detalla cada uno de los elementos que componen el equipo por separado por separado [8]:

- **Láser de diodo:** Para la excitación de la muestra se necesita una potente fuente óptica monocromática. Para conseguir una excitación homogénea existen 4 diodos láseres comerciales de alta potencia montados en formato cs-mount. Los dispositivos son cuatro diodos láser de AlGaAs fabricado por la compañía COHERENT. La potencia óptica de salida máxima es de 20 W con una corriente máxima de 25 A, en la Figura 6.2 se muestran las características del diodo láser. La longitud de onda



Figura 6.1: Fotografía del equipo de medición visto desde su vista frontal

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



Figura 6.2: Características de los láseres de diodo del equipo

de emisión del láser es de 808 nm con una profundidad de penetración en silicio cristalino de 13 μ m.

Los diodos láser se polarizan en directa y empiezan a emitir cuando se alcanza una circulación de 4 A, incrementando linealmente hasta el máximo de emisión.

- Soporte para cámara superior:** Para la toma de imágenes en reflexión, la cámara se posiciona en ángulo, en un saliente de la columna principal del equipo, este saliente se puede apreciar en la vista lateral del equipo de la Figura 6.1 Para acceder a este soporte existe una puerta que asegurara cuando este cerrada, un correcto aislamiento lumínico del interior del equipo de medida. Para posicionar correctamente la cámara, se dispone de un mecanismo fijo que permite ajustar la altura y la inclinación de la cámara para poder obtener imágenes centradas. En la Figura 6.3 se puede ver una fotografía del soporte para cámara superior.



Figura 6.3: Soporte de la cámara en la posición superior



Figura 6.4: Soporte de la cámara en la posición inferior

- Soporte para cámara inferior:** Cuando se han de tomar imágenes en transmisión (fotoluminiscencia en obleas y electroluminiscencia en células solares) la cámara se coloca en la parte inferior del equipo. Para acceder a esta zona, al igual que ocurre con el soporte de cámara superior, se dispone de una puerta que aisle el interior

del equipo de la luz cuando este cerrada. A la hora de posicionar la cámara en la parte inferior se dispone de un equipo de sujeción móvil, ajeno al equipo, en el que se coloca la cámara en posición vertical. En la Figura 6.4 se puede ver la cámara colocada en la parte inferior del equipo.

- **Bandeja de muestras:** En la parte intermedia del equipo se sitúa la bandeja de muestras que se compone de una bandeja extraíble con una apertura en su base en la que se colocan las muestras. El área de esta abertura es similar al de una célula solar estándar, 156 mm x 156 mm, con un fino marco en su interior donde se apoya la muestra.



Figura 6.5: Bandeja extraíble para la colocación de las muestras

La existencia de esta abertura en la bandeja de muestras se justifica con el ensayo de luminiscencia en transmisión, que se emplea para realizar ensayos de electroluminiscencia en células solares y para ensayos de fotoluminiscencia en obleas de silicio, en el que la imagen se toma desde la parte inferior de el equipo de medida. Por diversos problemas que se exponen posteriormente se decidió modificar esta pieza para facilitar su manejo. En la Figura 6.5 se puede ver una fotografía de la bandeja de muestras.

- **Fuente de alimentación:** La alimentación de los diodos de alta potencia requiere fuentes de alimentación capaces de aportar un gran amperaje. Para este fin existen dos PSUs (Power Supply Unit, en sus siglas en ingles) de ordenadores personales que además de cumplir con los requerimientos de tensión y potencia, poseen una gran estabilidad en la corriente y la tensión de salida.
- **Sistema de refrigeración:** Los diodos láser tienen una potencia máxima de unos 55 Vatios con una corriente máxima de 25 A, por tanto al pasar una cantidad tan elevada de amperios, se calentarán bastante, por lo que el sistema posee un sistema de refrigeración capaz de disipar todo ese calor para evitar que el láser se dañe. El sistema de refrigeración existente es un conjunto de disipador de calor y ventilador,

CAPÍTULO 6. EQUIPO UTILIZADO

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



Figura 6.6: Características del disipador y del ventilador, proporcionadas por el fabricante. Aspecto físico del conjunto disipador de calor Artic Freezer 13 utilizado.

en concreto el modelo ARTIC FREEZER13, cuya hoja de características se expone en la Figura 6.6.

- Driver electrónico de control del láser:** La corriente que circula por los láseres debe ser regulada y adaptada, ya que la salida directa de la fuente de alimentación no es la correcta para el funcionamiento adecuado de los láseres. Esta necesidad de regulación es debida a que los láseres no funcionarán a máxima potencia todo el tiempo, ya que solo hará falta que proporcionen toda su potencia lumínica durante unos segundos en cada medida. Además, queremos que tanto la tensión como la corriente en los láseres sea lo más estable posible absorbiendo y controlando los picos y los transitorios rápidos limitando la corriente máxima que podría circular por el láser.

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 6.7: Características del driver electrónico y el aspecto físico del dispositivo LDP-C 40-05.

Los drivers se encuentran entre el láser y la fuente de alimentación y son los encargados de adaptar los 5 V de la salida de la fuente en los <1.8 V (voltaje del láser). El dispositivo existente es el modelo LDP-C 40-05 de PICOLAS. En la Figura 6.7 se pueden ver las características más destacables del driver, así como su aspecto físico. Estos dispositivos son los encargados de gestionar una gran cantidad de corriente

continua, por ello existe en la base de cada uno disipadores de calor para evitar una subida de temperatura del sistema.

El funcionamiento del driver está basado en un convertidor Buck o reductor. Este tipo de convertidor DC/DC sin aislamiento galvánico que obtiene a su salida una tensión continua de menor magnitud que a la entrada.

Para el control de la salida del convertidor el driver posee el Sistema BOB (Break Out Board) que es el encargado de regular la corriente por el driver, tanto de forma manual a través del potenciómetro o de forma automática a través de una señal analógica externa. En la Figura 6.8 se puede ver una imagen del Sistema BOB.

Alimentación	La suministra el propio driver
Dimensiones	67 x 100 x 32 mm
Peso	54 g
Temperatura de funcionamiento	-20 a +55 °C



Figura 6.8: Características del sistema BOB y el aspecto físico del dispositivo.

Mediante el uso del mando del potenciómetro se puede ajustar de manera rápida la corriente por el láser. El dispositivo permite monitorizar varias señales del driver, así como la corriente por el láser o la corriente por el inductor. Para ello dispone de varias salidas analógicas cuya salida tiene una relación directa con la señal que se quiere monitorizar.

- **Tarjetas de adquisición de datos:** El sistema posee tarjetas de adquisición de datos para poder automatizar el proceso de toma de medidas, debido a la utilización de 4 láseres y de la necesidad de controlar y monitorizar las variables de todos los láseres existen dos tarjetas de adquisición de datos ya que, con una sola tarjeta no tiene las suficientes entradas analógicas necesarias para monitorización del láser.
- **Sistema de control de temperatura de los láseres:** Como sistema de seguridad adicional existe un dispositivo de medida de la temperatura de los láseres. La finalidad de este sistema es evitar que los diodos láser alcancen temperaturas superiores al umbral de operación, poniendo en peligro la durabilidad de los diodos láser. Para la interpretación y el registro de los datos se usa un datalogger de aplicación específica en registro de temperaturas, que emite una señal de alarma si se sobrepasa la temperatura óptima de funcionamiento de 40°C.

6.1.2. Mejoras realizadas

Sobre el sistema existente se han realizado algunas mejoras para dotar a dicho sistema de manejabilidad así como de sencillez a la hora de realizar los ensayos. Más en concreto se ha modificado la pieza en la que se introducen las muestras. Dicha pieza está compuesta por una bandeja extraíble y una compuerta que aísla lumínicamente el interior del sistema.

CAPÍTULO 6. EQUIPO UTILIZADO

Las modificaciones realizadas sobre la pieza en cuestión tienen como objetivo: facilitar la introducción de las muestras en el sistema así como evitar un posible deterioro de estas al ser introducidas, y realizar los contactos eléctricos oportunos en las muestras para poder realizar la toma de imágenes de electroluminiscencia con la cámara situada en la parte inferior del sistema y evitar así tomar imágenes en perspectiva.

6.2. Cámara CCD de silicio

Las cámaras CCD de silicio han sido históricamente las más extendidas y aunque en la actualidad existen sensores CCD más eficientes, los CCD de silicio siguen siendo óptimos para determinadas aplicaciones más centradas en el espectro visible que en infrarrojo. Una de las características de los CCD de silicio es el tamaño del sensor, los más habituales son:

- 8,5 mm (1/4 de pulgada).
- 2,7 mm (1/2 de pulgada).
- 17 mm (2/3 de pulgada).

La cámara CCD que se ha utilizado es el modelo 1300 solar de la marca PCO. El sensor de esta cámara tiene un tamaño de 17 mm (2/3 de pulgada). En la Figura 6.9 se puede ver la hoja de características de la cámara.

6.3. Cámara CCD de InGaAs

A través de la colaboración con la empresa NOVADEPT, se consiguió el préstamo de una cámara de tecnología InGaAs que ofrece una visión más amplia del espectro infrarrojo llegando hasta los 1700 nm frente a los 1100 nm que ofrece una cámara con tecnología de silicio y con mayor eficiencia cuántica. La cámara con el sensor de InGaAs corresponde con el modelo C12741-03 del fabricante Hamamatsu. Respecto al tamaño del sensor, el de la cámara de InGaAs es de 1 pulgada, un tamaño atípico en sensores de silicio. En la Figura 6.10 se pueden ver la hoja de características de la cámara.

6.4. Objetivo

El objetivo del que se ha dispuesto a la hora de realizar las medidas, es un objetivo modelo HF12.5SA-1 del fabricante Fujinon. Este objetivo lleva acoplados varios filtros, en concreto, uno que filtra la luz visible así como el infrarrojo cercano, incluyendo la luz emitida por los láseres de excitación (808nm), y otro que filtra el infrarrojo lejano. El fin de la colocación de estos filtros es captar, en la medida de lo posible, solo la banda de emisión del silicio que corresponde a un ancho de banda en torno a los 1100nm.

Resolución	Unidad	Punto de funcionamiento	Pco.1300 solar
Resolución	Pixel	Modo extendido	1424 x 1060
Modo normal		1392 x 1040	
Tamaño del pixel	µm	-	6.45 x 6.45
Eficiencia cuántica	%	@880 nm	13
Corriente de oscuridad	/pixel*seg	@10°C	0.05
Rango dinámico A/D	Bit	-	12
Ruido de lectura	rms	@10 / 20 Mhz	42649
Factor de conversión	/cuenta	-	3.8/1.9
Alimentación	VDC	Típico	24 V (18...28 V)
Consumo	W	Máximo	20
Dimensiones			113 x 104 x 110
Peso	Kg	-	1.1
Temperatura de operación	°C	Rango	+10...+40
Humedad de operación	%	Rango	10...80

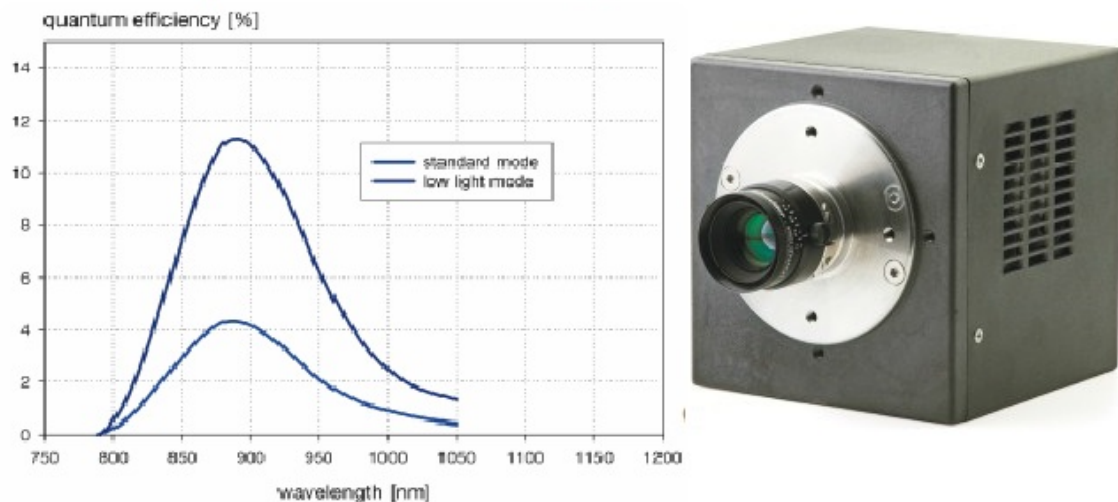



Figura 6.9: Principales características del dispositivo (arriba), eficiencia cuántica en función del modo de funcionamiento (abajo-izquierda) y aspecto físico de la cámara 1300.solar PCO (abajo-derecha).

Type number	C12741-03	
Quantum efficiency	Over 50 % (at 1500 nm)	
Imaging device	InGaAs sensor	
Effective no. of pixels	640 (H)×512 (V)	
Cell size	20 μm × 20 μm	
Effective area	12.8 mm (H) × 10.24 mm (V)	
Full well capacity	600 000 electrons	
Readout speed	59.774 frames/s	
Readout noise	1000 electrons (rme, Max) 500 electrons (median, typ)	
Exposure time	16.7 ms to 1 s	
Cooling method	peltier cooling	
Cooling temperature	+10 °C (Passive-air cooled, Ambient temperature +25 °C)	
Dynamic range	600:01:00	
Interface	USB 3.0	
A/D converter	14 bit	
Lens mount	C-mount	
Power supply	DC +12 V	
Power consumption	Approx. 16 W	
Ambient operating temperature	0 °C to +40 °C	
Ambient storage temperature	-10 °C to +50 °C	
Ambient operating humidity	30% to 80% (with no condensation)	
Ambient storage humidity	30% to 90% (with no condensation)	

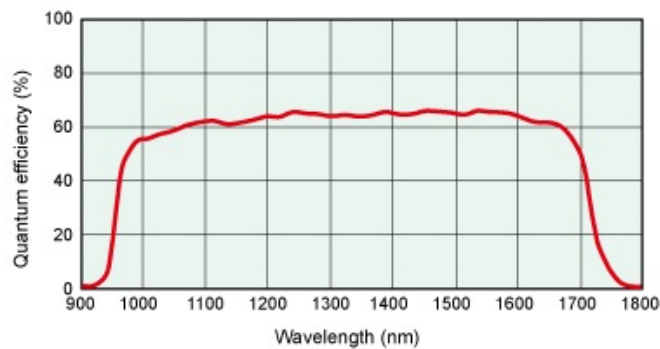


Figura 6.10: Principales características, eficiencia cuántica y aspecto físico del dispositivo CCD de InGaAs.

Distancia focal	12.5 mm
Rango de iris	F1.4-F22
Rango de enfoque	0.1 m
Distancia focal trasera	16.07 mm
Peso	295 g



Figura 6.11: Características del objetivo acoplado a la cámara y aspecto físico del mismo.

6.5. Software cámara CCD de silicio

El fabricante de la cámara CCD de silicio, PCO, ofrece con la cámara un software de control de esta, CAMWARE. Este software permite controlar todos los parámetros de la cámara, así como modificar las propiedades de la captura de imágenes.

Al ejecutar el programa, este exige para funcionar que haya una cámara conectada, por lo que será necesario tener conectada la cámara a la hora de trabajar con este software. Una vez el software ha reconocido la cámara, se puede empezar la adquisición de imágenes, para ello, lo primero que se debe hacer es abrir una ventana de visualización de imágenes, pudiendo elegir si esta es para imágenes en blanco y negro (B/N) o en color (RGB). Las cámaras con las que se ha trabajado permitían solo tomar imágenes en escala de grises, por lo que habitualmente se ha trabajado con ventanas de visualización en B/N. En la Figura 6.12 se puede ver las ventanas de visualización en el entorno del programa.

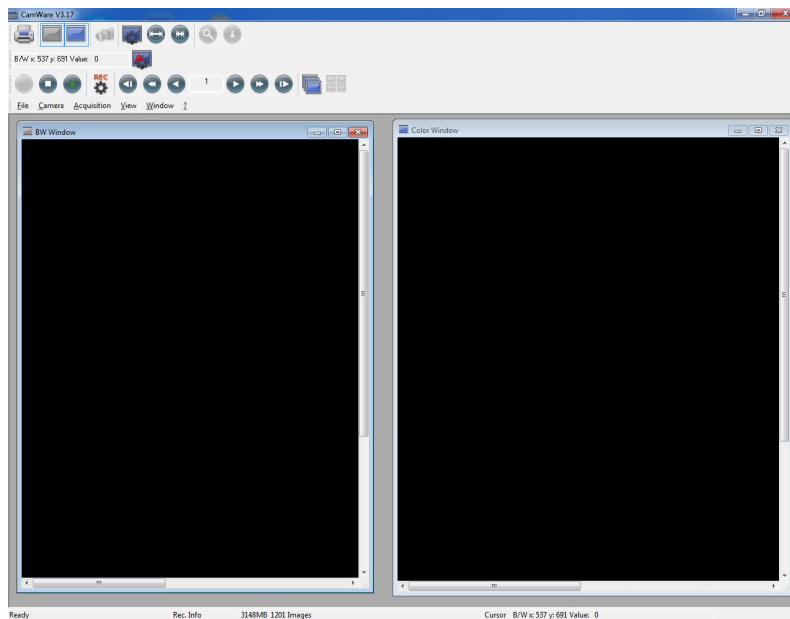


Figura 6.12: Ventanas de visualización en el entorno del software CAMWARE.

Una vez se tiene la ventana de visualización se deben configurar las distintas características de la cámara y de la toma de imágenes, para ello se deberá configurar: las opciones generales del programa, los ajustes de adquisición de imágenes y las opciones de la cámara. Posteriormente se explicará el proceso de captura de imágenes y el ajuste posterior de las mismas para una correcta visualización así como otras funciones que ofrece el software.

6.5.1. Opciones generales del programa

Para acceder a las opciones generales del programa, se accede al menú *File* y posteriormente a la opción *Options*. En la Figura 6.13 se puede apreciar una captura de pantalla

de este menú y de todos sus submenús.

En estas ventanas se puede elegir entre otras cosas las barras de herramientas que se mostraran en la ventana principal del programa. También se puede elegir el formato de salida de la imagen o la opción de guardar las imágenes como imágenes de alta calidad, entre otras opciones. En nuestro caso se han dejado todas las opciones por defecto, salvo la que corresponde a la visualización de las imágenes que se ha establecido en b/w, blanco y negro.

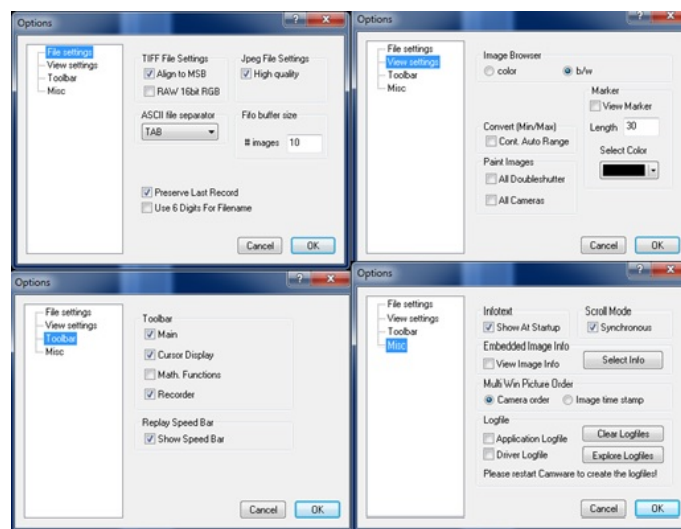


Figura 6.13: Opciones generales del software CAMWARE.

6.5.2. Ajustes de adquisición de imágenes

Una vez configurada la cámara se pasara a configurar la grabación de imágenes. Para ello entramos en el menú *Acquisition* y posteriormente en el submenú *Recorder setings*. En este submenú encontramos diversas opciones de grabación, una de ellas es el *Averaging*, que consiste en que el programa toma un número determinado de imágenes (1, 2, 4, 8, etc) y muestra como resultado final de la captura una media aritmética de todas ellas.

Con esto conseguimos evitar posibles errores en la imagen debidos a pequeños movimientos de la cámara y eliminar en gran medida el ruido de la imagen, con el defecto de que se multiplicara el tiempo de adquisición de las imágenes tantas veces como imágenes usemos para hacer la media. En la Figura 6.14 se puede ver las opciones que ofrece este menú.

6.5.3. Grabación de imágenes

Una vez se han configurado todos los parámetros según se necesiten, se puede empezar la toma de imágenes. Para ello tenemos dos opciones, la primera, la opción *Live Preview* nos permite previsualizar la imagen que se está tomando sin almacenarla en la tira de imágenes. Esta opción sirve para poder reajustar algunos parámetros para mejorar las imágenes sin que las imágenes defectuosas sean almacenadas. La segunda opción es *Star*



Figura 6.14: Menú de ajustes de grabación del software CAMWARE.

Record que comienza la captura y el almacenamiento de las imágenes. Otras opciones de la adquisición de imágenes se encuentran en el menú *Camera control*. Este menú permite modificar parámetros de la grabación propios de la cámara. El tiempo de exposición es uno de estos parámetros y es el tiempo que la cámara está captando luz. En función del valor del tiempo de exposición cada píxel tendrá un valor mayor de luz para más tiempo de exposición y menor para un menor tiempo de exposición.

Del resto de opciones que ofrece el menú *Camera control*, la más interesante es la opción de hacer *Binning*. El *Binning* se basa en reducir el número de píxeles para obtener una imagen con menor resolución pero libre de ruido y deformidades. Para obtener esta mejora de calidad en la imagen, este método recopila la información de varios píxeles contiguos en uno solo, dando como resultado un valor medio relativo del nivel de luz de estos píxeles. En concreto para la cámara PCO 1300 solar, modelo existente en el laboratorio, el software CAMWARE permite hacer un *Binning* máximo de 2x2 píxeles, lo que reduce la resolución de la imagen a la mitad tanto de forma horizontal como vertical. En la Figura 6.15 se puede ver una captura de pantalla de este menú.

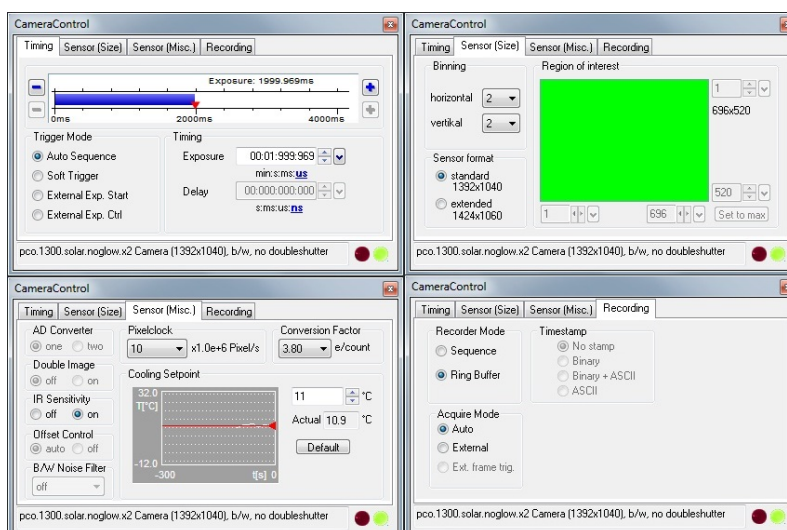


Figura 6.15: Menú de control de los parámetros de la cámara del software CAMWARE.

6.5.4. Ajuste de las imágenes

Cuando ya se hayan tomado las imágenes, estas aparecerán en la ventana de visualización que se haya abierto, pudiéndose navegar por las distintas imágenes que se hayan podido tomar.

Para optimizar la visualización de la imagen es necesario modificar alguno de sus parámetros de luz y contraste. Para ello accedemos al menú *View* y luego al submenú *Convert Control BW* o *Convert Control Color* en función de si nuestras imágenes son el blanco y negro o en color. En la Figura 6.16 se puede ver este menú.

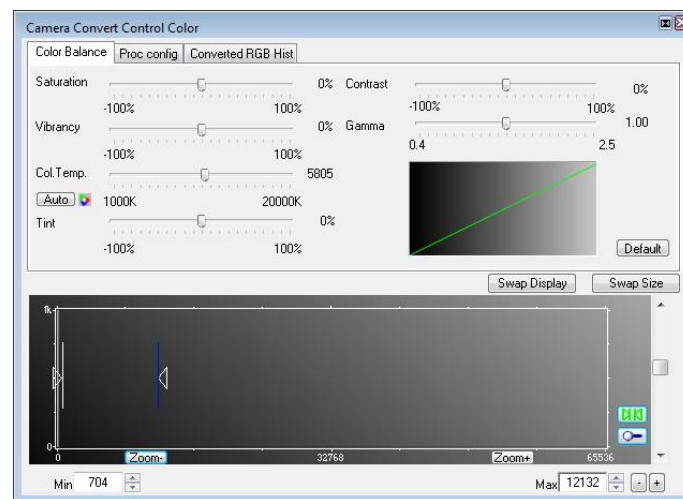


Figura 6.16: Ajuste del contraste con el software CAMWARE.

En la parte inferior del menú, se puede ajustar el rango de intensidades de luz que se desea ver, pudiendo así eliminar píxeles demasiado oscuros o demasiado claros. Dependiendo del tamaño de la imagen (8, 16 o 32 bits) la profundidad de color variara y con ello la cantidad de píxeles que se pueden eliminar sin perder información. El software empleado para la visualización de imágenes trabaja con una profundidad de color de 16 bits lo que nos da 65536 valores de luminosidad, cifra más que suficiente para poder eliminar posibles puntos negros o puntos de luz sin perder información.

La parte superior del menú, nos da la opción de cambiar parámetros como el contraste, la saturación o el factor gamma de la imagen, sin embargo, en nuestro caso estos parámetros se han ajustado posteriormente con un software específico de tratamiento de imágenes.

6.5.5. Otras funciones del programa

A la hora de exportar las imágenes tomadas desde el programa, CAMWARE ofrece diversas opciones. El formato de exportación del software por defecto, es el formato tif, sin embargo ofrece la posibilidad de exportar las imágenes en otros formatos como: jpg o bmp, entre otros. Además el programa ofrece la posibilidad de exportar varias imágenes como una secuencia de imágenes, algo muy útil para realizar comparaciones entre imágenes de

la misma secuencia.

Otra de las funciones que nos ofrece el programa es la corrección de *hot pixels*. Esta función consiste en tomar con la cámara una imagen totalmente oscura. En esta imagen solo se verán los puntos de luz defectuosos de la cámara, los llamados *hot pixels*. Una vez se tiene esta imagen el programa permite guardarla como un mapa de puntos defectuosos, aplicándola posteriormente a las imágenes tomadas, sustituyendo estos *hot pixels* por pixels con una intensidad de luz igual a la media aritmética de la de sus pixeles vecinos.

6.6. Software cámara CCD de InGaAs

La cámara InGaAs se controla mediante el programa Hi Pic 9, dicho software se instaló en uno de los equipos del laboratorio por la empresa NOVADEPT, y se proporcionó con él, la correspondiente licencia para su uso.

En la Figura 6.17 se puede ver la ventana del menú *acquisition*, donde se puede elegir entre distintos métodos para la toma de imágenes, además de poder elegir el tiempo de exposición con el que trabaja la cámara que en el caso de este software es como máximo de 1 seg.

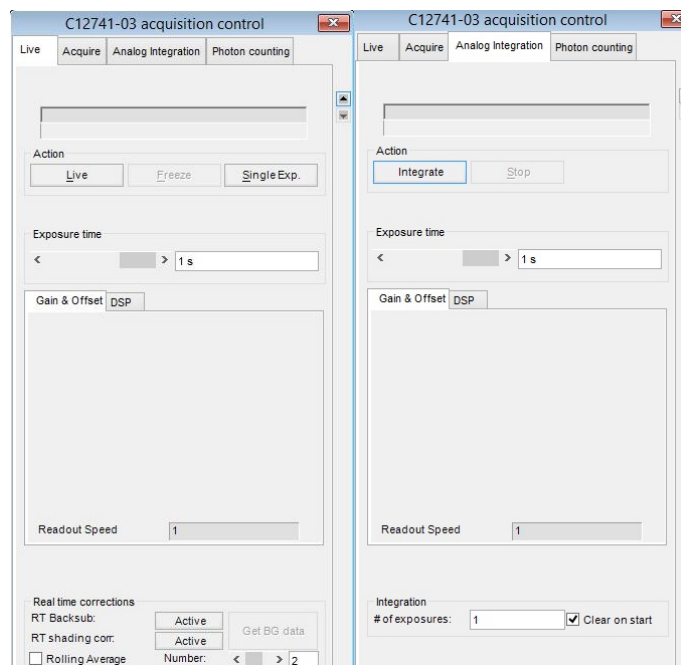


Figura 6.17: A la izquierda, opción *live* del menú *acquisition* del software Hi Pic, a la derecha opción *analogic integrator* del mismo software.

El método *live* permite ver imágenes en tiempo real, pudiendo detener la captura de imágenes en cualquier momento, para guardar los resultados. Otro método más interesante es el *analogic integrator* que toma varias imágenes consecutivas para luego integrarlas en

una sola y obtener como resultado final una imagen de mejor calidad, y libre de ruido. En la Figura 6.18 se pueden ver el menú de ambas opciones.

Una de las limitaciones de la cámara de InGaAs empleada con respecto a la CCD de silicio, es que el tiempo de exposición máximo que permite es de 1 segundo cuando el de la CCD de silicio, este solo está limitado por la saturación del sensor de la cámara.

El software Hi Pic ofrece la posibilidad de realizar la corrección de *shading*, *background* y de *defect pixel*, automáticamente después de realizar la captura. La Figura 6.18 muestra los menús de estas opciones de corrección.

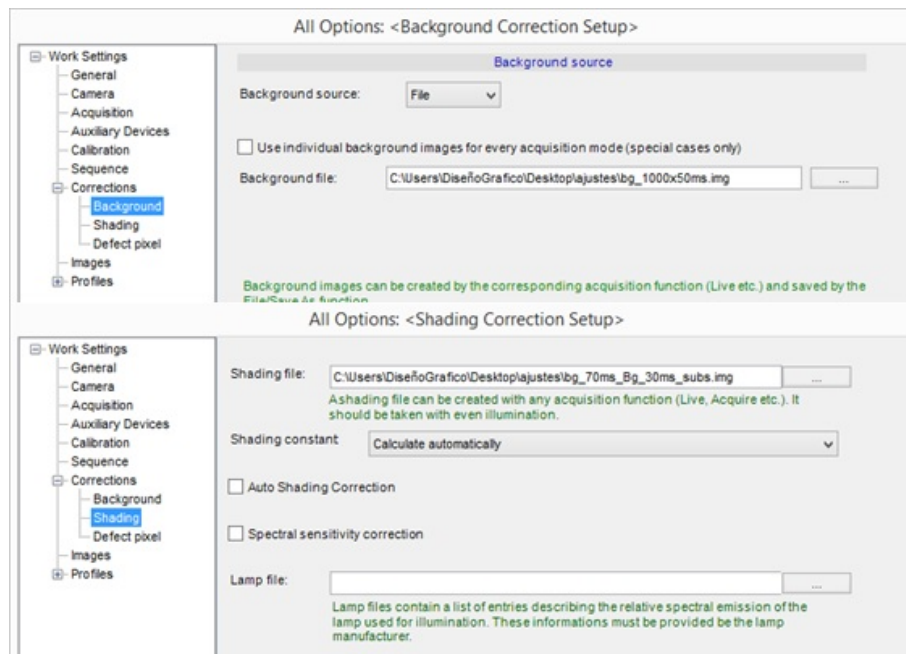


Figura 6.18: menús de corrección de *background* y *shading* en el software Hi Pic.

Para efectuar las distintas correcciones de la imagen, es necesario cargar los archivos correspondientes en Hi Pic. Por ejemplo, para realizar automáticamente la corrección de *background* habrá de cargar en Hi Pic la correspondiente imagen de *darkfield*. De igual manera para realizar la de *shading* habrá de cargar en Hi Pic la correspondiente imagen de *flatfield*.

El hecho de poder automatizar estas correcciones genera un ahorro considerable de tiempo en el tratamiento posterior de las imágenes y además, permite una comparación cuantitativa de estas de forma inmediata tras su adquisición.



Capítulo 7

Modo de ensayo PL

7.1. Justificación del ensayo

El ensayo de fotoluminiscencia (ensayo PL) se basa en la exposición de una de las muestras a la luz emitida por los láseres del equipo para posteriormente, con una cámara CCD, tomar una fotografía de la luz emitida por la muestra su fotoluminiscencia. Además de una cámara CCD capaz de captar la luminiscencia del silicio, que se emite entorno a los 1100 nm de longitud de onda, es necesario usar una óptica adecuada. La óptica habrá de filtrar, de la forma más efectiva posible, el espectro visible y el infrarrojo lejano, ya que, toda señal lumínica percibida por la cámara alejada de los 1100 nm no corresponderá a la luminiscencia propia de las muestras de silicio, sino que procederá de otras fuentes de luz que perturbarán la imagen resultado del ensayo de fotoluminiscencia. El ensayo PL arroja resultados interesantes en varias fases de la producción de una célula solar fotovoltaica.



Figura 7.1: Fotoluminiscencia de una célula solar de silicio multicristalino (mc-Si) captada con una cámara CCD de InGaAs.

Las células solares son la última fase del proceso de producción. Las células son ya productos acabados que posteriormente habrán de integrarse en paneles solares para su funcionamiento, los resultados arrojados por el ensayo de fotoluminiscencia permiten evaluar cada célula para evitar posibles pérdidas de eficiencia en el producto final, el panel solar fotovoltaico. En la Figura 7.1 se puede ver una imagen de una célula solar de silicio multicristalino (mc-Si) emitiendo fotoluminiscencia.

Las obleas de silicio (monocristalino, cuasimonocristalino o multicristalino) son la primera fase en la producción de células solares. A partir de un bloque de silicio dopado se obtienen, mediante corte, las obleas de silicio que posteriormente se convertirán en células solares. En las imágenes de la fotoluminiscencia de estas obleas de silicio se puede apreciar, como se expone en el capítulo 10, zonas más oscuras que podrán ser sinónimo de posibles defectos en la célula solar final. En la Figura 7.2 se puede ver el resultado de un ensayo de fotoluminiscencia sobre una oblea de silicio multicristalino.



Figura 7.2: Fotoluminiscencia de una oblea de silicio multicristalino (mc Si) captada con una cámara CCD de Silicio.

7.2. Disposición de los equipos

Cabe distinguir dos tipos de ensayo de fotoluminiscencia en función de la disposición de los equipos de medida, superior o inferior, y del tipo de muestra a analizar, oblea de silicio o célula solar. La posición superior de la cámara permite realizar el ensayo en reflexión, y la posición inferior permite realizar el ensayo en transmisión. A continuación se exponen los detalles de estos dos modos de ensayo.

7.2.1. Ensayo en transmisión

El ensayo en transmisión requiere que la fotoluminiscencia emitida por la muestra se produzca por la cara inversa a por la que se excita con la luz láser. En el equipo de caracterización de células solares y obleas de silicio del laboratorio la excitación lumínica se produce desde arriba, por lo que en el ensayo en transmisión la cámara CCD deberá colocarse en la parte inferior del equipo. En la Figura 7.3 se puede ver un esquema del ensayo en transmisión.

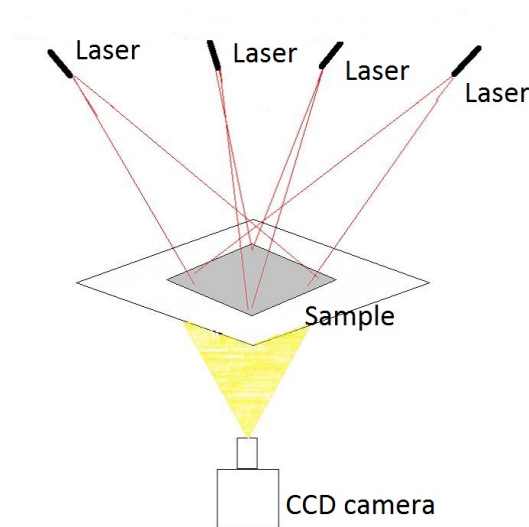


Figura 7.3: Esquema de la disposición de los equipos en el ensayo de fotoluminiscencia en transmisión.

Las obleas de silicio pueden ser caracterizadas mediante el ensayo de fotoluminiscencia en transmisión, ya que al ser excitadas por los láseres emiten luminiscencia tanto por su cara superior como por la inferior, lo que permite tomar la fotografía de la fotoluminiscencia con la cámara situada en la posición inferior del equipo. En cambio las células solares no pueden ser ensayadas mediante este método. Esto es debido a que en su cara inferior se sitúa una lamina metálica, habitualmente de aluminio, que actúa como electrodo positivo y que impide que la luminiscencia emitida por las laminas de silicio pueda apreciarse desde la cara inferior de la célula.

Uno de los problemas que presenta el ensayo de fotoluminiscencia en transmisión, es que la luminiscencia de las muestras, en transmisión es muy pobre. Esto hace que para tomar las imágenes de luminiscencia en transmisión, se necesiten tiempos de exposición mas largos que los necesarios en reflexión. En concreto con la cámara de InGaAs, en transmisión se han realizado los ensayos de fotoluminiscencia con el tiempo máximo e exposición que permite la electrónica de la cámara, que es de un segundo. Con la cámara CCD de silicio, se han realizado los ensayos en transmisión con tiempos de exposición de entre 120 y 300 segundos, dependiendo de la calidad de la imagen requerida en cada caso.

7.2.2. Ensayo en reflexión

El ensayo en reflexión consiste en excitar una muestra con luz en su parte superior y posteriormente tomar imágenes con una cámara CCD colocada en ángulo respecto a la luz de excitación. En la Figura 7.4 se puede ver la disposición del ensayo de reflexión con la cámara colocada en ángulo respecto a la luz emitida por los láseres.

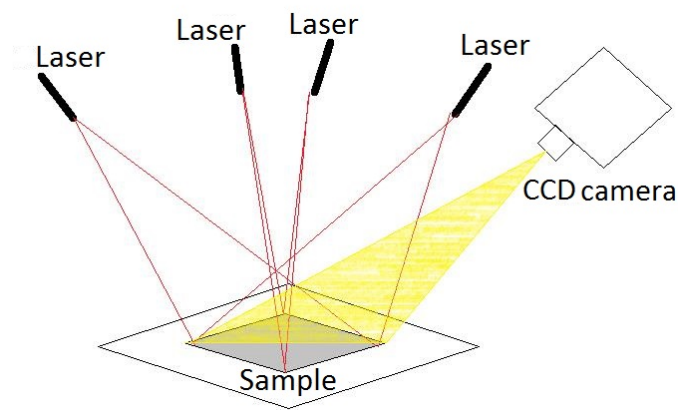


Figura 7.4: Esquema de la disposición de los equipos en el ensayo de fotoluminiscencia en reflexión.

Como se ha expuesto en el apartado anterior, las células solares no pueden ser caracterizadas en transmisión, lo que implica que ha de hacerse en reflexión. En el ensayo de fotoluminiscencia en reflexión la luz de excitación se refleja en la muestra y se mezcla con la luminiscencia de la muestra lo que da lugar a una imagen errónea.

Lo que hace posible realizar este ensayo de forma correcta sobre las células solares, es que estas tienen en su parte superior capas antirreflejantes que permiten que la luz penetre en la célula pero impiden que esta salga, aumentando así su rendimiento final, por lo que la luz de excitación será retenida en la célula y no afectará a la imagen de luminiscencia.

A las obleas de silicio, aun no se les han aplicado estas capas antirreflejantes por lo que al intentar caracterizar estas mediante el ensayo en reflexión, en la imagen se verá la luz de excitación reflejada, cuya señal es mucho más intensa que la de luminiscencia, quedando esta totalmente eclipsada. En la Figura 7.5 se puede ver la luz de excitación reflejada en una oblea de silicio y como eclipsa totalmente la señal de luminiscencia no pudiéndose apreciar esta en la imagen.

7.3. Procedimiento

El procedimiento seguido a la hora de realizar los ensayos variará en función del tipo de muestra que se desea ensayar. No obstante muchos de los pasos a dar para ensayar obleas de silicio o células solares son similares.

A la hora de empezar el ensayo es importante estabilizar la temperatura de la cámara. Cada modelo de cámara tiene una temperatura óptima de trabajo. Para que las cámaras

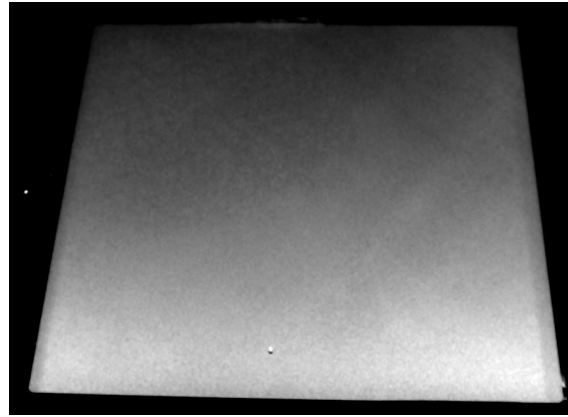


Figura 7.5: Luz de excitación reflejada en una oblea de silicio, eclipsando la luminiscencia de esta.

alcancen esa temperatura, gracias al sistema de ventilación que llevan integrado, en necesario conectar la cámara con anterioridad a hacer las medidas. Los softwares propios de las cámaras (HiPic y CAMWARE) permiten visualizar la temperatura de la cámara en todo momento, pudiendo así saber cuándo esta alcanza la temperatura óptima de funcionamiento.

Para la cámara CCD de silicio la temperatura óptima de trabajo es de 11°C , mientras que para la cámara CCD de InGaAs es de 10°C . Que las cámaras no trabajen en su temperatura óptima puede provocar distorsiones por ruido en la imagen, reduciendo la calidad final de esta.

Una vez que se ha estabilizado la temperatura de la cámara se puede proceder a introducir la muestra en el equipo de medida y comenzar a obtener la imagen de *darkfield* para la posterior corrección. Para obtener esta imagen se debe eliminar cualquier señal lumínica tanto exterior como propia del equipo de medida. El tiempo de exposición con el que se debe tomar la imagen de *darkfield* debe ser igual al que se empleara posteriormente para tomar la imagen de la luminiscencia de la muestra. Dependiendo del tipo de cámara y del tipo de ensayo realizado, se deben emplear distintos tiempos de exposición. Tras experimentar con los distintos tipos de cámara y las distintas muestras se tomó como tiempos de exposición los se pueden ver en el cuadro 7.1.

Para reducir el ruido en las imágenes, es necesario tomar varias imágenes consecutivas

Cámara	Muestra	Tiempo de exposición	Numero de imágenes
silicio	Oblea	3 min	2
silicio	Célula	1 min	4
InGaAs	Oblea	1 seg	50
InGaAs	Célula	150mseg	50

Cuadro 7.1: Tiempos de exposicion empleados en función del tipo de muestra y del tipo de CCD

y posteriormente realizar la media aritmética de estas. Cuanto mayor sea el número de imágenes consecutivas tomadas menos ruido tendrá la imagen final. La tecnología InGaAs debido a los cortos tiempos de exposición que emplea hace posible tomar muchas imágenes y reducir notoriamente el ruido de la imagen final. Los CCD de silicio en cambio, necesitan un tiempo de exposición mucho mayor, haciendo inviable tomar un gran número de imágenes debido a que la duración del ensayo sería excesiva.

Después de tomarse la imagen de *darkfield* se encenderán los láseres, conectándolos a máxima potencia para conseguir la máxima luminiscencia posible. Una vez encendidos se puede ya tomar la imagen de luminiscencia respetando el tiempo de exposición empleado en la captura del *darkfield*.

7.4. Fiabilidad y seguridad

Fiabilidad

A la hora de analizar los resultados del ensayo y comparar las distintas muestras ensayadas, se debe tener seguridad en que el procedimiento seguido a la hora de ensayar las distintas muestras ha sido el mismo.

La colocación de las muestras en la bandejas de pruebas es uno de los aspectos clave. Puesto que es necesario hacer una comparación entre imágenes, es también necesario colocar todas las muestras orientadas de la misma manera. Para esto es necesario realizar una serie de marcas en las muestras que permita saber cuál es la orientación correcta. Debido a la no uniformidad de la luz de excitación así como a la gran sensibilidad de los sensores CCD, un cambio de posición de la muestra variara el nivel de luminiscencia que se mida posteriormente en la imagen.

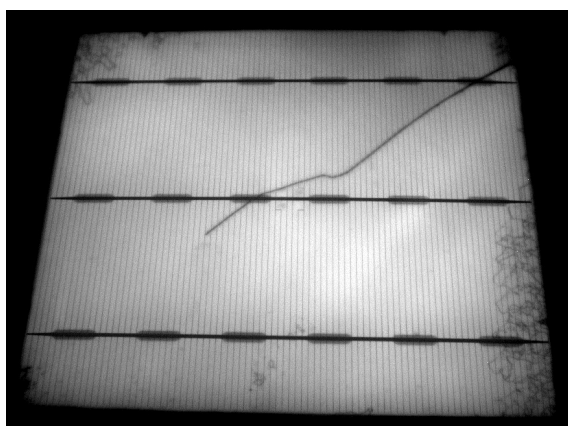


Figura 7.6: Célula fotovoltaica fracturada debido a una mala manipulación de la misma

Otro aspecto importante en la fiabilidad de los ensayos es la óptima conservación de las muestras. Tanto las obleas de silicio como las células solares son materiales muy frágiles, para poder tomar imágenes de las mismas muestras con distintas cámaras y obtener resultados comparables será necesario una óptima conservación de las muestras así como

tomar las medidas de seguridad necesarias a la hora de manipularlas para no contaminar las muestras con huellas, manchas, etc. En la Figura 7.6 se puede ver una célula solar fotovoltaica con una fractura debido a su mala manipulación.

Seguridad

Los equipos empleados conllevan cierto riesgo en su manejo y manipulación. En concreto los láseres empleados son láseres de diodo de una elevada potencia (20 vatios cada láser) dañinos para los ojos. Como medida de seguridad siempre que se trabaja con los láseres es necesario el uso de unas gafas protectoras capaces de filtrar la luz de 808nm de longitud de onda de los láseres, para evitar posibles daños en la retina.

Para evitar la contaminación de las muestras ensayadas se deben usar guantes de látex para la manipulación de las mismas, evitando así un posible deterioro del material. En la Figura 7.7 se pueden ver los equipos de seguridad empleados.



Figura 7.7: Equipos de seguridad empleados en la realización de los ensayos de fotoluminiscencia



Capítulo 8

Tratamiento de las imágenes adquiridas

Una vez obtenidas las imágenes, éstas requieren de un proceso de postprocesado en función de la información que se pretenda obtener de ellas. Para esta labor se ha dispuesto de los softwares *imageJ* y *Fiji*.

ImageJ es un software de procesamiento de imágenes desarrollado en java y de código abierto. Esto último permite a los usuarios la creación de pluggins y macros personalizados que resuelven muchos problemas a la hora del tratamiento y análisis de imágenes.

Fiji es un software de procesamiento de imágenes de código abierto basado en *ImageJ*. El propósito principal de *Fiji* es proporcionar una distribución de *imageJ* con muchos pluggins incrustados. *Fiji* cuenta con un sistema de actualización integrado y tiene como objetivo proporcionar a los usuarios una estructura coherente de menú, una amplia documentación en forma de descripciones detalladas de algoritmos y tutoriales, y la capacidad de evitar la necesidad de instalar varios componentes de diferentes fuentes. Estos programas son muy extensos, y poseen pluggins para trabajar en diversos campos como la biología o la medicina, entre otros. A continuación se exponen solamente las herramientas que se han empleado de este software. En la Figura 8.1 se puede ver una imagen de la ventana principal del software *Fiji*.

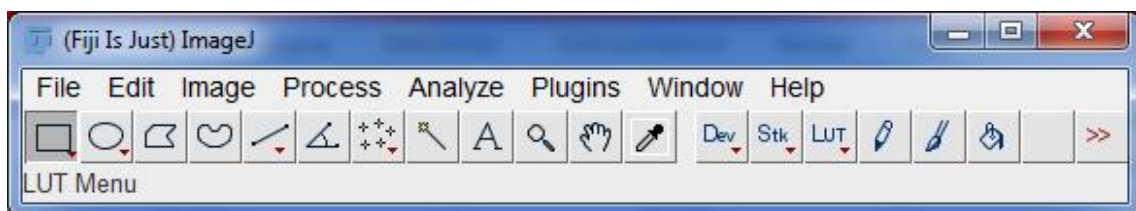


Figura 8.1: Ventana principal de control del software para tratamiento de imágenes *Fiji*.

8.1. Reducción del ruido y ajuste del contraste

Ajuste del contraste

Las imágenes adquiridas con las cámaras CCD se guardan en formato .tif, este formato es un formato de imagen sin comprimir por lo que es necesario ajustar el contraste y el brillo de las imágenes para poder ver la franja de luz correspondiente a la célula obviando todo lo demás, como pueden ser: esquinas, bordes, salientes, etc.

Desde el menú *Image* ⇒ *Adjust* ⇒ *Brightness/Contrast* accedemos a una ventana que permite modificar el brillo, el contraste y el nivel de luz máximo y mínimo que se visualizara en la imagen. En este menú se muestra un pequeño histograma que representa el numero de pixeles en función de su intensidad de luz. En la Figura 8.2 se puede ver una imagen de este menú.

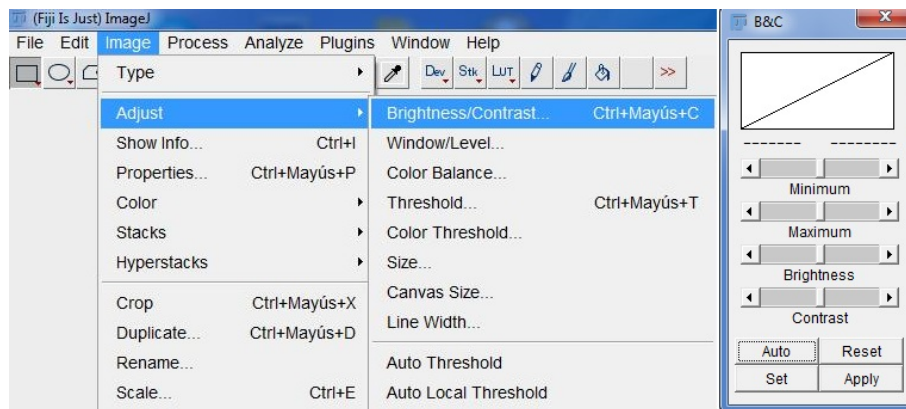


Figura 8.2: Menú de ajuste del brillo y el contraste en el software *Fiji*.

La opción *auto* ajusta automáticamente los valores de luz máximo y mínimo para que coincidan con los valores de luz de la imagen. No obstante es recomendable ajustar estos valores de forma manual para poder obviar todos aquellos pixeles con un bajo nivel de luz que no aporten una información relevante (bordes y partes externas a la muestra), estos pixeles se corresponde con los de la parte izquierda del histograma del menú *Brightness/Contrast*, ya que son una gran cantidad de puntos con un bajo nivel de luz. En la Figura 8.3 se puede ver una comparación entre una imagen con el contraste y el brillo ajustado en modo automático y otra con el contraste y el brillo ajustado de forma manual, se puede observar como en la imagen ajustada de forma manual el contraste entre zonas claras y zonas oscuras es mucho mas elevado y como esto se ve reflejado en el histograma de pixeles del menú *Brightness/Contrast*.

Reducción del ruido

El ruido digital es la variación aleatoria del brillo o el color en las imágenes digitales producido por la cámara. En una imagen digital existen muchos tipos de ruido como los

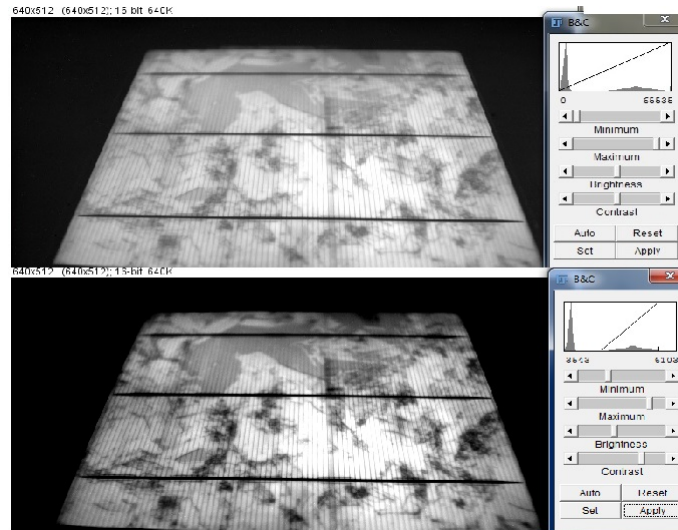


Figura 8.3: Arriba: imagen de una célula solar con el brillo y el contraste ajustados de forma automática. Abajo: imagen de una célula solar con el brillo y el contraste ajustados de forma manual.

antes mencionados, ruido térmico, fotonico y de lectura, pero existe otro tipo de ruido, que se da por el desgaste del sensor CCD es el ruido impulsional.

En el tipo de ruido conocido como ruido impulsional, o efecto sal y pimienta, los píxeles de la imagen afectados son muy diferentes en color o intensidad a los píxeles circundantes. Generalmente este tipo de ruido afectará a una pequeña cantidad de píxeles de la imagen. En la imagen se podrán observar puntos blancos sobre puntos negros o puntos negros sobre puntos blancos. Algunos defectos que contribuyen a este tipo de ruido son las manchas de polvo dentro de la óptica de la cámara, o un CCD con pixeles defectuosos que realizará una captura errónea.

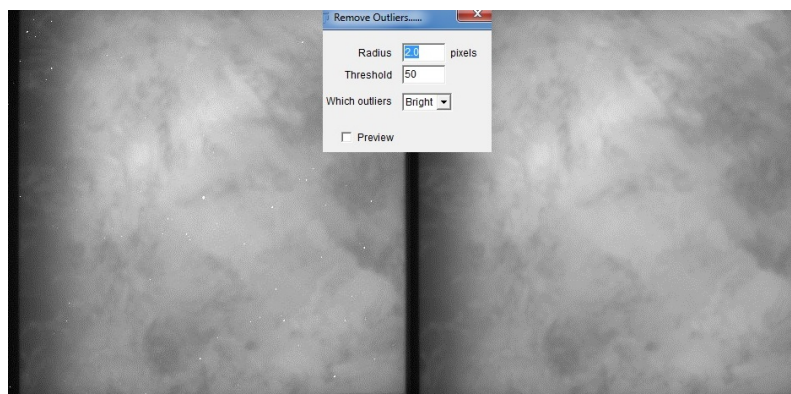


Figura 8.4: A la izquierda se puede apreciar una imagen de una oblea de silicio afectada por el ruido impulsional. A la derecha se muestra la misma imagen corregida. En el centro se muestra una captura de la ventana del menú *Remove outliers*.

Para solucionar este tipo de ruido debe hacerse una corrección de los *hot pixels* o puntos calientes que es como se denomina a aquellos píxeles a los que les afecta el ruido impulsional. Usando el software *ImageJ* esta corrección se hace desde el menú *Process* \Rightarrow *Noise* \Rightarrow *Remove outliers*, eligiendo posteriormente el área de píxeles a evaluar alrededor de los *hot pixels* (*Radius*), el nivel de desviación de la media de luz para considerar un pixel como *hot pixel* (*Threshold*) y si los *hot pixels* son puntos demasiado claros o puntos demasiado oscuros (*Which Outliers: Bright/Dark*). En la Figura 8.4 se puede ver el resultado de la corrección de *hot pixels* así como una imagen del menú *Remove outliers*.

8.2. Cambio de perspectiva

Para realizar la toma de imágenes de fotoluminiscencia en las células solares, se coloca la cámara en su posición superior y en ángulo con la muestra para evitar interferir en los láseres empleados como fuente de excitación, es por esto que se obtienen las imágenes en perspectiva. Para corregir esto, *Fiji* posee un plugin llamado *interactive pererspective* que permite corregir la perspectiva de las imágenes. Para agilizar el proceso de corrección de la perspectiva, se ha programado una macro que automatiza el proceso. Esta macro permite elegir las esquinas de la célula y posteriormente reposicionarlas hasta conseguir que la imagen quede totalmente rectangular. En la Figura 8.5 se puede ver una célula antes y después del cambio de perspectiva.

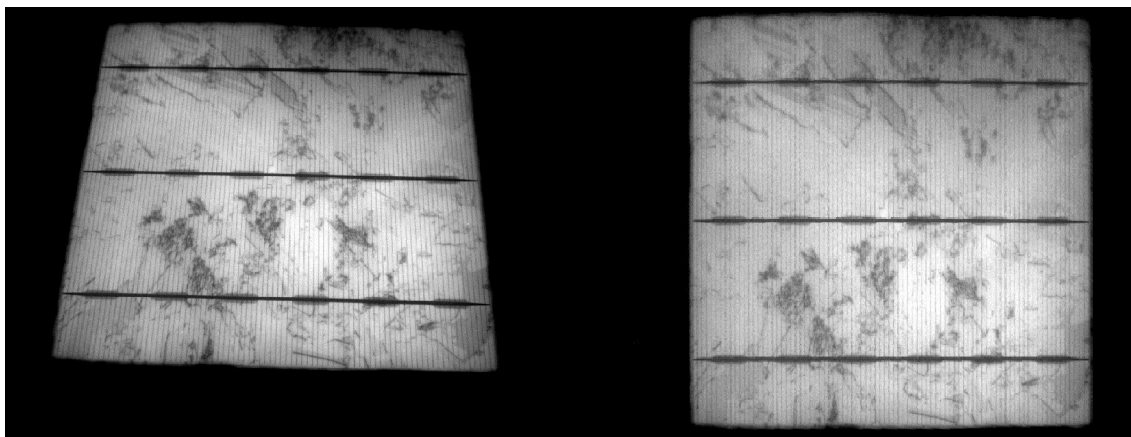


Figura 8.5: Cambio de perspectiva realizado sobre una imagen de luminiscencia de una célula solar.

Una vez se ha aplicado esta corrección la imagen original se ve modificada por lo que, a la hora de obtener resultados cuantitativos de las imágenes, estos se tomarán de las imágenes en perspectiva y no de las imágenes corregidas.

8.3. Aplicación de LUTs

Las *Look Up Tables* o LUTs son, en el tratamiento de imágenes, la aplicación de una gama de colores concreta a los distintos niveles de luz de una imagen, consiguiendo así

separar por colores los distintos niveles de iluminación presentes en cada pixel de la imagen. En la Figura 8.6 se pueden ver algunas de las LUT aplicables con el software *Fiji*. La aplicación de LUTs a las imágenes de luminiscencia permite hacer un examen visual de las muestras de una forma mucho mas objetiva. Esta forma de visualización permitirá detectar mas fácilmente zonas con determinados defectos cuya cuantificación ha de hacerse de forma visual, como roturas en la rejilla de contactos o las áreas de tiempo de vida reducido. Existen multitud de LUTs predeterminadas. Cada una de ellas sera optima para una aplicación concreta, por lo que la forma ideal de trabajar con este tipo de tratamiento de imagen es crear una LUT propia que optimice la visualización de las imágenes de fotoluminiscencia. Para ello el software *Fiji* posee un editor de LUTs que nos permitirá elegir los colores que mas se ajusten a nuestras necesidades.

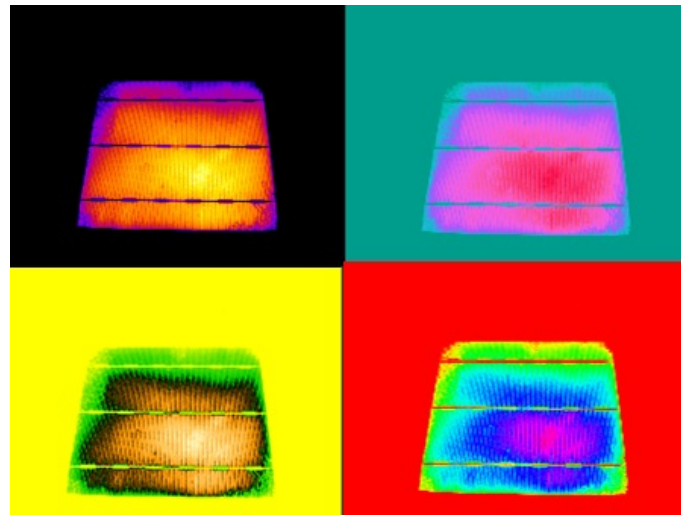


Figura 8.6: Diferentes *Look Up Tables* aplicadas sobre la imagen de fotoluminiscencia de una célula solar.

8.4. Corrección de la corriente de oscuridad

Como se ha explicado previamente la corriente de oscuridad es el nivel de luz que la cámara es capaz de captar en condiciones de oscuridad debido principalmente a el ruido térmico que genera, dependiendo de la temperatura, la recombinación de cierto numero de electrones. Cuanto mayor es la temperatura, mayor es el numero de electrones recombinados por efecto térmico y por tanto mayor es la corriente de oscuridad en el sensor CCD. Es por esto que los mas avanzados sensores CCD van refrigerados mediante agua, aire forzado o TECs (Thermo Electric Collers) para conseguir muy bajas temperaturas de operación. Para corregir este defecto es necesario tomar una imagen de oscuridad o *darkfield*, para posteriormente realizar la corrección sobre la imagen de fotoluminiscencia de la muestra. En la Figura 8.7 se puede ver una imagen de *darkfield* de una oblea de silicio monocristalina.



Figura 8.7: *Darkfield* de una oblea de silicio monocristalina.

La luz que recoja la imagen de oscuridad o *darkfield*, no procede de la luminiscencia de la célula, por lo que se toma como una perturbación de la imagen resultante del ensayo. Es por esto que es necesario una corrección de esta corriente de oscuridad. Para realizar esta corrección *ImageJ* posee una herramienta llamada *image calculator* que permite hacer operaciones matemáticas entre imágenes. En este caso es necesario sustraer a la imagen de la muestra su imagen de *darkfield*.

Los resultados obtenidos de esta corrección son mas significativos en imágenes con niveles de luz bajos (oblas de silicio) ya que en imágenes con altos niveles de luz (células solares) la corriente de oscuridad apenas es significativa.

8.5. Corrección de la no uniformidad en la fuente de luz

Para realizar los ensayos de fotoluminiscencia la muestra se excita con 4 láseres de longitud de onda de 808nm. Cada uno de estos láseres incide sobre una esquina de la célula. Esto y 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. Esta no uniformidad de la incidencia de la luz de los láseres sobre la muestra genera que en partes de la célula donde hay un mayor nivel de luminosidad se recombinen más electrones produciendo así un mayor número de fotones, o lo que es lo mismo que esas partes emitan un mayor nivel de luminiscencia. Es por esto que es necesario corregir ese patrón de no uniformidad de la luz que incide sobre la muestra. Para ello se usa una corrección mediante una imagen de *flatfield* pero no correspondiente al sensor CCD como se expone en el capítulo 3, sino correspondiente a la iluminación de los láseres sobre la zona del equipo donde se colocan las muestras a ensayar.

Para obtener estas imágenes de *flatfield*, es necesario iluminar con los láseres una muestra

que no emita luminiscencia, o que en todo caso emita luminiscencia de forma uniforme. Los distintos materiales probados que no emitían luminiscencia (cristal y metal) causaban el problema de que al reflejar casi la totalidad de la luz de los láseres, la imagen resultante quedaba distorsionada. Debido a esto se ha usado como *flatfield* la imagen de fotoluminiscencia captada en transmisión de una oblea de silicio monocristalino, que al estar formada por un único cristal de silicio presenta una luminiscencia totalmente uniforme.

Una vez obtenido el *flatfield* emitido por los láseres, se deben normalizar los valores de luz presentes en esta imagen. Para realizar esta normalización se ha empleado el software *Matlab*. Como se explico anteriormente cada pixel lleva asociado un numero entero que determina el numero de electrones captado por el sensor CCD en ese pixel. El que esos valores sean números enteros impide realizar la normalización con la precisión requerida, por eso es necesario cambiar el formato de esos números del formato Uint8 o Uint16, propio de la imágenes de 8 o 16 bits, por el formato Double que admite valores con una precisión de 15 a 17 decimales.

Después de normalizar la imagen de *flatfield* se debe dividir la imagen original, a la que ya se le ha sustraído la corriente de oscuridad, entre la imagen de *flatfield* normalizada. El resultado será que las zonas oscuras aumentarían sus niveles de luz en proporción a la imagen de *flatfield* quedando todo el área de la muestra con un nivel de luz equitativo e independiente de la no uniformidad de la excitación de los láseres. En la Figura 8.8 se puede ver una muestra de oblea de silicio con y sin corrección de *flatfield*.

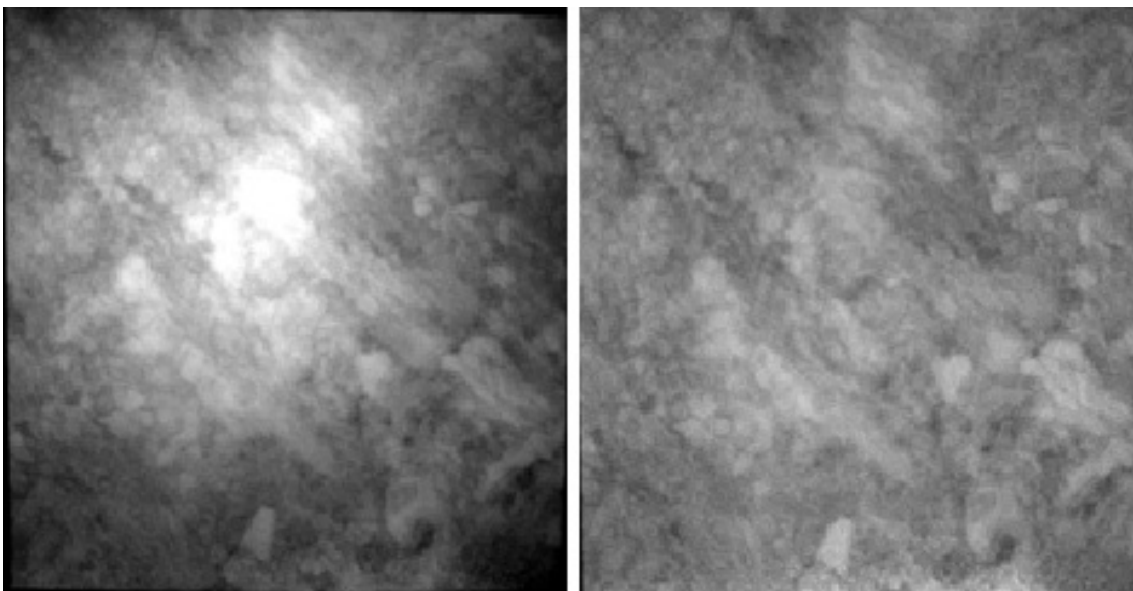


Figura 8.8: Resultado de la corrección de *flatfield* en una oblea de silicio monocristalina.



Capítulo 9

Muestras analizadas

En relación al proyecto: "Caracterización óptica de obleas y células tándem de silicio de bajo coste", que lleva a cabo el grupo GDS optronlab de la UVA con la empresa Silicio Ferrosolar, se ha dispuesto para su caracterización de tres series de células solares multicristalinas de distintos rendimientos. Estas muestras son células en las que ya se ha realizado la unión p-n y se han añadido los electrodos positivo y negativo, están totalmente preparadas para integrarse en un panel solar. Se han clasificado las muestras en tres series según el rendimiento que tuviesen:

- Serie A: 17,0 - 17,4 %
- Serie B: 16,8 - 17,0 %
- Serie C: 16,4 - 16,6 %

A su vez, se han numerado las células de cada serie, en relación al orden en que fueron enviadas. Además de las células, desde la empresa proveedora se han proporcionado los datos de rendimiento eléctrico de las células así como otros valores como la corriente de cortocircuito (I_{sc}), la tensión en vacío (U_{oc}) o el factor de forma (FF) de cada célula. En las tablas 9.1 y 9.2. se muestran estos datos.

Debido a que de la serie A no se recibieron datos sobre el rendimiento de cada célula, se enviaron las muestras al Instituto de la Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid, donde se determinó la eficiencia y el resto de parámetros eléctricos de las células pertenecientes a dicha serie obteniéndose los datos que se pueden ver en tabla 9.3.

Para la caracterización de estas células se usaron procedimientos estándar, así como las denominadas condiciones normales de operación (CON) en la caracterización de células solares fotovoltaicas.

No obstante, debido a que los datos de rendimientos eléctricos de las series B y C han sido medidos en distintos laboratorios que los de la serie A, se evitara hacer comparaciones globales entre ellos, para evitar así posibles fallos en el análisis de los resultados debido a la no homogeneidad de las medidas.

Además de las células solares, también se han caracterizado por fotoluminiscencia distintos tipos de obleas de silicio. Mas en concreto se han estudiado mediante el ensayo de fotoluminiscencia en transmisión obleas de silicio de diferentes resistividades, yendo desde

Numero	Uoc (V)	Isc (A)	FF	Rendimiento
B1	0,623202341	8,46326268	77,6237841	16,82335 %
B2	0,632954244	8,29249501	78,7485313	16,98442 %
B3	0,633964218	8,27609978	78,8113291	16,99143 %
B4	0,633204177	8,27357262	78,7938235	16,96211 %
B5	0,633662821	8,29151425	78,6957602	16,99003 %
B6	0,634446088	8,28888675	78,6412405	16,99386 %
B7	0,626226924	8,36649628	78,2452114	16,84550 %
B8	0,632930351	8,27509269	78,7039678	16,93855 %
B9	0,633584071	8,28903436	78,7283108	16,98986 %
B10	0,633342222	8,30338621	78,6417001	16,99407 %
B11	0,633364590	8,28310471	78,7492981	16,97635 %

Cuadro 9.1: Parametros característicos de las células de la serie B

Numero	Uoc (V)	Isc(A)	FF	Rendimiento
C1	0,62101984	8,25819842	78,1431313	16,46768 %
C2	0,6200149	8,38573167	77,1415379	16,48095 %
C3	0,62135726	8,29651857	77,4924548	16,41525 %
C4	0,62174877	8,34557371	77,5856144	16,54258 %
C5	0,62058371	8,34723851	77,1164292	16,41500 %
C6	0,61890599	8,46009076	76,765693	16,51649 %
C7	0,62477212	8,32202861	77,5446248	16,56736 %
C8	0,61953489	8,26169109	78,1330014	16,43312 %
C9	0,6204854	8,21782457	78,4021916	16,42735 %
C10	0,6203312	8,22412655	78,416174	16,43879 %

Cuadro 9.2: Parametros característicos de las células de la serie C

CAPÍTULO 9. MUESTRAS ANALIZADAS

Numero	Voc (V)	Isc (A)	Fill Factor	Efficiency
A1	0.62891151	8.05341617	75.5585	17.01 %
A2	0.62838876	8.14425014	75.6079	17.03 %
A3	0.63054775	8.14392	76.7821	17.35 %
A4	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
A5	0.62863297	8.13354832	76.7151	17.26 %
A6	0.624634	8.12190232	75.7734	16.92 %
A7	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
A8	0.6250021	8.10970828	78.431	17.49 %
A9	0.62449433	8.1076147	77.0688	17.17 %

Cuadro 9.3: Parámetros característicos de las células de la serie A

la baja resistividad hasta la muy alta resistividad. La resistividad es la resistencia eléctrica por unidad de longitud de un determinado material, su valor variara en función a los parámetros característicos de la oblea de silicio (dopado, tipo de crecimiento, etc) y en función de la temperatura, aumentando a la par que lo hace esta [9]. En la tabla 9.4 se puede ver las características de estas muestras. Otra forma de clasificar las obleas de silicio

	Crecimiento	Resistividad (Ω/cm)	Crecedor
Baja Resistividad	C0106064	0.4-0.5	DC Wafers
Media Resistividad	D0507004	0.7-0.8	DC Wafers
Alta Resistividad	D0507004	1.5-3	DC Wafers
Muy Alta Resistividad	D0404C02	>3	DC Wafers

Cuadro 9.4: Clasificación de las obleas de silicio estudiadas segun su Resistividad.

es su grado de cristalinidad. La cristalinidad se corresponde con el numero de granos o cristales que forman la oblea y depende de el metodo de enfriamiento empleado a la hora de crear los lingotes de silicio [9]. Según este criterio se han estudiado muestras de silicio monocristalino (mono), cuasimonocristalino (monolike) y multicristalino (multi). En la tabla 9.5 se pueden ver las características de las obleas estudiadas.

En la tabla 9.5 se clasifican las obleas de silicio monocristalino (mono) y cuasimonocristalino (monolike) según su clase. Esta clasificación corresponde con la situación de la oblea en el lingote de silicio del que son cortadas, siendo en el caso de las monocristalinas las *Top 2 y 3* de la parte superior del bloque de silicio y las *Top 11 y 12* de la parte inferior. En el caso de las cuasimonocristalinas (monolike) el termino *Prime 1* corresponde con las obleas de mejor calidad del bloque de silicio mientras que el termino *Prime 3* se refiere a una calidad inferior.

	Crecimiento	Resistividad (Ω/cm)	Clase	Crecedor
Monolike	09M055	1.2-1.6	Prime 1	Pillar
Monolike	09M055	1.2-1.6	Prime 3	Pillar
Mono	23p802	-	Top 2 y 3	Pillar
Mono	23p802	-	Top 11 y 12	Pillar
Multi	09M075	1-1.2	-	Pillar

Cuadro 9.5: Clasificación de las obleas de silicio estudiadas segun su Cristalinidad.



Capítulo 10

Análisis cualitativo de las imágenes de fotoluminiscencia

Los procedimientos explicados en el capítulo 7 para llevar a cabo el ensayo de fotoluminiscencia sobre células solares fotovoltaicas o obleas de silicio, dan como resultado una imagen sin comprimir en formato TIFF (Tagged Image File Format = Formato de Archivo de Imagen Etiquetada). Este formato almacena las imágenes con una excelente calidad pudiendo tener una profundidad de color entre 1 y 32 bits, lo que lo hace ideal para almacenar archivos originales, pero con el inconveniente de que produce archivos muy grandes.

En el caso de las cámaras con las que se ha trabajado, la cámara CCD de InGaAs C12741-03 del fabricante Hamamatsu ofrece imágenes con una profundidad de color de 14 bits, mientras que la de silicio 1300 solar del fabricante Pco proporciona imágenes con profundidad de color de 12 bits. Habitualmente los programas de tratamiento de imágenes trabajan en 8, 16 o 32 bits así que la cámara genera un archivo de una cantidad determinada de profundidad de color (12 bits o 14 bits) y el software falsea el resto de información hasta llegar a la unidad inmediata superior, lo que permite que los programas puedan abrir y manejar la imagen como si contuviera 16 bits de información. Por lo tanto al abrir las imágenes obtenidas del ensayo de fotoluminiscencia con el software *fiji*, se trabajara con imágenes con profundidad de color de 16 bits.

Una de las formas de evaluar una imagen resultado de un ensayo de fotoluminiscencia es un estudio cualitativo. Para poder llevar a cabo este estudio cualitativo habrá de acentuar los defectos frente a las zonas normales de la muestra mediante softwares de tratamiento de imágenes. La principal característica de las zonas con defectos en una célula solar fotovoltaica o en una oblea de silicio es que en la mismas condiciones de excitación emiten una menor señal de luminiscencia que las zonas sin defectos. Por lo que el tratamiento de imágenes deberá ser capaz de separar visualmente las zonas con defectos (zonas oscuras) de las zonas sin defectos (zonas mas claras).

Para llevar a cabo esa separación visual de las zonas oscuras de las zonas de más luminiscencia, habrán de aplicarse las medidas de tratamiento de imagen expuestas en el capítulo 8. La reducción del ruido digital permitirá mejorar la resolución de la imagen, por lo que se distinguirá mejor la frontera entre la zona de defectos y la zona de funcionamiento normal. El ajuste manual del brillo y el contraste permitirá asignar los valores mínimos de luz a

las zonas de defectos y no a las zonas más oscuras como pueden ser los bordes o la parte del equipo de medida que se vea en la imagen.

En el caso de muestras ensayadas en reflexión (fotoluminiscencia en células solares fotovoltaicas), será necesario aplicar también un cambio de perspectiva que permita visualizar una imagen con el tamaño real de la célula.

10.1. Análisis cualitativo de la fotoluminiscencia en células solares

Como se expuso en el capítulo 7, el ensayo de fotoluminiscencia en células solares ha de hacerse en reflexión, con la cámara situada en la posición superior del equipo. Las imágenes de fotoluminiscencia en células solares permiten determinar ciertas características de las de estas, así como detectar algunos posibles defectos presentes en dichas células. Mas concretamente, en imágenes de fotoluminiscencia han de poder detectarse los siguientes defectos [13]:

- **Micro-grietas:** Las grietas en las células solares son un verdadero problema para los módulos fotovoltaicos ya que son difíciles de evitar y, hasta el momento, es básicamente imposible cuantificar su impacto en la eficiencia del módulo durante su vida útil. En concreto, la presencia de micro grietas puede tener un efecto marginal sobre la potencia de un módulo, siempre y cuando las diferentes partes de las células están todavía conectadas eléctricamente. Sin embargo, en los módulos de cierta edad, debido a tensiones térmicas y mecánicas pueden aparecer micro grietas. La aparición de varias micro grietas en la misma zona puede llevar a una rotura total de la célula, lo que generara que partes de la célula se queden inactivas. En la Figura 10.1 se pueden apreciar distintos tipos de micro grietas.

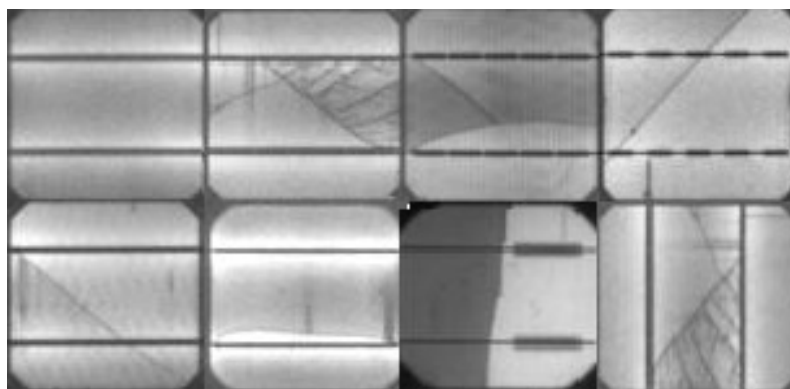


Figura 10.1: Diferentes tipos de micro roturas, de izquierda a derecha: sin rotura, dendrítica, varias direcciones, 45 grados, -45 grados, paralela al embarrado, perpendicular al embarrado, dendrítica 2.

- **Calidad del material: reducción de la tensión de circuito abierto:** La tensión de circuito abierto es la tensión a la que la corriente de difusión en directa es exac-

tamente igual a la corriente de cortocircuito. Esta corriente de difusión en directa crece en función de la cantidad de electrones que se recombinan en la unión p-n, y a medida que crece hace disminuir la tensión en circuito abierto.

El parámetro del material que da la recombinación en polarización directa es la corriente de saturación del diodo. La recombinación, a su vez es controlada por el número de portadores en el borde de la unión, la presencia de fuentes de recombinación localizadas dentro de la longitud de difusión de la unión y la longitud de difusión en el material.

Una longitud de difusión baja significa que los portadores minoritarios desaparecen desde el borde de la unión con rapidez debido a la recombinación lo que permite que haya más caminos de cruce para los portadores minoritarios y por lo tanto una mayor corriente de difusión y una menor tensión de circuito abierto.

La longitud de difusión depende del tipo de material, del proceso de transformación de la oblea de silicio y del dopado. Un alto dopado reduce la longitud de difusión por lo que se antoja necesario buscar un equilibrio entre el mantenimiento de una alta longitud de difusión y la obtención de una alta tensión de circuito abierto.

- **Baja resistencia en paralelo:** Defectos intrínsecos de la célula o inducidos mecánicamente por agentes externos, pueden generar derivaciones en el circuito de la célula lo que provoca la reducción de la resistencia en paralelo global de la célula que conlleva una tensión de circuito abierto reducida.
- **Degradación inducida por potencial:** La degradación inducida por potencial (PID por la expresión inglesa potential induced degradation) es una degradación en paneles fotovoltaicos causante de pérdida de rendimiento que se debe a la presencia de corrientes parásitas en los mismos. Su efecto potencial puede reducir la potencia del equipo hasta en un 30 %.

La causa de estas corrientes se debe a la presencia de diferencias de potencial entre el módulo y tierra. En la mayoría de sistemas fotovoltaicos sin puesta a tierra, los módulos tienen un voltaje no nulo que genera este efecto, si bien es más frecuente en voltajes negativos, especialmente cuando se dan condiciones de altos voltajes, alta humedad ambiental o elevadas temperaturas.

El efecto puede ser completamente prevenido si el inversor presenta la opción de poner a tierra el polo positivo o negativo. La elección de cuál aterrizar debe ser tomada de acuerdo a la tecnología de los módulos y del tipo de inversor.

En la Figura 10.2 se puede ver una imagen corregida apta para detectar defectos mediante un estudio cualitativo a la que se le ha aplicado una LUT que va del amarillo al negro en función de la luminiscencia. La LUT aplicada variara en función de lo que se pretenda apreciar en la imagen, en este caso se ha elegido una LUT amarilla para zonas de alta luminiscencia y negra para zonas de baja luminiscencia que quedaran muy contrastadas aun siendo estas muy pequeñas o finas, como se puede apreciar en la imagen.

En la Figura 10.2 también se han localizado algunos de los defectos expuestos anteriormente como microgrietas o la degradación inducida por potencial. En la muestra se pueden apreciar más defectos de los que se han señalado ya que solo se pretende exponer un ejemplo de los tipos de defectos visibles en la imagen de fotoluminiscencia.

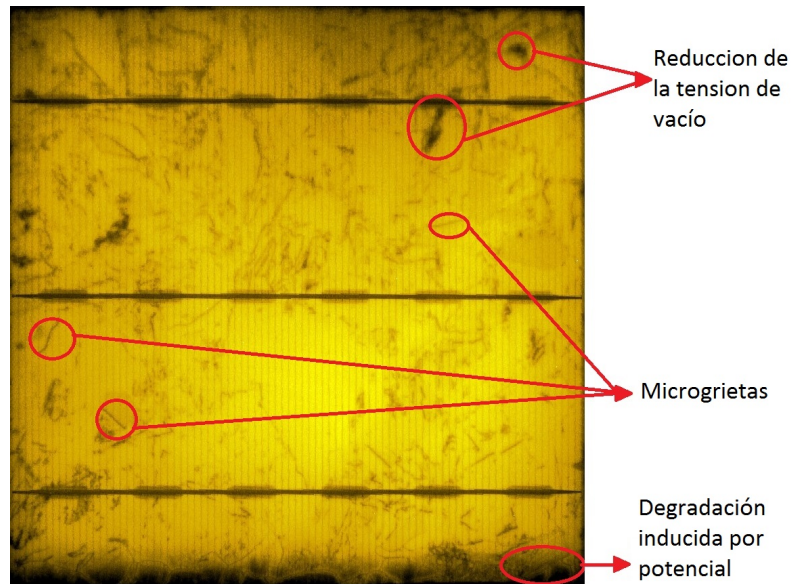


Figura 10.2: Imagen de la fotoluminiscencia en la célula solar numero 6 de la serie B, una vez aplicadas todas las correcciones.

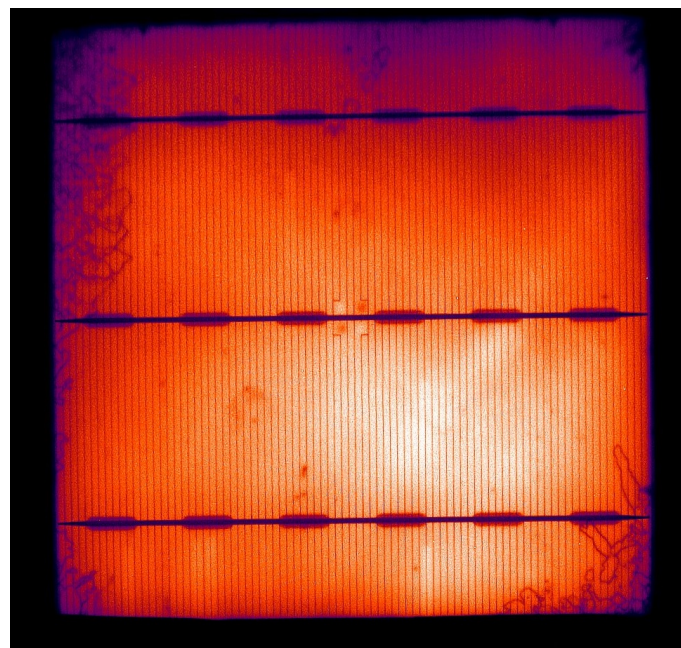


Figura 10.3: Resultado del ensayo de luminiscencia y el tratamiento de imágenes en una célula de la serie A.

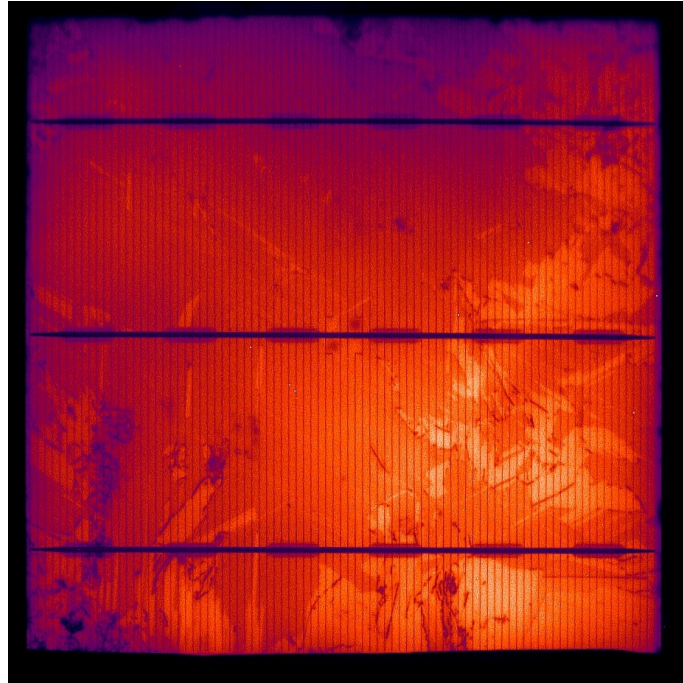


Figura 10.4: Resultado del ensayo de luminiscencia y el tratamiento de imágenes en una célula de la serie B.

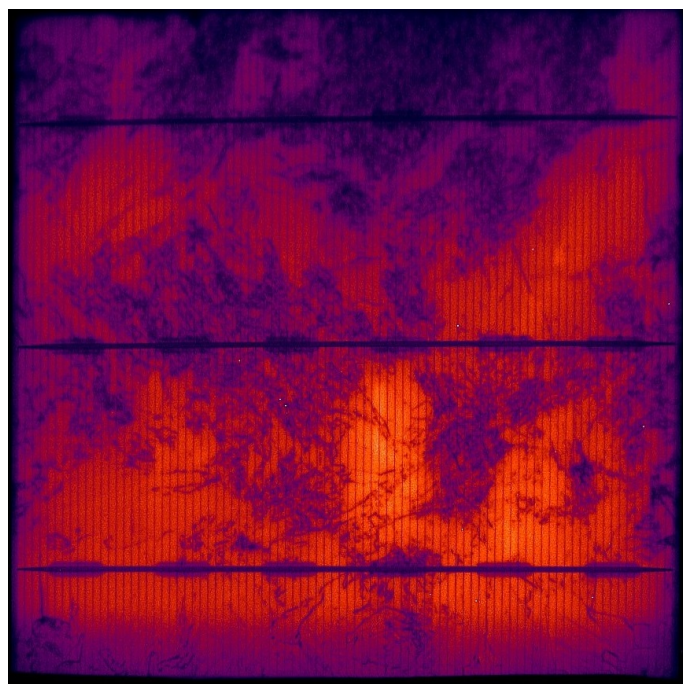


Figura 10.5: Resultado del ensayo de luminiscencia y el tratamiento de imágenes en una célula de la serie C.

En el estudio cualitativo de las imágenes de luminiscencia se puede apreciar como el rendimiento de las células solares esta relacionado con la presencia de zonas oscuras en estas imágenes. Para ver esto, las Figuras 10.3, 10.4, 10.5 exponen la imagen resultado final del ensayo de fotoluminiscencia de una célula de cada serie de las que se han ensayado, y en las que se puede apreciar como las imágenes correspondientes a células de menor rendimiento tienen mas zonas oscuras que las imágenes correspondientes a células de mayor rendimiento. Esto induce a pensar que puede haber una relación directa entre el rendimiento eléctrico de una célula solar y el nivel de luminiscencia emitido por esta, razón por la cual, en el Capitulo 11 se ha realizado un análisis cuantitativo de las imágenes de luminiscencia.

10.2. Análisis cualitativo de la fotoluminiscencia en obleas de silicio

10.2.1. Obleas monocristalinas

Las obleas monocristalinas presentan un grano único, con unas características uniformes, por lo que la luminiscencia deberá ser uniforme en toda la oblea. No obstante en los ensayos realizados sobre este tipo de muestras se aprecia como la luminiscencia no es uniforme, sino que aparecen distintos patrones luminosos en el área de la oblea. En la Figura 10.6 se muestra la imagen de luminiscencia de una oblea monocristalina en la que se puede apreciar la no homogeneidad de la luz.

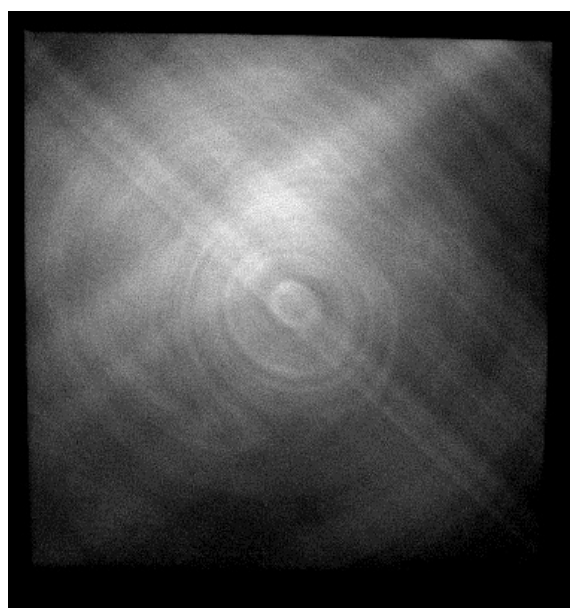


Figura 10.6: Fotoluminiscencia de una oblea de silicio monocristalino.

Las zonas con una intensidad de luminiscencia mayor son debidas a la no homogeneidad de la luz de excitación. Debido a que uno de los 4 láseres es defectuoso, una zona de la muestra queda mas iluminada que el resto. Además, se observan patrones de luz en forma de linea recta que también son causados por la excitación, ya que los láseres del equipo emiten luz de forma lineal y no planar. Para corregir estos patrones habría que sustituir los láseres averiados, y conseguir una focalizacion uniforme de la muestra mediante algún tipo de lente que uniformice la luz de excitación [6].

Los patrones de luz circulares que se aprecian en la Figura 10.6, son causados por la óptica de la cámara y por como esta deja pasar cierta cantidad de luz y retiene otra parte.

La fotoluminiscencia en obleas monocristalinas no aporta resultados interesantes en cuanto a la caracterización de la muestra se refiere, en cambio ofrece la posibilidad de caracterizar el sistema de excitación lumínica del equipo del laboratorio y comprobar como afecta la óptica de la cámara a la imagen final de luminiscencia. Estas imágenes de fotoluminiscencia en obleas de silicio monocristalinas se han empleado en el tratamiento de imágenes de luminiscencia de otros tipos de muestras como *flatfield* para la corrección de la no uniformidad de la luz de excitación como se ha expuesto en el Capitulo 8.

10.2.2. Multicristalinas

Las obleas multicristalinas, en su fabricación han sido enfriadas de manera artificial, acelerando su proceso natural, de esta manera, el silicio cuando se enfría se fragmenta, quedando cristales separados unos de otros. La existencia de múltiples cristales en la oblea genera que las propiedades de la célula no sean tan homogéneas como en el caso de las obleas monocristalinas. Factores como el borde de grano y la distinta dirección de crecimiento de cada cristal, hacen que la eficiencia de las células solares elaboradas con obleas multicristalinas sean menores que las elaboradas con obleas monocristalinas.

La simplicidad en el proceso de fabricación así como su reducido coste, hacen que este material, pese al menor rendimiento que presenta frente a el silicio monocristalino, sea el que copa el mercado siendo el material mas rentable económicamente. En la Figura 10.7 se puede ver la imagen de fotoluminiscencia de una oblea de silicio multicristalina. En este caso, las zonas mas claras o mas oscuras dependen tanto de los defectos presentes en cada cristal, como de sus diferentes características, que provocaran que en cada se produzca mayor o menor numero de recombinaciones y, por tanto, que el cristal emita mas o menos luminiscencia.

10.2.3. Cuasimonocristalinas

Existen un tipo de obleas con un grado de cristalinidad intermedio entre las monocristalinas y las multicristalinas. Las obleas cuasimonocristalinas se fabrican por los mismos procesos que las obleas monocristalinas, pero acelerando ligeramente el enfriamiento del lingote, lo que conlleva la fragmentacion parcial del silicio. En la Figura 10.8 se puede ver una imagen de fotoluminiscencia de una oblea cuasimonocristalina obtenida con una cámara de InGaAs.

La luminiscencia en este tipo de obleas se puede evaluar de la misma forma que en las obleas multicristalinas, con la peculiaridad de que en este tipo de obleas el numero de granos sera mucho menor que ne el caso de las multicristalinas.

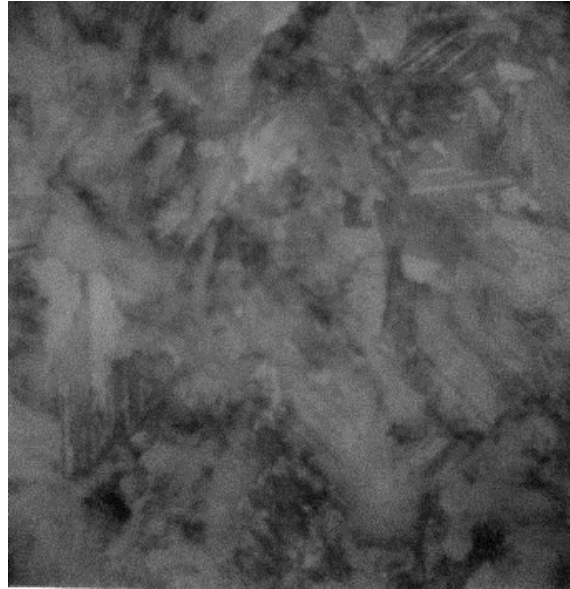


Figura 10.7: Fotoluminiscencia de una oblea de silicio multicristalino.

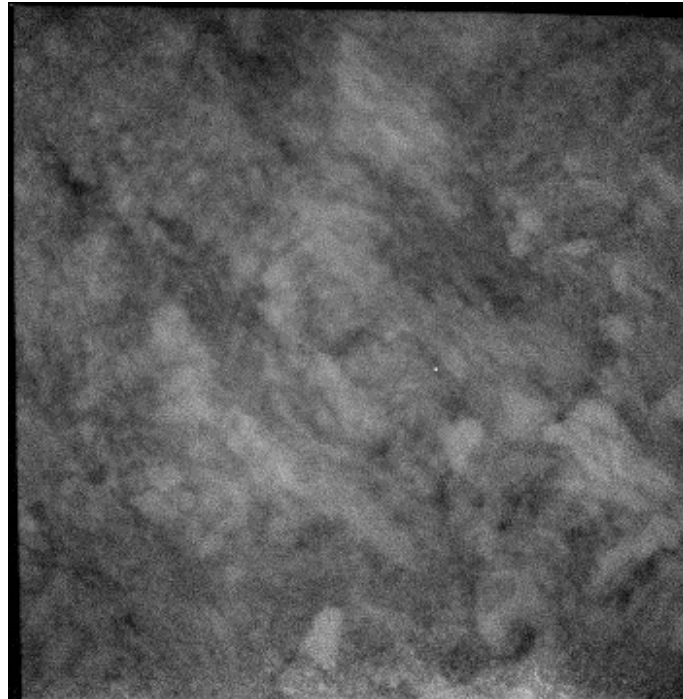


Figura 10.8: Fotoluminiscencia de una oblea de silicio cuasimonocristalina.

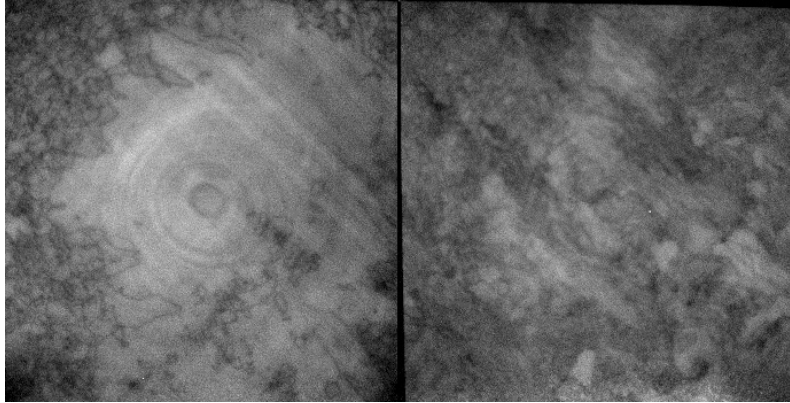


Figura 10.9: A la izquierda: imagen de fotoluminiscencia de una oblea de silicio cuasimonocristalina con un alto grado de cristalinidad. A la derecha: imagen de fotoluminiscencia de una oblea cuasimonocristalina con una baja cristalinidad.

Este tipo de obleas abarca un amplio rango de cristalinidades, pudiéndose encontrar obleas con muy pocos granos, con un valor elevado de cristalinidad, y obleas con un gran número de granos muy similares a las multicristalinas. En la Figura 10.9 se pueden ver las imágenes de luminiscencia de dos obleas cuasimonocristalinas de distinto grado de cristalinidad, tomadas con una cámara CCD de silicio.



Capítulo 11

Análisis cuantitativo de las imágenes de fotoluminiscencia en células solares

Más allá de un simple examen cualitativo de las imágenes de fotoluminiscencia de las células solares, este TFG pretende exponer experimentalmente la relación entre el nivel de luminiscencia de un grupo de células solares medido a partir de imágenes de fotoluminiscencia adquiridas con una cámara CCD y los parámetros eléctricos característicos de las mismas células solares, más en concreto del parámetro eléctrico más significativo, su eficiencia.

A partir de las características eléctricas de las células solares ensayadas (corriente de cortocircuito, tensión de vacío y eficiencia) y de los niveles medios de luminiscencia en cada célula, se han obtenido distintas gráficas que permiten observar la relación entre estos parámetros.

Los niveles medios de luminiscencia de cada célula, se han obtenido mediante el software *Fiji*. Este software muestra una imagen digital en la que cada píxel lleva asociado un valor que corresponderá con el nivel de luz captado por la cámara en dicho píxel. Ese valor, puesto que *Fiji* trabaja con imágenes de 16 bits de rango dinámico, se encuentra en un rango de 65536 valores. Esto significa que el nivel de luz será un valor entre 0 y 65535, donde 0 se corresponderá con la ausencia de luz (color negro), y 65535 con el nivel máximo de luz (color blanco).

Dependiendo de la resolución de la cámara, 640 x 512 píxeles para la cámara CCD de InGaAs y 1392 x 1040 píxeles para la cámara CCD de silicio, y de el *binning* usado a la hora de tomar la fotografía, el resultado será una imagen con un número determinado de píxeles, de los cuales no todos habrán de ser tomados en cuenta a la hora de determinar el nivel de luminiscencia de la célula solar. La óptica empleada, no permite tomar imágenes exclusivamente de la muestra, sino que además aparecerán distintas partes del equipo de medida, que pese a no emitir luminiscencia, emiten señales de luz reflejada que interferirá con la luminiscencia de la muestra y no han de tenerse en cuenta a la hora de calcular el valor medio de luminiscencia.

Para solucionar esto, se ha seleccionado solo el área de la imagen correspondiente a la cé-

lula solar. Debido a que los píxeles pertenecientes a la célula tienen un nivel de luz mucho mayor que el resto de la imagen, al crear una imagen en blanco y negro (imagen binaria) con *ImageJ* los píxeles con mayor nivel de luz (los que representan la célula) se colorearán de negro, y los de menor nivel de luz (los que no pertenecen a la célula) se colorearán de blanco. Esta imagen binaria nos aporta la información sobre los píxeles que deberán ser tenidos en cuenta a la hora de calcular el valor medio de luminiscencia de la célula, los de color negro de la imagen binaria.

Mediante la aplicación de la imagen binaria, como una máscara, sobre la imagen real, se seleccionarán solo los píxeles pertenecientes a la célula para calcular posteriormente el valor medio de luz de esos píxeles. En la Figura 11.1 se puede ver una imagen binaria de la luminiscencia de una célula solar.

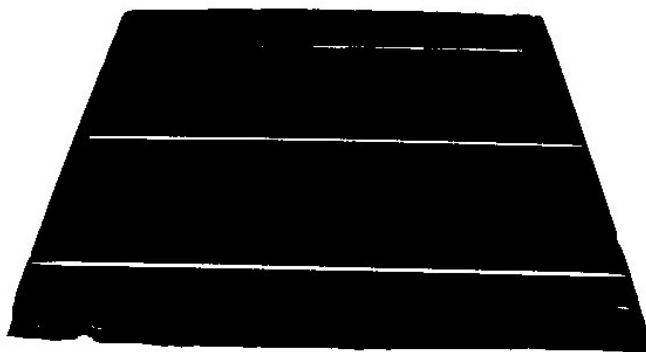


Figura 11.1: Imagen binaria de la luminiscencia de una célula solar, en negro: la muestra. En blanco: partes del equipo de medida visibles en la imagen.

La aplicación de la técnica descrita para seleccionar únicamente los píxeles de la imagen correspondientes a la muestra y permite una cuantificación mucho más precisa de la luminiscencia generada por esta. Para corroborar esta mejora en la Figura 11.2 se exponen dos histogramas relativos a el número de píxeles por cada nivel de luminiscencia de una fotografía tomada a la fotoluminiscencia de una célula solar.

El histograma de la izquierda de la Figura 11.2 corresponde a la imagen completa (la muestra y parte del equipo del laboratorio) y en él se puede apreciar como la mayoría de los píxeles de la imagen corresponden a píxeles de muy bajo nivel de luminiscencia o píxeles negros. Estos píxeles no pertenecen a la muestra y no deben ser tenidos en cuenta. El histograma de la derecha de la Figura 11.2, corresponde a la misma imagen que el histograma anterior, pero sobre este se ha aplicado una máscara binaria que permite discriminar los píxeles de la imagen no pertenecientes a la muestra, como se ha explicado antes. Los píxeles de la imagen pertenecientes a la célula solar, representados en el histograma de la derecha de la Figura 11.2, tienen un nivel de luminiscencia elevado, y al no estar presentes los píxeles más oscuros de la imagen también será más elevado el nivel medio de luminiscencia de esta.

El resultado del análisis cuantitativo de las imágenes de fotoluminiscencia es el valor me-

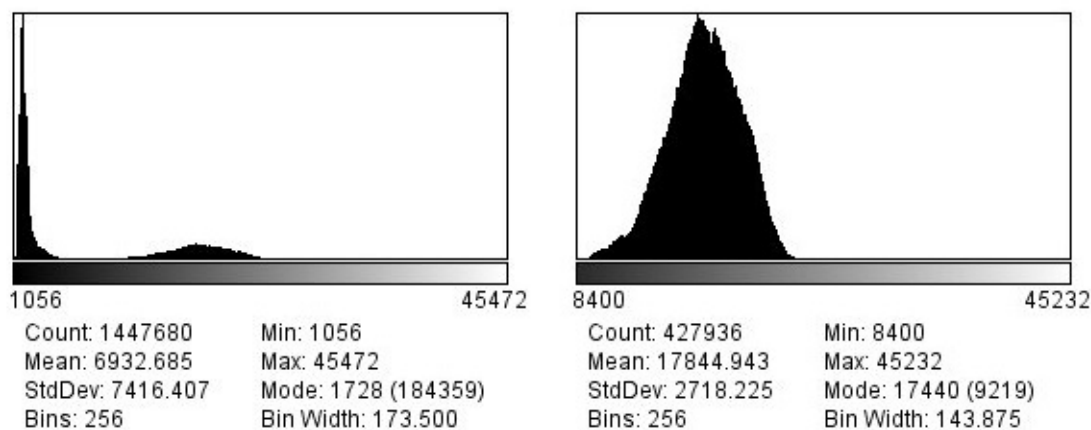


Figura 11.2: Histogramas de una imagen de luminiscencia de una célula solar, el de la izquierda corresponde a la imagen completa, el de la derecha se han eliminado los pixeles no correspondientes a la célula solar.

dio del nivel de luz de los pixeles de la imagen pertenecientes a la célula solar o a la obleas de silicio. Este sera el valor que se compare con los parámetros eléctricos de la célula para ver la evolución de la luminiscencia.

En cuanto a los parámetros eléctricos correspondientes a las células solares que se han estudiado, los distintos valores han sido proveídos por el fabricante de las células (en las series B y C) o bien obtenidos tras un análisis de estas en el Instituto de Energía Solar (IES) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) (en la serie A). Como ya se expuso en el Capitulo 9. Por problemas a la hora de realizar las mediciones por parte del IES de la UPM, las células de las serie A no han sido estudiadas cuantitativamente, limitando su caracterización al estudio cualitativo.

11.1. Nivel de luminiscencia frente a eficiencia eléctrica

La eficiencia de una célula solar es un parámetro que mezcla tanto las características intrínsecas de la célula como su respuesta a la luz, lo cual hace que sea el parámetro ideal de caracterizar una célula solar. Como se ha expuesto en el capítulo 4 la eficiencia de una célula solar es la relación porcentual entre la potencia que puede aportar la célula y la irradiancia recibida por esta.

De cada célula de las series B y C se conoce su eficiencia, calculada a partir condiciones estándar de medida (CEM) o Standard Test Conditions (STC), que son: temperatura de la célula 25°C , irradiancia $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ y AM (masa de aire) 1,5. A partir de estos datos, en la Figura 11.3 se ha comparado, en una gráfica, la eficiencia de las células solares de las series B y C con su nivel de luminiscencia medido con la cámara CCD de silicio.

En la Figura 11.3 se aprecia como la eficiencia de la célula crece a la par que lo hace el nivel de luminiscencia. La figura 11.4 muestra un análisis por separado de las series B y C donde al igual que en la imagen anterior se expone la eficiencia de estas células frente

a su nivel de luminiscencia.

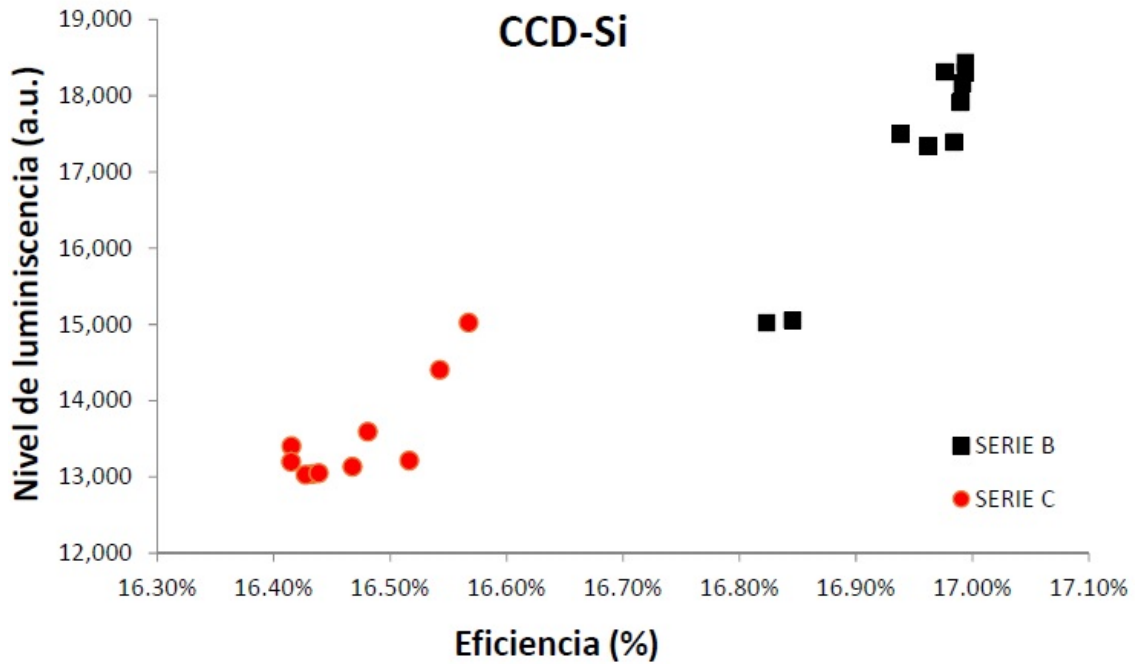


Figura 11.3: Nivel de luminiscencia frente a eficiencia de las células solares de las series B y C.

El análisis particular de las series B y C permite visualizar la relación existente entre la eficiencia y el nivel de luminiscencia en cada serie. Al igual que sucedía en el análisis global, en el análisis particular de cada serie se aprecia la dependencia directa entre ambos parámetros.

Las distintas series de células poseen características particulares que las diferencian entre si como pueden ser el nivel de dopado, la resistividad, o el grado de cristalinidad del silicio usado en la fabricación de la célula entre otros. Un análisis global de todas las series obvia estos parámetros pudiéndose distorsionar la gráfica obtenida. Por otra parte en un análisis particular de cada serie de células, la mayoría de estos parámetros son compartidos por todas las muestras de la serie, por lo que afectarían a todas las células por igual, y por lo tanto no afectarían a la gráfica de resultados.

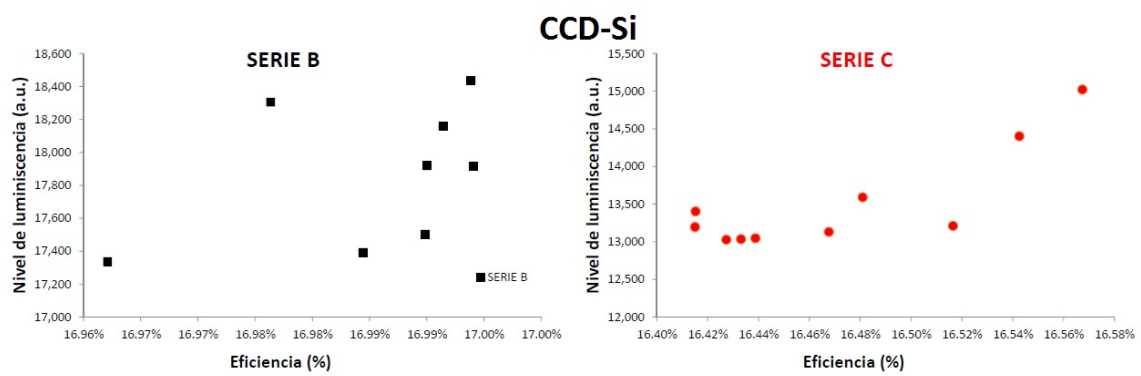


Figura 11.4: Nivel de luminiscencia frente a eficiencia de las células solares de las series B y C por separado.



Capítulo 12

Sensores CCD para fotoluminiscencia en células solares: CCD de silicio frente a CCD de InGaAs

Para el estudio de la fotoluminiscencia, como se expuso en el Capítulo 7, se han empleado dos tipos de cámaras con sensor CCD: una CCD de silicio y una CCD de InGaAs. Debido al escaso tiempo del que se dispuso de la cámara de InGaAs en el laboratorio los resultados mostrados en los Capítulos 10 y 11 son los obtenidos con la cámara CCD de silicio.

No obstante el mismo estudio de las muestras realizado con la cámara CCD de silicio, también se ha realizado con la cámara CCD de InGaAs. En este capítulo se exponen los resultados obtenidos con la cámara CCD de InGaAs para ser comparados con los resultados obtenidos con la cámara CCD de silicio, para determinar cual de los dos tipos de sensores CCD es mejor para la caracterización de células solares.

Debido sobre todo a la mejor eficiencia cuántica en las cámaras con sensor de InGaAs se puede reducir el tiempo de exposición de la captura de imágenes a valores de mili segundos obteniendo, a pesar de esto imágenes de gran calidad y con un aceptable nivel de luminiscencia, aunque este suele ser menor que el obtenido con las cámaras CCD de silicio. En la Tabla 12.1 se muestran los distintos valores de luminiscencia con los que se trabaja para una misma serie de células fotografiadas con distintos sensores CCD. El hecho de trabajar con distintos niveles de luminiscencia no afecta al estudio cuantitativo de las imágenes de luminiscencia. Las unidades empleadas en la medida del nivel de luminiscencia, son una conversión directa de la cuenta de electrones que realiza el sensor CCD para cada pixel. Además ambos sensores CCD utilizados trabajan de forma lineal, más tiempo de exposición y más eficiencia cuántica del sensor significa un mayor nivel de luminiscencia de tal manera que las medidas aunque tengan distinto valor numérico, tendrán el mismo significado físico. Debido a esto, los resultados en el estudio cuantitativo del nivel de luminiscencia de las células solares, son similares con ambas cámaras aunque con valores significativamente distintos.

Serie/numero	Nivel de luminiscencia (a.u.)	
	CCD silicio (Texp: 30s)	CCD InGaAs (Texp: 150ms)
B1	15022	5307
B2	17392	5257
B3	18159	5539
B4	17337	5458
B5	17920	5492
B6	18436	5667
B7	15055	5345
B8	17502	5392
B9	17917	5421
B10	18306	5446
B11	18316	5514
B12	18304	5324

Cuadro 12.1: Niveles de luminiscencia de las células de la serie B tomados con la cámara CCD de silicio y la cámara CCD de InGaAs

En la Figura 12.1 se muestran dos imágenes de luminiscencia tomadas a la misma célula solar. La imagen de la izquierda se ha adquirido con la cámara CCD de InGaAs, mientras que la de la derecha ha sido adquirida con la cámara CCD de silicio.

La disposición del equipo esta optimizada para la cámara CCD de silicio, por lo que se tuvo que adaptar este para la cámara CCD de InGaAs, de distinto tamaño, provocando problemas a la hora de enfocar a las muestras y de conectar la cámara con el PC. En la Figura 12.1 se puede ver como la imagen tomada con la cámara CCD de InGaAs (izquierda) esta desenfocada en sus extremos superior e inferior, mientras que esto no ocurre en la imagen tomada con la cámara CCD de silicio (derecha), debido a las limitaciones de la óptica empleada para con la cámara de InGaAs.

En la Figura 12.1 también se aprecia que, pese a las deficiencias en el equipo para con la cámara CCD de InGaAs, los resultados de un estudio cualitativo de las imágenes adquiridas con esta cámara son mas determinantes que los obtenidos con la cámara CCD de silicio. Las principales mejoras que se observan en las imágenes son la reducción del ruido digital y el alto nivel de contraste entre zonas oscuras y zonas claras.

A la hora de escoger el tipo de cámara CCD para la caracterización de células solares, son varios los parámetros a tener en cuenta. Mas allá de la resolución de las imágenes, o la profundidad de color que la cámara ofrezca, la característica determinante deberá ser el tipo de sensor CCD. De los dos tipos estudiados, el sensor CCD de InGaAs resulta mas eficiente cuanticamente en la banda de emisión del silicio, y a la vez ofrece imágenes de mejor calidad en tiempos de exposición muy reducidos frente a los de un CCD de silicio. No obstante el precio de un sensor CCD de InGaAs es muy superior a uno de silicio llegando a duplicar varias veces el precio.

Como conclusión a este capítulo decir que para la caracterización de células solares las

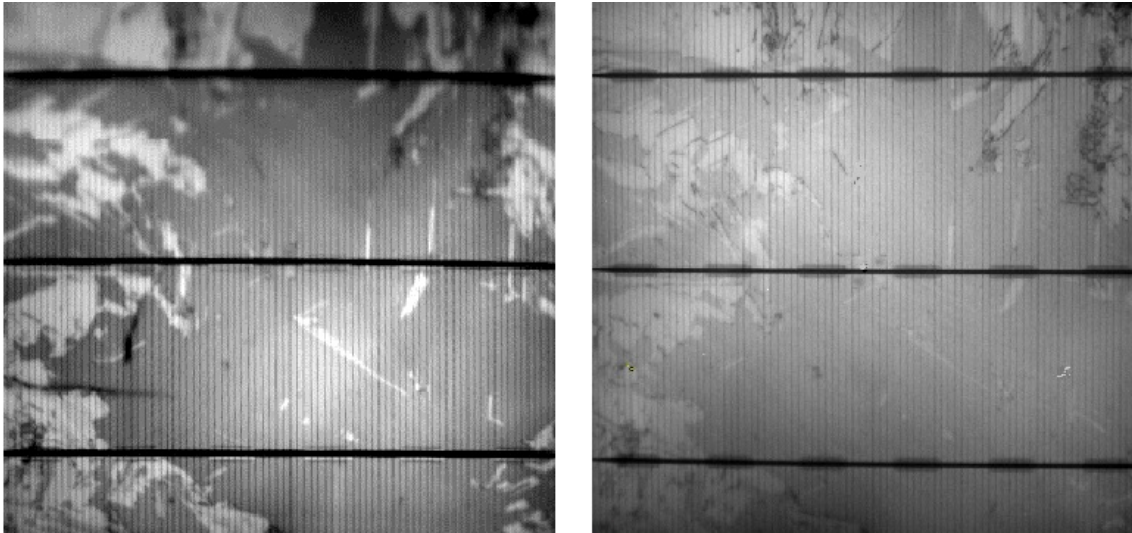


Figura 12.1: Ala izquierda: imagen de fotoluminiscencia de una célula solar tomada con una cámara CCD de InGaAs. A la derecha: imagen de fotoluminiscencia de la misma célula solar tomada en este caso con una cámara CCD de silicio.

cámaras CCD de silicio ofrecen imágenes de luminiscencia con las que se puede caracterizar la célula a altos niveles de detalle. No obstante los CCD de InGaAs aunque mas caros, ofrecen mejores resultados en menores tiempos, por lo que serán los requerimientos específicos de cada aplicación y las posibilidades económicas lo que determinen la elección de un tipo de tecnología u otra.



Capítulo 13

Fotoluminiscencia en obleas de silicio multicristalino de distintas resistividades

En este capítulo se exponen y se analizan los resultados obtenidos de la caracterización por fotoluminiscencia de obleas de silicio multicristalino de diferentes resistividades. En la Tabla 9.4 expuesta en el Capítulo 9 se hace referencia a los cuatro niveles de resistividad de las obleas que se han ensayado, estando estos valores de resistividad comprendidos entre 0.4 y 3 Ω/cm . A mayor resistividad, menor conductividad eléctrica por lo que se generaran menos electrones consecuencia de la excitación lumínica, lo que conducirá a un menor nivel de luminiscencia. Este fenómeno se puede observar en los histogramas expuestos en la Figura 13.1, correspondientes a la luminiscencia de una oblea de baja resistividad y a la de una de alta resistividad.

La Figura 13.1 muestra, a la izquierda, el histograma de la imagen de fotoluminiscencia

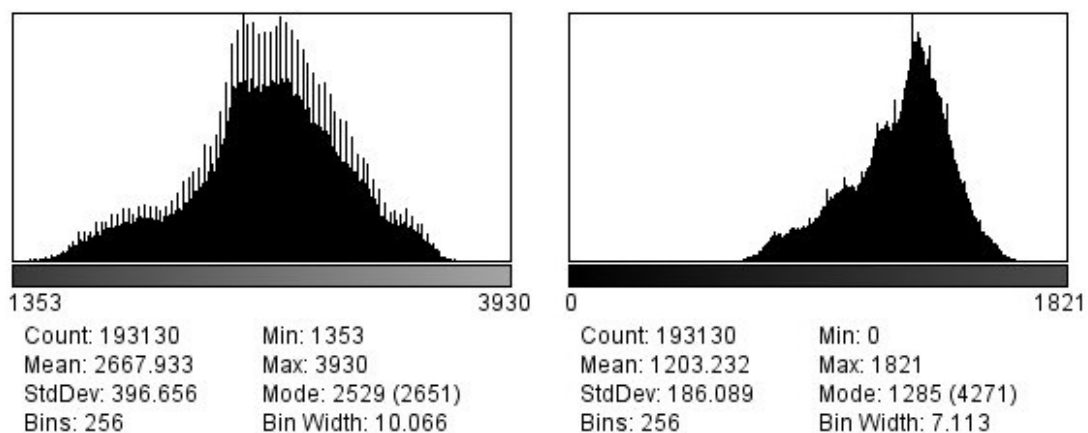


Figura 13.1: Histogramas de dos imágenes de luminiscencia de obleas de silicio multicristalino, el de la izquierda corresponde a una de baja resistividad y el de la derecha a una de alta resistividad

de una oblea de silicio multicristalino de baja resistividad y, a la derecha, el de una de alta resistividad. Estos histogramas, al igual que los mostrados en el Capítulo 11 representan el número de píxeles de la imagen por cada nivel de luminiscencia. En ellos se puede apreciar como los niveles de luminiscencia de la imagen correspondiente a la oblea de silicio multicristalino de baja resistividad son mayores que los correspondientes a la de alta resistividad.

Para concretar esto, además se han ensayado por fotoluminiscencia en transmisión cuatro obleas multicristalinas de baja, media, alta y muy alta resistividad. Los niveles de luminiscencia obtenidos del PL imaging con la cámara CCD de silicio se muestran en la Figura 13.2 en la que se aprecian los bajos niveles de luminiscencia para altas resistividades.

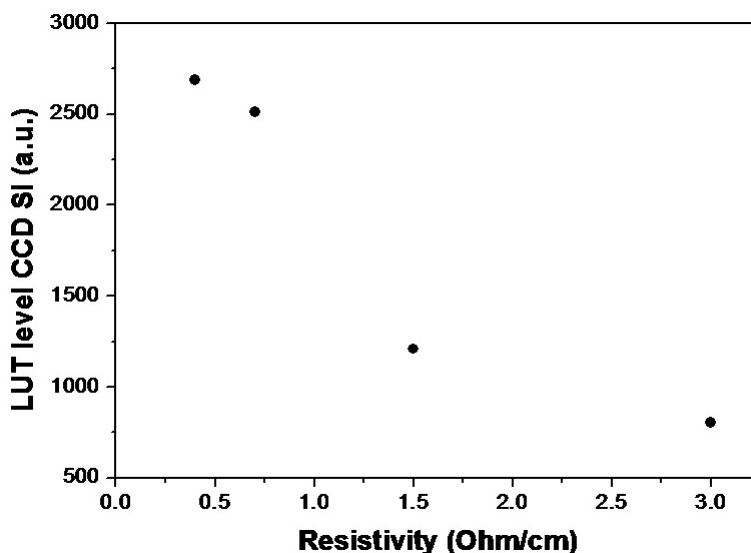


Figura 13.2: La gráfica representa el nivel de luminiscencia medido con la cámara CCD de silicio frente a la resistividad de las obleas multicristalinas de silicio.

Como ya se ha explicado anteriormente, las cámaras con CCD de InGaAs tienen una mayor eficiencia cuántica en el espectro de emisión del silicio que las cámaras CCD de silicio. Esto provoca que las imágenes de luminiscencia de obleas de alta resistividad, debido a su baja luminiscencia sean muy distintas en función de la cámara con las que se realicen ya que el InGaAs será capaz de captar ese bajo nivel de luminiscencia mientras que el silicio no. En la Figura 13.3 se muestran tres imágenes de fotoluminiscencia tomadas en transmisión a una oblea de baja resistividad, una con la cámara CCD de InGaAs, otra con la cámara CCD de silicio y otra con una cámara de un teléfono móvil comercial que mostrara la oblea tal y como se ve en la realidad. En la 13.3 se puede ver como para bajas resistividades la cámara de InGaAs y la de silicio ofrecen resultados similares, no obstante la imagen de la cámara de silicio se tomó con un tiempo de exposición de 3 minutos mientras que la imagen tomada con la cámara de InGaAs se tomó con un tiempo de exposición de 1 seg. En el ensayo de fotoluminiscencia en transmisión no solo se capta la señal proveniente de

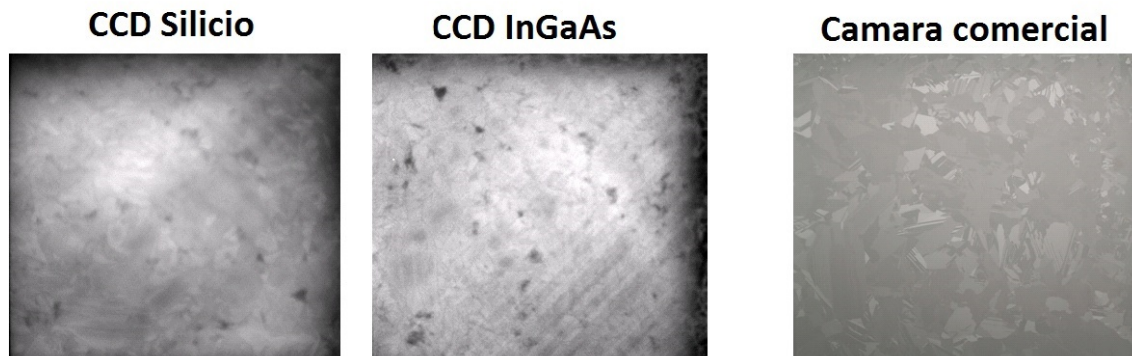


Figura 13.3: Fotografías tomadas a una oblea de silicio multicristalino de baja resistividad con diferentes tipos de cámaras.

la luminiscencia de la muestra, sino que cierta cantidad de luz de excitación es capaz de atravesar la muestra y ser detectada por el sensor CCD. Para altos valores de resistividad la luminiscencia de las obleas es muy reducida debido, como se dijo anteriormente, a la escasa recombinación electrónica que se produce. Esto lleva a que exista un valor de resistividad de las obleas a partir del cual la señal luminosa que atraviesa la muestra sea mas intensa que la propia señal de luminiscencia.

Pero esto no ocurre en todos los tipos de cámaras por igual. Las cámaras CCD de InGaAs tienen una mayor eficiencia cuántica en el rango infrarrojo, incluido en la banda de emisión del silicio, y una menor eficiencia cuántica en la longitud de onda de los láseres de excitación (808 nm). Sin embargo en los CCD de silicio ocurre lo contrario, tienen mayor eficiencia cuántica en el espectro visible y en la longitud de onda de los láseres de excitación, pero esta eficiencia cuántica es muy reducida en la banda de emisión del silicio. Estas características se presentaron gráficamente en la Figura 5.4 contenida en el Capítulo 5.

Lo expuesto anteriormente concurre en que para altas resistividades los CCD de silicio captan mas información proveniente de la luz de excitación que atraviesa la oblea de que de la luminiscencia de esta. En la Figura 13.4 se puede apreciar este fenómeno. Se puede apreciar como la imagen tomada con la cámara CCD de silicio es similar a la imagen tomada con una cámara comercial y que no muestra la luminiscencia de la oblea sino que solo muestra la distribución de los granos de silicio. La cámara CCD de InGaAs, en cambio, si es capaz de reflejar la luminiscencia de la muestra.

Gracias a el estudio realizado sobre las obleas de silicio de diversas resistividades se ha podido concluir que una cámara CCD de silicio no es valida para realizar ensayos de fotoluminiscencia en obleas de silicio multicristalino de alta resistividad, pero si que lo es para ensayar las de bajas resistividades. Por otra parte se ha concluido que la tecnología de sensor CCD mas apta para realizar el ensayo de fotoluminiscencia sobre cualquier tipo de oblea de silicio son los CCD de InGaAs, debido principalmente a su alta eficiencia cuántica en la banda de emisión del silicio que repercute en tiempos de exposición muy reducidos en la toma de imágenes.

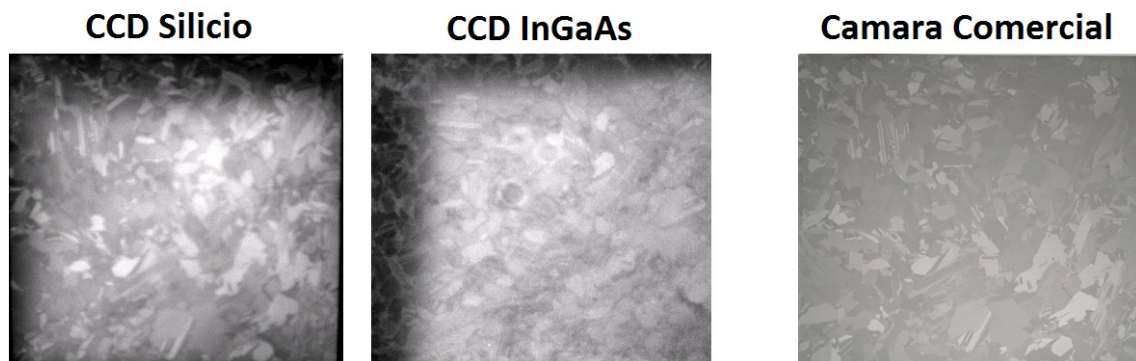


Figura 13.4: Fotografías tomadas a una oblea de silicio multicristalino de alta resisitividad con diferentes tipos de cámaras.



Capítulo 14

Conclusiones y trabajo futuro

En este TFG se hace un estudio de las características, posibilidades y resultados de la caracterización de células solares y obleas de silicio mediante ensayos de fotoluminiscencia. No se centra en buscar un único fin a la caracterización de estos materiales mediante la fotoluminiscencia sino que se han intentado abarcar distintos focos de trabajo, las conclusiones obtenidas se explican a continuación:

- Las cámaras CCD, son cámaras de compleja tecnología, capaces de captar intensidades de luz muy pequeñas, y de hacerlo con una resolución y un ratio señal-ruido aceptable si las condiciones de trabajo son las adecuadas. A pesar de esto, sobre las imágenes resultantes han de aplicarse diversas correcciones que paliaran los posibles defectos resultantes de los sensores CCD (corriente de oscuridad y ruido de lectura).
- El análisis cualitativo de las imágenes de luminiscencia, permite ver distintos defectos habituales en las células solares. Gracias a este método de caracterización se podrán identificar estos defectos tanto en su fase de fabricación como una vez instaladas las células en los paneles solares. Actualmente este análisis cualitativo de la fotoluminiscencia se emplea en la industria junto con el análisis de las imágenes de electroluminiscencia y termografía para el mantenimiento de los parques solares.
- El análisis cuantitativo de las células solares relacionado con la eficiencia, da como resultado una evidente relación entre ambos parámetros. Esta relación habrá de ser estudiada mas en profundidad con un mayor numero de muestras y añadiendo al estudio otros factores que puedan afectar a esta relación.
- El análisis de la fotoluminiscencia en obleas de silicio multicristalino de distintas resistividades ha servido para determinar "*a grosso modo*" como, a medida que aumenta la resistividad disminuye la luminiscencia, y a partir de ahí descubrir que las cámaras CCD de silicio no son capaces de captar la luminiscencia de obleas de alta resistividad, mientras que las de InGaAs si que son aptas. Por otra parte después

de experimentar con ambos tipos de tecnología CCD, se ha visto como las cámaras CCD de InGaAs son capaces de reducir el tiempo de adquisición de las imágenes de fotoluminiscencia mejorando el contraste y la calidad de estas.

Como conclusión final a este TFG, exponer como la fotoluminiscencia en células solares y obleas de silicio es un método de caracterización con distintos frentes abiertos en lo que a su uso se refiere. Esta forma de caracterización ofrece resultados en todas las fases del proceso de producción de una célula solar además de servir como herramienta para el mantenimiento de los módulos en los parques solares.

La rapidez y facilidad con la que se puede llevar a cabo la caracterización de las muestras así como la drástica reducción del precio de los equipos necesarios en los últimos años presentan un futuro prometedor para este tipo de técnicas.

Los trabajos y resultados contenidos en este TFG, han sido expuestos en el congreso EXMATEC 13 (*Expert Evaluation and Control of Compound Semiconductor Materials and Technologies*) celebrado en Aveiro, Portugal entre el 8 y el 10 de Junio del año 2016. Para este congreso se ha elaborado el correspondiente abstract, adjuntado en el Apéndice A, para la presentación general y un póster, adjuntado en el Apéndice B para ser expuesto en el propio congreso.

Trabajo futuro

Este TFG solo ha incurrido en medidas de fotoluminiscencia, no obstante el equipo de medida del laboratorio también está preparado para realizar ensayos de electroluminiscencia, en los que actualmente ya se está trabajando.

El equipo de medida del laboratorio, tiene los elementos necesarios para ser controlado con el ordenador. Tiene integrado drivers específicos para el control de los láseres y tarjetas de adquisición de datos que permitirán en un futuro crear una aplicación mediante algún software de control que permita controlar los láseres de forma remota.



Apéndice A

Abstract EXMATEC 13

Photoluminescence imaging of solar grade mc-Si wafers and solar cells as a tool for efficiency qualification

Oscar Martínez^{1*}, Angel Moretón¹, Eusebio Solorzano², Miguel Angel González¹, Juan Jiménez¹

¹GdS-Optronlab Group, Dpto. Física Materia Condensada, Univ. de Valladolid, Edificio I+D, Paseo de Belén, 11, 47011 Valladolid, Spain

²Novadep Scientific S.L., C/ Pino 1 parcela 27R, Oficina 2 Polígono Industrial "La Mora", 47193 La Cisterniga, Valladolid, Spain

*oscar@fmc.uva.es

Abstract

The photoluminescence imaging (PLi) technique allows for the fast qualification of mc-Si wafers and solar cells, giving information of the presence and distribution of carrier capture centres, which obviously affect the final efficiencies. In this work, we characterize a wide collection of solar cells by PLi, correlating some aspects extracted from the PL images to their efficiencies. The desired goal of this approach is to provide a tool allowing a robust prediction of solar cell efficiency from the PL images of the wafers.

Introduction

The photovoltaic industry is, nowadays, dominated by crystalline silicon, on the form of mono-crystalline (c-Si), or multi-crystalline (mc-Si) material. The use of mc-Si grown from casting processes is preferential for cost effectiveness, in spite of their high concentration of intrinsic structural defects. The efficiency losses in mc-Si are mainly caused by the structural defects inherent to the growth, e.g. grain boundaries (GBs), dislocations, and incorporation of impurities [1-3]. In particular, in the case of solar grade material, this can be a critical point, due to the high amount of impurities [4]. These defects act as charge traps, killing the minority carrier lifetime (τ), and shortening the diffusion length (L_{diff}), which negatively affects the conversion efficiency [2, 3].

An important effort is being carried out in the last years in the development of characterization tools allowing the screening of the mc-Si wafers and solar cells. Both scanning and imaging techniques have been developed. One of the most promising experimental tools for a fast qualification of mc-Si wafers is the PL imaging (PLi) technique, which permits to acquire in a short time a wafer panoramic view of the main carrier capture centres [5]. This technique is very promising for the fast in-line screening of the wafers. A very interesting characteristic of the technique would be to infer an estimation of the final efficiency of the solar cell from the alone PLi of the wafer. In this work, we have analysed in detail the PLi of several solar cells of known efficiencies, observing a very good correlation between the colour lookup table (LUT) extracted from the PL images and the solar cell efficiencies. The difficulties to extrapolate the data extracted from the PL images of the wafers to the cell efficiency are discussed.

Experimental and samples

The PLi set-up consists of a dedicated in-house built system. The whole wafers/solar cells were excited with four laser diodes ($\lambda = 808$ nm, optical output power of 25 W). The luminescence emission was collected with a Peltier-cooled Si-CCD camera (PCO1300-Solar, 12 bits, 1392 x 1040 pixels). Several filters were used to suppress the laser spurious light and the background light. A 12.5 mm optical objective was coupled to the camera allowing the acquisition of the PL image from a

whole wafer or cell. The exposure time can be shorter than 2 s in the case of solar cells (using front-side illumination and front-side collection), being of the order of 1-2 min for obtaining the full wafer PL image (using front-side illumination and back-side collection); these time can be largely shortened by improving the experimental set-up.

Both solar grade mc-Si wafers grown by conventional casting and solar cells fabricated from them following standard BSF industrial methods have been investigated. P-type mc-Si bricks (B-doped) were grown, conventional square shaped wafers (156x156 mm²) were cut from these bricks. Solar cells were performed using HNO₃/HF-based texturing processes and a typical H-patterned screen-printing metallization. P-diffusion was performed by offline (POCl₃) method.

Results and discussion

PLi has the advantage of the fast inspection of the mc-Si wafers or solar cells, allowing a rapid identification of areas with trapping activity. Fig.1 show the PL image of a mc-Si wafer in which one can observe a very inhomogeneous distribution of the dark luminescence (quenched) zones. Such features correspond to the typical non-radiative recombination pattern revealed on mc-Si; the inhomogeneous distribution being related to the presence of GBs, and a high density of dislocations [6]. The GBs, by themselves, are not the main electrical active defects in mc-Si [7], but their electrical activity depends on their decoration by impurities. These features make mc-Si material very inhomogeneous in terms of local charge trapping activity. This can be especially critical in the case of solar grade mc-Si.

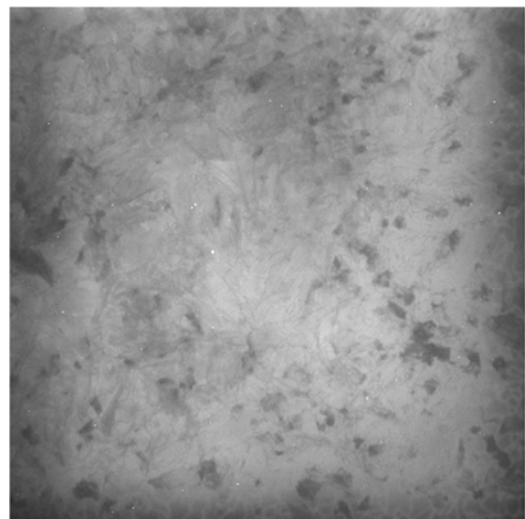


Figure 1. PL image of a mc-Si wafer.

PLi can be used to qualify the mc-Si wafers with the aim of establishing a relation between the PL response and the efficiency once the wafer has been processed into cell.

In order to quantify this correlation, PL images of a set of solar cells with known efficiencies were analysed. Three sets of 10 different solar cells, processed in the same way from similar wafers (solar grade mc-Si), were analysed, with average efficiencies for each cell lot of 16.4, 16.8 and 17.4%, respectively. Fig. 2 shows two representative PL images of solar cells with the lowest and highest average efficiencies, respectively. The LUT level intensity observed in the PL images matched well with the efficiencies; the solar cell with lower efficiency showed, in average, darker LUT levels in the PL image. Fig. 3 shows the obtained correlation between the average LUT levels and efficiencies for the three set of solar cells with low, medium and high efficiency, showing that the PL images seem to give a quantified information with respect to the final efficiencies.

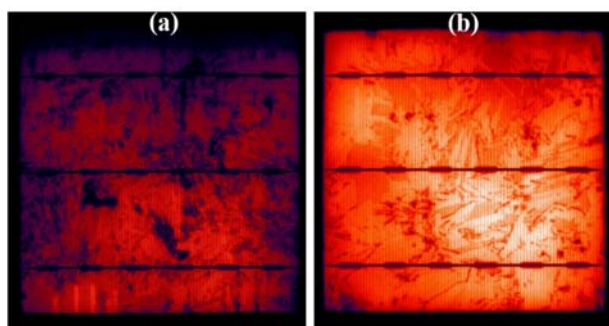


Figure 2. PL images of solar cells with efficiencies of 16.4% (a) and 17.4% (b) (average efficiencies). LUT contrast is the same in both images.

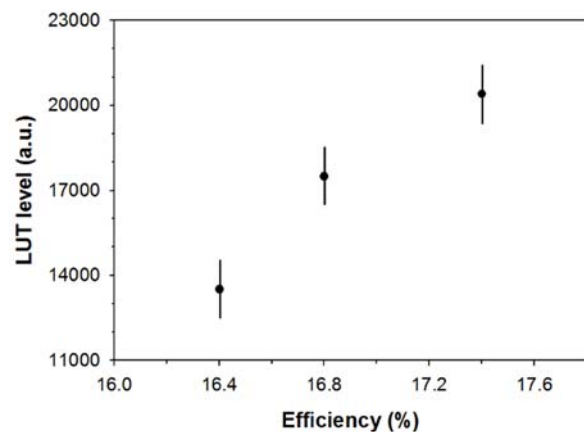


Figure 3. LUT levels obtained from the PL images of the three set of solar cells investigated, with low (16.4%), medium (16.8%) and high (17.4%) efficiencies.

The correlation obtained is valid since all the solar cells have been processed in the same way with the only difference of the initial wafer quality and characterized by PL using the same parameters. In this sense, the LUT levels extracted from the PL images are supplying information about the influence of the defects present in the wafers and their impact on the final efficiency. In particular, it is worth noting to mention the very

high sensitivity of the PLi technique, since we observed a variation of 6000 a.u. of the LUT intensity correlated to a variation of 1% in cell efficiency. Although these data are still preliminary, the trend observed is believed to be likely related to the deleterious character of the impurities in these solar grade mc-Si solar cells.

The next step would be to quantify also the PL images of the wafers (Fig. 1) and to provide a prediction of the efficiency expected from wafers using a well-established solar cell technology. In fact, this procedure only makes sense when comparing solar cells processed with the same technology. Some drawbacks to be mentioned here are related to the use of a Si CCD camera, giving typical times for wafers PLi acquisition in the range of 1 minute. In addition, problems related to inhomogeneous excitation of the wafers can be also critical. Moreover, and pretending the PLi technique to be an in-line tool, such long times must be drastically reduced. Nevertheless, significant time reductions can be achieved by adjusting the experimental set-up, with more sensitive detectors like InGaAs cameras, and/or higher power lasers. The design of a quantitative procedure to perform the wafer classification from PL images shall be very useful, being nowadays the subject of intense research [8, 9].

Conclusions

PLi is a fast tool allowing to catch information about the presence and distribution of carrier capture centres in both silicon wafers and solar cells. A good correlation between the LUT levels extracted from the PL images and the efficiency of three set of solar cells has been observed, providing a high sensitivity to the efficiency variations. The PLi technique appears as a promising in-line tool for fast qualification of wafers and cells.

References

- [1] Pizzini S., Sandrinelli A., Beghi M., Narducci D., Allegretti F., and Torchio S., *J. Electrochem. Soc.* 135 155-165, 1988
- [2] Kaden T., Würzner S., Dreckschmidt F., and Möller H.J., *Phys. Status Solidi C* 6, 748-757, 2009
- [3] Möller H.J., Funke C., Kreßner-Kiel D., and Würzner S., *Energy Procedia* 3, 2-12, 2011
- [4] Istratov A.A., Bounassisi T., McDonald R.J., Smith A.R., Schindler R., Rand J.A., Kalejs J.P., Weber E.R., *Journal of Applied Physics* 94 6552-6559, 2003.
- [5] Trupke T., Bardos R.A., Schubert M.C, and Warta W. *Appl. Phys. Lett.* 89 044107, 2006
- [6] Sinton R.A and Cuevas A. *Appl. Phys.Lett.* 69 2510, 1996
- [7] Palais O., Clerc L., Arcari A., Stemmer M., and Martinuzzi S. *Mat. Science Eng. B* 102 184-188, 2003
- [8] Trupke T., Nyhus J., and Haunschild J. *Phys. Status Solidi RRL* 5 131-137, 2011
- [9] Liu F., Jiang C.S, Guthrey H., Johnston S., Romero M.J, Gorman B.P, and Al-Jassim M.M *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 95 2497-2501, 2011

Acknowledgments

This work was supported by the Research Project ENE2014-56069-C4-4-R (MINECO). Authors are indebted to Silicio FerroSolar for providing the samples.



Apéndice B

Póster EXMATEC 13

Photoluminescence imaging of solar grade mc-Si wafers and solar cells as a tool for efficiency qualification



Oscar Martínez^{1(*)}, Angel Moretón¹, Miguel Guada¹, Eusebio Solórzano², Miguel Ángel González¹, Juan Jiménez¹

¹ GdS-Optronlab group, Dpto. Física de la Materia Condensada, Univ. de Valladolid, Edificio I+D, Paseo de Belén 11, 47011 Valladolid, Spain

² Novadep Scientific S.L., C/ Pino 1 parcela 27R, Oficina 2 Polígono Industrial "La Mora", 47193 La Cisterniga, Valladolid, Spain

(*)Corresponding author. E-mail: oscar@fmc.uva.es, Phone / Fax: +34 983 184956

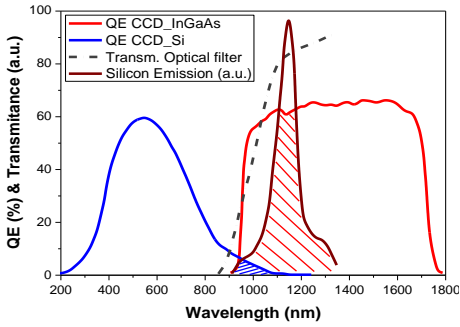


INTRODUCTION

- The photovoltaic industry is, nowadays, dominated by silicon technology. In the case of multi-crystalline Si (mc-Si) the efficiency losses are mainly caused by the structural defects inherent to the growth, e.g. grain boundaries (GBs), dislocations, and incorporation of impurities
- PL imaging (PLI) technique is a promising experimental tool for a fast qualification of mc-Si wafers because permits acquiring in a short time a panoramic view of full wafers. PLI gives information about the presence and distribution of carrier traps, which negatively affect the efficiency
- In this work, we analyze the PLI of several solar cells of known efficiencies, observing a correlation between the colour lookup table (LUT) extracted from the PL images and the solar cell efficiencies. Both, a Si CCD and an InGaAs CCD detectors were used. The images were processed with "Image J" software
- The final goal of this approach is to provide a tool allowing a robust prediction of solar cell efficiency from the PL images of mc-Si wafers

CHARACTERIZATION: Photoluminescence measuring equipment (Silicon CCD Camera / InGaAs CCD Camera)

PCO 1300 solar (Silicon CCD camera) vs. Hamamatsu C12741-03 (InGaAs CCD camera)

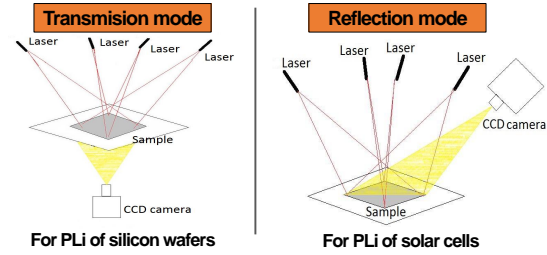


	Silicon CCD	InGaAs CCD
Maximum resolution	1392 x 1040 pixel	640 x 512 pixel
Maximum quantum efficiency	11% @ 900 nm	50% @ 1500 nm
Dynamic range	12 bit	14 bit
Exposure times	5 μs to 3600 s	17 ms to 1 s

InGaAs CCD has better quantum efficiency at silicon band emission

PLI equipment

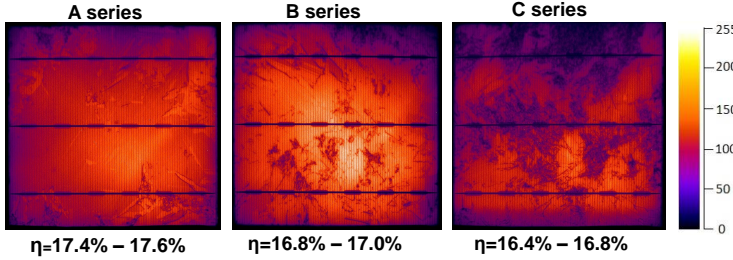
$\lambda_{exc} = 808 \text{ nm}$ (4 x 20 W optical power)
12.5 mm focal length optical objective



RESULTS AND DISCUSSION

PL imaging as a tool for solar cell characterization

Different solar cells analyzed (Silicon CCD camera images)

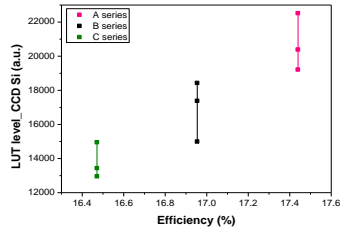


LUT level vs. efficiency

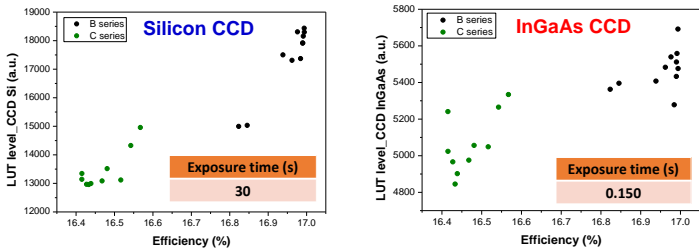
LUT level reflects the luminescence level of the solar cells

The maximum, minimum and mean LUT levels of each series are represented on the graph

LUT levels increase with efficiency



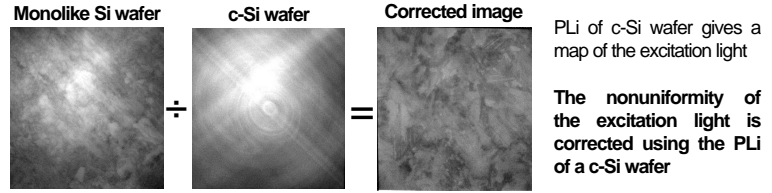
Particular PL analysis of B and C series with InGaAs CCD and Silicon CCD



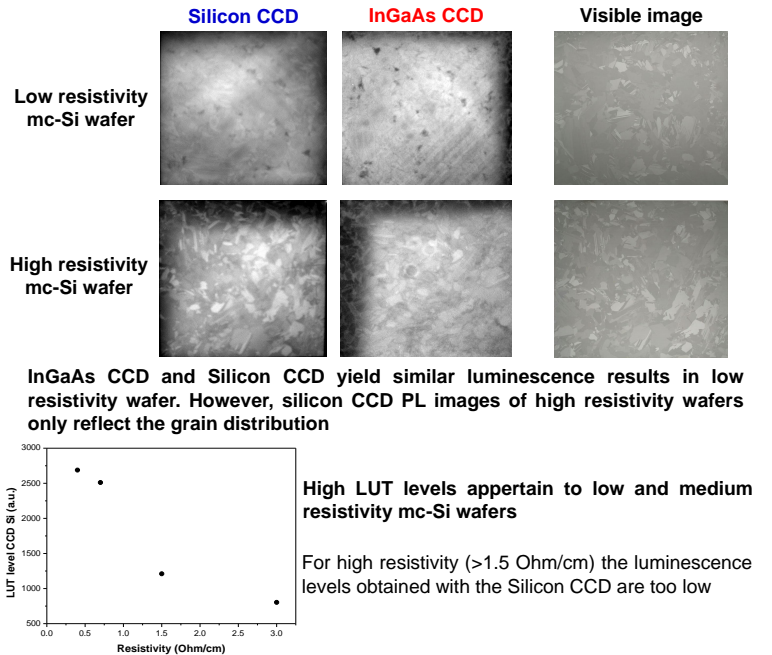
InGaAs CCD and Silicon CCD yield similar results in solar cell's PLI. However, InGaAs CCD gives better results in a short time

PL imaging as a tool for Silicon wafers characterization

PLI treatment. InGaAs CCD (c-Si wafer used for flat field correction)



Analysis of mc-Si wafers with different resistivities



CONCLUSIONS

- Fine agreement between LUT levels and cell efficiency for the three series of samples analyzed (efficiencies ranging from 16.4% to 17.6%)
- InGaAs CCD detector permits a substantial reduction of the acquisition time without loss of contrast. In the case of high resistivity wafers, it highlights the non radiative recombination pattern
- PLI is a fast tool allowing to catch information about the presence and distribution of carrier capture centers in both silicon wafers and solar cells
- The PLI technique can be implemented as an in-line tool for fast qualification of wafers and cells

ACKNOWLEDGMENTS: "Silicio Ferrosolar" and "Ministerio de Economía y Competitividad, Spain (INNPACTO IPT-420000-2010-022)"





Bibliografía

- [1] José Balenzategui. Fundamentos de la conversión fotovoltaica: La célula solar. 2007.
- [2] Matevž Bokalič and Marko Topič. *Spatially Resolved Characterization in Thin-film Photovoltaics*. Springer, 2015.
- [3] Otwin Breitenstein, Hannes Höffler, and Jonas Haunschild. Photoluminescence image evaluation of solar cells based on implied voltage distribution. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 128:296–299, 2014.
- [4] Gerald C Holst and Terrence S Lomheim. *CMOS/CCD sensors and camera systems*, volume 408. JCD Publishing USA, 2007.
- [5] Steve Johnston and Tim Silverman. Photoluminescence and electroluminescence outdoor module imaging. 2015.
- [6] Zhe Liu, Marius Peters, Vinodh Shanmugam, Yong Sheng Khoo, Siyu Guo, Rolf Stangl, Armin G Aberle, and Johnson Wong. Luminescence imaging analysis of light harvesting from inactive areas in crystalline silicon pv modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 144:523–531, 2016.
- [7] Antonio Luque and Steven Hegedus. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley & Sons, 2011.
- [8] Mario Martínez González et al. Puesta en práctica y elaboración de un sistema de caracterización de células fotovoltaicas mediante electro y fotoluminiscencia. 2015.
- [9] Robert F Pierret and Gerold W Neudeck. *Advanced semiconductor fundamentals*, volume 6. Addison-Wesley Reading, MA, 1987.
- [10] Antonio Manuel Pozo Molina. Caracterización óptica de dispositivos ccd y aplicaciones. 2008.
- [11] Uwe Rau, Daniel Abou-Ras, and Thomas Kirchartz. *Advanced characterization techniques for thin film solar cells*. John Wiley & Sons, 2011.
- [12] Chao Shen, Henner Kampwerth, and Martin A Green. Photoluminescence based open circuit voltage and effective lifetime images re-interpretation for solar cells: The influence of horizontal balancing currents. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 130:393–396, 2014.

- [13] L Stoicescu, M Reuter, and JH Werner. Daysy: luminescence imaging of pv modules in daylight. In *29th European photovoltaic solar energy conference and exhibition proceedings (EU PVSEC)*, pages 2553–2554, 2014.
- [14] Dr Peter Würfel. *Physics of solar cells*. Wiley Vch, 2016.

